



小行星的起源、物理化学特性及其与防御的关联

张东亮¹, 李世杰^{2*}, 沈德汗^{2,3}, 王得亮^{2,3}, 赵海斌⁴, 李明涛⁵, 龚自正⁶

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083

2. 中国科学院地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

5. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

6. 深空探测实验室, 北京 100089

* 联系人, E-mail: lishijielpsc@mail.gyig.ac.cn

2025-08-24 收稿, 2026-01-09 修回, 2026-01-09 接受, 2026-01-12 网络版发表

空间碎片与近地小行星防御科研专项(KJSP 2023020301)、贵州省高层次创新型人才项目(GCC[2022]017-2)和国家自然科学基金(42173046)资助

摘要 从内太阳系中温区到外太阳系低温区, 小行星呈带状分布, 形态、大小各异, 其起源与特征不仅与太阳系早期物质分布密切相关, 还受形成后物理化学作用及天体碰撞等多种因素影响. 长期以来, 针对小行星开展的各项研究为验证太阳系演化、行星形成理论, 以及地外资源探索等积累了丰富的基础资料. 然而, 随着越来越多的潜在危险小行星(potentially hazardous asteroids, PHAs)被识别确认, 地外天体撞击对地球和人类的威胁日益受到关注, 使得为小行星撞击风险评估和防御提供数据支撑也成为小行星科学研究的重要使命. 本文在详细介绍不同类型小行星的起源、空间分布及物理化学特征的基础上, 归纳总结了小行星的潜在撞击威胁及其物理属性与撞击防御的关联, 有望促进我国对地外天体及其资源的研究认识, 同时积极推动我国在小行星防御领域的系统布局.

关键词 小行星起源, 轨道特征, 物质组成, 化学成分, 小行星防御

小行星保存有太阳系形成初期的物质成分^[1-3], 且不同类型小行星对应着不同的形成环境和物质条件^[4,5], 因此蕴含着太阳系起源以及行星形成与演化机制等关键科学信息^[6,7], 被称为太阳系物质演化的“活化石”^[8]. 长期以来, 国内外学者通过光谱观测、陨石类比等方式对它们的物理化学特征进行探索^[9-12], 并以此来揭示其起源与演化历史^[13,14], 同时也为理解太阳系物质循环与生命前有机分子的来源搜寻重要证据^[4,15]. 近年来, “OSIRIS-Rex”^[16]、“Hayabusa”^[17]以及“Hayabusa2”^[18]针对不同类型小行星采样返回的研究, 极大地

推动了行星科学以及天体化学的发展, 更是为小行星探索和资源开发奠定了基础.

然而, 地表已经确认的190多个撞击坑^[19], 表明自形成以来漫长时间里地球一直承受着各类大型陨石以及小型天体的撞击. 据美国国家航空航天局(NASA)近地天体研究中心(CNEOS)统计, 截至2025年8月, 潜在危险小行星(potentially hazardous asteroids, PHAs)已达2504颗. 尽管短期内这些小行星撞击的概率非常低, 但一旦发生, 后果可能极其严重^[20-22]. 因此, 近年来科学界和国际组织正在努力尝试多种防御措施来降低这种

引用格式: 张东亮, 李世杰, 沈德汗, 等. 小行星的起源、物理化学特性及其与防御的关联. 科学通报, 2026, 71: 3858–3871

Zhang D, Li S, Shen D, et al. The origin, physical and chemical properties of asteroids, and their association with defense (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3858–3871, doi: [10.1360/CSB-2025-5409](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5409)

风险^[23]。2022年9月, NASA借助DART探测器对直径160米的小行星Dimorphos实施的动能撞击试验^[24], 开创了人类主动干预天体运动轨迹的先例, 不仅成功使其轨道发生偏转, 并且将其环绕主星的周期缩短了4.5%。中国也于2024年宣布启动“近地小行星防御系统”(www.cnsa.gov.cn), 计划在2027~2029年间对直径约30米的小行星实施在轨演示验证任务。

空间科技的发展表明积极的防御措施是未来减少小行星撞击危害的关键, 而这种技术所需的核心信息是目标小行星的成分、结构以及轨道等物理化学数据。因此, 深入了解不同类型小行星的物理化学特性以及它们对防御措施的响应, 是评估小行星撞击风险和布局防御任务的重要前提。本文旨在通过介绍小行星的起源、分布位置, 以及不同类别星体的物质特征, 对它们的物理属性及其防御相关性进行归纳总结, 并对未来小行星研究需要为撞击防御提供的贡献与支持进行展望, 以推动我国在小行星防御领域的系统布局。

1 形成机制与后期演化

1.1 小行星起源

陨石研究结合光谱分析的结果表明, 小行星的起源和形成机制不仅与太阳形成早期物质的聚集相关, 还涉及行星形成的过程以及天体碰撞等因素, 具有多重性。

(1) 物质聚集失败的星子。根据太阳星云假说^[15,25], 太阳系最初由巨大的气体尘埃云(太阳星云)坍缩产生, 其中心部分演化为太阳, 周围剩余物质则形成了旋转的盘状结构——星云盘。由于旋转产生的离心力与太

阳引力平衡, 盘内的尘埃颗粒在引力和静电作用下逐渐聚集为体积较大的星子(planetesimal)^[15], 随着对周围物质的持续吸积以及相互合并, 星子会逐步长大并依次发展为行星胚胎再到完整的行星^[26,27]。

星子是星云演化中首个通过引力主导形成的固态天体, 其积累过程是星云物质从分散到聚集的关键^[25]。但这一过程存在重叠性^[3]: 先形成的行星对邻近区域星子的引力扰动会打断其吸积进程^[26,28], 使其无法继续生长, 最终以未完全聚集的星子残留为小行星^[29](图1)^[30,31]。因此, 小行星本质上属于原始星云到行星系统演化过程的“副产品”, 其最初始的物质来源是原始太阳星云的尘埃颗粒。

(2) 碰撞碎片。行星形成早期太阳系发育了大量的星子及“行星胚胎”, 巨行星强大的引力扰动使其轨道变得不稳定^[28], 导致相互出现频繁的高能碰撞^[3,15], 由此产生的碎片若未被行星引力清除而保留下来也会成为小行星^[32]。例如, 灶神星(Vesta)表面巨大的撞击坑表明它是一颗未完全吸积的行星胚胎被碰撞后的残留体^[12,33]。

此外, 小行星之间的碰撞也是常见现象^[34], 尤其是在小行星密集区域^[35]。碰撞引起母体部分剥离或者碎裂产生的碎片, 可成为新的小行星^[36], 甚至形成具有相似轨道特征的“小行星家族”。花神星族(Flora family)包含超过16000颗小行星, 研究表明其源自一次大型碰撞事件的碎片^[37], 这表明碰撞碎裂是维持太阳系小天体数量的重要机制之一。

(3) 彗星残骸和星际捕获物质。部分小行星的产生与彗星存在演化关系^[38,39]。当彗星多次靠近太阳, 表面冰质物受热挥发殆尽, 而核心的岩石-尘埃结构可能残

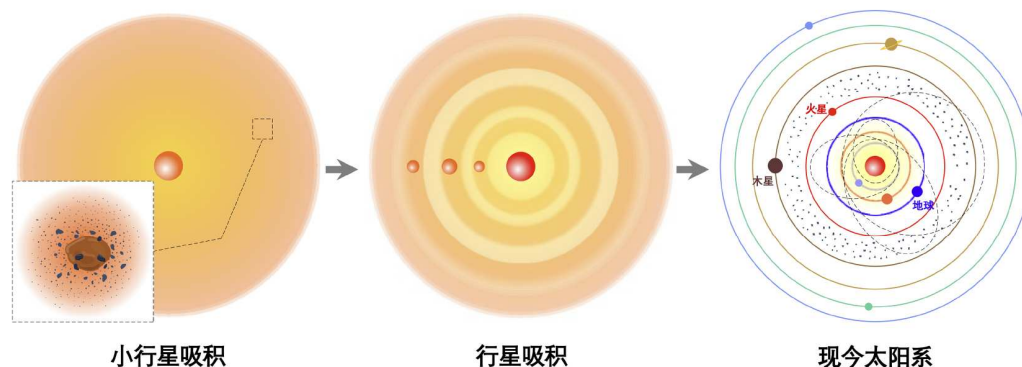


图1 (网络版彩色)太阳系小行星起源和演化流程以及分布位置图示。虚线为近地小行星轨道示意。修改自文献^[30,31]

Figure 1 (Color online) Schematic illustration of the origin, evolutionary pathways, and distribution of asteroids in the Solar system. Dashed lines indicate near-Earth asteroid orbits. Modified from Refs. ^[30,31]

