

小行星Ryugu喷发尘埃粒子与地球的共振与交汇

郭文琦^{1,2}, 刘晓东^{1,2}, 蔡梓哲^{1,2}, 杨 堃^{1,2}

(1. 中山大学·深圳 航空航天学院, 深圳 518107; 2. 中山大学·深圳 深圳市智能微小卫星星座技术与应用重点实验室, 深圳 518107)

摘要: 针对从小行星162173 Ryugu表面喷发并逃逸至行星际空间的尘埃粒子, 采用直接数值仿真的方法分析其在1 000年内的轨道动力学行为规律、与地球的平均运动共振以及与地球的近距离交汇。分析了非引力摄动(太阳光压、Poynting-Robertson拖曳力和太阳风拖曳力)对尘埃粒子长期轨道演化的影响; 在尘埃粒子运动的空间区域内, 分析了尘埃粒子与地球发生3:4和4:5共振时其半长轴、偏心率 and 轨道倾角演化规律, 即尘埃粒子的半长轴呈现周期性振荡, 偏心率呈现周期性变化且略有增大, 轨道倾角呈现出周期性下降的趋势; 分析了尘埃粒子与地球的近距离交汇次数, 发现其在400~500年的时间段内达到最大值, 且在1 000年内尘埃粒子不会与地球发生碰撞。

关键词: 小行星; 轨道动力学; 尘埃粒子; 平均运动共振

中图分类号: P185.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)01-0023-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2025.20240042

引用格式: 郭文琦, 刘晓东, 蔡梓哲, 等. 小行星Ryugu喷发尘埃粒子与地球的共振与交汇[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(1): 23-30.

Reference format: GUO W Q, LIU X D, CAI Z Z, et al. Resonance and intersection with the Earth for dust particles ejected from asteroid Ryugu[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(1): 23-30.

引言

小行星探测是当前国际深空探测的热点之一, 世界主要航天国家已经广泛地开展了多项小行星探测任务^[1], 例如美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的“双小行星重定向测试”(DART)任务^[2]和针对目标小行星101955 Benu进行采样返回的“欧西里斯号”(OSIRIS-REx)任务^[3]。中国的“天问二号”小行星探测任务已正式获得国家批准立项, 该探测任务计划对近地小行星2016 HO3实施采样返回任务, 并对主带活跃小行星311P进行环绕探测。

162173 Ryugu是一个Cb类型的近地小行星, 其密度为 $1\ 190\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[4-5]。日本的“隼鸟2号”(Hayabusa2)航天器于2014年发射, 首次针对小行星Ryugu开展探测和采样返回任务^[6], 并于2020年12月返回地球。值得注意的是, “隼鸟2号”探测器在撞击小行星Ryugu时, 产生了类似于活跃小行星的明显尘埃喷发现象^[7-8], 对这些尘埃粒子的后续演化及其与地球的交互作用进行研究具有重要的意义, 将有助于理解尘埃粒子对地球空间环境的影响, 并进而为中国“天问二号”的规划实施提供理论参考。

在中心天体的引力、太阳辐射压力、太阳风拖曳力等摄动力的作用下^[9-10], 进入行星际空间的尘埃粒子逐渐偏离小行星的运行轨道^[11], 经过长期演化甚至会抵达地球形成流星雨现象^[12], 例如活跃小行星3200 Phaethon喷发的尘埃粒子到达地球后形成了被观测到的双子座流星雨^[13]。Yu等^[14-15]对DART任务撞击小行星产生的尘埃粒子轨道演化进行了研究; McMahon等^[16]研究了小行星喷发尘埃粒子的轨道演化, 其主要关注从小行星表面喷发的尘埃的“命运”; Melikyan等^[17]研究了活跃小行星尘埃流的轨道演化及其与地球的交互。迄今为止, 针对小行星Ryugu喷发尘埃粒子的轨道演化的研究相对较少。Kováčová等^[12]分析了从小行星Ryugu喷发的尘埃粒子的长期轨道演化, 但并未考虑非引力摄动对其的影响。

当尘埃与行星的公转周期之比接近于小整数比时, 两者会发生平均运动共振。Klačka等^[18]对尘埃流与行星的平均运动共振进行了详细的研究; Galushina和Sambarov^[19]揭示了3200 Phaethon与行星的平均运动共振; Sambarov等^[20]证明了象限仪座流星雨流中的尘埃粒子在运动过程中与行星存在平均运动共振。

本文主要研究从小行星Ryugu表面喷发的尘埃粒

子的动力学行为。首先,介绍尘埃粒子的轨道动力学模型和数值仿真策略;在此基础上,通过大规模数值仿真,分析尘埃粒子的轨道长期演化规律、与地球的平均运动共振以及与地球的近距离交汇现象;最后,对研究结果进行总结。

1 动力学模型与数值仿真策略

1.1 尘埃粒子动力学模型

尘埃粒子在空间中的运动主要受到太阳引力、太阳系内其它天体的引力摄动和非引力摄动等。其动力学方程可表达为

$$\ddot{\mathbf{r}} = \ddot{\mathbf{r}}_S + \ddot{\mathbf{r}}_P + \ddot{\mathbf{r}}_{NG} \quad (1)$$

其中: $\ddot{\mathbf{r}}$ 表示尘埃粒子在日心惯性坐标系下运动的加速度; $\ddot{\mathbf{r}}_S$ 表示由太阳引力引起的加速度; $\ddot{\mathbf{r}}_P$ 表示由太阳系内其它天体引力摄动引起的加速度; $\ddot{\mathbf{r}}_{NG}$ 表示由非引力摄动引起的加速度。

