

# “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

宫晓蕙, 金亚秋\*

复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433

\* 联系人, E-mail: yqjin@fudan.ac.cn

2011-03-30 收稿, 2011-06-20 接受

国家自然科学基金资助项目(41071219, 60971091)

**摘要** 由中国“嫦娥一号”(CE-1)微波辐射计对月球虹湾地区观测时刻相对应的太阳入射角与方位角, 由极点球面坐标系与月球观测点局部坐标系的转换关系, 得到 CE-1 对月球虹湾区域(Bay of Rainbow, 拉丁文 Sinus Iridum)观测的当地时间. 采用 CE-1 微波辐射计观测数据, 得到月球虹湾地区当地不同时间的辐射亮度温度( $T_b$ )变化分布. 由月表三层模型的热辐射传输理论, 结合 CE-1 微波辐射计 19 与 37 GHz 通道的  $T_b$  数据, 反演得到月球昼夜不同时段虹湾地区表面月尘层与月壤层的物理温度变化, 分析了影响虹湾地区月表面物理温度的主要因素.

## 关键词

“嫦娥一号”(CE-1)  
微波辐射计  
虹湾地区  
辐射亮度温度  
物理温度反演

在长期的地质演化过程中, 月球表面由于火山喷发以及受到陨石小天体的撞击在月表形成了一层由尘土、非集结性岩块、碎屑、玻璃熔融物质等构成的月壤层, 位于其表面的是很薄的月尘土表层<sup>[1]</sup>. 由于没有大气的热传导, 月球表面物理温度昼夜变化极大<sup>[1,2]</sup>. 了解月表面物理温度分布及其昼夜变化, 对探索月表面环境特征, 开展登月与其他探月活动都是十分重要的.

2007年10月24日我国成功发射了第一颗探月卫星“嫦娥一号”(CE-1), 作为“嫦娥一号”的备份星, 具有更低运行圆轨道(约100 km)的“嫦娥二号”(CE-2)卫星也于2010年10月1日成功发射. “嫦娥一号”和“嫦娥二号”在世界上首次搭载了四通道微波辐射计, 频率分别为3.0, 7.8, 19.35, 37.0 GHz, 观察角度为0°, 其空间分辨率分别约为50 km (3 GHz)和35 km (其余三通道), 测量精度为0.5 K<sup>[3,4]</sup>. 其任务旨在测量整个月表面的微波辐射亮度温度( $T_b$ , brightness temperature), 进而反演月表层物理温度和月壤层厚度, 估算月壤层富含的氦-3( $^3\text{He}$ )含量<sup>[5,6]</sup>.

CE-2与CE-1的一个不同点是在其运行椭圆轨道时可达月球正上方约15 km, 特别以更高分辨率对虹湾地区(43°N, 31°W)进行CCD相机照相(www.people.com.cn, 2010-11-8), 为今后CE-3计划着陆的地点做准备(www.people.com.cn, 2010-11-8).

对于月表面物理温度的认识以往主要来自于以地球为基地的辐射测量<sup>[7]</sup>, 在过去Apollo等探月计划中<sup>[1,8]</sup>, 未曾针对虹湾地区有过特别的了解. 由于月表面受太阳光直接照射的影响, 昼夜表面温度变化很大. 本文采用CE-1的 $T_b$ 数据, 结合月表面三层热辐射模型<sup>[9]</sup>, 反演虹湾区域不同月球时刻的月表层物理温度, 将有助于了解作为一典型例子的虹湾地区月表层物理温度及其昼夜变化, 为CE-3在虹湾区域登陆和其他探月活动提供一个物理环境特征的参考.

## 1 CE-1 观测数据的月球当地时间

采用2007年11月27日~2008年2月4日和2008年5月15日~2008年7月28日共1307轨CE-1微波辐射计观测 $T_b$ 数据, 从中挑选出在虹湾地区不同月

球当地时间的  $T_b$  数据. CE-1 是一颗极轨卫星, 在月球自转一周的时间内, CE-1 可以分别在月球白天与黑夜各观测到虹湾地区一次. 月球的自转周期相对较长, 为 27 d 7 h 43 min<sup>[1]</sup>, 因此可以先将所有数据按照地球时间将每月球自转周期(27 d 7 h 43 min)进行划分. 参照 CE-1 给出的数据, 观测时间可以划分为 6 个月, 分别为 2007 年 11 月 27 日~12 月 24 日 (M1)、2007 年 12 月 25 日~2008 年 1 月 21 日 (M2)、2008 年 1 月 21 日~2 月 4 日 (M3)、2008 年 5 月 15 日~6 月 11 日 (M4)、2008 年 6 月 11 日~7 月 7 日 (M5)、2008 年 7 月 7 日~7 月 28 日 (M6).

这样, 在每个月球日中 CE-1 都可以观测到虹湾地区白天和黑夜辐射亮度温度的一组数据. 由于月球对太阳的相对位置会随时间发生变化, 因此每个月份 (M1 等) 所观测到的虹湾区域实际上所处的月球当地时间并不相同. 如果要确定每个月球日中所观测到虹湾区域所处的月球当地时间, 则需要计算观测当时的太阳星下点所在经度与虹湾区域所在经度两者之差, 这是表征当地时间的一个参量. 举例来说, 如果该夹角为  $0^\circ$ , 表明观测地区处于正午; 若该角度为  $180^\circ$ , 则该地区处于午夜. 在 CE-1 数据中, 除了给出观测点辐射亮度温度的同时, 也给出了相应的太阳入射角与方位角.

