科学通报 2026 年 第 71 卷 第 17 期: 3927 ~ 3936
香山科学会议专栏 论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
第776次学术讨论会·近地小行星防御关键科学与工程技术问题

小行星撞击成坑及溅射粉尘扩散过程研究

刘芹芹[1], 徐文杰[2,3*], 申旭辉[1,4*], 欧阳鹏昊[2,3], 周鹏程[1], 张杨杨[2,3]

1. 中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190
2. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084
3. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084
4. 国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073
* 联系人, E-mail: wenjiexu@tsinghua.edu.cn; shenxuhui@nssc.ac.cn

2025-08-06 收稿, 2026-02-28 修回, 2026-03-02 接受, 2026-03-03 网络版发表
空间碎片与近地小行星防御科研项目(KJSP2020020303, KJSP2020020101)、九章人才T类计划启动项目(E3RC2TQ5)、国家自然科学基金(42203082)和腾冲火山地热区多参量背景场特征提取及其地震响应研究项目(E62626A06S)资助

摘要 小行星撞击地球虽属小概率事件, 却是一种灾害链极端复杂的自然灾害, 伴随着超高温、超高压、超高速等撞击动力效应. 小行星撞击成坑伴随有大量的溅射粉尘产生, 这些溅射粉尘会被高速抛射进入大气层, 甚至部分粉尘进入平流层扩散并可能引发全球性的环境效应. 本文从撞击成坑"溅射粉尘形成→粉尘对流层运动→粉尘平流层扩散"全过程中不同阶段的物理力学机制出发, 提出了小行星撞击成坑及溅射粉尘扩散数值分析方法. 基于有限元-光滑粒子流体动力学(finite element method-smoothed particle hydrodynamics, FEM-SPH)耦合方法, 实现了小行星撞击成坑动力过程及溅射粉尘质量、动力特征的定量分析, 揭示了溅射粉尘质量与小行星撞击能在双对数坐标系呈现良好的线性关系; 提出了基于有限体积法(finite volume method, FVM)的溅射粉尘在空气冲击波及重力驱动下在大气层中的动力扩散分析方法, 揭示了撞击溅射粉尘从"初始高浓度速射→冲击波驱动扩散→气流涡旋强化混合→粉尘持续扩散"的动力学演化过程; 在此基础上, 利用FLEXPART(flexible particle dispersion model)模型分析了粉尘平流层全球扩散的时间效应, 揭示了粉尘在平流层扩散具有"快速扩散→逐步高纬扩展→长期趋于平稳"的时序性与层次性特征. 本文建立的研究方法为未来小行星防御提供了有效的理论和技术支撑.

关键词 撞击成坑, 溅射粉尘, 灾害效应, 计算方法

小行星撞击事件对地球的地质构造、生物圈等的形成和演化发挥了重要作用[1,2]. 研究发现, 过去2.9亿年的撞击频率较此前骤增2.6倍[3], 且撞击威胁持续存在. 根据NASA近地天体研究中心(CNEOS)的评估[4], 直径≥1公里的小行星撞击地球的概率约为每70万年一次, 可能引发全球性灾难; 而直径≥50米的天体撞击概率为每1000年一次, 可导致大城市级的危害. 近地小行星撞击对地球的破坏性威胁虽然是小概率事件, 但在当今人类社会极有可能给人类造成巨大的灾害, 促使世界各国对小行星撞击地球事件的关注.

与常规的自然灾害不同, 近地小行星撞击地球主要体现在其超高速(12~75 km/s)进入大气层、撞击地球表面, 并形成极高温(10^5 K)和极高压(10 TPa, 相当于地核压力的10倍)瞬时接触[5]. 在这种超高速、超高温和超高压条件下的撞击过程中, 地球表层各种材料的响应均处于超临界或超极限状态, 由此而引致的灾害链效应也远比常规的自然灾害链更为复杂和严峻. 根据目前研究, 超高速撞击地表致灾机理可分为光热辐射[6]、近地表大气冲击波[7]和撞击效应[8,9]三大类, 其演化过程呈现出复杂的"力学爆发-环境崩塌-生态重

引用格式: 刘芹芹, 徐文杰, 申旭辉, 等. 小行星撞击成坑及溅射粉尘扩散过程研究. 科学通报, 2026, 71: 3927–3936
Liu Q, Xu W, Shen X, et al. Asteroid impact cratering and ejecta dust diffusion process (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3927–3936, doi: 10.1360/CSB-2025-5313

© 2026《中国科学》杂志社

构”的时空扩展特征[10]. 这个过程中, 撞击产生的大规模粉尘通过热抬升效应进入平流层(高度≥20 km), 其中亚微米级颗粒可进一步扩散至中间层(80~100 km). 由于平流层缺乏降水清除机制, 这些颗粒的滞留时间可达数十年[11], 形成全球性气溶胶层, 从而对全球气候、环境生态带来潜在的重大影响.

小行星撞击地球是一个极为复杂的物理-力学-化学耦合过程. 对小行星撞击过程及成灾机制研究主要分为物理试验及数值模拟. 在物理试验方面, 受限于当前技术条件与经济条件, 超高速撞击模型试验一般难以开展. Yamamoto等人[12]、Tsujido等人[13]、Kiuchi等人[14]开展了室内撞击试验研究, 证实了统一撞击坑相似理论在低速条件下的适用性, 但距离实际模拟小行星进入、撞击此类超高速超高温问题还存在较大差距.

相较于试验, 使用数值计算对实际物理过程或系统进行模拟和仿真的数值模拟是一种成本较低、效果较好的辅助研究手段, 可以在一定程度上模拟超高速撞击条件下的撞击过程与结果. 小行星撞击过程在力学上属超高速冲击问题. 固体材料在超高速冲击过程中会表现出近似于流体的性质, 涉及高应变率、大变形及流动界面等. 因此, 小行星撞击问题的数值模拟主要通过光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)、离散元方法(discrete element method, DEM)、任意拉格朗日-欧拉方法(arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)等可以有效刻画介质大变形或破坏的无网格方法开展相关研究, 目前国内外对此已经开展了初步的研究及相关分析[15~20]. 由于小行星撞击的复杂性, 数值模拟主要聚焦于动力学机制分析, 目前较少对相变、传热、化学反应等问题进行关注. 粉尘溅射及演化研究主要关注基于希克苏鲁伯撞击事件的溅射物量级估算和对全球气候影响, 溅射物的量级估算早期主要依据希克苏鲁伯撞击案例中撞击坑周围沉积岩层的分布和厚度, 估算溅射物总质量和粒径分布[21], 基于估算的溅射物参数利用全球气候模型模拟撞击粉尘对全球气候影响[22,23].

