

月球某些资源的开发利用前景

欧阳自远^{1,2} 邹永廖^{1,2} 李春来^{1,2} 刘建忠^{1,2}

(1.中国科学院地球化学研究所,贵州贵阳 550002 2.中国科学院国家天文台,北京 100012)

摘要:21世纪月球探测的主要趋势是建立月球基地,开发利用月球的矿产资源、能源和特殊环境,为人类社会的可持续发展发挥长期而有效的支撑作用.通过对月海玄武岩中的钛铁矿、克里普岩中的U、Th、REE和月壤中的氦-3在月面的含量与分布的系统分析,月海玄武岩中蕴藏有极丰富的钛铁矿, TiO₂总资源量超过70万亿t,钛铁矿还是月球基地生产水和火箭燃料的主要原料,克里普岩是未来月球探测与研究的热点之一,其蕴藏有巨量的铀、钍、钾、磷和稀土元素资源,月壤长期受到太阳风的照射,使其蕴藏有极其丰富的氢、氦、氧、氮等气体资源,其中氦-3的资源量大于100万t,它是一种可供人类社会长期使用的、安全、清洁、高效、廉价的核聚变发电燃料,其含量与月壤的化学成分、矿物组分、颗粒大小等有密切的关系.

关键词:月球资源;月海玄武岩;克里普岩;月壤.

中图分类号:P184.5 文献标识码:A

文章编号:1000-238X(2002)05-0498-06

作者简介:欧阳自远(1935-),男,中国科学院院士,研究员,主要从事天体化学、地球化学、资源与环境地球化学领域的研究工作,最近主要从事月球探测与月球科学的研究.

0 引言

月球是人类探测与研究程度最高的地外天体,它还是人类飞向深空、开发深空的首选目标和中转站.人类对月球的观察、探测与研究贯穿了人类的整个文明史,大体上可分为4个阶段^[1~3](1)1959年以前,人类只能用肉眼和望远镜对月球进行描述性、甚至是想象性的观察(2)1959年—1976年,美国和前苏联展开了以月球探测为中心的空间科学和技术的激烈竞争,发射了87枚月球探测器,对月球进行了系统的研究,取得了一系列划时代的成就,实现了人类登月的壮举(3)1976年—1994年的18年间几乎停止了探月活动,是月球探测活动的低潮期(4)尽管1986年美国就提出“重返月球、建立月球基地”的设想,但真正掀起新一轮探月高潮是由美国于1994年1月25日发射的“克莱门汀”号探月器和1998年1月7日发射的“月球勘探者”号环月探测器,标志着“又快、又好、又省”的空间探测战略与重返月球计划的开始实施.

21世纪的前20年将是月球探测的另一个高潮.欧洲空间局(ESA)1994年就提出重返月球建立月球基地的计划,SMART-1月球卫星计划在2003年发射,对月球进行资源调查和成像分析.美国预计在2020年前实现重新载人登上月球,在月球上建立适于居住的前哨站,逐步建立第1个具有生命保障系统的受控生态环境的月球基地,进行月面建筑、运输、采矿、材料加工和各项科学研究.日本也制定了雄心勃勃的探月计划,将在21世纪初发射“月神号”、“月球-A”探测器,在进行月球的全球性地形地貌、矿物岩石成分和内部结构的探测基础上,至2015年将发射月球轨道卫星系列探月器,进一步探讨月球的全球性演化;2015年后,拟建立一个采用大型太阳阵和红外干涉仪的月球极区定位观测站,对月球开展系统而深入的研究.俄罗斯也制定了月球探测和建立月球基地的长远规划,通过月球轨道卫星、月球车月面软着陆等探测,确定氦-3开采区和建立月球基地的位置.印度计划于2005年发射绕月飞行的月球探测卫星,对月球进行首次探测.德国、英国、乌克兰、奥地利等国也提出了各自的月球探测计划.

