中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 11 期: 2457 ~ 2481
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

太阳系天体火山地质作用

肖龙[1*], 黄俊[1], 肖智勇[2], 綦超[3,4], 钱煜奇[1]

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;
2. 中山大学大气科学学院, 珠海 519082;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
4. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
* 通讯作者, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

收稿日期: 2022-04-30; 收修改稿日期: 2023-01-12; 接受日期: 2023-02-28; 网络版发表日期: 2023-08-14
国家自然科学基金项目(批准号: 42241111、41773061、41773063)资助

摘要 火山活动是所有分异型天体热和成分交换与循环的主要方式. 太阳系内所有类地行星、月球和巨行星的多个卫星以及矮行星都经历过或正在经历不同形式的火山活动. 本文总结了内太阳系月球、火星、金星和水星的火山分布及其主要火山地貌类型与成因, 外太阳系巨行星的卫星如木卫一的火山作用与木卫二、土卫二等天体上的冰火山作用特征, 以及小行星带内的谷神星与柯伊伯带内的冥王星两个矮行星的火山地质活动特点. 结果显示, 太阳系天体火山活动的驱动因素多样, 火山地貌和火山产物类型丰富. 利用比较行星学的研究思路, 开展行星火山地质活动类比研究, 对于深化太阳系天体火山活动、行星宜居环境的形成及其蕴含的行星形成与演化历史的认知具有重要意义.

关键词 火山活动, 类地天体, 行星演化, 太阳系

1 前言

火山活动是行星及其卫星、矮行星、小行星在热演化过程中, 向其表面喷发固体、液体、气体和其混合物的地质现象. 太阳系天体上火山活动的样式和产物丰富多样. 除地球上常见的硅酸岩熔体外, 木卫一上持续的火山活动可产生超基性和富硫熔体, 外太阳系行星的冰卫星及一些矮行星上的冰火山喷发可形成由水冰和其他烷类物质主导的“岩浆”. 所有天体的火山活动都受两个基本因素控制, 即热源以及被热所融化的物质.

火山学研究表明, 地球现今火山活动主要受板块构造和地幔柱的控制, 热源主要来自内部地幔对流传导以及长周期放射性元素^{40}K、^{235}U和^{238}Th的衰变. 在星子形成阶段, 残余星子不断吸积增生, 由撞击体的动能转化的热能和短寿命的^{26}Al放射性衰变生热量非常巨大. 随着天体体积的增加, 重力自压会使得行星内部温度升高(Francis和Oppenheimer, 2004). 这一过程可能是像灶神星这类体积较大的小行星发生熔融的主要热能来源. 体积更大的分异型天体, 核的形成构成了后续持续性的热源(Solomon等, 1981).

天体运动的潮汐能是不可忽视的另外一种热源.

中文引用格式: 肖龙, 黄俊, 肖智勇, 綦超, 钱煜奇. 2023. 太阳系天体火山地质作用. 中国科学: 地球科学, 53(11): 2457–2481, doi: 10.1360/SSTe-2022-0123
英文引用格式: Xiao L, Huang J, Xiao Z, Qi C, Qian Y. 2023. Volcanism in the Solar System. Science China Earth Sciences, 66(11): 2419–2440, https://doi.org/10.1007/s11430-022-1085-y

© 2023 《中国科学》杂志社

对于地月系统而言, 引力引起了明显的表面液体潮汐, 但难以引起内部热能的明显变化. 金星没有卫星, 火星的两个卫星极小, 都不存在潮汐能或潮汐能极小. 水星由于离太阳很近, 轨道共振可能对其内部热能产生影响, 但不足以支撑现今火山活动. 对于外太阳系的一些卫星, 潮汐能是其维持火山和低温火山活动的主要能量来源(Wilson, 2009), 如木卫一、木卫二、土卫二等. 对于冥王星等天体, 表面冰火山活动的热源尚是个未解之谜.

天体形成之后, 其内部的放射性生热元素衰变产生的热量随时间都在减少, 因此表面热流自形成至今持续降低, 处在不断冷却过程中. 目前的研究表明, 尽管大部分天体在宏观尺度都服从行星热演化的一般规律, 但是理论预测与实际探测结果之间的巨大差异, 促使科学家不得不重新思考太阳系天体火山活动的热源、驱动机制、火山产物的多样性和随时间变化的规律等重大科学问题. 本文将在总结太阳系主要类地天体火山地质活动研究进展的基础上, 提出未来需要重点关注的科学问题和探测目标.

2 内太阳系天体火山活动

地球是人类最为熟悉的星球, 也是开展其他天体火山地质活动研究的基本参照对象, 相应的研究成果很多. 限于篇幅, 本文将主要介绍月球、火星、金星和水星的火山地质活动研究进展.

2.1 月球的火山作用

月球是地球的唯一天然卫星, 其直径为1737.4km, 距离地球的平均距离为384400km, 密度为3.344g cm^{-3}, 表面重力加速度为1.624m s^{-2}. 月球形成于~4.5Ga前(Yin等, 2002; Kleine等, 2002; Barboni等, 2017)一个火星大小的天体Theia和原始地球的碰撞(Halliday, 2000). 巨大的撞击作用使月球发生了全球性的熔融事件, 产生了岩浆洋(Warren, 1985). 月球火山活动在岩浆洋固结的晚期(~4.35Ga前)便拉开了序幕(Terada等, 2007), 至少持续到了距今约2Ga(Che等, 2021; Li等, 2021), 并可能延续到近1.2Ga前(Hiesinger等, 2011). 火山活动是月球最主要的内动力地质作用, 也是认识月球内部性质和热演化的重要窗口.

月海玄武岩是月球表面最重要的火山作用产物. 月海和隐雨海覆盖了月球表面至少约18%的面积(Whitten和Head, 2015a), 总体积约为1×$10^7$$km^3$, 占到了月壳总体积的约1%. 月海玄武岩大部分充填在大型盆地内部, 尤其是酒海纪及其之后的大型盆地, 如雨海、澄海、静海、酒海和危海, 形成了广袤的熔岩平原(乔乐等, 2021). 月球最显著的特点是具有正背两面二分性, 以正背两面不同的月壳厚度、高程、地质及热演化为特征(Laneuville等, 2013). 月海玄武岩主要分布在月球正面, 在月球背面分布较少并局限在南极-艾肯盆地和东海盆地等几个大型盆地内部. 位于月球正面的“风暴洋克里普”地体内(Jolliff等, 2000), 发育了月球表面绝大多数的月海玄武岩(Hiesinger等, 2011). 在“风暴洋克里普”地体的北部、中部和南部, 大规模的月海玄武岩喷发形成了吕姆克山(Mons Rümker)、阿里斯塔克斯高原(Aristarchus Plateau)和马里乌斯山(Marius Hills)等三个火山杂岩体, 是月球上最显著的火山构造(图1). 年轻月海玄武岩则全部发育在“风暴洋克里普”地体内, 集中在风暴洋中部和雨海西南部. 这可能与该地体较高的放射性生热元素含量和较薄的月壳厚度相关(Laneuville等, 2013), 但还有待嫦娥五号样品对这一观点进行检验.

月球火山作用按其喷发方式主要分为溢流式和爆裂式火山作用. 溢流式火山作用受其喷发速率、喷发持续时间、冷却速率、岩浆供给和地形地貌等因素控制, 可形成不同的火山构造(Head和Wilson, 2017; Zhang等, 2017). 熔岩流较低的喷发速率和较快的冷却速度, 有利于形成小型盾状火山; 较高的喷发速率和较快的冷却速率, 有利于形成复合熔岩流; 高通量、长时间的喷发会促进热侵蚀作用, 有利于形成月溪; 甚至更高的喷发速率将会产生长达数百千米的巨型熔岩流. 由于喷发环境的不同, 爆裂式火山作用也存在多种形式(Head和Wilson, 2017). 斯特隆布利式喷发(Strombolian Eruption)可产生火山渣锥和寄生熔岩锥, 夏威夷式喷发(Hawaiian Eruption)可产生火山碎屑堆积, 超普林尼式喷发(Ultraplinian Eruption)可产生在全月广泛分布的气体和泡沫液滴, 伏尔坎宁式喷发(Vulcanian Eruption)可产生暗晕火山口并混合大量围岩物质, 爱奥尼亚式喷发(Ionian Eruption)可产生暗色火山碎屑环, 多期次富挥发分裂隙喷发可产生区域暗色盖层, 长时间、高通量喷发伴随火山碎屑活动有可能促进中心热侵蚀形成熔岩池或者熔岩渠道. 除此之

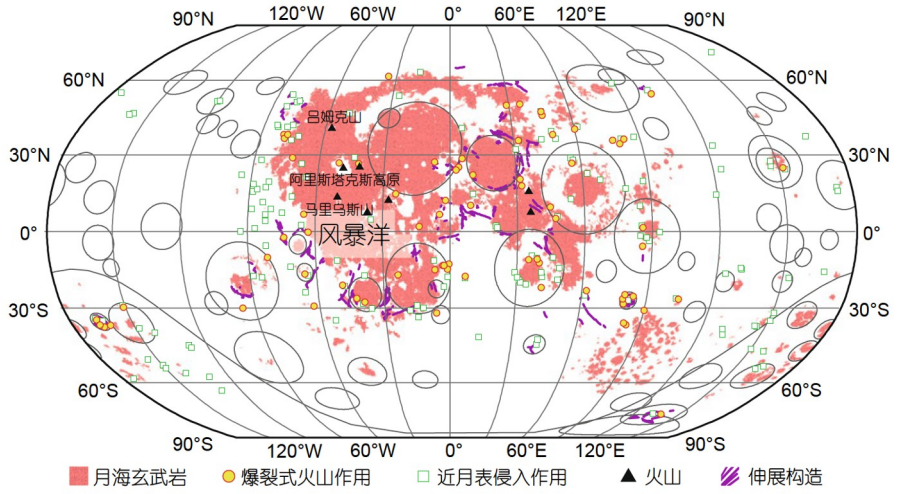

图 1　典型月球火山构造分布

据Byrne(2020), Copyright © 2019 Springer Nature

外，岩墙上升中的底辟或硅酸岩液相不混融作用可产生硅质岩浆，其喷发到月表可形成特殊的硅质火山，主要分布在格罗特胡森(Gruithuisen)、阿里斯塔克斯(Aristarchus)、汉斯廷(Hansteen)、里菲(Riphaeus)、拉塞尔(Lassell)和黑尔梅特(Helmet)等地区(图2).

近年来一些特殊的火山地貌被发现或者重新认识. 不规则月海斑块以独特的不规则形状为特征, 具有保存完好的微小地形起伏、非常低的光学成熟度和非常少的叠置撞击坑(Qiao等, 2017). 目前为止，月球表面共发现91处不规则月海斑块，主要分布在月球正面月海区域(Qiao等, 2020). 不规则月海斑块的形成机制存在较大争议. Braden等(2014)认为其可能是近100Ma以来火山喷发的产物. Qiao等(2017)、Head和Wilson(2017)认为其可能形成于月球古老熔岩湖过程(>3Ga), 并伴随着超高孔隙度岩浆物质的喷发. 环形凹陷穹丘是新近发现的一种被负地形环绕的低矮穹窿构造，广泛分布于月海玄武岩流表面(Zhang等, 2017). 目前为止, 月球表面共发现环形凹陷穹丘超过8000个, 主要分布在静海、丰富海、风暴洋、湿海、云海和雨海等盆地内部的熔岩平原上(Zhang等, 2020). 对环形凹陷穹丘的认识存在争议，Zhang等(2017)和Wilson等(2019)提出了泡沫岩浆理论成因模型. 熔岩流膨胀和泡沫岩浆形成使熔岩流表层壳破碎，泡沫岩浆挤出形成了穹丘，随后其加载使周围表面发生凹陷. Garrick-Bethell和Seritan(2021)认为浅部岩浆侵入和岩席的形成是环形凹陷穹丘的成因. Fitz-Gerald(2021)提出月震可能导致月壤球形聚集形成环形凹陷穹丘，但该模型目前缺乏地球物理学证据. 环形凹陷穹丘的形成年龄也存在争议，Zhang等(2021)认为某些环形凹陷穹丘可能形成于100Ma内.

新近的月球采样返回任务，例如嫦娥五号任务极大地促进了月球火山学的发展(Zhou等, 2022). 嫦娥五号着陆在月球正面风暴洋北部，距吕姆克山约170km的埃拉托逊纪玄武岩单元(Qian等, 2021). 嫦娥五号返回样品显示该地区的玄武岩年龄约为2.0Ga(Che等, 2021; Li等, 2021), 将月球火山活动的结束时间往后推了至少约800Ma(刘守偈等, 2021). 返回样品的U-Pb、Rb-Sr、H同位素和微量元素显示玄武岩源区并不富集放射性生热元素(Tian等, 2021)和水(Hu等, 2021), 对目前的月球热演化模型提出了挑战(刘守偈等, 2021; Mitchell, 2021). 虽然嫦娥五号采回了年轻玄武岩样品，但是只有更多年轻玄武岩样品返回，包括不规则月海斑块和环形凹陷穹丘样品，才能充分认识月球的年轻火山活动(Draper等, 2021; Tartèse等, 2019).

2.2　水星的火山作用

水星是太阳系最内侧的行星，大小和月球相似(半径约2440km), 表面重力加速度与火星相当，整体铁含量位居类地天体前列. 水星缺乏对流型大气, 但拥有高度变化、强度极低的全球性偶极子磁场. 在强大的太

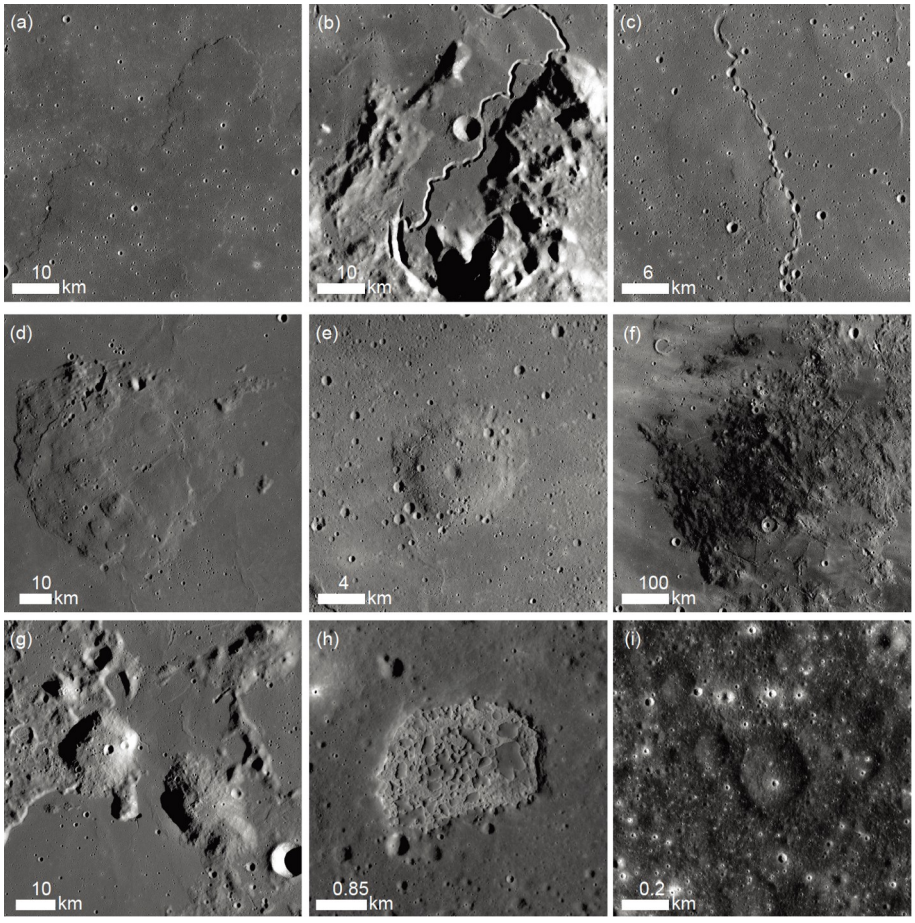

图 2　典型月球火山构造

(a) 雨海中部的熔岩流(22.45°W, 31.95°N); (b) 雨海东南部的哈德利月溪(2.74°E, 25.35°N); (c) 格罗特胡森西北侧的疑似熔岩管(43.479°W, 34.583°N); (d) 吕姆克山(57.9°W, 40.70°N); (e) 米利奇乌斯撞击坑西侧的穹丘(31.24°W, 10.09°N); (f) 施罗特撞击坑西北侧的火山碎屑堆积(7.90°W, 5.91°N); (g) 格罗特胡森硅质火山(40.14°W, 36.43°N); (h) 不规则月海斑块Ina(5.30°E, 18.15°N); (i) 环形凹陷穹丘(静海中部). (a)~(g)的底图为月亮女神号(Kaguya)TC Morning Map数据. (h)和(i)的底图为月球勘测轨道器窄角相机数据. 所有图片均为北上

阳风的笼罩下, 水星和月球的表面空间环境和地貌特征较为相似.

