文章编号:1000-4734(2007)01-0064-05

月壤厚度的研究方法与进展

李雄耀[1,2],王世杰[1]*,陈丰[1],欧阳自远[1],程安云[1,2],李世杰[1,2]

(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,贵州 贵阳 550002;
2.中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:月壤厚度的研究对未来月球探测、登月与月球资源开发均具有十分重要的意义。它是恢复月球起源和演化历史的重要参数,也是估算月球^{3}He资源量的必要前提。本文将月壤厚度的研究方法归纳为直接和间接两类,直接方法主要是利用月震数据对月壤厚度进行推算,间接方法包括基于撞击坑形态、分布以及地基雷达遥感数据估算月壤厚度两种。随着定量微波遥感的发展,结合我国嫦娥探月工程的实施,利用高分辨率被动微波遥感亮温反演月壤厚度为月壤厚度的研究指出一个新的方向。

关键词:月壤;厚度;微波遥感;月球探测

中图分类号:P184.5; P579　　**文献标识码**:A

作者简介:李雄耀,男,1978年生,博士研究生,主要研究方向为月球与行星科学.

月壤广义上是指覆盖在月球基岩之上的所有月表风化物质,甚至包括直径为几米的岩石。狭义的月壤则是根据月球样品的分类来定义的。Apollo计划负责月球样品地面接收的部门在进行月球样品的分类时,把直径≥1 cm的团块作为岩石进行处理和研究,称为月岩;直径<1 cm的颗粒才是狭义上的月壤[1]。月壤厚度通常是指狭义上的月壤层厚度。研究月壤厚度对未来月球探测、登月与月球资源开发均具有十分重要的意义。首先,月壤是对月遥感探测的直接目标,它包含了大量地球化学信息,包括其化学和矿物组成、月壤的形成和演化等等。月壤的形成是十分漫长的过程,在月球形成后最初的15亿年(距今46~31亿年前)中,剧烈的火山岩浆活动、地质构造运动和小天体撞击事件,强烈改变着月球的内部结构和表面形貌;之后,月球内部能量近于衰竭,几乎成为一个僵死的天体。因此,月壤厚度的主要增长期是雨海纪(39.5~31.5亿年)。月壤厚度研究对恢复月球起源和演化历史、推测和反演地球历史(尤其是地球形成后最初的15亿年的历史)具有特别重要的意义。其次,由于在月壤的形成过程中,伴随太阳风的作用,^{3}He不断注入到月壤层中,从而积聚了大量的核资源,确定月壤的厚度及分布是对^{3}He储量进行估算的必要前提。根据笔者的理解,可将目前研究月壤厚度的方法归纳为直接和间接两种,前者包括在月球上进行的月震实验和多频电磁探测,后者主要是基于撞击实验,通过对撞击坑形态和直径分布频率的分析,推测出月壤的厚度,或者利月球卫星图像以及遥感数据进行推算。

1 月壤厚度的直接测量方法

月壤厚度的直接测量方法包括Apollo和Luna探测计划中实施的钻探实验,由于钻头不可能到达埋藏较深的月岩,这种直接钻探的方法仅能测量出较薄的月壤层厚度,具有很大的局限性。因而,在月壤厚度的直接测量中,大部分结果来源于月震实验和多频电磁探测。Nakamura等[2]研究表明,月震波信号特征,尤其是来源于月表的月震波信号特征,明显区别于地球上的地震波信号,在开始和结束时,月震波信号存在明显的逐渐增强和减弱的延时特征。Nakamura等[2]认为这是由于月表物质成分的巨大差异,尤其是低吸收和高速率变化梯度介质所引起的月震波散射造成。此外,Nakamura等[2]还发现,在被动月震探测中,最先接收到的月震回波的横波与纵波波幅比非常大,他们将之归结为月球表层四分之一波长的剪切波回

收稿日期:2006-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(批准号:40473036;40673053);贵州省最高科学成就奖匹配项目