尽管月球探测与科学研究已经取得了巨大成

果,但登月取样还仅局限于月球正面,取样点连线控制的面积约占月球面积的 5%,至今人类对月球的整体性了解仍较肤浅。目前,月球研究的科学问题已跨越了描述性和解释性阶段,侧重于机制与成因的解释,而月球研究的应用问题也已提到议事日程,主要侧重于能源、矿产资源和特殊环境开发利用的评估与实施方案的预研究。月球是人类社会的资源与能源的巨大储存库,并将为人类社会的可持续发展发挥长期而有效的支撑作用。未来的探月活动的总趋势必将朝着为解决以下几个问题的方向而进行:(1)月球能源资源的全球分布和利用方案研究(2)月球矿产资源的全球分布和利用方案研究(3)月球特殊空间环境资源(超高真空、无大气活动、无磁场、地质构造稳定、弱重力、无污染)的开发利用(4)建立月球基地的优选位置和方案。

1 月球的某些特征矿产资源

经长期研究^[1]证明月球内部的地质构造活动历史集中在距今 $46 \times 10^8 \sim 31.5 \times 10^8$ a 间,主要的演化事件如图 1 (1)前雨海纪($40 \times 10^8 \sim 40.5 \times 10^8$ a),月球早期熔融,全球性岩浆洋的发育,岩浆分异形成斜长岩、富镁结晶岩套和克里普岩(KREEP 岩——富含 K、REE 和 P 的岩石)的月壳(月陆)(2)雨海纪($40.5 \times 10^8 \sim 39 \times 10^8$ a),大量小天体撞击月球,开掘形成大型月海盆地(3)风暴洋纪($39 \times 10^8 \sim 31.5 \times 10^8$ a)在月海盆地内大面积月海玄武岩喷发,形成月海充填事件(4)爱拉托逊纪($31.5 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8$ a),小天体不断撞击月球,在月陆和月

海表面形成大小不等的撞击坑(5)哥白尼纪(8×10^8 a 至今),小天体撞击月球,形成有辐射纹的撞击坑。自距今 31.5×10^8 a 以来,月球只是一个固化的岩石躯壳在围绕地球旋转。月表的岩石受到小天体频繁撞击、破碎、溅射和太阳的辐射,形成厚达 3~20 m 覆盖月表的月壤层。

1.1 月海玄武岩与钛铁矿

阿波罗 6 次登月取回的样品及 3 次月球号探测器所带回的月壤样品的分析表明,月海玄武岩含 TiO_2 的范围为 0.5%~13%。根据 TiO_2 的质量分数,月海玄武岩分为高钛玄武岩、中钛玄武岩、低钛玄武岩和高铝玄武岩。各类月海玄武岩的矿物组成主要由辉石、长石、橄榄石和钛铁矿组成。高钛月海玄武岩中 TiO_2 的质量分数大于 7.5%,中钛玄武岩为 4.5%~7.5%,低钛玄武岩和高铝玄武岩中 TiO_2 的质量分数均小于 4.5%。

上述分析结果也可从“克莱门汀”(Clementine)和“月球勘探者”(Lunar prospector)(图 2)的探测结果中得到证实^[4]。从图中可以看出,高 Fe、Ti 区域主要分布于月海玄武岩的分布区域。

月面上有 22 个月海,除东海、莫斯科海和智海位于月球的背面外,其他 19 个月海都分布在月球的正面,为粗略估算月海玄武岩中钛铁矿的资源量,过去只能根据撞击坑(或盆地)的形貌、地层与地形的关系和有关的地球物理参数来估算玄武岩的厚度^[8~10],目前较为通用的计算方法是根据撞击坑(盆地)的周边溅射物的多光谱成像数据来判断月海物质(玄武岩)和高地物质(斜长岩)的分布特征,再利用上述成坑模式推算出月海盆地玄武岩的延伸深度,进而计算玄武岩的体积。Head 等^[11,12]和 Budney 等^[13]依据克莱门汀多光谱成像数据对直径约 425 km 的湿海中的玄武岩厚度进行了定量模式计算,并推算出其对应玄武岩的体积约 4 万 km^3 。据此模式,我们对月表上其他月海的玄武岩的体积也进行了粗略估算,月球上 22 个月海中所充填的玄武岩总体积约 106 万 km^3 。

