

长周期彗星动力学特性统计研究*

杨梅^{1,2,3} 赵玉晖^{1,2,3†} 季江徽^{1,2,3‡} 姜浩轩^{1,3}

(1 中国科学院紫金山天文台 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 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)

摘要 基于JPL (Jet Propulsion Laboratory)和MPC (Minor Planet Center)的彗星观测数据,对长周期彗星(Long Period Comet, LPC)的轨道进行逆向演化,得到其原始轨道,并分析了LPC的观测轨道和原始轨道的动力学特性.研究表明:LPC观测轨道半长轴倒数 $(1/a)_{\text{obs}}$ 和原始轨道半长轴倒数 $(1/a)_{\text{ori}}$ 分布存在显著差异,峰值分别位于 $(1/a)_{\text{obs}} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 和 $(1/a)_{\text{ori}} \sim 6 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$;大近日点LPC(近日点距离 $q > 3.1 \text{ au}$)和小近日点LPC(近日点距离 $q \leq 3.1 \text{ au}$)的原始轨道 $(1/a)_{\text{ori}}$ 峰值位置相同,均位于 $1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$;JPL和MPC数据中LPC的原始轨道 $(1/a)_{\text{obs}}$ 峰值没有显著差异,均在 $1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$;奥尔特云彗星(Oort cloud comet)中很多拥有较大的近日点距离(超过50%的奥尔特云彗星 $q > 3.1 \text{ au}$).其对了解长周期彗星和奥尔特云彗星的动力学特性提供了重要信息,也将为未来以长周期彗星为目标的空间任务目标选取提供研究基础.

关键词 彗星; 普通, 行星系统, 奥尔特云, 方法: 统计
中图分类号: P136; **文献标识码**: A

1 引言

彗星是一类绕日运行、在太阳辐射作用下具有挥发性活动(表层和亚表层冰升华为气体)的小天体^[1]. 彗星的起源一直备受关注, Morbidelli等^[2]、Russo^[3]认为彗星起源于海王星轨道以外的两个低温区域: 柯伊伯带(热平衡温度为40 K)和奥尔特云(热平衡温度为10 K), 研究发现还存在着另外两个彗星发源地, 即主小行星带和星际空间^[4-5]. 相较于其他太阳系天体, 彗核内部演化程度很小, 较好地保留了太阳系形成早期的原始物质(冰及复杂有机物)^[1], 对彗星的全面深入研究能够为揭开生命起源以及行星与太阳系的形成和演化过程提供线索^[6].

长周期彗星(Long Period Comet, LPC)的传统定义是轨道周期 $P > 200 \text{ yr}$, 仍被太阳引力束缚在太阳系的椭圆轨道彗星^[7-8]. 大部分长周期彗星可能来自遥远的奥尔特云(Oort cloud)^[9-11]. 它们拥有偏心率很大的椭圆轨道, 但由于质量较小、从远距离靠近太阳的漫长过程中, 其轨道会受到大行星的引力摄动而发生显著变化^[12]. 观测轨道为抛物线或双曲线轨道的彗星, 除了星际彗星2I/Borisov之外, 其“原始”轨道(未进入太阳系行星区域前)均是椭圆轨道, 这类彗星被称为“近抛物线彗星”(nearly parabolic comet)^[12-13], Oort^[9]、Królikowska等^[13]将此类彗星与“长周期彗星”视为等同展开

2021-09-10收到原稿, 2021-11-25收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12073084、12033010), 中国科学院先导B项目(XDB41000000), 空间先导预研项目(XDA15017600), 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究项目(CMS-CSST-2021-B08)和紫金山天文台小行星基金会资助

†zhaoyuhui@pmo.ac.cn

‡jjjh@pmo.ac.cn

了相关研究. 本文使用了他们的定义, 并将长周期彗星数据按轨道类型分为椭圆轨道、抛物线轨道和双曲线轨道进行了研究.

Oort^[9]发现长周期彗星原始半长轴倒数在零附近($0 < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)有极其明显的峰值分布, 将此峰值区域称为“Oort peak”(奥尔特峰)、称峰内彗星为“Oort cloud comet”(奥尔特云彗星), 称峰值以外的非奥尔特云彗星($(1/a)_{\text{ori}} > 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)为“剩余彗星”(Remaining LPC)^[9, 14]. 来自奥尔特云的彗星中包含很多首次到达太阳系行星区域的“新”彗星, 因此 $(1/a)_{\text{ori}} = 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 也作为动力学“新”彗星(Dynamically New Comet, DNC)和动力学“旧”彗星(Dynamically Old Comet, DOC)的判据^[9]. 随后许多学者在不同工作中对该判据进行了修改, Kresák等^[15]和Dybczyński等^[16]认为应该将DNC加上近日点距离的限制(近日点距离 q 普遍大于15 au), Matese等^[17]于1989年将DNC的定义修改为 $(1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q > 15 \text{ au}$, Królikowska等^[14, 18-20]首先采用了较窄的定义($(1/a)_{\text{ori}} < 10^{-5} \text{ au}^{-1}$)对DNC进行了研究, 之后将定义区间扩大并明确指出: $(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 的彗星全部为DNC; $(1/a)_{\text{ori}} > 5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 的彗星全部为DOC; 中间区域($2.5 \times 10^{-5} < (1/a)_{\text{ori}} < 5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$)既有DNC也有DOC. 实际上对长周期彗星的半长轴很难进行准确测定, 观测定轨和演化计算时也存在随机误差^[14]. 因此, 较宽泛的奥尔特云彗星的定义: $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 被广泛接受和认可^[14, 18, 21], 我们也使用该定义对奥尔特云彗星进行研究.

图1是奥尔特云彗星、DNC、DOC和“剩余彗星”的定义图. 红色双向箭头: “Oort cloud comet”是奥尔特云彗星($0 < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)^[9]、“Remaining LPC”是“剩余彗星”($(1/a)_{\text{ori}} > 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)^[9, 14]、“DNC”($(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$)和“DOC”($(1/a)_{\text{ori}} > 5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$)分别表示全部为动力学“新”彗星和全部为动力学“旧”彗星的范围^[20]. “DNC defined by Matese”表示被Matese等^[17]所定义的DNC范围(如图1中蓝色

区域). 我们收集了2021年4月19日之前在JPL¹ (Jet Propulsion Laboratory)和MPC² (Minor Planet Center)中记录的长周期彗星, 以网站公布的轨道数据作为观测轨道根数, 逆向积分得到它们进入太阳系行星区域之前未受到巨行星显著扰动的原始轨道根数(积分方法详见第2部分). 将 $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 范围内的奥尔特云彗星和“剩余彗星”分别用紫色散点和红色散点展示在图1中, 其中彗星C/2019 E3、C/2003 A2和C/2010 L3的近日点距离较大(在10 au附近). 若根据Matese等^[17]对DNC的定义(图1中蓝色区域), 可以发现目前探测到的彗星中没有DNC, 我们采用Królikowska等^[20]对DNC的定义($(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$)进行了后续分析. 图1中粉色区域($(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q \leq 3.1 \text{ au}$)表示探测到的近日点距离较小的DNC范围^[16, 20], 它们非常适合作为探测目标^[22-23]; 绿色区域($5 \times 10^{-5} < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q > 3.1 \text{ au}$)是探测到的近日点距离较大的奥尔特云彗星的范围^[9, 14], 它们的近日点离太阳较远, 在近日点前后活动性较小^[6, 24-26], 被探测到的几率较小^[27]. 黄色区域($(1/a)_{\text{ori}} > 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)是探测到的近日点距离较小的“剩余彗星”的范围^[9, 14], 它们多次经过太阳附近, 由于物质蒸发亮度逐渐变暗^[9, 28-29].

