

小行星YORP效应的可探测候选体*

田君^{1,2†} 赵海斌^{1,2,3}

(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 YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)效应是小行星长期动力学演化的机制之一. 与碰撞、引力摄动等因素相比, YORP效应作用量级小, 短时标观测效应不明显, 这给直接测量YORP效应带来了很大的困难. 利用小行星光变数据库中已知的小行星数据, 统计了小行星的自转速率分布, 使用核密度估计以及Kolmogorov-Smirnov检验分别分析了近地小行星和主带小行星自转速率的分布特性, 分别给出了在近地小行星和主带小行星中寻找受YORP效应影响减速自转的最佳样本群; 基于7颗已被探测到YORP旋转加速度的近地小行星, 利用YORP强度估计方法和光变探测条件建立了筛选模型, 给出了未来可直接通过光变数据探测YORP效应的10颗近地小行星.

关键词 自转特性, YORP效应, 小行星: 普通, 方法: 数据分析, 统计

中图分类号: P185; **文献标识码:** A

1 引言

小行星作为太阳系形成初期的残留物, 不仅保存了太阳系原始星云中的关键信息, 而且为刻画大行星的形成与演化过程提供了关键数据, 是研究太阳系形成与演化的活化石. 影响小行星长期演化的机制主要包括小行星相互碰撞、大行星引力摄动以及非引力效应等^[1]. 由于小行星不规则表面在对太阳光等热辐射的散射和再辐射时会形成反冲力, 在这个反冲力对小行星产生净力矩的长期作用下小行星自转状态将发生改变, 这种效应称作YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)效应, 是一种非引力效应. YORP效应对直径为10 cm–15 km的小行星动力学演化有显著影响^[2–3]. 早期理论研究认为小行星的自转速率分

布应遵循碰撞演化的规律, 呈麦克斯韦分布. 直径 $D > 40$ km的小行星基本符合该分布^[4]; 但对于 $D \leq 40$ km的小行星, 受YORP效应影响变得明显^[5], 自转速率分布与麦克斯韦分布有显著差异. 尤其对于直径 $D \leq 15$ km的小行星, 自转速率分布中存在大量快自转($\omega \geq 8 \text{ d}^{-1}$)和慢自转($\omega \leq 2 \text{ d}^{-1}$)的小行星^[3, 6]. YORP效应对小行星的自转演化作用直接体现在其自转速率的分布特性中.

通过小行星的自转速率分布可以证明YORP效应的演化影响. 2008年, Pravec等^[3]基于268颗主带和越火小行星(main belt/Mars crossing asteroids)的实测数据, 分析了其自转速率分布, 发现慢自转的小行星占比较高, 存在显著的“慢自转过剩”(the slow rotators excess). 2011年, Hanuš等^[7]基

2022-10-08收到原稿, 2021-11-26收到修改稿

*国家自然科学基金项目(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), 民用航天预研项目(D020304, D020302)和紫金山天文台小行星基金会资助

†tianjun@pmo.ac.cn

于221颗由光变数据反演得到的小行星形状, 统计分析了其自转轴指向分布, 发现自转轴指向的黄纬分布呈现明显的双峰结构, 即自转轴倾向于聚集在高纬度方向(-90° 或 90°). 这些研究都证明了YORP效应的演化影响, 但过去通过自转速率分布和自转轴指向分布来研究YORP效应的小行星样本数量较少, 随着越来越多的小行星被探测到, 重新对其自转速率分布进行分析研究已变得十分必要. 另一方面, 通过光变数据直接探测小行星的YORP旋转加速度来直接验证YORP理论也至关重要.

YORP效应的思想最初形成于1901年^[8], 但由于观测数据和小行星物理参数的缺乏, 研究停滞了近一个世纪. 直到2000年, Rubincam^[9]建立了YORP效应的力矩分析理论, 标志着YORP效应的正式提出. 2007年, Lowry等^[10]通过光变数据发现(54509) YORP小行星的自转周期在不断减小, 与YORP理论的预测一致. 根据YORP效应的理论, YORP效应可以加速或减速小行星的自转. 在加速自转的作用下, YORP效应会促进小行星加速分裂^[11]、表面物质迁移^[12]、形状重塑^[13]以及双小行星系统形成^[14]等, 在观测上表现如陀螺型小行星表面“赤道脊”形状特征的形成^[15]和活动小行星(6478) Gault突然出现的两条尾迹等^[16]; 在减速作用下, YORP效应会使小行星进入非惯性主轴自转的状态, 即翻滚态. 但是, 迄今为止还没有找到因YORP效应减速自转的小行星. 目前直接测得YORP旋转加速度的仅有7颗小行星, 都处于加速自转的状态, 分别为(54509) YORP^[10]、(1620) Geographos^[17]、(1862) Apollo^[18-19]、(3103) Eger^[20-21]、(161989) Cacus^[21]¹、(25143) Itokawa^[22]和(101955) Bennu^[23].

为丰富YORP效应的研究目标和寻找因YORP效应减速自转的候选体, 需筛选出在未来可以通过光变数据直接探测YORP旋转加速度的小行星, 以便利用近地天体望远镜(China Near Earth Object Survey Telescope, CNEOST)等米级望远镜进行针对性观测研究. 本文第2节将首先对小行星光变数据库(Asteroid Lightcurve Database, LCD-

B)中小行星的参数空间做初步限制, 通过对初选样本自转速率的统计和分析, 给出两个寻找YORP效应减速自转的最佳样本群; 第3节使用YORP强度估计和光变探测条件对小行星初选样本做进一步筛选, 最终得到了一个可通过光变直接探测YORP效应的候选体列表, 在未来进行针对性观测和研究; 最后, 总结并讨论了本文的主要研究成果.

2 小行星样本初步筛选

小行星的自转速率, 形状模型等信息主要由小行星的光变数据导出, YORP效应的直接探测也与小行星的光变数据密切相关. LCDB最早是由Warner等^[24]创建, 目前由Warner和Pravec等人在持续维护, 主要目的是汇集公开发表的与小行星光变相关的数据, 包括小行星自转周期、分类、绝对星等、几何反照率、直径大小以及光变振幅等信息. 故本文的研究将以LCDB中汇集的小行星作为初始样本来展开.

截止2021年6月, LCDB中已经包含了近3.5万颗太阳系小天体的相关信息. 其中有来自不同巡天观测的数据, 有来自业余天文爱好者的数据, 导致LCDB汇集的数据中有部分小行星的光变数据质量较低, 自转周期等信息的误差较大甚至存在错误, 故本文要求LCDB中光变曲线的质量评价参数 $U \geq 2$; 获得小行星高置信度的自转周期需要光变数据至少覆盖半个周期, 因此对于自转周期 $P > 20$ h的小行星, 地基望远镜在单个观测夜的光变数据无法保证自转周期的精度, 本研究样本不包括 $P > 20$ h的小行星; 通常 $P < 2.2$ h的小行星其直径不超过0.2 km^[25], 此类源处于米级地基光学望远镜观测能力的极限, 长曝光才能获得足够的信噪比, 导致通过光变测量得到的自转周期误差较大, 同样不适合作为YORP效应候选体筛选的样本, 故本研究也不包括 $P < 2.2$ h和 $D < 0.2$ km的小行星; 同时YORP效应对直径 $D \leq 15$ km的小行星有显著影响, 因此选取直径 $D \leq 15$ km的小行星作为研究样本; 另外, 考虑到主带外侧小行星受YORP效应影响弱, 本研究在确保有足够样本数的前提下, 剔

¹对(161989) Cacus的YORP旋转加速度的计算十分依赖1978年的光变数据

除了主带外侧的小行星, 即剔除了轨道半长轴 $a \geq 2.7$ au 的源. 综上, 本文基于以下4个初选条件对初始样本进行筛选: (1) 光变曲线在LCDB中质量评价参数 $U \geq 2$; (2) $2.2 \leq P \leq 20$ h; (3) $0.2 \leq D \leq 15$ km; (4) $a < 2.7$ au.

