

# 下一次革命

雷奕安

几十亿年以来，作为生命的我们，不断地演化，不断地独立。我们利用阳光，改变了对天然有机物的依赖；走出海洋，摆脱了对水环境的依赖；使用工具，摆脱了对身体自然能力的依赖；使用语言，摆脱了对自身经历的依赖；种植养殖，摆脱了对食物采集的依赖；建设房屋、城市，摆脱了对天然栖息地的依赖；用火用灯，摆脱了对阳光照明的依赖；我们摆脱了饥荒，摆脱了无知，摆脱了恐惧，……。自最近一次冰期 12000 年前结束以来，作为地球上的主导物种，人类持续发动层出不穷的技术革命，迅猛的发展大规模地改变了地球外貌，引起历史上的第六次生物大灭绝。

我们还需要发动一次革命，我们需要从自然生物脱胎为智慧生物，需要从听命于自然，不自觉发展，到创造生存环境，长远持续发展，需要让地球上的生命从大灭绝到大创生，……

本书将从自然，人类社会，和技术发展的角度，讨论人类文明发展的技术路线。

## 目录

前言 .....	6
第一章 缘由.....	9
巨变的时代.....	9
人类活动的痕迹.....	11
未来的挑战.....	12
第二章 人类发展的历史.....	13
旧石器时代与火.....	13
新石器时代和农业革命.....	14
工业革命.....	16
信息革命.....	18
小结.....	19
第三章 发展的问题.....	21
百年大势.....	21
能源.....	23
粮食安全.....	24
自然资源.....	25
环境改变.....	25
城市化的困惑.....	27
过剩的工业能力.....	29
小结.....	30
第四章 下一次革命.....	31
下一代城市.....	31
天方夜谭? .....	36
为什么? .....	40
摩天大楼与垂直城市.....	43
历史.....	47
小结.....	48
第五章 技术就绪程度.....	49
建筑设计、结构与材料.....	49
空气循环与处理.....	51
照明.....	55
交通.....	57
距离问题.....	59
老人、儿童、失能人、病人的交通.....	60
货物运输.....	61
短时间大规模人流.....	61

灾难场景下的疏散.....	61
交通层次化.....	62
更多的交通考虑.....	63
消防.....	64
物联网.....	65
第六章 新的生活方式和社会形态.....	68
生活方式的变化.....	68
封闭的环境.....	69
季节、天气、甚至昼夜的消失.....	70
体育活动.....	71
饮食习惯.....	72
通风换气.....	73
驾驶.....	73
衣着.....	74
摆花弄草.....	74
出城.....	74
出行.....	75
社交活动.....	75
社会治安.....	76
工作.....	76
住房问题.....	77
自然环境.....	78
家庭生活.....	78
健康.....	79
文化与城市特色.....	80
旅游.....	80
虚拟现实.....	81
远距离快速交通.....	82
医疗技术.....	83
物联网.....	84
机器人与人工智能.....	84
农业和能源.....	85
代价还是改变? .....	86
遥远的自然.....	86
虚拟世界的沉溺.....	87
个人的独特性消失.....	88
隐私不再.....	89
老年化.....	90

宗教地域差别的淡化.....	91
退化的人体机能.....	92
改变的兩难.....	93
新的社会形态.....	96
犯罪基本消失.....	96
日常生活.....	97
共产主义社会? .....	98
第七章 发展的历程.....	100
巨大的建筑.....	100
技术再讨论.....	101
城市设计.....	103
渐进的发展方式.....	105
生活社区.....	105
大型单位.....	105
小城镇.....	108
大城市的逐步升级方案.....	109
大规模安置成本.....	110
投资模式.....	111
垂直城市与房地产.....	112
垂直城市的设计原则.....	115
投资的风险.....	117
发展的方向.....	118
第八章 自然资源.....	120
自然资源需求.....	120
钢材.....	121
水泥.....	121
塑料.....	122
玻璃.....	122
地板, 隔斷材料.....	123
铝.....	123
铜.....	124
其它元素.....	124
短缺的相对性.....	125
地壳中的化学元素丰度.....	126
垂直城市的材料需求变化.....	128
能源.....	129
基础工业能力.....	130
金融资源.....	133

第九章 能源.....	135
能源的基本性.....	135
能源的构成.....	136
太阳能.....	137
风能.....	138
水能.....	139
核能（裂变）.....	140
核能基本原理及其优缺点.....	140
核能的危险性.....	141
新一代核能研究的困难.....	144
核能发展策略讨论.....	147
核能（聚变）.....	148
地热能源.....	152
生物能源.....	153
蓄能技术.....	154
能源互联网.....	157
垂直城市时代的能源.....	158
小结.....	160
第十章 农业.....	161
农业与人类生存.....	161
农业发展简史.....	162
更现代的农业.....	163
独立于自然的农业？.....	164
可能的道路，西部温室农业.....	168
露地，大棚，温室.....	168
西部——垂直城市时代的农业基地.....	169
西部农业基地的开发.....	173
青藏高原，新的生态圈.....	175
走向独立于自然的农业.....	176
一次种植，多次收获.....	177
调整饮食结构.....	178
提高光合作用效率.....	178
养殖与绿化海洋.....	180
其它.....	182
结语.....	182
第十一章 中国可能的特殊角色.....	184
城市的变化趋势.....	184
中国亟待解决的问题.....	186

创新与模式.....	189
我们能做到吗? .....	191
发展之路.....	192
历史与责任.....	194
结语.....	198
第十二章 幻想还是必然? .....	199
前进的方向.....	199
人类的脚步.....	200
全面的保障.....	200
生命之路.....	201
是革命, 还是一小步? .....	204
更多的启示.....	205
再穿越.....	207
更多的考虑.....	211
人口.....	211
生物圈总量.....	212
竞争力.....	213
发展就是建设.....	214
科幻作品中的未来城市.....	215
更遥远的未来.....	216
后记 .....	218

# 前言

本书从生命和人类的发展历史，以及人类技术的大尺度发展历史出发，讨论人类以后的发展方向。本书将回答下面的问题：生命与人类发展的脉络是什么？农业革命、工业革命、信息革命之后的下一次革命是什么？如何解决现代社会面临的各种问题？城市如何发展？经济如何发展？农业如何发展？能源如何保障？人类如何永久生存下去？

未来总是要到来的。未来会怎样？我们怎么才能走到未来？这是一个很多人都很关心的问题。对于很多人来说，30年，50年前也很难预料我们现在会是这样。再过30年，50年，生活会变成什么样子呢？我们又需要一个什么样的未来呢？这本小书将给出一些猜想。希望能够抛砖引玉，引起更多的人来思考这一问题，一起来讨论我们更本质的需要，和人类更长远的未来。

科普是将已经知道的东西，以通俗的方式告诉大家。本书不是一本科普，不只是为了介绍未来将出现的各种技术。科幻是对未来，一般是比较遥远的未来，的一种预测。本书也不是一本科幻，要对未来的生活展开狂想。

本书希望基于现有的社会，现有的资源，现有的技术，和近期内可以实现的、看得见技术，讨论从现在开始，应该怎样建设一个什么样的未来。从时间尺度上来说，讨论的是未来二三十年到一百年内，而不是遥远的不可验证的未来。

我们希望，这个未来应该能够解决目前各种主要社会问题。能够让每个人生活得舒适、充实和健康，能够持续发展，能够面对各种挑战，能够让我们更从容、更自信地走向更遥远的未来。

过去的几十年里，中国发生了天翻地覆的变化。我们每个人生活也发生了很大的变化，忙乱的我们可能并没有意识到。其实整个世界也一样，只是没有中国那么明显。我们在很短的时间内，跨过了多个时代，从传统封建农业社会到工业社会，到信息社会，到信息社会下的各种技术再革命，再到今天看起来有点混乱、衣食无忧，但是还有很多问题让我们焦虑而不是满足的现在。下一步应该怎么办？我们好像失去了方向。是不是还会继续发生令人目不暇接的变化？是不是还会发生各种技术到社会的革命？以解决我们现在面临的资源短缺，环境污染，社会低效运行，全球气候变化，文明冲突，……，等等问题？

存在这种可能吗？

具体的实现方案？

可行吗？

会不会引起新的问题？

本书将提出一系列可能的发展模式。它们应该是具体的，可行的，应该能解决我们现在面临的大多数问题。这种模式应该保证：

人类生活得更好  
人类各种需求更有保障  
人类社会的生存能力更强  
发展模式更环保，对地球自然环境的影响大大下降  
为更长远的发展打好基础

我们将回顾我们走过的路，参考几十亿年的生命历程，几百万年的人类历程，几万年的人类文明历程，讨论未来应该怎么走，怎么持续前进。

我们也将从非常现实的角度，也就是我们的衣食住行、生老病死出发，讨论我们应该有什么样的日常生活。

站在大的时空尺度，技术进步是平凡的。每一次划时代的技术革命，比如火的利用，工具的制造，农业的起源，蒸汽机的发明，都是非常平凡的一步。但是这些进步的积累，导致了完全不同的世界。我们现在已经有了很多的技术，也即将拥有更多的技术。这些技术互相影响，在人类需求的驱动下，假以时日，会一次又一次地产生翻天覆地的变化。本书将讨论下一次变化，下一次革命，是什么。

本书也不是一部学术专著。书中的观点来自作者长期的观察。所有的技术或者数据引用都有来源，但是没有采用学术论文的格式。这些技术或者数据，读者自己很容易根据文中的关键词在网上搜索到。但要注意网上信息参差不齐，最好采用严肃出版物，或者学术网站的信息。大众媒体的信息要看来源。为了便于非专业人士阅读，本书采用科普著作的书写原则，尽量不用公式，不讨论理论和计算细节，如果没有必要，数据也尽量粗略，定性的讨论多于定量。除了关于核能的讨论有一定的专业性之外，本书其它内容具备高中及以上的知识就可以看懂。

本书的基本构成如下：第一章建立观察和思考的时间和空间尺度；第二章回顾人类发展的历史，各阶段的挑战，主要技术发展的意义及其影响；第三章总结我们现在面临的各种问题；第四章提出下一次技术革命的设想，主要解释垂直城市的概念；第五章详细解释垂直城市建设用到的各种技术和成熟程度；第六章推测垂直城市的生活可能的细节；第七章讨论垂直城市的发展步骤；第八章讨论垂直城市建设需要的各种自然资源；第九章专门讨论人类长期发展如何解决能源问题；第十章讨论农业的长期发展方向；第十一章讨论作为工业革命后来者的中国，在下一轮革命中可能承担的特殊角色；第

十二章从生命和人类走过的历史角度，讨论下一次革命的意义和必然性，并且为更后面的发展提出设想。

本书正文中楷体字部分为补充内容，或为事实，或为引申。

# 第一章 缘由

如果可以选择，你希望生活在历史或未来的哪一个时代、哪一个地区？

## 巨变的时代

穿越是很有意思的话题。如果能够神奇地穿越到从前，并且安全返回，那么上面那个问题就不成立。因为这种穿越只是一种逼真一些的梦，一种猎奇，一种经历，去一个陌生环境扮演超人。但如果无法返回，你愿意去哪个时代？在什么地方？当什么人？

假如一个人真的对现实世界没有留恋，没有羁绊，愿意穿越到从前，那么他多半会选择太平盛世，衣锦之家，再给自己挑选一些令人羡慕的亲属，为自己安排一个美好的命运。有些希望一展身手，创造历史的人，会利用在现代社会中掌握的一些知识，穿越到一个乱世，再把自己设计成一个英雄，大干一场，成就惊天伟业。

但如果条件再苛刻一点，你不能设计自己的命运，没有现代社会的知识和器具，而只是作为一个普通人，生活在一个你选择的时代。换句话说，你无法超越你的时代，不会比别人多知道任何东西，没有超能力。这种条件下，你会怎么选择？

这就令人为难了。无论回到哪一个历史年代，汉唐也好，宋明也好，康乾盛世也好，或者是国力最强大时期的罗马，思想最开放时期的希腊、或者东周，甚至是地理大发现时期的西欧。作为一个普通人，怎么也不能和生活在现在相比。那些时代再伟大，也无法逃避一些基本的事实：没有电，没有汽车、火车、飞机，没有手机及任何电子通讯工具，上不了网；很大的可能你不会认字写字；你有大约三分之一的可能活不到五岁，平均来讲你活不过四十岁；夏天很热，冬天很冷，整个冬天都不太可能洗澡；很多现在看来很简单的疾病无法医治，周围有很多人正在遭受病痛折磨；有一大半的机会一辈子不会走到你家十公里以外；害怕陌生人，并且想通过伤害他们来自我保护；永远都要为食物发愁；有很大的可能被奴役或欺凌；如果遇到战争及饥荒，有很大的可能活不下去，……，等等。

崇古的人士，穿越小说作者，还有拍摄穿越片的导演，似乎从来不担心这些事情。但是一旦穿越回去，这些很难避免。那些帅哥美女，回到从前，个人卫生和衣着打扮马上就成为大的问题，人身安全也没法保证。

所以对我来说，为什么要穿越到过去呢？现在多好啊。不愁吃不愁穿，

不怕生病；只要愿意，可以到世界各地去看看；有那么多的新鲜东西去了解、去学习、去体验，可以碰到各种各样的人，跟世界上任何一个人聊天，……。

如果愿意放弃现在的生活和亲人，穿越到未来技术上可能是可行的，而穿越到过去是绝对不可能的。虽然还没有现成的例子，但是原则上可以把人冷冻起来，在未来复活。（警告！现在的技术还不能保证人未来完整复活）

作为一个中国人，生活在现在这个时代尤其幸运。笔者这一代人，出生在文化大革命期间，上学前生活在农村。六、七十年代的中国农村，在社会形态上跟两千年前没有什么差别。男耕女织，封建礼教，……。当然，自然环境很好，天是蓝的，水是清的，山上有各种好吃的野果，……。

祖辈父辈们经过的各种动荡和灾荒，我们没有经历，但能感觉到。成长之时正值中国改革开放，亲身经历了一轮又一轮的“思想解放”。世界上，可以说大部分人，一出生就受某种信仰的影响，然后一辈子都会坚持。我们祖辈的中国，大部分人都遵循儒家的教导，忠孝仁义，有些人信佛、信道。单一信仰的人，很难想象中国人一百多年来的信仰变革。从华夷之争到洋务运动，从儒家的根本忠孝君臣到推翻帝制，……，五四运动，新文化运动，科学救国，实业救国，三民主义，共产主义，抗日救亡，土地改革，解放妇女，工农业社会主义改造，大跃进，困难时期，文化大革命，四个现代化，包产到户，真理标准讨论，改革开放，农业文明与蓝色文明，白猫黑猫，全民打鸡血，练气功，补资本主义课，开放私人经济，抓大放小，反官倒，外汇券，出国留学，圈地运动，新左派，工业化，信息革命，建立社会保障，……。人类世界五千年经历的变革，我们要在三十年内完成。从这一角度来说，我们这一代人，特别是中国人，是特别幸运的。这个世界上，古往今来，再也找不倒第二个时代，第二个地方，在那么短的时间内，经历那么多的变革，但是又能基本保持社会稳定，避免大规模的人类悲剧。几十年的时间内，我们亲身经历了农业文明，工业文明，信息文明这几个最主要的人类文明形态，经受了各种思想的冲击。

世界上的绝大部分，几百年内一样经历了巨大的变化，但是很少有中国这么复杂，这么集中、快速、和充满冲突还能基本稳定。

思想的冲击是一方面，物质方面的变化也同样惊人。比如，中国历史上，很少连续十年不出现灾荒。而我们这一生，不仅没有亲身体会过灾荒的残酷，甚至可以在任何季节吃到任何东西。而我们的人口，比历史上任何时期都要多好几倍。人类走出非洲之后，到近几十年的几十万年内，食物的短缺和季节性都消失了。我们每年可以旅行几万公里，而不是像农业时代那样，束缚在很小面积的土地上。大批的高楼代替了砖瓦房或者土坯房，旷阔笔直的公路代替了乡间小路。下雨出门不再是一脚泥了。一年四季，都可以在舒适的环境中生活。白天黑夜都可以做各种事情，不再依赖太阳给予我们光明。一些以前只有神话传说里面才会出现的东西，比如电灯，电话，电视，汽车，飞机，等等，已经变成了日常生活的一部分。

所有的这一切，几乎都是在几十年的时间内完成的。但这并不是中国独立创造的成就。我们只是学习和享受了世界上别的地区长期发展的成果。几百年来，全世界一直都在发生着巨大的变革，近几十年变化尤其迅速。世界上大部分国家，都进入了后工业的信息文明时代。

自人类诞生以来，困扰人类的基本生活物资短缺，恶劣自然生存环境等问题，已经基本消失。人类从蛮荒、无知、粗鲁、恶性竞争、互相杀戮，发展到友爱和互相帮助，直到现在的互相依赖。人类社会本身变成了一个智慧的整体。没有人能够脱离人类社会整体存在。

对中国来说，如果几十年的巨变，更多体现在思想上的冲击的话，对于全人类，一次一次的变革，则更多是技术进步积累的结果。每一次技术进步，开始看起来似乎微不足道，但是长期积累的效果是惊人的。

中国三十年的改革开放，主要是传统思维方式的改变。一切物质或经济上的成就，主要依靠简单引进现有技术，加上中国人一些传统特点如勤奋、喜欢积累等取得的。从最初的引进电视机、自行车、化工、冶金、……、等各种生产线，大学引进教材（引进之前，几乎所有的专业教材只是西方科技理论的转述），到现在的大量留学，引进研究课题、研究方法和人才等。不过科技成就本来就属于全人类。百年尺度上，中国主要处在学习阶段，发展初期原创贡献较小，也是正常的。随着中国的进步，原创必须也必将变得越来越重要。

## 人类活动的痕迹

从更大的尺度看，地球表面的形态，在人类的历史时期内，发生了巨大的变化。这些变化是在仅仅一万年内，完全因为人类活动发生的。变化的规模，在地球诞生以来的 46 亿年内，非常少见。变化的速度更是惊人，特别是最近的几百年，甚至几十年。

直观地，从太空中，或者从飞机上往下看，基本上所有的温带平原都变成了一望无际的耕地、纵横交错的道路、和仍在不断生长的城市。夜间，本来是一片漆黑的大地，布满了星星点点的灯光。而大片的城市地区更是灯火通明、亮如白昼。遍布视野的公路和停车场上，跑着或停着数以十亿计的机动车。相比之下，全世界只剩下几千只老虎，几万只狮子，几十万头大象，……。除了家养的动物，世界上数量超过一百万的大型动物屈指可数，而人类人口已经接近一百亿。蓄养的猪、牛、羊、家禽也数十亿计。

历史上，作为数千万种生物共享的家园——地球——已经成为某一单一物种——人类——的私有领地。地球上的一切活动，逐渐变得以人类为中心。平原变成耕地，草原变成牧场，海洋变成渔场，河流被拦蓄，森林被砍伐，矿物被开采，……。我们眼里的“自然”已经变了。海平面在上升，气候变

得恶劣，大洋上出现巨大的垃圾洲；稳定了几亿年的背景放射性辐射，因为人类涉核活动的出现而增加；大气中突然充满了各种从来没有出现过的化学成分；只是偶尔受到闪电和太阳活动影响的空白电磁环境，突然充满了各种频段的电磁波；甚至太空——历史上没有任何生物到达过的近地空间——也因为人类活动而突然充满了垃圾，……。

过去的几亿年中，定居的生物只能与周围很小范围的环境交互。迁移的动物也只是在磁场、星空、或者洋流的引导下，沿固定线路迁移。生物依靠改变自己的形体，变成另一个物种，来适应不同的环境。而人类依靠不同的工具、制造适合自己生存的环境，走遍了地球的每一个角落。

人类已经描绘和标记了地球的每一寸土地和海洋，找出了几乎所有的矿藏。很短的时间内，用掉了地球需要几百万年到几亿年，才积累出来的煤炭、石油和天然气的很大一部分。

作为地球主宰的人类，对作为生命圈共同体的其它物种，对自然，变得很不友好。粗暴地根据自己的需要改造地球，也必然地承受着自然母亲的责难与报复。

## 未来的挑战

巨大的变化惊心动魄。匆忙的步伐之下，也出现了很多让人担忧的问题。人们最担心的事情包括气候变化，灾害频发，环境污染，能源供应，水资源短缺，大城市病，住房问题，交通问题，过剩的生产力，食品安全，社会保障，大规模战争，等等。

对于亲身经历了巨大和快速变化的我们，当然应该好奇：未来会怎么样？会怎么发展？也许在我们的有生之年，还会发生巨大的快速的变化，也许会慢下来，也许会有意外发生，但是我们应该怎么做？怎么发展？

人类发展的历史几乎就是技术发展的历史。因此，本书希望从技术的角度，针对人类面临的各种问题，为未来发展作一个猜想。抛砖引玉，希望有更多的专业人士能够做出更有洞见的思考。

## 第二章 人类发展的历史

大尺度上看，人类发展的历史几乎等同于技术发展的历史。

### 旧石器时代与火

人类出现以前，或者说，人类开始使用火以前，人和别的动物并没有本质的区别。即使能够使用简单工具，也不能把人和动物区别开。不仅仅黑猩猩等类人猿可以使用多种工具，海獭也能够用石头把贝壳砸开，乌鸦和啄木鸟能够使用树枝取物，章鱼也非常聪明，等等。只能说，思考和尝试，只是脑这种神经器官的功能。只要有脑，就会去做各种尝试。语言和动物的鸣叫也没有本质的差别。但是火的利用的确是人类独有的。

开始利用火之前，人类和别的动物一样，有固定的栖息地，依靠采集获得食物，靠毛发保暖，听天由命。生活环境变化不适合生存了，或灭绝，或迁徙。食物得不到保障，很高的死亡率，种群发展缓慢。

石器的使用很自然。使用石头工具很多别的动物都会。虽然人类使用的频率可能更大一些，但是不算很特别。原材料到处都有，加工也很简单，砸一砸，磨一磨就很好了。早在两百多万年以前，人类的外形跟现在比，还有很大的差别，很多原始人种也不是我们的直系祖先，但他们都已经经常使用石器了。

因为我们的生活中离不开石头棍棒。由于气候变化，人类的原始栖息地森林大片转为草原。草原上了人类必须直立行走，必须用石头和棍棒自卫和攻击，否则无法和强壮敏捷的猛兽对峙。

石器时代的说法有些片面。木制工具至少同样重要，使用量同样大，使用时间也同样长。木制工具的问题是无法在自然环境中保存很长时间，考古学家找不到。

火是自然存在的。因为闪电，干燥高温，火山爆发，生物体分解自燃等，都能引发自然明火。森林或草原上，也经常发生火灾。由于火的破坏性，动物对火都很恐惧。但是很容易发现，火灾之后，经火烧烤过的动物尸体更容易咀嚼和消化；大型猎食动物对火的恐惧，导致火边相对安全；火还可以在天冷的时候带来温暖；因此，如果可以的话，旁边有一堆可以控制的火，显然是一件很好的事情。只要不断添柴，就可以维持火的燃烧，与火保持一定距离就能保证自身的安全。-那么为什么不烧一堆火呢？即使没有自然灾害

带来火种，钻木取火，或者燧石打火，也不是我们现代人想象的那么困难。

现代人很少使用古老的传统方法生火，连火柴都很少用了，所以会觉得钻木取火这种方式非常神奇。古人也有燧人氏，普罗米修斯等传说，将生火变成了神话。但是生火，的确是上古人类在日常生活中，有很大机会自然发现的。

比如燧石生火。燧石，在自然中大量存在，又比较坚硬，自然会被古人选中作为日常用的工具。石头需要打制才能比较好用，在晚上打制燧石的时候，能看到明显的火花，火花落到干草堆里会点燃干草。这样一个完全自然的，不经意的行为，就可以发现燧石生火。

钻木取火也类似。钻洞是石器的基本加工方法之一。钻的制作很简单，一根木棍加一根绳就可以了，甚至用一根木棍也能做钻。既然能在石器（玉器）上钻洞，那么如果有需要，在木制工具上钻洞也很自然。钻洞的过程中，易燃的木屑会被点着。摸索几次（用什么木材，怎么搓）就可以点着了。当然，生火还需要一双灵巧的手，不过这时我们早已经具备了。

钻木取火也好，燧石打火也好，都是偶尔发现的，而不是刻意发明的。只不过一旦发现，人们就会刻意利用它。就像有的果子有毒，有的果子好吃，有人发现好吃的果子了，就会特意去寻找。一百五十万年前的人类已经开始使用火，但是学会点火可能要晚很多。

在人类出现的早期，自然条件恶劣。作为依靠采集和捕猎为生的物种，没有尖利的爪牙，没有强壮的躯体，也不能快速奔跑。要与体型巨大而凶猛的野兽面对面竞争，没有工具、武器、和协作是很难成功的。以石器棍棒为主的武器，增加了我们的攻击和自卫能力。火能在我们休息的时候提供保护，食物的烹煮让可以杀死有毒的细菌，并且更容易消化，节约了宝贵的能量和时间，来发展更重要的器官——大脑。火也改变了人对环境温度的依赖，再加上服装的使用，不仅在温度适宜的非洲，地球的其它地区，人类也可以迁徙过去了。

旧石器时代，从约二百五十万年前开始，一直持续到大约一万年前。这段时间里，依靠石器和火，人类完成了从动物到人的转变。体型和脑量变已经与现代人无异，并且从非洲出发，扩散到了地球的几乎每一个角落。迁徙的同时，逐渐适应了栖息地的地理气候，形成各种各样的人类种群和人类社会。

## 新石器时代和农业革命

旧石器时代的人们依靠采集和捕猎生存。采集和捕猎的食物来源很不稳定。以采集为例，人们喜欢吃，或者说只能吃几种果实。可是大片森林或草原中，这几种果实很少，而且还有很强的季节性。有时候有，有时候没有。

没有的时候只能饿肚子。捕猎也是一样，不仅可能很长时间猎获不到足够的动物，还可能因为过度捕猎导致食物匮乏。但是种子扔到地上，来年或者过几年，可以长出同样的果实。如果把别的树砍掉或者烧掉，然后都扔上喜欢吃植物的种子，以后就会长出很多果实来。这就是种植，也就是农业。捕猎也可以发生类似变化。捕获到了动物不杀，或者抓来动物幼崽蓄养，可以保持肉食的持续供应。这样，同样一块森林或草地，可以只生长人类需要的植物或者动物，别的都烧掉或者杀掉，就可以收获到比原来多很多倍的食物，也就可以养活更多的人。

环保主义者可能会觉得这样不道德。可是我们的祖先就是那么过来的，正是有了这种“掠夺自然”的手段，人类才能发展起来。几乎任何一种新生命形态的出现，都会大规模地改变原有生态和环境。并不只有工业化以后人类才变得贪婪，并且受到大自然的惩罚，而是一直都是，呵呵。

农业出现以后，同样多的人口对土地面积的要求大大下降。换句话说，同一块土地能够供养的人口多了很多倍。加上畜牧业，人类不再需要长途跋涉，冒着各种危险去采集和捕猎了。土地耕作、村落聚居、家畜蓄养，这种农业社会模式一直持续到今天。

作为动物，食物是最基本的需求。这一需求得到满足，人类才有余力从事别的社会活动，比如手工业、艺术、宗教、科学、战争，等。因此，农业（包括畜牧业）出现以后，人类社会才开始大发展，开始出现真正意义上的文明和历史。世界上所有的古文明，从早期的埃及、巴比伦，到晚些时候的印度和中国，无一例外。后来各种技术的出现，如陶器、犁、金属冶炼、建筑、运输（轮子）等等，都是围绕农业生产、农业引起的定居和聚居，发展起来的。社会分工也围绕农业生产进行。因此引起了社会形态的变化，阶级的产生，……，等等。所有这一切的基础都是农业革命。科学的发展，如天文、历法、数学、化学等，也是因为农业生产的需要。战争的主要原因，也是出于对农业生产资源，主要是土地，或者产品，也就是粮食，的争夺。

农业时代中，衡量一个国家、地区、或者家族是否强大或富足的标准，就是看它拥有多少人口，多少土地，和多少牲畜。

如果说，对工具和火的利用，让人类成为适应性最强的物种，走向全世界。农业的出现，则使人类成为了世界的主宰。仅仅一万年，人类刚跨入新石器时代，农业时代开始的时候，全球人口数目仅有一百万左右，不比很多大型动物如大象、熊、牛、海豚、鲸鱼更多。但到了两百年前，工业革命的影响还很轻微，世界人口已经增长到十亿，远远超过地球上任何一种野生大型动物的数目，甚至它们的总和。直到今天，世界上多数人口仍然是农业人口。改革开放以前，我们生活的中国，绝大部分依旧是农村，人们过着跟两千年前没有多少差别的生活。

金属的使用（青铜时代，铁器时代）是新石器时代主要的技术进步之一，它们提高了耕种和捕猎的效率（当然还有战争和杀戮）。而陶器是因为需要

处理和保存很多食物，以及用水而发展起来的。

## 工业革命

农业革命使人类进入自给自足的复杂社会。社会结构变得复杂之后，需要很多食物以外的东西，比如服装、建筑、炊具、武器、生产工具、运输工具（车、船）、宗教用品等等。这些东西，以前一直都依靠手工制作，需要使用大量的劳动力。

工业革命以前，人类能够利用的动力只有人力和畜力，以及少量的自然力如风力，水力等。有些行为，比如建筑、开矿，需要大量的劳动力，而劳动力的供应是有限的。由于生产力低下，大量劳动力不从事耕作，会造成食物供应不足。因此，农业社会中，非农业生产过度使用劳动力，会引起社会不稳定。比如秦朝的灭亡就是因为大修长城、阿房宫引起的。

随着社会的进一步发展，需要越来越多的“其它的东西”，也就是工业产品。以前的手工作坊模式（瓷窑，铁匠铺，各家各户纺织，……）能提供的产品不能满足需要，主要原因是劳动力不足。为了让有限的劳动力生产出更多的产品，需要借助人力和畜力以外的力量。

直到上世纪 70 年代，中国农村大部分人还没有足够的衣服穿。经常一家人只有一两件能穿出门的衣服。女孩只有出嫁的时候才能穿上新衣服。

“穷”的定义就是，某人没有拥有足够的产品来满足他自己的需求。

自然存在的，可以利用的“力量”包括水力和风力。农业社会中，它们最常见的用途是驱动磨盘将谷物碾碎。如果把船帆也算上，风力的利用时间就很长了。

一般认为，英国人瓦特改进的蒸汽机是工业革命的标志，因为它把人力、畜力、水力、风力以外的一种“力量”，引入人类社会之中。煤和木材以前只是用来取暖和烹煮食物。有了蒸汽机，它们一起可以碾碎谷物，可以织布，可以拉车，可以开船，……，而且不知疲倦，不会生病。它的力气也要大很多。以前需要很多匹马才能拉动的车，或者根本没法拉动的东西，比如很大的船，都可以用蒸汽机拉动。

衡量人、马、牛、蒸汽机各有多大力量，有一个形象的单位——马力，也就是一匹马全力工作时的“力量”。如果持续工作，马和牛的力量差不多，人只有它们的几分之一，而一台蒸汽机的“力量”可以从几马力到几千、甚至几万马力。

按照现在的国际单位制，一马力等于 0.746 千瓦，大约相当于每秒钟把一个 150 斤的人举一米高。作为参照，电动自行车不到一马力，普通家用汽车一般一百多马力（想象一下，一百多匹马拉着你家里的车走在大街上，而古代的皇帝坐的车也就几匹马），火车机车大约一万马力，而大型轮船的发

动机可以达到几十万马力。

工业革命开始之后，各种机械大量涌现，带动了冶金、采矿、制造、运输、建筑等各行业大发展。生产能力和效率的提高，导致越来越多产品的出现，更多的劳动力解放出来。他们可以上学，可以从事艺术、宗教、科学，可以研究和发明出更多的产品，或更好的生产方式。教育和科学技术的发展，又推动社会进行各方面的变化。比如农业、医学、社会科学等。工业革命对人类社会的影响，远远超过工业本身。后来的许多变化，包括社会形态的变革，全球化，世界大战，甚至后来的信息革命，都是工业革命的必然结果。

以农业为例，农业机械的出现使大规模开垦农田，兴修水利，耕种土地更容易；化学工业的发展，导致化学肥料和杀虫剂的大量使用，不仅单位人口耕种的土地大大增加了，单位面积土地的作物产量也大大增加了；育种技术和基因技术的应用，带来了产量更高、对自然条件要求更低的种子。农业方面，不仅粮食产量大大增加，还摆脱了对气候的依赖，基本上解决了庞大人口的食物保障问题。人类进入农业文明以来，频繁发生的各种自然灾害（水灾、旱灾、雪灾、过热、过冷、虫灾等等），以及随后引起的饥荒和战乱，在建立了现代农业的国家内，已经不再出现了。这是一个非常大的变化，它本身也被称为新的农业革命。

交通是另外一个例子。蒸汽驱动的轮船，使越洋航行变得容易。贸易发展到了全球，世界从此不再是很多孤立的体系的集合，而变成了一个整体。火车、汽车等不仅解决了货物的运输，人类也不再像前几百万年中那样，被约束在一个小范围的栖息地上。

我六岁以前主要生活在农村。当地的孩子甚至大人看见汽车过来，总要去围观，很多小孩喜欢拿石头砸汽车。他们中的大部分人没有坐过汽车或者火车，最远只到过 15 公里外的一个集市。周围的几个村子，每个村子都有自己的方言，跨几个乡（那时候叫人民公社），方言就听不懂了。

工业革命的另一个副产品是城市化。虽然农业社会也有很大的城市，但绝大部分人还是农民。工业革命带来的农业生产率提高，第一次使农业人口降到总人口的一半以下。工业化国家的人，大部分都生活在城市，巨大无比的城市。农业社会的城市，主要功能是防御。城市的大小，就是城墙包围的大小，一般是几平方公里。古代最大的城市，如隋唐长安、北魏洛阳、明北京等，也不到一百平方公里。而现代城市基本已经失去封闭的、局域的“城”的概念了，已经变成连绵数万平方公里的都市区。城市与城市之间，已经没有物理上的界限。城市防御的功能也已经失去，而仅仅聚集的生活空间。城市，成了作为一个物种的我们，新的栖息地。

历史上，城市和农村很不一样。最大的差别就是城市不从事农牧业。现在随着工业化引起的生活条件改善，城乡差别已经很模糊了。农牧业只是很少一部分人的工作。

工业化产生的深远影响，是我们改变了整个地球。自从生命诞生以来，

绝大部分在地球上存在过的物种都消失了。但也总有新的物种出现，以适应地球上千变万化的生存环境。现在的地球上，生活着大约一千万种生物。工业革命以来，人类也同样制造了大量的工业产品。据统计，人类制造的工业产品种类数目，已经超过了物种的数目，也就是说，人类自己制造的产品多样性，已经超过地球制造的生物多样性了。我们创造了一个超过生物多样性的工业产品世界，而这个世界还在以更快的速度发展。

## 信息革命

对我们这一代人来说，信息革命无疑是最激动人心的一次革命。它是我们亲身经历，亲身体会的。从大的尺度上看，它也许算不上一次真正的革命，因为看不出人类社会物理形态的明显变化。但跟以前所有的革命一样，它显著地改变了整个世界的运作方式，以及我们每个人的生活。

以计算机和通讯技术的发展为基础的信息革命，仅仅开始于上世纪末。现代计算机和通讯已经有了近百年的历史了。技术一点一滴地积累，一步一步的前进，在某一时刻突然出现了一个产业，叫做信息产业。很多人从事信息产品的设计、开发、应用。该产业又出现了很多的分支，叫做软件、硬件、网络、数码影像、数据库、地理信息系统、电子商务、电子政务、高性能计算、搜索、云计算、智能终端、物联网、区块链、人工智能、……、等等，令人眼花缭乱。

除了每天离不开智能手机、电脑、网络，信息革命究竟给我们带来的什么？要回答这个问题，应该先看看这一切发生之前，我们怎么生活和工作。我们这一代人，在上世纪七八十年代主要在学习。学习就会碰到很多问题，一般可以找老师或者看书、或者和同学讨论来解决，但是每一种方式都不能保证解决问题，也不能保证答案的质量，而且也不是非常方便。特别是，如果你学的是自己感兴趣的东西，而不是课堂上的东西的时候。我本人因为兴趣很杂，以前总是碰到这类问题，很难解决。现在当然很方便了，只要你的问题，基本上都可以在互联网上找到答案。互联网把全世界的知识呈现在每个人面前。也许你需要知道怎么去找答案，也许你需要有专业文献的访问权限。但不管怎么样，原则上每个人都可以迅速地获取全世界的所有知识，了解所有的从不同角度思考的观点。这是多么惊人的事情啊！以前那种背书式的老学究一下就失去光环了。专家学者的个人观点不再高不可攀，每个愿意思考愿意探寻的人，都可以站在同样的平台上探讨。就像一个长时间在黑暗中摸索的人，眼前突然一片光明，以前需要猜测的、试探的，或者不知道的东西全部出现了。

在我读大学的时候，电话还很少。跟家里联系一般是写信，紧急的时候需要走到市中心给家里发电报，或者打长途电话。长途电话的通话效果很差，

经常这边大吼大叫，那边糊里糊涂。而现在可以在任何时候，任何地方，跟世界上任何一个人视频通讯。

还记得书籍吗？以前说一个人有学问，或者家学渊源，就说这人家里有很多书。家里有很多藏书，是一个非常奢侈的事情。需要富足的生活条件，和长时间的积累。但是，一家人的书再多，怎么能比得上图书馆；一个图书馆里的资料再多，怎么能够比得上全世界所有的图书馆加起来？一个专家再有学问，怎么能比得上全世界所有的专家加起来？

信息革命是工业革命后的必然，因为信息需要共享，联系需要加强，生产和产品设计需要自动化，人为错误需要减少。

信息时代里，世界更紧密地结合到一起。每个人都能感受到全人类的存在。世界大同成为很现实的可能。

也有人把工业革命以来的技术进步分成三次工业革命，分别是十八世纪始于英国的纺织工业机械化，二十世纪初源于美国的流水线生产，和上世纪九十年代开始的数字化、信息化。还有人将类似的几个阶段分别叫做三次科技革命。个人认为技术的进步是渐进的，但是发展的速度在某些阶段更快一点。以信息传播和共享为例，文字的出现可以算一次革命，印刷术，活字印刷，图书馆，电报电话，光通讯，互联网等都是革命性的，但这样分就太多了。本书还是采用传统的分法。

## 小结

人类社会发展到今天，经历了多次大变革。石器时代产生了人类，农业时代产生了人类社会，工业时代人类成为了地球的主宰，而信息时代将全人类将变成一个有生命力、有智慧整体。

其实，也许从来没有什么革命，而只有一个长期的过程，在几百万年的时间里，一直持续地缓慢发生。人类走得越来越远，了解的东西越来越多，对地球的影响越来越强。换句话说，地球生命的有序化程度越来越高了，从局部、物种、生物链之间的有序性，演变成了全球性的有序性，甚至可以跨出地球，走向宇宙空间。

每一次革命，开始的时候，也不是那么美好、激动人心和波澜壮阔。每一步都充满了困惑、痛苦和绝望。栖息地的变化、伊甸园消失，才让人类从相对安全的森林里走向草原，这绝不是一个愉快的过程。物种灭绝、从地球上彻底消失的压力始终存在。掌握火，也不会是一个伟大发明家天才的发现。肯定有很多人被烧伤烧死，或者在山洞中，因不了解火的特性而窒息而死，或者不小心引发森林或草原大火，从而遭受重大损失。火灾即使在很近的古代，甚至现代也时常发生。农业社会里，时常受到各种自然灾害的煎熬，饥荒和战乱也是家常便饭。工业革命成就非凡，但是随之而来的环境污染、

气候变化、资源枯竭也总令人忧心忡忡。信息时代似乎很美好，但是信息的共享意味着，工业化更容易在尚未工业化的地区实现，从而加剧资源与环境的问题。每个人能获得更多的知识，也意味着恐怖分子、反社会人员更容易对社会产生大规模破坏。

那么下一次革命将会是什么呢？世界和生活会发生什么样的变化？我们可能要先看一下我们现在都碰到了那些问题。

## 第三章 发展的问题

地球已经存在几十亿年，地球上的复杂生命已经存在几亿年，人类也诞生几百万年了。如果把地球表面许多物理参数比如气温、海平面高度、臭氧层厚度、电磁环境、辐射量、大气中的杂质含量、森林面积，等等，在千年，或者万年的尺度上以十年为单位画成一张图，所有的曲线画到近几十年都出现了快速的变化，甚至变成了一个奇点。

如果要问现代社会有些什么问题，每个人都能列出一个单子，但是不同的人会有不同的单子。打开电视，前几年是伊拉克、阿富汗战争，这几年是金融危机，还有持续了好多年的全球气候变化、环境污染、能源短缺等。在中国，我们讨论更多的是经济发展，收入不均，住房问题，交通问题，教育问题，食品问题，医疗问题等。这些问题中，哪些是人为的，可以通过简单改变一些规则，或修正人类的行为来解决？哪些是本质的，共同的，难以解决，或者需要全人类做出巨大改变才能解决？本章将从现有模式出发，讨论全世界在持续发展的过程中，哪些问题将出现，哪些问题将恶化，以及可能的解决方案。

### 百年大势

虽然工业革命已经经过了二百多年，但在全球的发展却很不平衡，工业化国家的人口还是占少数。也就是说，地球的工业化还没有完成。由于交流的增加，教育和信息技术的发展，以及很多个工业化成功地区的先例，现在世界上还没有完成工业化的国家和地区，应该在未来的五十到一百年内走完这一步。这意味着还需要超过现在数倍的工业产品，来满足这些人口的现代化要求。需要建更多的城市，盖更多的房子，修更多的公路，开采更多的矿藏，建更多的电厂，……。这一切都需要资源。

世界上有很多国家和地区。这些地区，在近二百年内的个体差别非常大。但如果把全世界的人类看成一个整体，分析它在过去几百年，乃至几千年各种参数的变化，可以发现它基本是连续的、平稳的，比如世界的人口总数、粮食总产量、运输总量、贸易总量、总能源消耗量等等。不过这一发展趋势是指数型的。越到后来，绝对数目的增长越快。我们可以根据历史上这些数字的变化模式，来预测以后的发展情况。

以人口为例，由于医疗条件的改善，和粮食产量的提高，在过去的二百年内，人口每年都以百分之一到百分之二的速率增长。后工业化国家的人口出生率在下降，但是这类国家目前还占很小的比例。人口占大多数的发展中国家，在很长的一段时间内，人口还会以较快的速度增长。到 2012 年，世界人口已经超过了 70 亿。到 2100 年，按照联合国 2010 年的预测，世界人口大概会增长到 100 亿，但是也有可能增长到 160 亿或者下降到 60 亿。但到 2050 年，所有的预测都是增长的，数字在 80 亿到 100 亿之间。几十年内，如果没有重大变故，人口还会较大程度地增长。

工业化的程度也将不断提高。二战结束的时候，工业化的只有西欧、北美、日本等很少的一些地区。即使这些地区，工业化程度与现在相比，也不算高。二战之后，六七十年代，日本重新崛起，苏联广大地区开始现代化；七八十年代，东亚、南亚、西亚部分国家发展起来；八九十年代，中国、印度、巴西等人口大国开始加速；再往后，人口增长迅速的非洲大陆、中东国家，人口稠密的东南亚其他国家，人口增长潜力很大的拉丁美洲，还要沿着这条路往下走。从战后开始算，一百年内，工业化人口将增长 100 倍。与现在相比，至少也要增加一倍。

工业化人口和非工业化人口有什么差别呢？直观来看，非工业化人口只需要一块土地，房子可以自己盖，或许需要一些商品，但是量很少。没有电器，不用电，各种消耗品基本自给自足。而工业化人口需要城市，需要各种商品，需要交通，需要公共服务，需要冬季供暖和夏季空调，所有这些东西都需要消耗大量资源。从数字上看，拿全民工业化的美国和刚开始走向工业化道路的印度来比，每一个美国人消耗的初级能源，差不多是一个印度人的 20 倍。中国的工业化人口大概为人口总数的一半，但是程度比美国低，平均每个人的能源消耗量是美国人的四分之一。其它资源比如钢材、水泥、玻璃、化工原料、纺织品等的比例也差不多。甚至基本应该跟人口数量成正比的粮食产量，美国也远远高于印度。平均到每个人，美国粮食产量是印度的 7 倍。

同样发展程度下，资源消耗量与人口数量基本成正比。有多少人口就需要多少资源，包括能源、土地、淡水、矿产，等等。如果资源无限，那么工业化人口继续增加并没有什么问题。可是所有的这些资源，现在就已经很紧张了。因此简单复制工业化国家的发展过程，对于人口更庞大的发展中国家来说，是一项很困难的任务。

在农业社会，最主要的资源是土地和淡水。因为资源的限制，导致发展受阻甚至文化灭绝的例子并不少见。很多情况下，是因为人们没有意识到，他们的生存模式不可持续。有兴趣的读者可以查阅复活节岛消失的文明、玛雅文化等方面的有关资料。

与相对缓慢增长的人口和经济相比，贸易、运输、电力消耗的增长更快，这意味着全球化还是一个快速发展的过程。世界各地之间的联系会更紧密，

相互依赖会更强。

衡量人类社会发展程度有一个量化的指标，就叫人类发展指数 (Human Development Index, HDI)。如果分析它的构成，比如期望寿命，受教育程度，收入等，可以发现它们都和工业化程度直接相关。

人类需要发展。在可以预见的将来，工业化的脚步不会停滞，因为资源紧张带来的各种限制必须突破，已经存在的问题需要解决。

我们来看看现行发展模式的限制和问题都有哪些：

## 能源

能源其实是一切自然活动和社会活动的基础。农业时代能源没有成为限制性因素，是因为人口总量小，当时人类需要的太阳能、木材等资源太丰富了，并且可以自然再生。人力和畜力消耗的主要是粮食，所以粮食就是最重要的限制因素。到了工业时代，动力主要依靠机器，机器工作需要的煤炭、石油、电力就成了新的“粮食”。这种新的“粮食”就是能源。

工业化程度越高，对能源的需求就越大。在过去的四十年内，中国的煤炭产量增长了近 20 倍，而发电量增长了 100 倍，而同期人口只增加了不到一倍。近几年，以百分之二十的人口，中国的煤炭产量和消费量已经占到了全世界的近一半。四十年内，全世界初级能源消耗增长了三倍，但人口增长不到一倍。2012 年，世界初级能源消耗，折算成功率约为 170 亿千瓦，到 2050 年，考虑到人口的增长和工业化的继续，这一功率大约会是 350 亿千瓦。

截止到 2016 年底，世界上的能源供应主要依靠化石能源（煤炭、石油、天然气），它们占到了初级能源总量的 85.5%，剩下的水力占 6.9%，核能占 4.5%，风能、地热、太阳能等其它可再生能源加在一起占 3.2%。水力开发程度已经很高了，核能有安全性问题，聚变发电还很遥远，其它可再生能源的发展也困难重重。因此到本世纪中叶，巨大的能源供应缺口，恐怕化石能源还要占很大比重。但是，相对目前的消费量，已探明的化石能源储量相当有限，考虑到能源需求的增长，如果仍然按照目前的方式发展，石油大约会在 50 年内枯竭，煤炭也只要一两百年的时间。最近源自美国的“页岩气革命”有可能缓解能源供应的紧张现状，但是缺口还是很大。

化石能源除了存在枯竭的问题外，按现有模式大规模利用，引起的环境问题也非常严重。尚未完成工业化的地区，不能复制以前工业化的发展模式。如果全球的工业化保持目前的步伐，必须找到办法解决能源问题。或者找到新的能源，或者找到低能源强度的发展和生存方式。

# 粮食安全

虽然与以前的几百万年相比，人类粮食安全问题大大缓解了，但并没有彻底解决。不仅世界上还有很多地方存在饥荒，到目前为止，人类也还没有能力应对大规模自然灾害引起的粮食供应中断。随着人口数目的继续上升，土地被工业、城市和交通占用，粮食生产与分配的矛盾还会更尖锐。

在人口稠密的国家，耕地资源有限，即使工业化程度很高的国家，比如日本、英国、韩国等，粮食也不能自给。这几个国家百分之四十以上的粮食需要从国外进口。中国的工业化导致耕地面积减少。很难想象中国每年从世界上进口几亿人的口粮。同样的问题在很多地区也存在。

纯粹从生产能力考虑，美国、巴西、阿根廷、澳大利亚等农业大国有足够的粮食生产能力，可以养活全中国。这些国家的大量农产品被用作工业原料。以大豆为例，中国市场上百分之八十以上的大豆是进口的。2017年中国进口粮食超过1.3亿吨，超过全国粮食总产量的五分之一，已经成为最大的粮食进口国。

历史上经常看到持续几年的饥荒。在绝对人口数量少，自然环境大部分保持原始的情况下，饥荒给人类带来的冲击还不是致命的，因为还有足够的森林、湖泊、草原让人们采集维持生命的食物。可是现在的人口太多了，自然生态地区所剩无几，不可能有那么多的树皮和野菜来维持几十亿人的生命。工业时代的人类，没有应对全球性大饥荒的能力。

目前全世界的粮食库存仅能养活人类三个月。

耕地面积下降，水资源短缺，大规模气候变化，都将威胁人类的粮食安全。粮食安全就是人类的安全。

也许有人会说，自然灾害总是局部的，现代农业能够应付大部分自然灾害。过去的几十年来，年年都发生很多灾害，但是粮食总产量还是逐年增加的。只要合理的分配，不必担心灾害问题。这种说法有一定道理，但是过去的几十年里，没有发生过全球性自然灾害，并不等于以后不会发生。

历史上，全球性的自然灾害多次发生。例如，1815年4月，印度尼西亚的坦博拉火山(Mount Tambora)爆发，大量火山灰抛入大气层，遮挡了阳光，造成全球连续几年的气温大幅下降，全球范围内，发生普遍的粮食短缺。要知道，人类走出上一个冰川时代才一万年，根据几十万年的地球气温变化历史推测，下一个冰期也许很快就会到来。在冰川时期，人口稠密的欧亚大陆，工业化程度很高的北美洲，都将被掩埋在几百米到几公里厚的冰层之下，人类将遭受真正的灭顶之灾。

在地球复杂生命诞生以来，历史上共经历了五次主要的，和几十次次要的生物大规模灭绝事件。在主要的大规模灭绝事件中，很短的时间内（数千到数十万年），全球百分之七十到百分之九十的物种灭绝。这些灭绝都是比

较罕见的自然原因引起的，包括超大型火山爆发，小行星撞击，大冰期引起的海平面剧烈下降等。这类事件还会按照固定的概率或周期发生，但是现在的人类还没有任何办法应对。

## 自然资源

农业革命仅仅开始了一万年，工业革命不到 300 年，但是我们向地球母亲索取的太多的资源。可以耕作的土地基本都已经开发了，大面积的森林、草原变成了农田和城市；几乎所有的大江大河都被层层截留。养育了中华民族几千年的黄河，竟然发生连续断流；煤炭、石油、铁矿、铜矿等各种自然矿产，以前所未有的速度开掘出来，很快消耗掉，或者变成产品。开采和加工还要污染大片的土地、天空、和河流。

我们需要的各种自然资源都短缺。发展中的人口大国，特别是中国，土地资源非常有限。中国人均耕地面积仅为世界平均的三分之一，草地面积为世界平均的二分之一，林地面积为世界平均的五分之一。耕地与城市与基础设施建设，及生态保护的矛盾也很突出。

水是生命的基础，没有水就没有生命。人类社会的农业、工业、生活都需要大量的水。我们对水的需求越来越大，越来越难以满足。大量抽取地下水造成地下水位下降，形成大面积的地下水位漏斗，产生地面沉降。河流被截断，引走，造成下游缺水，洄游的鱼类灭绝。工业和生活污水排放到河道中，造成严重污染。大量发展中国家的人民，没有干净的水可以饮用。水资源分布不均。中国北方人口众多，工农业都需要大量用水，但是水资源不足，有 16 个省市区严重缺水。

工业需要大量的矿产资源。除了耕地和城市以外，人类对自然最大的改变就是开矿了。几百米深的大坑，几千米深的矿井，开采的矿石、废弃的矿渣堆成巨大的山丘。几公里长的重载列车和上百万吨的远洋巨轮，将一座座小山从地球的一个地方搬到另一个地方。

容易开采的矿产资源越来越少，几乎所有的矿物的储量除以每年的开采量都持续不了多少年。

地球每年都会再生一些资源，但是我们每年都在透支。这种状态是不可持续的，有办法逆转吗？

## 环境改变

工业革命以来，我们太多地改变了地球。大规模使用化肥和农用杀虫剂，大量排放废水废气废渣，到处挖洞到处留坑的矿山，越来越大的城市，大面

积铺满水泥和沥青的公路及停车场，更多的土地变成农田，森林被砍伐，河流被截断，高大的烟囱排出自然界不存在的化学成分，核电厂和火电厂把附近的河流湖泊及海面烧热，成片高耸的风力发电机改变了大地的景观，飞机在蓝天上留下条条白烟，……。

2013年初，媒体报道了北京持续的雾霾，可实际上中国的雾霾面积达到了一百多万平方公里。早几年，整个冬天，北方主要大城市全城都是浓烈的煤烟味。

景观只是表面，数据更能体现变化的深远。全球平均气温，近百年来上升了大约 0.8 度，其中 0.5 度是近三十年贡献的。燃烧化石能源，每年排放 350 亿吨的二氧化碳到大气中。全球大气中的二氧化碳总量，大约是 30000 亿吨，百年内上升了近 10000 亿吨。同时发生的还有森林面积下降，土地荒漠化。过去的几百万年中，大气二氧化碳含量在百万分之 180 到 300 之间，随着冰川周期变化。但近一百年内，突然上升到了百万分之 400。二氧化碳对气候的影响是长期的，即使现在完全停止排放，上千年内仍将显著影响全球气候。

因为气候的变化，百年来海平面上升了大约 20 厘米。这些水相当于长江一年流量的 360 倍，可以把全中国淹没到 8 米深的水下。

气温上升，海平面上升，大气中二氧化碳浓度增高。这些现象还有正反馈特性。气温越高，海平面越上升，作为主要温室气体的水蒸气和二氧化碳在大气中含量就越高，反射阳光的南北极及高原的冰川面积也越小，吸收太阳能更多，气温就升得更高，……。根据美国国家研究委员会 2010 年的研究报告，本世纪海平面可能还会上升 56 厘米到 2 米。

也有负反馈因素，气温升高将导致地球向宇宙空间的辐射增加，云量的增加也能反射更多的太阳辐射。

全球气温上升，还将造成气候活动更剧烈。极端低温、极端高温、热带风暴、暴风和暴雨等极端气候出现更频繁。这些都将给人类的生存和发展带来负面影响。

如果说气候变化看起来还有点遥远，工业化对环境的各种污染，每个人都能切实感觉到。灰暗的天空，黑臭发泡的河沟，高耸如山的垃圾堆，到处飘飞的垃圾袋，有毒物质污染的耕地，……，还有不太引人注意的光污染，声污染，电磁污染，放射性污染，热污染，等等。

近年来，夏天在长江中下游发生大面积的持续高温，而东北发生洪水。2017 年发布的一份对青藏高原土壤温度的研究报告中，发现 50 多年来，土壤浅层平均温度每年上升 0.03 到 0.05 摄氏度。全球气候变化并不是像我们指责西方，和特朗普指责我们的那样，是一个阴谋，而是已经非常明显的现实。否则，2015 年世界各国也不会通过《巴黎协定》。

农业工业化以后，广阔无垠的土地上，原本接近平衡的生态，丰富的物种被一两种作物取代。所有其它的生物都被杀虫剂、除草剂杀死。这些化工

产品又成了新的污染。耕地、牧场、城市、公路、和其它人类设施占用了大量土地，原本生活在这些土地上的动植物都消失了。野生动物的栖息地越来越少。按照现在模式发展的工业化，必将占用更多土地。是不是以后的世界只有人类、家畜和作为粮食的植物存在？如果按照现有模式发展，很有可能。

地球历史上第六次生物大灭绝正在发生。农业革命以来，由于人类的快速发展，侵占了其它生物栖息地，物种的灭绝速度已经达到了历史上几次大灭绝的速度。工业革命之后，物种的灭绝速度更快。

虽然污染普遍发生，但并不是不可避免的。有预见的规划，有效的治理，严格的环境保护执法，可以避免很多大规模污染事件的发生。很多后工业化国家，已经成功控制了工业带来的污染。但是对于尚未工业化的国家来说，恐怕还是要经历痛苦的污染过程。大部分污染是局部的，影响的范围小，但是像温室气体排放这种行为，有全球性的长期后果。

## 城市化的困惑

工业化的重要表征之一就是城市化。工业革命之初的 1800 年，世界城市人口只占总人口的 3%，到 2018 年这一比例已经达到了 55%。中国在 1949 年的城市人口比例是 10%，而 2012 年已经超过 50%。越是发达国家，城市化比例越高。人类文明最高级、让人印象最深刻的景观，就是高耸的摩天大楼，建筑和道路上拥挤的人群和机动车，以及每天夜间大片通明的灯光。

城市已经成为人类这一物种的栖息地。它把更多的人口和资源聚集到一起，缩短了人和人之间的距离，提供全面的物资和服务，减轻气候给人类日常活动的负面影响，给人们更舒适的生活、更好的教育，更多的生存机会。但是迅速的、持续的、大规模的城市化产生了很多问题，影响了城市功能的正常发挥，给人类带来不便。现在的城市模式，能够满足人类社会下一步发展的需要吗？我们需要什么样的城市？或者说，我们需要什么样栖息地，什么样的生活方式，我们的城市能够有效地让我们按照理想的方式生活吗？

那么现在的城市都有哪些问题呢？

如果说资源聚集效应是城市最大的优点，那么城市越来越大，聚集的人口越来越多，就是一个必然的趋势。

越来越大的城市带来问题也很多。交通拥挤恐怕是最严重的。通勤时间大大增加，社会的运行效率降低。大量的机动车还污染了空气，产生大量噪声。夏天排出的废热和小颗粒加剧了城市热岛效应。更多的废热意味着低效的空调，低效的空调意味着更多的能源消耗，反过来又排出更多的废热。越大的城市，需要越多的机动车，也就需要越多的路面和停车场，反过来又需要更大的城市。更多的道路和停车场还意味着居住和工作空间的压缩，高密度的居住和工作空间，意味着交通更加拥堵。

有段时间人们希望通过卫星城的建设，降低中心城区人口密度，减少交通量，可是城市的聚集效应意味着，各种公共资源是由城市整体提供的，卫星城的建设无助于解决交通问题，甚至更糟。北京的天通苑、通州、回龙观到主城区的交通就是很好的例子。

公共交通的发展能够缓解部分问题。但是公共交通不方便，也有很多问题，如：受气候影响大，没有个人交通快捷，不能运送货物，对老人、病人和小孩也不够友好。

工业化过程中，由于人口的聚集速度大于城市能够接纳的速度，很多城市化是在无序的状态中完成的。完全没有规划，或者没有长远的规划，或者虽有规划但是无法有效执行。

如果不考虑无序的城市化，城市建成什么样，首先看规划。城市规划必须依据某一种原则，某一种思想，比如文化遗址的保护，城市风格的统一，建筑密度控制，环境生态保护等等。可是制定规划原则的人，很难预计以后的发展和需要。比如中国一线城市中，人口和机动车增加速度太快，总量太大。城市的重要产业也发生了变化，以前的规划完全不能适应。但是城市规划又很难调整，因为基础设施的建设投入很大，各种系统相互影响，协调、拆迁成本很高。

与大城市相比，中小城市便于规划，即使规划不当，由于城市规模小，各种问题也不是很突出。是不是可以建设大量中小城市，解决城市过大的问题呢？只要优质资源有向中心城市集中的趋势，人口就会同样集中。中小城市的人员仍然必须到中心城市活动，大量的中小城市反而会增加整个社会的运行成本。

对于大多数地区，城市化是在原有城市的基础上完成的。而原有的城市是从农业时代过来的，完全不适应工业化城市的需要，比如交通，供水供电，排污等等。如果还要考虑历史风貌保护，改造起来更是困难重重。

相比而言，美国几乎所有的城市都是新建的，可以根据工业时代的要求规划和发展城市，因此可以看到美国城市整齐和高密度的街道。但即使如此，城市的发展程度仍然超过了人们的想象，所以还是出现了纽约、芝加哥这样的高密度中心城区。

巨大的城市需要很多土地。不仅仅是住房需要土地，公共空间，道路，停车场，公园，商业区，办公区，绿地，……，都需要大量土地。历史上城市都建在肥沃的土地上。城市的扩张意味着耕地的减少。很多土地资源有限的工业化国家已经无法养活自己，需要进口大量粮食。

大城市带来了很大的资源压力，比如水资源短缺、能源短缺等。北方城市冬天供暖需要消耗大量煤炭。高密度的城市意味着高密度的污染源和巨量的污染。严重的污染导致每年有几个月的时间人们无法在户外活动。而夏天降温又需要消耗大量电力。

一些国家的城市化还伴随着贫民窟，高犯罪率的出现。这一点在中国并

不突出。

城市中，人们生活在人造的环境之中。随时都有灯光，冬暖夏凉，所有房间的温度需要维持在一个变化很小的范围内。但是城市区域的开放性，意味着城市不能摆脱自然灾害的影响。一旦自然灾害发生，比如暴雨、大雪、冰冻、飓风等，城市就会瘫痪。

随着新的技术、新的应用出现，城市基础设施需要改造。但是基础设施的改造成本很高。比如以前北京冬天取暖主要用煤，现在改成天然气，需要将天然气管道铺设到所有的建筑或小区。互联网的发展，需要铺设光纤，同样需要在全城挖很多的沟。以后还会有排水体系的改造，全城无线网建设，道路智能化等等。每次都是大工程、大改造。地铁施工缓慢，成本高昂，主要原因就是与已有设施及建筑冲突。城市改造成本的增加，提高了社会发展的成本，减缓了新技术投入应用的步伐。

欧美国家已经普遍出现了城市基础设施老化的问题。

根据现有的城市规划，以及没有预计到的城市发展，现在城市的生活区和工作区一般是分开的，距离比较远。这样上下班，小孩上学，老人看病都需要长距离跋涉，都要使用拥挤的交通。即使交通顺畅，每天固定的长时间旅行也令人疲惫。大城市中出行难，已经成为影响生活质量的重要负面因素。

污浊的空气影响人们的健康，每天的跋涉令人焦虑，这些都会给人们带来疾病。

城市密集的人流，增加了传染病大流行的风险。一旦传染病大规模流行，首当其冲的是公共交通。公共交通失效了，城市同样会瘫痪。高密度的城市在战争、恐怖活动面前也非常脆弱。

在国际政治中，宗教和文明冲突也是很现实很严重的问题。个人认为，随着信息化全球化的更深入的发展，不同宗教和文明间的交流会更频繁，会慢慢地相互理解并取得共识，最终学会和平共处。

## 过剩的工业能力

工业化使用大量能源，采用各种自动化技术，生产率大幅提高，但随之而来的问题是生产过剩。

生产过剩意味着，产品的生产能力，超过市场能够容纳的产品数目。这一点在中国特别明显。从早期的彩电、冰箱、洗衣机，到现在的服装、电脑、手机、汽车、钢材、水泥、风力发电机，太阳能电池……，等待。每一种产品，从短缺到过剩只需要短短几年。

衡量生产能力是否过剩有一个指标，叫做产能利用率，也就是生产量占所有设备开足马力生产时的总生产量的百分比。一般考虑到升级、维护等因素，85%左右的产能利用率是比较理想的。国际上的主要工业化国家的产能

利用率，都在这个比率附近，比如美国约 80%，日本 83-86%，欧盟 82%，澳大利亚 80%，加拿大 87%，但中国只有大约 60%。

大量的过剩生产能力意味着设备利用率低，投资效益差。另一方面意味着需求不足，生产的東西用不完。

产能过剩会带来很多经济问题，如低价倾销，恶性竞争等，导致全行业利润率过低。行业利润低、收益差，企业没有钱投入必要的研发和设备改造，降低全行业的创新能力，技术进步困难，难以发展。大面积产能过剩，变成整个社会的问题，阻碍社会整体进步。

但基础产业如钢材、有色金属、建材、化工等产业的强大生产能力也是一种重要的资源。如果社会需要大发展，大建设，需要大规模更新基础设施，那么这些产业强大的生产能力，不但不是负担，反而成了重要的资源。

## 小结

工业化的发展改变了我们生活的世界，给我们带来便利和生活保障，但是也产生了新的问题，包括环境破坏，生态失衡，气候变化，资源短缺。同时，因为旧发展模式的饱和，基础建设基本完成，也会造成既有生产能力大量过剩。

城市是现代人的生存空间，是我们的栖息地。但是工业革命以来的城市，特别是大城市，有很多问题，城市功能不能有效发挥。城市人口生活的舒适度下降，甚至不再适合人类生存。

我们还需要新的革命，提高人类社会的运行效率，改善我们的生存环境，开拓新的人类栖息地。

## 第四章 下一次革命

信息革命尚未明显改变地球景观。它会吗？

城市化是工业革命的必然结果。中国的近期发展重要目标之一，也是进一步的城市化，让更多的农民住到城市里面来，完成全社会的工业化。城市化是现代化的直观体现，其进程本身也有助于解决生产能力过剩的问题。但是，考虑到传统城市出现的问题，我们应该建设什么样的城市呢？

### 下一代城市

很少有人讨论“下一代”城市，但是城市应该是什么样的，很多人有自己的看法。

有人希望城市应该是和谐的，人人都有工作，生活都有保障。人民素质高，没有犯罪，生活和谐幸福。这是社会层面的要求，每个人都会有这种希望，但是在技术层面呢？毕竟，社会的存在方式，或者说，物理的、技术的存在方式，就是一切。

有人希望城市是智能的。汽车不需要驾驶，能够自动带你去你要去的地方，不会堵车，不会发生事故；随时随地都可以宽带上网，可以工作或者跟亲人联系，能够控制办公室或者家里的各种设备；需要什么东西，物流网络可以很快传递到你的手上；等等。

有人说城市应该是生态友好的，建筑物不需要多少能源，并且采用可再生的绿色能源，城市就是一个美丽的花园，垃圾都可以回收，每个人都离办公室或者学校很近，可以步行或者采用无动力交通工具到达，……。

不过先等一下，假定你的城市的确是那样美好、那样环保，但是如果暴风雪来了怎么办？飓风呢？高温呢？生态和智能好像能够解决部分问题，或者缓解一些破坏，但总的来说自然灾害会影响城市功能的发挥，会影响人们的生活。那么什么样的城市既可以是智能的，又可以是生态友好，还能节能，能解决交通问题，能少占用土地，能不受季节气候影响，还需要能够容易技术更新？或许还可以更多？

其实所有的这一切都是可以实现的。

先让我们假设一个场景，看看它是否解决了上面说的的问题？它是不是会有新的问题？新的问题是不是能够解决？

想象一座很大的楼，比方说有 1 公里长，1 公里宽，400 米高，共 100 层，平均每层 4 米高（这是一个非常宽裕的高度，普通城市高层住宅每层只

有不到3米)。这座楼共有1亿平方米建筑面积。如果我们预留大量的公共空间,将5000万平方米用于生活居住和商业办公,(普通建筑的建筑面积包含公摊面积,即走廊电梯及公用建筑等,100平方米的建筑面积对应的地板面积只有70平方米左右,这里的5000万平方米可以算地板面积)。根据北京市目前的人均住房(30平方米)和商用办公建筑面积估算,这部分空间可以生活100万人,每人还可以有差不多同样面积的公共空间。这座楼占地1平方公里。考虑楼与楼之间的距离,可以占用4平方公里土地。北京市目前的常住人口2000万左右,20栋楼可以满足居住和工作的要求,共需要80平方公里土地。北京市2012年的建成区面积约1300平方公里,用这种方式可以生活3.25亿人。下面我们把这种方案叫做垂直城市。

与未来的垂直城市相比,我们把现在的城市叫做传统城市。但是工业化国家的城市并不完全是二维的,立交桥网络和大量的摩天大楼,已经向三维发展了,但是城市的布局还是二维的。也可以把这种城市叫做二维半城市。

传统城市中,人均占用的各种建筑面积并不大。以北京市为例,人均公园绿地面积约10平方米,其中包括郊野公园。但是郊野公园的利用效率很低。绿地也名不副实,因为一年中有半年的时间是不绿的。大部分时间也不适合人们活动。北京的人均道路面积不到10平方米,人均商业面积仅2-3平方米。公园加商业面积已经包括了体育设施。如果按照现有人均占有各类面积计算,扣除掉道路面积,北京市每个人的生活空间平均不到50平方米。在垂直城市中,我们为每个人安排了100平方米,已经非常宽裕了。

先不要着急质疑,我们再来看看这种垂直城市,或城市群,还有什么优势。

第一,城市的聚集程度更高,优势更明显,人口密度更高(每平方公里100万人,算上周围空地是25万人,现在的北京不到每平方公里2万人)。更少的土地可以承载更多的人。大量土地可以节约出来还给自然,或用来耕作放牧。

聚集程度的提高意味着,同样的距离内,人们可以享受的各种城市服务更多,任何一个商业设施、公共设施、服务机构,能够覆盖的服务对象也更多。例如公园,每个人都可以短距离到达。而在传统城市中,很多人很难步行走到一个公园。

