

# 利用嫦娥一号卫星微波探测仪数据 反演月球表面物理温度

李 芸<sup>1,2</sup>, 姜景山<sup>1,2</sup>, 王振占<sup>1,2</sup>, 张德海<sup>1,2</sup>, 张晓辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**[摘要]** 本文利用理论研究的结果,建立了月表物理温度反演模型,结合嫦娥一号微波探测仪(CELMS)数据对全月球物理温度进行了反演。同时分析了物理温度变化对微波辐射的影响及其与表面地形等的关系,为其他月表信息反演提供了依据和物理温度的测量信息。

**[关键词]** 嫦娥一号微波探测仪;月球表面物理温度;反演

**[中图分类号]** V447+.1;TP732.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0106-07

## 1 前言

根据微波辐射传输原理,嫦娥一号微波探测仪(CELMS)探测月壤的微波辐射亮温包含了月表层一定深度内的亮温贡献之和。频率不同则探测深度不同,随着频率升高,探测深度逐渐减小,反映的月壤厚度不同。不同厚度内月壤的物理特性,如温度、介电常数、密度、热导率和比热等参数不同,反映到微波辐射传输模型中就是不同层的发射率、透过率和物理温度不同,导致这些层内的辐射亮温被CELMS接收到的比例不同。对CELMS亮温影响最大的两个参数是月壤的温度剖面 and 介电常数剖面。月壤温度对不同波段微波辐射亮温的贡献体现在:不同频率探测厚度不同,对应的有效温度(探测深度内的加权平均温度)不同,因而不同深度的温度起伏,最主要的是表层1.0 m内的温度变化,决定了微波辐射计测量亮温的时变特性,即一个月球昼夜内,不同时刻测量的亮温不尽相同,尤其在白天表现非常明显。因此通过分析CELMS接收到的辐射量,就可以反演辐射源的深度,进而反演这些深度内月壤层的物理特性。此外,月表的微波辐射还受到表面粗糙度和地形等参数的影响。

月表物理温度(以下简称温度,以示与微波探测仪的亮温区分)是研究月壤及其内部变化的重要参数之一。月表温度的已知程度及其准确度直接关系到CELMS科学目标的实现,尤其是月壤厚度的反演,这是因为月表的微波辐射不但是表面发射率的函数,也是表面温度的函数。同时,月表温度也是研究月球热进化过程的必要边界条件。

目前获取月表温度的方法大致有两种<sup>[1]</sup>: a. 直接月表温度测量<sup>[2]</sup>; b. 间接方法,包括利用遥感测量的方法,如利用绕月飞行器的遥感测量<sup>[3-8]</sup>和地基的遥感测量<sup>[9-16]</sup>,利用登月器带回来的月壤样品的热物理性质推算的月表温度<sup>[2,17-22]</sup>,以及利用从月壤样品得到的热物理参数的模型,通过求解热辐射或热传导方程得到月表温度分布<sup>[23-27]</sup>等。

Apollo计划的15号和17号任务是到目前为止仅有的两次在登月点成功地对月表温度进行直接测量试验的任务。迄今为止,地基遥感观测主要是基于红外和微波波段的观测,通过获得亮温数据反演得到月表温度。Price等<sup>[28]</sup>利用“空间中段监视”试验卫星(MSX)获得了4.3 m谱段月表月食过程的热图像,空间分辨率为45 km,从图像中发现很多热温度点,这些温度点与火山坑对应,另外发现在阴

**[收稿日期]** 2013-04-22

**[基金项目]** 国家“863”计划重点项目(2010AA12220405)

**[作者简介]** 李 芸(1978—),女,天津市人,博士,助理研究员,主要研究方向为微波遥感数据处理及应用;E-mail:liyun@mirslab.cn

影和半阴影区的温度比高原地区温度高。MSX观测到的月食过程中月表温度不均匀冷却的现象揭示了各种月表特征的热物理特性的差异。

地基遥感观测主要集中在月球正面的赤道地区,空间分辨率较差<sup>[29]</sup>。Mitchell等<sup>[30]</sup>利用Hat Creek射电天文台BIMA射电望远镜阵的0.3 cm毫米波干涉仪以及波长范围1.3~20.5 cm的超大阵列(VLA)观测的数据来分析水星表面的热辐射,发现水星表面的土壤比月表阴暗区月壤的透过率高至少2~3倍,而比月表高地的透过率至少高出40%,他们认为可能是由于水星表面Fe、Ti的丰度与月表有较大差异所致。

