

不同测站近地小行星地基观测效能评估研究*

冒雨萌^{1,2†} 赵海斌^{1,3‡} 李彬^{1,2}

(1 中国科学院行星科学重点实验室 紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

(3 中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 目标的完备性搜索是开展近地小行星预警和防御的前提. 为量化评价近地小行星观测效能, 提高监测设备使用效率, 提出一种综合望远镜参数和测站天文条件的观测效能评估方法. 以观测目标信噪比作为检测指标, 设定检测条件形成目标检测方法, 定义评价指标用于评估近地小行星观测效能. 再基于近地小行星轨道数据和尺度分布模型, 建立近地小行星轨道数据模拟样本库. 最后选取中国科学院紫金山天文台盱眙观测站和中国科学院国家天文台冷湖观测台址, 仿真分析近地天体望远镜对直径0.01–30 km近地小行星的观测效能, 结果表明: 不考虑两观测站年有效观测时间差异, 近地天体望远镜在冷湖观测全尺寸模拟样本的效能比在盱眙提高了5.21倍, 其中对1 km以上直径目标的观测效能相当, 对1 km以下直径目标的观测效能差异开始显现, 对0.1 km以下直径目标冷湖优势更显著.

关键词 望远镜, 近地小行星, 观测效能, 方法: 分析

中图分类号: P185; 文献标识码: A

1 引言

近地天体是与太阳最近距离小于1.3 au的太阳系小天体, 其中小行星占大多数, 与地球轨道交会距离小于0.05 au且绝对星等小于22等(相当于直径大于140 m)的近地小行星被定义为潜在威胁小行星, 可能会对地球安全造成威胁, 因此开展近地小行星的预警和防御对保护人类及地球的安全有重要意义. 目标的完备性搜索是开展预警防御的前提, 由于目前观测技术的局限性, 仍有大量小行星未被人类发现. 我国于2018年加入国际小行星监测网, 位于中国科学院紫金山天文台盱眙观测站的近地天体望远镜(China

2021-04-09收到原稿, 2021-06-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11633009), 中国科学院战略性先导科技专项(XDB41000000), 空间碎片与近地小行星防御科研项目(KJSP2020020204、KJSP2020020102), 民用航天预研项目(D020304、D020302)及小行星基金会资助

†maoyumeng@pmo.ac.cn

‡meteorzh@pmo.ac.cn

Near-Earth Object Survey Telescope, CNEOST)是目前我国唯一提供国际共享数据的设备,为我国开展近地小行星监测预警提供了数据基础.但该地基望远镜受到测站条件的制约,未能发挥其优越的观测效能.因此提高近地天体望远镜观测效能,对于提高我国在近地小行星监测预警领域的国际贡献具有重要意义.

提高地基望远镜观测效能最直接的方法是选择观测条件优良的站址.对于运行中的望远镜来说搬迁成本和难度较大,本文使用仿真的方法可以有效量化其不同测站的观测效能.目前国际上小行星监测搜索以大视场地基光学望远镜为主,近年来也展开了利用天基望远镜进行观测的探索,如美国部署了广域巡天望远镜(Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explore, NEOWISE)用于搜索太阳系天体^[1].针对观测效能评估的问题,2002年NASA (National Aeronautics and Space Administration)成立科学小组(Science Definition Team, SDT)研究将近地天体搜索范围扩展至更小直径的可行性,使用FROSST (The Fast Resident Object Surveillance System)工具包基于小行星的分布估计进行仿真,对不同地基和天基监测系统性能进行了分析^[2],但该仿真工具为美国国防部下的非公开软件,无法直接利用;2017年在此基础上又对近地小行星搜索和特性研究的可行性进行了仿真分析^[3];Michelsen等^[4]基于小行星尺度分布的最佳估计建立模型,模拟验证了白令(Bering)计划的可行性并确定了该计划科学仪器的关键技术要求;国内王新涛等^[5]也通过仿真评估了地球公转轨道天基光学望远镜对已知潜在威胁小行星的监测效能.