其中,由太阳引力引起的加速度表达式为

$$\ddot{\mathbf{r}}_S = -\frac{GM_S}{|\mathbf{r}|^3} \mathbf{r} \quad (2)$$

其中: G 为引力常量; M_S 为太阳质量; \mathbf{r} 表示太阳到尘埃粒子的位置矢量。

由太阳系内其它天体引力摄动所引起的加速度可表示为

$$\ddot{\mathbf{r}}_P = -\sum_{i=1}^n GM_i \left(\frac{\mathbf{r}_{PDi}}{|\mathbf{r}_{PDi}|^3} + \frac{\mathbf{r}_{Pi}}{|\mathbf{r}_{Pi}|^3} \right) \quad (3)$$

其中: M_i 为第*i*个天体的质量; \mathbf{r}_{PDi} 表示第*i*个天体到尘埃粒子的位置矢量; \mathbf{r}_{Pi} 表示中心天体太阳到第*i*个天体的位置矢量。本文主要考虑太阳系八大行星、冥王星及月球等天体的引力摄动。

尘埃粒子在空间中运动所受到的非引力摄动包括太阳光压、Poynting-Robertson拖曳力和太阳风拖曳力,引起的加速度由下式表达^[21-22]

$$\ddot{\mathbf{r}}_{NG} = \beta \frac{GM_S}{|\mathbf{r}|^2} \left[1 + \frac{\eta_2}{Q_{pr}} \frac{u}{c} - \left(1 + \frac{\eta_1}{Q_{pr}} \right) \frac{\dot{r}}{c} \right] \hat{\mathbf{S}} - \beta \frac{GM_S}{|\mathbf{r}|^2} \left(1 + \frac{\eta_2}{Q_{pr}} \right) \frac{\mathbf{v}}{c} \quad (4)$$

其中:与速度有关的项为Poynting-Robertson拖曳力和太阳风拖曳力; \dot{r} 为尘埃粒子运动的径向速度大小; \mathbf{v} 为尘埃粒子的速度矢量; c 表示为光速; $\hat{\mathbf{S}}$ 为太阳光入射方向的单位矢量; u 为太阳风的速度,假定太阳风的速度不依赖于太阳周期的相位时^[23], $u = 450$ km/s; η_1 和 η_2 是与太阳风拖曳力有关的参数,其值分别为

1.1和1.4^[24];参数 β 是太阳辐射压力与太阳引力的比值,其数值与尘埃的尺寸和密度有关。对于相同材质的尘埃粒子,尘埃的尺寸越小, β 值越大。参数 β 可表达为

$$\beta = 5.76 \times 10^2 \frac{Q_{pr}}{R\rho} \quad (5)$$

其中: R 为尘埃粒子的半径,单位为 μm ; ρ 为尘埃粒子的密度,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; Q_{pr} 为太阳光压系数, $Q_{pr} = 1$ 。

1.2 平均运动共振

尘埃粒子与行星的平均运动共振的共振比为 $k_p:k$,则两者的共振角可表达为^[25-26]

$$\sigma = k_p \lambda_p - k \lambda + (k - k_p) \varpi \quad (6)$$

其中: λ_p 和 λ 分别为行星和尘埃粒子的平经度(即升交点赤经、近地点幅角和平近点角之和); ϖ 为尘埃粒子的升交点赤经与近地点幅角之和。

尘埃粒子与行星是否发生平均运动共振可以通过共振角的变化进行判断^[27]。如果共振角在 $0 \sim 2\pi$ 之间振荡并循环,表明尘埃粒子与行星不存在平均运动共振;如果共振角在 $0 \sim 2\pi$ 之间某一固定值附近振荡,表明尘埃粒子与行星处于平均运动共振状态。另一种判断尘埃粒子是否共振的方法^[28]是利用共振角创建 $0 \sim 360^\circ$ 的直方图,间隔为 5° (或 10°),如果直方图中至少有一个区间为空白,则该尘埃粒子处于共振状态;若直方图中所有区间均被填充,则尘埃粒子处于非共振状态。

1.3 数值仿真策略

为探讨非引力摄动对尘埃粒子长期轨道演化的影响,本文参考文献[12]选取了5个 β 值进行数值仿真,其相应的尺寸由式(5)计算可得(如表1所示),假定尘埃粒子与小行星Ryuguu的密度相同,其值为 $1\ 190$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。尘埃粒子的数值仿真使用REBOUND开源软件包中的IAS-15积分器^[30]进行积分计算。REBOUND是一个可以对粒子(天体)运动进行轨道积分的开源软件包^[29],所使用的IAS-15是一个计算效率和精度都非常高的15阶非辛积分器,其系统误差在机器精度以下^[30]。

表1 尘埃粒子的质量、半径及 β 值

Table 1 Mass, radius and β of dust particles		
β	尘埃的半径/mm	尘埃的质量/kg
0	—	m_0
5×10^{-5}	9.70	$m_1 = 4.5 \times 10^{-3}$
1×10^{-4}	4.80	$m_2 = 5.6 \times 10^{-4}$
5×10^{-4}	0.97	$m_3 = 4.5 \times 10^{-6}$
1×10^{-3}	0.48	$m_4 = 5.6 \times 10^{-7}$

