

Gan Hong, Wang Shijie, Li Xiongyao. Electrostatic transportation of lunar dust: a review. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(2): 135-142

月尘静电迁移研究进展^{*}

甘 红^{1,2} 王世杰¹ 李雄耀¹

1(中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心 贵阳 550002)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 月尘的静电悬浮和迁移是 Apollo 时期留下的最有争议的问题之一。其既是研究月球表面物质演化历史的重要线索,也是探月工程必须考虑的重要因素。月尘在月表环境下易因电子附着、光电效应、二次电子发射等过程带电,并在月球全球性静电场作用下发生迁移运动。但目前对月尘静电迁移过程的认识还不全面,其主要原因在于对月尘静电特性的了解不够准确,对静电迁移过程的地面模拟不够充分以及对月球尘埃环境的探测较为缺乏。未来需进一步开展模拟月尘的研制,月尘静电特性的分析,静电迁移过程模拟以及尘埃环境的探测等工作。

关键词 月球,月表环境,月尘,带电机制,静电迁移

中图分类号 P 148

Electrostatic Transportation of Lunar Dust: A Review

GAN Hong^{1,2} WANG Shijie¹ LI Xiongyao¹

1(Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Electrostatic levitation and transportation of lunar dust had been one of the most interesting and controversial problems since the Apollo era. It is not only significant clues to study the evolution of lunar surface material, but also a key factor which should be considered in lunar mission. On lunar surface, the dust grains are electrostatically charged by electron deposition, photoemission, and secondary electron emission. With the charge processes, an electrostatic field might be formed on lunar near-surface. As a result, dust grains could be lifted. However, the electrostatic levitation and transportation process of lunar dust grains are still not clear. Shortage in comprehension of electrostatic properties of lunar dust grains, simulation of electrostatic levitation and transportation, and landing detection of lunar dust environment might be the main factors which limit the further knowledge of electrostatic levitation and transportation of lunar dust grains. To satisfy the need

^{*} 国家自然科学基金项目 (40803019, 40904051), 探月工程 (TY3Q20110029), 国家高技术研究发展计划项目 (2010AA122204) 和中国科学院地球化学研究所前沿领域项目共同资助
2012-01-16 收到原稿, 2012-09-17 收到修定稿
E-mail: ganh1988@yahoo.cn, lixiongyao@vip.skleg.cn

of lunar science and future lunar missions, development of lunar dust simulant, measurement of electrostatic properties of lunar dust, simulation of electrostatic levitation and transportation, and detection of lunar dust environment are important aspects in the study of lunar dust in the future.

Key words Moon, Lunar surface environment, Lunar dust, Charging mechanism, Electrostatic transportation

0 引言

月壤中粒径小于 $20\mu\text{m}$ 的月尘, 在月表环境中易发生迁移运动. 20 世纪 60 年代, Surveyor 5-7^[1], Lunokhod 2^[2] 以及 Apollo 8, 10, 15-17 都探测到由于月尘运动折射出的辉光现象^[3], 1994 年发射的 Clementine^[3-4] 再次证实了辉光现象的存在.

月尘的静电悬浮和迁移是 Apollo 时期留下的最有争议的问题之一^[5]. 月尘的迁移运动是研究月表物质演化历史的重要线索^[6-7], 同时也是探月工程必须考虑的关键因素^[8]. 月表物质的分布特征及其演化历史是月球主要的基础科学问题, 除小天体撞击、太阳风以及宇宙射线等太空风化过程改造外, 月表物质长期的横向迁移运动也是改变其分布特征的一个因素, 因此, 研究月尘的运动迁移对研究月表物质演化历史具有重要的科学意义. 另外, 月尘是月面探测和月面作业的重大安全隐患, 其危害性比想象的更为严重^[9]. 在 Apollo 探月活动中, 月尘粘附于仪器和宇航服的表面, 导致表面磨损、机械阻塞、密封失效、散热性能退化以及仪表读数错误等问题^[10-12]. 此外, Apollo 11 航天员指出, 由于月尘弥漫, 难以看清月面情况^[13], Apollo 12 登月舱甚至因此落入一个小撞击坑中^[14]. 不仅如此, 月尘给航天员健康造成威胁. 月面活动时, 月尘导致航天员产生咳嗽、流泪、打喷嚏等过敏症状, 严重时甚至堵塞肺泡引起呼吸困难, 长期吸入易诱发各种呼吸道、内脏器官癌变^[15].

Apollo 时期对月尘负面影响的报道不胜枚举. 为确保 Apollo 计划顺利实施, 美国早在 20 世纪五六十年代就已针对月尘环境的成因、环境效应及其防护进行研究, 但至今仍有大量问题有待进一步解决. 近年来, 随着新一轮探月热潮的到来, 月尘相关环境问题再次成为关注焦点^[16]. 随着中国探月工程的推进, 无人或载人的月面探测已成为必然趋势, 月尘的运动及其影响是现阶段亟待解决的关键问题.

