

主带彗星的长期光变曲线*

梁合^{1,2} 史建春^{1,3,4†} 马月华^{1,2‡}

(1 中国科学院紫金山天文台/中国科学院行星科学重点实验室 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 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(4 中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 主带彗星是指既具有主带小行星的轨道特征, 又具有类似彗星的彗发或彗尾的小天体, 其活动性是由水冰升华驱动. 通过收集最近20多年的主带彗星观测数据, 绘制了5颗主带彗星238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS的长期光变曲线, 进而分析了主带彗星的活动性特征. 研究发现: (1) 238P/Read的活动性比较稳定, 其他4颗主带彗星的活动性相较于之前的回归周期均存在不同程度的衰减; (2)通过比较反映彗星活动性的参数测光年龄 P_{AGE} , 发现324P/La Sagra在2010年的活动性最强, 313P/Gibbs在2014年的活动性最弱; (3) 313P/Gibbs在2020年回归周期出现了明显的非近日点活动性. (4)主带彗星的活动性开始和结束时对应的时间和日心距相对于过近日点时间和日心距具有不对称性.

关键词 天体测量, 方法: 观测, 技术: 测光, 彗星: 个别: 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra, 358P/PANSTARRS

中图分类号: P185; **文献标识码:** A

1 引言

彗星是太阳系形成时期遗留下来的残骸, 包含太阳系形成时期的原始信息. 当彗星靠近太阳时, 彗核中富含的易挥发物受太阳辐射而升华, 从而产生壮观的彗发和彗尾. 根据形态和轨道特征不同, 太阳系小天体传统上被分为小行星和彗星两个不同种类. 彗星一般认为起源于太阳系外部的奥尔特云和柯伊伯带, 而小行星主要存在于内太阳系. 活动小行星的发现使得小行星和彗星的区分不再像以前那样明确. 活动小行星既有小行星的轨道特征, 又具有类似彗星特征. 小行星出现活动性的机

制有很多, 比如: 水冰升华、撞击抛射、自转不稳定性、热效应、静电力等^[1]. 其中活动性是由水冰升华驱动的主带小天体称之为主带彗星(Main-belt Comet). 越来越多主带彗星的发现, 使小行星主带成为除奥尔特云和柯伊伯带之外的第3个彗星起源地. 主带彗星有着稳定的轨道和相对应的小行星族群意味着它们是形成于主带并且是由大的母体小行星破碎形成^[2-3]. 主带彗星的动力学特征是典型的主带小行星特征. 然而它们持久性和周期性的尘埃活动最可能来自于水冰升华^[4]. 水冰可以在温暖的内太阳系存在数十亿年表明它不太可能存在彗

2023-11-03收到原稿, 2023-12-22收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12173093、12033010), 江苏省自然科学基金项目(BK20191512), 中国载人空间项目(CMS-CSST-2021-B08)和小行星基金会资助

[†]jcschi@shao.ac.cn

[‡]yhma@pmo.ac.cn

星表面而是隐藏在表层下^[5]. 研究认为, 能把主带彗星内部冰层暴露在太阳辐射下进而产生活动的触发机制是偶然的米级小天体撞击, 撞击会在主带彗星表面形成一个无壳层或者壳层比较薄的区域, 此处表层下水冰能接收到太阳辐射而升华进而产生活动性^[6]. 随着主带彗星多次回归使得水冰逐渐耗尽且壳层慢慢变厚, 其活动性也就逐渐减弱直至停止. 水冰大量存在于主带天体上这一发现能为我们研究原始行星盘水冰的分布和地球水的来源提供很有价值的线索. 基于主带彗星重要的科学意义, 我国天问二号也将开展针对主带彗星的空间探测^[7].

长期光变曲线(Secular Light Curve, SLC)是在彗星公转周期的时间尺度(通常是年为单位)上描述彗星亮度的变化, 区别于自转光变曲线(以小时或天为单位). 通过SLC可以研究不同主带彗星活

动性大小和活动性演化规律. 此外, SLC可以用于估计主带彗星的水产率. Kamel^[8]最先提出在一个回归周期研究彗星光变曲线的方法. 经过Ferrín等人的完善和发展^[9-16], SLC 成为从总体上研究彗星活动性的实用方法. 我们之前的研究^[17]也对活动性较小的主带彗星长期光变方法进行了改进, 使得SLC更加精确.

我们选取5颗观测数据较多的主带彗星(238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS, 后文简称238P、259P、313P、324P和358P)作为研究目标. 这5颗主带彗星的活动性较强, 观测数据的时间跨度在3至4个轨道周期. 长期光变振幅都曾大于3并且有着比较显著的彗发和彗尾. 相对于其他主带彗星亮度更高, 适宜地面或者空间观测, 也适宜空间探测. 这5颗主带彗星的基本参数见表1.

表 1 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS的轨道参数
Table 1 The orbital elements of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra and 358P/PANSTARRS

Object	a^a/au	e^b	$i^c/^\circ$	q^d/au	Q^e/au	P^f/yr	T_J^g	Class ^h	Family ⁱ
238P	3.165	0.251	1.264	2.369	3.1961	5.63	3.153	C	Gorchakov
259P	2.730	0.339	15.890	1.806	3.655	4.51	3.217	B/C	Unknown
313P	3.163	0.234	10.981	2.412	3.904	5.32	3.133	C/D/X	Lixiaohua
324P	3.098	0.153	21.397	2.625	3.571	5.45	3.100	B/C/X	Alauda
358P	3.150	0.238	11.056	2.402	3.899	5.59	3.135	C/D/X	Lixiaohua

^a Semimajor axis
^b Eccentricity
^c Inclination
^d Perihelion distance
^e Aphelion distance
^f Regression period
^g Tisserand parameter with respect to Jupiter
^h Spectral types of family members for which taxonomic classifications are available^[3]
ⁱ Asteroid family associations

238P (最初被命名为P/2005 U1)在2005年10月24日被偶然发现. CCD (Charge Coupled Device)显示出一团模糊彗发并带有较长的彗尾^[7]. 随后的几天都确认有彗发和彗尾. 进一步的研究表明238P的

活动性是水冰挥发驱动的. 238P在最近4次过近日点(2005、2011、2016和2022年^[18-23])都有活动性. 238P是第2颗发现的主带彗星, 其活动性比第1颗发现的主带彗星133P/Elst-Pizarro要强很多.

259P (最初临时命名为P/2008 R1)于2008年9月24日由Garradd发现^[24]. 由于它有着稳定且持久的活动性, 259P被认为是由水冰挥发产生的活动性. 259P至少在两次过近日点(2008、2017年)都有活动性, 由于缺乏2013年过近日点期间的观测数据所以无法确认其活动性^[24-28]. 259P位于主带内侧, 是现今所有已知的主带彗星中近日距最小的($q = 1.793$ au). 而其他主带彗星大多位于主带外侧.

313P (最初命名为P/2014 S4)在2014年9月24日由Catalina Sky Survey发现有活动性^[29]. 实际上在2003年Sloan Digital Sky Survey的巡天数据就已经显示出313P有活动性了. 313P至少在3个近日点回归时被发现具有活动性(2003、2014、2019年)^[29-33]. 313P活动性比较强并且是水冰挥发驱动, 有着比较明显的彗发和彗尾.

324P (最初命名为P/2010 R2)的活动性最早发现于2010年9月14日. 随后, 在2015和2021年近日点附近也有活动性^[34-38].

358P (最初命名为P/2012 T1)的活动性在2012年10月6日被Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)一期巡天望远镜(Pan-STARRS1)发现^[39], 在2017年再次过近日点时也观测到其活动性^[40-41].

本文研究了238P、259P、313P、324P和358P的SLC和它们的活动性. 第2节介绍了数据来源和SLC的研究方法; 第3节给出了这5颗主带彗星的SLC和一系列与活动性相关的参数; 第4节计算了这5颗主带彗星的水产率和质量损失; 第5、6节是讨论与结论.

2 数据来源和方法

2.1 数据来源

我们搜集了358个238P的观测数据, 114个259P的观测数据, 220个313P的观测数据, 555个324P的观测数据和211个358P的观测数据. 这些数据主要来源于国际小行星中心(Minor Planet Center,

MPC)¹, 其他数据来源包括Comet Observation Database (COBS)²、西班牙彗星观测组(Cometas-obs)³、Seiichi Yoshida's Home Page⁴和已经发表的文献^[18-41].