将所有满足4个初选条件的小行星分为近地

小行星(near-Earth asteroid, NEA)和主带小行星(main-belt asteroid, MBA)², 分别得到了一个由846颗近地小行星组成的样本集和一个由9454颗主带小行星组成的样本集. 它们的直径和自转速率分布如图1所示.

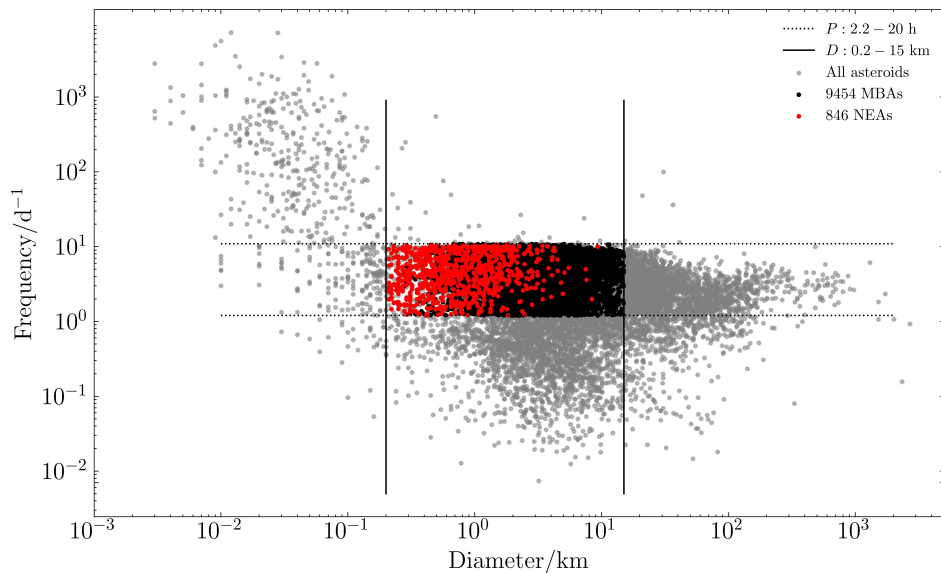


图1 小行星的直径和自转速率分布. 红点代表846颗NEA组成的样本集, 黑点代表9454颗MBA组成的样本集; 两条点线表示小行星样本自转周期的选取范围, 两条实线表示小行星样本直径的选取范围.

Fig.1 Distribution of diameter and rotation rate of asteroids. The red dots represent the sample set composed of 846 NEAs, and the black dots represent the sample set composed of 9454 MBAs; the two dotted lines indicate the selection range of the sample period, and the two solid lines indicate the selection range of the sample diameter.

2.1 近地小行星自转速率分布

首先对846个近地小行星组成的初选样本集进行自转速率分布的统计研究. 图2为近地小行星的自转速率分布, 图中显示近地小行星在快自转和慢自转区域都有明显聚集, 发现其自转速率分布明显偏离了麦克斯韦分布. 利用核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)进行分析, 通过交叉验证得到该核密度估计的最优带宽为3, 并使用高斯混合模型(gaussian mixture model, GMM)得到两个高斯核峰值所对应的自转速率分别约为 3.26 d^{-1} 和 9.10 d^{-1} , 两个峰值的距离大于最优带宽(即 $9.10 - 3.26 = 5.84 > 3$), 从而确认了近地小行星自转速率

分布存在双峰特征, 这与YORP效应的理论预测一致, 不仅进一步确认了Pravec等^[3]对近地小行星自转速率分布的分析结果, 而且表明了YORP效应在近地小行星自转速率的演化中扮演了重要角色.

为了寻找因YORP效应而减速自转的样本群, 进一步分析在YORP效应作用下, 不同直径范围的近地小行星自转速率的分布特征. 本文以1 km作为近地小行星初选样本直径的分割点, 原因有二: (1) 大于1 km的近地小行星可以通过米级口径的地基望远镜获得高质量的光变数据, 有利于YORP效应的探测研究^[26], 而小于1 km的近地小行星可能需要借助于雷达或深空探测数据来探测其YO-

²LCDB中的越火小行星、Hungaria族小行星和Flora族小行星等, 均属于主带小行星

RP效应, 仅利用光变数据较为困难; (2)近地小行星样本直径的中值为0.71 km, 接近1 km, 以1 km为分割点有利于通过统计分析方法来比较米级和千米级的近地小行星在YORP效应作用下的分布特征. 根

据该分割点将近地小行星分为2个子样本群, 分别为 $0.2 \leq D \leq 1$ km (子样本群1)和 $1 < D \leq 15$ km (子样本群2), 并对子样本群的自转速率进行统计分析.

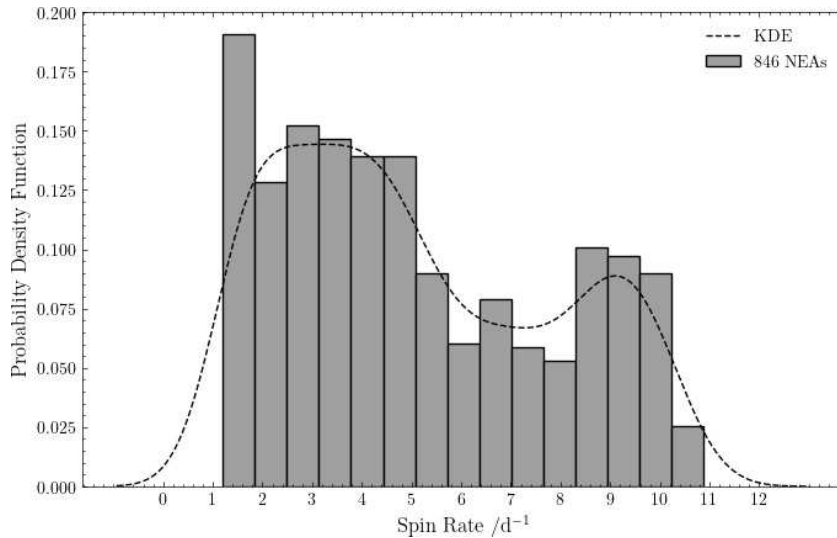


图2 近地小行星的自转速率分布, 可见呈双峰结构. 图中虚线为KDE方法的拟合结果.

Fig. 2 The distribution of the spin rate of NEAs shows a bimodal structure. The dashed line in the figure is the fitting result of the KDE.

