

# 行星大气研究进展综述

胡永云<sup>1</sup>

北京大学 物理学院 大气与海洋科学系

田丰

清华大学 地球系统科学研究中心

刘钧钧

加州理工学院, 地质与行星科学学部

---

<sup>1</sup>通讯作者: [yyhu@pku.edu.cn](mailto:yyhu@pku.edu.cn)

## 摘要

在美欧等国家，行星大气科学早已成为了一门独立的学科，并有众多独立的人才培养和研究机构，而在我国，行星大气科学教育和研究还基本是一个空白。在这篇综述论文里，我们将简要但全面地总结行星大气科学的基本知识、目前国际上的研究动态和发展方向，以及近几年来迅速发展的太阳系外行星大气研究。我们将重点强调行星大气科学进展的两个层面：基础科学研究和探测技术。在科学层面，行星大气科学有其自成一体的知识体系，同时也是地球大气科学和天文学的交叉领域，它也是地球大气科学的很好参照。在技术层面，行星大气科学将带动星际通讯、大型计算、卫星遥感、太空探测技术和耐高（低）温材料的研发等。此外，我们还将给出一些国家关于行星大气科学的主要人才培养机构、科研机构 and 世界各国已发射的关于行星大气的主要探测项目。据此，我们呼吁我国行星大气科学研究的开展和相关的人才培养基地的建立是一项刻不容缓的任务。

**关键词：**行星大气、太空探测、金星、火星、木星

## 1、引言

在太阳系的 8 大行星中，除了距离太阳最近的水星只有极为稀薄的大气之外，其它 7 大行星均有大气层。另外，木星和土星的一些卫星也具有大气层（如土卫六、木卫一等）。这些行星大气的化学成分、物理特性和运动特征既具有共性，又各不相同。研究行星大气有助于我们理解地球大气的起源、演化和现代人类生存环境的变化和稳定性。通过对其它星球气候变化的研究，尤其是金星和火星气候变化的研究，也将有助于我们理解地球历史气候演化以及目前所关心的全球气候变化问题，还将有助于我们理解地球生命的起源和演化以及地外生命存在的可能性。研究行星大气的物理、化学、动力学、气象学、光化学、太阳风和磁层/大气相互作用、火星系统对太阳周期的反应和在火星极端条件下的温室效应都可以大大加深人类对地球系统科学的认知。

行星大气科学最早起源于天文学。当天文学的主要研究兴趣从太阳系转向外太空之后，行星大气科学便逐步与地球大气科学相结合，通过与地球大气研究相比较成为一门独立的学科。在欧美等许多国家，行星大气科学早已作为一门独立的学科普遍存在于高等院校和专门研究机构。表 1 给出的是不完全统计的欧、美和日本主要高校和研究机构所拥有的行星大气科学系和研究机构。可以看出，这些国家的一流大学均设有行星大气科学系或专业，说明行星大气科学是属于国际前沿的基础研究领域。美国宇航局（NASA）是美国行星和太空科学研究的专门机构，于 1958 年 7 月 29 日成立，现拥有一系列的研究院/所。近年来，欧洲行星探测技术和行星科学基础研究的发展非常迅速。与美国 NASA 相对应的机构是欧盟的欧空局（European Space Agency, ESA），ESA 于 1975 年成立，近年发射了针对金星的探测器。日本的行星大气研究在近年来发展也很快，成立了太空探测署（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA），日本的许多大学都设有行星科学系或专业。与美、欧和日本等国家相比较，我国在行星大气科学研究领域基本是空白。目前，我国还没有专门的行星大气研究机构，国家自然科学基金委虽然列有行星大气研究方向，但几乎没有人申报该研究方向的科研项目。在我国各高等院校中，也没有行星大气科学专业，在教育部所列出的各学科方向中，没有行星大气学科。行星科学或行星大气科学是连接地球科学与天文学的桥梁。在我国，地球科学和天文学都有相对完善的研究机构和教育机构，但唯独缺少了行星

科学或行星大气科学这一重要的桥梁。因此，在我国研究机构 and 高校中尽快建立行星大气的教育和研究机构并开始人才培养是一项非常迫切的任务。

行星大气科学研究不仅具有重要的基础科学意义，也具有极为重要的国防意义。近代行星大气科学的发展一方面是由于科学家们的科学兴趣驱动的，另一方面也与美国和前苏联的冷战时期的军备竞赛密切相关，近代大规模的行星探测和研究主要起源于美国和前苏联的冷战竞争（见参考文献：世界各国月球和行星探测项目时间表网页。与行星大气有关的主要探测项目可参见表 2）。自从前苏联在 1957 年 10 月 4 日发射第一颗人造卫星开始，美苏之间的太空竞赛日趋白热化，这种竞争一直持续到前苏联在上个世纪 90 年代初解体。两者的竞争首先围绕登月，其次是金星探测，然后是火星探测。在前苏联太空项目无以为继之后，美国继续开展了一系列行星探测研究，对太阳系除地球之外的其他 7 大行星进行了广泛和系统的探测和研究。美苏之间太空竞赛的主要目的并不是为了基础科学研究，而是军备技术和政治层面的竞争。即使在冷战后的和平年代，对太空技术发展及其在军事方面应用的强调和重视仍然是行星探测的首要目的，而科学层面的意义则是相对次要的。因此，发展行星科学对促进我国高科技的发展及其在国防方面的应用也是极为重要的。

本综述文章将只集中在行星大气学科的科学层面，不涉及该学科对提升高科技发展及其应用的方面。本文分为以下几个部分：我们将首先简要综述行星大气的起源、演化，概述除地球和水星之外的其它 6 大行星的大气基本特征；其次，我们将分别综述各个行星大气的研究进展、最新研究动向、未来发展方向以及与行星大气相关的主要行星探测项目；除此之外，我们还将简要介绍最近几年新兴起的太阳系外行星（简称系外行星）大气的研究进展。最后，我们对行星大气科学研究提出展望，并结合我国的情况给出一些建议。

## 2、太阳系行星大气的起源和演化

### 2.1 行星大气的起源

如图 1 所示，太阳系的 8 颗行星大致可以分为两大类：靠近太阳的 4 颗行星（水星、金星、地球、火星）是固态星球，它们的体积和质量相对较小，外围的 4 颗行星（木星、土星、天王星和海王星）是气态星球，它们的体积和质量都较

内侧的固态星球大得多（胡永云和田丰，2013）。例如，木星的质量大约是地球的 318 倍，而其体积是地球的 1300 倍（太阳系行星以及土卫六的基本物理参数参见表 3）。固态星球和气态星球大气成分截然不同（见表 4）。在内围的固态星球中，金星和火星的主要大气成分都是二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ），而地球的主要大气成分是氮气（ $\text{N}_2$ ）和氧气（ $\text{O}_2$ ）。外围 4 个气态星球的主要大气成分都是氢气（ $\text{H}_2$ ）和氦气（ $\text{He}$ ）。为什么靠近太阳的行星是固态星球，而外围的是气态星球？为什么固态星球与气态星球的大气成分截然不同？这涉及到行星形成的基本问题，详细的论述可参见教科书《Planetary Sciences》（de Pater and Lissauer, 2010）。简单地讲，在太阳系形成之初，距离太阳较近的范围温度较高，易气化的物质都在高温下挥发，仅留下岩石和金属性的物质，这些密度较大的物质经碰并逐步汇集形成了固态行星，一些分子量较大的气态物质也储存在固态行星内部，这些气态物质逐步从固态星球内部，后来通过地质活动释放出来，形成固态星球的大气层。而太阳系外围的温度相对较低，水和其它气体以固态存在，如冰或含冰的物质，这些物质形成气态星球的核，当这些星球的质量快速增长到其引力可以吸引住周围分子量较低的气体（如氢和氦）时，便形成巨型气态星球。宇宙大爆炸产生的主要成分是  $\text{H}_2$  和  $\text{He}$ ，它们构成了这些气态星球的大气层。固态和气态星球的范围由所谓的“雪线”（Snow line）分离开来。在太阳系，“雪线”位于火星和木星之间，正好是固态和气态星球的分界线。

## 2.2 行星大气的演化

宇宙大爆炸所形成的主要成分是  $\text{H}_2$  和  $\text{He}$ ，它们是宇宙最具丰度的物质，占宇宙总量的 99%。所以，行星的原始大气成分主要都应该是  $\text{H}_2$  和  $\text{He}$ 。固态和气态行星之所以在今天有着截然不同的化学成分，是因为行星大气的化学成分处于不断的演化过程中。在行星的演化过程中，太阳系外围一些较小的固态天体曾经频繁地撞击固态行星，这些撞击可能给固态行星带来气体和水，也可能造成固态行星失去其原始大气和水。固态行星还可以通过其它热力、动力、物理、化学过程改变其大气成分。这些过程包括：大气逃逸、大气成分凝结或凝固沉降到地面、大气成分与地面物质发生化学反应、生物化学反应等。

太阳风侵蚀是造成固态行星早期大气逃逸和演化的主要机制之一。在太阳形

成的早期，太阳风比现在要强烈得多，足以在较短的时间内（估计在千万年时间尺度内）卷走固态星球早期的原始大气（ $H_2$  和  $He$ ），这也是为什么太阳系内侧固态星球大气中缺少原始大气成分的重要原因。水星之所以几乎没有大气层，其较小的质量和受较强的太阳风影响是主要原因。尽管太阳风强度随时间在不断地减弱，但对于没有磁场屏蔽太阳风的行星如金星和火星仍有很大的影响。即使今天，太阳风仍具有足够的能量造成金星和火星大气的逃逸。早期太阳的超紫外辐射很强，而较强的超紫外辐射可以造成大气动力逃逸，这一过程不受行星磁场的影响，因此，动力逃逸是影响有磁场的固态行星早期大气演化的重要机制。除太阳风侵蚀和大气动力逃逸之外，行星高层大气的热力学、化学和粒子碰撞过程都可能造成固态行星大气逃逸。

行星原始大气逃逸之后，固态星球的次生大气成分应主要由行星的内部排气和逃逸来决定。从理论上讲，金星、地球和火星应具有类似的次生大气成分，因为它们固体成分大致是类似的。什么原因造成地球大气的化学成分与金星和火星如此不同？首先，行星的质量以及行星与太阳的距离都影响次生大气的逃逸率。火星的质量太小，不足以吸引大量的次生大气，这被认为是火星大气比地球和金星大气稀薄的多重要原因之一。其次，还有两个因素起着关键的作用：一个是地球有液态水，另一个是地球有生命存在。在液态水的作用下，固态星球大气中的  $CO_2$  可以形成弱的碳酸，并与地表岩石（如硅酸盐岩石等）发生化学反应（风化反应），最终形成碳酸岩沉降到地表和海底；地球内部的碳酸岩在高温作用下分解出  $CO_2$ ，并通过地质过程（火山、大洋中脊等）使得  $CO_2$  重新进入大气中，这就是所谓的碳酸盐-硅酸盐之间的循环。地球大气正是由于这一循环的存在使目前大气  $CO_2$  维持在 400 ppmv 的水平。与地球不同的是，金星至少在最近二、三十亿年都没有液态水存在，所以，行星内部释放的  $CO_2$  都保留在了大气中，从而形成了很高浓度的  $CO_2$ 。另外，铁的氧化（生锈）和硫化物循环也属于这种类型的化学反应。一般认为，地球早期大气是还原性的，并没有氧存在，因为那时地表和水圈还存在大量的还原性铁，即使水的光解可以产生部分氧气，也很容易与铁发生化学反应。直到地表中的铁沉降到地球深层，而且水圈中的还原性铁全部被氧化了之后，地球大气才有可能存在氧气。与金星和火星大气相比，地球大气之所以具有丰富的氧气，是因为地球上存在生命，生物的光合作用降

低大气中的  $\text{CO}_2$ ，产生氧气。因此，生物化学反应也是行星大气演化一个重要因素。

### 2.3 固态星球的气候演化

伴随着固态星球的大气演化，这些星球的气候环境也发生了剧烈的变化。有证据表明在 30 亿年前，金星、地球、火星表面都有液态水存在，但这三个星球现代的气候环境却截然不同。现在，金星表面极端炎热，其表面平均温度大约是 730 K，而火星则极端寒冷，大约是 220 K，只有地球的表面温度仍然处于液态水存在的范围内，并且适宜生命存在。什么原因导致了这些行星的气候和大气朝着截然不同的和不可逆的方向演化/气候变化？为什么地球气候系统是一个充满活力的系统？气候演变和生命演化的关系是什么？这些问题一直是行星气候演化的根本问题，也与理解地球气候变化密切相关。

关于金星的气候演化，目前被广泛接受的理论是，在金星的早期，太阳比现在昏暗，也就是太阳的辐照度较现在小得多，在 30 亿年前，太阳的辐照度只是现在的 70%，所以，金星表面可以存在液态水，金星的大气与地球类似。但随着太阳的亮度（辐照度）增强，金星表面温度逐渐升高，当表面温度超过温室逃逸的阈值（粗略的估计是 340 K），在水汽正反馈的作用下，液态水被完全蒸发，并进入大气中高层。在太阳紫外辐射的作用下，水汽光解，氢原子由于分子质量较小，很容易达到逃逸速度，因此逃逸到太空。一个有力的证据是金星大气中氢同位素氘与氢的比例是 200:1（地球大气中两者的比例大约是 2:1），意味着较轻的氢同位素比较重逃逸更多，说明了金星大气中确实存在水光解和氢大量逃逸的事实。金星大气的温室逃逸问题一直是进行大气的研究热点（Ingersoll, 1969, Pierrehumbert, 2011）

当金星的液态水完全蒸发之后，金星大气和地表缺乏水循环。在没有液态水的环境下，大气中的  $\text{CO}_2$  无法与地表岩石发生风化反应，其结果是火山喷发出的  $\text{CO}_2$  完全累积在金星大气中，使得金星大气中  $\text{CO}_2$  的分压高达 90 个大气压。图 2 很好地展示了在没有液态水的条件下，金星大气缺乏有效的循环机制来稳定金星的气候。 $\text{CO}_2$  一旦由于火山爆发而被喷发到大气中，它将永久性地留在大气中；水汽一旦被光解，氢原子将永久性地逃逸到太空，氧则与其它物质发生化学

反应； $\text{SO}_2$ 一旦与其它物质发生化学反应，将永久性地堆积在金星表面（仅有一少部分与大气中微量的水汽之间存在可逆的化学反应）。部分  $\text{SO}_2$  与大气中的水汽结合形成硫酸云，因此，金星大气非常浑浊，云层的反照率高达 0.78。如此高浓度  $\text{CO}_2$  产生了非常强的温室效应，温室效应使得金星表面温度升高了近 500 K，这也是为什么金星气候如此炎热的重要原因。

相对于金星，地球因为有液态水存在，以上的过程都是可逆的，尤其是在液态水的作用下， $\text{CO}_2$  可以与地面硅酸盐石发生风化反应。虽然火山喷发不断地向大气中释放  $\text{CO}_2$ ，但风化反应不断地降低大气中的  $\text{CO}_2$ ，从而使地球大气中  $\text{CO}_2$  维持在一个较低的水平，地球气候也保持在一个比较温和的水平。因此，碳酸盐-硅酸盐之间的化学反应在地质时间尺度上提供了一个能够维持地球气候稳定的负反馈机制（Walker et al., 1981）。关于该负反馈机制的一个典型例子是发生在 7 亿年前新元古代时期的冰雪地球（Snowball Earth）（Hoffman and Shrag, 2002）。在大约 7 亿年前，大陆板块主要位于热带地区，由于没有冰雪覆盖，地表完全裸露，大气中的  $\text{CO}_2$  很容易与地表硅酸岩发生风化反应，导致大气中  $\text{CO}_2$  含量降低，温室效应减弱，从而形成了冰雪地球。一旦冰雪地球形成之后，大气中的  $\text{CO}_2$  与地表硅酸岩之间的风化反应被终止或变得非常弱，于是，火山喷发出的  $\text{CO}_2$  都累积在大气中，经过上千万年的积累，大气中  $\text{CO}_2$  变得足够高，温室效应足够强，从而使冰雪地球融化。

如果说太阳辐射的逐步增强可以解释金星大气温室逃逸和气候变得极端炎热，这一机制则很难解释地球和火星的气候演变。大量的证据表明，地球早期的气候比现在更温暖。为什么地球早期气候在太阳辐射弱的时候比现在温暖？这便是著名的“暗弱太阳问题”（Faint Young Sun Paradox）。目前的观点一致认为地球早期大气的温室效应比现在强，也就是说温室气体的浓度比现在高得多，但哪一种温室气体起着主要的作用，则存在各种不同的观点。对火星气候演变的解释也同样存在“暗弱太阳问题”。有研究认为火星表面在早期存在液态水并且有可能有生命存在。如果是这样的话，为什么现在火星是一个极端寒冷的星球？一个可能的解释是火星早期有一个比较浓密的大气层，但由于火星的质量较小，其引力不足以维持该浓密的大气层，当其大气层变得稀薄之后，火星表面温度降低了。也有其它机制被提出来解释火星早期表面温暖的问题（Forget and Pierrehumbert,