第二,所有的距离都缩短了。除掉电梯,任意两点之间的距离最多1.4公里,如果采用垂直的网络,最长的距离为2公里。如果要到另外一个楼,考虑楼于楼之间通过快捷交通互联,最长的步行距离还是2公里。通过优化的电梯设置,安排横向自动扶梯,这一距离还可以减小。如果适当布置居住区与学校和工作地点的位置,大部分人都可以步行少于1公里到达工作或学习的地点。

对于一条1公里长的道路,任意两点间的平均距离为0.33公里。如果采用棋盘式道路布置,1乘1公里的正方形内,任意两点间的平均步行距离

为 0.667 公里，即 667 米。

这个距离是通勤距离，代表我们的上下班，出门办事的距离，不是从办公室到周围小饭店，小公园的距离。

第三，机动车没有必要了，公共汽车也没有必要了，大容量快捷交通只是用于楼与楼之间。除了电梯之外，楼内基本不需要公共交通系统。这样社会运行成本将大大下降。交通能源消耗也将大大下降。城市的重要空气污染源，声环境污染源，热污染源少了最大的一个。公交系统的人员数目也将大大下降。公路系统没有必要了，立交桥、公路照明、灯光信号系统、路牌标识也不需要了。城市交通事故成为历史，机动车服务业，销售、维修、保养、保险等都不需要了。公路和停车场占用的土地也不需要了，公路对旁边设施的负面影响没有了。

第四，城市供暖不需要了。这一点可能有点难理解。散热发生在楼体表面，方式有热辐射、热传导、和对流等。现在的楼房为了考虑采光和通风，有很大的表面积，楼体保温比较困难，导致冬季采暖消耗大量能源。大体积的楼宇，表面积除以体积的比例很小。上面说的那栋楼共有表面积 260 万平方米，而体积是 4 亿立方米，表面积与体积比是 0.65%，而一般的现代塔楼，这一比例可以达到 20%，是上面那栋楼的 30 倍。楼内各种活动，如人体自然代谢，烹煮食物，电器运行都会产生大量热量。这些热量无法通过楼体表面自然散发出去，必须由温度控制和热循环系统带走。即使在很冷的冬天，表面散热也非常少，楼体内仍然需要排热，而不是取暖。这样可以节约大量能源，减少污染。

任何一种电器消耗的任何一度电，在密闭空间里都将产生相应的热量（3.6 兆焦耳），无论是冰箱（制冷，只是把热量从冰箱里抽到冰箱外，消耗的电力是整个系统额外的热能来源），电梯（转换为机械能，但是平均的效果是一样的），电灯（部分转换成光能，光能如果不辐射出去，还是会被周围介质吸收变成热），还是电脑，电视，洗衣机，音箱（电能转化为声能，但是被周围介质吸收，变成热）等。

城市供暖烧煤，是中国北方城市空气污染的主要来源。中国的北方，绝大多数大城市，整个冬季都是浓烈的煤烟味。因为供暖，中国北方一年要烧近 10 亿吨煤。近年来，在华北地区发生的大规模长时间雾霾，供暖烧煤是主要原因之一。

除了用电外，我们每天摄取食物、新陈代谢，每人每天平均放出大约 10 兆焦耳热量（约三度电）。

第五，每家每户的独立的制冷降温也没有必要了。因为环境温度由整个大楼的热循环系统控制，一年四季都维持在最舒适的温度范围，除了冰箱，不需要局部空调系统。这样可以节省大量生产空调的原材料，减少温室气体（空调工质气体）排放，同时节约大量电力。超大型智能建筑可以采用非常经济的降温手段，比如利用空气对流、烟囱效应、水蒸发、高空冷源等。夏

天房间里热的来源，主要是太阳辐射和热空气传导对流，热量同样与楼宇的表面积成正比。上面说的垂直城市中，表面面积占的比例很小，接受的热量平均到全楼要少很多。况且表面积小，还可以使用高端保温隔热材料，这样按体积计算的平均成本并不高。

现行开放式楼宇，在夏天需要消耗大量的电力运行空调制冷，大量废热又加剧了热岛效应，导致更多的电力消耗。夏季城市空调耗电功率可以达到城市总用电的一半。

为了维持室内的温度，原则上要把外界传给楼宇，以及楼宇内正常活动产生的所有热量都排到室外。由于表面积的巨大差别，传统城市楼群吸收的外界热量，比垂直城市多几十倍。制冷需要消耗的能源，也要多几十倍。传统城市排热到周围环境中，加热了周围环境，环境反过来又会给楼宇更多的热。而垂直城市的热直接可以排除到外部。

据统计，中国的建筑能耗（主要是采暖和制冷）已占全社会能耗的三分之一，交通能耗约占四分之一。

第六，自然气候的影响没有了。楼里面是完全人工控制的气候。最舒适的温度，适中的湿度。没有风，没有雨，没有雪，没有高温，没有冰冻，没有沙尘暴，没有雾霾。外面气候变化，对垂直城市完全没有影响。没有季节，没有气候变化，没有污染。人们的日常活动不受季节和气候影响，任何时候都可以打球、可以聚会，……。影响日常工作和安排最大的一个不确定性消失了。防汛抗旱，防晒指数，洗车指数，锻炼指数，还有各种气候黄色红色橙色警报都消失了。人工控制下的环境，可以做得更彻底。比如楼内当然需要人工照明，人工照明可以根据人的需要，配置光源光谱，减少对人体皮肤有伤害作用的紫外线，但保留适量便于维生素 D 合成波段的紫外线。

由于一直生活在人工环境中，没有必要使用防寒、防晒、防雨、防紫外线用品，日用品商店的东西要少好多类。进门出门不用换衣服。到处都是室内，没有灰尘泥土，衣物鞋袜等用很久也不脏。

人体合成维生素 D 需要的紫外线量很少。直射的太阳光中含有大量有害的紫外线，能够伤害皮肤，产生光损伤，引起色斑、红肿、水泡等症状，加速皮肤老化，还可能引起皮肤癌。强烈的阳光也能伤害眼睛，引发白内障等疾病。阳光对多数有机物、化工产品、药品都有破坏性，比如普通塑料在日光照射下很快就会老化变脆。

崇尚自然的人士，可能不愿意承认阳光有害这一事实。可是他们享受大自然的时候，需要戴保护眼睛的太阳镜，需要擦防晒霜。人的皮肤在强烈的阳光下，会很快变黑，以保护人体免受伤害。世界卫生组织明确建议，人们应当减少在阳光下的暴露时间，以预防癌症。

第七，城市基础设施一次整体建成，比如电力、数据通讯（含无线宽带、监控、温度、湿度、空气质量传感器、大楼健康安全检测网络等）、给排水、燃气、空气循环系统等。对照现在土地一级开发的七通一平（给水、排水、

通电、通路、通讯、通暖、通气、场地平整), 可以发现基础设施的定义有一些差别, 不含通路、通暖, 和场地平整, 但是多了智能城市 and 智能建筑方面的内容。大楼内规划足够的空间容纳这些系统, 并且考虑维护和升级的需要进行设计, 这样可以避免现有城市模式下, 基础设施升级改造困难的问题。

垂直城市建设也可以采用分层分隔的熟地模式, 即每 20 到 50 米规划一个大层, 相当于传统城市的一个城市区块。大层间安排一个基础设施层, 布置水、电、信息、水处理、垃圾处理等基础设施。

第八, 智能城市的建设变得自然和简单, 可以一次建成, 同时保留以后升级换代的接口。或者以熟地建设的模式, 先建好各项基础设施, 由不同的开发商开发不同用途功能的城市空间。在传统城市结构条件下, 城市智能化工程浩大, 更新换代困难。而在下一代城市中, 智能化是城市的基本属性, 是基础设施的一部分。具体内容包括: 遍布大楼每一个角落的数据通讯网络, 安全监控系统, 大楼安全检测监控系统 (温度、湿度、声强、光强检测, 主要有害气体检测, 区域空气化学成分分析, 大楼结构应力检测, 电磁环境检测, 其它各种安全隐患排查等), 楼内定位系统, 人流分布分析及预测, 电力监控, 环境调节等。大楼是一个复杂的系统, 能够自我诊断, 自我修复。

在这样全面监控的大楼内, 普通犯罪基本上可以消除, 有组织的犯罪更是困难。

第九, 现代传统城市中, 出于生态环境保护考虑, 保留大量的绿地和水面, 这样就会有更多有害的动物和昆虫, 如老鼠、蛇、蚊子、苍蝇、马蜂等。环境保护更好的地方, 还有大型动物如熊和鹿等。这些动物对日常生活是有负面影响的, 能传播疾病, 或者伤害人类。在垂直城市里, 虫害控制比较容易, 原则上可以防止任何一种我们不喜欢的动物进入城市。

第十, 垂直城市的环境是封闭的, 免疫及传染病预警可以在城市范围内施行。可以随时检测空气中的细菌病毒种类和含量, 监控所有人的体温, 甚至可以直接分析下水道中人体排泄物, 掌握所有市民的健康状况, 及时提醒市民就诊。

第十一, 由于城市环境完全人为控制, 所有城市都可以提供同样舒适的生活环境, 城市之间没有季节的差别、气候的差别。城市外部环境虽然还有差别, 但是影响没有现在那么大, 传统城市之间的地域差别就消失了。这样的结果是, 人口没有必要聚集到特定的一些城市中。但是到特大城市的聚集趋势还是会存在。特大城市的建设, 可以通过安排成相互距离比较近的垂直城市群解决。

第十二, 城市全封闭, 水资源可以完全依赖自身循环, 或者只需要很少的外部补充, 不占用外部资源。水资源问题是现在社会最严重的资源和环境问题之一, 垂直城市几乎完全不需要外界水供应, 从而可以最大限度减少对自然界的掠夺, 保护生态。

## 天方夜谭？

一百万人住在一个楼里？嗯，这个想法好像是有点天方夜谭，肯定会有很多问题。好，我知道很多人会有一些疑问，我们可以逐个讨论。

**问题：一百万人住在一个楼里，好像交通是个大问题，楼道不够那么多人走。**

**回答：**传统的楼房大小有限，楼内交通不重要，因而楼道很窄。但大楼可以根据人流情况设计足够宽的通道。现有的例子可以参考一些大型商厦、机场、车站、图书馆、影剧院等公共设施。在上面说的垂直城市中，公共空间的面积占到全部面积的一半，足够安排经过优化设计、并充分考虑冗余的通道系统，和其它公共设施，如公园，文化体育设施等。

**问题：我有幽闭症，看不到蓝天白云还不如让我死了呢。**

**回答：**首先，上面说的垂直城市有 260 万平方米的周边和楼顶，可以看到蓝天白云。其次，你并不需要看到真的蓝天白云，本来也不是每天都有蓝天白云。越来越多的雾霾天同样令人沮丧。垂直城市出现在信息技术和影像技术非常发达的时代。你家的天花板，出门后楼内的过道顶部和两边，都可以是蓝天白云，也可以是森林草原，或者海洋湖泊，或者沙漠戈壁，还可以随时变换，比现在不得不生活在其中的任何一个单调的传统城市都丰富。第三，人们对蓝天白云的向往只是一种习惯，因为经常看到。其实人并不是必须看到蓝天白云。今后垂直城市长大的孩子很少会有这种渴望。

**问题：电梯够用吗？**

**回答：**可以根据人流特点设计电梯运行方案，配置足够的电梯组。如果按照步行不超过一百米范围内必有贯穿全楼的电梯组，每组电梯 8 到 10 台，则可以配置数百台全高电梯。每组电梯可以分快慢梯，快梯 10 层一停，慢梯只在某 10 层内往返，这样可以配置强大的纵向运输能力。对于独立的单位或者社区，尽量不跨或少跨楼层。两三层之间的升降可以采用滚梯。以楼层和空间集中度优先安排社区、商业和办公区。当然也可以配置一些局部的轻便电梯。

如果设计不合理，纵向交通的确可能成为新的瓶颈。这里有一点是心理问题。即使换一次电梯，纵向交通花费的时间并不会超过横向交通(5 到 10 分钟)，但是人们在密闭的电梯里呆两三分钟可能就会觉得烦躁。第二，如果大多数人下三层，上一层楼不乘电梯的话，那么不使用电梯可以到达的地面积，可以达到传统城市移动同样横向距离到达目的地面积的 5 倍。还有一种方式就是滚梯与直梯结合。滚梯上下几层楼并不会令人烦躁。

**问题：如果停电怎么办？**

**回答：**对于现代社会，无论是现在的二维、二维半城市，还是这里说的垂直城市，停电引起的问题一样严重。除了网络通讯中断，工作停顿，无法

刷卡购物，无法用水，……，传统城市还有额外的交通混乱问题，交通信号灯全灭，地铁停运，供暖或者空调消失，等等。

垂直城市的确会有新的问题。如果停电几个小时时间，应急照明一般足够应付，关键系统（安全保障等）也可以由应急电源维持。如果长时间停电，照明不足会引起极大的混乱，环境调节系统的中断也会带来很大的问题。停电绝对是噩梦。

对于现代社会，大规模停电是极端重大的事故。那么多年来，中国很少发生较大范围和较长时间的停电事故。作为解决方案，第一是加强用电安全保障，第二是建立应急体系，建造足够功率和运行时间的应急电源系统。对民众要做好教育和事故演练。

另外，因为同样人口的垂直城市，本质上更节能，对电力和其它能源的需求比传统城市低。统计来看，停电事故的概率将会降低，停电带来的危害也将减少，同时对应急电源容量的要求也降低了。

**问题：发生火灾怎么办？**

回答：现代社会已经建立了一套有效的火灾应对体系，如建筑防火规范，消防体系等。垂直城市的防火更重要，需要建立更严格的规范，防止火灾发生。即使发生，也要在第一时间内把灾情控制住。可以建立遍布全楼的火灾喷淋系统，建立快速火灾反应体系。考虑到全楼智能化，到处都有温度传感器和烟雾传感器，并且监控系统时刻都在运行，火灾预警可以比传统城市好得多。由于垂直城市没有交通问题，根本不需要消防车，救火反应时间非常短，没有火灾不受控制蔓延的可能性。垂直城市空气循环由大楼控制系统控制。如果情况紧急，可以切断火灾区域的空气供应，让大火自然熄灭。还可以设置火灾逃生房间，每个人在火灾的时候都有地方可以去。

传统意义上的火灾如果在垂直城市发生，后果的确非常严重。但是我们可以让火灾不发生，或者迅速控制住。表现在建筑规范或防火法规上，可以要求建筑材料均不可燃，使用电炉而不是天然气炉烹煮食物，只允许在某些特定的场所使用明火，尽量使用电子设备而不是纸张传播信息，等等。当然，还有全楼禁烟。

除了衣物、床上用品之内的织物以外，楼内基本没有别的可燃物。考虑到楼内环境是人工控制的，织物的量也不大，火灾会自然限制在很小的范围内，无法蔓延。也可以要求不经常使用的织物放在防火的容器内。同样也必须对大众进行消防教育，让每个人都知道怎么防止火灾发生，在火灾发生时应该怎么应对。

**问题：如果真的发生灾难性事件，比如恐怖袭击，失控的火灾，大地震等，那么多人怎么疏散？疏散到哪里去？**

回答：首先应该尽量避免任何灾难性事件发生。比如恐怖袭击和火灾，实际上是可控的。火灾的应对方案见前面。恐怖袭击除非来自外部，内部不太可能发生大规模的恐怖行为，因为智能三维大楼有各种安全保障措施。而

从外部对城市进行大规模攻击属于战争行为，这一点在以后单独讨论。

关于大地震，可以做以下考虑：首先，不要在地震活跃带建垂直城市。垂直城市需要的土地很少，有足够多的地震不活跃带可以选择。其次，垂直城市可以设计成抗强烈地震。这有许多现成的技术手段。垂直城市与摩天大楼不同，横向尺度很大，结构稳定，没有倾覆的问题。因此，发生地震时不需要疏散。

如果真的发生万年、百万年一遇的大灾难，那就需要疏散。如果灾难只发生在一座垂直城市建筑里，城市间快速交通系统能够快速地把一百万人疏散到周围的城市内。如果灾难是全局的，比如小行星撞地球，那生活在现在的传统城市里也同样无处可去，垂直城市还能提供一些保护。

大楼本身是一个复杂的系统，有安全措施，有冗余，有应急方案，有修复能力，当然这些东西都需要人来设计和执行，但的确是可以做到的。

**问题：整天看不到太阳，是不是会太压抑了？**

回答：这个问题有点复杂。如果我说这种感觉更多是主观的，很多人也会有不同看法。实际上现在也有很多人整天看不到太阳。比如爱斯基摩人每年有四个月完全没有阳光。就算在现代社会里，那些在很大的办公楼里工作的人，还有大型封闭商场的员工，实际上整天都处在人工照明环境中。不错，他们有机会看到太阳，但如果你愿意，垂直城市也有楼顶，有边墙，可以欣赏到外面的自然风光。如果天气合适，周边还有广阔的公园。的确，你直接站在大自然中间，享受阳光、春风的机会少了，可是你遭受风沙、严寒、酷暑的机会更少了。

实际也未必长期见不到阳光，因为垂直城市中，整个社会运行效率大大提高，每个人的休闲时间可以大大延长。你仍然有很多的机会外出旅游，享受自然。只是，我会在后面证明，也许你更愿意呆在垂直城市里，享受更多的东西。人工的照明也可以足够明亮，足够温馨，足够浪漫，足够健康，足够……，你可以任意选择。

现代的发光二极管(LED)照明系统可以方便高效地产生各种照明效果，如色调，量暗，变换等等。

心理学研究发现，人在明亮环境下心情要舒畅一些。垂直城市中可以在一些公共区域设置明亮的照明。

**问题：战争的时候，垂直城市是不是太脆弱了？**

回答：现代社会，全球性的毁灭性战争还是很难发生的。因为全球一体化，没有人能从世界大战中得到好处。即使发生大规模战争，垂直城市也有很多优势。考虑到公共交通的便捷和快速，以及垂直城市占用土地少，城市不必修那么密集，这样大规模杀伤武器产生的破坏效果就有限。垂直城市目标小，防空等设施需要防护的范围小，容易部署，有利于防御。垂直城市内部环境独立可控，化学武器和生物武器很难造伤害，这一点远远优于开放空间的传统城市。对于核攻击，垂直城市的尺度很大，辐射穿透能力有限，除

了被直接照射的部分外，别的部分相对传统城市更安全。另外由于垂直城市的能源和资源消耗远远低于传统城市，而现代战争是后勤和资源的战争，以垂直城市为主的国家，在战争时期可以为我方提供更多的资源。

**问题：楼那么大，过了使用年限怎么拆？**

回答：不需要拆。由于垂直城市体积很大，可以设计足够的结构冗余，让每一部分都可以修复或更换。它能进行主要结构的自我健康检查，随时发现问题，随时解决。随着以后的技术进步，它还可以更新，因此不需要考虑拆卸。当然一定要拆也是可以的，一点一点，一层一层，从上到下拆就行了。

由于垂直城市隔断自然环境。结构材料、建筑材料、和日常用品的使用不受风雨阳光等自然因素的危害，使用条件温和，使用寿命会大大延长。如果主要的建筑材料和城市结构都按照可拆卸、可回收、可重构设计，整个城市可以做到永不需拆除，只需要维护和检修。

**问题：空气质量怎么保障？**

回答：这的确也是一个很大的问题。一百万人生活在一个大楼里，新陈代谢以及别的活动会改变空气成分。不过现在已经有很多很大的楼，出于保温、安全等原因，都是封闭的。楼内的温度和空气质量保障，就必须通过专门设备来实现。

现在已经有比较成熟的系统，用来控制大楼空气质量。一般是由中央新风空调系统，调整楼内的新风供应和温度。这方面已经是一个成熟的行业，名字比较长，叫取暖通风空气调节系统(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)。有很多厂商提供 HVAC 系统的安装维护。

取暖和空调比较好理解。通风主要是要从室外将新鲜空气抽进来，并将室内的污浊空气排出去。这一过程中还必须换热，以节约能源。空气如果只在楼内循环要更简单一些。空气中的杂质颗粒和有害气体量比较少，可以通过物理或化学的方法去除。但关键是很多人在室内活动，新陈代谢产生的二氧化碳量比较大，而且不断积累。目前还没有好的办法处理，只能不停地排放到室外，并从室外抽进新鲜空气。对于垂直城市，通风要复杂得多，但是也是可以做好的，关于这一点后面还要详细介绍。

垂直城市中，空气中的污染物容易控制，温度湿度也好解决，但是二氧化碳可能不能按照现在的做法，用楼外新风替换，而是简单地利用化学置换，直接将二氧化碳置换为氧气。这一技术也是现成的。

**问题：都在室内，我想踢足球(打篮球，游泳，……)怎么办？**

回答：传统的想法，特别是南方人，觉得体育运动都应该在户外。实际上在北方的城市里，这些活动本来就可以在室内。足球场需要的场地大一些，考虑到观众的人数，一般是独立的大体育馆，但是也完全可以在室内解决。足球场需要的净空比较高，跨度比较大，从经济的角度，可以建在楼顶，其它小一些的文体活动场地如篮球羽毛球、剧场等都可以建在楼内任何一个地方。游泳池有一点特殊，因为它的安全性要求较高。简单一点可以放在最底

层，但是楼内游泳池、空中游泳池，在现代建筑中已经很常见。

**问题：公园可以建在室内吗？**

回答：可以的。最简单的做法是建在顶楼。小的花园也可以建在周边甚至内部。建在内部空间的花园需要比较多的人工照明。

人工照明的条件下，植物的生长比较缓慢，但其实这更有利于公园的管理。后面还会专门讨论植物生长的人工照明问题。

**问题：建那么大的又很复杂的大楼，要花多少钱，多少时间啊？经济上可行吗？**

回答：这一点后面专门有一章讨论。基本的出发点是从小一点开始，先完善各种技术，建立示范社区，逐步发展，降低大规模开发的风险。大的垂直城市需要专门的城市基础设施建设部门或者开发商，只负责城市基本结构和基础设施的建设。空间功能的规划和开发留给其它开发商。

相对传统城市高昂的地价，垂直城市土地成本几乎可以忽略。几乎所有的成本都是建筑安装成本。在中国的一线城市，建筑安装成本只占房价的十分之一。即使垂直城市的建筑安装成本比普通民用建筑高一两倍，总的成本还是远低于一线城市的房价。

高昂的地价来源于该地块附近众多的优质资源，如教育、服务、公共设施，等。这是城市聚集效应带来的资源优势。垂直城市聚集度更高，任何一点周边的优质资源更丰富，生活也更安全，更舒适。如果根据地价的资源原则，垂直城市的每一间房子都应该有更高的价值。

除了上面说的一些问题外，还有很多问题，但是整体来看，似乎没有难以逾越的技术障碍。上面的回答并不全面，但是希望有人可以往这方面思考，并为可能存在的问题提供解决方案。后面还会从经济和社会的角度，分析垂直城市的可行性。

## 为什么？

垂直城市为什么能够以很少的土地资源，很少的能源消耗，提供更好的生活条件，和更有效的社会运行模式？可以从下面几个方面解释。

第一，从数学上看，由于我们生活在陆地上，地球的表面是二维的，所以传统上我们以二维的方式划分领土，建立城市。

工业化以后，出于对生存空间的要求，以及效率的需要，开始建造立交桥，多层楼房这种向三维发展的结构，但是城市整体的布局仍然是二维的。在二维的基础上，提高聚集密度，并建立交通体系有很多限制，而垂直城市打破了这一限制。任意两个人或社会单位之间的距离大大缩短了，可以建立的连接通道数目也大大增加。这样就解决了交通的问题。

在现在的传统城市中，虽然可以盖多层高楼，但是如果算上公路，绿地的面积，城市建成区内建筑面积与建成区面积的比还不到 1（即容积率），即一平方米土地盖不了一平方米房子。但在垂直城市中，这个比例可以很大，在上面的例子中，即使扣除电梯，公共空间，高净空空间（体育场等），容积率可以超过 50。如果算建筑面积，以北京市为例，1300 平方公里的土地上，建设了约 10 亿平方米的建筑。如果采用垂直城市方案，80 平方公里的土地上，可以提供 20 亿平方米的建筑面积。

也可以从体积角度来看。现在城市普通住宅的层高不到 3 米，商用建筑要高一些。以 3 米为平均数，10 亿平方米的建筑，提供了 30 亿立方米的生活和工作空间。而上面的例子中，20 座垂直城市可以提供 80 亿立方米的空间，是占地面积为 16 倍的传统城市的 2.7 倍。多出来的空间，足够满足高净空的公园和文化体育场所的要求。

从连通性的角度来说，传统城市交通集中在地面。地面是各种交通的共享通道，集中在二维平面上不同的交通流，必然产生大量的连通冲突。垂直城市点到点的连接通道很多，冲突自然大大减少。

第二，从物理上看，我们所处的世界本来就是三维的，各种物体以三维形态存在。城市的二维布局本来就不合理，当然会带来许多难以克服的困难。垂直城市是自然的选择。

人类活动消耗能源的几大类行为，包括工业、交通、取暖和空调。其中交通、取暖和空调可以占到总能源消耗的一半以上。由于容纳同样人口的传统城市，表面积巨大，这三项耗费都很大。垂直城市表面积小，受环境影响小，只有把生活废热排出的需要，这三项能源开支都可以大大降低。

非平衡统计理论认为，能量驱动复杂体系产生有序结构，有序的结构通过自组织产生更复杂的结构，垂直城市显然是比传统城市更复杂的结构，它的各种子系统和构成部分的关联度更高，协同工作更有效，还能降低对外界能源的需求。

仅从能量消耗来看，把一个人从某一个地方移动到另一个地方需要的能量非常少。如果不改变海拔高度，原则上不应该消耗能量。把一个 50 公斤的人提升 400 米，只需要 0.2 兆焦耳，仅相当于燃烧 5 毫升汽油的化学能。汽车以 20%左右的效率将化学能变成机械能，搬动相当于人体重量几十倍的汽车，克服各种摩擦和空气阻力，把一个人运送到一个地方。原则上，如果没有海拔高度差，汽车每 10 公里消耗的 1 升汽油完全没有做功。楼内的交通就避免了这种低效的工作方式。电梯都有配重，提升电梯的能量原则上全部用来提升乘客或货物，而且直接将电能转换为机械能的过程效率很高。很多电梯上上下下，可以适当调度或者蓄能放能，让下的电梯带动上的电梯，从而进一步节约能量。

第三，从化学的角度看，阳光和雨水是各种人造产品老化和锈蚀的罪魁祸首。垂直城市阻断了阳光和雨水的侵蚀，很大程度上避免了这些破坏，提

高了各种产品的使用寿命，避免不必要的损失和事故。人体也是一个生物化学个体。阳光同样也能伤害人体。垂直城市的人工环境可以降低阳光的损害，改善人们的健康，降低生病的几率，延长人类寿命。

第四，从工程系统论的角度看，设计和建设一个完整的新系统，与改造一个庞大复杂的老系统相比，要简单有效得多。从工程上看，改造的成本要高很多。

垂直城市分离基础设施和生活工作环境的建设。基本结构和基础设施可以维护更换，保证了城市建设投资的效益，至少可以大大延长了城市（大楼）的寿命。生活及工作环境的建设，可以根据社会发展的情况，独立完成，也可以在不改变大楼基础结构和设施的基础上，重新构建。

模块式的设计和建设方式，也是各种复杂工程项目管理的通用模式。

第五，从信息和通讯技术角度考虑，在一个封闭完整的楼体内，完成信息系统布线、信息点安装、监控和传感器安装，比在一个覆盖面积很广，线路错综复杂，施工复杂困难的传统城市安装，当然要容易得多。

大楼智能化技术是现成的，而开放式传统城市的智能化需要克服的困难要多很多。

传统城市基础设施施工经常需要挖开地面，施工难度高，需要多单位多系统协调，还会出现很多不确定性因素。

第六，从系统论的角度看，垂直城市无疑是一个联系更紧密的整体，它的构成复杂，有很多子系统；它既是一个人为的技术系统，又是一个社会系统；从更广的尺度上看，它还是自然系统的一部分；垂直城市及其集合构成了多层次、多尺度的复杂系统，同时作为人类社会的载体，该系统的稳定性和安全性至关重要。

系统论有各种学科和理论，如控制论、协同论、信息论、结构论、运筹学、系统工程等。即使单纯从学术的角度考虑，垂直城市的发展和运行，新的文明形态与自然的相互作用，都会是各种系统理论应用的重要领域。

从一般系统的演化规律上看，在存在合适的驱动因素的条件下（系统所在宏观环境），系统总是向更复杂，更高效的方向演化。比如地球上的生命越来越复杂，相互之间的关联度越来越高，出现越来越多的层次结构，等等。垂直城市是现代文明和传统城市进一步发展的必然方向。

从生命和人类的发展历史上看，也可以看出垂直城市的出现应当是必然的。最早的生命是单细胞生物，慢慢形成多细胞生物。多细胞生物中每个细胞的功能有了分工。这个过程不断发展，出现大量生物物种。为了抵抗环境的变化，出现温血动物。温血动物开拓了新的生存空间。人类首先依靠火、衣物、山洞、房屋进一步改善了生存环境，现在我们通过取暖、空调为自己提供舒适的生活环境，而垂直城市对环境的改造更有效、更彻底。

实际上，对于人类的健康生活来说，自然是邪恶的，阳光是有害的。我们直接生活在自然环境中，对环境的粗暴改造也伤害了地球生态。垂直城市

可以提供专属人类的优化生存空间，与周围环境隔绝，大大减少与自然的交互，对人类和自然双方都有益。

我们已经建造了很多摩天大楼，从这些摩天大楼出发，我们可以看到未来城市的影子。摩天大楼应用的各种技术，也为垂直城市的建设打下了基础。从技术来看，垂直城市和摩天大楼并没有本质的差别。但是体量的变化，可以彻底改变城市和人类社会的运作方式。下面我们可以看看垂直城市和摩天大楼有什么异同。

## 摩天大楼与垂直城市

摩天大楼令人印象最深刻的特征就是高，这也是最早城市与农村的差别。只有城市才有高楼。高楼越多，城市越繁华，该城市的人也越自豪。一座城市最高的大楼，往往也是这座城市的象征，城市的标志。

工业化以来，不同城市的人们对于大楼高度的追求，成为获得认知度和自豪感一个重要手段。大楼的高度已经超过了普通的山丘。还有更多更高的大楼在规划和建设。

摩天大楼最大的优势，当然是提高了土地利用效率。在房产以金钱衡量的时代，每一层楼都是很大一笔钱，建筑成本相对于楼价，几乎可以忽略。因此，虽然摩天大楼近几十年受到了很多批评，但是在全世界范围内，摩天大楼还是越建越多，越建越高。到 2018 年，世界上已经有 350 米以上的摩天大楼 56 座，其中近一半（27 座）在中国。

截止到 2018 年中，世界上最高的已经投入使用或者结构封顶的 10 座大楼见表 1。

表 1 截止到 2018 年中世界上最高的 10 座大楼

排名	名称	城市	国家	高度 (米)	层数	建成年份
1	哈里发塔	迪拜	阿联酋	828	163	2010
2	上海中心	上海	中国	632	128	2015
3	麦加皇家钟塔饭店	麦加	沙特阿拉伯	601	120	2012
4	平安国际金融中心	深圳	中国	599	115	2017
5	乐天世界大厦	首尔	韩国	554.5	123	2016
6	世界贸易中心一号楼	纽约	美国	541.3	104	2014
7	广州周大福金融中心	广州	中国	530	111	2016
	天津周大福金融中心	天津	中国	530	98	2018
9	中国尊	北京	中国	528	108	2018

10	台北 101	台北	中国	509	101	2004
----	--------	----	----	-----	-----	------

可以看到，世界上最高的大楼已经高达 828 米，排在前 10 的大楼全部超过了 500 米。还有计划建造高达 1200 米甚至更高的大楼。500 米左右高度的摩天大楼很快会变得很常见。

500 米看起来不是一个很大的数字，但是已经非常高了。北京的香山海拔 575 米，从山脚下上去高差不到 500 米，爬过香山的人都知道，如果停了电，爬 500 米可不太容易。如果大楼的水管是通的，低层水管的压强将达到 50 大气压，是普通汽车轮胎气压的 20 多倍。如果地面大气压是 1，楼顶的气压是 0.95 大气压。楼顶的气温也要比地面低 3 摄氏度。

现代的摩天大楼或楼群，能够提供很大的建筑面积。如 911 事件前的美国世界贸易中心，两栋大楼有 80 万平方米，可以容纳 5 万人同时办公，2 万人同时就餐，另外还能接待约 8 万客人。从规模上看，这两座楼及其附属建筑已经是一座城市。楼下有地下火车站，有可以停放 2000 辆汽车的停车场。楼内也有大型商场，22 家餐厅，很多家专卖店，以及各种大小的会议室，展览厅等。大楼还有自己的邮政编码。

世界贸易中心于 1966 年开工，1973 年竣工。是信息时代之前的作品，由于没有使用计算机辅助设计，虚拟现实等技术，大楼的设计并不完美。投入使用后发现很多问题。主要的问题有交通不方便，人流拥挤，电梯很多但是关系复杂，空调常出问题，火警会引起很大的困扰。

世界贸易中心全部 7 座大楼共 124 万平方米办公空间，花费 4 亿美元，折合为 2013 年的 23 亿美元，约 143 亿人民币，每平方米不到 1.2 万元人民币。

现代摩天大楼有一个显著的特征，就是很单薄。像一根柱子直插天空。这种结构会带来一些问题。

也有一些大楼，最求的不是高度，而是大的使用面积。

一些地方的大型会展、旅店、娱乐中心，本身几乎也构成一座城市。如沙特阿拉伯的麦加皇家钟塔饭店，就是由几座相连的楼构成，共有约 160 万平方米建筑，可供 10 万人同时入住。澳门的威尼斯人酒店有 98 万平方米，是世界上最大的赌场。

还有一类现有的建筑有未来的气象，它们就是各地新建的大型航空枢纽。它们占地面大，全封闭，净空大，总使用面积和空间也大。比如北京首都机场三号航站楼，使用面积近 100 万平方米。阿联酋杜拜国际机场三号航站楼，更是高达 170 万平方米。

表 2 世界上最大的 10 座建筑

排	名称	国家	面积	造价	平米造价
---	----	----	----	----	------

名			万平米	(亿元)	(万元)
1	成都新世纪环球中心	中国	176	120*	0.62
2	杜拜国际机场 3 号航站楼	阿联酋	171	283	1.66
3	麦加皇家钟塔饭店	沙特阿拉伯	158	933	5.5
4	曼谷中央世界商业中心	泰国	102	改造	
5	阿尔斯梅尔花卉拍卖中心	荷兰	99	不详	
6	北京首都机场 3 号航站楼	中国	98.6	220	2.2
7	澳门威尼斯人酒店	中国澳门	98	150	1.5
8	金沙城中心	中国澳门	89	250	2.8
9	成功时代广场	马来西亚	70	不详	(2003)
10	雅加达中央公园	印度尼西亚	65.5	不详	

\*造价包括旁边的另一座建筑。

排名第一的成都新世纪环球中心 2013 年 4 月 28 日才投入使用，长 500 米，宽 400 米，最高点 122 米，总建筑面积 176 万平方米，其中有 40 万平方米购物中心，80 万平方米办公室，还有共 45 万平方米的两家大酒店。该项目耗资约 120 亿元，但是还包括旁边 18 万平方米的新世纪当代艺术中心，所以总的平均造价应该是 0.62 万元每平方米。

如果按占用的地面面积来计算，世界上最大的建筑是美国波音公司的埃弗雷特飞机制造车间(Boeing Everett Factory)，占地面积为 0.4 平方公里，是我们垂直城市的 40%。该车间还是世界上体积最大的建筑，总体积为 1330 万立方米，相当于我们垂直城市的 3.3%。

这些已有的大建筑，无论是面积还是能够容纳的人数，都可以算一座城市了。古代一般的城市，也就是几十万到几百万平方米大小，人口从几千到几万不等。

但是我们的垂直城市还是要大很多。表 2 列举的大建筑，地板面积在 100 万平方米上下。我们在前面提到的垂直城市有 1 亿平方米，是现有建筑的 100 倍左右。垂直城市的人口，只有这些商用大楼的 10 倍左右。相对人口密度只有十分之一，也就是每个人拥有的私有空间和公共空间比这些建筑要多十倍。

考虑到一般家庭房子的使用面积在 100 平方米左右，除了大型宗教建筑以外，建筑面积达到 1 万平方米应该是个很大的飞跃。这一步是在工业化过程中完成的。1 万平米大小的建筑，在二战前后就很平凡了。百万平方米建筑是很近的事情。表 2 列举的建筑多在 10 年内建成。考虑到世界上最大建筑物的大小几乎是连续增加的，我们有理由相信这一趋势还会延续。那么再过几十年，我们应该可以看到面积再大两个数量级的建筑物出现。也就是说，垂直城市的出现应该是一个自然的过程。技术一点点进步，规范一点点完善，

投资方的野心一点点增大，过了几十年，城市面貌会发生很大的变化。

当然，慎重的人有理由怀疑，这一过程是不是能够延续？因为现在的摩天大楼也有很多问题。前面举的纽约世贸大楼就是一个例子，它们的悲剧性结局也许是一种启示。可是，从积极一方的角度来看，新的世贸大楼不是又盖起来了吗？悲剧并不意味着结束，而是一种新生。

具体地看，现在的细高式摩天大楼的问题有：

第一，摩天大楼很高，很重，本身有较高的自由能。细高的结构，在灾难发生时不稳定，会放大灾难的伤害。

第二，把那么大量的各种材料提升那么大的高度，也要消耗很多的能源，建造过程不经济。摩天大楼的运行也要消耗更多能量，因为像水等各种日常用品必须提升很高。

第三，在各种自然力的作用下，无法保证摩天大楼表面的部件不脱落往下掉，从而发生危险。

第四，摩天大楼会影响环境和局部气候。由于大楼对风的扰动，会在局部地区产生强风，带来危害。摩天大楼巨大的阴影使周边大片地区阴冷，缺乏光照。而大片的玻璃幕墙将阳光反射到其它的区域，又会造成那些区域过热。

第五，摩天大楼彻夜通明的灯光会产生光污染，干扰人和动物的生物钟，降低他们的睡眠质量，影响鸟类迁徙和其它正常活动。

第六，高层火灾发生时无法救援。因为云梯高度有限。

第七，有些心理学家认为，人类在高层建筑里生活，会变得更孤独，不愿意下楼与人交往，影响心理健康。

等等。

垂直城市会继承和加剧这些问题吗？是不是还会有新的问题出现？我们在前面一节已经讨论了垂直城市可能出现的问题。与现代的摩天大楼相比，实际上很多问题可以在垂直城市中解决。我们可以逐条分析上面的几个问题。

第一，高层建筑有较高的自由能，增加了不稳定因素，这一点原则上存在。但是，垂直城市可以避免很多经常发生的自然灾害，如极端气候。有些灾害可以在设计上考虑进去，采取措施减轻甚至消除危害，比如地震。很大的灾难本来就很少发生。我们对高楼坍塌的恐惧更多是一种心理作用，就像害怕坐飞机一样。垂直城市不是细高结构，横向尺度大于高度，结构稳定，在地震等灾害中的存活能力更强。当然在技术上必须考虑各种最坏的情形，尽量减轻可能的危害。

第二，通过适当设计，可以减少不必要的能量消耗。典型的做法是在垃圾下降的时候回收能量。比如将电梯联网，下降的能量回收，用来提升上升的货物。提升货物消耗的能量与汽车运输相比其实非常少，前面的计算已经说明了。在高处的物品总量是不变的，因此运行的时候，原则上不会因为势能变化消耗能量。一般来说，人或者物升降的能量消耗并不多。

第三，垂直城市高空脱落坠物危害的可能性小得多。因为人都在楼内生活，外面是空地或者公园等。由于垂直城市相对表面积很小，可以使用更加可靠的材料和技术固定表面的部件，也不会明显提升建筑成本。建筑规范也可以禁止高的竖直墙下安排建筑或其它设施。在楼内，可以在竖直方向隔断下落的高度差。

第四，同样，因为人都在楼内生活，外面的局部气流变化可以不用管。也可以在那些风大的区域安装风力发电机。现在的摩天大楼外面无法使用这种技术。

第五，对外部的灯光污染不会成为问题，因为不需要对外照明。可以没有光污染。为解决飞行安全问题的建筑物灯光轮廓线可以取消，而在飞行管理中，可以规范飞机的飞行范围，在垂直城市周边设立禁飞区。

第六，垂直城市不存火灾救援云梯不可到达在这个问题。城市设计和规范将避免火灾发生，即使发生也可以在楼内快速处理，不需要在外面操作。

第七，垂直城市内部就是外部，所有的东西都在楼内，不会因为建筑的封闭而影响人的心理。现代影像技术、虚拟现实技术、室内自然环境重现技术等，可以让在很小的空间内感受到大尺度的空间和自然环境，楼边沿了窗户阳台等也很多，距离也不远。

垂直城市能够解决摩天大楼的很多问题，通过规范技术和人们的行为，没有无法解决的问题。而摩天大楼一般是商用建筑，没有解决人类的基本要求之一：家居问题。正因为没有解决家居问题，反而导致人口大规模朝夕流动，加剧了交通的困难。摩天大楼提供的使用空间仍然有限，整个城市仍然是二维布局的。传统城市的所有问题都存在，并且更严重。垂直城市可以提供大量生活空间，如果按照目前传统城市的人均有效生活空间（居住，工作学习，公共休闲娱乐）大小的标准，垂直城市可以使用很少的土地提供更多的生活空间。

## 历史

像垂直城市这样的巨型结构建筑概念，并不是新的概念。自工业革命以来，许多建筑师、未来学者、科幻作家等，都有类似的想法，主要出发点都是高效，环保，平等，以及健康舒适的城市生活。

十九世纪初，法国著名哲学家、经济学家、空想社会主义者夏尔·傅里叶提出的一种社会主义具体形式——法朗斯泰尔(Phalanstères)——就是一种基于大型建筑的城市。著名物理学家和科幻作家阿西莫夫也提出过未来地下钢铁城市的概念。

二十世纪初，有霍华德(Ebenezer Howard)提出花园城市，柯布西耶的光辉城市等概念。六十年代日本提出了东京湾巨型建筑计划。九十年代开始涌

现一些具体的设计构想，比如美国旧金山的终极塔楼（Ultima Tower），有三公里高，可以住 100 万人；日本的清水城市金字塔，两公里高，住 75 万人，X-Seed 4000 计划，四公里高，住 50 到 100 万人；西班牙建筑师提出的，希望在香港或者上海建设的仿生塔方案，1228 米高，可以住 10 万人。进入 21 世纪，更多的巨型城市概念出现，或者细化，比如迪拜城市塔方案，2400 米高，荷兰人造山方案，2000 米，时代广场 3015，1733 米，等等。

## 小结

与现有的城市模式相比，垂直城市有巨大的优势。它能大量节约土地，节省能源，减少人类社会运行不必要的消耗，大幅改善人居环境。

对人类来说，生存环境巨大变化引起的担心，一部分是习惯与观念的问题，一部分可以通过技术手段解决。

从人类建筑和城市的发展过程来看，垂直城市的出现应该是一个自然的过程。我们已经可以盖更高的大楼。现有的建筑与垂直城市相比，差别虽然还很大，但并非遥不可及。

人类战争的主要原因之一，是对资源特别是土地资源的争夺，也就是生存空间的争夺。垂直城市可以创造出大量的生存空间，从而降低战争发生的可能性。

垂直城市的建设，意味着更大规模的自然改造和工业化，建设本身需要消耗的大量的自然资源。但提供同样的生活空间，传统城市需要消耗更多的资源。

垂直城市必然是智能的城市，是未来的城市，但是会在可以看得见的未来出现，它是人类的下一次革命。

## 第五章 技术就绪程度

未来有多远？其实我们已经生活在未来了，我们有了千里眼、顺风耳，可以在天上飞、海里游，甚至可以飞到月亮上。我们大致知道未来城市应该怎么样了，那么为什么不建一个未来城市呢？

我们已经盖了很多摩天大楼，巨型建筑，已经积累了很多知识和技术。但毕竟垂直城市是往前很大的一步，这些技术是不是足够？再往前发展有没有困难？这一章我们来仔细看一看，垂直城市需要哪些技术？这些技术是不是已经准备好了？

### 建筑设计、结构与材料

垂直城市一个突出特点是大的横向截面，高度并不是非常突出。但高度也不小，属于超高层建筑。

传统超高层建筑，基本上上下一样大，是一种细高结构。细高结构的建筑在抗风，抗震方面有固有的缺陷。高耸的垂直立面也有很多问题，包括稳定性问题，安全性问题，心理问题（恐高）等。垂直城市横截面大，可以是下面大上面小的锥形或坛形，周边不必是很高的垂直立面。

对于四五百米高度的垂直城市，从承重来说，目前的技术和材料都已经足够了。考虑到横向刚性的要求没有目前的摩天大楼高，单纯从结构受力设计和材料来说，垂直城市应该更简单，更安全，更容易实现。

垂直城市几乎不可能建成一座大方块。有各种各样的结构和形状可以选择，这是新一代建筑师可以充分发挥他们的想象力和创造力的地方。它们可以在外观上是艺术品，内部也布置合理，运作高效。

大体积垂直城市的建筑设计，几乎不可能通过人工完成。现代建筑设计，虽然使用计算机辅助，但是还是必须人工在计算机上画出每一根线，每一个面。相同的结构可以复制粘贴或者用脚本自动实现，但每一个操着仍然是人工完成的。垂直城市那么大的结构，各种系统错综复杂，有逻辑，有拓扑，有水，有电，有送风排风，有信息和监控，还要考虑容灾和冗余，等等。设计工作量与建筑物的体积成正比，考虑到复杂性，恐怕还要大。从体积上看，垂直城市是目前最大建筑的几十倍，但是目前最大的建筑是飞机车间，空间很大，结构相对简单。别的大型商业中心或者大酒店，大部分房间是统一标

准的，容易设计。垂直城市容纳的设施和单位众多，要求不一，仅住宅就会有很多方案，这些全靠人工设计可能就像只用扳手螺丝刀打造航天飞机一样困难。因此，必需开发专门的软件进行辅助自动设计。因为体积增加造成的数据量也大幅度增加，要对大楼的蓝图进行展示和分析，桌面电脑是无法胜任的，恐怕需要超级计算机。甚至展示屏幕可能都需要非常大的面积和非常高的分辨率。我们说过垂直城市的长宽在 1000 米量级，而墙的厚度在 10 厘米量级，两者差 10000 倍，要全面展示垂直城市某一层的平面图，哪怕墙只显示为一条线，显示设备的分辨率也必须达到 10000×10000，即 1 亿像素。

为了对大尺度复杂产品的设计有形象的理解，可以参考微处理器(芯片)的设计。现代的芯片结构非常复杂，里面有几十亿只晶体管，分很多层，构成各种功能部件。每个晶体管都要考虑联通和绝缘，相邻元件要避免相互干扰。几十亿只晶体管虽然数目庞大，但是按照功能可以分区设计，分不同的计算核心，高速缓存，高速数据通道，每个核心又有逻辑单元，浮点数计算单元等。如果没有分层的计算机设计，在一个很小的芯片上安排几十亿只晶体管是很难想象的。

垂直城市是一个非常复杂的系统，设计好了之后，恐怕需要利用虚拟现实技术在里面安排几十万人模拟生活一段时间，其中的大部分是虚拟人，但他们也可以“抱怨”，汇报生活中的不便，一些人可以由真人扮演和体验，测试各种场景下垂直城市的运行情况。

电路(强电)，信息(弱电，监控)设计目前也有规范可循。考虑到大量直流电器，如电子二极管(LED)灯，电脑，手持电子设备，无线网络设备等的需求，可能还需要设计直流供电线路。

给排水设计(冷热水，下水)也可以参照现有建筑规范。

在结构设计方面，虽然常用的钢筋混凝土结构可以有很长的寿命，也很安全，但是考虑到垂直城市的安全性和可维护性，希望在结构上设计足够的冗余，可以更换和维修任何结构部分。

更可能的是，全楼以钢结构为主。竖直方向按照一定高度分区，以减少高度带来的各种问题。

另外，考虑到对于高楼，普通地板承重不可能设计得非常高(否则大楼的整体重量会大大增加，反而会影响大楼的结构)，而上层的楼板坍塌可以引起下面连续坍塌，将产生非常严重的后果。因此应当在每层楼的应力集中区设置应力或受力传感器，随时掌握全楼结构的受力情况，发现异常及时处理，从而避免因使用不当造成的巨大破坏。

对于抗震，垂直城市要比细高的摩天大楼容易实现，只要结构有一定的柔性就行。钢筋混凝土框架结构，或者钢结构都有很好的抗震能力，几乎不需要做额外的处理。而细高的摩天大楼为了防止大楼横向大幅度摇摆，要在上部花费宝贵的空间和结构安全余量，安装横向摆动阻尼装置。垂直城市的横向尺度很大，不可能受地震影响侧倒。

垂直城市的通风和照明特别重要。虽然看起来和现在摩天大楼的相应系统差不多，但是由于体量非常大，有许多需要注意的特殊之处。这两个子系统将在后面专门讨论。

在材料方面，目前摩天大楼用结构材料（钢材，水泥等）的强度和耐用性已经可以满足垂直城市的要求。对于外立面，考虑采光，一般还是会使用能透光的玻璃，即使考虑太阳能发电和保暖隔热。这方面的技术也已经很成熟了。出于节能的考虑，现在的建筑都要求安装保温层。对于垂直城市，由于内部温度舒适恒定，整个楼的内部几乎不需要考虑保温，也就没有必要大量使用有消防隐患的保温材料。与现有建筑相比，垂直城市用到的其它各种材料也没有什么特别的，可以使用现有技术。

在施工方面，一旦工程图纸绘就，巨大的施工场地似乎也没有特别的困难。无论是钢结构还是钢筋混凝土结构，都是分散以层为单位施工的。水泥泵送的距离可能要远一些，但是根据现有的技术，没有什么难度。项目管理会复杂一些，物资供应会紧张一些，但是应该都可以解决。

## 空气循环与处理

送风排风，也就是空气循环及温度调节，是现代大型建筑不可缺少的部分。但对于垂直城市，经过处理的新鲜空气必须均匀地、安静地送到城市的每一个房间、每一个角落，同时还要将废气排出去。对于设计来说，这是一项比较困难的任务。但是空气自身有较强的流动性，即使开始设计有疏漏，也可以实时监测，局部补充通风解决。

室内的空气必须和外界交换，原因是我们在室内新陈代谢排出二氧化碳，消耗氧气。如果不换气，二氧化碳会积累，浓度越来越高，而氧气会消耗掉，浓度越来越低。由于工业化的影响，大气中二氧化碳的浓度已经达到了约千分之零点四。

人类生活的环境中，对二氧化碳浓度的要求很高。如果环境二氧化碳浓度超过千分之一，有些人会觉得容易疲劳，困倦，哮喘病人会出现症状；达到千分之五，多数人都会出现症状，呼吸频率和心率都会提高；再高会引起恶心、呕吐、眩晕、昏厥，甚至死亡。如果一个人的体重维持不变，吃下食物中的碳水化合物最终都要变成二氧化碳排放到环境中。每人每天要排出 0.5 到 1 立方米的二氧化碳。如果不允许在垂直城市里面使用明火，那么主要的二氧化碳来源，都是人和其它生物的新陈代谢。按 100 万人算，每天就是 100 万立方米，除以城市的体积得到千分之二点五。实际上必须持续换气，那么每天的换气量应该是数十亿立方米，每秒数千立方米。由于新风必须从城市外表面获取，而外表面与体积的小比例导致数百个取风和排风口可能会成为瓶颈，因此换新风只能成为部分解决方案，还需要别的技术手段。

除了二氧化碳之外,由于人类的活动,以及物质的基本化学和物理性质,还会有很多不受欢迎的东西进入到室内空气之中,比如粉尘,细菌,放射性物质,有毒化学物质等等。这些都会污染室内环境,危害人体健康。目前在室内环境质量控制中,需要考虑的污染物主要包括:

- 一、二手烟。能够产生各种气态有害物质和直径小于 2.5 微米的有害颗粒(PM2.5)。
- 二、霉菌及其它过敏原。包括霉菌和其它真菌,它们的孢子,花粉,动物皮屑等。
- 三、细菌及其它病原体。包括军团菌,病毒等。
- 四、一氧化碳。来自通风不畅的燃烧(取暖和烹煮)和吸烟。它很危险,因为无色无臭而且有毒。
- 五、二氧化碳。
- 六、臭氧。来自复印机,激光打印机,臭氧发生器。臭氧可以杀菌,但是也会刺激肺部组织。
- 七、挥发性有机物。各种工业产品的生产工艺都要用到大量有机化合物,它们会残留在产品的表面或者体内,并且以一定的速率挥发到空气中,对人的身体产生长期或者短期的伤害。常见的有甲醛,丙烯醛,苯,六氟丁二烯,乙醛,1,3 丁二烯,氯苯,二氯苯,四氯化碳,丙烯腈,氯乙烯等。
- 八、粉尘。包括建筑材料中的石棉纤维,玻璃纤维等超细纤维。
- 九、氡气。花岗岩等建筑材料含有放射性的铀、钍等元素。氡是它们的衰变产物,也具有放射性。氡气无色无臭,但是放射性危害比较大,是仅次于抽烟的二号肺癌引发原因。

现代建筑特别是摩天大楼很多本来就是密封的,住户无法开窗,因此需要考虑室内空气质量控制。针对上面说的各种污染源,许多国家已经制订了一些建筑规范。在垂直城市中,需要更严格地控制空气质量,针对上面各种污染源,可以做以下考虑:

- 一、全城禁烟。吸烟有很多害处,出于对全民健康问题的考虑,在全世界范围内,禁烟已经是大势所趋,最终会实现全社会禁烟的。世界卫生组织的控烟标准是所有公共场所禁烟。但是垂直城市的初期,恐怕难以彻底执行。因此仍然需要设置吸烟间,把吸烟源和公共空间隔离,尽量减少吸烟对空气质量的影响。这是折衷的常规做法。
- 二、霉菌,真菌,细菌等。它们是无法根除的。常规的做法是通风,保持干燥,让它们不容易生存和繁殖。垂直城市在全面监控室内环境的基础上,这一点是可以做得很好。但在特别的区域,如卫生间、公共花园、水体,必然有一定的微生物和花粉的浓度。对

这部分区域，同样可以通过空间隔离，减少对公共空间的影响。至于病毒，因为它们必须寄生在生物体内，通过对垂直城市内市民身体健康的全面监控，可以减少病毒来源。

- 三、规范燃烧和食物烹煮。垂直城市是密闭的环境，氧气供应量不像开放环境下那么无限，原则上不应该有任何化学燃烧过程。比如常见的燃气烹煮。垂直城市中除了特别的管制区域，或者特定开放区域外，不应该有燃气。食物烹煮可以用电磁炉，微波炉，电压力锅等用电炊具，而不使用燃气炉具。这对人们传统烹煮方式有一定影响，但是更卫生，更安全，更健康。这样可以防止氧气过量消耗，二氧化碳积聚，以及一氧化碳的产生。还有，就是日用品及建筑材料、家具等，不使用可燃材料，并减少明火的使用。除了衣物、床上用品等很难避免使用可燃材料外，其它用品都可以使用不可燃材料，甚至木材也可以做阻燃处理。当然，全城的消防监控，烟雾和高温点检测是必不可少的。
- 四、一定浓度的臭氧是有益的。臭氧浓度监测应该纳入空气质量管理之中，根据不同区域和空气条件的要求，调节臭氧浓度。臭氧的化学性质很活泼，浓度会自然下降，所以对臭氧浓度的控制一般是补充臭氧，这很容易实现。
- 五、关于室内挥发性有机物含量的控制，现在已经有了一些规范。垂直城市可以更严格地规范排放量，产品生产工艺上减少这些化合物的使用。或者要求做后处理，如热蒸发处理、表面密封处理等。还有一种做法，就是在空气循环的时候，用各种方法集中去除各种有害物质，包括粉尘等。在这种思路下，室内空气可以循环再生，不需要与外界交换。唯一需要处理的是二氧化碳积累问题，这一点我们下面还要详细讨论。
- 六、氡的来源一般是过度装修，包括花岗岩或者其它含放射性元素材料的使用。垂直城市应该减少含放射性元素材料的使用，尽量使用轻元素构成的材料。氡的密度比较大，趋向于积累到最低处，但要求空气循环不要太快。如果采用室内空气内循环，有一些物理的办法，能够降低空气中氡的浓度。

室外空气为什么让人感觉清新？其中的原因包括：二氧化碳及其它有害气体的浓度低；植物是很好的空气清新机；阳光是很好的杀菌剂、除霉剂、有机物降解剂、臭氧产生器、负离子发生器，……，等等。如果要想实现室内空气循环，再生新鲜空气，必须在室内实现植物和太阳对空气实现的功能。植物通过吸附和光合作用处理各种有害气体，太阳主要通过紫外线杀死细菌、病毒，降解有害物质，产生臭氧和负离子等。太阳对空气的净化作用可以通过设备实现，比如紫外灯，光催化，空气高压击穿电离，粉尘可以通过经典

吸附、过滤等方法去除，挥发性有机物也可以通过紫外照射，电离，化学溶液处理等方式除掉。

唯一比较困难的是二氧化碳，因为量很大。

一个自然的想法是采取室内种植的方法，由植物吸收二氧化碳，排出氧气，从而在室内完成碳循环。这个想法在一定条件下是可行的，但是如果要将一百万人每天产生的二氧化碳都通过光合作用再生，需要的植物和光太多了。可能需要另建 10 座一样的大楼，专门用来生长植物，并且还要消耗非常多的电力来照明。还有一个办法是像在潜水艇中那样，用化学方法吸收二氧化碳，并放出等摩尔量的氧气。同样，这种做法的成本也比较高，但是可行。大规模应用时，成本应该大幅下降。

室内空气循环再生的难点，在于二氧化碳的固定和氧气的补充，别的都好处理。著名的“生物圈二号”实验也碰到了这个问题。这也是人类征服太空，在太空中种植植物，从而补充氧气和食物的难点。尽管如此，同时种植植物，形成一个完全封闭的生态圈是可能的。后面我们还要继续讨论这一想法。

假定二氧化碳固定和氧气再生的问题不好解决，我们还可以稍稍提高垂直城市内可以容忍的二氧化碳浓度标准，比如到千分之一。这样基本不会影响人类活动，但是可以大大减少换气量。千分之一的二氧化碳比例，在普通封闭办公空间、商业中心等建筑内，是一个正常的比例。

空气净化和循环再生，可以保证城内的空气质量。这类装置复杂，庞大，只有在大楼或者城市规模上使用才经济。在小型建筑或者房间内应用，要么功能大打折扣，要么代价高昂。这就是传统城市中，家用空气处理设备比较少见的原因。

我相信，很多人对封闭的环境，还是会感觉不舒服。但是不管你喜欢不喜欢，很多情况下，你已经生活封闭的人工环境中了。比如摩天大楼基本都是封闭的，大型商场基本也是封闭的，你坐的飞机是完全封闭的环境，高铁也是这样，连很多长途大巴都是。各位可以到城市的中心商务区（CBD）转一圈，看看鳞次栉比的楼群中，哪座楼的玻璃墙是可以开窗。

对室内空气质量控制没有信心的人，可以看看飞机上是怎么做的。现代飞机上，空间狭小，人口密度很高。很小的空间里面坐满了人，所有的人要吃饭上厕所。不同的人用不同的香水，还有脚臭汗臭等。但是飞机上空气还是很新鲜的，因为飞机不停地循环和处理空气。飞机的空气质量控制有更多的困难，因为高空氧气含量低，气压和温度都非常低，不可能直接通风，需要升温加压。飞机上的空气过滤系统效率非常高，能够每三分钟将机舱中的空气换一遍，能过滤掉 99.7% 0.3 微米以上的微粒（香烟的微粒一般大于 0.5 微米，通常我们说的 PM2.5 是指 2.5 微米以上的颗粒，细菌大于 5 微米），能把空气加热到 475 摄氏度，以杀死所有的病毒细菌。

# 照明

垂直城市有巨大的面积，原则上都需要人工照明。考虑到传统城市有很大一部分照明取自自然光，如果垂直城市提供同样多的生活与工作空间，就会需要更多的人工照明。从总量上看，即使考虑调度优化，传统城市白天大量采用室内照明等因素，垂直城市的照明总量（发光量）也要达到同样人口的传统城市的两倍左右。也就是在垂直城市中，每人需要两倍左右的人工光。

这是一个估算。不同的传统城市在不同的政策、建筑风格及照明规范条件下，在照明上的用电量差别很大。美国人均用电量约是中国人的四倍，但是照明用电是中国人的八倍。美国还采用了夏令时制度，以减少照明用电。美国照明用电量大的主要原因有：封闭大楼比较多，昼夜都需要照明；人均住房面积大，相应照明面积大；公共区域的照明有规定，很多地方彻夜不能熄灯。我们用软件对照明用电量进行了模拟计算。结果发现，垂直城市的照明用电，比美国现有的人均照明量多百分之三十。

虽然垂直城市需要更多的照明，但也有如下因素需要考虑：

- 一、照明用电占全社会用电的比例不算高，在中国是百分之十二，美国约百分之二十。注意用电量不等于能源消耗量。即使比较大幅度地提高照明用电的消耗量，总的用电量还是在社会可以承受的范围内。
- 二、现行主流照明技术比较落后，灯具的发光效率还比较低。全面使用高效率的灯具可以提高发光效率一到两倍。因此，也许不需要提高照明用电总量，就可以提供足够的人工光。
- 三、垂直城市将减少城市交通、取暖、降温方面的能源消耗。即使提高照明标准，增大部分照明电力支出，城市总的能源效率还是可以大大提高。
- 四、除了提高照明发光效率外，在需要高照明亮度的场合，比如体育馆，可以改善设计。我们一般说的明亮与否，是指光通量大小，单位是流明，定义为每平方米多少照度。光发出来后，如果周围封闭，并且反光度很高，即使光源不强，空间内也会很明亮。如果周边反光度小，即使光源很强，空间和可能不够明亮。如果不封闭，则开放部分相当于一个百分之百吸收光的黑体，光都从那里漏失了。比如现在的大体育馆基本都不是封闭的，上面是空的，观众席的反光率也很低，这样就需要非常强的照明光源。
- 五、室内照明效率总是高于室外照明。由于空间开放，传统城市有大量的室外照明，如公路、停车场、广场等，照明效率低下。垂直城市中，由于城市内任何空间都是封闭的，如果使用高反光率的涂料或者材料，总的照明功率不需要很大，就可以得到比较高的

有效照度。

六、现代城市的照明中，还有很多低效率现象。人不在，照明仍在继续的过度照明现象非常普遍。在智能化的垂直城市中，自动感应技术可以减少这方面的浪费。

发光强度单位是烛光 (candela, cd, 坎德拉)，大约相当于一根普通蜡烛的发光强度。1 烛光的光源在 1 立体角内的光通量为 1 流明，1 立体角是距离 1 米处 1 平方米球面看起来的大小，三维空间圆球的立体角为  $4\pi$ ，即 4 乘以圆周率，约 12.57，所以 1 烛光共产生 12.57 流明的光通量。照度的单位是勒克斯 (lux)，定义是 1 流明的光在 1 平方米面积上的光照强度。

根据建筑规范，一般办公室的照度要求是 300 到 500 勒克斯，如果采用局部高照度，则总平均环境照度可以是 200 到 300 勒克斯。

太阳是一个极强的光源，阳光直射的情况下，能达到 30000 到 130000 勒克斯，是办公室人工照明的数百倍，普通的阴天也能达到 1000 勒克斯左右。

发光效率是指消耗多少能量发出多少可见光。人眼可见的光波长在 400 到 700 纳米之间，如果光源发出的光不在此范围内，就浪费了。人眼对不同波长的光，敏感度是不一样的。因此光源即使能百分之百地把电能变成光能，颜色不同，流明数也不一样。人眼对 555 纳米的黄绿光最敏感，1 瓦的功率如果完全转变为 555 纳米的光，等于 683 流明。也就是说 1 瓦 683 流明是理论发光效率的最高值（明亮环境，亮视觉）。同样百分之百的光电效率，发出 500 纳米的绿光只有大约每瓦 270 流明，而 650 纳米的红光只有每瓦 70 流明。普通钨丝白炽灯的发光能力约为每瓦 15 流明，对应的发光效率约 2%。荧光灯能达到每瓦 50 到 100 流明，发光效率为 7-15%。最近才开始使用的发光二极管照明 (LED) 大约是每瓦 50 到 200 流明，效率为 7-30%。对于自然白光光谱，LED 的理论极限约为每瓦 280 流明，对应发光效率是 40% 左右，这是因为人眼对其它波长光不敏感引起的。到 2014 年，实验室中效率最高的 LED 灯具已经能够达到每瓦 300 流明（不是自然白光），比现在最好的荧光灯管高两倍。

不同光源的发光效率不同，主要因为它们的发光机制不同。蜡烛或者油灯燃烧产生高温，温度越高发出的光能量越高，波长越短，只有波长为 400 到 700 纳米的光才能产生照明效果。当温度为 5500 摄氏度左右时，辐射光的波长集中在人眼敏感的 550 纳米附近，这时候作为靠温度辐射（黑体辐射）发光的光源效率最高，约为 37%。蜡烛或者油灯只能达到 2000 度左右，发光效率为每瓦 0.5 到 1 流明左右（参考流明和烛光的定义）。白炽灯也是同样的原理，但是温度要高一些，能达到 3000 度左右，效率也要高一些。

荧光灯利用高电压将灯管里面的稀薄气体原子激发，原子回到稳定态会发出特定波长的紫外线。紫外线照射到荧光物质上就会转化为可见光。这一过程虽然复杂，而且有损失，但是电激发原子的效率很高，可以达到 80% 以

上，因此总的发光效率仍远大于白炽灯。

发光二极管（LED）是一种半导体光源。同普通半导体二极管一样，LED 是一个 p-n 结，p 端的导流子是空穴，n 端的导流子是电子，电流从 p 端流向 n 端，空穴与电子结合，电子能量降低，发出一个光子。LED 导电的过程就是发光的过程。不同的半导体电子空穴能量差不一样，发出的光颜色就不一样。由于电子空穴对的能量差是一定的，发出的光的能量就很集中，也就是单色性很好，但实际上由于各种原因，光子能量有一定的分布宽度，并不是完全单色的。由于 LED 的发光是电子直接发出一定能量的光子，因此效率很高。目前可以实现最高的发光效率是每瓦 300 流明，为荧光灯的 3 倍。LED 的成本还比较高。作为新一代光源，LED 还有一些优点，比如温度低，体积小，低电压工作，发光平稳（与荧光灯的闪烁相比），寿命长，可选颜色多，开关迅速并且可以容忍多次开关循环，光度可调，不怕撞击（与以真空方式工作的灯泡相比），还可以发出有方向性的光，以提高照明效率。

如果大规模推广节能灯（荧光灯），可以大幅改善照明效率，但市面上 LED 比荧光灯并没有多少提高，而且现在节能灯的使用率已经很高了。考虑到 LED 发光技术还有提高的余地，因此随着技术的发展，还是可以较大幅度地提高照明效率。

我们再来看看反射的影响。考虑到反射，总的光通量或亮度实际上是光源加上多次反射的结果。如果反光率为 50%，则总的亮度是  $1 + 50\% + 25\% + \dots = 2$ ，也就是 1 流明的光源能产生 2 流明的照明效果。如果发光率达到 80%，这个数字是 5，相当于照明效率提高了 5 倍。反光率为三分之一，即 33.3%，效率提高 50%。可惜大部分材料的发光率并不高，大约在 30%到 50%之间。考虑到人对环境的偏好，除了某些特定的场合，通过提高反光率大幅度提高照明效率的可能性并不大。况且在目前的室内照明中，反光率因素已经自然包括了。

因此总的来说，垂直城市需要更多的照明，但是考虑照明技术的发展、城市智能化、室内照明效率高等因素，照明部分的能源消耗并不会大幅提高。

## 交通

垂直城市的交通与传统城市相比有很大的差别。城市三维化之后，变得非常紧凑，主要目的之一，就是为了解决传统城市的交通问题。

传统城市的交通是现代城市最大的困扰之一，主要特征有：

- 1、需要旅行的距离长。由于传统城市散布在很大的面积上，无论是通勤（上下班，上学），还是购物，休闲，都需要出行比较大的距离。平均来说，现代化传统城市中每人每年旅行的距离超过一万公里。这样就导致了：

