

柯伊伯带尘埃动力学研究进展

杨堃¹, 贾晓宇², 李飞², 刘晓东^{1,3}

(1. 中山大学·深圳 航空航天学院, 深圳 518107; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
3. 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: 回顾了针对柯伊伯带开展的空间探测任务, 介绍了柯伊伯带尘埃的2类形成机理和3类破坏机理。在此基础上, 总结了前人在柯伊伯带尘埃动力学建模方面所做的工作, 探讨了柯伊伯带尘埃表现出的族群迁移机制, 以及柯伊伯带尘埃对于内太阳系行星际尘埃的贡献。研究有助于理解太阳系边际与星际空间的尘埃环境, 从空间环境安全角度为太阳系边际探测任务的轨道设计提供一定的指导意义。

关键词: 尘埃动力学; 柯伊伯带; 太阳系边际探测; 尘埃探测

中图分类号: P185.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0394-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230113

引用格式: 杨堃, 贾晓宇, 李飞, 等. 柯伊伯带尘埃动力学研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 394-404.

Reference format: YANG K, JIA X Y, LI F, et al. Progress of research on Kuiper Belt dust dynamics[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 394-404.

引言

柯伊伯带是位于海王星轨道以外、黄道面附近的小行星聚集的圆盘状区域, 被认为是太阳系形成初期留下的痕迹, 保留着太阳系最原始的信息^[1]。柯伊伯带天体相互碰撞或遭受星际尘埃(Interstellar Dust, ISD)的撞击会产生大量尘埃粒子。由于柯伊伯带天体的逃逸速度较小, 起源于柯伊伯带的尘埃极易发生逃逸。其中, 部分逃逸尘埃的半长轴在坡印廷-罗伯逊(Poynting-Robertson, P-R)拖曳力和太阳风拖曳力的作用下逐渐衰减, 使得尘埃粒子朝着太阳的方向缓慢迁移, 成为内太阳系行星际尘埃(Interplanetary Dust, IDP)的重要来源^[2], 在这一过程中可能将原始有机物和水携带至地球^[3]。对柯伊伯带尘埃进行探测和研究, 有助于探索太阳系边际与星际空间环境, 理解外太阳系天体的形成与演化, 探寻地球生命与水的起源。

柯伊伯带尘埃可能粘附在航天器表面, 造成航天器机械结构、电子系统、光学传感等分系统发生故障^[4-7]。在轨道设计阶段计算航天器受到的尘埃撞击通量, 可以帮助评估探测任务风险等级。本文对柯伊伯带尘埃动力学相关研究进行综述, 回顾柯伊伯带探测

任务进展, 阐述柯伊伯带尘埃的形成及破坏机理, 总结前人在柯伊伯带尘埃动力学建模方面所做的工作, 介绍柯伊伯带尘埃的族群迁移机制及其对内太阳系行星际尘埃的贡献, 以期为中国未来太阳系边际和柯伊伯带尘埃探测提供参考与借鉴。

1 柯伊伯带探测任务进展

早在20世纪50年代, Kuiper等^[8]就预言了一个太阳系“边缘”地带的存在。1992年, Jewitt等^[9]发现了除冥王星和冥卫一外的第一个柯伊伯带天体——小行星15760(1992 QB1), 仅半年后又发现了第二个柯伊伯带天体181708(1993 FW), 首次证实了柯伊伯带的存在。

由于柯伊伯带极远、极寒、极暗, 导致探测难度极大, 因此人类对柯伊伯带的探测起步相对较晚。迄今为止, 仅有“先驱者10号”(Pioneer 10)、“先驱者11号”(Pioneer 11)、“旅行者1号”(Voyager 1)、“旅行者2号”(Voyager 2)和“新视野号”(New Horizon)探测器抵达过柯伊伯带。上述任务中, “先驱者10号”和“先驱者11号”受限于当时的科学载荷的探测手段和精度, 没有实现对柯伊伯带尘埃的探测^[10];

收稿日期: 2023-07-20 修回日期: 2023-09-22

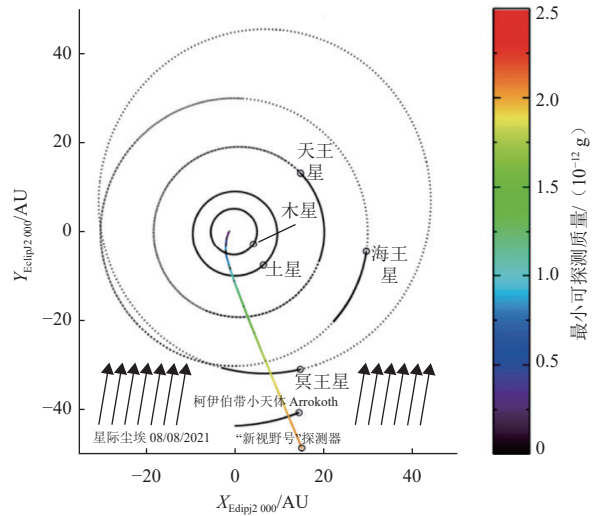
基金项目: 国家自然科学基金(12002397, 12311530055, 62388101); 国家重点研发计划课题(2020YFC2201202, 2020YFC2201101); 深圳市科技计划(ZDSYS20210623091808026)

“旅行者1号”和“旅行者2号”探测器尽管没有搭载专门的尘埃分系统,但其搭载的其它实验载荷^[11-12]间接探测到距太阳30~50 AU区域的持续性尘埃撞击。其中,“等离子体波设备”(Plasma Wave Instrument, PWS)主要由电子天线系统(两根长约10 m的可延展天线)和电子放大器两部分组成,通过观察尘埃撞击时导致的天线电压变化,探测平均数密度约为 $2 \times 10^{-8} \text{ m}^{-3}$,平均质量约为 10^{-11} g 的尘埃粒子撞击^[11]。需要注意的是,尽管PWS引入了撞击检测阈值,以避免将背景噪声识别为尘埃撞击,但仍需对撞击波形进行目视检查,从而实现尘埃撞击的半自动检测。

此后,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)曾提出“冥王星-柯伊伯快车”(Pluto-Kuiper Express, PKE)探测计划^[13],但由于经费原因该计划最终取消,柯伊伯带探测被迫中止。直到2001年,NASA宣布重启针对冥王星和柯伊伯带的探测计划,并将新的探测器命名为“新视野号”。2006年1月,“新视野号”探测器成功发射,历时近10年的时间,于2015年7月首次实现了人类对冥王星和冥卫一的近距离探测^[14]。2019年1月,“新视野号”探测器飞越了人类迄今造访的最远天体——柯伊伯带小行星Arrokoth,并拍摄回传了其特写照片,被《Science》列为2019年十大科学突破之一^[15]。“新视野号”(New Horizons)探测器搭载了尘埃载荷“学生尘埃计数仪”(Student Dust Counter, SDC),首次对柯伊伯带尘埃开展了原位探测。该载荷由一组聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)薄膜撞击传感器组成,传感器面积约为 0.1 m^2 ,重量约为 1.6 kg ,可以有效检测质量范围为 $10^{-12} \sim 10^{-9} \text{ g}$ 的尘埃撞击^[16]。2019年4月,“新视野号”抵达了距太阳50 AU的空间(运行轨迹如图1所示),其搭载的SDC对距太阳约2~50 AU范围的行星际尘埃进行了长期测量,发现尘埃通量在距太阳42 AU附近达到峰值($10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,如图2所示^[17-21])。根据NASA的柯伊伯带扩展任务规划,“新视野号”探测器未来将对至少20个柯伊伯带天体开展新一轮的探测任务^[22]。

