0254-6124/2026/46(5)-0001-15 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

SHI Minyu, FENG Shuai, WANG Ronglan, LUO Bingxian. Analysis of Micrometeoroid Environment Characteristics Using Meteor Radar Data from the Meridian Project (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–15. CSTR:32142.14.cjss.2025–0236. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0236

# 基于子午工程流星雷达数据的微流星体环境特征分析

石敏钰　冯　帅　王荣兰　罗冰显

(中国科学院国家空间科学中心　北京　100190)

(中国科学院大学　北京　100190)

**摘　要**　微流星体是威胁中国空间航天器安全的重要因素, 历史上已发生多起流星体撞击导致航天器异常的事件, 因此开展流星体环境的建模研究具有重大意义. 基于中国子午工程漠河站的观测数据, 反演近地空间微流星体的特征, 分析中国中高纬度上空微流星体的数量、高度、方位角、天顶角及通量等时空分布特征, 并反演了其质量和速度等物理特性. 结果表明, 流星体活动呈现明显季节与昼夜波动差异, 夏季多于冬季, 夜间高于白天; 空间分布不均, 主要集中在西北方向; 速度多在 20～80 km·s$^{-1}$ 之间, 高度集中于 75～125 km. 反演通量结果与经典 Grün 模型对比发现, 对于大尺寸流星体的通量结果, 二者一致性较好. 该研究可为中国自主流星体环境建模研究提供技术支撑.

**关键词**　流星体环境模型, 流星体通量, 时空分布, 通量分布

**中图分类号**　V520.7

# Analysis of Micrometeoroid Environment Characteristics Using Meteor Radar Data from the Meridian Project

SHI Minyu　FENG Shuai　WANG Ronglan　LUO Bingxian

(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

**Abstract**　Micrometeoroids represent a significant factor threatening the safety of China's spacecraft in space. Historically, numerous incidents of spacecraft anomalies due to meteoroid impacts have been reported; therefore, conducting modeling studies on the meteoroid environment is of great significance. This study utilizes observational data from the Mohe Station of China's Meridian Project to retrieve the characteristics of micrometeoroids in near-Earth space. We analyzed the temporal-spatial distribution of micrometeoroids over China's mid-to-high latitudes, specifically examining parameters including number,

2025-12-26 收到原稿, 2026-04-27 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

velocity, altitude, azimuth, zenith angle, and flux. Furthermore, physical properties such as mass were derived from the observational data. The results indicate that meteoroid activity exhibits distinct seasonal and diurnal variations: activity is higher in summer than in winter and significantly higher at night than during daytime. In addition, the spatial distribution of meteoroids is non-uniform and primarily concentrated in the northwest direction; their velocities predominantly range from 20 to 80 km·s$^{-1}$, and altitudes are mainly concentrated on 75-125 km. Comparing the retrieved inversed flux results with the classical Grün model indicates that there is good consistency between the two sets of results for the flux of larger-sized meteoroids. This research can provide technical support for developing China's independent meteoroid environment modeling studies.

**Key words** Meteoroid environment Model, Meteoroid flux, Temporal-spatial distribution, Flux distribution

## 0 引言

近地空间及行星际环境中, 自然存在的微流星体与日益增多的人造空间碎片共同构成了对各类航天器运行安全与任务持续性的严重威胁. 高速的微流星体撞击可能导致航天器表面损伤、功能退化乃至关键部件失效, 影响空间任务的可靠性、安全性和持续性. 因此, 认知和掌握空间微流星体环境的时空分布、通量、速度及物理特性, 并建立流星体环境模型, 是当前空间科学领域的重要需求之一.

为研究近地空间流星体环境, 多个研究团队相继提出了不同的流星体模型. 1985 年 Grün 等[1] 开发的 Grün 通量模型被广泛用于地球附近流星体通量分析. 随后, 1993 年 Divine[2] 提出的 Divine 模型将适用范围扩展至 0.3～20 AU, 覆盖质量范围 $10^{-18}$～1 g. 后续开发的 Divine–Staubach 模型进一步引入了轨道演化、辐射效应和行星引力等物理过程[3]. 欧洲空间局 (ESA) 在 2005 年基于该模型开发了行星际微流星体模型 (IMEM), 整合了小行星和彗星来源的尘埃群体, 提升了在 0.1～5.0 AU 范围内的预测可靠性[4]. 美国宇航局 (NASA) 在 2004 年开发了流星体工程 (MEM) 系列模型, 包括 EarthMEM、LunarMEM 和 IPMEM[5], 并持续更新至 2015 年的 MEM 2[6] 和 2020 年的 MEM 3 版本, 在速度、密度和通量分布方面进行了细化[7]. 近年来, IMEM 也演进为 IMEM 2.0, 通过长时间动力学积分优化了尘埃云的质量通量连续性[8].

针对上述模型, 有研究开展了系统性比较. 例如 Drolshagen 等[9] 对 Grün 通量、Divine、Divine–Staubach 以及 IMEM 模型开展对比分析后发现, 尽管这些模型的通量量级相近, 但流星体的速度与方向分布存在显著差异. Eberhard 等[10] 研究指出 MEM 与 IMEM 模型之间存在较大不一致性, 认为其数据基础尚不充分, 且缺乏相关物理理论支持. Rodmann 等[11] 进一步将 Grün 通量、Divine–Staubach、IMEM、IMEM2、MEMR2 和 MEM 3 等六个模型进行对比, 结果显示在 1 AU 处, 质量大于 $10^{-6}$ g 的流星体通量预测差异可达一个数量级以上. 因此流星体模型被认为是最不确定的环境因素之一.

尽管上述现有的国际主流模型 (如 Grün, MEM, IMEM 等) 基于地基雷达、在轨探测器及撞击坑分析等多种数据源构建, 为航天器设计和风险评估提供了重要参考, 但这些模型的数据基础主要源于早期的空间原位探测及北美、欧洲等特定区域的地基观测. 相关研究表明, 受行星际尘埃云分布及地球轨道动力学影响, 近地空间流星体环境呈现出显著的各向异性特征[12] 及纬度效应[13], 直接沿用上述模型难以精准反映中国所在的东亚中高纬度区域的局部环境特征. 相比之下, 地基流星雷达 (特别是高频/甚高频波段) 凭借其全天候、大范围及高时空分辨率的探测优势, 在获取流星体速度、高度和通量等动力学参数方面发挥着独特作用[14,15]. 鉴于国内在该领域起步较晚, 长期缺乏基于自主观测数据的环境模型, 利用中国子午工程流星雷达网积累的海量实测数据开展本地化研究[16], 对于填补区域数据空白、校验国际模型偏差以及支撑中国自主流星体环境建模具有重要意义.

中国子午工程 (全称空间环境地基综合监测网) 是国家关键科技基础设施, 已建成一个先进的、

配备高性能流星雷达的空间环境地基监测网. 该工程一期 (2008－2012 年) 和二期 (2019 年开工建设) 采用“一链、三网、四聚焦”的架构, 致力于对日地空间环境进行全圈层、多要素的综合立体探测. 在其支持下, 中国科学院地质与地球物理研究所在黑龙江漠河与湖北武汉建成了全天空流星雷达. 这些雷达专为探测中间层和低热层 (MLT) 的大气动力学而设计, 但也可同步采集进入大气层并产生电离尾迹的流星体的宝贵观测数据. 当前, 子午工程流星雷达的观测数据的科学应用主要集中于中高层大气研究, 其在微流星体环境科学研究和建模应用方面的潜力尚未得到充分挖掘.

基于子午工程的漠河站流星雷达实测数据, 初步开展近地空间微流星体环境特征的分析, 研究质量约在 $10^{-6}$～1 g 之间、进入地球大气的微小颗粒, 其尺寸范围通常对应于微流星体 (以下简称流星体). 通过对流星体数量、速度、高度、方位角、天顶角以及通量等参数的时空分布进行深入研究, 并尝试反演大气影响下的流星体状态, 旨在利用该观测数据揭示中国上空特定区域的流星体环境特征, 初步验证基于国内实测数据的分析方法, 并与现有国外经验模型进行对比, 为未来构建中国自主的近地空间流星体环境模型提供数据基础和方法探索.

# 1 流星雷达设备与观测数据

## 1.1 漠河站流星雷达

在子午工程的支持下, 中国科学院地质与地球物理研究所在中国黑龙江漠河站 (53.5°N, 122.3°E) 建成了全天空流星雷达, 全天空流星雷达是国际上 20 世纪末才发展起来的一种新型流星雷达, 采用宽波束发射, 具有干涉测量和流星尾迹自动识别技术. 漠河站流星雷达采用澳大利亚 ATRAD (Atmospheric Radar Systems) 公司的增强流星探测雷达 (EMDR) 系统, 其结构和配置与 Buckland Park 全天空流星雷达类似, 可用于探测距离雷达天线阵 300 km 范围内约 70～110 km 高度的流星尾迹回波[14,15]. 漠河站流星雷达系统包括: 控制采集系统、分析处理计算机、接收机、发射机、发射天线和接收天线. 控制采集系统包括相应的控制、通信与分析软件等. 漠河站流星雷达由 5 个接收天线组成一个干涉仪, 可以获得精确的流星回波及到达角 (仰角和方位角)[17]. 漠河站流星雷达设备运行参数列于表 1.