CELMS是人类第一次在月球轨道上对月球表面微波特性进行探测的微波辐射计。其于2007年10月24日成功发射,并于同年11月7日进入工作轨道,于2009年3月1日受控落月,在轨运行一年多,其观测面元已多次覆盖全月表面,获取了全月表面微波亮温,由此创建了“微波月亮(MicM)”<sup>[31]</sup>。MicM是月表物理化学特性的直接反映,通过对微波亮温的研究,建立这些特性与亮温的关系,就能够对这些参数进行直接反演。

本文利用从月壤样品得到的热物理参数的模型,通过求解热辐射和热传导方程的方法<sup>[32]</sup>,建立了月表温度反演模型,结合CELMS数据对全月温度进行了反演,并分析了温度变化对微波辐射的影响,为其他月表信息反演提供依据和先验信息。

## 2 CELMS反演月表温度的原理和算法

实际的月壤既不是均匀的,也不是等温的,表面更不是光滑的,因此月壤表面的微波辐射不但受到下层温度和介电常数廓线的影响,而且受到月球表面粗糙度的影响。由于月表的下行辐射来自宇宙背景,当没有星体直接照射月表而镜面反射进入微波辐射计的接收天线时,月表的散射基本可以认为是其表面反射的2.7 K的宇宙背景辐射。对于天底观测的CELMS而言,基本上不存在地形对传输路径上微波辐射遮挡的问题,因此表面散射和遮挡的问题可以忽略。但是,由于月表地形高低起伏且没有大气对流,其表面温度呈现很大的各向异性,太阳照射区和非照射区温度差异明显,从而导致辐射计的面元内温度的分布非常不均匀。

根据微波辐射传输方程,在月球卫星上接收的月表亮温 $T_B$ 可以表示为<sup>[33]</sup>

$$T_B = r_0 T_{BC} + (1 - r_0) [T_{Bregolith} + T_{rock} (1 - r_n) \tau] \quad (1)$$

式(1)中, $r_0$ 为表面的反射率,是表面介电常数、粗糙度等参数的函数; $T_{BC}$ 为背景亮温,假设为常数2.7 K; $T_{Bregolith}$ 为不同月壤层的亮温贡献; $T_{rock}$ 为下伏岩石层的温度; $r_n$ 为岩石表面的反射率; $\tau$ 为月壤的透过率。

如果把不同月壤层的亮温 $T_{Bregolith}$ 表示为有效温度和权重之积的形式

$$T_{Bregolith} = G T_{eff} \quad (2)$$

式(2)中, $G$ 为该频率的权重,表示在这个频率下介质对微波的吸收和传输的总能力; $T_{eff}$ 为有效温度,即探测深度内的加权平均温度。那么在目前的情况下与频率有关的项就包括 $T_{eff}$ 、 $G$ 和 $\tau$ ,其中 $G$ 和 $\tau$ 还与厚度直接相关,而 $T_{eff}$ 和厚度间接相关。通过表面温度廓线的模拟发现<sup>[33]</sup>,主要的温度变化集中在0.5 m以内(除了极区),其他基本上是线性变化。而在0~0.5 m任意深度内37.0 GHz的有效温度可以与0.5 m的有效温度建立二次曲线关系,即

$$T_{eff(h)} = a T_{eff(0.5 m)}^2 + b T_{eff(0.5 m)} + c \quad (3)$$

式(3)中,系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 根据太阳高度角的变化而变化,且南、北纬的二次曲线关系是不同的。这样,这些与厚度、温度、介电常数有关的参数 $G$ 、 $\tau$ 、 $r_n$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 一旦确定,那么利用CELMS亮温就可以反演月表信息。

37.0 GHz主要反映表面温度的变化,对月壤厚度变化不敏感,因此可以用37.0 GHz昼夜平均的亮温数据作为有效温度变化趋势度量的一个标准<sup>[33]</sup>。有效温度在月壤介电常数反演中非常重要,它的准确度直接影响反演的介电常数准确度。

