

## 月球南极尘埃等离子体环境特性\*

李梦瑶<sup>1)2)#</sup> 夏清<sup>1)#</sup> 蔡明辉<sup>1)3)†</sup> 杨涛<sup>1)</sup>  
许亮亮<sup>1)</sup> 贾鑫禹<sup>1)</sup> 韩建伟<sup>1)3)</sup>

1) (中国科学院国家空间科学中心, 空间天气国家重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2024年4月30日收到; 2024年6月4日收到修改稿)

由于缺少大气和全球性磁场的保护, 空间等离子体环境可直接作用于月球表面的月壤层, 月壤中较小粒径的月尘带电后会在月面附近形成复杂的尘埃等离子体环境, 影响探月任务的顺利实施. 针对月球南极尘埃等离子体环境, 本文利用 SPIS (spacecraft plasma interactions software) 软件, 仿真研究了月球南极 0—200 m 高度范围的等离子体和月尘的空间分布情况及月面充电特性, 揭示了月面附近尘埃等离子体环境特征及悬浮在月面附近的带电月尘对等离子体环境的影响. 仿真结果与 Apollo 探测数据和 Popel 团队的理论数据吻合. 研究结果: 表明空间电位随着高度升高而增加, 月球南极附近 0—10 m 电位约为 -40 V, 在 100 m 处空间电位约为 -20 V; 在 10 m 以下高度范围内月尘密度为  $10^{7.22}$ — $10^{4.66}$   $\text{m}^{-3}$ ; 月表附近尘埃等离子体中的电子密度为  $10^{5.47}$   $\text{m}^{-3}$ , 离子密度为  $10^{6.07}$   $\text{m}^{-3}$ , 并随着高度升高而增大; 带电月尘会影响月尘的空间分布, 主要是通过影响空间电场的分布, 进而导致电子分布差异, 对离子的影响不大.

**关键词:** 月球南极, 尘埃等离子体环境, SPIS 仿真, 月面电位分布**PACS:** 52.65.-y, 52.65.Rr**DOI:** 10.7498/aps.73.20240599

## 1 引言

月球缺乏大气层和全球磁场的保护, 将直接暴露于高能宇宙射线、太阳风和地球磁尾等离子体等复杂辐射环境中. 月球表面覆盖一层厚厚的月壤, 月壤中粒径在 30 nm—20  $\mu\text{m}$  之间的称为月尘, 月尘在太阳风或磁尾等离子体以及太阳光照环境下会携带电荷成为带电月尘<sup>[1,2]</sup>. 在空间环境的作用下, 月球表面会出现较大的电势差, 产生较高的表面电位和强电场. 月表电场会引起带电月尘的迁移运动, 带电后月尘极易附着在仪器设备表面, 造成

视觉障碍、宇航员的行动障碍、设备机械堵塞、密封失效和材料磨损<sup>[3]</sup>, 还会对月表光学平台的安全和最佳使用构成潜在的危害<sup>[4]</sup>. 目前我国正在进行探月工程第四期任务, 未来将进行载人登月和月球基地建设等长期任务, 综合考虑月球南极地区的资源可利用性、能源供应、温度稳定性以及科学研究价值等因素, 月球南极区被选为探月任务的着陆区. 相比于中纬度地区, 月球南极区域低温、低太阳高度角的环境特征使月壤的电导率非常低, 会导致比较复杂的月面尘埃等离子体环境. 对于长期的月面任务, 带电月尘对任务的顺利进行具有较大威胁.

针对月面尘埃等离子体环境这一特定场景, 国

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 42204175) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn

内外研究学者进行了一系列理论和实验研究, 测量了月尘在不同环境下的荷电情况<sup>[5-7]</sup>, 研究了月尘静电迁移物理机制<sup>[8-10]</sup>. 近年来, 俄罗斯 Popel 研究团队<sup>[11-17]</sup> 针对月面尘埃等离子体环境进行了大量理论研究. 该团队系统的研究了月球向阳面、背阳面、晨昏线环境下月表尘埃等离子体特性, 研究了电场、鞘层分布特性, 预测了月尘密度, 并分析了月面尘埃等离子体的尘埃声波、尘埃-离子声波等集体行为特性. 美国 Coronado 大学 Roberson 研究团队采用实验手段研究了月面尘埃等离子体鞘层特性、月尘的迁移<sup>[18]</sup> 及鞘层不稳定性等物理机制<sup>[19]</sup>, 建立了 PIC-MCC 尘埃等离子体数值仿真手段<sup>[20]</sup>. 同样, 美国 Maryland 大学 Hartzell 研究团队<sup>[21]</sup> 为了有效了解尘埃等离子体环境, 提出了研究月球表面静电尘埃运动有效载荷的概念. 国内对月面尘埃等离子体的研究近几年刚刚起步, 目前仍在快速发展. 中国科学院国家空间科学中心谢良海等<sup>[22]</sup> 分析了 LADEE 探测数据发现撞击坑附近的月尘静电喷泉现象, 且尘埃密度与阿波罗观测相当, 进一步分析表明月球坑对太阳风的遮挡效应导致背阳面深坑底部存在几百伏的负电势和强电场进而产生了局部的月尘喷泉现象, 并根据月球南极区的沙克尔顿陨石坑建立了研究陨石坑表面电位和静电运输的模型<sup>[23]</sup>. 随着月球充电、月面尘埃等离子体研究的进行, 目前已取得了一定的研究成果. 如美国 Apollo 任务、Artemis 任务, 我国嫦娥任务等都积累了大量月球充电、尘埃密度和尘埃吸附污染的探测数据, 并发展了丰富的理论基础. 近年来, 各国家航天领域快速发展, 各航天大国将目光投向具有重要战略意义的月球南极区域. 由于该区域缺乏探测数据支撑, 月球南极区域的尘埃等离子体环境特性目前仍不明确. 如该区域月面充电机制, 带电月尘的密度空间分布、空间电位分布特征, 悬浮在月面附近的带电月尘的空间电荷效应等, 都需进行系统的研究.

