

近地小行星发现数目与发现场景的统计分析*

胡寿村^{1,2,3†} 赵海斌^{1,2,3} 季江徽^{1,2,3}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)

(3 中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 近地小行星是一类可能对地球安全造成潜在威胁的太阳系小天体,目前绝大部分的近地小行星是由地基望远镜发现的,且数目仍在不断增加.为了对我国未来开展近地小行星发现监测提供参考和借鉴,利用国际小行星中心公开的数据库对所有近地小行星首次发现时刻的观测资料开展了多维度统计分析.发现望远镜探测能力的限制会对近地小行星的发现造成选择效应,导致不同轨道类型近地小行星发现的相对比例逐年变化且与直径有关.另外,结合数值模拟获得的轨道数据,对近地小行星首次发现时的观测场景进行了还原,获得了发现时刻近地小行星位置在不同天球坐标系的分布,分析了其分布特征与季节、测站纬度和小行星直径的依赖关系.最后,通过分析数据定量考察了太阳、月球和银道面对近地小行星发现的影响,发现地基望远镜一般难以发现来自太阳方向 90° 范围内直径140 m以下的近地小行星,并且随着小行星直径的减小该限制范围也将变大;月光污染对近地小行星发现的影响也非常显著,望月前后几天的观测限制可导致约29%的目标无法被发现,而且分析表明农历上半月发现的目标一般比下半月发现的更难以被跟踪观测;银道面特别是银心方向会对近地小行星发现产生影响,使得黄道面附近存在与季节相关的观测“盲区”.

关键词 小天体: 近地小行星, 巡天, 方法: 统计, 轨道力学

中图分类号: P185; **文献标识码:** A

1 引言

小行星是一类环绕太阳运行的岩质或金属小天体,蕴含有关于太阳系早期形成历史的重要信息.对小行星的研究有助于回答太阳系的形成历史以及地球上水和生命的起源问题,而小行星丰富的矿产资源以及相对低成本的可达性也使得其可作为未来人类进行太空资源开发的目标^[1-2].小行星的分布非常广泛,运动范围覆盖了从水星轨道内部到海王星轨道以外的广大区域.其中近地小行星

星是一类近日距小于1.3 au的小行星,按轨道类型可进一步分类为:阿波罗型(半长径 $a > 1.0$ au,而近日距 $q \leq 1.017$ au)、阿莫尔型(q 在1.017–1.3 au之间)、阿登型($a < 1.0$ au、远日距 $Q \geq 0.983$ au)和阿蒂娜型($Q < 0.983$ au).根据国际小行星中心(<https://www.minorplanetcenter.net/>,以下简称MPC)的汇总资料,截至2021年8月1日人类已发现约111万颗小行星,其中近地小行星有26250颗(其中有正式编号的仅占11.1%),占总数的

2021-11-15收到原稿, 2021-12-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11873098、11633009),中国科学院先导专项B类(XDB41000000),空间碎片与近地小行星防御科研项目(KJSP2020020204、KJSP2020020102、KJSP2020020101),民用航天预研项目(D020304、D020302),中国载人航天工程巡天空间望远镜科学专项(CMS-CSST-2021-B08)和紫金山天文台小行星基金会资助

[†]hushoucun@pmo.ac.cn

2.4%. 阿波罗型、阿莫尔型、阿登型和阿蒂娜型分别占近地小行星总数的55.6%、36.6%、7.7%和0.1%.

由于近地小行星轨道与地球轨道交叉或接近,在大行星引力摄动、雅尔可夫斯基效应等的作用下其轨道会发生变化从而产生与地球相撞的可能,给地球安全带来威胁^[3]. 最小轨道交会距离(Minimum Orbit Intersection Distance, MOID)定义为两条二体开普勒轨道的最近距离. 若某颗近地小行星与地球的MOID值小于0.05 au (约20个地月距离)且绝对星等 H 不暗于22等(对应直径 D 约140 m, 换算公式 $D = 1329 \times 10^{-0.2H} / \sqrt{p_v}$, p_v 为小行星几何反照率, 取值为0.15, D 的单位为km^[4]), 该小行星则被称为潜在威胁小行星(Potentially Hazardous Asteroid, PHA). 目前已发现直径1 km以上的近地小行星有941颗, 140 m以上的有9519颗, 其中PHA有2262颗.

研究表明, 直径1 km以上的小行星撞击地球后会引发海啸以至于改变全球气候, 人类将面临灭绝的风险, 此类事件大约每70万年发生一次, 而直径140 m的小行星撞击地球将产生区域性的灾害, 大概每3万年发生一次^[5-6]. 2013年2月15日发生于俄罗斯车里雅宾斯克的小行星撞击事件造成了1500多人受伤, 而“罪魁祸首”是一颗直径仅约19 m的小行星^[7]. 这次陨击事件是自1908年通古斯大爆炸以来在地球上发生的威力最大的空爆事件, 也再一次证实了近地小行星对地球安全所带来的现实威胁.

小行星的物质特性和动力学性质对于设计选择适当的防御方案有重要影响. 除了利用地基望远镜基于光变数据、雷达回波数据和光谱数据反演小行星的形状、自转参数、表面特性和成分性质之外, 空间探测器的抵近探测可更直接地通过科学载荷来获取小行星的性质. 目前探测过近地小行星的任务主要包括美国的尼尔-苏梅克号探测器、奥西里斯-雷克斯号探测器以及日本的隼鸟一号和隼鸟二号探测器^[8-11]. 我国的嫦娥二号在完成对月球和日地拉格朗日L2点的探测任务后于2012年12月13日近距离飞越了近地小行星图塔蒂斯, 并获取了一批科学成果^[12-15]. 另外, 美国的一个名为双小行星重定向测试(Double Asteroid Redirection Test,

DART)的任务也已发射, 预计在2022年9月底撞击一颗名为迪迪莫斯的近地双小行星的卫星并检测撞击对卫星所造成的轨道变化, 为未来实际在轨处置近地小行星开展技术验证^[16].

目前绝大多数的近地小行星是由美国的地基望远镜首次发现并跟踪观测的, 尽可能快速而完备地发现近地小行星并确定轨道是保证地球安全的首要措施. 为了对我国开展近地小行星监测、预警和防御提供参考和借鉴, 本文利用MPC公布的(截至2021年8月1日)近地小行星发现数据, 分析了不同测站、直径和轨道类型近地小行星的发现情况随时间的变化, 并结合通过完整动力学模型积分获得的小行星轨道, 对首次发现时刻的位置分布进行了统计分析, 并通过分析数据定量讨论了太阳、月球和银盘对近地小行星发现的限制.

2 近地小行星的发现数目统计

2.1 不同测站的发现数目统计

自1898年首次发现近地小行星(433) Eros以来, 一直到1950年, 全球总共累计发现的近地小行星数目也只有16颗, 随后从1951到1995年共发现了379颗. 随着多个小行星巡天观测计划的开展, 自1995年至今每年新发现的近地小行星数目持续增长. 目前绝大部分近地小行星是由位于北半球的观测台站发现的(占比达96%), 其中美国的卡特琳娜巡天计划(Catalina Sky Survey, CSS)和泛星计划(Pan-STARRS)共发现了大约19000颗近地小行星, 占总发现数目的72.4%. 南半球发现近地小行星的项目主要是赛丁泉巡天计划(Siding Spring Survey)以及位于智利托洛洛山美洲际天文台执行的一项暗能量巡天计划(Dark Energy Survey), 两者分别发现了512颗和296颗近地小行星. 我国的紫金山天文台盱眙观测站和国家天文台兴隆观测站分别发现了26颗和5颗近地小行星. 目前绝大多数的近地小行星是由地基光学望远镜发现的, 最主要的天基计划是由NASA行星科学部资助的近地天体红外巡天卫星(NEOWISE), 目前已发现362颗近地小行星. 若依照发现总数进行排序, 排名前8位的观测计划的简要介绍如表1所示, 每年发现的近地小行星情况如图1所示, 图1(左)是新增发现数目变化, 图1(右)为不同直径范围的新增发现数目变化.

表 1 近地小行星(Near-Earth Asteroids, NEAs)累积发现数排名前8位的观测计划简介
Table 1 A brief introduction to the top 8 observational programs in the cumulative number of discoveries of the NEAs

Programs	Number	Brief introduction
Catalina Sky Survey (CSS, 1998—to date)	11828	A survey program funded by NASA specifically for the discovery of asteroids and comets. Its goal is to discover more than 90% of NEAs larger than 140 m. It uses a 1.5-m telescope, a 68-cm Schmidt telescope and a 1-m follow-up telescope, located in the Santa Catalina Mountains in Tucson, Arizona.
Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS, 2010—to date)	7172	A survey program funded mainly by NASA's near-Earth object observation project. It consists of two 1.8-m telescopes with a field view of 3° located at Haleakala Observatory, Hawaii.
Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR, 1997—2017)	2479	It uses a 1-m and a 0.5-m telescope for follow-up observation. The equipments are located at the White Sands Missile Range in New Mexico
Spacewatch (1990—2018)	847	It uses 4 telescopes of apertures 0.9-m, 1.8-m, 2.3-m, and 4-m, located at Kitt Peak National Observatory in Tucson, Arizona.
Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System (ATLAS, 2015—to date)	622	It is committed to discovering near-Earth objects that may impact the Earth several days to weeks in advance, including two 0.5-m telescopes 160 kilometers apart, located at Haleakala Observatory and Mauna Loa Observatory in Hawaii.
Siding Spring Survey (SSS, 2004—2013)	521	It used a 0.5-m Schmidt telescope, located at Siding Spring Observatory in New South Wales, Australia.
Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer (NEOWISE, 2010—to date)	362	Wide-field infrared survey explorer (WISE) is a 0.4-m near-infrared space telescope funded by NASA. It was launched in 2009. After its solid hydrogen coolant depleted, it was renamed NEOWISE and continued to work.
Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT, 1996—2007)	331	A survey program run by NASA and the Jet Propulsion Laboratory (JPL) for near-Earth objects, conducted at ground-based electro-optical deep space surveillance system (GEODSS) on Hawaii, as well as at Palomar Observatory in California.

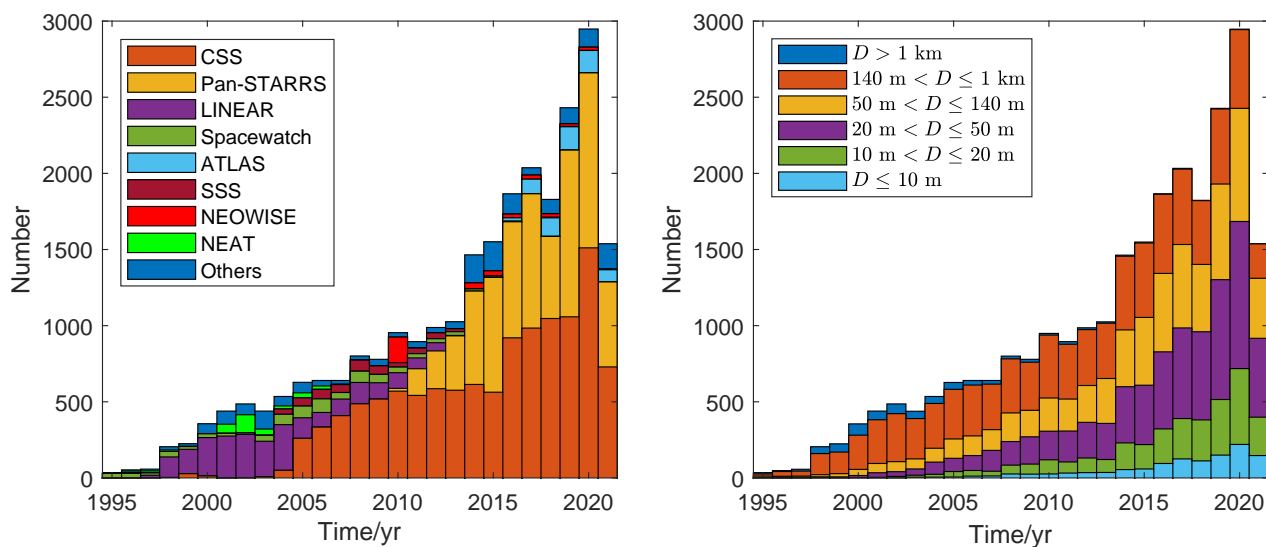


图 1 近地小行星累积发现数排名前8位的观测计划每年新发现的数目随时间的变化(左图)以及5个不同直径范围的近地小行星每年新增发现数目随时间的变化(右图), 只展示了1995年至今的发现结果.

Fig. 1 The annual change of discovered number of NEAs for the top 8 observational programs in terms of cumulative discoveries (left) and the annual change of discovered number for 5 different diameter ranges (right), showing discoveries from 1995 to present only.

图2给出了发现过近地小行星的地基测站地理位置分布(左)以及发现数目随测站经纬度的分布(右), 可见所有的测站分布在南纬 40° 和北纬 60° 之间. 若考虑发现数大于100颗的测站, 则其位置分布主要集中于4个区域: (1)美国夏威夷群岛的哈雷阿卡拉天文台和莫纳罗亚天文台; (2)美国本土的亚利桑那州图森市北部的卡特琳娜山脉、图森市西南方的基特峰国家天文台、旗杆镇的罗威尔天文台、加利福尼亚州圣地亚哥的帕洛玛山天文台以及新墨西哥州索柯洛白砂导弹靶场; (3)澳大利亚新南威尔士州的赛丁泉天文台; (4)智利托洛洛山美洲际天文台. 当前最主要用于发现近地小行星的巡天计划是CSS和Pan-STARRS^[17-18], 本文也会着重对这两个计划的发现情况进行分析.