由于收集到的星等数据包含不同的滤光片系统, 在绘制SLC时需要统一到同一波段. 对于其他波段的观测星等数据我们都已经用相应的转化公式转化为Johnson-Cousins测光系统的V波段^[42-45]. 例如, SDSS calibration、Pan-STARRS1 calibration等. 转换系数列在表2中.

2.2 星等简化

绘制SLC的方法有两种, 一种是时间图(time plot), 描述的是彗星在日心距和地心距均为1 au、相角为0时对应的绝对星等 $m(1, 1, 0)$ 与时间的关系. 当彗星不活动时, 绝对星等 $m(1, 1, 0)$ 是一个固定值, 不会随时间变化, 当彗星活动时SLC会因亮度增加而出现突起. 另一种是对数图(log plot), 描述的是彗星在地心距为1 au、相角为0时的星等 $m(1, R, 0)$ 与 $\lg(R/q)$ 的关系, R 为日心距, 当彗星不活动时遵循幂律为5的线性关系, 当彗星活动时SLC可以用复杂的多项式函数定义. 这两种图分别描述彗星星等在时间和空间两个尺度上的变化, 二者相辅相成能让我们更好地了解彗星的活动性. 参考Ferrín等人对低活动性小行星SLC的研究^[15], 我们采用下面的公式进行星等简化:

$$m_V(1, 1, 0) = m_V(\Delta, R, \alpha) - 5 \lg(\Delta R) - \beta \alpha - O - A, \quad (1)$$

$$m_V(1, R, 0) = m_V(\Delta, R, \alpha) - 5 \lg(\Delta) - \beta \alpha - O - A, \quad (2)$$

其中 $m_V(\Delta, R, \alpha)$ 是V波段的视星等、 Δ 是彗地距离、 α 是相位角、 β 是相位系数、 O 是冲效应项、 A 是视界角效应项. 对于主带彗星, 由于活动性相对较弱, 与彗核相关的一些效应(冲效应, 视界角效应)必须扣除掉才能使得SLC真正反映出由于活动而

¹<https://cgi.minorplanetcenter.net/>

²<https://cobs.si/home/>

³<http://www.astrosurf.com/cometas-obs/>

⁴<http://www.aerith.net/index.html>

造成的亮度增加. 视界角效应是指由于不同的视界角观测非球体形状小天体时的可视截面积变化引起的星等变化. 当彗核有着较大的轴比和自转轴倾角时, 视界角会在SLC上产生一个波形线从而影响彗星的SLC准确性^[14]. 视界角效应对SLC的影

响比较小, 例如133P和176P视界角效应对SLC的影响约在0.2^[17]. 本文中5颗主带彗星的SLC大于3, 视界角的影响可以忽略. 此外, 由于这5颗主带彗星不活动期的观测太少, 未显现出明显的视界角效应, 所以在本文中不讨论这一效应.

表2 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS的色指数转化系数
Table 2 The color transformations of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra and 358P/PANSTARRS

Object	V-R ^a	V-w ^b	V-g ^b	V-r ^b	V-i ^b	V-z ^b	V-u ^b	V-G ^c	V-o ^c	V-C ^c
238P	0.37	0.14	-0.20	-	-	-	-	0.27	-	-
259P	0.37	0.14	-	0.18	-	-	-	-	-	-
313P	0.39	0.23	-0.33	0.20	0.31	0.34	0.03	0.28	0.25	0.19
324P	0.40	0.11	-	0.16	-	-	-	0.28	-	-
358P	0.37	0.15	-	-	-	-	-	0.27	-	0.2

^a Johnson-Cousins color index^[18, 24, 30-31, 35, 39].

^b The difference of conversion formula of SDSS and PAN-STARRS1 to the V-band is less than 0.05 magnitude, so we neglect the small difference between them and list them together.

^c The other photometric system calibration^[46-47].

2.3 相位函数和冲效应

为了得到这5颗主带彗星精确的SLC, 首先要确定它们的相位函数和冲效应. 由于活动期时彗核星等总是在不同程度上受到彗发污染, 为了避免这种情况, 我们用彗星不活动时期的观测数据来拟合相位函数. 由于测光孔径不同, 在相同的采样间隔内, MPC的观测数据呈现出垂直分布. 为了减小这种效应, 对同一采样间隔内的观测数据取平均. 相位函数拟合采用了两种常用的方法: 线性和 (H, G) 相位函数, 其中 H 为绝对星等、 G 为相位系数. 二者最大的差别在 $\alpha < 5^\circ$ 时, (H, G) 相位函数能够更准确描述由于阴影隐藏(shadow hiding)和相干背散射(coherent backscattering)导致的观测亮度非线性增加, 这也被称为冲效应. 沿用Ferrín等^[15]的方法, 采用线性相位函数进行星等简化((1)式、(2)式), 仅在 $\alpha < 5^\circ$ 时利用 (H, G) 相位函数扣除由于冲效应带来的亮度增加. 这5颗主带彗星的最大冲效应对星等的影响大约为0.4. 这对活动性较低的主带彗星来说不可忽略. 图1是5颗主带彗星的相

位函数, 相关参数如表3所示, 其中 $m_{\text{evn}}(1, 1, 0)$ 是彗核亮度最大值对应的绝对星等, Δm 为星等振幅, 而 $m_V(1, 1, 0)$ 表示V波段绝对星等.

当主带彗星的SLC振幅大于3时, 主带彗星往往会表现出显著的尘埃彗发. Ferrín^[9]对于活动期的观测数据通常不进行相位角简化. 他认为彗星被气体和尘埃包裹, 使得彗星不能明显地显现出相位函数的特征. 这是由于彗星处在活动期, 彗核被不同程度污染导致没有表现出明显的相位函数特征. 主带彗星在不活动期的相位系数 β 一般约为0.04 (C-type小行星典型值见图1、表3). Boehnhardt等^[48]给出彗星在活动期尘埃的相位系数 β 一般在0.018到0.035之间. Snodgrass等^[49]在研究67P/Churyumov-Gerasimenko (67P)活动期的彗发尘埃时给出一个合理的取值0.03. 由于67P活动期的日心距和主带彗星活动期日心距接近, 因此对于振幅大于3的观测数据, 我们用相位系数 $\beta = 0.03$ 来进行星等简化. 研究发现取不同相位系数对SLC的影响仅仅表现在SLC振幅上(0.1至0.2), 对其他参数的影响可以忽略.