本文采用欧洲空天局开发的航天等离子相互作用系统 SPIS (spacecraft plasma interactions software) 软件, 仿真研究了月球南极区尘埃等离子体环境特性, 具体包括以下几个方面: 首先介绍了尘埃等离子体的基本特性, 第 2 节介绍了仿真方法与过程. 然后第 3 节基于 SPIS 软件建立了月球南极环境下的月面尘埃等离子体仿真模型, 研究了月球南极区域月面附近尘埃等离子体环境特性, 其

中, 第 3.1 节研究了月球南极区带电月尘空间分布特征; 第 3.2 节研究了月面尘埃等离子体的空间分布特征; 第 3.3 节分析了带电月尘的空间电荷效应. 仿真结果与相似环境下的探测数据及理论研究结果进行了对比, 其中月面电位与 Apollo 时期探测到的月面电位数据一致, 月面附近月尘密度量级与俄罗斯 Popel 团队理论研究结果相近. 最后, 第 4 节对全文进行了总结.

## 2 模拟方法

### 2.1 物理模型

物理模型利用 SPIS 中的 SPIS-DUST 软件来模拟月球南极区的表面充电和静电尘埃的输运. 使用静电 PIC 数值模拟来对月尘带电后的悬浮进行受力分析. 仿真中月尘主要受电作用力、重力和范德瓦耳斯力的作用, 受力平衡后发射出月尘. SPIS 代码使用放大因子  $\beta$  来模拟尖端的微观充电过程, 有助于从表面发射尘埃颗粒<sup>[24]</sup>. 月尘离开月面后, 微观电场的作用会消失, 后续尘埃的运动主要受重力和等离子体鞘层电场决定.

### 2.2 仿真模型

仿真中, 采用一个有限的“元胞”来模拟无限大的月球南极区表面, 假设模拟的月表是平坦的, 其中仿真框边长设置为  $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 200\text{ m}$ , 如图 1 所示. 为了利用有限的空间模拟无限的月球表面, 仿真中将太阳风通过的  $y$  方向两个边界设置为周期性边界条件, 周期边界将进入模拟域的粒子返回到模拟域中, 此时如果一个粒子到达外边界, 它将被移动到相反边界, 并保持速度不变; 将平行于太阳风的  $x$  方向两个边界设置为反射性边界条件, 反射边界将进入模拟域中的粒子反射到模拟域中, 并使粒子速度的垂直分量反向<sup>[25]</sup>; 上边界设为开放性边界, 因为模拟域相对于德拜长度的范围很大, 所以模拟域满足等离子体鞘层厚度的要求, 开放边界对周围等离子体施加零电位和经典注入条件; 与月球表面接触的边界设置为吸收性边界条件, 该表面是含尘表面, 模拟中根据月表月尘所受的各种力之间平衡使月尘悬浮. 月球南极区处的等离子体德拜半径较大, 因此月球南极区处的仿真模型采用均匀网格划分. 根据德拜半径的计算公式得到月球南极等离子体的德拜半径为  $7\text{ m}$ . 仿真中网

格尺寸划分设置为 3 m, 网格尺寸的划分满足网格尺寸小于德拜长度的要求, 仿真效果如图 1 所示.

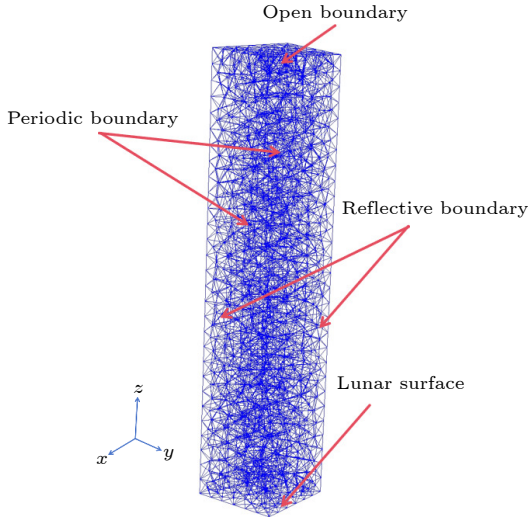


图 1 仿真区域网格划分图  
Fig. 1. Mesh division diagram of the simulation area.