与其他内太阳系天体一样, 水星表面经历了大规模和长时期的火山活动, 岩浆洋分异的原始壳被后期火山活动的产物覆盖, 并在持续撞击作用下强烈混合. 水星上的火山地貌、喷发机制、持续时间以及火成岩类型等特点和其他类地天体明显不同. 水星表面的铁(<2wt%)和钛(<0.4wt%)含量极低(Weider等, 2016), 而镁(9~25wt%)和硫(4wt%)含量很高(McCoy等, 2018). 表面火成岩的主要矿物为长石、辉石、橄榄石和少量的石英(Charlier等, 2013; Vander Kaaden等, 2017), 主要的岩石类型是富含碱性元素的科马提岩和玻安岩(Vander Kaaden等, 2017; McCoy等, 2018). 水星岩浆的黏度很低(黏度系数为0.4~82Pa s; McCoy等, 2018), 流动性比地球、月球、火星、木卫一上的拉斑玄武岩和科马提质玄武岩岩浆更高(Stockstill-Cahill等, 2012; Byrne等, 2018). 这意味着在足够的喷发速率下, 水星上的火山喷发可形成类似月海和地球上大火成岩省的火山平原(Sehlke和Whittington, 2015).

水星表面广泛分布着坑间平原(Intercrater Plain; Trask和Guest, 1975)和平坦平原(Smooth Plain; 图3a; Denevi等, 2013). 坑间平原是水星表面最广泛分布的一类平原物质(图3b和3c), 最显著的地貌特征是掩埋了大量直径小于~20km的撞击坑, 导致20~128km的撞击坑密度明显低于月球高地(Fassett等, 2011). 坑间平

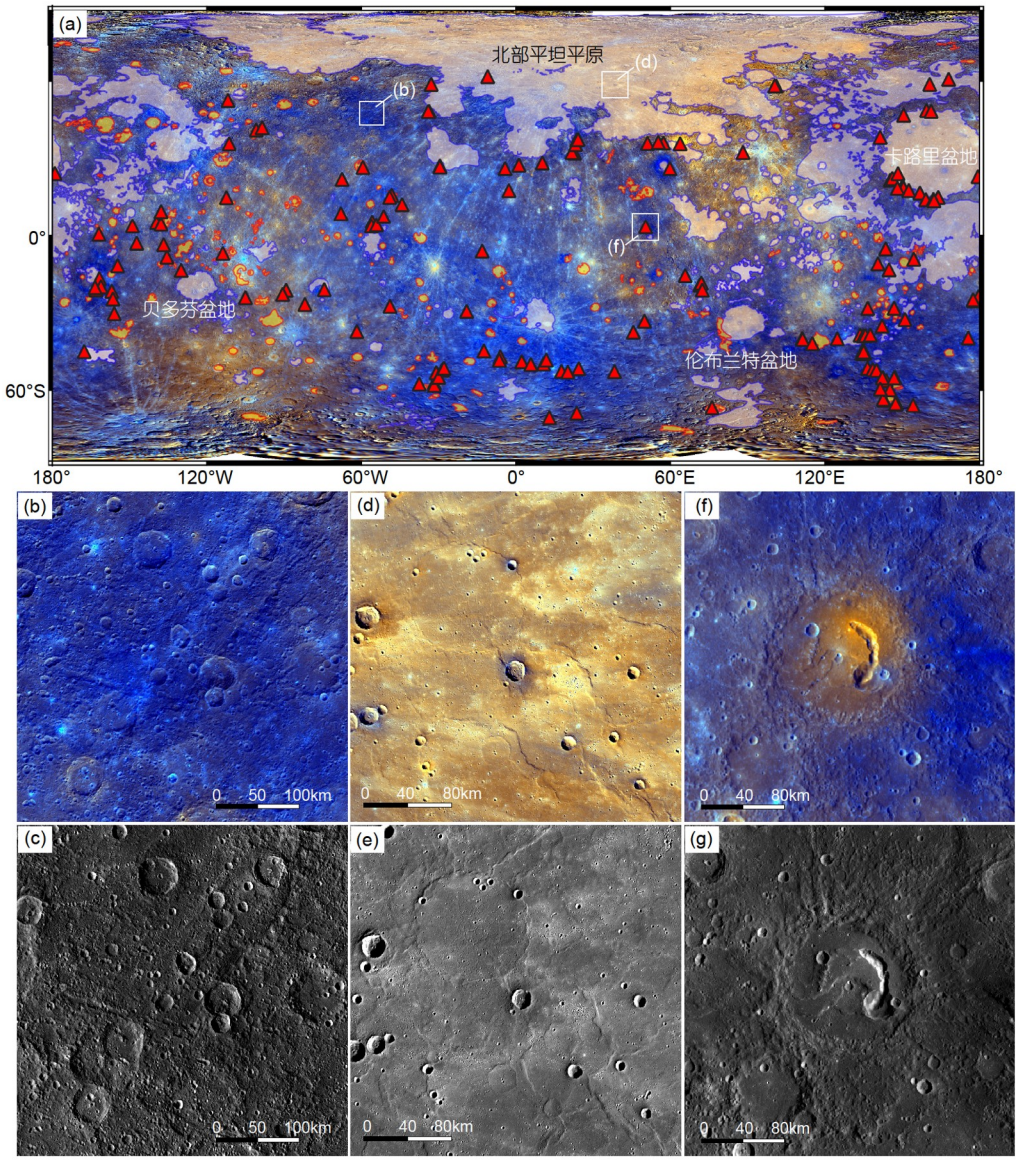

图 3　水星表面平原和火山碎屑沉积物分布图

(a) 蓝色边框内部粉色区域为火山成因的平坦平原, 红色边框的黄色区域为无法明确火山成因的平坦平原, 红色三角为火成碎屑沉积物. 底图数据为水星主成分增强彩色镶嵌图. (b)、(c) 坑间平原; (d)、(e) 平坦平原; (f)、(g) 火山口与周围的火成碎屑沉积物. 数据来源于信使号

原的火山成因和撞击成因一直是水星地质学的争论问题(Spudis和Guest, 1988; Strom等, 2011). 信使号(MESSENGER)发现部分坑间平原的反照率光谱和地球化学特征与水星表面典型熔岩流和熔岩平原相似(Murchie等, 2018), 且二者在地层交切关系和撞击坑密度上存在渐变过渡的关系(Whitten等, 2014). 这些证据均支持坑间平原形成于溢流型熔岩流充填. 同时, 已探明的水星大型撞击盆地溅射物的体积与分布范围和坑间平原不一致(Byrne等, 2018), 说明单依靠撞击溅射物的就位无法形成全球坑间平原. 因此, 系统的填图和地质研究认为坑间平原是水星表面最古老的地质单元, 它们覆盖了早期严重撞击的区域, 大部分是~41亿年前的全球性火山活动的产物(Marchi等, 2013).

平坦平原是高反照率、地势平坦、撞击坑密度低于全球平均值的平原物质, 覆盖水星表面积的~27%

(图3d和3e)(Denevi等, 2013; Wang等, 2021). 单个平坦平原的覆盖面积的差别高达4个数量级(10^2~10^6km^2; Byrne等, 2016; Wang等, 2021), 厚度可达数千米. 平坦平原主要形成在低地势(Denevi等, 2013)和壳厚度较薄(Wang等, 2021)的区域, 通常位于撞击坑或撞击盆地内部(Wang等, 2021). 平坦平原的时空分布特征与卡路里(Caloris)盆地、伦布兰特(Rembrandt)盆地、贝多芬(Beethoven)盆地等形成于3.8Ga前后的大撞击盆地(Whitten和Head, 2015b; Mancinelli等, 2016; Byrne等, 2018)有着紧密的联系. 平坦平原集中产出在这些盆地周围, 而在这些盆地的对趾区域, 平坦平原的数量和面积均较少(图3a)(Wang等, 2021). 撞击坑统计定年发现平坦平原几乎都形成于3.7Ga前后, 大部分介于3.6~3.8Ga(Denevi等, 2013; Byrne等, 2016; Wang等, 2021). 交切关系和成分研究表明大部分平坦平原是溢流型火山活动的产物, 少部分是撞击盆地的熔融物堆积形成的地貌(Wang等, 2021). 因此, 形成平坦平原的全球性火山活动与水星上的大型撞击盆地的形成时间重叠, 大撞击事件可能造成水星内部的热扰动(>100Ma; Padovan等, 2017), 增强了局部幔部物质的部分熔融程度, 并在盆地周围形成大量的岩石圈深大断裂, 触发形成平坦平原的火山活动.

水星上共发现了170余处围绕不规则凹陷(图3f和3g)发育、具有弥散边界的亮色火成碎屑沉积物(图3a和3f). 水星上的火成碎屑沉积物的覆盖范围比月球上更大(Besse等, 2020). 考虑到水星表面重力加速度大于月球, 水星上的爆发性火山活动应伴随着更高的喷发速率, 这意味着水星的岩浆中含有更多的挥发分(Kerber等, 2009; Thomas等, 2015). 信使号探测发现, 水星表面最大的一处火成碎屑沉积物(Nathair Facula)的硫(Weider等, 2016)和碳含量(Peplowski等, 2016)低于周围地质单元(图4a~4c). 这意味着硫和碳的氧化物气体可能是驱动该爆裂式火山喷发的主要组分(Weider等, 2016). 最近, 水星表面还发现了一类柯伊伯纪(Kuiperian)的暗色火成碎屑沉积物(Xiao等, 2021), 部分此类暗色火成碎屑沉积物在600nm波段具有微弱的吸收特征, 表明其中存在石墨(图4d~4f). 水星上的火成碎屑沉积物大多和撞击坑、断裂构造、先前存在的火山口有关(Goudge等, 2014; Jozwiak等, 2018); 在空间分布上呈聚集性, 主要围绕卡路里盆地等大型撞击构造产出(图3a). 水星上的火成碎屑沉积物的地形和空间分布表明其形成于伏尔坎宁式的火山喷发(Besse等, 2015). 驱动这些火山喷发的挥发分可能主要来自于水星幔部, 抑或是幔源岩浆从围岩中提取出的硫和碳(Weider等, 2016; Xiao等, 2021). 在岩浆上升的过程中, 火山气体在浅表层汇聚和增压, 当超过上覆压力时发生剧烈爆炸形成火山口和火成碎屑沉积物.

水星的火山活动主要发生在太阳系形成之初的1.0Ga内, 水星演化早期内部放射性元素生热和外来大型撞击事件的热能转化维持了内部的高温(Deng等, 2020), 触发了多期次、大规模的溢流型火山活动, 形成了全球分布的坑间平原和平坦平原. 随着内部逐渐冷却, 水星自~3.8Ga前后进入全球收缩的热状态. 内部冷却使得幔部物质部分熔融量减小, 岩石圈收缩阻碍了岩浆上升至表面, 这二者共同导致了大规模溢流型火山活动在3.5Ga前后迅速停止. 自3.5Ga以来到水星地质历史的近期(Thomas等, 2014; Xiao等, 2021), 水星表面的火山活动主要是挥发分驱动岩浆沿岩石圈薄弱带快速上升引起的爆发性火山活动. 这意味着水星内部的挥发分含量依然很高, 并足以克服全球收缩形成的压应力, 形成爆裂式喷发.

地球上的岩石样品库中尚未发现来自水星的样品, 因此水星火成岩及其挥发分等关键信息缺乏样品标定. 在未来水星采样任务成功实施之前, 遥感观测将是研究水星火山活动特征的主要方法. 观测表明, 水星表面的元素分布和反照率光谱特征无严格对应关系, 但元素丰度数据的空间分辨率极低(远大于100km/像素), 导致对水星上火山岩单元的元素丰度认识仍存在不足. 同时, 实验岩石学和地球物理探测表明水星岩石圈中的侵入岩数量极低, 这和其他类地天体的岩浆活动模式截然不同. 然而, 水星的内部结构数据(如重力场)的分辨率极低, 难以精确获得驱动水星上火山活动的动力学机制.

欧洲航天局(简称“欧空局”)和日本宇航局联合发射的Bepi-Colombo任务正在飞往水星, 计划于2025年前后入轨. 该探测器将极大提升对水星空间环境、内部结构、表面物质的物理和化学性质刻画的数据的空间分辨率, 届时将极大提升对水星岩浆活动的认识. 另外, 水星岩石样品将是实质性提升对水星火山活动认识的关键, 美国和欧空局正在分别论证水星样品返回任务, 在地球陨石样品库中寻找可能来自水星的陨石也是必要的工作.

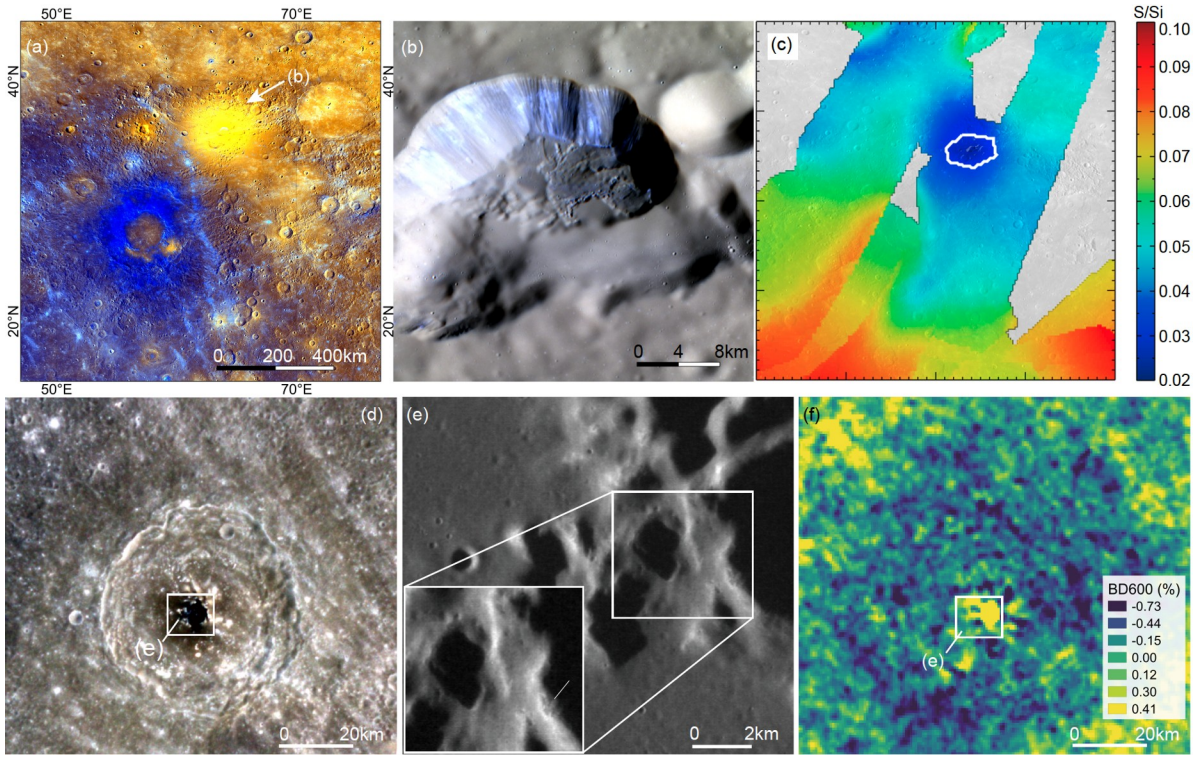

图 4　水星表面亮色与暗色火成碎屑沉积物及其挥发分组成

(a) 箭头指示Nathair Facula. 数据来源于信使号; (b) Nathair Facula中央火山口; (c) S/Si分布图显示火成碎屑沉积物贫S(Weider等, 2016), Copyright © 2016 American Geophysical Union; (d) 一未命名撞击坑(155.8°E, 4.7°N)内的暗色火成碎屑沉积物(Xiao等, 2021), Copyright © 2021 American Geophysical Union; (e) 暗色火成碎屑沉积物内的火山口(Xiao等, 2021), Copyright © 2021 American Geophysical Union; (f) 暗色火成碎屑沉积物的反照率光谱在600nm波段的吸收特征, 显示范围与(d)相同

2.3　金星的火山作用

金星是内太阳系第二颗行星, 也是与地球具有较高相似度的行星. 金星直径为12103km, 距离太阳的平均距离约为0.7AU, 密度为5.243g cm^{-3}, 表面重力加速度为8.87m s^{-2}. 金星表面具有浓密的大气, 表面压强约为9200kPa, 主要成分为二氧化碳(96.5%)和氮气(3.5%). 浓密的大气使金星表面发生了极强的温室作用, 平均温度可达464℃. 浓密的大气和炎热的表面极大地影响了金星的火山活动.