为了深入了解彗星的特性及其形成和演化历史的相关问题, 对彗星开展深空探测成为当前热点^[11]. 目前已经对短周期彗星(Short Period Comet, SPC)进行了多次探测(包括哈雷型彗星和多颗木星族彗星)^[5], 对主带彗星、长周期彗星和星际彗星的探测是彗星探测领域中的空白. 短周期彗星多次靠近太阳, 经历了较为强烈的彗核活动和演化, 而长周期彗星长期处于较冷区域, 其所携带的初期信息被完好保留, 只在经过近日点前后活动性强烈^[6, 24], 它们从被发现到运行至近日点附近(适合探测的区域)往往只有几年或半年, 没有足够的时间设计特定探测器对其进行探测^[6, 14]. 欧空局(European Space Agency, ESA)的一项彗星探测任务Comet Interceptor将首次飞越探测来自外

¹JPL网址: <http://ssd.jpl.nasa.gov>

²MPC网址: <http://minorplanetcenter.net>

太阳系深处的一颗新彗星或星际天体, 探测器将在L2点等待, 最终将在距离目标100–1000 km 的地方进行飞越探测^[22]. 我国也正在积极推进对长周期

彗星和星际彗星的探测计划³.

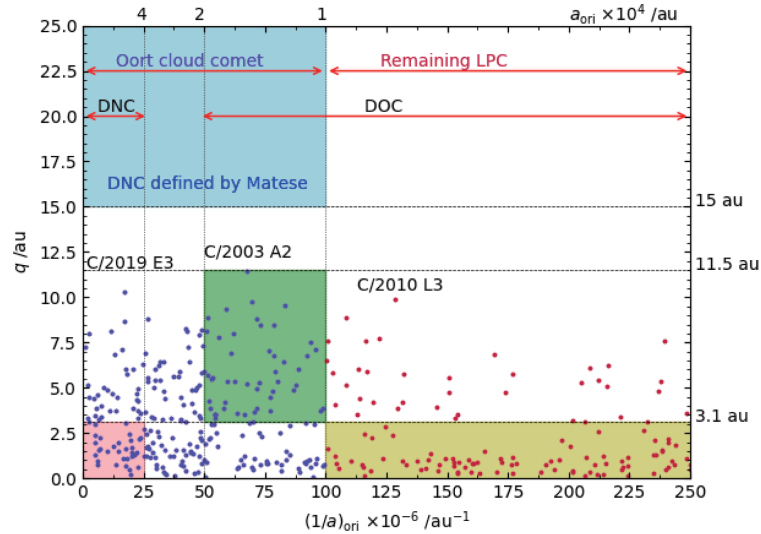


图1 长周期彗星相关定义图示说明. 横坐标为LPC原始轨道的半长轴倒数, 纵坐标为观测轨道的近日点距离. “Oort cloud comet”是奥尔特云彗星 $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ [9]; “Remaining LPC”是“剩余彗星” $(1/a)_{\text{ori}} > 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ [9, 14]; “DNC”表示全部为动力学“新”彗星的区域 $(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ [20]; “DOC”表示全部为动力学“旧”彗星的区域 $(1/a)_{\text{ori}} > 5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ [20]; 中间区域既有“新”彗星, 又有“旧”彗星[20]. 蓝色区域是Matese等[17]对DNC的定义, 即 $(1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q > 15 \text{ au}$; 粉色区域 $((1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q \leq 3.1 \text{ au}$)表示探测到的近日点距离较小的DNC范围[16, 20]; 绿色区域 $(5 \times 10^{-5} < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q > 3.1 \text{ au}$)是探测到的近日点距离较大的奥尔特云彗星的范围[9, 14]; 黄色区域 $((1/a)_{\text{ori}} > 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1})$ 是探测到的近日点距离较小的“剩余彗星”的范围[9, 14].

Fig. 1 The illustration of the relevant definitions of LPCs. The abscissa is the reciprocal of the semi-major axis of the original orbit of a long-period comet, and the ordinate is the perihelion distance of the observed orbit. The “Oort cloud comet” is $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ [9]; the “Remaining LPC” is $(1/a)_{\text{ori}} > 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ [9, 14]; the “DNC” represents the region of all dynamically new comets, i.e. $(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ [20]; the “DOC” represents the region of all dynamically old comets, i.e. $(1/a)_{\text{ori}} > 5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ [20]; there are both DNC and DOC in the middle region[20]. The blue area is Matese et al.[17] definition of DNC, namely $(1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$, $q > 15 \text{ au}$; the pink region $((1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ and $q \leq 3.1 \text{ au}$) represents the range of DNC detected with small perihelion distances[16, 20]; the green area is the range of “Oort cloud comet” detected at large perihelion distances $(5 \times 10^{-5} < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$, $q > 3.1 \text{ au})$ [9, 14]; the yellow area is the range of “Remaining LPC” detected at small perihelion distances $((1/a)_{\text{ori}} > 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1})$ [9, 14].

长周期彗星动力学特性的研究, 尤其是原始半长轴倒数和近日点距离的分析, 对长周期彗星的探测意义重大. 本工作中我们首先对长周期彗星的数据来源和分析方法进行了介绍(见第2部分); 其次对长周期彗星动力学特性(半长轴倒数、近日点距离)进行了研究分析(第3部分); 最后对工作进行总结(第4部分).

2 长周期彗星观测数据和统计

本文的观测数据来源于更新较快、轨道信息较完善的两个网站JPL和MPC, 目前(2021年4月)在JPL数据库中已发现了近千颗长周期彗星. 在长周期彗星数据中包括很多近日点距离较小的掠日彗星(sungrazing comet), 它们是太阳系形成早期时大彗星的碎片, 受到木星引力作用被扰乱到目前

³国家航天局网址: <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6>

的轨道^[30-31]. 由于非常靠近太阳, 在太阳风的强烈作用下彗核(直径通常只有几十米)极易被完全破坏^[32]. 掠日彗星大部分是SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)发现的^[30-32], 由于SOHO的天体测量质量较差(受限于日冕仪成像元件和有效孔径^[31]), 再加上掠日彗星极短的轨道弧段(典型值仅1-3 d), 目前所获得的掠日彗星轨道数据大多数是在假设偏心率 $e = 1$ 的情况下模糊估计的^[30]. 掠日彗星主要被划分为4个彗星群, 即Kreutz、Meyer、Marsden和Kracht^[32]. 数量最多的Kreutz彗星群以Heinrich Kreutz的名字命名^[33-34], 是由公元326年的一颗彗星分裂成的一组彗星群^[33, 35-36], 近日点距离大概只有1-2 R_{\odot} ($0.00465-0.0093$ au, $1 R_{\odot} = 0.00465$ au)^[30]、轨道倾角较高($i \sim 140^{\circ}$)并且轨道周期为500-1000 yr^[34, 37-38]. 对第2大彗星群Meyer的溯源是最难的, 目前无法确定此彗星群形成的时间和轨道周期^[30]. Marsden和Kracht起初是作为两个单独彗星群被记录的, 随后的研究确定两者具有较紧密的联系, 被修正后的轨道呈现出周期性和低倾角的特点^[39], 目前已经确定它们是在过去800-1200 yr的某个时候从彗星96P/Machholz 1中分离出来的^[30, 40]. 我们根据4个彗星群的列表数据⁴, 得到了JPL中的1406颗彗星群数据(1263颗Kreutz、89颗Meyer、26颗Marsden和28颗Kracht), 逆向积分计算出了这些彗星的原始轨道根数.