近年来,太阳系边际探测已经成为未来深空探测的热点与前沿。NASA发布了《2014—2033年日球物理路线图》,将太阳系边际探测列入高优先发展任务之一^[23]。Wimmer-Schweingruber等^[24]提出了太阳系边际探测的国际合作项目——“星际日球层顶探针/日球层边界探索计划”(Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric EXplorer, IHP/HEX),预计用时25年抵达日球层边缘。值得一提的是,IHP/HEX任务规划中计划搭载质

量为 1.1 kg ,尺寸为 $24 \text{ cm} \times 24 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$ 的“日球层尘埃分析仪”(Heliopause Dust Analyzer, HDA)。该载荷基于“卡西尼号”(Cassini)尘埃探测仪进行设计,将利用“飞行时间质谱仪”(Time-Of-Flight Mass Spectrometer, TOF-MS)对日球层空间尘埃的质量、速度及组分进行测量^[24-25]。



注:彩色实线为飞行轨迹。

图1 J2000日心黄道坐标系下“新视野号”探测器的飞行轨迹图^[17]
Fig. 1 Flight path of New Horizon spacecraft in heliocentric ecliptic J2000 frame^[17]

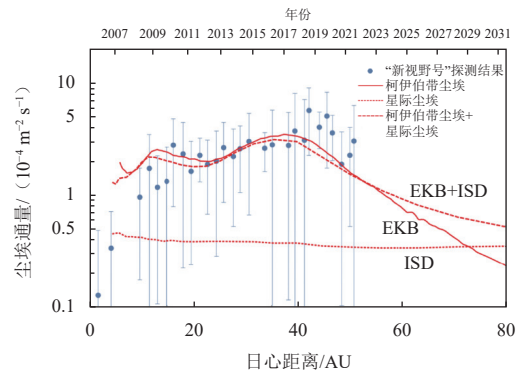


图2 “新视野号”探测到的尘埃通量^[17-21]

Fig. 2 Dust flux detected by New Horizon spacecraft^[17-21]

2 柯伊伯带尘埃的形成及破坏机理

2.1 尘埃形成机理

1) 柯伊伯带天体相互碰撞

自从Jewitt等^[9]发现了第一颗外海王星天体(Trans-Neptunian Objects, TNOs) 1992 QB1之后,各国先后开展了“深度黄道巡天”(Deep Ecliptic Survey, DES)^[26-27]、“加拿大-法国黄道面巡天”(Canada-France Ecliptic

Plane Survey, CFEPS)^[28-31]、“外太阳系起源巡天”(Outer Solar System Origins Survey, OSSOS)^[32-34]等多项针对TNOs的巡天任务。截至2023年9月,小行星中心(Minor Planet Center, MPC)^①共计提供了超过5000个具有高精度轨道参数和详细物理特征的在编TNOs。

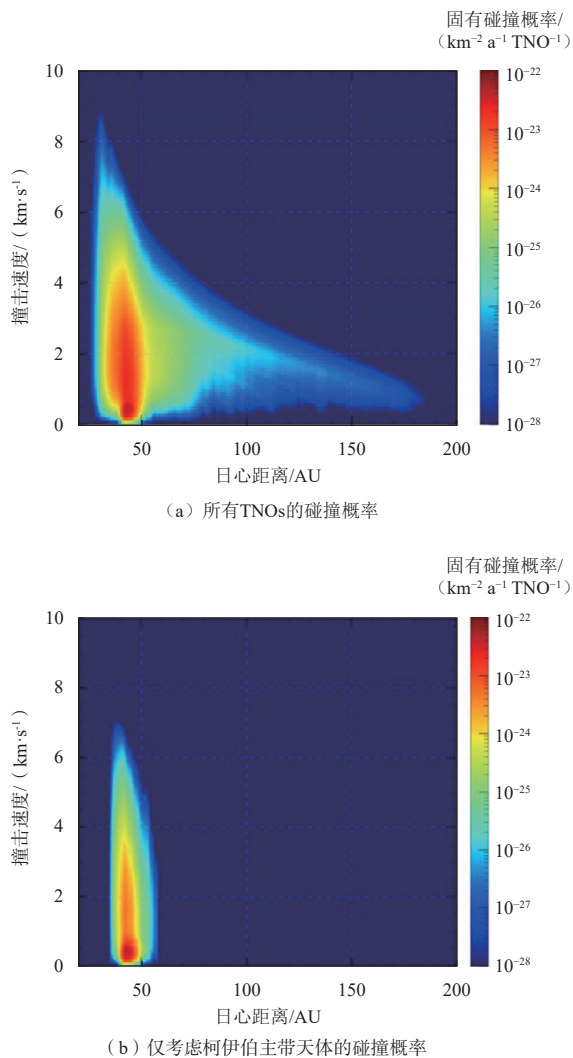
柯伊伯带区域内天体数量众多,不可避免地会发生相互碰撞。探究柯伊伯带天体之间的碰撞过程,对于理解柯伊伯带和外太阳系天体具有重要意义。Stern^[35]首次系统地构建了柯伊伯带天体相互碰撞的理论模型(后文简称为Stern1996模型),计算得到与QB1尺寸相当的柯伊伯带天体相互碰撞的质量产率为 $9 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{11}$ g/s。Yamamoto和Mukai^[36]基于Stern1996模型的计算结果,估算出柯伊伯带天体相互碰撞大约产生 $8.6 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^7$ g/s的小尺寸尘埃($0.1 \sim 10 \mu\text{m}$)。上述早期研究给出了柯伊伯带天体间相互碰撞的尘埃产率,但当时可供参考的观测统计数据仅有25颗与QB1尺寸相当的TNOs的探测数据。

近年来,随着发现的TNOs数量的增加,可以提供更加真实的柯伊伯带天体轨道数据,从而更加准确地计算柯伊伯带天体的相互碰撞概率或者尘埃质量产率。基于CFEPS L7模型, Dell'Oro等^[37]采用文献[38]的TNOs分类方法,计算了不同TNOs种群和亚种群之间的固有碰撞概率。Abedin等^[39]基于2013年1月—2017年12月期间OSSOS的观测数据^[33],采用文献[40]基于Öpik行星碰撞理论的小行星碰撞概率计算方法,计算出不同种群和亚种群TNOs发生碰撞的固有概率,在此基础上对不同位置和撞击速度下的柯伊伯带天体的碰撞概率进行计算(如图3所示)。计算结果表明:在距太阳30~200 AU的空间范围内、撞击速度小于9 km/s的情况下,TNOs发生相互碰撞的可能性相对较大,其中大多数表现为柯伊伯带主带(距太阳30~55 AU)TNOs之间的低速碰撞(< 4 km/s)。由图3(a)和图3(b)对比可知,与考虑所有TNOs相比,柯伊伯带主带天体之间的碰撞发生范围更加集中,撞击速度更低。值得注意的是,文献[39]的计算结果与Dell'Oro等^[37]提供的数据量级保持一致,同样低于此前研究的预估值^[41-42]。

对以上的结果分析可以得出,由于缺乏足量的观测数据,且采用的不同理论模型,各文献计算结果仍然存在量级上的差异。

2) 星际尘埃撞击柯伊伯带天体

星际尘埃是存在于星际介质中的宇宙尘埃^[43]。20世纪70年代,星际风的首次探测引发了关于“星际尘



注: 图例为单位天体(TNO)、单位时间(a)、单位面积(km^2)的碰撞次数。

图3 柯伊伯带天体的碰撞概率^[39]

Fig. 3 Intrinsic collision probability of Kuiper Belt objects^[39]

埃是否能够进入太阳系”问题的讨论^[44-45]。1992年,“尤利西斯号”(Ulysses)探测器搭载的尘埃探测载荷穿越局部星际云(Local Interstellar Cloud, LIC)时,通过撞击方向(与星际中性氢原子的方向夹角小于 140°)和撞击速度(大于25 km/s),首次明确识别出存在于太阳系中的星际尘埃^[46]。此次探测尘埃的质量范围为 $10^{-19} \sim 10^{-11}$ kg(假定尘埃密度为 2500 kg m^{-3} ,对应尘埃半径为 $0.02 \sim 10 \mu\text{m}$),尘埃通量为 $0.5 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[47]。Landgraf^[48]对起源于LIC的星际尘埃粒子进行大规模数值仿真计算,证明了部分小尺寸星际尘埃(半径 $< 0.4 \mu\text{m}$)可以进入太阳系,甚至抵达地球轨道(距太阳约1 AU)附近,其通量和空间分布均具有时变性。Frisch等^[49]认为日球层内探测到的少量大尺寸

①https://minorplanetcenter.net/iau/mpc.html.