引起月尘运动的因素包括自然因素和人为因素.

自然因素主要包括小天体撞击和静电作用; 人为因素主要包括航天员的行走、月球车的行驶、航天器的着陆和起飞等. 小天体撞击和静电作用引起的月尘运动一直存在且广泛分布. 虽然每年约有 10^6 kg 的微陨石撞击月表, 溅射物质更约是其本身质量的 1000 倍^[17], 但其所引起的月尘迁移量远小于静电作用. 静电作用是月尘运动的主要因素, 尘埃可从月表迁移至几千米^[18] 甚至 100 km 的高空^[19]. 因此, 研究月尘运动的关键在于深入认识静电迁移过程, 进而了解月表物质的分布和演化特征^[7]. 同时, 鉴于月尘的大规模运动对月表物质遥感探测^[6,20-21] 和月基天文观测^[22-23] 具有一定影响, 所以, 认识月尘的静电迁移过程有利于月表物质遥感数据解译和月基天文观测站的选址和选时.

1 月尘的静电迁移机制和模型

1955 年, Gold^[24] 提出静电力是月尘迁移的可能原因. Apollo 时期, 大量证据表明月尘悬浮迁移的主要原因在于月尘带电和近月表存在全球性静电场^[25]. 月尘直接暴露于月表环境, 长期遭受太阳风和宇宙射线的入射轰击, 主要带电过程包括带电粒子在月尘颗粒表面的附着、二次电子发射、光电效应和摩擦作用等.

1.1 月尘带电过程

(1) 附着带电. 月尘最为普遍的带电机制是持续的太阳风和高能粒子将电子从光照区的月尘颗粒中轰击出来, 并在黑暗区尘埃颗粒表面附着沉积使之带电^[26-27]. 电子、离子由于热运动或定向流动撞击尘埃表面, 使尘埃不断收集离子、电子而带电. 电子附着在颗粒表面时, 月尘带负电; 离子等附着在颗粒表面时, 月尘带正电. 由于电子的热运动速度远大于其他粒子速度, 因此附着带电往往使月尘带负电.

(2) 二次电子发射带电. Andereg 等证实月表静电场和月尘带电均与二次电子发射有关^[28]. 在月

表环境中, 电子流或离子流不断轰击颗粒表面, 使之发射二次电子, 失去电子的月尘带正电. 月尘的二次电子发射带电与颗粒粒径^[29]、颗粒表面电势^[29]及入射电子能量^[29-31]等有关. Abbas 等^[29]研究表明, 对于带负电的尘埃颗粒, 由二次电子发射与初级电子吸附共同作用, 最终达到平衡电势; 对于带正电的尘埃颗粒, 二次电子发射更为复杂, 在入射电子能量较低(约 10~25 eV)的情况下不断充电产生高的表面电势; 在入射电子能量约 100 eV 的情况下, 尘埃颗粒具有低的表面电势而不断放电.

(3) 光电效应带电. 月尘颗粒主要的光电效应带电过程包括紫外辐射和 X 射线等引起的光电子发射. 在太阳紫外线和 X 射线的照射下, 月尘颗粒被光子激发, 内部电子吸收光子能量, 克服原子核对其束缚, 逸出月尘颗粒表面成为光电子, 从而使颗粒整体呈正电. Apollo 14 的带电颗粒月球环境实验 (Charged Particle Lunar Environment Experiment, CPLEE) 得到月尘光电发射产生了 40~200 eV 能量范围的低能电子流^[28]. 月尘的光电效应产率研究表明其产率与颗粒粒径^[26,32-33]、入射光能量^[28]等有关. Feuerbacher 等^[28]对 Apollo 14 样品研究得出, 在 90 nm 波长的光照下获得样品的最大光电产率仅 7%, 主要归因于月尘多孔表面对光电子的再吸收.

(4) 摩擦带电. 月尘颗粒因组份、结构、表面形貌、温度等差异而具有不同的电子束缚能, 在碰撞摩擦过程中, 电子束缚能力较弱的颗粒往往失去电子带正电, 而电子束缚能力较强的颗粒得到电子带负电. 实验表明^[34], 电荷分离过程中, 小颗粒趋于带负电, 大颗粒趋于带正电. Sickafoose 等^[35]利用美国国家宇航局 (NASA) 下属的约翰逊空间中心 (JSC) 主持研制 JSC-1 模拟月壤进行颗粒间的摩擦实验, 结果表明, 通过颗粒间的摩擦可使半径约 50 μm 的单颗粒获得约 10^5 个电子电量. 真空环境中的地面实验表明, 模拟月壤颗粒间的摩擦力增大, 带电量的增加幅度从 1.5 倍至 60 倍不等^[36]. 因此, 在月球高真空环境下, 月尘颗粒之间的摩擦带电可能比地面实验更加显著.