当前, 金星不存在板块活动, 稠密的大气减弱了撞击事件对金星表面的改造, 因此火山作用是改造金星表面的主要地质作用(Strom等, 1994; Nimmo和McKenzie, 1998). 撞击坑年代学估测金星的表面模式年龄约为300Ma~1.0Ga, 代表了表面火山活动产物的年龄. 新近研究发现金星上的火山活动可能持续到了现在(Smrekar等, 2010; Filiberto等, 2020). 由于金星的火山活动极为活跃, 覆盖了前期形成的火山作用产物, 因此对金星早期的火山活动并没有较好的认识.

金星表面的火山建造规模差异巨大(图5). 金星表面火山地貌可分为中心式和熔岩流式火山构造(图6)(Ivanov等, 2015). 中心式火山构造可分为大型火山、中型火山、小型火山和破火山口, 以及特殊的火山构造, 如冕状火山、蛛网状和新星状火山. 熔岩流式火山地貌包括熔岩渠道和熔岩流.

大型火山是指直径在100km以上的火山中心, 在金星表面约有156个. 这些火山构造以放射状的熔岩流为特征, 通常与同心圆状或圆形的构造相伴, 分布在地形较高和构造交汇的部位. 部分大型火山顶部发育明显的火山口. 典型的大型火山包括艾斯塔拉(Eistla)西部地区的斯夫(Sif)和古拉(Gula)火山. 中型火山直径在20~100km. 它们通常都有对称的、由放射状的熔岩流和裂隙刻画出的盾形轮廓. 根据它们的形貌, 又进一步分为简单型、海葵状、薄饼状和壁虱状火山. 直径不到20km的小型火山是金星表面发育最为广泛

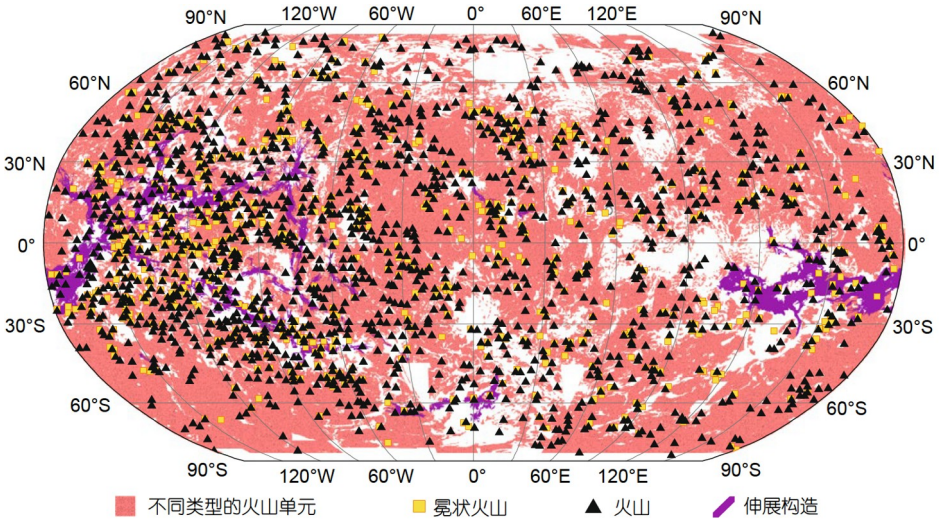

图 5　金星表面的火山及火山单元分布

据Byrne(2020), Copyright © 2019 Springer Nature

的构造. 这些小型火山常常聚集形成火山群. 在金星表面共发现了10000多个小型火山和556个火山群(Head等, 1992), 这些小型火山具有圆形或椭圆形的轮廓, 总体坡度平缓. 冕状火山构造是金星上所特有的火山构造, 目前金星上共发现362处, 按照形貌可分为同心圆状、双环形同心圆状、带放射线同心圆状、不对称型和多环型(Stofan等, 1992). 这些冕状火山构造的大小变化很大(60~2000km), 因此部分也被包括在大型和中型火山中. 新星状火山构造的特征是具有放射状破裂带, 这些破裂带大都是地堑, 形成在正地形之上. 金星表面共有50个新星状火山构造, 它们的直径在50~300km, 主要分布在高程较高地区, 如亚帝伦(Atla)和阿夫罗迪特(Aphrodite)西部, 以及成串排列, 如忒弥斯(Themis)地区. 这些新星状火山构造通常在空间上与大型火山、海葵状火山以及冕状火山构造伴随, 相互叠置和包围.

金星表面发育有多种熔岩流(图6), 包括溢流式熔岩流、熔岩渠道和花彩状熔岩流等, 是由高黏度岩浆多期喷发叠加在一起形成的. 熔岩流的长度在几千米至几百千米. 它们从火山口、地壳裂缝和一些表面洼陷中流出, 但由于多期熔岩的叠加, 很多情况下无法确认源头. 熔岩流表面平滑, 存在熔岩渠、熔岩堤、挤压脊、熔岩流前缘等特征, 并指示一定的流动方向. 火山平原上有大量的长度从几百到几千千米的熔岩渠道. 简单的熔岩渠道分支很少或没有分支. 一般运河状的熔岩通道发育在地形起伏不大的地区, 具有较大的宽度与深度比, 并且在很长的距离内保持不变.

除这些在地质历史时期形成的火山构造之外, 金星表面现在仍可能存在着火山活动. 根据金星快车表面热辐射数据, Smrekar等(2010)研究了金星表面的三个热点. 与周边地区相比, 位于这三个热点之上的熔岩流具有异常高的热辐射强度, 这预示着金星表面可能存在非常年轻的火山活动. Bondarenko等(2010)通过对麦哲伦号雷达和微波热发射数据的研究发现贝雷菲利亚(Bereghinia)平原现今仍存在火山活动, 很可能代表了基性火山喷发. 对金星大气SO_2气体含量监测(例如, Esposito, 1984; Marcq等, 2013)、橄榄石氧化试验(例如, Filiberto等, 2020)和冕状火山生长模型(例如, Gülcher等, 2020)等也为金星目前可能还存在热点活动提供了间接性的证据.

2.4　火星的火山作用

火星质量约为地球的1/9, 半径仅为地球半径的1/2左右, 密度(3.933g cm^{-3})和表面重力加速度(3.72m s^{-2})均小于地球. 火星引力场较弱, 大气十分稀薄, 表面平均大气压力约为610Pa, 主要成分为二氧化碳(95%). 火星地形具有明显的二分性(图7), 南部地势较高且表面年龄相对较老, 而北部地势较低且年龄较年轻(肖龙, 2013). 火星表面发育了丰富的火山地貌、流水地貌和冰川地貌, 是地外宜居环境和生命探测的重要场所.

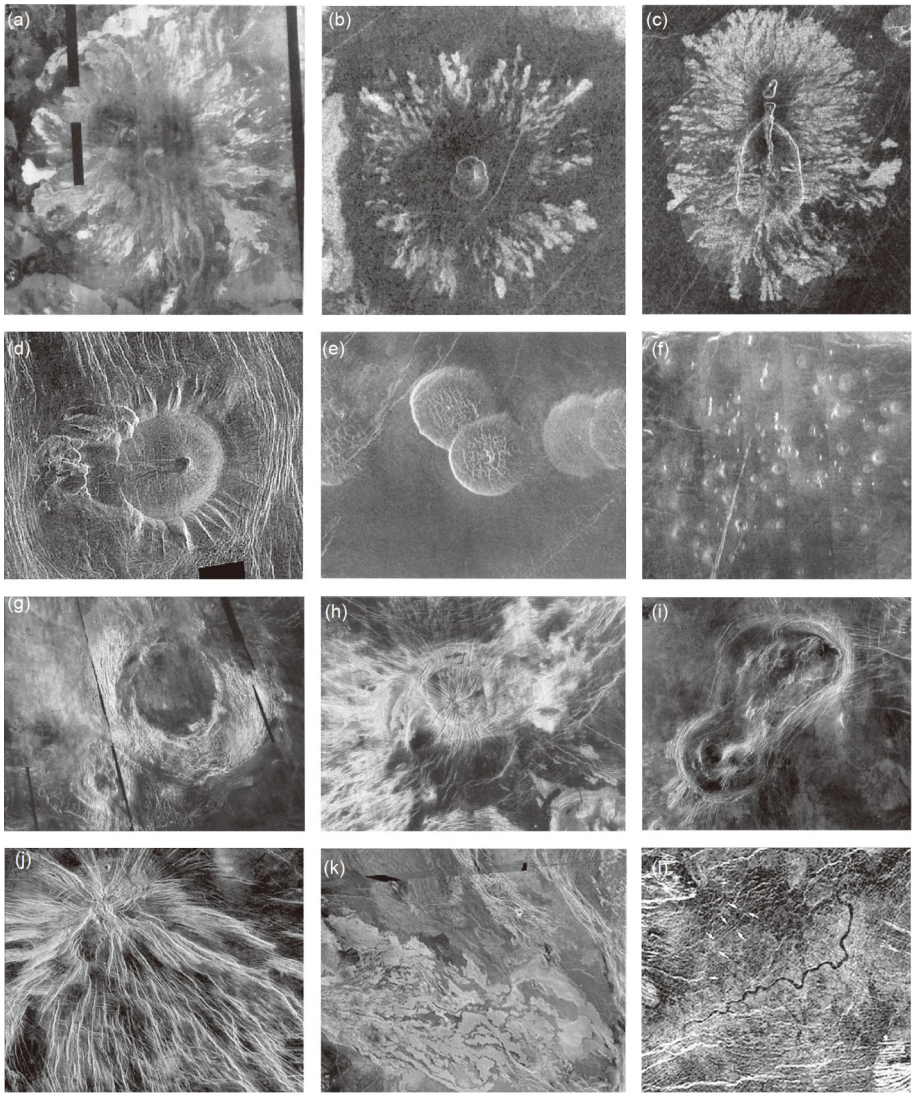

图 6　典型金星火山构造

(a) 大型火山(直径520km); (b) 中型火山(直径38km); (c) 海葵状火山(大小为40km×60km); (d) 壁虱状火山(直径65.6km); (e) 薄饼状火山穹隆(平均直径25km); (f) 小型盾火山群(直径129km); (g) 同心圆状冕状火山(直径370km); (h) 放射状冕状火山(直径175km); (i) 多环冕状火山(大小为380km×200km); (j) 新星状火山(直径250km); (k) 金星表面最长的熔岩流之一(长度为1000km); (l) 熔岩渠(分布范围为130km×190km). 所有图片均为北上. 数据来源于NASA麦哲伦(Magellan)号

大范围的火山形迹主要分布在火星的南部高原, 包括萨希斯、环海拉斯中心式火山区和广泛分布的熔岩平原, 而北部平原最显著的中心式火山区为艾丽丝米(肖龙和Greeley, 2008), 火山单元覆盖面积约为火星表面的22%(Tanaka等, 2014)(图7). 此外, 在火星北部的乌托邦、艾丽丝米、克律塞和阿茜达利亚平原发育了大量直径不到1km的小型锥形地貌(Ivanov等, 2014; Ye等, 2021; Zhao等, 2021), 可能是泥火山、无根锥或冰核丘(de Pablo和Komatsu, 2009; Hamilton等, 2011; Ivanov等, 2014), 是验证火星北部平原古海洋假说的重要地质特征.

盾状火山(Shield Volcano)是火星表面最典型的火山建造, 具有宽广缓和的斜坡和较大的基座, 整体形似盾牌. 萨希斯火山区的奥林帕斯火山和阿尔巴火山等(图8a), 艾丽丝米火山区的艾丽丝米、赫卡忒斯和阿尔伯火山(图8b), 以及环海拉斯火山区的塔海尼亚、

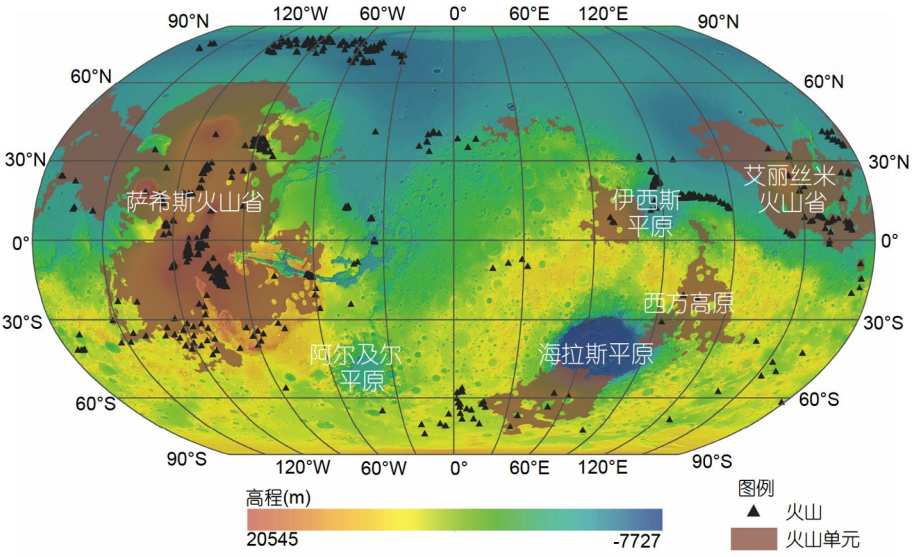

图 7　火星全球火山地貌分布图

底图为MOLA DEM覆盖在山体阴影图上. 据Tanaka等(2014)和Byrne(2020), Copyright © 2019 Springer Nature

哈达利卡和安非特利特等(图8c)均属于盾状火山. 其中, 奥林帕斯火山是太阳系最高的火山——高度为22km, 阿尔巴火山的基座范围超过2000km且坡度极小(~0.5°), 这些盾状火山都形成于岩浆的溢流式喷发. 中心火山口式洼陷在形态上类似大型撞击坑, 但缺乏突出的撞击坑边缘, 且周围可能发育皱脊或谷网, 与地球上的破火山口相似. 环海拉斯火山区的帕尼乌斯(图8d)、马列亚和匹提尤萨等碟形坑都是中心火山口式洼陷, 通常认为这些碟形坑地貌形成于上升的岩浆与地下水相互作用而产生的爆裂式喷发(Brož等, 2021). 火星的低大气压力有利于上升岩浆的破碎, 因此爆裂式火山喷发应该是较为常见的(Head和Wilson, 1998), 但实际火星上的爆裂式火山证据十分稀少(Brož等, 2021), 位于古瑟夫撞击坑北部的阿波罗山(Apollinaris Mons; 图8e)可能是爆裂式火山建造, 其南翼的扇形堆积物可能为火山碎屑物质(Brož等, 2021).

在高分辨率的影像上可以观测到除上述大型火山建造外, 火星表面还有分布范围广泛的小型锥形地貌. 萨希斯火山区发育了大量的火山渣锥(Scoria Cone)(Brož等, 2015)、小喷发口(Small-vent Field)和裂隙式喷发口(Fissure Vent)(Bleacher等, 2007)(图8f~8h), 都是小规模的岩浆活动形成的火山遗迹. 在火星北部平原广泛分布顶部具有凹坑的小型锥形地貌(Pitted Cone), 在中国"祝融号"着陆区内也是显著的地貌特征(Zhao等, 2021)(图8i), 其潜在的泥火山成因一度引起国内外学者的重视(Ivanov等, 2014; Salvatore和Christensen, 2014; Ye等, 2021), 相关研究也日益增多. 相似的小型锥形地貌在火星北部低地分布十分广泛, 其可能的成因除泥火山外还有无根锥(Frey和Jarosewich, 1982; Fagents等, 2002)、冰核丘(de Pablo和Komatsu, 2009; Dundas和McEwen, 2010), 以及火山碎屑锥/环(Brož和Hauber, 2013)等, 其形成过程都与地下水/水冰相关, 对研究火星宜居环境和生命具有重要意义.