图3中分别为子样本群1和子样本群2的自转速率分布, 其中可以看到子样本群1中大量近地小行星聚集在慢自转区, 而且在 $2-5 \text{ d}^{-1}$ 和 $5-10 \text{ d}^{-1}$ 范围内的近地小行星的自转速率分布呈近似均匀分布, 本文进一步利用Kolmogorov-Smirnov检验(Kolmogorov-Smirnov test, K-S检验)分别进行验证. 原假设 H_0 : 子样本群1在 $2-5 \text{ d}^{-1}$ 和 $5-10 \text{ d}^{-1}$ 范围内的小行星的自转速率呈均匀分布. K-S检验在子样本群1在 $2-5 \text{ d}^{-1}$ 和 $5-10 \text{ d}^{-1}$ 范围内给出的 p 值³分别为0.95和0.68, 均大于0.05的显著水平, 即都在95%的置信水平上接受了原假设 H_0 . 这与Pravec等^[3]的模拟研究结果一致, 其模拟结果表明YORP效应所引起直径较小小行星的自转速率改变量与其自转速率无关, 因此经过长时标演化后自转速率分布呈现近似均匀分布的特征. 子样本群1在 $2-5 \text{ d}^{-1}$ 和 $5-10 \text{ d}^{-1}$ 的自转速率呈均匀分布的特征, 是Pravec等^[3]的模拟研究结果的实测证据. 此外, 子样本群1

在自转速率大于 5 d^{-1} 处小行星的数密度发生了明显下降, 这可能是由于观测选择效应导致的(具体原因在第2.2节最后进行讨论). 对于子样本群2的自转速率分布, 利用KDE进行拟合分析, 通过交叉验证得到与其对应的核密度估计的最优带宽为3, 并发现存在两个高斯密度核, 同样使用GMM得到其峰值对应的自转速率分别约为 3.79 d^{-1} 和 9.09 d^{-1} , 两个峰值的距离大于最优带宽(即 $9.09 - 3.79 = 5.30 > 3$), 从而确认其呈显著双峰特征, 这表明YORP效应对直径在 $1 < D \leq 15$ km内的近地小行星演化作用明显. 其中子样本群2在 $3-5 \text{ d}^{-1}$ 的自转范围内的峰值大, 聚集明显, 这可能暗示仍有部分近地小行星受YORP效应影响处在减速过程中, 同时子样本群2的小行星直径相对较大, 有利于米级口径的地基光学望远镜在未来对其进行跟踪观测. 综上, 子样本群2很可能是未来寻找因YORP效应减速自转小行星的最佳样本群.

³ p 值就是当原假设为真时, 比所得到的样本观察结果更极端的结果出现的概率, p 值越小, 拒绝原假设的理由就越充分.

对比子样本群1和子样本群2, 发现缓慢自转的近地小行星占比都较高. 在直径0.2–1 km的近地小行星中, 慢自转区内的小行星占比约为18%; 而在直径1–15 km的近地小行星中, 慢自转区内的小行星占比约为8%, 前者比后者高约10%, 这可能有两个原因: (1)直径越小受YORP

效应作用越明显, 使得更多小直径的近地小行星减速为慢自转状态或非主轴自转状态; (2)地基望远镜对直径较小的小行星的观测并不完备, 存在观测选择效应, 可能降低小直径近地小行星在快自转区域的占比.

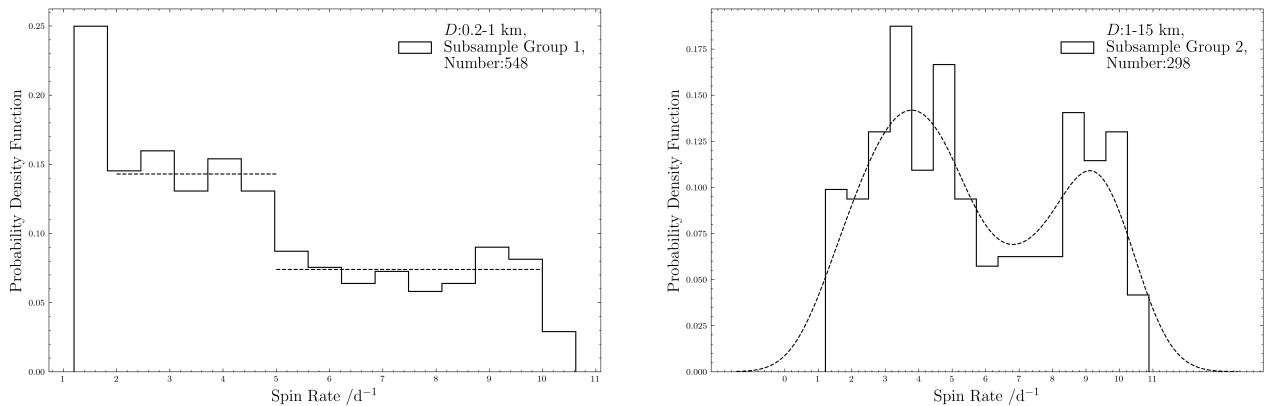


图3 左图为直径0.2–1 km的近地小行星的自转速率分布, 虚线所示为2–5 d^{-1} 和5–10 d^{-1} 范围内与其对应的平均值, 均呈均匀分布; 右图为1–15 km的近地小行星的自转速率分布, 虚线为KDE的拟合结果.

Fig. 3 The left panel shows the distribution of the spin rate of NEAs with a diameter of 0.2–1 km. The dashed line represents the appropriate average value in the 2–5 d^{-1} and 5–10 d^{-1} ranges, all of which are uniformly distributed; The right panel shows the distribution of the spin rate of NEAs with a diameter of 1–15 km, and the dashed line shows the fitting result of the KDE.

2.2 主带小行星的自转速率分布

同样对9454个主带小行星组成的样本集进行自转速率分布的统计研究, 主带小行星的样本数量比Pravec等^[3]在2008年的统计样本扩大了近30倍. 图4直方图显示了主带小行星样本的自转速率分布情况和与其对应的麦克斯韦分布拟合情况, $f(x)$ 为对应的麦克斯韦分布函数^[3].

本文利用了K-S检验来验证主带小行星的自转速率分布是否可以用麦克斯韦分布拟合, 其给出的 p 值接近于零, 远小于0.05, 这表明在95%置信水平上否定了主带等小行星自转速率符合麦克斯韦分布的假设, 进而证实其自转速率分布可能受YORP效应作用的影响. 从图4可以看到, 主带小行星在快自转区和慢自转区域的占比明显高于麦克斯韦分布的拟合结果, 存在明显“慢自转过剩”, 这与早期对主带小行星的理论研究结果一致. 主带小行星自转速率分布与近地小行星的自转速率分布

有较大区别, 其在快自转区和慢自转区的小行星占比分别为10.3%和13.5%, 小于近地小行星在快自转区(占比21.4%)和慢自转区(14.8%)对应的占比, 这表明YORP效应对主带小行星的演化作用弱于近地小行星. 主带小行星快自转区样本的占比比近地小行星小约11%, 除YORP效应影响较弱外, 还可能受观测选择效应的影响, 根据小行星“碎石堆”结构的理论, 快自转源的直径通常较小, 地基观测对此类样本不完备而存在观测选择效应, 导致主带小行星在快自转区样本占比较小.

