

基于 LRO 卫星 Diviner 热红外发射率的尺度问题研究

马明^{1,2}, 陈圣波^{1*}, 陆天启¹, 路鹏¹, 肖扬^{1,2}

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

2. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 吉林 长春 130118)

摘要: 尺度问题作为对地观测的主要挑战和遥感科学的核心问题, 一直以来备受关注. 国内外学者对这一问题进行了大量的基础理论研究和科学验证工作, 探讨和解决了许多与遥感尺度相关的核心问题. 当然, 在遥感探测内容中, 发射率和温度遥感中也存在明显的尺度问题. 以往混合像元发射率尺度问题的研究往往集中于地球表面, 幸运的是, 月球为我们研究这一问题提供了绝佳的对象. 同时, 伴随着 Diviner 热辐射探测器月表测量数据的不断更新, 混合像元中发射率尺度问题的具体研究及其定量描述逐渐变为可能. 本文以月表 Diviner 热红外测量数据为基础, 在充分研究和分析 Diviner 数据特征和发射率计算方法的前提下, 以不同尺度下的 Apollo 15 登月区或者登月点热红外发射率为研究对象, 依据混合像元发射率定义, 分析和研究了混合像元中发射率的尺度转换和尺度效应两个问题, 从发射率数值角度出发讨论和验证了尺度变换和尺度效应的一般规律, 并给出定量描述, 希望能够为尺度变换和尺度效应等问题的研究提供理论支持和实验依据.

关键词: 发射率; Diviner; 尺度转换; 尺度效应; 定量描述

中图分类号: P184.5+3 **文献标识码:** A

Study on scale problems based on the diviner thermal infrared emissivity of LRO satellite

MA Ming^{1,2}, CHEN Sheng-Bo^{1*}, LU Tian-Qi¹, LU Peng¹, XIAO Yang^{1,2}

(1. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. College of Surveying and Exploration Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: The scale problem is the main challenge of Earth observation, and it is also the core issue that has been receiving attention in remote sensing science. A lot of basic theoretical research and scientific verification work have been done on this, and many core issues related to remote sensing standards have been discussed and solved. In remote sensing content, scaling issues including emissivity and temperature measurements are more reliable and less affected by the Earth's atmosphere. At the same time, with the continuous update of the Diviner thermal radiation detector's monthly surface measurement data, the specific research and quantitative description of emissivity scaling problems in mixed pixels has gradually become possible. Based on Diviner's thermal infrared measurement data on the moon's surface, the thermal infrared emissivity of the moon landing area or moon landing point of Apollo 15 at different scales was studied under the premise of full study and analysis of Diviner data characteristics and emissivity calculation methods. Based on the definition of mixed-cell emissivity, two problems of emissivity scaling and scale effect in mixed pixels are analyzed and studied. From the emissivity numerical point of view, the general rules of scaling and scaling effects are discussed and verified. The given quantitative descriptions are hoped to provide theoretical support and experimental evidence for research on issues such as scale transformation and scale effects.

收稿日期: 2017-12-01, 修回日期: 2018-03-02

Received date: 2017-12-01, revised date: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372337, 3A415AK44423, #1772346), 科技基础专项项目(2015FY210500)和 863 计划(2015AA123704)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41372337, 3A415AK44423, #1772346), Special project of science and Technology Foundation (2015FY210500), the National High Technology Research and Development Program ("863" Program) of China (2015AA123704)

作者简介 (Biography): 马明 (1979-) 男, 汉族, 辽宁丹东人, 讲师, 博士, 主要从事月球热红外遥感研究. E-mail: 121303083@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: chensb@jlu.edu.cn

Key words: emissivity, Diviner, scale transformation, scale effect, quantitative description

PACS: 95.55.-n, 95.55.Pe

引言

尺度问题被广泛认为是对地观测的主要挑战,也是遥感科学中的核心问题^[1]. 从上世纪 80 年代末期美国 NASA 推出的“遥感科学计划”开始,国内外学者对于尺度问题进行了大量的研究. 当然,在表面发射率和温度遥感中也存在明显的尺度问题. 早期对它们的研究主要集中在对于大气校正和温度发射率分离算法上,而对于地表方向发射率机理的研究却相对较少,甚至会出现理解上的错误. 经典定义认为物体表面应具有均一温度,进而可以与相同表面温度黑体的热辐射进行比较,获取物体表面的热发射率. 但是,几乎每个遥感像元中都存在着物质混合、多重散射和温度差异等问题. 例如,林冠结构或者土壤的非等温像元中的热辐射就是由双向反射(BRDF)发射率和不同温度单元相互间的多重散射共同产生的. 因此,从这一角度出发,对于特定尺度下的非等温遥感像元的有效或者等价发射率定义是存在混淆的^[2].

尺度问题研究需要回答的两个主要问题分别是:不同分辨率尺度上的尺度转换和像元尺度上基本物理定律的适用性^[3]. 对于这两方面问题国内外红外遥感研究者做了大量有意义的探索. 一方面,对于不同尺度的发射率和温度转换问题的研究主要有: Raffy 以几何外包络线模型空间化方法和最小平方模型为基础,利用小尺度半经验模型系数计算了全球尺度的辐射亮度值^[3]; Hu 等人在辐射亮度计算中加入了方差和协方差尺度修正因子,保证了植被指数算子的尺度不变性^[4]; 李小文等成功的将直方图应用于热红外遥感像元中地表辐射和大气辐射的分离中,进而为空间信息分布的分类面积和降尺度转换打下基础^[5]; 全金玲等研究了不同尺度因子在地表温度降尺度转换中的性能和实用性^[6],等等.

另一方面,发射率和温度中的尺度效应始于对于不同温度的物质组分作为一个像元的辐射量与相同温度黑体贡献的辐射量间的关系这一关键问题, Balick et al.^[7]、Norman and Becker^[8]、Wan and Dozier^[9]和 Li and Wang^[10]等相继从混合像元中非均匀物质组分间的温度、辐射量、发射率和内在机理等角度出发,研究了非等温表面热辐射特性,进而给出了

相同混合像元的不同发射率定义以及尺度效应物理意义. 基于以上理论研究,李小文从简单几何光学模型、物理学原理和定律在遥感像元尺度上的实用性等角度出发,建立了李小文-Strahler 几何光学模型,探讨和解决了 Beer 定律向上的尺度纠正^[11]、Helmholtz 互易原理在像元尺度上的失效^[12]和 Planck 定律中的尺度效应^[13]等问题,并将尺度效应问题引入了定量遥感研究^[14]. 随后,尺度差异^[15]和分形^[16]等方法相继被应用于遥感尺度内涵和混合像元尺度效应的研究中.

