

文章编号: 1000-8349(2009)04-0301-15



系外类地行星的内部结构及 大气成分研究进展

晋 升^{1,2}, 季江徽¹

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 系外类地行星是目前搜寻地外生命的主要目标。随着观测仪器的发展, 现在已经能探测到低于 10 个地球质量的系外行星。该文简要回顾了系外类地行星的形成与演化, 介绍了当前研究它们内部结构的模型和方法, 以及由此得出的类地行星质量 - 半径关系。同时, 对应不同的行星初始物质成分, 讨论了各种可能的大气结构。最后介绍了未来的空间任务在相关方面的工作。

关键词: 系外行星; 类地行星; 状态方程; 内部结构; 大气

中图分类号: P185

文献标识码: A

1 引 言

到目前为止, 借助不同的观测方法, 已发现了 3 百多颗太阳系外行星 (简称系外行星)^[1]。其中, 绝大多数是类似于木星的气态巨行星, 由于这样的行星不适宜生命存在, 人们希望能发现和地球相似的行星^[1,2]。但是类地行星的质量较小, 受观测技术和精度限制, 不容易观测到。随着观测精度的不断提高, Rivera 等人^[3]才在 2005 年通过视向速度法确定了第一颗系外类地行星 GJ 876d。这颗行星的质量为 $(7.5 \pm 0.7)M_{\oplus}$, 轨道周期为 1.94 d, 围绕着一颗 M4 V 型的母星 GJ 876 公转。其后, 又有数颗这样的行星被相继发现^[4-6], 最近又发现了一颗质量为 $1.94 M_{\oplus}$ 的行星^[7]。未来几年里, 伴随着 Kepler、COROT 等一系列空间计划的实施, 将会有越来越多的系外类地行星被发现^[8]。

根据行星形成理论可知, 质量在 $1 \sim 10 M_{\oplus}$ 范围内的固态行星是广泛存在的。人们把这样

收稿日期: 2009-05-03; 修回日期: 2009-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10973044, 10833001, 10573040, 10673006); 江苏省自然科学基金和紫金山天文台小行星基金会资助课题; 国家自然科学基金国际合作项目 (10911130220)

较大质量的类地行星称为超级地球；当行星的质量达到 $10 M_{\oplus}$ 以上时，它就开始吸积 H 和 He，这个过程将使它迅速增长成一个气态巨行星^[9-12]，而不再是类地行星。对行星形成过程的数值模拟表明，行星可以在很大的径向范围内吸积水物质^[13]，并最终保留在行星上面。因此在超级地球中，还包括称为海洋行星的一小类，这些行星的含水量超过其质量的 10%，以水或冰的形式覆在岩石内核外。

类地行星的质量较小，发现都很难，对它们直接观测更为困难。目前搜寻系外行星主要通过两种方法：视向速度法和掩星法。通过视向速度法可以估计出行星的质量；通过高精度的掩星法则可以得到行星的半径，对于已经知道质量和半径的行星，希望通过研究弄清它的内部结构是怎样的，可以联合两种方法去推测超级地球的内部信息。

类似的研究也在针对太阳系内的行星与卫星展开。依赖一系列的空间探测，人们对太阳系内行星、卫星内部结构的了解也逐渐增多。如根据 Cassini 探测器提供的资料，Schubert 等人推测 Enceladus(土星的冰卫星) 上有大规模的构造运动，也经历过重力分异，它的表面可能完全是后来重新形成的。在它大小约为 150~170 km 的岩石或者金属内核外，包裹着质量近 50% 的液态水冰层^[14]。Anderson 等人根据 Galileo 空间飞船获得的引力场与磁场的资料，指出 Ganymede(木星最大的卫星) 也已经分异形成核与幔。它大概由 60% 的岩石与 40% 的冰组成，在大小约 400~1300 km 的金属核外包裹着硅酸盐幔，最上面覆盖着大约 800 km 的冰层^[15]。根据 Galileo 得到的 Callisto(木星伽利略卫星中最外面的一个) 的引力场和半径值，Anderson 等人还拟合出满足其半径、密度和转动惯量的层圈模型。表明 Callisto 的内部存在着冰、岩石可能还有金属共存的区域^[16]。

随着实验条件的发展，关于巨行星内部结构的研究也发展很快。现在已经可以得到高压情况下的金属氢及其状态方程，配合实地的光谱测量，又能得到太阳系巨行星的化学成分，这样就能得知巨行星的详细信息。在所发现的系外行星中，有一种被称为类 51 Peg b 的行星 HD 209458 b，它们的半长径小于 0.1 AU，是质量较大的类木行星。根据对 HD 209458 b 的掩星现象的观测，研究人员找到了其存在甲烷、二氧化碳等物质的证据。Guillot 等人还给出了不同的行星大气温度对 HD 209458b 的半径的影响，指出仅从行星的质量、半径和轨道特征是不足以确定行星的内部成分的^[17]。Adams 等人研究了行星不同的物质组成与半径的关系，指出对于较小的行星来说，不同的物质组成可以具有相同的平均密度，而且少量的大气能使行星半径显著增大。比如对一个 $10 M_{\oplus}$ 的行星，占总质量 0.1% 的 H/He 大气能导致半径增加 5%，而占总质量 1% 的大气能使半径增加 20%^[18]。这些工作为以后进一步的研究打下了基础。

本文第 2 章和第 3 章拟简述类地行星的形成理论；第 4 章则介绍类地行星的内部结构模型和质量 - 半径关系，并叙述了潮汐效应产生的影响；第 5 章基于类地行星的物质成分讨论了其可能的大气成分。

2 存在的理论依据及目前的观测结果

除地球外，太阳系里没有其他质量在 $1\sim 10 M_{\oplus}$ 范围内的行星，可能会有人因此猜测这样的行星不容易形成。但行星形成的吸积理论可以证明它们是普遍存在的。一般说来，限制行星

