

冰巨星探测的前沿科学问题

王赤^{1,2,*}, 李晖^{1,2,*}, 孔大力^{2,3}, 王宇贤¹, 杨忠炜¹

1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 101408

3. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030

摘要:对冰巨星及其卫星的探索一直是深空探测和空间科学研究的前沿热点,目前国际行星探测规划均将冰巨星探测列为重点方向。聚焦中国未来冰巨星探测任务,考察了冰巨星探测的国内外现状,梳理和归纳了冰巨星探测的七大前沿科学问题。围绕这些科学问题,通过冰巨星系统特性的对比分析,结合行星探测的发展趋势,提出了未来冰巨星探测的展望和建议,并指出海王星-海卫一探测是冰巨星探测任务的首选。未来探测的科学主题可大致分为三个方面:探索地外海洋和生命;认知柯伊伯带天体,理解太阳系演化;探索冰巨星系统,理解行星起源与演化。对冰巨星探测科学目标的论证分析,能够为中国未来深空探测任务提供科学参考。

关键词:冰巨星;天王星;海王星;海卫一;行星探测

中图分类号:V476.4

文献标识码:A

Cutting-edge scientific issues in ice giant exploration

WANG Chi^{1,2,*}, LI Hui^{1,2,*}, KONG Dali^{2,3}, WANG Yuxian¹, YANG Zhongwei¹

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

3. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: Exploring ice giants and their moons stands as one of the frontiers in deep space exploration and space science research. Current international planetary exploration plans all include missions to ice giants. Focusing on China's future ice giant exploration missions, the current status of ice giant exploration is investigated, and seven key scientific questions are identified and summarized. By comparing and analyzing the characteristics of ice giant systems, and combining with the development trends in planetary exploration, the prospects and recommendations for future ice giant missions are proposed. Neptune-Triton exploration as a priority for ice giant missions is highlighted. Future exploration can be broadly divided into three subjects: exploring extraterrestrial oceans and life, understanding Kuiper belt objects and solar system evolution, and investigating ice giant systems to understand planetary origins and evolution. Analyzing the scientific objectives for ice giant exploration provides a scientific reference for China's future deep space missions.

Keywords: ice giants; Uranus; Neptune; Triton; planetary exploration

收稿日期:2024-12-20;修回日期:2025-01-10;录用日期:2025-01-22

基金项目:国家自然科学基金(42374198,42188101);民用航天预先研究项目(D010301,D010202)

*通信作者. E-mail: hli@nssc. ac. cn

引用格式:王赤,李晖,孔大力,等. 冰巨星探测的前沿科学问题[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2025,45(4):1-11. WANG C, LI H, KONG D L, et al. Cutting-edge scientific issues in ice giant exploration[J]. Chinese Space Science and Technology, 2025,45(4):1-11 (in Chinese).

0 引言

冰巨星(天王星和海王星)是太阳系八大行星中最后一类亟需专门的探测任务来探索的行星。自进入太空时代以来,人类便开启了对太阳系行星探索的漫长之旅^[1-2]。随着美国宇航局旅行者 2 号于 1986 年和 1989 年分别飞掠天王星和海王星^[3-4],以及地面和空间大口径望远镜对两颗行星的成功观测^[5-6],人类逐步窥见了太阳系行星环境的多样性和复杂性,极大提升了对冰巨星系统的认知。

冰巨星这类中等尺寸的行星在宇宙中非常普遍^[2,7],对其进行研究有助于增进对银河系中这一最常见类别的行星形成与演化的认知。冰巨星的内部结构和形成极大地挑战了现有的行星形成理论^[8]。天王星和海王星都具有高倾斜且严重偏离中心的奇异内禀磁场,这种异常姿态结合高速自转形成了复杂多变和高度扭曲的磁层^[9-12]。冰巨星距离太阳是日地距离的几十倍,相对微弱的太阳风和太阳辐射也增加了太阳风和冰巨星磁层间相互作用的独特性^[13-14]。天王星和海王星间也表现出明显差异,例如微弱的内部热流形成了相对平静的天王星大气,而海王星大气则拥有剧烈的风暴^[15]。天王星可能拥有一个自然的原始卫星系统,而海王星则捕获了一个

柯伊伯带天体——海卫一。海卫一可能蕴藏着地下海洋,存在活跃的地表地质活动,是地外生命探寻的热点目标之一^[16]。

本文首先梳理了国内外关于未来几十年行星探测征集的科学主题,凝练了冰巨星探测的关键科学问题,并结合行星探测的发展趋势,提出了未来冰巨星探测的展望和建议,可以为中国未来的行星探测规划提供一定的参考。

1 行星探测科学问题

2022 年美国国家科学院发布的行星科学 10 年调查报告(2023—2032)将太阳系天体起源、巨行星结构和演化、地外生命和宜居性等列为优先科学问题^[17]。“对冰巨星了解的匮乏”被确定为未来 10 年最应优先解决的问题。其中,天王星轨道器和探测器(UOP)被列为行星科学领域的最高优先级大型旗舰任务,旨在突破对冰巨星,特别是天王星系统的认知。

2023 年法国发布的“地平线 2061 行星探索”将行星系统宜居性以及地外生命探寻列为六大科学问题之一(图 1)^[18]。欧空局发布的“Voyage 2050”针对冰巨星提出七大科学主题(图 2),并着重强调了冰巨星探测的重大科学意义和必要性,提出冰巨星探测应成为欧空局未来 10 年科学规划的基石^[15,19]。

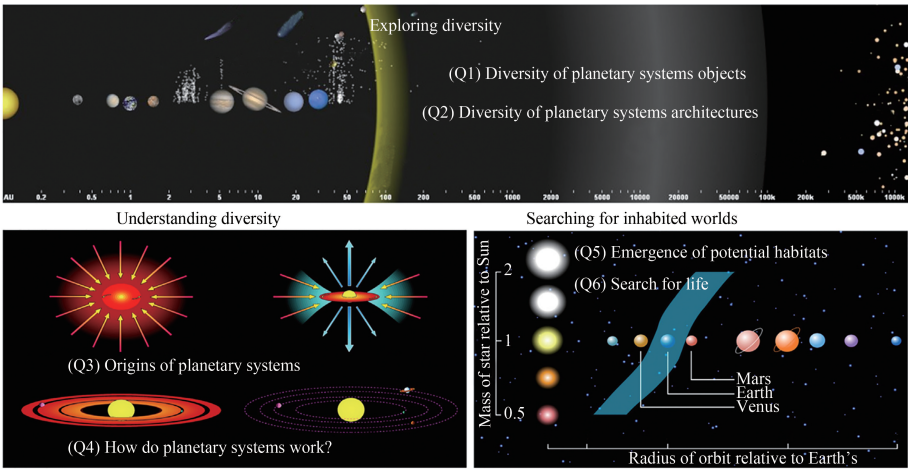


图 1 法国“地平线 2061”关于行星系统提出的 6 个科学问题^[18]

