

近地小行星撞击风险等级划分方法

金岩¹, 梁子璇², 杨大陶¹, 李明涛³, 唐梦辉¹, 赵海斌⁴, 宋政吉⁵, 石方圆²

(1. 国家航天局对地观测与数据中心, 北京 100101; 2. 北京理工大学深空探测技术研究所, 北京 100081; 3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 4. 中国科学院行星科学重点实验室 紫金山天文台, 南京 210023; 5. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 风险等级研究是应对近地小行星撞击地球的重要前提。针对近地小行星撞击风险预估问题, 提出一种新型的风险等级划分方法。分析了近地小行星撞击的危害形式与严重后果, 并梳理了撞击风险等级划分的要素; 探讨了相对成熟的都灵指数模型和巴勒莫指数模型, 并以等效直径与撞击概率为主要考虑因素, 设计了撞击风险等级划分方案, 建立风险等级精细划分模型; 针对不同风险等级模型, 进行了仿真对比与分析, 验证了方法的有效性; 实现了在近地小行星等效直径和撞击概率的整个值域范围内连续描述撞击风险。

关键词: 近地小行星; 撞击风险; 风险等级; 精细划分; 都灵指数

中图分类号: P185.7;V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)04-0369-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230092

引用格式: 金岩, 梁子璇, 杨大陶, 等. 近地小行星撞击风险等级划分方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(4): 369-377.

Reference format: JIN Y, LIANG Z X, YANG D T, et al. Grading method for impact risk of near-Earth asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(4): 369-377.

引言

天文学界将轨道近日点距离在1.3 AU以内的小行星称为近地小行星。受到行星引力和雅可夫斯基效应等的影响, 近地小行星可能会近距离飞掠地球甚至撞击地球。截至2023年2月19日, 已经发现31 351颗近地小行星, 其中直径大于140 m的有10 408颗, 直径大于1 km的有852颗, 具有潜在危险的有2 330颗^[1]。近地小行星撞击风险是自然界客观存在且不可忽视的, 有必要对近地小行星, 尤其是可能撞击地球的小行星进行观测预警。为应对小行星撞击地球事件, 美国和欧洲提出了“阿波菲斯探索与减缓平台”(ApoPhis Exploratory and Mitigation, AEMP)^[2]、“超高速小行星拦截器”(Hypervelocity Asteroid Intercept Vehicle, HAIV)^[3]、“近地小行星防护盾”(Near-Earth Objects Shield, NEO Shield)^[4]、“堂吉珂德”(Don Quijote)^[5]、“双小行星重定向测试”^[6](Double Asteroid Redirection Test, DART)等小行星防御计划。中国基于紫金山天文台近地天体望远镜, 监测3 000多个近地小行星的运行, 其中包括多颗对地球构成潜在威胁的近地小行星, 于2018年加入联合国和平利用外层空间委员会下

设的国际小行星监测预警网^[6](International Asteroid Warning Network)。2021年国家航天局联合有关部门启动了应对近地小行星撞击风险的中长期发展规划论证工作, 以提升中国近地小行星撞击风险应对处置的能力。

小行星撞击地球造成的危害巨大。6 500万年前白垩纪晚期, 一颗直径约10 km的小行星撞击墨西哥尤卡坦半岛, 导致地球上的恐龙等近75%物种灭绝^[7]。1908年6月30日, 在俄罗斯西伯利亚通古斯地区一颗直径约30~50 m的小行星撞击地球并在8.4 km上空发生爆炸, 爆炸当量预估超过10 Mt TNT, 毁灭了约2 000 km²的西伯利亚森林的8 000万棵树^[8]。1976年3月8日, 在吉林市上空发生陨石爆炸事件, 产生的陨石碎片散落在附近500 km²的范围内^[9]。2008年10月7日, 2008TC₃撞击非洲苏丹北部的努比亚沙漠, 直径约为4 m, 在37 km的高空爆炸, 释放出总计高达1.1~2.1 kt当量的能量, 相当于一枚低级别小型核弹的威力^[10]。2013年2月15日, 一颗直径约为19.8 m的近地小行星在俄罗斯车里雅宾斯克(Chelyabinsk)地区27 km的高空爆炸, 此次爆炸当量约为500 kt TNT, 相当于1945年广岛原子弹爆炸当量的30倍^[11], 造成1 200多人受伤和

10亿卢布的经济损失。如果对近地小行星进行监测预警,并提前实施防御策略,就可以减弱小行星撞击地球安全给人类生存带来的危险。

划分撞击风险是监测预警的重要前提。近地小行星运动轨道的不确定性、撞击地球时危害形式的多样性以及带来损失的多维性对综合评估风险带来极大困难。根据对以往发生的近地小行星撞击事件统计^[12],发现近地小行星撞击发生的频率、撞击影响范围和其尺寸大小(等效直径)有关,而近地小行星撞击的危害程度也和其撞击时的能量直接相关,撞击能量这一物理量也与小行星的等效直径有直接关系(撞击动能和等效直径3次方呈线性关系)。