1996)。

### 3、行星大气研究进展

#### 3.1 金星大气

在太阳系 8 大行星中，金星位于地球的内侧，是距离地球最近的行星。金星的自转速度非常慢，自转周期大约是 243 天（地球天数），但其自转方向与其它星球相反，是自东向西旋转的。金星的公转周期与其自转周期接近，大约是 225 天。观测表明，金星没有磁场，金星的地壳没有板块运动，但却有比地球更活跃的火山活动。

金星大气层厚重而又浑浊（图 2 和 3），表面大气压力大约是 92 个大气压，CO<sub>2</sub> 含量占 96%。火山喷发的二氧化硫气溶胶及其与少量水汽结合形成的硫酸云层对太阳辐射有很强的散射和反射，造成金星的反照率高达 0.78，只有大约 2%-4% 的太阳光可以透过大气层最终到达金星表面。根据辐射能量平衡原理，我们可以很容易计算出金星的辐射平衡温度（黑体温度）大约是 240 K。虽然早在 20 世纪 30 年代，人们已经认识到金星的大气成分以 CO<sub>2</sub> 为主（Adams and Dunham, 1932），但当时并不知道 CO<sub>2</sub> 的含量如此之高，其温室效应如此之强。直到 50 年代，人们使用可以穿透金星云层的地基微波望远镜进行观测，才发现金星表面温度超出了液态水和生命存在的范围。60 年代初，美国发射的“水手 2 号”证实了金星表面的温度确实很高。苏联发射的“金星号”系列探测在金星表面着陆，确定了金星表面温度高达 730 K，超过了铅和锌的熔点，并且给出了金星的表面大气压力高达 92 个大气压。“金星 13 号”发回的照片表明，金星的天空完全被浓密的云层覆盖、到达地面的太阳光非常微弱、大气中有放电现象（云团之间的放电，而非云层与地面的放电），金星的主要地貌特征是火山和熔岩冲积的平原。

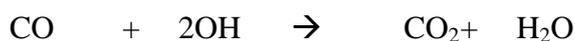
由于金星的自转很慢，金星大气的哈德雷环流比地球大气的宽得多，基本是从赤道延伸到两极（图 2）。同样是由于很慢的自转速度，金星大气的罗斯贝变形半径很大，这意味着金星大气很少有涡旋。这些都从观测中得到了证实。金星大气环流的另一个重要特征是其赤道上空气流呈现强的超级旋转，东风风速高达  $100 \text{ ms}^{-1}$ 。

金星大气存在三类重要的化学反应：二氧化硫（SO<sub>2</sub>）生成硫酸的循环反应、一氧化碳和二氧化碳之间的循环反应、水汽光解反应。火山喷发的 SO<sub>2</sub> 与大气中的氧原子反应生成 SO<sub>3</sub>，后者与水结合生成硫酸（H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>），H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 光解后再生成 SO<sub>2</sub>。金星大气高层的 CO<sub>2</sub> 在紫外辐射作用下生成 CO 和氧原子。这一反应过程非常迅速，如果没有其他化学过程使得 CO 很快地再合成成为 CO<sub>2</sub> 的话，那么金星大气将在很早以前就以 CO 为主要成分。这需要有其它极端有效的机制很快地使 CO 转换成 CO<sub>2</sub>。现在，人们认为水光解后生成的氢氧根（OH）起着关键的作用。当大气高层 CO<sub>2</sub> 被光解成 CO 之后，CO 迅速地与 OH 反应生成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。同时，CO 还与 SO<sub>3</sub> 反应并将其还原成 SO<sub>2</sub>。这些反应方程式如下：

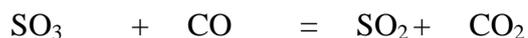
1) 水汽光解：



2) 二氧化碳循环：



3) 二氧化硫循环：



目前对金星大气的研究仅次于对火星大气的研究。金星大气探测的两大主要困难是：1) 金星的极端高温对进入大气低层和地表探测的探测器材料要求很高。如前所述，金星的地表温度高达 730 K，超过了铅和锌等金属的熔点，这要求制造探测器的材料必须是耐高温的，探测器在如此高温条件下如何长时间工作也是一个问题；2) 由于金星大气中的云层非常浓密，轨道探测器使用的波段必须是微波波段或某些红外波段，这样才能穿透云层和探测到大气低层以及近地面的温度，例如“水手 2 号”携带的是一个双通道的辐射计，两个通道的波长分别是 1.9 和 1.35 cm。正是由于金星大气的复杂性，金星大气最下层的 10 公里至今还没有被探测过。

到目前为止，还没有比较可靠的大气辐射传输模式可以用来研究金星大气的

垂直温度结构、大气成分和化学反应等,现有的地球大气辐射传输模式无法适用,这是因为金星大气很高的大气压和高浓度  $\text{CO}_2$ 。在气压很高的情况下,温室气体 ( $\text{CO}_2$  等) 的吸收谱线会变宽,也就是所谓的压致增宽效应。另外,在  $\text{CO}_2$  浓度较高的情况下,  $\text{CO}_2$  分子之间的碰撞也会产生吸收谱线增宽的效应(碰撞增宽效应)。在研究金星大气的辐射传输过程时,这些吸收谱线增宽效应必须考虑。目前所使用的  $\text{CO}_2$  在高压和高浓情况下的谱线吸收系数基本是根据 Baranov 等 (2004) 的实验结果,这些结果的可靠性还需要进一步检验。金星大气中的二氧化硫气溶胶和硫酸云的散射特性也需要进一步的研究。

金星大气在赤道上空的超级旋转及其宽广的哈德雷环流是金星大气动力学的研究重点。但除了使用一些理想的大气环流模式对这些问题进行研究之外,目前还没有被一致认可的金星大气环流模式用于研究这些问题。除了金星大气动力学本身的复杂性,缺乏可靠的辐射传输模式也是制约发展较复杂和真实的金星大气环流模式的障碍。

在 2009 年发表的行星科学 10 年 (2013-2022) 规划中,美国科学院科学研究顾问委员会行星科学专家组建议的金星研究计划是在 21 世纪 20 年代中期发射“金星气候探测器”,其目的主要为了研究:

- 1) 确定金星强  $\text{CO}_2$  温室大气在辐射平衡、云的性质、大气动力和化学在三维空间的分布和随时间变化的特征,
- 2) 确定金星大气超级旋转的动力学性质和变化特征,提高金星大气环流模式的模拟和预测能力,
- 3) 更准确地理解金星低层大气与金星表面的化学反应,
- 4) 确定金星大气的起源,
- 5) 寻找金星大气近期气候变化的大气证据,
- 6) 搞清楚金星大气气候演化对地球历史气候长期演化的重要意义,尤其是为什么金星从一个与地球类似的气候环境发生了剧烈的气候变化?地球在何时也有可能经历一个类似的气候变化?

### 3.2 火星大气

在太阳系各行星中,火星的自传速度和自转轴倾角都与地球的最为接近。在

火星早期，其气候环境可能与地球的相似，气候比较温和，有液态水，并适合生命的生存。因此，研究火星大气为理解地球气候系统和地球生命的演化进程提供了最佳的参照。

火星大气非常稀薄，其地表大气压大约只有6-7 hPa，大气的主要成分同样是CO<sub>2</sub>，其含量是96%。虽然CO<sub>2</sub>浓度很高，但由于其大气稀薄，所以，火星地表平均温度大约是-60 °C。火星表面呈红褐色（图5），这是因为其表面土壤含有丰富的三氧化二铁（铁锈）。图5中火星两极的白色物质为CO<sub>2</sub>干冰和水冰冰盖。因为火星的冬半球温度极低，低于CO<sub>2</sub>凝固成干冰的温度（在6 hPa大气压的条件下大约是-123°C），所以，在火星的两极冠区有长年存在的干冰冰盖。因为没有臭氧层，火星大气的平流层基本是等温的（图6）。火星大气的对流层有沙尘暴卷起的沙尘，在对流层上层存在冰晶云（H<sub>2</sub>O）。在平流层低层，温度更低，开始出现干冰云。

图7给出的是观测的火星纬向平均温度、风速和火星大气环流模式模拟的纬向平均质量流函数的分布（Haberle et al., 1993, Leovy, 2001）。火星大气的温度场与地球大气不同，其地面和对流层最高温度并不位于赤道，而是位于夏半球中纬度。这是因为火星大气的下垫面是陆地而不是海洋。陆地的热力惯性很小，地表温度对太阳辐射响应很快。因此，地表最高温度并不位于赤道。简单地讲，火星大气的纬向平均温度场很像地球大气平流层的温度分布。温度场的分布决定了火星大气的纬向风分布与地球不同（热成风关系），没有副热带急流，仅在冬半球副极地有一支急流，很像地球大气平流层的极夜急流。另外，无论在对流层或是平流层，热带和夏半球基本为东风，而冬半球为西风，这些也都与地球大气平流层的纬向风场很相似。火星平流层极夜急流风速比地球的大得多，高达120 ms<sup>-1</sup>。火星大气的哈德雷环流也与地球不太一样，其冬半球的环流圈占主导地位，相应的夏半球环流圈区域较小又微弱。冬半球的单圈跨赤道环流圈主导了火星大气两个半球之间的质量输送。火星大气环流与地球的差异在很大程度上是由于下垫面不同造成的（没有海洋），火星表面的热力惯性较小，而且大气的辐射平衡时间尺度也较短。

火星大气环流与二氧化碳循环、水循环和沙尘循环是密切耦合在一起的。大气运动卷起沙尘，而扬起的沙尘反过来影响大气辐射传输和热力场，进而影响火

星大气运动。在夏半球，在太阳光照射下，地表升温，大气被加热后产生上升运动。另外，地表干冰由于温度的升高而升华进入大气（CO<sub>2</sub>基本是从固态直接转换成气态，很少以液态的形式出现，因为液态CO<sub>2</sub>存在的温度-压强相空间非常小），在冬季，大气中的部分CO<sub>2</sub>凝固并沉降到地表，到了夏季，部分地表干冰升华进入大气，构成CO<sub>2</sub>相变循环过程。通过哈德雷环流被输送到冬半球。在冬半球，由于地表和大气温度较低，CO<sub>2</sub>凝固成干冰，一部分以干冰云留在大气里，另一部分降落到地面。因此，火星季节性极冠区二氧化碳的相变，并在哈德雷环流的作用下形成了二氧化碳在两半球之间的质量迁移，使两个半球的大气压力呈现周期性变化。火星大气中的水汽也在哈德雷环流的作用下在不同的源区之间随季节迁移，并在大气中形成云、霜、雾等气象现象。

火星早期的气候是否曾与地球一样温暖？是否曾有液态水存在？是否曾有生命存在？这些问题一直是火星大气研究的热点。图8是1984年12月27日在南极发现的一块被认为是来自早期火星的陨石（编号为：ALH84001）。该陨石表面有原始微生物的特征，一些学者据此认为在火星的早期曾有原始生命存在（McKay et al., 1996），这也意味着火星的早期气候可能曾经像地球那样温和，并曾有液态水存在。由于现在火星的表面温度很低，火星表面目前不可能有液态水存在，但在远古时期是否曾存在液态水一直是人们关注的中心问题。过去的十年里，人们对火星演化历史的知识增进了很多。火星表面古老的地质单元的地质和矿物学证据（包括高密度的河流系统、三角洲沉积、静态水体沉积物和蒸发矿物等等）都表明，远古火星可能曾经有温暖和湿润的环境（Karr and Head 2003, Malin and Edgett 2003, Bibring et al. 2006），而这一温暖湿润的环境到距今约35亿年时逐渐消失了（Andrews-Hanna et al. 2010）。值得指出的是所有温暖湿润环境的证据都不存在于早于40亿年前(Fassett and Head 2010)，有学者指出这可能代表着古代火星的温暖湿润的环境是与发生在40亿和38亿年前之间的晚重轰击时期有关(Segura et al. 2002, Toon et al. 2010)。另一方面，如果早期火星有过温暖湿润的环境，是什么导致了火星环境从暖至冷这一气候变化呢？“火星全球观测者”发现了远古时代火星存在磁场的证据。远古时代火星的磁场有可能减弱了太阳风对古火星大气的剥蚀作用，从而使得古火星得以保持其大气。到35亿年前，古火星磁场减弱了，火星大气逃逸，从而引发了前述的气候变化(Solomon et al. 2005)。

值得注意的是，迄今为止所有的数值计算都不能支持从38亿年以来火星大气逃逸是其气候变化的原因这一说法(Tian et al. 2009)。NASA预计于2013年发射的MAVEN探测器，将用于探测火星的高层大气，它将有利于加强我们对火星演化历史的理解。另一个未解之谜是古火星的大气和岩石成分可能与今天火星的非常不同。如果远古火星有温暖湿润的环境，应当形成大规模的碳酸盐岩石。尽管在火星陨石中和火星表面都已经发现了碳酸盐(Ehlmann et al. 2008)，火星上到底有多少碳酸岩仍有待回答。

寻找火星上是否曾存在液态水一直是行星科学学者们的巨大兴趣。NASA于2003年发射的“勇气号”和“机会号”火星探测车（图9）为火星曾存在液态水提供了有力的证据。火星探测车的数据显示，在35亿年前火星表面的液相化学呈酸性，并在古老的地层中发现了局部的碳酸岩，而碳酸盐岩石的形成需要液态水，说明火星早期确实曾经温和而且湿润。这些岩石形成时的火星环境应该比35亿年前的环境酸性更弱。这一环境变化究竟是全球性的还是局域性的仍然是激烈争论的课题（Morris et al. 2010）。长时间的火山运动可能导致了大范围的酸性环境出现，从而掩盖了更古老碳酸岩的纪录（Murchie et al. 2009）。如果火星上存在全球性的古代碳酸岩沉积，古火星的环境可能适合生命的存在。

最近人们发现火星大气中存在较多的甲烷，并且其随时间和空间的变化均较强（Mumma et al. 2009）。由于甲烷在火星大气里的光化反应时标约为300年，如果有关火星大气甲烷的发现被未来的行星探测计划证实，某种快速产生甲烷的地下过程（火山、地热、地球化学或生物活动）正在火星上发生(Lefèvre and Forget. 2009)。今天火星的表面不适于维持生命。火星的表面环境类似于寒带沙漠，并且呈氧化性。另外火星的稀薄大气使太阳紫外辐射可以直达其表面。这些都使得火星表面难以维持生命生存。有人认为，在金星和火星演化历史的前5亿年这两颗行星都可能有液态水存在，从而可能有生命存在的环境。比较行星学试图通过研究地球的近邻或相似体来理解地球的过程和发展历史。除了液态水和相对温和稳定的环境以外，火星地下生命还需要有机物和能量以维持其新陈代谢功能。当我们考虑古火星上的可能的生命环境时，所有这些都需要考虑。

如何来验证火星大气甲烷的观测并验证有关甲烷起源的假说呢？NASA和ESA计划于2016年发射火星大气痕量气体观测任务来测量关键痕量气体及其同

位素在大气中的成分、含量和变化。虽然对火星地下生命的确凿无疑的验证工作需要等待样品返回计划的实施,但研究火星大气中的甲烷和其他痕量气体将能够来验证火星大气甲烷的探测并回答火星大气甲烷是由地质过程还是由生命过程产生这一问题。因此测量火星大气痕量气体是2020年以前火星研究的重点课题。

远古火星可能是温暖湿润的,但是远古时期的太阳光度却很弱。如何使远古火星维持温暖湿润的环境还是未解之谜(Haberle, 1998, Jakosky and Phillips, 2001)。火山活动所喷发的二氧化硫气体可能为远古火星提供了额外的温室效应(Johnson et al. 2008),但硫酸盐气溶胶会使火星表面冷却(Tian et al. 2010)。干冰云可能对表面有加热作用(Forget and Pierrehumbert 1997),但如何维持全球性的干冰云覆盖是个问题(Colaprete and Toon 2002)。在较晚的重轰击时期火星表面可能发生频繁而又短暂的暖化事件(Segura et al. 2008),这种短暂的暖化能否解释今天的火星地貌值得进一步研究。继续通过观测和理论研究远古火星气候变化是今后一段时间火星研究的重点课题。

火星大气中二氧化碳循环的凝结部分因大气沉降、近地表加热和其它气体混合等过程而变得相当复杂。在其升华过程中,高速二氧化碳喷柱可以把沙子大小的颗粒带到表面并形成可以影响极冠反照率的暗斑(Kieffer et al. 2006)。火星南极有厚约几米的干冰极冠,其下面是水冰极冠(Byrne and Ingersoll 2003, Bibring et al. 2004)。气候模式计算表明这一干冰极冠的厚度应该在10年的时间尺度上发生明显变化(增厚或完全消失)。因此我们观测到的南极干冰极冠可能意味着火星气候变化的时间尺度只有10年左右。更令人惊讶的是这一发现也意味着火星上可以很容易地进入大气层的二氧化碳远远小于原来的估计(Byrne and Ingersoll 2003)。火星极区的地貌和沉积物结构告诉我们火星在最近千万年时间尺度里经历了较大的气候变化,火星大气中的水汽含量变化较大,相当多的地表冰在极区和低纬地区之间迁移,这些有可能与其自转轴倾角和轨道偏心率的周期性变化有关(Head et al. 2003, Mischna et al. 2003, Levrard et al. 2004, Forget et al. 2006)。我们还不理解与此周期性变化相关的气候过程,对这些过程和火星极区的进一步研究将有利于我们对火星古气候变化的理解。

