

# 我国低钛月海型模拟月壤初始物质 选择的地球化学依据

刘春茹<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 冯俊明<sup>1</sup>, 李雄耀<sup>1</sup>,  
付绍洪<sup>1</sup>, 欧阳自远<sup>1</sup>, 郑永春<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;  
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

**【摘要】** 以 Apollo14 月壤样品和美国 JSC-1 模拟月壤的地球化学特征为基础, 结合我国低钛玄武岩火山的分布, 对我国不同地区新生代玄武岩的化学成分、年龄、储量等方面进行对比分析结果表明, 滇西北金沙江地区和吉林辉南红旗林场-四海地区的玄武质火山喷发物的化学成分与 Apollo14 月壤样品和美国 JSC-1 模拟月壤相似, 比较适合用于我国低钛月海玄武岩模拟月壤研制的初始物质。野外地质调查发现, 吉林省辉南县金川镇红旗林场—四海一带产出的玄武质火山渣为距今 1 600 a 的该玄武质火山岩的喷发物, 其储量大、质地纯、粒度均匀, 而且比滇西北金沙江地区最近一期的玄武质火山渣新鲜, 最适合作为我国低钛月海玄武岩模拟月壤研制的初始物质。

**【关键词】** 玄武质火山渣; 矿物学; 地球化学; 模拟月壤; 中国吉林

中图分类号: P595 文献标识码: A

文章编号: 1001-6872(2007)03-0028-06

## 0 引言

整个月球表面覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃等物质组成的结构松散的风化层——月壤<sup>[1~4]</sup>。随着科学技术的发展和进步及当前的国际形势, 我国也提出了相应的月球探测计划。探月工程中所用仪器、设备的检验需要在模拟月壤铺设的月面实验场进行反复试验<sup>[2,5]</sup>; 模拟月壤还

为月球科学研究和开发利用月球资源提供重要实验基础, 因此模拟月壤在开展月球探测、开发利用月球资源、建立月球基地相关研究工作中扮演着重要的角色<sup>[6~13]</sup>。据统计, 迄今为止世界上已有美国研制的 JSC-1, MLS-1, MLS-2 和日本研制的 MKS-1, FJK-1 共 5 种模拟月壤<sup>[8,9,14~16]</sup>, 其中在工程研究中应用最多的是美国研制的 JSC-1 低钛月海型模拟月壤。目前, 美国可供使用的模拟月壤数量不多, 日本的模拟月壤在谱学表现、电学性质方面与月球样品

收稿日期: 2007-04-01; 改回日期: 2007-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40473036), 中国知识创新工程项目(No. KZCX2-115)

作者简介: 刘春茹, 女, 27 岁, 博士生, 地球化学专业, 研究方向: 环境地球化学. E-mail: liuchunru0821@126.com.

之间存在较大差异,难以满足我国探月工程中的特殊需求。因此,随着“嫦娥”探月工程的顺利实施,新的模拟月壤研制显得尤为迫切。

月壤样品以岩石类型大致可分为:低钛月海玄武岩、高钛月海玄武岩、高地斜长岩、克里普玄武岩 4 大类。目前,除根据 Apollo11 登月点的高钛月海月壤和 Apollo14 登月点的低钛月海月壤及低钛高地月壤的平均组成提出模拟月壤之外,其他 Apollo 和 Luna 采样点还没有任何模拟月壤提出。月壤样品大多含有较高体积分量的玻璃,这种玻璃是在陨石冲击月面物质产生的高温高压作用下熔融冷却形成的。为使模拟月壤中也含有相当含量的玻璃,最好是从火山喷发物质中寻找模拟月壤的初始物质。以 Apollo14 月壤样品和 JSC-1 模拟月壤为参照,通过对比分析我国不同地区新生代玄武岩的地球化学特征,寻找可用于低钛月海型模拟月壤研制的初始物质,以满足我国探月工程研究的实际需要。