- 2、旅行必须依赖机动车辆。包括私家车，公共汽车，轨道交通等。轨道交通运输效率高，但是投入大，换乘多，最后一公里不方便。在人口密集总量大的城市，轨道交通拥挤严重。大量的小汽车和公共汽车竞争拥挤的道路，造成交通堵塞，引起：
- 3、交通效率低下。更多的汽车意味着更多的道路和停车场，也就需要占用更多的城市空间。城市交通系统的更新改造代价巨大，改造过程中还会影响交通性能的发挥，带来更多的交通问题。更多的城市空间被交通系统占用后，城市其它功能区域的可用空间数量就会下降，这样就需要更大规模的城市来弥补交通系统占用的空间，因而城市变得更大，出行距离更长，交通问题更突出，形成恶性循环。
- 4、流动本质是三维的，二维流动本来就不自然。复杂的城市结构，交通冲突点非常多。每一个交叉路口都是冲突点。接近饱和的复杂管状流，非常容易因为一两个点的故障，造成大面积的死锁。为了减少冲突点，必须建立立体交通。但在二维平面上，立体交通系统复杂，占用大量空间，建设成本很高，只能在部分主干道上应用。
- 5、传统城市的交通系统很难适应城市的快速发展。农业社会的城市化主要是通过现有城市规模扩大实现。以十年为尺度，快速城市化导致城市的变化非常大。而城市基础设施，包括交通体系，很难及时更新。渐进的城市化过程，导致交通体系改造成本高昂，更新困难。
- 6、为了解决传统城市的交通问题，现在通行的做法是修建高密度的地铁，但是地铁的财务成本和时间成本都很高。主要原因是，地铁几乎总是在建成区施工。地下管网、建筑基础错综复杂，规划和施工都非常困难。传统城市覆盖区域广阔，高密度的地铁，意味着非常多的站点和大量的转乘，同样也会增加出行时间、降低交通效率。地铁对于老人、病人、小孩也不够友好，需要行走较长的距离，上下楼梯，缺少座位。普通人携带行李乘坐地铁也不方便。

垂直城市应该能够彻底解决传统城市面临的交通问题，原因包括：

- 1、垂直城市结构紧凑得多。在距离自己 1 公里范围内，传统城市只能提供约 100 万平方米的城市生活和工作空间。这只有大城市生存空间总量的千分之一左右，因此几乎所有的日常活动都会超过这一距离。垂直城市在同样的范围内，可以提供 100 倍以上的空间，也就是同样移动 1 公里，可以到达 100 倍的目的地。这样，大部分日常活动都可以在这一距离内解决，从而不再需要机动车。

- 2、在垂直城市群中，人的旅行是大容量大楼间公共交通加上楼内交通。旅行方式有点像现在的地铁模式，但现在大城市的地铁站点太多，耗费时间长，线外交通困难。垂直城市的绝大多数日常活动在楼内解决，不需要到另外一座楼。即使到另外一座楼，也比现在的地铁方便快捷，因为站点非常少。
- 3、垂直城市的交通本来就是三维的，主要的人和物流动没有冲突点。以人而不是机动车为基础的交通，发生冲突的机会少得多。
- 4、每座垂直城市包括交通在内的基础设施一次建成，不需要大规模更新。
- 5、城市的扩容，可以通过在附近增加另一座垂直城市解决，而不是大规模改造现有的城市。城市之间通过地面轨道快速交通互联，并不需要修建昂贵的地铁。

虽然说垂直城市能够解决目前现代传统城市面临的大量交通问题，但是由于从来还没有出现过一座能够容纳几十万人生活的垂直城市，没有人设计过这种城市的交通系统。虽然可以参照现有摩天大楼的运作模式，但还是会有难以想见的问题出现。我们可以猜想一下，可能出现哪些问题，并提出可能的解决方案。

熟悉信息通讯系统和计算机数据通讯的人士，可以从信息交换的角度理解垂直城市与传统城市交通方式的差别。最早计算机内及计算机间数据通讯方式，由于数据不多，以及设计简单，都是采用共享式通讯。如基于同轴电缆的早期以太网，晚一些的集线器，电脑主板上的数据（指令）总线系统，等。随着数据通讯量的增加，及通讯节点数的增加，共享式数据通道技术很快就不行了。很快演变成基于交换的通讯系统，如多层交换机，计算机主板上的网络交换式数据通道等。传统城市就是将交通共享在地面上，随着交通量、流通类型、节点数的增加，地面交通也不堪重负，因此需要改变成多联通的交换网络式三维交通。而传统城市的地铁、高速公路系统等，大致相当于总线式到网络式之间的局域总线数据体系。

## 距离问题

前面我们说到，垂直城市中人的旅行距离大大下降，完全不需要机动车。但在实际情况下，可能会有一些问题。如果按照我们最早提到的城市规模，即大约一公里长宽和四百米高度，完全随机的两点之间的距离平均为 0.67 公里（不考虑垂直距离，因为垂直方向的运动由电梯解决，不需要走动），街道或者通道按照整齐的棋盘方式安排，最大是 2 公里。在同样规模的垂直城市群中，不考虑垂直距离及城市间交通，任意两点间的行走距离是一样的，

如果简单假定电梯组和交通中心在城市中心下部。

单次旅行行走 0.67 公里对于健全的普通人是完全可以接受的。但对少数老人，失能人，还是不方便。作为每天通勤的行走距离，单次最好不要超过 500 米，即大约 5 分钟。1 公里或者说 10 分钟的行走距离可以作为设计的极限，这样在垂直城市群中，城市间任意两点的交通可以控制在 20 分钟以下。

对于少数行走距离超过 1 公里的人来说，可以有一些办法解决出行问题。一个办法当然是搬家。由于垂直城市中，距离主要通勤点行走距离少于 500 米的住房选择很多。传统城市中，决定住房价值的位置、朝向等因素，在垂直城市中不存在，或者不显著，因而很容易找到距离近的房子。

城市也可以提供横向辅助交通比如传送带，轻型轨道交通等。这会略微会增加垂直城市的复杂度，提高建设成本，并占用城市空间。不是一种好的选择。人力交通工具如自行车、小孩喜欢的滑板车，或者小型电瓶车等，不适合在小的空间内使用。如果街道足够宽，并且限制这些工具的速度，也可以作为一种辅助解决方案，主要供老人和失能人使用。

自行车不是一个好的方案。因为自行车本身体积较大，行驶时也需要比较大的间隔。由于日常旅行距离不超过 2 公里，城市是一座大楼，地面非常平整，如果需要缩短旅行的时间，滑板车、滑轮、或者小型平衡车就很方便。

## 老人、儿童、失能人、病人的交通

这些人是必须使用辅助交通工具的。儿童由于需要成人照顾，并不需要考虑他们的单独要求。考虑到垂直城市中旅行的绝对距离短，行动不便的老人和残疾人可以使用小型代步工具如电动轮椅。

病人比较特殊，特别是需要紧急抢救的情况下。像救护车这样的交通工具仍然是必要的，但是可以小型化。因为不需要移动很长距离，不需要快速运动，也不需要防风遮雨的封闭结构。垂直城市的救护车可以小到只有一张救护床的大小，医护人员可以简单步行跟随照料。

其实，现在的很多大医院中，病房到手术室或者检查室的距离就有几百米。垂直城市由于所有任意两点的距离都很短，医护人员完全可以直接将病床推到病人家，再推回医院急救，或者就地紧急处理。垂直城市中完全不需要救护车。

长期来看，垂直城市因为生活和医疗条件的改善，人们也会更健康，更少生病。这部分人的特别交通需求总量，应该比现代传统城市小很多。

## 货物运输

城市活动中有很大的物流要求。虽然从总量上看，垂直城市因为已经基本没有建设需求，不会有重工业、建筑工地等存在，需要的运输量少得多。但是像城市居民的日常消费品运输，家具和设备运输，房屋装修，公共空间的维护和改造等，都会有比较大的物流要求，这就需要相应的解决方案。

我们可以将物流需求大的社会单位设置在最低几层，这几层可以使用卡车，铲车等大型交通工具，主要的商业中心和城市间交通中心也放在这几层。上面的工作和生活空间只允许轻型的交通和运输工具，如轻型电瓶车等。由于这些空间的运输量很小，轻型运输工具足够了。

如果采用专门的轻型垂直城市城市设计，可以不必专门考虑大型重型物流需求。

## 短时间大规模人流

垂直城市有充裕的空间。人均实际可使用的净空间大小，大于现代传统城市。但充裕的空间，意味着人群过度聚集的可能性。有些活动如体育比赛，演唱会，节日活动都会带来额外的人流聚集。过度聚集会带来交通的问题，但对于垂直城市，更重要的是会引起局部空间承重过大，给城市带来安全威胁。这是传统城市没有的问题，或者虽然有，但是影响不会那么大。

解决这一问题，应该避免人群在不应该集中的地方集中，引导人群到专门设计的区域如公园，体育馆等可以承受大容量人流的地方活动。

这个问题也许并没有传统城市严重，因为垂直城市的疏散途径更多。

根据一般建筑的设计承重，如每平方米 300 公斤到 500 公斤，城市是可以容许大规模的人员聚集的。特殊的场合如体育馆，可以增大设计冗余。

有很多观众席位的大型体育馆，没有必要建设在垂直城市之内。实在需要的话，可以建在空旷的垂直城市附近。在视频转播非常发达的条件下，未必需要在比赛场地安排太多的座位。

可以想象，如果把大型体育馆建设在城市内部，如果同时有 10 万观众出席，这些多出来的重量（约一万吨），可以让体育馆所在位置略微下沉。

## 灾难场景下的疏散

垂直城市应该比传统城市生存能力更强，能够承受更严重的灾难。大规模的灾害也更容易发生。我们希望，垂直城市能够解决现代城市的所有问题。

现代城市中常见的灾难比如自然灾害，火灾，大规模停电等，在垂直城市中不应该出现。但是我们还是必须考虑，在最坏情况下，城市的应对能力。

最坏的情况就是必须抛弃城市，疏散到别的城市或者外面。现代传统城市中，各种建筑都有紧急情况下的疏散方案。但是上百万人的高楼疏散是个很严重的问题，特别是如果电梯不能使用的情况下。

首先我们还是强调，垂直城市与现代摩天大楼有很大差别。垂直城市在建筑 and 材料使用中，不允许产生明火燃烧。城市的冗余设计保证，城市内大规模火灾不可能发生。因此即使是最坏的场景下，城市中也不会发生大规模火灾。电力供应有可能消失，但是电梯作为关键交通设施不会停止工作，一方面可以用紧急电力供应保证，另一方面，设计合理的电梯系统消耗能源很少。特别是在疏散的场景下，下楼的人远多于上楼的人，这时候电梯系统是可以净输出电力的，不需要外部电力驱动。城市中有多样套电梯组，一次全部破坏的可能性不大。城市应急广播通讯系统、应急照明都应该是可以工作的，可以有效引导疏散。如果情况比这更糟，市民们应该按事先准备的应急方案疏散。在有一定的应急照明，没有火灾的条件下，疏散可以有序进行。

垂直城市的规模很大，许多看起来很大的破坏性事件，比如炸弹爆炸，飞机撞击，对于垂直城市破坏都是局部的，不需要全楼疏散。

飞机撞击能够引起火灾，因为飞机上有很多燃油。火灾影响的范围可以达到几个街区。

## 交通层次化

从上面提到的各种问题出发，我们知道，垂直城市应该建立多层次的交通体系。物流中心和大型货物运输可以建在低层，直接利用卡车或火车，主要的货物处理也在这里。

低层还有人员长途交通中心，横向辅助交通系统，如传送带或者轻型轨道车，用来减少城市间交通的横向行走距离。中间层及高层可以每隔几层设置平面辅助交通系统。

配置一定数量的货物运输电瓶车，老年人和残疾人代步车。平衡车、滑板车之内的个人辅助代步工具，应该控制数量，不应成为主要的交通手段。

优化居住区、工作区、休闲区的位置，减少每天通勤距离。保证大部分人不需要辅助交通工具，就可以很舒适地抵达日常生活的目的地。

街道或通道需要有一定的宽度。主要通道应该达到目前城市双向机动车道的宽度，并保留足够的冗余量。这样即使有比较多的小型辅助交通工具，也能很好容纳。现代传统城市的高层楼房，通道及公共空间占的面积比例并不小，大约在 30% 左右，但是使用效率很低。垂直城市的通道可以作为街道使用，使用效率高，面积也可以扩大，这样通道和电梯的面积都可以很大。

这种条件下，即使有一部分辅助交通工具，也不会对交通形成压力。

像救护车、救火车、警车这种紧急交通工具，与传统城市不同，垂直城市有不一样的解决方案。救护车上已经提到过，由于城市的规模已经达到数十万到上百万人，每座城市都可以配置足够的医院和医疗设施。任何急救都不必出城，这样移动距离短，不仅为病人大大节约了宝贵的时间，还大大降低了对救护车的性能要求，急救车可以仅仅是一张急救床。

救火车也有类似的解决方案。垂直城市内部已经有很严的消防规范，火灾很难发生。救火设施也是根据规范配置的，随时随地可以方便地拿到。还是由于距离的缩短，消防员到火灾发生地并不需要机动车，跑过去最多几分钟。当然也可以使用那种单人站立的电动车，迅速带灭火工具到达火警地点。同样的情况也适用于警车。

现在的人工智能摄像头已经能够提前预判火情，警情。消防人员，警察可以在危害尚未发生之前注意到风险，并及时做出响应。

## 更多的交通考虑

垂直城市是基于无机动车交通考虑的，但城市规模过大也会带来旅行距离过长的问题。如果使用机动交通系统（包括轨道交通），那么现代城市交通问题都会出现，虽然程度上会大大降低。考虑现代社会的交通需要，完全不依赖机械（不包括电梯）的交通体系很难，因此垂直城市的交通架构必然是多层次的。辅助交通的使用率必须维持在低水平，从而保持整个城市的高效运转。

垂直城市是三维结构，如果要建立区域到区域的公共交通体系，那么也必须是三维的。三维交通体系比二维交通体系复杂。如果必须建，也只能设置比较少的交通节点。考虑到垂直城市的高密度，节点数少的三维交通体系足够覆盖全城。

如果总城市规模不大，比如 100 万人左右，单个垂直城市规模 10 万人左右，也可以建设以二维地面轨道交通为基础的垂直城市群，城市之间可以通过串列型、矩阵型等的轨道交通互联。楼内步行距离控制在 300 米以下，从而大大减少楼内辅助交通。

即使规模很大的单体城市，人们的日常通勤距离并不是完全随机的，不能按照平均的随机距离来估计步行距离。第一，可以优化办公、商业、学校之间的距离。第二，垂直城市中，由于住房条件或者价格与坐标位置关系不大，环境也大同小异，搬家解决距离问题比较方便。第三，由于城市的三维属性，距离主要通勤地点 500 米内的住房选择非常多，高于传统城市几十倍，所以很容易找到距离主要通勤点近的房子。

以主要通勤点为中心画一个圆，传统城市只能在一个平面内选择住房，

而且传统城市由于道路、公园等公共设施占用大量土地，在一个平面内的密度也大大低于垂直城市。垂直城市可以从上到下选择几十层。即使考虑传统城市的另半维因素（多层住房），地面的行走需要上下楼，过马路，或者天桥地道，根据天气不同带雨具、穿外套等，远没有垂直城市方便。

## 消防

对于摩天大楼来说，火灾、地震是最大的威胁之一。其中火灾是人为的。在垂直城市的设计考虑中，火灾防范是最重要的考虑因素之一。垂直城市会改变人们的生活方式，其中一部分原因来自消防的需要。

首先，传统的消防措施，比如烟雾探测器和燃气探测器的安装、自动喷淋灭火系统等，不但需要维持，还需要加强。不过对于智能的垂直城市来说，加强是比较容易实现的。前面我们提到，城市里的空气时刻动态检测，烟雾和燃气检测可以作为其中的一个部分。从系统的复杂性和成本角度考虑，不一定所有的地方都需要安装自动喷淋系统。只有在有火灾可能的地方，有可燃物的地方，才需要。

垂直城市还调控全城温度，自然掌握全城温度分布情况，作为火灾表现或隐患的局部温度变化可以随时监测到，并可以及时告知相关部门，由他们做出适当处置。

全面、持续的监测，在预防火灾及控制火灾方面非常重要，同样重要的还有快速的反应。垂直城市由于任意两点距离短，不需要机动车，消防人员很容易做出快速反应。

此外，还可以采取多种措施消除火灾隐患，让火灾不可能发生，或者至少不在人员密集的生活区和工作区发生。具体的措施有包括：

- 1、完全不使用明火。日常生活中使用明火的场合只有食物烹煮。现在已经有很多更高效，更安全的食物烹煮方法和工具，比如电磁炉，微波炉，烤炉等。这些工具很安全，可以进行几乎所有的食物处理。垂直城市可以在日常生活中完全杜绝燃气的使用，用电作为唯一的能量来源。炒菜和烧烤产生油烟，严重污染空气，应该减少这类烹饪方式的使用。但也可以像现在那样，用专门的油烟管道带走油烟。油烟只是有害，并且会唤醒烟雾报警器，但是并不会引起火灾。
- 2、使用阻燃的建筑材料，家具材料。如果使用可燃材料如木材，也必须做阻燃处理。最大幅度地减少城市里面的可燃物。如果家具不可燃烧，日常生活中的可燃物只有纸张、书籍和衣物了。社会信息化、电子化之后，纸张和书籍的使用是可以减少的，但好像到现在为止，这一变化还不明显。垂直城市可以鼓励非纸张传播

产品的使用，减少纸张使用。衣物主要由棉花、羊毛、化纤等材料组成，从舒适性考虑，几乎不可能做阻燃处理。因此火灾隐患中，只剩下衣物难以处理。但是也有有利因素。那就是垂直城市是恒温的，不需要防寒的衣物及床上用品。由于没有季节因素，因此需要的衣物总量，原则上比传统城市少，这有助于减轻可能的火灾危害。从统计上来看，仅仅由于家用衣物燃烧引起的火灾都不严重。如果在辅以严格的防火教育和规范，要求不用的衣物放置在阻燃的家具内，可以将衣物引起的火灾隐患大大降低。

- 3、 建筑材料阻燃、防火，还要能够抵抗一定时间的高温，这样即使发生局部火灾，也不会影响整个城市的安全。这一点已经有现成的技术了。

对于垂直城市，火灾的危害太大了。采取上面说的一些措施，可以将火灾发生的可能性降到最低。

## 物联网

垂直城市必然是智能城市。智能城市就是所有的设备和产品都通过网络互连。能够让所有设备或产品互连的关键，是分布和覆盖足够广的网络基础设施，即接入设备。接入设备不仅需要覆盖面广，还需要足够的带宽，即联网速度。互联网和信息技术的下一步发展，包括物联网，云计算，大数据等，这些都离不开网络基础设施，即覆盖全社会的高速互连网络。其中不可缺少的重要组成部分，是无线互联接入。只需要现有技术，垂直城市就能够非常容易地提供覆盖全城的高速无线互联，而现代传统城市要实现这一点，还有许多技术困难需要克服，工程量也要大很多。

以 4G 通讯技术（第四代移动通讯技术）为例。由于智能手机及其它手持设备的普及，现在已经有极大的移动高速互联通讯要求。覆盖面比较广的无线通讯技术，主要仍然是第二代和第三代，通讯带宽非常有限，严重影响了移动互联网应用的推广。互联网给我们带来的各种好处，经常无法利用。互联网的社会效益大打折扣，也限制了很多新应用的发展。第四代移动通信技术，能够将移动互联带宽提高到数百兆比特每秒，是二代技术的上万倍，三代技术的上百倍，但目前仅在部分地区试用，没有大规模推广。目前国际上的四代技术还有很多问题，比如标准众多，互不兼容，市场更新和迁移困难等。除了政治和商业的因素之外，技术方面也有很多困难，但是这些困难在垂直城市中将不复存在，甚至可以做得更好。下面将简单介绍。

四代技术的通讯带宽高很多，但是在传统城市中，由于移动通讯基站密度低，一座基站覆盖面很大，不得不由一座基站服务众多终端设备，这必然

导致带宽分流，每个客户端连接质量和带宽受限。这个问题在二代、三代技术中就存在，四代技术由于服务模式没有变，这一困难不会有效改善。但在垂直城市中，由于基础网络设施自动覆盖全城，即使用现成的无线局域网技术(Wifi, WLAN 等)，也可以提供全覆盖的高速宽带互联。

传统的 Wifi 技术能较好地处理静态互联，对于运动中的互联设备由于需要跳转接入点，会引起网络通讯短时间中断，但这一点很容易通过修正传统技术，加入接入点复用等方式解决。

广域无线高速接入系统（四代移动通讯），很难处理楼宇和山岭的屏蔽和干扰问题。由于基站数目有限，相对位置固定，楼宇结构复杂，楼内又有各种屏蔽和干扰源，总会有一些区域信号不好，难以保证所有区域的覆盖。这个问题在二代、三代中就存在。四代技术中由于载波频率更高，问题更严重。在垂直城市中，因为接入点众多，这个问题几乎不存在。

实际上，在垂直城市中，根本就不存在移动通讯从二代、三代向四代过渡的问题。城市里面根本不需要目前意义上的移动通讯技术（指 GSM, CDMA, WIMAX 等），通讯设备可以基于任何一种网络协议如 ipv6，或者应用服务如在线语音、在线视频等，而这正是未来通讯技术的发展方向。四代移动通讯技术的目的就是为了实现这些应用。在现有的技术条件下，垂直城市因为距离的缩短，空间的优化，网络基础设施的完善，已经能够实现这些应用了。短距离高速无线接入技术以更大的带宽实现更多的应用，那么为什么还需要四代无线通讯技术呢？当然，以后的四代无线通讯技术还是有用武之地的，比如城市外面的无线接入。这正是四代技术，或者广域无线通讯技术的优势所在。

所有设备高速互联之后，人类社会会发生一些变化。比如任何人，或者电子设备，随时随地都是连在互联网上的。可以随时得到有用信息，随时了解家里的各种事情，随时控制家里各种电器的工作状态，随时知道任何一个人或者任何一个东西在什么位置，等等。物品丢失或者找不到这样的事情就不会发生了。随之而来的结果是，盗窃很难发生了，因为任何一件物品都可以有电子识别标签。当然，对隐私比较关注的人可以随时把相关功能关闭。

物联网技术(Internet of things, 所有物品，主要指人工产品都连在一起的网络)，被认为是互联网的发展方向，是继计算机、互联网之后信息通讯产业的又一次革命。物联网的核心和基础仍然是互联网，但是终端可以延伸到任何一件与人类社会相关的物品。

一般把物联网分成感知层、网络层和应用层。

感知层包括各类传感器，如射频身份识别(RFID)，温度、湿度、空气成分传感器，条形码或二维码标签及识别器，图像及语音识别，监控系统，定位系统等。

全球定位系统(GPS)定位是物联网的重要信息来源之一，但是 GPS 信号

由卫星发布，在垂直城市中被楼层结构屏蔽掉了，无法利用，因此需要建立基于信息接入点位置的定位系统。类似的系统目前已经有应用了。

物品的自动感知识别，对于建立循环经济非常重要。垃圾问题是现代社会最严重的问题之一，造成严重的环境污染和资源浪费。普通的垃圾分类回收只能处理几大类垃圾，如纸张、塑料、金属、厨余有机垃圾等。对于越来越多的工业产品，特别是电子产品垃圾，回收利用有很大的困难。产品能够自动识别后，可以将这些产品分类拆解回收。

网络层就是现在的骨干互联网络。在垂直城市中，体现为密布全城的有线和无线宽带信息接入点，宽带网络，各种信息中心和服务平台，信息终端及家庭信息中心等。

应用层是各种服务和应用。未来最重要的，也许是云计算服务平台。

以云计算、物联网、智能社会、移动计算、5G 为代表的下一代信息和通讯技术，必将继续发展，这不是垂直城市特有的。但是垂直城市由于空间密集，基础骨干网容易实施和升级，必将加速这一过程，让人类社会全面信息化这一天早日到来。

## 第六章 新的生活方式和社会形态

未来是未知的，应该会发生很大的变化。有些变化很难想象，有些变化也许我们现在难以接受。但是未来总会在不知不觉中到来。

垂直城市极大地改变了我们的生活环境和生存方式。我们能够适应吗？对于一些人来说，变化永远都是不好的，但是他们的孩子却并不接受他们怀念的生活方式。那么垂直城市的生活会发生一些什么变化呢？

### 生活方式的变化

垂直城市我们新的栖息地，是一个新的生活环境。其中的生活方式和我们现在有差别吗？是好还是不好？这个问题不是那么容易回答。

垂直城市的生活应该怎样，取决于我们想过什么样的生活。我们可以按照我们的愿望，把城市建设成我们需要的样子。

但是我们真的很清楚我们自己的愿望吗？我们应该有多大的包容性？我们会不会从技术、实用的角度出发调整城市的设计，甚至我们自己的愿望？从历史的角度来看，人类的生活方式是一直在变化的。在更大的尺度上看，生命在地球上的演化过程，就是适应和调整生活环境和生活方式的过程。未来的我们不完全是现在的我们。我们现在的喜好和选择，不等于未来的喜好和选择。

现在也许很多人会觉得，垂直城市给人的感觉像是一座蚂蚁窝。人类像蚂蚁一样在里面生活，这种生活令人压抑。

我小的时候生活在南方的农村，每天喜欢在田野山林里疯玩，不喜欢呆在家里。因为过去的房子窗户小，是用纸糊的。房间里还有烧柴火的灶台，墙壁黑乎乎的。家里很暗，气味也不是太好。现在我住在北京，我的女儿从很小的时候就喜欢呆在家里，不喜欢出门。道理也很简单，家里冬暖夏凉，有电视有电脑有玩具，也有小朋友一起玩。外面要么冷、要么热、要么刮风、要么下雨，正好适合户外活动的日子并不多。天气好了，还会有蚊子咬人。所以每次叫她出去都很不情愿。这并不是教育的结果，也不是人性的变化，而是小孩天性的自然选择。

现在为什么有那么多的宅男宅女，让老一代的人皱眉头，正是因为同样的理由。对于成年人，户外活动还有更多的问题，比如紫外线很强晒黑皮肤

了，出门堵车或者公交车上人太多了，花的时间长还很累了，空气不好了，天气不对了，等等。

所以，也许年轻的人们会更愿意生活在垂直城市里。因为垂直城市没有上面提到的所有问题。而且对于从小在垂直城市长大的人来说，离开城市去旷野之中，可能就像我们现在去原始森林探险一样让人兴奋（也许那时候，出了城市真的都是原始森林了），而垂直城市才是他们情感中的家，让他们依恋，同时也许有更多的人生烦恼。

那么对于我们习惯生活在开放空间的传统城市中的大多数人，垂直城市能够让我们感觉自在吗？或者问细一点，垂直城市限制我们生活的自由了吗？是不是有些东西传统城市有，而垂直城市没有？生活在垂直城市中，剥夺了我们的选择权利了吗？垂直城市是不是太封闭了，太压抑了？

习惯不习惯，更多是一种主观感觉。习惯的定义，就是经常接触某种情形而逐渐适应。我们现在的生活，跟几十年前相比，已经有很大的变化了。习惯旧的生活方式（比如田园生活）的人，并不一定习惯现代传统城市的生活。对于他们中的很多人来说，不能种菜，不能养鸡养猪，是一件很难受的事情。可是习惯生活在城市里的年轻人，就很难理解父辈们的想法。不管很多人心里怎么想，我们现在还是在持续城市化，大部分人最终都会生活在城市中。垂直城市与现代传统城市的差别，并不比传统城市与田园生活的差别大。人们生活方式的过渡，也许都可以基本平稳地进行。

垂直城市与现代传统城市相比，在生活上带来的具体变化有一些。我们可以分别看一看，并对比传统城市与田园生活的差别，看看大多数人能不能适应这些变化。

## 封闭的环境

对于很多人来说，封闭的环境让人感到压抑。人类的确习惯在开放空间中生活，虽然我们现在大部分时间，都生活在封闭的楼宇内，但是楼宇本身，基本上还是开放的。不仅可以随时进出，一般的房间也有窗户。窗在视觉上是开放的，并且一般也可以打开，即使不能打开，也能给人通向自然开放空间的心理暗示，让人感觉一直生活在开放空间中。

垂直城市大部分空间是封闭的，也许大多数房间甚至连窗都没有，因为窗外只是另一个房间。我们可以从如下几个方面来理解这一变化：

- 1、现代建筑有越来越封闭的趋势，这是出于室内环境控制和安全的需要。建筑越来越大，内部环境越来越独立，都加强了这种趋势。所以即使生活在传统城市里，也需要适应越来越封闭的生活。
- 2、大的室内空间并不让人感到压抑，比如很多大型商业中心、办公场所、文体中心、交通枢纽等，都是封闭的，但是有高大宽阔的室内

公共空间。

- 3、宽阔深远的视野可以人造。窗户可以变成画，电子相框，显示屏等。蓝天白云都可以出现在室内。
- 4、在信息社会中，空间是封闭的，但人的视觉并不限于实物空间，可以有大量的视频或者图像信息，让我们感觉自己生活在开放空间中。

到过澳门或者美国拉斯维加斯威尼斯人酒店的人，会对酒店内的人造天空、室内河道以及室内广场印象深刻。没有去过的读者可以在网上搜索相关图片。

## 季节、天气、甚至昼夜的消失

季节、天气的消失，对人类日常生活的影响并不大。毕竟我们一直在营造一个独立于自然的生活环境。从最初的住山洞、茅屋，用火，到现在无所不在的空调，都是为了摆脱天气、季节对我们生活的不利影响。垂直城市是这一过程的简单继续，只是走得更远，可以让我们彻底摆脱天气和季节的影响，永远生活在舒适的环境中。

现代社会中，昼夜更多是一种生物生活节律控制。即使白天黑夜的概念还存在，但是我们的日常活动，越来越不受白天和黑夜的限制了。无所不在的人工照明几乎让黑夜的概念消失。实际上，我们不是按照日出日落安排生活，而是根据各种各样机械或电子的计时工具。这些工具有全球统一的时间标准。该标准原则上与日出日落无关，而是几台精密的原子钟，只是需要与天文现象校对。

在地球上，白天黑夜的长短，在不同的季节是不一样的。高纬度地区更极端，可以一天只有两三个小时的白天或者黑夜，但是人类的生活和工作，还是按照基本相同的节律进行。

基本的时间单位如天和年，实际上它们的定义在不断变化。以它们为基准的其它时间单位当然也一样。这样传统的计时工具，比如日晷，就不可靠了。以摆为计时标准的装置不准确。原子钟非常精确，但是原则上也需要修正，比如相对论修正。

垂直城市中，人们的生活节律可以跟传统城市一样，按照同样的原则安排。但对于孩子来说，白天、黑夜要变成一种需要在课堂上学习的概念了，虽然还是有很多机会亲身体会到。第一次看到太阳升起或者落下，天空变得光明或者黑暗，月亮和星星出现或消失，一定是一种很奇妙的体验。

孩子们盼望的寒暑假可能要发生一些变化。在现代城市中，人们的生活还是无法摆脱天气季节的影响。对于生活在北半球温带的大多数人，每年暑期天气炎热，气候潮湿，过去还有农忙，的确无法学习。暑假是这一农业时

代生活节律的延续。垂直城市中连昼夜都没有，当然就更没有寒暑了。休假也许会选择更适宜外出旅行的春秋，而不是夏天。也许会变成每工作或学习两个月，就休假一个月。这样一年四季都可以休息或者出游。

## 体育活动

很多人觉得，体育活动应该是室外的。跑步、足球、篮球等等。但是很多运动，如果需要标准或者公平的话，本来就应该在室内进行。比如羽毛球、乒乓球、篮球、射箭等，因为这些运动对风很敏感。在竞技的前提下，这种不确定因素是不公平的。但如果要排除风雨、气候等影响，那么几乎所有的运动都应该在室内进行，比如田径、球类等。

我们可以看看所有的奥林匹克比赛项目，看看那些是室内的，那些是室外的。

现代奥运会比赛项目比较多，一般有 30 来个。传统上室内的项目或类别有：羽毛球，乒乓球，体操类，搏击类（拳击、摔跤、柔道等），游泳，跳水，击剑，蹦床，举重，短距离射击。室外项目有：射箭，大球类（篮球、足球、排球等），部分水上运动（皮划艇，帆船，水球），现代五项、铁人三项，自行车类，马术，网球，曲棍球，田径等。大部分运动项目发源于室外，但比赛慢慢转移到室内。不能转移到室内的项目主要是因为需要的场地空间过大，现在还没有那么大的封闭运动场，比如足球、长距离射击、射箭等。一些水上运动需要很大的水面，如皮划艇，是一样的道理。但帆船是必须在自然水面进行的，因为需要风。自行车的很多项目也转移到室内了，除了山地赛和公路赛。

游泳、跳水其实室内室外差别不大，但是大家好像更习惯它们在室内进行，因为这类活动对水温气温敏感，自然条件下没有保障。

足球对比赛场地的气候条件要求最宽，雨、雪、风、高温、低温都不影响比赛进行，但主要原因是，没有那么大的封闭运动场。

冬季奥运会的项目除了速滑和表演类，大多数都是室外的。

还有一些比较热门的运动项目比如放风筝，冲浪，滑翔，登山等，当然都必须在室外进行。

垂直城市中的确不能从事很多运动项目。但是，首先垂直城市和室外运动并不矛盾，原来传统城市中必须出门从事的运动，在垂直城市中可能还是需要出去。必须在室外进行的运动，一般都需要特别的场地，即使在传统城市中，也必须专门跑到这些特别的场地去。垂直城市周边有很大的空地，如果将周边设计为公园和运动场，那么还是很方便的。现代传统城市由于空间有限，适合室外运动的场地并不多。

其次，垂直城市把很多运动搬到了室内，室内运动更方便了。如果从锻

炼身体的角度出发，室内运动比室外运动更有优势。因为锻炼要求定时规律进行，由于季节和气候因素消失，运动时间更容易把握。其实现代传统城市中，很多人更多到健身房、体育馆锻炼，而不是在操场、公园运动。

从大学时代开始，我们一些朋友坚持爬了十几年的香山，几乎每周都去。一般坐车，也有骑车甚至跑步过去的。进入 21 世纪后，大家逐渐有了车，就开车过去。后来香山的人越来越多，我们就开辟了香山后山的路线。但到了最这几年，北京交通拥堵越来越严重，朋友们集合和回家都需要很长时间，慢慢就不去了。不只是北京，现代大城市中出行的时间和经济成本都很高。户外运动，原来是家庭日常聚会最常见的选择，现在已经变成少数爱好者的运动项目。

第三，除了健身房和普通体育场馆，越来越多的室外运动已经搬到了室内。甚至像滑雪这样天经地义的室外项目，也被搬到了室内。阿联酋的迪拜已经在世界上最热的沙漠之中，建了一个世界上最大的室内滑雪场。

有些体育活动本来就是应该在野外的，比如越野、登山等。垂直城市中不能解决所有的运动场地要求，但传统城市也一样。这些活动还是可以像以前一样进行。但垂直城市能更好地解决日常锻炼问题。

## 饮食习惯

世界范围内，人类的饮食习惯差异很大。饮食习惯是很难改变的。大部分食物制作方式都要用到火，会排放油烟，如炸、烤、炒、熏、蒸、煮等。垂直城市由于环境封闭，对明火的使用、油烟排放有很强的限制。除了特定场所，普通家庭的饮食习惯恐怕会受到一些影响。当然，技术上解决这个问题并不难，可以采用更严的标准，全面覆盖的监控，特殊的油烟排放管道等。但从安全性，经济性出发，普通家庭的食物烹煮恐怕要以电为能源，使用电炊具而不是有明火的燃气炊具。

即使用电炊具，仍然要专门排放，或者处理食物制作时的各种气味，否则对空气质量影响很大。另外卫生间也需要排气，所以以家庭或单位为单元的生活工作空间内，除了空气循环部分外，还是必须有专门的污浊空气排放或处理系统的。

小单位或家庭不使用明火烹煮，主要出于消防的考虑。燃气泄漏带来的危害太大了。

技术上，电炊具也可以进行各种方式的食物制作，只是目前从经济的角度考虑，还在使用燃气等能源。垂直城市里大家会更多地使用电炊具。

由于垂直城市全城都在室内，紧凑，各种服务覆盖客户范围大，每个消费者可以享受的服务选择多，物流配送简单快捷，家庭烹煮食物并不是必要的。饮食完全可以作为一种基本消费服务，由社会解决。

从能源价格考虑，一立方米的天然气热值大约是一度电的 10 倍，而目前北京一立方米民用天然气的价格是一度电的 4 倍。所以电热的成本大约是天然气的 2.5 倍。但是一般用电的效率要高一些，因为燃烧有余热浪费。另外如果使用热机（利用温差做功，或者做功产生温差的机器）制冷制热，电能的效率还会有数倍的提升，但是烹煮不能使用热机。总的来说，用电为能源制作食品的成本，比使用天然气高 50%到 1 倍。

## 通风换气

通风换气是很多家庭的日常生活方式之一。尽管大多数人并没有意识到，这种做法有切实的合理性：第一，降低房间内二氧化碳含量。因为人的呼吸持续不断地将空气中的氧气置换为二氧化碳。空气中氧气含量过低，二氧化碳含量过高都将引起不适，甚至危及生命。第二，房间里的各种物品都会散发出各种化学物质，有些让人不快，有些有害。第三，无所不在的微生物如霉菌等，也会产生各种气体和孢子等。第四，人类的生活离不开水，如果不换气，水会不停蒸发直到饱和，也就是湿度过高，人体无法通过出汗散热，感觉闷热潮湿。

垂直城市的通风换气是自动进行的。空气循环和净化是垂直城市最重要的基本功能之一。但是再没有那种开窗户带来的那种清爽感觉了。喜欢开窗通风的人，开始的时候大概会非常不习惯。城市的空气管理系统，保证城市每一个生活角落的空气质量，但是对于某些对空气有特殊要求的人士，比如喜欢特别洁净，喜欢香味，喜欢臭氧含量高一点等等，那么必须有订制的局部空气质量、组成、或风格调节设备，这些可以在技术上实现。

## 驾驶

驾车是很多人的爱好。垂直城市没有机动车。很多人的驾驶乐趣就没有了。越野或者城市间公路驾驶，仍然可以成为一些人的业余爱好。自驾游也仍然会是一种休闲方式，但是由于平常的驾驶机会不多，普通人的驾驶技术也许会下降。不过当垂直城市成为人类主要生存地的时候，自动驾驶技术应该可以代替人工驾驶了。

作为运动的驾驶是体育活动或者竞技。赛车需要特别的场地，与城市是二维还是三维无关。

工业及商业方面的货物、人员运输如卡车、旅游大巴等仍将继续提供服务，但服务范围是垂直城市之外。

## 衣着

垂直城市没有季节和气候，衣着也就没有季节和气候的特征，一年四季（应该叫做一年到头，因为没有季节）都穿同样的轻便装。日常生活中，现在在很多衣物都不需要了，比如羽绒服，防寒服，防雨衣，防晒衣，毛衣，羊绒衣，秋衣秋裤，风衣，防寒帽，耳套，保暖的袜子和鞋，口罩（这是中国北方城市近年来多出来的常见用具）等等，衣橱里的东西种类可以减少。服装店可以只卖夏秋装了。上面说的那些东西不再属于服装的范畴，会变成户外装备，要去装备店购买。

对于爱美的人士，服装主要是装饰品，保暖功能并不需要，因此会非常享受舒适城市环境带来的穿着审美感受。由于空气清洁，地面干净，衣服也不容易脏，因此即使对于职业的高效率人士，同样可以享受到生活的简单。

如果要外出游玩，衣物将是需要认真准备的、最重要一类装备。因为平常用不着这些东西。

## 摆花弄草

在家里种植花草是很多人的爱好，但在垂直城市中，会有一些不同，因为绝大多数家庭不能直接接触阳光。

人工照明比太阳光弱很多。家庭种植的很多花草是喜阴的，可以在弱光下生存。喜阴的植物生长慢，不需要太多打理。但即使如此，种植花草的人显然不愿意接受这一限制。喜光的花草一般比较鲜艳，美观，这是人们在家里摆花弄草的重要愿意之一。

强光人工照明的成本较高。如果为了节能，采用针对植物生长优化的光谱，也就是使用发光二极管(LED)生长灯，那么电能消耗可以降低到四分之一左右。但是LED生长灯的光照下，植物的颜色不是我们在阳光下看见的颜色，偏紫偏红偏暗，看起来很奇怪。花草本来是为了好看的，谁愿意在家里放一堆看起来很阴森的花草呢？

垂直城市的人们恐怕只能在楼顶花园，专门的城市公园，郊野公园，或者无处不在的显示屏上欣赏花草了。

## 出城

出城是一件大事。如果要离开城市，到野外或者开放空间活动，需要许多准备工作。首先要了解目的地的天气情况，气温如何，要穿什么衣物（装

备), 要防晒, 防蚊虫叮咬, …… , 就像现在出去旅游甚至探险一样。

对孩子来说, 出城将有出城教育。老师或者家长会告诉他们, 城外的世界有什么不一样。什么是风, 什么是雨, 什么是云, 什么是泥土, 什么是黑夜, 什么是太阳, 如何适应阳光开始的刺激, 如何防止紫外线伤害, 冷了怎么办, 热了怎么办, 见到小虫子小动物应该怎么办, 等等。

出城对孩子来说将是很兴奋的事。但也会有一些小朋友会害怕出城, 会有蚊虫恐怖症, 可能会有更多的过敏, 会有人不适应, 有人焦虑。就像现在有大片的“宅”一族一样, 垂直城市中也将会出现很多“恐出城”一族。出城将会成为中小学的重要活动内容。

长期生活在密闭的, 舒适的环境中的人, 感觉和习惯也会发生变化。就像我们现在很难忍受长期生活在一个密闭环境中一样。长期生活在垂直城市中的人, 很多也许会难以忍受开放空间的生活, 感觉不自在, 没有安全感。

## 出行

出行是垂直城市最大的改进之一, 也是垂直城市设计最优先考虑的因素。由于垂直城市的特点, 点到点距离大幅缩短, 绝大部分出行仅靠步行。少量借助短距离慢速辅助交通工具。城市群之间依靠大容量快速公共交通。每个人花在出行方面的时间都会大大减少, 门到门的出行时间降到 10 分钟左右, 城市间的出行也基本在半小时以内。

困扰现在大型传统城市的交通拥堵问题将不复存在。由于大型活动等原因, 局部短时间可能出现人流聚集的情况, 但是常态化的交通拥堵将不会发生。

传统城市的公交最后一公里不好解决, 需要上上下下, 经常要过马路。对于老人、残疾人等行动不便的人士, 使用公共交通尤其困难。在繁忙的城市如北京, 出租车都很难打, 特别是行动不便的人, 司机经常拒载。根据现行法律, 上了年纪的老人(七十岁以上)自己也不能开车。

## 社交活动

现代传统城市中, 我们有了更多的路, 更多的车, 更多的通讯手段, 但是亲友间的面对面交流却减少了, 因为出行的时间成本和经济成本都很高。出行时间长, 又很累人, 人与人的交流自然就少了。

垂直城市解决了交通问题, 见面容易多了, 出门没有障碍, 没有传统城市的交通焦虑, 聚会容易组织和得到响应。人和人之间面对面直接交流的必然增加, 亲情友谊容易巩固加强。

直接交流的增加，有助于家庭团聚，社会安定，避免很多心理问题，提高民众的幸福感。

## 社会治安

随着社会的发展，社会治安本来就会逐渐改善。垂直城市是智能社会，有很多的安全保障措施，犯罪的成本和门槛都会提高，破案也更容易了，因此在垂直城市中，犯罪率会大大下降。路不拾遗、夜不闭户将会成为普遍现象。

垂直城市中，全城都有安全监控。物联网技术及其它技术的发展，可以确定跟踪高价值产品的去向。需要的话，垂直城市可以定位任何一个人或物品，因此盗窃抢劫这种普通刑事犯罪很难成功。

人工智能的监控识别系统甚至可以判别人群情绪，发现冲突，和不合理的个人行为，及时干预，将冲突和犯罪控制在实际发生之前。

## 工作

出行问题的解决，可以减少人们浪费在交通上的时间和精力，提高工作效率。特别是一些与直接沟通或出行相关的工作，比如销售、访问、邮递、货物配送等，出行是他们工作的一部分。出行问题的解决，这些行业的工作效率自然大大提高。

对于北京、上海这样的大城市，平均每天上下班花费的时间超过一个半小时，相当于工作时间的五分之一，而垂直城市只需要不到半个小时。

传统城市交通系统占用大量资源，包括土地，建筑材料，工业生产力，自然资源（原材料，能源），还有人力等社会资源。垂直城市解决出行问题后，可以大量节约资源，反映在工作方面，就是这方面的劳动力需求和工作岗位大大减少，具体包括：

1. 汽车产业大大缩减，相关产业链需要的工人数下降，相关服务如汽车销售、维修保养、旧车回收、机动车保险等方面的从业人数也会大大下降。
2. 公路和交通相关的行业，如公路建设和维护、交通管理、交通执法等方面的人员。
3. 基础设施建设改造中的土建施工人员。传统城市的基础设施改造，比如管线铺设、楼宇、道路改造，等都需要大量土建施工，而垂直城市内基本上不需要土建施工。
4. 加油站行业。相关的运输，消防。车辆的大幅减少，以及使用量的

减少，都会降低燃油的消耗。

5. 石油化工。石油化工行业不会消失，但是机动车燃油消耗会大幅下降，因此行业规模会大幅收缩。相关的石油开采，勘探，研究人员都会减少。
6. 出租车，公交车及其它短途机动车人员，以及货物运输行业。
7. 所有以上行业的辅助，服务，管理，研究人员等。如税务人员，执法人员（交通警察）等。

垂直城市将引发社会结构、产业结构的深刻变化。总的来说，简单、重复、高强度的工作会减少，复杂、高科技、服务方面的工作会增加，但社会的总体劳动强度将明显下降，因而全体人员的工作时间可以缩短，工作更轻松。

垂直城市时代由于全社会简单、重复性工作下降，每个人也许只需要每周工作三天。多出来的时间可以用于休闲和学习。更多的人会从事专业性很强的技术性工作，或者创造性工作，比如计算机技术和互联网运营管理和互联网运营服务，科学研究，技术研究，产品开发，心理咨询，艺术创作，等等。

与现在相比，那时候每个人都是专家、学者，都是科学家、艺术家、工程师，就像古代的人看现代人，觉得每个人都很有学问一样，因为居然每个人都认识很多字，都会算数。

## 住房问题

住房是人类生活的基本条件之一，就像水和空气一样。每个人都应该有地方住。但在现代传统城市中，住房问题是最严重的社会问题之一。特别在人口密度大的国家，由于土地资源匮乏，房价居高不下。很多人买不起住房，或者住在很远，通勤困难，或者居住条件恶劣，严重影响生活质量。

垂直城市将土地使用效率提高数十倍，在同样的土地面积上，可以增加几十倍的住房面积，道路、停车场等的减少还可以节约大面积土地，进一步提高土地利用效率。住房供应大幅度增加，可以保证每个人的安居。

传统城市中，住房的地理位置有很大的差别。同样的住房，距市中心的远近、自然环境、学校好坏，都是决定房屋价格的重要因素。而在垂直城市中，所有地段的房子差别都不太大，因为任意两点的出行距离都很短，环境也都是是一样的。仅从生活条件上看，所有的房子都一样好，没有传统城市那种严重的位置问题。垂直城市也可以优化城市规划，降低位置差别的影响。

靠近学校，靠近工作单位，靠近商业中心或交通中心，可以看到城市外面景象的住房仍然会是人们优选的住房，但是差别不会有现在的那么夸张。毕竟，垂直城市中，家到学校或者公司的距离，比目前从家到小区门口或者公交车站的距离还要短。

## 自然环境

工业化革命以来，人类对自然的破坏达到了空前的程度，严重改变了地球的环境，引起了地球历史上第六次物种大灭绝。主要原因是人类侵占了几乎所有其它物种的栖息地，将土地转换为耕地、道路和城市。

垂直城市大幅提高土地使用率，城市、道路、公园占用的土地减少。农业的进一步现代化，也可以减少耕地面积。节约出来的土地都可以回归自然。

机动车的减少可以减少空气污染，减小冶金、采矿、石油化工、交通运输等产业规模，这些都可以降低污染，减少土地侵占。

垂直城市不需要冬季取暖，对煤炭、天然气等取暖能源的需求大幅下降，同样也大幅降低了二氧化碳及其它污染物的排放。煤炭、天然气等资源开采和运输量的大幅下降，本身也极大地保护了环境。

垂直城市的目的之一，就是建造完全人为可控的、优化的人类生活环境。该环境独立于自然环境，对自然环境的影响自然大幅降低。自然就可以回归自然。因此垂直城市时代，人的生存环境与自然是隔开的，人类日常生活不会影响自然，自然环境可以得到很好保护。这种保护是自然的，不需要刻意倡导。

人类直接在“自然”的环境中生活，需要做很多刻意改变自然的事情，比如赶走大型野生动物，捕杀毒蛇白蚁，排放生活废水，照明和取暖改变自然环境，对野生动物有害的垃圾如塑料袋等会被动物啄食，机动车危害野生动物，等等。所以，隔绝人与野生动植物的生存环境是对自然最好的保护。

## 家庭生活

现代传统城市中，由于交通拥堵，出行困难，工作时间长，家庭生活质量下降已经成为一个很严重的社会问题。我们经常听到的是，没有时间回家、没有时间陪老人、没有时间陪孩子。在农村，有大量的留守老人和儿童。这些老人的老年生活，和留守儿童的教育，都是越来越严重的社会问题。

垂直城市中，由于住房成本大幅降低，供应量大大增加。农村的留守老人和儿童，完全可以一起搬到城市里面来。农村可以自然凋完，城市化自然走到下一步文明形态。

仅从生存条件和生产能力来说，许多农村没有必要存在。农村只不过是农业时代人类扩张的栖息地。我们有了更好的新栖息地之后，完全可以放弃原有的栖息地。农村的凋零不一定会影响农业生产。农业问题后面有专门讨论。

垂直城市中，由于工作的时间减少，出行占用时间缩短，用于教育和家

庭生活的时间将大幅增加，人们可以花更多的时间和家人在一起。

出行的困难，自然环境的污染，以及室外不舒适，是现代城市“宅一代”存在的客观因素。垂直城市中这些问题将得到解决，城市提供的各种丰富多彩的生活内容很容易参与，人们没有必要“宅”在家里。

住房供应问题的解决，包括住房供应量的增加，房子与位置的无关性，使房屋调配置换变得容易，一家人更容易住在一起，或者住在附近。这样亲情问题，老年人的居家养老问题都迎刃而解。

我女儿从六岁开始，每天早上六点必须起床，六点半乘班车去上学，正常的话七点半能到学校。每天下午放学后，有两天必须等一到两个小时班车，然后乘一个小时班车回家。大人的时间和小孩不统一，每天路上单程需要一到一个半小时，每天回到家都很晚了。家里必须有老人照顾小孩，老人整天在家也很无聊。到周末出门的时候，每次都是车堵车，人堵人，既疲惫，也不能好好休息或者办事。这就是拥堵的大型传统城市中，一个普通家庭生活的典型状况。而在垂直城市，大人小孩每天都可以节约三个小时，差不多是小孩一半的上课时间，大人三分之一的工作时间。

垂直城市周末如果要集中出城的话，恐怕也会很拥堵，主要由于人口绝对密度大，外面没有足够的集中接待能力。而且这种大规模的出城休闲会集中在春秋季节的周末，有季节性，以及以工作-休闲周期为特征的不连续性。

## 健康

健康分为生理上的健康和精神上的健康。

在身体方面，由于垂直城市生活的环境完全可控，并针对人的生活需要进行优化，外界对人体的各种不良刺激减少，如高温、低温、潮湿、干燥、风寒、紫外线照射、环境污染等。这些刺激因素，对人们的健康一般都是有害的，引起不适或疾病如中暑、脱水、感冒、风湿、皮肤疾病、季节性流行病等。空气污染引起很多呼吸系统慢性病。

垂直城市优化的生活环境，纯净的空气，可以大幅降低各种疾病的发生率，改善生活质量。

在季节变换时，人们容易生病。因为身体需要随环境变化而调整，体弱或者敏感的人难免会生病。

阳光中部分紫外线是有害的，能够让皮肤加速老化，并引发皮肤癌。现代人看起来比农业时代的人年轻，除了营养改进，生活条件改善，更少晒太阳也是一个重要原因。人体只需要很少的紫外线，就可以由皮肤合成身体需要的维生素D，可以在人工照明中加入这部分有用的紫外线解决。

垂直城市还可以全面监控空气质量和病原体数量，阻断传染病的传播渠道。随时监控发热病人，保证病人得到及时的治疗。这些措施可以大大减少

全体市民生病的机会。

精神层面的疾病比较复杂，除了先天因素外，很多疾病包括亚健康等，和人们受到的各种压力有关。现代社会的各种问题，如住房、养老、看病、社会保障、甚至堵车都会引起各种各样的焦虑。缺乏交流也是心理不健康的诱因。垂直城市可以消除目前社会的很多焦虑来源，大家可以花更多的时间在家庭中，可以有更多的人际交流，这些都助于心理健康。交流对老人、儿童以及一些心理脆弱的人尤其重要。家庭生活，人际交流的增加可以大大改善这些人群的生活质量，提高幸福感。

## 文化与城市特色

垂直城市除了体量大、交通方便、生活舒适等共性以外，城市设计风格、文化风格等还是有很大的选择自由度。不同地域、不同文化背景的人们，可以根据自己的喜好来选择性设计自己的城市，在尊重个人权利的基础上形成城市的风格和文化。

风格有很多因素，外观方面，有造型，色彩等。文化方面，有艺术、风俗习惯等。不同的城市，法律也可以有一些差别（也许需要在更大的尺度上）。各地的城市使用的技术不会有很大的差别，但是文化可以不同，外在风格也可以不同。

由于不同地域的城市在生活条件上没有差别，人们的迁移更加容易，不同观念爱好的人更容易迁移到一起，可能会形成大量风格迥异的城市。如儒家传统城，文艺城，音乐城，科幻城，养生城，等等。普通的城市中，不同观念爱好人的聚集也更容易。

## 旅游

环游世界是很多人的梦想。垂直城市时代，外出旅行更容易、更方便。但是考虑旅游人口的大量增长，如果大家仍然按照现在的方式旅游，在热门的旅游地区或景点，一定会造成严重的拥堵。

旅游的人多，需要有很多的旅行目的地，和很大的接纳能力。一些独一无二的旅游地点，比如故宫、长城、泰姬陵、卢浮宫等，不可能接待比现在还多几倍的人流。旅游需要有新的方式，那就是不需要亲自过去，至少大部分人可以不必亲自过去，就可以详细地欣赏了解景点。

最简单的解决方案是看纪录片。看纪录片，比全家跑到几万公里外旅游相比，有很多优点。比如没有旅途的劳累，不需要担心天气，不受别人干扰，节省费用。纪录片介绍全面，亲自过去反而走马观花等等。纪录片的缺点是

现场感不如亲临现场，但这一点可以通过技术进步弥补，比如超大屏幕（3DMAX 等）技术，立体电视技术，现场体验技术（如谷歌街景概念，虚拟现实技术）等等。

还有一种做法就是，可以实时发布主要拥堵景点的人流数据，限制人数。网络直接预定购票等，让旅游者自己选择，保证著名旅游景点的秩序。在大数据时代，这一点不难实现。

垂直城市之间如果城市风格不同，那么也会吸引人到不同的城市旅游，这样接待能力的问题要好解决一些。

有些生活中的变化，并不是垂直城市直接带来的，而是技术继续进步的结果。就算从现在开始规划设计，要建成一个以垂直城市为主的人类社会，至少需要三十年以上。这段时间内，可以预计，科技的进步还将给人们带来很多变化，例如：

## 虚拟现实

所谓现实，是指我们每天看见的、听见的、感觉到的东西，或者说信息。虚拟现实是指用计算机产生这些信息，让我们感觉到生活在另外一个环境中。电影是最早的虚拟现实技术，三维或者更多维电影（三维指立体，其它维可以包括运动感、气味等），是这种技术的继续。随着传感，图像处理，体感识别，和其它一些技术的发展，虚拟现实可以做得非常“真实”，让人完全浸入到虚拟的环境中。这种环境是可以订制的，比如可以是一个有名的旅游景点，也可以是月球或者火星，还可以是侏罗纪、或者战国时代，或者进入到一个传奇故事之中。人不仅可以被动地感觉这个虚拟的世界，还可以与这个虚拟世界互动。一家人或者一群朋友，可以一起到一个虚拟场景旅游、探险，或者演绎一出惊天地泣鬼神的故事。

虚拟现实目前是信息科学的分枝之一。信息时代的特点就是信息大爆炸，人们能够接触的信息几何级数增长。这些信息也可以是虚拟的，比如电影大片里面的各种场景。虚拟的动物、卡通、自然环境等，都可以看起来非常“真实”。

未来虚拟技术，也许可以发展到直接与神经系统互联，直接给大脑视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉、运动等感觉，原则上分不清什么是真实，什么是虚拟信息输入。虚拟现实技术在垂直城市的应用，可以让人不再无聊，可以让人足不出户环游世界，可以更容易地“体会”各种东西，可以让人愉快地接受教育，可以让人感觉不到封闭环境可能给人带来的压抑。

在教育方面，虚拟现实技术可以大大改善现在的教育方式。不仅可以让孩子在游戏中学习和体会，而且多种感官的综合刺激，可以大大增强学习效

果。小孩可以花更少的时间，更愉快地学到更多的东西，效果也更好。

虚拟现实技术还可以做得更多，如职业或人格培训，不良习惯改正等。比如当教师或者医生需要从业人员有耐心、有爱心、有更多的责任心。虚拟现实技术可以制造各种人生经历，让这些人去体验。他们可以体验父母的担心，病人的痛苦，病愈后的喜悦。“亲身”经历了这些事情之后，他们会变得成熟，变得更负责任，更热爱自己的岗位，更胜任自己的工作。

其实人的各种能力比如反应能力，创造能力，领导能力，沟通能力，应对紧急状态的能力等等，都可以有针对性地训练和加强。这样每个人都可以很专业，很负责，从而大大改善全体工作人员的素质，提高整个社会的层次和竞争力。

人必须经历过磨难才能变得成熟，失败很多次才能获得成功，但是成熟的过程是痛苦的，还会给自己和社会带来危害。比如学骑自行车，可能需要摔很多跤，撞坏自行车，但不能用同样的方式学习开飞机。你必须有经验，能够控制飞机才能让你开，但是没有开过怎么会有经验呢？虚拟现实技术提供了一种解决方案。实际上，现在飞行员的培训就是在仿真器里面进行的。

垂直城市设计也离不开虚拟现实技术的帮助。垂直城市实在太复杂了，如果设计上有疏忽，建成之后再要修改就太困难了。垂直城市设计好了之后，可以用虚拟现实技术让一些人在里面虚拟生活，“真实”地感受垂直城市中的一切，从而发现问题，在建设之前解决问题。

## 远距离快速交通

垂直城市可以让人的聚集程度进一步提高，快速公共交通的站点可以大大减少，从而提高公共交通的效率。以北京为例，北京市常住人口超过 2000 万，地铁站点约 300 个，公共汽车的站点，如果包括市郊，则多到无法统计。如果按照我们前面提到的垂直城市规模，可以只需要 20 到 30 座楼，也就是 20 到 30 个交通站点，即使加上机场、森林公园等设施，也不会有很多的站点。站点数目越少，交通停靠和换乘的次数越少，每次出行需要的时间越少，公共交通的效率就越高。

基于同样的理由，城市的聚集程度也可以提高，不需要那么多的遍布全境的小城市，那么像高速铁路这样的大容量高速公共交通，就可以很容易地覆盖全国主要的城市群。

受限于空气阻力，现有的铁路速度不会太高，不会超过每小时 500 公里。更快速的地面交通必须使用封闭的真空或低压管道，管道运输速度可以提高到每小时数千，甚至上万公里。

高超音速航空也可以达到同样的速度，但是运输量很小。

## 医疗技术

垂直城市中，由于生活条件、卫生条件的改善，普通疾病、流行病将减少，这有利于人们的健康。

医疗技术的进步，对人类社会的影响也是非常深刻的。不仅死亡率大大下降，寿命大大延长了，医疗技术进步，对人们的心理也产生了重要的影响。人们不再长期生活在生病和死亡的恐惧之中，不再需要惧怕和崇拜鬼神，劳动力和创造力都大大提升了，生活更有保障，更少忧虑和悲伤。

到垂直城市时代，医疗技术还会继续进步，继续对人类社会产生更多的深刻影响。有些影响可能不是那么直观。我们可以在这里，针对最近世界医疗方面出现的一些新技术新概念，对人类生活产生的冲击，做出一些猜想：

**器官再生。**很多低等生物的器官可以再生，但是人类一般不能。困扰人类的各种疾病中，某种器官的问题或者失效，是很重要的一类，比如心脏和其它脏器的疾病。随着医疗水平的提高，现在已经可以进行很多器官的移植。但是，由于伦理及其它方面的问题，器官的供应严重不足。而且还有排异反应等问题。现在已经有办法，可以提取病人的健康脏器细胞，在培养皿中培养，再通过三维模具成型，生长成为功能完全的全新脏器，最后植入病人身体，代替原有病变脏器。由于脏器是由病人自己的细胞培育成的，不会产生排异。

随着器官再生技术的完善，很多现在折磨人们的顽疾，比如心脏病、肝病、肝病、胃病、肾病、免疫系统疾病，……，等等，我们都可以有办法治愈。原则上，除了大脑不能换，别的器官都可以病了就换，就像修车一样。这样人类不再受到很多慢性病折磨，医院和家庭也不需要长期照顾这些病人了。

**癌症治疗。**当传染病和感染受到控制之后，癌症现在已经成了对人类危害最大的一类疾病。癌症种类繁多，难以治疗。由于治疗费用高昂，照顾不易，一家人一旦有一个人患上癌症，整个家庭的生活质量会大大下降，甚至连亲朋好友的生活都会受到影响。癌症是社会悲剧的重要来源。由于社会的发展，各种致癌因素增加，比如有害化学产品、辐射、污染等，这些因素导致癌症发病率增加，降低了社会的幸福感。

传统癌症治疗，只能杀死或者切除肿瘤组织，但是肿瘤细胞容易扩散，很难控制。现在有一些新的癌症治疗技术，比如溶瘤病毒技术，可以专门攻击癌细胞。器官移植技术如果大规模使用，也可以对付很多未扩散的癌症。

有些癌症并没有人们以前以为的那么可怕，治疗的效果也不好，或者说甚至会适得其反。这类癌症已经被纳入慢性病管理的范畴。

**干细胞技术。**干细胞（“干”是树干的“干”，表示还没有分枝的意思）是胚胎发育早期留下的，一些尚未分化的细胞。它们能够分化形成生物的各

种组织和器官。干细胞分为全能干细胞，多能干细胞，单能干细胞等。简单地说，干细胞可以理解成某种人体组织或者器官的种子。如果能够按照人类的愿望控制干细胞的发育，适当的干细胞可以发育成特定的健康组织或者器官，代替人体中功能不正常的部分，从而治疗很多慢性病如哮喘、气管炎、肺气肿，甚至包括一些神经性疾病如小儿脑瘫、自闭症等。

干细胞技术甚至可以直接克隆人体。所以原则上，可以生长出需要的各种人体部位，比如手或者鼻子，用于修复受到严重伤害的身体部位。

整容。整容似乎不算正经的医疗技术，但是它对人类社会的确有很大的影响。人的自信是人类最重要的心理健康因素之一。人类对俊男美女的喜爱也是发自内心的。荧幕上的爱恨情仇总是发生在俊男美女之间。人类很早就开始用涂画、饰物的方式改变自己的外貌，现在的化妆品、美容、时装等都是庞大的行业。整容只不过是这一悠久传统的延续。

整容技术的成熟和大众化，会使整容变得和纹身、化妆一样平凡。俊美是平凡的需求，会有人喜欢特立独行，把自己整得像某种动物，或者奇丑。人们可以根据自己的心情，整成不同的容貌。器官再生技术，可以用自己的细胞打印出不同的脸型，虽然手术还需要时间，但是一年换几次形象是没有问题的。

整容的流行会让人的识别产生混乱，变成“新形势下的新问题”，年轻人的叛逆也有了新的发泄渠道。

整容可以给人一种“与过去划清界限，从头再来”的感觉。生活发生重大变故，失恋，工作变动，心理变化，下定决心改变等，都会让人产生改变容貌的想法。

## 物联网

物联网前面已经述及，但是对人类产生的深刻影响还是很难想象。

物联网可以让垂直城市的几乎所有东西，通过网络连在一起，本质上整个城市乃至整个人类社会变成了一个统一的、有机的整体。人们会有更多的整体感、社会感，更少孤立无助感；会更负责任，行为也会更规范，因为人的大量行为记录都是有据可查的，什么做得对、什么不对，有更多的监督和制约。

但是个人隐私会受到一定的影响。

## 机器人与人工智能

机器人技术已经发展多年，也取得了很大的进步，但是现在机器人的智

力仍然有限。物联网和云计算的发展将改变这一情况。相关的技术比如语音识别，目前通过云计算网络已经做得相当好，而单机的语音识别仍然比较困难。

超级计算机不仅在下棋这样的计算型智力游戏上打败了人类，甚至语音提问语音回答的综合知识竞赛中也打败了人类。

物联网、云计算、大数据、人工智能等技术的发展，可以让机器人成为人类智慧整体的一个终端。机器人不仅可以听懂你的话，回答你提出的任何问题，还可以做家务，照顾老人，陪老人聊天，陪小孩游戏，给小孩上课，等等。

以深度学习等技术为基础发展的最新人工智能技术，本身也被看作是一次新的技术革命，对人类社会的发展必将产生深远的影响。

到目前为止，机器人的运动能力，感知能力仍然有很大的提高空间。一个重要原因是，人脑实际上是一台超级计算机，计算能力和存储能力都与目前世界上最快的超级计算机相当(不同的估计从每秒千万亿到每秒百亿亿次不等)。这类超级计算机一般重达数百吨，耗电数万千瓦，占地数百平方米，而人脑只有 1.5 公斤，20 瓦。生物感知系统，如声音，图像，气味等，需要强大的计算和数据处理能力。即使机器的传感器(图像、声音数字化)很强，现在单处理器或者单主机计算机的图像和声音处理能力仍然很弱。在运动控制方面，动物能够独立控制的肌肉群数，远远大于驱动机器人的电动机数。

智力方面，特别是特定的技能如算术计算，公式推导，记忆，大量数据采集和处理等方面，计算机已经远远超过人类。是不是有必要限制机器人的智力，以增强人类的自信心？

## 农业和能源

可以说，农业和能源是现代社会最重要的两大行业。垂直城市环境下，农业和能源会有很多新特点，也会有新的发展。这两方面太重要，也太复杂，不可能几句话讲清楚，将在后面单独分章介绍。但总的趋势是，农业会更集约，更现代，更不依赖自然条件。与人类的生活环境一样，更加独立，还可以占用更少的耕地。能源会向绿色能源过渡，向可持续发展过渡。由于垂直城市的节能特点，普通生活的能源消耗强度可能会降低，但是社会的总能量消耗可能仍然会增长。

## 代价还是改变？

垂直城市是很大的变化，很多人可能愿意接受这种变化，也有很多人可能不喜欢。前面我们说的基本都是正面影响，但肯定也有很多人不那么想。站在不同的立场，持不同的态度，会有不同的观点。很多即使后来看起来非常重要，得到大多数人赞同的变化，开始的时候都要承受各种怀疑，各种非议，甚至迫害。从技术的发展，到认识的进步，到社会结构或者信仰的改变，等等，莫不如此。

生活在垂直城市中，我们是不是必然付出一些代价？就像现代工业和农业带来了污染和生态环境破坏，科学的发展带来了大规模杀伤武器，垂直城市会让我们付出什么样的代价呢？或者仅仅是生存方式的一种改变？

下面我们来猜测一下，我们可能付出哪些代价。

## 遥远的自然

垂直城市是完全独立的人为环境，人们生活在舒适的城市之中。气温，湿度，光照，空气，声音环境都是针对人们的需要优化的。就像温室里的植物，有充足的阳光，水，肥料，可以生长得很好。但是一旦移植到野外，就很难生存。人们也是一样，一直生活在舒适的环境中。不需要经历风雨，连太阳光都不常见到，一旦发生大的变故，需要在野外生存，一定会遇到极大的困难。

这个问题可以从两方面看。

第一，新的环境和城市自身是有生命力的。它们是人类新的生存方式，只要人类社会存在，垂直城市就不会荒废或者放弃。就像现在我们基本解决了食物的供应一样。农业现代化之前，地球上的耕地是不可能养活现在那么多人的。即使人口更少，饥荒仍然时常发生。现在在工业化国家，大规模的饥荒是很难发生的。

作为类比，我们建立了一套新的依靠机械、化肥、除草剂、杀虫剂、育种技术、基因技术，……，等等，的农业。这套农业没有各种工厂是不可能持续的。甚至我们使用的种子，几乎所有的都不能持续到第二代。也就是说，现代育种技术培育的种子生产出的果实，不能再作为种子种到地里。这是一个非常大的变化。传统的观念也是很难接受的。但是就是这些技术，养活了所有工业化国家的人，而且粮食还可以大量过剩。

垂直城市建成以后，维护、更新便成了日常工作。所有设施和结构的监控、检测、维护足以维持城市的持续存在，人们不需要考虑没有垂直城市后的生活。就像我们现在用不着考虑没有电、没有高速公路、没有自来水、没

