网络出版时间：2015-06-03 09:55
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20150603.0955.002.html

DOI：10.13203/j.whugis20120571　　文章编号：1671-8860(2015)06-0732-06

利用嫦娥二号微波辐射计数据的全月亮温制图

连　懿[1]　陈圣波[1]　孟治国[1]　张　莹[1]

1　吉林大学地球探测科学与技术学院，吉林 长春，130021

摘　要：中国嫦娥绕月卫星在世界上首次搭载了微波辐射计，用于获取不同深度月壤的微波辐射亮温，而这正是月壤厚度研究和月壤表层参数信息反演的基础。基于嫦娥二号的微波辐射计 2C 级数据，建立 4 个频率通道(3.0、7.8、19.35、37.0 GHz)在不同纬度下的亮温日变化模型，并通过该模型对亮温数据进行时角校正，得到了正午时刻的全月微波亮温图。结合 CCD 影像和 DEM 数据比较的结果表明，处理后的亮温数据很好地反映了月球的地形特征及月表的反射率信息。基于高频的亮温数据对月球亮温异常区域进行了分析，发现其都是哥白尼纪的新鲜撞击坑。

关键词：嫦娥二号卫星；微波辐射计；亮温；时角

中图法分类号：P231.5　　**文献标志码**：A

微波辐射计是搭载在嫦娥卫星上的主要载荷之一，是国际上第一台绕月被动微波探测仪，用于获取不同深度的月壤微波辐射亮温，探测月壤特性[1]。早在 1960s，基于地基微波辐射计月球的被动微波辐射测量就开始了，其观测波长在 1～500 cm 之间[2-4]。但是利用地基微波辐射计存在如下缺陷：① 无法实现对月球背面的观测；② 空间分辨率较低；③ 存在临边效应[5]。我国嫦娥一号绕月卫星发射后，对月球表面亮度温度的研究重新引起关注，并针对不同频率的微波辐射计数据开展了不同目标的科学研究。基于嫦娥一号微波辐射计低频数据主要研究了月壤厚度[6,7]，进而反演出月壤的表层参数信息，并评估了 ^{3}He 的资源量[8,9]。高频主要探测月表的基本辐射。通过高频通道测量到的月表基本辐射，配合模拟的月球表面温度剖面可以反演出月球表面的介电常数分布[2]。亮温数据是上述研究的基础，因此亮温数据的处理对于月壤特性的研究有着重要的意义。

目前，基于嫦娥一号微波辐射计数据已经利用插值的方式完成了全月微波亮温图的制作[10,11]。在此基础上，郑永春以及 Chan 提出了利用时角校正亮温数据，并得到了基于时角校正的全月微波亮温图像，校正后的数据表现出了更丰富的信息[5,12]。但是其使用的嫦娥一号微波辐射计数据无论在数据量上还是在覆盖的时间跨度上都低于嫦娥二号，因此，本文基于嫦娥二号微波辐射计数据实现全月微波亮温图的制作。

1　数据选取及预处理

1.1　微波辐射计

搭载微波辐射计的嫦娥二号卫星于 2010 年 10 月 1 日成功发射，进行了长达半年的技术试验与科学探测。嫦娥二号工作轨道为 100 km×100 km 圆轨道，轨道周期约 118 min，回归周期约为一个月，回归总圈数约 334 轨。微波辐射计的探测频率为 3.0、7.8、19.35 和 37.0 GHz，每个频段的探测灵敏度均为 0.5 K，空间分辨率在 3.0 GHz 通道下为 50 km，在 7.8、19.35、37.0 GHz 通道下为 35 km。微波辐射计亮温数据以 PDS (planetary data system) 标准存储，2C 级轨道数据包括了数据采样时间、4 个频率通道的亮温、星下点太阳入射角和方位角、月球表面经纬度以及轨道高度等信息[10]。

