Phobos起源与地质演化研究进展

任坤熠[1]，程彬[1]，焦艺菲[1]，刘山洪[2]

（1. 清华大学 航天航空学院，北京 100084；2. 智能博弈与决策实验室,北京 100071）

摘　要 Phobos作为火星的两颗卫星之一，其起源与地质演化一直是行星科学研究中的焦点问题。本文系统总结了近年来关于Phobos物理特性、表面地质特征及其形成机制的最新研究进展，重点分析了其独特的平行沟壑Stickney陨石坑、红蓝光谱单元分布等地质现象的成因，并对潮汐力、撞击事件、内部结构等多重因素在Phobos演化过程中的作用进行了深入探讨。本文就Phobos的起源问题综合对比了“捕获假说”与“原位形成假说”的多模型证据，指出该问题当前尚无定论，亟需更多探测数据支持。因此本文着重阐明了中国天问一号拓展任务及未来的火卫一探测任务MMX在验证这些假说中的关键作用。本综述不仅为Phobos的深入探索提供了不同理论视角，也为理解类地行星卫星系统的形成与演化提供了重要参考。

关键词 火卫一（Phobos），Stickney（斯蒂克尼）陨石坑，表面沟壑，陨石坑，起源问题

中图分类号 V11

最新录用

Origin and geological evolution of Phobos

Kunyi Ren[1]，Bin Cheng[1]，Yifei Jiao[1]，Shanhong Liu[2,3]

(1.Tsinghua University School of Aerospace Engineering, Beijing100084, China;
2.Intelligent Game and Decision Laboratory, Beijing100071, China)

AbstractAs one of the Martian moons, Phobos has been a focal point in planetary science due to questions surrounding its origin and geological evolution. This paper systematically summarizes recent advances in the study of Phobos's physical properties, surface geological features, mechanisms. It highlights the origins of unique geological phenomena such as its parallel grooves, the Stickney impact crater, and the distribution of red and blue spectral units. The review provides an in-depth discussion on the roles of multiple factors—including tidal forces, impact events, and internal structure—in shaping the moon's evolution. Furthermore, it predominant origin hypotheses—the capture hypothesis and the in-situ formation hypo concludes that the issue remains unresolved due to a lack of definitive evidence, underscoring the need for more data from future missions. The importance of China's Tianwen-1 extended mission and the upcoming MMX (Martian Moons eXploration) mission in testing these hypotheses is also emphasized.
This review not only offers theoretical support for the deep exploration of Phobos but also serves as a valuable reference for understanding the formation and evolution of satel planets.

Keywords Phobos, Stickney Crater, Grooves, Craters, Origin

1 引言

1877 年 8 月 18 日，美国海军天文台使用当时最大的折射望远镜观测深空时发现了火卫一。此火星卫星后来由英国学者Henry Madan命名为Phobos，取自古希腊神话中的恐惧之神的名字。Phobos是火星两颗卫星中较大的一个，其大小约为$26\,km \times 22.8\,km \times 18.2\,km$。Phobos是太阳系中一个特殊的天体：Phobos的轨道半径仅有约9400 km（火星半径的2.76倍），拥有极小的轨道偏心率轨道处于火星的流体洛希极限之内，并且在以每年厘米级的速度不断下降[1]。

人类对于Phobos的探索相对比较有限，表1中显示了人类对于Phobos的探索历程和未来探索任务基于Viking、MRO和Mars Express等任务返回的图像，通过光谱分析，可以得知Phobos具有丰富且特殊的地质特征。Phobos表面覆盖着厚度不均风化层但相对比于火星的另外一颗轨道靠外且体积较小的卫星Deimos较为光滑的表面，Phobos表面更为粗糙，存在几乎遍布整个星体的平行线性沟壑结构[1]。Phobos表面同样存在数以千计的陨石坑，其中最大的陨石坑为Stickney。Phobos表面物质在不同地区表现出显著的光谱差异，形成了红色与蓝色两种光谱单元。颜色的差异可能源于星体表面材料的不均匀性、风化层的颗粒迁移[2]以及表层物质年龄的不同[3]。

Phobos的形成和演化历史为研究火星形成甚至太阳系早期环境提供了重要线索。通过解开Phobos 的成因之谜，研究者们可以更好地理解太阳系中类似小天体的形成机制，以及它们在整个太阳系演化过程中的作用。根据当前Phobos的轨道特征及物理性质，学术界在其起源问题上主要分为两种假设。第一种假设为原位形成，即Phobos是在火星轨道上由物质吸积形成的，该假设主要包含三种主要形成机制：行星撞击形成[4]、循环撞击形成[5]、火星共聚形成[6]。另一假设认为Phobos可能是被捕获的主带小行星[7][8]，然而捕获起源需要一种特殊机制来使Phobos最初高度偏心的轨道圆化，并将其倾角调整到赤道平面。

本文通过梳理Phobos物理特性、起源与地质特征成因相关研究，总结现今研究成果，以期对未来研究有一定程度的启发。

表**1 Phobos**探测任务

时间	任务名称	任务内容
1971	Mariner 9	第一个成功环绕火星的探测器，拍摄了首批 Phobos 和 Deimos 的近距离照片，揭示了其表面特征和陨石坑分布[9]。
1976	Viking 1	环绕火星期间，获得了比水手 9 号分辨率更高的 Phobos 图像，为早期形态学研究提供了关键数据[10]。
1988	Phobos 2	进入火星轨道并获得了包括红外光谱在内的多项数据，但在即将释放着陆器前与地球失联[11]。
1996	MGS	多次飞掠 phobos 并拍摄高分辨率图像，测量其形状、体积，发现其表面覆盖细小尘埃层
2003	Mars Express	欧洲航天局探测器，详细研究了 Phobos 的表面特征，拍摄了高分辨率图像，提供了物质分布和地质构造的新见解[12]。
2006	MRO	美国探测器使用高分辨率成像设备对 Phobos 进行详细观测，分析其表面的细节结构和颜色分异现象[13]。
2020	天问一号 (Tianwen-1)	计划对 Phobos 进行遥感观测，研究其表面的地质构造和物质分布[14]。

计划 2024（至今仍未发射）	MMX	日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）计划采集 Phobos 样本并返回地球，以揭示其起源和地质演化历史[15]。

2 Phobos的发现历程和地质特征

2.1 Phobos物理特性

随着人类航天事业的不断发展，曾有几艘探测器近距离拍摄了Phobos：1971年的Mariner 9、1977 年的Viking 1，1988 年的Phobos 2，1996年的MGS任务，2003年发射的Mars Express以及2006 年的MRO等。这些探测器获取了一些Phobos表面图像和观测数据。

Phobos质量约 10^{16} kg，大小约为 $26\,km \times 22.8\,km \times 18.2\,km$，呈三轴椭球状，表面覆盖有数十至几百米量级的风化层[1][16]。风化层主要由碎石和撞击熔融物的混合物组成，其粒度分布深受特殊环境塑造：由于火卫一重力极低，撞击产生的、小于约300微米的细颗粒很容易被抛射出去并随太阳光压等因素影响最终从系统中消失；而较大的颗粒则能保留在表面或附近，并落回形成风化层。这一动力学筛选过程导致Phobos表面物质构成将相对缺乏细颗粒[1]。根据其低密度特性，学界推断火卫一内部可能为高度多孔结构，并可能含有水冰[17]。这一推断最终确认需依靠直接探测。

