

近地小行星监测预警六度分析框架

赵坚¹, 张如生¹, 李明涛^{2,9*}, 于喜双¹, 赵海斌^{3,10}, 宋政吉⁴, 程昊文^{5,9}, 张崑⁶, 刘志敏⁷, 李彬^{3,10}, 叶钊⁸, 冯思亮⁴

1. 国家国防科技工业局重大专项工程中心, 北京 100101;
2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
3. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023;
4. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
5. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;
6. 上海卫星工程研究所, 上海 200240;
7. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
8. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;
9. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;
10. 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

2022-08-21 收稿, 2022-12-06 修回, 2022-12-08 接受, 2022-12-12 网络版发表

国家国防科技工业局空间碎片与小行星专项(KJSP2020020102)、北京市重大科技专项(Z181100002918004)、空间科学任务预先研究(XDA15014900)和中国科学院青年创新促进会资助

摘要 近地小行星撞击是国际社会面临的共同威胁。作为来自外空的非传统类型灾害风险, 其中包含着威胁整个人类文明安全的超级重大风险。通过监测预警发现并识别风险, 是实施小行星防御、防范化解小行星撞击风险的前提条件。当前, 经过多年持续投入和开展专用设备业务运行, 人类已发现编目超过2.9万颗近地小行星, 并且通过专用系统分析了它们的撞击风险。按照小行星群体分布的理论模型, 还有大量可能危及人民生命财产安全、国土安全甚至是地球环境安全的近地小行星藏匿于茫茫太空之中。2013年, 俄罗斯车里雅宾斯克地区的近地小行星撞击事件发生前没有任何预警信息, 表明现有小行星监测预警系统尚存在漏洞。面对人类长期可持续发展的根本需求, 本文在分析近地小行星监测预警现状的基础上, 围绕对近地小行星“全面监测”“精准预警”的总体要求, 面向“普查编目”和“风险预警”运行场景, 提出了基于“六度”(深度、广度、频度、精度、维度和速度)分析框架评估监测预警体系能力的构想, 并对六度要素的内涵进行了理论探讨, 冀望助力人类命运共同体构建, 为我国近地小行星监测预警体系规划、论证、设计、建设和运行提供基础理论支撑。

关键词 近地小行星, 监测预警, 体系设计, 六度分析框架

近地小行星撞击是国际社会共同面临的重大潜在威胁, 10 km直径小行星撞击地球就足以摧毁人类文明。小行星撞击在历史上深刻塑造了地球的气候生态环境, 是地球上物种灭绝与更替的原因之一。6500万年前, 一

颗直径约10 km的小行星撞击了北美墨西哥湾尤卡坦半岛, 形成了直径约180 km的撞击坑^[1]。大量海底物质被抛射到空中, 高温热辐射和溅射落羽点燃了全球70%的森林。燃烧的灰尘进入了平流层, 遮挡了太阳光, 全

引用格式: 赵坚, 张如生, 李明涛, 等. 近地小行星监测预警六度分析框架. 科学通报, 2023, 68: 981-992

Zhao J, Zhang R S, Li M T, et al. Six-degree analysis framework for near-Earth asteroids monitoring and warning (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 981-992, doi: 10.1360/TB-2022-0875

球温度骤降. 植物光合作用受到影响, 植物和以植物为生的动物大量死亡, 最终导致了包括恐龙在内全球超过70%的物种灭绝. 这次撞击事件也标志着白垩纪的结束, 由此地球迎来了新生代. 统治地球长达1.6亿年的恐龙灭绝, 体型更小、消耗性更少的哺乳动物更好地适应了撞击后的环境, 成为地球的统治者. 他们中的佼佼者——人类, 最终成为今天地球的主人, 演化出高度发达的人类文明. 然而, 人类出现在地球上不过10万年, 智人走出非洲也不过百万年. 人类若想在地球上继续生存, 必须重视来自太空中的威胁.

即使中小尺寸的小行星撞击地球也会导致显著危害. 1908年6月30日, 一颗直径约50 m的小天体袭击了俄罗斯通古斯河地区^[2], 等效当量约1000颗广岛原子弹, 摧毁了超过2000 km²的原始森林. 2013年2月15日, 一颗直径约18 m的小行星在俄罗斯车里雅宾斯克地区上空30 km高空解体爆炸^[3], 等效当量约30颗广岛原子弹, 导致了接近1500人受伤、3000栋房屋受损. 如果发生在人口稠密的地区, 后果将不堪设想.

正因为小行星撞击巨大的危害性, 行星防御得到了国际组织、航天机构和天文机构的高度重视. 2013年, 联合国推动成立了国际小行星监测预警网和空间任务规划咨询小组^[4], 致力于协调全球资源, 发展小行星监测预警和处置应对技术, 中国国家航天局是其正式成员. 2013年, 欧洲空间局(简称欧空局)成立了欧空局行星防御办公室. 2016年, 美国成立行星防御协调办公室, 依托美国国家航空航天局(又称美国宇航局), 负责协调美国国家小行星防御事宜. 2018年, 美国发布了《国家近地天体防御战略与行动规划》, 提出在未来5~10年大幅度提升近地天体的监测预警和应对处置能力^[5].

提前发现并预警小行星撞击风险是小行星防御的前提条件. 欧美等国家对近地小行星监测预警高度重视, 从装备建设、体系运行等硬实力和软实力出发, 构建了近地小行星监测预警体系. 在装备建设方面^[6], 建设了包括卡特琳娜巡天系统、泛星计划望远镜、小行星撞击最后告警系统等专用小行星光学巡天系统, 用于近地小行星的普查编目和跟踪精测, 阿雷西博(已失效)和金石等雷达系统用于小行星的跟踪精测和特性测量. 此外, 还有多台大口径的光学、红外、光谱测量兼用设备用于小行星的物理化学特性测量. 在体系运行方面, 美国依托近地天体研究中心开展小行星撞击风险研究, 发展了“侦察兵”新发现小行星即时撞击预

警系统和“哨兵”小行星撞击预警软件系统^[7]. 欧洲依托近地天体协调中心建立了小行星撞击威胁预警系统^[8]. 除此之外, 在国际天文学联合会的支持下, 美国依托哈佛大学史密松天体物理天文台建立国际小天体中心, 汇聚、处理、融合全球小行星监测数据, 形成了较为完善的发现-后随跟踪机制, 充分利用全球的观测资源, 高效率实现近地小行星轨道编目.

开展行星防御是续存人类文明、保卫人民生命财产安全、构建人类命运共同体的必然需求. 对近地小行星开展监测预警是应对近地小行星威胁的前提条件, 但车里雅宾斯克等事件说明目前的近地小行星监测预警系统仍然存在漏洞. 准确评估监测预警系统的效能是设计监测预警系统的基础. 本文综合考虑近地小行星目标特性、监测预警任务场景、监测预警系统的工作模式等因素, 尝试6个角度构建近地小行星监测预警系统的效能评估模型, 期望能够为下一代近地小行星监测系统的规划、论证、设计、建设、运行提供基础理论支撑.

