

doi:10.3799/dqkx.2013.033

月尘的性质及危害评述

张森森^{1,2}, 王世杰¹, 李雄耀^{1*}, 李世杰¹, 唐红¹, 李阳^{1,2}, 于雯^{1,2}

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: 月尘是广泛分布于月球表面的微小颗粒, 大小约在 30 nm~20 μm 之间, 95% 以上小于 2 μm, 中值粒径约为 100~300 nm, 形态复杂多变, 以玻璃小球、气泡构造、棱角状碎片为主, 含有大量纳米颗粒金属铁和玻璃质, 玻璃质含量超过 50%, 尤其是 <2 μm 的部分中, 玻璃质含量高达 80%~90%, 化学成分与月壤基本类似, 在不同地貌单元也体现出 SiO₂ 含量的差异。月尘的成分和颗粒特征使其具有独特的电磁性质和生物毒性, 容易粘附于航天器表面和进入航天员体内, 危害航天器和航天员的安全和健康, 严重影响月面探测的正常实施。因此, 对月尘的研究是保证月面探测工程正常实施的迫切需要; 同时, 月尘是月球表面物质经历长期的太空作用形成的, 在颗粒成分和结构特征上保留了其演化过程的重要信息, 是研究月表物质和大气演化、太空风化作用等科学问题的关键线索。但是目前对月尘的颗粒微观成分和结构差异、电磁特性和光学特性、纳米金属铁的特征和成因等方面的研究还不够深入, 限制了月表物质演化历史的研究和月尘粘结腐蚀性、生物毒理学具体机理的认识。在月尘研究中利用模拟月尘弥补月尘样品稀缺的局限, 并通过模拟实验加强以上方面的研究, 能够更好地满足科学问题和工程探测的实际需要。

关键词: 月尘; 颗粒; 性质; 危害; 模拟月尘。

中图分类号: P691

文章编号: 1000-2383(2013)02-0339-12

收稿日期: 2012-04-13

Properties and Harmfulness of Lunar Dust: A Review

ZHANG Sen-sen^{1,2}, WANG Shi-jie¹, LI Xiong-yao^{1*}, LI Shi-jie¹, TANG Hong¹, LI Yang^{1,2}, YU Wen^{1,2}

1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Lunar dust is the small particle widely distributed on the lunar surface, of which sizes range from 30 nm to 20 μm with the median diameter of 100–300 nm and more than 95% are less than 2 μm. The grains have complex shapes and usually show glass beads, vesicular texture, and angular shards. High contents of agglutinate glass and npFe⁰ are the remarkable properties in mineral composition. The glass content is usually more than 50 vol%, and it can reach 80% to 90% in <2.5 μm part. Lunar dust is similar to lunar soil in elemental compositions, but it also shows different contents of SiO₂ in different areas. The composition and geometrical characteristics of lunar dust lead to special electromagnetic properties and biological toxicity. These properties might cause the lunar dust adhered to spacecraft and inhaled by astronauts easily, and then damage the spacecraft and threaten the health of astronauts. So, it is necessary to study lunar dust further to facilitate lunar surface exploration, which also can better the understanding of the evolution of lunar surface materials and lunar atmosphere due to the fact that lunar dust has been formed during a long time space weathering and conserves important information of space weathering history in the composition and microstructure of lunar dust grain. Currently, the properties of lunar dust grains in micro-morphology and chemical composition, electromagnetic properties and spectral characteristics, the feature and origin of npFe⁰ are still not clear, which challenges the understanding of the mechanism of lunar dust's adhesion, biological toxicity and space weathering. To meet the needs of lunar science and lunar exploration, studying the properties of lunar soil grains and process of space weathering by simulated experiments using lunar dust stimulants as a candidate might be an important trend in the coming decades.

Key words: lunar dust; particle; property; harmfulness; lunar dust stimulant.

基金项目: 国家“863”计划项目 (No. 2010AA122200); 中国科学院地球化学研究所前沿领域项目; 国家自然科学基金 (Nos. 40803019, 40873055, 40904051); 中国科学院“西部之光”人才培养计划。

作者简介: 张森森 (1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为月球与行星科学。* **通讯作者:** 李雄耀, E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn

月尘通常指颗粒细小的月壤颗粒, 粒径小于 $20\ \mu\text{m}$, 主要来源于月球表面的风化碎屑物, 其成因与陨石、微陨石轰击、太阳风和宇宙射线以及巨大的昼夜温差变化等太空风化作用密切相关 (Keller and McKay, 1993, 1994, 1997; Keller *et al.*, 1999). 月尘记录了陨石、微陨石的撞击历史, 也指示了太阳风作用过程以及挥发分的保存和逃逸, 深入了解月尘的基本性质对研究月球表面物质和月球大气演化具有重要科学价值 (Allen *et al.*, 1995; Keller *et al.*, 1998; Keller *et al.*, 1999; Anand *et al.*, 2004). 月尘的成因过程主要包括: (1) 陨石或微陨石撞击的粉碎和熔融作用. 陨石或微陨石撞击过程的巨大冲击造成大颗粒的破碎, 使粒径变细, 同时撞击产生的高温熔融将会使相邻颗粒胶结, 导致颗粒变粗 (Bibring *et al.*, 1972; Hapke *et al.*, 1975; Hapke 1998). (2) 太阳风或高能宇宙射线的溅射、注入和损伤作用. 由于月球缺乏浓密大气和全球性磁场保护, 太阳风粒子和宇宙射线的作用也要远远高于地球表面, 能量为 keV 级的太阳风质子, 能量为 MeV 级的太阳耀斑, 能量为 GeV 级的银河宇宙射线长驱直入地持续轰击月表物质, 产生粒子的溅射、沉积和注入, 不断改变月表物质的颗粒形态和物理化学特性 (Simpson, 1983; Miroshnichenko, 2001; Vernet, 2007). 这些成因过程使月尘的颗粒形态、化学组成以及物理性质独特, 而这些性质恰恰是研究月球表面物质和大气演化、太空风化等科学问题的关键线索.

月尘具备的特殊性质使其在太阳辐射、陨石轰击等自然作用和登月着陆、巡视探测等人为扰动下很容易产生迁移运动, 影响航天器和宇航员的正常工作, 是威胁月面探测的一个重要因素. 在 Apollo 时期, 月尘对月面探测的危害已经得到了很好的证实, 也是当前月球探测迫切需要解决的一个重要问题. Apollo 17 宇航员尤金·塞尔南 (Eugene Cernan) 曾说过: “我认为月尘是我们在月球上工作遇到的最大障碍之一, 我们或许可以克服其他生理问题、物理问题和机械问题, 但很难克服月尘带来的问题”. 美国在总结了 Apollo 登月计划中获得的成果、经验和教训中指出解决月尘对月表探测活动的影响是人类重返月球所必须解决的问题之一 (Calle *et al.*, 2009).

随着我国月球探测工程的进一步深入, 月球尘埃环境探测和无人或载人月面探测将是一个重要的发展趋势 (欧阳自远, 2005), 也是解决月球演化等基本科学问题的迫切需要. 如何更好地认识月尘, 理

解月表物质和月球大气的演化过程, 有效规避月尘对月面探测的危害, 是当前我国月球探测, 也是世界各国月球探测所面临的一个迫切需要解决的问题. 但是, 对月尘性质以及其对航天器和宇航员的危害研究还非常零散, 为了更好促进月尘的研究, 以下章节将对月尘的基本性质进行总结, 对月尘的危害机理和存在问题进行初步探讨.

