

月球表面月壤中 ^3He 含量分布的定量估算

法文哲, 金亚秋*

复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433

* 联系人, E-mail: yqjin@fudan.ac.cn

收稿日期: 2007-02-05; 接受日期: 2007-12-21

国家重点基础研究发展计划项目(批准号: 2001CB309400)、国家自然科学基金项目(批准号: 40637033, 605710520)和复旦大学研究生创新基金资助

摘要 太阳风注入月球表面月壤层的 ^3He 是一种可供人类使用的潜在月球资源. 月壤中 ^3He 含量主要与太阳风通量、月壤成熟度以及月壤中 TiO_2 含量等主要因素有关. 根据受地球磁尾影响的太阳风通量模型, 给出了月球表面太阳风通量随经纬度的分布. 根据 Clementine (克莱门汀) 的紫外-可见光光学数据, 计算了整个月球表面月壤光学成熟度 (OMAT, Optical Maturity) 以及月壤中 TiO_2 含量的分布. 在此基础上, 根据 Apollo (阿波罗) 月壤样品的测量结果, 给出月壤表层 ^3He 含量与月表归一化太阳风通量、月壤光学成熟度以及 TiO_2 含量之间的关系, 并由此计算了整个月球表面月壤表层 ^3He 含量的分布. 根据 Apollo 测量数据, 以月球表面数字高程经验性构造的月壤厚度为例, 给出了月球表面整个月壤层单位面积内 ^3He 含量分布, 并估算了整个月球表面月壤层所蕴含的 ^3He 的总量.

关键词

^3He 含量
太阳风通量
光学成熟度
 TiO_2 含量
月壤厚度

^3He (氦 3) 是一种可供人类长期使用的、清洁、安全的可控核聚变燃料. 与传统的反应堆燃料 ^3H (氚) 相比, ^3He 在聚变过程中不产生高能中子, 产生的辐射小, 对环境特别是反应堆造成的损害也比较小. 地球上 ^3He 资源极其稀少, 总量约为 $2.0 \times 10^4 \text{ kg}$ 左右^[1]. 已有探测与研究分析表明, 除了极少数陡峭的环形山或火山通道峭壁外, 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厚度不等的风化层, 即月壤^[2]. 月海地区平均月壤厚度约为 4~5 m, 月陆地区平均月壤厚度约为 10~15 m^[2]. 由于月球没有大气以及磁场, 在漫长的月球地质历史过程中受太阳风的直接照射, 使得月壤表层积累了丰富的 ^3He ^[1,3].

Wittenberg 等^[3] 和 Ehrcke^[4] 最早提出月壤中 ^3He 可作为核聚变燃料, Kulcinski 等^[5] 进一步论证了从月壤中开采 ^3He 的可行性. Swindle 等^[6,7] 分析了月壤样

品中 ^3He 含量与月壤颗粒大小、 TiO_2 含量以及 Is/FeO 比值 (单质铁/氧化亚铁含量)^[8] 之间的关系, 初步估算出整个月球表面月壤中 ^3He 的总量为 $8.6 \pm 6.9 \times 10^8 \text{ kg}$. Taylor^[9,10] 根据 Apollo 月壤样品, 发现月壤中 ^3He 含量与月壤的 Is/FeO 比值以及 TiO_2 含量有关, 而 ^3He 含量与 Is/FeO 比值和 TiO_2 含量的乘积相关性最好. Taylor^[10] 进一步简单假设整个月球表面只有厚度为 3 m 的月壤层中含有均匀分布的 ^3He , 由此估计出整个月球表面 ^3He 总量为 $7.15 \times 10^8 \text{ kg}$. Johnson 等^[11] 提出了受地球磁尾影响的月球表面太阳风通量分布模型, 由 9 个月壤样品实验测量结果定标, 给出了月壤中 ^3He 含量与太阳风通量、 TiO_2 含量以及月壤光学成熟度 (OMAT) 之间的定量关系, 根据 Clementine (克莱门汀) 光学反射率数据计算出整个月球表面月壤表层 ^3He 含量分布. 根据 Taylor 给出的 ^3He 含量与月壤 Is/FeO 比值以及 TiO_2 含量之间的定量关系, Shkuratov 等^[12] 由

地基观测的月球正面反照率给出了月球正面 ^3He 含量分布, 并由雷达与光学数据推算月球正面月壤厚度分布, 给出了月球正面单位面积内 ^3He 含量的分布. 但是, 这些研究要么未纳入太阳风通量对月表 ^3He 含量的影响, 要么只给出月壤表层 ^3He 含量分布. 此外, 由于对包括月球背面在内的整个月球表面月壤厚度的分布未曾有任何定量研究与估算, 使得对整个月球表面月壤层中 ^3He 的分布及其总量未曾有精确的估算.

我国绕月探测工程的嫦娥 1 号卫星上将首次搭载多通道微波辐射计, 对包括月球背面在内的整个月球表面的辐射亮度温度进行观测^[13]. 我们提出了可见光与被动微波遥感相融合的探测技术^[14], 进一步发展了三层月壤岩模型的反演方法^[15,16], 以通过多通道微波辐射亮度温度来反演整个月球表面月壤厚度的分布. 这些工作使得定量获取整个月球表面月壤中 ^3He 含量分布以及估算整个月球表面 ^3He 总量成为可能.

本文讨论月壤中 ^3He 含量随太阳风通量的变化情况, 根据受地球磁尾影响的月球表面太阳风通量模型, 给出月球表面归一化太阳风通量分布. 讨论了月壤成熟度以及月壤中 TiO_2 含量等因素对月壤中 ^3He 含量的影响, 由 Clementine 光学反射率数据, 计算了整个月球表面月壤光学成熟度以及 TiO_2 含量的分布. 根据 Apollo 月壤样品的实验测量结果, 给出月壤中 ^3He 含量与归一化太阳风通量、 TiO_2 含量以及光学成熟度的定量关系. 在上述工作的基础之上, 计算整个月球表面月壤表层 ^3He 含量分布. 最后以文献^[17]构造的月球表面月壤厚度分布为实例, 定量估算整个月球表面月壤层单位面积内 ^3He 的含量以及整个月球表面月壤中 ^3He 的总量.