而对于近地小行星地基观测效能的评估,目前国内还未形成具体的方法.近地小行星观测效能主要体现在搜索完备度上,而目标能否被检测取决于其信噪比,信噪比不仅受测站天文条件(如视宁度、天光背景等)和地理位置的影响,也与目标的轨道、运动速度和尺度等相关.本文在考虑观测站天文条件及地理位置对地基望远镜观测影响的基础上,对信噪比计算模型进行了改进,提出一种近地小行星观测效能的评估方法,以近地小行星检测覆盖率作为观测效能的评价指标,通过仿真望远镜在不同测站的观测来评估其对近地小行星的观测效能.由于目前存在大量未发现的目标,本文基于现有近地小行星轨道数据和尺度分布模型,构建轨道数据模拟样本库,对近地天体望远镜在不同测站的观测进行仿真评估.

2 基本原理及方法

2.1 信噪比计算模型

信噪比是指图像区域内目标源信号和噪声的比值,是描述成像质量的重要指标,可以作为目标源检测的重要条件.

CCD (Charge-Coupled Device)图像上,一个目标源信号^[6]为

$$S = S_0 q_e T_{\text{int}}, \quad (1)$$

其中, q_e 为CCD量子效率, T_{int} 为有效曝光时间, S_0 为单位时间内接收到的目标源光子量^[3],表达式为

$$S_o = A_{\text{eff}}\tau_{\text{optics}}\tau_{\text{path}}N_010^{-0.4V_m}, \quad (2)$$

其中, A_{eff} 为望远镜有效口径, V_m 为目标源视星等, τ_{optics} 为透光率, τ_{path} 为光程透过率, N_0 为带内辐射太阳常数^[3], 取 $5.79 \times 10^{10} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

CCD将电信号转换为数字信号读出时, 存在增益和读出噪声. 本文增益在计算时取 $2.1 \text{ e}^{-1}/\text{ADU}$, 噪声主要来自目标源的光子噪声、读出噪声 N_R 、暗流噪声 N_D 和天光背景噪声 N_B . 天光背景噪声^[3]表示天光背景信号的大小, 可根据天光背景亮度计算,

$$N_B = q_e\Omega A_{\text{eff}}\tau_{\text{optics}}\tau_{\text{path}}N_010^{-0.4V_B}, \quad (3)$$

其中, Ω 表示每像元立体角大小, V_B 表示天光背景亮度.

用 n_p 表示目标源在CCD图像上的像元数, 总噪声^[6]为

$$N = \sqrt{S_o q_e T_{\text{int}} + (N_B T_{\text{int}} + N_D T_{\text{int}} + N_R^2)n_p}, \quad (4)$$

由(1)–(4)式得到信噪比SNR的计算模型:

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{S_o q_e T_{\text{int}}}{\sqrt{S_o q_e T_{\text{int}} + (N_B T_{\text{int}} + N_D T_{\text{int}} + N_R^2)n_p}}. \quad (5)$$

2.2 小行星光度模型

1985年IAU (International Astronomical Union)协议采用由Bowell等人提出的双参数(H, G)星等系统来定义小行星的绝对星等^[6], 2010年在此基础上Muinonen等人提出了3参数(H, G_1, G_2)星等系统^[7]. 这些模型在仿真中使用差异不大, 因此本文选用较为简单且广泛使用的双参数(H, G)星等系统作为小行星的星等模型. H 表示小行星的绝对星等, 是小行星距离太阳、地球1 au, 且相位角为 0° 时的归算星等; G 为斜率参数(Slope parameter), 其值取决于小行星表面粒子对光的散射方式^[7]; V 表示小行星的视星等, 是观测者观测到的星等亮度或CCD系统得到的星等亮度, 小行星的视星等是关于绝对星等、日心距、地心距和太阳相位角的函数^[4]:

$$V = H + 5 \lg r \Delta - 2.5 \lg [(1 - G)\phi_1(\alpha) + G\phi_2(\alpha)], \quad (6)$$

其中, r 和 Δ 分别为小行星日心距和地心距, α 为相位角, 通常假设 $G = 0.15$ ^[7], ϕ_1 、 ϕ_2 为相位函数,

$$\phi_i = W\phi_{iS} + (1 - W)\phi_{iL}, \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

通常取 $W = 0$, 近似为:

$$\phi_i = \phi_{iL} = e^{-A_i \tan(\alpha/2)^{B_i}}, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

其中, $A_1 = 3.332$ 、 $A_2 = 1.862$ 、 $B_1 = 0.631$ 、 $B_2 = 1.218$.

