“嫦娥一号”和“嫦娥二号”微波辐射观测对月温度分布廓线的月壤层介电特性的反演

宫晓蕙, 金亚秋*

复旦大学电磁信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

* 联系人, E-mail: yqjin@fudan.edu.cn

2013-05-08 收稿, 2013-07-12 接受

国家自然科学基金(41071219)资助

摘要 选取 Apollo 15 登陆点附近月海地区与赤道月陆地区, 由一维热扩散方程, 并由 Diviner 红外观测数据验证, 确定这些地区在各月球时刻的月壤层物理温度廓线. 通过 CE-1 与 CE-2 四通道微波辐射计观测的辐射亮度温度数据, 由辐射传输数值模拟, 用最小二乘法反演各通道月壤层热发射率和介质层吸收系数, 由此反演月壤层的微波有效复介电常数, 并得到全天时各通道微波热辐射的变化, 及其与 CE-1, CE-2 观测数据的比较与验证.

关键词

嫦娥一号
嫦娥二号
微波与红外热辐射
月壤
模拟与反演
介电常数

月表面物质——月壤层一直是探月计划研究的主要对象, 它体现了月球地质演化的丰富历史成果, 对于月球资源勘探或者寻找月球水冰等都具有十分关键的意义. 对月壤层研究中, 需要确定的基本物理参数是月壤介质的介电常数.

在已有的月壤介电常数的研究中, 主要是由地基望远镜或者星载相机观测月球表面的光学反照率, 结合 Apollo 计划携返的实际样品, 按月表面不同波段的光学反射率来确定月壤的成分及其介电常数. 美国的克莱门汀号(Clementine)卫星曾搭载紫外-可见光波段的 CCD 相机, 获得全月表面紫外-可见光 5 个波段的光学发射率. Shkuratov 等人^[1]建立了一种分光反照率几何模型, 将月壤层的 FeO 与 TiO₂ 含量与其可见光谱对应, 通过统计的介电常数经验公式, 估算月壤物质介电常数. Lucey 等人^[2-4]通过定义一种角度参数来消除月壤成熟程度不同对月表面光学反射率的影响, 提出用 415, 750, 950 nm 波长的光学反射率来计算 FeO 和 TiO₂ 的含量. 但是, 这些方法都可能存在光学反照率数据精确定标问题. 若有其他

影响光学反照率的因素, 单凭 FeO 和 TiO₂ 的含量是不准确的. 特别是, 全月球表面的介电常数无法用 Apollo 有限的样品及其经验公式来确定.

2009 年美国月球侦察轨道器(LRO, lunar reconnaissance orbiter)搭载了 9 通道的红外探测仪预言者(Diviner), 测量月表面红外(IR, infrared)热辐射. 由于红外波穿透深度很小, 测量得到的 IR 热辐射温度只是月表面物理温度^[5]. Langseth 等人^[6]通过对 Apollo 15 地区热流实验的研究, 推算出月表面月壤层物理温度廓线的分布.

中国于 2007 年 10 月 24 日成功发射了第一颗绕月卫星(200 km 轨道高度)“嫦娥一号”(CE-1). 作为“嫦娥一号”的备份星, 在 100 km 轨道高度的“嫦娥二号”(CE-2)于 2010 年 10 月 1 日成功升空. “嫦娥一号”和“嫦娥二号”在世界上首次搭载了四通道微波(MW, microwave)辐射计, 测量整个月球表面(正面与背面)的微波热辐射^[7]. 该微波辐射计有 4 个工作频率: 3.0, 7.8, 19.35, 37.0 GHz, 观察角度为 0°, 月表面空间分辨率 30~50 km, 热辐射测量精度为 0.5 K^[8]. MW 辐

引用格式: 宫晓蕙, 金亚秋. “嫦娥一号”和“嫦娥二号”微波辐射观测对月温度分布廓线的月壤层介电特性的反演. 科学通报, 2013, 58: 3798–3805

Gong X H, Jin Y Q. Inversion of dielectric properties of the lunar regolith media with temperature profiles using Chinese Chang'E-1 and Chang'E-2 MW observations (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 3798–3805, doi: 10.1360/972013-540

射观测不需要光照,特别是它能穿透月壤层的一定深度,反映月壤层的物理构造信息.

