

行星半径对类金星行星氧离子逃逸 比例长期演化的影响*

王鑫珂^{1,2} 李海涛^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 近年来已发现数千颗系外行星, 并对这些行星的大气成分、轨道特性、宜居性等特性展开了深入研究. 恒星与行星大气的相互作用被认为是影响行星大气演化及其宜居性的核心机制之一. 本研究旨在揭示行星半径在其大气逃逸长期演化中的作用, 通过建立三维磁流体动力学模型, 结合恒星系统演化特征, 并基于类金星大气逃逸模型, 以 Kepler-1649 c 及其宿主恒星的参数作为样本, 假设一颗具有类金星大气的行星作为研究对象, 构建了涵盖不同行星半径和恒星年龄的数值模拟体系. 研究发现行星半径会显著改变各离子的逃逸比例, O^+ 的逃逸率占总逃逸率的比例随行星半径的增大而减小. 研究结果揭示了行星半径对离子逃逸行为的差异性影响, 为理解系外行星大气演化提供了新视角.

关键词 MHD 模拟, 空间等离子体, 系外行星, 离子逃逸

中图分类号 P354

Effects of Planet Radius on Long-term Evolution of Oxygen Ion Escape Proportion in Venus-like Planets

WANG Xinke^{1,2} LI Haitao^{1,2}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In recent years, the study of exoplanets has become a hot topic in astronomy and planetary science. With the rapid development of detection technology, mankind has discovered and confirmed thousands of exoplanets, and has carried out in-depth studies on the atmospheric composition, orbital properties, habitability and other key characteristics of these exoplanets. In this context, star-planet atmosphere interactions have been recognized as one of the central mechanisms affecting the evolution of planetary atmospheres and their habitability. In this study, we aim to reveal the role of planetary radii in the long-term evolution of their atmospheric escape. By building a three-dimensional Mag-

* 国家自然科学基金面上项目资助 (12273043)

2025-06-06 收到原稿, 2025-07-28 收到修定稿

netohydrodynamic (MHD) model and combining it with the evolutionary characteristics of the stellar system, we reveal the role of planetary radii in the long-term evolution, and construct a numerical simulation system based on the Venus-like atmospheric escape model, taking the characteristic parameters of Kepler-1649 c and its host star as a sample, it is assumed that a planet with Venus-like atmosphere is used as the research object, which covers different planetary radii and stellar ages. It is found that the planetary radius significantly changes the escape contribution ratio of each ion. Among them, the escape rate of O^+ as a proportion of the total escape rate decreases with increasing planetary radius, from 99.3% to 17.1% at 4.8 Ga. Meanwhile, the variability between the O^+ ion distribution and the total ion distribution in interplanetary space increases with radius. This study provides a new perspective for understanding the mechanism of exoplanet atmospheric evolution by discovering the differential effect of planetary radius on the escape behavior of different ions.

Key words MHD simulation, Space plasma, Exoplanets, Ion escape

0 引言

近年来,中国在系外行星探测与理论研究领域取得显著进展. 2022年启动的地球2.0项目,旨在通过结合凌星法和微引力透镜法,构建银河系类地行星样本库,重点探测接近地球大小且位于宜居带内的行星,以解答类地行星的普遍性与演化机制问题^[1]. 2024年,中国科学院紫金山天文台主导的近邻宜居系外行星巡天计划(CHES)进一步推进,其采用高精度天体测量法,计划通过空间望远镜直接探测距太阳系32光年内的类日恒星宜居带行星,填补近邻宜居行星探测空白^[2]. 南京大学天文与空间科学学院主导了紫瞳科学卫星计划,目标是揭示恒星活动规律、热行星的大气特征以及寻找宜居行星^[3]. 在行星形成模型、大气逃逸机制及宜居性评估等方面也取得了突破性成果,例如云南天文台提出的改进金斯参数模型,为低质量行星大气逃逸分类提供了新方法^[4]. 欧阳青林等^[5]提出了利用观测变量体系准确估计行星宜居性的方法. 董俊杰^[6]分析了太阳系内外岩石行星的储水能力,行星的储水能力在一定程度上决定了其宜居性.

行星大气逃逸是塑造行星演化的关键过程,直接关系到行星大气成分、丰度,乃至长期宜居性. 由于行星所处的空间环境存在差异,根据逃逸能量来源和物理过程的不同,大气逃逸主要分为热力学逃逸、非热力学逃逸两类. 热力学逃逸指大气分子在恒星辐射下通过分子热运动达到逃逸速度,从而脱离行星重力,逃逸到太空的过程. 根据逃逸速度的量级和物理机制可以进一步分为金斯逃逸和流体动力学逃逸. 非热力学逃逸由非热过程驱动,其能量来源包括恒星高

能粒子轰击、光化学反应和电磁场加速等,这些物理过程使得一些粒子可以获得足够的能量以发生逃逸. 发生热力学逃逸的行星主要是热木星等具有大量原生大气且轨道半径较小的行星,对于类地、类金星的行星,这些行星在行星系统形成的初期可能也经历过剧烈的热力学逃逸,但是对于一颗位于宜居带内的类地、类金星的行星,在度过年轻恒星剧烈活动的阶段之后,大气逃逸主要以非热力学逃逸为主.

对于类金星行星,其大气损失主要由太阳风与电离层相互作用驱动的离子逃逸主导. 针对系外类金星行星大气逃逸的研究,近年来,借助数值模拟和观测反演取得显著进展. 例如, Dong等^[7]的模拟研究揭示了恒星风条件、行星磁场强度对系外行星 Proxima Centauri b 逃逸率的关键影响. 然而,系统探究行星基础参数如何调控类金星行星的长期离子逃逸行为及其对不同离子成分的差异化影响,仍是当前研究的关键问题之一.