如图 1, P 点为月球主坐标系的北极点, Q 点 ( $\varphi_0, \lambda_0$ ) 为观测点, 例如虹湾地区,  $\varphi_0$  和  $\lambda_0$  分别为虹湾地区的经纬度, K ( $\varphi, \lambda$ ) 点为太阳所在位置. 太阳入射角以及太阳方位角的定义都是基于以观察点 Q 为极点的地平坐标系而言的, 太阳入射角是指太阳入射光线与当地 Q 点法线的夹角, 太阳方位角则定义为太阳入射光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角. 可以看到, 图 1 中天顶距  $z$  所对应的圆心角 (以  $z$  表示) 和  $\alpha$  满足太阳入射角和方位角的定义. 这样, 由 (1) 式即可确定 K 点, 亦即太阳所处的位置, 再由 K 点与 Q 点的经度差就可以得到该观测点所处的月球当地时间. 事实上, (1) 式可以通过球面三角形的正弦定理和余弦定理通过简单的变换得到<sup>[10]</sup>.

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0), \\ \sin z \cos \alpha &= \sin \varphi \cos \varphi_0 - \cos \varphi \sin \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0), \\ \sin z \sin \alpha &= \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0). \end{aligned} \quad (1)$$

采用上述方法, 对 CE-1 的  $T_b$  数据按月球自转周期进行分组, 找到对应的虹湾地区的  $T_b$  数据, 并按照太阳入射角首先区分是月球白天还是黑夜的数据, 得到 CE-1 所观测到的所有各个时间段的虹湾地区的辐射亮度温度  $T_b$  分布以及所对应观测  $T_b$  数据的太阳入射角和方位角, 按照 (1) 式换算成月球观测点的当地时间, 如表 1 所示.

这里月球观测点的当地时间的换算原则是以太阳所在经度为正午 12 时, 向左向右各  $7.5^\circ$  为正午 12 时时段, 以此推断出虹湾地区所处的时间段, 来确定其月球当地时间. 这里的月球当地时间仅是指观察点区域所处的时间段. 由于 M3 和 M6 时段并不是一个完整的月球自转周期, 在这两个时段中没有月球黑夜的观测  $T_b$  数据, 因此在月球黑夜只得到了 4 个时间点的观测  $T_b$  数据.

图 2 给出各个时间段太阳与虹湾地区的相对位置. 图中是以虹湾中心位置为观察点对月球进行投影得到的结果, 此时太阳出于虹湾地区的背面, 无法直接观测到, 图中给出的是透视到月球背面的太阳

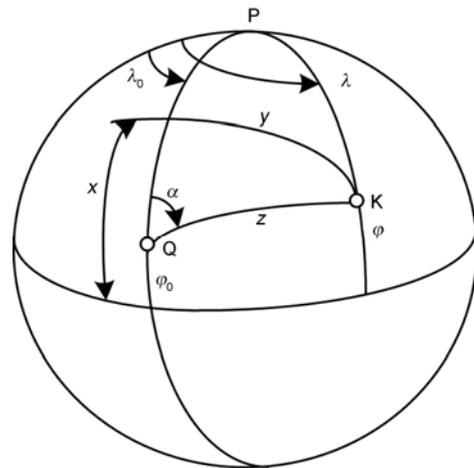


图 1 确定新极点的球面坐标系各点之间的相对位置关系<sup>[10]</sup>

表 1 CE-1 观测到虹湾地区不同时间段的太阳入射角和方位角以及对应的月球当地时间

	月球白天						月球黑夜			
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1	M2	M4	M5
太阳入射角( $^\circ$ )	47.1835	45.3518	54.7299	46.3664	42.0414	48.9401	137.852	133.497	134.149	133.3
太阳方位角( $^\circ$ )	204.971	166.705	132.251	213.772	176.823	141.744	9.65368	329.043	12.5084	336.425
当地时间	13:00	11:00	9:00	14:00	12:00	10:00	0:00	22:00	1:00	23:00

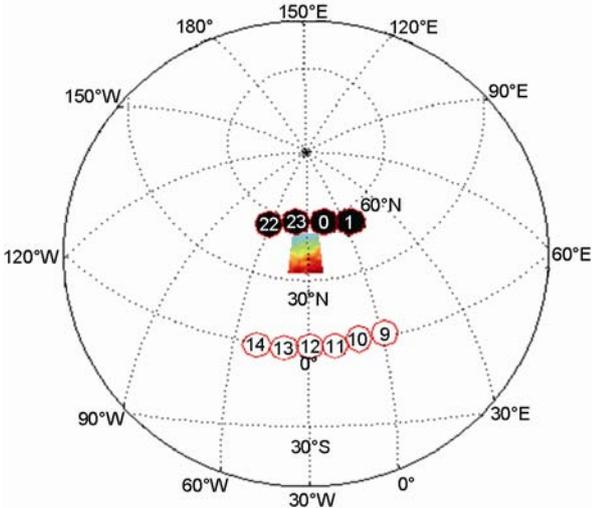


图2 月球当地时刻下太阳与月球虹湾地区的各个相对位置  
彩色的梯形区域是虹湾地区,白底红色圆表示月球白天时刻太阳的位置,黑底红色圆表示黑夜时刻太阳的位置

所在的位置.

## 2 虹湾地区地形特征与不同月球时间的 CE-1 观测 $T_b$ 数据

由日本 SELENE 卫星的激光高度计数据<sup>[11]</sup>, 虹湾地区地面数字高程(DEM)及其等高线图如图3(a)和(b)所示. 虹湾地区中心位置经纬度为(43°N, 31°W), 这里选取了以该点为中心, 长宽各 20 个经纬度的范围进行成图, 其中成图分辨率是每个经纬度 4 个像素, 对数据缺失点采用双线性插值法进行补充.