盘内部岩石类行星质量的是它可获得的固体物质总量^[9]：

$$M \approx 1.2\eta_{\text{ice}}fa^{1/2}M_{\oplus} . \quad (1)$$

其中, f 是原行星盘总质量的定标参数 (0.1~30 之间); η_{ice} 在 1~4 之间变化, 它刻画了处在雪线外距中心恒星为 a (以 AU 为单位, 通常为几 AU) 处由于凝结冰物质导致的密度增加。根据当前的原行星盘模型可以计算出原始太阳星云质量的下限^[10-12], 结果表明行星盘中的固体物质足够形成在这个质量范围内的行星。另一方面, 当行星胚胎增长到一定大小时会开始从行星盘中吸积气体, 这个过程会使它迅速成长为一个气态巨行星^[19-21]。因此, 决定吸积气体的过程开始的临界质量 M_{crit} 也是判断超级地球存在的依据。对 M_{crit} 的精确估计牵涉到三维的辐射流体动力学, 由简化的模型可知^[22], M_{crit} 与吸积率 \dot{M} 及行星盘不透明度 k 之间存在一个很强的依赖关系:

$$M_{\text{crit}} \approx 10\dot{M}^q\kappa^sM_{\oplus} . \quad (2)$$

这里 \dot{M} 以 $10^{-6}M_{\oplus} \cdot \text{a}^{-1}$ 为单位, κ 以 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 为单位, q 和 s 介于 0.2~0.3 之间。Ida 与 Lin 通过模拟得到行星在 $10\sim 100M_{\oplus}$ 之间的增长速度特别快的结果^[9], 以致最终质量位于 $10\sim 100M_{\oplus}$ 之间的行星非常少。他们预言, 在行星盘的内部完全可能有质量在 $1\sim 10M_{\oplus}$ 范围内的超级地球存在, 其中大多数将是干燥的类地行星, 也有一部分会有大量的挥发性物质(原始水)^[23]。因此, 按照当前的行星形成理论, 超级地球并不罕见。表 1 列出了截至 2009 年 4 月已被确认的 12 颗超级地球。由于观测上的选择效应, 已发现的行星大多周期较短, 轨道半长径也较小(有 7 颗在 0.1AU 之内), 其中一些还具有较大的轨道偏心率。这样的轨道特征是太阳系内没有的, 暗示了它们可能经历过特殊的动力学演化过程。

表 1 已发现的 12 颗超级地球的相关参数

行星名称	质量 M/M_{\oplus}	周期 P/d	轨道半长径 a/AU	偏心率	发现时间 / 年份
G1 581e	1.940 034 32	3.149 42	0.03	0	2009
MOA-2007-BLG-192-L b	3.178 3	—	0.62	—	2008
HD 40307 b	4.195 356	4.311 5	0.047	0	2008
G1 581 c	5.021 714	12.932	0.073	0.16	2007
OGLE-05-390L b	5.403 11	3 500	2.1	—	2005
Gliese 876 d	5.720 94	1.937 76	0.020 806 7	0	2005
HD 40307 c	6.865 128	9.62	0.081	0	2008
HD181433 b	7.564 354	9.374 3	0.08	0.396	2008
G1 581 d	7.723 269	83.6	0.25	0.2	2007
HD 285968 b	8.422 495	8.783 6	0.066	0	2007
HD 40307 d	9.153 504	20.46	0.134	0	2008
HD 7924 b	9.217 07	5.397 8	0.057	0.17	2009

3 大质量类地行星的形成与演化

根据当前的行星形成理论,行星在中心恒星附近的原行星盘中形成。针对气态巨行星的形成的不同方式,目前主要有两种流行的理论模型:引力不稳定模型(Gravitational Instability)和核吸积模型(Core Accretion)。引力不稳定模型假定气态巨行星形成于原行星盘中较厚较冷的区域,这里引力收缩力超过了气体压力和离心力,很容易形成行星质量大小的团块^[24]。不过由于引力不稳定模型所要求的条件非常严格,只在少数极端情况下行星才能通过这种途径形成。核吸积模型被认为是行星形成的主要途径,它是指在原行星盘中通过尘埃凝聚、星子黏合和巨碰撞而形成行星胚胎^[25]。对核吸积的演化途径而言,高金属丰度是有利的,因为在那种情况下星子的密度和碰撞几率相应较高。引力不稳定演化途径则不受金属丰度的影响,它主要依赖于原行星盘的温度。

目前,尽管人们对巨行星形成过程的细节还存在一些争论,对低质量类地行星的演化过程却没有太大分歧,普遍认为类地行星是通过固态物质缓慢聚积而成。这一过程通常可以分为三个阶段,整个时标约为 10^8 a^[26]。首先,原始行星云的中平面处尘埃颗粒通过低速碰撞互相聚积,形成 $1\sim 10$ km大小的星子^[27]。对于这样大的星子,其引力场开始变得不容忽视,它们的碰撞截面也相应变大。随着一次次的碰撞吸积,星子逐渐增长成直径约 10^3 km左右的行星胚胎。第二个阶段是快速增长时期,星子(行星胚胎)之间随机轨道能量的均分使得大星子具有较小的轨道偏心率和轨道倾角,这能让它们更快地从周围获取物质^[28,29]。同时,气体对碰撞碎片的拖曳作用使这些大星子的轨道更趋于圆形,也更加与行星盘的中平面共面,这又进一步加快了它们的增长速度^[30]。在第三个阶段,行星胚胎间强烈的摄动使它们的轨道互相交叉,这时,快速增长开始变缓甚至完全停滞。大小类似于月球或火星的行星胚胎发生猛烈的碰撞,最终形成少数几个轨道相隔较远的类地行星。

在行星形成的晚期阶段,巨碰撞是普遍存在的。碰撞释放的能量加上行星内部的放射元素衰变能足以使行星熔融和分异。结果铁和亲铁元素下沉形成行星核,而较轻的硅酸盐和亲石元素形成行星幔^[31]。分异可能是在这一阶段连续进行的,并不是单一事件。例如,对地球这样的行星来说,估计那些被它吸积到的行星胚胎就已经部分或完全分异了。

已发现的类地行星大多是短轨道周期行星,半长径很小。理论上认为这样的行星并非在原地形成,而是通过类型I迁移或散射到达距离中心恒星较近的地方。类型I迁移是指当行星的大小接近地球质量时,在气体行星盘中旋转密度波的作用下将产生转矩,因此物质不断向内迁移。如果行星被卷入到中心恒星里的时标大于原行星盘的寿命(约3Ma),类型I迁移就是观测到的短轨道周期类地行星的一个可能的形成机制^[32]。行星散射也能产生短轨道周期行星,当行星开始动态地相互作用时,稳定组态和不稳定组态之间的半长轴边界非常狭窄。这样,轨道相似的两个行星密近交会时会产生动力学不稳定^[33]。当行星被散射到低近星点轨道后,潮汐效应可以使行星的轨道变圆,而且这个时标也在允许的范围^[34]。