1 近地小行星监测预警现状分析

按照业务运行模式, 近地小行星监测预警可以分为“普查编目”、“威胁预警”等方面的观测、数据处理和研究活动. 普查编目是指以新发现小行星为目标的巡天观测活动, 实现形式是利用大视场巡天望远镜对广域天区进行大范围重复扫描, 利用巡天观测软件对数据进行关联处理, 以发现未知小行星. 威胁预警是指对已经发现的小行星进行跟踪精测、光谱测量、雷达测量等观测活动, 并发展威胁预警软件对多波段观测数据进行融合处理, 以确定小行星的精确轨道和物理化学特性, 预报小行星与地球的交会轨迹, 评估小行星的撞击风险和危害, 预报小行星的撞击落区.

1.1 近地小行星普查编目现状

截至2022年6月20日, 人类已经发现了29131颗近地小行星(<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>). 根据近地小行星群体的理论模型^[9], 可以估算不同尺寸小行星的发现率: (1) 直径140 m级近地小行星, 可能引发区域级灾难, 理论数量约为2.7万, 发现数量10098颗, 发现完成率约为37.4%; (2) 直径50 m级近地小行星, 可能引发大城市级灾难, 理论数量约为15.3万, 发现数量为7872颗, 发现完成率约为5.1%; (3) 直径20 m级近地小行星, 可能引发区域级灾难, 理论数量约为226万, 发

现数量为6645颗,发现完成率约为0.29%。还有大量中小尺寸的近地小行星尚未被发现编目,未编目的中小尺寸近地小行星是撞击风险的重要来源。

在已经编目的近地小行星中,约98.6%由地基光学望远镜发现,1.4%由美国NEOWISE天基红外望远镜发现,因此,地基光学望远镜是当前近地小行星发现的主力装备。表1列出了世界发现数量排名前三的光学望远镜能力。可以看出,表现最出色的卡特琳娜巡天系统口径并非最为突出,但其在望远镜口径、极限探测能力、视场、扫描能力等指标方面表现较为均衡,从而得以在小行星发现方面居于世界首位。而小行星撞击末端告警系统尽管在望远镜口径方面不占优势,但在天区扫描能力方面占据显著优势,也以较低的成本取得了不错的小行星发现成绩。

此外,美国正在建设大型综合巡天望远镜(LSST),该望远镜口径为8.4 m,视场9.62平方度,每晚可扫描6000平方度天区,探测能力为24.5视星等^[10]。预计LSST服役后,将能显著提升中、小尺寸小行星的发现能力,进一步巩固美国在小行星巡天领域的优势地位。

地基光学系统具备建设成本低、服役周期长、可升级换代、利于全球组网布局等优势。但地基光学系统也有其固有劣势,主要表现在:(1)受昼夜、气象、大气等因素影响,单望远镜年度有效观测时间较少;(2)受阳光和大气散射等因素影响,可观测天区有限,其优势方向为夜空方向,如果小行星来自太阳一侧方向,地基望远镜无法及时开展有效观测。

在2013年俄罗斯车里雅宾斯克事件中,肇事小行星来自太阳一侧方向,因而在撞击前没有任何预警信息。实际上过去120年,最知名的4次撞击事件均来自太阳一侧方向:(1)通古斯大爆炸,撞击时间为1908年当地时间7时15分,撞击体尺寸约为50 m;(2)吉林陨石雨事件,撞击时间为1976年当地时间15时02分,撞击体尺寸不详;(3)车里雅宾斯克事件,撞击时间为2013年当地时间9时30分,撞击体尺寸约为18 m;(4)白令海峡事件,撞击时间为2018年当地时间11时48分,撞击体尺寸约为10 m。

天基监测不受大气影响,具备全天时、全天候的优势,通过优化轨道设计,能够对地基盲区实现有效覆盖,是未来的发展趋势。2009年,美国宇航局发射了WISE天基红外望远镜,运行在太阳同步轨道上,2013年更名为NEOWISE,用于近地天体巡天与测量研究^[11],至今发现了346颗近地小行星和34颗彗星。2014

年,美国提出了NEOCam近地小行星天基监测望远镜。2019年,NEOCam更名为NEO Surveyor^[12],进入工程立项研制状态,计划于2028年发射到日地系统L1点,目标是5年完成编目超过三分之二的直径为140 m级近地小行星。

在小行星普查发现方面,存在的主要问题在于:(1)目前地基监测系统只能监测夜空方向,无法对太阳一侧方向小行星进行及时监测,存在观测盲区;(2)目前各监测系统布局不均衡,呈现西半球、北半球设备多,而南半球、东半球设备少的问题,如果小行星从南半球飞来,则遗漏率高;(3)目前各望远镜缺乏有效协调,观测计划是独立的,导致部分天区重复观测而部分天区缺乏观测;(4)目前设备的探测能力、覆盖天区范围、重访能力还欠缺。

小行星巡天发现不仅与望远镜性能有关,也与观测策略设计有关。地基望远镜如何规划布局、天基望远镜如何建设、天地基设备如何协同配合、观测策略如何设计、观测数据如何处理与关联等直接影响近地小行星的巡天发现效能,因此除了加强装备等硬实力建设,还需要研究体系的时空协同运行、数据处理与轨道关联等软实力建设。

1.2 近地小行星威胁预警现状

准确预警近地小行星撞击风险,需要对小行星的轨道、物理化学特性等进行精确测量和研究。其中,精确测定轨道是预警小行星撞击风险的核心要素。小行星物理化学特性的测量有利于评估小行星撞击危害,也有助于确定小行星的精确轨道。

小行星的轨道测量一般采用可见光精测望远镜和雷达精密跟踪。在小行星发现后,会尽快安排可见光精测跟踪望远镜对小行星进行后随观测,以确定小行星的精确轨道。一般需要完成多次回归观测后,才能最终确定高精度轨道,获得永久编号。雷达观测可显著提升近地小行星轨道确定精度^[13],但雷达探测距离较近,探测机会有限。小行星的物理化学特性测量可采用可见光、红外、雷达、多光谱、偏振、掩星等观测手段,获取自转、大小、反射率、光谱类型等信息,少数条件下可以获取小行星的形状和物质成分等信息。

对多波段观测信息进行数据融合处理,能精确确定小行星的轨道,评估小行星与地球的撞击风险,预报小行星撞击区域,评估小行星撞击危害,因此撞击威胁预警软件系统是威胁预警的核心组成部分。美国、欧

表1 近地小行星发现数量排名前三的望远镜观测能力

Table 1 Observation ability of top three telescopes discovering the highest number of near Earth asteroids