## 1 Apollo14 月壤样品与 JSC-1 模拟月壤的地球化学特征

### 1.1 Apollo14 月壤样品的地球化学特征

1.1.1 化学成分 月壤的化学成分、岩石类型和矿物组成非常复杂,几乎每一个月壤样品都由多种岩石和矿物组成,并且差异较大。与地球矿物相比,月球上的矿物是在缺水和还原条件下形成的,所有矿物都不含水,也不存在含水的矿物(如粘土、云母、闪石等);钾长石和氧化硅(如石英等)虽然在地球上含量丰富,但在月球上却极为稀少;矿物中的变价元素多为低价,如 Fe 全为 FeO 和 Fe<sup>2+</sup>,没有 Fe<sup>3+</sup>, Apollo14 低钛月海型模拟月壤样品的平均化学组成  $w(B)/\%$  为: SiO<sub>2</sub> 48.10, TiO<sub>2</sub> 1.70, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 17.40, FeO 10.40, MnO 0.14, MgO 9.40, CaO 10.70, Na<sub>2</sub>O 0.70, K<sub>2</sub>O 0.55, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.51, LOI 微量,总计 99.60(Basu and Riegsecker, 1998)。

1.1.2 矿物组成 从 Apollo 各次登月点月壤的平均化学组成出发, Basu 和 Riegsecker(1998) 计算了各次登月点颗粒粒径在 90  $\mu\text{m}$ ~150  $\mu\text{m}$  之间的月壤的平均矿物组成和标准矿物组成(表 1)。平均矿物组成是在假设月壤不含石英、磷灰石和黄铁矿,而由长石、辉石、橄榄石、钛铁矿和尖晶石组成的前提

表 2 JSC-1 模拟月壤的化学成分  $w(B)/\%$

Table 2 The JSC-1 simulated chemical compositions of Moon soil(in percentage)

化学成分	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总计
JSC-1	47.71	1.59	15.02	7.35	3.44	0.18	9.01	10.42	2.70	0.82	0.66	0.11	99.01

注: LOI 为烧失量。美国研制的 JSC-1 模拟月壤的化学成分数据来源于 Mckay 等, 1993, 1994

下根据 CIPW 计算得到的; 标准矿物组成是在假设月壤中不含玻璃、角砾岩和粘合集块岩等非矿物的前提下计算得到的。这两种方法得到的计算结果之间有一定差异, 原因可能在于计算的假设前提条件并不完全成立、从化学组成出发根据 CIPW 计算矿物组成并不适合月壤样品等。

表 1 Apollo14 登月点月壤平均矿物组成、标准矿物组成 /%  
Table 1 The average mineral compositions and standard mineral components from the landing position of Apollo14 (in percentage)

矿物	长石	橄榄石	辉石	不透明矿物
平均	49.70	1.80	47.00	1.50
标准	52.90	0.00	43.50	3.60

1.1.3 相对密度 月壤颗粒的相对密度与其中不同颗粒类型(如玄武岩、矿物碎片、角砾岩、粘合集块岩、玻璃等)的相对含量有关。大部分月壤颗粒的相对密度/(g·cm<sup>-3</sup>)从 2.3~3.2 不等, 绝大部分在 2.9 以上, 明显高于地球土壤的颗粒相对密度<sup>[18]</sup>(地球土壤的颗粒密度一般为 2.6~2.8), Apollo14 的平均相对密度为 2.9<sup>[19]</sup>。

### 1.2 JSC-1 模拟月壤的地球化学特征

JSC-1 是一种富含玻璃的玄武质火山灰, 经简单加工研制而成, 主要结晶相是长石、辉石和橄榄石, 副矿物包括钛铁矿、铬铁矿和痕量粘土, 玄武质玻璃含量大约占 50%(体积比)<sup>[9]</sup>。JSC-1 模拟月壤的初始物质为旧金山 Flagstaff 附近 Merriam 火山喷发的厚达数米的黑色(局部红色)火山灰和火山砾物质, 附近火山口玄武岩流的 K-Ar 年龄为 0.15 Ma±0.03 Ma<sup>[20]</sup>。

