

近地小行星撞击风险应对战略研究

吴伟仁^{1,2}, 龚自正^{3,4}, 唐玉华¹, 张品亮³

(1. 探月与航天工程中心, 北京 100190; 2. 深空探测实验室, 合肥 230026; 3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 4. 辽宁大学空间科学与技术研究院, 沈阳 110036)

摘要: 小行星撞击地球引发过 10 次以上不同程度的生物灭绝事件, 是人类长期共同面临的重大潜在威胁; 防范近地小行星 (NEA) 撞击风险事关全球安危与人类文明存续, 相关研究现实需求迫切、战略意义深远。本文阐述了 NEA 撞击危害及撞击地球风险情况, 研判了积极开展应对的重要意义; 系统分析了当前 NEA 撞击风险应对的国际研究态势, 涵盖应对流程、监测预警、撞击灾害评估、在轨处置等内容; 全面总结了我国 NEA 撞击风险应对的基础进展及存在不足。在此基础上, 研究提出了我国应对 NEA 撞击风险的发展目标、体系构成, 论证形成了监测预警、在轨处置、灾害救援等重点任务以及基础研究、国际合作主导方向。研究建议, 加强撞击风险应对能力顶层设计和长远谋划, 高效建立“内聚外联”撞击风险应对业务体系, 快速形成撞击风险应对能力和创新能力, 着力构建行星防御领域人类命运共同体, 由此发展适应国情特色且“监测精准、预警可靠、应对有效、救援有力”的行星防御体系。

关键词: 近地小行星; 撞击危害; 撞击风险应对; 监测预警; 在轨处置; 国际合作

中图分类号: V57; V11 **文献标识码:** A

Response to Risk of Near-Earth Asteroid Impact

Wu Weiren^{1,2}, Gong Zizheng^{3,4}, Tang Yuhua¹, Zhang Pinliang³

(1. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China; 2. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230026, China; 3. Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 100094, China; 4. Institute of Space Science and Technology, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Near-Earth asteroid (NEA) impacts on the Earth have caused over 10 biological extinction events of different degrees, threatening all human beings in the long term. The prevention of NEA impacts concerns global security and the survival of human civilization and urgently requires extensive research. In this paper, the hazards and risks of NEA impact on the Earth are described, and the significance of active response is discussed. The current international research situation and trend regarding NEA impact risk response were analyzed, involving response procedures, monitoring and early warning, impact hazard assessment, and on-orbit disposal. The basic progress and shortcomings of NEA impact risk response in China are summarized. Based on the above analysis, the development goals and system structure of NEA impact risk response in China are proposed, and the key tasks are summarized and discussed involving monitoring and early warning, on-orbit disposal, disaster rescue, basic research, and international cooperation. Furthermore, we suggest that China should strengthen the top-level design and long-term planning of impact risk response, establish an integrated impact risk response system, develop impact risk response and innovation capabilities, and build a community with a

收稿日期: 2022-02-01; **修回日期:** 2022-03-07

通讯作者: 龚自正, 北京卫星环境工程研究所研究员, 研究方向为近地小行星防御、空间碎片防护与清除、冲击动力学;

E-mail: gongzz@263.net

资助项目: 国家航天局“近地小行星撞击风险应对重大专项”(KJSP2020020101); 国家航天局民用航天技术预先研究项目(D020304)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

shared future for mankind in the field of planetary defense, thereby creating a planetary defense system that adapts to China's national conditions and achieves accurate monitoring, reliable warning, effective disposal, and efficient rescue.

Keywords: near-Earth asteroid; impact hazards; impact risk response; monitoring and early warning; on-orbit disposal; international cooperation

一、前言

在天文学上,将轨道近日点距离在 1.3 AU ($1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$) 以内的小行星称为近地小行星 (NEA)。截至 2022 年 3 月 7 日,已发现的 NEA 共有 28 464 颗 [1],其中直径大于 140 m 的有 10 024 颗,直径大于 1 km 的有 887 颗,具有潜在危险的有 2263 颗。NEA 亮度暗弱、分布广泛、难以发现,运动轨道易受大行星牵引而改变;可能与地球交会,撞击地球具有一定的突发性。在历史上,NEA 撞击地球事件频发 [2~6]。地球上发生过 22 次不同程度的生物灭绝事件,至少 10 次是由 NEA 撞击地球所致 [7]。2013 年 2 月 15 日,一颗直径约为 18 m、质量约为 7000 t 的 NEA 以 18.6 km/s 的速度在俄罗斯车里雅宾斯克地区约 30 km 高空爆炸,造成了人身伤害和财产损失。仅在 2021 年,全球发生 NEA 飞掠地球事件约 1600 次,观测到 29 颗 NEA 进入地球大气层;我国的河南省驻马店市等地也发生了火流星事件。

NEA 飞向地球,在大气层会发生空爆,撞击到地表可能引发地震、海啸、火山爆发,还可能导致全球气候环境灾变,甚至造成全球性生物灭绝和文明消失;作为人类长期面临的重大潜在威胁,需要世界各国联合应对;也给国际航天界、天文界等领域带来了重大科学和技术挑战。关于 NEA 撞击风险应对,国际上一般称为行星防御。1994 年彗-木撞击事件、2013 年俄罗斯车里雅宾斯克 NEA 撞击事件,都促使相关问题得到国际社会的普遍重视,如联合国和平利用外层空间委员会 (UNCOPUOS)、政府、非政府 3 个层面都成立了行星防御组织,积极开展应对工作。1995 年,联合国首次召开“预防近地天体撞击地球”国际研讨会。2014 年,在 UNCOPUOS 框架下成立国际小行星预警网 (IAWN)、空间任务规划咨询小组 (SMPAG)。2016 年,联合国大会将每年的 6 月 30 日定为国际小行星日,以引导公众更多了解 NEA 对地球的潜在威胁。2009 年起,国际宇航科学院、联合国外空

司定期举办国际行星防御大会 (PDC)。在政府层面,美国成立了行星防御协调办公室 (PDCO) (2016 年),发布了《国家近地天体应对战略及行动计划》(2018 年) [8],旨在提升 NEA 的发现、跟踪、表征能力并发展 NEA 偏转和摧毁技术,颁布了《近地天体撞击威胁紧急协议报告》(2021 年) [9];德国、英国、俄罗斯、日本等国家先后成立了近地天体监测预警防御中心。

相比之下,我国 NEA 撞击风险应对工作起步较晚,研究工作多为自发、零星、分散,缺乏综合性部署规划和专门的支持渠道,导致基础薄弱、国际贡献率低、国际话语权小;与优势国家的差距呈现拉大趋势,既不利于国家安全,也影响了在面临 NEA 撞击威胁这种攸关全球安危重大事件时的自主决策和主导权,与负责任、有担当的大国形象,建设科技强国、航天强国的国际地位不相称。2021 年起,国家航天局联合有关部委,启动了我国 NEA 撞击风险应对的中长期发展规划论证工作,旨在系统性加强 NEA 撞击风险应对处置能力。本文作为相关研究的先导内容,剖析应对需求、梳理现状趋势、总结面临差距,提出发展目标、论证体系构成、策划重点任务,以期为 NEA 撞击风险应对相关的国家规划制定、总体研究工作提供基础参考。