小行星的绝对星等由其直径和反照率决定^[4], 具体关系如(9)式所示:

$$H = 15.618 - 5 \lg D - 2.5 \lg P_v, \quad (9)$$

其中, D 为小行星直径, 单位为km; P_v 为小行星的表面反照率, 本文中取 $P_v = 0.14$ ^[3].

2.3 观测效能评估方法

2.3.1 方法概述

本文使用仿真的方法对近地小行星的观测效能进行评估. 计算仿真观测时模拟样本库中目标的信噪比, 将其作为目标检测指标, 设定检测条件用于目标检测, 定义评价指标对近地小行星的观测效能进行评估; 基于已知近地小行星轨道数据和尺度分布模型, 构建近地小行星轨道数据模拟样本库; 利用近地天体望远镜开展观测仿真, 选取不同观测站进行分析, 对其在不同观测站对近地小行星的观测效能进行定量评估, 同时对比分析其对不同尺寸目标的观测效能.

2.3.2 评价指标定义

望远镜的观测效能体现在对近地小行星搜索的完备性上, 本文定义近地小行星的检测覆盖率为评价望远镜的观测效能. 噪声的存在不可避免地使探测器的可探测范围受到限制, 按 3σ 判则, 只有大于噪声均方根值3倍的部分才可判定为信号^[8]. 设目标源检测条件为 $\text{SNR} > 3$, 当满足该条件时, 认为目标源被检测.

n 天内近地小行星的检测覆盖率为:

$$\text{检测覆盖率} = \frac{n\text{天内累积检测数量}}{\text{总数量}},$$

其中, 累计检测数量表示 n 天内至少一次满足检测条件被检测出的近地小行星数量, 同一个目标多次检测不重复计算.

2.3.3 关键影响因素

地基望远镜测站受到可观测晴夜数、夜天光背景、视宁度和大气透明度等因素的影响. 因此, 同一个望远镜放置在不同的观测站, 其观测效能有很大差异, 其中本文主要考虑的影响因素为视宁度、天光背景、测站地理纬度和大气消光系数.

视宁度描述大气的稳定性. 望远镜成像时曝光时间达到秒级以上时, 通过不同波前的星象光斑叠加成一个圆面, 其半径大小取决于视宁度^[8]. 视宁度越小成像半径越小, 其与小行星的运动速度共同决定目标源在图像上的像元数.

天光背景描述观测点的夜天光背景亮度, 通常用每平方角秒的天光背景相当于多少星等的亮度来表示, 星等值越大则表明背景亮度越暗. 天光背景受城市灯光和月光明暗的影响. 天光背景越暗背景噪声越小.

此外, 对于特定的目标, 观测站的地理纬度直接决定观测目标的天顶距, 天顶距越小, 穿过的大气厚度越小. 不同地理位置的大气消光系数不同, 其大气质量也不同, 共同影响目标的光程透过率.

3 近地小行星轨道数据模拟

3.1 已知近地小行星轨道数据分布

国际小行星中心(Minor Planet Center, MPC)发布了目前已知近地小行星的轨道数据, 本文使用其发布的Xephem格式数据, 共包括18169颗近地小行星. 图1中红色部分是已知近地小行星轨道半长轴、偏心率、轨道倾角的分布.

