

全球变暖的物理基础和科学简史^{*}

胡永云[†]

(北京大学物理学院 大气与海洋科学系 北京 100871)

摘要 全球变暖不仅是当今大气科学乃至整个地球科学的热门研究领域,也是国际社会争论较多的热门话题. 文章的目的并不是为了澄清这些争论,而是集中于简要阐述全球变暖的物理学基础,回顾其近 200 年的科学发展历史. 藉此希望对非大气科学背景的学者理解有关全球变暖的科学问题有所帮助.

关键词 全球变暖,温室效应,温室气体,气候变化

The physics and history of global warming

HU Yong-Yun[†]

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Global warming is not only a hot research area in atmospheric sciences and even all Earth sciences but is also a controversial topic in the international community. The purpose of this paper is not to clarify these controversies, but instead, to address the physical basis on which our understanding of global warming is founded, and to briefly review the nearly 200-year history of global warming sciences. We hope the paper will help readers, who have no background in the atmospheric and climate sciences, understand scientific issues of global warming.

Keywords global warming, greenhouse effect, greenhouse gases, climate change

1 引言

全球气候变暖已不是单纯的学术问题,而是早已成为国际社会和各国政府所关心的政治问题. 尤其是在政府间气候变化专门委员会第 4 次评估报告(The Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 通常简称 IPCC AR4)工作组被授予 2007 年诺贝尔和平奖和 2009 年所谓的“气候门”¹⁾事件之后,全球变暖在社会上引起很大争论,这些争论很有些类似于核武器的出现所引起的关于物理学的争论以及目前生命科学一些领域的发展与伦理道德的冲突所引起的争论. 一旦争论超出了学术的范畴,全球变暖的科学基础和许多概念都被模糊了,其科学历史也被淡化了. 本文的目的既不是为了澄清那些超出学术范围的争论,也不是为了维护全球变暖的观点. 相反,我们将介绍全球变暖的物理学基础及其科学发展的历史,目的是为了

读者对全球气候变暖有一个全面的科学认识.

虽然全球变暖在最近几十年才成为热门的研究领域,但认识全球变暖的科学基础在大约两个世纪

^{*} 国家自然科学基金(批准号:41025018)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB428606)资助项目

2012-07-14 收到

[†] Email:yyhu@pku.edu.cn

1) “气候门”事件指的是,2009 年 11 月,“黑客”攻击了英国东安吉利亚大学气候研究组(Climatic Research Unit at the University of East Anglia)的服务器,拷贝走了 160MB 的数据,包括 1000 多封电子邮件和 3000 多份其他文件,并将这些文件公布于众,一些对全球变暖持怀疑和批评态度的人士根据电子邮件中的一些内容和措辞,认为这些涉及到的气候学家操控了气候数据,并认为全球变暖是一场“科学的阴谋”(a scientific conspiracy),后面将提到的 P. D. Jones 和 M. E. Mann 是被指控的主角. 因为这恰好是 2009 年哥本哈根世界气候大会召开的前夕(该会议于 2009 年 12 月 7—18 日在哥本哈根召开),所以显得特别敏感. 后来,多个独立的委员会经过调查指出,没有发现这些学者有欺诈和科学不端行为.

前就已开始建立了. 从傅里叶在 1827 年首次提出地球大气具有温室效应^[1], 到今天人们认识到人类燃烧化石燃料产生的二氧化碳(CO₂)将导致全球气候变暖, 其间经历了一个漫长的发展过程. 与其他科学领域的发展一样, 人类对全球变暖的认识也经历了从最初的感性认识到理论基础的建立, 再到逐步修正和完善的过程. 这期间有几个关键的步骤是与物理学的发展联系在一起的, 那就是量子力学理论和辐射传输理论的建立以及气体分子辐射和吸收谱线的测定. 正是由于现代物理学的发展, 大气的温室效应、温室气体以及大气中 CO₂ 浓度增加导致全球变暖等的坚实的科学基础才得以建立.

在全球变暖科学近 200 年的发展历史中, 除了大气科学家之外, 许多物理学家、化学家和天文学家都做出了直接或间接的巨大贡献, 其中既包括一些举世闻名的科学家, 如傅里叶、丁铎尔、阿伦尼乌斯、施瓦氏、钱德拉塞卡等, 也有一些对公众来说名字比较陌生的学者. 我们将从本文中看到, 即使如傅里叶这样著名的学者, 在构建该科学领域的最初根基时, 仍免不了犯一些错误, 甚至是根本性的错误. 但是瑕不掩瑜, 这是科学认知过程的必然, 丝毫不冲淡这些科学巨人的聪明和智慧.

2 全球变暖的物理基础

2.1 大气层的温室效应

大气层的温室效应可以通过比较地球表面的实际观测温度和假定没有大气层存在的情况下的辐射平衡温度来说明. 假定没有大气层的存在, 地球表面的辐射能量平衡可以用下面的公式来表示:

$$S_0(1 - \alpha)\pi R^2 = 4\pi R^2\sigma T^4 \quad (1)$$

这里的 $S_0 = 1368 \text{ Wm}^{-2}$ 是太阳常数, 也就是太阳辐射在地球轨道的辐射通量, $\alpha = 0.3$, 是地球的行星反照率, 也就是 30% 的太阳辐射被反射回太空, 只有 70% 的太阳辐射被地面吸收, $R = 6370 \text{ km}$ 是地球半径, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 是斯特藩-玻尔兹曼常数, T 是全球平均地表温度. (1) 式的左边表示地球以圆形截面接收太阳的短波辐射, 右边表示地球以球面向太空辐射的红外辐射. 把上面所有的参数值代入 (1) 式, 得到地表辐射平衡温度是 $T = 255 \text{ K}$. 而观测到的全球平均地表温度是 288 K , 这说明大气层的温室效应把地表温度升高了 33 K .

我们也可以使用 (1) 式计算其他行星的辐射平衡温度. 例如, 已知金星的行星反照率是 0.78, 太阳

常数是 2639 Wm^{-2} , 将其代入 (1) 式, 得到金星的辐射平衡温度是 225 K . 但金星的实际地表平均温度大约是 730 K , 所以, 金星大气的温室效应将其表面温度升高了大约 500 K . 这个数值比地球大气的温室效应导致的温度升高的数值要大得多, 说明金星大气的温室效应比地球强得多. 这是因为金星大气比地球大气含有更多的 CO₂. 金星表面的大气压力是 93 个大气压, 其中的 95% 是 CO₂. 对火星而言, 其大气层非常稀薄, 其大气压强不足地球的百分之一, 尽管其大气中 CO₂ 的含量也高达 96%, 但其温室效应非常弱.