目前对于潜在的小行星撞击威胁有两套成型的风险等级划分方法,分别为都灵撞击危险指数(简称都灵指数)^[13]和巴勒莫撞击危险指数(简称巴勒莫指数)^[14]。都灵指数基于撞击概率和撞击动能使用10分制整数等级对潜在撞击事件造成的风险进行清晰划分,数值越大对应撞击风险等级越高,该指数设计简单,且便于与公众交流,但也存在2个主要问题:一是撞击动能难以准确预估,在目前的观测条件下可操作性较差;二是采用整数划分的区间过大,不能用于撞击风险的精确预估。巴勒莫指数克服了使用整数刻度的困难,可在撞击日期、能量和概率的整个值域范围内连续描述撞击风险。该指数将检测到的潜在撞击事件概率和距离撞击发生的几年间相同大小或更大尺寸天体发生潜在撞击的平均风险进行对比,得到相对风险值。但该指数需要对背景风险进行建模,计算复杂且不利于与大众沟通。除都灵指数和巴勒莫指数外,布鲁菲尔德危险等级和博斯拉夫空爆预警等级也用于近地小行星撞击风险的评估。布鲁菲尔德危险等级以近地天体尺寸作为唯一的撞击参数,忽略了其它参数^[15];博斯拉夫空爆预警等级是一种定性描述方式,不涉及具体的参数,仅涵盖空爆情景^[16]。

为发展中国近地小行星监测预警体系,有必要结合中国的发展理念和技术条件,建立一种便于沟通、可操作性强、可精细化的小行星撞击风险等级模型。考虑到都灵指数便于沟通的特点,本文参考其设计思路,并结合可操作性与可精细化需求,提出一种新型的风险等级划分方法:可操作性方面,以等效直径与撞击概率为主要考虑因素,设计了撞击风险等级划分方案;可精细化方面,考虑到等效直径与撞击概率对风险等级的耦合影响,使用基于加权平均插值方法建立了风险等级精细划分模型。

1 近地小行星撞击风险分析

1.1 危害形式

近地小行星撞击会导致不同程度的后续影响,主要涉及3个部分:由空中爆炸或地面撞击造成的区域性破坏;海洋冲击造成的海啸破坏,以及大规模影响造成的全球气候破坏。具体的破坏形式有以下几个方面。

1) 热辐射:超过一定速度的撞击通常会引起爆炸。近地小行星在进入大气的过程中,存在能量耗散,这部分能量在与地球大气层相互作用的过程中释放出热辐射可能会点燃靠近撞击点的材料,但其强度随着距离的增加而迅速下降。热辐射有2种形式:不透明的火球及当火球的内禀辐射被释放时更强烈的火球。

2) 空气冲击爆炸:由撞击爆炸引起的空气爆炸可分为2种现象:一是爆炸过程中空气快速膨胀和压缩引起的压力冲击波;二是跟随压力波的风,虽然大多数损坏是由超压引起的,但具有高阻力的物体特别容易受到强风的影响。

3) 地震影响:直径超过数百m的大型近地天体会引起明显的地震效应,可以通过地震的度量来描述。此外也可能引发火山效应,尽管这种情形可能性极低。

4) 陨石坑和溅射物:定义两种不同的陨石坑,在撞击点形成的所谓的瞬态陨石坑和由瞬态陨石坑随后坍塌形成的最终陨石坑。

5) 空爆:撞击物整体到达地面,撞击物分解并分成几块到达地面,撞击物在大气中分解并爆炸。撞击物是否碎裂以及碎裂到什么程度在很大程度上取决于它的组成。现有模型复杂,且缺乏数据,预测难度较大。

6) 海啸:地球表面70%以上是水,因此撞击发生在海洋的可能性更大。海啸可以通过2个参数来表征,海岸海啸波的高度和海啸从海岸向内陆传播的距离。由于尚未记录到全球性海啸,所有已知的撞击物与不同深度水的相互作用模型都是纯理论的,包含许多不确定性。

7) 大气污染:大型近地天体可能会影响到灰尘和水蒸气,影响范围从局部臭氧消耗到类似于众所周知的“核冬天”的情况,导致大规模灭绝事件。

1.2 撞击后果

从上述小行星撞击地球的危害形式可以得出,典型的灾害场景包括空爆解体、撞击陆地引发地震、撞击海洋引发海啸等,从而有可能造成局部(Local)、区域(Regional)或全球(Global)破坏。一次撞击事

件的危害程度和小行星的组分结构、撞击能量及撞击角度、撞击点位置及人口密度等有关, 其中撞击能量是最重要的, 其又主要取决于撞击体的直径。此外, 同等尺寸小行星撞击海洋造成的伤亡只是撞击陆地造成伤亡人数的一小部分。

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^[17-18], 如表 1 所示。

表 1 小行星撞击的危害形式与等效直径关系^[19]

Table 1 Relation between hazard forms of asteroid impact and equivalent radius^[19]

等效直径	影响范围	类似事件	发生概率
km级	全球	恐龙灭绝 ^[20]	1 × 10 ⁸ 年1次
140 m级	洲际	2019 OK小行星事件 ^[21]	1 000年1次
50 m级	大型城市	通古斯爆炸 ^[10]	100年1次
10 m级	城镇	车里雅宾斯克爆炸 ^[22]	30~50年1次
m级	无	河南驻马店火流星事件 ^[23]	频繁发生