行星大气逃逸研究对揭示半径谷成因具有关键作用^[8],其核心在于量化行星半径对离子逃逸的调控机制. Zhang等^[9]通过 MAVEN 探测数据,发现火星磁尾电流片中 O^+ 离子以 $>100\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度逃逸,验证了三维磁流体动力学模型对非热逃逸过程的模拟能力. Xie等^[10]基于三维多流体磁流体动力学模型,模拟了金星、火星电流层中磁通量绳的产生过程,并与观测结果进行对比,解释了金星与火星磁通量绳之间的差异.

当前研究瓶颈在于,现有模型多采用静态恒星辐射场,未能耦合恒星 EUV 辐射随年龄衰减的时变特征,且缺少系统考察行星半径这一基础参数在长期

演化中对不同离子逃逸行为的差异化影响. 本研究基于空间天气建模框架 (Space Weather Modeling Framework, SWMF), 构建三维磁流体动力学模型, 通过耦合时变恒星辐射与光化学反应模块, 以 Kepler-1649 c 及其宿主恒星的特征参数作为样本, 系统模拟覆盖典型类地行星半径范围, 即半径为 Kepler-1649 c 0.5~2.0 倍的类金星行星在 0.7~4.8 Ga 时间尺度下恒星与行星的相互作用, 重点分析行星半径对不同离子成分的差异性影响及其演化规律. 研究成果可为“半径谷”的成因提供基于离子逃逸物理机制的解释, 并为中国系外行星空间探测任务的目标筛选提供理论支撑.

1 研究方法

1.1 空间天气建模框架

空间天气建模框架 (Space Weather Modeling Framework, SWMF)^[11] 是专门为空间科学研究和空间天气预报开发的多尺度、多物理场耦合三维数值模拟平台. 该软件能够模拟从恒星表面到行星中高层大气的复杂物理过程, 涵盖了恒星风、行星际介质、行星磁层、电离层以及高层大气等多个空间区域. SWMF 的核心设计理念是模块化集成与跨尺度耦合, 通过动态调度不同物理模块的协同运行, 实现对日冕

物质抛射、电离层扰动等空间天气事件的精细化建模. SWMF 已被 NASA 列为空间天气预测的标准工具, 并在多个空间探测任务中发挥了重要作用.

SWMF 的输入参数通过 PARAM.in 文件进行统一管理, 用户可以在该文件中设置模拟的时间步长、模块激活序列、网格配置、边界条件等参数. 例如, 在模拟地球磁层对太阳风的响应时, 用户可以在 PARAM.in 文件中指定太阳风的密度、速度、行星际磁场 (Interplanetary Magnetic Field, IMF) 等参数, 这些参数通常需要通过其他模型或观测数据获得. SWMF 还提供了灵活的数据输出接口, 支持多种数据格式, 方便用户进行后处理和分析.

图 1 给出了 SWMF 程序运行的流程, 首先程序通过读取 PARAM.in 文件中的 5 类参数进行全局配置, 随后进入运算阶段, 基于输入参数初始化计算域, 加载源项, 并设置初边值条件. 根据算法参数与网格参数, 调用对应的数值求解器迭代求解磁流体动力学控制方程. 在每一时间步后, 判断解的收敛性, 如果没有收敛, 则继续迭代计算; 如果收敛, 则按 I/O 参数输出运算结果.

输出文件有三类, 分别是数据文件、运算日志文件和重启备份数据文件. 其中数据文件包含流体的速度、密度、压强、各成分的密度和磁场在各方向的分量等, 用于后续可视化等分析. 运算日志文件除了包

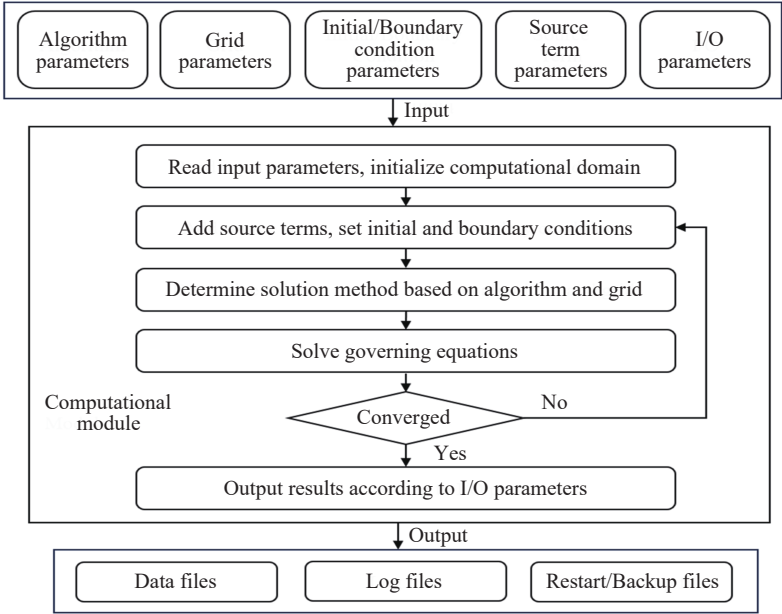


图 1 SWMF 运行流程
Fig. 1 SWMF operation process

含集群作业的信息,例如计算节点负载、配置和警告等,还记录关键步骤上的数据,可以通过修改 I/O 参数来设置输出的数据类型和间隔.重启备份数据文件保存指定步数间隔的计算状态,用于发生中断后恢复计算,节省时间和计算资源.

总体而言,SWMF 作为一个高度模块化、多尺度的空间天气三维建模框架,通过其灵活的物理模块和先进的数值算法,能够高效模拟从太阳到地球的复杂空间天气过程.其核心求解器 BATS-R-US 提供了多种 MHD 方程组和数值算法,结合自适应网格加密技术,能够在不牺牲精度的情况下显著提高计算效率.

1.2 网格

在磁流体动力学模拟中,网格生成^[12]是数值求解的基础,会直接影响计算精度和效率.为了捕捉行星大气逃逸过程中不同区域的物理特性,本研究采用任意拉伸网格,根据物理过程的尺度特征对网格进行分层设计.网格划分的逻辑基于行星电离层、热层和磁层等区域的典型尺度,确保在关键区域实现高分辨率,同时在大尺度区域采用较粗网格,以提高计算效率.

