

# 月球水冰探测进展

郑永春<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 刘春茹<sup>1,2</sup>, 李雄耀<sup>1,2</sup>, 欧阳自远<sup>1</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 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550002;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**月球上是否存在水冰是第二次月球探测热潮中的热点问题。1994 年克莱门汀号(Clementine)环月探测器搭载的频率为 2.273 GHz 双基地雷达探测到月球南极一些地区出现同向极化增加等独特的回波特征, 这些地区正好处于极地永久阴影区, 表明这些地区可能存在水冰。Arecibo 天文台频率为 2.38 GHz 的地基雷达对月球极地进行制图, 也得到类似结论。1998 年月球勘探者号(Lunar Prospector)环月探测器搭载的中子探测器在月球极地永久阴影区探测到高含量的氢信号大多认为是水冰引起的。但雷达探测和中子探测结果均存在多解性。月球表面粗糙度同样可以引起雷达回波呈现出类似水冰的异常特征, 而中子探测器测量到的仅仅是氢信号而非水, 而且月球勘探者号撞击月表之后并没有探测到任何的水蒸气信号。月球极地水冰存在与否、存在形式和存在数量等科学问题的回答需要对月球极地特别是永久阴影区作进一步探索。

**关键词:**月球水冰; 雷达; 中子探测器; 探测

**中图分类号:**P184 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2004)02-0573-06

月球是地球惟一的天然卫星, 也是距离地球最近的天体。最被广泛接受的有关地月系起源的大碰撞假说认为, 月球是 45 亿年前一个火星大小的行星(Theia)撞击原始地球抛出的碎片凝聚形成的<sup>[1]</sup>, 撞击事件的许多早期记录至今仍保存在月球上, 而地球上的这些记录受内力和外力作用消失殆尽。因此, 月球研究对于解释地球的早期演化历史具有重要意义。而且, 月球的特殊环境(如超高真空、无大气活动、无磁场、地质构造稳定、弱重力、无污染等)和丰富的自然资源(钛铁矿、克里普岩(KREEP, 富含钾、稀土和磷)、<sup>3</sup>He 等)吸引着人类去探索和开发利用。自 20 世纪 80 年代末期美国启动“重返月球”计划并成功实施两次月球探测计划以来, 欧洲空间局、日本、俄罗斯、印度、中国等国家和地区纷纷提出各自的月球探测计划并逐步付诸行动。

一直以来, 科学家认为, 月球上没有水, 当然也

没有冰。几十年各种手段探测月球的结果似乎也证实这一点。事实之一, 月球岩石类型主要有斜长岩、玄武岩和角砾岩, 而没有发现地球存在的水成岩石(砂岩、页岩和石灰岩等), 月岩是在很高的还原条件下形成的(O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 及 S 的分压很低); 事实之二, 月球的主要矿物是辉石[(Ca, Fe, Mg)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]、斜长石[(Ca, Na)(Al, Si)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>]、橄榄石[(Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>]、钛铁矿(FeTiO<sub>3</sub>)、尖晶石(MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)等, 没有发现任何原生的和次生的含水矿物, 如粘土、云母、闪石等; 事实之三, 月球上没有发现大气、水体和生物等外营力作用留下的痕迹, 而火星则有此类发现; 事实之四, 月表风化层(一般称为月壤)是由数十亿年大大小小的陨石和外星体撞击月球表面形成的, 撞击过程产生的高温, 加上月球没有大气层、低重力等因素, 使得月球表面很难保存水。

月球存在水冰的设想最早由美国科学家 Watson 等于 1961 年提出<sup>[2]</sup>。他们认为, 月球极地一些撞击坑底部可能处于太阳照射不到的永久阴影区, 表层和次表层温度将常年维持在 40 K 左右(-223 ~ -233 °C)。原始月球脱气作用产生的水、彗星和小行星撞击月球携带至月表的水在这样的低温下可能会以水冰的形式在地质历史中保存下来, 逃逸进

