月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证

张璐[1,2,3]，张鹏[3]，胡秀清[3]，陈林[3]，王阳[4]，王威[1,3]

1. 中国气象科学研究院，北京 100081;
2. 南京信息工程大学，南京 210044;
3. 国家卫星气象中心，北京 100081;
4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，长春 130033

摘 要：月球是除太阳外对地张角最大的天体，反射率稳定性为10^{-8}每年，适合用于遥感卫星的辐射定标、夜间地基大气遥感和夜间卫星遥感，但月球辐射照度模型的精度束缚了上述应用的发展。为检验现有ROLO(RObotic Lunar Observatory)和MT2009(Miller-Turner 2009)地基整盘月球辐射照度模型的精度，国家卫星气象中心于2015年底至2016年初在云南丽江组织了3个月的地基对月观测，使用高光谱月球成像光谱仪获取了399.00—1060.00 nm连续光谱的月球辐射照度。基于整盘月球辐射照度模型，利用丽江地基对月观测试验资料，对比模型与模型、模型与丽江地基观测月球辐射照度。结果表明：(1)MT2009与ROLO模型在短波红外谱段的差异明显大于可见光谱段；(2)地基观测高光谱月球辐射照度结果与ROLO模型更接近，但是可见光波段比ROLO模型辐射照度平均小5.86%左右。为探究差异产生的主要来源，对结果还进行了进一步的分析和讨论，以期为今后月球辐射模型的改进和夜间微光遥感研究提供经验和依据。

关键词：ROLO，MT2009，月球辐射照度模型，地基观测，辐射定标

中图分类号：TP701 **文献标志码：**A

引用格式：张璐, 张鹏, 胡秀清, 陈林, 王阳, 王威. 2017. 月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证. 遥感学报, 21(6): 864–870
Zhang L, Zhang P, Hu X Q, Chen L, Wang Y and Wang W. 2017. Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth. Journal of Remote Sensing, 21(6): 864–870 [DOI:10.11834/jrs.20176342]

1 引 言

月球作为辐射定标源，具有独特的优势，它的辐射能量处于大多数星载设备动态范围内，反射率光谱变化平缓，而且稳定性极高，变化仅为1×10^{-8}每年(Kieffer，1997；Kieffer和Wildey，1985)。月球辐射定标与地面多场地替代定标相比，不受大气散射和吸收的干扰；与深对流云定标相比，动态范围和地面目标更为接近(吴荣华等，2016)。因此，月球非常适合作为地球卫星交叉定标传递辐射的基准源，如美国CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory)定标卫星和欧洲TRUTHS(Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial and Helio Studies)定标卫星都将月球选作交叉传递基准(Green和Lobb，2015；Leckey，2015)。此外月球还可以作为夜间辐射源，用于夜间红外低云遥感(Miller和Turner，2009)、大气光学厚度反演(Barreto 等，2013)。

长期以来，关于月球辐射特性的研究一直备受关注。在地基观测月球方面，Lane等人(1973)使用月球光度计获得月球359—1064 nm内12个通道的反射率；Saiki等人(2008)使用可调谐滤波器获得月球650 nm、750 nm、900 nm和1000 nm通道的反射率；Velikodsky等人(2011)使用商用相机获得了红通道603 nm、绿通道529 nm、蓝通道472 nm的月球反射率。为了将月球用于在轨遥感仪器的定标，美国航天局NASA于1996年启动了月球自动观测ROLO(RObotic Lunar Observatory)计划

收稿日期：2016-09-23；**预印本：**2017-06-09
基金项目：国家高技术研究发展计划(863计划)(编号：2015AA123704)
第一作者简介：张璐(1988—)，男，博士研究生，研究方向为遥感仪器可见光谱段辐射定标。E-mail：l-zhang@hotmail.com
通信作者简介：张鹏(1970—)，男，研究员，研究方向为遥感仪器定标、卫星大气遥感、卫星资料定量应用。E-mail：zhangp@cma.gov.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(Kieffer和Anderson，1998)。在5年多地基对月观测的基础上，建立了ROLO辐射照度模型，模型给出了月球350—2550 nm内32个通道的月球等效圆盘反射率特征，而且与阿波罗月壤样本融合，得到了高光谱的月球辐射照度模型(Kieffer和Stone，2005)。