本研究为了深入理解小行星撞击成坑及溅射粉尘的演进方式和动力学机制, 对于撞击成坑过程中的大变形区域和小变形区域, 采用光滑粒子流体动力学-有限元耦合方法进行高效模拟; 对于粉尘的短期快速扩散, 采用有限体积法进行精确捕捉, 对于粉尘的长期弥散分布, 则采用FLEXPART(flexible particle dispersion model)模型进行长时间序列的演化模拟, 形成撞击成坑“溅射粉尘形成→粉尘对流层运动→粉尘平流层扩散”全过程中不同阶段的多物理过程模拟, 进一步理解不同撞击场景撞击成坑及溅射粉尘的演化过程.

1. 小行星撞击成坑动力过程分析

1.1 分析方法

小行星撞击成坑过程中, 撞击点附近的陆地岩土体将发生碎裂、大变形, 甚至熔融, 而在撞击点一定范围外则主要是以连续小变形为主的震动过程. 为了更好地模拟这一过程, 基于有限元方法(finite element method, FEM)、SPH各自的优势, 本文提出基于FEM-SPH耦合的方法, 充分利用FEM在连续小变形分析及SPH在处理自由表面、碎裂、大变形等问题分析方面各自的优势, 结合小行星撞击成坑动力学过程物理力学机制, 在撞击坑及附近采用SPH、远离撞击坑采用FEM, 从而有效解决单纯采用FEM面临的计算不收敛及SPH面临的大规模计算问题. 在与SPH求解域邻近的FEM单元中心设置SPH耦合粒子, 通过构建耦合算法实现SPH与FEM间的信息传递来解决这一过程分析(图S1). 为了简化, 本文暂不考虑小行星自身及撞击过程中产生热、相变及空气动力学问题.

计算过程中(图S1), 首先, 进行FEM计算完成单元状态更新, 并针对FEM耦合单元将其各个节点的速度、位移信息传递至SPH耦合粒子; 然后, 进行SPH计算, 根据邻居搜索更新邻居列表, 并对所有SPH粒子进行光滑积分、更新自身状态. 在此过程中, SPH耦合粒子不进行独立的时间步进计算, 而是将光滑积分得到的合力传递至对应的FEM单元, 作为其计算的外力输入, 并依赖FEM单元进行位移的计算及更新.

1.2 计算模型

图1显示了所采用的数值计算模型. 小行星半径为R, 陆地计算域选取以撞击点为中心、半径为R_2=12R的圆柱范围. 根据现有小行星撞击成坑破坏范围, 并考虑计算效率, 将撞击点周围R_1=7R的半径范围内的岩土体采用SPH, 剩余部分采用FEM表征. 设置SPH的粒子间距dp=0.01R.

为研究小行星尺寸、撞击速度等对撞击成坑及溅射物的影响, 选取表1所示的共8种工况进行分析. 小行星撞击方式均为垂直入射, 重力加速度取9.8 m/s^2.

在计算中, 弱可压缩SPH采用Tait状态方程建立压

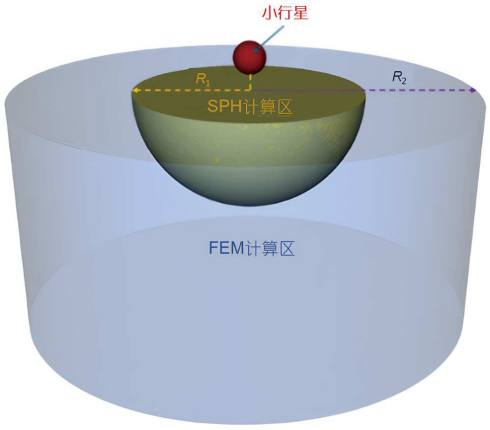


图 1 小行星撞击陆地成坑计算模型
Figure 1 Computational model of crater formation when an asteroid impacts the land

表 1 小行星撞击陆地数值仿真计算工况表
Table 1 Numerical simulation calculation condition table for asteroid impact on land

计算工况	小行星直径(m)							
	10		20		50		100	
撞击速度(km/s)	10	20	10	20	10	20	10	20

力-密度关系, 其形式如式(1)所示[24]:

$$p = \frac{c_0^2\rho_0}{\gamma}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma} - 1\right], \tag{1}$$

式中, ρ_0为人工声速, ρ_i为初始密度, γ为方程参数, 通常取7.

为反映超高速撞击中高应变率导致材料强度的变化, 小行星和陆地的材料采用Holmquist-Johnson-Cook (HJC)本构模型. HJC模型能够很好地描述工程材料在大应变、高静水压力和高应变率下的动态力学行为, 因此在冲击爆炸问题的数值分析中得到广泛应用. 故本研究使用HJC模型对撞击体及陆地材料力学性质进行表征, 以准确表现超高速撞击过程中材料的力学行为. 考虑小行星强度通常高于地球陆地岩石强度, 本文计算采用的小行星和陆地的HJC模型各参数参考如表S1所示.

