

\*

# 月球表面的环境特征

邹永廖 欧阳自远 徐琳 刘建军 胥涛

(中国科学院国家天文台,北京 100012; 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002;  
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,贵阳 550002)

**摘要** 本文通过对月球探测资料和研究结果的系统分析,认为月球体积小、质量轻、离太阳较近(温度高)等因素是月球只有极为稀薄大气层的原因;论证了月球极地阴影区存在水冰的证据,并计算出水资源量约为 66 亿吨。研究了月壤中氦-3 的含量与月壤颗粒大小、矿物组成、元素成分和结构特征的关系,并估算了氦-3 的资源量;探讨了月球表面的反射率;综合分析了月球区域性磁场的形成机制。

**关键词** 月球表面环境 大气层 稀有气体 反射率 磁场

## 1 月球大气层与月球表面温度特征

根据太阳系及其各天体演化理论,月球在早期演化阶段存在比现在浓密得多的原始大气层。而现在的月球大气极为稀薄,其主要组分为氦、氢、氦和氙。大部分的氦来自太阳风,只有约 10% 的氦来自辐射成因和原始大气成分;绝大多数的氙是以  $^{40}\text{Ar}$  的形式存在, $^{40}\text{Ar}$  是月球中的  $^{40}\text{K}$  的衰变产物<sup>[1]</sup>。

原始月球大气不被月球俘获的主要原因是月球大气分子运动速度比其逃逸速度大。表 1 列出了类地行星、月球以及与月球大小相当但具有相对较为浓密大气层的土卫-6 的逃逸速度。

表 1 一些行星和卫星的逃逸速度<sup>[2]</sup>

Table 1 The escape velocity of some planets and satellites in the solar system<sup>[2]</sup>

行星和卫星	逃逸速度/ $\text{km s}^{-1}$	行星和卫星	逃逸速度/ $\text{km s}^{-1}$
地球	11.2	水星	4.3
金星	10.4	土卫-6	2.5
火星	5.0	月球	2.4

影响星体能否保持其大气层的因素极为复杂,主要有星体的质量和大小、星体与太阳的距离、星体表面温度和组成大气层的气体分子类型<sup>[2]</sup>。从表 1 可以看出,土卫-6 尽管与月球有相近的逃逸速度,但与月球相比,它离太阳远得多,表面温度极低,分子运动速度

\* 第一作者简介:邹永廖 男 38 岁 副研究员 天体化学专业 E-mail: ylzou@bao.ac.cn

中国科学院知识创新工程项目(批准号:KZCX2-115)和中国科学院高技术与发展局专项项目(批准号:KGX2-406)

2002-07-29 收稿,2002-09-02 收修修改稿

较小,因而大气层中的气体分子难以达到其逃逸速度而逃离土卫-6。而月球离太阳较近,表面温度高,原始大气层的气体分子运动速度较大,容易达到其逃逸速度;月球的质量只有地球质量的1/80,体积仅为地球的1/50,表面重力为地球的1/6。因此,原始大气层中的气体分子如氢、氦、氩、水蒸气等的运动速度很容易达到逃逸速度而逃离月球。即使后来由火山作用而喷发出质量较大的气体分子如二氧化碳、二氧化硫、硫化氢、水蒸气等的运动速度也容易达到月球的逃逸速度而逃离月球。根据月球大气成分与太阳风成分的比较,现在的月球大气成分主要由太阳风所提供<sup>[1]</sup>。

由于月球表面几乎没有大气层和大气活动,没有大气的热传导,所以月球表面白天与夜晚的温差很大,白昼温度为130~150,太阳不能照射到的阴影区和夜晚期间的月球表面温度为-180~-160。

月球表面温度主要是由太阳辐射和月球内部释放能量所决定。假设月面物质的热流是恒定的,那么月面的温度变化曲线则由热惯量决定,其关系为

$$= 1/(k \rho c)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $k$  ——热传导率  
 $\rho$  ——密度  
 $c$  ——热容