在人造飞行器探月方面，进入21世纪后，先后有多颗绕月飞行器分别携带各种探测器研究月球的光谱及反射率特性，并建立了反射率模型，如美国的Clementine(Eliason 等，1999)，搭载在印度Chandrayaan-1月球飞船上的M3(Moon mineralogy mapper)探测器(Pieters 等，2009)，搭载在日本SELENE月球飞船上的SP(Spectral Profiler)探测器(Yokota 等，2011)，搭载于中国Chang' E-1月球飞船上的IIM(Interference Imaging Spectrometer)探测器(Wu 等，2013)。对月观测试验和月球模型研究加深了人们对月球辐射特性的认识。

目前，国际上用于定标的月球辐射模型主要有ROLO辐射照度模型和MT2009(Miller-Turner 2009)辐射照度模型。尽管绕月探测数据所建模型尚未真正用于月球定标，但与地基观测相比，有在大气层外且分辨率高的观测优势，其应用是未来发展的一种趋势。ROLO模型光谱覆盖300—2550 nm，模型不确定度为5%—10%，一致性为1%—2%(Kieffer和Stone，2005)。MT2009模型覆盖200—2800 nm，模型不确定度为7%—17%(Miller和Turner，2009)。

地基观测月球辐射照度，大都采用通道式探测器，为验证可见光短波红外波段高光谱月球辐射模型的精度，国家卫星气象中心联合中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海技术物理研究所和西安光学精密机械研究所等多家单位于2015年底至2016年初开展了为期3个月的地基对月观测，获得399—1060 nm的高光谱月球辐射照度观测数据。本文在系统比较ROLO模型与MT2009模型差异的基础上，利用地基对月观测数据对两个模型进行了比较和验证，分析了差别的来源，这些分析和讨论将为今后月球辐射模型的改进和夜间微光遥感研究提供经验和依据。

2 ROLO模型和MT2009模型

2.1 ROLO模型

ROLO模型源于美国地质调查局于1995年开始的ROLO月球观测计划，5年半时间的月球和恒星观测，获取了350—2500 nm波段内32个通道的83000次月球观测数据和800000次恒星观测数据，其中恒星观测是为了绝对辐射标定和计算大气光学厚度。ROLO模型将月球观测数据转化为月球等效圆盘反射率，再经多项式拟合得到月球等效圆盘反射率的函数表达式，公式为

$$\begin{aligned}\mathrm{In}\boldsymbol{A}'_k = &\sum_{i=0}^{3}\boldsymbol{a}_{ik}g^i + \sum_{j=1}^{3}\boldsymbol{b}_{jk}\Phi^{2j-1}c_1\theta + c_2\phi + c_3\Phi\theta + c_4\Phi\phi \\ &+\boldsymbol{d}_{1k}\mathrm{e}^{-g/p_1} + \boldsymbol{d}_{2k}\mathrm{e}^{-g/p_2} + \boldsymbol{d}_{3k}\cos[(g-p_3)/p_4]\end{aligned} \tag{1}$$

式中，g是月相绝对值，θ、ϕ是观测点月面经度和纬度，Φ为太阳月面经度。$\boldsymbol{a}_{ik}$，$\boldsymbol{b}_{jk}$，$\boldsymbol{d}_{1k}$，$\boldsymbol{d}_{2k}$，$\boldsymbol{d}_{3k}$为与波长k有关的系数，其他参数都为模型拟合系数(Kieffer和Stone，2005)。

ROLO模型利用Apollo采集的高光谱月壤反射率数据对原始观测的32个通道的等效圆盘反射率进行插值融合处理，得到月球的高光谱等效圆盘反射率(图1)，观测点月面经度和纬度都为0°，太阳月面经度为7°，月相为7°，日月距离为1 AU，观测点与月球距离384400 km。将高光谱等效圆盘反射率与太阳光谱耦合，得到高光谱月球辐射照度。

