



论文

可居住行星 HD40307g 的大气压和二氧化碳含量

田丰^{①②*}

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

② 清华大学地球系统科学研究中心地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084

* E-mail: tianfengCO@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013-02-01; 接受日期: 2013-05-15; 网络版发表日期: 2013-11-25

国家自然科学基金项目(批准号: 41175039/D0504)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KJCX2-YW-T27)和 Templeton 基金会项目资助

摘要 HD40307g 是人们发现的距地球最近的可居住行星, 其主星类型为 K2V, 类似于太阳. 如果其存在获得确认, 将是未来人类探测系外生命计划的主要目标之一. 尽管通过 HD40307g 收到的恒星辐射知道其大气应该比地球大气浓厚, 但具体多浓厚尚不得而知, 更多关于 HD40307g 大气的信息对探测 HD40307g 上可能存在的生命是有用的. 利用一维辐射-对流模式研究 HD40307g 的大气压和二氧化碳含量对其表面温度的影响, 发现下列大气压和二氧化碳含量的组合可以使 HD40307g 的全球平均表面温度与今天地球一样(288 K): (1) 10-bar+3% CO₂; (2) 5-bar+10% CO₂; (3) 3-bar+30% CO₂.

关键词系外行星大气
系外行星气候
系外生命
宜居带
宜居行星

截至 2013 年 4 月, 人们已发现 10 颗可能的可居住行星(胡永云, 2012), 其中大多数是位于质量远小于太阳的红矮星周围, 很可能处于潮汐锁相状态, 其气候状态和大气环流与地球可能有较大不同. HD40307g 的特殊性在于其主星是类似于太阳的 K 型恒星. HD40307g 的最小质量为 7 个地球质量, 所接受的恒星辐射为地球从太阳接受辐射的 62%(Tuomi 等, 2013). 由于 HD40307g 是迄今为止所发现的位置最接近太阳并且主星特性最类似于太阳的可居住系外行星, 如果其存在得到确认, 它将是未来系外行星生命探测计划的主要目标之一, 因此我们希望了解更多的 HD40307g 大气的信息.

太阳演化理论(Gough, 1981; Gilliland, 1989)和对类日恒星的观测(Wood 等, 2005)告诉我们, 43 亿年前和 28 亿年前的太阳比今天的太阳分别暗 25% 和 20%

左右. 如果早期地球大气的大气压和成分与今天地球大气相同的话, 早期地球的全球平均表面温度应该在距今 20 亿年前就低于冰点(Kasting 等, 1988). 因此, 需要较强的温室效应和较低的地表和大气反照率才能解决这一暗弱太阳问题(Rosing 等, 2010). 与此同理, 接受恒星辐射小于今天地球水平的 HD40307g 的温室效应必须比今天地球的温室效应更强才能维持与今天地球相似的气候条件. 对另一个可能的可居住行星 GJ581d 的研究表明当 CO₂ 分压达到 10 个大气压时, 其地表温度可达 292 K(Hu 和 Ding, 2011). 其他学者使用不同的模式也得到了类似的结果(Wordsworth 等, 2010; von Paris 等, 2010). 本文所关注的问题是, 需要多高的大气压和二氧化碳浓度才能使 HD40307g 的表面温度和地球相同.

如果 HD40307g 的平均密度与地球相同, 其重力

中文引用格式: 田丰. 可居住行星 HD40307g 的大气压和二氧化碳含量. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 2099-2102

英文引用格式: Tian F. Atmospheric pressure and CO₂ concentration of potential habitable planet HD40307g. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4757-4

加速度应该是地球的两倍. 地球大气含有 0.7 大气压的氮气, 而其内部可能含有多达 2 大气压的氮, 这些氮可能是通过生物的固氮作用从大气圈转化到岩石圈的(Goldblatt 等, 2009). 如果 HD40307g 的成分和生物过程与地球类似的话, 其大气中可能的氮气压强是在 5~10 个大气压. 考虑以上这些基本参数, 本文的计算包括了 3, 5 和 10 个大气压的不同情景, 每种情景都对不同二氧化碳含量进行了表面温度计算.