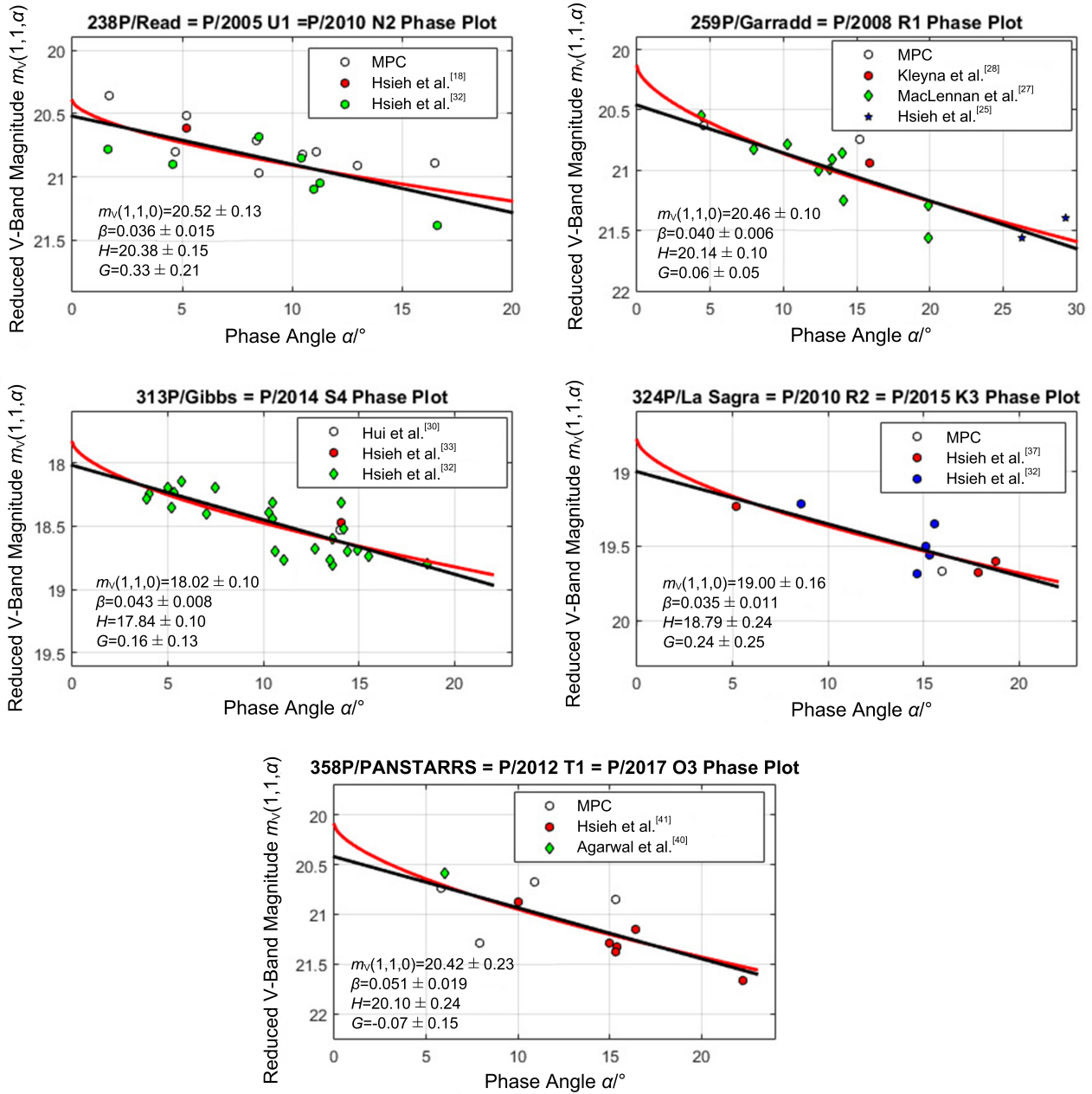


图1 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS的相位函数。彗星临时名称在对应子图的顶部标题中给出。数据是不活动期同一天临近几个小时的V波段平均值。直线是线性相位函数(扣除相位角 $\alpha < 5^\circ$)。曲线是(H,G)相位函数。

Fig. 1 Phase functions of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra, and 358P/PANSTARRS. The provisional designations of comets are given in the top captions of the corresponding subfigures. The data points are the V band average value of inactive observations in the nearby hours. The straight line represents linear phase function (excluding photometry points for which $\alpha < 5^\circ$). The curve represents the (H,G) phase function.

表 3 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS相位函数的相关参数
Table 3 The phase function parameters of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra and 358P/PANSTARRS

Object	$m_V(1, 1, 0)$	β	H	G	$m_{\text{env}}(1, 1, 0)$	Δm
238P	20.52 ± 0.13	0.036 ± 0.015	20.38 ± 0.15	0.33 ± 0.21	20.02	0.50
259P	20.46 ± 0.10	0.040 ± 0.006	20.14 ± 0.10	0.06 ± 0.05	20.06	0.40
313P	18.02 ± 0.10	0.043 ± 0.008	17.84 ± 0.10	0.16 ± 0.13	17.71	0.31
324P	19.00 ± 0.16	0.035 ± 0.011	18.79 ± 0.24	0.24 ± 0.25	18.65	0.35
358P	20.42 ± 0.23	0.051 ± 0.019	20.10 ± 0.24	-0.07 ± 0.15	19.59	0.45

3 长期光变曲线

正如Ferrín指出^[9], 有很多因素导致对彗星测光不完全, 使得一些对彗星活动期的观测比较暗, 显得弥散、无规律和难以定义. 最亮的星等数据有着光滑的边界可以定义为包络线(envelope). 包络线代表着对彗星活动期SLC的较为合理的描述. 对于彗星活动期的观测, 我们采用Sosa等^[50]和Ferrín^[9]的拟合方法, 选取10 d为一个时间单元并在此单元内选取亮点占比5%, 用不超过5次的多项式函数进行拟合. 我们用多项式函数 $(a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x + a_3)/(x^2 + b_1 \cdot x + b_2)$ 去拟合活动期的数据. 但对于

活动期观测比较少的彗星, 采用分段拟合的方法来确定包络线.

自转光变对SLC也有一定的影响, 超出自转光变上限的部分认为彗星是活动的. 取时间图中彗星在不活动期自转光变最亮的数值为 $m_{\text{env}}(1, 1, 0)$, 超出 $m_{\text{env}}(1, 1, 0)$ 的部分认为是由彗星活动性引起的亮度增加. 自转光变范围 $\Delta m = m(1, 1, 0) - m_{\text{env}}(1, 1, 0)$, 5颗彗星的 $m_{\text{env}}(1, 1, 0)$ 和 Δm 具体数值列在表3中.

通过以上方法我们得到了这5颗主带彗星的SLC分别如图2-6所示, 相关参数如表4所示, 图表中相关参数的定义详见附录.

表 4 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS的SLC相关参数
Table 4 The parameters related to SLC of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra and 358P/PANSTARRS

Object	P_{AGE} (LAG)	T_{AGE} (LAG)	R_{ON}	R_{OFF}	R_{LAG}	T_{ON}	T_{OFF}	T_{LAG}	A_{MAX} (LAG)
238P	59 ± 8	31 ± 3	-2.69 ± 0.05	3.28 ± 0.09	2.432 ± 0.002	-242 ± 20	461 ± 40	61 ± 2	4.1 ± 0.2
259P ₂₀₀₈	83 ± 4	72 ± 5	-1.98 ± 0.02	2.23 ± 0.03	1.887 ± 0.002	-115 ± 13	191 ± 7	65 ± 2	4.1 ± 0.2
259P ₂₀₁₇	92 ± 4	80 ± 6	-1.98 ± 0.02	2.23 ± 0.03	1.884 ± 0.002	-115 ± 13	191 ± 7	58 ± 2	3.7 ± 0.2
313P ₂₀₀₃	90 ± 2	87 ± 20	-2.40 ± 0.01	2.78 ± 0.04	2.461 ± 0.001	-53 ± 10	281 ± 25	108 ± 2	3.1 ± 0.2
313P ₂₀₁₄	132 ± 13	129 ± 16	-2.40 ± 0.01	2.78 ± 0.04	2.394 ± 0.002	-53 ± 10	281 ± 25	65 ± 2	2.1 ± 0.2
324P ₂₀₁₀	45 ± 3	20 ± 2	-2.80 ± 0.05	3.16 ± 0.06	2.708 ± 0.001	-356 ± 50	509 ± 27	152 ± 2	5.3 ± 0.3
324P ₂₀₂₁	95 ± 3	90 ± 2	-2.80 ± 0.05	3.16 ± 0.06	2.686 ± 0.001	-356 ± 50	509 ± 27	119 ± 2	3.0 ± 0.2
358P	57 ± 4	49 ± 3	-2.53 ± 0.01	2.67 ± 0.01	2.443 ± 0.001	-155 ± 7	256 ± 9	23 ± 1	4.6 ± 0.3

