doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.01.001

Flora小行星族自转特性研究

王夷博† 刘承志 范存波 许 妍

(中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站长春130117)

摘要 小行星族作为灾变碰撞的残留物,其基础物理性质提供了其母体以及后续 演化信息.其中轨道以及自转特性分别反映了Yarkovsky效应以及Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack效应(YORP效应)对于小行星族演化的影响.基于小行星光变数据 库(Asteroid Lightcurve Database),通过对Flora小行星族自转速率分布进行研究,发现 随着直径减小,族成员自转速率倾向于主要集中在3-5 d⁻¹的范围内.同时,可以注意 到Flora小行星族整体表现出更倾向于顺行自转状态的现象,但对于轨道半长轴小于2.2 au的成员来说,其顺行自转与逆行自转状态成员数目比接近于近地小行星中顺逆行自转 状态源1:3的比例;此外,对于轨道半长轴大于2.2 au且具有顺行自转状态的部分族成员,在轨道半长轴-绝对星等分布中表现出聚集现象,并在聚集区域中有9颗成员展现出类 似Slivan状态特征.

关键词 小行星: 普通, Flora小行星族, 自转特性, Yarkovsky效应, YORP效应 中图分类号: P185; 文献标识码: A

1 引言

小行星作为行星形成时期构成类地行星以及气态巨行星核的原始星子的"残留物",保留了大量太阳系形成初期物质成分以及环境信息,其物理性质研究对于提升关于行星形成的认识具有非常重要的意义^[1];而小行星族(asteroid family),作为灾变碰撞(catastrophic collision)最终的产物,为太阳系小天体的演化研究提供了可靠的图景. 当前认为,在灾变碰撞过程中,小行星族母体被撕裂成为数以千万计的碎片,这些碎片的残余构成了今天小行星族的成员;同时,由于这些小行星族成员源自于同一母体,保有相近的轨道参数(半长轴、偏心率、倾角)分布特征.因此,小行星族候选体的这些轨道参数成为判断其是否是小行星族成员最主要的依据之一.虽然随着天文学的高速发展,今天我们对于太阳系小天体的认识相较于上个世纪甚至十余年前都已有了非常显著的提升,但对于小行星族的形成与演化机制,我们依旧有许多疑惑尚待解答.

目前研究认为,Yarkovsky效应和Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack效应 (YORP效应)在小型小行星(一般是指直径小于30-40 km的小天体)演化过程中起到 了关键性的作用^[2-3]:Yarkovsky效应主要是由具有热惯性(thermal inertia)的小天体将

²⁰¹⁸⁻⁰⁶⁻²⁶收到原稿, 2018-09-30收到修改稿

[†]wangyb@cho.ac.cn

吸收的太阳光以各向异性热辐射的形式释放从而对小天体轨道特征产生影响,其中最显著的表现形式之一是导致小天体轨道半长轴大小发生改变;YORP效应则主要是由于小天体光散射以及热的再发射,进而对小天体的自转状态施加影响的一种长效作用机制.根据经典模型,Yarkovsky效应又可以分成周日(diurnal)作用和季节(seasonal)作用两部分.周日作用的主要表现为由于小行星自转状态的不同,而对轨道改变量产生正负不同的作用效果;而季节作用则会始终导致小行星向内太阳系旋进.Yarkovsky效应和YORP效应的研究已经成为当前太阳系小天体研究领域中核心课题之一.

Flora小行星族是上世纪初继Koronis小行星族、Eos小行星族以及Themis小行星族 之后,Hirayama所提出的小行星族^[4-5].Flora小行星族居于小行星带内边缘处,是内主 带中最大的小行星族之一^[6].此外,由于Flora小行星族所处位置非常接近于 ν_6 长期共振 区域,研究表明Flora小行星族可能是千米级近地小行星(near-earth asteroids, NEAs)及 陨星(meteorites)的主要贡献源之一^[7].同时,现有的研究认为,单纯的碰撞机制不足以 产生足够大的抛射速度使小行星族成员直接跨越 ν_6 长期共振区域到达近地小行星分布 区域,甚至到达 ν_6 长期共振区域所需的抛射速度也是碰撞过程难以提供的;如果Flora小 行星族确实是近地小行星稳定的来源之一,必然存在其他的物理机制,能将族成员运输 至 ν_6 长期共振区域,从而使得Flora族小行星在 ν_6 长期共振作用下被传送至近地小行星轨 道区域,这其中Yarkovsky效应起到了重要的作用^[8].