1.3 计算结果分析

1.3.1 撞击成坑动力过程

小行星撞击成坑过程呈现多阶段动力学特征, 不同阶段的物理力学机制有着显著差异, 在此过程中, 高温、高速的小行星与陆地撞击, 发生碎裂、熔融、成坑及溅射物形成与抛射等动力过程. 以直径50 m的小行星以20 km/s速度撞击成坑计算结果(图2)为例, 对撞击成坑动力过程进行分析. 整个过程大致可分为初始撞击、撞击挖掘、高速抛射和回落调整四个阶段[25], 分别如图2(a)~(d)所示. 在初始撞击阶段, 小行星基础地表产生高强度冲击波并向地下、四周传播, 在超高温高压下岩土体将发生熔融、气化与电离; 在挖掘阶段, 小行星撞击体完全碎裂, 产生的冲击波能量转化为动能, 导致撞击点岩土体呈中心下陷、四周隆起的动态挖掘, 形成瞬态坑并引发周边岩石变质; 高速抛射阶段, 受超高速冲击破碎、挤压、挖掘等强动力作用的影响, 大量撞击残留物与岩土体碎屑被以每秒数千米速度向空中抛射, 产生包含大量亚微米级粉尘的撞击羽流、溅射云. 该系列过程持续时间极短, 撞击体释放能量水平极高, 撞击点附近的物质受到冲击波作用并迅速达到极高速度. 在此期间, 由于重力远小于由撞击产生的对物质的作用力, 故在此过程中, 重力的影响可以忽略不计. 在撞击过程中随着动力逐渐减弱, 撞击坑逐渐达到最大值, 撞击瞬时坑随着地表向下挖掘不断扩大并达到体积最大值, 基于FEM-SPH耦合的模拟结果显示0.28 s瞬时坑直径272.8 m, 撞击坑深度111.8 m, 深径比为0.41. 对于垂直入射产生的撞击瞬时坑直径, Salah[26]提出可采用式(2)进行估算:

$$D \cong 15.6d\left(\frac{\rho_i}{\rho_t}\right)^{0.33}\left(\frac{\rho_t}{2.5}\right)^{0.28}\left(\frac{10}{Y}\right)^{0.28}\left(\frac{v_i}{10}\right)^{0.56}, \tag{2}$$

式中, 撞击瞬时坑直径D单位为km; ρ_i是撞击体密度, ρ_t是目标物质密度, 单位为g/cm^3; d是撞击体直径, 单位为km; v_i是撞击速度, 单位为km/s. Y单位为MPa, 可根据Holsapple[27]给出的式(3)进行估计:

$$Y = \rho_t v_i^2\left[\left(\frac{gd}{2v_i^2}\right)\left(\frac{\rho_i}{\rho_t}\right)^{0.33}\right]^{\frac{2}{2+\mu}}, \tag{3}$$

式中, g是地球表面的重力加速度, 对于岩土材料, μ可取0.55. 根据式(2)计算得到估计瞬时坑直径为283.2 m, 与基于FEM-SPH耦合模拟计算结果较为接近.

1.3.2 撞击成坑溅射物质分析

根据表1所示不同工况下小行星撞击成坑计算得到的溅射动力过程分析, 可将撞击成坑过程中的溅射物质可分为两部分(图3). ① 抛射碎屑: 主要为速度较低、溅射角度较小、相对连续的毯式溅射物质, 主要

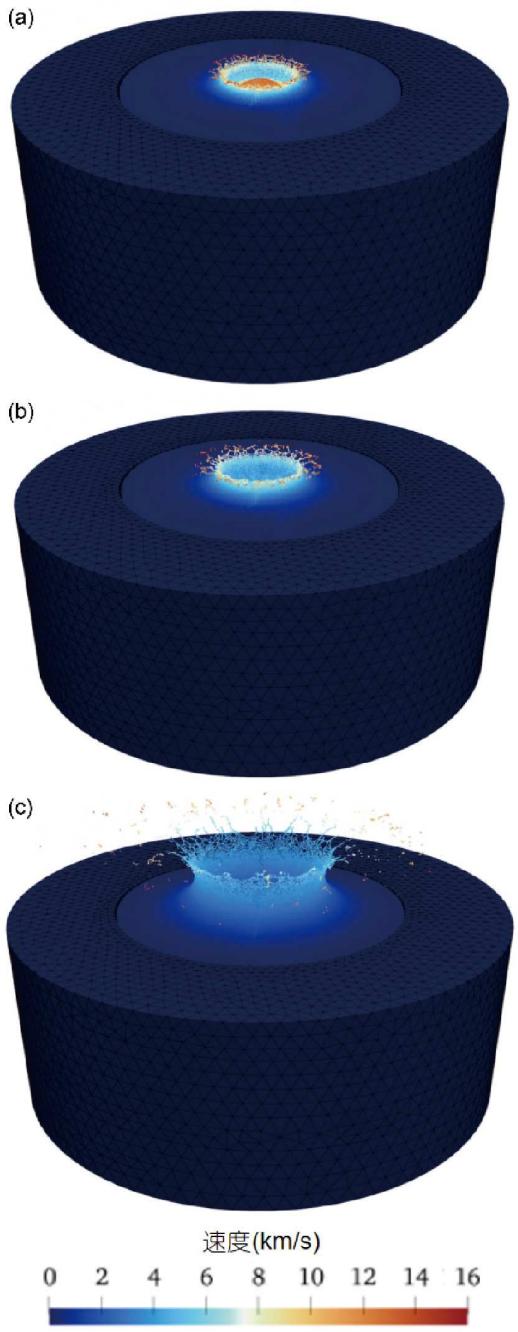


图 2 小行星撞击成坑溅射动力过程(撞击速度20 km/s, 直径50 m). (a) 初始撞击(t = 0.0025 s); (b) 撞击挖掘(t = 0.005 s); (c) 高速抛射(t = 0.02 s)

Figure 2 Dynamic process of cratering and ejecta caused by asteroid impact (impact velocity: 20 km/s, diameter: 50 m). (a) Initial impact (t = 0.0025 s); (b) excavation phase of impact (t = 0.005 s); (c) high-velocity ejecta (t = 0.02 s)

由受挖掘作用及挤压作用而发生连续移动及溅射的陆地撞击坑边缘物质构成. 这部分物质颗粒相对较大, 通常在空中进行数秒到数小时不等的短距运动后下落沉积[28]. ② 溅射粉尘: 主要为速度较高、距离较远、分散的碎散溅射物质, 该部分溅射物位于撞击形成的瞬时结构体外侧, 主要由小行星的反弹射物质及成坑挖掘溅射陆地物质构成. 这部分物质初始速度高、溅射角度大, 将在大气层中进行长距离、长时间的迁移, 甚至部分细小粉尘可抵达平流层, 在更大时间、空间尺度乃至全球尺度上产生影响, 也是本文主要分析的内容.

为定量分析小行星撞击成坑过程中形成的“溅射粉尘”, 对溅射粉尘的速度、角度、起始高度等特性参数(图3)进行了定量的提取分析(表S2), 为后续粉尘扩散及灾害效应计算提供输入基础. 其中, 溅射距离为溅射物距撞击坑外缘最远水平距离, 最低溅射角度为提取部分外缘包络直线与水平地面最小夹角, 起始高度为提取范围最低点距水平地面的竖直距离.