1 模式描述

本工作利用了 Tian 等(2010)中所描述的 1 维辐射-对流模式. 目前还不知道 HD40307g 大气中是否包含氧气或臭氧, 因此模式大气只包含了氮气、二氧化碳和水汽三种成分. 模式在表面大气压和 10^{-3} 大气压之间划分了 25 层, 并利用二流散射近似方法(Toon 等, 1989)计算源于太阳的短波和源于地面/大气的长波辐射在大气中的吸收、散射和传输. 模式考虑了大气压和成分改变(二氧化碳浓度)对瑞利散射的影响. 对大气中的主要温室气体(二氧化碳和水汽)该模式使用了相关 k 方法, 模式所包括的水汽和二氧化碳的红外波段相关 k 参数与 Mischna 等(2000)中的一致. 平流层及以上高度的温度由辐射平衡决定. HD40307g 的更大的重力加速度和大气成分改变对气体比热容的影响均考虑在对流层大气温度递减率的计算中.

本文所使用的模式包括水汽, 其含量设定使用了 Manabe 和 Wetherald 的标准相对湿度参数化方案(Manabe 和 Wetherald, 1967). 在该方案中, 大气相对湿度与大气压成正比且不低于 8%(今天地球大气 15 公里高度的相对湿度), 地表相对湿度固定为 77%. 这一参数化方案适用于本文所研究的类似今天地球的表面温度情况.

利用该模式对今天地球进行的计算可以在 1 个大气压, 二氧化碳浓度 350 ppmv (1 ppmv=1 $\mu\text{L/L}$)和表面反照率为 0.23 的情景下得到 288 K 的全球平均温度(Haqq-Misra 等, 2008). 这一反照率大于今天地球的实际表面反照率, 因此可以认为是部分包含了云对辐射的影响(Haqq-Misra 等, 2008). 对于 HD40307g 的计算, 我们保持此表面反照率不变, 因此可以较好地反映不同表面温度所对应的大气压和二氧化碳含量的变化. 在下面一节中我们还讨论了较低的表面反照率对结果的影响.

2 讨论和结果

图 1 显示了在 3 种大气情景中(3, 5 和 10 个大气压)HD40307g 模式得到的接近现在地球情景的大气温度廓线. 二氧化碳含量在这 3 个大气情景中分别是 30%, 10%和 3%. 对流层中的温度廓线在这 3 个大气情景中是相同的, 但对流层顶位于不超过 5 km 的高度. 比较而言, 今天地球的对流层顶在 15 km 左右. 因为 HD40307g 的重力是地球的两倍, 其大气密度和压强随高度的下降均快于地球大气的密度和压强(大气标高为地球的 1/2), 因此可以在较低的高度达到辐射平衡. 同样的道理, HD40307g 的干绝热温度递减率是地球的两倍, 即使考虑水汽凝结所带来的潜热释放, 其对流层温度随高度的下降也快于地球对流层的温度下降.

模式计算得到的 HD40307g 平流层温度(160 K 左右)比地球平流层温度(200 K)低, 部分原因是 HD40307g 从其恒星接受的辐射仅为地球从太阳接受辐射的 62%, 部分原因是 HD40307g 的浓厚大气带来比地球大气强得多的瑞利散射, 增大了行星反照率(在 10, 5 和 3 个大气压情景中分别为 0.33, 0.29 和 0.26). 图 1 中较高的大气压对应的平流层温度较低, 这与较厚大气中较强的瑞利散射的效应是一致的.