已有研究明确表明, Yarkovsky效应以及YORP效应分别在小行星轨道和小天体自转特性的演化中扮演着重要的角色^[2-3],但我们对于其实际运行机制的认识还非常有限.现有的研究仅证实, Yarkovsky效应和YORP效应主要与小行星的热特性、几何形状以及自转状态等小行星基础物理性质有关,但相互间的具体联系还不十分清楚.因此,需要更多观测为理论提供可靠的限制.小行星族的基础物理特性是理解Yarkovsky效应和YORP效应具体作用最主要的研究资料之一.特别是,由于Yarkovsky效应所导致的小行星族中顺行、逆行自转状态源分布上的差异,YORP效应所导致的小行星族成员自转轴指向(orientation of pole)倾角(obliquity)与其自转周期的强相关(即所谓的Slivan状态特征)以及致使小型小行星自转速率改变等,都成为构建Yarkovsky效应和YORP效应理论模型必不可少的依据^[2-3,9].

当前,对于Flora小行星族基础物理性质的研究,也已受到了广泛的关注.一方面,对于Flora小行星族成员来说,其轨道参数中轨道半长轴a具有非常明显的弥散,这被认为是Yarkovsky效应对小行星轨道长时间演化施加影响强有力的佐证.另一方面,在Flora小行星族成员自转状态研究中,Kryszczyńsky的研究结果表明,Flora小行星族成员自转轴指向倾角与自转周期间存在显著的关联,并认为这种关联是Flora小行星族在YORP效应作用下处于Slivan状态的证据^[10];但随后Hanuš等人的研究结果则有别于Kryszczyńsky的结论,认为Flora小行星族成员并没有处在Slivan状态之中^[11].显然,想要确定Flora族成员是否处于Slivan状态,需要一个具有更大数目的样本,并对其进行系统分析.

基于小行星光变数据库(Asteroid Lightcurve Database, LCDB)^[12],本研究试图 对Flora小行星族成员的自转特性进行分析.在获得Flora小行星族成员自转速率分布情 况下,利用目前具有最大数目的Flora小行星族自转轴指向倾角样本,我们着重分析了其

60卷

族成员自转轴指向倾角分布的情况,并讨论这些族成员是否处于Slivan状态.本文第2章 主要介绍了小行星光变数据库相应情况以及本研究中是如何筛选获取Flora小行星族成 员样本;在第3章中,分析了Flora小行星族自转速率分布特征;第4章重点研究了Flora小 行星族自转轴指向倾角的分布情况以及其自转状态特征;最后,总结了本研究主要结果.

2 小行星光变数据库与Flora小行星族样本选取

LCDB数据库拥有当前最丰富的小行星基础物理性质研究样本,最早是由Alan W. Harris创建,主要目的是通过收集小行星相关性质(诸如小行星自转周期、几何反照率、绝对星等、分类、小行星族归属、光变振幅等)的已有研究结果,从而为研究者提供可靠的统计样本,是目前被使用频次最高的小行星领域相关数据库之一^[12];截止2018年3月,已经有超过1.9万颗太阳系小天体的相关信息被收录在LCDB数据库中(包括部分尚未被编号的小天体).

LCDB数据库定义的Flora小行星族成员分布在 $a \in [2.15, 2.35]$ au的区间中(如图1所示),相比于其他研究所选取的半长轴分布区域范围有所缩小;但考虑到,在Flora小行星族所居区域周边还分布着其他小行星族,因此在能保证足够样本数目的条件下,适当减少半长轴分布范围可以在一定程度上降低其他小行星族成员混入Flora族的概率. 截止2018年3月,已有超过2600颗Flora小行星族成员的相关基础物理性质信息被收录在LCDB数据库中.为了保证研究的可靠性,本研究对样本进行了筛选,主要选取数据质量评价参数 $U \ge 2$ 的源,同时排除了具有或潜在具有歧义周期(ambiguous period)的源(数据质量评价参数U以及歧义周期的定义具体解释见文献[12]或数据库说明).



图 1 Flora小行星族成员半长轴与绝对星等分布关系.图中三角形代表了逆行自转状态源;矩形代表了顺行自转状态源; 五角星标示出第8号小行星Flora所处位置.不同轨道半长轴-绝对星等关系参数C暗示了不同的演化进程.