遥感参数的尺度效应作为遥感应应用中的一个重要科学问题,之前的学者已经从理论和模型角度剖析了混合像元发射率中的尺度问题,并初步利用遥感数据从辐射亮度值和因子角度加以分析和研究. 但是,他们的研究并没有脱离地球,没有利用适合的热红外数据直接验证和探讨发射率像元中尺度问题,更没有对于尺度转换和尺度效应给出数值化的定量描述. 本文将地质单元简单,逻辑关系明确,且几乎不受大气影响的月球为研究对象,以 LRO (The Lunar Reconnaissance Orbiter) Diviner 热红外测量数据为基础,依据混合像元发射率定义,通过提取和计算不同尺度下的月表亮温值、辐射亮度值和发射率数据,分别从尺度转换和尺度效应两个角度出发,探讨和研究月表发射率中的尺度问题的一般规律,并给出了尺度转换和尺度效应的定量描述,验证了尺度转换中的非线性关系和尺度效应的分布规律,希望能够在以往地球表面尺度问题研究的基础上,为尺度转换和尺度效应问题的研究提供一个新的尝试.

1 混合像元发射率定义

像元表面辐射遵循普朗克定律(式 1),即温度为 T 的单位表面积,单位观测时间内,固定波长范围内,向半球空间辐射的能量,表示为波长与温度的函数.

$$R_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(c_2/\lambda T) - 1} \quad (1)$$

根据普朗克定律,像元发射率为像元的辐射能量与同温度黑体辐射能量的比率,即:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \frac{R_{\lambda}(T)}{B_{\lambda}(T)} \quad (2)$$

式中 $R_\lambda(T)$ 和 $B_\lambda(T)$ 定义为温度 T 的普朗克函数.

然而, 空间观测的表面通常是非均匀等温表面, 尤其是在低空间分辨率的观测当中, 这种不均匀性更加明显. 从几米到几公里空间尺度下的遥感观测中不可能找到一个理论上的等温像元. 因此, 对于一个混合像元, 有 N 个特定谱段和视角的均匀像元组成.

基于混合像元中组分的温度差异, Balick et al.^[7] 通过各个像元组分的温度计算总的混合像元温度, 进而得到混合像元发射率, 称为 t -发射率, 混合像元温度为:

$$T_0(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N a_i T_i(\theta, \varphi) \quad , \quad (3)$$

式中 T_0 为混合像元温度, T_i 为像元组分的温度, 且保证 $\sum_{i=1}^N a_i = 1$, θ 和 φ 为每像元天顶角和方位角.

基于混合像元中组分的发射率差异, Wan and Dozier^[9] 给出了一种混合像元发射率定义, 用 $\varepsilon_r(\theta, \varphi)$ 表示, 称为 r -发射率, 即

$$\varepsilon_r(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N a_i \varepsilon_i(\theta, \varphi) \quad , \quad (4)$$

式中 ε_r 为混合像元发射率, ε_i 为像元组分 i 的发射率. 从尺度的角度分析, r -发射率被认为尺度恒定, 也可称为混合像元理想发射率.

基于混合像元中组分的辐射量差异, Norman and Becker^[8] 和 Wan and Dozier^[9] 也给出了另一种混合像元发射率定义, 用 $\varepsilon_e(\theta, \varphi)$ 表示, 称为 e -发射率, 即

$$\varepsilon_e(\theta, \varphi) = \frac{\sum_{i=1}^N a_i \varepsilon_i(\theta, \varphi) B_k(T_i)}{\sum_{i=1}^N a_i B_k(T_i)} \quad , \quad (5)$$

式中 T_i 为像元组分的温度, $B_k(T_i)$ 为像元组分的辐射量, ε_i 与 r -发射率中的定义一致.

基于普朗克函数和双向反射分布函数, Li et al.^[2] 和 Li and Wang^[10] 提出了一种带有尺度效应的混合像元发射率定义, 用 $\varepsilon_{app}(\theta, \varphi)$ 表示, 称为视在发射率, 即

$$\varepsilon_{app}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N a_i \varepsilon_i(\theta, \varphi) + K_\lambda(T_0) \sum_{i=1}^N a_i \varepsilon_i(\theta, \varphi) \Delta T_i \quad , \quad (6)$$

式中, 视在发射率为理想发射率(r -发射率)和视在发射率增量之和, ΔT_i 是像元组分的温度与参考温度 T_0 的温度差, 并且 $K_\lambda(T_0) = B'_\lambda(T_0)/B_\lambda(T_0)$, $B'_\lambda(T_0)$ 是温度 T_0 的普朗克公式的一阶微分近似值(视在发射率增量)或者 Taylor 级数二阶近似值

(Planck 定律的尺度纠正因子).

2 LRO Diviner 通道发射率

2.1 LRO Diviner 数据

从 LRO 于 2009 年 6 月 19 日(北京时间)发射成功后, 作为 LRO 上七个有效载荷之一的 Diviner 已经从 2009 年 6 月 28 日开始工作至今, 其九通道(每通道有 21 个阵列)推扫式天底观测方式已经获取了全月统一和最大时间覆盖度的月表太阳反射和热红外发射数据. 与此同时, NASA 将 Diviner 辐射计数据分成 4 个级别, 大量 Diviner 测量原始信息存储于 RDR(Reduced Data Rec)级数据中, 为 ASCII 格式. 目前(截止至 2017 年 9 月), 可以获取的全月 RDR 级数据为 200907051650 至 201706152350(间隔时间大约为地球时间 10 min), 共计 415 330 景, 每景数据为 33 列, 88 万行左右, 大小约为 288 MB.

2.2 Diviner 数据预处理

Greenhagen et al.^[17] 首次提出了 Diviner 测量数据反演月表发射率的方法, 并利用 Diviner 通道 3 至 5 的发射率数据计算获得了全月范围内的硅酸盐发射率光谱特征(CF 特征), 并反演了月表硅酸盐含量. 随后, Allen et al.^[18] 和马明等^[19] 等相继利用此方法计算了月表的通道发射率. 但是, 研究 Diviner 测量的原始数据发现, 除了 Bandfield et al.^[20] 认为的 Diviner 通道 3 到 5 夜间红外数据没有足够信噪比, 不能应用于月表发射率计算之外, Diviner 原始数据中还存在一个重大的问题被之前的研究所忽视或者未加论述.