收稿日期: 2003-11-06; 修订日期: 2003-12-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-115); 国家自然科学基金资助项目(40373037, 40273033)

作者简介: 郑永春(1977—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为月球与行星科学。电话: 0851-5895328, E-mail: lunarsoil@tom.com 或 zhengyongchun88@hotmail.com

入宇宙的几率很小。他们推测月球两极撞击坑中可能存在大量水冰, 形态为冰尘混合物, 即“脏冰”(dirty ice)。

在月冰设想提出后的 30 余年间, 许多学者进行多方面的探索, 但无论是 Apollo 登月计划, 还是月球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, 大多数科学家一直认为月球表面不存在任何形式的水。这样的情形一直延续到 1994 年美国克莱门汀号环月探测器发射。

## 1 克莱门汀号搭载的双基地雷达对月冰的探测

1994 年 1 月 25 日, 美国为试验“星球大战”计划中研制的仪器, 向月球发射克莱门汀号探测器, 在绕月运行的 71 天中, 获得了 200 万幅高精度的月球表面热红外、可见光和紫外图像, 第一次获得整个月球表面的化学元素丰度分布图, 利用激光高度计获得了全月球的数字和彩色三维地形图, 图像分辨率比以往的月球照片高出 100 倍以上, 使人类对月球的认识达到第二个高峰。

克莱门汀号环月探测器上搭载有双基地雷达(也称双站雷达或收发分置雷达, Bistatic Radar)。双基地雷达的原理是从航天器向月球上的目标物体发射电磁波信号, 在地球上接收反射回来的电磁波(即回波信号), 由此获得目标物体的性质。该雷达发射的是未经调制的 S-波段右旋圆极化(S-Band right circular polarization, RCP)电磁波, 发射天线是直径 1.1 m 的高增益天线(high gain antenna, HGA), 频率 2.273 GHz(波长 13.19 cm), 净功率 6 W, 半功率点波速宽度为 4 度。回波信号由美国加利福尼亚州的高斯登(Goldstone, CA, USA)、西班牙的马德里(Madrid, Spain)和澳大利亚的堪培拉(Canberra, Australia)三地 70 m 天线组成的深空网络(Deep Space Network, DSN)地面站接收。只有当月球目标物、地基接收站和航天器轨道面处于同一平面时才能进行观测<sup>[3]</sup>。这种情形每月在两极各出现一次, 1994 年 4 月 9、10 日和 23、24 日地球穿过克莱门汀号轨道平面期间, 分别对月球南极和北极进行观测。

克莱门汀号搭载的双基地雷达测量的是月球极地区域的雷达回波能量和极化方式, 也就是搜寻水冰和其他冰冻挥发物有特别意义的回波特征。冰冻

挥发物(如水冰)具有全内反射性质(total internal reflections)<sup>[4]</sup>, 使散射信号中的电磁波保持原来的极化方式, 而且冰冻挥发物比硅酸盐类岩石的传输损耗更低, 相应的电磁波平均反射率更高, 回波能量就高, 即水冰比月表岩石能反射更多的 S 波段电磁波。而月表硅酸盐类岩石则向所有方向散射电磁波, 部分能量不能被地面接收天线接收。因此从两者表面返回的回波具有不同的极化方式和能量特征。回波能量高意味着有某种介质导致更多的能量返回。这种介质可能是平坦表面能像镜面一样向特定方向反射电磁波(这样表面的几何形状就很重要), 也可能是能放大回波能量的介质, 如水冰。此外, 在接收器—反射物体—航天器的角度接近 0 度时, 还可以得到水冰的散射中心。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、地面接收站成一条直线时, 同向极化(same sense polarization)增加, 右旋圆极化与左旋圆极化之比(RCP/LCP)明显增大, 出现特殊散射效应, 即雷达回波不呈现月表岩石碎屑所应具有的特征, 而呈现出挥发性冰的特征(可能混合有土壤和沙砾)<sup>[3]</sup>, 月球两极水冰的存在第一次有了直接证据。