## 1.2 漠河站流星雷达数据

漠河站流星雷达对 MLT 区域的流星尾迹进行探测, 子午工程一期和二期数据格式略有不同. 在子午工程一期, 流星雷达产生三种数据格式: 流星雷达观测数据文件、流星雷达流星参数图形文件及流星雷达分析数据文件. 其中观测数据文件用于描述流星余迹参数信息; 流星参数图形文件用于输出流星余迹参数信息的可视化图形, 流星雷达分析数据文件用于输出高空大气平均风场剖面. 以 2022 年 3 月 31 日为例, 图 1 显示了改日的流星参数图形文件结果, 即 2022 年 3 月 31 日漠河站流星雷达观测的流星余迹在天空中的分布.

子午工程一期的流星雷达观测数据文件以二进制方式存储, 文件格式由文件头信息、数据头信息和数据块组成. 其中文件头信息包含类型识别号, 数据记录个数, 以及首次与末次记录的时间信息; 数据头包含该参数块的类型识别号和版本号、长度、生成时间, 以及该参数块起始位置在数据文件中的偏移量. 表 2 列出了该流星雷达观测数据文件中主要参数的数据类型, 大小及数值范围.

表 2 中的 $\varphi$ 和 $\theta$ 分别为回波的到达角, 包括方位角和天顶角, 其中天顶角是指回波与天顶方向的夹角, 方位角指从正北方向顺时针旋转的角度[18].

**表 1 漠河站流星雷达的运行参数**

**Table 1 Operational parameters of meteor radar at Mohe Station**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 位置 | 53.49°N, 122.34°E |
| 雷达工作频率/MHz | 38.9 |
| 固态发射机峰值功率/kW | 20 |
| 发射脉冲重复频率/Hz | 430 |
| 脉冲波形 | 高斯 |
| 高度/km | 70～110 |
| 发射机可工作最大脉冲占空比/(%) | 10 |
| 发射信号极化方式 | 圆极化 |
| 相干接收机通道数 | 5 |
| 距离分辨率/km | 1.8 |
| 角度分辨率/(°) | 2 |

子午工程二期, 流星雷达产生的数据更为直观, 包括大气风场垂直剖面和日变化图、流星余迹参数和分布图, 以及多通道 IQ 记录. 其数据文件以记事本的格式储存, 表 3 列出了该流星雷达观测数据文件中主要参数的数据类型、大小、数值范围及缺失数据标志.

基于中国子午工程漠河站 (53.5°N, 122.3°E) 流星雷达的观测数据, 该流星雷达通过测量流星余迹的散射回波, 获取流星体的流星余迹参数信息及时间特征, 进而推断流星体的空间位置、速度等特性.

### 1.3 数据处理

受漠河站流星雷达设备自身和环境等因素影响, 该观测数据文件在剔除了方位角、流星体速度和拟合高度为 0 的观测数据后, 仍存在部分数据错误、探测时间不足或文件缺失的情况. 例如一期数据在 2021 年 4 月 1 日至 2022 年 3 月 31 日中有 46 天探测时长不足 24 h, 2021 年的 6 月 9 日、6 月 10 日、6 月 27 日、6 月 28 日、7 月 22 日和 7 月 23 日观测数据文件丢失, 2021 年 11 月 14 日观测数据文件出现错误. 二期数据在 2024 年 3 月 1 日至 2025 年 4 月 1 日中有 96 天的数据完全缺失以及 3 天 (2024 年 11 月 30 日至 2024 年 12 月 2 日) 的数据出现错误, 另有 1 天 (2024 年 9 月 9 日) 的探测时长不足 24 h. 为了分析全年的流星体分布情况, 对数据不完整和缺失的情况进行了补充和估计. 考虑到流星体分布受到偶发性流星体和季节性流星雨的共同影响, 本研究采用了如下数据补充方法:

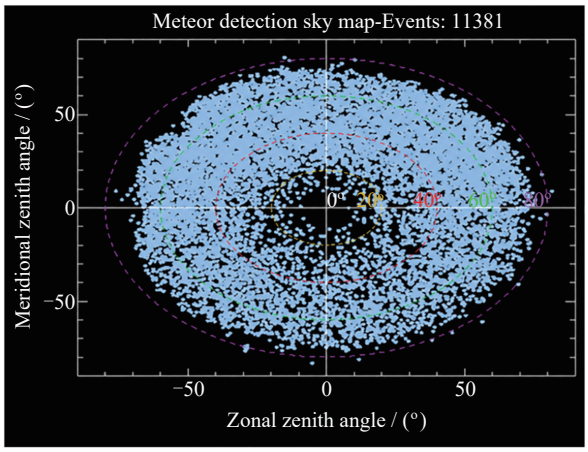



图 1 漠河站流星雷达 2022 年 3 月 31 日 12:00:00 UT 流星参数图形文件

Fig. 1 Meteor parameter graphic file of meteor radar at Mohe Station at 12:00:00 UT on 31 March 2022

流星体的分布不仅与偶发性流星体有关, 还受到流星体流的影响, 对于地球观测而言, 会受到季节性流星雨的影响. 若某天流星体探测数据缺失且未发生流星雨活动, 则取前后若干天的流星探测数据平均值作为补充; 若某天流星体探测数据缺失且发生了一种或多种流星雨活动, 则取流星雨活动期前后非活动起止时段的流星探测数据平均值进行补充, 具体如下.

假设第 $D$ 天的流星体探测数据缺失, 若第 $D$ 天未发生流星雨活动, 则取前后$\Delta D$天的流星探测数据取平均值, 即

$$N_D=\frac{\sum\limits_{i=D-\Delta D}^{D-1}N_i+\sum\limits_{i=D+1}^{D+\Delta D}N_i}{2\cdot\Delta D}. \tag{1}$$

若第 $D$ 天发生了 $A$ 种流星雨, 并且第 $a$ 种流星雨的开始时间为第$D_1^a$天, 结束时间为第$D_2^a$天, 其中, $a$=1,⋯,A. 令 $D_1$=max$\{D_1^1,\cdots,D_1^A\}$, $D_2$=min$\{D_2^1,\cdots,$

**表 2 子午工程一期漠河站流星雷达观测数据文件主要参数描述**

**Table 2 Description of the main parameters of meteor radar observation data files at Mohe Station of Meridian Project Phase I**

| Parameter | Data type | Data size | Valid range |
|---|---|---|---|
| Event start time/s | Float | 4 | ⩾ 0 |
| Angle of arrival/(°) | Float array | 4×2 | Azimuth $\varphi$: 0∼360<br>Zenith $\theta$: 0∼90 |
| Decay time/s | Float | 4 | ⩾ 0 |
| Diffusion coefficient/($m^2\cdot s^{-1}$) | Float | 4 | ⩾ 0 |
| Radial velocity/($m\cdot s^{-1}$) | Float | 4 | ⩾ 0 |
| Meteoroid speed/($m\cdot s^{-1}$) | Float | 4 | ⩾ 0 |
| Fitted range estimate/km | Float | 4 | ⩾ 0 |

**表 3　子午工程二期漠河站流星雷达观测数据文件主要参数**

**Table 3　Main parameters of meteor radar observation data files at Mohe Station Ⅱ**

| Parameter | Data type | Data size | Valid range | Missing value flag |
|---|---|---|---|---|
| Time (UTC) | String | 19 characters | – | – |
| Range | Float | F8.4 | ⩾ 0 km | –99999999 |
| ECode | Integer | I2 | 0～17 (0 indicates excellent quality) | –99 |
| SNR | Float | F6.1 | ⩾ 0 dB | –999999 |
| Power | Float | F10.1 | ⩾0 $(\mathrm{ADACU})^2$ | –9999999999 |
| Azimuth | Float | F6.2 | 0°～360° | –999999 |
| Zenith | Float | F5.2 | 0°～90° | –99999 |
| DecayTm | Float | F5.3 | ⩾ 0 s | –99999 |
| DifCof | Float | F5.1 | ⩾ 0 $\mathrm{m^2{\cdot}s^{-1}}$ | –99999 |
| RadialVel | Float | F6.1 | $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ (Positive/negative indicates moving away from/ toward the radar) | –999999 |
| MeteorVel | Float | F8.1 | ⩾ 0 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ | –99999999 |

$D_2^A\}$, 则第 $D$ 天的流星体总数为

$$N_D = \frac{\sum_{i=D-\Delta D_1}^{D-1} N_i + \sum_{i=D+1}^{D+\Delta D_2} N_i}{\Delta D_1 + \Delta D_2}. \tag{2}$$

其中, $\Delta D_1 = D - D_1 - 1$, $\Delta D_2 = D_2 - D - 1$, 需要注意的是, 此处由于流星雨的起止当天流星体环境的相对不稳定性, 剔除流星雨起止当天的数据.