*通讯作者,E-mail:wangshijie@vip.skleg.cn

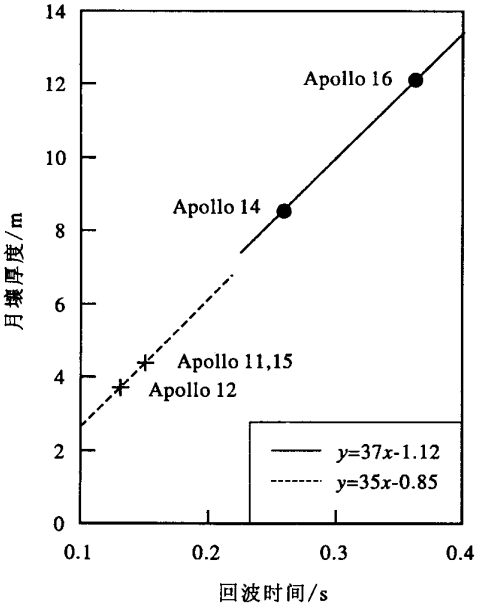
波影响,即认为月壤层厚度与四分之一波长的剪切波回波信号有关。根据以上月震波证据,Nakamura 等[2]认为月球表面覆盖着一层具有较低月震波传播速率的月壤,在 Apollo 11、12 和 15 登陆点的厚度在 3.7 ~ 12.2 m 之间(表 1)。结果与 Cooper 等[3]和 Duenneber 等[4]通过主动月震探测得到的月壤厚度数据相比较,在月壤厚度与四分之一波长的剪切波回波时间关系上具有一致性(图 1)。此外,Strangway[5]利用多频电磁探测数据也对 Apollo 17 登陆点的月壤厚度进行推测,结果表明在 Apollo 17 登陆点的月壤厚度达到 32 m。

表 1　Apollo 各登月点的月壤厚度

Table 1. Lunar soil thickness at Apollo landing sites

Apollo Mission	回波时间/s	月壤厚度/m	
		月震探测	多频电磁探测
11	0.15	4.4[a]	-
12	0.13	3.7[a]	-
14	0.26	8.5[b]	-
15	0.15	4.4[a]	-
16	0.36	12.2[b]	-
17	-	4.0[b],8.5[c]	32[d]

注:a. Nakamura 等[2]利用被动月震数据推算的结果,b. Copper 等[3]的主动月震测量值,c. Duennebier 等[4]的主动月震测量值,d. Strangway 利用多频电磁探测数据推算的结果.



+ 为 Nakamura 等利用被动月震数据对月壤厚度进行推算的结果,圆点为 Cooper 等利用主动月震测量得到的结果

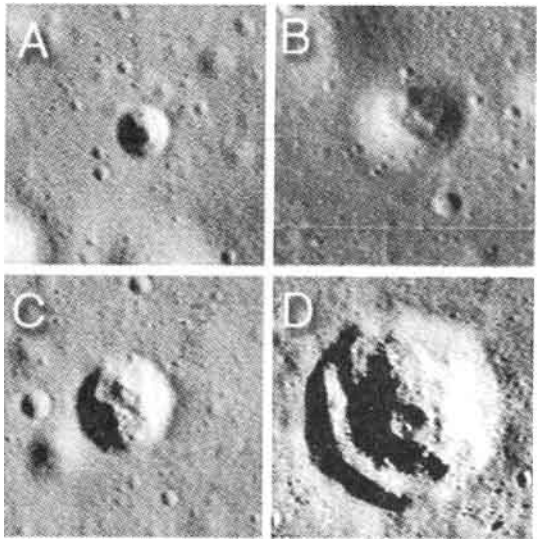
图 1　回波时间与月壤厚度关系

Fig. 1. Relationship between echo time and lunar soil thickness.

2　月壤厚度研究的间接方法

2.1　基于撞击坑形态和分布

月壤厚度研究的间接方法主要是基于撞击实验,通过对撞击坑形态和直径分布频率的分析,推测出月壤的厚度。Oberbeck 和 Quaide[6]以及 Quaide 和 Oberbeck[7]首先利用直径小于 250 m 的小型撞击坑形态推算月壤厚度,根究 Lunar Orbiter 获得的影像资料,他们将撞击坑分为普通碗状、中间隆起型、平地型和同心型4类(图2)。通过模



A. 普通碗状撞击坑　B. 中间隆起型撞击坑
C. 平底型撞击坑　D 代表同心型撞击坑

图 2　四种撞击坑形态(引自 Oberbeck 和 Quaide[6])

Fig. 2. Four classes of craters.