星际尘埃 (>1 μm) 可能来自于狮子座尘埃云或其他类似的密集局部尘埃云。这些位于日球层边界至柯伊伯带的星际尘埃撞击柯伊伯带天体会产生新的尘埃粒子。尽管与柯伊伯带天体之间的相互碰撞相比, 星际尘埃与柯伊伯带天体单次碰撞形成的尘埃数量较少, 但其碰撞频率更高, 撞击速度更快 ($\sim 26 \text{ km/s}$), 因此也会产生大量的尘埃, 所以星际尘埃撞击柯伊伯带天体也是柯伊伯带尘埃的重要来源之一。

Yamamoto等^[56]基于“尤利西斯号”探测器对星际尘埃碰撞通量的探测数据, 采用柯伊伯带天体表面为坚硬水冰和表面被松散的水冰尘埃覆盖两种模型, 分别估算出在两种模型假设下星际尘埃撞击柯伊伯带天体的尘埃质量产率, 分别为 $3.7 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^6 \text{ g/s}$ 和 $8.5 \times 10^5 \sim 3.1 \times 10^7 \text{ g/s}$, 结果表明, 除TNOs相互碰撞以外, 星际尘埃撞击是半径小于10 μm 的外太阳系行星际尘埃的另一重要来源。Shivakarthik等^[50]通过地面实验, 探究尘埃高速撞击对于水冰表面的影响, 发现不同尘埃尺寸和撞击角度均会影响撞击结果, 其中小尺寸 ($\leq 250 \mu\text{m}$) 尘埃以 $90^\circ \sim 30^\circ$ 的角度入射时可粘附至水冰表面, 而大尺寸 (>250 μm) 尘埃会造成水冰表面破坏。

此外, 还有许多研究人员基于原位观测数据对柯伊伯带尘埃的质量产生率进行估算。Landgraf等^[51]指出, 柯伊伯带尘埃总质量产率须达到 $5 \times 10^7 \text{ g/s}$, 才能吻合“先驱者10号”和“先驱者11号”探测器对土星轨道外侧尘埃的观测结果。Han等^[52]基于“先驱者10号”和“新视野号”探测器提供的尘埃观测数据, 估算出柯伊伯带小尺寸 (0.1~10 μm) 尘埃的质量产率为 $(8.9 \pm 0.5) \times 10^5 \text{ g/s}$, 溅射尘埃的初始质量分布满足斜率为 3.02 ± 0.04 的幂律分布。

3) 其它形成机理

表面物质喷发是彗星喷发尘埃的主要方式^[53]。“旅行者2号”曾拍摄到海卫一 (Triton) 具有类似间歇泉的喷流现象^[54]。文献^[55]推测其它半人马星座或柯伊伯带天体可能也会由于表面CO或N₂冰升华而发生短暂的物质喷发活动。尽管与彗星相比, 柯伊伯带天体的物质喷发不够频繁和明显, 且直接观测十分困难, 但它们确实可能形成部分柯伊伯带尘埃。此外, 天体表面长期暴露于太阳辐射、宇宙射线以及其他天体的影响下, 可能会发生风化^[56]、滑坡^[57]或脱落^[58]现象, 这一过程伴随着少量尘埃粒子的形成。

2.2 尘埃破坏机理

1) 碰撞

在抵达内太阳系之前, 柯伊伯带尘埃可能会发生

相互碰撞或者遭受星际尘埃的撞击, 造成尘埃的轨道改变、质量损失甚至破坏解体。Liou等^[2]采用直接数值仿真的方法, 证明了碰撞对直径为1~4 μm 柯伊伯带尘埃的影响可忽略不计, 但会造成大部分直径大于9 μm 柯伊伯带尘埃的解体。Moro-Martín等^[59]计算了不同尺寸和密度下柯伊伯带尘埃的相互碰撞频率和遭受星际尘埃的撞击频率, 发现较之相互碰撞, 微米尺寸的柯伊伯带尘埃遭受星际尘埃撞击的频率更高, 主要造成直径为6~50 μm 柯伊伯带尘埃的破坏解体。

2) 升华

Moro-Martín等^[59]假定柯伊伯带尘埃是硅酸盐和水冰材料的结合, 计算了不同尺寸下纯硅酸盐尘埃粒子和纯水冰尘埃粒子升华点对应的日心距离, 发现对于纯硅酸盐尘埃粒子, 升华过程基本不会影响其轨道演化; 对于纯水冰尘埃粒子, 直径小于120 μm 的尘埃粒子会在距太阳约4 AU处达到升华点, 即便没有被彻底破坏, 水冰成分的损失也会造成尘埃粒子的尺寸减小, 导致其所受的太阳光压作用增强, 因此到达内太阳系的能力大幅削弱。Kobayashi等^[60]探究了水冰成分升华对于柯伊伯带尘埃粒子轨道演化的影响, 结果表明“旅行者号”和“先驱者号”探测器捕捉到的径向恒定尘埃通量可能是由尘埃水冰成分升华造成的。

3) 溅射

太阳风粒子的溅射效应会造成柯伊伯带尘埃的质量损失和表面化学物质改变。文献^[61~65]对太阳风粒子的溅射效应进行研究, 并得到了不同量级 (可达200倍) 的溅射破坏率。Moro-Martín等^[66]采纳文献^[65]的溅射破坏率, 通过数值仿真发现直径小于3 μm 的柯伊伯带尘埃在抵达内太阳系之前就被完全破坏, 而直径大于10 μm 柯伊伯带尘埃的溅射损失可忽略不计。需要注意的是, 文献^[66]的仿真结果取决于模型采用的溅射破坏率。此外, 太阳风粒子的溅射效应还会导致离子注入尘埃粒子, 通过在不同材料层之间产生分子键改变尘埃粒子表面化学性质的改变, 从而在尘埃表面形成一层发黑、高度碳化、耐溅射、耐火的表层, 一定程度上减少了太阳风粒子溅射造成的尘埃质量损失^[65, 67-68]。

3 柯伊伯带尘埃的动力学建模

尘埃动力学的研究方法包括解析法和数值法两类。对于柯伊伯带尘埃, 通常太阳引力占主导地位, 其表达式为

$$F_{\odot} = -\frac{GM_{\odot}m}{r_s^2} \hat{r}_s \quad (1)$$

其中： G 为牛顿引力常数； M_{\odot} 为太阳质量； m 为尘埃粒子质量； $\hat{\mathbf{r}}_s$ 为尘埃粒子相对于太阳的单位位置向量； r_s 为尘埃粒子的日心距离。

除太阳引力外，柯伊伯带尘埃粒子在朝太阳迁移的过程中，还会受到其它非中心天体引力的作用，可表达为

$$F_{\text{others}} = \sum_{i=1}^n GM_i m \left(\frac{\mathbf{r}_{dp_i}}{r_{dp_i}^3} - \frac{\mathbf{r}_{pi}}{r_{pi}^3} \right) \quad (2)$$