小行星Ryugu及其它天体的初始轨道根数的数据来源为NASA JPL Horizons System^①, 其中小行星Ryugu的轨道根数, 即半长轴 a 、偏心率 e 、轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 、近点幅角 ω 和真近点角 f 如表2所示。选取25 000颗(每个尺寸5 000颗)尘埃粒子从小行星表面随机喷出, 尘埃喷发时刻在小行星Ryugu的第一个轨道周期上均匀分布。小行星Ryugu是一个形状不规则的小行星, 其逃逸速度区间^[31]为0.22~0.65 m/s, 因此, 选取尘埃粒子喷发的初始喷发速度(相对于小行星)区间为0.5~5 m/s, 在此区间内尘埃粒子的喷发速度大小随机分布; 此外尘埃的喷发方向也随机分布。仿真开始时间为JD 2305 447.5, 即1600年1月1日0时0分0秒^[12], 仿真时长为1 000年, 仿真输出步长为0.01年。

表 2 小行星Ryugu的初始轨道根数
Table 2 Initial orbital elements of Ryugu

轨道根数	值
a/km	$1.77\ 322 \times 10^8$
e	0.187 912
$i/(\text{°})$	5.943 478
$\Omega/(\text{°})$	256.550 040
$\omega/(\text{°})$	206.290 331
$f/(\text{°})$	28.832 459

2 尘埃粒子的轨道演化

本节通过数值仿真, 对Ryugu表面喷发尘埃的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角的长期演化(1 000年)进行分析, 同时探讨非引力摄动对尘埃粒子轨道根数演化的影响。

图1为不同尺寸尘埃粒子的平均半长轴的长期演化图。由图1可知, 当非引力摄动较小($\beta = 5 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 1 \times 10^{-4}$), 即尘埃粒子的尺寸较大时, 尘埃粒子的半长轴变化趋势与不考虑非引力摄动($\beta = 0$)基本相

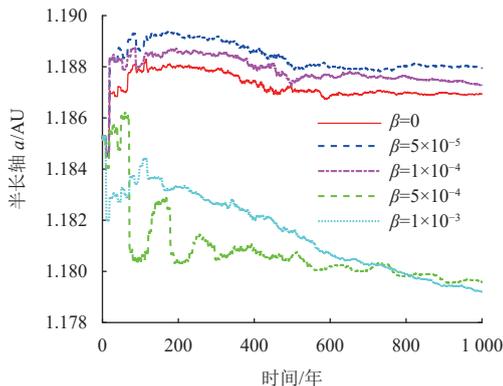


图 1 不同尺寸尘埃粒子的轨道半长轴演化图

Fig. 1 Evolution of semi-major axis of dust particles with different sizes

同, 即尘埃粒子的半长轴变化较为平缓; 当减小尘埃粒子的尺寸, 即非引力摄动较大($\beta = 5 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 1 \times 10^{-3}$)时, 尘埃粒子的半长轴呈现逐渐衰减的趋势。并且随着非引力摄动的增大, 尘埃粒子半长轴衰减的趋势更加明显, 这主要是由于Poynting-Robertson拖曳力和太阳风拖曳力对粒子半长轴的长期衰减作用^[32-33]。相比于Poynting-Robertson拖曳力和太阳风拖曳力, 太阳光压对尘埃的半长轴主要为短期作用, 而长期影响较小。

不同尺寸尘埃粒子的偏心率均呈现先减小后增大的变化趋势, 并且在约400年附近达到最小值, 如图2所示。与不考虑非引力摄动时尘埃粒子的偏心率随时间的变化曲线相比较, 当考虑非引力摄动且其作用较小($\beta = 5 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 1 \times 10^{-4}$), 即尘埃粒子的尺寸较大时, 尘埃粒子的偏心率相对较大; 然而当继续增大非引力摄动的作用($\beta = 5 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 1 \times 10^{-3}$), 意味着尘埃粒子的尺寸减小时, 尘埃粒子的偏心率相对较小。

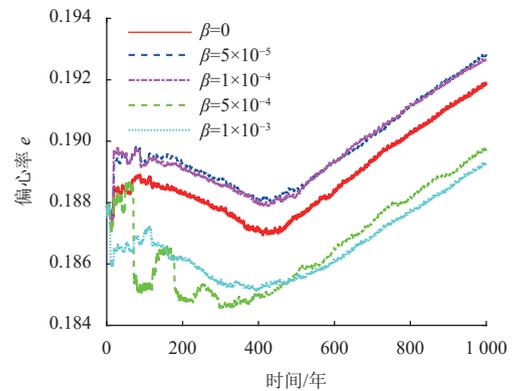


图 2 不同尺寸尘埃粒子的偏心率演化图

Fig. 2 Evolution of eccentricity of dust particles with different sizes

不同尺寸尘埃粒子的轨道倾角演化如图3所示。与尘埃粒子的偏心率变化趋势相反, 尘埃粒子的轨道倾

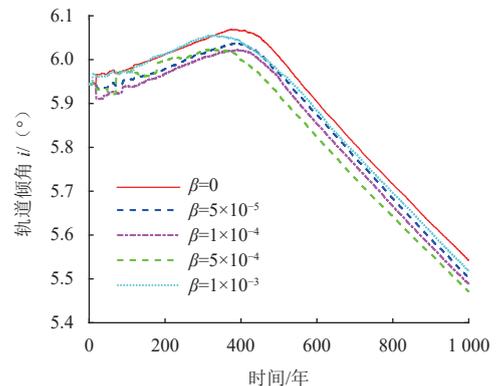


图 3 不同尺寸尘埃粒子的轨道倾角演化图

Fig. 3 Evolution of orbital inclination of dust particles with different sizes

①https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/.

