

月球南极的微波辐射分布与异常

张卫国*, 姜景山, 刘和光, 张晓辉, 张德海, 李涤徽, 胥传东

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

* E-mail: wgzhang@nmrs.ac.cn

收稿日期: 2009-04-21; 接受日期: 2009-07-08

国家自然科学基金(批准号: 40601066)和“嫦娥一号”工程微波探测仪项目资助

摘要 对南极的探测是几乎所有月球卫星探测任务的重点目标之一. 其目标意在利用该地
的光照资源和可能存在的冰为今后建立月球基地提供条件. 利用多层微波辐射传输方程模拟
并分析了多种影响因子对月壤微波亮温的影响. 使用“嫦娥一号”微波探测仪(CELMS)所获得
的观测数据研究了月球南极的微波辐射分布规律. 在分析其普遍规律的基础上, 研究了具有
异常微波辐射特征的地区. 月球极地微波亮温呈现规则环状分布, 从赤道向两极递减. 分析认
为, 在赤道月壤内温度梯度较大, 越向两极月壤内的平均温度梯度越小. 随着频率降低, 白天
夜晚的亮温差也逐渐降低. 据此制作了两极月球亮温分布图. 研究发现, 微波亮温的变化在南
纬 85°以后逐渐与高程变化同步. 这一现象与太阳照射月球的角度有关, 并指示了南极月壤温
度的冷热分布. 所提取出的异常冷点分布是永久阴影区的搜索方向, 异常热点则标志着该地
有丰富的热量资源.

关键词

月球
极地
微波辐射
光照
冰
嫦娥一号

对月球南极的研究是近期月球探测和研究的热
点. 自 20 世纪 90 年代起, 几乎所有的月球卫星探测
任务都将极地探测尤其是南极的探测作为重点目标.
究其原因, 有以下几点: (1) 由于日, 地, 月的相互位
置关系, 极地存在永久阴影区和永久照明区. 这形成
了极地丰富的光照资源, 并可能存在以冰形式存在
的水资源. 考虑到运输成本等因素, 任何月球上可便
捷使用的资源都将为人类建立月球基地提供极为珍
贵的便利条件; (2) 从伽利略时代开始到现在, 人们
持续地利用望远镜开展对月球的各种观测, 但这样
的地基观测没有办法看到极地的全部, 这使得月球
极地还有其神秘性, 卫星任务能在某种程度上, 揭开
这层神秘的面纱; (3) 天文学, 月球学中对极地的研
究有助于如月球起源等问题的解答.

中国“嫦娥一号”卫星所搭载的微波辐射计(CELMS)
是一台 4 频率垂直观测的非成像辐射计. 探测目标为:
给出全月微波亮温分布; 给出月壤厚度信息并评估
氦 3 量; 研究极地冰的存在性等^[1]. 自 2007 年 10 月
发射入轨以来, 该仪器运转正常, 并已与“嫦娥一号”
同时圆满完成工程任务.

Clementine 的双站雷达^[2]和 Lunar Prospector 的
氢原子探测仪^[3]都曾提出在月球两极特别是南极可
能有水冰存在. 但反证认为双站雷达的结果具有多
解性^[4], 有超常量的氢原子存在并不代表有 H₂O 存在,
况且 SMART-1 在月表的撞击也没有拿到所期望的有
水冰存在的直接证据. 这些都对利用其他多种遥感
手段继续开展针对性探测与研究提出了需求与挑战.

从原理上说, 水冰与其寄居背景(月壤、月尘或月

岩)介电常数不同, 存在的形态可能不同, 因而, 含水冰与不含水冰的月球物质微波辐射有差别, 用微波辐射计有探测的可能. 但理论计算证明, 这种差别很小, 且需要与温度, 粗糙度等的影响做严格区分. 因此, 从假设冰存在与否计算亮温差别, 并由此与实际观测对比来找冰的思路是较难实现的. 本文从月球南极微波辐射特性的研究入手, 通过分析异常点来确定冰存在的潜在区域.

南极的永照区或多照区有两方面的意义. 一是在该地有可能利用充足的太阳能, 从而减少建立人工基地时对发电的需求; 二是持续稳定的光照使该地的热环境相对平稳. 例如根据模拟, 极地永照区的温度约在(220±10) K, 而月球其他地区则往往有 140 K 的日变化^[5]. 关于月球南极的光照资源, Bussey等^[6]有专门研究; 他们在分析Clementin的全部可见光图像后, 给出了南极约 88°S以内受光照时间的百分比. 并认为这项工作仍有欠缺, 需要更多其他的数据源相互支持. 微波辐射计所测得的亮温受穿透深度(从厘米到数米)以内物理温度的影响, 本文期望利用微波亮温数据更快地确定极地多照区的区域.

影响月球微波辐射亮温的因素包括月壤温度廓线、月壤质地、密度、成分的组成情况、大型地形起伏和粗糙度^[1]. 利用理论模型计算微波辐射亮温的研究可追溯到Troisky^[7], Hagfors^[8], Keihm和Langseth^[9]等对地基射电望远镜观测数据的解释上, 他们认为月球的平均微波亮温在 230 K附近, 月球表层物质为低损耗物质, 介电常数在 1.5~2.5 之间:

$$T_b(\nu) = \left\{ [1 - R(\nu, \theta_{out})] \int T(z) K(\nu) \frac{dz}{\cos \theta_{in}} \cdot \exp[-|z| K(\nu) / \cos \theta_{in}] \right\}, \quad (1)$$

其中, $K(\nu)$ 为频率 ν 时的吸收系数, $T(z)$ 为在深度 z 时的温度, $R(\nu, \theta_{out})$ 为菲涅耳系数. 可以看出, 该类模型将月壤假设成为一个均匀的半空间介质, 且真空与介质表面是平滑的. 利用此模型, Troisky^[7]分析出随着波长增加, 平均亮温也增加. 并由此推导出月球向外的净热通量为 $10^{-6} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 这个值与后来

Apollo宇航员的实测值没有量级上的差别. 这些研究表明, 月球的平均微波辐射亮温决定于月壤的温度廓线和平均介电常数.