其中： M_i 为第*i*颗非中心天体的质量； \mathbf{r}_{dp_i} 为尘埃粒子指向第*i*颗非中心天体的位置矢量； \mathbf{r}_{pi} 为第*i*颗非中心天体指向太阳的位置矢量。需要注意的是，行星引力是影响尘埃轨道演化的重要因素，可将尘埃粒子捕获至行星附近，或与行星发生轨道共振现象，特别是与海王星的外部轨道共振；如果尘埃粒子与行星的距离过近，则有可能在行星引力散射的作用下被驱逐出太阳系。关于行星引力共振与引力散射的详细阐述可详见第4节。

太阳光压是阻碍柯伊伯带尘埃朝太阳迁移的主要作用力，可以将大部分尺寸小于1 μm 柯伊伯带尘埃粒子驱逐出太阳系，其表达式为^[69-70]

$$F_{\text{RP}} = \frac{S_0 A}{r_s^2 c} Q_{\text{pr}} \hat{\mathbf{r}}_s \quad (3)$$

其中： S_0 为太阳常数，即距太阳1 AU处尘埃粒子单位面积受到的太阳辐射通量密度； A 为尘埃在太阳光照方向上的横截面积； c 为光速； Q_{pr} 为太阳光压系数。可以看出，太阳光压与尘埃日心距离呈平方反比关系，与尘埃半径呈反比关系。

柯伊伯带尘埃粒子在太阳风等离子体环境中运动会产生拖曳力，即P-R拖曳力和太阳风拖曳力。尽管这些拖曳力十分微弱，但它们可以消耗尘埃粒子的能量和动量，使得尘埃粒子朝着太阳的方向螺旋运动。通常情况下，尘埃粒子受到的总拖曳力可以表达为

$$F_{\text{drag}} = \frac{S_0 A}{r_s^2 c} Q_{\text{pr}} \left[-(1+sw) \frac{\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{r}}_s}{c} \hat{\mathbf{r}}_s - (1+sw) \frac{\mathbf{v}}{c} \right] \quad (4)$$

其中： \mathbf{v} 为尘埃粒子相对于太阳的速度矢量； sw 为太阳风拖曳力与P-R拖曳力的比值^[71]。

除此之外，带电的尘埃粒子在行星磁场或者太阳风磁场中运动，还会受到电磁力，又称洛伦兹力，其表达式为^[72-73]

$$F_L = \frac{Q}{c} (\mathbf{v}_{\text{rel}} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

其中： Q 为尘埃粒子携带的电荷量； \mathbf{v}_{rel} 为尘埃粒子与磁场之间的相对速度； \mathbf{B} 为磁场强度。

综上所述，考虑中心天体太阳的引力、其它天体引力、太阳光压、P-R拖曳力、太阳风拖曳力和洛伦兹力，柯伊伯带尘埃粒子的运动方程可表示为

$$F_{\odot} = -\frac{GM_{\odot}m}{r_s^2} \hat{\mathbf{r}}_s + \sum_{i=1}^n GM_i m \left(\frac{\mathbf{r}_{dp_i}}{r_{dp_i}^3} - \frac{\mathbf{r}_{pi}}{r_{pi}^3} \right) + \frac{S_0 A}{r_s^2 c} Q_{\text{pr}} \left[-(1+sw) \frac{\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{r}}_s}{c} \hat{\mathbf{r}}_s - (1+sw) \frac{\mathbf{v}}{c} \right] + \frac{Q}{c} (\mathbf{v}_{\text{rel}} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

4 柯伊伯带尘埃的族群迁移机制

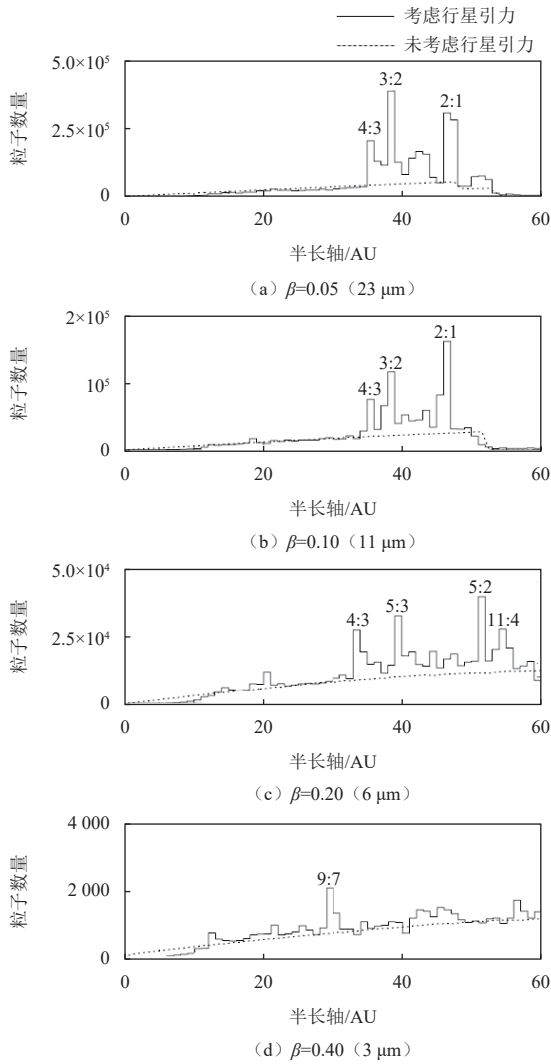
4.1 尘埃轨道演化研究

脱离母体表面后，柯伊伯带尘埃的轨道半长轴会在P-R拖曳力和太阳风拖曳力的作用下逐渐衰减，驱使尘埃粒子朝着太阳的方向缓慢迁移。行星的引力共振和引力散射是影响尘埃迁移轨道演化的两大重要因素。

Liou等^[2]基于“尤利西斯号”探测器在木星轨道附近的尘埃探测结果^[46]，对直径为1~9 μm 柯伊伯带尘埃粒子的轨道演化进行直接数值仿真，统计了不同尺寸柯伊伯带尘埃的终端状态，发现木星和土星的引力散射作用可将约80%的柯伊伯带尘埃驱逐出太阳系，而其余约20%的柯伊伯带尘埃则会一直迁移至太阳附近。在朝着太阳迁移的过程中，柯伊伯带尘埃粒子可能会被途中经过的行星捕获，陷入行星的长期轨道共振。与其他行星相比，柯伊伯带尘埃与海王星的2:1和3:2的轨道共振现象最为明显。同时，大尺寸柯伊伯带尘埃相对更容易陷入海王星的轨道共振位置，在共振位置的停留时间更长。

Liou等^[74]考虑太阳引力、行星引力（除水星和冥王星）、太阳光压、P-R拖曳力及太阳风拖曳力，对直径为3~23 μm 尘埃进行直接数值仿真，得到不同直径柯伊伯带尘埃的半长轴分布（如图4所示），得到与文献^[2]相似的结论，即柯伊伯带尘埃主要与海王星发生外部轨道共振，此外还发现少数尘埃会与天王星发生轨道共振现象。

由图4可以看出，是否考虑行星引力对于柯伊伯带尘埃轨道演化的影响重大，行星引力对尘埃分布的作用主要体现在：①陷入海王星外部轨道共振的尘埃数量增加；②距太阳10 AU以内的尘埃数量显著减少^[59,66]。



注: 比值代表尘埃与海王星的相应共振位置; β 为太阳光压与太阳引力比值, 对应不同的尘埃粒子尺寸。

图 4 不同直径 (3~23 μm) 柯伊伯带尘埃的半长轴分布^[74]

