

曾献棣,唐红,李雄耀,等.月表太阳风成因水的研究现状和意义[J].地球科学进展,2018,33(5):473-482.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.05.0473.[Zeng Xiandi,Tang Hong, Li Xiongyao, et al. Research review and significance of lunar water originated from solar wind[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(5): 473-482. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.05.0473.]

月表太阳风成因水的研究现状和意义*

曾献棣^{1,2,3}, 唐红^{1,3*}, 李雄耀^{1,3}, 欧阳自远¹, 王世杰⁴

(1.中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心,贵州 贵阳 550081; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.中国科学院太空制造技术重点实验室,北京 100094; 4.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 550081)

摘要:水是生命活动的基础,也是天体演化的重要部分。月球一直被认为是“无水”星体,但这一观点被最新的研究成果推翻。月球遥感红外光谱和 Apollo 样品分析结果均证实了月球表面能通过太阳风质子与月壤矿物相互作用来产生 OH 甚至是 H₂O。为探讨其反应过程,相关理论分析和离子注入模拟实验等研究已逐步开展。但是,目前对于太阳风成因水的成因机制,形成时的影响因素,产生后在月表的赋存、迁移和保留机制仍缺乏系统研究。针对这些问题,未来立足于嫦娥五号样品分析,建立月球表面太阳风成因水的形成和迁移运动的模型将会是推进月球水研究的重要部分。这不仅能为月球水资源开发利用提供线索,还可能为太阳系内其他无大气类地行星水来源和演化研究提供参考。

关键词:月球水; 太阳风; 红外光谱; 月壤; 离子注入实验

中图分类号: P691 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2018)05-0473-10

1 引言

水是生命活动赖以维持的基础,是揭示太阳系天体形成演化过程的重要依据,同时也是重要的资源物质,因此,地外天体水一直是月球和深空探测的重要内容。但是月球水的探测却经历了漫长曲折的过程。月球水最早由 Watson 等^[1]提出,认为月球永久阴影极区的低温环境(约 40 K)有助于保存水冰。但是 Apollo 和 Luna 时期的探测结果表明月球是一个极其干燥的天体,无论在月球表面还是月球样品中都没有发现水存在的明显证据^[2]。

20 世纪 90 年代的月球探测引起了人们对月球水的再次关注。1992 年利用 Arecibo 天文台地基雷

达对月球两极进行了探测,但没有发现面积大于 1 km² 的水冰区域^[3]。1994 年发射的 Clementine 通过雷达检测到月球极区永久阴影区中疑似水冰的信号,但是由于雷达数据的多解性,这一结论未获得广泛共识^[4-5]。1998 年发射的 Lunar Prospector 搭载的中子光谱仪探测到月球两极有大量的氢(H)存在,却无法确定其存在形式(水冰、羟基或其他含氢化合物)^[6-9]。更遗憾的是,1999 年 Lunar Prospector 撞击到月球 Shackleton 撞击坑的试验中也没有获取到任何有关水冰的证据^[10]。自此,月球水的探测活动又重新进入低迷时期。

21 世纪是月球水探测和研究的新时期,无论是遥感探测还是月球样品的重新分析,都明确证实了

收稿日期: 2018-01-01; 修回日期: 2018-04-10.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“月表主要硅酸盐矿物中太阳风成因水的实验对比研究”(编号: 41773066); 中国科学院青年创新促进会资助。

作者简介: 曾献棣(1992-),男,广东广州人,硕士研究生,主要从事月球与行星科学研究.E-mail: zengxiandi@mail.gyig.ac.cn

* 通信作者: 唐红(1984-),女,四川内江人,副研究员,主要从事月球与行星科学研究.E-mail: tanghong@vip.gyig.ac.cn

月球水的存在。在遥感探测方面, Cassini, Chandrayaan-1 和 Deep Impact 这 3 次探测任务上搭载的红外光谱仪均发现几乎整个月球表面都出现 2.8 和 3 μm 的水吸收信号,证实了月表羟基和水的存在^[11-13]。2008 年发射的 Chandrayaan-1 搭载的微型雷达对月球北极撞击坑进行了探测,通过排除月表粗糙度的影响,初步确定了 30 个撞击坑含有水冰^[14]。2009 年发射的月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 搭载的中子探测仪在永久阴影区中也发现了丰富的 H^[15]。2009 年月球陨坑观测与传感卫星(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS) 撞击月球 Cabeus 撞击坑,通过检测撞击溅射物质成分最终确认该地区有水的存在,并推测其含水量为 $(5.6 \pm 2.9) \text{ wt. \%}$ (wt.% 为重量百分含量)^[16]。在月球样品分析方面,随着实验室精细分析技术的发展和提高,对 Apollo 时期返回月球样品的重新检测,相继发现月球中的火山玻璃、磷灰石、钙长石、胶结质玻璃、熔融包裹体中有微量水的存在,而且这些水并非来自地球污染^[17-22]。

目前认为月球水的来源主要有 3 种^[23-27]: ①月球内部岩浆洋的水; ②彗星或陨石撞击携带的水; ③太阳风质子与月表含氧物质相互作用产生的水。其中,产生于太阳风质子与月表含氧矿物之间相互作用的太阳风成因水,会受月表温度发生迁移运动,部分最终在月球永久阴影区中保存下来^[28, 29]。因此开展月球太阳风成因水的研究,是认识月球水的来源、成因及其演化的重要基础,有助于评估太阳风成因水对月球极区水冰来源和储存的贡献,对月表水开发利用具有重要意义。

太阳风成因水不仅在月球出现,太阳系其他无大气天体如水星、小行星以及星际尘埃物质也一直接受太阳辐射,很有可能在其表面形成水。Starukhina^[9]总结了雷达探测水星极区水冰、中子谱仪探测月表 H 分布以及红外光谱仪探测 M 和 E 群小行星 3 μm 附近水吸收峰的结果,提出月球、水星和小行星表面探测到的水主要形成于太阳风质子注入作用; 轨道观测器 Dawn 探测到在小行星带的 Vesta 和 Ceres 上有疑似水的存在^[30, 31], Farrell 等^[32]认为其部分水也可能产生于太阳风作用; Delitsky 等^[33]探讨水星极地阴影区的挥发分时认为其中部分水由太阳风注入产生; Bradley 等^[34]在行星际尘埃硅酸盐颗粒表面的非晶质环带中也检测到太阳风成因水; Djouadi 等^[35]通过模拟实验得出星际尘埃的颗粒表面能产生太阳风成因的 OH 基团,并指出太阳