Nozette 的研究发现, 同向极化增加的区域正好位于月球永久阴影区, 太阳照射到的月表区域却没有极化增加<sup>[3]</sup>, 表明这种极化增加只发生在永久阴影区。234 号轨道的观测覆盖月表面积 45 000 km<sup>2</sup>。由于月球北半球极地地区没有大的盆地, 而南半球有直径大于 2 500 km, 盆地中心平均深度达到 12 km 的爱肯盆地(South Pole Aitken basin, SPA)存在。因此, 据估算, 南极至少有 6 361 km<sup>2</sup>, 北极有 530 km<sup>2</sup> 位于永久阴影区<sup>[3]</sup>, 南极比北极可能保留更多的挥发物。保守估计南极存在纯水冰的面积接近 90~135 km<sup>2</sup>。这个面积和用 Arecibo 雷达观测到的月球南极 RCP/LCP 比值高( $\geq 1$ )的地区面积估算<sup>[5]</sup>是一致的。

但是, 有科学家认为, 根据克莱门汀号双基地雷达实验并不能肯定水冰的存在, 也无法确定水冰的准确储量。因为克莱门汀号搭载雷达极地观测采用的人射角为 82°~90°, 大入射角使得产生的散射很难预测, 会由于遮蔽、衍射、多次散射效应而产生异常<sup>[6]</sup>。因此并不能确定 234 号轨道极化率的增加是相干后向散射反效应(coherent backscatter opposition effect, CBOE)还是其它的散射效应引起的, 支

持体散射机制的低损耗物质同样可以引起这种效应。虽然水冰可以引起 COBE,但其它的散射机制(如月表粗糙度、二次反射等)也可解释月球极地 RCP 增加的现象。因此,克莱门汀号双基地雷达极化率的增加是月球极地存在水冰引起的观点并没有被广泛接受<sup>[7]</sup>,克莱门汀号探测器的发现受到一定程度的质疑。

## 2 Arcibo 地基雷达对月冰的探测

1992 年,美国康纳尔大学(Cornell University)的 Stacy 利用波多黎各 Arcibo 天文台 2.38 GHz (波长 12.6 cm)地基合成孔径雷达以 125 m 空间分辨率、双极化方式对月球极地进行表面制图,搜寻月球极地永久阴影区的水冰<sup>[7]</sup>。雷达波长和入射角与克莱门汀号搭载雷达相似。月球南极的观测结果与克莱门汀双基地雷达的观测结果存在部分不一致,没有发现任何一块面积大于 1 km<sup>2</sup> 的区域存在高雷达后向散射截面和高圆极化率,即月球极地至少不存在大面积分布的水冰<sup>[7]</sup>。虽然一些面积小于 1 km<sup>2</sup> 的区域观测到特殊的回波特征,但航天器上的光谱影像显示其中一些区域位于太阳照射区,而非永久阴影区。如 Arcibo 雷达对月球北极北纬 47° 的 Sinus Iridium 地区的回波也显示独特特征。由于雷达回波同感极化增加可能是水冰引起的,也可能是月球表面粗糙度引起的。所以,有科学家认为,某些太阳照射区甚至月球赤道附近也存在雷达回波同向极化增加的现象,明显是由于撞击坑边缘陡坡表面粗糙度引起的,而非水冰。

然而,另外一部分科学家认为,雷达观测结果的正确解译依赖于水冰的含量、月表特征以及测量的灵敏度等因素,因而不可能得到决定性的结论。而且,雷达一般只能检测到平板状的水冰,如格陵兰冰盖、木星的伽利略卫星表面等才会产生雷达后向散射异常,因此 Arcibo 雷达观测结果虽然与克莱门汀号搭载雷达不完全一致,但不能证明月球上没有水冰。