## 3 月表温度的反演方法及其灵敏度分析

### 3.1 反演方法及流程

为了利用37.0 GHz的亮温反演月表温度,不区分37.0 GHz的探测深度差异,统一设定为0.5 m。这样,根据式(1)和式(2),在0.5 m厚度下,微波亮温是介电常数和温度分布特性的函数,因此二者的反演是同时进行的。首先,对任意给定的介电常数,可以计算出 $G$ 、 $\tau$ 、 $r_n$ 、 $r_0$ ,因而可以计算出37.0 GHz在0.5 m厚度内的有效温度。其次,结合测量时的太阳高度角,根据有效温度的修正公式,计算修正温度的修正量,这样就可以得到当时情况下0.5 m内的有效温度<sup>[33]</sup>,然后根据式(2)计算理论的

37.0 GHz亮温。最后通过最小二乘法,在理论和测量的37.0 GHz亮温之间求最小,可以得到最佳的介电常数值。一旦这个介电常数确定后,再通过式(2)结合37.0 GHz的实测亮温,就可以得到0.5 m内的有效温度反演值。进而根据式(3)得到不同深度的有效温度以及表面温度。温度反演的流程图如图1所示。

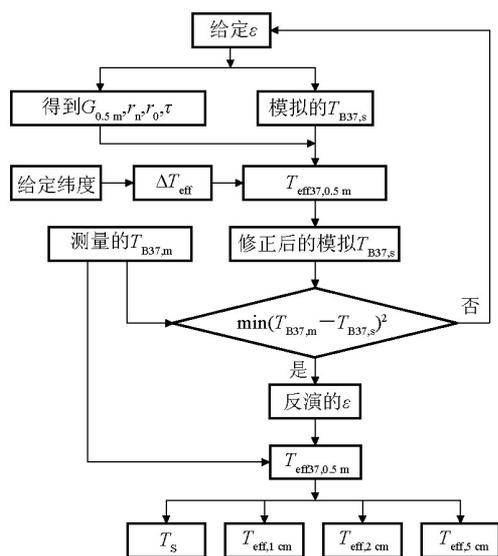


图1 温度反演算法流程图  
Fig.1 Temperature retrieving algorithm flow

### 3.2 温度对微波亮温的灵敏度分析

根据给定介电常数和月壤厚度,利用不同温度剖面模拟的37.0 GHz亮温,可以分析温度对37.0 GHz亮温影响的灵敏度。图2给出了不同温度层面有效温度变化对37.0 GHz亮温的影响,即亮温随温度的变化率。由图2可以看出,这一变化率随着月壤厚度的增加而略微增大,一般大于0.5 K。另外发现,随着温度的升高灵敏度增大。但是由于模拟的局限性,无法模拟实际月表温度廓线的进化历史,当前的模拟结果显示北纬的灵敏度略高于南纬,其实南、北纬不存在明显的灵敏度差异。

## 4 月表温度反演结果及分析

### 4.1 月表温度初步反演结果

利用2007年12月5日—12月30日期间CELMS亮温数据,对月表温度进行了初步反演。这段时间内,月白天和夜晚的太阳高度角在不同的地区是不同的,图3给出了这一时间段全月表面太

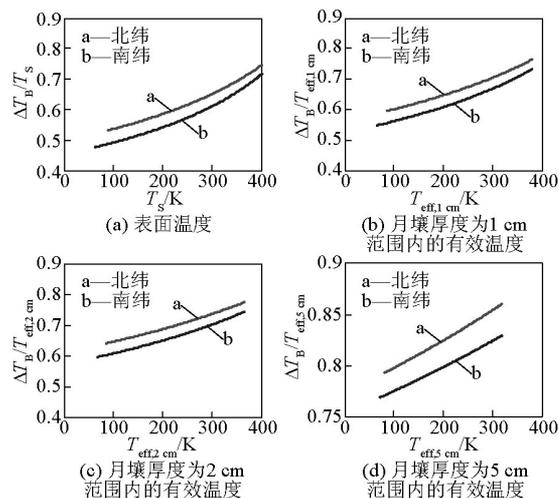


图2 南北纬亮温对不同层面有效温度的变化率  
Fig.2 The changing rate of effective temperature in different level between south and north latitude