4 超级地球的内部结构与质量 – 半径关系

4.1 超级地球的内部结构模型

由于得不到地外行星上像地震和月震那样的资料, 只能借助一定的模型来研究其内部结构。假设它们形成后的热演化过程和地球相似, 拥有和地球类似的层圈结构, 就能通过数值模拟得到它们的内部信息。对行星的模型做两个假定: (1) 这些行星都经历过重力分异形成了层圈结构; (2) 行星中各种元素的丰度与太阳系以及太阳系的邻近空间相似。第一个假设是基于太阳系中所有的类地行星以及较大的卫星都经历过分异的事实; 第二个假设也是相对合理的, 因为空间计划的探测目标就在太阳系附近。

模型把超级地球的内部分成一系列的同心层, 假设单个层内的物质成分相同。在各个层内, 密度、压力、质量、重力由流体力学平衡状态下标准微分方程描述:

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{\rho(r)g(r)}{\phi(r)} ; \quad \frac{dg}{dr} = 4\pi G\rho(r) - \frac{2Gm(r)}{r^3} ; \quad (3)$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2\rho(r) ; \quad \frac{dP}{dr} = -\rho(r)g(r) . \quad (4)$$

其中 $\phi(r) = K_s(r)/\rho(r)$ 是可以由状态方程求出的地震参量, K_s 是绝热体积模数, G 是引力常数, r 是到行星中心的距离。

密度、压力和温度又通过状态方程 (Equation Of States, EOS) 联系起来。除了行星表层的水圈外, 各个层圈中都选择三维 Birch-Murnaghan 状态方程^[35], 并加上一个德拜热修正项:

$$K_T(\rho, 300) = \frac{K_{0,300}}{2} \left\{ \left(7x^{7/3} - 5x^{5/3} \right) \times \right. \\ \left. \left[1 + \frac{3}{4} \left(K'_{0,300} - 4 \right) \left(x^{2/3} - 1 \right) \right] + \frac{3}{2} \left(x^{9/3} - x^{7/3} \right) \left(K'_{0,300} - 4 \right) \right\} . \quad (5)$$

$$K_T(\rho, T) = K_T(\rho, 300) + \Delta K_{th}(\rho, T) . \quad (6)$$

其中 x 是密度与未压缩时的密度之比, $x(r) = \frac{\rho(r)}{\rho_0}$; $K_{0,300}$ 、 $K'_{0,300}$ 是在压力为 0, 温度为 300 K 时的参考环境下得出的等温体积模数。

层圈划分依据 PREM(Preliminary Reference Earth Model)^[36], 分为行星核与上、下行星幔。对于海洋行星, 还有由液态海洋及其下的高压相冰层组成的 H_2O 层。如果采用精细的层圈结构, 还应考虑矿物相变的影响。各个层圈的厚度由行星的冰质量分数 (Ice Mass Fraction, IMF) 及核质量分数 (Core Mass Fraction, CMF) 决定。层圈中的矿物成分均参照地球, 行星幔由硅酸盐及少量的铁构成; 行星核的主要成分是铁, 或者混有少量硫。考虑各个层圈内均有对流存在, 层圈内温度特性对应于绝热的情形:

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{\rho(r)g(r)T(r)}{K_s(r)}\gamma(r) . \quad (7)$$

计算的方法多种多样。一般是先给出某一物理量的猜测值, 然后进行迭代求解。比如先给出一个猜测的半径值 R_0 , 由这个 R_0 和行星总质量 M 算出行星的表面重力值, 然后根据一定的边界条件, 联合所给方程逐步计算温度、密度、压力等物理量并积分; 依次积分完所有层圈后, 计算得到行星的总质量, 将其与实际行星总质量 M 比较, 根据其差值的正负和大小来判断半径的选取是过大还是过小, 相应地对半径的大小进行调整后重新求解, 如此反复迭代, 直到找出符合所给质量的半径值 R 时为止^[37]。也可以选取其他物理量作为迭代计算的判据, 如描述行星核幔比例的 Fe/Si^[50]。

4.2 行星半径值与其物质成分的关系

图 1 是由模型计算得到的结果^[38], 它给出了行星核、幔, 以及含水量与行星半径值的关系。三角图的每条边代表一个轴, 描绘一个相关变量。顶点处代表此变量占行星总质量的 100%, 三角图给出了在所有可能的物质成分比例下, 行星半径的变化趋势。三角图内的每一点均对应不同的核质量分数(过此点平行左斜边的直线与右斜边相交处的数值)和冰质量分数(过此点平行右斜边的直线与底边相交处的数值)。

对于一个质量确定的行星来说, 存在一个阈值半径。超过这个半径时, 表明这个行星是海

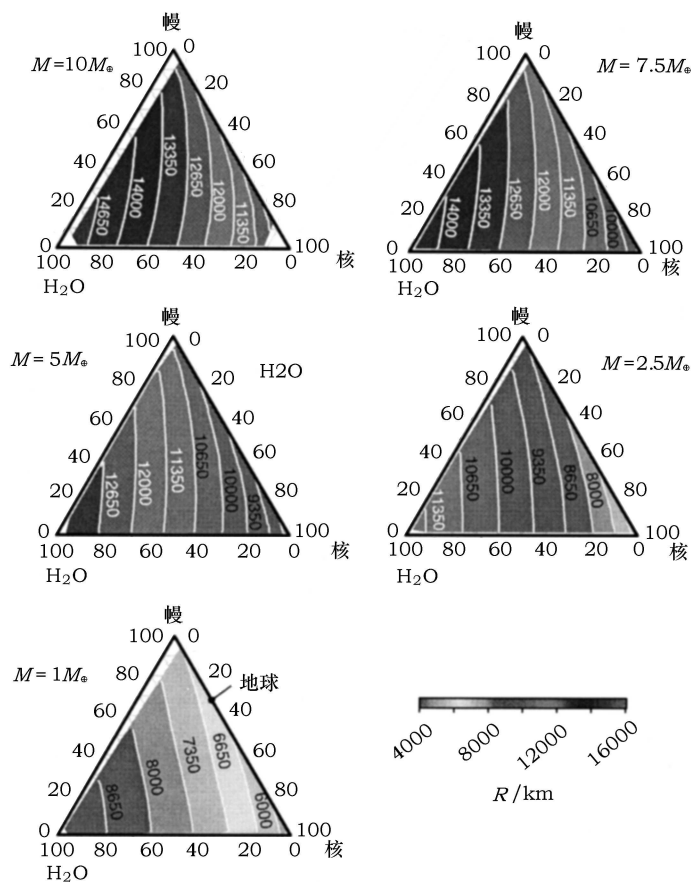


图 1 行星的质量, 半径, 以及物质成分间的关系^[38]