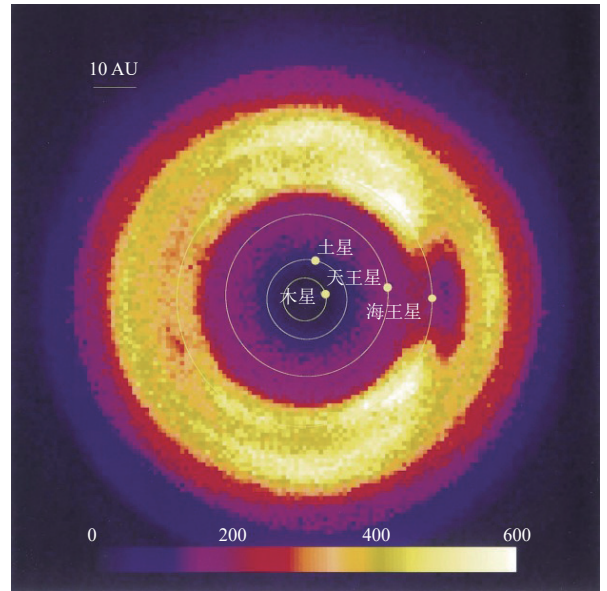
Fig. 4 Semimajor-axis distributions of EKB dust particles with different sizes (3~23 μm)^[74]

4.2 柯伊伯带尘埃盘结构特征研究

柯伊伯带尘埃与海王星轨道共振会在距太阳 35~50 AU 的区域形成一个明显的尘埃盘结构, 通常被称为柯伊伯带尘埃盘。Liou 等^[74]首次尝试通过直接数值仿真的方法揭示柯伊伯带尘埃盘的结构特征, 但受到当时可用计算资源的限制, 仅对 400 颗柯伊伯带尘埃粒子进行轨道仿真。结果显示, 柯伊伯带尘埃盘的密度沿环的径向和周向变化, 密度峰值 (约 600 AU^{-2}) 出现在 2:1 (距太阳约 47 AU) 和 3:2 (距太阳约 39 AU) 海王星共振位置。尘埃密度峰值处分别位于海王星两侧, 相隔约 70°, 如图 5 所示。

Moro-Martín 等^[59]选取了一种更高效的积分器^[65], 采用更宽泛的母体轨道参数 (半长轴分布范围为 35~50 AU, 偏心率分布范围为 0°~17°) 和柯伊伯带尘埃

尺寸 (3~120 μm), 从数值仿真的角度证明了在距太阳 35~50 AU 的区域柯伊伯带尘埃密度增加, 同时在距太阳 10~15 AU 的区域也存在一个具有尖锐内边缘 (土星和木星引力散射造成) 的尘埃盘结构。除在海王星附近存在间隙外, 该尘埃盘的其他环向结构特征并不明显。Moro-Martín 等^[66]在文献^[59]的基础上, 通过数值仿真计算出柯伊伯带尘埃盘内尘埃的径向分布, 发现尘埃尺寸满足斜率约为 2.5 的幂律分布, 并证明了行星引力可对柯伊伯带尘埃盘结构产生显著影响。



注: 单位为 AU^{-2} 。

图 5 柯伊伯带尘埃 (23 μm) 的数密度图^[74]

Fig. 5 Number density of Kuiper Belt dust (23 μm)^[74]

Holmes 等^[75]对陷入 3:2 海王星轨道共振的尘埃粒子进行数值仿真计算, 得到柯伊伯带尘埃盘中的尘埃分布, 证明了大尺寸尘埃粒子对于尘埃盘结构的决定性作用。Liou 等^[76]绘制了柯伊伯带尘埃的亮度分布图, 指出柯伊伯带尘埃盘具有以下结构特征: ①尘埃径向亮度随太阳方向单调递增; ②沿海王星轨道形成一个明显的环状结构; ③尘埃亮度随环向变化, 并在海王星所在位置存在缺口 (亮度明显降低)。

证实柯伊伯带尘埃盘的方法主要有红外波段直接观测和航天器就位观测。目前仅有极少数航天器实现了对柯伊伯带尘埃的就位观测。“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”探测器搭载了 PWS, 其探测结果^[11,77]证实了柯伊伯带尘埃的存在, 但无法量化地描述柯伊伯带尘埃盘的结构特征。直到“新视野号”探测器携带的 SDC 提供了距太阳 50 AU 范围内行星际尘埃近乎连续的观测结果, 得到了距太阳 50 AU 范围内尘埃的空间密度分布, 揭示了柯伊伯带尘埃盘的结构特征, 并与不同理

论模型的预示结果进行定量对比, 结果证明了星际尘埃对于SDC探测到的尘埃通量具有显著贡献^[17, 78-79]。

Poppe等^[19]对27 500颗柯伊伯带尘埃(半径为0.5~100 μm)进行大规模数值仿真, 并将结果与“先驱者10号”和“新视野号”前期(距太阳2~30 AU)探测数据进行拟合, 预测柯伊伯带尘埃质量通量在40 AU附近达到峰值(10^{-14} ~ 10^{-13} $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 与“新视野号”在距太阳30~50 AU的实际探测数据^[17]基本保持一致。

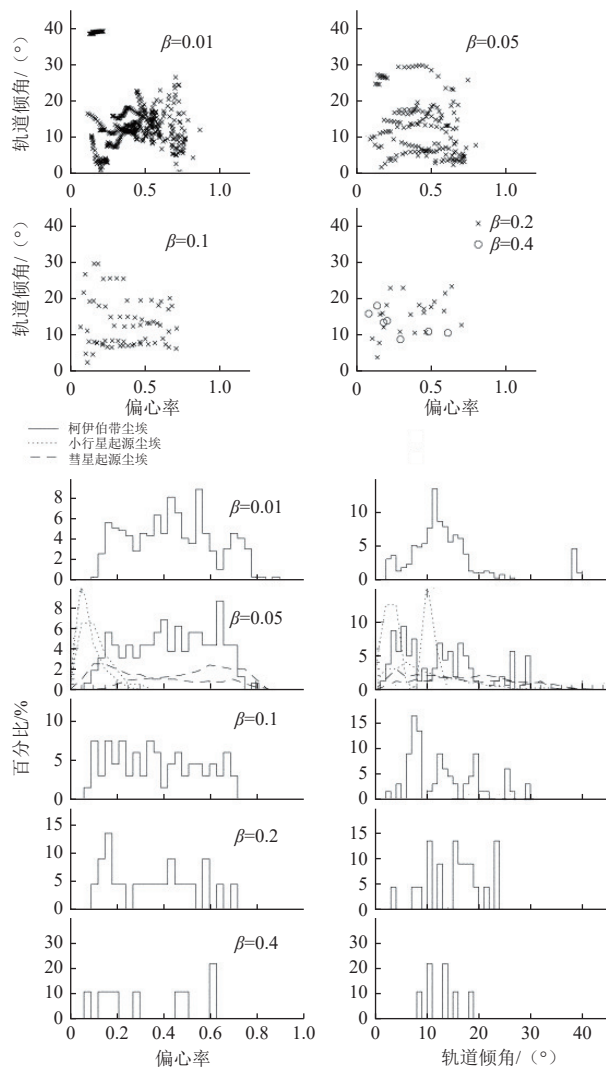
5 柯伊伯带尘埃对地球附近行星际尘埃的贡献

据估计, 每年约有 3×10^7 kg的行星际尘埃会进入地球大气层^[80]。内太阳系行星际尘埃通常被认为主要来源于彗星和小行星^[81-84]。Kortenkamp等^[85]计算了起源于小行星和彗星的行星际尘埃的捕获率, 指出地球捕获的行星际尘埃的主要来源是小行星带, 仅有不超过25%的行星际尘埃可能来源于彗星, 然而, 他们的研究并未将柯伊伯带尘埃考虑在内。

事实上, 柯伊伯带是太阳系中最大的尘埃源, 尘埃质量产率($\sim 3.5 \times 10^7$ g/s)比木星族彗星($\sim 5 \times 10^5$ g/s)高出1~2个量级^[20]。但如前文所述, 柯伊伯带距离太阳过于遥远, 起源于柯伊伯带的尘埃能否在迁移至内太阳系的过程中幸存下来, 决定着它们对内太阳系行星际尘埃的贡献情况。

