中国科学: 地球科学 2016 年 第 46 卷 第 5 期: 720 ~ 729
SCIENTIA SINICA Terrae earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

$(FeO+TiO_2)$含量对月壤微波热辐射的影响

孟治国[①②③], 杨国东[①*], 平劲松[③], 蔡占川[④], Alexander GUSEV[⑤], Edward M. OSEI[⑥]

① 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
② 中国科学院行星科学重点实验室, 上海 200030;
③ 中国科学院月球与行星科学重点实验室, 北京 100012;
④ 澳门科技大学资讯科技学院, 澳门 999078;
⑤ Institute of Geology, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia;
⑥ Department of Geomatic Engineering, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi 060227, Ghana
* 通讯作者, E-mail: ygd@jlu.edu.cn

收稿日期: 2015-11-19; 接受日期: 2016-01-27; 网络版发表日期: 2016-05-05
国家自然科学基金项目(批准号: 41371332, 41590851)、中央高校基本科研业务费项目(编号: JCKY-QKJC23)和澳门科技发展基金项目(编号: 110/2014/A3)资助

摘要 $(FeO+TiO_2)$含量(FTA)是月壤微波热辐射(MTE)的重要影响因素之一. 文章首先基于辐射传输方程, 数值模拟研究了不同频率、不同月表温度条件下 FTA 对 MTE 的影响. 然后, 结合 Clementine 卫星 UV-VIS 数据及 Apollo 和 Surveyor 计划样品得到的 FTA 资料, 基于嫦娥 2 号卫星微波辐射计(CELMS)数据, 系统分析了 FTA 对月壤 MTE 的影响. 结果表明: (1) FTA 是同一纬度方向上 MTE 的重要影响因素, 但不是月壤 MTE 的决定性因素; (2) FTA 随月壤深度的增加而略有下降. 研究结果对基于嫦娥系列卫星 CELMS 数据的月壤参数反演具有重要意义.

关键词 月壤, 微波热辐射, 辐射传输模拟, $(FeO + TiO_2)$含量, CELMS数据

1 引言

在中国的探月工程中, 微波辐射计(Chang'E Lunar Microwave Sounder, CELMS)是首个星载的微波热辐射测量仪器, 其前所未有的高的空间分辨率和温度分辨率对于月球科学研究具有重要意义(Zheng等, 2012). 然而, 由于月壤参数分布资料的匮乏, 尤其是$(FeO+TiO_2)$含量(FTA)数据, 极大地限制了CELMS数据的应用(姜景山等, 2008; Fa和Wieczorek, 2012; Vijayan等, 2015).

FTA的存在会直接改变介质的介电常数, 进而影响其微波热辐射(Microwave Thermal Emission, MTE)特性, 这在当前基于数值模拟的月壤微波MTE研究中已被广泛采用(Hagfors, 1971; Keihm和

中文引用格式: 孟治国, 杨国东, 平劲松, 蔡占川, Gusev A, Osei E M. 2016. $(FeO+TiO_2)$含量对月壤微波热辐射的影响. 中国科学: 地球科学, 46: 720–729, doi: 10.1360/07SCES-2015-0195
英文引用格式: Meng Z G, Yang G D, Ping J S, Cai Z C, Gusev A, Osei E M. 2016. Influence of $(FeO+TiO_2)$ abundance on the microwave thermal emissions of lunar regolith. Science China Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-016-5280-1

© 2016《中国科学》杂志社

Langseth, 1975; Heiken等, 1991; 金亚秋等, 2003; 王振占等, 2009, 李芸等, 2009; Fa和Wieczorek, 2012; 孟治国等, 2014). 早在1964年, Krotikov和Troitsky (1964)在研究月球微波发射特征时, 认为介电常数会影响月壤MTE. Troitskii和Tikhonova(1970)、Hagfors (1971)以及Keihm和Lengseth (1975)在研究月壤微波辐射传输机理时, 均将介电常数列为月壤MTE的重要影响因素之一. 为了基于嫦娥卫星CELMS数据进行月壤厚度反演, 金亚秋等(2003)、王振占等(2009)和李芸等(2009)都认为FTA是月壤介电常数的重要影响因素之一, 在模拟月壤MTE时必须考虑FTA的影响.

当前的月壤MTE研究中, 所采用的FTA是基于Apollo计划期间获取的月壤、月岩样本得到的(Keihm和Langseth, 1975; 金亚秋等, 2003; 王振占等, 2009; 李芸等, 2009; 张卫国等, 2010; 封剑青等, 2013), 或是基于Clementine卫星UV-VIS数据反演得到的(法文哲和金亚秋, 2007; Fa和Wieczorek, 2012). 然而, 考虑到月壤运移和空间风化的影响, 这些数据不足以代表月壤层FTA的空间分布特征(Feldman等, 2002). 作为基于CELMS数据进行月壤参数反演的前提和基础, 对全月表月壤FTA对MTE影响的研究是非常必要的.

嫦娥1和2号卫星CELMS数据的成功获取使得评估月壤FTA空间分布对MTE的影响成为可能. 当前, 广泛使用的FTA数据是基于Clementine UV-VIS数据反演得到的(Lucey等, 2000; Gillis等, 2003; Korokhin等, 2008; Christian等, 2011). 该FTA数据空间分辨率很高, 并且几乎覆盖全部月表(Lucey等, 2000; Gillis等, 2003; Christian等, 2011), 足以用来评估FTA对以CELMS数据为代表的月壤MTE的影响.

微波信号对月壤有一定的穿透深度, CELMS数据也为评估月壤FTA的空间分布提供了极好的条件. 本文拟结合数值模拟和嫦娥2号卫星CELMS数据, 研究FTA对月壤MTE的影响.