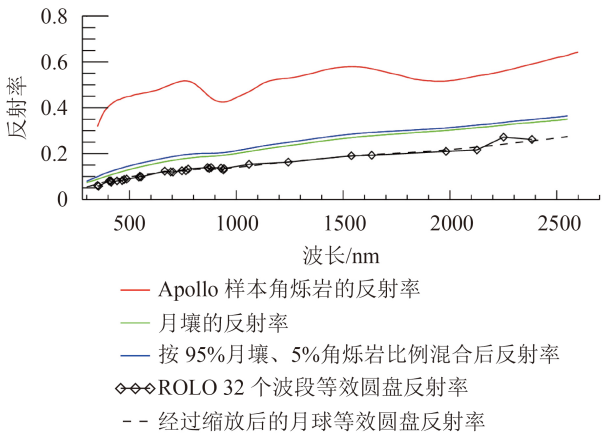


图 1 经Apollo样本融合的高光谱月球等效圆盘反射率

Fig. 1 Adjustment to the hyper-spectral equivalent reflectance of the entire lunar using Apollo spectra

但是Apollo采回样本破坏了本来覆盖在月壤表层的风化层，而且样本带回地球实验室测量反射率，会因为地球和月球的重力不同，使得样本的空隙特征不同，从而导致反射率的变化(Hapke，2012)。此外，月壤样本和角烁岩的比例混合不能代表整个月面。所以将ROLO 32个波段等效圆盘反射率与月壤反射率融合的方法会带来新的误差。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 MT2009模型

MT2009模型建立于多位科学家观测月球光谱反射率的数据集合(Miller和Turner，2009)，并且将影响月球光谱辐射照度的因素分为4类：(1)月相变化的影响；(2)日地距离月地距离的影响；(3)太阳辐射内在的不稳定性；(4)各向异性反射率的月面特征。独立研究各因素对月球辐射照度的影响，对这4个因素分析如下。

(1)MT2009给出了月球相函数修正因子$f(\theta_p)$

$$f\left(\theta_p,\lambda\right)=10^{-0.4\left(a\left(\theta_p\right)-b\left(\theta_p\right)\lambda\right)} \tag{2}$$

式中，$a(\theta_p)$、$b(\theta_p)$是特征相角系数。

(2)MT2009给出的日地距离，月地距离修正因子F^{-1}，式(3)将试验观测时的距离转换到标准距离。

$$\begin{aligned} F^{-1}&=\left(\frac{\bar{R}_{se}}{\bar{R}_{sm}}\right)^2\left(\frac{r_m}{\bar{R}_{me}-r_e}\right)^2\\ \bar{R}_{sm}&=\sqrt{\left(\bar{R}_{se}^2+\bar{R}_{me}^2+2\bar{R}_{se}\bar{R}_{me}\cos\left(\theta_p\right)\right)}\end{aligned} \tag{3}$$

式中，$\bar{R}_{se}$为平均日地距离，$\bar{R}_{sm}$为平均月日距离，$\bar{R}_{me}$为平均月地距离，r_m为月球半径，r_e为地球半径。

(3)MT2009给出太阳辐射不稳定性修正因子$a(\lambda)$。通过对Shaw(1999)、Younkin(1970)及Lawrence等人(2003)的研究成果总结，太阳辐射内在的不稳定性对月球辐射的影响如下

$$a(\lambda)=\sum_{i=0}^{n}\boldsymbol{A}_i\lambda^i \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{A}_i$为拟合系数，具体参见MT2009模型(Miller和Turner，2009)。

(4)各向异性反射率的月面特征对月球辐射的影响没有量化，所以在最终模型修正中没有这一项影响。

将模型3个影响因素统一，得到月球在标准距离情况下的辐射照度，如式(5)。MT2009将原始数据外推波长范围覆盖202—2800 nm，相位角覆盖0°—180°，但波长小于360 nm或者大于1060 nm时，不推荐使用MT2009模型。此外，MT2009模型没有考虑反冲效应(opposition surge)，相角小于5°也不推荐使用。由于MT2009的数据基本来自地基观测，而地面观测大月相角意味着月球辐射照度比较低，持续时间较短，而且暮署光会影响月球辐射照度，很难控制大月相角的数据精度，所以大于120°相角也不推荐使用。

$$\bar{E}_{TOA}=E_0a(\lambda)f\left(\theta_p,\lambda\right)F^{-1} \tag{5}$$

3 地基月球观测试验

3.1 试验概述

地基观测试验选址于云南省丽江市天气雷达站，距离云南天文台5 km，经度100.04°，纬度26.76°，海拔3175 m。观测场地周围是大片的森林，无人类活动影响，夜间观测几乎不会受到地面杂散光的干扰。试验时间为2015年12月16日—2016年3月1日。