## 3 月球勘探者号中子探测器对月冰的探测

1998 年 1 月 7 日美国发射耗资 6 300 万美元的“月球勘探者”号(Lunar Prospector, LP)探测器,在

月球极地轨道上 100 km 高度运行一年,后降低到 50 km 和 30 km 高度飞行。搭载的有效载荷包括:γ 射线谱仪、中子探测器、磁强计、电子反射计、α 离子谱仪、多普勒(Doppler)重力场探测仪等仪器,获得月球表面高分辨率的化学成分、磁场、重力场、地形等数据,其中中子探测器能够测量整个月球表面的氢含量,氢信号的强弱又可以反映水含量的多少。中子探测器可探测到含量小于 0.01% 的水,探测深度约为 0.5 m,以 150 km 分辨率在南北纬 80° 和极地之间进行探测。探测结果表明:在月球两极,中子流数据显示丰富的 H,而且月球北极氢的信号比南极稍强。因此推测月球极地可能含有丰富的水冰,通过分析探测数据,水冰可能是以坚实的近乎纯水冰的形式埋藏于干燥的表土下约 40 cm 处,两极水冰总有效面积约为 1 850 km<sup>2</sup>。这些水冰也可能以一层月壤一层水冰的层叠形式储存,这样的结果可以是不同时期的彗星撞击造成的。

### 3.1 中子谱仪探测原理

高能宇宙射线与月表物质作用时会释放中子和其他亚原子粒子,其中一些中子能量高,能直接逃离月表进入宇宙,称为快中子(能量:500 keV~8 MeV);一些中子射入月表物质并与其它原子碰撞,如果碰撞的是较重的原子,那么撞击过程失去的能量不多,仍然会以接近初始速度运动,当它们到达月球上空的中子探测器时(如 LP 的中子探测器)还会保持一定的能量,这些中子称为超热中子(能量: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质量大小接近的原子碰撞。实际上只有一种原子的质量与中子相近,即氢原子。如果月球表面某个区域氢含量高,那么,任何在这个区域运动的中子在从月表逃逸进入宇宙之前都会被快速“冷却”,速度明显变慢,能量锐减,成为热中子(能量<0.3 eV)。当中子探测器经过氢含量高的地区上空时,中子探测器将检测到超热中子数的减少,同时检测到热中子数急剧增加。目标区域的氢含量就可通过不同类型中子计数率的相对高低来反映。

判断月球极地是否存在水冰的关键在于各种能量中子与含水冰月壤和干燥月壤相互作用过程的差异。如果月壤含有水冰,则氢原子丰度高,超热中子和快中子与氢原子作用后运动速度减慢,损失能量成为热中子,超热中子和快速中子密度相应衰减。

### 3.2 中子谱仪探测结果

超热中子计数率的最低值,在北极附近沿 $-50^{\circ}$ ~ $+130^{\circ}$ 的子午线方向延伸,覆盖 Peary、Rozhdenskiy、Plaskett 等撞击坑的范围。而在南极与最大的盆地爱肯(Aitken)盆地的分布范围大致相当。说明其与极地附近撞击坑中的永久阴影区有密切关系。超热中子对物质成分的敏感度相对较低,观察到的超热中子衰减的地区正好和月球两极永久阴影区重合的事实,支持有关水冰存在的推测。理由是氢丰度的提高很大部分归因于水分子的存在<sup>[8]</sup>。