阳高度角的分布。由图3可以看出,在这段时间内,过境时对应的赤道太阳高度角变化范围集中在 $\pm 65^\circ$ 以上,变化不大。根据月表温度剖面模拟结果<sup>[32]</sup>,如果假设月表是平滑的,那么当太阳高度角由 $65^\circ$ 上升到最高时,赤道地区表面温度上升约10 K;相对的,当太阳高度角由 $-65^\circ$ 下降到最低时,赤道地区表面温度下降约4 K。这一温度变化随着纬度升高逐渐减小。由于相邻经度间的太阳高度角变化很小,其表面温度差异也很小。

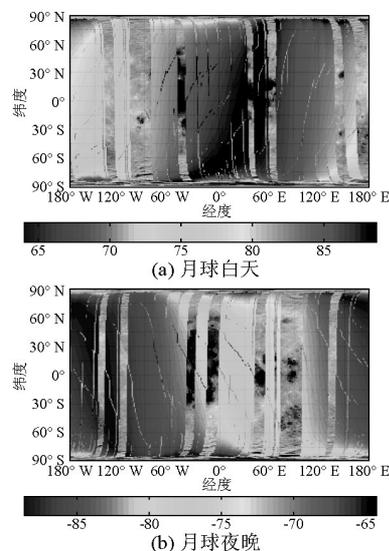


图3 2007年12月5日—12月30日过境时对应的赤道太阳高度角变化(单位:度)  
Fig.3 Change of solar elevation angle at equator from 5th to 30th in Dec. 2007(unit: degree)

表面温度的反演结果如图4所示。图4中分别给出了月球白天和夜晚的表面温度和厚度在1 cm、2 cm和5 cm内月壤的有效温度的反演结果。可以看出:无论在哪个层面,由赤道向两极,温度均随着纬度的升高而降低。在月球白天,由表面向5 cm深度,温度逐渐降低,而在月球夜晚,温度随厚度的增加而升高,这与模拟结果<sup>[32]</sup>趋势是一致的。由图4

中可以清楚的看到,月海和月陆的温度变化是不一致的:白天月海的温度相对较高,月陆温度较低,而夜晚则相反。也就是说,月海的温差相对月陆要大一些,这与介电常数反演的结果也是一致的<sup>[33]</sup>。这些结果表明,利用37.0 GHz微波亮温数据可以很好地反演月表温度和各个层面的有效温度。