1 月尘基本性质

1.1 颗粒大小和形态特征

月尘具有颗粒细小, 形态极其复杂的特征. 由于不同地区月尘的成因历史和物质组成存在差异, 不同地貌类型区域的月尘粒度分布也存在区别, 通常月海月尘相对高地月尘颗粒更为细小, 月海月尘的中值粒径位于 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 之间, 高地月尘的中值

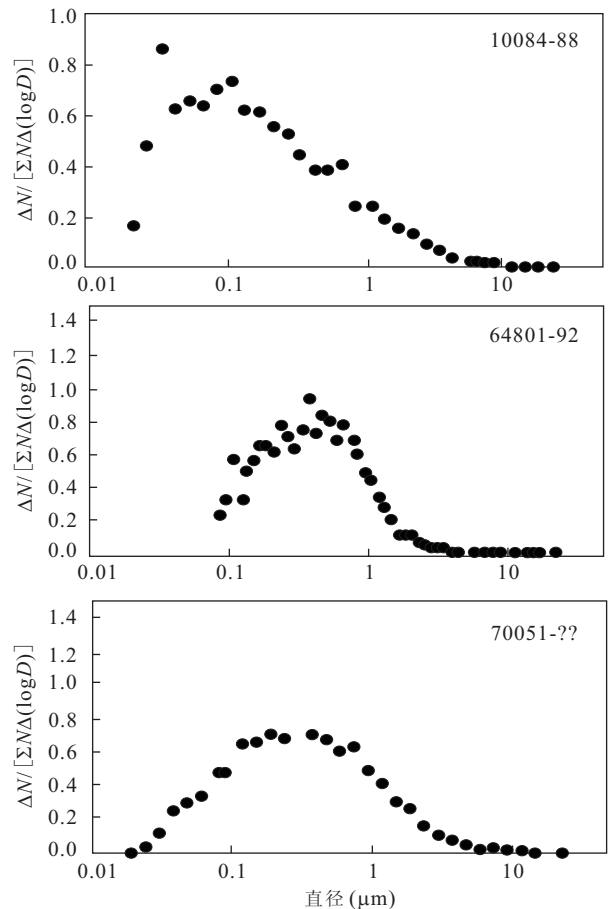


图 1 Apollo 11、16 和 17 样品中月尘的颗粒大小分布
Fig. 1 Particle size distribution of the Apollo 11, 16, and 17 lunar dust

ΔN 为相应颗粒大小半径对应的数目; ΣN 为整体数目; $\Delta \log D$ 为对应直径的修正对数

粒径位于 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 之间,高地与月海结合部区域的月尘样品的中值粒径位于两者之间(Liu and Taylor, 2008; Park *et al.*, 2008). 总的来说,月尘颗粒大小基本范围为 30 nm 到 $20 \mu\text{m}$,其中绝大部分颗粒(约 95%)小于 $2 \mu\text{m}$,并且大部分颗粒(大于 50%)位于 $100 \sim 300 \text{ nm}$ 附近. 图 1 显示 Apollo 11、Apollo 16、Apollo 17 月尘样品颗粒的峰值分别集中在 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \mu\text{m}$ 附近,这与样品的 Is/FeO 参数变化参数相吻合,这说明月尘的成熟度越高,其颗粒粒径越细微.

Apollo 样品的形态分析表明,随着颗粒直径的

减小,颗粒长宽比减小,颗粒整体更趋于球形,但同时表面粗糙度随之增大,产生更多棱角(Park *et al.*, 2006a, 2006b; Liu *et al.*, 2007; Taylor *et al.*, 2009). Liu *et al.* (2006) 通过扫描电镜(SEM)观察,将月尘颗粒形态(图 2)划分为:玻璃小球(a、b、c、e)、气泡构造(h、i、j、k)、棱角状碎片(m、o)、块状碎片(c、d)和集合体颗粒(g),除了玻璃小球和部分块状碎片的颗粒外,大部分月尘颗粒都具有参差不齐的边缘,其中前 3 种形态在月尘中非常普遍(图 2). 月尘颗粒的表面结构非常复杂,大部分颗粒都具有各种气泡、隆起和褶皱等构造,大大增加了

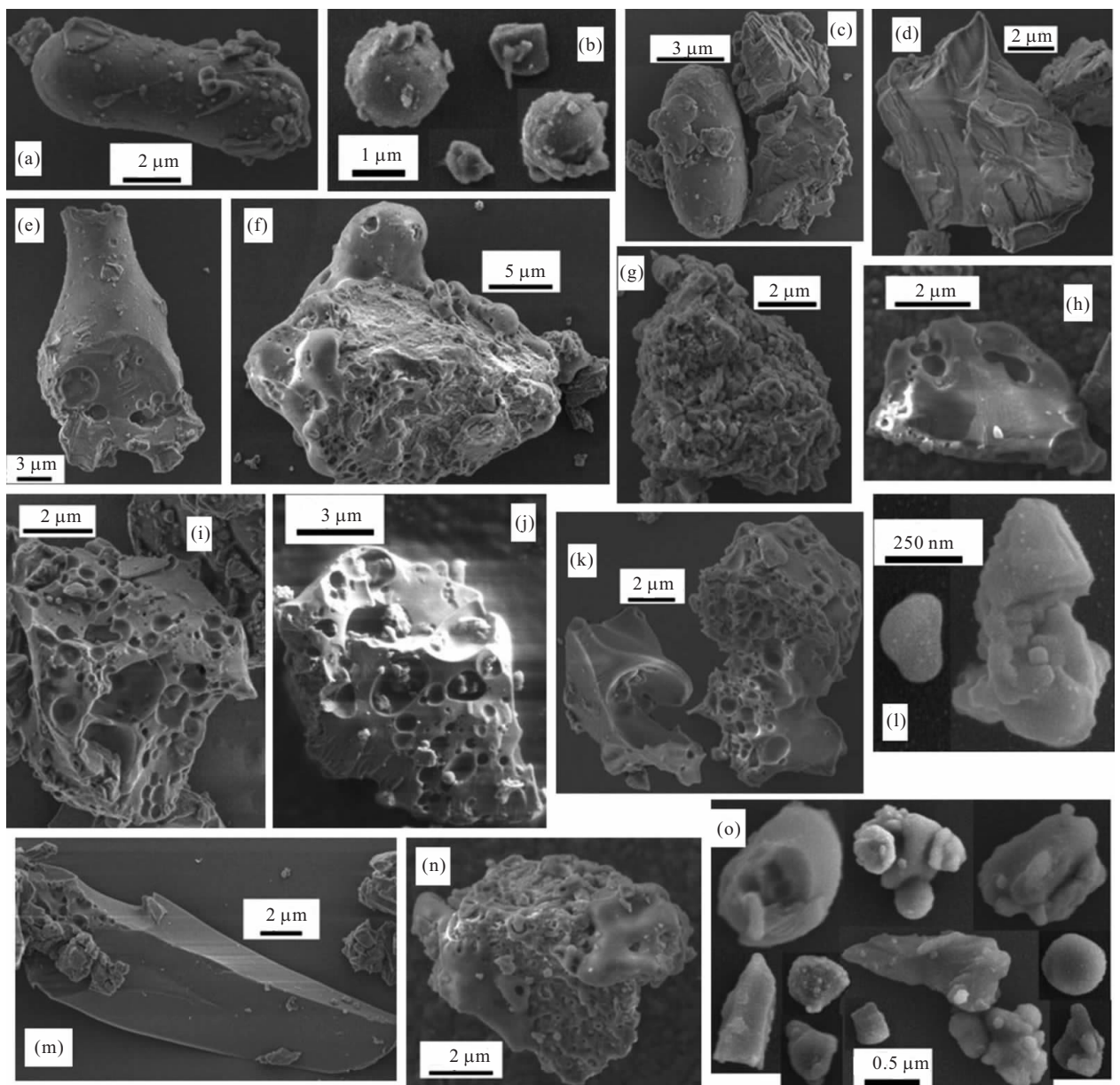


图 2 月尘颗粒基本形态的 SEM 图像,除了 j 图显示颗粒以外的所有颗粒均经过表面活性剂清洗处理(Liu *et al.*, 2006)