虽然我们形象地把大气对地面的增温作用比喻作玻璃温室的保温效应, 但它们之间既有相似的地方, 也有本质的不同. 它们的相同点是, 都允许太阳短波辐射透过, 并且都阻挡红外长波辐射透过, 使地面得到加热; 不同点是, 温室玻璃阻挡了温室内外热力对流和热量交换, 而地球大气层中则有热力对流运动发生. 当大气下层被加热而产生向上运动时, 下层的的热量被输送到了大气高层, 同时由于大气层的压力随高度的升高而降低, 因此, 下层的气块进入高层之后由于体积膨胀而降温^[2].

2.2 温室气体的分子结构和辐射谱

大气层具有温室效应并不意味着所有大气成分都对温室效应有贡献. 实际上只有几种含量很少的痕量气体具有温室效应, 它们分别是: CO₂、H₂O、CH₄、N₂O 和 O₃ 等. 这几种气体在大气中所占的比例都非常小, 通常被称为痕量气体. 相反, 大气的主要成分 N₂ 和 O₂ 则没有温室效应. 这些痕量气体与 N₂ 和 O₂ 在温室效应上的差异, 主要是由于它们的分子结构决定的. 图 1 是 4 种温室气体的分子结构. CO₂ 和 N₂O 分子中的三个原子呈直线排列, 该分子结构决定了它们没有永久性的偶极矩, 因为无论从其哪一端来看都是相同的, 因此, 不可能有单纯的转动跃迁, 也就是说没有单纯的转动能量变化. 但是, 这种线性排列的分子有三种振动模态: 对称拉伸、非对称拉伸和弯曲. 当分子结构从基本态向任何一种振动态转化时, 都需要吸收一定的能量, 根据量子力学的原理, 吸收或放出的能量是量子化的, 也就是 $E_n = nh\nu (n = 1, 2, 3, \dots)$. 振动跃迁需要的光子频率位于电磁波红外波段, 如 CO₂ 的振动跃迁所需要的光子波长大约在 $15 \mu\text{m}$ 附近 (主要对应于三种振动模态中的弯曲模态). 虽然 CO₂ 分子没有单纯的转动跃迁, 但在产生振动跃迁时, 会出现瞬时的偶极矩. 所以, 伴随着振动跃迁, 也有瞬时的转动跃迁发生. 这种振动-转动跃迁所吸收或放出的光子对应

于一个较宽的频率带,而非一条线.水汽分子与CO₂的分子结构不一样,不是直线排列的,具有永久的偶极矩,所以,水汽分子除了具有振动—转动跃迁之外,还有单纯的转动跃迁.水汽有一个重要的振动—转动吸收带位于波长6.3μm处,另有单纯的转动模态位于波长大于12μm的红外波段.

图2是几种温室气体对应于太阳辐射和地球红外辐射的吸收谱. N₂O在4μm和7μm的地方有两个强的吸收带; O₃除吸收太阳的紫外辐射之外,在9.6μm的红外谱段也有一个强的吸收带; CO₂除了在15μm处有一个强的吸收带,在2—4.5μm的波段还有弱的吸收带;水汽是一个强的吸收性气体,从近红外到7μm的波段散布着一些吸收带.因为水汽具有单纯的转动跃迁,又因为转动跃迁所需要的光子能量较低,所以水汽在12—200μm之间均有强的近乎连续的吸收带.相对于这些温室气体而言, N₂和O₂仅吸收能量(频率)很高的光子,并且一旦吸收这些光子,就被光解.例如, O₂吸收波长小于200 nm的光子,后被光解, O₂光解后生成两个氧原子,氧原子与氧分子结合生成 O₃.

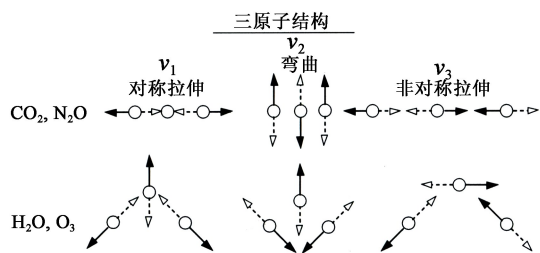


图1 三原子分子结构和振动模式示意图

从图2中可以看出,大气层对太阳辐射(尤其是占太阳辐射大部分的可见光)基本是透明的,而对地球红外辐射基本是不透明的.这也是大气层具有温室效应的本质所在.在地球红外辐射的峰值附近(大约10μm附近),地球红外辐射可以相对多地穿越大气层进入太空,所以,这一波段通常被称为“大气窗口”.

2.3 气候系统的反馈机制

气候系统是一个复杂的系统,包括各个分量之间的相互作用,例如,既包括大气、海洋、陆地、冰雪之间的相互作用,还涉及物理、化学和生物等过程.当其中一个分量发生变化时,这些相互作用将引起其他分量发生变化,并反馈给最初的变化,从而造成更大的变化.目前所关心的主要反馈过程包括:水汽正反馈、冰—雪反照率正反馈、云—辐射的反馈等.

水汽正反馈指的是,CO₂增加导致地面和大气温度增加,造成更多的地表(海洋)液态水蒸发进入

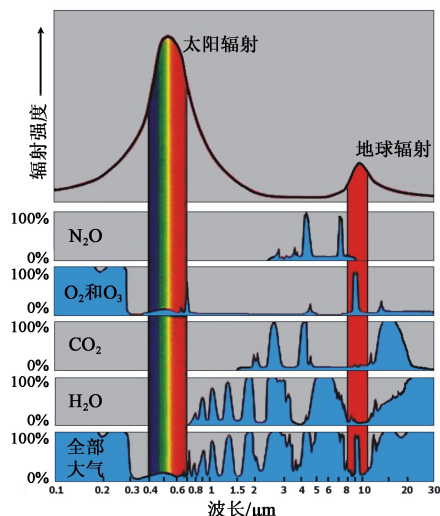


图2 太阳和地球辐射谱以及各种温室气体的吸收率(横坐标是电子波的波长,纵坐标是温室气体的吸收率.100%表示辐射能量完全被大气吸收,0%表示辐射能量完全不被大气吸收)

大气层,因为水汽本身也是温室气体,水汽的增加将使得地表和大气温度升高更多,从而导致更多的液态水蒸发进入大气层,产生更强的增温,从而构成一个正反馈的过程.例如,如果大气是干空气,单纯的CO₂加倍造成的地面增温大约是1.1K,如果考虑水汽的正反馈,则CO₂加倍造成的地面增温将是5.2K^[3].