此外, 热发射、离子溅射等也会使月尘颗粒带电, 但规模较小可忽略. 月尘颗粒带电会引起许多伴生效应, 例如带同种电荷的颗粒相互排斥, 带异种电荷的颗粒相互吸引并凝聚, 这取决于月尘的基本特性及周围环境, 尤其是静电场环境.

带电尘埃迁移受月表静电场环境的强烈影响^[37]. 月表静电势由注入月表的光电子流、二次电子流、等离子体电子流和等离子体离子流等共同决定^[38-39], 月球光照区主要带电机制包括附着带电、光电效应、二次电子发射及离子溅射等, 但光电效应占主导, 光电流强度是粒子流和电子流的几个数量级或者更多^[40]. 其中, 波长小于 200 nm 太阳紫外辐射所诱导的光电发射是月尘带电的最主要过程^[26,41]. 在太阳紫外线和 X 射线等光电作用下, 月表物质不断发射电子, 使月表带正电. 由于月表电势为正, 且发射的光电子平均能量不足以克服静电力的作用, 发射的大多数电子返回月表, 在月表上方形成非中性等离子体光电子层^[42]. 当发射电子与返回电子数量相当时, 月表电势不再变化, 此处的月尘带正电. 光电子层与月表之间形成垂向电场, 其稳定电势在 +5 至 +10 V 之间^[40]. 当月球进入地球磁尾时, 地球磁场屏蔽太阳风, 月表物质发射的电子在月球静电场和地球磁场的耦合场作用下运动, 在月球光照区可产生高达 +200 V 的电势^[43], 但其德拜半径始终保持在米级^[39-40]. 在月球黑暗区, 带电粒子在颗粒表面的附着是其最主要的带电机制, 此外, 二次电子发射带电作用显著, 特别是在月球穿越地球磁尾过程中^[28]. 由于电子热运动速率远大于质子和离子的热运动速率, 来自于太阳风、光照区光电效应和二次电子发射的自由电子在月表黑暗区大量聚集, 使月表电势为负, 此处月尘带负电. 高层准中性等离子体和月表间形成垂向电场, 德拜半径可延伸至约 1 km 高度^[39,43], 稳定电势一般在 -35 V 至 -100 V^[39,40,44], 且越接近月表, 电势增加越显著^[42]. 但当进入地球磁尾, 月球黑暗区电势可达 -500 V^[39,45-46], 在太阳活动极大年甚至可达 -4.5 kV^[47-48]. 光照区电势为正, 黑暗区电势为负, 在晨昏线处形成强烈的横向电场^[49-50]. 即使在月球光照区, 由于地形遮挡也会形成类似于晨昏线处的局部横向电场. 月尘在电场作用下, 离开月表, 发生水平或垂向迁移, 甚至逃逸出月球^[51].

1.2 静电迁移模型

近年, 对月尘在光照区和晨昏线处的静电迁移开展了部分理论研究^[22,49,51-53]. 目前最为接受的月尘静电迁移模型是动态喷泉模型^[22]. 早期的理论模型^[54]解释了距月表大约 10 cm 范围内的微米级月尘颗粒在局部电场中的悬浮, 但并不能解释亚微米级颗

粒在约 100 km 高度的悬浮. 2006 年, Stubbs 等^[22] 基于探测结果和地面实验提出动态喷泉模型 (见图 1), 认为尘埃颗粒一旦获得足够电量, 静电力克服重力和内聚力, 尘埃即离开月表, 在月表近电场中加速运动至飞离德拜半径区域. 在德拜半径外, 月尘可视作等离子体, 不显电性. 因此, 尘埃在重力作用下沿抛物线轨迹运动, 并返回月表. 动态喷泉模型得出月尘迁移的最大高度与月尘粒径和月面的太阳天顶角有关, 成功解释了早期模型无法解释 100 km 高度亚微米级尘埃运动的问题. 但是, 该模型进行了部分假设, 且并未强调静电场与地球磁场耦合作用下带电尘埃的运动特征.

以单颗粒尘埃为研究对象, 假设颗粒为理想球形, 且静止在月表, 忽略颗粒形态对带电能力的影响及尘埃颗粒间的内聚力. 事实上, 月尘颗粒形状极不规则, 所带电荷在颗粒表面非均匀分布, 直接影响到尘埃颗粒的带电能力. 与地球不同, 在高真空、微重力的环境中, 尘埃颗粒间相互作用力比地面实验室测得的数值高得多, 例如范德华力高出两个数量级^[16]. 动力喷泉模型中忽略的内聚力决定了尘埃静电迁移的基本条件和初始速度, 在尘埃静电迁移模型中必须

加以考虑. 此外, 在动态喷泉模型中, 发生静电迁移的月尘最初都是静止的, 而在月球环境下, 微陨石速度为 $10 \sim 72 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[17], 并高速轰击月表, 因微陨石轰击溅射的月尘在月球全球性电场中再加速, 迁移的实际高度可能会比该模型得出的迁移高度大得多, 甚至可被加速到月球的逃逸速度^[55], 逃离月球的引力范围, 成为宇宙尘埃的一部分.