为寻找因YORP效应减速自转的样本群, 进一步分析主带小行星自转速率分布与其轨道半长轴(即受太阳热辐射差异)以及直径大小的关系. 根据Pravec等人的统计^[27], 在具有自转周期参数的主带小行星中, 直径大于3 km的样本更丰富, 这也是前人的统计和模拟^[3]均以3–15 km的主带小行星为研究对象的主要原因, 目前主带小行星的统计样本支

持本文对3 km以下的主带小行星展开统计研究, 进而与直径大于3 km的主带小行星的分布进行对比分析. 除直径大小外, 小行星的YORP效应与热辐射直接相关. 轨道半长轴选择2.4 au和2.6 au作为样本群分割点, 小于2.4 au的小行星位于主带内带内

侧, 如Flora族小行星, 2.6 au则是主带的内带和中带的分界点. 它们代表了主带小行星受到太阳热辐射的3个不同水平. 将主带小行星以上述3个分割点分为6个子样本群, 如表1所示.

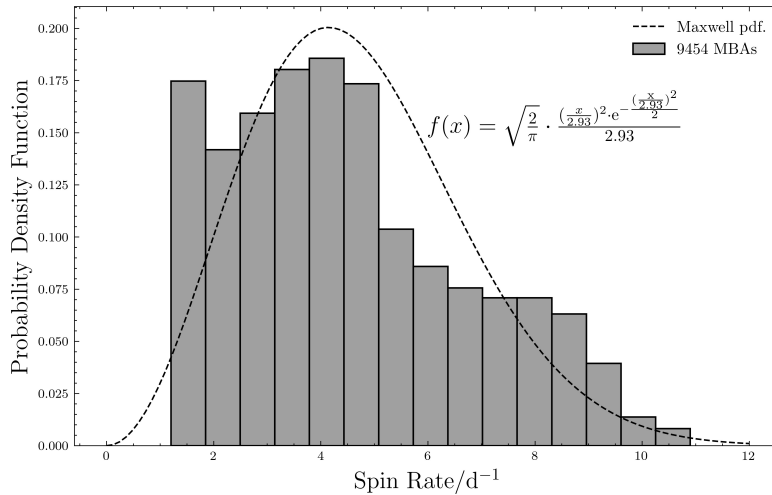


图4 主带小行星的自转速率分布, 虚线所示为与其相对应的麦克斯韦分布.

Fig. 4 The distribution of the spin rate of the MBAs. The dashed line shows the corresponding Maxwell distribution.

表 1 主带小行星的6个子样本群
Table 1 Six subsample groups of MBAs

Subsample	Axis/au			
		$a \leq 2.4$	$2.4 < a \leq 2.6$	$a > 2.6$
$0.2 \leq D < 3$		Subsample Group 3	Subsample Group 5	Subsample Group 7
		Number: 2924	Number: 1412	Number: 586
$3 \leq D \leq 15$		Subsample Group 4	Subsample Group 6	Subsample Group 8
		Number: 1936	Number: 1301	Number: 1295

6个子样本群的自转速率分布如图5所示, 分别对6个子样本群进行核密度估计, 以确定其自转速率聚集的特征. 对比图5中的子图(a)、(c)、(e)发现子样本群3、5、7表现出相同的分布特征, 这表明直径在0.2-3 km的主带小行星在YORP效应作用下的自转速率分布与其轨道半长轴的关系并不明

显; 同样对比图5中的子图(b)、(d)、(f)发现子样本群6和8表现出相同的分布特征, 即都只在慢自转区有明显聚集, 而子样本群4通过KDE发现其有两个峰值, 通过交叉验证得到其最优带宽为3, 并使用GMM得到这两个峰值对应的自转速率分别为 3.83 d^{-1} 和 8.28 d^{-1} , 两个峰值的距离大于最优带宽

(即 $8.28 - 3.83 = 4.45 > 3$), 从而验证了子样本群4不仅在 $3-5 \text{ d}^{-1}$ 的自转范围内表现出明显的聚集特征, 而且在快自转区也有聚集, 这可能暗示直径为 $3-15 \text{ km}$ 的主带小行星中, 轨道半长轴较小的小行星受YORP作用明显, 导致其在快自转区也发生了聚集. 但主带小行星的数据并不完善, 很难通过统计分析给出其与轨道半长轴较为明确的相关性; 对比图5中左右两列分布直方图, 发现小直径源(子样本

群3、5、7)的主带小行星在 $3-5 \text{ d}^{-1}$ 的自转范围内有明显的聚集特征, 这反映了随着直径减小YORP效应变得明显, 导致小直径源的自转速率变化量及其自转速率表现出显著的相关性. 这种小直径小行星自转速率的改变具有选择性, 从而导致小直径小行星自转速率分布具有显著聚集的特性, 这在Flora族中小直径天体的自转速率分布上也得到了验证^[28-29].

