

短期威胁小行星*

朱 进¹ 杨志涛^{2,3†} 甘庆波^{2,3‡} 赵海斌⁴ 霍卓玺⁵
姜晓军^{2,6}

(1 北京天文馆 北京 100044)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(3 国家航天局空间碎片监测与应用中心 北京 100101)

(4 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)

(5 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室 北京 100094)

(6 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要 为更明确近地小行星撞击地球威胁的监测预警需求,提出了“短期威胁小行星”的概念,即未来100 yr内可能对地球造成撞击威胁且等效直径大于10 m的近地小行星.以目前已发现的756颗短期威胁小行星为基础,分析短期威胁小行星的轨道分布特点,研究显示其与一般近地小行星的轨道分布存在差异,短期威胁小行星的轨道半长轴更集中于1 au,轨道面更集中于黄道面.基于近地小行星的数量模型,初步建立了短期威胁小行星的数量估计模型,并预估了未来100 yr内存在撞击可能的短期威胁小行星的总体数量.短期威胁小行星的特定研究对制定近地小行星搜巡监测策略有重要意义.

关键词 近地小行星, 短期威胁: 小行星, 撞击: 概率, 等效: 直径

中图分类号: P185; 文献标识码: A

1 引言

由于小行星撞击地球事件频发,并可能诱发巨大灾难,科技共同体和国际社会将其作为影响人类社会和文明可持续发展的一个重大科学问题来积极应对^[1].国际组织“国际小行星预警网”(IAWN)¹和“空间任务规划建议组”(SMPAG)²的成立则充分反映出国际社会的高度关注和重视.与此同时,我国对近地小行星撞击威胁的重视程度亦在快速提升.近地小行星(NEA)³是轨道近日点在1.3 au以内的太阳系小行星,其中与地球最近距离在0.05 au以内且绝对星等亮于22 mag (对应直径约140 m)的近地小行星

2021-02-22收到原稿, 2021-03-11收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12073045)、中国科学院青年创新促进会(2018183)资助

†ztyang@nao.cas.cn

‡ganqingbo@nao.cas.cn

¹<http://iawn.net/about.shtml>

²<https://www.cosmos.esa.int/web/smpag>

³https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html

又称为潜在威胁小行星(PHA). 截至2021年1月10日, 据小天体中心(MPC)公布数据⁴显示, 已发现近地小行星24446颗, 其中潜在威胁小行星有2176颗. 根据美国国家航空航天局(NASA)公布的报告²估计, 直径在100 m以上的近地小行星目前已发现数量只占理论预测数目1/3左右, 100 m级小行星若撞击地球便足以造成巨大危害³⁻⁴. 实际而言, 并非所有的NEA或PHA均有撞击地球的可能性, 而就危害而言10 m级的小行星撞击地球也可导致一定的损害, 2013年车里雅宾斯克撞击事件就是由一颗19 m左右的小行星引起的⁵. 直径更小的小行星撞击地球造成的物理危害有限, 多是在大气层空爆解体³. 为明确近地小行星撞击监测预警需重点考虑的范围, 我们提出“短期威胁小行星”(Short-term Hazardous Asteroid, SHA)的概念, 并将其定义为: 在未来100 yr内与地球存在撞击风险且等效直径大于10 m的近地小行星, 此处“存在撞击风险”是指撞击概率大于零.

2 短期威胁小行星

短期威胁小行星概念的提出主要考虑以下3个因素: (1)预报期为100 yr. 这是因为对近地小行星的监测和轨道计算均会存在误差且预报期越长误差越大, 同时人类监测预警及防御应对的技术也会日益提高, 因此预报期很长的撞击风险无需重点关注; (2)存在一定的撞击风险. 是指近地小行星撞击地球的风险不能排除, 仍然有一定概率发生撞击. 这将只是近地小行星的一个较小子集; (3)等效直径大于10 m. 表示近地小行星撞击地球后不会在大气层中完全烧蚀, 其空爆当量可能造成相当程度的潜在危害. 这有别于PHA只考虑140 m以上可造成巨大危害的NEA. 短期威胁小行星组成的集合是动态变化的, 一是随着探测到的近地小行星数量越来越多, 同时发现有撞击风险的目标亦会越来越多; 二是随着观测数据的积累, 编目轨道和撞击概率的计算精度会逐渐提高, 因此原有的威胁目标有可能解除风险, 不再成为短期威胁小行星.