Fig. 1 Six scientific questions about planetary systems proposed by "Horizon 2061"

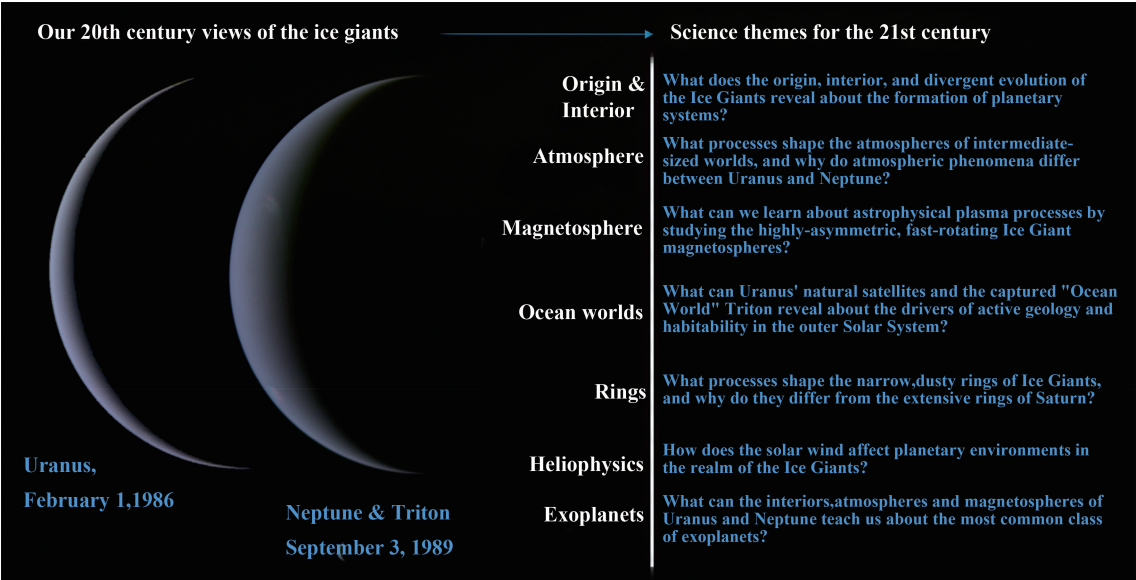


图 2 “Voyage 2050”针对冰巨星提出的七大科学问题^[15]
Fig. 2 Seven scientific questions about ice giants proposed by “Voyage 2050”

针对已经计划和正在论证的深空探测任务，中国科学家围绕深空探测前沿领域，系统梳理了三大科学主题：太阳系的形成和演化、行星宜居性和地外生命探索^[1]。2024 年 10 月发布的中国首个国家空间科学规划《国家空间科学中长期发展规划（2024—2050 年）》，将冰卫星和冰巨星宜居环境与生命信号探测列为重大科学问题之一。规划提出在中国空间科学发展的第二阶段（2028—2035 年）将论证实施巨行星系统探测的科学任务。

综上所述，目前公开的国际行星探测规划中均包含冰巨星探测，对太阳系冰巨星及其卫星的探索正逐渐成为深空探测和空间科学研究的前沿热点。

2 冰巨星的独特性

太阳系八大行星按照组成特征可分为类地行星（水星、金星、地球和火星）和类木行星（木星、土星、天王星和海王星）。类木行星按照化学成分和物态又可以分为气态巨行星（木星和土星）和冰巨星（天王星和海王星）。气态巨行星的 90 % 以上的质量都由氢和氦组成；而冰巨星体积相对较小，并富含一些较重的元素，其内部存在大量由原始行星盘中低折射率的物质（比如

水、甲烷和氨等）冷凝而成的冰。冰巨星引力势能很大，在太阳系早期形成和演化中起着重要作用，其星球上保留大量太阳系形成初期的气体，可能包含原恒星云的状态条件和行星形成位置等信息。

2.1 行星内部结构和分层特征

天王星和海王星具有相似的内部结构，其结构分层特征和气态巨行星明显不同^[21]。冰巨星的岩石核心区域以外的物质密度分布接近于冰：在行星的浓密大气层（氢氦气体）以下，随着深度增加，物质由水、甲烷和氨组成的混合物迅速转变为理化性质尚不明确电离流体。气态巨行星和冰巨星内部分层结构和物质组分如图 3 所示。

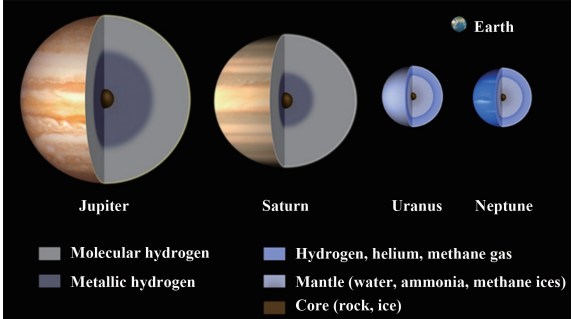


图 3 气态巨行星和冰巨星内部分层结构和物质组分示意
（图片来源：NASA/Lunar and Planetary Institute）
Fig. 3 Schematic diagram of internal structure and composition of gas giants and ice giants

了解巨行星内部元素丰度(特别是稀有气体元素及其同位素的丰度比例)对于探究太阳系和行星形成理论至关重要。由于冰巨星内部结构分层和组分分异相比气态巨行星更加显著,且原位探测数据非常有限,目前对冰巨星内部的组分丰度,特别是元素同位素丰度的理解非常不足^[22]。