1.3 等级划分要素

近地小行星撞击威胁着地球的安全与人类生存, 而撞击风险等级划分是应对该风险的重要前提。根据近地小行星撞击事件风险要素的分析, 影响其评估的主要因素包括以下几个方面。

1) 撞击日期

撞击日期是衡量近地小行星撞击地球事件紧迫性的参数, 可通过轨道递推直接求解。即使是未来几十年, 近地小行星和彗星飞掠地球的事件日期一般可以精确确定, 且日期仅和初始轨道(含历元时间)有关。

2) 撞击位置(撞击中心点、落区)

撞击位置直接关系到撞击发生区域的损失评估。撞击位置在海洋还是陆地、国内还是国外、城市还是无人区, 后续所产生的危害形式和损失评估模型是不同的, 对应的危害等级、应急处置、灾害救援措施也各不相同。因此撞击位置是近地小行星撞击风险等级划分的重要因素, 也是应急响应必然要考虑的因素。撞击位置是通过计算近地小行星运动轨道、交会角度和地球运动(公转和自转)相交时得到的位点估计。具体涉及的地球运动目前可以准确计算, 而小行星的运动轨道和撞击角度受到观测手段的限制无法准确测量, 因而对撞击位置估计精度不足。

3) 等效直径

等效直径是近地小行星分类分级的重要指标之一。由于近地小行星多数为不规则形状, 通常以近地小行星等效直径描述其大小。小行星等效直径可通过其绝对星等和几何反照率估计获得, 公式^[24]为

$$D_0 = \frac{10^{-0.2H}}{p^{0.5}} \times 1\,329 \quad (1)$$

其中: D_0 为小行星的等效直径; H 为其绝对星等; p 为几何反照率。

4) 撞击能量

相比于其它事件, 近地小行星撞击地球的主要特点是本身超高速(12~20 km/s)撞击时携带巨大的动能, 从而产生巨大危害。在进入大气的过程中, 存在能量耗散, 其危害程度取决于穿过大气层后剩余的能量(与小行星进入大气时的质量和速度、小行星结构以及撞击角度有关)。假设撞击释放的能量全部来自动能, 以此判断灾害范围(以TNT当量为单位), 常见形式为

$$E = \frac{1}{2}MV^2 \quad (2)$$

5) 撞击概率

撞击概率是衡量小行星撞击地球可能性高低的参数。由于天体天文观测(角位置或赤经赤纬)误差统计的不确定性, 通常非线性转化为轨道确定的不确定性, 最终转化为与观测结果一致轨道可能范围的不确定性。撞击概率基本计算原理是将定轨得到的置信域从该历元时间递推到小行星和地球的交会时刻, 然后将置信域投影到小行星双曲线轨道的二维平面(B平面)内, 计算得到置信域和地球重合部分占整个置信域的比重。因而, 撞击概率的大小取决于近地点位置和轨道确定的精度。假如一个近地天体被认为未来将接近地球并且在特定日期其轨道位置不确定性和地球已知位置相交时, 可计算得到其撞击概率, 一般来说, 轨道不确定性(用“误差椭球”表示)越大, 撞击概率越低, 如图 1 所示。一般采用线性撞击预测理论可以评估概率为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级的撞击事件; 但如果小行

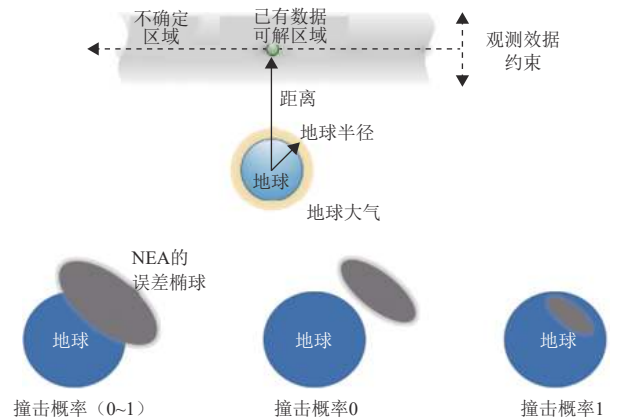


图 1 撞击概率和轨道不确定性的关系

Fig. 1 Relation between impact possibility and orbit uncertainty

星直径超过1 km, 其撞击能量相当于2万Mt当量的TNT, 即使撞击概率只有 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 的量级也不能忽略, 这样的目标也很可能产生严重的后果。

2 近地小行星撞击风险等级划分方法

2.1 都灵指数与巴勒莫指数分析

都灵指数使用介于0~10之间的整数对撞击风险进行分级, 数值越大对应撞击风险等级越高。同时, 为实现在各种不同层次传达信息的目标, 将颜色编码和解释性标签应用于指数的定义, 如图2所示。

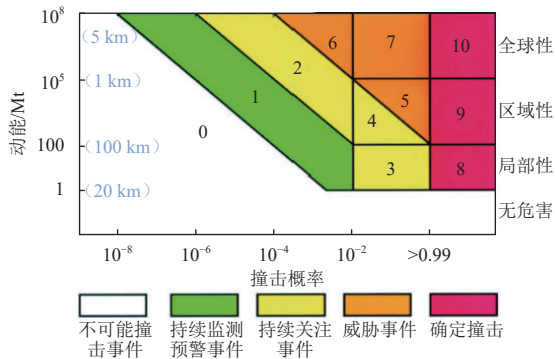


图2 都灵指数等级定义^[25]