我们采用最小可接受近日点距离0.07 au作为限制^[14]将JPL和MPC中轨道确定的长周期彗星(87颗)与4个彗星群的原始轨道半长轴、近日点距离和轨道倾角进行了比较, 如图2所示. 可以发现, 4大彗星群的近日点距离全部小于0.07 au, 在彗星群聚集分布的区域存在一定数量的长周期彗星($q < 0.07$ au). 至今仍无法确定4大彗星群相互之间、彗星群与长周期彗星的动力学联系. 因此, 对近日点距离小于0.07 au的所有彗星进行清晰明确的分类, 彻底将彗星群和长周期彗星分开, 进而防止彗星群对长周期彗星数据($q < 0.07$ au)的“污染”显得格格外困难. Królikowska等^[14]也考虑到掠日彗星对长周期彗星数据纯净度的影响、掠日彗星产生的难以分析的复杂活动, 提出对彗星群的研究需要一个与长周期彗星完全不同的方法, 并直接删除了

所有 $q < 0.07$ au的彗星^[14, 30]. 为了确保本文长周期彗星数据的可靠性和准确性, 我们在本文第3部分(动力学特性统计分析)直接删除了JPL和MPC中所有 $q < 0.07$ au的彗星(其中包括所有4大彗星群和87颗长周期彗星).

需要说明的是, 由于JPL和MPC彗星数据的观测历元不同^[41], 同一颗彗星的轨道在两个数据库中有所差异, 我们对两个数据库的长周期彗星做了筛选和处理: 以JPL网站上的长周期彗星数据为主, MPC中的数据作为补充; 若同一颗彗星在两个数据库中的轨道形状划分(椭圆: $0 < e < 1$ 、抛物线: $e = 1$ 、双曲线: $e > 1$)相同, 我们选择使用JPL数据^[14]. 在1850年之前由于观测能力和水平较低, 将轨道偏心率无法确定的彗星轨道粗略划分为抛物线轨道^[7]; 两次世界大战对1910—1950年期间彗星探测数量和精度产生了很大影响^[14]; 1950年之后探测能力不断提高, 逐渐得到了更精准的彗星轨道信息, 对抛物线和双曲线轨道也有了更准确的划分^[12]; 1970年之后的数据才较为可靠^[14]. 在本文数据分析中, 我们也着重对1970年之后的长周期彗星数据进行了深入分析. 观测数据的来源情况如图3所示.

我们收集了截止2021年4月19日发现的645颗周期大于200 yr的椭圆轨道、363颗抛物线轨道和412颗双曲线轨道彗星, 组成1420颗长周期彗星的观测数据. 其中1970年以后观测到的的长周期彗星共有899颗, 分别是496颗椭圆轨道彗星(周期大于200 yr)、91颗抛物线轨道和312颗双曲线轨道彗星. 在图3中带斜线蓝色区域为JPL和MPC中重复记录的彗星数据(轨道形状划分相同), 纯蓝色区域和带斜线白色区域分别为仅在JPL和仅在MPC中记录的数据. 可以发现: 因为在1850年之前的粗略划分, 抛物线轨道彗星在1970年前后数量变化较大^[7, 14]. 我们将1970年之后的长周期彗星数据随时间变化的情况展示在图4中, 可以发现: 2010年之前彗星数量都呈现系统性增加、2010年之后抛物线轨道彗星数量突然迅速减小(2010—2020年间仅1颗), 主要是因为这一时期的地面观测和空间探测极大提高了天文观测水平, 对彗星轨道的划分也更精确了^[14].

⁴彗星群数据网址: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_comets_by_type

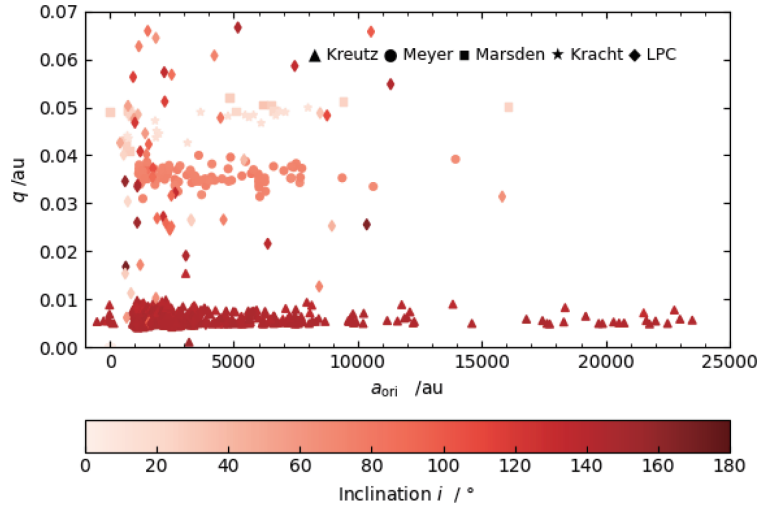


图 2 长周期彗星($q < 0.07$ au)和4个彗星群的轨道比较. 横坐标是原始轨道半长轴 a_{ori} , 纵坐标是近日点距离 q , 颜色棒是彗星轨道倾角 i . 正三角代表Kreutz彗星群、圆代表Meyer彗星群、正方形代表Marsden彗星群、五角星代表Kracht彗星群以及菱形代表长周期彗星.

Fig. 2 The comparison of the orbits of long period comets ($q < 0.07$ au) and four comet groups. The abscissa is the semi-major axis of the original orbit, the ordinate is the perihelion distance, and the colorbar is the orbital inclination of the comet. The triangle represents the Kreutz group, the circle represents the Meyer group, the square represents the Marsden group, the pentacle represents the Kracht group, and the diamond represents the long period comets.

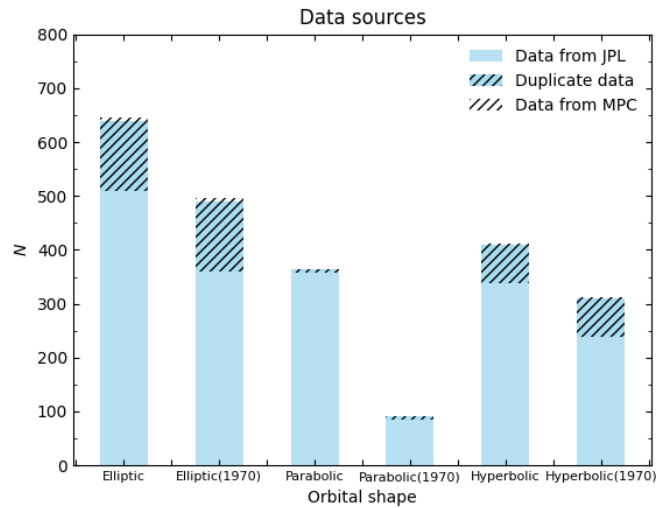


图 3 长周期彗星的数据来源. 横坐标为轨道形状, 纵坐标为彗星数量. (1970)表示1970年之后的数据. 具体数值为[柱形图总高度(不含重复值), 蓝色区域来自JPL 数据, 斜线区域来自MPC数据, 总数据(包括重复值)]: 椭圆[638, 136, 129, 645]、1970年后的椭圆[489, 136, 129, 496]、抛物线[363, 6, 6, 363]、1970年之后的抛物线[91, 6, 6, 91]、双曲线[410, 73, 71, 412]、1970年之后的双曲线[310, 73, 71, 312].

