

2023年行星物理学热点回眸

魏勇^{1,2}, 柴立晖^{1,2}, 陈一定^{1,2}, 范开¹, 高佳维¹, 何飞^{1,2}, 乐会军^{1,2}, 李国主^{1,2}, 林红磊¹, 綦超^{1,2}, 戎昭金^{1,2}, 宋玉环¹, 孙伟家¹, 王誉棋^{1,2}, 吴兆朋¹, 徐长仪¹, 闫丽梅^{1,2}, 尧中华^{1,2}, 袁憧憬^{1,2}, 乐新安^{1,2}, 张驰¹, 张辉^{1,2}, 张金海¹, 钟俊^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要 2023年, 行星物理学作为行星科学的一个主干分支学科, 呈现出百花齐放、交相辉映的态势。中国的行星物理学还发展出一些新兴的领域, 如太阳与行星磁场发电机过程、地球与行星空间环境长期变化、地球与行星多圈层耦合过程等, 为中国未来深空探测的跃升发展奠定了坚实基础。选择20个行星物理研究领域, 以中国行星物理学的进展和热点为主线, 置于世界和历史的时空纵横之中, 展示了中国和世界行星物理学的发展态势。

关键词 深空探测; 行星科学; 行星物理学

21世纪以来, 中国深空探测战略带动中国行星科学迅速走到世界前沿, 比肩“两弹一星”时期“任务带学科”的发展速度。从2004年1月探月工程批准立项, 到2024年1月, 中国的深空探测事业已经蓬勃发展了整整20年。回望这20年, 中国在工程技术和科学研究2个方面都取得了巨大进展: 一方面, 探月工程“三步走”圆满收官, “天问一号”实现从地月系到行星际探测的跨越, 中国深空探测事业取得了举世瞩目的辉煌成就; 另一方面, 行星科学的学科建设传承了“两弹一星”精神, 凝聚了社会各界的共识, 走出了一条有中国特色的学科建设

之路。这些成就彰显出中国正在从快速发展的航天大国迈向航天强国行列。

行星物理学开展对天体和行星系统的全面研究, 是一个非常典型的交叉学科。它建立在许多相关科学领域的基础上, 汇集了来自不同领域的知识和过程, 在很大程度上依赖于行星地质学, 该学科研究太阳系中的固体天体及其结构和撞击过程。行星物理学借鉴了行星化学的研究, 即对天体的化学组成及形成行星的化学反应的研究, 还使用来自大气科学的技术来理解行星的天气和气候模式, 特别是与热量和风的分布有关。此外, 如物理学、海

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42388101)

作者简介: 魏勇, 研究员, 研究方向为行星物理学、行星科学一级学科建设理论, 电子信箱: weiy@mail.iggcas.ac.cn; 钟俊(通信作者), 副研究员, 研究方向为行星空间环境, 电子信箱: j.zhong@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 魏勇, 柴立晖, 陈一定, 等. 2023年行星物理学热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 99-113; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.006

洋学、水文学、冰川学等科学分支在探索具有海洋、冰等的天体时也发挥作用。

中国的行星物理学是在中国深空探测战略的带动下发展起来的,因而具有十分鲜明的中国特色。除了上述的经典研究领域之外,中国的行星物理学还发展出了一些新兴的领域,例如,太阳与行星磁场发电机过程、地球与行星空间环境长期变化、地球与行星多圈层耦合过程等。这些领域的主要特征是“比较研究”,包括地球与行星的比较、行星与恒星的比较、行星不同演化阶段的比较等。这些新兴领域的发展,充分体现了中国地球科学、天文学、物理学等各基础学科群水平高和规模大的优势,更彰显了中国科研人员自主创新、引领行星科学发展新方向的智慧和勇气。

1 古赤道极光揭示非常规太阳活动周期

太阳活动周直接影响着行星及其环境的长期变化。通常太阳黑子和太阳活动呈现约11年的准周期变化。但有时太阳黑子会进入持续几十年的异常低水平,称为太阳活动超级极小期,给太阳/恒星发电机理论带来了挑战。

发生在1645—1715年的蒙德极小期,常被看作太阳和类太阳恒星超级极小期的范例。蒙德极小期太阳活动周期是理解太阳/恒星发电机理论和超级极小期产生机制的关键。而受限于目前所用的表征太阳活动水平的指标,包括太阳黑子数、极区极光、宇宙同位素等,蒙德极小期太阳活动周期的存在及存在状态一直处于争议之中,难以确认。2023年科研团队用古赤道极光这一种新的独立指标揭示了蒙德极小期的太阳活动变化以~8年周期为主导,而非常规为~11年周期(图1)^[1]。这一研究结果为研究蒙德极小期太阳活动提供了新的数据源,为太阳/恒星发电机理论提供了新的重要约束条件,对理解太阳/恒星活动超级极小期的产生机制和蒙德极小期期间的日地关系具有重要意义。相关研究成果被美国地球物理学会会刊《Eos》作为“编辑亮点”报道^[2],引发了学界的重点关注和报道^[3]。

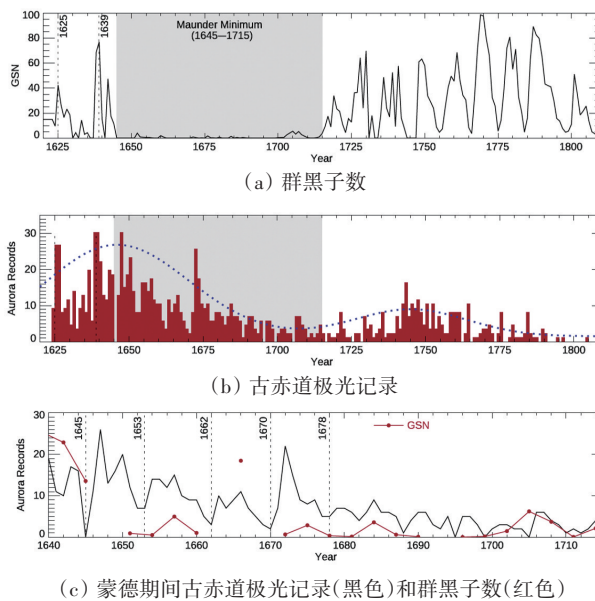


图1 古赤道极光与太阳黑子数

2 水星磁层

水星是离太阳最近且最小的类地行星,拥有独特的空间环境。“信使”号(2011—2015)在轨探测揭示出与地球显著差异的特征,在2023年持续产出新发现。

太阳风与行星磁层相互作用时,会在上游形成无碰撞激波——弓激波。观测显示,在行星际日冕物质抛射事件(ICMEs)期间,驻哨声波普遍存在于水星弓激波上游,相对于地球较少的报道,水星具有高发生率的特点^[4]。这表明驻哨声波在水星弱弓激波中充当着重要的角色,为研究驻哨声波提供了天然实验室。当太阳风压缩行星磁层时,磁场强度会增加;其压缩率可以用压缩磁场与内禀偶极磁场的比值来恒定。对地球来说,压缩率与日下点磁层顶尺度成正比。而水星的情况正好相反,压缩率与磁层顶尺度成反比;水星核的感应电流在其中起着主要的作用^[5]。水星的磁尾是高度动态变化的,太阳风方向变化可以引起水星磁尾电流片的大振幅偏转^[6]。统计发现,近磁尾磁重联事件的发生与行星际磁场驱动存在明显的相关性,而且在水星磁尾空间存在明显的晨昏不对称性^[7]。由此导致的夜侧磁层与行星相互作用可能显著影响近水星空间等离子体环境。在磁层能量储存和耗散方面,发现

水星磁尾亚暴膨胀阶段的零星和短期能量耗散过程,在膨胀阶段发生了3个阶梯状的极化,磁能进行间歇性释放,意味着能量耗散在亚暴膨胀阶段通过多个局部瞬态过程发生^[8]。在水星内磁层中,夜侧磁赤道面附近有带状的等离子体分布,并且该等离子体带可能与多种磁层电流体系,如分叉环电流、亚暴电流楔和东向电流等,密切相关^[9]。