对月球虹湾地区 DEM 的了解, 有助于理解整个月表面 DEM 对月表辐射亮度温度分布的影响. 虹湾地区最显著的地形特征是具有清晰的月海与月陆的

分界线, 这在 CE-3 登月时或许可能实现一次探月同时比较月海与月陆的异同.

根据表 1 中给出观测数据的月球当地时间, 图 4 给出了月球白天各个月球当地时间下, 虹湾地区 37.0 GHz 的  $T_b$  分布  $T_{b37}$ . 由于篇幅所限, 不将其他通道的  $T_b$  逐一列出, 其一般的规律是高频通道的  $T_b$  高于低频通道, 如  $T_{b37} > T_{b19}$ . 图中以三维形式表现 DEM 的起伏, 以颜色表示  $T_b$  的高低, 对于观测数据缺失点采用最近邻方法完成插值计算, 本文中所有 DEM 的单位都是千米(km).

从图 4 可看出, 在月球当地时间 9:00~14:00 之间, 虹湾地区月表面  $T_b$  随时间逐渐升高, 于月球当地时间 14:00 时达到最高. 这是由于月表面受太阳光照的影响, 太阳光照在到达正午之前一直持续增强, 使月表面物理温度与  $T_b$  随之增强. 在 12:00~14:00 点之间, 太阳光照的累积效果使月表面热吸收与热辐射仍持续, 而使物理温度与  $T_b$  仍保持增加. 而对于一固定时间段内的虹湾整个地区的  $T_b$ , 则按一般的规律随纬度增高而逐渐降低. 在 DEM 较低的环形山底部由于太阳光照度的减少,  $T_b$  也相对较低. 月海与月陆的分界线也表现为  $T_b$  变化的分界线, 朝向月海区域的  $T_b$  相对较高, 而朝向月陆区域的  $T_b$  明显降低.

作为对照, 图 5 给出月球黑夜各个月球时段虹湾地区的 CE-1 观测  $T_{b37}$  数据. 夜间一个主要特点是低频通道  $T_b$  要高于高频通道  $T_b$ , 如  $T_{b37} < T_{b19}$ , 与白天恰相反. 这是由于月球黑夜表面顶层没有太阳光照, 物理温度骤冷, 穿透深度小的高频通道对月表层顶部的温度变化更为敏感, 因而下降很快. 22:00~次日 1:00 时段里月表面  $T_b$  的变化表现为先下降, 到午夜 0 时达到最低, 之后有小幅回升. 这可能是由于 0 时左右是一个月球日当中受太阳光照影响最小的时刻.