Fig. 3 The source of LPCs data. The abscissa is the orbital shape and the ordinate is the number of comets. (1970) represents data after 1970. The specific values are [the total height of the histogram (excluding duplicate values), the blue histogram from JPL data, the diagonal histogram from the MPC data, total data (including duplicate values)]: elliptic [638, 136, 129, 645]; after 1970 elliptic [489, 136, 129, 496]; parabolic [363, 6, 6, 363]; after 1970 parabolic [91, 6, 6, 91]; hyperbolic [410, 73, 71, 412]; after 1970 hyperbolic [310, 73, 71, 312].

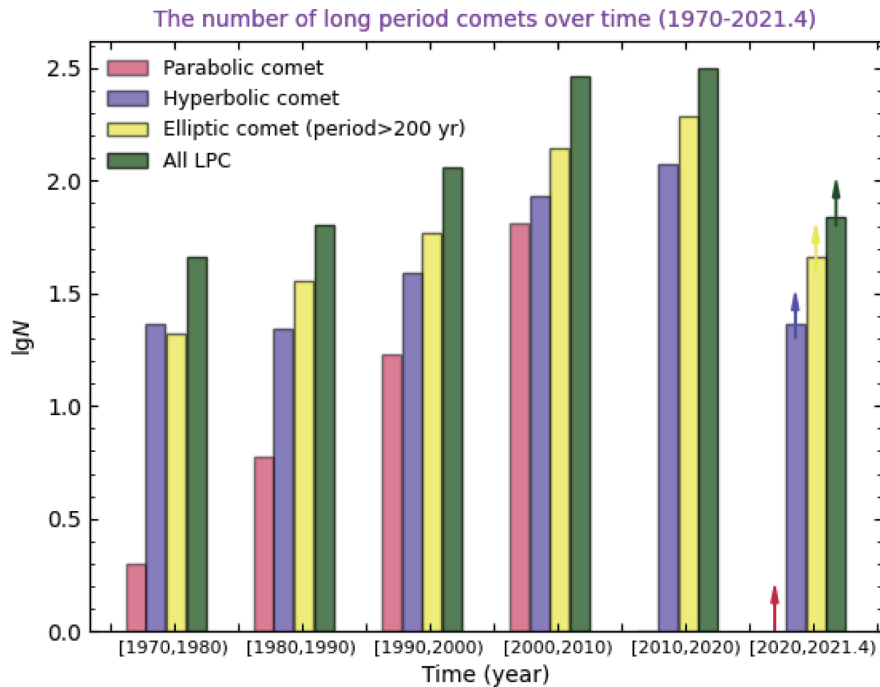


图 4 1970年之后观测到的LPC数量随时间的变化. 横坐标为时间, 纵坐标为彗星数量的对数值. 红色直方图表示91颗抛物线轨道彗星[2, 6, 17, 65, 1, 0], 紫色直方图表示312颗双曲线轨道彗星[23, 22, 39, 86, 119, 23], 黄色直方图表示496颗椭圆轨道彗星[21, 36, 59, 139, 195, 46], 绿色直方图表示总共899颗长周期彗星[46, 64, 115, 290, 315, 69].

Fig. 4 The distribution of the number of LPCs observed over time after 1970. The abscissa is time and the ordinate is the logarithm of the number of comets. The red histogram represents 91 parabolic comets [2, 6, 17, 65, 1, 0], the purple histogram represents 312 hyperbolic comets [23, 22, 39, 86, 119, 23], the yellow histogram shows 496 elliptic comets [21, 36, 59, 139, 195, 46], and the green histogram represents the total of 899 LPCs [46, 64, 115, 290, 315, 69].

长周期彗星原始轨道(未进入行星区域之前)的计算, 需要对观测轨道数据进行逆向积分, 使用的动力学模型应该尽可能考虑彗星在漫长演化过程中的各种扰动^[42]. 只要以足够的精度模拟所有的扰动力, 如复杂的银河系中心潮汐作用(galactic disk tidal force)、恒星扰动(stellar perturbation)和非引力效应(non-gravitational effect)等^[12], 太阳系内彗星的原始轨道几乎都是椭圆^[6]. 但是由于银河系中心潮汐难以准确估计、过路恒星(passing star)的随机性质以及不完整且不准确的恒星数据, 要严格分析近几百万年来星系和过路恒星对彗星的影响是相当困难的^[16, 43-45]. 此外Marsden等^[46-48]指出了非引力效应对长周期彗星的影响似乎遵循平方反比定律, Królikowska等^[13, 49]提出了非引力效应的参数模型, 发现忽略非引力效应会使演化得到的原始轨道中双曲线轨道彗星的数量增

加^[13, 49]. Yabushita和Bolatto认为非引力效应对长周期彗星的影响非常微小^[50-52], 并且Vokrouhlický等^[6]指出Królikowska等^[13, 49]对非引力效应的简单参数化使彗星轨道演化结果(主要是轨道半长轴较小的彗星)与观测数据的一致性变得更差. 目前彗星活动对轨道摄动影响的计算模型过于简单^[6], 多数情况下对非引力效应的建模并不完美^[4]. 所以Johnstone等^[4]、Dybczyński等^[16]和Vokrouhlický等^[6]虽然承认非引力效应的重要性, 但在计算中都选择了忽略非引力效应. 在彗星演化计算中由于无法对复杂扰动进行全面分析以及不太完美的动力学模型, 演化得到的彗星原始轨道不可避免地包括部分双曲线和抛物线轨道(尤其是远日点距离相当大的彗星)^[6, 16].

我们考虑了太阳系八大行星以及冥王星对LPC的引力摄动, 忽略了各长周期彗星之间的相

互作用以及非引力效应, 利用多体问题数值模拟软件MERCURY^[53] (Manual for the mercury integrator package version 6) 计算长周期彗星的轨道演化, 主要使用了最新的JPL DE441历表^[41]产生的行星初始轨道信息, 将网站上彗星的观测数据作为初值, 利用混合辛/布尔施-斯托算法^[53] (Hybrid symplectic/Bulirsch-Stoer integrator) 进行逆向积分. 由于在距离太阳250 au的位置大行星的引力摄动作用可以忽略^[16, 54], 在该距离的彗星被认为保留了其原始轨道根数^[13, 16, 54]. 因此, 我们将长周期彗星逆向积分到距离太阳250 au, 对于那些不能到达250 au的彗星, 将其在远日点的轨道作为原始轨道.