冰和雪的反照率比陆地和洋面大得多,洋面对太阳辐射的反照率一般小于0.1,陆地的反照率通常小于0.2,而冰的反照率一般大于0.6,雪的反照率大于0.8.因此,冰和雪覆盖面积的变化将造成地表接收太阳辐射能量的巨大变化.如果温度升高造成冰—雪覆盖面积减少,地表反照率将减少,地表接收太阳辐射增加,地表温度升高,从而造成冰—雪覆盖面积进一步减少,温度进一步升高,构成一个正反馈机制.以地球历史气候的长期变化为例,在冰川期和间冰期之间的气候转化过程中,冰—雪反照率正反馈起着至关重要的作用.以现代气候变化为例,北极附近的变暖比全球其他地方的变暖幅度大得多,这也是因为北冰洋的海冰和周边的雪盖的正反馈在起作用.

地表对太阳辐射的平均反照率大约只有0.15.但全球的天空平均大约有60%是被云层覆盖的,正是云层的覆盖,地球的行星反照率实际是大约0.3.相对于水汽和冰—雪反照率正反馈,云—辐射的反馈作用则比较复杂,因为低层的液态水云主要反射太阳辐射,降低地表温度,而高层的冰晶云则允许太阳辐射透过,阻挡地球的红外辐射,具有温室效应.另外,云

量的测定也是一件困难的事情. 因此, 确定云—辐射反馈的强度和正负符号是非常困难的. 云—辐射反馈是气候变化研究中最不确定的因素之一.

3 全球气候变暖的科学历史

3.1 傅里叶提出大气具有温室效应

回顾全球变暖的科学历史, 通常可追溯到数学家傅里叶在 1827 年提出的地球大气具有温室效应的论点^[1]. 需要指出的是, 傅里叶在提出这一论点时, 他并没有给出(1)式那样的定量计算, 而只是定性地论述了这一问题. 这是因为当时现代物理学的许多方面都还处于“婴儿”阶段. 虽然红外辐射早在 1800 年就被德国天文学家 Frederick William Herschel^[4]发现, 但那时红外辐射仍然被称为“暗热”(dark heat)或“暗辐射”(dark radiation), 很类似今天所说的“暗能量”. 虽然已认识到红外辐射的强度随温度的升高而升高, 并且知道红外辐射可以穿越真空, 但还不知道如何定量地计算红外辐射传输. 可见, 当时对红外辐射的认识还相当模糊. 尽管如此, 傅里叶的论文提出了以下几个重要的论点: (1) 地表温度是由其接受的能量与其失去的能量之间的平衡所决定的, 因此, 计算地表温度需要首先确定其能量的源和汇; (2) 地球表面的热能有三个可能的来源: 太阳光、地球内部热能的扩散和傅里叶所定义的“太空温度”(temperature of space), 傅里叶认为地热的贡献可以忽略不计; (3) 红外辐射是地球热能失去的唯一方式, 因为红外辐射随温度的升高而升高, 所以, 地表温度将在得到的能量与失去的能量相等时达到平衡状态; (4) 可见光被地表和海洋所吸收, 并转化为红外光; (5) 地球大气对太阳光是透明的, 但对红外辐射是不透明的. 虽然傅里叶对这些问题的论述都是定性的, 但他的第 5 个论点基本是我们今天对大气的温室效应和温室气体的通俗描述, 他的关于辐射能量平衡、地表温度与辐射能量之间的关系、地球大气的辐射传输特性和地热的作用等的直觉认识基本奠定了后来研究地表温度问题的基础. 在论述大气层对地球表面能量所起的作用时, 傅里叶曾用瑞士登山家 de Saussure 发明的有玻璃盖子的“热箱”做比喻. 傅里叶指出, 大气层就像该玻璃盖子一样, 对太阳光是透明的, 但对红外辐射有阻挡作用, 其效果很像玻璃温室的效应(如前所述, 大气层的温室效应与玻璃温室的增暖效应有着本质的不同).

作为一位数学物理学家, 傅里叶不可能对一个

科学问题的论述仅停留在定性的层面, 他最擅长的还是使用数学的语言来论证物理问题. 傅里叶在论述地热对地表温度的贡献时, 其结论是通过严格的推导给出的. 傅里叶根据金属热传导的原理来计算地球内的热量向地表的扩散, 尽管他的计算过高地估计了地热的热传导, 但其结论是, 地热对地表温度的贡献是非常微弱的, 基本可以忽略不计. 傅里叶还使用了地表温度的周期性日变化和季节变化作为边界条件计算地球次表层的温度变化, 正是根据这样的计算, 他后来发展出了我们今天称之为傅里叶级数的重要数学分析工具. 傅里叶还根据该计算正确地预测了地球次表层温度的日变化随土壤深度的加深而迅速衰减, 但次表层温度的年际变化随深度的衰减要弱得多. 我们知道, 傅里叶最为重要的科学贡献就是推导出固态物体热传导的偏微分方程. 根据傅里叶本人的说法, 试图解释地热向地表的传导是其解决热传导问题的主要动力^[5].

在构建现代科学基础的早期阶段, 人们的认知总是会出现这样或那样的错误, 有一些在我们今天看来甚至是根本性的错误, 即使像傅里叶这样的科学巨人也不例外. 他在解释为什么极地的地表温度在极夜期间接近 200K 而不是无限低时, 曾提出在太空存在大约 200K 的“太空温度”^[5]. 他认为正是这一热源的存在, 极夜期间极地的温度接近 200K. 我们今天知道, 傅里叶所谓的“太空温度”应该是宇宙背景温度, 大约是 3K, 而不是 200K. 我们也知道, 极地在极夜期间的地表温度之所以接近 200K, 是由于大气和海洋自热带向极地输送热量的结果, 输送来的热量与极地红外辐射冷却之间的平衡决定了极地温度在极夜期间接近 200K, 而不是因为存在所谓的太空热源^[6].