成因的 OH 可能在类地行星吸积过程中提供一个重要的水源。太阳系形成距今已约有 46 亿年,从太阳开始燃烧并产生辐射,太阳风就会持续不断作用于行星吸积形成前的太阳星云尘埃颗粒并形成 OH,最终部分水可能保留于行星内部。Vattuone 等^[36]指出在地球吸积时,太阳风注入产生的羟基在高温条件下仍能保留于矿物结构中,这部分水可能是早期地球水的重要来源之一。所以,深入探讨月球太阳风成因水,不仅能对比太阳系中其他无大气天体表面太阳风成因水的形成和演化过程,还有助于揭示内太阳系行星内部水的来源和演化。

2 太阳风成因水的证据

虽然月球太阳风成因水的假设很早就被提出,但因为缺少实证,长期以来没有被学术界重视,直到 Cassini, Chandrayaan-1 和 Deep Impact 3 次绕月遥感探测搭载的红外光谱仪获得了月球表面存在水的重要证据^[11-13],月球太阳风成因水研究才不断深入。

2.1 红外光谱证据

Cassini 搭载的可见光—红外成像光谱仪(Visual and Infrared Mapping Spectrometer, VIMS) 由 2 个光学系统组成,光谱范围为 0.3 ~ 5.1 μm ,能同时产生 352 个二维图像,空间分辨率为每像素 0.5 mrad \times 0.5 mrad,红外波段的光谱分辨率为 16 nm^[37]。Chandrayaan-1 搭载的红外光谱仪是 Moon Mineralogy Mapper(M^3),光谱范围为 0.43 ~ 3.00 μm ,0.7 mrad 的空间分辨率对应的光谱分辨率为 10 nm^[38]。Deep Impact 上搭载的是 HRI-IR(High Resolution Instrument-Infrared),测量范围为 1.05 ~ 4.80 μm ^[39]。从光谱的测量范围看,这 3 个红外遥感光谱仪均包含 OH 和 H₂O 基频的吸收范围^[40, 41],且这 3 种红外遥感光谱仪都是探测月表水有效的仪器。

通过对这 3 次红外遥感探测数据的分析,获得了以下结论^[11-13, 42-46]: ①3 个红外光谱均发现月球表面广泛存在 2.8 和 3.0 μm 的信号,代表了 OH/H₂O,其中 2.8 μm 的特征峰在整个月球表面都有检测到,而 3 μm 主要分布在中高纬度地区(图 1); ②OH 和 H₂O 的吸收强度与纬度存在正相关性,即在赤道的吸收强度最弱,随着纬度增加其吸收强度逐渐增强,极区最强,这反映了水从低纬度到高纬度存在丰度变化; ③OH 和 H₂O 的吸收强度与温度(光照条件)具有负相关性(图 2),Deep Impact 检测的光谱显示,相同或相近区域在早晨其 OH 和 H₂O 的吸收强度最强,中午表现出最弱,到傍晚基本恢复到早

上的吸收强度,说明日照面的月表能持续产生 OH/H₂O, 并且其水含量是瞬时变化的,随着光照和温度的增强,OH 和 H₂O 不断减少;④月表水含量与物质成分也存在一定的相关性,月表高地 OH 和 H₂O 的吸收强度均明显强于月海,特别是几个年轻的富斜长石撞击坑表现出非常强的 OH/H₂O 吸收,并且高地和月海 OH/H₂O 受温度和太阳辐射的影响也有所不同,表现为高地长石保存水的能力要高于月海玄武岩;⑤OH/H₂O 的红外光谱信号强度与月壤成熟度成正相关,随着月表矿物颗粒受太空风化越强烈,其成熟度越高,而光谱数据显示该区域的水含量

要更高;⑥紫外辐射对月表 OH 也具有一定的影响,通过分析 Boguslawsky 撞击坑的 M³ 数据,发现在清晨含 OH 的逃逸主要由热效应作用控制,而午后则主要受紫外辐射造成的光解作用影响;⑦这 3 次红外光谱均分别估算出了月表水含量,VIMS 检测到水含量范围为 10×10⁻⁶~1 000×10⁻⁶,M³ 数据反映的水含量最高可达 770×10⁻⁶,HRI-IR 估算出水含量小于 5 000×10⁻⁶。