尽管已有的火星探测为我们提供了比较丰富的关于水、二氧化碳和沙尘的季节性循环的纪录(Smith, 2004, Kleinböhl et al., 2009),但这些记录中火星气候变

化的复杂程度使得归纳总结季节循环的规律非常困难，而且数值模式计算结果与气候记录之间的比对尚未完全成功。我们还不懂得火星沙尘暴发生和发展的规律。我们也不理解火星极区沉积层中有关沙尘和水汽的记录与有关冰云的观测（Fouchet et al., 2007, Whiteway et al., 2009）。

火星热层和电离层的光化学过程在某种程度上控制了今天火星大气的逃逸过程，而大气逃逸对火星气候从远古至今的演化历史有重大影响。最近的观测显示火星高层大气随时间的变化比较剧烈（Forget et al., 2009），这些变化在多大程度上影响大气逃逸还不为人所知。研究火星大气逃逸和气候可以验证地球气象学和高层大气动力学的理论。

目前，有关火星大气和气候研究的重要问题如下（Smith, 2009, Mischna, 2009, Titus, 2009）：

- 1) 控制现代火星气候变化的物理过程是什么？从表面边界层到大气顶层的火星大气四维风场结构是怎样的？引发和影响火星全球沙尘暴的主要原因是什么？火星大气中二氧化碳、水和沙尘之间的耦合过程是怎样的？
- 2) 火星大气化学组分的分布和源与汇的信息；痕量气体是否能够告诉我们关于近火星表面的地质、地球化学甚至生命活动的信息？火山活动及气溶胶对大气成分和气候的影响；
- 3) 能否观测到火星气候在10至1000年时间尺度上的变化？这些变化的原因是什么？什么影响了火星极区的残余干冰和水冰冠的形成？火星气候和水循环是如何受其轨道和自转轴倾角变化影响的？火星全球水冰的演化历史是怎样的？
- 4) 远古火星的气候环境是什么样的？表面气候环境是否曾经适于生命存在？
- 5) 什么过程影响了火星环境从远古时期至今的演化？什么物理过程控制了大气逃逸和火星内部的去气化过程？

火星是目前人类探测次数最多，也是探测最广泛的行星。在过去几十年，美欧苏等国家已发射了一系列火星探测器（见表 2），这些探测提供了火星地形、地质结构、表面矿物质和元素成分、近表面水分布、内在和残余磁场、重力场和壳层结构、和大气成分等的系统信息。这一阶段的探测告诉我们水在火星演化历

史上扮演了重要的角色。近几年的“火星快车”、“火星勘测卫星”等探测项目告诉我们火星的表面环境是多种多样的。为了加强对火星的研究，NASA 和 ESA 计划在近期向火星发射一系列的探测器，其主要火星探测项目及其科学研究目标有：

1) 火星科学实验室 (MSL, 将于 2012 年着陆)，目的是为了研究火星表面是否有支撑生命存在的条件；

2) 火星高层大气观测任务 (MAVEN, 将于 2013 年发射) 研究高层大气和大气逃逸过程；

3) 火星痕量气体观测任务 (Trace Gas Orbiter, 简称 TGO, 将于 2016 年入轨) 研究痕量气体 (包括甲烷) 的空间和时间分布与变化。

日程未定的火星探测项目及其科学研究目标有：

1) 火星采样返回任务 (MSRM) 获得火星岩石和土壤样品并将其返回地球，

2) 火星空间生命探险者 (MAX-C) 收集火星岩石和土壤样品，应视为火星采样返回任务的先导，

3) 火星地球物理网络 (Mars Geophysical Network) 探测火星内部结构，测量壳层、幔层和核心厚度、密度和成分；收集局部气象数据用以验证在轨探测器的数据，

4) 火星极区气候任务 (Mars Polar Climate Mission) 探测火星极区冰层沉积从而为研究火星气候变化提供数据，这一任务可以与研究地球气候变化紧密联系。

### 3.3 土卫六 (Titan)

土卫六是土星最大的卫星 (图 10)，它的体积甚至比水星还要大。在太阳系各行星的卫星中，土卫六仅比木星的卫星 Ganymede 小一些。与其它太阳系卫星不同的是土卫六拥有相当厚的大气层，地表大气压力为 1.467 个大气压。土卫六大气的重要成分是氮气，占大气总质量的 95%，其余为甲烷。为什么一个质量比火星还小的卫星能够拥有比地球还厚重的大气层，而火星只有很稀薄的大气层，这至今还没有确定的答案。这也从一方面说明，火星的质量是可以吸引更多大气的。

土卫六大气层丰富的氮气最初很可能是由于氨气分解而来，因为氨气很容易光解为氮和氢，当氢逃逸向太空后，留下的氮气成为土卫六的主要成分。在太阳紫外辐射作用下，土卫六大气中的甲烷大约在 100 万年的时间内就可以被完全光解掉。因此，一定存在一个甲烷的生成源，现有的估计是甲烷来自土卫六内部的排气过程。“卡西尼”宇宙飞船已探测到甲烷自土卫六内部喷发出来的情景。土卫六的密度相当小，只有  $1.88 \text{ kgm}^{-3}$ ，因此，它的固体核应该主要是由固态的甲烷、氨和水冰等组成的。

土卫六大气高层有一层烯类橙色的有机气溶胶（霾）。这层有机气溶胶能够吸收太阳短波辐射，而是地表温度降低，这种效应通常称为“反温室效应”，其作用就像地球大气平流层臭氧那样，在大气上层形成逆温现象（如图 11 所示）。这些有机气溶胶应主要是甲烷和氮气光解后，经过一系列化学反应生成的，并逐步合并成气溶胶颗粒。“卡西尼”携带的“惠更斯”探测器在土卫六大气层中观测到了这些气溶胶颗粒。

土卫六的表面温度大约是  $-178^\circ\text{C}$  ( $95 \text{ K}$ )，低于甲烷等的凝结温度。因此，土卫六的表面有可能存在液态的甲烷。“卡西尼”飞船确实发现土卫六表面有甲烷等碳水化合物的湖泊和河流存在的迹象。“卡西尼”飞船还发现土卫六大气层中存在强的对流运动风暴等“天气现象”，伴随风暴的是液态的甲烷“雨”降到地面，蒸发后又返回大气中。

与金星类似，土卫六的自转速度比较慢，自转周期大约是 16 个地球日，所以，在很多方面，土卫六大气的环流特征与金星可比较。“卡西尼”和“旅行者”飞船测量的土卫六的纬向风高达  $100 \text{ ms}^{-1}$ ，在平流层，风速甚至高达  $160 \text{ ms}^{-1}$ 。与金星一样，土卫六大气也具有超级旋转现象。与金星和地球大气的哈德雷环流不一样，土卫六大气的哈德雷环流基本是从一个极地到另外一个极地，这很可能与土卫六的自转轴倾角较大有关 ( $26^\circ$ )。与金星大气不一样的是，土卫六大气运动有很强的季节性，这是由于金星地表温度主要是由大气的温室效应决定的，而非由太阳辐射决定的，其表面温度比较均匀，没有明显的季节性。土卫六的对流层顶高达  $40 \text{ km}$ ，有利于垂直对流运动和丰富“天气现象”以及风暴的发生。伴随着风暴活动，有两种“降水”发生，一种是比较缓慢的和较重的有机气溶胶粒子，另一种是液态甲烷等。“卡西尼”飞船甚至观测到了闪电的发生。

土卫六是目前所发现的除地球以外唯一有液态流体的星球。液态流体为那些需要液态物质作为循环载体的生命提供了必要的生存条件，其丰富的氮气也是生命所必需的元素。土卫六的气候环境是否适于生命（至少是厌氧生命）的存在一直是人们关心的一个重要问题。土卫六大气的成分有可能与早期地球大气成分类似，因此对土卫六大气逃逸、大气化学和气候的研究对理解早期地球大气、生命起源和早期演化有重要意义，也是当前国际上土卫六大气研究的热点之一。

### 3.4 巨行星大气

木星，土星，天王星和海王星是太阳系外围的巨行星。这些巨行星由流体外层和很小的固体内核构成。木星和土星是气态巨行星，它们的流体外层主要是氢，氦，以及少量重元素组成的气层。天王星和海王星是冰巨行星，它们的流体外层可分为两层：外层主要是由氢和氦组成的大气层；内层是由水，甲烷和氨混合组成的冰层(Guillot, 2005)。以木星为例，其大气温度在 100 hPa 以下随高度升高而递减，类似于地球大气的对流层（图 12）。由对流运动造成的氨气和水汽所凝结成的云层分别分布于 1~3 大气压以及 5~10 大气压。在 100 hPa 之上，有逆温层。这是由于由甲烷光解后生成有机气溶胶吸收太阳辐射造成的。巨行星具有很大的体积和质量，这四颗行星的总质量占太阳系行星质量的 99.5%。这些巨行星主要由流体构成，并不适宜生命存在。

与地球大气层不同的是，巨行星的大气层与其下层没有明显的界限。在巨行星上，没有陆地和海洋对大气层的运动产生较大的摩擦。也就是说，巨行星的大气层是没有底的，它们直接深入行星的内部。对于巨行星，驱动大气运动的能量不仅来自太阳辐射，还来自于行星内部发射出的热能。“旅行者”宇宙飞船上的红外干涉光谱仪收集到的数据表明，木星、土星和海王星的行星内部热能都超过了它们所吸收的太阳辐射能量。天王星内部热能很小，可以忽略不计 (Lodders and Fegley, 1998)。

巨行星大气环流的重要特征是多急流和涡旋，例如木星大气在每个半球都有许多东西风交替的急流带（图 13）。巨行星的风速是通过跟踪小尺度云系相对于行星磁场的运动而测量的。巨行星的风速非常强，并且非常稳定，在数十年中变化很小。木星和土星的赤道上空有强的西风急流，也就是所谓的超级旋转，最大

风速分别为  $100 \text{ ms}^{-1}$  和  $400 \text{ ms}^{-1}$ 。天王星和海王星的赤道上空有东风急流，最高风速分别达到  $100 \text{ ms}^{-1}$  和  $450 \text{ ms}^{-1}$ 。在中高纬度区域，木星和土星的东风交替的急流分别对应于观测到的亮暗交替的云带，而天王星和海王星在中高纬度只有西风急流。

除了非常强的急流，巨行星的大气层中还有很多不同尺度，颜色，和旋转方向的涡旋。其中最值得注意的涡旋是木星上的大红斑和海王星上的大黑斑。木星上的大红斑是太阳系中最大的涡旋。它可以装下 2 - 3 个地球，并且已经存在了至少 346 年（由 Robert Hooke 于 1664 年首次观测到，而非伽利略首次观测到的（Lodders and Fegley, 1998））。由局部强对流所生成的强风暴和闪电也在最近被观察到。在 2010 年 12 月 5 日爆发的土星超级风暴非常壮观，爆发两个月后，超级风暴环绕了整个土星。在风暴最强时，每秒钟有 10 次闪电产生(图 14)。

NASA 向太阳系外围的巨行星发射了一系列的宇宙飞船和探测器。例如，“先锋 10 号”探测器 (Pioneer 10) 是第一个穿越小行星带并且访问木星的宇宙飞船，它于 1973 年经过木星飞向太阳系的边缘；“先锋 11 号” (Pioneer 11) 是第一个访问土星的宇宙飞船；“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”宇宙飞船去探索太阳系外围，包括巨行星和它们的卫星。“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”于 1979 年飞过木星，于 1980 年飞过土星。“旅行者 1 号”在对土卫六号进行了短暂的观测之后，飞往了太阳系的边缘。“旅行者 2 号”于 1986 年飞经天王星，于 1989 年飞经海王星，完成了对太阳系外围的探测。“旅行者 2 号”发现了海王星上的大黑斑 (Ingersoll et al., 2004)。“伽利略号”是第一个环绕木星飞行的宇宙飞船，从 1995 到 2003 年，该飞船对木星进行了长期的观测 (Porco et al., 2003)，它探测到了闪电并且给出了闪电分布图。“伽利略号”还第一次把探测器抛入木星的大气层，该探测器测量了木星外大气层（深达 22 个大气压）中的温度和风速。“卡西尼号”于 2000 年底经过木星，于 2004 年到达土星并且围绕土星进行观测直到现在。“卡西尼号”宇宙飞船对土星的南极涡旋、深度闪电、赤道纬向风的变化以及土星大气的季节变化进行了详细的探测，它于 2005 年向土卫六抛入了“惠更斯”探测器，考察了土卫六大气和地表。这些宇宙飞船上安装的摄像机连续地拍摄了许多高分辨率的图片，另外，这些宇宙飞船上还安装了红外干涉光谱仪，用于测量行星发出的红外辐射。

除了宇宙飞船对巨行星的观测，地基望远镜和空间望远镜也对巨行星大气进行了连续的观测。这些观测记录了巨行星大气的长期演变和突发现象。由地基望远镜观测到的现象包括：彗木大撞击（1994 年），木星上的白色大涡旋合并（1998 和 2000 年），木星上的大面积云变色（2009 年），土星上的超级风暴（2010 年），天王星大气的季节变化，海王星的南极涡旋（2007 年）等等。宇宙飞船和望远镜的观测对研究巨行星的大气运动非常重要。

由于巨行星的快速自转，巨行星大气层中的风主要是纬向风。对于云层下面的风向以及风速，我们所知甚少。当“伽利略号”宇宙飞船上的探测器被抛入木星时，它测量到 6.4 N 附近纬向风的风向和风速，所测量到的西风风速从 0.7 大气压处的  $90 \text{ ms}^{-1}$  增加到 4.0 大气压处的  $170 \text{ ms}^{-1}$ ，然后保持不变一直到大约 20 个大气压（Atkinson et al., 1998）。巨行星内部的压强大概在百万大气压，“伽利略号”探测器仅测量了不到巨行星半径 1% 的纬向风的垂直结构。由于巨行星上的大气层与行星内部没有明显的界限，我们不知道观测到的行星表面纬向风是否一直延伸到行星的内部，还是在云层下就很快消失了。它们有可能延伸到行星内部，但是风速是否是逐渐减弱，目前还不太清楚。与此相关的一个问题是：巨行星大气中的纬向风是如何形成的？对于纬向风纵向结构和形成机制的研究是巨行星大气动力学中非常重要的课题。

目前，大致上有两种模型被用于研究巨行星大气中风的形成机制和纵向结构：深流体模型和浅流体模型。深流体模型假设巨行星大气中的风是由行星内部发出的热能驱动的（Busse, 1976, 1994; Christensen, 2002; Aurnou and Olson, 2001; Kaspi et al. 2009; Vasavada and Showman 2005）。Busse（1976）最先提出了以下理论：由于巨行星的快速自转和大气的很小的粘度，行星大气中流体的流速和气压梯度在沿着转轴的方向保持不变（Taylor-Proudman 原理）。所以，行星大气中的对流单体是沿着转轴方向的细柱形结构（如图 15）。对流单体之间的相互作用形成了套在一起的，以转轴为中心的，并且沿着转轴的柱状结构。Busse（1976）认为这些转速不同的柱状结构于行星表面相互作用形成了在木星和土星大气中观测到纬向风。最近的三维数值模型的计算表明由热能驱动的球层内部的对流可以生成表面的纬向风，包括赤道的超转动的纬向风以及中高纬度区域的东西交替的纬向急流（Aurnou and Olson, 2001, Christensen, 2002）。然而，由于这些数

值模型模拟延伸到几百万大气压的很厚的流体层，它们必须在计算中使用很大的数值粘度来保证计算的稳定性。一般来说，所用的数值粘度是巨行星内部流体粘度  $10^6 - 10^{10}$  倍。所以，在这些模型中驱动球层内部对流的热能要比观测到的巨行星内部的热能大很多 (Heimpel and Aurnou, 2007)。此外，由深流动模型所生成的纬向风一般会沿着柱状结构一直延伸到行星内部，并且风速在转轴方向保持不变 (Taylor-Proudman 原理)。但是，冲激波实验表明在木星和土星行星内部，随着温度和压强的升高，氢 (巨行星大气的主要成分) 逐渐转化为具有金属性质的导电半导体 (Nellis et.al., 1996)，这也是木星等具有磁场的重要原因。如果观测到的纬向风在沿转轴方向保持常速并且延伸到行星内部由半导体氢组成的部分，这些纬向风将和行星的磁场相互作用，所产生的欧姆热能将远远大于行星受到的太阳热辐射和行星内部发出的热能之和 (Liu et.al, 2008)。近年，用深流动模型进行的研究开始包括球层内部流体和磁场的相互作用，并且在三维数值模型中同时模拟纬向风和磁场的形成。这些研究还包括考察流体的可压缩性对纬向风生成的影响和用超级计算机进行计算以减小数值粘度并且使模型参数接近行星内部参数值。