Fig. 1 Distribution of the relationship between the semi-major axis and the absolute magnitude of the Flora family asteroids. The triangles represent the retrograde rotating; the rectangles represent the prograde rotating; the star indicates the location of asteroid (8) Flora. Different values of parameter C of the semi-major axis-absolute magnitude relationship imply different evolution processes.

3 自转速率分析

自转周期作为太阳系小天体研究中最基础的可观测量,代表了小天体自形成之后, 在碰撞以及非引力作用机制下,经历长时间演化所导致的当前转动状态.因此,小行星 自转速率的统计分析可以帮助我们提升对于小行星演化机制的认识.早期研究的重点主 要围绕是否能利用麦克斯韦分布(Maxwellian distribution)拟合主带小行星自转速率分 布,研究结果表明对于直径较大(*D* > 50 km)的小行星所组成的样本其自转速率分布可 以利用麦克斯韦分布来进行拟合,但对于直径较小的样本来说,其自转速率分布显著地 背离麦克斯韦分布,快自转与慢自转源比例较相应的麦克斯韦分布拟合结果偏高^[13-15]. 小行星族作为母体发生灾变碰撞后的产物,其自转速率的研究对于认识碰撞过程以及非 引力作用都具有非常重要的意义.Binzel等人总结了前人对于Eos小行星族与Koronis小 行星族自转速率分布研究成果,但受限于当时对于小行星族演化的认识,在他们的研究 过程中仅考虑了碰撞过程本身的作用^[14].当前研究表明,除碰撞因素外还存在其他对小 行星族演化具有显著作用的机制;特别是,由于受太阳辐照作用而产生的YORP效应则 被认为在小行星族自转特性演化过程中起到了关键性作用^[2-3].

基于LCDB数据库,我们选取了一个目前所能获得具有最大数目的Flora小行星 族样本,通过系统地对Flora族成员的自转速率分布进行研究,确认Kryszczyńsky等人 对Flora小行星族成员自转速率的分析结果^[16].图2直方图显示了本研究中所选用样本 的自转速率分布情况和与其相对应的麦克斯韦分布拟合结果(图2中点线所示).从图2中 可以看到,Flora族成员在快速自转区域与慢速自转区域所占比例明显高于相应的麦克 斯韦分布拟合结果,这与早期对主带小型小行星自转速率分布研究的结果一致.同时 可以注意到,族成员在自转速率5-7 d⁻¹之间所占比例明显低于麦氏分布拟合结果.利 用Kolmogorov-Smirnov检验,在0.95置信水平上也否定了Flora小行星族自转速率符合 麦克斯韦分布的假设,从而进一步证实Flora族成员的自转速率分布确实不能采用一个 麦克斯韦分布进行拟合.



图 2 Flora小行星族自转速率分布直方图. 图中点线代表了相应麦克斯韦分布拟合结果.

Fig. 2 Histogram of the spin rate distribution for the Flora asteroid family. The dotted line respesents the corresponding Maxwellian distribution fitting result.

此外,从图2中还可以注意到,Flora小行星族除在慢自转上的比例显著偏高外,与Pravec等^[17]所得主带小直径小行星样本自转速率拥有均匀分布的结果具有显著差异,主要表现为自转速率2-6 d⁻¹范围内的小行星数目相较于其他区域显著增多.因此,我们试图对是否是由于样本中包含了更多较大直径的族成员导致Flora小行星族自转速率在2-6 d⁻¹分布区域中表现出更高占比的特征进行讨论.我们将Flora族成员按不同直径大小分成5个子样本(分别为 $D \le 1$ km、1 km < $D \le 3$ km、3 km < $D \le 15$ km、15 km < $D \le 30$ km以及D > 30 km),并对子样本的自转速率分布进行分析.如图3所示,Flora小行星族自转速率在2-6 d⁻¹区域中拥有相对较高的比例并不单纯是由于样本中包含较多具有较大直径成员所致,而是Flora族中不同大小成员的共同特征.