火卫一内部可能呈现分层特征，即由不同机械强度和成分组成的多个地层单元。这些地层可能源于早期吸积过程中的物质分异，或后期撞击事件导致的碎屑再堆积[1][18]。例如，表面风化层与深部基岩可能在密度、孔隙率和岩石类型上存在显著差异Stickney陨石坑等大型撞击构造可能进一步改变了局部地层分布[1]。近期对火星快车（MEX）飞越数据反演的第二阶重力系数（如C20和C22）的分析表明，Phobos可能存在一个密度较低的轻质核心，这一发现支持了内部物质因离心力或热-冷吸积过程向表面迁移的假设[19]。进一步的联合反演研究通过优化转动惯量和重力系数，推测核心半径约8.2 km，核心密度约2500 kg/m³，外层密度约1400 kg/m³，表明内部密度随深度增加，这为Phobos的碎石堆结构或分层演化提供了新的约束[20]。

Phobos物质组成仍存在争议。早期光谱观测数据显示，Phobos在0.2~0.9 μm波长范围内的表面反射光谱呈现平坦、缺乏明显吸收特征的整体形态。这一光谱特征与某些碳质球粒陨石或C型小行星的谱线特征具有一定相似性[21]。更高分辨率的光谱成像揭示了Phobos表面红色与蓝色单元的本质差异。红色单元显示出浅而宽的0.6 μm吸收以及清晰的2.8 μm吸收带；蓝色单元则不同，其0.65 μm吸收微弱，但具有与D/T型小行星相似的2.8 μm吸收特征[3][21][22]。2.8 μm吸收峰被解释为羟基或水合矿物的标志而0.65 μm处的吸收则与多种过程相关，包括矿物的脱水作用、铁化合物的氧化还原跃迁，或是太阳风粒子与表层物质的相互作用[3]。这一发现揭示了Phobos表层物质可能包含多种来源，既包括捕获小行星的残余物质，又可能涉及内生地质过程的影响因此未来的任务和更详细的光谱分析有望提供更多关于 Phobos 表面成分及其起源的信息。

Phobos的轨道同样充满特殊性。Phobos 的轨道非常接近于圆形，偏心率极低：Phobos 的平均轨道半径约为 2.76 倍的火星半径，这小于火星的同步轨道半径（约为6倍火星半径），并且处于流体洛希极限之内。这意味着Phobos正在受到火星潮汐力的强烈影响，Phobos 的动能正在不断被消耗转化为热能，使其轨道不断衰减，半径逐渐减小。潮汐力还导致了 Phobos 的潮汐锁定，即Phobos总是同一面朝向火星。

Phobos地质特征和地质结构展现了星体复杂的演化历史。Phobos上最显著的两大表面地质特征是占据了卫星表面的很大一部分的大型撞击坑Stickney，以及在整星表面分布的簇状平行沟壑[23][24]。这些沟壑通常是线状平行排列的，如同交织的线条网络构成多个不同的“家族”。每个家族内的沟壑走向相似，呈现出有序的排列。这种交织的家族式分布，以及沟壑自身的形态和走向，都与其独特的地质背景密切相关。平行沟壑这一地质特征在宇宙天体中十分罕见，沟壑的出现可能是多种机制

共同作用下的结果，过程复杂。对沟壑成因的研究可以让我们更多认识Phobos上可能发生过的地质事件，以及更好的了解太阳系卫星可能存在的运动机制。对沟壑地貌的详细介绍将在2.2节一一梳理并分析。Stickney 是 Phobos 上最大且最显眼的陨石坑，Stickney 陨石坑表示历史上存在一次巨大的撞击事件，这可能改变了Phobos轨道和物理场特征。现如今Phobos呈现在人类面前的各项状态，与Stickney撞击事件密不可分，陨石坑的大小和形状也使其成为研究天体撞击过程的理想对象。通过对该坑的细致研究，科学家可以更好地理解陨石坑的形成机制冲击波的传播以及撞击对小天体的影响。

由于没有直接探测任务，Phobos重力场模型构建研究处于起步阶段。Davis等人基于火卫一三轴椭球形状模型构建了重力场，并分析了表面物质的逃逸机制、溅射物二次撞击，初步探索了火卫一表面动力学环境及其形成机制[25]。史弦等人利用MEX影像数据获得了17阶火卫一形状模型，并正演计算了20阶火卫一重力场模型[26]。Le Maistre等人假设均值密度通过晶格多面体逼近火卫一形状，计算每个立方体所产生重力位累加并解算得到火卫一的球谐系数，得到10阶次的火卫一重力场[18]。Yang等人研究构建了一个将火卫一轨道运动与三维自由旋转完全耦合的精密动力学模型，该研究将欧拉旋转方程与轨道运动方程进行联合数值积分，能够更真实地模拟Phobos的复杂运动状态[27]。最新的模拟研究显示结合已有的MEX飞越数据和天问一号（Tianwen-1）的额外五次飞越数据，有望将Phobos重力场模型的估算精度提升至3阶甚至5阶，从而显著改善对其内部结构的建模[28]。

由于缺乏Phobos的直接地震观测数据，对Phobos内部结构的认知主要依赖于上述的重力场和形状模型的间接反演。近年来数值模拟技术的发展为探索其内部结构提供了新的途径，名为AstroSeis的三维边界元法计算程序，能够模拟具有任意形状和内部界面（如液态核心）的天体中的地震波传播，为未来在Phobos上实施主动或被动地震学实验、通过地震波场直接探测其内部孔隙率、分层结构等地质特征提供了正演模拟平台[29]。

2.2 Phobos 的表面沟壑

Phobos 表面的沟壑（Grooves）是其地质特征中最引人注目的一部分，这些线性凹陷通常宽度在100到200米之间，深度约为10到30米，长度最长可达 20 千米，沟壑的墙壁通常陡峭，而底部较为平坦[30]。在风化层覆盖区域，沟壑边缘的退化程度因宽度不同而有所差异，宽度较大的沟壑边缘更加锐利，退化程度较低，这表明其形成时间可能相对较短。除此之外许多沟壑底部常见圆形的小撞击坑，这些撞击坑可能是沟壑形成后小天体撞击所致[30]。

沟壑的分布表现出明显的方向性，在Stickney陨石坑附近，沟壑呈辐射状分布，从陨石坑内部向外扩展，形成交叉结构[31]，暗示出沟壑的辐射状分布可能与Stickney撞击事件产生的冲击波有关。但是在Phobos表面的其他区域，沟壑更多地表现为平行排列的簇状分布，与Stickney陨石坑周围的辐射状沟壑并不统一。这种差异暗示着Phobos上沟壑的形成机制可能并不单一，而是多种地质过程共同作用的结果。沟壑的密度在不同区域也有所差异：Stickney陨石坑附近的沟壑密度最高，尤其是在陨石坑的边缘区域，而赤道区域和Stickney陨石坑内部的沟壑数量则相对较少[32]。为了解释沟壑如何形成，又如何在Phobos表面呈现上述分布，许多学者提出了多种模型，包括潮汐断裂模型、次级撞击模型和巨石移动模型，这三种模型均揭示了Phobos可能经历的地质演化过程。

2.2.1 模型一:潮汐断裂模型

潮汐力撕裂是Phobos表面沟壑形成的可能因素之一。为研究潮汐力对Phobos地质结构有何作用，研究人员提出了潮汐断裂模型[33][34]。该模型的核心观点是由于Phobos位于火星的流体洛希极限内部，并且正在逐渐向火星靠近，由此产生了Phobos全球潮汐应变。这种潮汐应变会拉伸Phobos的外壳，导致其内部产生裂缝，随着裂缝的扩张，上层的松散物质会流入这些裂缝中，形成沟壑状结构[34]。由于Phobos的内部结构可能是分层异质的，包括一个弱内核和一个可破裂的粘性层，因此在验证该假说时

构建了类似于Phobos由上方松散风化层和下方较坚实堆积的岩石层形成的多种表面地层结构模型，并对该模型施加多种大小和方向的潮汐应力。通过调整模型使其受力与Phobos所受潮汐力几乎相同时，在该地层模型上的确产生了与Phobos中纬度地区实际观测到的沟壑方向一致断层现象。产生的沟壑形态和间距与均匀厚度的脆性层地层模型中扩展断裂的特征相似，甚至可以推断Phobos的表层很可能为为上覆盖有松散风化层的脆性岩层。