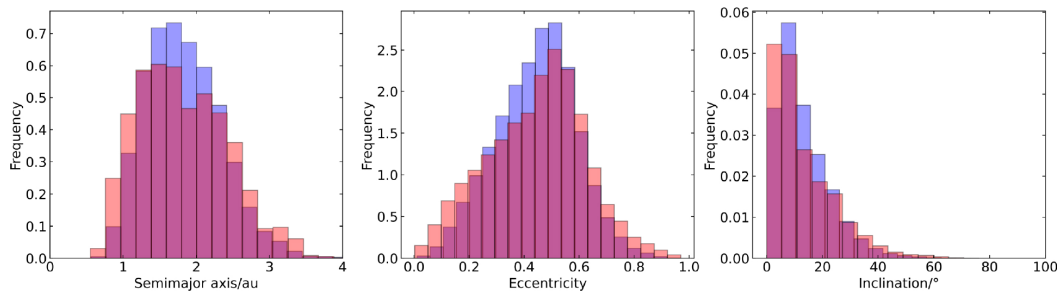


图1 近地小行星(Near-Earth Asteroids, NEAs)的半长轴、偏心率、轨道倾角分布对比图(红色: 已知NEAs, 蓝色: 模拟NEAs)

Fig.1 Comparison between semimajor axis, eccentricity and inclination distribution of NEAs (red: known NEAs, blue: simulation NEAs)

3.2 近地小行星轨道数据样本模拟

近地小行星的数量和直径存在统计相关性, Stokes等^[2]给出了近地小行星数量关于直径的累积分布函数:

$$N(> D) = 942D^{-2.354}, \quad (10)$$

其中, D 表示小行星的直径, 单位为km; N 表示大于 D 的近地小行星累积数量.

如图2所示, 虚线为尺度模型中近地小行星绝对星等的累积分布, 曲线为已知近地小行星绝对星等的累积分布. 绝对星等亮于17.75等即直径大于1 km的目标探测已接近完备, 直径大于140 m (绝对星等小于22等)的目标绝大多数未被检测(完备率约30%)^[9], 而直径更小的目标探测完备率更低. 由于目前已知近地小行星轨道数据中直径参数分布与模型预估分布不符, 因此本文对近地小行星的轨道数据样本进行了扩展, 以获得接近实际分布的近地小行星轨道数据模拟样本.

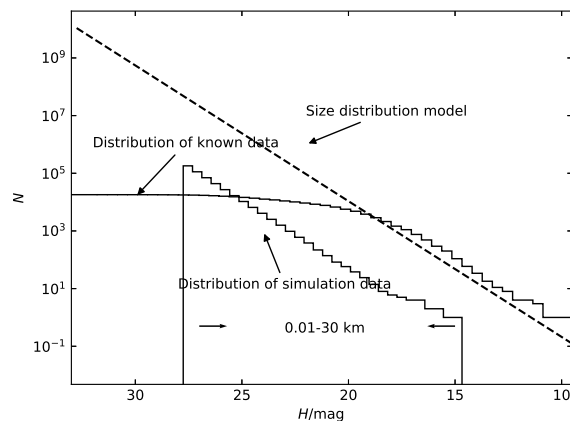


图2 NEAs绝对星等累积分布图

Fig.2 Cumulative distribution of NEAs

为保证模拟数据中近地小行星的半长轴、偏心率、轨道倾角等参数的分布与观测到的样本分布一致, 采用插值法对数据进行扩展, 扩展后数据的轨道半长轴、偏心率、

轨道倾角分布如图1中蓝色部分所示. 图3是实测和模拟近地小行星样本的轨道半长轴和偏心率分布, 其中(a)、(b)分别为已知近地小行星和模拟近地小行星样本的情况.

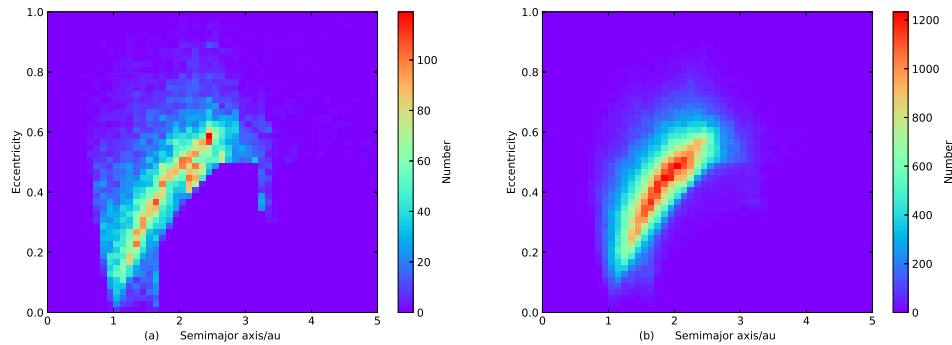


图3 (a)已知近NEAs半长轴和偏心率分布, (b)模拟NEAs半长轴和偏心率分布.