研究 Diviner RDR 级 ASCII 数据发现, 除了少量明显的“点”或者“线”状错误数据之外, 每隔 40 分钟(地球时间) Diviner 会出现一次仪器“故障”, 并且伴随着纬度的升高, “故障”出现的频率逐渐升高, 尤其是在两极地区, 甚至会出现几乎一景数据中全是“故障”数据的现象. 一般情况下, NASA 将 diviner “故障”测量数据标定为“-9999”. 但是, 继续分析发现, 在 Diviner 回复正常后的一段时间内, Diviner 测量的红外数据依然缺乏足够的信噪比, 表现为“故障”排除后的一段时间内的测量值明显低于同一区域其他正常测量值. Diviner 每次的“故障”数据为 66 528(352 × 9 × 21) 行, “故障”排除后的低信噪比数据约为 6 615(35 × 9 × 21) 行. 因此, 在利用 Diviner 红外数据进行月表发射率或者温度计算前, 应该对 Diviner 测量数据进行预处理, 除了剔除“点”或者“线”状错误数据外, 还必须剔除 Diviner 原始

测量数据中“故障”和“故障”解除后共计 73 143 行的红外数据.

2.3 Diviner 通道发射率计算

研究区选定为 Apollo 15 登陆点(3. 633 86°E , 26. 132 22°N)附近的 10° × 10° 范围(0° - 10°E , 20° - 30°N) 内的区域 , 该区域中几乎包含着月表各种类型的地质单元 , 主要有山脉、撞击盆地和月谷等. 复杂的地层单元决定了研究区矿物和成分的相异性 , 为发射率反演提供了非常合适的研究区域. 截止至 2017 年 9 月 , 能够获取的研究区 Diviner RDR 级数据共计 2611 景 , 即 200907130440 至 201706120530.

研究将 Greenhagen et al. [17] 计算的月表通道发射率空间分辨率(32 × 32 像素/度)提高了一倍 , 主要原因是在 Diviner 八年多的运行时间内 , 随着测量数据的不断更新 , 月表红外数据的时间和空间尺度都在不断改进 , 这也为计算 Diviner 最高分辨率(64 × 64 像素/度)的月表发射率提供了可能. 通道发射率计算方法为: 在剔除“坏点”、“坏线”、“故障”以及“故障”排除后失真数据的前提下 , 以单景红外测量数据为基础(测量时间大致相同) , 先利用 Diviner 通道 3、4 和 5 的白天亮温值计算每个像元的最大亮温值(式 7 和式 8) , 代替像元实际温度 , 然后利用白天通道辐射亮度值与最大亮温普朗克辐射量值计算通道发射率(式 9) , 最后取多个计算结果的平均值作为像元发射率的最终值 , 具体计算方法参见马明等 [19] .

$$\begin{aligned}
 T_3 &= A_1 * \lambda_3^2 + B_1 * \lambda_3 + C_1 \\
 T_4 &= A_1 * \lambda_4^2 + B_1 * \lambda_4 + C_1 \\
 T_5 &= A_1 * \lambda_5^2 + B_1 * \lambda_5 + C_1 \quad , \quad (7) \\
 T_{max} &= C_1 - B_1^2 / (4 * A_1) \quad , \quad (8)
 \end{aligned}$$

式(7)中 T_3 、 T_4 和 T_5 分别为每个像元 Diviner 通道 3、4 和 5 的亮温值 λ_3 、 λ_4 和 λ_5 分别为 Diviner 通道 3、4 和 5 的中心波长 , 分别为 7. 80 μm 、8. 25 μm 和 8. 53 μm , A_1 、 B_1 和 C_1 为亮温值二次拟合系数. 式(8)中 T_{max} 为每个像元最大亮温值 , 用来代替像元实际温度.

$$\varepsilon(\lambda_{3,4,5}) = \frac{L(\lambda_{3,4,5})}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda_{3,4,5}) B(\lambda_{3,4,5}, T_{max}) d\lambda} \quad , \quad (9)$$

式(9)中 , 式中 $\varepsilon(\lambda_{3,4,5})$ 分别为 Diviner 通道 3、4 和 5 的通道发射率值 $f_k(\lambda_{3,4,5})$ 是三个通道的仪器响应函数 , 满足 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_k(\lambda) d\lambda = 1$ $L(\lambda_{3,4,5})$ 是三个通道

测量的辐射亮度值 $B(\lambda_{3,4,5}, T_{max})$ 是与最高亮温值的普朗克辐射量.

基于等距圆柱投影和 GCS_MOON_2000 坐标系的 64 × 64 像素/度空间分辨率的 Apollo 15 登月区 Diviner 通道 3、4 和 5 的发射率如图 1、图 2 和图 3 所示.

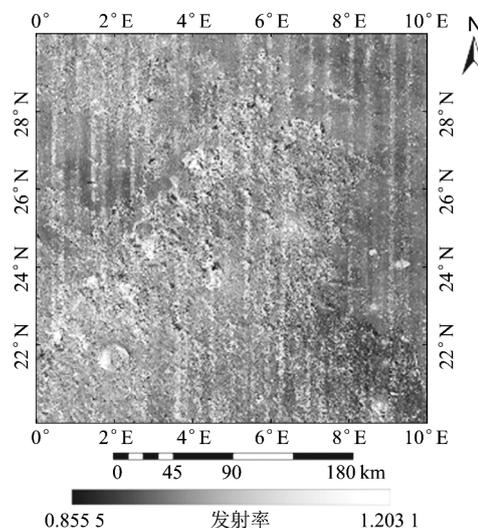


图 1 Apollo 15 登月区 Diviner 通道 3 发射率(64 × 64 像素/度)
Fig. 1 Diviner channels 3 emissivity of the Apollo 15 landing area(64 × 64 pixels/degree)