表2是根据实际测得的月球表面温度的变化规律<sup>[3]</sup>。可以看出,因太阳光入射角的因素,极区的平均温度比赤道区和典型中纬区的温度约低35。

表2 月球表面的平均温度<sup>[3]</sup>

Table 2 The average temperature on the lunar surface<sup>[3]</sup>

区域	极地撞击坑阴影区	极区	赤道区			典型中纬区
			正面	背面	两边	
平均温度/K	40	220	254	256	255	255

## 2 月球表面极区存在水冰的证据及其资源量

月球表面没有液态水,更没有任何生命存在的痕迹。但这并不是说月球表面没有水(以固态形式存在)。事实上,在月球极区的永久阴影区存在水冰的设想首先是由 K. Watson 等<sup>1)</sup>于1961年提出来的。他们认为,既然太阳赤道平面与月球赤道平面的夹角不超过1.6°,那么月球两极一些撞击坑的底部有可能常年处于阴影下,温度为40~50K。在这样的低温下,水完全可能以冰的形式保存下来,逃逸进入深空的概率很小,所以在月球两极的撞击坑中水可能大量存在,其存在的形态可能为冰尘混合物。这一设想尽管在理论上是合理的,但无论是美国 Apollo 和原苏联 Luna 计划的实施,还是返月样品和月球陨石的研究,都没有找到月球上存在水的证据,因而过去一直认为月球表面没有任何形式的水。直到1994年美国发射克莱门汀号环月探测器后,月球两极水冰的存在才第一次有了直接证据,即当克莱门汀号绕234号轨道运行到月球南极上空200km高处并与月球、地球成一

1) 转引自[4,5]

条直线时,传回的雷达反射信号不是月球表面岩石碎屑所具有的那种特征,据此,一些专家认为这种信号表明该区可能有水的存在。当然,也有部分专家认为粗糙的月球表面也可能导致这种信号的产生。1998年,月球勘探者号环月探测器所携带的中子谱仪所传回的信号不但证实了月球南极有水冰的存在,而且北极也存在着大量的水冰<sup>[6,7]</sup>。月球勘探者号传回信息中的超热中子和快中子分析结果表明,在月球两极撞击坑永久性阴影区域明显富含水分子组分。其中,月壤中水的含量一般为0.3%~1%,这些水几乎是以纯冰的形式富集在月球表面下10cm左右<sup>[6,7]</sup>。根据月球勘探者号的探测结果<sup>[5,6]</sup>可计算阴影区含水的面积,北极含水冰区域为10 000~50 000 km<sup>2</sup>,南极5 000~20 000 km<sup>2</sup>,其富集区南极650 km<sup>2</sup>,北极1 850 km<sup>2</sup>,据此,可估算出月球极区水冰含量为66~200亿吨。

总的说来,月球表面的水冰主要来源于<sup>[4,5]</sup>:1)由彗星或小天体撞击月球表面带进的水;2)由太阳风中的氢与月壤和月岩中的FeO发生还原反应产生的水(FeO + H<sub>2</sub> = Fe + H<sub>2</sub>O);3)由月球深部释放的岩浆水。关于月球极地永久性阴影区可能存在的水冰的来源,较公认的看法是,当彗星撞击月球表面时,撞击体剧烈破碎,其碎块溅射落在原有的撞击坑永久阴影区与月壤混合。

### 3 月球表面辐射历史和月壤中太阳风稀有气体组分

月球表面物质主要受到以下3种辐射源的辐射,即太阳风、太阳耀斑和银河宇宙线<sup>[1,8]</sup>。太阳辐射是最主要的辐射源,它包括向外发射的电磁波、粒子流(太阳风和高能粒子流)、中微子,以及重力波、声波等多种形式,其波长可测范围从射线、X射线、紫外线、可见光、红外线,直到射电波段的米波区<sup>[9]</sup>。

太阳风粒子直接注入月壤内,深度可达30~50nm,不但引起月壤晶体结构的某些微观尺度大小变化,而且也引起化学和同位素效应。对月球样品分析表明,月壤中积累并蕴藏有丰富的稀有气体组分(表3),特别是月壤中丰富的氦-3已被认为是最具开发利用前景的能源资源。

