近地小天体调查、防御与开发

刘慧根^{1*}, 赵海斌², 周济林^{1*}

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210046;

2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210046

* 联系人, E-mail: huigen@nju.edu.cn; zhoulj@nju.edu.cn

近地小天体(near-Earth objects, NEO)是指轨道近日点在1.3个天文单位(astronomical unit, AU)距离的天体, 按照天体种类, 可以分为近地小行星(near-Earth asteroids, NEA)和近地彗星(near-Earth comets, NEC)两类. 目前已经发现的近地小天体中, 绝大部分是近地小行星, 有20000多颗, 而近地彗星仅100多颗^[1]. 按照轨道的半长轴(a)、近日点(q)和远日点(Q), 近地小天体可以分为如下4类^[2]. (1) 阿波希利(Apohele, 又称Atiras)型: $Q < 0.983$ AU(地球近日点); (2) 阿登(Aten)型: $a < 1$ AU, $Q > 0.983$ AU; (3) 阿波罗(Apollo)型: $a > 1$ AU, $q < 1.017$ AU(地球远日点); (4) 阿莫尔(Amor)型: 1.017 AU $< q < 1.3$ AU. 截至2019年6月28日, 已发现36个阿波希利型, 1510个阿登型, 10199个阿波罗型和8583个阿莫尔型近地小天体^[3]. 图1给出了目前已发现的近地小天体的直径分布, 大部分直径小于1 km.

1 为什么研究近地小天体

近地小天体的观测对了解太阳系具有重要的科学意义, 同时其与地球上生命的安全息息相关, 具有现实意义. 本节将分别从近地小天体研究的科学意义和人类自身安全两方面阐述研究近地小天体的意义.

现有的太阳系形成理论中, 各大行星的形成都是在围绕恒星的原行星盘中形成的. 盘中的固体物质经过持续增长, 形成了太阳系大行星和小天体^[3], 例如太阳系中的地球、火星、主带小行星等. 对于大行星而言, 由于风化作用、分异过程等因素的影响, 已经难以从地表推测这些行星形成之初的物质分布等特征. 而质量较小的小天体(例如球粒陨石等)上, 大部分物质仍是原行星盘上的原始物质, 能较好地保留太阳系早期的物质特征, 是科学家们研究早期太阳系化学组成的绝佳对象^[4].

此外, 地球上水的来源也是一个尚未解开的谜题. 太阳系“雪线”(即水-冰分界线, 约为2.7 AU)以外的小行星, 可能会含有较多的水, 甚至可能含有氨基酸等与生命关系密切的有机物^[5]. 这些外侧的小行星在太阳系演化过程中, 受大行星扰动, 可能运动到地球附近, 增加了与地球的碰撞概率, 可能给地球带来水、有机物等对生命起源至关重要的物质^[6].

刘慧根 南京大学天文与空间科学学院副教授、硕士生导师. 2011年南京大学获博士学位. 主要研究领域为太阳系形成与演化、太阳系动力学、系外行星探测及观测数据处理.

周济林 南京大学天文与空间科学学院教授、博士生导师, 教育部科技委数理学部委员, 中国天文学会秘书长, 江苏省天文学会理事长. 1995年南京大学获博士学位. 2009年获国家杰出青年科学基金资助. 主要研究领域为行星探测与动力学. 主持建设南京大学时域巡天阵列.

月球的起源也被认为和近地天体有关. 约45亿年前, 在太阳系演化历史中, 一颗火星大小的天体撞击了地球. 剧烈的撞击使得火星大小的天体和部分地球物质变成碎块, 这些碎块由于地球引力还围绕地球运转, 通过长时间的引力和碰撞作用重新聚集, 形成了如今的月球^[7,8]. 这就是目前主流的月球形成理论, 即大撞击假说(giant impact hypothesis), 既能解释地球和月球成分的相似性^[9], 也能解释地球自转轴的倾斜, 如图2所示.

由此可见, 对近地小天体的研究有助于了解原始太阳系的成分、太阳系水的分布以及太阳系的动力学演化历史. 这为揭示太阳系的形成、理解行星形成的一般理论提供了重要观测证据.