Fig. 2 Definition of Torino scale model^[25]

都灵指数设计简单, 但存在2个主要问题: ①撞击动能难以精确预测, 都灵指数的设计需获得近地小行星动能, 而动能由质量和速度共同决定, 由于小行星的材质难以在撞击前准确判定, 且速度测量误差较大, 使得撞击能量很难精确预测; ②风险等级不能精确描述, 都灵指数中, 落在同一区域两端的2个事件, 可能具有明显不同的危险程度, 但依此指标却无法区分等级, 区域以不均匀的方式排列, 相邻区域不一定具有连续的整数值, 导致边界事件等级难定义。

巴勒莫指数将检测到的潜在撞击事件的概率和距离撞击发生的几年内相同大小或更大尺寸天体发生潜在撞击的平均风险进行对比, 得到相对风险值。定义巴勒莫指数值 \mathcal{P} 为相对风险的对数值(以10为底)^[26], 即

$$\mathcal{P} = \lg \frac{p_i}{f_B T} \quad (3)$$

其中: p_i 为撞击概率; T 为 p_i 被考虑的时间间隔; f_B 为背景撞击的频率。

$$f_B = \frac{3}{100} E^{-\frac{4}{5}} \text{yr}^{-1} \quad (4)$$

其中: 能量阈值 E 为以TNT当量(Mt)为单位; yr 是以年为单位的时间数值。

等级为0意味着危险与背景风险一样, +2的数值意味着风险是随机背景风险的100倍, 等级小于-2的数值反映出事件产生后果的可能性不大。巴勒莫指数可连续描述撞击风险, 但背景风险建模困难, 存在设计复杂和不方便交流沟通的问题。

2.2 小行星撞击风险等级划分方案

近地小行星撞击地球是一个物理-力学-化学强耦合的过程, 需要开展超高速进入和撞击试验, 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。由式(2)可知, 准确获取小行星的质量 M 需要对小行星的轨道、物理化学等特性进行精确测量和研究。

目前针对小行星轨道测量一般采用可见光精测望远镜和精密跟踪雷达^[27]。利用可见光望远镜对小行星观测, 可确定小行星的精确轨道, 进而获取速度信息。但该过程需要多次回归观测, 大大增加了任务复杂度, 对最终观测速度也有一定的不确定性; 利用雷达可显著提升近地小行星轨道的确定精度, 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, 但仅在少数条件下可获取小行星的形状和物质成分等信息。因此, 考虑到小行星质量和撞击速度的观测局限性, 同时尽可能保证等级划分的简洁和便于交流, 有必要利用新的划分要素对近地小行星撞击风险进行等级划分。近地小行星多数为不规则形状, 相比其它参数, 利用式(1)易获得其等效直径, 故本文选取等效直径来表征撞击危害同时充当风险等级划分的要素。

从历史情况看, 直径1 km以上近地小行星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; 而直径10~1 000 m的近地小行星是国际社会关注和应对防范的重点对象, 相应危害程度主要划分为6类。

1) 等效直径为千米级

当传统的都灵指数危险等级达到7或8以上时, 影响都是全球性的, 都需要全世界联手消除危险, 因此将直径1 km以上的小行星统一设立相同的危险等级。

2) 等效直径为140 m级

直径140 m以上的小行星可引发洲际性灾难, 对地球造成重伤, 因此将140 m级作为小行星撞击风险等级设计的第2阈值。

3) 等效直径为50 m级

等效直径50 m级的小行星可引发大型城市级灾难,因此将50 m级作为小行星撞击风险等级设计的第3阈值。

4) 等效直径为20 m级

等效直径为20 m级的小行星在穿透大气后还会有少量的残余部分可引发中小型城市级灾难,因此将20 m级作为小行星撞击风险等级设计的第4阈值。

5) 等效直径为10 m级

等效直径为10 m级的小行星可引发城镇级灾难,设立10 m等级的小行星预测等级,一方面可以增加小行星防御的保守性;另一方面考虑到近地航天器也可能受到小行星靠近地球的影响,因此需要增加这一等级尺寸小行星的监测。

6) 直径较小的(米级)小行星在穿越地球大气层时在空中爆炸,形成火流星,该类事件频繁发生,不会带来大规模人员伤亡,故为10 m以下的小行星统一设立最低的危险等级。

整体划分方案分粗划分和精划分两步,首先结合近地小行星的等效直径和撞击概率,使用0~10的整数数值对撞击风险进行初步分级,数值越大风险等级越高。参考都灵指数,设计遵循以下2个原则:在最大自然范围内使用钱博曼和莫里斯成果年发生概率线的斜率;利用概率空间的幅度宽的特性(跨越两个数量级)以最小化风险等级确定中的“噪声”。