对于探测时长不足 24 h 的日期, 根据其实际探测时长和探测数量, 按比例估算全天探测数量. 若第 $D$ 天流星雷达的探测时长为 $\Delta t$, 第 $D$ 天实际探测的流星体数量为 $N_{\mathrm{real}}$, 则第 $D$ 天平均每小时探测到的流星体数量为

$$\overline{N_{\mathrm{h}}} = \frac{N_{\mathrm{real}}}{\Delta t}. \tag{3}$$

进而可估计第 $D$ 天探测的流星体总数为

$$N_D = 24 \cdot \overline{N_{\mathrm{h}}}. \tag{4}$$

依据上述方法 (逻辑流程见图 2), 对研究期间内的数据进行了补充和估计, 以构建用于后续分析的完整数据集, 并以相同原理计算平均通量等特征.

需要特别说明的是, 上述数据补全方法基于短期环境平稳的假设, 该方法在处理偶发流星占主导的平静期时具有较高的可靠性. 然而, 在流星雨活跃期间, 由于流星体活动具有爆发性和极强的短时变率, 采用平静期数据进行补齐可能会低估当天的实际总通量. 在本研究统计的时间范围内, 需补全的日期占全年数据的比例较低 (如表 4 所示, 仅 7 天, 占比约 1.9%), 且多数缺失日并未处于主要强流星雨的极大值窗口. 因此, 虽然该方法在单日细节上可能存在平滑误差, 但对全年流星体环境的季节性趋势分析以及整体通量量级评估的影响均处于可接受范围内.

## 2　微流星体特征参数计算方法

### 2.1　流星体特性计算与大气影响模型

为了分析流星体的物理特性, 需要根据雷达观测参数计算流星体的质量、速度、高度等. 假设流星体为球形, 则流星体半径 $r$ 可以表示为

$$r = \left(\frac{3m}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{3}}. \tag{5}$$

其中, $m$为流星体质量, 单位 g; $\rho$为流星体密度, 单位 $\mathrm{g{\cdot}cm^{-3}}$.

若设置研究的流星体质量范围为 $10^{-6}$ g ⩽ $m$ ⩽ 1 g, 假设流星体密度与 Grün 通量模型相同, 即 $\rho$ = 2.5 $\mathrm{g{\cdot}cm^{-3}}$, 可得到流星体半径的范围约为 $4.571\times10^{-4}$ mm ⩽ $r$ ⩽ $4.571\times10^{-2}$ mm, 二者之间的关系如图 3 所示.

流星体距地面的高度 $h$ 可根据雷达斜距 $R_{\mathrm{R}}$ 和天顶角$\theta$近似计算[19], 其表达式为

$$h = \sqrt{R_{\mathrm{E}}^2 + R_{\mathrm{R}}^2 + 2R_{\mathrm{E}}R_{\mathrm{R}}\cos\theta} - R_{\mathrm{E}}. \tag{6}$$

其中, $R_{\mathrm{e}}$ 为地球半径.

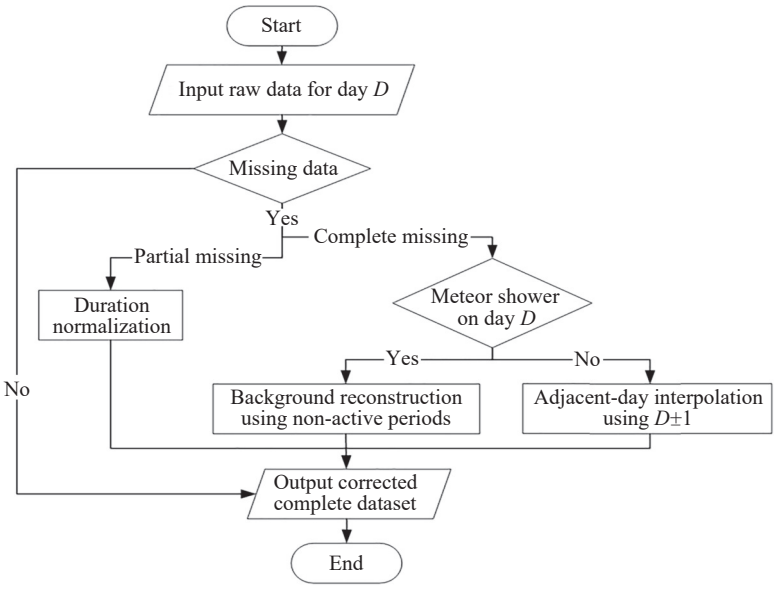



图 2　数据缺失补全与预处理逻辑流程

Fig. 2　Logical flowchart of data completion and preprocessing strategy

**表 4　缺失 7 天数据的补充**

**Table 4　Supplement for missing 7 days of data**

| Date | Meteor shower | $\Delta D_1$ | $\Delta D_2$ | $N_D$ |
|---|---|---|---|---|
| 9 Jun. 2021 | Arietids, Dayt. Arietids, ζ-Perseids, β-Taurids, June Bootids | 3 | 13 | 21561 |
| 10 Jun. 2021 | Arietids, Dayt. Arietids, ζ-Perseids, β-Taurids, June Bootids | 3 | 13 | 21561 |
| 27 Jun. 2021 | June Bootids, ζ-Perseids, β-Taurids | 4 | 3 | 20581 |
| 28 Jun. 2021 | June Bootids, ζ-Perseids, β-Taurids | 4 | 3 | 20581 |
| 22 Jul. 2021 | Perseids | 4 | 31 | 22017 |
| 23 Jul. 2021 | Perseids | 4 | 31 | 22017 |
| 14 Nov. 2021 | N. Taurids, Leonids, Nov. Orionids | 0 | 15 | 15702 |

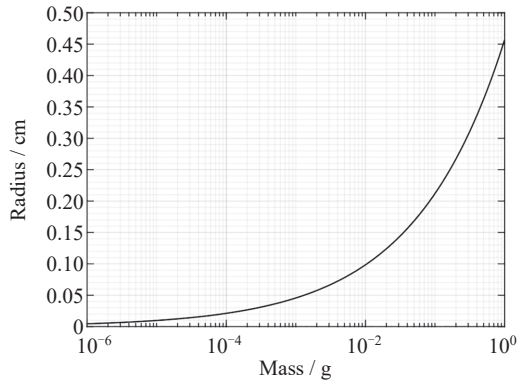



图 3　流星体质量和半径的关系

Fig. 3　Relationship between meteoroids mass and radius

流星体的质量$m$与地心速度 $v_{\mathrm{g}}$ 和星等 $M_{\mathrm{V}}$ 之间存在经验关系[20,21], 其表达式为

$$0.92\lg m = 24.214 - 3.91\lg\left(v_{\mathrm{g}} \cdot 10^{5}\right) - 0.4M_{\mathrm{v}}. \quad (7)$$

流星雷达探测到的速度为大气进入速度 $v_{\mathrm{R}}$, 流星体的地心速度 $v_{\mathrm{g}}$ 需考虑地球引力校正[22,23], 即

$$v_{\mathrm{g}}^2 = v_{\mathrm{R}}^2 + \frac{2\mu_{\mathrm{E}}}{r}. \quad (8)$$

其中, $\mu_{\mathrm{E}}$为地心引力常数, $r$为流星体与地心距离.

由于地球引力作用, 绝大多数的地球大气在 50 km 的高度范围内, 其约为总质量的 99.9%. 流星体进入地球大气层后, 会受到大气阻力的影响, 发生烧蚀和质量损耗. 本文采用的地球大气密度模型为 1976 标准大气数据拟合曲线, 1000 km 以下区域大气

密度$\rho_{\text{air}}$随高度$h$变化公式为[24]

$$\rho_{\text{air}} = -140.2\text{e}^{-0.000187h} + 141.4\text{e}^{-0.000186h}. \quad (9)$$

其中, $h$为高度, 单位 m; $\rho_{\text{air}}$ 为当地空气密度, 单位 kg·m$^{-3}$.

大气密度在 75～300 km 的高度范围内变化趋势如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 大气密度在高度介于 75～100 km 范围内急剧下降, 高度>100 km 的大气密度下降缓慢, 且逼近于 0.

流星体与空气中的分子发生碰撞会产生能量损失, 能量损耗通量 (ELF) 的计算公式为

$$F_{\text{EneLos}} = \frac{\pi\rho_{\text{air}} r^2_{\text{met}} v^3}{2}. \quad (10)$$

其中, $\rho_{\text{air}}$ 为当地空气密度, $r_{\text{met}}$ 为流星体的半径, $v$ 为流星体的速度.

流星体随时间的质量损耗率为[25]

$$\frac{\text{d}m}{\text{d}t} = -\pi r_{\text{met}}\rho_{\text{air}} v^3 \sigma. \quad (11)$$

其中, $m$为流星体的质量, $\sigma$为烧蚀系数. 假设为普通球状粒子, 则其值约为 0.014 s$^2$·km$^{-2}$[26].