2　数值分析

2.1　辐射传输模拟

论文采用通用的月壤-月岩模型(Keihm, 1984; Shkuratov 和 Bondarenko, 2001; 金亚秋等, 2003; Meng等, 2014a). 根据金亚秋等(2003), 王振占等(2009)和Meng等(2014a)的结果, 月壤T_B包括两个部分: 来自月壤层的辐射T_{B1}和来自岩石层的辐射T_{B2}, T_{B1}又包括上行辐射$T_{1\mathrm{up}}$和下行辐射$T_{1\mathrm{dn}}$, 即:

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} = T_{1\mathrm{up}} + T_{1\mathrm{dn}} + T_{2\mathrm{up}}. \tag{1}$$

这里

$$\mathrm{d}T_{1\mathrm{up}} = \frac{1-r_{p1}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec\theta_1 \mathrm{e}^{-\int_0^z k_{a1}(z')\sec\theta_1 \mathrm{d}z'} \mathrm{d}z, \tag{2a}$$

$$\mathrm{d}T_{1\mathrm{dn}} = \frac{(1-r_{p1})r_{p2}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec\theta_1 \mathrm{e}^{-\left(\int_z^D k_{a1}(z')\sec\theta_1 \mathrm{d}z' + \int_0^D k_{a1}(z')\sec\theta_1 \mathrm{d}z'\right)} \mathrm{d}z, \tag{2b}$$

$$\mathrm{d}T_{2\mathrm{up}} = \frac{(1-r_{p1})(1-r_{p2})}{1-L} k_{a2}(z) T(z) \sec\theta_2 \mathrm{e}^{-\int_D^z k_{a2}(z')\sec\theta_2 \mathrm{d}z'} \mathrm{d}z \cdot \mathrm{e}^{-\int_0^D k_{a1}(z')\sec\theta_1 \mathrm{d}z'}, \tag{2c}$$

式中, D是月壤层厚度; θ_0是观测角; θ_1和θ_2分别是微波在月壤和月岩中的出射角; p=h, v, 分别代表水平极化和垂直极化; k_{a1}和k_{a2}分别是月壤和月岩的吸收系数; $T(z)$是月壤内部的温度分布; r_{p1}和r_{p2}分别代表真空-月壤界面和月壤-月岩界面的反射率; 1/(1–L)为多次反射系数.

介电常数是月壤有效反射率r_{p1}、r_{p2}和吸收系数k_{a1}、k_{a2}的决定性因素, 是影响月壤微波热辐射的关键参数之一. Heiken等(1991)给出了介电常数实部ε'、损耗角正切tanδ以及(FeO和TiO_2)含量S(wt.%)之间的关系:

$$\begin{cases} \varepsilon' = 1.919^{\rho}, \\ \tan\delta = 10^{0.038S + 0.312\rho - 3.260}, \end{cases} \tag{3}$$

式中, ρ是月壤密度. 最终的T_B是式(1)在整个月壤厚度D上的积分.

2.2　模拟结果

结合式(1)~(3), 可以建立月壤MTE与FTA之间的关系. 研究中, 假设月壤厚度为6m(封剑青等, 2013; Meng等, 2014b), 表面光滑, 月壤密度分布采用双曲线模型, 下伏基岩的介电常数假设为6.15+i0.155(Apollo 15计划第1555采样点). 另外, 考虑到时间和位置对月球表面温度的影响很大(Heiken等, 1991), 假设月表温度为390K(正午)、300K(白天)

和200K(晚上)、100K(午夜), 基于式(1)和热传导模型, 得到不同频率、不同月表温度条件下T_B随着FTA的变化曲线(图1).

图1表明, FTA变化对T_B的影响非常强. 无论是正午还是午夜, 随着FTA从0增加到40%, 3GHz通道, T_B的变化量达55K, 变化幅度达23.5%; 37GHz通道, T_B的变化量达80K, 幅度达29.6%. 这表明, FTA对高频T_B的影响非常大; 频率越高, MTE受FTA的影响越大. 另外, 在3GHz条件下, T_B对FTA较高时的响应比较显著; 而在37GHz条件下, T_B对FTA较低时的响应比较显著.

即使在高频通道, 正午时刻由FTA变化造成T_B变化量约为80K, 而由表面温度变化带来的T_B变化量达320K. 这表明, 表面温度对月壤T_B的影响远大于FTA变化带来的影响. 因此, FTA决不可能是月壤MTE的决定性因素. 这也表明, 月表温度对CELMS数据的影响很大. 为了更好地了解FTA对月壤MTE的影响, 必须使用相同观测时间的CELMS数据, 来消除由于观测时间差异带来的月表温度变化对月壤MTE的影响.

图1还表明, 最高和最低月表温度条件下, T_B随FTA的变化可能代表着不同的月壤微波热辐射特性. 因此, 本研究处理得到和使用了正午和午夜时刻的CELMS数据.

3 数据处理

本研究选用嫦娥2号CELMS数据进行处理, 并基于Clementine UVVIS数据、采用Gillis方法(Gillis等, 2003)反演得到FTA数据.

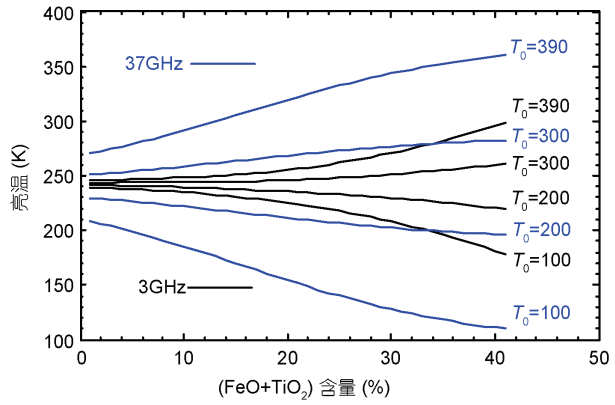


图 1　不同表面温度条件下模拟 T_B 随 FTA 的变化

3.1 CELMS 数据

研究中, 所使用的CELMS数据是由嫦娥二号卫星微波辐射计获取的, 观测频率为3.0、7.8、19.35和37GHz. 微波辐射计的观测角为0°, 空间分辨率为1°×1°, 辐射分辨率约为0.5K. 所有数据都是经过系统校正和几何校正的2C级数据, 以PDF格式存储.