2.2 行星内部对大气动力学的影响

木星、土星表面大气环流具有鲜明的赤道东风急流和中高纬条带结构,而天王星、海王星大气环流却为赤道西风急流,也欠缺中高纬条带特征^[23]。太阳系巨行星大气环流风速和条带结构如图4所示。冰巨星和气态巨行星的大气动力学差异可能源于二者内部对大气影响的不同:气态巨行星内部的强大热流可以显著驱动并控制大气运动,而冰巨星内部对大气影响则相对较弱。

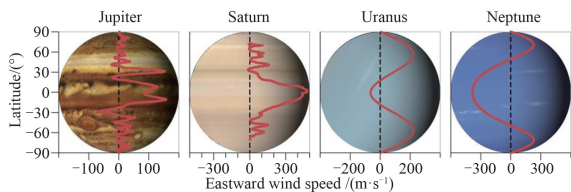


图4 太阳系巨行星大气环流风速和条带结构^[24]
Fig. 4 Wind speed and banded structure of atmospheric circulation in giant planets

巨行星强大、稳定而持久的大气环流的成因和维持机制是长期存在的科学难题。目前存在两种可能机制:①深理论,由行星内部深热对流维持和产生^[25];②浅理论,局限于非常薄的天气层,该天气层下方存在未知的深部对流^[23]。近年来,科学界试图利用重力场和磁场数据来辨别这两种机制^[26-29],但至今尚未达成研究共识。

2.3 行星发电机的动力学特性

行星的内禀磁场通过发电机机制产生并维持^[30-31]。在行星尺度上,内部热能决定了湍流运动的强度和磁场的平均强度;行星的快速自转使得流体呈现大尺度结构,进而形成偶极形态主导的磁场;内部流体的电导率分布决定了磁场产生的区域和范围;而洛伦兹力、科里奥利力、热浮力、黏性力等力平衡关系则决定了发电机的动力学类型。冰巨星内部的热能、电导率、自转和力

平衡类型都与气态巨行星明显不同,这也导致二者磁场无论从强度、形态还是范围都明显不同。

3 冰巨星探测科学问题

尽管旅行者2号和地基、空间望远镜极大拓展了人类对冰巨星系统的认知,但仍存在大量未知的科学谜团和奥秘有待解决。

3.1 内部结构和状态

冰巨星内部的物质组成与圈层结构研究需结合分子动力学第一性原理计算、高温高压实验和行星环绕探测等多种手段。

从第一性原理计算的角度,冰巨星内部状态方程比气态巨行星更复杂。尽管目前氢氦混合气体在高温高压条件下的物态性质计算已经较为成熟,并可以通过高温高压实验数据校正或确定状态方程中的热力学参数,然而,由于冰巨星内部成分复杂,其物质组成对第一性原理计算和高温高压实验提出了巨大挑战。因此,冰巨星内部的温度、压强、密度、热导率、电导率、物质成分比例随行星半径的分布,以及相应的圈层划分,至今仍是未解之谜。这一不确定性进一步制约了对冰巨星形成演化、内部动力学及磁场发电机机制的研究。

未来,通过将行星自转平衡理论与环绕探测获得的行星重力场数据相结合^[33-34],有望为冰巨星内部状态方程提供更精确的约束。

3.2 大气带状环流和涡旋结构

如第2章节所述,冰巨星与气态巨行星的大气环流在表象和内在机制上存在显著差异。尽管朱诺号和卡西尼号任务为木星和土星研究提供了大量观测数据,其大气环流的成因仍存在大量未知。相比之下,天王星和海王星的大气环流机制更是鲜有探索的研究前沿。待解决的科学问题包括:确定大气环流的垂直结构范围,解析大气赤道西向环流的成因,理解冰巨星大气环流与内部对流的耦合关系,以及解释为何冰巨星与气态巨行星的大气环流特征存在根本性差异等。巨行星的大气环流与深部对流运动如图5所示。

除带状环流外,目前对冰巨星是否存在类似

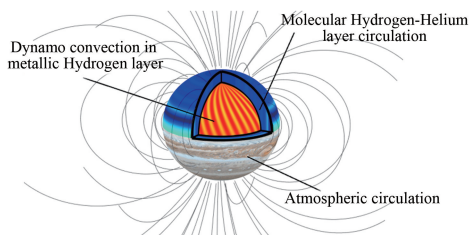


图5 巨行星的大气环流与深部对流运动

Fig. 5 The atmospheric circulation and deep convection in gas giants

木星和土星的大型涡旋系统仍不清楚。旅行者2号在飞掠海王星时,于多个波段观测到大气中的大型暗斑^[35]。类似的复杂现象也在James Webb空间望远镜的观测中发现过(图6,图片源自<https://www.space.com/james-webb-space-telescope-ice-giant-preview>)。这些大气斑块可能是大型大气涡旋,或是类似于土星“大白斑”的季节性风暴系统^[36]。此外,目前尚不清楚冰巨星的南北极区域是否存在大型极地涡旋系统。

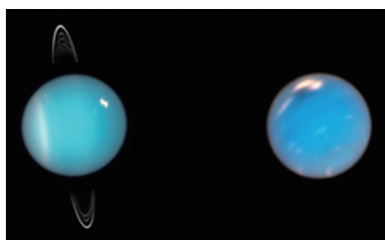


图6 James Webb空间望远镜在红外波段对天王星和海王星的成像观测

Fig. 6 Infrared observations of Uranus and Neptune by James Webb space telescope

3.3 磁场发电机与深度对流

旅行者2号于1986年和1989年分别近距离飞掠天王星和海王星^[3-4],最近距离分别为4.2个天王星半径($R_U = 25\,600\text{ km}$)和1.2个海王星半径($R_N = 24\,765\text{ km}$)。在此过程中,磁强计短暂观测并成功绘制了两颗行星的大尺度全球磁场^[37-39]。相较于太阳系其他行星,冰巨星磁场具有独特特征:

- 1) 磁轴严重偏离行星中心,且相对于自转轴存在较大夹角(约 50°);
- 2) 除偶极成分外,磁场主要由四极和八极分量构成,这些分量强度可与偶极成分相当甚至更强^[40]。