撞击概率 ≥ 0.1 的区域被认为有较大可能发生撞击事件,根据等效直径大小依次赋予10、9、8、7这4个等级;撞击概率 ≤ 0.01 的区域被认为有较小可能发生撞击事件,根据等效直径大小依次赋予1、2、3这3个等级;为增加风险等级设置的保守性,考虑到等效直径140 m以上且撞击概率在 10^{-3} 以上的区域也应该得到重视,将所属区域赋予5级的权重,提示天文学家应该注意加紧观测,以最大程度减少损失;撞击概率介于0.01~0.1之间的区域,有中等程度的可能性发生撞击事件,根据等效直径大小赋予3、4、5、6这4个等级,提示各国政府可被授权采取紧急应对计划;最后为助于公众对风险进行直观理解,对上述分级方案进行配色,得到如图3所示的小行星撞击风险等级粗划分方案。

配色标准参考国家突发事件预警制度对自然灾害、事故灾难和公共卫生事件的预警级别,该等级使用了白、蓝、黄、橙、红5种颜色去代表不同的级数。白色代表无危险,该行星撞击地球的机率是0,或是在数10年内的撞击机会比相近大小的行星低;蓝色代表

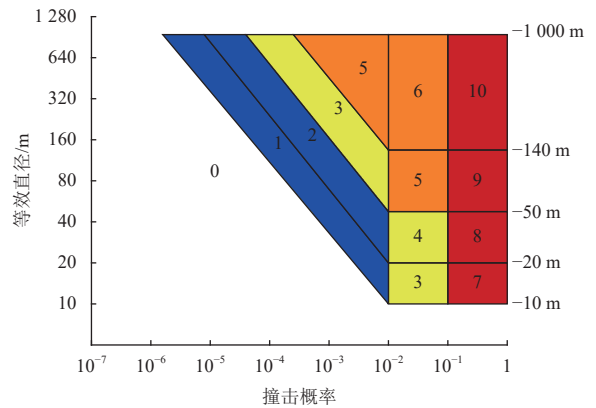


图3 小行星撞击风险等级粗划分方案

Fig. 3 Coarse grading method for impact risk of asteroids

需要监测,该行星在数10年间撞地球的机会与其它相近大小的行星接近;绿色代表需要关注,该行星有微乎其微的撞击机会,天文学家应该注意及加紧观测;橙色代表撞击机会更高,撞击会造成区域性的严重毁坏。如果该行星10年内可能撞击地球,各国政府可被授权采取紧急应对计划;红色代表危险,行星撞击将会发生,并会对局部地区造成损毁,或对大面积地区造成损毁。

由图3可知,与刻度每个整数数值相关联的各个区域以不均匀的方式排列,因此相邻区域不一定具有连续的整数数值。处于区域4、5、8、9交界,等级难定义如图4中a点。此外,实际上无法区分2个事件可能落在边界的哪一边,因此看起来具有明显不同的危险程度,b、c两点处于区域9两侧,风险等级明显不同,实际确实无法区分等级,这使整个分级问题更加复杂。因此提出包含区域顶点撞击风险等级求取和区域内部撞击风险等级求取的两步式解决方案对初步划分结果进行精细划分。

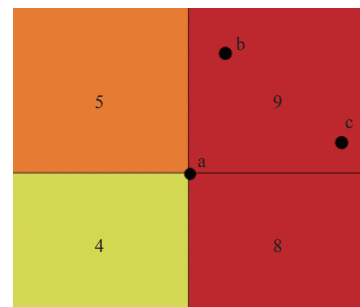


图4 小行星a、b、c在撞击风险等级粗划分中的位置

Fig. 4 Positions of asteroids a, b and c in the coarse grading of impact risk

2.3 小行星撞击风险等级精细分级方法

2.3.1 区域顶点撞击风险等级求取

由于顶点存在于多个等级区域,不利于风险等级

设计, 故首先确定各顶点的等级, 根据风险等级从左向右、从下向上变大的原则将各区域顶点的风险等级设计。结合中国的发展理念, 应尽可能保守的对小行星撞击风险等级进行设置, 各顶点风险等级设置为相邻区域等级的最大值, 例如区域5、区域6、区域9、区域10的交点, 风险等级设置为10, 如图5所示。

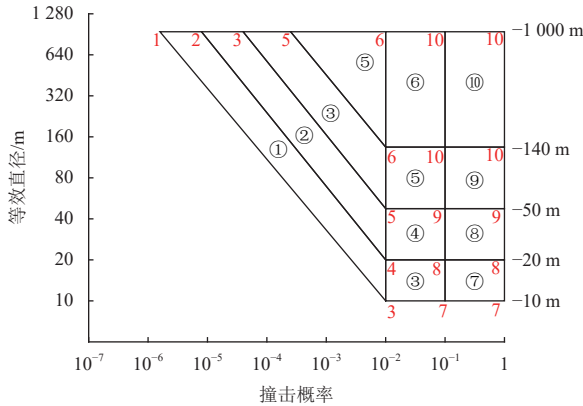


图5 区域顶点的风险等级
Fig. 5 Grading for impact risk of at vertexes of regions

根据以上设计, 12个区域内的最大, 最小撞击风险等级如下。

- 区域①: 最大为4, 最小为1;
- 区域②: 最大为5, 最小为2;
- 区域③(下): 最大为8, 最小为3;
- 区域③(上): 最大为6, 最小为3;
- 区域④: 最大为9, 最小为4;
- 区域⑤(下): 最大为10, 最小为5;
- 区域⑤(上): 最大为6, 最小为5;
- 区域⑥: 最大为10, 最小为6;
- 区域⑦: 最大为8, 最小为7;
- 区域⑧: 最大为9, 最小为8;
- 区域⑨: 最大为10, 最小为9;
- 区域⑩: 最大为10, 最小为10。