这 3 次红外光谱探测不仅证实了月表全球范围内 OH 和 H₂O 的存在,并且还发现 OH 和 H₂O 的吸收强度与纬度、光照条件(温度)和矿物成分具有一

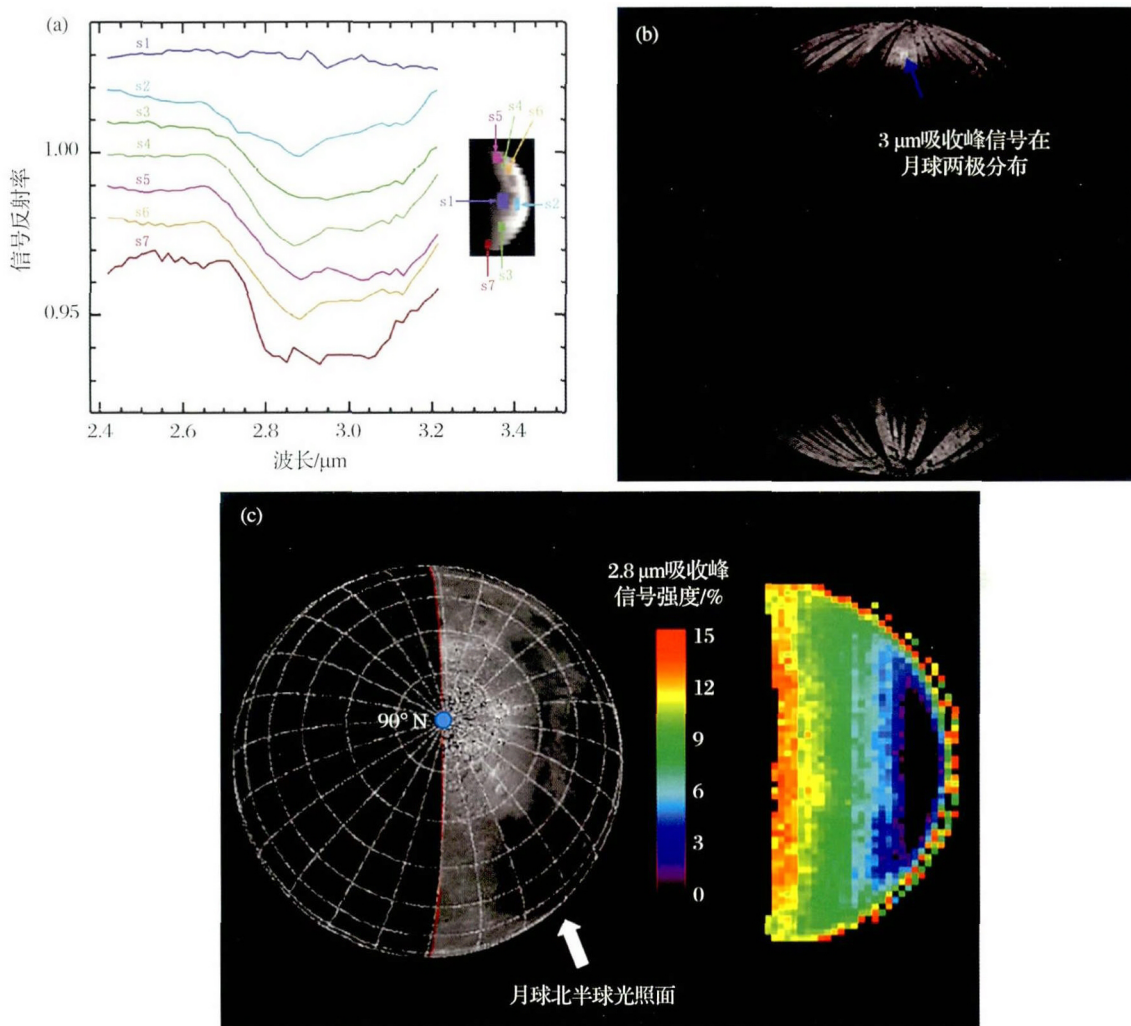


图 1 月表上遥感红外水吸收峰分布

Fig.1 Infrared remote sensing of water absorption peaks on lunar surface

- (a) VIMS 检测在月表不同纬度范围的水吸收峰变化^[11]; (b) M³ 检测 3 μm 吸收峰主要在月球极地区域分布^[12];
 - (c) Deep Impact 检测 2.8 μm 吸收峰在北半球月面含量变化图^[13]
- (a) Varying water absorbance distribute on lunar surface in different latitudes from VIMS^[11]; (b) Measured 3 μm absorption strength on the polar region of the moon from M³^[12]; (c) The strength of the continuum-removed 2.8 μm hydration feature on lunar surface of the Northern Hemisphere from the Deep Impact^[13]

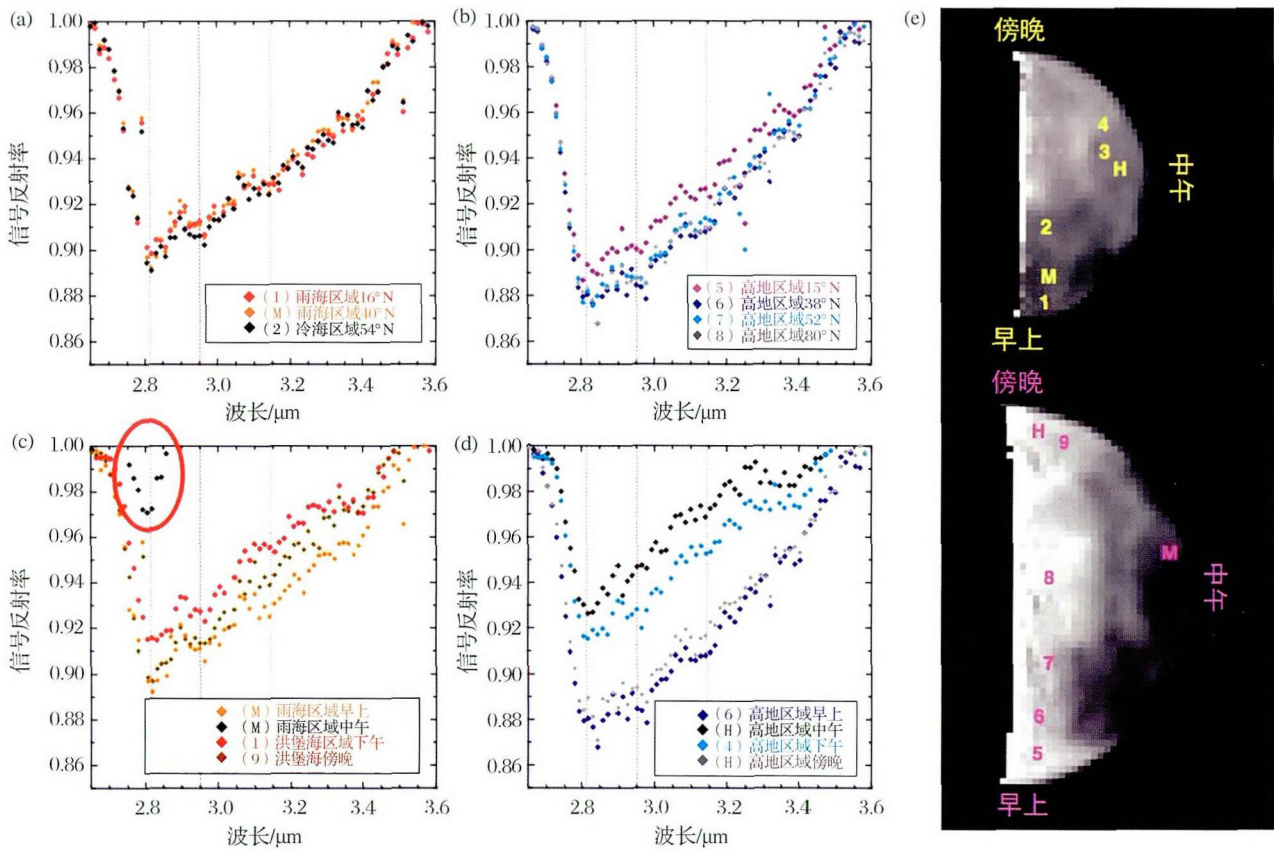


图2 对比 1/4 天内月海和高地区域在不同纬度和不同时间的水吸收峰变化^[13]