### 2.3 环境参数

月球南极区的等离子体环境参数设置慢太阳风条件下的典型值<sup>[26]</sup>, 其中密度  $n_0 = 1.2 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ , 速度  $v_{sw} = 400 \text{ km/s}$ , 电子和离子温度  $T_e = T_i = 10 \text{ eV}$ . 由于月球极区温度很低(约 100 K), 而且月球南极区表面几乎没有光照, 因此将月球土壤的电导率设定为  $10^{-14} \text{ S/m}$ <sup>[27,28]</sup>. 仿真中采用 71501-1 号模拟月壤, 月尘颗粒半径为 2 nm—100  $\mu\text{m}$ , 月尘密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 其中月尘颗粒的密度为  $3000 \text{ kg/m}^3$ ; 月面电位初值设置为 0 V.

## 3 仿真结果与讨论

### 3.1 月球南极带电月尘空间分布特征

月球南极附近的太阳高度角长期在  $0^\circ$ — $2^\circ$  的范围内变化<sup>[29]</sup>. 模拟中太阳高度角设置为  $0^\circ$ , 太阳风从  $y$  方向的周期边界注入模拟区域, 采用第 2.3 节所述的环境参数, 数值模拟时间设置为 60 s, 此时可以获得准平衡的模拟结果, 如图 2 所示. 图 2 为电子、离子、带电月尘等各种充电过程对应的月面吸收/发射电流值随时间的变化. 在达到(动态)平衡前, 如 10 s 时刻, 月面吸收的电子电流为  $-76 \mu\text{A}$ , 吸收的离子电流为  $52 \mu\text{A}$ , 发射的带电月尘电流为  $1.7 \mu\text{A}$ , 吸收的带电月尘电流为  $-54 \mu\text{A}$ , 在 20 s 后各种电流达到动态平衡.

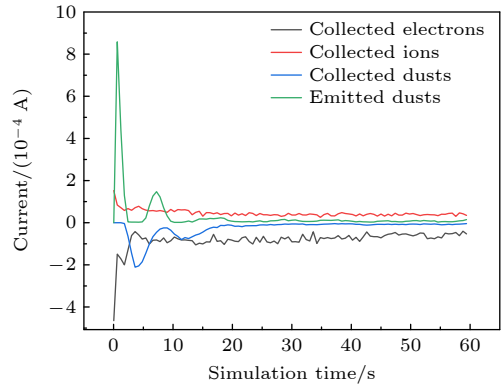


图 2 仿真过程中电流的变化  
Fig. 2. Changes in current during simulation.

仿真计算得到了月球南极区环境下仿真空间中月尘的带电量对数分布(图 3)和月尘密度空间分布(图 4). 图 3 所示为仿真空间月尘带电量空间分布  $x$ - $z$  剖面图, 不同颜色(蓝色-红色)对应不同电荷量的对数值. 月面附近带电月尘在南极区环境下的电荷量为  $10^{-17.3}$ — $10^{-17.1} \text{ C}$ , 发射至空间中的带电月尘粒径为 0.7—1.5 nm.

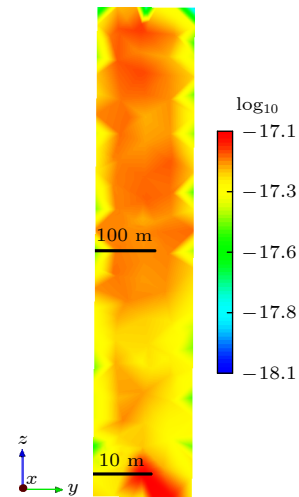


图 3 月尘颗粒带电量对数分布(月球南极环境, 单位: C)  
Fig. 3. Logarithmic distribution of charge amount of lunar dust particles (lunar south pole environment, unit: C).

在电场力作用下月尘被发射至月面上方空间中. 月面电位平衡后 60 s 时刻月尘密度空间分布  $x$ - $z$  剖面图如图 4 所示, 图中下边界为月面, 上边界为 200 m 高的月面上方边界, 中间的高度已标注出(下同). 采用不同颜色代表月尘密度的对数值(红色为最大值, 蓝色为最小值). 月面附近月尘密度最高, 为红色 ( $10^{7.22} \text{ m}^{-3}$ ); 在 10 m 以下高度范围内月尘密度为  $10^{7.22}$ — $10^{4.66} \text{ m}^{-3}$ (红色-黄色); 10—200 m 高度范围内为  $10^{4.66}$ — $10^{2.11} \text{ m}^{-3}$ (黄色-绿色).