我们对2021年4月19日之前的1420颗彗星进行

了逆向积分计算, 得到的原始轨道包括148颗原始双曲线轨道彗星、37颗原始抛物线轨道彗星和1235颗原始椭圆轨道彗星, 按照定义 $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ ^[18]从原始椭圆轨道彗星中筛选出268颗奥尔特云彗星. 在1970年之后的899颗长周期彗星原始轨道数据中有795颗原始椭圆轨道彗星、26颗原始抛物线轨道彗星、78颗原始双曲线轨道彗星, 在这795颗原始椭圆轨道彗星中包含了196颗奥尔特云彗星. 1970年之后的原始椭圆轨道彗星和奥尔特云彗星数量随时间的变化显示在图5中. 可以发现1970—2020年间以10 yr为统计单位, 原始椭圆轨道彗星和奥尔特云彗星的探测数量都呈系统性增加(最后一个柱形图仅显示了不足2 yr的数据).

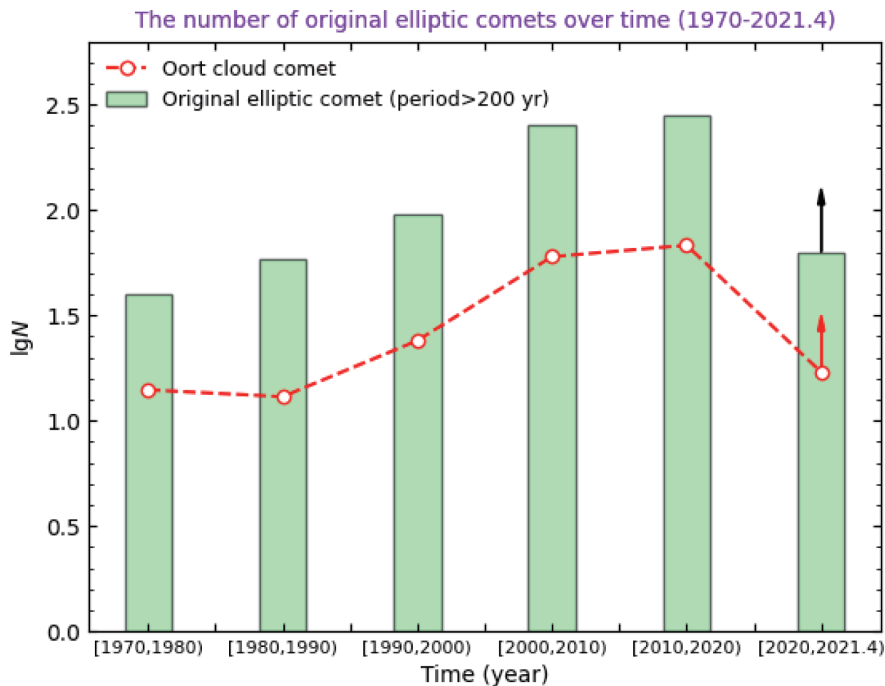


图5 1970年之后原始椭圆轨道彗星数量随时间的变化. 横坐标为时间, 纵坐标为彗星数量的对数值. 绿色直方图表示795颗原始椭圆轨道彗星[40, 58, 96, 255, 283, 63], 红色折线图表示196颗奥尔特云彗星[14, 13, 24, 60, 68, 17].

Fig. 5 The variation of the number of original elliptic orbit comets with time after 1970. The abscissa is time and the ordinate is the logarithm of the number of comets. The green histogram shows the 795 original elliptic comets [40, 58, 96, 255, 283, 63], and the red line chart shows 196 Oort cloud comets [14, 13, 24, 60, 68, 17].

3 动力学特性统计分析

3.1 原始轨道半长轴倒数分布

开普勒第三定律指出行星轨道周期的二次方与轨道半长轴的三次方成正比($P^2 \propto a^3$), 轨道半长轴倒数常常用来表征彗星轨道的能量^[9, 55]. 我们删除了近日点距离 $q < 0.07$ au的彗星^[14], 基于截止到2021年4月19日原始轨道为椭圆的1167颗LPC (奥尔特云彗星为252颗), 将其观测轨道

($1/a$)_{obs}与原始轨道的($1/a$)_{ori}进行对比分析. 观测轨道和原始椭圆轨道半长轴倒数在不同取值范围内的分布如图6所示. 需要说明的是, 在1167颗原始椭圆轨道LPC中, 有251颗彗星的观测数据是抛物线轨道(半长轴无穷大), 其观测轨道的($1/a$)_{obs}无限接近0, 无法获得这251颗彗星的($1/a$)_{obs}. 因此, 我们从1167颗LPC中剔除这251颗彗星后, 对剩余的916颗长周期彗星进行了($1/a$)_{obs}分布的研究, 如图6 (a)、(b).

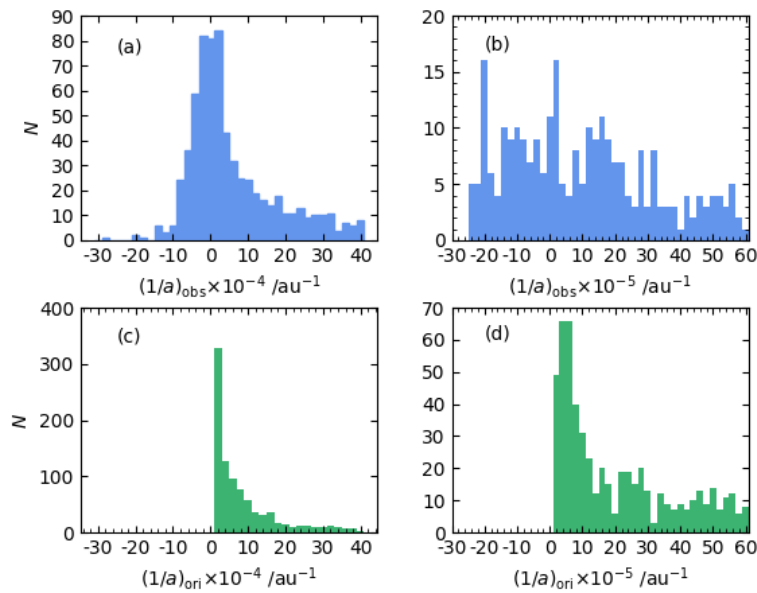


图 6 长周期彗星的($1/a$)_{obs}和($1/a$)_{ori}分布. 上图(a)、(b)显示了916颗长周期彗星的($1/a$)_{obs}分布, 下图(c)、(d)显示了1167颗原始椭圆轨道长周期彗星的($1/a$)_{ori}分布; 左图(a)、(c)取值范围为 -3×10^{-3} 至 4×10^{-3} au⁻¹, 并以 2×10^{-4} au⁻¹为一个刻度间隔; 右图(b)、(d)取值范围为 -3×10^{-4} 至 6×10^{-4} au⁻¹, 以 2×10^{-5} au⁻¹为一个刻度间隔.

Fig. 6 The distribution of ($1/a$)_{obs} and ($1/a$)_{ori} of LPCs. Panels (a) and (b) show the ($1/a$)_{obs} distribution of the observed orbits of 916 LPCs, and panels (c) and (d) show the ($1/a$)_{ori} distribution of the original elliptic orbits of 1167 LPCs. The left panels (a) and (c) range from -3×10^{-3} au⁻¹ to 4×10^{-3} au⁻¹, with a scale interval of 2×10^{-4} au⁻¹; the right panels (b) and (d) range from -3×10^{-4} au⁻¹ to 6×10^{-4} au⁻¹, with a scale interval of 2×10^{-5} au⁻¹.