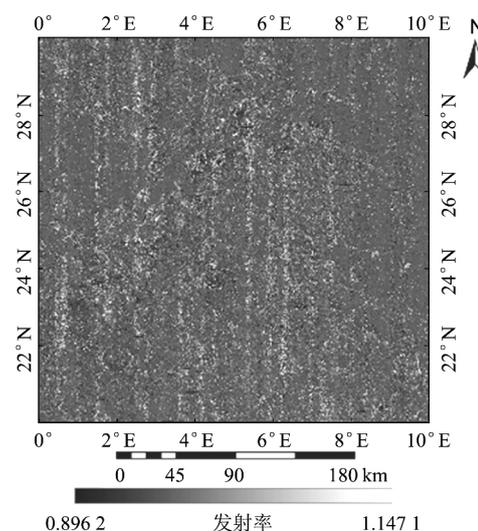


图 2 Apollo 15 登月区 Diviner 通道 4 发射率(64 × 64 像素/度)
Fig. 2 Diviner channels 4 emissivity of the Apollo 15 landing area(64 × 64 pixels/degree)

分析图 1、图 2 和图 3 发现 , Diviner 三个通道的发射率都遵循月表物质发射率的一般规律 , 即

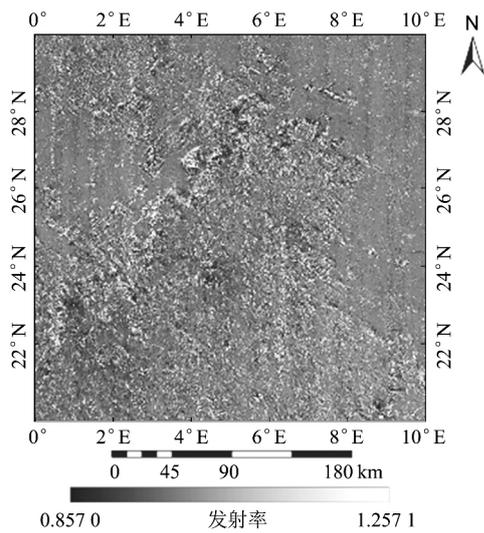


图3 Apollo 15 登月区 Diviner 通道 5 发射率(64 × 64 像素/度)
 Fig. 3 Diviner channels 5 emissivity of the Apollo 15 landing area(64 × 64 pixels/degree)

裸露大块岩石的山脉和撞击坑盆地边缘相对于月壤为主的撞击坑坑底和月海地区具有较高的通道发射率. 但是, 由于 Apollo 样品发射率光谱 CF 特征波长位置^[21]多数位于 Diviner 通道 4 的范围(8. 10 ~ 8. 40 μm) 内, 因此, 图 2 中的大部分通道发射率都接近于 1, 相比图 1 和图 3, 图 2 发射率的区分度较低. 此外, 在 Apollo 样品中, 由于硅酸盐矿物含量较高的岩石样品相对于月海月壤样品的发射率光谱 CF 特征更靠近短波方向, 因此, 通道 3 的发射率表现为更强的岩石性特, 而通道 5 的发射率变现为更强的月壤特征. 例如, 通道 3 的发射率反映了研究区的山脉和撞击坑坑壁附近分布着大量的岩石, 而通道 5 的发射率更加明显的反映了研究区月壤覆盖情况.

需要说明的一点是, 在 Diviner 通道发射率计算过程中存在一个明显的问题, 即研究区的部分通道发射率大于 1 或者小于 0. 9. 其主要原因是 Diviner 通道 3、4 和 5 的设计初衷是利用发射率归一化法求取三个通道发射率, 进而再利用二次拟合求取 CF 特征对应的波长位置, 其核心目标不是在发射率测量的绝对精度上. 因此, 测量过程中的通道辐射定标和发射率计算等因素共同导致了部分通道发射率大于 1 或者小于 0. 9 的现象, 但不影响探测器目标任务的完成, 也不影响尺度问题的研究(研究中剔除了小于 0. 85 和大于 1. 5 的发射率计算值).

3 发射率的尺度问题

3.1 发射率的尺度转换

一般情况下, 如果不考虑尺度效应问题, 基于像元理想发射率定义, 低一级别空间分辨率的像元发射率可以由高一级别空间分辨率的像元发射率简单叠加而得. 因此, 以岩性特征区分度较大的 Diviner 通道 3 发射率为研究对象, 可以基于 64 × 64 像素/度(图 1) 通道发射率数据依次获得 32 × 32 像素/度、16 × 16 像素/度(图 4)、8 × 8 像素/度和 4 × 4 像素/度(图 5) 四种空间分辨率的研究区发射率.

研究图 1、图 4 和图 5 发现, 作为有真值、可测量和可标度的发射率, 随着空间尺度的变化, 其表示的地理信息特征也在发生变化. 尽管不同尺度的发射率是通过线性聚合获得, 但是, 其表示的地理信息的聚类结果却是不同的. 具体来说, 伴随着空间分辨率的降低, 一方面, 发射率反映的地理信息出现了明显的取舍现象, 哈德利月谷(Rima Hadley) 和研究区部分撞击坑逐渐消失, 地层单元的边界也变得模糊; 另一方面, 在高分辨率发射率向低分辨率发射率转换过程中, 地形影响、机制性信息和下垫面的非均匀性等逐渐弱化, 而转换非线性和宏观格局性逐渐增强.

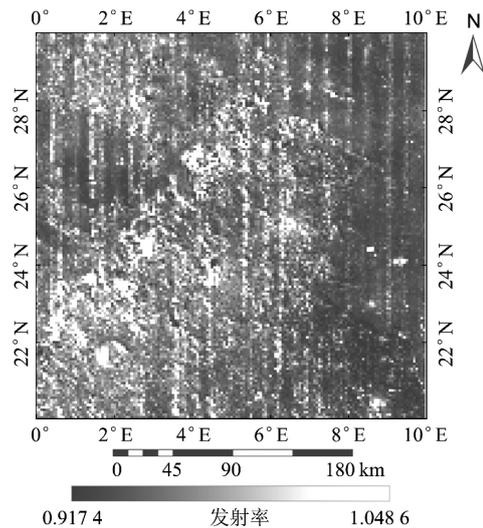


图4 Apollo 15 登月区 Diviner 通道 3 发射率(16 × 16 像素/度)
 Fig. 4 Diviner channels 3 emissivity of the Apollo 15 landing area(16 × 16 pixels/degree)