尽管潮汐断裂模型为沟壑的成因提供了合理的解释，但它也存在明显的局限性。赤道区域沟壑的缺失现象与潮汐应力理论的预期不符。另外在Mars Express搭载的HRSC拍摄的高分辨率图像中，沟壑边缘的凸起现象也无法通过潮汐应变解释[1]。这些问题提示出Phobos 表面的沟壑成因不仅仅是潮汐力作用的结果，潮汐撕裂过程无法完美描述Phobos表面的沟壑起源。

2.2.2 模型二**:**次级撞击模型

Phobos表面分布的大量线性沟壑彼此交叉，但未出现明显的横向错动，其形态特征与月球和火星表面已确认的次级撞击坑链高度相似[35][36]。这些结构可能源于Phobos自身经历的大型撞击事件：当陨石高速撞击Phobos表面时，撞击碎片的动力学行为与其速度分布存在显著分界，溅射物分为两类：速度低于Phobos逃逸速度（11 m/s）的碎片受其自身引力主导，通过表面滚动或短暂弹道运动后以≤11 m/s速度回落，形成浅层模糊的放射状/簇状撞击坑群。速度＞11 m/s的高速碎片，其突破Phobos引力束缚进入火星轨道，经历火星-Phobos双体引力摄动后以特定角度和速度再次撞击Phobos表面，最终形成链状分布的次级撞击坑群，并塑造出观测到的线性沟壑[37]。

Phobos质量小、逃逸速度低（仅约11 m/s），其溅射物动力学过程具有独特性。数值模拟表明，逃逸火卫一进入火星环绕轨道的溅射物在数天至数百年内持续回落，撞击方位和轨迹受Phobos自转及轨道运动影响[35]。通过调整主撞击坑位置和溅射物速度场参数，研究发现此类二次撞击形成的坑链几何形态与Phobos实际沟壑高度吻合，甚至能解释部分与潮汐应力模型矛盾的异常结构。例如，M. Nayak等人以Grildrig陨石坑为案例，模拟其溅射物在火星轨道上的演化路径，发现二次撞击形成的链状沟壑与Phobos北半球观测到的线性网络在空间分布上存在显著对应性[38]。

但该模型仍面临挑战：若要形成Phobos表面典型的平行沟壑系统，溅射物需满足近乎理想化的条件——包括碎片半径高度均一以保证撞击能量一致溅射物分散率趋近于零从而形成线性排列、入射角小于5 °等，这些严苛条件在自然撞击事件中极难同时实现[38]。

此外有学者提出沟壑可能源于火星表面巨型撞击事件的溅射物（如形成赫拉斯盆地的撞击），但量化分析显示即使火星史上最大规模撞击（溅射物总量约10^{16} kg）的碎屑扩散至Phobos轨道，最终沉降厚度仅约5毫米，且毫米级以上碎片的撞击概率低于10^{-4}/Myr [35][36]。这种低物质通量和低概率事件显然无法解释Phobos全球范围内密集分布的沟壑体系。目前基于Phobos自身撞击-溅射物循环的二次撞击模型，仍是符合观测特征与动力学约束的最优解

2.2.3 模型三**:**巨石撞击模型

巨石移动模型为解释Stickney陨石坑周围的辐射状沟壑提供了另一种视角：Stickney撞击事件产生了大量巨石，这些巨石在低重力环境中滚动、跳跃或滑动，在Phobos表面留下线性凹痕，形成沟壑[39]。计算机模拟中这些巨石的运动轨迹与部分沟壑的形态一致。然而图片观测到的巨石数量远少于理论预测，并且在大多数沟壑末端未发现对应的巨石残留[40]，这对模型提出了很大挑战。在这样的背景下，该假说需要构建更复杂的巨石动力学模型，考虑风化层的流动性和巨石自身的物理特性，才能更全面地解释其运动与沟壑分布的关系。

综上所述，火卫一表面的沟壑更可能是多种机制协同或序贯作用的产物：潮汐断裂模型可以很好地解释中纬度区域的线性沟壑，而次级撞击模型为簇状排列的沟壑提供了合理的成因假设；巨石移动模型则揭示了Stickney陨石坑周围辐射状沟壑的潜

在形成机制。未来的探测任务将为这些模型的验证提供重要的实验依据。通过更高分辨率的成像技术和样本采集，可以揭示Phobos沟壑的细节特征，并进一步验证不同成因模型的适用性。这些研究不仅有助于解决Phobos表面沟壑的成因之谜，也将深化我们对小天体地貌演化的理解，为探索火星卫星系统的起源和演化提供宝贵线索。

2.3 Phobos 陨石坑

Phobos表面陨石坑的分布、形态及其演化揭示了该天体的撞击历史和风化过程，并为理解行星卫星的形成机制提供了重要线索。

Phobos的表面存在着大量陨石坑，这些陨石坑的大小和分布各异,根据观测，Phobos表面大约有1300个直径大于200 m的陨石坑，70余个陨石坑直径超过 1 km，最大陨石坑为Stickney，直径约 9 km，占卫星主轴三分之一[39][41]。这些陨石坑大部分是由小行星带天体撞击Phobos形成，小部分可能是火星大型撞击事件产生的溅射物与Phobos相撞所导致[36]。陨石坑的形成不仅深刻影响了表面形态，还对整个风化层的产生、结构及物质分布造成影响[42]。根据边缘形态和风化程度，Phobos的陨石坑可分为边缘清晰、边缘平滑、逐渐模糊以及几乎完全消失的四种类型，这反映了不同的形成时间和风化程度[25]。陨石坑随时间不断退化，其边缘由最初的尖锐锋利逐渐风化变得模糊，甚至最终完全被风化层覆盖。Phobos陨石坑的形态不仅包括常见的“碗状”陨石坑，还展现了其他多样化的结构特征，如平底陨石坑、中心堆积陨石坑以及同心状陨石坑[39]。这些形态的形成与Phobos表面双层结构密切相关，即上层为松散的风化颗粒，下层为更为坚实的基岩层。当撞击能量仅作用于风化层时，形成碗状陨石坑；当撞击触及基岩层边界或更深层时，则分别产生平底和同心状陨石坑[43]。当撞击穿透表面风化层后，与基岩的相互作用则会在中心形成明显的堆积特征，进一步支持了风化层的分层假设[43]。Phobos表面还存在少量陨石坑呈现椭圆或多边形结构，可能由低角度撞击或多次叠加撞击形成[32]。

陨石坑分布的统计分析进一步揭示了Phobos表面风化层的厚度与分层现象。风化层的厚度可能存在局部差异，不同深度地层机械强度有所变化，直接影响了陨石坑形态的多样性[1]。风化层中岩石颗粒的分布和压实程度也表明撞击历史和物质沉积的复杂性[11]。由于Phobos绕极轴不断旋转，分层现象还与地形位置相关，例如赤道区域风化层会相对更厚，极地风化层相对更薄[44]。