表3 月壤细颗粒中的稀有气体浓度<sup>[1]</sup>

Table 3 The concentrations of rare gases in the lunar regolith<sup>[1]</sup>

样品	稀有气体/cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>					合计
	<sup>4</sup> He/10 <sup>-2</sup>	<sup>20</sup> Ne/10 <sup>-4</sup>	<sup>36</sup> Ar/10 <sup>-4</sup>	<sup>84</sup> Kr/10 <sup>-8</sup>	<sup>132</sup> Xe/10 <sup>-8</sup>	
Apollo - 11	11~25	20~31	3.3~4.1	16~38	2.1~10	52.4~108.1
Apollo - 12	4~38	7~61	1.2~3.1	4~20	1.1~2.6	17.3~124.7
Apollo - 14	5~9	9~16	2.4~4.4	9~24	1.4~4.6	26.8~58.0
Apollo - 15	4~10	7~22	0.9~4.1	4.4~24	0.6~3.3	16.9~63.4
Apollo - 16	0.6~5.1	2.4~13	1.3~6.0	4.5~34	1~6.5	9.8~64.6
Apollo - 17(月海)	12~29	14~45	1.6~6.2	3.7~16	1.3~2.4	32.6~98.6
Apollo - 17(高地)	5.9~16	12~28	2.5~4.9	10~18	1.8~2.9	32.2~69.8
Luna - 16	18	34	5.4	22	8.5	87.9
Luna - 20	3.81	10.1	2.88	10.9	2.25	29.94

月壤中稀有气体具有多途径来源的特点,如俘获太阳风粒子,太阳耀斑粒子的注入,由太阳质子和银河宇宙线与月壤物质相互作用产生散裂反应形成的<sup>3</sup>He, <sup>20</sup>Ne, <sup>21</sup>Ne, <sup>22</sup>Ne,

$^{38}\text{Ar}$ 等核素;由 U, Th 和 K 衰变产生的  $^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ;由重核裂变产生的 Kr, Xe 和由中子俘获产生的 Xe 等。其中太阳风组分的直接注入是月壤中稀有气体的主要来源,这可从表 4 的分析结果看出,月壤细粒粉末中稀有气体同位素比值与太阳风比较接近,而与地球大气层差别很大。

表 4 月壤细粒粉末中稀有气体同位素比值与太阳风和地球大气层的比较<sup>[1]</sup>

Table 4 Comparison of the ratio of rare gases isotope abundances in the fine grains of the lunar regolith with that of the solar wind and Earth's atmosphere<sup>[1]</sup>

样 品	同 位 素 比 值				
	$^4\text{He}/^3\text{He}$	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$	$^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$
月壤细粒粉末	2 300 ~ 2 800	96 ±18	12.4 ~ 12.8	31 ±1.2	
太阳风	2 350 ±120	570 ±70	13.7 ±0.03	30 ±4	28 ±9
地球大气层	$7 \times 10^5$	0.3	9.8 ±0.08	34.5 ±1.0	0.5

研究表明<sup>[5,8]</sup>,月壤中稀有气体的含量不但与月壤颗粒大小有关,也与月壤中的矿物组成、元素成分和结构特征的不同有关。一般地,月壤中的稀有气体含量与颗粒粒度成线性反相关关系,即稀有气体的含量随粒度的增大而减少;所有的返月样品分析都表明,钛铁矿俘获的稀有气体的浓度是最高的。特别需要强调的是,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,致使月球表面物质完全混合,在深达数米的月壤中这些亲气元素含量较均匀。由于太阳风离子注入物体暴露表面的深度一般小于  $0.2 \mu\text{m}$ ,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含量高达  $0.1 \sim 1 \text{cm}^3/\text{g}$  (标准状态下),相当于  $10^{19} \sim 10^{20}$  原子/ $\text{cm}^3$ 。

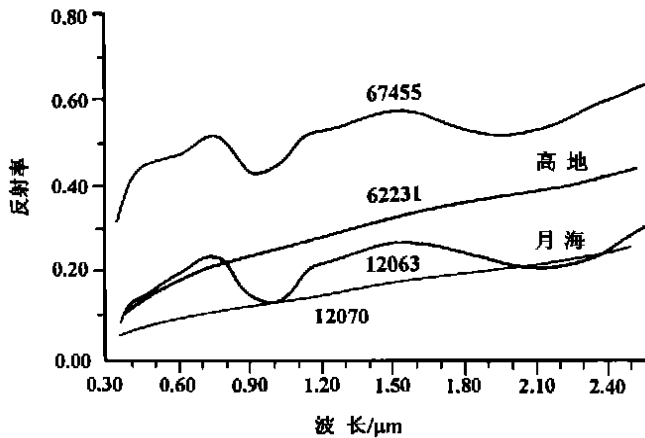
在这些稀有气体中,氦-3 是一种极具开发前景的核聚变燃料。相比目前正在加速发展的利用氘和氚的热核聚变反应装置来说,用氦-3 来进行核聚变反应具有比用氘作燃料更多的优点,主要表现在:1) 反应产生的能量更大;2) 传统的氘-氚核聚变反应过程,要产生大量的中子,相反若用氦-3 作为反应物,则产生质子而不是中子,质子产生的放射性损伤较中子易于防护。因此,估算月壤中氦-3 的资源量对未来开发利用月球能源具有重要的意义。