浅流体模型假设纬向急流是由云层中的湍流生成的，或是由行星受到的随纬度变化的太阳辐射生成的。巨行星的云层中存在由对流形成的流体纵向运动。但由于纵向运动的速度较小，巨行星的云层常被近似成二维的球面。根据二维湍流运动理论，巨行星云层中的纬向急流是由湍流动能由小尺度向大尺度传播而形成的 (Rhines, 1975; Williams, 1978; Panetta, 1993; Rhines, 1994)。Rhines (1975) 首先提出由于科氏力参数随纬度而变化，快速转动的二维球层上的湍流是各向异性的。因此在湍流动能由小尺度向大尺度传播的过程中，在南北方向的大尺度涡动被随纬度变化的科氏力参数限制，而沿东西方向的大尺度涡动不被限制。所以，小尺度湍流自我重组成纬向急流，而急流沿南北方向的尺度由 Rhines 尺度确定。建立在二维湍流运动理论上的数值模拟可以产生类似于巨行星大气中的中高纬度的东西交替的急流，但一般不能产生在木星和土星大气中观测到赤道的超级旋转急流 (Cho and Polvani, 1996)。

在浅流动模型中，如果用行星所受到的随纬度变化的太阳辐射驱动大气，中高纬度区域的東西交替的纬向急流可以形成。这些急流的形成机制与地球大气中

的纬向急流的形成机制相同(Williams, 2003a)。也就是说, 当随纬度变化的太阳能照射大气时, 行星大气中产生沿纬向的温度梯度。中高纬度斜压不稳定并生成斜压涡旋。当斜压涡旋从生成区域传出并消散, 它们将角动量传入纬向并生成纬向急流 (Vallis, 2006)。但是仅由太阳能驱动的流体模型一般不能生成赤道上的超级旋转急流, 除非是在赤道区域添加额外的热源或是波动源(Williams 2003a, b; Lian and Showman 2008), 而巨行星的大气的赤道区域并没有这些额外的热源或是波动源。最近, 使用全球环流大气模型(GCM)进行的数值模拟表明, 行星接收到的太阳辐射和行星内部的热能对于驱动行星大气运动同样重要 (Schneider and Liu, 2009; Liu and Schneider 2010)。如果行星内部的热能足够强, 行星大气将产生对流不稳定, 并且对流将在赤道区域产生 Rossby 波源。当 Rossby 波传播出赤道区域时, 向东的角动量被传入赤道区域而形成赤道超级旋转急流。也就是说, 行星内部的热能驱动了赤道超级旋转急流 (Schneider and Liu 2009; Lian and Showman 2009)。

在巨行星的大气中还存在很多不同尺度的涡旋。一层或两层的 QG 模型以及多层模型都被用于模拟巨行星上的涡旋(Ingersoll and Cuong, 1981; Marcus, 1988; Williams and Wilson, 1988; Dowling and Ingersoll, 1989; Cho and Polvani, 1996; Marcus, 1993; Cho et al., 2001)。这些模型都很好地模拟了涡旋的相互作用以及涡旋合并, 可以用于解释大尺度涡旋的稳定性。但是, 人们仍不清楚这些涡旋是怎样生成的和消散的, 以及是什么因素决定它们的存在时间。在 QG 模型中, 使用具有均匀的背景绝对涡度的条件可以模拟大尺度涡旋的生成 (Marcus, 1988, 1993, 2004)。然而, 人们并不清楚大尺度涡旋是怎样在球面上以及行星表面生成, 因为球面上有绝对涡度的梯度。

多急流带和多涡旋是这些快速旋转的巨型气态星球的共同特点。为什么木星和土星的超级旋转如此之强? 为什么木星的大红斑能够持续如此长的时间? 为什么土星上会出现环绕全球的超级风暴(巨白斑), 其北极的正六边形极涡是如何形成? 什么物理机制驱动了所观测到的行星表面大气的运动? 行星表面大气的运动如何随深度变化以及怎样与深层大气运动相连? 巨行星大气赤道区域平流层的温度波动是由什么机制驱动的? 地球大气平流层的风、温度和相关的丰度物质(臭氧、水汽等)的变化是否也由同样的机制驱动? 虽然上面提到的各种机制

可以解释现象的某些方面，但都还无法对这些现象做出更完整和全面的解释。如何进一步理解巨行星大气环流的动力学特征仍然需要进一步加强研究。整体来说，目前对巨行星大气的观测认知仍然太少，尤其不清楚巨行星大气的急流带和涡旋随深度的变化，因此，只有在未来加强对这些巨行星的探测才能够从根本上促进我们对巨行星大气环流结构的认识。

上面我们曾谈到过固态星球大气的演化，但对气态星球的演化还知之甚少。巨行星在演化的过程中，其内部不断向外辐射热能。巨行星大气中的能量来自于行星形成过程中所积累的引力势能和元素衰变所释放的能量以及所吸收的太阳辐射。巨行星大气不仅是控制了热辐射的速度，并且还随着行星的演化而变化。行星演化理论可以很好的描述木星的演化，但却不能描述土星的演化，因为土星比行星演化理论预测的要热很多。一个基本假设是土星内部的氦雨(百万大气压)可以延长土星的热演化，使得它冷却得慢一些。但这个假设必须通过测量土星内部的氦来验证。同样，我们对天王星和海王星的热演化了解的也很少。其主要原因是，我们对行星大气中的能量的分布并不了解。“旅行者号”宇宙飞船只测量到了天王星行星辐射热能的上限，但没有测到行星辐射的具体数值。

我们对巨行星大气化学还知之甚少。目前已知的是巨行星大气中有少量的甲烷，在太阳紫外辐射的作用下，甲烷产生一系列的化学反应，生成有机气溶胶，它们能够吸收太阳短波辐射，对巨行星大气的热力结构有重要的影响。NASA 于 2011 年 8 月发射的 Juno 飞船将于 2016 年抵达木星，该飞船的主要目的是为了研究木星的形成、演化、大气深层结构和磁场等，该探测计划将有望大大地提高我们对木星以及其它巨行星大气的认识。

地球和火星大气随季节的变化已被很好地观测和了解。但是，我们对巨行星的大气是怎样随季节变化所知甚少。除了木星，其他的巨行星都有随季节的变化。特别值得一提的是海王星，它的黄道面与赤道面的夹角是 98 度。也就是说，在公转周期中一半的时间，太阳直接照射在海王星的两极。由于公转周期较长(土星 29 地球年；天王星 84 地球年；海王星 165 地球年)，人们需要对巨行星大气长时间的观测来了解它们随季节的变化。

### 3.5 太阳系外行星大气

过去，太阳系外行星（简称系外行星）的探测和发现主要是天文学界的关注范畴。但近几年对系外行星的研究已远远超出了天文学的范围，世界各国原来从事地球科学、行星科学、甚至生命科学的学者一部分转到系外行星研究领域，使得这一领域在短短的几年中有了迅速的发展，并成为了一个交叉性的热点学科（胡永云，2013，胡永云和田丰，2013，王伟等，2013）。自1995年发现第一颗系外行星以来，随着天文观测技术的发展，愈来愈多的太阳系外行星被发现，截至2013年3月1日，已有861颗系外行星被发现（如图16所示），预期未来几年被发现的系外行星的数量将会成倍地增长。但由于现有观测技术的局限，目前被观测到的系外行星绝大部分是质量较大、距离其恒星较近的行星，而行星质量与地球相当的则比较少。但是开普勒计划有望在未来3至5年发现大量类地系外行星，可以预见对类地系外行星大气的研究将成为系外行星研究的新焦点。

系外行星研究关注的热点之一是太阳系之外是否有适合生命存在的行星（简称宜居行星）。一般认为，宜居行星首先必须是固态星球，因为气态星球质量较大，巨大的引力和大气压力并不适合生命的存在。其次，固态星球必须位于其恒星的宜居带之区。图17所示的蓝色带状区域是太阳系和红矮星系 Gliese 581（简称 Gl 581）的宜居带示意图（Selsis et al., 2007）。在太阳系，地球位于宜居带的中央，金星不在宜居带内，而火星则位于外侧边沿。宜居带表示位于其中的行星表面温度不低于 273 K（也就是液态水存在的温度），也不高于引发快速大气逃逸的温度阈值（Kasting et al., 1993, Selsis et al., 2007）。即使位于在宜居带内，系外行星的表面温度还受行星大气的成分决定。如果一个行星的温室气体浓度较高，其表面温度也将较高，也有可能不适于液态水和生命存在。相反，温室气体浓度较低，行星表面温度也较低，同样不适于液态水和生命存在。例如，地球大气的温室效应是地球表面温度升高了 30 K，如果没有温室效应的作用，地表平均温度将是-15℃，也将不适于生命存在。目前，国际上对宜居带的研究主要关注能否在行星表面维持液态水长期存在的环境，对生命所需的其它元素（如氮、碳等）的研究正在逐渐增加并有可能改变系外行星可居住性的认识。目前，很多研究结果是使用一维辐射-对流模式或单独的大气环流模式得到，将来还需要考虑海洋以及海冰对候环境所起的作用（Hu and Yang, 2013）。因为恒星宜居带的范围直接影响人们发现太阳系之外是否有适于生命存在的行星的前景，关于宜居

带的研究是目前系外行星大气研究的重点之一。

到目前为止，还没有发现一颗真正的宜居系外行星，只有 7 颗系外行星被认为是宜居行星（胡永云，2013）。2007 年曾在 Gl 581 星系发现两颗被认为是宜居星球（既 Gl 581c 和 Gl 581d，Udry et al., 2007），但后来的计算表明，Gl 581c 太热，很可能像金星那样曾出现温室逃逸现象，而 Gl 581d 则比较冷，需要大约 7 个大气压的  $\text{CO}_2$  才能使其地表温度高于 273 K（Hu and Ding, 2011）（图 18）。另外，这两颗行星的最小质量分别大约是地球的 5 和 8 倍，其实际质量很可能超出地球的 10 倍，所以，有可能是气态行星或类似较小的海王星。

由于目前所发现的系外行星基本上都距离其恒星比较近，一部分非常近的系外行星由于较强的引力作用而处于潮汐锁相的运动状态中，也就是一面永久性面对其恒星，而另一面永远背向其恒星，就像月球被地球潮汐锁相，我们只能看到月球的一面。这样，就造成向阳的一面被加热，而另背阳的一面接收不到恒星的辐射能量，向阳和背阳面形成强烈的温度反差。这一特定的热力结构决定了潮汐锁相行星的大气环流和气候状态与地球或太阳系行星的不同。这是目前系外行星大气研究的一个重要方向。目前所发现的系外行星中大部分是气态巨行星。其中一部分由于距其恒星较近，表面温度可高达 1000 K 以上。虽然这些巨行星的质量接近太阳系木星，但它们的热力、动力性质都与太阳系木星不同，所以被称为“热木星”（hot Jupiter），热木星通常是潮汐锁相行星。热木星距离它们的恒星很近，它们所受到的太阳辐射远远大于行星发出的热能。相比较而言，在太阳系中，木星，土星和海王星的行星热辐射大于行星所受到的太阳辐射（天王星的行星热辐射很小，可以忽略不计）。系外巨行星中比较年轻的行星距离它们的恒星通常很远，所受到的太阳辐射远远小于行星发出的热能。可以预期这些系外巨行星的大气在热力、动力和化学等方面都有非常不同的性质。这些都将是系外巨行星大气研究的重点。

在目前阶段，对系外行星大气的观测仍然是相当困难的，这主要是因为系外行星距离我们太遥远。现在所观测到的距离我们最近的系外行星是 Alpha Centauri Bb，它距离太阳系也在 15 光年之外。目前对于行星大气成分的观测还仅限于热木星一类的巨型气态星球，对超级地球等体积较小或温度较低的行星大气进行观测还比较困难。这是因为现在对系外行星大气的观测方法是掩星法，也

就是当行星运行到与地球和其恒星在一条直线上并且遮挡恒星时（“凌日”），使用地基或太空望远镜观测恒星辐射的透过光谱（或者是行星大气的吸收谱）。这需要行星的大气层足够浓密并且有较大标高（ $H=kT/(Mg)$ ，这里  $H$  是大气层的标高， $k$ 、 $T$ 、 $M$  和  $g$  分别是波尔兹曼常数、大气温度、平均分子质量和重力加速度），浓密的大气意味着大气层对恒星辐射有较大的光学厚度，而较大的标高意味着大气分子分布在较大的垂直尺度上，这样才能够产生较强的吸收/透过谱信号。热木星的大气成分以  $H_2$  和  $He$  为主，分子量较小，但温度较高（超过 1000 K），因此，其大气标高超过 100 km，满足现有观测精度的要求。相对而言，太阳系木星因为大气温度较低，其标高大约是 27 km，而地球大气的标高仅仅是 8 km。所以，现有的观测技术还不能使用“凌日”法对类地行星的大气成分进行观测。尽管如此，现在还是初步观测到了一些系外行星的大气成分。例如，现有的观测和模拟结果很好地证实了热木星 HD 189733b 大气中含有水汽和甲烷（Swain et al., 2008）。HD 189733b 的质量和半径均与太阳系的木星类似，但它距离其恒星（HD 189733）非常近，大约是 0.03 AU，所以，HD 189733b 是一颗潮汐锁相的热木星，其向阳面的表面温度超过 1000 K（太阳系木星在 1 个大气压处的温度大约是 165 K）。

#### 4、总结

在本文中，我们对太阳系行星大气的起源、演化和现有的物理、化学和动力特性做了简要的介绍，我们同时也简要地介绍了太阳系行星和系外行星大气目前的研究动态，我们尤其强调了以探测项目为主导的行星大气研究的未来发展方向。希望这些能够帮助我们了解行星大气与地球大气的相似性和不同之处，认识到自然规律的普适性和自然界的复杂性。我们特别希望强调的是研究行星大气对认识地球大气、气候和生命演化的重要性。

在表 1 中，我们特别给出了国际上行星大气科学的主要研究机构。其目的是为了说明在国际上，尤其是在美、欧、日等国家，行星大气科学早已成为一门独立的学科和研究领域，但在我国，行星大气科学无论是在教育还是在研究方面都基本是空白。随着我国经济的发展和太空探测项目的发展，我们也必将进行深层太空探测。要达到这一目标，我们需要在行星大气科学的人才培养和基础研究方

面做好充分准备，在一些高校（尤其是一流的高校）成立行星大气学科和在一些研究机构成立专门的研究组织是一项刻不容缓的任务，组织相关人员开始对行星大气探测项目进行讨论和筹划也应该从现在开始。

在表 2 中，我们还给出了美、欧、日以及前苏联的一些主要行星探测项目。通过这些探测项目，我们希望能够意识到行星大气探测项目不仅具有重要的科学意义，也具有技术层面的重要意义。这些探测计划的实施首先是一个系统工程，需要事先的周密计划、各方面的严密组织、大规模的团队合作。其次，这些探测项目需要尖端的技术，包括星际间的远距离通讯和遥控、复杂和精准的计算、大推力的火箭等等。再其次，对制作探测仪器的材料也有极高的要求，因为这些仪器需要在或者是极端寒冷（如火星或外围巨行星）或者是极端高温（如金星或水星）的严酷环境条件下工作。这些技术的研发、特殊材料的制造不仅对我国国防而且对民用都有极为重要的意义。

## 参考文献:

1. 月球和行星探测项目时间表：  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/chronology.html>, 该网页列出了已知的世界各国发射的月球和行星探测器时间表和简要描述, 包括成功的和未成功的。
2. Andrews-Hanna, J. C., M. T. Zuber, R. E. Arvidson, and S. J. Wiseman, 2010. Early Mars hydrology: Meridiani playa deposits and the sedimentary record of Arabia Terra. *Journal of Geophysical Research*, **115**: E06002, doi:10.1029/2009JE003485.
3. Atkinson, D. H., J. B. Pollack, and A. Seiff, 1998. The Galileo probe Doppler wind experiment: Measurement of the deep zonal winds on Jupiter. *J. Geophys. Res.*, **103**, 22 911–22 928.
4. Aurnou, J. M., and P. L. Olson, 2001. Strong zonal winds from thermal convection in a rotating spherical shell. *Geophys. Rev. Lett.*, **28**, 2557–2559.
5. Baranov, Y. I., Lafferty, W. J., and Fraser, G. T., 2004. Infrared spectrum of the continuum and dimer absorption in the vicinity of the O<sub>2</sub> vibrational fundamental in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures. *J. Mol. Spectrosc.*, **228**, 432-440.
6. Bibring, J.-P., Y. Langevin, F. Poulet, A. Gendrin, B. Gondet, M. Berthe, A. Soufflot, P. Drossart, M. Combes, G. Bellucci, V. Moroz, N. Mangold, B. Schmitt, and OMEGA team, 2004. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars. *Nature*, **428**, 627-630.
7. Bibring, J.-P., Y. Langevin, J. F. Mustard, F. Poulet, R. Arvidson, A. Gendrin, B. Gondet, N. Mangold, P. Pinet, F. Forget, and OMEGA team, 2006. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. *Science*, **312**:400-404, doi:410.1126/science.1122659.
8. Bullock, M. A., and D. H. Grinspoon, 1999. Global climate change on Venus. *Scientific American*, **3**, 50-57.
9. Busse, F. H., 1976. Simple model of convection in Jovian atmosphere. *Icarus*, **29**, 255–260.
10. Busse, F. H., 1994. Convection driven zonal flows and vortices in the major planets. *Chaos*, **4**, 123–134.