月球勘探者号在月球南北极发现中能中子(能量:5~100 keV)的计数率出现明显的波谷,这是由于中能中子被月球表面的氢原子减速而数量减少的结果,也是存在水冰的重要证据。中能中子的计数率给出水冰是否存在的信息,快中子计数率则提供水冰存在形式的信息,即水冰的含量、水冰和月壤的混合比的信息。如果水冰是以大块固体形式存在,那么快中子记录曲线上就会出现波谷。而实际观测发现月球南北极快中子计数率均无明显变化,表明月球水冰是以很低混合比的细小晶体形式存在,混合比在0.3%~0.1%之间。因而推测,水冰可能分布在很大的区域里,南极的分布面积可能为 $5 \times 10^5$ ~ $2 \times 10^4$  km<sup>2</sup> 范围内,北极的分布面积可能为 $1 \times 10^4$ ~ $5 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。水冰的分布集中在月表以下40 cm左右。其中,南北极某些地区(南极为650 km<sup>2</sup>,北极1850 km<sup>2</sup> 面积)存在水冰的富集区,估计月球极地水冰的总储量约66亿t。这个数量约是过去20亿年彗星撞击携带并滞留于月球的水冰总量的10%左右,因而是完全可能的<sup>[9]</sup>。但也有学者认为,陨石的撞击汽化、微粒飞溅、星际氢的光致电离导致的水冰损失速率可能超过彗星输送水冰的量。

### 3.3 存在的疑问

美国国家航天局的研究人员相信,当重达160 kg的月球勘探者号高速撞向月球南极的一个可能存在水冰的区域时,释放的能量很可能撞开一个大坑。如果水冰确实存在于月表月壤层中,撞击力将足以使水冰蒸发或溅射出一团水蒸气。因此,1999年7月31日,当“月球勘探者”号即将完成使命之前,NASA下达指令,让探测器以6115 km/h的速度向月球极地预定目标表面撞去,科学家原本估计撞击将激发18 kg左右的水蒸气供地基和空基观测,从而得到无可争议的水冰存在的证据。然而,月

球勘探者号撞击后却没有出现期待中的水汽云,哈勃空间望远镜和得克萨斯大学 McDonald 天文台地基探测设备也没有探测到任何有关水的信息。

对此结果有几种可能的解释:(1)航天器可能撞击到目标区的一块岩石或干燥的月壤上,斯坦福大学的研究人员埃什尔曼和帕古斯<sup>[10]</sup>在写给 Science 的一封信里辩解,月球勘探者在坑内撞击到干燥月壤层的可能性多于撞到冰层;(2)水分子被岩石牢固束缚,而不是以冰晶体的形式存在;热力学研究数据表明,月壤中的无水矿物相与水冰起反应,化学结合进入矿物晶体中,形成含水矿物,这些无水物和含水矿物分别类似于硅酸盐水泥和干燥混凝土<sup>[10]</sup>。而要分离出含水矿物晶体内的水分,需要815℃的高温,但“月球勘探者”号撞击产生的温度只有382℃。这样的温度虽能使冰转化成水蒸气,却不能使矿物中的水分子释放出来。而且,由于含水矿物的形成和水冰的耗尽,同样可能使地基和空基雷达不能观测到清晰的水冰信号;(3)撞击坑里根本没有水冰,中子探测器探测到的纯粹是氢;(4)观测的望远镜没有对准,释放的水蒸气没能进入望远镜的视域。

## 4 希望与挑战

### 4.1 月球水冰的可能来源

如果证实月球极地存在水冰,这些水冰的可能来源包括:(1)由彗星或小天体带入。当彗星撞击月表并剧烈破碎时,碎块溅落到撞击坑永久阴影区与月壤混合;(2)由太阳风中的氢原子与月壤和月岩中的FeO发生还原反应产生: $\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ ;(3)月球深部释放的岩浆水。有关研究表明,上述这些水中应有20%~50%以冰的形式储存在月球两极撞击坑永久阴影区<sup>[2,11]</sup>。

月球极地水冰的确切来源有待于在未来的月球探测计划加以判断。判断的一个重要标准就是D/H比值,彗星起源的水的一个重要特征就是异常高的氘含量,D/H比值为 $3 \times 10^{-4}$ <sup>[12]</sup>,而太阳风注入月表的D/H比值约为 $2 \times 10^{-5}$ <sup>[13]</sup>,陨石撞击带入的D/H约为 $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ <sup>[14]</sup>。