留下来转变为小行星。例如, (2060) Chiron等轨道与彗星相似且表面成分含有冰升华痕迹的小行星^[40], 可能是彗星失去挥发分后的残留部分。它们的起源与彗星一致, 但光度特性接近小行星, 体现了小行星与彗星特征的连续性。此外, 极少数小行星可能源自太阳引力捕获的系外物质, 如2015 BZ509的高倾角逆行轨道特征表明其源自星际捕获^[41]。

1.2 小行星的后期演化

原始小行星(形成于太阳系早期的、由星云尘埃和冰粒聚集而成的小天体)形成后, 在内部能量与外部环境共同作用下发生的一系列后期演化过程, 深刻影响着其物质组成、内部结构以及表面形态。

1.2.1 内部物质演化

在放射性衰变等自身能量驱动下, 原始小行星内部会发生“加热-分异-冷却”的改造过程, 物质密度差异与矿物结晶顺序及其程度使其构成物质形成明显的分层结构。

(1) 热变质作用。小行星形成初期, 内部的短寿命放射性元素(如铝-26、铁-60)衰变释放的大量热量会引发矿物热变质^[11,27], 导致部分含水矿物脱水、细小颗粒重结晶为粗粒、星云尘埃凝聚的球粒被部分或完全破坏等。如普通球粒陨石的母体(包括H型、L型、LL型), 其热变质程度随内部温度升高而增强^[42,43], 反映母体小行星不同深度的加热差异。

(2) 熔融分异。若衰变加热使温度超过硅酸盐熔点(约1000~1500℃), 星体内部将发生完全或局部熔融^[6,25]。由于铁镍金属熔体与硅酸盐熔体不混溶, 密度大的铁镍金属下沉形成核心^[14], 密度中等的硅酸盐形成地幔, 密度小的硅酸盐(如斜长岩)上浮形成地壳^[12], 最终分异出类似行星的“核-幔-壳”圈层结构。来自陨石的证据显示铁陨石(来自核心)、石铁陨石(橄榄陨铁, 来自核幔边界)、无球粒陨石(来自壳或幔)均为分异小行星的碎片^[44], 如灶神星的HED陨石即来自其地壳和地幔^[45,46]。

(3) 冷却与收缩。当放射性元素衰变减弱、热量逐渐散失后, 小行星内部开始冷却, 熔融物质结晶形成火成岩^[12], 同时整体收缩可能导致表面开裂, 形成断裂或火山活动痕迹^[47]。

1.2.2 外部特征演化

受太阳系动力学和空间环境影响, 原始小行星的形态、表面地貌等外在特征(图2)也会随着时间发生

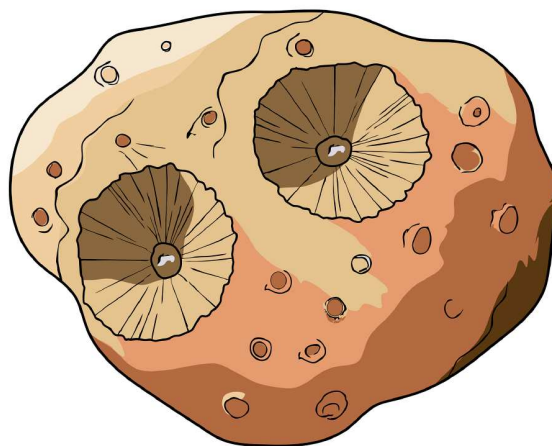


图2 (网络版彩色)小行星的形状、表面地貌卡通图

Figure 2 (Color online) Cartoon illustration of asteroid shapes and surface morphology

改变。

(1) 撞击事件。遭受小天体撞击会引起星体表面物质剥离或者产生撞击坑^[48,49], 使星体表面形成明显的撞击地貌。强烈撞击产生的冲击压力同时还会引发“冲击变质”^[25,50], 致使表面矿物结构改变(如橄榄石变为林伍德石^[39]), 甚至局部熔融形成玻璃质(如陨石中的冲击熔融脉^[51]), 冲击变质程度可反映母体小行星经历的撞击强度^[17]。

(2) 太空风化。长期暴露在太阳风(高能带电粒子)、宇宙射线和微陨石撞击下, 小行星表面物质会发生物理和化学变化^[50], 进而掩盖小行星的原始物质信息^[8,52]。如矿物颗粒被击碎为细粒, 表面粗糙度会降低; 铁元素从矿物中游离出来会形成纳米级金属铁颗粒^[53], 导致表面矿物的光学性质改变, 这些变化将影响光谱观测的解读^[50]。

(3) 形状塑造。受自身引力、自转离心力, 以及外部环境的叠加改造, 小行星的形状呈现从极端不规则到近球形的多样化发展。体积较小的星体因引力不足以克服自身材料强度多呈现不规则块状、棱角状等, 而较大小行星的自身引力可达到流体静力学平衡^[54], 逐渐形成近似球形(如谷神星)。同时, 快速自转的小行星会在离心力作用下发生持续形变, 形成扁球形、纺锤形^[55], 而来自其他天体长期的引力摄动, 可能导致形状进一步扭曲^[56]。此外, 体积足够大的小行星内部热演化导致的物质重新分布会间接影响球形度, 太阳辐射和微陨石撞击等风化作用引起的表面物质剥离也会使

形状发生轻微调整。

1.2.3 其他演化机制

(1) 挥发分流失. 若原始小行星含有冰等挥发性物质, 在受热(太阳辐射或内部加热)或撞击作用下, 挥发性物质会升华形成气体(如Chiron的喷发^[8]), 并携带表面尘埃逸出^[57,58]. 挥发性物质的流失会改变小行星的物质组成, 残留的非挥发性物质(如硅酸盐、有机分子)则可能在表面重新沉积^[39].

(2) 潮汐作用. 小行星靠近大质量天体时, 近侧和远侧所受的引力差异会对其产生“潮汐力”. 周期性变化的潮汐作用可引发小行星内部物质摩擦产生持续的潮汐加热, 促进物质分异^[59,60]. 持续的潮汐作用会将小行星沿引力方向拉伸、垂直方向压缩, 形成椭球形状变. 如火卫一、火卫二, 因长期受火星潮汐作用呈明显的长椭球形^[61,62]. 当潮汐力超过小行星自身的引力或内部结合力时, 可引发小行星的解体^[56].

2 分布位置和轨道变化机制

2.1 小行星的空间分布

太阳系小行星的空间位置和分布具有显著的集中性和区域差异, 按轨道位置的分布可分为五个主要区带.

(1) 主带小行星. 大部分小行星分布于火星与木星轨道之间的小行星带^[63,64], 距离太阳2.1~3.3 AU(1 AU=地球与太阳之间的平均距离). 该区域是太阳系内已知小行星最密集的区域. 主带小行星公转方向多与行星一致, 轨道近圆形, 倾角较小, 主要分布在黄道面附近. 受木星强大引力扰动的影响, 该区域的物质未能形成完整的行星, 因而保留下了大量未完成聚合的原行星残骸^[36,65]. 由于未直接参与后续的行星形成过程, 它们较好地保留了原始行星盘的物质组成, 是研究太阳系早期演化历史的重要窗口.

(2) 近地小行星. 地球轨道空间附近的小行星称为近地小行星(near-Earth asteroids, NEAs), 其轨道的近日点距离通常小于1.3 AU^[15,66]. 这类小天体主要来源于主带小行星, 一部分因受到行星的引力扰动和雅尔科夫斯基效应(Yarkovsky effect)^[48,67,68], 从主小行星带迁移进入近地轨道; 另一部分则可能是主带小行星间碰撞产生的碎片, 在撞击能量的推动下其轨道逐步演化至靠近地球轨道区域^[35].

近地小行星处于复杂的动力学环境中, 轨道稳定

性普遍较低^[38], 轨道寿命(从进入近地区域到彻底脱离的时间跨度)相对较短^[69]. 按轨道特征以及与地球轨道的交叉关系^[38,66], 可将其分为阿波罗型(Apollo)、阿莫尔型(Amor)、阿登型(Aten)和阿波希利型(Atira)四类, 其中阿波罗型与阿登型小行星会频繁穿越或靠近地球轨道, 因此属于对地球潜在撞击威胁最大的小行星类型^[70]. 目前, 随着对地外撞击风险关注度的提升, 近地小行星的探测与监测已成为行星科学和行星防御领域的研究热点^[23].

(3) 特洛伊小行星. 位于太阳-木星系统的三角拉格朗日点(L4和L5)上的特洛伊小行星^[8], 可能是在太阳系早期被木星引力俘获的主带小行星, 或是与木星同时在原始行星盘中形成的残留星子^[71], 也有观点基于尺寸分布和光谱特性推断其主要起源于太阳系边缘的柯伊伯带^[7]. 由于受太阳和木星引力的共同作用, 这些小行星在轨道上运行稳定^[7], 与木星共轨绕日运行, 通常分为位于L4点的“希腊群”和位于L5点的“特洛伊群”. 其他行星的L4和L5区域也有特洛伊群存在, 不过除海王星外, 规模都很小, 且大多不稳定^[10].