若以钛铁矿质量分数超过 8%,即 TiO_2 的质量分数大于 4.2% 的月海玄武岩进行估算,通过多光谱成像数据(图 2b)分析,玄武岩中 TiO_2 质量分数大于 4.2% 的月海玄武岩占月海玄武岩总体积的 30% 左右,则钛铁矿($FeTiO_3$)的总资源量约为 150 万亿 t。根据月球正面月海玄武岩厚度分布图(图 3)^[14],估算玄武岩总体积和钛铁矿($FeTiO_3$)的总资源量分别为 80~160 万 km^3 和 100~200 万亿 t。根据月球正面玄武岩中 TiO_2 质量分数分布(图 4)^[15],估算 TiO_2 质

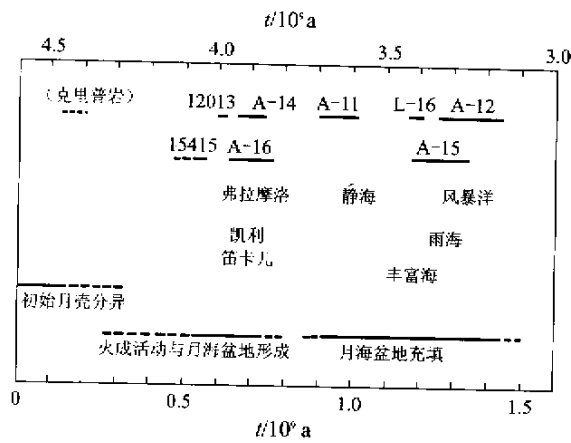


图 1 月球主要演化事件年代分布

Fig. 1 Ages of lunar main evolutionary events
实线为已测定的事件年龄;虚线为推测的事件年龄;12013 及 15415 为阿波罗 12 与 15 的样品编号;A-11, A-12, A-14, A-15 及 A-15 为阿波罗样品 L-16 为月球 16 号样品

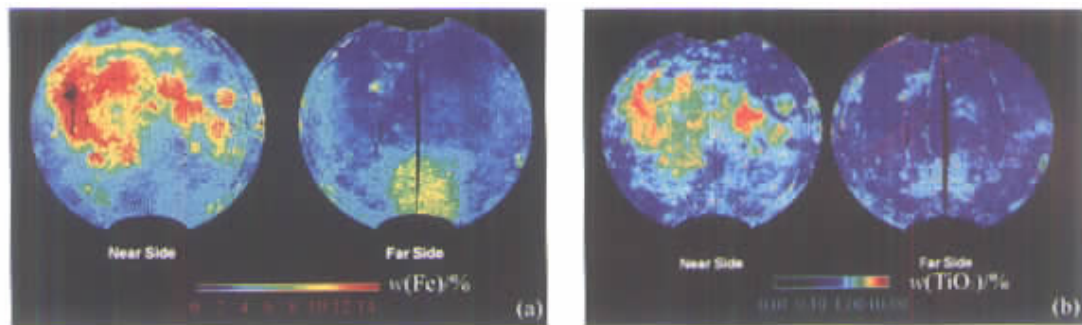


图 2 月球表面铁和钛的质量分数分布^[5]

Fig.2 Mass fractions of iron and titanium on the lunar surface

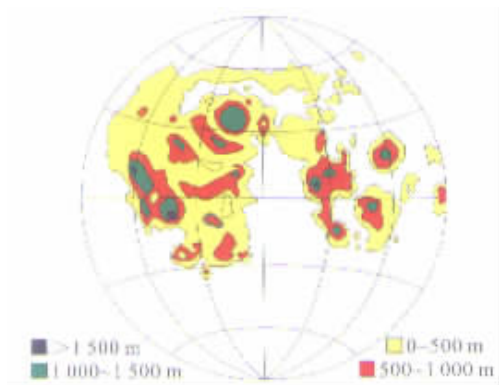


图 3 月球正面月海盆地内玄武岩的厚度分布^[14]