月球成像光谱仪为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制，通过赤道仪对月球进行自动跟踪，获得高光谱月球辐射照度，其光谱范围为400—1100 nm，光谱分辨率为2 nm。为消除大气对观测的影响，试验过程中使用北京遥测技术研究所研制的大气探测激光雷达获取气溶胶廓线，并且子夜零点前后加放了探空仪，获取温湿大气廓线信息。

3.2 数据处理

将激光雷达探测气溶胶光学厚度和探空仪探测的大气廓线，输入模型MODTRAN计算大气透过率。

月球成像光谱仪于中国计量科学研究院进行实验室绝对定标。实验室绝对定标不确定度、仪器采样、杂散光、仪器噪声、仪器非线性响应对月球辐射照度不确定度的评估如表1。

表 1 误差估计

Table 1 Estimated errors from different sources

不确定来源	不确定度/%
实验室绝对定标	2.00
仪器采样	0.37
杂散光	1.00
仪器噪声	1.67
仪器非线性响应	0.30
其他	0.20
合计	2.84

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于地表杂光以及太阳散射光影响，试验挑选月球天顶角小于60°，且太阳位于地平面以下30°的观测数据。为消除大气的扰动影响，将5 min内大气不稳定度大于1%以上的数据剔除。不稳定度定义为

$$\sigma_i = \sum_{k=0}^{n} \left|(\boldsymbol{T}_{k,i} - \boldsymbol{T}_{k+1,i})\right| / (\boldsymbol{T}_{k,i} + \boldsymbol{T}_{k+1,i}) \tag{6}$$

式中，σ_i为i时刻的大气不稳定度，$\boldsymbol{T}_{k,i}$为i时刻k波长处的透过率，$\boldsymbol{T}_{k+1,i}$为i+1时刻k波长处的透过率，n为波段数。

将大气稳定性1%视为大气消光的不确定度。综合仪器不确定度与大气消光的不确定度，地基对月观测数据的不确定度为$\sqrt{2.84^2 + 1^2}\% = 3.01\%$。

4 月球辐射照度比较

4.1 模型辐射照度比较

图2模拟了ROLO模型与MT2009模型月相绝对值在90°以内、550 nm波长处的月球辐射照度随月相的变化，观测点月面经度和纬度都为0°，太阳月面经度为0°，日月距离为1 AU，观测点与月球距离384400 km，观测几何由深空导航软件包SPICE模拟(Acton Jr，1996)。从图2中可以看出ROLO模型在月盈和月亏时，月球辐射照度不对称。在相位绝对值相等情况下，月盈(负月相)的辐射照度大于月亏，这也印证了月盈时高地面积较月海面积大(高地反射率大于月海)。而MT2009既没有包含天平动，也没有考虑正负月相对月球辐射模型的影响，因此MT2009模型在月盈和月亏时月球辐射照度对称。比较月球辐射照度随月相的变化，可以明显看出ROLO模型较MT2009模型精度高。

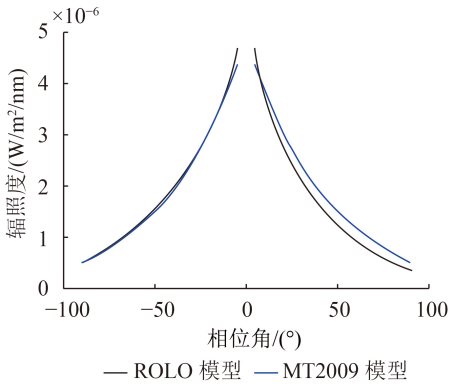


图 2 模拟550 nm波段处月球相位与月球辐射照度关系

Fig. 2 The relation between lunar phase and lunar irradiance at 550 nm

ROLO模型的相对一致性为1%—2%，不确定度为5%—10%(Kieffer和Stone 等，2005)，而MT2009模型的不确度为7%—17%(Miller 等，2009)。ROLO的数据来源于完备的试验，有统一的定标方案和去除大气消光方案(Kieffer和Stone 等，2005)。而MT2009来自多位科学家多年观测，数据没有统一的绝对定标，各个观测数据源的计算大气消光方法也不一致。因此，从建立两个模型的数据源头也决定了模型本身辐射测量不确定度的大小。