Fig. 2 Represent SEM images of lunar dust particles; particles in all images except Fig. 2j were cleaned with the surfactant solution

表 1 高 Ti 月海月尘化学特征

Table 1 Elemental content of high-Ti mare lunar dust

样品	10084-78		71061-14		71501-35		70181-47		79221-81	
	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm
SiO ₂	41.20	42.10	39.50	40.20	39.00	40.40	40.40	41.50	40.90	42.30
TiO ₂	7.94	7.25	8.94	7.89	9.83	8.27	7.88	6.54	7.21	5.83
MgO	7.98	7.20	10.40	9.18	9.52	8.76	9.97	9.12	10.40	9.59
FeO	14.70	12.00	17.50	14.80	16.40	13.50	15.50	12.70	15.00	11.30
Al ₂ O ₃	13.20	15.90	10.80	13.80	11.60	14.50	12.70	15.40	12.90	15.90
CaO	11.80	12.30	9.79	10.70	10.10	11.20	10.40	11.50	10.40	11.70
Na ₂ O	0.43	0.46	0.40	0.46	0.39	0.42	0.34	0.46	0.39	0.49
Cr ₂ O ₃	0.30	0.27	0.48	0.44	0.45	0.40	0.42	0.39	0.40	0.35
MnO	0.21	0.19	0.23	0.20	0.23	0.19	0.23	0.18	0.20	0.17
K ₂ O	0.13	0.15	0.09	0.11	0.09	0.11	0.08	0.13	0.10	0.15
P ₂ O ₅	0.11	0.20	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.10	0.07	0.07
SO ₂	0.13	0.14	0.02	0.25	0.19	0.25	0.15	0.20	0.19	0.17
Total	98.13	98.16	98.25	98.19	97.93	98.11	98.15	98.16	98.23	98.10

表 2 低 Ti 月海月尘化学特征

Table 2 Elemental content of low-Ti mare lunar dust

样品	12030-14		12001-56		15071-52		15041-94	
	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm
SiO ₂	46.30	46.20	45.00	46.00	45.70	46.90	46.20	46.60
TiO ₂	3.32	3.01	2.96	2.78	1.88	1.57	1.88	1.79
MgO	9.86	8.37	10.00	8.79	11.00	9.85	10.80	9.37
FeO	17.20	14.30	15.90	12.50	15.40	9.59	14.40	11.00
Al ₂ O ₃	10.70	13.90	12.30	14.90	12.90	17.10	13.50	16.40
CaO	9.64	10.40	10.20	11.20	10.20	11.80	10.20	11.60
Na ₂ O	0.44	0.53	0.44	0.51	0.39	0.48	0.41	0.49
Cr ₂ O ₃	0.50	0.43	0.46	0.42	0.53	0.40	0.41	0.37
MnO	0.20	0.19	0.23	0.19	0.22	0.15	0.21	0.17
K ₂ O	0.26	0.35	0.23	0.30	0.18	0.22	0.18	0.23
P ₂ O ₅	0.23	0.32	0.28	0.24	0.19	0.09	0.24	0.20
SO ₂	0.12	0.15	0.18	0.29	0.10	0.14	0.12	0.11
Total	98.27	98.14	98.18	98.12	98.69	98.30	98.55	98.35

表 3 月球高地月尘化学特征

Table 3 Elemental content of highland lunar dust

样品	14141-5,7		141631-57		61221-9,2		67481-31		64801-82	
	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm	10~20 μm	<10 μm
SiO ₂	48.40	49.20	47.40	47.20	44.50	44.50	44.40	44.50	44.50	44.80
TiO ₂	1.71	1.51	1.88	2.07	0.50	0.05	0.40	0.42	0.68	0.61
Al ₂ O ₃	17.20	19.20	17.00	18.90	27.50	28.50	28.40	29.10	26.30	27.70
Cr ₂ O ₃	0.23	0.21	0.22	0.21	0.09	0.08	0.09	0.08	0.12	0.12
MgO	9.08	6.99	9.57	8.14	5.16	4.35	4.54	4.09	6.18	5.22
CaO	10.70	11.30	10.80	11.60	16.00	16.50	16.40	16.70	15.60	16.10
MnO	0.13	0.10	0.13	0.12	0.05	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07
FeO	9.46	7.66	10.10	8.83	4.40	3.64	4.04	3.61	4.78	3.84
Na ₂ O	0.71	0.91	0.67	0.70	0.45	0.53	0.45	0.46	0.41	0.42
K ₂ O	0.66	0.96	0.51	0.55	0.09	0.13	0.07	0.08	0.11	0.14
P ₂ O ₅	0.32	0.40	0.27	0.33	0.05	0.06	0.04	0.04	0.06	0.04
SO ₃	0.07	0.10	0.10	0.11	0.06	0.10	0.06	0.07	0.07	0.11
Total	98.68	98.61	98.72	98.85	98.93	99.00	99.08	99.22	98.99	99.21

月尘颗粒的表面积,月尘颗粒表面积一般数倍高于相同体积球体表面积(Park *et al.*, 2006a, 2006b; Liu *et al.*, 2008).

1.2 化学成分

Taylor 等人 and 月壤特征协会(LSCC)对 Apollo 时期所采回的月壤样品进行了详细的化学分析,并且根据月壤颗粒大小进行筛选,分析了不同大小月壤颗粒的化学特征,特别是月壤细粒部分的化学特征,对月尘的化学特征也有了较好的认识(Taylor *et al.*, 2001; Taylor *et al.*, 2003). 相对于月壤其他颗粒大小部分,月尘中 SiO_2 变化不大,但月尘中 Al_2O_3 、 CaO 和 Na_2O (斜长石成分)更高,而 FeO 、 MgO 和 TiO_2 (辉石成分)则更低(Mckay *et al.*, 1991). 表1~表3分别列出了月球高 Ti 月海月尘、月球低 Ti 月海月尘和月球高地月尘中部分代表性样品的整体化学含量. 如表1~表3所示,高 Ti 月海月尘、低 Ti 月海月尘和高地月尘中, SiO_2 变化范围分别为 39%~42%, 45%~47% 和 44%~49%. 月海月尘和高地月尘化学成分变化较大,其中月海月尘中辉石成分(FeO 、 MgO 和 TiO_2)含量较高,而高地月尘中斜长石成分(Al_2O_3 、 CaO 和 Na_2O)含量则更高. 月海月尘中除了 TiO_2 和 SiO_2 外,其他化学含量相对变化较小. 另外,月尘的化学成分会受到颗粒大小和 IS/FeO 的影响.

1.3 矿物学特征

月尘中的主要组成成分为胶结质玻璃、斜长石、辉石、钛铁矿、橄榄石,其中胶结质玻璃含量最高,一般为 40% 以上,其次为斜长石,一般为 20% 左右,但在 Apollo 16 中的高地月尘的可高达 60% (Mckay *et al.*, 1991; Taylor *et al.*, 2003). 钛铁矿、辉石和橄榄石含量较少,均在 10% 以下,特别是在高地月尘中的含量更少. 随着颗粒大小的减小,月尘中胶结质玻璃含量增加,在 $<2 \mu\text{m}$ 部分含有高达 80%~90% 胶结质玻璃,而斜长石、辉石、钛铁矿和橄榄石的含量则在减少(Taylor *et al.*, 2001; Taylor *et al.*, 2003; Liu and Taylor, 2008).

月尘中胶结质玻璃的 SiO_2 含量一般为 44%~46%, 低 Ti 月尘中胶结质玻璃的 SiO_2 含量相对高一些,其次为 Al_2O_3 . 月海月尘胶结质玻璃中的 Al_2O_3 含量一般为 15%~18%, 高地月尘胶结质玻璃中的含量更高,一般为 20%~25%; MgO 、 FeO 和 CaO 的含量一般在 10% 左右. 其中高地月尘的胶结质玻璃中的含量稍低于月海月尘的胶结质玻璃中的含量(Taylor *et al.*, 2001, 2002).