在行星电离层内部,即网格下边界到电离层顶,由于光化学过程和离子-中性碰撞的尺度较小,网格间距设置为 5 km,以确保能够精确模拟电离层中离子密度的梯度变化和电场加速过程.从电离层顶到磁层顶,物理过程的尺度逐渐增大,网格间距调整为 50 km,以平衡计算精度与资源消耗.在磁层顶到一个行星半径的高度范围内,热层和低层磁层的物理过程需要中等分辨率,因此网格间距设置为 100 km.在一个行星半径以上的区域,由于物理过程的尺度进一步增大,网格间距由 200 km 逐渐放宽至 1000 km.

这种分层网格设计能够有效捕捉从电离层到行星际空间的多尺度物理过程.在电离层内部,高分辨率网格能够精确模拟光致电离和离子-中性碰撞的局部效应;而在磁层顶和太阳风相互作用区域,粗网格足以解析大尺度的磁场重联和等离子体对流现象.通过这种设计,既保证了不同区域的模拟精度,又避免了因过度加密网格而导致的计算问题.此外,为了确保网格过渡的平滑性,本研究在不同分层区域之间设置了过渡区域,在过渡区域中网格分辨率缓慢改变,避免了因网格间距突变引起的数值振荡.这种平滑过渡设计不仅提高了数值稳定性,还减少了因网格不连续导致的误差累积.

通过这种网格设计,本研究可以模拟从行星电离层到行星际空间的多尺度物理过程.模拟结果表明,该网格方案在保证精度的同时,显著提高了计算效率,为行星大气逃逸的跨尺度研究提供了可靠的技术支持.

1.3 初边值条件

在磁流体动力学模拟中,初边值条件的设置是数值求解的基础,其合理性直接决定了模拟结果是否符合物理实际.初边值条件包括初始条件和边界条件,前者定义了模拟初始时刻的物理状态,后者规定了计算域边界上的物理量分布或变化规律.本研究针对类金星行星大气中不同成分的带电粒子的逃逸过程与行星半径变化的内在联系问题,明确了以下几个关键参数,分别是恒星风参数、化学反应网络、行星中性大气和行星参数.

1.3.1 恒星风参数

为了量化恒星风参数随恒星年龄的演化规律,研究采用 Parker^[13]的恒星风模型计算恒星风参数.19 世纪地球磁场与太阳风相互作用的观测促使 Chapman 提出了第一个日冕膨胀理论^[14].然而,这个理论存在问题,例如日冕膨胀理论假设恒星风的速度是恒定的,这会导致恒星风的密度随着半径的增加趋向于无穷大. Parker^[13]在 1958 年提出,日冕不处于静态平衡,而是不断向外扩展,修正了这个理论.这一理论在当时引起了重大争议,但是 Luna 1 和 Venera 1 卫星直接观测到太阳风,证实了日冕并非处于流体静力学平衡,而是因热压梯度形成的持续外流的等离子体,为 Parker 太阳风模型提供了依据.

目前一些最新的太阳风模型是三维自洽的^[15],这些模型考虑了各种物理现象,例如恒星风的磁化或日冕加热,使用这些模型通常需要恒星磁场的分布.但是由于缺乏目标恒星的磁图,本研究采用 Parker 太阳风模型,有

$$\left[\frac{v(d)}{v_{\text{crit}}}\right]^2 - 2 \ln \left[\frac{v(d)}{v_{\text{crit}}}\right] = 4 \ln \frac{d}{r_{\text{crit}}} + 4 \frac{r_{\text{crit}}}{d} - 3. \quad (1)$$

通过求解该方程可以计算目标半径 d 处的恒星风速度 $v(d)$,其中临界速度与临界半径公式如下:

$$v_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{k_B T}{m}}, \quad (2)$$

$$r_{\text{crit}} = \frac{m G M_{\text{star}}}{4 k_B T}. \quad (3)$$

式中, T 为恒星日冕温度, m 为质子质量, M_{star} 为恒星质量. 恒星风数密度 $n(r)$ 通过质量损失率 $\dot{M}_{\text{star}}$ 和速度 $v(d)$ 关联, 即

$$n(r) = \frac{\dot{M}_{\text{star}}}{4\pi d^2 v(d) m}. \quad (4)$$

Grißmeier^[16] 对上述过程进行了改进, 引入恒星年龄的影响, 恒星风速度和密度可以约束为

$$v(t) = v_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-0.4}, \quad (5)$$

$$n(t) = n_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-1.5}. \quad (6)$$

其中, v_0 和 n_0 的值根据当前的恒星风参数决定, 时间常数 $\tau = 2.56 \times 10^6$ a. 利用这些参数可以使用式 (5) 和式 (6) 计算不同年龄下太阳风的速度和密度. 值得注意的是, 这两个公式只适用于恒星年龄 ≥ 0.7 Ga 的情况, 这是因为对于非常年轻的恒星, 其恒星风动态压力实际强度远高于本方法的计算值, 因此需限定时间下限为 0.7 Ga, 确保输入参数在物理上的合理性.

根据上述过程, 可以计算目标恒星在不同年龄下不同轨道半径处的恒星风参数. 使用式 (5) 和式 (6) 计算太阳在轨道半径 $d_0 = 1$ AU 处目标年龄 t 下的恒星风速度 v 和密度 n , 并带入式 (4), 可以得到太阳在目标年龄下轨道半径 $d_0 = 1$ AU 处的质量损失率为

$$\dot{M}_s(t) = 4\pi d_0^2 n(r d_0) v(d_0) m. \quad (7)$$

计算太阳在轨道半径 $d_0 = 1$ AU 处目标年龄下的质量损失率. 由于恒星质量损失率与恒星表面积成正比, 所以在已知目标恒星半径 R_{star} 的情况下, 可以计算目标恒星在轨道半径 $d_0 = 1$ AU 处目标年龄 t 下的质量损失率

$$\dot{M}_{\text{star}}(t) = \dot{M}_s(t) \left(\frac{R_{\text{star}}}{R_s}\right)^2. \quad (8)$$