太阳系各行星表面磁场分布如图7所示。

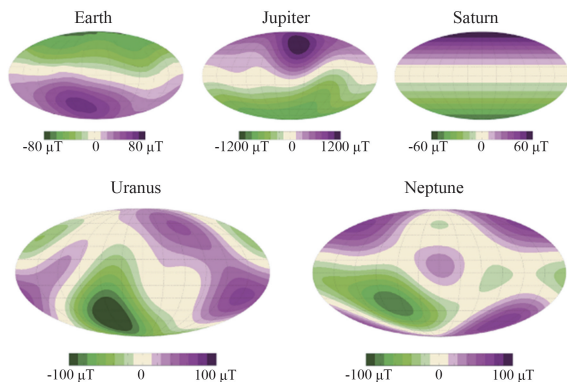
图7 太阳系各行星表面磁场分布^[40]

Fig. 7 Magnetic field distribution on the surfaces of solar system planets^[40]

根据行星磁场发电机理论,内禀磁场源于行星内部导电流体区域的对流运动,通过动能转化为磁能^[30]。理解冰巨星内部结构、成分、热平衡及动力学特性,对于磁场发电机研究具有重要意义。现有观测表明,冰巨星的发电机层可能与其内部液态层相关^[41]。随深度增加,冰行星内部的压强和温度升高,物质逐渐离解和电离,可能导致约0.8倍行星半径以下的流体足以维持发电机过程,该推断可有效解释冰巨星的奇异磁场特征^[42-44]。

由于观测数据匮乏,冰巨星不规则磁场的成因尚不明确。未来冰巨星探测任务获取的磁场、内部结构和动力学参数等信息,将有助于约束现有的多种地磁发电机模型^[45-48],深化对发电机统一理论的理解,提升对系外行星磁场演化的预测能力^[49]。此外,这些数据还将有助于揭示冰巨星的深度对流过程等。

3.4 磁层空间环境

冰巨星的偏离中心、高度倾斜且快速旋转的行星磁场形成了太阳系独特的高度动态且不规则的行星磁层^[10-12]。冰巨星附近的高马赫数太阳风进一步增加了太阳风和冰巨星磁层相互作用的独特性^[13-14]。由于倾斜度不同且存在类似海卫一的内等离子体源,天王星和海王星的磁层动力学也可能表现出明显差异^[12]。目前对冰巨星磁层运行机制的理解主要局限于旅行者2号飞掠期间的单点测量数据^[50-51]和数值模型^[12,52]。磁层动力学研究是冰巨星探索的重点之一,有助于拓展对太阳系行星磁层多样性的认

知,并为其他系统如系外行星磁层或地磁反转期间的地球磁层研究提供重要参考^[53-54]。冰巨星磁层磁流体力学模拟结果如图 8 所示。

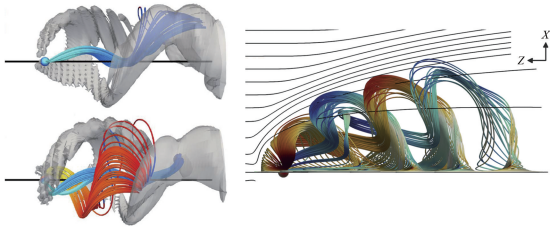


图 8 冰巨星磁层磁流体力学模拟结果^[12,55]

Fig. 8 Simulation results of ice giants magnetosphere

针对冰巨星独特的空间环境,关键的科学问题包括:

(1)冰巨星磁场产生机制及其对磁层动力学的影响

冰巨星的多极奇异内禀磁场对全球磁层位形和动力学具有决定性作用^[12,55]。由于磁场的高度不规则特征以及磁轴和自转轴间的较大夹角,冰巨星磁层位形可能存在显著的日变化和季节性变化特征^[55-57]。揭示冰巨星内禀磁场的产生机制对磁层研究和行星发电机理论研究等具有重要意义。

(2)冰巨星磁层动力学过程及其动态演化

冰巨星磁层存在显著的时空变化特征^[37-39,58],磁层顶处的磁场重联可能随行星自转而剧烈变化,因此由太阳风输入磁层内的物质和能量也可能存在明显的日变化^[13]。

冰巨星磁层位形和动力学主要由行星自转和太阳风共同驱动,但二者相对主导作用尚不明确^[59]。理解太阳风和磁层的相互作用对于识别系统中的物质/能量传输至关重要,并有助于理解具有高磁倾角的系外行星与恒星风的相互作用,进而将比较行星学拓展到太阳系外。

(3)磁层等离子体源、输运和损失机制

观测表明,海卫一可能是海王星磁层的主要等离子体来源^[60-61],然而,其在海卫一大气层/电离层与海王星磁层耦合中的具体角色仍待进一步研究^[62]。卫星、行星环与磁层间的相互作用对于评估磁层空间环境物质输运以及卫星地表环境极为重要。高度动态的磁层环境也为卫星-磁层相互作用研究提供了绝佳的天然实验

室^[63],时变的背景磁场和卫星导电层(如地下海洋)的结合可能产生可探测的感应磁场,并反馈地下海洋信息。研究卫星和磁层相互作用,也有助于认知卫星大气特性^[64]。

认知冰巨星磁层的动力学特性是揭示磁层中的物质和能量输运的关键,因此需要厘清磁层中的等离子体和尘埃的物质源和损失机制,查明辐射带及其内粒子捕获和加速过程^[65-66],研究磁层内强烈的等离子体波^[67]和太阳风-磁层间复杂的相互作用^[68]。

3.5 天然卫星系统

宿主行星和其天然卫星系统间存在着潮汐相互作用,进而对系统的演化产生长期影响。对于轨道位于行星同步轨道(即在行星赤道面内公转周期等于行星自转周期的圆轨道)之外的天然卫星,行星的自转角动量会通过潮汐相互作用向卫星转移,导致卫星轨道向外迁移。迁移效率主要取决于行星内部潮汐耗散效率,通常以潮汐耗散品质因数 Q 衡量。

对于类地行星,品质因数 Q 主要取决于行星物质的黏弹特性,和平衡潮作用相关。离行星越近,对应的潮汐耗散越大,卫星的轨道迁移效率则越高。巨行星(包括气态巨行星和冰巨星)由于其内部由低黏性流体构成,其潮汐耗散机制与类地行星有本质区别。巨行星的 Q 值主要取决于卫星的轨道状态,而非行星本身的物质特性。当天然卫星的轨道运动周期与巨行星内的某一振荡模式满足共振条件时,会激发出强烈的动力学潮汐耗散,导致较小的 Q 值。若巨行星拥有多个卫星,每个卫星对应的 Q 值则可能各不相同^[69]。土星天然卫星的轨道迁移和相应的潮汐耗散规律如图 9 所示,可以看到平衡潮固定的耗散因数 Q 无法解释各个卫星的轨道迁移历史。