二、积极应对近地小行星撞击风险的重要意义

(一) 近地小行星撞击危害概述

NEA 撞击地球产生的危害程度与撞击能量直接相关 [10],相应过程分为超高速进入大气层、撞击地表、长期环境效应 3 个阶段 (见图 1)。NEA 以极高速度 (约 20 km/s) 进入地球大气层,在大气层中形成高温、高压冲击波;冲击波向地表传播,引起地面超压损伤。NEA 在气动热、气动力耦合作用下出现剧烈烧蚀和解体,甚至在空中爆炸形成火球,与大气分子电离一起形成热辐射,进而传至地表造成热辐射损伤并引发森林大火。直径较小、结

构疏松度较大的解体碎块，将在大气层中烧为灰烬；直径较大、结构疏松度较小的解体碎块，将穿过大气层撞击到地球表面，在短时间内急剧释放其携带的巨大动能。通常直径大于 60 m 的石质陨石（S 型）或大于 20 m 的铁质陨石（M 型）才能穿过地球大气层撞击到地球表面 [11]。

NEA 撞击地表后，撞击区域的材料瞬间经历温度从 300 K 到 10^5 K、压强从 0.1 MPa 到 10 TPa、应变率高达 10^8 /s 的极端状态，发生破碎、熔化、气化乃至等离子体化相变，产生撞击坑 [12]。NEA 撞击会引起地表岩石发生化学反应（产生各种气体），可能将地表部分物质、尘埃抛向空中（产生反溅碎片云），相应的冲击波可诱发强烈地震。这些气体、尘埃和灰烬将弥漫充斥整个大气层（遮住阳光），特殊情况下可使地表的年平均温度下降 2~5 °C，影响长达百万年 [13,14]。NEA 对海洋的直接撞击，会激起数百米高的巨浪，引发强烈的海啸与地震、大量的海水蒸发 / 溅射；海底沉积物与岩石粉尘抛射到平流层中并滞留，海洋中大量生物死亡。

NEA 撞击地球是一个物理 - 力学 - 化学强耦合过程。需要开展超高速进入和撞击实验，结合数值模拟与理论分析，才能建立有关进入大气、撞击地表过程及效应的准确模型，这是国际性的重大前沿和难点问题。然而相比其他参数，NEA 直径较易获得，NEA 质量也可通过等效直径来估

算，因此国际上通常用等效直径来表征撞击危害。相应危害程度主要划分为 5 类 [8,15]：① 等效直径为千米级，可引发全球性灾难，如 6500 万年前 K-T 事件，该类事件发生概率为每 1×10^8 年 1 次；② 等效直径为 140 米级，可引发洲际性灾难，如 2019 OK 小行星事件，该类事件发生概率为每 1000 年 1 次；③ 等效直径为 50 米级，可引发大型城市级灾难，如 1908 年俄罗斯通古斯事件，该类事件发生概率为每 100 年 1 次；④ 等效直径为 10 米级，可引发小城镇级灾难，如 2013 年俄罗斯车里雅宾斯克事件，该类事件发生概率为每 30~50 年 1 次；⑤ 等效直径为米级，大多产生空爆并出现火流星现象，如 2021 年河南省驻马店市火流星事件，该类事件频繁发生。对撞击事件的统计表明，NEA 的撞击落点在地球表面是均匀分布的 [16]。

（二）近地小行星撞击风险分析

撞击风险指撞击地球的概率与撞击所致危害的乘积，评估 NEA 撞击风险通常涉及都灵风险指数 [17]、巴勒莫风险指数 [18]：前者采用 11 个整数（0~10）将风险等级划分为 5 种，对应不同的撞击概率及危害；后者由撞击概率、距离发生撞击的时间、撞击能量等计算获得。为进一步明晰相关指数的物理意义，有研究 [19] 将人员伤亡估算引入 NEA 撞击风险评估中，建立了基于撞击概率、撞

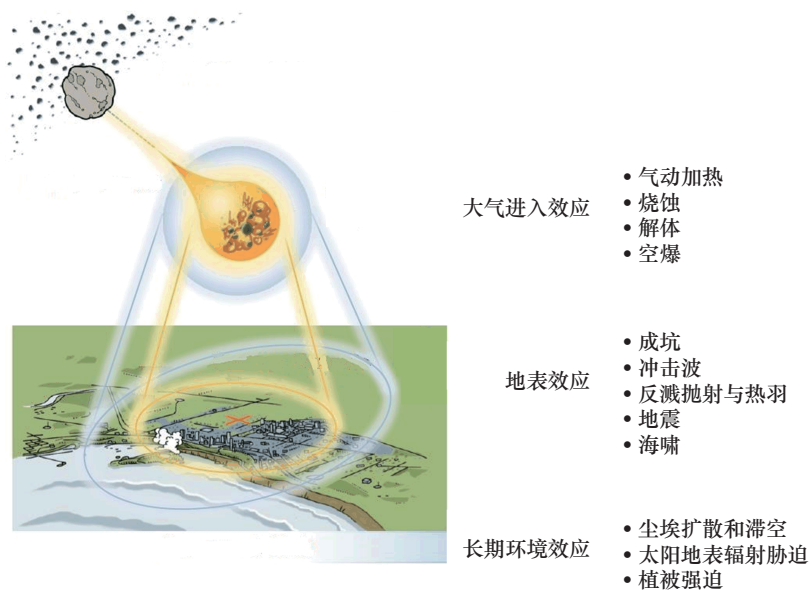


图 1 NEA 撞击地球的过程与危害示意图

击事件类型和预警时间,可给出撞击导致死亡人数的定量评估指数。数据分析显示 [1]:100 年内威胁最大的 NEA 是直径约 370 m 的编号 99942 小行星,预测在 2029 年 4 月 14 日在距离地表 3.1×10^4 km 处(高度小于 GEO 轨道)飞越地球,2068 年再次接近地球(撞击概率约为百万分之七);10 年内威胁最大的 NEA 是直径约 18 m、编号 2016NL39 小行星,预计在 2030 年 6 月 30 日距离地球 1.2×10^5 km 处(约 1/3 的地月距离)飞越地球。