当然, 发射率尺度转换的规律性可以通过发射率的极值和均值(表 1) 进行数值定量描述. 研究表 1 发现, 发射率空间分辨率由 64 × 64 像素/度一直

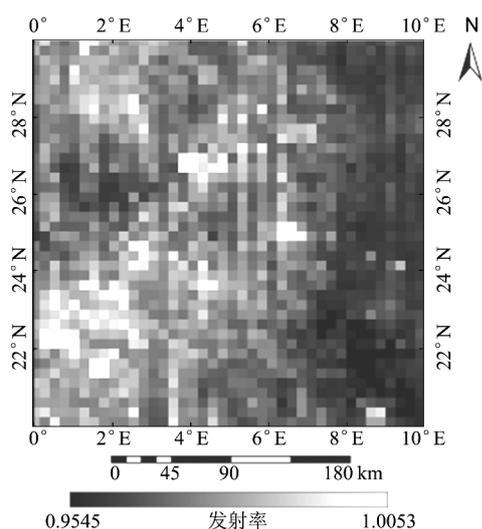


图5 Apollo 15 登月区 Diviner 通道3 发射率(4×4 像素/度)

Fig. 5 Diviner channels 3 emissivity of the Apollo 15 landing area(4×4 pixels/degree)

变化到4×4 像素/度,依次降低1 倍,共计降低4 倍,五种尺度发射率的极大值依次减小,极小值依次增大.换言之,随着空间分辨率的不断降低,研究区发射率的区分度也在不断降低.

但是,发射率尺度转换中却存在着明显的非线性关系,即不同分辨率的发射率极值横向和纵向变化幅度明显大于尺度的变化幅度.例如,三个通道的64×64 像素/度发射率极值变化幅度分别是4×4 像素/度发射率极值变化幅度的6.8 倍(0.347 6/0.050 8)、17.9 倍(0.250 9/0.014 0)和14.8 倍(0.400 1/0.027 0),即月表发射率空间分辨率减小4 倍,发射率(7.55~8.70 μm 波段)区分度减小13.2 倍((6.8+17.9+14.8)/3).又如,三个通道的64×64 像素/度与32×32 像素/度发射率极大值减小量分别是8×8 像素/度与4×4 像素/度减小量的5.9 倍(0.124 5/0.021)、26.6 倍(0.095 9/0.003 6)和9.9 倍

(0.171 9/0.017 3),平均减少量为17 倍,反之,极小值增加量分别为18.4 倍(0.049 7/0.002 7)、10.1 倍(0.041 4/0.004 1)和5.5 倍(0.054 2/0.009 8),平均增加量为11.3 倍.值得注意的是,如果忽视尺度效应问题,研究区三个通道5 种分辨率发射率均值相同,分别为0.970 4、0.985 3和0.975 6.

3.2 发射率的尺度效应

在研究发射率的尺度效应之前,首先提出两个假设:第一,Diviner 最大空间分辨率(64×64 像素/度)的每个像元都为等温均一表面,并且高一级别分辨率的像元为低一级别空间分辨率像元的4 个组分;第二,混合像元的辐射亮度可以精确测量,研究中利用多个相近时间(地球时间10 分钟内)的辐射亮度测量值的平均值作为混合像元辐射亮度的最终值.基于以上两点假设,式(3-6)中的N 值设定为4,其中,公式(6)中的 T_0 为平均温度,介于 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 之间; $\Delta T_1 = T_0 - T_1$, $\Delta T_2 = T_0 - T_2$, $\Delta T_3 = T_3 - T_1$, $\Delta T_4 = T_4 - T_0$; $K_\lambda(T_0) = e^{\frac{D_\lambda}{T_0}} \cdot D_\lambda \cdot \frac{1}{T_0^2 \cdot (e^{\frac{D_\lambda}{T_0}} - 1)}$,为像元组分温差造成的视在发射率增量.

以 Apollo 15 登月点(3.633 86°E, 26.132 22°N)为中心的1°×1°范围(3°~4°E, 26°~27°N)内的 Diviner 通道3 的64×64 像素/度空间分辨率下辐射亮度测量值,像元温度(最大亮温)计算值和通道发射率计算值(图5 中 a)为基础,基于式(3-6),分别计算32×32 像素/度、16×16 像素/度和8×8 像素/度空间分辨率下的 t -发射率(图5 中 b(1)、b(2)和 b(3))、 r -发射率(图5 中 c(1)、c(2)和 c(3))、 e -发射率(图5 中 d(1)、d(2)和 d(3))、以及视在发射率(图5 中 e(1)、e(2)和 e(3))四种发射率.其中,需要说明的两点是:(1)对于多个发射率计算值,取其平均值作为最终的像元发射率值;(2)低一

表1 Apollo 15 登月区不同尺度(像素/度)通道发射率极值和均值

Table 1 Extremum and mean values of different scales channels emissivity of the Apollo 15 landing area

	极值	64×64	32×32	16×16	8×8	4×4	均值
通道 3	极大值	1.203 1	1.078 6	1.048 6	1.026 3	1.005 3	0.970 4
	极小值	0.855 5	0.905 2	0.917 4	0.951 8	0.954 5	
	极值差	0.347 6	0.173 4	0.131 2	0.074 5	0.050 8	
通道 4	极大值	1.147 1	1.051 2	1.016 2	0.997	0.993 4	0.985 3
	极小值	0.896 2	0.937 6	0.964 2	0.975 3	0.979 4	
	极值差	0.250 9	0.113 6	0.052	0.021 7	0.014 0	
通道 5	极大值	1.257 1	1.085 2	1.047 8	1.003 1	0.986 8	0.975 6
	极小值	0.857 0	0.911 2	0.932 3	0.950 0	0.959 8	
	极值差	0.400 1	0.174	0.115 5	0.053 1	0.027 0	