3.2 温室气体的确定

在傅里叶提出大气层具有温室效应 30 多年之后, 爱尔兰物理学家丁铎尔才通过实验确定了大气中哪些气体具有温室效应^[7]. 丁铎尔曾明确指出, 他测量温室气体的目的是为了了解释大气的温室效应及其对地球气候的影响. 丁铎尔发现大气的温室效应只是几种含量很少的由三原子组成的分子贡献的, 也就是 CO_2 和 H_2O 等, 而大气的主要成分氮气和氧气并没有温室效应(氮气在压力足够大的环境下也具有温室效应). 这些测量结果使丁铎尔意识到, 地球气候的改变并不需要整个大气层在质量上有根本的改变, 而只需要几种痕量气体的变化. 丁铎尔也意识到, CO_2 是地球气候变化的关键因素, 因为虽

然水汽的温室效应比 CO_2 更强,但大气中水汽的含量是由大气的温度决定的(克劳修斯-克拉珀龙方程),当水汽含量达到饱和时,水汽凝结形成降水,从而减少大气中的水汽.当然,水汽的正反馈将放大 CO_2 的温室效应,使得地球表面的增温远大于单纯的 CO_2 增加所造成的温度升高.

图 3 是丁铎尔实验装置的示意图.他使用该仪器测量了温度较低的气体对红外辐射的吸收以及当气体被加热时红外辐射的特性.丁铎尔所测量的气体吸收和发射红外辐射的特性也就是后来的基尔霍夫定律.他还发现,在气体浓度较低并且压力较低的情况下,气体的吸收性正比于气体的浓度,而当气体浓度足够高时,继续增加气体的浓度对气体吸收红外辐射没有影响,这是现在所知的吸收线饱和效应.

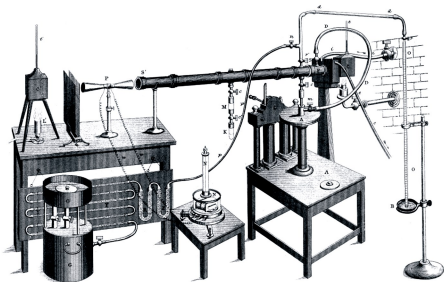


图 3 丁铎尔测量温室气体所使用的实验装置示意图

在丁铎尔的时代,还没有关于分子结构的认识.因此,丁铎尔试图使用化学键的概念来解释为什么三原子分子能够吸收红外辐射,而双原子分子如 N_2 和 O_2 不吸收红外辐射.我们现在知道,双原子分子也具有化学键,它们之所以不吸收红外辐射是因为这些双原子分子的电子对称性,它们在振动时不会出现偶极矩,因此也不会吸收或放射红外辐射.可见,对温室气体的正确和全面的理解是在分子结构物理学和量子力学建立了之后才有的.

3.3 气候对 CO_2 的敏感性

傅里叶提出了大气层具有温室效应,丁铎尔发现了大气中只有 CO_2 等痕量气体才具有温室效应^[8].但无论是在傅里叶的时代或是丁铎尔的时代,都无法就气候对 CO_2 变化的敏感性进行定量计算.直到 1896 年,瑞典物理化学家阿伦尼乌斯才开始定量地计算气候对 CO_2 变化的敏感性.阿伦尼乌斯的主要研究工作是物理和化学,他于 1903 年获诺贝尔化学奖²⁾,他的一项重要成果是推算 CO_2 和水汽对红外辐射的吸收谱,并使用斯特藩-玻尔兹曼定律和能量平衡原理计算气候对 CO_2 变化的敏感性以及水汽的正反馈效应.

如前所述, CO_2 和水汽对红外辐射的吸收包括了在不同波段上的吸收带,今天对它们吸收性的测量是在实验室使用精密仪器进行的,而在阿伦尼乌斯的时代,并不具备这些实验条件.阿伦尼乌斯推算 CO_2 和水汽对红外辐射的吸收所使用的数据是来自美国天文学家 Samuel P. Langley 积累的月光红外波段的观测资料.Langley 曾试图根据对月光红外波段的观测来确定月球的表面温度.阿伦尼乌斯的想法是使用这些观测数据来计算整个大气柱中的 CO_2 和水汽对月光红外辐射的吸收特性.图 4 中的带方块的断线是阿伦尼乌斯使用 Langley 的观测数据所得到的 CO_2 和水汽的吸收谱,6.5 μm 附近的水汽吸收带清晰可见,但阿伦尼乌斯的推算数据并没有延伸到 15 μm 的波段,实际上 CO_2 在该处有一个最强的振动吸收带, CO_2 之所以是强的温室气体,正是由于该吸收带的存在.与现在的测量对比,两者定性的一致,但定量地讲,还有很大的差距.

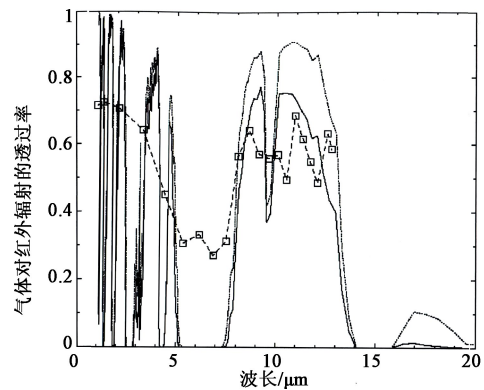


图 4 阿伦尼乌斯使用 Langley 的观测数据所推算的 CO_2 和水汽的吸收带(纵坐标轴上的 1 表示 CO_2 和水汽对该波段的红外辐射没有吸收,0 表示完全吸收.图中带方块的断线是阿伦尼乌斯的推算结果,点线和实线是在两种不同的 CO_2 和水汽含量条件下根据现在的 CO_2 和水汽吸收谱所绘出的吸收带)

在验证气候对 CO_2 的敏感性时,阿伦尼乌斯设计了一个简单的气候模式,该模式在垂直方向只有一个等温的大气层,在纬度方向是格点化的,并有季节变化,类似于我们今天所说的一维气候模式.该模式还考虑了水汽的正反馈和冰-雪反照率的正反馈.利用该模式,阿伦尼乌斯发现,如果大气中的 CO_2 浓度增加一倍,全球平均的地表温度将升高 6°C .与现在精确的多层气候模式给出的地表气温对

2) 阿伦尼乌斯是一位有着重要科学贡献的科学家,但同时也是一位充满争议的人物,最突出的是在他担任诺贝尔奖评委会成员期间,利用职务帮助他的几位朋友(Jacobus van't Hoff, Wilhelm Ostwald, Theodore Richards)获奖,并试图拒绝他学术上的敌人(Paul Ehrlich, Walther Nernst, Dmitri Mendeleev)获奖^[9].