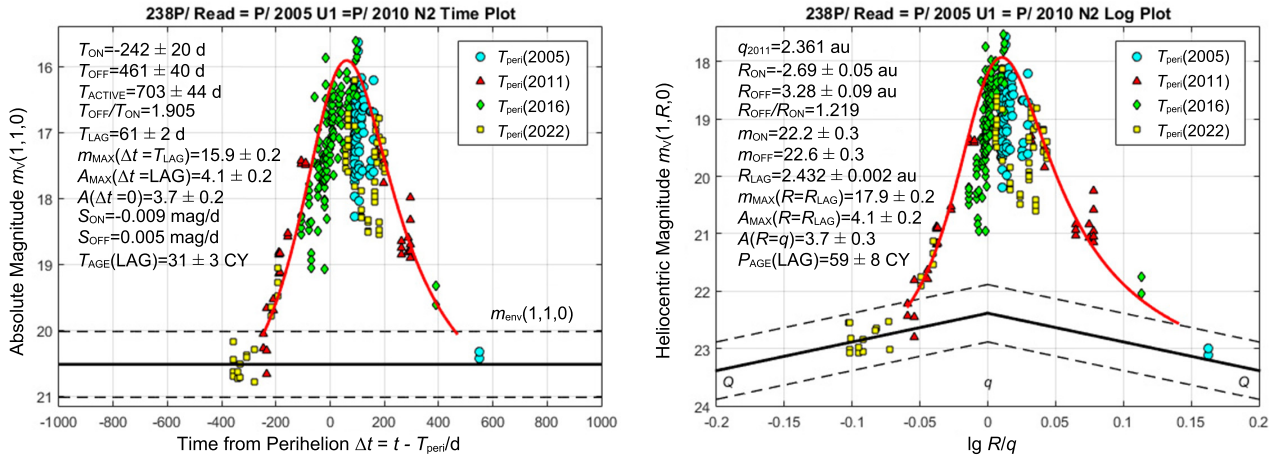


图2 238P的长期光变曲线. 左图是时间图, 其中纵坐标是扣除冲效应后的V波段绝对星等, 横坐标是相对于近日点的时间. 右图是对数图. 其中纵坐标是扣除冲效应后的V波段日心距星等, 横坐标是相对于近日点(2011年近日距 $q_{2011} = 2.361$ au)的日心距的对数. 直线是彗核不活动时对应的亮度. 两条虚线之间的区域代表着自转光变振幅 $\Delta m = 0.5$ mag. 其中时间图中上面一条虚线是 $m_{env}(1, 1, 0)$, 在这条虚线以上代表着彗星有活动性. 曲线代表着238P活动期的包络线.

Fig. 2 The SLC of comet 238P. The left panel is time plot, the vertical axis is V band absolute magnitude after deducting the opposition effect. The horizontal axis is the time with respect to perihelion. The right panel is log plot. The vertical axis is V band heliocentric magnitude after deducting the opposition effect. The horizontal axis is the logarithm of the heliocentric distance from the perihelion in 2011 ($q_{2011} = 2.361$ au). The straight line represents the brightness of inactive nucleus, and the area between the two dashed lines is the rotational magnitude variations $\Delta m = 0.5$ mag. The top dashed line in the time plot is $m_{env}(1, 1, 0)$. Observations above this dashed line represent the activity of comets. The curve is envelope of 238P activity.

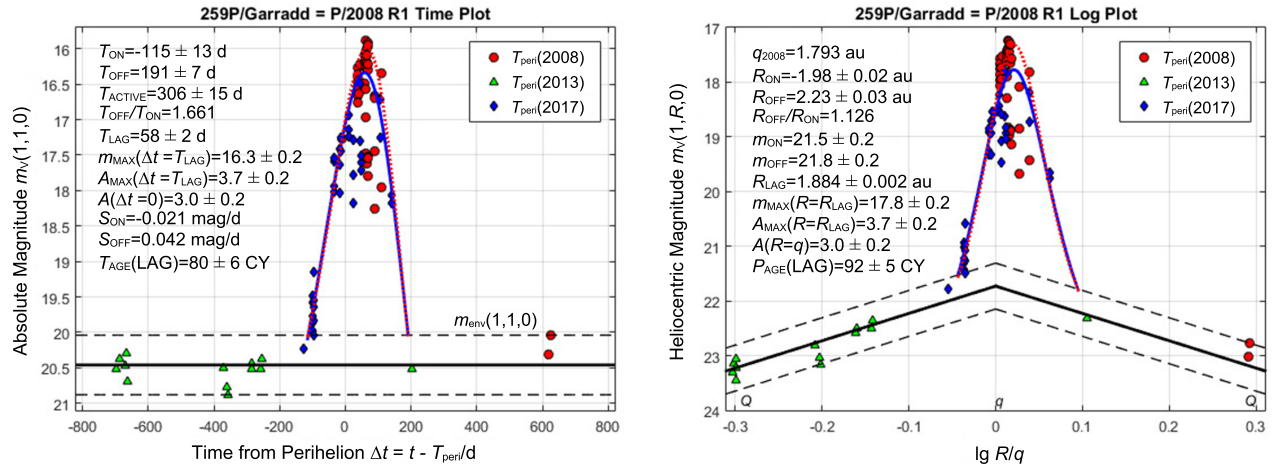


图3 259P的长期光变曲线. 左图是时间图. 右图是对数图(以2008年近日距 $q_{2008} = 1.793$ au作为参考点). 实曲线代表着2017年过近日点的包络线. 图中参数代表着2017年的包络线. 虚曲线代表着2008年过近日点的包络线. 由于此次回归周期的观测较少, 我们拟合包络线时加入了2017年回归周期的观测数据. 2008年的包络线对应的参数列在表5中.

Fig. 3 The SLC of comet 259P. The left panel is time plot. The right panel is log plot (using the 2008 perihelion $q_{2008} = 1.793$ au as a reference point). The solid curve represents the envelope of 2017 perihelion passage. The parameters in the figure represent the envelope in 2017. The dashed curve represents the envelope of 2008 perihelion passage. Due to the limited observation of this perihelion passage, we included the observation data of the 2017 perihelion passage when fitting the envelope. The parameters corresponding to the envelope in 2008 are listed in Table 5.

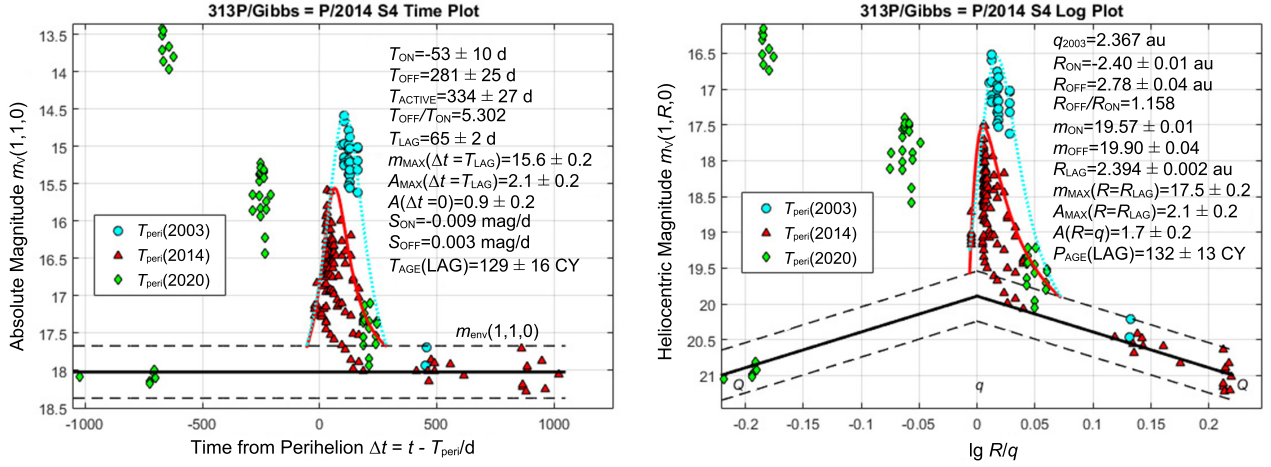


图 4 313P 的长期光变曲线. 左图是时间图, 右图是对数图(以 2003 年近日距 $q_{2003} = 2.367$ au 作为参考点). 实曲线代表着 2014 年过近日点的包络线. 图中参数代表着 2014 年的包络线. 虚曲线代表着 2003 年过近日点的包络线. 由于此次回归周期的观测较少, 我们拟合包络线时加入了 2014 和 2020 年回归周期的观测数据.

Fig. 4 The SLC of 313P. The left panel is time plot. The right panel is log plot (using the 2003 perihelion $q_{2003} = 2.367$ au as a reference point). The solid curve represents the envelope of 2014 perihelion passage. The parameters in the figure represent the envelope in 2014. The dashed curve represents the envelope of 2003 perihelion passage. Due to the limited observation of this perihelion passage, we included the observation data of the 2014 and 2020 perihelion passages when fitting the envelope.