(4) 半人马小天体. 轨道近日距位于木星和海王星之间(5.2~30 AU)的外太阳系小天体被称为半人马小天体, 它们受巨行星引力扰动显著, 通常轨道演化是混沌的^[38]. 此类天体在物理和化学性质上可能同时具有小行星与彗星的某些特征^[72], 因此被认为是二者的过渡类型, 比如著名的(2060) Chiron^[40]. 目前, 多数学者认为半人马小天体主要起源于柯伊伯带, 在海王星迁移过程中被引力散射而进入巨行星区. 它们的轨道不稳定性及部分天体展现出的彗星活动迹象^[8], 均支持这一演化路径.

(5) 外太阳系的小行星. 位于遥远的海王星轨道以外的边缘区域(>30 AU), 主要包括柯伊伯带天体和可能存在的奥尔特云. 这一类小行星通常由冰、岩石和含碳物质组成^[7,73], 受太阳辐射影响较弱, 因此保留了更多太阳系形成早期的原始信息^[74]. 典型代表包括阋神星(136199) Eris和创神星(50000) Quaoar等.

2.2 轨道演化机制

2.2.1 引力摄动效应

小行星绕日轨道变化的主要驱动力来自行星的引力摄动, 尤其是木星、土星等大行星的长期引力摄动. 这些作用通过轨道共振、近距离交会时的引力牵引等机制^[28,32], 显著影响小行星的轨道半长轴、偏心率和

轨道倾角^[38],进而将其引导进入轨道不稳定区^[34].小行星带天体若进入与木星的轨道平运动共振区,可能形成轨道聚集或激发,当其轨道偏心率受激发持续增大^[32],最终可能被甩出稳定带,迁移至近地轨道或太阳系外缘^[5,68].

在近地区域,小行星与地球、金星等类地行星的引力交互亦可能造成轨道剧烈扰动,甚至出现被暂时俘获的现象.2020 CD₃曾因受地球引力捕获,短暂成为一颗“迷你卫星”^[75].此外,银河系引力场也对太阳系小天体的运行产生扰动^[76],尽管引力极为微弱,但长期的积累效应可导致其轨道参数缓慢改变.

2.2.2 非引力效应

非引力效应是指不依赖于天体之间的引力相互作用,而通过其他物理机制(如热辐射、物质喷发等)对小行星轨道产生影响.

(1) 雅尔科夫斯基效应(Yarkovsky effect).小行星吸收太阳辐射后,其向阳面加热、背面冷却,热量以红外辐射的形式释放,由此产生的微小推力会导致轨道半长轴缓慢改变^[34,67,77].表面粗糙程度越高,热辐射越不均匀,推力效应就越强^[78].例如,近地小行星(6489) Golevka的轨道12年间因雅尔科夫斯基效应漂移了约15公里,这一变化已被雷达观测所证实^[79].因此,该效应被认为是近地小行星轨道演化的重要驱动力之一,也是解释主带小行星轨道扩散现象的关键机制.

(2) YORP效应(Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack effect).非对称形状小行星在吸收和释放热辐射时,其不同区域产生的热力矩不均匀,从而引起自转速率和自转轴方向的变化^[10,78].该变化又可间接影响小行星的轨道演化.若小行星自转方向与公转方向一致,YORP效应可推动轨道半长轴逐渐增加;反之,则可能导致轨道收缩,甚至最终坠入太阳或被行星引力捕获^[80,81].

(3) 太阳热驱动喷发(sublimation-driven outgassing).含有挥发性物质的小行星在运行至近日点附近时,受太阳加热,内部冰质升华释放出气体和尘埃^[58],产生方向性喷流^[65].这种反作用力可在相对短时间内改变轨道的半长轴和偏心率,如(2060) Chiron就被观测到因喷发活动导致其轨道偏心率出现逐年变化^[40].

(4) 光压与玻印廷-罗伯逊效应(radiation pressure & Poynting-Robertson drag).太阳光子不仅携带能量,也携带动量.当光子照射到小行星表面时,会施加微小的“光压”^[82],对轨道造成阻尼作用.该效应强度与星体

的尺寸成负相关关系,因此主要影响直径较小天体的运行轨道,使其半长轴缓慢缩小,逐渐向太阳靠近^[83].

2.2.3 突发机制

碰撞是驱动小行星轨道演化的突发性动力源^[35,48].低速碰撞通常不会导致结构性破坏,但可能引发轨道偏心率和倾角的微幅调整,有助于小行星群体内部的动态重组.相对速度较高(可达5~10公里/秒)的碰撞^[78],不仅能通过动量交换显著改变小行星的轨道参数(包括半长轴、偏心率和倾角^[49]),还可能造成母体解体或结构重构^[34].此外,在长期演化过程中,小行星表面物质可能因微陨石撞击、太阳风剥蚀或挥发分升华而流失.质量的变化会破坏原有的轨道角动量平衡,进而引发轨道参数的调整.例如彗星在挥发分耗尽后,其质量减轻会使轨道趋于圆形或稳定化^[40].

3 物质组成和化学成分

3.1 物质组成与分类

小行星的物质组成具有显著的多样性^[84],依据矿物学特征和物理性质主要可分为三大类(图3)^[85,86],反映了其形成环境的差异(表1)^[87].

(1) 碳质小行星(C型).以碳质球粒陨石成分为代表的碳质小行星,被认为是太阳系中最原始的天体类型之一^[88].这类小行星的主要特征是富含碳化物,质量占比可达10%甚至更高^[89].矿物组成包括大量含水硅酸盐(如蛇纹石、绿泥石)、碳酸盐矿物、水冰与硫化物(如陨硫铁),并伴有种类繁多的有机分子,如多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)与氨基酸前体等^[90,91].这些成分表明它们在形成后未经历剧烈的热变质或撞击改造,因而保留了太阳星云演化早期的原始信息.

碳质小行星通常具有极低的反照率(0.03~0.10)^[92],表面结构松散,呈典型“碎石堆(rubble pile)”状^[93].典型代表如日本“隼鸟2号”探测的龙宫(Ryugu)和美国“OSIRIS-Rex”任务目标贝努(Bennu),其表面物质分析证实水蚀变矿物和有机碳化物广泛存在^[91],进一步支持其原始性的判定.

(2) 石质小行星(S型).以硅酸盐为主要组成物质,包括橄榄石、辉石及长石等硅酸盐矿物,含少量铁镍金属(约5 wt%~20 wt%)^[94],几何反照率较高(0.15~0.35)^[95].陨石样品显示该类小行星部分组成物质经历过中等程度热变质,表现出矿物重结晶和熔体