需要指出的是,超过 98% (以数量计)的 NEA 尚未被人类发现编目,可能对地球构成严重威胁 [8];如直径 140 m 以上的约 70%、直径 50~140 m 的约 97%、直径 10~50 m 的约 99% 的 NEA 未被发现 [20]。这些大量未被发现的 NEA,其运动过程因受到其他大型天体引力影响而造成飞行轨道变化,撞击威胁难以准确预测,因而实际风险较已掌握情况严重得多;亟需提升 NEA 探测水平、发展更为精确的撞击风险预估理论及模型。从历史情况看,直径 1 km 以上 NEA 的撞击事件发生概率较低,短期内难以有效实施在轨处置防御;直径 10 m 以下的撞击事件虽然频发,但实际危害较小;因而直径 10~1000 m 的 NEA 应是国际社会关注和应对防范的重点对象,而直径 30~50 m 的 NEA 则是“重中之重”。

国际上通常依据 NEA 等效直径,将撞击风险和对应的预警及响应分为 4 个等级 [8,15]:① I 级风险(对应红色预警),特别严重危害事件,重点对象为直径 140 m 以上的 NEA,危害范围为洲际级至全球;② II 级风险(对应橙色预警),严重危害事件,重点对象为直径 50~140 m 的 NEA,危害范围为大型城市级至洲际级;③ III 级风险(对应黄色预警),较严重危害事件,重点对象为直径 20~50 m 的 NEA,危害范围为中小城市级至大型城市级;④ IV 级风险(对应蓝色预警),一般危害事件,重点对象为直径 20 m 以下的 NEA,危害范围为城镇级至中小城市级。

(三) 近地小行星撞击风险的应对意义

与地震、洪水等自然灾害不同,NEA 撞击地球的危害具有以下特征:一是瞬间发生的全球性灾害,在直径 50 m 以上特别是 140 m 以上的 NEA 撞击下,没有国家和人员能够幸免;二是撞击威胁可测,只要持续提升监测预警能力,稳步增强国际合

作,就可对 NEA 的撞击时间、撞击落点、危害程度进行相对准确的提前预报;三是撞击危害可防,积极发展多手段在轨处置技术,形成一定的主动防御能力,可完全避免或显著降低撞击造成的损失。加强 NEA 撞击风险的应对工作,具有重要的现实意义和深远的历史意义。

一是贯彻落实总体国家安全观不可或缺的重要实践。NEA 撞击地球的风险概率虽然不高,但危害极大,几乎与国家安全体系中所有领域的安全密切相关;NEA 撞击地球直接威胁居民生命财产安全,影响经济社会发展和安全稳定局面。稳妥应对 NEA 撞击风险,既是统筹各项事业全面发展的必然要求,也是筑牢国家安全基础、推动深度融合发展的重要切入点。

二是引领科技创新发展的重要动力。应对 NEA 撞击风险,需要解决所涉及的天文学、数学、物理学、力学、地学、信息科学、控制科学、航空宇航科学、法学等领域的基础科学与关键技术问题,多学科交叉特征显著。提升相关领域的科学技术水平并形成体系能力,是超前布局外层空间资源开发利用、牵引新型空间技术发展的重要途径,也是辐射带动关联产业发展、加快建设科技强国、航天强国的应有之义。

三是推动构建外层空间人类命运共同体的重要举措。NEA 撞击地球事件一旦发生,人类都身在其中,应对举措的成效事关人类文明存续;因而做好撞击风险应对、保护地球家园是人类、各国的共同责任。我国积极应对 NEA 撞击风险,与国际社会一道保护人类安全,将彰显负责任航天大国的良好形象,体现和平利用空间、增进人类福祉的一贯宗旨,支撑构建新型国际关系和人类命运共同体。

三、近地小行星撞击风险应对的国际研究态势

(一) 撞击风险应对流程

综合国际上有关 NEA 撞击风险研究,应对流程可概括如下(见图 2)。① 监测预警,包括搜索发现、跟踪定轨及数据更新、物性测量、撞击风险预报等,为撞击风险评估提供输入。② 撞击风险评估,包括依据小行星轨道及理化特性参数开展撞击概率计算、撞击风险走廊预估、撞击落点预报、撞击效应分析等,为在轨处置提供输入。③ 在轨处置,

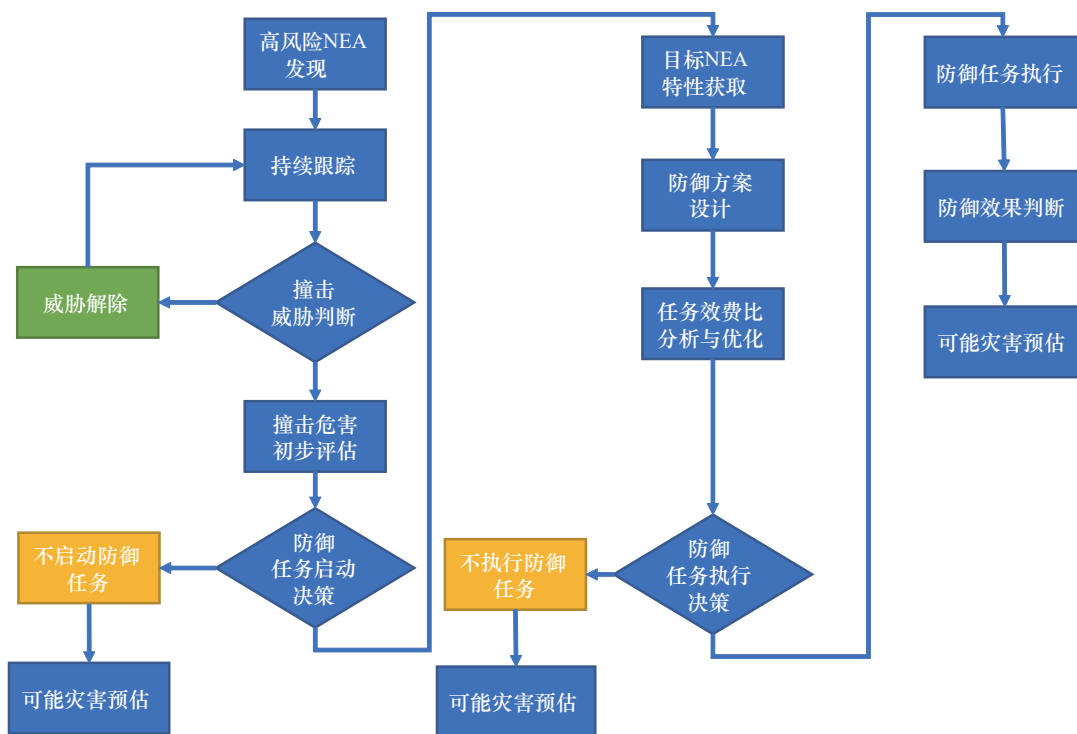


图2 NEA 撞击风险的通用应对流程

在对危险 NEA 进行预警的前提下，改变 NEA 轨道以避免撞击地球，或将 NEA 分裂为碎片以避免或降低对地球的危害；包括处置任务规划、处置方案设计、处置任务实施、处置效果评估，为开展灾害救援工作提供输入。④ 灾害救援，对于未能提前预警的撞击事件或处置不成功的撞击事件，建立撞击灾害应急响应机制，开展灾害救援以降低灾害损失并恢复环境。