为了对嫦娥二号亮温数据的空间分布进行研究，基于圆柱投影、GCS_MOON_2000 坐标系和嫦娥微波计的空间分辨率，并采用转化后的亮温

收稿日期：2013-08-28

项目来源：国家自然科学基金资助项目(41372337，40901187)；国家 863 重大计划资助项目(2008AA12A212)。

第一作者：连懿，博士，主要从事微波遥感与光学遥感研究。E-mail：fishlice@163.com

通讯作者：陈圣波，博士，教授。E-mail：chensb@jlu.edu.cn

值对 0.5°分辨率的网格进行填图，将月表划分为 0.5°×0.5°的规则格网，统计了所有嫦娥二号亮温数据在全月面的空间覆盖状况。如图 1 所示，其数据覆盖率达 99.97%。从覆盖密度的分布来看，覆盖密度随纬度的升高而增加，在两极地区最高，这是由 CE-2 的极轨轨道特性决定的。

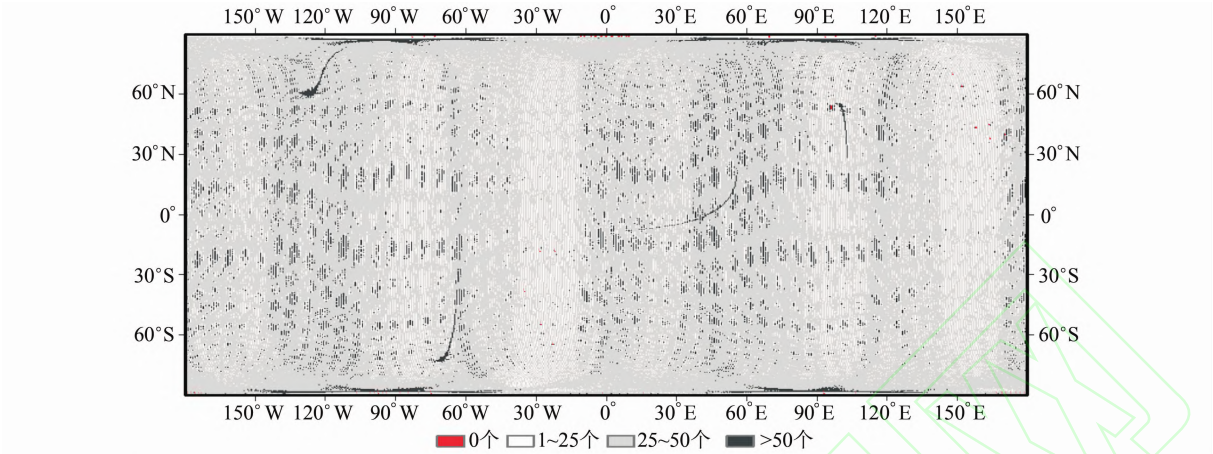

图 1　嫦娥二号微波辐射计数据在 0.5°×0.5°网格下的空间覆盖分析图

Fig. 1　Spatial Cover Analysis Chart of Chang'E-2 Microwave Radiometer Data Under 0.5°×0.5° Grid

1.2　时角校正

月表温度受月球时间的影响较大，这是由于其温度随月球时间的变化会引起亮温的剧烈变化，进而会掩盖其他诸如地理位置、地形以及月表物质介电性能等对亮温的影响。为了更加准确地表达月表亮温的空间变化，本研究引入了时角的概念来表示月球的时间(1 h 对应 15°角)[5]。

在地平坐标系统，采用嫦娥二号微波辐射计 2C 级数据中的太阳入射角和方位角来表示太阳的方位。但当地时间的时角还与纬度有关，因此采用赤道坐标系来表示月球的时角信息。在地平坐标系到赤道坐标系的转化中，将太阳入射角和方位角信息转化为时角信息，其计算公式[5,12]为：

$$\tan\varphi = \sin a \tan i / (\cos\lambda - \sin\lambda \cos a \tan i) \quad (1)$$