1 影响月壤中 ^3He 含量的主要因素

月壤中 ^3He 的含量与两个因素有关: 一是太阳风粒子注入月壤中 ^3He 的总量; 二是月壤的脱气作用 (Outgassing) 对月壤 ^3He 保持能力的影响. 如果太阳风对 ^3He 含量的影响占主要地位, 则 ^3He 含量应该与月球表面经纬度有关. 而如果月壤的脱气作用占主要地位, 则 ^3He 含量与月壤的表面温度以及月壤对 ^3He 的吸附能力有关, 而这些因素与月壤的结构和化学成

分有关. 下面分别讨论这些因素对 ^3He 含量的影响.

1.1 月球表面太阳风强度分布

太阳风指的是从太阳大气最外层的日冕层, 向空间持续不断地抛射出来的物质粒子流. 太阳风的主要成分是氢(H)粒子和氦(He)粒子, 其中氢粒子约占 90%, 氦粒子约占 7%^[10]. 由于月球上几乎没有大气层衰减和磁场对太阳风的偏转, 太阳风粒子能够直接辐射到月球表面, 并且注入到月球表面厚约 1 μm 的月壤层中. 太阳风通量越大, 注入月壤层的 ^3He 就越多.

月球表面接收到的太阳风通量随月表的经纬度变化. 首先, 太阳风粒子的照射方向近似为恒定方向且与月球的自转平面平行, 受太阳风照射方向的影响, 高纬度地区单位面积内接收到的太阳风小于赤道附近接收到的太阳风. 其次, 月球每月之中有 6~8 天的时间 (接近满月) 处于地球磁尾的影响之中. Neugebauer 等^[18]指出 Apollo 12 着陆点在一个月之内大约有 30% 的时间受地球磁尾或磁鞘的影响. 在这段时间内, 有接近一半的时间受地球磁尾的影响, 使得月表接收到太阳风粒子流实质上为零, 其余时间内受地球磁鞘的影响, 月表接收到的太阳风通量减少到未受地球磁尾影响的其它地点太阳风通量的 0~90%. 本文不考虑由于地球磁场发生变化或地月距离变化对月球表面太阳风通量遮蔽所造成的变化, 也不考虑小尺度上由于小天体撞击月球表面在月球外壳产生的磁场对太阳风通量的影响. 为计算简单, 不考虑月球自转平面与太阳黄道面之间的夹角 (恒定为 $1^\circ 32'$) 以及月球的天平动, 这些因素对本文的模型及结果影响不大.

假设月球表面任意一点的经度为 θ , 纬度为 ϕ . 在某一给定时刻, 以 δ ($\delta < 90^\circ$) 表示月球表面任意一点到日下点的角距离, 则月球表面任意点在此时刻接收到的太阳风通量为 $F(\phi, \theta) = F_0 \cos(\delta)$, 其中 F_0 为日下点的太阳风通量, 可近似为常数. 由球面几何的余弦定理, 有 $\cos(\delta) = \cos(\phi)\cos(\beta)$, $\beta = \theta + \tau$ 为相对于日下点的经度, 在每个月球自转周期内, τ 与前一次满月到观测时刻的时间成正比, 在 0 到 2π 之间变化. 假设月球受地球磁尾影响的半角度为 π , 则在一个月球

自转周期内月球表面接收到的平均太阳风通量 为 [11]

$$F(\phi, \theta) = \int_0^{2\pi} F_0 \cos(\phi) \xi(f) \cos(\theta + \tau) d\tau, \quad (1)$$

其中

$$\xi(f) = \begin{cases} 1 & f\pi < \tau < (2-f)\pi, \\ 0 & \tau \leq f\pi \text{ 或 } \tau \geq (2-f)\pi, \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表示当 $f\pi < \tau < (2-f)\pi$ 时, 月表不受地球磁尾或磁鞘的影响, 而当 $\tau \leq f\pi$ 或 $\tau \geq (2-f)\pi$ 时月表受地球磁尾或磁鞘的影响. 月球表面经度为 θ 的点满足条件 $-\pi/2 < \theta + \tau < \pi/2$ 时受到太阳风的照射. 综合考虑到上述因素, 则一个月球自转周期内月球表面任意一点接收到的平均太阳风通量为

$$F(\phi, \theta) = F_0 \cos(\phi) \times \begin{cases} 2 + \sin(\theta - f\pi) - \sin(\theta + f\pi) & |\theta| \leq \pi(0.5 - f), \\ 1 + \sin(|\theta| - f\pi) & \pi(0.5 - f) \leq |\theta| \leq \pi(0.5 + f), \\ 2 & \pi(0.5 + f) \leq |\theta| \leq \pi. \end{cases} \quad (3)$$

注意文献 [11] 中给出的月球表面太阳风通量模型推导有误(Swindle T D, 私人通信), 正确的应为(3)式所示.

按照文献 [11], 月表在一个月球自转周期内有 1/4 的时间受地球磁尾的影响, 即 $f=0.25$. 取 $F_0=0.5$, 图 1 给出了月球表面归一化太阳风通量分布. 可以看出, 受太阳风照射角度的影响, 赤道附近太阳风通量高, 随着纬度的增加而减小, 两极附近最低. 受地球磁尾的影响, 月球正面正中心太阳风通量很小, 随着经度变大而逐渐增大, 至月球背面正中心处达到最大值 1. 由图 1 可知, 月球正面正中心处接收到的太阳风通量约为背面正中心太阳风通量的 29.3%. 如果月球在一个月球自转周期内有 30% 的时间受地球磁尾的影响(如 Apollo 12), 则正面正中心接收到的太阳风通量降低为背面正中心的 19.1%.

如果在大尺度上月球局部地区受小天体的撞击是随机的, 月壤颗粒吸收的 ^3He 未达到饱和, 且月壤的化学成分不影响月壤中 ^3He 含量, 则太阳风注入月壤中的 ^3He 含量应该与图 1 成比例. 换句话说, 如果月球表面 ^3He 含量仅与太阳风通量有关, 则图 1 表示了月壤中 ^3He 含量的相对分布.