巡天系统	望远镜口径(m)	极限探测星等(m_v)	视场(平方度)	单晚扫描天区(平方度)	5年年均发现量
	1.5	21.5	5	1000	
卡特琳娜巡天系统	0.7	19.5	19.4	4000	1185
	1.0	22	0.3	跟踪精测	
泛星计划	1.8(2台)	22	7	1000/台	994
小行星撞击末端告警系统	0.5(4台)	19	30	10000/台	137

洲等国家和组织均在这方面开展了大量投入,发展了“侦察兵”、“哨兵”等小行星预警系统,能够对近地小行星的短、中、长期撞击风险进行计算分析。

在小行星预警方面,还存在以下问题:(1)各设备测量精度不一,并且缺乏标定,不利于精密定轨;(2)光学设备多,而雷达测量设备少;(3)光谱测量能力有限,特性获取能力欠缺;(4)预警算法和模型尚未建立标准规范,主要预警系统的撞击概率等信息存在明显差别。

1.3 我国构建近地小行星监测预警体系必要性

我国在近地小行星防御方面起步较晚,专用监测设备单一,监测手段不完善,尚未形成体系布局,自主数据不健全,预警算法模型亟待提升,尚不具备业务化的轨道编目和威胁预警能力,在近地小行星监测预警方面与欧美存在较大差距^[14]。国家航天局对地观测与数据中心组织开展了近地小行星撞击风险应对仿真推演,对近地小行星监测预警、决策支持、在轨处置、灾害救援等应对全流程进行了仿真推演。在近地小行星发现方面,中国科学院紫金山天文台和国家天文台等机构陆续发现了33颗近地小行星,国际排名第6位;目前仅有中国科学院紫金山天文台盱眙站一台1.2 m口径的专用望远镜,难以为保障我国人民生命财产安全提供足够的信息支持。

秉持“生命安全,人民至上”的原则,我国亟须加强近地小行星防御体系建设。2018年,中国国家航天局加入了国际小行星监测预警网和空间任务规划咨询小组。2019年,“小天体调查、防御和开发”问题入选了中国科学技术协会发布的20个重大科学问题和关键技术难题^[15]。近年来,中国国家航天局推动建立了近地小行星应对协调机制,组织制定中长期发展规划和在轨处置演示验证任务论证,持续开展环境技术攻关和研究创新工作。2021年,中国国家航天局张克俭局长在航天日开幕式致辞时指出:“站在新的历史起点,中国航天将

论证实施探月工程四期、行星探测工程、建设国际月球科研站和近地小行星防御系统,拉开新时代探索九天的新序章”(https://www.guancha.cn/industry-science/2021_04_24_588636.shtml?s=fwrplbbt)。在《2021中国的航天》白皮书中,也明确提出将“论证建设近地小天体防御系统,提升监测、编目、预警和应对处置能力”(http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1719689/1719689.htm)。2022年4月24日,中国国家航天局副局长吴艳华在接受采访时表示,“我国将着手组建近地小行星防御系统,共同应对近地小行星撞击的威胁,为保护地球和人类安全贡献中国力量”(http://www.news.cn/mil/2022-04/24/c_1211640150.htm)。监测预警系统是近地小行星防御系统的核心组成部分。站在新的历史起点,需要思考如何科学规划中国特色的近地小行星监测预警系统,以实现“全面监测可能威胁地球生命安全的近地小行星、精准预警近地小行星撞击风险”,为保障人民生命财产安全提供信息支持,为存续人类文明贡献中国智慧、中国方案和中国力量。

2 近地小行星监测预警复杂性分析

2.1 目标特性复杂性分析

近地小行星广泛分布在太阳系中,总体态势呈现分布广、数量多、维度宽的特点,个体特性呈现亮度暗、易扰动、运动快的特点,从而给小行星监测预警带来巨大困难和挑战。

分布广指近地小行星空间分布广泛:一是空间范围,分布在从金星轨道到火星轨道范围的广袤空间,部分小行星的远日点甚至在木星轨道以远,近日点甚至在水星以内;二是空间方位,虽然主要分布在45°倾角范围内,但即使70°以上高倾角轨道也有分布^[9];三是来袭方向,从地球昼夜、晨昏等各方向都存在来袭风险。近地小行星分布广的特点,对望远镜的天区覆盖、

扫描频率等提出了更高要求。

数量多指近地小行星的数量众多,短时间内难以完全编目。考虑10 m以上目标,根据模型估计数量在1000万以上^[9],目前主要完成了千米以上直径小行星的编目,140 m以上目标仍有超过60%未被发现,50 m以上目标仍有超过96%尚未被发现。

维度宽指近地小行星风险评估和防御所需掌握的特性维度种类多^[16]。除编目要求的精确轨道外,撞击危害评估还需要获取尺寸、材质、密度等信息,才能准确分析撞击能量,给出威胁等级。进一步开展在轨处置还要关注小天体结构、表面特性、自转特性等。

亮度暗指绝大多数近地小行星的可观测能量暗弱^[17]。以50 m目标为例,平均绝对星等约为24等,当前绝大部分地基监测设备均无法在1个天文单位(约1.5亿千米)距离探测。这类小行星往往只有临近地球时,才有被发现的机会。

易扰动指近地小行星轨道易受大行星引力和雅科夫斯基效应等非引力效应的影响,其轨道运动呈现混沌特性^[18],要准确预测其轨道、精准预警其撞击风险,需要对小行星进行长弧段精测跟踪。

速度快指近地小行星相对地球运动速度快。初步统计,近地小行星在深空相对地球运动平均速度超过10 km/s,临近地球时平均速度超过17 km/s^[19],这对发现预警时效提出了严峻挑战。

2.2 任务场景与工作模式复杂性分析

参照美国和欧洲等主要国家和组织已开展的近地小天体监测预警开展情况,结合我国近地小天体监测预警实践,对任务场景及对应的工作模式进行了梳理。

任务场景包括:(1)日常编目。通过地基、天基设备日常执行巡天搜索,以发现新的近地小行星,利用精测望远镜获取跟踪数据,开展定轨编目。(2)威胁预警。针对日常编目中发现的具有潜在撞击风险的近地小行星,通过地基、天基等专用和兼用设备,开展精密跟踪和特性测量,获取精密轨道和理化特性,细化评估撞击风险和危害。(3)短临预报。针对进入地球一定距离范围内(如750万公里),且撞击概率大的近地小行星,通过专用和兼用设备对目标小行星开展加密跟踪,预报撞击区域等信息。