Liou等^[3]首次提出, 柯伊伯带尘埃可能是内太阳系行星际尘埃和黄道云的重要来源, 通过直接数值仿真发现, 约有20%的柯伊伯带尘埃可从柯伊伯带迁移至内太阳系, 且柯伊伯带尘埃的越地轨道(距太阳约1 AU处)保持较低的偏心率(约0.2)和轨道倾角(约 6°), 增加了柯伊伯带尘埃被地球引力捕获和进入大气层的可能性。

Moro-Martín等^[66]更新了柯伊伯带天体的轨道数据, 即柯伊伯带尘埃的初始轨道, 同样采用了数值仿真计算, 得到了与文献^[3]不同的结论, 柯伊伯带尘埃在越地轨道上保持较大的偏心率和轨道倾角值, 与彗星起源的行星际尘埃的轨道特征相似(如图6所示)。这种大偏心率和轨道倾角的轨道特性导致柯伊伯带尘埃粒子很难被地球捕获, 由此可以推断出地球平流层收集到的行星际尘埃中最多有25%来自彗星或柯伊伯带, 其中柯伊伯带尘埃的贡献可能仅有1%~2%。值得注意的是, Moro-Martín等^[66]基于轨道参数得到的行星际尘埃的彗星或柯伊伯带来源比例与文献^[86]基于热脉冲法(Thermal Pulse Method, TPM)得到的结果(约20%)相似。



注: β 为太阳光压与太阳引力比值, 对应不同的尘埃粒子尺寸。

图6 柯伊伯带尘埃越地轨道的偏心率 and 轨道倾角分布^[66]

Fig. 6 Distributions of eccentricities and inclinations for Kuiper Belt dust in Earth-crossing orbits^[66]

行星际尘埃在P-R拖曳力作用下朝太阳的方向缓慢迁移, 由于暴露在太阳高能粒子(Solar Energetic Particle, SEP)环境中, 尘埃粒子的表面会留下不同程度的电离损伤痕迹。Keller等^[87]利用透射电子显微镜技术(Transmission Electron Microscope, TEM), 对地球平流层收集到的29颗行星际尘埃粒子(16颗无水组, 13颗水合组)进行分析, 基于这些尘埃粒子的SEP痕迹产生率, 推测出它们的空间暴露年龄(约 10^6 ~ 10^7 a), 证明了它们可能来自更加遥远的柯伊伯带区域, 表明以往的研究^[3, 66]可能都低估了行星际尘埃的柯伊伯带来源比例。

6 结论与展望

本文主要对柯伊伯带尘埃的动力学相关研究进行综述, 具体而言包括以下5个方面:

1) 自20世纪90年代第一个柯伊伯带天体(除冥王星和冥卫一)小行星15760被发现之后, 人类一直没有停下探索新柯伊伯带天体的脚步。但由于柯伊伯带过于遥远、寒冷和阴暗, 目前关于柯伊伯带尘埃的探测成果相对较少, 仅有“旅行者1号”“旅行者2号”和“新视野号”探测器提供了少量关于柯伊伯带尘埃的观测数据。未来, 世界各国将陆续开展针对柯伊伯带的探测任务, 如NASA的柯伊伯带扩展任务和17国合作的星际日球层顶探针/日球层边界探索计划。

2) 柯伊伯带尘埃主要通过柯伊伯带天体相互碰撞和遭受星际尘埃撞击两种方式形成, 研究人员结合空间观测和地面实验结果, 推导出不同产出模型下的尘埃质量产率。同时, 尘埃相互撞击、水冰成分的升华及太阳风粒子的溅射效应会造成尘埃粒子的轨道改变、质量损失甚至破坏解体。

3) 起源于柯伊伯带的尘埃主要受到太阳引力、其他非中心天体引力、太阳光压、P-R拖曳力、太阳风拖曳力及洛伦兹力等的作用。目前已有部分文献对柯伊伯带尘埃的动力学建模进行研究, 并探讨各类摄动力对于柯伊伯带尘埃动力学演化的影响。

4) 柯伊伯带尘埃的族群迁移机制主要受到行星引力共振和引力散射的影响, 其中引力共振现象造成海王星轨道附近的柯伊伯带尘埃盘的形成; 引力散射现象可将大部分(约80%)柯伊伯带尘埃驱逐出太阳系, 使得距太阳10 AU以内的柯伊伯带尘埃的密度迅速衰减。

5) 柯伊伯带尘埃在结束与海王星的共振之后, 一部分会迁移至内太阳系, 甚至运动至地球附近。许多文献从尘埃轨道特征的角度, 统计出内太阳系行星际尘埃的各个来源比例; 最新的一项研究对地球平流层收集到的行星际尘埃进行了年代分析, 结果表明内太阳系行星际尘埃中的柯伊伯带来源比例可能高于以往研究的预估值。

柯伊伯带尘埃动力学相关研究已经取得了一定的成果, 但仍然存在许多问题有待解决, 如部分可能影响尘埃动力学演化的因素没有考虑在内, 包括行星际磁场和行星磁场的时变性, 尘埃粒子在等离子体环境中的充电效应, 碰撞、升华、溅射等物理过程造成尘埃尺寸和形状的动态变化等。此外, 尽管发现的柯伊伯带天体数量越来越多, 探测到的柯伊伯带天体轨道参数越来越精确, 但用于数值仿真的轨道参数与实际情况仍存在较大偏差, 目前基于这些数据得到的尘埃轨道演化仿真结果可能仍然存在较大误差, 需要更多的实测结果进一步约束模型。

参 考 文 献

- [1] STERN S A, COLWELL J E. Collisional erosion in the primordial Edgeworth-Kuiper Belt and the generation of the 30-50 AU Kuiper gap[J]. *Astrophysical Journal*, 1997, 490(2): 879-882.
- [2] LIU J C, ZOOK H A, DERMOTT S F. Kuiper Belt dust grains as a source of interplanetary dust particles[J]. *Icarus*, 1996, 124(2): 429-440.
- [3] LIU J C, ZOOK H A, DERMOTT S F. The contribution of Kuiper Belt dust grains to the inner solar system[C]//Proceedings of ASP Conference Series. [S. l.]: ASP, 1996: 163-166.
- [4] 董尚利, 刘海, 吕钢, 等. 光学器件的空间粉尘高速撞击效应研究[J]. *航天器环境工程*, 2011, 28(2): 115-120.
- [5] DONG S L, LIU H, LV G, et al. Investigation of effects of hypervelocity impact of space dust on optical components[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(2): 115-120.
- [6] GAIER J R, JAWORSKE D A. Lunar dust on heat rejection system surfaces: problems and prospects[C]//Proceedings of AIP Conference Proceedings. [S. l.]: American Institute of Physics, 2007: 27-34.
- [7] CAIN J R. Lunar dust: the hazard and astronaut exposure risks[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2010, 107(1): 107-125.
- [8] STUBBS T J, VONDRAK R R, FARRELL W M. Impact of dust on lunar exploration[J]. *Dust in Planetary Systems*, 2007, 643: 239-243.
- [9] EDGEWORTH K E. The origin and evolution of the solar system[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1949, 109(5): 600-609.
- [10] JEWITT D, LUU J. Discovery of the candidate Kuiper Belt object 1992 QB1[J]. *Nature*, 1993, 362(6422): 730-732.
- [11] HUMES D H. Results of Pioneer 10 and 11 meteoroid experiments: interplanetary and near-Saturn[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, 85(A11): 5841-5852.
- [12] GURNETT D A, ANSHER J A, KURTH W S, et al. Micron-sized dust particles detected in the outer solar system by the Voyager 1 and 2 plasma wave instruments[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(24): 3125-3128.
- [13] PEDERSEN B M, MEYER-VERNET N, AUBIER M G, et al. Dust distribution around Neptune: grain impacts near the ring plane measured by the Voyager planetary radio astronomy experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1991, 96(1): 19187-19196.
- [14] TERRILE R J, STERN S A. Spacecraft missions to Pluto and Charon system[M]//Proceedings of Pluto and Charon. Tucson: University of Arizona Press, 1997.
- [15] STERN S A, BAGENAL F, ENNICO K, et al. The Pluto system: initial results from its exploration by New Horizons[J]. *Science*, 2015, 350(6258): aad1815.
- [16] American Association for the Advancement of Science. 2019 breakthrough of the year [EB/OL]. (2019-12-19)[2023-07-20]. <https://vis.sciencemag.org/breakthrough2019>.
- [17] HORANYI M, HOXIE V, JAMES D, et al. The student dust counter on the New Horizons mission[J]. *Space Science Review*, 2008, 140: 387-402.
- [18] BERNARDONI E, HORÁNYI M, DONER A, et al. Student dust counter status report: the first 50 AU[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, 3(3): 69.