其中，i 是太阳入射角，取值范围为$[0, \pi]$；a 是太阳方位角，取值范围为$[0, 2\pi]$；θ 是极角，用来表示极距，取值范围为$[0, \pi]$；φ 是负极角，取值范围为$[-\pi, \pi]$；λ 是纬度，取值范围为$[-\pi/2, \pi/2]$；h 则表示时角，$h=-\varphi$。

1.3　数据比较

嫦娥一号和嫦娥二号上同时搭载了性能相似的微波辐射计。本文在对微波辐射计数据时角进行计算的基础上，对 CE-1 和 CE-2 的数据进行了比较分析。从图 2 中可以看出，尽管 CE-1 卫星在绕月飞行期间测得的亮温数据可以多次覆盖月球表面，但对亮温数据的统计结果表明，其亮温数据多数集中在月球午夜时刻(对应时角 −180°或 180°)和正午时刻(对应时角 0°)，而不能够覆盖一天当中的整个时段，因此不能很好地模拟亮温数据的日变化特征。而嫦娥二号在每个时段上都拥有大量的亮温数据，相对嫦娥一号而言，能更好地模拟亮温随时角变化的特征。因此，根据亮温数据的时角特性，本文采用嫦娥二号微波辐射计数据来制作全月亮温图。

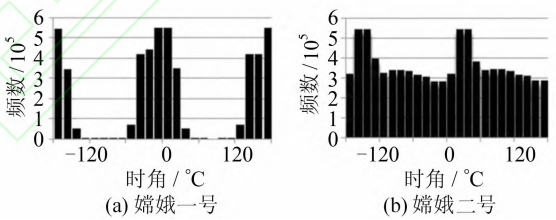

图 2　嫦娥数据采样点的时角信息统计

Fig. 2　Sampling Points Hour Angle Information Statistics of Chang'E Data

2　全月亮温制图

2.1　亮温日变化模型

为了获取全球范围内特定时刻的亮温分布，分别提取每 20°纬度区域的中心纬度±0.1°的亮温数据，建立不同纬度的亮温日变化的高斯拟合模型。研究中比较了高斯拟合、线性拟合、傅立叶拟合等几种拟合方式，并利用精度高的 3 次高斯拟合模型来拟合嫦娥二号的亮温数据，即

$$TB_{model} = a_1 \cdot e^{(-((h-b_1)/c_1)^2)} + a_2 \cdot e^{(-((h-b_2)/c_2)^2)} + a_3 \cdot e^{(-((h-b_3)/c_3)^2)} \quad (2)$$

其中，h 表示时角，取值范围为$[-\pi, \pi]$；a_i、b_i、c_i ($i=1,2,3$)分别是高斯模型的拟合参数；TB_{model} 是

表1 不同纬度的高斯拟合模型参数

Tab. 1 Parameters of Gaussian Model at Different Latitudes

拟合数据	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3	模型
0°N±0.1°	151.6	8.775	123.2	207.4	202.3	203.9	218.4	−210	148.8	model0
20°N±0.1°	153.2	−11.1	172.4	183	244	305.5	148.7	−206.1	98.23	model20
40°N±0.1°	62.56	42.25	141	192.8	866	2 711	36.07	−174.3	63.67	model40
60°N±0.1°	78.26	−199.3	88.19	205.3	53.16	286.2	11.87	184	34.03	model60
80°N±0.1°	66.8	−182.2	95.25	−9.145	11.2	9.236	141.8	68.76	247.9	model80

通过模型计算不同时角的亮温值。表1是拟合模型分别在不同纬度的拟合参数。

为了构造正午时刻的全月亮温图像，需要将所有时间段下的亮温数据转化为正午时刻，即时角为0°时的亮温值。根据式(2)并结合空间插值方法，通过式(3)对每个亮温数据进行不同时角的尺度变化，得到正午时刻的亮温值。

$$\mathrm{TB}_{\mathrm{noon}}=\frac{\mathrm{lat}_{(\mathrm{center})}-\mathrm{lat}_{(\mathrm{lowlat})}}{20}\cdot\mathrm{TB}_{h(\mathrm{measured})}\cdot\mathrm{TB}_{\mathrm{noon}(\mathrm{lowlatmodel})}/\mathrm{TB}_{h(\mathrm{lowlatmodel})}+\frac{\mathrm{lat}_{(\mathrm{highlat})}-\mathrm{lat}_{(\mathrm{center})}}{20}\cdot\mathrm{TB}_{h(\mathrm{measured})}\cdot\mathrm{TB}_{\mathrm{noon}(\mathrm{highlatmodel})}/\mathrm{TB}_{h(\mathrm{highlatmodel})}\tag{3}$$