Fig.2 Comparisons of mare and highland terrains as a function of latitude and time of day as observed over a quarter of a lunar day^[13]

(a) 不同纬度月海区域的水吸收峰变化; (b) 不同纬度高地区域的水吸收峰变化; (c) 月海区域在不同时间的水吸收峰变化;

(d) 高地区域在不同时间的水吸收峰变化; (e) 1 2 3 9, M 为月海区域, 5 6 7 8, H 为高地区域

(a) Variation of water absorption in mare region at different latitude; (b) Variation of water absorption in highland region at different latitude;

(c) Variation of water absorption in mare region at different time; (d) Variation of water absorption in highland region at different

time; (e) 1, 2, 3, 9, M for mare region, 5, 6, 7, 8, H for highland region

定的相关性。由于红外光谱仅代表月表最上层毫米级范围内物质的吸收特征,且月表 OH/H₂O 信号表现具有全球性分布和随光照条件变化的特点,结合 Lunar Prospector 搭载的中子光谱探测到月表数厘米内 H 的信号分布^[6],说明红外光谱仪探测到的 OH 和 H₂O 形成于月球最表层的水合作用,并且这种动态的水合作用明显受太阳辐射的驱动,这意味着探测到的羟基和水主要来源于太阳风的注入作用。

2.2 样品分析证据

除了遥感探测,月壤样品分析结果也是太阳风成因水的重要证据之一。最早由 Housley 等^[47, 48]提出太阳风质子进入月表矿物颗粒中能使部分矿物发生还原反应,产生亚微米级铁颗粒以及 OH 或 H₂O。此外,他们还提出在月壤胶结质玻璃中出现的小囊泡结构是由太阳风气体(主要为 H⁺)及其产物(OH

或者 H₂O) 饱和充填所形成的。尽管如此,这仍不是月表太阳风成因水存在的直接证据。

近年, Apollo 计划时期返回月壤的分析结果确认了部分样品中含有微量水,并根据氢同位素特征推断了这些水的可能来源,其中就包括太阳风来源。Liu 等^[20]利用傅里叶红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)和二次离子探针(Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS)分析了 Apollo 11 和 17 月海月壤、Apollo 16 高地月壤样品。FTIR 在 Apollo 11 和 17 的胶结质玻璃中发现了 OH 的特征峰,其水含量为 $70 \times 10^{-6} \sim 170 \times 10^{-6}$,同时, SIMS 检测出样品水含量为 $160 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$,氢同位素比值为 $\delta D < -500\text{‰}$ (图 3),与太阳风的 $\delta D \approx -1\,000\text{‰}$ 相近(其他来源如地球、陨石和彗星等的 δD 远高于胶结质玻璃中所测的 δD 值),这意味着

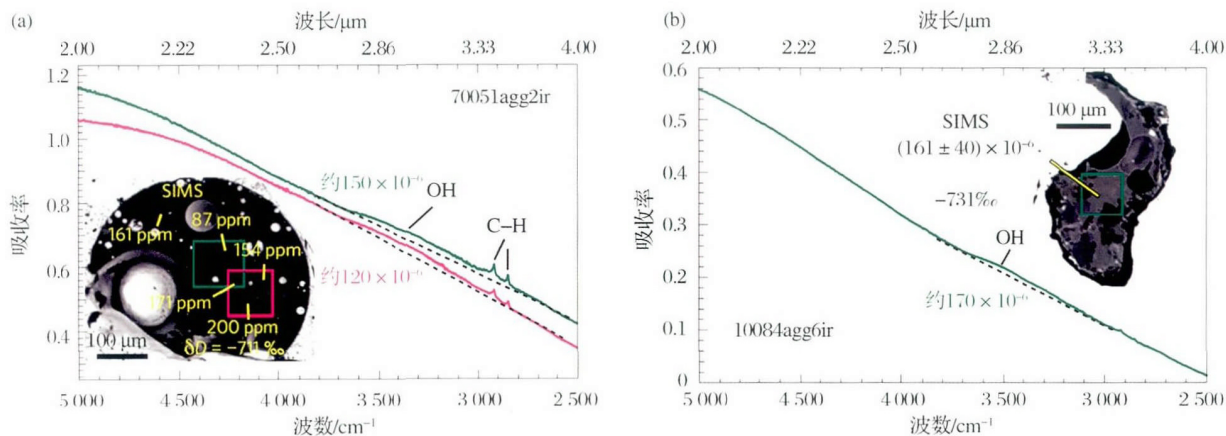


图 3 月壤胶结质玻璃 FTIR 光谱及 SIMS 数据对比^[20]

Fig.3 FTIR spectra and SIMS data of two agglutinates^[20]

$$\delta D(\text{‰}) = [(D/H)_{\text{measured}} / (D/H)_{\text{standard}} - 1] \times 1000 \quad (D/H)_{\text{standard}} = 1.5576 \times 10^{-4}; \text{ppm} \times 10^{-6}$$

太阳风对月壤胶结质玻璃中水的贡献,证实了太阳风成因水的存在。此外,Izawa等^[49]用反射光谱分析从月球返回后一直保存在真空中且未受地球大气污染的月球样品。样品类型包括 Apollo 11, 12, 15, 16 和 17。光谱分析发现所有样品都出现了 3 μm 附近水的吸收峰,含水量为 $800 \times 10^{-6} \sim 1600 \times 10^{-6}$,与 VIMS, HRI-IR 和 M³ 的光谱数据结果相一致。由于反射光谱检测到的 3 μm 附近的信号反映了样品极表面的水合作用,且其吸收峰深度和样品的成熟度具有正相关性,因此得出了分析月壤样品中的水主要来源于太阳风质子注入作用的结论。