CELMS 为在轨观测, 即在距离月球表面 200 km 的极地轨道上对月球连续观测. 对其数据的分析, 需要更为细致的模型. 从微波辐射传输的基本理论出发, 考虑体散射、吸收与损耗等, 月壤内部的辐射传输方程^[2]可写为

$$\begin{aligned} \mu_s \frac{dT_u}{d\tau} = & T_u(\tau, \mu_s) - (1 - \alpha)T(\tau) \\ & - \frac{\alpha}{2} \int_0^1 P_s(\mu_s, \mu) T_u(\tau, \mu) d\mu \\ & - \frac{\alpha}{2} \int_0^1 P_s(\mu_s, -\mu) T_\delta(\tau, \mu) d\mu, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu_s \frac{dT_\delta}{d\tau} = & -T_\delta(\tau, \mu_s) + (1 - \alpha)T(\tau) \\ & + \frac{\alpha}{2} \int_0^1 P_s(-\mu_s, \mu) T_u(\tau, \mu) d\mu \\ & - \frac{\alpha}{2} \int_0^1 P_s(-\mu_s, -\mu) T_\delta(\tau, \mu) d\mu, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, T_u 和 T_δ 是每一层内向上和向下的微波辐射亮温, α 是介质的单次反照率, $P_s(\mu_s, \mu)$ 是散射相矩阵的 0 阶 Fourier 分量, τ 是光学厚度, μ_s, μ 是出射和入射角的余弦值, $T(\tau)$ 是月壤的温度廓线. 在求解过程中, 作为边界条件, 可用粗糙度散射辐射模型来模拟表面和月壤月岩间粗糙度的影响. 对于给定地点, 某一频率的微波亮温决定于温度廓线和月壤厚度, 月壤温度廓线与观测时该地的月球时刻有关.

在该项目的正反演研究中, 将月壤简化为 3 层相邻介质, 通过致密介质的辐射传输理论, 可以得到能够用于反演月壤厚度的辐射模型^[10]. 该模型将月壤内温度廓线的影响概化为 3 层内月壤的平均温度, 从而分离出了月壤厚度的作用. 这样层与层之间的反射, 层内的吸收都与介质本身的介电特性相关, 如月壤内金属含量和密度等.

综上所述, 研究月球微波辐射及其分布的规律,

1) 张卫国, 姜景山. 月球微波辐射的若干影响因素研究. 第一届微波遥感会议, 三亚. 2004

2) Fung A K, Bredow J, Tjuatja S. Microwave emission from lunar regolith. Wave Scattering Lab, Arlington University, TX, USA. Research Report for National Microwave Remote Sensing Lab, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences. 2008

主要是了解月壤内温度和厚度的分布规律, 对特定重点地区则应具体考虑粗糙度, 月壤钛铁含量, 岩石大小, 月壤质地等因素. 作为反问题, 通过观测到的微波辐射亮温, 应能够获得关于月球温度与厚度的信息.

本文着力在南极, 该地温度既是一种热量资源, 在极低的状态下也是蓄积冰的标识. 因此假定在月球南极月壤厚度是相对较均匀或尽管厚度不同, 但不足以影响到各频率的微波辐射特性. 在此基础上, 使用“嫦娥一号” CELMS 所获得的观测数据研究月球南极的微波辐射分布规律. 在分析其普遍规律的基础上, 研究了具有异常微波辐射特征的地区.

1 月球极地的低频微波辐射模拟及影响因素分析

将月壤划分为 9 层含散射粒子的介质, 每一层月壤具有各自的介电常数和物理温度, 层与层之间光滑但月壤与真空界面, 月壤与月岩界面粗糙. 在模拟中, 使用了关于 Apollo 和 Luna 任务中月壤样品的介电常数廓线研究结果, 以此来代表月球表面典型地区的介电常数廓线. 如图 1, 2 所示. 图 1 为不同地点月壤介电常数实部廓线, 图 2 则为对应的虚部廓线. 由于随着深度增加, 月壤密度增加, 其介电常数的实部也增加. 在垂直入射的条件下, 介电常数实部是决定其发射率的主要因素. 月壤介电常数的虚部变化较大, 不同地点其虚部可有量级上的差别. 如 Apollo 11, 12 和 Luna 16 着陆点的月壤介电常数虚部较大, 在 0.01 以上. 其余着陆点的月壤介电常数较小, 在 0.002~0.009 之间. 特别是 Apollo 16 着陆点其介电常数虚部约在 0.002~0.003 之间. 介电常数虚部决定了月壤对微波辐射的损耗. 本文用上述多种介电常数廓线代表月球上可能出现的月壤介电常数的范围. 图 3 显示了模拟中使用的典型的低纬度月壤温度廓线. 其中每一深度对应的温度为该层的月壤平均温度. 图 4 显示了模拟中使用的每层月壤中所含的散射粒子的平均半径和占空比.

首先利用前述模型模拟了月球典型地区白天和夜间的 3 GHz 微波亮温. 图 5(a)和(b)分别表示了白天和夜间在 8 个代表地区获得的模拟微波亮温. 随着月壤厚度增加, 微波亮温逐渐增加. 月壤厚度从 1 m 变

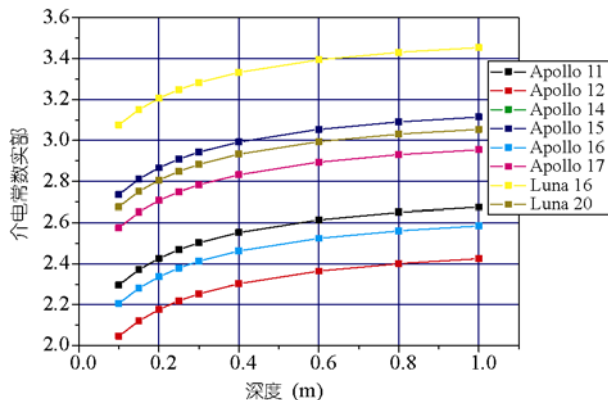


图 1 模拟中使用的不同地点的月壤介电常数实部廓线
不同颜色代表该介电常数廓线是由相应月球任务所取回的样品分析计算得到, 这些月球任务包括: Apollo 11, 12, 14, 15, 16, 17 和 Luna 16, 20