图6中(a)、(b)是916颗长周期彗星的($1/a$)_{obs}分布图, (c)、(d)是1167颗长周期彗星的($1/a$)_{ori}分布图, 图(a)、(c)的取值范围为 -3×10^{-3} 至 4×10^{-3} au⁻¹并以 2×10^{-4} au⁻¹为一个刻度间隔进行了统计; 为了获得更准确的峰值位置, 我们将图(b)、(d)的取值范围缩小一个数量级, 即 $-3 \times$

10^{-4} 至 6×10^{-4} au⁻¹并以 2×10^{-5} au⁻¹为一个刻度间隔进行了统计. 观测轨道($1/a$)_{obs}出现负值, 可能原因有两方面: 第一, 观测轨道中有302颗双曲线轨道彗星; 第二, 彗星轨道测定时未充分考虑各种摄动的影响^[56]. 可以发现, 在图6 (a)中观测轨道数据集中在 -4×10^{-4} au⁻¹ < ($1/a$)_{obs} <

$2 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$, 其中图(a)负峰值区域($-4 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1} < (1/a)_{\text{obs}} < -2 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)为82颗长周期彗星(其观测轨道为双曲线轨道), 图(a)正峰值区域($0 < (1/a)_{\text{obs}} < 2 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$)为84颗长周期彗星, 峰值之后呈现迅速下降趋势. 对比图6 (b)可以发现, 图(b)正峰值位于 $0 < (1/a)_{\text{obs}} < 2 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$, 这说明许多长周期彗星以较大距离绕日运行^[9]; 图(b)负峰值 $-2.2 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1} < (1/a)_{\text{obs}} < -2 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 处聚集了16颗双曲线轨道彗星. 图6 (c)中原始轨道数据的主峰区域 $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 2 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ 有328颗长周期彗星(包括252颗奥尔特云彗星), 主峰之后呈现出比图6 (a)更陡峭的下降, 这说明大部分长周期彗星原始轨道的 a_{ori} 大于5000 au. 如图6 (d)所示, $(1/a)_{\text{ori}}$ 峰值位于 2×10^{-5} 至 $6 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 之间, 此区间的132颗彗星均为奥尔特云彗星, 在 $(1/a)_{\text{ori}} < 6 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 范围内的181颗奥尔特云彗星中包括67颗动力学“新”彗星^[20], 这说明在大距离绕日运行的奥尔特云彗星中动力学“新”彗星所占数目超过1/3. 长周期彗星的 $(1/a)_{\text{obs}}$ 和 $(1/a)_{\text{ori}}$ 分布的峰值和变化趋势差异很大, 说明太阳系行星区域的引力作用对长周期彗星的轨道影响显著^[56].

3.2 近日点距离分布

彗星在近日点附近受到的太阳辐射最强烈, 活动性最显著^[6, 14, 24-26]. Everhart^[57]在1968年选取多组参数对彗星经过行星区域的能量扰动进行拟合后发现, 近日点在2.08 au、3.12 au和4.16 au时彗星总能量会发生显著变化. Hayashi^[58]在1981年提出了太阳系“雪线”(2.7 au)的概念, 彗星越过雪线靠近太阳的过程中会受到越来越强的水冰升华等非引力效应的影响^[16], 之后提出的更详细的模型将雪线的位置改变至3 au附近^[59]. Fouchard等^[60]、Królikowska等^[49]将近日点距离的阈值选在3.1 au附近, 研究了长周期彗星和奥尔特云彗星受到的扰动. Królikowska等^[13]认为 $q \leq 3.1 \text{ au}$ 的彗星进行轨道计算时必须考虑非引力效应, 并且在其随后的多篇文章中都将长周期彗星分为小近日点($q \leq 3.1 \text{ au}$)和大近日点($q > 3.1 \text{ au}$)进行了研究^[14, 20].

我们沿用了Królikowska等^[14]对于大近日点和小近日点彗星的定义, 将1167颗原始轨道为椭圆的

LPC分为小近日点 $0 < q \leq 3.1 \text{ au}$ (865颗)和大近日点 $q > 3.1 \text{ au}$ (302颗), 并结合 $(1/a)_{\text{obs}}$ 进行了分析. 原始椭圆轨道LPC的近日点分布如图7所示, 蓝色斜线直方图和黄色直方图分别表示在JPL和MPC中记录的原始轨道为椭圆的LPC (包括重复数据), 红色斜线直方图表示不含重复彗星的总数据(重复彗星取JPL数据). 可以发现, 小近日点($q \leq 3.1 \text{ au}$)和大近日点($q > 3.1 \text{ au}$)的长周期彗星峰值范围均是 $0 < (1/a)_{\text{ori}} < 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$ (分别为125颗和127颗), 此范围涵盖了图6 (c)中的主峰区域彗星, 这说明奥尔特云彗星普遍是大近日点, 而“剩余彗星”大多是小近日点. 并且在图7(黄色直方图)中来自MPC的大近日点彗星比小近日点彗星数量多, 来自JPL的小近日点彗星比大近日点彗星数量多, 而JPL和MPC的数据峰值均集中在 $(1/a)_{\text{ori}} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$, 所以在选择长周期彗星研究数据时应该兼顾两个数据库网站.

此外, 我们对1167颗原始椭圆轨道LPC、252颗奥尔特云彗星和915颗“剩余彗星”的近日点数据进行了统计分析, 结果如图8所示, 在上图的1167颗长周期彗星中, 小近日点($q \leq 3.1 \text{ au}$)原始椭圆轨道LPC集中在 $0.75 \text{ au} < q < 1 \text{ au}$, 大近日点($q > 3.1 \text{ au}$)原始椭圆轨道LPC集中在 $3.25 \text{ au} < q < 3.5 \text{ au}$, 在 $q = 4.25 \text{ au}$ 附近数量突然减小, 这可能是统计上的偶然波动现象; 在中图的252颗奥尔特云彗星中大近日点彗星的数量高达127颗, 占奥尔特云彗星总数的50%以上; 下图的915颗“剩余彗星”中小近日点彗星有740颗, 约占“剩余彗星”总数的80.9%. 尽管近日点距离的真实分布是未知的^[14], 但奥尔特云彗星中大近日点彗星所占比重(超过50%)确实高于“剩余彗星”(小于20%), 对此有两种可能的解释: 其一, 奥尔特云彗星中包含很多动力学“新”彗星, 在相同的地心距离下, 这些彗星比其他彗星更亮(不是绝对亮度, 而是在它们进行可观测活动时从远距离探测到的亮度), 在观测选择性效应的影响下被探测到的数量自然更多^[11, 14]; 其二, 奥尔特云彗星在靠近太阳的过程中活动性逐渐增强, 比其他彗星更易在彗核表面形成明亮包层^[14].