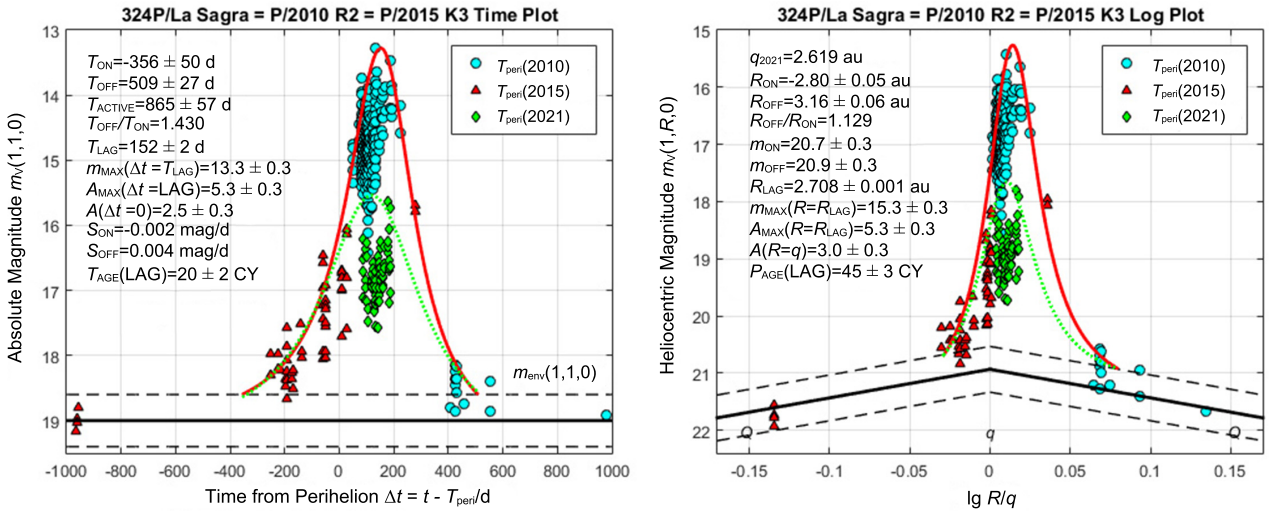


图 5 324P 的长期光变曲线. 左图是时间图, 右图是对数图(以 2021 年近日距 $q_{2021} = 2.619$ au 作为参考点). 实曲线代表着 2010 年过近日点的包络线. 图中参数代表着 2010 年的包络线. 虚曲线代表着 2021 年过近日点的包络线. 由于此次回归周期的观测较少, 我们拟合包络线时加入了 2010 和 2015 年回归周期的观测数据.

Fig. 5 The SLC of comet 324P. The left panel is time plot. The right panel is log plot (using the 2021 perihelion $q_{2021} = 2.619$ au as a reference point). The solid curve represents the envelope of 2010 perihelion passages. The parameters in the figure represent the envelope in 2010. The dashed curve represents the envelope of 2021 perihelion passage. Due to the limited observation of this perihelion passage, we included the observation data of the 2010 and 2015 perihelion passages when fitting the envelope.

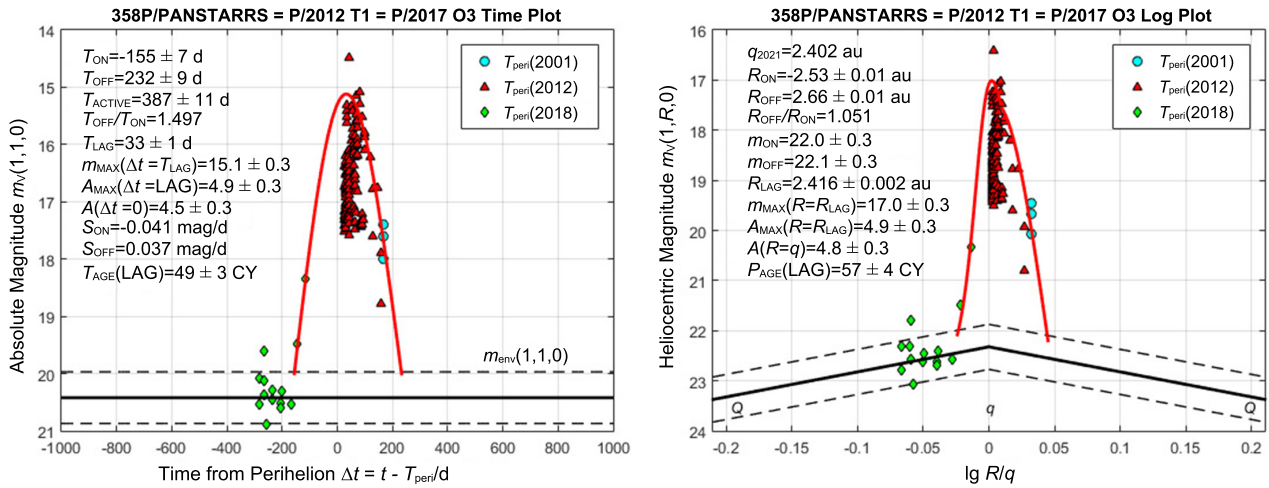


图 6 358P 的长期光变曲线. 左图是时间图, 右图是对数图(以 2021 年近日距 $q_{2021} = 2.402$ au 作为参考点). 实曲线代表着 2012 年过近日点的包络线. 图中参数代表着 2012 年的包络线. 由于此次回归周期的观测较少, 我们拟合包络线时加入了 2001 和 2018 年回归周期的观测数据.

Fig. 6 The SLC of comet 358P. The left panel is time plot, the right panel is log plot (using the 2021 perihelion $q_{2021} = 2.402$ au as the reference point). The solid curve represents the envelope of the 2012 perihelion passage. Parameters in the diagram correspond to the 2012 envelope. Due to limited observational data during this orbital return, we incorporated observations from the 2001 and 2018 perihelion passages when fitting the envelope.

3.1 238P/Read

图2是238P的长期光变曲线, 可看出238P在2005、2011、2016和2022年过近日点附近都有活动性, 且在连续回归期间活动性最大振幅没有明显下降, 这表明238P的活动性处于稳定阶段. 另外, 238P在活动开始和结束时活动性变化率较小($S_{ON} = -0.009$ mag · d⁻¹, $S_{OFF} = 0.006$ mag · d⁻¹).

3.2 259P/Garradd

图3是259P的长期光变曲线图, 从中可以看出, 259P在2008和2017年过近日点附近都有活动性. 在2013年近日点附近缺乏观测数据, 不能判断是否具有活动性. 259P在活动开始和结束时活动性变化率较大($S_{ON} = -0.021$ mag · d⁻¹, $S_{OFF} = 0.042$ mag · d⁻¹).

比较2008年和2017年的包络线, 最大振幅从2008年的 $A_{MAX} = (4.1 \pm 0.2)$ 变为2017年的 $A_{MAX} = (3.7 \pm 0.2)$. 活动性达到最大时的时间和日心距从2008年的 $T_{LAG} = (65 \pm 2)$ d 和 $R_{LAG} = (1.887 \pm 0.002)$ d 变为2017年的 $T_{LAG} = (58 \pm 2)$ d 和 $R_{LAG} =$

(1.884 ± 0.002) d. 随着主带彗星多次回归近日点, 持续活动会使得SLC的最大振幅 A_{MAX} 减小. 但259P活动性下降比较小, 振幅变化仅为0.4.

3.3 313P/Gibbs

313P光变曲线如图4所示, 从中可以看出, 313P在2003、2014和2020年过近日点附近都有活动性. 此外在2020年回归周期还有两处非近日点活动. 313P在2014年过近日点时得到的参数: $S_{ON} = -0.009$ mag · d⁻¹, $S_{OFF} = 0.003$ mag · d⁻¹. 这表明其在活动开始和结束时活动性变化率较小.