工作模式包括:(1)巡天搜索。对大范围天区进行搜索,以发现未编目的近地小行星,更新已编目的近地小行星轨道信息。(2)跟踪精测。针对已发现目标进行

精密跟踪,改进提升轨道测定精度,提高撞击概率计算的准确性。(3)加密跟踪。对特定目标开展高频度、多维度跟踪测量,获得特定目标的精密轨道和物理化学特性信息。

综合以上任务场景和工作模式,监测预警系统的核心要求:(1)针对未知近地小行星,开展广域巡天搜索,以在较远距离对尺寸较大的小行星进行发现编目,在较近距离对未编目小天体进行发现临近告警,实现对近地小行星的全面监测;(2)针对已发现小行星,开展精密跟踪,预警其撞击地球的风险和危害,必要时启动加密跟踪,实现对近地小行星撞击风险的精准预警。

3 近地小行星监测预警六度分析的理论框架

近地小行星目标特性复杂、任务场景多样,设计近地小行星监测预警体系,必须有科学的方法论作为指导,其中关键技术之一就是如何构建效能评估模型,对近地小行星的监测预警效能进行评估。围绕全面监测、精准预警的任务目标,我们提出了“六度”(深度、广度、频度、精度、维度和速度)分析框架构想,如图1所示,并探讨了基于六度理论框架对小行星监测预警系统进行效能评估,期望能够为近地小行星监测预警体系建设提供支撑。

3.1 六度要素与内涵

3.1.1 深度

深度表征监测系统对深空物体的极限观测灵敏度。以可见光望远镜为例,极限观测灵敏度可用极限视星等 V 描述^[20],极限视星等 V 越高,望远镜越能够在更远的距离发现更暗弱的小行星。红外望远镜和雷达可选择核心观测灵敏度指标参照处理。

假设 V_{limit} 是满足对特定尺寸小行星监测预警所需的望远镜极限灵敏度,如监测设备为了发现140 m直径目标小行星,所需的极限灵敏度 V_{limit} 约为22 m_v ,其中 m_v 为视星等,用于表征小行星在可见光波段的亮度。对于某个可见光望远镜系统,其深度为

$$\text{Depth} = 10^{0.4(V - V_{limit})} \quad (1)$$

表2给出了典型近地小行星观测系统的观测深度。如卡特琳娜巡天系统1.5 m口径巡天望远镜的极限视星等为21.5等(可见光波段),意味着其能够在夜空方向1.5亿千米处发现等效直径约为170 m的近地小行星(假设反射率为0.15)。泛星计划望远镜1.8 m口径巡天望远镜

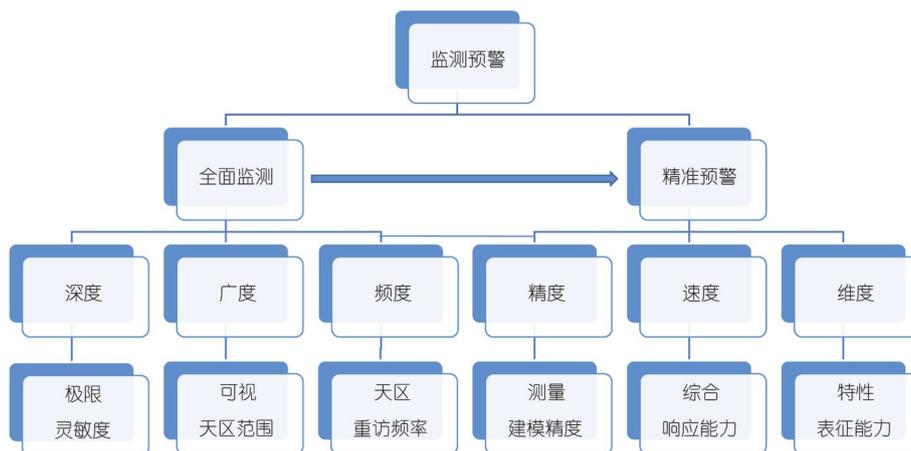


图1 六度分析构架
Figure 1 Six degree analysis framework

表2 典型望远镜系统的观测深度
Table 2 Observation depth of typical telescopes

巡天系统	望远镜口径(m)	极限探测星等(m _v)	探测能力@1.5亿千米(m)
卡特琳娜巡天系统	1.5	21.5	170
	0.7	19.5	440
泛星计划	1.0	22	140
	1.8(2台)	22	140
小行星撞击末端告警系统	0.5(4台)	19	550
大型综合巡天望远镜	8.4	24.5	44
近地天体巡天望远镜	1.2	20	350

的极限视星等为22等(V波段), 意味着其能够在夜空方向1.5亿千米处发现等效直径约为140 m的近地小行星. 大型综合巡天望远镜的极限视星等为24.5等(V波段), 意味着其能够在夜空方向1.5亿千米处发现等效直径约为44 m的近地小行星.

无论是巡天望远镜, 还是后随观测望远镜, 都要求有一定的深度, 并且一般来说, 后随望远镜的深度要优于巡天望远镜的深度, 才能保证有更长时间的跟踪弧段.

3.1.2 广度

广度表征望远镜所能够观测的极限可视天区范围 A , 一般用球面度或平方度描述. 一般来说, 地基望远镜仅能够在夜晚工作, 其观测范围要小于天基望远镜.

全天球为 4π 球面度, 对应 41252.96 平方度. 对于某个望远镜系统, 其广度为

$$\text{Width} = \frac{A}{4\pi}. \quad (2)$$

地基和天基望远镜的极限可观测天区如图2所示. 地基望远镜的观测范围局限在其台站所在天区一定范围内, 即地平线上方一定仰角之上的天区, 任意时刻小于 2π 天区. 随着地球自转, 在一个夜晚, 一个特定台站的可视天区小于 3π 天区. 而天基望远镜在任意时刻的可视天区较大, 考虑必要的太阳抑制角, 其瞬时可视天区超过 3π , 接近 4π . 相比地基观测, 天基观测信噪比受太阳相位角影响更小. 但实际上受到光照、能源、杂散光、观测策略等因素影响, 每个望远镜的值守天区一般不会超过 2π .