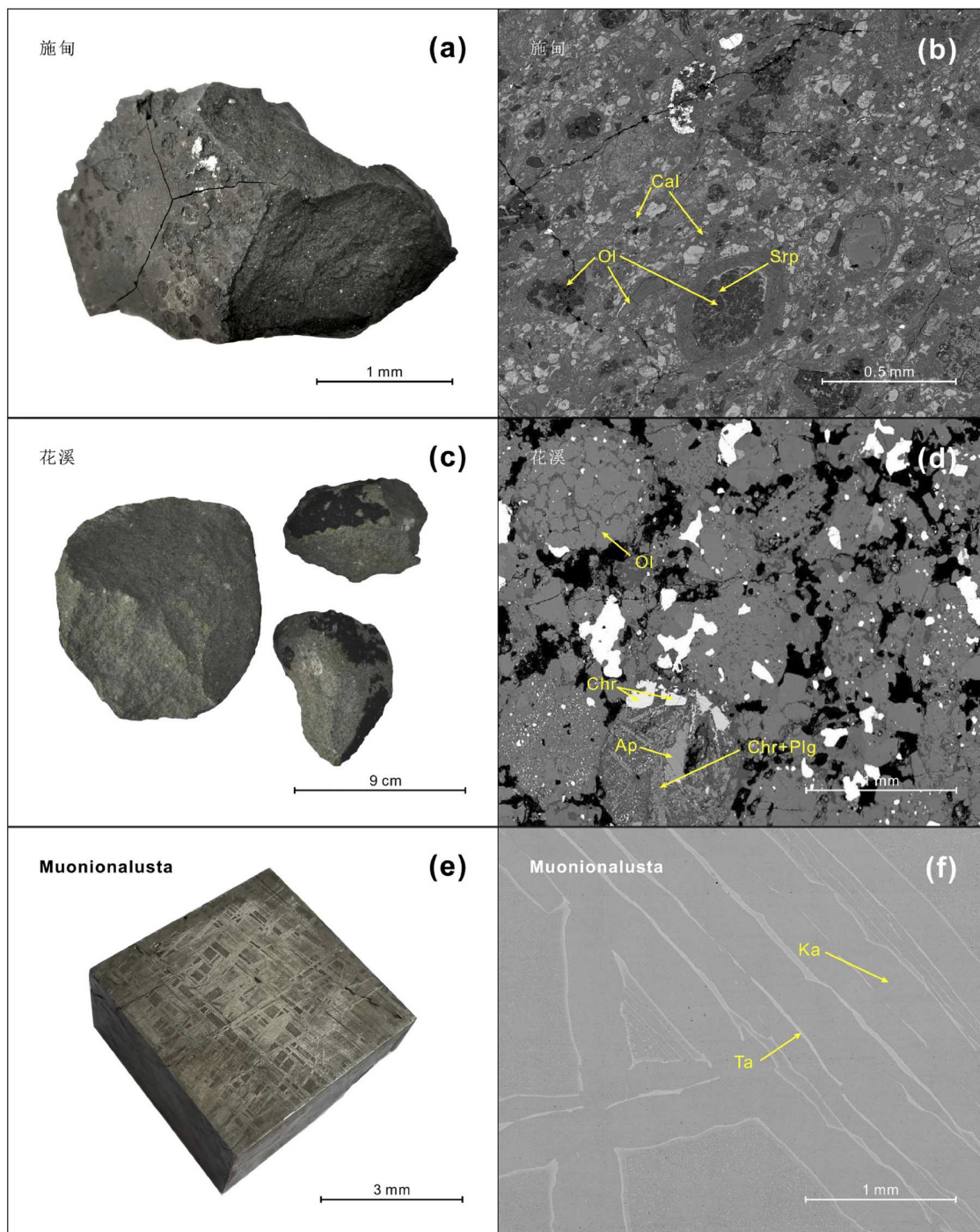


图 3 (网络版彩色)不同物质类型陨石照片(C型、S型、M型; 手标本和镜下矿物组合)^[85,86]. (a) 施甸陨石标本照片; (b) 施甸陨石内部的扫描电子显微镜背散射(BSE)图像; (c) 花溪陨石标本照片; (d) 花溪陨石内部的扫描电子显微镜背散射(BSE)图像; (e) Muonionalusta铁陨石切割块体, 表面经酸洗处理后, 维斯台登花纹清晰可见; (f) Muonionalusta铁陨石内部的扫描电子显微镜背散射(BSE)图像. Ol=橄榄石, Srp=蛇纹石, Ka=铁纹石, Ta=镍纹石, Cal=方解石, Chr=铬铁矿, Ap=磷灰石, Plg=斜长石

Figure 3 (Color online) Photographs of meteorites of different types (C-type, S-type, and M-type; hand specimens and mineral assemblages under the microscope)^[85,86]. (a) Photograph of the Shidian meteorite specimen; (b) backscattered electron (BSE) image of the interior of the Shidian meteorite obtained by scanning electron microscopy; (c) photograph of the Huaxi meteorite specimen; (d) backscattered electron (BSE) image of the interior of the Huaxi meteorite obtained by scanning electron microscopy; (e) cut block of the Muonionalusta iron meteorite, with well-developed Widmanstätten patterns clearly visible after acid etching; (f) backscattered electron (BSE) image of the interior of the Muonionalusta iron meteorite. Ol=olivine, Srp=serpentine, Ka=kamacite, Ta=taenite, Cal=calcite, Chr=chromite, Ap=apatite, Plg=plagioclase

表 1 小行星的主要物质类型及典型代表^{a)}

Table 1 Major compositional types of asteroids and their typical representatives

类型	占比	反照率	物质组成	起源区	典型代表
碳质 (C型)	75%	0.03~0.1	富含碳化合物; 含水硅酸盐、碳酸盐、水冰、硫化物、多种有机分子	外太阳系低温区	Ryugu(龙宫); Benu(贝努)
硅质 (S型)	17%	0.15~0.35	橄榄石、辉石等硅酸盐矿物为主, 含少量铁镍金属(约5 wt%~20 wt%)	内太阳系中温区	433 Eros(爱神星); 951 Gaspra(加斯普拉)
金属质 (M型)	<8%	0.1~0.2	镍-铁(Fe-Ni)合金为主, 铁含量占70%~90%, 镍含量占5%~20%, 并含有少量陨硫铁及陨磷铁镍石等副矿物	原行星核部残留	16 Psyche(灵神星); (1620) Geographos

a) 不同类型小行星的占比数据参考文献[87]

抽取的特征(例如4-6型的球粒陨石及原始无球粒陨石^[96]), 主要是由太阳系早期的短寿命放射性核素²⁶Al衰变产热引发小行星内部的部分熔融和分异所致^[11]. 这些特征反映了太阳星云内侧高温环境下的矿物凝聚、吸积及热演化进程, 与类地行星核-幔分异早期的演化路径具有一致性.

(3) 金属质小行星(M型). 金属质小行星以铁镍合金为主要组成, 其中铁含量占70%~90%, 镍含量占5%~20%, 并含有少量陨硫铁及陨磷铁镍石等副矿物^[97], 可能是铁陨石的母体, 与顽辉石球粒陨石的母体共属M型^[84,98]. 这类小行星可见-近红外反射光谱没有明显吸收特征, 几何反照率中等(0.1~0.2)^[99]. 多数金属质小行星被认为是早期经历过核-幔分异的星子在剧烈撞击事件中剥离外部硅酸盐幔层后暴露出的金属内核残余物, 这一成因模型为研究早期行星形成过程中的热演化及核-幔分异过程提供了天然的样本窗口, 其典型代表为直径超过220公里的小行星16 Psyche^[100].

3.2 化学成分特征

小行星的化学成分信息可通过地面及空间望远镜光谱观测与陨石分析联合获取, 主要特征通过元素丰度与同位素组成的差异体现.

(1) 元素组成与分异特征. 碳质小行星富含挥发性元素(C、H、O、N、S)及亲石元素(Mg、Si), 而亲铁元素(Fe、Ni)含量较低^[101]. 其中, CI型碳质球粒陨石的元素丰度(除H、He和Li等少数元素)与太阳元素丰度高度一致(如图4所示^[102]), 因而被视为太阳星云未分异物质的“标准样本”^[88]. 硅酸盐质小行星以亲石元素(Si、Mg、Fe²⁺和Al)为主, 亲铁元素含量居中, 反映其形成于太阳星云的内侧区域, 挥发性元素因高温逃逸而显著亏损. 金属质小行星则以亲铁元素(Fe、Ni、Co)为绝对优势, 亲石元素极度亏损, 充分印证了熔融分异过

程中金属相(铁镍合金)与硅酸盐相的分离.

(2) 同位素组成. 模型研究表明, 太阳极紫外辐射自屏蔽效应的影响使早期太阳星云中O同位素分布呈现径向不均一性, 相较内太阳系, ¹⁶O在外太阳系更为富集^[103]. 外太阳系冰卫星与彗星的观测显示, 其较内太阳系通常具有更高的D/H值^[104]. 这些研究结果与陨石的分析完全一致. 碳质球粒陨石普遍在水合矿物和有机质中富含D, 其氧同位素偏离地月分馏线(terrestrial fractionation line, TFL), 并具有偏负的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值, 反映C型小行星组成物质形成于外太阳系环境. 而普通球粒陨石具有与类地行星相似的 $\Delta^{17}\text{O}$, 则指示S型小行星的物质源区为内太阳系. 此外, 不同区域起源的小行星中⁵⁴Cr和⁵⁰Ti等核合成同位素的差异, 反映出早期太阳星云中物质分布不均, 以及木星的动力学屏障可能导致内外太阳系物质交换受限^[105,106].