Fig.3 Basalt thickness on the lunar mare basin

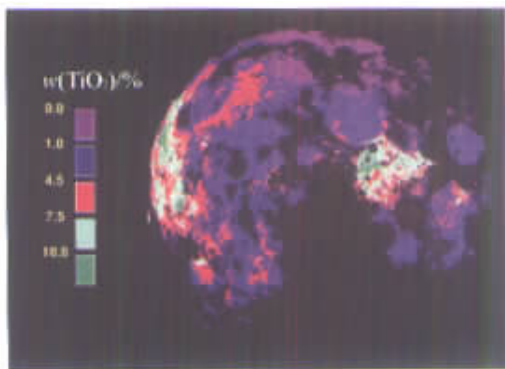


图 4 月球正面 TiO₂ 质量分数分布^[15]

Fig.4 Mass fraction of TiO₂ on the lunar nearside surface

量分数大于 4.5% 的月海玄武岩中 TiO₂ 的总资源量为 70 ~ 100 万亿 t, 钛铁矿 (FeTiO₃) 的总资源量为 130 ~ 190 万亿 t. 尽管上述估算带有很大的推测性与不确定性, 但可以肯定月海玄武岩中蕴藏有丰富的钛铁矿. 钛铁矿不仅是生产金属铁、钛的原料, 还是生产水和火箭燃料液氧的主要原料, 是未来月球开发利用的最重要的矿产资源之一.

1.2 克里普岩与稀土元素、钍、铀等资源

克里普岩 (KREEP) 是高地三大岩石类型之一, 因富含 K (钾) REE (稀土元素) 和 P (磷) 而得名. 克里普岩最早在阿波罗 - 12 样品 (12013 号样品) 中发现, 实际上克里普岩在月球上分布很广泛. 阿波罗 - 12, 14, 15, 16, 17 所采集的克里普岩中稀土元素的配分模式相近似, 以及 $w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$ 和 $w(^{143}\text{Nd})/w(^{147}\text{Nd})$ 的比值都比较接近, 说明了所有的克里普岩属同源的, 是岩浆分异或残余熔浆结晶形成的富含挥发组分元素的岩石^[1-3, 14, 16-18]. 根据克里普岩中钾质量分数的高低, 又可分为高钾 ($w(\text{K}) > 0.7\%$) 克里普岩、中钾 ($w(\text{K}) = 0.35\% \sim 0.7\%$) 克里普岩和低钾 ($w(\text{K}) < 0.35\%$) 克里普岩.

根据 Clementine 和 Lunar prospector 的探测结果^[4, 10, 15], 发现在月球正面风暴洋区域的 Th 的质量分数大于 3.5×10^{-6} (有些甚至高达 9×10^{-6}). 进一步分析发现, 这一区域可能就是克里普岩分布区^[4, 10, 15]. 即由于克里普岩被该区月海玄武岩所覆盖, 加之更晚期的撞击作用挖掘、掀起下覆的克里普岩, 使克里普岩与月海玄武岩混合并形成了所谓的高 Th 物质区. 根据这一看法, Haskin 等^[10] 对其形成演化进行了模式推导, 认为风暴洋区月海玄武岩覆盖着一层比月海玄武岩厚得多的克里普岩, 其厚度估计有 10 ~ 20 km. 可见, 风暴洋区克里普岩的体积是相当巨大的, 也就是说, 克里普岩中含有巨量的稀土元素乃至铀、钍和钾.

尽管对克里普岩分布区域的争论, 以及目前还无法估算出克里普岩的总体积, 会对评估克里普岩中的稀土元素乃至钍、铀等重要资源性元素的资源量产生影响, 但克里普岩中所蕴藏的丰富的稀土元

表 1 标准状态下月壤细颗粒中的稀有气体质量体积^[1,2]

Table 1 Concentrations of rare gases in the lunar regolith under the standard temperature and pressure (cm³·g⁻¹)