CO₂ 加倍的敏感性数值(2—4℃)相比,阿伦尼乌斯的模式过高地估计了气候对 CO₂ 变化的敏感性. 他的误差主要来源于两点:(1)阿伦尼乌斯所推算的 CO₂ 和水汽吸收谱并不准确,过高地估计了 CO₂ 的温室效应;(2)他的一层等温大气模式高估了大气层向外辐射的红外辐射,也就是降低了大气的温室效应,二者的综合效应是高估了 CO₂ 和水汽的温室效应. 如果把现在准确的 CO₂ 和水汽吸收谱放到阿伦尼乌斯的气候模式,结果是气候对 CO₂ 的敏感性将弱得多.

虽然阿伦尼乌斯的简单气候模式给出的结果有较大的误差,但他是第一位定量地计算气候对 CO₂ 的敏感性的科学家,也是第一位提出人类燃烧的化石燃料有可能导致全球变暖,并且有可能阻止气候系统向下一个冰川期演变的科学家. 有意思的是,阿伦尼乌斯认为气候变暖将有助于人类生存环境的改善,而且日益增加的地球人口需要更为温和的气候环境. 这一观点也是目前那些认为全球变暖并非是一件坏事的人们的主要论点之一.

3.4 辐射传输和能量平衡

当气候科学进入 20 世纪之后,它的发展极大地得益于物理学,尤其是物理学中关于分子结构的认识以及量子力学的发展极大地促进了人们对气体分子吸收谱(分子光谱)的理解. 这些物理学理论告诉我们,一种气体分子的吸收谱是由其分子结构决定的(如 CO₂ 和水汽的分子结构决定了它只吸收和放出红外波段的电磁波),吸收谱中的每一根吸收线实际上是该分子在两个振动态之间的能量差,是量子化选择性吸收的结果. 在此基础上,温室气体的吸收谱也在实验室得到了广泛和准确的测量.

另一个对气候学发展具有重要贡献的是天文学领域辐射传输理论的发展和完善. 在 20 世纪初期,天文学家和天体物理学家出于对恒星结构以及恒星内部能量的径向辐射和对流的研究兴趣,建立了辐射传输的基本理论,这方面的代表性工作是施瓦氏在 1906 年发表的论文^[10]. 在该论文中,施瓦氏给出了辐射传输的基本方程. 还有一些天文和天体物理学家为了解释地球大气层对太阳辐射传输的影响和校正太阳辐射的地面观测结果,也开始研究太阳辐射在地球和太阳系行星大气中的传输问题. 一个代表性工作是 Frank Very 在 1908 年发表的论文^[11]. 他们已开始用多层大气的模型来研究辐射传输问题,而非像阿伦尼乌斯那样的一层大气模式. 著名天体物理学家钱德拉塞卡在 1950 年发表了关于辐射传输的著作^[12],从而系统地建立了辐射传输理论.

到了 20 世纪 50 年代,已经有了更为准确的 CO₂ 吸收谱的数据^[13],先进的计算机的出现也为准确地计算多层大气辐射传输和 CO₂ 吸收谱的积分提供了有效的计算工具(需要指出的是,即使现代的巨型计算机比半个世纪前的计算速度和存储空间大了许多,对辐射传输和辐射谱的积分仍然是一项复杂的工作. 为了节约计算时间或加快计算速度,现代气候模式采用的仍然是近似的带模式,而非对数百万条吸收线进行逐线积分). 这些为更准确地计算气候对 CO₂ 的敏感性提供了条件. 在这一背景下,美国学者普拉斯首先使用了更为准确的 CO₂ 吸收谱和多层大气辐射传输模式来计算 CO₂ 变化对气候的影响^[14]. 他的结果表明,CO₂ 加倍将造成地面增温大约 3—6℃,这说明阿伦尼乌斯的计算结果仅代表了气候对 CO₂ 敏感性范围的上边界.

虽然普拉斯的计算结果比阿伦尼乌斯的结果更为可靠,但普拉斯对地面辐射能量平衡的解释存在错误^[2,5]. 在普拉斯的计算中,假定了 CO₂ 增加仅造成地面温度的升高,而大气层温度是不变的,其结果将造成大气层顶入射和向外辐射的不平衡. 实际上,在大气中 CO₂ 增加之后,大气对流层的温度必将升高,正是由于大气对流层在较高温度下向下辐射红外能量的增加才造成了地面温度的升高,而在大气层顶,入射的太阳辐射和出射的地—气系统能量应该是平衡的.

在普拉斯的计算中,还没有很好地考虑水汽的吸收谱,因为那时还没有完整的水汽吸收谱的测量结果. 这主要是因为水汽的红外吸收谱比 CO₂ 的要复杂得多,并且延伸到远红外波段. 另外,普拉斯的计算也没有考虑大气的垂直对流运动. 当 CO₂ 增加使地面增温之后,近地面层大气密度变小,将产生上升运动,空气的上升将把大气低层的热量带到对流层高层,完成上下层大气之间的热量交换,从而改变大气的热力结构. 这些问题直到 20 世纪 60 年代后期才由 Manabe 和 Wetherald 解决^[15]. 他们设计了更为真实的辐射传输模式,并充分考虑了水汽的吸收谱以及水汽的反馈作用. 他们最为重要的贡献是考虑了大气的对流运动,并清楚地解释了在地面和大气层顶的辐射平衡问题. 正因为如此,人们才认为是 Manabe 和 Wetherald 的工作真正把全球变暖的问题推向了现代. 半个世纪过去了,他们的论文仍然是我们认识全球变暖最基础的参考文献.