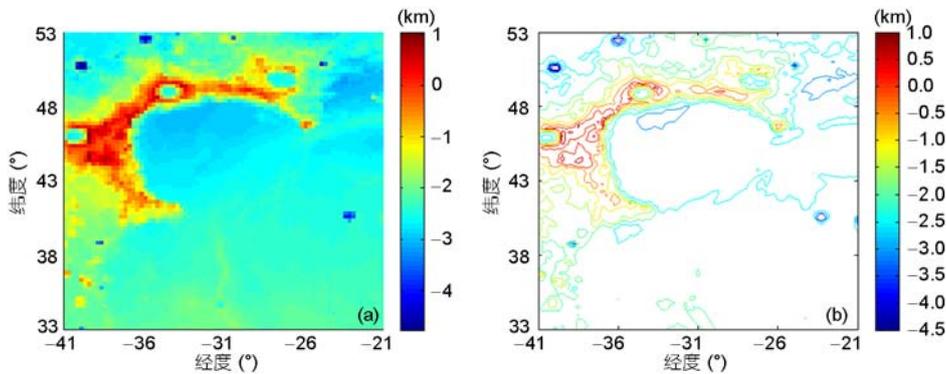


图3 由日本 SELENE 卫星激光高度计数据获得的虹湾地区 DEM(a)与等高线(b)示意图

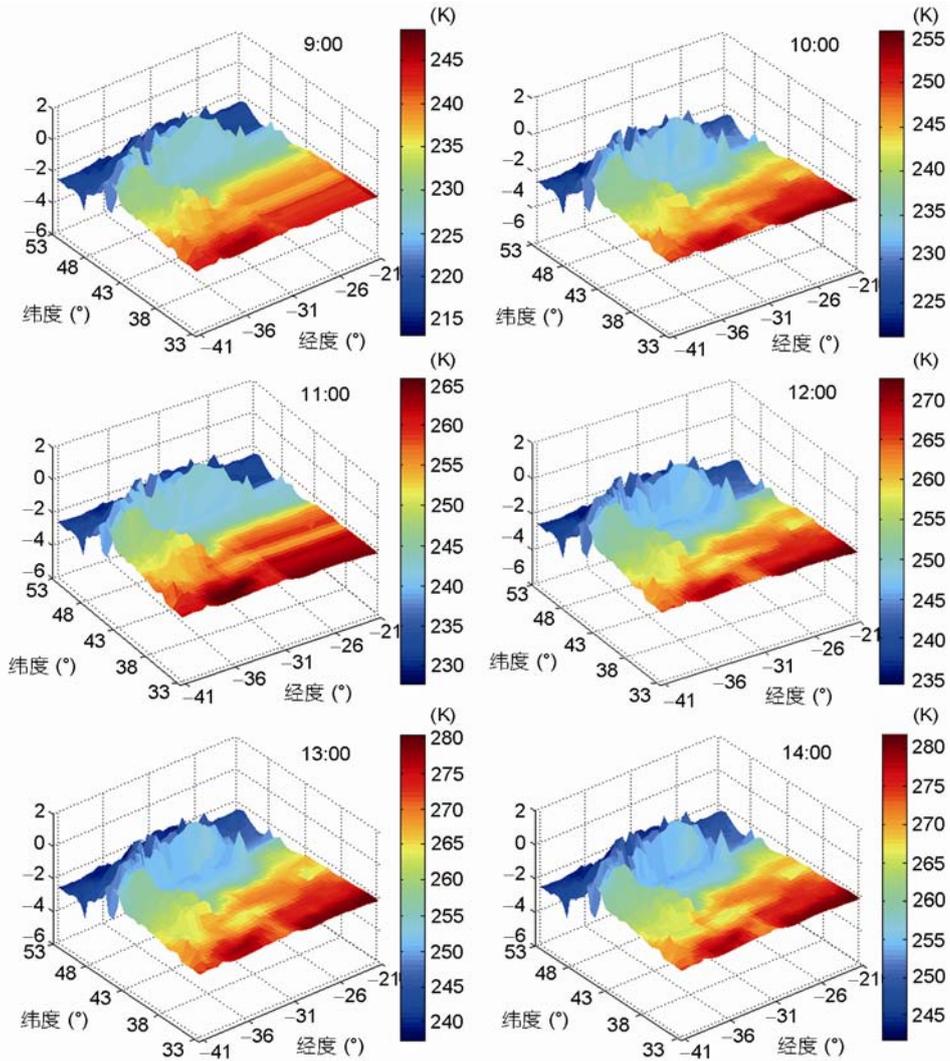


图4 月球白天各当地时段虹湾地区  $T_{b37}$  分布

### 3 月球虹湾地区表面不同时间的物理温度

以月尘、月壤、月岩三层模型的辐射传输理论,可以得到该分层模型的辐射亮度温度,  $T_b$  由月面介质层介电常数(与介质体密度、FeO+TiO<sub>2</sub>含量等有关)、物理温度、表面起伏与DEM、经纬度位置(太阳光照不同)等有关,具体可参见文献[9,12,13]的阐述.本文用上述CE-1高频通道的  $T_{b19}$  与  $T_{b37}$  观测数据反演虹湾地区不同月球时段的月尘层与月壤层分别的物理温度  $T_1$  和  $T_2$ .按文献[9],高频通道(CE-1的19,37GHz)辐射亮度温度的表达式可写为

$$T_b = (1-r_{01})(1-e^{-\kappa_{a1}d_1})(1+r_{12}e^{-\kappa_{a1}d_1})T_1 + (1-r_{01})(1-r_{12})e^{-\kappa_{a1}d_1}T_2. \quad (2)$$

由(2)式,得到月尘层与月壤层物理温度  $T_1$  和  $T_2$  的反演式:

$$T_1 = \frac{B_{37}T_{b19} - B_{19}T_{b37}}{A_{19}B_{37} - A_{37}B_{19}}, \quad T_2 = \frac{A_{37}T_{b19} - A_{19}T_{b37}}{A_{37}B_{19} - A_{19}B_{37}}, \quad (3)$$

其中参数

$$A_\nu = (1-r_{01})(1-e^{-\kappa_{a1}d_1})(1+r_{12}e^{-\kappa_{a1}d_1}), \quad (4)$$

$$B_\nu = (1-r_{01})(1-r_{12})e^{-\kappa_{a1}d_1},$$

式中  $\nu=19, 37$  GHz,  $r_{01}$  和  $r_{12}$  分别为月尘顶面与月尘/月壤界面的反射率,  $\kappa_{a1}(\nu)$  为该  $\nu$  通道的月尘层衰减系数,  $d_1$  为月尘层厚度.

图6给出了月球白天各时段虹湾地区物理温度  $T_1$  和  $T_2$  的反演结果.其中参数按文献[12,13],  $d_1=0.2$  m, 月尘层密度  $\rho_1=1.3$  g/cm<sup>3</sup>, 月壤层  $\rho_2=1.5$  g/cm<sup>3</sup>. 从图