若将所有由地基望远镜发现的近地小行星按照发现的观测计划分为由CSS发现的、Pan-STARRS发现的以及所有其他测站发现的3类, 图3(左)给出了各自发现时刻的视星等分布, 可以发现目前发现的近地小行星发现时刻的视星等总体上看在21等左右发现得最多, Pan-STARRS的更暗一些, 达到了21.5等, CSS的则在20.5等左右. 图3

(右)则给出了视星等四分位数的第1、2、3分位值(即将视星等从小到大排序, 取位于序列中第25%、50%和75%位置的值, 分别记为Q1、Q2和Q3, Q2即中位值)每年的变化. 注意到, 随着时间的推移, 每年的视星等分位值不断增长, 如中位值已从2000年的18.5等增长到2021年的20.8等, 这说明每年新发现近地小行星在发现时的平均亮度在下降.

2.2 不同直径近地小行星的发现统计

从图1(右)中给出了6个不同直径范围近地小行星每年新增发现数目随时间的变化中可以看出, 直径1 km以上的近地小行星发现数目已几乎不再增加, 直径140 m–1 km范围的最近7 yr每年新增发现数“稳定”在500颗左右, 直径50–140 m、20–50 m、10–20 m以及10 m以下的新增发现数则逐年增长. 事实上, 近期的研究表明, 绝对星等19等以下(即直径560 m以上)的近地小行星发现数量的完备性已达90%以上, 22等以下的仅发现约44%^[19]. 朱进等^[20-21]提出了短期威胁小行星的概念, 此类小行星的直径需大于10 m. 若以此为限, 则目前已发现直径10 m以上的近地小行星总数仅占理论

预测值的不到0.1%^[19]. 可见, 若要确保能对未来可能对地球造成威胁的小行星撞击事件做充分的预警, 还有大量的近地小行星尚待发现. 容易理解, 由于较大直径的目标更容易被发现, 未来新

发现近地小行星的平均直径将逐渐下降. 统计结果表明, 2000年发现的近地小行星直径的中位值大约是500 m, 而2021年发现的直径中位值已降至约40 m (参考下节图5 (c)).

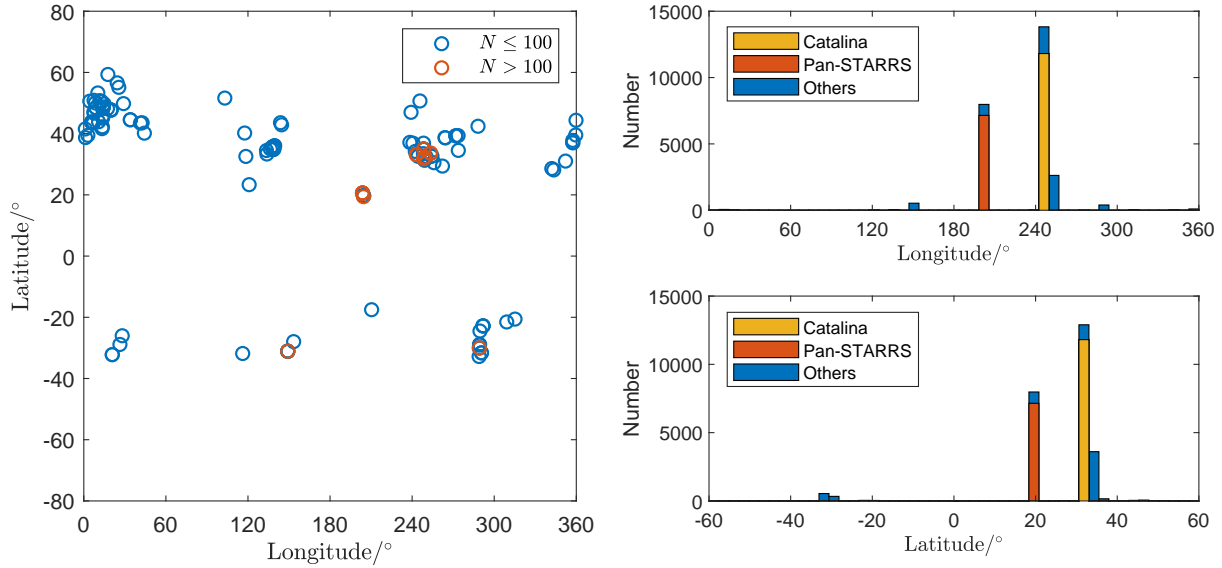


图2 近地小行星发现数目(N)小于等于100颗和100颗以上的地基测站位置分布(左)以及发现数目随测站经纬度的分布(右)

Fig. 2 The distribution of the location of ground-based observational stations with number of discoveries (N) no more than 100 and more than 100 (left) and distribution of discoveries versus latitude and longitude of the stations (right)

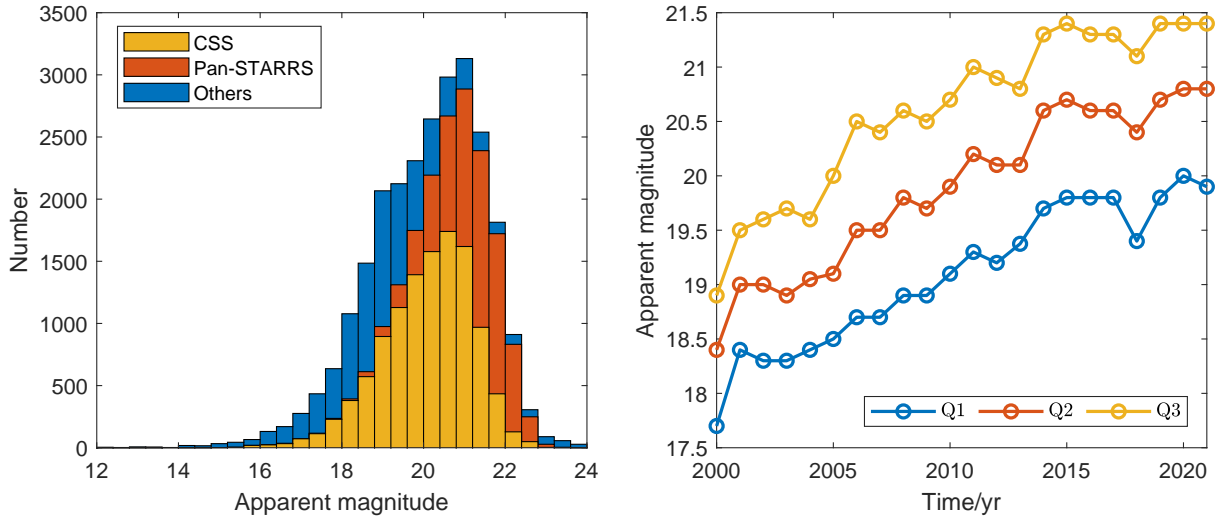


图3 CSS、Pan-STARRS以及所有其他地基测站发现的近地小行星发现时刻的视星等分布(左)以及每年的视星等分位值随时间的变化(右)

Fig. 3 The apparent magnitude distribution at the time of discovery for the NEAs discovered by CSS, Pan-STARRS and all the other ground-based stations (left) and the annual change of apparent magnitude quartiles (right)

2.3 不同轨道类型近地小行星的发现统计

图4 (左)给出了3种不同轨道类型(忽略了数量太少的阿蒂娜型小行星)的近地小行星每年发现的数目以及各自所占当年发现比例随时间的变化. 结果表明, 近些年每年发现的近地小行星各轨道类型所占比例随时间略有变化, 阿波罗型占比有所增长, 从2000年的占比47%增加到2021年的59%; 而相对而言阿莫尔型所占比例处于下降趋势, 从2000年的43%下降到2021年的31%. 另外, 图4 (右)将所有已发现的目标分为6个不同直径范围, 给出了3种轨道类型的相对比例随直径范围的变化. 容易发现, 随着直径的减小, 阿莫尔型的比例逐渐降低, 而阿波罗型和阿登型的比例逐渐增加: 1 km以上的近地小行星中阿波罗、阿莫尔和阿登型的比例分别为49%、47%和4%, 而10 m以下的比例分别为85%、2%和13%.

以上现象其实是由于望远镜的探测能力有限

导致的. 利用MPC获取的轨道根数, 在考虑完整力模型(8大行星引力摄动+日心后牛顿效应+4颗质量最大的主带小行星, 对于本文的分析精度已足够)之后可以对近地小行星的轨道进行数值积分, 并计算得其首次发现时刻的地心距(Δr). 图5 (a)给出了 Δr - D 的分布情况, 显然直径越小, 发现时刻的地心距也越小: 对于一颗直径0.1 km的小行星, 首次发现它的地心距均值约0.1 au, 而若直径为0.01 km, 则需减少至约0.01 au. 由于更大直径的目标更容易被发现, 图5 (b)-(d)给出的四分位值的变化趋势表明每年发现的近地小行星的直径以及发现时刻的地心距均值都在不断减小, 相应的绝对星等均值则在增大. 小直径的目标在发现时的地心距较小以及每年目标发现时地心距越来越小的规律均使得对应的小行星轨道越来越不容易满足阿莫尔型的定义标准($q > 1.017$ au), 使得相应的阿莫尔型占比降低而相应的阿波罗型和阿莫尔型占比增大, 从而解释了图4中的现象.

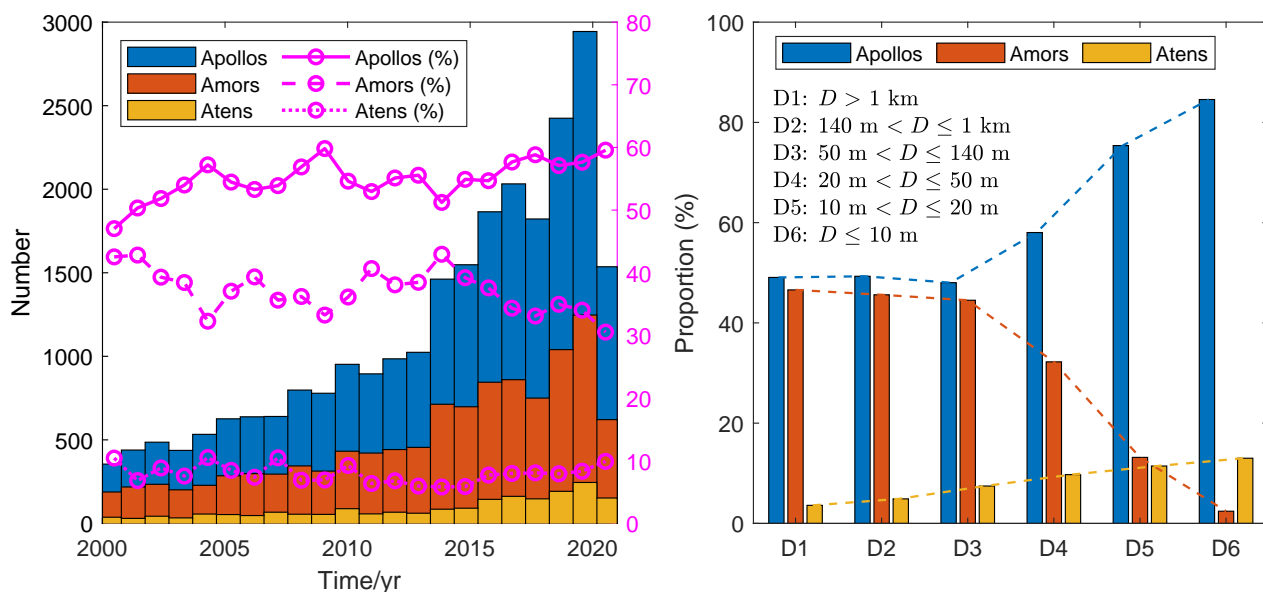


图4 不同轨道类型的近地小行星每年新增发现的数目和所占比例随时间的变化(左)以及各轨道类型所占百分比随直径范围的变化(右)

Fig. 4 The annual change of the numbers and proportions of newly-discovered NEAs with different orbital types (left) and the change of the proportions of different orbital types over diameter range (right)