所获取的CELMS数据的观测日期为2010年10月至2011年5月. 首先, 根据Zheng等(2012)的研究方法, 通过引入时角分析, 得到给定观测条件下月表CELMS数据, 以消除由观测时间带来的影响, 但同一时角条件下的CELMS数据不能覆盖全月球表面. 为了解决这一问题, 本研究采用Zheng等(2012)提供的方法, 将月球表面按纬度分成多个区域, 对每个区域, 采用七次多项式插值的办法建立观测T_B与模拟T_B的关系, 进行生成正午和午夜时刻、频率分别为3.0(图2)、7.8、19.35和37GHz(图3)条件下的全月表亮温分布图, 空间分辨率为1°×1°. 正午具有最高的表面温度, 午夜时间的表面温度非常低, 它们代表了月

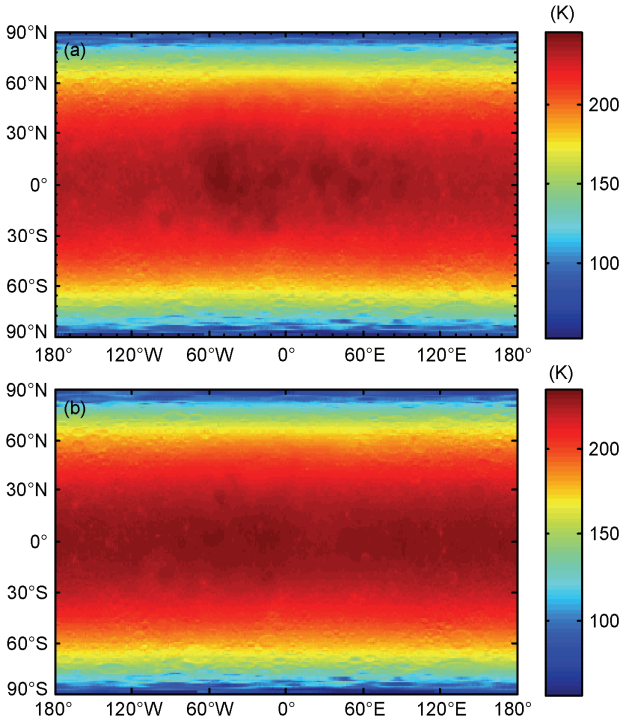


图 2　全月表 T_B 分布(3GHz)

(a) 正午; (b) 午夜

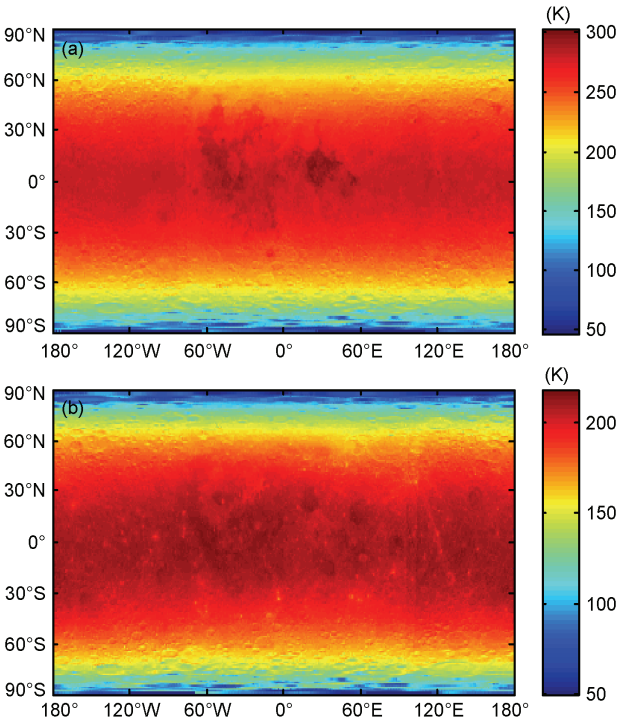


图 3　全月表 T_B 分布(37GHz)

(a)正午; (b)午夜

壤MTE的两个极端状况，是利用微波辐射计数据研究月壤微波热本质的最理想的时间(Ulaby等, 1981).

3.2　FeO 和 TiO_2 含量

估算月壤(FeO+TiO_2)含量(FTA)是月球探测基本的科学目标之一(Lucey等，2000; Gillis等，2003; Korokhin等，2008; Christian等，2011). 基于月球Clementine计划获取的全月球紫外-可见光(UV-VIS)数据，采用Lucey等(2000)和Gillis等(2003)提出的反演算法，是当前普遍采用的FTA反演方案. 本研究中，采用的Clementine UV-VIS数据和Gillis方法来估算FeO含量(wt.%)和TiO_2含量(wt.%).

Clementine UV-VIS数据的空间分辨率为0.00625°×0.00625°，这样，在一个CELMS数据范围内，将会有160×160个FTA数据. 本研究中，取CELMS像元范围内所有FeO含量和TiO_2含量的平均值为该范围内新的FTA数据. 考虑到在部分地区可能存在没有FTA值或FTA为负值的情况(Christian等, 2011)，在计算FTA分布图时将去掉这些值. 图4为最终的全月FeO和TiO_2含量分布图.

4　结果

本部分主要讨论整个月表、0°经线和0°纬线方向上FTA对月壤MTE的影响.

4.1　全月分布

数值模拟结果(图1)表明, FTA对高频T_B的影响明显大于其对低频T_B的影响. T_B观测数据(图2、3)和FTA估算数据(图4)的对比也可以清楚地证明这一点.

图2a、3a和图4表明，正午时刻, FTA与观测T_B之间呈现出明显的区域性特征. 在FTA较高的地区，尤其是在静海、丰富海、湿海、雨海和风暴洋等地区，FTA的值超过30%，相应的观测T_B值明显高于其他地方. 月陆地区，FTA低于10%，同一纬度所对应的T_B变化很小. 这与模拟结果相吻合. 此外，在3GHz时，同一纬度的亮温总变化不超过10K，远远小于37GHz(图3a)时的80K. 这再次证明，正午时刻，高频条件下的T_B受FTA的影响更大.