角呈现先增大后减小的变化趋势, 在约400年时达到最大值, 其原因是尘埃粒子流在演化过程中会接近地球 (见第4节)。

图4给出了仿真至50年 (图4 (a) 和 (c)) 和1 000年 (图4 (b) 和 (d)) 时, 不同尺寸尘埃粒子的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角的分布情况。从

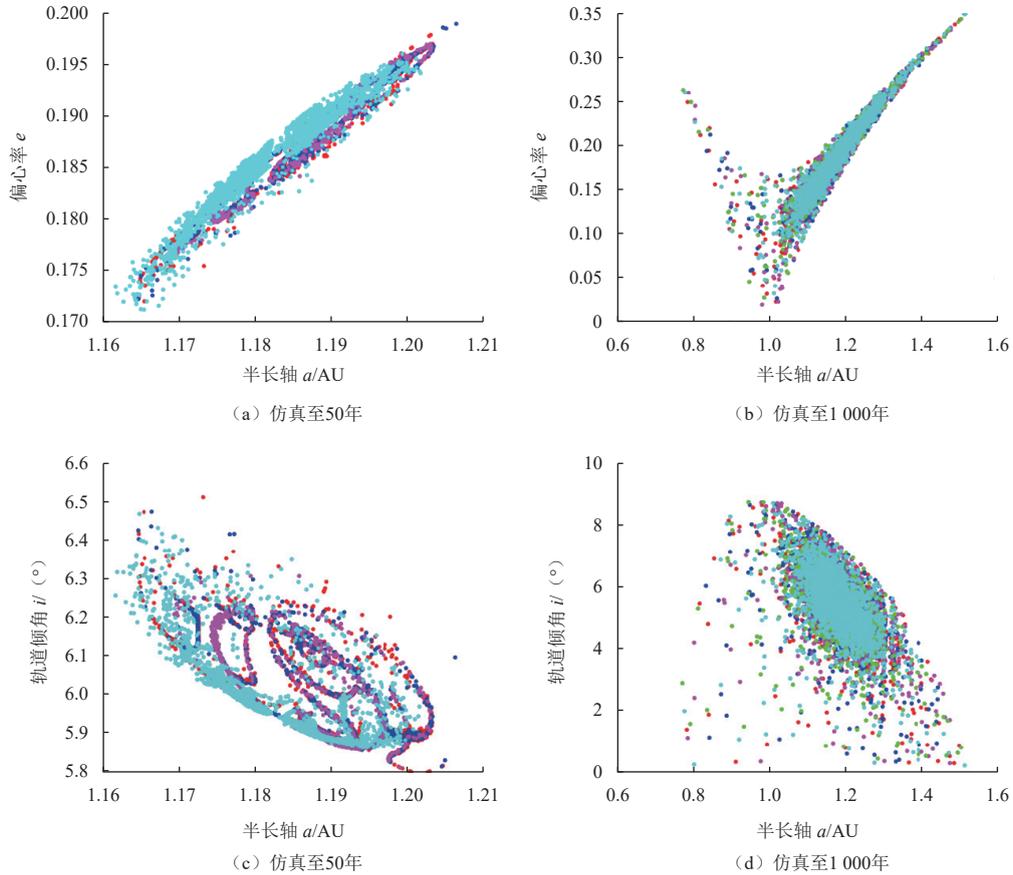


图4 尘埃粒子的半长轴、偏心率和轨道倾角的分布

Fig. 4 Distribution of semi-major axis versus eccentricity and orbital inclination of dust particles

此外, 由图4可知, 当仿真至50年时, 轨道半长轴主要分布在1.16~1.2 AU范围内, 偏心率主要集中在0.17~0.2范围内, 轨道倾角主要分布在5.8~6.5°的范围内; 当仿真至1 000年时, 轨道半长轴分布在0.8~1.4 AU范围内, 其中大部分尘埃粒子的位于1.0~1.4 AU区域, 偏心率主要分布0.05~0.3范围内, 轨道倾角主要分布在3~8°范围内。因此, 在确定尘埃粒子与地球的共振区域时, 可限制轨道半长轴、偏心率和轨道倾角的范围分别为1.0~1.4 AU、0.05~0.3°和3~8°。

3 尘埃粒子与地球的平均运动共振

本文使用Superatlasv2程序^①确定尘埃粒子与地球可

图4 (a) 可知, 当仿真至50年时, 尘埃粒子的半长轴与偏心率之间存在正相关, 即半长轴越大, 偏心率越高; 当仿真至1 000年时, 只有在半长轴大于1 AU的情况下, 半长轴与偏心率之间才存在正相关, 如图4 (b) 所示。尘埃粒子的轨道倾角与半长轴之间的关系则不明显。

能发生平均运动共振的区域^[34]。经计算得到共10个可能的平均运动共振, 其共振比及相应的位置、宽度和强度如表3所示。根据共振强度并考虑尘埃粒子的平均半长轴区间 (见图1) 选出具有代表性的尘埃粒子与地球的平均运动共振区域, 即尘埃粒子与地球的3:4和4:5共振。

利用公式 (6) 可计算尘埃粒子与地球的共振角, 由此判断尘埃粒子与地球是否发生平均运动共振现象。表4给出各尺寸5 000颗尘埃粒子中与地球的发生共振的粒子所占的百分比。根据表中数据可知, 与地球发生3:4共振和4:5共振的尘埃粒子占比相近。此外, 不同尺寸的尘埃粒子与地球发生共振的百分比也相

①Superatlasv2程序可用于计算平均运动共振的扰动函数以及共振的半长轴位置、强度和宽度。参考<http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/atlas/>。