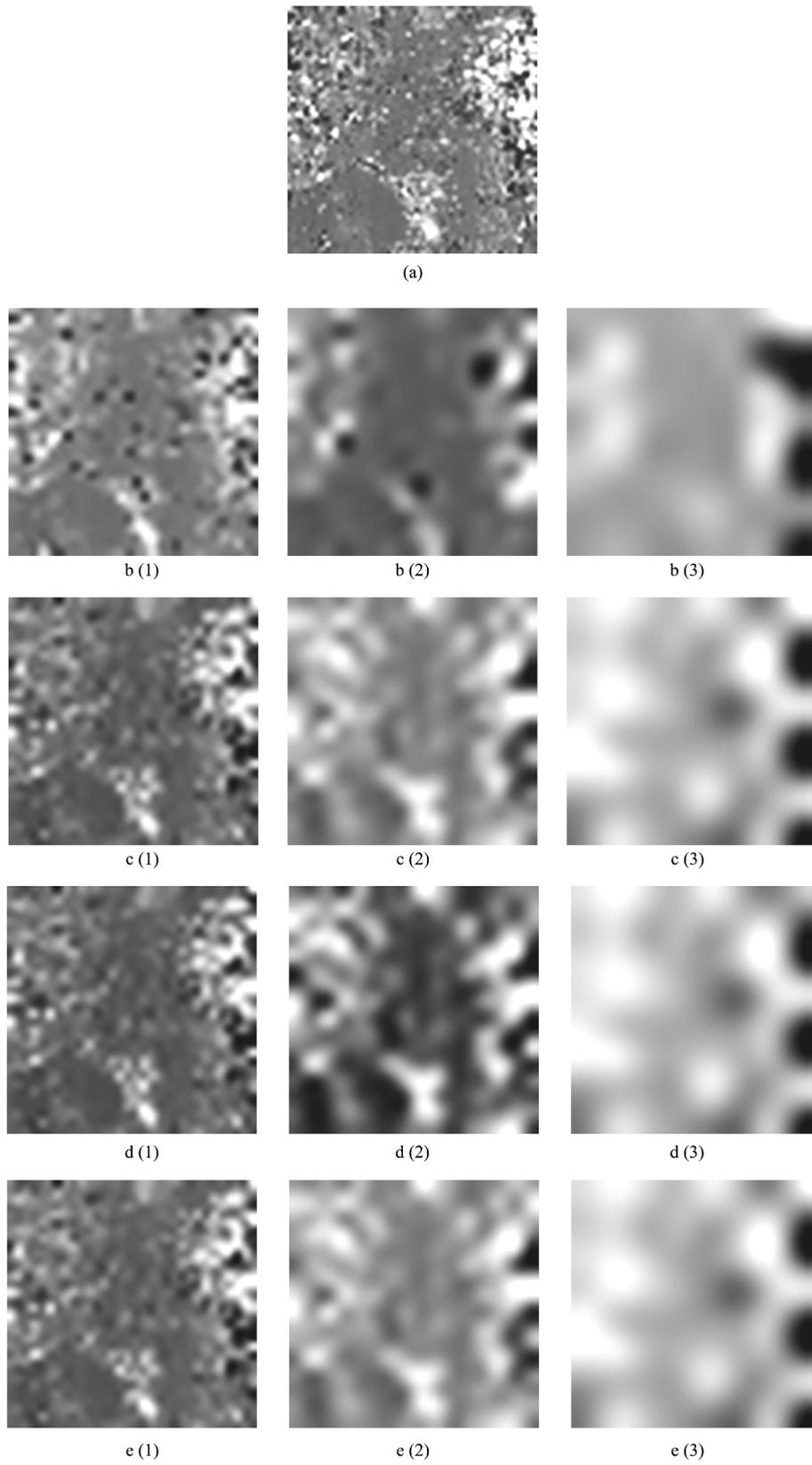


图 6 不同尺度和定义的发射率(3° ~4°E 26° ~27°N)
Fig.6 Emissivity of different scales and definition(3° ~4°E 26° ~27°N)

级别空间分辨率的每个像元都是由高一级别分辨率的四个像元计算获得,这将导致 8×8 像素/度空间分辨率的像元发射率中存在数据缺失(发射率 = 0)现象,计算结果并不代表像元在此分辨率下没有测量值.

以混合像元理想发射率(r -发射率)为基准,分别对其他三种混合像元发射率进行评定.不同尺度的 t -发射率与其他三种发射率存在明显的差别,不仅研究区发射率极值出现较大的偏差(见表 2),而且由于 t -发射率在计算过程中增加了温度计算,导致了最终发射率计算误差的增大和大量像元发射率失真的现象(图像中舍弃了失真的发射率).而不同尺度的 e -发射率和视在发射率与理想发射率较为接近,但是 e -发射率与理想发射率和视在发射率分布规律却存在明显的不同(见图 7).具体表现为 e -发射率的极值和均值都大于理想发射率的极值和均值,而视在发射率的极大值和均值小于理想发射率的极大值和均值,极小值却大于理想发射率的极小值.换言之,基于像元组分辐射亮度的混合像元发射率夸大了理论发射率数值,而视在发射率也就是遥感探测结果降低了理论发射率数值的变化范围,减少了发射率的对比度.值得注意的是,随着空间分辨率的不断降低, e -发射率和视在发射率都在不断的接近甚至几乎等于理论发射率.

以 Apollo 15 登月点为中心的 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 范围($3.625^\circ \sim 3.75^\circ \text{E}$, $26.25^\circ \sim 26.125^\circ \text{N}$) 内的 Diviner 通道 3 的 64×64 像素/度空间分辨率下的 64 个像元发射率为研究对象,不同月球观测时间的通道发射率如图 7.研究发现, Apollo 15 登月点发射率测量值共有 1 396 个,数值范围在 0.904 6 至 1.200 4 之间波动,除了下午 16 ~ 18 点间少量的发射率测量值波段幅度较大外,多数测量值都集中在均值 0.966 7 附近,均方差为 0.011 7,观测精度为 1.21% (均方差/均值 $\times 100\%$).这些观测值符合遥感观测物质发射率的一般规律,即遥感观测的像元

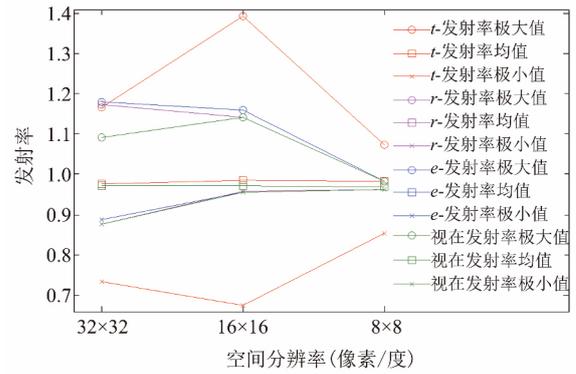


图 7 不同尺度和定义的发射率极值和均值的分布规律
Fig.7 Extremums and mean values distribution of different scales and definition emissivity

发射率应该保持不变或者变化幅度较小,并不随观测时间、物质表面温度变化和周围环境变化而发生变化.