图2b和3b表明，午夜时刻，T_B和FTA之间的对应关系不明显，具有高FTA差异的月海和月陆之间的T_B差异并不显著. 同时，午夜时刻出现了大量T_B异常

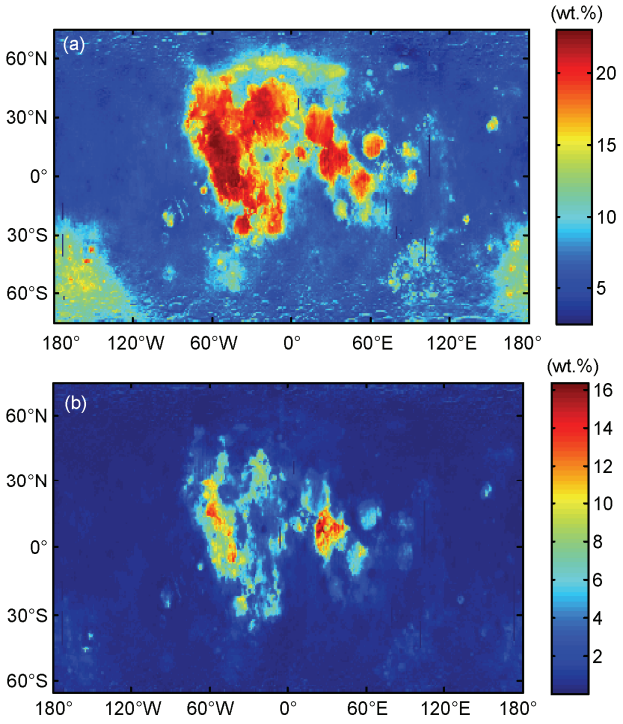


图 4　月表 FeO (a)和 TiO_2 (b)含量分布图

区域, 且这些T_B异常明显与FTA的分布无关. 这表明, 月壤的复杂性远远超过我们当前所掌握的情况.

图2~4还表明, 观测T_B随纬度的变化远大于其随FTA的变化. 考虑到月表温度与其纬度位置直接相关, 这也证实了之前的模拟结果: 表面温度对T_B的影响比FTA的影响更大.

4.2 0°纬线和 0°经线

图5是0°纬线和0°经线方向FTA和观测T_B分布曲线. 图5a主要反映了FTA对观测T_B的影响, 而图5b可以体现FTA对观测T_B的影响程度.

图5a表明, 正午时刻, T_B与FTA的对应关系非常明显. 尤其是60°W~70°E之间, 高的T_B显然与高的

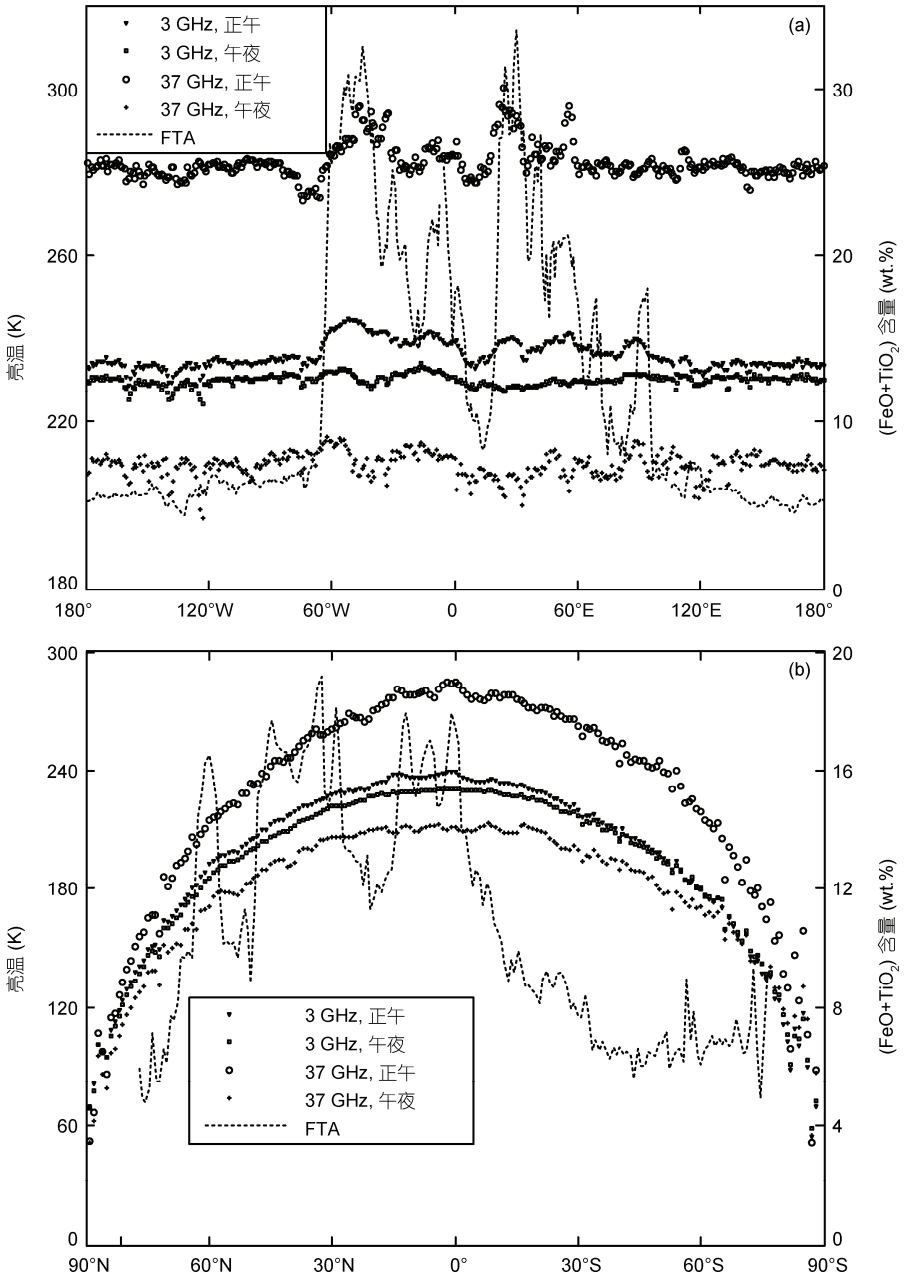


图 5 0°纬线(a)和 0°经线(b)方向上 T_B 和 FTA 分布曲线

FTA相对应. 在60°~22°W和20°~70°E区间, T_B与FTA的变化吻合的非常好; 而120°~110°W和115°~120°E地区, FTA的变化对T_B的影响很小.

图5b表明, T_B的分布具有强烈的纬度依赖性. 纬度位置, 即月表物理温度(Racca, 1995; Li等, 2007; 孟治国等, 2014), 对观测T_B的影响非常大. 尽管如此, 观测T_B对FTA变化也出现了明显的响应. 尤其35°N和70°S附近及12°N~6°S地区, 观测T_B对FTA的变化较为敏感. 在南极和北极附近, 剧烈的T_B变化与FTA高度无关.