JSC-1 模拟月壤<sup>[8,9]</sup> 是由美国国家宇航局(NASA)约翰逊空间中心(JSC)主持研制, 其化学成分与 Apollo14 登月点的低钛月海月壤相似(表 2)。JSC-1 模拟月壤的颗粒平均相对密度为 2.9 g/cm<sup>3</sup><sup>[9,21]</sup>, 与 Apollo14 的相对密度相似。

## 2 我国不同地区新生代玄武岩的地球化学特征

在地球上, 与 Apollo14 月壤样品、JSC-1 模拟月壤相似的物质为玄武质火山灰或玄武岩。由于月球表面没有水和空气, 物质不易被氧化。因此, 为了达到最佳的模拟效果, 应该选择比较年轻的玄武质

火山喷发物,以降低其受地表物质氧化和污染的程度。结合我国火山岩分布,在新生代玄武岩主要分布区(青藏高原及周边地区、东南沿海地区、华北地区、东北地区)挑选了几个有代表性的样点进行研究。

### 2.1 矿物组成

滇西北金沙江一带有强烈的火山活动,火山岩分布广泛,火山活动可分为3个演化时期,最近一期(第三期)为典型的钙碱性系列玄武岩-英安岩-安山岩-流纹岩组合<sup>[22]</sup>;江孜盆地位于西藏雅鲁藏布江以南,其大地构造位置隶属于喜马拉雅构造带,江孜盆地北缘火山岩分布的地层分属喜马拉雅特提斯沉积带和雅鲁藏布江混杂岩带,其中雅鲁藏布江混杂岩带火山岩的喷发时代为早-中三叠世<sup>[23]</sup>;图们江流域新生代火山岩以溢流式喷发为特征,其主要岩石类型以拉斑玄武岩,含少量玄武质粗安岩、碱性玄

武岩、玄武质安山岩和粗面玄武岩<sup>[24]</sup>;济阳拗陷属于渤海湾晚侏罗世—第三纪裂谷性盆地构造环绕,玄武岩主要分布于滨南、草桥、惠民等地区,岩石一般呈深灰色,基质为玻璃质或长石微晶,斑晶长石<sup>[25]</sup>;东南沿海地区新生代火山岩主要形成于新近纪—第四纪,火山岩以玄武质熔岩为主,少数为玄武质火山角砾岩,岩石为碱性系列和拉斑系列<sup>[26]</sup>;长白山火山区的第四纪火山除喷溢大量熔岩以外,在吉林辉南地区的龙岗火山群的红旗林场—四海一带还喷发出大量的玄武质火山渣<sup>[27,28]</sup>。

### 2.2 化学成分

各样点的玄武岩的化学成分分析结果见表3。为了找到可用于低钛月海型模拟月壤的初始物质,将各样点的玄武岩的化学成分分别与Apollo14、JSC-1的对应化学成分进行方差检验(权重取值为参照样品的各成分质量分数),检验结果见表4。

表3 我国不同地区低钛玄武岩的化学成分.  $w(B)/\%$

Table 3 The chemical compositions of low-Titanium basalts from different parts of China (in percentage)

取样位置	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总计	资料来源
金沙江	47.42	1.55	16.39	7.30	6.26	0.24	8.14	9.27	2.71	0.29	0.19	—	99.76	[29]
江孜盆地	44.55	4.37	15.85	12.10	3.57	0.16	4.85	4.43	3.87	0.16	0.56	4.26	102.30	[23]
图们江	50.82	2.12	16.54	7.53	2.92	0.13	5.89	8.50	3.55	0.78	0.34	0.00	102.04	[24]
渤海湾	49.06	1.14	13.07	8.33	2.64	0.17	9.23	8.64	2.50	1.03	0.48	—	96.29	[25]
东南沿海	46.70	2.72	13.78	7.68	4.28	0.18	8.35	8.63	3.10	1.72	0.73	—	97.87	[26]
红旗-四海	48.85	2.31	16.49	8.67	2.54	0.19	6.51	7.42	3.82	2.45	0.60	0.97	100.79	[28]