洋行星(含水量 $\geq 10\%$), 不再是纯粹的岩石行星了^[39]。由图可见, 对于质量为 1, 2.5, 5, 7.5 和 $10M_{\oplus}$ 的行星来说, 这个阈值半径分别为 6 600, 8 600, 10 400, 11 600 和 12 200 km。对于一个已经定出质量的系外行星, 如果它的半径超过相应的阈值, 则它很可能是在雪线外形成的, 或者是在演化的后期潮湿星子给它带去了很多水分。

图中描绘了一些有代表性的等半径线, 还可看出, 随着行星幔所占比例的增加, 这些等半径线几乎一直保持平行, 可见行星幔的大小对行星半径值的影响不是很大。例如质量为 $5M_{\oplus}$ 的行星, 行星幔占行星质量的比例从 0% 变化到 85% 时, 伴随行星含水量的调整(从 50% 到 15%), 竟可以产生相同半径的行星(11 350 km)。不过对质量为 $1M_{\oplus}$ 的行星来说则略有不同, 此时行星含水量对行星半径值的影响比较显著, 等半径线看起来更加平行于等含水量线。对于质量为 $10M_{\oplus}$ 的情况, 行星的内部压力很大, 行星含水较多时($>70\%$), 行星的半径值更依赖于行星核的质量分数(CMF), 相反, 在行星核所占的比例较大时($>70\%$), 行星含水量在很大程度上决定了行星半径值。这是因为两者的密度差异较大, 而行星的半径值在一定程度上与行星的平均密度相关。总体说来, 行星的半径值对行星中硅酸盐类物质(行星幔)的多少不是很敏感, 它更依赖于行星中较轻物质(水和冰)与较重物质(行星核中的铁)的比例。

4.3 由模型得出的质量 - 半径关系

根据所得结果, 可以拟合出类地行星质量与半径的幂率关系。一般的幂率关系为^[38]:

$$R_p = (1 + 0.56IMF)R_{\oplus} \left(\frac{M_p}{M_{\oplus}} \right)^{0.262(1-0.138IMF)}, \quad (8)$$

其中 R_p 和 M_p 是类地行星的半径和质量, R_{\oplus} 和 M_{\oplus} 是地球的半径和质量。图 2 描绘了不同 IMF 类地行星的质量半径关系。由图 2 可见, 若地球的含水量达到 50% 的话, 半径将比现在大 26%, 差别较为显著。

所得结果的意义在于: 存在一个可以估计行星整体成分的阈值精度。若是观测误差在这个阈值精度内, 就可以通过质量 - 半径关系来判断行星的物质成分。这个阈值精度对行星半

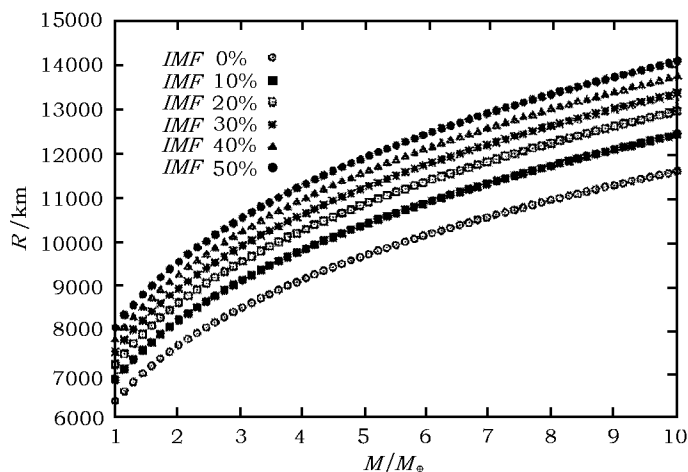


图 2 不同含水量下的行星质量半径关系曲线

径来说是 5%，在行星质量则为 10%。目前正在筹备中的 Kepler 和 HARPS-NEF 项目联合起来可以实现这一精度。

4.4 潮汐效应对类地行星形成的影响

潮汐力是万有引力产生的，起于一个天体对另一天体的引力梯度或天体上各点所受引力的差异。潮汐效应加热类地行星，对它们的形成和演化过程具有重要影响。行星受到的潮汐力在离母星近时影响剧烈，离母星远时微弱，这个摩擦效应能产生可观的内热^[40-42]。不过对于不同的物理结构和轨道特征，潮汐加热的幅度相差甚远。有的能导致全球性的火山活动，有的仅能产生板块运动。Trilling^[43]指出，对那些具有较大偏心率的系外行星来说，潮汐加热的时间尺度一定大于它们所在行星系统的年龄，不然它们的偏心率早在潮汐效应的影响下消失了。因此，这些行星的潮汐加热时间尺度约为数十亿年。