（二）监测预警研究进展

NEA 监测预警方式有多种，按照观测点位置可分为地基监测、天基监测，从技术原理角度又可细分为光学观测、红外谱段观测、雷达探测。监测预警主要有 3 类场景：① 日常编目场景，通过专用的天基、地基设备，例行执行巡天搜索以发现新的 NEA，由精测望远镜进行跟踪以获取足量数据并进行定轨编目；② 威胁预警场景，针对日常编目中 20 年内撞击概率大于 1% 的 NEA，通过地基、天基等专用 / 兼用设备开展精密跟踪，获取精密轨道并细化评估撞击风险及危害；③ 短临预报场景，针对进入距地球 7.5×10^6 km 范围之内，撞击概率大于

10% 的 NEA，开展加密跟踪和特性测量，获取理化特性并持续性预报撞击区域（落点）信息。

美国的 NEA 监测预警项目开始于 1992 年（“太空卫士巡天”项目），目前相对完整地构建了地基为主、天基补充的监测网络，是世界近地天体监测技术的先行者和监测数据的主要贡献者；监测发现体系具有不同口径搭配、光学与雷达配合、南 / 北半球布局、专 / 兼结合等特点，国际编目贡献率超过 98%。例如，在日常编目方面，有 11 台专用光学望远镜（口径 0.5~1.8 m），兼用望远镜最大口径为 4.2 m [1]；平均每年新发现约 1500 个 NEA，构建数据库并公开发布；正在建设天基红外望远镜（口径 0.5 m）、地基大视场巡天望远镜（口径 8.4 m），将形成监测 1 AU 远处直径 30 m NEA 的能力。欧洲航天局（ESA）2013 年成立了行星防御办公室，组织开展 NEA 监测、数据处理、在轨处置等技术研究工作；现有 14 台兼用望远镜（口径 0.4~4.2 m），国际编目贡献率为 0.88%，正在建设口径 1 m 的“复眼”系统以显著提升搜索效率。俄罗斯 2002 年成立了行星防御中心，现有 9 台专用望远镜（口径 0.2~0.7 m），但面向国际共享的监测数据偏少（国际编目贡献率

为 0.08%)；兼用望远镜最大口径 2.6 m，主要用于 NEA 特性测量；2016 年投入使用的 AZT-33VM 大型望远镜（直径 1.6 m）可对远距离 NEO 进行探测。在监测编目的基础上，美国利用地基光学设备、阿雷西博射电望远镜、金石太阳系雷达等，开展有威胁 NEA 的精确定轨、特性测量等研究，细化评估撞击风险。建立的“哨兵”撞击监测系统，可分析确定新发现 NEA 的精确轨道，计算撞击地球的概率；寻找未来 100 年内可能与地球接近的 NEA，及时更新并公开发布分析结果，为 PDCO 提供决策支持。与此同时，对于大量短期内无法编目、可能突然接近地球的 NEA，形成了良好的短临预报能力（如 2008 TC3、2014 AA、2018 LA、2019 MO 等数起 NEA 撞击地球事件）。

地基监测预警系统建设起步早、技术相对成熟，是目前的骨干设备，但在精度、效率、能力上有其难以克服的固有缺陷，无法实现全空域、全天时监测预警，主要体现在：自身能力受大气条件、台站位置制约，存在太阳光照区域“死角”，仅能监测约 30% 的天域；属于“守株待兔”工作模式，到达探测数量峰值耗时长，无法在给定期限内完成探测。天基监测预警系统具有监测范围广、追踪手段多样、轨道预测准确等技术优势，能够弥补地基监测系统的固有缺陷，成为当前各国重点建设方向，但也面临成本高、在轨维护困难、有效载荷配置单一等制约因素。后续，监测预警的设备及技术发展方向表现为：地基为主转向地基/天基协同，口径进一步加大、视场继续拓宽，可见光向红外、单一波段向多波段集成转变，重视前沿技术演示验证和软硬件升级；形成天地一体化监测预警能力，对直径大于 140 m 的 NEA 完成不低于 90% 的编目，开展直径 50 米级的 NEA 监测预警及编目。

（三）撞击灾害评估研究进展

美国国家航空航天局（NASA）将超高速飞行器研制所发展的空气动力学技术拓展应用到 NEA 进入大气层过程，建立了 NEA 超高速进入大气高温流场、激波层辐射及烧蚀的耦合算法、进入过程中 NEA 材料烧蚀及辐射效应的地面试验手段、NEA 进入过程激波效应数值模拟方法，深入研究了 NEA 的气动热环境、烧蚀及冲击波传播问题。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室发展了模拟 NEA 进入

与撞击效应的冲击动力学方法，研究了 NEA 进入中的解体、空中爆炸以及撞击成坑、撞击海洋引起海啸等问题。2017 年，NASA 建立了 NEA 进入与撞击风险分析评估系统（PAIR），可对设定的 NEA 撞击地球过程及效应进行定量分析，对地面人口和设施的危害开展定量评估，成为实施 NEA 撞击联合应急桌面演习/演练的主要支撑工具。英国帝国理工大学、比利时冯卡门流体力学研究所、德国斯图加特大学、捷克科学院等机构研究了 NEA 超高速进入过程中的解体、空中爆炸、热辐射以及撞击地表成坑等问题，发展了相应的冲击动力学仿真手段；英国科研机构建立了 NEA 进入与撞击效应模型，研制了 NEA 撞击灾害评估软件，提供开放使用服务。

目前，NEA 撞击灾害的研究热点及难点有：精确描述 NEA 撞击地球全过程，揭示致灾与灾害演化机理，建立全过程响应模型及灾害演化模型。① 在 NEA 极高速进入大气效应与机理方面，国际上缺乏速度大于 12 km/s 的高温气体模型、地面实验技术，NEA 多孔隙、含裂纹、各向异性、几何形貌复杂等特性进一步增加了问题难度，数十年来研究进展缓慢。② 在 NEA 极高速撞击地表效应与建模方面，因相对速度极高（平均 20 km/s）、撞击地表产生固-液-气-等离子体多相混合态而成为物理-力学-化学强耦合过程，国际上尚不能开展此类极高速撞击实验；撞击区材料处于固-液-气多相混合状态，描述此类状态的宽区多相状态方程的理论建模还不成熟。③ 在 NEA 撞击地球的致灾机理与长期环境效应方面，已有工作集中在冲击波、地震、火灾、溅射物、撞击成坑、海啸、火山爆发等单灾种，而撞击引发的各灾种耦合效应研究未有开展，撞击后的灾害长期演化研究存在空白。