样品	$\alpha(^4\text{He})/10^{-2}$	$\alpha(^{20}\text{Ne})/10^{-4}$	$\alpha(^{36}\text{Ar})/10^{-4}$	$\alpha(^{84}\text{Kr})/10^{-8}$	$\alpha(^{132}\text{Xe})/10^{-8}$	合计
Apollo-11	11.0 ~ 25.0	20.0 ~ 31.0	3.3 ~ 4.1	16.0 ~ 38.0	2.1 ~ 10.0	52.4 ~ 106.1
Apollo-12	4.0 ~ 38.0	7.0 ~ 61.0	1.2 ~ 3.1	4.0 ~ 20.0	1.1 ~ 2.6	17.3 ~ 127.7
Apollo-14	5.0 ~ 9.0	9.0 ~ 16.0	2.4 ~ 4.4	9.0 ~ 24.0	1.4 ~ 4.6	26.8 ~ 58.0
Apollo-15	4.0 ~ 10.0	7.0 ~ 22.0	0.9 ~ 4.1	4.4 ~ 24.0	0.6 ~ 3.3	16.9 ~ 63.4
Apollo-16	0.6 ~ 5.1	2.4 ~ 13.0	1.3 ~ 6.0	4.5 ~ 34.0	1.0 ~ 6.5	9.8 ~ 64.6
Apollo-17(月海)	12.0 ~ 29.0	14.0 ~ 45.0	1.6 ~ 6.2	3.7 ~ 16.0	1.3 ~ 2.4	32.6 ~ 98.6
Apollo-17(高地)	5.9 ~ 16.0	12.0 ~ 28.0	2.5 ~ 4.9	10.0 ~ 18.0	1.8 ~ 2.9	32.2 ~ 69.8
Luna-16	18.0	34.0	5.4	22.0	8.5	87.9
Luna-20	3.81	10.1	2.88	10.9	2.25	29.94

素及放射性元素钍、铀是未来人类开发利用月球资源的重要矿产资源之一,为未来月球资源开发与利用提供了广阔的探测与研究前景。

1.3 月壤与核聚变原料——氦-3

根据已有的探测结果分析,除了极少数非常陡峭的撞击坑和火山通道的峭壁可能有裸露的基岩外,整个月球表面都覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃物质组成的、结构松散的、厚度为 1~20 m 的混合物,即月壤。月海区月壤厚度平均为 4~5 m,高地区平均约 10 m。

月壤中绝大部分物质是就地及邻近地区物质提供的,大约 50% 以上来自附近 3 km 范围,有 5% 左右来自 100 km 以外的溅射物,而来自 1 000 km 以外的溅射物仅占 0.5%^[2,14]。

“阿波罗-15号”探测器钻取的 243 cm 的土壤岩心钻孔的分析与研究表明,月壤结构松散,可划分出 42 层不同的月壤结构单元,每个单元从几 mm 到 13 cm 不等,这是由于长期受陨石冲击及其溅射物的堆积所造成。对月壤的形成机制与过程的研究表明,月壤的粒度以小于 90 μm 的颗粒含量最高。

月壤的成分极为复杂,加上由于月球几乎没有大气层,月球表面长期受到微陨石的冲击及太阳风粒子的注入,使月球表面的挥发性元素,如 Ag、Br、Cd、Ga、Ge、Hg、In、Pb、Sb、Te 和 Sn 等产生迁移并富集于月壤颗粒表面,特别是太阳风粒子的注入使月壤富含稀有气体组分。表 1 是 Apollo 和 Luna 月壤样品稀有气体组分的分析结果。可以看出,月壤中稀有气体质量体积很高,达 10~128 cm³/g(标准状态下)。

研究表明^[1,14],月壤颗粒吸附的稀有气体质量体积不但与月壤颗粒大小有关,也与月壤中的矿物组成、元素成分与结构特征有关。月壤中的稀有气体质量体积与颗粒粒度呈线性反相关关系,即稀有气体的质量体积随粒度的增大而减少;所有的返月样

