中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 7 期： 2540–2572
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

类地行星的形成演化及其宜居性

汪毓明[1*]，刘建忠[2]，刘立波[3]，秦礼萍[1]，李阳[2]，苏振鹏[1]，柴立晖[3]，方玄[4]，徐建桥[5]，杨兵[1]，杨蔚[3]，岳宗玉[3]，赵宇鹏[6]

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院，合肥 230026
2. 中国科学院地球化学研究所，贵阳 550081
3. 中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029
4. 中国科学院国家天文台，北京 100012
5. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院，武汉 430071
6. 成都理工大学地球与行星科学学院，成都 610059
* 通讯作者，E-mail：ymwang@ustc.edu.cn

2025-07-31收稿，2026-02-17修回，2026-03-30接受，2026-06-16网络版发表
中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB41000000)资助

摘要 太阳系中八大行星，为何只有地球宜居？在太阳系长达46亿年的演化过程中，为何火星和金星的演化结果如此不同？生命从何而来，未来的地球又会如何演化？这些问题不仅是21世纪行星科学的核心前沿，也深刻关联着人类对自身存在与行星宜居性的根本认知。要深入理解和回答这些重大科学命题，必须从多维度展开系统性研究。在时间维度上，我们需要追溯类地行星的早期形成与演化过程；在空间维度上，我们需要解析行星的圈层结构及其之间的耦合作用；在对比的视野下，我们还要拓展至系外行星大气特征及其宿主恒星对宜居性的影响。在中国科学院“类地行星的形成演化及其宜居性”战略性先导科技专项的支持下，我们以行星宜居性为研究主线，综合运用月球与行星样品分析、深空探测数据处理、数值模拟与实验模拟等多种技术手段，对类地行星开展了系统而深入的研究。本文从类地行星的早期过程、环境演化，再到连接外部空间环境的开放的行星系统；从与地球密切相关的月球到系外行星，全面总结了专项在过去五年多时间内取得的重要进展，包括首次确认火星存在固态内核，并揭示其形成于高温高压条件下的核幔分异过程；发现月球最年轻的玄武岩源自贫水的非克里普地幔源区，从而否定了长期流行的“富挥发分驱动晚期火山活动”的传统假说等教科书级别的成果。本文在总结最新研究进展的同时，也展望了未来的发展方向。大力提升行星多圈层多要素探测能力，尤其是行星全球普查能力；大力发展相关的技术手段和研究方法，尤其量子技术和人工智能等最新科技的应用，将是行星科学未来继续取得重大突破的关键。我们通过分享这些研究成果和见解，希望能够激发更多年轻人投身于行星科学这一充满机遇和挑战的领域，推动我国乃至世界行星科学的可持续发展。

关键词 类地行星，宜居性，深空探测，比较行星学

1 引言

太阳系是人类目前所知的唯一一个宜居恒星系，而地球也是人类目前所知的唯一一颗宜居星球。所谓“宜居”，指的是天体具备支持生命起源与演化的基础条件，包括适宜的能量来源、关键元素与成分组成、足够活跃且稳定的环境状态，以及有效的防护体系。然而太阳系中八大行星，为何只有地球宜居?作为地球的近邻——金星和火星，同样位于宜居带内。前者拥有浓密的大气层，表面炙热且遍布火山；后者大气稀薄，寒冷而荒芜。在

中文引用格式：汪毓明, 刘建忠, 刘立波, 秦礼萍, 李阳, 苏振鹏, 柴立晖, 方玄, 徐建桥, 杨兵, 杨蔚, 岳宗玉, 赵宇鹏. 2026. 类地行星的形成演化及其宜居性. 中国科学: 地球科学, 56(7): 2540–2572, doi: 10.1360/SSTe-2025-0231
英文引用格式：Wang Y, Liu J, Liu L, Qin L, Li Y, Su Z, Chai L, Fang X, Xu J, Yang B, Yang W, Yue Z, Zhao Y Y S. 2026. Formation, evolution, and habitability of terrestrial planets: A review of research progress. Science China Earth Sciences, 69(7): 2495–2528, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1921-0

© 2026《中国科学》杂志社

太阳系长达46亿年的演化过程中，为何这三颗类地行星的演化结果会如此不同?生命从何而来，未来的地球又会如何演化?这些都是21世纪最前沿的科学问题，也是行星科学研究的核心问题。

要深入理解和解决这些问题，从时间维度，我们需要知道太阳系的演化历史，尤其要了解类地行星的早期演化过程，它们是如何形成的，如何熔融和分异的，关键的挥发分在这些过程中是起什么样的作用，水是如何逃逸的，地形地貌是如何演化的，撞击在其中扮演什么样的角色等；从空间维度，我们希望了解类地行星的圈层结构是什么样的，为何会形成不同内禀磁场的天体，地表环境如何与大气耦合，大气和电离层磁层又是如何耦合，太阳活动和太阳风又是如何作用和影响类地行星的宜居环境的等；从对比角度，我们想知道早期的地球是什么样的，伴生的月球是如何形成的，系外行星大气具有什么特征，恒星活动会如何影响行星宜居性等。

人类过去60多年的太空探索历史，已经给出了很多答案，但离真相还很远。一方面行星探测的技术和工程能力有限，探测的参数、覆盖面、精度都不足以完全解答相关问题。比如缺少有效探测手段或缺少充足的探测数据，所有地外天体的内部结构都是不确定的，火星是否存在内核还是个争论(Bi等，2025)；关于月球是什么时候停止活动的，在嫦娥5号样品返回后，几十年的认知被颠覆了(Li Q L等，2021；Hu等，2021；Tian等，2021)。另一方面我们无法回到过去，所有历史的追溯极大地依赖于模型的可靠程度和样品的原始性。比如空间探测的多种手段获得的火星水逃逸量外推到整个45亿年的演化历史，比地质学上水同位素分析得到的结果小一个数量级(Jakosky等，2018；Villanueva等，2015)。因此要真正理解和认识宜居行星的形成和演化过程及其内在机理，是一个巨大的挑战。

为此，2020年中国科学院启动实施了“类地行星的形成演化及其宜居性”战略性先导科技专项。在比较行星学的框架下，以行星宜居性为切入点，采用多学科交叉、多方法并举的研究路径，结合样品分析、探测数据处理、数值模拟与实验室模拟等多种技术手段，系统地研究了类地行星的起源、形成环境与地质演化过程，探讨了其内部圈层与大气、空间环境之间的相互作用及协同演化规律，并通过与系外行星的综合比较，来深入理解宜居环境的形成机制与演化历史。

专项实施期间，恰逢我国嫦娥五号月球采样返回和天问一号火星探测任务的顺利实施，有力地支撑了专项的研究。我们不仅在类地行星的形成环境和早期过程、地质演化与宜居环境演变、空间环境和大气逃逸过程等重要前沿科学问题方面，取得丰硕的研究成果，也为我国培养了一支在国际上有影响力的行星科学研究队伍，推动了我国行星科学领域的学科建设，服务了未来深空探测任务的战略布局。

本文围绕“类地行星的宜居性”这一主题，系统总结了专项过去五年的研究成果。撰写的思路从类地行星的早期过程、环境演化，再到连接外部空间环境的开放的行星系统，既有时间维度的考虑，也有空间维度的考量。月球作为地球唯一的天然卫星，由于其与地球关联的特殊性，以及嫦娥五号样品的独特性，单列一章。太阳系内的天体毕竟样本有限，因此，最后一部分我们把视野放到更大的尺度，去了解系外行星，从中汲取更多可供参考的信息。每一章均有三到四节，我们先提供当前的图景和研究的意义或问题，然后再展示我们在这方面的研究进展和成果，以及未来的研究方向。

这篇进展综述主要聚焦于专项的研究成果，因此在内容覆盖面上可能并不全面。然而，我们的目的是通过这篇综述，为对行星科学感兴趣的学者和学生们提供一个窗口，让他们能够了解到行星科学前沿的问题及最新的研究进展。我们希望通过分享这些研究成果和见解，不仅能够激发更多年轻人投身于这一充满机遇和挑战的领域，同时也为推动我国乃至世界行星科学研究的可持续发展贡献力量。

2 类地行星的早期过程

在太阳系的早期阶段，从太阳星云中的气体与尘埃吸积凝聚形成星子，再到这些星子间的聚合形成原行星，直至最终原行星之间的碰撞形成了今天我们所见的太阳系和行星系统，类地行星经历了复杂且剧烈的演化历程(Boss，2003)。首先，由于不同星体形成位置和时间的不同，导致它们具有各异的初始成分。随后，因短半衰期核素(如^{26}Al)的放射性衰变或星体间的碰撞事件，一些类地行星、小行星以及卫星经历了熔融过程。某些天体甚至发展出了全球性的岩浆洋，在此过程中，金属熔体与硅酸盐熔体发生分离，密度较大的金属熔体下沉形成核心，而外部的硅酸盐熔体则构成了幔层(Warren，1985)。这种核幔分异过程显著改变了分异天体内部结构与成分分布，成为其早期演化史上的关键事件。此外，在熔融过程中，挥发性较强的元素可能会逸散，造成各星体不同程度上挥发性元素的缺失。随着星体逐渐冷却，幔部岩浆及核心铁浆逐步结晶，进一步加剧了幔部与核心成分的差异。这些早期过程是研究类地行星演化的起点，它们深刻影响了类地行星后续的演化过程以及宜居性。

2.1　早期天体的岩浆洋演化

岩浆洋假说是广泛接受的月球早期演化理论(Wood等，1970)，在其形成初期存在一个全球性的岩浆洋，为理解月球的壳-幔结构奠定了基础，并已被推广应用于火星、灶神星等其他类地行星和小行星的早期演化研究中。然而，对于这些天体是否经历了类似的全球规模岩浆洋阶段仍存争议。比如灶神星是否经历过全球尺度的岩浆洋阶段就一直是科学界讨论的热点(Elkins-Tanton，2012)。

HED(Howardite-Eucrite-Diogenite)陨石是地球上最常见的无球粒陨石类型，它们代表了三种不同的岩石类型，并普遍被认为源自灶神星。特别是针对Eucrite和Diogenite这两种由岩浆作用形成的陨石，金属同位素研究可以为理解灶神星的岩浆过程提供重要的约束条件。Ca是难熔元素，其组成不会受到物质挥发的影响；由于其亲石特征，也不会受到核幔分异过程影响。岩浆结晶时的主要矿物如橄榄石、辉石、斜长石等具有不同的Ca同位素组成，所以Ca同位素数据可以反演岩石经历的岩浆演化过程。通过灶神星陨石Ca同位素组成的系统分析(图1)，我们发现玄武质Eucrite陨石的$\delta^{44/40}$Ca分布在0.88‰–1.02‰，平均值为0.95‰±0.07‰(2SD，N=15)，与地球、月球、火星、球粒陨石的平均组成一致；Diogenite陨石比Eucrite陨石系统偏重，$\delta^{44/40}$Ca分布在1.09‰–1.28‰，平均值为1.18‰±0.15‰(Xue等，2023)。通过对熔融和岩浆洋演化过程进行数值模拟，发现熔体的钙同位素组成主要受控于部分熔融程度，当灶神星发生>20%的部分熔融，可解释Eucrite陨石的$\delta^{44/40}$Ca特征。这说明灶神星母体发生了中至高度部分熔融(>20%)作用并且形成了岩浆洋，Eucrite陨石由早期岩浆洋冷凝结晶后的残余熔体形成。此外，Diogenite陨石的$\delta^{44/40}$Ca与1/Ca呈正相关，与1000×Lu/Ti比值呈负相关，和Eu/Eu*无相关性，说明$\delta^{44/40}$Ca>1.17%、低Lu/Ti比值、低Ca含量的Diogenite陨石可能代表岩浆洋早期堆晶；而$\delta^{44/40}$Ca<1.17%、高Lu/Ti比值、高Ca含量的Diogenite陨石可能形成自后期堆晶体重熔，侵入Eucrite质灶神星壳并同化<10%的星壳熔体形成。灶神星陨石的Ca同位素数据说明，灶神星母体形成了全球性的岩浆洋，Diogenite陨石和Eucrite陨石不同的同位素和元素特征，反映了岩浆洋不同阶段的堆晶物质和残余熔体特征。

如果灶神星确实经历过全球性岩浆洋和后续的矿物堆晶过程，则其表面理应存在一层由漂浮的钙长石构成的斜长岩地壳(Elkins-Tanton，2012)，然而前人研究并未发现明确来源于灶神星的斜长岩陨石。我们发现源自灶神星的斜长岩陨石NWA 15118(Li S等，2024)，不同于之前的源自灶神星的玄武质陨石。矿物化学、全岩氧同位素和铬同位素分析显示，NWA 15118陨石与HED族陨石具有高度亲缘性。该样品表现出显著的Eu正异常和轻稀土元素富集特征，且与已知HED陨石的成分互补。这一结果支持灶神星经历了类似于月球的岩浆洋演化过程：在岩浆洋演化晚期，钙长石上浮并结晶，形成了斜长岩地壳。斜长岩陨石NWA 15118的发现为灶神星曾经历全球性岩浆洋过程进一步提供了关键证据。太阳系早期频繁的撞击事件可能导致了斜长岩壳的大规模剥蚀，这可能是今天难以在灶神星表面直接观测到斜长岩，以及在地球上仅发现一块此类陨石的主要原因。

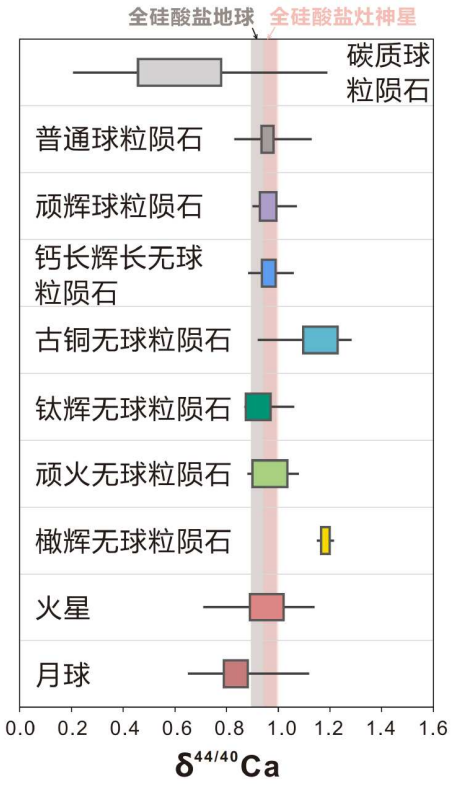


图 1　球粒陨石、无球粒陨石、月球以及火星陨石的钙同位素组成情况(Xue等，2023，Copyright © 2023 Elsevier B.V.)。方框表示数据围绕中位数的±25%分布范围。数据来源自Valdes等(2021)及其引用文献。灰色和粉色的条形分别代表全硅酸盐地球的估计值(0.94‰±0.05‰，Kang等，2017)和全硅酸盐灶神星组成的估计值(0.97‰±0.03‰)

这些发现表明，太阳系早期类地行星和小行星可能普遍经历了广泛的岩浆洋演化。未来的研究应结合更多天体样品(如各种无球粒陨石)的多元同位素分析，深化对岩浆洋动力学过程(如结晶顺序、堆晶迁移)的理解，探讨撞击剥蚀对星壳保存的影响，以构建太阳系早期天体演化的统一模型。

2.2 类地行星的核幔分异

在太阳系中，从小行星到行星普遍存在分异过程。这一过程由四个关键因素决定(McCoy和Bullock，2017)：(1) 成分，影响熔融的特征和类型；(2) 氧逸度，影响变价金属的种类；(3) 温度，影响熔融的程度；(4) 尺寸，影响压力和重力。分异过程为研究类地行星的大规模岩浆行为提供了重要线索，有助于深入理解类地行星的形成与演化。熔融是分异的关键步骤，在此过程中发生的各种地球化学行为(如元素分配和同位素分馏等)均受到物理化学条件的影响。熔融还伴随着多种动力学效应，例如元素扩散和电导率异常等。不同元素和物相对物理化学条件的响应程度差异显著。在核幔分异过程中，碱金属元素和挥发性元素在硅酸盐相和金属相之间的分配系数与金属相中的S和O含量呈正相关；亲铁元素在硅酸盐相和金属相之间的分配系数随温度和氧逸度变化明显，甚至可能出现相反趋势。元素在不同物相间的分配是否达到平衡也受到动力学效应的约束。熔融过程中不同物相的存在与否及其比例随着温度和氧逸度发生显著变化。由于系统复杂的多变量耦合特性，只有结合系统性的高温高压实验、理论模型模拟以及天然样品的综合分析，才能深入认识小行星和行星的分异过程(Steenstra等，2022，2023)。

利用第一性原理计算，我们研究了在火星核幔分异条件下液态铁与硅酸盐熔体之间的FeO分配行为(Li等，2025)。结果表明，FeO的分配系数随压力升高而降低，随温度升高而增加，但受硫含量影响较小。结合InSight任务(Stähler等，2021；Khan等，2022，2023)提供的地震学数据推断，若要在火星核心中实现约5wt.%的氧含量，并匹配火星幔母岩浆限定的氧化还原条件，核幔分异必须发生在高于18.5 GPa的压力和超过2900 K的温度条件下(图2)。对于中度亲铁元素(Ni、Co、Mo、W、P)，火星幔较地幔具有显著更高的Cr含量和更低的Ni和Co含量，而在更高温度压力下重新计算Ni、Co等元素的分配行为，仍与火星幔中观测到的丰度相符(Yoshizaki和McDonough，2020)。因此，该研究首次将火星的地球物理证据与地球化学证据纳入统一的自洽框架，表明火星可能经历了比以往认知更为剧烈的早期演化过程。

同时，我们利用InSight任务获取的高质量火震数据

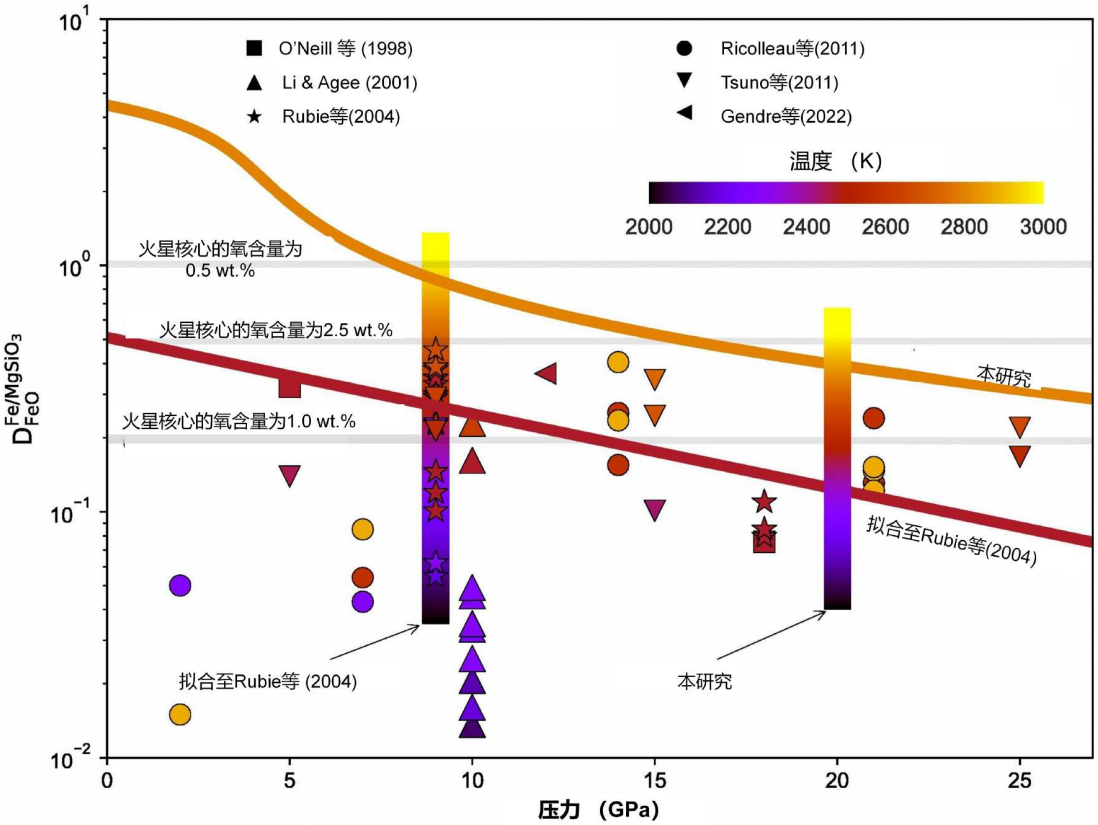


图 2 本研究和其他文献给出的FeO分配系数(以摩尔比值给出)对比。FeO在核幔之间的分配系数强烈受控于压力、温度和氧逸度。文献数据的氧逸度变化范围为~IW−3.6到IW+0.39。本研究中硅酸盐熔体中FeO的含量为13.wt%，不同压力和温度下的氧逸度详见Li等(2025) Copyright © 2024 Science China Press。图中不同的图例代表不同的实验结果。三条灰色的线分别代表金属核内的氧含量为1.0wt.%、2.5wt.%和5.0wt.%

确定了火星存在固态内核(Bi等，2025)。通过创新性地引入火震阵列分析方法，成功提取出穿越火星核的关键震相。观测结果显示，PKKP震相的到时较仅考虑液态核的模型提前50–200 s，表明火星核具有分层结构：外层为液态核，内部存在波速更高的固态内核。进一步识别出的PKiKP震相信号为火星存在固态内核提供了直接证据。综合多种震相分析结果，我们估算火星固态内核半径约600公里，内外核间存在约30%的波速跳变和约7%的密度差异。矿物组成分析显示，火星核可能由富含轻元素的铁镍合金构成，含有硫、氧和碳等成分。这种含有轻元素的火星核结构，不仅为火星磁场从早期活跃到如今沉寂的演化历程提供了重要线索，也为研究火星的核幔分异奠定了关键基础(图3)。

在氧逸度方面，目前学界对火星幔源氧逸度特征存在明显分歧：部分研究认为其氧逸度随源区富集程度而变化(Udry等，2020)，而另一些研究则支持其整体呈均一还原态(Nicklas等，2021)。这种分歧主要源于不同氧逸度计方法的适用性与代表性差异。我们通过评估多种氧逸度计的适用性，并结合地球化学与氧逸度数据，提出了一种可靠的火星幔源氧逸度测定方法(Chen等，2024)。计算结果显示，中等型Shergottite源区的氧逸度与亏损型源区一致，而富集型源区则更具氧化性。这一发现否定了中等型Shergottite由富集型和亏损型岩浆混合形成的观点。我们进一步提出，火星幔可能仅由还原的亏损型源区和氧化的富集型源区两种不同的氧化还原态储库组成，这种差异可能源于火星早期岩浆洋的结晶分异作用。这一发现为火星内部演化提供了新的证据。

系统性的高温高压实验可以为理解行星早期岩浆演化提供关键的实验支撑。我们针对钾玄岩熔体，通过测量在不同温压及水含量条件下其电导率的变化，建立相应的定量模型(Li B等，2020)，研究结果表明，水对钾玄岩熔体电导率的增强作用显著强于其他亚碱性熔体，且除Na^+外，K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子也对电导率有明显贡献。进一步通过测定钾玄岩熔体在不同温度和水含量条件下的水扩散系数，构建相应的扩散模型(Zhang等，2020)，发现富碱熔体中的水扩散速率明显快于亚碱性熔体，表明碱金属对水的扩散具有显著促进作用。