基于表S2所示不同工况下数值计算得到的撞击成坑溅射粉尘质量, 图4(a)显示了不同撞击速度下溅射粉尘质量(M)随小行星直径(d)的变化关系. 从图中可以看出, 溅射粉尘的质量对数(lg$M$)随小行星直径d呈显著的指数关系. 针对直径相同的小行星, 20和10 km/s的速度撞击产生的溅射粉尘质量比(M_{v20}/M_{v10})随着小行星直径的增加而近似呈线性降低趋势. 根据不同小行星的质量、撞击速度计算得到不同工况下小行星撞击时的动能(E), 从图4(b)显示的溅射粉尘质量(M)随小行星撞击能(E)的变化关系可以看出: 在双对数坐标系下, 两者呈现良好的线性关系.

2. 撞击溅射粉尘动力过程分析

2.1 溅射粉尘对流层动力过程及分布规律

2.1.1 分析方法

小行星超高速撞击成坑形成的溅射粉尘受自身初始速度及空气动力学影响向四周及上部扩散, 这一过程涉及复杂的流体动力学行为和多相耦合作用. 为实现这一过程计算, 本文采用CoSim的有限体积法(finite volume method, FVM)模块—CoSim-FVM开展. FVM作为流体动力学常用的数值计算方法之一, 在处理大尺度颗粒-流体多相体系物理过程分析方面具有强大的优势. 基于可压缩N-S方程[29]实现高速空气冲击波及溅射粉尘多相系统的分析, 参见式(4)和(5):

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\nabla\cdot F=0, \tag{4}$$

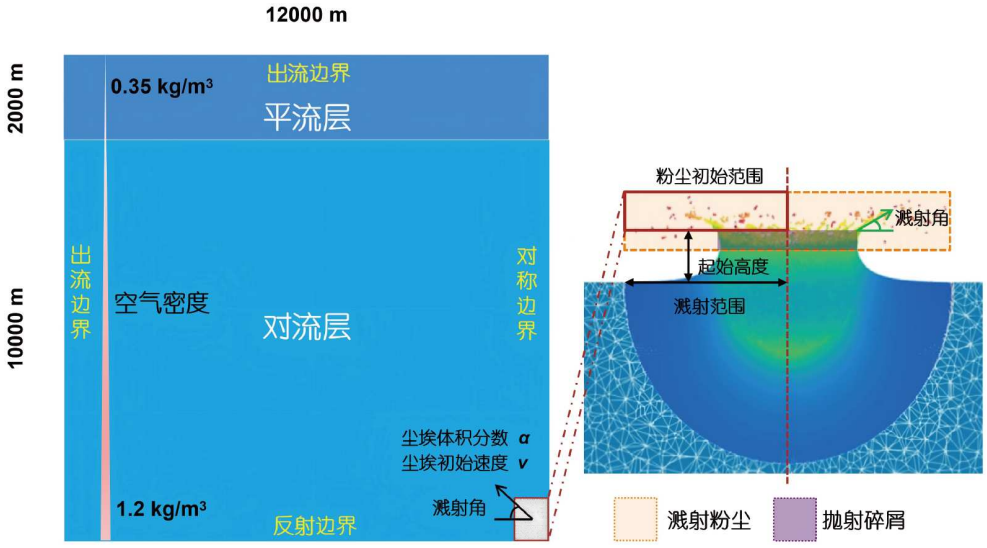


图 3 撞击溅射物质分区及粉尘动力过程分析示意图
Figure 3 Schematic diagram of impact ejecta zonation and dust dynamics analysis

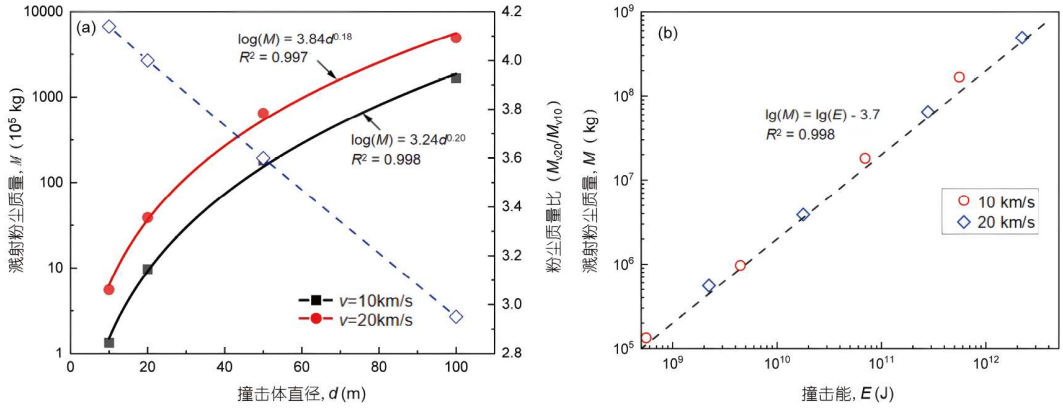


图 4 小行星撞击陆地溅射粉尘质量分布曲线. (a) 粉尘质量与小行星直径关系; (b) 粉尘质量与撞击能关系
Figure 4 Dust mass distribution curve from asteroid impact on land. (a) Dust mass as a function of asteroid diameter; (b) dust mass as a function of impact energy

$$U=\begin{bmatrix}\alpha_i\\ \alpha_i\rho_i\\ \rho\vec{u}\\ \rho E\end{bmatrix}\quad F=\begin{bmatrix}\alpha_i\vec{u}\\ \alpha_i\rho_i\vec{u}\\ \rho\vec{u}\vec{u}+pI\\ \vec{u}(\rho E+p)\end{bmatrix}, \tag{5}$$

式中, $\vec{u}$为速度, α_i为任意相的体积分数, E为能量, p为压力.

在空间离散上, 采用二阶精度的HLLC(Harten–Lax–van Leer contact)格式[25], 并引入了接触不连续性以高效捕捉流场中的接触面和切向波, 提高激波和接触不连续性的分辨率. 时间离散上, 采用具有强稳定性保持特性的二步Runge-Kutta方法[30], 具有二阶精度, 以在保证数值解稳定性的同时保持较高的计算精度.