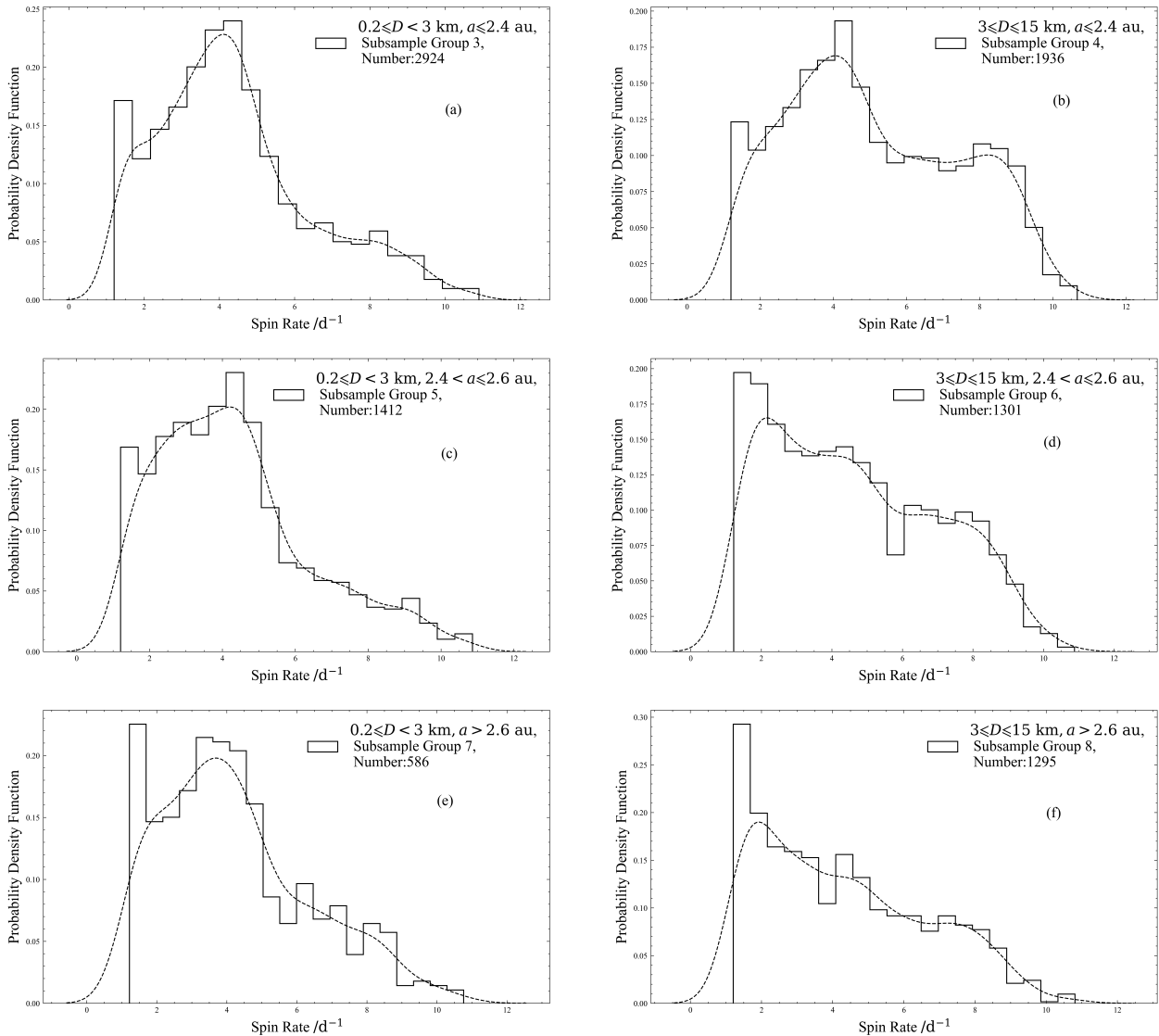


图5 主带小行星6个子样本群的自转速率分布直方图. 虚线为KDE方法的拟合结果.

Fig. 5 Histogram of the spin rate distribution for six subsample groups of the MBAs. The dashed line in the figure is the fitting result of the KDE.

从整个主带小行星样本的自转速率分布来看, 6个子样本群在慢自转区占比较大, 这与Pravec等^[3]得到的“慢自转过剩”一致. 尽管Pravec等^[3]认为这种显著的“慢自转过剩”的成因尚不完全清楚, 但可能由以下两个原因导致: (1)小行星被YORP效应减速自转而进入翻滚态后, YORP效应不再是小行星自转速率演化的主要因素, 翻滚态持续时标接近小行星的碰撞时标, 大于YORP演化时标, 而导致小行星在慢自转区域富集; (2)由于观测选择效应导致缺少快速自转的目标, 而使得缓慢自转区域的小行星在样本中占比较高. 对比子样本群4、6、8, 发现随着轨道半长轴的增加, 其在慢自转区的小行星占比也在增加, 分别为9.2%、14.9%和21.1%, 主要原因可能是受地基望远镜观测能力影响, 随小行星轨道半长轴的增加地基望远镜观测能力变弱, 快自转区中直径较小的小行星很难被观测到. 其中, 子样本群4在3–5 d⁻¹自转范围和快自转区内的聚集特征不仅表明其相较于子样本群6和子样本群8受YORP效应作用更明显, 也暗示子样本群4可能还有很多没有被减速至缓慢自转区域, 同时直径在3–15 km的主带小行星通过米级口径的地基望远镜也更容易获得高质量评价参数的光变曲线; 尽管子样本群3、5、7同样在3–5 d⁻¹自转范围内有明显聚集特征, 但是其直径较小, 不利于通过米级口径的地基望远镜进行跟踪观测, 从其快自转区内小行星严重缺失的特征也可以推断出相同结论. 综上, 子样本群4可能是在主带小行星中寻找因YORP效应减速自转的最佳候选体样本.

此外, 在所有子样本群中发现一个共同的特征, 即大于5 d⁻¹小行星的数密度有明显下降, 目前尚不明确其具体原因. 2000年, Pravec等^[25]统计发现, 小行星的光变平均振幅在自转速率5–6 d⁻¹下降得最快, 光变振幅小的数据得到的周期参数置信度差, 从而导致有确定的大于5 d⁻¹自转周期数据的小行星数目大大减少.

3 小行星样本的进一步筛选

通过初选条件以及对自转速率分布的分析, 只能给出受YORP效应影响比较明显且可能存在因YORP效应减速自转的样本群, 例如子样本群2和

子样本群4, 但无法给出未来10 yr通过跟踪观测可直接探测到YORP效应的候选体. 目前YORP效应的直接探测主要来自于光变数据, 长时间跨度和高密度时序测光数据是直接探测YORP效应的必要条件. 所以下文将通过估计直接探测YORP效应所需的光变时间跨度来对小行星样本做进一步筛选.

3.1 光变探测条件

2013年, Rozitis等^[30]给出了直接探测近地小行星YORP旋转加速度所需光变时间跨度的探测条件估计, 即光变探测的条件:

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| \geq \frac{8X\pi C_P}{T_{CAM}^2}, \quad (1)$$

其中, ω 为小行星的自转角速度, t 是以yr为单位的时间; $\left| \frac{d\omega}{dt} \right|$ 是YORP旋转加速度的大小, 单位为 rad · yr⁻²; T_{CAM} 是以yr为单位的光变时间跨度, C_P 是旋转精度系数, 本文参考Rozitis等人的工作^[30], 取值为0.025, X 为在小行星上探测到YORP效应的置信水平, 即探测到自转周期的改变量必须是两次周期测量误差的 X 倍. 该光变探测条件与小行星自转周期无关, 但是一般来说该方法并不适用快速自转(小于2.2 h)和缓慢自转(大于20 h)的小行星, 因为此类小行星的自转周期误差相对较大. 但随着深空探测任务的增加以及辅以雷达数据, 可以得到这类小行星较精确的自转周期, 该探测条件仍具有一定的参考意义. 从(1)式可以看到光变探测条件要求对小行星YORP效应的大小进行有效估计. 2009年, Rossi等^[31]给出了小行星YORP效应的强度公式, 将小行星形状和热惯量等难以评估的因素参数化为YORP因子,

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| = \frac{G_1}{a^2 \sqrt{1-e^2} \rho D^2} C_Y, \quad (2)$$

其中, G_1 是修正的太阳常数, 约为 6.4×10^{10} kg · km · s⁻²; ρ 为小行星的体密度, 统一取均值2000 kg/m³, e 为轨道偏心率; C_Y 是YORP因子, 是一个无量纲参数. Rozitis等^[30]基于(1)式和(2)式利用蒙特卡洛方法(Monte Carlo method)给出了估计直接探测近地小行星YORP效应所需光变时间跨度的条件:

$$T_{\text{CAM}_{50}} = 12.5(a^2\sqrt{1-e^2}\rho D^2)^{1/2}, \quad (3)$$

其中, $T_{\text{CAM}_{50}}$ 是针对一个近地小行星其要实现50%的探测概率需要的光变时间跨度, 单位为yr. 本文则从实测数据出发, 结合(1)式和(2)式建立一个通过光变数据直接探测YORP效应的筛选模型. 表2中列出了这7颗已被探测到YORP旋转加速度的近地小行星的相关数据.