不同类型小行星成分的差异表明太阳星云内化学

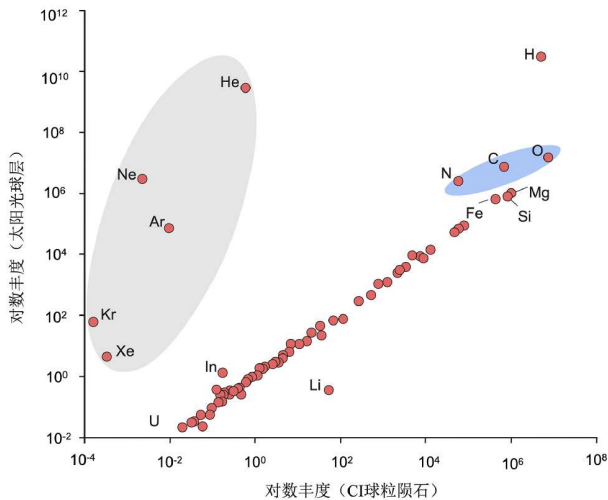


图 4 (网络版彩色)CI型碳质球粒陨石与太阳元素丰度的相关性^[102]
Figure 4 (Color online) Correlation between CI carbonaceous chondrites and solar elemental abundances^[102]

成分梯度与温度梯度的高度对应,验证了“星云吸积理论”中物质按温度分异的核心假设^[2,8]。

4 小行星属性与防御的关联

小行星的物理化学属性决定其在遭遇外部干预时的响应方式,是制定行星防御策略的核心依据。不同的小行星在尺寸、轨道、自转状态、表面形状、物质成分与内部结构等方面存在显著差异,这些差异将影响撞击风险判定、拦截时机选择、动量传递效率、导航精度以及防御手段的选择与实施效果。因此,深入理解目标小行星的关键属性,识别其对不同防御策略的响应机制,是构建有效防御系统的基础。

4.1 尺寸和轨道: 撞击威胁判定与拦截时机

小行星尺寸与轨道参数是判断其是否构成地球威胁、是否需要开展主动防御以及决定拦截时机的基础属性。其中,尺寸决定撞击可能造成的破坏程度和规模,轨道参数则决定其与地球的交会概率与可预警时间,二者因素共同构成了拦截决策的初始依据。

(1) 尺寸效应。依据美国国家航空航天局(NASA)与欧洲航天局(ESA)的风险分级标准,距地球轨道小于0.05 AU(约750万公里)、直径超过140米的小行星即被视为潜在威胁天体(PHA),其撞击可造成区域性毁灭,需重点监测与评估。若目标直径超过1公里,则具备引发全球性灾害的能力,其防御优先级最高^[70]。防御策略需基于质量评估构建偏转模型,尺寸误差将直接影响拦截方案的设计有效性。

(2) 轨道效应。小行星轨道的半长轴、偏心率以及倾角决定其与地球轨道的交会频率与相对速度,根据这些参数可以计算其撞击概率与干预窗口宽度^[77]。高偏心率与高倾角轨道目标(如3200 Phaethon)虽然不常接近地球,但其突发撞击的预警时间短,需提前布设长期监测机制。若轨道误差大、交会窗口短,拦截任务则需更高导航精度与响应速度。此外,Yarkovsky效应等非引力因素可能长期改变小行星轨道,使轨道演化呈非线性趋势,增加远期撞击概率的预测难度^[67,77]。因此,防御系统需结合尺寸估算与轨道演化建模,制定适时干预计划,并为高危目标设立长期监测机制。

4.2 自转与形状

小行星的自转状态与三维形状对防御任务中拦截器的命中精度和动量传递效率具有重要影响,尤其在

动能撞击等精度敏感型任务中表现尤为突出。忽略这些参数可能导致偏转效果显著降低,甚至引发任务失败或二次风险。

(1) 自转状态。小行星的自转周期直接决定了撞击器命中的时间窗口长度。快速自转的小行星在短时间内完成整圈旋转,撞击器需要在极窄的时间窗口内命中预设位置,否则将撞偏或撞击次优部位,动量传递方向与预期偏离。同时,部分小行星由于受到潮汐或太阳辐射影响,其姿态并不稳定,而呈现自由进动或非主轴自转状态(tumbling asteroid),如小行星4179 Toutatis就存在显著的非主轴自转行为^[107]。在这种状态下,撞击点的预测变得尤为困难,需得到更高精度的动力学模型预测与实时导航系统修正,增加了相关技术难度。

(2) 表面地貌。小行星形状与地貌的复杂性同样干扰导航精度与撞击点选择。大量近地小行星展现出非球形、双叶或近双锥状结构,如小行星25143 Itokawa呈现典型的“哑铃型”形貌^[108]。在这类形态中,目标的质心与几何中心通常存在偏移,且表面地形起伏剧烈,易引起导航误差与姿态解算失准。OSIRIS-REx任务就曾因Bennu复杂地貌而多次修改采样点设计,并对接近路径反复仿真优化^[109]。

在潜在的防御任务中,对小行星自转状态和形状特征的准确识别、预测与建模,构成了拦截路径设计与命中精度控制的关键环节。通过预先的光变曲线反演与影像测绘等手段构建高保真的目标小行星模型是提升拦截精度保障能力的必要前提。

4.3 成分与结构

小行星物质成分与内部结构是决定拦截方式选择的核心因素,只有在充分了解目标的成分与结构特性基础上,才能制定出效果最优、风险最小的拦截方案。

(1) 物质成分。不同类型小行星的成分差异决定了其物理特性以及化学特性差异,因此对拦截方式响应存在显著不同。例如,C型小行星主要由碳质物质组成,表面富含挥发分和低导热材料^[101],更容易在激光加热或太阳能聚焦下产生喷射作用,以光能驱动的轨道偏转手段在该类小行星上可获得更高的偏转效率。相反,M型小行星具有较高的金属含量,其反照率高、热导率大^[14],对热驱动响应较弱,更适合采用动能撞击或核爆炸等高能量输入方式。

除化学成分外,小行星组成物质的力学特性也是影响防御偏转效果的关键因素。小行星组成物质是构

建小行星实体的“骨架”，在动能撞击情景下，组成物质的力学强度决定冲击应力下小行星的变形与破裂行为。陨石的研究发现^[110,111]，在厘米尺度下，C型小行星组成物质(碳质球粒陨石)通常具有较低的力学强度，其抗压强度约20~80 MPa，抗拉强度通常小于30 MPa。S型小行星组成物质(普通球粒陨石)具有中等的力学强度，抗压强度普遍接近200 MPa，部分可高至400 MPa，其抗拉强度在20~60 MPa之间。M型小行星组成物质(铁陨石)具有较大的力学强度，其抗压和抗拉强度分布范围相似，为200~400 MPa，部分铁陨石强度可高至600 MPa以上。模拟研究显示，在相同的内部结构下，强度更高的组成物质会在动能撞击下形成质量更小的反向溅射羽流，导致动量传递因子获得的增益相较于低强度组成物质的小行星更少^[112]。因此，获取目标小行星成分特征及其相应的组成物质力学参数是对动能撞击偏转等防御手段效能进行准确评估的重要前提。

(2) 内部结构。实际上，小行星对于外部荷载的响应并不取决于单一因素。小行星整体属性由其物质成分与内部结构共同控制，是多重因素耦合的结果。除组成物质的成分与力学强度外，小行星的内部结构特征决定了其组成物质的体积分布与接触关系，对小行星的整体力学特性也存在深刻影响。对于单体结构小行星，其具有较小的表征单元体积(representative elementary volume, REV)，整体的力学特性与组成物质的力学特性相似。然而，近地小行星中存在宏观孔隙度(小行星整体孔隙度减去组成物质孔隙度)可能高达30%~60%的碎石堆结构(rubble pile)小行星^[113,114]，该类小行星多由大量巨石在低重力作用下聚集而成^[93]。由于宏观孔隙的存在增大了小行星内部结构的不连续性，改变动能撞击下的能量传递路径，冲击波在碎石堆小行星中传播的能量损耗增大，限制了冲击碎裂的范围与深度。但是，宏观孔隙的存在也进一步降低了小行星内部物质的内聚力与内摩擦角，使得小行星物质更加容易产生反向溅射以增大其撞击过程的动量传递因子。例如，DART任务撞击Dimorphos后的观测表明，其为低密度碎石堆结构小行星，动量增强因子 β 达2~5^[115,116]。而任务前基于高密度单体结构(monolith)小行星进行的模拟结果显示，该结构下动量增强因子明显较低^[117]，需通过提高撞击速度或改用核爆等方式来弥补效率不足。此外，结构的不均质性(如存在裂隙、空腔或块体分层)还可能导致局部过度响应或整体解体，增加干预的不确定性。因此，对目标小行星进行动能撞击偏转效能评

估时，不仅需要考虑目标小行星组成物质的物理化学属性，同时也需要结合其内部结构特征进行耦合分析，以此对小行星的偏转效率进行更为准确合理的评估。

4.4 典型PHAs的分类与防御应对

截至2025年，NASA近地天体研究中心(CNEOS)已确认2500余颗PHAs，其典型轨道类型多为Apollo型(轨道半长轴大于1 AU，近日点穿越地球轨道)与Aten型(轨道半长轴小于1 AU，但远日点穿越地球轨道)^[66]。这两类轨道类型的天体因轨道与地球交会频繁，撞击概率最高，被视为行星防御的重点目标，其中包括如下典型PHAs及其防御应对案例。

Apophis(99942): Apophis是最早引发全球关注的PHA之一。其等效直径约370米^[77]，轨道属于Apollo型，曾在2004年被评估为2029年有2.7%的概率撞击地球，引发广泛恐慌。虽然后续观测已排除短期撞击可能，但其将在2029年以不到3.8万公里的距离掠过地球，成为近地天体与地球最接近的一次“擦肩而过”事件。这一事件将成为测试地基雷达成像、引力扰动效应和表面响应等研究的重要窗口^[77]。