Fig. 3 (a) semimajor axis and eccentricity distribution of known NEAs, (b) semimajor axis and eccentricity distribution of simulation NEAs.

根据(10)式对绝对星等数据进行模拟, 图2中实线为模拟数据绝对星等的累积分布, 模拟近地小行星的直径范围为 $0.01 \text{ km} < D < 30 \text{ km}$. 考虑到数据样本量对仿真运行速度的影响, 本文使用符合小行星尺度分布估计模型的180970颗近地小行星轨道数据作为模拟样本库.

4 仿真结果与分析

4.1 近地天体望远镜相关参数

本文利用CNEOST进行仿真, 该望远镜采用传统施密特型光学系统, 施密特改正镜口径为1.04 m, 球面反射主镜口径为1.2 m, 焦距为1.8 m, 光学无晕视场为 3.14° . CCD量子效率在峰值时可达约90%, 在仿真中近似取80%. 本文在目标信噪比计算中使用的望远镜参数如表1.

4.2 近地天体望远镜在不同观测站对近地小行星的观测效能仿真分析

选取盱眙和冷湖两个观测站对近地天体望远镜的观测进行仿真并比较分析其对近地小行星的观测效能. 两个测站所在的地理纬度分别为北纬 32.7343° 和 38.2476° , 视宁度分别取 $2.7''$ 和 $0.75''$, 天光背景分别取21等^[10]和22等¹. 盱眙观测站测光夜r波段的消光系数取 $0.55 \text{ mag/airmass}^{[10]}$, 而冷湖观测站尚无实测数据, 考虑到冷湖站高海拔和优秀的大气条件, 参考国际上典型的测站数据^[11-13]取消光系数为 0.15 mag/airmass . 利用近地小行星轨道数据模拟样本并结合望远镜和观测站参数对近地天体望远镜在2021年1月1日至2021年1月31日的观测进行仿真. 在不考虑有效观测时间的前提下, 过滤掉与太阳角距小于 30° 及南纬 30° 以南的目标, 曝光时间设为60 s. 结果如图4所示, 随着观测时间的增加, 对模拟样本库中近地小行星的检测覆盖率不断提高, 近地天体望远镜在盱眙和冷湖测站31 d内对近地小行星的检测覆盖率分别为0.038%和0.236%, 在冷湖对近地小行星的观测效能比在盱眙提高了5.21倍.

¹<http://china-vo-product-public.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/allsky/lenghu/gifs/index.html>.

表 1 近地天体望远镜相关参数
Table 1 The parameters of CNEOST

Parameter	Value
$A_{\text{eff}}/\text{m}^2$	0.715
$\tau_{\text{optics}}(\%)$	80
$N_{\text{R}}/(\text{e}^{-1} \cdot \text{p}^{-1})$	7
$N_{\text{D}}/(\text{e}^{-1} \cdot \text{p}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0001
$\Omega/''$	1.028
$q_{\text{e}}(\%)$	80
T_{int}/s	60