在航天器对许多陨石坑的拍摄图像中可以发现在陨石坑周围的溅射物中，存在高亮区域与暗部区域，高亮区域可能反映的是浅层存在长石成分[45]，而暗环区域则可能表示风化层深层的碳质成分[46]，或者明亮区域可能与较暗的层具有相同的成分但在风化程度上有差异[44]。通过代入陨石坑的直径与挖掘深度的关系：对于简单的撞击坑，最大挖掘深度通常为弹坑直径的 0.15-0.2 倍[47]，我们可以大致计算出高亮物质或者相对较暗的部分处于的地层深度。这种现象说明Phobos表面的风化层可能存在不连续分布[1]。Phobos表面上少量高亮溅射物呈现的放射状形态与月球上年轻陨石坑的结构相似[48]，该形态可能主要源于撞击冲击波与火卫一表层物质不均一性（如成分、密度的局部差异）的相互作用[49]，这些特征也可能指示了相对年轻的撞击事件，因为其溅射物未被充分空间风化，或者挖掘出了与周围背景反照率不同的次表层物质，从而形成了鲜明对比。根据三轴椭球体模型的计算结果表明Phobos两极的逃逸速度为 10.5-15.5 m/s，亚火星点的逃逸速度为 3.5-13 m/s 并且沿赤道变化很大[25]。这种特性进一步加剧了溅射物分布的不对称性和不均匀性，并影响了局部风化层的形成和堆积[4]。例如在Stickney陨石坑，其东缘的逃逸速度约为2.4 m/s，而西缘可达9.8 m/s，因此会形成了三角形的覆盖层[50]。观测数据中Phobos和火星的颜色极为相近，这暗示着Phobos表面的风化层可能还包含火星溅射物的混合成分，这一现象为火星物质的传输和沉积提供了独特视角[36]。

Phobos 表面地质演化还受到撞击和其他物理过程的持续影响，大撞击事件如Stickney陨石坑的形成，可能将深层物质挖掘至表面，重新分布于全星[51]，并且引发局部地形变化和次生撞击[42]。昼夜温差和震动效应可能同时促使表面颗粒沿坡移动，进一步塑造了地形[31]。这些复杂的地质过程共同作用

使得 Phobos 表面的陨石坑特征与月球和其他小行星存在显著差异。

Phobos 表面的陨石坑及其相关地质特征为理解火星系统及太阳系小天体的演化提供了重要线索[52]，未来的任务或将通过采集 Phobos 表面样本，进一步验证风化层分层模型并揭示其物质组成。

2.4 Phobos 表面物质迁移与内部结构

Phobos的表面物质分布与迁移是其多阶段地质演化的综合记录。其表层物质的光谱多样性，为理解物质迁移过程提供了关键证据。将火星来源物质纳入考虑后，这些光谱特征共同指向一个多源性表层模型：即Phobos当前的表层是外来撞击体残留、内生改造产物及可能火星物质的混合体，其分布受到撞击挖掘、轨道动力学等迁移过程的改造[36]。

Phobos的反射率空间分异显著，根据影像可划分为光谱红化程度差异明显的红色与蓝色单元[11]。红色单元普遍分布对应长期空间风化形成的成熟表土层，富含水合矿物或氧化产物；蓝色单元则呈离散斑块状聚集于撞击坑边缘（如Stickney陨石坑东缘），可能代表新鲜出露的金属矿物或撞击熔融物质[2],[53],[54]。这种二元性反映了表层物质暴露年龄与改造强度的空间分异。

作为Phobos最大撞击构造，Stickney陨石坑及周边区域是解析其地质过程的关键。坑内及邻近区域的红色单元集中分布，而东缘局部富集蓝色单元[10]。撞击动力学分析表明，Phobos的同步自转轨道特性导致溅射物抛射路径具有方向性差异：西部溅射物因逃逸速度较高形成广泛覆盖，而东部溅射物受限于坑缘局部堆积[4]。此不对称性为地层结构研究提供了关键约束，目前存在两类竞争性假说：（1）分层模型认为Phobos以蓝色基岩为主体，表层覆盖红色风化层，Stickney撞击穿透红色层并喷出混合物质，后续撞击则依据深度揭露不同层位[9]；（2）混合模型主张红蓝单元呈非均匀块体混杂撞击发生于二者交界带，造成溅射物成分随方位显著变化[1]。两类模型均能解释部分观测现象：蓝色单元覆盖区出现的红色溅射物支持分层结构，而局部出露的高反射率蓝色物质可能指示存在原生基岩[11]。

如图一，Stickney陨石坑以东区域分布的蓝色单元，其地形相对陡峭，而与之“一墙之隔”的坑内南壁虽也陡峭却呈现红色单元，二者形成鲜明对比[2],[50]。这种差异源于其动力环境的不同：Stickney陨石坑以东区域的初始坡度高于坑内南壁区域，加之Phobos轨道偏心性引起的周期性潮汐力变化（每轨道周期坡度波动可达2°），共同触发了其表面有效的质量迁移。这一过程被称为冷流机制（Cold-Flow Mechanism），具体指在低重力环境下，由轨道偏心性驱动的周期性潮汐力变化导致表层风化层颗粒发生缓慢的塑性流动。该迁移速率受局部地形的初始坡度、坡度变化幅度以及物质流变特性共同调控[2]。该作用通过持续暴露新鲜表面物质，可抑制空间风化效应，从而维持蓝色单元的光谱特征[2]。

Phobos表层并非静态体系，而是潮汐应力（含长期轨道衰变与周期性变化）、撞击扰动与冷流迁移等多过程耦合的动态界面。

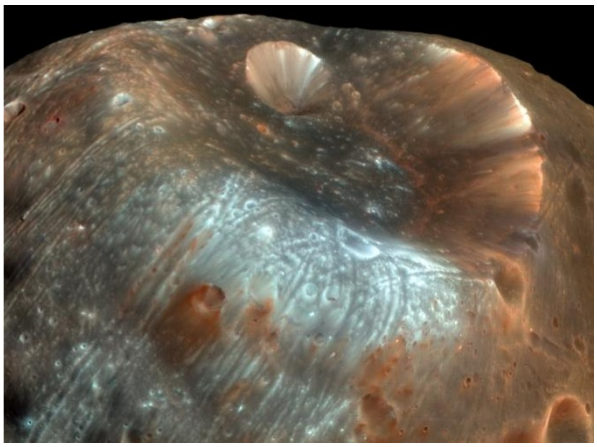


图1 Phobos表面的红蓝单元分布

Fig 1.Distribution of red and blue units on the surface of Phobos.

NASA/JPL-Caltech/University of Arizona

3 火星双卫星起源

在探讨Phobos的起源时，通常也需将Deimos纳入整体考量。这两颗卫星不仅在轨道构型上高度相似，其物质组成、密度与反射光谱等物理特征也显示出明显的关联性。具体而言，Phobos直径约22公里，而Deimos更为细小，仅约12公里，两者均呈不规则状，且表面反射率极低[1]。它们的轨道接近圆形，偏心率极小，并与火星赤道面基本共面——这种规则轨道在被捕获的小行星中极为罕见。此外，两者的密度均低于火星典型岩石，其光谱特征更接近C型（碳质）小行星，表明它们的组成可能与火星本身存在显著差异。因此，对Phobos形成机制的研究难以脱离对Deimos的共同分析。有充分理由认为，两者的形成可能由同一类天体物理过程驱动。

上述物理特性之间的矛盾，进一步催生了解释其起源的两大主流假说。捕获假说认为，它们原是位于小行星带中的天体，后期被火星引力捕获并进入当前轨道[7]。而原位形成假说则推测，它们形成于火星附近，具体包括三种主要模型：一是巨撞击溅射模型，认为它们源于火星早期遭受的一次巨大撞击后形成的碎屑盘吸积而成[4]；二是循环撞击形成模型，强调由后续多次撞击事件持续提供环绕火星的碎石[5]；三是共吸积模型，主张它们与火星几乎同时由同一片原始星云物质凝聚形成[6]。

假说之间争论的焦点在于如何协调火卫光谱特性与轨道特性之间的内在矛盾。若要评判其优劣则需深入剖析它们各自的动力学过程与物理解释。捕获假说虽能自然地解释Phobos与C型小行星相似的光谱特征，却必须依赖复杂的轨道耗散机制来解释其当前规则、共面的圆轨道；而原位形成的各类模型虽能圆满地解释其轨道特性，却又难以说明其物质组成为何与火星本身存在显著差异。下文将分别对这两类假说的理论基础、支持证据与核心挑战进行详细探讨，以揭示当前研究的关键症结与未来验证的方向。