Bennu(101955): Bennu是美国OSIRIS-REx任务的目标，其轨道为Apollo型，直径约490米，重约 7.3×10^{10} kg，表面结构为典型碎石堆状，宏观孔隙度可能高达40%以上^[91,93]。其物质组成以碳质球粒陨石类物质为主，富含含水硅酸盐与有机化合物，具有代表性的小天体低强度、低热导、松散结构属性^[91]。研究显示Bennu的撞击概率虽低，但其接近地球的频率较高，被列为未来百年重点监测目标。

2024 YR4: 2024 YR₄是近期发现的一颗直径约60米的阿波罗型地球交汇小行星，其轨道近日点与地球轨道高度重叠，并预计在2032年与地球撞击概率达到3%，被列入监测级别提升清单^[68]。其光变观测显示自转周期短、形状不规则、轨道演化受Yarkovsky效应影响显著^[68]，是一颗具有代表性的复杂轨道演化目标。

目前，针对PHAs的防御策略主要包括四个维度：一是开展轨道监测与参数修正，利用地基光学、雷达和红外等多源观测手段，实现轨道元素的高精度拟合与误差动态更新^[77]；二是加强属性识别与响应建模，通过获取目标的大小、形状、自转状态、密度及内部结构等关键参数，构建多因素耦合的偏转模拟体系^[23,67]；三是推动任务演示与技术验证，继DART任务之后，ESA的Hera任务与NASA的NEO Surveyor项目均已开

展部署, 针对动能撞击、引力牵引与激光蒸发等多种偏转机制开展系统试验^[24]; 四是强化国际协作与战略储备, 全球正逐步建立以国际小行星预警网络(IAWN)和空间任务规划咨询组(SMPAG)为核心的防御协调机制^[23]。与此同时, 中国已启动“近地小行星防御系统”工程, 计划在2027~2029年间实施亚百米级目标的动能偏转在轨验证, 标志着我国在该领域迈出了关键技术步伐。

PHAs作为地球面临的主要外部威胁之一, 其轨道类型、物理化学性质与结构特征高度多样, 决定了拦截任务的响应窗口、技术路径与实施难度。通过对Apophis、Bennu、2024YR₄等典型目标的系统研究, 有望构建面向未来的风险分级体系与属性响应模型, 支撑以情景模拟为基础的差异化防御决策, 这不仅是科学问题的延展, 更是构建全球行星防御体系的战略基石。

5 结语与展望

当前小行星科学研究主要依托陨石的化学成分、矿物组成及同位素特征, 结合遥感观测数据, 揭示小行星的形成环境与演化过程, 进而探讨太阳系早期物质分布与成因机制。直接的采样返回任务能够提供未受

地球环境影响的原位小行星样品, 弥补陨石与远程探测的信息局限, 但迄今为止获得的样品数量仍极为有限。随着技术进步与国际合作深化, 未来采样返回任务的探测范围将持续扩大, 为更多小行星研究提供直接且高精度的物质样本, 推动人类对太阳系乃至宇宙认知的突破。对于人类而言, 小行星不仅是理解太阳系形成与演化的重要参照, 也是地外稀有资源的潜在储藏库, 但它们潜在的撞击威胁同时也是地球文明面临的重大危机。

降低和规避小行星撞击风险是全球社会的共同责任, 而所有防御策略的前提是对小行星物理化学特性进行深入解析, 包括通过光谱分析确定成分类型及结构松散度, 利用雷达观测测量大小、形状及自转周期, 以及航天器近距离探测或直接着陆分析表面成分、密度与内部结构等。这些工作需要国际社会的协同合作。值得庆幸的是, 随着空间望远镜的部署及全球小行星预警网络的完善, 人类对撞击风险的识别与应对能力不断增强。中国“天问二号”探测器的成功发射, 标志着全球首个单次任务实现小行星采样与彗星探测的突破, 极大提升了我国在国际航天合作中的话语权, 同时将推动更多国家与我国在深空探测领域的技术交流与合作, 进一步巩固我国在该领域的国际地位。

参考文献

- Hiroi T, Zolensky M E, Pieters C M. The Tagish Lake meteorite: a possible sample from a D-type asteroid. *Science*, 2001, 293: 2234–2236
- Ebel D S. Condensation of rocky material in astrophysical environments. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 253–277
- Scott E R D. Chondrites and the protoplanetary disk. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 577–620
- Lunine J I. Origin of water ice in the solar system. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 309–319
- Lin Y. Key Questions of solar system formation and exploration of small celestial bodies (in Chinese). *Space Debris Res*, 2019, 19: 14–21 [林杨挺. 太阳系起源与小天体探测的前沿科学问题. *空间碎片研究*, 2019, 19: 14–21]
- Greenwood R C, Burbine T H, Miller M F, et al. Melting and differentiation of early-formed asteroids: the perspective from high precision oxygen isotope studies. *Geochemistry*, 2017, 77: 1–43
- Bottke W F, Marschall R, Nesvorný D, et al. Origin and evolution of Jupiter's Trojan asteroids. *Space Sci Rev*, 2023, 219: 83
- Barucci M A, Cruikshank D P, Mottola S, et al. Physical properties of Trojan and Centaur asteroids. *Asteroids III*, 2002. 273–286
- Cellino A, Bus S J, Doressoundiram A, et al. Spectroscopic properties of asteroid families. *Asteroids III*, 2002. 633–643
- Emery J P, Marzari F, Morbidelli A, et al. The complex history of Trojan asteroids. *Asteroids IV*, 2015. 203–220
- Desch S J, Dunlap D R, Williams C D, et al. Statistical chronometry of Meteorites: II. initial abundances and homogeneity of short-lived radionuclides. *Icarus*, 2023, 402: 115611
- Li S, Zhang D, Shu Q, et al. An anorthositic meteorite supporting an ancient magma ocean on Vesta. *Nat Astron*, 2024, 8: 739–747
- Connolly H C, Desch S J, Ash R D, et al. Transient heating events in the protoplanetary nebula. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 383–397
- Ockert-Bell M E, Clark B E, Shepard M K, et al. The composition of M-type asteroids: synthesis of spectroscopic and radar observations. *Icarus*, 2010, 210: 674–692
- Bottke W F, Cellino A, Paolicchi P, et al. An overview of the asteroids: the asteroids III perspective. *Asteroids III*, 2001. 3–15