纳米金属铁是月尘中重要的矿物之一,是空间风化作用的产物. 根据月壤中不同颗粒大小部分的 IS/FeO 计算可知,月尘中 IS/FeO 相对于月壤中其他颗粒大小部分的 IS/FeO 要高得多,其增加量远远大于胶结质玻璃的增加量,因此月尘中含有更多的蒸汽沉积作用产生的表面相关的纳米金属铁,特别是 $<10 \mu\text{m}$ 部分的月尘中,由蒸汽沉积作用产生的表面相关的纳米金属铁的含量远远高于胶结质玻璃中的纳米金属铁(Bernatowicz *et al.*, 1994; Taylor *et al.*, 2001). 月尘中含有大量的纳米金属铁使得月尘具有明显的磁性,且能被磁铁刷吸引(Liu *et al.*, 2007).

1.4 电磁学性质

Apollo 样品 15301 和 65015 的电磁性质分析表明,月表物质具有非常低的直流电导率和介电损耗,容易在颗粒中积累电荷. 而其光电导率在不同波长光照条件下产生很大的差异,从近红外到紫外,月表物质的光电导率增加 10^6 倍(Heiken *et al.*, 1991). 在月球表面随着太阳辐射的变化,月尘等月表物质将发生高效率静电充电过程,使月尘颗粒具有较强的迁移运动特性和静电粘附性质.

Apollo 和 Luna 采回的月球样品进行了磁性测量研究,磁化率(χ)测量结果显示,月壤样品的 $\log\chi$ 平均值为 4.39 ± 0.2 , 属于强磁性样品(Nagata *et al.*, 1970; Grommé and Doell, 1971; Tsay *et al.*, 1971; Pearce *et al.*, 1974; Bentley *et al.*, 2010; Rochette *et al.*, 2010), 其磁化率随着颗粒的减小呈变大的趋势(Pearce *et al.*, 1973; Rochette *et al.*, 2010). Apollo 样品 79221 的细小颗粒部分实际分析表明,月尘具有较强磁性(Taylor *et al.*, 2005), 其原因可能与月尘中的纳米颗粒金属铁密切相关(Larochelle and Schwarz, 1970; Fuller *et al.*, 1975). 由于太空风化的长期作用,月壤颗粒中存在为数不少的金属铁颗粒,由于其颗粒直径极其细微,大部分可视作单畴颗粒,附存于月尘的非晶表层(Martel, 2004; Noble and Keller, 2006). 研究表明,月尘的剩余磁化强度与矫顽力非常低,具有很强的超顺磁性特征(Liu *et al.*, 2007), 在外加磁场下呈现较强的磁性,而外加磁场撤销后体现出极弱甚至没有剩磁. 同时,月尘的磁化强度随温度升高大致呈线性不断降低(Helsley, 1970; Pearce *et al.*, 1973; Hanneken *et al.*, 1976), 在夜晚或者阴暗区月尘可能呈现相对较强的磁性.

2 月尘的危害

在着陆到返回的整个期间内,绝大部分的月面探测活动均受月尘的严重影响.月尘影响航天器的正常运转,同时也使航天员产生强烈的生理刺激反应,危害航天员的生命健康安全(Heiken, 1991).

2.1 对航天器的影响

在 Apollo 探月活动中,月尘严重影响了航天器的正常运转和航天系统的可靠性.月尘黏结磨蚀空气过滤器、转轴/轴承、滑竿/滑块、辐射器/反射器、接线盒/开关等零部件,影响 CCD 摄像机、太阳能电池板、宇航服、月球车等航天器的正常工作并造成一定程度的损害,严重者可导致某些部件系统运行瘫痪,直接影响月面探测的正常进行(Calle *et al.*, 2009).

(1)黏附污染.在月面探测活动中,由人类和航天器活动所扬起的月尘很快附着于宇航服和航天器表面,且很难清除干净.研究表明月尘对金属表面附着力一般为 200~300 Pa,对油漆表面的附着力更高,一般在 1 000 Pa 左右(Stubbs *et al.*, 2005).Apollo 16 登月任务中由于月球车后挡板的损坏,扬起的月尘导致航天器和宇航服表面黏附了大量的月尘(Doug and Kenneth, 2008, Apollo 16 Technical Debrief. NASA MSC-4561).

(2)设备阻塞.设备阻塞是指黏附污染在航天器表面的月尘堆积在一起,导致月球漫游车的运动系统、宇航服拉链、遮阳器等部件发生故障.在所有成功登月的任务中,都有机械结构卡死的情况发生. Apollo 11 登月任务中,照相设备送回登月舱的过程中发现月尘几乎将传送带完全阻塞,难以正常将相机送回登月舱(Apollo 11 Mission report. NASA MSC-00171);在 Apollo 12 登月任务中,由于锁扣被月尘充填,7~13 cm 的取样铲延长柄与取样器的连接锁环链结合牢固,在不需要取样器时不能轻易分离(Apollo 12 Mission report);在 Apollo 15 登月任务中,由于卡口积满月尘,哈苏相机的偏振滤光器无法安装,月尘阻塞给工具手柄的操作增加了难度(Apollo 15 Mission report);Apollo 16 登月任务中真空吸尘器损坏,宇航服腕关节和面罩被月尘阻塞(Apollo 16 Technical Debrief. NASA MSC-4561);少数极端情况下,机械机构卡死导致了月球行走的紧急终止,被卡死的机构永久性丧失了活动能力(Morea, 1992).

(3)密封失效.颗粒直径极其细微的颗粒嵌入密

封垫、密封胶条等密封设备的零部件、部分月尘磨损宇航服,导致宇航服的密封性遭到破坏. Apollo 12 宇航员皮特·康拉德的宇航服在第一次月面活动后的气压漏损率为 1.03 kPa/min,在第二次月面活动后气压漏损率就达到 1.72 kPa/min,非常接近宇航服安全极限,从而不能再进行月面活动;另一方面,月尘的渗入也会影响到月球样品保存箱的密封,在到达地球时遭到污染(Apollo 12 Mission report).

(4)材料磨损.月尘颗粒形态极不规则,大多数带着锋利的颗粒边缘,因此月尘具有很强的磨蚀性,很容易造成仪器设备和宇航服表面的磨损. Apollo 12 两位宇航员在完成月球行走后,宇航服的微流星保护层被磨穿,多层隔热材料也被磨透了数层(Apollo 12 Mission report. NASA MSC-01855). Apollo 17 登月任务中,哈里森·斯密特的面罩被月尘刮花,以至多个方向无法被观察.此外, Apollo 17 钻探实验过程,宇航员的手套被月尘严重磨损,在第三次实验时不得不抛弃破损的手套(Apollo 17 Mission report).

(5)散热退化.月尘的表面在仪器设备表面附着的另一个影响是降低散热器的散热效果,导致仪器温度过高而失效(Stephen, 1971).对 Apollo 12 磁力计的 5 个不同位置温度测量发现,月尘附着于散热器表面,使磁力计温度高出设计温度约 38 °C(Apollo 12 Mission report. NASA MSC-01855);由于不能有效清除月球车电池板表面附着的月尘(Apollo 12 Mission report. NASA MSC-01855), Apollo 15 月球车的 1 号和 2 号电池组在第二次行进中温度分别达到了 42 °C 和 45 °C(Apollo 15 Mission report. NASA MSC-5161); Apollo 16 月球车在向 11/12 号目的地行进过程中由于电池板温度过高报警;散热效率降低还会导致仪器性能的下降, Apollo 16 的被动月震仪和宇宙射线监测器由于月尘附着使仪器温度过高,导致仪器性能大幅下降(Apollo 16 Mission report. NASA MSC-7230).