根据氦-3 在总的氦元素中的比值,可计算出氦-3 在月壤中的平均含量为  $3 \sim 4 \text{ng/g}$ 。对于成熟月壤而言,因月壤中  $^3\text{He}$  的含量较为稳定,只要能够精确探测月壤的厚度,就可以估算出月壤中  $^3\text{He}$  的资源量。以 Apollo 和 Luna 的实测结果(月海区月壤平均厚度 5m,月陆区平均 10m)为计算参考标准,月壤中  $^3\text{He}$  的资源总量可达  $100 \sim 500$  万吨。

## 4 月球的反射率

由于月球几乎没有大气层,太阳辐射长驱直入,因此,月面物质的反射率基本上是由矿物成分组成特征和太阳光的入射角等因素决定。月球上最常见的成岩矿物有长石、辉石、橄榄石、钛铁矿。根据这些矿物在实验室中所测得的光谱特征结果<sup>[9,10]</sup>,以及月球表面岩石由月海玄武岩、高地斜长岩两大类型的岩石组成<sup>[1]</sup>,可通过对月海玄武岩和高地斜长岩的矿物组成特征进行模拟计算这两类岩石及月壤在不同波段的光谱特征(图 1)。

月海玄武岩的反射率明显比高地斜长岩的低(见图 1)。由于月球正面和背面的物质

图1 月球表面物质的反射率<sup>[9]</sup>

67455, 62231, 12063 和 12070 为月球样品编号

Fig. 1 The reflectance of the lunar surface materials<sup>[9]</sup>

成分差异很大,绝大多数的月海玄武岩分布于月球正面(约占正面的50%),而背面的月海玄武岩的分布区域很小,因此,月球正面的平均反射率比背面的低。在讨论月面受辐射强度特征时,一般是将月球正面和背面分开研究。图1反映的是在不考虑太阳辐射角度以及理想状态情况下(即不考虑月面物质的混合特性等因素)的反射率,而实际的反射率要低些(表5)。

表5 月球正面和背面的正常反射率<sup>[3]</sup>Table 5 Normal reflectance values of the lunar near and far side<sup>[3]</sup>

区域		正常反射率		
		最小值	最大值	平均值
月球正面	月海区	0.06	0.09	0.07
	月陆区	0.11	0.20	0.15
	正面	0.07	0.10	0.09
月球背面		—	—	0.22

## 5 月球磁场

阿波罗探测和研究结果表明,月球没有全球性的偶极磁场。对月球岩石的分析表明,许多岩石中都存在较为稳定的剩磁,过去多认为这种剩磁是岩石在冷却过程中热剩余磁化的结果;36~38亿年期间月球的磁场比38亿年以前和36亿年以后的磁场大一个数量级<sup>[11]</sup>,其原因长期以来没有得到解决。

根据最近月球勘探者号的探测结果,发现月球正面部分撞击盆地在月球背面的投影点附近存在较微弱的区域性磁场<sup>[11,12]</sup>,特别是在雨海和澄海两个撞击盆地在月球背面的投影点附近具有明显的区域性磁场,即:1)雨海和澄海通过月心在月球背面的投影点的磁场强度绝大多数在1~5nT范围内;2)在雨海内环的投影区有较强的磁场,最大的磁场

强度可达到 10nT(反射系数为 0.78),同样,澄海南内环的投影区的磁场也较强。

月球正面巨大撞击盆地在月球背面的投影区内往往能被探测到的区域性分布磁场可能与大型撞击盆地的形成有关。这是因为:1)36~38 亿年间,月球遭受最强烈的小天体轰击;2)由于超速撞击(速度大于 10km/s),在月球正面形成巨大撞击盆地的同时,在月球背面所受的冲击压力最强,其上空可产生等离子体云,这一等离子体云可膨胀并滞留于月球周围 5 分钟左右<sup>[11]</sup>,从而使原先的磁场得到加强,而被加强了磁场在等离子体云衰减变薄之前可保持一天左右,在如此短的时间内,由大量的岩石在冷却过程中产生热剩磁化是不可能的;而巨大撞击能量向月球背面传导完全可以产生撞击剩磁化<sup>[11,12]</sup>,即冲击压力(超过 10GPa)足于产生撞击剩磁化并使之保存下来。