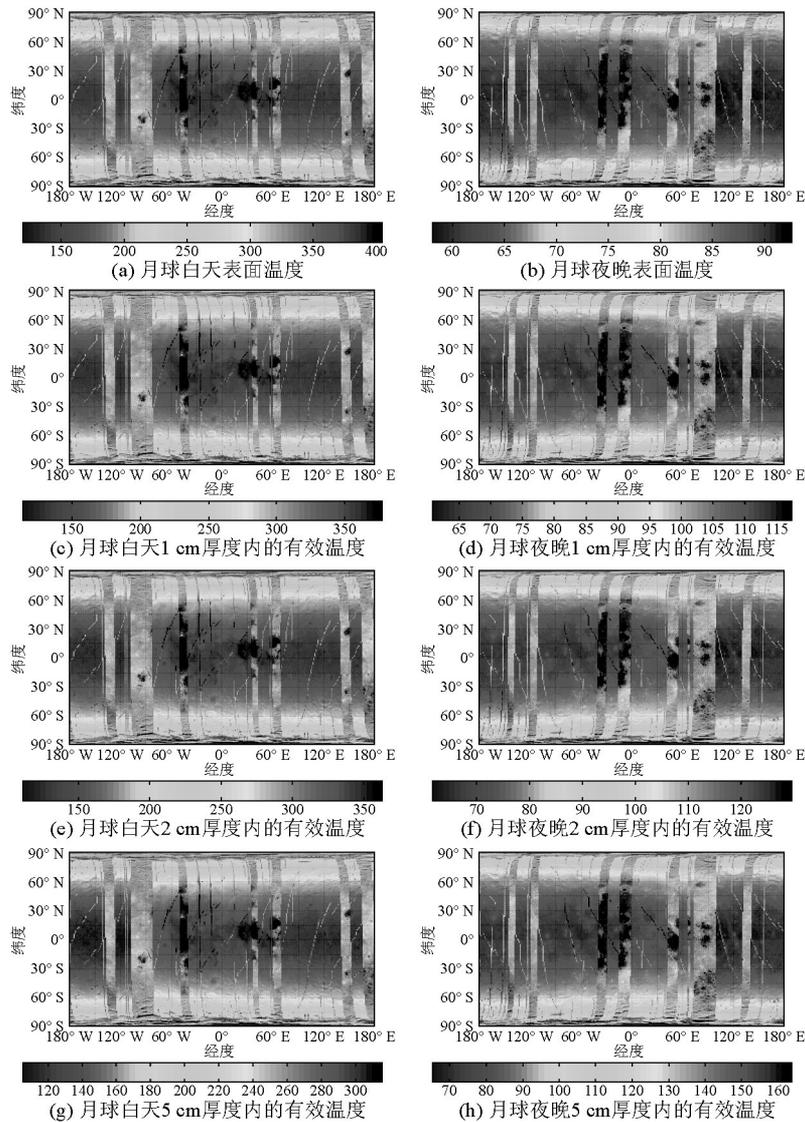


图4 反演的月表温度(单位:K)

Fig.4 Retrieved lunar surface temperature (unit: K)

注:图片背景中黑色部分为月海,灰色部分为月陆

#### 4.2 月球表面特征区域温度反演结果

下面对月球表面特征区域的温度反演结果进行分析。图5给出了澄海(28°N, 17.5°E)和静海(8.5°N, 31.4°E)地区37.0 GHz月球白天和夜晚的亮温及反演的表面温度。由图5可以看出,无论是月

球白天还是月球夜晚,表面温度基本呈现由低纬向高纬逐渐降低的趋势;月球白天整体温差较大,由低纬到高纬的差异达到40 K以上;而在月球夜晚,整体温度变化较小,只有5 K左右。在月球白天,澄海温度明显低于静海,而在月球夜晚则相反,这与

两个地区的物质组成、月壤密度和月壤厚度相关。另外,反演的月球表面温度与37.0 GHz亮温一致性良好,说明37.0 GHz亮温完全能够反映月表温度的变化。

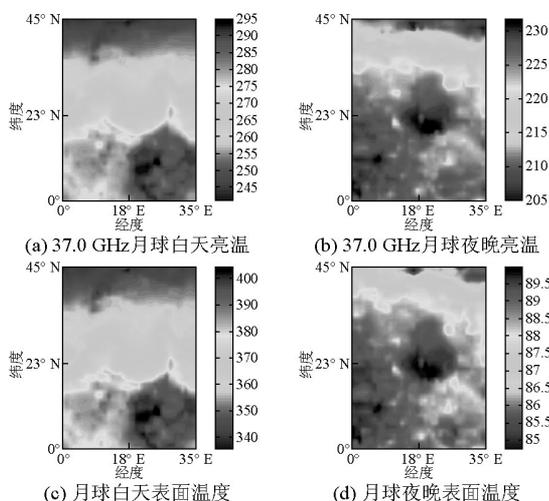


图5 Apollo 17 37.0 GHz亮温和反演的表面温度的比较 (单位:K)

Fig.5 Comparison between brightness temperature at 37.0 GHz and retrieved surface temperature at Apollo 17 (unit: K)

图6给出了哥白尼坑(9.7°N, 20.0°W)附近的月球表面温度反演结果。由图6可知,由月表到月壤厚度5 cm,温度变化状况符合月表温度分布整体变化特点:在月球白天,由表面向5 cm深度,温度逐渐降低;而在月球夜晚,温度随厚度的增加而升高。除此之外,在月球白天,哥白尼坑内温度低于坑外温度,且环状变化不明显并呈现一定的复杂性,但由低纬向高纬地区,温度的总体趋势是逐渐下降的;在月球夜晚,反演结果表明哥白尼坑内温度低于坑外,呈明显环状分布。这说明,坑内和坑外的月壤物质组成和分布以及月壤厚度是截然不同的,对热量的吸收和释放能力是完全不同的,坑内物质吸热和放热速度明显高于坑外物质。