品分析都表明,钛铁矿捕获的稀有气体的质量体积是最高的。图 5 是不同矿物组成、不同颗粒大小下所捕获的稀有气体质量体积,可以看出,钛铁矿捕获的稀有气体质量体积明显比辉石高得多,而且随着颗粒变小稀有气体的质量体积增加^[1,2]。特别需要强调的一点是,在整个月球演化史中,由于外来物体对月球表面的频繁撞击,使月球表面物质完全混合,在深达数 m 的月壤中这些亲气元素含量较均匀,但由于太阳风离子注入物体暴露表面的深度一般小于 0.2 μm,因此这些元素在细粒月壤中平均含量最高,有些月壤细粒粉末中稀有气体质量体积高达 0.1~1 cm³/g(标准状态下),相当于原子数 10¹⁹~10²⁰ cm⁻³。

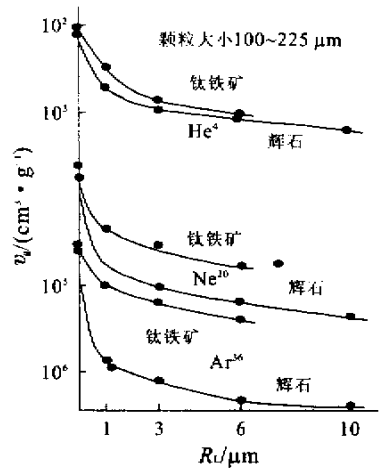


图 5 月球土壤 12070 样品中的稀有气体质量体积与矿物、粒度关系^[1]

Fig.5 Relation between the concentration of rare gas elements in the lunar regolith (sample No. 12070) and minerals, granularity^[1]

氦-3 在月壤中的平均质量分数为 $(3 \sim 4) \times 10^{-9}$ 对于成熟月壤而言, He 的质量分数较为稳定. 以 Apollo 和 Luna 的实测结果为参考标准计算, 月壤中 ^3He 的资源总量可达 100 ~ 500 万 t. 地球上天然气中可提取的氦-3 是非常少的, 只有 15 ~ 20 t. 建设一个 500 MW 的 D- ^3He 核聚变发电站, 每年消耗的 ^3He 仅需 50 kg. 美国如果全部采用 D- ^3He 核聚变发电, 年发电总量仅需消耗 25 t 的 ^3He , 而中国需 8 t 的 ^3He , 全世界年总用电约需 100 t 的 ^3He . 也就是说, 月壤中的氦-3 可供地球用于核聚变发电近万年. 因此, 开发月壤中所蕴涵的丰富的氦-3 对人类未来能源的可持续发展具有重要而深远的意义.

随着科技的发展和进步, 核聚变发电装置的商业化和航天运输成本的日益降低, 地-月之间的运输成本将降低到可以接受的程度, 并且随着人们生活水平的进一步提高, 人们环保意识将逐渐增强, 因此 ^3He 作为一种清洁、高效、安全的核聚变发电燃料是有广阔前景的. 月壤中蕴藏有丰富的的气体资源, 人类要开发月球, 建立月球基地, 必然要在月球上获取维持生命系统的各种气体, 如 O、H、 ^4He 、N 等, 从月壤中提取 1 t 的 ^3He 可同时获得 3 125 t 的 ^4He 、6 000 t H_2 、700 t N_2 等, 同时氦-3 可作为副产品来进行开发, 将会进一步降低成本.

综上所述, 月海玄武岩中蕴涵着极为丰富的钛铁矿, 克里普岩所含的大量的 REE、铀、钍是月球重要的矿产资源, 而赋存于月壤中的大量氦-3 则是重要的能源资源, 这些月球资源可为人类社会的可持续发展提供重要的保障. 未来的月球基地应考虑建立在月球正面、地形开阔、资源富集区.

参考文献:

[1] 中国科学院地球化学研究所. 月质学研究进展 [M]. 北京: 科学出版社, 1977. 41 - 203.

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Research progress of selenology [M]. Beijing: Science Press, 1977. 41 - 203.

[2] 欧阳自远. 天体化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 93 - 145.

OUYANG Z Y. Space chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1988. 93 - 145.

[3] 邹永廖, 欧阳自远, 李春来. 月球探测与研究进展 [J]. 空间科学学报, 2000, 20(增刊): 93 - 103.