对于 CE-1 和 CE-2 测量数据的验证和应用已有不少研究^[8-14]. 本文通过 CE-1 和 CE-2 测量的全月球微波辐射亮度温度(T_b , brightness temperature),选取 Apollo 15 登陆点附近月海地区与赤道月陆地区,结合由 Diviner IR 对月表面温度观测数据验证的热扩散方程数值解,得到各月球时刻的月壤层物理温度分布廓线数值结果. 在非均匀物理温度分布廓线介质微波热辐射传输方程数值模拟的基础上,由最小二乘法反演月表面热发射率和介质层吸收系数,求解得到全月球月壤层各 MW 通道热辐射的有效复介电常数,以及各通道微波穿透深度.

1 月壤物理温度廓线与 Diviner IR 数据的匹配

月球没有大气层的保护,白天月表面直接接受太阳光照,表面温度剧增;而在夜晚月表层物理温度主要受到月壤自身内部热流及其颗粒间固体热传导的支配. 在整个月球表层演化过程中,月壤层形成随深度变化的体密度为 $\rho(z)$ 的颗粒性组合物质,其物理温度呈现昼夜变化的非均一的温度廓线分布 $T(z)$.

Mitchell 等人^[15,16]曾采用月壤的两层模型,即由 2 cm 厚的月尘层与相对密实且热传导性好的月壤层组成. Keihm^[17]分析了 Apollo 15 登陆地区的热流实验,提出月壤两层模型,其中月尘层 2 cm 内的体积密度为 1.25 g/cm³,在 2 cm 以下的月壤密度逐渐增大至 1.9 g/cm³,写为

$$\rho(z) = 1.25, |z| \leq 2 \text{ cm}, \quad (1)$$

$$\rho(z) = 1.25 + 0.65 \times [1 - e^{-(|z|-2)/4}], |z| > 2 \text{ cm}. \quad (2)$$

由于月壤层颗粒的固体能量导热以及热辐射,在忽略地球等背景辐射条件下,考虑沿月壤深度 z 方向的一维热扩散,以及热特性参数随月壤深度及温度的变化,得到一维热扩散方程

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K(z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho(z) C(T) \frac{\partial T}{\partial t} + J(z), \quad (3)$$

其中 $K(z, T)$ 表示深度 z 处物理温度为 T 时的热导率, $C(T)$ 表示比热容, t 为时间. $J(z)$ 表示月球内部热流产生的影响,数值约 0.02 W/m²,一般予以忽略不计.

考虑月壤单位深度内的固体导热和热辐射,月壤层内能量的增加或减少应满足能量守恒定律;再

由平衡深度处的物理温度不再变化的边界条件,利用时域有限差分方法求解得到各个月球时间下,月壤物理温度随深度的变化 $T(z)$.

在 Apollo 计划中,只有 Apollo 15 和 17 在登陆点附近进行了月壤的热流实验^[6]. 按 Keihm^[17]对 Apollo 15 月海地区热流实验的分析,及其一维热扩散方程中参数取值,求解一维热扩散方程,得到昼夜不同时刻的月壤层物理温度廓线 $T(z)$ ^[15-17],其月表面($z=0$)的物理温度 $T(0)$ 与 Diviner 对应观测的 IR 数据匹配,如图 1 实线所示. 图 1 中离散点是 Apollo 15 地区 Diviner 第 7 通道的 IR 观测结果,视为月表面的物理温度. 可见,月表面温度昼夜变化很大;而在深处的物理温度 $T(z>2 \text{ m})$ 已不再变化,如图 1 中点划线所示.