综上,巨行星天然卫星系统的轨道迁移演化与行星内部的振荡模式直接相关,通过精确测量卫星轨道演化可推断行星内部的圈层结构和热力学特性。对于冰巨星研究,这一方法尤为重要。结合地面高精度天体测量和未来的环绕探测,能精确测量天然卫星系统的轨道演化,为探测冰巨星内部结构和动力学提供了一种独立于

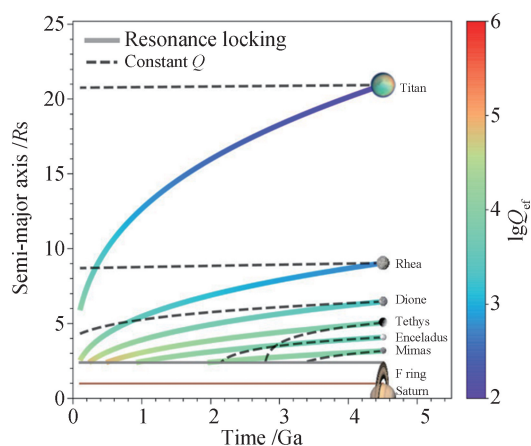


图9 土星天然卫星的轨道迁移和相应的潮汐耗散规律
Fig. 9 The orbital migration of Saturn's natural satellites and the corresponding tidal dissipation patterns

重力场、磁场等传统测量的新途径。

3.6 海卫一冰下海洋和空间环境

海卫一是海王星最大的一颗卫星,也是太阳系唯一一颗公转轨道和行星自转方向相反的大卫星,这表明该卫星很可能是被俘获的柯伊伯带天体^[15]。海卫一同时兼具柯伊伯带天体、海洋世界和地质活跃天体的特征。海卫一是太阳系少数具有显著大气层和活跃地质活动的天体之一,其表面和大气与冥王星有诸多相似之处^[15,70]。旅行者2号在海卫一南极发现了喷发的羽流,这些间歇泉可喷发高达8 km的暗色物质云,并随风漂移100 km以上^[71],但其具体机制尚未查明。图10为旅行者2号拍摄的海卫一地表。

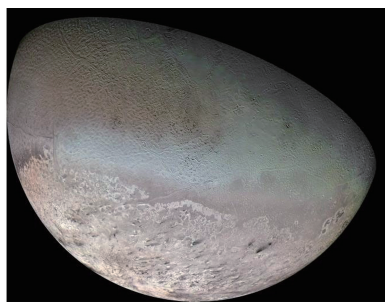


图10 旅行者2号拍摄的海卫一地表
(图片来源:NASA/JPL/USGS)

Fig. 10 Triton's surface captured by Voyager 2
(Credit: NASA/JPL/USGS)

地基望远镜的近红外观测表明海卫一表面可能存在挥发性冰,包括氮气、水、二氧化碳和甲烷^[72-74]。海卫一地表可能还含有由大气光化学

作用产生的复杂有机物^[75]。海卫一地表相对比较年轻(大约1亿年),其表面存在多种独特的曲线状山脊和沟槽,这表明潮汐力和耗散在海卫一地质活动中可能发挥了重要作用,且该过程目前可能仍在持续中^[76]。海卫一被捕获时产生的强烈潮汐加热可能导致其内部冰的融化^[77],相对较年轻的地表也表明其近期可能经历了一个海洋结晶期^[78]。海卫一表面具有极高的反照率以及较低的陨石坑密度,且有活跃的间歇冰火山活动,显示出其冰下有液态水海洋的宜居性特征^[71]。未来海卫一的环绕探测任务或多次飞掠任务可以通过探测磁场、重力场和位形等数据,来判定海卫一是否存在冰下海洋,并限定冰壳的厚度,探究羽流和海洋之间的联系。

海卫一作为海王星最大的卫星,可能存在潜在的冰下液态海洋,是地外“海洋世界”探寻和地外生命探索的最佳目标之一^[15]。然而,海卫一冰下海洋的存在性及其特性、地下海洋是否存在生命或生命信号等仍为重要的科学问题。

海卫一的稀薄大气主要由分子氮组成,在地表附近还有微量甲烷和一氧化碳^[60,79]。光化学模型表明还存在碳氢化合物和腈类等^[75]。目前对海卫一大气的具体组成、动态变化和化学过程仍不清楚。尽管海卫一距离太阳十分遥远,且表面温度很低,但微弱的太阳辐射依然能够驱动其表面和大气层出现显著的季节性变化特征,这些特征可能对大气动力学和演化产生重大影响^[80]。海卫一具有浓厚的电离层,由于太阳紫外辐射强度较低,海卫一电离层的形成可能主要源于能量粒子沉降,而非太阳辐射。海卫一可能是太阳系内唯一一颗由磁层粒子沉降而非太阳光导致电离层的天体^[75]。海卫一电离层的产生机制、粒子成分和带电粒子特征仍需要进一步的观测研究^[63]。

3.7 行星环

天王星和海王星都拥有复杂的卫星和行星环系统^[81-82](图11)。这些行星环主要由狭窄密集环带以及相对暗淡但分布更广泛的尘埃成分组成。尽管太阳系4个巨行星(木星、土星、天王星和海王星)都有行星环,但不同行星环的结构和组成存在显著差异,这可能归因于星环的不同形成机制^[82]。相较于土星,冰巨星环质量更

小,且结构明显不同。冰巨星环的反照率远低于土星,可能主要由冰和暗色成分(硅酸盐和有机物)混合物组成,因此有观点认为冰巨星环系统可能产生于流星体对周围小卫星的频繁撞击^[83-84]。

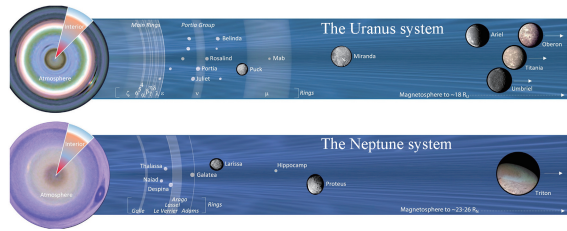


图 11 天王星和海王星的卫星和环系统^[15]
Fig. 11 Satellites and ring system of Uranus and Neptune