其中，$\mathrm{lat}_{(\mathrm{center})}$为采样点的纬度；$\mathrm{lat}_{(\mathrm{lowlat})}$、$\mathrm{lat}_{(\mathrm{highlat})}$分别是低于采样点和高于采样点并且最靠近采样点的高斯拟合模型的中心纬度；$(\mathrm{lat}_{(\mathrm{center})}-\mathrm{lat}_{(\mathrm{lowlat})})/20$、$(\mathrm{lat}_{(\mathrm{highlat})}-\mathrm{lat}_{(\mathrm{center})})/20$分别表示采样点低、高纬度的高斯拟合模型的权重函数；$\mathrm{TB}_{h(\mathrm{measured})}$表示采样点的亮温测量值；$\mathrm{TB}_{\mathrm{noon}(\mathrm{lowlatmodel})}$、$\mathrm{TB}_{\mathrm{noon}(\mathrm{highlatmodel})}$分别表示采样点低、高纬度的高斯拟合模型对应的正午亮温值；$\mathrm{TB}_{h(\mathrm{lowlatmodel})}$、$\mathrm{TB}_{h(\mathrm{highlatmodel})}$分别表示采样点低、高纬度的高斯拟合模型对应的采样时角的亮温值。

2.2 数据滤波

由于仪器系统噪声、月表地形起伏、卫星轨道与姿态测量等多个环节都存在误差，嫦娥微波辐射计数据中不可避免地含有一定的误差。从原始数据到时角处理的过程中，数据的误差会被传播和放大，导致微波辐射计数据中存在明显的亮温奇异值，甚至出现严重的失真和扭曲现象，因此需要通过滤波的方法进行处理。本文采用基于地学统计法[13]的单轨滤波，逐点统计每个0.5°×0.5°网格点中通过亮温日变化模型校正后的所有亮温数据。

$$\overline{T}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}T_i,\delta=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(T_i-\overline{T})^2/N}\tag{4}$$

式中，$\overline{T}$为该网格点中所有亮温数据的平均值；δ为标准差；N为该网格点中亮温数据的个数；T_i为网格点中各个亮温数据的值。如果该亮温数据满足$|T_i-\overline{T}_i|>M\delta$，则将该值作为奇异值被剔除。其中，$M$为阈值测点参数，这里取$M=4$[14]。

2.3 制作全月亮温图

在剔除掉奇异点后，基于简单圆柱投影和GCS_MOON_2000坐标系，并采用转化后的亮温值对0.5°×0.5°分辨率的网格进行填图。由于嫦娥二号微波辐射计数据在0.5°×0.5°分辨率的网格下并不是全覆盖的，因此还需对填图结果进行克里金插值，得到正午时刻3.0、7.8、19.35和37.0 GHz下的全月亮温图(见图3)。

图3显示，月球表面的亮温随纬度的升高而降低，这是因为太阳辐射分布不同以及影响亮温的月球表面的物理温度从赤道向两极逐渐降低的缘故。比较图3(a)至3(d)可以发现，频率越高，全月表面亮温分布的差异越大，这是因为频率越高，电磁波对月壤的穿透深度就越小，月壤深度越小，其不同纬度的物理温度差异越大。

3 亮温数据分析

3.1 结合DEM和CCD影像分析亮温数据

从微波亮温分布图上可以看出，除从宏观上存在明显微波亮温纬度性分布外，还可以看到即使在同一纬度上的亮温也并不完全相同。结合CCD影像和DEM数据进行比较(图4)，结果表明，微波辐射的局部特征受到月球地形和月表反射率的影响。