这7颗近地小行星都在加速自转, 即YORP因子为正值. YORP因子的正负依赖于其形状及热

惯量等热物理参数, 很难确定, 但其正负并不影响对小行星YORP效应强度的估计. 为了更好地估计探测近地小行星YORP效应所需光变时间跨度, 本文基于这7颗近地小行星YORP因子绝对值的均值即 $|\bar{C}_Y| \approx 0.006073$, 给出了近地小行星的YORP效应强度估算公式:

$$\left| \frac{d\omega}{dt} \right| = 0.87 \times 10^{-2} (a^2\sqrt{1-e^2}\rho D^2)^{-1}. \quad (4)$$

表 2 7颗基于光变测得YORP旋转加速度的近地小行星
Table 2 Seven NEAs with YORP rotational acceleration measured by lightcurve

Asteroid	YORP/ ($10^8 \text{ rad} \cdot \text{d}^{-2}$)	Semimajor axis/au	Diameter /km	Period /h	Eccentricity -	Obs. yrs. ^a -	YORP coefficient -
(1620) Geographos ^[17]	1.15 ± 0.15	1.245	2.56	5.223336(2)	0.336	1969—2020	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$
(1862) Apollo ^[18-19]	5.3 ± 1.3	1.470	1.45	3.065448(3)	0.560	1980—2014	$(1.9 \pm 0.4) \times 10^{-2}$
(3103) Eger ^[20-21]	1.1 ± 0.5	1.405	1.80	5.710156(7)	0.345	1987—2019	$(7.8 \pm 3.4) \times 10^{-3}$
(25143) Itokawa ^[22]	3.54 ± 0.38	1.324	0.327	12.132371(6)	0.20	2000—2007	$(7.6 \pm 0.8) \times 10^{-4}$
(54509) YORP ^[10]	349 ± 30	1.006	0.113	0.20283333(1)	0.230	2001—2005	$(4.2 \pm 0.4) \times 10^{-3}$
(101955) Bennu ^[23]	363 ± 52	1.259	0.265	4.2960477(19)	0.204	1999—2018	$(3.0 \pm 0.5) \times 10^{-4}$
(161989) Cacus ^[22]	1.9 ± 0.3	1.123	1.68	3.755067(2)	0.214	1978—2016	$(4.5 \pm 0.7) \times 10^{-4}$

^a “Obs. yrs.” gives the length of the total observation span.

同时基于这7颗近地小行星的YORP因子均值以及YORP效应的强度估算方法, 本文通过光变探测条件给出了另一个估计探测近地小行星YORP效应所需光变时间跨度的条件:

$$T_{\text{CAM}} = 7.89(a^2\sqrt{1-e^2}\rho D^2)^{1/2}. \quad (5)$$

为了不遗漏可能的候选体目标, 将 X 取值为1, 即探测到自转周期的改变量不小于周期测量误差. 对比这7颗近地小行星的实际光变跨度和光变探测条件给出的理论光变跨度, 发现小行星(3103) Eger的实际光变时间跨度低于(3)式估计的理论光变时间跨度; 而7颗近地小行星的实际光变时间跨度均达到了(5)式估计的理论光变时间跨度. 后者较前者更符合实际探测数据的探测结果, 下文将使

用(4)式和(5)式组成的筛选模型对初选样本做进一步筛选.

3.2 小行星YORP效应候选体

小行星的光变数据难以进行详尽的统计, 但有光变反演形状模型的小行星一般均有足够的光变数据, 这也是光变反演模型的必要条件. 将初选样本与小行星形状模型数据库(Database of Asteroid Models from Inversion Techniques, DAMIT)⁴对比^[32], 发现近地小行星的初选样本中除上述7颗小行星外, 仅有16颗近地小行星具有形状模型, 这也表明其余小行星的光变数据都非常少, 不足以反演出形状模型, 与直接探测YORP旋转加速度所需要的光变时间跨度相差太远. 这16颗小行星中,

⁴形状数据截止2021年6月.

只有(85990) 1999 JV6属于子样本群1 ($0.2 \leq D \leq 1$ km, NEA), 其余均属于子样本群2 ($1 < D \leq 15$ km, NEA). 本文详细统计了这23颗近地小行星的已有光变时间跨度, 即小行星的第一次光变观测与最后一次光变观测的时间间隔, 图6展示了这23颗近地小行星的实际光变时间跨度和两种光变探测条件的区别.

根据本文给出的筛选模型, 除7颗已探测到YORP旋转加速度的小行星外, 列出了未来10 yr内可能探测到YORP效应的10颗近地小行星候选体, 如表3所示. 其中, (1865) Cerberus、(2100) Ra-Shalom、(3200) Phaethon、(85990) 1999 JV6的光变时间跨度均满足探测条件(3)式, 但尚未给出确定的YORP旋转加速度. (1865) Cerberus^[20]和(2100)

Ra-Shalom^[20-21]已被确认存在YORP效应, Āurech等^[20-21]给出了YORP旋转加速度的推荐值, 分别为 0.8×10^{-8} rad/d²和 1.25×10^{-8} rad/d², 前者由于光变数据较少不能给出准确的YORP旋转加速度, 后者由于自转周期相对较大, 其自转周期的测量误差较大未能给出YORP旋转加速度的最优值. 而(3200) Phaethon表面存在类彗星活动^[33], 如大质量物质脱落^[34], 这会造成自转周期变化, 无法确认周期的改变完全由YORP效应导致. (85990) 1999 JV6由于光变数据仍较少无法得到稳健的形状模型, 该小行星与Itokawa相似, 均为接触型双小行星, 结合雷达数据给出了其YORP旋转加速度的上限为 8.5×10^{-8} rad/d²^[35], 为了确定其YORP旋转加速度, 需要更多的光变数据.