(6)仪表错误.月尘对仪表读数的影响主要发生在登月舱着陆过程中的降落速度监测. Apollo 12 登月舱的速度跟踪系统采用信号衰减方式监测,对登月舱发动机喷射气流扬起的月尘运动非常敏感,在最后 50 英尺(约 15.24 m)降落过程中,速度监测器锁定运动的月尘为参照,给出错误的降落速度(Apollo 12 Mission report. NASA MSC-01855); Apollo 15 的测速雷达在最后 30 英尺(约 9.14 m)也受到了运动的月尘干扰(Apollo 15 Mission report).

2.2 对宇航员的影响

月球的重力只有地球重力的 $1/6$, 月尘在近月空间悬浮的时间相对比较长, 宇航员执行月表探测任务时, 月尘毒性和污染问题严重阻碍宇航员月面观察、月面巡视、月面实验等活动的正常进行。在月面探测活动中, 月尘生物毒性使宇航员产生咳嗽、流泪、打喷嚏等过敏反应症状, 严重者甚至产生呼吸困难等症状, 月尘对人体中长期毒理影响目前还在研究之中。从 Apollo 宇航员在月球停留很短时间内就已经出现一些健康问题可以推测, 在月球基地建设以及运行过程中, 月尘将成为月球居民面对的首要问题。

(1) 宇航员的视觉阻碍。月尘对宇航员的视觉阻碍影响登月舱的安全着陆、月面物体颜色的正确判别和月面的成像摄影等月面探测活动。月尘对宇航员的视觉阻碍在 Apollo 11 登月舱登陆月面时第一次被关注, Apollo 11 宇航员称:“月面被吹起约 100 英尺(约 30.48 m)高的月尘所弥漫, 随着高度降低, 月面能见度越来越糟糕”(Apollo 11 Mission report, NASA MSC-00171)。Apollo 12 着陆时遇到了同样的问题, 在着陆前几秒钟几乎看不到月面的实际情况, 以至使登月舱的一只脚落入一个小的撞击坑中(Apollo 12 Mission report)。除了 Apollo 14 和 17 幸运地选中月尘覆盖较薄的区域而使宇航员视线较低程度被月尘影响之外, Apollo 15 和 16 宇航员报告称由于月尘弥漫, 在登陆最后几秒钟也很难看清月面的情况(Apollo 16 Mission report)。月尘除了影响登月舱安全着陆外, 其在岩石或航天器表面的堆积会改变物体颜色影响宇航员的正确判别。Apollo 12 登月过程中, 宇航员发现原本为白色的 Surveyor III 着陆器变成了棕色, 后来发现这完全是因为其表面覆盖了一层棕色的月尘所致(Apollo 12 Mission report)。此外, 月尘在成像摄影中也会造成影像模糊。Apollo 15 宇航员在月面拍摄过程中发现了月尘引起的光圈效应现象(Apollo 15 Mission report)。

(2) 宇航员行动阻碍。月尘附着于宇航员的靴子会使宇航员容易滑倒, 附着和掩埋仪器设备的电缆和传输带也会容易绊倒宇航员, 对宇航员造成伤害。Apollo 11 宇航员在完成月面作业返回登月舱时, 多次由于靴子沾满月尘在攀爬梯子过程中打滑而差点摔倒(Apollo 11 Mission report, NASA MSC-00171)。其原因可能是细小的月尘颗粒附着在宇航员靴子底部, 当靴子和梯子或者岩石表面等相对较

硬的表面接触时, 月尘颗粒的滑动使靴子和梯子或者岩石表面的摩擦减小, 从而容易导致宇航员摔倒。

(3) 月尘的生理与健康影响。Apollo 宇航员报告称月尘散发出一种明显不同的刺鼻气味, 大卫·斯科特描述闻起来像火药的味道。这些味道极可能是月尘颗粒表面的挥发性气体被活化释放导致。除了气味难闻之外, 无孔不入的月尘导致了 Apollo 12 宇航员在整个返回过程中眼睛和肺部的刺痛(Apollo 12 Mission report)。月尘的生理与健康影响也体现在月尘引起人体机能的过敏反应, 使人体产生流泪、咳嗽等过敏症状, 严重者甚至产生呼吸困难, 还包括皮肤刺激、渗透、视觉伤害, 力学和可能的化学刺激。另外, 月尘对人体可能存在潜在毒性, 长期吸入易诱发各种呼吸道、内脏器官的癌变(Buhler, 2007)。

2.3 月尘对月球基地建设的影响

月尘对月球基地选址、月面机器人的正常运行和后期的月面建筑日常维护都将产生严重影响。月尘不但会严重干扰宇航员的正常月面工作, 长期在月尘干扰的环境下工作有可能诱发一系列的严重生理疾病, 甚至产生心理疾病。月尘会导致月面工作的各种航天器出现系统故障和使用寿命缩短的现象, 同时, 月尘也有可能磨损月面建筑物, 给月球基地的日常维护增加困难。

3 存在问题 and 研究趋势

针对月球表面物质演化科学问题和月面探测工程技术攻关, 当前对月尘的认识尚缺乏系统性的研究, 尤其在月尘的颗粒特性、危害机理以及模拟月尘研制方面, 很难满足月球科学和月球探测的发展需要。

3.1 月尘的颗粒特性

月尘分布于月球的最表层, 是暴露于宇宙空间的最直接对象, 在太阳风、宇宙射线、微陨石等的长期作用下, 从颗粒大小、形态到微观物质组成和物理性质都具有显著的特殊性。通过对探测数据和实际月球样品的分析, 目前对月尘的研究虽然从整体上对其性质有了初步的认识, 包括其平均化学组成、矿物组成、直流电导率、光电导率以及介电性质等, 但对月尘颗粒的微观特征研究还存在欠缺。而月尘颗粒的微观特征恰恰是其成因过程的关键线索, 是认识月尘形成和演化历史的重要基础, 尤其在以下方面有待进一步深入:

(1) 月尘颗粒的微观成分和结构差异. 已有研究表明, 大部分星际尘埃、月壤或月尘颗粒表面均存在明显的微观环带结构特征, 不同颗粒的环带在结构和成分分布上存在差异, 这是由于尘埃颗粒在太空风化中的不同作用过程所导致 (Christoffersen *et al.*, 1996; Keller and McKay, 1997; Hapke, 2001). 通常而言, 太阳风的作用主要包括注入和溅射两个过程, 在成分分布上注入过程将导致外来元素的增加, 而溅射过程则引起原有元素的减少和缺失, 这两个过程均会改变颗粒表层化学成分分布 (Bibring *et al.*, 1972; Keller and McKay, 1997), 同时, 大量的离子注入和溅射会导致矿物结构的畸变甚至非晶化; 微陨石的轰击主要引起高温熔融、蒸发沉积导致颗粒表层微结构和成分的改变 (Keller and Mckay, 1993; Anand *et al.*, 2003; Anand *et al.*, 2004). 因此, 月尘颗粒的微观成分分布特征和结构特征与太空风化的作用过程存在密切联系, 是探讨月球表面物质演化过程的一个关键线索. 但目前对月尘颗粒微观成分和结构特征的研究还存在很大不足, 也无法进一步根据月尘颗粒的微观特征探讨月球表面太空风化历史和物质演化过程. 随着我国探月工程的进一步实施, 月球样品的采样返回将为开展月球颗粒微观特征研究提供实际样品, 也为进一步探讨太空风化和月表物质演化提供基础. 因此, 不论是科学问题的解决, 还是工程目标的实现的需求, 月尘颗粒微观成分和结构特征的研究势必是未来月尘研究的一个重要内容.