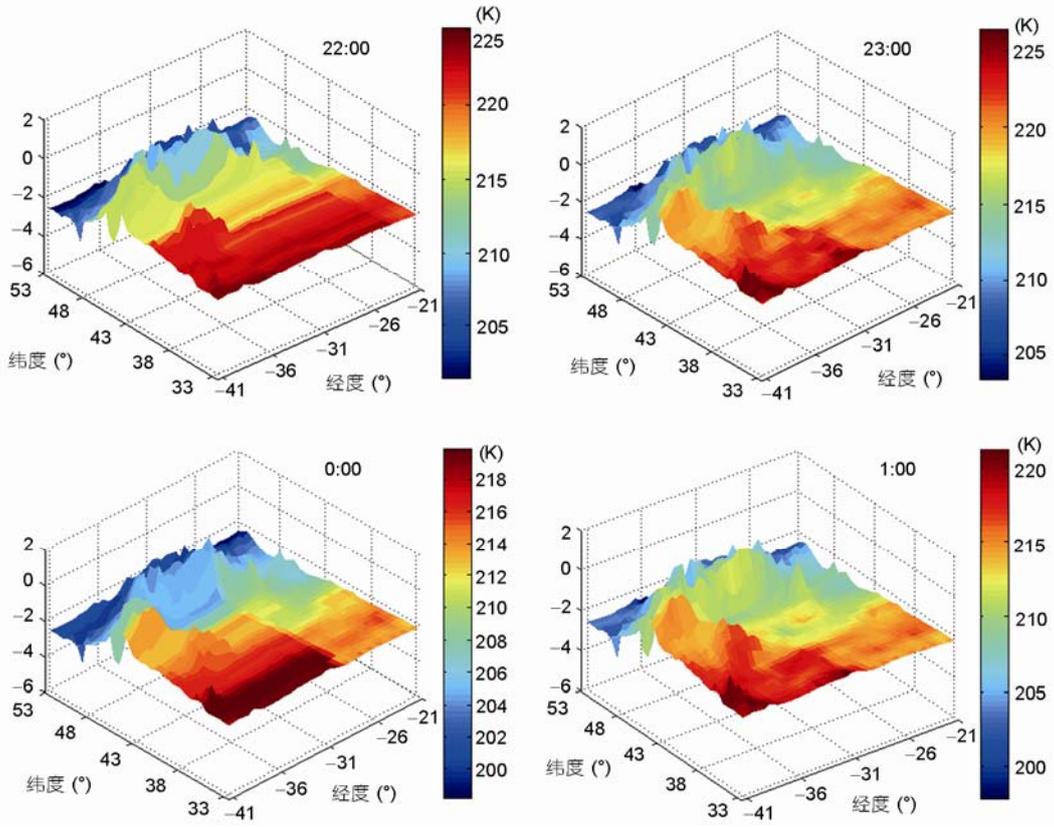


图 5 月球黑夜各当地时段虹湾地区  $T_{b37}$  分布

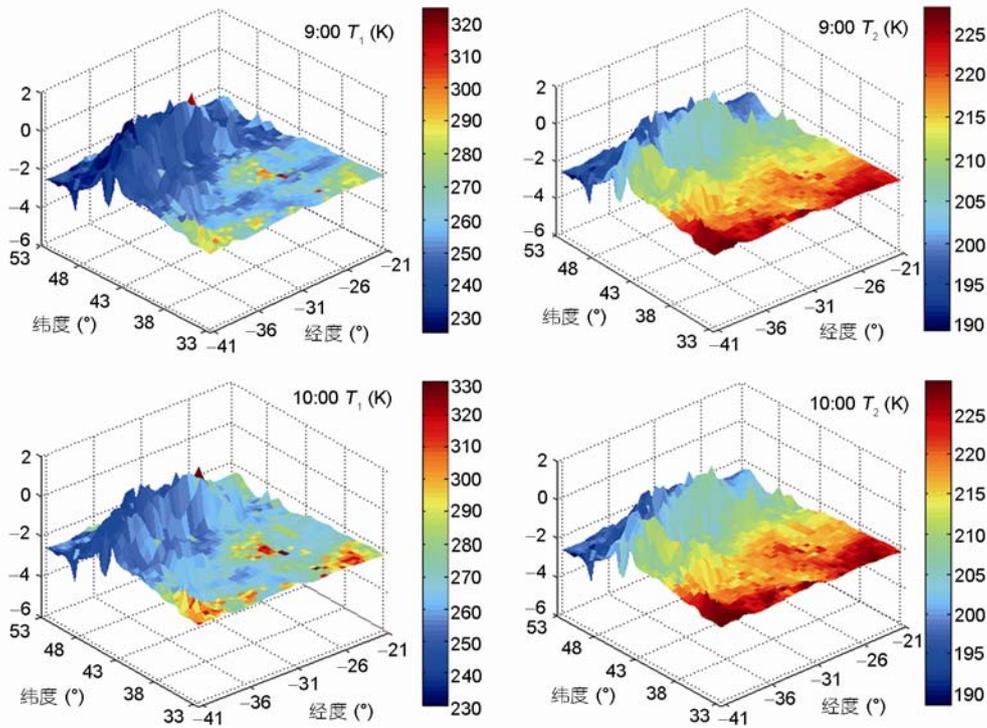


图 6 月球白天各时段虹湾地区月表层物理温度分布

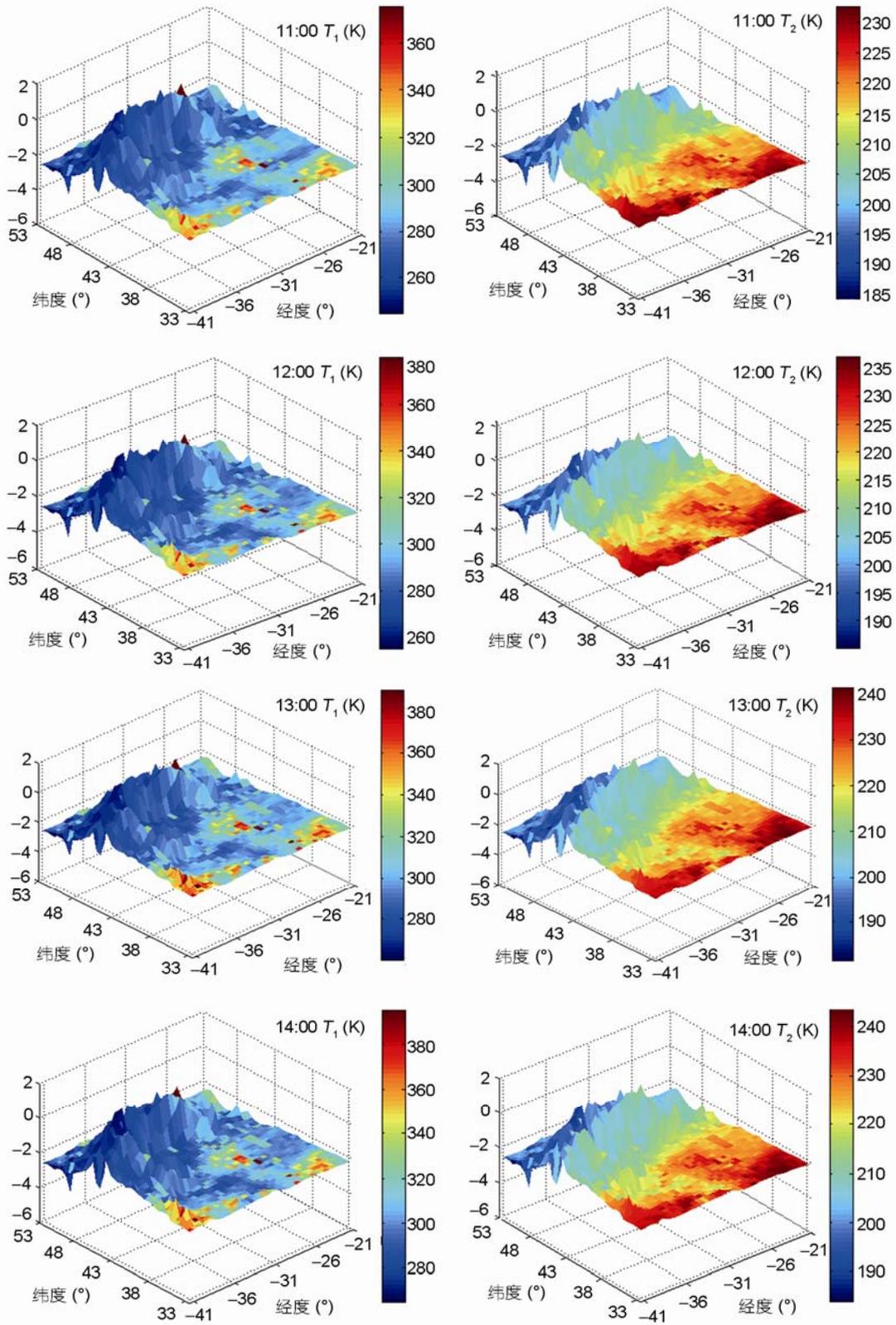


图 6(续)

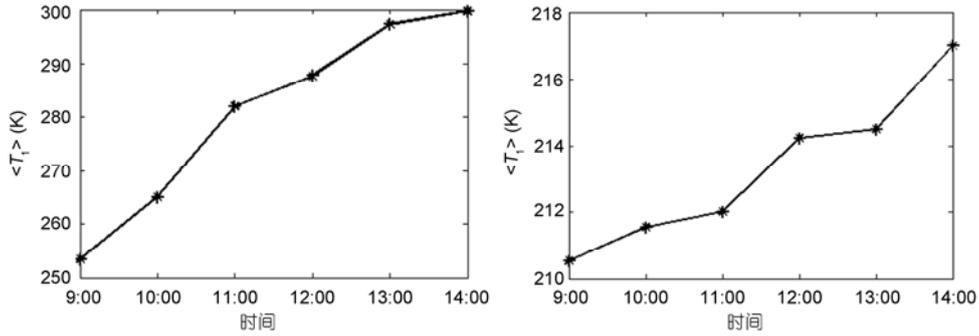


图7 月球白天虹湾地区表面平均物理温度 $\langle T_1 \rangle$ 与 $\langle T_2 \rangle$ 随时间的变化

6 各图比较可看出, 月球白天的物理温度变化与月表面  $T_b$  的变化规律类似, 朝中午逐渐升高, 在当地时间 14:00 达到最高.

以(43°N, 31°W)为中心, 在覆盖整个虹湾地区的长宽各 10 个经纬度的范围内计算平均温度, 图 7 所示为 9:00~14:00 时段整个虹湾地区平均的  $T_1$  和  $T_2$  的变化. 可以看到, 在白天 6 h 内 $\langle T_1 \rangle$ 就有近 50 K 的温度变化. 而月壤层的 $\langle T_2 \rangle$ 变化要小一些, 更多的是表现出纬度以及地形的影响. 因此, 月球白天月表层温度的变化随时间、纬度、地形、月尘与月壤成分等的不同是十分剧烈的.

从局部来看, 月表面  $T_b$  与该地的 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量有关, 它是决定月表层介电常数和热发射率的主要因素之一. 虹湾地区 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量分布如图 8 所示.

图 9 给出月球黑夜各个时段虹湾地区月表层物理温度的反演结果. 此时, 月壤层的  $T_2$  高于月尘层  $T_1$ , 这是由于月球黑夜接受不到太阳照射, 月尘层  $T_1$  急速下降, 而月壤层由于热传导缓慢, 维持住其物理温度与热辐射. 在 22:00~1:00 的时段内, 虹湾地区的月表物理温度先下降, 到 0:00 达到最低, 之后有小幅回升.