利用撞击坑大小-频率分布统计法, 前人获得了火星全球中等及较大规模火山形迹的活动时间(Werner, 2009; Robbins等, 2011; Xiao等, 2012). 这些年代学的研究表明: 诺亚纪时期, 剧烈喷发的火山在火星全球广泛发育, 随着整个星球内部能量的耗散, 火山作用的区域主要集中在萨希斯、艾丽丝米以及环海拉斯盆地; 随后, 环海拉斯盆地的火山在早西方纪停止了活动, 艾丽丝米地区的火山活动持续到500Ma左右; 最后只有萨希斯地区的火山活动得到延续, 活动的时间段大概是1.6Ga~100Ma. 近年来, 随着新的探测数据的获得, 特别是对洞察号着陆器获得的地震数据的分析发现, 在艾丽丝米火山东南部的刻耳柏洛斯沟(Cerberus Fossae)区域存在活动的地质构造(Giardini等, 2020). 有趣的是, 该区域展现出火星表面最年轻的火山活动形迹, 可能的最晚活动年龄为53~210ka(Horvath等, 2021). 通

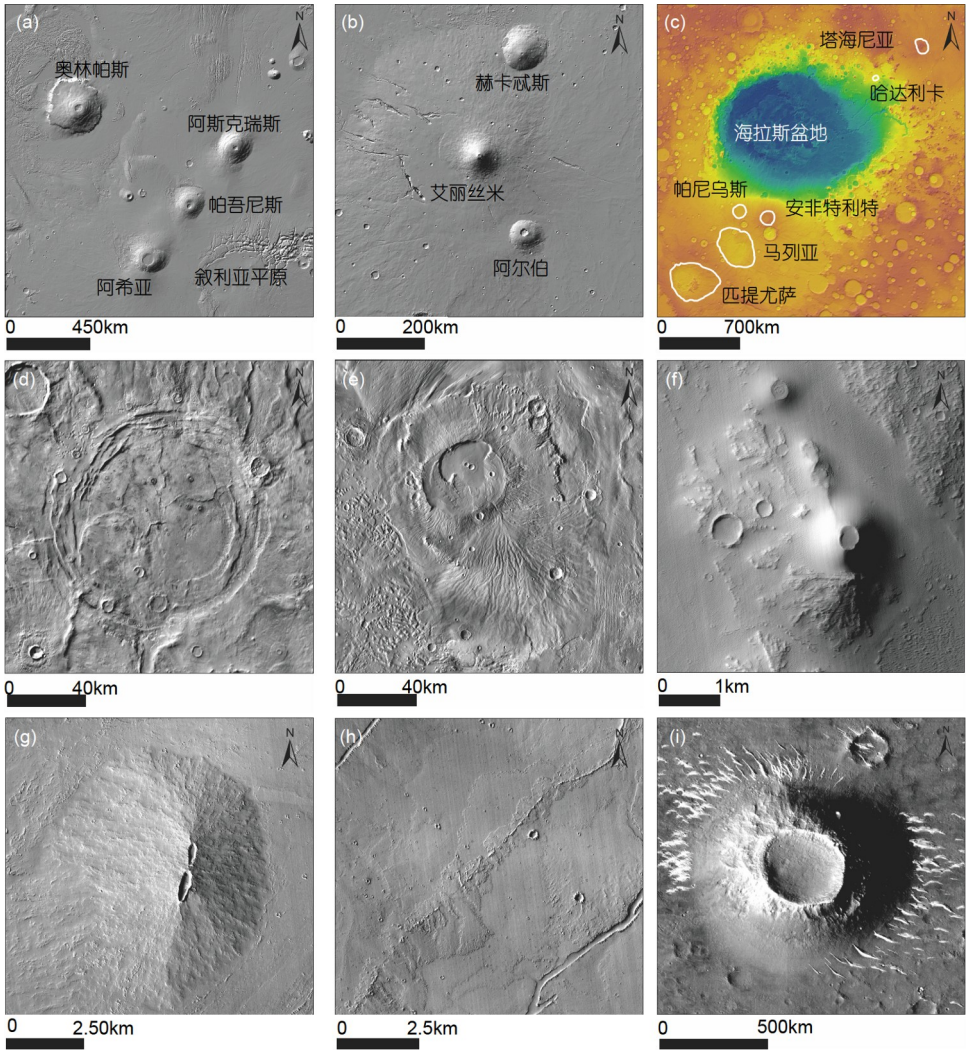

图 8　火星典型火山地貌

(a) 萨希斯火山省主要的火山建造. 底图为MOLA山体阴影图; (b) 艾丽丝米火山省主要的火山建造, 底图为MOLA山体阴影图; (c) 环海拉斯火山区主要的火山地貌, 底图为MOLA DEM覆盖于山体阴影图之上; (d) 帕尼乌斯碟形坑, 底图为THEMIS日间全球拼接图; (e) 阿波罗山, 底图为THEMIS日间全球拼接图; (f) 萨希斯火山区的疑似火山渣锥, 底图为CTX; (g) 小喷发口, 底图为CTX全球拼接图; (h) 裂隙式喷发, 底图为CTX全球拼接图; (i) “祝融号”着陆区内的凹锥, 底图为天问一号高分辨率相机数字影像图(HiRIC DIM)

过对地形、铁元素分布以及构造解析, Broquet和Andrews-Hanna(2022)大胆假设该区域仍然存在活跃的地幔柱构造.

由于大部分的中心式火山区覆盖了较厚的灰尘(Christensen等, 2001), 因此无法直接利用光谱观测获取这些火山区域的岩石成分. 利用图像和高程数据, 前人对上述大型火山开展了形貌学研究, 较低的坡度强烈指示了较低的岩浆黏度(Plescia, 2004). 基于火山形迹的形貌和年代研究, 前人对溢流式熔岩的成分进行分析: 利用火星轨道遥感获得的热红外和可见光/近红外光谱数据获得了全球(Bandfield等, 2000; Rogers和Christensen, 2007; Ody等, 2012)和局部(Christensen等, 2005; Rogers和Nazarian, 2013; Huang和Xiao, 2014)的矿物成分, 发现绝大部分的熔岩成分为玄武质成分, 由不同含量的橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、斜长石和高硅相矿物(如玻璃、沸石和层状硅酸盐)组成; 利用伽马射线谱仪, 获得了南北纬45°范围全球H、Si、Cl、K、Fe和Th元素的分布(Boynton等, 2007; El

Maarry等, 2009; Gasnault等, 2010), 发现不同的火山岩省之间具有一些元素成分的差异, 可能是不同程度火星幔熔融导致的(Baratoux等, 2011). 到目前为止, 相比玄武岩更为演化的岩浆出现在大赛提斯区域的一小片熔岩流(Christensen等, 2005). 虽然轨道探测(Carter和Poulet, 2013; Wray等, 2013)和就位探测(McLennan等, 2014; Vaniman等, 2014)发现了富含斜长石的物质, 但它们可能是暴露的斜长岩地壳残余物.

火星壳物质组成的研究一直存在较大的争议: 溢流式火山作用产生的熔岩(McEwen等, 1999; Beyer和McEwen, 2005)还是爆裂式火山作用产生的火山碎屑占主导地位(Bandfield等, 2013). 有关超级火山(Michalski和Bleacher, 2013)和南部高原古老火山上的瘤状地形(Huang和Xiao, 2014)的发现和解译支持碎屑物质占据上地壳的很大一部分, 表明爆裂式喷发形式很可能在火星早期的火山作用中占主导地位(Bandfield等, 2013; Huang和Xiao, 2014). 此外, 长久以来被认为是爆裂式喷发作用典型代表的塔海尼亚火山, 通过地形和重力数据反演, 发现在其疏松的火山喷发物之下却很可能存在大量的溢流式熔岩(Grott和Wieczorek, 2012). 因此, 火星上地壳中较为致密的熔岩和较为疏松的火山碎屑的大致比例以及它们各自在水平和垂直方向的分布需要进一步深入研究.

3 外太阳系天体火山活动

外太阳系行星主要由氢、氦等气体组成, 没有观测到相关的火山活动. 但其卫星通常由岩石和冰等固态物质组成, "旅行者""新视野"和"伽利略"等探测器和地基望远镜对外太阳系的卫星进行了详细探测, 获取的大量影像数据表明木卫一表面具有活跃的火山活动, 在木星潮汐加热的作用下, 大量岩浆从木卫一内部喷出, 形成大型的火山口和广阔的熔岩流. 此外, 在诸如木卫二(Europa)、土卫二(Enceladus)、海卫一(Triton)、谷神星(Ceres)、冥王星等冰卫星和矮行星表面存在冰火山喷发, 可能是冰下海洋中的水和气体在潮汐力作用下沿冰裂隙喷出, 这对天体生物学研究具有重要意义.

3.1 木卫一

木卫一(Io)是木星的卫星之一, 与月球大小相近(半径1822km), 但密度(3528kg m^{-3})高于月球, 表面存在大量含硫物质. 木卫一是太阳系已知火山活动最为剧烈的天体, 热流是现今地球的约30倍, 大约55%的热流源于火山热点. 从地基可见光/近红外影像和探测器近距离获取的增强热发射数据上, 可观测到木卫一表面有大量正在活动的火山中心(de Pater等, 2021). 这些火山在喷发类型、持续时间和喷发强度等方面, 存在较大差异(Davies等, 2001). 根据探测器获取的多源数据, 在木卫一表面已经识别到250多个火山中心(Veeder等, 2012, 2015), 其中包括大量火山作用相关的热点和碟形坑(Paterae; Hamilton等, 2013)(图9).

木卫一的火山地貌和热流并不是随机分布的, 前人研究发现火山中心、热点和山脉具有非常复杂的空间分布特征(Keane等, 2018; de Pater等, 2021), 众多学者认为这种特殊的分布模式与木卫一内部潮汐热的释放位置和释放形式有关. 木卫一上同一区域的一系列大型火山相继喷发(de Pater等, 2016, 2021), 表明这些火山区的岩浆房埋深相近或某一火山活动触发的地震将它们联系在一起. 目前, 木卫一的数据过少而无法进行统计学分析来解释这一现象, 但在前人的研究中报道了地球的某一次火山活动触发了几百千米外另一座火山的喷发(Linde和Sacks, 1998). 因此, 木卫一的火山活动可能也具有连锁效应.

岩浆突然的剧烈喷发形成熔岩喷泉, 其喷发持续时间短且喷发前的热异常低, 在时间采样频率较低的地基望远镜上很难被捕捉到. 木卫一缺乏大气层, 即使岩浆中挥发分含量很低也可能产生猛烈喷发(Wilson和Head, 1981), 伽利略号探测器于1999年11月和2000年2月观测到了特瓦史塔碟形坑(Tvashtar Paterae)正在喷发的熔岩喷泉(图10a和10b), 发现岩浆从25km长的裂缝中喷出, 喷发高度可达~1km(Keszthelyi等, 2001; Milazzo等, 2005; Davies, 2010), 证明了木卫一表面突发的放热事件与剧烈喷发的熔岩喷泉有关. 地基望远镜观测到木卫一表面活动熔岩流的温度为1200~1500K(Johnson等, 1988; Veeder等, 1994), 与地球上的玄武岩岩浆(1300~1450K)相近; 伽利略号探测器观测到彼兰碟形坑(Pillan Patera)的喷发(McEwen等, 1998; Davies等, 2001)(图10c和10d), 产生的熔岩温度约为1825K(McEwen等, 1998), 与地球上的超基性岩浆温度(1700~1900K)相近; 地基望远镜于2013年观测到编号为201308C(de Kleer等, 2014)(图10e~10h)的另一

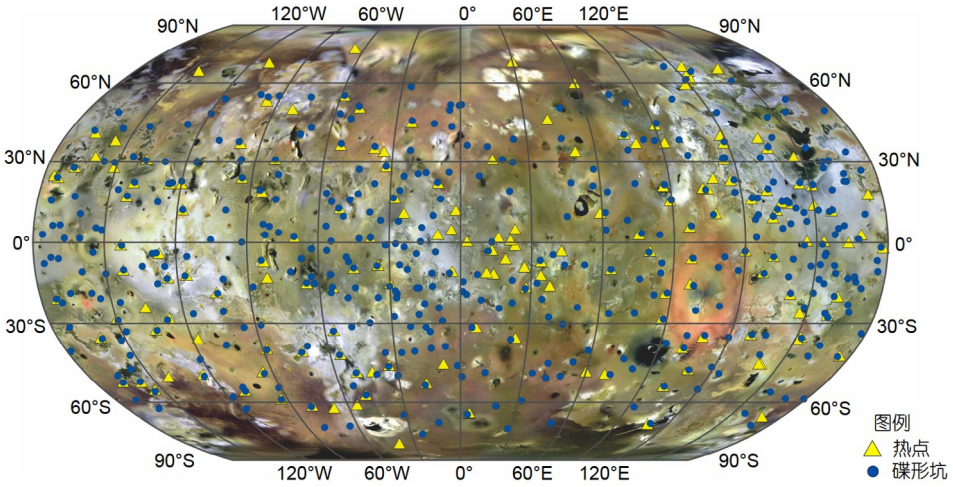

图 9　木卫一表面热点和似火山口碟形坑的分布图

据Hamilton等(2013). 底图为木卫一伽利略-旅行者号全球拼接图

起可能的高温超镁铁质火山喷发. 前人利用1.98~4.07μm的光谱分析发现木卫一表面广泛分布了二氧化硫的霜(Carlson等, 1997; McEwen等, 1998; Laver和de Pater, 2009). 进一步的研究表明较粗颗粒的二氧化硫霜分布在赤道附近, 而较细的颗粒分布在较高的纬度(Geissler等, 2001; Laver和de Pater, 2009), 这些物质很可能都是通过火山喷发形成的.

木卫一和地球是太阳系中当前仅有的能够观测到具有活动的硅酸盐火山喷发的天体(Tyler等, 2015), 地球的火山活动依靠放射性元素释放的能量, 而木卫一表面的火山喷发则主要依靠与木星之间潮汐作用的摩擦生热. 传统的潮汐加热模型假定木卫一内部主要为固态, 所产生的热量几乎全部扩散到了固态层内; 新的研究则认为潮汐作用产生的热量主要扩散到液态层中, 即木卫一内部不是完全固态的, 可能存在类似岩浆洋的层位(de Pater等, 2021). 相比于传统的固态层, 木卫一次表层液态层位的存在使得潮汐加热具有多种扩散模式, 可能更有利于表面热点火山的发育.

目前, 关于木卫一的研究尚存在以下科学问题: 木卫一核、幔和岩石圈的范围, 物质组成和存在的形态, 以及其次表层是否存在岩浆洋? 木卫一热流的规模和空间分布特征是怎样的, 是否能够通过表面热流和地质特征反映出来? 木卫一潮汐热产生于其内部的什么位置, 软流圈、深部地幔还是岩浆洋? 木卫一岩浆的物质组成和化学性质如何, 超镁铁质、镁铁质还是硫化物, 与空间位置是否有关联? 木卫一是否处于热均衡状态? 木卫一上氯化钠和氯化钾是如何形成的, 其与二氧化硫为何不分布在同一区域? 木卫一的火山喷发柱与大气圈会发生怎样的相互作用? 隐秘的火山活动在木卫一大气圈的形成过程中发挥怎样的作用(de Pater等, 2021)?