回顾早期的研究, Pravec等人对由直径3-15 km的主带小行星所组成样本的自转速 率进行了分析,表明除慢自转小行星比例有较明显地偏高外,小直径源的自转速率表现 出均匀分布特征,通过假定由YORP效应所引起的小直径源自转速率改变量独立于其自 转速率,从而推断出3-15 km主带小行星经长时间演化后自转速率分布会表现近似均匀 分布的特征^[17].我们发现对于Flora小行星族中直径在3-15 km成员所组成的子样本,其 自转速率整体表现出近似的均匀分布特征(如图3 (A)所示),大体上与Pravec等人所获 得的结果一致,但不存在如Pravec等人得到的显著"慢自转超".并且Pravec等人也认为 其分析中这种在自转速率分布中慢自转显著聚集现象的成因尚不完全清楚,但强调了 当YORP效应使直径3-15 km主带小行星的自转速率衰减到一定程度后,可能YORP效 应不再是小行星自转速率演化的主导因素.此时慢自转小天体会有很大可能处于非惯 量主轴转动状态,当非稳状态的持续时标可以与YORP效应作用时标相比拟时,就会发 生显著的聚集特征^[17].而我们发现对于Flora小行星族而言,直径3-15 km的成员中不存 在显著的慢自转超,这一现象实际上可能预示了YORP效应尚未能导致大量的Flora族 成员自转速率减缓至非稳自转状态,这与Flora小行星族相对年轻的年龄相一致. 另 外, Flora族小行星自转速率的分析为YORP效应对于小行星自转演化的显著作用时标 提供了一个潜在限制,表明YORP效应对于直径3-15 km小行星的经典作用时标要大 于Flora小行星族的年龄.

对比图3 (A)与图3 (B),不难发现对于Flora族中直径小于15 km的成员表现出非常 有趣的现象,即随着直径的减小自转速率分布表现出显著聚集在3-5 d⁻¹区间范围内的 趋势.这反映了随着直径的减小,YORP效应作用强度发生了变化,所引起更小直径小 天体的自转速率改变具有选择效应,从而导致小直径源自转速率分布具有显著聚集.从 图3 (B)中也可以注意到,更小直径的Flora族成员在超慢自转区域中比例有所增加;这 是由于随着直径的减小,YORP效应的作用强度变得更显著,意味着可能更小的族成员 相比于3-15 km的源更多地由于YORP效应导致其自转速率更快地减缓,致使其处于非 稳状态,并产生了如Pravec等人所言的演化时间上的延滞^[17],从而在自转速率分布中超 慢自转区域出现相应比例的增加.根据当前的理论,YORP效应对于具有较大直径的小 天体影响有限,但很难严格界定作用强度与小行星直径大小之间具体关系.而小行星族 起源于其母体的灾变碰撞,所存留的成员中包含了不同大小的碰撞碎片,因此提供了更 多的关于YORP效应作用效果的相关信息.从图3 (C)-(D)中,可以注意到,在Flora小行 星族中直径大于30 km的族成员自转速率显著聚集在一个很小的范围内,表明了Flora族 原始母体自转周期可能分布在8-24 h之间;随着直径的减小,YORP效应明显表现出 对于15 km < $D \leq 30$ km族成员自转速率作用强度的提升,导致相应族成员自转速率 开始偏离其母体自转特性,自转速率分布区间也开始变大;当族成员直径减小至3-15 km范围时,自转速率分布范围达到最大,并表现出近似均匀分布特征.同时对比图3 (C)和图3 (D),可以注意到D > 30 km的族成员自转速率主要集中在2-3 d⁻¹,其中值为 2.50 d⁻¹;在15 km < $D \leq 30$ km的成员中自转速率集中在2-5 d⁻¹,中值则为3.36 d⁻¹; 当直径减小到3-15 km区域时,虽然自转速率近似均匀分布,但在4-5 d⁻¹区域中依旧 表现出一定比例上的升高,而其自转速率中值则出现在4.50 d⁻¹.从而表明,YORP效 应不但会导致直径大于3 km的Flora小行星族成员自转速率分布区域变广,也更倾向 于致使其自转增速.这与当前YORP效应对于近地小行星自转速率影响的直接探测结 果相一致,但也必需认识到,直接探测结果可能受到观测上选择效应的影响;因此,这 种YORP效应倾向于导致自转增速的现象需要更多的证据支持,特别是更多小行星族自 转特性分析将可能提供更多有效的限制.