1.2 月壤成熟度的影响

月球表层月壤物质暴露于空间环境中, 在月球地质历史过程中受各种尺度(直径从纳米到千米)小天体的撞击, 受太阳风、银河系宇宙射线的照射, 月壤的物理化学特性发生变化如月壤平均颗粒直径变小、撞击熔融玻璃物质如粘合集块岩的形成、矿物中 FeO 含量的减少以及纳米级单质铁的增加、月壤颗粒表面挥发物沉积以及太阳风粒子的注入等, 这一变化过程称为月壤的成熟过程 [2,19]. 而成熟度指的是月壤成熟过程中与暴露在月球表面时间有关的月壤物理化学特性变化到某种程度的定量指标. 根据月壤平均粒径大小以及月壤中粘合集块岩的含量, 可以将月壤分为不成熟、亚成熟和成熟三大类 [2]. 衡量月壤成熟度的参数一般有光学成熟度 OMAT、Is/FeO 比值、太阳风气体含量、平均粒径以及粘合集块岩含量等. 一般这些参数只能表征月壤物理化学特性的一个或几个方面.

月壤的光学特性与月壤中金属元素 Ti 和 Fe 的含量以及月壤的成熟度有关. 在月壤的成熟过程中, 随着暴露在宇宙空间中时间的变长, 月壤平均粒径减小, 小天体撞击产生的粘合集块岩增多, 使得月壤的光学特性发生显著的变化, 如月壤变暗变红, 其光谱对比度变小. 美国探月卫星 Clementine 测得了整个月球表面紫外-可见光(UV-VIS)的 5 波段反射率数据. Lucey 等 [19] 分析了月面物质的光谱特性以及对应 Apollo 着陆点的月壤样品, 提出了由 Clementine 的 UV-VIS 5 波段光学数据计算光学成熟度(OMAT, Optical Maturity)以及 TiO_2 含量 [20] 的方法.

月壤光学成熟度 OMAT 的计算公式 [19] 为

$$\text{OMAT} = \left[(R_{750} - x_0)^2 + \left(\frac{R_{950}}{R_{750}} - y_0 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

其中 $x_0=0.08$, $y_0=1.19$. R_{750} , R_{950} 分别为波长为 750 nm, 950 nm 时月球表面的反射率.

根据 Clementine UV-VIS 5 波段光学反射率数据和 Lucey 等 [19] 的方法, 计算出月球表面月壤光学成熟度如图 2 所示. 需要说明的是, 月壤光学成熟度 OMAT 越小, 月壤越成熟. 图 2 中 OMAT 比较大的部分为环形山及其辐射纹等新生的不成熟月壤, 如月球正面的 Tycho 环形山(43.3°S, 10.3°W). 可以看出,