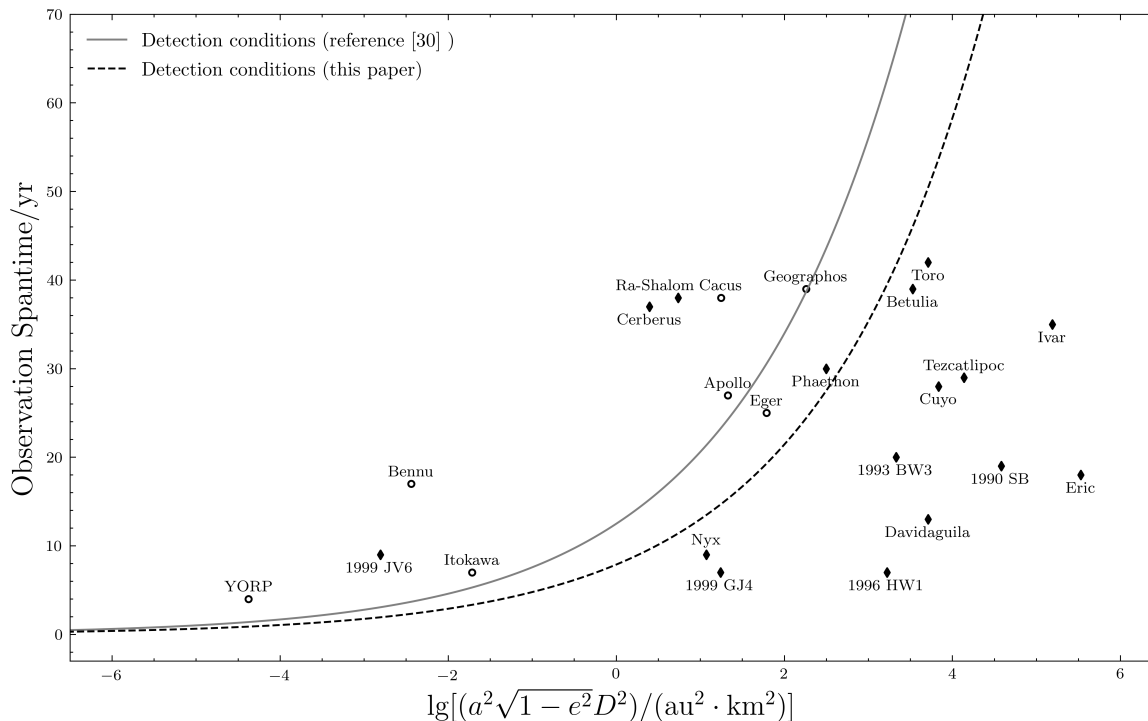


图 6 两种光变探测条件的对比图. 空心圆点为7颗已探测到YORP效应的近地小行星, 菱形点为16颗有形状模型的近地小行星.

Fig. 6 Comparison chart of two light-curve detection conditions. The hollow dots are 7 NEAs that have been detected to have the YORP effect, and the diamond-shaped dots are 16 NEAs with shape models.

表 3 10颗在未来的探测中可能直接探测到YORP旋转加速度的近地小行星
Table 3 Ten NEAs that may directly detect YORP rotation acceleration in the future

Asteroid	Semimajor axis/au	Diameter /km	Period /h	Eccentricity	Obs. yrs.	Pre. yrs. ^a /yr	Database source
				–	–		–
(1580) Betulia	2.197	4.20	6.13836 (1) ^[36]	0.487	1976—2015	46.5	LCDB, DAMIT
(1917) Cuyo	2.149	3.41	2.6897642 (4) ^[37]	0.506	1989—2017	54.3	LCDB, DAMIT
(6053) 1993 BW3	2.148	2.67	2.5737 ^[38]	0.528	1995—2015	42.1	LCDB, DAMIT
(3200) Phaethon	1.271	5.80	3.603957 (1) ^[39]	0.890	1989—2019	27.8	LCDB, DAMIT
(3908) Nyx	1.928	1.04	4.42601 ^[40]	0.459	1988—1997	13.6	DAMIT
(40267) 1999 GJ4	1.339	1.62	4.9582 (5) ^[41]	0.808	2010—2017	14.8	LCDB, DAMIT
(85990) 1999 JV6	1.008	0.25	6.536787 (7) ^[34]	0.312	2007—2016	1.96	LCDB, DAMIT, CNEOST
(2100) Ra-Shalom	0.832	2.78	19.8200 (3) ^[20–21]	0.437	1978—2016	11.5	LCDB, DAMIT
(1865) Cerberus	1.080	1.61	6.803286 (5) ^[20]	0.467	1980—2017	9.7	LCDB, DAMIT
(1685) Toro ^[21]	1.368	4.10	10.19782 (3) ^[21]	0.436	1972—2021	51.0	LCDB, DAMIT, Yaoan

^a “Pre. yrs.” denotes the minimum observation span that can sufficiently predict the detection.

此外, (1917) Cuyo和(6053) 1993 BW3在10 yr后的光变时间跨度仍略低于光变探测条件的要求, 但(1917) Cuyo已有较好的热红外数据和雷达数据^[36], 其与(6053) 1993 BW3都被欧南台(European Southern Observatory, ESO)列入重大项目的主要研究目标, 将对其进行雷达和热红外观测, 结合光变数据有利于YORP效应的探测和研究. 这10颗YORP候选体在未来通过米级口径的地基光学望远镜均可获得高质量高密度时序的测光数据, 这些数据将被用于形状模型的优化和YORP旋转加速度的测量. 未来我们会继续跟踪观测这些候选体并研究其YORP效应.

此外, 本文基于主带小行星和近地小行星具有相同YORP因子均值的假设, 使用该筛选模型计算了子样本群4中小行星直接探测YORP效应所需的光变时间跨度, 发现其均大于40 yr. 子样本群4中已有形状模型的小行星共352颗, 它们的光变时间跨度均远低于筛选模型所需的光变时间跨度, 且多为稀疏测光数据, 不能直接用于YORP效应的探测研究. 这暗示主带小行星受YORP效应影响较弱, 目前仍无法通过光变直接探测其YORP旋转加速度,

也是迄今为止没有通过光变直接探测到受YORP效应减速自转的小行星的重要原因之一.

4 结论与讨论

(1)本研究先对LCDB数据库的小行星进行了初选, 对初选样本自转速率分布的统计分析结果表明: 对于近地小行星, 发现其自转速率在快自转区和慢自转区均有明显聚集, 利用核密度估计验证近地小行星自转速率分布呈双峰特征, 是YORP效应影响小行星演化的直接证据. 其中0.2–1 km的近地小行星在 $2\text{--}5\text{ d}^{-1}$ 和 $5\text{--}10\text{ d}^{-1}$ 范围呈近似均匀分布的特征, 验证了Pravec等^[3]的模拟研究推论, 是较小尺寸的小行星长时间演化后的结果; 直径1–15 km的近地小行星的自转速率分布呈现非常显著的双峰特征, 表明YORP效应对直径较大的近地小行星也有明显影响; 对于主带小行星, 其自转速率分布同样偏离了麦克斯韦分布, 但明显不同于近地小行星, 不仅存在明显“慢自转过剩”, 而且在 $3\text{--}5\text{ d}^{-1}$ 的自转范围有明显聚集特征. 子样本群3 ($a \leq 2.4\text{ au}$ 且 $0.2 \leq D < 3\text{ km}$)、子样本群5 ($2.4 < a \leq 2.6\text{ au}$ 且 $0.2 \leq D < 3\text{ km}$)、子样本群7 ($a >$

2.4 au且 $0.2 \leq D < 3$ km)的自转速率分布相似,表明主带小行星的自转速率分布与其轨道半长轴的关系并不明显. 子样本群4 ($a \leq 2.4$ au且 $3 \leq D \leq 15$ km)、子样本群6 ($2.4 < a \leq 2.6$ au且 $3 \leq D \leq 15$ km)、子样本群8 ($a > 2.6$ au且 $3 \leq D \leq 15$ km)的自转速率分布明显与子样本群3、子样本群5、子样本群7不同,小直径的主带小行星在 $3-5 \text{ d}^{-1}$ 的自转范围内表现出明显的聚集特征,表明小行星自转速率分布与直径的关系较明显,直径越小受YORP效应影响越明显.

子样本群1的小行星的自转演化可能经历了YORP效应的长期影响,因YORP效应减速自转的大部分小行星可能已经进入慢自转区,而子样本群2 ($1 < D \leq 15$ km, 近地小行星)和子样本群3 ($a \leq 2.4$ au且 $0.2 \leq D < 3$ km)、子样本群4 ($a \leq 2.4$ au且 $3 \leq D \leq 15$ km)、子样本群5 ($2.4 < a \leq 2.6$ au且 $0.2 \leq D < 3$ km)、子样本群7 ($a > 2.6$ au且 $0.2 \leq D < 3$ km)一样,在 $3-5 \text{ d}^{-1}$ 自转范围内有明显聚集特征,这不仅表明其受YORP效应作用较明显,而且暗示它们的YORP时标可能较长,还有很多小行星没有被减速至缓慢自转的区域. 同时考虑到米级口径的地基光学望远镜的观测能力,子样本群2 ($1 < D \leq 15$ km, 近地小行星)和子样本群4 ($a \leq 2.4$ au且 $3 \leq D \leq 15$ km)可能是未来寻找因YORP减速自转的最佳候选样本.