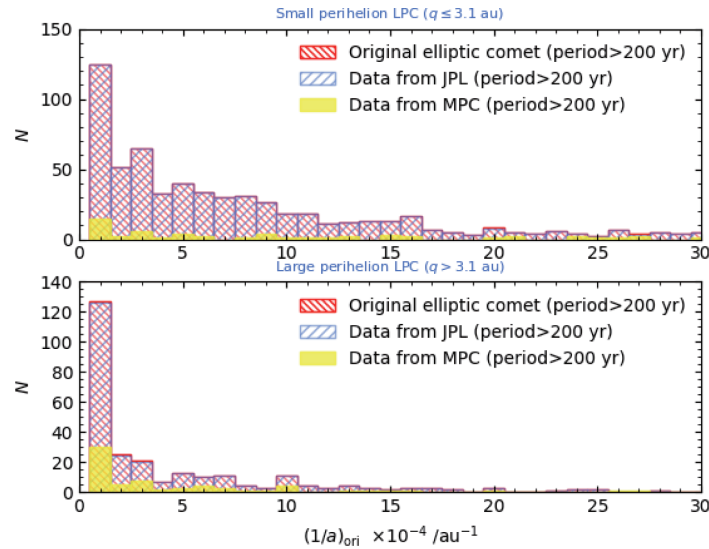


图 7 JPL和MPC数据中小近日点和大近日点原始椭圆轨道LPC的 $(1/a)_{ori}$ 分布。上、下图分别显示了小近日点($q \leq 3.1$ au)和大近日点($q > 3.1$ au)长周期彗星的 $(1/a)_{ori}$ 分布。蓝色斜线直方图表示在JPL中记录的长周期彗星数据(包括重复数据),黄色直方图表示在MPC中记录的长周期彗星数据(包括重复数据),红色斜线直方图表示对应范围的总数据(不包括重复数据)。

Fig. 7 The $(1/a)_{ori}$ distribution of the original elliptic LPCs at small- and large-perihelion in JPL and MPC. The top and bottom panels show the $(1/a)_{ori}$ of the small perihelion ($q \leq 3.1$ au) and large perihelion ($q > 3.1$ au) LPC, respectively. The blue diagonal histogram represents LPCs recorded in JPL (including duplicate data), the yellow histogram represents LPCs recorded in MPC (including duplicate data), and the red diagonal histogram represents the total data in the corresponding range (excluding duplicate data).

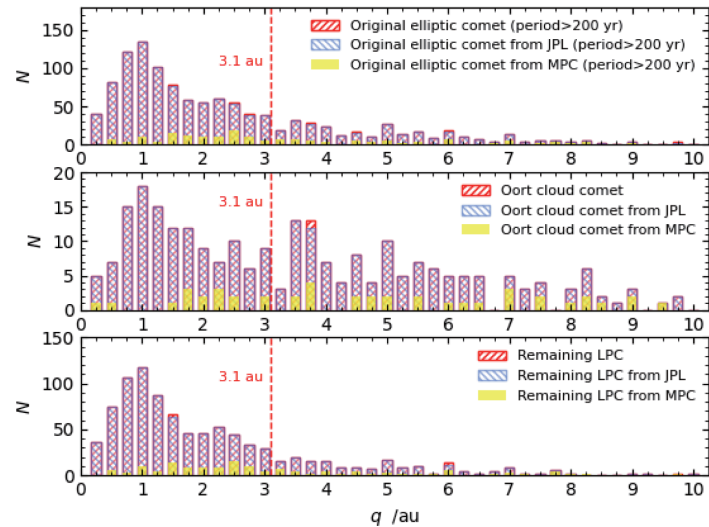


图 8 原始椭圆轨道LPC、奥尔特云彗星和“剩余彗星”的近日点距离分布。横坐标为近日点距离,纵坐标为彗星数量。红色斜线直方图代表彗星的总数(不包括重复数据),蓝色斜线直方图代表来自JPL的彗星(包括重复数据),黄色直方图代表来自MPC的彗星(包括重复数据),红色虚线位于 $q = 3.1$ au。

Fig. 8 The distribution of original elliptic LPCs, Oort cloud comets and remaining LPCs. The abscissa is the perihelion distance and the ordinate is the number of comets. The red diagonal histogram represents the total number of comets (excluding duplicate data), the blue diagonal histogram represents comets from JPL (including duplicate data), and the yellow histogram represents comets from MPC (including duplicate data). The red dotted line is at $q = 3.1$ au.

4 结论与展望

本文通过对JPL和MPC的长周期彗星数据按照不同轨道形状进行了整理, 将“近抛物线轨道彗星”和周期大于200 yr的椭圆轨道彗星均视为长周期彗星^[9, 13]. 考虑到4大彗星群对长周期彗星数据纯度的影响, 剔除所有 $q < 0.07$ au的彗星数据后获得了2021年4月19日之前的1420颗长周期彗星. 统计发现1970年之后长周期彗星数量均呈现系统性增加, 并在2010年左右达到峰值. 将所有长周期彗星样本进行逆向积分计算, 得到其原始轨道, 去除近日点距离小于0.07 au的彗星后, 基于1167颗原始轨道为椭圆的长周期彗星、252颗奥尔特云彗星和915颗“剩余彗星”, 进行长周期彗星动力学特性的分析后发现: 长周期彗星(原始椭圆轨道)($1/a$)集中分布在零附近, 但 $(1/a)_{\text{obs}}$ 和 $(1/a)_{\text{ori}}$ 分布有很大差异: 观测轨道 $(1/a)_{\text{obs}}$ 峰值位于 $2 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$, 随后呈下降趋势; 原始轨道 $(1/a)_{\text{ori}}$ 峰值位于 $6 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$, 随后呈更为迅速的下降趋势. 此外, 大近日点($q > 3.1$ au)和小近日点($q \leq 3.1$ au)长周期彗星的 $(1/a)_{\text{ori}}$ 峰值位置相同, 位于 $1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$. JPL和MPC的 $(1/a)_{\text{ori}}$ 分布相似, 集中在 $(1/a)_{\text{ori}} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$, 但JPL的彗星更多更全、轨道信息更详细. 若研究较早时期的LPC或对长周期彗星数量进行统计研究, 我们推荐以JPL数据为主, MPC数据作为补充. 大多数长周期彗星的近日点集中在1 au附近, 而大近日点长周期彗星集中在 $q \sim 3.5$ au附近; 相较于“剩余彗星”, 奥尔特云彗星中大近日点($q > 3.1$ au)彗星数量占比很大, 高达50%以上. 对长周期彗星的空间探测倾向于活动性强且轨道较为“原始”的彗星^[16, 20], 那些近日点较小的动力学“新”彗星非常适合作为探测目标, 如图1中粉色区域: $(1/a)_{\text{ori}} < 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ 并且 $q \leq 3.1$ au, 这类小近日点动力学“新”彗星(排除掠日彗星), 在我们的数据样本中有37颗.