高温高压实验与理论模拟明确了火星核幔分异所需的特殊温压条件，建立了不同类型熔体在电导率、水扩散等方面的定量模型，深化了对氧逸度调控矿物结晶以及碱金属影响岩浆动力学等核心过程的理解。这些结果为构建行星演化模型提供了重要的理论和实验依据。未来需进一步加强理论模型和实验数据与深空探测结果的交叉验证，推动行星演化理论模型的完善，并重点关注不同尺度天体在分异过程中的共性与差异，从而更全面地认识类地行星的形成与演化规律。

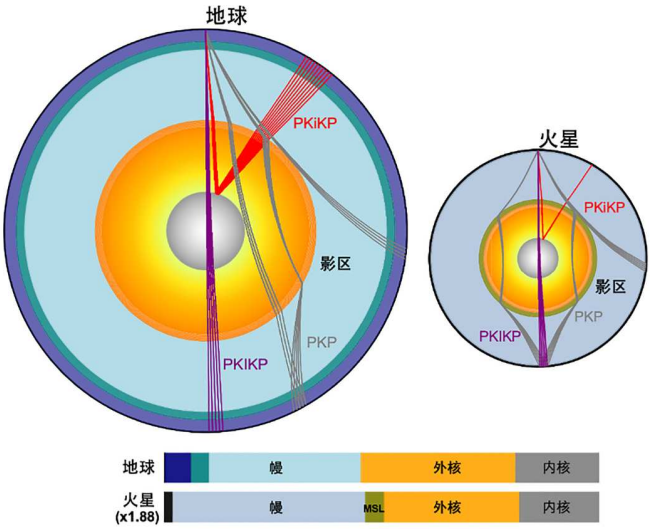


图 3　地球和火星深部结构对比示意图(Bi等，2025)。图中MSL为火星幔底部可能存在的熔融硅酸盐层。PkiKP、PKP和PKIKP显示了系列用来对核结构探测的地震学震相

2.3　早期的地球

地球早期演化研究同样面临诸多未解之谜。关于大陆地壳形成机制和板块构造启动时间，学界尚未达成共识。不同研究模型将这一过程的时间跨度从冥古宙延续到新元古代(Harrison，2024)。就早期板块体制而言，暖俯冲、局部俯冲和全球板块构造等假说各执一词(Zheng和Zhao，2020；Cawood等，2022)。此外，TTG(Trondhjemite-Tonalite-Granodiorite)等花岗质岩石的成因机制、洋壳加厚过程以及部分熔融记录虽然提供了多种可能的演化路径，但仍缺乏统一的解释模式。

在地球华北克拉通南缘太华杂岩中，我们识别出两期新太古代岩浆作用(2.65 Ga和2.55–2.50 Ga)，并通过锆石Hf-O同位素研究揭示了太古宙时期的地壳形成机制(Li Z X等，2021)。研究表明，汇聚大洋板块边缘加厚洋壳的部分熔融是形成TTG和钾质花岗岩的有效途径，这一机制有助于理解早期地球的地壳演化，并为类地行星的岩浆作用提供了参考。进一步的研究发现，扬子克拉通在约2.0 Ga同时发育了加厚下地壳熔融成因的奥长花岗岩、伸展背景成因的A型花岗岩和镁铁质岩墙，反映了一次重要的构造体制转变(Zhang L等，2022)。这一特征与西伯利亚克拉通南部的记录高度相似，推测扬子克拉通在古元古代超大陆中的位置可能靠近西伯利亚克拉通南部。这一研究有助于重建早期地球超大陆的构造格局。

尽管取得了一系列重要进展，但地球早期板块构造的启动时间、不同克拉通间的构造演化路径及TTG岩石的成因机制亦尚无统一认识。未来研究应结合热力学相图模拟与大数据方法，深入解析太古宙TTG岩石形成的温压条件与源区性质，厘清大陆地壳演化的物质基础与构造转型过程。

3 类地行星的环境演化

类地行星的环境演化涉及多个圈层——包括大气圈、水圈、岩石圈等——以及这些圈层之间的复杂相互作用。地球、火星和金星等类地行星在早期经历了相似的物质积累和热演化过程，但随后却呈现出截然不同的大气、地质和水文特征。因此类地行星的环境演化过程和机理是理解行星形成、宜居性及生命潜力的关键科学问题。尤其研究挥发分的分布与演化、火星地貌变迁与水体演化，不仅有助于揭示其独特的环境演化路径，也为理解地球环境变迁提供了重要对比框架。此外，金星的高温高压环境及其缺乏板块构造的地质演化模式，为探讨宜居行星与非宜居行星之间的差异提供了关键参考。

3.1 关键挥发分的分布与演化

硫(S)和氢(H)作为关键的挥发性元素，在行星演化中发挥着重要作用。硫是行星幔和核的重要组成部分，由于其与铁有强亲和力，硫在行星分异过程中的分布对行星核形成、行星幔氧化还原状态以及大气化学等方面具有深远影响。例如，硫在行星核中的含量会影响核的密度与导电性，进而影响行星磁场的产生(Wade和Wood，2005)。同时，硫的氧化还原状态决定了行星大气中气体的组成，这对维持稳定的表面环境和潜在的生物圈至关重要(Gaillard和Scaillet，2014)。氢则是构成水和大气的主要成分之一。在行星形成过程中，氢的获取与丧失直接影响行星的质量、结构和水资源的储量。氢的存在对行星的热演化也起着调控作用，通过促进地幔熔融引发复杂的地质活动，为行星提供了长期的热源与构造运动(Hirschmann，2006)。

目前学界对于硫、氢等挥发分在行星中的来源及其增生过程存在争议(Norris和Wood，2017)。以地球为例，主要有两种观点：一种是后期增生模型，即地球初始物质几乎不含挥发分，现在地球挥发分含量是在增生末期通过加入少量富含挥发分的物质(如碳质球粒陨石)建立的，其质量约为地球总质量的0.5%(Wang和Becker，2013)；另一种是行星演化模型，即地球初始增生于富含挥发分的物质，但在增生过程中由于早期星胚熔融挥发等原因导致大量挥发分丢失，形成目前观测到的地球挥发性元素丰度(Braukmüller等，2019)。由于早期地球记录极少被保留下来，直接研究这些挥发分的演化历史非常困难。

我们利用第一性原理计算获得了核幔分异和挥发过程中的硫同位素分馏系数(Wang W Z等，2021)发现核幔分异引起的硫同位素分馏几乎可以忽略不计，这意味着无论是后期增生模型还是核幔分异都无法解释硅酸盐地球具有比球粒陨石更低的硫同位素比值的现象。计算还进一步揭示了在早期太阳系中，当H_2尚未完全散去时，星胚发生部分熔融，硫主要以H_2S的形式挥发，并带走了较重的硫同位素，导致残留的硅酸盐富集轻硫同位素。大约90%的原始增生硫挥发可以定量解释地球当前较低的硫同位素比值及硫含量。这说明早期挥发是地球建立其现今挥发性元素组成的关键因素，这为学界研究类地行星挥发分物质的起源提供了新的视角。

重要挥发分在行星表面和内部的分布和稳定存在形式同样受到关注。以氢为例，氢主要以结构羟基、水以及H_2的形式存在于行星表层和内部。尤其行星表面含水矿物反映了地质历史时期的液态水活动，这些矿物的类型和分布可以用于反演早期的气候和环境状态。通过行星探测数据分析含水矿物的种类，并结合地球上的类比研究探究其成因，可以更好地认识行星早期的宜居性演化进程(Ehlmann和Edwards，2014)。

挥发分如何影响行星的演化，以及类地行星的不同演化路径与挥发分间的关系，是值得进一步深入探讨的问题。特别是不同种类的挥发分在行星演化过程中是否呈现出与硫类似的特性目前尚不清楚。

3.2 火星的地貌演化

火星作为太阳系中与地球最为相似的类地行星，其丰富多样的地貌类型保存了从早期诺亚纪至今的重要地质信息。河道、古湖泊、冲积扇、层状沉积台地、蜿蜒脊、雅丹与风成脊等地貌特征，共同记录了火星水体演化、气候变迁和地质改造的历史痕迹。其中，多种与水活动相关的地貌形态不仅证实了火星表层曾存在液态水，还为评估其历史宜居性提供了直接证据。

当前火星地貌演化研究仍面临若干关键科学问题：首先，受早期探测器分辨率限制，对中小尺度地貌特征的识别存在不足，特别是亚马逊纪时期地表重塑、火山-冰相互作用等过程尚未得到系统解析；其次，火星地貌与地下水冰分布之间的关系仍不明确，制约了对火星气候演化和水圈变化的全面理解；再次，现有研究多依赖定性描述，缺乏对典型地貌演化过程的定量建模与精确年代学约束，导致火星气候与地质演化的重建存在较大

不确定性。

我们的研究发现火星的雅丹地貌长期受到南北向的古风场影响，与哈德利环流一致(Liu J等，2020，2021c)。横向风成脊(TARs)定年结果显示其形成于100万年前，并且至今仍在缓慢演化，表明火星风场在近期未发生显著变化(Gou等，2022)。火星南北二分性边界上的蜿蜒脊状地貌极可能是河流干涸后侵蚀形成的倒转河道(Liu Z等，2021)。这些发现表明，即使火星地质历史时期总体上为干冷气候，其在早期诺亚纪仍可能经历了较长时间的间歇性暖湿宜居时期，可能由火山喷发、撞击事件或自转倾角变化引发。

火星乌托邦平原南部是我国首次火星探测任务的着陆点，我们基于祝融号火星车的遥感影像和地形分析建立了该区域的地层序列模型，并识别出火山锥、撞击坑、多边形槽及风成地形等地貌(图4)(Zhao等，2021)。通过撞击坑统计定年，研究约束该区域的地质单元年龄约为757 Ma，远低于前人统计的北方荒原组年龄(3.6 Ga)，表明祝融着陆区在亚马逊纪经历了地表重塑事件。低矮丘陵形态分析表明，其形成可能与小规模岩浆活动有关，其中部分丘陵的底部凹陷可能由易挥发物质释放所致(Lin等，2023)。此外，凹锥地貌的形态特征和区域地质背景分析支持其为爆裂式泥火山形成的假说，即富含挥发分的泥浆在强烈地热作用下剧烈喷发(王乐等，2023)。这一发现支持火星北部平原古海洋假说，并具有重要的天体生物学意义。

上述发现深化了对火星地貌演化的认识，为理解火星表面水体活动持续时间、地下水冰赋存状态及早期气候环境重建提供了重要依据。与国际相关研究对比，这些研究推动了火星地貌研究从定性描述向定量重建、从表层形态分析向内部结构解析的转变。未来研究应着重提升火星地貌三维重建精度和时间分辨率，重点解析亚马逊纪及更年轻地貌的形成过程，深入探究风—冰—水相互作用驱动下的地貌演化机制。通过结合撞击记录与热演化建模，可进一步阐明地貌更新与局部环境变化的关联性。整合地貌、矿物与大气等多维度信息，有望构建火星气候变化与地貌演化的耦合体系，为评估火星长期宜居性演变趋势提供理论基础。

3.3　火星的水体演化

水是判定行星宜居性的重要指标之一。火星表面广泛分布着与水活动密切相关的次生含水矿物和地貌特征，如层状硅酸盐、硫酸盐、卤盐以及河谷网、三角洲和古湖泊等，这些证据共同揭示火星早期曾经历持续且活跃的液态水作用。然而，大多数气候模型却显示火星早期为寒冷干燥环境，难以长期维持液态水稳定存在，这一点与地质观测结果形成了显著反差。火星上的次生含水矿物，如层状硅酸盐、硫酸盐和卤盐，不仅记录了水活动的存在与演化过程，也反映了古环境氧化还原状态和化学条件。因此，系统研究这些矿物的形成机制、水—岩相互作用过程及其与有机质的相互作用，将为揭示火星表层环境演化和宜居潜力提供关键约束，进而建立水环境演化与宜居性之间的耦合框架。

我们通过实验研究发现，黄钾铁矾与其他铁硫酸盐矿物在火星低温低氧条件下表现出较高的稳定性，能够在含水环境中长期存在(Zhou等，2022)；火星低温酸性流体环境中四方纤铁矿能够与黄钾铁矾共生。研究成果支持，这些矿物的形成与泥岩成岩作用后的地下水面抬升和蒸发作用密切相关(Zhang等，2024)。

祝融号火星车着陆区的层状喷射物撞击坑(LECs)记录了火星过去3.5 Gyr以来的地下水冰层序。我们基于相关数据分析推测南部预选区(SUIP)区域600 m深和北部预选区(SCP)区域700 m深仍然可能存有地下水冰(Niu等，2022)。火星北半球六大平原的LECs直径随纬度升高而减小，反映出地下水冰层的地域差异，并进一步估算其地下水冰存量约24–110 m全球等效水层(GEL)，为未来火星采样和宜居性研究提供了关键数据(Gou等，2024a，2024b)。同时，基于祝融号火星车的探测数据，我们发现岩化的板状硬壳层，并通过短波红外光谱检测到特征吸收峰(~1.9 μm和~2.2 μm)，推测其为含水硅酸盐或含水硫酸盐矿物(图5)(Liu Y等，2022)。矿物学分析表明，这些含水矿物可能源于地下水涌溢或毛细蒸发结晶作用。这一发现不仅证实火星亚马逊纪水圈活动比传统认知更为活跃，也对这一时期火星极端干燥的假设提出了挑战。

通过火星原位数据解译，我们发现火星表面的卤盐矿物(如氯化物、溴化物、高氯酸盐等)受温度、相对湿度及大气成分等环境因素的显著影响(Wang X等，2021)。在较温暖干燥的赤道区域，卤盐矿物主要通过挥发和浓缩作用形成，而在北极地区，长期冷冻干旱条件使卤盐矿物呈现出高ClO_4^-/Cl^-比值，反映了与水体迁移和挥发物循环密切相关的富集机理(Li Y H等，2022)。此外，铁次生矿物(如铁氧化物和铁氢氧化物)可通过紫外辐射(254 nm)和CO_2气分作用促进氯酸盐(ClO_3^-)和高氯酸盐(ClO_4^-)的生成，这一发现揭示了火星表面卤素与铁矿物的复杂氧化还原循环(Qu等，2022)。

此外，基于模拟实验研究，我们发现火星黏土矿物和氢氧化物能够与有机分子发生吸附和赋存作用，为火星表面可能存在的生命提供了重要的矿物学证据(Nie等，2023)。批次吸附实验显示，静电作用是铁(氢)氧化物富

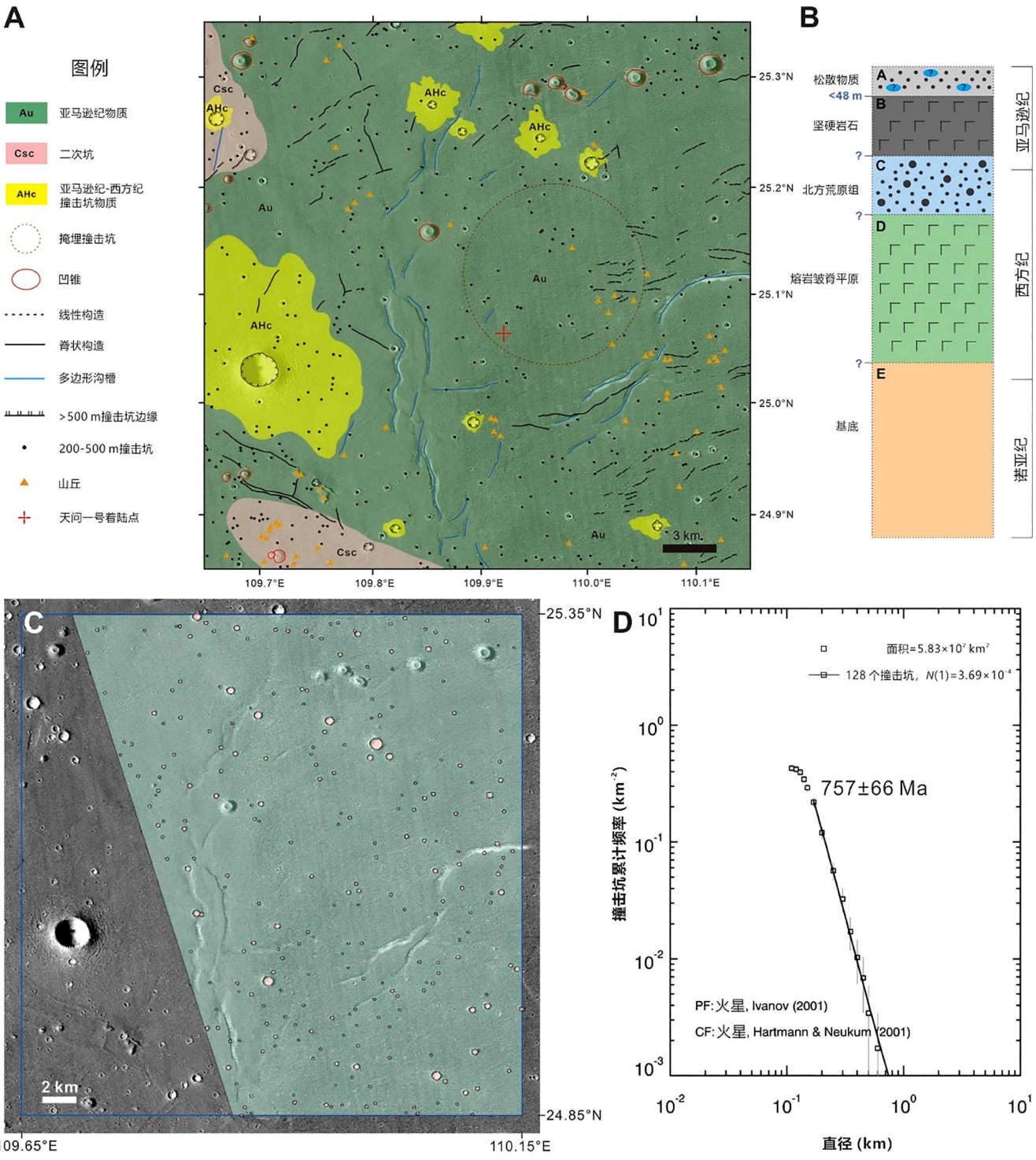


图4　祝融号火星车着陆区地质特征研究，参考Zhao等(2021)，Copyright © 2021 American Geophysical Union。(A) 祝融着陆区地质图；(B) 祝融着陆区地层柱状图；(C) 撞击坑统计定年区域(蓝绿色)，背景图是CTX (context camera)拼接图；(D) 撞击坑大小-频率分布曲线，PF和CF分别表示撞击坑产率函数(Ivanov，2001)和年代学函数(Hartmann和Neukum，2001)。$N(1)$为直径大于等于1 km的撞击坑的累计频率

集有机分子的主要驱动力。这一发现表明，火星表面矿物不仅可作为过去生命的潜在存储介质，也可能影响未来火星取样任务对有机物的探测。

在火星表面诺亚纪-西方纪之交的地层中，广泛分布有富铁氧化物和硫酸盐沉积；在中国柴达木盆地尕斯库勒湖东部干盐滩区域，我们也发现了类似的富铁氧化

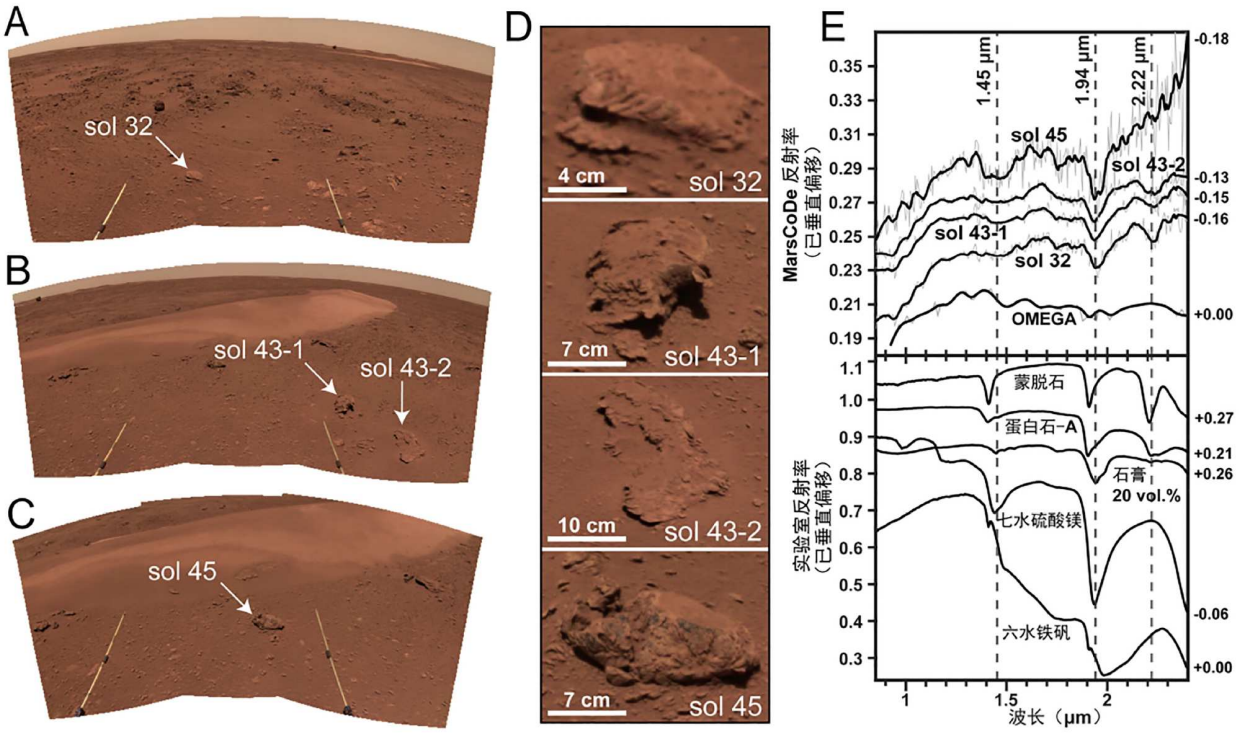


图 5　祝融号导航地形相机沿巡视路径拍摄的地物、板状硬壳层，及其短波红外光谱特征(Liu Y等，2022)。(A–C) NaTeCam全景图展示MarSCoDe在第32、43和45火星日进行光谱观测的局部环境，白色箭头指示目标岩石位置；(D) 目标岩石的放大图像；(E) MarSCoDe短波红外光谱与实验室光谱对比，轨道光谱OMEGA数据一并列出

物和硫酸盐沉积物。通过系统的地球化学分析，发现地下水驱动的铁迁移以及在干旱氧化环境下上涌的地下水强蒸发过程是这些沉积物形成的主因(Fang等，2024)。这一发现为火星表面类似现象提供了一种可能的形成机制，即地下水活动可能是火星表面干旱化进程中的一个重要地质过程，并对火星宜居性的演化产生了重要影响。

上述结果揭示了火星表面全球范围内的水-岩作用、氧化还原条件和水体迁移过程，提出了火星早期生命活动的潜在保存介质。研究系统展示了从轨道探测—就位巡视探测—实验模拟—机制整合的完整链条；同时，基于我国首次自主火星探测任务“天问一号”就位探测的原创性成果，也在一定程度上填补了国际研究中的数据和机制空白。未来研究应重点关注以下方向：一是利用实验模拟和热力学建模揭示火星低温冰冻环境下次生矿物的稳定性与转化机制；二是系统探讨水-岩相互作用在不同氧化还原条件下对Fe、S、Cl、Br等关键元素迁移与反应路径的控制作用；三是结合未来的天问三号火星采样返回任务(Hou等，2024，2025)，通过原位矿物与有机质共赋存关系分析，建立火星古水体演化、气候变迁与宜居性评估之间的综合模型。这些研究将为深入理解火星水环境演化历史提供新的科学视角，并为评估火星宜居性建立更完善的理论框架。