不同组份的月尘, 其电学性质也存在一定差异, 这直接影响到月尘的静电迁移. 不同矿物组成的月尘颗粒, 其电学性质不同. 例如, 胶结玻璃是月尘的重要成分, 其组成极不均一, 可能是纯斜长石, 也可能是橄榄石、辉石和玻璃等多种物质的胶结物, 特别是其中含有大量的太阳风挥发份逸散形成的小泡及大量太阳风粒子还原生成的 Fe^0 , 对月尘的电学甚至光学都有明显影响. 不考虑月尘颗粒成分和表面形态的影响, 单颗粒尘埃碰撞吸积成多颗粒尘埃时, 由于比表面积发生变化, 其带电能力也会发生改变. 单颗粒所带电荷会因尘埃的吸积作用而减少^[22], 电场对尘埃的作用力发生改变, 从而改变其迁移特征.

动态喷泉模型并未强调地球磁场对月表静电场和月尘迁移的影响. 约 1/4 的月球轨道处在地球磁

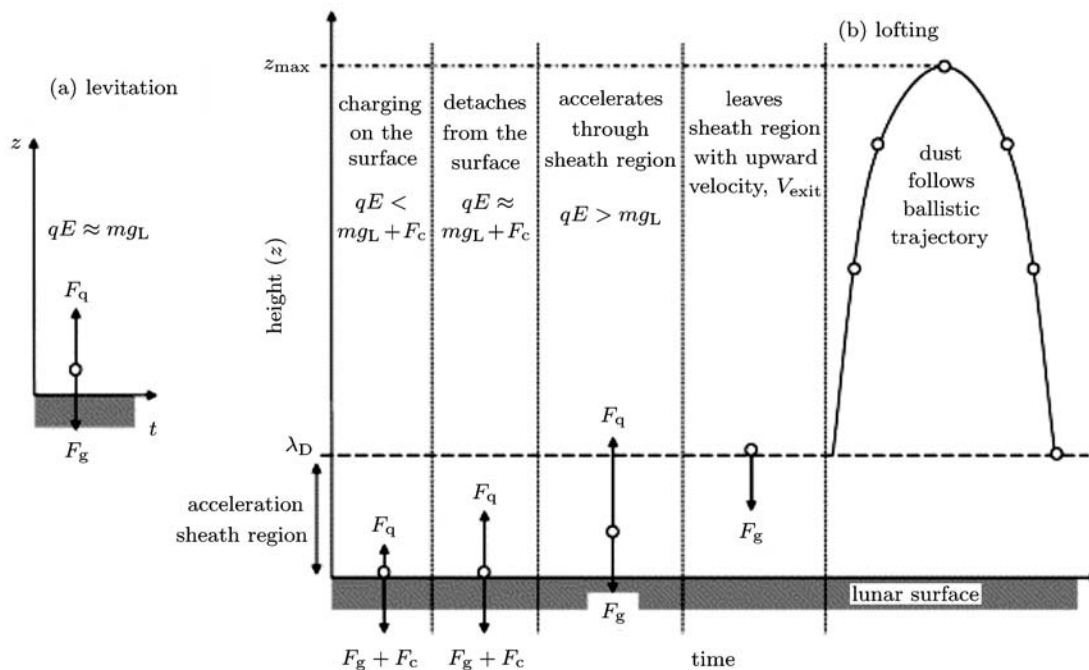


图 1 月尘静态悬浮模型和动态喷泉模型对比

Fig. 1 Schematic comparing (a) the static levitation concept with (b) the evolution of a dust grain in dynamic fountain model

层等离子体环境中, 由于地球磁层等离子体比太阳风更热更稀薄, 因此, 月球一旦进入地球磁层, 其表面电势将发生显著变化^[39], 月球黑暗区电势可达 -600 V . 在极端条件下, 月球黑暗区的电势甚至可增加到约 -5 kV , 进而改变月尘的迁移特性.

综上所述, 月尘的静电迁移机制和过程已具有一定理论基础和地面实验验证, 但更进一步的认识尚存在较多不足, 在理论上有待进一步研究和探讨, 在实证上有待新的探测数据和地面实验验证.