表 3 尘埃粒子与地球可能的共振区域 (按共振强度排序)

Table 3 Possible mean motion resonance region between dust particles and Earth (sorted by resonance strength)

$k_p:k$ 共振	位置/AU	宽度/AU	强度
E3:4	1.211 41	0.011 894	$2.614 0 \times 10^{-10}$
E4:5	1.160 40	0.007 105	$2.316 9 \times 10^{-10}$
E2:3	1.310 37	0.009 490	$2.103 0 \times 10^{-10}$
E5:6	1.129 24	0.005 261	$1.946 3 \times 10^{-10}$
E6:7	1.108 23	0.004 104	$1.542 7 \times 10^{-10}$
E5:7	1.251 46	0.006 832	$1.452 7 \times 10^{-10}$
E7:9	1.182 39	0.005 704	$1.441 0 \times 10^{-10}$
E7:8	1.093 10	0.003 203	$1.095 9 \times 10^{-10}$
E5:8	1.367 98	0.004 090	$6.175 6 \times 10^{-11}$
E8:9	1.081 69	0.002 387	$5.988 1 \times 10^{-11}$

注: E代表尘埃粒子与地球的共振。

表 4 各尺寸与发生共振的尘埃粒子百分比

(每个尺寸5 000颗尘埃粒子)

Table 4 Percentage of resonant dust particles for each size (5 000 dust particles per size)

$k_p:k$ 共振	百分比/%				
	m_0	m_1	m_2	m_3	m_4
E3:4	9.3	10.3	9.9	9.6	10.2
E4:5	9.8	10.3	9.7	9.6	10.4

近, 约为10%, 表明尘埃粒子的尺寸对尘埃与地球是否发生共振的影响很小。

3.1 尘埃粒子与地球的3:4共振

图5为某个质量为 m_1 的尘埃粒子与地球的3:4共振的共振角演化, 该粒子在约400~1 000年期间与地球发生了平均运动共振, 其共振角呈现出缓慢减小的趋势。图6给出了该尘埃粒子的轨道半长轴、偏心率 and 轨道倾角的演化, 在尘埃粒子进入共振区域之前, 其半长轴、偏心率和轨道倾角的变化不规律。在共振发生期间, 即约400~1 000年间, 轨道半长轴在尘埃粒子与地球的3:4共振区域 ($1.200 \text{ AU} \leq a \leq 1.223 \text{ AU}$, 见表3) 呈现周期性变化, 变化区间在 $1.207 \text{ AU} \leq a \leq$

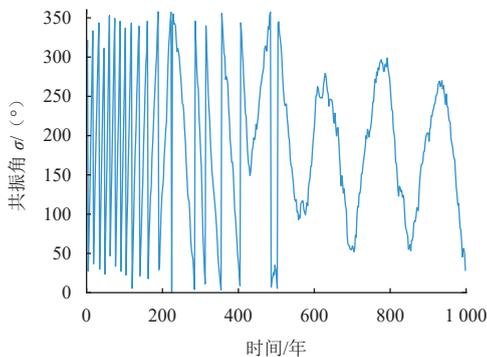


图 5 某个质量为 m_1 的尘埃粒子与地球的3:4共振的共振角变化
Fig. 5 Resonance angle of a dust particle with mass m_1 in resonance with E3:4

1.216 AU; 偏心率在0.198~0.204之间周期性变化, 且略有增长; 轨道倾角在共振期间呈现周期性减小的变化趋势。需要说明的是, 质量为 m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 和 m_4 的尘埃粒子与地球的3:4共振 (包括3.2节的4:5共振) 的共振角以及尘埃的轨道根数演化有相似的变化趋势, 这里仅选取质量为 m_1 的尘埃粒子进行讨论。

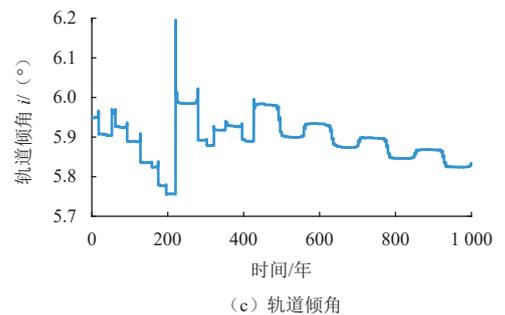
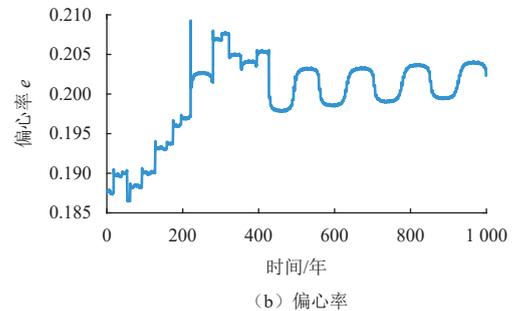
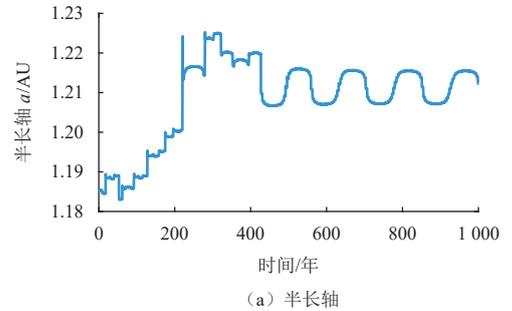


图 6 图5中的尘埃粒子的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角演化图
Fig. 6 Evolution of semi-major axis, eccentricity and orbital inclination for the dust particle in Figure 5