3.4　现代火星的大气和高能粒子辐射环境

火星现代环境虽以低温、干燥和稀薄大气为特征，但多项探测任务已证实其大气中存在水汽，火表和地下广泛分布有水冰及各种含水矿物和潮解物质。观测数据显示，火星大气中水汽浓度呈现明显的季节性变化特征，同时地下冰和极冠水冰也表现出显著的消长规律(Crismani等，2021)。这一现象反映出火星土壤中的水通过吸附、解吸和扩散等机制与大气发生耦合交换作用。模拟实验和数值模拟研究进一步揭示，风化层中的含水矿物在火星温压条件下可发生潮解与脱附反应，这些过程在不同时间和空间尺度上影响着大气水汽含量和水冰的全球分布格局(Vandaele等，2019)。这些发现表明，在现代火星表面环境下，水可在气体、液体和固体三相之间发生转化，并在大气、极冠、土壤和地下冰层之间进行全球性的交换与运移，从而驱动形成一个独特的火星水循环系统(尹浩安等，2024)。然而当前研究仍存在以下关键问题：一是缺乏对火星土壤水含量变化的系统性定量研究；二是火星沙尘天气与水冰分布之间的相互作用机制尚未

形成统一认识。这些问题的解决将有助于深入理解火星水循环系统对气候演化、尘暴形成及表面风化过程的影响机制。

我们通过模拟实验研究发现，火星沙尘暴的静电放电作用可诱发大气与土壤的化学反应，导致CO_2气体被固定为碳酸盐(Mao等，2023)。这一气-固相反应机制为理解火星大气CO_2循环提供了新视角，并可能影响其长期气候演化。实验还发现，在沙尘暴放电过程中，NaCl(氯化钠)晶体可产生空穴型色心和钠溶胶，同时伴随Cl元素的持续丢失。这些游离Cl可能进一步氧化形成高氯酸盐(Mao等，2022)，揭示了火星表面卤盐化学成分的演化路径，为未来火星资源利用提供了新思路(图6)。此外，火星大气温度的观测结合模式反演，发现全球沙尘暴期间形成的大气潮汐风场能进一步促进大气水的逃逸(见4.3节)。这些发现为理解火星现代气候系统提供了重要理论基础。

地面模拟实验与数值建模揭示了现代火星环境中水-土壤-大气之间的多尺度耦合机制，表明现代火星的水循环和气候过程并非孤立运行，而是在尘埃、电化学、水汽输运等多因素耦合驱动下共同演化。这些研究不仅推进了现代火星水循环的过程理解，也为未来取样探测与资源利用提供了新的思路，有效推进了火星现代大气—水—土壤系统领域的耦合研究。未来研究应进一步整合遥感观测、火星车就位分析和实验模拟结果，提升模型的区域适应性和过程解析度，深入探讨火星不同圈层之间的相互作用机制。同时，应关注水循环与气候演化对火星资源潜力和宜居环境评估的综合影响，为后续探测任务提供理论支持和科学依据。这些研究将有助于构建更完善的火星现代环境演化模型，并为未来火星探测和资源利用奠定基础。

高能粒子辐射也是决定类地行星宜居与否的一个重要因素。通过多种物理和化学过程，高能粒子辐射可能影响行星大气演化以及生命有机物质的合成和变异等(Boudaïffa等，2000；Dartnell，2011)。类地行星环境中的高能粒子可以分为两类：(1) 广域性高能粒子辐射，例如，星系尺度上跟超新星爆发相关的宇宙射线和太阳系尺度上太阳爆发活动产生的高能粒子等；(2) 局域性高能粒子辐射，主要与行星土壤、大气和磁层核物理、粒子物理和等离子体物理过程有关。由于大气层和磁层屏蔽效应，地球表面的高能粒子辐射相对较弱。相比地球，火星没有全球性的内禀磁场，仅有稀薄的大气；月球更是缺少大气。外部的高能粒子到达火星和月球后，能够与大气和土壤相互作用，产生大量的次级和反弹粒子(Dobynde和Guo，2024)，因此火星和月球更易受到宇宙射线和太阳高能质子的危害(Guo等，2021)。

基于欧洲核物理中心最新开发的Geant 4模型，我们利用蒙特卡罗方法，精确模拟了空间高能粒子在类地行星环境中传输和作用的过程。开发并验证了火星全球辐

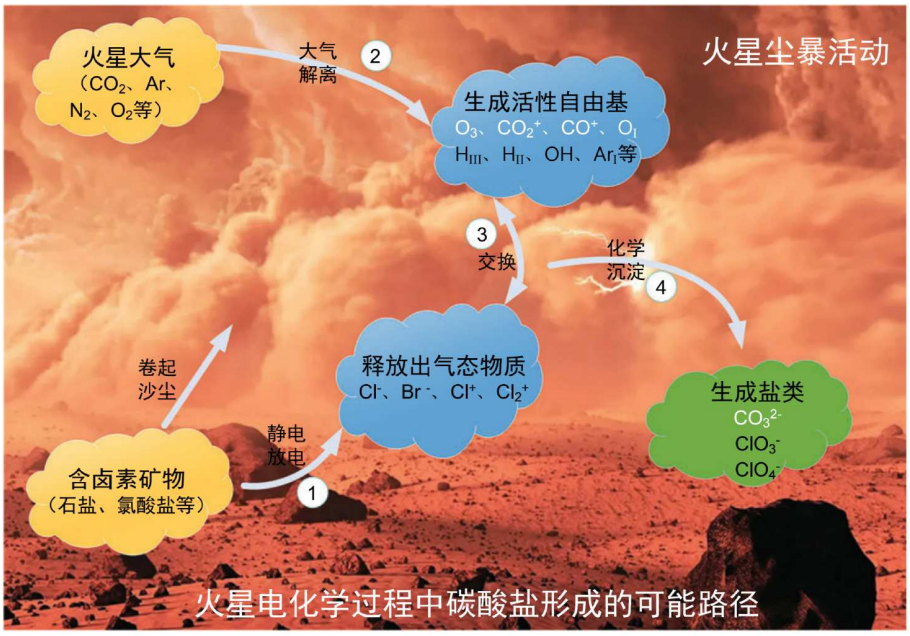


图6 火星尘暴静电放电过程中碳酸盐形成路径(Mao等，2023)。尘暴电化学促使的气-固反应生成碳酸盐的包括四个步骤：(1) 卤族和/或高氯酸盐释放的气态物质；(2) 大气电离或解离；(3) 游离物质(CO2+，CO+)与不同氧化剂之间的气相反应产生不同的碳酸盐物质；(4) 生成碳酸盐和(高)铝酸盐在火星表面物质上沉淀。底图火星沙尘暴来自Getty Images/Science Photo Library

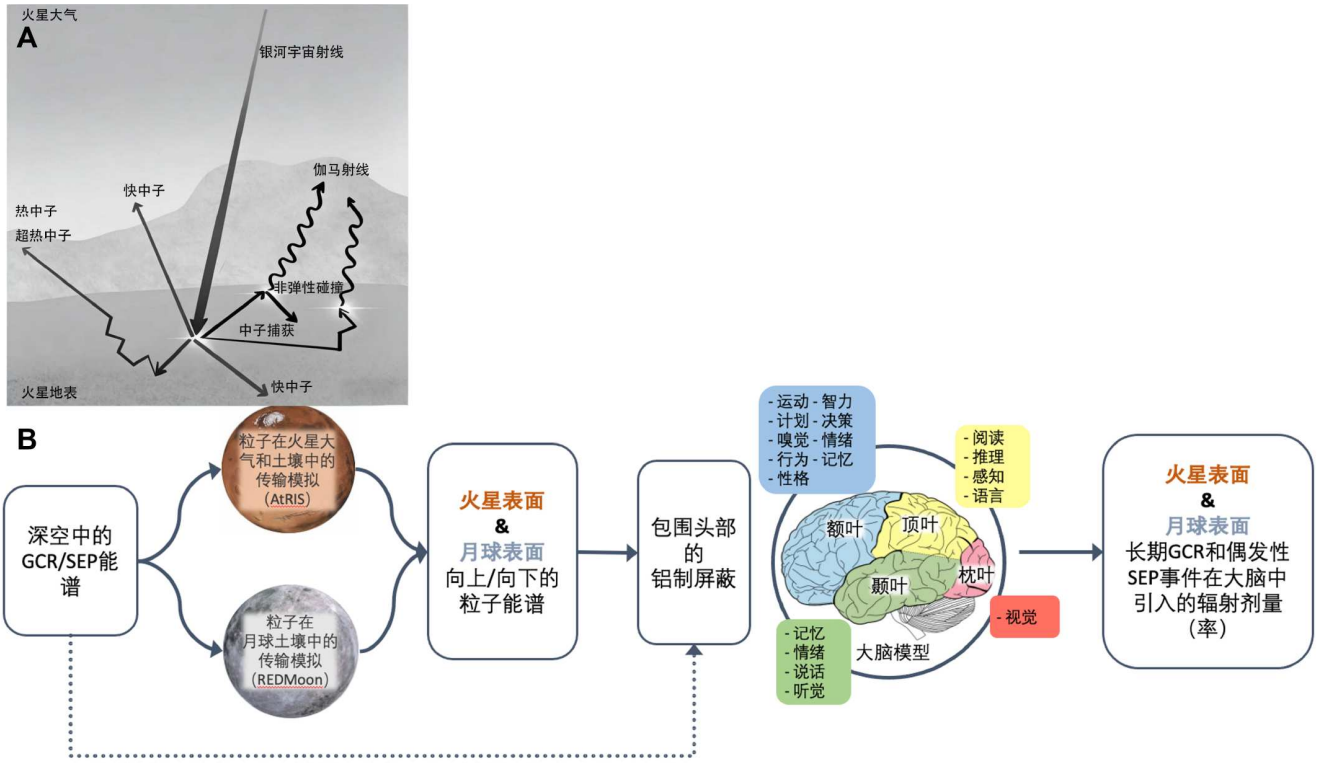


图 7　高能粒子在自然环境和人脑中的传输模型。(A) 高能粒子在自然环境中的传输辐射模型(改自Martinez Sierra等，2023)：空间高能粒子到达火星表面后和表面土壤作用，产生包括中子在内的一系列次级粒子，形成和深空不同的辐射环境。(B) 计算深空中的高能宇宙射线GCR或太阳高能粒子SEP到达月球表面、火星表面或深空中的飞船内部(虚线)的人类脑部产生辐射剂量的流程图：高能粒子与月/火土壤及火星大气的反应过程分别由REDMoon模型(Dobynde和Guo，2024)和AtRIS模型(Guo等，2019)计算，高能粒子到达有铝制头盔保护的大脑中后，可与大脑不同部位发生反应，其所产生辐照剂量由脑部模型(Li等，2023)进一步计算

射模型(图7左)，给出了不同大气厚度、地表高度和土壤深度处的高能粒子辐射强度，全面地描述了未来人类登陆火星不同位置所面临的辐射风险(Zhang J等，2022；Liu等，2023)；定量确定了未来建立火星基地的最佳取材和最佳地层深度，发现水含量较高的土壤具有较高的屏蔽效能，有效屏蔽的地层深度在0.5 m至2.5 m之间不等(依赖于土壤成分、太阳活动周期和火星大气)(Zhang J等，2023)。进一步利用真实大脑的三维CT图像，构建了高能粒子辐射在大脑中的传输模型(图7右)，并基于国际公认的辐射危害标准，提出载人行星探测辐射屏蔽的候选方案(Li等，2023)。

对比地球、火星和月球的辐射环境要更加恶劣。正如上面的研究展示的，主要的科学问题包括：广域的高能粒子如何在行星际空间中传输和分布?高能粒子如何在不同行星的大气和土壤中传输和演化?如何评估不同行星环境中高能粒子辐射对生命体的危害?如何减轻和避免未来载人行星探测任务面临的辐射危害?此外，高能粒子辐射如何影响行星的宜居环境，如何作用于生命的起源和演化等，是另一个非常重要且有意义的方向，值得探索。

4　开放的行星系统

行星不是孤立的体系，它们都或强或弱地与其周围的太空环境发生着相互作用。这种相互作用，使行星和太阳风之间持续进行着物质和能量的交换。地球和木星等有全球磁场和大气的行星，其两极绚烂的极光就是太阳风注入磁层、与大气作用的表现。水星这样有全球磁场、但没有大气的行星，太阳风会注入磁层、直接轰击两极的表面，扬起的尘埃形成了水星的外逸层(Leblanc等，2007)。火星、金星和彗星等没有全球磁场、但有大气的天体，高速的太阳风会直接冲击电离的大气，造成天体水和大气被太阳风剥蚀带走的效果，这被认为是火星和金星失去水和宜居性的重要原因(Lammer等，2018)。月球和小行星等没有全球磁场、也没有大气的天体，其表面土壤的风化和氢或水的注入也是太阳风连续几十亿年轰击表面的累计效应(Chaussidon，2012)。另外月表局部磁场附近的白斑和火星磁尾结构的扭曲，都显示月球和火星的局部岩石磁场也参与了与太阳风的相互作用(Blewett等，2011；DiBraccio等，2018)。这些行星与周围太空环境之间各式各样的相互作用，会不同程度

地影响行星表面和大气的挥发物逃逸，以及辐射环境，长期累积会进一步影响行星大气和宜居性演化。因此，研究行星系统与周围太空环境的相互作用，对理解行星的演化和宜居性有着至关重要的作用。

4.1 行星磁层与太阳风的相互作用

磁层是太阳风与行星的磁场和高层电离大气作用形成的主要由磁场控制的区域。行星磁层是行星际物质到达行星大气和表面的必经通道，也是行星大气和水向外太空逃逸获得能量和动量的主要区域之一。然而，行星磁层影响行星宜居性的具体物理过程仍不明确(Ramstad和Barabash，2021)。地球作为太阳系唯一一颗具有生命的星球，其大型偶极磁层保护了地球的水和大气不被太阳风剥蚀，也屏蔽了部分来自外部的高能粒子和宇宙线。作为对照组的金星和火星，地球的左邻右舍，它们没有偶极磁场保护。同位素观测证实了它们曾经发生过比地球严重很多的水逃逸(Donahue等，1982；Owen等，1988)。因此，一般认为行星磁层是一把“保护伞”，保护着星球的物质和生命。然而，也有观点指出行星磁层也可以是一个“漏斗”，磁层的存在极大地增加了行星与太阳风相互作用的横截面积，使行星系统可以获得的更多的太阳风能量，从而有可能使更多行星粒子发生逃逸。这两种理论都缺乏明确地观测支持，无法证明金星、火星和地球的粒子逃逸量有质的不同(Ramstad和Barabash，2021)。因此，要确定行星磁层是行星水和生命的一把“保护伞”还是粒子逃逸的一个“漏斗”，还需要进一步的研究。

火星表面的岩石剩磁能同时阻挡太阳风的离子和电子，形成“局地迷你磁层”；在没有岩石剩磁的地方，是火星高层大气和电离层与太阳风发生相互作用，这与金星类似，会在星球周围形成“感应磁层”。通过火星空间磁场的观测，我们发现火星强岩石剩磁会将火星空间环境的最外层边界弓激波顶到更高的高度，当强岩石剩磁在晨侧和昏侧时顶起的弓激波位置会分别向西和向东偏移，这说明火星强岩石剩磁形成的“局地迷你磁层”会穿过感应磁层进入磁鞘并与太阳风相互作用，从而使“局地磁层”也像地球全球磁层那样被磁鞘太阳风束流往尾侧拖拽发生延展(图8)(Guo等，2025)。火星“局地迷你磁层”的形态特征将为研究局地磁场对水的保护，以及地磁倒转期间地球空间环境状态提供依据。

水星具有弱全球性偶极磁场，能形成一个比地球磁层小很多的“小型全球性磁层”。该磁层的结构并不是地球磁层的简单缩小，其内部存在很多小型磁层特有现象。如磁通量传输事件(FTEs)在地球磁层更接近微观现象，

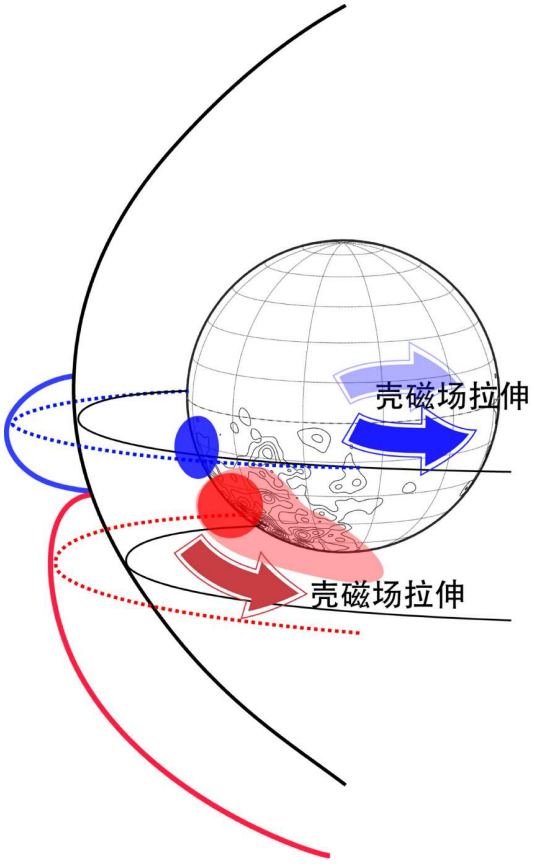


图8 太阳风与火星局地强磁场相互作用形成的“局地迷你磁层”的拖拽延展新图像(Guo等，2025)。极区附近的壳磁场(深红区)受太阳风压制弱，形成的迷你磁层(浅红区)能伸入磁鞘并被太阳风向后拉伸(红色箭头)，进而抬升上方大范围弓激波(红色曲线)。赤道附近的壳磁场在日下点受太阳风压制强，只在当地形成迷你磁层(浅蓝区)，进而只能抬升正上方弓激波(蓝色曲线)，当这些壳磁场旋转到晨昏两侧时，受太阳风压制变弱，伸入磁鞘并被太阳风向后拉伸(蓝色箭头)，使弓激波抬升区发生向后偏移

但在水星上一些宏观FTEs尺度能与水星磁层相当，我们发现这些宏观FTEs很可能是离子尺度通量绳合并形成(图9)(Zhong等，2020)，而不是地球上多重重联形成。磁层的小尺度还可能导致各种不对称性。在强行星际磁场下，水星磁层重联位置在晨侧更靠近水星，这会影响近水星空间等离子体环境(Zhong等，2023)，使得水星磁层的晨侧更容易注入太阳风，再加上水星偶极磁场位置偏北，最终形成水星磁层的南北半球物质能量分布不对称(Zhong等，2024)。水星内磁层的东向电流，也与地球电流体系不一致，这更新了对偶极磁层电流体系的传统认知(Shi等，2022)。水星磁层的等离子体和磁场特性，为理解比地球磁层小的偶极磁层内的物质能量输运带来了新的启示。

地球具有较强的偶极磁场，会形成10个地球半径大

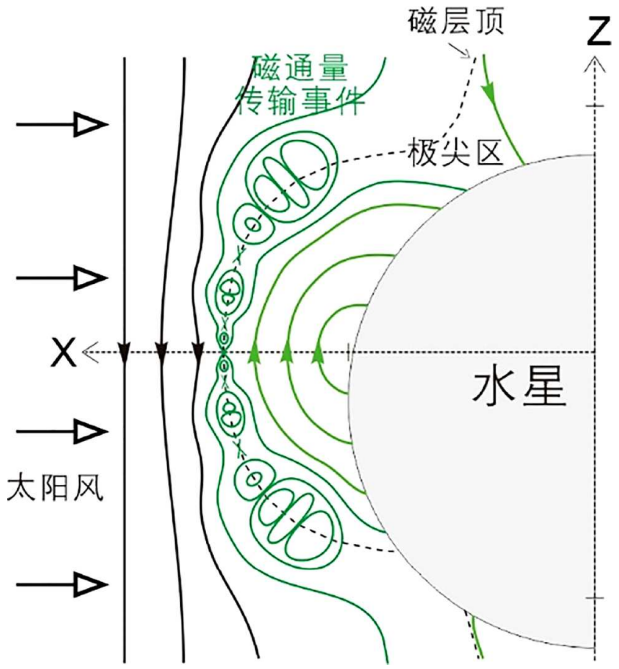


图 9　水星“小型全球性磁层”的宏观尺度磁通量绳形成过程示意图(Zhong等，2020)。磁层顶电流片通过强烈压缩，发生撕裂模不稳定性产生众多离子尺度通量绳。这些离子尺度通量绳在磁层顶传输过程中相互作用、多步骤合并从而产生宏观大尺度结构

的“中型偶极磁层”，它能偏转太阳高能粒子和银河宇宙线粒子的运动轨迹，从而起到地球“防护罩”的屏蔽作用。但是，历史上这个“防护罩”地磁场曾多次出现磁极倒转和偏移，这期间地磁强度会大幅降低。我们发现过去十万年间(Gao等，2022a)和著名的Laschamps地磁偏移期间(Gao等，2022b)，地磁场对高能粒子的屏蔽效应大幅减弱，进入地球大气层的宇宙线通量增加到现在的三倍以上。这些研究不仅评估了地磁场对高能粒子的屏蔽作用，也为进一步研究过去十万年间地球大气层中的宇生同位素产生率、低高度电离层电离率等科学问题提供了基础。另外，我们还发现当行星际日冕物质抛射到达地球时，会在地球内磁层形成了一条离子传输“高速公路”，会促进了快速而显著的大气离子逃逸。仅仅通过这条高速公路的逃逸率就可能远超火星和金星等非磁性行星目前的总体逃逸率(Zhang H等，2022)。这也说明了磁层过程的复杂性，及其对行星水和大气的作用的不确定性。

木星和土星的偶极磁场非常强，会形成远远大于地球磁层的“巨型磁层”，其内部的物质主要来自土星和木星卫星喷出的等离子体。加上行星本身的快速自转，这使得木星和土星的磁层循环主要受其内部因素控制，而不像地球磁层那样主要受外部太阳风控制。观测发现木星自转带动磁层一起自转对木星磁鞘的数小时周期超低频波有调制作用(Gu W D等，2023)，且木星晨侧普遍存在的电流片磁场曲率散射可能是木星X射线极光的主要起源机制之一(Gu W D等，2024)。我们构建了一个能模拟多成分输运过程的木星内磁层模式(Wang Y M等，2023)，并系统地探究了影响内磁层交换对流的主要因素(Wang等，2024)。我们还发现只存在于地球磁层夜侧的等离子体团，在土星磁层的日侧也大量存在(Xu等，2021)。这些研究对不同行星磁层尺度的物质能量循环对比研究提供了启示。