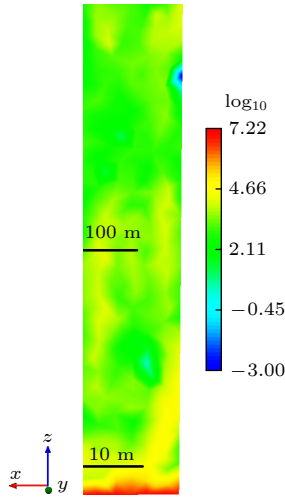


图 4 月尘空间密度对数分布 (月球南极环境, 单位:  $\text{m}^{-3}$ )  
 Fig. 4. Logarithmic distribution of lunar dust spatial density (lunar south pole environment, unit:  $\text{m}^{-3}$ ).

月面环境下的尘埃等离子体尘埃云密度足够大, 满足: 尘埃半径  $\ll$  平均尘埃粒间距离  $\ll$  德拜长度, 此时月面附近环境为尘埃等离子体环境, 遵循与尘埃等离子体相同的方程. 平衡后的带电月尘最终以带电的“尘埃云”形式存在于月面附近, 影响月面附近电场分布, 调制带电粒子运动轨迹.

### 3.2 月面尘埃等离子体空间分布特征

电子和离子从模型上边界 (开放性边界) 进入仿真空间, 月面电位平稳后 (60 s 时刻) 电子离子的空间分布主要受空间电位分布的影响. 图 5 为  $x$ - $z$  剖面图, 如图 5(a) 所示, 电子受月面附近负电位及月尘碰撞荷电消耗的影响, 在月面附近 0—10 m 范围内的电子密度为  $10^{5.47} \text{ m}^{-3}$  (浅蓝色); 10—100 m 范围内的电子密度为  $10^{5.47}$ — $10^{6.00} \text{ m}^{-3}$  (浅蓝色-绿色); 100—200 m 范围内的电子密度为  $10^{6.00}$ — $10^{7.07} \text{ m}^{-3}$  (绿色-红色); 离子主要受月面附近电位的影响, 在月面附近 0—10 m 范围内的离子密度为  $10^{6.07} \text{ m}^{-3}$  (蓝色); 10—100 m 范围内的离子密度为  $10^{6.07}$ — $10^{6.23} \text{ m}^{-3}$  (蓝色-绿色); 100—200 m 范围内的离子密度为  $10^{6.23}$ — $10^{6.71} \text{ m}^{-3}$  (绿色-红色) 如图 5(b) 所示.

月面电位平稳后 (60 s 时刻) 月面附近 0—200 m 高度空间电位分布如图 6 所示, 月面附近 0—10 m 电位约为  $-40 \text{ V}$ . 空间电位随着高度升高而增大, 在 100 m 处空间电位约为  $-20 \text{ V}$ .

月球表面的月尘颗粒受太阳风中各种粒子的撞击作用. 太阳风中包含电子流和离子流. 电子流

作用于月尘颗粒表面使月尘表面带负电, 离子流作用于月尘颗粒表面使月尘表面带正电. 由于在月球南极区太阳风是水平入射的, 月面的充电主要由太阳风中电子和离子的热运动主导. 由于电子质量远小于离子质量, 而太阳风中的电子和离子温度相同, 因此电子热运动速率远高于离子, 即月面电位达到平衡前, 月面吸收的太阳风电子电流 (远) 大于离子电流, 月面电位降低变为负值. 随着电位进一步降低, 太阳风中的电子被月面负电位排斥, 吸收的电子电流减少, 月面净电流在 0 附近达到动态平衡状态, 此时月面电位基本稳定为  $-40 \text{ V}$ .

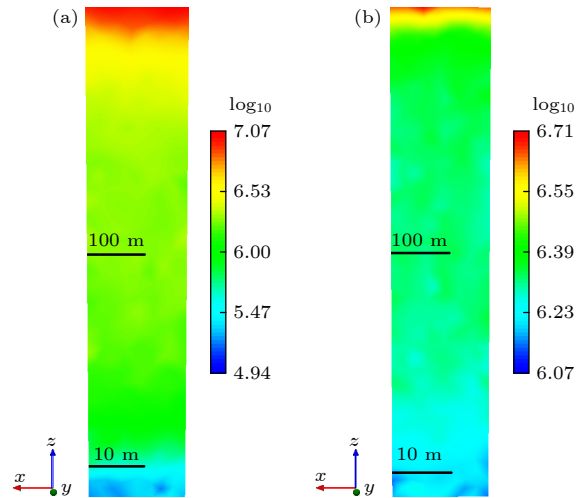


图 5 等离子体空间密度对数分布 (月球南极环境, 单位:  $\text{m}^{-3}$ ) (a) 电子; (b) 离子  
 Fig. 5. Logarithmic distribution of plasma spatial density (lunar south pole environment, unit:  $\text{m}^{-3}$ ): (a) Electrons; (b) ions.