2 CE-1 与 CE-2 MW T_b 数据

由 CE-1 在 2008 年 11 月至 2009 年 2 月、2009 年 5 至 7 月间的约 1307 轨的 MW T_b 测量数据,以及 CE-2 在 2010 年 10 月至 2011 年 2 月间的 1468 轨 MW T_b 观测数据,以 Apollo 15 登陆点(26.4°N, 3.65°E)为中心,在经纬度为 1°×1°的范围内选取数据,提取 MW T_b ,并确定观测时所处月球的当地时间^[18],给出 Apollo 15 地区 CE-1 与 CE-2 MW T_b 数据随时间的变化,如图 2 所示. 可以看到,CE-2 与 CE-1 在高频 37.0 与 19.35 GHz 通道的 T_b 观测结果基本一致;由于在 3.0 GHz 通道 CE-2 观测有 15°偏差,校正后两者 T_b 值也相当接近. 但是,CE-2 观测的 7.8 GHz 通道的 T_b 比 CE-1 观测的约低 20 K. 在下面的研究中,我们主要参考 3.0, 19.35, 37.0 GHz 通道的 CE-1 与 CE-2 T_b

图 1 Apollo 15 地区 Diviner IR 观测值与模拟的月表面物理温度昼夜变化

图 2 Apollo 15 地区 CE-1 与 CE-2 MW T_b 观测结果随当地时间变化

观测值的反演结果.

将月表面物质看成半空间 ($z \in [0, \infty]$) 且温度分布、体密度分布分别为 $T(z)$ 和 $\rho(z)$ 的耗散介质. 该 $T(z)$ 是由一维热扩散方程求解得到, 其月表面物理温度 $T(0)$ 与 Diviner 对应观测的 IR 数据匹配; 体密度分布 $\rho(z)$ 采用(1)和(2)式. 由 MW 辐射传输 WKB 解^[19], 观测角 0° 的频率通道的辐射亮度温度写为

$$T_{bv} = (1 - r_v) \int_0^\infty \rho(z) \kappa_v(z) T(z) e^{-\int_0^z \rho(z') \kappa_v(z') dz'} dz, \quad (4)$$

其中 r_v 为月表面的反射系数, $(1 - r_v)$ 即为月表面热发射率; $\kappa_v(z)$ 为月壤层的吸收系数, 主要为介电常数虚部支配. WKB 解忽略非均匀月壤层内部层间的反射. 由于式(4)积分中衰减因子已纳入 $\rho(z)$ 的影响, κ_v 作为常数处理.

由一维热扩散方程求解 $T(z)$, 其月表面物理温度 $T(z=0)$ 由 Diviner 对应时刻观测的 IR 数据验证, 得到 CE-1 观测到的 Apollo 15 地区在各月球时刻月壤温度廓线, 如图 3 所示. 可以看到, 白天与夜晚月壤物理温度廓线是有不同递减与递增的表现. 而在深处 30 cm 处已无变化, 达到了热平衡.

3 Apollo 15 登陆地 MW T_b 对月壤层有效介电常数的反演

式(4)中未知量是 r_v 与 κ_v . 选取 CE 某一观测时刻的各通道(v)的 T_b , 由一维热扩散方程数值解中匹配到最近邻该时刻的物理温度廓线 $T(z)$, 在一定的范围里试验给 r_v ($0.01 \sim 0.2$) 与 κ_v/f ($0.8 \times 10^{-10} \sim 3.0 \times 10^{-10}$) 迭代取值, 计算式(4)各通道(v)的 T_b 为试验值 $\tilde{T}_b$. 由最

图 3 Apollo 15 地区不同月球时刻的月壤物理温度廓线

小二乘法, 使得 4 个通道(v : 3, 7, 19, 37 GHz)的试验值 $\tilde{T}_b$ 与观测值 T_b 的差异总和极小, 得到各通道的 r_v 与 κ_v , 即