全球平均表面温度与模式大气压和二氧化碳含量的关系可见图 2. 今天地球的全球平均温度由水平蓝线标出. 为达到同一表面温度所需的大气二氧化碳浓度随大气压增高而减少, 这是由各种温室气体

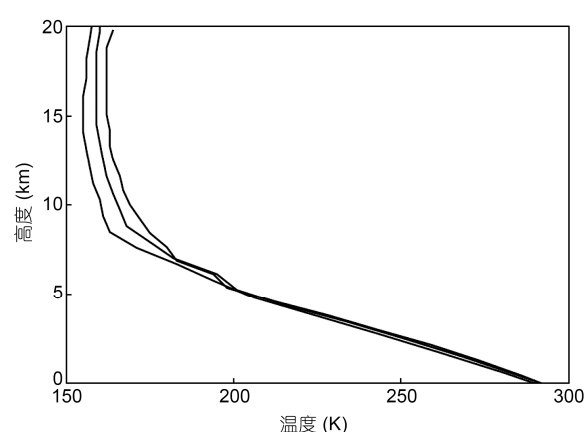


图 1 表面温度类似于今天地球的 HD40307g 大气温度廓线
大气压和二氧化碳含量分别为: (1) 10-bar+3% CO₂(左边曲线); (2) 5-bar+10% CO₂(中间曲线); (3) 3-bar+30% CO₂(右边曲线)

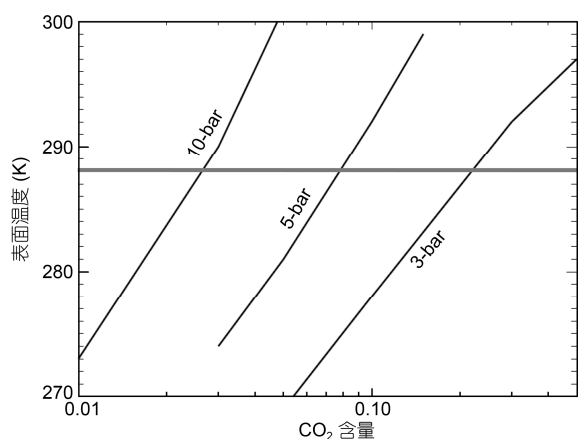


图2 HD40307g 大气压、二氧化碳浓度与其全球平均表面温度的关系

水平蓝线代表今天地球的全球平均表面温度

吸收系数的压致增宽效应导致的。可以看到, 如果 HD40307g 的全球平均表面温度是 273 K(对应的冰雪覆盖率将比今天地球的大, 具体数值需要 3 维模式计算), 在 3, 5 和 10 大气压情景下其所需的大气二氧化碳浓度将分别是 7%, 3% 和 1%。这些二氧化碳浓度虽然比维持 288 K 全球平均表面温度的情景要少, 仍然远远高于今天和大部分已知地球演化历史中的大气二氧化碳浓度。因此, HD40307g 的大气不仅应该比地球大气浓厚, 而且含有更高浓度的二氧化碳。

模式计算的结果表明 HD40307g 的大气的主要成份可以是氮气而非二氧化碳, 这与另一颗可居住系外行星 GJ581d 不同。GJ581d 的大气必须是二氧化碳才能使其表面温度在 7 个大气压的情况下维持在 273 K(Hu 和 Ding, 2011)。二氧化碳的凝结可能导致其大气含量下降, 从而进一步降低温度, 促进二氧化碳凝结。这一正反馈对 GJ581d 类型的行星的可居住性可能有比较重要的影响, 也是需要用 3 维大气模式计算的。相比而言, HD40307g 大气与今天地球大气有更好的可比性。

Pierrehumbert(2011)指出在高于 5 个大气压的情形下氮气的碰撞诱发吸收(collision-induced absorption)可能对类地行星的气候有一定影响。Pierrehumbert 和 Gaidos(2011)考虑了纯氢气的大气中氢气碰撞诱发吸收对系外行星表面温度的影响。Wordsworth 和 Pierrehumbert(2013)针对 1~3 个大气压和不同氢气含量的情形对早期地球气候做了计算, 发现在这些情形下 N_2-H_2 的碰撞诱发吸收可能提供较多的温室效