Fig. 3 Histograms of the spin rate distributions for the Flora family asteroids

4 自转轴指向分析

60 卷

在早期小行星自转轴指向的分布研究中, Magnusson首先对20颗具有较大直径的 主带小行星进行了分析, 发现其自转轴指向的经度分布表现出近似均匀的分布^[18].随 后, Kryszczyńsky等人的研究结果表明, 小行星自转轴会表现出整体倾向于与太阳系 黄道面法线平行的特征^[19]; 而在后续的研究中, Marciniak与Michalowski的分析结果却 显示, 小行星自转轴指向分布在低纬度处并没有显著低的比例, 而是更多地聚焦在纬

1期

度 $\beta_p > 0^{\circ}$ 区间中, β_p 显著倾向于分布在高纬度区域^[20]. Hanuš等人按不同直径大小 对小行星样本进行分组,并对其自转轴指向分布进行了研究^[21],其结果一定程度上表 明Kryszczyńsky等^[19]和Marciniak与Michaĺowski的分析结果^[20]成立需要满足特定的条 件:对于直径大于60 km的小行星样本其自转轴的纬度分布与Marciniak、Michaĺowski 2人的结论相似;但对于具有小直径的小行星更趋向于符合Kryszczyńsky等^[19]的研究结 果. 与此同时, Slivan对Koronis小行星族的自转状态进行了研究,发现其逆行自转状态 成员自转轴指向倾角和自转周期分散在较广的范围内,而对于顺行自转的Koronis族 成员来说,自转轴指向倾角聚集在 $\epsilon_p \in [42^{\circ}, 50^{\circ}]$ 的一个较小的区域中,同时自转周期 则分布在7.5–9.5 h之间,即所谓的Slivan状态^[9]. 随后,Vokrouhlický等人对这种现象进 行了研究,并认为是由YORP效应引起Koronis小行星族成员陷入轨旋共振(spin-orbit resonance)所致^[22]. 随后,Kryszczyńsky通过对Flora小行星族自转特性的分析认为, Flora族成员也处于Slivan状态中^[10],但被Hanuš等人的后续研究所否定^[11].

正是基于以上原因,使得我们对Flora小行星族成员自转特性的具体状态感兴趣.通 过LCDB数据库,本研究选取了由124颗单体Flora族小行星所组成的样本,我们试图对 这些小行星族成员的自转状态参数信息进行分析,并依据这些小行星的轨道根数1获得 其自转轴指向倾角, 共包括71颗顺行自转小行星以及53颗逆行自转小行星. 这其中顺、 逆行状态源数目之比约1.34,表明Flora族成员整体倾向于顺行自转. 从图4中可以注意 到,顺行自转小行星族成员自转轴指向倾角集中在20°-50°之间,中值为37°,而逆行自转 的则集中分布在130°-170°的区间范围内,中值取149°.相较而言,顺行自转源的自转轴 指向倾角分布更集中,这与Slivan状态中自转轴指向倾角的分布取向非常相似.我们以 轨道半长轴2.2 au为分界,分别对其两侧族成员自转顺行、逆行情况进行了分析,其中共 有27颗族成员其半长轴小于2.2 au, 而大于2.2 au的(包括8号小行星Flora在内)共有97颗 小行星. 我们发现对于半长轴小于2.2 au的族成员,其自转状态表现出倾向于逆行自 转,其顺行状态源占比仅0.296,与近地小行星中相应顺逆行自转状态源约1:3的比例接 近^[2-3],表明Flora小行星族与近地小行星间具有潜在的联系,同时考虑到Flora小行星族 非常接近于内主带边缘v₆长期共振区域,暗示了Flora族是近地小行星潜在的主要来源 之一. 通过对比图5中Flora小行星族成员自转轴指向倾角的分布, 可以注意到, 对于半 长轴不小于2.2 au的族成员, 其自转状态更倾向于顺行自转, 这符合Yarkovsky效应的理 论预测;但同时我们还注意到,对于半长轴不小于2.2 au的族成员来说,其顺行与逆行自 转源间的比例约为2:1,这一比例是否具有更深层次的内涵则需要更多的观测资料以及 理论研究支持. 不同于以往的研究, 我们分别对两个区域中自转轴指向倾角与自转速率 的分布情况进行了分析. 如图6 (A)所示, 对于半长轴小于2.2 au的族成员所组成的样本, 其顺行自转相较于逆行自转源更倾向于有较慢的自转速率,但考虑到这一区域中顺行自 转状态源的数目较少,因此这一趋势具有较大的不确定性,有很大可能是选择效应所引 起的. 特别是对比于半长轴不小于2.2 au的族成员所组成的样本则没有表现出明显的趋 势(如图6 (B)). 此外, 从图6中可以注意到, 虽然Flora族成员自转轴指向倾角会呈现出显 著聚集的倾向,但其自转速率则分布在一个较大的区间范围中,这表明对于Flora小行星 族来说,其成员可能并不处于Slivan状态之中.同时,由图1可以注意到,对于半长轴小

 $^{^1~{\}rm https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html}$

于2.2 au区域中顺行自转族成员的轨道半长轴显著地聚集在2.2 au附近;相对而言,逆行自转族成员则具有更大的半长轴分布范围.