313P的SLC在距离近日点时间 $\Delta t \sim -650$ d ($R \sim 3.60$ au) 和 $\Delta t \sim -250$ d ($R \sim 3.73$ au) 处都显示出持续数十天的非近日点活动性. 这两处活动性被多个望远镜观测到, 其中包括 Gemini South Observatory, Palomar Mountain-ZTF (Zwicky Transient Facility)、ATLAS-MLO (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System-Mauna Loa Observatory) 和 Lowell Discovery Telescope 等. 这两处活动性在前几次近日点回归未被观测到, 我们不能确定其是由于偶然爆发或是季节性效应导致的.

313P在2003年过近日点的观测太少, 拟合包络线时加入了2014和2020年回归周期的观测数据. 不过可以确定的是313P在2003年近日点的最大活动振幅 $A_{\text{MAX}}(R = R_{\text{LAG}}) = (3.1 \pm 0.2)$. 2014年的 $A_{\text{MAX}}(R = R_{\text{LAG}}) = (2.1 \pm 0.2)$. 由此可见经过两次过近日点, 313P的活动性迅速衰减. 313P和259P一样都出现 T_{LAG} 和 R_{LAG} 减小的情况. 这是由于随着主带彗星活动性减弱, SLC相对近日点会更对称^[17].

3.4 324P/La Sagra

324P的SLC见图5, 从中可以看出324P在2010、2015和2021年过近日点附近都有活动性. 324P在活动开始和结束时活动性变化率较小($S_{\text{ON}} = -0.002 \text{ mag} \cdot \text{d}^{-1}$, $S_{\text{OFF}} = 0.004 \text{ mag} \cdot \text{d}^{-1}$). 已知的主带彗星中, 324P有着最长的活动时间和最大的振幅. 324P在2010年振幅为5.3, 而到2021年变为3. 经过两次近日点回归324P的活动性急剧衰减. 经历两次近日点后, 损失了大量的水冰.

3.5 358P/PANSTARRS

图6是358P的SLC, 从中可以看出358P在2001、2012和2018年过近日点附近都有活动性. 358P在活动开始和结束时活动性变化率较大($S_{\text{ON}} = -0.041 \text{ mag} \cdot \text{d}^{-1}$, $S_{\text{OFF}} = 0.037 \text{ mag} \cdot \text{d}^{-1}$). 这表明358P活动开始和结束时活动性变化比较剧烈. 358P的不对称性参数 $R_{\text{OFF}}/R_{\text{ON}} = 1.051$ 比较小. 长期光变有着明显的对称性.

4 水产率和质量损失

Jorda等^[51]对37颗彗星的234个水产率数据统计分析, 得到彗星水产率 $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ (molecules/s)与简化星等 $m_V(1, R)$ 的经验公式如下:

$$\lg Q_{\text{H}_2\text{O}} = 30.675 - 0.2453 \cdot m_V(1, R). \quad (3)$$

Ferrín^[13]引入了预算水量(Water Budget, 简称WB, 指的是彗星在一个轨道周期所损失水量的总和)这一概念. 可以用如下的公式描述:

$$\text{WB} = \sum_{T_{\text{ON}}}^{T_{\text{OFF}}} Q_{\text{H}_2\text{O}}(t) \Delta t, \quad (4)$$

其中 T_{ON} 、 T_{OFF} 分别是彗星活动性开始和结束的时间. Ferrín^[10]定义了预算水量年龄(water budget age), $\text{WB}_{\text{AGE}} = 3.58 \times 10^{11} / \text{WB}$ (CY), 这是以28P/Neujmin 1的 WB_{AGE} 为100 CY (Comet Year)定义的一个用于反映彗星水产率大小的参数.

主带彗星易挥发物质主要是水冰. 图7是我们绘制的5颗主带彗星水产率对比图. 从图7得知主带彗星的水产率大体上在 10^{26} molecules/s左右. 对于CO和CO₂等气体, 由于主带彗星的水产率过低至今未探测到. 我们忽略这些产量很少的气体. 主带彗星总的质量损失除了H₂O, 还包括尘埃. 为了计算主带彗星在一个轨道周期损失的总质量, 引入尘埃对H₂O的质量比 δ . 一个轨道周期彗核损失物质的总质量 $\text{ML}_{\text{Budget}}$ 为:

$$\text{ML}_{\text{Budget}} = \text{WB}(1 + \delta). \quad (5)$$

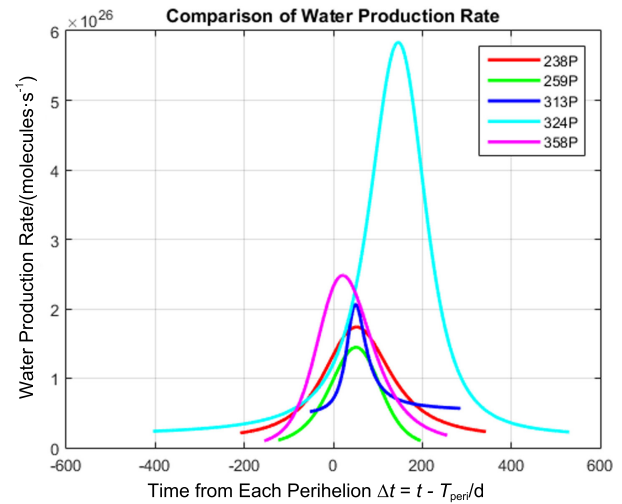


图7 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra、358P/PANSTARRS的水产率对比图. 每颗彗星都是从各自 T_{ON} 开始到 T_{OFF} 结束.

Fig. 7 Comparison plot of water production rate of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra, and 358P/PANSTARRS. Each comet starts with its own T_{ON} and ends with its own T_{OFF} .

Sanzovo等^[52]的研究表明 $0.1 < \delta < 1$. 我们选取3个可能的数值 $\delta = 0.1$ 、 0.5 和 1 来分别计算.

彗星每经过一次近日点, 由于活动损失质量, 彗核半径变小. Ferrín^[10]给出了彗核半径变化的公式:

$$\Delta r = \text{ML}_{\text{Budget}} / 4\pi\rho r_e^2, \quad (6)$$

其中 ρ 代表彗星密度. 我们采用Ferrín^[10]总结数十颗彗星的平均值 $\rho = 530 \text{ kg/m}^3$. 此外彗核的有效半径 r_e 可用以下公式给出^[53]:

$$P_V r_e^2 = 2.238 \times 10^{22} \times 10^{0.4[m_{\text{sun}} - m_V(1,1,0)]}. \quad (7)$$

假设几何反照率 $P_V = 0.05$, 太阳绝对星等 $m_{\text{sun}} = -26.75$ ^[54]. 由(6)式得出这5颗彗星的彗核有效半径, 结果见表5. 这与Hsieh等^[32]计算的这5颗主带彗星彗核半径是一致的. 我们采用Hsieh等^[32]得出的彗核半径数值来计算彗核半径的变化. 剩余回归次数RR (remaining returns)则为:

$$\text{RR} = r_e / \Delta r. \quad (8)$$

表 5 238P/Read、259P/Garradd、313P/Gibbs、324P/La Sagra和358P/PANSTARRS的水产量相关参数
Table 5 The parameters related to water budget of 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra, and 358P/PANSTARRS

Object	WB/kg ^a	WB _{AGE} /CY ^b	WB ^c	r_e /km	$\Delta r/\text{m}$ $\delta = 0.5$	RR $\delta = 0.1^d$	RR $\delta = 1^d$	RR $\delta = 0.5^d$
238P	1.68×10^8	2131	1.32%	0.36 ± 0.02	0.29	343 ± 31	60 ± 1	3.3 ± 0.2
259P	5.59×10^7	6404	0.44%	0.24 ± 0.01	0.22	193 ± 5	61 ± 1	3.8 ± 0.2
313P	7.61×10^7	4831	0.58%	0.83 ± 0.05	0.02	282 ± 34	64 ± 2	2.0 ± 0.2
324P	3.18×10^8	1126	2.50%	0.30 ± 0.02	0.80	530 ± 60	152 ± 1	5.3 ± 0.3
358P	1.10×10^8	3255	0.87%	0.25 ± 0.03	0.40	256 ± 9	23 ± 1	4.6 ± 0.3

^a Water budget

^b Water budget age

^c Compared to the water budget of 9P/Tempel 1

^d Remaining returns, $\text{RR} = r_e / \Delta r$; $\delta = M(\text{dust}) / M(\text{gas})$

用(3)–(7)式, 计算出这5颗主带彗星的水产率和质量损失相关参数, 列在表5中. 通过表5和图7我们不能识别出水产率与彗核大小的相关性. 比如313P的彗核最大而水产率和预算水量都不是最大的. 358P的彗核比较小但水产率和预算水量是较大的.