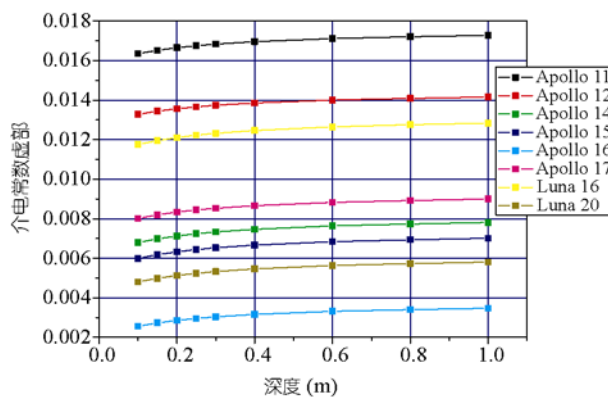


图 2 模拟中使用的不同地点的月壤介电常数虚部廓线
不同颜色代表该介电常数廓线是由相应月球任务所取回的样品分析计算得到, 这些月球任务包括: Apollo 11, 12, 14, 15, 16, 17 和 Luna 16, 20

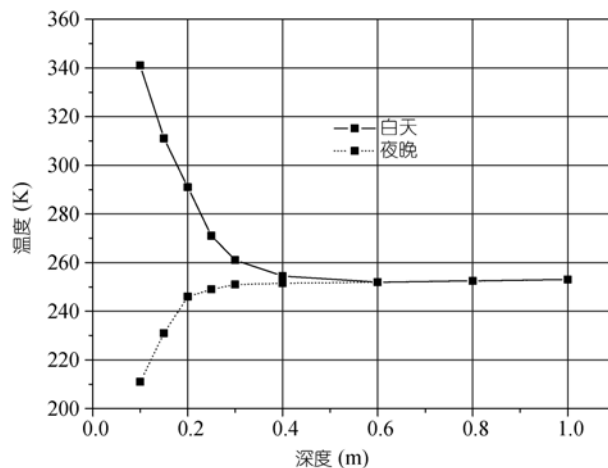


图 3 模拟中使用的低纬度地区典型的月壤温度廓线
每个数据点表示该层的平均温度

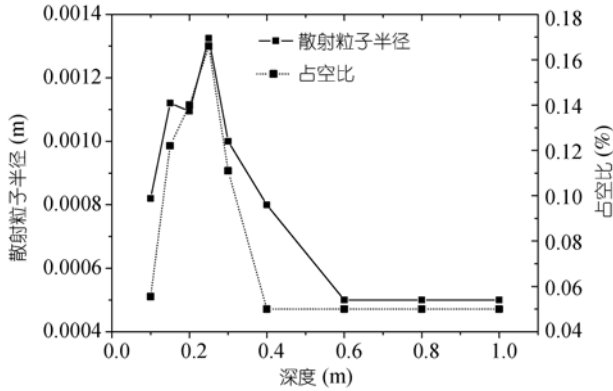


图4 模拟中使用的每层散射粒子的半径和占空比

化到 10 m, 亮温增加 3~6 K. 若月壤处于同一厚度, 则不同地点亮温变化白天在 10~15 K, 夜间在 4~7 K. 实部小, 损耗大的综合效果使得 Apollo 11, 12 点的亮温在白天和夜间都高于其他点. 说明在低纬度地区, 除厚度和温度外, 其他影响因素(主要是介电特性)会造成亮温 4~15 K 的变化. 图 6 表示了从图 5(a)和(b)中得出的微波亮温日较差. 日较差较大的地点对应其损耗大, 受表层温度影响相对较大, 最大可达 15 K. 当介质损耗小, 则微波辐射的贡献主要来自温度稳定层, 即 30 cm 以下. 这时, 亮温日较差最小约 2 K. 说明在低纬度地区由于温度的影响, 可在同一地点