有现代农业的生活一样。

垂直城市是人类社会的一部分。人类存在，垂直城市就存在，除非有了更好的生活方式。

第二，我们现在就离自然很近吗？野外没有电，没有住房，没有各种设施，没有食物，我们现在的人能容易地生存下去？垂直城市生活与现代传统城市生活相比，并没有质的不同，与“自然”的距离只有很小的差别。

“自然”未必是我们愿意接受的。自然有各种问题，有酷暑、有严寒、有雷电风暴、有猛兽毒虫。风景如画、恬淡悠闲田园生活般的“自然”，更多的情况下只是一种想象和愿望。

另外，我们前面也说了，垂直城市中，污染减少了，疾病减少了，因为交通浪费的时间减少了，身体锻炼可以更有规律地进行，人们的健康状况会变得更好。虽然没有各种自然因素的刺激和锻炼，但是人们仍然可以更强壮，更健康。就像现在工业化国家中，人们的健康水平明显比传统地区更高一样。

对于不能接触自然的焦虑是一种传统。我们小的时候，分不清韭菜和麦子是要遭到耻笑的。“四体不勤，五谷不分”是一种相当贬义的评价。如果有人怕虫子老鼠，会成为别人的笑谈。上体育课的时候，如果因为阳光太强，或者有点小雨而不积极，老师会当成很严肃的一个问题（资本主义还是社会主义！），找你谈话。而现在的孩子并不要求能干农活，也不在阳光强烈或者雾霾天上体育课。但他们还是能接触各种各样的农业，到体育馆参加各种各样的体育活动，还能到野外露营。这种状态，在垂直城市中不会变得更坏，人们能够接触到更多东西，可以有更多的经历。

同样的焦虑还包括对孩子们好奇心，探索精神的担心。比如，平常接触不到风，看不见云，不会去思考风是什么？云会不会掉下来？看不见太阳升起，不知道什么是白天黑夜；看不见星星月亮，不会对宇宙产生好奇心和敬畏感，等等。但是这些问题其实并不存在。

垂直城市中，人们有更多的时间休闲和学习。郊游，到自然中去“探险”，可以成为日常生活的一部分。远距离公共交通的解决，可以让人直接体会不同的自然与人文环境。虚拟现实技术的发展，可以让人足不出户体验几乎是没有限制的各种场景。到山上露宿一夜，看天上的星星，未必有看一次壮观的环幕科教片更能激发人的好奇心。体验是必须的，但垂直城市并没有为人们的自然体验设置障碍，而是提供了更多的机会。

在自然环境中的生存能力，可以作为一种户外技能，自愿学习，或者以义务教育的形式，要求大家掌握。

## 虚拟世界的沉溺

垂直城市有人造的生存环境，也有人造的信息环境。在家也好，工作也

好，学习也好，都可以认为自己生活在另外一个时空。走在楼道里，可以让你感觉在旷野或者海边散步；办公的时候，可以让你感觉身处森林深处；休闲的时候，可以让你体验时空穿越，走进历史或未来。

但是虚拟现实世界里的刺激和成功，容易让人沉溺其中，脱离现实社会。就像现在那些网络成瘾、电脑游戏成瘾的孩子那样，可能还会更严重。对于现在的年轻人来说，这的确是个很严重的问题。谁不愿意接受令人激动的挑战，并且获得成功呢？毕竟到了虚拟世界，一切美梦都可以变成“现实”。

不良网络游戏几乎精确地满足毒品的定义：它使你上瘾不能自拔，让你得到虚假的满足，让你为它付钱甚至倾家荡产，让你脱离社会，需要强制戒瘾。作为一个新兴行业，现在的网络游戏发展迅速。网络游戏产业影响千家万户，尤其对孩子们的成长影响巨大。很多游戏鼓励不良的价值观，错误引导孩子，但是缺乏有效监管。

网瘾或者电脑游戏成瘾是一个严重的社会问题。不过并不是不可治疗的。现在的办法主要是强制。强制戒瘾很难防止复发。我们在前面讲过，虚拟现实技术可以用来从事教育，可以培养人的性格和技能。因此，虚拟技术也可以治疗成瘾，甚至可以在所有的虚拟现实游戏中加入告诫、诱导，预防成瘾。

另一方面，现代社会中存在的吸烟、酗酒、精神药物等不良嗜好，在三维世界应该能得到缓解。原因包括，环境空气的全面监控让吸烟不方便；同样的原因也导致毒品更容易监控；总的犯罪率下降；更有效的教育手段，生活的舒适，都会大大改善人们的心理健康。人们缺乏逃避社会，进入虚拟世界的动力。

## 个人的独特性消失

垂直城市及其时代看起来更美好，但其中有一个问题。这个问题不太明显，也主要不是垂直城市的原因，而是技术发展的结果。

虽然这世界上有近一百亿人，但每个人都有自己的特点，每个人都是独一无二的，都是自己，这是每个人明确可以自信的地方。但在垂直城市中，同样的生活条件，同样的医疗条件，同样的教育，同样的良好生活习惯，关键还有整容的流行，可以使人和人的差别减小，会有很多人看起来很相似，特别是一些明星名人等的外貌。喜欢同样外形的人，也很有可能同样的爱好、性格、技能、甚至工作。不是说人们都会变成差不多，但会趋向与几十种、或者几百种性格类型，体型外貌，这样很容易碰到似曾相识的人。

经过分门别类的性格、社会经历培训之后，人们都会变得成熟、负责，但是个人特征就会变得不明显，特别是从事同类工作的人。

这会是一个问题吗？至少很多现在的人，都不喜欢碰到一个跟自己一样的人。单纯从社会的角度来说，每个人的素质都提高了，每个人都胜任自己

的工作，都有职业的良好态度，对家人、朋友充满爱心，社会当然比现在安定，人们也应该更幸福。可是，个人的思考和追求呢？还有天马行空的梦想？

这里的问题似乎应该更深刻：到底人是什么？人应该变得怎么样？人应该拥有什么样的自由和个性？人生的目的是什么？在一个高度现代化，高度社会化，高度职业化的人类社会中，人的角色究竟是什么？是不是向我们以前提倡的：做一个合格的螺丝钉？螺丝钉是可以互换的，人也应该可以互换吗？我们多次提到，新的教育方式多么高效，但是教育的结果应该是一件合格的产品吗？

## 隐私不再

一般看来，隐私权是人权的一部分。每个人都有一些不愿意让人知道的东西。只要不影响和危害他人，每个人都有权不让人知道自己的一些事情，比如所在的位置，每天干的事情。

在垂直城市中，由于城市智能化，安全监控全面，各种电子设备都有记录功能，物联网的广泛使用，导致无处不在的“眼睛”和“耳朵”。随身携带的电子设备，随时报告着你的方位。电子化的个人信息，虽然可能有法律保护，但是技术上是不受自己支配的。无所不在的密码认证太脆弱，很容易破解。所以在垂直城市中，至少在技术上，每个人都没有秘密。

这对社会的公共安全，预防犯罪及追踪问题来源，都是非常有利的，但是也的确会让每个人都不自在。

这不是一个以后才会出现的问题，现在也一样。信息革命之后，个人的信息更多存在于互联网中。电话可以窃听，电子邮箱密码可以破解，私密信息空间会被人闯入，银行信息会被窃取，手机暴露你在什么地方。上网的时候，你的网络地址也暴露了你在什么地方。同样，也有无所不在的摄像头，虽然覆盖面没有那么广，可能分辨率也还不够。还有很多微小的电子摄录装置可以偷拍偷录。所以个人隐私在信息时代已经很难保护。垂直城市信息化更彻底，你每天进出几次门，每天走什么路线，见什么人，买什么东西，甚至连你冰箱里面每天进出的食品种类数量，都会有记录。

父母可能对能够随时知道孩子在哪里、在干什么感到满意，但孩子会觉得没有自由。他们显然不想让父母知道，自己每天几点到几点，在玩什么电脑游戏。年轻人有了爱慕之人，多访问几次别人的个人信息空间，访问记录很快会把他出卖，这可比较尴尬。

垂直城市时代，人的定义都已经变了，干脆忘掉隐私吧，大大方方，坦坦荡荡。反正也没有人骗得了你。银行的钱也很安全。知道你每天什么时候在什么地方，也不会有人来抢你。“天知，地知，你知，我知”的东西，反正也没有什么好事。

古人用“举头三尺有神明”来提醒和警戒人们做事要对得起良心。垂直城市时代恐怕是“举头三尺有监控”了，而且是实实在在的。

## 老年化

垂直城市生活条件舒适，卫生条件好，也没有那么多现代人的烦恼，人均寿命当然会延长。这会引来对老年化的关注。

假定那时候，人们平均能活到 90 岁，65 岁退休。由于专业化教育的需要，学习时间延长，每个人平均 25 岁开始工作。那么每个人工作 40 年，活 90 年，一大半时间都需要供养。这势必增加工作人口的负担。

一般对老年化的担心，主要是考虑老年人需要照顾。特别是老年人一般经常上医院，需要陪同照料。垂直城市医疗条件的改善，也意味着必须提供足够的床位和医护人员照顾这些病中的老人。如果老年人口占的比例过大，就会成为严重的社会负担。

在北京看过病的人，特别是陪老人看过病的人，会知道看病有多么艰难。以社会保障形式提供医疗保障，在很多国家都造成了沉重的财政压力。

寿命延长很多，但是工作时间并不能延长过多。老人能够活得更长，主要是因为以前将导致死亡的很多疾病，现在都可以通过医疗手段治好，或者至少是能够延长生命。但是这样做的成本很高。特殊社会地位的人，能够享受特殊的医疗服务。延长他们生命的成本非常高。社会的发展，必将导致更多的人能够享受到更好的服务，但是成本并不会明显下降，其中主要是人力成本，包括医护人员的工作投入。垂直城市中必然有更多的老年人，如果每个病人都享受到良好的专业医疗服务，那么恐怕需要很多的医护人员。我们很难想象，一个社会一半的人是医生。

这是一种按照现有医疗模式的直接外推。垂直城市生活条件的改善，各种焦虑减少，导致精神状态的改善，可以让人不生病，少生病。我们前面还说过，有足够的技术手段，可以对所有的人进行随时的疾病防治和排查。一旦有人开始生病，就能得到治疗，生病对人身体的伤害可以降到最低，也不容易发展为慢性病等长期危害身体的疾病。这样可以大大降低生病的可能性，或者缩短每个人生病的时间，或者降低生病的严重程度。总的效果是，城市中病人数目不多，这样每个病人都能得到很好的医疗服务。

另外，自动诊断、自动治疗的医疗专家系统是可以实现的（计算机软件，人工智能医生）。这样可以避免医生个人判断的影响，让每个病人都能得到最全面、最专业的诊断和治疗。

因此，我们有理由认为，人们寿命的延长并不会导致老年化问题的加剧。

寿命的延长，实际上是生命的延长。人类生命的每一个阶段都延长了，包括儿童，青年，中年，老年。仅仅是上世纪改革开放前，农村里一般十五

六岁就结婚生孩子了，到了三十多岁就很苍老了。但在现在，六十岁的人还是壮年，四十岁只能算青年，如果接受专业教育（读完博士学位），上学要上到近三十岁。以前十四五岁生孩子，现在很多人的初次生育年龄超过了三十岁，这在几十年前已经可以当奶奶了。过去的人老得快一些，原因有生活条件差，营养不良，受疾病折磨比较多，长期受日光直射也能加快皮肤老化。“饱经风霜”这个成语描述的完全是字面意义的磨难，只是古人还不知道日光也不能多晒的。

2013年，联合国世界卫生组织提出新的年龄分段为：44岁以下为青年人，45岁至59岁为中年人，60岁至74岁为年轻老年人，75岁至89岁为老年人，90岁以上为长寿老人。

## 宗教地域差别的淡化

垂直城市的发展，还有一个副产品就是，宗教和地域的差别会逐渐淡化。

人类进入文明时代的几万年来，不同地区的文化差别非常大。特别是交通不便的地方，通常每一座村落就有一种文化。不同的地区，几乎就是不同的世界。人们衣着不同，用具不同，食物不同，房子不同，语言不同，婚姻嫁娶不同，信仰不同。人们通常对外面的人充满了怀疑和敌意。

在我的家乡，每一个乡就有一种方言，甚至每个村庄，发音都有差别。不同的县说话基本听不懂。出来上大学的时候，最担心经过每个地方的话都听不懂，因为那个时候人们也很少说普通话。

地域差别的弱化是社会融合，社会大尺度有序化、组织化，特别是工业化、现代化的结果。通过人员流动、全社会教育水平提高来实现。中国这些年的发展，美国与欧洲对比等，都可以证明这种趋势。

世界上有几千种语言已经消失，或者正在消失，很多少数民族已经没有了自文化特点。很多学者对此感到忧心。就像物种灭绝一样，少数民族及其文化的消失，会损害人类自身的多样性。对于研究人类在地球上的活动规律，以及语言的发展规律也很不利。但这是正在发生的事实，也是社会发展的必然趋势。

在垂直城市中，人们生活在同样的环境中，必须遵守同样的市民行为规范，使用和制造同样的工业产品，采用同样的产品协议或标准。专业人员的比例越来越大，这些人接受同样的专业教育，会有类似的思想行为。虽然城市的文化，宗教，装饰风格还可以有自己的特点，但人们的交流还是会增强。食品也会更多地从经济（大规模生产），安全（室内制作的消防安全），健康（营养均衡）的角度生产，而不只是局限于当地的自然食物来源。这些因素都会促使地域差别的淡化。

语言，宗教和文化的问题要复杂一些。它们更持久、有更强的生命力。

但是小语种会逐渐消亡，人口数目少的少数民族，也会逐渐失去自己的特点。教育必然普及，教育也必然要求孩子掌握一种通用语言。交流增加使人们越来越多地使用通用语言，一两代人之后，使用人口少的语言就会没有人用了。即使像人口数目高达千万的中国满族，几百年内也失去了自己的语言和文化。虽然很多人很痛心，但是这是必然的。

其实汉语言中，不同地区的方言也是听不懂的，风俗习惯也不一样。虽然没有叫做不同的民族，但历史上也曾是不同的国家。所以这些地区地域差别的缩小和方言的淡化，跟少数民族文化语言的消失，原则上是一样的。满族与汉族的差别，并不比西北人和广东人的差别大。汉族只是消失得更早的更少数民族的总称。

宗教更顽强，因为按照教规自律和传教是宗教的属性。自律意味着坚持，传教意味着扩张。科学也是一种思维方式，或者说一种宗教，通过技术扩散和教育的方式扩张。科学和宗教的接触并不是很平和的，至今也难说谁胜谁负。但现在大家也在避免冲突，也许还需要在很长时间内和谐共存。垂直城市中，至少原则上，人在一生中的生活保障、疾病治疗是由世俗的城市基础设施和专业人士提供的，神明的万能只能通过这些设施和人来体现。宗教信仰坚定的人，至少需要了解这些世俗的东西，除非他们拥有足够的权力和金钱，把这些工作全部外包出去。

宗教的淡化，或者说至少可以与其它宗教或信念共存，而不是以强迫的手段，将别人从本教派认为的地狱里拯救出来，应该是现代化（即科学技术及世俗人文理念扩张）的一种必然结果。

宗教给人希望，规范人的行为。除此之外，还有一个现实的原因，就是组织社团互助，保障生活安全。垂直城市中，生活有更多的保障，日常行为必须遵守市民规范，这些都是世俗的。即使信仰某种宗教，仍然必须接受世俗的法规限制，享受世俗的保障，这样宗教会逐步退守到精神层面，脱离宗教也不需要承担严重的后果（有些对退教行为特别严格的宗教例外）。

## 退化的人体机能

这是与“遥远的自然”相关的一种可能。

温室里的花草搬出温室马上就会枯萎，可爱的宠物小猫小狗，回到自然难以生存，鱼缸里漂亮的金鱼，放到大河里马上就会被别的鱼吃掉。生活在舒适卫生环境里面的人，会不会一样退化呢？

首先，“退化”，“进化”这两个词带有褒贬色彩。达尔文的进化论，英文原文是 *theory of evolution*，*evolution* 的原意是演化。有什么样的环境，就会演化出最适应该环境的生物物种。翻译成进化论之后，该理论在中国带上了本来没有的政治色彩。因为“进步”是好的，“退步”是坏的，所以进

化就是好的，退化就是坏的。可是事实上只是发生了变化而已。什么是好的，什么是坏的，要看用途和立场。人的尾巴退化了，这是好呢还是坏呢？人“进化”为直立人之后，直立步行是人的特征，但是现在每天坐着，走的时候开车、坐车、骑自行车，造成身体步行能力的下降，这算好还是坏呢？在垂直城市里，又回到了主要靠步行的状态，这又是好还是坏呢？

人们生活在舒适的垂直城市里，出城可能一时难以适应强烈的阳光，寒冷或者炎热的环境。即使现在，生活在赤道的人到北方，生活在干旱地区的人到潮湿的地方，一样也不适应，是不是可以说这些地区的人退化了呢？垂直城市的人，生活舒适了，不需要额外的精力和体力应对自然的挑战，但是有了更多的知识，更多的技能，更健康的身体，更完善的人格，那么是进化还是退化呢？另外，垂直城市的人，还有更多的步行，更规律的健身，更全面的人工免疫，似乎没有明显的理由，认为垂直城市的人“退化”了。

自然条件下，除了部分先天免疫能力，大部分免疫能力是后天获得的。获得免疫力的过程一般比较痛苦，需要生一场大病。古代的时候，很多人不能挺过这些病而夭折，导致平均寿命很短。现代医学通过注射减毒疫苗的方式，使人被动获得免疫能力。许多重要的传染病如天花，麻风等，就是这样消灭的。垂直城市时代，预防性免疫可以更广泛，因此人们可以有更强的免疫能力。

垂直城市时代，会有一些人的身体机能有一定的退化，但是整体身体健康状况应该更好，就像现在工业化社会的健康情况比传统社会好一样。

## 改变的两难

社会或者环境变化，总会引起一些不适。任何一次变化，无论后来看来多么必要，开始的时候也不是那么理由充分。

火的使用就是一个例子。火有很多好处，可以带来温暖和光明，使人类可以在恶劣的自然条件下生存；可以作为安全屏障，驱离凶猛的野兽；还可以煮熟食物，让食物容易消化，食物的来源更广泛；煮熟食物还可以杀死细菌病毒，从而减少生病；用火煮熟的食物也更可口。刚开始用火的时候不可能有炊具，只能是简单烤熟。烤熟的食品如肉，只是一种稀奇的东西，不吃也不会影响人们的日常生活，因为大家一直都是吃生的东西过来的。所以在当时的人们看来，并不是非常有必要用火。用火的早期，也不可能每次都钻木取火或燧石引火，而是必须保留火种，随时添加木柴，这样用火就需要复杂的维护。需要投入人力，需要保证用火安全。火还有很多问题，如果要在人类寄居的洞穴里面用火，烟熏火燎会破坏“室内生活环境”；可能会不小心被火烧到；如果不留神点着了柴火堆，会造成重大灾难；洞穴内如果通风不好，会引起大范围缺氧窒息，威胁整个部落的生存。无论冬夏，都要去外

面捡很多柴火，会“引起资源和环境问题”。干旱季节，火的危险更大，在外面火势失控“可以大面积摧毁人类赖以生存的家园”，造成巨大的灾难。因为森林被烧了，食物就没有了，生态要几年几十年才能恢复，而对于采集时代的人们来说，完全没有“战略粮食储备”，森林火灾是灭顶之灾。

火在人的心理上，是一种可怕的东西，因为火通常是以森林或者草原大火的形式出现的。几乎所有的野生动物都惧怕火，用火要人们广泛接受，并不容易。一两个人无法长期维护火种。在洞穴里永久维持一个火堆，显然要依靠集体的努力。

在寄居的洞穴里用火，最初的决策未必是民主的。有可能是一两个人即兴所为，也可能是现实的需要，比如为了照明或者取暖。但最终用火成了人类的基本技能。火成了文明的象征，是划分人与动物的标志之一。用火之后，人类并不是没有为火付出代价。刀耕火种会破坏森林，也可能失控。进入文明时代之后，城市的大规模火灾造成了人员伤亡，人们无家可归。有的部落用火，可能会因为洞穴的通风条件不好，或者特殊气候条件，导致某一段时间通风不畅，大量人员缺氧窒息而死。没有用火的部落可能会以此为戒，但是更多用火的部落因为更安全，食物更多，更易消化，更不容易生病会在竞争中占优势，发展起来，挤占不用火部落的生存空间。不用火的部落要么同样使用火，要么消亡。

站在马后炮的角度，我们现在当然知道，当时人类用火有多么重要。但当时好处坏处并不是那么明显的。“玩火者，必自焚”，这是一句典型的中国古典“智慧”，或者说诅咒。如果把它当成一种信念，那么必然不会用火了。

人类其它的重大变化还有穿衣，农业革命等。我们可以列举当时条件下，如果将它们作为一种改革措施，按照现在的辩论方式，将正反双方的观点列举如下：

题目：是不是应该披上其它动物的毛皮御寒。	
背景：当时还没有织物，可以用来御寒的只有其它动物的毛皮。从来没有过动物利用其它动物的毛皮保暖。有时候有点冷，把动物毛皮披在身上会暖和一些。	
正方	反方

<ol style="list-style-type: none"> <li>1、有必要，天气冷了，不用动物毛皮会很冷。</li> <li>2、兽皮还可以提供保护，在遇到猛兽的时候不容易受伤。</li> <li>3、可以去更冷的地方，那些地方没有人，但是有食物。</li> <li>4、兽皮可以裁剪，缝得比较合身。骨头可以做针，筋可以做线。</li> <li>5、可以有办法保存兽皮，并且把它变软。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1、你为什么不在暖和的地方呆着呢？冷的地方是有毛发动物呆的地方。你的毛发不够，呆在你该呆的地方就行了。这种地方多着呢。</li> <li>2、兽皮披在身上？你不嫌臭啊？</li> <li>3、多不方便啊，披在身上不舒服，很笨拙，影响奔跑和捕猎。</li> <li>4、我们祖祖辈辈都生活在这里，为什么要去冷的地方？那里有什么东西你知道吗？远的地方会有鬼，有怪物，有老虎，多危险啊。</li> <li>5、不穿兽皮会活不下去吗？我们不是一直都那么过来的吗？</li> <li>6、用不着的时候怎么办，随时带着？多麻烦啊。</li> <li>7、兽皮很硬，会长虫子，会掉毛。披在身上不合身。什么针、线、把兽皮变软什么的，都是从来没听说过的东西，是虚无缥缈的想象。</li> </ol>
--	---

从上面的辩论可以看出，除非必须用兽皮御寒，并且慢慢发展出相关的裁剪，缝制，硝制技术，从当时听众的习惯和生活方式出发，很难说服人披上兽皮。

另外一个例子是农业。同样我们可以列表如下：

<p>题目：要不要把一块地上别的植物都烧掉，埋下一些果实，到秋天来收。</p> <p>背景：有人刚发现把食物果实撒在地上，第二年会长出更多的食物。</p>	
<p>正方</p>	<p>反方</p>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1、有必要，有些果实喜欢吃的人多，但是找不到那么多。</li> <li>2、能吃的果子没有那么多，种下去年底可以收获更多的食物。</li> <li>3、想吃什么就可以种什么。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1、能吃的东西埋在地里，被虫子吃掉了怎么办？霉掉了怎么办？本来能吃的都没了。</li> <li>2、要烧掉很多林子，很危险，把一些能结果子的树也烧掉了。</li> </ol>

	<ol style="list-style-type: none"><li>3、一年的什么时候种？</li><li>4、总要去照顾，太麻烦。</li><li>5、也没有长出多少东西来，不种采野果基本也够吃。</li><li>6、种了东西，就不能到处游牧了。只能呆在一个地方不动。</li><li>7、要好多瓶瓶罐罐装东西，到哪去找呢？</li></ol>
--	---

当然，农业后面的发展复杂得多，需要历法，需要灌溉，需要精耕细作，需要手工业，文明从此诞生。但最初也并不是那么理所应当，原因就在需要后面这些东西。如果没有，产量很低，收获难以保证，甚至可能收的不如种下去的多。而当时毕竟人口密度低，只依靠采摘狩猎也可以活得很好。

## 新的社会形态

垂直城市里，变化都发生在技术层面，但是技术的变化能够改变我们的生存方式，改变社会的构成方式。许多单一的改变，会产生难以预料的综合效应。从上面谈到的变化，我们可以继续设想，在垂直城市里，日常生活会怎么样。

## 犯罪基本消失

上面提到的全面安全监控，物联网全面应用，医疗技术发展，虚拟现实技术导致教育的高效率，人际交流增加，等，加在一起，会产生一些综合的效应，其中的一个现象就是犯罪的基本消失。

原因同样是综合的。以财产侵犯犯罪为例，财产侵犯可以说是犯罪的第一大表现方式，包括抢劫，盗窃，诈骗，贪污等。垂直城市物联网全面应用，主要工业产品都可以识别法定主人并定位；货币电子化，个人财务来去透明；财物侵占很难成功，这样就不会有人把它作为职业。另一个原因是，垂直城市时代工业更加发达，产品和服务更加完善，每个人也有事情可以做，没有侵占他人财物的必要。

人身侵犯类犯罪应该还是会有。但作为最大可能的人身伤害，因为医疗技术、整容整形技术发展，不太容易产生永久后果，这样人身伤害造成的社会危害程度，就没有现在那么大。特别是一些即兴犯罪，或者一时冲动发生的冲突，如果不会产生严重伤害，受害方容易谅解，当事双方也容易和解。

还有一个原因是，个人受教育水平的提高，一方面更不容易主动去犯罪，

一方面也知道如何保护自己不受犯罪侵害。比如现在发生在街头或者以电信、网络形式出现的诈骗犯罪，一方面技术上容易封杀，一方面人们不容易上当。

其它的像毒品，爆炸等危害社会或者公共安全的犯罪，由于垂直城市里空气全面监控，很容易定位毒品或者爆炸物的位置，从而预防恶性事件发生。

由于犯罪容易被抓到，职业罪犯就难以形成。没有职业犯罪，社会要安定很多。

人际交往增加，每人心理健康的改善，满足度提高，都可以使人们失去犯罪的动力。全面的社会保障，也让以生存为目的犯罪没有必要。

当然，新的社会，新的技术条件下，也会有新的犯罪形式出现。比如前面我们虽然提到“忘掉自己的隐私吧”，但法律还是会保护隐私的，这样必然会有人以非法的技术手段获取别人的隐私。其它的像网络人身攻击，篡改个人信息等，都会成为新的犯罪形式。

犯罪基本消失会减少刑事警察的工作。警察职业的角色会发生改变，警察会变得更像心理医生，更像随叫随到助人为乐的好青年，或者更像坐在监控室分析各种数据的计算机黑客。

交通方式的改变会导致交通相关犯罪的消失，交通事故基本绝迹。

以机动车为主要交通工具的现代交通，很难杜绝交通事故的发生。交通事故是和平时期人身伤害最大的来源，产生大量人生悲剧。中国现代化以来，高峰的时候每年有 10 万人死于交通事故，现在事故率有所下降，但每年死亡人数仍在 6 万以上（该统计数字有质疑）。

## 日常生活

在各种改变的综合影响下，日常生活也许会出现一些难以预料的新现象。包括：

- 1、街坊邻里人情恢复。自改革开放以来，以前密集的居住环境变成了单元楼，邻里见面也不打招呼。人情的淡化好像是发展的必然。但其实主要是大家在生活上没有交流，互相不熟悉，出门只有狭窄的楼道，没有公共空间可以一起活动。垂直城市有很多的公共空间，离家也很近。大家出门活动，见面的机会增多。因为交通改善，工作更轻松等原因，每个人在家的时间也长了，也会增加邻里交流的机会。
- 2、各种兴趣团体增加。每个人都有一些爱好，如户外，艺术，体育等。每一大类有可以细分为很多更细分的兴趣。传统城市工作、交通压力大，共同爱好的人见面不容易。垂直城市中，出于上面说的原因，见面方便，也有时间。即使不见面，通过电子远程交流的方式也很便捷。团体更容易凝聚。

- 4、也许会放弃在家做饭，而在公共食堂就餐或叫外卖。做饭虽然是一些人的爱好，但是对大多数人，做饭只是一种不得不做的家务。垂直城市出门方便，没有季节气候影响，距离食堂或者饭店也很近。垂直城市很多现有行业的消失，也可以导致饮食服务的加强，因而完全可以每餐都在食堂饭店吃饭。做饭是一个服务行业，而不是一件家庭琐事。因为距离短，外卖的食品容易投递，需要的时间也短。以家庭为基本单位的日常食品制作，与以社区为单位相比，当然效率低，选择少，浪费大。
- 5、衣服不容易脏，家里也没有多少灰尘。因为空气一直都是循环过滤的。这样洗衣、打扫房间之内的家务事会减少，进一步腾出时间。专门在室内穿的鞋的种类会增多，会更轻便，更舒服，不需要考虑防水和在室外的使用。
- 6、爱情悲剧会减少。爱情是感性的，最大的直观影响因素是对方的外表。漂亮英俊的人多了，即使一次失恋也容易找到别的机会。整形整容还能给一个人“重来一次”的感觉。受教育程度的提高，也能使人更理性地对待爱情。即使对于一些“爱情困难户”，垂直城市将更多人聚集在很小的范围内，通过网络、电脑牵线，总会找到一些适合自己的人。见面以前，视频了解很方便。
- 7、等等，……

垂直城市的一切好像都很美好，没有犯罪，没有地域差别，生活舒适，人们相处幸福和谐，什么都有，……，不过等一下，怎么觉得听起来耳熟？难道这是：

## 共产主义社会？

如果你一定要那么叫的话，再做一点小小的改变，它的确是马克思说的共产主义了。首先物质极大丰富不是问题。实际上即使在今天，主要的生活产品已经过剩了。现代化的工农业，生产出足够养活全球人类的产品是没有问题的。对于生活必需品来说，也就是温饱所需，基本上可以“按需分配”。

教育、监督、生活舒适，可以提高人们的自律，增加生活的幸福感，以及产生健康的自我成就感。以赚钱，积累个人财富的个人奋斗目标会逐渐淡化，而是寻求社会贡献，寻求社会认同。嗯，这里听起来有点像“各尽所能”。

还是稍微有点差别。垂直城市基本是技术发展的结果，也是人们生活水平及社会效率提高的要求，而不是单纯信仰的力量。这本书里不讨论信仰，但是可以证明，如果不按照我们说的方式发展，将得到一个让每个人都不舒服的社会，或者总和幸福指数低的社会。一个不公平的社会是不安定的。我

们为什么不让每个人都生活得很舒服,同时教育他,让他对整个社会负责任,为社会作贡献?

这是可以实现的,一方面通过技术和工程建设,一方面通过建立合理的社会机制(修改法律法规)。

## 第七章 发展的历程

革命或者改变的过程似乎总是混乱的。这种混乱足以使很多人不愿意接受改变。渐进的改变似乎不那么令人反感，很多革命其实也是渐进的，垂直城市时代会逐步到来吗？

### 巨大的建筑

垂直城市是一座很大的结构，内部各种系统、功能区划分非常复杂。一次建设一个哪怕是中等规模的垂直城市，也会有很大的风险。为了给出一个直观的印象，简单列举一下相关数字。

以我们前面最简单的大方块为例，高 400 米，1000 米见方，每层 4 米高，一共有 1 亿平方米建筑面积。也就是说，需要盖 1 亿平方米的楼。目前为止，世界上最大的楼还没有超过 200 万平方米，只有这座楼的百分之二。北京首都机场三号航站楼 2007 年竣工，总地板面积不到 100 万平方米，造价 220 亿。如果直接按此造价，这个大方块的建设成本需要 2.2 万亿元人民币。第四章的世界最大大楼列表中，特别列出了已经知道的每平米造价，都在数万人民币左右。简单类比，垂直城市的成本很有可能在这一范围。

这些造价我们后面还要讨论。

1 亿平方米也是一个很大的面积。它等于 100 平方公里，摊平在地上摆成方形，每条边有 10 公里，几乎可以填满整个北京的三环以内。北京市的人均住房面积大约是 32 平方米，1 亿平方米可以解决 300 万人的住房需求。按照北京市的平均房价，这栋楼至少值 5 万亿人民币。

如果是按照现在普通高楼的建筑技术，1 亿平方米的建筑大约需要钢材数百万吨，混凝土数千万吨，用 10 吨的大卡车需要运几百万次。

现在还很难估计这座城市需要的建设时间。首都机场三号航站楼花了不到 4 年，这座城市规模大得多，也复杂得多，用现在的建筑技术也许会需要 10 年时间。

建设速度难以估计。要建设那么大的城市，必须有与之相应技术和设备，以加快建设进度。一座城市的建设时间不应该超过 5 年，最好在 3 年以内。钢结构工厂预制现场组装的方法，可以大幅度提高建设速度。

如果要全面建设垂直城市，基本上相当于把全国的所有民用建筑重新建

设一遍，还要加上很多公共设施如公园等。不过现在中国的所有民用建筑，大部分是改革开放以后新建的，到现在为止大约正好也是 30 年。如果需要全面建设，该过程大概也会花费 30 年到 50 年。

## 技术再讨论

我们在第五章专门讨论过垂直城市将运用的各种技术。原则上这些技术现在已经基本成熟了，但是我们没有考虑建设速度的要求。要在 3 年或者 5 年内建成那么大一座结构，需要效率更高，速度更快的施工方案。

垂直城市与现在的摩天大楼或者普通建筑相比，因为表面积小，主要是内部结构，没有那么多的外墙，不需要那么厚。可以用更少、更轻的材料，从而减少垂直城市的整体材料用量。

建筑外墙需要同时满足承重、保暖、防水、美观等要求，一般都比较厚，消耗材料多，成本也高。

我们现在已经能建规模很大的摩天大楼，主要的技术都基本具备了。但是垂直城市毕竟规模大很多。我们还从来没有建成过，一座包含所有城市生活空间的垂直城市。还有一些技术需要验证。这些技术包括：

1、可维修更新的城市建筑结构。我们设计的垂直城市，原则上应该可以永久使用，所有的结构都应该可以维修或更换。传统的钢筋混凝土框架结构，使用年限在 100 年以内，一般仅为 60 年。主要限制因素是混凝土的寿命。混凝土会发生老化。虽然可以采用一些技术手段，延长混凝土的寿命，但是很难对主要结构进行维修。我们经常可以看到超过使用年限，或者别的原因需要拆除的钢筋混凝土大楼被整座炸掉。

可以替代的现有技术是钢框架结构，它的使用年限长，可以更换或者维修，建设周期短，但是成本要高一些。除了材料以外，在设计以及建筑规范中，也必须考虑结构部件的意外损坏和维修。钢结构并不是真的永久不老化。它也有疲劳，锈蚀等问题。但是对于建筑结构，受力基本上是静态的，不容易发生疲劳。室内环境可控，不会发生过于潮湿，空气中盐分过多等加速锈蚀的现象。锈蚀问题也比较好解决，一般的物理或电化学防锈方法就非常有效。即使钢结构垂直城市的寿命只有两三百年的，依然比混凝土结构寿命长好几倍，这样节约下来的建设成本总量非常大。

从成本和施工能力考虑，国内目前的高层建筑绝大部分是混凝土结构的，但发达国家已经以钢结构为主了。钢结构部件可以在工厂做好，现场安装，大大提高建筑速度，缩短工期。此外，钢结构比混凝土轻，占用的楼内体积小，施工过程没有污染和噪音扰民，可以全天候施工，不像混凝土施工因为凝固条件的原因，对施工天气有要求。

钢结构有一个特点，就是受力后形变要大一些，这会引出一个问题，就

是按照设计尺寸安装好的结构，形状跟设计时不一样。这个问题当然可以在设计时预先计算好形变量，让城市全部建成后达到设计的形状要求。但这又会在安装过程中造成麻烦，因为此时还没有上面的结构，受力不一样，安装的时候，“好像没装对”。大的钢结构，比如桥梁，北京奥运主场馆鸟巢，设计的时候都要考虑比较大的形变。

钢结构容易变形的特点也带来一个优势，就是容易诊断建筑的受力和结构安全。通过激光、应力分析、无损探伤等手段，可以很容易知道每一个受力构件的安全性，从而保证整栋建筑的安全。钢结构的受力形变特性还有一个好处，就是对地震、飓风的承受能力大大增强。钢结构可以承受较大的形变并且能很快恢复，不留后患，而混凝土形变后的损伤是永久的。

钢结构受力变形后，在一定范围内强度更大，能够承受更大的载荷，更不容易破坏。这与混凝土的不可塑性相比，是很大的优势。

钢结构还有一个好处，就是它容易通过磁铁、低温焊接等方式将别的东西附着在承重构件上。混凝土一般用膨胀钉，安装困难，不环保，还对结构有损害。

钢结构框架预制搭建，是一种速度很快的建筑方案。曾经有企业在十几天的时间内建成了一座 30 层的大楼。垂直城市的建设很可能采用这种标准件预制，现场拼装的办法，以大幅提高建设速度。

现在的工业生产正在经历再现代化。建筑业的再现代化也将逐渐实现。大型建筑的自动化设计，施工，将会是建筑行业再现代化的主要内容。再现代化之后的建筑业足够满足大规模建设垂直城市的需要。

2、空气管理。虽然现在高楼的通风技术已经比较完善，但垂直城市的普通住宅都需要通风，人们对通风系统的噪音更敏感，需要提高通风系统的静音性。垂直城市的巨大体量也意味着通风量的大幅增加。如果采用分散式二氧化碳化学置换的方法，对通风量的要求可以大大降低，但仍需要局部空气循环，以便于空气质量控制。

二氧化碳化学置换应该是优先选择的方案。通风可以局部进行，大大减少换气量。有助于降低城内噪音和保温。

大型建筑内部空气与外面隔绝会带来几个平常不注意的问题。这几个问题在现有的摩天大楼环境下已经存在，但是垂直城市要更严重。

第一个问题是内外空气压强差的平衡。随着气候变化，城市周边空气的温度、密度、湿度都是变化的。这些变化会带来气压的变化。城市内部保持恒温恒湿，气压一般不变。这样城内城外就会存在气压差，大小可以达到 0.1 大气压左右，也就是正常海平面附近气压的百分之十。0.1 个大气压，对于表面积巨大的垂直城市外墙结构来说，是一个非常大的气压差。如果完全密封，相当于每平方米要承受 1 吨的压力。很难设计那么大的外墙横向受力。因此必须随时平衡内外气压。也就是随时根据压强差换气。好在这一换气量并不大，实现起来不是很困难。

第二个问题，与上面的问题有关。气压平衡之后，由于空气温度湿度的差别，密度并不平衡。密度不平衡，对于小的空间问题不大。但对于大体量的空间，将会产生一个巨大的浮力或者下沉力。一般来说，湿度的影响不是很大，可以忽略。但是内外的温度差别可以很大，特别是高纬度寒冷地区。城市里面需要维持 25 摄氏度左右恒温，但外面可以从 30 到负 30 摄氏度之间变化，因此带来的密度差超过 20%。考虑一个比较极端的情况，外面的温度为-30 摄氏度。内外温差 55 摄氏度。如果要维持压强平衡，城市内的空气密度比外面要低大约 20%。整个城市变成一个巨大的热气球。如果城市是一个单一的封闭空间，那么上面受到的浮力，大约相当于每平方米一百公斤。对于面积很大的顶棚来说，是不可承受的。

外面温度高，原则上类似，只是压力朝下。但是考虑温差不大，没有上面说的严重。

解决这个问题的办法是，纵向将垂直城市分成很多独立的空间，比如均分为十份或者二十份，每层独立平衡，这样每一层的问题就容易处理多了。

垂直城市的纵向分割将是城市设计的重要原则。同时也便于城市的模块设计和分层投入使用，降低城市建设的时间成本。

3、全电力食物烹煮。三维大楼对火灾很敏感，普通家庭可能不允许使用明火制作食物。全电烹饪在技术上没有任何问题，只是需要人们改变习惯。

垂直城市中，整个社会饮食行为可能发生很大的变化。由于出行和配送都很便捷，人们可能更愿意去餐厅，或者订餐配送。毕竟选择余地大的多，而且不用做饭，不需要维持厨房（购置食物及配料，餐具炊具清洁，等）。

随着技术的发展，烹饪机器人不难实现。但烹饪机器人配置到家庭显然很不经济，应该以社区为单位配置，同时配置食品仓库。这样机器人的利用效率会大幅提高，食品种类的选择也多很多。

## 城市设计

垂直城市是体量巨大，结构复杂的建筑，能够容纳上百万人，数十万家庭，几百万个房间，几万个企事业单位。从技术上看，需要布设几万公里的给排水管道，几万至几十万公里的电力和宽带网络线路，几百万个无线网络接入点，还有对应的通风，照明，消防应急系统，自动物流配送系统，垂直及水平辅助交通系统，等等，非常复杂。

这样一个复杂的系统完全通过人工设计是不可能的，即使使用现在的计算机辅助软件(CAD)设计也不行。必须有更高层，功能更强大的辅助设计软件。或者将城市模块化，不需要一次完成所有细节的设计。

在现代工业中，超大规模集成电路芯片设计的复杂程度可以与垂直城市相比。这些芯片中有几十亿甚至更多个晶体管，需要完成的各项分功能也很

多，综合在一起还要考虑设计验证，逻辑综合，等效性，统一时序，布线，物理散热，等等。手工一个一个布置晶体管，甚至一块一块的逻辑电路，都是不可能的。必须使用电路设计自动化(EDA)技术，在行为综合，算法综合，逻辑综合，电路布局等方面自动设计。通过多层次模拟和功能验证确定设计的有效性，再流片生产测试。

还有钢结构的设计。自动设计软件可以根据用户指定的结构形状和受力要求，以及可选择的原材料类型，自动划分钢结构网架，确定每个构件的几何尺寸、连接方式，甚至施工方案，然后通过自动生产设备加工出每一个部件，运输到现场由机器人自动安装。

垂直城市必须有类似的辅助设计软件，在很大程度上，结合工厂和建筑现场，可以完成自动设计，自动分析（功能模拟），自动加工，自动组装全周期的工作。城市设计人员需要做的工作是，根据城市所在地理位置，承担的主要功能，与其他城市的相互关系，设计城市的外形，城市内大功能区如住宅区、商业区、产业区、休闲区的划分，各自的容量，相互依赖关系等。软件将自动根据功能划分，优化地添加必要的设施。比如住宅区中，自动配置适当规模的中小学校，幼儿园，医疗点，公园，文化体育设施。商业区中，自动配置一定数目和布局的快餐店，盥洗室，物流中心。住宅、商业中心、办公区如果综合在一起配置，则需考虑隔音，垂直及水平方向步行距离优化，高净空（低承重）区与高承重区的结构负载均衡等。同时在基础设施层面，如水、电、网、通风、照明、自动物流通道等，统一优化安排。

这样可以大大减少设计工作量。通过模拟验证等手段，也可以大大减少设计失误。

在模块式城市设计中，可以参考现在传统城市的熟地模式。即政府或者基础设施开发商一次提供基础设施完善的一大块空间。

以大方块为例，考虑到城市的纵向空间分段，我们将 400 米高的城市分成 20 米高的 20 段。每段作为一个大层，一次建好所有的基础设施。纵向主电梯直接加接在下一层的上方，完全联通。两大层中间多留出一层服务层，或者叫基础设施层，用来安排上下水、动力电网、信息骨干网，甚至垃圾处理和废水处理等。大层提供 20 米净空的整 100 万平方米空间，由次级开发商开发。由于 20 米是几乎所有民用设施的最高净空，因此这一大层相当于一块目前意义的熟地。

按照现有标准，20 米净空足够建设 7 层住宅，5 层商业建筑，两层小公园和包括篮球场、羽毛球场、乒乓球场、儿童游乐场等文体设施，一层足球场、大型公园等。特殊情况下，更大的高度，如 40 米，也可以提供。

为了解决大层间和大层内的交通，次级开发商需要遵循一些规范，减少大层内的交通需求，缩短出行距离。比如保证大层中有一到两层空中无障碍通道，不需要经过“地面”。一定密度的大层内电梯，等。

## 渐进的发展方式

垂直城市的规模本身虽然很重要，但是刚开始的时候，不太可能直接建设很大的城市，因为各种技术尚未经过检验，风险大。所以开始的时候，主要是建立全封闭的生活环境，规模不要太大，可以找一些有特点的社区、单位、或者城镇进行尝试。

我们现在已经能够建设同时容纳数万人的摩天大楼。以目前最大面积建筑的规模为例，如果垂直城市为每个人提供一百平方米的生活空间，现在最大的建筑可以生活数万人。垂直城市的规模不宜太小，必须能够包括绝大多数人的日常活动地点。数百万平方米建筑使用的各种技术，以及市民对垂直城市的适应情况，可以在这些小的垂直城市中得到检验。

为了保证城市规模，模块式从下往上逐层建设模式是可行的。每一大层的基础设施独立完备，建成后直接容纳 5 万左右市民和配套生活办公空间。无缝式逐层往上，一直到设计的规模。

## 生活社区

刚开始的时候，可以直接以现在的摩天大楼为模板。但是不用盖很高，而是在横向盖大一些，多留公共空间和通道。除了住房，再建设配套的幼儿园、小学、中学、公园、医院、商业中心。这样除了上班之外，基本上不用出楼。

这种楼可以验证垂直城市需要的各种技术，只是规模小一些，也不包括主要的办公空间。功能上，这样一座楼可以代替现在的居住小区，但是比现在的小区功能更丰富，相当于居住小区、商业中心、中小学、医院、小公园、体育馆加在一起的一个综合体。

现在大城市中的大型商业中心已经比较大，提供的服务包括购物、饮食、娱乐休闲等。大型商业中心的体量在百万平方米量级，最大的已经达到四百万平方米（迪拜），离我们小型垂直城市两千万平方米的标准已经不太远。

## 大型单位

有些平常行动范围小，人员集中的单位，比如大学，也可以用一座大型建筑囊括。大学本来就是一个比较独立的小社会，人数一般有几万，面积数千平方公里。每天的日常行动在教室或办公室，食堂，图书馆之间，经常也还需要到运动场或者体育馆锻炼。现在的大学中，由于平常行动的距离需要 1

公里左右，很多人都使用自行车。大学的相对人口密度大，自行车的密度也非常大，经常导致非机动车人流拥堵。

跟机动车类似，大学中的自行车同样占用大量的空间。停靠的自行车需要占用2平方米路面或停车场，移动中的自行车需要更多的道路面积。

大学不需要是一座独立的建筑。一座垂直城市可以容纳多个大学和别的单位。

以北京大学为例。北京大学校本部占地约2平方公里，也就是200万平方米。所有办公楼、宿舍、教室的建筑面积加在一起，不到1.7平方公里（170万平方米），也就是北大的总建筑容积率约为0.85。若平均楼层数为4<sup>1</sup>，那么170万平方米建筑约占用42万平方米地面面积，总的可利用面积为200-42+170=328万平方米。一般欧美大城市的道路加停车场面积，占市区面积的30%到60%不等，北大没有统计。但可以那么估算，扣除部分园林（20%左右，40万平方米），其它区域布局与城市相差无几，打个折扣算25%，那么机动车占用的地面面积约为200/4=50万平方米（实际上有部分路面是人与机动车共用的，但是人也好，机动车也好，都不希望发生这种情况）。还有一些空间，如路边的绿化带，建筑物墙根附近，都是不可利用的，应当扣除。这部分的总面积相当大，由于没有统计，可以少算一点，以10%计，即20万平方米。这样，在占用200万平方米地面面积的情况下，北京大学师生们可以利用的空间是328 - 40 - 50 - 10 = 228万平方米。当然，绿地、园林、湖面有观赏价值，全加上的话是268万平方米。

如果在我们的大方块垂直城市中安排北京大学（恐怕没有多少校友会同意），占用其中的5层，总高度为20米。如果每层都按办公室和宿舍配置，总共可用空间是500万平方米（4米净空）。

学校必须有较多的体育设施，而体育设施一般需要比较大的净空。现在北大体育场馆总建筑面积有78633.94平米，其中办公及教学用房2858.93平米，运动场地总使用面积71811平米，又分为室外场地（建筑）面积65247.79平米和室内场地使用面积6563.21平米。一般室内足球场的净高是15米左右，20米的净高（约7层住房高度）应该基本满足所有室外运动的高度需求了。如果我们拿出10万平方米全5层净空作为体育活动空间，其中8万平米20米净空，10000平米10米净空（篮球，排球，羽毛球等大多数活动都够了），10000平方米4米净空（办公，健身，器械等），那么总共会有8+1\*2+1\*4=14万平方米的可用空间，大约是现在的两倍。实际的使用效率应该还不止两倍，因为气候的原因，大面积的室外场地使用效率很低，而在垂直城市城市中，高净空场地可以在所有时段内使用。考虑开放空间照

---

<sup>1</sup> 北京大学的建筑楼层普遍偏低，因为北大处于周边建筑高度控制的圆明园南面。办公及科研楼普遍为2到4层，6层以上很少，提供的楼面空间占比例非常小。尤其是未名湖及周边地区，办公楼为1到2层为主。新盖的2到3层办公楼还有一层是地下停车场。学生宿舍普遍为4到6层。

明的效率很低，甚至照明的费用都可能不会提高。现在大学的室外体育设施中，铺人工草皮的足球场的使用效率是最低的。因为草皮需要养护，使用频率高会破坏草皮。花钱多，而利用率非常低。垂直城市中的足球场没有阳光，完全采用人工照明，可以使用尼龙等材料制作的草皮，大大降低养护成本和提高使用效率。这种技术在发达国家的室内运动场已经普遍使用。室外不能使用化纤草皮的一个重要原因是，在阳光紫外线照射下，化纤材料容易分解老化。

除了体育设施，其实大学的所有空间都可以理解成办公室、宿舍，及少量商业空间（食堂，商店等）。商业办公一般需要较高的净空，比如4米，但普通办公及宿舍不到3米的净空就够了，我们可以选宽裕一点的3.3米，20米内可以安排6层。如果商业设施、以及部分实验室、会议室、教室使用较高的4米净空，安排10万平方米\*5层=50万平方米。这已经远远超过现在的面积。剩下还有80万\*6层=480万平方米的可用空间，拿出三分之一作为公用通道，小公园，电梯等附属设施空间，还有320万平方米，加上50万平方米高净空空间，超过现有170万平方米总建筑面积的两倍。

总的可利用空间折算成平方米是480+50+14=544万平方米，大于现在包括绿地、园林在内的总使用空间268万平方米的两倍。几乎所有的空间资源都增加了一倍。

与现在的校园占用的200万平方米土地相比，新的北京大学占用的土地资源是100万平方米/20=5万平方米，因为我们只用了100层中的5层。而可以利用的空间资源增加了一倍有余。除此之外，还有下面一些好处：1、校园完全没有机动车，也完全不需要自行车。任意两点间的距离平均缩短为670米。如果根据普通学生三点一线规律安排，适当配置教室、食堂、及宿舍的位置和数目，并加宽通道，可以消除拥堵的情况，距离还可以缩短。对于一个拥挤的校园，自行车占用的空间资源非常多。甚至每年学生毕业留下的废旧自行车都是一个大问题。如果完全不用自行车，校园环境会改善很多。2、几乎完全可以不使用电梯，完全随机的话，每次出行上下楼层平均仅为两层。如果每层配置食堂，按照同层原则安排院系，那么可以很少需要上下楼。而二维校园由于交通集中在地面，一次活动上下楼层平均为4到5层。比如我的办公室在4楼，上课的教室也在4楼，我需要下三层，再上三层才能到达教室，回来还要重复一次，而在垂直城市的校园中，我完全不需要上下楼。3、由于通道数目大量增加，而且没有瓶颈（红路灯路口等），校园里的普通出行要方便快捷得多，也不会出现拥堵和冲突。出于安全的考虑，即使在学校内部，每个单位，每座办公楼或教学楼都只有一两个出口，这样在上下课或就餐高峰，人流非常集中。垂直城市的安全是内在的（无处不在的监控），不需要有这样的安全措施，既减少了人流的拥堵，也缩短了每个人的出行距离。4、宿舍和办公空间的成倍增加，意味着每个学生都可以有自己的房间。5、教师都可以住在学校，不需要每天上下班奔波。6、当然，

没有坏天气，每天都可以锻炼，出门不用换衣服，不用担心安全问题，这些都是垂直城市内在的特征。

还有一些庞大的政府机关，特别是一些本来就有保密性质的单位。封闭的环境除了生活舒适、节能之外，也便于管理。比如美国的国防部五角大楼，中央情报局等，本身就是一座庞大的建筑（但是周边是停车场和道路，单以占地面积计，停车场和道路的面积比大楼办公面积大多了）。

## 小城镇

还可以考虑规模小一些的城镇。

发达地区的小城镇有资金，有专业人才，也有土地可以开发。垂直城市的主要优点是生活舒适安全，减少不必要的时间精力支出，提供的生活水平高于个人住宅，而且不受气候季节影响。这种生活对富裕地区的人们应该有吸引力。

正是因为垂直城市良好的人工环境，对于很多在地理气候条件恶劣的地区生活的人们，比如西部常有大风沙，北部很长的时间内寒冷刺骨，东部很多地区夏天闷热潮湿，高原地区寒冷并且阳光刺目，风调雨顺的平原地区有可能是飓风的肆虐区域，等等，垂直城市都是一种好的选择。这些城市不太大，大约生活数万人，需要数几百万平方米的城市空间，如果开始不考虑盖很高，大约需要几百亩土地，能够节约几万亩原来的城市建设用地。

在自然条件恶劣的地区，正因为条件的恶劣，经济发展有很大的困难。人们不得不花大量人力物力对付恶劣的自然条件。垂直城市能够将任何地区改造成人类生活天堂。

垂直城市体积很大，内部环境完全独立，水资源完全依靠自身循环，或者少量取自外部。如果应用防震技术，垂直城市对地理位置和自然条件都不敏感，可以在自然生态条件恶劣的地区如荒漠、山地等地建设。这样可以节约宝贵的生态环境用地、工农业用地。

其实规模稍小的类似建筑已经大量存在，很多购物中心、商务中心、交通枢纽、大型文化设施、大型酒店，都是封闭的人造空间。所以可以说造小型垂直城市的技术已经完全成熟了，需要的只是规划和投资。

中国的东部经济比较发达，但是气候条件并不好。冬天阴冷，夏天炎热高温，春天梅雨连绵。2013年夏天，长江中下游发生了长达一个多月的高温，多地气温连续多日超过40℃，最高达44.1℃，最低气温也连续超过30℃，不但严重影响人们的日常生活，也造成农作物大面积枯萎。这些地区有能力也有必要建设垂直城市。

## 大城市的逐步升级方案

大城市的三维化要麻烦一些，主要是现有土地使用已经非常紧张，原有楼宇的投资很大，拆迁困难。

大城市的三维化，可以从老旧城区改造，或者新小区建设等方面着手。

现有的生活小区，以同样的占地面积，建成封闭的垂直城市，可以容纳更多的人，提供更舒适的生活空间，节约能源，减少外出。即使按照现有的商业运营模式，也是可操作、并且有利可图的。需要的只是修改现有的建筑规范，改进关于容积率、绿化率、商业用途、住宅用途等方面的规定，法律上允许修建功能齐全的垂直城市。

这种三维小区规模不宜太小，即使开始的时候，也应该能容纳 5 万到 10 万人。我们前面说过垂直城市设计为：所有的部分，包括建筑结构，都可以从内部维修更新。垂直城市一旦建成，基本上是永久的，不太可能大规模拆除。小区规模过小意味着全城需要很多的小区，这样整个城市范围内交通节点太多，影响小区间公共交通的效率。因此在开发三维小区的时候，规模应当适度超前。

纵向模块式设计的垂直城市，开始的投入要大一些，因为基础部分的规模比较大。如果我们把这部分叫做城市基础，那么城市基础的建设可以在经济低迷的时候用来调节经济周期。

按照现在的小区开发模式，只需要土地区块略微大一些。目前城市小区，使用土地大概在数百亩到数千亩。1 平方公里等于 1500 亩，所以稍微大一些的商业或者住宅小区用地，就可以建设三维小区。如果以非常宽裕的标准建设一个容纳 5 万人的生活小区，每人平均空间 200 平方米，总共需要 1000 万平方米建筑面积，是我们上面提到大方块的十分之一。这样一个小区可以在 300 亩的土地上盖 200 米高（50 层）的垂直城市实现，如果以现在传统城市的空间标准，每个人 100 平方米，可以盖到 100 米，25 层。300 亩等于 0.2 平方公里，可以是长 500 米，宽 400 米的地块，基本上是现在城市小区的典型大小，但一般的新建小区可能要大一些。

在垂直城市大量修建之前，刚修好的三维小区中，大部分人仍然需要到外面去上班，由于教育资源、学校好坏的原因，很多孩子也还需要出去上学，因此除了商业购物、休闲、运动基本不用出楼之外，还是有很多的外部交通，有很多私家车，需要很大的停车场。同时，由于人口密度大的原因，周边交通的压力仍然会比较大。特别是在城市建设，以及人口开始迁入的过程中，由于材料运输，搬家等的流量非常大，都会造成周边拥堵。即使入住基本结束，在城市投入使用的早期，搬入的居民仍然有很大的外部交通量，因为单位和学校都在外面。但是随着三维小区的逐渐成熟，除了部分外部上班上学之外，普通的日常活动不用出楼，才可以大幅减少外部交通量。

垂直城市化也许要经过 50 年到 100 年的时间。目前中国的建筑物设计寿命为 50 到 60 年，但实际平均使用寿命仅为 30 年。也就是说，住宅小区经过 30 年到 50 年时间就应该改造。如果提前规划，按照稍微超前的垂直城市方案设计新的生活小区，以及全市的长期改造升级规划，那么可以加速垂直城市时代的到来。

改革开放后 30 年内修建的各种小区，基本都是混凝土建筑，再过几十年(建筑寿命最多 70 年)，都需要推翻重建。如果采用现有的城市建设规范，受容积率限制，小区改造后不可能提供更多的使用空间。这样，小区改造的巨大人力物力投入，完全不能产生价值。只是旧房子变成了新房子。从住户看，房子要拆迁，拆迁款不能改善住房条件，只是白搬一次家，多装修一次房子。从开发商看，拆了多少房，只能再盖同样多的房子，售房价格原则上不会比拆迁高多少，整个工程不可能盈利。因此，现行的旧城区改造模式，在几十年后，完全不适用于近期新建住宅小区，包括商业物业，的改造。但如果改造成垂直城市，提供的生活空间可以多出几十倍，在降低大幅降低房价的基础上，工程仍然有利可图。因此，下一步的城市改造必然三维化。

现在很多城市内的很多老旧小区无法改造，就是上面说的原因。这些小区多建于上世纪七八十年代，楼房密度高，居住条件差，楼体已经破旧，房屋使用寿命已经达到或者快要达到，但是却因为经济上不合算，无法改造。

## 大规模安置成本

前面说到，小型或者微型的垂直城市建设已经没有技术困难，而且在世界范围内，这类建筑已经大量存在了。但是我们没有强调的是，这些建筑一般是高档住宅、高档商业区、高档酒店、高档文化设施。造价远高于普通建筑。以普通住房为例，2012 年全国建筑安装造价不到 2000 元，一般的高档商业物业也不过 5000、6000 元，而我们在前面列举的那些大楼每平方米造价高达数万元。

这里面有一个原因是，综合的高档大楼一般有很大的空间，地板面积相对小很多，这样平均到以地板面积为计数单位的建筑面积上，造价就非常高。垂直城市有住宅区，商业区和公共空间。住宅和商业区的空间利用率高，地板密度要高很多（也就是空间狭小），而我们前面统计地板面积的时候，是按照每层的总面积统计的，因此造价应该更靠近普通住宅或办公楼。如果按照普通办公楼的建筑成本计算，那么每平方米大约是 5000 元左右。

每平方米 5000 元的造价，已经比我们现在的摩天大楼造价低很多了，但是 5000 亿元建一座城市仍然是一个非常大的投资。如果认为一个人 100 平方米的空间够用的话，那么安置一个人的成本就是 50 万元。居住，休闲，办公用空间等加在一起达到每个人 200 平米，应当相当宽裕了，这时候安置

一个人的成本是 100 万元。比照现在一线城市如北京，上海等地的房价，这不是一个很大的数字。因为垂直城市对地理位置不敏感，城市自身环境独立。开始就可以把城市建在比较偏僻的地方，以避免困扰现在城市建设的拆迁问题。如果结合未来的小区改造，则可以平稳地实现城市三维化。

各种地标性建筑造价高昂，一个重要原因就是它们的“地标”属性。通常它们代表最高端的追求。用最新的技术，最好的材料，最奢华的装饰，处在最繁华的地段，设计建造周期也很长，这些都会使造价大幅攀升。垂直城市主要强调功能，环保，实用，使用大众化的材料，可以大幅降低成本。

垂直城市从小到大，建设越来越多之后，各种技术逐渐成熟，生产效率提高，常用材料、设备生产及工程施工“白菜化”，成本会进一步降低。这是产业发展的自然过程。

虽然与传统城市相比，垂直城市看起来需要更多的材料，但是考虑垂直城市整体运作效率高，很多传统城市必须的基础设施，如公路系统、下水道系统等，在垂直城市里面不需要建设了，因此会节约大量的建筑材料。建设同样数量使用空间的传统城市和垂直城市相比，垂直城市表面积小，没有很多外立面，内部可以用轻材料隔断，不需要考虑保暖承重以及纵向建筑刚度，也会节约大量材料。

建筑材料使用减少了，城市的重量也会下降，这样有助于城市的结构安全，并进一步节约材料。

## 投资模式

垂直城市最终的建设目的，必然是完全替代原来的城市，但是一次投入非常大，要全面展开建设很难，只能渐进实现。

即使规模比较小的三维小区或者小城镇，也需要总额很大的投资。目前房地产开发商的物业（楼盘）开发规模，一般能达到几十亿到上百亿的资金量。前面提到的 5 万人三维小区需要 250 亿到 500 亿的投资规模，超过了一般物业投资能力。但是项目可不可以投资，不是看有没有那么多钱，而是看投资有没有收益，能不能挣钱。我们可以计算一下，这一假想项目的投资前景。

保守一些，按照现有人均占有综合空间的数字，每人 100 平方米，也就是上面 250 亿的方案。这座楼有 500 万平方米的高净空建筑面积。假定其中住宅、公共空间、商业及办公用途各占三分之一，那么大约各有 170 万平方米的住宅和商业办公空间，如果按照每平方米 2 万的住房价格计算，该三维小区的住宅物业就可以卖到 340 亿元，商业办公应该也有差不多的收益，所以整个项目按照市场价收益是非常高的。即使考虑财务费用、施工周期等因素，项目仍然收益可观。

单纯从财务上看,该项目收益非常高的一个原因,是土地相对成本很低。按照现在的建筑规范,普通多层住宅小区的容积率只能略大于 1,也就是说一平方米的土地只能盖 1 平方米的房子,而目前一线城市的土地价格很高,每平米要数万元,这样房价就非常高了。这一假想三维小区的容积率,简单计算是 25,相当于每平米地价只有 1000 元左右,只有普通多层住宅小区的几十分之一。其实这正是垂直城市的主要优点之一,土地利用效率大大提高了。现在一线城市的物业开发,土地成本占绝对大头。

我们现在能看到的,类似垂直城市雏形的项目,由于生活条件优越,不受季节影响,都属于高档物业。高档物业的建筑安装和装修的成本会提高不少。由于三维小区项目投资巨大,开发商有理由,也有动力,把项目包装为高档项目,这样会提高建筑的成本,但不会特别大。该三维小区的所有成本可以控制在 400 亿元人民币以内。

那么,一百多万平方米的住宅和商业办公用房,是一个很大的供应量,市场能不能容纳呢?如果能够以比较便宜的价格(一线城市 2 万每平方米左右),买到一套不需要空调,不需要取暖,孩子上学,老人看病,锻炼身体日常购物和休闲不用出门,没有空气污染,空气质量总是优,没有风没有雨,没有蚊子苍蝇,没有小偷,安全有保障的房子,消费者愿意不愿意呢?只要技术和管理过硬,这类物业一定会有强大的竞争力。不仅如此,三维小区还能对传统物业产生强大的压力,最终促进传统城市向垂直城市转变。

上面的计算有些粗略,考虑影响房价最大的因素是土地价格,而三维小区将土地价格降到了几乎可以忽略不计的程度,建筑安装、内部装修、各种城市基础设施等,平均到每平方米也不会太高。如果 5000 元每平方米是一个合理的价格,那么除掉三分之一的公共空间,住宅和商用办公用房的成本只有 7500 元每平米,加上合理的利润,垂直城市物业的市场价格可以在 1 万元上下,这在目前的中国,几乎所有地区都可以接受。

由于垂直城市的成本来源只是施工、各种原材料、各种设备、以及财务管理等,规模更大不会导致平均成本上升,而是应该略有下降。这些成本的地域差别也不太大,所以上面的估算,基本上可以适用于各种规模,和所有地方的垂直城市,误差不会很大。

## 垂直城市与房地产

从形式上看,垂直城市也就是盖一座大楼,是一项大的综合地产投资项目。因此,垂直城市与房地产业有密切的关系,或者说,就是未来房地产发展的方向,下一代的房地产发展的模式。这一点很容易理解,随着社会的发展,每个产业都在向大型化,综合化发展。作为城市发展的最直观代表,房地产也必然向这个方向发展。

中国今天的房地产业发展有很大的问题，主要体现为房产价格过高。这其中的原因比较复杂，有政府的原因，货币政策的原因，经济发展的原因，投机的原因，等等，并且也有一定合理性，但产生的后果很严重。具体包括：

- 1、过高的房价严重影响工薪阶层民众的生活。住房是生活的最基本需求。居民购房压力太大，钱都用来买房了，没钱消费，生活质量受到很大影响。年轻人为了房子推迟婚育，还会引起一系列社会问题。
- 2、有钱人投机房产获利太大，一方面加剧社会不公，一方面伤害实体经济。买几套房子什么也不用干就能挣大钱，为什么要去辛苦工作？有钱投资实业都会有风险，为什么不去投机房产？
- 8、恶性循环。房地产商建了房子不卖，捂着就能多挣钱，房子的供应量就会减少，更加推高房价。工薪阶层没钱消费，会进一步伤害实体产业，伤害经济。
- 9、房地产泡沫是巨大的经济隐患，泡沫一旦破裂，后果非常严重，世界范围现成的例子很多。
- 10、房地产业还是很多腐败行为的源头。挣钱不是靠提高产品和服务的质量，而是拉关系批地。因此房产行业没有动力提高产品和服务的质量。
- 11、对新技术没有兴趣，一切只为节省短期成本，全国上下盖同样的低技术楼。盖楼没有前瞻性。在外部推动下，才会应用已经成熟的技术。结果是楼用了不到十年，就处处落后，二三十年就推倒重建，造成极大浪费。
- 12、设计能力低下，不了解建筑业发展的新技术，新概念。目前国内几乎所有的撑门面工程，标志性建筑都是国外设计的。
- 13、施工队伍素质低（因为工资低）。施工层层转包，本来应该用于施工建设的钱都吃喝贪污掉。
- 14、产业整体有很大的惰性。目光短浅，只想挣钱。

房地产行业发展的的问题，不合理的不动产政策，加上人们的短浅目光，造成大量不合理的社会现象。这些现象很普遍，以至于很多人习以为常，以“存在即是合理”来解释。不知道所有这些现象都是愚蠢的社会机制形成的。只有一个愚蠢的社会，才会产生那么多愚蠢的社会现象：

1. 为了房产假结婚，假离婚。有人乘机假戏真做。
2. 一个人多个户口。
3. 有钱就买房，经济发达的地方每户人家可以有七八套房，住不了，租不出去，没人维护，等在那里烂掉。
4. 地段最好，最高端，最值钱的房子大量闲置，没人住。
5. 一两户钉子户能让几十亿的工程拖上三五年。增加的财务成本超过

拆迁补偿几十倍，但是有的开发商却乐意拖着，因为反正房价会涨得更多。

6. 很多人拥有多套房，出于各种各样的原因，不愿意出租。住房空置和经常照料一套不住的房子都是愚蠢的。
7. 某个地区快要拆迁了，马上平地盖起来许多高大威猛无法使用的“被拆楼”，以谋求更多拆迁款。这种做法，无论动机怎么合理，操作怎么可行(贿赂)，对整个社会都是一种极端愚蠢的空耗行为。
8. 楼没盖好就交全款，到时候拿不到房。
9. 开发商拿了地囤着，不盖房，等着地价涨，房价涨。
10. 拿了很多套好房子的人，害怕别人知道自己有多少房。以至于很多地方出台规定，禁止“以人查房”。
11. 七八十年代盖的旧楼房，又丑又破，住着不舒服，使用年限快到了，应该马上拆掉，可是房价比新盖的楼还要高好几倍。因为中心城区这些破楼拆迁太贵，就无法拆迁，在中心城区留下大片破楼。这些破楼里住的一般都不是房主，因为居住条件太差了，楼里又黑又臭，房子小，停不了车，房主宁可高价把这些房子租出去。这些房子成为新的都市贫民窟。

房产对于绝大多数中国人来说，是最大的财产。房产分配和占有中的不公，腐败，和现实的无奈扭曲了民众的价值观，影响了他们的判断力，剥夺了他们的羞耻感，让社会走向拜金，走向低俗。