11. Byrne, S., and A. P. Ingersoll, 2003. A sublimation model for martian south polar ice features. *Science*, 299:1051-1053.
12. Cho, J. Y.-K., M. D. Juarez, A. P. Ingersoll, and D. Dritschel, 2001. A high-resolution, three-dimensional model of Jupiter's Great Red Spot. *J. Geophys. Res.*, **106**, 5099–5105.
13. Cho, J. Y.-K., and L. M. Polvani, 1996. The emergence of jets and vortices in freely evolving, shallow-water turbulence on a sphere. *Phys. Fluids.*, **8(6)**, 1531-1552.
14. Christensen, U. R., 2002. Zonal flow driven by strongly supercritical convection in rotating spherical shells. *J. Fluid Mech.*, **470**, 115–133.
15. I. de Pater, and J. J. Lissauer, 2010. *Planetary Sciences*. Cambridge University Press, 647 pp.
16. Dowling, T. E., and A. P. Ingersoll. 1988. Potential vorticity and layer thickness variations in the flow around Jupiter's Great Red Spot and white oval BC. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1380–1396.
17. Forget, F., and R. T. Pierrehumbert, 1997. Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation. *Science*, **278(5341)**:1273.
18. Forget, F., R. M. Haberle, F. Montmessin, B. Levrard, and J. W. Head, 2006. Formation of glaciers on Mars by atmospheric precipitation at high obliquity. *Science*, **311**:368-371.
19. Forget, F., F. Montmessin, J. Bertaux, F. González-Galindo, S. Lebonnois, E. Quémerais, A. Reberac, E. Dimarellis, and M. A. López-Valverde, 2009. Density and temperatures of the upper martian atmosphere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM. *Journal of Geophysical Research*, **114**:E01004.
20. Fouchet, T., E. Lellouch, N. I. Ignatiev, F. Forget, D. V. Titov, M. Tschimmel, F. Montmessin, V. Formisano, M. Giuranna, A. Maturilli, and T. Encrenaz, 2007. Martian water vapor: Mars Express PFS/LW observations. *Icarus*, **90**:32-49.
21. Guillot, T., 2005. The interiors of giant planets: Models and outstanding questions. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **33**, 493–530.

22. Haberle, R., J. B. Pollack, J. R. Barnes, R. W. Zurek, C. B. Leovy, J. R. Murphy, H. Lee, and J. Schaeffer 1993. Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA/Ames general circulation model, 1. The zonal-mean circulation. *J. Geophys. Res.*, **102**, 13301–13311.
23. Haberle, R. M., 1998. Early Mars climate models. *Journal of Geophysical Research*, **103**:28467-28479.
24. Hammel, H. B., K. Rages, G. W. Lockwood, E. Karkoschka, and I. de Pater, 2001. New measurements of the winds of Uranus. *Icarus*, **153**, 229–235.
25. Head, J. W., J. F. Mustard, M. A. Kreslavsky, R. E. Milliken, and D. R. Marchant, 2003. Recent ice ages on Mars. *Nature*, **426**:797-802.
26. Heimpel, M., and J. Aurnou, 2007. Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn. *Icarus*, **187**, 540–557.
27. Hoffman, P. F. and Schrag D. P., 2002. The snowball Earth hypothesis: Testing the limits of global change. *Terra Nova*, **14**, 129–155.
28. Hu, Y., and F. Ding, 2011. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d. *Astron. & Astrophys.*, **526**, A135, DOI: 10.1051/0004-6361/201014880.
29. Hu, Y., and J. Yang, 2013. Exo-oceanography and habitability of aqua-planets around M-Dwarf Stars. Submitted to *Nature Geoscience*.
30. 胡永云, 2013. 太阳系外行星大气与气候. 大气科学, **37** (2), 451-466, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12314.
31. 胡永云, 田丰, 2013. 太阳系行星. 陆垓. 现代天体物理. 北京, 北京大学出版社.
32. Ingersoll, A., 1969. The runaway greenhouse: A history of water on Venus. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1191-1197.
33. Ingersoll, A. P. and P. G. Cuong, 1981. Numerical model of long-lived Jovian vortices, *J. Atmos. Sci.* **38**, 2067–2076.
34. Ingersoll, A. P., and coauthors, 2004. Dynamics of Jupiter’s atmosphere. F.

- Bagenal, T. E. Dowling, and W. B. McKinnon, Eds., *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Cambridge University Press, 105–128.
35. Jakosky, B. M., and R. J. Phillips, 2001. Mars' volatile and climate history. *Nature*, **412**, 237-244.
  36. Johnson, S. S., M. A. Mischna, T. L. Grove, and M. T. Zuber, 2008. Sulfur-induced greenhouse warming on early Mars. *J. Geophys. Res.*, **113**:E08005.
  37. Kaspi, Y., G. R. Flierl, and A. P. Showman, 2009. The deep wind structure of the giant planets: results from an anelastic general circulation model, *Icarus*, **202**, 525-542.
  38. Kasting, J. F., D. P. Whitmire, and R. T. Reynolds, 1993: Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*, **101**, 108-128.
  39. Kieffer, H. H., P. R. Christensen, and T. N. Titus, 2006. CO<sub>2</sub> jets formed by sublimation beneath translucent slab ice in Mars' seasonal south polar ice cap. *Nature*, **442**:793-796, doi:710.1038/nature04945.
  40. Kleinböhl, A., J. T. Schofield, D. M. Kass, W. A. Abdou, C. R. Backus, B. Sen, J. H. Shirley, W. G. Lawson, M. I. Richardson, F. W. Taylor, N. A. Teanby, and D. J. McCleese, 2009. Mars Climate Sounder limb profile retrieval of atmospheric temperature, pressure, and dust and water ice opacity. *Journal of Geophysical Research*, **113**:E10006.
  41. Lefèvre, F., and F. Forget, 2009. Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics. *Nature*, **460**:720-723.
  42. Leovy, C., 2001. Weather and climate on Mars. *Nature*, **412**, 245-249.
  43. Levrard, B., F. Forget, F. Montmessin, and J. Laskar, 2004. Recent ice-rich deposits formed at high latitudes on Mars by sublimation of unstable equatorial ice during low obliquity. *Nature*, **431**:1072-1075.
  44. Lian, Y. and A. P. Showman, 2008. Deep jets on gas giant planets. *Icarus*, **194**, 597-615.
  45. Lian, Y. and A. P. Showman, 2009. Generation of equatorial jets by large-scale latent heating on the giant planets. *Icarus*, doi: 10.1016/j.icarus.2009.10.006.

46. Liu, J. J., P. M. Goldreich, and D. J. Stevenson, 2008. Constraints on deep-seated zonal winds inside Jupiter and Saturn. *Icarus*, **196**, 653–664.
47. Liu, J. J. and T. Schneider, 2010. Mechanisms of jet formation on the giant planets. *J. Atmos. Sci.*, In press.
48. Lodders, K., and B. Fegley, Jr., 1998. *The Planetary Scientist's Companion*. Oxford University Press, 400 pp.
49. Malin, M. C., and K.S. Edgett. 2003. Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. *Science*, **302**:1931-1934.
50. Marcus, P. S., 1988. Numerical simulation of Jupiter's Great Red Spot. *Nature*, **331**, 693–696.
51. Marcus, P. S., 1993. Jupiter's Great Red Spot and other vortices. *Annu. Rev. Astron. Astronophys.*, **31**, 523–573.
52. Marcus, P. S., 2004. Prediction of a global climate change on Jupiter. *Nature*, **428**, 828–831.
53. McKay, D. S., E. K. Gibson Jr., K. L. Thomas-Keprta, H. Vali, C. S. Romanek, S. J. Clemett, X. D. F. Chillier, C. R. Maechling, and R. N. Zare, 1996. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, **273**, 924–930.
54. Mischna, M. A., M. I. Richardson, R. J. Wilson, and D. J. McCleese, 2003. On the orbital forcing of Martian water and CO<sub>2</sub> cycles: A general circulation model study with simplified volatile schemes. *Journal of Geophysical Research*, **108**:5062, doi:5010.1029/2003JE002051.
55. Mischna, M. A., 2009. Atmospheric Science Research Priorities for Mars. White paper submitted to the Planetary Science Decadal Survey, National Research Council, Washington, D. C.
56. Mumma, M. J., G.L. Villanueva, R. E. Novak, T. Hewagama, B. P. Bonev, M. A. DiSanti, A. M. Mandell, and M. D. Smith, 2009. Strong release of methane on Mars in Northern Summer 2003. *Science*, **323**:1041-1045, doi:10.1126/science.1165243.
57. Nellis, W. J., S. T. Weir, and A. C. Mitchell, 1996. Metallization and electrical

- conductivity of hydrogen in Jupiter. *Science*, **273**, 936–938.
58. Pierrehumbert, R. T., 2010. *Principles of Planetary Climate*, Cambridge University Press, New York, 652 pp.
  59. Porco, C. C., and coauthors, 2003. Cassini imaging of Jupiter’s atmosphere, satellites, and rings. *Science*, **299**, 1541–1547.
  60. Porco, C. C., and coauthors, 2005. Cassini Imaging Science: Initial results on Saturn’s atmosphere. *Science*, **307**, 1243–1247.
  61. Rhines, P. B., 1975. Waves and turbulence on a  $\beta$ -plane. *J. Fluid. Mech.*, **69**, 417–443.
  62. Rhines, P. B., 1994. Jets. *Chaos*, **4**, 313–339.
  63. Sánchez-Lavega, A., S. Perez-Hoyos, J. F. Rojas, R. Hueso, and R. G. French, 2003. A strong decrease in Saturn’s equatorial jet at cloud level. *Nature*, **423**, 623–625.
  64. Sánchez-Lavega, A., R. Hueso, and S. Perez-Hoyos, 2007. The three-dimensional structure of Saturn’s equatorial jet at cloud level. *Icarus*, **187**, 510–519.
  65. Schneider, T., and J. J. Liu, 2009. Formation of jets and equatorial superrotation on Jupiter. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 579–601.
  66. Seager S, Deming D. 2010. Exoplanet Atmospheres. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **48**, 631–672.
  67. Segura, T. L., O. B. Toon, and A. Colaprete. 2008. Modeling the environmental effects of moderate-sized impacts on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **113**:E11007.
  68. Smith, M. D., 2004. Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999-2003. *Icarus*, **167**:148-165.
  69. Smith, M. D., 2009. Mars Trace Gas Mission: Scientific Goals and Measurement Objectives. White paper submitted to the Planetary Science Decadal Survey, National Research Council, Washington, D. C.
  70. Selsis, F., J. F. Kasting, J. Paillet, and X. Delfosse, 2007, Habitable planets around the star Gl581? *Astron. & Astrophys.* **476**, 1373-1387.
  71. Sromovsky, L. A., P. M. Fry, T. E. Dowling, K. H. Baines, and S. S. Limaye, 2001.

- Coordinated 1996 HST and IRTF imaging of Neptune and Triton III. Neptune's atmospheric circulation and cloud structure. *Icarus*, **149**, 459–488.
72. Swain, M R, Vasisht, G, Tinetti, G., 2008. The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature*, **452**, 329–331.
  73. Taylor, F. W., 2010. Planetary Atmospheres. Oxford University Press, New York, p. 261.
  74. Tian, F., J. F. Kasting, and S. C. Solomon, 2009. Thermal escape of carbon from the early Martian atmosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L02205, doi:10.1029/2008GL036513.
  75. F. Tian, M. W. Claire, J. D. Haqq-Misra, M. Smith, D. C. Crisp, D. Catling, K. Zahnle, J. F. Kasting, 2010. Photochemical and Climate Consequences of Sulfur Outgassing on Early Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 412.
  76. Titus, T. N., 2009. Mars Polar Science for the Next Decade. White paper submitted to the Planetary Science Decadal Survey, National Research Council, Washington, D. C.
  77. Udry, S., X. Bonfils, X. Delfosse, and coauthors, 2007. The HARPS search for southern extra-solar planets. XI. Super-Earths (5 and 8  $M_{\oplus}$ ) in a 3-planet system. *A&A*, **469**, L43.
  78. Whiteway, A., L. Komguem, C. Dickinson, C. Cook, M. Illnicki, J. Seabrook, V. Popovici, T. J. Duck, R. Davy, P. A. Taylor, J. Pathak, and coauthors, 2009. Mars water-ice clouds and precipitation. *Science*, 325:68.
  79. Vallis, G. K., 2006. *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
  80. Vasavada, A. R., and A. P. Showman, 2005. Jovian atmospheric dynamics: an update after Galileo and Cassini. *Rep. Prog. Phys.*, **68**, 1935–1996.
  81. *Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013-2022*. By the Committee on the Planetary Science Decadal Survey, National Research Council of the National Academies. The National Academies Press, Washington DC, 400 pp.
  82. Walker, J. C. G., P. B. Hays, and J. F. Kasting, 1981. A negative feedback

- mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **86**, 9776-9782.
83. 王炜, 刘玉娟, 胡永云, 田丰, 2013. 太阳系外行星系统的搜寻和研究. 陆琰. *现代天体物理*. 北京: 北京大学出版社.
84. Williams, G. P., 1978. Planetary circulations: 1. Barotropic representation of jovian and terrestrial turbulence. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1399–1426.
85. Williams, G. P., and R. J. Wilson, 1988. The stability and genesis of Rossby vortices. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 207–241.
86. Williams, G. P., 2003a. Jovian dynamics. Part III: Multiple, migrating, and equatorial jets. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1270–1296.
87. Williams, G. P., 2003b. Jet sets. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 439–476.

表1、国际主要行星大气科学院系和研究机构（不完全统计）

美国：

1. **National Aeronautics and Space Administration (NASA)**
2. California Institute of Technology: Division of Geological and Planetary Sciences, Jet Propulsion Laboratory
3. Cornell University: Space and Planetary Sciences
4. Harvard University: Earth and Planetary Sciences
5. MIT: Dept. of Earth, Atmosphere, Ocean and Planetary Sciences
6. University of Chicago: Dept. of Geophysical Sciences, Dept. of Astrophysics
7. University of Arizona: Department of Planetary Sciences, Lunar and Planetary Laboratory
8. University of California, Los Angeles: Dept. of Earth and Planetary Sciences
9. University of California, Berkeley: Dept. of Earth and Planetary Sciences
10. University of California, Santa Cruz: Dept. of Earth and Planetary Sciences
11. Brown University: Dept. of Earth and Planetary Sciences
12. Johns Hopkins University: Dept. of Earth and Planetary Sciences
13. University of Colorado at Boulder: Astrophysics and Planetary Sciences
14. University of Michigan: Dept. of Atmospheric, Oceanic, and Space Sciences
15. University of Washington: Dept. of Earth and Planetary Sciences
16. Purdue University: Dept. of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences

欧洲：

European Space Agency

Oxford University: Atmospheric, Oceanic and Planetary Sciences

University of College London: Birkbeck Centre for Planetary Sciences

University of Cambridge: Institute of Astronomy

University of Copenhagen: Center of Planetary Research

CNRS (France)

Laboratory of Meteorological Dynamics (France)

Max-Planck Institute

加拿大：

British Columbia University: Institute of Planetary Sciences

Western Ontario University: Planetary Sciences and 行星科学和探测研究中心

日本:

Japan Aerospace and Exploration Agency

University of Tokyo: Dept. of Earth and Planetary Sciences

Kyoto University: Division of Earth and Planetary Sciences

Kobe University: Dept. of Earth and Planetary Sciences

Tokyo Polytechnic University: Dept. of Earth and Planetary Sciences

Nagoya University: Dept. of Earth and Planetary Sciences

表 2、世界各国发射的主要行星大气探测器。

金星：

1. 前苏联在 1961-1984 年发射了一系列金星探测器，命名为“金星号”系列（Venera），九次是成功的。其中，“金星 4 号”探测器是首个人造仪器进入其它行星的大气层，它于 1967 年 6 月 12 日发射，1967 年 10 月 18 日进入金星大气层，一直到达金星上空 24.96 km 的高度。1970 年 8 月 17 日发射的“金星 7 号”于 1970 年 12 月 15 日到达金星表面，是第一个在其它行星表面“软”着陆的探测器，着陆后向地球发射了 24 分钟的信号。1975 年 6 月 14 日发射的“金星 9 号”于 1975 年 10 月 25 日在金星表面着陆，是首个向地球发射回照片的探测器。1975 年 6 月 14 日发射的“金星 10 号”于 1975 年 10 月 25 日在金星表面着陆，给出了金星温度廓线并发射回电视画面。这些探测器对金星大气压、温度、云层、带电粒子、表面风速和金星磁场进行了探测。
2. 美国 NASA 自 1961 年向金星和火星发射了 10 个探测器，命名为“水手号”（Mariner）系列。其中，1962 年 8 月 27 日发射的“水手 2 号”于 1962 年 12 月 14 日飞过金星，是第一个星际空间探测并发回探测数据的探测器。它对金星的表面温度、大气成分、磁场和带电粒子进行了探测，探测到的金星表面温度是 500 °C。
3. NASA 自 1978 年发射了一系列金星探测器，命名为“金星先锋号”系列（Pioneer Venus）。用于探测金星大气温度、云、气溶胶、地形和极端气候条件等。
4. 欧空局（ESA）于 2006 年 4 月 11 日发射了第一个金星探测器，也就是“金星快车号”（Venus Express），主要目的是测量金星大气环流。
5. 日本于 2010 年 5 月 21 日发射了“金星气候轨道飞行器”（Venus Climate Orbiter），但飞行器没有进入正确的金星轨道。