3 短期威胁小行星特点分析

近地小行星按照轨道大小分为如下4种类型⁶: (1)阿莫尔型(Amor): 近日距在1.017–1.3 au之间且轨道半长轴大于1 au; (2)阿波罗型(Apollo): 近日距小于1.017 au且半长轴大于1 au; (3)阿登型(Aten): 半长轴小于1 au且远日距大于0.983 au; (4)阿提拉型(Atira): 远日距小于0.983 au. 其中阿波罗型和阿登型近地小行星的轨道会穿过地球轨道, 而阿莫尔型和阿提拉型近地小行星的轨道分别在地球轨道之外和之内. 因此, 从轨道分布来看, 由于短期威胁小行星与地球存在撞击可能, 其轨道类型基本只能是阿登型或阿波罗型. 阿莫尔型或阿提拉型中仅轨道根数处于分类边界附近的少数近地小行星, 在摄动力作用下轨道可能逐渐变化至与地球轨道相交, 进而成为短期威胁小行星. 4类近地小行星和短期威胁小行星的半长轴 a 与偏心率 e 的可行域如图1中所示, 其中散点区域表示短期威胁小行星的可行域.

基于近地天体研究中心(CNEOS)公布的数据⁵进行分析, 截至2020年1月10日已有短期威胁小行星756颗, 其中等效直径最小10 m, 最大916 m (编号2014 MR26, 撞击概

⁴<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>

⁵<https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>

率 2.5×10^{-8}), 对应的绝对星等分别约为28 mag和18 mag.

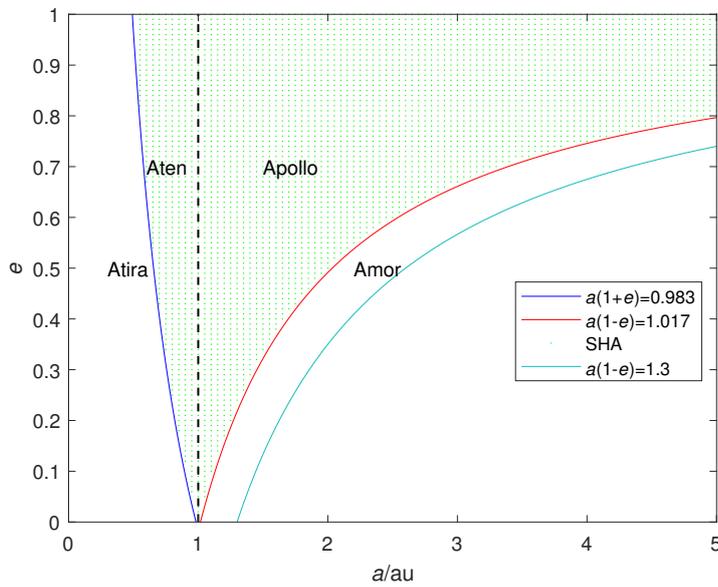


图1 短期威胁小行星轨道分布可行域示意图

Fig. 1 The a - e distribution of SHAs

3.1 轨道分布

短期威胁小行星和已编目近地小行星的轨道分布情况如图2所示, 其中左图是轨道半长轴的分布情况, 右图是轨道倾角 i 的分布情况.