欧洲航天局和日本联合的BepiColombo计划已于2018年发射前往水星,现已经历了3次水星飞掠,揭示出水星空间环境的一些新的特征。最近,等离子体探测结果显示了压缩磁层的准周期波动和与亚暴相关的脉冲电子注入;尽管行星磁层结构存在差异,但在整个太阳系中,电子注入和漂移是产生极光的普遍机制^[10]。BepiColombo即将在2025年底入轨,在轨探测将有助于解决水星空间环境及多圈层耦合的关键性问题。

3 金星磁场

金星是离地球最近的行星,曾被多次探索过。自2015年金星快车(Venus Express, VEX)结束探测后,目前金星上只剩下“拂晓号”在轨探测。不过太阳探测器Parker Solar Probe、Solar Orbiter和水星探测器BepiColombo在飞往目的地时会飞掠金星。研究人员通过之前的金星环绕器和最近的飞掠金星的探测器观测数据,以及数值模拟来继续研究金星的磁场。

Xu等^[11]通过分析金星快车的所有磁场数据,对金星磁场结构进行分析发现:拖拽结构是近金星空间环境中的主要结构,占比>70%;开放和闭合磁力线结构在磁尾区域平均占20%~30%,而在低海拔地区可达50%。Stergiopoulou等^[12]利用Solar Orbiter两次飞掠金星的数据,研究了到80RV(金星半径)外的磁尾特征。研究发现尽管2次飞掠的磁尾磁场特征不同,但都观测到了磁尾电子密度增强延伸到~20RV外的现象,并就观测结果和混杂模拟进行了对比研究。Rojas等^[13]通过研究准平行和准垂直情况下磁鞘的等离子体密度、速度和温度,发现金星磁鞘中明显存在准平行-准垂直不对称性。

Xu等^[14]利用三维单流体的磁流体动力学(MHD)模型,发现磁鞘对行星际磁场(IMF)变化的响应时间不超过1 min,即使IMF发生剧烈变化,磁鞘时钟角的偏离也不会超过45°,因此,可用金星磁鞘测得的磁场时钟角作为上游IMF的响应条件。Dang等^[15]也建立了金星全球多流体的磁流体模型,该模型能够捕捉到磁层的精细结构,如KH不稳定性和夜侧的尾流等。

金星和太阳风的直接相互作用可能是导致金星离子逃逸的原因之一。Xu等^[16]研究发现太阳极紫外辐射会增大离子的逃逸率。Ma等^[17]利用数值模拟也发现,尽管热氧冕对电离层中的离子密度分布影响很小,但在太阳活动极大年离子损失率仍然会增加。Signoles等^[18]通过分析金星快车的数据,发现在太阳活动极大年(2006—2011年),日侧的离子成分边界会随着动态压力的增加而降低,但在极小年(2011—2014年)却没有明显趋势。另外,行星电离层的电势降也可能会促进离子逃逸。Collinson等^[19]经过观测,发现金星上强烈的电势降来自非常小尺度的结构。

金星待解决和发掘的研究问题还有很多,未来需要更多的卫星数据和更完善的计算机数值模拟来推进。

4 地球空间环境长期变化

迄今为止,还没有自然介质可用于重构“古”电离层与高层大气,因此,目前对电离层和高层大气长期趋势的了解主要来自对约70 a现代观测数据的分析,并辅以理论模拟。科研人员量化分析地磁场、二氧化碳水平和太阳活动3个驱动因素对全新世热层中性密度和温度变化的影响。如图2所示,发现太阳活动的振荡对热层变率的贡献超过80%,而CO₂或地磁场对热层变率的贡献不到10%。CO₂对全球平均中性密度和温度的影响与整个全新世对地磁场的影响相当,但在公元1800年以后更为显著^[20]。此外,热层密度和温度与地磁场偶极矩、CO₂和F10.7呈近似线性变化,仅与地磁场的线性增长率在世界时和纬度上有显著变化。增加的偶

极矩和CO₂使热层冷却和收缩,而太阳活动则有相反的效果。海拔越高,这3个因素对热层的影响越大。不同因素对热层变化产生不同的季节变化影响。此外,预测发现,CO₂浓度每增加4×10⁻⁴,将导致全球平均中性密度和温度分别降低50%~70%和84~114 K,直接影响到航天器和空间碎片的轨道和寿命。在热层环流方面,研究表明,在整个全新世,CO₂的增加/减少将增强/削弱热层环流,但这种影响是非线性的^[21]。热层中CO₂的冷却效应进一步为大气潮汐传播提供了合理条件,并增加了热层潮汐振幅。地磁变化引起热层环流的半球非对称反应。环流的巨大变化发生在磁极漂移较远的半球的高纬度地区,推断出地磁非偶极子变化在环流变化中的关键作用,如图3所示。首次揭示了昼夜迁移潮(DW1)与地磁偶极矩之间的正相关关系。偶

极矩每增加1×10²² Am²,温度中DW1的振幅将增加1~3 K。

5 地球磁场长期变化与气候

地磁场起源于地球内核,分布在岩石圈、大气层、电离层、磁层以至广袤的行星际空间,是日地系统多圈层耦合的重要基础。在漫长的地质历史时期,频繁的地磁倒转与地磁偏移曾严重破坏地球的宜居环境并对生物演化产生至关重要的影响^[22]。然而,地磁倒转与生物灭绝的因果关系从“一对一”假说到“多对一”假说的过渡,更加强调了地磁场长期变化对气候演化的影响。近1个世纪以来,地磁场正在持续减弱,其强度降低了约10%。2023年,中国漠河地区多次出现极光,在新疆、北京与河北多地也罕见地观测到了极光现象,这将把地磁场变化对气候的影响研究推向新的高潮。中国科研团队编译了古汉语圈朝鲜半岛正史中记录的西太平洋区域负地磁异常区(WPA)(图4)红色赤道极光数据库。千年赤道极光的发现与西太平洋地磁异常的提出将为未来研究区域地磁场异常对区域气候的影响提供独一无二的历史视角。

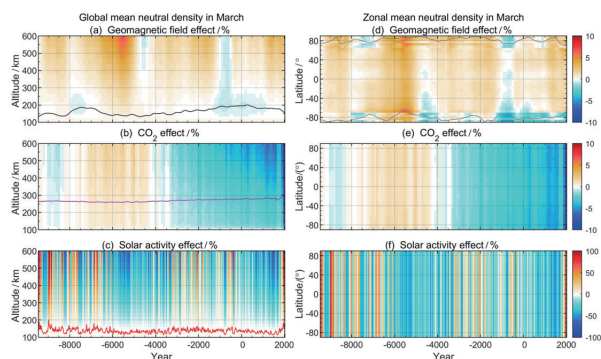
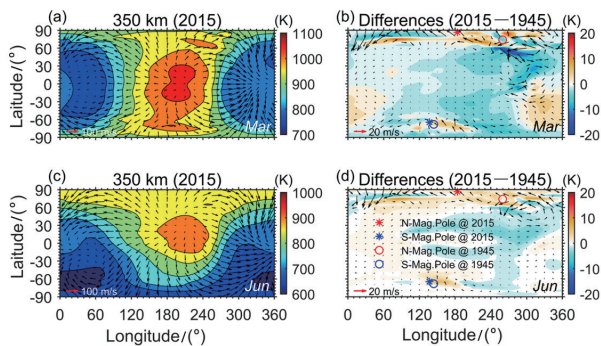
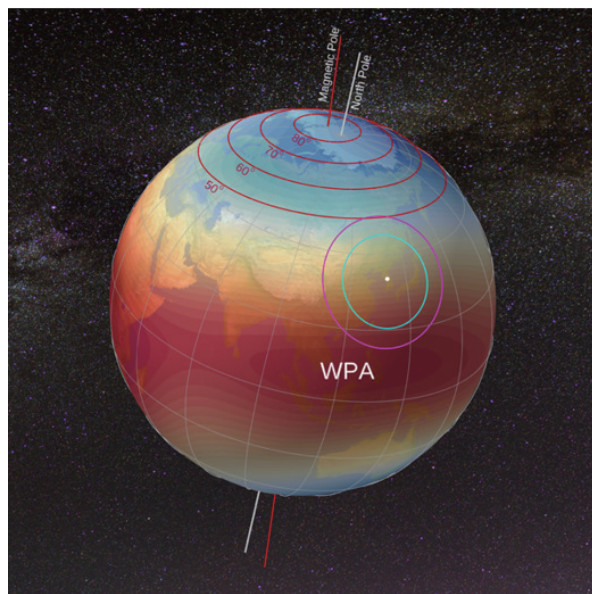