火星：

- 1、NASA 于 1971 年 5 月 30 日发射了“水手 9 号”火星人造卫星，该卫星于 1971 年 11 月 13 日开始绕火星运行。它的主要目的是火星大气的温度和湿度。
- 2、NASA 于 1975 年 8 月 20 日和 9 月 9 日分别发射了“海盗 1 号”和“海盗 2 号”（Viking I and II）。这两个探测器都包括火星轨道飞行器和着陆器两个部

分。这些飞行器的目的是探测大气温度、水汽含量和地表物质特征，以及寻找生命是否存在的证据。“海盗1号”于1976年6月19日到达火星，着陆器于1976年7月20日在火星着陆。“海盗2号”于8月7日进入火星轨道，着陆器于9月3日在火星表面着陆。两个轨道飞行器在绕火星飞行了1400和708圈之后失去动力，分别于1980年8月17日和1978年7月25日终止。“海盗1号”和“海盗2号”着陆器分别于1982年11月13日和1980年4月11日终止与地球的通讯联系。其间发回了大量的火星表面照片。

- 3、ESA于2003年6月2日发射了“火星快车号”探测器(Mars Express)，该探测器于2003年12月25日到达火星。“火星快车号”的目的是探测火星大气成分、全球大气环流、地表以及地表与大气之间的相互作用。
- 4、NASA于2003年6月10日和2003年7月8日分别发射了设计相同的火星车“勇气号”(Spirit)和“机会号”(Opportunity)。两辆火星车的主要目的是通过测量火星表面岩石和土壤的化学成分寻找液态水存在和活动过的证据和痕迹。“勇气号”在2004年1月4日在火星表面着陆，“机会号”在2004年1月25日在火星表面着陆。两辆火星车的设计寿命是90天，但它们在火星表面的实际运行时间远超过设计寿命。“勇气号”在2009年早些时候一个轮子陷入沙土，但还可以发射信号，它停止与地球的通讯时间是2010年3月22日。它运行的实际距离是7.73 km，远超过设计的运行距离600 m。“机会号”至今还在工作，其运行距离已超过34 km。
- 5、NASA于2005年8月12日发射了“火星巡视号”(Mars Reconnaissance Orbiter)。该探测器于2006年3月10日进入火星轨道，其目的是为了探测火星气候季节和年际变化的机制、全球垂直温度廓线、地表层的复杂性、有水的的海貌特征、水活动的地貌特征等。
- 6、NASA于2007年8月4日发射了“凤凰号”(Phoenix)火星探测器，它于2008年5月25日在火星北极地区着陆，其目的是研究火星的极地环境，研究水对火星表面矿物分布的影响。
- 7、NASA于2011年11月26日成功发射了“好奇号”(Curiosity)火星探测器，2012年8月6日成功着陆在火星表面。“好奇号”火星车比“勇气号”和“机遇号”大得多，设计寿命大约为两个地球年(大约一个火星年)，它的主要任务是探测火星上是否存在适合生物生存的环境。与前两者不同的是，“好奇号”携带有

一整套实验仪器，可以现场对火星表面岩石、土壤等矿物质进行测验和分析。

### 外围气态巨行星：

- 1、NASA 于 1977 年 9 月 5 日和 1977 年 8 月 20 日分别发射了“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”（Voyager 1 和 Voyager 2）。这两个探测器的目的是为了探测太阳系外围四个巨型气态行星的大气环流、行星大气的动力、结构和化学成分，揭示这些行星的卫星的地表、地质和物理状态，提供这些行星以及它们的卫星的质量、体积、形状等。由于种种原因，“旅行者 1 号”比“旅行者 2 号”发射晚半个月。到目前为止，“旅行者 1 号”是飞行距太阳最远的人造飞行器。它于 1979 年 3 月 5 日最近距离经过木星、于 1980 年 11 月 12 日最近距离经过土星，发回了 18000 张木星及其卫星的照片和 16000 张土星及其卫星的照片。“旅行者 2 号”最近距离飞过木星是 1979 年 7 月 9 日、最近距离飞过土星是 1981 年 8 月 5 日、发回了大致同等数量的照片。“旅行者 2 号”于 1986 年 1 月 24 日飞过天王星、于 1989 年 8 月 25 日飞过海王星，分别发回了 8000 和 10000 张这两个行星及其卫星的照片。
- 2、NASA 于 1989 年 10 月 18 日发射了“伽利略号”（Galileo）。该探测器分两个部分：轨道飞行器和大气探测器。其大气探测器的目的是为了确定木星大气的化学成分，揭示木星大气层深至 10 个大气压的大气结构，研究木星大气中云颗粒的性质和云层的结构和高度，测量木星热辐射收支，研究木星大气闪电活动，测量木星大气高层高能带电粒子通量。其轨道飞行器的目的是为了研究木星大气动力学和大气环流，研究木星高层大气，揭示木星卫星的地表特征、地质和物理学状态，研究木星卫星的地表物质成分和分布，揭示木星卫星的重力和磁场性质，揭示木星卫星的磁层、电离层等。在飞向木星的过程中，“旅行者 2 号”还对金星、月球和小行星带（asteroid belt）中的小行星进行了探测。
- 3、NASA 于 1997 年 10 月 15 日发射了“卡西尼号”土星探测器（Cassini）。“卡西尼号”的目的是为了确定土星光环的三维结构和动力特征，确定土星卫星的地表物质成分和地质历史，测量图形磁层的三维结构和动力学特征，研究木星大气在云层附近的动力学特征。“卡西尼号”还搭载了 EPA 的“惠更斯号”（Huygens）探测器，用于探测土卫六的云物理特征、大气放电现象、大

气环流，以及其地形、地表物质成分。由于在当时无法把飞行器发射到土星，“卡西尼号”是在“金星-金星-地球-木星”重力助推(VVEJGA)作用下飞行的，它在 1998 年 4 月和 1999 年 6 月两次飞过金星，于 1999 年 8 月飞过地球，于 2000 年 12 月飞过木星，于 2004 年 12 月进入土星轨道。

表 3、太阳系有大气的各行星的物理参数

行星	半径 ( $10^6$ m)	重力加速度 ( $\text{m s}^{-2}$ )	太阳常数 ( $\text{W m}^{-2}$ )	行星反照率	自转速度 ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )	公转周期 (年)
金星	6.05	8.60	2620	0.77	0.03	0.615
地球	6.37	9.81	1370	0.29	7.29	1.00
火星	3.40	3.72	590	0.15	7.09	1.88
木星	71.4	22.88	50.6	0.45	17.57	11.86
土星	60.0	9.05	15.1	0.61	16.34	29.5
土卫六	2.56	1.44	15.1	0.21	0.456	29.5
天王星	26.15	7.77	3.72	0.37	11.26	84.0
海王星	24.75	11.00	1.52	0.37	11.05	165

表 4、太阳系行星大气成分、表面气压\*和温度

行星	主要大气成分	$P_s$ (bar)	$T_s$ (K)
金星	$\text{CO}_2$ (96%), $\text{N}_2$ (3%)	90	730
地球	$\text{N}_2$ (77%), $\text{O}_2$ (21%), $\text{H}_2\text{O}$ (1%)	1	288
火星	$\text{CO}_2$ (95%), $\text{N}_2$ (3%), Ar (2%)	0.007-0.01	218
木星	$\text{H}_2$ (90%), He (10%)	0.42 <sup>*</sup>	125
土星	$\text{H}_2$ (97%), He (3%)	1.1 <sup>*</sup>	95
土卫 6	$\text{N}_2$ (82-99%), Ar (0-12%), $\text{CH}_4$ (1-6%)	1.8	92
天王星	$\text{H}_2$ (83%), He (15%), $\text{CH}_4$ (2%)	5 <sup>*</sup>	57
海王星	$\text{H}_2$ (83%), He (15%), $\text{CH}_4$ (2%)	1.5? <sup>*</sup>	57