其中 R_s 表示太阳半径. 再将计算得到的质量损失率带入式 (4), 计算目标恒星在轨道半径 $d_0 = 1$ AU 处目标年龄 t 下的恒星风速度 $v(d_0, t)$ 和密度 $n(d_0, t)$, 带入式 (1), 即可求解恒星风的日冕温度 T . 由于 Parker 恒星风模型^[16] 是等温模型, 确定了日冕温度 T , 即可根据式 (2) 和式 (3) 确定临界速度 v_{crit} 和临界半径 r_{crit} , 改变轨道半径 d 即可使用式 (1) 求解不同轨道半径下目标年龄 t 处的恒星风参数. 改变目标年龄 t , 重复上述过程, 可以得到目标恒星在不同年龄 t 下不同

轨道半径 d 的恒星风的速度、密度和温度.

行星际磁场通过球坐标系下的 Parker^[17] 螺旋场模型计算, 有

$$B_r(r, \theta, \phi) = B(\theta, \phi_0) \left(\frac{b}{r}\right)^2, \quad (9)$$

$$B_\theta(r, \theta, \phi) = 0, \quad (10)$$

$$B_\phi(r, \theta, \phi) = B(\theta, \phi_0) \left(\frac{\omega}{v_m}\right) (r - b) \left(\frac{b}{r}\right)^2 \sin \theta. \quad (11)$$

1.3.2 化学反应网络

为了模拟不同恒星年龄下, 恒星辐射对离子逃逸的影响, 研究考虑光电离率随恒星年龄的变化, 计算光电离率的公式^[18] 如下:

$$q_i = \int_{\lambda} \sigma_i(\lambda) F_{\infty}(\lambda) d\lambda. \quad (12)$$

其中, σ_i 为电离截面, F_{∞} 为大气顶部的辐射通量. 在类金星行星的高层大气中, 发生光电离的中性成分主要是 CO_2 和 O , 这里使用了 Schunk 等^[19] 在 2009 年专著中 CO_2 和 O 的光电离截面数据.

恒星 EUV 辐射是驱动大气光电离的主要能量源, 由于 Kepler-1649 的光谱类型为 M5 V^[20], 与 GJ551 的光谱类型一致, 所以这里使用了 MUSCLES 数据库^[21] 提供的 GJ551 的高分辨光谱数据, 结合 EUV 辐射通量与轨道半径的平方反比关系, 可以得到大气层顶的辐射通量.

为了体现恒星年龄对光电离率的影响, 使用 Ribas^[22] 提出的公式对 GJ551 的光谱数据进行缩放, 以此得到不同恒星年龄下的光谱, 即

$$F_{\text{EUV}} = \begin{cases} 84.1\tau^{-0.71}, & 10 < \tau < 300; \\ 1.47, & 300 < \tau < 1640; \\ 9.74 \times 10^4 \tau^{-1.5}, & 1640 < \tau < 4800. \end{cases} \quad (13)$$

式中, F_{EUV} 为辐射强度, 单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; τ 为恒星年龄, 单位 Ma. 由于确定了 Kepler-1649 的年龄约为 2 Ga, 因此基于 2 Ga 的时间节点对公式进行归一化, 以此得到其他时间节点的比例系数, 用于计算对应的恒星光谱.

根据上述过程, 得到光电离反应的截面数据和不同年龄下的恒星光谱, 即可通过式 (12) 计算不同年龄下的光电离率.

对于除光电离之外的化学反应, 由于 Kepler1649 c 的空间环境是类金星的, 并且假设其具有类金星的大

气结构, 因此基于金星的离子逃逸化学反应网络设置了 Kepler-1649 c 的化学反应网络 (见表 1), 其中电子温度 T_e 与离子温度 T_i 是相等的, 为等离子体温度的 一半.

1.3.3 中性大气

参考 Dong 等^[7] 的方法, 通过缩放金星的中性大气经验公式计算目标行星的中性大气, 金星中性成分的垂直分布由以下经验公式计算:

$$[\text{CO}_2] = 1.0 \times 10^{15} \text{ e}^{-\frac{(z-z_0)}{5.5}} \text{ cm}^{-3}, \quad (14)$$

$$[\text{O}] = 2.0 \times 10^{11} \text{ e}^{-\frac{(z-z_0)}{17}} \text{ cm}^{-3}. \quad (15)$$

其中, $z_0=100 \text{ km}$ 为参考高度, 由于 Kepler-1649 c

的表面气压是未知的, 假设为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$, 与地球一致, 即模型下边界处的密度是金星的 0.011 倍, 然后根据标高受重力的影响计算标高, 有

$$H_{\text{Kepler-1649c}} = \frac{kT}{mg} = 0.84 H_{\text{Venus}}. \quad (16)$$

其中, $H = \frac{kT}{mg}$ 为标高. 该标定方法保留了金星大气的成分结构, 同时通过重力修正反映了与目标行星之间的半径质量差异. Kepler-1649 c 的中性大气结构为

$$[\text{CO}_2] = 1.1 \times 10^{13} \text{ e}^{-\frac{(z-z_0)}{4.6}} \text{ cm}^{-3}, \quad (17)$$

$$[\text{O}] = 2.2 \times 10^9 \text{ e}^{-\frac{(z-z_0)}{14.3}} \text{ cm}^{-3}. \quad (18)$$

综上, 可以得到不同恒星年龄下的恒星风参数、行星际磁场和光电离率 (见表 2).

1.3.4 行星参数

将 Kepler-1649 c 的半径作为单位 R_p , 以 0.25 为间隔设置了 7 个半径格点 (见表 3), 覆盖从超级地球到亚海王星之间的行星半径分布特征. 在不同半径的情况下, 行星的质量也会发生改变, 根据经验公式计算不同半径下的行星质量, 有

$$\frac{R}{R_p} \approx \left(\frac{M}{M_p} \right)^{\frac{1}{3.7}}. \quad (19)$$

其中, R 和 M 分别为目标行星的半径和质量. 根据式 (16) 可以计算不同情况下的中性大气标高. 不同半径下模型存在的主要差异是行星重力以及大气结构, 行星半径和质量的具体数值列于表 3.