（四）在轨处置研究进展

在轨处置研究始于 20 世纪 80 年代，已经形成较完整的技术体系 [15]，重点发展两类手段：以动能撞击为主的瞬时作用方式，已开展在轨演示验证任务；激光烧蚀、拖曳、引力牵引等长期作用方式，尚处于概念探索阶段。

美国 2005 年成功实施“深度撞击”任务 [21]，质量为 370 kg 的铜制撞击器在飞行 4.3×10^8 km 后以 10 km/s 的相对速度撞击坦普尔 1 号彗星彗

核,验证了动能撞击防御小行星的技术可行性。NASA、ESA 联合开展了“小行星撞击偏转评估计划”(AIDA) [22],旨在进一步在轨验证动能撞击防御技术。AIDA 项目中的“双小行星重定向测试”(DART) 任务由 NASA 负责实施,已于 2021 年 11 月 24 日成功发射;计划在 2022 年 9 月,采用质量为 550 kg 的撞击器以 6.6 km/s 相对速度撞击距离地球 1.1×10^7 km 远的双小行星(编号 65803)中较小的 B 星(直径 160 m),撞击后预估 B 星出现约 0.4 mm/s 的速度变化,绕转周期则缩短约 10 min;随后采用地面光学设备、伴飞小卫星(撞击前 10 天释放)开展联合观测,对抵近探测、动能撞击、效能评估等关键技术进行演示验证。ESA 承担对撞击效应及效果进行抵近测量与评估任务,相应的伴飞小卫星拟于 2024 年发射、2026 年绕飞撞击后的小行星,可更精确地评估动能撞击效果并修正动能撞击偏转模型。

在轨处置研究趋势主要有:进一步在轨验证动能撞击偏转技术的有效性,完善处置-评估一体化技术;发展激光烧蚀偏转、拖曳等新型技术,从概念研究向关键技术攻关迈进;全面分析并评价单一处置技术对各类目标的适用性、效能及成本,开展多手段协同的高效处置方案设计;综合在轨与地面演示验证,加速小行星防御能力的实用化进程。

四、我国近地小行星撞击风险应对的基本情况

(一) 整体进展

我国小行星防御领域研究起步较晚,2000 年起依托国家国防科技工业局“空间碎片专项科研”,才陆续形成空间碎片监测预警及清除等共性技术和设备,为开展 NEA 撞击风险应对提供了关键基础积累。2018 年召开了以“小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术”为主题的第 634 次香山科学会议,聚焦研讨小行星安全防御问题。2018—2020 年,组织召开了 3 届“全国行星防御研讨会”。2019 年,“近地小天体调查、防御与开发问题”入选中国科学技术协会第 21 届年会发布的 20 个对科学发展具有导向作用、对技术和产业创新具有关键推动作用的重大前沿科学问题和工程技术难题。2021 年 10 月,第一届全国行星防御大会顺利召开,共有 300 多名代表参会。

2020 年,国家航天局牵头组建专家组,针对 NEA 撞击风险应对问题开展方案论证工作。2021 年 4 月,国家航天局表示,中国航天将论证实施探月工程四期、行星探测工程、国际月球科研站、NEA 防御系统,由此启动新时期我国探索九天的新篇章。2021 年,国家航天局牵头论证制定我国 NEA 撞击风险应对中长期发展规划。《2021 中国的航天》白皮书提出论证建设 NEA 防御系统。可以认为,2021 年是我国全面开展行星防御业务架构、机制流程、体系能力建设的肇始之年。

(二) 技术研究与对外合作情况

在地基观测方面,中国科学院紫金山天文台的 1 m 口径望远镜是我国仅有的 1 台 NEA 监测专用设备(位于江苏省淮安市盱眙县,台站编号 D29),已加入国际联测网并支持日常编目工作,可监测直径 300 m 以上的 NEA [15];至 2021 年共发现 33 颗 NEA,国际编目贡献率为 0.13%。我国另有 32 台望远镜(口径 1 m 以上)也可兼顾 NEA 监测。

在天基观测方面,我国还没有在轨服役的天基监测预警装备。我国提出的构建天基异构星座的 NEA 普查与定位系统(CROWN)方案 [15],拟在距太阳 0.6~0.8 AU 的类金星轨道上部署数颗小卫星(含 1 颗搭载窄视场光学-红外望远镜的机动主星、多颗搭载宽视场光学波段望远镜的微小卫星);卫星星座,视场、分辨率、灵敏度、巡天模式、星上计算等多个层面均采取异构设计,由此形成普查与详查相结合的天基任务模式。我国学者还提出了地球领航轨道天基监测预警望远镜任务概念,通过在地球前方或后方约 1×10^7 km 处部署天基望远镜,为弥补地基监测盲区、预警来自白天方向的 NEA 提供了可行方案 [23]。我国迄今没有自行建立小行星数据库。

在撞击灾害评估方面,我国开展了基于观测数据的 NEA 物理-化学特性及其统计分布规律研究,先期探索了部分关键技术和地面缩比试验方法;研究了 NEA 进入地球大气层的气动热环境、烧蚀、冲击波、地面成坑及反溅碎片云问题,发展了 NEA 撞击陆地与海洋的数值仿真方法,初步建立了 NEA 进入大气层、撞击地表效应的分析评估模型 [12]。开展了动能撞击偏转小行星动量传递规律的建模与仿真、基于激光烧蚀驱动移除空

间碎片地面试验及半物理仿真系统的激光偏转防御技术可行性等研究 [24], 在动能撞击方面具备基本的效能评估能力。提出了“以石击石” [25]、“末级击石” [26] 等加强型动能撞击防御方案构思, 为防御大尺寸潜在威胁 NEA 提供了除核爆之外的新选项; 开展了核爆防御 NEA 的作用机理数值仿真, 获得了不同核爆条件下的 NEA 偏转规律, 同时开展了典型核设施在 NEA 撞击条件下的安全评估分析。

我国高度重视 NEA 防御的国际合作, 近年来在该领域的参与度稳步提高。2018 年, 亚太空间合作组织理事会批准了亚太空间科学天文台项目, 拟在 8 个正式成员国 (含中国) 分别部署 1 台小口径望远镜, 开展 NEA 监测预警研究。2019 年, 中国科学院和高校所属的盱眙站、长春站、新疆站、威海站, 参与了 1999KW4 小行星国际联合观测。此外, 对于行星防御领域的法律法规, 因涉及防御的合法性、责任、义务、决策机制等宽泛内容, 我国相关研究尚处于起步阶段。

(三) 发展面临的迫切问题

一是 NEA 撞击风险应对的顶层设计缺乏。我国尚未形成该领域的顶层规划与系统设计, 对应的组织体系、流程机制、各个环节的工作责任主体尚未明确。

二是专用监测设备与信息平台缺乏。目前仅有 1 台专用望远镜, 只能监测直径 300 m 以上 NEA (亮度相当于绝对星等 20), 不具备 NEA 轨道编目能力; 尚未自主建立 NEA 信息平台, 无法汇聚数据并开展预警业务, 监测预警数据依赖国际公开平台。