3.2　冰卫星

外太阳系的巨行星系统存在大量的冰卫星. 如同在有硅酸盐岩石外壳的行星上, 熔融的岩浆从灼热的行星内部上涌并在表面喷发形成火山, 在以冰这种广义岩石作为外壳的行星上, 液态或气态水(往往携带固态物质)从内部上涌并在表面喷发便可以形成低温火山(Cryovolcano)或冰火山(Ice Volcano). 这种深部的含冰物质上涌喷出所造成的冰火山作用不断地重塑着行星的表面, 并揭示行星的内部结构和热演化历史(Kargel, 1991; Schenk等, 2001; Quick等, 2017). 在太阳系内的矮行星和许多冰卫星上, 例如谷神星、木卫二、木卫三(Ganymede)、土卫二、土卫六(Titan)、天卫五(Miranda)、海卫一、冥卫一(Charon)等, 都有着冰火山活动(Geissler, 2015). 旅行者2号的数据揭示了首个有着正在活跃的冰火山的星球——海卫一. 这颗冰卫星上有着间歇泉一样的热柱, 向外界喷射着氮气. 卡西尼-惠更斯号探测器在土卫二上发现了壮观的盐水喷泉, 在土卫六上发现了可能是从内部喷发上来的甲烷

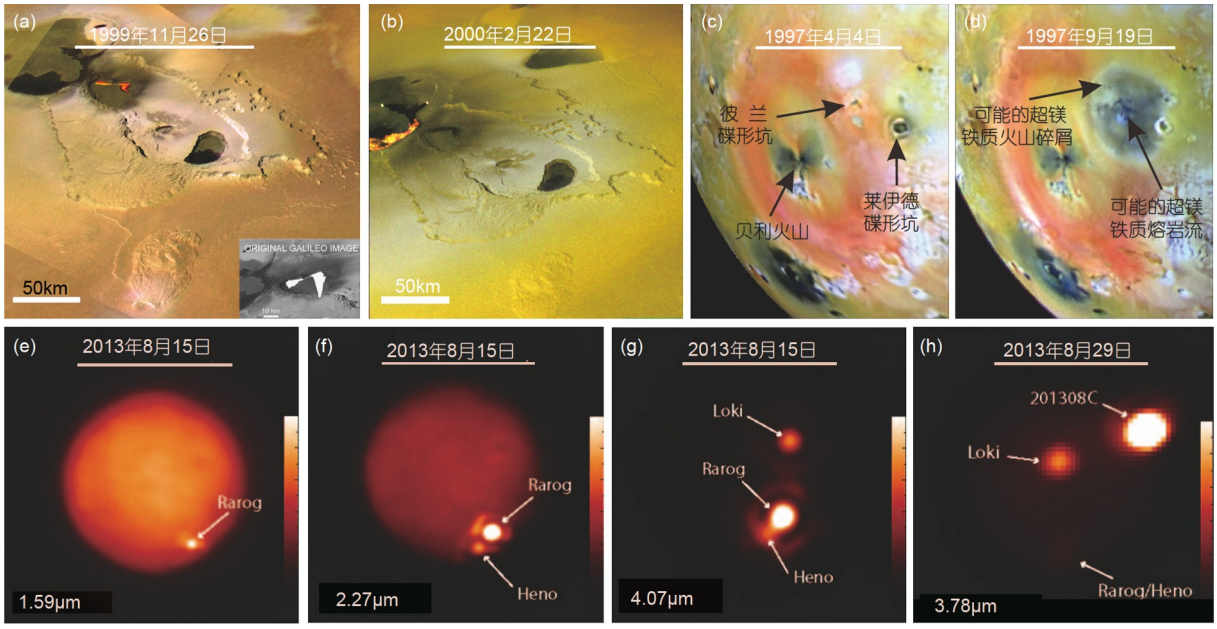

图 10　木卫一表面典型火山活动

(a)、(b) 特瓦史塔碟形坑1999和2000年的两次熔岩喷泉喷发. (a)中的熔岩流是基于右下角真实数据绘制的插画. 图源分别为NASA PIA02545和PIA02550. (c)、(d) 彼兰碟形坑喷发前后的对比图. 改自NASA PIA00744. (e)~(h) 木卫一在不同热红外波段的地基遥感图像, (e)~(g)由W. M. Keck天文台的10m凯克Ⅱ望远镜于2013年8月15日拍摄, (h)由北双子座望远镜于2013年8月29日拍摄, 展示了阿罗格、埃诺、洛基碟形坑和201308C喷发时木卫一表面热红外发射特征, 图右侧的色条表示热发射的强度. 改自NASA PIA18656

湖泊. 哈勃太空望远镜也在木卫二上面观测到了一个喷射气态水的热柱. 而在其他星球上, 研究者也发现了许多冰火山作用的痕迹. 这些冰火山作用分布广泛, 而且极为多变. 有一些冰火山产生的地形与地球上硅酸盐火山相似, 有着隆起的火山、破火山口、凝固的岩浆湖、岩浆流、裂隙火山屑(Breached Cinder)、复合火山(Stratovolcanoes)等; 而另一些星球上却很难找到火山的痕迹(Kargel, 1995). 冰火山作用基本上都是由液态水溶液或泥浆喷发所致. 即使在地壳由固体氮组成的冰卫星上, “冰岩浆”的主要成分仍是水. 非极性和弱极性分子(如N_2、CH_4、CO、CO_2等)构成的液体可能在一些冰卫星上也有喷发, 但是没有水的话, 这些物质无法形成稳定的、坚固的固体物质, 从而无法在地质时间尺度抵御升华. 冰火山作用在天卫和海卫上可以形成厚达数百乃至数千米的“冰岩浆”层, 而木卫和土卫上“冰岩浆”往往可以覆盖一个平原而难以积累得非常厚. 这种现象说明了木卫和土卫上的“冰岩浆”在成分上可能有着更多的水, 从而有着较低的黏度, 而“天卫”和“海卫”上的冰岩浆可能更多是泥浆状, 有着其他挥发分的水合物以及硅酸盐. 此外, 笼形气体水合物(Clathrate Hydrates)可能在与冰火山相关的多方面起到重要作用. 有研究认为大量水合物可能存在于土卫六(Lunine和Stevenson, 1985)、冥王星(Kamata等, 2019), 以及谷神星(Fu等, 2017)的壳层中.

冰火山作用的发生通常被认为需要满足两个条件: (1) 内部可以产生液体(熔体), (2) 这些液体(熔体)可以迁移到星球表面. 掺杂盐降低溶液的三相点是让冰在更低的温度下熔融的重要方法. 此机制可能在谷神星和冥王星等, 除日光辐射加热以外无其他热源的冰行星上的冰火山活动中起重要作用(Castillo-Rogez等, 2018). 让星球内部产生液体的加热机制有许多, 其中最重要的几种能量来源是重力、放射性元素和潮汐. 此外, 太阳能的加热也在海卫一的冰火山作用中扮演了重要角色. 因此, 从行星角度来讲, 能决定冰火山作用产生与否的因素有大小、成分(影响放射性元素的加热)、在太阳系中的位置(影响表面温度)、从形成至今的轨道历史(影响潮汐加热). 在21世纪以来的几次深空探测获取了关于冰行星(冰卫星)的大量观测结果, 下面将介绍木卫二、土卫二上冰火山研究的一些进展.

3.2.1　木卫二

木卫二半径为1565km, 主要由硅酸盐岩石组成, 并掺杂了少量较轻的物质. 在旅行者号探测器探测之前, 人们就通过地面雷达对木卫二等冰天体进行了观测, 并初步推断木卫二上可能存在水冰. 1979年, 旅行者1号、旅行者2号相继抵达木星, 对木星的伽利略卫星进行了更详细的观察. 根据旅行者的数据, 木卫二的大部分表面被归类为斑驳的地形或平原. 木卫二大部分表面较为明亮并且被数十千米宽的巨大暗色条纹交叉分割. 大量学者们都将木卫二表面的地形归结于广泛的冰火山作用(Lucchitta和Soderblom, 1982; Squyres等, 1983).

1996年伽利略号探测器飞抵木卫二, 获得了更多的数据, 并掀起了学者们对木卫二研究的热潮. 基于伽利略号的数据, 学界都确信木卫二冰壳地下海洋的存在(Khurana等, 1998; Kivelson等, 2000). 地下海洋的存在让学者们更倾向于将木卫二的地形归结于冰火山作用, 其中三种地形被认为有可能是冰火山活动造成的(Fagents, 2003): (1) 可能与岩浆流相关的长叶状的地形(图11a); (2) 可能是熔岩穹丘的穹窿地形(图11b); (3) 可能是低黏度岩浆喷发的低反照率的平滑地形(图11c). 伽利略号探测之后, 也有学者利用哈勃太空望远镜对木卫二进行观测, 意图找到冰火山活动的证据. Roth等(2014)发现了木卫二上有局域的水汽光解产物的放射谱. Sparks等(2016, 2017)在木卫二凌木时观测到了连续的水汽的吸收谱. 这些观测都指示当前木卫二上存在着液态水的喷发, 极可能是活跃的冰火山活动. 冰火山的存在为连通木卫二的表面与地下海洋提供了一个简单通道, 对木卫二宜居环境的存在至关重要.

3.2.2　土卫二

土卫二是土星的第六大卫星, 也是太阳系中最亮的卫星. 它的平均直径为505km, 是一个被冰覆盖的卫星. 旅行者2号在土卫二上观测到了至少五种不同的地形, 撞击坑地形、平坦地形、平坦地形附近的山脊、大量的线性地缝和悬崖. 鉴于在平坦地区分布的撞击坑较少, 学者推测这些平坦地区的形成时间可能只有几亿年. 所以, 在较近的一段地质时间里, 土卫二上必然发生了冰火山活动(Kargel和Pozio, 1996). 土卫二的冰火山作用首个确凿证据来自卡西尼-惠更斯号探测器. 巨大的羽流(Plume)从这个星球的南极喷发, 它们每秒向空中喷出200kg的物质, 速度高达1.2km s^{-1}, 最远可喷射500km. 这些喷泉是从被称作“虎纹”的裂隙处喷出的(图12). 这些裂隙连接处的冰山脊比周围温暖得多(最高达180K). 喷发的羽流随着土卫二的轨道有着明暗变化, 在远地点时最明亮. 这说明作用在裂隙上的潮汐力影响着喷发. 卡西尼号3次飞过羽流, 对其成分做了直接测量: 喷出的气态物质包含90%的H_2O、5%的CO_2、1%的CH_4、1%的NH_3, 以及少量的氢气和有机分子; 固态物质主要是盐水冻结成的冰, 含盐量为1%的NaCl(Hansen等, 2011; Waite等, 2017). 由于在冻结过程中盐会从冰排出, 而羽流中含盐说明这些羽流不是来自于星球表面的冰壳, 而是直接从冰壳下的液态水喷发而出的. 结合喷出的有机分子, 许多学者怀疑土卫二的地下海洋可能是一个宜居的环境. 这是太阳系内地外生命探索的重要一步, 土卫二的海洋世界很有可能成为潜在的地外生命绿洲.

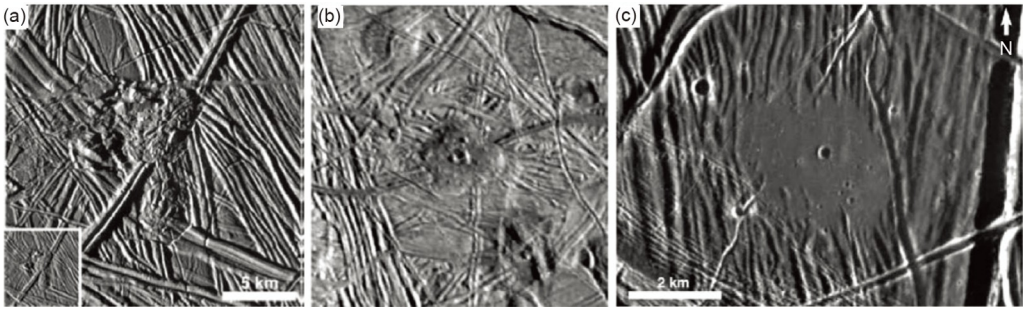

图 11　木卫二地形

(a) 明显的叶状地形(35°N, 88°W); (b) 一个比周围地形高的穹窿地形(12°N, 272°W), 图片分辨率为200m/像素; (c) 低反照率、平滑的物质占据一块低地形(6°N, 327°W). 图片来自Fagents(2003), Copyright © 2003 John Wiley and Sons

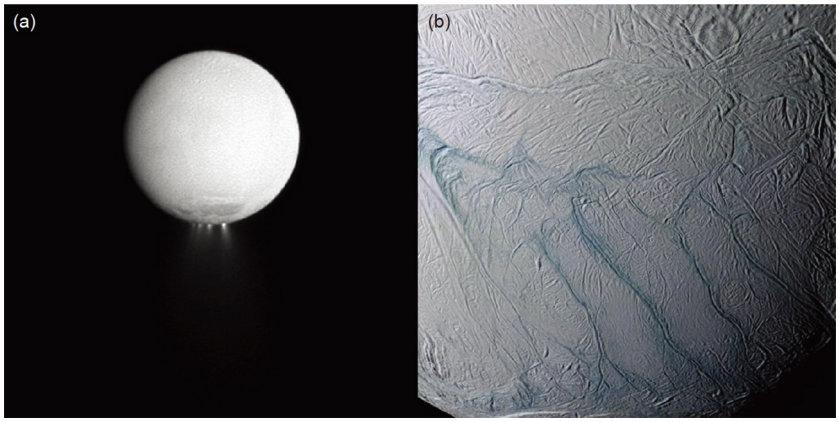

图 12　土卫二Enceladus

(a) 从南极喷发的盐水羽流; (b) 虎纹裂隙. 图片来自NASA/JPL-Caltech/SSI

3.3　矮行星

太阳系有五个公认的矮行星，一个位于小行星带内，四个位于柯伊伯带内. 其中只有小行星带内的谷神星和柯伊伯带内冥王星有专门的探测任务，获得了较多的探测数据，展示了矮行星火山活动的一些重要特征.

3.3.1　谷神星

谷神星是唯一位于小行星带的矮行星，同时也是小行星带中最大的天体. 它的直径约为950km, 距离太阳2.8AU. 研究者认为, 尽管它的最外一层表面由硅酸盐岩石构成，但其浅层地下应由30~40%冰与60~70%岩石的混合物构成(Bland等, 2016). 而在其更深部, 从地下到岩石内核之间，有可能存在着由更纯的冰形成的“地幔”层(Castillo-Rogez和McCord, 2010). 主流观点认为谷神星幔层主要由水合硅酸盐成分组成，在上幔层的岩石孔隙中可能含有液态水(Castillo-Rogez等, 2020), 在壳幔的边界可能存在局域的卤水液体存储区(Raymond等, 2020). 2015年，黎明号探测器入轨谷神星，让谷神星成为了首个被在轨探测研究的太阳系冰行星. 黎明号在谷神星表面发现了一座约4km高的圆拱型山峰. 这座名为阿胡纳山(Ahuna Mons)的山峰被认为是一座冰火山(图13).

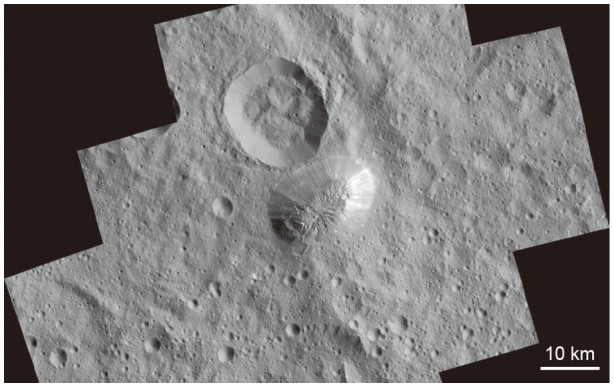

图 13　黎明号拍摄的谷神星上的阿胡纳山

阿胡纳山直径约20km，平均高度约4km. 数据来自NASA/JPL-Caltech, 该图方向为北上

许多学者对阿胡纳火山的生命周期进行了研究(例如, Ruesch等, 2016). 他们普遍猜测冰火山比谷神星上的冰地壳要软, 在重力作用下, 黏性松弛会使冰火山逐渐变得扁平，并最终与周围地形融为一体而难以分辨(Sori等, 2017). 基于此假设, Sori等(2018)在谷神星表面找到了多个可能曾是冰火山的圆拱，并估算了它们的年龄，认为“冰岩浆”的平均上涌速率约为$10^4 m^3\ a^{-1}$. 此外, Ruesch等(2019)分析了由阿胡纳山所影响的重力异常数据, 发现存在区域性的地幔上升, 并认为这可能是一个地幔热柱. 这种地幔热柱可能是由岩石与水混合形成. 学者认为这种泥浆状物质广泛存在于谷神星的地幔中，并进行着对流(Travis等, 2018), 从而引发了谷神星上的冰火山作用. 许多研究也认为气体水合物可以作为谷神星壳层中的低密度高强度组分, 可能大大减慢谷神星散热过程, 从而有助于维持内部液体的存在，并影响到其内部结构(Castillo-Rogez等, 2019; Hesse和Castillo-Rogez, 2019)，而当其中的气体释放时，会强烈推动和影响冰火山过程(Quick等,

2019). 阿胡纳山的存在和唯一展示了谷神星上独特的冰火山作用, 而谷神星的演化历史不但是科学家理解冰卫星演化的重要参考, 也可以从一个不同的角度帮助理解类地行星的演化.

3.3.2 冥王星

冥王星是太阳系柯伊伯带中的矮行星, 是太阳系内已知体积最大、质量第二大的矮行星. 它仅有月球质量的六分之一、月球体积的三分之一. 它的半径约为1188km, 有一个岩石的核心, 而最外层300km主要由岩石和冰所组成(Grundy等, 2016; McKinnon等, 2017). 2015年7月新视野号飞过了冥王星系统, 获取了大量的图像和成分数据. 科学家们发现这颗矮行星并不是一个完全冻结的星球, 它有着大量的山脉和高原(如Voyager Terra), 以及一个广阔而平坦的大平原(Sputnik Planitia), 预示着这颗星球上有构造活动、冰川运动甚至冰火山活动(Moore等, 2016). 在35~60K的表面温度和~10μbar(1bar=10^5Pa)的表面气压下, 冥王星表面的水、甲烷、一氧化碳、氨气和氮气等都大幅低于它们的三相点温度, 冻结成了冰. 在这样的温压条件下, 纯水冰是十分坚硬的, 通常会形成无法流动的基岩. 而当其他挥发分(如氨气)或盐加入水冰后, 水冰才会在较短的地质时间尺度上变得可流动, 就像地球上的地质活动一样(Cruikshank等, 2019). 最近, Singer等(2022)在冥王星的表面发现了许多冥王星独有的圆形结构, 至少有7km高和100km宽. 他们认为这些结构表明存在与冰火山有关的地质活动, 例如Wright Mons. 通过光谱研究发现, Wright Mons区域富含挥发分, 包括水冰、甲烷和氮气(图14a~14e). 过去科学家广泛认为冥王星在很久以前就失去了大部分内部热量, 而冰火山的发现说明它能保持足够能量诱发其历史上相当晚期的地质活动. 这意味着也许太阳系更多的冰天体都存在冰火山活动, 而科学家们将需要重新审视冰天体上的热量来源和演化历史.