从图4(b)中可以看出，在虹湾地区，亮温随等高线的分布趋势，这些地形信息都可以从时角校正后的微波亮温图中获得。在图4(b)箭头位置的北部地区，同一纬度下山脊的阳面亮温值高于阴面，由此可以看出太阳辐射是决定亮温值高低的重要因素。

亮温值除了反映月球的地形信息外，还反映反射率的信息。将虹湾的亮温图和该地区嫦娥一号CCD影像图进行比较可以看出，CCD影像图中海拔较高的区域内的亮度值比月海区域内的高，而亮温值则相反。这是由于月海区域的反射

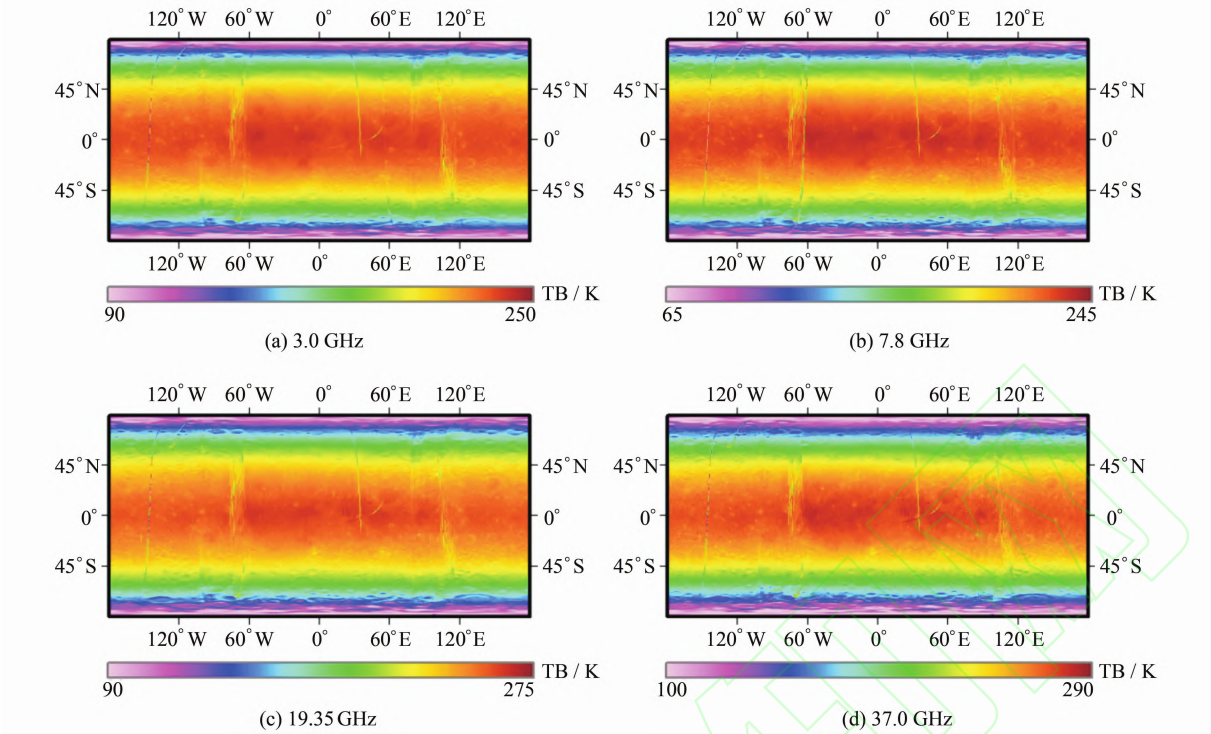

图 3　正午时刻各频率亮温分布图

Fig. 3　Lunar Bright Temperature Image at Daytime at Each Frequency

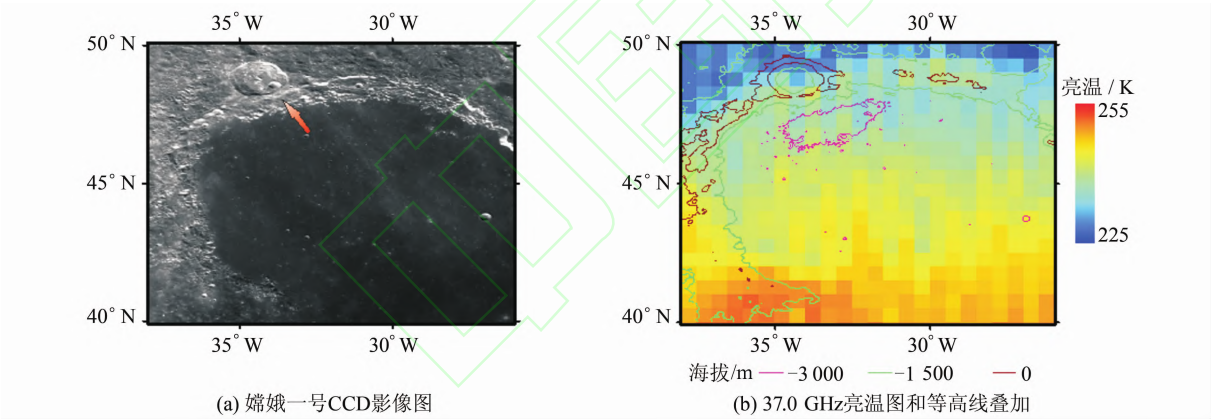

图 4　虹湾地区 CCD 影像图和亮温图比较

Fig. 4　Comparison of CCD Image and Brightness Temperature Image at Sinus Iridum

率较低,相对而言可以吸收更多的热能,因此表现出了较高的亮温值。

3.2　亮温异常区域研究