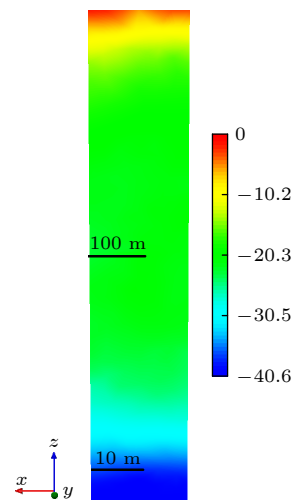


图 6 月面附近电位分布 (月球南极环境, 单位:  $\text{V}$ )  
 Fig. 6. Potential distribution near the lunar surface (lunar south pole environment, unit:  $\text{V}$ ).

### 3.3 带电月尘的空间电荷效应

带电月尘作为月面尘埃等离子体环境中的一种带电粒子, 单个尘埃带电量较高、质量较大, 且大量带电月尘悬浮于月面附近. 因此, 必然会影响到月面附近电位分布. 本节将讨论带电月尘对月面电场和等离子体环境的影响.

此前俄罗斯 Popel 团队<sup>[16]</sup>理论推导的晨昏线环境下月面附近的月尘密度在  $10^4 - 10^5 \text{ m}^{-3}$  量级, 由于晨昏线月面环境与月球南极区的环境相近, 因此该量级范围也可适用于月球南极区. 仿真得到的月尘空间分布结果在理论量级范围内. 选取月面附近月尘密度  $10^5 \text{ m}^{-3}$  量级的情况进行研究. 图 4 为月尘密度对数分布的定性展示, 可以看出, 月尘密度对数分布在水平方向分布均匀. 为了更精确直观地分析尘埃等离子体的时空分布特性, 进一步提取了垂直高度的月尘密度对数分布. 处理得到的结果如图 7 所示, 月面附近 0—1 m 高度范围内月尘密度最高, 为  $1.2 \times 10^5 - 1.3 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ ; 1—10 m 高度范围内月尘密度为  $5 \times 10^4 - 1.2 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ ; 10—200 m 高度范围内为  $7 \times 10^3 - 5 \times 10^{5.4} \text{ m}^{-3}$ .

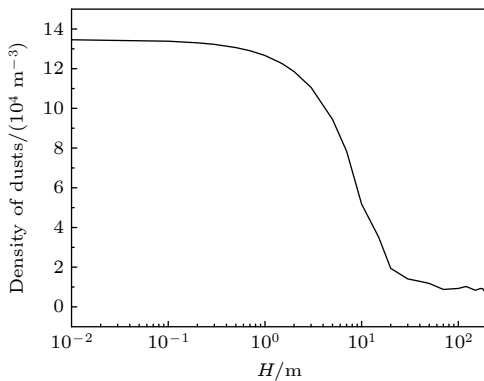


图 7 月尘空间密度分布

Fig. 7. Distribution of lunar dust spatial density.

月面附近空间电位分布如图 6 所示, 图中月面的空间电位值在  $-40 \text{ V}$  左右. Apollo 时期 SIDE 仪器测量的太阳风终止区表面电势为  $-10 - -100 \text{ V}$ , 因此仿真得到的月球南极区的月面电位分布结果较为合理<sup>[30]</sup>. 图 6 为月面附近电位分布的定性展示, 可以看出, 月面附近电位分布在水平方向分布均匀. 为了更精确直观地分析月面附近电位的时空分布特性, 进一步提取了垂直高度的月面附近的电位分布, 并对比了有、无月尘两种情形下月面附近的电位分布情况, 如图 8 所示. 图 8 中黑色曲

线为有月尘的情形, 红色为无月尘的情形. 可以看出, 无论有无月尘, 月球南极区环境下稳定后月面电位均为  $-40 \text{ V}$ . 太阳风等离子体的电子、离子密度在  $10^7 \text{ m}^{-3}$  量级, 其中电子、离子 (主要成分为氢离子) 带电量均为  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ . 因此, 月面附近密度在  $10^5 \text{ m}^{-3}$  量级, 带电量为  $10^{-17} \text{ C}$  的月尘必然对空间电位产生一定影响, 有月尘时空间电位整体上低于无月尘时的情况.

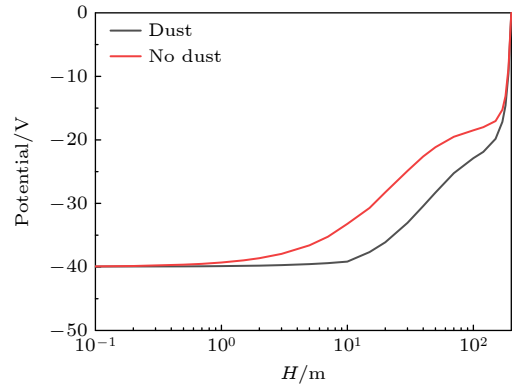


图 8 月尘空间电位分布

Fig. 8. Distribution of lunar dust space potential.