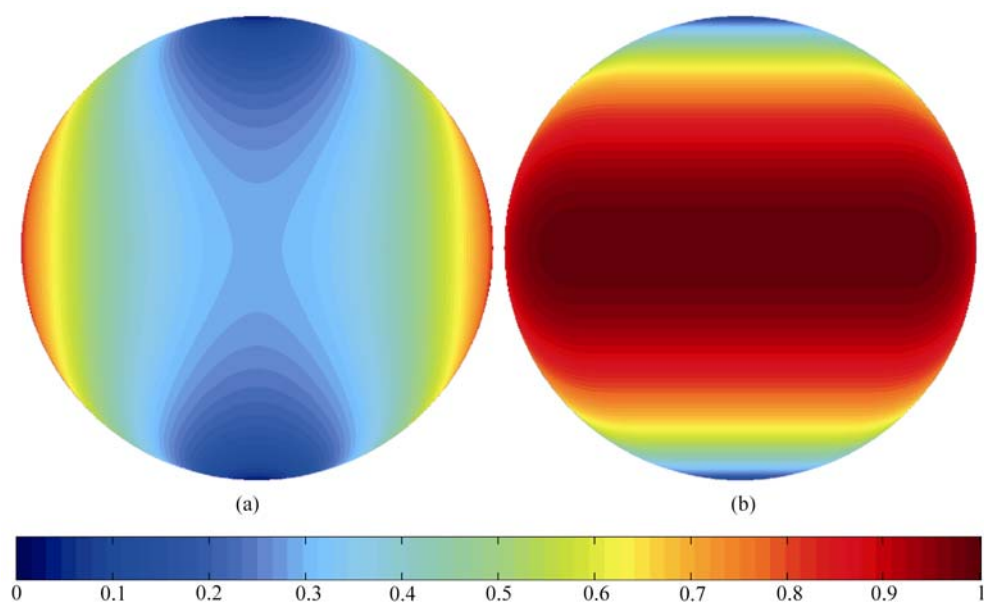


图1 月球表面归一化太阳风通量分布
(a) 正面; (b) 背面

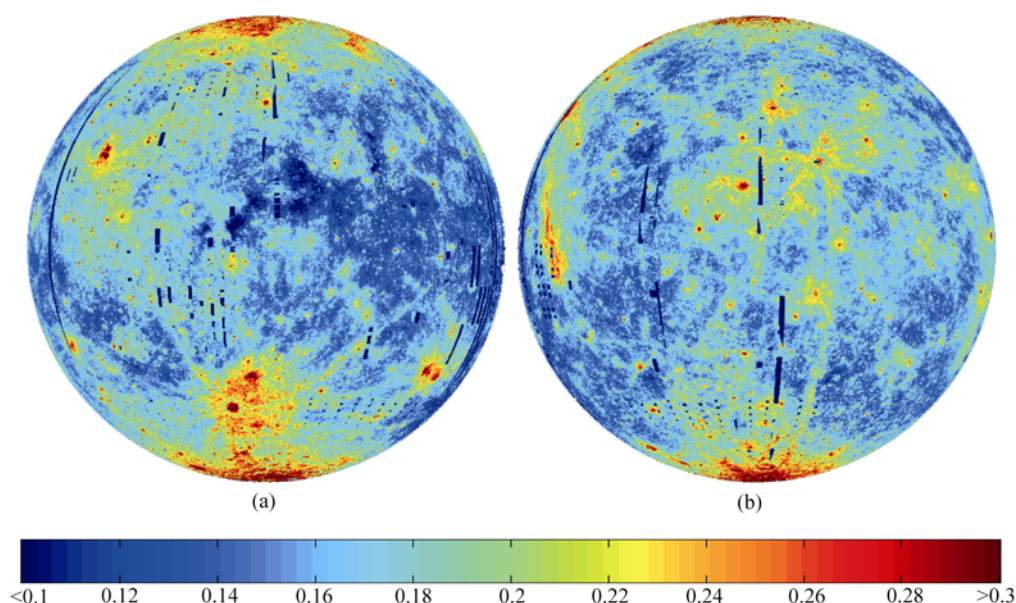


图2 月球表面光学成熟度(OMAT)分布
(a) 正面; (b) 背面

图2中月海与月陆的交界变得不明显,而在 FeO 含量与 TiO_2 含量分布图中^[20]月海与月陆的交界很明显,这说明光学成熟度受月壤成分的影响较小。

月壤中的 ^3He 含量与月壤的成熟度有关。随着月壤变得成熟,月壤受太阳风照射的时间越长,月壤的平均粒径减小。受太阳风照射的时间越长,太阳风注

入月壤中的 ^3He 也就越多;月壤平均粒径越小,月壤颗粒的比表面积增加,对 ^3He 的吸附能力也增加^[10,12]。

图3给出Apollo月壤样品的 ^3He 含量^[6]与光学成熟度OMAT^[19]之间的关系。可以看出,如果不考虑图3左上方 ^3He 含量大于 $7.5 \times 10^{-9} \text{ g/g}$ 的3个月壤样品,则 ^3He 含量与OMAT之间的相关性比较好。OMAT越

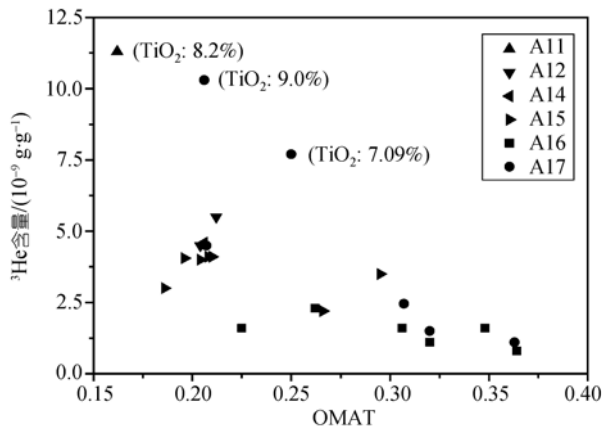


图3 Apollo月壤样品 ^3He 含量与光学成熟度(OMAT)之间的关系

小, ^3He 含量越高. 如果仅考虑光学成熟度对月壤中 ^3He 含量的影响, 则图 2 中月球表面环形山及其辐射纹等新生月壤中 ^3He 含量较低.

1.3 钛铁矿的影响

^3He 的保持能力与月壤的矿物组成明显相关, 特别是与月壤中 TiO_2 的含量密切相关. 对同一月壤样品中同一粒级的不同矿物如钛铁矿、辉石、斜长石、橄榄石等的研究分析发现, 钛铁矿中的 ^3He 含量为其他矿物组分的 10~100 倍 [6,10]. 由于月壤中的 TiO_2 绝大部分以钛铁矿的形式赋存, TiO_2 含量可作为衡量钛铁矿的一个指标, 因而也是衡量月壤对 ^3He 的保持能力的一个指标.

图 4 为 Apollo 月壤样品中 ^3He 含量 [6] 与 TiO_2 含量 [6] 之间的关系. 可以看出, 月壤中 ^3He 含量随着 TiO_2 含量的增加而增大. 实际上, 由于月海 TiO_2 含量很高, 使得图 3 中 ^3He 含量与光学成熟度 OMAT 之间的相关性变得不明显. 图 3 中 ^3He 含量大于 $7.5 \times 10^{-9} \text{ g/g}$ 的 3 个月壤样品 (1 个 A11, 2 个 A17) 的 TiO_2 含量都大于 7% (图 3 中括号内标注), 而其他 22 个月壤样品 TiO_2 含量的平均值为 1.43%, 最大值也仅为 3.38%. 可见与月壤成熟度相比较, TiO_2 对 ^3He 含量的影响更为明显. 因此, 在富含钛铁矿的月海地区, 即使月壤不成熟, ^3He 含量也可能很高.

按照 Lucey 等 [20] 的方法, TiO_2 含量的计算公式为

$$\theta_{\text{Ti}} = \arctan \left(\frac{R_{415}/R_{750} - y_{0\text{Ti}}}{R_{750} - x_{0\text{Ti}}} \right), \quad (5)$$

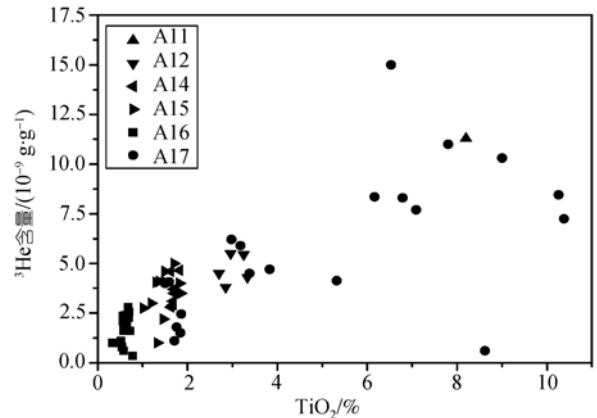


图4 Apollo月壤样品中 ^3He 含量与 TiO_2 含量之间的关系

$$S_{\text{Ti}}(\%) = 3.708 \times [\theta_{\text{Ti}}]^{5.979}, \quad (6)$$

其中 $x_{0\text{Ti}} = 0.0$, $y_{0\text{Ti}} = 0.42$. R_{415} 和 R_{750} 分别为波长为 415 nm 和 750 nm 时月球表面的反射率.

图 5 给出了由 Clementine UV-VIS 5 波段光学反射率数据和式(5), (6)所计算出的月球表面 TiO_2 含量的分布. 可以看出, 月球正面的月海地区 TiO_2 含量很高, 月陆 TiO_2 含量较低. 如果仅考虑月壤对 ^3He 的保持能力, 则 ^3He 主要蕴涵于月球正面的富含钛铁矿的月海之中.

上述分析表明, 月壤中 ^3He 主要来源于太阳风照射, 月壤表层 ^3He 含量与太阳风通量有关. 受月壤脱气作用的影响, 月壤中 ^3He 含量与月壤光学成熟度 OMAT 以及月壤中 TiO_2 含量有关, 而与 TiO_2 含量的关系最为明显.