流星体的下落加速度为

$$\frac{\text{d}v}{\text{d}t} = -\frac{\pi r^2_{\text{met}}\rho_{\text{air}} v^2}{m}. \quad (12)$$

由式 (11) 和 (12) 可得

$$\frac{\text{d}m}{m} = \sigma v \text{d}v. \quad (13)$$

假设$\sigma$为常数, 则有以下关系

$$\ln\frac{m}{m_0} = \frac{\sigma(v^2 - v_0^2)}{2}. \quad (14)$$

其中, $m_0$和$v_0$为流星体沿流星雷达轨迹的初始质量和初始速度.

由此可以根据流星雷达探测到的流星体状态 (通常在 75～125 km 高度), 反推其在更高高度 (例如中国空间站所在的 340～450 km 区域) 的质量和速度状态.

### 2.2 距离阈值平均通量计算模型

流星体通量定义为单位时间通过单位面积的流星体数量. 为计算特定空间区域的流星体通量, 本文构建了距离阈值平均通量计算模型. 该模型以流星雷达为原点建立雷达当地坐标系 (RLCS). 如图 5 所示, 其中 $R$ 为流星雷达, $RQ$ 位于当地水平面上, $\varphi$为点 $M$ 在 RLCS 中的方位角, $\theta$为点 $M$ 在 RLCS 中的天顶角. 在 RLCS 中选取一个样本球体区域 $M'$, 其球心 $M$ 具有特定的斜距、天顶角和方位角, 半径为 $R_{M'}$. 通过已探测到的流星体, 判断其轨迹是否穿过与样本球体相交的特定截面 (例如, 通过球心 $M$ 且法向量为指定方向的平面), 并设置距离阈值 $d_{\text{thr}}$ 来定义 "通过" 区域, 从而统计通过该区域的流星体数量.

模型采用空间几何和矢量运算, 确定流星体与截面的位置关系. 具体地, 计算流星体位置向量与截面法向量的点积或流星体到截面所在平面的距离$d_\theta$, 结合距离阈值来判定流星体轨迹是否通过有效截面区域. 通过统计一段时间$\Delta t$内通过特定截面区域的流星体数量, 可以计算出该区域的平均数量和通量. 模型中可以选取不同位置、不同半径的样本球体和不同方向的截面进行分析. 本文选取天顶角介于 30°～75°、高度介于 75～275 km 范围的流星体进行通量计算, 并设定样本球体半径为 100 km, 球心高度为 175 km. 日平均通量可由统计的日平均数量除以截面

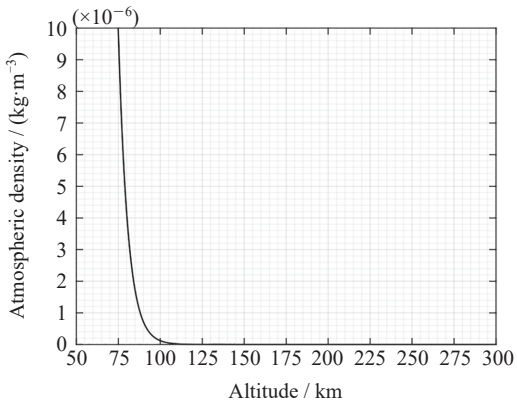



图 4 地球大气密度随高度变化

Fig. 4 Atmospheric density as a function of altitude

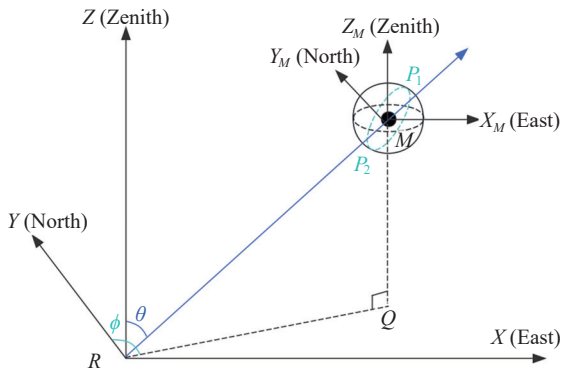



图 5 空间点 $M$ 处通量示例

Fig. 5 Schematic of flux at spatial point $M$

面积获得. 计算过程中考虑了日探测时长的差异.

### 2.3 Grün 模型概述与近地空间通量计算

经典的 Grün 模型是一种基于空间探测数据的经验模型[4], 旨在描述 1 AU 处行星际微流星体通量与粒子质量之间的关系. 该模型基于对太空中微流星体撞击率的统计测量, 反映了行星际空间粒子碰撞与破碎过程的统计平衡状态. 模型假设粒子为球形, 并考虑一定的密度分布.

该模型的数学表述为一个分段的经验公式, 用于计算单位面积、单位时间内质量大于或等于$m$(g) 的微流星体累积通量 $F$(m) (单位是颗数 $\mathrm{m^{-2}\cdot a^{-1}}$) 在 1 AU 行星际空间的平均值. 虽然模型最初给出的单位应为 $\mathrm{m^{-2}\cdot s^{-1}}$, 但在应用中常折算为年通量, 其核心公式为

$$F(m) = 3.15576 \times 10^7 \times [F_1(m) + F_2(m) + F_3(m)]. \tag{15}$$

其中, $m$为粒子质量, 单位 g; 1 年约为$3.15576 \times 10^7$ s. $F_1(m)$ 表达式为

$$F_1(m) = (2.2 \times 10^3\, m^{0.306} + 15.0)^{-4.38}. \tag{16}$$

适用于大粒子 (约 $m$>$10^{-9}$ g). $F_2(m)$ 表达式为

$$F_2(m) = 1.3 \times 10^{-9}(m + 10^{11}m^2 + 10^{27}m^4)^{-0.36}. \tag{17}$$

适用于中等粒子 (约 $10^{-14}\mathrm{g}<m<10^{-9}\mathrm{g}$)[19]. $F_3(m)$ 表达式为

$$F_3(m) = 1.3 \times 10^{-16}(m + 10^6 m^2)^{-0.85}. \tag{18}$$

适用于小粒子 (约 m<$10^{-14}$g).

该函数覆盖了从纳克到克量级的微流星体质量范围, 通过参数拟合实测数据. 将 Grün 模型应用于地球附近空间站轨道高度 (例如约 386～400 km), 需对原始行星际通量进行修正, 主要考虑地球环境的两个效应.

第一个效应为地球屏蔽效应. 地球屏蔽通过几何乘性因子($\xi$)体现, 该因子取决于航天器高度. 其作用是减去屏蔽体 (地球屏蔽锥) 所张立体角内的通量 (如图 6 所示). 若假定目标平面随机取向, 需考虑平均($\xi$)因子, 其表达式为

$$\xi(h) = 0.5(1 + \cos\theta). \tag{19}$$

其中, $\sin\theta = \dfrac{R_\mathrm{E} + h_\mathrm{a}}{R_\mathrm{E} + h}$, $R_\mathrm{E}$为地球半径, $h_\mathrm{a}$ 为大气层有效屏蔽高度 (约 100 km), 在 390 km 高度处, $\xi \approx 0.645$.

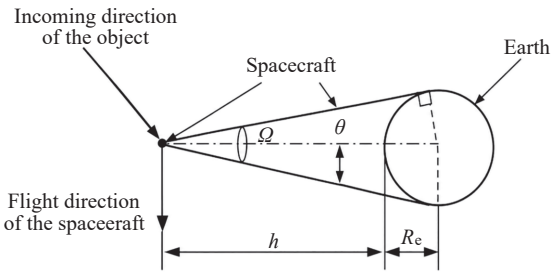



图 6 流星体通量的地球屏蔽效应

Fig. 6 Earth's shielding effect on meteoroid flux

第二个效应为地球引力聚焦效应. 根据轨道高度 $h$, 计算地球引力对微流星体的聚焦效应因子 $G_\mathrm{E}$, 其表达式为

$$G_\mathrm{E}(h) = 1 + \frac{R_\mathrm{E} + h_\mathrm{a}}{R_\mathrm{E} + h}. \tag{20}$$

在 390 km 高度处, $G_\mathrm{E}$≈1.957.

修正后的近地空间通量近似为

$$F_\mathrm{c}(m, h) = F(m) \times G_\mathrm{E}(h) \times \xi(h). \tag{21}$$

Grün 模型具有坚实的经验基础, 数学表达式简洁, 应用广泛, 覆盖粒径范围广. 但其主要局限性在于假定环境各向同性, 未区分粒子来源和方向性 (特别是流星群), 对近地环境处理简化, 且所采用的数据年代较早.

### 2.4 曲线拟合方法

为描述流星体特征分布 (例如通量随时间、数量密度随速度) 的函数形式, 本文尝试使用曲线拟合方法. 主要使用了最小二乘法 (LSM). LSM 通过最小化数据点与拟合曲线的距离平方和来确定函数系数, 评估拟合效果使用决定系数$R^2$. 拟合函数阶数越高通常$R^2$越大, 但复杂度也越高.