图2 全新世期间地磁场变化、CO₂变化和太阳活动变化引起的全球平均中性密度((a)(b)(c))和温度((d)(e)(f))百分比偏差



彩色等值线表示中性温度,黑色箭头表示水平风
(a) 3月00:00 UT时的地理分布;(b) 1945—2015年地磁场变化导致的中性温度和水平风的差异;(c) 6月00:00 UT时的地理分布;
(d) 1945—2015年南北磁极的变化

图3 350 km处中性温度和水平风的地理分布



白点表示韩国首尔的古代天文台;粉红色和青色的圆圈分别表示在400 km和200 km高度首尔的可见范围
图4 朝鲜半岛极光观测图

6 彗星和小行星结构与物质成分

每天有数以亿计的来自彗星或小行星的流星体进入地球空间,给地球带来外部物质并影响地球空间环境。多数流星体进入地球高空后蒸发殆尽,产生壮观的流星光学余迹和等离子体尾迹等现象,只有极少数穿过大气坠落地表留下陨石。探测流星及其流星体信息,有助于了解其母体彗星和小行星等成分、结构和运动规律,以及深刻认识地外物质如何影响地球空间环境。

近年来,国际上对彗星和小行星结构与物质成分等研究,主要通过实地采样和遥感探测开展。例如,MacLennan等^[23]分析双子座流星雨可能的母体(3200)Phaethon的红外辐射光谱,发现其最接近CY碳质球粒陨石,提出当Phaethon接近太阳时其内部温度的升高有助于碳酸盐等矿物热分解,释放的气体可能触发尘埃喷射;Vida等^[24]报告了一颗分米大小岩石流星体的直接观测,其在飞行过程中在动态压力下碎裂,类似于火星残留的普通球粒陨石,结合模型估计了从奥尔特云撞击地球的岩石流星体通量为 $1.08_{-0.95}^{+2.81}$ 颗/(10^6 km²·a)。

国内科研人员通过研制建设有关地基监测设备,对流星体进入地球大气后的系列过程开展无线电和光学综合探测。Li等^[25]分析1例流星火球多次闪耀,其在中间层产生多团等离子体非场向不均匀体,流星母体具有木星族彗星轨道特征,力学强度大约为10~74 kPa,材料强度PE分类属于类型I,可能含有坚硬炭质夹杂物微粒,指出质量克级的流星体在地球空间烧蚀蒸发的过程中可能形成带电尘埃等离子体尾迹。

7 月球空间环境

月球空间环境是研究等离子体物理过程的重要实验室^[26],一方面,月球自身在外部环境作用下可以形成逃逸层^[27],它的成分表征了月表物质^[28];另一方面,月表还受太阳风/地球风的持续轰击,反向散射太阳风质子可以产生能量中性原子^[29-30],这种作用还可以在月球周边激发星体与太阳风相互

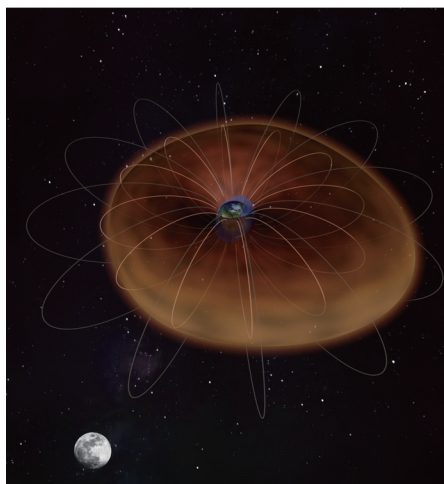
作用过程普遍存在的1 Hz波动^[31],在尾迹中激发低频静电波,尽管激发机制尚未完全厘清^[32]。研究表明,太阳风注入月球表面,可以产生大量的太阳风衍生水,最新估计此种月球水储量约为 2.7×10^{14} kg^[33]。同时,研究人员还提出了利用热通量法分析月表含水量的方法和原理^[34]。最新观测表明,地球磁尾中的高能电子注入月壤,起到维持月表水的关键作用^[35]。太阳风与月表逃逸层电子(电离层)可以在特定条件下发展双流不稳定性^[36]。月球与太阳风相互作用过程中能形成新的宏观结构^[37-38]和微观结构^[39]。

8 月地关联与地月联测

地月关系是热点研究领域。一方面,地球对月球的影响受到广泛关注,月球轨道位于地球磁尾中,源自地球电离层的等离子体(地球风)典型特征已被详细研究^[40-41],发现了地球风在月球赤铁矿渐进和持续氧化形成过程中的重要作用^[42],以及地球磁尾不是月球免受太阳高能粒子辐射的有效磁屏障^[43]。另一方面,月球对地球影响的研究,发现月球反射太阳光可以扰动地球电离层^[44],此外,还强调了月球作为观测地球^[45],甚至其他天体^[46]基地的重要性。

科研人员利用国内外近40年来10余颗卫星(包括中国“嫦娥三号”、美国THEMIS卫星及欧洲Cluster卫星等)穿越地球等离子体层顶的数据,通过分析等离子体层顶位置随月相的变化情况,首次观测到地球等离子体层中存在月球潮汐信号^[47],其特性显著区别于绝大部分低高度(如地壳、海洋和大气等)潮汐信号:存在全日周期和全月周期,且高潮只有1个,并出现在月球地方时的昏侧附近,其相位领先月球约90°。研究人员进一步分析电场观测数据,发现径向电场也显示出了全日和全月周期的潮汐变化,并与等离子体层顶的潮汐信号相对应。等离子体层顶位置的潮汐变化可能是由电场的潮汐变化引起的,该形成机制也被2种等离子体层顶模型所检验。这表明引力和电磁力的共同作用,导致了等离子体层顶潮汐信号特征显著区别于

近地面区域仅由引力引起的潮汐信号(图5)。这一新发现更新了对潮汐现象的认知,也表明月球对近地空间环境的作用比设想的更为重要,拓展了对地月系统相互作用的理解,并有助于进一步研究其他行星系统中卫星和行星的相互作用过程。



蓝色部分表示海洋潮汐,橙色部分表示层顶潮汐

图5 海洋潮汐与等离子体层顶潮汐对比

9 火星磁场

中国“祝融号”火星车携带磁强计于2021年5月15日成功着陆于火星表面乌托邦平原处,并在火星表面实现了人类首次移动式磁场测量。杜爱民等^[48]根据火星车磁强计在乌托邦平原处的实际测量,发现在乌托邦平原处的磁场非常低。这表明乌托邦盆地在形成过程中被撞击完全退磁,支持火星早期磁场发电机在~4.0 Ga已经停止工作;后续形成的早西方纪熔岩流也未被重新磁化,表明火星后期磁场发电机可能在36亿~37亿年前就已经停止了。

由于火星内部发电机的消亡,火星当前不具备全球偶极型磁场,但火星表面磁性矿物则以岩石剩磁的形式记录下了早期火星发电机磁场。火星岩石剩磁对于影响火星磁层、电离层动力学过程发挥着重要作用。研究团队首次定量估算得到了磁尾磁场振荡的各项物理参数,发现火星磁尾磁场振荡的能量损耗率要比地球磁尾的高1个数量级^[49]。科研人员首次发现了火星壳磁场可“捕获”太阳风。

太阳风能够通过一种特定的物理过程,周期性地渗透到火星的壳磁场中,并被这些壳磁场成功捕获,最终被融入火星的大气层中^[50]。基于这一发现,研究人员提出了将火星的壳磁场形象地描述为一种“迷你磁层”或“微型磁层”的新观点(图6),从而颠覆了之前普遍认为小尺度壳磁场难以捕获太阳风的看法。