$$\Delta = \min \sum_v \sqrt{(T_b - \tilde{T}_b)^2}. \quad (5)$$

一旦得到 r_v , 由 0° 观测角的反射率 $r_v = |(1 - \sqrt{\epsilon'}) / (1 + \sqrt{\epsilon'})|^2$ 得到月壤有效介电常数实部 ϵ'_v ^[14]. 再用 κ_v 与 ϵ'_v , 得到有效介电常数虚部 $\epsilon''_v = \kappa_v \bar{\rho} c \sqrt{\epsilon'_v} / (2\pi f)$ ^[20], 这里用“有效的”, 是指具有非均匀密度廓线 $\rho(z)$ 的月壤对不同频率有不同的穿透深度, 表现为不同通道的 T_b 观测的是不同的介质. 采用式(1)的 $\bar{\rho} = 1.25$ 得到极小值 ϵ''_v . 按穿透深度 d 的定义 $e^{-k''d} \equiv e^{-1}$, $k'' = \kappa_v \bar{\rho} / 2$ 是月壤介质中传播波数的虚部. 这样得到穿透深度极大值 $d_{\max} = 2 / (\kappa_v \bar{\rho})$. 若取式(2)的 $\bar{\rho} = 1.9$, 则得到穿透深度极小值 $d_{\min} = (1.25 / 1.9) d_{\max}$. 表 1 和 2 分别给出 Apollo 15 地区 CE-1 与 CE-2 MW T_b 数据反演得到的各通道的最佳匹配参数值 r_v , κ_v , 对应的 ϵ'_v , 损耗正切 $\tan \delta / \rho (\equiv \epsilon'' / (\epsilon' \rho))$ 及其穿透深度 $d_{\max}$, $d_{\min}$.

可以看到, 反射率 r_v 随波长增大而略有增加, κ_v/f 值较稳定, 而吸收系数 κ_v 随波长增大而减小, 3.0 GHz 在该地区的穿透深度不足 1 m. 由 CE-2 反演得到的 κ_v/f 与 r_v 比 CE-1 的稍大, 但总体较为接近. 7.8 GHz 通道由于定标问题, 两次反演结果差异较大.

将月球全天各个时间的物理温度廓线 $T(z)$ 以及上述反演得到的 r_v 与 κ_v 代入式(4), 计算得到月球表面微波辐射亮度温度全天的变化. 图 4 分别给出计算的 Apollo 15 地区全天 MW 各通道 T_b (曲线) 和 CE-1, CE-2 对应的观测值 (离散点). 可以看到, 由最小二乘

表 1 CE-1 观测值 T_b 反演的 Apollo 15 地区的各通道 r_v 与 κ_v 等参数

通道(GHz)	$\lambda(\text{cm})$	r_v	$\kappa_v/f (\text{m g cm}^{-3} \text{ Hz})^{-1}$	$\kappa_v (\text{m g cm}^{-3})^{-1}$	$d_{\max} (\text{cm})$	$d_{\min} (\text{cm})$	ε'_v	$\tan \delta/\rho$
37	0.8108	0.0300	1.2×10^{-10}	4.4400	36.04	23.71	2.012	0.0041
19	1.5504	0.0500	1.1×10^{-10}	2.1285	75.17	49.46	2.482	0.0034
7	3.8462	0.0425	1.6×10^{-10}	1.2480	128.21	84.36	2.307	0.0050
3	10.000	0.1345	2.3×10^{-10}	0.6900	231.88	152.58	4.656	0.0051

表 2 CE-2 观测值 T_b 反演得到的 Apollo 15 地区各通道 r_v 与 κ_v 等参数

通道(GHz)	$\lambda(\text{cm})$	r_v	$\kappa_v/f (\text{m g cm}^{-3} \text{ Hz})^{-1}$	$\kappa_v (\text{m g cm}^{-3})^{-1}$	$d_{\max} (\text{cm})$	$d_{\min} (\text{cm})$	ε'_v	$\tan \delta/\rho$
37	0.8108	0.0650	1.6×10^{-10}	5.9200	27.03	17.78	2.835	0.0045
19	1.5504	0.0600	1.4×10^{-10}	2.7090	59.06	38.86	2.717	0.0041
7	3.8462	0.1100	2.15×10^{-10}	1.6770	95.41	62.78	3.968	0.0052
3	10.000	0.1350	2.6×10^{-10}	0.7800	205.13	134.98	4.670	0.0057