- 16 Laurretta D S, Balram-Knutson S S, Beshore E, et al. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu. *Space Sci Rev*, 2017, 212: 925–984
- 17 Nakamura T, Noguchi T, Tanaka M, et al. Itokawa dust particles: a direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. *Science*, 2011, 333: 1113–1116
- 18 Watanabe S, Tsuda Y, Yoshikawa M, et al. Hayabusa2 mission overview. *Space Sci Rev*, 2017, 208: 3–16
- 19 Osinski G R, Grieve R A F, Ferrière L, et al. Impact Earth: a review of the terrestrial impact record. *Earth-Sci Rev*, 2022, 232: 104112
- 20 Chyba C F, Thomas P J, Zahnle K J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, 1993, 361: 40–44
- 21 Schulte P, Alegret L, Arenillas I, et al. The chixulub asteroid impact and mass extinction at the cretaceous-paleogene boundary. *Science*, 2010, 327: 1214–1218
- 22 Popova O P, Jenniskens P, Emel'yanenko V, et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 2013, 342: 1069–1073
- 23 Wu W, Gong Z, Tang Y, et al. Response to risk of near-Earth asteroid impact (in Chinese). *Eng Sci*, 2022, 24: 140–151 [吴伟仁, 龚自正, 唐玉华, 等. 近地小行星撞击风险应对战略研究. *中国工程科学*, 2022, 24: 140–151]
- 24 Chabot N, Adams E, Rivkin A, et al. DART: latest results from the Dimorphos impact and a look forward to future planetary defense initiatives. *Acta Astronaut*, 2024, 220: 118–125
- 25 Nichols R H. Chronological constraints on planetesimal accretion. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 463–472
- 26 Petit J M, Chambers J, Franklin F, et al. Primordial excitation and depletion of the main belt. *Asteroids III*, 2002. 711–723
- 27 Russell S S, Hartmann L, Cuzzi J, et al. Timescales of the solar protoplanetary disk. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 233–251
- 28 Roig F, Nesvorný D. The evolution of asteroids in the jumping-Jupiter migration model. *AJ*, 2015, 150: 186
- 29 Swindle T D, Lewis J S, McFadden L A. Near-Earth asteroids and the history of planetary formation. *EoS Trans*, 1991, 72: 473–480
- 30 Halliday A N, Canup R M. The accretion of planet Earth. *Nat Rev Earth Environ*, 2023, 4: 19–35
- 31 Shi Y, Li L. Near-Earth asteroids: characteristics, defense strategies and prospects for resource development (in Chinese). *Acta Mineral Sin*, 2025, 45: 288–310 [石羽钧, 李林. 近地小行星: 特性、防御策略与资源开发展望. *矿物学报*, 2025, 45: 288–310]
- 32 Clement M S, Morbidelli A, Raymond S N, et al. A record of the final phase of giant planet migration fossilized in the asteroid belt's orbital structure. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2020, 492: L56–L60
- 33 Marchi S, McSween H Y, O'Brien D P, et al. The violent collisional history of asteroid 4 Vesta. *Science*, 2012, 336: 690–694
- 34 DeMeo F E, Carry B. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 2014, 505: 629–634
- 35 Zappalà V, Cellino A, Dell'Oro A, et al. Physical and dynamical properties of asteroid families. *Asteroids III*, 2002. 619–631
- 36 Napier W M, Dodd R J. On the origin of the asteroids. *Mon Not R Astron Soc*, 1974, 166: 469–490
- 37 Vokrouhlický D, Bottke W F, Nesvorný D. Forming the Flora family: implications for the near-Earth asteroid population and large terrestrial planet impactors. *AJ*, 2017, 153: 172
- 38 Morbidelli A, Bottke W F, Michel P, et al. Origin and evolution of near-Earth objects. *Asteroids III*, 2002. 409–422
- 39 Miura H, Nakamura E, Kunihiro T. The asteroid 162173 Ryugu: a cometary origin. *ApJL*, 2022, 925: L15
- 40 Weissman P R, Bottke W F, Levison H F. Evolution of comets into asteroids. *Asteroids III*, 2002. 669–686
- 41 Namouni F, Morais M H M. An interstellar origin for Jupiter's retrograde co-orbital asteroid. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2018, 477: L117–L121
- 42 Keil K. Thermal alteration of asteroids: evidence from meteorites. *Planet Space Sci*, 2000, 48: 887–903
- 43 Slater-reynolds V, McSween Jr. H Y. Peak metamorphic temperatures in type 6 ordinary chondrites: an evaluation of pyroxene and plagioclase geothermometry. *Meteoritics Planet Sci*, 2005, 40: 745–754
- 44 Wadhwa M, Srinivasan G, Carlson R W. Timescales of planetesimal differentiation in the early solar system. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 715–731
- 45 Mittlefehldt D W. Asteroid (4) Vesta: I. the howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Geochemistry*, 2015, 75: 155–183
- 46 Vaci Z, Day J M D, Paquet M, et al. Olivine-rich achondrites from Vesta and the missing mantle problem. *Nat Commun*, 2021, 12: 5443
- 47 Xiao L, Huang J, Xiao Z, et al. Volcanism in the Solar System. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66: 2419–2440 [肖龙, 黄俊, 肖智勇, 等. 太阳系天体火山地质作用. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53: 2457–2481]
- 48 Ivanov B A, Neukum G, Bottke W F, et al. The comparison of size-frequency distributions of impact craters and asteroids and the planetary cratering rate. *Asteroids III*, 2002. 89–101
- 49 Paolicchi P, Burns J A, Weidenschilling S J. Side effects of collisions: spin rate changes, tumbling rotation states, and binary asteroids. *Asteroids III*, 2002. 517–526
- 50 Clark B E, Hapke B, Pieters C, et al. Asteroid space weathering and regolith evolution. *Asteroids III*, 2002. 585–599
- 51 Xu Y, Wang S, Hu S, et al. Petrology, mineralogy and shock metamorphism of the Chelyabinsk meteorite (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 1581–1590 [徐于晨, 王世杰, 胡森, 等. 车里雅宾斯克(Chelyabinsk)陨石的岩石矿物特征与冲击变质作用. *岩石学报*, 2016, 32: 1581–1590]

- 52 Cheng A F. Near earth asteroid rendezvous: mission summary. *Asteroids III*, 2002. 351–366
- 53 Matsumoto T, Harries D, Langenhorst F, et al. Iron whiskers on asteroid Itokawa indicate sulfide destruction by space weathering. *Nat Commun*, 2020, 11: 1117
- 54 Kaasalainen M, Mottola S, Fulchignoni M. Asteroid models from disk-integrated data. *Asteroids III*, 2002. 139–150
- 55 Walsh K J, Richardson D C, Michel P. Rotational breakup as the origin of binary asteroids. *Nature*, 2008, 454: 188–191
- 56 Richardson D C, Leinhardt Z M, Melosh H J, et al. Gravitational aggregates: evidence and evolution. *Asteroids III*, 2002. 501–515
- 57 Davis A M. Volatile evolution and loss. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006. 295–307
- 58 Jewitt D, Li J, Agarwal J. The dust tail of asteroid (3200) Phaethon. *Astrophys J Lett*, 2013, 771: 332–341
- 59 Efroimsky M. Tidal dissipation compared to seismic dissipation: in small bodies, Earths, and super-Earths. *Astrophys J*, 2012, 746: 150
- 60 Beuthe M. Spatial patterns of tidal heating. *Icarus*, 2013, 223: 308–329
- 61 Pou L, Nimmo F, Lognonné P, et al. Forward modeling of the phobos tides and applications to the first martian year of the InSight mission. *Earth Space Sci*, 2021, 8: EA001669
- 62 Huang K, Zhang L, Yang Y, et al. Precision orbit determination for the dynamics model of Deimos (in Chinese). *Prog Astron*, 2024, 42: 669–682 [黄凯, 张利军, 杨永章, 等. 火卫二动力学模型与精密定轨研究. *天文学进展*, 2024, 42: 669–682]
- 63 Wetherill G W. An alternative model for the formation of the asteroids. *Icarus*, 1992, 100: 307–325
- 64 Burbine T H, Greenwood R C. Exploring the bimodal Solar System via sample return from the main asteroid belt: the case for revisiting ceres. *Space Sci Rev*, 2020, 216: 59
- 65 Walsh K J, Morbidelli A, Raymond S N, et al. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, 2011, 475: 206–209
- 66 Binzel R P, Lupishko D F, Martino M D, et al. Physical properties of near-earth objects. *Asteroids III*, 2002. 255–271
- 67 Vokrouhlický D, Milani A, Chesley S R. Yarkovsky effect on small near-Earth asteroids: mathematical formulation and examples. *Icarus*, 2000, 148: 118–138
- 68 Bolin B T, Hanuš J, Denneau L, et al. The discovery and characterization of Earth-crossing asteroid 2024 YR₄. *ApJL*, 2025, 984: L25
- 69 Gladman B J, Migliorini F, Morbidelli A, et al. Dynamical lifetimes of objects injected into asteroid belt resonances. *Science*, 1997, 277: 197–201
- 70 National Research Council. *Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies*. Washington DC: The National Academies Press, 2010
- 71 Marzari F, Scholl H, Murray C, et al. Origin and evolution of Trojan asteroids. *Asteroids III*, 2002. 725–738
- 72 Harris A W, Lagerros J S V. Asteroids in the thermal infrared. *Asteroids III*, 2002. 205–218
- 73 Mckinnon W B, Prialnik D, Stern S A, et al. Structure and evolution of Kuiper Belt Objects and dwarf planets. *The Solar System Beyond Neptune*, 2008. 213–241
- 74 Barr A C, Schwamb M E. Interpreting the densities of the Kuiper belt's dwarf planets. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 460: 1542–1548
- 75 Fedorets G, Micheli M, Jedicke R, et al. Establishing Earth's minimoons population through characterization of asteroid 2020 CD₃. *AJ*, 2020, 160: 277
- 76 Higuchi A, Kokubo E, Kinoshita H, et al. Orbital evolution of planetesimals due to the galactic tide: formation of the comet cloud. *AJ*, 2007, 134: 1693–1706
- 77 Farnocchia D, Chesley S R, Chodas P W, et al. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. *Icarus*, 2013, 224: 192–200
- 78 Bottke W F, Vokrouhlický D, Rubincam D P, et al. The effect of Yarkovsky thermal forces on the dynamical evolution of asteroids and meteoroids. *Asteroids III*, 2002. 395–408
- 79 Chesley S R, Ostro S J, Vokrouhlický D, et al. Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka. *Science*, 2003, 302: 1739–1742
- 80 Bottke Jr W F, Vokrouhlický D, Rubincam D P, et al. The yarkovsky and yorp effects: implications for asteroid dynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2006, 34: 157–191
- 81 Xu X, Wang X, Muinonen K, et al. Photometric analysis of asteroids in the phocaea region. *AJ*, 2025, 170: 35–52
- 82 Robertson H P, Russell H N. Dynamical effects of radiation in the Solar System. *Mon Not R Astron Soc*, 1937, 97: 423–437
- 83 Minton D A, Malhotra R. Dynamical erosion of the asteroid belt and implications for large impacts in the inner Solar System. *Icarus*, 2010, 207: 744–757
- 84 Burbine T H, McCoy T J, Meibom A, et al. Meteoritic parent bodies: their number and identification. *Asteroids III*, 2002. 653–667
- 85 Fan Y, Li S, Liu S, et al. Shidian meteorite, a new fall analog of near-Earth asteroid (101955) Bennu. *Meteorit Planet Sci*, 2022, 57: 2192–2215
- 86 Li S, Wang S, Leya I, et al. Petrology, mineralogy, porosity, and cosmic-ray exposure history of Huaxi ordinary chondrite. *Meteorit Planet Sci*, 2017, 52: 937–948
- 87 Chapman C R, Morrison D, Zellner B. Surface properties of asteroids: a synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry. *Icarus*, 1975, 25: 104–130