2.1.2 计算模型

小行星撞击成坑所产生溅射粉尘在低空对流层中的运动主要受初始速度、撞击冲击波、空气及重力等的影响. 为了简化, 计算中暂不涉及热效应及对流层中的季风等影响. 计算模型如图3所示, 选择的计算区域为12 km × 12 km, 竖直方向覆盖平流层至10 km, 大气密度随高度z方向均匀减小, 以反映不同高程处大气分布. 在计算中, 将溅射范围内设置为溅射粉尘和空气的混合相, 并给予相应的初始边界条件(如速度、粉尘体积分数等), 范围以外设置为空气相. 模型左侧和上侧

为出流边界，允许气体及尘埃自由流出，避免反射，模拟开放空间；下侧为反射边界，对应地表，除尘埃和气体不可穿透外，还可反弹部分粒子；右侧为对称边界，利用问题对称性优化计算负担，保证流场和结构在该侧梯度为零.

针对不同工况，根据表S2所示溅射粉尘特征参数作为计算输入初始条件，计算得到撞击溅射粉尘随时间和空间分布特征及抵达平流层的粉尘质量，为后续粉尘平流层扩散分析提供初始条件.

2.1.3 计算结果分析

图5显示了撞击速度10 km/s、直径50 m小行星的撞击溅射粉尘扩散过程. 从图中可以看出: 小行星撞击成坑瞬间溅射形成的粉尘，在自身速度及高速空气冲击波作用下，快速(0.1 s)扩散至3 km高空，形成以撞击点为中心、呈扇形发散的分布区域; 随后，撞击产生的冲击波继续推动粉尘快速扩散，随着空气动力作用的加强，粉尘逐渐演化出复杂的涡和剪切结构，且垂直和水平扩散同步进行. 在1.0 s时，部分粉尘已上升至6.5 km高空，且粉尘的分布范围持续扩大; 5.0 s时，受动力学不稳定扰动影响产生更多层次、尺度各异的涡结构，垂直方向扩散范围超过10 km，不断进入对流层顶端，部分已接近平流层; 10.0 s左右后，大量粉尘进入平流层中，空间分布趋于均匀，整体体积分数由起初的高集中态逐渐演化为大范围低浓度弥散态. 重力作为影响因子之一，主要对溅射粉尘的垂直扩散过程起到抑制作用，不仅限制了颗粒的上升高度，还促使部分颗粒在大气层中沉降，从而影响了粉尘的垂直分布特征.

从整体上而言，初始高速溅射与冲击波推动能使粉尘快速上升并突破对流层顶端，部分尘埃在数秒至数十秒内成功进入平流层，在平流层内因大气稀薄呈现长时间均匀弥散分布[31]. 在此过程中，溅射粉尘动态演化过程大致可以分为“初始高浓度速射→冲击波驱动扩散→气流涡旋强化混合→粉尘持续扩散”四个阶段. 高能撞击产生的初始速度及高速冲击波促发粉尘快速上升和水平伸展，形成分布由局部向整体、由高浓度向低浓度转变的时空规律.

2.2 粉尘平流层扩散过程

2.2.1 进入平流层的溅射粉尘质量估计

如上分析，溅射粉尘在冲击波作用下，部分微细颗粒将进入平流层. 假定粉尘颗粒密度保持不变，基于计算得到的不同工况下溅射粉尘在大气中的体积分数分布可得到处于对流层中粉尘总质量，进而根据质量守恒原理将初始总质量减去对流层的粉尘量即可得到进入平流层的粉尘质量.

表S3显示了不同工况下计算得到的进入平流层的粉尘百分比及质量，从中可以看出随着小行星直径和撞击速度的增加，进入平流层的粉尘质量呈显著增长趋势. 其中，小行星直径的增加主要体现在提升初始粉尘总质量，从而提高进入平流层的粉尘绝对量; 而撞击速度的增加则显著增强垂直输送能力，大幅度提高了粉尘进入平流层的比例. 两者呈现协同增强作用，使得在小行星直径较大、撞击速度极高的小行星撞击地表过程中，进入平流层的粉尘质量显著增大.

2.2.2 平流层溅射粉尘扩散分析方法

以撞击进入平流层的溅射粉尘质量为输入条件，

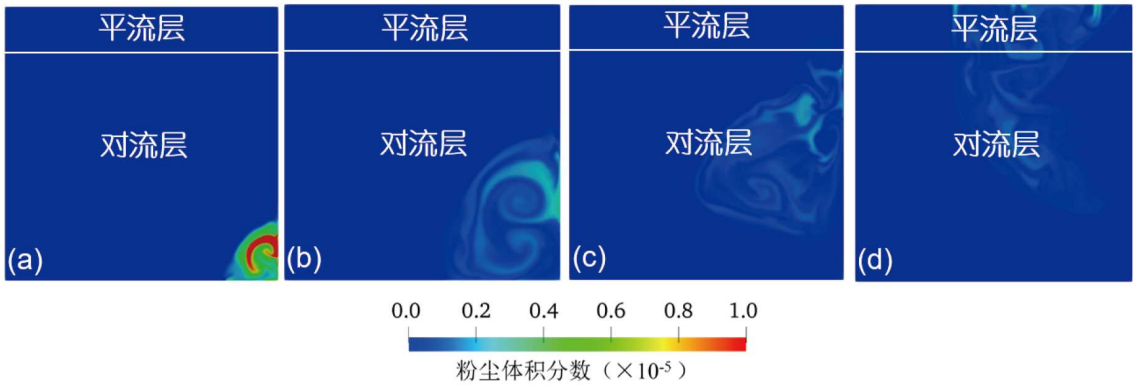


图 5 不同时刻粉尘体积分数分布(撞击速度10 km/s、直径50 m). (a) t=0.1 s; (b) t=1.0 s; (c) t=5.0 s; (d) t=10.0 s

Figure 5 Distribution of dust volume fraction at different times (impact velocity: 10 km/s, asteroid diameter: 50 m). (a) t=0.1 s; (b) t=1.0 s; (c) t=5.0 s; (d) t=10.0 s

基于FLEXPART(flexible particle dispersion model)模型可实现粉尘在平流层扩散演化过程. FLEXPART是一种拉格朗日粒子弥散模型[32], 最初由Stohl等人[33]开发用于模拟大气中从点源、线源、面源或体积源释放的污染物的长距离和中尺度输运、扩散和沉降过程. 下文将基于此开展撞击溅射粉尘在平流层中的弥散分析.