需要指出的是, 如图3所示, 极限可视天区、瞬时观测视场和值守天区是3个不同的概念, 不能相互混淆. 但望远镜的瞬时视场一般约10平方度, 要扫描全部可视天区, 需要较长的时间. 如卡特琳娜巡天系统 1.5 m口径巡天望远镜, 极限可视天区每晚接近 3π , 但每晚仅能观测1000平方度, 完成全部可观测天区重访需要约1个月. 因此, 每个望远镜会分配值守天区, 即只观测

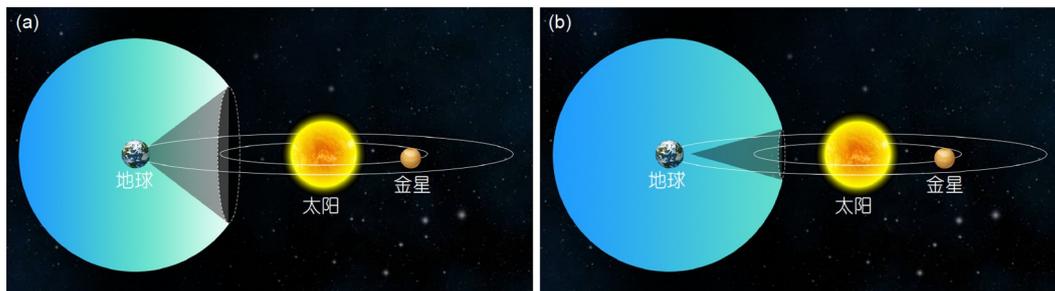


图2 极限可视天区. (a) 地基; (b) 天基
Figure 2 Limited observation field of view. (a) Ground based; (b) space based

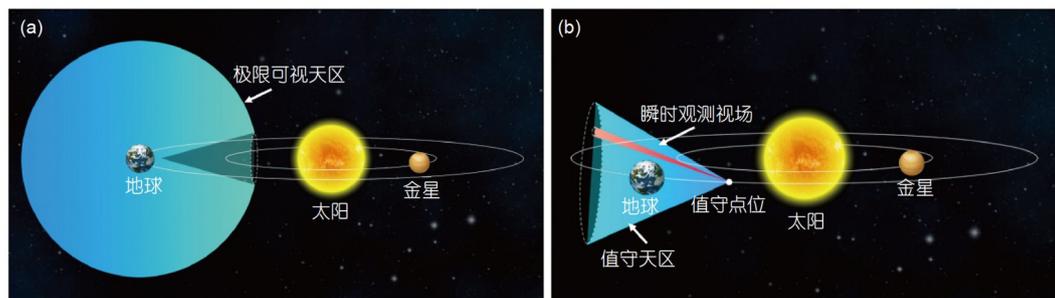


图3 极限可视天区(a)、值守天区与瞬时观测视场(b)
Figure 3 Limited (a), duty and instantaneous (b) observation field of view

极限可视天区的一部分,以缩短重访时间,减少漏警率.

在极限可视天区内,一般来说,仰角越高,大气影响越小,仰角越低,大气影响越大,信噪比下降越快.地基望远镜在日出前和日落后的短暂时间,可以对太阳一侧天区进行扫描,但由于仰角较低,探测信噪比较低,不利于对太阳一侧小行星的巡天发现.因此,大部分望远镜不将晨昏线附近天区作为“值守天区”.

3.1.3 频度

频度表征望远镜对值守天区的覆盖重访能力.一般来说,望远镜的值守天区远大于望远镜的瞬时视场.将值守天区划分成若干网格,类似棋盘的格子或者渔网的网孔,然后利用望远镜对网格进行逐个扫描,是目前主流的巡天方式.

为了满足移动目标检测需求,一般需要间隔几十分钟到1 h,对同一片天区进行重复扫描,如图4所示.在其他条件不变的情况下,重复扫描次数越多,检测移动目标的正确率越高.一般对天区实施2~4次扫描后,可以稳健地检测出移动目标,称为形成一条轨线^[21].如卡特琳娜巡天系统采用了3次观测的扫描策略,而泛星计划望远镜系统采用了4次观测的扫描策略.大型综合巡天望远镜计划采用2次观测的扫描策略.因此,我们这里定义完成一次轨线观测为一次完整的网格扫描,

也就是说,轨线观测包含了2~4次网格扫描.

望远镜对值守天区完成完整扫描的频率定义为系统的频度(frequency),望远镜对值守天区完成的完整轨线扫描所需时间定义为重访周期 P .如卡特琳娜巡天系统视场为5平方度,积分时间约为30~60 s,形成完整轨线需要3次观测,每晚可扫描1000平方度,假若其目标天区为20000平方度,其扫描频度为20 d/次.

扫描频度越高,值守天区重访时间越短,越不容易遗漏目标.而扫描频度越低,值守天区重访时间越长,越容易产生漏警.卡特琳娜巡天系统和泛星计划望远镜的天区重访时间约为20 d,适合于在遥远的距离对直径为140 m级近地小行星进行监测^[22].对于小尺寸小行星,其只有在接近地球时才可见,约20 d/次的观测频度很容易漏警.而地球末端撞击告警系统^[23]可以实现约1 d的天区重访能力,对发现临近地球的小尺寸小行星是非常有效的.因此,从设备的角度,应该考虑深度巡天和频度巡天的协同配合,满足直径为140 m级小行星以及小尺寸小行星的巡天发现需求.

对于远距离发现类望远镜和临近告警类望远镜,其观测频度是不同的.远距离发现类望远镜标称观测频度为 N d/次(如10 d),即可保证尽可能少遗漏目标.而临近告警类望远镜,观测频度为 M d/次(如1 d),才能

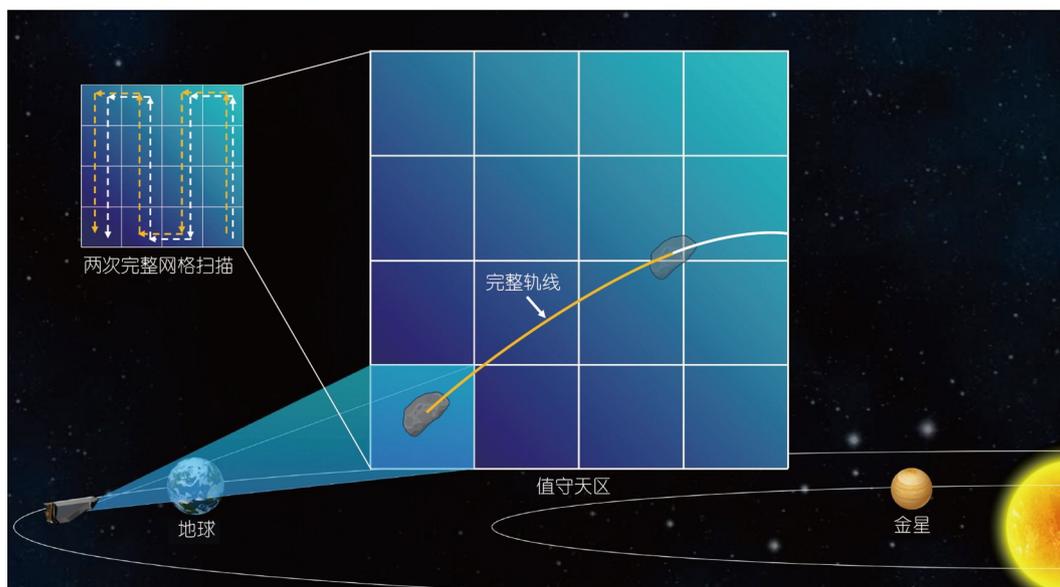


图4 望远镜巡天示意图
Figure 4 Schematic diagram of telescope survey

保证尽可能少遗漏目标. 因此, 望远镜系统的观测频度可以由两个指标来构成:

$$\text{Frequency} = \omega_{\text{depth}} \frac{N}{P_{\text{depth}}} + \omega_{\text{width}} \frac{M}{P_{\text{width}}}. \quad (3)$$

3.1.4 精度

精度是测量精度、撞击风险计算精度、撞击危害评估精度的综合表征. 要精准预警小行星撞击风险, 首先要获取高精度的轨道测量数据, 再结合高精度轨道动力学建模, 确定出小行星的高精度轨道, 进一步高精度预报近地小行星与地球的交会, 计算小行星与地球的撞击概率.