解决房产分配的问题，让住房回归居住功能，让社会恢复公平，有很多现成可行的办法。但是这一领域的腐败，既得利益集团对房地产业、对经济的绑架，他们的短视，和他们对政策的影响力，有可能将大家都拖入深渊。

有兴趣的读者自己可以查阅以下关键词：德国、美国、新加坡的住房政策，房产税。

垂直城市的出现，能够在技术上改变这一趋势。因为垂直城市可以极大地增加住房供应，极有效地降低土地成本（缩小权力寻租腐败空间），极大地节能，极大地降低物业的特殊性和唯一性（与地理位置无关），提高每个人生活的舒适程度。

垂直城市的建设需要综合的技术能力，设计能力，施工能力，统筹管理能力。城市的每一部分技术含量都很高，但是都是现在已经存在的技术。垂直城市的开发，促进更多的人掌握这些技术，促使社会向更好的未来发展。而不是像现在那样，给工人低工资，盖落后的楼，浪费大量资源，盖好后还要浪费大量能源，人们的生活也不方便，但是能给开发商和腐败官员带来很多的钱和房产。

现在大批量盖的所谓“高档社区”，并没有什么技术含量，也没有特色，

没有品味。所有的楼房都一样落后，过了四五十年都一样要拆掉。它们唯一可取之处在于，它们被拆的时候不会有人可惜，不会遭到反对。不像欧洲城市中心那些旧房子，基本都是文物，虽然过了几百年了，住起来也不方便，但是人们还是舍不得拆。实际上这对城市的现代化，生活的改善，也有很大的负面影响。

## 垂直城市的设计原则

垂直城市和现在的各种大型建筑有很大的差别，如细高型摩天大楼，大型商业中心，大型公共建筑如体育场、机场，等。它是作为独立的城市单元设计的，大约相当于一个传统城市的卫星城。

从这个角度来说，一个卫星城需要哪些设施，垂直城市中就应该有哪些设施。卫星城怎么规划设计，垂直城市也可以按大致的原则规划设计。卫星城需要多个居住小区，商业中心，文体设施，医院，公园等，垂直城市也必须包含这些部分。

差别在于垂直城市是立体布置的。简单类比，可以将现有的卫星城全部限高 20 米，然后垂直摞起来。所有的基础设施在单独一层服务层中布设。扣除机动车部分，减小街道宽度，添加空中走廊，减少上下楼，就基本妥当。卫星城居住小区的建设是分批分期进行的，垂直城市也可以按照一定节奏往上盖。

这种模块化的逐层上盖的熟地模式，最大的优势是比较容易执行。一次规划建设一个 100 万平方米大小的小区也不算一个很大的项目，现在很多开发商都有这一规模地产的开发经验。需要调整的只是道路设计，空中连接规划。由于排除了机动车及其道路交通系统，这一空间的利用率大幅提高，人口规模是 5 万。比目前一线城市主要城区人口密度高一倍。但是由于空间利用效率的提高，每个人平均拥有的空间体积是 400 立方米，超过现在大约 200 立方米一倍。所以应该感觉更宽裕，更从容。

除了模块式外，第二个原则是轻量化。

我们前面说过，由于混凝土的缺陷，垂直城市应该用钢结构。普通的建筑用钢，强度是普通混凝土的 10 到 15 倍，取一个中值 12 倍，而密度是混凝土的 3 倍。因此，如果完全用钢结构代替钢筋混凝土结构，结构可以减重四分之三。对于大型建筑，结构重量是大楼总重量的三分之二以上。取三分之二，建筑总重量可以减轻一半。这样，钢材用量可以减少一半。减少的钢材量当然又减轻了建筑总重，因此还可以继续减少钢材用量。

其实混凝土还是要用的，比如城市基坑和桩础。不过这些部分不需要结构来承重，不影响结构重量。一般混凝土的寿命在 100 年以下。但是如果负荷相对稳定，不受环境侵蚀，并且注意混凝土的成分，混凝土的寿命也可以

很长。比如胡佛大坝的寿命有人评估可以达到数千年。基坑和桩础的使用条件与胡佛大坝类似，几百年的使用寿命没有问题。

轻量化要求城市内所有结构和设施都尽量轻量化。一般来说，隔断家具等的问题不大，因为它们不需要多大的受力。除了柱、梁等关键结构外，地板也需要设计很大的承重。

影响地板承重能力的因素是其跨度和厚度。由于各种隔断，包括地板，中间还要布线（电力、网络、上下水等），考虑所有隔断都设计为双层空心结构，大尺度强度由框架提供。可拆卸、双层空心隔断的地板和墙的形式，可以参考现在的防静电地板、吊顶、肋条中空双层墙等。防静电地板每块都很结实，但是需要框架支起来。垂直城市的地板都设计为轻钢框架，上面铺设强度高的硬地板，下面是下一层的吊顶，可以隔音防水，都直接扣在框架上。

隔断或墙采用类似结构，但因为不需要提供大的支撑强度，厚度可以小一些，两边扣上的墙面强度可以低一些。

这种楼板和隔断都可以拆卸，可以重新布置，中间可以过电线、网线、水管等。因此，每个大层空间，所有建筑都是可拆卸可重构的。

这就是第三个原则，大层空间内，所有的建筑可拆卸，可回收，可重构。轻量化和钢结构是实现可重构的必要条件。这两条也大大减少了工作量，并且让施工环境很环保很友好。标准化的设计和施工，为建筑的自动组装即拆卸，机器人施工，创造了条件。每个大层成了一个巨大的拼装玩具乐园。

出于舒适性和风格要求的装修，可以在结构拼装后完成。也应该大量使用可回收材料。由于垂直城市内环境温和，没有风沙雨露阳光的破坏。日常用品不容易老化，使用时间长，便于回收利用。这样，拆卸时，风格装修材料也可以回收再用。

钢筋混凝土结构的房屋，装修有很多麻烦。打墙、铺设地暖地砖，对于装修这种细致工作，都是大工程。墙内走线必须在盖楼的时候完成，否则对结构有损伤。但垂直城市城市的轻量可重构房屋没有这些问题。走线可以随时调整，房间布局也很容易调整。不需要专业人员，普通人就可以完成。

第四个原则是城市的可扩展性。

向上扩展已经体现在第一条原则中了。原则上，单独一座楼横向扩展也不是很困难，只要在开始规划的时候留下余地。但出于出行距离的限制，横向扩展不会太大。一种情况是，在开始的时候，如果人口规模有限，横向采取较小的设计。如果以后人口发展超过了预期，可以横向扩展到 1 公里左右的上限。一般情况下，横向 1 公里，纵向 400 米应该作为垂直城市的设计上限。

如果高度是一个问题，比如在风大的区域，那么也可以建低一些，或者利用地势，依山而建。或者利用凹陷结构，将较多的生活空间建在地面以下，或者峡谷之中。

## 投资的风险

垂直城市技术复杂，投资巨大。大规模的建设，对经济和资源都可能造成巨大的压力，那么它是不是有很大的风险呢？

首先，作为投资，追求的是收益。上面我们计算过一座小型垂直城市的投资收益情况。在完全可以接受的物业价格下，它是盈利的。对整个社会来说，它大幅提高了土地利用效率，降低了地价，同样也降低了房价。在大幅降低房价的基础上，仍然可以实现可观的盈利。其实垂直城市经济性还要更好，因为它的使用寿命长，至少是现有建筑的 4 到 5 倍，简单的计算，可以认为它的经济价值是现有物业价值的 4 到 5 倍。也就是同样的投资，收益期可以延长 4 到 5 倍。

其次，垂直城市建设是基础建设。基础建设投资更多以社会效益来衡量。比如公共交通系统，它是社会运作不可缺少的，它的改善能够为社会其它部分高效运转创造条件，但是它本身可能是不盈利的。垂直城市改善了生活条件，节省了大家的时间和精力，提升了生活品质，节约了能源，降低了社会的运行成本，是社会效益非常高的基础建设。

第三，就算作为房地产开发项目，建筑也需要升级换代，现在的高端商业中心、酒店、公共设施，已经在向垂直城市的方向发展。生活小区，至少是高端的生活小区，向垂直城市发展，是建筑和城市升级换代的自然需求和发展方向。

第四，还有一点本质的原因。人类一直在发展，在拓展自己的生存空间，甚至不惜发动战争以激烈的方式争夺土地。垂直城市创造了生存空间。由于人是陆地动物，日常生活需要的空间，不过是从脚底到头顶上空几尺的范围。所以无论是领土还是房间的大小，都是用面积来计算的。垂直城市能够将一平方公里的使用面积变成一百平方公里，换句话说，可以将领土扩展一百倍。当然，这只是发生在局部，但是局部生存空间大幅增加仍然非常重要，因为这些地方已经没有足够的生存空间了。

垂直城市的建设规模宏大，会给宏观经济或者自然资源带来很大压力吗？资源方面，我们会在下一章详细讨论。但基本的事实是，垂直城市平均到每个人的建筑面积，只是略大于现有传统城市所有建筑加公共设施（包括城市公园和绿地）平均到每个人的面积，消耗的资源不会有很大的差别，垂直城市对宏观经济或自然资源的压力不会比现在更大。实际上，垂直城市节省了大量道路建设、机动车方面的投资及资源消耗，不需要取暖，制冷量少（由于表面积与体积的比例小），使用寿命长，在建设的时候的确需要消耗一些资源（不大于传统城市建设），但是长期来看，能源及其它资源的节约带来的效益非常大。

## 发展的方向

中国改革开放以来，很长时间自己的技术创新很少，一直在学习、引进技术。学美国，学日本，学新加坡，学韩国，……。在集体的意志和勤奋努力之下，我们取得了很大的成就。但发展到今天，我们的学习榜样先后出现了问题。几十年高速发展之后，经济也好，社会也好，向什么方向发展都成了一个问題。

社会发展方向，更多表现在宏观经济的发展方向。英国因为工业革命、全球拓荒而成为日不落帝国。美国开发中西部，大修铁路，大修公路，大修飞机场，鼓励发明，鼓励思辨，大力发展信息产业，执世界牛耳上百年。今天，中国的工业产值，国际贸易，能源生产与消费都已经超过了美国，国民生产总值的超过也指日可待，可是我们应该向什么方向发展呢？

中国还有一半的农民，它们的现代化是必须的。农民进城后农业怎么办？城市已经非常拥堵了，各种负面效应越来越严重，还能够按照既有模式发展吗？发展方向的错误带来的后果是严重的。同样的发展模式，过去是对的，不等于以后还对。简单外延式发展，造成危机，给社会带来严重后果的例子很多。西方国家有一次又一次的经济危机。中国的大炼钢铁，毁林垦荒让自己付出承重代价。现在的中国的劣质房产制造业，跟毁林垦荒有很大的相似性。毁林破坏了生态，庄稼又长不好。现代的房产制造业占用了城市里宝贵的土地，造出来的房子，以及这些房子堆出来的城市，什么都不方便，浪费大量资源。

垂直城市是现代城市的升级，是未来的城市模式。是不是未来城市的发展模式，这里有一些基本的判据，也是我们在前面提到的垂直城市的优势，包括：

1. 低能耗。能源是现代社会最紧缺的资源之一。垂直城市在运行过程中，同样人口的能源消耗，只有现代传统城市的一半，甚至更低。
2. 交通便捷，聚集度高。城市的社会资源聚集特征是城市的最大优势。垂直城市能够更密集地聚集社会资源。
3. 可持续能力。垂直城市使用寿命长，能耗低，意味着持续能力强。
4. 生存能力。能抵抗恶劣环境和自然灾害，可以建在本不适合人类生存的地方，比如高原、戈壁、南极、甚至海洋之中。
5. 智慧化。一座大楼的智慧化，信息化，比一座暴露和杂乱的传统城市容易得多，有大量现成的技术。
6. 基础设施完善，容易更新和维护。包括交通，给排水，电力，垃圾处理等。
7. 独立，优化的人类生活环境。既不受外界环境影响，也不危害自然环境。

直观地看，一个家庭的能源支出主要包括汽油，取暖，空调，及其它家用电器、煤气。对于一个普通家庭，家用电器用电，照明，煤气，一个月200块钱就够了。但是汽油要每个月500以上，取暖费折合到12个月每个月也要200多元，夏季空调各家差别较大，但是每台家用空调机每小时差不多要0.5元，一台空调一个月开三分之一的时间，也需要120元/月，可以按平均到每个月每户100元算。那么垂直城市中，一个普通家庭百分之八十的能源消费都可以节省下来。但是城市运行的公共能源支出要增加，包括公共照明，电梯扶梯，城市空气循环及温度控制系统等。

这些优势是具体的，物理的，放在人类乃至生命发展几百万年、几亿年的尺度内，都是发展（演化）的一贯方向。

无论是世界，还是中国，资源紧缺，能源紧张，土地稀缺，都是现代化过程中面临的普遍问题。垂直城市能够大大缓解这些问题。垂直城市需要的是什么呢？比现在的建筑和城市更好的技术，内涵更丰富规模更大的集成。这不正是人类社会应该的发展方向吗？

## 第八章 自然资源

建设垂直城市需要钱，需要强大的设计能力和工业能力，需要消耗大量的材料和能源。这些都有保障吗？会不会事与愿违，导致更多的资源消耗，让地球无法承受？

### 自然资源需求

工业化社会对自然资源的需求非常大，包括土地、水、矿物、能源等，以至于出现了人类历史上从来没有的自然资源短缺现象。

垂直城市是工业化、信息化的继续，同样需要大量自然资源。虽然我们说过，垂直城市并不比传统城市消耗更多的资源，但是还是会有一些原因，将导致资源消耗增加。这些原因包括：第一，现在的城市化程度还不是很高，以后会更高。第二，在垂直城市的建设过程中，垂直城市的建设消耗是增量，建设量增加会导致资源需求量增加。所以，不是垂直城市导致资源消耗增加，而是垂直城市时代，自然资源消耗量要比现在高。

垂直城市建设过程中，建筑材料的消耗非常大，主要包括钢材、水泥、玻璃等。但是也有很多资源会节约下来。比如空调机要消耗大量的钢材和铜，传统城市中，几乎每个房间都要配备空调，导致铜的消耗量很大。垂直城市中，只有集中的空气处理和温度控制系统，总的铜消耗量会大大下降。

铜的另外一个消耗大户是电力导线及设备。垂直城市密集程度高，电力传送距离短，导线总长度下降，也不需要现在那么多的变压器，这些都会降低铜的消耗。

垂直城市发展需要的自然资源包括，建筑材料（钢材，水泥，塑料，玻璃，等），黑色金属（铁，铬，锰，钢材的主要成分），有色金属材料（铜，铝，锂，镍，铅，锌，锡，钴，等），半导体材料（用于无所不在的芯片和半导体照明），能源等。

要分析整个社会需要的所有自然资源是一个大课题，不是这本小书的目的。这里只是分析一下最重要的资源，最大宗的需求。一般来说，总需求量比较小的材料，如半导体材料和大部分有色金属，供应量不是问题。它们的总需求量一般只有大宗材料如钢材，水泥的几十分之一到几千分之一。大宗材料需求量很大，它们的开采和提炼都会对环境产生很大的影响，能源的消

耗也很大。

我们分析一下主要材料在垂直城市时代的需求情况。

## 钢材

垂直城市如果以钢结构为主，甚至楼板也采用钢结构做肋条，那么将增加对钢材的需求。由于垂直城市整体有很大的高度，低层需要使用较多的承重结构钢。普通钢结构高层建筑用钢量一般每平方米 60 到 80 公斤不等，垂直城市要达到或者略超过 100 公斤。如果我们以 100 公斤每平方米作为估算的基础，那么一座 5 万人的小城市或者社区需要 50 万吨钢，平均每个人 10 吨钢材。中国 2017 年的粗钢产量是 8.3 亿吨，14 亿人需要 140 亿吨钢，相当于 17 年的产量。考虑每年钢产量的增加幅度超过人口增长幅度，建筑用钢占有所有钢材的比例，垂直城市的建设时间跨度（30 年到 50 年）等因素，钢材供应不应该带来很大压力。世界范围来看，情况要糟一些，因为中国的钢产量约为全世界的一半，但是人口只有世界人口的五分之一。

另外我们可以看一下铁矿的供应能力。按照美国地理调查局的统计（2011），世界已探明铁矿储量可以产铁 870 亿吨。这个数据相当保守，因为还有很多没有探明的储量没有算进去。中国截止到 2005 年探明铁矿 600 多亿吨，换算成铁 200 多亿吨。中国钢铁经济杂志统计的世界铁矿储量为 13800 亿吨，含铁量超过 4000 亿吨。

铁是地球上是最丰富的化学元素。在地壳上也是最多的几种元素之一，占地壳总重量的 5.6%，如果将陆地上 2000 米深度以内的铁全部收集起来，重量可达 5 万亿吨，只利用万分之一也有 5 万亿吨。

世界目前每年开采 30 亿吨以上的铁矿，但是随着新矿源的不断出现，可采储量每年还在增加。

铁矿虽然是一种不可再生资源，但是钢材几乎可以百分之百地循环利用。开采出来的铁矿不会浪费。所以作为建设垂直城市的主要材料，钢材不会短缺。对于中国来说，即使大规模建设垂直城市，对钢材的需求量也是略微超过现在的产量水平。要知道中国钢铁产业产能过剩已经很多年了。

## 水泥

水泥主要用来制作混凝土。垂直城市将以钢结构为主。为了减轻城市重量，我们希望尽量少用混凝土。与传统城市相比，垂直城市总的建筑面积只是略有增加，大幅削减混凝土的用量将减少水泥的需求。水泥在基坑施工，地下层施工，桩础，垂直城市外的设施施工方面仍然有很大的需求，但平均

到建设面积的水泥用量将会下降。总的水泥需求会有较大的下降。

水泥是用量最大的普通建筑材料。中国目前一年生产水泥 23 亿吨，约占全世界的 60%。水泥生产使用的原料是普通的岩石和粘土，来源非常广泛。水泥生产需要消耗大量的煤炭，同时排出大量二氧化碳，因此水泥需求的下降有助于降低能耗和保护环境。

## 塑料

塑料是现代社会普遍使用的化工产品，使用量巨大。2016 年全球塑料产量 3.35 亿吨左右，其中中国 8400 万吨。从体积来说，塑料用量已经超过了钢材。塑料是高分子化合物，原料主要是石油。全世界每年有 5% 左右的石油用来生产塑料。

垂直城市对塑料没有特别的要求，根据供应能力，很多建筑构件，如门窗，地板等可以选用塑料制品。因为在垂直城市中，社会比较安定，不需要高强度的防盗门窗。塑料制品怕高温怕阳光，但垂直城市中，塑料的使用环境稳定温和，不容易老化，可以有很长的寿命。作为建筑构件，塑料可以与一些其它材料互换，比如合成纤维板。

垂直城市有大量管道，塑料管道在温和的使用环境下，可以大规模替代钢材，重量轻且不容易腐蚀。

塑料也可以回收，但是再制成品的品质会下降。

总的来说，塑料制品使用寿命的延长可以有效降低塑料需求。但随着石油价格的上扬，塑料生产的成本会上升，但这不是垂直城市引起的。

## 玻璃

中国 2017 年平板玻璃的产量约 4000 万吨，约占全世界的一半。70% 平板玻璃用于建筑。主要作为建筑的外部玻璃幕墙和窗户。

垂直城市中，外墙面积占可用建筑面积的比例非常低，因此可以节省大量玻璃。城市内部除了少数地方外，普通的房间不需要窗户，因此玻璃的使用量可以大幅下降。

这是垂直城市的主要特征之一，直接接触外界的外墙面少。传统城市的建筑需要大量窗户通风与采光。为了保证每间房都可以自然采光，楼是细高或者是窄长的。垂直城市里面，只有像橱窗，商业用房的墙会采用玻璃。住宅甚至一扇窗都不需要。

相对其它大宗建筑材料，玻璃的产量并不算高。玻璃的主要成分是二氧化硅，氧化钙等，是地球上最常见，最不值钱的矿物。

玻璃的生产也要消耗不少能源,生产一吨玻璃需要大约相当于自身重量三分之一的煤。

从提高照明效率等方面考虑,垂直城市的公共空间,商业中心等,可能大量采用玻璃分隔空间,从而提高建筑玻璃使用量。

垂直城市建设过程中,玻璃的用量并不需要超过现在的用量,供应不会有问题。

## 地板, 隔断材料

垂直城市采用钢结构,体积巨大,因此希望自重越小越好。使用各种轻质的建筑材料不仅可以节约材料,降低成本,对环境也更友好,还可以进一步减轻支撑结构的材料用量。框架采用钢结构之后,建筑的主要材料就是地板和隔断。地板需要承重能力,可以选用钢或者轻钢肋条,上铺复合地板,阻燃胶合板,阻燃地毯等。这种结构不仅远比混凝土结构轻,并且可以拆卸,便于城市空间重新布置,造价也不是很高。

隔断的强度要求低一些,可以采用石膏板,阻燃纤维板,加气混凝土等轻质材料。这些材料原料来源广泛,密度小,隔音效果好(垂直城市内不需要考虑隔热保温)。

## 铝

铝是人类使用量仅次于铁的第二大金属。铝的密度小,延展性好,是电和热的良导体。很多铝合金强度很高,在工业和民用方面都有广泛的用途。铝在地壳中的丰度很高,是仅次于氧和硅的第三大元素,以及第一大金属元素。但是铝的生产成本较高。因为铝的化学性质比较活泼,不能采用化学冶金方法,只能电解,能耗很高。中国在 2017 年产铝 3260 万吨,超过全世界的一半,电解铝生产耗电大约占中国总用电量的 7%。

铝在家用空调中作为换热器。垂直城市中不再需要家用空调,虽然仍然需要集中空气温度管理,但是城市中的用铝量可以下降。建筑业中常用的铝合金窗在垂直城市中用量会大幅下降。汽车行业也是铝的主要消费者。所以在垂直城市代替传统城市的过程中,铝的消耗量可能下降。

铝还有一个重要用途是制作饮料罐。垂直城市中,垃圾回收和处理比传统城市容易。另外人们绝大部分时间呆在室内,可以使用公用饮水设备及水杯,没有太大的必要性使用一次性封装饮料,因此饮料封装行业将有一定的下降趋势。饮料罐的回收率很高。

## 铜

铜是人类大规模使用的第一种金属。青铜时代是人类第一次迈入历史，迈入复杂文明的时代。铜有良好的物理化学性质，使用面极广。按照使用量来看，主要用户是电力电气行业。建筑用铜中，少量用作水管，大量用在电线电缆上。垂直城市将使用大量的电线电缆，使用面要比传统城市广。但是考虑到垂直城市的连接距离短，变压设备也会少一些，所以铜的总用量也许会下降。

已探明的世界铜矿储量约 6 亿吨，其中智利占三分之一。2017 年全世界产精炼铜 2300 万吨，其中中国 844 万吨，但是中国的铜消费量有 1100 万吨。

铜在地壳中的含量并不丰富，只有万分之 0.6，比很多稀土元素都少。按照现在的开采量，现有铜矿储量只够开采 30 年。

铜的性质稳定，通常以纯铜的形式使用，回收利用率非常高。

## 其它元素

硫有点特别，我们从自然界大量开采，但并不是为了利用硫元素本身。比如黄铁矿，白铁矿，石膏矿的大规模开采等。硫的确也有很重要的用途，比如作为化工原料的硫酸，以及农业用的化肥。

人类从自然界提取量超过千万吨的化学元素还有：

- 钠（和氯一起作为盐被开采，主要用作化工原料）
- 锰（和铬一起作为钢材里的重要成分）
- 锌（同样主要出现在冶金行业，作为钢材的保护层）
- 氮（氮在地壳中的含量很低，但是它是大气中含量最丰富的元素，占近 80%，主要以化肥和化工产品的形式利用）。

超过百万吨的元素有：

- 硅，用于冶金，微电子，光伏行业。
- 钛，用于高强度轻合金，涂料。
- 锆，用于核能，硬质合金。
- 镍，用于制造不锈钢，钱币，电池。
- 铅，用于蓄电池，配重等。
- 硼，用于冶金，化工，核能等。

其它重要元素还有镁，钾，锶，钒，钴，铌，锂，砷，钨，钼，溴，碘，铀，镱，镉，银等。

这些元素由于总的需求量小，供应应该不会有什么压力。除非某项大规

模应用的出现，需要用到供应量较少的一些元素。比如蓄能电池的大规模应用，将对铅、锂等元素的供应带来很大压力。

## 短缺的相对性

除了少数矿产资源之外，几乎所有元素的矿物储量，乍一看都不够。比如我们前面提到，铜矿储量只够开采三十年，铅矿储量只够二十年。其它的重要资源比如石油、天然气、铝土矿等，也有类似的特点。但是在全世界范围内，勘探的水平还很低，并且随着需求的增加，勘探技术、开采能力及冶金加工能力的提高，矿物的储量还会提升。

以铁矿为例。铁矿的品位可以达到 60%以上。品位 30%左右的算贫矿，但是仍然可以冶炼，只是需要洗矿选矿，成本有一定提高。那么 20%可以不可以呢？这种矿也算的话，总的储量可以提高很多。铁的百分比占到 30%才算铁矿，可是品位只有 0.1%的铀矿就算富矿了。

总的来说，地壳、海洋中各种矿物或者元素的总量很大，我们开采的元素占地壳中资源总量的比例还非常小。随着技术的进步，人类社会需要的大部分材料在相当长的一段时间内不会短缺。垂直城市建设需要的各种材料应当有保障。

但是的确也要注意，一般来说，地壳上人类可采范围内，丰度越低的元素，开采和提炼的成本越高，总供应量也越不容易上去。如果我们需要大规模应用某种技术，需要某种元素，在地球上的矿物不够，那么该技术的发展前景就会受到限制。比如蓄能技术是大规模开发可再生能源的关键，常用的高能量密度充电电池需要用到锂元素。如果要建立大规模的供电锂电池组，全世界可能需要几十亿吨锂，可是锂的产量 2017 年只有 23.54 万吨碳酸锂，折合锂不到 5 万吨，全球探明锂矿储量只有 3000 万吨左右。

另外，除了化石能源以外，大部分开采出来的化学元素可以重复使用，城市或者设备更新换代的时候，不需要从地球提取全新的矿物供应。

长期以来，我们认为地球的资源不够。化石能源的储量有限，各种矿物也会逐渐枯竭。所以，包括能源在内的各种自然资源的价格必然越来越高。但是世界上铁矿石，铜，铝，镍，铀等重要大宗商品的价格，长期低迷已经很长时间了。

尤其是到了 2014 年，随着全球经济发展放缓，包括原油在内的各种大宗商品的价格大幅下跌。原油价格与历史最高价相比，几乎跌去了一半，用来避险保值的黄金价格也跌去了三分之一，其它如天然气、铁矿石等价格都在大幅下跌。这是因为全球经济发展暂时放缓，而导致的短期的不正常趋势，还是有别的深层原因？

这里还有一个很重要的原因。就是资源开采，即供应能力的不断提高。

技术的发展，必然导致矿物的开采能力提高。不仅如此，勘探能力的提升，还导致矿产储量不断增加。以中国为例，虽然经过了几十年的大规模开采，但是几乎所有的矿产资源储量不降反升<sup>2</sup>。任何一种矿物，或者说化学元素，如果以丰度折算的话，在地壳及海洋中的总量是极其巨大的。除了化石能源，储量可能在百年的时间尺度上枯竭外，其它矿物或者化学元素的供应能力，与人类目前的工业开采能力相比，几乎是无限的。地表以下 2 公里之上的地壳质量约为 300 亿亿吨，仅黄金就有 120 亿吨。截止到 2014 年，人类总共开采了不到 17 万吨黄金，为什么要担心黄金不够呢？

## 地壳中的化学元素丰度

根据 CRC 化学与物理手册，地壳中的化学元素丰度如下（质量比）：

原子序数	元素名称	元素符号	丰度	产量（吨，2012 年）
8	氧	O	46.1%	
14	硅	Si	28.2%	760 万
13	铝	Al	8.23%	4500 万
26	铁	Fe	5.63%	14 亿
20	钙	Ca	4.15%	
11	钠	Na	2.36%	2.8 亿(盐)
12	镁	Mg	2.33%	75 万
19	钾	K	2.09%	3.4 万
22	钛	Ti	0.56%	650 万
1	氢	H	0.14%	
15	磷	P	0.105%	
25	锰	Mn	0.095%	1600 万
9	氟	F	0.06%	
56	钡	Ba	0.04%	
38	锶	Sr	0.037%	38 万
16	硫	S	0.035%	7 亿
6	碳	C	0.02%	
40	锆	Zr	0.017%	142 万

<sup>2</sup> 以石油为例。石油差不多是中国最短缺的自然资源之一，储采比长期只有 10 左右，也就是探秘石油储量只够 10 年开采的。但是经过多年开采，开采量逐年增加，储采比却基本不变，并且在产业规划中，要求到 2020 年，储采比达到 15 左右。

23	钒	V	0.012%	6.3 万
17	氯	Cl	0.015%	2.8 亿
24	铬	Cr	0.01%	2400 万
37	铷	Rb	90 ppm	
28	镍	Ni	84 ppm	210 万
30	锌	Zn	70 ppm	1300 万
58	铈	Ce	66.5 ppm	
29	铜	Cu	60 ppm	2000 万
60	钕	Nd	41.5 ppm	
57	镧	La	39 ppm	
39	钇	Y	33 ppm	8,900
27	钴	Co	25 ppm	11 万
21	钪	Sc	22 ppm	
3	锂	Li	20 ppm	3.7 万
41	铌	Nb	20 ppm	6.9 万
31	镓	Ga	19 ppm	
7	氮	N	19 ppm	13.7 亿
82	铅	Pb	14 ppm	520 万
5	硼	B	10 ppm	460 万
90	钍	Th	9.6 ppm	
59	镨	Pr	9.2 ppm	
62	钐	Sm	7.1 ppm	
64	钆	Gd	6.2 ppm	
66	镝	Dy	5.2 ppm	
68	铒	Er	3.5 ppm	
70	镱	Yb	3.2 ppm	
55	铯	Cs	3 ppm	
72	铪	Hf	3 ppm	
4	铍	Be	2.8 ppm	230
92	铀	U	2.7 ppm	6.6 万
35	溴	Br	2.4 ppm	58 万
50	锡	Sn	2.3 ppm	23 万
63	铕	Eu	2 ppm	
73	钽	Ta	2 ppm	765
33	砷	As	1.8 ppm	4.4 万
32	锗	Ge	1.5 ppm	128

67	铱	Ho	1.3 ppm	
74	钨	W	1.25ppm	7.3 万
42	钼	Mo	1.2 ppm	25 万
65	铽	Tb	1.2 ppm	
81	铊	Tl	0.85 ppm	10
69	铥	Tm	0.52 ppm	
71	镱 <sup>[7]</sup>	Lu	0.5 ppm	
53	碘	I	0.45 ppm	2.8 万
49	铟	In	0.25 ppm	670
51	锑	Sb	0.2 ppm	18 万
48	镉	Cd	0.15 ppm	2.3 万
80	汞	Hg	0.085 ppm	1600
47	银	Ag	0.075 ppm	2.4 万
34	硒	Se	0.05 ppm	2000
46	钯	Pd	0.015 ppm	200
83	铋	Bi	0.0085 ppm	7400
78	铂	Pt	0.005 ppm	179
79	金	Au	0.004 ppm	2700
76	锇	Os	0.0015 ppm	
44	钌	Ru	0.001 ppm	
52	碲	Te	0.001 ppm	
77	铱	Ir	0.001 ppm	
45	铑	Rh	0.001 ppm	
75	铼	Re	0.0007 ppm	52

ppm 是浓度单位，表示百万分之一。

最后一列的产量数据来自美国地理调查局（USGS）2012 年的报告，少量数据根据最新的统计调整。

需要说明的是，不同机构对地壳元素丰度的估算是不一样的，以上表格只能作为一个参考，但是不同机构的数据来源不会有很大的差别。

## 垂直城市的材料需求变化

由于垂直城市主要是钢结构，因此钢材的使用量会有较大的增加。

其它材料主要是地板和隔断。地板和隔断墙可以采用多种材料，包括钢材，木材，合成材料等。商业、办公区的很多隔断可以用玻璃。玻璃可以提供大的视觉深度，也可以提高照明效率。

由于城市的轻量化，钢材的使用量虽有增加，但是并不是不能接受的。我们前面估算中，在 30 年到 50 年的时间尺度内，每人 10 吨的钢材用量不会造成承重的负担。

水泥的用量应当有所降低，因为垂直城市中几乎不用水泥。但是城市外部的基础设施，道路桥梁，设施农业等，仍然会用到很多水泥。

经过阻燃处理的木材，合成材料等，由于可再生，供应量很大。垂直城市中，这些材料的使用寿命大大延长，因此也相当于可以回收利用。长期来看，由于石油供应量的下降，石化产品用量会下降。以石油、天然气为原料的各种石化产品，如塑料，纤维，等，需要找到以可再生资源为原料的替代产品。这不是很困难。

大量使用以可再生资源为原料的产品，如木材，生物制品，长期来看，有助于固碳，降低大气中二氧化碳含量。

因此，垂直城市建设过程中，除了钢材的使用量会有较大增长外，其它材料的使用量应该跟现在差不多，或者有所下降，或者来源于可再生资源。

## 能源

能源是社会发展的基础。人类社会的所有活动都需要能源。随着工业化程度的加深，人类对能源的需求越来越大，引起的问题也越来越多。能源已经成为一个全世界关注的中心问题之一。

虽然垂直城市建成之后，运行时的能源消耗，大幅度地低于现在的传统城市。但在垂直城市的建设过程中，需要大量建筑材料。这些建筑材料的生产需要消耗大量能源。钢材，铝，水泥的生产都是耗能大户，也是污染大户。能源工业本身，无论是石油和煤炭开采，运输，还是发电，同样也要消耗能源和产生污染。

能源供应是个很复杂的问题，我们将在下一章专门讨论。垂直城市导致工业体系和社会运行体系的变化，能源消耗如何变化，也是一个很大的课题，这里只能给出一些定性的看法。

首先，地球的能源供应量很大，仅仅是可再生能源总量，就超过人类目前利用所有初级能源的一万倍。地球上还有很多能源，但是还没有大规模开发，或者还有很大的开发潜力，比如太阳能，风能，核能等。的确，这些能源各有各的问题，但是传统的化石能源煤炭、石油、天然气也有很多问题。

其次，垂直城市节省了大量的交通、取暖、制冷用能源。主要的建筑材料生产除了钢材的生产，因为供应量增加会消耗更多的能源外，水泥，玻璃等大宗建筑材料的需求量可能会下降，城市的轻质化也可以节省大量运输能耗。钢结构施工可以缩短建设时间，减少噪音与扬尘，这些都有助于节能和环保。

第三，根据研究，我们在后面会详细说明，有可能建立一套完全依靠可再生能源的能源体系，长期维持人类社会运行。

第四，在 50 年或者更长的时间尺度上，安全核能特别是聚变核能有可能大规模投入应用，从而为人类社会提供几乎用之不竭的能源。

总的来说，垂直城市建设的能源消耗并不会大幅上升。随着越来越多垂直城市的建成，总体生活能源消耗会下降。但是，随着技术的发展，有可能出现新的工业或应用，造成总能源消耗量仍然不断上升。

## 基础工业能力

除了原材料，能源的供应必须保证外，垂直城市的建设，还依赖于人类社会的工业能力。也就是说，我们有没有能力生产出那么多的建筑材料，有没有能力设计一座布局合理的垂直城市，并且在合理的时间内把它建设成功。

这个问题似曾相识。在改革开放之初，如果有人说我们要盖现在那么多的房子，修现在那么多的高速公路，开现在那么多的汽车，任何一个严肃的人都会持怀疑态度。可是三十年的时间内，我们做到了，本来应该在 2050 年达到中等发达国家水平的目标，在 2010 年就实现了。而且我们现在不是基础建设不行，生产能力不够，而是大量生产能力闲置。煤炭开采达到 10 亿吨的时候，很多人忧心忡忡，可是现在已经超过 30 亿吨。大炼钢铁的时候，提出的目标是，一年钢铁产量翻一番，到 1958 年产量达到 1000 万吨，可是现在年产量已经超过 8 亿吨，占全球产量近半，比后面第二名到第二十名加起来都多。

目前，作为工业化最重要的指标之一，发电量中国已经是世界第一。其它遥居世界第一的基础工业产品产量还有煤炭，钢铁，电解铝，铜(消费量)，稀土，水泥，玻璃，化肥，棉纱，化纤，等等。许多工业产品产量占到全世界的一半或者以上，如微型计算机，手机，冰箱，彩电，空调，微波炉，等等。

中国的基础设施建设量，很多也是遥居世界第一。如建筑，中国一年建设 10 亿平方米建筑，占全世界一半以上。其它的像发电装机量，高速公路完工里程，高速铁路完工里程，城市地铁建设数量和每年投入使用的里程，等等。

但是房子，公路，地铁，大桥不可能永远建下去。建设到一定程度之后，投资收益率会下降，庞大基础工业体系就会陷入困境。至少从供应的角度考虑，中国目前主要的工业生产能力都是过剩的。国内市场不够，就去开拓国际市场。现在有大量的建筑公司在海外承包工程。

建设是改变人类社会形态，开拓新的生存空间，形成更大生产能力，和提高更多服务的必由之路。但是过度建设将极大浪费资源，恶化经济环境，

阻碍进一步发展。到 2015 年，中国经济进入“新常态”，增速下滑，但固定资产投资比例仍然很高。大量的住房、生产能力闲置，但还在大力重复建设。以现代社会最重要的基础工业之一——电力行业——为例：2015 年中国的用电量几乎没有增长（0.8%），但截至到 9 月底，装机容量增速高达 9.4%，在建规模高达 1.77 亿千瓦，约占装机规模的七分之一。因为新能源的高速发展，应该限制发展的火电在建规模也高达 7800 万千瓦。而中国的发电能力已经开始过剩，大量弃风、弃光、弃水。

我们生产了那么多东西，但是生活并不令人满意。我们整日在外奔波，家庭生活淡化，没有时间陪老人陪小孩。到处堵车，一上路就发怒。空气污染严重，每天看着灰霾的天空心里压抑，生理和心理的健康都受到威胁。

建筑公司在海外施工，对于大部分国内过去的工人来说，长期封闭在工地，不能回家，不能过家庭生活，不能尽父母的责任和子女的义务，最后只是拿回来几万块钱。家庭生活是生活质量最重要的部分，家庭责任也是社会责任重要的部分。家庭生活受到严重影响，是社会安定和生活质量不佳的重要原因。

过剩的工业能力是沉重的经济负担。垂直城市建设，需要大量基础工业生产能力，这些工业能力就成了宝贵的战略资源。

从改革开放以来，中国经济已经发生了持续三十多年的高增长。三十多年来，每年经济增长率近 10%。长期的高速增长有很多原因，主要包括：除了原来基础差，总量小；中国人整体勤奋，任劳任怨，人工成本低（原因也是基础差，过去的日子更难过）；没有强调环境保护，生产成本低；抵消费，高储蓄，国家有钱投资基础建设；处于跟进阶段，也就是所谓的“后发优势”，所有技术、规范、政策都可以找到借鉴；人口密集，劳动力丰富，容易产生全面的、成规模的产业群；国际市场开放，国内市场总量较大，产品有很大的市场；等等。

几十年的高增长也经过了多次转型。最初直接引进纺织，家电等生产线，生产日用消费品，解决国内的物资短缺问题，后来大量投资基础设施，建设公路，铁路，港口，矿山，到 90 年代借信息革命东风，社会逐步智能化，技术壁垒下降，主要消费品产业凭，借中国的低劳动力成本和环保成本优势发展壮大。再后来房地产、汽车等产业大发展，极大增加了社会财富总量。

但发展到今天，我们的技术和产业已经基本与国际同步，虽然城镇化，第三产业等还有较大的发展空间，但持续高增长越来越难。产能过剩、市场饱和、劳动力短缺、房地产泡沫等负面因素逐渐显现。中国需要新的发展方向。

现在看到最多的一种提法是，经济必须由出口型、投资型向内需型转变，需要扩大内部消费。消费可以从很大程度上拉动经济增长，但是消费不等于发展。消费的增加也是社会运行成本的增加。中国长期的低劳动力成本优势就是低消费优势。

按照现在的工业生产能力，人的基本生活要求很容易满足。绝大多数高消费是畸形的，对社会有害。无论是喝很贵的酒，抽很贵的烟，吃很贵的菜，戴很贵的手表，开很贵的车，住很大的房子，买昂贵的红木家具，还是文物字画玉器个人收藏。

烟酒对人体和社会都是有害的，人们不会因为烟酒很贵，就觉得它们是好东西，拿回家给自己的孩子喝或者吸。一种东西，不准自己的孩子碰，自己也不想用，在餐座上却作为尊重的表示请别人用过量享用，这是一种非常奇怪的现象，如果不是愚蠢的话。

中国的高端烟酒市场，几乎全部靠公务消费支撑。与烟酒相关的很多社会现象，都不可以用常识来理解。比如红酒，它只是一种佐餐饮料，跟啤酒没有什么差别，价钱也应该跟啤酒差不多或者略贵。世界上几乎所有其它地区都是这样。中国人并不习惯喝红酒，就像不习惯吃奶酪一样。这是由于中西方的饮食差异引起的。很少中国人能够欣赏红酒，但是同样的红酒在中国的价格极高，消费量还很大，其中不乏大量假酒。其中有一种有名的法国红酒，一年总产量只有 15 万瓶，出口到中国的只有 4、5 万瓶，但是中国一年这种牌子红酒的销量能达到 300 万瓶。该红酒在中国能买到 7、8 万元一瓶，但是成本只有 100 元左右。

任何一种白酒，无论如何“高端”，每瓶价值只有三四十元。

中国的文物市场，也是一个对社会负面效益大于正面效益的市场。所有的文物应该只有一个归宿地，就是博物馆，特别是那些“高价”的文物。文物市场的泡沫化，鼓励了盗墓、盗窃博物馆，作假，并成为新的行贿受贿和洗钱方式。历史文物是属于全社会的。个人持有文物大大降低了文物的价值，还容易造成文物的破坏和流失。

人们基本的生活需求，按照现在的生产能力很容易满足。一个家庭拥有过多的冰箱彩电、衣服鞋子，并不会增加生活的舒适度和幸福感。过度消费，畸形消费意味着低效地消耗大量资源。这种行为和社会绿色运行，可持续发展的理念也是不相容的。所以希望消费成为中国下一步发展的驱动力量，并不可行。

但是文化体育消费能够改善人们的生活质量，并且拉动经济增长。这方面还有很大的潜力可挖。

垂直城市可以提高所有人的生活水平，改善生活质量，节约资源，创造生存空间，提高社会运行效率，也可以充分利用和发展现有的工业生产能力，为经济发展的升级换代进一步发展提供动力，是中国乃至世界进一步发展的当然方向。

## 金融资源

经济发展，基础建设，特别是大型基础设施的建设，比如铁路、公路、大型水库、城市改造等，通常最大的一个问题是没有钱。

我们已经计算过，如果以每个人需要 100 到 200 平方米垂直城市空间，每平方米造价 5000 元计算，每个人就需要 50 到 100 万元的安置费用。全中国 14 亿人就需要 700 到 1400 万亿元。我们可以大致取 1000 万亿元作为估算依据。如果在 50 年内基本完成垂直城市化，那么每年需要 20 万亿元。2012 年中国的国民生产总值(GDP)是 52 万亿元，房地产投资约 7.2 万亿元。假定在各种因素的刺激下，中国剩下的五六十年内仍然能维持 7% 的增长，到 2020 年 GDP 接近 90 万亿元，2020 年到 2069 年的 GDP 之和为 36000 万亿元。1000 万亿元不算很大一个数字。需要注意的是 GDP 增长已经剔除了通货膨胀因素，所有的计算都是以 2012 年估算值为基础的。即使 GDP 增长率降到 5%，2020 年到 2069 年 50 年内的 GDP 总和仍然可以达到 16000 万亿元，垂直城市建设费用不到 GDP 总量的百分之十，大约只有 2012 年房地产投资占 GDP 的比例的一半。

垂直城市应该是逐步建设的，开始的投入少，然后逐年增加。假定 2020 年垂直城市投资 1 万亿元，之后每年增加 10%，50 年内总投资可以达到 1164 万亿元，正好和我们的前面的估算差不多。

钱，是一个综合的资源概念。意味着需要投入多少人力物力，去办一件事情。花钱，或者说投资，最重要的是必须有效益。对整个社会的效益越大，就越应该去花这个钱。钱能创造就业机会，创造更多的财富。

现在社会上有很多钱，2017 年底，中国几大银行里的存款就超过 157 万亿元，但是没有足够的投资渠道。垂直城市的建设可以吸纳大量投资，创造新的生活空间，大量节约资源，改善全体人民的生活条件，是优秀和体量巨大的投资项目，可以让社会跨越式发展。

垂直城市建设形式上与房地产很相似，只是需要建立一些技术规范，在大的规模上完善一批技术，修改部分建筑建设法规，培养一批垂直城市的设计和管理人员。

原则上来说，钱的数量是无限的，只要选对了好的发展方向，注意节奏和步伐，不引起资源过度的紧张，总有足够的钱，来做好一件事情。

钱可以由银行几乎凭空提供，如果投资收益好，贷款不但能收回还会有利息，也就是说实在的利息可以凭空产生。但如果投资失败，最后必须由银行承担损失，银行就亏掉了借出去的钱，或者成了烂账坏账，大量的烂账坏账就会引起金融危机。所以，投资有效益，会给社会带来财富。

许多新产业的出现最初都需要大量金融支持，比如汽车业，航空业，信息技术行业等，最后的结果是人类社会出现了更多的行业，吸纳了更多的专

业人员，社会更有序更有效。

一次重大技术革命，或者在需求驱动下的一系列连续的技术进步，可以使社会发生深刻的变化，对应的经济效益也很显著。比如持续进行的信息技术行业变革，从电子计算机出现，集成电路出现，数字通讯技术和网络技术投入应用，先后带动了计算机硬件行业，软件行业，网络与通讯行业，网络服务行业，网络媒体和应用行业等二级行业的出现和发展。信息技术的发展缩短了每个人的距离，人们可以接触和了解更多的东西，掌握更多的知识，提高了整个社会的运行效率。

垂直城市在物理上将人连接得更紧密，地理上缩短了每个人的距离，是下一次革命，同样能为世界带来巨大的变化。它能改善所有人的生活品质，节约大量土地，让环境得到最大保护，大大降低日常生活的能源、时间及物资耗费，提高整个社会的运行效率，和人类整体生存能力。

中国在这一次革命中处在最优的位置上，因为中国对能源节约，可持续发展，生存空间拓展的需求最迫切。也有足够的人力、物力、生产能力、建设能力、技术能力、调度和动员能力启动这一次革命。

垂直城市革命的特点是大规模，高投资，高效益。需要综合的技术和生产建设能力。我们在技术上虽然不是最好，但对于垂直城市建设来说基本够用了。中国已经建设了很多大型建筑，世界上前十大建筑中国占据四席，更是刚刚投入使用了世界上最大的单体建筑，建筑面积达到了176万平方米，距离我们上面提到三维小区的1000万平方米差距并不遥远。

# 第九章 能源

能源是一切活动的基本动力，是人类社会运行和发展最基本的物质保证。人类社会诞生以来，对能源的索取一直在稳步上升。能源供应是一个永恒的话题。

虽然垂直城市的运行本身可以节约大量能源，但是由于更多的人口进入城市生活，以及未来将出现的一些新的社会行为、生产活动，人类对能源的需求仍将上升。

垂直城市时代，能源供应的形势怎么样？有什么特点？怎样才能保证呢？

## 能源的基本性

能源是一切自然活动和社会活动的基础。自宇宙诞生以来，大到星系形成，恒星发光，小到细菌繁殖，原子核衰变，地壳板块运动，没有任何自然过程不是由能源驱动的。生命在地球上出现后，经过了数十亿年的演化，无数的生命种类在地球上产生并消失，但基本的趋势是，越是高级的、适应能力强的生命形式，对能量的需求越高，消耗的能量越多。人类社会也是一样。在人类诞生后的数百万年内，不仅人口数量不断增长，每个人消耗的能量也在不断增加，从个体采集，到集体狩猎，制造工具，蓄养动物，生火取暖烹煮……直到工业革命发生，每个人的衣食住行无不消耗大量额外能源。

越是先进的社会，越是文明的国家，每个人消耗的能源越多。以中国为例，1965年到2012年间，煤炭消耗从每年2.3亿吨增加到36亿吨，增长超过15倍，而同期人口增长不到一倍。世界范围来看，从1965年到2012年，全世界初级能源消耗从50亿千瓦增加到170亿千瓦，同期人口增长也不到一倍。

能源是社会发展的根本保证。只要社会继续向前发展，对能源的需求就会越来越大。虽然能源使用的效率越来越高，比如采光从蜡烛变为白炽灯，再变为效率更高的荧光灯，汽车的每百公里耗油量也越来越低，但是总的照明耗电量，交通耗油量却是在不断上升的。

同样人口的垂直城市，比传统城市可以节约大量的交通能源和采暖制冷用能源，但是还有很多别的因素，会导致总能源消耗的增加。比如：新兴工业化国家，及其它发展中国家的城市化，大规模基础设施建设，航空与航海的持

续稳步发展，工业化国家的基础设施更新，宇宙开发起步，以及我们后面要提到的新型农业等等。这些都需要消耗大量能源。

## 能源的构成

到目前为止，人类消耗的能源绝大部分来自不可再生能源，包括化石能源和核能。根据美国能源信息署(EIA)的统计，到2010年，单化石能源(煤、石油、天然气)一项就占总初级能源消耗的86%，核能占6%。其他能源包括水力，风力，地热，太阳能等加在一起才占不到8%，其中水力一项又占了7%。也就是说，除了传统的水力以外，所有其它可再生能源只占全世界初级能源消耗的1%，但近几年发展非常快。到2012年，风力发电已经占到世界总发电量的3%（注意发电量和初级能源是两个概念）。

世界范围来看，化石能源中，石油占大头，约占40%。煤和天然气各占约30%，煤略多。这与中国能源消耗构成有很大的差别。长期以来，中国初级能源近80%依靠煤炭。目前中国煤炭消耗量已占世界煤炭消耗量的一半。正是因为近年来中国煤炭消耗大幅增加，世界化石能源消耗中，天然气所占比例才与煤炭逐渐拉开。

以可再生能源为代表的新能源，虽然近年发展很快，但占人类消耗总能源比重仍然很低。

化石能源的利用量很大，占实际利用能源的比例在80%以上，但是化石能源的资源有限。虽然化石能源能够使用多少年还有争议，但如果按照目前的能源消费方式，考虑消费的增长，在一两百年内耗尽所有的化石燃料几乎没有悬念。随着开采程度的提高，开采难度也会不断上升。也就是说，为了开采这些不易获取的能源，还要消耗更多的能源。化石能源特别是资源量很大，相对容易开采的煤炭并不能无限利用，因为烧煤过多对环境的影响很大。中国能源对煤炭的依赖，在很短的二三十年内就应该彻底改变。

但从资源上看，新能源（包括核能和可再生能源）的资源总量远远大于化石能源。地球上接受的太阳辐射高达17.4亿亿瓦，大约正好是全世界人类消耗所有初级能源的1万倍。风能总量也有3000到6000亿千瓦，远远超过初级能源消耗量。作为核能资源的铀和钍元素，在地壳中相当丰富，虽然它们是不可再生的，但是折合成煤炭可以供全世界利用上百万年。作为未来能源的聚变能源资源，海水中的氘和地壳中的锂，大约可以供全世界利用上千万年。

垂直城市化应该在一百年左右完成。这段时间内，能源利用的构成将要发生很大的变化。传统化石能源利用比例下降，新能源利用量需要有大程度的提高。下面将对太阳能，风能，裂变核能，聚变核能，及其它新能源逐一讨论，看看它们各有什么优缺点，大规模利用有没有可能，以及各有什么样

的问题。

## 太阳能

太阳能资源量极大，它是地球上几乎所有生命的能量来源。除了火山、地震、造山等地质过程以外，也是其它几乎一切自然现象的能量来源，比如风雨，雷电，万物生长，江河流动，……。所有的化石燃料，也是地球历史上生命活动和地质活动留下的痕迹。

在地球接受的太阳辐射中，大约 30%直接反射到太空。其中大气反射 6%，云反射 20%，地球表面反射 4%。19%被大气和云吸收，并辐射到太空。剩下的 51%被地表吸收，其中的 23%以相变潜热的方式用于蒸发水分，7%用于加热地表空气，6%直接辐射到太空，15%辐射到大气，再辐射到太空损失掉。全球光合作用转换的功率大约是 1000 亿千瓦，但考虑代谢分解与光合作用总体大致平衡，实际上不用另外考虑。地球每年吸收的能量和辐射的能量应该是平衡的，否则就会引起全球温度变化。以二氧化碳、水蒸气、甲烷为代表的温室气体，能够减少辐射损失，所以会引起全球气温升高。

因为太阳能总量极大，很容易想到，即使利用太阳能的很小一部分，比如说万分之一，就可以满足全球能源的需要。万分之一的地球面积为 5 万平方公里，不算很大，地球上贫瘠的荒漠地区面积就有上千万平方公里。但如果考虑太阳能只有大约一半到达地表，太阳能电池的效率只有 10%左右，太阳辐射的角度，光伏板的相互影响遮盖等因素，全球需要的太阳能发电场需要两三百多万平方公里。世界沙漠面积超过 3000 万平方公里，仅撒哈拉沙漠的面积就有 900 万平方公里。

我们再以中国为例，从另外一个角度算一次。中国 2012 年底全部电力装机容量为 11 亿千瓦，地球每平方米平均获得的太阳能是 350 瓦，因此只需要  $1.1 \times 10^{12} \text{W} / 350 \sim 3 \times 10^9$  平方米 = 3000 平方公里，算 10%左右的发电效率，只要 3 万平方公里。到本世纪末，用电量再增加 3 倍左右，也只要 10 万平方公里。据统计，中国沙漠、戈壁和沙漠化土地面积总计约 130.8 万平方公里，只要一个零头就完全可以满足所有的电力需求。

然而事情没有那么简单，我们还需要做一些修正。第一，太阳能电池板只能装在地面，必须去掉大气和云层反射和吸收的部分，这样只剩下一半，总面积必须乘二。第二，由于太阳的角度是不停变化的，实际上需要更多的土地来放置能够跟踪太阳的光伏板，否则不能充分利用光伏板的发电能力。占用的土地面积一般是光伏板面积的三到五倍，以四倍计算，那么还需要乘以四。第三，由于太阳能是间歇性的，实际发电能力只有铭牌功率的五分之一左右或者更低，也就是要发 1 亿千瓦电，需要安装 5 亿千瓦太阳能板。这样算下来，上面的数字需要再乘以 40，也就是 120 万平方公里。需要安装

的太阳能电池板功率也不是 11 亿千瓦，而是 55 亿千瓦。

据统计，近年来中国太阳能发电的利用小时数是 1500 小时左右，风电 1900 小时左右，而一年有 8765 个小时，这样它们的利用率分别只有 17%（约六分之一）和 22%。

实际上中国总的发电装机容量 11 亿千瓦是安装功率，不是发电功率。平均发电功率可以用年发电量来计算。具体到 2012 年，中国共发电约 5 万亿度，这样平均发电功率就是  $50000/8765 = 5.7$  亿千瓦。但是用电有峰谷，装机容量必须满足峰值用电需求，全部用太阳能的话，还是需要 40 亿千瓦左右。

这里的计算还有一些问题，因为太阳能并不稳定，需要考虑蓄能的因素。如果蓄能容量和备份发电能力足够，可以减少装机容量，但不会低于 30 亿千瓦。

由于太阳能的低转化效率，低功率密度，间歇性，工程开发成本高，因此，虽然总量非常大，但很长时间不被人看好。但近几年太阳能发展非常快，巨大的潜力逐渐显现。在政策的鼓励下，2017 年中国光伏装机净增五千二百万千瓦，总装机达 1.3 亿千瓦，已经成为能源构成中非常重要的一个部分。2018 年，大型光伏项目已经要求平价上网，国家不再补贴。

结合人工环境农业发展太阳能具有非常大的发展潜力，特别是在高原地区。后面我们会讲到，高原地区不仅特别适合发展人工环境农业，太阳能资源也非常丰富，对于农业来说是过剩的，多余的部分可以同时发展光伏发电。高原地区大量的落差巨大的大型湖泊和河流，为大规模、低成本蓄能提供了优越的条件，完全可以在现有技术的基础上，发展全部基于可再生能源的能源体系。

青藏高原有 250 万平方公里，其中一半土地，由于高寒，极度贫瘠，几乎寸草不生，但特别适合发展人工环境农业。只要拿出 10 万平方公里，用来发展光伏人工环境农业，可以同时解决全国的农业与能源问题。结合国内巨大的水电装机容量，可以解决太阳能的昼夜节律问题，甚至不需要安装太多的抽水蓄能设施。

## 风能

与人类消耗的能源总量相比，风能资源量是非常大的。美国在 2010 年初发布的一份报告称，美国大陆 48 州陆上现有技术可开发风能（80 米高空）为 130 亿千瓦。如果按照此数字推广到全球，则风能总量可以达到 6000 亿千瓦以上，是目前全世界初级能源消耗量的近 40 倍。

中国有广阔的高原和大面积的近海大陆架，至少应该有和美国差不多的风能资源量。但国家气象局在 2005，2009 年出的两个报告称中国风能资源

量分别为 2.5 亿千瓦（10 米高度）和 24 亿千瓦（50 米高度），该数据没有看到国外文献引用。

从能量密度上来说，典型的风力资源区可以达到 1 千瓦每平方米，远远高于太阳能。风能开发占用土地资源很少，不需要每天维护，发电可以直接上网。因此，与太阳能相比，风力发电有明显的优势。这也是世界上风力发电装机的发展速度远远高于太阳能发电的原因。

风能和太阳能一样，有一个大规模发展的限制因素，那就是它的间歇性，即不稳定性。它能不能发电，发电功率多大，与季节、气候，以及小区域的气象条件都有关系，不能保证出力。气候条件不佳时，需要传统后备电源填补空缺，因此电网中风能所占比例不能太大，一般认为极限在 20% 左右。考虑到风电的实际发电能力只有装机容量的五分之一到三分之一，20% 的风力发电贡献，意味着风力装机容量已经达到其它方式装机容量的总和了。换个方式来说，如果需要 10 亿千瓦的持续发电能力，那么风力发电能力必须达到 10 亿千瓦才能达到 20% 的发电量，而最坏的情况下，还必须安装 10 亿千瓦其它可随时上网的发电能力，也就是总共要安装 20 亿千瓦发电能力。风力发电白白增加了 10 亿千瓦的发电设备。当然，它的好处是这 20% 的电没有燃料成本，不会产生污染。

风电的不稳定性对电网有很大的威胁。由于风电出力功率不可控，也难以预测，电网不愿意接受。即使有政策支持，技术上也威胁着电网的稳定运行。据报道，到 2017 年底，中国的风力发电并网装机达到了 1.9 亿千瓦，居世界第一；风力发电 3057 亿度，超过核电发电量。

导致弃风的一个原因是，北方冬天供暖采用热电联发的方式，用电厂的余热为城市供暖。冬季供暖不能停，发电也就不能停，这样就没有足够的负荷接纳风电，只能放弃风力发电。在蒙东，吉林等地去，弃风比例超过 30%。

在大规模蓄能技术得到解决的情况下，弃风弃光会大大改善。如果能把风电或者太阳能发电蓄存起来，那么可以大量安装风力太阳能发电系统，装机容量可以超过所谓的风电极限，能够达到 100%。

## 水能

地球吸收的太阳能，用于蒸发水分的部分超过 10%，总量非常大，但是水循环中的降水只有很少一部分可以利用，因为大部分降落到海面或者低海拔地区，不能产生足够的势能差。全球陆地上的水能资源量约为 72 亿千瓦，目前已经利用了大约 11 亿千瓦。水能利用有一些制约因素。一是环境和生态，不可能把所有的河流都变成湖泊，大量海洋洄游的鱼类需要完整的河流才能繁殖。建坝后即使人类考虑了它们的需要，帮助它们翻坝，但是由于各种原因，人类一旦不能履行自己的义务，该物种就会灭绝。二是经济性，不

可能把所有的小河小汉都一层层拦起来。三是河流的流量是不稳定的，汛期需要泄洪，这部分能量无法利用。

水能在中国、巴西等一些发展中国家，有比较大的发展余地。对于主要依靠电力的垂直城市，水能还是非常重要的。它不污染环境，可再生，可以一定量蓄存，也可以作为其它可再生能源（风能，太阳能）的调节能源。

海洋的洋流、温差、波浪和潮汐能等资源量也很大，大约有 100 亿千瓦左右，目前的开发程度还很低。但是潮汐和波浪的能量密度较低。温差发电的效率非常低。洋流也不能大规模开发，否则会对全球气候产生不利的影 响，造成热的地方更热，冷的地方更冷，极端气候更加频繁发生。

## 核能（裂变）

由于对环境及气候问题的担心，曾经让人谈核色变的裂变核能，现在已 归到清洁能源和新能源一类，因为没有温室气体和化学污染物的排放问题。 核能在本世纪中，有可能是重要的能量来源之一。

裂变核能的原料铀或钍在自然界非常丰富。常见的世界铀资源总量只有 550 万吨的说法（世界能源组织报告）有很强的误导性。该报告的前提是， 开发成本在每千克 130 美元（2007 年价格）以下。实际上到 2010 年铀的价 格就跌到了每千克 100 美元以下（铀黄饼价格，2012 年回升到 140 美元， 2013 年中不到 90 美元）。如果将铀的价格提高一倍，可开采储量将增加 10 倍。海洋中有 110 亿吨铀，从海里提取铀的成本是每千克 300 美元左右。 由于地壳中铀的丰度是海洋的 1000 倍，海里的铀提取出来之后，地壳中的 铀会自动补充到海里，因此海里的铀几乎是取之不尽，用之不竭的。地壳中 每吨土壤中的铀和钍含有的裂变能大约相当于 30 吨煤。因此发展核能，铀 或钍资源不是问题。一千克铀的热值大约相当于三千吨煤，而目前一千克铀 的价格大致与一吨煤相当。在一座核电站中，铀燃料的成本几乎可以忽略。 而同样规模的燃煤电厂中，煤的成本要占 70%。所以铀的价格即使再涨几倍， 也不会造成电价大幅上涨。

## 核能基本原理及其优缺点

核能利用的主要形式是发电，核能几乎等同于核电。自然界或人工生产 的一些重原子核，吸收一个中子会裂变成几个轻原子核。裂变释放大量的能 量，与煤炭燃烧释放的化学能相比，裂变元素释放的能量，大约是同等质量 煤炭的三百万倍。

重核裂变时放出更多的中子，从而引起更多的裂变，这就是链式反应。

核反应堆中，有些中子会被吸收，不参与裂变反应。为了让核反应堆持续稳定运行，在裂变产生的第二代中子中，需要正好有一个中子引发裂变，而多余出来的中子要吸收掉。多余的中子可以用控制棒吸收。但持续调节控制棒很难保证安全。现在的反应堆都设计为负功率因子，也就是当反应堆功率超过设计功率时，因为水中气泡增多、密度下降等因素会导致慢中子数下降，从而裂变功率下降，也就是说，即使不用控制棒，反应堆也不会超过设计功率运行（燃料加载初期因燃料反应性过大，需要用控制棒降低反应性）。控制棒可以用来调降功率或者停堆。从这个角度来说，核反应堆是非常安全的。

核能的主要优点体现在，它的能量密度很高，需要的燃料少。一个机组每年大概只需要几十吨核燃料。在正常工作情况下，除了排出一些废热，对环境影响微乎其微。废热也可以用来供热。与化石能源相比，不排出二氧化碳，不污染环境，没有海量燃料运输要求，燃料储量几乎无限。与风能、太阳能等新能源相比，它紧凑、可靠、可在任何时候出力，能够保障能源安全，运行成本低。

核能的缺点包括：建设成本高、周期长；危险，一旦出问题，后果非常严重；系统太复杂；设计寿命到期，拆除费用高昂；能生产核武器原料，意味着谁都能做原子弹；乏燃料（用过的核燃料）、核废料问题还没有解决；等等。

核能虽然建设和拆除的成本高，但总的成本并不比化石能源高，如果化石能源要收碳税的话，核能的成本更低。

## 核能的危险性

自美国三哩岛事件以来，人们突然意识到核能的危险。核能的形象也突然从天使变成了恶魔。那么核能具体有些什么危险呢？

核能的危险性主要来自它的重核裂变及嬗变后的产物。重核裂变后产生轻核，但这些轻核基本都是不稳定的。不稳定意味着它们要衰变，变成稳定的原子核。衰变的过程就是放射，发出各种高能射线。反应堆的危险性主要来自这些放射性。裂变产物有很多种，大部分寿命很短，半衰期从几秒到几十分钟不等，很快就衰变掉了。衰变的时候也会放出大量能量。这是反应堆设计需要考虑的最重要因素之一。但也有一些产物，包括重核俘获中子后产生的一系列产物，寿命比较长，半衰期从几天到几万年不等。这些产物会带来长期的危害。

大多数人对放射性的危害不太了解。简单地说，放射性和生命是不相容的。这是因为生命由各种有机物组成。多种复杂的有机物在一个要求非常严格的物理化学环境中，以非常复杂的方式，精确地按照遗传代码预先指定的方式演化。如果它们的运作被打乱，就会引起细胞死亡，或者发生病变，或

者转化为癌细胞。从而打断生命正常的运行,导致整个生命体病变或者死亡。

以人体为例,我们的体温保持恒定,低几度或者高几度都会对身体造成巨大的伤害。我们必须维持水分,保证各种营养物质和化学物质的浓度,等等。但是放射性元素放出的高能射线,能够彻底打乱生命中脆弱的生物化学过程。它们能够彻底破坏蛋白质分子、核糖核酸分子,或者直接将基因打断或打乱。这是因为高能射线的能量高达几十万到几百万电子伏特,而维持化学分子存在的化学键只有几个电子伏特。生物化学反应中的自由能变化,只有零点几个电子伏特。射线从细胞中经过,会把细胞内的生物化学过程搅得一团糟,蛋白质被打成氨基酸或者自由基,大分子被打成一堆小分子,等等。如果把生命或者细胞比作一个设计巧妙,精细美观的手表,高能射线就是一颗穿过手表的高速子弹。

自然界到处都存在一定的放射性,但是量很小。平均每秒钟,大概有几百次高能射线穿过我们的身体。我们的身体大约有 100 万亿个细胞,即使每秒杀死几万个细胞,我们一般能够自我修复。但是如果辐射太强,我们就修复不过来了。人体如果短时间内(几天)每公斤体重接受 5 到 10 焦耳的放射性能量,就会死亡。杀死一个一百公斤的人,最多只需要 1 千焦耳的能量。焦耳是一个很小的能量单位。电梯把一个人拉高 1 米,对人做的功就是每公斤 10 焦耳。如果把这些能量全部折算成热,只够把这个人的体温提高 0.002 摄氏度。换句话说,如果一个人接受的放射性辐射导致体温升高了 0.002 摄氏度,他就一定会被杀死。没有人能感觉到 0.002 度体温的升高,因为体温昼夜正常的变化就可以达到 0.2 摄氏度,是辐射致死剂量导致体温升高量的 100 倍。

反应堆里面的放射性非常强。一座百万千瓦的核电厂,正常运行时,不考虑中子和裂变碎片动能,剩下的衰变放射性辐射功率是 20 万千瓦,相当于每秒可以杀死 20 万个体重 100 公斤的人。核燃料棒在反应堆烧尽之后叫做乏燃料。乏燃料的放射性仍然非常强,无法处理,只能在反应堆就地存放。在一般日常情况下,自然界的本底辐射,每秒大约有几百次高能射线穿过我们的身体,也就是每立方米每秒几百贝克勒耳。乏燃料从堆芯取出存放 10 年之后,每吨每秒仍然有上亿亿贝克勒耳的辐射,是日常背景的百万亿倍,仍可每秒杀死一个人。

放射性对材料也有很大的破坏性。因为所有的材料同样依靠结合能很低的化学键。高能射线通过,可以熔化或者汽化材料的一个小区域,破坏材料的晶格结构,改变材料的物理化学性质,使它们无法提供应有的功能。

对于现代数字技术的硬件核心——大规模集成电路,即芯片,放射性的破坏性也非常强。因为芯片的结构非常小,只有几十个纳米,这种尺度的结构能够被放射性高能射线破坏,将绝缘的地方击穿,或者改变半导体的极性,导致芯片失效。用作数据传送的光纤,同样受不了放射性辐射。光纤在辐照下很快会变得不透明,光信号无法通过。

一般来说，放射性的伤害范围很小。电荷中性的辐射，包括伽玛辐射（高能光子辐射）和中子辐射，伤害的范围从几米到几十米不等，而带电的阿尔法辐射和贝塔辐射，伤害的范围只有微米量级，只要不直接接触就不会伤害人体。所以，放射性对人体伤害最大的方式是，放射源直接被人体吸收，或者附着在人体皮肤衣物上。