图 4 Apollo 15 地区全天候 MW 各通道 T_b 和 CE-1 (a), CE-2 (b) 观测值的比较

法反演参数而计算的 T_b 分别与 CE-1, CE-2 观测值吻合的很好。

图 5 给出由 CE-1 与 CE-2 MW 各通道 T_b 数据反演的 ε'_v 与 $\tan \delta$. 从图上可以看出反演的 ε'_v 与频率有关, 是一种有效介电常数, 受不同频率的穿透深度影响, 即不同的通道看到了不同深度的月壤层. 由于非均匀的 $\rho(z)$ 与 $T(z)$, 看得深的低频通道(如 3.0 GHz)的有效介电常数最大. 而反演得到的各通道的损耗正切则相当接近.

据月尘-月壤的两层模型, 不妨设月尘层(厚度 d_1)介电常数为 ε_{10} , 月壤层介电常数为 $\varepsilon(z)$, 写为

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_{10} + (\varepsilon_{20} - \varepsilon_{10})(1 - e^{-\alpha(z-d_1)}), \quad z > d_1, \quad (6)$$

其中 ε_{20} 为 $z \rightarrow \infty$ 月壤层深处的介电常数, α 为参数变化因子. 则传播至深度 Z 的波传播指数因子写为

$$k_{\text{eff}}Z = k_0\sqrt{\varepsilon_{10}}d_1 + k_0\int_{d_1}^Z\sqrt{\varepsilon_{10} + (\varepsilon_{20} - \varepsilon_{10})(1 - e^{-\alpha(z-d_1)})}dz. \quad (7)$$

近似推导得到

$$\begin{aligned} \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} &\sim \sqrt{\varepsilon_{10}} \frac{d_1}{Z} \\ &+ \sqrt{\varepsilon_{10}} \left[\left(1 - \frac{d_1}{Z} \right) \frac{\varepsilon_{20} + \varepsilon_{10}}{2\varepsilon_{10}} + \frac{\varepsilon_{20} - \varepsilon_{10}}{2\varepsilon_{10}\alpha Z} (e^{-\alpha(Z-d_1)} - 1) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

由上式可看出, 当 $Z \sim d_1$, 即高频通道穿透深度很小时, $\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} \sim \sqrt{\varepsilon_{10}}$, 辐射计只能看到月表面层; 而当 $Z \gg d_1$, 即低频通道穿透深度很大时, $\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} \propto \sqrt{\varepsilon_{20}}$. 这样就解释了由 T_b 反演的 $\varepsilon_{\text{eff}} (\equiv \varepsilon'_v + i\varepsilon''_v)$ 与各通道有关.

4 赤道月陆地区 MW T_b 对月壤层介电常数的反演

由于赤道月陆地区主要影响介电常数的 FeO 与 TiO₂ 含量相近, 同一时刻全月球表面的物理温度分布主要与纬度有关, 因此赤道月陆地区看作同一地区来讨论. Vasavada 等人^[21]曾讨论月球赤道地区月

图 5 CE 数据反演的 Apollo 15 地区的介电常数
(a) 有效介电常数实部; (b) 损耗角正切

壤热特性模型, 其月表面物理温度与 Diviner IR 观测结果相匹配. 因此, 按上节所述方法, 首先根据文献[21]中月壤密度廓线 $\rho(z)$ 确定各热特性参数, 由一维热扩散方程求解各月球时刻的月壤温度廓线 $T(z)$, 其 $T(0)$ 与 Diviner IR 观测结果一致; 再由辐射传输式 (4)和最小二乘法反演各通道 r_v 与 κ_v , 最终求解得到月球赤道月陆地区的 ε'_v 与 $\tan \delta$.

由于赤道月陆地区 CE-1 与 CE-2 观测数据量特别大, 图 6 以每 15 min 为间隔对 MW T_b 数据进行平均后得到的结果.

同样地, 表 3 和 4 分别给出 CE-1 与 CE-2 数据反演赤道月陆地区反演得到的各通道最佳匹配参数值 r_v , κ_v , ε'_v , $\tan \delta$ 及其 $d_{\max}$, $d_{\min}$.