表4 各预选样点玄武岩化学成分与Apollo14、JSC-1的对应化学成分的方差检验结果  
Table 4 Verification of corresponding chemical compositions for Apollo14, JSC-1 and basalt

取样位置	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总计
Apollo 14	金沙江	0.22	0.00	0.18	1.04	0.00	0.15	0.22	0.03	0.00	0.00	—	1.84
	江孜盆地	6.06	0.12	0.42	2.89	0.00	1.95	4.21	0.07	0.00	0.00	0.00	15.71
	图们江	3.56	0.00	0.13	0.00	0.00	1.16	0.52	0.06	0.00	0.00	0.00	5.42
	渤海湾	0.44	0.01	3.26	0.03	0.00	0.00	0.45	0.02	0.00	0.00	—	4.23
	东南沿海	0.94	0.02	2.28	0.25	0.00	0.10	0.46	0.04	0.01	0.00	—	4.10
红旗-四海	0.27	0.01	0.14	0.07	0.00	0.79	1.15	0.07	0.02	0.00	0.00	2.52	
JSC-1	金沙江	0.04	0.00	0.28	0.00	0.27	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	—	0.81
	江孜盆地	4.76	0.12	0.10	1.66	0.00	1.56	3.74	0.04	0.00	0.00	0.02	11.99
	图们江	4.61	0.00	0.35	0.00	0.01	0.00	0.88	0.38	0.02	0.00	0.00	6.26
	渤海湾	0.87	0.00	0.57	0.07	0.02	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	—	1.87
	东南沿海	0.49	0.02	0.23	0.01	0.02	0.00	0.04	0.33	0.00	0.01	0.00	1.15
红旗-四海	0.61	0.01	0.32	0.13	0.03	0.00	0.57	0.94	0.03	0.02	0.00	2.66	

注:各样点的化学成分与Apollo14进行比较时,由于Apollo14的Fe为二价铁,为了比较,将各样点中的FeO和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>简单合并为一个值

从表4可以看出,与Apollo14月壤样品的化学成分相似的样点是滇西北金沙江地区的玄武岩、吉林辉南红旗林场-四海地区的玄武岩,同时这两个样点也与JSC-1模拟月壤的化学成分相似。虽然渤海湾和东南沿海的玄武岩的化学成分与JSC-1的化学成分也很相似,但与Apollo14的化学成分相似性较低。因此,从化学成分上看,滇西北金沙江地区和吉林辉南红旗林场-四海地区的玄武岩的火山喷发物(火山渣)比较适合用于我国低钛月海玄武岩模拟月壤研制的初始物质。

资料表明吉林省辉南县金川镇红旗林场—四海一带产出的玄武质火山渣为距今1600a的该玄武质火山岩的喷发物,面积约数十平方公里,以其储量大、质地纯、粒度均匀优于其他地方<sup>[27,28]</sup>。与滇西北金沙江地区最近一期的玄武质火山渣比较,吉林地区的玄武质火山喷发物比较新鲜且储量大,很适合作为我国低钛月海玄武岩模拟月壤研制的初始物质。