3 成因机制与实验研究

针对月表太阳风质子与月壤含氧物质之间的相互作用形成水这一问题,国内外部分学者从理论上分析了该过程的成因机制,论证反应形成条件与合理性,并开展了相关的模拟实验,验证了太阳风成因水的反应过程,并对一些影响因素进行了分析。

3.1 形成机制与理论分析

太阳风是指从太阳日冕向行星际空间辐射的连续的等离子体粒子流,包含约 95% 的质子,约 4% 的氦核和极少量的其他元素,其到达地月系统的通量约为 $4 \times 10^8 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,平均能量约为 1 keV (范围为 0.5~3 keV)^[50-52]。而月壤是受太阳风作用的直接物质,主要矿物有斜长石、辉石、橄榄石及大量的胶结质玻璃等^[53]。在一系列太空风化的长期作用下,月壤矿物颗粒表面会产生大量晶格缺陷,这为太阳风质子在晶格结构中保留并成键提供了条件^[54]。通常注入的太阳风质子能进入到矿物颗粒表面 0.5

$\times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 以下的位置^[8]。其中部分以弱键形式,如氢键或范德华力等停留在月壤颗粒表层结构中,但这些键在月表环境中不稳定,容易受到温度等影响发生逃逸。另外,部分质子能进入矿物颗粒内部的缺陷中,并与 O 离子相结合形成 -OH 甚至是 H₂O^[42,55]。这部分 OH/H₂O 相对稳定。Starukhina^[9]结合太阳风质子注入量以及月表矿物对 H 的储集能力,通过数学模型论证太阳风作用生成 OH 的饱和浓度以及温度和月壤物性对 OH 形成的影响。Farrell等^[32]在 Starukhina^[9]的基础上,细化了理论计算公式,指出颗粒表面活化能较大时 (>1 eV),注入的 H 就能长时间保留在月壤中并可能形成 OH,活化能较小时 (<0.2 eV) 则很快逃逸,当活化能能量范围在 0.3~0.9 eV 时,注入的 H 极易受环境温度影响,其中月壤中的晶格缺陷起关键作用。

3.2 实验模拟

为验证太阳风质子与含氧物质相互作用生成水这一过程,国内外学者开展了模拟太阳风质子注入实验。最早 Zeller等^[56]通过质子注入实验来证明月表羟基的形成,并为太阳风成因水假设提供实验证据。该实验使用的注入能量远高于太阳风注入月表矿物的能量,所用样品是化学合成的模拟玻璃质物质。数据显示 H 生成 OH 的转化率能达到 5%~100%,虽然实验条件未达到真实的月表环境,但为太阳风作用成因水提供了很好的研究思路和方法。

近年来,随着太阳风作用成因水的研究热潮重新掀起,并且实验设备和检测技术不断完善,太阳风模拟研究实验也取得了新的进展。

Zent等^[57]使用 Apollo 17 月壤样品开展了太阳

风生成 OH 的模拟实验,利用红外光谱仪检测经 H 等离子体辐射前后样品中水的吸收峰变化,确认有 OH/H₂O 产生。Managadze 等^[58]对橄榄石和 SiO₂ 的粉末样品注入 D⁺来模拟太阳风质子注入生成水实验,SIMS 检测发现注入后不仅有 OD 产生,而且还有 D₂O,由于 H⁺和 D⁺性质相近,由此推断太阳风质子注入在月表矿物中会产生 OH/H₂O。Ichimura 等^[59]使用了月壤颗粒样品进行模拟实验,分别使用 1.1 keV 的 H⁺和 D⁺开展了注入实验,实验结果也都显示注入后的样品有 OH 和 OD 生成,同样验证了太阳风成因水的存在。Bradley 等^[34]用 5 keV 的 H⁺对标准无水硅酸盐矿物橄榄石、单斜辉石和钙长石样品进行了离子注入模拟实验,并通过透射电镜和价电子损失能谱仪(Valance Electron Eenergy-Loss Spectrometer, VEELS)检测出离子注入后样品表层非晶质环带中的小气泡有新形成的水存在,其中钙长石中的水信号最强。目前所有模拟实验中仅有 Burke 等^[60]的实验没有羟基或水生成,Managadze 等^[58]推测其可能原因是实验使用的样品为抛光薄片样品,其表面积要比粉末样品小得多,从而导致实验效果不理想。Farrell 等^[32]则认为样品的晶格缺陷起关键作用,Burke 等^[60]使用的样品是抛光后完整矿物,内部缺陷极少,不利于 H 保留。

以上模拟实验主要是验证太阳风质子与含氧物质相互作用是否能够产生水,实验流程和条件相对单一。为了更深入地认识太阳风作用生成水过程的影响因素,Djouadi 等^[35]选用橄榄石作为模拟实验的样品,Schaible 等^[61]则用非晶质化 SiO₂ 和橄榄石作为模拟实验的样品,实验设计不同的能量、通量及惰性离子预处理(提高样品成熟度)等条件,探究这些因素对太阳风成因水的具体影响。实验结果表明:这些 H⁺注入实验均产生了 OH,并且注入 H⁺通量越高,样品生成 OH 的量越多,但是会达到一个饱和值,其中橄榄石通量的饱和值要高于非晶质 SiO₂;注入能量越高能 OH 的饱和值越高;此外提高样品成熟度同样也能提高 OH 的生成量。

总的来说,目前太阳风注入的模拟实验已经获得了新的进展,不仅证实了月表条件下太阳风成因 OH/H₂O 的可能性,并且还揭示了太阳风质子与月壤物质相互作用产生水这一过程会受到含氧物质类型、太阳风通量(暴露时间)和月壤成熟度等因素影响。

4 问题与展望

迄今为止,在月球表面太阳风质子轰击到月壤

颗粒上并与矿物中的氧发生反应生成 OH 或者 H₂O 已经得到了很多重要的证据,包括一系列的红外遥感数据、月壤返回样品的分析结果以及相关的理论分析和模拟实验。但太阳风成因水的具体形成机制、特征和影响因素等重要问题尚不明确,还需要进行系统深入的研究。