2.2.3 计算模型

基于表S3计算得到的不同撞击工况下进入平流层的溅射粉尘质量, 将其作为初始条件输入FLEXPART模型中, 模型中考虑干沉降影响, 见式(6):

$$v_{\mathrm{d}}(z)=[r_{\mathrm{a}}(z)+r_{\mathrm{b}}+r_{\mathrm{a}}(z)r_{\mathrm{b}}v_{\mathrm{g}}]^{-1}+v_{\mathrm{g}}, \tag{6}$$

式中, $v_{\mathrm{d}}(z)$是干沉降速度, 表征颗粒从高度z沉降到地面的总速度; $r_{\mathrm{a}}(z)$是空气动力阻力, 表征湍流将颗粒输送到地面的阻力; r_{b}是准层流阻力, 表征近地表薄层的阻力; v_{g}是重力沉降速度, 表征颗粒自身重量下落的速度, 见式(7):

$$v_{\mathrm{g}}=\frac{g\rho_{\mathrm{p}}d_{\mathrm{p}}^{2}C_{\mathrm{cum}}}{18\mu}, \tag{7}$$

式中, g是重力加速度; ρ_{p}为颗粒密度; d_{p}为颗粒直径, 为Cunningham滑流修正; μ为空气动力黏度.

模型中设定粉尘的粒径为0.25 μm, 撞击粉尘粒子受到布朗扩散、气动力、湍流扩散的影响远大于重力, 通过式(6)和(7)计算得出沉降速度仅约0.1~0.3 cm/s. 对小行星撞击产生的大量溅射粉尘开展进入大气高层后随风场长距离输送模拟, 本文FLEXPART模型模拟设定条件如下. ① 时空分辨率设定: 模拟区域为全球, 纬度10°N~80°N, 经度–180°~180°, 空间分辨率为1°×1°, 时间跨度为撞击后180 d, 时间分辨率为1 h, 每月输出一次柱浓度在平流层的分布图, 用于分析溅射粉尘扩散过程. ② 初始条件设定: 假设小行星于冬季撞击北半球东部平原陆地. 根据数值计算结果, 进入平流层的初始释放高度为10~15 km.

2.2.4 计算结果分析

小行星撞击溅射产生的大量亚微米级粉尘被热羽流携带至平流层长期扩散[11,28]. 图6展示了平流层中溅射粉尘浓度随时间(天)变化的情况, 图6(a)和(b)分别表示不同小行星直径与撞击速度组合下的月均浓度和最大浓度. 总体上, 平流层粉尘在撞击初期(0~30 d)达到峰值, 随后浓度逐月递减, 其下降速度缓慢, 表明粉尘在平流层中滞留时间更长、扩散更为稳定. 在小行星直径和速度的各种组合下最大浓度下降明显, 平均浓

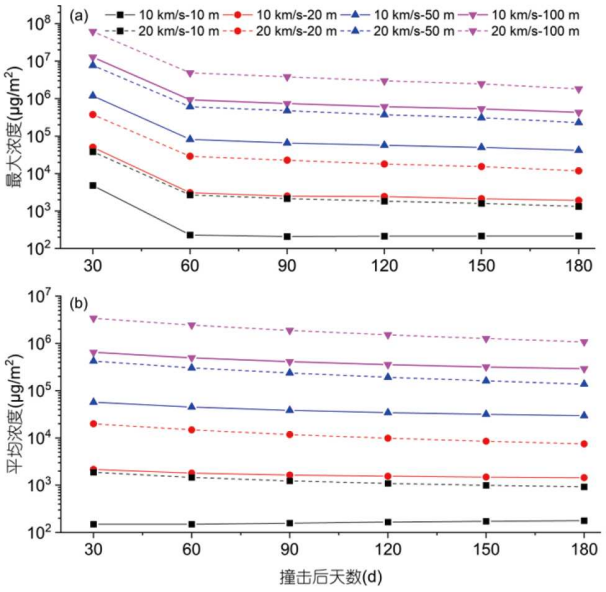


图 6 平流层中溅射粉尘最大浓度(a)和平均浓度(b)随撞击天数演化结果

Figure 6 Evolution results of the maximum concentration (a) and average concentration (b) of sputtering dust in the stratosphere with the number of impact days

度下降速度较为缓慢, 表明随时间变化平流层粉尘分布逐渐趋于均匀. 随着小行星直径和速度的增加, 平流层粉尘的初始浓度显著提升, 扩散范围和持续时间明显增强. 例如, 小行星直径100 m、速度为20 km/s撞击场景, 在30 d内平流层粉尘扩散的平均浓度为3.40×10^{6} μg/m^2, 远高于小行星直径为10 m、撞击速度为10 km/s撞击场景的溅射粉尘扩散浓度(1.78×10^{2} μg/m^2), 表明更强烈的撞击将大量溅射粉尘注入平流层, 产生更长期的环境影响.

以小行星直径为50 m、撞击速度为20 km/s为例, 图S2显示了该初始条件下粉尘在平流层中的时序扩散过程. 撞击发生后的30 d内, 粉尘在中高纬度迅速形成一条高浓度带, 进入平流层的粉尘[11]在开始阶段(数小时至数周)主要受高空急流影响沿纬度呈带状扩散, 平均浓度达4.22×10^{5} μg/m^2, 最大值高达7.72×10^{6} μg/m^2, 呈现出大范围高强度分布. 自撞击后的60 d起, 粉尘开始扩散, 向高纬扩散的趋势尤为明显, 平均浓度降至3.04×10^{5} μg/m^2, 最大值大幅下降至6.07×10^{5} μg/m^2. 随后几个月内, 浓度持续降低, 自撞击后90、120、150和180 d的平均浓度依次为2.37×10^{5}、1.92×10^{5}、1.61×10^{5}和1.38×10^{5} μg/m^2, 最大值分别为4.76×10^{5}、3.72×10^{5}、3.11×10^{5}和2.30×10^{5} μg/m^2. 整体上, 平流层粉尘浓度呈

现明显的时间衰减趋势, 至180 d, 浓度趋于低值且分布较为均匀, 扩散过程基本稳定.