冰巨星环可能由行星形成之初的物质构成,因此研究环的组成不仅对认知环本身很有意义,也有助于揭示太阳系行星形成和迁移信息。由于观测数据有限,目前对冰巨星环的形成机制、复杂成分和演化规律等仍存在大量未知。未来冰巨星探测项目对环的观测将可能限定已知尘埃环的形状和特性、发现新的环或卫星、确定构成环的颗粒尺寸和分布、厘清较密环的精细结构等^[15,19]。冰巨星的环和小行星间的相互作用以及演化过程也是冰巨星的关键科学问题。在冰巨星系统中,卫星对行星环存在着强烈影响:粘滞运输、环-卫星相互作用、自引力作用以及流星体和彗星撞击等都可能使环在短时间尺度内快速演化^[85-87]。卫星可以通过引力约束行星环,并可能作为物质源和损失源影响行星环的内部结构、粒子成分和动态变化^[86]。

4 未来探测展望与建议

自 20 世纪六七十年代美国实施阿波罗计划以来,大量航天器进入空间轨道,并结合地面和空间望远镜对太阳系八大行星进行了详尽的探测,并实现了月球和小行星的采样返回^[1]。这极大地拓展了人类对空间的认知范围,对人类科技进步和文明发展具有重大意义。然而,国际上对于太阳系探测存在严重的“内外失衡”现象,绝大多数卫星计划都集中于地球附近的行星和内日球层,离太阳越远则探测越少。冰巨星(天王星和海王星)作为太阳系中离太阳最远且探索程度最低的两颗行星,正逐渐成为国际深空探测和空

间科学研究的前沿热点并受到高度关注。截至目前,天王星和海王星的原位探测仅限于 20 世纪 80 年代的旅行者 2 号飞船短暂的飞掠观测,尚无专门的探测任务,对冰巨星系统仍缺乏有效的探测手段。一个专门的、综合性的冰巨星探测项目十分必要且蕴含着巨大的科学价值。科学论证表明,海王星-海卫一探测是冰巨星探测任务的首选。

本文梳理的冰巨星探测前沿科学问题,按照科学属性,可划分为 3 类:海卫一生命信号探寻、海卫一柯伊伯带天体研究和冰巨星系统探索。综合冰巨星探测的研究现状和发展趋势,基于梳理的关键科学问题,同时考虑工程实现难度,冰巨星探测的科学主题可大致分为以下 3 个方面:

(1)探索地外海洋和生命

太阳系内蕴含地外海洋的天体可分为 2 类:原行星吸积盘卫星(如木卫四)和柯伊伯带天体(如海卫一)。其中前者已规划天问四号,而后者尚无相关探测任务。海卫一是海王星最大的卫星和柯伊伯带天体,可能存在潜在的冰下液态海洋,是地外生命探索的最佳目标之一。

(2)认知柯伊伯带天体,理解太阳系演化

对海卫一相关研究也有助于提升对柯伊伯带天体的理解。柯伊伯带天体因质量小而不易减速并环绕探测,然而,海王星-海卫一探测任务可首先经由海王星减速,是最可能实现柯伊伯带天体环绕和着陆探测的方式之一。

(3)探索冰巨星系统,理解行星起源与演化

冰巨星和柯伊伯带天体是太阳系内认知最少的两类天体,也是国际深空探测的前沿热点。如第 3 章所述,海卫一由于其独特的地质、大气和空间环境特征,具有重要的科学研究价值。

围绕这 3 个科学主题,未来的冰巨星探测任务应涵盖物理场、粒子和天体形貌及成分的探测,从系统空间环境、地质地貌和尘埃羽流等方面展开,高度结合原位探测(粒子和场)和遥感观测(不同波段的成像或光谱)手段,充分论证并优化卫星轨道设计,更高效可靠地展开冰巨星探测任务。

参考文献(References)

[1] 吴伟仁,王赤,刘洋,等. 深空探测之前沿科学问题探析[J]. 科学通报,2023,68(6):606-627.