(2) 月尘颗粒的电磁性质和光谱特性. 目前, 月球探测的主要手段仍然是各种光学或电磁波遥感探测, 它们最直接的探测对象是广泛覆盖于月球表面的月尘. 因此, 月尘的电磁学和光谱性质是影响遥感探测的重要因素, 包括 CCD 成像、多光谱成像、微波辐射遥感以及雷达探测等 (Fischer and Pieter, 1994; Sunshine and Pieters, 1998; Mouélic *et al.*, 2002; Wilcox *et al.*, 2005). 对月尘电磁学性质和光谱特性的认识主要来源于对月壤分析结果的推测, 尚缺乏系统的实际分析 (Noble *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2007). 实际上, 由于月尘在几何特征和组分上的特殊性, 其电磁学性质和光谱特性与月壤存在较大差异. 如由于月尘中更富集纳米金属铁 (Wiesli *et al.*, 2003), 其磁性体现出明显的超顺磁特征 (Liu *et al.*, 2007), 而在 UVVIS-NIR 光谱上表现出降低整体反射率、特征峰红移和强度减弱等特征 (Noble *et al.*, 2001). 对月尘这些特性的认识不足

将不利于月球探测数据的准确解译.

另外, 月尘的迁移运动以及粘附是月面探测面临的一个重要威胁, 是将来月球探测迫切需要解决的一个问题. 月尘的静电迁移以及静电和磁力吸附是月尘危害的两个重要过程 (Taylor *et al.*, 2005; Buhler *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2007), 深入认识月尘的电磁学特性, 从机理上理解月尘的迁移运动和粘附机制, 是进行月尘防护技术攻关的重要基础.

(3) 月尘颗粒纳米金属铁. 由于月球的高真空还原环境, 区别于地球土壤和矿物, 纳米金属铁大量富集于月尘中, 这是导致月尘特殊性质的一个主要原因, 也是月表物质演化过程残留的特殊线索. 月尘中纳米金属铁的赋存特征、含量以及成因过程等问题至今尚未得以很好地解答, 需要在获取更多更新鲜的月尘样品基础上开展进一步的研究.

3.2 月尘的危害机理

月尘对月面探测活动的危害主要是由粘结腐蚀性与生物毒性引起, 这些月尘特性与颗粒的粒径大小、颗粒形态、矿物与化学成分、电磁特性等密切相关. 进一步认识月尘的危害需要结合月尘自身特性分析其粘结性与生物毒理学的具体作用机理.

(1) 月尘粘结性. 月尘的粘结力主要以静电力和磁力吸附为主, 与其成分、粒径、颗粒形态特征和电磁性质存在密切关系 (Buhler *et al.*, 2007). 月尘主要由不导电的硅酸盐物质组成, 在月表的真空干燥强辐射的环境和各种接触、摩擦等作用下, 月尘颗粒不断积累电荷, 与航天器表面产生了静电吸附. 带电月尘颗粒与非导体表面接触时, 静电力与颗粒介电性质、表面势能、静电场强度以及颗粒半径都存在密切联系 (NASA/CR-2007-214685). 由于月尘颗粒细微, 颗粒形态复杂, 带电后月尘颗粒的表面势能一般较大, 因而在月球表面实际环境中月尘的静电吸附较强. 由于大量纳米金属铁的存在, 月尘具有显著的超顺磁性特征 (Liu *et al.*, 2007), 在很弱的外加磁场作用下也能表现出很强的磁性, 因此, 对于产生电磁场的电子元器件, 月尘的磁力吸附是月尘粘结性的另一个重要作用力.

在月球表面实际环境中, 静电荷的积累和静电场的产生与太阳辐射具有密切关系 (Heiken *et al.*, 1991), 通常在太阳照射区与阴暗区产生异性电荷积累, 更容易导致静电吸附; 同时, 具有超顺磁性的月尘随温度的变化, 其磁化率也会发生较大的变化, 在低温条件下表现出更强的磁性 (Liu *et al.*, 2007). 因此, 可以进一步推测, 在月球白天, 由于表面复杂

地形形成的明暗区域之间更容易产生异性电荷的积累,而较强的太阳辐射使月表温度升高导致月尘的磁化率降低,月球白天月尘的粘附作用力可能更主要来自于静电吸附。相反,月球夜晚不存在太阳辐射差异产生异性电荷的可能性会降低,而较低的月表温度会导致月尘具有较强的磁性,其粘附作用力更可能来源于磁力吸附。

(2)月尘的生物毒理学。月尘的粒径、成分、微观结构是影响月尘毒理学的重要因素(Guthrie, 1997)。月尘颗粒中,小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒均可以被人体吸入,颗粒物的直径越小,进入呼吸道的部位越深,月尘的大部分颗粒可随人的呼吸沉积于肺部,这些月尘颗粒不但伤害上部通道,如对鼻咽喉的伤害,而且伤害气管、细支气管、肺部等器官,有可能使人体出现水肿炎症、纤维症,并可能诱发癌症(Lam *et al.*, 2002a, 2002b)。月尘中主要组分 SiO_2 以及 TiO_2 组分可能是诱发尘肺病、矽肺病等一系列严重疾病的重要因素(Latch, 2008),而月尘中含有的颗粒表面纳米金属单质铁,一部分粒径极其细微的颗粒会进入血液中,还原血红蛋白里的三价铁,使血红蛋白运输氧气的的能力降低,严重的状况下会影响人体呼吸系统的正常运转(Plumlee *et al.*, 2006)。月尘相对较大的比表面积和锋利的边缘结构很有可能影响这些颗粒在肺部的沉淀,并损害肺泡巨噬细胞等细胞组织,也增加了其迁移到血液循环中的机率。

目前,对于月尘毒理学的研究一般利用石英粉、JSC-1A-vf模拟月尘,通过动物实验分析月尘对生物体机能的影响(Holland, 1973; Batsura, 1981)。但是,由于石英粉、JSC-1A-vf模拟月尘在化学成分、物相组成以及颗粒大小和形态上与月尘存在较大差异,而这些特征恰恰可能是危害生物体的关键因素,因此通过这些实验尚未很好地认识月尘的生物毒理学危害机理(Liu *et al.*, 2008; Mayberry, 2008)。

总的来说,开展必要的实验模拟,深刻认识月尘对航天器和宇航员的主要危害机理,为月尘防护提供必要的指导是未来月球探测的迫切需求,也是月尘研究的一个重要发展方向。

3.3 模拟月尘的研制

由于月尘样品严重匮乏,不能实现系统的分析测量和模拟实验需要,因此,模拟月尘的研制成为了月尘研究的关键瓶颈。

目前,美国约翰逊空间中心研制的JSC-1A-vf是唯一一个已有报道的模拟月尘,它主要是利用矿

物组成和化学成分与Apollo 14月壤性质相似的JSC-1A模拟月壤进行研磨筛选得到的。JSC-1A-vf模拟月尘以长石为主,硅酸盐矿物约占50%,中值粒径在 $0.6\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 之间,约90%的颗粒小于 $13\ \mu\text{m}$,多为椭球体。其与月尘相比,在粒度分布、颗粒形态和组分特征等方面存在较大差异,这些差异严重制约其在月尘的电磁特性、光谱特性以及月尘危害机理实验研究中的应用(Liu *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2008)。根据实际应用需要,参照月尘的整体特征,需要进一步研制出具有更好相似性的模拟月尘。其主要改进应体现在粒度分布、物相组成以及纳米金属铁含量方面,达到中值粒径在 $100\sim 400\ \text{nm}$ 、95%以上颗粒小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 、玻璃相组成大于60%、含有一定量的纳米金属铁等基本特征要求。

为了尽快实现模拟月尘的研制,应结合国内实际情况,在已有CLRS系列模拟月壤标准样品的基础上通过矿物分选、研磨以及纳米金属铁的制备掺杂等一系列过程,最终实现模拟月尘的制备,为实验研究提供必要的替代样品。