实现近地小行星的高精度轨道测量依赖于精测设备的测量精度、测量弧段长度、高精度轨道确定模型和高精度轨道预报模型. 测量设备的测量精度取决于精测跟踪光学望远镜的天文定位精度. 雷达观测数据的加入可以增加测距和测速信息, 数量级提升测量精度. 天基与地基的长基线协同监测可以显著提高观测数据对轨道的几何约束, 也可以显著提高定轨精度. 此外, 测量弧段越长, 积累的观测数据越多, 定轨精度就越高. 国际小天体中心将小行星的轨道不确定性量化为0~9, 共10个等级(<https://www.minorplanetcenter.net/iau/info/UValue.html>). 轨道不确定性为0表征获得轨道已经得到了较为高精度的测量. 一般经历多次回归观

测或者有雷达数据加入后, 轨道精度会得到很大提高, 轨道不确定性降低, 此时小行星可获得永久编号. 轨道不确定性为9表明小行星的轨道存在较大不确定性, 需要后续观测数据进行轨道改进. 大型光学望远镜的天文测量精度一般优于1角秒, 专用跟踪精测设备的测量精度可以达到几十甚至毫角秒量级, 而欧空局的盖亚卫星可以达到亚毫角秒量级的测量定位精度. 定轨算法需要融合多源轨道数据, 不同定轨系统之间的定轨精度略有差别, 一般定轨残差为亚角秒级.

在获得高精度轨道数据后, 结合小行星的高精度轨道预报模型, 才能准确预报小行星与地球的交会情况. 进一步结合高精度撞击概率评估模型, 才能准确评估小行星与地球的撞击概率^[24]. 目前美国宇航局和欧空局都公开了各自系统计算的小行星撞击概率列表. 以2022 UE3小行星为例, 美国宇航局公布的累计撞击概率为1/4000, 而欧空局公布的累计撞击概率为1/3095, 两者仍然有一定差别.

如果要准确预报小行星撞击区域和评估撞击危害, 还需要发展高精度的小行星大气进入模型^[25], 对小行星的烧蚀、解体、空爆等过程进行高精度建模; 发展小行星高精度灾害评估模型, 对小行星撞击引发的冲击波、热辐射、光辐射、地震、海啸、溅射物、粉尘等效应进行建模. 目前尚未有公开对外服务的撞击威胁评估系统.

精度(precision)可以用测量精度(observation)、撞击风险评估精度(probability)、撞击危害评估精度(hazard)的加权表示:

$$\text{Precision} = \omega_{\text{obs}} \frac{P_{\text{obs_std}}}{P_{\text{obs}}} + \omega_{\text{prob}} \frac{P_{\text{prob_std}}}{P_{\text{prob}}} + \omega_{\text{hazard}} \frac{P_{\text{hazard_std}}}{P_{\text{hazard}}}, \quad (4)$$

式中,下标std表示满足精准预警要求的精度指标,权重系数需要对精度链开展深入研究后才能形成较为科学的结论,本文不做深入探讨。

3.1.5 速度

速度是表征监测预警系统全过程运行响应能力的综合性指标,主要取决于任务规划、计划执行、传输处理、定轨预报、风险评估等关键环节的效率。综合考虑规划(plan)、执行(execution)和处理(procession)三个核心指标,可以定义速度指标为

$$\text{Velocity} = \omega_{\text{plan}} \frac{P_{\text{plan_std}}}{P_{\text{plan}}} + \omega_{\text{execu}} \frac{P_{\text{execu_std}}}{P_{\text{execu}}} + \omega_{\text{proc}} \frac{P_{\text{proc_std}}}{P_{\text{proc}}}. \quad (5)$$

小行星撞击预警涉及复杂的数据获取、融合、处理、运算过程,提高系统的响应速度:(1)要设计合理的系统架构,理顺业务运行流程;(2)要加强对算法、模型和软件等软实力的研究和投入,重视从机理上突破轨道确定、轨道预报、撞击概率计算、落区预报、危害评估等关键技术,探索人工智能、大数据、并行计算等新技术的应用,提高系统的综合响应能力;(3)开展数值、半物理和实装演习演练,验证并优化系统的响应能力。

3.1.6 维度

维度是对小行星物理化学特性测量与反演能力的综合表征。影响小行星轨道演化规律的一个关键因素是对非保守力的建模,如太阳光压和雅克夫斯基效应^[26],其与小行星的材质、结构、自转等密切相关。小行星的撞击危害与小行星的尺寸、形状、材质、结构、孔隙率、自转等因素密切相关,因此测量并反演小行星的物理和化学特性至关重要^[27]。然而,这些特性信息往往并不能直接通过光学测量获得,需要进一步拓展小行星的观测维度,丰富小行星的特性信息,从而提高小行星撞击风险和危害的预报精度提供条件,也为处置小行星提供输入。

拓展小行星探测信息维度,需要开展光变测量、

红外测量、光谱测量、雷达测量和掩星测量。一般来说,光变测量可以获得小行星的自转和大致形状信息;红外测量可以获得小行星的大小信息;光谱测量可以获得小行星的光谱类型,进一步反演小行星的物质成分等信息;雷达测量可以获得小行星的形状、形貌、表面粗糙度、自转、表层物质成分、孔隙率等信息;掩星测量可以获得小行星的形状等。

在高精度轨道测量与确定的基础上,拓展探测维度,能够有效提升对撞击风险的预警精度、对撞击落区和危害的评估精度,为制定合理的处置决策与救援措施提供参考依据。目前美国宇航局已经建设有覆盖可见光、红外、雷达等多波段的维度测量设备,如金石行星雷达、NEOWISE天基红外望远镜等。