只需要非常少量的放射性，就可以杀死一个人。我们一般用的痕量单位是十亿分之一或者万亿分之一。从地上任意抓一把土，平均里面就有十亿分之四的黄金。万亿分之一量级的检测在化学分析上非常难。但是放射性却很好检测，因为任何一次衰变都能产生可探测的效应。人体吸收半衰期几十天之内强放射性物质，重量达到体重的万亿分之一，大约千万分之一克，就可以致死。千万分之一克不过一粒肉眼难以察觉的灰尘，人体每天掉的死皮的质量都是它的千万倍。

现在对放射性的防护方法，只能是防止它扩散，即将放射性材料控制在已知的安全区域内。可是物理上，任何东西都是要扩散的，无论是宏观上材料散落，被盗，还是微观上的溶解，渗漏。现在的乏燃料，几十万年内是必须绝对防止扩散的。几十万年，对人类社会来说，是一个很长的时间，可以发生很多事情。造成这些放射性的人，没有能力提供那么长时间的保证。

我们可以看看，历史上前几千年里，都发生过什么事情。在过去的几千年内，很多国家改朝换代或多次改朝换代，世界级的大规模战争两次，地区级的大规模战争几百次，九级以上超大规模地震几百次，超大规模风暴洪水几千次，超级火山爆发几次，等等。一个国家或者机构，在这样的场合中，怎么能维持自己对大量核废料的绝对控制，维持社会秩序，保证核废料的绝对安全？

正因为放射性裂变产物的巨大危险性，反应堆的设计需要保证运行的绝对安全。虽然纯粹从技术上来说，一般反应堆的设计已经非常保守，考虑了各种意外因素，但是还是有一些问题难以解决：

第一，核电厂需要持续不断的强制散热。同燃煤电厂一样，核燃料裂变释放的能量用来把水烧开，产生水蒸气发电。这个过程中，大约只有三分之一的能量转换为电能，其余三分之二的能量作为废热释放到环境中。一台发电 100 万千瓦的核电机组，废热功率约 200 万千瓦，如果用海水冷却，为了不影响环境，假定进出水温差为 2 度，则每天需要 2000 万吨海水，每秒近 250 吨（实际上废水温度很高，有时候不能直接排放，需要在一个大池子中冷却）。反应堆正常运行期间，大概 6.5% 的功率由衰变热提供。对于 100 万千瓦电的机组，衰变热功率约 20 万千瓦。这意味着即使完全停堆，反应堆还有 20 万千瓦的热需要排除到环境中。20 万千瓦是很大的一个热功率，如果散热失效，核燃料将融毁，导致不可控的核泄漏，后果非常严重。由于大部分裂变产物寿命很短，从几十秒到几十分钟不等，衰变热衰减很快。实际上，停堆 10 分钟后，衰变热功率就会从刚停堆的 6.5% 降到 2% 左右，1

小时后 1.5%，一天后 0.4%，一周后 0.2%，对于 100 万千瓦电功率机组，一周后的热功率为 6 千千瓦，仍然需要强制散热。也就是说，核电机组几乎永远需要强制散热，即使在完全没有任何电力供应，没有人员操作干预的情况下，也必须维持持续的强制散热。这显然是一个非常强的要求。2011 年 3 月日本福岛 7 级核事故，就是因为无法在海啸发生的时候，保证散热系统的正常运行，堆芯过热失控而引起的。

第二，核反应堆装料量巨大，如果加上随堆放置的乏燃料，一个堆可以有数百吨放射物质，其中放射性裂变产物有数百公斤。作为对比，一颗原子弹只产生一两公斤放射性裂变产物。因此，一个失控的反应堆对环境的危害，远远超过一颗原子弹。一百公斤放射性裂变产物中蕴含的放射性，足以杀死一万亿人。全世界每年产生数万吨乏燃料。这些乏燃料，在人类看得见的未来时间内，永远都是一个很大的隐患。乏燃料非常难处理，处理过程也非常危险，即使花费很大的代价，对乏燃料进行后处理，仍然会留下大量的放射性核废料。

第三，核电厂是一个非常复杂的系统。为了保证安全，核电厂设计了很多冗余，又很复杂的控制系统。系统越复杂，越容易出问题。系统复杂了，操作人员很难掌握所有系统。出现异常，不能保证所有的处置都是正确的。

第四，核事故的后果太严重，如果发生融堆、大规模核泄漏，电厂周围数千平方公里的土地在数百年内都不适合人类居住，放射性污染影响遍及全球。

要全面评价新一代反应堆的安全性，那种百万分之一、千万分之一的概率论分析是不够的。核反应堆建成后要工作五、六十年，甚至八十、一百年。一百年内，很多看起来很小概率的事情可能发生。比如如果真的像有些人预测的那样，本世纪中叶海平面要上升几米的话，所有沿海核电站的安全性都要大打折扣。如果中国决定大规模采用核能，达到本世纪末 300 到 400 个堆的水平，必须做好发生一到两次大规模核事故的准备。

即使反应堆设计很好，事故概率低。但在人为破坏和军事打击之下，核反应堆是没有任何抵抗力的。当前的做法是，在受到重大地质灾害或军事威胁的时候，反应堆停堆卸载燃料。如果核能是社会的主要能量来源，这种做法意味着能源安全没有保障，而且也无法保证乏燃料，核废料等强放射性物质不泄露。

## 新一代核能研究的困难

现在通行的一次通过燃料利用模式（即燃料加工出来之后，只在反应堆中使用一次），大量浪费核能资源。结果是，开采出来的核燃料，只有大约 0.4%能得到利用，其它都变成不可碰的高放射性废物，成为社会的沉重负担。

无疑，乏燃料后处理，提高燃料利用率的快中子堆，钍熔盐堆，燃料现场增殖的行波堆等其它第四代反应堆，以及聚变裂变混合堆等概念，成为核能研究的重要课题。

第三代反应堆强调非能动散热，第四代强调燃料增殖和内禀安全性。但是无论如何，由于核能与强放射性息息相关，实验研究进展很缓慢。核电站是工业项目，仅仅依靠理论和数值模拟是很不够的。新一代核能技术研究的困难具体有：

强放射性的实验环境。反应堆一旦临界运行，就会产生放射性的裂变和嬗变产物。即使非常小型的实验堆，也会达到数万千瓦的热功率，对应放射性功率数百千瓦，一次实验几个小时之后，研究人员几年内都不可以接近堆芯，以及所有的核燃料，只能远程做一些测量。基本的热力学定律决定了，要完全防止放射性元素的扩散是不可能的，其中有些放射性裂变产物还是气体。实验室不可能造一个像核电厂那样的反应堆防护壳。

强放射性，以及实验设备不可能按照实际工况设计，导致每次实验的时间都很短，总的实验时间非常可怜，相隔的时间也非常长。这样的实验工况与实际满功率长时间运行工况有很大的差别，有关安全性、材料耐辐射能力、结构在运行工况的可靠性等设计要求无法得到验证。

任何一个新的反应堆，必须经过工业示范堆阶段，有了长期运行的实验检验之后，才可能投入规模生产。可是工业示范堆同商业堆一样，需要满足国际原子能机构对安全的各项要求。这就成了一个悖论：安全性达不到要求就不让你建；我不建怎么知道是不是足够安全？那么我们只好一起来看图纸，分析一下是不是足够安全，可是凭图纸、理论和计算是不能证明安全的。

中国实验快堆（钠冷快堆）和高温气冷堆的实际情况，足以说明反应堆研究的困难程度。首先，两个堆在开始建设以前，就已经是很成熟的方案了。这里的成熟是指方案是现成的，别人已经有了同样或者同类的堆型很长时间了，技术细节都是公开的，或者可以容易得到。但并不是说它们可以成熟地应用。

快堆、高温气冷堆、钍熔盐堆等几种所谓的第四代反应堆，都是上世纪四十年代提出来的方案，远早于后来大规模应用的压水堆。它们更应该称为不成功的第一代反应堆。

理论上，快中子堆能够大幅度提高燃料利用率，减少放射性废物排放总量，燃烧掉有害的超铀元素。世界上第一台实验性快堆 1946 年就在美国建好了，1951 年已经尝试用于商业发电。但快堆技术比较复杂，特别是用来冷却的液钠化学性质特别活泼，一不小心泄露了就会引起火灾，现场很难处理。世界多国，如法国，美国，英国，德国，日本，等，总共花费不下 1000 亿美元（2007 年美元标准）试图将钠冷快堆商业化，但收获的都是惨痛的教训。

中国实验快堆与 1987 年列入 863 计划，1995 年立项，2000 年 5 月开工，

2008年完成安装，2010年首次临界，2011年首次并网发电。反应堆设计热功率6.5万千瓦，发电功率2万千瓦，投资14亿元。2011年7月首次并网发电，成为当年中国十大科技进展之一。但新闻里面没有提到的是，实验快堆总共就发了一天电，而且功率只有设计的百分之一，也就是200千瓦，还不如一台风力发电机。发的电总共价值2000元。之后长期处于冷停堆状态。原计划2012年7月满功率发电也没有做到，直到2014年底才实现。

一般的宣传中，高温气冷堆热效率高，燃料利用率高，绝对安全，发生事故时不需要强制散热，堆芯出口温度高，可以用于工业制氢等。

可是中国的高温气冷堆技术原型是德国的AVR。AVR始建于1960年，1967年并网发电，发电功率为1.5万千瓦。1988年停堆，原因就是担心它不安全。后来发现它发生了泄露，现在用了几千吨水泥把它封起来了，以防止放射性继续扩散。后续处理的费用远远高于它的建造费用。

德国基于AVR技术研究的第一座球床高温气冷商业示范堆是THTR-300，该堆满功率运行423天之后，就因为出现燃料球破裂，以及对进水引起严重核事故的担心，强行关堆，导致投资方重大损失。

德国90年代初放弃高温气冷堆后，以该国专家为主，推动南非开发高温气冷堆。但在花费了12年和10亿美元之后，连设计都没有完成。

从技术上看，高温气冷堆工作机制比较复杂，需要控制燃料球的循环，燃料球运动有机械摩擦，容易造成破损；高温高密高速气流吹过燃料球容易产生粉末，粉末在高速气流的带动下破坏力更强。气流在一堆球中通过容易发生流场不均匀，也就是有的地方快，有的地方慢，慢的地方冷却不足，就会产生局部高温，这也是AVR的一个教训。

任何核装置，一旦开始运行，里面就是一个黑盒子，无法检测，无法维护，发生了什么都不知道，所以应该越简单越好，因为越简单越不容易出问题。球床高温气冷堆实际上犯了这个忌讳。作为优点宣传的低能量密度特征意味着，这个黑盒子的体积很大，所以实际上这更应该看成一个问题。

所有的核能实验装置，绝大部分时间处于冷停堆状态，一次热实验（临界，也就是开始链式核反应）之后，反应堆及周边设施就带上强辐射了，不可以再接近。这对研究来说是致命的。虽然可以得到热实验的很多数据，但是后续实验和设计改进实施非常困难。

也许从概念上来说，绝对安全，燃料利用率高，听起来很诱人。但是把历史上基本已经证明了不成功的堆型叫做更先进的堆型，很难令人信服。

在研究人员主张一种方案或者堆型的时候，当然会强调它的优势。但是经过长期的实践，发现它有难以克服的困难的时候，就不会很积极地宣传（这些困难）了。很遗憾我们的很多专家只能看到那些理论上的优势，看不到实际的问题。

## 核能发展策略讨论

目前全世界主流的核电站，包括在建的，仍然是压水堆和沸水堆。所谓第三代只是在维持强制散热方面改进了设计，核电站的工作原理并没有变化。在不出现大的意外的前提下，现有压水堆和沸水堆都是相当安全的。中国因为核能发展较晚，堆型总的来说更安全。现有的二代半技术其实已经非常安全。三代技术还没有经过验证，长期来看要比二代、二代半安全。但考虑到尚无运营经历，初期的安全性个人觉得不会比二代半更好。因为一般来说，新系统研制和投入使用阶段，是最容易出安全事故的阶段，这时设计缺陷尚未暴露出来，操作人员也尚未掌握规程。

如果保守一些，考虑到核废料的问题，可以把目前的核能当成一种过渡的能源，限制核能的利用时间，比如在一两百年之内，也不失为一种方案。

实际上驱动工业革命的化石能源，就是，而且只能是，一种过渡能源。核能与化石能源有很强的相似性。化石能源是火，是热，核能更“热”；火能够伤害生命，放射性更可怕；火在古代是一种难以控制的大规模杀伤武器，核武器是现代的大规模杀伤武器；化石能源燃烧，产生长期危害环境的二氧化碳。核能产生的核废料，在很长的时间内都会破坏地球的生态环境；化石燃料只能使用几百年，核燃料如果采用现有技术，加上开采或提取技术的提高，也只能维持几百年，等等。

现阶段，如果没有新的大规模能源供应，仅仅和煤炭比较，核能还是值得尝试的。目前中国使用的初级能源 80% 来自煤炭，发展核能就是要取代煤炭。我们可以比较一下两种方式各自的代价。

首先，两种方式的经济性目前差不多，如果要考虑对环境的破坏和碳税的实现的话，核能经济性优于煤炭。其次，核能资源（铀和钍）折合成热值远远大于煤炭资源量，供人类几万到几十万年发展没有问题。

3 万个百万千瓦年，如果采用燃煤机组，需要 1200 亿吨煤。2010 年我国开采百万吨煤死亡率约 1.2 人，就算该数值还会不断下降，开采 1200 亿吨煤也意味着上十万煤炭工人的牺牲。比较而言，一次重大核事故造成的人员伤亡几乎可以忽略。2010 年中国电煤产量超过 16 亿吨，平均价格约每吨 600 元。1200 亿吨煤价值超过 10 万亿美元，考虑到以后能源供应必须增加，实际的数字还要高。在核电厂运营中，核燃料占的成本很低，与煤炭相比，在能源上节省的成本至少是数万亿美元，完全可以支付重大核事故引起的损失。所以，从经济和人员损失的角度来说，核电都应该远好于燃煤。100 年内，就算发生几次重大核事故，整体来说，核电还是合适的。如果再考虑环境、运输等方面的好处的话，核电更有优势。

如果有安全的、经过检验的、能够解决核废料问题和燃料利用率问题的新核能技术出现，核能无疑可以成为未来的重要能源。但是这些问题很难解

决，因为我们上面提到的放射性问题。连研究本身都困难重重。研究验证装置也有很大、甚至更大的风险。

在这种条件下，如果实在没有别的能源可以使用，可以大规模应用成熟的核能技术，或者现有技术的安全改进方案。对新概念核能方案需要非常慎重。同时应该限制核能的使用期限，保证最多一两百年内过渡到新的可靠能源，比如聚变或者可再生能源，以免出现类似化石能源大量使用引起的全球性环境问题。

最坏情况下，燃烧化石能源给人类带来的灾难，不过是全球变暖，社会动荡。或许引发大规模人口迁移，以及相应的战乱。但是不会危害人类整体的存在。海平面上升 100 米也不能让人类灭绝。但是核能可以。如果不加限制地使用裂变核能，积累大量放射性核废料，一旦失控，足够让地球大面积区域不再适合人类生存。

毕竟地球只有一个，我们破坏不起。而且地球是动态的，有风有雨，有地质活动，不能指望几十万年的时间尺度内，核反应堆和存放的核废料是绝对安全的。

对于即将到来的太空探索时代，核能可以有很广阔的应用范围，因为宇宙空间本来就有很强的辐射，（但是仍然远远不能和核反应堆及核废料的辐射量相比）。对于宇宙殖民前哨的小卫星或者行星，地质稳定，自然的破坏过程很少。对于太阳能（或者其它恒星辐射）很弱的地区，环境温度很低，散热很容易，核能的优点非常多，比如体积小，服务时间长等。核燃料在启用之前放射性很弱，危害不大，不用担心发射时发生事故导致巨大灾难。在地球上不安全的堆型，如钠冷快堆，在宇宙空间由于没有空气（与液态钠反应），运行和操作都要简单得多，成为安全高效的堆型。核废料也更容易处置，扩散到地球的可能性小得多。

近几年，可再生能源发展很快。如果蓄能技术也能相应发展，则人类可以仅依靠可再生能源生存。既不需要化石能源，也不需要核能。实际上，到 2015 年，随着福岛事故的进一步发酵，全世界都意识到核能的巨大潜在危害。代表发达国家的 G7 已经决定到 2015 年全部过渡到可再生能源。核能应用将逐渐减少，直至无足轻重(phase out).

## 核能（聚变）

对于自然界存在的所有的原子核，中等大小的铁镍等元素是最稳定的，很轻的原子核反应形成重的核，要释放大能量。同样质量的燃料，聚变反应放出的能量大约是化学反应的一千万倍。与燃煤相比，一座百万千瓦电厂，一年约需要 400 万吨煤，产生约 1000 万吨二氧化碳，但是如果用聚变，假设发电效率相同，只需要不到 300 公斤氘，产生约两百公斤氦。海洋中的

氘大概有 40 万亿吨，氚要靠锂 6(约占自然界锂总量的 7%)来生产，锂 6 在地壳中约有 30 万亿吨。长远来看，聚变可以只用氘做基本燃料，只需要源源不断地从水中把氘提取出来就行。

氘：又叫重氢，原子核中有一个质子和一个中子；氚：又叫超重氢，有一个质子和两个中子；氦 3：两个质子两个中子；氦 4：两个质子一个中子。

氘氚反应是最容易实现的聚变反应，单位质量放出的能量差不多也是最多的，所以目前寻求的聚变主要是氘氚聚变。氘氚聚变产生一个中子和一个氦原子，其中能量主要以中子动能形式释放出来。高能中子的能量利用在技术上很困难。氘与氦 3 聚变反应产生一个氢和一个氦原子，放出的能量比氘氚还要多一点，但是它们反应的难度要大很多，而且氦 3 在地球上很少，也无法方便地生产。氘氘反应更难，放出的能量也要少一些。

地球大气中大约有 4 万吨氦 3。据估计，月球表面约有数百万吨氦 3，如果用来提供人类的所有能源，够数千年之用。这是探月计划经常被拿来证明探月必要性的一个理由。其实这只是一个以讹传讹的错误说法。要知道，月球表面还有几亿亿吨的氧，和不太少的水，这一事实并不说明月球表面适合人类生存。要把含量只有亿分之一，一旦离开土壤就会逃逸到太空中（月球表面白天的温度有 100 多度，对应氦 3 的热速度约为每秒 1500 米，而月球表面的逃逸速度只有每秒 2400 米，考虑到热速度的麦克斯韦分布，以气体形式存在于月球表面的氦 3 会很快跑光。月球连氮、二氧化碳这样的重气体分子都保持不住），又不参加化学反应的氦 3 收集起来，长远来看也非常困难。而且，如果氘-氦 3 反应能够很好实现，完全可以直接在核反应堆中生产氘，然后由氘衰变生产氦 3。这一方案是现成的，完全没有必要花费更大的代价跑到月球上，用现在完全不知道的技术开采氦 3。除了开采困难以外，认为氦 3 是理想的核燃料，因为和氘反应不产生中子，（从而没有困扰现行聚变研究材料问题），这一说法犯了一个基本错误。氘氦 3 反应虽然不产生中子，但是把氘和氦 3 放在一起，氘和氘是要反应的，氘氘反应在低温区间（两三亿度）更容易发生，等量生成氦 3、氘、中子和质子，氘与氘容易反应得多，这样，即使存在氘氦 3 反应，整个反应堆仍然要放出大量高能中子。即使在优化的温度区间（10 亿度左右，非常难达到），中子的释放量也是不可忽略的（氘氘反应的几分之一），所以氦 3 并不是神奇的聚变燃料。不能说有了它，能源问题就解决了。纯氦 3 聚变是没有中子的，但是聚变温度更高，更难实现。

关于聚变有三个概念容易混淆。一是聚变，即核聚变反应本身，研究的是能量释放量，反应截面，不同温度下反应速率等内容。这方面的研究，很早就做得差不多了。二是约束聚变，研究怎么把高温的聚变等离子体约束住，现在说的聚变一般是这个意思。三是聚变能源，也就是聚变能利用，主要是发电，是聚变研究的最终目标。

约束聚变要求将温度为 1 亿度左右的等离子体维持一段时间，聚变产生

能量。由于聚变功率与密度平方成正比，一类方案是将等离子体密度提到非常高，让聚变瞬间完成，这就是惯性约束聚变(ICF)。另一类方案是将低密度的高温等离子体维持很长时间，这就是磁约束聚变(MCF)。还有一类方案是用磁场将初始温度比较高的等离子体约束比较短的时间，绝热压缩该等离子体团达到更高温度产生聚变，叫做磁惯性约束聚变(MIF)。

聚变需要的条件从能量上来看，只需要 1 亿度，或者说约 1 万电子伏特。与一般高能实验中动辄 GeV, TeV (十亿电子伏, 万亿电子伏) 相比，是一个很低的能量。我们知道，普通骨干输电线上面的电压都是数十万伏。可是问题在于，两个氘氚原子核相对能量达到 1 万电子伏特后，虽然可以发生核聚变，但可能性却很小。需要碰撞成千上万次才可以聚变一次。聚变一次放出 1 千 7 百万电子伏特能量，还不够加速那么多的氘氚原子核。因此，最好加速一次可以碰撞很多次，也就是要把这些一万电子伏特能量的原子核约束起来，保持在一个区域内不停互相碰撞。这就是“磁约束聚变”、“惯性约束聚变”里面“聚变”前面要加“约束”的原因。没有约束的聚变在能量上是亏损的。

1 万电子伏特能量对应的温度是 1 亿多度。这一温度下氘氚是完全电离的，成为等离子体。等离子体能量很高，如果不加约束，就会以每秒几百公里的速度飞散开。作为比较，高能炸药爆炸只能产生每秒几公里的爆轰波。带电粒子在磁场里面会作回旋运动，所以加磁场可以约束住高温等离子体。惯性约束其实没有约束，只是让聚变燃料同时向心高速运动（内爆），靠燃料的惯性猛烈挤到一起，达到很高的温度和密度。在飞散开前，相当部分燃料聚变，释放能量。

1 亿度是个非常高的温度。太阳表面只有 5500 度，太阳核心也只有 1500 万度。如果太阳表面达到一亿度的话，直径只需要 5 米，就可以辐射出现在那么多的能量。这个球的体积只有太阳的 20 亿亿亿分之一，比太阳变成中子星后还要小 100 亿倍。要真正达到 1 亿度（热平衡温度，也就是黑体辐射温度）在地球上是不可能的。

聚变研究中说的 1 亿度，是指氘氚原子核或者电子的平均动能达到 1 亿度的水平，这是一个非常不稳定的状态。因此，产生和维持这么高的温度（平均动能）都非常困难。

磁约束用大约相当于地球磁场 10 万倍的磁场，将密度不到空气百万分之一的氘氚等离子体约束在几百立方米的空间内，而惯性约束需要用大约 1 万亿大气压将几毫克的氘氚压缩到固体氘氚密度的数千倍。磁约束目前能在秒量级的时间内将等离子体约束住。要延长约束时间，就必须降低等离子体的密度和温度。世界上最主要的惯性约束聚变研究计划是美国的国家点火计划。从上世纪 90 年代开始，该计划共花了 40 多亿美元，计划 2012 年实现激光能量增益，也就是产生大于 1 兆焦的聚变能量，但是没有成功。截止到 2014 年中，聚变能量输出只达到原计划的百分之一左右。

高的温度意味着很大的等离子体内能。很大的内能意味着将出现各种各样的能量丧失机制。两种聚变方式都要解决各种各样的不稳定性问题。磁约束中的不稳定性控制不住的话，等离子体会撞上容器，损坏设备。惯性约束中的不稳定性也不好控制，结果是能量无法集中，温度升不到点火温度，但不会破坏装置。各种不稳定性性质和来源都不同。

什么是不稳定性呢，举个例子。把一颗完好的鸡蛋放在另一颗完好的鸡蛋上面，上面的鸡蛋容易掉下来，这就是不稳定性，如果在上面的鸡蛋上面继续放鸡蛋，就更不稳定。磁约束聚变中众多的不稳定机制，就像一次摆几十个鸡蛋，并不停地观察，发现哪个鸡蛋要歪了，马上用一根棍子捅回去。聚变中的不稳定性的抑制比这还要困难，你可以想象在大风大雨的操场上，还有网球、足球横飞，而你还是要靠一根棍子，不让这一摆鸡蛋掉下来。理论上，是可以把所有的不稳定性都抑制住的，但实际操作起来有很多困难。

除了不稳定性外，还有很多技术上的问题。比如磁约束中，高温等离子体会从容器壁上打下一些碎片，一两毫克大小的碎片进入中心等离子体就会完全破坏等离子体（破裂，**disruption**，产生高能电子，打坏第一壁，并放出大量高能伽马射线，后果非常严重）。根据估计，ITER（在建的国际热核实验堆）大小的装置，一年内至少会打下几百公斤容器壁材料。正常运行的聚变堆将有很多高能中子，这些中子将活化和嬗变部分材料。产生约束磁场的线圈是超导的，必须冷却到绝对温度4度左右，超导体对中子的加热和活化都非常敏感。如何在高中子通量中保护超导体是一个难题。氘氚聚变释放的能量主要体现为中子的动能。高能中子对壁的破坏很大。现在还没有任何一种材料，可以承受商用聚变堆中子照射一年以上。氢和氦在材料中的沉积也将导致材料的破坏。这些问题现在都无法解决。

由于还没有一个能够运行的聚变堆，聚变堆究竟能不能稳定运行，装置材料可以支撑多久，都还不知道。另外，由于目前条件下超导材料能产生的磁场是有限的，能约束的等离子体密度就受到限制，聚变堆要提高功率只能增大体积，也就是增大装置尺寸，这样装置的成本就非常高。

聚变虽然比裂变放射性小得多，但毕竟是有放射性的。聚变燃料氘具有比较强的放射性。聚变产物中子本来就是一种放射性，不好防护。氘还需要在反应堆壁增殖，也就是生产。这一过程会产生大量放射性物质。所以聚变堆一旦开始运行，一样带有强放射性。研究人员和敏感的电子仪器都不能靠近反应堆。

聚变装置投入大，周期长，还有很多技术没有得到验证，也还有一些问题没有解决。指望聚变发电短期内实现，并担当世界能源重任是不现实的。但到目前为止，除了磁约束第一壁材料问题尚需解决之外，其它各种关键技术已经基本明朗。如果能够按照路线图顺利发展，20到30年内也许能够实现聚变发电。如果再保守一些，无论惯性约束还是磁约束，40到50年内实现聚变发电的可能性非常大，80到100年内应该能够大规模普及，再过50

到 100 年成为社会的主要能量来源。但到目前为止,这些都还只是一种可能。

磁惯性约束聚变最近有所加强,但是还不是聚变研究的主流。它对聚变条件的要求居于磁约束和惯性约束之间,最大的优势是成本低很多,很有希望成为一类有前途的聚变方案。国内外目前还对轴向箍缩(Z-Pinch)方案进行了研究。该方案曾是惯性约束聚变的另一大途径,但现在转成了一种磁惯性聚变方案。

我们用火已经有几十万年了。煤、石油、天然气等化石能源的使用有一千多年历史。而大规模开发利用,成为社会主要能量来源,只有两三百年。如果花一两百年过渡到聚变能源,可以保证人类以后非常长时间的生存和发展,付出再多的努力,都是值得的。

由于纯聚变堆研究的困难,还有一种用聚变堆驱动裂变的混合堆方案,用聚变产生的高能中子照射裂变材料(主要是常规裂变反应堆不能直接燃烧的铀 238 和钍 232,以及乏燃料中的其它重元素),引起它们裂变,将总能量输出放大数倍,从而降低聚变部分的能量增益要求。聚变-裂变混合堆对聚变功率输出的要求比纯聚变堆低。所以大家一度认为混合堆更容易实现,是聚变能源应用的第一步。但考虑到混合堆百分之八十以上的能源来自裂变,而裂变(即常规核能)的风险(强放射性裂变产物)是大家非常忌讳的一个问题。混合堆由于其复杂性,装料量大,放射性的风险更难控制。一旦发生事故,危害比常规核电站更大。混合堆的超高放射性运行环境意味着,系统一旦运行,就不可能维护。此外,困扰常规核能的衰变热问题,核扩散问题,都同样存在,甚至更严重。2010 年,美国能源部组织全世界主要国家的聚变和裂变核能方面的专家,专门讨论了混合堆的各种科学问题,会后形成了一份白皮书,基本结论是混合堆的问题很多,不应很快推进。

## 地热能源

其它新能源,还有地热和生物质能等。

地热能源的来源包括天体运动造成地球变形和摩擦,主要是地球与太阳和月球相对运动的潮汐能,和地球内部各种放射性元素衰变放出的能量。总资源量高达 450 亿千瓦。但是地热资源的能量密度非常低,每平方米不到 0.1 瓦,只能在局部地热资源丰富区域利用。地热发电的投入也比较大,而且效益会逐年递减,因为该地区的地热温度随着时间推移会逐渐下降。

地热开发有一个额外的用途,就是可以抑制火山爆发。巨型火山爆发是地球上生命的大敌。曾经有好几次生命大灭绝是由巨型火山爆发引起的。在人类历史上,曾也几次造成社会大动荡。因为火山爆发的灰尘会停留在大气高层很长时间,导致全球气温大幅降低,植物生长受到影响,农作物收成大大下降,从而引起饥荒和战乱。

火山爆发的巨大能量，换算成热量并不多。我们经常说，一座火山爆发相当于多少颗原子弹，但是 1000 颗原子弹（特指二战结束时美国投在广岛那一颗）只相当于 2000 万吨 TNT，或 200 万吨汽油，用来发电大约相当于 20 万千瓦机组一年的发电量。有些对全人类潜在危害特别大的火山，比如美国黄石公园火山群，有必要很快开发利用它的地热资源，降低地下温度，让地壳变硬增厚，阻止火山爆发。

美国黄石公园地下是一座巨大的“超级火山”，也是全球唯一活跃的超级火山。一旦爆发，喷发的火山灰足以覆盖大半个美国，并造成全球型的气候灾难。火山灰长期停留在大气层，可以让全球平均温度下降十几度，季风消失，大部分生物将死亡。黄石超级火山的爆发周期为 60 到 80 万年，上一次爆发是 64 万年前。

地热开发长期来看，会降低地壳的温度，增加地壳的厚度。但对地球表面的温度不会有明显的影响。因为，第一，我们只可能在局部地热资源丰富地区开发地热，对地层的影响也只是局部的；第二，地球表面温度主要受太阳和大气的影 响，地热每平方米只有 0.1 瓦，而太阳能是 350 瓦，几乎可以忽略，也可以很容易利用太阳能调整。

大气会影响太阳能的吸收和地面热能的辐射。

在垂直城市时代，地热大量开发是有利的。因为地层变厚之后可以减少地质活动，降低地震发生频率，减轻地震带来的危害。垂直城市是很大的建筑，虽然可以设计抵御大的地震，如果地震能够减少，并且破坏程度减轻，当然再好不过。

## 生物能源

地球是个生命世界，每天有大量太阳能被光合作用转化为生物质能。虽然光合作用的效率很低，但总量巨大。据估算，地球上光合作用转化能量的功率达到 1300 亿千瓦，远远超过人类利用的初级能源总量。但是由于生命过程本身需要代谢，除了人类之外，其它的生命也需要生存。我们可以利用的生物能源，应该局限于我们自己种植养殖的动植物。

2010 年世界粮食产量约 23 亿吨，对应的残留物（秸秆等）大约也是这个数量。再加上树木及已砍伐木材的老化废弃等，全球每年可利用的生物质能在 50~100 亿吨左右。折合成能量功率约为 20 到 40 亿千瓦。

垂直城市时代，为了最大程度地降低对环境的影响，我们可以把农牧业也封闭起来。那么这些多余的秸秆，动物粪便等都需要处理。它们也是能量来源，可以以沼气、低热值燃料等形式利用。人类直接处理这些养殖业的废料，还可以为农业提供碳肥（二氧化碳）及微量元素肥料。

长期来看，随着化石燃料的逐渐消耗，有些必须使用液体燃料的场合，

比如远洋运输，航空航天等领域，必须找到石油以外的替代燃料。最有可能的就是生物燃料（乙醇，生物柴油等）。它们的来源是粮食、植物油、农牧业有机废弃物等。生物燃料在农牧业发达、土地资源丰富的地区有比较大的发展潜力。

地球上还有大量近海沙漠地区，如澳大利亚，撒哈拉沙漠，纳米布沙漠，中东，等。这些地区阳光充沛，在海水淡化技术或海水温室等技术大规模应用之后，也可以作为重要的种植业发展地区。因此，生物质能还有较大的发展潜力。

由于近海沙漠地区气温高，湿度低，可以直接抽取海水在温室一端蒸发，为温室降温，维持温室生产，同时增加周边湿度，形成降水，改变沙漠生态。海水直接蒸发析出的盐可以工业开发。这种技术叫海水温室技术，已经有相当成功的示范项目。

## 蓄能技术

随着工业化的发展，电气设备使用越来越多，蓄能技术越来越重要。比如，平常困扰大家的智能手机电池续航时间太短，被寄予厚望的电动汽车行驶里程过短等问题，都与蓄能技术达不到应用要求有关。如果垂直城市时代人类主要依靠可再生能源，特别是风能和太阳能生存，蓄能技术尤其重要。

然而，大规模蓄能是一件很困难的事情。比如将一百万千瓦一天的能量储存起来，需要 60 万吨铅酸电池，或 12 万吨钠硫电池，或 15 万吨锂电池，或 9000 万吨水提升 100 米。可是 2017 年中国电力装机已经有 17.8 亿千瓦，用电量已经达到 6.4 万亿度。假定垂直城市时代，主要依靠太阳能和风能，可以假定电能蓄存能力为 5000 亿度。如果用最经济的铅酸蓄电池，需要 180 亿吨。全世界一年铅酸蓄电池的产量才 450 万吨，并且已探明铅矿储量只有 8500 万吨。如果使用锂电池，情况更不乐观。储存 5000 亿度电至少需要 20 亿吨锂电池，而全球锂产量只有 5 万吨（锂电池重量跟用到锂的重量不是一回事）。需要几十万年才能把那么多锂开采出来，但锂在全世界的探明储量只有 1300 万吨。这里还没有讨论它们的成本和充放电次数。所有的电化学电池，在大规模储能方面都有同样的问题。也就是说，如果希望用化学电池的方式实现大规模蓄能，以调节风能和太阳能的输入输出，是不可能实现的，百分之一也实现不了。

这里锂的储量数据，和上面讨论聚变能时使用的数字有很大的出入。主要原因是，作为锂电池的锂和作为核燃料的锂价值差别很大，暂时不值得用海水提取锂的技术来开采锂电池用的锂。

目前成熟的大规模蓄能手段只有抽水蓄能电站。抽水蓄能电站已经有很多的工程上的例子，主要用途是电力消费的调峰填谷。储存 5000 亿度电需

要多少水呢？大约需要将 1 万亿吨水提升 200 米，也就是将长江入海口一年流量的水提高 200 米。如果把这些水覆盖江苏，浙江，安徽，福建四个省，可以达到 10 米深。普通的抽水蓄能电站一般只有几千万立方米，不到这一数字的万分之一。所以抽水蓄能也不可能实现如此规模的蓄能。

5000 亿度的储能量，是一个比较保守的估计数字。如果只考虑昼夜的差别，那么只需要存半天。但是风能和太阳能都有季节因素，有可能十天半个月发不了什么电。如果还有其它能源作补充，这一比例还可以低一些。

一些特殊的地区，比如青藏高原，天然存在很多面积巨大，相距不远，高差数百米的湖泊群，或者紧邻雅鲁藏布江。考虑到青藏高原极为丰富的可再生能源资源，就近发展大规模抽水蓄能仍然有很大的潜力。

那么，有什么技术可以实现大规模的蓄能呢？其实还有一种技术，就是压缩空气蓄能，可以满足间隙性可再生能源的大规模蓄能要求。300 大气压的压缩空气可以实现每公斤 500 千焦耳或者每升 170 千焦耳的储能能量密度，按质量计与锂电池相差不远，按体积计只有锂电池的四分之一。但是空气本身并没有成本，成本来自容器。如果使用高压罐，大约每 0.5 公斤罐体材料可以提供 1 升的容积。这样按罐体材料质量计算的能量密度，大约是锂电池的一半。但是锂电池的价格很高，高压罐的罐体材料是普通的钢材或者铝材（作为内胆），加上外层加固用的碳纤维或者玻璃纤维。这些材料成本价格大约是 10 元人民币左右 1 公斤，只有锂电池的几十分之一。考虑到高压罐的使用寿命一般是 20 到 30 年，远长于充电电池的寿命，作为存储介质，高压气罐的成本应该在电化学电池的百分之一以下。

对于压力容器，最关键的指标是罐体材料的抗拉强度。几乎任何材料拉成细丝后，抗拉强度都非常高。抗拉强度越高，需要的材料就越少，罐体的安全系数也越高。普通结构钢的抗拉强度只有 3000 大气压左右，高强度钢能达到 7000，但玻璃纤维能达到 40000，碳纤维能达到 60000 左右。玄武岩是地球上最常见的一种岩石之一，储量极其丰富。把它融化后制成丝，抗拉强度也能达到四五万大气压。

压缩空气蓄能是非常有前途的大规模蓄能方案，但是尚未形成产业，相关研究也还很不够。国际上，已经一些公司开发出小规模的产品，可以实现很高的充放能效率。

压缩空气除了直接蓄能以外，还可以实现很多看起来不太可能实现的功能，比如充放能效率超过百分之百，也就是充进去 1 度电，放出来超过 1 度电。有两种方法可以实现这一点。一是在寒冷的地方压缩，然后再炎热的地方膨胀做功，由于内能和气体的绝对温度成正比，如果在 0 度左右的高原压缩空气，在 27 度左右的城市环境中膨胀空气，空气的能量就会多出 10%。还有一种方式是利用高度差，比方在海拔 1550 米左右的高原（风能集中地区）压缩空气到 200 大气压，再用管道将压缩空气传送到在海拔 50 米左右的城市，压缩空气气压自然会上升到 250 大气压左右，因为压缩空气很重，

在联通的管道里，底部压强大，顶部压强小。这样又可以得到额外的一些能量。这些能量来自高原空气本身的势能。相对同一地点的压缩空气蓄能，高原压缩，低海拔地区利用，可以不费代价地多得到温度差，势能差，压强差三份能量（有重复计算）。

如果使用 300 大气压的压缩空气，同样储存 5000 亿度电，大约需要 100 亿立方米的高压容器，折合钢材、玻璃纤维等材料为 50 亿吨。虽然这也是一个很大的数字，但是钢材、铝、玻璃、还有玄武岩等，都是很平凡的资源，根据我们前面对各种资源的分析，在几十年的范围内，并不很难实现。而电化学方法和抽水蓄能在几十年内都是不可能做到的。

100 亿立方米 300 大气压的空气，放出来大约等于 30000 亿立方米，重约 40 亿吨，略不到地球空气总量的百万分之一，因此基本不会影响地球大气的功能。在全球变暖的场景下，少一些空气有助于降低地球表面温度，能够缓解全球变暖，但是幅度很小。

大规模蓄能技术与垂直城市关系不是很大，但是与未来大规模利用可再生能源关系很大。如果没有大规模蓄能，风能和太阳能等可再生能源的利用率很难超过 20%。一旦实现了大规模蓄能，就可以百分之百地使用可再生能源。

垂直城市每天要消耗很多电。这些电最后都会变成热，需要靠空气管理系统排出城市。等温压缩空气蓄能，在压缩的时候排出热量，发电的时候吸收热量。如果直接在垂直城市里利用压缩空气发电，则电总的热贡献是零。也就是电发出的热都被发电机吸收了，这样可以大幅降低排热系统的功率。另外，在高原或者沿海压缩的空气，直接排放到垂直城市里面，也可以改善城市的空气质量。

城市空气管理系统应该提供最好的空气质量，但外来的空气仍然可以作为一种资源。

压缩空气蓄能目前还存在一些技术困难。绝热压缩存在高温问题，等温压缩存在热源和换热效率问题，罐式存储存在安全性问题。

除了大规模蓄能以外，垂直城市里，普通设备的蓄能要求并不是很强。因为一直都在室内，可以随时充电。没有电动汽车的需求，但是有电动代步工具的要求。由于旅行距离短，普通的蓄电池足够了。

对于平时在室外道路上运行的电动汽车和电动自行车，充电非常不方便。垂直城市的代步工具本来就在室内使用，充电很方便。

垂直城市之间采用高效的轨道交通，城市内采用大量的电梯。这些交通方式如果考虑蓄能的话，能量的消耗还可以大幅降低。比如电梯，每天上上下下，平均下来并不做功。如果我们让下的电梯拉动上的电梯，不需要消耗什么能量。可以设计出电梯的能源回收方案，下的时候（其实是减速或者匀速下降的时候）发电，存起来，上的时候用。如果再在很多电梯间调度，下降的电梯发电，上升的电梯用电，只是不匹配的时候才把电存起来或者从外

界取电，这样就可以节省大量电能，也不需要很多蓄电池。

垂直城市之间的轨道交通也是类似的，加速的时候用电，减速的时候发电，同样可以节约很多能源。

其实现在的轨道交通，特别是地铁就是这样工作的。地铁从一站到另一站纯粹消耗在动力上的能源非常少，甚至不如该地铁列车在空调和照明上用的电量大。

## 能源互联网

要建立基于全可再生能源的能源体系，除了大规模蓄能外，由于能源生产地与消费地经常相距遥远，还需要建立强大的输变电网络。

对于新建的垂直城市，由于城市对自然地理环境不敏感，占用土地面积小，可以综合考虑能源，农产品产地等，以缩短运输距离。

可再生能源，特别是太阳能，在每个地方都有很强的昼夜节律。但如果将不同经度的太阳能电站联网，就可以大大延长太阳能的出力时间，甚至消除昼夜节律。因为地球每一时刻接受到的太阳能变化不大，本地太阳落山了，西边还没有落。一般本地太阳能一天能出力 10 个小时左右，如果联合相邻的五个时区，则每个地方太阳能的出力都能达到 15 小时。如果把全球的太阳能电站都联网，就可以不间断出力。当然并不需要每个时区都有等量的发电能力，间隔一两个时区也没有问题。

很长时间以来，由于电力的长距离大容量传输存在较大的技术困难，因此一般都是靠近最终消费地建设发电厂，而煤炭，石油，天然气等，要依靠火车，轮船，管道等长距离运输。但可再生能源，如风能，太阳能，水能，地热能，都无法运输，不能选择地点，只能在资源地发电。

大容量输电技术（特高压技术，超导输电）发展起来之后，电力可以经济传输数千公里，从而解决电力生产和消费的距离问题。

如果把全球所有的电力生产者与消费者通过大规模的大容量输电技术连接起来，就可以高效地利用所有的能源，保障全球的电力安全，这就是能源互联网概念。广义的能源互联网包含所有了种类的能源，但一般指电网。

能源互联网的发展还在初期。跨国电网调度存在地缘政治等问题。欧洲已经建立了跨洲的电力网络，北美的美加之间电力也是联网的，但要把更大范围内的电网连接起来，还需要更多的努力。

国内围绕特高压技术有一些争论，批评的人认为特高压不安全，造价高，浪费等。但能源互联是大方向，如果要用可再生能源的话。安全裕度不够正是因为还没有到规模。造价要看效益。传输能力闲置是因为原有架构还在工作。可再生能源发展很快，对能源互联的需求会越来越大。作为一个例子，设计为西藏输电的“电力天路”青藏，川藏 500 千伏高压输电线路，由于西

藏可再生能源发电的发展，已经开始往外输电。

## 垂直城市时代的能源

垂直城市革命可能最多只需要一百年时间。在这段时间内，传统能源在挖掘潜力的情况下，似乎也基本够用。

近几年，发源于美国的页岩气、页岩油革命让美国变成了一个能源净出口国。这是一个很大的变化，因为美国几乎一直都是作为一个能源掠夺者、资源浪费者的典范出现的。依靠自己丰富的页岩气资源，美国不仅可以更环保地使用传统能源，还能出口天然气到别的国家。美国国内的天然气和燃油价格，也远低于欧洲和亚洲。

据评估，页岩气的资源很丰富。中国也有很大的页岩气储量。除此之外，世界的可燃冰（天然气水合物）好像也很丰富。这些新型化石能源也许能够发展起来，也许会碰到更多的问题。究竟能不能逐渐取代现有的化石能源，或者更大程度地补充现有能源，改善能源结构，还有待观察。

化石能源，无论如何努力地勘探和开采，总是会用完的。天然气水合物的主要成分是甲烷，它的温室效应非常强。天然气水合物不稳定，如果发生大规模甲烷排放，对全球变暖无疑是雪上加霜。

化石能源也是重要的化工原料，对于以后的人类来说，仅仅作为能源使用太浪费了。虽然也可以开发新的材料、新的工业，采用别的资源作原料，但是总应该给我们的后代留下一些资源。

化石能源的优势在于，能源产业不需要做出大的改动，技术和管理手段都是现成的。这对于发展中国家，包括中国，是非常重要的。因为这意味着低的发展成本。

核能资源丰富，但是现有的技术尚有很大的风险，也为以后的人类留下了严重的隐患。但它有一个优势是所有别的能源都没有的，就是它是一种独立于地球自然环境的能源。我们说过，地球的自然环境在各种因素影响下，在大的时间尺度内，是会发生剧烈变化的。有周期性的冰川时期，有巨型火山爆发，有小行星撞击，……。在这些极端恶劣的自然条件下，人类需要生存，依靠别的能源都不行，因为化石能源这是很难开采和运输，太阳能和风能发电站在恶劣的自然环境下会很快破坏，海平面会大幅下降，陆地上的河流会消失，……。这时候唯一能够使用的就是核能。基于类似的理由，在即将到来的航天时代中，核能也是唯一可以依赖的能源。

从核能的这一特点出发，也许我们应该任何时候，都保持一定量可以随时投入使用的核电站，建而不用。平时不运行，这样就不会产生讨厌的放射性核废料。一旦重大自然灾害发生，马上可以作为应急能源投入使用，让人类熬过最难过的几年，保留人类文明的火种。

花巨资建设一批核电站，平常又不用，当然这是很不经济的。但是有什么比人类的生存更重要呢？

可再生能源资源丰富，总量巨大，绿色环保，适合大规模开发和日常使用。当然这里必须解决能量的大规模存储问题。压缩空气蓄能可以实现大规模蓄能。我们前面提到，为了百分之百地使用风能和太阳能维持社会运行，需要 30000 亿立方米空气和 40 亿立方米的高压容器。那么大量的高压容器，无疑会引起对它们安全性的担忧。但其实并不需要那么多的高压容器。1000 米深的地下，本身就是很好的自然高压容器。1000 米深的地下，环境压强在 300 大气压左右，越深，压强越大。还记得化石能源的天然气和石油吗？它们开采出来之后，地下实际上有足够的空间容纳很多的压缩空气，1000 米到 2000 米是石油和天然气的典型储藏深度。原则上可以利用这些腾出来的空间储藏压缩空气。甚至不需要再钻井和铺设管道，因为在石油和天然气开采的时候就已经做好了，所以成本可以很低。也就是说，深层压缩空气存储几乎没有存储成本，使用年限也几乎无限。

仅在中国的地下，就有几十万亿立方米的天然气和页岩气，上百亿吨的石油。我们上面计算的压缩空气总量是 3 万亿立方米和 40 亿吨，远小于可以开采的石油和天然气量，所以一定有足够的空间存放这些压缩空气。

石油和天然气开采出来之后，并不会留下一个空洞。地面会下沉，或者由地下水等填充原来石油和天然气占据的空间。但是仍然可以把压缩空气压进去，因为原来可以储藏这些石油和天然气，说明了这里是密封的，压缩空气打进去也不会泄露。而且因为深度很大，地表少量沉降或上升不会影响地面的建筑。

一般来说，可能不能直接把空气打进去，然后放出来使用。因为地下的环境与地表不同，如果地下残留较多的天然气，空气进去有可能引起爆炸，但是不会对地面产生大的影响。随着更多的空气注入，天然气浓度很低，难以反应。

已经有现成的技术使用同样的原理储藏天然气，也就是把采光了的油井或气井作为外来天然气的储藏室。西气东输工程中，就有好几处这样的储气井。

在垂直城市时代，维持社会运行的能量来源主要应该是风能、太阳能等可再生能源，条件是建立基于压缩空气的大规模蓄能系统，或者大规模抽水蓄能系统，或者改造现有水电装机。在 100 年的时间范围内，应该逐渐完成从现有能源结构到完全可再生能源的转变。核电站可以保留，但是应该逐渐减少出力，并且定期维护，保证紧急状态下可以使用。

垂直城市效率很高，非常节能，但并不意味着垂直城市时代，总的能量消耗会下降。化石能源和核能的消耗可以大幅下降，这无疑是我们乐意看到的。风能和太阳能，有那么多，不用也就浪费了，用了也没有什么坏处。

导致垂直城市时代总能量消耗增加的因素，我们前面也提到过，包括工

业化人口绝对数目的上升，垂直城市建设过程需要消耗能源，更多的航空和运输，航天成为规模较大的产业，……，以及，我们在下一章要讲到的垂直城市时代的农业，都可能需要消耗更多的能源。

## 小结

能源是现代社会运行和发展的基础。化石能源用不了很久，也会带来严重的环境问题。核能有严重的安全隐患，但是可以作为应急能源，和下一步宇宙开发用能源。聚变能的实现还需要较长的时间，除非出现新的方案。

垂直城市非常节省能源，但是社会的能源消耗还是会上升。

基于大规模蓄能的全可再生能源解决方案是可行的。可以利用的大规模蓄能技术是抽水蓄能和压缩空气蓄能。可再生能源（风能，太阳能，水能）蓄能，和能源互联网，可以为未来的人类社会提供足够的绿色能源。

# 第十章 农业

人不可能不吃食物，所以农业是人类生存的基本保障。农业生产从来是人类社会的第一要务。现代农业技术的使用保障了人类的食物供应，但也带来了很多问题。垂直城市时代农业应该怎么发展？

## 农业与人类生存

我们已经进入工业时代，信息时代。大部分人离农业越来越远，甚至有些人对农民和农业很不屑，羞于承认自己的农村出身，因为农村通常代表落后。但是农业仍然是人类社会的基础，是人类生存最基本的条件。

广义的农业包括种植和养殖，即所有与食品供应相关的行业，如粮食种植，畜牧，水产养殖等，但一般不包括食品加工业如酿造。农业为所有人生产食品。没有农业，人类就回到原始的采集时代，跟动物没有明显的差别。但是现代的人口数量太大了，不可能再回到采集时代。现代农业是工业时代人类生存的基础。

工业或者信息时代，只需要很少的人，就可以生产足够所有人消费的食品。但是农业产品没有很多的储备，必须连续不断地生产，才能保证人类对粮食的需求。

由于工业革命之后，人口数目的爆炸性增长，农业必须提供相应的食品增量。这对土地、水资源等，提出了更高的要求。耕地，是人类对地球景观的改变中，面积最大的部分了。以前的森林，草原，沼泽，现在都变成了耕地。但是每年的生产的粮食只不过刚刚够用，局部地区还有饥荒。

农业如此重要，但是几十万年以来，人类作为一个整体，基本解决粮食供应问题，还只有几十年的历史。历史上，饥荒是常态。各种常见的自然灾害如水灾，旱灾，虫灾，风暴，雹灾，还有社会动荡，都会导致粮食大面积歉收，从而造成大规模饥荒。

工业时代的人们，离开自然越来越远。饥荒是难以想象的大灾难。垂直城市时代，人类已经“寄居”在一个人造的环境中，这个环境本身是不会生产食物的。食物需要一个在别的环境中，与日常生活无关的产业来提供。这个产业跟现在比会有什么差别呢？垂直城市独立于自然环境，没有自然灾害，永久可靠地为人类提供舒适的生活环境。三维时代的农业是不是也可以独立于自然环境，不受自然灾害影响，永久可靠地为人类生产粮食，同时还能把

对自然的影响降到最低？

我们先回顾一下农业发展的历史，再根据过去发展的趋势，和现代农业发展的方向，推测垂直城市时代的农业应该变成什么样。

## 农业发展简史

农业是人类改造自然最早的尝试之一。改变被动接受自然产出食物的状态，种植选定的植物，以得到更多的食物。早期原始农业阶段，刀耕火种，开辟荒地种植作物，产量很低。同样一片土地能够养活的人口很少。但是毕竟比采集多得多，人口因此获得较大增长。这期间采集和渔猎的数量逐渐下降，种植业畜牧业的比重逐渐上升。原始农业诞生之后，锄耕和灌溉也慢慢出现了。

进入文明社会以后，农业进入传统农业时期。特点是精耕细作，使用铁制或木制农具，利用人力、畜力、水力、风力等自然能源，还有自然肥料，依靠祖祖辈辈流传下来的经验，以及历法从事耕作。精耕细作的劳动强度很大，需要使用人工或者畜力把地翻一遍，平整土地，归垅，下种，浇水，施肥，持续不断的照料，除草，浇水，还要防止虫害，兽害。收获的劳动量也很大，需要将果实和秸秆分离，去壳或者去皮，然后晒干，归仓，秸秆还需要打捆便于利用。即便是非常辛勤的劳作，仍然不能保证有好的收成。收成与气候，天气，虫害等有关，主要靠天吃饭。传统农业产量不高，意味着每个人必须种更多的地，出更多的力，很辛苦。

“谁知盘中餐，粒粒皆辛苦”，“一粥一饭，当思来自不易”，这些古语格言，都是传统农业辛劳的反应。农业和食物保障的辛苦和不可靠，造成了农耕民族勤俭的品格。勤俭，没有食品安全保障，也同样促生了保守、听天由命的性格特征。

传统农业的后期，由于贸易的发展，世界其它地区的高产作物如红薯，玉米，番茄等开始引入到传统农业地区。这些作物的引进，能够提高产量，改善食物结构。

耕作和收获都需要大量的劳力，现代农业最早使用农业机械翻地、收割、运输等，解放了劳动力。后来大量使用化肥增加农产品产量。利用杀虫剂控制虫害，除草剂清除杂草。同时大修水利，以便旱涝保收。再后来，通过生物技术或者基因技术，培育更好的种子，让作物有抗虫，或者抗风抗雨（抗倒伏）的能力，提高作物品质和产量。所有这些技术，构成了现代农业的主体。现代农业基本摆脱了低产，摆脱了对气候条件的依赖，人类也因此基本摆脱了饥荒。

但是现代农业也带来一些问题，包括占用土地过多，化肥和杀虫剂对环境的负面影响，生产这些物资的化工厂的污染，农业机械和灌溉设备使用大

量能源，农业用水量非常大，很多地区地下水位下降，地面沉降，土地盐碱化，等等。这些问题随着人口的进一步增长，农业现代化进一步的渗透，还会变得越来越严重。

## 更现代的农业

为了克服现代农业带来的问题，更现代的农业技术，已经摆脱了对土地的依赖。利用温室，可以让作物在完全人为的环境中生长，这就是现代温室农业，也有人叫做植物工厂，或设施农业，人工环境农业。在温室农业之前，还有地膜技术，大棚技术等，可以保水或者保温，让作物在北方或高原有更好的生长环境。

作物生长要求的条件很简单。要有光、要有水、要有一定的温度、和少量的营养物质。但是这些条件必须同时满足，而且在作物的全部生长期内，都必须满足。作物在地里长不好，就是因为需要的这些条件中，有些不能都满足，比如温度不够，或者没有水，或者某一段时间内光照不够或者水不够，等等。但这些条件，在人工温室里面，很容易在作物的全部生长期内同时满足。

实际上，人工温室还有更多的优势。

温室可以将植物生长所需的温度、湿度、光照等条件控制到最优，让植物尽情地生长。除此之外，可以根据植物生长不同时期的需要，配置最合适的营养液，可以让根处于最佳的吸收和呼吸周期，可以在空气中补充二氧化碳，这些都有助于植物长得更好，长得更快。还有，由于温室是封闭的，虫子进不来。即使有少量虫子，也可以通过诱捕等物理手段消灭，这样就不需要使用杀虫剂了；营养液是循环使用的，不会排放到自然界中，不会对环境造成污染。同时也很节约，利用效率高；温室中没有风雨，也就没有风灾或者暴风雨造成的损失。植物也不需要抗倒伏的特性。实际上，任何普通的自然灾害，都不会影响植物的生长；水是循环使用的，不像浇地那样有渗漏和额外的蒸发，因此用水也会大大节省；出于同样的原因，化肥和微量元素等肥料也非常节约，不会发生自然环境中的浪费现象。因此，温室农业是非常绿色环保的。

在人工控制环境下生长的植物，可以有惊人的生长速度和产量。曾经有多个实验室和温室农场示范过，一株西红柿可以在两年时间内连续不断地结果，单株总产量能达到3到5吨。单株茄子的产量也可以达到1吨。这些数字是露地种植的几十倍。

温室农业的产量很高，意味着生产同样数量的食物只需要很少的土地，因此可以大量节约土地。

现代化的温室农业也有一些问题，除了建造和维护费用高外，能源消耗

也很大。原因是“温室”本身，温室有很强的温室效应，阳光照进来，温度会升高很多，这就增加了维持温度的成本。如果简单通风换气，就不好补充二氧化碳。现代温室仍然需要太阳光作为植物生长的光源。这就决定了单位面积土地的利用效率低，只能种植一层或很少几层植物。利用太阳光的温室还不能说完全摆脱了气候的影响，因为有没有太阳光也是气候的一部分。阳光太多，可以遮掉一部分，但是如果阳光不足，就没有好的办法了，虽然也可以用人工照明补光，但是补光的费用很高。

温室农业是现代农业很重要的一个发展方向。除了产品绿色，产量高以外，还有一些额外的优势。正因为单位面积产量高，它可以建在城市中或者周边，这样不需要像普通蔬菜基地那样长途运输，即可节省运输费用和能源，又可以保鲜，还降低了运输过程中的损失。城市中的温室，可以利用城市较高的二氧化碳浓度，让植物长得更好。同时也可以改善城市大气质量。市民也可以享受到最新鲜的蔬菜。

那么在垂直城市中，温室农业可以有什么帮助呢？

很自然地，容易想到，如果将温室农业或者植物工厂，引进到垂直城市中，然植物工厂和人类社会形成一个完整的生态系统，不是很好吗？人类消耗植物工厂的植物，代谢排出二氧化碳，再由植物吸收变成蔬菜瓜果，……，听起来很好，但很遗憾，很难。原因是，垂直城市能够接触阳光的部分面积很小，即使全部拿来做植物工厂，也远远不能吸收城市中人类代谢产生的全部二氧化碳。“很难”的意思是说，如果大大减少垂直城市中人口数量，并且大大增加植物工厂数量，同时大量使用人工照明促进植物生长，那么是可能的。因为，为了消耗一个成年人排出的二氧化碳，需要7到8颗10米米高的树，或者10平方米的森林，或者25平方米的草地。更大的问题是，要维持这些植物的生长，需要常年开着一盏两千五百瓦的高压钠灯。

## 独立于自然的农业？

无论有多少困难，像垂直城市那样，完全独立于自然的农业，还是很有吸引力的。进入文明社会以来，人类从地球母亲掠夺的最大资源是土地，其中最多的那部分就是耕地。如果使用很少的土地，就可以种植足够的食物供养人类，我们就可以大大减少对地球母亲的侵占，就像垂直城市大大减少城市用地那样。

独立于自然，包括不需要太阳光的农业，无疑具有更深远的意义。因为这意味着我们人类，作为地球母亲和太阳父亲的孩子，已经长大了，已经独立了。我们可以自己生存下去了，可以不再依赖母亲，可以跨出地球，走向太空了，……。

先不要那么乐观，先看看能不能做到，以及都有哪些困难。

多层室内植物工厂，国外叫做垂直农场的，现在暂时还没有实例。但是可以看到这种农场的雏形。现在有两三层的阳光温室，或者更多层人工照明的蔬菜工厂。这类概念还有很多前卫的概念设计，感兴趣的读者可以在网上搜索“垂直农场(vertical farming)”，有很多精美的图片。至少在目前看来，它还是一项未来技术，我们详细地把它的优缺点列一下：

优点：

1. 最明显的优势当然是节约土地。室内种植节约土地的效应是多重的。首先，室内种植有便于植物生长的优化环境，植物生长速度快得多。其次，室内种植不像在室外有季节效应，全年都可以种植。第三，在育种和幼苗阶段其实不要那么多的土地和照明，但在露地上无法调整。移栽的人工成本很高，因此幼苗阶段会浪费大量土地和阳光；室内种植可以随着植物的生长，不断调节植株间距，最大程度地利用空间和光照。在这些因素的影响下，即使不考虑多层，室内种植单位面积的产量也是室外的4到6倍，对于某些植物如草莓和生菜，产量可以增加30倍（这里是指和室外露地种植比，不是和温室大棚比）。第四，室内可以多层种植。很多叶菜如油菜，鸡毛菜，生菜等，需要的垂直高度很小，加上照明及其它结构，最多0.5米就可以安排一层。二十层楼高度的植物工厂内，可以安排100层种植层。这样又可以提高土地利用效率100倍。这些因素加在一起，只要需要，可以将土地利用效率提高1000倍以上。中国现在有18亿亩耕地，千分之一就是180万亩，等于1200平方公里，仅比北京五环内面积略大。平均每个人，仅需要不到1平方米。如果耕地面积变成了千分之一，那么耕地占用的全球土地资源就可以忽略，对自然环境的影响也基本降低到零。
2. 一般来说，室内种植采用无土栽培技术，可以是水培或者气培。也可以使用少量营养土作为培养基，但是不需要大量的土壤。水是间歇性流动的，不需要保持很多的水。这样建筑结构不需要设计很大的承重，可以节约建筑材料。或者说，可以建很高，从而节约更多的土地。
3. 室内种植管理和收获都很方便。可以全面自动化，将生产、收获及后处理过程统一起来，流水线作业。而在露地上虽然也可以使用大型机械，但是要移动很长的距离，工作条件也比室内复杂，还多出来运输、归仓、再运输这些流程。
4. 因为室内种植占用土地很少，垂直城市占用土地也很少，所以它们可以建在一起。产品不需要长途运输，可以减少运输能量浪费和产品包装运输过程中的损坏和浪费。露地种植因为采收，包装，运输等原因造成的作物浪费相当大。浪费部分可以达到总产量的10%到30%。有很多农产品，如草莓，西红柿，以及一些水果，特别容

易在采收运输过程中损坏。这些作物可以种植在垂直城市中，便于人们直接采摘享用。

5. 农产品生产不受季节影响，不受自然灾害影响，不受虫害影响。这些都是室外露地种植的大敌。
6. 不需要使用杀虫剂，不需要除草剂，肥料使用量恰到好处，没有浪费，水资源循环使用，没有浪费。
7. 可以用作饲料或者工业原料的农业生产副产品，如秸秆、根茎等，容易自动回收利用。

室内种植不需要使用杀虫剂，是因为虫子无法在密闭分隔分区的种植空间内迁移传播，少量害虫可以通过物理方式诱捕消灭。种子和培养基都可以做灭虫处理，这样就不会有害虫的来源。不需要使用除草剂更容易理解，因为不会专门培养草的种子，每一份培养基只生长一株作物。

网络上已经可以找到很多植物工厂，或者叫垂直农业的精美图片，各种优点也得到了特别的强调，但是你需要多问一句，成本怎么样？

对于中国来说，土地资源，环境污染，食品安全等问题尤其严重。如果室内种植发展起来，这些问题都可以彻底解决。

当然，室内种植也有自己的问题：

第一个问题是投资很大。虽然技术方面问题不大，因为现有的植物工厂已经积累了很多相关技术和管理经验。更大规模的植物工厂，技术虽然仍需完善，但是原则上不应该有问题。大规模的室内植物工厂建设成本并不低。如果考虑全楼的供电，水循环，照明，自动化管理等，大型多层植物工厂的成本应该在每平方米 3000 元以上，超过普通住宅的建设成本。如果 1 平方米植物工厂可以代替 5 平方米耕地，那么中国需要 2400 亿平方米的植物工厂种植面积，再考虑建筑面积可以复用（一层楼布置多层种植层），那么也需要 1000 亿平方米左右的植物工厂，需要投资 300 万亿人民币以上。

这个数字听起来很大，但是与垂直城市安置一个人 50 到 100 万，全国 700 万亿到 1400 万亿相比，似乎也不算大。这里的估算很粗略，下面还会用别的算法计算。

第二个问题是，在植物工厂中，叶菜、果菜的增产效应很明显，但是主要粮食作物如大米、麦子等，增产没有那么明显。考虑到国内很多大米产区已经双季种植，如果要在植物工厂内种植大米，增产效应恐怕没有那么显著。

从饮食健康来说，多吃菜，少吃饭，更健康。少喝一点酒，粮食消耗量也不会那么高。当然，这并不是解决问题的办法。

第三个问题，其实也是最严重的问题。就是多层室内种植工厂基本上无法利用阳光自然照明，必须全面采用人工照明。但人工照明的成本，主要体现在能源消耗，非常高。

我们可以估算一下室内种植人工照明需要的能源量。

地球每平方米地表接受的太阳光辐射是 350 瓦,除掉反射的部分大概还有 180 瓦。这些光中,只有可见光部分对植物的生长有用,大概是 100 瓦。也就是说,太阳提供给植物的阳光功率密度平均为每平方米 100 瓦。但这里还有一个问题,就是一平方米 100 瓦的光照功率,是植物光合作用的饱和极限。光照大于这个极限的部分,植物无法利用。在太阳提供的平均 100 瓦光照中,大部分来自晴天的高功率光照。这时净光功率能达到 400 到 500 瓦每平方米,超过了光合作用饱和极限。大多数阳光都浪费了。不仅浪费,还因为光的热效应,植物需要消耗额外的能量和水分降温。所以实际上植物没有得到那么多有用的阳光。

那么在不浪费的条件下,究竟需要多少照明功率呢?从优化的角度出发,我们只需要不超过光合作用饱和极限就够了,比如说 80 瓦(接近饱和的时候效率也会下降)。这就是人工照明需要提供的功率。

80 瓦光照功率,用比较传统的高压钠灯,大约需要耗电 200 瓦。这样,可以计算出,如果要把中国所有的耕地都用室内种植代替,用传统的照明手段,需要  $2400 \text{ 亿平方米} \times 0.2 \text{ 千瓦} = 480 \text{ 亿千瓦}$ 。中国 2012 年总装机容量是 11 亿千瓦。发电功率是 6 亿千瓦,只有所需功率的八十分之一。

高密度的照明意味着高密度的发热,为了将温室维持在植物最优的生长温度,还需要强大的制冷。制冷功率大约是照明功率的五分之一到三分之一。这样将中国的农业全部转移到室内,需要额外提供 600 亿千瓦的发电能力,是目前发电能力的 100 倍。这显然是难以想象的。

那么有没有改进的余地呢?有。

首先,高压钠灯虽然是传统光源中效率最高的,但是现代的光电二极管(LED)光源效率可以更高。目前效率最高的 LED 白光光源效率已经达 80%,是高压钠灯的 2 倍。其次,植物的光合作用并不是全部可见光谱都一样有用,叶绿素有两个吸收峰,在这两个频率段光子利用效率最高。LED 本来就是窄谱的,发光颜色比较单一。如果我们用高效的 LED 只发出植物需要的光子,那么效率还可以提高一倍。再考虑人工室内种植可以优化不同生长期的照明,还可以把用于控制温度的能量节省回来。这样,需要的能量就从 600 亿千瓦降到 120 亿千瓦。

普通植物光合作用的光效率,在实验室的优化条件下,为 5.4%。考虑各种因素,虽然地球大部分表面都有光合作用(包括海洋,森林,草地,耕地等),但实际上只有 1%左右的太阳能被光合作用转化。因为太阳能总量巨大,所以总转化的能量仍然非常惊人,是目前人类初级能源使用量的 100 倍左右。实验室控制的优化生长条件下,再加上一些别的技术,提高光合作用效率是可行的。

假定光合作用效率能增加一倍,农业照明用电仍然需要 60 亿千瓦。是中国 2014 年装机总量的 5 倍左右。仍然是一个天文数字,短期内不可能实现,但已经不是特别远了。

光合作用效率太低，是全人工照明农业能源消耗量太大的直接原因。

人工照明种植，现在已经是一个比较成熟的产业。种植照明光源叫做植物生长灯。主要用于大棚中为植物补光。由于我们前面计算过的成本问题，全部使用人工照明还比较少，除非植物工厂产品的附加值很高，可以卖出很高的价钱。

实际上，世界上已经存在一个地下产业，专门在封闭的人工环境中种植大麻，完全采用人工照明。由于大麻的价值比较高，在西方一些地区，个人可以合法种植，相对于购买，种植投入的成本还是值得的。

## 可能的道路，西部温室农业

现代农业靠机械化，化肥，杀虫剂，除草剂，以及育种技术，已经取得了很好的效果，基本解决了庞大人口的粮食安全问题。但继续大幅度提高产量的希望渺茫。

## 露地，大棚，温室

完全依靠人工光源的室内种植，消耗能源太多，成本太高，暂时不能大规模应用。垂直城市时代，应该在我们看得见的未来到来。这段时间内，能源供应大幅提高几十倍的可能性不大。虽然垂直城市能够节省一半左右的能源，但是考虑全社会工业化程度还会加深，工业化人口总量也在上升，总的能源消耗不会有太大的降低。因此我们没有足够的能源，支持完全独立于自然的农业。