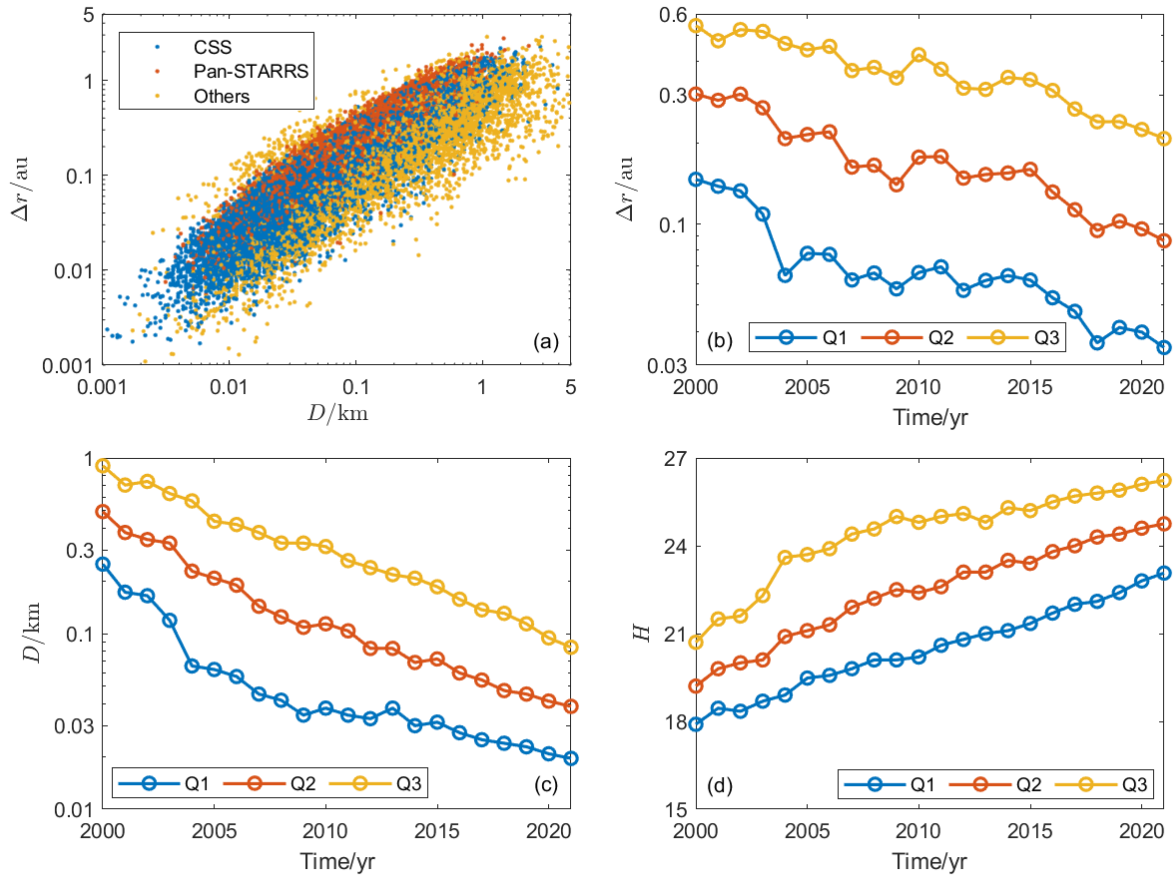


图5 近地小行星发现时刻的地心距随直径的分布(a)以及发现时的地心距, 直径和绝对星等 H 的四分位值随时间的变化(b)–(d).

Fig. 5 The distribution of geocentric distance with diameter at the time of discovery of the NEAs (a), and change of the quartiles of geocentric distance, diameter and absolute magnitude H at the time of discovery (b)–(d).

3 近地小行星发现时刻的位置分布

3.1 地平坐标系下的位置分布

地平坐标系是与地基望远镜指向最直接相关的参考系, 可用方位角 A 和高度角 h (或天顶距 z) 进行描述, 这里方位角定义为由北点沿地平经圈向东起量(因此方位角在 0° – 180° 范围为地平坐标系下的东半球), 高度角则从地平往天顶方向起量(天顶距则相反).

图6分别给出了由CSS和Pan-STARRS发现的近地小行星在发现时刻的天球位置分布(图中的 t 为发现时刻的测站地方时, 可由发现时刻的协调世界时与测站地理经度转换而来, 上半夜和下半夜发

现的目标分别标识了不同的颜色), 采用了相对于发现测站的地平坐标系, 极坐标系下的矢径和幅角分别表示天顶距和方位角. 结果显示CSS和Pan-STARRS发现的小行星方位角和天顶距的分布规律均不相同, 这表明两者采用了不同的巡天策略. 两者的方位角分布均在南天方向较为聚集, 这是由于测站位于北半球, 一般而言南天方向的黄纬较低, 更容易发现近地小行星(近地小行星的轨道倾角一般较小, 因此主要分布在黄道面附近). 从方位角分布来看, CSS发现的目标分布总体较为随机一些, 而Pan-STARRS在 0° 、 90° 、 180° 和 270° 方向均有不同程度的聚集.

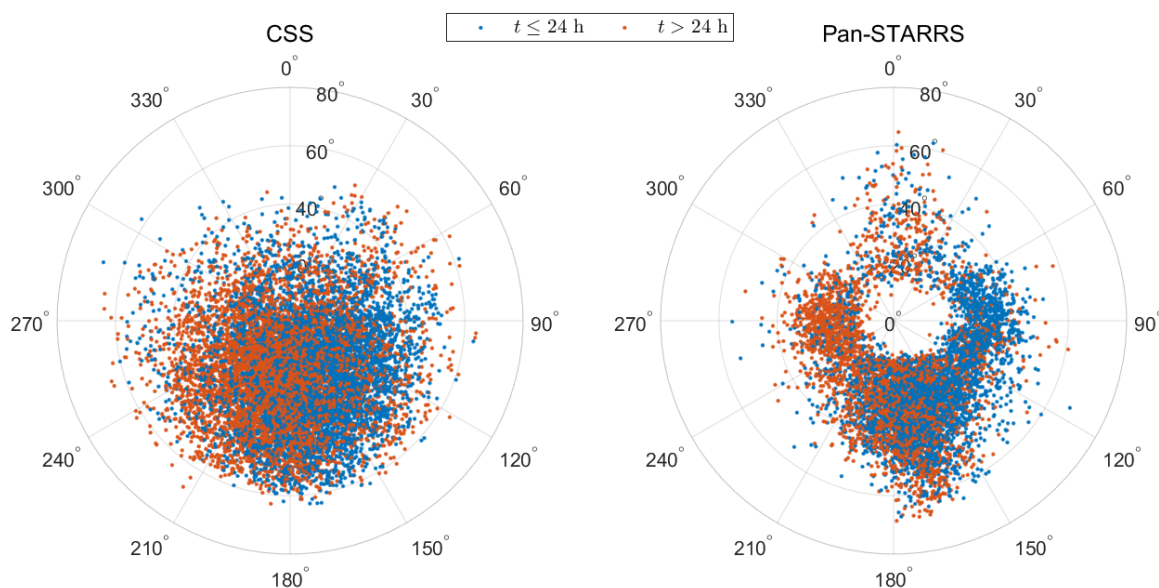


图 6 由CSS和Pan-STARRS发现的近地小行星在发现时刻相对测站的地平方位角和天顶距分布(中心为天顶方向, 上方为北点方向)

Fig. 6 The distribution of the azimuth and zenith distance of the NEAs discovered by CSS and Pan-STARRS relative to the stations at the time of discovery (the center is the zenith direction, and the upper is the north point direction)

从高度角(与天顶距互余)分布来看, 统计结果表明, CSS和Pan-STARRS发现的目标中分别有99.6%和98.9%的比例在发现时高度角大于 30° 、87.0%和89.4%发现时高度角大于 45° . 相较于Pan-STARRS, CSS的分布较为随机, 而Pan-STARRS由于军事原因被限制观测敏感的人造目标, 因此在距离天顶约 10° 的天区存在一个“盲区”¹.

另外, 图6中的结果从统计上看CSS和Pan-STARRS发现的目标中分别有51.0%和51.1%发现于上半夜, 因此这两个巡天计划在上半夜和下半夜发现的小行星数目在总体上无太大差异. 小行星的相位角定义为太阳和小行星相对于测站的夹角(这里可以将测站位置近似为地心位置), 当相位角为 0° 时具有最好的观测条件. 图6中的结果表明上半夜发现的目标主要集中在地平坐标系下的东半天球, 而下半夜发现的主要集中于西半天球. 这是由于上半夜的东半天球和下半夜的西半天球具有更好的相位角条件, 更容易发现目标.

为了更直观地比较不同方位处小行星发现的

数目, 定义发现数密度为单位天球面积上发现的近地小行星数目. 显而易见, 实际观测获得的数密度分布受近地小行星的轨道分布、尺寸分布、望远镜极限星等、望远镜所在位置、观测日期(决定了地球的空间位置和望远镜所能够覆盖的天区)甚至天气等不确定性因素的影响. 事实上, 图6的总体分布结果掩盖了很多细节, 特别是没有体现季节的差异. 若以方位角为横坐标, 高度角为纵坐标, 图7给出了4个不同季节数密度(已做归一化)的分布结果. 图中第1行和第2行分别为CSS和Pan-STARRS的结果, 从左到右4列分别对应春夏秋冬4个季节(春季和秋季定义为春分日和秋分日前后45 d, 夏季和冬季定义为夏至日和冬至日前后45 d).

图7的结果表明CSS和Pan-STARRS发现的目标在地平坐标系下表示的数密度分布各自随季节存在明显差异. CSS使用的测站位于北纬 32.3° , 不同季节发现目标的高度角分别集中于春、秋季约 60° 以及夏、冬季约 45° 和 75° 的区域. Pan-STARRS的测站位于北纬 20.6° , 距离赤道更近, 因此高度角

¹<https://en.wikipedia.org/wiki/Pan-STARRS>

分布随季节的变化更不明显. 然而, 由于巡天策略的不同, 不同于CSS的结果, Pan-STARRS的数密度分布在方位角方向存在多中心聚集现象, 特别是在冬季表现得尤为明显(分别在方位角 0° 、 90° 、

180° 和 270° 方向存在聚集, 这解释了图6中Pan-STARRS方位角的聚集分布现象). 下一节将在黄道坐标系下继续讨论小行星发现时的位置分布规律.

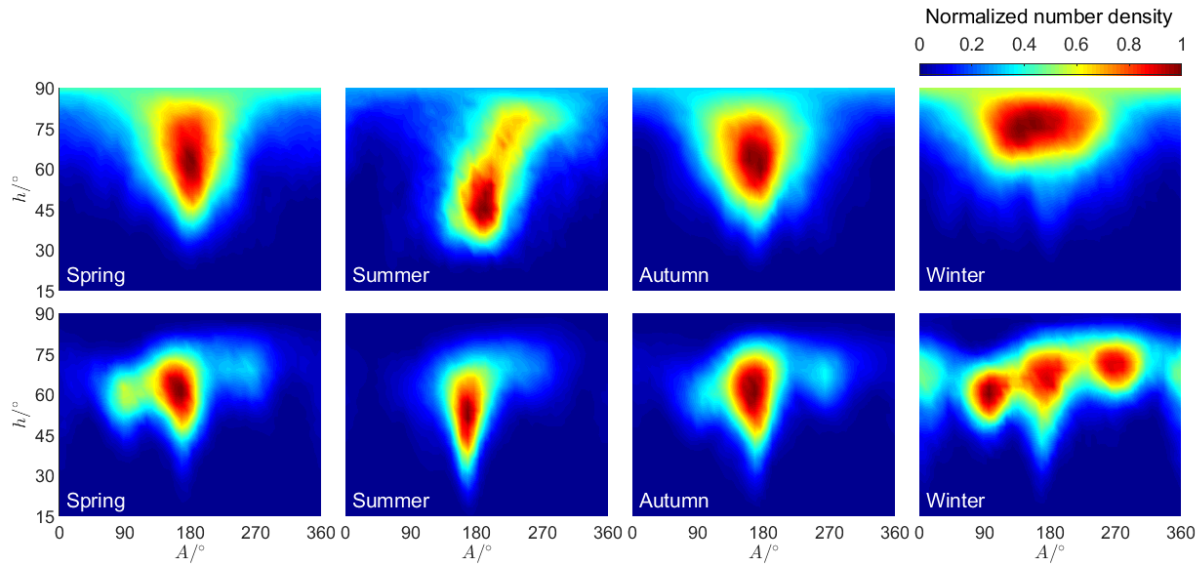


图7 CSS (第1行)和Pan-STARRS (第2行)发现的近地小行星在天球上的归一化数密度随方位角和高度角的变化, 从左到右分别对应春夏秋冬四季.

Fig. 7 The normalized number density of the NEAs on the celestial sphere discovered by CSS (the 1st row) and Pan-STARRS (the 2nd row) varies with the azimuth and altitude angles, corresponding to the four seasons of spring, summer, autumn and winter from left to right.

3.2 惯性天球坐标系下的位置分布

地平坐标系适合用于描述望远镜的观测指向, 但描述小行星的位置时更适合用惯性天球坐标系(如赤道和黄道坐标系). 因为如果同一颗小行星在上半夜和下半夜某时均被观测到, 那么在站心地平坐标系下两者的坐标很可能有很大的变化(取决于间隔时间). 而若转换到站心黄道坐标系, 则虽然测站随地球自转和公转而移动, 但往往变化范围远远小于测站与小行星的距离, 而且在几个小时内小行星的位置一般不会有太大的变化, 因此采用惯性天球坐标系更适用于描述小行星发现时的“本征”分布规律.