通过分析中低纬度地区 37.0 GHz 的亮温图,发现了一些亮温异常的区域,如图 5 中的 *A*、*B*、*C* 区域是相对周围区域的一个亮温异常冷点。图 6 显示了这些亮温异常冷点几乎都是撞击坑,并且普遍都是一些比较新的撞击坑,如哥白尼纪形成的 Aristarchus 撞击坑(图 6(a))、Langrenus 撞击坑(图 6(b))和 Lents 撞击坑(图 6(c))[15]。这是因为在哥白尼纪或者更晚形成的撞击坑的反射率高,其热变换速度也高于周围区域,因此其亮温值不同于周围区域。

研究中将 Aristarchus 撞击坑的亮温值与该撞击坑所在纬度带的亮温数据的平均值进行了比较,如表 2 所示,其中,TB_{cra} 表示 Aristarchus 撞击坑的亮温值;TB_{avg} 表示 Aristarchus 撞击坑所在纬度带的亮温均值。由表 2 可见,Aristarchus 撞击坑的亮温普遍低于同纬度的均值,并且随着频率的增加,差值也随之增大。且频率越高,探测深度越浅,这是由于表层温度变化较底层温度变化快,因此高频通道的亮温更表现出亮温的异常特征,这也是本文选用最高频率通道(37.0 GHz)的亮温值来研究亮温异常区域的原因。