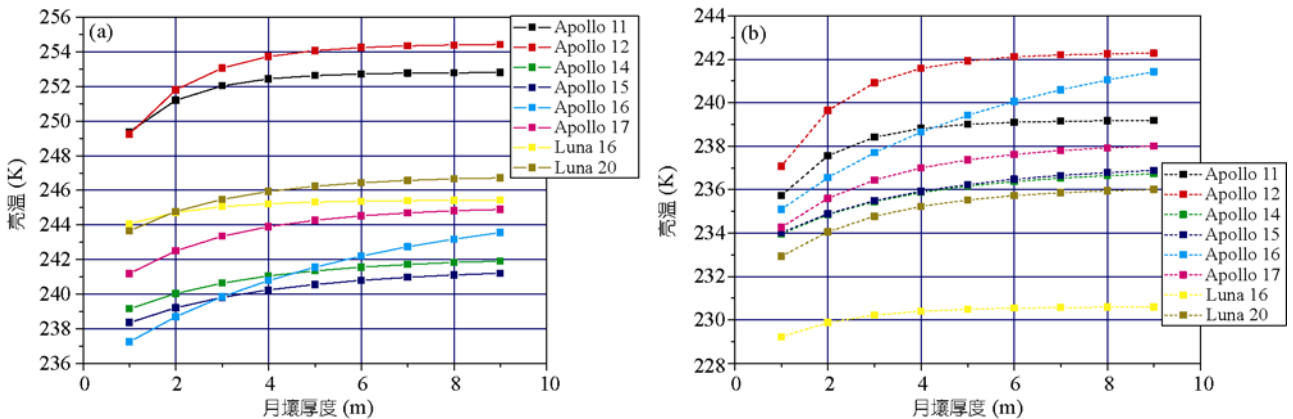


图5 白天和夜间低纬度地区模拟 3 GHz 微波亮温随月壤厚度的变化

模拟中所使用的温度廓线为低纬度地区典型的白天(a)、夜间(b)的温度廓线, 如图 3 所示. 不同颜色的曲线代表所使用的介电常数廓线为相应着陆点的介电常数廓线

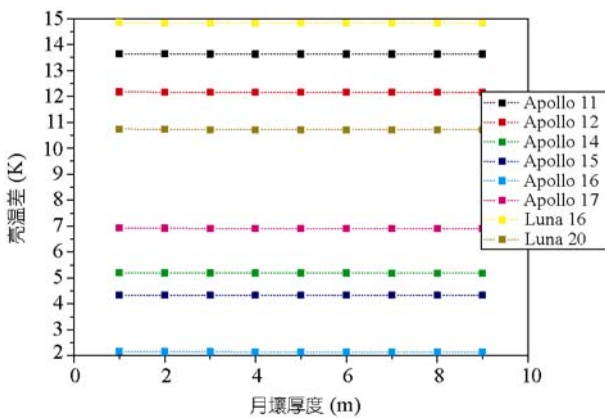


图6 模拟获得的低纬度地区 3 GHz 微波亮温日较差随月壤厚度的变化

不同颜色的曲线代表所使用的介电常数廓线为相应着陆点的介电常数廓线

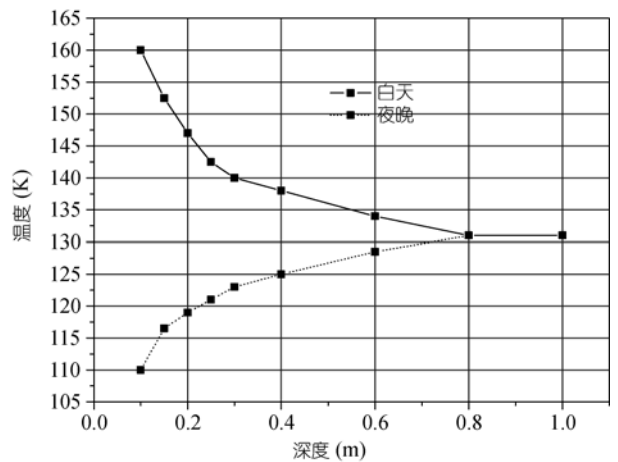


图7 模拟中使用的极地地区典型的月壤温度廓线
每个数据点表示最高和最低温度在该层的平均值

使得月壤微波辐射产生 2~15 K 的变化.

作为对比, 利用前述模型模拟了月球极地地区白天和夜间的 3 GHz 微波亮温. 即模拟中其他条件不变, 只是用图 7 中的典型极地温度廓线代替低纬度温度廓线. 图 7 中的温度廓线是 Vasavada 等^[11]根据模拟获得的月球极地 85° 的最低和最高温度廓线. 其中每一深度对应的温度为该层的平均最低和最高温度. 模拟结果见图 8(a)和(b). 月壤厚度从 1 m 变化到 10 m, 亮温增加 1~4 K. 若月壤处于同一厚度, 则不同地点亮温变化白天在 6~7 K, 夜间在 1~4 K. 说明在极地地区, 除厚度和温度外, 其他影响因素(主要是介电特性)会造成亮温 1~7 K 的变化. 图 9 表示了从图 8(a)和(b)中得出的微波亮温日较差. 日较差最大可达 8 K, 最小约 1 K. 说明在极地地区由于温度日变化的影响,

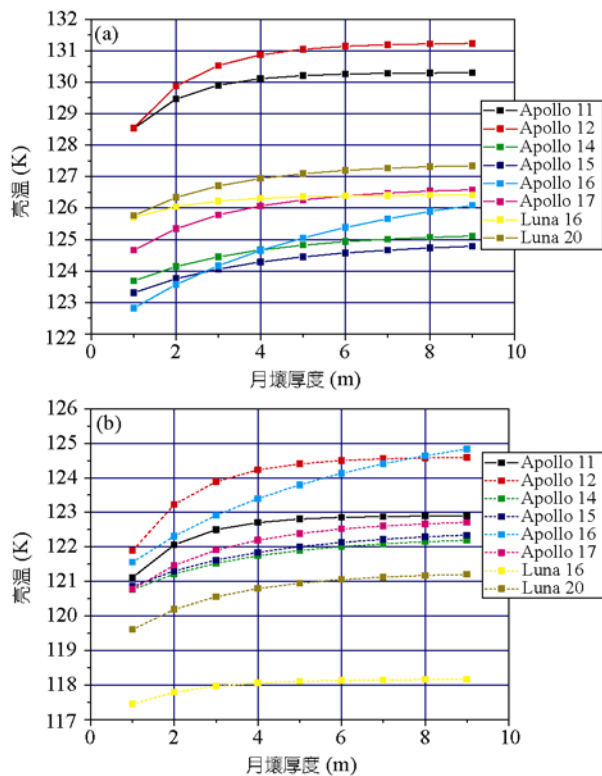


图 8 白天和夜间极地地区模拟 3 GHz 微波亮温随月壤厚度的变化

模拟中所使用的温度廓线为极地地区白天(a)、夜间(b)的温度廓线, 如图 5 所示. 不同颜色的曲线代表所使用的介电常数廓线为相应着陆点的介电常数廓线

可在同一地点使得月壤微波辐射产生 1~8 K 的变化.

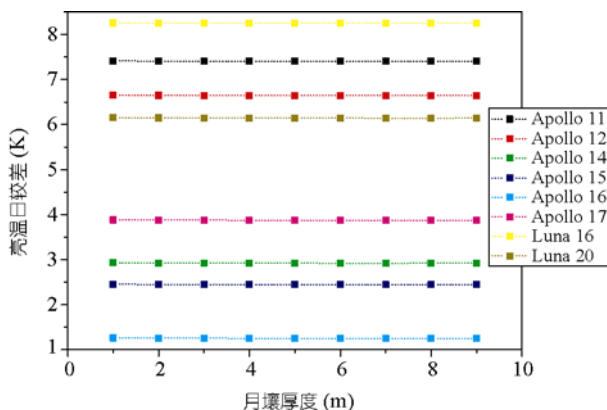


图 9 模拟获得的极地地区代表性介电常数廓线下 3 GHz 微波亮温日较差随月壤厚度的变化

不同颜色的曲线代表所使用的介电常数廓线为相应着陆点的介电常数廓线

2 数据和处理方法

本文所使用的数据为 CELMS 在“嫦娥一号”发射后, 辐射计仪器经开机、调整、稳定等步骤后获得的近一个地球月数据, 具体时间段为 2007 年 12 月 5~31 日.

该数据在后处理过程中, 经过了冷空星系影响剔除, 交叉极化校正, 两点定标等步骤^[1,12]. 本文对该数据的分析着重在相对量的变化, 因此所引用的测量绝对值可能在数据后处理的升级中有所变化, 但不影响本文主要结果.

文中对定标后的数据进行了南极正交投影, 即经度中心为 0°, 纬度中心为 -90°. 投影球体采用半径为 1737.4 km 的球体. 底图采用“嫦娥一号”激光高度计所获得的月面高程数据, 对该数据进行了同样的投影处理. 其他处理将在文中针对具体问题说明.

3 月球南极的微波亮温宏观分布

考虑到在白天和黑夜中, 月面所受的太阳照射不同会造成微波辐射不同. 将所获得的亮温数据分为白天和黑夜分别绘制, 如图 10, 11. 从图 10 和 11 上可见, 月球极地微波亮温呈现环状分布, 纬度越低, 亮温越高, 到月球极点亮温最低. 对于这一点, 可以从图 12~15 获得更清楚的认识.