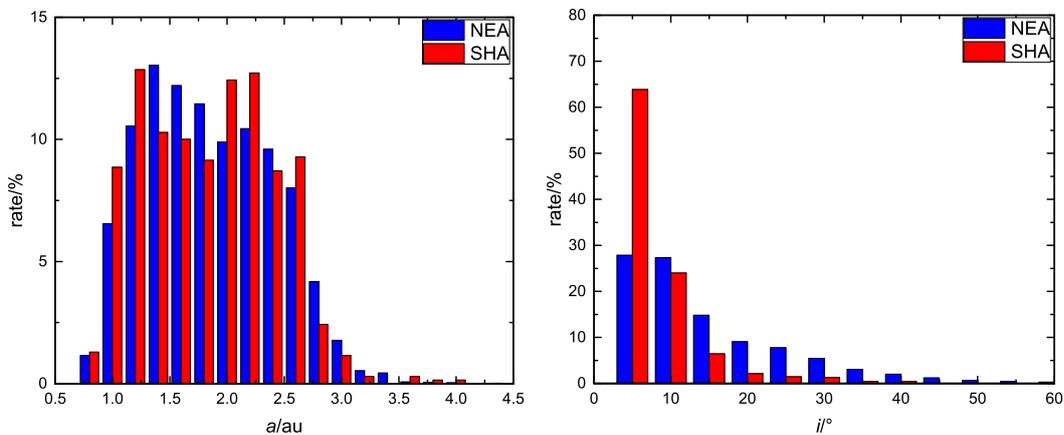


图2 SHA和NEA的轨道分布对比(左图: 轨道半长轴对比情况; 右图: 轨道倾角对比情况)

Fig. 2 Comparison of orbital distribution of SHAs and NEAs (left panel: orbital semi-major axis; right panel: orbital inclination)

由图2可见两者的轨道分布并不一致, 其中轨道倾角的差异最为明显, 短期威胁小行星中小倾角的比例很高, 倾角在 5° 以内的比例超过60%, 倾角在 10° 以内的占比超过85%,

而在一般近地小行星中占比分别不足30%和60%. 因此, 对短期威胁小行星的搜索探测应更多集中在黄道面附近.

3.2 撞击速率与撞击概率

分析已发现的756颗SHA, 其平均撞击速率达17.1 km/s, 标准差4.8 km/s, 中位数为15.8 km/s. 图3展示了SHA撞击速率(左图)和撞击概率(右图, 其中Cum代表累积)的分布情况. 如图3左图所示, 撞击速率 V 在13–15 km/s区间的SHA最多, 占比约25.8%, 撞击速率在19 km/s以内的占比约75%.

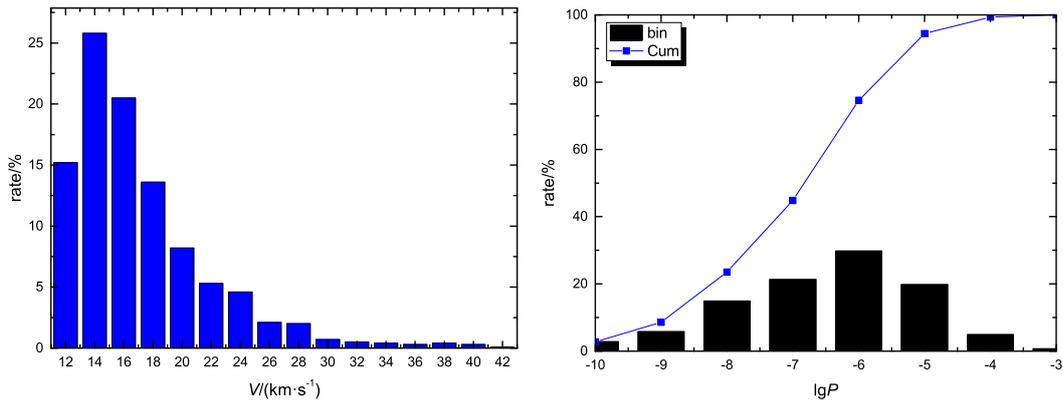


图 3 SHA撞击速率(左图)和撞击概率(右图)分布情况

Fig. 3 Distribution of impact velocity (left panel) and probability (right panel) of SHAs

此外, 分析这些SHA的撞击概率 P , 不同量级的分布情况如图3右图所示, 撞击概率在 10^{-6} 量级的SHA最多, 占比约30%, 且撞击概率不高于 10^{-6} 的累积数量占比约75%. 其中, 撞击概率最高在 10^{-3} 量级, 共有5个, 基本信息如表1所列.