对吉林辉南县金川镇红旗林场—四海一带的火山渣层进行野外地质踏勘后,选定红旗林场采集的黑色火山渣约20多千克作为实验室样品。

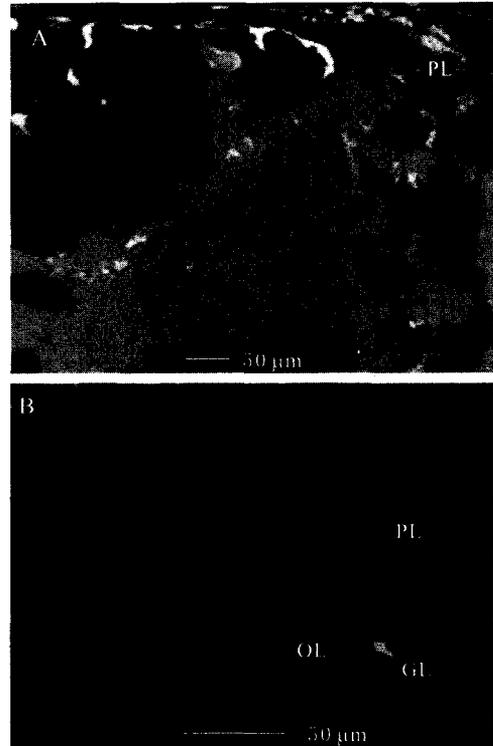
### 3 金川火山渣的地球化学特征

金川黑色火山渣外观形态为黑色,形状似焦炭,多气孔,平均粒度 3 mm~10 mm。除含少量玄武岩碎块外(≤1%),无杂质,质地新鲜,无风化产物。

#### 3.1 矿物组成

金川火山渣矿物组成的鉴定分析方法是将样品制成薄片,在偏光显微镜下根据不同矿物光学性能差异定名,确定矿物组成及估算含量。对于一些微小矿物或光学难确定矿物,辅以扫描电镜和 X 射线衍射分析。分析结果显示,金川火山渣主要矿物组成为橄榄石、辉石、长石、钛铁矿等,并含有大量的火山玻璃(≥50%),与美国研制的 JSC-1 模拟月壤的主要矿物成分基本一致(照片 1,图 1)。

Basu 和 Riegsecker (1998)从化学成分出发,根据 CIPW 计算得到 Apollo14 月壤样品的平均矿物组成为长石 49.7%、辉石 47.0%、橄榄石 1.8%、不透明矿物 1.5%(表 1),此结果与金川镇火山渣、JSC-1 模拟月壤的矿物组成之间都存在一定的差异。岩石学研究认为,从化学组成出发根据 CIPW 计算矿物组成并不能反映非晶质玻璃含量,所以不能完全反映月壤的真实矿物组成。这也说明,对火山渣矿物组成采用的分析鉴定方法是适宜的。



照片 1 扫描电镜背散射电子图像  
A. 金川镇火山渣的扫描电镜背散射电子图像; B. 美国研制的 JSC-1 模拟月壤的扫描电镜背散射电子图像,图像来源 McKay *et al.*, 1994; GL. 玻璃; PL. 长石; OL. 橄榄石