- [18] POPPE A R. An improved model for interplanetary dust fluxes in the outer solar system[J]. *Icarus*, 2016, 264: 369-386.
- [19] POPPE A R, LISSE C M, PIQUETTE M, et al. Constraining the solar system's debris disk with in situ New Horizons measurements from the Edgeworth-Kuiper Belt[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 881(1): L12.
- [20] STERKEN V J, STRUB P, KRÜGER H, et al. Sixteen years of Ulysses interstellar dust measurements in the solar system. III. Simulations and data unveil new insights into local interstellar dust[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 812(2): 141.
- [21] STRUB P, STERKEN V J, SOJA R, et al. Heliospheric modulation of the interstellar dust flow on to Earth[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 621: A54.
- [22] STERN S A, WEAVER H A, SPENCER J R, et al. The New Horizons Kuiper Belt extended mission[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(4): 1-23.
- [23] National Aeronautics and Space Administration. Our dynamic space environment: heliophysics science and technology roadmap for 2014-2033[EB/OL]. (2020-08-18)[2023-07-20]. https://science.nasa.gov/science-red/s3fs-public/atoms/files/2014_HelioRoadmap_Final_Reduced.pdf.
- [24] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, MCNUTT R, SCHWADRON N A, et al. Interstellar heliospheric probe/heliospheric boundary explorer mission—a mission to the outermost boundaries of the solar system[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 24(1): 9-46.
- [25] 张爱兵, 李晖, 孔令高, 等. 太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 545-553.
- ZHANG A B, LI H, KONG L G, et al. Scientific payloads proposal for Chinese solar system boundary exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 545-553.
- [26] MILLIS R L, BUIE M W, WASSERMAN L H, et al. The Deep Ecliptic Survey: a search for Kuiper Belt objects and Centaurs. I. description of methods and initial results[J]. *The Astronomical Journal*, 2002, 123(4): 2083.
- [27] ELLIOT J L, KERN S D, CLANCY K B, et al. The Deep Ecliptic Survey: a search for Kuiper Belt objects and Centaurs. II. Dynamical classification, the Kuiper Belt plane, and the core population[J]. *The Astronomical Journal*, 2005, 129(2): 1117.
- [28] JONES R L, GLADMAN B, PETIT J M, et al. The CFEPS Kuiper Belt survey: strategy and presurvey results[J]. *Icarus*, 2006, 185(2): 508-522.
- [29] KAVELAARS J J, JONES R L, GLADMAN B J, et al. The Canada-France ecliptic plane survey—L3 data release: the orbital structure of the Kuiper Belt[J]. *The Astronomical Journal*, 2009, 137(6): 4917.
- [30] PETIT J M, KAVELAARS J J, GLADMAN B J, et al. The Canada-France ecliptic plane survey—full data release: the orbital structure of the Kuiper Belt[J]. *The Astronomical Journal*, 2011, 142(4): 131.
- [31] GLADMAN B, LAWLER S M, PETIT J M, et al. The resonant trans-Neptunian populations[J]. *The Astronomical Journal*, 2012, 144(1): 23.
- [32] BANNISTER M T, KAVELAARS J J, PETIT J M, et al. The outer solar system origins survey. I. design and first-quarter discoveries[J]. *The Astronomical Journal*, 2016, 152(3): 70.
- [33] BANNISTER M T, GLADMAN B J, KAVELAARS J J, et al. OSSOS. VII. 800+ trans-Neptunian objects—the complete data release[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, 236(1): 18.
- [34] LAWLER S M, SHANKMAN C, KAVELAARS J J, et al. OSSOS. VIII. the transition between two size distribution slopes in the scattering disk[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(5): 197.
- [35] STERN S A. Signatures of collisions in the Kuiper Disk[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 310(3): 999-1010.
- [36] YAMAMOTO S, MUKAI T. Dust production by impacts of interstellar dust on Edgeworth-Kuiper Belt objects[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1998, 329(2): 785-791.
- [37] DELL'ORO A, BAGATIN A C, BENAVIDEZ P G, et al. Statistics of encounters in the trans-Neptunian region[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, 558: A95.
- [38] GLADMAN B, MARSDEN B G, VANLAERHOVEN C. The solar system beyond Neptune[M]. Tucson: University of Arizona Press, 2008: 43-57.
- [39] ABEDIN A Y, KAVELAARS J J, GREENSTREET S, et al. OSSOS. XXI. collision probabilities in the Edgeworth-Kuiper Belt[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, 161(4): 195.
- [40] WETHERILL G W. Collisions in the asteroid belt[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(9): 2429-2444.
- [41] DAVIS D R, FARINELLA P. Collisional evolution of Edgeworth-Kuiper Belt objects[J]. *Icarus*, 1997, 125(1): 50-60.
- [42] DELL'ORO A, MARZARI F, PAOLICCHI P, et al. Updated collisional probabilities of minor body populations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, 366(3): 1053-1060.
- [43] MANN I, MEYER-VERNET N, CZECHOWSKI A. Dust in the planetary system: dust interactions in space plasmas of the solar system[J]. *Physics Reports*, 2014, 536(1): 1-39.
- [44] BERTAUX J L, BLAMONT J E. Possible evidence for penetration of interstellar dust into the solar system[J]. *Nature*, 1976, 262(5566): 263-266.
- [45] MORFILL G E, GRÜN E. The motion of charged dust particles in interplanetary space—II. Interstellar grains[J]. *Planetary and Space Science*, 1979, 27(10): 1283-1292.
- [46] GRÜN E, ZOOK H A, BAGUHL M, et al. Discovery of Jovian dust streams and interstellar grains by the Ulysses spacecraft[J]. *Nature*, 1993, 362(6419): 428-430.
- [47] MANN I. Interstellar dust in the solar system[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2010, 48: 173-203.
- [48] LANDGRAF M. Modeling the motion and distribution of interstellar dust inside the heliosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, 105(A5): 10303-10316.
- [49] FRISCH P C, SLAVIN J D. Interstellar dust close to the Sun[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, 65: 175-182.
- [50] SHIVAKARTHIK E, MEKA J K, SURENDRA V S, et al. Sticking dust and micrometeorite particles on to ices at high impact velocities—implications for astrochemical ice enrichment[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 190: 104972.
- [51] LANDGRAF M, LIOU J C, ZOOK H A, et al. Origins of solar system dust beyond Jupiter[J]. *The Astronomical Journal*, 2002, 123(5): 2857.
- [52] HAN D, POPPE A R, PIQUETTE M, et al. Constraints on dust production in the Edgeworth-Kuiper Belt from Pioneer 10 and New Horizons measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(24): L24102.
- [53] FARNHAM T L, WELLNITZ D D, HAMPTON D L, et al. Dust coma morphology in the Deep Impact images of Comet 9P/Tempel 1[J].