如图5所示,初步梳理出了包括轨道在内16种维度的特性信息。一个系统的维度可以用具备测量的特性种类 D 与维度总数量 D_N 的商表达,因此可以定义监测系统维度为

$$\text{Dimension} = \frac{\sum D_i}{D_N}. \quad (6)$$

3.2 六度要素间耦合关系

六度之间不是割裂的,深度、广度、频度这3个要素相互耦合、相互制约,与精度、速度、维度共同服务于提高近地小行星监测预警的能力和水平。

对于日常编目工作场景,以实现全面监测为主要目标,主要考核指标是减少漏警率。监测系统深度、广度越高,则一般频度越小,对值守天区的重访覆盖能力就会下降,漏警率就会上升;监测系统的广度、频度越好,则一般深度越小,对小尺度近地小行星的探测能力降低;监测系统的深度、频度越好,则一般广度越低,对可测天区的覆盖率降低,近地小行星监测预警的实时盲区会增加。因此,对日常编目场景的设备规划论证,需要结合小行星的尺度分布、轨道分布和视运动特性,合理优化深度、广度和频度的关系,利用不同口径、不同视场、不同布局的望远镜组合,实现既能对大尺寸小行星远距离监测,也能对中小尺寸小行星临近发现告警,尽可能减少遗漏率。

对于威胁预警工作场景,以实现“精准预警”为主要目标,主要考核指标是提升预警精度。精度是预警能力的核心,是精准预警的前提条件。高效的监测预警体系响应速度可为近地小行星高精度、多维度目标特性的获取提供重要的保障。维度是提升预警精度、危害

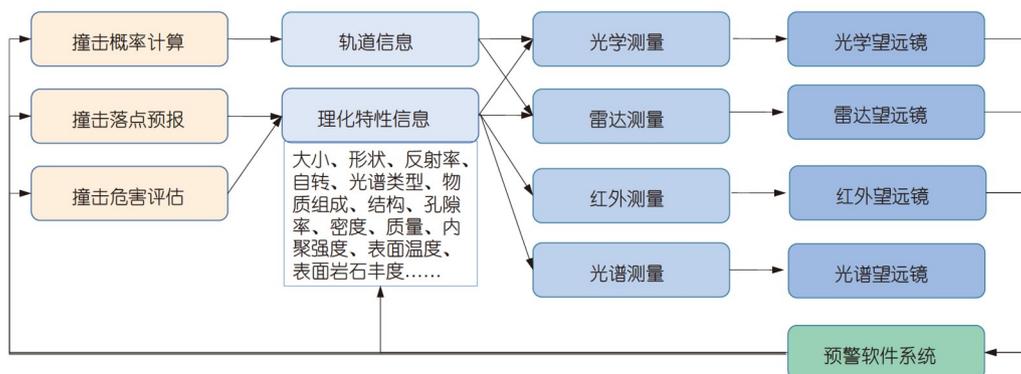


图5 小行星特性维度
Figure 5 Dimension of asteroid characteristics

评估精度的基础，近地小行星的多维度信息不仅是撞击效应评估和处置策略制定的输入，同时还可以为提升近地小行星的轨道和撞击概率的计算精度提供帮助。同时足够的深度信息，可以保证较长的观测弧段，也是提升预警精度的基础。因此，对威胁预警场景的设备规划论证，需要考虑精测跟踪设备、光谱测量设备和雷达测量设备的联动配合。

对于短临预报工作场景，则希望能够实现对目标小行星的全程精确跟踪监视，以尽可能提高定轨精度、轨道预报精度、撞击概率计算精度和落点预报精度，需要考虑系统的广度和精度。此外，考虑到小行星特性对撞击危害评估的重要性，也需要提高系统对目标小行星物理化学特性测量的维度。但对深度，一般要求不高，因为此时小行星已经接近地球，大部分设备都可以跟踪到小行星。为了追求全程跟踪监视能力，需要调动一些兼用设备。因此，对于短临预报工作场景的设备规划论证，需要考虑纳入兼用设备。

近地小行星普查编目需要精度、速度和维度的共同支撑，足够的精度才能实现对小行星的定轨编目，快速系统响应速度才能提升普查编目效率，拓展维度才能提高轨道关联的效率。与此同时，要实现小行星精准预警，也需要深度、广度和频度的支撑，缺乏观测深度无法保证长时间跟踪弧段，缺乏广度则会存在跟踪盲区，而加密跟踪则对频度提出了高要求。而短临预警工作场景，除了专用设备外，还需要统筹考虑兼用设备，以拓展广度和维度。

3.3 近地小行星监测预警六度分析框架应用展望

本文提出了用于指导近地小行星监测预警体系建设的六度分析框架，期望未来能够基于六度分析框架

形成类似图6所示的评价效果，实现对监测预警体系综合能力科学、全面、有效、直观的评价。

需要指出的是，对六度的指标链条和精度链条、六度之间的赋权规则、六度内部的赋权规则、六度的标称指标等，还需进一步深入研究和分解。我们期望建立六度分析框架的完整数学模型，发展六度分析框架的分析评估软件系统，最终形成能够对监测预警体系有效指导的理论和分析工具。

4 结论

六度分析框架是在分析近地小行星监测预警现状

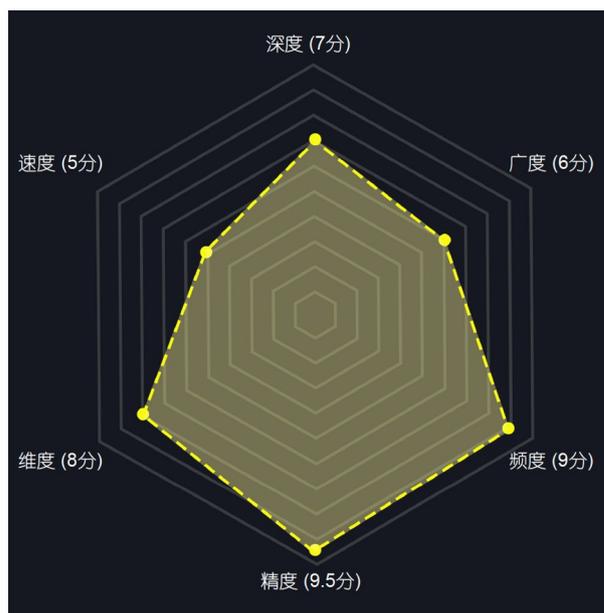


图6 六度分析理论效能评估示意
Figure 6 Schematic diagram of performance evaluation using 6 degree framework

的基础上, 针对近地小行星目标特性复杂性、任务场景复杂性与工作模式复杂性, 围绕全面监测、精准预警等任务目标, 提出的指导监测预警体系规划、论证、设计、建设与运行的理论框架。围绕近地小行星监测预警中的关键问题, 面向普查编目和风险预警运行场景, 对深度、广度、频度、精度、维度、速度(六

度)分析框架的内涵进行了探讨, 对六度之间的耦合关系与协同关系进行了初步分析。未来还需要对六度分析框架的指标及精度链条分解、评估赋权规则、数学模型构建、分析评估软件开发等方面开展持续深入的工作, 以期形成能够对监测预警体系设计有效指导与评估的理论工具。