- WU W R, WANG C, LIU Y, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(6): 606-627 (in Chinese).
- [2] 焦维新. 冰巨星探索的科学问题和目标[J]. 国际太空, 2024, 12(1): 54-59.
- [3] NESS N F, ACUNA M H, BEHANNON K W, et al. Magnetic fields at Uranus[J]. Science, 1986, 233(4759): 85-89.
- [4] NESS N F, ACUNA M H, BURLAGA L F, et al. Magnetic fields at Neptune [J]. Science, 1989, 246 (4936): 1473-1478.
- [5] LAMY L, PRANGÉ R, HANSEN K C, et al. Earth-based detection of Uranus' aurorae[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(7): 2012GL051312.
- [6] BHARDWAJ A, GLADSTONE G R. Auroral emissions of the giant planets[J]. Reviews of Geophysics, 2000, 38(3): 295-353.
- [7] FULTON B J, PETIGURA E A. The California-Kepler survey. VII. Precise planet radii leveraging Gaia DR2 reveal the stellar mass dependence of the planet radius gap[J]. The Astronomical Journal, 2018, 156(6): 264.
- [8] HELLED R, BODENHEIMER P. The formation of Uranus and Neptune: challenges and implications for intermediate-mass exoplanets [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 789(1): 69.
- [9] BAGENAL F. Planetary magnetospheres: the double tilt of Uranus[J]. Nature, 1986, 321(6073): 809-810.
- [10] BAGENAL F. Giant planet magnetospheres[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1992, 20(1): 289-328.
- [11] KEILING A, JACKMAN C M, DELAMERE P A. Magnetotails in the solar system[M]. Wiley: Geophysical Monograph Series, 2015: 119-133.
- [12] GRITON L, PANTELLINI F, MELIANI Z. Three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of the solar wind interaction with a hyperfast-rotating Uranus [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2018, 123(7): 5394-5406.
- [13] MASTERS A. Magnetic reconnection at Uranus' magnetopause [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(7): 5520-5538.
- [14] MASTERS A. Magnetic reconnection at Neptune's magnetopause [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015, 120(1): 479-493.
- [15] FLETCHER L N, HELLED R, ROUSSOS E, et al. Ice giant systems: the scientific potential of orbital missions to Uranus and Neptune[J]. Planetary and Space Science, 2020, 191(1): 105030.
- [16] HENDRIX A R, HURFORD T A, BARGE L M, et al. The NASA roadmap to ocean worlds[J]. Astrobiology, 2019, 19(1): 1-27.
- [17] National Academies of Sciences, Engineering, and medicine. origins, worlds, and life: a decadal strategy for planetary science and astrobiology 2023-2032 [M]. Washington D C: The National Academies Press, 2023: 265-284.
- [18] BLANC M, BOUSQUET P W, DEHANT V, et al. Planetary exploration Horizon 2061: a long-term perspective for planetary exploration[M]. United States: Elsevier, 2023: 17-56.
- [19] FLETCHER L N, HELLED R, ROUSSOS E, et al. Ice giant system exploration within ESA's Voyage 2050[J]. Experimental Astronomy, 2022, 54(2-3): 1015-1025.
- [20] GUILLOT T. The interiors of giant planets: models and outstanding questions[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2005, 33(1): 493-530.
- [21] STEVENSON D J. Interiors of the giant planets[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1982, 10(1): 257-295.
- [22] MOUSIS O, ATKINSON D H, AMBROSI R, et al. In situ exploration of the giant planets[J]. Experimental Astronomy, 2022, 54(2-3): 975-1013.
- [23] LIU J, SCHNEIDER T. Mechanisms of jet formation on the giant planets [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, 67(11): 3652-3672.
- [24] CONSTANTIN A, GERMAIN P. Stratospheric planetary flows from the perspective of the Euler equation on a rotating sphere[J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 2022, 245(1): 587-644.
- [25] HEIMPEL M, AURNOU J, WICHT J. Simulation of equatorial and high-latitude jets on Jupiter in a deep convection model [J]. Nature, 2005, 438 (7065): 193-196.
- [26] KASPI Y, GALANTI E, HUBBARD W B, et al. Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep[J]. Nature, 2018, 555(7695): 223-226.
- [27] KONG D, ZHANG K, SCHUBERT G, et al. Origin of Jupiter's cloud-level zonal winds remains a puzzle even after Juno[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(34): 8499-8504.
- [28] XUE S, LIN Y. Numerical simulations of magnetic effects on zonal flows in giant planets[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2024, 129(8): e2023JE008280.
- [29] WICHT J, CHRISTENSEN U R. Contributions of Jupiter's deep-reaching surface winds to magnetic field structure and secular variation[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2024, 129(4): e2023JE007890.
- [30] JONES C A. Planetary magnetic fields and fluid dynamos [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43(1): 583-614.
- [31] AURNOU J M, KING E M. The cross-over to magnetostrophic convection in planetary dynamo

- systems [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, 473(2199):20160731.
- [32] MILITZER B, SOUBIRAN F, WAHL S M, et al. Understanding Jupiter's interior[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2016, 121(9):1552-1572.
- [33] HELLED R, SCHUBERT G, ANDERSON J D. Empirical models of pressure and density in Saturn's interior: implications for the helium concentration, its depth dependence, and Saturn's precession rate [J]. Icarus, 2009, 199(2):368-377.
- [34] KONG D, ZHANG K, SCHUBERT G. A fully self-consistent multi-layered model of Jupiter [J]. The Astrophysical Journal, 2016, 826(2):127.
- [35] IRWIN P G J, TEANBY N A, FLETCHER L N, et al. Hazy blue worlds: a holistic aerosol model for Uranus and Neptune, including dark spots [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2022, 127(6):e2022JE007189.
- [36] LI C, DE P I, MOECKEL C, et al. Long-lasting, deep effect of Saturn's giant storms [J]. Science Advances, 2023, 9(32):eadg9419.
- [37] CONNERNEY J E P, ACUN A M H, NESS N F. The magnetic field of Uranus [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1987, 92(A13):15329-15336.
- [38] CONNERNEY J E P, ACUN A M H, NESS N F. The magnetic field of Neptune [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1991, 96(S01):19023-19042.
- [39] HOLME R, BLOXHAM J. The magnetic fields of Uranus and Neptune: methods and models [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1996, 101 (E1):2177-2200.
- [40] SCHUBERT G, SODERLUND K M. Planetary magnetic fields: observations and models [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 187(3-4):92-108.
- [41] NELLIS W J. The unusual magnetic fields of Uranus and Neptune [J]. Modern Physics Letters B, 2015, 29(1):1430018.
- [42] REDMER R, MATTSSON T R, NETTELMANN N, et al. The phase diagram of water and the magnetic fields of Uranus and Neptune [J]. Icarus, 2011, 211(1):798-803.
- [43] LEE M S, SCANDOLO S. Mixtures of planetary ices at extreme conditions [J]. Nature Communications, 2011, 2(1):185.
- [44] KNUDSON M D, DESJARLAIS M P, LEMKE R W, et al. Probing the interiors of the ice giants: shock compression of water to 700 GPa and 3.8 g/cm³ [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(9):091102.
- [45] STANLEY S, BLOXHAM J. Convective-region geometry as the cause of Uranus' and Neptune's unusual magnetic fields [J]. Nature, 2004, 428(6979):151-153.
- [46] STANLEY S, BLOXHAM J. Numerical dynamo models of Uranus' and Neptune's magnetic fields [J]. Icarus, 2006, 184(2):556-572.
- [47] GOMEZ P N, HEIMPEL M. Numerical models of zonal flow dynamos: an application to the ice giants [J]. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 2007, 101(5-6):371-388.
- [48] SODERLUND K M, HEIMPEL M H, KING E M, et al. Turbulent models of ice giant internal dynamics: dynamos, heat transfer, and zonal flows [J]. Icarus, 2013, 224(1):97-113.
- [49] TIAN B Y, STANLEY S. Interior structure of water planets: implications for their dynamo source regions [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 768(2):156.
- [50] STONE E C, MINER E D. The Voyager 2 encounter with the Uranian system [J]. Science, 1986, 233(4759):39-43.
- [51] STONE E C, MINER E D. The Voyager 2 encounter with the Neptunian system [J]. Science, 1989, 246(4936):1417-1421.
- [52] MEJNERTSEN L, EASTWOOD J P, CHITTENDEN J P, et al. Global MHD simulations of Neptune's magnetosphere [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, 121(8):7497-7513.
- [53] COWLEY S W H. Response of Uranus' auroras to solar wind compressions at equinox [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, 118(6):2897-2902.
- [54] MERRILL R T, MCFADDEN P L. Geomagnetic polarity transitions [J]. Reviews of Geophysics, 1999, 37(2):201-226.
- [55] GRITON L, PANTELLINI F. Magnetohydrodynamic simulations of a Uranus-at-equinox type rotating magnetosphere [J]. Astronomy & Astrophysics, 2020, 633(A87):1-7.
- [56] CAO X, PATY C. Diurnal and seasonal variability of Uranus's magnetosphere [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2017, 122(6):6318-6331.
- [57] TOTH G, KOVACS D, HANSEN K C, et al. Three-dimensional MHD simulations of the magnetosphere of Uranus [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2004, 109(A11):2004JA010406.
- [58] HERBERT F. Aurora and magnetic field of Uranus [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2009, 114(A11):2009JA014394.
- [59] MASTERS A. A more viscous-like solar wind interaction with all the giant planets [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(15):7320-7329.
- [60] BROADFOOT A L, ATREYA S K, BERTAUX J L, et al. Ultraviolet spectrometer observations of Neptune and Triton [J]. Science, 1989, 246(4936):1459-1466.
- [61] RICHARDSON J D, MCNUTT R L. Low-energy plasma in Neptune's magnetosphere [J]. Geophysical Research