2 月球表面 ^3He 含量分布

文献 [6] 给出了 Apollo 月壤样品中 ^3He 含量和 TiO_2 含量的测量结果, 文献 [19] 给出了由实验测量的月壤光谱特性计算出的月壤光学成熟度 OMAT, 再由 Apollo 着陆点的经纬度 [14,15] 按照(3)式计算出这些月壤样品的归一化太阳风通量. 一共有 25 个月壤样品同时具备这 4 个参数. 综合考虑月壤表层 ^3He 含量与太阳风通量, 光学成熟度以及 TiO_2 含量之间的关系, 对这些月壤样品的测量数据进行拟合, 得到月球表面 ^3He 含量 C_0 与归一化太阳风通量 F , TiO_2 含量 S_{Ti} 以及光学成熟度 OMAT 之间的关系为

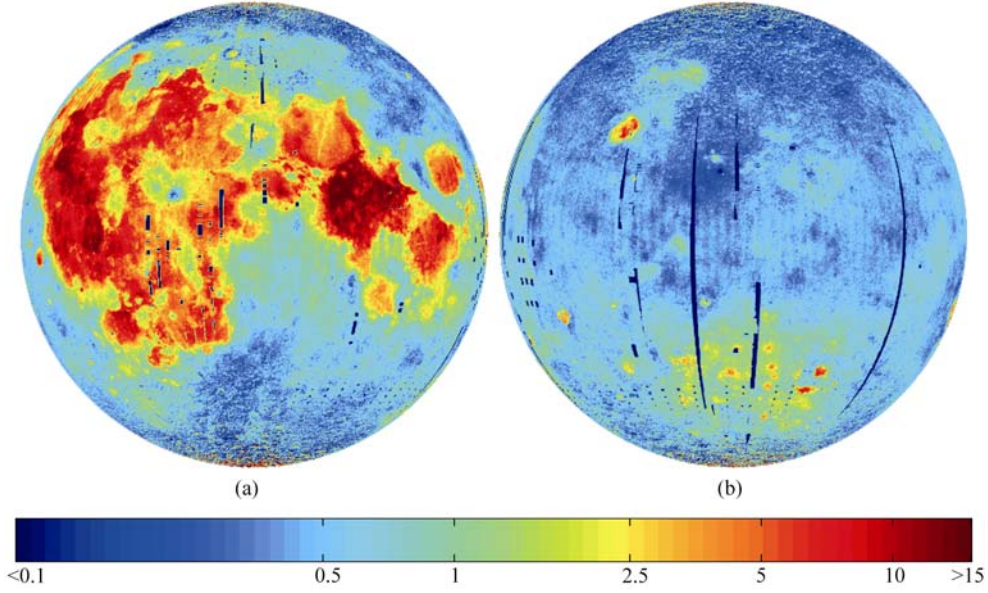


图5 月球表面 TiO_2 含量分布
(a) 正面; (b) 背面. 单位 wt.%, 为质量分数

$$C_0 = 0.56 \times (S_{\text{Ti}} \times F/\text{OMAT}) + 1.62. \quad (7)$$

图6给出了月壤样品的实验测量数据和拟合结果的比较, 拟合的相关系数为 0.938. 与Taylor^[10]的方法比较, 式(7)纳入了太阳风通量对月表 ^3He 分布的影响. Johnson等^[11]取太阳风通量最大值为 1000(即 $F_0=500$), 根据 9 个月壤样品的测量值得到 ^3He 含量为 $C_0 = 5.5886 \times 10^{-4} \times (S_{\text{Ti}} \times F/\text{OMAT}) + 2.21313$. 式(7)是由 25 个月壤样品的测量值拟合的结果, 比Johnson等^[11]9 个月壤样品的结果更具有说服力.

根据图1所示月球表面归一化太阳风通量分布,

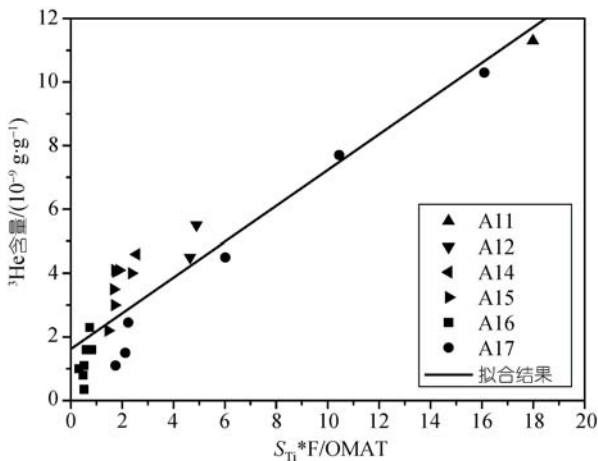


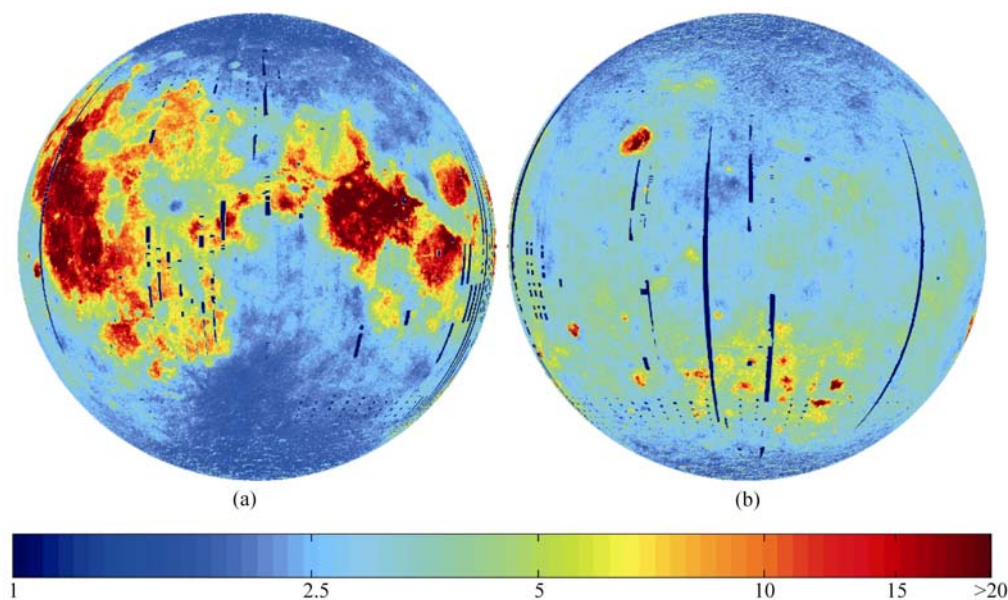
图6 Apollo 月壤样品测量值与拟合结果

图2所示的月球表面光学成熟度 OMAT 和图5所示的月球表面月壤中 TiO_2 含量分布, 由公式(7)计算出月球表面月壤表层 ^3He 含量分布如图7所示. 可以看出, 虽然受地球磁尾的影响月球正面的月海地区接收到的太阳风通量比较小, 由于 TiO_2 对 ^3He 的吸附能力很强, 月球正面的月海地区 ^3He 含量仍然很高. 此外, 月球背面月海地区 ^3He 的含量也很高.