4 结语

随着月球探测的不断发展,无人或载人月面探测、建设月球基地已成为月球探测必然的趋势,新的形势迫切要求全面认识月尘的特性和危害,从而更好地理解月尘的形成、迁移运动,解决月球表面物质演化等科学问题,指导月球探测过程中的月尘防护技术攻关,更好地推进我国乃至世界月球科学和月球探测的进一步发展。为了满足这一实际发展需要,月尘的颗粒特性、危害机理以及模拟月尘的研制等作为关键制约因素,是月尘研究的重要内容,利用实验模拟等手段,从微观的角度认识月尘颗粒的成分和结构差异、电磁特性的成因特征、光谱特性以及其粘附和生物毒理学机理是月尘研究的重要发展趋势。

References

- Allen, C. C., Morris, R. V., McKay, D. S., 1995. Experimental Space Weathering of Lunar Soils. *Meteoritics*, 30 (5): 479-480.
- Anand, M., Taylor, L. A., Nazaraov, M. A., et al., 2003. New Lunar Mineral HAPKEITE-Product of Impact-Induced Vapor-Phase Deposition in the Regolith. In: 34th Proceedings of Lunar and Planetary Science Confer-

- ence. Lunar and Planetary Institute, Houston, 1818—1819.
- Anand, M., Taylor, L. A., Nazarov, M. A., et al., 2004. Space Weathering on Airless Planetary Bodies: Clues from the Lunar Mineral Hapkeite. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(18): 6847—6851. doi: 10.1073/pnas.0401565101
- Batsura, L. D., Kruglikov, G. G., Arutyunov, V. D., 1981. Morphology of Experimental Pneumoconiosis Developing after Exposure to Lunar Soil. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 92(9): 376—379.
- Bentley, P. M., Wildes, A. R., Kilcoyne, S. H., et al., 2010. The Effect of α -Fe Crystallites on the Magnetic Structures of Fe_{100-x}Zr_x Glasses. *Journal of Physical: Conference Series*, 200(3): 3. doi: 10.1088/1742-6596/200/3/032006
- Bernatowicz, T. J., Nichols, R. H., Hohenburg, C. M., 1994. Origin of Amorphous Rims on Lunar Soil Grains. In: 25th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, XXV: 105—106.
- Bibring, J. P., Duraud, J. P., Durrieu, L., et al., 1972. Ultrathin Amorphous coatings on Lunar Dust Grains. *Science*, 175(4023): 753—755. doi: 10.1126/science.175.4023.753
- Buhler, C. R., Calle, C. R., Clements, J. S., et al., 2007. Test Method for in Situ Electrostatic Characterization of Lunar Dust. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1—19. doi:10.1109/aero.2007.352755
- Calle, C. I., Buhler, C. R., Mcfall, J. L., et al., 2009. Particle Removal by Electrostatic and Dielectrophoretic Forces for Dust Control during Lunar Exploration Missions. *Journal of Electrostatics*, 67(2—3): 89—92. doi:10.1016/j.elstat.2009.02.012
- Christoffersen, R., Keller, L. P., McKay, D. S., 1996. Microstructure, Chemistry, and Origin of Grain Rims on Ilmenite from the Lunar Soil Finest Fraction. *Meteoritics & Planetary Science*, 31(6): 835—848. doi: 10.1111/j.1945-5100.1996.tb02117.x
- Doug, R., Kenneth, W. S., 2008. Some Expected Mechanical Characteristics of Lunar Dust: A Geological View. In: Space Technology and Applications International Forum. University of New Mexico, New Mexico, AIP Conf. Proc., 969: 949—955. doi:10.1063/1.2845062
- Fischer, E. M., Pieters, C. M., 1994. Remote Determination of Exposure Degree and Iron Concentration of Lunar Soils Using VIS-NIR Spectroscopic Methods. *Icarus*, 111: 475—488.
- Fuller, M., Wu, Y. M., Wasilewski, P. J., 1975. The Magnetic Characteristics of Returned Lunar Samples and Their Implications for Regolith Processes. *Moon*, 13: 327—328.
- Grommé, C. S., Doell, R. R., 1971. Magnetic Properties of Lunar Samples 12502 and 12065. Second Lunar Science Conference. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3(Suppl. 2): 2491—2499.
- Guthrie, G. D., 1997. Mineral Properties and Their Contribution to Particle Toxicity. *Environment Health Perspective*, 105(Suppl. 5): 1003—1011.
- Hanneken, J. W., Carnes, J. G., Vant-Hull, L. L., 1976. The Frequency Dependence of the Viscous Component of the Magnetic Susceptibility of Lunar Rock and Soil Samples. *Earth and Planetary Science Letters*, 32(1): 45—50. doi:10.1016/0012-821X(76)90183-7
- Hapke, B. W., 1998. The Vapor Deposition Model of Space Weathering: Strawman Paradigm for the Moon. In: Jolliff, B. L., and Ryder, G., eds., Workshop on New Views of the Moon: Integrated Remotely Sensed, Geophysical, and Sample Datasets. Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Hapke, B. W., 2001. Space Weathering from Mercury to the Asteroid Belt. *Journal of Geophysical Research*, 106(E5): 10039—10073. doi: 10.1029/2002JE001338
- Hapke, B., Cassidy, W., Wells, E., 1975. Effects of Vapor-Phase Deposition Processes on the Optical, Chemical, and Magnetic Properties of the Lunar Regolith. *Earth, Moon, and Planets*, 13(1—3): 339—353. doi: 10.1007/BF00567525
- Heiken, G. H., Vaniman, D. T., French, B. M., 1991. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press and Lunar and Planetary Institute, Houston.
- Helsley, C., 1970. Magnetic Properties of Lunar Dust and Rock Samples. *Science*, 167(3918): 693—695. doi: 10.1126/science.167.3918.693
- Holland, J. M., Simmonds, R. C., 1973. The Mammalian Response to Lunar Particles. *Space Life Sciences*, 4(1): 97—109. doi: 10.1007/BF02626346
- Keller, L. P., McKay, D. S., 1993. Discovery of Vapor Deposits in the Lunar Regolith. *Science*, 261(5126): 1305—1307. doi: 10.1126/science.261.5126.1305
- Keller, L. P., McKay, D. S., 1994. The Nature of Agglutinitic Glass in the Fine-Size Fraction of Lunar Soil 10084. In: 25th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, XXV: 685—686.
- Keller, L. P., McKay, D. S., 1997. The Nature and Origin of Rims on Lunar Soil Grains. *Geochimica et Cosmochimi-*