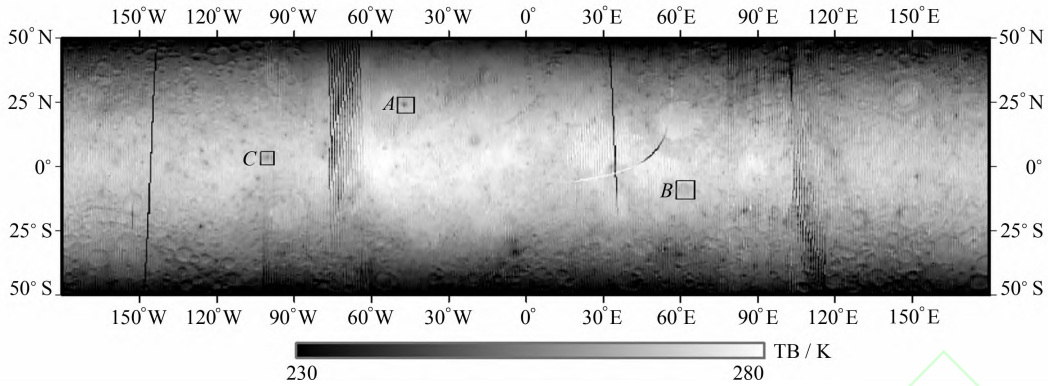

图5 37.0 GHz中低纬度亮温图

Fig. 5 Brightness Temperature Image at Middle and Low Latitudes at 37.0 GHz

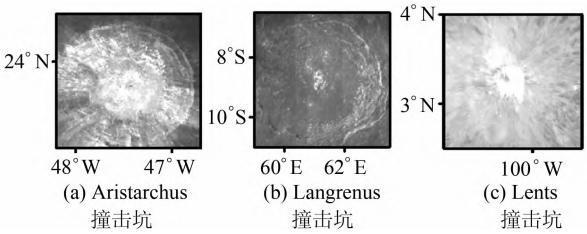

图6 亮温异常区域CCD影像

Fig. 6 CCD Image of Anomalous Brightness Temperature Area

表2 Aristarchus撞击坑不同频率亮温异常比较

Tab. 2 Comparison of Different Frequency Anomalous Brightness Temperature of Aristarchus Crater

亮温/K	微波辐射计测量频率/GHz			
	3.0	7.8	19.35	37.0
TB_{cra}	212	204	228	239
TB_{avg}	229	222	246	261
$TB_D=TB_{avg}-TB_{cra}$	17	18	18	22

4 结 语

本文对嫦娥亮温数据的时角信息进行了统计分析。结果表明,嫦娥二号微波辐射计数据无论是在数量上,还是覆盖的时间跨度上,都优于嫦娥一号,其数据空间覆盖度也达到99.97%,一定程度上对嫦娥一号和嫦娥二号的数据质量进行了评价。通过研究不同频率及不同纬度下的时角和亮温的相关关系,分别建立了不同频率通道下和不同纬度下的亮温日变化模型,并根据模型对亮温数据进行了时角校正。亮温分布图显示,月球表面各频率的亮温随纬度的升高而降低;频率越高,全月表面的亮温分布差异越大。本文还结合DEM和CCD影像数据比较评价了微波亮温图。同时还基于高频的亮温数据研究了月球亮温异常区域,结果表明,亮温异常区域为哥白尼纪的新鲜撞击坑。

参 考 文 献

[1] Ouyang Ziyuan. Science Results of Chang'E-1 Lunar Orbiter and Mission Goals of Chang'E-2[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 19(5): 1-6(欧阳自远. 嫦娥一号卫星的初步科学成果与嫦娥二号卫星的使命[J]. 航天器工程, 2009, 19(5): 1-6)

[2] Hirth W, Butz M, Fuerst E, et al. The Brightness Distribution over the Moon's Disk at 6 cm Wavelength[J]. *The Moon*, 1976, 15: 317-323

[3] Marina B. Moon Disc Temperature as a Function of Phase at 1 700 MHz[R]. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Department Physik, Switzerland, 2003

[4] Keihm S J, Gary B L. Interpretations of High Resolution Lunar Brightness Temperature Maps at Lambda 3.55 Micrometer[J]. *EOS Trans*, 1979, 60: 299

[5] Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, et al. First Microwave Map of the Moon with Chang'E-1 Data: The Role of Local Time in Global Imaging[J]. *Icarus*, 2012, 219: 194-210

[6] Meng Zhiguo, Chen Shengbo, Du Xiaojuan, et al. Influence of Temperature and Frequency on Microwave Dielectric Properties of Lunar Regolith Stimulant[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(1): 94-101