表1给出了正午和午夜时刻、0°纬线方向上四通道T_B与FTA的相关系数. 表1表明, 正午时刻, T_B与FTA之间的相关性非常强, 19.35GHz时, 相关系数达到了0.89, 说明T_B与FTA的空间分布是高度相关的. 随着频率从3GHz增加到19.35GHz, 其对应的相关系数也在增大, 这表明高频条件下, T_B与基于UV-VIS数据得到的FTA的分布具有更好的一致性. 然而, 37GHz对应的相关系数比其他频率的相关系数都要低, 说明高频条件下, 月壤MTE可能要受到更多其他月壤物理参数的影响.

午夜时刻, 四通道T_B与FTA的相关系数都很小, 最高的相关系数只有0.1. 这表明, 此时的月壤MTE更多的受月壤物理特性的影响(Zheng等, 2012; 封剑青等, 2013).

表2提供了正午和午夜时刻0°经线方向四通道T_B与FTA的相关系数. 表2表明, 0°经线方向上, 正午时刻T_B与FTA的相关系数较0°纬线方向上的低, 而午夜时刻的相关系数远高于0°纬线方向. 然而, 正午和午夜时刻的相关系数相差不大, 表明在同一经度方向上观测T_B和FTA相关关系很弱.

表 1　0°纬线方向上亮温与($FeO+TiO_2$)含量的相关系数表

时间	通道 (GHz)			
	3.0	7.8	19.35	37
正午	0.8689	0.8773	0.8906	0.7254
午夜	0.1012	0.0902	0.0012	0.027

表 2　0°经线方向上亮温与($FeO+TiO_2$)含量的相关系数表

时间	通道 (GHz)			
	3.0	7.8	19.35	37
正午	0.5450	0.5088	0.4970	0.4718
午夜	0.5171	0.4890	0.4825	0.4956

4.3　Apollo 和 Surveyor 着陆点

0°经线和0°纬线方向上, 四通道T_B与FTA的相关性分析结果提供了两个截然不同的关于FTA对T_B影响的结论. 同时, 沿0°经线和0°纬线的取样, 也限制了我们对全月表FTA与T_B关系的分析. 此外, 研究中基于UV-VIS数据、采用Lucey和Gillis方法进行全月表FTA反演, 但是UV-VIS数据在月壤中的穿透深度极小, 且反演得到的TiO_2含量在月海地区的可靠性尚有疑问(Pieters等, 2008). 为了进一步确定FTA对月壤MTE的影响, 研究中使用了Apollo和Surveyor着陆点的FeO和TiO_2含量, 以及相应位置正午和午夜时刻的CELMS数据(表3).

表4给出了Apollo和Surveyor着陆点正午和午夜时刻观测T_B与FTA之间的相关系数. 表4表明, 正午时刻的FeO、TiO_2和观测T_B的相关系数远小于表2中的系数, 这是因为着陆点处于不同的纬度, 从而造成不同的表面温度, 进而对观测T_B造成很大影响. 从表4可以看出, 正午时刻, 3GHz条件下FeO含量与T_B的相关性要大于TiO_2含量与T_B的相关性; 而在高频条件下, FeO含量和TiO_2含量与T_B的相关程度正好相反. 而根据数值模拟, FeO含量和TiO_2含量对观测T_B具有相同影响(Shkuratov等, 2001; Jin和Fa, 2011). 这也说明, 月壤微波热辐射机制有待深入挖掘. 随着频率从3GHz增加到19.35GHz, T_B与FeO含量的相关系数从0.0427上升到0.1171, 然而T_B与TiO_2含量的相关系数从0.0171上升到0.2168; 表明TiO_2含量与高频条件下的月壤MTE的相关程度更大. 有趣的是, 表1和表4呈现出相同的相关系数变化规律, 即在37GHz时的相关系数相对变小. 其原因有待进一步分析.

午夜时刻, FeO含量、TiO_2含量与T_B的相关系数随频率的分布没有明显的规律性. 但从绝对值上来看, 低频条件下, FeO含量与T_B的相关系数略大于TiO_2含量与T_B的相关系数; 而在高频条件下, FeO含量与T_B的相关系数远小于TiO_2含量与T_B的相关系数. 这也表明, 午夜时刻月壤MTE可能与TiO_2含量分布的相关程度非常高.

5　讨论

5.1　FTA 是重要的影响因素

图2~4中, 正午时刻全月T_B分布与FTA呈现出明

表 3　Apollo 和 Surveyor 着陆点的 FeO 和 TiO_2 含量及相应的亮温数据 [a)]

位置	FeO* (wt.%)	TiO_2* (wt.%)	3GHz		7.8GHz		19.35GHz		37GHz	
			正午	午夜	正午	午夜	正午	午夜	正午	午夜
Apollo 11	15.8	7.4	239.3410	227.4089	242.2030	214.2500	276.9100	219.0244	294.8940	202.1244
Apollo 12	15.7	2.68	239.5800	230.4975	240.2280	218.6650	271.2640	227.4675	287.8600	213.8375
Apollo 14	10.4	1.64	238.8290	232.5600	236.7520	220.9560	266.3380	228.4730	282.6010	212.6070
Apollo 15	15.2	1.64	228.3800	221.5070	223.3470	208.6850	251.3740	220.1450	265.0590	207.1320
Apollo 16	5	0.55	233.6282	228.3000	231.9073	217.4500	262.6609	224.4300	280.3464	207.4000
Apollo 17	15	9.5	231.6010	223.5330	228.0640	210.5740	258.9530	219.8610	274.8300	204.7900
Surveyor 5	12.1	7.6	240.5300	227.9029	244.3689	215.3180	279.6044	220.9230	298.1367	204.9952
Surveyor 6	12.4	3.5	239.2130	230.6500	238.5510	218.7917	268.6940	226.5450	284.4690	211.6283
Surveyor 7	5.5	0.5	206.3630	202.4800	208.1540	190.9830	242.0030	199.7540	259.9910	184.5420

a) * 数据来自 Shkuratov 和 Bondarenko (2001). 亮温单位: K

表 4　采样区亮温与(FeO+TiO_2)含量的相关系数表

成分	3GHz		7.8GHz		19.35GHz		37GHz	
	正午	午夜	正午	午夜	正午	午夜	正午	午夜
FeO(wt.%)	0.0427	–0.3647	0.0872	–0.4791	0.1171	–0.4125	0.0490	–0.1657
TiO_2(wt.%)	0.0171	–0.3524	0.0957	–0.4493	0.2168	–0.6320	0.2136	–0.6348

显的相关关系, 表明FTA是月壤MTE的重要影响因素之一.