Kelley等^[54]计算238P的水产率在近日点后95 d约为 $10^{25} \text{ molecules/s}$, 我们计算的数量级为 $10^{26} \text{ molecules/s}$. 二者之间的差异可能是由于我们使用Jorda等^[51]的经验模型主要针对活动性较大的彗星, 此经验模型是基于 $m_V(1, R)$ 介于 $-2 \sim 10$ 之间的, 水产率大于 $10^{28} \text{ molecules/s}$ 的彗星, 这些彗星的亮度为其彗发主导. 为了解决模型与观测之间的差别, Sosa等^[50]针对 $m_V(1, R)$ 为 $10 \sim 14$ 之

间的木星族彗星给出了一种修正方法, 但仅能减少半个数量级. 对于主带彗星, 目前还没有更好的修正模型. 基于Jorda等^[51]的经验模型估算主带彗星水产率可以当作水产率的上限. 基于水产率的变化有助于比较主带彗星之间活动性的强弱.

5 讨论

5.1 活动性演化

对于具有多个回归周期SLC的主带彗星, 可以通过比较活动性参数的变化来研究它们的活动性演化. 259P在2008年SLC的 $A_{\text{MAX}} = 4.1$, 在两次近日点后(2017年) A_{MAX} 变为3.7. 313P由2003年的 $A_{\text{MAX}} = 3.1$ 变为2014年的 $A_{\text{MAX}} = 2.1$. 324P在2021年过近日点的活动性要比2010年低很多,

由 $A_{\text{MAX}} = 5.3$ 变成 $A_{\text{MAX}} = 3.0$. 上述情况表明主带彗星活动性衰减的幅度根据每颗彗星情况不同也表现出差异性. 324P活动性减弱相对于其他4颗主带彗星更快.

除了振幅, T_{OFF} 和 R_{OFF} 是最能反映彗星活动性演化的参数. 对于刚活动不久的主带彗星, 其SLC常有拖尾现象(比如133P/Elst-Pizarro, 简称为133P), 也就是在活动结束时活动性衰减很慢, 有一个较长的残留活动性. 对于259P、313P和324P, 它们的 T_{OFF} 和 R_{OFF} 没有较大变化. 因为这3颗主带彗星的观测太少, 我们仅仅能确定 A_{MAX} 有活动性减弱的迹象. 目前已知活动性减弱的主带彗星有133P、176P、259P、313P和324P.

5.2 主带彗星活动性比较

通过比较5颗主带彗星长期光变的相关参数, 发现按 A_{MAX} 这个参数由大到小排列为: $324P_{2010} > 358P > 238P = 259P_{2008} > 259P_{2017} > 313P_{2003} > 324P_{2021} > 313P_{2014}$, 下标为对应年份, 下同. 按 $P_{\text{AGE}}(\text{LAG})$ 这个参数, 这5颗主带彗星的活动性排列如下: $324P_{2010} > 358P > 238P > 259P_{2008} > 313P_{2003} > 259P_{2017} > 324P_{2021} > 313P_{2014}$. 发现按照这两个参数, 它们的活动性大小排序是差不多一致的. 此外我们还计算了这5颗主带彗星的水产率和总的水产量. 按水产量由大到小的顺序为: $324P > 238P > 358P > 259P > 313P$. 主带彗星的最大水产率一般都在 $10^{25} - 10^{26}$ molecules/s之间, 这比已知的木星族彗星在相同日心距下要小.

5.3 包络线的形状

从图2-6可看出主带彗星的长期光变曲线的包络线形状具有两个特征: 一是活动性开始和结束时星等变化缓慢; 二是活动性开始和结束时对应的时间和日心距相对于近日点时间和日心距是不对称的. 这些特征可结合主带彗星的轨道特征和彗核表面存在不活跃壳层进行解释, 一是由于大部分主带彗星偏心率很低, 在接近近日点时, 日心距变化不大, 所以当主带彗星从寒冷的外主带逐渐靠近近日点时, 活动性增加缓慢; 二是由于彗核表面不活跃壳层的存在, 主带彗星在向近日点运动的过程中存在

一定的热迟滞效应, 主带彗星的活动性开始和结束时对应的时间和日心距相对于近日点时间和日心距是不对称的, 壳层越厚不对称性越大.

活动性开始和结束时刻变化率相对于活动期间低的原因可能与活动区面积和尘埃/气体产率较低有关, 不同主带彗星活动变化率的差异也与不同彗核表面的活动区面积和尘埃/气体产率的高低有关.

6 结论

本文绘制了5颗主带彗星的长期光变曲线, 得到了反映彗星活动性的系列参数, 通过对比长期光变曲线和活动参数的变化, 得到了以下结论: (1)发现238P的活动性比较稳定, 其他4颗主带彗星的活动性相较于之前的回归周期均存在不同程度的衰减; (2)通过比较反映彗星活动性的参数—测光年龄 P_{AGE} , 我们对5颗主带彗星的活动性大小进行了排序, 发现324P在2010年的活动性最强, 313P在2014年的活动性最弱; (3) 313P在2020年回归周期出现了明显的非近日点活动性; (4)主带彗星的活动性开始和结束时对应的时间和日心距相对于近日点时间和日心距具有不对称性.

参考文献

- [1] Jewitt D. AJ, 2012, 143: 66
- [2] Haghighipour N. Icy Bodies of the Solar System, 2010, 263: 207
- [3] Hsieh H H, Novaković B, Kim Y, et al. AJ, 2018, 155: 96
- [4] Privalnik D, Rosenberg E D. MNRAS, 2009, 399: L79
- [5] Schorghofer N. ApJ, 2008, 682: 697
- [6] Capria M T, Marchi S, de Sanctis M C, et al. AAP, 2012, 537: A71
- [7] Snodgrass C, Jones G H, Boehnhardt H, et al. AdSpR, 2018, 62: 1947
- [8] Kamel L. Icar, 1991, 93: 226
- [9] Ferrín I. Icar, 2005, 178: 493
- [10] Ferrín I. Icar, 2006, 185: 523
- [11] Ferrín I. Icar, 2007, 187: 326
- [12] Ferrín I. Icar, 2008, 197: 169
- [13] Ferrín I. Planetary and Space Science, 2010, 58: 365
- [14] Ferrín I, Perez M, Rendon J. Planetary and Space Science, 2017, 137: 52
- [15] Ferrín I, Arcila A, Saldarriaga M. MNRAS, 2018, 479: 3726
- [16] Ferrín I, Fornari C, Acosta A. arXiv: astro-ph/1907.01096
- [17] Liang H, Shi J, Ma Y, et al. Icar, 2023, 401, 115605