(1) 太阳风成因水的成因机制。①关于质子与颗粒物质是如何相互作用的,目前成因机制仅是假说,具体反应过程尚不清楚。②虽然遥感红外数据中出现 2.8 与 3 μm 的红外特征峰,但两者的分布并不完全统一,可能有不同生成条件。这个问题即使是在模拟实验中也未得到很好的验证和解释,虽然目前认为在质子注入过程中形成 OH 达到饱和后,在 H 继续补充的情况下,OH 会进一步形成 H₂O^[42,59],但仅有 Bradley 等^[34]的实验有 H₂O 产生,具体原因仍不清楚。所以关于太阳风成因水的形成过程,是一步生成还是分步进行,羟基和水生成对应的具体反应所需条件和反应过程是什么,都需要更深入的分析。

(2) 太阳风成因水的特征。目前学术界对太阳风生成的 OH 或者 H₂O 的化学状态、赋存位置、含量以及稳定性等特征都还未有明确的认识。Mccord 等^[42]初步认为太阳风成因的 OH 和 H₂O 赋存形态主要有 2 种形式:一是 H 与颗粒表层悬挂的 O 结合,以范德华力或弱键形式存在于极表层区域,容易受外界影响而分解;二是扩散到内部的 H 与矿物内部的晶格缺陷中的 O 结合形成结构水,其状态相对更稳定。Bradley 等^[34]用透射电镜和 VEELS 检测到实验后矿物样品非晶质环带与矿物界面上的气泡有水的存在,认为 OH/H₂O 可能存在于气泡之中。因此太阳风成因水的化学状态、赋存位置、含量变化和稳定性仍需要进一步研究。

(3) 太阳风成因水生成的影响因素。太阳风成因水会受内外两大因素影响,内在因素包括月壤物质类型和成熟度,外在因素包括光照、温度、紫外辐射、真空等。但目前仍未对这些因素做全面系统的分析和探讨。遥感红外光谱结果分析和模拟实验中均反映了不同类型区域(样品)中生成水和保存水的能力存在差异^[12,13,34,61]。这是由于不同硅酸盐矿物的化学成分和结构具有明显差异,注入质子与氧结合的形态和化学位置也会不同,进而影响不同矿物中保留 H 和形成水的能力。但是目前仅对比分析了部分矿物在形成 OH 之间的差异,尚未形成系统全面的认识。其次,Izawa 等^[49]的研究揭示了月

壤成熟度与太阳风成因水存在一定正相关性,成熟度越高意味着对矿物晶格的破坏越严重,更有利于质子的进入和扩散,从而促进 OH 和 H₂O 的生成,但对该影响仅进行了简单分析,其具体影响程度尚不清楚。外在因素包括温度、紫外辐射和真空,对于太阳风成因水的保存具有重要影响,但是目前尚没有开展定量、全面的分析探讨,仅进行了单一因素的定性对比。

(4) 太阳风成因水的迁移运动。在月表真空环境中受温度和辐射的驱动下,太阳风成因水由于其特殊成因表现出不稳定性,极易发生分解、逃逸和迁移。部分学者在理论上探讨了月表水的迁移运动过程。Butler^[28]用数值模拟简单计算出月表及水星表面的水分子迁移率分别为 20%~50% 和 5%~15%,随后 Crider 等^[62,63]用 Monte-Carlo 模型结合月表温度、大气情况和月壤矿物表面的解吸作用,计算出太阳风质子进入到月表有 60% 转化为 H₂, 27% 仍以 H 原子形式存在,而形成 OH 的仅占 10%,迁移到极区的 H 主要以 OH 为主,约占 66.7%。但是,由于月表环境的复杂性,包括质子进入矿物后反应生成水的含量和位置、不同区域太空风化作用的程度、月表不同纬度和时间对水的影响差异等,这些影响因素对太阳风成因水的生成、迁移、逃逸和保存都没有得到清楚的认识,限制了关于太阳风成因水迁移运动的研究,还需要更为系统全面的理论分析和实验验证。

总体来说,太阳风成因水作为月表水的重要来源之一已经普遍被学术界所认可,但还需要开展系统的研究,才能深入理解太阳风成因水的形成和特征。结合太阳风成因水的研究进展,立足于理论分析的基础上,根据月壤中不同矿物的晶格结构,计算不同阳离子和氧的结合能,探讨在太阳风质子注入下矿物结构损坏程度以及与氧反应生成 OH 甚至 H₂O 的能力和稳定性,从而推断月表太阳风成因水在月壤不同载体矿物中的生成机制。目前仅在胶结质玻璃中发现太阳风成因水^[20],所以未来需要结合 CE-5 返回样品来开展太阳风成因水的深入研究,分析不同类型月壤颗粒的水含量及氢同位素,结合采集点环境和月壤矿物性质来分析其赋存状态和稳定性,探讨其形成机理、保存机制和迁移过程。同时,以模拟实验的方式根据月表环境设计不同的条件,包括辐照的能量、通量、流速以及真空、温差、紫外辐射等,综合探讨月表太阳风成因水的形成和保存的影响因素。最后结合遥感数据、月球样品分析、理论计算和模拟实验的结果,建立月球表面太阳风成因

水的形成和迁移运动的模型,全面认识月表太阳风成因水生成—分解—逃逸—迁移—储存这一系列复杂的过程,并以此评估太阳风成因水对月球极区水冰的贡献。总之,深入认识太阳风成因水不仅能更好地认识月球水的来源、形成和演化过程,更能进一步延伸到太阳系其他无大气天体表面太阳风成因水的特征对比,并且有助于探讨内太阳系行星内部水的来源。

参考文献(References):

- [1] Watson K, Murray B C, Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9): 3 033-3 045.
- [2] Jolliff B L, Wiczorek M A, Shearer C K, et al. Review in Mineralogy and Geochemistry Vol. 60: New Views of the Moon [M]. Chantilly V A: Mineralogical Society of America, 2006: 365-518.
- [3] 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(5 318): 1 527-1 530.
- [4] Nozette S, Lichtenberg C L, Spudis P, et al. The clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274(5 292): 1 495-1 498.
- [5] Weidenschilling S J, Nozette S, Shoemaker E M, et al. The possibility of ice on the moon[J]. *Science*, 1997, 278(5 335): 144-145.
- [6] 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[J]. *Science*, 1998, 281(5 382): 1 496-1 500.
- [7] Feldman W C, Lawrence D J, Elphic R C, et al. Polar hydrogen deposits on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2000, 105(E2): 4 175-4 195.
- [8] Starukhina L V, Shkuratov Y G. The lunar poles: Water ice or chemically trapped hydrogen? [J]. *Icarus*, 2000, 147(2): 585-587.
- [9] Starukhina L. Water detection on atmosphereless celestial bodies: Alternative explanations of the observations[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2001, 106(E7): 14 701-14 710.
- [10] Goldstein D B, Nerem R S, Barker E S, et al. Impacting lunar prospector in a cold trap to detect water ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(12): 1 653-1 656.
- [11] Clark R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon [J]. *Science*, 2009, 326(5 952): 562-564.
- [12] Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1 [J]. *Science*, 2009, 326(5 952): 568-572.
- [13] Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft [J]. *Science*, 2009, 326(5 952): 565-568.