图6给出了0°纬线和0°经线方向观测T_B与模拟T_B的变化曲线. 其中, 模拟T_B是假设月表温度为390K, 且不随纬度或经度位置变化, 其他参数同图1. 图6a表明, 在同一纬度上, 观测T_B和模拟T_B具有明显的对应关系. 月陆地区的FTA很低, 低频时T_B的变化不显著, 而高频时T_B随FTA的变化呈现微弱的波动, 变化幅度约为10K. 月海地区的FTA相当高, 变化范围也大, 因此, 对应的月海地区的T_B也很高, 相应的亮温动态范围也很大. 尤其是在60°W~6°E、20°~70°E和80°~90°E地区, 3GHz时T_B的变化约为20K, 37GHz时T_B的变化量可达50K. 这表明, FTA与T_B的分布密切相关, 是月壤MTE的重要影响因素.

然而, 图2~4也表明, 尽管高的FTA和高的T_B分布表现出明显的对应关系, 但T_B随纬度(即表面温度)的变化明显大于其随FTA的变化. 图6b表明, 如果表面温度相同, 0°经线方向模拟T_B随FTA的变化将会非常明显. 3GHz时T_B的变化量约为10K, 而37GHz T_B的变化量达30K, 变化幅度超过10%. 但是, 观测T_B则表明, 无论是在高频还是低频, 由FTA造成的T_B曲线的波动非常小, 远小于由纬度位置或表面温度造成的T_B波动. 同时, 从月球赤道到高纬度地区, 37GHz时T_B的变化量达200K, 3GHz时T_B的变化量也达170K左右, 变化幅度达70%, 是由FTA造成的T_B变化量的7倍. 这表明, 月表温度才是月壤MTE决定性因素之一, 而FTA不是.

图6b还表明, 尽管FTA对T_B的影响远低于月表温度的影响, 但在某些地区由FTA变化导致的T_B变化仍然非常明显. 在0°~20°N的低纬度地区, 模拟T_B与观测T_B表现出明显的相应的变化特征. 在36°~40°N区间, 模拟T_B表现出较大的波动, 但相应的观测T_B的波动较弱, 仅在高频数据上有较为明显的表现. 高纬度地区, 60°~70°N区间的模拟T_B的变动则没有相应出现在观测T_B曲线上. 这表明, 尽管FTA不是月壤MTE的决定性因素, 但对MTE也有一定程度的影响.

5.2　FTA 不是唯一的影响因素

图2~4表明, 尽管FTA与正午时刻T_B的对应关系很明显, 但是仍然存在大量的异常区域. 静海的FTA略高于澄海地区, 但前者的观测T_B远远高于后者, 其原因有待进一步考察. 在第谷撞击坑(43.4°S/11.1°W), FTA很低, 但在图3a中呈现高T_B异常. 在南极艾肯盆地, FTA明显高于周围地区, 但在图2和3中并没有出现相应的高T_B分布. 另外, 午夜时刻的T_B分布没有任何明显的区域性规律, 说明FTA不是月壤MTE的唯一影响因素.