Photo 1 Image of SEM

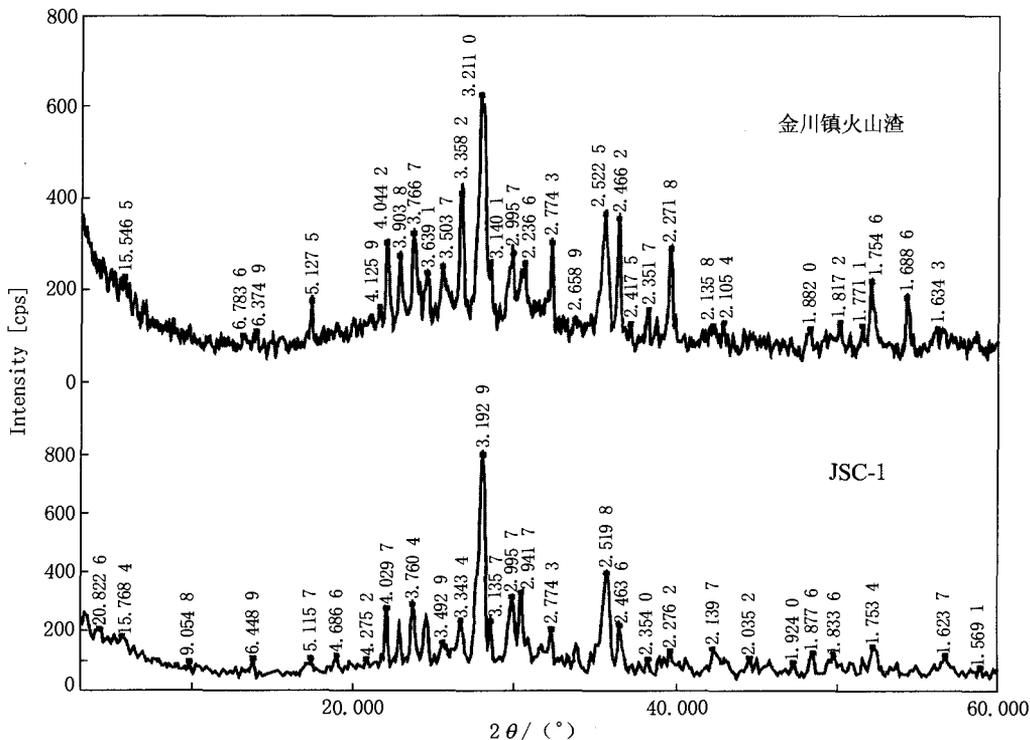


图 1 X 射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction diagram

#### 3.2 化学成分

采用 X 荧光光谱法对金川火山渣的化学成分

进行分析(其中 FeO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 用化学分析方法分析),这种火山渣的化学成分与其下覆玄武质火山岩

的化学成分基本一致,由此可判定该火山渣为玄武质火山渣(表5),将金川火山渣的化学成分与 Apollo14、JSC-1 的对应化学成分进行方差检验,结果表明金川火山渣与 JSC-1 模拟月壤、Apollo14 月壤样

品的化学成分比较接近(表6)。

### 3.3 相对密度

金川火山渣的相对密度测量采用相对密度瓶法。相对密度瓶法是测量颗粒密度或相对密度最为

表5 金川火山渣、金川火山岩的化学成分.  $w(B)/\%$

化学成份	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总计
金川火山渣(平均)	49.24	1.91	14.83	7.89	3.58	0.14	9.81	7.25	3.08	1.03	0.30	0.52	99.58
金川火山岩	48.75	1.77	15.87	7.83	3.63	0.16	7.48	7.27	3.67	2.19	0.36	—	98.98

表6 金川火山渣化学成分与 Apollo14、JSC-1 的对应化学成分的方差检验结果

化学成份	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总计
JSC-1	1.12	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.06	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	2.25
Apollo14	0.63	0.00	1.15	0.12	—	0.00	0.02	1.27	0.00	0.00	0.00	—	3.19

经典的方法,也是精确度较高的方法。多次测量结果的平均值为 2.74,测量时的环境温度为 25℃。

## 4 讨论

通过对我国新生代的玄武岩地质地球化学研究,与真实月壤和国外模拟月壤各参数的比较,选定金川火山渣作为我国模拟月壤(低钛玄武岩)的初始物质。金川火山渣样品与 Apollo14 月壤样品、JSC-1 模拟月壤的化学成分相似。由于地球与月球形成条件不同(如月壤样品不存在 Fe<sup>3+</sup>,钾、钠含量偏低等,这说明两个星球的地球化学特征不同),这种玄武岩质火山渣和 Apollo14 月壤样品的化学成分存在差异,但主要组成元素化合物指标与 Apollo14 月壤样品基本一致。

矿物组成和相对密度是样品化学组成在物质结构状态与物理性能上的对应反映。金川火山渣样品与美国研制的 JSC-1 模拟月壤的矿物组成基本接近。由于 Apollo14 月壤样品的矿物组成是根据 CIPW 的计算值,因此与金川火山渣样品不具有可比性。

金川火山渣样品的密度较美国研制的 JSC-1 模拟月壤的密度(2.9 g/cm<sup>3</sup>)和 Apollo14 月壤样品的

密度(2.9 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[18]</sup>要小一些,这可能是由于测试过程种没有将火山渣中的气体完全排净而导致的结果。另外,由于它们各自在岩石化学组成和矿物组成上的微小差别,实际月壤中含钙铁成分的矿物比例偏高,所以相对密度偏大。