对于月表地形相似的区域,由于其物质组成和成分等不同,其温度分布特征也不尽相同。图7给出了哥白尼坑和月球背对地球面的科罗廖夫坑(4.0°S, 157.4°W)附近的高程比较。图8和图9为其亮温及反演结果分布比较。虽然科罗廖夫坑附近地形结构与哥白尼坑相似,都是中间低周围高,呈环状分布。但这两个地区的表面温度分布是截

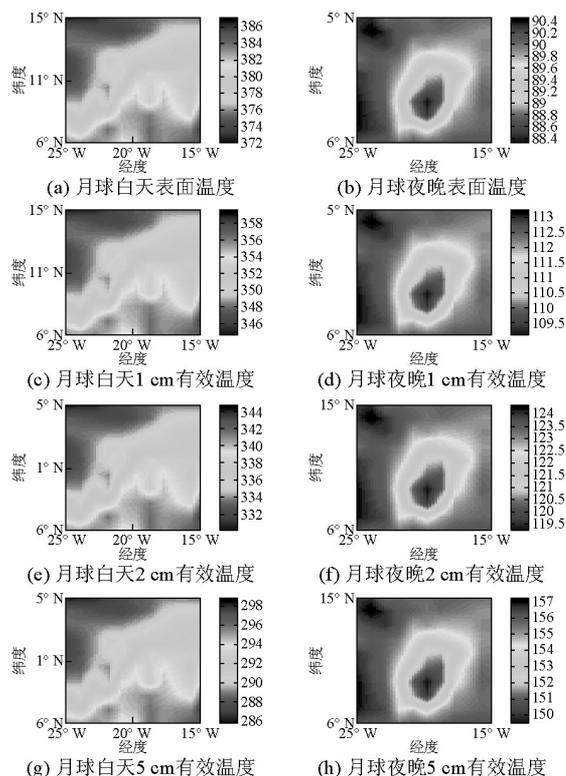


图6 哥白尼坑附近月球表面温度以及不同厚度内有效温度反演结果(单位:K)

Fig.6 Retrieved results near Copernicus (unit: K)

然不同的。科罗廖夫坑区域表面温度分布特点是:不论白天还是夜晚,都是坑中心温度高,而周围相对较低。

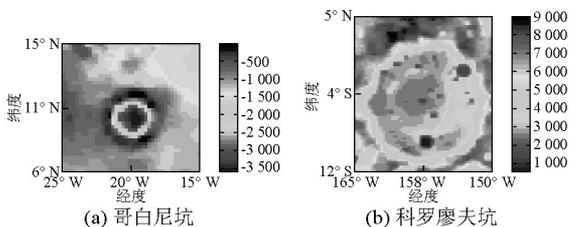


图7 哥白尼坑和科罗廖夫坑附近高程比较(单位:m)

Fig.7 Comparison of elevation between Copernicus and Korolev (unit: m)

## 5 结语

本文介绍了利用CELMS数据对月表温度反演的方法和初步结果。研究表明:月表亮温包含了丰富的月壤特性信息,是表面物质的介电特性、地形、表层温度分布、月壤厚度分布特性的综合反映。月球表层温度是月球物理化学特性的一个重要物理量,也是月表微波遥感的重要参数。

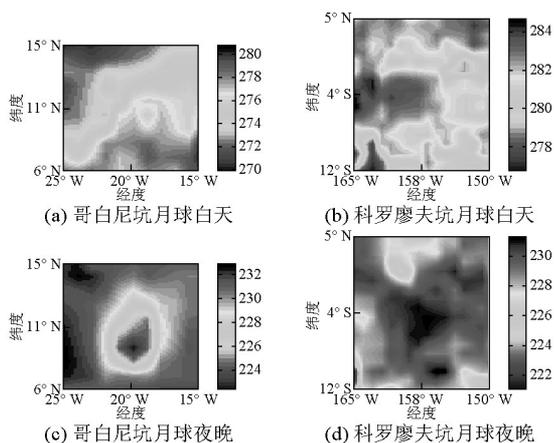


图8 哥白尼坑和科罗廖夫坑附近白天和夜晚37.0 GHz亮温的比较(单位:K)