### 4.2 水冰不能解决月球基地供水问题

毋庸置疑,月球极地可能存在水冰的发现,掀起进一步探测月球表面水的热潮,也为解决月球基地的供水问题提供强有力的希望,极大地鼓舞人类重返月球、建立月球基地的热情。虽然月球勘探者号

的撞击没有发现水冰信号, 尽管有各种解释, 但毕竟给月球上水的存在问题留下了阴影。但反过来, 即使月球极地存在水冰, 也不太可能是月球基地可以依赖的水资源。首先, 水冰含量低且存在于极地永久阴影区, 阴影区终年黑暗、低温, 对开采仪器的性能要求非常高, 人类很难直接利用。其次, 月壤中水冰的含量极微, 分布面积广, 并与月壤混合, 生产 1 t 水, 需要开发数 km<sup>2</sup> 面积的月壤, 水冰的收集和运输不仅在技术上存在着很大难度, 而且也不是非常经济的办法。

月海玄武岩中的钛铁矿体积分数可高达 25%, 钛铁矿不仅是铁(Fe)、钛(Ti)金属和氧气的主要来源, 钛铁矿与氢的反应所产生的水( $\text{FeTiO}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ )也将是未来月球基地获取水资源的重要途径之一。消耗 1 t 钛铁矿, 同时需消耗 0.013 t 氢气, 可以生成 0.12 t 水, 0.37 t 铁和 0.52 t 二氧化钛。如果按照月壤厚度为 40 cm 计算, 生产 1 t 水, 大约需要 10 t 的钛铁矿, 只需要开采 220 m<sup>2</sup> 的月海区月壤, 而且此方法可以在月球基地附近直接生产<sup>[15,16]</sup>。因此, 开发钛铁矿从而获取水, 是更为实用和可靠的途径。也就是说, 月球上是否存在水冰, 尽管是一个重要的科学问题, 但对人类建立月球基地是无关紧要的。

#### 4.3 月冰的存在需要进一步探测来证明

克莱门汀号双基地雷达的特征散射并不能确定是水冰引起的, 现在还无法排除是否是月球表面粗糙度引起的可能。Arecibo 地基雷达观测数据也不能证实水冰的存在<sup>[17]</sup>。而月球勘探者号虽然为水冰的存在提供新的证据, 但其反映的只是极地永久阴影区氢含量增加, 且撞击过程也没有观测到水蒸气的信号。因此月球是否真的存在水冰迄今仍然没有明确的答案。水冰的存在与否、存在形式、分布面积与含量仍然存在着很大的争议。

与此同时, 其他天体陆续报道有水或水冰存在的消息。如伽利略航天器对木卫四的探测结果表明, 木卫四存在水冰<sup>[18]</sup>; 火星 Odyssey 探测器搭载的高能中子探测器对火星观测表明, 火星北部洼地和南部高地的高能中子偏低, 这种现象表明, H 富集在次表层, 即可能存在水冰层<sup>[19,20]</sup>; 水星上似乎也存在水冰<sup>[10]</sup>。虽然这些信息也都是推测性的, 但一定程度上使月球极地存在水冰的希望增大, 吸引人类去进一步探索和研究。欧洲空间局已决定 SMART-1 之后预计实施的 LUNARSAT 月球探测