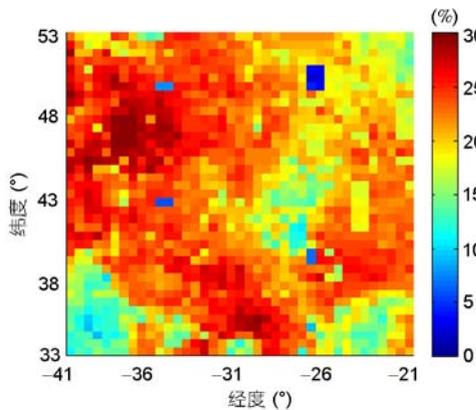


图8 虹湾地区的 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量分布

图 10 给出月球夜间 22:00~1:00 时虹湾地区月尘层与月壤层平均温度的变化. 由于采用的数据时间跨度较小, 变化不是太剧烈. 可以看到, 此时月壤层平均温度要远高于月尘顶层.

在月球白天, 由于月尘层  $T_1$  远大于月壤层  $T_2$ , (2) 式右端第一项中  $(1 - e^{-\kappa_{a1}d_1})T_1$  占主导作用, 即月尘层贡献显著. 在 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量较低的地方, 其因子  $1 - e^{-\kappa_{a1}d_1}$  较小, 若固定一个  $T_b$  值, 该地的  $T_1$  就必须较大. 而到了月球黑夜, 由于  $T_1 < T_2$ , (2) 式右端第二项贡献将占主导作用. 在 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量较低的地方, 第二项中对应的因子  $e^{-\kappa_{a1}d_1}$  较大,  $T_2$  也大, 这样在相同的  $T_b$  值下第一层的贡献必然减小, 进而导致较小的  $T_1$ . 这样就造成了在 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量较低的地方昼夜温差  $\Delta T_1 (\equiv T_{1\text{白天}} - T_{1\text{黑夜}})$  较大. 反之, 在 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量较高的地方, 昼夜温差就会小一些.