ZOU Y L, OUYANG Z Y, LI C L. The lunar exploration and research progress [J]. Journal of Space Sciences, 2000, 20 (Suppl): 93 - 103.

[4] Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A, et al. Major lunar crustal terranes: surface expressions and crust-mantle origins [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E2): 4197 - 4216.

[5] Elphic R C, Lawrence D J, Feldman W C, et al. Lunar Fe and Ti abundance: comparison of lunar prospector data [J]. Science, 1998, 281(4): 1493 - 1496.

[6] Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO_2 content of the lunar surface with multispectral imagery [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 3679 - 3699.

[7] Lucey P G, Taylor G J, Hawke B R, et al. FeO and TiO_2 concentrations in the South Pole-Aitken basin: implications for mantle composition and basin formation [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 3701 - 3708.

[8] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. Global elemental maps of the Moon: the lunar prospector gamma-ray spectrometer [J]. Science, 1998, 281(4): 1984 - 1988.

[9] Lucey P G, Blewett D T. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E8): 20297 - 20305.

[10] Haskin L A, Korotev R L, Rockow K M, et al. The materials of the Lunar Procellarum-KREEP terrane: a synthesis of data from geomorphological mapping, remote sensing, and sample analyses [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E8): 20403 - 20415.

[11] Head J W. Lava flooding of ancient planetary crusts: geometry, thickness, and volumes of flooded lunar impact basins [J]. Moon and Planets, 1982, 26: 61 - 88.

[12] Head J W, Wilson L. Lunar mare volcanism: stratigraphy, rption conditions and the evolution of secondary crusts [J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1992, 56: 2155 - 2175.

[13] Budney C J, Lucey P G. Basalt thickness in mare humorum: the crater excavation method [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 105(E8): 16855 - 16870.

[14] Heiken G, Vaniman D, French B M. Lunar sourcebook — a user's guide to the Moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 121 - 474.

[15] Giguere T A, Taylor G J, Hawke B R, et al. The titanium contents of lunar mare basalts [J]. Meteoritics and Planetary Science, 2000, 35(1): 193 - 200.

[16] Wieczorek M A, Phillips R J. The "Procellarum KREEP Terrane": implications for mare volcanism and lunar evolution [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E8): 20417 - 20430.

[17] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. High resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar [J]. Geophy Res Lett, 1999, 26(17): 2681 - 2684.

- [18] Lawrence D J , Feldman W C , Barraclough B L , et al. Thorium abundances on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research* , 2000 , 105(E8) : 20307 – 20331.

Prospect of Exploration and Utilization of Some Lunar Resources

OUYANG Zi-yuan^{1 2} , ZOU Yong-liao^{1 2} , LI Chun-lai^{1 2} , LIU Jian-zhong^{1 2}

(1. *Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550002 , China* ; 2. *National Astronomical Observatories , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100012 , China*)

Abstract : The establishment of the lunar base is the main trend of the lunar exploration and detection in the 21st century , because the exploration and utilization of the lunar mineral resources , energy and specific environment will effectively support the sustainable development of human society. The authors make a systematic study of the distributions and contents of ilmenite in lunar basalts , those of U , Th , REE in KREEP rocks and those of He-3 in the lunar regolith. Then the authors show two points : (1) More than 70 000 billion tons of titanium dioxide occur in lunar basalts. The ilmenite is the major raw material for the production of water and missile fuel in the lunar base. (2) KREEP rocks , one of the hot issues for the detection of and research into the lunar planet , contain a gigantic amount of uranium , thorium , calcium , phosphorus and rare earth elements. The lunar regolith has been affected by the solar wind for a long time , so that it contains such abundant gas resources as hydrogen , helium , oxygen and nitrogen. In particular , the He-3 , amounting to over 1 million tons , is a kind of nuclear fusion fuel for the production of electrical power. This kind of fuel , safe , clean , highly efficient and cheap , can be applied to the human society for a long time. The content of helium is closely associated with the chemical composition , mineral assemblage and grain size of the lunar regolith.

Key words : lunar resources ; lunar mare basalt ; KREEP rock ; lunar regolith.