\*：气态行星无固体表面，表中所示气压与温度相应。

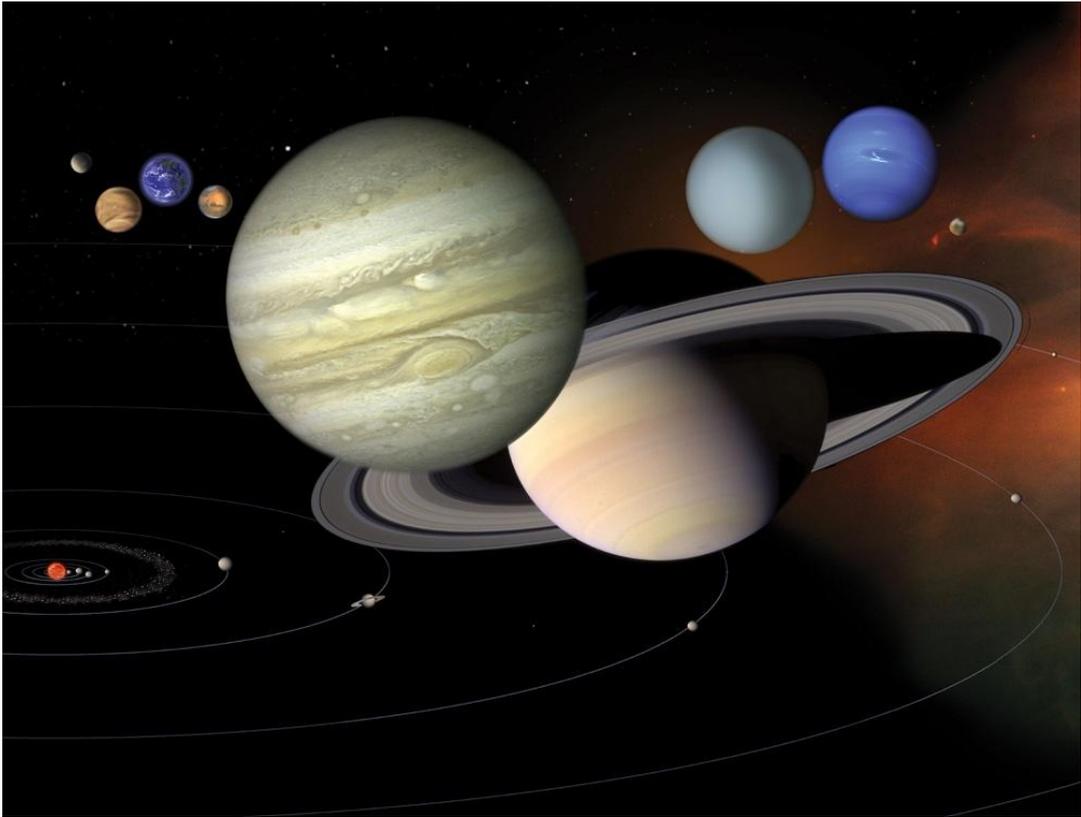


图 1、太阳系 8 大行星的体积对比（来自 NASA）。

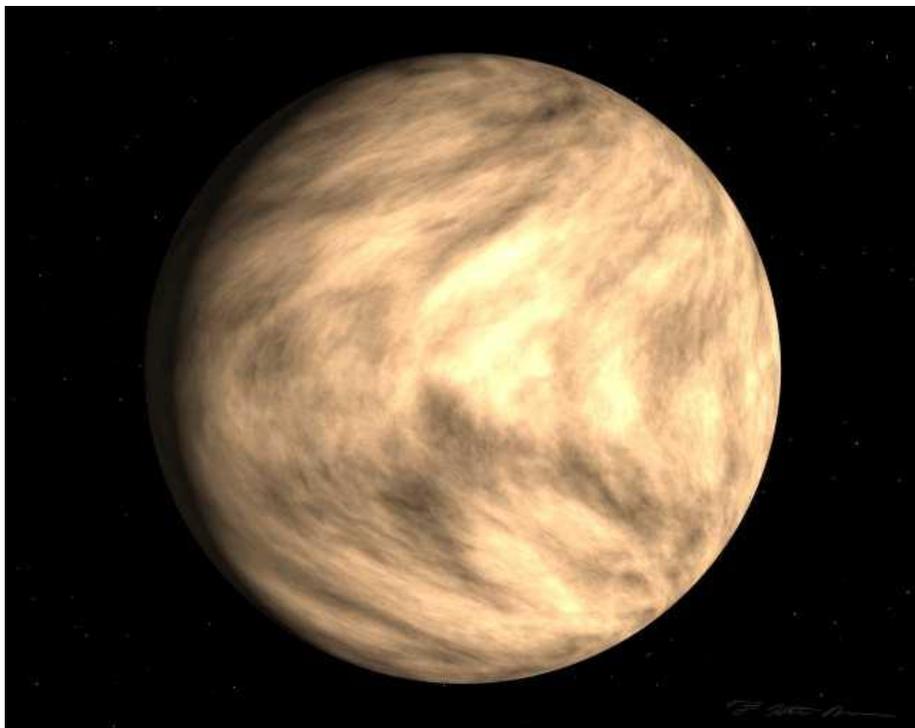


图 2、“水手 10 号”拍摄的金星图片。混浊的大气、浓密的云层以及自赤道到极地的气流结构都可以看到（来自 NASA）。

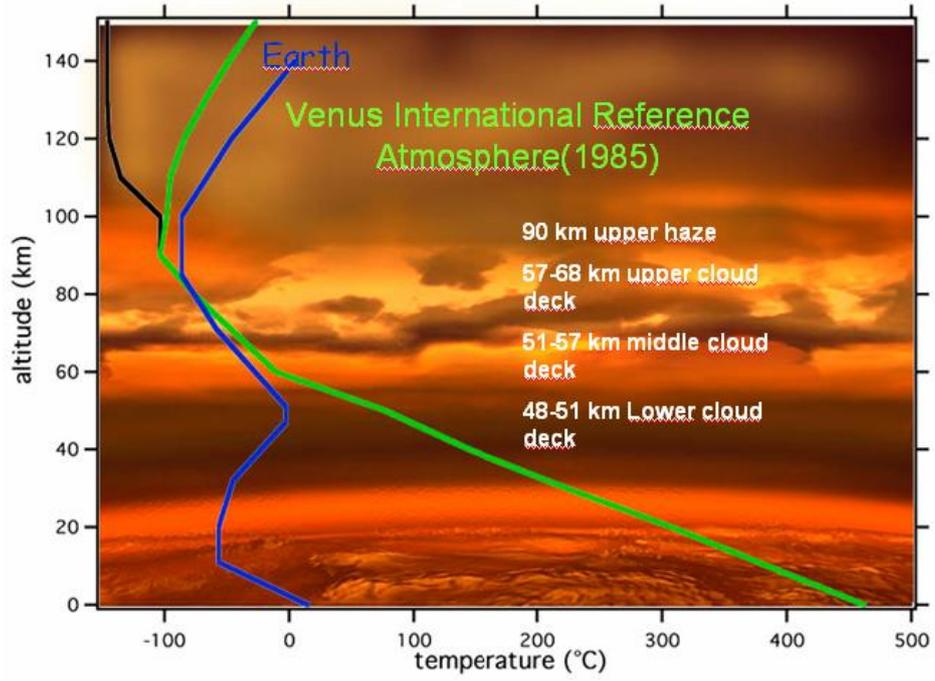


图 3、金星大气垂直温度廓线和云层示意图（来自 ESA）。

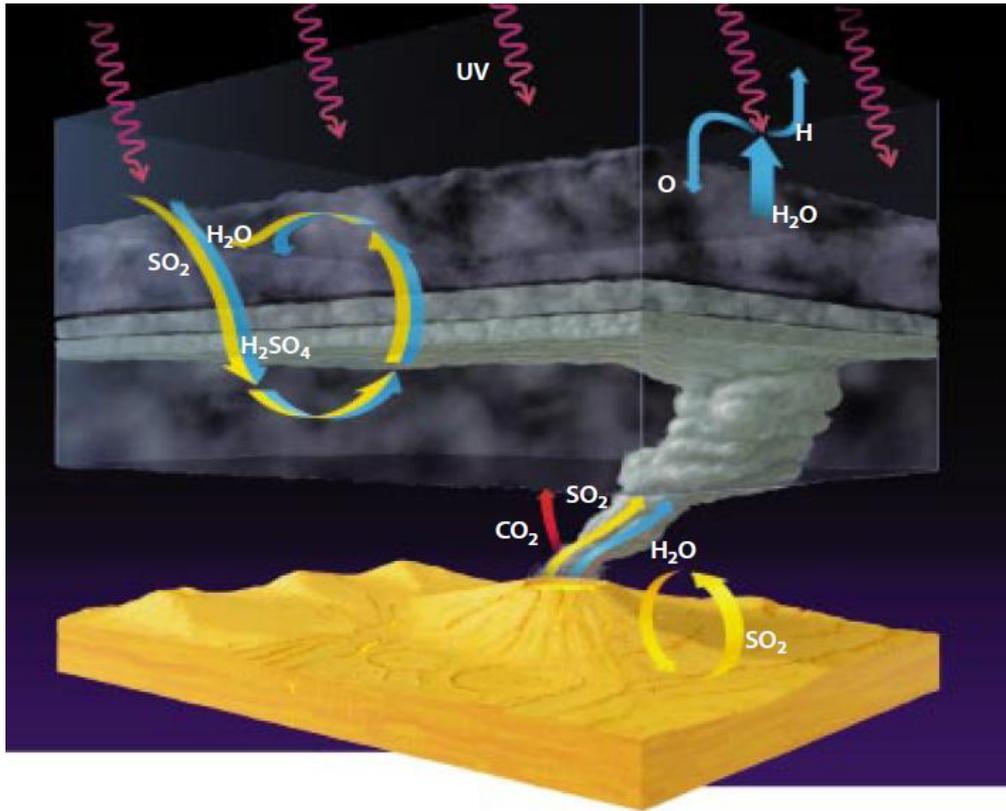
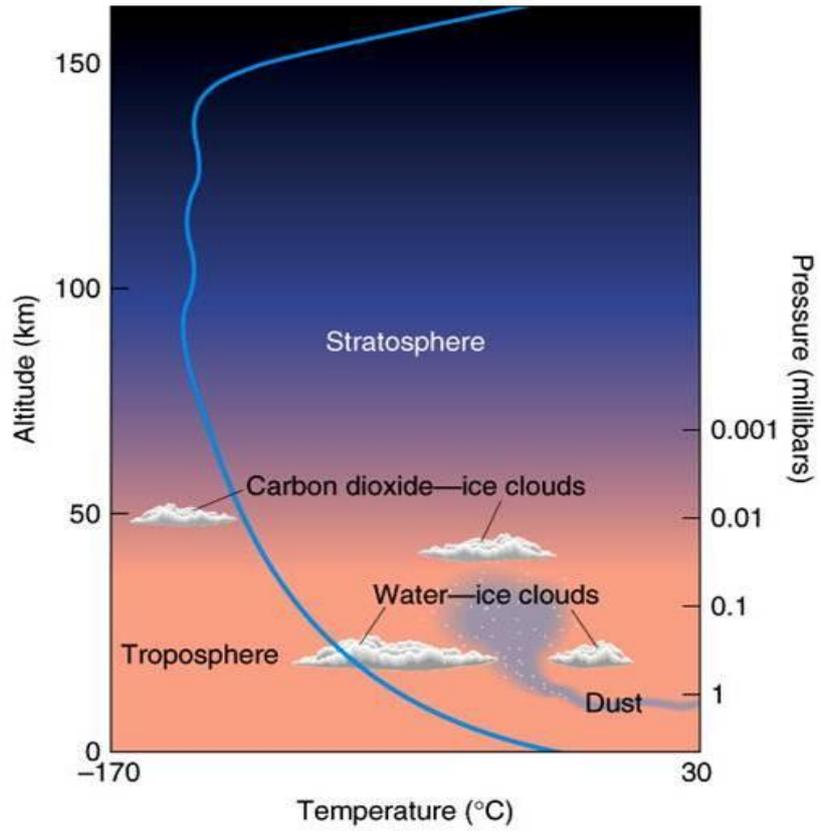


图 4、金星大气的不可逆物理和化学过程示意图(Bull lock and Gr inspoon, 1999)。



图 5、哈勃望远镜拍摄的火星照片。两极的白色为  $\text{CO}_2$  干冰和水冰盖。火星表面呈红褐色是由于其土壤中含有大量的三氧化二铁（来自 NASA）。



6、火星大气温度垂直廓线和云层示意图（来自 NASA）。

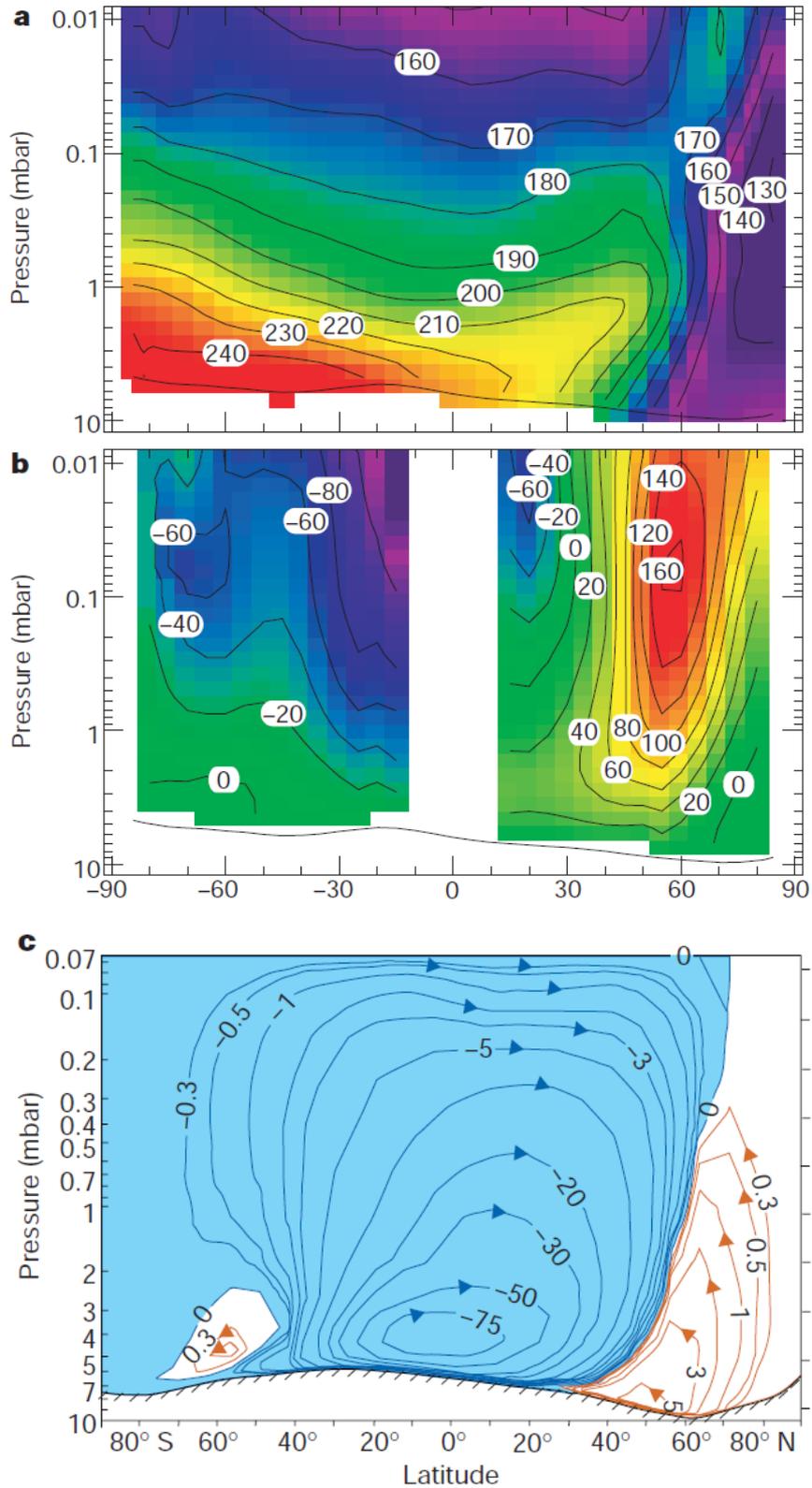


图 7、火星探测器观测的北半球冬至时 (a) 纬向平均温度 (K) 和 (b) 纬向平均风速 ( $\text{ms}^{-1}$ )。 (c) 大气环流模式模拟的北半球冬至时的径向质量流函数 ( $10^8 \text{ kgs}^{-1}$ , 蓝色阴影代表顺时针旋转)。摘自 Haberle 等 (1993) 和 Leovy (2001)。

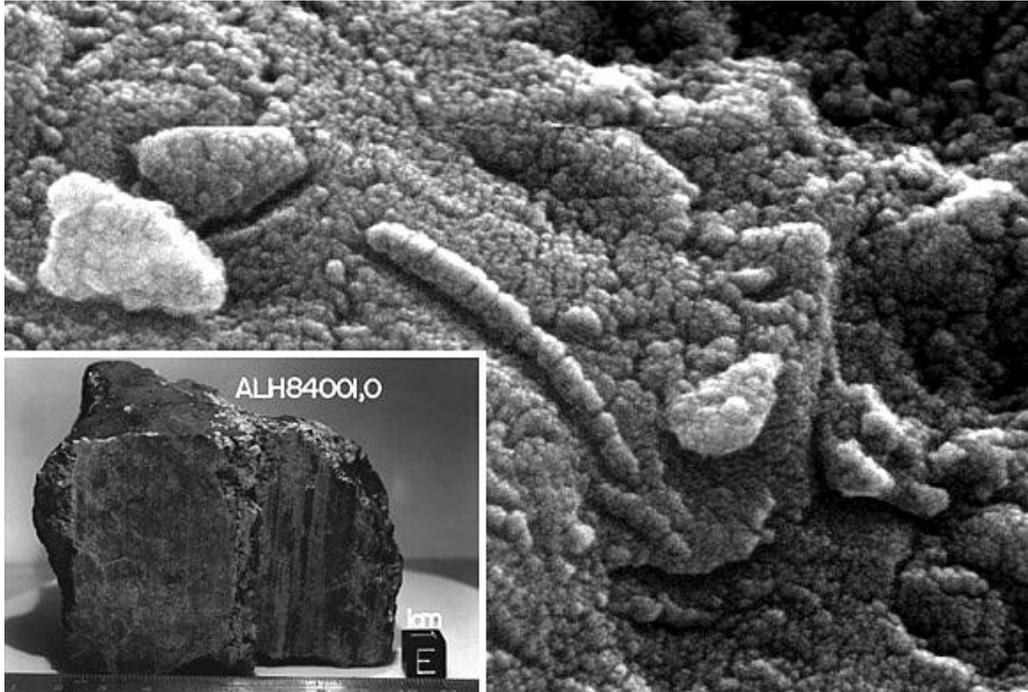


图 8、1984 年 12 月 27 日在南极发现的被认为是来自火星的陨石（编号：ALH84001）。图中显示的是在电子显微镜下看到的类似菌类微生物化石的特征。左下角的图给出了整个陨石的形状（摘自 McKay 等（1996））。