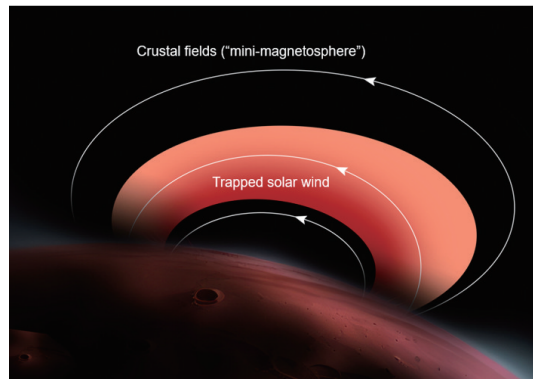


图6 火星壳磁场可捕获太阳风

10 火星高层大气

火星高层大气是火星空间环境中物质、能量传输的关键区域,在火星圈层内部及与行星外部的耦合中发挥重要作用,同时也是火星大气中性分子及离子逃逸的重要过渡区域。Yigit等^[51]回顾了低层大气波、沙尘暴和大气损失的作用,并讨论了这些过程是如何在火星整个大气系统中耦合的。这些认识对于理解火星低层大气与高层大气耦合,以及对于了解火星过去和现在的气候都是至关重要的。火星电离层是火星低层大气和外部磁化等离子体环境之间的过渡区域,有着复杂的物理过程,同时也存在多种物理过程共存并共同发挥作用。不同高度区域有着不同的主控物理过程。估计相关的时间常数是一个准确评估特定过程占主导地位的方法,由此可以确定适当边界位置。Cao等^[52]利用数据驱动模拟估算了火星电离层中每种离子的时间常数范围,包括化学损失时间常数、扩散时间常数、离子-中性和离子-离子碰撞时间常数及回转周期。通过比较这些时间常数,确定了光化学平衡边界、磁冻结边界、离子碰撞边界和离子回旋边界

随太阳活动及地方时的变化,这些研究有助于更深入理解火星电离层各物理过程在不同区域的控制作用。Chen 等^[53]定量评估了火星高层大气对电离层变化性的贡献。在 MGS 的观测条件下(北半球高纬、较大的太阳天顶角),高层大气变化对电离层峰值密度变化性的统计平均贡献约为 1.4%,其中非迁移潮汐引起的高层大气变化是主要贡献因素。可推测在较低纬度和较小的太阳天顶角情况下,这种贡献会增大。

11 火星大气逃逸

火星大气的逃逸现象一直是全球科学研究的前沿热点,这一研究对于理解行星大气及宜居性的演变过程至关重要。火星的大气既能通过中性粒子的形式逸出,也可作为离子逃逸到太空中。2023 年,基于中国的“天问一号”任务和美国的火星大气与挥发分演化任务(MAVEN)所获得的数据,配合数值模拟,科研人员取得了关于这一主题的一系列重要科学发现。

在离子逃逸研究领域,科研人员最近提出了一个重要的观点,指出火星质子极光的强度与离子逃逸率之间可能存在着潜在的相关性。研究发现,随着太阳风动压的增加,离子逃逸率和质子极光的强度都呈现出幂指数式的增长趋势^[54]。这一发现开辟了一条新的研究途径:通过构建离子逃逸率与质子极光强度之间的经验关系,未来将有望利用光学遥感成像技术来有效评估火星乃至其他系外行星的离子逃逸情况。

由火星壳磁场形成的这种微磁层可以延伸至高达 1300 km 的高度,并直接与太阳风发生相互作用^[55],这一发现丰富了对太阳风与火星之间相互作用的理解。研究人员还通过数值模拟发现火星的壳磁场可以有效减少 10%~30% 的逃逸率^[56]。这些研究均表明壳磁场在太阳风-火星相互作用,以及火星大气逃逸的过程中扮演了重要的角色。

研究人员在首次综合利用 MAVEN 和“天问一号”的数据后,证实了对流电场主导了“离子羽”的形成过程^[57]。研究人员还揭示了磁层动力学过程

对火星大气中离子逃逸的贡献。发现在发生磁场重联的事件中,离子的逃逸通量明显增加,这间接表明磁场重联在一定程度上可以促进火星大气的逃逸^[58-59]。此外,研究还显示,大量的行星离子通过边界层中由开尔文-赫姆霍兹不稳定性驱动的涡旋结构而逃逸^[60]。

在研究火星离子逃逸的过程中,研究人员开发了一种包含 5 个组分的磁流体力学模型,首次计算了行星质子的逃逸率^[61]。研究发现,行星质子的逃逸率高于重离子的逃逸率,但是只有不到 10% 的氢是通过离子逃逸的方式逸出的。研究人员利用混合模拟方法研究了火星离子逃逸与太阳风条件之间的关系^[62]。研究发现,离子逃逸率随着极紫外辐射和太阳风动压的增加而上升,特别是当行星际磁场为径向分布时,离子逃逸率会被显著提升。这些数值模拟的研究成果提供了更深入的洞察,帮助更好地理解火星大气的逃逸过程。

在中性粒子逃逸研究领域,研究人员揭示了风场对火星大气中性逃逸的影响。发现在沙尘暴期间,由于水平风场的作用,氢原子的逃逸量增加了 15%,而氢分子的逃逸量则显著增加了 60%^[63]。同样,该团队还研究了太阳耀斑对中性逃逸的促进作用。以 2017 年 9 月 10 日发生的一次太阳耀斑事件为例,发现在耀斑期间,碳原子的逃逸率上升了 8%,而氮原子的逃逸率则增加了 20%^[64]。这一现象的原因是太阳耀斑期间电离层的光化学反应过程更加强烈,导致更多的热原子从火星大气中逃逸。这些研究成果不仅增进了对火星大气动力学的理解,也为行星科学提供了宝贵的洞见。

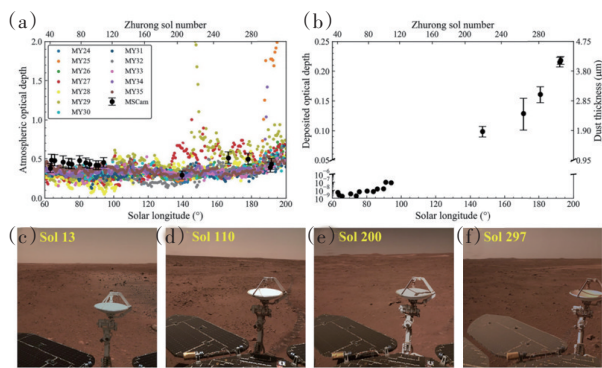
12 火星表面水活动

基于大量的遥感和就位探测,在火星表面发现了多种类型的含水矿物和诸如复现性斜坡纹、冲沟河谷网络、外流河道、冲积扇等与水活动相关的地貌,表明古代火星曾经有过丰富的液态水活动。最近成功着陆于火星表面的“祝融号”和“毅力号”火星车分别在北部平原和南部高地进行了巡视探测,揭示了火星表面水活动历史的更多重要细节。基

于在轨道标后的“祝融号”火星车短波红外光谱数据^[65]和LIBS(laser-induced breakdown spectroscopy)光谱的元素含量估计^[66],确定了火星乌托邦平原存在硫酸盐,表明火星北部低地曾经存在水活动^[67];着陆区岩石发育的层理构造指示双向水流成因^[68],为火星古海洋的存在提供了支持。结合沙丘表面的多边形等形貌特征,揭示现代火星仍存在水活动^[69-70]。

13 火星沙尘环境

火星沙尘活动是影响火星气候系统和宜居性的重要因素,相关研究也随着火星探测任务的增加而得到快速发展。中国的“天问一号”“祝融号”和美国的“毅力号”获得了火星沙尘环境的最新观测数据。“祝融号”成功登陆火星后,其搭载的多光谱相机 MSCam 及其校准目标也可用于监测火星沙尘的沉积过程。基于 MSCam 的成像结果,科研人员对“祝融号”前 300 个火星天的大气光学深度和沙尘沉积率进行了研究,得到的大气光学深度约为 0.44,表明当时的沙尘活动水平相对较低,且在最初的 110 个火星天没有明显的沙尘沉降,之后沙尘开始快速积聚(图 7^[71])。结合“祝融号”的气象测量



(a) “祝融号”MSCam 反演的 650 nm 波段的光学深度随太阳经度的变化情况(黑点),同时给出了火星年 MY24—35 年同一时期“祝融号”着陆区的历史沙尘光学深度情况;(b) 沙尘沉积对应的光学深度随太阳经度的变化情况,右侧 y 轴对应沉积沙尘的厚度;(c)~(f) 分别是“祝融号”搭载的导航地形相机 NaTeCam 在第 13、110、200 和 297 火星天拍摄的太阳能电池板上的沙尘积累图像