三是相关科学研究与技术储备不足。对于 NEA 撞击风险应对的科学与技术问题, 系统梳理、体系布局、深化研究均有待开展, 且当前重技术、轻科学的研究倾向突出; 在轨处置技术基本上处于概念研究阶段, 撞击灾害评估与在轨处置研究深度、广度均不足, 撞击灾害评估与在轨处置全过程仿真模拟平台未能建立, 无法支持开展全过程演习 / 演练。

四是行星防御领域的国际贡献率低、话语权小。受限于 NEA 监测设备和技术能力, 国内机构向国际社会提供的观测数据较少, 没有形成与我国国际地位相匹配的影响力。尤其在相关国际规则研究与

制定方面, 未能积极发声, 缺少话语权, 与我国负责任航天大国形象不符。

五、我国近地小行星撞击风险应对处置体系与重点任务

(一) 应对处置体系发展目标

结合国情、体现共性, 按照“夯基础、补短板、挖潜力、强体系、上水平”的原则, 稳步发展我国 NEA 撞击风险应对处置体系。国际前沿的研究水平与保障有力的业务能力并重, 以此为核心目标开展处置体系构建; 实施小行星天地协同监测网、在轨处置演示验证系统、重大灾害救援系统等重大工程, 形成“监测精准、预警可靠、处置有效、救援有力”的行星防御能力。

在近期 (2025 年前), 重点构建 NEA 监测预警网络, 具备直径 140 米级 NEA 自主发现与持续编目能力, 提升我国的国际编目贡献率; 完成动能撞击等在轨处置关键技术研究, 择机开展在轨处置技术演示验证; 初步建立特种灾害救援力量体系, 提升灾害救援先进适用装备的供给能力; 建立国内应对工作机制与国际合作机制。

在中期 (2030 年前), 重点提高在轨处置能力, 建立天地协同的监测预警网络; 具备直径 50 米级 NEA 自主发现与持续编目能力, 建设以自主数据为基础的 NEA 数据库, 进一步提升我国的国际编目贡献率; 开展动能撞击等处置技术及处置效果评估的在轨演示验证, 形成直径 50 米级 NEA 的在轨处置技术能力; 常态化开展联合演习 / 演练, 提升特种灾害救援综合能力。

在远期 (2035 年前), 全面提升体系应对能力, 建成全面可靠的监测预警网络; 具备直径 30 米级 NEA 自主发现与持续编目能力, 我国的编目贡献率达到国际先进水平; 深化处置技术在轨演示验证, 具备直径 50 米级 NEA 的多手段在轨处置技术能力; 显著提升复合型巨灾应急救援综合实力, 着力构建行星防御领域人类命运共同体。

(二) 应对处置体系构成

按照 NEA 撞击风险的应对处置流程, 应对处置体系主要分为决策指挥层、组织协调层、执行层 (见图 3); 成立专家委员会支撑各层级技术工

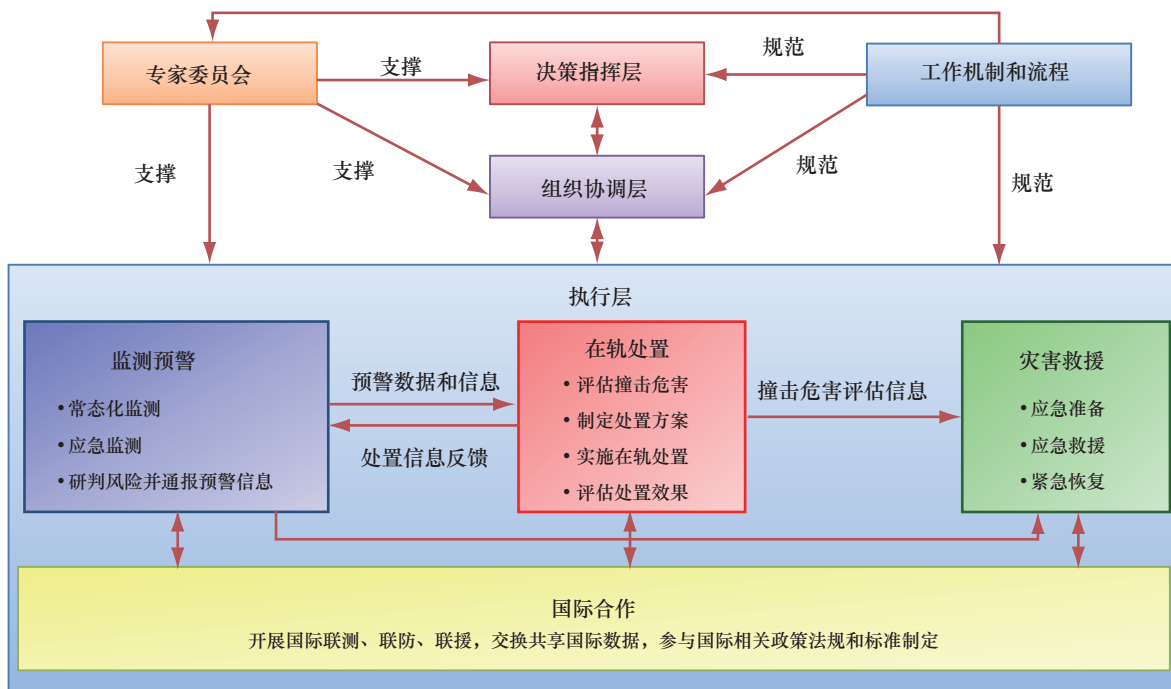


图3 我国 NEA 撞击风险的应对处置体系构成

作，制定工作机制并规范流程，形成科学的层级工作程序。决策指挥层负责防范 NEA 撞击相关重大事项决策。组织协调层负责资源协调与任务规划，例行开展常规工作。执行层负责防范决策的具体实施，涉及监测预警、在轨处置、灾害救援、国际合作等主要方面：① 开展常态化监测，在发现 NEA 撞击威胁后实施应急监测，及时判明风险、通报预警信息，为在轨处置提供预警数据和输入；② 评估 NEA 撞击危害、制定处置方案，实施在轨处置任务，评估处置效果；③ 在平时做好应急准备，得到预警、危害评估信息后启动实施应急救援，在撞击事件发生后进行紧急恢复；④ 参与国际联测 / 联防 / 联援并交换共享数据，国际相关政策法规和标准制定，提出发挥我国影响力的 NEA 撞击风险应对国际研究计划等。