3.1 捕获假说

捕获假说认为，Phobos和Deimos起源于太阳系小行星带的某颗小行星，通过某种动力学机制被火星引力捕获[55]。这一假说的主要支持证据来自于两颗卫星的光谱特性和密度：Phobos和Deimos表面暗淡，反射率极低，光谱中表现出2.8μm的吸收峰，这被认为是表面含有水合矿物的标志，与碳质小行星的反射光谱相吻合。尽管光谱特性为捕获假说提供了有力支持，但太阳风的长期作用可能对这些光谱特性产生了重要影响。Phobos和Deimos的2.8 μm吸收峰可能并非源自其原始成分，而是太阳风中的质子与表面矿物相互作用形成的羟基。这种现象可能会掩盖其真正的光谱特征，使其与碳质小行星表现出虚假的相似性[3]。这意味着虽然光谱特性为捕获假说提供了证据，但其解读可能受到环境效应的显著干扰。

如何使被捕获的小行星从随机轨道演化为Phobos和Deimos目前的规则轨道，是一个尚未解决的挑战。通常，被捕获的天体会保持高偏心率和随机倾角，但Phobos和Deimos的轨道却近乎圆形且与火星赤道面对齐。这种规则性无法通过简单的捕获过程实现。为了解释这一轨道变化过程，研究人员提出火星在早期形成阶段可能拥有致密的大气层[7]，这些气体通过与捕获天体的相互作用降低其轨道能量，从而使轨道倾角和离心率逐渐减小，最终趋于规则化[55][56]，如图2左上示意图。当气体密度足够高且小行星进入轨道的初始速度在一定范围内时这种机制可以有效地解释轨道的圆化过程。然而这一模型需要火星早期存在异常高密度的大气层：气体密度大于$4.9*10^3\ kg/m^3$[7]，这一点目前缺乏直接证据支持。

当前理论研究指出，暂时性捕获（Temporary Capture）是解释Phobos可能起源的关键机制之一。数值模拟表明，约0.1%的日心轨道小天体在穿越火星希尔球（Hill sphere）时，可因其雅可比能量（Jacobi energy）被限制在由L1和L2拉格朗日点构成的势能壁垒内，从而进入暂时性捕获状态[57]。在此状态下天体会与火星发生多次近距交会。要实现从暂时性捕获到永久性捕获的转变，核心机制并非轨道能量持续低于某一阈值，而是需要外部阻尼力（如火星原初气体包层的气动阻力）来耗散其轨道能量[8]。后续的轨道演化（如圆化和衰减）则强烈依赖于气体环境的特性（如密度分布和共转状态）以及气体消散的时机[7]。该理论框架的优势在于无需引入异常高密度的原始大气模型[57]，其物理机制更符合火星早期轨道动力学环境特征，与行星形成晚期吸积阶段的天体迁移模型具有更好的兼容性。

捕获区域的来源也是争议之一，理论上Phobos和Deimos可能来自小行星带的外侧，也可能来源于木星附近的轨道区域。然而要使这些小行星迁移至火星附近并被捕获，需要复杂的轨道演化和外部扰动这一过程在目前的动力学模型中尚未得到充分的支持和验证。

3.2原位形成假说

与捕获假说相比，原位形成假说在解释两颗卫星规则的轨道方面更具优势，原位形成假说提出，Phobos和Deimos的起源问题存在三种假说：巨型撞击模型、循环撞击形成模型以及共吸积模型，如图2所示。

3.2.1巨型撞击模型

火星北半球的Borealis盆地或类似的巨大撞击事件为Phobos和Deimos的形成提供了初始物质[58]。这些巨大撞击形成的碎片被抛入轨道，逐渐吸积成两颗卫星。Borealis盆地尺寸为$10600\,km \times 8500\,km$，可能是由一颗直径大约2,000 km的天体以每秒6公里以上的速度斜向撞击火星形成的。支持巨型撞击模型的关键证据来自碎片环的动力学演化：碎片通过相互碰撞摩擦耗散能量使初始的大偏心率与大倾角轨道逐渐圆化；与此同时，火星赤道隆起的不对称引力场对这一演化过程施加了关键约束，驱使碎片轨道平面最终与火星赤道面对齐[53][59]。

巨型撞击模型也面临挑战，大多数撞击碎片集中在火星的流体洛希极限以内，而一部分碎片分布在外侧。流体洛希极限内的碎片由于潮汐力难以聚集，而位于洛希极限外的碎片则更容易吸积形成卫星。Borealis过于巨大，撞击会在火星周围形成极大的碎片盘，难以形成质量与Phobos和Deimos相符的小卫星。火星上的其他大型撞击盆地，如Utopia或Hellas，更可能提供合适的碎片量。Phobos和Deimos的光谱特性显示，它们的物质组成更接近碳质小行星，而非典型的火星地幔物质。这种矛盾表明在撞击后吸积过程中可能混入了撞击体的物质，或在吸积过程中碎片盘经历了某种改造[58]。

3.2.2 循环撞击形成模型

进一步的数值模拟研究提出了循环撞击形成模型，补充了解释两颗卫星轨道规则性以及成分差异和可能的形成机制。该模型认为，Phobos和Deimos并非一次性形成，而是经历了多代的卫星-环转化过程。如图2右侧图示，大质量的初代卫星首先在流体洛希极限外形成，通过潮汐作用逐渐向内迁移，其轨道接近刚体洛希极限时，受到火星的潮汐力作用可能被破坏并重新形成环状物质。这些物质再度吸积并形成新一代的卫星[5]。Phobos和Deimos的质量和轨道特性与这一模型高度吻合[4]。

循环撞击形成模型还可以解释 Phobos 的轨道衰减现象。当前观测数据显示Phobos 的轨道以每年约2厘米的速度向火星靠近，这可能最终导致它在20-40百万年内瓦解并重新形成一个环，继续着星-环迭代事件[5]。环-卫星循环模型还可以解释火星表面的部分地质特征。由于碎片盘的动力学过程，一些碎片可能以极低的入射角返回火星表面形成细长形态的撞击坑。

尽管卫星-环循环模型可以很好地解释两颗卫星的起源问题，但也存在一些挑战和尚未解决的难题自存在观测手段以来，人类从未观测到火星周围有环或者环的残余存在，模型假设的初代卫星的形成条件也尚不明确，这种循环是否能够解释Phobos和Deimos的物质组成仍需进一步探讨[60]。

近期的高精度模拟研究对循环撞击形成模型的可行性提出了新的质疑。该模型的核心在于，被潮汐瓦解的卫星物质能有效形成一条稳定的、足以再生新卫星的环。然而有研究指出，由于Phobos内部颗粒间可能存在较强的凝聚力，其在穿越刚体洛希极限时可能不会完全碎裂和扩散，而是以较大块体的形式直接坠向火星，从而无法形成再生卫星所需的足够密集的碎片环[61]。因此，循环模型能否真实发生，在很大程度上取决于Phobos的内部结构和力学性质，这有待未来探测的直接验证。