图 7 “祝融号”着陆区前 300 火星天的大气光学深度变化和沙尘沉积过程

数据和数值模拟,该研究认为风速可能是控制沙尘沉降速率的关键因素^[71]。此外,“祝融号”搭载的火星气象站 MCS 也首次给出了乌托邦平原南部的火表气压、温度、风场数据,其具有明显的季节变化^[72]。除了中国的“祝融号”,美国的“毅力号”也利用其多仪器的就位联合探测对当地的起沙过程进行了研究。地表反照率的时间演化分析表明,尘卷风可以导致地表反照率的瞬时变化,而沙尘暴对火表的除沙过程则可以导致地表反照率降低超过 15%^[73]。

火星沙尘活动的发展和演化规律关系到沙尘暴的发生机制,科研人员利用火星勘测轨道飞行器(MRO)的火星每日全球地图(MDGMs)手动追踪了从第 29 到 33 火星年的沙尘暴,并构建了火星沙尘暴序列数据集(MDSSD),该数据集包含 12000 多个沙尘暴实例^[74]。利用该最新的数据集,研究人员根据时空演化分布特点对火星沙尘暴进行了分类,对沙尘暴的发展和演化规律进行了多年统计分析,其中一个显著特征是沙尘暴事件和沙尘暴序列所表现出的不同年份的准周期性重复暴发。沙尘暴的发生还可能伴随相关物质化学特性的变化。科研人员通过模拟实验,发现火星沙尘暴中的气体-固体多相电化学反应可以在无水的环境中形成碳酸盐,从而揭示了一种火星固碳的新途径^[75]。

科研人员利用机器学习聚类算法重新分析了火星轨道飞行器激光高度计(MOLA)数据集,获取了一套新的大型火星大气结构数据集,可以用于研究火星远日点云带、极地云带、区域沙尘暴和地形云的发展过程^[76]。基于火星大气和挥发性气体演化探测仪(MAVEN)的观测数据,科研人员还利用物理网格深度神经网络算法建立了火星电离层电子密度模型,结果表明,第 34 火星年的全球沙尘暴显著提高了火星电子层的峰值高度^[77]。此外,火星沙尘暴会显著降低火星轨道器的成像质量,进而影响对全球地形和地貌的测绘过程。为了解决这一问题,科研人员利用“天问一号”拍摄的沙尘图像作为机器学习的训练集,并借鉴了地球卫星成像的脱雾技术,对火星观测图像中的沙尘暴进行去除,从而使火星的地形地貌细节得到明显改善^[78]。

中国在火星沙尘环境研究中起步较晚,但发展迅速。国内火星研究团队基于自主研发的高分辨率大气模式动力框架,引进并耦合了国际先进的火星物理过程,构建了新一代火星大气模式“Global Open Planetary atmospheric model for Mars”,具备了火星沙尘、水和二氧化碳的模拟能力^[79]。除了数值模型之外,适用于火星环境的沙尘模拟实验设备也是研究火星沙尘环境的重要工具。有科研团队提出了一种新的沙尘诱导的回流式风洞设计,以模拟更真实的火星沙尘暴,结果表明,在100~1500 Pa的低压环境中,模拟可以达到5~180 m/s的风速跨度^[80]。

然而,目前对火星沙尘暴的研究尚不成熟,无法进行准确预报,火星沙尘暴的实时监测对于保障未来火星探测任务的安全实施很有必要。针对这点,科研人员提出了一个火星沙尘暴监测方案,包括火星赤道同步轨道处的3颗卫星及1颗椭圆极轨卫星,可形成“四点一体”的火星全球天气监测组网,从而对火星全球形成大尺度、无间断的持续监测,这对于监测和预警火星沙尘暴具有潜在的科学和工程意义^[81]。

14 火星内部结构与现今构造活动状态

火星内部结构与现今构造活动状态是认识行星形成和演化的重要窗口之一。“洞察号”(InSight)火星探测任务搭载了地震仪、热流仪和自转探测等3套科学载荷,为认识火星的内部结构和现今构造活动状态提供了历史机遇。该任务的主要科学目标:一是获得火星内部结构,二是查明火星现今构造活动状态。“洞察号”任务研究团队利用地震学方法明确了火星与地球一样具有壳-幔-核的圈层结构。在“洞察号”着陆器下方,火星壳分为3层结构,火星壳厚度为~45 km;在火星幔~1006 km深度存在一条间断面,其对应地球地幔转换带410 km深度间断面,由矿物相变引起;对火星核半径主要存在2种认识,即~1830 km和~1675 km,该差异在于火星核幔边界是否存在富硅的熔融层^[82-84],迄今未探测到火星存在固态的内核^[84]。

15 火星自转、潮汐和重力观测

在无法进行表面原位探测时,行星自转、潮汐和重力观测是揭示行星内部圈层结构的首要手段,尤其是记录了行星形成与演化、行星宜居性,以及行星发电机历史与状态的“心脏地带”——行星核。重力场的球谐系数模型、行星潮汐勒夫数和自转观测中的钱德勒晃动、液核自由章动、内核自由章动和内核晃动皆是行星外部形状、内部圈层结构(大小、密度、状态)的函数。2023年利用国际多种载荷数据,中国和欧洲团队均有重要科学发现。

研究团队通过利用“洞察号”的自转与内部结构实验装置600多d的观测,成功获取了火星自转观测参数,并发现火星自转速率加速的现象,成功探测到火星液核自由章动周期并继而反演了火星核的大小和密度^[84]。由于没有观测到相应的内核自由章动现象,研究推测火星不存在固态内核。然而,该观测得到的火星自转加速现象尚缺少可靠的物理机制,且观测的灵敏度仍然需要进一步提高。因此,未来研究火星自转加速的物理成因,提高观测精度将为理解火星内部动力学过程、火星内核有无与发电机启停历史提供关键信息。

研究团队联合火星全球重力场数据,火星岁差观测,重新计算了火星的平均密度和平均惯性矩因子,并发展了火星自转变化理论模型^[85]。通过发展与矿物物理模拟计算自洽的重力学反演方法,利用新的火星平均密度和平均惯性矩因子,获得了4层火星圈层结构模型,该模型对于进一步研究火星核大小和密度及其相应的轻元素分布,火星核幔边界性质,火星液核自由章动、火星自由振荡和火星幔层相变具有重要的参考价值。

16 “天问一号”着陆区次表层精细结构及地质演化过程

2021年,“天问一号”携带“祝融号”火星车成功在乌托邦平原南部着陆。“祝融号”火星车配备的次表层探测雷达(rover penetrating radar, RoPeR)为研究火星次表层精细结构、地质和古环境演化带来

了新的契机。

Chen 等^[86]基于“祝融号”火星车前 1200 m 采集的高频雷达数据,获得了着陆区 5 m 深度范围内高精度雷达反射图像。在高频雷达图像上未发现明显的连续反射层,但存在多个碗状和斜坡结构,对应于完整或部分退化的撞击坑壁和近地表的撞击透镜体。雷达数据直观地展示了稀薄火星大气和风蚀等表面地质作用对次表层结构的影响。

Zhang 等^[87]在低频雷达垂向分层结构研究的基础上,利用时频分析方法,发现雷达数据在 35~65 m 深度范围内沿巡视路径具有高低频交替展布的特征,表明地下介质结构和物性存在明显横向差异。对低频条带的尺寸、分布特征及着陆区地质背景的综合分析显示,这一频率的横向变化可能对应于埋藏在地下的古多边形地貌特征。基于多学科观测约束提出,这些已被埋藏的古多边形地貌可能形成于冻融循环作用,表明火星低纬度地区早期可能处于寒冷潮湿的环境;古多边形地层与其上覆沉积地层的结构和物性差异进一步表明,着陆区的水活动特征和/或热状态在晚西方纪/早亚马逊纪发生了显著变化。上述观测为理解火星古环境和气候演化提供了重要依据。

17 木星空间环境

木星作为太阳系中最大的行星,其独特的空间环境提供了一个关于行星形成、磁场活动及天体物理现象的丰富研究平台。2023 年各种新的关于木星空间环境的研究报道层出不穷。

Cavalié 等^[88]提出了一种新的化学反应机制来解释 CO 的生成和消耗过程,提供了关于木星大气成分和化学过程的重要信息。Mauduit 等^[89]开发了一种新的探测方法,用于在大量高时间-频率分辨率数据中探测漂移的离散木星射电爆发,揭示了木卫三-木星相互作用和主要木星极光相关的快速漂移射电爆发。Galanti 等^[90]结合了重力和射电掩星测量更准确地计算木星和土星的形状。Chen 等^[91]展示了在基于第一原理的物理全球模拟中,木星磁层顶的重联分隔线可能存在显著的轴向不对