在发现的系外行星中，大多数的轨道偏心率大于 0.1，甚至接近 1^[44]。对于这样的行星，潮汐作用的影响十分重要^[45,46]。另外，潮汐效应也与行星的质量有关，潮汐效应对超级地球的影响同样不容忽视。可以预计，多数超级地球上遍布火山活动。潮汐加热的公式为^[47]：

$$H = \frac{63}{4} \frac{(GM_*)^{3/2} M_* R_P^5}{Q_P} a^{-15/2} e^2, \quad (9)$$

其中 G 是万有引力常数， M_* 是母恒星质量， R_P 是行星半径， $Q'_P = 3Q_P/2k$ 。 Q_P 和 k 分别是潮汐耗散参数和 Love 数。加热率随着时间变化，与行星的轨道演化相联系。估计这些系外行星在形成初期离母星比较远，具有更大的轨道半长径，潮汐力也不大。但潮汐效应使行星的半长径不断减小，潮汐力随之增加，不过越来越强的潮汐效应会使行星轨道趋于圆形，最终结束潮汐加热的过程。即存在两个因素竞争的机制：逐渐减小的半长径 a 会加剧潮汐效应，逐渐衰减的轨道偏心率 e 却在减小潮汐效应，这两个因素的相对强度及它们随时间的变化就决定了行星的演化过程。计算表明，在早期， a 的大小起着决定性的作用，到晚期则是 e 在起决定性作用^[47]。一般情况下，加热率是开始时逐渐增加，随后逐渐减小。

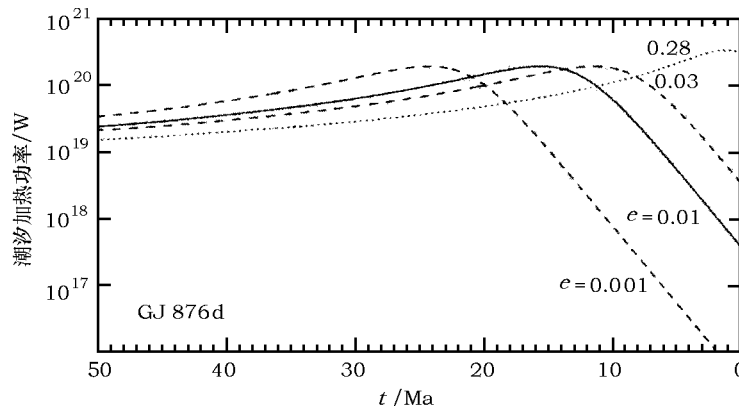


图3 GJ876 d 的潮汐加热功率变化^[47]

以 GJ876 d 为例，假设 Q_P 为 100， k 为 0.3(对应岩石行星的情况^[48,49])，测得它的轨道偏心率 e 为 0。考虑 0.001、0.01、0.03、0.28 四种情况(取 0.28 作为 e 可能达到的最大

值^[3]), 设 $R_p \approx 10\ 200\ \text{km}^{[50]}$, 基于这 4 个当前偏心率, 不考虑行星之间的影响, 图 3 给出了由式 (9) 算出的潮汐加热历史。可以看出, 在四种情形下, 加热功率在数千万年的时间里均超过 $10^{19}\ \text{W}$, 最高可达 $10^{20}\ \text{W}$ 。不同当前偏心率的主要区别是加热功率到达峰值的时间 (均在距今 300 万年以内)。由结果可知, 潮汐加热的影响是非常可观的。同样, 对于 G1581 c 的类似计算表明, 潮汐加热能使它产生 100 倍于地球的表面热流量^[51], 这暗示了 G1581 c 上极强的地质活动性。当然, 一些长期项的作用以及轨道共振会影响这一过程, 但由结果可知, 潮汐效应在系外类地行星的物理演化过程中不容忽视, 甚至起着主宰作用。

5 类地行星的大气成分

5.1 类地行星大气的形成方式及其物质来源

行星大气的形成可能有三种途径: (1) 从原始星云中捕获气体; (2) 吸积过程中的气体排放; (3) 后续板块活动中的气体排放。其中, 途径 (1) 是气态巨行星获得气体的关键过程, 还不确定它对类地行星的大气形成是否同样重要。因为低质量行星在早期无捕获原始星云中的气体的能力, 直到行星吸积的最终阶段才具有这种能力, 但这时原来在原始星云中的气体估计也大都损失掉了。因此, 人们主要还是关注类地行星在吸积过程中排出的气体量。这与组成行星的矿物成分密切相关。只要假设类地行星的矿物组成与地球相似, 就可以由此估计出其内部物质蕴含的挥发物总量。虽然计算是基于简单的矿物模型, 不过可以据此对行星的大气成分有个初步的了解。

落在地球上的大量陨石是判断行星物质组成, 进行相关计算的依据。在这些陨石中, 球粒状陨石所经历的演化最少, 属于最原始的一类。球粒状陨石中含有大量的硅酸盐成分。在球粒状陨石中, 水是以 OH 的形式存在的, 当矿物熔融后 OH 会以水的形式释放出来。碳质球粒状陨石中含水最高可达其质量的 20%。含水多的球粒状陨石很少含铁甚至不含铁, 而含水少的球粒状陨石能含有最高达质量 50% 的铁或镍成分^[52]。

另一种在行星中普遍存在的陨石是非球粒状陨石。它们普遍缺少金属铁, 被认为是星子分异形成金属行星核与硅酸岩行星幔后的硅酸盐残余, 是通过后期的碰撞到达太空中的。非球粒状陨石含水很少, 最高也只是其质量的 3%, 有些甚至不含水^[52]。

类地行星被认为是由类似球粒状陨石的物质吸积而成。现代数值模拟表明, 行星胚胎在吸积形成行星的过程中于径向上是移动的, 所以最终的行星混合了内、外原行星盘的物质, 行星总的物质成分很广泛^[53-55]。但对类地行星整体的物质组成来说, 存在两种极端的矿物种类: 一种是无水的铁类陨石; 一种是由金属铁、硅酸盐再混合一些外行星盘的挥发物与冰组成。这是用来建立模型并分析类地行星大气种类的基础。

5.2 四种不同的初始条件及其模型

根据不同的矿物成分, Elkins 把可能的情况分为两类: 第一类是行星由原始的球粒状陨石吸积而成, 行星中的水和金属铁发生化学反应, 生成氢气; 第二类是行星已经分异成核, 类似非球粒状陨石成分的地幔物质与大气发生反应, 金属行星核不参与反应^[56]。每类情况又分成两种: 一是只有行星形成后的最初物质; 一是除了最初物质外, 还有附加的水。因此, 共有 4 个模型:

Model I: 行星只含有最初物质: 球粒状陨石成分的物质吸积形成行星, 然后水与金属铁发生氧化反应直至水全部耗尽, 反应的产物是氢气。少数情况下, 可能在水耗尽之前, 金属已全部被氧化了, 这样水汽也会排放到大气中。