3 月壤中 ^3He 总量

要估计月球表面某一特定地点所蕴含的 ^3He 总量, 必须知道这一点的月壤厚度以及月壤中 ^3He 含量随月壤深度的分布.

月海约占整个月球表面面积的 15%, 月陆占 85%. 取月海地区平均月壤厚度为 8 m, ^3He 含量为 5.3×10^{-9} g/g, 月陆地区平均月壤厚度为 15 m, ^3He 含量为 3.2×10^{-9} g/g. Swindle等^[6]根据这些条件计算出当 ^3He 含量随深度 z 按 $e^{-0.347z}$ 衰减时, 整个月球表面月壤中 ^3He 总量为 4.50×10^8 kg, 而 ^3He 均匀分布时总量为 3.22×10^9 kg. Fegley等^[7]进一步简单假设月表只有 3 m 厚的月壤中含有 ^3He , 并且 ^3He 随深度均匀分布, 含量为 $(4.2 \pm 3.4) \times 10^{-9}$ g/g, 根据这些条件估算出整个月球表面 ^3He 总量为 $(8.4 \pm 6.9) \times 10^8$ kg. Taylor^[10]假设月海面 ^3He 含量为 6×10^{-9} g/g, 月陆表面 ^3He

图 7 月球表面月壤表层 ^3He 含量分布($\times 10^{-9}$ g/g)

(a) 正面; (b) 背面

含量为 3×10^{-9} g/g, 假设整个月球表面只有 3 m 厚的月壤中含有 ^3He 且均匀分布, 估算出整个月球表面的 ^3He 总量为 7.15×10^8 kg. 由于缺少整个月球表面月壤厚度以及 ^3He 含量随经纬度分布的信息, 这些计算都只是粗略的估计.

在以往 Apollo 和 Luna (月球) 计划中对月球表面曾进行了直接的探测试验来确定月表的月壤厚度 [15,17,21], 基于环形山的形态学分析及其直径的频数分布的研究也曾间接地确定过月表一些点的月壤厚度值及其极限值 [15,17,21], Shkuratov 等 [21] 由光学和雷达数据推算月球正面月壤厚度分布. 但是, 对于包括月球背面在内的整个月球表面月壤厚度的分布还未曾有定量的估算与研究.

我国绕月探测工程的嫦娥 1 号卫星将首次搭载四通道微波辐射计, 将对整个月球表面辐射亮度温度分布进行测量 [13]. 我们在文献 [14] 中提出可见光与被动微波遥感相融合的探测技术, 并且进一步发展了三层月壤月岩模型对月表辐射亮度温度的模拟以及月壤厚度反演的方法 [15,16], 以通过多通道微波辐射亮度温度来反演包括月球背面在内的整个月球表面月壤厚度的分布.

一般情况下, 月壤厚度与月球表面物质的暴露年龄有关, 年龄越古老, 暴露于空间环境的时间越久,

遭受小天体撞击的几率越大, 月壤厚度越大 [2,21]. 但是, 目前月球表面年龄的数据仍然偏少. 本文由 Apollo 着陆点月壤厚度的测量值的拟合, 用月面数字高程 (DEM) 先构造一种月壤厚度的试验性分布 [15,17], 作月面辐射亮度温度的模拟. 这一月壤厚度构造在月球正面分布与 Shkuratov 等 [21] 结果十分相似.

图 8 给出由月球表面数字高程 (DEM) 与 Apollo 着陆点月壤厚度的测量值经验构造的整个月球表面月壤厚度 d 的分布 [17], 其中 A11, A12, A14, A15, A16, A17 为 Apollo 着陆点. 对于月球正面月壤厚度, 图 8 与 Shkuratov 等 [21] 月球正面月壤厚度之差的平均值仅为 1.4 m. 在现有缺少整个月球表面辐射亮度温度分布的条件下, 本文以图 8 给出的月壤厚度分布为计算实例. 将来只要获得了整个月球表面多通道辐射亮度温度分布, 按照文献 [15,16] 的反演方法获得整个月球表面的月壤厚度分布, 再按照本文方法即可获得月球表面月壤中的 ^3He 总量.

太阳风注入的 ^3He 主要集中于月球表层 $1 \mu\text{m}$ 以内, 由于受各种尺度小天体的撞击, 使深层月壤与表层月壤相混合, 因此月壤深层也含有 ^3He . 譬如在 Apollo 11 着陆点, 由于受小天体的撞击, 厚度为 0.1, 1 和 3~4 m 的月壤层月壤混合的次数分别为 2000, 100 和 10 次 [12]. 随着月壤深度的增加, 月壤混合的次数

减少, 月壤中所蕴含的 ^3He 含量也减少. 因此, 在整个月壤中 ^3He 不应是均匀分布. Apollo 探月计划中曾对月球表面深至 3 m 的月壤进行过直接探测, 但是测量中随机因素的影响过大而掩盖了 ^3He 含量随深度变化信息^[17]. 对月球表面月壤的演化过程定量模拟结果显示了月壤中的 ^3He 含量随月壤深度指数衰减^[22].

因此, 取月壤中 ^3He 含量随深度 z 的变化为

$$C(z) = C_0 e^{-\alpha z}. \quad (8)$$

取月壤的体积密度为 ρ , 则月表任意一点单位面积内 ^3He 含量为

$$M = \int_0^d \rho(z) \cdot C(z) dz. \quad (9)$$

按照文献^[22], 当月壤深度为 3 m 时 ^3He 含量约变为表层 ^3He 含量的 e^{-1} , 因此我们取 $\alpha = 1/3$. 改变参数 α 的值, 可以得到 ^3He 含量随月壤深度按照不同廓线分布, 譬如 $\alpha = 0$ 表示 ^3He 含量随深度均匀分布.