露地耕作到独立于自然的农业之间，还有一些中间步骤，包括大棚种植，阳光温室，阳光和自然光源并用的温室等。每一步都可以节约土地，延长土地使用时间，提高农作物产量。即使不使用人工照明，阳光温室也可以大幅度增加产量，节约土地，消灭病虫害，绿色种植。

一般露地西红柿的亩产 2000 公斤左右，大棚种植可以到 4000 到 5000 公斤，而温室的平均产量能达到 30000 公斤每亩，是露地的 15 倍。

阳光温室虽然一般不需要人工照明，但是仍然需要消耗很多能源。这些能源主要用来给温室降温，驱动各种设备运行等。温室的人工费用也高于露地，因为对从业人员专业化程度要求高很多。北方的大棚可以延长土地利用时间，提高产量。但由于纬度较高，一般棚间距比较大，将浪费一些土地面积。

现在温室种植的作物品种，一般局限于蔬菜和瓜果。因为它们的产量高，作为绿色蔬菜的价格也高。温室项目在经营上是有利可图的。温室用于粮食

作物生产，同样可以大幅度提高产量，但是没有蔬菜那么明显。粮食作物的种植面积很大，需要大型机械辅助管理和收割，不方便在现在的温室里进行。粮食作物不能在温室种植，实际上还有一个最重要的原因，就是粮食价格太低，温室种植无法收回成本。

从光合作用和能量利用的效率来看，叶菜利用效率最高，因为植物生产出来的大部分都可以利用。果菜类次之，如西红柿、茄子、青椒，等，实用部分水分足，可连续收获。谷物类的粮食作物效率最低，一季只能收获一次，秸秆浪费大量能量。

在总的耕地播种面积中，蔬菜瓜果的播种面积比例比较低，不到耕地总数的百分之十。所以即使大面积推广大棚和温室，节约土地的效应也不是非常明显。

蔬菜大棚或者温室一般建在大城市附近，这些地区的土地价值较高，节约土地仍然有较大的意义。

世界上大多数耕地仍然用来种植粮食，如水稻，小麦，玉米，大豆，等。玉米的产量高，现在中国第一大粮食作物已经从水稻变成玉米了。只要粮食作物不进入温室，就难以大面积节约土地。

除了温室之外，还有一些办法可以减少人口密集地区耕地的面积，那就是开垦人口稀少地区的荒地。利用适合大规模耕作的现代农业技术，开发部分荒地，以替换中国东南、西南等地区的小片耕地。中国西部和北部尚有大批宜耕土地。采用现代的节水农业技术，引进水源，可以开发大片土地，进行集约化管理和工厂化种植。西部降水量少，虽然导致干旱，但是也有好处，就是水土流失不严重，土地肥力容易保持。另外，西部阳光充足，昼夜温差大，这些都对农作物生长有利。

## 西部——垂直城市时代的农业基地

中国西部除了干旱之外，春秋的风沙和冬季的寒冷，也是发展农业的不利因素。如果能建温室，可以最大程度地降低这些不利因素的影响。同时，最大程度地利用高原地区阳光充足，气温较低的优势。阳光充足意味着白天容易维持温度，气温较低意味着不需要消耗很多能量制冷。夜间温度低，还有利于植物保持养分。

中国北部，包括内蒙，河北北部，东三省西部等，有大量宜耕土地，并不干旱，风沙也不太严重，同样拥有西部适宜发展农业的自然条件（阳光充足，温度不太高，昼夜温差大），非常适合发展温室农业。

有一点似乎令人奇怪，中国的太阳能资源，或者说用于植物生长的阳光资源，中国的北方比南方更丰富。主要原因是西部及北部地势高，被云及低海拔（浑浊）空气遮挡的阳光少。查一查中国太阳能资源分布图就可以发现

这一点。

植物生长需要充足的阳光，一定的温度，一定的养分，和充足的水分。在中国的西部和北部，阳光资源更加丰富，如果能够人为增加地表温度，会比西部更适合发展农业。而对温室来说，只要有阳光，温度自然会提升到合适的程度。温室中的水分和养分本来就可以得到最大程度的利用。由于总的气温较低，温室不像在南方那样需要很强的降温措施，从而有助于降低能源消耗和运行成本。强烈的阳光和很大的昼夜温差，对昆虫的生长不利。所以这些地区的自然病虫害也较少。

西部也是可再生能源非常丰富的地区，包括风能，太阳能，水力等。如果需要对作物补光，延长作物的每天的光合作用时间，缩短成熟时间，会有丰富的绿色电力供应。植物补光并不需要非常规律。效果是累积的，即使来电不稳定也没有关系。有就补一点，没有就不补，最多成熟晚几天。

在前面论证太阳能的困难的时候，我们说过，要开发数十万平方公里土地发展太阳能是非常困难的。但是结合高原温室农业发展则有很大的前途。因为高原太阳光能丰富，而植物对太阳光的利用有一个极限，为每平方米100瓦。但是高原太阳光能高峰时可以达到每平方米1000瓦，植物无法利用。如果把这部分太阳能利用起来，即在温室顶部铺设一定比例的太阳能电池板，既可以充分利用太阳能，又可以减少温室的降温需求，是一个两全其美的方案。

温室中的植物由于温度、湿度、水分、光照、养料都足够丰富，生长很快。但是还缺乏一个必要的因素，那就是空气中的二氧化碳。二氧化碳是植物光合作用必不可少的。对于露地种植，这不是一个问题，因为空气中自然含有一定浓度的二氧化碳，况且也无法控制。一般来说二氧化碳浓度越高，植物生长越快。但在温室中，植物生长很快，容易很快降低二氧化碳浓度。城市周边，二氧化碳浓度本来就偏高，只要持续换气就可以了，但一般也会补充一些二氧化碳。但在高原地区，二氧化碳浓度偏低，必须在温室中补充。

中国的西北部也是化石能源资源丰富地区，有大量的煤炭和坑口电站，每年排出大量二氧化碳。如果把这些电站的排放收集起来，作为温室的碳肥，无疑皆大欢喜。但长期来看，这些电站是要停掉的。在几十年的时间内，逐步停掉内地的火电站，保留西部的火电站，可以保证温室对二氧化碳的需求。如果火电站不够了，那么还可以走人工碳循环的路线，即封闭农业和畜牧业，让碳在人工控制的小范围内循环。

这种碳循环可以将垂直城市和温室基地用管道连接起来，或者在垂直城市中用物理、化学的方法捕获二氧化碳，运输到温室。畜牧业基地可以直接和温室基地间隔布置，建立独立的生态圈。

在有足够的能源发展独立于自然的室内种植以前，在西部和北部开发温室农业是很好的选择。考虑到温室土地利用效率的倍增能力，西部开发一平方公里温室，至少可以代替东部经济发达地区六平方公里耕地。东部可以保

留部分土地开发温室，种植瓜果蔬菜，这样可以降低瓜果蔬菜的运输费用和损失，而将粮食搬到西部和北部的温室中种植。

也许有人会问，垂直城市已经非常节约土地了，还要发展温室，搬迁粮食种植干什么？土地不是够用了吗？理由如下：我们的长远目的重建是一个自然的“自然”，尽量降低人类对自然的影响，为地球上其它的动植物留下更多的生存空间。西北部是自然条件恶劣地区，本来没有多少动植物。我们改造过来保证人类食物供应，可以最大程度地减小对自然环境的影响。

实际上我们需要要把所有的耕地都改造成温室，这样才能建立一个健康、有保障、受气候变化和自然灾害影响小的农业。

那么，中国的西部和北部，并不是传统的种植农业地区，将农业基地建在这里，合适吗？

需要知道的是，温室农业和传统农业有很大的差别。它们对自然环境和资源的要求是不一样的。

作物生长的条件是阳光，温度，水分，和含有必需养分的土壤。传统农业完全依靠气候条件和肥沃的土壤。有了灌溉和肥料之后，对气候和土壤的要求降低，但是仍然需要保证环境的温度及光照。传统条件下，只能依靠地理位置和气候条件来保证。即使有现代农业技术的帮助，传统露地农业仍然有不少问题，比如灌溉的能力有限，病虫害不好控制等。大范围干旱的情况下，灌溉技术也无能为力。露地农业对严重一些的其它自然灾害，如暴风，暴雨，冰雹，等，也没有很强的抵抗能力。

温室农业唯一需要的外部资源是阳光。温度可以在很大范围内控制，水分、养分都不是问题。西部北部阳光充足，昼夜温差大，降尘量少，都是发展温室农业的天然优势。所以，要发展温室农业，西部和北部是更好的选择。

国际上，现代农业，或者叫温室农业，设施农业，主要不是在传统农业地区发展。除了日本主要是因为土地不足以外，以色列，美国，还有西班牙南部的自动化设施农业都是在沙漠或者戈壁地区。即使温室花卉种植发达的荷兰等地，也不是传统的农业地区（因为纬度太高）。

现在南方也有很多塑料大棚。在南方，大棚在冬天的优势比较明显，但在夏天有很多弊端。夏天南方气温高，昼夜温差小，大棚内温度更高，湿度也很高，超过了作物生长的适宜温度区间，作物反而生长不好。昼夜温差小，生长季节夜间延续时间也很长，这样作物在夜间消耗养分也多，白天合成的养分难以积累，导致农作物的产量和品质都下降。普通大棚的降温只能掀开塑料膜，这样大棚的意义就没有了。

基于同样的原因，由于环境温度高，温室大棚建在南方降温成本过高，作物的生长条件不如北方。

大片温室人工降温非常困难。太阳直射时功率可以高达 1 千瓦每平方米，一亩地近 700 千瓦，即使制冷效率很高，至少也需要 200 千瓦，每小时电费超过 100 元，一天超过 1000 元。夏季如果按一百天计，仅制冷的电费成本

就会超过 10 万元。这显然是不可能接受的。况且大面积制冷，废热甚至没有地方可以排放。南方夏季高温期间，不但白天温度高，夜间温度也很高。如果要维持较低的温度，夜间也需要制冷。在高原由于环境温度低，可以适当设计温室，以被动的方式散热和控温。

南方多暴风雨和虫害，北方多风沙和雪害。

对于大片的温室，只有局部位置需要加强对大风的防护，温室采用钢结构，加强设计和施工可以避免风沙的危害。只要温室结构不破坏，风沙对植物生长是没有影响的。

对于温室来说，雪害不容易成灾。一是因为降雪量不像降水量那么大，一般定义的暴雪，降水量只有暴雨的十分之一左右。二是温室依靠阳光加热，土壤和多层玻璃保温，能够常年维持在一一定的温度。下雪持续时间不会很长，能够很快融化，不容易积累。我们也不用在特别冷，雪灾特别严重的地方建温室。

温室的成本高。现在农产品基地更多采用塑料大棚。简易的大棚以竹竿和木头为拱架。优点是取材容易，施工方便，造价低廉，平均每平方米仅需几十元人民币；但它的缺点是强度低，抗风、雨、雪能力差，容易朽烂，需要经常维修和更换，操作管理也不方便。竹木支架跨度小，大棚内空间狭小，需要很多柱子，棚内工作不方便，增大了劳动强度。

增强的钢架式大棚以方钢管为拱架，涂防锈漆或镀锌防锈。强度高，抗风雨雪能力强，跨度大，大棚空间大，操作管理方便，使用寿命较长，可达 10-15 年。钢架大棚成本比较高，约每平方米 100 元人民币。

塑料大棚的保温效果不太好，夜间需要覆盖保温层，白天在太阳直射下温度又容易过高。过高的温度增大蒸发量，增加湿度，导致霉菌大量繁殖，引起减产及作物品质下降。

玻璃联排温室的造价每平方米 400 元左右。但国内目前的“玻璃温室”，“阳光温室”智能化程度还不够。本章用的“温室”一词专指自动控温，自动灌溉，自动施肥，自动监测，等等，的智能温室。小面积智能温室投入很大，主要是控制部分的成本高。框架，玻璃，管道等的成本并不高。控制部分对于大面积的温室也是一样的，所以规模上去后，控制部分的成本平均起来会大幅下降。

温室可以为作物提供优化的生长条件。我们经常在新闻中看到，某一科研单位开发的新品种，可以使粮食作物亩产达到多少公斤，比如说亩产 1500 公斤的玉米，“吨粮田”，等等，但是那么多年来，经过长期努力，全国粮食（包括稻谷、小麦、玉米）亩产平均仅仅只有 353 公斤（2012 年）。考虑到南方很多土地已经实现了多季种植，这个数字是非常低的。试验田的产量都很高，但是一旦推广，产量马上下降。这是因为试验田有很好的其它条件，如光、温、肥等，种植人员的专业水平也要高一些。

对粮食产量有决定影响的因素，除了种子之外，其它物理条件也非常重

要，比如雨水，积温，光照等。在全部耕地面积中，比例更大的是低产田。作物生长需要的各种条件，只要一项不具备或者不足，就足以大幅度影响产量。这些条件在露地是很难控制的，但是在温室则可以。温室可以充分发挥良种的优势，提高粮食产量。

除了产量之外，物理条件不够，粮食的品质也会受到很大影响。目前国内几大粮食品种的优质率在 50% 上下。温室能够提供优化的生长条件，优质率更有保证。

我们也可以看到，自动化智能温室的产量非常高，瓜果蔬菜类是露地的十几倍到几十倍，那么推广之后，是不是也会发生同样的“推广难”问题呢？刚开始的时候，应该是会有的，因为大量人员需要培训。

温室与露地相比，还有一个重大差别：智能温室是可以复制的，但是土地和气候不可以。经过人员培训之后，所有的温室都应该能按照设计的性能工作。智能温室专业性很强，但是可以将用户界面做得很友好。就像汽车制造很专业，但是司机只需要定期开车到 4S 店就可以了。在物联网充分发展的垂直城市时代，只需要少量专业人员，甚至专家系统（种植管理软件），监控温室、维持设备正常运行就行。

## 西部农业基地的开发

将农业迁移到西北，并且完全智能化、温室化，可以彻底解决常规条件下的粮食保障和食品安全问题。粮食生产与气候季节无关，与普通的自然灾害无关。任何时候，任何季节都可以享用任何品种的瓜果食品。如果没有特别巨大的灾难，可以说，这样做可以完全解决我们生存所需的粮食问题。

目前国内设施完善的钢架玻璃温室大棚，报价于每平方米 300-400 元。规模连片的造价要低一些。如果以 300 元每平方米作为参考价格，全国 18 亿亩耕地约需要 2 亿亩温室来代替，等于 13.3 万平方公里，即 1330 亿平方米，需要投资 40 万亿人民币。这个数字只有完全独立自然农业投入的五分之一。如果在二三十年内完成，每年只需要两三万亿人民币，对宏观经济的冲击很小。当然实际上还需要包括相应的基础建设投入。考虑增加自动化采收系统，配套畜牧业、能源供应以及其它生物能源、酿造等行业，以消耗秸秆等副产品。总投资可能需要 100 万亿人民币左右。这些基础设施、配套产业、人员集中居住的小型垂直城市等，也需要土地，总的开发面积可能要到 20 万平方公里。

这是一个保守的估算，后面还有更合理的估算数。

建设智能温室农业，主要消耗的材料是钢材和玻璃。管道可以采用塑料。这些都是大宗工业产品，资源丰富，供应能力强。温室内自动采收需要大量的机械设备，主要原材料是钢材，也需要消耗一部分铜和铝。加上这些设备

后，钢材的消耗量会增加很多，但是应该是可以承受的。

西部并不是传统的农业基地，也不是人口密集区域，开发程度低。大规模开发西部，发展智能温室农业，必要性和重要性是毋庸置疑的，但是如此大规模的开发需要注意发展步伐。既有大尺度的基础规划，也要花时间储备和开发相关技术，还要准备充足的产业能力。

由于西部自然条件相对恶劣，人口聚集在垂直城市是必然的。但考虑到智能温室农业分布面积很广，这些垂直城市的规模都不会很大。可能每座城市就一两万人。基本上只是为附近的农业和配套畜牧业，食品加工业，能源等产业服务。

在西部温室技术逐步成熟，形成规模，能提高大批高质量、绿色的农产品之后，可以逐步退耕东部的低产田，坡耕地，小块耕地。东部农业地区的人口也可以有引导地迁移，或进入城市，或到西部农牧业基地。温室种植虽然需要大量人力，但是总量不会太大，人口总数的百分之一以下从事农业，就足够养活全国的人口了。

目前中国的西部和北部已经有大量耕地。这些地区相对开发程度较高，基础设施建设比较完善。单纯就耕地面积而言，如果把这些耕地全部改造成智能温室，足够替代全国所有的耕地。但是这些耕地仍然以露地为主，走的是传统农业的发展路线。当然也有很多地方适合改造成温室。另有一些跟东部的一样，夏天温度太高，人工降温代价太大。因此还是需要开发大量海拔更高，更便于温度控制的土地。

西部和北部多为高原，地势平坦，基础设施建设比较容易。西北地区面积很大，可开发利用土地很多。气候条件跨度也很大，不同地区可以根据作物习性和当地气候条件（主要是必须能以最小代价控制温室温度）种植不同的作物，满足食品供应的多样性要求。

西部更高的地区有永久冻土带。这些地区空气稀薄，但阳光资源特别丰富，但是不便大规模施工。也许开发为可再生能源生产基地比较合适。

中国的西部和北部很多地区仍然欠发达。社会发展程度与东部相比有一定距离，没有产业或者只有原始的畜牧业。很多地区的生活状态和人们的思维方式仍然停留在中世纪。现代化必须改变生活方式和思维方式。救助性的支援和帮助，只能让当地的人们在原始的生活状态中过得更舒适，更不愿意接受变化。无论是农业还是新能源的大开发，都能够帮助当地人民更多地接触现代，转变思维方式，生活也会更好。生活、就业等问题解决之后，民族、宗教问题也会大大缓解。

二十万平方公里，约等于中国所有耕地面积的六分之一。我们可以再换种方式计算一下，看看那么多智能温室面积够不够。

以稻谷为例。稻谷在南方是每年两熟，但是品质较差，在泰国等热带地区可以一年四熟。为了缩短田里的生长期，尽量利用阳光，稻谷种植需要先育种，再移栽到大田里。但移栽后苗很小，阳光利用不充分。假定温室可以

随苗的长大，不断调整间距，那么在不改变其它因素的条件下，可以做到一年六熟。目前超级稻的产量已经超过每亩 900 公斤，在温室优化的生长条件下，可以合理假设每亩 1000 公斤，那么每亩的年产量就是 6000 公斤，是目前全国平均水稻产量的 14 倍。但是这里还需要扣除露地复种因素，扣除之后，大约还有 10 倍左右。

小麦有点特殊，冬小麦在冬季生长，这样生长期就很长。但是也可以在温室中种植小麦，生长期 120 天左右，和水稻差不多。

其它的粮食作物如玉米、小麦，传统上不多季种植，因此不好直接比较。但如果将每亩每年 6000 公斤作为参考，近年来年中国粮食产量约为 6 亿吨，只需要 1 亿亩温室，不到 7 万平方公里。即使加上一些富余量，10 万平方公里的温室应该是足够了，这样连同配套的附属设施，公路等，总共只需要开发大约 15 万平方公里的温室农业基地，相应的投资等比例下降。

## 青藏高原，新的生态圈

温室农业需要良好的自然环境。仔细梳理一下中国各地的自然环境，我们会发现，在发展下一代温室农业方面，青藏高原具有得天独厚的优势。

在严重依赖自然环境的农业时代，中国的粮食供应主要靠温带亚热带的水稻和其它经济作物。“湖广熟，天下足”，“江南鱼米香”，“天府之国”，北方种植小麦、小米、高粱等，因为气候和水资源的原因，单位面积产量完全无法和南方比。但工业化以来，中国的商品粮基地已经转移到北方，东北成了粮食基地，西北发展各种经济作物种植。这是因为北方可以开垦的地方很多，土地平整，适合工业化大机械作业，夏季气候适宜。而南方大量传统梯田，小块耕地，不适合大规模机械化耕作。

北方气温低，发展温室可以大幅延长种植时间。这些年在山东、河北等地发展了大量温室，反季节种植。目前已经可以完全满足华北，东北等地的冬季蔬菜供应需求。东北、西北虽然也有一定的温室发展，但是难以克服冬季温度过低的问题。如果要人工加热，则成本太高。此外，温室为了透光和种植，一般结构上都比较单薄脆弱，对风沙，冰雹等自然灾害承受能力较弱，一次灾害造成的损失很大。

相对东北和西北，青藏高原纬度低（意味着冬夏差别小），海拔高（意味着本底温度低，昼夜温差大，自然生态贫瘠），阳光充足（意味着有利于种植和太阳能开发），没有破坏性自然灾害，没有本地病虫害，水资源丰富，可利用土地面积巨大，开发程度低，等等，发展下一代农业优势突出。

青藏高原共 250 万平方公里，其中的一半，因为高寒，依靠光合作用的自养生物无法生存，自然生态极度贫瘠。根据我们前面的计算，只要开发其中的二十分之一，也就是极度贫瘠土地的十分之一，约 12 万平方公里，就

可以解决全中国的农业和能源问题。

在存在充足光照的条件下，温室创造的人工环境可以非常优越，同时非常节能。高原条件下，普通结构的温室也可以有效提高气温 40℃ 到 50℃。即使在最冷的冬天，也可以很容易维持植物生长需要的温度和光照条件。高原地区的冬季几乎没有阴天。白天可以升温并蓄热，维持夜间不霜冻，夜间的低温又可以有效保持植物养分。而在夏天，高原上不存在高温。在青藏高原，仅利用低成本的被动控温，温室就可以常年维持植物的最佳生长条件。种植发展起来后，养殖业顺理成章。

人工环境控制所有的环境要素，种植业和养殖业的发展没有限制，无论是热带作物，温带作物，还是潮湿，干旱需求，都可以满足。因此人工环境下，可以打造各种各样不同的生态圈，培养不同的生物群落。

种植养殖产业发展起来之后，城市，休闲，观光的发展自然而然。在发展被动型人工环境的条件下，青藏高原几乎是理想的天府之国。

青藏高原没有东部常见的台风，冰雹，没有西北的大风，沙尘暴，没有东北的低温，土地平整，没有本地病虫害。种植发展起来之后，强烈的阳光和低氧环境让困扰全球农业的各种病虫害无法发展，因而种植成本低，产品绿色有机。

近年来，西藏已经发展来大量大棚种植，已经取得了很多经验，大大改善了西藏本地的饮食结构。

青藏高原发展的缺点在于基础设施还不够完善，人才缺乏，高原缺氧不适合长时间户外工作。但西藏的基础设施正在不断完善，川藏铁路将很快通车。牧民定居和社区化，人才培养等，也取得了长足的进步。

高原缺氧在人工环境中可以解决。

随着技术的进步，由于温室环境温和，发展以机器人为主的精细自动化目前看来并不存在原则性的障碍。由于可再生能源丰富，大规模工程施工可以考虑电气化，以降低开发成本并保护环境。

认为青藏高原自然环境恶劣，无法发展农业的人士应该知道，上世纪初，东北和西北能够成为农业基地也是难以想象的。还有就是，西藏已经发展了上万亩大棚，产量不比内地差。

## 走向独立于自然的农业

回顾几万年来农业的发展过程，从原始的刀耕火种，到传统的精耕细作，再到现代的机械化、化肥、杀虫剂、除草剂、生物技术，等等，每一步都在摆脱自然不利的影 响，争取更独立更安全的农业生产。现在已经开始大规模的使用大棚、温室，智能温室、植物工厂已经出现，但是还不够普及。下一步必然是智能温室的大规模建设。

但是智能温室仍然离不开太阳，土地使用面积也还很大，仍然是二维的发展模式。效率虽然比现代农业高，但在垂直城市时代，仍然让人觉得不够完美。最好还是能够发展完全独立于自然的农业，这样人类才能够在任何自然条件下生存。

智能温室之后，发展到完全人工环境的农业，与历史上农业发展的每一步一样，也是一个很自然的过程。

但是我们计算过，如果不利用太阳光，完全人工照明的农业代价太高，需要的能源太多。主要原因是光合作用的效率太低了。即使在实验室的优化条件下，对光能的利用效率也只有 5%。前面我们也提出了一些想法，可以提高能源的利用率，如使用高效率光源，针对植物生长不同时期优化光源光谱等。这些做法都可以提高光源的照明效率，降低能源消耗。但这些还不够。

那么还可能有些什么办法呢？

## 一次种植，多次收获

由于地球的气候是季节性的，以一年为周期，所有禾本科的粮食作物（稻谷、小麦、玉米都是），本质上都是草，自然也受到一年的生命周期限制。短短的生命周期内，从一粒小种子开始，发芽，生长，变成幼苗，再生长，花很长时间长到成熟了，才能开花结实。但是结一次实后就到秋天了，死掉了（冬小麦是夏天收割）。一大半时间是在准备，在积累自身，在生长根茎叶，真正结实的时间只有一个月左右。看一看玉米，高粱等高大的作物。它们必须在短短两三个月内长到三米来高，然后很快就要死掉了，的确很浪费。即使多年生的植物，比如果树，由于季节变换，每年要把所有的叶子换一遍，同样需要大量时间和养分。

但是在人工控制的温室里面，可以没有年度周期。作物不再需要“一岁一枯荣”，浪费大量养料生长根茎叶，然后只用一次。可不可以将主要粮食作物培育成多年生，或者常年结实的植物呢。西红柿也是草本科的，在温室里长大后，可以连续两年一直结果，单株产量可以达到数千公斤。茄子，瓜类，豆类等，长大后，只要生长条件合适，都可以延长结果时间。这些作物温室种植的成功经验，可以为其它作物进入温室提供借鉴。

多年生粮食作物如水稻，玉米，小麦的研究，是一个活跃的研究课题。除了增加粮食产量，降低重复劳动量以外，多年生的作物还有助于水土保持（因为根系长期都很发达），生物固碳等。但是自然环境下，多年生作物还是有枯有容，不能连续收获。

## 调整饮食结构

人类的饮食习惯首先受地理气候限制。生活在什么地方，有什么食物，就只能吃什么食物。现在影响饮食习惯的最大因素，仍然是地域。时间长了以后，人们适应了当地的食物，开发了基于当地食材的各种食品，就形成了各自的饮食文化，成为一个地区的传统习惯。不同地区，饮食习惯差异很大，有吃肉为主的，有素食为主的，有食用水产品为主的。我们的肠胃身体，也会逐渐适应这种变化。

但是人类毕竟是一个物种，我们对各种营养摄取的要求，基本上是一样的。新鲜的蔬菜水果，以前很多人都吃不到，因为他们生活的地区没有。但是现在几乎所有的地方，都可以吃到各种食物。以后慢慢地，人类的饮食习惯会向有益于身体健康的方向改变，这就包括多食用蔬菜、水果、奶制品等。

室内种植，最终还是以人类的消费需求为目标。但是开始在能源成为限制因素的条件下，可以适度考虑节能的需要。比如蔬菜种植比主食种植更节能，水产养殖比畜牧养殖更节能，那么可以适度鼓励食用蔬菜和水产。

营养专家建议，为了保持身体健康和减少慢性病的危害，人们的饮食应该遵循“营养金字塔”构成。金字塔中，油脂类最少，奶制品，豆制品，鱼禽肉蛋次之，蔬菜水果谷物最多。

## 提高光合作用效率

植物的光合作用效率，也就是将太阳能转换为化学能的效率，一般在3-6%之间，但随着光谱，光强，温度和空气中二氧化碳含量的变化，实际的效率可以在0.1%到8%之间变化。有些植物有较高的光合作用效率，比如甘蔗和玉米，这是因为它们光合作用固碳的机理有所不同。

普通植物的光合作用，通过卡尔文循环将二氧化碳固定。这类植物叫做碳3植物，因为光合作用的第一个产物含有三个碳原子。玉米等植物除了卡尔文循环外，还通过一条叫做哈奇-斯莱克途径的循环将碳固定，二氧化碳与一个三碳分子合成一个四碳分子，所以也叫碳4循环。碳4循环固定同样的二氧化碳需要的光子数比卡尔文循环少，也就是光合作用效率更高。

玉米是碳4植物，稻谷是碳3植物，这也可以解释为什么同样一片地，同样多的光照，玉米长得高大，产量也比水稻高。作为特例，甘蔗也是碳4植物，它的光合效率非常高，能达到8%。它的能量储存率也很高，因为它的利用方式不是果实而是茎，能量储存方式不是淀粉而是糖，所以几乎所有转换的光能都能被人类利用。陆上碳4植物的物种数，只占植物物种总数的3%，但是光合作用提供的氧气量，却占全部植物的40%。

光合作用在地球上已经存在几十亿年了，叶绿素及相关的生物化学过程也进化了那么多年，再提高光合作用效率似乎应该很难了。但事实上，还可以通过技术干预的办法，来提高光合作用效率。自然界的光合作用效率不高另一个原因是，阳光太丰富了。植物对阳光的利用率，并不是生存竞争的主要限制因素。

提高光合作用效率，或者人工照明能源的利用效率，可以在技术上采用一些办法。

一种办法是像我们前面提到的那样，优化人工光源的光谱。太阳光有一半左右波长过长或过短，能量太低或者太高，对光合作用贡献较小。那么我们可以让人工光源多发对光合作用贡献高的光。植物常见的两种叶绿素，对一定波长的红光和蓝光有较高的吸收率，那么我们就多发出这两个波长的光。很多情况下，一个蓝光光子或一个红光光子，对光合作用的贡献是一样的。那么我们就可以多发红光，少发蓝光，因为红光的能量低，光电二极管发红光的效率也更高。人工光源光谱的优化，可以将光合作用光能转换效率提高4到5倍。

如果在阳光温室中，我们同样想办法，将阳光中对光合作用没有贡献的部分，转换到有用的波长段来，那么可以大大提高阳光的利用率。比如紫外光可以通过荧光的方式转换为可见光，红外的部分也有技术转换到可见光。这些技术目前还不够成熟，没有开始使用。其实主要原因是需求不大，因为通常来说，阳光是足够丰富的。但对于温室种植，阳光资源需要最大化利用的情况下，这些技术会有用武之地。

还有一种办法，可以改善光合作用的效率。阳光虽然非常丰富，但一般是有方向的。作物有些部分阳光不够，叶子不能发挥应有的功效。人工照明可以在所有方向安排灯光，让所有的叶子都有效地进行光合作用。

另一种做法是改良作物。比如碳4作物的光合作用效率高，我们可以将碳3作物用各种办法转变为碳4作物。实际上这是一个活跃的前沿研究课题，目前主要的研究对象就是水稻。如果水稻能够同时进行碳4循环，那么在不改变任何其它种植条件的情况下，产量可以提高近一半。

用生物或者基因工程的办法改良作物，还有许多事情可以做。比如现在露地种植的条件下，育种的目标除了高产之外，还需要能够抗虫，能够抗倒伏。比如近年来大家关注和争议较多的转基因作物。转基因的几个重要特性，包括抗虫，抗除草剂等。但是在温室条件下，并不需要抗虫，不需要抗除草剂，也不需要抗倒伏，因为温室里即没有无孔不入的害虫，不会使用除草剂，也没有大风大雨。不需要这些特征之后，我们可以培育适合在温室生长的作物类型。比如，不需要太高大，光合作用效率要高，长大之后能够长期收获，能够连续收获，等等。

## 养殖与绿化海洋

人类是杂食动物，动物蛋白是食物中不可缺少的。采集时代，动物蛋白依靠狩猎、捕鱼、或者食用昆虫等小动物。农业时代，主要的动物蛋白供应依靠蓄养的家畜。即使到现在，还有一些人群或者民族，完全依靠畜牧、或者渔猎生存，如游牧民族，北极苦寒地区的人们等。

动物养殖业，包括畜牧业，禽类养殖，水产养殖等，是广义农业的一部分，都是为人类提供食物来源。

最初的畜牧业是游牧或者散养。游牧需要大片草地，散养需要喂食。从供养能力来说，早期的畜牧业并不能为大量人口提供肉食需求。工业化之后，主要的动物养殖都在现代化养殖场圈养。饲养密度大，需要喂食大量专业饲料。由于饲养密度大，动物防疫是日常工作的一部分。同时，为了增加产出，避免损失，业界大量使用动物激素、抗生素等生化药品，引发食品安全问题担忧。高密度的养殖也恶化了动物的生存环境，很多人对动物养殖业有负罪感。

除了传统的猪、牛、羊等哺乳动物养殖，鸡、鸭、鹅等禽类养殖以外，水产养殖，特别是海洋水产养殖，近几十年来发展很快。

海洋养殖与陆域养殖相比，有几个很大的优势：

第一、海洋面积广阔，体量远大于陆域养殖。陆地上适合自然养殖的地区是一些草原。草原有季节变化，冬季气候恶劣，给养殖业带来很大困难。工厂化养殖需要大量饲料，饲料的种植实际上也需要大片土地。以草原或者粮食种植为基础的畜牧业需要大面积的土地。人类占据土地面积最大的是耕地，其次便是牧场。陆地是二维的，平面的，单位面积承载动物有限。而海洋不仅面积远比可用作牧场的陆域大，还是立体的。全球海洋的平均深度近3700米，而陆地空间的有效高度仅数米。因此，海洋的生物承载能力远大于陆地。地球上百分之九十九的可生存空间是海洋。

第二、水生动物养殖效率更高。因为鱼类为冷血动物，而海洋的气候也更加温和，没有过冷过热，产生同样量的动物蛋白，鱼类消耗的食物比温血的哺乳类和鸟类少。

第三、对人类来说，水产动物蛋白更健康。

但是，与陆地相比，海洋却显得非常贫瘠。

海洋，或者陆地供养人类、或者各种动物的能力，取决于它的初级生物质生产能力，主要表现为光合作用能力。每平方米海洋的初级生物质生产能力只有一般温带森林的十分之一。占地球表面积71%的全部海洋的生物质生产能力，还不如有很大比例荒漠和冻土冰原的陆地。广阔的大洋中心，大部分是缺少生命的“荒漠”。海洋中生命丰富的地区，主要是珊瑚礁，河流入海口，海岸附近，等。因为这些水域有一些关键营养元素来源。

生命离不开水和一些矿物质。陆地上矿物质丰富，只要有水，就会有动植物生存。海洋不缺水，但是会缺少矿物质。只要有矿物质供应，海洋生物就会繁盛。陆地上的沙漠和远洋是生命要素供应不平衡的两个极端。与沙漠相比，“荒漠”海洋的面积大的多，可以养育生命的空间也大得多。

海洋中的化学元素本来非常丰富，但是浮游植物的生长繁殖会消耗一些关键的元素，如铁、磷、等。如果这些元素浓度过低，浮游植物就无法生长繁殖了。没有浮游植物，就没有以它们为食的浮游动物，以及食物链上端的小鱼、大鱼、鲨、鲸、等。近海，珊瑚礁，河流入海口，由于存在这些营养元素的补充渠道，浮游植物生长旺盛，其它海洋生物也很丰富。远离陆地的大洋中部，缺乏部分关键营养元素，成为“荒漠”。

大洋中心偶尔也会有来自陆地的大规模沙尘暴，和火山爆发，带来的营养物质降落。一旦发生这种事件，海洋中部生物总量会突然大增。例如 2008 年阿拉斯加阿留申群岛的一次火山爆发，在营养缺乏的东北太平洋撒下了大量火山灰，导致两年后阿拉斯加湾一条河里的洄游红大马哈鱼数量猛增 20 倍。

陆地生物链的底层是各种植物。海洋里面，特别是远洋，缺乏高等植物。生物链的底层是微小的浮游植物。在条件适宜的情况下，浮游植物的生长繁殖速度比高等植物高得多。因为高等植物需要复杂的输运过程，来保证全体细胞得到足够的营养。但浮游植物非常小，只要温度和养分适宜，很快就可以成熟并繁殖。

人为地为贫瘠的海洋补充营养元素也会产生同样的效果。这种对蓝色海洋的“绿化”可以改善海洋生态环境，增加远洋鱼类产出，还能固定大气中的二氧化碳，缓解全球变暖效应。

对于大规模绿化海洋，有些人担心会改变自然生态。大规模绿化海洋的结果是，海洋中的生物量保有量大幅增加。既可以提高固碳量，缓解全球气候变化，还可以增大生物圈总量，保护各种濒危海洋动物，也可以为人类增加海洋动物蛋白的供应能力。如果经过充分研究和尝试，绿化海洋可以成为人类反哺地球母亲的一项重大事业。

远洋的矿物质补充，除了依靠大气环流输运之外，海底生物周期的上浮进食也可以起到一定作用。它们会把少量的海底矿物质带到海面上来。一种绿化海洋的方法就是依靠太阳能和风能，用长长的水管直接将海底的水抽到海面上来。局部实验的结果很好。海底的水很冷，密度略大，往上抽需要耗费一些能量，但是不多。如果抽浑一点的水更好，因为矿物质含量高，需要抽的水量少，对海面的温度影响也很轻微。

这种方法绿化海洋，比在陆地上绿化沙漠容易多了。因为绿化沙漠需要很长的引水渠，水资源量也是一个大问题。而海洋的平均深度不到四公里，抽水难度小，消耗的能源也少。

随着海面生物总量的增加，海底生物量也会同步增加。因为海底生物的

最终食物来源还是海面。海底生物增加，由它们周期上浮带来的矿物质也会增加。这一效应可以降低海洋绿化的工程难度。

## 其它

现在的农业已经不仅仅是育种和种植，提高农业产量有很多的办法可以用。光可以由发光二极管提供，温室的玻璃可以利用紫外线发电，可见光照明，红外线升温。可以人工安排多层植物，喜欢强光的在上面，喜欢弱光的下面。如果需要温度和光照循环，可以在自然光照循环之外，采用循环的传送带。

我们可以专门培育适合人工环境生长的物种。在现代生物技术、基因技术的武装下，我们已经“制造”出很多物种了。很多甚至都不能算物种。它们完全依赖人类生存，比如一些花草、宠物、粮食等。离开了人类，它们不能生存下去，甚至无法存在。比如各种多倍体的粮食品种，还有像骡子这样的杂交动物。它们不能有后代。生命之所以成为生命，就是因为它们能繁殖。我们居然培育出一大批不能繁殖的“生物”，为我们所用。我们应该因此反思，因此自责。虚伪地反思自责过后，如果我们实际一些，这条路其实还可以走得更远。它们甚至也可以不是完整的生物，比如烧杯里长出的肉，苹果树上嫁接梨树枝长出来的苹果梨，等等。光合作用效率太低，要不干脆直接给植物注射葡萄糖。

常年结果的西红柿，几百公斤重的南瓜。种一株麦子干脆直接长面条好了，还要像韭菜那样摘了还长。

未来的农业跟现在比，当然应该有很大的差别，就像现在跟过去比那样。不过究竟会怎么样，还需要发挥想象力。

## 结语

我们依靠农业现代化基本解决了粮食安全问题。以后怎么办？既然我们已经有了更先进的手段，可以进一步节约土地，进一步提高产量，并更绿色，更与气候季节无关，那么继续发展这些手段就可以了。

垂直城市节约了大量土地，降低了能源消耗，创造了独立于自然的人类生存环境。但是如果没有相应的农业，人类还谈不上独立，和进入下一层次的文明。在能源供应尚未解决的情况下，大规模的智能温室农业是一个选择。温室农业可以利用西部和高原的少量土地，替换人口密集区的大片耕地。粮食生产更有保障，环境污染和食品安全等问题也迎刃而解。在室内种植技术不断完善之后，完全依靠人工照明的高效农业，也可以在能源供应充足的情

况下慢慢替代阳光温室农业。这样不仅对地球的负面影响降到最低，人类自身的生存能力也更强。

# 第十一章 中国可能的特殊角色

从形式上看，城市，农业，能源，再加上工业，一起构成了现代人类的生存方式。历史上，人类的生存方式已经发生过多次重大变化。可以预计，下一次革命也会很快到来。在即将到来的下一次革命中，中国有可能能够扮演一个特殊的角色。那就是中国必须快速地，提前一步，向下一代文明过渡。这是因为：第一，由于土地资源的限制，以及庞大的人口数量，现有的城市化生存方式，如美式生活方式，在中国有很多问题。这些问题，即城市病，在中国比别的国家更严重，更难以解决。中国需要有新的思路、新的做法。第二，作为近三十年来，经济快速发展和现代化快速完成的后来者，完全照搬别人的发展经验，并且坐等别人提供经验，是极端懒惰和不负责任的。当经济，科技发展到一定程度，再加上中国自身的特殊性，不会总有成熟的经验和技術可以参考。中国有条件、也有义务找到新的发展路线，在人类发展的历史长河中，做出自己本来应该做的贡献。

## 城市的变化趋势

城市，是现代人类的栖息地，也是人类聚集式生存方式的直观体现。自人类文明诞生以来，城市的功能和形式都经过了多次变革，虽然它们的地点或者名称可能已经延续了几千年。

最早出现的城市，根据一些人建议的定义，只需要人口密度较高，有社会分工和商品流通。那么，自农业革命以来，大量有手工业的人类聚居地都可以叫做城市。因为有手工业，就有交换和商品流通。但是人们一般意义上的城市，还是要规模大一些，人口多一些，分工细一些，有复杂的社会结构。而汉语里面的“城”和“市”分别指城墙和集市，所以“城市”的字面意义就是带防御功能的人口聚集地。古代的城市都应该是这样的城市。这种城市可以叫第一代城市。

除了简单的聚集，基础设施也很重要。传统的城市基础设施，包括防护（城堡，城墙），公共设施，道路，给排水，垃圾处理等等。

第一代城市是农业革命的成果。世界上的大部分传统城市，都始于第一代城市。

我们说过，即使在四五十年前，中国社会的大部分和几千年前没有很大的差别，其中就包括城市的形式。

工业革命之后，城市的防御功能消失，城市的标志——巍峨的城门、坚固的城墙，变成了让人凭吊的遗迹。与农业时代的城市相比，工业时代的城

市规模越来越大，与周围的边界越来越模糊，道路越来越宽，越来越规则，建筑越来越高。特别是工业革命后新建的城市，比如中国各地的新城区，开发区，美国的大部分城市，中东石油国家新建的城市等，有预先的规划蓝图，非常整齐，规则。

与整齐、高大和有点杂乱的外观相比，工业化城市的交通，供电，供水，排水，通讯，照明，垃圾处理等基础设施纵横交错，纷繁复杂。并且随着城市的不断扩张，基础设施也要不断扩容，更新。

全球大规模工业化实际在二战以后。即使西方国家，二战后也几乎重建了所有的城市。因此，几乎所有国家的基础设施实际上都是二战以后才修建的。一般的基础设施设计寿命也就 50 到 60 年，因此，传统发达国家目前已经面临基础设施更新的问题。

在中国，北京的城市现代化相对较早。由于近二十年规模扩大很快，大部分基础设施是新建的。但老城区的基础设施也有改造更新的问题。

规模巨大，人口密集的第二代城市，基础设施更新非常困难。

如果把工业时代的城市叫做第二代城市，可以发现，第二代城市的成长过程基本上是连续的。建筑一点点增加和更新，城市一点点变大，各种基础设施一点点完善，……。除了大规模建设新城区的时候，可以看到比较大的景观变化外，第二代城市的出现很难看出“革命”的特点。但是，经过长期的变化，城市面貌的变化依然是惊人的一一上世纪的纽约、芝加哥、东京，本世纪的海、北京、新加坡、杜拜、阿布扎比，等等。

中国的城市，同样从农业时代的面貌，几乎连续地变化到现在的样子。上世纪上半叶的多次战争摧毁了大部分旧城市。50 年代的工业化进行了大量的基础建设。改革开放之后，继续大规模地建设。旧城改造和新城市的建设规划，从原苏联模式到西方模式到“中国特色”的模式，都是遵循工业时代的原则。同样，也继承了所有城市，特别是大规模城市的城市病。由于中国城市化过程的速度快，规模空前，以拥堵、出行困难为基本特征的城市病就更加突出。

那么，下一代的城市会是什么样？应该建设成什么样？从现在最现代的城市中，我们应该能够发现一些趋势。其中最显著的趋势就是：楼越来越高，越来越大。尽管很多人对摩天大楼深恶痛绝，并流传有“摩天大楼魔咒”的说法。但是世界上，特别在新兴地区，摩天大楼，巨型商务中心，越来越多，并且有加速发展的趋势。毕竟，正如我们前面说过的那样，摩天大楼有很多优势。事实上，几乎所有城市的市中心，新的物业开发都是体量庞大的摩天大楼或者综合楼群。

所以，下一代的城市，从现有的趋势，以及我们以前的分析看来，都应该自然地发展到垂直城市。如果我们在中国的大规模城市化过程中，适度考虑垂直城市建设的需要，以后应该会少走很多弯路，少浪费很多时间和资源。

## 中国亟待解决的问题

中国在改革开放以来的几十年中，长期快速发展，取得了令人瞩目的成就。但是，近年来，随着国际国内形势的变化，经济增速下降，各种社会问题逐渐暴露，并且变得越来越严重，亟待解决。

这些问题，或多或少也是全人类面临的问题。但是同样因为发展迅速，在中国，这些问题特别突出，特别需要很快找到答案。

总结一下进入二十一世纪以来中国的社会热点问题，可以发现下面一些：

### 资源问题

人类社会发展需要各种资源。中国的快速工业化，快速发展，就需要快速地供应更多的资源。在三十多年的快速发展中，我们经历了各种各样的资源供应紧张，比如煤炭，石油，铁路公路运能，电力，水资源，土地资源，各种工农业原材料如铁矿石，化肥，等等。

资源中的能源，水，土地，矿物原料等，每一项都是独立的大问题。

受各种限制，资源供应不可能无限增长，新的发展模式必须节约使用各种资源，提高资源的利用效率。

### 环境问题

环境也是一个长期困扰中国发展的重要问题。空气污染，水污染，耕地污染，食品污染，电磁污染，噪声污染，城市和乡村的人居环境恶化，恶性污染事件频发，全国大范围长时间的雾霾，……。污染在不知不觉中变得越来越严重。并且在看得见的将来，有更严重的趋势。但是，要治理却非常困难。

新的发展模式必须将人类对环境的负面影响减到最低，减少各种排放，降低资源消耗量，让自然回归自然。

环境问题的全球化还引发了全球的气候变化，造成严重的气候问题。

### 气候问题

人类几百年来大规模现代化过程，严重干扰了地球气候变化的天文及地质周期。前几年我们还在感叹，大气中二氧化碳含量从几千年的百万分之280升到了380，但到了2014年，这个数值已经是440。这种变化速度是惊人的。气候变化、全球变暖、海平面上升，飓风、暴雨、干旱等自然灾害频发，……，在本世纪内几乎是必然发生的。然而，生活在海洋淹没区的数十亿人怎么办？这些地区的耕地怎么办？如果现在还不作准备，很快就会来不及了。

新的发展模式必须考虑气候变化的影响。必须能在不消耗过多社会资源的情况下，降低各种自然灾害的影响。

## 住房问题

住房问题长期以来，都是一个社会焦点问题。中国房地产业几十年的快速发展，到了二十一世纪第二个十年的中期，大量问题的后果开始显现。大量的烂尾房、空置房和畸高的房价形成鲜明的对比。住房消费在居民消费比例过高降低了人民的生活水平，抬高了各种社会成本包括工商业的经营成本，房地产投机也打击了实体经济，还滋生了大量腐败，引起各种社会不公，造成社会动荡。

住房或者房地产价格过高的根源之一，是政府从严控土地资源，市场上地价奇高。土地资源是有限的，自然和健康的生态环境也需要大量土地，全面放开土地供应是不可能的。新的发展模式必须更有效地节约土地，提高土地利用率。

## 食品安全问题

资源、环境等问题，再加上快速发展中的种种不规范，导致中国的食品安全问题突出。为了满足城市化的需要，耕地面积减少，粮食自给率下降；部分耕地污染、品质下降；水资源过度利用；化肥、杀虫剂大规模使用；食品安全中频频出现的地沟油，过期变质食品，化肥农药残留，对人体有害的添加剂，奶制品、肉制品残留抗生素、激素等。

食品加工过程中带来的问题，如地沟油，有害添加剂，过期变质等问题，需要完善法规和监管。但食品生产过程中的问题，如农药残留，过量激素抗生素，需要生产养殖过程有机化。自动化温室农业就可以解决这些问题，并且大规模提高产量，节约土地。

还有与食品相关的一个问题是食品的浪费。由于大多数食品的保鲜期很短，生产、加工、运输环节都会带来消耗和浪费。消费环节也有很大浪费，但是更多与消费和文化习惯有关。垂直城市由于城市恒温恒湿，温度较低，没有阳光，食物变质要慢一些。城市中的食品运输转移过程，由于没有机动车和自然环境的各种损耗，也更不容易产生浪费。

转基因也是很多人关心的一个问题。我们这里不讨论转基因食品本身的安全性问题。但在自动化温室中，由于植物生长条件已经控制到了最优，没有必要采用大部分转基因技术，如抗虫，抗除草剂等。

## 医疗与养老保障问题

中国人口众多，未富先老。医疗保障，养老服务都不健全。未来几十年内，这方面的要求将越来越高，占用的社会资源也会越来越多。但中国完全没有准备好老年化浪潮、医疗保健浪潮的到来。现有城市模式下，老人居家

养老需要专人照顾，将占用很多社会资源。看病急救因为交通和医疗资源紧张，有很多实际困难。而集中养老需要大量养老设施，同样需要消耗大量资源。因为交通问题，亲属探望不易，老年人的精神需要难以满足。

垂直城市可以提供舒适的生活环境，人们不容易生病，人与人面对面对流容易。老年人就医也很方便，不需要救护车就可以直接很快到医院。由于交通的便捷，每个人都可以居家养老或者集中养老。老年人的晚年生活幸福度可以大大提高。

垂直城市中沒有机动车交通，机动车事故会大大减少。由此带来的社会悲剧和医疗需求也会大大减少。

### **教育问题**

教育方面，现在主要的问题是优质教育资源不足。对于初级教育，家长很难选择好的学校。孩子负担过重，竞争激烈。此外还有校园安全、孩子出行安全问题也比较严重。

垂直城市能够保证出行的便捷和安全，保证学校没有地理位置的差别。学生和老师的流动都很方便，这样更容易公平地配置教育资源，让每个孩子都有接受优质教育的机会。

高等教育和职业教育，可以通过改进教学方法，例如应用虚拟现实技术，让每个人都更有效率地学习和成长。

### **产能过剩与产业升级问题**

经过几十年的快速发展之后，中国的产能过剩问题越来越严重。产业升级也很难确定方向，因为这取决于我们要发展哪些产业，建设一个什么样的社会。

如果我们确定垂直城市及相关的农业、能源是未来的发展方向，那么产业升级和社会发展就有了明确的方向。由此将发展一批产业，创造一批产业。

大开发，大发展带来的各种机遇是巨大的。因为这是一次革命，革命会使整个社会的构成和形态都发生巨大变化。不一样的生活环境，不一样的产业链，几乎所有的东西都要发生变化。对于现代经济来说，任何一种新产品的出现都代表着新的增长。

大建设需要大量的基础工业产能，中国基础工业产能过剩问题不仅仅不是一个问题，反而成了重要的战略资源。

### **国际大环境变化问题**

在前几十年的发展过程中，在国际上，中国一直是作为一个打工者，生产者，跟随者的角色出现的。但中国经济发展到一定程度，经济实力增加，劳动力成本提高，简单的跟随已经无法继续。虽然城市化还没有完成，但是前面的路已经要靠自己走了。我们不可能永远靠生产廉价产品在这个世界上存在。

特别是，还有更多的更不发达的国家会走这条路。我们也不可能像美国那样消耗非常多的资源，也没有那么多的资源供中国消耗。

低端竞争，让自己更苦更累，让别人没有工作。我们已经积累了世界上最多的外汇储备，生产了世界上最多的产品，但是我们自己却生活在各种焦虑之中。

我们既需要升级产业，避免低端竞争，又要提高资源利用效率，还需要进一步改善人民的生活。

大规模的自我建设是最佳的选择。即提高了各种资源的利用效率，升级了产业，改善了人们的生活条件，保障了粮食和能源供应，又能开创一种新的文明，引领世界上尚未工业化的国家和地区，向更有效率和品质的生活方式过渡。

总之，垂直城市及相关农业、能源保障体系是发展的大方向，也是中国的急需。

## 创新与模式

有些人认为，在几千年的历史长河中，中国在上领先的时间占大部分。中国在近几十年的崛起只是回归历史常态。当然，这取决于如何定义“领先”。但是这句话也说明了，在近期很长一段时期内，我们是落后的。

我们落后在什么地方？这是一个很大的题目。我们不妨从自然和社会发展的历史经验中，寻找一些启示。

当我们说一个东西“领先”，“落后”的时候，其实主要指这个东西是不是有竞争力，在与别的东西竞争的时候，能不能胜出。

生物演化的历史就是一部残酷的竞争史，一定有很多经验值得借鉴。

首先，竞争离不开环境。不同的环境下，哪些特点占优势，哪些特点占劣势，结论是不一样的。但最后的评价标准是，在受同样资源和生存空间限制的条件下，必须能够生存和发展壮大。

生命从诞生之初，经过几十亿年的发展，出现了各种各样的生存模式。每种能够在生物进化史上留下痕迹的模式，都有它们的成功之处。无论我们现在的人类看起来有多么难以理解。比如，有些生命可以完全不需要阳光，完全不需要氧气，或者生存在一百多摄氏度的高温环境下，……，等等。再比如，我们是温血的哺乳动物。我们长期以来，几乎是定义哺乳动物比爬行动物高级。但在漫长的三叠纪到侏罗纪的一亿多年内，哺乳动物一直在爬行动物的淫威之下，过着东躲西藏的悲惨生活。

但是的确有一些特征，可以使物种在相同的条件下更具优势。比如更灵敏的感官，更强健的肌肉，食物充沛时或寒冷时更大的体型，物种内或物种

间的合作行为，等等。灵敏的感官可以找到更远处食物、天敌、和配偶。大的体型可以更强壮，更安全，相对消耗更少量的食物。社会行为或互助行为，可以在自身相对弱小的情况下，更容易获得食物和安全保障，等等。

在人类出现以前，生物的生存模式也发生过一次又一次的大变革，比如出现生命，出现自养式生命（光合作用），他养式生命，各种生物门类的出现，生存空间的拓展，等等。每一次大变革之后，都会大幅度改变地球生态，改变地球的生存环境。比如光合作用导致地球大气从还原性的变成氧化性的。对当时的主流生命体来说，“彻底破坏了地球的生存环境”，但是后果是捕食性高等生命的出现。捕食对于生命来说，也是一种自杀性行为。因为捕食生物的无限制发展必然导致食物匮乏。但是食物链的生成，地域和季节因素的调节，导致差不多平衡的生态系统的出现。但是从来没有一个静态的平衡生态系统。生态系统不停地演化，生命形式也在不停变化。

在生物演化时代，更有竞争力的生活模式，更多地是通过物种演化和自然淘汰形成的，主要体现在物种的遗传物质之中。单一物种很难改变自己的生存模式。

人类的生存模式也是一样的。从树栖到地栖，从采集到农耕，游牧，再到工业化，信息化。每一种模式都会有极限，到了极限就必须寻求变化。每种模式的竞争方式不一样，能够更快找到更有效生存方式的群体，才能在竞争中占得先机。

在人类时代，人类，作为物种的演化，已经基本停滞了，尤其是在工业革命以来数百年的时间尺度内。可是，人类自诞生至今，社会形态千变万化。不同的外貌，不同的语言，不同的自然条件，不同的信仰，不同的价值观，不同的饮食，不同的食物获取方式，不同的建筑形式，……，人类社会的差别已经不能通过物种来描述，而是根据不同人群的文化和价值观来区分。人类不同生存模式竞争力的差别，也体现在各自的文化和价值观上面。

当然，自然条件也很重要。类似的自然条件，文化和价值观的条件下，只能取决于各项实力。比如生产能力，劳动效率，组织能力，执行能力，创新能力等。更加细分的指标，可以参考一些研究机构的竞争力指标，效率指标，社会发展指标等等。但是，更高的效率，更强的创新能力，更有序的社会环境，更强的执行能力，总是国与国竞争的关键。

三十多年以来，中国发生了巨大的变化，这一变化深刻地影响了世界政治经济格局。但是，到目前为止，经济份额的增加，和作为政治一极的复兴，还没有让中国成为改变世界和引领世界的力量，其中最主要的体现，就是各种技术及包括社会发展模式的领先能力。

虽然我们还没有领先，但是在很多方面，都已经逐渐走到了前列。已经走到前面了，或者到以后领先了，就不能像以前那样，继续跟随。走在前面的人有义务带路，哪怕要付出更大的代价。而不是踌躇不前，等着别人把路探明。因为已经没有人前面了。虽然现在中国还不是领导者，但是要做好

当领导者的准备，开始去探索发展的路线。其实这一步一直都应该走，也许我们也一直也在走自己的路，只是在技术方面，我们一直在效仿，在跟随。

现代化是我们在前一百多年内一直在做的事情。当现代化走到瓶颈，解决的办法是更进一步的现代化，也可以叫再现代化。

垂直城市在提高能源效率和社会运行效率，形成更有序的社会环境，鼓励创新，形成新兴产业，提高社会整体竞争力等方面，都有很大的优势。

更重要的是，垂直城市是一种新的人类社会形态，是我们可以预见的未来社会的存在形式，是下一次人类社会的革命。

## 我们能做到吗？

长期以来，无论是各种技术，还是社会组织形式，中国并不领先。工业革命以来，世界上大大小小的重大技术变革，我们都是跟随者。那么我们没有能力发起下一次革命呢？

也许很奇怪，目前看来，似乎只有中国有条件开始去做。

首先，几十年来，中国积累了强大的基础设施建设能力。中国现在每年在建和完工的高速铁路，高速公路，风电装机量，城市轨道交通，住房，商业中心，水电大坝，港口，还有远距离输水的大运河，等等，都遥居世界第一。此外，还大量向非洲，中亚，拉美等地输出劳务和工程建设项目。

与此相关，中国的基础工业能力，如钢铁，电解铝，水泥，硫酸，玻璃，煤炭，等基础工业产品的产量都遥居世界第一。2010 年以来，总的能源消耗量和发电量也已经超过美国，成了世界第一。

由于垂直城市的建设，就是大规模的基础设施建设。强大的基础工业生产能力和基础设施建设能力，是垂直城市建设的基本保障。

其次，中国连续几十年的大规模基础建设，也培养了一批素质较高的队伍，主要的技术包括部分高端技术，无论是建设手段，还是装备技术，都已经掌握。并且，仅就盖楼而言，并没有非常多的难以掌握的高科技。我们虽然拥有较少的顶级的科学家和工程师，但是各行各业的中高级技术人员数量庞大。

对于内部结构极为复杂的垂直城市，设计会是一个难点。而在设计方面，中国整体的能力还比较欠缺。即使在世界范围内，如此复杂的结构，也没有成功的先例可循。但是，可以先易后难；先建小的，后建大的；模块化，功能化设计；等等。走点弯路是免不了的。只要充分分级规划，注意层次，并利用虚拟现实等技术进行方案预演，总会一座一座盖得越来越好。

我们现在已经盖成了建筑面积 200 万平方米的单座大楼，离我们的小型垂直城市，1000 万平方米，并不太远。

只要楼越盖越大，经验和都会逐渐积累。综合设计能力也会慢慢提

高。在建设大型垂直城市之前，适当确定一些原则，如模块化，可重构，可扩展，也可以避免或者改正一些设计错误。

改革开放以来，我们一直在大拆大建大盖。无论是从经济发展的角度，还是从思维和产业惯性，继续建设都是大家熟悉和感到舒服的发展方式。拆掉旧楼，盖出更多使用面积，更少占地，更节能，生活条件更好的新楼来，难道不是我们一直在做的吗？

## 发展之路

垂直城市，与现行的传统城市相比，形态上有很大差别。基于传统城市的规划原则，不适合垂直城市或城市群。如果基于“城市连续变化”的原则，对规划和建筑法规稍加修改，也可以在原有城市的基础上，逐渐建设垂直城市。

我们在前面第七章，详细地讨论过垂直城市的发展模式。但作为长远的发展规划，同时考虑西部开发，高原温室农业，垂直城市的长使用寿命及地域不敏感性，基于可再生能源的能源战略，等，也可以考虑一条基于西部发展的路线。

我们已经说过，中国的中东部传统农业地区，并不适宜发展下一代自动化温室农业。高科技农业的未来在西部。可再生能源，特别是太阳能，也是一样。所以，我们必然在西部高原地区大规模建设，也需要大规模移民。垂直城市特别节省能源，特别节省水，而且并不在乎地理位置。西部发展垂直城市，还有一个额外的优势。在高原地区建设垂直城市，受全球气候变化，海平面上升的影响很小，不会产生灾难性后果。东南沿海地区则有很大的风险。在高原地区，破坏性的自然灾害本来就少。

到目前为止，中国版图的东南方向，一直是经济、文化、政治、和人口的中心。西部主要是高原。传统的自然环境只能支持较低强度的畜牧业，不支持农业发展。由于高寒，也不支持大量人口生存。所以直到现在，西部仍然是经济和社会发展不发达地区。除了部分采矿、能源工业之外，没有多少现代产业。

现代大城市的发展，主要不是靠工农业，而是靠服务业。大城市，基本上都是消费型城市，生活型城市，不是产业城市。这是现代城市发展的基本原则。垂直城市是人工的生活环境，基本与自然环境无关，因此可以建设在西部高原。实际上，垂直城市建设在高原更有优势，因为垂直城市不需要采暖，只需要散热。气温比较低的高原地区显然更容易自然散热，城市可以更节能。传统的西部城市正好相反，几乎不需要空调，不需要考虑散热，但是需要消耗大量能源采暖。

对于未来的社会，需要依赖可再生能源，依赖高原自动化温室农业。高

原风能，太阳能丰富，气温较低，昼夜温差大，特别适合发展可再生能源工业及温室农业，也适合垂直城市的发展。西部高原还有一个特点，就是自然灾害的危害程度较小。东南沿海每年持续发生的台风，暴雨，高温，都会带来很大的破坏，影响生产和生活。西部高原虽有大风，雪灾，但是对基础设施和人们生活的破坏性比较小。沙尘暴的危害范围有限，强度也比台风低。西部高原，如青藏高原，云贵高原，水资源也很丰富。风能、太阳能等可再生能源的开发，基本不需要水。温室农业对水资源的要求，也远远低于露地农业。工业化生产的温室农业，水资源的回收利用也很自然。因此，垂直城市及相关农业、能源产业条件下，西部地区的开发，不会遇到工业化传统城市时代的自然条件恶劣、水资源缺乏等问题。

总之，西部高原的大开发，应该是中国未来的重点发展方向之一。产业、人口都应该向这些地区转移。必然，会有很多的新兴城市出现在这里。由于这些地方高寒，缺氧，阳光太强，显然现代传统城市的发展模式并不适合。但是对于农业和能源的开发，由于产业在地域上分散，并不需要大量人口集中的特大城市。因此，除非完全代替东部的消费型特大城市，西部高原的新兴城市还是应该以小规模城市为主。但是，考虑到自然条件的问题，这些城市仍然应该用垂直城市的标准来建设。也就是，它们必须封闭，环境独立。

考虑容纳一万左右人口的小型垂直城市，按照每个人一百平方米城市空间计算，需要一百万平方米。这是我们目前就能够做到的。按照每层4米高度，一座长宽各200米，高100米，25层的建筑就可以满足要求。对于服务于周边产业的生产型城市来说，仍然需要比较多的机动车，以方便工作人员、设备、原料、产品等在工厂和城市间的运输，但是城市生活并不需要。

因此，以可再生能源和高原自动化农业为驱动，大规模开发西部高原地区，先以产业和开发带动大量小型垂直城市的建设。随着开发和建设的成熟，消费城市也可以逐渐搬到西部。这样做的一个好处是不用在东部城市原址拆迁式改造，随着开发的进行，人口和城市都逐步自然迁移。

生活城市即消费型城市的西迁，还有排放较少的轻工产业支撑城市的西迁，仍然是很大的一步。因为与开发西部的新建城市不同，它们必须从原址搬迁。

当然，既然垂直城市对城市所在地的地理气候条件不敏感，它们也可以在原址或者附近建设，并不一定整体搬迁到西部。

垂直城市城市的内部生活环境基本与外部地理环境无关。但是建设的时候，外部环境还是有一定的影响。

## 历史与责任

人类社会发展至今，经历了多次重大变革。从离开森林走向草原，从采集狩猎到农业，利用火，利用工具，……。远古的历史，虽然能给我们启示，但是很难给我们带来切身的体会。但起源于两百多年前的工业革命，由于我们的落后，造成了我们一百多年的屈辱和痛苦。

工业革命的深刻影响，我们现在也很难全面理解。其中一个变化，是西方在全世界的殖民。上万年来仅仅生活在欧洲西部的一小群人，在一两百年内殖民到全世界。秦始皇两千多年前统一中国的时候，“书同文”，“车同轨”。如今世界上的铁路也基本上是同样轨距的，只不过是英国最早的轨距标准。英文也成为了世界事实上的通用语言。全世界仍有超过四分之一的国家和地区承认英国女王为自己的国家元首。

而中国，因为在工业革命中的落后，在近代失去了数千年来历史上的重要地位。以世界人口三分之一之众，成为一个无足轻重的国家，一个任人宰割的民族。仅仅领先一步的日本，以十分之一之人口，三十分之一之国土，仅以半国之力，数次击败中国，几乎使中国亡国。这就是文明世代之差的差别。

二次世界大战直到本世纪初，各种新技术革命层出不穷，农业技术，生物技术，军事技术，半导体微电子技术，计算机软件，激光，通讯，互联网，基因技术，人工智能，……，等等。觉醒之后的中国仍然是跟随者。但到了互联网时代，世界越来越透明，越来越融为一个整体，只要不把自己封闭起来，技术上很难落后别人太远。而作为领先者，技术上也很难保持很大的优势，虽然到现在为止，我们在很多方面和先进国家的差距还很大。但从大趋势上看，技术上的差距会缩小。

如果我们认为下一次革命是生存方式的革命，是城市形式的革命，是农业和能源的革命，那么本书讨论的具体发展形式，就很有可能是人类社会下一步发展的必由之路。

前面讨论的各种大规模建设，需要坚强的意志，长期的执行能力，和强大的生产能力。我们已经有了强大的生产和基础建设能力，也有能够执行长期目标的政治体系。如果明确发展方向，我们有可能率先进入下一阶段的人类文明。

作为跟随者，只需要照搬照抄。我们引进生产线，派人出去培训，派人留学，引进各种规章制度，引进各种标准，引进法律体系，引进教育体系，……。大约到 2020 年，中国就会成为世界上最大的经济体，各种技术和世界先进水平差距会缩小，甚至有部分技术会领先。但是对于社会发展来说，需求或者说发展方向是重要的，技术反倒是次要的、可以解决的。比如冷战时期的太空竞赛。因为有了走向太空的需要，才有大量相关技术的发展，才有了后

面的卫星通讯，全球定位系统，甚至互联网。

垂直城市只要开始建设，就会产生大量的技术需求。这些技术的积累，就是社会整体的技术优势。垂直城市本身创造的环保节能，洁净安全的生存空间，可以彻底改善全民的生活，降低社会能源消耗强度，减少人类对自然环境的负面影响，并大幅提高恶劣环境条件下整个社会的生存能力。建设垂直城市的意愿，就是各种技术发展，及社会组成形式演化直至领先的驱动力。

建设，更新换代永远都是经济发展的超级引擎。技术停滞不前，不拓展新的发展空间，只在现有生存空间竞争，就会成为零和游戏。零和游戏是冲突和战争的根源，比如中国几千年的朝代更迭，和近代两次世界大战。而一次一次的技术革命，提高了农业的产量，养活了越来越多的人；技术的发展创造了更多的产业，分工更细，需要更多的人从事各种专业工作，创造了更多的工作机会；这些变化反过来又提高了整个社会的生产力，创造出更多的财富，以供养更多的人口。

中国的基础建设，包括房地产建设，是改革开放以来社会发展的巨大推动力之一。尽管我们认为现有的城市模式有很多问题，但是毕竟建设了大量的公路、铁路，盖了很多房子，也就是创造了新的生存空间。继续发展，或者说继续建设，不断更新，仍然可以成为后续发展的持续推动力。

从世界范围来看，发达国家人口约 10 亿。世界上的各种资源已经非常紧张。正在快速发展的新兴国家包括中国、印度、东南亚、拉美、非洲，人口高达 50 亿，这些人要达到同样的社会发展水平，不可能走发达国家的老路。必须尽可能地节约资源，提高单位空间的供养能力。同时，还要减少对自然的负面影响。垂直城市及相关的高科技农业，绿色能源工业，几乎是唯一的解决方案。中国如果把这条路走通了，这个世界就不会像现在那样，有那么多无法解决的难题。

中国是工业文明、信息文明的后来者，人口众多，有责任有义务找到一条能够持续发展，而不对地球产生严重负面影响的新路。比中国先发展起来的国家，如美国，幅员辽阔，资源丰富，人口不多，各种技术先进，没有发展垂直城市的动力；欧洲历史包袱太重，那些美轮美奂的老城市几乎不可能放弃。同时的人口压力也不大，也缺少动力；日本的地理条件太差。即便如此，他们也有与垂直城市类似的概念提出，如数千米高的东京湾金字塔城市方案。