图 12 是以 0.2° 纬度为间隔, 利用在月球夜间获得的微波亮温, 计算得到的纬度平均亮温. 图 13 是计算纬度平均亮温时, 每个纬度间隔所获得的观测

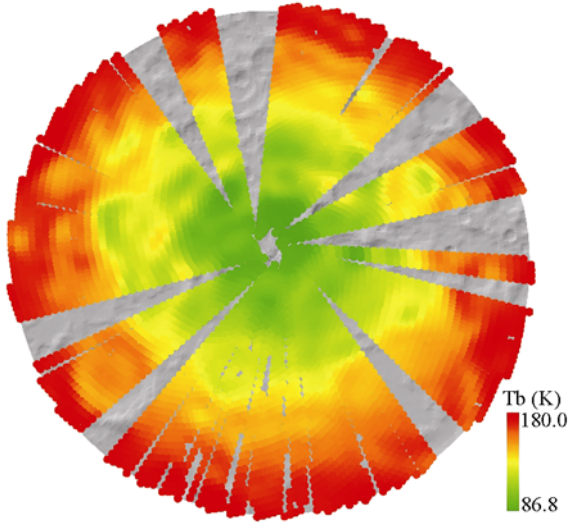


图 10 在南极获得的白天的 3 GHz 亮温分布图
70°S 以内, 观测时间为 2007 年 12 月 5~31 日, 下同

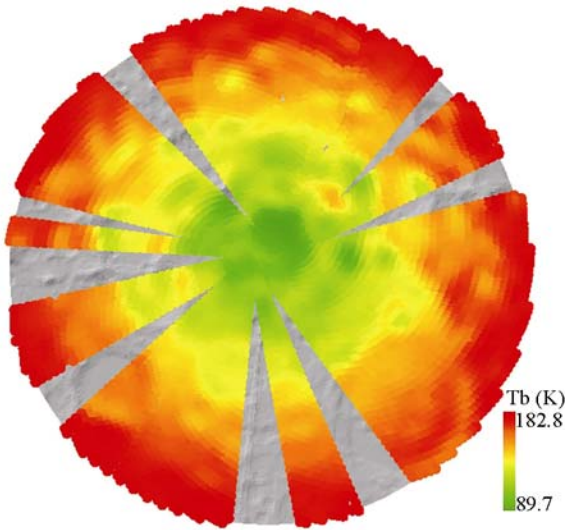


图 11 在南极获得的晚上的 3 GHz 亮温分布图

点数. 图 14 同图 12, 图 15 同图 13, 但所使用的数据为白天获得. 可以看到, 从南极点到 70°S, 不论白天黑夜, 各频率微波亮温呈近直线式上升, 表现在图 10, 11 中即规则的环状结构. 这种结构是由于不同纬度经受的太阳照射的规律性变化, 说明了温度在月球微波辐射的分布中占支配地位. 在夜间, 由于穿透深度不同, 深层月壤温度高于表层温度, 使得频率越低温度越高. 7.8 GHz 趋同于 3 GHz, 但温度略高. 在白

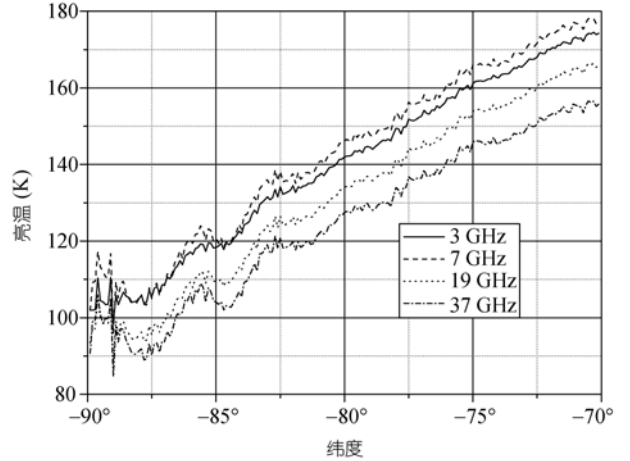


图 12 夜间月球南极各频率纬度平均亮温的分布

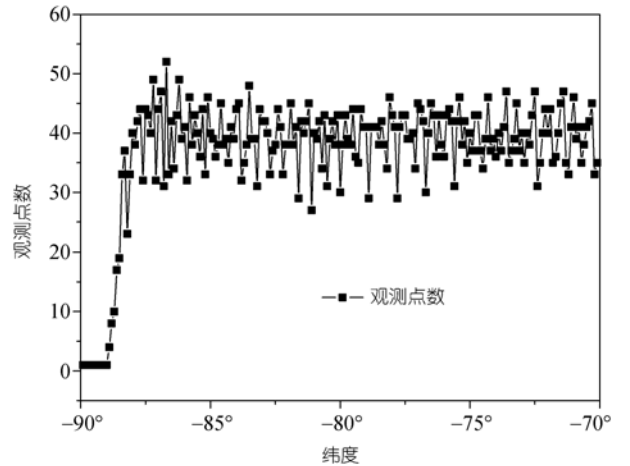


图 13 CELMS 在夜间每 0.2 纬度获得的观测点数

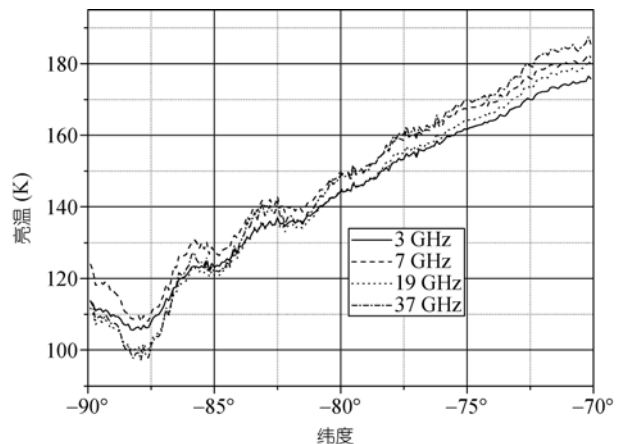


图 14 白天月球南极各频率纬度平均亮温的分布

天, 各频率亮温越向南极越接近. 这说明, 越向两极月壤内的平均温度梯度越小. 作为对比, 图 16(a)和(b)

分别是白天和夜间月球全球纬度平均亮温的分布. 可以清楚的看到, 在赤道月壤内温度梯度较大. 但随着厚度加深, 温度趋向于相同. 通过对比还可以看到, 随着频率降低, 白天夜晚的亮温差也逐渐降低. 例如, 在 -70° , 37 GHz 的日较差约为 30 K(185-155), 3 GHz 的日较差在 2 K 左右. 这一趋势, 越往极点应越明显. 基于这一原理, 制作了两极的近全覆盖微波亮温分布图, 如图 17 所示. 在该图中, 同时包含有白天和晚上获得的 3 GHz 观测数据. 通过插值和平滑处理后, 几乎难以分辨出观测时间的差别. 证明在 3 GHz 的穿透深度内, 辐射的主要贡献来自于温度稳定的深度内, 即 0.3 m 以下.