对比表 1 与 2, 赤道月陆地区 3.0 GHz 通道的穿透深度是 Apollo 15 月海地区的近 3 倍, 这是由于月陆 FeO 与 TiO_2 含量比较低, 月陆地区具有较低的损耗正切.

将各个时间的物理温度廓线 $T(z)$ 以及上述反演得到的 r_v 与 κ_v 代入式(3), 图 7 分别给出计算的赤道月陆地区全天时间 MW 各通道 T_b (曲线)和 CE-1, CE-2 对应的观测值(离散点). 可以看到, 两者吻合得很好.

选择赤道月陆地区的范围为纬度 $\pm 0.5^\circ$ 的条带, 经度范围为 $(-180^\circ, -75^\circ)$ 以及 $(100^\circ, 180^\circ)$. 由图 7 可以预测赤道月陆地区没有观测数据的 T_{bv} 分布. 可以看到, 高频通道的 T_{bv} 一天中变化剧烈, 而低频通道(如 3.0 GHz) T_b 昼夜变化较小.

反演赤道月陆地区各通道的有效介电常数, 如图 8 所示. 对比图 5, 赤道月陆地区各通道的有效介电常

图 6 CE-1 与 CE-2 微波辐射计对赤道月陆地区的各时间观测结果

表 3 按赤道月陆地区 CE-1 数据反演的各通道 r_v 与 κ_v 等参数

通道(GHz)	$\lambda(\text{cm})$	r_v	$\kappa_v/f (\text{m g cm}^{-3} \text{ Hz})^{-1}$	$\kappa_v (\text{m g cm}^{-3})^{-1}$	$d_{\max} (\text{cm})$	$d_{\min} (\text{cm})$	ε'_v	$\tan \delta/\rho$
37	0.8108	0.0450	1.2×10^{-10}	4.4400	34.65	23.71	2.365	0.0039
19	1.5504	0.0650	1.1×10^{-10}	2.1285	72.28	49.45	2.835	0.0032
7	3.8462	0.0550	0.6×10^{-10}	0.4680	328.73	224.92	2.599	0.0018
3	10.000	0.0600	0.85×10^{-10}	0.2550	603.32	412.80	2.717	0.0024

表 4 按赤道月陆地区 CE-2 数据反演的各通道 r_v 与 κ_v 等参数

通道(GHz)	$\lambda(\text{cm})$	r_v	$\kappa_v/f(\text{m g cm}^{-3} \text{ Hz})^{-1}$	$\kappa_v(\text{m g cm}^{-3})^{-1}$	$d_{\max}(\text{cm})$	$d_{\min}(\text{cm})$	ε'_v	$\tan\delta/\rho$
37	0.8108	0.0650	1.35×10^{-10}	4.9950	30.80	21.07	2.835	0.0038
19	1.5504	0.0700	1.05×10^{-10}	2.0310	75.75	51.83	2.955	0.0029
7	3.8462	0.1200	1.00×10^{-10}	0.7800	197.24	134.95	4.241	0.0023
3	10.000	0.0710	0.90×10^{-10}	0.2700	569.80	389.86	2.979	0.0025

图 7 赤道月陆地区各通道 T_b 模拟值与 CE-1 (a), CE-2 (b) 观测值的比较

图 8 由 CE 微波辐射计数据反演的赤道月陆地区的介电常数

(a) 有效介电常数实部; (b) 损耗角正切

数要比 Apollo 15 月海地区小一些, 这是由于赤道月陆地区 FeO 与 TiO_2 含量较低, 其对电磁波的衰减较弱, 电磁波穿透深度在这些地区较大. 这也使得赤道月陆地区 MW 热辐射要高一些, 而且深处月壤的贡献大一些.

5 结论

选取 Apollo 15 登陆点月海区 and 赤道月陆地区, 基于 Diviner IR 辐射观测月表面物理温度的数据验证, 由一维热扩散方程, 得到了该地区两层模型不同昼

夜时刻月壤物理温度廓线.

