

月球表面水冰的探测和意义^{*}

徐 琳^{1,2} 刘建忠² 邹永廖² 李春来²

¹(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

²(中国科学院国家天文台)

摘 要

综述了月表水冰的发现, 探测技术, 水资源的存在形式、分布、资源量, 月表水的运移和利用前景. 已有的探测表明, 月球上的水资源主要分布在两极的永久阴影区内, 储量约为 66 亿吨. 月表水冰主要分布于两极永久阴影区中的原因, 是月球上的水可以通过弹道式跳跃逐步迁移到温度低的地区所致. 本文认为月球上是否存在水对于人类进行月球基地的建设没有根本性的影响, 而利用月球玄武岩中钛铁矿的反应来获取水, 是更为简便和经济的方法.

关键词 月表; 水冰; 永久阴影区

1 引言

月球是地球惟一的天然卫星, 自古以来人们赋予了月球许多美丽神奇的传说. 但通过对月球的长期地面观察和航天器的近旁探测, 特别是 1969—1976 年间 6 次阿波罗号飞船载人登月和 3 次月球号飞船不载人登月的勘察和取样, 明确了月球是一个既无生命又无大气的荒漠世界. 月球表面满目疮痍、山峰遍布、粉尘满地, 是一片不毛之地, 但却有可供开发利用的独特的信息资源、环境资源和丰富的物质资源. 而重返月球计划的目标就是在月球上建立永久性的基地, 为开发和利用月球上的宝贵资源奠定一个坚实的基础. 建立月球基地, 人类就要生活和工作在月球上, 因此, 月球上是否存在水, 以及如何来获取水就成为新一轮月球探测的关键和瞩目的焦点.

本文回顾了关于月球上水资源问题的长期的探索过程, 并通过模拟计算表明, 即使是月球上不存在水, 也不会给人类在月球上建立永久性基地带来根本性的影响, 在月球上还有更为简单、经济和可靠的水资源.

2 水冰的发现

在月球极地的永久阴影区存在水冰的设想首先由 Watson 等提出来. 1961 年, Watson, Murray 和 Brown 提出了一个推论^[1]. 他们认为, 既然太阳相对月球赤道平面的位置从不超过 1.6°, 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—50 K. 在这样的低温下, 水会以冰的形式保存下来, 逃逸进入宇宙空间的概率很小, 所以在月球两极的

^{*} 中国科学院知识创新工程项目资助 (KZCX2-115)

2002-01-08 收到原稿, 2002-11-05 收到修定稿

撞击坑中水可能大量存在, 形态可能为冰尘混合物。自从 Watson 等的文章发表以来, 对于月球上存在水冰的可能性进行了许多推论性的工作。Arnold^[2] 通过考虑月表下的热传导, 太阳风热流和相邻地区太阳光的再辐射, 估算了永久阴影区的热平衡。Lanzetta 等^[3] 基于溅射实验对在阴影区存在稳定的水提出了相反的意见。Hodges^[4] 认为水的分解产物更趋向于形成其他的氢化合物并发送到极地, 同时也考虑到了在月球的夜晚, 移动的水汽会被月壤所吸收, 制约了 ^{40}Ar 的吸收能力。相反地, 阿波罗的月壤样品显示了较高的 ^{40}Ar 的吸收能力, 表明月壤中单质水的含量十分有限。Morgan^[5] 等认为冰的源区一定是突发的, 比如一个大彗星的撞击, 他们发现并没有一个稳定的源, 因为在极地地区由溅射作用和星际的辐射光解作用引起的水的损失率等于或大于由月壤的覆盖导致水沉积的速率。

遗憾的是, 基于地面观测和登月计划都未能就月球是否有水给出一个很明确的答案, 因而一直认为月球表面没有任何形式的水, 这样的情形一直延续到 1994 年克莱门汀号发射之前。