由于近地小天体距离地球较近, 即使有月球的保护, 地球仍有被碰撞的可能, 例如发生于中生代白垩纪与新生代第三纪之间(距今约6550万年前)的大规模物种灭绝事件. 根据地质学家的考察结果, 在白垩纪与第三纪的地层之间,

图1 (网络版彩色)近地小天体分类和数目统计。(a) 截至2019年4月18日, 已发现的近地小行星的直径分布(<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>).(b) 截至2018年11月25日, 已发现的近地彗星和4类近地小天体的数目和占比

Figure 1 (Color online) Size distribution and orbital statistics of NEOs. (a) Diameter distribution of known near-Earth objects (as of 2019-Apr-18) (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>). (b) Number and fraction of near-Earth comets and 4 different kinds of asteroids

图2 (网络版彩色)月球形成的大碰撞假说示意图. 图片来源: ESO

Figure 2 (Color online) How did the Moon form: The giant impact hypothesis. The figure is from ESO

有一层富含铱的黏土层, 名为K-T 界线. 由于地壳上铱的含量极少, 部分太阳系小天体上铱的含量丰富, 因此这次地球生物大规模灭绝的原因之一, 被认为是一颗 10~15 km

大小的近地小天体撞击地球, 改变了当时的气候和环境, 破坏了原有生物链^[10].

最近两个世纪, 最著名的小天体撞击地球的事件当数

1908 年的“通古斯大爆炸”。据科学家推测,小天体撞击释放的能量达到 2000 万~3000 万吨级^[11],将约 2000 km² 的森林夷为平地,万幸的是地点发生在西伯利亚荒无人烟的通古斯地区。即使直径很小的近地小天体,也可能威胁到人类安全。例如,2013 年 2 月 15 日中午 12 时 30 分左右,一颗直径 15 m 左右的陨石在穿越大气层时摩擦燃烧,在俄罗斯车里雅宾斯克州上空发生爆炸,产生大量碎片,形成了所谓“陨石雨”。在坠落区域,许多建筑的窗户玻璃破裂,1200 多人受伤,此事件对人类的生活产生了很大影响。因此,关注近地小天体,和人类的生活息息相关、紧密联系。

2 近地小天体的监测

1577 年,丹麦天文学家第谷第一次发现了一颗近地天体,被后人证实是近地彗星。随着望远镜技术的提升和天文学的进步,越来越多的近地小天体被发现。鉴于上一节提到的近地小天体的科学意义,以及更为重要的人类自身安全,对近地小天体进行监测、预报,鉴别出对地球有潜在威胁的近地小天体,正越来越受到各国重视。按照目前国际天文学联合会(International Astronomical Union, IAU)的定义,把与地球最小距离小于 0.05 AU,绝对星等小于 22 等(对应直径大约 140 m)的天体称为潜在威胁天体(potentially hazardous object, PHO)。根据科学家估计,直径大于 140 m 的小天体撞击地球,就能在局部范围引起巨大破坏,或者引发海啸等灾难,威胁人类安全。因此,对这些潜在威胁天体进行监测和预报至关重要。

1973 年,在美国成立了第一个近地小天体监测项目——the Palomar Planet-Crossing Asteroid Survey。1996 年,IAU 设立了专门基金支持各国搜寻和监测近地小天体。此后,越来越多的近地小天体搜寻项目开始大放异彩,例如较早的 Catalina Sky Survey, Near-Earth Asteroid Tracking(NEAT),

近年的 Pan-STARRS, Zwicky Transient Facility, 以及在空间进行红外波段观测的 Near-Earth Object WISE(NEOWISE)。图 3 给出了不同项目在不同年份监测到的 NEA 数目。值得一提的是,卡特林那巡天系统(Catalina Sky Survey)于 2008 年 10 月 6 日凌晨发现了一颗直径 2~5 m 的小行星 2008 TC₃。数小时后,国际小行星中心所在的哈佛-史密松天体物理中心宣布,该小行星有 99.8%~100% 的概率将于 2008 年 10 月 7 日凌晨 2:45(UTC)与地球相撞。事实上,这颗小行星于 2008 年 10 月 7 日 2:46(UTC)撞击地球,并在苏丹上空爆炸。这是天文学家首次成功对小行星撞击地球做出提前预报。