在对冰行星和冰卫星上冰火山作用的研究中, 观测数据都来自于天体表面, 而未来着陆探测和采样都极为困难, 因此大量关于冰体流动的模型和模拟都依赖于冰的流变学性质. 理解了冰的流变学性质, 才能进一步探索这些冰行星和冰卫星的成分、结构和演化历史. 尽管冰有着许多的晶型, 但是在200MPa以下、72~273K之间, 冰Ih相即六方晶系的冰I相, 为唯一的稳定相. 在太阳系中, 除了木卫三深层可能存在高压相的冰II, 冥王星表面低温区域可能存在低温相的冰XI, 所有其他天体的冰都是冰Ih. 尽管学界对纯冰的流动行为已经有了较为深入的研究和显著的成果(Glen, 1952, 1955; Goldsby和Kohlstedt, 2001), 而行星冰往往不纯. 冰可以和砂石类的固体颗粒杂质混合在一起, 也可以和甲烷、氮气等挥发分的冰混合在一起. 此外, 甲烷、氨气等也可以和冰(水)形成气体水合物, 这类"冰"的结构和变形也在冰火山作用中扮演了重要的作用. 因此, 想要了解这些冰体的运动、黏性松弛、内部结构等科学问题, 就需要知道杂质对冰流动的影响(Durham等, 1992; Qi等, 2018). 这是未来行星科学中冰物理学研究的一个重要方向.

4 结论和展望

月球是目前为止唯一有原位样品返回的星球, Apollo、Luna和嫦娥五号任务共采集月球样品约384kg. 基于这些样品, 提出了月球岩浆洋模型, 揭示了月幔性质和火山喷发过程. 然而, 现有的样品并不能完全解决月球火山学中的所有关键科学问题, 其中最为关键的问题包括月球火山活动的结束时间, 不规则月海斑块和环形凹陷穹丘到底是雨海纪火山活动的产物还是新近火山喷发的产物? 哪里是月球上最年轻的玄武岩单元? 只有在这些关键地区的采样返回任务才能解决这几个关键问题.

火星的火山活动在其地质演化历史中对气候演变和生命宜居性的影响是未来需要重点关注的科学和探测主题, 包括火山喷发产生的岩浆对全球水量的贡献、火山喷发释放的二氧化碳和甲烷等温室气体是否能够使火星形成温暖气候条件, 以及火星火山活动历史中是否存在早期爆裂式喷发向晚期溢流式喷发的演化等.

目前对水星火成岩成分的认识相对局限, 信使号元素探测的分辨率和探测深度尚且无法精细地揭示局部的火成岩物质成分的差别. 此外, 水星最早期的热演化形式, 特别是火山活动的形成期次、活动样式、喷发通量等信息依然存在大量未知. 因此, 未来水星探测任务应侧重于高分辨率的表面物质成分探测, 开展水星表面样品的原位分析和采样返回探测, 将极大提升对水星火成岩的物质组成、熔岩的物理化学性质以

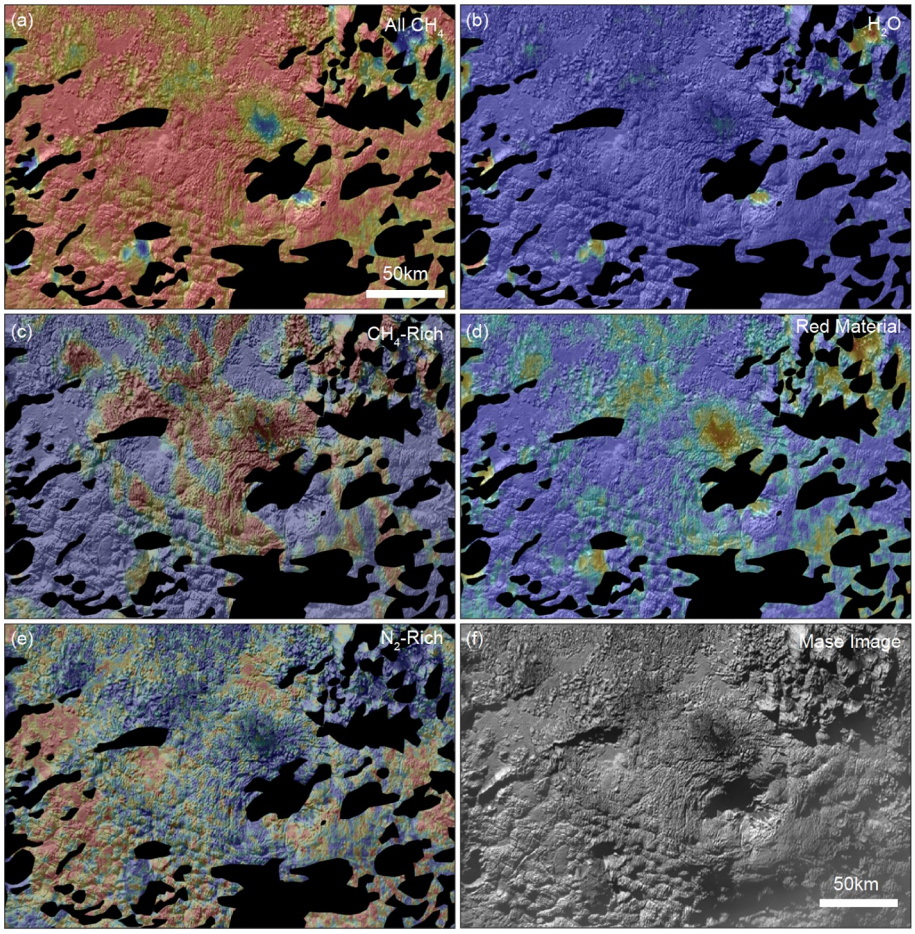

图 14　利用新视野号探测器上LEISA光谱数据绘制的冥王星Wright Mons区域成分图

(a) 甲烷, (b) 水冰, (c) 甲烷比氮气多的区域, (d) 有机物质, (e) 氮气比甲烷多的区域, (f) 灰度地形图. 在所有图中, 更红的颜色代表更强的吸收, 指示该物质含量更多. 图片来自于Singer等(2022), Copyright © 2022 the Author(s)

及熔体的形成机制和演化历程的认识.

由于表面恶劣的环境(高压、高温), 金星是内太阳系最难着陆的星球之一, 目前仅有苏联的数次任务成功着陆于金星表面并采集了少量数据. 除此之外, NASA的麦哲伦号成功环绕金星, 并获得了大量数据, 但由于金星浓密的大气, 对金星表面的研究主要基于雷达数据, 存在一定多解性. 在麦哲伦号之后, 金星的探测并不十分活跃, 不过未来NASA和ESA都有任务探测金星, 如VERITAS、DAVINCI+和EnVision. 金星的探测将在21世纪20年代末期迎来一次高潮, 从而揭示这颗与地球最相似行星的火山特征.

冰作为宇宙中最为常见的化合物H_2O的固体形态, 构成了太阳系雪线之外的许多天体主要成分. 冰火山作用重塑着这些冰天体的表面, 是研究这些天体构造和演化的重要研究对象和途径, 同时, 这类研究也可以通过对比增进我们对地球上火山作用的认识, 是行星地质学、行星物理学和天体生物学研究的一个重点方向.

致谢　感谢惠鹤九教授和三位匿名审稿专家提出的宝贵修改意见.

参考文献

刘守偈, 周琴, 李秋立, 胡森, 杨蔚. 2021. 嫦娥五号样品揭示月球20亿年前火山活动及源区性质. 中国科学: 地球科学, 51: 2048–2055

乔乐, 陈剑, 凌宗成. 2021. 月球火山作用的地貌学特征. 地质学报, 95: 2678–2691

肖龙, Greeley R. 2008. 火星的火山作用特征与演化历史. 矿物岩石地球化学通报, 27: 60–61
肖龙. 2013. 行星地质学. 北京: 地质出版社. 495
Bandfield J L, Edwards C S, Montgomery D R, Brand B D. 2013. The dual nature of the martian crust: Young lavas and old clastic materials. Icarus, 222: 188–199
Bandfield J L, Hamilton V E, Christensen P R. 2000. A global view of Martian surface compositions from MGS-TES. Science, 287: 1626–1630
Baratoux D, Toplis M J, Monnereau M, Gasnault O. 2011. Thermal history of Mars inferred from orbital geochemistry of volcanic provinces. Nature, 472: 338–341
Barboni M, Boehnke P, Keller B, Kohl I E, Schoene B, Young E D, McKeegan K D. 2017. Early formation of the Moon 4.51 billion years ago. Sci Adv, 3: e1602365
Besse S, Doressoundiram A, Barraud O, Griton L, Cornet T, Muñoz C, Varatharajan I, Helbert J. 2020. Spectral properties and physical extent of pyroclastic deposits on Mercury: Variability within selected deposits and implications for explosive volcanism. J Geophys Res-Planets, 125: E2018JE005879
Besse S, Doressoundiram A, Benkhoff J. 2015. Spectroscopic properties of explosive volcanism within the Caloris basin with MESSENGER observations. J Geophys Res-Planets, 120: 2102–2117
Beyer R A, McEwen A S. 2005. Layering stratigraphy of eastern Coprates and northern Capri Chasmata, Mars. Icarus, 179: 1–23
Bland M T, Raymond C A, Schenk P M, Fu R R, Kneissl T, Pasckert J H, Hiesinger H, Preusker F, Park R S, Marchi S, King S D, Castillo-Rogez J C, Russell C T. 2016. Composition and structure of the shallow subsurface of Ceres revealed by crater morphology. Nat Geosci, 9: 538–542
Bleacher J E, Greeley R, Williams D A, Cave S R, Neukum G. 2007. Trends in effusive style at the Tharsis Montes, Mars, and implications for the development of the Tharsis province. J Geophys Res-Planets, 112: E09005
Bondarenko N V, Head J W, Ivanov M A. 2010. Present-day volcanism on Venus: Evidence from microwave radiometry. Geophys Res Lett, 37: L23202
Boynton W V, Taylor G J, Evans L G, Reedy R C, Starr R, Janes D M, Kerry K E, Drake D M, Kim K J, Williams R M S, Crombie M K, Dohm J M, Baker V, Metzger A E, Karunatillake S, Keller J M, Newsom H E, Arnold J R, Brückner J, Englert P A J, Gasnault O, Sprague A L, Mitrofanov I, Squyres S W, Trombka J I, d'Uston L, Wänke H, Hamara D K. 2007. Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the low- and mid-latitude regions of Mars. J Geophys Res, 112: E12
Braden S E, Stopar J D, Robinson M S, Lawrence S J, van der Bogert C H, Hiesinger H. 2014. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. Nat Geosci, 7: 787–791
Broquet A, Andrews-Hanna J C. 2022. Is there an active mantle plume beneath Elysium Planitia? Houston: 53rd Lunar and Planetary Science Conference. Abstract#2351
Brož P, Bernhardt H, Conway S J, Parekh R. 2021. An overview of explosive volcanism on Mars. J Volcanol Geotherm Res, 409: 107125
Brož P, Čadek O, Hauber E, Rossi A P. 2015. Scoria cones on Mars: Detailed investigation of morphometry based on high-resolution digital elevation models. J Geophys Res-Planets, 120: 1512–1527
Brož P, Hauber E. 2013. Hydrovolcanic tuff rings and cones as indicators for phreatomagmatic explosive eruptions on Mars. J Geophys Res-Planets, 118: 1656–1675
Byrne P K, Ostrach L R, Fassett C I, Chapman C R, Denevi B W, Evans A J, Klimczak C, Banks M E, Head J W, Solomon S C. 2016. Widespread effusive volcanism on Mercury likely ended by about 3.5 Ga. Geophys Res Lett, 43: 7408–7416
Byrne P K, Whitten J L, Klimczak C, McCubbin F M, Ostrach L R. 2018. The volcanic character of Mercury. In: Solomon S C, Nittler L R, Anderson B J, eds. Mercury: The View After MESSENGER. Cambridge: Cambridge Planetary Science. 287–323
Byrne P K. 2020. A comparison of inner Solar System volcanism. Nat Astron, 4: 321–327
Carlson R W, Smythe W D, Lopes-Gautier R M C, Davies A G, Kamp L W, Mosher J A, Soderblom L A, Leader F E, Mehlman R, Clark R N, Fanale F P. 1997. The distribution of sulfur dioxide and other infrared absorbers on the surface of Io. Geophys Res Lett, 24: 2479–2482
Carter J, Poulet F. 2013. Ancient plutonic processes on Mars inferred from the detection of possible anorthositic terrains. Nat Geosci, 6: 1008–1012
Castillo-Rogez J C, Hesse M A, Formisano M, Sizemore H, Bland M, Ermakov A I, Fu R R. 2019. Conditions for the long-term preservation of a deep brine reservoir in Ceres. Geophys Res Lett, 46: 1963–1972
Castillo-Rogez J C, McCord T B. 2010. Ceres' evolution and present state constrained by shape data. Icarus, 205: 443–459
Castillo-Rogez J C, Neveu M, Scully J E C, House C H, Quick L C, Bouquet A, Miller K, Bland M, De Sanctis M C, Ermakov A, Hendrix A R, Prettyman T H, Raymond C A, Russell C T, Sherwood B E, Young E. 2020. Ceres: Astrobiological target and possible ocean world. Astrobiology, 20: 269–291
Castillo-Rogez J, Neveu M, McSween H Y, Fu R R, Toplis M J, Prettyman T. 2018. Insights into Ceres's evolution from surface composition. Meteorit Planet Sci, 53: 1820–1843
Charlier B, Grove T L, Zuber M T. 2013. Phase equilibria of ultramafic

compositions on Mercury and the origin of the compositional dichotomy. Earth Planet Sci Lett, 363: 50–60

Che X, Nemchin A, Liu D, Long T, Wang C, Norman M D, Joy K H, Tartese R, Head J, Jolliff B, Snape J F, Neal C R, Whitehouse M J, Crow C, Benedix G, Jourdan F, Yang Z, Yang C, Liu J, Xie S, Bao Z, Fan R, Li D, Li Z, Webb S G. 2021. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. Science, 374: 887–890

Christensen P R, Bandfield J L, Hamilton V E, Ruff S W, Kieffer H H, Titus T N, Malin M C, Morris R V, Lane M D, Clark R L, Jakosky B M, Mellon M T, Pearl J C, Conrath B J, Smith M D, Clancy R T, Kuzmin R O, Roush T, Mehall G L, Gorelick N, Bender K, Murray K, Dason S, Greene E, Silverman S, Greenfield M. 2001. Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results. J Geophys Res-Planets, 106: 23823–23871

Christensen P R, McSween Jr H Y, Bandfield J L, Ruff S W, Rogers A D, Hamilton V E, Gorelick N, Wyatt M B, Jakosky B M, Kieffer H H, Malin M C, Moersch J E. 2005. Evidence for magmatic evolution and diversity on Mars from infrared observations. Nature, 436: 504–509

Cruikshank D P, Umurhan O M, Beyer R A, Schmitt B, Keane J T, Runyon K D, Atri D, White O L, Matsuyama I, Moore J M, McKinnon W B, Sandford S A, Singer K N, Grundy W M, Dalle Ore C M, Cook J C, Bertrand T, Stern S A, Olkin C B, Weaver H A, Young L A, Spencer J R, Lisse C M, Binzel R P, Earle A M, Robbins S J, Gladstone G R, Cartwright R J, Ennico K. 2019. Recent cryovolcanism in virgil fossae on Pluto. Icarus, 330: 155–168

Davies A G, Keszthelyi L P, Williams D A, Phillips C B, McEwen A S, Lopes R M C, Smythe W D, Kamp L W, Soderblom L A, Carlson R W. 2001. Thermal signature, eruption style, and eruption evolution at Pele and Pillan on Io. J Geophys Res-Planets, 106: 33079–33103