过去几十年里，行星探测基本都是单点探测的方式，而且太阳系八大行星基本都有了单点观测数据和研究。最近几年欧洲和日本合作的水星探测器BepiColombo、美国的火星等离子体逃逸和加速探测器Escapade、欧洲火星磁层-大气层-电离层和空间天气科学探测器M-MATISSE都是双星模式。我们的天问一号也可研究空-地耦合现象，其和美国MAVEN和将来的Escapade也可以组成双点，甚至四点同时观测。在未来的研究中，除了增加更多行星的探测器和积累更多数据，包括对各种类型的行星及其特征区域的重点观测，还可以考虑在多点观测的方向寻找突破。结合多卫星联合观测，再通过增加对日冕物质抛射期间的火星离子逃逸以及对其他行星地质样品分析，有助于反演过去几十亿年里不同行星的磁层和太空环境演化，再结合太阳风传播模式和各行星空间的高精度数值模拟，研究行星磁层动态变化和内外圈层耦合过程，深化太阳风动态变化对行星磁层和离子逃逸的控制作用，从而在行星太空环境影响行星宜居性的研究方面取得突破。

4.2　行星电离层与太阳风的相互作用

行星电离层是行星高层大气被太阳辐射电离了的部分。电离层中只有少部分粒子是电离的，大部分还是中性为主，因此中性成分和带电成分的碰撞极为频繁，使粒子之间在持续发生电荷交换、电离和复合等过程，这会影响电离层中等离子体电动力学过程，如波动激发、离子加速逃逸等(Ballester等，2018)，也会影响行星大气光化学过程(Cable等，2012)。根据行星具有的不同磁场和外部太阳风环境，电离层与太阳风的相互作用也呈现不同形态和电动力学特征。根据行星具有的不同大气和太阳辐射条件，电离层内部也具有不同强度的多组分、多尺度、多过程的复杂性(Haider等，2011)。

具有全球性磁场和大气的行星，其空间环境是由太阳风-磁层-电离层-大气层组成的多圈层结构，电离层不会直接与太阳风发生相互作用，这种多圈层之间的相互耦合和响应极为复杂。我们针对强耀斑事件，联合多种

地基和空基观测数据开展了系统的分析，获得日侧太阳风-磁层相互作用、全球磁层-极区电离层大尺度对流、沿磁力线的场向电流和全球电离层电子密度等多参量、多区域的对应参数分布。同时还结合了高时空分辨率磁层-电离层-热层理论模型的数值模拟，再现了观测到的由耀斑触发的磁层-电离层耦合系统的变化，首次揭示了太阳耀斑对电离层的影响(Liu J等，2021a，2021b)，以及耀斑后期极紫外(EUV)辐射增强对地球空间产生的影响(Liu X等，2024)，为预测包括磁层在内的整个地球空间响应太阳瞬时辐射变化奠定了理论基础。

不具有全球性磁场但有大气的行星，其电离层会与太阳风发生直接相互作用。这种直接相互作用不仅受到外部太阳风和太阳辐射的影响，还受到内部大气的各种波动影响。考察太阳辐射、太阳风变化、低层大气波动过程等对类地行星电离层和中高层大气控制作用，有助于理解行星大气离子逃逸过程，认识行星大气环境演化(Dong等，2015)。我们利用MAVEN观测数据，发现火星电离层与热层均出现显著的南北不对称性(Le等，2022)，揭示了火星北部和南部地形之间存在巨大差异，通过低层大气与高层大气的耦合过程，将低层大气的半球差异上传到高层大气，引起高层大气的南北不对称性；同时火星磁场南北差异也加剧了电离层的南北差异。我们还发现电离层与高层大气的经度变化可以由地形调制的非迁移潮汐的向上传播过程引起(Chen等，2022)，揭示了非迁移潮汐对低热层热结构的调制过程。

另一方面，联合行星际空间和太阳活动的观测，我们发现行星际激波压缩造成对流电场增强(He L等，2023)，这会促进源于高纬电离层的拾起重离子的能化和加速逃逸；还发现太阳耀斑会引起火星氢密度增大，诱发质子回旋波(Lin等，2022)、大尺度太阳风结构可使质子回旋波发生率增加10%–20%(Zhao等，2023a，2023b)，这为认识火星早期频发大耀斑引起的中性氢逃逸，以及行星际扰动加速氢逃逸提供了重要依据。

受探测数据质量和探测方式等诸多限制，高分辨数值模拟对研究太阳风和行星电离层相互作用必不可少。我们利用自主开发的多流体金星电离层-太阳风耦合模式(Dang等，2023)，揭示了金星电离层-磁层边界层开尔文-亥姆霍兹(KH)不稳定性的三维精细结构，通过分析金星KH不稳定性和氧离子外逸通量的分布，发现边界层不稳定性为氧离子逃逸提供了重要通道，氧离子在金星边界层的逃逸率达到4×10^{24}/s，这与卫星估测结果一致(Dang等，2022)。我们还开发了首套国内拥有自主产权的火星全球多流体磁流体动力学(MHD)模型(Li S等，2020，2023a)，揭示了火星全球电场分布特征(Li等，2023a)。同时基于对火星电磁场环境的模拟结果，我们探讨了太阳风质子和行星重离子在该环境下所受力情况(Song等，2023a，2023b；Li S等，2023b)，经过对多流体MHD模型耦合火星真实剩磁模型数值计算结果的分析，我们发现在火星剩磁区域存在较强的离子径向通量，并且其强度与磁场倾斜角有关。

此外，作为观测和数值模拟的补充，地面实验装置能从另一个方面开展相关机理和过程的研究。我们利用自主设计的电离层环境模拟地面实验装置(Liu Y等，2021；Jin等，2023)，成功复现了相互作用过程中边界层的存在。通过实验和观测结合发现结果显示，闭合磁场可以显著提高边界层高度，而开放磁场可以降低边界层高度(Jin等，2023)。实验研究还发现在类地行星等弱电离等离子环境中，等离子体动力学演化(如不稳定性激发、波动传播)会受到离子和中性离子之间非弹性碰撞的显著影响；以剪切不稳定性为例，中性组分和等离子体碰撞导致的电荷交换过程会显著降低速度剪切，从而影响等离子体不稳定性激发(Zhang X等，2023)。我们还在实验室中模拟了发生在底部电离层中的强碰撞，并在模拟的电离层中观察到了静电离子回旋波的激发和演化，证明了静电离子回旋不稳定性可以存在于E区电离层的弱电离等离子体中，并可以用来解释底部电离层中等离子体的加速逃逸机制(Liu Y等，2024；Huang等，2024)。

上述研究拓展了对于类地行星电离层内部动力学以及受外部太阳活动影响的认识，有助于提升对火星等类地行星宜居性演化过程和机理的认知水平。未来可以基于新的行星高层大气观测、利用国内行星空间环境模拟平台、发展新的行星高层大气数值模型和考虑更多火星电离层离子组分的火星-太阳风相互作用全球模型；可以进一步研究无内禀磁场类地行星的等离子体-中性大气上下耦合过程主控机制、强烈太阳风暴条件下的低层大气与高层大气的耦合，及其对大气逃逸的影响等。

4.3 行星大气的逃逸和动力学过程

行星大气通过调节表面温度、保护免受宇宙辐射和维持液态水的存在，对宜居性起着至关重要的作用。而大气逃逸不仅影响行星大气的演化速度，还可能决定行星能否维持足够的表面压力和温度来支持生命的存在。例如火星就可能因其没有全球性磁场，无法有效抵御太阳风的直接侵蚀，导致大气逐渐稀薄，从而失去了早期可能存在的液态水环境(Lammer等，2013，Lillis等，2015)。大气逃逸主要有两种机制：热逃逸和非热逃逸。热逃逸主要指分子动能通过各种机制达到逃逸速度，如金斯逃逸；非热逃逸则涉及太阳风剥蚀、光化学逃逸、

溅射逃逸等不依赖于热运动的物理过程(Johnson等，2008)。传统观点认为对于高表面温度、低质量行星，热逃逸在其大气损失中起到了极其重要的作用。相较于热逃逸，非热逃逸机制在低表面温度、质量较大的行星上更加重要，厘清类地天体大气不同成分的逃逸率及其主导逃逸机制对于我们认识行星大气逃逸的完整图像至关重要。

我们通过卫星观测数据，构建类地行星空间环境参数以及行星大气/电离层的特征参数；采用行星的热层-电离层化学模型(Gu等，2020)和MHD模型(Gu　H等，2023a)获取和补充无法观测的物理量，并通过蒙特卡洛粒子追踪模型获取非热粒子的逃逸概率(Gu等，2020，2021a，2021b，2023a)。我们构建了金星、火星、木卫一、海卫一等和系外“超级地球”(Kepler11b-f)的背景大气模型，通过比较这些天体大气中不同成分的热逃逸率和非热逃逸率，发现非热过程是驱动上述天体中性大气各成分逃逸的重要乃至主导机制，特别是对于一些比较重的粒子。该研究揭示了非热逃逸对驱动类地行星大气逃逸具有普适作用，因此是追溯行星大气演化历史、预测行星大气演化方向中需要重要考虑的因素。

类地行星的高层大气向上与外部空间环境(包括电磁辐射环境、粒子辐射环境等)，向下与低层大气(对流层、平流层)存在耦合，因此其大气逃逸率和主导逃逸机制将随着这些条件的变化而发生变化。其中最具代表性的就是火星，它的高层大气同时受到太阳辐射流量、太阳风动压、火星剩余磁场强度、火星沙尘含量等诸多因素的调控。这些因素共同造成的火星大气逃逸的复杂性和变化性，这一变化在某些极端事件(如日冕物质抛射、太阳耀斑、太阳高能质子事件、沙尘暴等)中显得尤为明显。针对这一问题，我们结合MAVEN和MRO等多个火星卫星的观测数据，提取太阳耀斑爆发和火星沙尘暴前后的火星大气和电离层分布特征。结合观测结果和蒙特卡洛粒子追踪模型，计算了火星大气各成分在上述极端天气事件前后的非热逃逸率(Gu等，2023b；Huang等，2023)，发现极端事件能够在很大程度上影响火星大气非热逃逸率，变化幅度可能高达一个量级，特别是非热逃逸过程逃逸随外部条件变化响应存在时间滞后效应。这是因为外部环境变化的特征时间尺度可能较短，而大气中的某些重要物理学、化学过程的时标可能较长，从而导致逃逸率的变化与外部条件的变化并不同步。

另外，我们基于大气波动中温度与风场扰动的动力学理论关系，利用MRO/MCS卫星对火星大气温度的观测，首次反演出沙尘暴期间火星大气潮汐风场，并揭示了大气潮汐活动对火星气候和环境演化的多种新作用机制，包括大气潮汐水平输运对水逃逸的促进作用，大气温度与水冰云潮汐的相互作用机制(Wu等，2020，2022)；结合火星气候研究与预报模式(WRF)进一步阐明了大气辐射-动力学耦合对沙尘活动的反馈作用(Wu等，2021)；联合多火星车观测和火星全球环流模式(GCM)，解释了大气潮汐主导的火星独特气压变化的形成机制(Yang等，2023)；基于多卫星观测，厘清了低层与高层大气间能量垂直输运的潮汐模态(Yang　C等，2024)。这些研究结果探讨了当前条件下类地行星大气非热逃逸方向的问题，也对深入认识大气动力学机制在行星大气演化、气候变化，物质、能量循环和演化中发挥的作用具有重要科学意义。

4.4　行星与太阳风相互作用的演变

不同时期的行星，具有不同的气候和宜居环境，其与太阳风的相互作用也是在不停演变的。无论是地球的沧海桑田，还是火星在三十几亿年快速从河流蜿蜒、湖泊满溢变得干枯冰冷(Villanueva等，2015)，都能在地质记录中窥得一斑。对于古代行星与太阳风的相互作用及其演变，又该如何开展研究?根据恒星演化理论，我们知道太阳辐射和太阳风条件会随着太阳年龄的增长而发生显著变化。青年时期的太阳，其极紫外辐射和太阳风条件都比现在强成百上千倍，且常是爆发性的(Boesswetter等，2010)；现在壮年时期的太阳，变得相对平静温和。这意味着早期行星与太阳风的相互作用，比现在观测到的要强很多。因此要研究火星和金星失去宜居性、与地球走上不同演化道路的原因等问题，就必须理解过去四十几亿年里它们与太阳风的相互作用。

虽然我们无法回到过去用卫星观测当时的太阳风-行星相互作用，但我们可以通过数值模拟和地面实验来反演模拟过去的历史。此外还有一个观测突破口，即现在的太阳风大尺度活动事件，例如，日冕物质抛射(CME)和共转流相互作用区(CIR)期间，对应的条件比较接近古代的太阳和太阳风条件(Wood等，2005)。美国MAVEN火星探测器通过观测CME到达之前和之后的离子逃逸，结合MHD模拟估算出火星离子逃逸率从每秒1.46×10^{24}个增加到3.34×10^{25}个(连续40亿年可逃逸覆盖全球的海洋深度，从5 cm增加到1 m)，考虑到早期太阳比现在CME期间还要强很多，证明火星早期太空逃逸是足够将火星气候从潜在宜居转变为干燥寒冷的(Jakosky等，2015)。天问一号发射后，我们利用天问一号的观测，结合全日球层模拟，做到了能够识别和提前预报火星周围的太阳爆发活动(Chi等，2023a，2023b)，并利用天问一号和MAVEN观测，发现CME期间电离层顶部电子和离子被大量

剥蚀，造成离子逃逸量的急剧增加(Yu等，2023)，该部分成果对研究和理解古代火星大气的演化及其在数十亿年来的宜居性变化具有重要的科学意义。

此外，我们发展了一系列太阳风MHD模型的高精度数值算法，能够比较准确地生成从太阳直至木星轨道以内的太阳风全球大尺度结构，并能模拟研究日冕物质抛射、太阳高能粒子等太阳扰动在行星际空间的传播演化过程(Shen等，2021a，2021b；Liu Y S等，2022；Lin等，2024)。这些研究能力的建设不仅帮助我们对日冕物质抛射从太阳到火星、木星的传播过程的理解，还为预报日冕物质抛射到达火星的时间及其影响提供了重要手段，也为认识古代的火星空间环境和水逃逸，理解行星空间环境的历史累积效应对行星宜居性演化的影响提供了重要的参考。

5 月球

月球虽然不是行星，但作为我们已知的唯一宜居星球的卫星，其起源、演化及其与地球的关系，是我们理解类地行星宜居性的非常重要的一个方面。尤其，月球保留了太阳系早期演化的关键信息，是研究地球和行星系统起源与演化的重要窗口。特别是我国嫦娥系列探测任务的实施，为月球科学研究注入了新的活力。

5.1 月球的起源与撞击作用

目前一般认为月球起源于一颗火星大小的原始星体与早期地球的撞击事件中，这种理论可以满足地月系统在地球化学和动力学两方面的约束(Canup和Asphaug，2001；Canup，2012)。月球形成的大碰撞事件不仅塑造了月球，也决定了原始地球的初始热力学状态和化学组成。这种理论提出之后科学家就从不同方面对其加以完善，但直到目前仍无法完全解释地月系统的所有特征，特别是关于月球磁场起源等关键问题尚未解决。因此，这次大撞击事件的具体机制仍然存在很多争议，例如有研究认为撞击产生的热能将会在地核产生温度分层结构，从而阻碍或者关闭地球早期发动机(Arkani-Hamed和Olson，2010；Roberts和Arkani-Hamed，2014)，然而也有研究认为这种撞击过程将破坏行星早期的温度分层结构，从而诱发产生发动机(Reese等，2010；Jacobson等，2017)。这些研究主要是基于理论的推测和分析，急需数值计算等其他方式的验证。但现有理论仍无法完全解释地月系统的所有特征，特别是关于月球磁场起源等关键问题尚未解决。因此，确定大碰撞的具体机制仍是当前研究的重点，亟需开展新的约束条件研究以深化认识。我们利用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics，SPH)方法对这次撞击以及月球的形成过程进行了数值计算，建立了描述月球形成的大碰撞过程的参数化热收支模型，深入分析了地核早期的热演化特征及其对地磁场启动的影响(Zhou等，2024)。结果表明，这次大碰撞事件向地核注入了大量热能，这些热量主要分布在地核最外层区域。这种特殊的温度分布源于碰撞体与原始地球核心的融合过程——碰撞体核心通常具有较低密度和较高温度的特性，导致其停留在地核外层形成热边界层，显著抑制了地核的热对流运动，使地磁场的产生延迟了约2.6亿年。

在形成之后，月球持续经历了的强烈撞击事件，这些撞击显著改变了其地形地貌、热结构和物质组成。南极-艾特肯(SPA)盆地撞击事件标志着月壳固结基本完成，足以保留撞击事件产生的地貌形态，月球地质演化从以内动力为主转向内外动力共同作用的新阶段(Guo D等，2024；Ji等，2022)。该事件对月球正面与背面的不对称性、磁场特征及后期玄武岩分布产生了深远影响，被视为月球科学研究的关键问题。我国嫦娥六号任务着陆于SPA内部的Apollo盆地，为深入理解该区域地质背景提供了有利条件。

我们基于多源遥感数据建立了南极-艾特肯盆地的地质层序模型(图10)，并进行了超高速撞击数值模拟(Guo D等，2024)。结果显示：(1) 撞击事件移除了表层物质，导致当前SPA盆地钍含量相对周边偏高；(2) 撞击并未完全剥离该区域的古老月壳，而是将其抬升至较浅层位。这些发现为理解SPA盆地的物质组成和演化历史提供了新的理论依据。

撞击作用不仅是月球地质演化的重要机制，也是建立月球地质年代学的重要依据。目前主要采用撞击坑大小-频率分布统计方法对未采样区域进行定年(Hartmann等，1981；Neukum，1983)。然而，在嫦娥五号样品返回前，作为该方法基础的样品同位素年龄在10–30亿年间存在长期空白，这一时段几乎覆盖了月球地质历史的一半，严重影响了定年结果的可靠性。嫦娥五号样品填补了月球撞击坑年代函数中的这一段空白，为验证和改进月球撞击坑年代函数提供了一颗“金钉子”。

我们基于嫦娥五号返回样品的精确年龄测定结果，对沿用近四十年的月球撞击坑年代函数进行了系统性更新(图11)(Yue等，2022)。研究通过整合嫦娥五号着陆区样品年龄与撞击坑频率分布数据，建立了更为精确的年代标定体系。与传统的年代函数相比，新模型给出的年龄估值普遍偏老，最大差异可达2亿年。这一更新为月球地质演化历史研究及内太阳系撞击通量演化分析提供了更可靠的时间标尺。

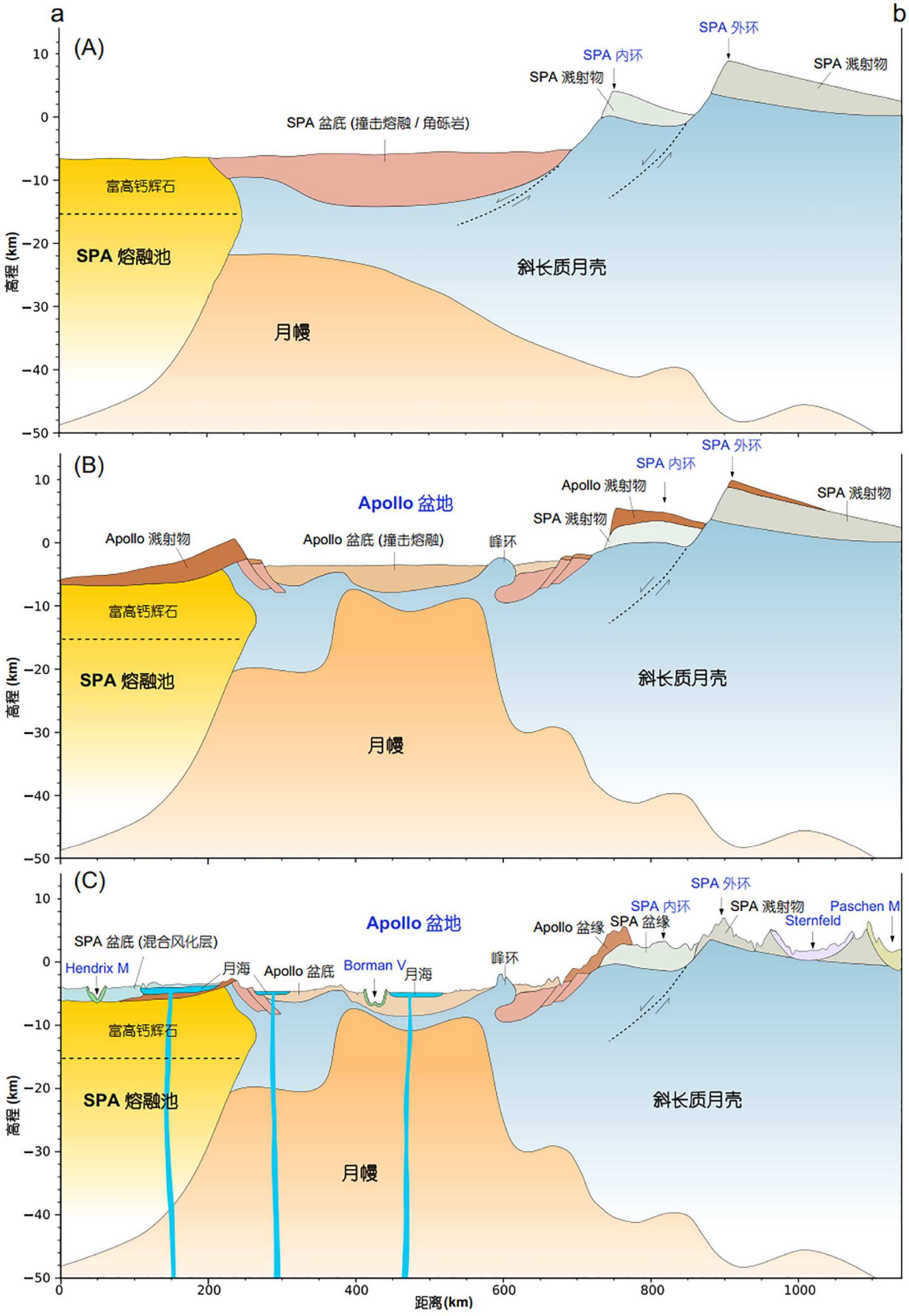


图 10　阿波罗盆地区域不同时期的地质剖面图(改自Guo D等，2024，Copyright © 2024 Elsevier B.V.)。分别表示SPA盆地形成后(A)、阿波罗盆地形成后(B)以及当前(C)的地质剖面图

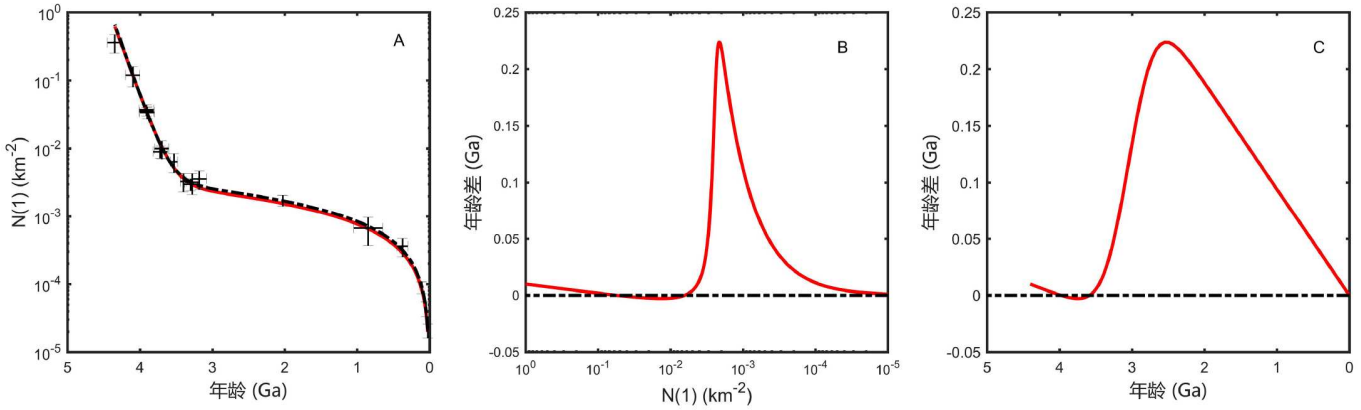


图 11 新月球年代学模型及其与广泛使用的Neukum模型的对比(Yue等，2022 Copyright © 2022, The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Limited)。(A)月球年代函数及控制点，其中红色实线表示利用嫦娥五号样品同位素年龄得到的新年代函数，黑色虚线表示Neukum(1983)模型，黑点表示根据月球样品同位素及对应区域的$N(1)$值得到的控制点，箭头所示为嫦娥五号样品的同位素年龄；(B和C)分别表示以$N(1)$和Neukum模型下的年龄值为参考得到的新旧年代函数模型的年龄差