拟试验发现,当月壤厚度介于 $D/4.2 \sim D/3.8$ 之间时(D 为撞击坑直径),将形成普通碗状撞击坑,当月壤厚度介于 $D/10 \sim D/8$ 之间时,形成同心型撞击坑。根据这一关系,他们给出了 Lunar Orbiter 部分点的月壤厚度(表 2)。Rennilson 等[8]通过研究发现,月壤厚度与边缘镶嵌着块状碎屑物的最小撞击坑深度基本一致。根据这一结论,Shoemaker 和 Morris[9]估算出 Surveyor 登陆点附近的月壤厚度在 0.02 ~ 10 m 之间。Shoemaker 等[10]在进一步研究中发现,月表撞击坑的大小和分布情况与月壤厚度存在密切关系,即月壤厚度等于撞击坑最初的深度与边缘隆起高度之差。此后,很多学者都沿用这些方法对不同月面点的月壤厚度进行探讨[11-14]。最近,Wilcox 等[15]综合

了前人的方法，进一步考虑入射角对撞击坑影像判别的影响，提出了利用平衡直径计算月壤厚度的方法，认为平均月壤厚度随平衡直径的增大而增大，通过对风暴洋中 3 个地区的撞击坑直径分析，得出这些地区的月壤厚度最小为 8 m，最大为 31 m。

表 2 Lunar Obiter 部分点的月壤厚度

Table 2. Lunar soil thickness at some locations along the orbit of Lunar Obiter

Lunar Orbiter 位置	类型	中心纬度/(°)	中心经度/(°)	面积/km²	平均月壤厚度/m
II-P2	B	+2.4	+33.9	516	4.6
II-P5	B	+2.5	+24.7	482	4.6
II-P6b	B	+4.4	+23.9	603	4.6
II-P8b	B	0.0	-1.1	643	4.6
II-P13b	B	+1.2	-41.8	537	4.6
III-P8	B	-0.9	-19.9	527	4.6
III-P9c	B	-3.2	-23.7	600	4.6
III-P11	A	-3.4	-36.8	616	3.3
III-P12	A	-2.8	-44.0	1468	3.3
III-P7b	C	+1.9	-2.1	336	7.5
V-38	C	+32.7	-22.0	3179	7.5
V-24	D	-4.7	+4.0	1389	16

注：A—D 分别代表普通碗状、中间隆起型、平底型和同心型撞击坑(Oberbeck 和 Quaide[6])；经纬度中“+”表示北纬和东经，“-”表示南纬和西经.

2.2 基于地基雷达遥感

随着遥感技术的不断发展，Shkuratov 和 Bondarenko[16]提出了利用地基雷达遥感数据对月壤厚度进行反演的方法。Apollo 17 登陆点的探测结果表明，在约 7 m 处介电常数发生很大变化，Strangway 等[17]据此推断这一深度以下为下垫基岩层，其上为月壤层，这一推断与月震波的探测结果基本相符[18-19]。因此，根据上述结论可以将月壤层简化为上下两层的理想结构(图 3)。

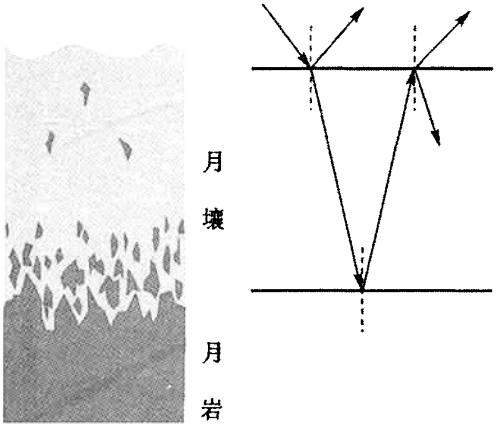


图 3 月壤层结构示意图
(引自 Shkuratov 和 Bondarenko[16])
Fig. 3. Structure of lunar soil layer.