[7] Fa Wenzhe, Jin Yaqiu. Inversion of Lunar Regolith Layer Thickness Using Microwave Radiance Simulation of Three Layer Model and Clementine UV-VIS Data[J]. *Space Sci*, 2007, 27(1): 55-65(法文哲,金亚秋. 三层月壤模型的多通道微波辐射模拟与月壤厚度的反演[J]. 空间科学学报, 2007, 27(1): 55-65)

[8] Wang Zhenzhan, Li Yun, Jiang Jingshan, et al. Lunar Surface Dielectric Constant, Regolith Thick-

ness and Helium-3 Abundance Distributions Retrieved from Microwave Brightness Temperatures of CE-1 Lunar Microwave Sounder[J]. *Sci China Ser D—Earth Sci*, 2009, 39(8): 1 069-1 084(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}He资源量评估的方法及初步结果分析[J].中国科学D辑:地球科学,2009, 39(8):1 069-1 084)

[9] Fa W Z, Jin Y Q. Quantitative Estimation of Helium-3 Spatial Distribution in the Lunar Regolith Layer[J]. *Icarus*,2007,1 990:15-23

[10] Wang Zhenzhan, Li Yun, Zhang Xiaohui, et al. In-orbit Calibration of and Antenna Pattern Correction to CE-1 Lunar Microwave Sounder (CELMS)[J]. *Sci China Ser D—Earth Sci*, 2009, 39(8): 1 029-1 044(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[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2009, 39(8): 1 029-1 044)

[11] Fa W Z, Jin Y Q. Analysis of Microwave Brightness Temperature of Lunar Surface and Inversion of Regolith Layer Thickness: Primary Results of Chang'E-1 Multi-channel Radiometer Observation [J]. *Sci China Ser*, 2010, E53: 168-181

[12] Chan K L, Tsang K T, Kong B, et al. Lunar Regolith Thermal Behavior Revealed by Chang'E-1 Microwave Brightness Temperature Data[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 295 (1/2):287-291

[13] Sheng Ju, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Theory of Probability and Mathematical Statistic[M]. Beijing: Higher Education Press, 1994(盛聚,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社, 1994)

[14] Hao Weifeng, Li Fei, Yan Jianguo, et al. Lunar Polar Illumination Based on Chang'E-1 Laser Altimeter[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(1):46-52(郝卫峰,李斐,鄢建国,等.基于"嫦娥一号"激光测高数据的月球极区光照条件研究[J].地球物理学报,2012,55(1):46-52)

[15] Chevrel S D, Pinet P C, Daydou Y, et al. The Aristarchus Plateau on the Moon: Mineralogical and Structural Study from Integrated Clementine UV-Vis-NIR Spectral Data[J]. *Icarus*, 2009, 199(1): 9-24

Distribution of Microwave Radiation Brightness Temperatures on the Lunar Surface Based on Chang'E-2 MRM Data

LIAN Yi[1]　*CHEN Shengbo*[1]　*MENG Zhiguo*[1]　*ZHANG Ying*[1]

1 College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130021, China

Abstract: The Chinese Chang'E lunar rover was equipped with a passive microwave radiometer (MRM) to measure for the first time the brightness temperature from the lunar surface. The brightness temperature is the base of inversion of lunar regolith thickness and lunar regolith parameters. Based on MRM 2C-level data from Chang'E-2, the models of diurnal variation of the brightness temperature in the four channels are established separately at different latitudes. Based on these models, microwave maps of the moon were constructed using hour angle calibration. The results were combined with a comparison of CCD images and DEM data showing that brightness temperature data commendably reflects the lunar terrain characteristics and lunar surface reflectivity. Abnormal areas of lunar brightness temperature based on brightness temperature data were analyzed at high frequency, which shows that all are fresh impact craters from the Copernican period.

Key words: Chang'E-2; microwave radiometer; temperature brightness; hour angle

First author: LIAN Yi, PhD, specializes in the microwave remote sensing and optical remote sensing. E-mail: fishlice@163.com

Corresponding author: CHEN Shengbo, PhD, professor. E-mail: chensb@jlu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41372337, 40901187; the Ministry of Science and Technology 863 Projects Topics, No. 2008AA12A212.