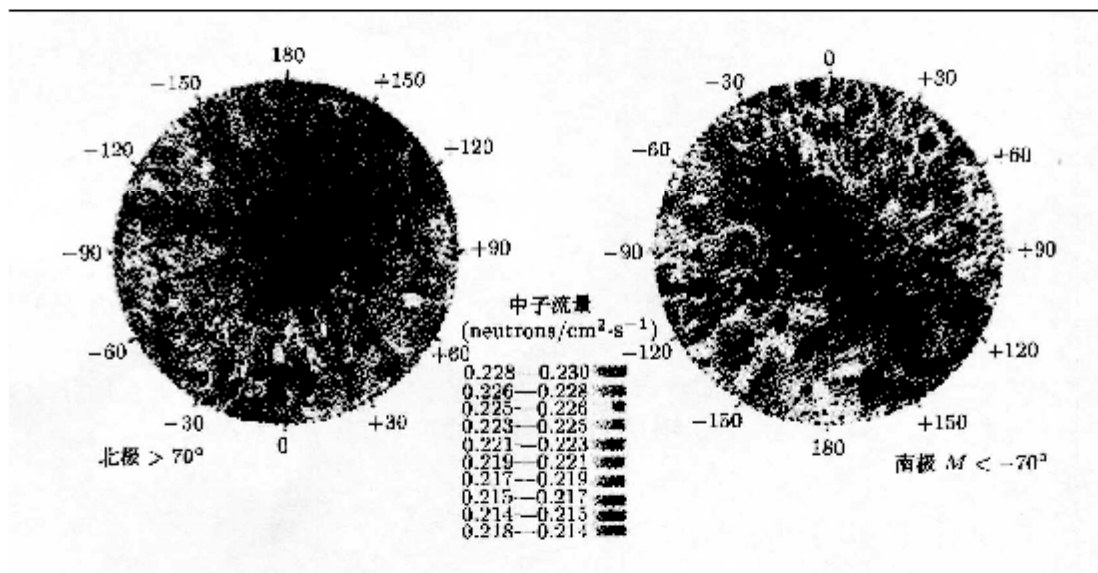


图 1 月球极区的超热中子计数率图

Fig.1 Maps of epithermal counting rates in the lunar polar region

1994 年 4 月, 当克莱门汀号绕 234 号轨道运行到月球南极上空 200 km 处并与月球、地球成一条直线时, 传回的雷达反射信号不是月面岩石碎屑所具有的特征, 而是呈现出冰的特征, 对于月球两极水的存在第一次有了直接证据。当 Nozette 等^[6] 解释克莱门汀号的雷达数据时, 又获得了月球上存在水冰的证据, 给世人带来了惊喜。但 Simpson 和 Tyler^[7] 对相同的位置和相同的数据进行再分析时, 却发现没有水冰。因此不能单纯地根据雷达信号来肯定水的绝对存在, 也无法确定水的准确含量。例如, Arecibo 射电望远镜用相同的频率研究月表, 结果有些非永久阴影区也显示出了相似的反射特征, 所以克莱门汀号的发现也可能是粗糙的月表所产生的, 而不是水冰。为了进一步澄清这一问题, NASA 于 1998 年又发射了月球勘探者 (Lunar Prospector) 探测器 (LP)。在该探测器上, 特别携带了中子

谱仪和 γ 谱仪, 对月球表面是否存在水进行了专门的探测.

LP 的中子探测器能够测量整个月球表面氢的含量, 探测深度约为 0.5 m, 氢信号的强弱可以反映水的含量多少. 结果中子探测器表明在月球两极, 氢的信号明显增强 (图 1—3)^[8]. 通过分析探测数据, 水冰可能是以固实的、近乎纯冰的形态埋藏在干燥的表土下面约 0.4 m 处. 月球北极氢的信号比南极更强一些, 分布范围为围绕北极 1850 km² 和围绕南极 650 km² 内的区域以及中纬零散的区域, 水冰的总量约为 6.6×10^9 t, 但这些都是初步估算, 误差可能较大.