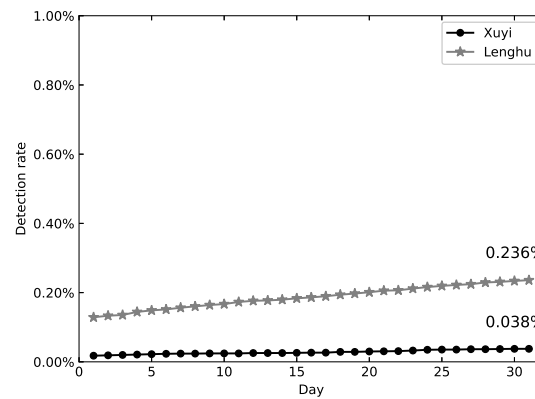


图 4 不同测站NEAs检测覆盖率

Fig. 4 Detection rate of NEAs in different stations

4.3 近地天体望远镜对不同尺寸近地小行星的观测效能评估

不同直径的近地小行星对地球的威胁程度不同. 为评估近地天体望远镜在不同观测站下对不同威胁程度近地小行星的观测能力, 我们将近地小行星分为5个区间, 分别为 $D \leq 0.03 \text{ km}$ 、 $0.03 \text{ km} < D \leq 0.1 \text{ km}$ 、 $0.1 \text{ km} < D \leq 0.3 \text{ km}$ 、 $0.3 \text{ km} < D \leq 1 \text{ km}$ 、 $D > 1 \text{ km}$. 图5统计了近地天体望远镜在盱眙和冷湖观测站对不同尺寸近地小行星的检测情况.

在盱眙观测站近地天体望远镜对这5个区间的近地小行星检测覆盖率分别为0.02%、0.12%、1.93%、3.7%、40%, 而在冷湖观测站其对这5个区间的近地小行星检测覆盖率分别为0.14%、1.07%、7.46%、12.96%、40%. 观测系统对近地小行星的探测能力取决于目标的视亮度, 而目标视亮度与其直径相关. 对于直径大于1 km的近地小行星, 近地天体望远镜在冷湖观测站与盱眙观测站观测效能相当, 而对直径1 km以下的目标观测效能冷湖均优于盱眙观测站.

在冷湖观测站对 $D \leq 0.03 \text{ km}$ 、 $0.03 \text{ km} < D \leq 0.1 \text{ km}$ 、 $0.1 \text{ km} < D \leq 0.3 \text{ km}$ 、 $0.3 \text{ km} < D \leq 1 \text{ km}$ 近地小行星观测效能比在盱眙分别提升了6.00倍、7.92倍、2.87倍、2.50倍. 对于小直径的暗弱目标, 在相同的望远镜观测能力下, 观测站的天文条件对观测

效能产生较大影响. 因此, 在冷湖观测站由于其优越的地理位置和观测条件, 对小尺寸近地小行星的观测优势显著, 更有利于搜索目前尚未发现的目标.

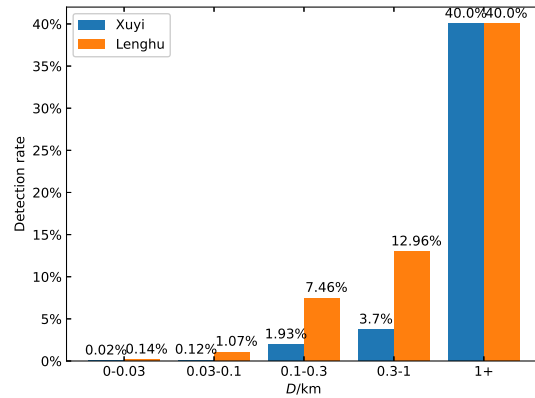


图 5 不同测站下不同尺寸大小NEAs的检测覆盖率

Fig. 5 Detection rate of NEAs with different sizes in different stations

5 总结与讨论

地基光学望远镜由于受到测站条件的制约, 未能发挥其优越的观测效能. 本文提出一种综合望远镜参数和测站天文条件, 基于近地小行星模拟样本库的观测效能评估方法, 对近地小行星在不同测站的观测效能进行评估研究. 主要内容总结如下:

(1)结合目标信噪比模型和小行星光度模型, 设定 $SNR > 3$ 为目标检测条件并定义近地小行星检测覆盖率作为观测效能评价指标;

(2)基于已知近地小行星的轨道数据分布和尺度分布模型, 构建了直径范围在0.01–30 km的近地小行星轨道数据模拟样本库, 用于对近地天体望远镜的观测开展仿真;

(3)通过仿真近地天体望远镜在盱眙和冷湖两个观测站的观测, 比较其对模拟样本库中近地小行星的观测效能, 得出在不考虑有效观测时间的前提下, 近地天体望远镜在冷湖观测站对近地小行星的观测效能优于在盱眙观测站, 尤其是对小尺寸近地小行星的观测优势更显著, 更有利于搜索尚未发现的目标, 提高近地小行星搜索效率.