## 3 结果与分析

### 3.1 流星体的时空分布特征与参数概率分布

考虑对数据缺失的补充, 表 4 估计了缺失的 7 天数据. 从表中可以发现, 2021 年 6 月 9 日和 6 月 10 日有 6 种流星雨活动, 而 2021 年 7 月 22 日仅有 1 种流星雨活动. 对数据开展针对性处理后, 对流星体的整体活动水平、时空分布规律以及关键参数 (速度、高度、方位角、仰角) 的概率分布特征进行综合分析.

在 2021 年 4 月 1 日至 2022 年 3 月 31 日期间, 漠河站流星雷达总共提供了 358 天的流星观测数据,

全年探测到流星体总数估计约为 $6.37\times10^6$. 图 7 给出了一年中流星体总数量分布规律, 从图中可以看出, 流星体的活动水平表现出明显的季节性和日变化规律. 2021 年 4 月初—9 月底呈现波动上升趋势, 表明夏季 (北半球, 4 月—9 月) 流星体活动强度显著高于冬季 (10 月—次年 3 月), 之后便开始震荡式下降. 具体而言, 夏季流星体总数约为冬季的 1.44 倍, 这与地球在轨道上穿越主要流星体流区域的季节性有关.

图 8 给出了全年平均 24 h 流星体数量分布规律, 从图 8 可以看出, 流星体活动水平表现出明显的昼夜变化特征. 夜间 (00:00—6:00 LT 和 18:00—23:00 LT) 活动强度显著高于白天 (06:00—18:00 LT), 平均每小时数量约为 900～1000, 白天平均约为 400～600, 夜间活动强度约为白天的 1.5～2.5 倍. 具体而言, 0 时达到峰值, 随后在 01:00—04:00 LT 时保持较高水平; 日出后 (6:00 LT) 活动快速下降, 10:00—11:00 LT 时达到最低点, 之后逐渐回升; 日落前后 (18:00 LT) 活动快速上升至夜间水平, 18:00—23:00 LT 时保持在较高位. 该昼夜分布特征与地球自转效应、太阳辐射对电离层的影响以及雷达观测几何有关. 夜间面向地球运动方向, 流星体相对速度较高, 更容易被探测到; 而白天受太阳辐射干扰, 探测效率相对较低.

图 9 给出了流星雷达探测到的流星体天顶角和方位角分布情况, 从图 9 可以看出, 流星体空间分布表现出显著的各向异性. 全年数据显示, 流星体主要分布在漠河站 (53.5°N, 122.3°E) 的西北方向 (方位角 315°～360°), 同时在西南方向 (方位角 180°～

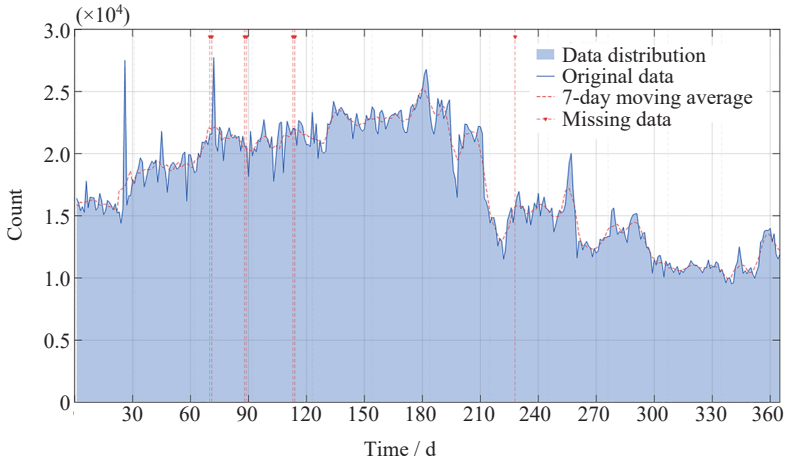



图 7　2021 年 4 月 1 日至 2022 年 3 月 31 日每日流星体总数分布

Fig. 7　Distribution of daily total meteoroid counts from 1 April 2021 to 31 March 2022

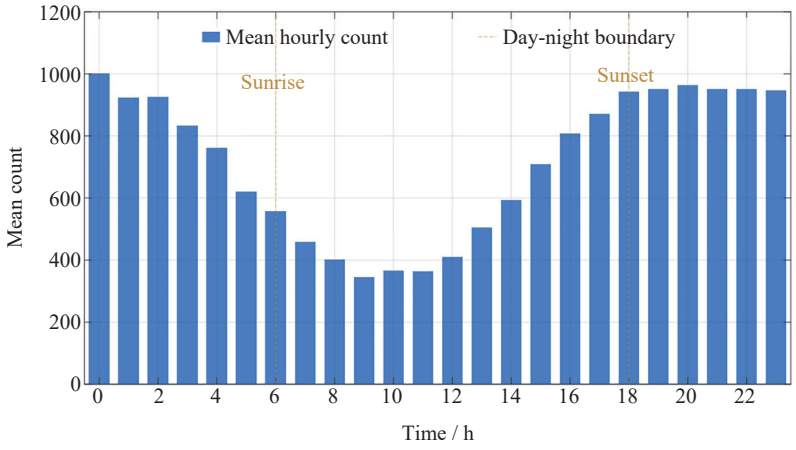



图 8　全年每小时流星体平均数量分布

Fig. 8　Distribution of mean hourly meteoroid counts across the year

225°) 也有较明显的分布, 尤其在 7 月－10 月期间, 这两个方向的活动较为活跃. 天顶角分布集中在 30°～75°之间, 尤其在 45°～75°区间数量最多. 这种西北和西南方向的聚集性与地球公转迎面方向 (较地球轨道运动方向偏前约 60°) 以及漠河站的地理位置和雷达几何有关. 流星体迎向地球时, 相对速度较高, 容易被探测到.

流星雷达探测到的流星体参数, 包括速度、高度、方位角和仰角, 呈现出各自独特的概率分布形态, 这些形态与流星体在近地空间的物理行为和雷达探测机制密切相关. 以下以 2024 年 10 月 2 日的流星雷达数据为例, 图 10 给出了高度、速度、方位角和仰角等流星体主要参数的密度概率分布.

(1) 速度分布 (图 10a). 速度分布呈现明显正偏态 (右偏) 特征. 概率密度最高的区域集中在约 25～30 km·s$^{-1}$ 的速度范围. 数据整体取值范围覆盖