电子和离子从模型上边界 (开放性边界) 进入仿真实空, 其空间分布主要受空间电位分布的影响. 如图 9 所示, 电子受到电位为负的月面施加的库仑 (排斥) 力的影响, 有月尘时在月面附近 0—10 m 范围内的电子密度为  $1.4 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ , 无月尘时为  $1.0 \times 10^5 - 3.5 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ ; 在月面附近 10—100 m 范围内的电子密度为  $1.4 \times 10^6 - 1.6 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$  (有月尘时), 无月尘时为  $3.5 \times 10^5 - 1.8 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ . 根据图 8 和图 9 可以看出, 太阳风中的电子空间分布主要受空间电场调制. 图 9 中电子分布特性主要在月面附近 0—60 m 差距较大. 由图 8 可见, 有月尘时的电

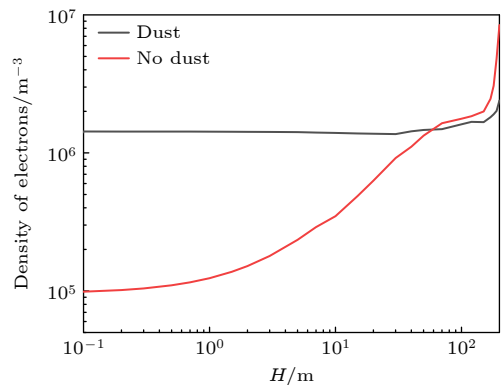


图 9 电子空间密度分布

Fig. 9. Distribution of electron spatial density.

势梯度 (即电场) 较小, 如二者在月面都是 $-40\text{ V}$ ; 而  $10\text{ m}$  高度处有月尘的情况 (黑色线) 空间电位为 $-40\text{ V}$ , 无月尘时为 $-33\text{ V}$ . 因此, 月面附近电场差异导致了图 9 中电子分布差异.

同样地, 如图 10 所示, 离子主要受月面吸引力影响, 有月尘时在月面附近  $0\text{--}100\text{ m}$  范围内的离子密度为  $1.4\times 10^6\text{--}1.7\times 10^6\text{ m}^{-3}$ , 无月尘时为  $1.2\times 10^6\text{--}1.7\times 10^6\text{ m}^{-3}$ .

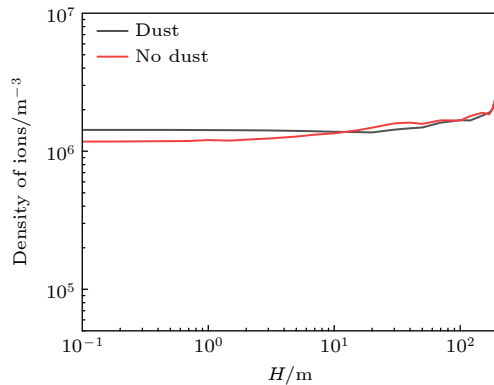


图 10 离子空间密度分布  
Fig. 10. Distribution of ion spatial density.

## 4 结 论

通过 SPIS 仿真模拟与数据分析, 研究了月球南极区  $0\text{--}200\text{ m}$  范围内的等离子体环境、月尘悬浮情况和月表电位分布. 并分析了带电月尘对月表电位分布和太阳风等离子体中的电子和离子的影响, 可以得出以下结论:

1) 月尘密度随高度分布, 越靠近月球表面月尘密度高, 距离月面  $0\text{--}10\text{ m}$  高度范围内, 月尘密度可达  $10^{7.21}\text{--}10^{4.66}\text{ m}^{-3}$ , 随着高度的上升, 月尘密度也会下降,  $10\text{--}200\text{ m}$  高度范围内为  $10^{4.66}\text{--}10^{2.11}\text{ m}^{-3}$ ;

2) 尘埃等离子体中的电子密度分布和离子密度分布随着高度升高而升高, 在月面附近  $0\text{--}100\text{ m}$  范围内的电子密度为  $10^{5.47}\text{--}10^{6.00}\text{ m}^{-3}$ ,  $100\text{--}200\text{ m}$  范围内的电子密度为  $10^{6.00}\text{--}10^{7.07}\text{ m}^{-3}$ ; 离子主要受月面附近电位的影响, 在月面附近  $0\text{--}100\text{ m}$  范围内的离子密度为  $10^{6.07}\text{--}10^{6.23}\text{ m}^{-3}$ ,  $100\text{--}200\text{ m}$  范围内的离子密度为  $10^{6.23}\text{--}10^{6.71}\text{ m}^{-3}$ ;

3) 月球南极附近  $0\text{--}10\text{ m}$  电位约为 $-40\text{ V}$ . 空间电位随着高度升高而增大, 在  $100\text{ m}$  处空间电位约为 $-20\text{ V}$ ;

4) 太阳风中的电子空间分布主要受空间电场调制, 月面附近电场差异导致电子分布差异, 对离子的影响不大.