Fig.8 Comparison of brightness temperature between Copernicus and Korolev (unit: K)

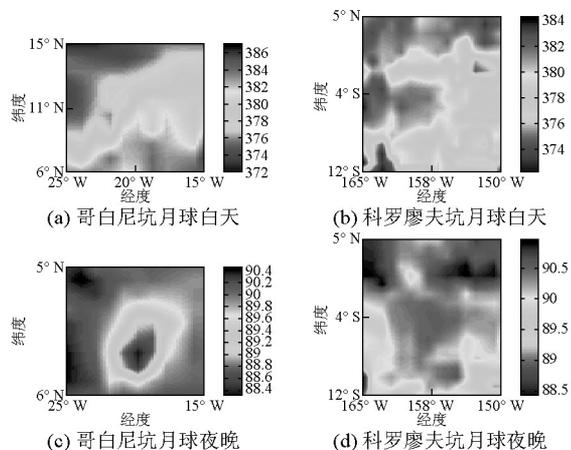


图9 哥白尼坑和科罗廖夫坑附近月球表面温度反演结果的比较(单位:K)

Fig.9 Comparison of retrieved surface temperature between Copernicus and Korolev (unit: m)

通过 CELMS 在不同纬度、不同时间测量亮温反演的月表温度的结果表明:温度的波动是月表亮温变化的主要原因。全月任一时刻表面温度分布是不均匀的,不但呈现白天南、北纬的相同纬度存在差异,而且在夜晚的不同时刻温度分布也是不同的。另外,相同地区由于地形、物质成分、月壤厚度等的不同,其昼夜温度变化也是不同的。对 CELMS 亮温的研究,必将对月表物理化学特性的研究起到促进作用,而且随着人类对这些特性了解的深入,也将促进对微波亮温所包含丰富信息的解译。

## 参考文献

- [1] 李雄耀, 王世杰, 程安云. 月球表面温度物理模型研究现状[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 480-485.
- [2] Lucas J W, Conel J E, Hagemeyer W A, et al. Lunar surface thermal characteristics from Surveyor 1 [J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72(2): 779-789.
- [3] Little R C, Feldman W C, Maurice S, et al. Latitude variation of the subsurface lunar temperature: Lunar Prospector thermal neutrons [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(E5): 12-1-12-9.
- [4] Lawson S L, Jakosky B M, Hye-Sook Park, et al. Brightness temperatures of the lunar surface: Calibration and global analysis of the Clementine long-wave infrared camera data [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(E2): 4273-4290.
- [5] Lawson S L, Jakosky B M. Brightness Temperatures of the Lunar Surface (Abstract No.1892) [C]// The Clementine Long-Wave Infrared Global Data Set, 30th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, 1999.
- [6] Lawson S L. Brightness temperatures of the lunar surface: Calibration and analysis of Clementine long-wave infrared camera images [D]. Boulder: University of Colorado, 2000.
- [7] Lawson S L, Jakosky B M. Lunar surface thermophysical properties derived from Clementine LWIR and UVVIS images [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(E11): 27911-27932.
- [8] Hagermann A, Tanaka S, Yoshida S, et al. Regolith thermal property inversion in the Lunar-A heat-flow experiment [J]. Bulletin of the American Astronomical Society, 2001, 33: 1147.
- [9] Pettit E, Nicholson S B. Lunar radiation and temperatures [J]. Astrophysical Journal, 1930, 71: 102-135.
- [10] Sinton W M. Physics and Astronomy of the Moon [M]. New York: Academic Press, 1962.
- [11] Murray B C, Wildey R L. Surface temperature variations during the lunar nighttime [J]. Astrophysical Journal, 1964, 139: 734-750.
- [12] Saari J M. The surface temperature of the antisolar point of the moon [J]. Icarus, 1964, 3: 161-163.
- [13] Low F J. Lunar nighttime temperatures measured at 20 microns [J]. Astrophysical Journal, 1965, 142: 806-808.
- [14] Ingrao H C, Young A T, Linsky J L. The Nature of the Lunar Surface [M]. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1966.
- [15] Stimpson L D, Lucas J W. Revised lunar surface thermal characteristics obtained from the Surveyor V spacecraft [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1970, 7(11): 1317-1322.
- [16] Pugh M J, Bastin J A. Infrared observations of the moon and their interpretation [J]. Earth, Moon, and Planets, 1972, 5(1-2): 16-30.
- [17] Vitkus G, Garipay R R, Hagemeyer W A, et al. Lunar surface temperatures and thermal characteristics, Surveyor VII: A preliminary report (NASA SP-173) [R]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 1968.
- [18] Vitkus G, Garipay R R, Hagemeyer W A, et al. Lunar surface temperatures and thermal characteristics, Surveyor VI: A preliminary report (NASA SP-166) [R]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 1968.
- [19] Vitkus G, Lucas J W, Saari J M. Lunar Surface Thermal Characteristics During Eclipse from Surveyors III, V and after Sunset from Surveyor V (No. 68-747) [C]// AIAA 3rd Thermophysics Conference, Los Angeles, California, 1968.
- [20] Cremers C J, Birkebak R C. Thermal Conductivity of Fines from Apollo 12 [C]// Proceedings of the Second Lunar Science Conference, Cambridge: MIT Press, 1971, 3: 2311-2315.