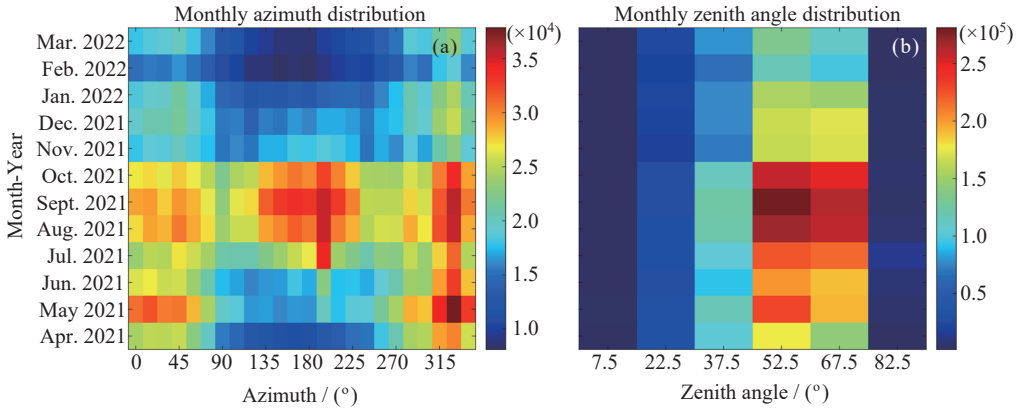



图 9 流星总数的方位角和天顶角分布

Fig. 9 Meteoroid zenith and azimuth angle distribution

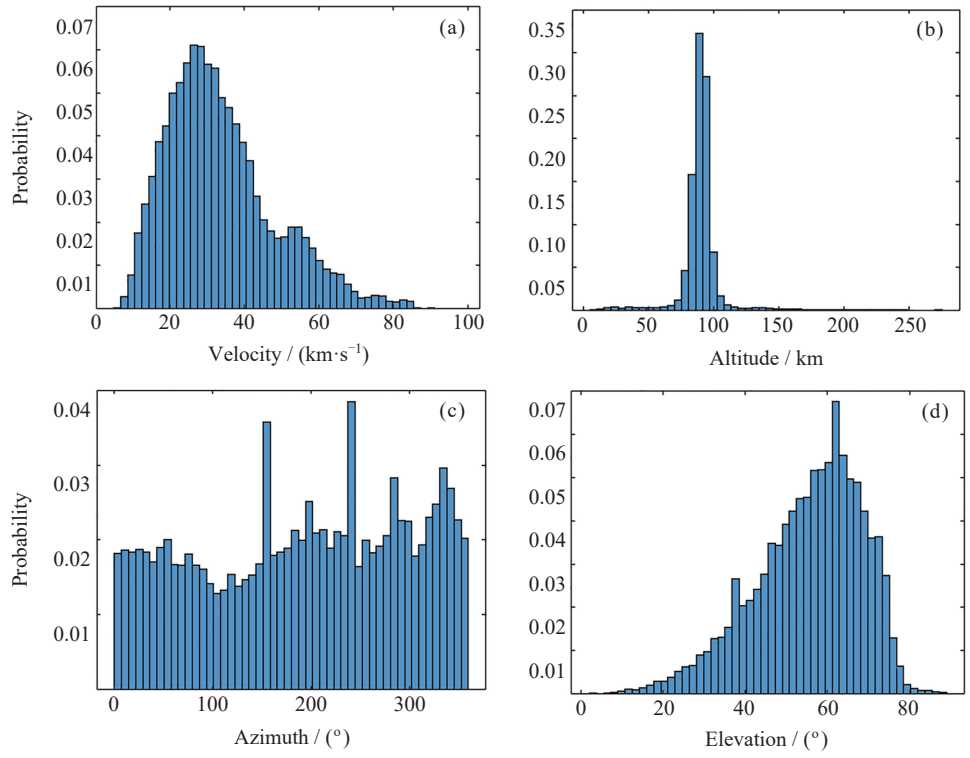



图 10 2024 年 10 月 2 日流星体参数分布

Fig. 10 Distribution map of meteoroid parameters on 2 October 2024

从约 0～100 km·s$^{-1}$, 超过 80 km·s$^{-1}$ 的概率密度较低. 该分布反映了流星体进入大气层的速度范围. 多数流星体速度适中, 但存在少量高速粒子.

(2) 高度分布 (图 10b). 高度分布呈现极其尖锐和对称的形态, 接近高度集中的类正态分布. 概率密度集中在约 90～95 km 的高度范围. 概率分布的范围大致在 80～105 km 之间. 这种狭窄的分布反映了流星体在大气中烧蚀形成可探测流星余迹的物理过程主要发生在特定的高度区间 (约 75～125 km), 其中 75～100 km 数量最多.

(3) 方位角分布 (图 10c). 方位角分布呈现明显的多峰和非均匀特征. 分布在整个 0°～ 360°范围内波动较大. 存在多个概率密度较高的区域或模态, 显著峰值出现在约 150°～180°和 240°～270°附近, 同时, 在 330°～360°和 0°～30° 附近也存在较高的概率密度. 这种多峰分布以及在西北方向 (270°～360°) 的较高概率密度, 与前述的空间分布特征一致, 再次印证了流星余迹的到达方向存在显著的方向偏好, 该现象可能与地球公转方向导致的迎面流、流星雨辐射点位置以及雷达的探测方向图等因素综合有关.

(4) 仰角分布 (图 10d). 仰角分布呈现明显的负偏态 (左偏) 特征. 概率密度从较低的仰角开始缓慢增加, 达到峰值后向较高的仰角方向相对较快地下降. 概率密度最高的区域位于约 60°～65°的仰角范围. 数据分布范围大致从约 0°～80°, 但概率密度主要集中在 40°～75°之间. 这种分布偏向较高的仰角, 表明被探测到的流星余迹更容易出现在相对于雷达站有一定仰角的方向上, 低仰角 (接近 0°) 探测到的事件较少. 这可能受雷达天线方向增益模式, 以及流星体进入大气层的轨迹角分布的综合影响. 综上, 漠河站流星雷达数据反映了流星体活动在时间 (季节、昼夜) 和空间 (方位、天顶) 上的不均匀性, 并据此获得速度、高度、方位角和仰角这些核心参数的概率分布特征. 这些分布形态相互关联, 共同反映了流星体在近地空间的运动、与大气的相互作用以及地基雷达的探测特性. 例如, 狭窄的高度分布直接对应流星体烧蚀集中发生的高度层; 特定的方位角与仰角分布则受到迎面流效应、流星群来源方向以及雷达探测盲区、增益模式等共同影响.

### 3.2 流星体特性分析

图 11 给出了流星体地心速度、观测速度和高度的关系, 从图 11 可以看出, 当观测速度 $v$ 大于约 10 km·s$^{-1}$ 时, 地心速度 $v_g$ 与 $v$ 近似呈线性关系, $v$ 越大, 大气速度损耗越低. 根据质量、地心速度和星等的关系, 地心速度不变时, 流星体质量随星等降低而增加; 星等不变时, 质量随地心速度增加而降低.

图 12 给出了 2021 年 9 月 30 日和 2022 年 3 月 7 日的流星体质量与速度分布, 从图中可以看出, 在假定星等恒定时, 不同日期流星体质量分布略有差异.

进一步尝试反推流星体在探测时刻前较高高度时的质量和速度状态. 基于初始高度≥75 km 的流星体的计算结果, 分析该部分流星体在距探测时刻前约 12 s(对应 5160 个雷达探测单位时间) 时的状态. 在该时刻, 这些流星体的高度介于 300～600 km 之间. 质量计算结果显示, 其质量约介于$10^{-5}$～$10^{-2}$g. 与探测时刻的最终质量相比, 反推至约 12 s 前的初始质量通常有所增加, 质量比值 (探测时刻质量/12 s 前质量) 最高可达约 186. 对于初始高度≥75 km 的流星

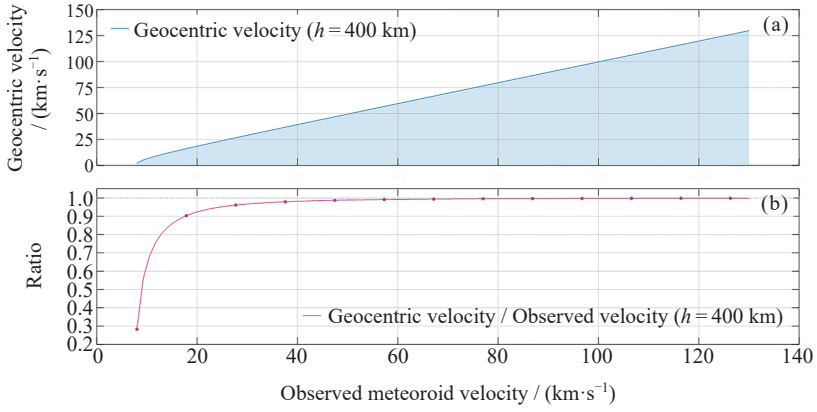



图 11 流星体的地心速度随观测速度和高度的变化 ($h$ = 400 km)

Fig. 11 Variation of meteoroid geocentric velocity with observed velocity and altitude ($h$ = 400 km)

体样本, 在 12 s 间隔内, 质量比值多数情况介于 1～1.5 或 1～186 之间. 对速度变化的分析显示, 在 12 s 的短时间间隔内, 流星体的速度变化极小, 基本可忽略不计, 这表明在较高且稀薄的大气中, 流星体受阻力导致的速度衰减并不显著.

### 3.3 流星体的通量分布及模型对比

这里仅考虑对航天器造成撞击风险的流星体, 故需设置速度阈值, 筛选出部分流星体, 并使用距离阈值平均通量计算模型对该部分流星体通量进行估算. 为估算通量, 将流星体星等固定为+6.5. 流星体的速度随质量和星等变化, 该星等下的最小速度约为 3.372 km·s$^{-1}$, 对应的流星体质量为 1 g, 则该流星体对应不同高度的观测速度如表 5 所示. 基于样本球体 (半径 100 km, 球心高度 175 km) 和特定速度阈值 (初始观测速度 ⩾11 km·s$^{-1}$, 对应 1 g 流星体在约 100 km 高度的观测速度), 统计一年内通过该区域的流星体数量, 实际观测得到的流星体总数约为 1.485×10$^5$ 颗, 加权流星体通量为 1.40×10$^{-8}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$; 通过模型计算的通过流星体总数约为 1.506×10$^5$ 颗, 算术平均流星体通量为 4.79×10$^{-6}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$. 每日平均每小时通过圆面区域的流星体数量变化趋势与每日总数趋势相似, 夏季高于冬季. 将每日平均数量转换为通量 (单位: km$^{-2}$·d$^{-1}$), 并以研究时段内的日序号 $d$ 为自变量, 采用最小二乘法进行多项式拟合. 定义 $P^k(d)$ 为日平均通量随日序号 $d$ 变化的 $k$ 次多项式拟合函数使用最小二乘多项式进行拟合, 其中 $k$ 为多项式阶数. 不同阶数的拟合结果如图 13 所示, 结果显示, 8 次多项式拟合 (见表 6) 效果较好 ($R^2 \approx 0.8579$). 若 $k$ 继续增加, 拟合效果或许更加, 但随着曲线阶数的增加, 复杂度也会随之增加.