3.2 尘埃粒子与地球的4:5共振

在图7中, 给出了质量为 m_2 的尘埃粒子与地球的4:5共振的共振角演化, 该尘埃粒子在接近200年时开始与地球发生平均运动共振, 一直持续至1 000年, 其共振角的振幅较大, 变化频率较高。该尘埃粒子的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角的演化由图8给出, 在尘埃粒子与地球发生共振期间, 轨道半长轴在区间 $1.207 \text{ AU} \leq a \leq 1.216 \text{ AU}$ 范围内周期性变化 (尘埃粒子与地球的4:5共振区域在 $1.153 \text{ AU} \leq a \leq 1.168 \text{ AU}$, 见表3); 与尘埃粒子与地球的3:4共振相同, 其偏心率在共振区域发生周期性变化, 并略有增长; 轨道倾

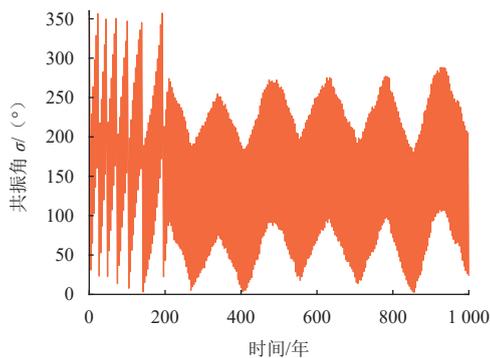


图7 某个质量为 m_2 的尘埃粒子与地球4:5共振的共振角变化

Fig. 7 Resonance angle of a dust particle with mass m_2 in resonance with E4:5

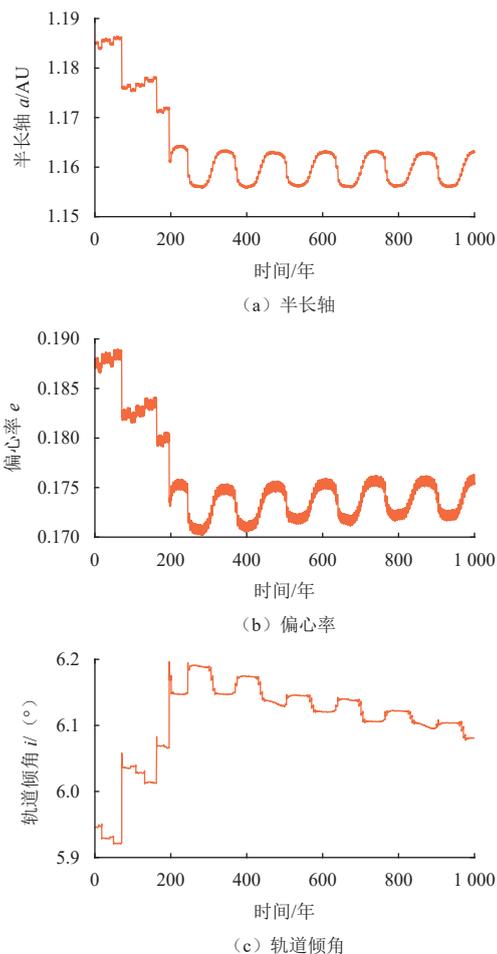


图8 图7中的尘埃粒子的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角演化图

Fig. 8 Evolution of semi-major axis, eccentricity and orbital inclination for the dust particle in Figure 7

角则呈现周期性减小的变化趋势。

在尘埃粒子与地球处于非共振状态时, 由于尘埃粒子在运动过程中与地球的近距离交汇, 尘埃粒子的轨道半长轴、偏心率和轨道倾角在较短的时间内会发生较大的变化, 如图6中0~400年和图8中0~200年所示。

4 尘埃粒子与地球的近距离交汇

不同尺寸(即非引力摄动不同)的尘埃粒子与地球的近距离交汇次数如图9所示, 图9(a)、图9(b)和图9(c)分别是在尘埃粒子与地球的距离小于100个地球半径、50个地球半径和10个地球半径的统计。尘埃粒子与地球的近距离交汇次数在400~500年左右达到最大值。

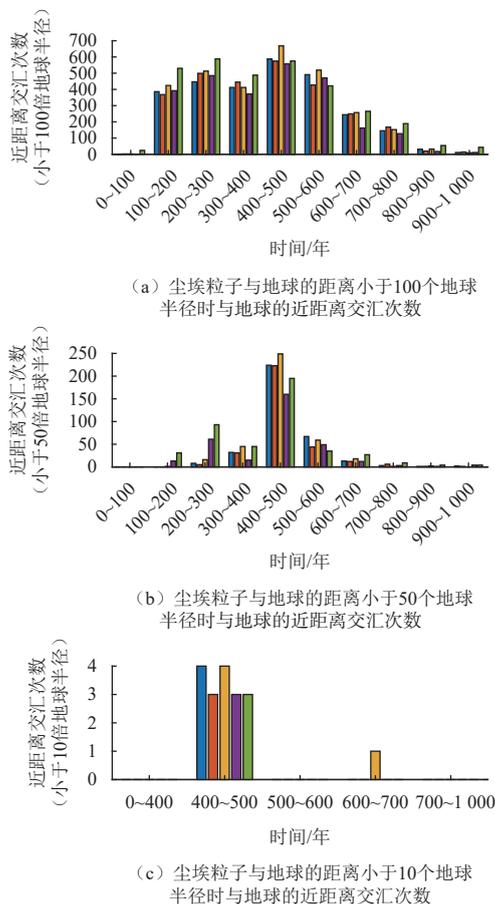


图9 不同尺寸尘埃粒子与地球的近距离交汇
Fig. 9 Number of close encounters between dust particles of different sizes and the Earth