收集不同昼夜时刻 CE-1, CE-2 MW 辐射计观测的各通道辐射亮度温度数据, 由 MW 辐射传输解和最小二乘法, 反演月壤表面反射率与月壤吸收系数, 由此推算月壤有效介电常数.

以不同昼夜时刻月壤物理温度廓线以及月表反射率和吸收系数为 MW 辐射传输的物理参数, 得到微波辐射亮度温度一天中的变化情况, 与 CE-1, CE-2 作 MW 数据验证. 对于一些没有微波辐射计观测数据的月球时刻, 是一个很好的补充.

具密度与温度分布廓线分布的月壤层对 MW 热辐射的贡献与各通道的月壤层有效介电常数有关,对月海、月陆地区介电常数的反演结果与其区域中

FeO 与 TiO₂ 含量变化是一致的,如赤道月陆地区 FeO 与 TiO₂ 含量较少,辐射穿透能力强一些,月壤深处对热辐射的贡献要大一些,反之亦然.

致谢 中国科学院空间科学与应用中心王振占研究员提供了 CE-2 数据,对此帮助谨致谢意.

参考文献

- 1 Shkuratov Y G, Kaydash V G, Opanasenko N V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on the lunar nearside. *Icarus*, 1999, 137: 222–234
- 2 Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3679–3699
- 3 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: 20297–20305
- 4 Lucey P G, Taylor G J, Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon. *Science*, 1995, 268: 1855–1858
- 5 Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter Diviner lunar radiometer experiment. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 125–160
- 6 Langseth M G, Keihm S J, Peters K. Revised lunar heat-flow values. In: *Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference*, 1976 Mar 15–19, Houston. New York: Pergamon Press, 1976. 3143–3171
- 7 Jiang J S, Jin Y Q. *Selected Papers on Microwave Lunar Exploration in Chinese Chang'E-1 Project*. Beijing: Science Press, 2011
- 8 Fa W, Jin Y Q. A primary analysis of microwave brightness temperature of lunar surface and Chang-E 1 multi-channel radiometer observation and inversion of regolith layer thickness. *Icarus*, 2010, 207: 605–615
- 9 宫晓蕙, 金亚秋. “嫦娥一号”微波辐射计观测月球虹湾地区表面物理温度昼夜时间分布. *科学通报*, 2011, 56: 1877–1886
- 10 法文哲, 金亚秋. “嫦娥一号”多通道微波辐射计测量估算全月球月壤层氦 3 含量. *科学通报*, 2010, 55: 3097–3101
- 11 金亚秋, 法文哲. “嫦娥一号”对环形山起伏非均匀月表层微波辐射观测的理论建模分析. *科学通报*, 2010, 55: 2040–2046
- 12 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪数据 TiO₂ 反演初步结果. *科学通报*, 2011, 56: 1257–1263
- 13 周增坡, 程维明, 周成虎, 等. 基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取. *科学通报*, 2011, 56: 18–26
- 14 李金岭, 刘鹏, 郑为民, 等. 定位归算在嫦娥二号任务实时阶段的应用. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41: 889–895
- 15 Mitchell D L, Pater I D. Microwave imaging of Mercury's thermal emission at wavelengths from 0.3 to 20.5 cm. *Icarus*, 1994, 110: 2–32
- 16 Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*, 1999, 141: 179–193
- 17 Keihm S J. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. *Icarus*, 1984, 60: 568–589
- 18 Gong X, Jin Y Q. Diurnal physical temperature at Sinus Iridum area retrieved from observations of Chinese Chang'E-1 microwave radiometer. *Icarus*, 2012, 218: 807–816
- 19 Jin Y Q. *Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing*. Singapore: World Scientific, 1994
- 20 Cuzzi J N, Muhleman D O. The microwave spectrum and nature of the subsurface of Mars. *Icarus*, 1972, 17: 548–560
- 21 Vasavada A R, Bandfield J L, Greenhagen B T, et al. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res*, 2012, 117: E00H18

Inversion of dielectric properties of the Lunar regolith media with temperature profiles using Chinese Chang'E-1 and Chang'E-2 MW observations