计划的主要目标之一, 就是以月球极轨卫星的方式探测月球水冰及其分布。

#### References[参考文献]:

- [1] BEN Z W, SLATTERY W L, CAMERON A G W. The origin of the Moon and the single-impact hypothesis[J]. *Icarus*, 1986, 66: 515-535.
- [2] WATSON H, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *J Geophys Res*, 1961, 66: 3033-3045.
- [3] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P, et al. The clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274 (29): 1495-1498.
- [4] OSTRO S J, SHOEMAKER E M. The extraordinary radar echoes from Europa, Ganymede, and Callisto: A geological perspective[J]. *Icarus*, 1990, 85: 335-345.
- [5] STACY N J S. *High-Resolution Synthetic Aperture Radar Observation of the Moon*[D]. Cornell University, 1993.
- [6] TSANG L, KONG J A, SHIN R T. Theory of microwave remote sensing[A]. KONG J A. *Wiley Series in Remote Sensing*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [7] STACY N J S, CAMPBELL D B, FORD P G. Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits[J]. *Science*, 1997, 276: 148-152.
- [8] FELDMAN W C, MAURICE S, LAWRENCE D J, et al. Evidence for water ice near the lunar poles[J]. *J Geophys Res (Planets)*, 2001, 106: 23232-23252.
- [9] ARNOLD J R. Ice on the Moon[J]. *J Geophys Res*, 1979, 84: 5659-5668.
- [10] ESHLEMAN V R, GEORGE A P, FELDMAN W C, et al. No ice on the Moon[J]? *Science*, 1999, 285: 531.
- [11] BUTLER B J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102: 19283-19291.
- [12] MEIER R, OWEN T C, JEWITT D C, et al. Deuterium in Comet C 1995 O1 (Hale-Bopp): Detection of DCN[J]. *Science*, 1998, 279: 1707-1710.
- [13] GEISS J, REEVES H. Deuterium in the solar system[J]. *Astron Astroph*, 1981, 93: 189-199.
- [14] KERRIDGE J F. Origins of organic matter in meteorites[A]. *Antarctic Meteorites (Proc. NIPR Symp)*[C]. 1993, 6: 293-303.
- [15] 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[A]. *Abstract of Space Resources Roundtable II*[C]. USA: Golden, 2000, 75.
- [16] NESS R O J, SHARP L L, BREKKE D W, et al. Hydrogen reduction of lunar soil and simulants[A]. *Proceedings of the*

- 3rd International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Space III[C]. New York, USA: ASCE, 1992. 617-628.
- [17] DUKE M B. Lunar polar ice deposits: Scientific and utilization objectives of the lunar ice discovery mission proposal[J]. *Acta Astronaut*, 2002, 50:379-383.
- [18] ANDERSON J D, SCHUBERT G, JACOBSON R A, et al. Distribution of rock, metals, and ices in Callisto[J]. *Science*, 1998, 280:1573-1576.
- [19] MORRIS R V. The surface exposure (maturity) of lunar soils: Some concepts and Is/FeO compilation[A]. *Proc Lunar Planet Sci 9th*[C]. 1978. 2287-2297.
- [20] MITROFANOV I, ANFIMOV D, KOZYREV A, et al. Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector, Mars Odyssey[J]. *Science*, 2002, 297:78-81.

## REVIEW ON EXPLORATION OF WATER ICE ON THE MOON

ZHENG Yong-chun<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>, LIU Chun-ru<sup>1,2</sup>,  
LI Xiong-yao<sup>1,2</sup>, OUYANG Zi-yuan<sup>1</sup>

(1. Center of Lunar & Planetary Science, State Key Lab of Environmental Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** It is one of the most important scientific topic whether there is water on the Moon. Most scientists think that there is no any form of water on the Moon. However, a bistatic radar experiment measured the magnitude and polarization of the radar echo versus bistatic angle for selected lunar areas during the Clementine mission. Observations of the lunar south pole yield a same-sense polarization enhancement around bistatic angle  $\beta=0$ . The observed enhancement is localized to the permanently shadowed regions. A probable explanation for these differences is the presence of water ice in the permanently shadowed region. The Arecibo 12.6-centimeter wavelength ground-based radar system imaged the polar regions of the moon and gained the similar results. Lunar Prospector's thermal and epithermal neutron data reveal the enhanced concentrations of hydrogen in permanent shade. It could be due to water molecules. However, we are far from finding the truth. For radar imaging, the roughness of lunar surface can also produce unusual echo. For neutron spectrograph, what we can decide is hydrogen, not water. Furthermore, we are failing to find any water vapor after the impact of Lunar Prospector. Human should do more work for exploration of water ice on the Moon than ever.

**Key words:** lunar water ice; radar imaging; neutron spectrograph; exploration