将小行星发现时刻的位置坐标转换到J2000历元地心赤道坐标系或黄道坐标系来表示(位置用赤

经 α 、赤纬 δ 或黄经 λ 、黄纬 β 描述, 在绝大部分情况下地球质心到测站的距离远远小于发现时刻小行星的地心距, 因此用地心或站心作为原点对本文的统计性结果无影响), 数密度分布如图8所示. 图中结果表明数密度在赤道坐标系和黄道坐标系的分布无明显区别, 区别只在于黄赤交角的转换, 因此这里只讨论黄道坐标系下的数密度变化. 容易发现, 近地小行星发现时刻的位置均主要分布于黄道面附近, 但仍然随着季节变化有所漂移, 这反映了测站纬度所带来的影响. 事实上, 测站纬度的影响可体现在不同季节所发现的目标具有不同的轨道倾角分布中. 例如, 一般来说CSS和Pan-STARRS夏季发现的近地小行星轨道倾角分布比冬季更高. 由于CSS的纬度更高, 因此这一点的影响会更为明显. 图9给出了两者夏季和冬季发现目标的轨道倾角*i*

的分布, CSS夏季和冬季的倾角分布峰值分别在 7° 和 3° 左右, 而Pan-STARRS分别在 7° 和 5° 左右. 这一现象事实上导致了已发现的近地小行星的轨道倾角分布存在季节上的“选择效应”.

另外, 图8的结果显示聚集处的黄经随季节变化, 这是由于地球的运动导致的. 容易注意到夏季和冬季的分布存在两个聚集区, 分别在以 270° 和 90° 为中心的两侧. 这主要是由于银道面的银心方

向和反银心方向的影响导致的, 具体的讨论见下一节. 容易理解, 一般而言两个聚集区中左侧的目标主要是上半夜发现的, 而右侧则主要为下半夜发现的. 由于银道面对春秋两季的观测影响较小, 因此只有一个聚集区. 总之, 近地小行星发现时刻的位置在黄道系下的分布是综合了近地小行星轨道分布, 望远镜指向的季节变化以及银道面位置等多种因素的结果.

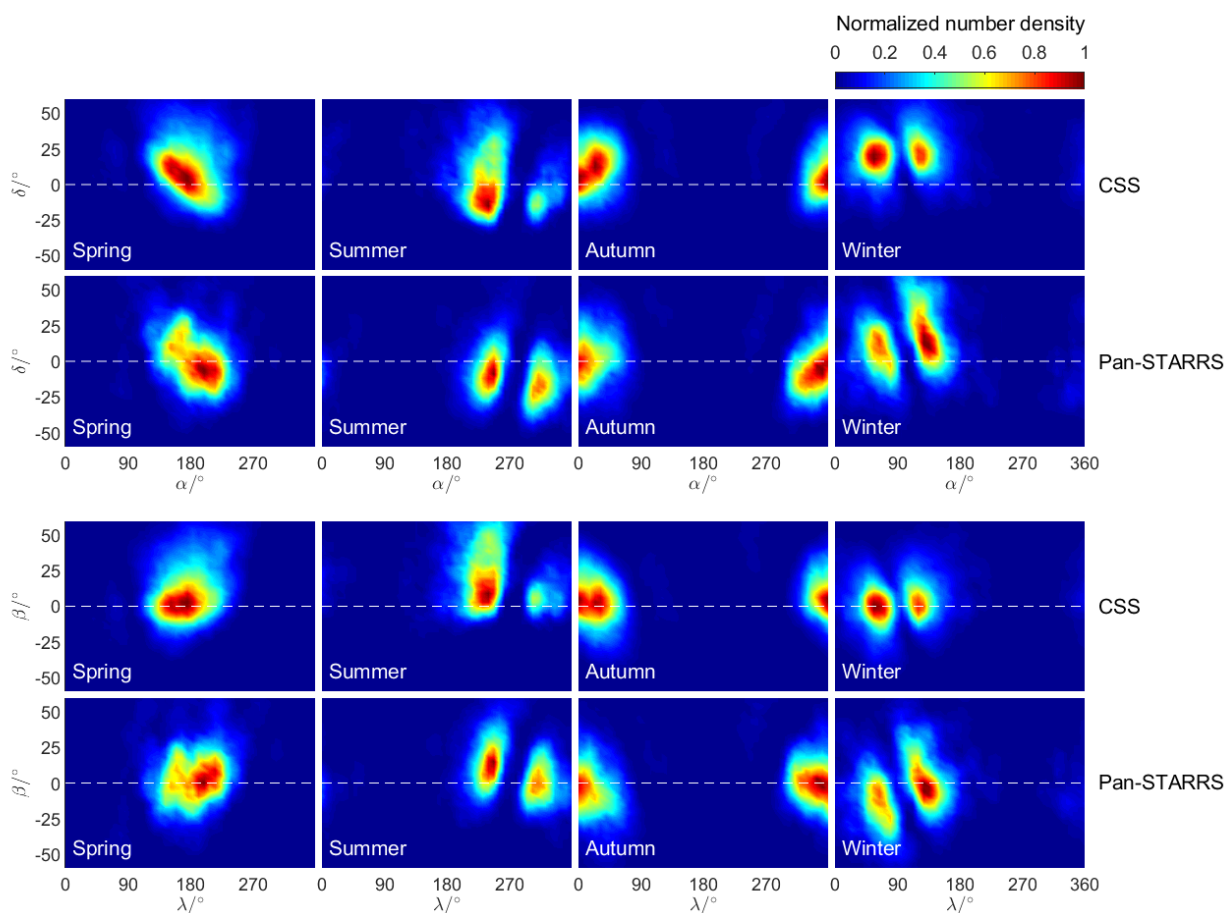


图 8 CSS (第1行)和Pan-STARRS (第2行)发现的近地小行星在天球上的归一化数密度随赤经赤纬和黄经黄纬的分布, 从左到右分别对应春夏秋冬四季.

Fig. 8 The normalized number density of the NEAs on the celestial sphere discovered by CSS (the 1st row) and Pan-STARRS (the 2nd row) varies with the right ascension and declination, and the ecliptic longitude and latitude, respectively, corresponding to the four seasons of spring, summer, autumn and winter from left to right.

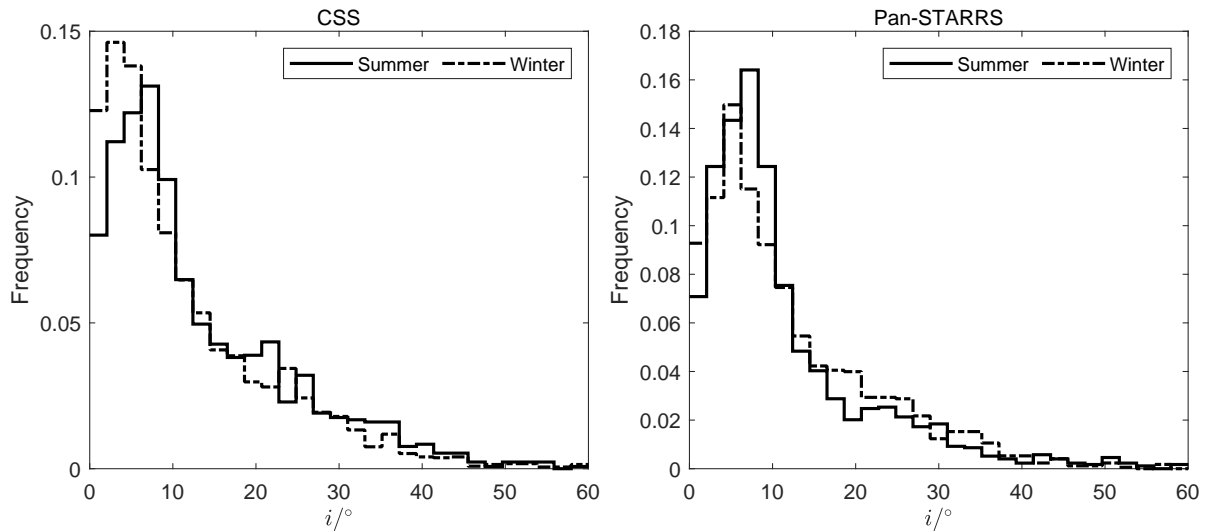


图9 CSS和Pan-STARRS分别在夏季和春季发现的近地小行星轨道倾角的频率分布

Fig.9 The frequency distribution of the orbital inclination of the NEAs discovered by CSS and Pan-STARRS in summer and spring, respectively

4 近地小行星观测发现的限制因素

4.1 太阳的影响

太阳会对近地小行星的观测发现带来显著影响,为了更好地理解发现时刻小行星与太阳、地球的位置关系,可以将小行星的位置坐标转换到日地会合坐标系,原点为地心, x 轴指向太阳-地球连线方向, z 轴指向北黄极, y 轴由右手螺旋法则确定.图10和图11形象地给出了所有近地小行星在发现时刻的位置分别投影到 x - y 平面和 x - z 平面上的分布情况,并按直径从大到小分为不同颜色的6组.图中结果清楚地表明直径越小的小行星发现时的地心距越小,与图5中的结论一致.

直观上看,图10中小行星的位置分布沿着 y 轴的对称性比较明显,但沿着 z 轴的对称性较差(图11),在黄道面以北的位置分布得更多一些,这与大部分地基望远镜位于北半球有关.图12和图13给出了会合坐标系下小行星发现时刻位置的经纬度(分别记为 λ_h 和 β_h)分布,统计结果为 $\beta_h > 0$ 的占比约60%.

另外,可以注意到经度和纬度均随着直径的减小而分布得更为集中: 140 m以上的小行星中有78.9%和79.3%的经纬度分布在 $\pm 60^\circ$ 范围内,而

140 m以下的小行星中这两个值分别为96.4%和88.4%.这是因为更小直径的小行星需要更小的相位角才容易被发现,因此发现时更倾向于分布在接近 0° 经度和黄道面附近.此外,从图13(左)给出的不同直径范围的经度分布可以发现,尺寸更大的更多分布在 $\lambda_h > 0$ 的区域(如直径140 m以上的小行星中 $\lambda_h > 0$ 的占比约59%,而直径140 m以下的为50%),这是由于一般更大直径的目标发现时的地心距更远,使得其轨道角速度小于地球,从而在首次发现时更倾向于在 $\lambda_h > 0$ 的位置被地球“追”着观测到.

相位角是衡量观测条件的一个重要参数,仅考虑由地基望远镜发现的目标,图14(左)给出了按照测站区分的相位角堆叠分布图,图14(右)给出了3个不同直径范围的相位角频率分布.左图结果说明相位角总体上最大概率分布在 15° 左右,93.9%的概率小于 60° ,即地基望远镜观测发现时相位角主要集中分布在较小的值.相比之下,图15给出了NEOWISE空间望远镜观测发现的相位角分布,可见其发现的目标相位角分布明显不集中在 0° 附近,而有54.7%的目标发现时相位角大于 60° ,但均小于 90° ,这显然与NEOWISE采用的观测策略有关^[22].

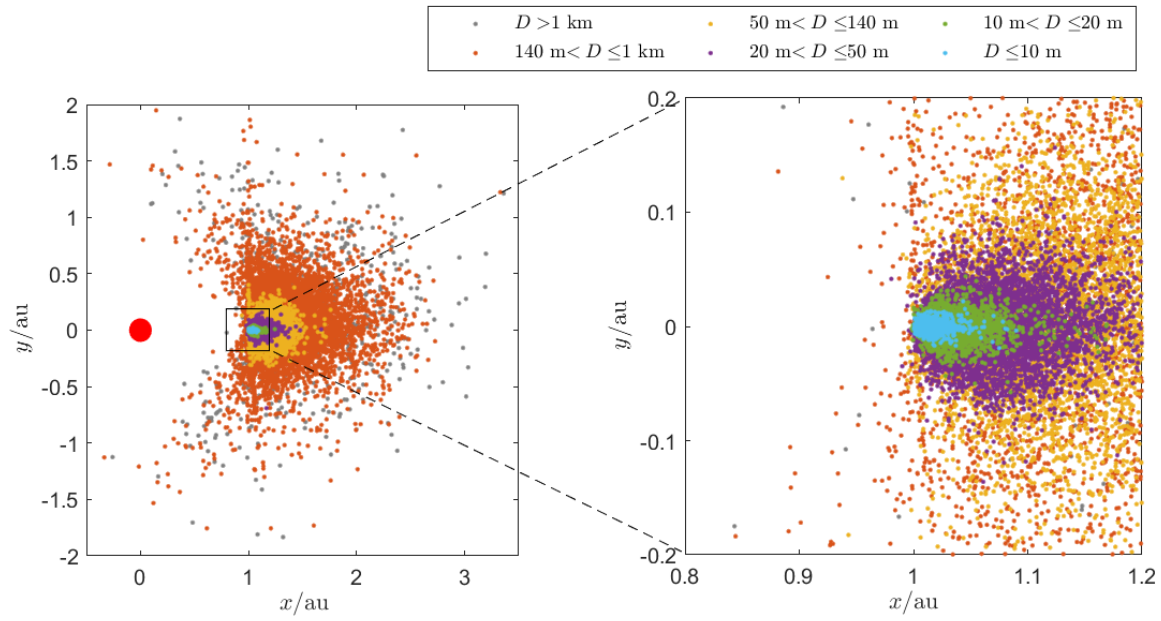


图 10 地心日地会合坐标系下近地小行星发现时刻的位置投影到 x - y 平面上的分布

Fig. 10 The distribution of the position of the NEAs at the time of discovery in the geocentric Sun-Earth rotating frame projected on the x - y plane