2.3.2 区域内部撞击风险等级求取

初始设计方案区域面积较大, 同种级别的不同撞击事件带来的风险差别可能很大, 有必要对其进行更精细的等级划分。

将横轴撞击概率和纵轴等效直径进行数据处理, 撞击概率处理为

$$\tilde{P} = \frac{1}{-\lg P} \tag{5}$$

其中: \tilde{P} 称为概率系数; P 为实际撞击概率, 例如碰撞概率为 10^{-8} , 代入公式得到 $\tilde{P} = \frac{1}{8}$ 。

等效直径处理为

$$\tilde{R} = \log_2 \left(\frac{R}{5} \right) \tag{6}$$

其中: \tilde{R} 称为尺寸系数; R 为实际等效直径, 例如等效直径80 m, 代入公式得到 $\tilde{R} = 4$ 。

依次求出区域4个顶点的概率系数和尺寸系数, 如图6所示。

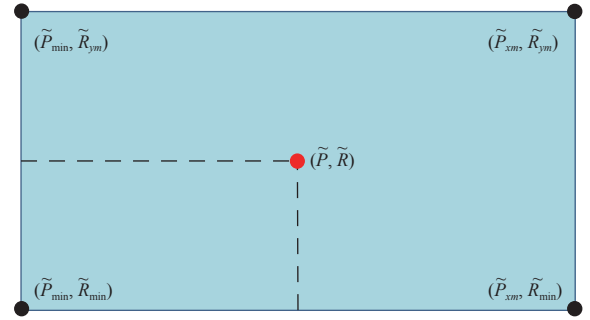


图6 区域内部的风险等级求取
Fig. 6 Grading for impact risk inside the regions

考虑到二者对等级的耦合影响, 采取加权平均法进行插值, 某一事件的精细化分级为

$$Q = Q_0 + 0.2 \frac{\tilde{R} - \tilde{R}_{\min}}{\tilde{R}_{ym} - \tilde{R}_{\min}} (Q_y - Q_0) + 0.3 \frac{\tilde{P} - \tilde{P}_{\min}}{\tilde{P}_{xm} - \tilde{P}_{\min}} (Q_x - Q_0) + 0.5 \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} (Q_{\max} - Q_0) \tag{7}$$

其中: Q_0 为该区域顶点中对应的最小风险等级; Q_{\max} 为该区域顶点中对应的最大风险等级; Q_x 和 Q_y 为其余2顶点对应的风险等级; \tilde{R}_{ym} 对应区域内等效直径最大值; \tilde{P}_{xm} 对应区域内碰撞概率最大值, 为简化公式, 将 \tilde{P} 和 \tilde{R} 的乘积记为 T 。

3 仿真分析

为验证所提出近地小行星撞击风险等级划分方法的有效性和适用性, 本节针对多颗近地小行星进行了数值仿真, 对其威胁分别进行了评估。考虑到不同撞击概率和等效直径的近地小行星对地球带来的威胁迥异, 选取如表2所示的4颗近地小行星, 分别计算风险等级。

表2 近地小行星参数

Table 2 Parameters of near-Earth asteroids		
近地小行星	撞击概率	等效直径/m
A	0.01	10
B	0.03	65
C	0.08	110
D	0.10	140

首先对4颗小行星进行风险等级粗划分, 在撞击概率、等效直径坐标系中画出各小行星的位置如图7所示, 可以看出4颗小行星均落在区域5, 风险等级 $D > C > B > A$, 然后对其风险等级进行精细划分。

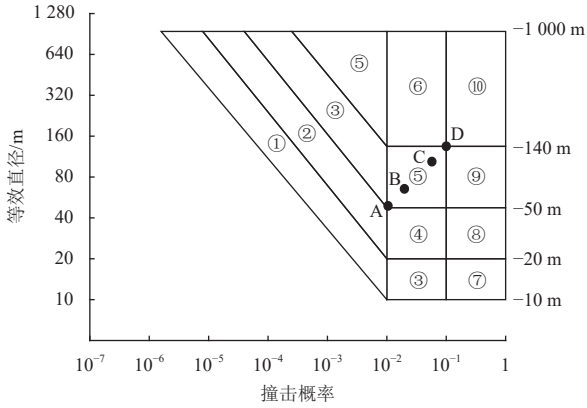


图 7 小行星 A、B、C、D 在风险等级划分中的位置

Fig. 7 Positions of near-Earth asteroids A, B, C, and D in the grading of impact risk

以近地小行星 B 为例, 可计算概率系数 $\tilde{P} = \frac{1}{-\lg P} = 0.65665$, 尺寸系数 $\tilde{R} = \log_2 \left(\frac{R}{5} \right) = 3.70043$ 。