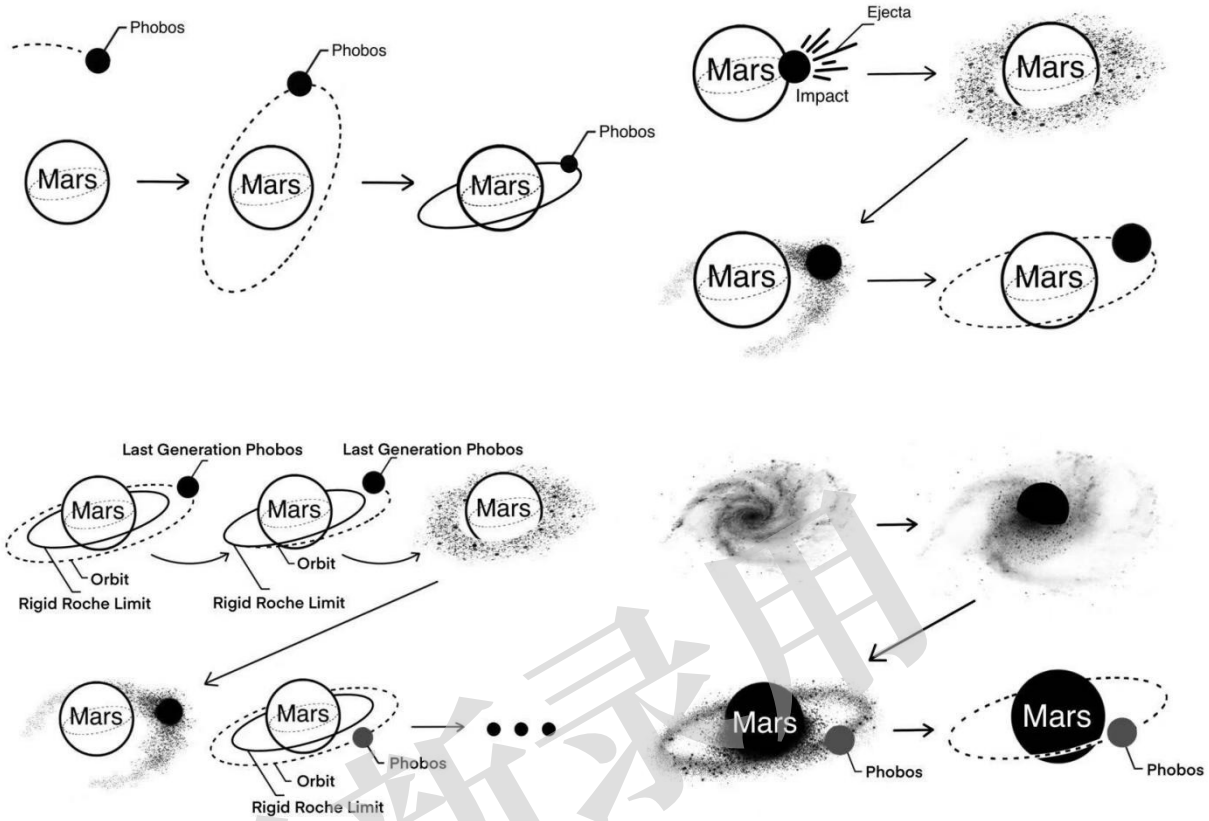
3.2.3 共吸积模型

原位形成假说下还存在一种共吸积模型 (Co-accretion Model)。该模型认为Phobos和Deimos与火星形成于同一时期的原始太阳星云中，作为火星形成的副产品，在火星的引力主导区内直接吸积形成[6]。当原火星通过“卵石吸积”（pebble accretion）过程快速生长时，部分围绕太阳运行的固态颗粒在进入原火星的引力范围后，可能被围绕火星运行的卫星胚胎所吸积，从而使得行星与卫星共同生长[62][63]。这一过程若发生在一个与火星自转方向共转的气体包层内，气体拖拽效应会显著减弱从而有利于固体颗粒在轨道上稳定存在并吸积成星[7]。该假说能很自然地解释两颗卫星规则、共面且接近圆形的轨道特性，因为其形成伊始就处于火星赤道平面附近的准圆轨道上。

共吸积假说面临两大核心挑战。动力学模拟表明，在火星周围稠密的原始气体包层中，固体颗粒极易因气体阻尼作用而损失轨道能量，从而快速螺旋坠入行星，而非在轨道上稳定地聚集成卫星[7]。除非存在一个与行星自转强烈耦合、近乎刚体共转的气体环境，才能有效抵消这种衰减效应，但构建并维持这样的环境需要特定的物理条件（如原行星磁场的存在和特定的盘气体黏滞度），其普遍性尚存疑问[64][65]。共吸积模型预测两颗卫星的物质成分应与火星本体相近，然而当前光谱数据显示，Phobos和Deimos的可见-近红外反射谱与碳质小行星高度相似，显示出低反照率与火星（其整体成分更接近于非碳质球粒陨石，以硅酸盐和金属铁为主，挥发性组分较低）存在显著差异[3]。这种成分上的不同强烈暗示火星卫星的原料库可能不同于火星本身。

未来通过近距离探测和样本返回（如MMX任务）进行精确的同位素分析，将为验证或否定共吸积假说提供决定性证据。若Phobos的样本显示出与火星陨石相同的Ti、Cr、Mo等核素同位素组成，则强有力地支持其与火星同源；反之，若其同位素特征与碳质球粒陨石相符，则共吸积假说将面临极大困难。

最新录入



2 四种模型图示：依次为捕获模型、巨型撞击模型、循环撞击形成模型、共吸积模型。

Fig 2. The diagrams of four models: Asteroid capture, Giant impact, Recycling and Co-accretion

最新录用

3.3 假说的对比验证方法

通过光谱特征的差异可以有效区分Phobos的起源机制。捕获假说认为，这两颗卫星是太阳系小行星带中的D型或C型小行星，被火星引力捕获后保留了原始的光谱特性。光谱应表现为低反射率、接近平坦的曲线，且可能在2.8 μm和0.65 μm处存在吸收峰，这些特征与典型的碳质小行星一致[3][22]。而在原位形成假说下，火卫一其光谱特征更可能与火星地壳物质相似。如果这一假说成立，Phobos和Deimos的光谱可能在水合矿物或铁矿物附近的波段出现吸收峰，与火星表面物质特性更为相似[3][22]。原位形成的卫星可能由于撞击溅射物的加热效应而显示出更明显的矿物吸收特征[3]。

同样通过样品分析可以直接区分Phobos是属于捕获的小行星或是由火星撞击形成的产物：如果捕获假说成立，这两颗卫星的样品应在同位素组成上显示出与碳质小行星相似的特征，尤其是氧、氢、氮等元素的同位素比率，与火星地幔或地壳物质将存在显著差异[4]。而原位形成假说则预测Phobos和Deimos的样品应显示出火星地壳物质与外来撞击物质的混合特征，可能在同位素比率上接近火星，但仍保留一定的撞击体来源特征[53]。原位形成的样品可能还含有撞击熔融物的特征矿物颗粒，而捕获假说的样品则更可能显示未经历强烈撞击的原始物质特性[22]。

捕获假说和原位形成假说分别在成分和动力学上具有优势，同时也各自存在无法回避的局限性。此外，Bagheri等人通过潮汐演化回溯计算发现，两颗卫星的轨道在约10亿至27亿年前可能相交，据此提出Phobos和Deimos可能是同一颗母卫星解体后的残余[66]，这为两者的共同起源提供了新的动力学证据。Phobos和Deimos的起源问题仍未得到明确的答案。

4 未来Phobos探测计划

在未来的火星探测任务中，探索Phobos将成为关键目标之一。后续天问一号拓展任务和MMX任务（Martian Moon eXploration）中都包含了对Phobos的探测。这些任务的成功实施预期为我们解开Phobos的起源、物质构成以及与火星之间的关系提供关键证据，推动人类对火星卫星的深入探索。

2020年7月23日“天问一号”任务发射，2021年2月“天问一号”近火制动，进行环绕火星探测，近火点高度调整至约265千米。5月，“天问一号”着陆巡视器成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区，同时环绕器实施近火制动进入周期为8.2小时中继通信轨道，之后进行测图轨道阶段。2022年6月天问一号完成所有既定任务。拓展任务进一步对火星系统进行科学探测其中对Phobos进行了初步的遥感观测，尤其是对Phobos的轨道、形态、表面特征等进行了一些基本的测量。通过高清晰度的拍摄，让我们有机会能够更清楚地了解Phobos的地质特征、撞击坑分布以及可能的风化层，也间接揭示了火星和Phobos之间的引力相互作用，进一步加深了我们对火星卫星起源的理解，为未来可能的Phobos探测任务提供了宝贵的初步数据[14]。