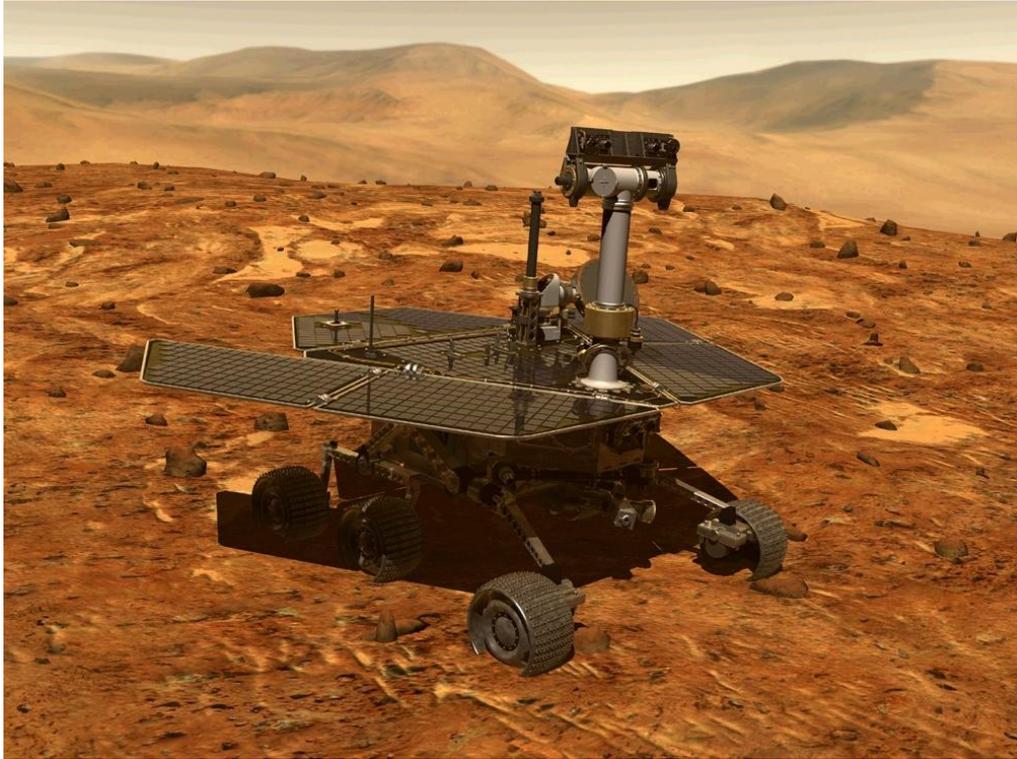


图 9、“勇气号”和“机会号”火星车外观（来自 NASA）。

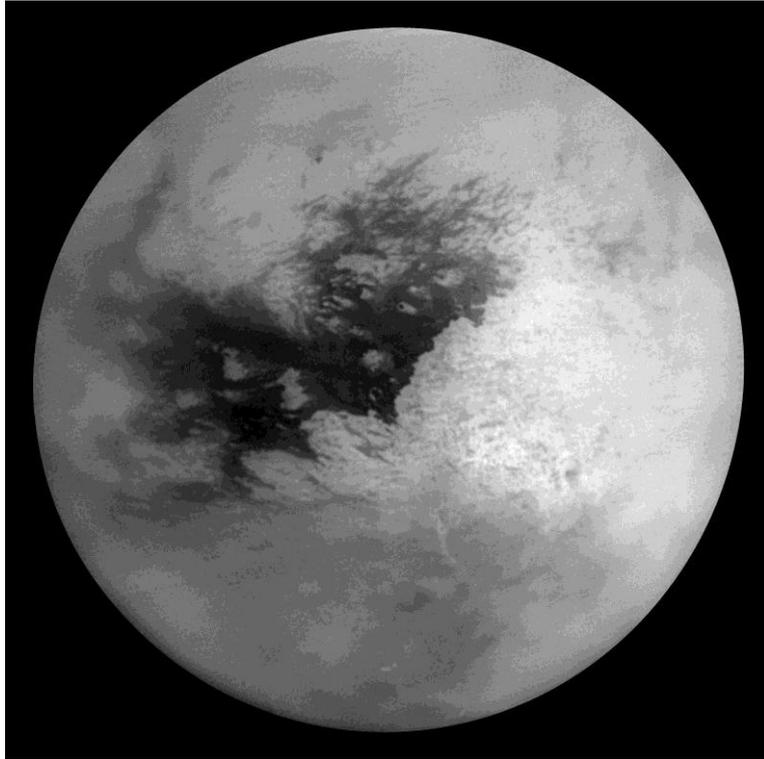


图 10、“卡西尼号”飞船拍摄的土卫六（来自 NASA）。

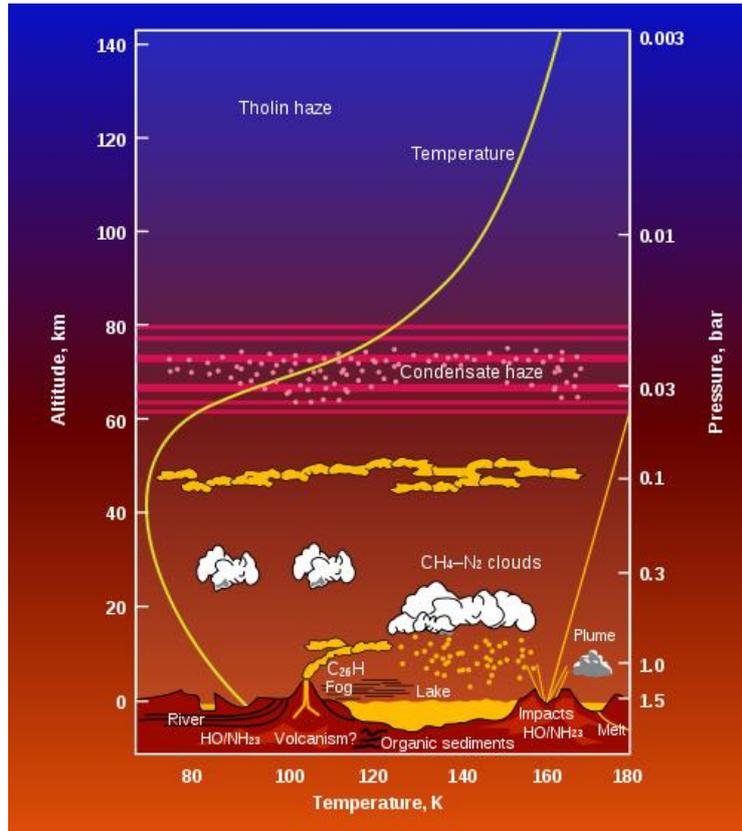


图 11、土卫六大气温度垂直廓线、霾层、云层、“甲烷雨”和地面湖泊示意图（来自 University of Virginia）。

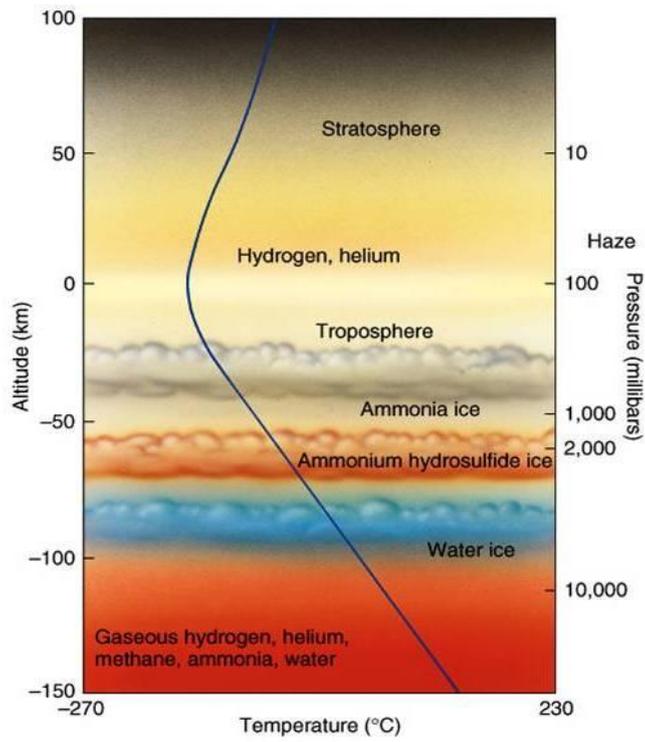


图 12、木星大气温度垂直廓线和云层示意图 (NASA)。

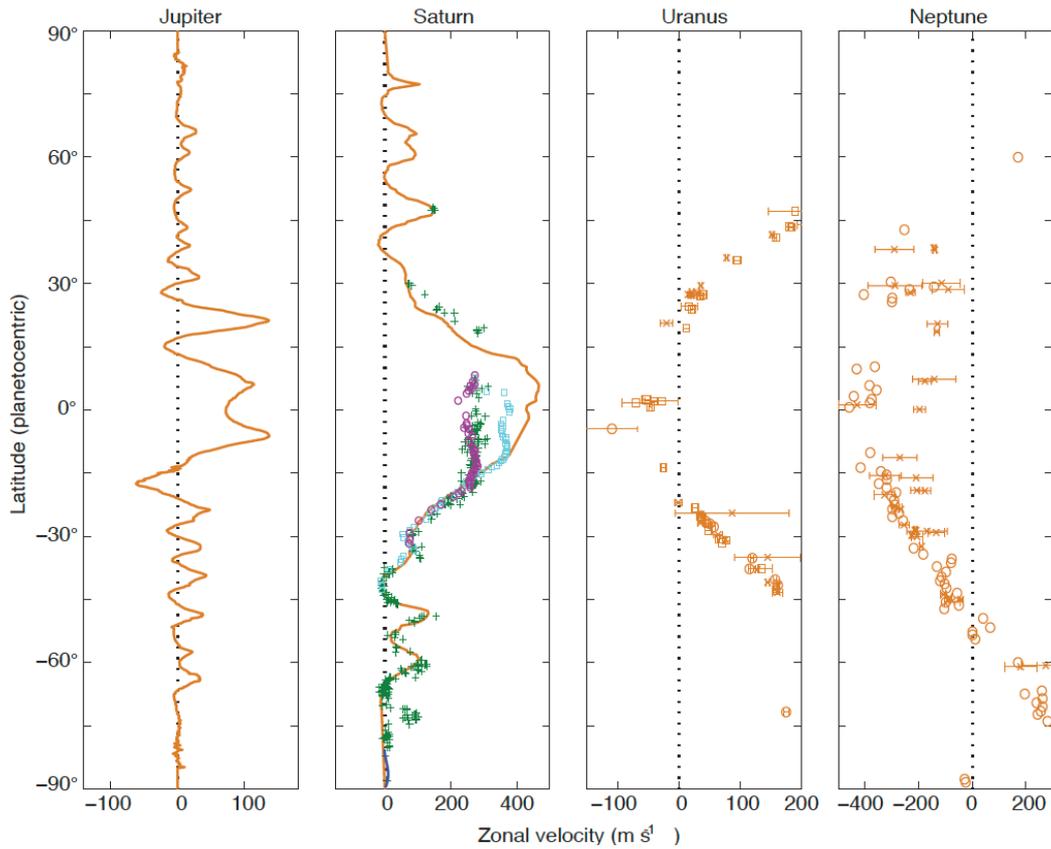


图 13、观测到的巨行星大气上层的纬向风风速(来自于 Liu and Schneider 2010)。木星:卡西尼宇宙飞船的测量 (橙色线) (Porco et. al., 2003) ;土星:旅行者宇宙飞船的测量 (橙色线), 哈勃空间望远镜的测量 (绿色符号), 卡西尼宇宙飞船的测量, 对应于 0.06 大气压 (紫色符号), 对应于 0.7 大气压 (淡绿色符号) (Sanchez-Lavega et al. 2003; Porco et al 2005; Sanchez-Lavega et al. 2007); 天王星:旅行者宇宙飞船的测量 (橙色圆圈), 哈勃空间望远镜的测量 (橙色方形) (Hammel et al. 2001, 2005); 海王星: 旅行者宇宙飞船的测量(橙色圆圈), 哈勃空间望远镜的测量 (橙色方形) (Sromovsky et al., 2001)。

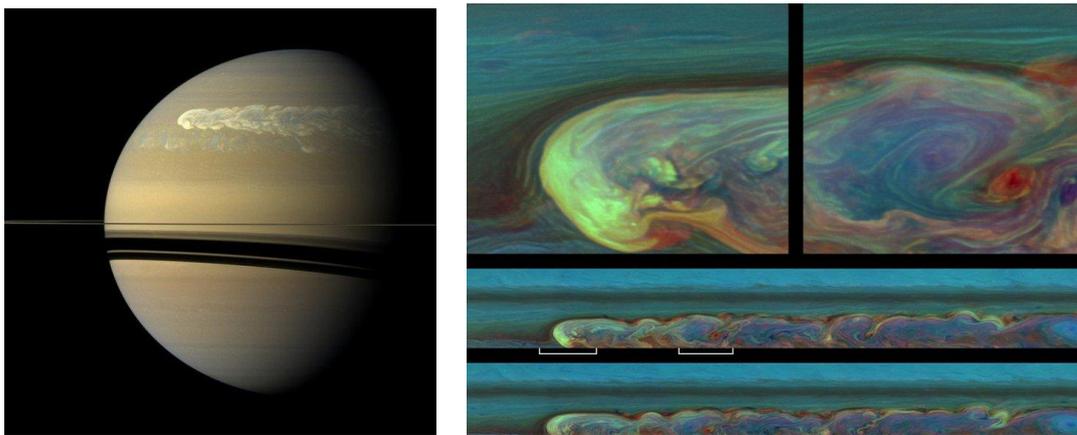


图 14、土星上的超风暴(左)；超风暴的局部合成图(右)。(来自于卡西尼宇宙飞船：NASA/JPL-Caltech/SSI)

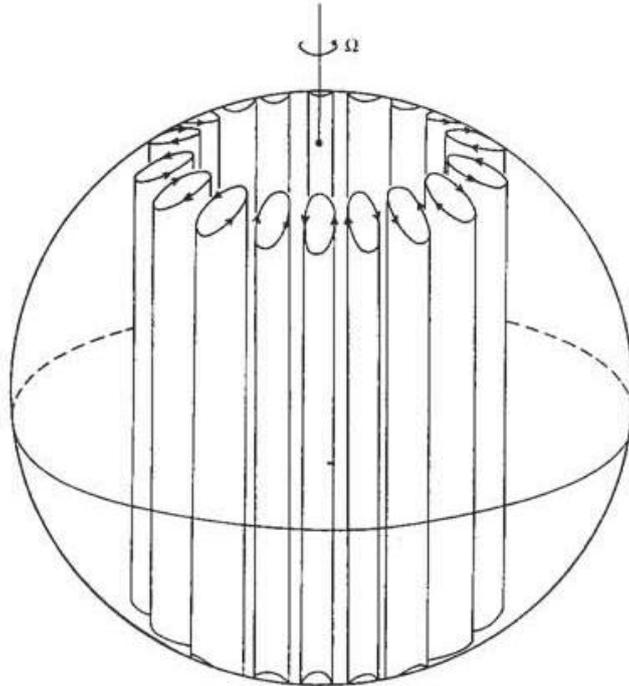


图 15、巨行星的柱状对流单体(摘自 Busse, 1976)。

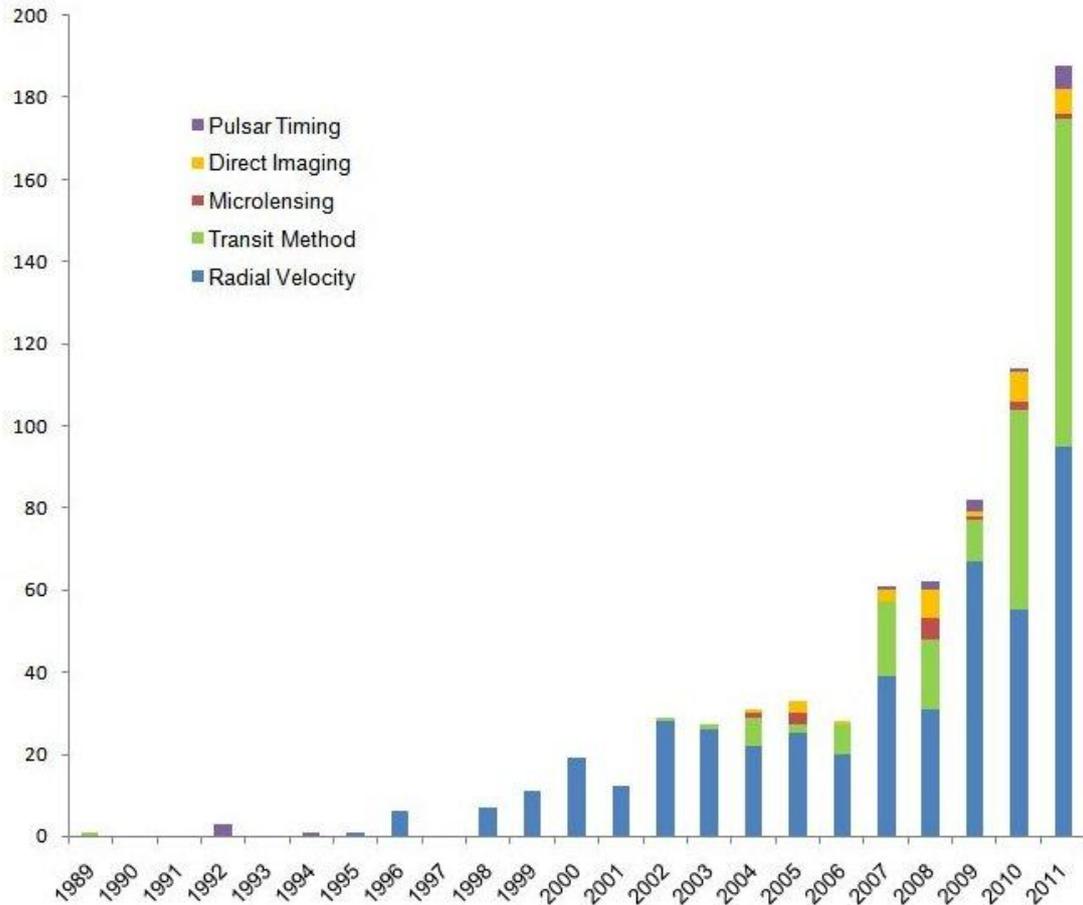


图 16、近三十年来每年所发现的系外行星个数分布图。图中的颜色代表发现系外行星所使用的探测技术（蓝色：视向速度；绿色：掩星；红色：微引力透镜；黄色：直接成像；紫色：脉冲星计时）（来自行星百科网站，<http://exoplanet.eu/index.php>）。

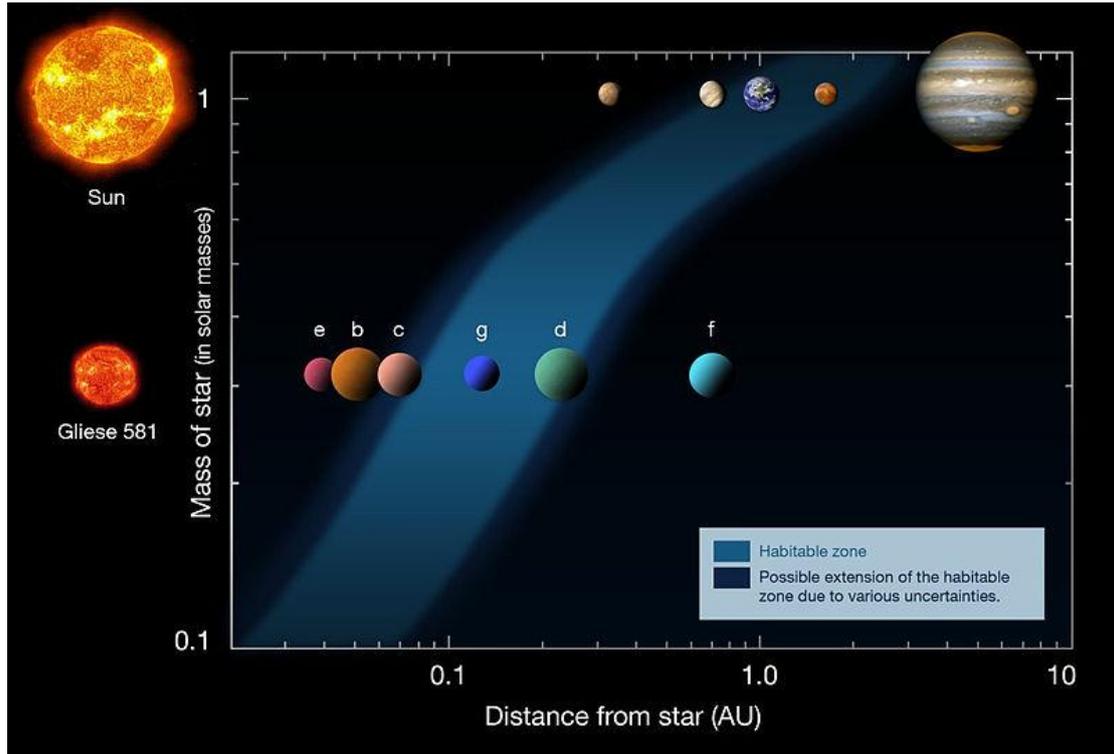


图 17、太阳和红矮星的宜居带（考虑液态水在行星表面的长期存在）（来自 ES0）。

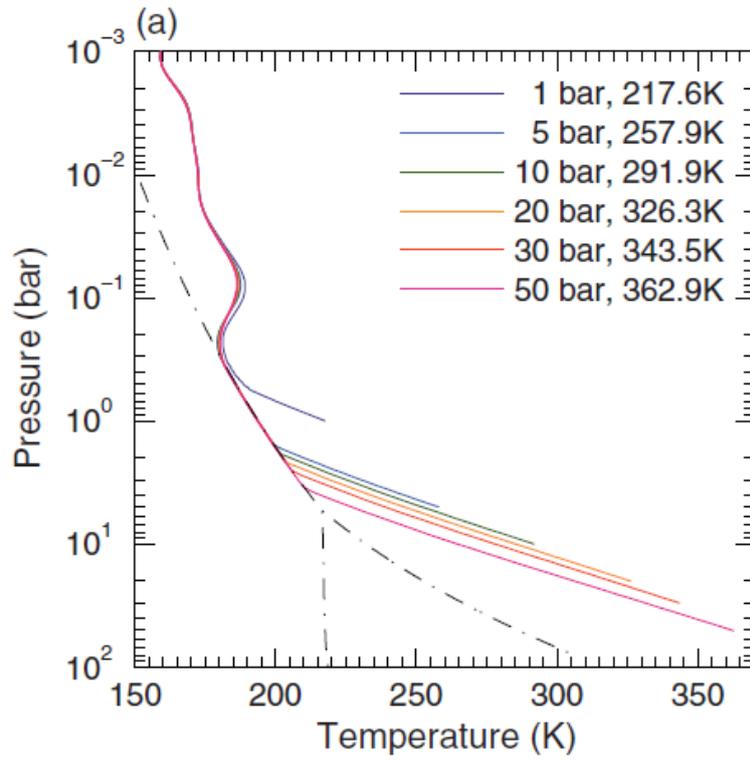


图 18、辐射-对流模式模拟的在不同 CO<sub>2</sub> 含量条件下的 Gliese 581d 垂直温度廓线和地面温度 (Hu and Ding, 2011)。