Model II: 行星最初物质以及附加的水: 基本过程同 Model I 一样, 只是因为附加的水参与反应, 所有的金属铁都能被氧化。

Model III: 行星只含有分异成核后的物质: 非球粒状陨石被吸积到已经形成行星核的原行星上。假设此时的硅酸盐行星幔处于完全熔融的状态(岩浆海洋), 随着行星幔的固化, 行星上的水分别进入行星幔矿物和逐渐增长的行星大气里。

Model IV: 行星分化成核后的物质以及附加的水。非球粒状陨石和挥发物都被吸积到行星上。大致过程和 Model III 相似, 只是在岩浆海洋阶段要考虑附加的水分。

在 Model I 与 Model II 的情况下, 经历的化学过程只是水和金属铁的反应。所以只需考虑参与反应的水的总量, 就可得出排放的氢气和水汽了。所以, 只需把 13 种球粒状陨石的成分进行平均, 再分成硅酸盐、金属铁和水三个部分, 然后分别进行计算就可以了。

Model III 与 Model IV 的情况则复杂一些。假定行星的整体结构与地球、金星、火星类似: 铁质行星核的半径达到行星半径的一半, 外面包以硅酸盐行星幔, 行星幔矿物中蕴含一些挥发物(主要成分是水)。据此构建行星处于岩浆海洋阶段的情形。岩浆海洋的凝结过程是从底部逐渐向上, 这时, 超过岩浆饱和度的挥发物排放到大气中^[57], 在平衡状态局部压力的作用下, 挥发物分成存在于大气以及岩浆海洋里的两部分。把大气中水和二氧化碳的局部压力写成在岩浆海洋中溶解的水和二氧化碳总量的函数, 然后根据由实验得来的分布系数和饱和度, 算出处于平衡状态的岩浆海洋在不同压力下析出的矿物。不同矿物从硅酸盐液体中吸取的 OH 比率不同, 行星内部的压力范围就决定了保留在岩石内部的水含量, 而不是排放到大气中的水含量。

5.3 四种模型对应的初始大气成分

在 Model I 的情况下, 产生的大气为水和氢的混合气体, 或者单独由氢构成。这依赖于行星最初的含铁比例。如果行星中所含的金属铁较少, 全被氧化掉了以至不能形成行星核, 行星大气将由水和氢气混合而成。相反, 含铁多的行星含水相应较少, 行星有足够多的铁剩余以形成金属行星核。所有的水都会在氧化反应中被分解掉, 行星大气将由氢气构成。对于 Model II 的情况, 由于有附加的水, 所有的金属铁都会被氧化, 最多能产生占行星质量 6% 的氢气。在有些球粒状陨石中, 除了水和氢以外, 还包含大量的碳。考虑所有的碳都挥发到大气中的情况, 对应不同的球粒状陨石种类, 大气中碳的成分可在 0.1%~5% 的行星质量之间^[52]。图 4 为 Model I、Model II 情况下行星核质量比例与大气成分的关系。图中横坐标表示行星最初金属铁核的质量比例, 两个纵坐标分别表示行星所排出的水和氢的质量分数。阴影部分表示火星、金星和地球对应的情况。

在 Model III 和 Model IV 的情况下, 随着岩浆海洋的演化, 挥发物分别进入行星幔和大气中。这一过程依赖于压力和行星幔的矿物成分, 所以必须考虑行星的质量范围。因为岩石结晶时保留的水分与硅酸盐液体的含水量有关, 而后者是随着大气压的增加而增加, 大气压又随着行星质量的增加而增加。因此, 质量越大的行星, 其行星幔矿物中的水分越多。假设一颗行星的物质成分与太阳系类地行星相似, 只有位于非球粒状陨石中的水分,

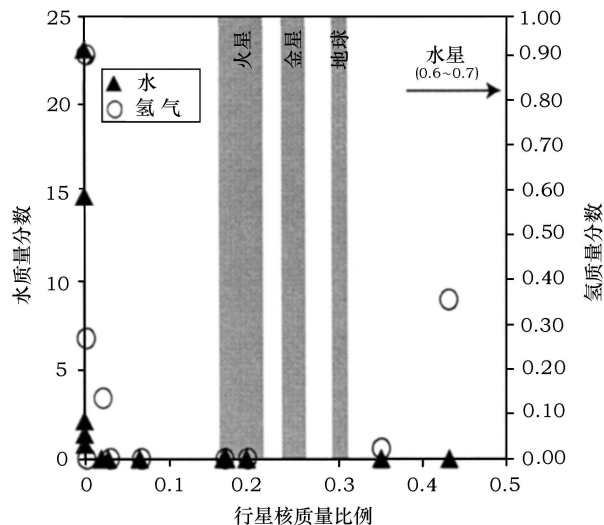


图 4 Model I、Model II 情况下行星核质量比例与大气成分的关系 [56]

若是它的质量为 $10M_{\oplus}$, 大约能排出 $0.2M_{\oplus}$ 的水汽。在非球粒状陨石中, 含水最多的也只占其质量的 3%, 通常情况下连 3% 的一半都不到, 因此用含水 1% 与含水 0.5% 的岩浆海洋代表 Model III 的情况。从图 4 可以看出, 这种情况下行星大气中的含水量也要比 Model I 小很多。即便如此, 也足以解释地球的情况了。行星形成的吸积模型表明, 富含挥发物的物质可以从外太阳系向内部迁移。据此, 可用含水 5% 和 10% 的岩浆海洋代表有附加水的情况。如图 5 所示, 对于一个质量为 $10M_{\oplus}$ 、最初含水 5% 的行星, 能排出 $0.3M_{\oplus}$ 的水。可见, 即使是附加有限的挥发物, 岩石行星也能形成很厚的水汽大气层。另外, 在岩浆海洋的固化过程中, 约 70%~97% 的挥发物被释放到大气中, 剩余的则保留在硅酸盐矿物里。碳排到大气中的比例要远高于水, 非球粒状陨石中碳的成分占质量的 0~3%, 大多数位于 0.01% 附近。与水相比, 碳类成分很难进入行星幔的物质中, 因此将以很快的速度排到大气里。