新兴的国家里面，俄罗斯、巴西同样幅员辽阔，人口压力不大；印度、非洲的经济发展还有很长的路要走。

地处西亚的阿拉伯联合酋长国，倒是有可能在下一次的城市革命中走在前面。因为阿联酋地处沙漠地带，气候炎热，多风沙。如果要提高生活品质，必须建设全封闭的生活环境。实际上他们也正在这么做。他们在热带沙漠中建设未来建筑，未来城市，全球最大的常年室内滑冰场，最大的全封闭商业中心，……。也许再过几年几十年，我们从前一百五十年持续不断的学欧洲、

学日本、学前苏联、学美国、学亚洲四小龙四小虎、……，中一路发展过来，去开始学习阿联酋。

迪拜在很短的时间内，崛起为全世界最重要商业中心之一。本世纪初，号称全世界四分之一的高层建筑塔吊都在迪拜。仅仅 20 来年，本来不名一文的沙漠，成为世界上房产价格最高的城市之一。其旅店平均价格在世界所有城市中，高居世界第二。

除了高速发展的迪拜以外，阿联酋在其首都阿布扎比还规划和建设了整体设计，面向未来，节能，不依靠机动车，全新交通策略，和完全基于可再生能源的新型城市——马斯达城。

阿联酋自身既没有设计能力，也没有工程能力，但是有精明的投资商人和巨额石油资本。在炎热的沙漠上投入巨资，几乎凭空建设一座巨大的城市，需要伟大的眼光(vision)和执行能力。

对于一个从农牧发展而来的民族，一个农业文明，一个宁可自损无数人力物力修长城的民族，一个一贯贫穷节俭的民族，一个善于精耕细作在贫瘠和狭小的土地上艰苦生存的民族，盖更多的楼，更好的楼，更有效地利用狭小的土地空间，更节俭地使用资源，难道不应该是我们最擅长和最应该做的吗？

至少从洋务运动开始以来的约一百五十年内，中国一直在跟随，在学习，在引进。我们学洋务，学民主，学立宪，学科学，学技术，学社会主义，学共产主义，学资本主义，学法律，学社会制度，……。我们习惯学习，只会学习。以世界上最长最详尽的可记录历史，世界上最大规模的文化单位和族群，差不多最聪明和最勤劳的人民，以及目前世界上控制能力最强的政府，世界上最强大的基础工业能力，至少从工业革命以来，对人类科学、文化、技术的贡献几乎可以忽略。不能不说，这也是一个奇迹。

以中国巨大的体量，沉重的历史包袱，比较合适的比较实体不是日本、韩国、新加坡、香港、俄罗斯等大小国家，而应该是印度、阿拉伯世界两个巨大的古文明延续体。相对而言，中国目前还算成功。但是跟随不可能让我们领先。

到 2014 年，根据国际货币基金组织(IMF)的统计，至少按照购买力平价的(PPP)计算方式，中国已经取代美国，成为全世界最大的经济体。即使根据名义汇率，五到十年之内，中国也很可能成为世界第一。这是一个巨大的变化，意味着美国近 150 年来第一经济大国地位的终结，意味着世界中心的变化。全世界都对此议论纷纷，但是中国主流媒体完全没有兴奋的声音，更多对“捧杀”，“阴谋论”的担心。冷静从来都是好的态度，但是全民共冷也很难理解。这就像运动员经过激烈竞争之后，夺得了冠军，但冠军本人却一点都不兴奋，反而怀疑是别人的阴谋。诚然，从人均和社会发展程度来看，中国和许多西方国家相比，差距还很大，但是第一就是第一。我们的经济总量世界第一，基础工业能力世界第一，体育也到了世界第二，有什么羞于承

认的呢？

虽然在几千年的历史尺度上看，很多人认为这只是历史常态的回归，因为 1870 年以前，中国一直是世界上最大的经济体，但其实并不是这样。中国不能只和美国比，而应该和人口总数差不多的整个西方相比。仅在五百年前，欧洲还只是欧洲，经济文化人口都局限于欧洲大陆及周边地区。但是今天欧洲的经济文化人口都已经扩散到全球。生存空间，或者说领土，除了欧洲之外，还包括全部的南北美洲，澳洲，以及部分非洲和亚洲。欧洲的技术、科学、文化、政治成为世界事实上的领导。作为东方文化代表的儒家文明，与西方基督教文明相比，在实力和影响上，仍远远落后，远不是一个级别。中国文明最多只能和印度文明、伊斯兰文明相提并论。

中国不愿意当世界第一，说明中国人既不是，也还没有学会、没有准备好，当一个现代的领导者。不能，也不愿意承担领导责任，不愿意冒险、不愿意拿主意，不敢去主张，不敢去倡导，不敢去推动人类的发展。实际上这也正是中国人，乃至中国文化的典型心态，畏首畏尾，不敢担当。所谓的中庸之道，本质就是庸俗之道。不负责任，不守公德。耗费巨资，遍布全球的孔子学院，除了中国传统文化以外，实在没有什么拿得出手的东西去教人家。

我们学了一百五十年，一直没有学到人类文明的精髓。五四运动推崇的科学和民主，到了一百年后的今天，居然完全变味。中国人心目中的科学，和世界其他地区的科学，定义是不一样的。中国的科学指的是别人建立的成熟理论。中国的科学家只是别人的小学生。没有思维能力，只有推导和计算能力。而民主这个词，在中国今天的语境中，居然是个贬义词。难以置信是吗？听听：“中国的民主派”，“民运人士”。别人推崇的普世价值观，在中国及中国价值观控制的海外媒体中，叫做“pussy”价值（pussy 发音近似普世，是女性生殖器粗俗称谓）。沧海桑田，不到一百年时间，中国也似乎远离亡国之忧。科学和民主，作为一代先人强国救亡的理想，居然变成今天这个样子。五四先烈们，九泉之下，不知作何感想。

虽然中国人和中国文化都还没有准备好当一个现代的领导者，但是传统的霸道思维倒是不乏市场。培养尚武精神，重返汉唐，以战雪耻，称霸天下，是一些中国人的理想。但是历史经验告诉我们，至少在近代，一个快速发展的国家，以世界第二的身份，用战争或者对抗的方式，向世界第一挑战，还没有成功的先例。例如一战和二战的德国，冷战时期的前苏联，九十年代初雄心万丈的日本。渴望一战而霸的中国人，应该知道，要在世界舞台上演出，眼里不应该只有小小的中国，和短短的几千年中国朝代史。根基未稳，实力不如，积累有限，而雄心或者复仇心太强，最后的结果不过是被人教训，自取其辱。

更早一点，英国取代中国成为世界第一，并不是因为战争，而是因为工业革命。英国或者说西方自身发展，到远超过清朝的实力之后，才摧枯拉朽地打败了清朝。在打败清朝之前，西方已经将几乎全世界的其它部分纳入自

己的势力范围。即使不算工业革命，由于技术世代差别的原因，清朝中国的实力与八国或者西方也无法相比。美国对英国的超越也是一样，发生在十八世纪两国之间的战争只是美国寻求独立，并不是要争夺霸权。美国通过大开发，大创新，进一步推动了工业革命。早在一战前，美国的实力已经超过英国很多。两次世界大战导致欧洲整体实力大损，美国自然成为无可争议的世界独霸。美国并不是通过挑战世界第一或者当时的世界秩序取得霸权的，而是自己潜心发展，和天时地利人和的结果。中国早期的历史如秦灭六国，同样是因为秦国率先变法，富国强兵，以一国之力，足以长期威逼六国。也就是说，通过变法，秦早就是超强的第一了。最后秦始皇奉六世余烈，横扫天下，一统华夏，毫无悬念。

一个强大的文化，有强大的生命力，会自然改变和同化不同文化背景的人，而不是通过武力和洗脑。强大的生命力也表现为强大的领导能力和变革能力。本书仅从技术的角度，讨论变革的方向和可行性。技术的变革，社会的高效运行，本来就是人类社会发展的生命力所在。垂直城市，以及相关的农业、能源产业，是人类生存发展的根本，是大量技术发展的源泉，是社会高效和透明运行的基础，也是人类走向下一代乃至更下一代文明必由之路。

## 结语

在人类发展的舞台上，中国作为工业革命和信息革命的后来者，经济总量已经，或者很快将超过美国成为世界第一。现成的发展模式有很多问题。我们重复了别人的问题，并且以中国的体量，放大和加剧了这些问题。当前面已经没有先例可循，作为后来者和超越者，我们有不可推卸的历史责任，去开拓新的发展方向。

任何一个模式的增长都有极限。到了极限就必须改变发展方式。中国近几年提倡的产业升级，一带一路，创新立国，都是有益的尝试。

如果中国还想维持快速增长，就必须解决当前遇到的各种问题。垂直城市的建设，自动化农业和完全可再生能源系统的发展，考虑到它们对资源的高效利用，就是下一步发展的必然选择。

中国几十年来积累的强大基础工业能力，建设能力，是下一代大规模建设，大规模开发的宝贵基础。

潜心自我发展，首先完成下一次革命，足以不战而霸。以战求霸，伤人害己。

千年不遇的机会就在眼前，为与不为，不知道二十一世纪的中国人会如何选择。

## 第十二章 幻想还是必然？

一百年在人类历史或者生命的历史中，是非常短暂的一瞬。我们论证了，在短短的一两百年时间内，工业文明，在信息文明的帮助之下，可以走向独立于自然环境，安全舒适的下一代文明。这是必然吗？

我们生活在永远舒适的垂直城市中，享受着三维农场生产的丰富的食物，各种各样的信息源让我们生活充实，完善的社会保障让我们没有担心害怕、没有后顾之忧，和谐美满的家庭和邻里关系让我们愉悦，……，这是传说中的乌托邦吗？还会发生什么？我们能不能走到这一步？再下一步怎么走？

### 前进的方向

一百年的确是一个很短的时间，但是在下一个一百年内，能变成什么样？我们却很难从以前的经验出发来推论。我们的父母总是以他们的经验劝诫我们，而我们总是很不以为然。然而同样的事情放在两百年前甚至一百年前，简直是金科玉律。

对于人类或者生命的历史来说，一万年也是短暂的一瞬。农业革命仅仅在一万年前，地球走出最后一个冰期后才开始。工业革命，从最初的小打小闹开始算，不过 300 年。信息革命，从互联网开始算，甚至只有 30 年。

按照前 30 年的发展速度，中国的经济在 100 年内应该再增长 1000 倍，能源消耗增长 100 倍，粮食产量增长 10 倍。这可能吗？我们至少不需要 100 倍的能源和 10 倍的粮食。

其实也未必，因为我们不知道 100 年后会怎么样。

中国传统文化相信从乱到治的循环。从世界范围来看，从西方的地理探险到全球殖民，再到世界大战，到自然与人类的关系恶化，的确也乱了不短的时间了。下一步是不是该由乱而治，走向世界大同呢？

无疑，垂直城市和三维室内农业能够提供一种“治”的可能。但它是不是唯一的路线，必然的选择，还是不太可能？

我们可以在更大的时空尺度上看一看。

# 人类的脚步

人类走到今天经过了很大的变化，或者叫做革命。我们再简单回顾一下这些革命。

1. 火让我们有更多的光明，让我们在更恶劣的环境下生存，让我们有更多的食物，让我们更安全。
2. 工具提高了我们的战斗力，让我们可以捕获更多的食物，更容易改造环境让我们生存。
3. 农业提高了土地的供养能力，使人口增加，迁移到世界各地。
4. 宗教和法律规范每个人的行为，将一大群分散的人变成一个整体的人群。
5. 工业让少量的人力可以生产大量的生活用品，解放了劳动力，提高劳动力素质，生产和创造更多的产品。
6. 新的农业革命同样解放了大量劳动力，保障了粮食的供应。
7. 全球化让分散的、互相冲突的人类社会变成一个更大的整体。
8. 信息革命将全人类的知识呈现到每个人面前，加强了所有人的沟通，地理文化上的差别逐渐缩小。

其实每一步都是为了使个体的生存得到保障，或者社会整体的生存得到保障。

## 全面的保障

人类下一步怎么走，要看现在都有一些什么问题，这些问题怎么危害人类整体。我们知道，现在人类面临的严重问题包括能源问题，粮食问题，环境问题等。人类社会很多冲突的起源，主要也是来自这些问题。从个人和社会的需要来看，每个人都需要安全，都需要舒适的生活，社会整体也必须安全，必须能够持续发展。

也许还有别的可能，但是垂直城市加上独立于自然的农业，能够提供对个体，对社会，以及对人类整体的生存和持续发展保障。

人类自诞生以来，一直遭受气候和天灾的困扰。冷、热、风雨、冰雪，轻则影响生活，重则威胁生存。但垂直城市摆脱了这些困扰。即使非常剧烈的变化，比如温室效应导致海平面上升数米，这是世界气候组织对本世纪气候变化最坏的估计。届时大量的低海拔城市和耕地将不再存在，直接影响世界数十亿人口。但是按照我们前面的讨论，垂直城市和农业建在高原地区更有优势，需要的土地很少，对地球原来环境和其它生物栖息地的影响也很小，

也不受海平面上升的影响。

如果维持现在的人口数量，对人类社会威胁最大的自然环境变化，还包括下一个冰期的到来。届时海平面会下降一两百米，陆地大部覆盖几百米到几千米的冰川，现代城市和农业都不可能在这种条件下存在，但垂直城市至少可以自救。冰期只是全球气温大幅度下降，阳光仍然丰富。我们可以在垂直城市及周边撒煤灰吸收太阳光的热量，融化冰层，阻止冰雪积累。冰期是逐渐到来的，不会突然出现几百米的积雪，我们也可以在全球气温开始下降的时候，释放更多的温室气体，阻止地球气温继续下降。

由于人类相对独立生存，即使地球环境发生较大的变化，对人类生活也不会产生大的影响。这样就不会发生大的社会动荡，导致局势失控。在这一前提下，如果地球环境发生巨大的变化，人类可以从容地调节地球气候（气候工程），让它恢复到适宜人类和其它生物生存的状态。

气候工程（Climate engineering），是指用大规模的工程手段影响地球气候，特指减轻全球变暖。主要的手段包括调节大气中的二氧化碳含量和地球吸收的太阳辐射量。具体的做法有，在控制二氧化碳浓度方面，可以将秸秆、森林降解生物质埋藏储存，减少进入大气的二氧化碳量；种树，增加生物体内滞留的碳；绿化海洋，扩大海洋生物圈种群，将碳滞留在海洋动物体内，等等。在控制太阳辐射量吸收方面，可以制造气凝胶云，阻挡阳光；采用反光率高的屋顶和道路材料，反射太阳光；将海水雾化；空间太阳伞；等。

很多人可能对这种大规模干涉自然的行为很反感，但是我们已经通过自己不自觉的行为改变地球太多了。弥补一下，恐怕也是应该的。

## 生命之路

比人类社会演化尺度更大的，是地球上生命的演化历史。回顾一下生命演化的历史，对于人类下一步的发展，也有借鉴意义。

地球上的生命如何起源尚无定论，但无论是被陨石污染的也好，还是在地球早期活跃地质活动中慢慢出现的也好，早期的生命很简单，只是一些能复制或交换物质的有机物质小球，叫原始生命。那时候还没有光合作用，这些生命只能利用周围环境的有机物慢慢地生长，偶尔自主或者被迫分裂。生命靠运气，时间也很漫长。当环境中的有机物养料消耗到一定程度，或者偶然的原因，能发生光合作用，生产有机物的小东西进入原始生命内，演化成能够自给自足，自己生产养分的蓝藻类原核生物。蓝藻不再像别的原始生命那样，完全靠运气吸收养料，而是自己生产主要的养料，生长的速度就快得多，长大到一定程度就会分裂。这样很快世界上充满了蓝藻。

早期地球大气的主要成分是二氧化碳、甲烷等气体，完全没有氧气。光合作用和蓝藻的出现，导致地球大气成分发生了质的变化。从还原性的变成

了氧化性的。厌氧的原始生命数目也大幅下降。按照现在的某些说法，蓝藻是地球的癌症，彻底破坏了地球的环境，造成其它生命大灭绝。最后它们也必然害死自己，因为它们生存需要二氧化碳，可是却无节制地把二氧化碳消耗殆尽。

氧气在大气中出现以后，逐渐出现了好氧的生物。消耗氧，代谢产生二氧化碳。看起来似乎很和谐，但是好氧、代谢意味着自己不生产养分，而是从外界获取。怎么获取最直接？直接把另一个生命吃掉！这当然又是一种地球癌症，有些细胞靠吃别的细胞生存。或许就在这一过程中，偶然诞生了真核生物，也就是细胞中出现了细胞核。我们知道，细胞核是细胞分裂和繁殖的重要部分。真核生物的出现，又是一次生命大革命，因为细胞的结构和运作都更复杂了，繁殖时细胞核和细胞体都需要分裂，这是以后有性繁殖的基础。氧气的出现也在大气层上空产生了臭氧层，过滤掉来自太阳的有害紫外辐射，让生命登上陆地成为可能。

水里的生物并不害怕紫外线，因为水也能屏蔽紫外线。

真核生物发展，有性生殖出现以后，生物演化速度加快，出现多细胞生物。这是生命演化的又一次革命，因为以前生命的单位本来是单个细胞，现在很多个细胞在一起构成一个生命体，每个细胞必须在整体里才能生存，繁殖也更复杂。对于单个细胞来说，原来自己就能生存的，现在要依靠别的细胞，似乎受到了限制。但多细胞生物因为分工合作，整体的生存能力更强。

到6亿年前，多细胞的动物开始出现。动物不能自己生产养分，必须食用其它生物。

5.8亿年前，寒武纪生命大爆发，物种数目大幅增加，生命越来越复杂。

4.8亿年前，植物开始登上陆地。这又是一次大革命，其意义无异于我们现在到火星上殖民。因为生命中的所有化学过程都离不开水，而陆地上水是没有保障的。陆地上的生物必须把自己包裹在一个水环境中。直到现在还是这样，我们自己就是一个由皮肤包裹起来的水袋子。水占我们体重的大部分。在陆地上还需要经受更严酷的气候。海洋相当温和，而陆地上可能很冷，也可能很热，或者很干燥。

4.5亿年前，节肢动物登上陆地，它们的外骨骼可以在陆地上支撑身体并保持水分，成为最早登上陆地的动物。

4亿年前，昆虫开始出现。

3.6亿年前，有些鱼类在气候变化的情况下，用鳍在陆地上短时间行走，逐渐演化为两栖类，可以长时间在陆地上生活。

3亿年前，爬行类出现。它们可以不依赖水繁殖，永久呆在陆地上。

2亿年前，哺乳动物出现。哺乳动物能够维持恒定的体温，可以在较大的气温变化范围内保持身体的活力。在这之前，动物都是冷血的，无法调节体温。再凶猛的鳄鱼和蟒蛇，在冬天或者气温较低的早晨，都是没有活力的，没有能力攻击其它动物。

哺乳动物曾在很长的时间内与爬行动物同行。当时主宰地球的是爬行动物——恐龙。原因是，当时地球的气候特别温和，一年四季从南到北气温都差不多，哺乳动物能够维持体温的优势不明显，反而因为维持体温，代谢更快，需要更多的食物。在气候温和的条件下，有时候反而处于劣势。大型的爬行类因为体型巨大，仅靠体型就有保持体温的能力，虽然它们可能不能主动调节体温。

1.5 亿年前，鸟类出现。和哺乳类一样，鸟类也是温血的。

6500 万年前，一颗直径 10 公里左右的小行星撞击地球。物种大规模灭绝，爬行动物时代结束，哺乳动物和鸟类开始主宰地球。

5500 万年前，灵长目动物出现。

2000 万年前，古猿出现。

250 万年前，能人出现，开始使用工具。从此人类成为了地球的新“癌症”。

生命的演化历史，可以给我们一些启示：

1. 单细胞到多细胞生物，虽然牺牲了个体的独立性，但是整体生命里更强。
2. 生命永远在不断地拓展自己的生存空间。从海洋到陆地，从水边到干旱的大陆，从地面到天空，……。
3. 温和的环境是生命诞生和发展的基础，但是剧变不时发生，从而引起生命形式的大变革。
4. 变化的过程比较漫长，一个适应能力更强的特征，不一定马上表现为生存的优势。
5. 演化的方向是越来越独立，越来越不依赖环境。如不依赖水，不依赖阳光，不依赖气温，等等。
6. 高等级的生命形式适应能力更强，但是需要消耗更多的能源（鸟类，哺乳类维持体温需要耗能，人类的大脑耗能很高）。
7. 哺乳类和鸟类恒定的体温，体内所有细胞工作在最佳的温度和化合物环境中。这与垂直城市恒定的室内温度和优化的生活环境，是不是非常相似？
8. 对于同一类型的动物，一般体型越大，生存能力越强，寿命越长，相对每公斤体重消耗的能量也越少。比如老鼠每天要消耗自己体重百分之十到二十的食物，而大象只需要百分之一，蜂鸟每天需要体重百分之四十的食物，鸵鸟只需要百分之一。这与小房子和大楼的比较是一样的。小房子耗能高，生存能力弱。垂直城市大楼抵抗各种自然灾害能力更强，也更节能。

还可以列出一条有些牵强的“启示”：

最早的多细胞动物是原始的腔肠动物，很多细胞构成一根管。这很像现

在的摩天大楼，也很像聚集在水边，农业文明到工业文明时代的村落链或者城市链。

生命越来越独立，离开孕育自己的母亲——江河湖海，越来越远。人类现在基本上还是逐水草而居，赖在水边。那么垂直城市走向高原和荒漠，是不是也很相像？

## 是革命，还是一小步？

人类进入文明时代以来，盖的房子一直在变得越来越大。从最初矮小的小茅屋，到家庭小院，到宫殿，到寺庙，到连排楼房，到大工厂，到摩天大楼，……。现在最大的房子有 200 万平方米，比人类最早搭建的小茅屋大 10 万倍。我们建议的小型三维小区是 1000 万平方米，只比现在最大的楼大 5 倍。人类 1 万年的时间内，盖的建筑大了 10 万倍。但在近 100 年的时间内，建筑大了 100 倍。如果按照近 100 年内建筑大小的增长速度简单外推，只需要 35 年，建筑的大小就能达到 1000 万平方米，85 年内就能达到 1 亿平方米。也就是说，50 到 100 年内，即使不去刻意追求，建筑物的大小也会达到我们巨大的垂直城市大小。这种规模的建筑，必须是一座功能完善的城市。

不过这样看来，垂直城市好像也算不上什么革命。没有人去提倡，去推广，人们自然会将楼越盖越大。直到大家发现生活在大楼里面挺好的，然后传统城市逐渐过渡到垂直城市。

温室农业或者三维农业也是一样。温室本来就建越多了，几十年后，温室自然会替代露地，成为人类粮食的主要提供者。继续发展，就到了三维的、独立于自然的农业。

从更大的时间尺度看，35 年也好，85 年也好，100 年也好，本来也不过是短暂的一瞬。这 100 年的变化，只是人类正常前进步伐中很自然的一步，很小的一步。

再往前看，人类还需要继续生存 10 万年，100 万年，或者更久，那么这些事情就是必须做的。因为 10 万年的时间内，人类必然经历几次超级火山爆发，几次小行星撞击，或许一次冰期，或许一次全球剧烈变暖，……。只有能够独立于自然，才能生存下去。

继续往前看，人类为了生存和发展，走出地球，迈向太空，也是必然的。垂直城市和室内农业的所有技术，都是必须的，稍加改进即可适应地球之外恶劣的自然环境，让人类在其它星球上生存。

在人类乃至地球生命演化、发展的历史长河中，垂直城市的出现，室内种植农业的出现，只是继多细胞生存，跨出海洋，使用工具，发展农业、工业、信息产业等变化之后微小的一步。我们跨出了海洋，离开了水边，占领

了天空，下一步自然是要迈入太空的。以前的每一步积累，改变基因也好，发展技术也好，只是生命发展过程的延续。什么都没有改变，我们还是生命，我们还在继续往前走。

只是，如果这一天必将到来，为什么我们不提前准备，早点规划呢？况且，未来的发展方向，如果提前知道，还必然是竞争的热点。

## 更多的启示

生命从单细胞变成多细胞，分工合作，集体生存，再把身体用甲壳，用皮肤，用毛发，用织物包裹起来，成为新的生命形式。

人类从小部落，小房子，变成大城市，大建筑，用玻璃、钢材把城市包裹起来，集体生存，人太多了再盖另一座垂直城市，是不是也是一种生命形式呢？它有类似的形状和结构，同样的功能，能够自我复制，能够适应不同的环境，能够迁移，殖民。以垂直城市为单位的人类社会，是不是变成了另一种超级生命体？

多细胞生物以细胞为基本单位，垂直城市以个人、或者家庭、或者居住空间，为不同定义下的基本单位。生物有不同功能的组织，器官。垂直城市有不同的基础设施系统，不同的模块，不同层次和用途的结构。

和人体相比，人体有循环系统，控制体温，将氧气传递到每一个细胞。垂直城市有空气控制系统，调节温度，输送氧气，回收二氧化碳和别的污染物；人体有消化系统吸收外界物质，垂直城市有电力供应，物资供应和配送系统；人体有神经系统，检测身体内外的各种异常，能够感觉到痛、冷、热、痒等，并及时做出反应，以防身体受到伤害。中枢神经系统能将指令下达到每一个身体单元，垂直城市有监控、消防、安保、信息网络，能够知道城市内发生的各种事情并且迅速做出反应，防止恶性事态发生；等等。我们完全可以从生命的角度，思考和规划一座垂直城市。

但是，生命会死亡。到目前为止，这一点还无法改变。垂直城市呢？也许我们需要重新理解死亡。一个细胞分裂变成了两个细胞，它死了吗？人类养育后代，虽然个体会死亡，但是人类整体还是存在，并不断发展。垂直城市可能时间很长以后需要更新，需要放弃，但是一定会出现新的更好的垂直城市。也许正因为如此，它更像生命体了，因为它会世代更迭。

生命演化的方向是更复杂，集成度更高，更加社会化。工业上一个类似的例子是微电子、计算机行业的发展。简单的逻辑电路出现之后，人们用逻辑代替计算，发明了简单的计算电路。计算电路的元件从继电器变为电子管，再变成晶体管，变成集成电路。一块集成电路包含的电子元件数目，从最初的几个变成几十个，几百个，几千个，……，到现在的几百亿个，集成度越来越高。一块集成电路上也有大量的功能单元，有控制器，运算器，高速缓

存，寄存器，数据总线，控制总线，等等。人类社会从分散的部落，到村镇，到城市，到工业化的大城市，集成度也越来越高。垂直城市与传统城市相比，能够大幅度地提高集成度，当然应该、也是一个自然的发展方向。

垂直城市在形式上只是一座大楼，一座非常大的楼。现在，人们愿意盖更高而不是更大的大楼，以争夺世界第一高楼的称号。细长的高楼有很多缺点，如果从天空往下看，细高的大楼首先就是不美观，也不安全。更大的楼，既可以盖得更高，也更实用，更稳定。相信很快，人们会更愿意竞争世界第一大楼，而不是世界第一高楼。从高度来说，现有摩天大楼的高度已经大大超过了我们垂直城市的高度。我们的垂直城市高度在两三百米到四五百米之间，而现在最高的摩天大楼已经超过 800 米，更高的楼还在建造之中。

再举一个让传统一些的人不舒服的例子。在非洲、澳洲和美洲的一些草原上，有一些巨大的白蚁丘。这种白蚁丘与我们的垂直城市有很多相似点，比如它能保暖防寒，抵御恶劣天气。能够换气，同时还要保证里面的温度湿度只在很小的范围内波动。它也是三维的，里面四通八达，不会有人类传统城市的拥堵问题。还有一个惊人的相似点，那就是一座白蚁丘内生活的白蚁数目也是百万量级，高度密集，跟我们的垂直城市差不多。另外，白蚁丘遭到破坏时，比如食蚁兽的攻击之后，白蚁很快会将破损的地方修复，因此它也几乎是永久可用的。

白蚁是非常脆弱的昆虫。任何一只白蚁，无法在蚁丘之外存活超过一天。因为蚁丘之外要不太热，要不太冷，或者太干燥，或者太阳太毒，不用说还有很多天敌。而蚁丘对白蚁来说，温暖舒适，安全有保证，食物和水有保障，就像垂直城市对人类一样。

自然界似乎已经给了我们一个提示，为了物理上让大量人群聚集，城市应该建成什么样子。白蚁丘似乎不是一个好例子，因为有些人会本能地反感，但是我们不是应该效仿自然吗？

如果把细胞当成生命的基本单元，那么高度复杂，单体数量众多，密集排布的高等生命应该比白蚁丘更难接受，因为基本的个体自由都没有了。

人类，或者更基本，生命，自诞生以来一直都在拓展生存空间，都在寻求生存保障。我们需要食物的保障，需要安全的保障，需要能源的保障，需要疾病和灾害条件下继续生存的保障。垂直城市及其农业和能源体系，只不过是这一持续亿万生存策略的简单继续。

大自然是变化无常的，人类通过使用工具，改变自己生活的小环境，成为有史以来地球上最成功的物种，扩散到了地球的每一个角落。但是，自然仍然变化无常，我们对自身生活环境的改变仍然不够彻底。我们仍然在承受季节、气候、自然灾害带来的困扰甚至伤害，而垂直城市城市可以彻底改变这一切。

即使有了空调、暖气，电灯，我们还是不能改变日照长短，不能改变环境温度。所以有些人，即使生活非常充裕，在不舒适的季节里仍然会拖家带

口，举家迁徙到气候适宜的地方去度过寒冬或者酷暑。但长时间举家迁徙只能是少数人的特权。对于绝大部分人来说，由于经济条件和工作需要等原因，不能选择这种生活模式。

或许有人相信，随着经济的进一步发展，举家迁徙这种候鸟式生活，会成为一种普遍的生活模式。但是，候鸟式生活同样有很多问题。比如，你还是不能摆脱气候和自然灾害的影响，冬天温暖的地方会过于潮湿或者炎热，搬空的城市仍然需要维护，搬一次家很麻烦，等等。当然，如果你喜欢的话，垂直城市并不排斥候鸟式生活，或者经常搬迁。相反，垂直城市让搬迁和短期移居更方便，因为日常生活是一样的，甚至不需要准备换季的衣物用具。

## 再穿越

回到开始关于穿越的话题，如果我们有人能够穿越到 200 年后，他应该可以看到碧水蓝天，广阔的原始森林，成群的野生动物。人们居住在群集的，高大的垂直城市中，分布在海拔较高地区的温室为人们提供粮食和电能，各种肉类在培养皿中生长，城市中或者附近的种植基地提供新鲜的瓜果蔬菜，人们没有衣食之忧，寒暑之困，过得充实幸福。

我们在讨论农业的时候，没有太多考虑畜牧和水产养殖。人类对动物蛋白的摄取是生存和健康的条件。我们的身体需要全面的营养。但是以养殖动物的形式获取肉类有诸多缺点。第一是有点残忍，屠杀家畜的行为在人类社会中，一直挑拨着很多人的道德神经。第二是效率低，供应同样热量的动物蛋白，需要五倍以上热量的饲料。第三是浪费，现代养殖业中，动物身体的很多部分如内脏、皮毛、骨头等，是不利用的。第四是破坏环境，养殖场环境恶劣，肮脏，恶臭，还释放大量温室气体。第五是食品不安全，动物也是复杂的生命，也会生病，为了保证产出，养殖行业会大量使用抗生素、激素等最终危害人类自生的产品。在培养皿中是可以直接培养动物组织的，原则上可以解决上面说的所有问题。现在这种技术还在研究过程中，虽然已经能够提供产品，但是成本还很高。十年或者更长的时间内，也许可以看到这种技术大规模应用。

他也许能看到漂浮在海上的巨大城市，看到大片的风力发电机和太阳能电池板，纵横交错的封闭轨道交通，快速地把旅客和货物送往世界各地，……。

海洋城市也可以不受季节或者气候的影响，因为它可以随着季节变化漂移。它也不太受大型自然灾害的影响。普通的暴风雨对海洋城市没有什么影响。超大型的飓风有固定发生区域和时间，只要在飓风发生季节不去那里就可以了。超级地震和海啸只会使漂浮在大海中的城市上下晃动一下，不能产生危害。但是海洋城市的建设成本更高，应该在陆地垂直城市大规模发展之后才开始。

但是如果假设有 200 年后的人穿越回来，来到我们今天，他会到什么感到惊奇呢？当然他会为环境污染，原始、高强度的农业耕作，城市的混乱无序，战乱和饥荒，和饱受冷热寒暑折磨的现代人类感到不解和同情。

就像我们从现在穿越到 200 年前一样，我们会很不理解当时的人们。为什么会因为一点小事情就打架械斗？为什么生了病去找和尚道士，而不是医生？为什么房子那么小，那么暗，那么冷？为什么不用玻璃？为什么大小便在桶里？粮食产量怎么那么低？为什么不想办法用杂交水稻呢？很容易啊。

但他更迷惑不解的也许是：为什么这些人已经有技术和能力了，还不建设垂直城市呢？为什么他们会一栋一栋地盖只能使用 50 到 60 年的，不环保的，不舒适的，交通不方便的，规模很小的楼呢？为什么这些人用尽手段挣钱，挣了钱不建好的房子，却去买很多破房子呢？一个人怎么会需要几套房子呢？为什么会有很多人花很多钱，喝对自己身体有害的东西呢？哦，明白他们为什么生活得那么糟糕了，因为他们能够影响社会发展的人，喝那些降低思考能力的东西太多了（呵呵）。为什么每个人都没有安全感，都需要积累很多的钱或者房产，而不建设一个每个人的任何方面需求都有保障的社会呢？为什么这些人竟然不知道社会是一个整体，而只是执着地满足个人的物欲，不顾他人？难道“每个人都是别人的他人”这一最浅显的道理，不需要智商就能明白的道理，21 世纪初的绝大多数人都不明白呢？……

我们还可以列一个表，对照一下穿越到 200 年前的现代人，和 200 年后穿越到我们现在的未来人，都会有些什么惊奇：

现代人看 200 年前	200 年后看现代
空气很好啊	空气很糟啊
这些人不洗澡，不刷牙，衣服脏兮兮的，臭死了	这些人都好丑啊
天天晚上睡觉被蚊子叮，虫子咬？	怎么小孩老生病？
山上有土匪强盗	为什么每家每户都装防盗门？
接生婆这样会害死小孩和产妇的	为什么癌症意味着死亡？
饥荒太可怕了，所有的人都没有吃的，卖儿卖女	野外种植太原始。野生动物很少见。
怎么没有几个人认字？而且一般的人好像都很粗鲁。	怎么没有几个人有基本的科学和人文素养？
什么活神仙赛诸葛，不就是骗子吗？	这些教授为什么要鼓吹那些不可能的技术。
怎么路都那么窄，那么高低不平？	快来看堵车，好壮观啊！
几乎所有的人都没出过远门	实地旅游是几百年前一种落后的人类行为。

刑罚很残酷，断案很任意，冤假错案很多

为什么法律都是惩罚性的？

穿越者如果只是观察，满足一下好奇的心理，以便回到自己的时代后，将自己的经历作为茶余饭后的谈资，或者是为了严肃地研究，应该没有什么问题。但是如果穿越者必须停留在穿越到的时空，再也不能回到自己原来生活的环境，恐怕需要有周密的计划。

穿越之后有许多种活法。可以默默无闻，男耕女织，静静享受平淡的生活；可以动用自己的知识，过上富足舒适的生活；可以避世隐居；可以悬壶济世；可以教化民众；也可以大干一番事业，让历史的车轮快进几百年。

我们假定穿越者有强大的历史责任感，雄心万丈，立意改变当时的世界，让人们尽快享受后世的文明。他可以怎么做呢？

这里还需要一些条件。比如，他在当时有没有历史？是石头缝里蹦出来的无亲无故的成年人？还是有合法身份，有完整生活记录，但是突然获得了后世生活体验和知识，并意识到自己使命的一个人？如果是后者，他的合法身份也很重要。是一位达官贵人，书生农民，还是乞儿佣人？是男是女？觉悟时候的年龄？

有合法身份好像并不是一件好事，即使你是达官贵人。你行为思维的突然变化并不容易被周围人接受。你的历史背景更大可能是你的包袱。

还是简单点，假定你以你现在的样子回去，但是不能带任何现代的东西。即使可以带一些东西，也没有什么帮助。电器是没用的；工具会坏，需要保养；书籍、或者有太阳能充电器的电脑可能是你最需要的，但是它们会引起别人的怀疑。所以，还是什么都不能带的好。衣服不能没有，但是不要奇怪到引起别人怀疑就行了（这一点并不容易，机织的布和手工纺的布看起来差别很大）。假定这些都不是问题。语言也没有问题，你正好掌握本地方言，也没有人注意你经常用词不当。而且你也有一个落脚的地方，晚上有地方睡觉。

在以上条件下，你要施展你的雄才大略，让历史快进，你会怎么做？

当然，第一件事是需要树立威信，建立领导力，让别人跟随你。具体怎么做？你的唯一优势是思想和知识，但具体的实用知识帮助不一定很大，因为你缺乏必要的物质支持。给人看病你没有药，发明东西没有工具和材料。只有少量你记得住的知识可能有用，比如种牛痘可以预防天花。你当然不能讲原理，要不别人不但不会崇拜你，还会心存疑虑。一旦出现意外，你将承担责任。

你需要评估一下你面临的社会现状。大多数人不识字，不会算数，很容易被激怒。识字的人会居高临下地给你讲大道理，而且不太有希望接受你的“异端邪说”。你的“奇技淫巧”只能把你归为方士之类的骗子。你需要一些帮手。说服别人当你的帮手也不容易。他们必须有足够的开放态度，知识

背景,和智商,以理解你说的话,并且愿意跟你干。这里的每一条都不容易。你必须能够养活他们。如果你走上层路线,别人对你的信任和权力斗争都是严重的问题。你需要经常抑制自己发笑的欲望,因为你会看到很多奇怪的迷信行为。

你要做那么多事,交通怎么解决?费用呢?要知道,出趟远门可不容易。而且,几乎什么都买不到。

政治路线不容易。有很多可能,让你出师未捷身先死。即使成功了,掌握了最高权力,政治改革同样要触动很多人的利益,教育改革也会被士大夫们反对,除非成为一个残暴的或者开明的独裁者。独裁者同样有独裁者的很多问题。除了开疆拓土可能容易成功一些,别的改革同样难以推行。在古代,高效的执行力几乎等于残暴。那么,以发展的名义,你准备屠杀多少人?

假定你要推行教育改革,知识体系、价值体系谁说了算?教材谁写?老师从哪里来?老师们会接受你的体系吗?

政治或者掌握权力是最有效的一条路线,但是风险也最大。如果不走这条路,而是走技术路线。比如从发明电开始,看看会发生什么。

发电需要用磁铁和铜,还需要机械加工。大块的磁铁即使找得到,也很难加工,因为没有工具。铜虽然有,但一般是青铜黄铜,导电率不好,延展性也差,做铜丝不容易。当然可以用金银代替铜,但是金银很贵重(铜也不便宜),你的发明作坊会有严重的安全问题。

假定你把发电机做出来了。怎么演示电的功能和别人接受用电呢?最简单又有实用功能的电器是电灯。电灯可不容易做。要有玻璃吹制工艺,要有惰性气体生产工艺,要有耐高温的金属,还要灌注封装玻璃灯泡。你不能指望自己做出发光二极管来吧?假设你花了很大的力气做出来了,经济性不可能很好,怎么推广呢?工厂和原材料怎么保证?物流怎么解决?产品质量控制?售后服务?你的原始资金怎么来的?你的第一个冤大头顾客(当然是权贵),不让你卖了怎么办?直接霸占了你的技术怎么办?

看起来穿越并不容易。无论你以什么身份回去。与其梦想穿越到古代建功立业,还不如梦想在今天这个世界中大彩来得实在。

如果有人从未来穿越到现在呢?他要说服现在的你们,从现在开始建设垂直城市,恐怕一样的困难。

这一节想表达的意思是,社会的发展是一步一步来的,需要积累,无论是人文认知,还是技术发展。认知不容易灌输,需要思辨,需要体验各种路线,需要承受改变的痛苦。灌输的认知是教条,教条不会自己发展。

现代的传统城市已经让我们痛苦。如果不改变发展模式,痛苦还会加剧。路上的车将越来越多,地铁会越来越拥挤,出行成本越来越高,空气治理和生活质量的矛盾越来越大,一次大雨或者大雪带来的混乱越来越严重,人们的日常生活会有越来越多的焦虑,……。

如果按照正常的学习曲线,根据我们前面的计算,也许 85 年或者 100

年之后会自然过渡到垂直城市。但是，同样根据我们前面的计算，如果我们认识到现在的城市模式无法持续，提前一点规划，30到50年内实现，好像也没有什么大的困难。

## 更多的考虑

### 人口

地球现在人满为患，各种资源供应都很紧张。但是如果过渡到垂直城市时代，再辅以温室农业或者三维农业、工厂养殖业、海洋绿化，需要的各种资源都要少很多。也许在建设的时候，同样需要消耗很多资源。但是这些资源都是可以循环利用的。城市、农业、能源的发展模式是可持续的，对地球资源的索取要下降很多。

再以土地为例，我们现在的城市、耕地、牧场、果园，几乎将地球上可以利用的土地开发殆尽。但是在垂直城市模式下，即使非常宽松地在十平方公里土地上建设占地两平方公里的垂直城市，平均每个人200平方米城市空间，平均每平方公里也可以让10万人生活得很好。这样，1万平方公里土地就可以安置10亿人，中国只需要2万平方公里的土地就可以在很长的时间内不需要担心人口过多的问题。这些人需要10万平方公里的高原温室，或者几千平方公里的三维农场就可以养活，

如果聚变能源，或者可持续、消除了长期危害的先进核能技术开发成功，人类可以完全依靠这些几乎取之不尽的能源，维持自身生存和发展。我们可以独立于任何自然环境，甚至不再需要太阳。

长期以来，我们认为人口过多了。但是人口增加到以前难以想象的程度之后，我们却再也没有饿过肚子，生活质量也更高了，寿命也更长了。中国也好，地球也好，究竟可以供养多少人，不能拿以前的标准来衡量。如果回到以前的采集时代，地球供养人口数目很难超过一亿。

人口是不是过多可以讨论，有没有必要保持更多的人口数目也可以讨论，但是垂直城市时代的中国，绝对有能力供养更多的人口。能源问题解决之后，再多几倍人口也没有问题。

在现阶段，工业化完成之后，许多国家的人口都出现了下降的趋势，如日本、西欧等。原因包括生活压力大，节育技术的发展，自我价值实现，以及专业工作，需要大量自己的时间和空间等等。但是这是一个长期的必然趋势吗？自人类诞生以来，一贯的趋势是人口数目的增长。依靠技术和社会的进步，人类一次又一次地突破增长了极限，创造了新的生存空间。垂直城市直接创造了更多的生存空间，降低了人类的内耗和社会运行的成本，为人口

进一步增长提供了条件。

如果全世界所有的国家都步入垂直城市时代，资源不是问题，粮食不是问题，那么就没有什么理由你死我活地争夺土地、石油和水资源了。现代的通讯和交通，使全球沟通和访问变得更加便捷，仇恨和不理解慢慢化解，新生的人们有越来越趋同的价值观，那么世界大同并不是梦。

可能有人认为，世界大同也是一种死亡，因为冲突消失意味着创造和改变消失。这一观点是否成立可以讨论，但是人类绝对可以继续往前走，仅仅是为了自己的生存也必须往前走。

## 生物圈总量

在地球历史的早期，碳在生物圈的保有量比现在大。由于生命活动和地质运动，在大约几亿年的时间内，大量的碳以煤炭、石油、天然气、碳酸钙的形式固定下来，脱离了生物圈的碳循环。工业革命之后，我们每年将数十亿吨变成化石的碳，燃烧成 300 亿吨二氧化碳释放到生物圈中，生物圈中的碳又增加了。如果我们不能增加生物体的总量，这些碳就会以二氧化碳、甲烷的形式存在于大气层中，从而加剧温室效应，引起全球气候变化。如果这些碳能够以森林，动物，海洋生物圈的形式存在，就可以增加生物圈物质的总量，改善生物多样性，让地球的生命更丰富。

解决这个问题的另外一种方式是：利用这些碳，将人类及与人类生存相关的动植物独立出来，在垂直城市、三维农业中循环，增加与人类相关的生物圈总量。这样，我们就把地球几亿年历史中积累的化石碳，转化为人类生物圈的有机碳。既可以繁荣人类世界，又可以降低对地球现状的影响，同时还保留了调节地球气候的能力。

构成人体或其它生命体最重要的元素是氧（按质量计），其次是碳、氢、氮等。在生物生活的大气和地表环境中，除碳之外，别的元素都非常丰富。碳相对较少。一个 60 公斤的人，大约需要 10 公斤碳。但维持一个人的存在，需要相应的植物群落提供氧气，还需要一些动物提供肉食品，这样一个封闭的碳循环圈大约需要 1000 公斤碳。也就是，多一个人在地球上生存，必须多出来 1000 公斤碳。

地球每年大约产生 1460 亿吨生物质，300 亿吨二氧化碳大约对应 500 亿吨生物质。要把人类多余排放的二氧化碳都吸收，生物圈必须增加三分之一以上的光合作用能力。

我们每年将几十亿吨的化石碳释放到地球生物圈中。多出来的这些碳足生成大量的生物。但如果自然界一时消化不了，就会引起问题。封闭的人类及人类食品供应生物圈，对地球更友好。

地球上的煤炭资源有几万亿吨，还有几千亿吨的石油和天然气。所以，

如果我们如果希望有更多的人口，可以再烧一些煤就可以了。

万亿？这个数字很大，地球上怎么也不会生活 1000 亿人吧。不过很难说，万一真的像某些人想象的那样，医学进步到人死不了了怎么办？

## 竞争力

巨大的垂直城市能够为人提供舒适的、有保障的生活环境。可是如果发生战争呢？在国家与国家的竞争中，三维时代的国家是不是会处于劣势？

在非战争条件下，供养同样人口，垂直城市需要的资源更少，人民的生活更有保障，应该在主要受资源限制的国家竞争中占优势。但在战争条件下，垂直城市看起来更容易受到攻击，在被攻击时也更脆弱。

但是我们需要更综合地看待垂直城市时代的战争。

首先，垂直城市时代是文明的下一步。在这一层次中，战争这类低端文明竞争的方式应该很难发生。就像我们在前面说的那样，没有必要打战了，因为资源足够。每个人都可以生活得很好，无冤无仇，旅行迁移自由，为什么要发动大规模的战争呢？战争的目的是什么？谁能够在战争中得到好处呢？

其次，现代或者后现代战争，是消耗战和生存能力战。谁消耗得起，谁能生存下去，谁就是胜利方。垂直城市的国家有强大的生产能力，资源利用效率高，可以提供强大的战时支持能力。

第三，如果战争的可能性存在，垂直城市可以建在地下。虽然成本高一些，但是所有的技术都是一样的。地下的垂直城市具有**绝对的生存能力**。如果把战略力量，战略工业，首脑机关安排在地下的垂直城市中，这样的国家在世界大战中将处于绝对的优势。地下（也可以是山腹之中）可以免受任何攻击，包括终极武器——原子弹。终极武器将失去威慑能力。长期地看，垂直城市国家有强大的工程能力，能源丰富（因为利用效率高），可以将主要的城市和工农业都建在地下，这样甚至可以在小行星撞击地球这样的灭顶之灾中生存下去，从而获得绝对的生存能力。毁灭性世界大战或者大灾难之后，能够生存下来的，就是最后的胜利者。

第四，从技术上看，垂直城市时代的战争，必然是飞机与导弹之间的战争，陆战只可能发生在边界。如果兵临城下，本来你就已经输了，没有必要再讨论传统城市垂直城市的优势劣势。在防空战中，目标较小的垂直城市更容易布防。在战争的威胁下，垂直城市也可以设计为容许一定的破坏，保持整体生存能力。

第五，垂直城市的生存环境是独立的，农业也是独立的，不怕破坏。如果垂直城市国家和非垂直城市国家竞争，只需要培育出一种超级害虫，破坏敌人的农业生产就行了。比方说，为了避免大规模使用对环境有害的化学杀

虫剂，现在转基因抗虫技术已经广泛应用。如果培育一种对抗虫基因不敏感的虫子，就可以很快破坏大范围的农业。

第六，再强调一遍，如果垂直城市在地球上大量出现，毁灭性的世界大战就非常不可能发生。要对别人的智慧有一点信心。战争总要有个目的吧，国家的概念都要消失了，谁跟谁打？喜欢竞争可以去竞技场比赛啊，要不来一场几万人对几万人的虚拟现实冷兵器大战？

## 发展就是建设

直观地从形态上看人类社会的发展历史，我们可以很简单地将社会的发展程度和建筑的大小联系起来。越发达的社会，人工建筑及工程越多，越大，建设能力也越强。因此我们也可以很有信心地说，未来我们会启动更大的工程，建设更多、更高大的建筑，而且我们能够建设得越来越快，越来越好。

这似乎与目前比较受欢迎一种想法——崇尚自然——有点不相容。有点奇怪的是，当我们听到或看到“回归自然”，“贴近自然”的说法的时候，往往都是人造的住宅小区，或者旅游景点的广告，也就是说，它们本来就是不自然的。

人类离开“自然”已经越来越远。换句话说，就是，“自然”已经不适合人类。通常，我们对“自然”的想象太美好了。而更经常的是，“自然”意味着严寒、酷暑、狂风、暴雨、毒虫、猛兽、……，等等，连铺设或者平整过的道路都是不自然的。人类现在只能生活在人造的环境中，即使你身处“大自然”。因为你带了户外装备，你的车就在附近，你的食品和水是从超市中买的，你还有帐篷，驱蚊剂，手电筒，多用途小刀，手机，等等。这些一点都不“自然”。如果出了意外，你需要呼叫救援体系。而且你最多呆上两天就呆不下去了，因为你还想洗个热水澡。

人类社会发展的历史，甚至生物进化的历史，都是要逃离“自然”。人类尤其如此。我们不停地改变自然，越来越挑剔地改变自己的生存环境。

建筑越来越高，越来越大，大型工程影响的范围越来越广。水坝可以完全拦蓄一条大河的水，使河水点滴都无法汇入大海。大运河将一个流域的水引到另一个流域。高山被推平，海洋被填成平地，巍峨的群山桥隧相连，高速公路、高速铁路穿行无阻，天堑变通途。

垂直城市仅仅是下一步。更高大的建筑，更舒适的环境，更节能的社会构成方式，……，虽然这意味着更多的努力和更困难的工作。

世界上几乎所有的基础工业产品，如钢材，水泥，玻璃，能源，发电量，……，产量逐年上升。中国这几十年尤其突出。以后会保持增长吗？或者再过几年，会下降吗，还是会维持？从发达国家的发展过程来看，是会稳定或者稍有减少的。但是，即使维持现有的产量，如果停止大规模基础建设，

中国的绝大部分工业产品都会大规模过剩。继续大规模建设，或者维持一定速度的更新，也是经济增长或者平稳运行的需要。

但经过几十年的建设，中国的基础建设，特别是房地产，逐渐饱和，部分地区还出现了过剩。再建设，该建设什么？垂直城市无疑是一个很好的答案。当然，我们还是需要更多的高铁，更安全便捷的高速公路，还有西部农业和可再生能源基地的开发。

在中国西部建设十万平方米的自动化温室，彻底解决未来几千年的农业问题，腾出一百多万平方公里的东部宜耕宜居宜工宜牧农业用地，几乎相当于多出一个中国。我们也可以将这些土地的一大部分作为自然生态用地，让土地回归自然，让自然更健康。生活在垂直城市中的人们，在休闲时也多了些真正的自然之地可以造访。

## 科幻作品中的未来城市

未来的城市应该怎么样，很多科幻作品中都有描述。从阿西莫夫，到现在很多的科幻大片、电视连续剧，都有巨大的未来城市的形象，也有对未来环境污染恶化的担忧。这些幻想的未来城市能给我们什么启示呢？

网上搜索“future city in science fiction”（科幻作品中的未来城市），可以找到很多精美的艺术图片。巨大的建筑，是几乎所有未来城市必须具备的特征。但是这些图片是艺术家的作品，不是城市规划专家和建筑师的设计。作为科幻作品，艺术家不需要为生活在那个时代的人们负责，不需要担心建筑的宜居性和人们的感受。很多图片仔细推敲，不一定非常合理。但是只要楼宇足够高大，就必然按照我们垂直城市的模式进行规划设计，必然处理本书中描述的各种问题，也必然具备本书描述的垂直城市的各种优势。

但是，本书中的垂直城市和科幻中的未来城市相比，还是有两个显著不同的特征。

第一，垂直城市将人们日常生活和工作环境与自然隔离开，是几乎完全独立的。而科幻作品中的城市，这一点并不明显。或者即使经过仔细推敲之后，那些城市本来也应该更像我们的垂直城市。但是科幻电影场景中，总是可以看到背景中壮观的城市。我们的垂直城市也可以有这样的景观，但是这样的地方显然比例比较低。大部分不是这样的，或者，要通过室内虚拟显示技术实现。

第二，科幻作品的未来城市中，各种奇形怪状，功能强大的个人高速交通工具，在空中有秩序地飞行。这一点技术上还是有困难。一是因为飞行器能源消耗太大，二是因为安全性较难保证。在我们的垂直城市中，普通的日常交通放弃了交通工具。

本书不是科幻，但是如果大家都认为，未来的城市主要由大型建筑构成，

那么，为什么不能现在就开始规划和建设呢？

## 更遥远的未来

人类是地球上的生命演化几十亿年的结果，人类的发展就是生命的发展。人类必须继续生存、发展、壮大下去，必须拓展新的生存空间。这是我们的义务，不是可有可无的选择。

人类的下一步，就是地球生命的下一步。人类应当以高级文明的形式向外扩散，保障自己生存，以保存地球几十亿年的演化成果。而不是在地球消亡时，以原始生命的形式，希望大灾变残存的仁慈，将生命带到下一个可能的伊甸园。

我们经常把太阳比喻成人类的父亲，地球比喻为人类的母亲。可是人类应该永远依赖父母的呵护吗？难道人类不应该长大，不应该独立生活吗？父母的养育与呵护是必要的，但是孩子长大成熟也是责无旁贷的。

可能有些人觉得，进入垂直城市，离开自然，或者更远，迈向太空，是对自然的背叛，是对上天对我们安排的辜负，大逆不道。可是你怎么知道，让你长大，让你自己对自己负责，就不是上天的安排呢？上天给了你几十亿年的时间，让你长大，让你终于成熟到能够依靠自己的力量和智慧生存，能够迈向太空保存生命的种子，你却不去做，赖在地球上不走，听凭随时可能出现的大灾变摧毁自己，难道这样才更负责任，才是上天的安排吗？

垂直城市，以及相关的农业和能源体系，只是地球上生命过程发展的延续。我们需要更强大，适应能力更强，生存能力更强，才能够走出地球，将智慧的生命带到太空，去寻找更广阔的生存空间。

我们在前面“竞争力”一节讨论过的地下垂直城市，稍加改进，即可在太空殖民中应用。与以前人们想象的不同，太空殖民不可能通过建造大型航天器实现。不仅因为大型航天器很难组装和发射，更大的问题是，大型航天器在宇宙空间中非常脆弱，不可能用于星际航行。航天器最多只可以让我们在太阳系内飞行。

如果最后太阳老去，地球真的变成不适合人类生存，我们必须把地球整个搬走。或者我们需要在太阳系以外的空间寻找第二个家园，我们必须驾驶一颗小行星或者卫星。人类寄居在星球的内部，离开太阳系。

为什么必须驾驶一颗很重的星球，而不是一艘航天器？宇宙中充满各种危险，特别是有很多看不见的小石块，小冰块。这些小天体与航天器的相对速度在几十到几百公里每秒。一旦被一块小石头击中，航天器就会被打烂，很难修复。此外，还有强大的辐射如超新星和伽马爆。这些强大的宇宙事件破坏力极强，能够直接将行星的大气蒸发，但是对星体的破坏有限。航天器不可能在这类事件中存活下来，但是小行星可以。即使没有剧烈的撞击和星

爆，宇宙空间无所不在的高能粒子无时不刻不在轰击着脆弱的航天器。每一个高能粒子造成的微观尺度伤害会不断积累，破坏航天器的外壳和结构件。

人还必须生活在一定压强的大气环境中。这一压强对大体积航天器的结构安全形成巨大威胁。

按照现有的技术，即使旅行到离太阳最近的恒星，也需要几万年。开拓者们显然不能永远生活在上述恐惧之中。解决的办法就是驾驶一颗小行星。人类的城市及其它设施安排在几公里或更深的地层下面，依靠地层的厚度抵抗小天体的袭击。更大的天体数目非常少，几万年也不会直接撞上一颗。也可以在星球表面设置预警，发现危险及时规避。

大的小行星还可以提供足够的矿产资源。星际航行没有太阳能（恒星光源）可以利用，所以在进入下一个恒星系统之前，开拓者们必须依靠核能坚持几万年。在一颗合适的小行星上，可以有足够的矿产资源供开拓者们几万年使用。

除了核能之外，其它的矿物都是可以循环利用的。承担开拓任务的团队，为了保持足够的生存能力和发展能力，还要有一定的多样性，恐怕至少需要几十万人。

# 后记

这本小书已经终于差不多写完了，但好像还有很多东西没有说到，或者没有说清楚。甚至书的定位，自己也不容易说明白。

笔者经常说，我们这一代人是最幸运的，在短短的几十年内，有惊无险地经历了人类社会几千年的变化。迅速的变化也让很多人迷茫，很多人不知所措，甚至不知道要相信什么，不知道怎么做才对。

早在当研究生的时候，那时候是 90 年代初，中国刚经历了一些动荡。当时，同学们中经常辩论中国应该怎么发展。当时有很多想法，很难在短暂的争论中说清楚，就很想写一本书。1999 年，已经工作一段时间了，大致安定下来。曾经动笔写过一万来字，也就是本书前面讨论人类历史的一些内容，但要详细一些，总结了当时人类学研究的一些进展。但是很快就停下来了。直到 2010 年，在美国访问的时候，有一些时间，做了一些调研，又重新开始写这一本书，题目和内容也确定下来了。但是回国后工作繁忙，再加上自己的拖延，事情又耽搁下来。

但在随后的几年里，一直在积累素材，做了大量调研，并且组织了几位有兴趣的学生，就相关问题作了一些计算或者研究。比如研究生李冰桓比较详细地研究了光合作用的量子效率和植物工厂的运行成本，杜奕辰同学计算了垂直城市的能耗，邝杨同学调研了不同社会形态下能源强度，陈超、金诸峰等同学对压缩空气蓄能进行了研究，等等。自己原来就对几乎所有的能源问题做过比较详细的调研，形成一些看法。

到了 2013 年初，恰逢北大物理百年，希望能借此机会把这本小书完成，否则不知道要拖到什么时候。

中学的时候，一直对物理、化学、生物等自然科学有浓厚的兴趣。高考没有考好，以遥遥领先的分数，服从分配进了自己当时不知道名字的一所重点大学，学了自己没有听说过的一个工科专业。大学二年级的时候，发现了自己对相对论、量子力学等理论非常着迷，于是开始自学大学物理课程。自学期间，学校的课程仍然比较繁重，但是我及格为目标的专业课程学习非常轻松（最后考试也都还不错，呵呵）。除了自学物理之外，还有很多时间在图书馆浏览。在图书馆里，好像突然发现了一个新大陆，中学时代狭窄的视野一下宽阔了。我看阅览室的书，不是按照专业，而是按照书架顺序，从第一排看到最后一排。每一本书，每一个学科都能引起我的兴趣。在暑假的时候，绝大部分同学都回家了，而我可以充分享受图书馆的安静。曾经一个星期在图书馆泡上 105 小时，每天早上等着阅览室开门，熄灯才走。除了最后一个暑假（1989 年）在混乱中度过之外，大学的每一个暑假，都是在图书馆看各种各样的书过来的。

1989 年考上北大理论物理研究生，师从曾谨言先生。上研究生后开始接触计算机，觉得计算机很重要，也很有意思，就自己泡在机房学会了上机和编程。后来接触微机，又自己看了很多东西，被当成专家咨询，并协助管理系里的计算机。再后来，因为工作的关系，开始高性能计算方面的工作，自己搭建计算集群。因此对信息行业有了比较多的了解。当然，在这期间，曾经也有很长一段时间，或者经常痴迷于计算机，痴迷于网络，痴迷于电脑游戏。

2002 年至 2003 年在美国从事高性能计算、多个学科的计算支持、分子动力学和从头计算等方面的工作。期间对美国社会有了很多了解和感触。回国后，因为中国加入国际热核实验堆计划（ITER），北大参与聚变研究，笔者开始进入聚变研究领域。出于兴趣和全面了解能源问题的目的，先后详细调研了各种聚变方案，裂变核能，储能与可再生能源等等。

这几年，又详细了解了农业的进展。有一段时间，曾经对发光二极管照明农业非常着迷，自己在办公室吊了两盏灯种菜。这为书中独立自然农业讨论作了准备。近两年，因为偶然的原因，在郊区种了一小块地，也比较充分地理解了传统农业的困难。

关于人类的发展和生存，以及以后的发展方向，长期就持本书中的观点。近年来对能源与农业的了解，细化了发展的方式。其中完全基于可再生能源的能源发展模式，是在这几年对蓄能和可再生能源研究的基础上提出来的。关于压缩空气蓄能，曾计划专门写一本书，但进行得不顺利。

要对社会和经济的发展提出长期的，具体的发展方向，似乎出发点本身就就很幼稚。但是社会总要有一个长远的发展方向，经济和产业也必须根据大的发展方向进行调整。垂直城市也好，高原温室农业也好，以蓄能为基础的可再生能源体系也好，都可以循序渐进，小规模成功了再继续往下走。但是中国的科研体制很难产生一个全新的研究方向。这需要很多人去倡导。

社会也许还有别的发展方向，但是书中提出的方案是可行的。粗略看来，这一套方案，应该可以解决很多目前社会面临的问题，从社会到经济，从能源到环境，再到食品安全，甚至更多。不过无论一个想法看起来多么合理，不去实践永远都是空想。很多事情开始做的时候，才会发现问题，才会遇到困难。比如垂直城市的设计就是一个大问题。现在还没有任何一个人设计过一个完整的垂直城市。一座城市和一座楼还是有很大差别的。

在这本书的酝酿和写作的 10 余年中，世界发生了很多变化：911 事件似乎使摩天大楼成为非理性发展的象征，但摩天大楼还是越盖越高；中国经济总量从世界第七上升到世界第二位，一线城市的房价上升了五六倍，耕地连年减少，但粮食产量逐年上升；计算机的速度提高了 1000 倍；互联网、移动通讯变得不可或缺；云计算的概念在鼓吹了 10 年之后终于看到了比较大规模的应用；物联网也提出很久了，但是还没有开始普及；医学的发展，

已经可以开始培养器官；整容开始流行；十几年前，当时物理系主任甘子钊老师就告诉我，发光二极管可以很快取代所有的照明，但到今天，虽然效率又大大提高了，但好像还没有那么普及；光伏产业从兴到衰；风力发电突然暴起，中国连续五年每年增长装机容量一倍以上；中国又盖了好多摩天大楼；奥运会、世博会成功举办；北京、上海的人口从一千多万增加到了两千多万；中国的高铁、地铁建设量和运营量突然变成了世界第一；……。但同时，也有恶化的环境，对食品安全的担心，越来越大的生活压力，越来越拥堵的交通，等等。

到 2013 年，中国建成了世界上最大的单体建筑，最高的建筑也在运作之中，号称将在七个月内建成。虽然笔者提倡垂直城市，但是垂直城市并不只是一座大楼。笔者专门访问了刚刚投入使用的世界第一大楼——成都新世纪环球中心。它看起来更像一座由玻璃外壳罩起来的建筑群，有很大的净空。很大的净空虽然壮观，但是会有一些问题，主要是空气温度不好调节。那么大的空间会形成自己的气候。大面积的玻璃让大量的阳光直射进来，变成一个巨大的温室。制冷的结果必然是上面热，下面冷。垂直城市不能按照这种方式简单建设。

在这本书初步完成之后，请朋友们批评指正。有朋友告诉我国内已经有企业在规划立体城市。上网看了一下，该项目很多出发点和这本书类似，而且已经开始筹备实施，这个项目的确是很有意义的工作。该项目由美国著名建筑事务所设计。很多细节尚不清楚，但是该项目与我们的垂直城市相比，还是有一些差别。第一，垂直城市是一座大楼，立体城市是很多楼。占地面积二者差不多，但是垂直城市使用面积还要多十倍以上，人口也要多十倍。第二，农业在立体城市中占的比例很大，但初期的垂直城市农业部分很少，因为我们认为城市里的农业只能提供很少的产品，作为食物供应者意义不大。人工照明的三维农业还不成熟。第三，垂直城市的日常生活基本摒弃了室外，专心经营室内环境。立体城市概念中，室外环境仍然很重要。第四，垂直城市的目的是所有城市三维化，是整体解决方案。立体城市似乎更着重推广一些理念。作为纯技术派，我对任何理念和文化都没什么感觉。任何做法，在我看来只有对和不对，高效率和低效率两种，而各种“文化”纯粹就是浪费时间。立体城市看起来像升级了的新加坡，或者低碳版的杜拜。无论如何，立体城市的规划和建设是很有意义的。

国内外还能听到一些巨型大楼的计划，但是要么太宏大，太科幻，要么太实际，综合性不强。其实美国纽约、芝加哥市中心的现状能够为垂直城市提供一些启示。很高的楼，密密麻麻，不需要机动车，工作和一般日常活动都可以步行。但这些密集的高楼群毕竟是 20 世纪的产物。新兴的城市国家，如新加坡，也开发了大量垂直城市时代的技术，如立体农业等。中国对新一代城市的需求最迫切，也最有条件建设下一代的城市。从最早实现工业化的欧洲城市，到在一张白纸上建设的美国城市，再到本世纪的新型城市，作为

新兴的工业化国家，拥有强大的工业能力，中国有义务最先建设适合未来生活的新型城市。

经济、能源、农业也是一样，作为后来者，中国已经差不多走到前面了。但走到前面之后，就没有别人的脚印可以跟随了。中国不能等着别人带路，必须自己负起责任来，去探索和开拓新的道路。

虽然经过了很多年，也尽力调研了很多学科的很多技术，但是一人之力毕竟微薄，书中的一些看法可能贻笑大方。自己看自己以前的东西，也会经常汗颜。不过如果能抛砖引玉，让更多的大家同仁往这方面思考，提出更合理的方案，或者去尝试，去研究，笔者心里就很满足了。毕竟，我们都希望生活更舒适、更健康，更有保障，也希望我们的孩子过得比我们更好。

雷奕安

2013年8月于北京大学

补记：

2013年10月贴出本书第一版。

2015年1月贴出第二版。

2015年12月贴出第三版，增加了在功能和空间上垂直城市模块式分层设计和建设方案，农业部分增加了海洋绿化内容。

本书提出的很多看法不是常规，担心有重大缺陷，所以把书贴到网上，希望专业人士指出。经过五年的“公示”求批，也在自媒体、论坛、科学网博客等平台上先后发表了书中的一些观点，包括垂直城市，高原农业，核能问题等。其中一些文章被广泛转发，引起较多关注。关于垂直城市的观点，和国际上推广垂直城市概念的一些专家、建筑师们等取得了联系，共同提倡这一概念。关于西藏高原农业的想法，引起许多忧虑关注中国农业同道的共鸣，已经开始着力推动这一想法，并在西藏得到了本地政府和一些企业的支持。

其中的一些问题，经过了充分争论，细化了一些内容。整体来看，虽然存在一些争议，但是本书的主要论点没有发现大的问题。

几年来，也常有人索书，分发的快印版本也超过了一百本。

希望本书的出版能够抛砖引玉，和大家一起探讨人类社会特别是中国未来的技术发展方向。

雷奕安

2018年6月于北京大学

附录:

表 1, 垂直城市与传统城市比较

	垂直城市	传统城市
人口密度 (人/平方公里)	250000	10000-20000
人均能源使用	低	高
人均占用土地面积 (平方米)	4	50-100
人均生活空间 (平方米)	100	约 50
人均公共设施空间 (平方米)	50	10 到 20
气候	四季如春	四季分明
自然灾害	无	有
城市基础设施	一次建成, 良好	需要经常更新维护
城市智能化	自然实现	实现困难
建筑寿命	长	短
城市建筑重构	简单	复杂
工业用品寿命	长	短
城市快速配送	容易, 可自动化	难以自动化
卫生条件	极好	取决于城市管理水平
人均寿命	很高	高
养老	居家, 集中都方便	困难
急救系统	快速便捷无障碍	取决交通情况
城市效率	很高	一般
交通	快速便捷无冲突	困难
可享受的商业和公共服务	多	少
商业, 公共设施服务服务范围	大	小
治安	好	取决于城市管理水平
生活环境	很好	取决于季节、气候、位置、污染、管理
生活中的事故和意外	少	多
锻炼	规律, 方便	不规律, 不方便
焦虑程度	低	高
健康状况	好	取决于卫生条件、工作压力、环境
住房	价格低	价格高
工作时间	短	长