- ca Acta, 61(11): 2332—2341. doi: 10. 1016/S0016—7037(97)00085—9
- Keller, L. P., Wentworth, S. J., Gezo, J., et al., 1999. Space Weathering Alteration of Lunar Soil Grains. *Lunar and Planetary Science*, XXX: 1820.
- Keller, L. P., Wentworth, S. J., McKay, D. S., 1998. Surface Correlated Nanophase Iron Metal in Lunar Soils: Petrography and Space Weathering Effects. Workshop on New View of the Moon, 44.
- Lam, C. W., James, J. T., Latch, J. N., et al., 2002a. Pulmonary Toxicity of Simulated Lunar and Martian Dusts in Mice: II. Biomarkers of Acute Responses after Intratracheal Instillation. *Inhalation Toxicology*, 14(9): 917—928.
- Lam, C. W., James, J. T., McCluskey, R., et al., 2002b. Pulmonary Toxicity of Simulated Lunar and Martian Dusts in Mice: I. Histopathology 7 and 90 Days after Intratracheal Instillation. *Inhalation Toxicology*, 14(9): 901—916.
- Larochelle, A., Schwarz, E. J., 1970. Magnetic Properties of Lunar Sample 10084—22. *Science*, 167(3918): 700—701.
- Latch, J. N., Raymond, R. F. J., Hamilton, A., et al., 2008. Toxicity of Lunar and Martian Dust Simulants to Alveolar Macrophages Isolated from Human Volunteers. *Inhalation Toxicology*, 20(2): 157—165.
- Liu, Y., Park, J. S., Hill, E., et al., 2006. Morphology and Physical Characteristics of Apollo 17 Dust Particles. In: 10th ASCE Aerospace Division International Conference, American Society for Civil Engineers Proceedings, Houston, CD-ROM.
- Liu, Y., Park, J. S., Schnare, D., et al., 2008. Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies II: Texture and Shape Characteristics. *Journal of Aerospace Engineering*, 21(4): 272—279. doi: 10. 1061/(ASCE)0893—1321(2008)21:4(272)
- Liu, Y., Schmare, J. S., Park, J. S., 2007. Shape Analyses of Lunar Dust Particles for Astronaut Toxicological Studies. In: 38th Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, XXXVIII: 1383.
- Liu, Y., Taylor, L. A., 2008. Lunar Dust: Chemistry and Physical Properties and Implications for Toxicity. *Lunar and Planetary Institute Contributions*, 1415: 2072.
- Liu, Y., Taylor, L. A., Thompson, J. R., et al., 2007. Unique Properties of Lunar Impact Glass: Nanophase Metallic Fe Synthesis. *American Mineralogist*, 92(8—9): 1420—1427. doi: 10. 2138/am. 2007. 2333
- Liu, Y., Thompson, J. R., Taylor, L. A., et al., 2007. Magnetic Properties of Unique Apollo 17 Soil 70051. In: 38th Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, XXXVIII: 1383.
- Martel, L., 2004. New Mineral Proves an Old Idea about Space Weathering. *Planetary Science Research Discoveries*, 1—7.
- Mayberry, N. K., 2008. The Lunar Environment: Determining the Health Effects of Exposure to Moon Dusts. *Acta Astronautica*, 63(7—10): 1006—1014. doi: 10. 1016/j. actaastro. 2008. 03. 015
- McKay, D., Heiken, G., Basu, A., et al., 1991. The Lunar Regolith. In: Heiken, G., Vaniman, D., French, B. M., et al., eds., *Lunar Sourcebook: A User's Guide To The Moon*. Cambridge University Press, New York.
- Miroshnichenko, L. I., 2001. *Solar Cosmic Rays*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Morea, S. F., 1992. The Lunar Roving Vehicle: Historical Perspective in NASA. In: *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*. Johnson Space Center, Houston, 2: 619—632.
- Mouélic, S. L., Lucey, P. G., Langevin, Y., et al., 2002. Calculating Iron Contents of Lunar Highland Materials Surrounding Tycho Crater from Integrated Clementine UV-Visible and Near-Infrared Data. *Journal of Geophysical Research*, 107(5074): 1—9. doi: 10. 1029/2000JE001484
- Nagata, T., Ishikawa, Y., Kinoshita, H., et al., 1970. Magnetic Properties and Natural Remanent Magnetization of Lunar Materials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Supplement: 2325—2340.
- Noble, S. K., Pieters, C. M., Taylor, L. A., et al., 2001. The Optical Properties of the Finest Fraction of Lunar Soil: Implication for Space Weathering. *Meteoritics & Planetary Science*, 36(1): 31—42. doi: 10. 1111/j. 1945—5100. 2001. tb01808. x
- Noble, S. K., Keller, L. P., 2006. Investigating the Nanoscale Complexity of Lunar Space Weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A448—A448. doi: 10. 1016/j. gca. 2006. 06. 900
- Noble, S. K., Pieters, C. M., Hirori, T., et al., 2000. Initial Results of MGM Analysis on Apollo 17 Soil Suite. In: 31th Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, XXXI: 1880.
- Ouyang, Z. Y., 2005. *Introduction of Lunar Science*. China Aerospace Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Park, J. S., Liu, Y., Kihm, K. D., et al., 2006a. Micromorphology and Toxicological Effects of Lunar Dust. In: 37th Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, 2193.

- Park, J. S., Liu, Y., Kihm, K. D., et al., 2006b. Toxicity of Lunar Dust for Humans at a Lunar Base. In: Southeastern 55th Annual Meeting. Section Geological Society of America Conference. The Geological Society of America, Knoxville, 102500.
- Park, J., Liu, Y., Kihm, K. D., et al., 2008. Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies. I: Particle Size Distribution. *Journal of Aerospace Engineering*, 21(4): 266–271. doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(266)
- Pearce, G. W., Gose, W. A., Strangway, D. W., 1973. Magnetic Studies on Apollo 15 and 16 Lunar Samples. In: 4th Proceedings of Lunar Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 4: 3045–3076.
- Pearce, G. W., Strangway, D. W., Gose, W. A., 1974. Magnetic Properties of Apollo Samples and Implications for Regolith Formation. In: 5th Proceeding Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 3: 2815–2826.
- Plumlee, G. S., Morman, S. A., Ziegler, T. L., 2006. The Toxicological Geochemistry of Earth Materials: An Overview of Processes and the Interdisciplinary Methods Used to Understand Them. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 64(1): 5–57. doi: 10.2138/rmg.2006.64.2
- Rochette, P., Gattacceca, J., Ivanov, A. V., et al., 2010. Magnetic Properties of Lunar Materials: Meteorites, Luna and Apollo Returned Samples. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(3–4): 383–391. doi: 10.1016/j.epsl.2010.02.007
- Simpson, J. A., 1983. Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 33(1): 323–381. doi: 10.1146/annurev.ns.33.120183.001543
- Stephen, J., Ronald, E. D., Robert, S. H., 1971. Lunar Dust Deposition on the Solar Absorptance of Thermal Control Materials. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 71–459.
- Stubbs, T. J., Vondrak, R. R., Farrell, W. M., 2005. Impart of Lunar Dust on the Experience Initiative. In: 36th Proceedings of Lunar Science Conference. *Lunar and Planetary Institute, Houston, XXXVI*: 2277.
- Sunshine, J. M., Pieters, C. M., 1998. Determining the Composition of Olivine from Reflectance Spectroscopy. *Journal of Geophysical Research*, 103(E6): 13675–13688. doi: 10.1029/98JE01217
- Taylor, L. A., Cahill, J. T., Patchen, A., et al., 2001. Mineralogical and Chemical Characterization of Lunar Highland Regolith: Lessons Learned from Mare Soils. In: 32th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 2196.
- Taylor, L. A., Cahill, J., et al., 2002. Mineral and Glass Characterization of Apollo 14 Soils. In: 33th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 1302.
- Taylor, L. A., Liu, Y., Zhang, A. Ch., 2009. Shape and Size Relationship of Several Lunar Dusts: Preliminary Results. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 2106.
- Taylor, L. A., Pieters, C. M., Keller, L. P., et al., 2001. Lunar Mare Soils: Space Weathering and the Major Effects of Surface-Related Nanophase Fe. *Journal of Geophysical Research*, 106(E11): 27985–27999. doi: 10.1029/2000JE001402
- Taylor, L. A., Pieters, C. M., Patchen, A., et al., 2003. Mineralogical Characterization of Lunar Highland Soils. In: 34th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 34: 1774–1775.
- Taylor, L. A., Schmitt, H., Carrier, W. D., et al., 2005. The Lunar Dust Problem: from Liability to Asset. In: 1st Space Exploration Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando, 1–8.
- Tsay, D. U., Chan, S. U., Manatt, S. L., 1971. Magnetic Resonance Studies of Apollo 11 and Apollo 12 Samples. In: Proceedings of the Second Lunar Science Conference. *Lunar and Planetary Institute, Houston*, 3: 2515–2518.
- Vernet, N. M., 2007. Basics of the Solar Wind. Cambridge University Press, New York.
- Wiesli, R. A., Beard, B. L., Taylor, L. A., et al., 2003. Space Weathering Processes on Airless Bodies: Fe Isotope Fractionation in the Lunar Regolith. *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4): 457–465. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00552-1
- Wilcox, B. B., Lucey, P. G., Gillis, J. J., 2005. Mapping Iron in the Lunar Mare: An Improved Approach. *Journal of Geophysical Research*, 110(E11001): 1–10. doi: 10.1029/2005JE002512

附中文参考文献

欧阳自远, 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社.