- [14] Spudis P D , Bussey D B J , Baloga S M , *et al.* Initial results for the north pole of the Moon from Mini-SAR , Chandrayaan-1 mission [J]. *Geophysical Research Letters* , 2010 , 37(6) : 401-408.
- [15] Mitrofanov I G , Sanin A B , Boynton W V , *et al.* Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND [J]. *Science* , 2010 , 330(6 003) : 483-486.
- [16] Colaprete A , Schultz P , Heldmann J , *et al.* Detection of water in the LCROSS ejecta plume [J]. *Science* , 2010 , 330(6 003) : 463-468.
- [17] Saal A E , Hauri E H , Cascio M L , *et al.* Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon ' s interior [J]. *Nature* , 2008 , 454(7 201) : 192-195.
- [18] Boyce J W , Liu Y , Rossman G R , *et al.* Lunar apatite with terrestrial volatile abundances [J]. *Nature* , 2010 , 466(7 305) : 466-469.
- [19] Hui Hejiu , Peslier A H , Zhang Youxue , *et al.* Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon [J]. *Nature Geoscience* , 2013 , 6(3) : 177-180.
- [20] Liu Yang , Guan Yunbin , Zhang Youxue , *et al.* Direct measurement of hydroxyl in the lunar regolith and the origin of lunar surface water [J]. *Nature Geoscience* , 2012 , 5(11) : 779-782.
- [21] Hauri E H , Orman J A V . High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions [J]. *Science* , 2011 , 333(6 039) : 213-215.
- [22] Greenwood J P , Itoh S , Sakamoto N , *et al.* Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon [J]. *Nature Geoscience* , 2011 , 4(2) : 79-82.
- [23] Arnold J R . Ice in the lunar polar regions [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1979 , 84(B10) : 5 659-5 668.
- [24] Lucey P G . A lunar ater world [J]. *Science* , 2009 , 326(5 952) : 531-532.
- [25] Anand M . Lunar water: A brief review [J]. *Earth Moon & Planets* , 2010 , 107(1) : 65-73.
- [26] Barnes J J , Kring D A , Tartèse R , *et al.* An asteroidal origin for water in the Moon [J]. *Nature Communications* , 2016 , 7: 11 684.
- [27] Stewart B D , Pierazzo E , Goldstein D B , *et al.* Simulations of a comet impact on the Moon and associated ice deposition in polar cold traps [J]. *Icarus* , 2011 , 215(1) : 1-16.
- [28] Butler B J . The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon [J]. *Journal of Geophysical Research Planets* , 1997 , 102(E8) : 19 283-19 291.
- [29] Schorghofer N , Taylor G J . Subsurface migration of H₂O at lunar cold traps [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* , 2007 , 112(E2) . DOI: 10.1029/2006JE002779.
- [30] Rayman M D , Fraschetti T C , Raymond C A , *et al.* Dawn: A mission in development for exploration of main belt asteroids Vesta and Ceres [J]. *Acta Astronautica* , 2006 , 58(11) : 605-616.
- [31] De Sanctis M C , Combe J P , Ammannito E , *et al.* Detection of widespread hydrated materials on Vesta by the VIR imaging spectrometer on board the Dawn mission [J]. *Astrophysical Journal Letters* , 2012 , 758(2) : L36.
- [32] Farrell W M , Hurley D M , Zimmerman M I . Solar wind implantation into lunar regolith: Hydrogen retention in a surface with defects [J]. *Icarus* , 2015 , 255: 116-126.
- [33] Delitsky M L , Paige D A , Siegler M A , *et al.* Ices on Mercury: Chemistry of volatiles in permanently cold areas of Mercury ' s north polar region [J]. *Icarus* , 2016 , 281: 19-31.
- [34] Bradley J P , Ishii H A , Gillis-Davis J J , *et al.* Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 2014 , 111(5) : 1 732.
- [35] Djouadi Z , Robert F , Sergeant D ' Hendecourt L L , *et al.* Hydroxyl radical production and storage in analogues of amorphous interstellar silicates: A possible "wet" accretion phase for inner telluric planets [J]. *Astronomy & Astrophysics* , 2011 , 531: 725-734.
- [36] Vattuone L , Rocca M . Accretion disc origin of the Earth ' s water [J]. *Philosophical Transactions: Series A , Mathematical , Physical , and Engineering Sciences* , 2013 , 371(1 994) : 1-11.
- [37] Brown R H , Baines K H , Bellucci G , *et al.* The Cassini visual and infrared mapping spectrometer (VIMS) investigation [J]. *Space Science Reviews* , 2004 , 115(1/4) : 111-168.
- [38] Green R O , Pieters C , Mourouls P , *et al.* The Moon Mineralogy Mapper (M³) imaging spectrometer for lunar science: Instrument description , calibration , on-orbit measurements , science data calibration and on-orbit validation [J]. *Journal of Geophysical Research Planets* , 2011 , 116(E10) : 1 241-1 249.
- [39] Hampton D L , Baer J W , Huisjen M A , *et al.* An overview of the instrument suite for the deep impact mission [J]. *Space Science Reviews* , 2005 , 117(1/2) : 43-93.
- [40] Chen Lin , Tang Hong , Li Xiongyao , *et al.* The quantitative IR spectroscopic determination of OH in Apatite based on 1.4 μm [J]. *Advances in Earth Science* , 2016 , 31(4) : 403-408. [陈林 , 唐红 , 李雄耀 等. 基于 1.4 μm 红外光谱测量磷灰石结构水的定量方法探讨 [J]. 地球科学进展 , 2016 , 31(4) : 403-408.]
- [41] Clarence K . Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Minerals [M]. New York: Academic Press , 1975.
- [42] Mccord T B , Taylor L A , Combe J P , *et al.* Sources and physical processes responsible for OH/H₂O in the lunar soil as revealed by the Moon Mineralogy Mapper (M³) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* , 2011 , 116(4) . DOI: 10.1029/2010JE003711.
- [43] Wöhler C , Grumpe A , Berezhnoy A A , *et al.* Temperature regime and water/hydroxyl behavior in the crater Boguslawsky on the Moon [J]. *Icarus* , 2017 , 285: 118-136.
- [44] Bandfield J L , Poston M J , Klima R L , *et al.* Widespread distribution of OH/H₂O on the lunar surface inferred from spectral da-