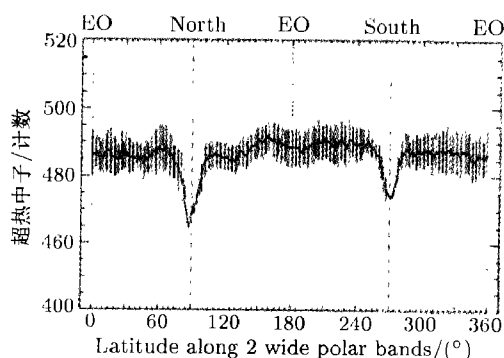


图 2 LP 超热中子探测结果剖面图

Fig.2 All epithermal counts section for Lunar Prospect

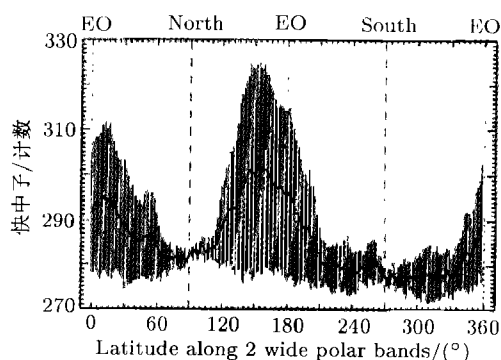


图 3 LP 快中子探测结果剖面图

Fig.3 All fast-neutron counts section for Lunar Prospect

从图 1 中可以看出, 超热中子记数率的最低值, 在北极附近沿 -50° — $+130^\circ$ 的子午线方向延伸, 覆盖 Peary, Rozhdestvenskiy, Plaskett 等撞击坑的范围. 而在南极与最大的撞击坑南极 Aitken 撞击坑的分布范围大致相当. 说明它与极地附近撞击坑中的永久阴影区有密切的关系, 换言之, 说明两极的永久阴影区内可能存在大量的水冰.

3 月球上水冰探测的基本原理

我们知道, 高能宇宙射线与月表物质作用时释放中子和其他亚原子粒子, 其中, 一些快中子 (500 keV—8 MeV) 直接逃离月表进入宇宙空间, 一些中子射入月亮并与其他原子碰撞, 如果碰撞的只是较重的原子, 在撞击过程中不会失去很多能量, 仍然会以接近初始的速度运动, 当它们到达月球上空的中子探测器 (如 LP 的中子探测器 NS) 时还会保持一定的能量, 这些中子称为超热中子 (0.3 eV—500 keV). 要使快速运动的中子减慢速度, 惟一有效的方法是使中子与其本身大小类似的原子碰撞. 但只有一种原子的大小与中子差不多, 即氢原子. 如果月球表面某个区域含有许多氢, 例如一个富氢的撞击坑, 任何在这个坑中运动的中子在从月表逃逸进入宇宙之前都会很快地“冷却”, 当中子探测器飞临撞击坑上空时, 中子探测器将可以探测到热中子数目 (0.001 eV—0.3 keV) 的急剧增加, 同时会检测到超热中子数目的减少. 于是氢的含量可以通过不同类型中子计数率的相对值来反映.

图 4 为 FAN(铁质钙长石质) 月壤中超热中子和快中子记数率与水含量之间的模拟关系图解^[8], 从图中可以看出, 月壤中超热中子和快中子记数率与月壤中水含量成明显的负相关关系, 说明水分子的主要影响是单向降低超热中子和快中子的强度. 因此, 可以利用超热中子和快中子的强度来反演水的含量. 通过对阿波罗带回的月球赤道附近月壤的分析表明, 月壤中平均的氢含量为 50×10^{-6} , 若将其作为参照物, 那么在月球南极 Aitken 盆地的永久阴影区内的氢含量要高出赤道 30 倍. 当然, 中子谱不能区分氢的不同化学形式. 但存在水冰的可能性应该被保存下来. 因此, 利用中子谱仪来探测月球表面的水是基本可行的.

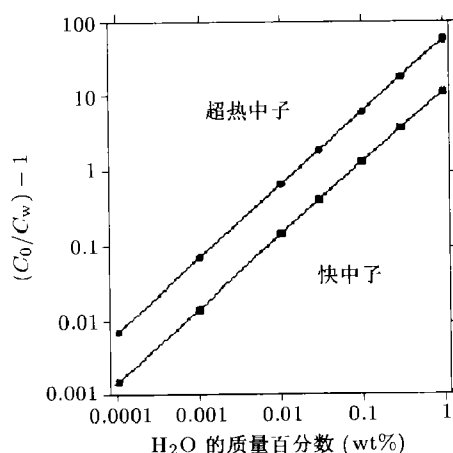


图 4 FAN(铁质钙长石质) 月壤中超热中子和快中子记数率与水含量之间的关系 (C 为计数率)

Fig.4 Simulated epithermal and fast-neutron counting rates as a function of mass fraction of H_2O (wt%), added to a FAN regolith