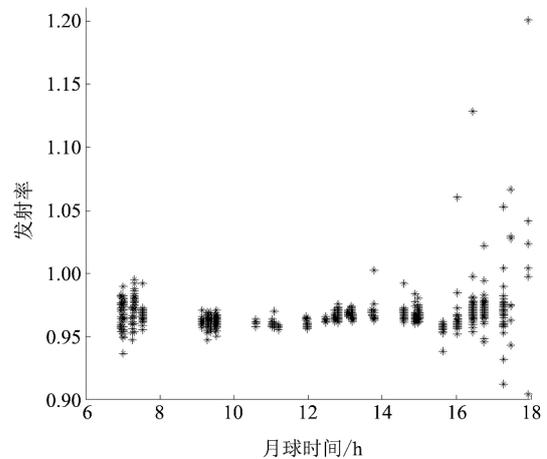


图 8 Apollo 15 登月点 Diviner 通道 3 发射率 ($3.625^\circ \sim 3.65625^\circ \text{E}$, $26.15625^\circ \sim 26.125^\circ \text{N}$, 64×64 像素/度)
Fig.8 Diviner channels 3 emissivity of the Apollo 15 landing site ($3.625^\circ \sim 3.65625^\circ \text{E}$, $26.15625^\circ \sim 26.125^\circ \text{N}$, 64×64 pixels/degree)

以相同范围内的 Apollo 15 登月点附近 32×32 像素/度、 16×16 像素/度和 8×8 像素/度空间分辨

表 2 Apollo 15 登月点区域不同定义发射率极值和均值

Table 2 Extremum and mean values of different definition emissivity of the Apollo 15 landing site area

空间分辨率	t -发射率		r -发射率		e -发射率		视在发射率	
	极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值
32×32	1.1669	0.9750	1.1725	0.9724	1.1796	0.9724	1.0921	0.9719
	0.7334		0.8753		0.8875		0.8756	
16×16	1.3935	0.9849	1.1426	0.9717	1.1593	0.9716	1.1421	0.9714
	0.6749		0.9571		0.9561		0.9565	
8×8	1.0745	0.9838	0.9822	0.9698	0.9823	0.9696	0.9822	0.9696
	0.8544		0.9614		0.9617		0.9614	

率的理想发射率和视在发射率增量为研究对象(表 3), 对尺度效应进行数值定量描述. 以 32×32 像素/度空间分辨率视在发射率增量为例(图 8) 进行分析发现, 不同观测时间的像元视在发射率增量绝对值均大于 0, 除了下午 16 ~ 18 点间两个相对较大的视在发射率增量外, 其他观测时间的视在发射率增量都在 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 范围内变化. 综合 3 种分辨率的视在发射率增量与理想发射率进行分析发现, 空间分辨率越低, 发射率的尺度效应越弱(视在发射率增量均方差分别为 0.4731×10^{-4} 、 0.52497×10^{-6} 和 0.19074×10^{-6}) 视在发射率增量与理想发射率相对误差绝对值变化范围越窄(分别为 0.00000005086% ~ 0.06176% 、 0.0000010777% ~ 0.0021198% 和 0.00004066% ~ 0.00021771%), 相对误差均值越低(分别为 0.00083167% 、 0.00026881% 和 0.00014249%).

表 3 Apollo 15 登月点视在发射率增量极值和均值
Table 3 Extremum and mean values of apparent emissivity increment of the Apollo 15 landing site

视在发射率增量	32×32	16×16	8×8
数量(个)	296	51	3
极大值	0.42305×10^{-3}	0.13005×10^{-4}	0.21151×10^{-5}
极小值	-0.62399×10^{-3}	-0.20568×10^{-4}	-0.16287×10^{-5}
均值	-0.33263×10^{-5}	-0.54926×10^{-6}	-0.31724×10^{-7}
相对误差均值	0.00083167%	0.00026881%	0.00014249%

从 Apollo 15 登月点不同空间分辨率的混合像元发射率尺度效应及其数值描述上可以得出三个明显的结论. 第一, 由于尺度效应主要取决于像元内组分间的温差, 即像元组分间热红外辐射的多次散射, 因此, 混合像元中组分划分的越明确, 像元组分温差越大, 视在发射率增量越大, 像元尺度效应越明显. 第二, 普遍存在于遥感观测混合像元中的尺度效应只取决于像元的粗糙度, 并不随观测时间、观测条件和混合像元整体温度变化而发生变化. 第三, 伴随着空间分辨率的不断降低, 混合像元中组分的区分度逐渐模糊, 尺度效应的影响也在不断降低, 直至消失.

4 结论

尺度问题在定量遥感研究中具有举足轻重的地位, 在表面温度遥感向 1K 精度前进的道路上, 能否精确确定混合像元的发射率是各种温度发射率分离算法的前提. 以几乎不受大气影响的月球为研究对象, 通过不同尺度下的 Apollo 15 登月区和登月点的

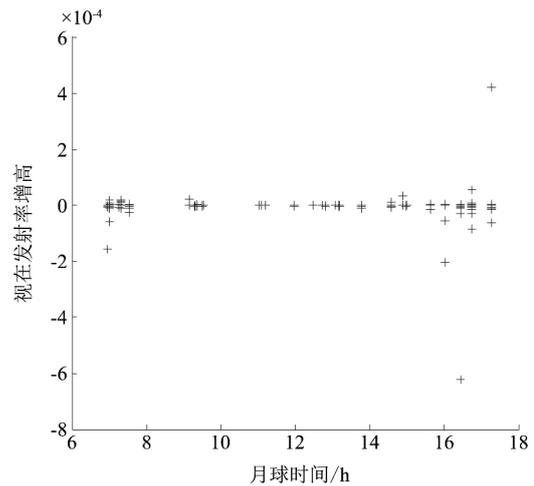


图 9 Apollo 15 登月点 Diviner 通道 3 视在发射率增量 (32×32 像素/度)

Fig. 9 Diviner channels 3 apparent emissivity increment of the Apollo 15 landing site (32×32 pixels/degree)

LRO Diviner 热红外测量数据, 研究分析了发射率中的尺度变换和尺度效应两个问题, 验证和讨论了尺度变换的非线性规律和尺度效应的分布规律, 并给出两种规律的数值定量描述, 主要有以下三点结论:

(1) 发射率遥感尺度问题的研究已经从理论研究阶段正在向模型建立阶段过渡, 如何选择适合的研究对象和研究数据对尺度问题进行描述就显得尤为重要. 本文首次选取月球和 LRO Diviner 热红外数据作为尺度问题的研究对象和研究数据, 希望能够为这一问题的研究提供一个新的视角.