在简化的理想月壤结构模型基础上，Shkuratov 和 Bondarenko[16]忽略月壤内部的月壤颗粒以及尺寸较大的碎屑物散射，以低损耗介质的吸收系数代替月壤的功率衰减系数，并进一步假设月面交叉极化雷达回波信号分布等于散射系数与入射角余弦之积，根据分层介质的电磁波传播理论，最终得出各物理参数与月壤厚度的关系：

$$R=\frac{(1-r_{01})(1-r_{10})r_{12}\cdot e^{-2\pi h\cdot\tan\delta\cdot\sqrt{\varepsilon}/\lambda}}{1-r_{10}r_{12}e^{-2\pi h\cdot\tan\delta\cdot\sqrt{\varepsilon}/\lambda}}$$

其中，R 为入射波与出射波强度之比，r_{01}、r_{12}、r_{10} 分别为真空-月壤、月壤-月岩和月壤-真空界面的平均菲涅尔反射系数，h 为月壤厚度，$\tan\delta$ 为介电损耗，ε 为相对介电常数，λ 为入射波波长。在这一基础上，Shkuratov 和 Bondarenko 利用 Arecibo 天文台 70 cm 波长雷达对月球正面的观测数据，结合铁和钛的元素丰度，对全月球的月壤厚度进行了估算(图 4)。结果表明，月球高地的月壤厚度变化范围在 1.0～18.0 m 之间，平均厚度为 12 m，月海的月壤厚度在 1.5～10.0 m 之间，平均厚度为 5 m[16]。

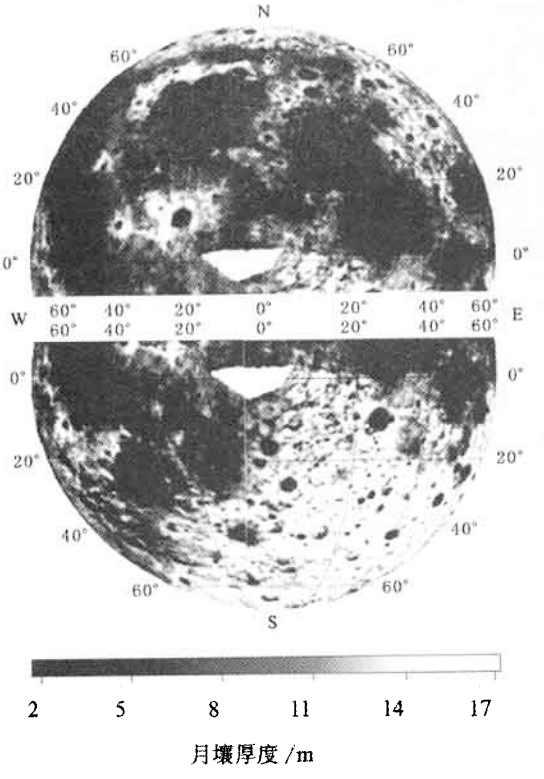


图 4　月壤厚度分布
(根据 Shkuratov 和 Bondarenko[16]发表的数据图像合成)
Fig. 4. Lunar soil thickness distribution.

3 展　望

在上述月壤厚度的研究方法中,利用月震数据、多频电磁探测数据、撞击坑的形态和分布规律等推算月壤的厚度均存在很多局限,数据的获取都比较困难,难以实现,误差也比较大,并且只能应用于特定的局部区域。随着遥感技术的不断发展,高精度的定量遥感已经在很多领域内得到广泛应用,其中,微波遥感由于其穿透深度大,不受太阳光照条件的影响等特点,在新一轮的探月热潮中倍受各国关注。Shkuratov 和 Bondarenko[16]利用地基雷达观测数据反演月壤厚度的方法是建立在理想模型基础上的,他们忽略月壤内部颗粒及碎屑物的散射,并将月壤视为低损耗介质对月壤的衰减因子进行简化,同时由于地基雷达的空间分辨率较低,最终导致其较大的误差,误差范围约在 10% ~ 30% 之间,对某些地方甚至高达到 70%[16]。结合我国嫦娥工程的进展,嫦娥一号卫星即将发射,其所携带的被动微波辐射计将为月球研究提供高空间分辨率的亮温数据,利用这些亮温数据反演月壤厚度是嫦娥工程的科学目标之一,也是当前月壤厚度研究的一种新方法。

参 考 文 献:

[1] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社, 2005: 151 - 157.

[2] Nakamura Y, Dorman J, Duennebier F, Lammlein D, Lathan G. Shallow lunar structure determined from the passive seismic experiment [J]. *The Moon*, 1975, 13:3-15.