（三）应对处置体系重点建设任务

1. 监测预警

建设重点在于天地一体化监测系统和综合服务平台。按照“天地协同、能力互补、场景驱动、业务运行”基本思路，构建精准预警、常态运行的天地一体化协同监测预警体系。

立足现有地基设备基础条件，增建直径 140 米级 NEA 日常编目能力，形成多口径搭配、多功能结合、高效协同的地基监测网。按照“国内优化布局、推动海外建站、普测 / 精测全面发展”的技术路线，建设国际一流水平的地基监测网。构建“可视天区互补、分时协同编目、短 / 临发现告警、广域巡天普查”的天基监测网，具有与地基监测网高效联合作业的能力。按照“开展验证试验、部署监测系统、能力升级完善”的技术演进路线，全面突破天基监测系统总体布局、先进监测载荷等关键技术。重点关注可在近地轨道、地月平动点、月球、日地平动点、地球公转轨道、类金星轨道等进行部署的天基监测设备（如图 4），丰富天基监测手段，力争尽快实现对发达国家、国际先进水平的追赶和超越。

综合服务平台具有任务规划、数据集成、编目更新、风险研判、信息发布、决策指挥、资源调度、救援支持等各类能力。按照“初步构建平台、开展示范应用，拓展升级应用、开展业务运行，强化内聚外联、有效支撑决策”的发展路线，开发先进软件、配齐必要硬件，为天地监测网的协同运行及预警业务实施提供综合服务保障。

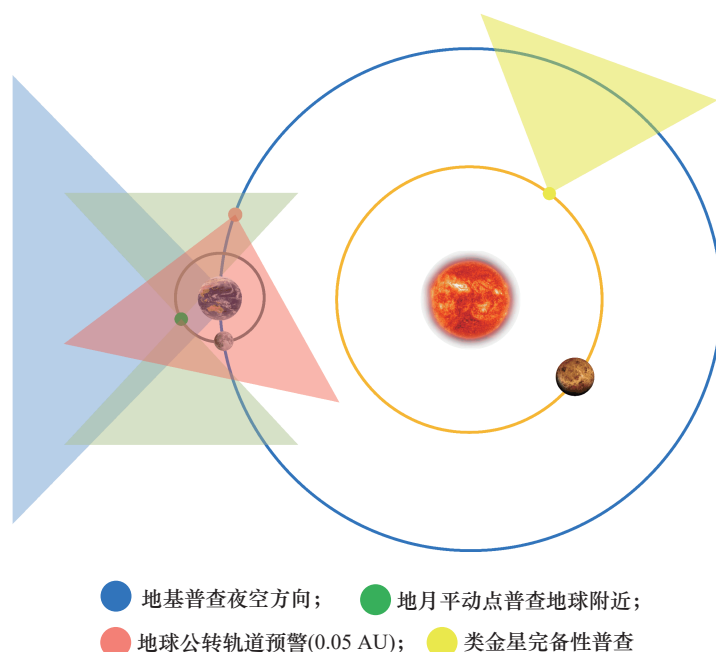


图 4 天基监测预警系统和设备布局示意图

2. 在轨处置

建设重点在于发展以动能撞击为主的在轨处置技术体系，开展有中国特色、国际亮点的在轨处置演示验证任务。以处置-评估结合、多目标/多手段协同作用等在轨飞行任务为牵引，开展以动能撞击瞬时作用为主、拖曳及激光偏转等长期作用为辅、兼顾新概念处置技术的关键技术研究；发展并完善涵盖瞬时作用、中长期作用、前沿探索类的处置技术体系，综合评估效能（如效率、成熟度、成本），明确场景适应性；建立在轨处置决策支持与评估、任务全流程设计仿真、地面试验验证等系统，支持地面推演与在轨验证。按照“撞得上、撞得动、防得住”的策略，分步实施具有国际显示度及影响力的在轨演示验证任务，形成直径 50 米级 NEA 多手段协同在轨处置任务能力。基于 NEA 目标理化特性，研究撞击地球的各种危害效应，建立危害效应的理论模型。在“探月工程”基础上，研究、试验、建设兼顾天基监测预警与在轨处置能力的“观-处”一体化体系方案，是我国行星防御领域赶超国际先进水平的突破口。

3. 灾害救援

立足现行的国家应急救援体系，针对 NEA 撞击地球的灾害特点，重点发展复合型巨灾应急救援

能力；按照“健全体制机制、完善综合能力、显著提升能力”的发展路径，分步开展建设，同步完善各级应急指挥机构。建立覆盖多灾种、灾害链的监测评估预警系统，优化复杂场景下灾情演化及快速评估模型，实现利用模拟仿真平台开展 NEA 撞击灾害救援演习/演练的常态化。针对性加强 NEA 撞击风险应对所需的特种灾害救援力量，提升重大场景下的保障能力。

4. 有关前沿基础研究

依据“引领学科发展，牵引并支撑未来重大任务”的基本原则，着眼未来 5~10 年行星防御发展趋势，开展有关基础研究和概念性/原理性研究，提升领域基础研究与创新能力，培育专精人才队伍。围绕 NEA 的轨道运行规律、物理化学特性、撞击效应与致灾机理、处置响应机理等方向，布局前沿基础科学问题研究，如小行星起源与演化、小行星轨道动力学演化机制、NEA 物质组成/结构特性/辐射特性、NEA 在大天体摄动影响下的轨道不确定性、NEA 进入大气层的热-力学耦合/烧蚀/爆炸解体机理、NEA 撞击地表的瞬时作用及引发的次生灾害机理、NEA 撞击对地球环境的长期演化影响、动能撞击下 NEA 的动态响应与能量传递规律、近距离核爆对 NEA 的作用机理及效应、激

光烧蚀等非接触式作用下的 NEA 偏转机理及轨道偏移规律等。

5. 国际合作

NEA 撞击危害的特点决定了有效防御离不开国际合作。采取“重点提升融入程度、着力发展区域合作、贡献更多中国力量”的基本思路，根据国情实际，深度参与国际组织机构（如 IAWAN、SMPAG、PDC），积极开展双边和多边国际合作。在双边国际合作方面，充分利用我国航天双边合作机制，开展联合观测、联合处置、联合救援，提高数据共享水平，推动实现应对“共商”、设备“共建”、数据“共享”，激发航天合作新活力。在多边国际合作方面，深入参与相关国际合作规则制定与完善工作，以构建外层空间人类命运共同体理念为指导，提出由我国主导的 NEA 撞击风险应对的国际研究计划、国际谈判规则、国际合作机制建议方案。

六、对策建议

（一）加强撞击风险应对能力顶层设计和长远谋划

充分发挥我新型举国体制优势，加强组织体系及应对流程机制建设，明确各环节责任主体。强化领域顶层设计，加快制定并适时发布 NEA 撞击风险应对的中长期发展规划及路线图。可按照 2025 年前重点构建监测预警体系，2030 年前重点提高应对处置能力，2035 年前全面提升体系应对能力的步骤安排，尽快实现撞击威胁可测、可防，形成与国际地位相匹配的 NEA 国家级应对能力体系。