MMX任务是由日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）主导的火星卫星探测计划，将深入研究火星的两颗卫星：Phobos和Deimos。任务的目标是解答火星卫星的起源、物质组成以及它们与火星之间的相互关系。MMX任务将通过多种先进的探测方法来实现这一科学目标。任务将搭载高分辨率相机和近红外光谱仪，对Phobos和Deimos进行详细的成像和光谱分析。这些仪器将帮助科学家获取包括矿物组成、光谱特征以及可能存在的水合矿物或铁矿物等的两颗卫星表面物质的关键信息[67]。利

用这些光谱数据将能够推断卫星的物质来源，并推测它们是否与火星的成分相似，或是否源自太阳系的其他区域。MMX 任务同样将进行高精度的轨道观测，研究 Phobos 和 Deimos 的轨道演化、物理特性及其与火星的引力交互作用。通过这些观测，科学家可以进一步了解卫星的质量分布、形状、密度等物理特性[42]。MMX 任务的核心是对 Phobos 表面样本进行采集和返回：任务将使用专门设计的采样装置，如采样臂或钻探工具，从 Phobos 表面提取土壤和岩石样本。返回的样本将通过一系列先进的检测方法进行分析，包括化学成分分析、同位素比值测定和矿物学分析等[67][68]。这些样本的详细分析将帮助确认 Phobos 的物质构成，为我们提供关于火星早期环境、撞击事件及风化过程的重要信息，这对于揭示它们的起源和演化过程至关重要[68][69]。

Phobos 和 Deimos 的起源至今仍然存在争议，尤其是它们是否通过捕获形成，还是由火星的撞击事件产生。通过对样本的详细分析，科学家将能够验证不同的起源假说，并为火星卫星系统的形成机制提供直接证据[68]。MMX 任务对 Phobos 和 Deimos 的研究将有助于拓展我们对太阳系其他小天体的认识，尤其是在低重力环境下物质的风化、迁移和演化过程。MMX 任务将为我们提供了一个理想的实验室，帮助我们理解类似天体的物质组成、演化过程和撞击历史。

5 总结与展望

近年来，火星快车、MRO 等探测任务获得的高分辨率数据，将对 Phobos 的研究推向新高度。我们对其独特地质特征、内部结构及轨道演化的认识取得了重大突破。这些成果不仅揭示了火卫一自身的演化历史，更为理解小天体的物理性质、太阳系的早期演化等关键问题提供了全新的视角。

Phobos 表面布满了许多显著的特征，如沟壑、陨石坑和清晰的光谱分区，这些都为其独特的地质背景提供了线索。从潮汐力作用引起的断裂，到撞击形成的次级沟壑，再到 Stickney 陨石坑的巨大影响，种种地质现象描绘了 Phobos 漫长的演化历程。尽管目前有多个关于 Phobos 形成的假说，但每种假说都面临着一定的挑战，尤其是在解释其物质构成、表面特征、低密度特征和轨道衰减等方面，仍需要更多的实证数据来验证。

天问一号拓展任务和 MMX 任务无疑是解开 Phobos 起源之谜的关键。天问一号拓展任务通过拍摄清晰的几乎覆盖整个 Phobos 星体表面的图像可以帮助我们构建更加精准的 3D 星体模型，为未来提供良好的研究基础。通过从 Phobos 表面采集样本并将其带回地球，MMX 任务将为我们提供有关 Phobos 物质构成和内部结构的直接证据。

尽管我们已经对 Phobos 有了许多深入的认识，但关于这颗火星卫星的诸多未解之谜仍然存在。未来探索 Phobos 的航天任务将为我们提供丰富的数据支持，帮助科学家们进一步验证现有的假设并完善相关模型。随着对 Phobos 的研究不断深入，我们不仅将揭开这颗卫星的神秘面纱，还将在更广泛的层面上推进太阳系乃至整个宇宙的探索。

6 参考文献

[1] BASILEVSKY A T, LORENZ C A, SHINGAREVA T V, *et al*. The surface geology and geomorphology of Phobos[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **102**: 95-118

[2] BALLOUZ R L, BARESI N, CRITES S T, *et al*. Surface refreshing of Martian moon Phobos by orbital

eccentricity-driven grain motion[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(4): 229-234

[3] FRAEMAN A A, MURCHIE S L, ARVIDSON R E, *et al*. Spectral absorptions on Phobos and Deimos in the visible/near infrared wavelengths and their compositional constraints[J]. *Icarus*, 2014, **229**: 196-205

[4] ROSENBLATT P. The origin of the Martian moons revisited[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2011, **19**(1): 44

[5] HESSELBROCK A J, MINTON D A. An ongoing satellite-ring cycle of Mars and the origins of Phobos and Deimos[J]. *Nature Geoscience*, 2017, **10**(4): 266-269

[6] WOOLFSON M, THUNT G E, WILKINS G A, PASCU D, *et al*. The Martian satellites—100 years on[J]. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 1978, **19**: 101-107

[7] HUNTEN D M. Capture of Phobos and Deimos by photoatmospheric drag[J]. *Icarus*, 1979, **37**(1): 113-123

[8] SASAKI S. Origin of Phobos-aerodynamic drag capture by the primary atmosphere of Mars[C]//Lunar and Planetary Science Conference. 1990: 1069-1070 .

[9] POLLACK J B, VEVERKA J, NOLAND M, *et al*. Mariner 9 television observations of Phobos and Deimos[J]. *Icarus*, 1972, **17**(2): 394-407

[10] TOLSON R H, DUXBURY T C, BORN G H, *et al*. Viking first encounter of Phobos: preliminary results[J]. *Science*, 1978, **199**(4324): 61-64

[11] MURRAY J B, ROTHERY D A, THORNHILL G D, *et al*. The origin of Phobos' grooves and crater chains[J]. *Planetary and Space Science*, 1994, **42**(6): 519-526

[12] WITASSE O, DUXBURY T, CHICARRO A, *et al*. Mars Express investigations of Phobos and Deimos[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **102**: 18-34

[13] PAJOLA M, ROUSH T, DALLE ORE C, *et al*. Phobos MRO/CRISM visible and near-infrared (0.5-2.5 μm) spectral modeling[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **154**: 63-71

[14] LIU S H, KONG J, CAO J F, *et al*. Precise orbit determination for Tianwen-1 during mapping phase[J]. *Astrodynamics*, 2024, **8**(3): 471-481

[15] KURAMOTO K. Origin of Phobos and Deimos awaiting direct exploration[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2024, **52**: 495-519

[16] ARCHINAL B A, A'HEARN M F, BOWELL E, *et al*. Report of the IAU Working Group on cartographic coordinates and rotational elements: 2009[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2011, **109**(2): 101-135

[17] FANALE F P, SALVAIL J R. Evolution of the water regime of Phobos[J]. *Icarus*, 1990, **88**(2): 380-395

[18] LE MAISTRE S, RIVOLDINI A, ROSENBLATT P. Signature of Phobos' interior structure in its gravity field and libration[J]. *Icarus*, 2019, **321**: 272-290

[19] GUO X, YAN J G, ANDERT T, *et al*. A lighter core for Phobos?[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **651**: A110

[20] ZHONG Z, WEN Q L, YAN J G, *et al*. The mean moment of inertia for irregularly shaped Phobos and its application to the constraint for the two-layer interior structure for the Martian moon[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(12): 3162

[21] MURCHIE S L, BRITT D T, HEAD J W, *et al*. Color heterogeneity of the surface of Phobos: relationships to geologic features and comparison to meteorite analogs[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, **96**(B4): 5925-5945

[22] RIVKIN A S, BROWN R H, TRILLING D E, *et al*. Near-infrared spectrophotometry of Phobos and Deimos[J]. *Icarus*, 2002, **156**(1): 64-75