总之, 基于不同的陨石种类, 超级地球的大气成分是多种多样的。对应不同的模型, 最初

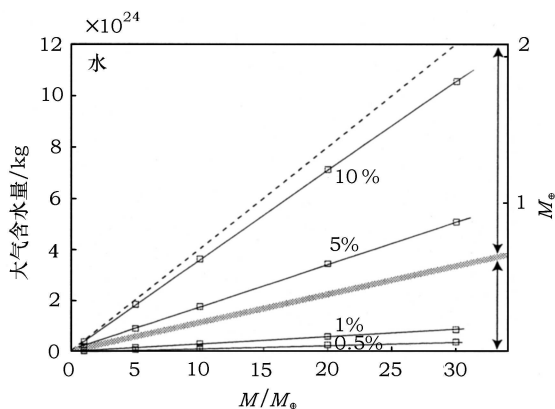


图 5 Model III、Model IV 情况下大气含水量与行星质量之间的关系 [56]

的大气质量可以占行星总质量的 1%~20%。行星大气的最初成分可能由碳、氢或水主宰,这取决于它吸积水分的多少和是否经历过岩浆海洋阶段。

需要注意的是,这里讨论的大气模型是由特定的陨石种类得出的,不同的矿物种类产生的结果相差很大。行星在形成过程中吸积了不同半径处的物质,它的成分必定是很复杂的。另外,仅凭所获得的陨石库不能准确地描述太阳系早期的物质成分,也不能很好地表示一些金属丰度较高的行星盘。对地球和火星的拟合也表明,它们是由多种陨石成分混合而成。因此,岩石行星最初的大气成分可能是上述某些结果的综合,甚至还会出现在所考虑的范围之外的成分。

行星最终的大气成分还依赖于一些其他的因素,它们分别是:大气逃逸、分子的光解作用、化学动力学(化学反应的速率)等。如果氢全部逃逸出去,行星将形成像金星那样由 CO_2 主宰的大气,可能也含有一些 H_2O 成分。在行星的引力能够束缚住氢的情况,若行星大气层内的温度和压力比较低,大气中 H, C, O 和 N 的主要形式将是 H_2 , CO , H_2O 和 N_2 ; 若大气层内压力和温度较高, H, C, O 和 N 的主要形式是 H_2 , H_2O , CH_4 和 NH_3 , 在更高的大气温度(数百 K)下, CO 也能够稳定存在。

6 讨论和展望

可以看出,本文中所有的计算均依赖于各种假设。比如在探求系外行星质量半径关系时,假设它们和地球一样经过了热演化、分异,形成了各个层圈,而且各个层圈的成分也与地球相似,但不能肯定这一过程的必然存在。在 GJ876 d 的情形,潮汐加热如此显著,以至它不大可能是一个固态的岩石行星,这样就不再符合本文中的模型了。另外,类地行星可能完全没有行星核,如行星完全可以由不含铁的球粒状陨石吸积而成,也可以像大气模型中的第一类情况那样,金属铁完全被氧化掉了并释放出氢气。由于无核行星与有核行星在内部密度结构方面相差很大^[59],并不能用文中介绍的质量半径去描述。

另一方面,描述行星内部压力、密度和温度的状态方程只是通过实验得到经验公式,只在地球内部的压力和温度范围内和测量结果相符;而且求解状态方程需要一系列参数,其中一些是依赖于矿物成分的,或者只是运用了根据 PREM 拟合得到的数值。而超级地球内部的压力和温度远高于地球,目前受实验条件所限,还不能得到超高温高压下的状态方程,所以,把地球的状态方程直接应用到超级地球内部是否恰当?一些参数值是否应该有所变化?这些类似的问题尚难以回答。另外,也不能排除行星真正的演化历史与本文所描述的模型并不相符的可能。

对类地行星的探测带来了许多新发现。在将来的研究中,主要还是根据所发现行星的实际情况,特别是对那些新探测到的行星种类进行分析。如它们经历了怎样的演化过程,所处环境有哪些特点等。然后结合观测资料,推测其内部结构及物质成分,或者对采用的模型进行修正。另外,根据掩星时得到的光谱,还有机会窥探行星的大气成分,看其是否具有形成生命的环境。人们期待在太阳系外找到适宜生命存在的环境,搜寻系外类地行星也就成为当前的热点之一,被发现的超级地球也在逐渐增加^[60]。当前国际上有很多相关的探测计划,例如基于掩星法探测的 COROT, Kepler, MOST 等空间计划、探测行

星大气的 Darwin 计划等^[61,62]。这些项目都具有很高的精度, 它们的成功实施将会有大量的超级地球被发现。就 Kepler 来说, 它可以探测到质量为 $1M_{\oplus}$ 的行星的掩星现象, 预计它能探测到 1 000 颗左右的类地行星。可以预期, 在未来几年中对系外行星的研究将进入快速发展的时期。

致谢: 非常感谢审稿人的细致审阅及有意义的建议。

参考文献:

- [1] 张 牛, 季江徽. 天文学进展, 2009, 27(1): 14
- [2] 刘玉娟, 赵 刚. 天文学进展, 2005, 23(3): 224
- [3] Rivera E J, et al. ApJ, 2005, 634: 625
- [4] Beaulier J P, et al. Nature, 2005, 439: 437
- [5] Lovis C M, et al. Nature, 2006, 441: 305
- [6] Mayor M, Udry S, Lovis C, et al. A&A, 2008, 451: 345
- [7] Mayor M, Bonfils X, Forveille Th, et al. A&A, 2009, preprint[arXiv:0906.2780v1]
- [8] Borde P, Rouan D, Leger A. A&A, 2003, 405: 1137
- [9] Ida S, Lin D. ApJ, 2004, 604: 413
- [10] Hayashi C. Prog. Theor. Phys. Suppl., 1981, 70: 35
- [11] Wetherill G. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 1990, 18: 205
- [12] Beckwith S, Sargent A I. Nature, 1996, 383: 139
- [13] Zhang N, Ji J H. Science in China, Series G, 2009, 52(5): 794
- [14] Schubert G, Anderson J D, Travis B J, et al. Icarus, 2007, 188: 345
- [15] Anderson J D, Sjogren W L, Schubert G. Science, 1996, 272: 709
- [16] Anderson J D, Jacobson R A, McElrath T P, et al. Icarus, 2001, 153: 157
- [17] Guillot T, Showman A P. A&A, 2002, 385: 156
- [18] Adams E R, Seager S, Elkins-Tanton L. AJ, 2008, 673: 1160
- [19] Mizuno H. Prog. Theor. Phys. Suppl., 1980, 64: 544
- [20] Stevenson D. Planet.Space Sci, 1982, 30: 755
- [21] Bodenheimer P, Pollack J. Icarus, 1986, 67: 391
- [22] Ikoma M, Emori H, Nakazawa K. ApJ, 2000, 537: 1013
- [23] Raymond S, Quinn T, Lunine J. Icarus, 2004, 168: 1
- [24] Youdin A N, Shu F H. ApJ, 2002, 580: 494
- [25] Inaba S, Wetherill G W, Ikoma M. Icarus, 2003, 166: 46
- [26] Chambers J E, Wetherill G W. Icarus, 1998, 136: 304
- [27] Weidenschilling S J. Icarus, 1997, 290: 306
- [28] Wetherill G W, Stewart G R. Icarus, 1989, 77: 330
- [29] Kokubo E, Icarus Ida S. 1996, 123: 191
- [30] Wetherill G W, G R Stewart. Icarus, 1993, 190: 209
- [31] 胡中为, 徐伟彪. 行星科学, 北京: 科学出版社, 2008: 463
- [32] Tanaka H, Takeuchi T, Ward W R. ApJ, 2002, 565:1257
- [33] Gladman B. Icarus, 1993, 106: 247
- [34] Rasio F A, Ford E B. Science, 1996, 274: 954
- [35] Birch F J. Geophys. Res., 1952, 57: 227
- [36] Dziewonski A M, Anderson D L. Phys. Earth Planet. Interior, 1981, 25: 297
- [37] Valencia D, O'Connell R J, Sasselov D D. Icarus, 2006, 181: 545
- [38] Valencia D, Sasselov D D, O'Connell R J. ApJ, 2007, 665: 1413

- [39] Valencia D, Sasselov D D, O'Connell R J. *ApJ*, 2007, 656: 545
- [40] Bodenheimer P, et al. *ApJ*, 2003, 592: 555
- [41] Winn J, et al. *ApJ*, 2007, 133: 11
- [42] Winn J, et al. *ApJ*, 2007, 657: 1098
- [43] Trilling D E. *ApJ*, 2000, 537: L61
- [44] Zhou J L, Lin D N C, Sun Y S. *ApJ*, 2007, 666: 423
- [45] Marcy G, et al. *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 2005, 158: 24
- [46] Rasio F A, et al. *ApJ*, 1996, 470: 1187
- [47] Jackson B, Greenberg R, Barnes R. *ApJ*, 2008, 678: 1396
- [48] Dickey J O, et al. *Science*, 1994, 265: 482
- [49] Mardling R A, Lin D N C. *ApJ*, 2002, 573: 829
- [50] Sotin C, et al. *Icarus*, 2007, 191: 337
- [51] Butler R P, et al. *ApJ*, 2006, 646: 505
- [52] Jarosewich E. *Meteor. Plan. Sci.*, 1990, 25: 323
- [53] Weidenschilling S J. *Astrophys. Space Sci.*, 1977, 51: 153
- [54] Kokubo E, Ida S. *Icarus*, 2000, 143: 15
- [55] Raymond S N, Quinn T, Lunine J I. *Icarus*, 2006, 183: 265
- [56] Elkins-Tanton L T, Seager S. *ApJ*, 2008, 685: 1237
- [57] Elkins-Tanton L T, Parmentier E M, et al. *Meteoritics Planet. Sci.*, 2003, 38: 1753
- [58] Burbine T H, O'Brien K M. *Meteoritics Planet. Sci.*, 2004, 39: 667
- [59] Elkins-Tanton L T, Seager S. *ApJ*, 2008, 688: 628
- [60] <http://exoplanet.eu/catalog.php>, 2009
- [61] http://planetquest.jpl.nasa.gov/atlas/atlas_search.cfm, 2009
- [62] http://planetquest.jpl.nasa.gov/missions/missions_index.cfm, 2009

Internal Structure and Atmospheric Composition of Super-Earths

JIN Sheng^{1,2}, JI Jiang-hui¹

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To date, more than 340 extrasolar planets have been discovered. These planets exhibit a plethora of diversity and have already changed our understanding of planet formation. The existence of massive terrestrial planets is predicted by planetary formation theory. Such planets are also called “Super-Earth” due to their masses ranging from 1 to $10M_{\oplus}$. Due to the improvements in detection methods, they are now explored through radial velocity technique. Such planets do not exist in our solar system, so they are introducing a novel physical regime that has never been investigated before. In this paper, we introduce a method by seeking the interior of Super-Earths nowadays. Based on the internal structure of Earth, the model may divide

the Super-Earth planets' internal into several shells according to their composition. Chosen an equation of state (EOS) in relation to density, pressure, and temperature within each layer, the numerical model can solve the standard differential equations for density, pressure, mass, and gravity structure under hydrostatic equilibrium. Then we present the latest results of current research and depict the mass-radius of the Super-Earth planets. In addition, we also discuss tidal heating effect on the terrestrial planet, i.e., GJ 876d. Planets may obtain atmospheres from three main sources: capture from the nebula, degassing during accretion, and later degassing from tectonic processes. Low-mass terrestrial planets are unable to capture and retain nebula gases, so researchers focus on the range of atmospheric masses possible form degassing terrestrial-analog materials in the planetary accretion process. The Atmospheric mass and composition for terrestrial planets is closely related to the composition of a rocky planet. From the library of meteorites that have fallen to Earth, we can build up several models corresponding to various plausible starting compositions for planetary accretion and degassing. Herein we give a detailed description of each model and major results. These outcomes show that degassing alone can create a wide range of masses of planetary atmospheres. The initial atmospheric mass could range from 1% of the planet's total mass or less to a few percent and even up to over 20% in extreme cases. The initial atmosphere may be dominated by carbon compounds, hydrogen, or water, depending on the composition of accreted materials and the presence or absence of a magma ocean.

Key words: extrasolar planet; terrestrial planets; equation of state; interiors; atmosphere