- Letters,1990,17(10):1689-1692.
- [62] HOOGEVEEN G W, CLOUTIER P A. The Triton-Neptune plasma interaction[J]. Journal of Geophysical Research;Space Physics,1996,101(A1):19-29.
- [63] STROBEL D F, CHENG A F, SUMMERS M E, et al. Magnetospheric interaction with Triton's ionosphere[J]. Geophysical Research Letters,1990,17(10):1661-1664.
- [64] DOUGHERTY M K, KHURANA K K, NEUBAUER F M, et al. Identification of a dynamic atmosphere at Enceladus with the Cassini magnetometer[J]. Science, 2006,311(5766):1406-1409.
- [65] MAUK B H, KRIMIGIS S M, KEATH E P, et al. The hot plasma and radiation environment of the Uranian magnetosphere[J]. Journal of Geophysical Research; Space Physics,1987,92(A13):15283-15308.
- [66] MAUK B H, KEATH E P, KANE M, et al. The magnetosphere of Neptune: hot plasmas and energetic particles[J]. Journal of Geophysical Research; Space Physics,1991,96(S01):19061-19084.
- [67] KURTH W S, GURNETT D A. Plasma waves in planetary magnetospheres[J]. Journal of Geophysical Research;Space Physics,1991,96(S01):18977-18991.
- [68] VASYLIUNAS V M. The convection-dominated magnetosphere of Uranus [J]. Geophysical Research Letters,1986,13(7):621-623.
- [69] LAINEY V, CASAJUS L G, FULLER J, et al. Resonance locking in giant planets indicated by the rapid orbital expansion of Titan[J]. Nature Astronomy,2020, 4(11):1053-1058.
- [70] GRUNDY W M, BINZEL R P, BURATTI B J, et al. Surface compositions across Pluto and Charon [J]. Science,2016,351(6279):aad9189.
- [71] SODERBLOM L A, KIEFFER S W, BECKER T L, et al. Triton's geyser-like plumes: discovery and basic characterization[J]. Science,1990,250(4979):410-415.
- [72] QUIRICO E, DOUTÉ S, SCHMITT B, et al. Composition, physical state, and distribution of ices at the surface of Triton[J]. Icarus,1999,139(2):159-178.
- [73] CRUIKSHANK D. Water ice on Triton[J]. Icarus,2000, 147(1):309-316.
- [74] TEGLER S C, GRUNDY W M, OLKIN C B, et al. Ice mineralogy across and into the surfaces of Pluto, Triton, and Eris [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 751 (1):76.
- [75] KRASNOPOLSKY V A, CRUIKSHANK D P. Photochemistry of Triton's atmosphere and ionosphere [J]. Journal of Geophysical Research; Planets,1995,100 (E10):21271-21286.
- [76] NIMMO F, SPENCER J R. Powering Triton's recent geological activity by obliquity tides: implications for Pluto geology[J]. Icarus,2015,246(1):2-10.
- [77] MCKINNON W B, LEITH A C. Gas drag and the orbital evolution of a captured Triton[J]. Icarus,1995,118(2): 392-413.
- [78] HUSSMANN H, SOHL F, SPOHN T. Subsurface oceans and deep interiors of medium-sized outer planet satellites and large trans-Neptunian objects[J]. Icarus, 2006,185(1):258-273.
- [79] LELLOUCH E, DE B C, SICARDY B, et al. Detection of CO in Triton's atmosphere and the nature of surface-atmosphere interactions [J]. Astronomy and Astrophysics,2010,512(1):L8.
- [80] TRAFTON L. Large seasonal variations in Triton's atmosphere[J]. Icarus,1984,58(2):312-324.
- [81] DE P I, GIBBARD S, HAMMEL H. Evolution of the dusty rings of Uranus[J]. Icarus,2006,180(1):186-200.
- [82] TISCARENO M S, MURRAY C D. Planetary ring systems: properties, structure, and evolution [M]. New York;Cambridge University Press,2018:93-111.
- [83] COLWELL J E, ESPOSITO L W. Origins of the rings of Uranus and Neptune:1. statistics of satellite disruptions [J]. Journal of Geophysical Research; Planets,1992,97 (E6):10227-10241.
- [84] COLWELL J E, ESPOSITO L W. Origins of the rings of Uranus and Neptune:2. initial conditions and ring moon populations [J]. Journal of Geophysical Research; Planets,1993,98(E4):7387-7401.
- [85] DUMAS C, TERRILE R J, SMITH B A, et al. Stability of Neptune's ring arcs in question[J]. Nature,1999,400 (6746):733-735.
- [86] NAMOUNI F, PORCO C. The confinement of Neptune's ring arcs by the moon Galatea [J]. Nature,2002,417 (6884):45-47.
- [87] DE P I, GIBBARD S G, CHIANG E, et al. The dynamic Neptunian ring arcs: evidence for a gradual disappearance of Liberté and resonant jump of courage [J]. Icarus, 2005,174(1):263-272.

作者简介:

王赤(1967—),男,研究员,研究方向为空间物理,cw@swl.ac.cn。

李晖(1985—),男,研究员,研究方向为空间物理,hli@swl.ac.cn。