目前,直径 1 km 以上的近地小天体观测得比较完备。最新数据显示,目前地球附近的近地小天体中,直径超过 1 km 的大约有 990 个,直径超过 140 m 的大约有 27100 个^[12]。现有数据显示,超过 97% 的直径大于 1 km 的小天体被探测到^[13]。借助 PAN-STARRS 和 NEOWISE 项目, NASA(National Aeronautics and Space Administration)希望 2020 年能探测到更多直径大于 140 m 的近地小天体。此外, NASA 还计划发射一个专门用于行星防御任务的望远镜(Near-Earth Object Surveillance Mission, NEOSM),用于预报、监测对地球具有潜在威胁的,直径大于 140 m 的近地天体。

按照 NASA 的估计,直径大于 100 m 的潜在威胁天体大约有 4700 个,而直径更小的潜在威胁天体由于亮度更低,很难被发现,成为“漏网之鱼”,但这些天体撞击地球仍然可能产生很大影响。因此,对直径更小的近地小天体建立更加完备的监测和预报系统,是未来各国合作、努力的目标。

我国也一直在开展近地小天体的搜索和监测,如紫金山天文台的近地天体望远镜,目前共计监测了 3000 多个近地小行星的运行,更新了它们的轨道信息,并且发现了 20 个新的近地小行星,包括 3 个对地球构成潜在威胁的近

图 3 (网络版彩色)不同 NEA 搜寻项目在 1995~2019 年间发现的 NEA 数目统计图(<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>)

Figure 3 (Color online) The number of discovered NEAs from 1995 to 2019, via different survey projects (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>)

地小行星. 2018年,我国航天局加入了联合国和平利用外层空间委员会下设立的国际小行星监测预警网(International Asteroid Warning Network).我国的近地小天体监测受限于天文望远镜资源,未来还需要建设更多大型的地面和空间望远镜,积极开展国际合作,对近地小天体进行更完备的实时全球联网监测和预警.例如,即将建成的大型综合巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST),有望在南半球的近地小天体搜寻上发挥巨大作用.

3 近地小天体的防御方案

近地小天体的威胁和极端天气一样,在建立了监测预报体系之后,需要做的就是提出防范措施.但近地天体防御的问题还未得到各国政府的足够重视,几乎没有专门的机构负责. NASA 于 2016 年才成立了行星防御协调办公室(Planetary Defense Coordination Office, PDCO),主要负责检测和追踪近地小行星,鉴别飞向地球的潜在威胁天体,并提出防御方案,同时向公众发布警告.但是,在如何防范小行星撞击地球上,受限于目前人类的技术发展水平,难度还相当大.虽然其他一些国家也有类似的防护计划在酝酿(如欧盟资助、德国主要负责的防御小行星项目——近地轨道防护盾计划(NEOShield),但大都停留在理论阶段,具体方案的可行性和有效性还存在争议.下面对几种可能方案进行探讨.

(1) 脉冲式能量转移法:即通过撞击或爆炸的方式,改变小天体能量,使其轨道改变,甚至分裂成碎片的方法.这种方案在科幻电影中经常出现,在电影中也常常有效.但现实中的问题是,在宇宙真空环境下,导弹的爆炸威力远不如地面,而且部分小天体结构松散,即使导弹爆炸,起到的瓦解作用也有限.即使能把小天体轨道改变甚至炸碎,残余的数量众多的小天体碎片仍然可能会碰撞地球,引起更大的次生灾难.此外,如果采用核爆,产生的放射性物质可能也会散落到地球大气中,形成核污染,威胁地球环境.碰撞也存在相似的问题,需要结合小天体物质特性,准确选择撞击/爆炸点,以及撞击和爆炸强度,尽可能减小小天体碎片的次生灾害^[14].这种防御方法的优点是见效快,有立竿见影的效果,但是容易产生次生灾害.

(2) 渐进式主动牵引法:即通过更温和的外力作用,逐渐改变小天体轨道,避免与地球发生碰撞.这种方案比第一种温和,但改变轨道需要更多的时间,例如引力牵引^[15]、质量驱动器方案^[16].现实中,近地小天体运动速度快,从预警到碰撞地球可能只有几天的时间(如上一节提到的撞击地球的小天体 2008 TC3),在这么短的时间内改变轨道,需要施加更大的外力.近地小天体速度普遍大于 10 km/s,而且可以引发地球灾难的小天体直径普遍较大,动辄上百万吨(100 m 直径,按照地球密度估计),其动能是个天文数字,即使对它的轨道做微小改变,所耗费的

能量对目前人类的航空发动机而言也是短期内难以实现的.因此这种方案虽然不容易产生次生灾害,但是需要花费更长的时间才能实现,时效性和及时性是主要缺点.