5.2 嫦娥五号的启示

嫦娥五号任务在月球正面中纬度区域(北纬43.06°，西经51.92°)成功采集并返回了1731克样品，这些样品来自最年轻的埃拉托逊纪中钛玄武岩单元(Em4/P58，年龄约1.2–3.0 Ga)(图12)(Chen等，2023)。该采样填补了阿波罗和月球号任务仅局限于月球正面低纬度区域的空白，为研究月球演化提供了全新的样品资源。这些来源单一、地质背景明确的新样品，为深入理解月球内动力(如，热演化和火山活动)和外动力(例如，撞击作用和太空风化作用)演化历史提供了关键约束。

基于嫦娥五号样品的研究主要聚焦于解决两个核心科学问题：(1) 月球晚期火山活动延续之谜：探究风暴洋克里普地体的玄武岩岩浆活动为何能持续至约20亿年前。研究重点包括：嫦娥五号月幔源区是否存在克里普组分富集，生热元素(K、Th、U)及挥发分(特别是水)含量是否足以解释月球年轻火山活动的成因机制。(2) 月壤风化历史记录：分析月壤在亿万年时间尺度上受陨石撞击、太阳风注入、热疲劳等多种外动力作用改造的特征。这些改造过程形成的复杂结构特征和独特微观性质，是反演月表环境演变历史的关键信息载体。

嫦娥五号玄武岩的主量元素组成具有显著特征性，表现为高FeO含量(22.2wt%)、中等Ti含量(5.7wt%)、低K(0.1wt%)和高Al(11.6wt%)，与阿波罗和月球号采集的玄武岩存在明显差异。原位斜长石Sr同位素和磷酸盐Nd同位素分析表明，其组成与大多数阿波罗样品及陨石相似，而与克里普端元存在明显偏离(图13)。这一结果排除了嫦娥五号玄武岩月幔源区富集克里普组分的可能性，表明放射性元素生热并非导致年轻火山活动的主要因素。

熔体包裹体的原位水含量和氢同位素分析为理解岩浆演化提供了重要线索。其中，δD值最低的包裹体(代表最早捕获的岩浆)显示母岩浆水含量约为280 ppm (1 ppm=1 mg/L)(图14)(Hu等，2021)。考虑到水的不相容性以及嫦娥五号玄武岩源区低程度部分熔融(2%–3%)和高比例分离结晶(43%–78%)的特征，推算出的月幔源区水含量仅为1–5 ppm，表明该区域异常“干燥”。这一数值显著低于基于阿波罗样品和月球陨石的估算值，可能反映了以下两种情形：一是嫦娥五号着陆区月幔经历了长期岩浆活动导致水分逐步耗散；二是月球内部水含量存在显著空间不均一性，这对理解月球形成和补水过程提出了新的挑战(Hu等，2021)。

上述发现对月球热演化历史提出了挑战，由于月球质量较小，理论上它的火山活动在25亿年前就应当结束(Spohn，200)，但嫦娥五号样品研究发现月球20亿年前仍有较强的火山活动(Tian等，2023)，且其源区既不符合放射性生热元素(Tian等，2021)，也不富含水(Hu等，2021)，说明有必要更新现有的月球热演化模型(Carlson，2021)。

在外动力即月表太空风化特征研究方面，传统观点认为月球因其低氧逸度和缺水环境而呈现还原性特征，月表的纳米级金属铁(npFe0)主要由撞击引起的蒸汽还原作用形成。然而，嫦娥五号月壤样品的分析揭示了更为复杂的形成机制，包括歧化反应、冲击热分解和太阳风溅射等多种成因的单质金属铁，以及气化沉积成因的低价铜硫化物(图15)(Guo Z等，2022，2023，2024；Li D等，2022；Li C等，2024)。这些发现不仅拓展了月球表

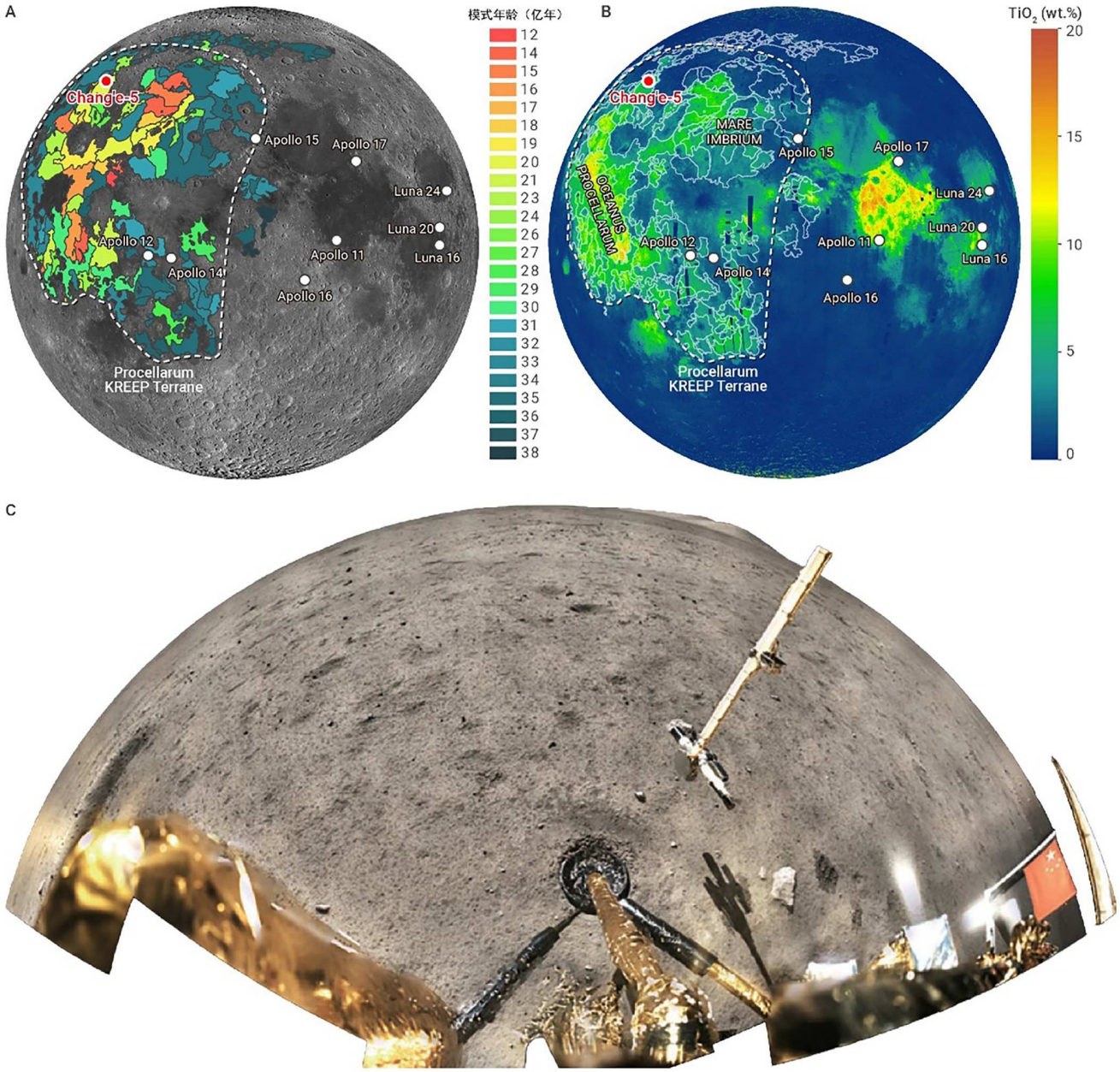


图 12　嫦娥五号着陆点和其他月球采样点(Chen等，2023)。(A) 风暴洋克里普地体月海玄武岩撞击坑模式年龄；(B) 月球正面月海玄武岩TiO_2含量分布；(C) 嫦娥五号着陆区铲取样品的图像

面还原反应的理论框架，也为准确评估月壤成熟度和反射光谱的太空风化效应提供了科学依据。尤为重要的是，我们在嫦娥五号月壤中首次发现了撞击诱导成因的亚微米级磁铁矿(Guo等，2022；Cao等，2024)，这一发现解决了长期以来关于月球表面是否存在自生磁铁矿的争议，并推测此类磁铁矿可能广泛分布于高钛玄武岩区域的月壤中。这些研究成果证实撞击作用是驱动月球表面微尺度氧化还原反应的主要因素，并初步构建了月球表面微尺度氧化还原作用的新理论体系，为理解月壤形成机制和时空演化历史开辟了新的研究方向。

尽管月球内部水含量极低，但长期太空风化过程中太阳风携带的氢粒子为月表提供了外源水补充。全球遥感数据显示，水(以OH形式存在)的丰度随纬度增加而升高，在极区可达500–700 ppm。此外，月球表面水含量还表现出时间变化特征。通过对嫦娥五号月壤中橄榄石、辉石、斜长石和玻璃颗粒的D/H比值及氢含量深度剖面分析发现，氢主要富集在颗粒最外层约100 nm范围内，含量最高达1116–2516 ppm，极低的δD值(−908‰至992‰)

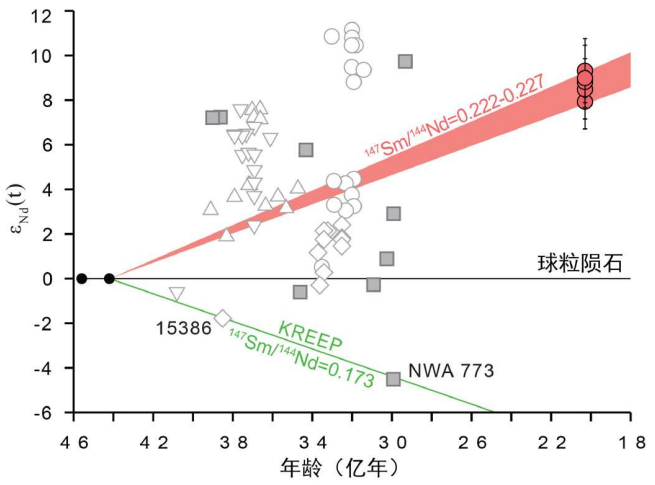


图 13 嫦娥五号玄武岩的Nd同位素组成(Tian等，2021)。玄武岩源区的$^{147}Sm/^{144}Nd$比值依据两阶段演化模型计算，即月球最初沿球粒陨石路径演化，直至44.2±0.07亿年前发生分异形成了玄武岩的源区。嫦娥五号玄武岩明显偏离KREEP的演化线

证实了太阳风注入来源(Xu等，2022)。不同物相(玻璃与晶体)呈现差异化的氢分布剖面特征，通过建立动态平衡模型，成功模拟了太阳风氢的注入-扩散-脱附过程。研究还发现，嫦娥五号月壤颗粒最外层100 nm范围内保存的太阳风衍生水含量约170 ppm，该数值与轨道光谱原位测量结果相当，可作为地面标定参考。模型预测高纬度细粒月壤(<2 μm)中太阳风衍生水含量可达~2 wt%。撞击玻璃珠中检测到0–1909 ppm的H_2O含量，其δD值从−990‰至522‰不等，表明太阳风来源水与玻璃珠中固有水的混合作用(He H等，2023)。这些玻璃珠可能储存了高达2.7×10^{14} kg的太阳风来源水，在月球表面水循环中发挥着重要的缓冲作用。

5.3 地月系统

月球受到地球和太阳引潮力作用会产生显著形变，同时其表面昼夜巨大温差导致的热负荷也会引发形变效应，这些形变过程会改变月球外部物理场的时空分布特征，这方面的研究不仅有助于理解地月系统演化，也为地球宜居环境形成研究提供重要线索，也对月表高精度观测和绕月探测任务具有重要的支撑作用。

我们提出了半解析解结合DVP(dual variable and posi-

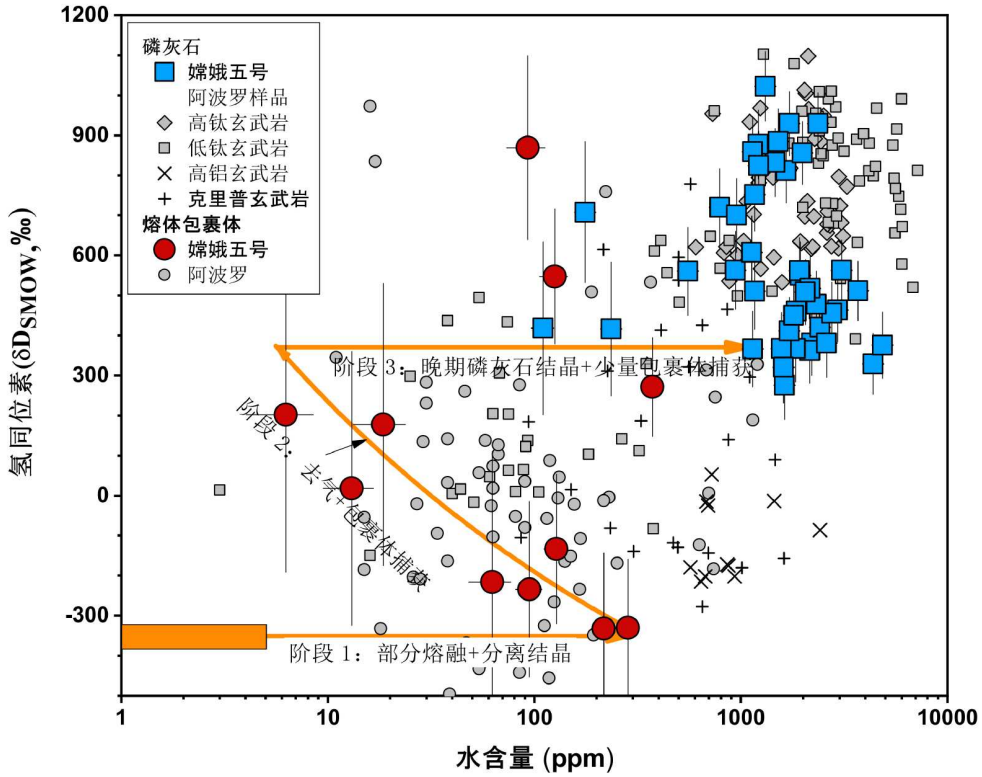


图 14 嫦娥五号玄武岩中钛铁矿熔体包裹体与磷灰石的水含量和氢同位素组成(Hu等，2021)。嫦娥五号玄武岩磷灰石具有非常明显的富氘特征，与阿波罗低钛和高钛玄武岩具有相似的氢同位素组成，与磷灰石晚期结晶相符(阶段3)，磷灰石结晶时母岩浆经历过强烈的去气作用，导致氢同位素分馏。相反，钛铁矿中的熔体包裹体呈现两阶段的演化模式，早期捕获的熔体具有贫氘特征，水含量与氢同位素负相关，指示熔体捕获与岩浆去气的叠加效应(阶段2)，晚期捕获的熔体具有与磷灰石相当的氢同位素组成(阶段3)。结合嫦娥五号玄武岩的岩石成因(Tian等，2021)，校正源区部分熔融与分离结晶效应，可以估算嫦娥五号源区的水含量为1–5 ppm(阶段1)

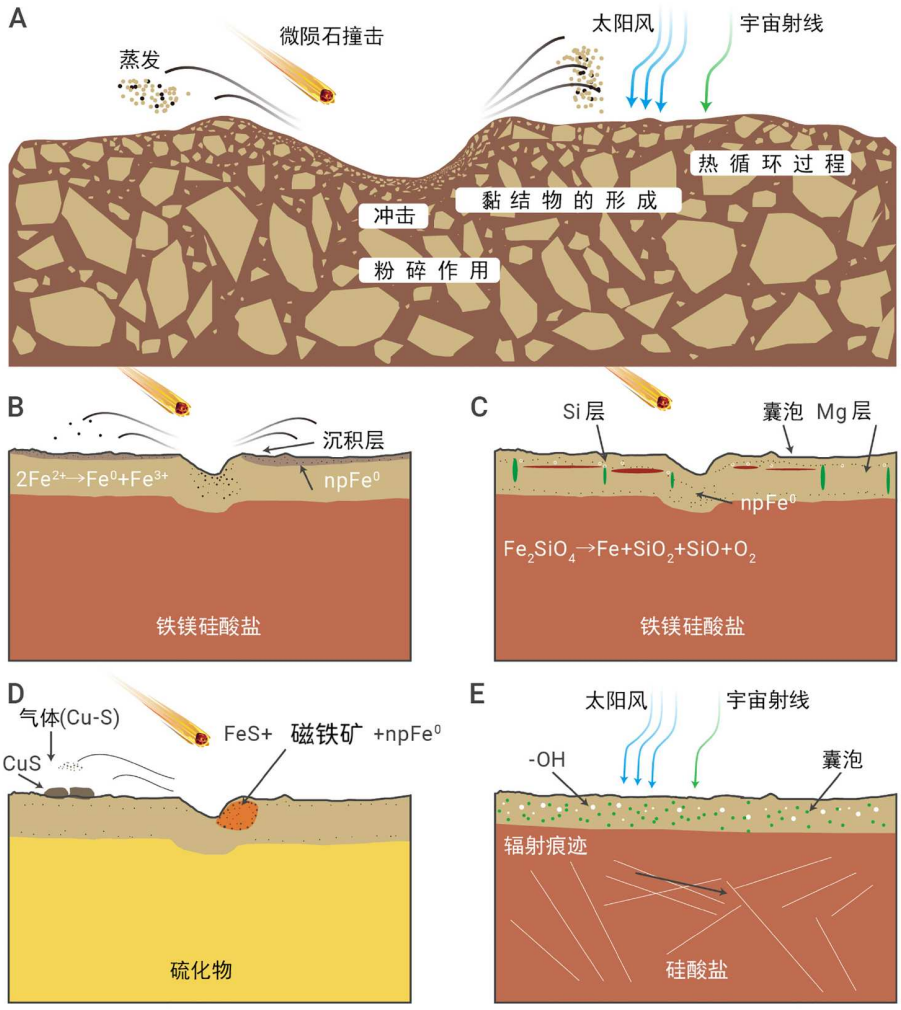


图 15　嫦娥五号样品中观察到的太空风化过程、影响和产物(Chen等，2023)。(A) 微陨石撞击、高能粒子轰击及热疲劳作用等风化机制；(B、C) 微陨石撞击过程中，微陨石坑内及周边区域发生的蒸发、还原及歧化反应，生成np-Fe0、SiO及三价铁离子；(D) 微陨石撞击过程中硫化物的改变，包括共晶反应形成np-Fe0和亚微米磁铁矿以及气相沉积的CuS；(E) 高能粒子注入产生的多种产物，包括水、氦气囊泡和辐射痕迹等

tion)传播矩阵法、(谱)有限元法以及自适应龙格库塔积分法，通过耦合热传导方程，建立了考虑自重效应的球形分层行星热弹性变形理论，并给出了非自重均匀球的严格解析解(Zhou等，2021a，2021b)。初步估算表明，地球内部的温度固体潮振幅可达1 mK量级(Zhou等，2023a，2023b)。这些研究发现，在热弹性变形理论框架下，行星温度场观测可成为研究其内部结构、地震震源性质及构造活动的重要技术手段。进一步我们通过数值模型，系统研究了地月系统的潮汐演化过程。数值模拟结果显示，在地月系统形成初期(约40亿年前)，地月距离仅为3倍地球半径，地球日长约6小时。此时月球对地球的引潮力高达3600毫伽，地球自转离心力为5300毫伽。随着潮汐摩擦作用的持续，地月距离逐渐增大至现今的60倍地球半径，地球日长延长至24小时，月球引潮力减弱至450微伽，而地球自转离心力降至333毫伽。这些结果表明：(1) 潮汐作用在地月系统早期演化中具有决定性影响，其效应随时间逐渐减弱；(2) 潮汐力对月球最终形状的形成具有重要贡献；(3) 潮汐加热是早期热演化研究中不可忽视的关键因素，必须在后续研究中予以充分考虑。该研究为理解地月系统演化机制提供了定量化的理论依据。

6　系外行星

上述研究聚焦于太阳系内天体，而系外行星在宇宙中普遍存在，尤其系外宜居行星是地外生命的潜在载体与地外文明摇篮。系外行星研究不仅丰富了我们对宇宙未知领域的探索，深化了对宇宙形成与演化的整体认知，也为解读地球生命起源提供了重要对照，并推动人类技术革新。长期以来，受限于太阳系这一单一参照样本，对行星宜居性的认知主要源于对地球及太阳系其他天体

的原位探测和遥感研究。随着近6000颗系外行星的发现，有望在宇宙尺度下检验宜居性的普适性，并为太阳系外生命摇篮的搜寻及人类在宇宙中是否孤独等问题提供重要经验预期(季江徽等，2024)。

6.1 系外行星大气及其形成演化

系外行星大气是评估其宜居性的关键要素。其物理状态和化学组成是否满足生命起源的初始条件?能否在宿主恒星及其他行星作用下长期保持稳定?行星形成演化过程又如何塑造其宜居性?解答这些问题均需深入刻画系外行星大气。然而，位于宜居带的系外岩石行星大气观测极具挑战，超出当前地基及空间望远镜设备能力。现有观测仍以气态巨行星为主，虽不具备宜居条件，但基于其开展的观测技术与方法研究，以及行星形成演化数值模拟，为未来宜居带类地行星大气表征奠定坚实基础，也助力通过比较研究深化对行星宜居性的认识。

系外行星大气研究主要依赖观测原子与分子谱线轮廓及连续谱特征，这对约束大气温度结构、化学性质和环流模式至关重要。然而，长期行星凌星透射光谱观测发现水蒸气的光谱特征普遍减弱。原因之一可能源于行星形成时的初始丰度偏低；更可能的解释则是晨昏大气普遍存在的云霾减少了大气可透射区域(Sing等，2016)。云霾的存在极大增加了精确测量行星大气化学丰度的难度，而后者对追溯行星形成演化历史具有重要意义。亟需识别能够约束云霾性质的光谱特征，以打破压强-丰度的简并关系，提高测量精度。

近期热木星光学波段透射光谱研究表明，可利用碱金属原子的压力致宽线翼约束云霾覆盖情况，进而实现对其大气组分化学丰度的精确测量(Nikolov等，2018；Chen等，2018)。另一方面，碱金属原子的线心轮廓携带了高层大气的温度与速度场信息。它作为为数不多能独立解析单线线心与线翼轮廓的良好探针，结合其他组分分析，可以同步约束低层至高层大气性质，全面重建大气的物理化学状态与环流模式。然而，当前针对碱金属压力致宽线翼的观测样本数量有限，且缺乏对这些样本线心轮廓的观测。因此，亟需结合低分辨率与高分辨率光谱技术，加强对碱金属原子的搜寻，以扩大能精确测量化学丰度及在宽压强范围内描绘大气特性样本的规模，并结合行星形成演化数值模拟，全面深化对系外行星大气特性的理解与认识。