图3为两个模型模拟2016年1月26日18时45分夜间位于云南丽江雷达站观测到的月球辐射照度(经度100.04°，纬度26.76°，海拔3175 m)。对比图3(a)和图3(b)发现，MT2009模型与ROLO模型的月球辐射照度，在可见光波段之间的绝对差异较小，随着波长增加波长差异越大。

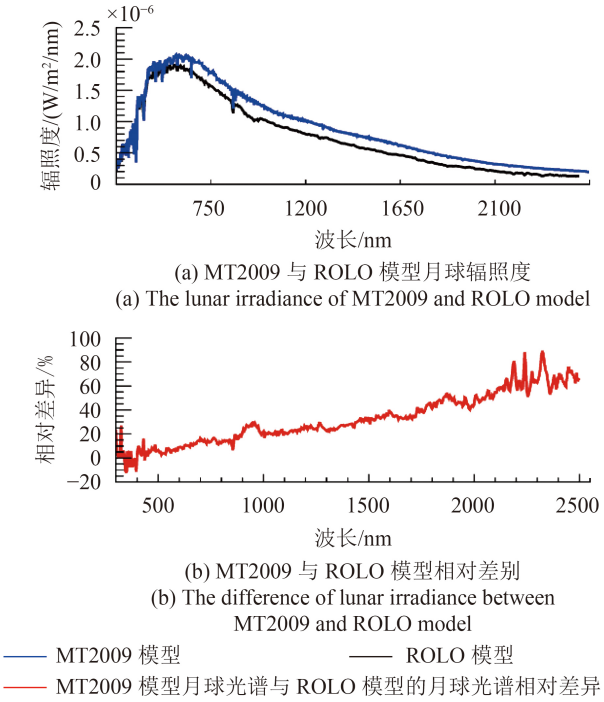


图 3 MT2009模型和ROLO模型辐射照度比对

Fig. 3 The comparison of Lunar irradiance between MT2009 and ROLO model

图4为随时间变化的ROLO和MT2009月球辐射照度模型的相对差异。波长范围为300—2550 nm；相角范围为−90°—90°；观测点月面经度范围为−2.08°—0.28°；测点月面纬度范围为0.13°—−1.92°；太阳月面经度范围为86.89°——90.10°；日月距离范围为0.9840—0.9832 AU；观测点与月球距离范围为369103.73—402471.39 km；时间范围

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为2015年12月18日17时—2016年1月2日7时。相对差异计算公式为

$$\sigma_{r,\lambda,t}=\frac{(Ir_{\mathrm{MT2009},\lambda,t}-Ir_{\mathrm{ROLO}\lambda,t})}{Ir_{\mathrm{ROLO}\lambda,t}}\times 100\% \tag{7}$$

式中，$Ir_{\mathrm{MT2009},\lambda,t}$表示MT2009模型波长$\lambda$处时间为$t$时的月球辐射照度；$Ir_{\mathrm{ROLO},\lambda,t}$表示ROLO模型波长$\lambda$处时间为$t$时的月球辐照度。

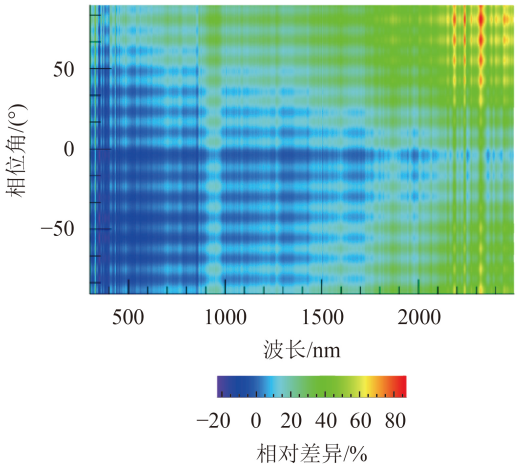


图 4 丽江月球雷达站月球观测试验点ROLO模型与MT2009模型月球辐射照度相对差异

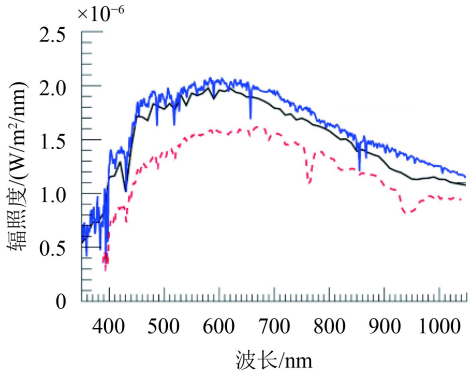
Fig. 4 The relative difference of ROLO and MT2009 model Lunar irradiance