Grün 模型在 400 km 轨道高度, 对于质量 ⩾ 10$^{-6}$g(约 100 μm 直径) 的粒子, 预测的累积通量约为 1～3 m$^{-2}$·a$^{-1}$. 对于质量⩾1 g 的粒子, 预测通量约为 10$^{-8}$～10$^{-7}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$.

漠河站流星雷达数据经距离阈值模型计算得到的通量, 来源于流星体在 75～275 km 探测高度范围内穿过设定区域的统计结果. 对于考虑初始观测速度⩾11 km·s$^{-1}$(对应约 1 g 流星体在约 100 km 高度)

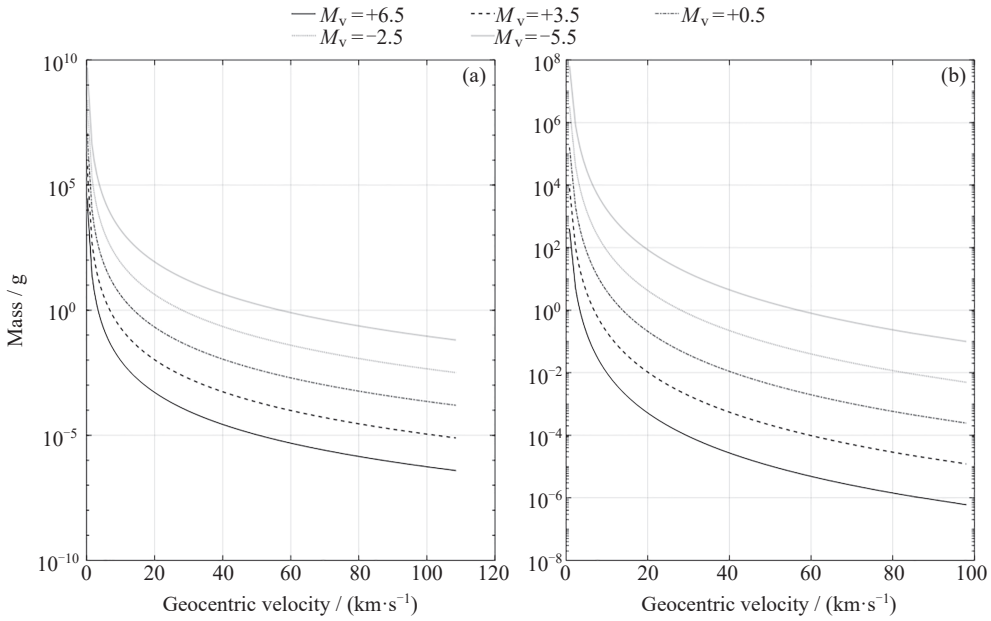



图 12 2021 年 9 月 30 日和 2022 年 3 月 7 日流星体的质量与地心速度的分布

Fig. 12 Distribution of meteoroid mass and geocentric velocity on 30 September 2021 and 7 March 2022

**表 5 近地空间不同高度的观测速度 ($M_v = +6.5$, $m = 1$ g)**

**Table 5 Observation speed at different heights in near-Earth space ($M_v = +6.5$, $m = 1$ g)**

| $h$ /(km) | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $v_R$ /(km·s$^{-1}$) | 11.201 | 11.180 | 11.159 | 11.137 | 11.117 | 11.096 | 11.075 | 11.054 | 11.034 |

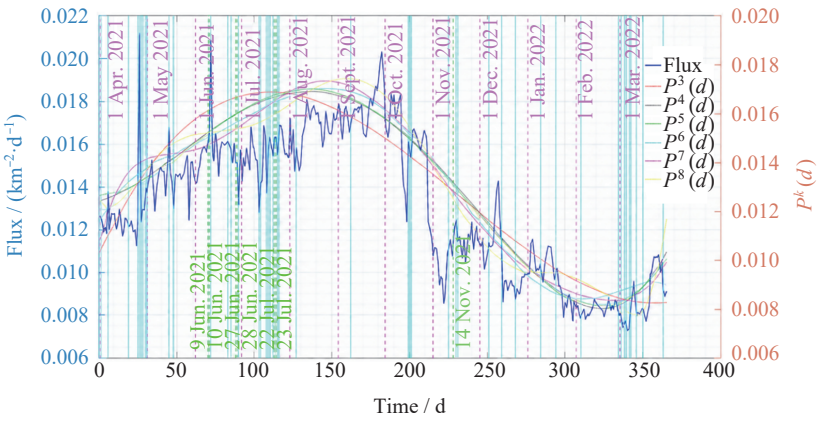



图 13　每日平均通量 (24 h) 与多项式拟合结果

Fig. 13　Daily average flux (over a 24 h period) and polynomial fitting results

**表 6　通量随时间的多项式函数 $P^k(d)$ 的评价指标**

**Table 6　Evaluation index of polynomial function $P^k(d)$ of the meteoroid flux with day**

| $k$ | SSE | $\overline{y}$ | SST | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 3 | $9.192\times10^{-4}$ | $1.313\times10^{-2}$ | $4.149\times10^{-3}$ | $7.785\times10^{-1}$ |
| 4 | $7.360\times10^{-4}$ | $1.313\times10^{-2}$ | $4.149\times10^{-3}$ | $8.226\times10^{-1}$ |
| 5 | $7.333\times10^{-4}$ | $1.313\times10^{-2}$ | $4.149\times10^{-3}$ | $8.233\times10^{-1}$ |
| 6 | $6.971\times10^{-4}$ | $1.313\times10^{-2}$ | $4.149\times10^{-3}$ | $8.320\times10^{-1}$ |
| 7 | $6.720\times10^{-4}$ | $1.313\times10^{-2}$ | $4.149\times10^{-3}$ | $8.380\times10^{-1}$ |
| 8 | $5.896\times10^{-4}$ | $1.313\times10^{-2}$ | $4.149\times10^{-3}$ | $8.579\times10^{-1}$ |

的流星体, 加权平均通量约为 $1.40\times10^{-8}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$. 该量级与 Grün 模型在 400 km 高度对 m≥1 g 粒子的预测量级 ($10^{-8}$～$10^{-7}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$) 接近.

然而, 如果考虑雷达探测到的所有流星体 (其质量多数远小于 1 g, 集中在 $10^{-5}$ g 和 $10^{-2}$ g 量级, 反推到 340～450 km 高度也多在 $10^{-4}$ ～$10^{-3}$ g 量级), 即使按照探测得到的总数量计算通过特定面积的通量 (例如假设所有探测到的粒子均通过某个横截面), 其量级约为 $2.028\times10^{-4}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$. 这个值与 Grün 模型对小质量粒子在 400 km 高度预测的通量 (量级 $1.31\times10^{-2}$～$7.55\times10^{-4}$ m$^{-2}$·a$^{-1}$) 相差约 2 个数量级. 这可能归因于小质量或低速流星体的电离效率较低, 产生的回波信号强度往往低于雷达探测阈值, 且小质量粒子通常在更高高度烧蚀, 受高层大气快速扩散效应影响, 回波持续时间极短, 难以被有效捕捉.

### 3.4　速度数量密度分布

若假设流星体的出现为泊松分布, 由于泊松分布的间隔具有无记忆性, 则缺失的流星体探测数据的影响可忽略不计, 因此该部分仅考虑 358 天流星雷达探测的所有数据. 利用 2021 年 4 月 1 日至 2022 年 3 月 31 日的实测数据分析流星体速度数量密度分布,如图 14 所示, 当速度区间取 1 km·s$^{-1}$ 时, 速度密度分布呈现多个峰值, 主峰位于 28～29 km·s$^{-1}$. 以流星体速度 $v$ 为自变量, 采用最小二乘法进行多项式拟合, 并定义 $P^k(v)$ 为速度数量概率随速度 $v$ 变化的 $k$ 次多项式拟合函数, 其中 $k$ 为多项式阶数. 不同阶数多项式的拟合结果如图 14 所示, 相应评价指标见表 7. 结果表明, 8 次多项式拟合的 $R^2$ 值最高 (约为 0.981), 但仍存在对高速部分拟合效果不理想的问题.