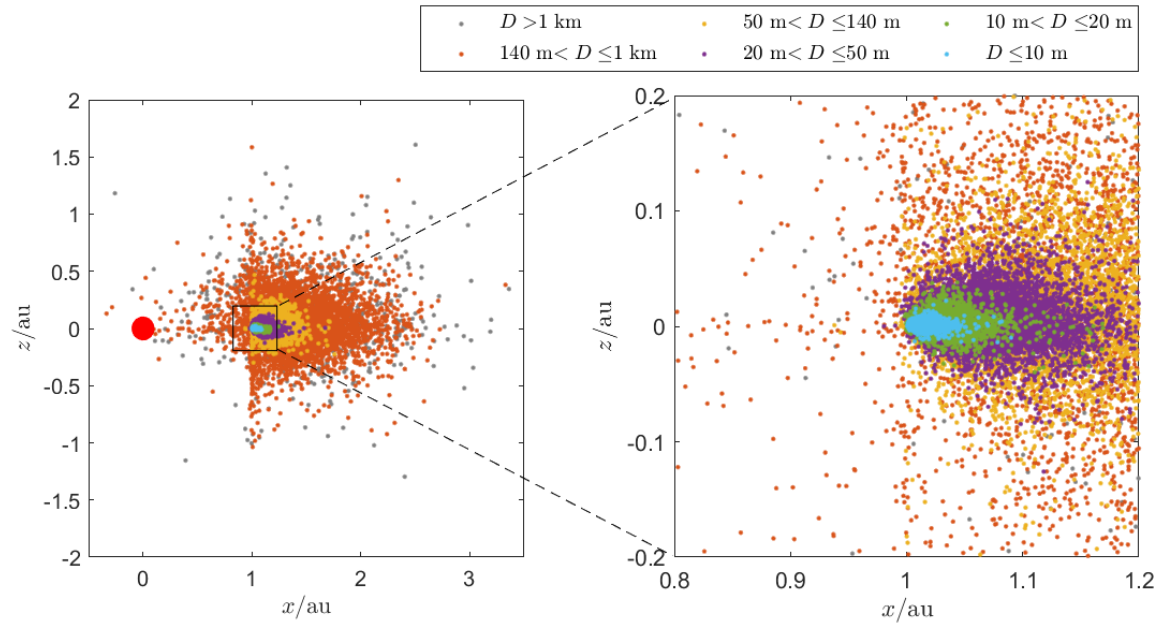


图 11 地心日地会合坐标系下近地小行星发现时刻的位置投影到 x - z 平面上的分布

Fig. 11 The distribution of the position of the NEAs at the time of discovery in the geocentric Sun-Earth rotating frame projected on the x - z plane

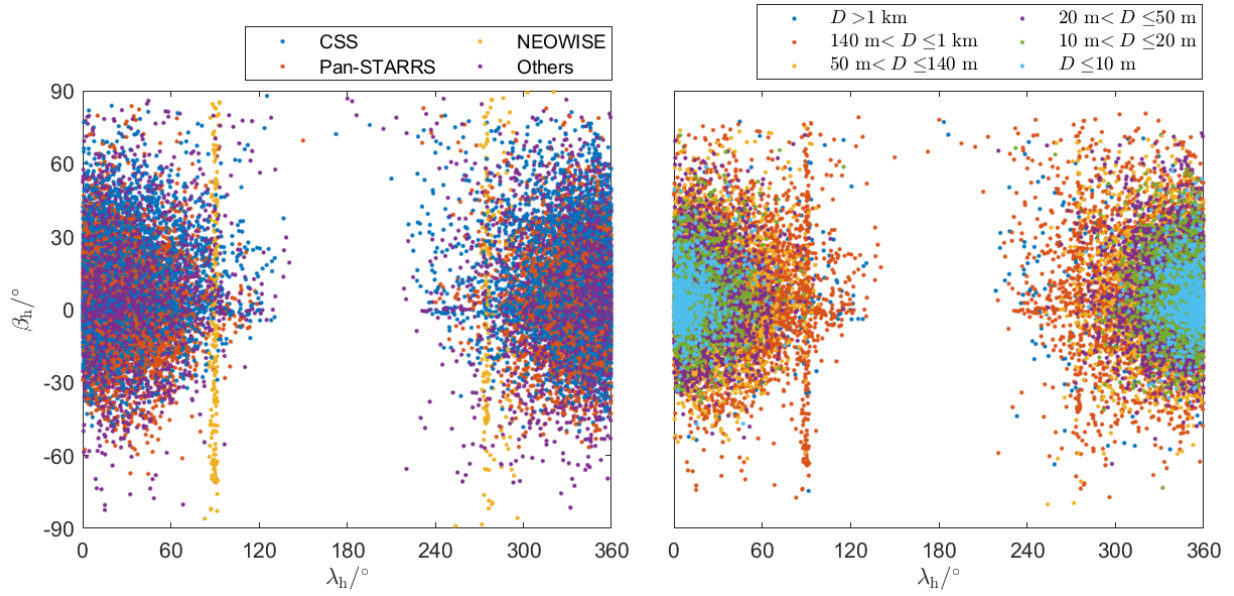


图 12 地心日地会合坐标系下近地小行星发现时刻的经纬度分布(其中经度分布在 90° 和 270° 附近的一些小行星为NEOWISE发现的)

Fig. 12 The latitude and longitude distribution of the NEAs in the geocentric Sun-Earth rotating frame at the time of discovery (some asteroids with longitude near 90° and 270° were discovered by NEOWISE)

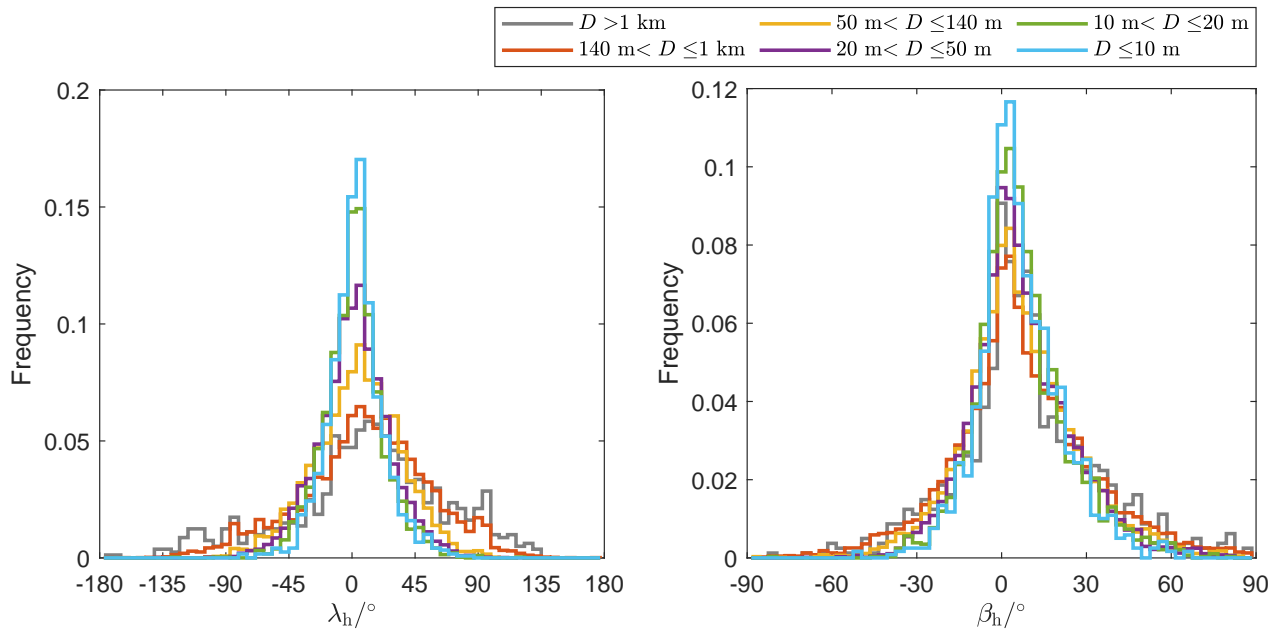


图 13 地心日地会合坐标系下近地小行星(分为6个不同的直径范围)发现时刻位置的经度(λ_h)和纬度(β_h)分布

Fig. 13 The longitude (λ_h) and latitude (β_h) distributions of the NEAs (divided into 6 different sized ranges) in the geocentric Sun-Earth rotating frame at the time of discovery

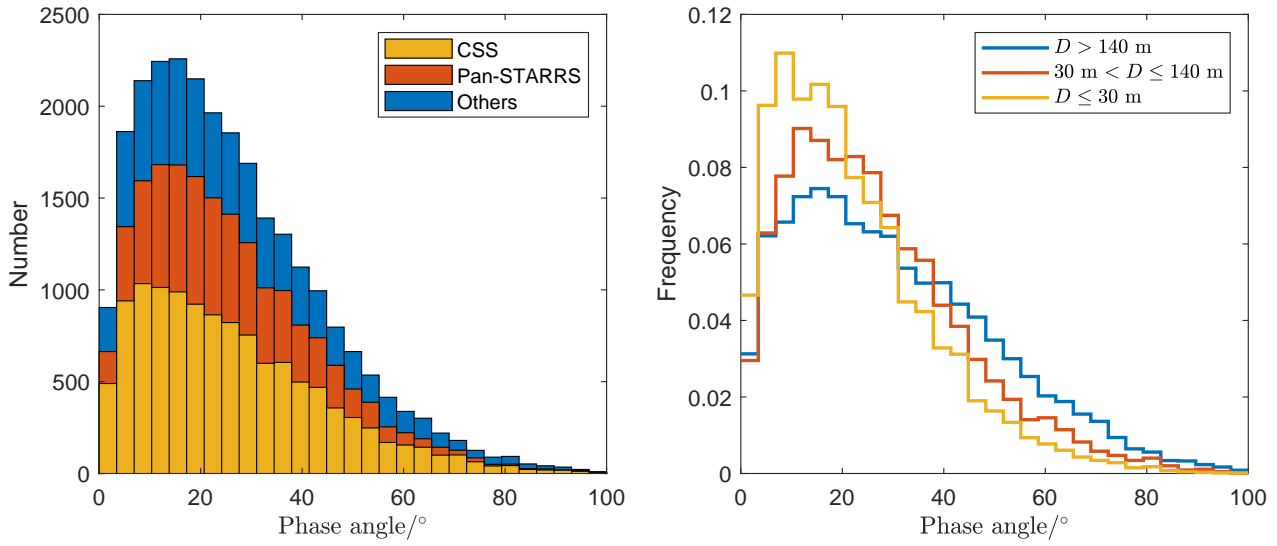


图 14 发现时刻不同测站发现的近地小行星的相位角堆叠分布图(左)以及3个不同直径范围相位角的频率分布(右)

Fig. 14 The phase angle stacking distribution of the NEAs discovered by different stations at the time of discovery (left) and the frequency distribution for three different diameter ranges (right)

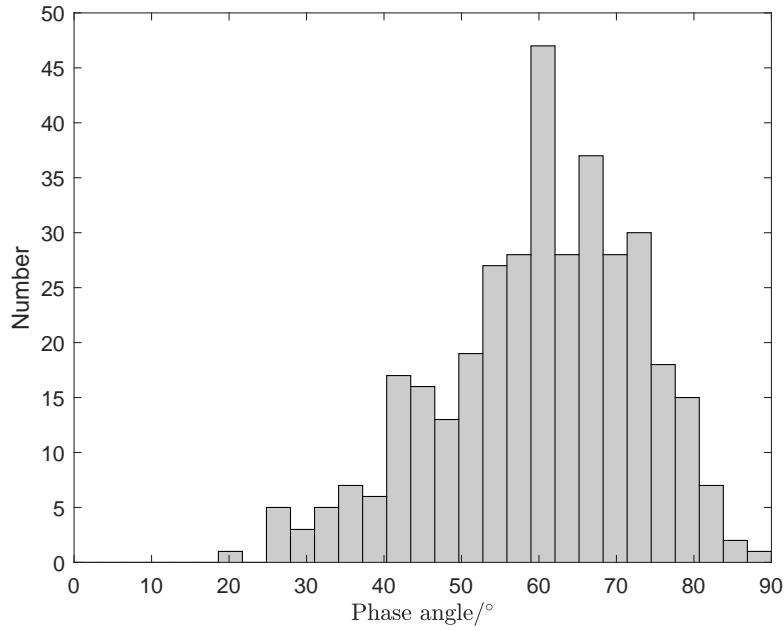


图 15 NEOWISE发现的近地小行星在发现时刻的相位角分布(由于NEOWISE卫星的地心距远远小于小行星的地心距, 计算相位角时测站位置可近似为地心位置)

Fig. 15 The phase angle distribution of the NEAs discovered by NEOWISE at the time of discovery (since the geocentric distance of the NEOWISE satellite is generally much smaller than the geocentric distance of the NEAs at the time of discovery, the satellite position can be approximated as the geocentric position when calculating the phase angle)

另外, 图14 (右)的结果表明相位角分布情况与直径存在明显的关系, 更大直径的分布更广平均值更大, 而更小直径的分布更为集中平均值更小. 在不考虑其他因素的前提下显然相位角越接近于 0° , 观测条件越好, 而小直径的小行星需要更为“苛刻”的相位角条件才能被发现.

考虑地基望远镜发现的目标, 图16 (左)给出了发现小行星时太阳高度角 h_S 的分布, 结果表明有占比99.5%的目标发现时太阳高度角小于 -15° , 这对应于地方时19点以后以及凌晨5点之前. 记小行星-太阳相对于地心的张角为 δ_S (对于发现时地心距很小的小行星 δ_S 与相位角接近互补), 图16 (右)给出了不同测站发现目标时的 δ_S 分布情况, 总体上看大部分目标发现时与太阳的夹角较大.