#### 4 结论

在 CE-1 观测数据中提取月球虹湾地区在月球当地时间白天 9:00~14:00 与黑夜 22:00~1:00 各时段的辐射亮度温度  $T_b$  分布, 在同一月球时间的  $T_b$  随纬度增加而降低; 同时受到 DEM 的影响, 在 DEM 较低太阳光照较少的环形山底部, 其  $T_b$  也相对较低. 月海与月陆的分界线也往往是  $T_b$  变化的分界线, 朝向月海区域的  $T_b$  相对较高, 而朝向月陆区域的  $T_b$  较低. 对于不同月球时间, 虹湾地区月表面的  $T_b$  在 9:00~14:00 随时间逐渐升高, 于当地时间 14:00 时达到最高. 而月球黑夜辐射亮度温度的特点低频高于高频, 在 22:00~1:00 时段里月表面  $T_b$  表现为先下降到 0:00 达到最低, 之后有小幅回升.

通过 CE-1 的 19 与 37 GHz 两通道的  $T_b$  反演月尘层与月壤层的物理温度. 在月球白天, 月尘层物理温

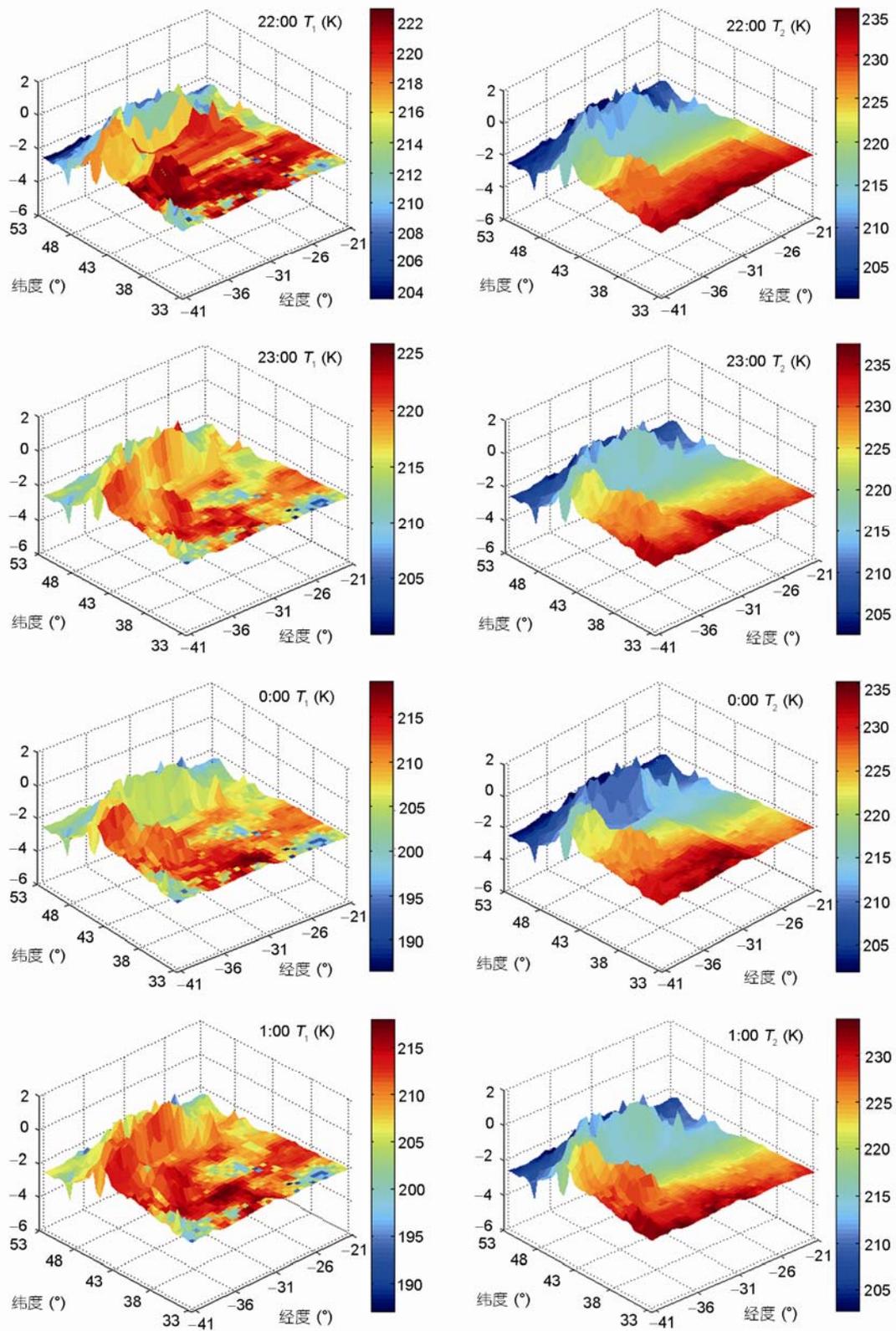


图9 月球黑夜各时段虹湾地区物理温度的变化

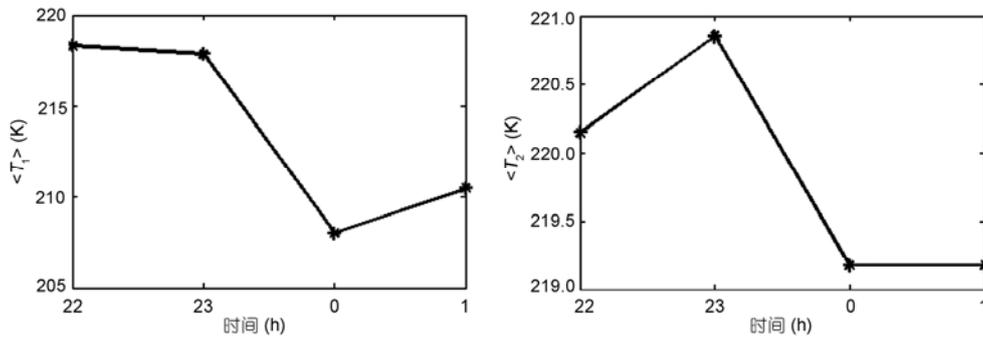


图 10 月球黑夜虹湾地区平均物理温度随时间的变化

度高于月壤层, 在月球黑夜则情况相反. 在月球白天不同时段里, 月表层物理温度的变化与  $T_b$  变化类似, 在 9:00~14:00 时段内月尘层平均温度从 253 K 可升至 300 K, 月壤层物理温度变化没那么大. 在夜间 22:00~1:00 时段内, 虹湾地区月表层物理温度呈先下降到 0:00 达到最低, 之后有小幅回升; 但在该时段内总体上物理温度变化不太大, 只有近 10 K. 在所有反演时段内的平均温度约为 254 K, 所有计算时段内昼夜最大温差可达约 90 K.

由于太阳光照度差异会明显影响不同时刻月尘

层物理温度. 随着月壤厚度加深, 月壤内部的热交换趋于平衡, 月壤层的温度变化似乎与纬度、DEM 的相关性更强. Lawson 等人<sup>[14]</sup>用红外数据也表明有类似的结论.

月表层介电常数由其体密度  $\rho$  与 FeO+TiO<sub>2</sub> 等参量决定<sup>[9]</sup>, 进而计算表面热发射率, 由此影响辐射亮度温度和物理温度分布. 可以看到, 在月球白天时 FeO+TiO<sub>2</sub> 含量低的地方温度较高, 而到了月球黑夜, 这些地方的物理温度却要更低一些. 而使得该地的月表面昼夜温差大, 反之亦然.

### 参考文献

- 1 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar Source-Book: A User's Guide to the Moon. London: Cambridge University Press, 1991
- 2 Dalton C, Hoffman E. Conceptual design of a lunar colony. NASA Grant Rpt. NGT 44-005-114, Washington D.C., 1972
- 3 姜景山. 微波月亮. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1028
- 4 Jiang J S, Jin Y Q. Selected Papers on Microwave Lunar Exploration in Chinese Cheng'E-1 Project. Beijing: Science Press, 2010
- 5 Fa W Z, Jin Y Q. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer. ICARUS, 2007, 71: 15-23
- 6 Fa W Z, Jin Y Q. Global inventory of helium-3 in lunar regolith estimated by multi-channel microwave radiometer on Chang-E 1. Chinese Sci Bull, 2010, 55: 4005-4009
- 7 Keihm S J, Gary B L. Comparison of theoretical and observed 3.55 cm wavelength brightness temperature maps of the full Moon. In: Proceedings of 10th Lunar and Planetary Science Conference, 1979. 2311-2319
- 8 Marcus G L, Stephen J K, Kenneth P. Revised lunar heat-flow values. In: Proceedings of 7th Lunar Science Conference, 1976. 3143-3171