2 存在问题

2.1 月尘的静电特性

静电特性决定了月尘的行为^[15,56-57]. 月表尘埃颗粒间的相互作用极为复杂, 这取决于环境条件、矿物组成及电磁学性质等^[54,58]. 静电迁移作为月尘迁移运动的重要过程, 其自身静电特性是认识静电迁移的关键. 为深入了解月尘的静电迁移过程, 须先解决单颗粒月尘所能累积的静电荷量, 月尘颗粒累积静电荷的能力与其组成和结构等的关系, 静电荷在颗粒表面的分布以及静电荷的维持时间等一系列问题, 对此目前尚未取得较好的认识.

为更好地指导月尘迁移的实验研究, 需要深入认识月尘的静电性质^[8]. 月尘静电性质的基本参数主要包括^[57,59]: 体电阻系数、电荷衰减、荷质比及介电性质. 体电阻系数决定了月尘得失电荷的能力, 电荷衰减可给出月尘电荷转移所需时间, 荷质比指示在具体过程中月尘可能获得的电荷数量, 介电性质用来度量月尘可极化的能力. 实际探测发现, 漂浮在远离月表高层空间的尘埃通常为纳米级颗粒, 而颗粒较大的月尘则趋于在更低层空间运动迁移. 除自身重力作用外, 从理论上分析, 颗粒的比表面积、矿物和化学成分等都会对其运动特征产生重要影响. 粒径越小、形态越复杂, 其比表面积越大, 积累的电荷可能越多; 非导体的辉石、橄榄石等硅酸盐矿物的电阻系数大于半导体的钛铁矿等氧化物矿物, 前者表面积累电荷的保持时间可能更长. 因此, 要更好地认识月尘静电性质, 还需针对不同矿物和化学成分以及不同颗粒大小和形态的月尘进行详细分析.

2.2 地面实验模拟

早在 20 世纪 60 年代人们就已探测到月尘的迁移运动^[60], 并认识到月尘对航天员健康和月球探测

活动存在严重影响. 但有关月尘迁移运动的相关地面模拟实验^[34-35,49,55,61-66]直到 21 世纪初才略有涉及, 至今仍存在大量问题有待解决. 目前有关月尘的地面模拟实验主要集中在尘埃环境模拟, 侧重于尘埃运动的危害、机理和工程防护研究, 而月尘在复杂月球静电场和地球磁场耦合作用下的带电机制和运动迁移过程研究尤为缺乏.

开展尘埃环境实验模拟研究的单位主要包括美国科罗拉多月尘与大气研究中心 (Colorado Center for Lunar Dust and Atmospheric Studies, CCLDAS) 及 NASA 马歇尔空间飞行中心 (Marshall Space Flight Center, MSFC)、戈尔德空间飞行中心 (Goddard Space Flight Center, GSFC) 和约翰逊航天中心 (JSC) 等, 内容涉及月尘对航天材料和仪器设备的磨蚀损坏^[10,12], 月尘对航天员生命健康的威胁^[67], 航天材料、机械部件在月球尘埃模拟环境中的测试^[68]以及防尘除尘技术的开发^[69]等.

而仅有 CCLDAS 和 MSFC 通过在真空环境中添加外加电场、紫外光源、电子枪等模拟静电场中的光电效应^[28,32,70]、二次电子发射^[71]、磨擦作用^[34-35]等过程, 研究月尘的带电机制和迁移机制. 但这些工作都未能较好地探讨月尘在复杂月球静电场和地球磁场耦合作用下的运动迁移机制.

另外, 月尘是在太阳风、宇宙射线长期共同作用下形成的, 地面模拟环境条件下, 高仿的月尘模拟样品难以获得, 这也是月尘地面模拟实验研究的主要制约因素. 目前广泛使用的模拟月壤 JSC-1 和明尼苏达州模拟月壤 (Minnesota Lunar Simulant, MLS-1), 其化学成分和矿物组成与月尘基本一致, 但粒度、形态、电学性质等与月尘仍存在较大差异^[8,72], 而这些恰好是影响月尘静电迁移运动的重要因素. 因此, 研制与月尘具有相似粒度、粒形等的模拟月尘已成为月尘静电迁移地面模拟研究的迫切需要.

2.3 月球尘埃环境探测

Apollo 11, 12, 14, 15, 17 上搭载了月尘探测实验 (Dust Detector Experiments, DDEs), 对月尘活动进行了四千万次的直接测量^[73]. Apollo 11 主要进行测试飞行, Apollo 12, 14-17 进行了月球尘埃环境探测. 此外, Apollo 17 还在着陆点开展了月球溅射物和陨石 (LEAM) 实验^[58], 目的在于测定微陨石及微陨石溅射物、星际尘埃、彗星碎片等的速度、能量和运动方向, 并期望提供月尘的物理特征信息, 从月尘

与月表气体和太阳风相互作用的角度解决航天员安全问题. 通过 LEAM 实验, 测得月壳的电性质, 并获得月尘运动的直接证据, 即晨线上大量的高速粒子自东向西运动.