根据图6b, 低频时月陆地区的模拟T_B与观测结

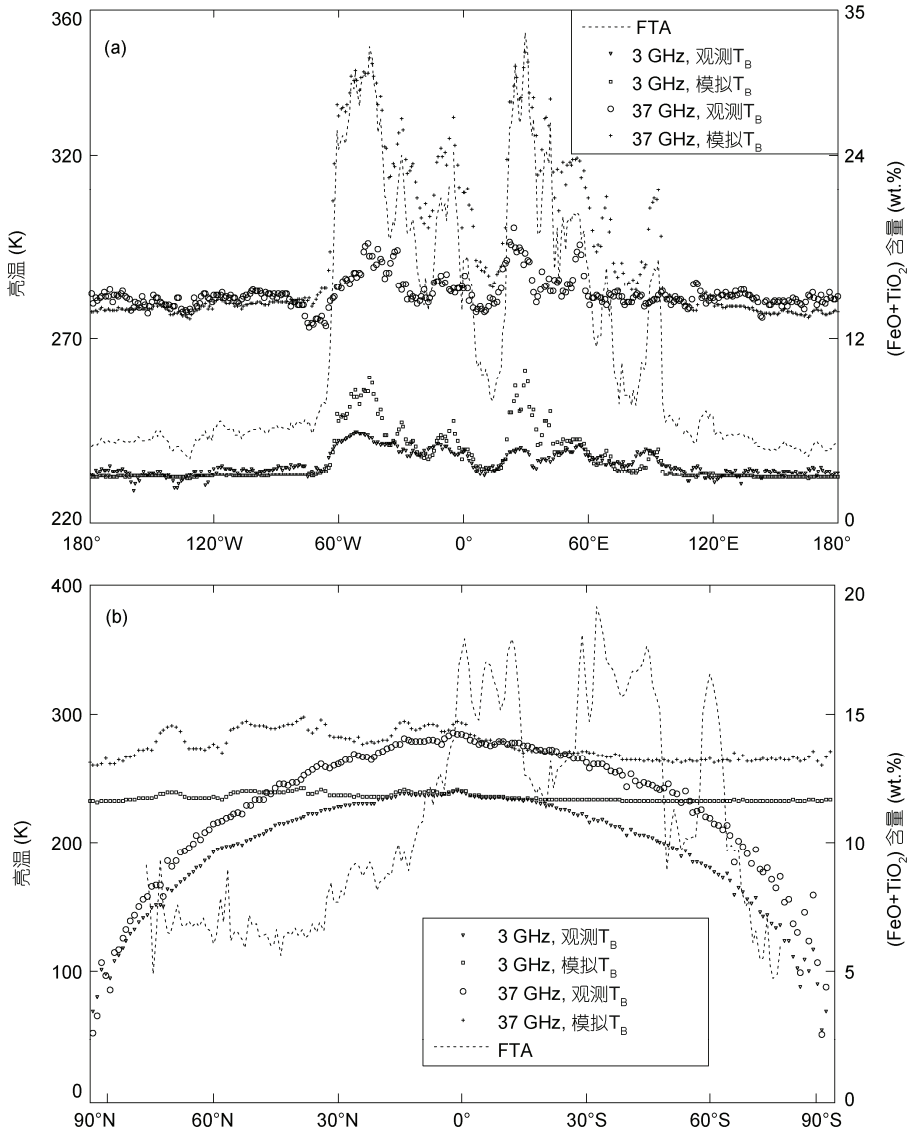


图 6　0°纬线(a)和 0°经线(b)方向上的的模拟亮温和观测亮温

果吻合的很好. 考虑到月陆地区的月壤厚度和表面粗糙度都比月海地区的大, 低频时FTA对此类地区的T_B的影响很小. 而在月海地区, 模拟T_B远高于观测T_B, 这表明, 除了FTA, 还存在其他影响T_B的因素. 同时, 在160°W(未命名撞击坑)、138°W(瓦维洛夫撞击坑)、125°W(赫茨普龙撞击坑)、116°E(阿布·瓦法环形山)、119°E(Heron撞击坑)、130°E(格雷戈里系列火山口)和140°E(门捷列夫系列火山口)附近, 均出现与FTA分布无关的明显的T_B异常. 考虑到撞击坑区域地形的起伏和表面岩块分布的不均匀(Heiken等, 1991), 这也间接表明地形和岩块分布也是月壤MTE的重要影响因素之一. 此外, 月陆地区的模拟T_B略低于观测T_B, 而月海地区的模拟T_B远高于观测T_B. 这一方面显示了月壤MTE的复杂性, 另一方面也再次表明FTA不是月壤MTE的唯一影响因素.

5.3　FTA 随月壤深度的变化

目前, 对月壤FTA分布的研究资料很多, 而对($FeO+TiO_2$)含量随深度变化的研究资料很少. 微波信号可以穿透一定深度的月壤, 相应的CELMS数据必然受可穿深度范围内月壤FTA分布的影响(姜景山等, 2008; Zheng等, 2012; Meng等, 2014a). 因此, 不

同频率的CELMS数据可以用来估算FTA随月壤深度的变化特征.

图6a中, 月海地区的模拟T_B, 是假设FTA不随月壤深度变化. 但模拟T_B远高于观测T_B, 表明这个假设不合理, FTA很有可能是随深度变化的. 由于研究中使用的FTA数据是基于Clementine UV-VIS数据得到的, 而UV-VIS对月壤的穿透深度极小, 反演结果只代表月壤最表层的FTA值, 而实际FTA值可能随着月壤深度的变化而变化.

根据表1和表4, 随着频率从3GHz增加到19.35GHz, FTA与T_B的相关系数增大, 而在37GHz时的相关系数变小, 即最高相关系数出现在19.35GHz. 这表明, 19.35GHz微波可穿透深度范围内的FTA接近于月壤表面的FTA, 最低的相关系数出现在3GHz, 表明此时的FTA与19.35GHz微波可穿透范围内的FTA是有差异的. 而7.8GHz的相关系数介于3.0GHz和19.35GHz的相关系数之间, 清晰地表达了纵向上FTA的过渡性特性.

然而, 当前关于FTA随着月壤深度变化的研究资料极为匮乏. 值得关注的是, 0°纬线方向, 基于γ谱仪数据得到的FTA(Prettyman等, 2006)和基于UV-VIS数据得到的FTA之间的相关系数约为0.89, 这与表1中19.35GHz条件下正午时刻的相关系数相同. 频率为19.35GHz的微波信号在月壤中的穿透深度约为0.4m(Zheng, 2005), 几乎与γ谱仪数据的穿透深度相同. 因此, 基于γ谱仪数据和基于UV-VIS数据得到的FTA值的对比(图7)可在一定程度上反映月壤FTA随深度的变化特征. 图7给出了基于γ射线数据和UV-VIS数据分别得到的FTA, 表明0.4m时的FTA要低于月壤表面的FTA. 结合之前的分析结果, 可以得到这样一个结论: 月壤FTA有随深度的增大而减小的趋势.

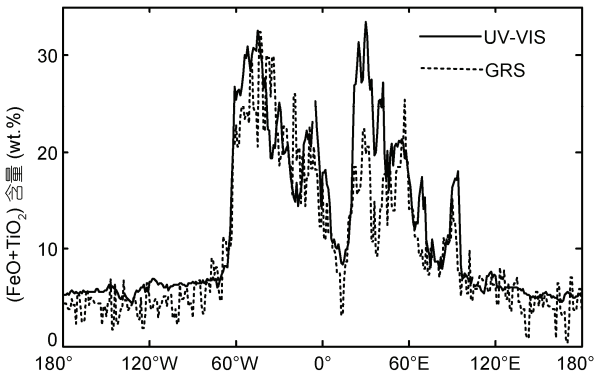


图 7　0°纬线上基于 γ 谱仪数据和 UV-VIS 数据反演得到的 ($FeO+TiO_2$)含量

同时, 图6a显示, 月海地区的观测T_B要低于模拟T_B, 再次验证了FTA很有可能是随深度的增加而减小的. 因为FTA的降低会导致发射率的减少(Ulaby等, 1981), 进而间接减弱了月壤MTE的能力.

然而, 3、7.8和19.35GHz时相近的相关系数还表明, 尽管FTA是随着深度的增加而降低的, 但是这个降低幅度是很小的.

6　结论

本研究基于嫦娥二号卫星CELMS数据, 结合基于Clementine卫星UV-VIS数据得到的月壤FeO和TiO_2含量信息, 系统分析了FTA对月壤MTE的影响. 0°纬线方向上FTA与CELMS数据的对比分析结果表明, FTA是月壤MTE的重要影响因素; 0°经线方向上的对比分析结果表明, FTA不是月壤MTE的决定性因素; 在160°W(未命名撞击坑)、138°W(瓦维洛夫撞击坑)、125°W(赫茨普龙撞击坑)、116°E(阿布·瓦法环形山)、119°E(Heron撞击坑)、130°E(格雷戈里系列火山口)和140°E(门捷列夫系列火山口)处的T_B异常结果表明, FTA不是月壤MTE的唯一影响因素. FTA与四通道T_B相关性结果表明, FTA随着月壤深度的增加而略有下降. 总的来说, FTA是影响月壤MTE的重要因素之一, 在基于CELMS数据进行月壤参数反演时必须给予重视, 尤其是FTA随月壤深度的变化.