[23] DUXBURY T C, VEVERKA J. Viking imaging of Phobos and Deimos: an overview of the primary mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977,

最新录用

82(28): 4203-4211

[24] DUXBURY T C. Phobos: control network analysis[J]. *Icarus*, 1974, **23**(2): 290-299

[25] DAVIS D R, HOUSEN K R, GREENBERG R. The unusual dynamical environment of Phobos and Deimos[J]. *Icarus*, 1981, **47**(2): 220-233

[26] SHI X, WILLNER K, OBERST J, *et al*. Working models for the gravitational field of Phobos[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, **55**(2): 358-364

[27] YANG Y Z, YAN J G, JIAN N C, *et al*. Numerical model of Phobos' motion incorporating the effects of free rotation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, **685**: A13

[28] GUO X, YAN J G, YANG X, *et al*. Simulation of Phobos gravity field estimation from Tianwen-1 flybys and implications for the modelling of Phobos' internal structure[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, **520**(1): 925-934

[29] TIAN Y, ZHENG Y C. AstroSeis: a 3D boundary element modeling code for seismic wavefields in irregular asteroids and bodies[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, **91**(6): 3528-3538

[30] THOMAS P. Surface features of Phobos and Deimos[J]. *Icarus*, 1979, **40**(2): 223-243

[31] SHINGAREVA T V, KUZMIN R O. Mass-wasting processes on the surface of Phobos[J]. *Solar System Research*, 2001, **35**(6): 431-443

[32] WILSON L, HEAD J W. Groove formation on Phobos: testing the Stickney ejecta emplacement model for a subset of the groove population[J]. *Planetary and Space Science*, 2015, **105**: 26-42

[33] CHENG B, ASPHAUG E, BALLOUZ R L, *et al*. Numerical simulations of drainage grooves in response to extensional fracturing: testing the Phobos groove formation model[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, **3**(11): 249

[34] HURFORD T A, ASPHAUG E, SPITALE J N, *et al*. Tidal disruption of Phobos as the cause of surface fractures[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, **121**(6): 1054-1065

[35] RAMSLEY K R, HEAD J W. The origins and geological histories of Deimos and Phobos: hypotheses and open questions[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(8): 86

[36] RAMSLEY K R, HEAD J W. Mars impact ejecta in the regolith of Phobos: bulk concentration and distribution[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, **87**: 115-129

[37] HEAD J W, CINTALA M J. Grooves on Phobos: Evidence for Possible Secondary Cratering Origin[R]. NASA TM-80339. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1979: 19–21.

[38] NAYAK M, ASPHAUG E. Sesquinary catenae on the Martian satellite Phobos from reaccretion of escaping ejecta[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 12591

[39] MURRAY J B, HEGGIE D C. Character and origin of Phobos' grooves[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **102**: 119-143

[40] THOMAS P C, VEVERKA J, SULLIVAN R, *et al*. Phobos: regolith and ejecta blocks investigated with Mars Orbiter Camera images[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, **105**(E6): 15091-15106

[41] KARACHEVTSEVA I, OBERST J, SHINGAREVA K, *et al*. Global Phobos geodatabase and GIS analyses[C]//Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2012: 1342

[42] ASPHAUG E, MELOSH H J. The Stickney impact of Phobos: a dynamical model[J]. *Icarus*, 1993, **101**(1): 144-164

[43] QUAIDE W L, OBERBECK V R. Thickness determinations of the lunar surface layer from lunar impact craters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, **73**(16): 5247-5270

[44] PIETERS C M, MURCHIE S, THOMAS N, *et al*.

最新录用

Composition of surface materials on the moons of Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **102**: 144-151

[45] HAWKE B R, BLEWETT D T, LUCEY P G, *et al*. The origin of lunar crater rays[J]. *Icarus*, 2004, **170**(S1): 1-16

[46] PRONIN A A, NIKOLAEVA O V. Dark halos of the Phobos craters and shock reproduction of carbon chondrites[J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1982, **265**: 429-432

[47] HÖRZ F, GRIEVE R, HEIKEN G, *et al*. Lunar surface processes[M]//HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 61-120

[48] MUEHLBERGER W R, BATSON R M, BOUDETTE E L, *et al*. Preliminary Geologic Investigation of the Apollo 16 Landing Site[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1972: 6

[49] SHUVALOV V. A mechanism for the production of crater rays[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, **47**(2): 262-267

[50] THOMAS P C. Ejecta emplacement on the Martian satellites[J]. *Icarus*, 1998, **131**(1): 78-106

[51] SCHMEDEMANN N, MICHAEL G G, IVANOV B A, *et al*. The age of Phobos and its largest crater, Stickney[J]. *Planetary and Space Science*, 2014, **102**: 152-163

[52] LEE P. First International Conference on the Exploration of Phobos and Deimos: Summary and Recommendations[R]. Mars Institute, 2009: 6-7

[53] HYODO R, GENDA H, CHARNOZ S, *et al*. On the impact origin of Phobos and Deimos. I. Thermodynamic and physical aspects[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **845**(2): 125

[54] THOMAS N, STELTER R, IVANOV A, *et al*. Spectral heterogeneity on Phobos and Deimos: HiRISE observations and comparisons to Mars Pathfinder results[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(13): 1281-1292

[55] POLLACK J B, BURNS J A, TAUBER M E. Gas drag in primordial circumplanetary envelopes: a mechanism for satellite capture[J]. *Icarus*, 1979, **37**(3): 587-611

[56] ADACHI I, HAYASHI C, NAKAZAWA K. The gas drag effect on the elliptic motion of a solid body in the primordial solar nebula[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 1976, **56**(6): 1756-1771

[57] HIGUCHI A, IDA S. Temporary capture of asteroids by an eccentric planet[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **153**(4): 155

[58] CANUP R, SALMON J. Origin of Phobos and Deimos by the impact of a Vesta-to-Ceres sized body with Mars[J]. *Science Advances*, 2018, **4**(4): eaar6887

[59] GOLDREICH P. Inclination of satellite orbits about an oblate precessing planet[J]. *The Astronomical Journal*, 1965, **70**(1): 5-9

[60] JACOBSON R A. The orbits and masses of the Martian satellites and the libration of Phobos[J]. *The Astronomical Journal*, 2010, **139**(2): 668-679

[61] MADEIRA G, CHARNOZ S, ZHANG Y, *et al*. Exploring the recycling model of Phobos formation: rubble-pile satellites[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **165**(4): 161

[62] JOHANSEN A, LAMBRECHTS M. Forming planets via pebble accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, **45**: 359-387

[63] JOHANSEN A, RONNET T, BIZZARRO M, *et al*. A pebble accretion model for the formation of the terrestrial planets in the Solar System[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(8): eabc0444

[64] KUROKAWA H, TANIGAWA T. Suppression of atmospheric recycling of planets embedded in a protoplanetary disc by buoyancy barrier[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **479**(1): 635-648

[65] KUWAHARA A, KUROKAWA H, IDA S. Gas flow around a planet embedded in a protoplanetary disc: dependence on planetary mass[J]. *Astronomy &*

最新录用

Astrophysics, 2019, **623**: A179

[66] BAGHERI A, KHAN A, EFROIMSKY M, *et al*. Dynamical evidence for Phobos and Deimos as remnants of a disrupted common progenitor[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(6): 539-543

[67] HIRATA K, USUI T, HYODO R, *et al*. Mixing model of Phobos' bulk elemental composition for the determination of its origin: multivariate analysis of MMX/MEGANE data[J]. *Icarus*, 2024, **410**: 115891

[68] MIYAMOTO H, NIIHARA T, WADA K, *et al*. Surface environment of Phobos and Phobos simulant UTPS[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**(1): 214

[69] USUI T, BAJO K I, FUJIYA W, *et al*. The importance of Phobos sample return for understanding the Mars-moon system[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(4): 49

最新录用