图 4 Flora族成员自转轴指向倾角分布直方图

Fig. 4 Histogram of the obliquity distribution of the orientation of pole for the Flora family asteroids



图 5 不同轨道半长轴区域中Flora族成员自转轴指向倾角分布直方图

Fig. 5 Histogram on the obliquity distribution of the orientation of pole for the Flora family asteroids belonging to different regions in the semi-major axis space



图 6 自转轴指向倾角-自转速率平面上的数密度分布((A)半长轴< 2.2 au; (B)半长轴≥ 2.2 au). 图中灰度棒表明了数 密度分布的归一化概率密度函数.

Fig. 6 Number density distributions in the obliquity of the orientation of pole and the spin rate plane ((A) semi-major axis < 2.2 au; (B) semi-major axis ≥ 2.2 au). The grayscale bar indicates the normalized probability density function of the number density distribution.

但在对这124颗族成员轨道半长轴与绝对星等分布的进一步分析中,我们发现,在 半长轴大于2.2 au的顺行自转状态的族成员中,有部分源的参数分布表现出显著的聚集 现象,这不能简单地用观测的选择效应来解释.同时,我们发现这些族成员表现出了相 似的特点,即分布于轨道半长轴-绝对星等关系中参数C ~ 0.00010的曲线附近,并且轨 道半长轴聚集在一个较小的范围内,这在以往研究中并没有被广泛关注.为了更细致 地对这一区域中的族成员进行分析,我们一方面需要所选取的子样本具有一定的数量 从而确保研究的可靠性,另一方面又要尽可能减少潜在污染源对于样本的影响.因此, 我们选取0.00008 ≤ C ≤ 0.00013以及半长轴[2.21, 2.25] au这一个确定区域中的源进行 分析. 在这一区域中共包括了26颗处于顺行自转状态的族成员. 占顺行自转族成员总数 目的0.37. 通过对这些族成员自转轴指向倾角与自转周期的分析, 我们发现这些小行 星中有9颗族成员的倾角与其自转周期分布表现出显著聚集现象(如图7所示). 分析表 明,这9颗Flora小行星族成员自转轴指向倾角显著聚集在35°-40°之内,自转周期则分布 在3-7 h区间之中(表1列出了这9颗小行星的相关信息),这与Slivan所得Koronis小行星族 所表现出的Slivan状态中顺行自转源的自转特性非常类似. 这是否暗示了这种自转轴指 向倾角与自转周期间的强关联是在YORP效应作用下各个小行星族自发形成的普遍现 象?但对于每个小行星族中的绝大多数成员来说,需要满足一定的前提条件才能使其处 于这种强关联状态之中,而这些前提极有可能与小行星的原始自转状态有关.换而言之, 如果小行星族成员能居于Slivan状态之下,其原始的自转轴指向和自转周期必须具有一 定的特殊限制,从而保证了在YORP效应机制的长期作用下,导致其自转状态演化至轨 旋共振状态.同时,这些初始条件又必然与小行星的轨道半长轴大小有关,也应与轨道 半长轴-绝对星等关系中参数C存在相关性. 但在本分析所选区域中共有26颗族成员处 于顺行自转状态,为什么仅有这9颗族成员能处于这种关联状态之中,而其他的源却没 有.可能的解释是那些没有处于此状态的族成员初始自转状态不完全满足特定条件,致 使这些小行星还处于演化历程中,这也在一定程度上解释了在我们的分析中这种强关联 为什么会潜在与参数C有相关性(C与演化时标有关),同时也与Flora小行星族有较为年 轻的年龄一致[23].



图 7 自转轴指向倾角-自转周期平面上的数密度分布.空心圆的不同大小代表了9颗小行星不同直径的大小.图中灰度棒 表明了数密度分布的归一化概率密度函数.

Fig. 7 Number density distribution in the obliquity of the orientation of pole and the rotation period plane. The different sizes of the hollow circle represent different diameters of the given nine asteroids. The grayscale bar indicates the normalized probability density function of the number density distribution.