- ta[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(3): 173-177.
- [45] Wöhler C, Grumpe A, Berezhnoy A A, et al. Time-of-day-dependent global distribution of lunar surficial water/hydroxyl[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701286.
- [46] Li Shuai, Milliken R E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins[J]. *Science Advance*, 2017, 3(9): e1701471.
- [47] Housley R M, Grant R W, Paton N E. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates [C]// Proceedings of the Lunar Science Conference 4th. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1973: 2 737-2 749.
- [48] Housley R M, Cirlin E H, Paton N E, et al. Solar wind and micrometeorite alteration of the lunar regolith [C]// Lunar and Planetary Science Conference 5th. New York: Lunar and Planetary Institute, 1974: 2 623-2 642.
- [49] Izawa M R M, Cloutis E A, Applin D M, et al. Laboratory spectroscopic detection of hydration in pristine lunar regolith [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2014, 390(4): 157-164.
- [50] Brandt J C, Öpik E J. Introduction to the Solar Wind [M]. San Francisco: Astronomy and Astrophysics Series, 1970: 73-74.
- [51] Starukhina L V. Computer simulation of sputtering of lunar regolith by solar wind protons: Contribution to change of surface composition and to hydrogen flux at the lunar poles[J]. *Solar System Research*, 2003, 37(1): 36-50.
- [52] Barabash S, Bhardwaj A, Wieser M, et al. Investigation of the solar wind-Moon interaction onboard Chandrayaan-1 mission with the SARA experiment [J]. *Current Science*, 2009, 96(4): 526-532.
- [53] McKay D S, Heiken G, Basu A, et al. The lunar regolith [M]// Heiken G, ed. Lunar Source Book. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 285-356.
- [54] Keller L P, McKay D S. The nature and origin of rims on lunar soil grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(11): 2 331-2 341.
- [55] Johnson R E. Energetic Charged-Particle Interactions with Atmospheres and Surfaces [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1990.
- [56] Zeller E J, Ronca L B, Levy P W. Proton-induced hydroxyl formation on the lunar surface [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1966, 71(20): 4 855-4 860.
- [57] Zent A P, Ichimura A I, Mccord T B, et al. Production of OH/H₂O in lunar samples via proton bombardment [C]// Lunar and Planetary Science Conference 41st. Texas: Lunar and Planetary Institute, 2010: 2 665.
- [58] Managadze G G, Cherepin V T, Shkuratov Y G, et al. Simulating OH/H₂O formation by solar wind at the lunar surface [J]. *Icarus*, 2011, 215(1): 449-451.
- [59] Ichimura A S, Zent A P, Quinn R C, et al. Hydroxyl (OH) production on airless planetary bodies: Evidence from H⁺/D⁺ ion-beam experiments [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2012, 345/348: 90-94.
- [60] Burke D J, Dukes C A, Kim J H, et al. Solar wind contribution to surficial lunar water: Laboratory investigations [J]. *Icarus*, 2011, 211(2): 1 082-1 088.
- [61] Schaible M J, Baragiola R A. Hydrogen implantation in silicates: The role of solar wind in Si-OH bond formation on the surfaces of airless bodies in space [J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2015, 119(9): 2 017-2 028.
- [62] Crider D H, Vondrak R R. The solar wind as a possible source of lunar polar hydrogen deposits [J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2000, 105(E11): 26 773-26 782.
- [63] Crider D H, Vondrak R R. Hydrogen migration to the lunar poles by solar wind bombardment of the moon [J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(8): 1 869-1 874.

Research Review and Significance of Lunar Water Originated from Solar Wind*

Zeng Xiandi^{1 2 3}, Tang Hong^{1 3*}, Li Xiongyao^{1 3}, Ouyang Ziyuan¹, Wang Shijie⁴

(1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Space Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Water plays an important role in the evolution history of terrestrial planets and is also an indispensable resource for space exploration. The moon was used to be thought as “bone-dry”. However, this view was challenged by the latest achievements. Both the infrared remote sensing data and Apollo sample results have shown that some hydroxyl (and even H₂O) can be produced by the reaction between the solar wind proton and regolith mineral on the Moon. A series of theoretical analysis and simulated ion implantation experiments have been carried out to discuss such processes. Many issues related to the solar wind-produced water have not been well understood yet, e.g., the formation mechanism, influencing factors, occurrence state, migration, and retention. To answer these questions, it is necessary to investigate the formation mechanism and migration of solar wind-produced water based on the Chang'e-5 returned samples in the future. These studies can not only provide clues for the exploitation and utilization of water on the Moon, but also help us to understand the origin and evolution of water on other airless terrestrial planets.

Key words: Lunar water; Solar wind; Infrared spectra; Lunar regolith; Ions implantation.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China “Experimental comparison of the solar wind-produced water in lunar main silicates minerals” (No.41773066); Youth Innovation Promotion Association CAS.

First author: Zeng Xiandi (1992-), male, Guangzhou City, Guangdong Province, Master student. Research areas include lunar planetary science. **E-mail:** zengxiandi@mail.gyig.ac.cn

* **Corresponding author:** Tang Hong (1984-), female, Neijiang City, Sichuan Province, Associate professor. Research areas include lunar planetary science. **E-mail:** tanghong@vip.gyig.ac.cn