在长周期彗星轨道计算时应该谨慎选取动力学模型和相应计算程序, 以便获得尽可能精确的轨道信息. 在我们的计算中, 忽略了非引力效应、过路恒星以及太阳系小天体(小行星、彗星、流星体)的扰动, 在某些情况下, 大型天然卫星也应该包

括在内, 但我们只考虑了月球. 虽然非引力效应对长周期彗星的影响很大, 但至今还没有一套非常可靠的非引力模型, 无法获得比较满意的结果. 如果采用的动力学模型可以将所有复杂扰动力都考虑进去, 将长周期彗星逆向积分到250 au以外的彗星将拥有椭圆原始轨道, 遗憾的是现有模型对银河系中心潮汐、过路恒星等影响无法准确估计, 所以逆向积分得到的原始轨道不可避免地包含抛物线和双曲线轨道. 考虑到近日点距离较小时彗星受到较为显著的非引力效应, 无论是预测将来的轨道还是追溯彗星的来源都需要全面考虑各种扰动力. 在将来的研究中我们将深入研究长周期彗星所受到的非引力效应、采用更完备的动力学模型进行轨道计算, 期望能得到更精确的长周期彗星轨道演化结果.

参考文献

- [1] 史建春, 马月华. 现代物理知识, 2015, 27: 50
- [2] Morbidelli A, Rickman H. A&A, 2015, 583: A43
- [3] Russo D N, Kawakita H, Vervack R J Jr, et al. Icar, 2016, 278: 301
- [4] Johnstone D, Adams F C, Lin D N C, et al. ASP Conference Series, 2004, 323: 1050
- [5] Rickman H, Gabryszewski R, Wajner P, et al. A&A, 2017, 598: A110
- [6] Vokrouhlický D, Nesvorný D, Dones L. AJ, 2019, 157: 181
- [7] van Woerkom A J J. BAN, 1948, 10: 445
- [8] Everhart E. AJ, 1967, 72: 716
- [9] Oort J H. BAN, 1950, 11: 91
- [10] Bailey M E, Stagg C R. MNRAS, 1988, 235: 1
- [11] Toliou A, Tsiganis K, Tsirvoulis G. CeMDA, 2020, 132: 1
- [12] Królikowska M. A&A, 2001, 376: 316
- [13] Królikowska M, Dybczyński P A. MNRAS, 2013, 435: 440
- [14] Królikowska M, Dybczyński P A. MNRAS, 2019, 484: 3463
- [15] Kresák L, Pittich E M. BAICz, 1978, 29: 299
- [16] Dybczyński P A, Królikowska M. MNRAS, 2011, 416: 51
- [17] Matese J J, Whitman P G. Icar, 1989, 82: 389
- [18] Królikowska M. A&A, 2004, 427: 1117
- [19] Królikowska M. AcA, 2006, 56: 385
- [20] Królikowska M, Dybczyński P A. MNRAS, 2017, 472: 4634
- [21] Hasegawa I. PASJ, 1976, 28: 259
- [22] Snodgrass C, Jones G H. NatCo, 2019, 10: 5418
- [23] Francis P J. ApJ, 2005, 635: 1348

- [24] Vivan G P, Hudson J. *JAnSc*, 2021, 68: 608
- [25] AßHearn M F, Schleicher D G, Millis R L, et al. *AJ*, 1984, 89: 579
- [26] Garcia R S, Gil-Hutton R. *P&SS*, 2021, 206: 105308
- [27] Everhart E. *AJ*, 1967, 72: 1002
- [28] Tryor J G. *MNRAS*, 1957, 117: 370
- [29] Levison H F, Duncan M J. *Icar*, 1997, 127: 13
- [30] Battams K, Knight M M. *RAPTA*, 2017, A375: 20160257
- [31] Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. *SoPh*, 1995, 162: 357
- [32] Jones G H, Knight M M, Battams K, et al. *SSRv*, 2018, 214: 20
- [33] Kreutz H. *PUSK*, 1891, 6: 1
- [34] Kreutz H. *AAAN*, 1901, 155: 63
- [35] Sekanina Z, Chodas P W. *ApJ*, 2004, 607: 620
- [36] Sekanina Z, Chodas P W. *ApJ*, 2007, 663: 657
- [37] Sheeley N R Jr, Howard R A, Koomen M J, et al. *Nature*, 1982, 300: 239
- [38] MacQueen R M, St. Cyr O C. *Icar*, 1991, 90: 96
- [39] Zhou B, Su H, Matson R, et al. *MPEC*, 2008, 2008-X25: 1
- [40] Ohtsuka K, Nakano S, Yoshikawa M. *PASJ*, 2003, 55: 321
- [41] Park R S, Folkner W M, Williams J G, et al. *AJ*, 2021, 161: 105
- [42] Dybczyński P. *A&A*, 2001, 375: 643
- [43] Fernández J A, Ip W H. *Icar*, 1981, 47: 470
- [44] Hills J G. *AJ*, 1981, 86: 1730
- [45] Wysoczańska R, Dybczyński P A, Polińska M. *A&A*, 2020, 640: A129
- [46] Marsden B G. *AJ*, 1969, 74: 720
- [47] Marsden B G. *AJ*, 1970, 75: 75
- [48] Marsden B G, Sekanina Z. *AJ*, 1973, 78: 1118
- [49] Królikowska M, Sitarski G, Pittich E M, et al. *A&A*, 2014, 571: A63
- [50] Yabushita S. *EM&P* 1991, 52: 87
- [51] Bolatto A D, Fernández J A, Carballo G F. *P&SS*, 1995, 43: 709
- [52] Yabushita S. *MNRAS*, 1996, 283: 347
- [53] Chambers J. *MNRAS*, 1999, 304: 793
- [54] Todorovic-Juchniewicz B. *AcA*, 1981, 31: 191
- [55] Wiegert P, Tremaine S. *Icar*, 1999, 137: 84
- [56] Fouchard M, Froeschlé C, Rickman H, et al. *Icar*, 2011, 214: 334
- [57] Everhart E. *AJ*, 1968, 73: 1039
- [58] Hayashi C. *PThPS*, 1981, 70: 35
- [59] Sasselov D D, Lecar M. *ApJ*, 2000, 528: 995
- [60] Fouchard M, Rickman H, Froeschlé C, et al. *Icar*, 2013, 222: 20

Statistical Study of the Dynamical Properties of Long Period Comets

YANG Mei^{1,2,3} ZHAO Yu-hui^{1,2,3} JI Jiang-hui^{1,2,3} JIANG Hao-xuan^{1,3}

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

ABSTRACT Based on comet observations from JPL (Jet Propulsion Laboratory) and MPC (Minor Planet Center), the orbits of long period comets (LPC) were reverse-evolved to obtain their original orbits. The dynamic characteristics of LPC observation orbit and original orbit are analyzed. The results show that the distribution of reciprocal of the semi-major axis of LPC observation orbit $((1/a)_{\text{obs}})$ is significantly different from that of the original orbit $((1/a)_{\text{ori}})$, and the peak values are at $(1/a)_{\text{obs}} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ and $(1/a)_{\text{ori}} \sim 6 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$, respectively; large perihelion LPC (perihelion distance $q > 3.1 \text{ au}$) and small perihelion LPC (perihelion distance $q \leq 3.1 \text{ au}$) have the same peak position of original orbit $((1/a)_{\text{ori}})$, both located at $1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$; the peak positions of original reciprocal semi-major axis of LPC between JPL and MPC are the same, both at $1 \times 10^{-4} \text{ au}^{-1}$. Many Oort cloud comets have large perihelion distances (more than 50% of comets with $q > 3.1 \text{ au}$). It will provide information to understand the dynamical characteristics of long period comets and Oort cloud comet, and will also provide a research basis for future space missions targeting long period comets.

Key words comets: general, planetary systems, Oort Cloud, methods: statistical