(3) 地面被动防御法:在地下修建地下城,躲避小行星撞击地球的第一波致命冲击,再慢慢恢复地球气候、环境.这种被动防御方案相对于前两种主动防御更具有可操作性.但是,修建地下城也需要耗费大量时间、资金、人力和物力,需要提前很久筹备才可以实现.目前近地小天体撞击地球的预报无法做到提前好几年.即使这个方案能预先实施,小行星撞击地球的影响是持续性的,尤其是对气候、生态、环境的影响,需要花费相当长的时间才能恢复,甚至有些影响是不可逆的,这种方案的有效性还需要生物、地质、气候、环境多方面的专家深入论证.

综上,可以看到,虽然大尺寸的小行星撞击地球是小概率事件,可一旦有近地小天体威胁地球,短时间内人类还无法找出可行有效的防御方案.我们应该居安思危,提前对近地小天体防御方案进行深入研究,提前准备,才能从容应对这样的小概率事件,尽量减少甚至避免撞击对地球、人类的不利影响.

4 近地小天体资源开发利用

任何事物都有两面性.近地小天体可能威胁地球,但也可以被人类利用.目前人类足迹所至的最深宇宙仅仅是月球表面,因为从地球运送物质到宇宙中成本太高.以人体必不可少的水为例,仅仅运送到国际空间站,运输成本就高达 2 万美金/kg.高昂的成本使得人类在探索深空的步伐步履维艰.

对小天体进行开采利用是人类突破地球资源限制的主要途径之一,尤其是距离我们较近的近地小天体.小行星上的资源包括矿产资源、水资源等,对小天体的资源进行普查是资源开发的第一步.各国的小行星探测计划,包括日本的隼鸟、欧洲的罗塞塔探测器、美国的 OSIRIS-RE 等,探测目的除了科学考察之外,也包括为今后太空资源的开发利用打下基础.我国也计划于 2022 年进行一次小行星探测计划,并且取样返回.如果能提取小行星上的水分,进行原位利用,自然就可以降低地面运输的需求.如果能提取小天体上的其他物质,例如铁、硅酸盐,以及稀有金属铂、铱等,进行原位利用,也将大大减少从地面运送这些物质的需求,为未来建立月球基地、火星基地提供原材料.图 4 给出了小天体上常见物质的用途.

小天体按照组成成分大致可以分为 3 大类.(1) C 类:成分构成与太阳类似,缺少了氢气、氦气和其他挥发气体,表面含碳较多,约占小行星数目的 75%.(2) S 类:成分构成多为镍、铁和镁,约占小行星数目的 17%.(3) M 类:成分构成多为金属,可能是体量较大的小行星残存的金属核,余下的小行星大多数属于这一类.目前,小行星采矿主要关注的

图4 (网络版彩色)小天体上不同元素相对地球的含量和应用价值(<https://www.planetaryresources.com/>)

Figure 4 (Color online) Abundance of different chemical elements on asteroids, and the practical application values (<https://www.planetaryresources.com/>)

目标是数目最多的C类和含稀有金属的M类小行星。

进行小行星资源利用的想法虽然比较超前,但已经有很多人嗅到了商机。2012年成立的美国的行星资源(Planetary Resources)公司,其创始人是在航天领域有着多年经验的亿万富翁埃里克·安德森和奇点大学联合创始人彼得·戴曼迪斯,已经与NASA签署了技术合作协议,期望利用小天

体上的H作为能源。同一年成立的深空工业公司(Deep Space Industries, DSI)也把近期目标放在了采矿实验探测器的研制上。图4给出的是深空工业公司小行星采矿探测器的构想图。中国也成立了“起源太空”等公司来调研小行星采矿的可行性方案。

当然,要进行小行星采矿,需要勘探、采集、回收或

图5 深空工业公司的小行星采矿构想图(<http://deepspaceindustries.com/>)

Figure 5 The idea drawing of asteroid mining from Deep Space Industries (<http://deepspaceindustries.com/>)

者原位利用几个阶段,每个阶段都还有很多关键技术有待突破.例如,勘探阶段需要对大量小天体进行光谱探测甚至原位探测,揭示表面和内部组成成分,需要大量观测设备支撑;采集阶段需要工业化的空间采矿设备,还需要保障设备自动运行所需的功率,对运载能力的要求很高,需要更先进的推进系统^[17];在原位利用阶段,原材料的提纯、炼制、组装等对空间设备的轻量化、小型化也提出了新要求.此外,资源利用必须考虑成本,运回地球成本太高.即使是铂、铱这样的稀有金属,运回地球后也很难溢价卖出.因此,原位利用也要兼顾到低成本火箭发射技术(如小推力推进技术)、低成本空间采矿设备研发(如空间3D打印技术)等^[18].