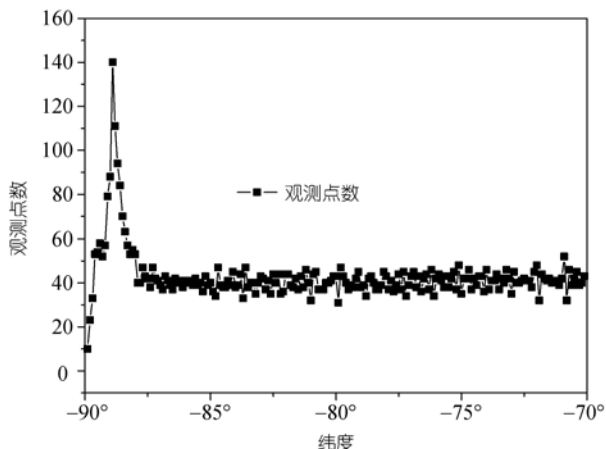


图 15 CELMS 在白天每 0.2 纬度获得的观测点数

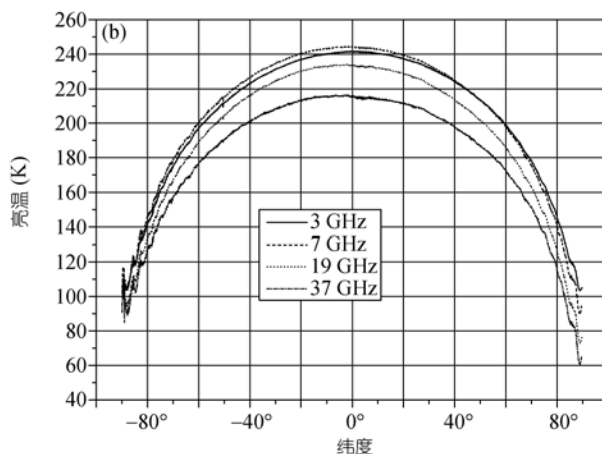
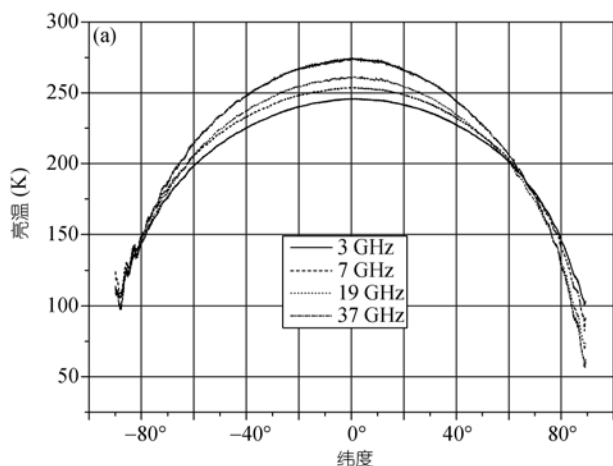


图 16 白天(a)和夜间(b)月球全球各频率纬度平均亮温的分布

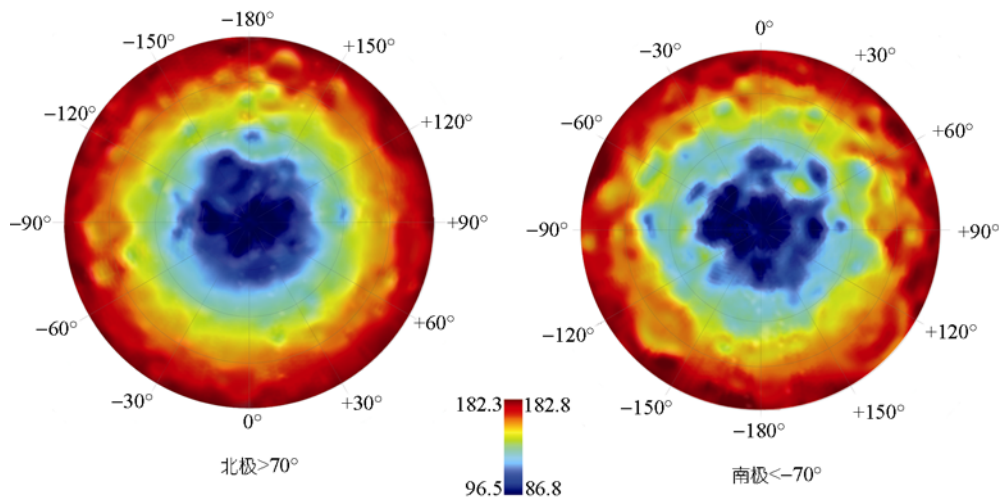


图 17 处理后的两极 3 GHz 微波亮温分布图

包括所有在 70°S 以内从 2007 年 12 月 5~31 日期间观测的数据. 在与月球表面宏观结构数据叠加的过程中进行了一次平滑处理

4 月球南极微波亮温的局部特性

从极地微波亮温分布图上, 除从宏观上存在明显的环状结构即微波亮温纬度性分布外, 还可以看到即使在同一纬度上, 亮温并不完全相同. 毫无疑问, 根据前面的分析, 微波辐射的局部特征与该地的月壤厚度, 金属含量, 密度等都有直接的关系.

图 18(a)是在 75°S 沿经度方向微波亮温与高程的对比图

对比图. 图 18(b), (c)分别对应 80°, 85°微波亮温与高程的对比图. 在 75°和 80°S 微波亮温的起伏受高程起伏的影响和调节, 但并不起决定性影响. 随着向南极点接近, 高程越来越起主要作用. 微波亮温的变化逐渐与高程变化同步. 这种趋势在图 18(d)~(f)中表现得十分一致. 图 18(d)~(f)分别是 86°S, 87°S, 88°S 沿经度方向微波亮温与高程的对比图.