我们利用地基4–10米级光学红外望远镜观测获取了21颗热木星的透射光谱，用于搜寻其大气组分。在部分行星大气透射谱中成功探测到氢(H)、钙(Ca)、钠(Na)、氧化钛(TiO)、氧化钒(VO)、氢化镁(MgH)、铬氢化物(CrH)等组分的吸收特征或霾的散射特征(Chen等，2020，2021a，2021b；Jiang等，2021，2023，2024；Kang等，2024；Yang Y等，2024a，2024b)，其中两颗行星的大气谱线呈现了显著的压力致宽线翼特征(Chen等，2020；Kang等，2024)，表明其晨昏线大气中存在部分晴空区域。这些组分是诊断行星大气云霾性质、化学丰度、温度结构和速度场的重要探针，为研究行星形成与迁移机制、高层大气加热机制、大气逃逸状态及环流模式提供了关键观测证据。特别是在对超热木星WASP-33b的高分辨率光谱研究中(图16)(Yang Y等，2024a，2024b)，基于中性氢(H I)和钙离子(Ca II)的探测结果推测其高层大气很可能处于非局域热动平衡状态，同时在凌星期间观测到夜侧水蒸气的发射特征，这一现象揭示了其夜侧大气存在温度反转结构，并表明其热传输效率高于预期。该发现不仅挑战了现有超热木星热结构模型，也为理解其三维化学、环流与热结构提供了全新视角。

此外，通过研究行星演化后期大气包层质量损失对紧致多行星系统构型的影响发现，最靠近恒星的行星若大气包层质量损失较小或损失时标较长，系统仍能保持稳定，表明观测到的稳定紧致多行星系统中的行星可能未经历显著质量损失(图17)(Wang和Lin，2023)。针对目前具备潜在大气可观测性的M型恒星周围类地行星研究，发现原位形成模型较迁移模型更符合观测，能形成多颗类地行星，但其含水量可能不足以支撑生命。向内迁移和反向迁移模型则能在宜居带附近形成含水量约10%的宜居行星(Pan等，2022)。上述研究为理解行星系统形成与演化提供新视角，尤其阐明气态巨行星、气体盘及行星大气质量损失等因素对类地行星形成与系统构型的影响，为未来系外宜居行星探测与研究奠定理论基础。

然而，当前系外行星观测研究仍处于大气组分探测的初期积累阶段，尚存在以下局限：(1) 缺乏覆盖宽波长范围、高光谱分辨率的数据以全面解析大气特性；(2) 行星形成演化的数值模拟尚未与大气观测特征建立有效关联。随着詹姆斯-韦布空间望远镜(JWST)和地面高分辨率光谱仪观测数据的持续积累，未来有望在揭示特定目标的大气形成演化机制及其宜居性评估方面取得突破。

6.2 富氢系外行星大气逃逸

行星大气的稳定性是评估行星宜居性的基本前提。然而，大气逃逸过程贯穿行星的整个生命周期。太阳系行星的大气逃逸主要受非热逃逸机制主导，其物质损失率介于每秒几克至几公斤之间(Lammer和Bauer，1991；Cui等，2008)。相比之下，对年轻或近距离系外行星的观测揭示了更为剧烈的流体动力学逃逸现象(Vidal-Mad-

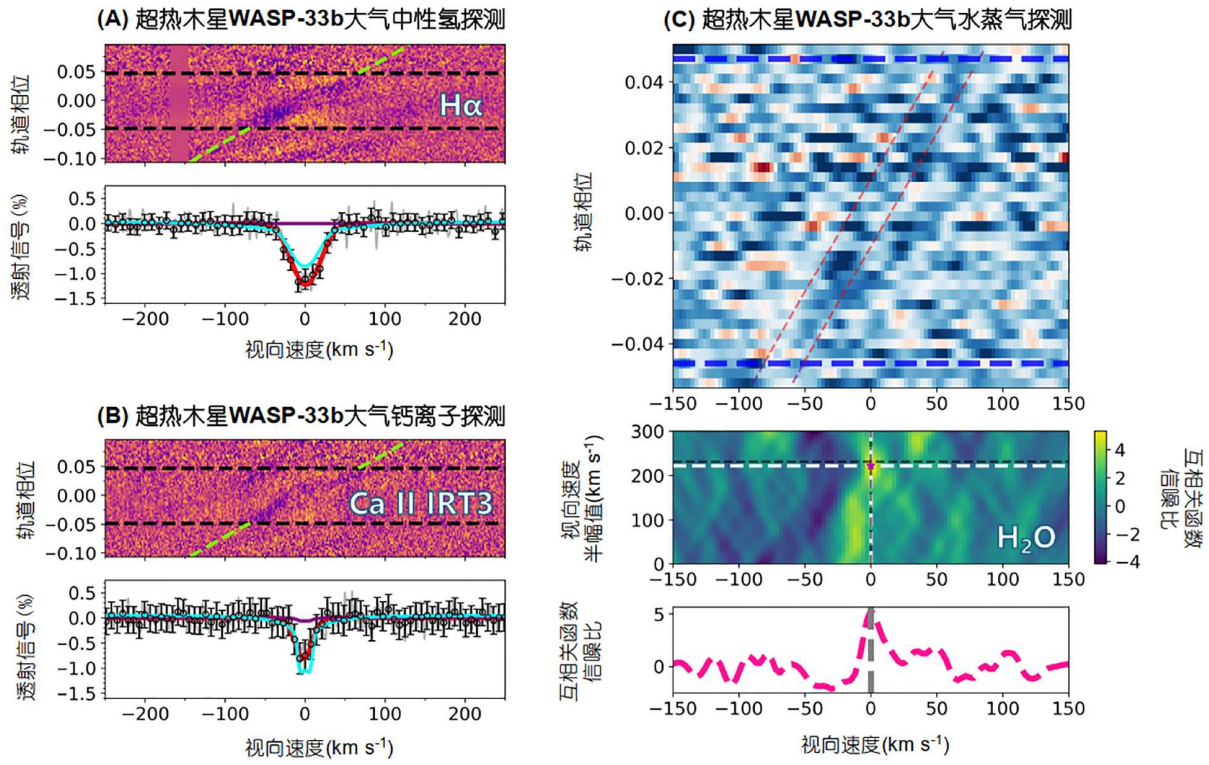


图 16　基于高分辨率光谱数据的超热木星WASP-33b大气成分探测结果(修改自Yang Y等，2024a，2024b)。(A) 晨昏大气的中性氢(H I)探测：第一行为恒星静止帧中相位分解的H I吸收信号，第二行为行星静止帧中相位叠加的H I信号，绿色虚线为行星轨道，黑色虚线为凌星起止相位；(B) 晨昏大气的钙离子(Ca II)探测：格式与(A)一致；(C) 夜侧大气的水蒸气(H_2O)探测：第一行为恒星静止帧中相位分解的H_2O互相关信号，第二行为行星静止帧中相位叠加的H_2O互相关信号，第三行为信噪比极值对应半幅值处的信噪比曲线

jar等，2003，以下简称流体大气逃逸)，其逃逸率可高达10^8–10^{12}克/秒(Yan和Guo，2019)。从行星演化角度看，富氢大气是类地行星形成初期的普遍特征。在行星演化的早期阶段(约数百万至数千万年)，行星大气主要呈现富氢状态。随后的岩浆海洋固化阶段(此时恒星高能辐射强度可达太阳的几倍至上百倍，持续约数千万至1亿年)，表层水蒸发进入高层大气形成水蒸气，并在恒星辐射作用下被光解为氢和氧。其中氢原子在辐射加热作用下逃逸，而氧原子则通过氢原子的摩擦拖曳作用随之逃逸，这一过程可导致数个地球海洋当量水分的损失(Guo等，2019)。因此，研究富氢大气的逃逸机制是理解类地行星大气演化和宜居性变化的关键基础。

影响流体大气逃逸的因素包括：恒星的潮汐力、X射线和极紫外辐射、行星内能等。尽管已有大量研究采用流体模型模拟极紫外辐射驱动的富氢大气逃逸过程，但目前仍缺乏对流体大气逃逸的整体认识。关键科学问题包括：不同族群行星大气流体逃逸的驱动机制及其表征方法、类地行星富氢大气的持续时间(虽然研究表明长期存在的富氢大气可能抑制水的逃逸，但具体持续时间尚不明确)、重元素组分的逃逸机制，以及磁场对流体逃逸的影响等。这些认知的缺失严重制约了我们对行星起源、演化和宜居性的理解。

我们的研究发现，在没有其他外部能量源的情况下，那些低质量、大半径的“胖行星”仅依靠自身高温就足以驱动流体大气逃逸。这一过程要求行星的金斯参数(描述行星引力势能与热能比例的无量纲参数)必须小于3.5(图18)。然而，当考虑外部能量驱动过程时，如恒星的极紫外辐射加热和潮汐力做功驱动的流体逃逸，传统的金斯参数就失去了区分能力。为此我们提出了考虑潮汐力影响后改进的金斯参数，这个新参数使我们能够更精确地区分不同外部能源导致的大气逃逸物理过程。即当行星距离主星很近且改进的金斯参数低于3时，强大的恒星潮汐力成为大气逃逸的主要驱动力；当改进的金斯参数介于3到6之间时，恒星的极紫外辐射和潮汐力都可能触发大气逃逸；而当改进的金斯参数超过6时，潮汐力的作用可以忽略，大气逃逸主要由恒星的极紫外辐射加热驱动(图18)。该研究利用基本的恒星-行星系统物理参数，首次对低质量行星大气逃逸驱动机制进行了清晰分类，为包括类地行星在内的低质量行星族群在不同演化阶段应采用何种大气逃逸驱动机制指明了研究方向(Guo，

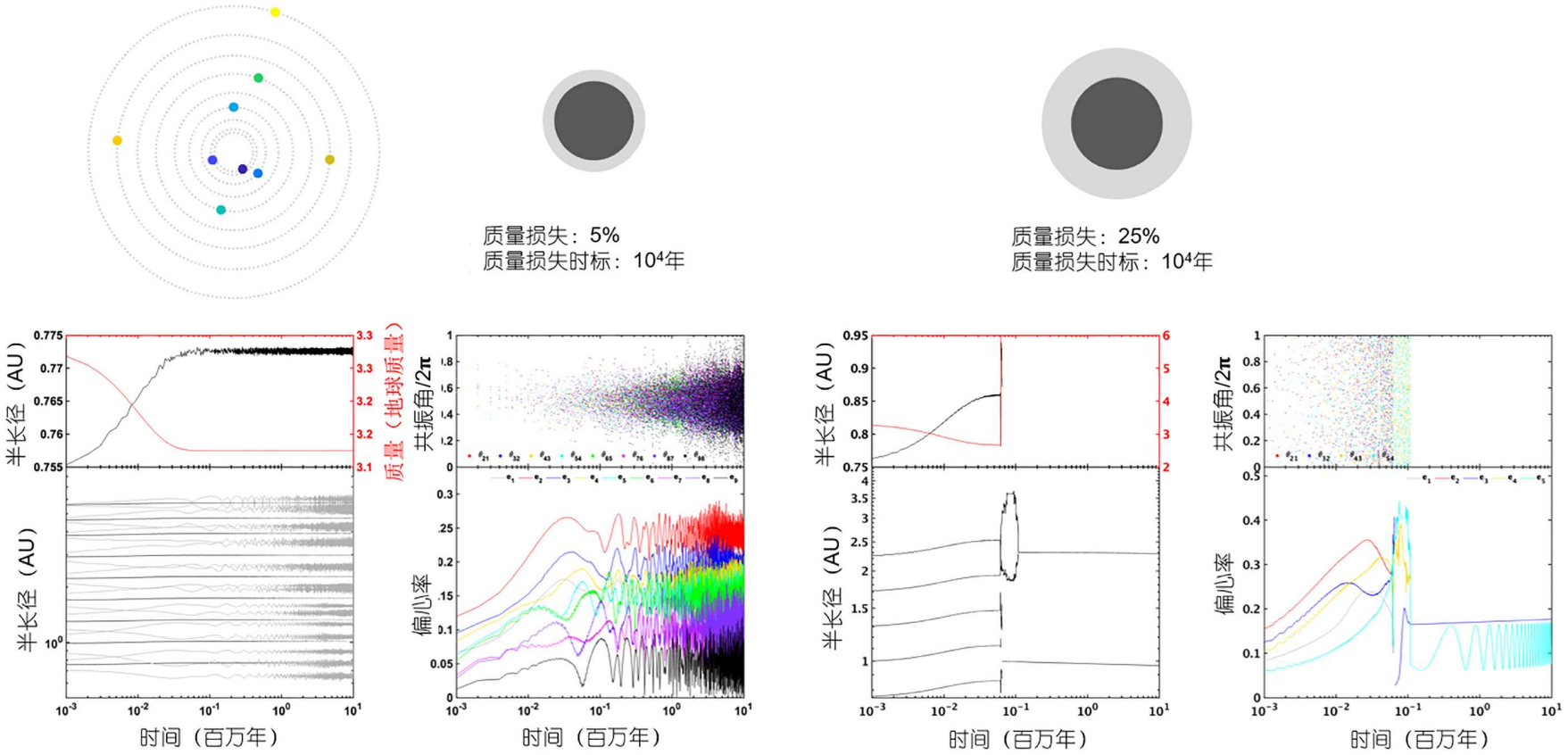


图 17 原行星盘消散后，紧致多行星系统构型在大气质量损失影响下的演化(Wang和Lin，2023)。左图显示的是行星的大气损失较小时，行星轨道的演化。5%的大气质量损失下，行星的轨道向外迁移，同时行星的偏心率被激发起来，但是行星之间的共振角仍然在平动状态，系统构型保持仅共振构型不变。右图则显示了行星质量损失在25%的情况下的构型演化。该情况下，行星之间的共振状态破坏，行星的偏心率可以激发到超过0.3，系统不再稳定，行星之间发生碰撞合并过程，最终形成距离较远的大质量行星系统构型

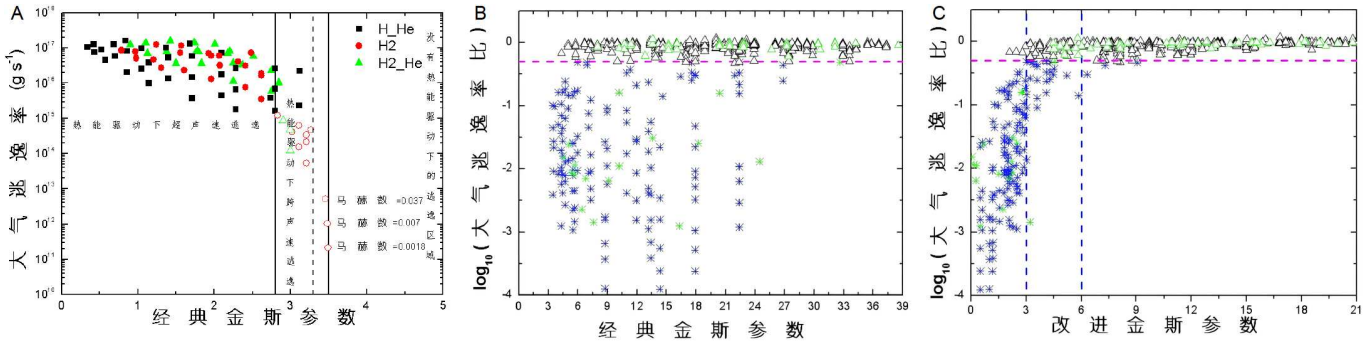


图 18　改进的金斯参数能有效区分极紫外辐射加热与潮汐力驱动的大气逃逸机制，据Guo(2024) Copyright © 2024，The Author(s)，under exclusive licence to Springer Nature Limited。(A)中横坐标为金斯参数，纵坐标为大气逃逸率；当金斯参数小于3.5，不需要其他外部能源驱动，大气可以自发逃逸；这类逃逸的发生要求行星的温度足够高或者引力势非常小。(B和C)横坐标分别为金斯参数和改进的金斯参数，纵坐标为没有包括潮汐力和包括了潮汐力下两种情况下大气逃逸率的比；对于金斯参数大于3.5的情况，使用经典的金斯参数无法区分宿主恒星的极紫外辐射加热(三角形)和潮汐力(星号)驱动的大气逃逸(B)；使用改进的金斯参数，它们能够被很好地区分(C)

2024)。

另一方面，我们基于多流(磁)流体动力学程序PLUTO-XMF，通过模拟不同大气组分相互之间的耦合过程，来追踪各个组分的逃逸情况(Xing和Guo，2023)。确定了热木星WASP-121b在氢原子光学谱线Hα(6563埃)的透射光谱信号是由于流体大气逃逸产生(Yan等，2021)，由此表明在光学波段探测行星流体大气逃逸是可行的。另外，一些系外行星在Hα和氦原子近红外谱线(HeI 10830埃)都显示了行星大气的信号。由于缺乏完备的计算模型，对它们的同时解释是国际上的难点。我们通过对蒙特卡洛辐射转移模型的改造，首次利用流体大气逃逸对热木星HAT-P-32b在Hα和HeI λ10830波段的透射光谱做出了解释(Yan等，2022)。更进一步的，为了解释许多热木星在HeI λ10830的观测信号，需要一个很低的氦丰度；但是对其物理原因缺乏认识。我们开发了一个多流的流体大气逃逸模型，对氦的逃逸进行了模拟，结果表明造成热木星HD 209458b大气中氦元素的缺乏是由于在大气逃逸过程中的质量分馏现象，即大气中氢和氦的解耦导致了氦元素的逃逸困难，这是导致行星大气中氦丰度下降的重要原因(Guo，2024)。其他重元素也存在类似的现象(Xing等，2024；Yan等，2024)。

研究伴随恒星演化的行星的可宜居性是一个涉及多方面、需要多种观测和模拟手段的长期工作。我们虽然解决了富氢行星大气流体逃逸的驱动机制和元素分馏等问题，但目前我们发展的恒星-行星协同演化模型尚未包含类地行星早期富氢流体大气逃逸过程。此外，考虑到类地行星的演化历程，富氢大气可能仅存在于其演化的最初阶段。与这些系外行星对比，地球大气组成已与富氢行星存在显著差异。

6.3　恒星活动对行星宜居性的影响

恒星宜居带有如下两类定义方案：(1) 水宜居带是指恒星周围的某一个区域内，行星表面可以维持液态水的存在，这是基于地球上生命依赖于液态水的事实推断出的生命存在可能性范围；(2) 紫外宜居带则是指恒星周围的一个特定区域，在此区域内，紫外线辐射水平适宜生命发展，适量的紫外线对于某些生物化学过程是必要的，但过量则会损害生命。通过结合这两种宜居带的概念，科学家们能够更全面地评估一颗系外行星是否具备支持生命存在的条件，这不仅关注行星所处的位置，还考虑到其大气层、磁场等特性以及恒星的性质。

恒星磁场不仅深刻影响着恒星自身的形成和演化过程，也与行星系统的形成、行星大气的化学演化乃至生命的起源条件密切相关。伴随恒星磁活动而增强的X射线和紫外辐射，对行星宜居性具有重要而复杂的影响。一方面，恒星的X射线、极紫外辐射及耀发事件会显著剥离行星大气层，抑制生命的形成(Lammer等，2007)。从生物学角度看，高强度紫外线辐射会破坏分子键，导致核酸和蛋白质等生命必需化合物的降解。另一方面，研究表明，适度的紫外线照射反而可能促进某些化合物的合成，特别是核糖核酸等生命基础分子的形成(Ritson和Sutherland，2012)。

过去数十年来，研究者通过多种方法对恒星磁活动进行了深入探索，在恒星不同活动性表征之间的联系、活动性-自转关系、恒星活动随时间的演化及其物理机制等方面取得了一系列重要进展，然而仍存在诸多未解之谜(Güdel，2004)。例如，恒星活动性与年龄的确切关系为何?恒星演化至10–20亿年后，其活动性随年龄降低的

规律是否依然成立?磁场加热日冕的具体机制是什么?这些关键问题的悬而未决，严重制约了我们对恒星磁场产生与分布机制、发电机理论、磁场与日冕相互作用的动力学过程，以及等离子体能量累积与释放等基本物理过程的理解。同样地，恒星磁活动与行星宜居性的关联作为新兴研究领域，仍存在大量不确定性，这极大限制了我们探索生命起源和搜寻系外生命的科学认知。

恒星磁场对不同大气包层的差异性加热导致了丰富的活动现象。在光球层主要表现为黑子形成与光学耀发；色球层活动通过氢巴尔末线系、钙离子发射线(Ca II H&K线)等发射线及紫外光变来表征；而冕层活动则体现为X射线和射电辐射。我们综合利用GALEX(Galaxy Evolution Explorer)卫星的紫外观测数据、Chandra和ROSAT卫星的X射线观测数据，以及中国LAMOST巡天望远镜的海量光谱数据，系统计算了各类恒星的多波段活动性指数。通过分析不同活动性指数间的关联性，统计活动性与自转的关系，深入探索了不同类型恒星的发电机机制(Wang S等，2020；Han等，2023，2024；Li X等，2024)。

基于X射线和Hα(6563埃)活动性的分析研究表明，恒星活动性-自转关系呈现出复杂的双区特征：慢衰减区显示活动性仍与自转相关，而非传统认为的饱和状态；快速衰减区则表现出X射线活动与罗斯比数的强相关性(Han等，2024)。值得注意的是，高温星与低温星在快速衰减区具有不同的斜率特征，这可能源于活动周期内的强度变化或不同的发电机机制(Han等，2023)。对M型恒星的研究发现，其远紫外和近紫外活动性指数呈单峰分布，而Hα和Ca II H&K指数则呈现明显的双峰分布，双峰间隙反映了活动性从饱和区向不饱和区的快速转变(Li X等，2024)。我们还进一步量化了恒星X射线辐射引发的行星大气质量损失率。研究表明，位于水宜居带内的类地行星极易损失其原始氢/氦包层(约1%行星质量)，这有利于形成次级大气并创造生命孕育条件(Han等，2024)。通过对约5000颗M型恒星的水宜居带和紫外宜居带的系统计算，发现70%的恒星同时满足这两个宜居条件(图19)。这项大规模M型恒星紫外宜居性评估工作，为在M型恒星周围寻找宜居行星提供了重要依据(Li X等，2024)。

以上研究成果不仅深化了对恒星活动性演化规律的认识，也为后续开展更高质量的天文观测和更精细的研究提供了重要样本。未来可以通过系统的理论建模，动态模拟恒星活动性演化对行星宜居性的长期影响。

7 总结与展望

我们系统总结了过去五年中国科学院“类地行星的形成演化及其宜居性”战略性先导科技专项的研究进展。通过本文的描述，可见行星是一个非常复杂的系统，从内部高温高压的固体和流体，到表面气液固多相作用界面，再从大气中性成分，到电离层和磁层的等离子体状态，行星介质涵盖了宏观物质的所有状态。行星系统不仅本身涉及多圈层的耦合和演化，同时还受到外部太阳(宿主恒星)和太阳风(恒星风)的作用和影响。这些作用和演化的时间尺度从粒子间的微秒量级到行星演化的亿年尺度，跨越了至少21个数量级；空间尺度从纳米级的物质晶格到100万公里左右的行星系统，跨越了至少18个数量级。这使得行星科学成为一门高度交叉、高度综合的学科，它的研究涉及到空间物理学、地球物理学、地质学、天体化学、天体生物学、大气科学、天文学、遥感测量学