3 结论与讨论

小行星撞击作用伴随着地球的形成和演化, 目前虽然是小概率事件, 但在人类文明高度发展的今天极有可能产生巨大的灾难. 开展小行星撞击地球灾害动力学过程及分析方法研究, 对于防御极端灾害事件及研究地球形成和演化具有重要的意义. 本文针对小行星撞击成坑及溅射粉尘动力过程研究面临的关键问题, 以高性能数值计算为基础, 从撞击成坑"溅射粉尘形成→粉尘对流层运动→粉尘平流层扩散"全过程中不同阶段物理力学机制出发, 提出了系统的数值计算方法.

针对小行星撞击成坑动力过程, 提出基于FEM-SPH耦合的撞击成坑及溅射粉尘的大规模、精细化分析方法. 通过不同大小、不同撞击速率下的成坑及溅射粉尘过程分析, 表明该方法可以较好地实现成坑动力学过程分析. 进而提出了撞击溅射粉尘质量、动力特征的定量分析方法, 表明溅射粉尘质量随着小行星直径及撞击速度增大而呈显著增大趋势, 且溅射粉尘质量与小行星撞击能在双对数坐标系中呈现良好的线性关系.

针对粉尘在对流层和平流层中动力机理差异, 围绕撞击成坑瞬时产生的高速溅射粉尘及空气冲击波动力学分析问题, 提出了基于FVM的多相流体动力学方法, 实现了小行星撞击溅射粉尘的动力过程分析, 揭示了粉尘在对流层中"初始高浓度速射→冲击波驱动扩散→气流涡旋强化混合→粉尘持续扩散"动力学演化过程, 开展了撞击粉尘进入平流层的定量分析方法. 在此基础上, 针对粉尘平流层全球扩散问题, 基于FLEXPART模型揭示了粉尘在平流层扩散具有"快速扩散→逐步高纬扩展→长期趋于平稳"的时序性与层次性特征, 对于巨型撞击工况可能长期残留一定浓度粉尘从而给全球气候环境带来潜在影响.

当今数值计算为巨灾风险评估、防控提供了重要手段. 本文所建立高性能数值分析方法为小行星撞击成坑、溅射粉尘动力过程分析评估提供了新的解决思路, 突破了目前仅限于单一过程、现象定性描述的不足. 然而, 小行星撞击地球灾害动力学是一个极端时空尺度、极端环境条件下的极端动力学问题, 不同的时空阶段其物理力学机制存在着显著的差异, 涉及超高速问题并伴随复杂的空气动力学、热力学、化学、力学等过程, 本文的分析过程中进行了一定的简化(如未考虑热、相变; 撞击成坑过程中未考虑空气动力学等), 目前的分析只是初步的. 为更好地考虑超高速撞击过程中的空气动力学效应、热力学、岩石相变过程及大尺度范围下对地壳岩石圈运动的影响等, 还需要发展撞击试验技术和方法以更好地揭示和认识其物理力学机理、深入发展相关算法, 促使相关学科理论体系的发展, 同时推动高性能数值计算理论、方法及自主国产软件的发展. 相关研究成果的形成, 将为小行星的防御灾AQ2害提供更加可靠的理论及技术支撑, 同时也将对于认识早期小行星撞击对地球形成演化的动力作用具有重要的意义.

参考文献

1 Osinski G R, Grieve R A F, Ferrière L, et al. Impact Earth: a review of the terrestrial impact record. Earth-Sci Rev, 2022, 232: 104112
2 von Frese R R B, Potts L V, Wells S B, et al. GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica. Geochem Geophys Geosyst, 2009, 10: 2008GC002149
3 Mazrouei S, Ghent R R, Bottke W F, et al. Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic. Science, 2019, 363: 253–257
4 NSTC. Report on Near–Earth Object Impact Threat Emergency Protocols. Washington DC: NSTC, 2021
5 Melosh H. Impact Cratering: A Geologic Process. New York: Oxford University Press, 1989. 53
6 Artemieva N, Morgan J. Quantifying the release of climate-active gases by large meteorite impacts with a case study of chicxulub. Geophys Res Lett, 2017, 44: 10–180
7 Gulick S P S, Bralower T J, Ormö J, et al. The first day of the Cenozoic. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 19342–19351
8 Kring D A. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous–Tertiary boundary. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 255: 4–21
9 Ward S. Asteroid impact tsunami: a probabilistic hazard assessment. Icarus, 2000, 145: 64–78
10 Liu Q Q, Shen X H, Zhou B H, et al. Disaster chain effects from near-earth asteroids collision with Earth surface (in Chinese). Space Debris Res, 2022, 22: 1–17 [刘芹芹, 申旭辉, 周炳红, 等. 近地小行星撞遇地球灾害链效应. 空间碎片研究, 2022, 22: 1–17]