表 1 金星离子逃逸化学反应网络^[23]
Table 1 Chemical reactions network for ion escape from Venus

化学反应	反应速率
$\text{CO}_2 + \text{h}\nu \rightarrow \text{CO}_2^+ + \text{e}$	见表2
$\text{O} + \text{h}\nu \rightarrow \text{O}^+ + \text{e}$	见表2
$\text{CO}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$	$1.64 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{CO}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{CO}_2$	$9.60 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{O}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{CO}$	$1.1 \times 10^{-9} (800/T_e)^{0.39} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}$	$3.75 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{O}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$7.38 \times 10^{-8} (1200/T_e)^{0.56} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{CO}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{CO} + \text{O}$	$3.50 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.5} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

表 2 恒星风参数、行星际磁场和光电离率
Table 2 Stellar wind parameters, the interplanetary magnetic field and the photoionization rate

年龄/Ga	太阳风密度/ cm^{-3}	太阳风温度 ($\times 10^6$)/K	太阳风速度/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	行星际磁场/nT	二氧化碳光电离率 ($\times 10^{-5}$)/ s^{-1}	氧原子光电离率 ($\times 10^{-5}$)/ s^{-1}
0.7	964	2.01	(-684, 0, 0)	(-144.732, -0.230, 0)	3.75	1.41
1.0	583	1.59	(-580, 0, 0)	(-123.843, -0.169, 0)	3.75	1.41
1.5	328	1.22	(-484, 0, 0)	(-104.446, -0.118, 0)	3.75	1.41
2.0	218	1.01	(-425, 0, 0)	(-92.509, -0.091, 0)	2.78	1.04
2.5	159	0.869	(-384, 0, 0)	(-83.557, -0.074, 0)	1.99	0.747
3.0	123	0.771	(-353, 0, 0)	(-77.588, -0.063, 0)	1.51	0.568
3.5	99	0.697	(-328, 0, 0)	(-74.604, -0.056, 0)	1.20	0.451
4.0	82	0.639	(-308, 0, 0)	(-70.128, -0.049, 0)	0.982	0.369
4.5	69	0.591	(-292, 0, 0)	(-67.144, -0.044, 0)	0.823	0.309
4.8	63	0.567	(-283, 0, 0)	(-64.160, -0.041, 0)	0.747	0.281

2 模拟设置

基于空间天气建模框架 SWMF 中的多成分磁流体动力学模型, 建立了经过验证的类金星行星离子逃逸模型并进行了数值模拟. 该模型基于有限体积法离散化控制方程, 结合 Linde 格式和 minmod 限制器, 确保了对激波的高分辨率捕捉以及数值稳定性. 边界条件基于物理过程的空间特征进行设置, 外边界在恒星方向设为内流边界条件, 固定各项物理量为恒星风参数, 磁尾方向设为外流边界条件, 允许等离子体和磁场自由流出, 无梯度约束, 其余方向采用浮动边界条件, 通过设置梯度为零保持物理量的连续性. 内边界位于行星表面以上 100 km 处, 约束条件包括各成分的密度和总压力. 中性成分密度根据金星大气剖面缩放来获取.

模拟计算域覆盖从行星表面到行星际空间, 范围是 $-20 R_p \leq x \leq 12 R_p$, $-16 R_p \leq y, z \leq 16 R_p$, 其中 R_p 为行星半径, 坐标系定义为: x 轴从行星指向恒星, z 轴垂直于轨道平面, y 轴根据右手定则确定, 该范围可充分容纳行星磁层顶、弓激波及磁尾电流片等结构, 网格采用随意拉伸网格, 确保电离层内部的径向分辨率为 5 km, 而外边界的分辨率为数千 km, 水平分辨率为 3° . 计算任务在高性能集群上并行执行, 采用 MPI 并行计算架构, 256 CPU 核心规模下单组模拟耗时约 2.5 h, 总计算量约 50000 核时, 这里核时表示超算平台 CPU 核心数与使用时间的乘积.

3 模拟结果与分析

根据上述模拟参数和模拟设置, 在高性能超算集

表 3 行星半径以及相应的质量
Table 3 Radii of planets and their corresponding masses

半径/ R_p	半径值/km	质量 ($\times 10^{24}$)/kg
0.50	3392	0.564
0.75	5088	2.528
1.00	6784	7.330
1.25	8480	16.74
1.50	10176	32.86
1.75	11972	58.12
2.00	13568	95.26

群上进行模拟, 并对模拟结果进行分析. 图 2 表示不同条件下 O^+ 逃逸率与总离子逃逸之比随恒星年龄的变化, 为了凸显半径变化对逃逸率比例的影响, 仅保留 $R = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 R_p$ 四种情况下的数据. 结果表明, 随着行星半径的增加, 比值会逐渐降低. 分段拟合了 1.5 Ga 前后不同年龄下该比例的趋势, 在 1.5 Ga 前, 比值的拟合指数为正数, 在 1.5 Ga 后, 随着半径的增加, 拟合指数从正变为负, 这种转变发生在约 $1.5 R_p$ 处, 对于 $< 1.5 R_p$ 的半径, O^+ 逃逸率的比例随着恒星年龄的增加而增加, 而对于 $> 1.5 R_p$ 的半径, 该比例随着年龄的增长而减小.

图 3 和图 4 所示给出了两个时间点 (0.7 Ga 和 4.8 Ga) 处行星际空间中不同半径上 O^+ 和总离子的对数分布. 与 4.8 Ga 相比, 0.7 Ga 时离子分布的密度和空间范围均更加明显, 较年轻的行星显示出更广泛和更密集的离子分布, 这是因为更年轻的恒星有更强的 EUV 辐射和恒星风. 随着半径的增加, O^+ 和总离子分布之间的差异在两个时间点上均变得更加显著, 这表明逃逸大气中较重离子的比例增加.