（二）高效建立“内聚外联”撞击风险应对业务体系

组建 NEA 撞击风险应对专家委员会，为撞击风险应对提供智力支撑。依托优势技术单位，设立国家小行星监测预警研究中心。建立小行星信息平台，打造高水平、业务化、开放型的国家研发力量，常态化开展日常编目、威胁预警、短临预报、信息共享等业务工作。增强行星防御数据安全、提升国际话语权，保障国家层面工作协同机制开展 NEA 风险防御相关工作。积极调动社会力量介入，可部分采用商业化发展模式。

（三）快速形成撞击风险应对能力与创新能力

建议设立国家自然科学基金委员会—国家国防

科技工业局行星防御联合基金，以重大专项方式支持 NEA 撞击风险应对涉及的基础科学问题研究，为行星防御工程提供坚实的科学基础支撑。建议统筹国家国防科技工业局空间碎片专项科研、民用航天科研等渠道，结合正在论证实施的行星探测工程，设立 NEA 撞击风险应对国家科技重大专项，支持行星防御关键技术攻关及体系能力建设，尽快建立体系化的 NEA 撞击风险应对能力。建议尽早成立深空探索国家实验室，汇聚相关领域优势力量，构建科学、技术、工程协同一体的创新研发体制机制，支撑行星防御国家科技协同创新平台建设。

（四）着力构建行星防御领域人类命运共同体

居安思危、未雨绸缪，从构建人类命运共同体理念出发，以开放、包容、合作、引领的姿态参与行星防御国际事务，联合开展 NEA 撞击风险应对工作。深度参与联合国有关组织，发挥主动作为，彰显我国负责任航天大国的良好形象。与国际社会共商“联防”机制、共享“联测”数据、共建“联援”力量，为世界行星防御积极贡献中国智慧、中国方案、中国力量。

致谢

中国科学院国家空间科学中心李明涛研究员，中国科学院紫金山天文台赵海斌研究员，钱学森空间技术实验室霍卓玺研究员，北京卫星环境工程研究所陈川博士、任思远博士、宋光明博士为本文撰写提供了有益帮助，谨致谢意。

参考文献

- [1] Jet Propulsion Laboratory. Discovery statistics [EB/OL]. (2020-05-15)[2022-03-07]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>.
- [2] Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinctions [J]. *Science*, 1980, 208(4448): 1095–1108.
- [3] Chyba C F, Thomas P J, Zahnle K J. The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid [J]. *Nature*, 1993, 361(6407): 40–44.
- [4] Brown P G, Assink J D, Astiz L, et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors [J]. *Nature*, 2013, 503(7475): 238–241.
- [5] Popova O P, Jenniskens P, Yanenko V E, et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization [J]. *Science*, 2013, 342(6162): 1069–1073.
- [6] Astronomy. A large asteroid just zipped between earth and the moon [EB/OL]. (2019-07-25)[2022-01-15]. <https://astronomy.com/news/2019/07/a-large-asteroid-just-zipped-between-earth-and-the-moon>.

- [7] 欧阳自远. 奔走天地间—欧阳自远科普文选 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Ouyang Z Y. Traveling between heaven and earth: Ouyang Ziyuan selected popular science literature [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [8] National Science & Technology Council. National near-earth object preparedness strategy and action plan [EB/OL]. (2018-06-05)[2022-01-15]. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ostp-neo-strategy-action-plan-jun18.pdf>.
- [9] National Science & Technology Council. Report on near-earth object impact threat emergency protocols [EB/OL]. (2021-01-15)[2022-01-15]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2021/01/NEO-Impact-Threat-Protocols-Jan2021.pdf>.
- [10] European Space Agency. ESA NEO risk page [EB/OL]. (2017-01-15)[2022-01-15]. <https://neo.ssa.esa.int/risk-list>.
- [11] Rumpf C M, Lewis H G, Atkinson P M. Asteroid impact effects and their immediate hazards for human populations [J]. *Geophysical Research Letter*, 2017, 44(8): 3433–3440.
- [12] 刘文近, 张庆明, 马晓荷, 等. 近地小天体对地撞击成坑模型研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(12): 1–16.
Liu W J, Zhang Q M, Ma X H, et al. A review of the models of near-Earth object impact cratering on Earth [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 1–16.
- [13] O’Keefe J D, Ahrens T J. Impact production of CO₂ by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the earth [J]. *Nature*, 1989, 338: 247–249.
- [14] Chen G Q, Tyburczy J A, Ahrens T J. Shock-induced devolatilization of calcium sulfate and implications for K-T extinctions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 128(3–4): 615–628.
- [15] 龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术 [J]. *科学通报*, 2020, 65(5): 346–372.
Gong Z Z, Li M, Chen C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 346–372.
- [16] Schmidt N. Planetary defense: Global collaboration for defending earth from asteroids and comets [M]. Switzerland: Springer, 2019.
- [17] Binzel R P. The torino impact hazard scale [J]. *Planetary and Space Science*, 2000, 48(4): 297–303.
- [18] Chesley S R, Chodas P W, Milani A, et al. Quantifying the risk posed by potential earth impacts [J]. *Icarus*, 2002, 159(3): 423–432.
- [19] Rumpf C M, Hugh G L, Atkinson P M. Southampton asteroid impact hazard scale [C]. Tokyo: The 5th IAA Planetary Defense Conference, 2017.
- [20] Johnson L. Planetary defense at NASA: A planetary defense primer [R]. Washington DC: NASA Planetary Defense Coordination Office, 2019.
- [21] A’Hearn M F, Belton M J S, Delamere W A, et al. Deep impact: Excavating comet Tempel 1 [J]. *Science*, 2005, 310(5746): 258–264.
- [22] Cheng A F, Atchison J, Kantsiper B, et al. Asteroid impact and deflection assessment mission [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 115: 262–269.
- [23] Wang X T, Zheng J H, Li M T, et al. Warning of asteroids approaching Earth from the sunward direction using two Earth-leading heliocentric telescopes [J]. *Icarus*, 2022, 377: 1–15.
- [24] Song G M, Chen C, Gong Z Z, et al. Experimental study on momentum coupling law of interaction between pulse laser and asteroid like material [C]. Dubai: The 71th International Astronautical Congress, 2021.
- [25] Li M T, Wang Y R, Wang Y L, et al. Enhanced kinetic impactor for deflecting large potentially hazardous asteroids via maneuvering space rocks [J]. *Scientific Reports*, 2020 (10): 1–15.
- [26] Wang Y R, Li M T, Gong Z Z, et al. Assembled kinetic impactor for deflecting asteroids by combining the spacecraft with the launch vehicle upper stage [J]. *Icarus*, 2021, 368(1): 1–15.