称。Damiano 等^[92]使用了混合陀螺流体-动力电子模型,研究了木星电离层附近惯性阿尔芬波在弱电条件下对电子的高能量化过程,解释了“朱诺号”观测到的在木星磁场中电子能量达到 $10^5\sim 10^6$ eV 水平的现象。Nichols 等^[93]比较了哈勃空间望远镜对木星远紫外极光的观测和“朱诺号”在木星赤道中部磁层的同时在位观测,提供了极光斑点与磁层对流之间关联的直接证据。Sulaiman 等^[94]研究了“朱诺号”在其高倾角轨道上对木星高纬度磁力线的采样,呈现了与木卫一及其轨道相连的磁场线上的阿尔芬通量和与场对齐的电流密度。Montgomery 等^[95]使用“朱诺号”数据对木星黎明侧磁层顶的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性进行研究,表明木星黎明侧磁层顶存在 KH 波,主要驱动因素包括高速度剪切和等离子体压力变化。Sarkango 等^[96]通过研究木星内部磁层中高能质子的赤道俯仰角分布,表明,由于波粒相互作用,质子可能从木星被注入磁层。Feng 等^[97]调查了在恒定太阳风条件下木星磁层顶位置表现出显著的动态变化,表明磁层中径向动态压力对木星磁层顶的位置和形状有显著影响。Menietti 等^[98]研究了木星内磁层中 Z 模式和 O 模式电磁波的发射特性及其与粒子动力学的关系,结果表明,这些发射可能在源区域附近观测到,但并不在源区域内,揭示了木星内磁层中电子加速的重要机制。Wang 等^[99]报道了木星极光区域中的电离层和热层中的非对称流动特征。

18 土星空间环境

土星磁层中的自转调制使探测数据呈现复杂的空间和时间变化特征,给解析数据带来巨大挑战。研究人员系统分析了卡西尼飞船的磁场、能量中性原子和射电辐射数据,构建了重现性磁场偶极化、准周期性能量中性原子增强、千米辐射和窄带辐射增强等关键现象的因果链,并进一步提出了土星磁层周期性变化的全景图像^[100]。科研人员分析了卡西尼飞船在 7.6~9 个土星半径区域对静电电子回旋谐波和电子蝴蝶状投掷角分布的观测。研究发现,100~1000 eV 电子的蝴蝶状投掷角分布主

要是由静电电子回旋谐波散射损失造成的,进一步的模拟结果成功重现了电子峰值投掷角及 90° 与峰值投掷角的相空间密度比值随着径向距离的变化,研究成果推进了对于土星磁层电子动力学的深入认识^[101]。

19 冰卫星研究

一些冰卫星(木卫二 Europa、土卫二 Enceladus)的冰层下方存在着下表面海洋。这种海洋是太阳系内除地球外,生命可能的宜居环境的地方,因此对冰卫星的探测和研究将是未来行星探测的一大热点。冰川学和冰物理学研究者主要依靠实验室模拟实验、计算机模型、地球冰川类比研究^[102],来推测冰卫星的结构、成分和地质活动。为研究可溶性杂质对多晶冰晶粒生长动力学的影响,研究团队对掺杂不同浓度 KCl(10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} mol/L)或 MgSO₄(10^{-2} 、 10^{-5} mol/L)的多晶冰样品分别进行了退火实验。样品在 20 MPa 静水压力和不同恒温(268、263、258 和 253 K)下退火最长 100 h。每次结束退火后,使用配备冷台的光学显微镜获得样品的表面图像。相对于纯冰,掺杂冰样品在不同温度下表现出不同的生长速率:在共晶点以上,可溶性杂质会在晶界形成液相,并提供快速扩散路径,从而促进晶粒生长;在共晶点以下,可溶性杂质可能通过形成可固定晶界的盐水合物来阻碍晶粒生长。该数据对流变律在冰卫星模拟上的应用起到重要的支撑作用^[103]。

20 展望

未来 10 年,中国将继续实施月球探测工程,发射“嫦娥六号”探测器、完成月球极区采样返回,发射“嫦娥七号”探测器、完成月球极区高精度着陆和阴影坑飞跃探测,完成“嫦娥八号”任务关键技术攻关,与相关国家、国际组织和国际合作伙伴共同开展国际月球科研站建设。继续实行星探测工程,发射小行星探测器、完成近地小行星采样和主带彗星探测,完成火星采样返回、木星系探测等关键技术

攻关。论证太阳系边际探测等实施方案。

可以预见,中国的深空探测战略需要更高水平的行星物理学,也将推动世界行星物理学向更高水平发展。可以期望,行星物理学的中国特色会越来越浓厚,给人类探索宇宙与和平利用太空带来更大福祉。

参考文献(References)

- [1] Yan L M, He F, Yue X N, et al. The 8-year solar cycle during the maunders minimum[J]. AGU Advances, 2023, 4(5): e2023AV000964.
- [2] Scharping N. Aurora records reveal shortened solar cycle during maunders minimum[J]. Eos, 2023, 104.
- [3] Baker H. Strange anomaly in sun's solar cycle discovered in centuries-old texts from Korea[EB/OL]. [2023-10-23]. <https://www.space.com/sun-solar-cycle-anomaly-discovered-korean-texts>.
- [4] Wang Y, Zhong J, Slavin J, et al. MESSENGER observations of standing whistler waves upstream of mercury's bow shock[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(10): e2022GL102574.
- [5] Chen Y W, Shue J H, Zhong J, et al. Anomalous response of mercury's magnetosphere to solar wind compression: Comparison to earth[J]. The Astrophysical Journal, 2023, 957(1): 26.
- [6] Shao P, Ma Y H, Odstroil D. Solar wind directional change triggering large-amplitude deflection of Mercury's Current sheet[J]. Astrophysics and Space Science, 2023, 368(4): 28.
- [7] Zhong J, Lee L C, Slavin J A, et al. MESSENGER observations of reconnection in mercury's magnetotail under strong IMF forcing[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2023, 128(2): e2022JA031134.
- [8] Shao P, Ma Y H, Zeng G. MESSENGER observations of multiple magnetic energy releases during mercury's substorm[J]. The Astrophysical Journal, 2023, 953(1): 110.
- [9] 石振, 戎昭金, 魏勇. 水星内磁层等离子体带及电流体系[J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2236-2251.
- [10] Aizawa S, Harada Y, André N, et al. Direct evidence of substorm-related impulsive injections of electrons at Mercury[J]. Nature Communications, 2023, 14: 4019.
- [11] Xu S S, Frahm R A, Ma Y J, et al. Statistical mapping of magnetic topology at Venus[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2023, 128(12): e2023JA032133.
- [12] Stergiopoulou K, Jarvinen R, Andrews D J, et al. Solar orbiter data-model comparison in Venus' induced mag-