这些结果提高了对月球南极区环境特点的认知, 在等离子体环境研究的基础上重点研究了带电月尘对等离子体环境的影响. 但同时又带来了一些新的问题. 首先, 如何从根本上降低月面电位对探月活动的影响. 其次, 带电悬浮的月尘应该如何处理. 未来借助更多的实测数据, 将有望得到更为准确的月面电位与月尘悬浮等信息, 有效地了解尘埃等离子体环境, 同时也为研究月球南极环境特点提供更多实测数据.

## 参考文献

- [1] Zhang S S, Wang S J, Li X Y, Li S J, Tang H, Li Y, Yu W 2013 *J. Earth. Sci.* **38** 339
- [2] Gaier J R 2007 *The Effects of Lunar Dust on EVA Systems During the Apollo Missions* NASA Technical Report TM-2005-213610
- [3] Park J, Liu Y, Kihm K D, Hill E, Taylor L A 2006 *Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environment* (Houston: American Society of Civil Engineers) p1
- [4] Horányi M, Szalay J R, Wang X 2024 *Phil. Trans. R. Soc. A.* **382** 20230075
- [5] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, Robertson S 2001 *Geophys. Res. Space Phys.* **106** S343
- [6] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, Robertson S 2002 *Geophys. Res. Space Phys.* **107** SMP 37-1
- [7] Sternovsky Z, Robertson S, Sickafoose A, Colwell J, Horányi M 2002 *J. Geophys. Res. Planets.* **107** 15
- [8] Colwell J E, Robertson S R, Horányi M, Wang X, Poppe A, Wheeler P 2009 *J. Aerosp. Eng.* **22** 2
- [9] Colwell J E, Batiste S, Horányi M, Robertson S, Sture S 2007 *Rev. Geophys.* **45** RG2006
- [10] Wang X, Schwan J, Hsu H W, Grün E, Horányi M 2016 *Geophys. Res. Lett.* **43** 6103
- [11] Popel S I, Zelenyi L M 2013 *J. Plasma Phys.* **79** 405
- [12] Popel S I, Golub' A P, Izvekova Y N, Afonin V V, Dol'nikov G G, Zakharov A V, Petrov O F 2014 *JETP Lett.* **99** 115
- [13] Popel S I, Golub' A P, Zelenyi L M 2014 *Eur. Phys. J. D.* **68** 245
- [14] Popel S I, Golub' A P, Lisin E A, Izvekova Y N, Atamaniuk B, Dol'nikov G G, Zelenyi L M 2016 *JETP Lett.* **103** 563
- [15] Popel S I, Golub' A P, Zelenyi L M, Horányi M 2017 *JETP Lett.* **105** 635
- [16] Popel S I, Zelenyi L M, Dubinskii A Y 2018 *Planet. Space Sci.* **156** 71
- [17] Popel S I, Zelenyi L M 2014 *J. Plasma Phys.* **80** 885
- [18] Anuar A K 2013 *Ph. D. Dissertation* (United Kingdom: Lancaster University)
- [19] Sternovsky Z, Chamberlin P, Horanyi M, Robertson S, Wang X 2008 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **113** A10104
- [20] Robertson S H, Sternovsky Z, Horanyi M 2010 *IEEE. Trans. Plasma. Sci.* **38** 766

- [21] Hartzell C M, Bellan P, Bodewits D, Delzanno G L, Hirabayashi M, Hyde T, Israelsson U 2023 *Acta. Astronaut.* **207** 89
- [22] Xie L H, Zhang X, Li L, Zhou B, Zhang Y, Yan Q, Yu S, Feng Y, Guo D, Yu S 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL089593
- [23] Zhao C X, Gan H, Xie L H, Wang Y, Wang Y J, Hong J Y 2023 *Sci. China Earth Sci.* **66** 2278
- [24] Hess S L G, Sarrailh P, Matéo-Vélez J C, Jeanty-Ruard B, Cipriani F, Forest J, Rodgers D 2015 *IEEE. Trans. Plasma. Sci.* **43** 2799-2807
- [25] Dyadechkin S, Kallio E, Wurz P 2015 *J. Geophys. Res. Space Physics.* **120** 1589
- [26] SPIS-DUST Detailed Design Document and Software User Manual\_v2, Sarrailh P, Hess S, Mateo Velez J C, Jeanty Ruard B, Forest J <https://www.spis.org/software/spis/documentation/> [2024-4-30]
- [27] Halekas J S, Delory G T, Lin R P, Stubbs T J, Farrell W M 2008 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **113** A09102
- [28] Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, Sefton-Nash E 2017 *Icarus.* **283** 300
- [29] De Rosa D, Bussey B, Cahill J T, Lutz T, Crawford I A, Hackwill T, Carpenter J D 2012 *Planet. Space Sci.* **74** 224
- [30] Freeman J W, Ibrahim M 1975 *Lunar Science Institute, Conference on Interactions of the Interplanetary Plasma with the Modern and Ancient Moon* Lake Geneva, Wis, September 30–October 4, 1974 p103