GONG XiaoHui & JIN YaQiu

Key Laboratory of EMW Information, Fudan University, Shanghai 200433, China

Numerical temperature profile with day-night variation of lunar maria at Apollo 15 site and highlands around the equator region are derived from the one-dimensional thermal diffusion equation, and the surface temperatures are validated by the Diviner infrared observations. Based on the microwave radiative transfer model, and using the least mean square method, the surface reflectivity and absorption coefficient through the media are inverted from CE-1 and CE-2 multi-channel microwave brightness temperatures. And then, the effective complex dielectric constant, including the real and imaginary parts, of the lunar regolith can be determined. Comparisons between observations from CE-1 and CE-2 microwave radiometers and the simulated brightness temperatures from best-fit parameters are discussed.

Chinese Chang'E-1, Chinese Chang'E-2, microwave and infrared radiation, regolith, simulation and inversion, dielectric constant

doi: 10.1360/972013-540

· 动 态 ·

《科学通报》2012 年度系列优秀评选揭晓

为了感谢和表彰对《科学通报》发展做出突出贡献的专家,推动期刊良性发展,从 2013 年起,《科学通报》开展上一年度“优秀编委”、“优秀审稿人”和“最具贡献作者”、“优秀作者”等系列评选活动。经编辑部及编委会提名推荐、主编审定,2012 年度评选结果揭晓,近 60 位专家入选,详细名单已在期刊网站公布(csb.scichina.com)。所有获奖者都将获得荣誉证书和奖金。

(一) “优秀编委”和“优秀审稿人”

此次“优秀编委”奖项评选出了陈景文等 20 位对《科学通报》发展给予大力支持的编委,他们为期刊 2012 年度的选题组稿、审稿把关等工作做出了重要贡献,促进了期刊影响力的提升。

“优秀审稿人”奖项授予艾华等 20 位在 2012 年度为《科学通报》的审稿工作做出重要贡献的专家。他们不仅审理了较多的稿件,而且提供了快速及时、客观公正、严谨翔实的审稿意见,帮助编委会决定是否录用稿件,启发了作者的研究思路,改进了稿件的质量和可读性,保障了《科学通报》录用稿件的高质量。

(二) “最具贡献作者”和“优秀作者”

经编委会及编辑部遴选提名、主编审定,评选出曹怀信等 10 位对期刊影响力的持续提升做出突出贡献的“最具贡献作者”,蔡青云等 9 位做出重要贡献的“优秀作者”。遴选提名是基于 2010~2011 年该作者团队在《科学通报》发表

文章数量及这些文章的创新性、科学影响力、社会影响力等指标,以定性和定量相结合的方式综合评估而产生的。

(三) “最佳封面”和“优秀封面”

经过网上公开投票,编辑部和编委会最终审定,评选出 2012 年《科学通报》“最佳封面”2 个(中、英文各 1 个)、“优秀封面”4 个(中、英文各 2 个)。《科学通报》自 1998 年起,选取当期重要文章的图片作为素材设计封面。这种封面形式集科学性与艺术性为一体,受到读者的广泛好评,长期以来已经成为《科学通报》的重要特色。《科学通报》编委会和编辑部衷心感谢长期以来为期刊提供优秀稿件和封面素材的作者,并诚挚欢迎广大科研工作者积极为《科学通报》投递优秀稿件,并自荐高质量的封面素材。

《科学通报》作为综合性学术期刊,学科涵盖面广,栏目丰富,载文量大,内容兼顾专业性与普及性、科学性与可读性,注重报道交叉学科和新兴学科,保持品牌特色。2011 年,《科学通报》荣获“第二届中国出版政府奖期刊奖”、2013 年被评为“全国百强科技报刊”,获得“中国科技期刊国际影响力提升计划”A 类项目支持,刊物发展受到各界广泛关注。这些成绩的取得与主办单位、编委会和广大作者、审稿专家的鼎力支持是密不可分的。由于此次评选表彰名额有限,在此,编委会及编辑部对所有长期给予《科学通报》大力支持和帮助的专家学者,表示衷心的感谢!

(本刊讯)