虽然, 已有探测证实了月尘迁移运动的存在, 但目前月尘迁移运动的具体探测数据还极为欠缺, 包括运动尘埃粒径、质量、组份、速度、电荷量、月表静电场等的直接测量. 为了解月球尘埃环境和尘埃运动迁移特征, NASA 计划 2013 年发射月球大气和尘埃环境探测器 (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE), 搭载月尘实验室 (Lunar Dust Experiment, LDEX) 专门探测月球尘埃^[17,40], 主要测量尘埃颗粒大小、质量、密度、速度和撞击频率等参数^[40].

长远来看, 尘埃环境已成为月球科学研究和工程探测的重要对象, 为进一步了解月尘的静电迁移机制, 需对月球的尘埃环境进行深入探测. 除探测运动尘埃的粒径、质量、组份、速度、电荷量等基本参数外, 月尘密度等随时间或空间的变化规律, 地球磁场、太阳活动等影响也是全面认识月尘环境的重要方面.

3 展望

随着航天技术的日趋成熟和月球探测的不断发展, 月尘迁移运动已成为解决月表物质演化过程的重要线索, 同时也是开展月尘工程防护技术研究及实施工程探测的重要基础. 然而, 目前对月尘迁移运动的认识还很有限, 仅认识到月表由于静电作用存在月尘的大范围迁移, 对其影响因素和迁移过程尚没有较好认识, 关键的制约因素包括, 对月尘静电特性的了解不够准确, 对静电迁移过程的地面模拟实验不够充分以及对真实月球尘埃环境的探测还较为缺乏. 随着月表物质演化问题的进一步深入和月球探测的进一步发展, 月尘的静电迁移过程将受到更多关注, 包括与之密切相关的模拟月尘研制、月尘静电特性分析、静电迁移过程模拟以及尘埃环境探测等.

参考文献

- [1] Rennilson J J, Criswell D R. Surveyor observations of lunar horizon-glow [J]. *Earth Moon Planets*, 1974, **10**(2):121-142
- [2] Severny A B, Terez E I, Zvereva A M. The measurements of sky brightness on Lunokhod-2 [J]. *Earth Moon Planets*, 1975, **14**(1):123-128
- [3] Zook H A, McCoy J E. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(11):2117-2120
- [4] Zook H A, Potter A E. The lunar dust exosphere and Clementine lunar horizon glow [C]//26th Lunar and Planetary Science Conference, 1995, **26**:1577-1578
- [5] Gold T, Williams G J. Electrostatic transportation of dust on the moon [C]//Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space, the 6th ESLAB Symposium. Noordwijk, 1973, **37**:557-560
- [6] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, *et al.* Experimental levitation of dust grains in a plasma sheath [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A11):1408
- [7] Liu Y, Taylor L A. Characterization of lunar dust and a synopsis of available lunar simulants [J]. *Planet. Space Sci.*, 2011, **59**(14):1769-1783
- [8] Horányi M, Walch B, Robertson S, *et al.* Electrostatic charging properties of Apollo 17 lunar dust [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(E4):8575-8580
- [9] Heiken G H, Vaniman D T. Lunar Sourcebook-A User's Guide to the Moon [M]. New York: Cambridge University Press, 1991
- [10] Gaier J R. The Effects of Lunar Dust on EVA Systems During the Apollo Missions [R]. NASA/TM-2005-213610, 2005
- [11] Wagner S A. The Apollo Experience Lessons Learned for Constellation Lunar Dust Management [R]. NASA/TP-2006-213726, 2006
- [12] Gaier J R, Jaworske D A. Lunar Dust on Heat Rejection System Surfaces: Problems and Prospects [R]. NASA/TM-2007-214814, 2007
- [13] Low G M. Apollo 11 Mission Report [R]. NASA-TM-X-62633, MSC-00171, 1969
- [14] McDivitt J A. Apollo 12 Mission Report [R]. NASA-TM-X-74200, MSC-01855, 1970
- [15] Buhler C R, Calle C I, Mantovani J G, *et al.* Test Method for In Situ Electrostatic Characterization of Lunar Dust [C]//IEEE Aerospace Conference, 2007. 1-19
- [16] Cheetham B W. Modeling lunar dust transport and surface interaction [R]. NASA Contractor Report 4404, 2008
- [17] Grün E, Horányi M, Sternovsky Z. The lunar dust environment [J]. *Planet. Space Sci.*, 2011, **59**(14):1672-1680
- [18] Calle C I. Measuring electrostatic phenomena on Mars and the Moon [C]//The Institute of Electrostatics Japan Annual Meeting. Tokyo: Institute of Electrostatics Japan, 2001. 169-279
- [19] McCoy J E, Criswell D R. Evident for a high altitude distribution of lunar dust [C]//5th Lunar Science Conference. Houston, Texas: Geochemica and Cosmochimica Acta, 1974, **3**:2991-3005