金川火山渣与 Apollo14 月壤样品、JSC-1 模拟月壤相比,三者具有相同或相似的地球化学特征。因此,金川火山渣可作为月壤样品的参照物质,是一种良好的可用于模拟月壤研制的初始物质。

## 5 结论

通过对我国新生代火山岩的化学成分、矿物成分比较,滇西北金沙江地区和吉林辉南红旗林场-四海地区玄武岩质的化学成分与 Apollo14 月壤样品和美国 JSC-1 模拟月壤相似,其火山喷发物(火山渣)比较适合用于我国低钛月海玄武岩模拟月壤研制的初始物质。但比较而言,吉林省辉南县金川镇红旗林场-四海一带产出的玄武质火山渣储量大、质地纯、粒度均匀,而且比滇西北金沙江地区最近一期的玄武质火山渣新鲜,非常适合作为我国低钛月海玄武岩模拟月壤研制的初始物质。

## 参考文献

- [1] Vaniman D. Exploration, samples and recent concepts of the Moon[A]. Heiken G H, Vaniman D T, French B M ed. *Lunar source book: A user's guide to the Moon*[C]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1991, 5-26.
- [2] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data[J]. *Icarus*, 2001, 149(2): 329-338.
- [3] McKay D. The lunar regolith[A]. Heiken G H, Vaniman D T, French B M ed. *Lunar Source Book*[C]. New York: Cambridge Univ. Press, 1991, 285-356.
- [4] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. *矿物岩石*, 2005, 24(4): 14-19.
- [5] 郑永春, 王世杰, 刘建忠, 等. 模拟月壤研制的初步设想[J]. *空间科学学报*, 2005, 25(1): 70-75.
- [6] Allen C. Sintering of lunar glass and basalt[A]. *Engineering, Construction, and Operations in Space III*[C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1992.
- [7] Desai C S, Saadatmanesh H, Allen T. Behavior of compacted lunar simulants using new vacuum triaxial device[J]. *Aeros Eng*, 1992, 5(4): 425-441.
- [8] Mckay D S, Carter J L, Boles W W, et al. JSC-1: A New Lunar Regolith Simulant[A]. *Lunar and Planetary Science XXIV*[C]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1993, 963-964.
- [9] Mckay D S, Carter J L, Boles W W, et al. A new lunar soil stimulant[A]. *Engineering, Construction, and Operations in Space IV*[C]. American Society of Civil Engineers, 1994, 857-866.
- [10] Willman B M. Properties of lunar soil stimulant JSC-1[J]. *Aeros Eng*, 1995, 8(2): 77-87.