应, 从而有助于解决暗弱太阳问题。相比之下, N_2-N_2 或 H_2-H_2 的碰撞诱发吸收对维持早期地球表面温度在冰点以上均不产生较大贡献。 N_2-H_2 的碰撞诱发吸收对维持温暖和湿润的早期地球的贡献在生命产生之后可能有较大的减弱, 原因是早期生命(产甲烷菌 methanogens)可能会比较有效地将氢气转化为甲烷, 从而摧毁 N_2-H_2 温室效应(Pierrehumbert 和 Gaidos, 2011; Wordsworth 和 Pierrehumbert, 2013)。同理如果 HD40307g 有生命的话, 其大气中的氢气含量可能不足以维持稳定的温暖湿润气候。如果这一理论成立的话, 本文的计算(没有包括上述碰撞诱发吸收)所给出的在 HD40307g 上维持类似地球表面温度的大气压和二氧化碳含量将是适当的。关于产甲烷菌对早期地球或系外行星大气中氢气含量的限制学界尚有争议, 另一个问题是氢气的大气逃逸效率问题, 这些都需要未来更多的研究工作。

如果能进行有氧光合作用的生命在 HD40307g 上繁盛生长, 该行星的大气可能含有氧气和臭氧。平流层臭氧吸收太阳紫外辐射, 造成平流层增温并在一定程度上保护地球表面生命。对流层臭氧对表面有一定增温作用, 但其效能随时间和地点而变化, 因此就全球而言氧气和臭氧在 HD40307g 大气中的形成不会对其大气的浓厚程度有太大影响。

为了判断较低的表面反照率对 HD40307g 大气性质的影响, 我们降低模式中 HD40307g 的表面反照率至 0.1。在 10 个大气压的情景中, 1%, 2% 和 3% 的大气二氧化碳浓度分别给出了 282, 293 和 300 K 的表面温度——维持今天地球全球平均表面温度所需的大气二氧化碳浓度从 3%(表面反照率为 0.23)降至略低于 2%(表面反照率为 0.1)。这一计算结果支持我们关于 HD40307g 大气二氧化碳含量高于地球大气的结论。

HD40307g 的浓厚大气对其大气中的物理过程有重要影响。更大的大气质量意味着大气从赤道向极区运输能量的能力更强, 因此 HD40307g 的纬向表面温度梯度应该较小, 极区气候可能更温暖, 哈德雷环流可能在一定程度上受到抑制。比较高的极区温度也有助于减少甚至消除 HD40307g 的极区冰盖, 因此减小全球表面反照率。HD40307g 的浓厚大气还可能影响该行星的降雨。雨滴的最大下落速度正比于 $g^{0.25} \rho^{-0.5}$ (Som 等, 2012), 这里 g 是重力加速度, ρ 是大气质量密度。如果 HD40307g 的大气压是 10 个大气压, 雨滴的最大下落速度应该是地球上雨滴下落速

度的 1/3, 该行星上的最大雨滴也可能比地球的小. HD40307g 的高二氧化碳浓度可能意味着该行星上的风化速率比地球快, 因此该行星的山脉高度可能比地球低. HD40307g 的强引力场也会使该行星的山脉高度比地球低.

HD40307g 的浓厚大气还可能对该行星的生命产生一些影响. 比如: 有研究认为地球上昆虫的最大体积是受到大气氧气分压限制的(Harrison 等, 2010). 同样的氧气含量在更浓厚的大气中对应更高的氧气分压, 因此 HD40307g 上有可能有体型更大的昆虫. 另一方面, HD40307g 上较高的二氧化碳含量应该减少其海洋的 pH(酸化), 从而可能使依赖于碳酸钙外骨骼的海洋生物的出现和发育受到一定阻碍.

最后我们希望强调的是本工作所得到的具体的 HD40307g 的大气压和二氧化碳浓度都不是完全精确的. 行星本身是一个复杂系统, 除了恒星辐射和温室效应, 大气圈与其他圈层相互作用、共同演化. 另外其他温室气体也可能有助于提升行星表面温度. 但我们关于 HD40307g 的大气比地球浓厚并且含有更多的二氧化碳的结论应该是可靠的. 这一结论也适用于最近美国开普勒望远镜发现的宜居系外行星 Kepler-62f(Borucki 等, 2013). 因为距离地球过远(1200 光年), 关于 Kepler-62f 的可居住性和是否有生命存在的问题可能很长时间无法得到解答. 与此相对应, 未来 10 年内对 HD40307g 的观测将解答并且揭示更多关于这颗可居住行星和该行星上的生命的问题.