[3] Cooper M R, Kovach R L, Watkins J S. Lunar near surface structure [J]. *Rev Geophys Space Phys*, 1974, 12:291-308.

[4] Duenneber F K, Watkins J S, Kovach R L. Results from the lunar surface profiling experiment [J]. *Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*, 1974, 5: 183.

[5] Strangway D. *Geophysics and Lunar Resources*, *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* [R]. Houston, T X: Lunar and Planetary Institute, 1985: 265-269.

[6] Oberbeck V R, Quaide W L. Genetic implication of lunar regolith thickness variations [J]. *Icarus*, 1968, 9:446-465.

[7] Quaide W L, Oberbeck V R. Thickness determinations of the lunar surface layer from lunar impact craters [J]. *J Geophys Res*, 1968, 73:5247-5270.

[8] Rennilson J J, Dragg J L, Morris E C, Shoemaker E M, Turkevich A. Lunar surface topography [J]. *Surveyor I mission report*, *part II*: *Scientific data and results*, *NASA JPL Technical Report*, 1966, 32-1023: 7-44.

[9] Shoemaker E M, Morris E C. Thickness of the regolith. Surveyor: Program results [J]. *NASA Special Paper*, 1969, 184: 96-98.

[10] Shoemaker E M, Batson R M, Holt H E, Morris E S, Rennilson J J, Whitaker E A. Observations of the lunar regolith and the Earth from the television camera on Surveyor 7 [J]. *J Geophys Res*, 1969, 74:6081-6119.

[11] Florensky K P, Basilevsky A T, Pronin A A, Popova Z V. *Prevoious Results of Panorama Geomorphologic Study*[R]. Peredvizgnaya Laboratory on the Moon, Lunochod 1, 1971: 96-155.

[12] Oberbeck V R, Quaide W L, Mahan M, Paulson J. Monte Carlo calculations of lunar regolith thickness distributions[J]. *Icarus*, 1973, 19:87-107.

[13] Basilevsky A T. The estimation of lunar regolith thickness and reworking degree by crater distribution [J]. *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1974, 12: 606-609.

[14] Florensky K P, Basilevsky A T. *The Processes of Surface Reworking at Le Monnier on Results of Detailed Study by Lunochod* 2 [R]. Tektonika I Strukturnaya Geologiya, 1976: 205-235.

[15] Willcox B B, Robinson M S, Thomas P C, Hawke B R. Constraints on the depth and variability of the lunar regolith [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2005, 40:695-710.

[16] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data [J]. *Icarus*, 2001, 149:329-338.

[17] Strangway D, Pearce G, Olhoeft G. Magnetic and dielectric properties of lunar samples[A]. Vinogradov A P. *Kosmochimiya Luny i Planet*[M]. Moscow: Nauka, 1975:712-728.

[18] Kovach R L, Watkins J S, Talwani P. Lunar seismic profiling experiment [J]. *Apollo* 17 *Prelim Sci Rep NASA SP*, 1973, 330:10-1.

[19] Olhoeft G R, Strangway D W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1975, 24:394-404.

METHODS AND ADVANCES IN RESEARCH ON LUNAR SOIL THICKNESS

LI Xiong-yao[1,2], WANG Shi - jie[1], CHEN Feng[1], OUYANG Zi-yuan[1], CHENG An-yun[1,2], LI Shi - jie[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract: Research on lunar soil thickness is very important in lunar exploration, human lunar landing and lunar resource exploitation in the future. It is an important parameter in the study of the origin and evolution of the Moon, and it is the prerequisite for estimation of the quantity of ^{3}He on the Moon. The research methods of lunar soil thickness can be classified as direct and indirect methods. The direct methods mainly used to estimate lunar soil thickness in term of the moonquake data. The indirect method is used to estimate lunar soil thickness based on the morphology and distribution of lunar craters, or based on the data from Earth-base radar remote sensing. With the development of microwave remote sensing and the implementation of Chang'e project in China, the inversion of lunar soil thickness using the brightness temperature derived from high-resolution passive microwave remote sensing is a new orientation in research on lunar soil thickness.

Key words: lunar soil; thickness; microwave remote sensing