随着行星半径的增加, 电离层结构的变化为解释逸出大气中 O^+ 相对于较重离子的比例降低提供了理论依据. 较大的行星往往会形成更密集的电离层, 这会改变不同离子种类可用的逃逸途径. 较轻的离子更有可能与电离区域发生相互作用, 经历多次碰撞和反

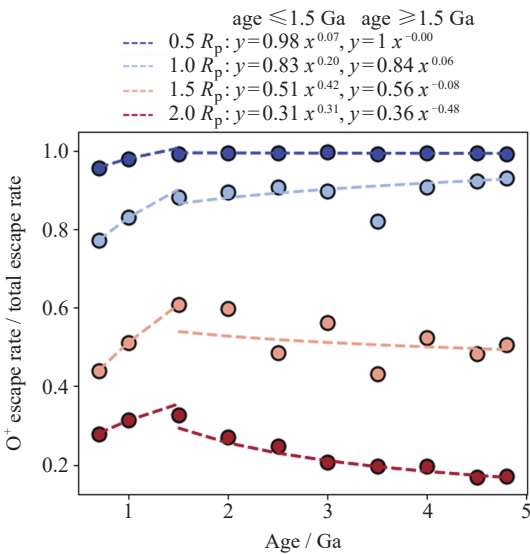


图 2 不同条件下氧离子逃逸率比例随年龄的变化

Fig. 2 Proportion of the oxygen ion escape rate as a function of age under different conditions

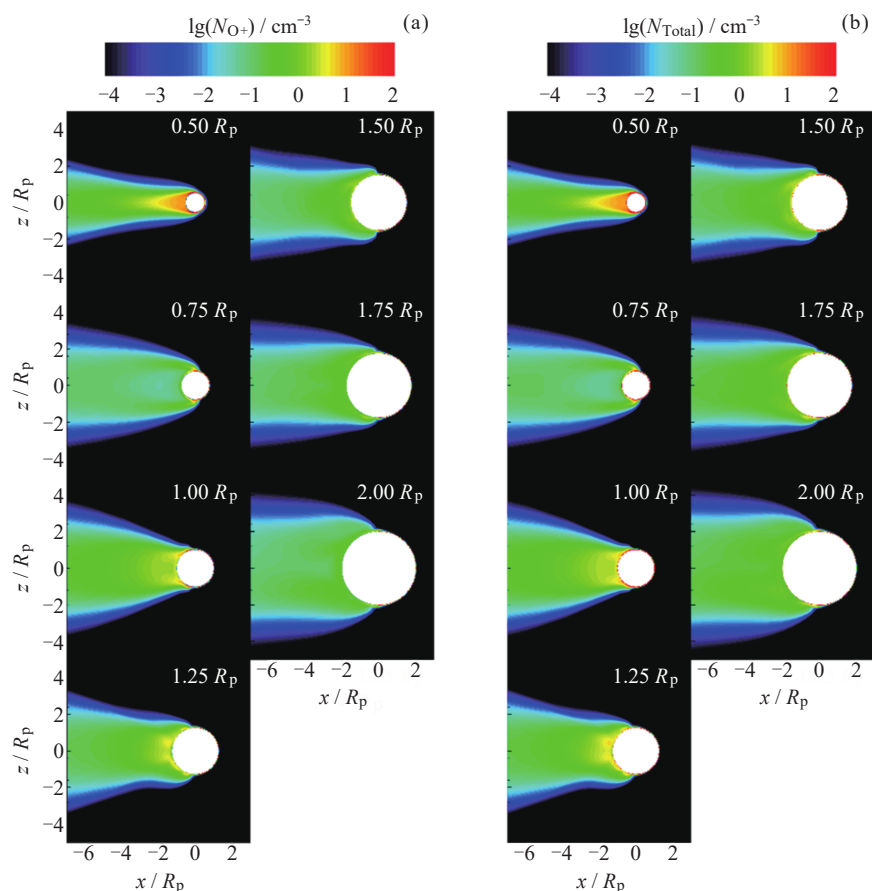


图3 0.7 Ga时不同行星半径下氧离子和总离子在行星际空间中的分布

Fig. 3 Distribution of oxygen ions and total ions in the interplanetary space at 0.7 Ga with different planetary radii

射,从而抑制其逃避行星引力影响的能力.较重的离子,例如 O_2^+ 和 CO_2^+ ,由于其较高的质量和惯性,受此类碰撞的影响较小,更有可能直接逃逸,尤其是在大气密度较低的电离层区域.较重离子在电离层中较高的碰撞频率会降低其有效逃逸率,导致总逃逸率中 O^+ 逃逸率所占比例下降.

4 讨论

通过揭示行星半径对离子逃逸演化路径的影响,为理解类金星行星大气演化机制提供了新的视角.近期,Chin等^[24]的研究指出,离子逃逸率随半径变化呈现先增后减的特征,认为这一现象本质上是重力约束与恒星风作用面积相互博弈的结果.在半径较小的情况下,行星表面积的扩张使更大范围的电离大气暴露在恒星风下,此时逃逸率随半径增长呈上升趋势;而当行星半径超过临界值后,增强的重力势垒逐渐成为

主导因素,显著抑制了离子的逃逸.图2中半径较大的时间点上 O^+ 逃逸率和总逃逸率的比值也有类似的现象,证明了本研究的合理性.逃逸率对半径参数的敏感性揭示了大气逃逸机制的多因素耦合特性,凸显了恒星-行星系统参数对大气演化路径的重要调控作用.

离子逃逸行为的行星半径依赖性对系外类地行星宜居性评估具有双重影响.具有较小半径的行星在早期演化阶段面临剧烈的大气剥离风险,这种高强度逃逸可能导致关键挥发性物质的快速流失,直接威胁行星在地表维持液态水的能力.而具有较大半径的行星虽然具备更强的重力,但重离子的持续逃逸可能会引起温室气体的损耗,这会削弱温室效应并导致全球平均温度下降,进而改变行星的冰线位置与气候稳定性.