致谢 感谢北京大学胡永云对本工作所提出的宝贵意见.

参考文献

- 胡永云. 2012. 太阳系外行星大气与气候. 大气科学, 37: 451–466
- Borucki W J, Agol E, Fressin F. 2013. Kepler-62: A Five-planet System with planets of 1.4 and 1.6 Earth Radii in the Habitable Zone. *Science*, 340: 587–590
- Gilliland R L. 1989. Solar evolution. *Glob Planet Change*, 1: 35–55
- Goldblatt C, Claire M W, Lenton T M, et al. 2009. Nitrogen-enhanced greenhouse warming on early Earth. *Nat Geosci*, 2: 891–896
- Gough D O. 1981. Solar interior structure and luminosity variations. *Solar Phys*, 74: 21–34
- Haqq-Misra J, Domagal-Holdman S D, Kasting P J, et al. 2008. A revised, hazy methane greenhouse for the Archean Earth. *Astrobiology*, 8: 1127–1137
- Harrison J F, Kaiser A, VandenBrooks J M, 2010. Atmospheric oxygen level and the evolution of insect body size. *Proc R Soc B*, 277: 1937–1946
- Hu Y, Ding F. 2011. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d. *Astron Astrophys*, 526: A135–142
- Kasting J F, Pollack J B, Crisp D. 1984. Effects of high CO₂ levels on surface temperature and atmospheric oxidation state of the early Earth. *J Atmos Chem*, 1: 403–428
- Kasting J F, Toon O B, Pollack J B. 1988. How climate evolved on the terrestrial planets. *Sci Am*, 256: 90–97
- Manabe S, Wetherald R T. 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J Atmos Sci*, 24: 241–259
- Mischna M A, Kasting J F, Pavlov A A, et al. 2000. Influence of carbon dioxide clouds on early martian climate. *Icarus*, 145: 546–554
- Pierrehumbert R. 2011. A palette of climates for Gliese 581g. *Astrophys J*, 726: L8–12
- Pierrehumbert R, Gaidos E. 2011. Hydrogen greenhouse planets beyond the habitable zone. *Astrophys J*, 734: L13–17
- Rosing M T, Bird D K, Sleep N H, et al. 2010. No climatic paradox under the faint early Sun. *Nature*, 464: 744–747
- Som S, Catling D C, Harnmeijer J P, et al. 2012. Air density 2.7 billion years ago limited to less than twice modern levels by fossil raindrop imprints. *Nature*, 484: 359–362
- Tian F, Claire M W, Haqq-Misra J D, et al. 2010. Photochemical and climate consequences of sulfur outgassing on early Mars. *EPSL*, 295: 412–418
- Toon O B, McKay C P, Ackerman T P, et al. 1989. Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres. *J Geophys Res*, 94: 16287–16301
- Tuomi M, Anglada-Escude G, Gerlach E, et al. 2013. Habitable-zone super-Earth candidate in a six-planet system around the K2.5V star HD 40307. *Astron Astrophys*, 549: A48–71
- von Paris P, Gebauer S, Godolt M, et al. 2010. The extrasolar planet Gliese 581d: A potentially habitable planet? *Astron Astrophys*, 522: A23–33
- Wood B E, Mueller H R, Zank G P, et al. 2005. New mass-loss measurements from astrospheric Ly alpha absorption. *Astrophys J*, 628: L143–L146
- Wordsworth R D, Forget F, Selsis F, et al. 2010. Is Gliese 581d habitable? Some constraints from radiative-convective climate modeling. *Astron Astrophys*, 522: A22–29
- Wordsworth R D, Pierrehumbert R. 2013. Hydrogen-nitrogen Greenhouse warming in Earth's early atmosphere. *Science*, 339: 64–67