11 Toon O B, Zahnle K, Morrison D, et al. Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets. Rev Geophys, 1997, 35: 41–78
12 Yamamoto S, Wada K, Okabe N, et al. Transient crater growth in granular targets: an experimental study of low velocity impacts into glass sphere targets. Icarus, 2006, 183: 215–224
13 Tsujido S, Arakawa M, Suzuki A I, et al. Ejecta velocity distribution of impact craters formed on quartz sand: effect of projectile density on crater scaling law. Icarus, 2015, 262: 79–92
14 Kiuchi M, Nakamura A M, Wada K. Experimental study on gravitational and atmospheric effects on crater size formed by low-velocity impacts into granular media. JGR Planets, 2019, 124: 1379–1392
15 Wang X F, Tao G, Wen P, et al. Application research of SPH method in hypervelocity impact (in Chinese). J Ordnance Equip Eng, 2019, 40: 7–11 [王小峰, 陶钢, 闻鹏, 等. SPH方法在超高速撞击问题中的应用研究. 兵器装备工程学报, 2019, 40: 7–11]
16 Schill W, Wasem J V, Owen J M. Modelling and simulation of cratering and ejecta production during high velocity impacts. J dynamic Behav Mater, 2017, 3: 180–188
17 Libersky L D, Petschek A G, Carney T C, et al. High strain Lagrangian hydrodynamics. J Comput Phys, 1993, 109: 67–75
18 Collins G S, Patel N, Davison T M, et al. A steeply-inclined trajectory for the Chicxulub impact. Nat Commun, 2020, 11: 1480
19 Libersky L D, Petschek A G. Smooth Particle Hydrodynamics with Strength of Materials. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 248–257
20 Xun W J, Liu Q Q, Shen X H. Computational simulation of the dynamics of craters formed by asteroid collisions with land (in Chinese). J Deep Space Expl, 2024, 11: 195–202 [徐文杰, 刘芹芹, 申旭辉. 小行星撞遇陆地成坑动力学的计算模拟. 深空探测学报, 2024, 11: 195–202]
21 Schulte P, Alegret L, Arenillas I, et al. The chicxulub asteroid impact and mass extinction at the cretaceous-paleogene boundary. Science, 2010, 327: 1214–1218
22 Brugger J, Feulner G, Petri S. Baby, it's cold outside: climate model simulations of the effects of the asteroid impact at the end of the Cretaceous. Geophys Res Lett, 2017, 44: 419–427
23 Tabor C R, Bardeen C G, Otto-Bliesner B L, et al. Causes and climatic consequences of the impact winter at the cretaceous-paleogene boundary. Geophys Res Lett, 2020, 47: e60121
24 Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. J Comput Phys, 1994, 110: 399–406
25 Gault D E, Quaide W L, Oberbeck V R. Impact cratering mechanics and structures. In: IGreeley R, Schultz P H, eds. A Primer in Lunar Geology. California: Ames Research Center, National Aeronautics and Spacel!lAdministration, 1974. 177–189
26 Nasri S. Sky Falling: Asteroids and Meteorite. Al-Ain: United Arab Emirates University, 2017. 17–18
27 Holsapple K A. The scaling of impact processes in planetary sciences. Annu Rev Earth Planet Sci, 1993, 21: 333–373
28 Senel C B, Kaskes P, Temel O, et al. Chicxulub impact winter sustained by fine silicate dust. Nat Geosci, 2023, 16: 1033–1040
29 Lax P D, Liu X D. Solution of two-dimensional riemann problems of gas dynamics by positive schemes. SIAM J Sci Comput, 1998, 19: 319–340
30 Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes. J Comput Phys, 1988, 77: 439–471
31 Covey C, Thompson S L, Weissman P R, et al. Global climatic effects of atmospheric dust from an asteroid or comet impact on Earth. Glob Planet Change, 1994, 9: 263–273
32 Pisso I, Sollum E, Grythe H, et al. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4. Geosci Model Dev, 2019, 12: 4955–4997
33 Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G. Validation of the lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data. Atmos Environ, 1998, 32: 4245–4264

补充材料

表S1 小行星撞击成坑计算材料参数
表S2 小行星撞击地表数值计算结果
表S3 不同撞击工况下溅射粉尘进入平流层的计算结果
图S1 FEM-SPH耦合算法示意图
图S2 小行星直径为50 m、撞击速度为20 km/s时溅射粉尘在平流层扩散模拟结果

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “小行星撞击成坑及溅射粉尘扩散过程研究”

Asteroid impact cratering and ejecta dust diffusion process

Qinqin Liu[1], Wenjie Xu[2,3*], Xuhui Shen[1,4*], Penghao Ouyang[2,3], Pengcheng Zhou[1] & Yangyang Zhang[2,3]

[1] *State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
[2] *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
[3] *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
[4] *College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*
* Corresponding authors, E-mail: wenjiexu@tsinghua.edu.cn; shenxuhui@nssc.ac.cn

Asteroid impacts represent a class of natural disasters that are rare yet capable of triggering exceptionally intricate disaster chains. These chains are dominated by ultra-high temperature, pressure, and velocity effects, among which the hypervelocity cratering process generates an enormous cloud of ejecta dust. Propelled by the impact, this dust is injected into the troposphere and, in part, into the stratosphere, where it may induce global environmental perturbations. This study develops an integrated numerical framework that resolves the full “ejecta formation → tropospheric transport → stratospheric diffusion” sequence, explicitly linking near-field impact physics to far-field atmospheric dispersion. The workflow is divided into three coupled modules. (i) In the cratering and ejecta-generation module, a finite-element-method–smoothed particle hydrodynamics (FEM–SPH) coupling strategy is used to efficiently represent both the severe fragmentation/large deformation zone near the impact point and the surrounding small-deformation continuum. With a weakly compressible SPH formulation (Tait-type equation of state) and an HJC constitutive description for high-strain-rate rock/asteroid response, the simulations reproduce the multi-stage cratering dynamics (initial contact and shock, excavation, high-velocity ejecta, and late-stage adjustment) and provide quantitative ejecta descriptors, including total ejecta-dust mass, ejection velocity spectrum, ejection angle, and effective release height. Across a suite of impact cases spanning asteroid diameters from 10 to 100 m and impact velocities of 10–20 km/s, the total ejecta-dust mass increases sharply with both size and velocity and exhibits a robust power-law scaling with impact energy, appearing as a clear linear relation in double-logarithmic space. This scaling supplies an engineering-grade correlation that can rapidly parameterize source strength for atmospheric models. (ii) For short-term, high-speed dispersion in the troposphere, an Eulerian finite-volume-method (FVM) multi-phase solver is introduced to capture compressible air dynamics, blast-wave propagation, and dust advection under gravity. Using a shock-capturing HLLC flux with a second-order time integrator, the model resolves the characteristic dynamical sequence observed in the simulations: an initial high-concentration jet-like ejection, shock-driven expansion, vortex-enhanced mixing, and sustained low-concentration diffusion as the plume transitions from a near-field cone to a broad regional cloud. The FVM results further enable estimation of the fraction of dust that is lofted across the tropopause, demonstrating strong sensitivity to impact velocity as well as to the initial ejection characteristics extracted from the FEM–SPH module. (iii) For long-term stratospheric transport, the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART is employed to track global spreading over multi-month timescales, using the stratospheric-injected dust mass and release heights as initial conditions. The simulations reveal a consistent temporal hierarchy: rapid early spreading after injection, followed by progressively enhanced meridional (poleward) expansion, and finally a quasi-stabilized, long-lived stratospheric layer with slowly declining and increasingly homogenized column loading. Collectively, the proposed coupled methodology bridges impact dynamics and atmospheric dispersion across extreme spatial and temporal scales, providing a transferable predictive tool for evaluating environmental consequences and informing mitigation strategies for future asteroid-impact scenarios.

impact cratering, ejecta dust, disaster effects, computational methods

doi: 10.1360/CSB-2025-5313