ROLO和MT2009月球辐射模型的相对差异较大部分集中在短波红外，且随着时间(相位)变化相对误差也存在变化。主要是由于短波红外区域MT2009使用经验模型外推，ROLO在短波红外区域通道较少，使得ROLO模型与MT2009模型在短波红外区域存在系统性偏差。而可见光区域，虽然时间(相位)变化，但是相对误差相对固定而且较小。相对误差最小的区域在500 nm附近，且随时间(相位)变化较小。此外，两模型月盈时的差异大于月亏，也就是说ROLO模型负月相时与MT2009模型差异更大，而且月相绝对值越大，模型之间的差异越大。

4.2 地基观测月球辐射与模型比对

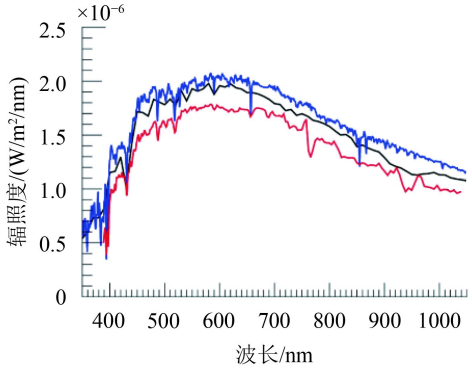
3个月相周期的地基对月观测，一共获取了2098个月球圆盘辐射照度数据。将月球天顶角大于60°和太阳天顶角小于120°的数据和大气不稳定度大于1%的数据去除，筛选后剩余145个数据，全波段平均与ROLO的差异为5.86%。

图5为丽江试验的观测月球辐射照度，月相为+31.56°(正月相)。从图5可以看出，丽江地基观测辐射照度基本小于模型辐射照度，且ROLO模型与地基观测全波段的平均差异为5.86%，但是模型与观测值的光谱趋势一致。地基观测数据760 nm附近为氧气A波带吸收，透过率没有很好扣除氧气影响存在大的吸收峰，而950 nm附近为水汽吸收带，MODTRAN不能很好地扣除水汽影响，所以也存在吸收峰，引起观测值产生较大差异。



(a) 未去除大气消光的地基月球辐射照度

(a) The lunar irradiance of Earth based observation with atmospheric extinction



(b) 去除大气消光的地基月球辐射照度

(b) The lunar irradiance of Earth based observation without atmospheric extinction

MT2009 模型 ROLO 模型

未去除大气消光后的地基观测值

去除大气消光后的地基观测值

图 5 地基观测月球辐射照度与模型比对

Fig. 5 The comparison of lunar irradiance between models and Earth based observation

5 结 论

MT2009模型的不确定度为7%—17%，主要是由于模型数据源于多位科学家，没有溯源到同一标准，而且也没考虑月相的正负和月球天平动对月球辐射照度的影响。而ROLO模型一致性为1%—2%，不确定度为5%—10%。此外，MT2009模型使用外推得到1060 nm外的月球辐射照度一

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定程度上引入了误差，这也可能是ROLO模型与MT2009模型在短波红外区域存在较大差异的原因。相比MT2009模型，ROLO模型更适合于地球遥感卫星的可见光近红外谱段标定以及夜间微光遥感。

ROLO模型高光谱月球等效圆盘反射率由原始32个通道的等效圆盘反射率数据与Apollo月壤数据融合推出，由于实验室测量月壤所处的重力等环境与月球不同，采样过程破坏了原有的月面风化层，而且提供的月壤样本混合比例不足以代表整盘月面物质的比例，所以ROLO模型在融合过程中会带来一定误差，且ROLO在地基观测期间使用恒星作为溯源基准这也一定程度上带来误差。地基对月观测辐射照度的不确定度为3.01%，与ROLO模型的平均差异为5.86%。地基月球辐射照度与ROLO模型差异较大的波段主要在760 nm和950 nm附近，这正是由于大气中氧气与水汽的吸收影响。尽管进行了大气订正，地基高光谱对月观测数据在大气强吸收波段依然存在较大误差。所以未来利用绕月数据建立月球辐射照度模型和网格分辨率的辐射亮度定标模型，与地基观测比起来，不存在大气层影响且分辨率高的观测优势，这将为高空间分辨率卫星辐射定标提供新的基准源。