Asteroid	Class	Absolute magnitude	Albedo ^a	Period	Semi-major axis	Obliquity
		/mag		$/\mathrm{h}$	/au	/°
(291) Alice	\mathbf{S}	11.45	0.2075	4.3160	2.222	37
(296) Phaetusa	\mathbf{S}	12.62	0.24	4.5380	2.229	38
(825) Tanina	\mathbf{S}	11.84	0.1508	6.9398	2.226	38
(915) Cosette	\mathbf{S}	11.76	0.24	4.4697	2.228	37
(1518)Rovaniemi	\mathbf{S}	12.40	0.24	5.2505	2.225	37
(1785) Wurm	\mathbf{S}	12.50	0.24	3.2693	2.236	38
(2094) Magnitka	\mathbf{S}	12.49	0.1204	6.1122	2.232	37
(3573) Holmberg	\mathbf{S}	12.90	0.24	6.5425	2.239	39
(3918) Brel	\mathbf{S}	13.03	0.2732	3.0968	2.245	37

表 1 Flora小行星族特定区域中9颗成员信息 Table 1 Information of the nine Flora family asteroids locating in a special region

^a For those objects whose albedos were not derived from the corresponding observations, the estimated albedo $p_{\rm v} = 0.24$ was used in LCDB.

为了进一步确认以上推断,我们对比了Slivan所得Koronis小行星族顺行自转成员自转状态^[9]与其轨道分布,我们发现其中(311) Claudia、(534) Nassovia和(720) Bohlinia的轨道半长轴-绝对星等分布聚集在一个较小的范围内,但(1223) Neckar则不能纳入到我们所假设的框架下,其明显偏离Claudia等所在区域.我们也注意到,Hanuš等人对Neckar自转轴指向进行了重新评估,其所获得的结果与Slivan所得有一定的偏差^[11];利用Hanuš等人新的结果,我们重新估算Neckar的自转轴指向倾角约为61°,这已超出了Slivan所得Koronis小行星族Slivan状态中原顺行自转成员自转轴指向倾角所聚集的区间.

以上这些结果实质上表明,我们目前对于YORP效应实际作用机理的认识可能是 不全面的,显然导致小行星族成员处于Slivan状态需要特定的初始限制.但想要确定 这些初始限制还需要更多的小行星族自转状态统计分析来提供更全面的证据.特别是 对Vesta小行星族、Eos小行星族和Eunomia小行星族等的相关研究将能为我们提供更 多更丰富的信息;同时,对于Flora以及Koronis小行星族来说,越来越多的族成员自转状 态分析结果的获得,有利于扩大研究样本数目,从而为Slivan状态以及YORP效应研究提 供更详尽的资料.

5 结论

小行星族自转特性的研究为我们认识小行星碰撞过程以及了解Yarkovsky效应对于 小行星轨道参数和YORP效应对于小行星自身自转状态演化的影响提供了可靠证据.基 于LCDB数据库,我们对Flora小行星族成员自转特性的分析结果表明:

(1)在一个具有更大数目的研究样本基础上,通过对Flora小行星族成员自转速率分 布进行分析,进一步证实Kryszczyńsky等人关于Flora小行星族自转速率分布不服从麦 克斯韦分布的结果;同时确认了族中慢自转以及快自转源数目远超于麦克斯韦分布理论 拟合结果的结论^[16].此外,我们注意到,对于Flora小行星族来说,其直径大于15 km的成员自转速率主要分布在1-5 d⁻¹范围内;直径3-15 km族成员所组成的样本,其自转速率则表现出近似均匀分布特征.我们还发现随着直径的减小,小直径Flora族成员表现出自转速率倾向于聚集在3-5 d⁻¹这一较小范围内的趋势.

(2)通过对由124颗Flora族成员所组成的自转轴指向倾角样本的分析,我们确 认Flora小行星族成员自转状态整体表现出倾向于顺行自转. 特别是对于轨道半长 轴不小于2.2 au的族成员来说,绝大多数处于顺行自转状态;而对于半长轴小于2.2 au的 成员则相反,更多地表现出逆行自转状态,这与Yarkovsky效应的理论预测一致;同时, 我们也注意到,对于半长轴小于2.2 au的族成员,其逆行自转与顺行自转状态源比例近 似于近地小行星中逆行自转与顺行自转状态源3:1的比例,表明Flora小行星族与近地小 行星存在关联,暗示了Flora族是近地小行星重要来源之一.