Davies A. 2010. Terrestrial lava lake physical parameter estimation using a silicate cooling model-implications for a return to the volcanic moon, Io. Vienna: EGU General Assembly Conference. 12: 5659

de Kleer K, de Pater I, Davies A G, Ádámkovics M. 2014. Near-infrared monitoring of Io and detection of a violent outburst on 29 August 2013. Icarus, 242: 352–364

de Pablo M, Komatsu G. 2009. Possible pingo fields in the Utopia basin, Mars: Geological and climatical implications. Icarus, 199: 49–74

de Pater I, Davies A G, Marchis F. 2016. Keck observations of eruptions on Io in 2003–2005. Icarus, 274: 284–296

de Pater I, Keane J T, de Kleer K, Davies A G. 2021. A 2020 observational perspective of Io. Annu Rev Earth Planet Sci, 49: 643–678

Denevi B W, Ernst C M, Meyer H M, Robinson M S, Murchie S L, Whitten J L, Head J W, Watters T R, Solomon S C, Ostrach L R, Chapman C R, Byrne P K, Klimczak C, Peplowski P N. 2013. The distribution and origin of smooth plains on Mercury. J Geophys Res-Planets, 118: 891–907

Deng Q, Li F, Yan J, Xiao Z, Ye M, Xiao C, Barriot J P. 2020. The thermal evolution of Mercury over the past ~4.2 Ga as revealed by relaxation states of mantle plugs beneath impact basins. Geophys Res Lett, 47: e89051

Draper D S, Lawrence S J, Klima R S, Denevi B W, van der Bogert C H, Elardo S M, Hiesinger H H. 2021. The Inner Solar System Chronology (ISOCHRON) lunar sample return mission concept: Revealing two billion years of history. Planet Sci J, 2: 79

Dundas C M, McEwen A S. 2010. An assessment of evidence for pingos on Mars using HiRISE. Icarus, 205: 244–258

Durham W B, Kirby S H, Stern L A. 1992. Effects of dispersed particulates on the rheology of water ice at planetary conditions. J Geophys Res-Planets, 97: 20883–20897

El Maarry M R, Gasnault O, Toplis M J, Baratoux D, Dohm J M, Newsom H E, Boynton W V, Karunatillake S. 2009. Gamma-ray constraints on the chemical composition of the martian surface in the Tharsis region: A signature of partial melting of the mantle? J Volcanol Geotherm Res, 185: 116–122

Esposito L W. 1984. Sulfur dioxide: Episodic injection shows evidence for active Venus volcanism. Science, 223: 1072–1074

Fagents S A. 2003. Considerations for effusive cryovolcanism on Europa: The post-Galileo perspective. J Geophys Res-Planets, 108: 5139

Fagents S A, Lanagan P, Greeley R. 2002. Rootless cones on Mars: A consequence of lava-ground ice interaction. Geol Soc Lond Spec Publ, 202: 295–317

Fassett C I, Kadish S J, Head J W, Solomon S C, Strom R G. 2011. The global population of large craters on Mercury and comparison with the Moon. Geophys Res Lett, 38: L10202

Filiberto J, Trang D, Treiman A H, Gilmore M S. 2020. Present-day volcanism on Venus as evidenced from weathering rates of olivine. Sci Adv, 6: Eaax7445

Fitz-Gerald B. 2021. The origin of Rim Moat Domes. Lunar Section Circular. 14–28

Francis P, Oppenheimer C. 2004. Volcanoes. Oxford: Oxford University Press. 521

Frey H, Jarosewich M. 1982. Subkilometer Martian volcanoes: Properties and possible terrestrial analogs. J Geophys Res-Solid Earth, 87: 9867–9879

Fu R R, Ermakov A I, Marchi S, Castillo-Rogez J C, Raymond C A, Hager B H, Zuber M T, King S D, Bland M T, Cristina De Sanctis M, Preusker F, Park R S, Russell C T. 2017. The interior structure of

Ceres as revealed by surface topography. Earth Planet Sci Lett, 476: 153–164

Garrick-Bethell I, Seritan M R K. 2021. Laccolith Model for Lunar Ring-Moat Dome Structures. The Woodlands: 52nd Lunar and Planetary Science Conference. Abstract #2369

Gasnault O, Jeffrey Taylor G, Karunatillake S, Dohm J, Newsom H, Forni O, Pinet P, Boynton W V. 2010. Quantitative geochemical mapping of Martian elemental provinces. Icarus, 207: 226–247

Geissler P, McEwen A, Phillips C, Simonelli D, Lopes R M C, Douté S. 2001. Galileo imaging of SO_2 frosts on Io. J Geophys Res, 106: 33253–33266

Geissler P. 2015. Cryovolcanism in the outer solar system. In: Sigurdsson H, ed. The Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic Press. 763–776

Giardini D, Lognonné P, Banerdt W B, Pike W T, Christensen U, Ceylan S, Clinton J F, van Driel M, Stähler S C, Böse M, Garcia R F, Khan A, Panning M, Perrin C, Banfield D, Beucler E, Charalambous C, Euchner F, Horleston A, Jacob A, Kawamura T, Kedar S, Mainsant G, Scholz J R, Smrekar S E, Spiga A, Agard C, Antonangeli D, Barkaoui S, Barrett E, Combes P, Conejero V, Daubar I, Drilleau M, Ferrier C, Gabsi T, Gudkova T, Hurst K, Karakostas F, King S, Knapmeyer M, Knapmeyer-Endrun B, Llorca-Cejudo R, Lucas A, Luno L, Margerin L, McClean J B, Mimoun D, Murdoch N, Nimmo F, Nonon M, Pardo C, Rivoldini A, Manfredi J A R, Samuel H, Schimmel M, Stott A E, Stutzmann E, Teanby N, Warren T, Weber R C, Wieczorek M, Yana C. 2020. The seismicity of Mars. Nat Geosci, 13: 205–212

Glen J W. 1952. Experiments on the deformation of ice. J Glaciol, 2: 111–114

Glen J W. 1955. The creep of polycrystalline ice. Proc R Soc Lond A, 228: 519–538

Goldsby D L, Kohlstedt D L. 2001. Superplastic deformation of ice: Experimental observations. J Geophys Res-Solid Earth, 106: 11017–11030

Goudge T A, Head J W, Kerber L, Blewett D T, Denevi B W, Domingue D L, Gillis-Davis J J, Gwinner K, Helbert J, Holsclaw G M, Izenberg N R, Klima R L, McClintock W E, Murchie S L, Neumann G A, Smith D E, Strom R G, Xiao Z Y, Zuber M T, Solomon S C. 2014. Global inventory and characterization of pyroclastic deposits on Mercury: New insights into pyroclastic activity from MESSENGER orbital data. J Geophys Res-Planets, 119: 635–658

Grott M, Wieczorek M. 2012. Density and lithospheric structure at Tyrrhena Patera, Mars, from gravity and topography data. Icarus, 221: 43–52

Grundy W M, Binzel R P, Buratti B J, Cook J C, Cruikshank D P, Dalle Ore C M, Earle A M, Ennico K, Howett C J A, Lunsford A W, Olkin C B, Parker A H, Philippe S, Protopapa S, Quirico E, Reuter D C, Schmitt B, Singer K N, Verbiscer A J, Beyer R A, Buie M W, Cheng A F, Jennings D E, Linscott I R, Parker J W, Schenk P M, Spencer J R, Stansberry J A, Stern S A, Throop H B, Tsang C C C, Weaver H A, Weigle Ii G E, Young L A. 2016. Surface compositions across Pluto and Charon. Science, 351: aad9189

Gülcher A J P, Gerya T V, Montési L G J, Munch J. 2020. Corona structures driven by plume-lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus. Nat Geosci, 13: 547–554

Halliday A N. 2000. Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon. Earth Planet Sci Lett, 176: 17–30

Hamilton C W, Beggan C D, Still S, Beuthe M, Lopes R M C, Williams D A, Radebaugh J, Wright W. 2013. Spatial distribution of volcanoes on Io: Implications for tidal heating and magma ascent. Earth Planet Sci Lett, 361: 272–286

Hamilton C W, Fagents S A, Thordarson T. 2011. Lava-ground ice interactions in Elysium Planitia, Mars: Geomorphological and geospatial analysis of the Tartarus Colles cone groups. J Geophys Res-Planets, 116: E03004

Hansen C J, Shemansky D E, Esposito L W, Stewart A I F, Lewis B R, Colwell J E, Hendrix A R, West R A, Waite Jr. J H, Teolis B, Magee B A. 2011. The composition and structure of the Enceladus plume. Geophys Res Lett, 38: L11202

Head J W, Crumpler L S, Aubele J C, Guest J E, Saunders R S. 1992. Venus volcanism: Classification of volcanic features and structures, associations, and global distribution from Magellan data. J Geophys Res-Planets, 97: 13153–13197

Head J W, Wilson L. 1998. Tharsis Montes as composite volcanoes? 1. The role of explosive volcanism in edifice construction and implications for the volatile contents of edifice-forming magmas. Houston: 29th Lunar and Planetary Science Conference. Abstract #1127

Head J W, Wilson L. 2017. Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: Predicted emplacement processes and observations). Icarus, 283: 176–223

Hesse M A, Castillo-Rogez J C. 2019. Thermal evolution of the impact-induced cryomagma chamber beneath Occator crater on Ceres. Geophys Res Lett, 46: 1213–1221

Hiesinger H, Head J W, Wolf U, Jaumann R, Neukum G. 2011. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis. In: Ambrose W A, Williams D A, eds. Recent Advances and Current Research Issues in Lunar Stratigraphy. Special Paper of the Geological Society of America. 477: 1–51

Horvath D G, Moitra P, Hamilton C W, Craddock R A, Andrews-Hanna J C. 2021. Evidence for geologically recent explosive volcanism in Elysium Planitia, Mars. Icarus, 365: 114499

Hu S, He H, Ji J, Lin Y, Hui H, Anand M, Tartèse R, Yan Y, Hao J, Li R, Gu L, Guo Q, He H, Ouyang Z. 2021. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5. Nature, 600: 49–53

Huang J, Xiao L. 2014. Knobby terrain on ancient volcanoes as an indication of dominant early explosive volcanism on Mars. Geophys Res Lett, 41: 7019–7024

Ivanov M A, Crumpler L S, Aubele J C, Head J W. 2015. Volcanism on Venus. In: Sigurdsson H, ed. The Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic Press. 729–746

Ivanov M A, Hiesinger H, Erkeling G, Reiss D. 2014. Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: Evidence for the ancient ocean. Icarus, 228: 121–140

Johnson T V, Veeder G J, Matson D L, Brown R H, Nelson R M, Morrison D. 1988. Io: Evidence for silicate volcanism in 1986. Science, 242: 1280–1283

Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A, Korotev R L, Wieczorek M A. 2000. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. J Geophys Res, 105: 4197–4216

Jozwiak L M, Head J W, Wilson L. 2018. Explosive volcanism on Mercury: Analysis of vent and deposit morphology and modes of eruption. Icarus, 302: 191–212

Kamata S, Nimmo F, Sekine Y, Kuramoto K, Noguchi N, Kimura J, Tani A. 2019. Pluto's ocean is capped and insulated by gas hydrates. Nat Geosci, 12: 407–410

Kargel J S. 1991. Brine volcanism and the interior structures of asteroids and icy satellites. Icarus, 94: 368–390

Kargel J S. 1995. Cryovolcanism on the icy satellites. In: Chahine M T, A'Hearn M F, Rahe J, eds. Comparative Planetology with an Earth Perspective. Dordrecht: Springer. 101–113

Kargel J S, Pozio S. 1996. The volcanic and tectonic history of Enceladus. Icarus, 119: 385–404

Keane J T, de Kleer K, Rathbun J, Ahern A, Radebaugh J. 2018. Comprehensive spherical harmonic analysis of the distribution of Io's volcanoes, mountains, heat flow, and other geologic phenomena. Washington DC: 2018 AGU Fall Meeting. P53C-2983

Kerber L, Head J W, Solomon S C, Murchie S L, Blewett D T, Wilson L. 2009. Explosive volcanic eruptions on Mercury: Eruption conditions, magma volatile content, and implications for interior volatile abundances. Earth Planet Sci Lett, 285: 263–271

Keszthelyi L, McEwen A S, Phillips C B, Milazzo M, Geissler P, Turtle E P, Radebaugh J, Williams D A, Simonelli D P, Breneman H H, Klaasen K P, Levanas G, Denk T. 2001. Imaging of volcanic activity on Jupiter's moon Io by Galileo during the Galileo Europa Mission and the Galileo Millennium Mission. J Geophys Res-Planets, 106: 33025–33052

Khurana K K, Kivelson M G, Stevenson D J, Schubert G, Russell C T, Walker R J, Polanskey C. 1998. Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto. Nature, 395: 777–780

Kivelson M G, Khurana K K, Russell C T, Volwerk M, Walker R J, Zimmer C. 2000. Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at Europa. Science, 289: 1340–1343

Kleine T, Münker C, Mezger K, Palme H. 2002. Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry. Nature, 418: 952–955

Laneuville M, Wieczorek M A, Breuer D, Tosi N. 2013. Asymmetric thermal evolution of the Moon. J Geophys Res-Planets, 118: 1435–1452

Laver C, de Pater I. 2009. The global distribution of sulfur dioxide ice on Io, observed with OSIRIS on the W.M. Keck telescope. Icarus, 201: 172–181

Li Q L, Zhou Q, Liu Y, Xiao Z, Lin Y, Li J H, Ma H X, Tang G Q, Guo S, Tang X, Yuan J Y, Li J, Wu F Y, Ouyang Z, Li C, Li X H. 2021. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. Nature, 600: 54–58

Linde A T, Sacks I S. 1998. Triggering of volcanic eruptions. Nature, 395: 888–890

Lucchitta B K, Soderblom L A. 1982. The geology of Europa. In: Satellites of Jupiter. Tucson: University of Arizona Press. 521–555

Lunine J I, Stevenson D J. 1985. Thermodynamics of clathrate hydrate at low and high pressures with application to the outer solar system. Astrophys J Suppl Ser, 58: 493–531

Mancinelli P, Minelli F, Pauselli C, Federico C. 2016. Geology of the Raditladi quadrangle, Mercury (H04). J Maps, 12: 190–202

Marchi S, Chapman C R, Fassett C I, Head J W, Bottke W F, Strom R G. 2013. Global resurfacing of Mercury 4.0–4.1 billion years ago by heavy bombardment and volcanism. Nature, 499: 59–61

Marcq E, Bertaux J L, Montmessin F, Belyaev D. 2013. Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus's dynamic atmosphere. Nat Geosci, 6: 25–28

McCoy T J, Peplowski P N, McCubbin F M, Weider S Z. 2018. The geochemical and mineralogical diversity of Mercury. In: Solomon S C, Nittler L R, Anderson B J, eds. Mercury: The View After MESSENGER. Cambridge: Cambridge Planetary Science. 176–190

McEwen A S, Malin M C, Carr M H, Hartmann W K. 1999. Voluminous volcanism on early Mars revealed in Valles Marineris. Nature, 397: 584–586

McEwen A S, Keszthelyi L, Spencer J R, Schubert G, Matson D L, Lopes-Gautier R, Klaasen K P, Johnson T V, Head J W, Geissler P, Fagents S, Davies A G, Carr M H, Breneman H H, Belton M J S. 1998. High-temperature silicate volcanism on Jupiter's Moon Io. Science, 281: 87–90

McKinnon W B, Stern S A, Weaver H A, Nimmo F, Bierson C J, Grundy W M, Cook J C, Cruikshank D P, Parker A H, Moore J M, Spencer J R, Young L A, Olkin C B, Ennico Smith K, New Horizons

Geology G. 2017. Origin of the Pluto-Charon system: Constraints from the New Horizons flyby. Icarus, 287: 2–11

McLennan S M, Anderson R B, Bell III J F, Bridges J C, Calef III F, Campbell J L, Clark B C, Clegg S, Conrad P, Cousin A, et al., a total of 448 authors. 2014. Elemental geochemistry of sedimentary rocks at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. Science, 343: 1244734

Michalski J R, Bleacher J E. 2013. Supervolcanoes within an ancient volcanic province in Arabia Terra, Mars. Nature, 502: 47–52

Milazzo M P, Keszthelyi L P, Radebaugh J, Davies A G, Turtle E P, Geissler P, Klaasen K P, Rathbun J A, McEwen A S. 2005. Volcanic activity at Tvashtar Catena, Io. Icarus, 179: 235–251

Mitchell R N. 2021. Chang'e-5 reveals the Moon's secrets to a longer life. Innovation, 2: 100177

Moore J M, McKinnon W B, Spencer J R, Howard A D, Schenk P M, Beyer R A, Nimmo F, Singer K N, Umurhan O M, White O L, et al., a total of 154 authors. 2016. The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. Science, 351: 1284–1293

Murchie S L, Klima R L, Izenberg N R, Domingue D L, Blewett D T, Helbert J. 2018. Spectral reflectance constraints on the composition and evolution of Mercury's surface. In: Solomon S C, Nittler L R, Anderson B J, eds. Mercury: The View After MESSENGER. Cambridge: Cambridge Planetary Science. 191–216