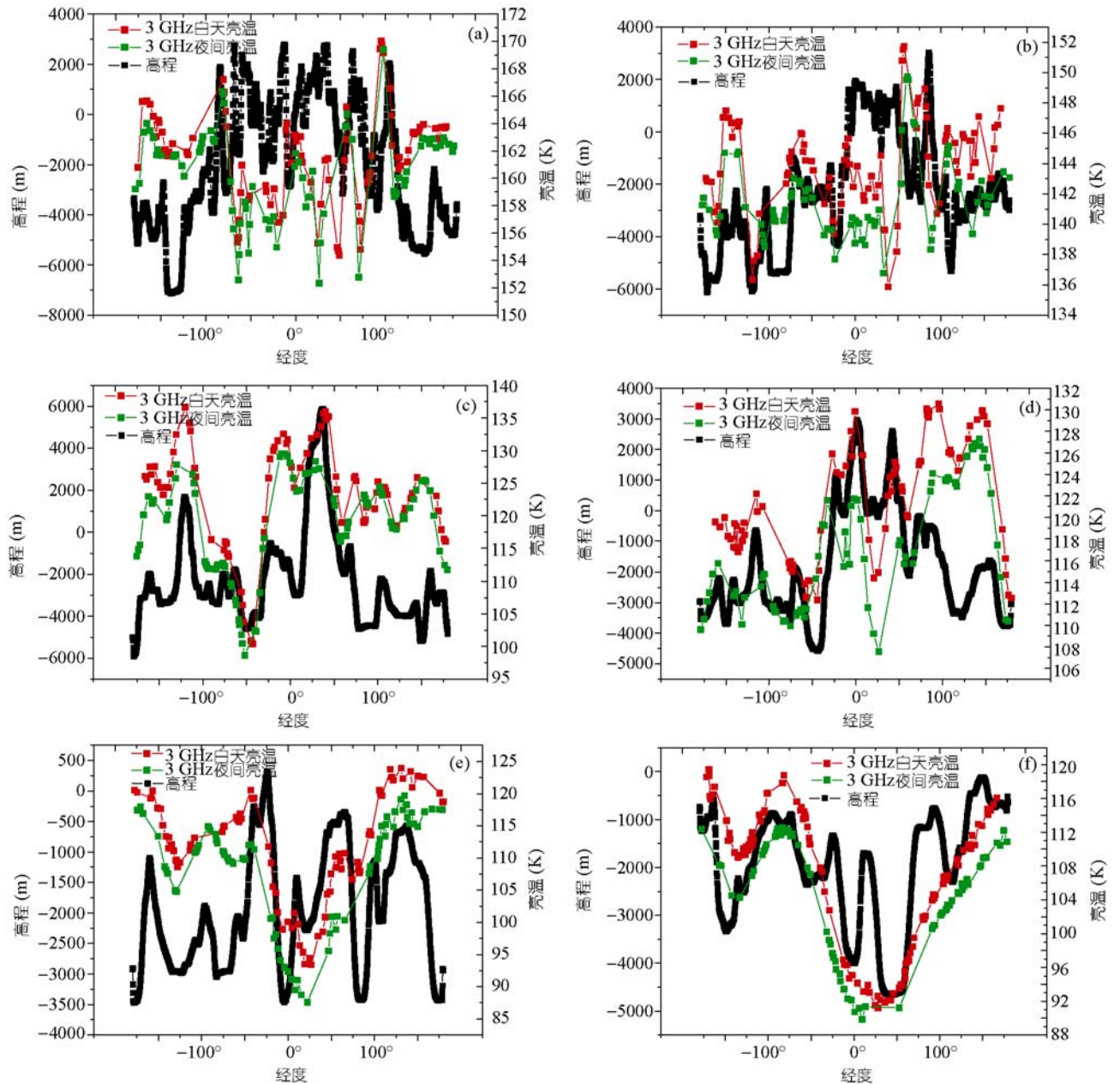


图 18 在南纬 75°(a)、80°(b)、85°(c)、86°(d)、87°(e)和 88°(f)各经度上 3 GHz 微波亮温与高程的对比图

在南极的极区微波亮温与高程变化一致的现象与太阳照射月球的角度有关. 在极区, 太阳几乎以平行于地平线的角度入射^[4]. 这使得高地受照多, 低地受照少, 甚至形成永久阴影区. 如果辐射计视场内多为低地, 则由于受太阳照射少, 月壤温度低, 则必然微波亮温低. 反之, 高地往往亮温高. 仔细分析图 18(d)~(f), 高地亮温高, 低地亮温低这一现象并不是绝对的. 具体情况可根据局部的互相遮挡, 观测时间等具体分析. 但通过这一现象, 说明在南极微波亮温的高低反映了月壤温度的高低, 过高的微波亮温可能预示着该地大部分时间受太阳照射, 过低的微波亮温可能预示着该地多数处于阴影区.

5 月球南极微波亮温的异常点和意义

在前面分析的基础上, 图 19 表示了亮温与纬度平均亮温的偏离值分布, 包括所有白天和黑夜在南极获得的数据, 其中, 白天, 夜晚的数据分开计算. 该图代表了月球南极热点和冷点的分布.

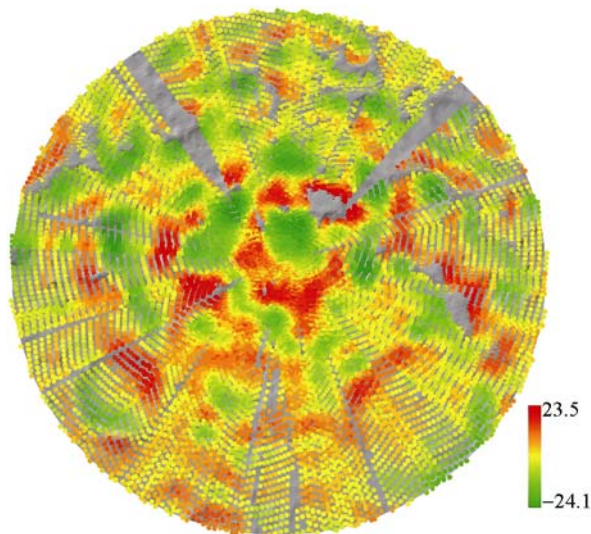


图 19 3 GHz 亮温与纬度平均亮温的偏离值分布
包括所有白天和黑夜在南极获得的数据

根据多层微波辐射传输方程模型的计算, 月壤厚度, 介电特性和温度日变化造成的极地亮温变化在 10 K 以内. 据此, 我们滤去图 19 中亮温变化在 10 K 以内的地方, 得到图 20 和 21.