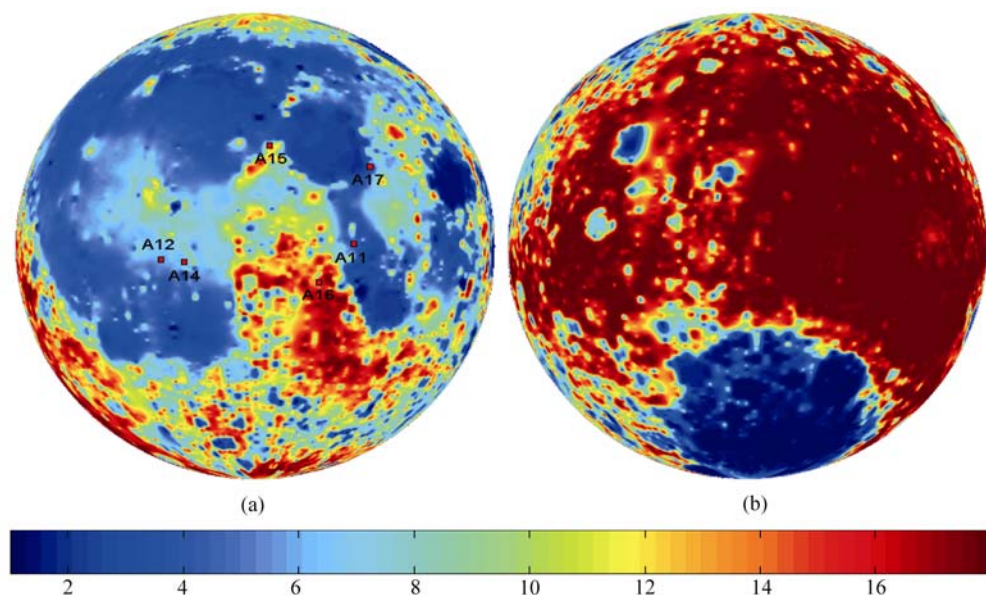


图 8 由 DEM 模拟构造的月球表面月壤厚度分布(单位: m)
(a) 正面; (b) 背面

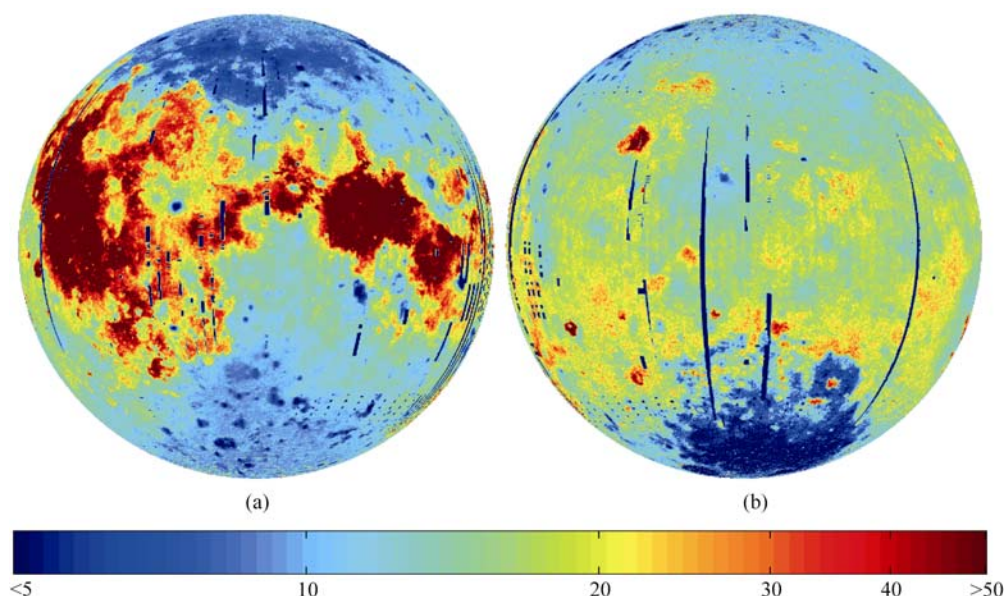


图 9 月壤层单位面积内 ^3He 含量分布(单位: ppb/m²)
(a) 正面; (b) 背面

虽然月壤层的体积密度可能随月壤深度而变化, 约在深度 1 m 处趋于恒定值 1.92g/cm^3 . 但是, 目前月壤密度随深度变化未能有可参照结论, 其可能的变化对本文结果影响也不大, 因此按照文献 [2], 取月壤的平均体积密度为 1.8g/cm^3 . 由图 7 给出的月壤表层 ^3He 含量分布以及图 8 给出的月壤厚度分布, 按照式(9)计算出的月球表面单位面积内 ^3He 含量分布如图 9 所示.

可以看出, 由于月海富含 TiO_2 对 ^3He 的吸附能力很强, 即使月海月壤厚度比较小, 月海地区单位面积所蕴含的 ^3He 也比较多. 而月球背面月陆地区由于月壤厚度较大, 单位面积内 ^3He 也比较高.

对月球正面和月球背面所有像素单元内的 ^3He 含量进行相加, 可以得到月球正面和月球背面 ^3He 的总量. 计算结果表明, 整个月球表面月壤中 ^3He 总量为 $6.50 \times 10^8\text{kg}$, 其中月球正面 ^3He 总量为 $3.72 \times 10^8\text{kg}$, 月球背面 ^3He 总量为 $2.78 \times 10^8\text{kg}$. 假如整个月壤层中 ^3He 随深度 z 均匀分布且等于月壤表层 ^3He 的含量, 即式(9)中取 $\alpha=0$, 则整个月球表面月壤中 ^3He 总量为 $1.27 \times 10^9\text{kg}$, 其中月球正面 ^3He 总量为 $5.59 \times 10^8\text{kg}$, 月球背面 ^3He 总量为 $7.15 \times 10^8\text{kg}$. 可以看出, 如果月壤中 ^3He 均匀分布的话, 由于月球背面主要为月陆, 月陆地区月壤厚度大于月海地区月壤厚度, 即使月球背面月壤表层 ^3He 含量小于月球正面月壤表层的 ^3He 含量, 但是背面的 ^3He 总量仍高于正面的 ^3He 总量.