- [20] Garrick-Bethell I, Head J W, Pieters C M. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls[J]. *Icarus*, 2011, **212**(2):480-492
- [21] Richard D T, Glenar D A, Stubbs T J, *et al.* Light scattering by complex particles in the Moon's exosphere: Toward a taxonomy of models for the realistic simulation of the scattering behavior of lunar dust[J]. *Planet. Space Sci.*, 2011, **59**(14):1804-1814
- [22] Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. A dynamic fountain model for lunar dust[J]. *Adv. Space Res.*, 2006, **37**(1):59-66
- [23] Johnson S W, Taylor G J. Environmental effects on lunar astronomical observatories[C]//2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, 1992: 329-335
- [24] Gold T. The lunar surface[J]. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, 1955, **115**:585-604
- [25] Atkinson Nancy. Lunar dust transport still a mystery [EB/OL]. 2010, <http://www.physorg.com/news/2010-12-lunar-mystery.html>
- [26] Abbas M M, Tankosic D, Craven P D, *et al.* Lunar dust charging by photoelectric emissions[J]. *Planet. Space Sci.*, 2007, **55**(7/8):953-965
- [27] Zoltaán S, Horányi M, Robertson S. Charging of dust particles on surfaces[J]. *J. Vac. Sci. Tech.*, 2001, **19**(5):2533
- [28] Feuerbacher B, Andereg M, Fitton B, *et al.* Photoemission from lunar surface fines and the lunar photoelectron sheath[C]//3rd Lunar Science Conference: Supplement 3, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, **3**. 2655-2663
- [29] Abbas M M, Tankosic D, Craven P D, *et al.* Lunar dust grain charging by electron impact: complex role of secondary electron emissions in space environments[J]. *Astrophys. J.*, 2010, **718**(2):795-809
- [30] Němeček Z, Pavlů J, Afrkov J, *et al.* Lunar Dust Grain Charging by Electron Impact: Dependence of the Surface Potential on the Grain Size[J]. *Astrophys. J.*, 2011, **738**(1):14
- [31] Halekas J S, Delory G T, Lin R P, *et al.* Lunar Prospector measurements of secondary electron emission from lunar regolith[J]. *Planet. Space Sci.*, 2009, **57**(1):78-82
- [32] Abbas M M, Tankosic D, Craven P D, *et al.* Photoelectric emission measurements on Apollo 17 lunar dust grains[C]//37th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: Lunar and Planetary Institute (LPI), 2006, 1415
- [33] Ignatov A M. Photoelectric charging of dust grains[J]. *Plasma Phys. Rep.*, 2009, **35**(8):647-650
- [34] Forward K M, Daniel J L, Sankaran R M. Triboelectric charging of lunar regolith simulant[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A10109
- [35] Sickafoose A A, Colwell J E, Robertson H S. Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A5):8343-8356
- [36] Nakagawa M, Agui J H. The Moon as a beach of fine powders[R]//The Lunar Regolith Simulant Materials Workshop. Madison: Marshall Space Flight Center, 2005, 19-20
- [37] Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. Impact of dust on lunar exploration[C]//Dust in Planetary Systems. Kauai, Hawaii: ESA, 2007. 239-243
- [38] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, Robertson S. Photoelectric charging of dust particles in vacuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(26):6034-6037
- [39] Stubbs T J, Halekas J S, Farrell W M, *et al.* Lunar surface charging: A global perspective using lunar prospector data[C]//Dust in Planetary Systems. Kauai, Hawaii: ESA, 2005. 181-184
- [40] Delory G T. Electrical phenomena on the Moon and Mars[C]//ESA Annual Meeting on Electrostatics, 2010, A1. 1-18
- [41] Sternovsky Z, Chamberlin P, Horanyi M, *et al.* Variability of the lunar photoelectron sheath and dust mobility due to solar activity[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, A10
- [42] Mall U, Borisov N. Electric potential distribution on the nightside of the Moon[C]//32nd Lunar and Planetary Science Conference, 2001. 1538
- [43] Dove A, Robertson S, Wang X, *et al.* Characterization of a Laboratory simulated lunar photoelectron sheath[C]//42nd Lunar and Planetary Science Conference, 2011
- [44] Halekas J S, Mitchell D L, *et al.* Evidence for negative charging of the lunar surface in shadow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(10):1435-1439
- [45] Halekas J S, Delory G T, Lin R P, *et al.* Lunar prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, A9
- [46] Colwell J E, Robertson S R, Horányi M, *et al.* Lunar dust levitation[J]. *J. Aerosp. Eng.*, 2009, **22**(1):2-9
- [47] Halekas J S, Delory G T, Lin R P, *et al.* Lunar surface charging during solar energetic particle events: Measurement and prediction[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A5
- [48] Halekas J S, Delory G T, Brain D A, *et al.* Extreme lunar surface charging during solar energetic particle events[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: 1-5
- [49] Wang X, Horányi M, Sternovsky Z, *et al.* A laboratory model of the lunar surface potential near boundaries between sunlit and shadowed regions[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**(16):1-5
- [50] Borisov N, Mall U. Charging and motion of dust grains near the terminator of the moon[J]. *Planet. Space Sci.*, 2006, **54**(6):572-580
- [51] Yamamoto S, Nakamura A M. A new model of continuous dust production from the lunar surface[J]. *Astron. Astrophys.*, 2000, **356**:1112-1118
- [52] Wang J, He X, Cao Y, *et al.* Modeling electrostatic levitation of dust particles on lunar surface[J]. *IEEE Trans. Plas. Sci.*, 2008, **36**(5):2459-2466