- Icarus*, 2007, 191(2): 146-160.
- [54] SMITH B A, SODERBLOM L A, BANFIELD D, et al. Voyager 2 at Neptune: imaging science results[J]. *Science*, 1989, 246(4936): 1422-1449.
- [55] LUU J X, JEWITT D C. Reflection spectrum of the Kuiper Belt object 1993 SC[J]. *Astronomical Journal*, 1996, 111: 499.
- [56] CLARK B E, HAPKE B, PIETERS C, et al. Asteroid space weathering and regolith evolution[J]. *Asteroids III*, 2002, 1: 585-599.
- [57] SCHEERES D J. Landslides and mass shedding on spinning spheroidal asteroids[J]. *Icarus*, 2015, 247: 1-17.
- [58] HIRABAYASHI M, SÁNCHEZ D P, SCHEERES D J. Internal structure of asteroids having surface shedding due to rotational instability[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 808(1): 63.
- [59] MORO-MARTÍN A, MALHOTRA R. A study of the dynamics of dust from the Kuiper Belt: spatial distribution and spectral energy distribution[J]. *The Astronomical Journal*, 2002, 124(4): 2305.
- [60] KOBAYASHI H, KIMURA H, YAMAMOTO S, et al. Ice sublimation of dust particles and their detection in the outer solar system[J]. *Earth, Planets and Space*, 2010, 62(1): 57-61.
- [61] MCDONNELL J A M, FLAVILL R P. Solar wind sputtering on the lunar surface-equilibrium crater densities related to past and present microparticle influx rates[C]//Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Science Research Council of England, 1974: 2441-2449.
- [62] MCDONNELL J A M, ASHWORTH D G, FLAVILL R P, et al. The characterization of lunar surface impact erosion and solar wind sputter processes on the lunar surface[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1977, 285(1327): 303-308.
- [63] FLAVILL R P, CAREY W C, MCDONNELL J A M, et al. Progress in defining the solar wind sputter rate on protoplanets and interplanetary matter[J]. *Planetary and Space Science*, 1980, 28(5): 511-524.
- [64] JOHNSON R E, BARAGIOLA R. Lunar surface: sputtering and secondary ion mass spectrometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(11): 2169-2172.
- [65] MUKAI T, NAKAMURA A M, BLUM J, et al. Physical processes on interplanetary dust[M]//*Interplanetary Dust*. Berlin: Springer, 2001: 445-507.
- [66] MORO-MARTÍN A, MALHOTRA R. Dynamical models of Kuiper Belt dust in the inner and outer solar system[J]. *The Astronomical Journal*, 2003, 125(4): 2255.
- [67] JOHNSON R E, LANZEROTTI L J. Ion bombardment of interplanetary dust[J]. *Icarus*, 1986, 66(3): 619-624.
- [68] JOHNSON R E. Energetic CHARGED-pARTICLE INTERACTIONS WITH ATMOSPHERES AND SURFACES[M]. New York: Springer, 1990.
- [69] BURNS J A, LAMY P L, SOTER S. Radiation forces on small particles in the solar system[J]. *Icarus*, 1979, 40(1): 1-48.
- [70] MIGNARD F. Radiation pressure and dust particle dynamics[J]. *Icarus*, 1982, 49(3): 347-366.
- [71] GUSTAFSON B A S. Physics of zodiacal dust[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22(1): 553-595.
- [72] BURNS J A, HAMILTON D P, SHOWALTER M R. Interplanetary dust[M]. Berlin: Springer, 2001: 641-725.
- [73] STERN D P. Representation of magnetic fields in space[J]. *Reviews of Geophysics*, 1976, 14(2): 199-214.
- [74] LIOU J C, ZOOK H A. Signatures of the giant planets imprinted on the Edgeworth-Kuiper Belt dust disk[J]. *The Astronomical Journal*, 1999, 118(1): 580.
- [75] HOLMES E K, DERMOTT S F, GROGAN K. Modeling Resonant Structure in the Kuiper Belt[C]//Proceedings of American Astronomical Society Meeting. [S. l.]: American Astronomical Society, 1999.
- [76] LIOU J C, KAUFMANN D E. Structure of the Kuiper Belt dust disk[M]//*The SOLAR SYSTEM BEYOND Neptune*. Tucson: University of Arizona Press, 2008: 425.
- [77] GURNETT D A, KURTH W S. Electron plasma oscillations upstream of the solar wind termination shock[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2025-2027.
- [78] POPPE A, JAMES D, JACOBSMEYER B, et al. First results from the Venetia Burney Student Dust Counter on the New Horizons mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L11101.
- [79] PIQUETTE M, POPPE A R, BERNARDONI E, et al. Student dust counter: status report at 38 AU[J]. *Icarus*, 2019, 321: 116-125.
- [80] GRÜN E, ZOOK H A, FECHTIG H, et al. Collisional balance of the meteoritic complex[J]. *Icarus*, 1985, 62(2): 244-272.
- [81] LIOU J C, ZOOK H A. Comets as a source of low eccentricity and low inclination interplanetary dust particles[J]. *Icarus*, 1996, 123(2): 491-502.
- [82] DERMOTT S F, DURDA D D, GUSTAFSON B A S, et al. Zodiacal dust bands[C]//Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors 1993: Proceedings of the 160th Symposium of the International Astronomical Union. [S. l.]: International Astronomical Union, 1994: 127-142.
- [83] DOHNANYI J S. Sources of interplanetary dust: asteroids[C]//Proceedings of International Astronomical Union Colloquium. [S. l.]: International Astronomical Union, 1976.
- [84] LIOU J C, DERMOTT S F, XU Y L. The contribution of cometary dust to the zodiacal cloud[J]. *Planetary and Space Science*, 1995, 43(6): 717-722.
- [85] KORTENKAMP S J, DERMOTT S F. Accretion of interplanetary dust particles by the Earth[J]. *Icarus*, 1998, 135(2): 469-495.
- [86] BROWNLEE D E, JOSWIAK D J, LOVE S G, et al. Identification and analysis of cometary IDPs[C]//Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference. Houston: The Lunar and Planetary Institute, 1994.
- [87] KELLER L P, FLYNN G J. Evidence for a significant Kuiper Belt dust contribution to the zodiacal cloud[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(6): 731-735.

作者简介:

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。

通信地址:中山大学深圳校区理学园西424(518107)

刘晓东(1985-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:深空探测动力学、空间尘埃/空间碎片/卫星星座轨道动力学等。本文通信作者。

通信地址:中山大学深圳校区理学园西421(518107)

E-mail: liuxd36@mail.sysu.edu.cn

Progress of Research on Kuiper Belt Dust Dynamics

YANG Kun¹, JIA Xiaoyu², LI Fei², LIU Xiaodong^{1,3}

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

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

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

Abstract: This paper reviews the recent research on the Kuiper Belt dust dynamics. Specifically, we review the related space exploration missions, introduce the origin and destruction mechanism of the Kuiper Belt dust, summarize previous studies on the modeling of the Kuiper Belt dust dynamics, and discuss the population migration mechanism as well as the contribution of Kuiper Belt dust to interplanetary dust in the inner solar system. This study helps to understand the dust environment in the solar system boundary and the interstellar space, and provide valuable insights for the orbital design of solar system boundary missions from the perspective of space environmental safety.

Keywords: dust dynamics; Kuiper Belt; solar system boundary exploration; dust detection

Highlights:

- Generation and failure mechanisms of Kuiper Belt dust are reviewed.
- Studies on the Kuiper Belt dust dynamics are summarized.
- Migration mechanism and contribution of Kuiper Belt dust to interplanetary dust in the inner solar system are reviewed.
- Suggestions for future studies on Kuiper Belt dust are proposed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]