(2)基于7颗已探测到YORP旋转加速度小行星的实测数据,建立了YORP强度估算方法和光变探测条件组成的筛选模型. 根据筛选模型,考虑米级口径的地基光学望远镜的观测能力,本文给出10颗通过未来10 yr的跟踪观测可能直接探测到YORP效应的候选体.

该筛选模型虽然只结合了7颗近地小行星的实测数据,但它们的自转周期分布在 $0.2-12.1$ h范围内,分布范围大,形状模型差异较大且来自不同的小行星分类,具有一定的代表性. 对此类近地小行星YORP强度的估计和模拟较为可靠. 10颗YORP候选体目标均为近地小行星,主带小行星受YORP效应作用较弱,使用光变数据进行直接探测十分困难,需结合雷达等数据进行探测研究. 未来对YORP效应直接探测的研究将优先选择近地

小行星. 通过模型对小行星进行筛选和评估,有利于未来对YORP候选体进行针对性跟踪观测和研究,也有助于完善YORP理论的观测证据并丰富YORP效应的研究目标.

致谢 感谢紫金山天文台陈媛媛和审稿老师对文章提出的宝贵建议.

参 考 文 献

- [1] Michel P, DeMeo F E, Bottke W F. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 3-10
- [2] Vokrouhlický D, Brož M, Bottke W F, et al. IAU Colloquium 197: Dynamics of Populations of Planetary Systems, 2005: 145
- [3] Pravec P, Harris A W, Vokrouhlický D, et al. Icar, 2008, 179: 479
- [4] Pravec P, Harris A W, Michalowski T. Asteroid Rotations//Bottke Jr W F, Cellino A, Paolicchi P, et al. Asteroids III. Tucson: University of Arizona Press, 2002: 113-122
- [5] Vokrouhlický D, Bottke W F, Chesley S R, et al. The Yarkovsky and YORP Effects//Michel P, DeMeo F E, Bottke W F. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 509-532
- [6] Lupishko D, Tielieusova I. M&PS, 2014, 49: 80
- [7] Hanuš J, Ďurech J, Brož M, et al. A&A, 2011, 530: A134
- [8] Yarkovsky I O. The Density of Luminiferous Ether and the Resistance it Offers to Motion//Brož M, Vokrouhlický D. Charles: Charles University, 2006: 153
- [9] Rubincam D P. Icar, 2000, 148: 2
- [10] Lowry S C, Fitzsimmons A, Pravec P, et al. Science, 2007, 316: 272
- [11] Jacobson S A, Marzari F, Rossi A, et al. Icar, 2016, 277: 381
- [12] Scheeres D J. Icar, 2015, 247: 1
- [13] Richardson D C, Elankumaran P, Sanderson R E, et al. Icar, 2005, 173: 349
- [14] Čuk M, Burns J A. Icar, 2005, 176: 418
- [15] Cheng B, Yu Y, Asphaug E, et al. NatAs, 2021, 5: 134
- [16] Kleyna J T, Hainaut O R, Meech K J, et al. ApJ, 2019, 874: L20
- [17] Ďurech J, Vokrouhlický D, Kaasalainen M, et al. A&A, 2008, 489: L25
- [18] Ďurech J, Vokrouhlický D, Kaasalainen M, et al. A&A, 2008, 488: 345
- [19] Kaasalainen M, Ďurech J, Warner B D, et al. Nature, 2007, 446: 420
- [20] Ďurech J, Vokrouhlický D, Baransky A R, et al. A&A, 2012, 547: A10
- [21] Ďurech J, Vokrouhlický D, Pravec P, et al. A&A, 2018, 609: A86

- [22] Lowry S C, Weissman P R, Duddy S R, et al. *A&A*, 2014, 562: A48
- [23] Hergenrother C W, Maleszewski C K, Nolan M C, et al. *NatCo*, 2019, 10: 1291
- [24] Warner B D, Harris A W, Pravec P. *Icar*, 2009, 202: 134
- [25] Pravec P, Harris A W. *Icar*, 2000, 148: 12
- [26] Dmitrij L, Iryna T. *The Meteoritical Society*, 2014, 49: 80
- [27] Pravec P, Harris A W, Warner B D. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2006, 2: 167
- [28] 王夷博, 刘承志, 范存波, 等. *天文学报*, 2019, 60: 1
- [29] Wang Y B, Liu C Z, Fang C B, et al. *ChA&A*, 2019, 43: 375
- [30] Rozitis B, Green S F. *MNRAS*, 2013, 430: 1376
- [31] Rossi A, Marzari F, Scheeres D J. *Icar*, 2009, 202: 95
- [32] Āurech J, Sidorin V, Kaasalainen M. *A&A*, 2010, 513: A46
- [33] Wu J W, Busmann R S, Tsai C W, et al. *ApJ*, 2014, 793: 8
- [34] Liu W, Lin S J, Hu H B, et al. *ApJ*, 2020, 892: 6
- [35] Rožek A, Lowry S C, Rozitis B, et al. *A&A*, 2019, 627: A172
- [36] Magri C, Ostro S J, Scheeres D J, et al. *Icar*, 2007, 186: 152
- [37] Rožek A, Lowry S C, Nolan M C, et al. *A&A*, 2019, 631: A149
- [38] Warner B D. *MPBu*, 2015, 42: 254
- [39] Kim M J, Lee H J, Lee S M, et al. *A&A*, 2018, 619: A123
- [40] Kaasalainen M, Pravec P, Krugly Y N, et al. *Icar*, 2004, 167: 178
- [41] Warner B D. *MPBu*, 2017, 44: 223

A Detectable Candidate for the YORP Effect of Asteroids

TIAN Jun^{1,2} ZHAO Hai-bin^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science, 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 Science, Hefei 230026)

ABSTRACT The YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack) effect is one of the mechanisms of the long-term dynamical evolution of asteroids. Compared with factors such as collision and gravitational perturbation, the YORP is of small magnitude, and the short-time scale observation effect is inconspicuous, which brings great difficulties to the direct measurement of the YORP. From the Asteroid Lightcurve Database, asteroids having a high confidence rotation period were selected for this study. Two subsample groups for identifying potential asteroids slowed by the YORP effect are provided by using the kernel density estimation method and the Kolmogorov-Smirnov test to analyze the rotation rate distribution characteristics of near-Earth asteroids and main belt asteroids; A screening model is proposed based on the light-curve data of seven YORP asteroids with YORP rotation acceleration, combined with the YORP intensity estimation method and the detection conditions of the YORP effect. Finally, ten candidates that can directly detect the YORP effect through light-curve data in the future are listed based on the screening model.

Key words spin characteristics, YORP effect, minor planets, asteroids: general, methods: data analysis, statistical