- 88 Weisberg M K, McCoy T J, Krot A N. Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006, 19–52
- 89 Zolotov M Y. The composition and structure of Ceres' interior. *Icarus*, 2020, 335: 113404
- 90 Parker E T, McLain H L, Glavin D P, et al. Extraterrestrial amino acids and amines identified in asteroid Ryugu samples returned by the Hayabusa2 mission. *Geochim Cosmochim Acta*, 2023, 347: 42–57
- 91 Schmitt-Kopplin P, Hertkorn N, Harir M, et al. Soluble organic matter Molecular atlas of Ryugu reveals cold hydrothermalism on C-type asteroid parent body. *Nat Commun*, 2024, 14: 6525
- 92 Zhou T, Tang H, Miao B, et al. Review of the spectral effects of space weathering on C-type asteroids (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2023, 43: 647–660 [周婷, 唐红, 缪秉魁, 等. 空间风化对C型小行星的光谱影响研究概述. *空间科学学报*, 2023, 43: 647–660]
- 93 DellaGiustina D N, Emery J P, Golish D R, et al. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis. *Nat Astron*, 2019, 3: 341–351
- 94 Gaffey M J. Mineralogy of asteroids. AIP Conference Proceedings. Melville: American Institute of Physics, 2011, 1386: 129–169
- 95 Usui F, Kasuga T, Hasegawa S, et al. Albedo properties of main belt asteroids based on the All-Sky Survey of the infrared astronomical satellite *AKARI*. *Astrophys J*, 2013, 762: 56
- 96 Li S, Yin Q Z, Bao H, et al. Evidence for a multilayered internal structure of the chondritic acapulcoite-lodranite parent asteroid. *Geochim Cosmochim Acta*, 2018, 242: 82–101
- 97 Scott E R D. Iron meteorites: composition, age, and origin. In: *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Oxford: Oxford University Press, 2020
- 98 Zhang P, Li Y, Zhang J, et al. Compositional indication of E- and M-type asteroids by VIS-NIR reflectance spectra of meteorites. *Astron Astrophys*, 2023, 671: A77
- 99 Tholen D J. Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. Doctor Dissertation. Tucson: the University of Arizona, 1984
- 100 Elkins-Tanton L T, Asphaug E, Bell Iii J F, et al. Distinguishing the origin of asteroid (16) Psyche. *Space Sci Rev*, 2022, 218: 17
- 101 Jones T D, Lebofsky L A, Lewis J S, et al. The composition and origin of the C, P, and D asteroids: water as a tracer of thermal evolution in the outer belt. *Icarus*, 1990, 88: 172–192
- 102 Dye S T, Hung Y, Lekic V, et al. Geo-neutrinos and Earth Models. In: *Physics Procedia*. Elsevier: Amsterdam, 2015, 61: 310–318
- 103 Lyons J R, Young E D. CO self-shielding as the origin of oxygen isotope anomalies in the early solar nebula. *Nature*, 2005, 435: 317–320
- 104 Alexander C M O, Bowden R, Fogel M L, et al. The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. *Science*, 2012, 337: 721–723
- 105 Trinquier A, Birck J, Allegre C J. Widespread ^{54}Cr heterogeneity in the inner Solar System. *Astrophys J*, 2007, 655: 1179–1185
- 106 Warren P H. Stable-isotopic anomalies and the accretionary assemblage of the Earth and Mars: a subordinate role for carbonaceous chondrites. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 311: 93–100
- 107 Hudson R S, Ostro S J. Shape and non-principal axis spin state of asteroid 4179 Toutatis. *Science*, 1995, 270: 84–86
- 108 Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans D K, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 2006, 312: 1330–1334
- 109 Lauretta D S, DellaGiustina D N, Bennett C A, et al. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature*, 2019, 568: 55–60
- 110 Ostrowski D, Bryson K. The physical properties of meteorites. *Planet Space Sci*, 2019, 165: 148–178
- 111 Pohl L, Britt D T. Strengths of meteorites—An overview and analysis of available data. *Meteorit Planet Scien*, 2020, 55: 962–987
- 112 Bruck Syal M, Michael Owen J, Miller P L. Deflection by kinetic impact: sensitivity to asteroid properties. *Icarus*, 2016, 269: 50–61
- 113 Watanabe S, Hirabayashi M, Hirata N, et al. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. *Science*, 2019, 364: 268–272
- 114 Barnouin O S, Daly M G, Palmer E E, et al. Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness. *Nat Geosci*, 2019, 12: 247–252
- 115 Cheng A F, Agrusa H F, Barbee B W, et al. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos. *Nature*, 2023, 616: 457–460
- 116 Raducan S D, Jutzi M, Cheng A F, et al. Physical properties of asteroid Dimorphos as derived from the DART impact. *Nat Astron*, 2024, 8: 445–455
- 117 Stickle A M, DeCoster M E, Burger C, et al. Effects of impact and target parameters on the results of a kinetic impactor: predictions for the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission. *Planet Sci J*, 2022, 3: 248

Summary for “小行星的起源、物理化学特性及其与防御的关联”

The origin, physical and chemical properties of asteroids, and their association with defense

Dongliang Zhang¹, Shijie Li^{2*}, Dehan Shen^{2,3}, Deliang Wang^{2,3}, Haibin Zhao⁴, Mingtao Li⁵ & Zizheng Gong⁶

¹ Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

² Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

⁵ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

⁶ Deep Space Exploration Lab, Beijing 100089, China

* Corresponding author, E-mail: lishijie@psec@mail.gyig.ac.cn

Asteroids are direct relics of early Solar system materials, whose composition, structure, and orbital distribution preserve crucial physical and chemical information about the evolutionary process from the primitive solar nebula to the planetary system. Significant differences exist in the formation conditions and evolutionary pathways reflected by different types of asteroids, making them important research objects for reconstructing Solar system material distribution, early planetary embryo accretion, and planetary differentiation processes. In recent years, based on multi-wavelength spectroscopic observations, thermal radiation characteristic analysis, dynamical simulations, and meteorite analog studies, systematic understanding has been gained regarding the mineral composition, internal structure, thermal history, and surface weathering of asteroids. The success of sample-return missions such as Hayabusa, Hayabusa2, and OSIRIS-REx has further advanced in-depth research on the structure of primitive planetary materials, volatile preservation mechanisms, and the origin of organic molecules, laying a solid foundation for the interdisciplinary development of planetary science and cosmochemistry.

Meanwhile, the continuous advancement of global asteroid exploration has led to the identification of a large number of near-Earth asteroids (NEAs) and potentially hazardous asteroids (PHAs). Although the short-term probability of these celestial bodies impacting Earth is low, their potential impacts could trigger severe regional damage or even global climate catastrophes. Therefore, research on asteroid impact risk assessment and deflection technologies is becoming a common focus in the international fields of planetary science and space engineering. NASA's 2022 DART (Double Asteroid Redirection Test) mission successfully validated the kinetic impact deflection strategy on a real celestial body for the first time, significantly altering the orbital period of the target asteroid and marking the transition of active planetary defense technologies from conceptual research to an in-orbit experimental phase. China officially launched the construction of its near-Earth asteroid defense system in 2024, planning to conduct an in-orbit impact deflection verification mission for small targets in the future, which is of great significance for promoting the systematic layout of China in the field of planetary defense.

The effectiveness of asteroid defense strategies relies heavily on the accurate understanding of the target celestial body's physical and chemical properties, including density, porosity, internal structure, rotational state, mineral composition, and space weathering degree. Asteroids with different compositions and structures exhibit significant differences in their responses to deflection methods such as kinetic impact, gravity tractor, and laser ablation. Therefore, a systematic understanding of asteroid formation mechanisms, evolutionary processes, and orbital variation laws is the foundation for advancing impact risk assessment, mission planning, and engineering scheme design.

Based on systematically sorting out the origin, late evolution, spatial distribution, and dynamical characteristics of asteroids, this paper focuses on summarizing the intrinsic links between asteroid material properties and planetary defense technologies, and proposes the needs and development directions of future asteroid scientific research in supporting impact risk assessment and defense engineering. It aims to provide a reference for scientific exploration and technological layout in related fields in China.

asteroid origin, orbital characteristics, material composition, chemical composition, asteroid defense

doi: [10.1360/CSB-2025-5409](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5409)