除FTA外, 月壤MTE也受其他因素的影响, 如地形变化、岩块丰度等. 因此, 对月壤被动微波辐射机理的研究仍有很多工作要做, 这对基于CELMS数据的月壤参数反演来说是必需的. 同时, FTA随月壤深度的变化将是未来月壤研究的新的内容之一.

致谢　本研究基于Clementine UV-VIS数据得到的月壤FeO和TiO_2含量是在南京大学吴昀昭副教授帮助下完成的, 所使用的月表亮温数据由中国科学院国家天文台郑永春研究员提供. 在此表示感谢.

参考文献

法文哲, 金亚秋. 2007. 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, 27: 55–65
封剑青, 苏彦, 刘建军, 郑磊, 谭旭, 戴舜, 李俊铎, 邢树果. 2013. 嫦娥二号卫星微波探测仪数据定标和处理结果. 地球科学——中国地质大学学报, 38: 898–906
姜景山, 王振占, 李芸. 2008. 嫦娥1号卫星微波探月技术机理和应用研究. 中国工程科学, 10: 16–22
金亚秋, 颜锋华, 梁子长. 2003. 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, 18: 477–486
李芸, 王振占, 姜景山. 2009. 月表温度剖面对于"嫦娥一号"卫星微波探测仪探测亮温影响的模拟研究. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1045–1058
孟治国, 平劲松, 徐懿, 陈圣波, 陈思. 2014. 厚度对月壤微波辐射的影响. 地理研究, 33: 1–8
王振占, 李芸, 姜景山, 李涤徽. 2009. 用"嫦娥一号"卫星微波探测仪亮温反演月壤厚度和^{3}He资源量评估的方法及初步结果分析. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1069–1084
张卫国, 姜景山, 刘和光, 张晓辉, 张德海, 李涤徽, 胥传东. 2009. 月球南极的微波辐射分布与异常. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1059–1068
郑永春. 2005. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究. 博士论文. 北京: 中国科学院研究生院
Christian W, Alexey B, Richard E. 2011. Estimation of elemental abundances of the lunar regolith using Clementine UVVIS+NIR data. Planet Space Sci, 59: 92–110
Fa W Z, Wieczorek M A. 2012. Regolith thickness over the lunar nearside: Results from Earth-based 70-cm Arecibo radar observations. Icarus, 218: 772–787
Feldman W C, Gasnault O, Maurice S, Lawrence D J, Elphic R C, Lucey P G, Binder A B. 2002. Global distribution of lunar composition: New results from Lunar Prospector. J Geophys Res, 107, doi: 10.1029/2001JE001506
Gillis J J, Jolliff B L, Elphic R C. 2003. A revised algorithm for calculating TiO_2 from Clementine UVVIS data: A synthesis of rock, soil, and remotely sensed TiO_2 concentrations. J Geophys Res, 108: 5009, doi: 10.1029/2001JE001515
Hagfors T, Johnson R G, Power R A. 1971. Simultaneous observation of proton precipitation and auroral radar echoes. J Geophys Res, 76: 6093, doi: 10.1029/JA076i025p06093
Heiken G H, Vaniman D T, French B M. 1991. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press
Jin Y Q, Fa W Z. 2011. The modelling analysis of microwave emission from stratified media of nonuniform lunar crater terrain surface for Chinese Chang'E-1 observation. Chin Sci Bull, 56: 1165–1171
Keihm S J. 1984. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. Icarus, 60: 568–589
Keihm S J, Langseth M G. 1975. Microwave emission spectrum of the Moon: Mean global heat flow and average depth of the regolith. Science, 187: 64–66
Korokhin V V, Kaydash V G, Shkuratov Y G, Stankevich D G, Mall U. 2008. Prognosis of TiO_2 abundance in lunar soil using a non-linear analysis of Clementine and LSCC data. Planet Space Sci, 56: 1063–1078
Krotikov V D, Troitsky V S. 1964. Radio emission and nature of the Moon. Sov Phys Usp, 6: 841–871
Li X Y, Wang S J, Cheng A Y. 2007. A review of lunar surface temperature model. Adv Earth Sci, 22: 480–485
Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. J Geophys Res, 105: 20297–20305
Meng Z G, Xu Y, Zheng Y C, Zhu Y C, Jia Y, Chen S B. 2014a. Inversion of lunar regolith layer thickness with CELMS data using BPNN method. Planet Space Sci, 101, doi: 10.1016/j.pss.2014.05.020
Meng Z G, Xu Y, Cai Z Z, Chen S B, Lian Y, Huang H. 2014b. Influence of lunar topography on simulated surface temperature. Adv Space Res, doi: 10.1016/j.asr.2014.05.015
Pieters C M, Head J W, Isaacson P, Petro N, Runyon C, Ohtake M, Foing B, Grande M. 2008. Lunar international science coordination/calibration targets (L-ISCT). Adv Space Res, 42: 248–258
Prettyman T H, Hagerty J J, Elphic R C, Feldman W C, Lawrence D J, McKinney G W, Vaniman D T. 2006. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector. J Geophys Res, 111: E12007, doi: 10.1029/2005JE002656
Racca G D. 1995. Moon surface thermal characteristics for Moon orbiting spacecraft thermal analysis. Planet Space Sci, 43: 835–842
Shkuratov Y G, Bondarenko N V. 2001. Regolith layer thickness mapping of the moon by radar and optical data. Icarus, 149: 329–338
Troitskii V S, Tikhonova T V. 1970. Thermal radiation from the moon and the physical properties of the upper lunar layer. Radiophys Quantum Electron, 13: 981–1010
Ulaby F T, Moore R K, Fung A. 1981. Microwave Remote Sensing. Reading, MA: Addison-Wesley-Longman
Vijayan S, Mohan S, Murty S V S. 2015. Simulated lunar brightness temperature in land and S-band and regolith thickness estimation using an index-based approach. 45th Lunar Planetary Science Conference. 1627
Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, Zou Y L, Zhang F, Ouyang Z Y. 2012. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: The role of local time in global imaging. Icarus, 219: 194–210