- [18] Hsieh H H, Jewitt D, Ishiguro M. AJ, 2009, 137: 157
- [19] Borysenko S, Baransky A, Kuehrt E, et al. AN, 2020, 341: 849
- [20] Hsieh H H, Meech K J, Pittichová J. ApJ, 2011, 736: L18
- [21] Martino S, Tancredi G, Monteiro F, et al. Planss, 2019, 166: 135
- [22] Shi J, Ma Y, Liang H, et al. Scientific Reports, 2019, 9: 5492
- [23] Hsieh H H, Ishiguro M, Kim Y, et al. AJ, 2018, 156: 223
- [24] Jewitt D, Yang B, Haghighipour N. AJ, 2009, 137: 4313
- [25] Hsieh H H, Ishiguro M, Knight M M, et al. PSJ, 2021, 2: 62
- [26] MacLennan E M, Hsieh H. AAS, 2012, 219: 334
- [27] MacLennan E M, Hsieh H H, ApJ, 2012, 758: L3
- [28] Kleyna J, Meech K J, Hainaut O R. PASP, 2012, 124: 1083
- [29] Jewitt D, Li J, Agarwal J, et al. AJ, 2015, 150: 76
- [30] Hui M T, Jewitt D. AJ, 2015, 149: 134
- [31] Jewitt D, Agarwal J, Peixinho N, et al. AJ, 2015, 149: 81
- [32] Hsieh H H, Micheli M, Kelley M S P, et al. PSJ, 2023, 4: 43
- [33] Hsieh H H, Hainaut O, Novaković B, et al. ApJ, 2015, 800: L16
- [34] Jewitt D, Agarwal J, Weaver H, et al. AJ, 2016, 152: 77
- [35] Hsieh H H, Yang B, Haghighipour N, et al. AJ, 2012, 143: 104
- [36] Moreno F, Lara L M, Licandro J, et al. ApJ, 2011, 738: L16
- [37] Hsieh H H. Icar, 2014, 243: 16
- [38] Hsieh H H, Sheppard S S. MNRAS, 2015, 454: L81
- [39] Hsieh H H, Kaluna H M, Novaković B, et al. ApJ, 2013, 771: L1
- [40] Agarwal J, Mommert M. A&A, 2018, 616: A54
- [41] Hsieh H H, Ishiguro M, Knight M M, et al. AJ, 2018, 156: 39
- [42] Hsieh H H, Novaković B, Kim Y, et al. AJ, 2018, 155: 96
- [43] Tonry J L, Stubbs C W, Lykke K R, et al. ApJ, 2012, 750: 99
- [44] Zhao C, Newberg H J. arXiv: astro-ph/0612034
- [45] Tonry J L, Denneau L, Heinze A N, et al. PASP, 2018, 130: 064505
- [46] Park W, Pak S, Shim H, et al. Advances in Space Research, 2016, 57: 509
- [47] Agarwal J, Kim Y, Jewitt D, et al. A&A, 2020, 643: A152
- [48] Boehnhardt H, Tozzi G P, Bagnulo S, et al. A&A, 2008, 489: 1337
- [49] Snodgrass C, Tubiana C, Bramich D M, et al. A&A, 2013, 557: A33
- [50] Sosa A, Fernández J A. MNRAS, 2009, 393: 192
- [51] Jorda L, Crovisier J, Green D W E. Asteroids Comets Meteors, 2008, 1405: 8046
- [52] Sanzovo G C, Sanzovo D T, de Almeida A A. Proceedings of the International Astronomical Union, 2010, 263: 272
- [53] Russell H N. ApJ, 1916, 43: 173
- [54] Kelley M S P, Hsieh H H, Bodewits D, et al. NAT, 2023, 619: 720

Secular Light Curve of Main-belt Comets

LIANG He^{1,2} SHI Jian-chun^{1,3,4} MA Yue-hua^{1,2}

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

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

(3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

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

ABSTRACT The main-belt comets (MBC) refer to both having the orbital characteristics of the main-belt asteroids and having the comet like coma or tail, its activity is driven by water ice sublimation. We collected MBC observation data from the past 20 years and plotted the Secular Light Curves (SLC) of the MBC 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra and 358P/PANSTARRS, thereby analyzing the activity characteristics of the MBCs. We get the following conclusions: (1) The activity of 238P was found to be relatively stable, while the activity of other main-belt comets showed varying degrees of attenuation compared to the previous perihelion passage. (2) By comparing the photometric age P_{AGE} , which reflects the activity of comets, we sorted the activity level of five main-belt comets and found that 324P had the strongest activity in 2010 and 313P had the weakest activity in 2014. (3) 313P showed significant non-perihelion activity during the 2020 perihelion passage, which was not observed in

previous perihelion passages. (4) The time and heliocentric distance corresponding to the beginning and end of the main-belt comet's activity are asymmetric compared to the perihelion time and heliocentric distance.

Key words astrometry, methods: observational, techniques: photometric, comets: individual: 238P/Read, 259P/Garradd, 313P/Gibbs, 324P/La Sagra, 358P/PANSTARRS

附录

以下是时间图里的相关参数的说明:

(1) T_{ON} , 单位d. 它是彗星活动性开始时相对于过近日点的时间, 负值表示在过近日点之前.

(2) T_{OFF} , 单位d. 彗星活动性结束的时间.

(3) $T_{\text{ACTIVE}} = T_{\text{OFF}} - T_{\text{ON}}$, 单位d. 彗星总的活动时间.

(4) $T_{\text{OFF}}/T_{\text{ON}}$. 这是一个在时间图中表征彗星活动性不对称的参数. 由于 T_{ON} 通常为负值, 我们取绝对值 $|T_{\text{OFF}}/T_{\text{ON}}|$.

(5) T_{LAG} , 单位d. 彗星活动性达到最大值时相对过近日点的时间.

(6) $M_{\text{MAX}}(\Delta t = T_{\text{LAG}})$. 彗星活动性达到最大时的绝对星等.

(7) $A_{\text{MAX}}(\Delta t = T_{\text{LAG}}) = M_{\text{env}}(1, 1, 0) - M_{\text{MAX}}(\Delta t = T_{\text{LAG}})$. 彗星活动性达到最大时SLC的振幅.

(8) $A(\Delta t = 0) = M_{\text{env}}(1, 1, 0) - M(\Delta t = 0)$. 在近日点处SLC的振幅.

(9) S_{ON} , 单位mag/d. envelope在 T_{ON} 处的斜率.

(10) S_{OFF} , 单位mag/d. envelope在 T_{OFF} 处的斜率.

(11) $T_{\text{AGE}}(\text{LAG}) = 90240/[A_{\text{MAX}}(\Delta t = T_{\text{LAG}}) \cdot T_{\text{ACTIVE}}]$, 单位CY. 一种使用时间图定义彗星目前年龄的方法. 其中常数是以28P/Neujmin 1定义为 $T_{\text{AGE}}(\text{LAG}) = 100$ CY得到的CY^[8]. $T_{\text{AGE}}(\text{LAG})$ 并不是彗星的真正年龄, 也和动力学

年龄有区别. 它只是用于反映彗星活动性的参数. 对于活动性较强的彗星, 其活动时间 T_{ACTIVE} 和最大振幅 $A_{\text{MAX}}(\Delta t = T_{\text{LAG}})$ 也很大, 对应的彗星年龄 $T_{\text{AGE}}(\text{LAG})$ 就小.

(12) $T_{\text{AGE}}(q) = 90240/[A(\Delta t = 0) \cdot T_{\text{ACTIVE}}]$, 单位CY. $T_{\text{AGE}}(q)$ 的定义与 $T_{\text{AGE}}(\text{LAG})$ 相同, 这里的振幅 $A(\Delta t = 0)$ 是在近日点处取得的.

以下是对数图里的相关参数的说明:

(1) R_{ON} , 单位au. 这是彗星活动开始处的日心距, 负值表示在过近日点之前.

(2) R_{OFF} , 单位au. 彗星活动结束处的日心距.

(3) $R_{\text{OFF}}/R_{\text{ON}}$. 这是一个在对数图中表征彗星活动性不对称的参数. 由于 R_{ON} 通常为负值, 我们取绝对值 $|R_{\text{OFF}}/R_{\text{ON}}|$.

(4) M_{ON} . 彗星在 R_{ON} 处的日心距星等.

(5) M_{OFF} . 彗星在 R_{OFF} 处的日心距星等.

(6) R_{LAG} , 单位au. 彗星活动性达到最大值处的日心距.

(7) $M_{\text{MAX}}(R = R_{\text{LAG}})$. 彗星活动性达到最大值时的日心距星等.

(8) $A_{\text{MAX}}(R = R_{\text{LAG}})$. 彗星活动性达到最大值时SLC的振幅. 它和 $A_{\text{MAX}}(\Delta t = T_{\text{LAG}})$ 的定义类似.

(9) $A(R = q)$. 在近日点处SLC的振幅.

(10) $P_{\text{AGE}}(\text{LAG}) = 1440/[A_{\text{MAX}}(R = R_{\text{LAG}}) \cdot (R_{\text{OFF}} - R_{\text{ON}})]$, 单位CY. 在对数图中定义目前彗星测光年龄的一种方法, 类似于 $T_{\text{AGE}}(\text{LAG})$ 的定义. 其中常数是以28P/Neujmin 1定义为 $P_{\text{AGE}}(\text{LAG}) = 100$ CY得到的CY^[8].