## 4　结论与展望

基于漠河站流星雷达数据对近地空间流星体特征进行初步分析, 分析结果显示, 流星体数量存在夏多冬少、夜多昼少的显著差异, 空间集中于西北方向, 速度和高度有特定分布范围, 质量与速度负相关且受大气烧蚀影响, 通量估算结果与 Grün 模型在大尺寸

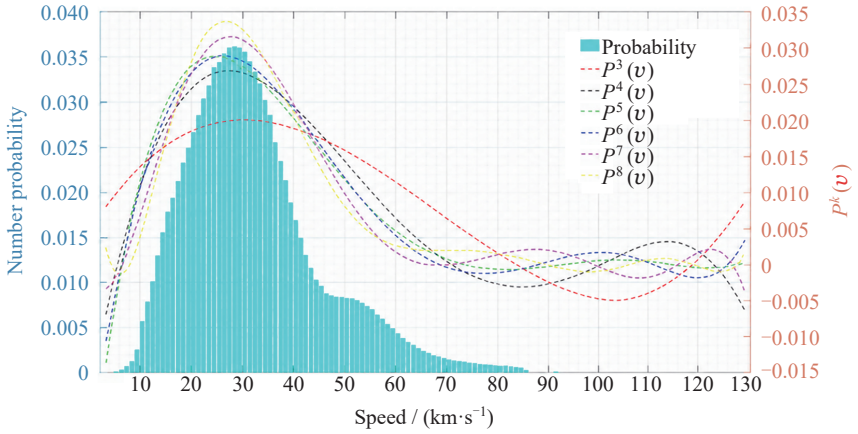



图 14 每个速度区间的流星体数量密度分布

Fig. 14 Meteoroid number density distribution per velocity interval

**表 7 速度数量密度随速度的多项式函数$P^k(v)$的评价指标**

**Table 7 Evaluation index of polynomial function $P^k(v)$ of the number probability with velocity bin**

| $k$ | SSE | $\overline{P}$ | SST | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 3 | $6.104\times10^{-3}$ | $7.576\times10^{-3}$ | $1.660\times10^{-2}$ | $6.323\times10^{-1}$ |
| 4 | $2.242\times10^{-3}$ | $7.576\times10^{-3}$ | $1.660\times10^{-2}$ | $8.650\times10^{-1}$ |
| 5 | $1.579\times10^{-3}$ | $7.576\times10^{-3}$ | $1.660\times10^{-2}$ | $9.049\times10^{-1}$ |
| 6 | $1.458\times10^{-3}$ | $7.576\times10^{-3}$ | $1.660\times10^{-2}$ | $9.122\times10^{-1}$ |
| 7 | $7.451\times10^{-4}$ | $7.576\times10^{-3}$ | $1.660\times10^{-2}$ | $9.551\times10^{-1}$ |
| 8 | $3.114\times10^{-4}$ | $7.576\times10^{-3}$ | $1.660\times10^{-2}$ | $9.812\times10^{-1}$ |

粒子上基本一致, 小粒子量级上差异较大; 多项式拟合虽可反映总体趋势, 但细节刻画不足. 后续将通过扩展数据覆盖、优化相关模型、探索更优拟合方法以弥补现有方法在细节刻画上的短板, 同时结合多源观测数据与跨学科分析手段开展综合研究, 进一步揭示流星体时空分布、物理特性等核心特征, 全面提升分析结果的精度、可靠性与研究广度. 具体结果如下.

(1) 流星体数量季节性显著, 夏季高于冬季, 夜间多于白天.

(2) 空间分布不均, 集中在西北方向; 速度多为 20～80 km·s$^{-1}$, 高度多为 75～125 km.

(3) 质量随速度增加而降低; 大气烧蚀导致质量在下落中增加, 340～450 km 高度质量约为 $10^{-4}$～$10^{-3}$ g; 短时速度变化可忽略.

(4) 通量估算结果在大粒子量级上可与 Grün 模型结果相当, 但对小粒子差异显著, 受大气烧蚀和探测限制影响. 多项式拟合能反映总体趋势, 但对速度分布中的多峰结构及高速区 (>70 km·s$^{-1}$) 的稀疏数据拟合效果不理想, 且平滑效应导致了对通量分布局部细节的失真.

未来的工作方向如下: 扩展流星雷达数据覆盖范围, 深入研究流星体时空变化规律; 建立更精确的大气烧蚀模型, 反演高层流星体状态; 构建更精确通量模型, 考虑大气损失效应; 探索更优分布拟合方法, 尝试引入物理引导的分布模型, 或应用分段函数拟合与非参数回归方法, 以实现对近地空间流星体动力学环境更精准的统计建模; 结合多源数据和方法, 进一步开展流星体分析.

**致谢** 本项成果使用国家重大科技基础设施子午工程提供的科学数据, 在此表示感谢.

**医学伦理** 研究不涉及人体或动物实验.

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突.

## 参考文献

[1] GRÜN E, ZOOK H A, FECHTIG H, *et al.* Collisional bal-

ance of the meteoritic complex[J]. *Icarus*, 1985, **62**(2): 244-272

[2] DIVINE N. Five populations of interplanetary meteoroids[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, **98**(E9): 17029-17048

[3] STAUBACH P, GRÜN E, JEHN R. The meteoroid environment near Earth[J]. *Advances in Space Research*, 1997, **19**(2): 301-308

[4] DIKAREV V, GRÜN E, BAGGALEY J, *et al*. The new ESA meteoroid model[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **35**(7): 1282-1289

[5] MCNAMARA H, JONES J, KAUFFMAN B, *et al*. Meteoroid Engineering Model (MEM): a meteoroid model for the inner solar system[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2004, **95**(1/2/3/4): 123-139

[6] MOORHEAD A V, KOEHLER H M, COOKE W J. NASA Meteoroid Engineering Model Release 2.0[R]. Huntsville, AL, USA: NASA Marshall Space Flight Center, 2015, NASA/TM-2015-218214

[7] MOORHEAD A V. Meteoroid Engineering Model (MEM) 3: NASA's newest meteoroid model[R]. Huntsville, AL, USA: NASA Marshall Space Flight Center, 2020, NASA/TM-2020-220555

[8] SOJA R H, GRÜN E, STRUB P, *et al*. IMEM2: a meteoroid environment model for the inner solar system[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, **628**: A109

[9] DROLSHAGEN G, DIKAREV V, LANDGRAF M, *et al*. Comparison of meteoroid flux models for near earth space [J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2008, **102**(1/2): 191-197

[10] GRÜN E, SRAMA R, HORANYI M, *et al*. Comparative analysis of the ESA and NASA interplanetary meteoroid enviroment models[C]//6th European Conference on Space Debris. Darmstadt: ESA Space Debris Office, 2013

[11] RODMANN J, MILLER A, TRAUD M, *et al*. Micrometeoroid impact risk assessment for interplanetary missions[C]//Proceedings of 8th European Conference on Space Debris. Darmstadt: ESA Space Debris Office, 2021

[12] JONES J, BROWN P. Sporadic meteor radiant distributions: orbital survey results[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1993, **265**(3): 524-532

[13] GALLIGAN D P, BAGGALEY W J. The orbital distribution of radar-detected meteoroids of the Solar system dust cloud[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, **353**(2): 422-446

[14] HOCKING W K, FULLER B, VANDEPEER B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(2/3): 155-169

[15] VALENTIC T A, AVERY J P, AVERY S K. MEDAC/SC: a third generation meteor echo detection and collection system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(1): 15-21

[16] WANG C. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather*, 2010, **8**(8): S08001

[17] XIE Haiyong, LIU Libo, NING Baiqi, *et al*. A dataset from Mohe all-sky meteor radar in 2018[J]. *China Scientific Data*, 2021, **6**(2): 88-98 (解海永, 刘立波, 宁百齐, 等. 2018 年黑龙江漠河站全天空无线电流星雷达数据集 [J]. 中国科学数据, 2021, **6**(2): 88-98)

[18] CAI Bing. Researches on MLT Meteor Wind Techniques and Observations of Solar Activities with MF Rada[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 (蔡冰. MLT 中频雷达流星余迹测风技术及太阳活动效应观测研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2021)

[19] HOLDSWORTH D A, REID I M, CERVERA M A. Buckland Park all-sky interferometric meteor radar[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(5): RS5009

[20] MATRIGO-RODRIGUEZ J, FABREGAT J, LLORCA J. Leonid fluxes: 1994-1998 activity patterns[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2001, **36**(12): 1597-1604

[21] TRIGO-RODRÍGUEZ J M, BLUM J. Learning about comets from the study of mass distributions and fluxes of meteoroid streams[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **512**(2): 2277-2289

[22] YOUNGER J P, REID I M, LI G, *et al*. Observations of the new Camelopardalids meteor shower using a 38.9MHz radar at Mohe, China[J]. *Icarus*, 2015, **253**: 25-30

[23] YOUNGER J P, REID I M, VINCENT R A, *et al*. A southern hemisphere survey of meteor shower radiants and associated stream orbits using single station radar observations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, **398**(1): 350-356

[24] GENG S, ZHOU B, LI M. Near-Earth object 2022 EB5: from atmospheric entry to physical properties and orbit[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **670**: A27

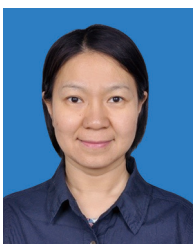
[25] BRONSHTEN V A. Physics of Meteoric Phenomena[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1983

[26] POPOVA O. Meteoroid ablation models[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2004, **95**(1/2/3/4): 303-319

## 作者简介



**石敏钰** 女, 1999 年 12 月出生于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市, 现为中国科学院国家空间科学中心飞行器设计专业在读博士生, 主要研究方向为空间碎片建模与碰撞预警等.
E-mail: shiminyu24@mails.ucas.ac.cn



**王荣兰 (通信作者)** 女, 1976 年 10 月出生于山西省运城市,现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间碎片预警与大气建模应用.
E-mail: wangrl@nssc.ac.cn