尘埃粒子与地球在小于10个地球半径的近距离交汇次数极少, 仅在400~500年间有3~4次交汇以及在600~700年间的一次交汇。尘埃粒子与地球在小于50个地球半径的近距离交汇次数在400~500年时间段内最多, 其中 $\beta = 0$ 、 $\beta = 5 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 1 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 5 \times 10^{-4}$ 和 $\beta = 1 \times 10^{-3}$ 的尘埃粒子分别为224、223、249、160和105次。同样地, 在尘埃粒子与地球小于100个地球半径的近距离交汇次数统计中, 在400~500年时间段内最多, 其中 $\beta = 1 \times 10^{-4}$ 的尘埃粒子最多为669次, 而 $\beta = 1 \times 10^{-3}$ 的尘埃粒子在200~300年间达到最大值为558次。

在1 000年的演化过程中,尘埃粒子均没有与地球发生撞击现象。值得注意的是,尘埃粒子与地球发生近距离交汇后均离开地月空间。

5 结 论

本文主要研究从小行星Ryugu表面喷发并进入行星际空间的尘埃粒子的轨道动力学行为,对尘埃粒子的长期轨道演化、与地球的平均运动共振以及尘埃粒子与地球的近距离交汇进行分析。

通过数值仿真得到了尘埃粒子1 000年内的半长轴、偏心率 and 轨道倾角的长期演化规律及其空间分布特征。通过计算尘埃粒子与地球的共振角,分析了小行星Ryugu表面喷发的尘埃粒子在长期演化过程中与地球发生的3:4和4:5平均运动共振的共振角演化规律以及相应的尘埃粒子轨道半长轴、偏心率和轨道倾角的演化规律,即在尘埃粒子与地球发生共振期间,尘埃粒子的半长轴在共振区域内周期性振荡,偏心率呈现周期性变化且略有增大,轨道倾角呈现出周期性下降的趋势。

此外,分析了尘埃粒子与地球的近距离交汇现象,交汇次数在400~500年之间达到最大值。在1 000年间的演化过程中,尘埃粒子与地球近距离交汇后均离开地月系统,而且也没有尘埃粒子与地球发生碰撞。

综上所述,小行星Ryugu喷发的部分尘埃粒子会与地球发生共振和近距离交汇,也可能产生流星雨现象。此外,本文的方法也可应用于分析其它小行星和彗星喷发的尘埃粒子的动力学演化过程,并且有助于预测小行星和彗星的流星雨现象。

参 考 文 献

- [1] 杨孟飞,郑燕红,倪彦硕,等. 太阳系内行星探测活动进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(5): 1-12.
YANG M F, ZHENG Y H, NI Y S, et al. Progress and prospect in planetary exploration of solar system[J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(5): 1-12.
- [2] DALY R T, ERNST C M, BARNOUIN O S, et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence[J]. *Nature*, 2023, 616(7957): 443-447.
- [3] LAURETTA D S, BALRAM-KNUTSON S S, BESHORE E, et al. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Benu[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212: 925-984.
- [4] SUGITA S, HONDA R, MOROTA T, et al. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: implications for parent-body processes[J]. *Science*, 2019, 364(6437): eaaw0422.
- [5] MICHIKAMI T, HONDA C, MIYAMOTO H, et al. Boulder size and shape distributions on asteroid Ryugu[J]. *Icarus*, 2019, 331: 179-191.
- [6] TACHIBANA S, SAWADA H, OKAZAKI R, et al. Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: in situ observation and particles returned to Earth[J]. *Science*, 2022, 375(6584): 1011-1016.
- [7] SOLDINI S, TSUDA Y. Assessing the hazard posed by Ryugu ejecta dynamics on Hayabusa2 spacecraft[C]//Proceedings of 26th International Symposium of Space Flight Dynamics. Matsuyama, Japan: Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2017: 1-11.
- [8] HIRATA N, IKEYA R. Ejecta distribution from impact craters on Ryugu: possible origin of the bluer units[J]. *Icarus*, 2021, 364: 114474.
- [9] 赖海容,贾英东,何建森. 行星际尘埃的探测与研究进展[J]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(5): 507-517.
LAI H R, JIA Y D, HE J S. Advances in observation and theory of interplanetary dust[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(5): 507-517.
- [10] 刘晓东. 太阳系尘埃动力学研究综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(3): 189-197.
LIU X D. Review of research on solar system dust dynamics[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(3): 189-197.
- [11] KOSCHNY D, SOJA R H, ENGRAND C, et al. Interplanetary dust, meteoroids, meteors and meteorites[J]. *Space Science Reviews*, 2019, 215: 1-62.
- [12] KOVÁČOVÁ M, NAGY R, KORNOŠ L, et al. 101955 Benu and 162173 Ryugu: dynamical modelling of ejected particles to the Earth[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 185: 104897.
- [13] WILLIAMS I P, WU Z. The Geminid meteor stream and asteroid 3200 Phaethon[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1993, 262(1): 231-248.
- [14] YU Y, MICHEL P, SCHWARTZ S R, et al. Ejecta cloud from the AIDA space project kinetic impact on the secondary of a binary asteroid: I. mechanical environment and dynamical model[J]. *Icarus*, 2017, 282: 313-325.
- [15] YU Y, MICHEL P. Ejecta cloud from the AIDA space project kinetic impact on the secondary of a binary asteroid: II. Fates and evolutionary dependencies[J]. *Icarus*, 2018, 312: 128-144.
- [16] MCMAHON J W, SCHEERES D J, CHESLEY S R, et al. Dynamical evolution of simulated particles ejected from asteroid Benu[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(8): e2019JE006229.
- [17] MELIKYAN R E, CLARK B E, HERGENROTHER C W, et al. Benu's natural sample delivery mechanism: estimating the flux of Bennuid meteors at Earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): e2020JE006817.
- [18] KLAČKA J, NAGY R, JURČI M. Dust grains in mean motion orbital resonances with a planet[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 182: 104852.
- [19] GALUSHINA T Y, SAMBAROV G E. Dynamics of asteroid 3200 Phaethon under overlap of different resonances[J]. *Solar System Research*, 2019, 53: 215-223.
- [20] SAMBAROV G E, KARTASHOVA A P, GALUSHINA T Y. Mean-motion resonances in the quadratid meteoroid stream and dynamic evolution of dust trail of (196256) 2003 EH1[J]. *Russian Physics Journal*, 2023, 66(6): 695-705.
- [21] BURNS J A, LAMY P L, SOTER S. Radiation forces on small particles in the solar system[J]. *Icarus*, 1979, 40(1): 1-48.
- [22] KLAČKA J. Solar wind dominance over the Poynting–Robertson effect in secular orbital evolution of dust particles[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 443(1): 213-229.
- [23] KIVELSON M G, RUSSELL C T. Introduction to space physics[M]. UK: Cambridge University Press, 1995.
- [24] LAZAR M, SCHLICKEISER R, POEDTS S. Suprathermal particle