- 9 Fa W Z, Jin Y Q. Simulation of brightness temperature of lunar surface and inversion of the regolith layer thickness. J Geophys Res-Planets, 2007, 112: E05003
- 10 张宏, 温永宁, 刘爱利, 等. 地理信息系统算法基础. 北京: 科学出版社, 2006
- 11 Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. Science, 2009, 323: 897-900
- 12 Jin Y Q, Fa W Z. An inversion approach for lunar regolith layer thickness using optical albedo data and microwave emission simulation. Acta Astronaut, 2009, 65: 1409-1423
- 13 Fa W Z, Jin Y Q. A primary analysis of microwave brightness temperature of lunar surface from Chang-E 1 multi-channel radiometer observation and inversion of regolith layer thickness. Icarus, 2010, 207: 605-615
- 14 Lawson S L, Jakosky B M, Park H S, et al. Brightness temperatures of the lunar surface: Calibration and global analysis of the Clementine longwave infrared camera data. J Geophys Res, 2000, 105: 4273-4290

## Diurnal distribution of the physical temperature at Sinus Iridum area retrieved from observations of CE-1 microwave radiometer

GONG XiaoHui & JIN YaQiu

*Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (MOE), Fudan University, Shanghai 200433, China*

Based on the incidence and azimuth angles of solar illumination during observations by Chinese Chang'E-1 lunar satellite, the brightness temperature ( $T_b$ ) observed by CE-1 multi-channel radiometers, especially at the Sinus Iridum (i.e. Bay of Rainbow) area, are collected at different lunar local time from the transformation between the principal coordinates and local coordinates at the observation point. It shows the  $T_b$  distribution and its diurnal variation. Based on the radiative transfer modeling of three-layer lunar media, the CE-1  $T_b$  data at 19 and 37 GHz channels are used to invert the physical temperatures of both the dust layer and the regolith layer at Sinus Iridum area, which might be the CE-3 landing site, at different lunar local time. The physical temperature variations with the lunar local time and other geophysical parameters of lunar layered media are discussed.

**CE-1, microwave radiometer, Sinus Iridum, brightness temperature, inversion of physical temperature**

doi: 10.1360/972011-30