- [53] Messmer P, Horányi M, Sternovsky Z, *et al.* Kinetic simulations of the lunar plasma environment with the VORPAL framework[C]//NLSI Lunar Science Conference. NASA Ames Research Center, Moffett Field, California: LPI Contribution, 2008. 1415
- [54] Criswell D R. Horizon-glow and the motion of lunar dust[C]//Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space, the 6th ESLAB Symposium. Noordwijk: D. Reidel Publ. Comp., 1973. 545-556
- [55] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, *et al.* Experimental levitation of dust grains in a plasma sheath[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A11), 1408
- [56] Horányi M, Walch B, Robertson S. Electrostatic charging of lunar dust[C]//29th Lunar and Planetary Science Conference, 1998. 1527
- [57] Calle C I. Electrostatic Characterization of Lunar Dust[R]. KSC Technology Development and Application 2006-2007, 2006
- [58] Berg O E, Wolf H, Rhee J, *et al.* Lunar soil movement registered by the Apollo 17 cosmic dust experiment[C]//31st Interplanetary Dust and Zodiacal Light. Springer-Verlag, Berlin, 1976. 233-237
- [59] Afshar-Mohajer N, Brian D, Wu C Y, *et al.* Electrostatic particle collection in vacuum[J]. *Adv. Space Res.*, 2011, **48**(5):933-942
- [60] Singer S F, Walker E H. Electrostatic dust transport on the lunar surface[J]. *Icarus*, 1962, **1**(1-6):112-120
- [61] Wang X, Colwell J, Horanyi M, *et al.* Charge of dust on surfaces in plasma[J]. *IEEE Trans. Plas. Sci.*, 2007, **35**(2):271-279
- [62] Wang X, Horányi M, Robertson S. Experiments on dust transport in plasma to investigate the origin of the lunar horizon glow[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A05130
- [63] Wang X, Horányi M, Robertson S. Investigation of dust transport on the lunar surface in a laboratory plasma with an electron beam[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**:1-6
- [64] Sternovsky Z, Horányi M, Gruen E, *et al.* Investigation of near-surface Lunar Dust Transport in the Laboratory[C]//38th COSPAR Scientific Assembly. Bremen: COSPAR, 2010
- [65] Wang X, Robertson S, Horányi M, *et al.* Dust charging and transport on surfaces[J]. *Am. Inst. Phys.*, 2011, **1379**:142-145
- [66] Wang X, Horányi M, Robertson S, *et al.* Dust transport on a surface in plasma[J]. *IEEE Trans. Plas. Sci.*, 2011, **39**(11):2730-2731
- [67] Cooper B L, McKay D S, Riofrio L M, *et al.* Lunar dust separation for toxicology studies[C]//41st Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas, 2010. 2297
- [68] Christoffersen R, Lindsay J F, Noble S K, *et al.* Lunar Dust Effects on Spacesuit Systems[R]. NASA/TP-2009-214786, 2009
- [69] Calle C I, Mazumder M K, Immer C D, *et al.* Controlled particle removal from surfaces by electrodynamic methods for terrestrial, lunar, and Martian environmental conditions[J]. *J. Phys.*, 2008, **142**(1):012 073
- [70] Sickafoose A A, Colwell J E, Hornyi M, *et al.* Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A5):8343-8356
- [71] Anderegg M, Feuerbacher B, Fitton B, *et al.* Secondary electron emission characteristics of lunar surface fines[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1972, **3**:2665-2669
- [72] Willis R F, Anderegg M, Feuerbacher B, *et al.* Photoemission and Secondary Electron Emission from Lunar Surface Material[C]//Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space, the 6th ESLAB Symposium. Noordwijk: Astrophysics and Space Science Library, 1973. **37**:389
- [73] O'Brien B J. Lunar dust and dust transport: "Basics" from Apollo dust detector experiments[C]//Lunar Dust, Plasma and Atmosphere: The Next Steps, 2010