表 1 撞击概率最高的5个SHA的基本信息

Table 1 Basic information of the 5 SHAs with the highest impact probability

Object-designation	Estimated-diameter/m	Impact-probability	Impact-velocity/(km·s ⁻¹)
2012 HG2	14	2.80×10^{-3}	11.67
2000 SG344	37	2.60×10^{-3}	11.26
2020 VV	12	2.30×10^{-3}	11.47
2017 LD	11	2.20×10^{-3}	12.05
2019 LW4	12	1.00×10^{-3}	14.12

3.3 尺寸分布及数量预测

图4所示为不同区间累积SHA数量及其所占相同区间NEA数量的比例(记其为R1), 以绝对星等 $H = 20$ mag的柱形为例, 其上方标注的数值11表示绝对星等 $H < 20$ mag的SHA数量 $N_{\text{SHA}} = 11$, 对应纵轴的数值则表示 N_{SHA} 占相同区间已编目NEA数量 N_{NEA} 的比例, 约为0.25%.

从图4可看出, SHA的尺寸越小所占已编目NEA的比例越高, 这主要是受监测能力影响造成的选择效应, 因为小尺寸的NEA需要离地球足够近时才可被探测到并编目. 同时, 尺寸越大的NEA对应的选择效应越弱. 此外, Stokes等^[7]预测了不同尺寸近地天体的总数量(Total), 将Stokes的估计量与已编目NEA数量进行对比, 并计算已编目数量占模型预测总数量的比例(记为R2), 结果如图5所示.