(3)基于对Flora小行星族成员自转状态的分析,我们发现Flora小行星族所有成员并不处于一个统一的Slivan状态中,但有大量顺行自转族成员聚集在一个很小的轨道半长轴-绝对星等分布范围内,其中有9颗族成员表现出类似Slivan状态中顺行自转源的特征.因此,我们推断Slivan状态可能广泛存在于诸多小行星族之中.但对于一个确定的小行星族来说,并不意味着所有顺行自转族成员都能表现出自转轴指向倾角与自转周期间的强关联.这种现象可能与小行星族形成后,成员所拥有的初始自转状态有关,需强调只有少数满足特定初始限制的族成员,才能在YORP效应驱使下经历足够长时间的演化,最终形成一种相对稳定的轨旋共振状态.特别是这种演化过程与族成员轨道半长轴和其大小存在必然联系.

致谢 作者向审稿老师表示由衷的谢意, 感谢审稿老师深刻的点评与建议, 使本文质量有 了显著提升.

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, Bottke Jr W F, Rubincam D P, et al. AREPS, 2006, 34: 157
- [3] 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: 509-531
- [4] Hirayama K. AJ, 1918, 31: 185
- [5] Hirayama K. AOTok, 1919, 1: 52
- [6] Nesvorný D, Brož M, Carruba V. Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families//Michel P, DeMeo F E, Bottke W F. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 297-321
- [7] Vokrouhlický D, Bottke W F, Nesvorný D. AJ, 2017, 153: 172
- [8] Bottke Jr W F, Vokrouhlický D, Rubincam D P, et al. The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids//Bottke Jr W F, Cellino A, Paolicchi P, et al. Asteroids III. Tucson: University of Arizona Press, 2002: 395-408
- [9] Slivan S M. Natur, 2002, 419: 49
- [10] Kryszczyńsky A. A&A, 2013, 551: A102
- [11] Hanuš J, Brož M, Ďurech J, et al. A&A, 2013, 559: A134
- [12] Warner B D, Harris A W, Pravec P. Icar, 2009, 202: 134
- [13] Farinella P, Paolicchi P, Zappala V. A&A, 1981, 104: 159

- [14] Binzel R P, Farinella P, Zappala V, et al. Asteroid Rotation Rates Distributions and Statistics//Binzel R P, Gehrels T, Matthews M S. Asteroids II. Tucson: University of Arizona Press, 1989: 416-441
- [15] 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
- [16] Kryszczyńsky A, Colas F, Polińska M, et al. A&A, 2012, 546: A72
- [17] Pravec P, Harris A W, Vokrouhlický D, et al. Icar, 2008, 197: 497
- $\left[18\right]$ Magnusson P. Icar, 1986, 68: 1
- [19] Kryszczyńsky A, La Spina A, Paolicchi P, et al. Icar, 2007, 192: 223
- [20] Marciniak A, Michaĺowski T. A&A, 2010, 512: A56
- [21] Hanuš J, Ďurech J, Brož M, et al. A&A, 2011, 530: A134
- [22] Vokrouhlický D, Nesvorný D, Bottke W F. Natur, 2003, 425: 147
- [23] Dykhuis M J, Molnar L, Van Kooten S J, et al. Icar, 2014, 243: 111

Study on the Spin Characteristics of the Flora Asteroid Family

WANG Yi-bo LIU Cheng-zhi FANG Cun-bo XU Yan

(Changcun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117)

ABSTRACT Asteroid families are the remnants of the catastrophic collision, and their fundamental physical properties provide us the information of their parent bodies and evolutions. Especially, the orbit and spin characteristics can reflect the influences of the Yarkovsky effect and the Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP) effect on the evolution of the asteroid family, respectively. Based on the Asteroid Lightcurve Database (LCDB), the spin rate distribution of the Flora asteroid family is studied, and a tendency that the spin rates of the small Flora family asteroids assemble primarily in the range of $3-5 d^{-1}$ is found; by analysis on the spin states of the Flora family asteroids, a phenomenon can be also found that the most majority of this asteroid family members lie in the prograde rotating state. However, for some Flora family asteroids which locate in the semi-major axis less than 2.2 au, the ratio between the number of prograde rotating bodies and that of retrograde ones is similar to that of the near-earth asteroids which have the corresponding ratio of 1:3. Furthermore, for those prograde rotating Flora family asteroids whose semi-major axis is more than 2.2 au, a portion of the members assemble in a special range reflecting a certain relationship between the semi-axis and the absolute magnitude, in which nine members show the similar feature of the Slivan state.

Key words minor planets, asteroids: general, Flora asteroid family, spin characteristics, Yarkovsky effect, YORP effect

1 - 12