- [11] Willman B M, Boles W W. Soil-tool interaction theories as they apply to lunar soil stimulant[J]. *Aeros Eng*, 1995, 8(2): 88-99.
- [12] Horanyi M, Robertson S, Walch B. Electrostatic charging properties of simulated lunar dust simulants JSC-1 and MLS-1[J]. *Geophys Res Lett*, 1995, 22; 2 079-2 082.
- [13] Hayes S, Hamlett H, Bustin R. Carbon reduction of iron oxides in lunar simulants[A]. *Proceedings the 1996 5th International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Space*[C]. Albuquerque, NM, 1996, Part 2 (of 2).
- [14] Weiblen P W, Murawa M J, Reid K J. *Preparation of simulants for lunar surface materials*[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1990, 428-435.
- [15] Kanamori H, Udagawa S, Yoshida T, et al. Properties of lunar soil stimulant manufactured in Japan[A]. Albuquerque, N M. *Proceedings of the International Conference and Exposition on Engineering, Construction, and Operations in Space*[C]. USA. ASCE, 1998, 462-468.
- [16] Yoshida H, Watanabe T, Kanamori H, et al. Experimental Study on Water Production by Hydrogen Reduction of Lunar Soil Simulant in a Fixed Bed Reactor[J]. *Golden, USA*, 2000, 75.
- [17] Basu A, Riegsecker S E. Reliability of Calculating Average Soil Composition of Apollo Landing Sites, Workshop on New Views of the Moon: Integrated Remotely Sensed[J]. *Geophysical, and Sample Datasets*, 1998, 20.
- [18] Duke M B, Woo C C, Sellers G A, et al. Genesis of lunar soil at Tranquillity Base, Proc. Apollo 11 Lunar Science Conf. Pergamon, New York, 1970, 347-361.
- [19] Carrier W D, Olhoeft G R, Mendell W. Physical properties of the lunar surface[A]. In: Heiken G H, Vaniman D T, French B M (Editors). *Lunar Source book*[C]. Cambridge Univ Press, New York, 1991, 475-594.
- [20] Moore R B, Wolfe E W. Geologic Map of the East Part of the San Francisco Volcanic Field, North-Central Arizona. U S Geological Survey, Washington, D C, 1987.
- [21] Willman B M, Boles W W, McKay D S, et al. Properties of lunar soil stimulant JSC-1[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(1): 13A.
- [22] 何龙清. 金沙江造山带的大地构造环境及演化模式[J]. *现代地质*, 1998, 12(2): 185-191.
- [23] 周志广, 刘文灿, 梁定益, 等. 藏南江孜盆地北缘火山岩地球化学特征及其大地构造背景[J]. *地质通报*, 2005, 24(4): 341-348.
- [24] 王团华, 樊祺诚, 孙 谦, 等. 长白山区图们江流域新生代火山岩的岩石化学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1 481-1 490.
- [25] 赵国连. 济阳凹陷火山岩的岩石学与地球化学[J]. *矿物学报*, 2006, 26(3): 335-345.
- [26] 赵海玲, 狄永军, 刘振文, 等. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱[J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 781-788.
- [27] 刘嘉麒. *中国火山*[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [28] 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等. 龙岗金龙顶子近代活动火山的岩石学与地球化学[J]. *岩石学报*, 1999, 15(4): 584-589.
- [29] 谢 静, 朱炳泉, 常向阳. 滇西北金沙江带中基性火山岩的地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(4): 299-308.

## THE GEOCHEMISTRY EVIDENCE FOR SELECTING THE SUITABLE RAW MATERIAL IN CHINA TO SIMULATE THE LOW TITANIUM LUNAR SOIL FROM LUNA-SEA BASALT

LIU Chun-ru<sup>1</sup>, WANG Shi-jie<sup>2</sup>, FENG Jun-ming<sup>2</sup>, LI Xiong-yao<sup>2</sup>,  
FU Shao-hong<sup>2</sup>, OUYANG Zi-yuan<sup>2</sup>, ZHENG Yong-chun<sup>3</sup>

1. *The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;*
2. *The State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*
3. *national Astronomical Observatories, Chinese Academy Sciences, Beijing 100012, China*

**Abstract:** The geochemistry characteristics of the lunar soil sample obtained in Apollo14 mission and the lunar soil simulations (JSC-1) were used to compare and contrast with the relative density, chemical and mineral composition of Cenozoic basalt volcanic in China. The result shows that the chemical and mineral composition of Cenozoic basalt volcanic collected at Jinchuan, Jinlin Province are extremely similar to the lunar soil sample obtained in Apollo14 mission and the lunar soil simulations (JSC-1). It is indicated that the basalt and volcanic breccia from Jinchuan are characteristic of uniform grain size, pure texture and large reserves. These volcanic products can be used as the original matters to simulate the low titanium lunar soil production.

**Key words:** basalt volcanic breccia; mineralogy; geochemistry; the lunar soil simulations; Jinlin China

ISSN 1001-6872(2007)03-0028-06; CODEN: KUYAE2

**Synopsis of the first author:** Liu Chunru, female, 27 years old, a Ph D of geochemistry. Now he is in engaged in the research of environment geochemistry. E-mail: liuchunru0821@126.com