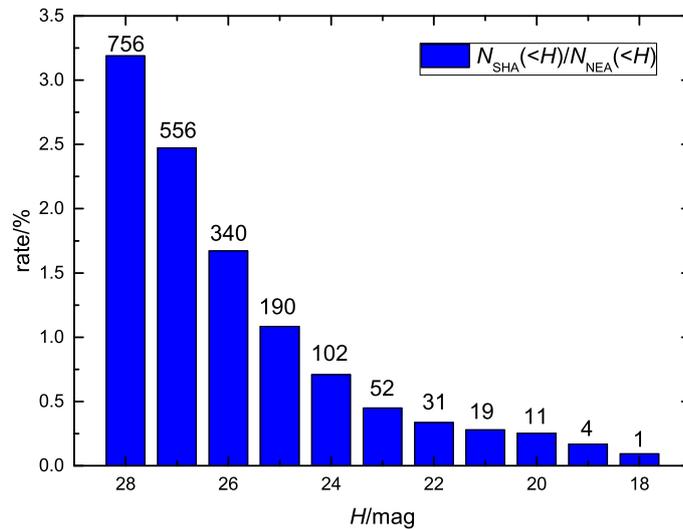


图 4 SHA相对于已编目NEA的数量占比分布

Fig. 4 Distribution of SHAs relative to the cataloged NEAs

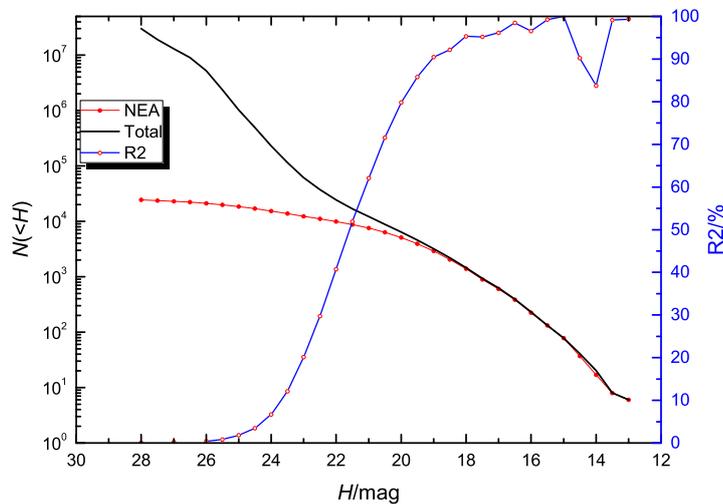


图 5 NEA预测数量、已编目数量及完成比例

Fig. 5 Predicted and catalogued numbers of NEAs, and the completion ratio

由图可见, 假定已基本无需考虑其选择效应, 对于 H 在20 mag以下(对应直径约350 m)的NEA, 已编目比例均超过80%. 此外, 据NEA数量分布模型的研究, 近地

小行星轨道与尺寸的分布相互独立, 而一颗NEA是否成为SHA主要取决于轨道参数. 因此, 作为初步估计, 选取 $H < 20$ mag对应的比例0.25%作为一般NEA中SHA所占的比例, 由此预测不同尺寸SHA的累积数量分布, 作为预测数量的下限, 记为TotalLow. 同时, 对于更小尺寸的SHA, 若不考虑选择效应, 即认为目前已发现的各区间数目的比例可代表SHA在总体NEA中的比例, 并由相应比例预测数量上限, 记为TotalUp. 如图6所示为SHA已发现数量和预测数量的对比情况. 其中预测数量的误差比例为0.5–2, 与Stokes等^[7]预测的NEA数量误差基本保持一致. 其中典型尺寸SHA累积已发现数量 N_{SHA} 、预测数量 N_{Total} 和已发现比例如表2所列. 预计直径 D 在10 m以上SHA的数量可达到近十万至百万之多, 直径50 m以上SHA的数量在575–1628之间. 此处预测模型的误差因子在2倍左右.

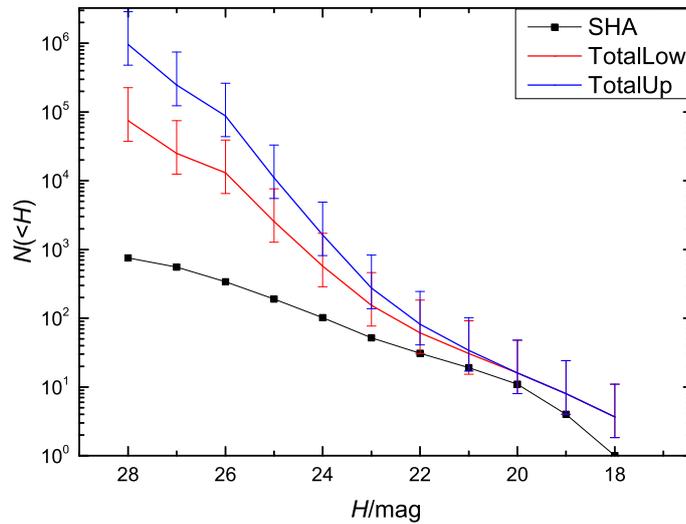


图 6 SHA 预测数量和已发现数量

Fig. 6 Predicted and discovered quantities of SHAs

表 2 典型尺寸SHA的已发现数量和预测数量

Table 2 Discovered and predicted quantities of typical size SHAs

H/mag	D/m	$N_{\text{SHA}} (< H)$	$N_{\text{TotalLow}} (< H)$	$N_{\text{TotalUp}} (< H)$
18	1000	1	4	4
20	355	11	16	16
22	140	31	61	82
24	50	102	575	1628
26	20	340	13050	87184
28	10	756	75000	956801