综上所述主要存在两个局限性.其一是未考虑大

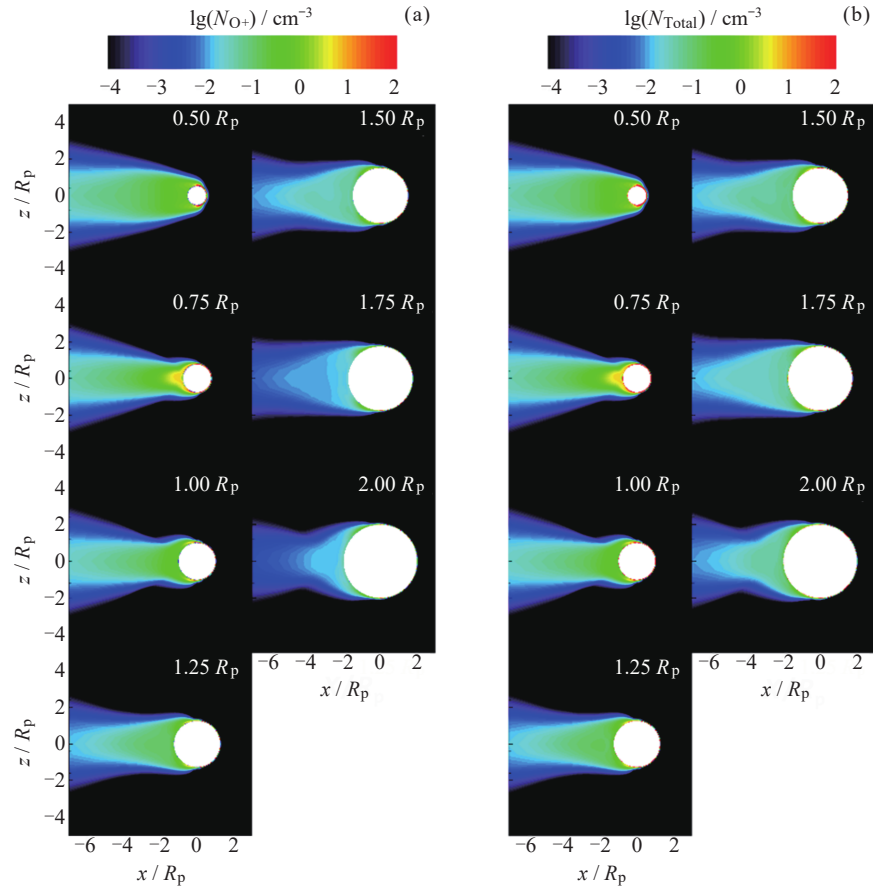


图 4 4.8 Ga 时不同行星半径下氧离子和总离子在行星际空间中的分布

Fig. 4 Distribution of oxygen ions and total ions in the interplanetary space at 4.8 Ga with different planetary radii

气结构随恒星年龄的演化过程, 恒星辐射随年龄的衰减会深刻影响大气结构. 例如早期更强的恒星辐射可能导致更热、更膨胀的大气, 增加中性成分的密度和标高, 而晚期较弱辐射下则相反. 其二是研究聚焦于离子逃逸过程, 未考虑热逃逸的影响, 热逃逸通常在演化早期占主导, 需要使用流体动力学模型并结合光化学与辐射传输计算. 这两个局限性在一定程度上会影响离子逃逸的演化过程, 对研究结果产生影响. 在未来的工作中, 将结合大气结构演化模型与磁流体动力学模型, 更精确地反映离子逃逸随恒星年龄的演化过程, 未来也会使用能够计算热逃逸的模型框架, 以更全面、精确地刻画行星大气在整个演化过程中的逃逸行为, 研究不同年龄下离子逃逸率与热逃逸率的相对大小及变化关系.

本研究揭示不同半径下轻重离子逃逸规律之间的差异, 为理解行星大气维持状态提供了新线索, 当

行星半径增长至某阈值时, O^+ 逃逸率的下降会在电离层累积大量氧离子, 对大气结构产生影响, 而 CO_2^+ 逃逸率的升高则可能打破温室效应的自调节机制. 这种效应会导致气候系统发生剧烈的变化. 因此, 在评估行星的长期宜居性时, 不仅需要关注总大气质量的损失, 更需要深入分析不同大气成分的时间依赖性, 例如生物标志气体与逃逸离子成分之间的耦合演化关系, 未来需要将大气逃逸模型与气候模型、地质循环模型进行深度结合, 构建跨时空尺度的系统演化框架.

5 结论

通过对一系列不同半径的类金星行星离子逃逸的演化过程进行三维磁流体动力学数值模拟, 揭示了行星半径对不同种类的大气离子逃逸的调控机制. 研究发现, 不同半径下 O^+ 逃逸率占总逃逸率的比值随