利用中子谱仪获得的只是氢的中子谱图, 要想知道其具体的含量还需要进一步的定量研究. 对于氢的定量研究, 已经有很多学者做出了不懈的努力^{[9],[10]}, Lingenfelter 等, Metzger 和 Drake 通过对从月表逃逸的中子能谱的理论计算表明, 热中子和超热中子是氢的灵敏指示剂. Metzger 和 Drake 发现, 如果基于 Haines 和 Metzger^[11] 释放 γ 射线的中子吸收体的技术, 将 γ 探测与中子探测结合起来, 就可以对某一像元在 10 h 的累计观测时间内, 获得 0.01 wt% 的检测限. Feldman^[12] 对上述理论工作进行了扩展, 计算了 8 种模拟化学组成在水含量不同时的中子能谱. 同时 Feldman 还计算了当氢含量变化时上述各种化学组成的中子能谱 (变化区间对应 0.01—3 (wt%) 的 H_2O), 在 100 km 高的月球轨道, 利用两个假想的直径 5 cm, 长 20 cm 的 He-3 气体正比计数器 (一个裸露, 另一个覆盖有 0.75 mm 厚的 Gd) 以及一个快中子探测器所获得的快中子/超热中子计数率比值以及热中子/超热中子计数率比值. 结果发现, 对于每种化学组成, 这两种比值都随氢含量的增加而变大. 其中, 快中子/超热中子计数率的变化更明显一些, 因此更适合探测氢. 进一步的研究表明, 当水的含量不高时, 归一化的计数率比值随着水含量的增加, 按幂函数的关系增加, 所以可以利用该关系进行定量分析^[8]. 如果预先不知道月表的化学组成, Feldman 计算得出利用快中子/超热中子计数率比值, 以及热中子/超热中子计数率比值定量的检测限分别为相当于 6.5×10^{-4} 和 3.5×10^{-3} (wt%) H_2O 的氢. 如果预先已知探测区

域的化学组成,如通过 γ 探测,则可以大大提高检测能力.而在 LP 上,不仅携带了中子谱仪,而且配备了 γ 谱仪,因此可以说,LP 的探测结果是可以信赖的.

4 月球表面水的来源及运移

3.1 月球水的来源及月壤中水冰的分布、浓度和储量

对于月球表面水的来源已经有许多构想和模拟实验,大致分为如下 3 种.

(1) 由彗星或小天体带入.当彗星撞击月表时,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^[13].

(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: $\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$.

(3) 月球深部释放的岩浆水.

研究表明,上述这些水中应有 20%—50% 以冰的形式存储于月球两极撞击坑的永久阴影区.根据月球勘探者号的最新研究结果,撞击坑阴影区月壤中水的含量一般为 0.3%—1%,富集在地下 10 cm 左右.北极含水冰区域为 10 000—50 000 km²,南极 5 000—20 000 km²,在某些地区(南极 650 km²,北极 1850 km²)存在水冰的富集区,估计月球上水冰的总储量约 66 亿吨^[8].

3.2 月球水的运动和转移

根据前人的研究结果,赤道地区月壤中氢的含量是两极永久阴影区的 1/30,为什么水会聚集在月球两极的永久阴影区内?它们是如何进行转移的?一些学者认为,因为月面大气压力不到地球大气压的万分之一,在月球上阳光照射到的地方,月面温度可达到 130—150°C.因此,对于沸点远低于 100°C 的月球液态水来说,很容易沸腾蒸发.加之月球质量小,引力弱,根本无力缚住水蒸气,致使月球上气态水逃逸殆尽而不留痕迹.但月球两极非常特殊,如南极的 Aitken 盆地,直径有 2500 km,深 13 km,黑暗幽深,终日不见阳光,温度一直保持在 -230°C 以下,因而可成为固态水——冰的藏身之地.根据最新的研究成果^[14],那些在月表其他部位被蒸发的水,也并没有全部逃逸到太空,而是通过热驱赶(或称为热逃逸)作用被运移到了两极. Crider 等对月表大气粒子的转移进行了模拟,阐述了月表水可以通过一系列的物理、化学过程被运移到极地并保存下来.

图 5 综合了月球挥发分运移、传输和储存的所有过程.如图所示,当彗星和微陨石与月球撞击时将产生一系列表面过程,如热解吸附作用、散射释放作用、撞击汽化作用和去气作用等,通过这样的表面作用从撞击物和当地物质中释放出气体.

月球大气层被看做是一个平面——反弹的外层大气.因为月球的大气层非常稀薄,粒子在大气层可以遵循弹道轨迹而不被其他粒子所碰撞,直到他们返回到月球表面.这样粒子在月球表面的移动可以用一系列自由弹性跳跃来模拟.因此,该过程可以利用基于 Butler^[15] 的框架性工作的模型来反演.