可以预见的是,近地小行星资源的成功开发利用将会是人类迈向深空的里程碑,是人类科技步入新时代的标志.在小行星采矿实现过程中,也将会产生大量的新技术、新设备.这些技术设备未必率先应用在近地小天体采矿上,但也会极大地推进人类科学、技术的进步,为人类的生活带来更多的便利和可能性.

5 总结

本文主要介绍了近地小天体的定义和分类,说明了研究近地小天体在科学研究方面对理解早期太阳系、行星的

形成和演化等科学问题具有重要作用,同时也与地球上每一个人息息相关.通过对当前近地小天体的观测概况和分布特征的介绍,说明了对近地天体进行监测,尤其是对那些具有潜在威胁的小天体的监测和预报是必要的,并非杞人忧天.目前 NASA, ESA 等机构已经越来越重视对小天体的监测,将来也会借助大型巡天望远镜(如 LSST^[19])进行小天体监测.未来应该通过更广泛的国际合作,建立地面望远镜监测和预报网络,更为准确地识别具有潜在威胁的小天体,增强危害预警的准确性,增加预报的提前量,为未来小行星防御提供更充足的应对时间.

针对小天体进行防御,文中提到的各类方案各有优缺点,脉冲式能量转移法的可行性相对较高,利用碰撞、核爆等手段消除小天体威胁也是目前研究较多的方案. NASA 在 2016 年成立了行星防御协调办公室,对不同的行星防御方案进行研究,我国也开始逐步增加行星防御方面的投入,对不同防御方案进行研究和论证,进行相应的技术储备,增加地球和人类的“容错率”,尽可能降低或避免小行星撞击地球带来的影响.最后,文章介绍了小行星资源开发和利用的构想和现状.虽然距离实现小行星资源开发和利用还有很长的路要走,但是这对人类文明的发展、突破地球资源的限制,以及构建人类命运共同体至关重要,同时也为人类探索广袤的宇宙提供更多的可能.

推荐阅读文献

- 1 NASA/JPL CNEOS. Discovery Statistics—Cumulative Totals. 2019-01-06. Retrieved 2019-01-08
- 2 NASA/JPL CNEOS. NEO Basics. NEO Groups. Retrieved 2017-11-09
- 3 Goldreich P, Ward W R. The formation of planetesimals. *Astrophys J*, 1973, 183: 1051–1062
- 4 Wood J A. Chondritic meteorites and the solar nebula. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1988, 16: 53–72
- 5 Campins H, Hargrove K, Pinilla-Alonso N, et al. Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 themis. *Nature*, 2010, 464: 1320–1321
- 6 Callahan M P, Smith K E, Cleaves H J, et al. Carbonaceous meteorites contain a wide range of extraterrestrial nucleobases. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 13995–13998
- 7 Hartmann W K, Davis D R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, 1975, 24: 504–515
- 8 Canup R M, Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature*, 2001, 412: 708–712
- 9 Herwartz E D, Kohl I E, Warren P H, et al. Identification of the giant impactor Theia in lunar rocks. *Science*, 2014, 344: 1146–1150
- 10 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 1980, 208: 1095–1108
- 11 Wheeler L F, Mathias D L. Probabilistic assessment of Tunguska-scale asteroid impacts. *Icarus*, 2019, 327: 83–96
- 12 Harris A W, D'Abramo G. The population of near-Earth asteroids. *Icarus*, 2015, 257: 302–312
- 13 Williams M. Good News Everyone! There are Fewer Deadly Undiscovered Asteroids than we Thought. *Universe Today*. Archived from the original on 2017-11-04. Retrieved 2017-11-14
- 14 Zhang Y, Liu Y, Li J F. Evaluation of effects of kinetic impact deflection on hazardous asteroids. *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 51–57 [张韵, 刘岩, 李俊峰. 小行星防御动能撞击效果评估. *深空探测学报*, 2017, 4: 51–57]
- 15 Cui H T, Zhang Z J, Cui P Y. Research on displaced non-Keplerian orbit of gravitational tractor in three-body system. *Acta Aeronaut ET Astronaut Sin*, 2011, 32: 997–1006 [崔枯涛, 张振江, 崔平远. 三体系统中引力拖车的偏置非开普勒轨道研究. *航空学报*, 2011, 32: 997–1006]
- 16 Corbin C K, Higgins J E. Preliminary mission study: Mass driver for Earth-bound asteroid threat mitigation. *Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environment*, 2006. 1–8
- 17 Li Z L, Gao J, Liu G X, et al. Study on the electric propulsion system for asteroid detection. *J Deep Space Explor*, 2018, 5: 347–353 [李宗良, 高俊, 刘国西, 等. 小行星探测电推进系统方案研究. *深空探测学报*, 2018, 5: 347–353]
- 18 Qiu C B, Sun Y K, Wang Y M, et al. Development of near Earth asteroid mining and planetary defense. *J Deep Space Explor*, 2019, 66: 63–72 [邱成波, 孙煜坤, 王亚敏, 等. 近地小行星采矿与防御计划发展现状. *深空探测学报*, 2019, 66: 63–72]
- 19 Jones R L, Slater C T, Moeyens J, et al. The Large Synoptic Survey Telescope as a Near-Earth Object discovery machine. *Icarus*, 2018, 303: 181–202