代入式 (7), 可得到近地小行星 B 的风险等级为 $R_b = 6.04$ 。同理, 可以求得近地小行星 A、C、D 的风险等级分别为 $R_a = 5$, $R_c = 8.05$, $R_d = 10$, 结果如图8所示。可以看出, 4颗近地小行星风险等级均介于 5~10, 近地小行星 A 到近地小行星 D 在颜色轴中对应颜色的逐渐加深, 意味着4颗小行星的撞击风险等级逐渐增大, 符合从上向下, 从左到右逐渐增大的原则。

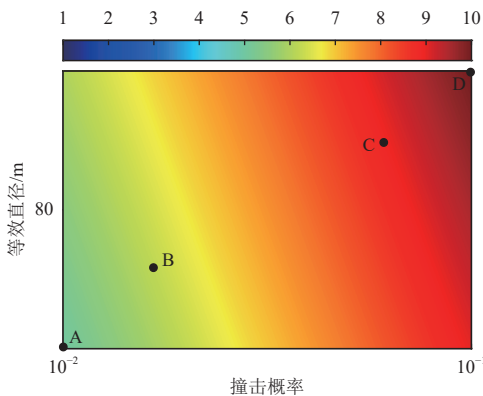


图 8 近地小行星 A、B、C、D 在区域 ⑤ 中的位置

Fig. 8 Positions of near-Earth asteroids A, B, C and D in Region ⑤

在撞击概率和等效直径坐标系中运用加权平均法对每个坐标进行遍历插值, 得到如图9的最终版近地小行星风险等级设计方案。相比都灵指数 (图2), 该方案解决了相邻区域等级不连续和不同位置差异难体现

的问题。从图9可以看出提出的近地小行星撞击风险等级设计方法可以对风险等级进行精细化分级, 弥补了只能使用整数刻度的困难, 可用来评估近地小行星撞击地球带来的风险。本文提出的方法与已有的近地小行星撞击风险等级划分方法对比如表3所示。

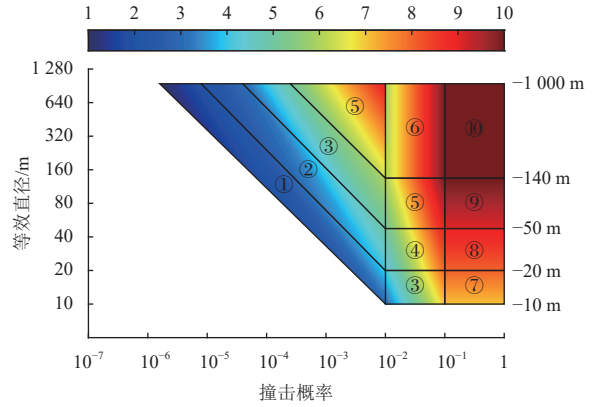


图 9 小行星撞击风险等级设计最终方案

Fig. 9 Final grading model for impact risk of near-Earth asteroids

表 3 近地小行星撞击风险等级划分方法对比

Table 3 Comparison of grading methods for impact risk of near-Earth asteroids

评估方法	优点	缺点
都灵指数	设计简单, 便于交流	撞击动能难以精确预测; 风险等级无法连续刻画
巴勒莫指数	能够连续刻画风险等级	设计复杂, 不便和公众沟通; 撞击动能难以精确预测
布鲁菲尔德危险等级	参数少, 设计简单	考虑因素过少, 缺乏对撞击风险明确解释
博斯拉夫空爆预警等级	包含对特定等级危险做出的反应说明	仅适用于空爆场景, 应用面狭窄
本文方法	设计简便, 便于公众交流; 对风险等级进行连续刻画	等效直径代替撞击动能, 模型精度有待提高

4 结 论

针对近地小行星撞击风险评估问题, 提出了一种“粗划分 + 精划分”的风险等级划分方法, 通过对风险等级精细化分级弥补了都灵指数的不足, 实现了在近地小行星等效直径和撞击概率的整个值域范围内连续地描述撞击风险。随着近地小行星观测能力的发展, 后续研究中可将小行星密度、撞击速度、撞击位置等因素纳入评估体系, 使风险等级评估更精确有效。

参 考 文 献

[1] Jet Propulsion Laboratory. Discovery statistics[EB/OL]. (2023-02-19) [2023-02-23]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats>.

[2] HYLAND D C, ALTWAIJRY H A, MARGULIEUX R, et al. A mission template for exploration and damage mitigation of potential hazard of near Earth asteroids[J]. *Cosmic Research*, 2010, 48(5): 437-