(2) 研究不同尺度下的 Apollo 15 登月区发射率数据发现, 尺度转换的一般规律和定量描述为: 随着空间分辨率的不断减低, 发射率代表的地理信息会出现明显的取舍现象, 地形、机制性信息和下垫面的非均匀性等逐渐减弱, 而转换非线性和宏观格局性逐渐增强; 其中, 发射率的空间分辨率线性降低 4 倍, 区分度非线性降低 13.2 倍, 极大值非线性减低 17 倍, 极小值非线性增加 11.3 倍.

(3) 研究不同尺度下的 Apollo 15 登月点发射率数据发现, 尺度效应的一般规律和定量描述为: 普遍存在于混合像元中的尺度效应(视在发射率增量绝对值均大于 0) 主要取决于像元的粗糙度, 并不随观测时间、观测条件和混合像元整体温度的变化而发生变化(视在发射率增量变化幅度为 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$), 在尺度转换过程中, 尺度效应会导致遥感探测范围内物质发射率区分度的降低, 并且伴随着空间分辨率的不断降低, 影响也在不断降低(不同分

分辨率的视在发射率增量均方差分别为 0.4731×10^{-4} 、 0.52497×10^{-6} 和 0.19074×10^{-6}), 直至消失.

References

- [1] LI X, WANG Yi-Ting. Prospects on future developments of quantitative remote sensing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(9): 1163-1169. (李小文, 王祎婷. 定量遥感尺度效应当议[J]. *地理学报*, 2013, **68**(9): 1163-1169.)
- [2] Li X, Strahler A H, Friedl M A. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1999a, **37**(5): 2508-2517.
- [3] Raffy M, Gregoire C. Semi-empirical models and scaling: A least square method for remote sensing experiments [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(13): 2527-2541.
- [4] Hu Z, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1997, **35**(3): 747-755.
- [5] LI X, ZHAO H, ZHANG H, et al. Global change study and quantitative remote sensing for land surface parameters [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(2): 365-370. (李小文, 赵红蕊, 张颢, 等. 全球变化与地表参数的定量遥感[J]. *地学前缘*, 2002, **9**(2): 365-370.)
- [6] QUAN J, ZHAN W, CHEN Y, et al. Downscaling remotely sensed land surface temperatures: A comparison of typical methods. *Journal of Remote Sensing*, 2013, **17**(2): 361-387. (全金玲, 占文凤, 陈云浩等. 遥感地表温度降尺度方法比较: 性能对比及适应性评价. *遥感学报*, 2013, **17**(2): 361-387.)
- [7] Balick L K, Scoggins R K, LINK L E. Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature models for thermal IR signature prediction [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1981 (3): 143-152.
- [8] Norman J M, Becker F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, **12**(3-4): 159-173.
- [9] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1996, **34**(4): 892-905.
- [10] Li X, Wang J. The definition of effective emissivity of land surface at the scale of remote sensing pixels [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(23): 2154-2158.
- [11] Albers B J, Strahler A H, Li X W, et al. Radiometric measurements of gap probability in conifer tree canopies. [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**(3): 179-192.
- [12] Li X W, Wang J D. The definition of effective emissivity of land surface at the scale of remote sensing pixels. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(23): 2154-2158.
- [13] Li X, Wang Z. Comments on reciprocity in the BRDF modelling. *Progress in Natural Science*, 1999, **3**: 99-103.
- [14] Hu Z, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **13**: 747-755.
- [15] LIU L. Simulation and correction of spatial scaling effects for leaf area index [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, **18**(6): 1158-1168. (刘良云. 叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正[J]. *遥感学报*, 2014, **18**(6): 1158-1168.)
- [16] Feng G, Wang M, Wang M, et al. Connotations of pixel-based scale effect in remote sensing and the modified fractal-based analysis method [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, **103**(C): 183-190.
- [17] Greenhagen B T, Lucey P G, Wyatt M B, et al. Global silicate mineralogy of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer [J]. *Science*, 2010, **329**(5998): 1507-1509.
- [18] Allen C C, Greenhagen B T, Donaldson hanna K L, et al. Analysis of lunar pyroclastic deposit FeO abundances by LRO Diviner [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12).
- [19] MA M, CHEN SB, ZHOU C, et al. Major Element Abundances at the Apollo 15 Landing Site: Results from Diviner Data. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, **32**(1): 144-150. (马明, 陈圣波, 周超, 等. 基于 Diviner 热红外数据的 Apollo 15 登陆区元素含量反演 [J]. *岩石学报*, 2016, **32**(1): 144-150.)
- [20] Bandfield J L, Ghent R R, Vasavada A R, et al. Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, **116**(12): 96-111.
- [21] MA M. Study on the Lunar Surface Emissivity Inversion and Scale Effect Based on the Diviner Thermal Infrared Data of LRO Satellite [D]. Jilin University, 2016. (马明. 基于 LRO 卫星 Diviner 热红外数据的月表发射率反演及其尺度效应研究 [D]. 吉林大学, 2016.)

(上接第 314 页)

- [11] LIANG Mei-Yan, ZHANG Cun-Lin, Improvement in the range resolution of THz radar using phase compensation algorithm [J], *Acta Physica Sinica*. (梁美彦, 张存林. 相位补偿算法对提高太赫兹雷达距离像分辨率的研究. *物理学报*), 2014, **63**(14): 148701-148701.
- [12] E. F. Knott, Radar cross section measurements (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993).
- [13] D. L. Mensa, High resolution radar cross-section imaging (Artech House, Boston, 1991).
- [14] JIANG Yue-Song, NIE Meng-Yao, ZHANG Chong-Hui, et al., Terahertz scattering property for the coated object of rough surface [J]. *Acta Physica Sinica*. (江月松, 聂梦瑶, 张崇辉, 等. 粗糙表面涂覆目标的太赫兹波散射特性研究. *物理学报*), 2015, **64**(2): 24101-024101.
- [15] JIANG Shan, WANG Guo-Dong, WANG Hua-Shen, Effects Analysis of Machining Tolerance on Monostatic RCS of Triangular Trihedral Corner Reflectors [J]. *Aero Weaponry*, (姜山, 王国栋, 王化深. 三角形三角反射器加工公差对其单站 RCS 影响研究. *航空兵器*), 2006, (4): 24-27.