Summary for “近地小天体调查、防御与开发”

Survey, defence and resource development of NEO

Huigen Liu^{1*}, Haibin Zhao² & Jilin Zhou^{1*}

¹ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

² Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210046, China

* Corresponding authors, E-mail: huigen@nju.edu.cn; zhoujl@nju.edu.cn

A near-Earth object (NEO) is any small Solar system body whose orbit brings it to proximity with Earth. Currently, more than 20000 NEOs are detected, most of which have diameters less than 1 km. The study of NEOs is significant to understand the solar system. NEOs formed in the very early stage of solar system according to isotope dating, and remain most original material in proto-planetary disk. Thus, the study of NEOs can reveal the components of early solar system. Besides, NEOs are also important to explain the formation of Earth-Moon systems in giant impact hypothesis, i.e., a mar-size asteroid hit Earth 4.5 billion years ago and the fragments around Earth formed Moon via gravitational accretion. Furthermore, survey of NEOs is also important for human beings, because of the potentially hazardous objects (PHOs), which lead to the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) extinction event, as well as the Tunguska event.

Fortunately, we have lots of NEO survey programs, e.g., Catalina Sky Survey, Near-Earth Asteroid Tracking, Pan-STARRS, Zwicky Transient Facility in ground, and Near-Earth Object WISE in space with near infrared telescope, etc. These projects provide a nearly completed catalog for NEOs with diameter >1 km. We can determine the orbits of these NEOs via the astrometric time series data. However, lots of smaller NEOs with diameter <140 m are still missing, due to the detection limits of faint objects using current survey telescopes. These missing small NEOs can also lead to local destruction on Earth, e.g., the Chelyabinsk meteorite in 2013. More survey programs with larger telescopes, e.g., LSST, will be helpful to generate a more completed catalog of small NEOs and to recognize more small PHOs.

After knowing the threat of PHOs, human beings need defense plans to avoid the impact or minimize the influence on human being. Although a big asteroid impact event would occur in a very low possibility, we need to take precaution. However, we do not have any feasible and effective plan to avoid the asteroid impact currently. Either nuclear explosive plan or drag the asteroid away using spacecraft engines can hardly work, Because of the huge mass (>millions tons) of the asteroid. Besides, the big fragments of the asteroid after explosion may lead to more impacts on Earth and make conditions worse. Better forethought plans need experts in astronomy, geology, life science, climatology etc., to discuss together.

The NEOs may be harmful if it impacts Earth. However, the resources on asteroid, e.g., water, metal can be utilized by human beings. Utilizing the resources in space is the only way to break through the limits of Earth's resources, and extend the footprint of human being further in space. Currently, some companies are set up and aim to mine on asteroids, e.g., the Planetary Resources Company and the Deep Space Industries. Chinese people also set up a company named Origin Space to study the plan in this field. Although, there is a long way to go, including lots of crucial techniques need to be studied, the success of development of the resources on asteroid would bring our technique and civilization in a new era.

near-Earth objects, potentially hazardous object, asteroid mining, planetary defense

doi: 10.1360/TB-2019-0706