- netotail[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(2): e2022JA031023.
- [13] Rojas M S, Stenberg W G, Futaana Y, et al. Proton plasma asymmetries between Venus' quasi-perpendicular and quasi-parallel magnetosheaths[J]. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2023, 128(6): e2022-JA031149.
- [14] Xu Q, Xie L H, Rong Z J, et al. The magnetic field clock angle departure in the Venusian magnetosheath and its response to IMF rotation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, 677: A142.
- [15] Dang T, Zhang B, Yan M, et al. A new tool for understanding the solar wind-venus interaction: Three-dimensional Multifluid MHD Model[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 945(2): 91.
- [16] Xu Q, Xu X, Zuo P, et al. Solar control of the pickup ion plume in the dayside magnetosheath of Venus[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(4): e2022GL10-2401.
- [17] Ma Y, Combi M R, Tenishev V, et al. The effects of the upper atmosphere and corona on the solar wind interaction with venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(4): e2022JA031239.
- [18] Signoles C, Persson M, Futaana Y, et al. Influence of solar wind variations on the shapes of venus' plasma boundaries based on venus express observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 954(1): 95.
- [19] Collinson G A, Frahm R A, Glocer A, et al. A survey of strong electric potential drops in the ionosphere of Venus [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(18): e2023-GL104989.
- [20] Cai Y H, Yue X N, Zhou X, et al. Simulated long-term evolution of the thermosphere during the Holocene-Part 1: Neutral density and temperature[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, 23(9): 5009-5021.
- [21] Zhou X, Yue X N, Cai Y H, et al. Simulated long-term evolution of the thermosphere during the Holocene-Part 2: Circulation and solar tides[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, 23(11): 6383-6393.
- [22] Pan Y X, Li J H. On the biospheric effects of geomagnetic reversals[J]. *National Science Review*, 2023, 10(6): nwad070.
- [23] MacLennan E, Granvik M. Thermal decomposition as the activity driver of near-Earth asteroid (3200) Phaethon[J]. *Nature Astronomy*, 2023: 1-9.
- [24] Vida D, Brown P G, Devillepoix H A R, et al. Direct measurement of decimetre-sized rocky material in the Oort cloud[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7(3): 318-329.
- [25] Li G Z, Wu Z, Li Y, et al. The spectrum and orbit of a fireball producing mesospheric irregularity and implications for meteor mass deposition[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 946(1): 11.
- [26] Dandouras I, Taylor M G G T, De Keyser J, et al. Space plasma physics science opportunities for the lunar orbital platform-Gateway[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, 10: 1120302.
- [27] Teolis B, Sarantos M, Schorghofer N, et al. Surface exospheric interactions[J]. *Space Science Reviews*, 2023, 219(1): 4.
- [28] Berezhnoi A, Velikodsky Y I, Pakhomov Y V, et al. The surface of the Moon as a calibration source for Na and K observations of the lunar exosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 2023, 228: 105648.
- [29] Leblanc F, Deborde R, Tramontina D, et al. On the origins of backscattered solar wind energetic neutral hydrogen from the Moon and Mercury[J]. *Planetary and Space Science*, 2023, 229: 105660.
- [30] Szabo P S, Poppe A R, Mutzke A, et al. Energetic neutral atom (ENA) emission characteristics at the moon and mercury from 3D regolith simulations of solar wind reflection[J]. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 2023, 128(9): e2023JE007911.
- [31] Lou Y, Gu X, Cao X, et al. Statistical analysis of lunar 1 Hz waves using ARTEMIS observations[J]. *Astrophysical Journal*, 2023, 943(1): 17.
- [32] Sreeraj T, Singh S V, Lakhina G S. Ion acoustic waves in lunar wake plasma[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(11): 4604-4612.
- [33] He H C, Ji J L, Zhang Y, et al. A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16: 294-300.
- [34] Liu Z H, He H Y, Li J N, et al. Measurement and uncertainty analysis of lunar soil water content via heating flux method[J]. *Aerospace*, 2023, 10(7): 657.
- [35] Li S, Poppe A R, Orlando T M, et al. Formation of lunar surface water associated with high-energy electrons in Earth's magnetotail[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 1427-1435.
- [36] Chakraborty M, Yadav V K, Kumar R. Two-stream instability generation in the lunar ionosphere[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(6): 2954-2966.
- [37] Omid N, Zhou X Y, Russell C T, et al. Interaction of interplanetary shocks with the moon: Hybrid simulations and ARTEMIS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(6): 5971.
- [38] Nabatov A S, Zakharov A I, Efimov A I. Formation of a plasma layer during the passage of the moon through the magnetic ropes of the solar wind[J]. *Solar System Research*, 2023, 57(1): 52-60.
- [39] Nakagawa T, Takahashi F, Saito Y, et al. Sub-ion-gyro

- scale magnetic field compressions generated by the solar wind interaction with the moon[J]. *Earth, Planets and Space*, 2023, 75(1): 60.
- [40] Runov A, Angelopoulos V, Khurana K, et al. Properties of quiet magnetotail plasma sheet at lunar distances[J]. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2023, 128(11): e2023JA031908.
- [41] Cao X, Halekas J, Haaland S, et al. Using machine learning to characterize solar wind driving of convection in the terrestrial magnetotail lobes[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, 10: 1180410.
- [42] Fu Y, Wang H Z, Zhang J, et al. Possible formation mechanism of lunar hematite[J]. *Magnetochemistry*, 2023, 9(2): 43.
- [43] Liuzzo L, Poppe A R, Lee C O, et al. Unrestricted solar energetic particle access to the moon while within the terrestrial magnetotail[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(12): e2023GL103990.
- [44] Friedrich M. Does the moon meddle with the lower ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2023, 250: 106119.
- [45] Gorkavyi N, Krotkov N, Marshak A. Earth observations from the Moon's surface: Dependence on lunar libration[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2023, 16(6): 1527–1537.
- [46] Chen G Q, Guo H D, Wu W J, et al. Spatiotemporal characteristics of near-earth object monitoring from a moon-based station: Case from 1962 to 2020 in CNEOS[J]. *Remote Sensing Letters*, 2023, 14(4): 423–432.
- [47] Xiao C, He F, Shi Q Q, et al. Evidence for lunar tide effects in Earth's plasmasphere[J]. *Nature Physics*, 2023, 19: 486–491.
- [48] Du A M, Ge Y S, Wang H P, et al. Ground magnetic survey on Mars from the Zhurong rover[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 1037–1047.
- [49] Zhang C, Rong Z J, Zhang L L, et al. Properties of flapping current sheet of the Martian magnetotail[J]. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2023, 128(4): e2022JA031232.
- [50] Zhang C, Nilsson H, Ebihara Y, et al. Detection of magnetospheric ion drift patterns at Mars[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6866.
- [51] Yigit E. Coupling and interactions across the Martian whole atmosphere system[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16: 123–132.
- [52] Cao Y, Cui J, Liang W, et al. Characteristic timescales for the dayside martian ionosphere: Chemistry, diffusion, and magnetization[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, 166(6): 264.
- [53] Chen Y D, Liu L B, Le H J, et al. Evaluation for effects of variable Martian upper atmosphere on ionospheric peak electron density based on the MGS RO observation[J]. *Icarus*, 2023, 391: 115364.
- [54] He F, Fan K, Hughes A, et al. Martian proton aurora brightening reveals atmospheric ion loss intensifying[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(5): e2023GL102723.
- [55] Fan K, Wei Y, Fraenz M, et al. Observations of a mini-magnetosphere above the Martian crustal magnetic fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(21): e2023GL103999.
- [56] Li G K, Lu H Y, Li Y, et al. Influence of crustal magnetic fields on horizontal plasma transport and ion escape on Mars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 957(2): 92.
- [57] Ma X, Tian A M, Guo R L, et al. Tianwen-1 and MAVEN observations of Martian oxygen ion plumes[J]. *Icarus*, 2023, 406: 115758.
- [58] Xu X J, Wang X, Zhou Z L, et al. Ion loss within a reconnection exhaust near Mars: MAVEN observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 955(1): 41.
- [59] Wang L, Huang C, Du A M, et al. Magnetic reconnection in the Martian magnetotail: Occurrence rate and impact on ion loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(18): e2023GL104996.
- [60] Wang L, Huang C, Du A M, et al. Kelvin-helmholtz instability at Mars: In situ observations and kinetic simulations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 947(2): 51.
- [61] Sun W Y, Ma Y J, Russell C T, et al. 5-species MHD study of Martian proton loss and source[J]. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2023, 128(4): e2023JA031301.
- [62] Zhang Q, Holmström M, Wang X D, et al. The influence of solar irradiation and solar wind conditions on heavy ion escape from Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(10): e2023GL104996.
- [63] Sun M Y, Hao G, Cui J, et al. Enhanced hydrogen escape on Mars during the 2018 global dust storm: Impact of horizontal wind field[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 953(1): 71.
- [64] Gu H, Wu X, Cui J. Photochemical escape of atomic C and N on Mars during the X8.2 solar flare on 10 September 2017[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, 672: A177.
- [65] Lin H L, Xu R, Lin Y T, et al. In-flight calibration of near-infrared reflectance spectra measured by the Zhurong Mars rover[J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10(2): e2022EA002624.
- [66] Zhao Y Y S, Yu J, Wei G F, et al. In situ analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars[J]. *National Science Review*, 2023,