在 Manabe 和 Wetherald 构建辐射对流模式之后不久,前苏联气候学家 Budyko 和美国气候学家

Sellers 分别独立地提出了气候能量平衡模式^[16,17],他们引入了冰-雪反照率的正反馈机制,并考虑了赤道与极地之间的热量输送问题.在他们的模式中,准确的大气辐射传输并不是他们关心的重点,所以,他们采用的是近似的灰体大气来代替辐射传输计算,在考虑赤道与极地热量输送时,没有使用真实的三维大气运动中的热量输送,而是用热量扩散的方案来代替,这些近似保证了他们构建的气候模式是简单的,并且可以简明而定量地揭示气候系统在冰-雪正反馈机制作用下的不稳定性和气候平衡态问题.根据他们的模式,气候系统在相同的太阳辐射条件下可以出现三种气候态:(1)两极没有冰盖的温暖气候,如 6500 万年前的恐龙时代;(2)两极存在冰盖的温和气候;(3)全球完全被冰封的冰雪地球气候^[18].其中第一种和第三种气候态是稳定的气候态,而第二种是不稳定的气候态,在外强迫或气候系统内部扰动的作用下,冰-雪正反馈机制很容易导致该气候态向第一种或第三种气候态转化.长期以来,第三种气候态一直被认为是该简单模式的数学解,并没有物理或现实上的意义.但近 10 年来的研究表明,全球性冰封的冰雪地球气候有可能在 25 亿年前和 7 亿年前出现过.

3.5 三维大气环流模式

地球大气是三维运动的流体,通过三维大气运动把太阳辐射能量和地球红外辐射能量在全球重新分布,大气运动也同时输送动量、水汽和其他化学物质.很难想象一个没有考虑大气三维运动的气候模式能够反映地球气候的真实状况. Manabe 和 Wetherald 的辐射对流模式虽然考虑了单一气柱中的大气垂直运动,但只是固定了大气温度垂直递减率条件下的垂直运动(在该模式中,相对湿度也是固定的). Budyko 和 Sellers 的能量平衡模式虽然考虑了赤道与极地之间的热量输送,但他们使用的是热量扩散近似,而非真正意义上的大气热量输送.这些简单气候模式的另一个主要缺陷是没有考虑云对辐射传输的影响,尽管云对太阳辐射的反照率是被考虑的.

随着辐射传输模式的完善,也由于计算能力的快速提高,人们开始考虑使用更真实也更复杂的模式取代简单的气候模式.这便是覆盖全球的三维大气环流模式(general circulation model, GCM).在 GCM 中,需要数值求解的是三维流体动力和热力学方程,因为在这些流体方程中,各个变量都随时间变化,给定初始和边界条件之后,可以对这些方程进行时间积分.如果我们以现在的气候状况作为初始

和边界条件,对时间的积分也就相当于预测未来的气候.这是 GCM 优越于过去简单的气候模式的主要原因.云和降水是气候系统中非常重要的一个环节,这在 GCM 中是一个自然的受大气运动控制的物理过程,但过去的简单模式却无法反映这一过程.仍然是 Manabe 和 Wetherald 首先在 GCM 的发展方面走出了开创性的一步^[19].他们的 GCM 计算结果表明,CO₂ 加倍将导致全球平均地面温度升高大约 3°C. Manabe 和 Wetherald 也发现了全球气候变暖并不均匀,陆地比海洋升温要大,并且随着气候变暖,全球降水量将增加,这些结果都是先前的简单气候模式所无法做到的.

鉴于 GCM 为气候变化研究和预测提供了广阔的前景,20 世纪 80 年代以来,世界各国的主要气候研究机构都纷纷发展各自的 GCM.美国哥达德空间研究所气候学家翰森为首的团队也较早地发展了他们的 GCM^[20],并利用该 GCM 广泛地研究了气候系统中的各种反馈机制,指出了云-辐射的反馈机制在气候变化中起着重要的作用.他们的另一个重要贡献是海洋由于其较大的热容量(热力惯性),将推迟全球变暖的出现,也就是地表气温的增加将落后于 CO₂ 增加达几十到上百年.这与实际结果基本一致,CO₂ 在工业革命时就开始增加,而全球变暖基本是从 20 世纪 70 年代开始的.

3.6 大气 CO₂ 浓度和温度升高的观测

前面我们回顾的是如何利用实验、理论和计算的手段理解 CO₂ 的温室效应及其对气候变化的影响.一个关键的问题我们还没有谈到,那就是 CO₂ 浓度是否是在随时间升高?地表气温是否在随时间升高?本节将从观测的角度来回答这两个问题.

美国加州大学圣地亚哥分校教授 Charles D. Keeling(1928—2005)是第一个用仪器观测大气 CO₂ 浓度的.他于 1958 年在国际地球物理年组织的资助下,在夏威夷的 Mauna Loa 山峰建立了世界上第一个 CO₂ 观测站,并开始 CO₂ 观测,因此,提供了世界上时间最长的 CO₂ 仪器观测资料. Keeling 的观测最初曾得到了美国自然科学基金会(NSF)的支持,但后来中止了,因为 NSF 认为 Keeling 的观测只是常规性的工作,没有太大意义.但在 1963 年,NSF 使用 Keeling 的观测结果发出警告:CO₂ 增加的温室效应有可能造成全球变暖,在 1965 年向美国总统科学顾问委员汇报类似的观点时,同样使用了 Keeling 的观测结果.

图 5 是 Keeling 观测的大气 CO₂ 浓度时间序列

图. CO₂ 浓度从 1958 年的 316 ppmv(每百万体积单位中所占的分量)增加到 2006 年的大约 381 ppmv(2012 年 6 月的 CO₂ 浓度是 397 ppmv). 目前的 CO₂ 浓度与工业革命前的 CO₂ 浓度(280 ppmv)相比,增加量已超过了 100 ppmv. 图中的红线代表月平均时间序列,红线的波动是 CO₂ 浓度的年循环,波动幅度大约是 7 ppmv. 这是因为北半球夏季植物茂盛期间的光合作用消耗了大量的 CO₂,因此,北半球 CO₂ 浓度自夏季开始下降,直到 9—10 月植物枯萎,光合作用减弱,CO₂ 浓度又开始回升,在次年的 5 月份植物繁茂之前达到最大值. Keeling 发表了多篇关于大气中 CO₂ 增加的重要论文,其中最重要的是 1960 和 1970 年的两篇论文^[21,22]. 在 1960 年,他的观测才刚开始 2 年,论文在当时并没有引起很大的轰动,但 1970 年的论文产生了巨大的影响,学术界和社会才开始认真地考虑人类燃烧化石燃料造成的 CO₂ 增加将有可能导致全球气候变暖.