- populations in the solar wind and corona[J]. *Exploring the Solar Wind*, 2012, 12: 241-246.
- [25] GALLARDO T. Strength, stability and three dimensional structure of mean motion resonances in the solar system[J]. *Icarus*, 2019, 317: 121-134.
- [26] GALLARDO T. Three-dimensional structure of mean motion resonances beyond Neptune[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2020, 132(2): 9-19.
- [27] KAJTAZI K. Capture into mean motion resonance[D]. Sweden: Lund University, 2021.
- [28] SEKHAR A, ASHER D J, VAUBAILLON J. Three-body resonance in meteoroid streams[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 460(2): 1417-1427.
- [29] REIN H, LIU S F. REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 537: A128.
- [30] REIN H, SPIEGEL D S. IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 446(2): 1424-1437.
- [31] LORDA L, CANALIAS E, MARTIN T, et al. Mascot: analyses of the descent and bouncing trajectories to support the landing site selection[C]//Proceedings of 26th International Space Symposium in Flight Dynamics. Matsuyama, Japan: [s. n.], 2017.
- [32] LIU J C, ZOOK H A, JACKSON A A. Radiation pressure, Poynting-Robertson drag, and solar wind drag in the restricted three-body problem[J]. *Icarus*, 1995, 116(1): 186-201.
- [33] MIGNARD F. Radiation pressure and dust particle dynamics[J]. *Icarus*, 1982, 49(3): 347-366.
- [34] GALLARDO T. Orbital stability in the Solar system for arbitrary inclinations and eccentricities: planetary perturbations versus resonances[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 487(2): 1709-1716.

作者简介:

郭文琦(2000-),男,博士生,主要研究方向:小行星喷发的尘埃粒子长期轨道演化。

通信地址:深圳市光明区公常路66号,中山大学深圳校区,航空航天学院(518107)

杨莹(1993-),女,博士后,主要研究方向:空间尘埃动力学、航天器轨道优化与设计。本文通信作者。

通信地址:深圳市光明区公常路66号,中山大学深圳校区,航空航天学院(518107)

E-mail: yangk77@mail.sysu.edu.cn

Resonance and Intersection with the Earth for Dust Particles Ejected from Asteroid Ryugu

GUO Wenqi^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,2}, CAI Zizhe^{1,2}, YANG Kun^{1,2}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Microsatellite Constellation, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

Abstract: The orbital dynamics of dust particles ejected from the surface of 162173 Ryugu and escaping into interplanetary space within 1 000 years, mean motion resonance of dust particles with Earth and close encounters between dust particles and Earth were analyzed using direct numerical simulations. The effects of non-gravitational perturbations (solar radiation pressure, Poynting-Robertson drag and solar wind drag) on the long-term orbital evolution of dust particles were investigated. In the spatial region where dust particles move, the evolution of the semi-major axis, eccentricity and orbital inclination of the dust particles in the 3:4 and 4:5 mean motion resonances with the Earth were analyzed. That is, the semi-major axis of the dust particles showed periodic oscillations, the eccentricity showed periodic changes and slightly increased, and the orbital inclination showed a periodic downward trend. The number of close encounters between dust particles and the Earth was counted and analyzed. It is found that the number of close encounters reaches a maximum value within a period of 400 to 500 years, and the dust particles will not collide with the Earth within 1 000 years.

Keywords: asteroid; orbital dynamics; dust particles; mean motion resonance

Highlights:

- The long-term orbital evolutions of dust particles ejected from Ryugu are analyzed.
- The evolution of the semi-major axis, eccentricity and orbital inclination of the dust particles in the 3:4 and 4:5 mean motion resonances with the Earth are analyzed.
- The number of close encounters between dust particles and the Earth is counted and analyzed. The results showed that dust particles will not collide with the Earth within 1000 years.

[责任编辑:高莎,英文审校:宋利辉]