图17 (左)给出了 δ_S 随地方时的分布, 考虑了3个不同直径范围. 容易理解, 只有在接近黎明或黄昏的时候才能在 δ_S 较小的情况下发现近地小行星,

而结合图17 (右)的分布可以看到 δ_S 分布的均值随着直径的减小而增大, 即越小直径的小行星越需要在与太阳方向夹角更大的区域才能被发现. 为了更详细地考察 δ_S 与直径的依赖关系, 对于小于某个直径 D 的目标, 将其发现时刻的 δ_S 按从大到小排序, 可计算出其位于99.73%位置的值(记为 3σ 分位值)以及50%位置的值(即中位值), 随直径 D 的变化关系如图18所示. 可以明显看到, δ_S 的分布与直径存在密切的依赖关系, 对于140 m直径以下的近地小行星, 99.73%在发现时与太阳方向的夹角需大于 90° . 这些结果表明目前的地基望远镜观测能力难以提前发现从太阳方向附近飞来的近地小行星, 特别是小尺寸的小行星. 另外我们看到, Pan-STARRS的 3σ 分位值一般比CSS更大, 这说明Pan-STARRS对太阳附近方向的观测发现能力总体上不如CSS.

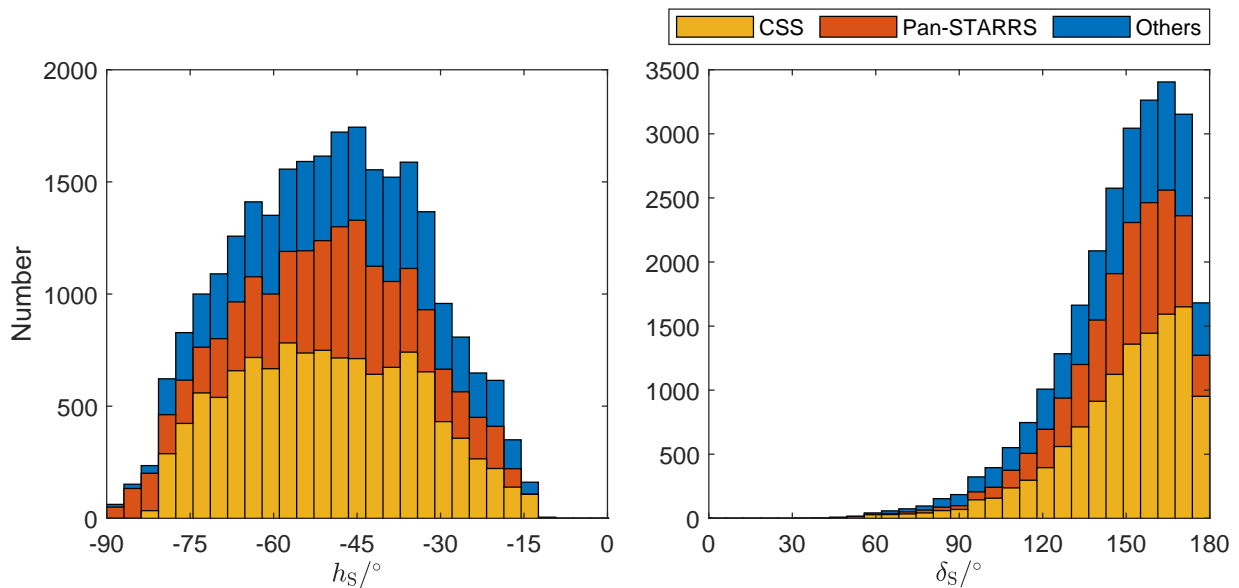


图 16 近地小行星发现时刻的太阳高度角(左)以及小行星-太阳相对地心张角(右)的分布

Fig. 16 The distribution of the solar height (left) and the asteroid-Sun angle relative to the Earth (right) at the time of discovery of the NEAs

经统计, $\delta_S < 60^\circ$ 的小行星只有53颗, 其中CSS发现了28颗, Pan-STARRS则未有发现. $\delta_S < 50^\circ$ 的小行星有14颗, 表2给出了这些小行星的轨道(半长

径 a 和偏心率 e)、直径、发现时刻的地方时 t 及发现的测站代码. 这14颗小行星中有8颗是由帕洛玛山天文台发现的(代码I41), 4颗是由CSS发现的(代码

为G96和703). 另外, 我们发现这些小行星的直径均比较大, 最小的也有330 m, 其中阿波罗和阿登型各有6颗和1颗, 而阿蒂娜型有7颗. 这说明阿蒂娜小行

星轨道的特殊性使得发现时往往与太阳的方向很接近, 而且表格里的时间数据说明发现这些小行星需要在接近黎明或黄昏的时候才容易被发现.

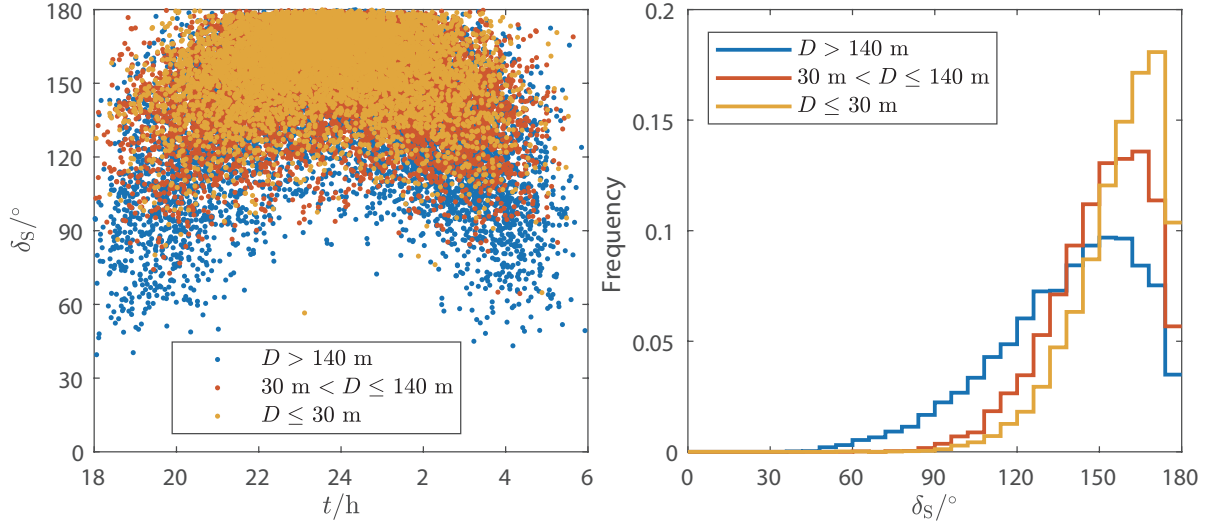


图 17 近地小行星发现时刻的小行星-太阳相对于地心的张角 δ_S 随发现时刻地方时 t 的分布(左)以及3个不同直径范围小行星的 δ_S 分布(右)

Fig. 17 The distribution of the asteroid-Sun angle δ_S relative to the Earth over the local time t at the time of discovery (left) and δ_S for asteroids of three different diameter ranges (right)

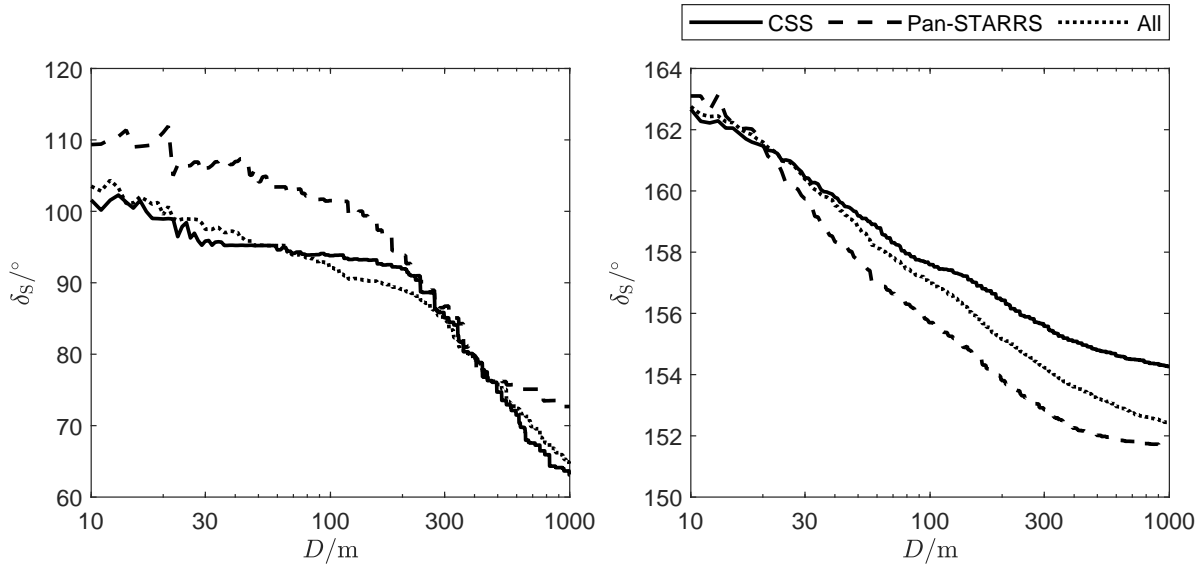


图 18 直径小于 D 的近地小行星发现时刻的张角 δ_S 分位值的变化, 分别考虑了CSS、Pan-STARRS以及全部的发现结果. 将 δ_S 从大到小排列, 左图为 3σ 分位值随 D 的变化, 右边为中位值随 D 的变化.

Fig. 18 The change of the quantile of δ_S of the NEAs with diameters smaller than D at the time of discovery, considering the discoveries by CSS, Pan-STARRS and the all, respectively. Arranging δ_S from large to small, the change of the 3σ quantile with D is shown on the left, and the change of the median value with D is shown on the right.

表 2 发现时张角 δ_S 小于 50° 的14颗近地小行星的参数Table 2 The parameters of the 14 near-Earth asteroids of $\delta_S < 50^\circ$ at the time of discovery

Asteroids	a/au	e	Type	D/km	t	$\Delta r/\text{au}$	$\delta_S/^\circ$	Obs. Code
2020 AV2	0.555	0.177	Atira	2.00	18:03	0.797	39.53	I41
2021 EX2	2.490	0.737	Apollo	0.97	18:56	1.279	40.36	I41
2020 QF6	2.726	0.652	Apollo	0.95	04:10	1.389	43.15	I41
2019 LL5	0.665	0.503	Aten	0.72	03:13	0.754	45.00	I41
2019 AQ3	0.589	0.314	Atira	1.09	18:06	0.521	46.43	I41
2021 LJ4	0.675	0.383	Atira	0.33	18:07	0.823	48.01	807
2020 OV1	0.637	0.255	Atira	0.60	03:30	0.460	48.21	I41
2011 BF59	1.402	0.610	Apollo	0.47	18:42	0.816	48.68	G96
2019 LF6	0.555	0.429	Atira	1.20	20:20	0.629	48.79	I41
2005 VP118	2.097	0.702	Apollo	0.56	04:27	1.615	49.08	568
2021 BS1	0.598	0.338	Atira	0.68	05:55	0.675	49.33	I41
2007 UB66	2.099	0.624	Apollo	0.62	04:49	1.063	49.42	G96
2008 EA32	0.616	0.305	Atira	1.74	19:04	0.672	49.89	703
2007 LC15	1.313	0.738	Apollo	0.62	21:01	0.969	49.93	G96

4.2 月球的影响

月相显然也会对近地小行星的观测发现产生影响, 为了考察发现时小行星与月球位置的相对关系, 类似地可以将小行星位置坐标转换到地月会合坐标系, 原点为月心、 x 轴指向地月连线方向、 z 轴指向白道北极、 y 轴由右手螺旋法则确定. 图19 (左)给出了所有近地小行星发现时刻的位置经纬度(仍用 λ_h 和 β_h 表示)在月心地月会合坐标系下的分布结果. 注意到CSS比Pan-STARRS发现的结果在纬度分布上偏北一些, 这是由于CSS测站的地理纬度高于Pan-STARRS导致的. 由于黄道面与白道面的夹角仅 5° 左右, 因此在此坐标系下纬度的分布规律与上一小节中日地会合坐标系下的结果相似(图13), 这里不再讨论. 另外, 相较于地基望远镜, NEOWISE发现的小行星经纬度分布较为随机且均匀, 这表明月球的位置对NEOWISE的观测策略影响较小, 下面主要讨论月球对地基望远镜发现近地小行星的影响.

月球在日地会合坐标系下的位置可以近似用

农历日(记为 d_L , 不区分月份, 只记录其在每个农历月的第几天, $1 \leq d_L \leq 30$)来表示, 例如初一(即 $d_L = 1$) 0时表示此时月球位于太阳-地球连线的中间位置. 图19 (右)的 λ_h - d_L 分布图表明小行星发现时经度的平均位置随着农历日期的增加而“退行”, 这主要是由于多数小行星发现时位于日地连线附近(背离太阳方向)所致.