# Characteristics of dust plasma environment at lunar south pole\*

Li Meng-Yao<sup>1)2)#</sup> Xia Qing<sup>1)#</sup> Cai Ming-Hui<sup>1)3)†</sup> Yang Tao<sup>1)</sup>  
Xu Liang-Liang<sup>1)</sup> Jia Xin-Yu<sup>1)</sup> Han Jian-Wei<sup>1)3)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 30 April 2024; revised manuscript received 4 June 2024 )

## Abstract

Unlike the Earth, the Moon lacks is not protected from the atmosphere and global magnetic field, and will be directly exposed to complex radiation environments such as high-energy cosmic rays, solar wind, and the Earth's magnetotail plasma. The surface of the Moon is covered with a thick layer of lunar soil, and the particles in the soil with a diameter between 30 nm–20  $\mu\text{m}$  are called lunar dust. In the complex environments such as solar wind or magnetotail plasma, lunar dust carries an electric charge and becomes charged lunar dust. Charged lunar dust is prone to migration under the action of the electric field on the lunar surface. Charged migrated lunar dust is easy to adhere to the surface of instruments and equipment, resulting in visual impairment, astronauts' movement disorders, equipment mechanical blockage, sealing failure, and material wear, which affects the lunar exploration mission. As an important lunar exploration landing site, the lunar south pole receives special solar radiation and produces a special dust plasma environment due to its special location. In order to provide an environmental reference for lunar south pole exploration, it is necessary to explore the characteristics of the dust plasma environment in the lunar south pole and its impact. In view of the lunar south pole environment, The Spacecraft Plasma Interactions Software (SPIS) software developed by the European Space Agency is used to carry out modelling and simulation in this work. Through the simulation, the logarithmic distribution of the lunar dust space density in a range of 0–200 m at the lunar south pole, the potential distribution near the lunar surface, and the spatial distribution characteristics of plasma electrons and ions are obtained. The obtained lunar dust space density and lunar surface potential are similar to the previous theoretical derivation and field detection data, so the simulation results have high reliability. The spatial potential distribution and the spatial density distribution of electrons and ions in the lunar environment with and without lunar dust are compared. Finally, the conclusions can be drawn as follows. The space potential increases with altitude increasing. The potential at 0–10 m near the lunar south pole is about  $-40$  V, and the space potential at 100 m is about  $-20$  V. The density of lunar dust in an altitude range below 10 m is  $10^{7.22} \text{ m}^{-3}$ – $10^{4.66} \text{ m}^{-3}$ . The electron density in the dust plasma near the lunar surface is  $10^{5.47} \text{ m}^{-3}$ , and the ion density is  $10^{6.07} \text{ m}^{-3}$ , and both increase with altitude increasing. Charged lunar dust affects the spatial distribution of lunar dust, mainly through affecting the distribution of the space electric field, which leads to difference in electron distribution, but has little effect on ions.

**Keywords:** lunar south pole, dust plasma environment, SPIS simulation, lunar surface potential distribution

**PACS:** 52.65.–y, 52.65.Rr

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240599

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42204175).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: [caiminghui@nssc.ac.cn](mailto:caiminghui@nssc.ac.cn)

## 月球南极尘埃等离子体环境特性

李梦瑶 夏清 蔡明辉 杨涛 许亮亮 贾鑫禹 韩建伟

### Characteristics of dust plasma environment at lunar south pole

Li Meng-Yao Xia Qing Cai Ming-Hui Yang Tao Xu Liang-Liang Jia Xin-Yu Han Jian-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 155201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240599

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240599>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多组分尘埃等离子体中非线性尘埃声孤波的传播特征

Propagating characteristics of nonlinear dust acoustic solitary waves in multicomponent dusty plasma

物理学报. 2023, 72(3): 035201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221843>

#### 热尘埃等离子体中(2 + 1)维尘埃声孤波的传播特征

Propagation characteristics of (2 + 1) dimensional dust acoustic solitary waves in hot dusty plasma

物理学报. 2022, 71(9): 095203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210902>

#### 容性耦合硅烷等离子体尘埃颗粒空间分布的二维流体模拟

Two-dimensional fluid simulation of spatial distribution of dust particles in a capacitively coupled silane plasma

物理学报. 2023, 72(16): 165202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230686>

#### 基于Fokker-Planck-Landau碰撞模型的非均匀尘埃等离子体目标散射特性

Scattering characteristics of non-uniform dusty plasma targets based on Fokker-Planck-Landau collision model

物理学报. 2023, 72(6): 060201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222113>

#### 含有非热电子和陷俘离子的复杂等离子体中非线性尘埃声波的传播特征

Propagation characteristics of nonlinear dust acoustic solitary waves in complex plasma with nonthermal electrons and trapped ions

物理学报. 2024, 73(7): 075201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231967>

#### 月球玻璃

Lunar glass

物理学报. 2023, 72(23): 236101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231238>