Nimmo F, McKenzie D. 1998. Volcanism and tectonics on Venus. Annu Rev Earth Planet Sci, 26: 23–51

Ody A, Poulet F, Langevin Y, Bibring J P, Bellucci G, Altieri F, Gondet B, Vincendon M, Carter J, Manaud N. 2012. Global maps of anhydrous minerals at the surface of Mars from OMEGA/Mex. J Geophys Res-Planets, 117: E00J14

Padovan S, Tosi N, Plesa A C, Ruedas T. 2017. Impact-induced changes in source depth and volume of magmatism on Mercury and their observational signatures. Nat Commun, 8: 1945

Peplowski P N, Klima R L, Lawrence D J, Ernst C M, Denevi B W, Frank E A, Goldsten J O, Murchie S L, Nittler L R, Solomon S C. 2016. Remote sensing evidence for an ancient carbon-bearing crust on Mercury. Nat Geosci, 9: 273–276

Plescia J B. 2004. Morphometric properties of Martian volcanoes. J Geophys Res-Planets, 109: E03003

Qi C, Stern L A, Pathare A, Durham W B, Goldsby D L. 2018. Inhibition of grain boundary sliding in fine-grained ice by intergranular particles: Implications for planetary ice masses. Geophys Res Lett, 45: 12,757–12,765

Qian Y, Xiao L, Wang Q, Head J W, Yang R, Kang Y, van der Bogert C H, Hiesinger H, Lai X, Wang G, Pang Y, Zhang N, Yuan Y, He Q, Huang J, Zhao J, Wang J, Zhao S. 2021. China's Chang'e-5 landing site: Geology, stratigraphy, and provenance of materials. Earth Planet Sci Lett, 561: 116855

Qiao L, Head J W, Ling Z, Wilson L. 2020. Lunar irregular mare patches: Classification, characteristics, geologic settings, updated catalog, origin, and outstanding questions. J Geophys Res-Planets, 125: e06362

Qiao L, Head J, Wilson L, Xiao L, Kreslavsky M, Dufek J. 2017. Ina pit crater on the Moon: Extrusion of waning-stage lava lake magmatic foam results in extremely young crater retention ages. Geology, 45: 455–458

Quick L C, Buczkowski D L, Ruesch O, Scully J E C, Castillo-Rogez J, Raymond C A, Schenk P M, Sizemore H G, Sykes M V. 2019. A possible brine reservoir beneath Occator crater: Thermal and compositional evolution and formation of the Cerealia dome and Vinalia Faculae. Icarus, 320: 119–135

Quick L C, Glaze L S, Baloga S M. 2017. Cryovolcanic emplacement of domes on Europa. Icarus, 284: 477–488

Raymond C A, Ermakov A I, Castillo-Rogez J C, Marchi S, Johnson B C, Hesse M A, Scully J E C, Buczkowski D L, Sizemore H G, Schenk P M, Nathues A, Park R S, Prettyman T H, Quick L C, Keane J T, Rayman M D, Russell C T. 2020. Impact-driven mobilization of deep crustal brines on dwarf planet Ceres. Nat Astron, 4: 741–747

Robbins S J, di Achille G, Hynek B M. 2011. The volcanic history of Mars: High-resolution crater-based studies of the calderas of 20 volcanoes. Icarus, 211: 1179–1203

Rogers A D, Christensen P R. 2007. Surface mineralogy of Martian low-albedo regions from MGS-TES data: Implications for upper crustal evolution and surface alteration. J Geophys Res-Planets, 112: E01003

Rogers A D, Nazarian A H. 2013. Evidence for Noachian flood volcanism in Noachis Terra, Mars, and the possible role of Hellas impact basin tectonics. J Geophys Res-Planets, 118: 1094–1113

Roth L, Saur J, Retherford K D, Strobel D F, Feldman P D, McGrath M A, Nimmo F. 2014. Transient water vapor at Europa's south pole. Science, 343: 171–174

Ruesch O, Genova A, Neumann W, Quick L C, Castillo-Rogez J C, Raymond C A, Russell C T, Zuber M T. 2019. Slurry extrusion on Ceres from a convective mud-bearing mantle. Nat Geosci, 12: 505–509

Ruesch O, Platz T, Schenk P, McFadden L A, Castillo-Rogez J C, Quick L C, Byrne S, Preusker F, O'Brien D P, Schmedemann N, Williams D A, Li J Y, Bland M T, Hiesinger H, Kneissl T, Neesemann A, Schaefer M, Pasckert J H, Schmidt B E, Buczkowski D L, Sykes M V, Nathues A, Roatsch T, Hoffmann M, Raymond C A, Russell C T. 2016. Cryovolcanism on ceres. Science, 353: aaf4286

Salvatore M R, Christensen P R. 2014. On the origin of the Vastitas Borealis formation in Chryse and Acidalia Planitiae, Mars. J Geophys Res-Planets, 119: 2437–2456

Schenk P M, McKinnon W B, Gwynn D, Moore J M. 2001. Flooding of Ganymede's bright terrains by low-viscosity water-ice lavas. Nature, 410: 57–60

Sehlke A, Whittington A G. 2015. Rheology of lava flows on Mercury: An analog experimental study. J Geophys Res-Planets, 120: 1924–1955

Singer K N, White O L, Schmitt B, Rader E L, Protopapa S, Grundy W M, Cruikshank D P, Bertrand T, Schenk P M, McKinnon W B, Stern S A, Dhingra R D, Runyon K D, Beyer R A, Bray V J, Ore C D, Spencer J R, Moore J M, Nimmo F, Keane J T, Young L A, Olkin C B, Lauer T R, Weaver H A, Ennico-Smith K. 2022. Large-scale cryovolcanic resurfacing on Pluto. Nat Commun, 13: 1542

Smrekar S E, Stofan E R, Mueller N, Treiman A, Elkins-Tanton L, Helbert J, Piccioni G, Drossart P. 2010. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. Science, 328: 605–608

Solomon S C, Ahrens T J, Reynolds R T, Cassen P M, Sleep N H, Minerar J W, Turcotte D L. 1981. Thermal histories of the terrerstrail planets. In: Basaltic Volcanism Study Project, ed. Basaltic Volcanism on the Therrestrial Planets. New York: Pergamon Press. 1130–1237

Sori M M, Byrne S, Bland M T, Bramson A M, Ermakov A I, Hamilton C W, Otto K A, Ruesch O, Russell C T. 2017. The vanishing cryovolcanoes of Ceres. Geophys Res Lett, 44: 1243–1250

Sori M M, Sizemore H G, Byrne S, Bramson A M, Bland M T, Stein N T, Russell C T. 2018. Cryovolcanic rates on Ceres revealed by topography. Nat Astron, 2: 946–950

Sparks W B, Hand K P, McGrath M A, Bergeron E, Cracraft M, Deustua S E. 2016. Probing for evidence of plumes on europa with *HST*/STIS. Astrophys J, 829: 121

Sparks W B, Schmidt B E, McGrath M A, Hand K P, Spencer J R, Cracraft M, Deustua S E. 2017. Active cryovolcanism on Europa? Astrophys J, 839: L18

Spudis P D, Guest J E. 1988. Stratigraphy and geologic history of Mercury. In: Vilas F, Chapman C R, Matthews M S, eds. Mercury. Tucson: University of Arizona Press. 118–164

Squyres S W, Reynolds R T, Cassen P M, Peale S J. 1983. Liquid water and active resurfacing on Europa. Nature, 301: 225–226

Stockstill-Cahill K R, McCoy T J, Nittler L R, Weider S Z, Hauck Steven A. I I. 2012. Magnesium-rich crustal compositions on Mercury: Implications for magmatism from petrologic modeling. J Geophys Res, 117: E00L15

Stofan E R, Sharpton V L, Schubert G, Baer G, Bindschadler D L, Janes D M, Squyres S W. 1992. Global distribution and characteristics of coronae and related features on Venus: Implications for origin and relation to mantle processes. J Geophys Res-Planets, 97: 13347–13378

Strom R G, Banks M E, Chapman C R, Fassett C I, Forde J A, Head III J W, Merline W J, Prockter L M, Solomon S C. 2011. Mercury crater statistics from MESSENGER flybys: Implications for stratigraphy and resurfacing history. Planet Space Sci, 59: 1960–1967

Strom R G, Schaber G G, Dawsow D D. 1994. The global resurfacing of Venus. J Geophys Res-Planets, 99: 10899–10926

Tanaka K L, Skinner J A, Dohm J M, Irwin III R P, Kolb E J, Fortezzo C M, Platz T, Hare T M. 2014. Geologic Map of Mars. Flagstaff: United States Geological Survey

Tartèse R, Anand M, Gattacceca J, Joy K H, Mortimer J I, Pernet-Fisher J F, Russell S, Snape J F, Weiss B P. 2019. Constraining the evolutionary history of the Moon and the Inner Solar System: A case for new returned lunar samples. Space Sci Rev, 215: 54

Terada K, Anand M, Sokol A K, Bischoff A, Sano Y. 2007. Cryptomare magmatism 4.35 Gyr ago recorded in lunar meteorite Kalahari 009. Nature, 450: 849–852

Thomas R J, Rothery D A, Conway S J, Anand M. 2014. Long-lived explosive volcanism on Mercury. Geophys Res Lett, 41: 6084–6092

Thomas R J, Rothery D A, Conway S J, Anand M. 2015. Explosive volcanism in complex impact craters on Mercury and the Moon: Influence of tectonic regime on depth of magmatic intrusion. Earth Planet Sci Lett, 431: 164–172

Tian H C, Wang H, Chen Y, Yang W, Zhou Q, Zhang C, Lin H L, Huang C, Wu S T, Jia L H, Xu L, Zhang D, Li X G, Chang R, Yang Y H, Xie L W, Zhang D P, Zhang G L, Yang S H, Wu F Y. 2021. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane. Nature, 600: 59–63

Trask N J, Guest J E. 1975. Preliminary geologic terrain map of Mercury. J Geophys Res, 80: 2461–2477

Travis B J, Bland P A, Feldman W C, Sykes M V. 2018. Hydrothermal dynamics in a CM-based model of Ceres. Meteorit Planet Sci, 53: 2008–2032

Tyler R H, Henning W G, Hamilton C W. 2015. Tidal heating in a magma ocean within Jupiter's moon Io. Astrophys J Suppl Ser, 218: 22

Vander Kaaden K E, McCubbin F M, Nittler L R, Peplowski P N, Weider S Z, Frank E A, McCoy T J. 2017. Geochemistry, mineralogy, and petrology of boninitic and komatiitic rocks on the mercurian surface: Insights into the mercurian mantle. Icarus, 285: 155–168

Vaniman D T, Bish D L, Ming D W, Bristow T F, Morris R V, Blake D F, Chipera S J, Morrison S M, Treiman A H, Rampe E B, Rice M, Achilles C N, Grotzinger J P, McLennan S M, Williams J, Bell III J F, Newsom H E, Downs R T, Maurice S, Sarrazin P, Yen A S, Morookian J M, Farmer J D, Stack K, Milliken R E, Ehlmann B L, Sumner D Y, Berger G, Crisp J A, Hurowitz J A, Anderson R, Des Marais D J, Stolper E M, Edgett K S, Gupta S, Spanovich N, the

MSL Science Team. 2014. Mineralogy of a mudstone at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. Science, 343: 1243480

Veeder G J, Davies A G, Matson D L, Johnson T V, Williams D A, Radebaugh J. 2012. Io: Volcanic thermal sources and global heat flow. Icarus, 219: 701–722

Veeder G J, Davies A G, Matson D L, Johnson T V, Williams D A, Radebaugh J. 2015. Io: Heat flow from small volcanic features. Icarus, 245: 379–410

Veeder G J, Matson D L, Johnson T V, Blaney D L, Goguen J D. 1994. Io's heat flow from infrared radiometry: 1983–1993. J Geophys Res-Planets, 99: 17095–17162

Waite J H, Glein C R, Perryman R S, Teolis B D, Magee B A, Miller G, Grimes J, Perry M E, Miller K E, Bouquet A, Lunine J I, Brockwell T, Bolton S J. 2017. Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes. Science, 356: 155–159

Wang Y C, Xiao Z Y, Chang Y R, Xu R, Cui J. 2021. Short-term and global-wide effusive volcanism on Mercury around 3.7 Ga. Geophys Res Lett, 48: e2021GL094503

Warren P H. 1985. The magma ocean concept and lunar evolution. Annu Rev Earth Planet Sci, 13: 201–240

Weider S Z, Nittler L R, Murchie S L, Peplowski P N, McCoy T J, Kerber L, Klimczak C, Ernst C M, Goudge T A, Starr R D, Izenberg N R, Klima R L, Solomon S C. 2016. Evidence from MESSENGER for sulfur- and carbon-driven explosive volcanism on Mercury. Geophys Res Lett, 43: 3653–3661

Werner S C. 2009. The global martian volcanic evolutionary history. Icarus, 201: 44–68

Whitten J L, Head J W, Denevi B W, Solomon S C. 2014. Intercrater plains on Mercury: Insights into unit definition, characterization, and origin from MESSENGER datasets. Icarus, 241: 97–113

Whitten J L, Head J W. 2015a. Lunar cryptomaria: Physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism. Icarus, 247: 150–171

Whitten J L, Head J W. 2015b. Rembrandt impact basin: Distinguishing between volcanic and impact-produced plains on Mercury. Icarus, 258: 350–365

Wilson L. 2009. Volcanism in the Solar system. Nat Geosci, 2: 389–397

Wilson L, Head III J W. 1981. Ascent and eruption of basaltic magma on the Earth and Moon. J Geophys Res-Solid Earth, 86: 2971–3001

Wilson L, Head J W, Zhang F. 2019. A theoretical model for the formation of Ring Moat Dome Structures: Products of second boiling in lunar basaltic lava flows. J Volcanol Geotherm Res, 374: 160–180

Wray J J, Hansen S T, Dufek J, Swayze G A, Murchie S L, Seelos F P, Skok J R, Irwin III R P, Ghiorso M S. 2013. Prolonged magmatic activity on Mars inferred from the detection of felsic rocks. Nat Geosci, 6: 1013–1017

Xiao L, Huang J, Christensen P R, Greeley R, Williams D A, Zhao J, He Q. 2012. Ancient volcanism and its implication for thermal evolution of Mars. Earth Planet Sci Lett, 323-324: 9–18

Xiao Z Y, Xu R, Wang Y C, Chang Y R, Xu R, Cui J. 2021. Recent dark pyroclastic deposits on Mercury. Geophys Res Lett, 48: e92532

Ye B, Qian Y, Xiao L, Michalski J R, Li Y, Wu B, Qiao L. 2021. Geomorphologic exploration targets at the Zhurong landing site in the southern Utopia Planitia of Mars. Earth Planet Sci Lett, 576: 117199

Yin Q, Jacobsen S B, Yamashita K, Blichert-Toft J, Télouk P, Albarède F. 2002. A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites. Nature, 418: 949–952

Zhang F, Head J W, Wöhler C, Basilevsky A T, Wilson L, Xie M, Bugiolacchi R, Wilhelm T, Althoff S, Zou Y L. 2021. The Lunar Mare Ring-Moat Dome Structure (RMDS) age conundrum: Contemporaneous with imbrian-aged host lava flows or emplaced in the Copernican? J Geophys Res-Planets, 126: e06880

Zhang F, Head J W, Wöhler C, Bugiolacchi R, Wilson L, Basilevsky A T, Grumpe A, Zou Y L. 2020. Ring-Moat Dome Structures (RMDSs) in the Lunar Maria: Statistical, compositional, and morphological characterization and assessment of theories of origin. J Geophys Res-Planets, 125: e05967

Zhang F, Head J W, Basilevsky A T, Bugiolacchi R, Komatsu G, Wilson L, Fa W, Zhu M H. 2017. Newly discovered ring-moat dome structures in the Lunar Maria: Possible origins and implications. Geophys Res Lett, 44: 9216–9224

Zhao J, Xiao Z, Huang J, Head J W, Wang J, Shi Y, Wu B, Wang L. 2021. Geological characteristics and targets of high scientific interest in the Zhurong landing region on Mars. Geophys Res Lett, 48: e94903

Zhou C, Jia Y, Liu J, Li H, Fan Y, Zhang Z, Liu Y, Jiang Y, Zhou B, He Z, Yang J, Hu Y, Liu Z, Qin L, Lv B, Fu Z, Yan J, Wang C, Zou Y. 2022. Scientific objectives and payloads of the lunar sample return mission—Chang'E-5. Adv Space Res, 69: 823–836

(责任编委: 惠鹤九)