记发现时刻小行星与月球相对于地心的张角为 δ_M , 考虑到月球的轨道运动特点可知月球对近地小行星发现的影响一般只发生在农历初八以后和二十二之前, 此时间段外太阳对观测的影响更大. 图20第1行的图给出了在此时间段内发现的小行星-月球张角分布情况. 结果表明, 对于CSS和Pan-STARRS, 分别有5.3%和2.0%发现时 $\delta_M < 45^\circ$. 而所有地基望远镜发现的目标中只有26颗(其中CSS发现3颗, Pan-STARRS发现0颗)在发现时满足 $\delta_M < 30^\circ$ (见图19中的绿色圈内). 因此, 保守估计结果说明月球的存在可导致月球附近 30° 范围以内的天区无法用于发现近地小行星. 此外, 由于距离月

球较近观测时曝光时间可能会多做一些限制, 因此图21给出的 $\delta_M < 45^\circ$ 时的视星等和绝对星等分布相比于总体分布偏小, 即月球附近发现的小行星直径分布相较于总体偏大, 这表明月球附近的观测对小行星直径的分布造成了一定的“选择效应”。

另外, 图20第2行和第3行分别给出了 λ_h 以及 d_L 的分布情况. 可以很明显看到, 农历上半月和下半月发现的近地小行星数目分布并不对称, 一般下半月发现的比上半月的更多一些, 但差别不大, 总体上下半月发现的数目比上半月发现的偏多3.2%. 而由于上半月发现的多数位于 $\lambda_h > 0$ 而下半月发现的多数位于 $\lambda_h < 0$, 因而不难理解发现数目随经度 $\lambda_h < 0$ 和 $\lambda_h > 0$ 的分布也不对称. 形成这种非对称性的原因可能与上下半月的观测条件有关, 即上半月发现的由于望月的影响较难作后随跟踪观测, 因此在确认新发现目标上存在更大的困难. 事实上, 通过分析MPC公布的观测数据, 只考虑没有编

号的近地小行星(占比89%), 图22分别给出了农历初八到十五以及十五到二十二发现目标的观测数据量(光学测角资料)分布. 统计表明, 140 m以下的目标中初八到十五发现的平均观测数据有45组, 十五到二十二发现的有55组, 差别明显; 140 m以上的则分别为119组和122组, 差别较小. 这是由于一般更大直径的目标可跟踪观测的时间更长, 受望月前后几天的“耽搁”影响更小.

最后, 我们可以通过图20第3行的分布定量估计一下月球的存在对近地小行星发现的影响. 若在不考虑月球干扰的情况下假设每个农历日发现的近地小行星数目相等, 并认为目前初一至初七的发现结果没有受到月球的影响, 则按照此发现速率可以计算出每月“应当”发现的近地小行星数目, 再减去目前已发现的数目就可得到因为月光污染而造成的发现“缺口”. 计算表明, 每月有约29%的近地小行星因为月球的影响而未被发现.

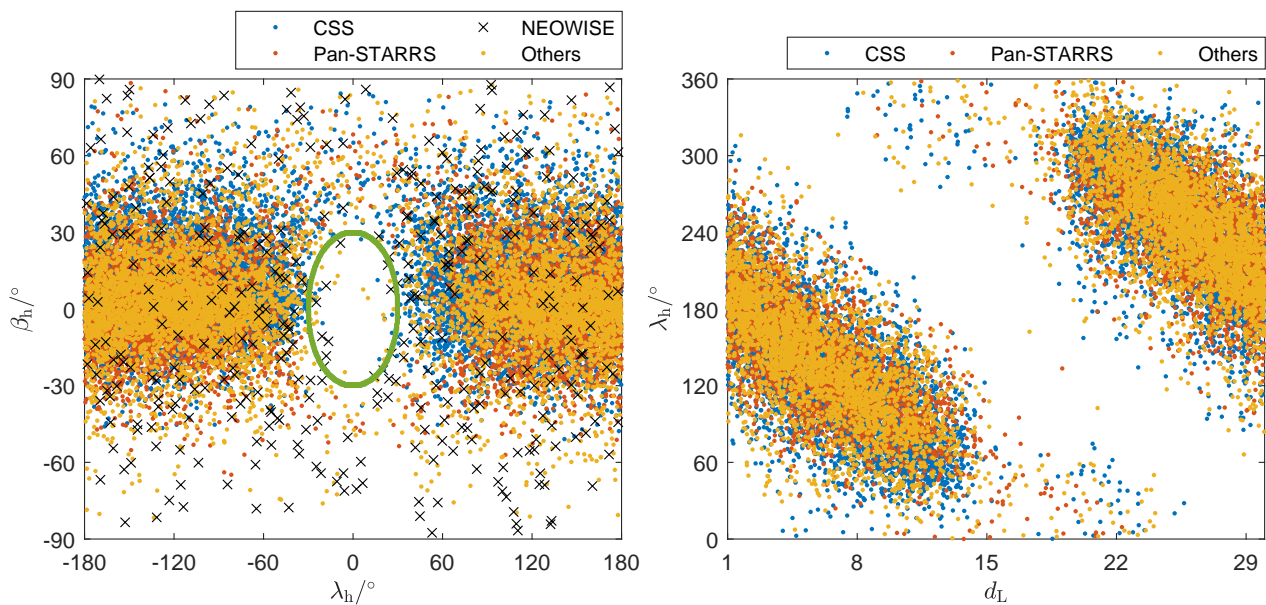


图 19 月心地月会合坐标系下近地小行星发现时刻的经纬度分布(左)以及经度随农历日的分布(右, 只考虑地基望远镜发现的结果), 左图中的原点为月球, 绿色圈为距离月球 30° 角距的范围.

Fig. 19 The longitude and latitude distribution of NEAs at the time of discovery in the Moon-centered Earth-Moon rotating frame (left) and the distribution of longitude with the lunar Calendar days (right, only considering the objects discovered by ground-based telescopes). The origin in the left panel is the Moon, and the green elliptic curve corresponds to the position of 30° from the Moon.

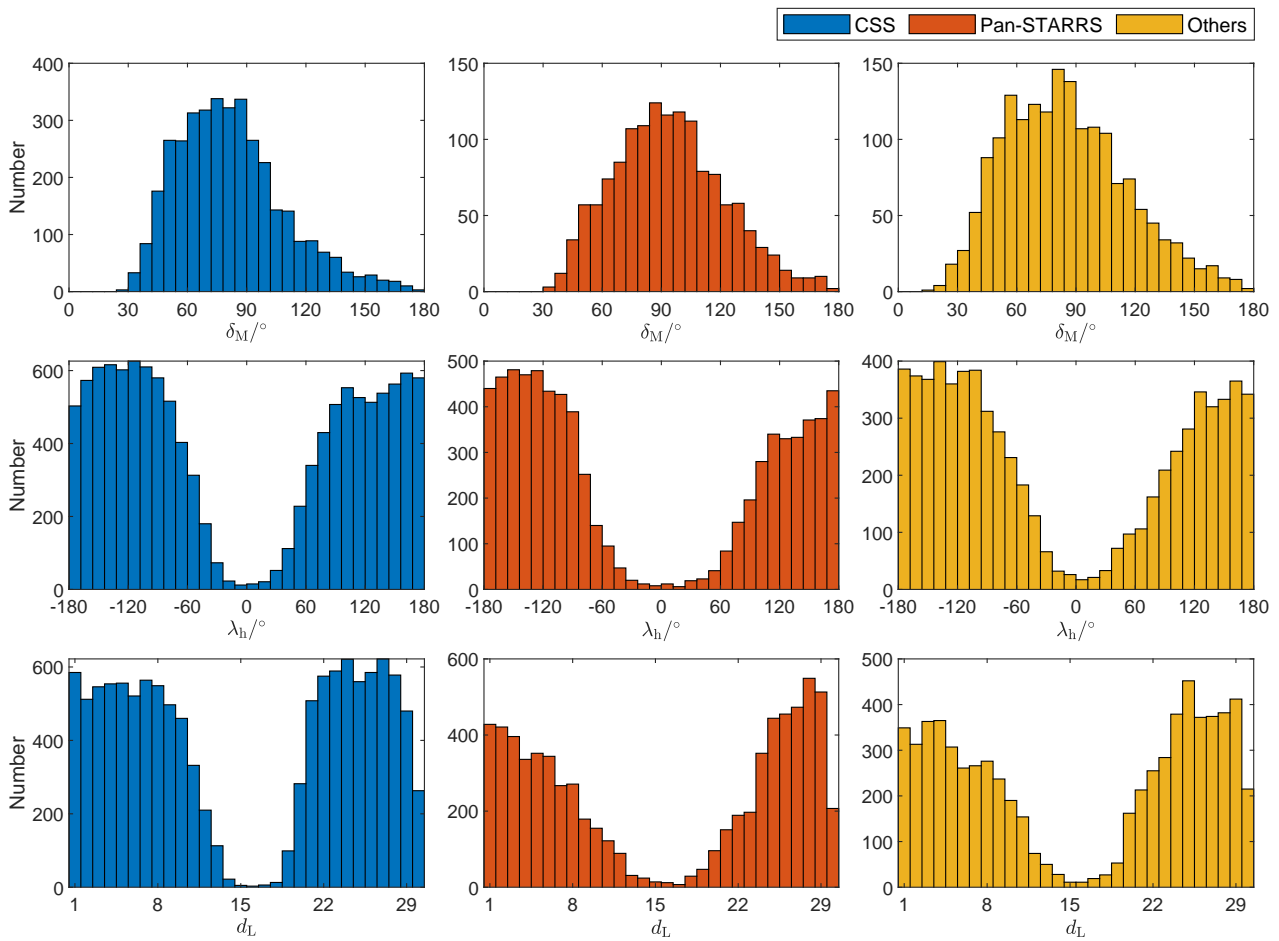


图 20 近地小行星发现时与月球的张角(第1行)、月心地月会合坐标系下的经度(第2行)以及农历日期(第3行)的分布情况

Fig. 20 The distribution of the angle between the NEAs and the Moon (the 1st row), the longitude of asteroids in the Moon-centered Earth-Moon rotating frame (the 2nd row), and the lunar Calendar days at the time of discovery (the 3rd row)

4.3 银道面的影响

银盘是银河系的主体部分, 太阳系就位于银盘内一条名为“猎户臂”的旋臂上, 银盘中心称为银心, 是银河系中最明亮的区域. 银盘内大量发光且绕着银河系中心旋转的恒星等物质形成了一个盘状平面, 称为银道面. 银道面构成了银道坐标系的基本平面, x 轴定义为银心方向. 银道面与黄道面的夹角为 60.2° , 因此如果在黄道面上巡天将有两次机会穿越银道面. 由于银心位置的黄纬为 -5.6° , 非常接近黄道面, 因此当在黄道面附近观测时需要避开银心区域. 图23给出了CSS、Pan-STARRS和其他所有地基测站发现目标时的黄经黄纬分布, 并标识

了银心和银道面的位置. 相较于最右边综合了其他所有地基测站的分布图, 显然CSS和Pan-STARRS的巡天观测结果分布得更更有规律, 即很好地避开了对银盘方向的观测, 特别是银心方向和反银心方向. 分析表明, CSS和Pan-STARRS分别在银心附近的黄道面黄经方向有大约 48° 和 38° 角直径的观测“盲区”, 这对近地小行星的观测发现显然是不利的, 特别是一些从银心附近方向飞来的小直径小行星. 图中还分别给出了1 yr内CSS和Pan-STARRS午夜0时时刻望远镜天顶方向的变化轨迹. 容易发现, 夏至日午夜0时望远镜天顶方向与银心方向的黄经很接近, 因此一般而言银心方向对夏季观测影响最大, 而反银心方向对冬季观测影响最大.

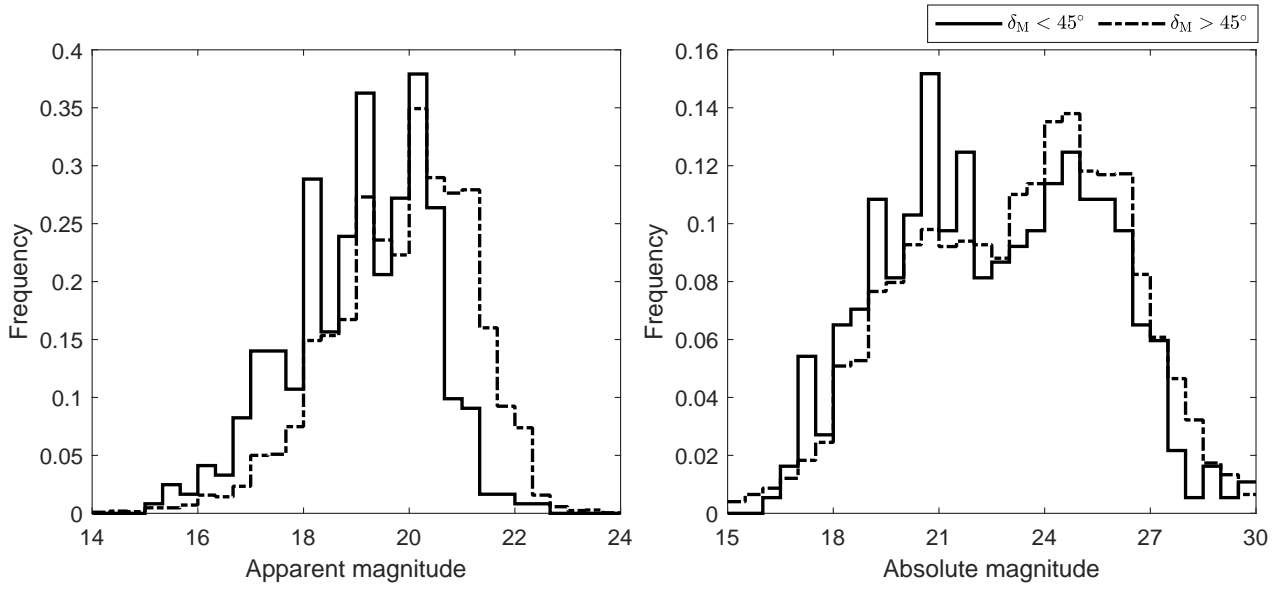


图 21 $\delta_M < 45^\circ$ 的小行星发现时的视星等(左)、绝对星等(右)分布与总体分布的对比.