本文的方法不仅可用于不同地基观测站近地小行星观测效能的评估, 还为天基望远镜开展观测效能分析提供了新的思路. 由于本文的研究目标是对两个观测站间近地小行星的观测效能进行比较, 且考虑到计算资源限制, 对仿真模拟做了大量简化, 仅考虑测站均为全年测光夜的情况, 与实际观测存在一定差异.

将近地天体望远镜的历史数据与仿真数据对比, 发现对直径0.3 km以上近地小行星的仿真结果能较好匹配该区间的实际探测, 可认为该模型可适用于不同观测站间的比较. 仿真使用的近地小行星模拟样本库中直径较小的目标数量占比远高于已知数量, 小尺寸区间的统计结果存在较大的差异, 两者差异主要源于: (1)有效观测时间和巡天策略设置; (2)每夜天区覆盖; (3)观测条件选取等. 由于实际情况中如视宁度和天光背景等参数随时间发生变化, 下一步可根据实测采用分布函数的形式作为仿真的输入. 还可在模型中增加可观测晴夜数、观测天区分布等未考虑因素, 对更长时间的观测进行仿真进一

步提高评估的可信度, 为提高望远镜对近地小行星监测效率提供更多参考.

参考文献

- [1] Mainzer A, Bauer J, Grav T, et al. *ApJ*, 2011, 731: 53
- [2] Stokes G H, Yeomans D K, Bottke Jr W F, et al. Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for Near-Earth Objects to Smaller Limiting Diameters. Washington, DC: NASA, 2003: 20
- [3] Stokes G H, Barbee B W, Bottke Jr W F, et al. Update to Determine the Feasibility of Enhancing the Search and Characterization of NEOs. Washington, DC: NASA, 2017: 111
- [4] Michelsen R, Haack H, Andersen AC, et al. International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul: IEEE, 2003: 247
- [5] 王新涛, 郑建华, 李明涛. *光学精密工程*, 2020, 28: 2563
- [6] Bowell E. *Handbook of CCD Astronomy*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 36
- [7] Muinonen K, Belskaya I N, Cellino A, et al. *Icar*, 2010, 209: 542
- [8] 王传晋, 叶彬浔. *天文可见光探测器*. 北京: 中国科学技术出版社, 2013
- [9] Granvik M, Morbidelli A, Jedicke R, et al. *Nature*, 2016, 530: 303
- [10] Zhang H H, Liu X W, Yuan H B, et al. *RAA*, 2013, 13: 490
- [11] 胡波. *天文学报*, 2010, 51: 422
- [12] Hu B. *ChA&A*, 2011, 35: 199
- [13] Jin W J, Bai J M, Yao Y Q. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2015, 10: 748

Ground-Based Observation Efficiency Evaluation of Near-Earth Asteroids in Different Observation Stations

MAO Yu-meng^{1,2} ZHAO Hai-bin^{1,3} LI Bin^{1,2}

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

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

ABSTRACT The searching completion of Near-Earth Asteroids (NEAs) is the premise of planetary defense. In order to quantify the observation efficiency of NEAs, a method for evaluating the observation efficiency is proposed, which includes telescope parameters and station conditions. Considering the signal-to-noise ratio of target and the NEAs visibility model, detect condition and evaluation index are defined to evaluate the observation efficiency. Then, based on the NEAs orbit data and the size distribution model, the simulated NEAs orbit database is established. Finally, two observation stations, Xuyi and Lenghu, are chosen for simulation analysis. The results show that without considering the effective observation time, the observation efficiency of CNEOST (China Near-Earth Object Survey Telescope) in Lenghu increased by 5.21 times than in Xuyi within one month. Compared to Xuyi station, Lenghu station has more advantages in observing smaller NEAs. It could also provide better observation efficiency for targets not found.

Key words telescopes, near-earth asteroids (NEAs), observation efficiency, methods: analytical