可以看出, 本文方法的计算结果在 Swindle 等 [6,7] 的估算范围之内, Taylor [9,10] 的结果偏大是因为 Taylor 假设 ^3He 随深度均匀分布的缘故. 虽然本文根据 Apollo 数据 [17,21] 和 DEM 经验性构造的月壤厚度有待

于进一步的验证和修正, 但与 Swindle 等和 Taylor 的计算相比较, 本文给出的整个理论框架和计算方法更为全面与合理.

4 结论

本文分析了影响月壤中 ^3He 含量的主要因素如太阳风通量, 月壤成熟度以及 TiO_2 含量等. 给出了月球表面太阳风通量相对分布, 由 Clementine UV-VIS 光学数据计算了整个月球表面光学成熟度以及 TiO_2 含量分布. 根据 Apollo 月壤样品的测量值, 给出了月球表面 ^3He 含量与太阳风通量, 光学成熟度以及 TiO_2 含量之间的关系, 并由此关系计算了整个月球表层 ^3He 含量分布. 以月壤中 ^3He 含量指数衰减模型以及模拟构造的月壤厚度分布为例, 给出了整个月球表面单位面积内 ^3He 含量以及整个月球表面 ^3He 总量, 并与前人估算结果作了比较. 计算结果表明, 即使月球正面的月海地区受地球磁尾的影响接收到的太阳风通量很少, 月球正面月海表层 ^3He 含量仍然很高, 而且月球背面的月海地区 ^3He 含量也很高, 月壤中 ^3He 的保持能力主要取决于月壤中钛铁矿含量. 以由月球表面 DEM 构造的月壤厚度为例, 月球表面月壤中 ^3He 总量为 $6.50 \times 10^8\text{kg}$, 其中月球正面 ^3He 总量为 $3.72 \times 10^8\text{kg}$, 月球背面 ^3He 总量为 $2.78 \times 10^8\text{kg}$.

本文为中国被动微波遥感探测月球资源提供一个范例, 在获得了整个月球表面辐射亮度温度和准确反演月壤厚度之后, 即可按照本文方法定量估算出整个月球表面的 ^3He 总量. 而可见光与被动微波遥感相结合的探测月壤中 ^3He 含量的方法也可以用来估算月壤中其他太阳风气体资源如 H 和 N 等的含量.

致谢 美国 University of Arizona 的 Timothy D. Swindle 教授提供了有关资料, 作者在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Lewis J S. Extraterrestrial sources of ^3He for fusion power. *Space Power*, 1991, 10: 363—372
- 2 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. *Lunar Source Book: A User's Guide to the Moon*. London: Cambridge University Press, 1991
- 3 Wittenberg L, Santarius J, Kulchinski G. Lunar source of ^3He for fusion power. *Fusion Technol*, 1986, 10: 167—178
- 4 Ehrlicke K A. A socio-economic evaluation of the lunar environment and resources——III 1. Selenospheric economics and cislunar/terrestrial market analysis. *Acta Astronaut*, 1984, 11(2): 111—136[DOI]

- 5 Kulcinski G L, Schmitt H H. The Moon: an abundant source of clean and safe fusion fuel for the 21st century. In: *Lunar Helium-3 and Fusion Power*, NASA Conference Publication 10018. 1988. 35—63
- 6 Swindle T D, Glass C E, Poulton M M. Mining lunar soils for ^3He . In: *UA/NASA Space Engineering Research Center for Utilization of Local Planetary Resources TM-90/1*. Tucson: University of Arizona Press, 1990. 1—38
- 7 Fegley B J, Swindle T D. Lunar volatiles: implications for lunar resource utilization. In: Lewis J, Matthews M S, Guerrieri M L, eds. *Resources of Near-Earth Space*. Tucson: University of Arizona Press, 1993. 367—426
- 8 Morris R V. Surface exposure indices of lunar soils: a comparative FMR study. In: *Proceedings of 7th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon, 1976. 315—335
- 9 Taylor L A. Hydrogen, helium, and other solar-wind components in lunar soil: abundances and predictions. In: *Eng Constr Oper in Space II, Proc. of Space'90*. New York: Am Soc Civil Eng, 1990. 68—78
- 10 Taylor L A. Helium-3 on the Moon: model assumptions and abundance. In: *Eng Constr Oper in Space II, Proc. of Space'94*. New York: Am Soc Civil Eng, 1994. 678—686
- 11 Johnson J R, Swindle T D, Lucey P G. Estimated solar wind-implanted helium-3 distribution on the Moon. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 385—388
- 12 Shkuratov Y G, Starukhina L V, Kaidash V G, et al. ^3He distribution over lunar visible hemisphere. *Sol Syst Res*, 1999, 33(5): 409—420
- 13 金亚秋, 颜锋华, 梁子长. 微波辐射计对月面特征参数的遥感理论模拟. *电波科学学报*, 2003, 18 (5): 477—486
- 14 法文哲, 金亚秋. 光学观测与微波辐射模拟对月壤厚度的反演. *电波科学学报*, 2006, 21 (3): 347—356
- 15 Fa W, Jin Y Q. Simulation of brightness temperature from lunar surface and inversion of regolith layer thickness. *J Geophys Res*, 2007, 112, E05003, doi:10.1029/2006JE002751
- 16 法文哲, 金亚秋. 三层月壤模型的多通道微波辐射模拟与月壤厚度的反演. *空间科学学报*, 2007, 27(1): 55—65
- 17 法文哲, 金亚秋. 月球表面多通道辐射亮度温度的模拟与月壤厚度的反演. *自然科学进展*, 2006, 16(1): 86—94
- 18 Neugebauer M, Snyder C W, Clay D R, et al. Solar wind observations on the lunar surface with the Apollo-12 ALSEP. *Planet Space Sci*, 1972, 20: 1577—1591 [\[DOI\]](#)
- 19 Lucey P G, Blewett D T, Taylor G J, et al. Imaging of lunar surface maturity. *J Geophys Res*, 2000, 105(E8): 20337—20386
- 20 Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 2000, 105(E8): 20297—20305 [\[DOI\]](#)
- 21 Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data. *Icarus*, 2001, 149(2): 329—338 [\[DOI\]](#)
- 22 Arnold J R. Monte Carlo simulation of turnover processes in the lunar regolith. In: *Proceedings of 6th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon, 1975. 2375—2396