4 总结与建议

鉴于实际存在的近地小行星数量巨大,且并非所有近地小行星均会对地球构成撞击威胁,与此同时,潜在威胁小行星只包含直径140 m以上的近地小行星,并且同样不是所有目标均会对地球构成撞击威胁,因此本文提出“短期威胁小行星”的概念,明确界定出监测预警近地小行星撞击威胁所要考虑的集合边界,并基于现有短期威胁小行星数据和近地小行星数量模型建立了短期威胁小行星的数量估计模型. 研究显示,短期威胁小行星数量可达到十万到百万之巨,且轨道半长轴更集中于1 au、轨道面更集中于黄道面. 短期威胁小行星轨道分布的研究对制定近地小行星搜巡监测策略有重要意义.

本文工作仅是相关研究的初步探索,为有效支撑我国在近地小行星监测预警领域研究工作的深入开展,建议在以下几方面开展深入研究:

(1)对短期威胁小行星的轨道分布及尺寸分布建模,提升对危险目标整体分布情况的认知,对天地基监测网的规划以及近地小行星搜巡策略的制定提供参考;

(2)进行短期威胁小行星的精密轨道确定及撞击风险评估算法的研究,提升对撞击威胁目标的准确判识和威胁预警能力;

(3)进行短期威胁小行星物理特性的探测及计算方法研究,提升对近地小行星撞击危害的评估准确性,这同时也是制定撞击危害减缓策略的关键要素.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议,使文章质量有了显著提高. 感谢MPC及CNEOS公布的近地小行星数据,为本文分析工作提供了数据基础.

参考文献

- [1] 龚自正,李明,陈川,等. 科学通报, 2020, 65: 346
- [2] Wackler T, Kontos C, Wilmer J, et al. National Near-Earth Object Preparedness Strategy and Action Plan: A Report of National Science & Technology Council. 2018: 3
- [3] Bobrowsky P T, Rickman H. Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 150-153
- [4] John L R, Hans J H. BuAtS, 2014, 70: 85
- [5] Brown P G, Assink J D, Blaauw R, et al. Nature, 2013, 503: 238
- [6] 刘慧根,赵海斌,周济林. 科学通报, 2020, 65: 757
- [7] Stokes G H, Barbee B W, Bottke JR W F, et al. Report of the Near-Earth Object Science Definition Team: Update to Determine the Feasibility of Enhancing the Search and Characterization of NEOs. NASA, 2017: 26

Short-term Hazardous Asteroid

ZHU Jin¹ YANG Zhi-tao^{2,3} GAN Qing-bo^{2,3} ZHAO Hai-bin⁴
HUO Zhuo-xi⁵ JIANG Xiao-jun^{2,6}

(1 Beijing Planetarium, Beijing 100044)

(2 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(3 Space Debris Observation and Data Application Center, China National Space Administration, Beijing 100101)

(4 Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(5 Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(6 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT In order to clarify the early warning and response requirements of near-Earth asteroids impact, the concept of “short-term hazardous asteroids” is proposed, that is, near-Earth asteroids with an equivalent diameter greater than 10 meters that may pose a threat to the Earth in the next 100 years. Based on the 756 short-term hazardous asteroids that have been discovered so far, the orbital distribution characteristics of short-term hazardous asteroids are analyzed, and the study shows that their orbital distribution differs from that of general near-Earth asteroids: the semi-major axis of the short-term hazardous asteroids is more concentrated in 1 au, and the orbital plane is more concentrated in the ecliptic plane. On the basis of the quantity model of near-Earth asteroids, a preliminary estimation model for the quantity of short-term hazardous asteroids is established, and the population of short-term hazardous asteroids with potential threat in the next 100 years is predicted. Some specific research on short-term hazardous asteroids is of great significance to the development of near-Earth asteroid search and monitoring strategies.

Key words near-Earth asteroid, short-term hazardous: asteroid, impact: probability, equivalent: diameter