在这些气体在运移过程中一定会发生损失.一个是 Jeans 逃逸,因为重力弱,白天温度高,轻元素 ($A < 4$) 在月球上更加倾向于热逃逸;另一个被考虑的是在跳跃过程中的光电解和光电离.而光电解的产物部分可能重新返回到月表,例如,水通过获得能量而电离为 H 和 OH,尽管原子氢可以逃逸,但 OH 可以返回表面并与土壤反应形成氢的其他化合物.

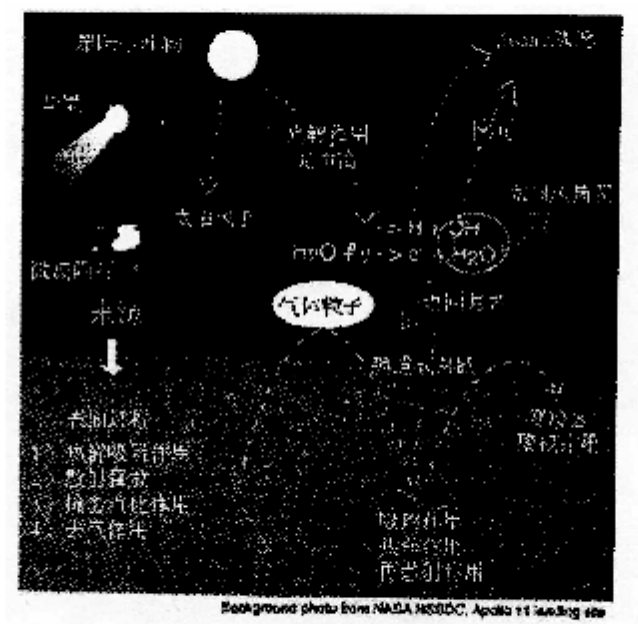


图 5 月球表面挥发分的运移存储模拟示意图解

Fig.5 The process involved with the migration and retention of volatiles in the lunar surface

这样气体粒子经过多次的跳跃之后, 尽管会有损失, 但肯定会有部分粒子到达极地的阴影区内被保存下来。

在充分考虑可能的影响因素的基础上, 计算机模拟的 7 种粒子 (共计 10 万个) 经过 50 次的跳跃之后的结果如表 1 所示, 表明后面 3 种粒子 OH, H₂O, HOD 的逃逸数量非常稀少, 而被中途捕获的数量对于 H₂O 和 HOD 来说没有超过 5%, 95% 以上的都可以进行运移。这一模拟结果显示, 在月面上不论以何种形式来源的水, 都可以通过这种热驱赶 (热逃逸) 的方式被运移到两极的永久阴影区中。

表 1 7 种粒子 50 次跳跃转移后的平均结果

Table 1 Average results for seven different species after 50 runs of 100 000 particles

	质量数	逃逸量 (%)	光转移量 (%)	捕获量 (%)
H	1	98.65 ± 0.03	1.25 ± 0.03	0.099 ± 0.006
D	2	97.13 ± 0.05	2.42 ± 0.05	0.45 ± 0.02
H ₂	2	96.33 ± 0.07	3.22 ± 0.06	0.45 ± 0.02
HD	3	93.36 ± 0.09	5.19 ± 0.07	1.45 ± 0.02
OH	17	0.002 ± 0.001	91.86 ± 0.09	8.14 ± 0.06
H ₂ O	18	0.0008 ± 0.0002	95.85 ± 0.06	4.15 ± 0.04
HOD	19	0.0002 ± 0.0004	95.78 ± 0.05	4.22 ± 0.04

5 水冰不可能是月球基地依赖的水资源

月球极区水冰的发现极大地鼓舞了人类重返月球、建立月球基地的热情。但 1999 年 7 月 31 日,当月球勘探者号即将结束任务之前, NASA 决定让飞船以 6115 km/h 的速度向月球表面冲去,然而,飞船撞击后,既没有出现水汽云,地基探测设备也没有探测到水的任何信息。尽管有各种解释,例如有人认为月球勘探者在坑内撞击到胶结的矿石层的可能性多于撞到冰层。而且如果月球有水,它只可能以含有水分的矿晶体的形式存在,而要分离出矿晶体内的水分,需要 815°C 的高温。但月球勘探者号的撞击所发出的温度将只有 382 摄氏度,这样的温度可以令冰化成水蒸气,却不足以释出矿物中的水分。但毕竟给月球上水的存在问题留下了疑问。

但反过来,月球是否有水存在对于人类建立永久性基地真的是不可或缺?据我们的研究计算表明,水冰不可能是月球基地依赖的水资源,主要基于以下几点原因:

(1) 水冰无一例外地存在于极地永久阴影区,温度约为 -230°C ,地形崎岖,难以从月壤中提取,人类很难直接利用。

(2) 以水冰形式存在,遇到阳光很容易散发,难以收集和运输。

(3) 如果生产一吨水,需要开发 80 m^3 的月壤(依据水冰保存在月表 0.1 m 深处,月壤的密度为 1.8 g/cm^3 计算),而通过月海玄武岩中的钛铁矿与月壤中的氢(氢来源于太阳风)反应来制造氧气(液氧)和水,生产一吨水,只需要开采 8.5 m^3 的月海玄武岩。

尽管在月球上发现水冰,是一个非常重要的科学问题,但目前对月球的探测和利用上,水的开发具有很大的难度,且不经济。而通过提取钛铁矿中的 TiO_2 来制造氧气(及液氧)和水($\text{FeTiO}_3 + \text{H}_2 = \text{TiO}_2 + \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$),工作量较低,而且可以在月球基地附近直接生产,是更为实用、经济和可靠的途径。也就是说,月球上是否存在水,对我们建立月球基地是无关紧要的。而开发月球上的矿产资源钛铁矿的同时可以为我们带来丰富的水资源。

重返月球,开发月球,在月球上建立永久性的基地在理论上已经不存在任何阻碍,月球在不久的将来将成为人类新的能源和资源基地。

参 考 文 献

- [1] Watson K, Murray B C, Brown H. On the possible presence of ice on the Moon. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**(9):1598—1600
- [2] Arnold J R. Ice in the lunar polar regions. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(B10):5659—5668
- [3] Lanzerotti L J, Brown W L, Johnson R E. Ice in the polar regions of the Moon. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**:3949—3950
- [4] Hodges R. Exospheric transport restrictions on water ice in lunar polar traps. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(11):2113—2116
- [5] Morgan T H, Shemansky D E. Limits to the lunar atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:1351—1367
- [6] Nozette S, Lichtenberg C L, Spauldis P *et al.* The Clementine bistatic radar experiment. *Science*, 1996, **274**: 1495—1498
- [7] Simpson R A, Tyler G L. Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar south pole. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(E2):3845—3862
- [8] Feldman W C, Maurice S, Binder A B *et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: Evidence for water ice at the lunar poles. *Science*, 1998, **281**:1496—1500

- [9] Lingenfelter *et al.* The Lunar neutron flux revisited. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1972, **16**:355—369
- [10] Metzger A E. Composition of the Moon as determined from orbit by gamma ray spectroscopy. In: Pieters C M, Englert P A J. Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition, New York: Cambridge Univ. Press, 1990. 341—365
- [11] Haines E, Metzger A. Lunar highland crustal models based on iron concentrations: Isostasy and center-of-mass displacement. In: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th, 1980. 689—718
- [12] Feldman W C, Reedy R C. Lunar neutron leakage fluxes as a function of composition and hydrogen content. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**:2157—2166
- [13] Weissman P R. The impact history of the solar system: Implications for the origin of atmospheres. In: Atreya S K, Pollack J B, Matthews M S. Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres, Tucson: Univ. of Ariz. Press, 1989. 230—267
- [14] Crider D H, Vondrak R R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposite. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(E11):26 733—26 782
- [15] Butler B J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(E8):19 283—19 291

DISCOVERY OF WATER ICE ON THE MOON SURFACE AND ITS SIGNIFICANCE

XU Lin^{1,2} LIU Jianzhong² ZOU Yongliao² LI Chunlai²

¹(Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

²(National Astronomical Observatories)

Abstract

This paper presents a review of the discovery of water ice on the Moon surface, the surveying techniques, the occurring forms, distribution and amount of water resources, and the migration of water on the Moon surface and its prospects in utilization. The surveying data available have shown that the water resources on the Moon are distributed mainly in the permanently shadowed areas of both lunar poles and water reserves amount approximately to 6.6×10^9 t. The dominant distribution of Moon surface water ice in the permanently shadowed areas of both lunar poles is attributed to the fact that water on the Moon surface may migrate gradually by way of elastic jumping to the temperature-low areas. This study holds that whether there exists water on the Moon would exert no influence on the construction of any moon base by mankind. It is simple and economic to acquire water by making use of ilmenite reactions in lunar basalts. Depends on new exploring data, if we produce 1 t water we need use ilmenite 8.5 m^3 , but we should consume regolith 80 m^3 .

Key words Moon, Water ice, Permanently shadowed area