- [21] Cremers C J, Birkebak R C, Dawson J P. Thermal Conductivity of Fines from Apollo 11 [C]// Levinson A A, ed. Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, New York: Pergamon Press, 1970, 3: 2045–2050.
- [22] Keihm S J, Langseth M G. Surface Brightness Temperatures at the Apollo 17 Heat Flow Site: Thermal Conductivity of the Upper 15 cm of Regolith [C]// Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference, Oxford: Pergamon Press, 1973, 3: 2053–2513.
- [23] Racca G D. Moon surface thermal characteristics for moon orbiting spacecraft thermal analysis [J]. Planetary and Space Science, 1995, 43(6): 835–842.
- [24] Wesselink A J. Heat conductivity and nature of the lunar surface material [J]. Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 1948, 10: 351–363.
- [25] Jaeger J C. The surface temperature of the moon [J]. Australian Journal of Physics, 1953, 6(1): 10–21.
- [26] Jones W P, Watkins J R, Calvert T A. Temperatures and thermophysical properties of the lunar outermost layer [J]. Earth, Moon, and Planets, 1975, 13(4): 475–494.
- [27] Wicczorek M A, Huang S. A reanalysis of Apollo 15 and 17 Surface and Subsurface Temperature Series (Abstract No. 1682) [C]// 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 2006.
- [28] Price S D, Mizuno D, Murdock T L. Thermal profiles of the eclipsed moon [J]. Advances in Space Research, 2003, 31(11): 2299–2304.
- [29] Monstein C. The moon's temperature at  $\lambda=2.77$  cm [R]. Switzerland: ETH Zürich, 2003.
- [30] Mitchell D L, Pater I D. Microwave imaging of Mercury's thermal emission at wavelengths from 0.3 to 20.5 cm [J]. Icarus, 1994, 110: 2–32.
- [31] 姜景山, 王振占, 张晓辉, 等. 微波月亮——人类对月球的全新视角——中国“嫦娥一号”卫星微波探测仪若干探测结果[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 409–422.
- [32] 李芸, 王振占, 姜景山. 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(8): 1045–1058.
- [33] 王振占, 李芸, 姜景山, 等. 用“嫦娥一号”卫星微波探测仪亮温反演月壤厚度和 $^3\text{He}$ 资源量评估的方法及初步结果分析[J]. 中国科学, 2009, 39(8): 1069–1084.

## Lunar surface physical temperature retrieved from the measurements by CE-1 lunar microwave sounder

Li Yun<sup>1,2</sup>, Jiang Jingshan<sup>1,2</sup>, Wang Zhenzhan<sup>1,2</sup>,  
Zhang Dehai<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaohui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, CAS, Beijing 100190, China; 2. National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China)

**[Abstract]** In this paper, algorithms of retrieving physical temperature and effective temperature from CE-1 lunar microwave sounder (CELMS) brightness temperatures are developed. The influences of physical temperature on microwave radiation are analyzed. These retrievals provide important information for evaluating other lunar surface parameters.

**[Key words]** CELMS; lunar surface physical temperature; retrieve