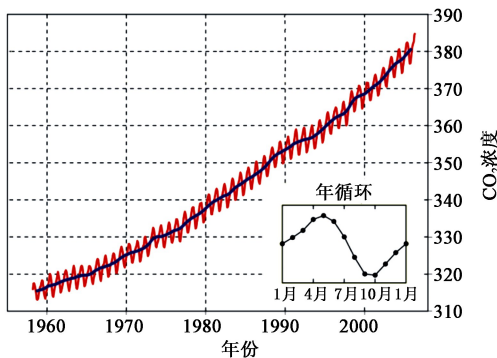


图 5 在夏威夷 Mauna Loa 气象台观测到的大气中 CO₂ 浓度随时间的变化(红色线是月平均值,蓝色线是年平均值. 见《物理》网刊彩图,下同. 图中右下角的方框中的曲线给出的是 CO₂ 浓度的年循环. 该时间序列曲线通常被称为“Keeling”曲线)

虽然温度的测量记录可以追溯到 17 世纪或者更早,但可靠的全球平均温度观测记录通常自 1850 年开始,因为在早期,占全球 70% 的海洋温度观测记录很少. 即使在今天,海洋表面的气温观测主要是通过卫星观测,直接的观测仍然很难覆盖全部海洋. 在人口稀少的陆地,直接的温度观测同样也很少. 英国东安吉利亚(East Anglia)大学的 P. D. Jones 教授在这方面做了大量的工作,他整理了世界各地的各种温度观测资料,给出了公认比较可靠的自 1850 年以来的全球平均温度时间序列. 图 6 是他们更新到 2010 年的南北半球和全球平均地表气温距平时间序列^[23,24]. 无论是全球还是南北半球的平均温度自 1900 年以来均呈上升趋势,除了 1940—1960 年这段时间,温度是下降的,北半球变暖较南半球强一

些. 线性回归表明,在 1900—2010 年间,南北半球分别增温 1.12℃和 0.84℃,全球平均增温 0.98℃^[24]. 美国宾州州立大学教授 Michael E. Mann 等使用树木年轮等替代资料推算了过去 1000 年的北半球地面平均气温变化,发现现在的气温在过去 1000 年都是最高的^[25]. 除了地面气温,整个大气对流层的温度也在升高,美国华盛顿大学付强教授等使用卫星微波遥感的温度资料计算了过去 30 年的对流层温度变化趋势,发现对流层温度也是升高的^[26]. 全球变暖是就全球平均温度的长期的变化趋势而言的,并非意味着持续不断的温度升高,因为气候系统有其自身在不同时间尺度上的自然变化,如图 6 中 60—70 年代的变冷,可以被看作气候系统自然波动的结果,也有人认为是人类活动造成的气溶胶增加,气溶胶散射太阳辐射,导致地面变冷. 但总体来讲,全球平均温度在过去 100 年是升高的.

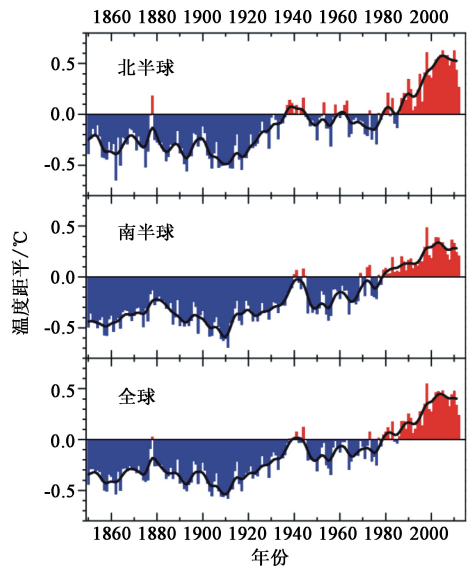


图 6 南北半球和全球年平均地表气温距平时间序列,这里的温度距平指的是每年的温度都减去了 1961—1990 年 30 年的温度平均值(摘自 <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>)

3.7 学术界的呼吁和政府间气候评估报告

阿伦尼乌斯在 100 多年前已思考过,化石燃料的燃烧将导致 CO₂ 增加,并将造成气候变暖. 半个多世纪后的 20 世纪 50 年代,一些学者开始向社会呼吁,人类活动导致的 CO₂ 增加将对气候产生重要的影响^[27—29]. 1979 年,美国著名气象学家恰尼等受美国科学院国家研究顾问委员会的委托提交了一份研究报告(后来被称为“恰尼报告”(The Charney Report))^[30]. 该报告在研究了各种可能的能够稳定气候系统的反馈机制和 Manabe 以及 Hansen 的 GCM 模拟结果之后指出,毫无疑问,CO₂ 加倍将导

致全球平均温度显著升高,估算气候对 CO_2 加倍的敏感性大约是 $1.5\text{--}4.5^\circ\text{C}$ 。自该报告之后,全球变暖的概念开始进入公众的视野,并引起欧美各国政府的高度重视。也是从那个时候开始,气候变化成为了大气和海洋的主要研究方向,后来也成了整个地球科学的重要研究方向。

1988年,世界气象组织和联合国环境署共同成立了“政府间气候变化专门委员会”(IPCC),其目的是为世界提供气候变化的现有进展状况和气候变化对社会、环境与经济的潜在影响的全面、综合的科学评估,联合国和世界气象组织的195个成员国均可参加。IPCC下设三个工作组,第一工作组评估气候系统和气候变化的科学问题,第二工作组评估社会经济和自然系统对气候变化的脆弱性和适应性,第三工作组评估人类应对气候变化的策略,如减缓 CO_2 等温室气体排放。IPCC于1990年、1995年、2001年和2007年分别发表了4次评估报告,第5次评估报告将于2013年发表。在第4次评估报告中,全世界23个GCM的模拟结果表明, CO_2 加倍将造成 $2\text{--}4.5^\circ\text{C}$ 的增温^[31]。图7是IPCC第4次评估报告使用全世界23个GCM数值模拟结果给出的20世纪全球平均地表气温变化和对21世纪全球变暖的预估。在21世纪的预估中,使用了几种不同的温室气体排放情景。如果温室气体被限制在2000年的水平不变,地球气温仍将缓慢增加(桔黄色曲线),其主要原因是已经被加热的海洋将持续地放出热量,并加热地面和大气。如果对人类排放温室气体的速度不加限制,在21世纪末,地表气温将升高大约 3.6°C 。虽然IPCC报告受到了这样或那样的质疑,但其权威性是不容置疑的,每一次报告都是世界各国数百名一流气候学家共同努力的结果^[32]。