6 结论

本文分析了所获得的“嫦娥一号”CELMS 在月球

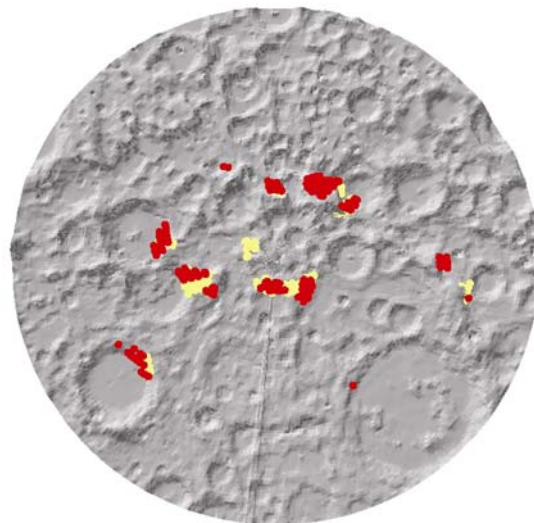


图 20 3 GHz 亮温与纬度平均亮温的偏离值大于 10° 的地方
与永照区或多照区有关. 其中, 红色为夜间数据,
黄色为白天数据

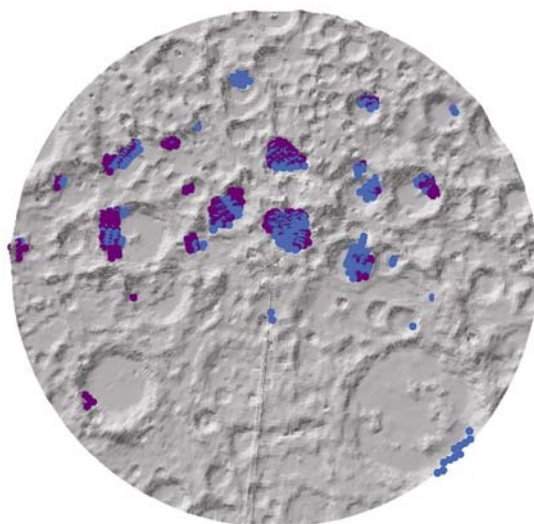


图 21 3 GHz 亮温与纬度平均亮温的偏离值小于 -10° 的地方
可能与永久阴影区有关, 或有冰存在. 其中, 紫色为夜间数据,
蓝色为白天数据

南极观测的近一个月数据. 通过对数据的分析, 总结出月球的微波辐射具有规则的环状结构, 即纬向性分布, 从赤道到南极点亮温递减. 尤其在 70°~88°S 之间, 亮温呈现直线式递减. 从低纬地区向高纬度地区过渡, 不同频率之间的亮温差距逐渐缩小, 到极区基本接近. 分析认为, 月球极区的月壤温度梯度小于其他地区. 利用低频微波辐射穿透深度深, 南极区白天夜晚的

亮温差小这一特点制作了两极月球亮温分布图。

在对月球南极的研究中, 增进对热量环境和冰存在可能性的了解是重点目标. 从人类建立月球基地的需要出发, 南极的热量资源有重要的可利用价值. 此前的研究中, 从分析极地的可见光图像来判别当地是否被光照射, 通过积累这类资料来获得受照时数的信息. 本文在分析南极 70° 以内地区的微波辐射亮温规律, 提出通过提取出南极的微波辐射异常热点来判定南极多照区的范围, 提供了一种新的途径, 更为快捷.

从 Clementine 任务提出有冰存在的迹象到后续 Lunar Prospector, SMART-1, Selene 和地基长波雷达观测等项目中, 已经先后使用了多种技术手段来探测. 存在的问题是, 所得结论具有多解性. 本文在分析南极微波辐射特性的基础上, 给出了搜索月球永久阴影区的范围, 这些地方可能是不同形式的冰寄宿的地方.

对月球南极每个亮温异常点的具体含义, 本文的研究只是开始. 在今后的工作中应综合多种数据源, 做进一步深入的研究.

致谢 与美国 Kansas 大学的 Fung, Bredow 和 Tjuatja 教授关于月壤微波辐射模拟进行了有益的讨论, 审稿专家提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Jiang J S, Zhang X H, Zhang D H, et al. Microwave sounding of lunar soil from China lunar orbit satellite "Chang'E-1 (CE-1)". The 37th COSPAR Scientific Assembly. July 13—20, Montréal, Canada, 2008. 1379
- 2 Nozette S, Lichtenberg C, Spudis P, et al. The Clementine bistatic radar experiment. *Science*, 1996, 274: 1495—1498[[doi](#)]
- 3 Feldman W, Barraclough B, Maurice S, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles. *Science*, 1998, 281: 1496—1500[[doi](#)]
- 4 Stacy N, Campbell D, Ford P. Arecibo radar mapping of the Lunar Poles: a search for ice deposits. *Science*, 1997, 176(6): 148—152
- 5 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. *Lunar Sourcebook, a User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- 6 Bussey B, Spudis P. Small spacecraft exploration of the Moon. *Acta Astronaut*, 2007, 55: 637—641[[doi](#)]
- 7 Troitsky V. Investigation of the surfaces of the Moon and planets by means of thermal radiation. *Proc Roy Soc London*, 1967, A296: 366—398[[doi](#)]
- 8 Hagfors T. Remote probing of the Moon by infrared and microwave emissions and by radar. *Radio Sci*, 1970, 5: 189—227[[doi](#)]
- 9 Keihm S, Langseth M. Lunar microwave brightness temperature observations reevaluated in the light of Apollo program findings. *Icarus*, 1975, 24: 211—230[[doi](#)]
- 10 Fa W Z, Jin Y Q. Simulation of brightness temperature from lunar surface and inversion of regolith-layer thickness. *J Geophys Res*, 2007, 112: E05003
- 11 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[[doi](#)]
- 12 王振占, 李芸, 张晓辉, 等. "嫦娥一号"卫星微波探测仪数据处理模型和月表微波亮温反演方法. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(8): 1029—1044