参考文献

- 1 Bottke W F, Vokrouhlický D, Nesvorný D. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, 2007, 449: 48–53
- 2 Chyba C F, Thomas P J, Zahnle K J. The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, 1993, 361: 40–44
- 3 Brown P G, Assink J D, Astiz L, et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 2013, 503: 238–241
- 4 Kofler R, Drolshagen G, Drube L, et al. International coordination on planetary defence: The work of the IAWN and the SMPAG. *Acta Astronaut*, 2019, 156: 409–415
- 5 Interagency Working Group for Detecting and Mitigating the Impact of Earth-bound Near-earth Objects. National Near-Earth Object Preparedness Strategy and Action Plan. Technical Report, 2018
- 6 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 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 346–372 [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. *科学通报*, 2020, 65: 346–372]
- 7 Ebr J, Karpov S, Eliášek J, et al. A new method for aerosol measurement using wide-field photometry. *Astron J*, 2021, 162: 6
- 8 Milani A, Chesley S R, Sansaturio M E, et al. Nonlinear impact monitoring: Line of variation searches for impactors. *Icarus*, 2005, 173: 362–384
- 9 Granvik M, Morbidelli A, Jedicke R, et al. Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus*, 2018, 312: 181–207
- 10 Ivezić V, Ivezić Ž. Predicting the accuracy of asteroid size estimation with data from the Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time. *Icarus*, 2021, 357: 114262
- 11 Myhrvold N. An empirical examination of WISE/NEOWISE asteroid analysis and results. *Icarus*, 2018, 314: 64–97
- 12 Michel V, Spencer A, Mike D, et al. Ball aerospace spacecraft and systems for the near-Earth object surveyor mission. In: IEEE Aerospace Conference, 2021. 1–14
- 13 Zhang X, Ji J H. Ground-based radar detection of near-Earth asteroids (in Chinese). *Progr Astron*, 2024, 32: 24–39 [张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状. *天文学进展*, 2024, 32: 24–39]
- 14 Wu W R, Gong Z Z, Tang Y H, et al. Response to risk of near-Earth asteroid impact (in Chinese). *Strat Study CAE*, 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]
- 15 Liu H G, Zhao H B, Zhou J L. Survey, defence and resource development of NEO (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 757–763 [刘慧根, 赵海斌, 周济林. 近地小天体调查、防御与开发. *科学通报*, 2020, 65: 757–763]
- 16 Mathias D L. Asteroid Impact Risk Assessment. In: Joint ESC/VSC/GMEG Seminar-Asteroid Impact Risk Assessment, 2018
- 17 Zhai C, Shao M, Saini N S, et al. Accurate ground-based near-Earth-asteroid astrometry using synthetic tracking. *Astron J*, 2018, 156: 65
- 18 Malhotra R. The case for a deep search for Earth's Trojan asteroids. *Nat Astron*, 2019, 3: 193–194
- 19 Zhu J, Yang Z T, Gan Q B, et al. Short-term hazardous asteroid (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2021, 62: 128–135 [朱进, 杨志涛, 甘庆波, 等. 短期威胁小行星. *天文学报*, 2021, 62: 128–135]
- 20 Muinonen K, Belskaya I N, Cellino A, et al. A three-parameter magnitude phase function for asteroids. *Icarus*, 2010, 209: 542–555
- 21 Wang X, Zheng J, Li M, et al. Warning of asteroids approaching Earth from the sunward direction using two Earth-leading heliocentric orbiting telescopes. *Icarus*, 2022, 377: 114906
- 22 Landis R, Johnson L. Advances in planetary defense in the United States. *Acta Astronaut*, 2019, 156: 394–408
- 23 Tonry J L, Denneau L, Heinze A N, et al. ATLAS: A high-cadence all-sky survey system. *Publ Astron Soc Pac*, 2018, 130: 064505
- 24 Romano M, Losacco M, Colombo C, et al. Impact probability computation of near-Earth objects using Monte Carlo line sampling and subset simulation. *Celest Mech Dyn Astr*, 2020, 132: 1–3
- 25 Geng S, Zhou B, Li M. On the capture of small stony asteroids into the Earth's orbit by atmospheric grazing. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2021, 507: 4661–4668
- 26 Fenucci M, Novaković B. The role of the Yarkovsky effect in the long-term dynamics of asteroid (469219) Kamo'oalewa. *Astron J*, 2021, 162: 227–232
- 27 Trigo-Rodríguez J M. Asteroid Impact Risk: Impact Hazard from Asteroids and Comets. Berlin: Springer, 2022

Summary for “近地小行星监测预警六度分析框架”

Six-degree analysis framework for near-Earth asteroids monitoring and warning

Jian Zhao¹, Rusheng Zhang¹, Mingtao Li^{2,9*}, Xishuang Yu¹, Haibin Zhao^{3,10}, Zhengji Song⁴, Haowen Cheng^{5,9}, Wei Zhang⁶, Zhimin Liu⁷, Bin Li^{3,10}, Zhao Ye⁸ & Siliang Feng⁴

¹ Key Projects Engineering Center of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing 100101, China;

² National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;

⁴ Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

⁵ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁶ Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;

⁷ Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

⁸ Aerospace Dongfanghong Satellite Co., Ltd, Beijing 100094, China;

⁹ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

¹⁰ School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding author, E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

Near-Earth asteroid (NEA) impact is a serious threat faced by the international community. As a non-traditional disaster from outer space, it may bring an unprecedented risk that could threaten the security of the entire human civilization. Detecting and identifying risks through monitoring and warning is a prerequisite for implementing planetary defense activities to mitigate asteroid impact risks. After years of continuous investment and operation of NEA monitoring and warning systems, including ground-based telescopes and space-based telescopes, over 30000 NEAs have been discovered and cataloged to date, and the risks of potential NEA impacts are analyzed via dedicated systems. However, according to the theoretic model of NEA population, numerous NEAs are yet to be discovered, which may threaten the safety of people's lives and property, homeland security, and even the Earth's environment, and may lead to the global extinction of species, including humans. There was no warning information regarding the asteroid impact event in the Chelyabinsk region of Russia in 2013 before its occurrence, highlighting the blind areas in the existing NEA monitoring and warning systems. To ensure the long-term sustainable development of humankind, this paper focuses on the overall need for “comprehensive monitoring” and “accurate early warning” of NEAs, analyzes the current status of NEA monitoring and warning, and proposes a “six-degree” analysis framework to evaluate the capability of NEA monitoring and warning systems. The implications of “six-degree”, namely “depth”, “width”, “frequency”, “precision”, “dimension”, and “speed”, are discussed theoretically. This study provides basic theoretical support for promoting the planning, demonstration, design, construction, and operation of NEA monitoring and warning systems, thereby helping build a community of shared future for humankind.

near-Earth asteroids, monitoring and warning, system design, six degree analysis framework

doi: [10.1360/TB-2022-0875](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0875)