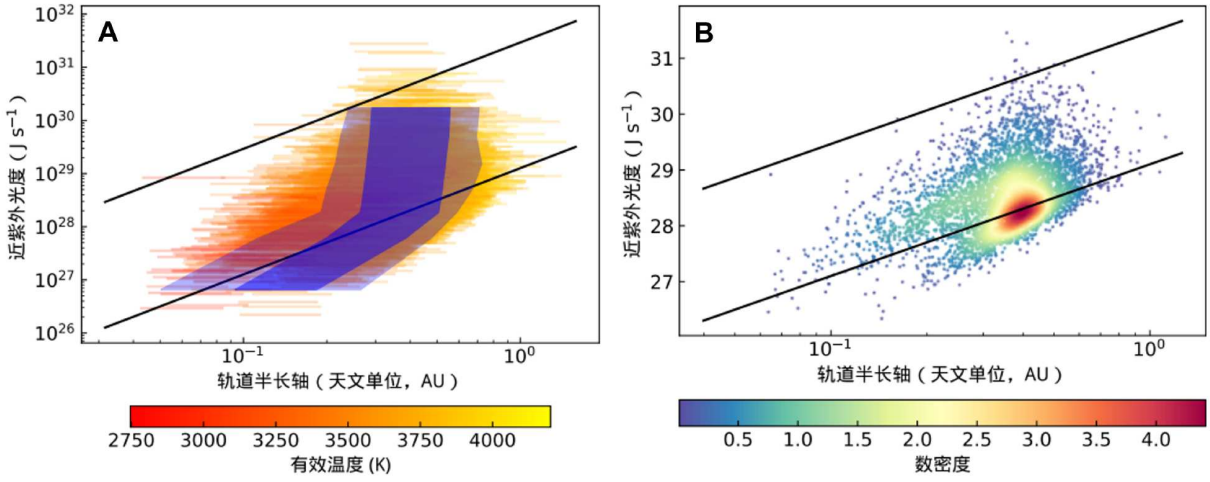


图19 M型恒星的近紫外光度与恒星-行星距离的分布图(Li X等，2024)。(A)中黄色水平线表示不同恒星水宜居带，颜色代表恒星的有效温度；蓝色阴影区域为按近紫外光度划分区间得到的水宜居带，两条黑线之间的区域表示紫外宜居带。(B)中颜色表示数密度

等众多学科领域，这也正是行星科学极具挑战、极具魅力的原因。

过去五年，虽然专项取得了系统性的进展，但仍然还有很多未解之谜，还有很多开放性的问题值得继续探索。如在类地行星的起源方面，行星的物质来源、岩浆洋的冷却和随后的核-幔-壳的分异过程和发生时间、地球大陆地壳的形成和板块构造启动的机制和时间等；在类地行星的环境演化方面，挥发分与演化路径的关系、关键元素的迁移与反应路径的控制作用、火星地下水冰分布与地貌和沙尘之间的关系等；在类地行星的大气逃逸方面，太阳系全空间太阳风环境、磁层的正向或负向作用、大气的热逃逸和非热逃逸的机理和贡献、极端空间天气下的空间多圈层耦合过程等；在月球方面，大碰撞的过程与效应、海陆二分性形成的机制、太空风化的效应以及月球的热演化历史等；在系外行星方面，大气组分的探测和解译、恒星与行星系统的协同演化等。归根结底，我们希望但依旧无法回答为何只有地球孕育了生命和文明这一重大科学问题。

这些科学问题的存在表明，我们仍需大力提升探测能力、技术手段和研究方法。行星科学的研究在极大程度上依赖探测数据和地外样品，同时辅以数字空间和物理空间的实验模拟。专项执行期间，我们恰逢嫦娥五号与天问一号任务的顺利实施，依托获取的独特样品和数据取得了丰硕成果。我国2025年5月发射了天问二号小行星探测与采样返回任务，并计划于2027年返回小行星2016HO3样品(张荣桥等，2025)；还计划在2028年10月发射天问三号实施火星采样返回任务(Hou等，2025)。同时，载人探月工程也在紧锣密鼓地论证和实施。欧洲和日本联合实施的BepiColombo水星探测计划预计于2026年11月进入环绕水星的轨道，将获取高分辨率的磁场、重力场及表面成分数据；美国计划今年发射ESCAPADE开展火星双星探测任务，未来2030年代美国和欧洲还计划发射多个探测器开展金星探测。这些任务的实施无疑将进一步推动行星科学研究的发展。

然而这些行星探测任务对解决行星科学的终极问题还是远远不够的。就地外样品而言，月球与行星的地质样品具有区域性，不同区域的样品能解决不同的科学问题，能给出不同的关于月球形成和演化的科学线索，嫦娥六号样品的众多成果(Cui等，2024；Zhang等，2025；Cai等，2025；He等，2025；Zhou等，2025)恰恰说明了这一现象；另外，人类目前还没有直接取自行星的样品，极大地限制了对行星地质现状和历史演化的深入认识；即使取回了样品，其区域性特点依旧限制了对行星全局演化的认识。在行星要素探测方面，我们目前的技术能力获得的信息相比地球是微不足道的，比如人类只在月球和火星表面开展过零星有效的地震波探测(Garcia等，2019；Lognonné，2005；Khan等，2021；Knapmeyer-Endrun等，2021；Stähler等，2021)，与生命信息相关的火星甲烷气体只有盖尔撞击坑的长期探测(Webster等，2018)等。因此，在未来如何提升行星多要素探测能力，尤其是行星全球普查能力，是行星科学研究取得重大突破的关键。

我国2024年10月发布了《国家空间科学中长期发展规划(2024–2050年)》(https://www.cas.cn/syky/202410/t20241014_5035917.shtml)，面向世界空间科学前沿和国家重大需求，提出了五大主题、三个阶段的发展路线图。宜居行星和日地全景为其中的两大主题，为当前和今后一个时期我国部署行星科学探测任务，开展行星科学研究提供了重要依据。专项在实施过程中，也提出了若干先进的空间探测计划，包括环日全景探测计划(Wang Y M等，2010，2023)、近邻宜居行星巡天计划(Ji等，2022，2024)等。以地外生命痕迹探寻和行星宜居性演化为主线的2030年代的行星探测工程接续任务也在酝酿和论证中(侯增谦等，2024)。此外，量子技术和人工智能的发展，推动了新一轮世界科技革命。如何将这些划时代的新技术新方法应用到行星探测和科学研究中，成为了当前的热点和焦点。

此外，专项的实施成功地培养了一批具有国际影响力的行星科学人才，有力地推动了我国行星科学学科体系的建设和发展，目前至少七所高校新增了行星科学本科专业，两所高校自主设置了行星科学相关的一级交叉学科。然而，与国际相比，我国行星科学研究的深度与广度仍处于起步阶段，许多空白领域尚缺乏研究力量。深空探测作为科技竞争的制高点，我国应持续加强对行星科学研究和探测技术研发的投入，通过完善学科体系、健全资助渠道、强化高层次创新人才培养与国际合作，保障我国在该领域的可持续发展和深空权益，为理解地球演变、探索深空奥秘、探寻地外生命、永续人类文明贡献中国智慧。

致谢　中国月球和行星探测工程提供样品和探测数据，国际探测任务提供开放共享的科学数据，历次专家咨询会与会专家提出了宝贵的意见和建议，专项各承研单位提供了人力、平台、管理等多方资源的保障，所有参与者包括科研助理、财务助理、档案助理、博士后、学生等为专项顺利实施付出了心血和努力，在此一并致谢。本文内容在专项各层级科技总结报告的基础上，凝聚整个专项力量系统梳理与深化而成，在论文的撰写过程中特别感谢以下各位

专家提供的材料和修改意见：中国科学技术大学地球和空间科学学院申成龙、孙道远、薛向辉、赵子福、陈伊翔、高晓英、耿雷、黄方、雷久侯、冷伟、李陶、毛竹、倪怀玮、陶鑫、张少兵、周根陶、郭静楠、康晋霆、刘宇、祁成杰、吴忠庆、张昊宇；中国科学院地球化学研究所李雄耀、李世杰、刘耘、唐红、张福勤、李婧、万泉、汪琪、曾小家；中国科学院地质与地球物理研究所陈一定、张辉、曹长乾、贺怀宇、乐会军、罗浩、乐新安、苟盛、胡森、彭澎、张驰；中国科学院地理科学与资源研究所程维明；中国科学院精密测量科学与技术创新研究院储日升、周江存；中国科学院国家天文台周桂萍、张渊智、王松；中山大学大气科学学院崔峻、肖智勇、顾浩；中国科学院空天信息创新研究院邸凯昌；中国科学院数学与系统科学研究院龚伟；中国科学院云南天文台郭建恒、杨家艳；中国科学院国家空间科学中心郭孝城、刘洋、沈芳、杨易；南京大学地球科学与工程学院惠鹤九；中国科学院紫金山天文台季江徽、徐伟彪、赵海斌、陈果、吴昀昭；中国科学院上海天文台孔大力；中国科学技术大学物理学院孔旭；香港大学地球与行星科学系李一良、尧中华；北京航空航天大学空间与地球科学学院吕浩宇；武汉大学地球与空间科学技术学院倪彬彬；南方科技大学地球与空间科学系叶生毅、杨亭；中国科学院广州地球化学研究所张兆峰；成都理工大学地球与行星科学学院李春辉、周游；吉林大学地球探测科学与技术学院陈圣波；深空探测实验室迟雨田；北京大学地球与空间科学学院法文哲；山东大学空间科学与技术学院付晓辉、凌宗成；北京师范大学物理与天文学院郭建鹏；中国地质大学(武汉)地球科学学院黄俊；桂林理工大学理学院谢明刚；湘潭大学物理与光电工程学院甄军锋等。

参考文献

侯增谦, 张荣桥, 刘继忠, 等. 2024. 地外生命痕迹探寻与行星宜居性研究总体发展设想. 北京: 第377期双清论坛

季江徽, 李海涛, 张俊波, 等. 2024. 近邻宜居行星巡天计划: 利用空间天体测量法寻找下一个“地球”. 空间科学学报, 44: 193–214

王乐, 赵健楠, 黄俊, 等. 2023. 火星乌托邦平原南部凹锥的爆烈式泥火山成因. 中国科学: 地球科学, 53: 2072–2084

尹浩安, 唐红, 李雄耀, 等. 2024. 火星水的主要赋存状态及其红外光谱特征. 空间科学学报, 44: 1086–1105

张荣桥, 张熇, 刘建军, 等. 2025. 天问二号小天体探测任务. 中国科学: 物理学力学天文学, 55: 279501

Arkani-Hamed J, Olson P. 2010. Giant impact stratification of the Martian core. Geophys Res Lett, 37: L02201

Ballester J L, Alexeev I, Collados M, et al. 2018. Partially ionized plasmas in astrophysics. Space Sci Rev, 214: 1–49

Bi H, Sun D, Sun N, et al. 2025. Seismic detection of a 600-km solid inner core in Mars. Nature, 645: 67–72

Blewett D T, Coman E I, Hawke B R, et al. 2011. Lunar swirls: Examining crustal magnetic anomalies and space weathering trends. J Geophys Res, 116: E02002

Boesswetter A, Lammer H, Kulikov Y, et al. 2010. Non-thermal water loss of the early Mars: 3D multi-ion hybrid simulations. Planet Space Sci, 58: 2031–2043

Boss A P. 2003. The Solar Nebula. In: Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier. 1: 711

Boudaïffa B, Cloutier P, Hunting D, et al. 2000. Resonant formation of DNA strand breaks by low-energy (3 to 20 eV) electrons. Science, 287: 1658–1660

Braukmüller N, Wombacher F, Funk C, et al. 2019. Earth's volatile element depletion pattern inherited from a carbonaceous chondrite-like source. Nat Geosci, 12: 564–568

Cable M L, Hörst S M, Hodyss R, et al. 2012. Titan tholins: Smulating Titan organic chemistry in the Cassini-Huygens era. Chem Rev, 112: 1882–1909

Cai S, Qi K, Yang S, et al. 2025. A reinforced lunar dynamo recorded by Chang'e-6 farside basalt. Nature, 643: 361–365

Canup R M. 2012. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. Science, 338: 1052–1055

Canup R M, Asphaug E. 2001. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. Nature, 412: 708–712

Cao Z, Guo Z, Li C, et al. 2024. Submicroscopic magnetite may be ubiquitous in the lunar regolith of the high-Ti region. Sci Adv, 10: eadn2301

Carlson R W. 2021. Robotic sample return reveals lunar secrets. Nature, 600: 39–40

Cawood P A, Chowdhury P, Mulder J A, et al. 2022. Secular evolution of continents and the Earth system. Rev Geophys, 60: e2022RG000789

Chaussidon M. 2012. Lunar water from the solar wind. Nat Geosci, 5: 766–767

Chen G, Pallé E, Welbanks L, et al. 2018. The GTC exoplanet transit spectroscopy survey. Astron Astrophys, 616: A145

Chen G, Casasayas-Barris N, Pallé E, et al. 2020. Detection of Na in WASP-21b's lower and upper atmosphere. Astron Astrophys, 642: A54

Chen G, Pallé E, Parviainen H, et al. 2021a. An enhanced slope in the transmission spectrum of the hot Jupiter WASP-104b. Mon Not R Astron Soc, 500: 5420–5435

Chen G, Pallé E, Parviainen H, et al. 2021b. Evidence for TiO in the Atmosphere of the Hot Jupiter HAT-P-65 b. Astrophys J Lett, 913: L16

Chen J F, Zhao Y Y S, Shu Q, et al. 2024. The oxygen fugacity of intermediate shergottite NWA 11043: Implications for Martian mantle evolution. Geochim Cosmochim Acta, 375: 90–105

Chen Y, Liu L B, Le H J, et al. 2022. Concurrent effects of Martian topography on the thermosphere and ionosphere at high northern latitudes. Earth Planets Space, 74: 26

Chen Y, Hu S, Li J H, et al. 2023. Chang'e-5 lunar samples shed new light on the Moon. Innovation Geosci, 1: 100014

Chi Y, Shen C, Cheng L, et al. 2023a. Interplanetary coronal mass ejections and stream interaction regions observed by Tianwen-1 and MAVEN at Mars. Astrophys J Suppl Ser, 267: 3

Chi Y, Shen C, Liu J, et al. 2023b. The dynamic evolution of multipoint interplanetary coronal mass ejections observed with BepiColombo, Tianwen-1, and MAVEN. Astrophys J Lett, 951: L14

Crismani M M J, Villanueva G L, Liuzzi G, et al. 2021. A global and seasonal perspective of Martian water vapor from ExoMars/NOMAD. J Geophys Res-Planets, 126: e2021JE006878

Cui J, Yelle R V, Volk K. 2008. Distribution and escape of molecular hydrogen in Titan's thermosphere and exosphere. J Geophys Res, 113: 2007JE003032

Cui Z, Yang Q, Zhang Y Q, et al. 2024. A sample of the Moon's far side retrieved by Chang'e-6 contains 2.83-billion-year-old basalt. Science, 386: 1395–1399

Dang T, Lei J, Zhang B, et al. 2022. Oxygen ion escape at Venus associated with three-dimensional Kelvin-Helmholtz instability. Geophys Res Lett, 49: e2021GL096961
Dang T, Zhang B, Yan M, et al. 2023. A new tool for understanding the Solar wind-Venus interaction: Three-dimensional multifluid MHD model. Astrophys J, 945: 91
Dartnell L R. 2011. Ionizing radiation and life. Astrobiology, 11: 551–582
DiBraccio G A, Luhmann J G, Curry S M, et al. 2018. The twisted configuration of the Martian magnetotail: MAVEN observations. Geophys Res Lett, 45: 4559–4568
Dobynde M, Guo J N. 2024. Guidelines for radiation-safe human activities on the Moon. Nat Astron, 8: 991–999
Donahue T M, Hoffman J H, Hodges Jr. R R, et al. 1982. Venus was wet: A measurement of the ratio of deuterium to hydrogen. Science, 216: 630–633
Dong Y, Fang X, Brain D A, et al. 2015. Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN: An important planetary ion escape channel. Geophys Res Lett, 42: 8942–8950
Ehlmann B L, Edwards C S. 2014. Mineralogy of the Martian surface. Annu Rev Earth Planet Sci, 42: 291–315
Elkins-Tanton L T. 2012. Magma oceans in the inner solar system. Annu Rev Earth Planet Sci, 40: 113–139
Fang Z, Li Y, He X, et al. 2024. Brine pools with round caps in the western Qaidam Basin: Application to iron mobility and the evaporation formation of the iron oxide and sulfate assemblage on Mars. J Geophys Res-Planets, 129: e2023JE008122
Gaillard F, Scaillet B. 2014. A theoretical framework for volcanic degassing chemistry in a comparative planetology perspective and implications for planetary atmospheres. Earth Planet Sci Lett, 403: 307–316
Gao J, Korte M, Panovska S, et al. 2022a. Geomagnetic field shielding over the last one hundred thousand years. J Space Weather Space Clim, 12: 31
Gao J, Korte M, Panovska S, et al. 2022b. Effects of the Laschamps excursion on geomagnetic cutoff rigidities. Geochem Geophys Geosyst, 23: e2021GC010261
Garcia R F, Khan A, Drilleau M, et al. 2019. Lunar seismology: An update on interior structure models. Space Sci Rev, 215: 50
Gou S, Yue Z, Di K, et al. 2022. Transverse aeolian ridges in the landing area of the Tianwen-1 Zhurong rover on Utopia Planitia, Mars. Earth Planet Sci Lett, 595: 117764
Gou S, Yue Z, Di K, et al. 2024a. Paleoenvironment implications of layered ejecta craters in the Chryse Planitia, Mars. Icarus, 410: 115918
Gou S, Yue Z, Di K, et al. 2024b. Subsurface stratigraphy suggested by the layered ejecta craters in the Martian northern planitiae. Icarus, 416: 116100
Gu H, Cui J, Niu D D, et al. 2020. Monte Carlo calculations of helium escape on Mars via energy transfer from hot oxygen atoms. Astrophys J, 902: 121
Gu H, Cui J, Niu D D, et al. 2021a. Non-thermal escape on Triton driven by atmospheric and ionospheric chemistry. Astron Astrophys, 650: A130
Gu H, Cui J, Niu D D, et al. 2021b. Hydrogen and helium escape on Venus via energy transfer from hot oxygen atoms. Mon Not R Astron Soc, 501: 2394–2402
Gu H, Wu X S, Huang X, et al. 2023a. Nonthermal atmospheric escape on the Kepler-11 “Super-Earths” driven by Stellar wind sputtering. Astrophys J, 959: 80
Gu H, Wu X S, Cui J. 2023b. Photochemical escape of atomic C and N on Mars during the X8.2 solar flare on 10 September 2017. Astron Astrophys, 672: A177
Gu W D, Yao Z H, Pan D X, et al. 2023. Hourly periodic variations of ultralow-frequency (ULF) waves in Jupiter’s magnetosheath. J Geophys Res-Planets, 128: e2022JE007625
Gu W D, Yao Z H, Wei Y, et al. 2024. A survey of magnetic field line curvature in Jovian dawn magnetodisc. Geophys Res Lett, 51: e2023GL106971
Güdel M. 2004. X-ray astronomy of stellar coronae. Astron Astrophys Rev, 12: 71
Guo D, Bao Y, Liu Y, et al. 2024. Geological investigation of the lunar Apollo basin: From surface composition to interior structure. Earth Planet Sci Lett, 646: 118986
Guo J H. 2019. The effect of photoionization on the loss of water of the planet. Astrophys J, 872: 99
Guo J H. 2024. Characterization of the regimes of hydrodynamic escape from low-mass exoplanets. Nat Astron, 8: 920–928
Guo J N, Banjac S, Röstel L, et al. 2019. Implementation and validation of the GEANT4/AtRIS code to model the radiation environment at Mars. J Space Weather Space Clim, 9: A2
Guo J N, Zeitlin C, Wimmer-Schweingruber R F, et al. 2021. Radiation environment for future human exploration on the surface of Mars: The current understanding based on MSL/RAD dose measurements. Astron Astrophys Rev, 29: 8
Guo M, Chai L, Bowers C F, et al. 2025. The influence of the stretch of mini-magnetospheres formed by crustal fields on the Martian bow shock location. Geophys Res Lett, 52: e2024GL114441
Guo Z, Li C, Li Y, et al. 2022. Sub-microscopic magnetite and metallic iron particles formed by eutectic reaction in Chang’e-5 lunar soil. Nat Commun, 13: 7177
Guo Z, Li C, Li Y, et al. 2023. Vapor-deposited digenite in Chang’e-5 lunar soil. Sci Bull, 68: 723–729
Guo Z, Zhang M, Jia B, et al. 2024. Space-weathered rims on lunar ilmenite as an indicator for relative exposure ages of regolith. Commun Earth Environ, 5: 426
Haider S A, Mahajan K K, Kallio E. 2011. Mars ionosphere: A review of experimental results and modeling studies. Rev Geophys, 49: RG4001
Han H, Wang S, Bai Y, et al. 2023. Stellar chromospheric activities revealed from the LAMOST-K2 time-domain survey. Astrophys J Suppl Ser, 264: 12
Han H, Wang S, Zheng C, et al. 2024. Stellar X-Ray activity and habitability revealed by the ROSAT sky survey. Astrophys J Suppl Ser, 273: 8
Harrison T M. 2024. We don’t know when plate tectonics began. J Geol Soc, 181: jgs2023–2212
Hartmann W K, Strom R G, Weidenschilling S J, et al. 1981. Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets. New York: Pergamon Press Inc
Hartmann W K, Neukum G. 2001. Cratering chronology and the evolution of Mars. Space Sci Rev, 96: 165–194
He H, Ji J, Zhang Y, et al. 2023. A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads. Nat Geosci, 16: 294–300
He H, Li L, Hu S, et al. 2025. Water abundance in the lunar farside mantle. Nature, 643: 366–370
He L, Guo J, Zhang F, et al. 2023. Enhanced energization of plume ions around Mars from interplanetary shocks. Astron Astrophys, 679: A79
Hirschmann M M. 2006. Water, melting, and the deep Earth H_2O cycle. Annu Rev Earth Planet Sci, 34: 629–653
Hou Z, Liu J, Xu Y, et al. 2024. The search for life signatures on Mars by the Tianwen-3 Mars sample return mission. Natl Sci Rev, 11: nwae313
Hou Z, Liu J, Pang F, et al. 2025. In search of signs of life on Mars with China’s sample return mission Tianwen-3. Nat Astron, 9: 783–792
Hu S, He H, Ji J, et al. 2021. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang’e-5. Nature, 600: 49–53
Huang W, Liu Y, Yu P, et al. 2024. Multifluid theory of electrostatic ion cyclotron waves in partially ionized plasmas. Astrophys J, 975: 157
Huang X, Gu H, Cui J, et al. 2023. Non-thermal escape of sulfur and oxygen on Io driven by photochemistry. J Geophys Res-Planets, 128:

e2023JE007811
Ivanov B A. 2001. Mars/Moon cratering rate ratio estimates. Space Sci Rev, 96: 87–104
Jacobson S A, Rubie D C, Hernlund J, et al. 2017. Formation, stratification, and mixing of the cores of Earth and Venus. Earth Planet Sci Lett, 474: 375–386
Jakosky B M, Grebowsky J M, Luhmann J G, et al. 2015. Initial results from the MAVEN mission to Mars. Geophys Res Lett, 42: 8791–8802
Jakosky B M, Brain D, Chaffin M, et al. 2018. Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time. Icarus, 315: 146–157
Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. 2022. CHES: A space-borne astrometric mission for the detection of habitable planets of the nearby Solar-type stars. Res Astron Astrophys, 22: 072003
Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. 2024. Closeby habitable exoplanet survey (CHES): An astrometry mission for probing nearby habitable planets. Chin J Space Sci, 44: 193–214
Jiang C, Chen G, Pallé E, et al. 2021. Evidence for stellar contamination in the transmission spectra of HAT-P-12b. Astron Astrophys, 656: A114
Jiang C, Chen G, Pallé E, et al. 2023. Featureless transmission spectra of 12 giant exoplanets observed by GTC/OSIRIS. Astron Astrophys, 675: A62
Jiang C, Chen G, Murgas F, et al. 2024. Confirmation of TiO absorption and tentative detection of MgH and CrH in the atmosphere of HAT-P-41b. Astron Astrophys, 682: A73
Jin R, Liu Y, Lei J, et al. 2023. Design and construction of a ground-based plasma device for Martian boundary layer investigation. Vacuum, 216: 112453
Johnson R E, Combi M R, Fox J L, et al. 2008. Exospheres and atmospheric escape. Space Sci Rev, 139: 355–397
Kang H, Chen G, Jiang C, et al. 2024. Detection of Na in the atmosphere of the hot Jupiter HAT-P-55b. Astron Astrophys, 687: A9
Kang J, Ionov D A, Liu F, et al. 2017. Calcium isotopic fractionation in mantle peridotites by melting and metasomatism and Ca isotope composition of the Bulk Silicate Earth. Earth Planet Sci Lett, 474: 128–137
Khan A, Ceylan S, van Driel M, et al. 2021. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data. Science, 373: 434–438
Khan A, Sossi P A, Liebske C, et al. 2022. Geophysical and cosmochemical evidence for a volatile-rich Mars. Earth Planet Sci Lett, 578: 117330
Khan A, Huang D, Durán C, et al. 2023. Evidence for a liquid silicate layer atop the Martian core. Nature, 622: 718–723
Knapmeyer-Endrun B, Panning M P, Bissig F, et al. 2021. Thickness and structure of the martian crust from InSight seismic data. Science, 373: 438–443
Lammer H, Bauer S J. 1991. Nonthermal atmospheric escape from Mars and Titan. J Geophys Res, 96: 1819–1825
Lammer H, Lichtenegger H I M, Kulikov Y N, et al. 2007. Coronal mass ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. II. CME-induced ion pick up of earth-like exoplanets in close-in habitable zones. Astrobiology, 7: 185–207
Lammer H, Chassefière E, Karatekin Ö, et al. 2013. Outgassing history and escape of the martian atmosphere and water inventory. Space Sci Rev, 174: 113–154
Lammer H, Zerkle A L, Gebauer S, et al. 2018. Origin and evolution of the atmospheres of early Venus, Earth and Mars. Astron Astrophys Rev, 26: 2
Le H, Liu L, Chen Y, et al. 2022. The north-south asymmetry of Martian ionosphere and thermosphere. J Geophys Res-Planets, 127: e2021JE007143
Leblanc F, Chassefière E, Johnson R E, et al. 2007. Mercury's exosphere origins and relations to its magnetosphere and surface. Planet Space Sci, 55: 1069–1092
Li B, Zhang L, Guo X, et al. 2020. Electrical conductivity of shoshonitic melts with application to magma reservoir beneath the Wudalianchi volcanic field, northeast China. Phys Earth Planet Inter, 306: 106545
Li C, Li Y, Wei K, et al. 2024. Impact-dispersed Fe-Fe1-S core-shell particles in Chang'e-5 lunar soil impact glass. Geochim Cosmochim Acta, 379: 134–144
Li D, Zhao Y Y S, Meslin P Y, et al. 2022. Cryogenic origin of fractionation between perchlorate and chloride under modern martian climate. Commun Earth Environ, 3: 15
Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. 2021. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. Nature, 600: 54–58
Li S, Lu H, Cao J, et al. 2023a. Global electric fields at mars inferred from multifluid hall-MHD simulations. Astrophys J, 949: 88
Li S, Lu H, Cao J, et al. 2023b. Effects of magnetic field direction on O+ vertical transport in the Martian ionosphere. Adv Space Res, 72: 3212–3219
Li S B, Lu H Y, Cui J, et al. 2020. Effects of a dipole-like crustal field on solar wind interaction with Mars. Earth Planet Phys, 4: 1–9
Li S, Zhang D, Shu Q, et al. 2024. An anorthositic meteorite supporting an ancient magma ocean on Vesta. Nat Astron, 8: 739–747
Li X, Wang S, Han H, et al. 2024. Ultraviolet and chromospheric activity and habitability of M Stars. Astrophys J, 966: 69
Li Y C, Guo J N, Khaksarighiri S, et al. 2023. The impact of space radiation on brains of future Martian and lunar explorers. Space Weather, 21: e2023SW003470
Li Y H, Wu Z Q, Huang S C, et al. 2022. Pressure and concentration effects on intermineral calcium isotope fractionation involving garnet. Chem Geol, 591: 120722
Li Y, Li C, Zhou Y, et al. 2025. A deeper and hotter Martian core-mantle differentiation inferred from FeO partitioning. Sci Bull, 70: 429–436
Li Z X, Zhang S B, Zheng Y F, et al. 2021. Crustal thickening and continental formation in the Neoarchean: Geochemical records by granitoids from the Taihua Complex in the North China Craton. Precambrian Res, 367: 106446
Lillis R J, Brain D A, Bougher S W, et al. 2015. Characterizing atmospheric escape from Mars today and through time, with MAVEN. Space Sci Rev, 195: 357–422
Lin H B, Guo J P, Masunaga K, et al. 2022. *In situ* observation of solar-flare-induced proton cyclotron waves upstream from Mars. Astrophys J, 934: 183
Lin R P, Yang Y, Shen F, et al. 2024. An algorithm for the determination of coronal mass ejection kinematic parameters based on machine learning. Astrophys J Suppl Ser, 271: 59
Lin Y, Zhao J, Wang L, et al. 2023. Evaluation of small-sized mounds formation mechanisms in China's Zhurong landing region. Icarus, 389: 115256
Liu J, Di K, Gou S, et al. 2020. Mapping and spatial statistical analysis of Mars Yardangs. Planet Space Sci, 192: 105035
Liu J, Qian L, Maute A, et al. 2021a. Electrodynamical coupling of the geospace system during solar flares. J Geophys Res-Space Phys, 126: e2020JA028569
Liu J, Wang W, Qian L, et al. 2021b. Solar flare effects in the Earth's magnetosphere. Nat Phys, 17: 807–812
Liu J, Yue Z, Di K, et al. 2021c. A study about the temporal constraints on the Martian yardangs'development in Medusae Fossae Formation. Remote Sens, 13: 1316–1329
Liu W H, Guo J N, Zhang J, et al. 2023. Modeling the radiation environment of energetic particles at Mars orbit and a first validation against TGO measurements. Astrophys J, 949: 77

Liu X, Fan X, Liu J, et al. 2024. Response of global ionospheric currents to Solar flares with extreme ultraviolet late phases. Astrophys J, 963: 27
Liu Y, Shi P Y, Zhang X, et al. 2021. Laboratory plasma devices for space physics investigation. Rev Sci Instrum, 92: 071101
Liu Y, Wu X, Zhao Y Y S, et al. 2022. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars. Sci Adv, 8: eabn8555
Liu Y, Jin R, Li M C, et al. 2024. Existence of electrostatic ion cyclotron waves in a laboratory created E region ionospheric-like plasma. Geophys Res Lett, 51: e2023GL107239
Liu Y S, Shen F, Yang Y, et al. 2022. Numerical research on the effect of the initial parameters of CME flux-rope model on simulation results. III. Different initial energy of CMEs. Astrophys J, 940: 11
Liu Z, Liu Y, Pan L, et al. 2021. Inverted channel belts and floodplain clays to the East of Tempe Terra, Mars: Implications for persistent fluvial activity on early Mars. Earth Planet Sci Lett, 562: 116854
Lognonné P. 2005. Planetary seismology. Annu Rev Earth Planet Sci, 33: 571–604
Mao W, Fu X, Wu Z, et al. 2022. The color centers in halite induced by martian dust activities. Earth Planet Sci Lett, 578: 117302
Mao W, Fu X, Wu Z, et al. 2023. Solid-gas carbonate formation during dust events on Mars. Natl Sci Rev, 10: nwac293
Martinez Sierra L M, Jun I, Ehresmann B, et al. 2023. Unfolding the neutron flux spectrum on the surface of Mars using the MSL-RAD and Odyssey-HEND data. Space Weather, 21: e2022SW003344
McCoy T J, Bullock E S. 2017. Differentiation under highly reducing conditions: New insights from enstatite meteorites and Mercury. In: Elkins-Tanton L T, Weiss B P, eds. Planetesimals: Early differentiation and Consequences for Planets. Cambridge: Cambridge University Press. 71–91
Neukum G. 1983. Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces. Habilitation Thesis, Munich: University München
Nicklas R W, Day J M D, Vaci Z, et al. 2021. Uniform oxygen fugacity of shergottite mantle sources and an oxidized martian lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 564: 116876
Nie X, Xing X, Xie R, et al. 2023. Impact of iron/aluminum (hydr)oxide and clay minerals on heteroaggregation and transport of nanoplastics in aquatic environment. J Hazard Mater, 446: 130649
Nikolov N, Sing D K, Fortney J J, et al. 2018. An absolute sodium abundance for a cloud-free 'hot Saturn' exoplanet. Nature, 557: 526–529
Niu S, Zhang F, Di K, et al. 2022. Layered ejecta craters in the candidate landing areas of china's first mars mission(Tianwen-1): Implications for subsurface volatile concentrations. J Geophys Res-Planets, 127: e2021JE007089
Norris C A, Wood B J. 2017. Earth's volatile contents established by melting and vaporization. Nature, 549: 507–510
Owen T, Maillard J P, de Bergh C, et al. 1988. Deuterium on mars: The abundance of HDO and the value of D/H. Science, 240: 1767
Pan M, Wang S, Ji J. 2022. The terrestrial planet formation around M dwarfs: *In situ*, inward migration, or reversed migration. Mon Not R Astron Soc, 510: 4134–4145
Qu S Y, Zhao Y Y S, Cui H, et al. 2022. Preferential formation of chlorate over perchlorate on Mars controlled by iron mineralogy. Nat Astron, 6: 436–441
Ramstad R, Barabash S. 2021. Do intrinsic magnetic fields protect planetary atmospheres from stellar winds? Space Sci Rev, 217: 36
Reese C C, Orth C P, Solomatov V S. 2010. Impact origin for the Martian crustal dichotomy: Half emptied or half filled? J Geophys Res, 115: 2009JE003506
Ritson D, Sutherland J D. 2012. Prebiotic synthesis of simple sugars by photoredox systems chemistry. Nat Chem, 4: 895–899
Roberts J H, Arkani-Hamed J. 2014. Impact heating and coupled core cooling and mantle dynamics on Mars. J Geophys Res-Planets, 119: 729–744
Shen F, Liu Y S, Yang Y. 2021a. Numerical research on the effect of the initial parameters of a CME flux-rope model on simulation results. Astrophys J Suppl Ser, 253: 12
Shen F, Liu Y S, Yang Y. 2021b. Numerical research on the effect of the initial parameters of a CME flux-rope model on simulation results. II. Different locations of observers. Astrophys J, 915: 30
Shi W G, Wei W, Sun N Y, et al. 2022. Thermal equations of state of corundum and Rh_2O_3 (II)-Type Al_2O_3 up to 153 GPa and 3400 K. J Geophys Res-Solid Earth, 127: e2021JB023805
Sing D K, Fortney J J, Nikolov N, et al. 2016. A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion. Nature, 529: 59–62
Song Y H, Lu H Y, Cao J B, et al. 2023a. Effects of solar wind density and velocity variations on the Martian ionosphere and plasma transport—A MHD model study. J Geophys Res-Space Phys, 128: e2023JA031788
Song Y H, Lu H Y, Cao J B, et al. 2023b. Effects of force in the Martian plasma environment with solar wind dynamic pressure enhancement. J Geophys Res-Space Phys, 128: e2022JA031083
Spohn T. 2001. The longevity of Lunar volcanism: Implications of thermal evolution calculations with 2D and 3D mantle convection models. Icarus, 149: 54–65
Stähler S C, Khan A, Banerdt W B, et al. 2021. Seismic detection of the martian core. Science, 373: 443–448
Steenstra E S, Berndt J, Rohrbach A, et al. 2022. Partitioning of Ru, Pd, Ag, Re, Pt, Ir and Au between sulfide-, metal- and silicate liquid at highly reduced conditions: Implications for terrestrial accretion and aubrite parent body evolution. Geochim Cosmochim Acta, 336: 15–32
Steenstra E S, Renggli C J, Berndt J, et al. 2023. Evaporation of moderately volatile elements from metal and sulfide melts: Implications for volatile element abundances in magmatic iron meteorites. Earth Planet Sci Lett, 622: 118406
Tian H C, Wang H, Chen Y, et al. 2021. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane. Nature, 600: 59–63
Tian H C, Zhang C, Yang W, et al. 2023. Surges in volcanic activity on the Moon about two billion years ago. Nat Commun, 14: 3734
Udry A, Howarth G H, Herd C D K, et al. 2020. What Martian meteorites reveal about the interior and surface of Mars. J Geophys Res-Planet, 125: e2020JE006523
Valdes M C, Bermingham K R, Huang S, et al. 2021. Calcium isotope cosmochemistry. Chem Geol, 581: 120396
Vandaele A C, Korablev O, Daerden F, et al. 2019. Martian dust storm impact on atmospheric H2O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter. Nature, 568: 521–525
Vidal-Madjar A, des Etangs A L, Désert J M, et al. 2003. An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b. Nature, 422: 143–146
Villanueva G L, Mumma M J, Novak R E, et al. 2015. Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs. Science, 348: 218–221
Wade J, Wood B J. 2005. Core formation and the oxidation state of the Earth. Earth Planet Sci Lett, 236: 78–95
Wang S, Lin D N C. 2023. Dynamical evolution of closely packed multiple planetary systems subject to atmospheric mass loss. Astron J, 165: 174
Wang S, Bai Y, He L, et al. 2020. Stellar X-ray activity across the Hertzsprung-Russell diagram. I. Catalogs. Astrophys J, 902: 114
Wang W Z, Li C H, Brodholt J P, et al. 2021. Sulfur isotopic signature of Earth established by planetesimal volatile evaporation. Nat Geosci, 14: 806–811
Wang X, Zhao Y S, Hood D R, et al. 2021. Multiphase volatilization of

halogens at the soil-atmosphere interface on Mars. J Geophys Res-Planets, 126: e2021JE006929
Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. 2020. Concept of the Solar ring mission: An overview. Sci China Tech Sci, 63: 1699–1713
Wang Y M, Bai X Y, Chen C Y, et al. 2023. Solar ring mission: Building a panorama of the Sun and inner-heliosphere. Adv Space Res, 71: 1146–1164
Wang Y X, Yang J, Guo X C, et al. 2023. Simulation of centrifugally driven convection in Jovian inner magnetosphere using the rice convection model. J Geophys Res-Space Phys, 128: e2022JA031132
Wang Y X, Yang J, Guo X C, et al. 2024. Energetic plasma injections in Jovian inner magnetosphere: A simulation study. J Geophys Res-Planets, 129: e2023JE008178
Wang Z C, Becker H. 2013. Ratios of S, Se and Te in the silicate Earth require a volatile-rich late veneer. Nature, 499: 328–331
Warren P H. 1985. The magma ocean concept and lunar evolution. Annu Rev Earth Planet Sci, 13: 201–240
Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, et al. 2018. Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations. Science, 360: 1093–1096
Wood B E, Müller H R, Zank G P, et al. 2005. New mass-loss measurements from astrospheric Lyα absorption. Astrophys J, 628: L143–L146
Wood J A, Dickey Jr. J S, Marvin U B, et al. 1970. Lunar anorthosites. Science, 167: 602–604
Wu Z, Li T, Zhang X, et al. 2020. Dust tides and rapid meridional motions in the Martian atmosphere during major dust storms. Nat Commun, 11: 614
Wu Z, Richardson M I, Zhang X, et al. 2021. Large eddy simulations of the dusty Martian convective boundary layer with MarsWRF. J Geophys Res-Planets, 126: e2020JE006752
Wu Z, Li T, Li J, et al. 2022. Diurnal variations of water ice in the Martian atmosphere observed by Mars climate sounder. Remote Sens, 14: 2235
Xing L, Guo J H. 2023. The mass fractionation of helium in the escaping atmosphere of HD 209458b. Astrophys J, 953: 166
Xing L, Guo J H, Yang C Y, et al. 2024. Simulating the escaping atmosphere of GJ 436 b with two-fluid magnetohydrodynamic models. Res Astron Astrophys, 24: 065022
Xu Y, Guo R L, Yao Z H, et al. 2021. Properties of plasmoids observed in Saturn's dayside and nightside magnetodisc. Geophys Res Lett, 48: e2021GL096765
Xu Y, Tian H C, Zhang C, et al. 2022. High abundance of solar wind-derived water in lunar soils from the middle latitude. Proc Natl Acad Sci USA, 119: e2214395119
Xue Y L, Kang J Y, Liao S Y, et al. 2023. Calcium isotope constraints on the origin of eucrites and diogenites: The role of magma ocean and magmatism. Earth Planet Sci Lett, 613: 118171
Yan D D, Guo J H. 2019. The escape of the hydrogen-rich atmosphere of exoplanets: Mass-loss rates and the absorption of stellar Lyα. Astrophys J, 880: 90
Yan D D, Guo J H, Huang C L, et al. 2021. Atmosphere escape inferred from modeling the Hα transmission spectrum of WASP-121b. Astrophys J Lett, 907: L47
Yan D D, Guo J H, Seon Kwang-il, et al. 2024. A possibly solar metallicity atmosphere escaping from HAT-P-32b revealed by Hα and He absorption. Astrophys J, 907: L47
Yan D, Seon K, Guo J, et al. 2022. Modeling the Hα and He 10830 Transmission Spectrum of WASP-52b. Astrophys J, 936: 177
Yang C, Sun C, Wu Z, et al. 2023. Observed dawn and twilight pressure sudden peaks in the global Martian surface and possible relationships with atmospheric tides. J Geophys Res-Planets, 128: e2022JE007650
Yang C, Li T, Yuan M, et al. 2024. Martian atmospheric tides revealed from MAVEN/IUVS and MRO/MCS observations. Geophys Res Lett, 51: e2024GL109742
Yang Y, Chen G, Wang S, et al. 2024a. High-resolution transmission spectroscopy of ultrahot Jupiter WASP-33b with NEID. AJ, 167: 36
Yang Y, Chen G, Yan F, et al. 2024b. Evidence for nightside water emission found in transit of ultra-hot Jupiter WASP-33 b. Astrophys J Lett, 971: L8
Yoshizaki T, McDonough W F. 2020. The composition of Mars. Geochim Cosmochim Acta, 273: 137–162
Yu B, Chi Y, Owens M, et al. 2023. Tianwen-1 and MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection. Astrophys J, 953: 105
Yue Z, Di K, Wan W, et al. 2022. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples. Nat Astron, 6: 541–545
Zhang H, Fu S, Fu S, et al. 2022. A highway for atmospheric ion escape from Earth during the impact of an interplanetary coronal Mass ejection. Astrophys J, 937: 4
Zhang J, Guo J N, Dobynde M I, et al. 2022. From the top of Martian Olympus to deep craters and beneath: Mars radiation environment under different atmospheric and regolith depths. J Geophys Res-Planets, 127: e2021JE007157
Zhang J, Guo J N, Dobynde M I. 2023. What is the radiation impact of extreme solar energetic particle events on Mars? Space Weather, 21: e2023SW003490
Zhang L, Ding J, Ni H. 2020. Effect of alkalis on water diffusion in silicate melts based on new experimental data for a shoshonitic melt. Geochim Cosmochim Acta, 290: 16–26
Zhang L, Liu H J, Zhang S B, et al. 2022. Tectonic switch of the north Yangtze Craton at ca. 2.0 Ga: Implications for its position in Columbia supercontinent. Precambrian Res, 381: 106842
Zhang L, Fu X, Ling Z, et al. 2024. The coprecipitation of akaganeite and jarosite and its implications for the late-stage diagenetic fluids in the Vera Rubin Ridge, Gale Crater, Mars. J Geophys Res-Planets, 129: e2023JE008157
Zhang Q W L, Yang M H, Li Q L, et al. 2025. Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts. Nature, 643: 356–360
Zhang X, Liu Y, Lei J, et al. 2023. Laboratory study of Kelvin-Helmholtz instability at ion kinetic scales. Phys Plasmas, 30: 042110
Zhao D, Guo J P, Lin H B, et al. 2023a. Upstream proton cyclotron waves at Mars during the passage of ICMEs. J Geophys Res-Planets, 128: e2023JE007757
Zhao D, Guo J P, Lin H B, et al. 2023b. Upstream proton cyclotron waves at Mars during the passage of solar wind stream interaction regions. Astron Astrophys, 674: A158
Zhao J, Xiao Z, Huang J, et al. 2021. Geological characteristics and targets of high scientific interest in the Zhurong Landing Region on Mars. Geophys Res Lett, 48: e2021GL094903
Zheng Y F, Zhao G. 2020. Two styles of plate tectonics in Earth's history. Sci Bull, 65: 329–334
Zhong J, Lee L, Slavin J A, et al. 2023. MESSENGER observations of reconnection in Mercury's magnetotail under strong IMF forcing. J Geophys Res-Space Phys, 128: e2022JA031134
Zhong J, Wei Y, Lee L C, et al. 2020. Formation of macroscale flux transfer events at mercury. Astrophys J Lett, 893: L18
Zhong J, Xie L, Lee L, et al. 2024. North-south plasma asymmetry across Mercury's near-tail current sheet. Geophys Res Lett, 51: e2023GL106266
Zhou D, Yu X, Chang R, et al. 2022. Effects of formation pathways and bromide incorporation on jarosite dissolution rates: Implications for Mars. J Geophys Res-Planets, 127: e2022JE007202
Zhou J, Pan E, Bevis M. 2021a. A point dislocation in a layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Part IV: Exact

asymptotic solutions of dislocation Love numbers for the special case of isotropy. Geophys J Int, 225: 664–683

Zhou J, Pan E, Bevis M. 2021b. Deformation due to surface temperature variation on a spherically layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Geophys J Int, 225: 1672–1688

Zhou J, Pan E, Lin C P. 2023a. Transient Green's functions of dislocations in transversely isotropic and layered poroelastic half-spaces. Eng Anal Bound Elem, 146: 155–169

Zhou J, Pan E, Lin C. 2023b. A novel method for calculating dislocation green's functions and deformation in a transversely isotropic and layered elastic half-space. Eng Anal Bound Elem, 146: 155–169

Zhou Q, Yang W, Chu Z, et al. 2025. Ultra-depleted mantle source of basalts from the South Pole-Aitken basin. Nature, 643: 371–375

Zhou Y, Driscoll P E, Zhang M, et al. 2024. A scaling relation for core heating by giant impacts and implications for dynamo onset. J Geophys Res-Planets, 129: e2023JE008163

（责任编委：林巍）