4 总结

人类对于全球变暖的认识是以数学、物理学和化学为基础的。简要地讲,研究全球气候变暖或气候变化就是求解流体力学方程、热力学方程和辐射传输方程,并试图探索人类活动对气候系统产生的重要影响。气候系统动力学、热力学和辐射传输这几方面的耦合包含了物理和化学等过程,甚至包括生物过程。气候系统是一个复杂的系统,各分量之间的相互作用以及涉及的各种反馈过程也是相当复杂的。我们现在对这些过程的了解还非常有限,因此,我们目前还不能很圆满地回答有关全球变暖的全部问题。

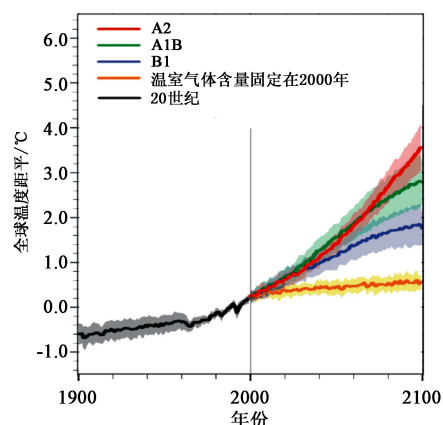


图7 气候模式模拟的20世纪全球平均地表气温距平变化(黑线)和在不同温室气体排放情景下21世纪地表气温预估(彩色线)(图中的阴影区代表23个模式集合结果的不确定性范围(也就是 ± 1 标准差),这里的温度距平是指每年的平均温度减去了1980—1999这20年的平均值。橘黄色线代表温室气体含量固定在2000年的温度距平随时间变化。B1、A1B和A2代表预估的温室气体在21世纪的三种排放情景,这些排放情景是根据未来的经济、社会、技术和环境等因素预估的。其中,B1代表人类限制温室气体排放,但温室气体排放以较低的速度增长,在2100年, CO_2 浓度将达到550ppmv(现在是390ppmv),A2表示人类如不限制温室气体排放,温室气体将快速增长,在2100年, CO_2 浓度将达到850ppmv,A1B是介于B1和A2之间的一种排放情景,在2100年, CO_2 浓度将达到720ppmv)

与其他学科的发展历史一样,人们对于全球变暖的认识也经历了一个漫长的过程,早期对于全球变暖的科学认知甚至存在着这样或那样的错误。但得益于物理学等其他学科的发展,也通过一代又一代学者的努力,我们现在对全球变暖才有了一个比较全面的认识。未来对全球变暖的认识,还将需要与其他基础学科的密切结合,大气探测技术和计算机计算速度的提高也是非常关键的。

无论对全球变暖持支持或反对的观点,也无论是否承认全球变暖是否是由于人类活动造成的,一个不可否认的事实是,现在人类改变自身生存环境的能力是巨大的。我们今天对化石燃料的燃烧实际上相当于把地球早期通过光合作用存储于地球内部的太阳辐射能量释放了出来,这部分能量毫无疑问将对气候系统产生重大的影响。

参考文献

- [1] Fourier J. Memoires de l'Academie Royale des Sciences, 1827,7:569
- [2] Pierrehumbert R T. Principles of Planetary Climate. Cambridge University Press,2011. p652
- [3] Goody R. Principles of Atmospheric Physics and Chemistry. Oxford University Press,1995. p336
- [4] Crowe M J. Modern Theories of the Universe from Herschel

- to Hubble. New York; Dover Publications, 1994
- [5] Archer D, Pierrehumbert R T. *The Warming Papers: The Scientific Foundation for the Climate Change Forecast*. Wiley—Blackwell Press, 2011
- [6] Pierrehumbert R T. *Nature*, 2004, 432: 677
- [7] Tyndall J. *Philosophical Magazine Series 4*, 1861, 22: 169
- [8] Arrhenius S. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5*, 1896, 41: 251
- [9] Coffey P. *Cathedrals of Science: The Personalities and Rivalries That Made Modern Chemistry*. Oxford University Press, 2008
- [10] Schwarzschild K. *Math. -phys. Klasse*, 1906, 195: 41
- [11] Very F W. *Philosophical Magazine Series 6*, 1908, 16: 462
- [12] Chandrasekhar S. *Radiation transfer*. Oxford University Press, 1950, p393
- [13] Cloud W H. *The 15 μ m band of CO₂ broadened by nitrogen and helium*. Johns Hopkins University, 1952
- [14] Plass G N. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1956, 82: 310
- [15] Manabe S, Wetherald R T. *J. Atmos. Sci.*, 1967, 24: 241
- [16] Budyko M I. *Tellus*, 1969, 21: 611
- [17] Sellers W D. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8: 392
- [18] 胡永云、闻新宇, *地球科学进展*, 2005, 20: 1226
- [19] Manabe S, Wetherald R T. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32: 3
- [20] Hansen J, Lacis A, Rind D *et al.* *Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms*. In: *Climate Processes and Climate Sensitivity*, AGU Geophysical Monograph 29, Maurice Ewing Vol. 5, 1984, J. E. Hansen and T. Takahashi, Eds. American Geophysical Union, p130
- [21] Keeling C D. *Tellus*, 1960, 12: 200
- [22] Keeling C D. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1970, 114: 10
- [23] Jones P D, Wigley T M, Wright P B. *Nature*, 1986, 322: 430
- [24] Jones P D, Lister D H, Osborn T J *et al.* *J. Geophys. Res.*, 2012, 117: D05127 (doi:10.1029/2011JD017139)
- [25] Mann M E, Bradley R S. *Geophysical Research letter*, 1999, 26: 759
- [26] Fu Q, Johanson C M, Warren S G *et al.* *Nature*, 2004, 429: 55
- [27] Bolin B, Eriksson E. *Changes in the carbon dioxide content of the atmosphere and sea due to fossil fuel combustion*. In *The Atmosphere and the Sea in Motion: Scientific Contributions to the Rossby Memorial Volume*. New York; Rockefeller Institute Press, 1958, p130
- [28] Revelle R, Suess H E. *Tellus*, 1957, 9: 18
- [29] Sawyer J S. *Nature*, 1972, 239: 23
- [30] Charney J G, Arakawa A, Baker D J *et al.* *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. National Academy Sciences, 1979, Washington, DC, 22pp
- [31] Solomon S, Qin D, Manning M *et al.* *IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes*. Cambridge University Press, 2007, p996
- [32] Houghton J. *Global Warming: The Complete Briefing*, 3rd edition, Cambridge University Press, 2004, p382