- 10(6): nwad056.
- [67] Lin H L, Lin Y T, Wei Y, et al. Mineralogical evidence of water activity in the northern Lowlands of Mars based on inflight-calibrated spectra from the Zhurong rover[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(11): 2463-2472.
- [68] Xiao L, Huang J, Kusky T, et al. Evidence for marine sedimentary rocks in Utopia Planitia: Zhurong rover observations[J]. *National Science Review*, 2023, 10(9): nwad137.
- [69] Qin X G, Ren X, Wang X, et al. Modern water at low latitudes on Mars: Potential evidence from dune surfaces [J]. *Science Advances*, 2023, 9(17): eadd8868.
- [70] Wang J, Zhao J N, Xiao L, et al. Recent aqueous activity on Mars evidenced by transverse aeolian ridges in the Zhurong exploration region of Utopia Planitia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(6): e2022GL101650.
- [71] Zhang Q, Liu D W, Ren X, et al. Dust deposition at Zhurong landing site from multispectral camera observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(13): e2023-GL104676.
- [72] Jiang C S, Jiang Y, Li H N, et al. Initial results of the meteorological data from the first 325 sols of the Tianwen-1 mission[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 3325.
- [73] Vicente-Retortillo A, Martínez G M, Lemmon M T, et al. Dust lifting through surface albedo changes at Jezero crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 2023, 128(4): e2022JE007672.
- [74] Wang H, Saidel M, Richardson M I, et al. Martian dust storm distribution and annual cycle from Mars daily global map observations[J]. *Icarus*, 2023, 394: 115416.
- [75] Mao W S, Fu X H, Wu Z C, et al. Solid-gas carbonate formation during dust events on Mars[J]. *National Science Review*, 2023, 10(4): nwac293.
- [76] Caillé V, Määttä A, Spiga A, et al. Revisiting atmospheric features of Mars orbiter laser altimeter data using machine learning algorithms[J]. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 2023, 128(1): e2022JE007384.
- [77] Zhong S B, Chen Z, Deng X H, et al. Study of the effect of Martian dust storms on ionospheric electron density based on physical-grid deep neural learning technology [J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 943(2): 141.
- [78] Li J, Li H Y, Ren X, et al. Eliminating massive Martian dust storms from images of Tianwen-1 via deep learning [J]. *The Astronomical Journal*, 2023, 165(2): 54.
- [79] 董理, 普业, 李艺苑, 等. 新一代火星大气模式 GoPlanet-Mars V1 的研制[J/OL]. *科学通报*, 2023. [2023-12-15]. <https://doi.org/10.1360/TB-2023-0699>.
- [80] Li L F, Chen Y, Hu S M, et al. A novel design for a dust-induced closed return Mars wind tunnel[J]. *Planetary and Space Science*, 2023, 235: 105742.
- [81] 戎昭金, 魏勇, 何飞, 等. 我国未来在轨监测火星沙尘暴的设想和方案[J]. *科学通报*, 2023, 68(7): 716-728.
- [82] Samuel H, Drilleau M, Rivoldini A, et al. Geophysical evidence for an enriched molten silicate layer above Mars's core[J]. *Nature*, 2023, 622: 712-717.
- [83] Khan A, Huang D, Durán C, et al. Evidence for a liquid silicate layer atop the Martian core[J]. *Nature*, 2023, 622: 718-723.
- [84] Le Maistre S, Rivoldini A, Caldiero A, et al. Spin state and deep interior structure of Mars from InSight radio tracking[J]. *Nature*, 2023, 619: 733-737.
- [85] Xu C Y, Jiang Y. Determining the moment of inertia of triaxial Mars with updated global gravity models[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2023, 7(6): 615-619.
- [86] Chen R N, Zhang L, Xu Y, et al. Martian soil as revealed by ground-penetrating radar at the Tianwen-1 landing site[J]. *Geology*, 2023, 51(3): 315-319.
- [87] Zhang L, Li C, Zhang J H, et al. Buried palaeo-polygonal terrain detected underneath Utopia Planitia on Mars by the Zhurong radar[J]. *Nature Astronomy*, 2023: 1-8.
- [88] Cavalié T, Lunine J, Mousis O. A subsolar oxygen abundance or a radiative region deep in Jupiter revealed by thermochemical modelling[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 678-683.
- [89] Mauduit E, Zarka P, Lamy L, et al. Drifting discrete Jovian radio bursts reveal acceleration processes related to Ganymede and the main aurora[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5981.
- [90] Galanti E, Kaspi Y, Guillot T. The shape of Jupiter and Saturn based on atmospheric dynamics, radio occultations and gravity measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(6): EGU-3964.
- [91] Chen J J, Zhang B Z, Lin D, et al. Prediction of axial asymmetry in Jovian magnetopause reconnection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(9): e2022GL102577.
- [92] Damiano P A, Delamere P A, Kim E H, et al. Electron energization by inertial Alfvén waves in density depleted flux tubes at Jupiter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(5): e2022GL102467.
- [93] Nichols J D, Allegrini F, Bagenal F, et al. Jovian magnetospheric injections observed by the Hubble space telescope and Juno[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(20): e2023GL105549.
- [94] Sulaiman A H, Szalay J R, Clark G, et al. Poynting fluxes, field-aligned current densities, and the efficiency of the io-jupiter electrodynamic interaction[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(10): e2023GL103456.
- [95] Montgomery J, Ebert R W, Allegrini F, et al. Investigating the occurrence of kelvin-helmholtz instabilities at jupiter's dawn magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): 324.

- [96] Sarkango Y, Szalay J R, Poppe A R, et al. Proton equatorial pitch angle distributions in jupiter's inner magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(11): e2023GL104374.
- [97] Feng E H, Zhang B Z, Yao Z H, et al. Variation of the Jovian magnetopause under constant solar wind conditions: Significance of magnetodisc dynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(12): e2023GL104046.
- [98] Menietti J D, Yoon P H, Averkamp T F, et al. Wave and particle analysis of Z-mode and O-mode emission in the Jovian inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(5): e2022JA031199.
- [99] Wang R Y, Stallard T S, Melin H, et al. Asymmetric ionospheric jets in jupiter's aurora[J]. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2023, 128(12): e2023JA031861.
- [100] Xu Y, Yao Z H, Ye S Y, et al. A possible unified picture for the connected recurrent magnetic dipolarization, quasi-periodic ENA enhancement, SKR low-frequency extension and narrowband emission at Saturn [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128(9): e2023JA031445.
- [101] Long M, Cao X, Ni B, et al. Formation of electron butterfly pitch angle distributions in Saturn's magnetosphere due to scattering by equatorial ECH waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50:e2023GL105318.
- [102] Rossi C, Cianfarra P, Lucchetti A, et al. Deformation patterns of icy satellite crusts: Insights for tectonic balancing and fluid migration through structural analysis of terrestrial analogues[J]. *Icarus*, 2023, 404: 115668.
- [103] Wang Q, Fan S, Qi C. Grain growth of ice doped with soluble impurities[J]. *EGUsphere*, 2023: 1–41.

Review of planetary physics in 2023

WEI Yong^{1,2}, CHAI Lihui^{1,2}, CHEN Yiding^{1,2}, FAN Kai¹, GAO Jiawei¹, HE Fei^{1,2}, LE Huijun^{1,2}, LI Guozhu^{1,2}, LIN Honglei¹, QI Chao^{1,2}, RONG Zhaojin^{1,2}, SONG Yuhuan¹, SUN Weijia¹, WANG Yuqi^{1,2}, WU Zhaopeng¹, XU Changyi¹, YAN Limei^{1,2}, YAO Zhonghua^{1,2}, YUAN Chongjing^{1,2}, YUE Xin'an^{1,2}, ZHANG Chi¹, ZHANG Hui^{1,2}, ZHANG Jinhai¹, ZHONG Jun^{1*}

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In 2023, planetary physics, a major branch of planetary science, exhibited a diverse and thriving landscape. China's planetary physics evolved into emerging areas, including the processes of generating solar and planetary magnetic fields, long-term variations in the space environments of Earth and other planets, and interconnected processes within Earth and planetary multilayer systems. These advancements laid a solid foundation for the future progress of deep space exploration. This paper carefully selects 20 research areas in planetary physics, focusing on the developments and key areas of interest within China's planetary physics. By placing them within the spatiotemporal context of the world and history, the paper presents a comprehensive overview of the planetary physics trends both in China and the world.

Keywords deep space exploration; planetary science; planetary physics ●



(责任编辑 王微)