行星年龄和半径的变化呈现显著的非单调性, 这与 O^+ 逃逸率和总逃逸率随年龄的递减现象存在差异. 具体而言, 在年龄小于 1.64 Ga 的阶段, 对于各个行星半径, 该比值均单调递增, 这主要因为恒星风动压随恒星年龄增大持续减弱, 而光电离率保持恒定导致的. 在年龄超过 1.64 Ga 后, 演化路径出现分化, 对于较小半径的行星, 该比值单调递增; 而对于较大半径行星, 该比值转变为单调递减. 这一分化现象可依据 Chin 等^[24] 的研究来解释: 半径较大的行星更强的重力场在演化后期较低的恒星风动压下, 能更有效地束缚离子, 减少逃逸. 这些结果充分证明行星大气逃逸过程本质上是行星重力、恒星风压与电离层结构协同作用的多尺度耦合过程, 其演化路径会显著影响大气成分的长期稳定性.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] GE Jian, CHEN Wen, CHEN Yonghe, *et al.* Search for a second Earth – the Earth 2.0 (ET) space mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(3): 400-424 (葛健, 陈雯, 陈永和, 等. 搜寻第二个地球——系外地球 (ET) 巡天计划 [J]. *空间科学学报*, 2024, **44**(3): 400-424)
- [2] BAO Chunhui, JI Jianghui, TAN Dongjie, *et al.* Observation simulation and orbital retrieval of the CHES satellite[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2024, **65**(4): 99-112 (暴春晖, 季江徽, 谭东杰, 等. 基于 CHES 卫星的模拟观测与轨道反演 [J]. *天文学报*, 2024, **65**(4): 99-112)
- [3] LIU Huigen, ZHOU Jilin, HUO Zhuoxi, *et al.* Ultraviolet-visible stellar activity and habitable exoplanet survey — the UVEYES satellite[J]. *Journal of Space Science and Experiment*, 2024, **1**(1): 23-32 (刘慧根, 周济林, 霍卓玺, 等. 恒星活动与系外宜居行星探索卫星——“紫瞳”科学卫星 [J]. *空间科学与试验学报*, 2024, **1**(1): 23-32)
- [4] GUO J H. Characterization of the regimes of hydrodynamic escape from low-mass exoplanets[J]. *Nature Astronomy*, 2024, **8**(7): 920-928
- [5] OUYANG Qinglin, LIU Jilin, HUO Zhuoxi, *et al.* Validation method for habitable planets observation variable framework[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2025, **45**(1): 69-80 (欧阳青林, 刘冀林, 霍卓玺, 等. 宜居行星观测变量体系验证方法研究 [J]. *中国空间科学技术 (中英文)*, 2025, **45**(1): 69-80)
- [6] DONG Junjie. A data science approach to study the water storage capacity in rocky planet mantles: Earth, Mars, and exoplanets[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2023, **42**(2): 275-288 (董俊杰. 基于数据科学方法的岩石行星地幔储水能力的研究: 地球、火星和系外行星 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2023, **42**(2): 275-288)
- [7] DONG C F, LINGAM M, MA Y J, *et al.* Is Proxima Centauri b habitable? A study of atmospheric loss[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, **837**(2): L26
- [8] PAN Mengrui, LIU Beibei. A review to the observational and theoretical studies of planetary systems around red dwarfs[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2023, **64**(6): 60-1-60-16 (潘梦睿, 刘倍贝. 环红矮星行星系统的观测和理论研究概述 [J]. *天文学报*, 2023, **64**(6): 60-1-60-16)
- [9] ZHANG C, RONG Z J, LI X Z, *et al.* The energetic oxygen ion beams in the Martian magnetotail current sheets: hints from the comparisons between two types of current sheets[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(5): e2023GL107190
- [10] XIE Lianghai, LI Luoquan, LI Lei, *et al.* Studies on the small-scale magnetic flux ropes at Venus and Mar[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2025, **56**(4): 458-473 (谢良海, 李罗权, 李磊, 等. 金星火星电离层小尺度磁通量绳研究 [J]. *地球与行星物理理论评 (中英文)*, 2025, **56**(4): 458-473)
- [11] TÓTH G, SOKOLOV I V, GOMBOSI T I, *et al.* Space weather modeling framework: a new tool for the space science community[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A12): A12226
- [12] ZHAO Ning, LIU Jianming, TIAN Linlin, *et al.* Progress and prospects of Cartesian mesh simulation methods for compressible flow problems[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, **57**(2): 285-314 (赵宁, 刘剑明, 田琳琳, 等. 可压缩流动问题笛卡尔网格模拟方法研究进展与展望 [J]. *力学学报*, 2025, **57**(2): 285-314)
- [13] PARKER E N. Interaction of the solar wind with the geomagnetic field[J]. *Physics of Fluids*, 1958, **1**(3): 171-187
- [14] CHAPMAN S, ZIRIN H. Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere[J]. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 1957, **2**: 1-14
- [15] YANG Zicai, SHEN Fang, YANG Yi, *et al.* Three-dimensional MHD simulation of interplanetary solar wind[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, **61**(11): 4337-4347 (杨子才, 沈芳, 杨易, 等. 行星际背景太阳风的三维 MHD 数值模拟 [J]. *地球物理学报*, 2018, **61**(11): 4337-4347)
- [16] GRIEBMEIER J M. Aspects of the magnetosphere stellar wind interaction of close-in extrasolar planets[J]. *Planetary and Space Science*, 2007, **55**(4): 530-531
- [17] PARKER E N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields[J]. *Astrophysical Journal*, 1958, **128**: 664
- [18] TORR M R, TORR D G. Ionization frequencies for solar cycle 21: revised[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, **90**(A7): 6675-6678
- [19] SCHUNK R, NAGY A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry (Cambridge Atmospheric and

Space Science Series)[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009

[20] ISABEL A, ROWE J F, HOWELL S B, *et al.* Kepler-1649b: an exo-venus in the solar neighborhood[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **153**(4): 162

[21] FRANCE K, LOYD R O P, YOUNGBLOOD A, *et al.* The muscles treasury survey. I. Motivation and overview[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **820**(2): 89

[22] RIBAS I, GREGG M D, BOYAJIAN T S, *et al.* The full spectral radiative properties of Proxima Centauri[J]. *Astrophysics & Astrophysics*, 2017, **603**: A58

[23] MA Y J, NAGY A F, RUSSELL C T, *et al.* A global multispecies single-fluid MHD study of the plasma interaction around Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(1): 321-330

[24] CHIN L, DONG C F, LINGAM M. Role of planetary radius on atmospheric escape of rocky exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, **963**(1): L20

作者简介



王鑫珂 男, 2000 年 1 月出生于河南省许昌市, 毕业于中国科学院国家空间科学中心, 主要研究方向为空间等离子体模拟。
E-mail: 1210763881@qq.com



李海涛 (通信作者) 男, 1982 年 9 月出生于山东省济宁市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 英国埃克塞特大学访问学者, 主要研究方向为系外行星探测与物理。
E-mail: lihaitao@nssc.ac.cn