- 442.
- [3] PITZ A, KAPLINGER B, VARDAXIS G, et al. Conceptual design of a hypervelocity asteroid intercept vehicle(HAIV) and its flight validation mission[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 94(1): 42-56.
- [4] GOLD R E. Shield: a comprehensive Earth-protection architecture[J]. *Advances in Space Research*, 2001(49): 1149-1158.
- [5] GALVEZ A. Near Earth objects space mission preparation: Don Quijote mission executive summary[R]. Madrid: European Space Agency, Madrid, 2003.
- [6] SAVITSKY Z. NASA asteroid test strikes a blow for planetary defense[J]. *Science*, 2022, 378(6615): 13-14.
- [7] 李虹琳, 党丽芳. 美欧合作的近地小行星防御任务进展[J]. *空间碎片研究*, 2021, 21(2): 35-39.
- LI H L, DANG L F. Progress of U. S. -European joint near-Earth asteroid defense mission[J]. *Space Debris Research*, 2021, 21(2): 35-39.
- [8] 刘慧根, 赵海斌, 周济林. 近地小天体调查、防御与开发[J]. *科学通报*, 2020, 65(9): 757-763.
- LIU H G, ZHAO H B, ZHOU J L. Survey, defence and resource development of NEO[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(9): 757-763.
- [9] 刘雪奇, 孙海彬, 孙胜利. 近地小行星防御策略分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(6): 557-563.
- LIU X Q, SUN H B, SUN S L. Analysis of defense strategies of near-Earth asteroids[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 557-563.
- [10] 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.
- [11] 马鹏斌, 宝音贺西. 近地小行星威胁与防御研究现状[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(1): 10-17.
- MA P B, BAOYIN H X. Research status of the near-Earth asteroids' hazard and mitigation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(1): 10-17.
- [12] JENNISKENS P, SHADDAD M H, NUMAN D, et al. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3[J]. *Nature*, 2009, 458(7237): 485-488.
- [13] BISCHOFF A, HORSTMANN M, PACK A, et al. Asteroid 2008 TC3-Almahata Sitta: a spectacular breccia containing many different ureilitic and chondritic lithologies[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010, 45(10-11): 1638-1656.
- [14] POPOVA O P, JENNISKENS P, EMEL'YANENKO V, et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization[J]. *Science*, 2013, 342(6162): 1069-1073.
- [15] 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.
- [16] HARRIS A W, D'ABRAMO G. The population of near-Earth asteroids[J]. *Icarus*, 2015, 257: 302-312.
- [17] HARRIS A W. The NEO population, impact risk, progress of current surveys, and prospects for future surveys[R]. USA: NASA, 2009.
- [18] BINZEL R P. The torino impact hazard scale[J]. *Planetary & Space Science*, 2000, 48(4): 297-303.
- [19] CHESLEY R S, CHODAS W P, MILANI A, et al. Quantifying the risk posed by potential Earth impacts[J]. *Icarus*, 2002, 159(22): 423-432.
- [20] BILLINGS L. Words matter: a call for responsible communication about asteroid impact hazards and plans for planetary defense[J]. *Space Policy*, 2015, 33: 8-12.
- [21] PETROSKI H. The essential engineer: why science alone will not solve our global problems[M]. USA: Random House USA Inc, 2011.
- [22] 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[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(2): 140-151.
- WU W R, GONG Z Z, TANG Y H, et al. Response to risk of near-Earth asteroid impact[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(2): 140-151.
- [23] WAINSCOAT R, WERYK R, CHESLEY S, et al. Regions of slow apparent motion of close approaching asteroids: the case of 2019 OK[J]. *Icarus*, 2022, 373: 114735.
- [24] 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>.
- [25] 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.
- [26] BINZEL R P, RIVKIN A S, STUART J S, et al. Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes[J]. *Icarus*, 2004, 170(2): 259-294.
- [27] 赵坚, 张如生, 李明涛. 近地小行星监测预警六度分析框架[J]. *科学通报*, 2023, 68(8): 981-992.
- ZHAO J, ZHANG R S, LI M T. Six-degree analysis framework for near-Earth asteroids monitoring and warning[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(8): 981-992.
- 作者简介:
金岩(1982-), 高级工程师, 主要研究方向: 近地小行星监测预警防御、小天体轨道动力学。
 E-mail: laomaohaidi@163.com
梁子璇(1988-), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 飞行器轨迹优化与制导控制、小天体探测与预警防御。
 E-mail: liangzx@bit.edu.cn

Grading Method for Impact Risk of Near-Earth Asteroids

JIN Yan¹, LIANG Zixuan², YANG Datao¹, LI Mingtao³, TANG Menghui¹,
ZHAO Haibin⁴, SONG Zhengji⁵, SHI Fangyuan²

(1. Earth Observation System and Data Center, China National Space Administration, Beijing100101, China;

2. Institute of Deep Space Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing100190, China;

4. Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing210023, China;

5. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Research on the grading of impact risk is an important prerequisite to dealing with the danger of impacts by near-asteroids. In this paper, a new risk-grading method was proposed to estimate the risk of near-Earth asteroid impact. The hazard forms and consequences of near-Earth asteroid impact were analyzed, and the factors of impact risk classification were sorted out. The relatively mature Torino scale model and Palermo index model were discussed, and the equivalent diameter and impact probability were taken as the main factors to design the impact risk grading method. A refinement of partition model of risk grade was established. Finally, the simulation comparison and analysis were carried out for different risk grading models.

Keywords: near-Earth asteroids; impact risk; risk grade; refinement of partition; Torino scale

Highlights:

- A new risk grading method is proposed to forecast the risk of near-Earth asteroid impact.
- The equivalent diameter and impact probability are taken as the main factors for designing the impact risk grading method.
- A refinement model which can continuously describe the risk grade of the near-Earth asteroid is established.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]