这一新的探测资料为研究月核是否存在或其大小等提供了新的线索。一些专家认为,月核即使存在,也没有过去模式计算出的 700 千米那么厚,可能只有 400 千米。

## 6 小结

根据前述月球大气层、月球表面温度、月球表面辐射历史及月壤中稀有气体、月球反射率和月球磁场的分析结果,可以看出:

(1) 月球质量和体积太小,与太阳的距离较近是导致其无法俘获大气层的气体分子的根本原因。由于几乎没有大气层,月球表面昼夜温差很大。

(2) 月球极区存在约有 66~200 亿吨的水冰。

(3) 太阳辐射是月球最主要的辐射源,太阳辐射不但使月壤发生晶体结构上的变化,也引起其化学成分和同位素的变化;太阳风粒子的直接注入,使月壤含有丰富的稀有气体组分,月壤中的氦-3 资源量可达到 100~500 万吨。

(4) 由于月球正面与背面的物质差异大,正面的平均反射率明显比背面的低。

(5) 月球没有全球性的偶极磁场,但存在区域性磁场,月球正面巨大撞击盆地的内环在月球背面的投影区可形成撞击剩磁,构成局部区域性的磁场。

## 参 考 文 献

- 1 欧阳自远. 天体化学. 北京:科学出版社,1988. 93~145
- 2 帕特利西亚·巴纳斯·斯万尼著. 张玲译. 小行星. 包头:内蒙古文化出版社,1998. 47~96
- 3 Preter E. The Lunar Base Handbook. New York: The McGraw Hill Companies, Inc., 1999. 140~149
- 4 Feldman W C, Maurice S, Binder A B *et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector. *Science*, 1998, **281** (4): 1 496~1 500
- 5 Grant Heiken, David Vaniman, Bevan M French. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. New York: Cambridge University Press, 1991. 287~305, 342~351
- 6 Feldman W C, Barraclough B L, Maurice S *et al.* Major compositional units of the moon: Lunar Prospector thermal and fast neutrons. *Science*, 1998, **281** (4): 1 489~1 493
- 7 Feldman W C, Lawrence D J, Elphic R C *et al.* Chemical information content of lunar thermal and epithermal neutrons. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105** (E8): 20 347~20 363
- 8 中国科学院地球化学研究所编. 月质学研究进展. 北京:科学出版社,1977. 41~53, 172~187
- 9 Piers M, Englert A J. Remote Geochemistry Analysis: Elemental and Mineralogical Composition. New York: Cambridge University Press, 1993. 309~366

- 10 Pieters C M, Fischer E M, Rode O *et al.* Optical effects of space weathering: The role of the finest fraction. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(E11): 20 817 ~ 20 824
- 11 Lin R P, Mitchell D L, Curtis D W *et al.* Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: Results from Lunar Prospector. *Science*, 1998, **281**(4): 1 480 ~ 1 484
- 12 Hood L, Huang Z. Formation of magnetic anomalies antipodal to lunar impact basins: Two-dimensional model calculations. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**:9 837 ~ 9 846

## LUNAR SURFACE ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

Zou Yongliao    Ouyang Ziyuan    Xu Lin    Liu Jianjun    Xu Tao

( *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012;*

*Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;*

*State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)*

### Abstract

Based on the exploration data and previous studies, the authors suggest that small volume and mass of the moon, the short distance from the sun (*i e.* high surface temperature) result in the very tenuous and thin lunar atmosphere, demonstrate that there exists ice-water on shadow area of the lunar polar region and calculate out 6.6 Ca tons of ice.

By comparing the composition of rare gas elements in the lunar regolith and in the solar wind, the authors analyze the physical, chemical and isotopic effects of the solar radiation on the lunar surface materials, the distributions and contents of the  $^3\text{He}$  in the lunar regolith, point out that the content of  $^3\text{He}$  relates with grain size, the mineral components, structures and elemental compositions of the lunar soil, and evaluate the exploration values of  $^3\text{He}$ .

The lunar surface materials govern the lunar reflectance. Based on the spectrum characteristics of the mare basalts, highland plagioclases and their mineral components which both of them are the main rocks of the lunar surface materials, the authors analyze the different reflectance of the lunar near side and far side.

Not only is the lunar magnetic field the important part of the lunar environment but also great significance for studying on the lunar interior structures. The moon has regional scale distribution magnetic field which may result from great impact processes.

**Key words**    lunar surface environment, atmosphere, rare gas, reflectance, magnetic field