Fig. 21 The comparison of the apparent magnitude (left) and absolute magnitude (right) distribution at the time of discovery of the NEAs with $\delta_M < 45^\circ$ and the all.

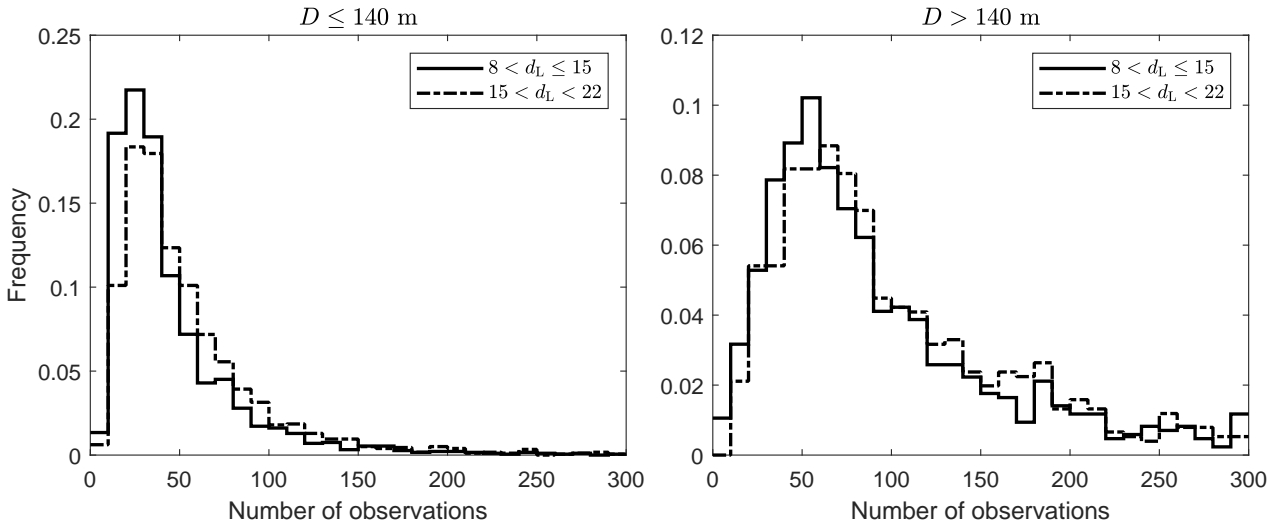


图 22 农历初八到十五以及十五到二十二发现的近地小行星(只考虑没有正式编号的)光学测角数据组数的分布, 分别考虑了直径140 m以下的(左)和140 m以上的(右).

Fig. 22 The distribution of the number of optical measurement data sets for the NEAs discovered from the 8th to the 15th day and from the 15th to the 22nd day of the lunar calendar (only unnumbered asteroids are considered). The objects with diameters of less than (left) and more than (right) 140 m are considered, respectively.

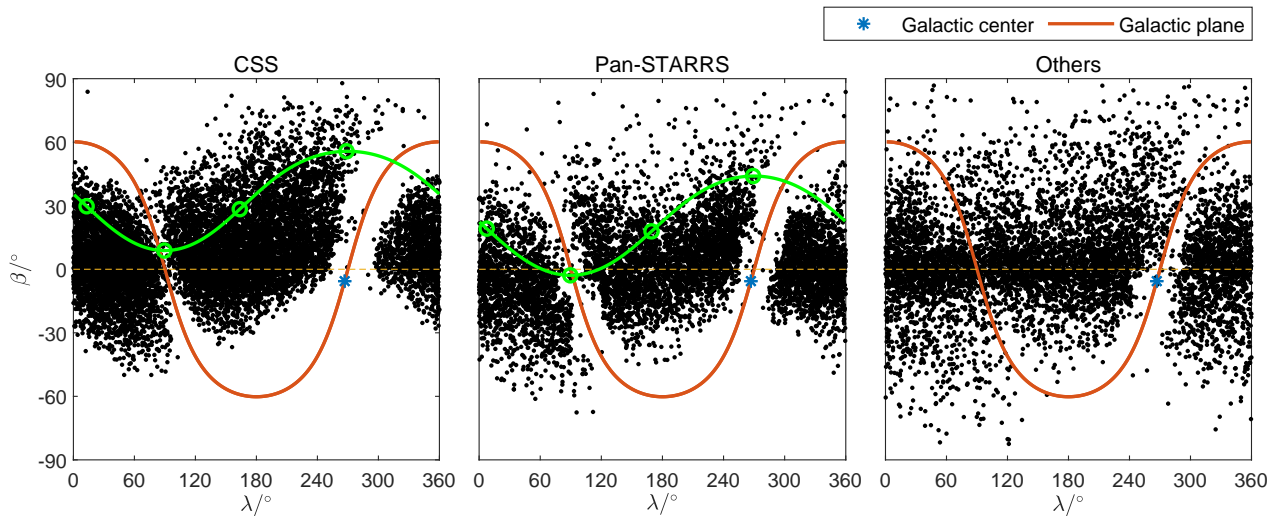


图 23 近地小行星发现时刻位置的黄经黄纬分布, 并给出了银心和银道的位置, 绿色线分别为 1 yr 内 CSS 和 Pan-STARRS 午夜 0 时时望远镜天顶方向的变化曲线, 绿色圈从左到右分别对应秋分、冬至、春分和夏至日。

Fig. 23 The distribution of the ecliptic longitude and latitude of the position of the NEAs at the time of discovery. The positions of the galactic center and the galactic plane are shown. The green lines are the curves of the zenith direction of the telescope of the CSS and Pan-STARRS at 0 o'clock within a year. The green circle from left to right corresponds to the day of autumnal equinox, winter solstice, vernal equinox and summer solstice, respectively.

5 总结

近地小行星是一类可能对地球人类安全带来威胁的太阳系小天体。目前仍有大量的近地小行星还未被发现, 因此利用地基或空基望远镜对近地小行星进行更多的观测发现是有效应对近地小行星撞击威胁的首要措施。为了对我国未来开展自主的近地小行星巡天观测提供借鉴和经验, 本文对近地小行星的发现数据和发现场景进行了系统性的分析研究。

我们发现, 由于更大直径的近地小行星更容易被发现, 因此每年发现的目标平均直径不断下降。而在目前望远镜探测能力(极限星等)没有大幅提升的情况下, 将导致近地小行星发现时的地心距不断减小。考虑到阿莫尔型小行星的定义标准, 将使得其每年发现所占比例逐渐下降。而地心距和直径的相关关系也导致更大直径近地小行星中阿莫尔型所占的比例高于小直径小行星中所占的比例。因此, 我们强调在对近地小行星轨道动力学性质进行统计性数值模拟时需要注意到这一现象。

利用 MPC 提供的轨道初值, 本文通过数值积

分回溯到首次发现时刻的位置, 从而对近地小行星首次发现时的观测场景进行了还原。我们获取了发现时刻小行星位置在站心地平坐标系、赤道坐标系和黄道坐标系的数密度分布。分析了其分布特征与季节、测站纬度和小行星直径的依赖关系, 并且通过分析夏季和冬季发现的小行星轨道倾角分布证实了测站纬度对近地小行星轨道倾角分布所造成的与季节相关的“选择效应”, 而且测站纬度越高该效应越明显。这也证实了在南半球布局近地小行星观测设备将有助于消除此效应。

最后, 本文基于观测数据定量分析了太阳、月球和银道面对近地小行星发现的影响。我们注意到太阳对近地小行星的地基观测发现产生的影响最大, 实际的观测数据表明 140 m 以下的近地小行星中有 99.73% 发现于与太阳夹角 90° 范围之外。而且小行星的直径越小, 则与太阳的夹角要越大才能被发现。月球的影响一般体现在农历初八以后和二十二之前。一般距离月球 30° 角的范围内较少发现小行星。而且通过比较分析发现距离月球 45° 角以内发现的目标比 45° 角之外发现的目标平均直径更大, 从而造成了一种“选择效应”。总体上看, 月球的影响

响可导致约29%的目标无法被发现, 而且一般农历上半月发现的目标比下半月发现的更难以被跟踪观测. 另外, 银道面方向也会对近地小行星发现产生影响, 特别是由于银心方向和黄道面很接近使得影响更为显著.

致谢 本文数据分析过程中与南京大学天文与空间科学学院的侯锡云教授、马里兰大学天文系叶泉志教授以及中国科学院紫金山天文台的李鑫冉和李彬博士进行过有益的讨论, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 徐伟彪, 赵海斌. 地球科学进展, 2005, 20: 1183
- [2] 季江徽. 国防科技工业, 2011, 4: 54
- [3] Bottke W F, Vokrouhlický D, Brož M, et al. Science, 2001, 294: 1693
- [4] Pravec P, Harris A W. Icarus, 2007, 190: 250
- [5] 刘雪奇, 孙海彬, 孙胜利. 深空探测学报, 2017, 4: 557
- [6] Perna D, Barucci M A, Fulchignoni M. A&ARv, 2013, 21: 65
- [7] Borovička J, Spurný P, Brown P, et al. Nature, 2013, 503: 235
- [8] Veverka J, Farquhar B, Robinson M, et al. Nature, 2001, 413: 390
- [9] Lauretta D S, Balram-Knutson S S, Beshore E, et al. SSRv, 2017, 212: 925
- [10] Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans D K, et al. Science, 2006, 312: 1330
- [11] Watanabe S I, Tsuda Y, Yoshikawa M, et al. SSRv, 2017, 208: 3
- [12] Huang J C, Ji J H, Ye P J, et al. NatSR, 2013, 3: 3411
- [13] Zhao Y H, Ji J H, Huang J C, et al. MNRAS, 2015, 450: 3620
- [14] Jiang Y, Ji J H, Huang J C, et al. NatSR, 2015, 5: 16029
- [15] Hu S C, Ji J H, Richardson D C, et al. MNRAS, 2018, 478: 501
- [16] Cheng A F, Atchison J, Kantsiper B, et al. AcAau, 2015, 115: 262
- [17] Drake A J, Djorgovski S G, Mahabal A, et al. ApJ, 2009, 696: 870
- [18] Kaiser N, Aussel H, Burke B E, et al. Proceedings of SPIE 4836, Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries. Waikoloa: SPIE, 2002: 154-164
- [19] Harris A W, Chodas P W. Icarus, 2021, 365: 114452
- [20] 朱进, 杨志涛, 甘庆波, 等. 天文学报, 2021, 62: 128
- [21] Zhu J, Yang Z T, Zhao H B, et al. ChA&A, 2022, 46: 55
- [22] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. AJ, 2010, 140: 1868

Statistical Analysis of Discoveries and Discovery Scenarios of Near-Earth Asteroids

HU Shou-cun^{1,2,3} ZHAO Hai-bin^{1,2,3} JI Jiang-hui^{1,2,3}

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

(2 Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(3 CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026)

ABSTRACT Near-Earth asteroids (NEAs) are a kind of small solar system bodies that may lead to potential hazard to the safety of the Earth. Currently, most of the NEAs are discovered with ground-based telescopes while the number is still growing. In order to provide references and experience to our future near-Earth asteroid discovery and monitoring, we perform a multi-dimensionally statistical analysis on the discovery data of NEAs with public database obtained from the website of Minor Planet Center (MPC). We find the constraint of observation ability can lead to selection effect on the discoveries, which causes a yearly dependence trend and a size-dependence characteristic of the relative proportion of different orbit types of discovered NEAs. Besides, combined with the orbits obtained from numerical simulations, we recover the discovery scenarios of these objects. The position distribution of the objects under different celestial coordinate systems are obtained, and the dependence on seasons, observatory latitudes, and the diameters are analyzed. Finally, we quantify the impact of the Sun, the Moon and the

galactic plane on the discoveries by analyzing the observation data and find that ground-based telescopes generally have difficulty in discovering NEAs within 90° from the Sun direction, and that this limitation generally has a greater impact on smaller-sized objects. The lunar position also has a significant effect on the discoveries, with the restriction on the nights before and after the full Moon resulting in 29% of NEAs being undiscovered, and analysis shows that objects found in the first half of the lunar calendar month are generally more difficult to be followed than those found in the second half. The galactic plane, especially the direction near the galactic center, also has an effect on the discoveries, resulting in a season-dependent “blind spot” for observations near the ecliptic.

Key words small bodies: near-Earth asteroids, surveys, methods: statistical, orbit dynamics