参考文献(References)

Acton C H Jr. 1996. Ancillary data services of NASA's navigation and ancillary information facility. Planetary and Space Science, 44(1): 65–70 [DOI: 10.1016/0032-0633(95)00107-7]

Barreto A, Cuevas E, Damiri B, Guirado C, Berkoff T, Berjón A J, Hernández Y, Almansa F and Gil M. 2013. A new method for nocturnal aerosol measurements with a lunar photometer prototype. Atmospheric Measurement Techniques, 6(3): 585–598 [DOI: 10.5194/amt-6-585-2013]

Eliason E M, McEwen A S, Robinson M S, Lee E M, Becker T L, Gaddis L, Weller L A, Isbell C E, Shinaman J R, Duxbury T and Malaret E. 1999. Clementine: a global multi-spectral map of the moon from the clementine UVVIS imaging instrument. Lunar and Planetary Science Conference, 30: 1933–1934

Green P D and Lobb D. 2015. The traceable radiometry underpinning terrestrial and helio studies (truths) mission//Proceedings of SPIE 9639, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIX. Toulouse: SPIE: 96391C [DOI: 10.1117/12.2192593]

Hapke B. 2012. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. 2nd ed. New York: Cambridge University Press

Kieffer H H, Anderson J M. 1998. Use of the moon for spacecraft calibration over 350 to 2500 nm. 325–336 [DOI: 10.1117/12.333646]

Kieffer H H and Wildey R L. 1985. Absolute calibration of landsat instruments using the moon. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51(9): 1391–1393

Kieffer H H. 1997. Photometric stability of the lunar surface. Icarus, 130(2): 323–327 [DOI: 10.1006/icar.1997.5822]

Kieffer H H and Stone T C. 2005. The spectral irradiance of the moon. The Astronomical Journal, 129(6): 2887 [DOI: 10.1086/430185]

Lane A P and Irvine W M. 1973. Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk. Astronomical Journal, 78: 267 [DOI: 10.1086/111414]

Lawrence S J, Lau E, Steutel D, Stopar J D, Wilcox B B and Lucey P G. 2003. A new measurement of the absolute spectral reflectance of the moon//34th Lunar and Planetary Science Conference. League City, Texas: LPI

Leckey J. 2015. Climate absolute radiance and refractivity observatory (CLARREO). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-7/W3: 213–217 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-213-2015]

Miller S D and Turner R E. 2009. A dynamic lunar spectral irradiance data set for npoess/viirs day/night band nighttime environmental applications. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(7): 2316–2329 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2012696]

Pieters C M, Boardman J, Buratti B, Chatterjee A, Clark R, Glavich T, Green R, Head J, Isaacson P, Malaret E, McCord T, Mustard J, Petro N, Runyon C, Staid M, Sunshine J, Taylor L, Tompkins S, Varanasi P and White M. 2009. The moon mineralogy mapper (M^3) on chandrayaan-1. Current Science, 96(4): 500–505

Saiki K, Saito K, Okuno H, Suzuki A, Yamanoi Y, Hirata N and Nakamura R. 2008. Estimation of the lunar reflectance by ground-based observation using a tunable liquid-crystal filter telescope. Earth, Planets and Space, 60: BF03352806 [DOI: 10.1186/BF03352806]

Shaw J A. 1999. Modeling infrared lunar radiance. Optical Engineering, 38(10): 1763–1764 [DOI: 10.1117/1.602250]

Velikodsky Y I, Opanasenko N V, Akimov L A, Korokhin V V, Shkuratov Y G, Kaydash V G, Videen G, Ehgamberdiev S A and Berdalieva N E. 2011. New earth-based absolute photometry of the moon. Icarus, 214(1): 30–45 [DOI: 10.1016/j.icarus.2011.04.021]

Wu R H, Zhang P, Yang Z D, Hu X Q, Ding L and Chen L. 2016. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance. Journal of Remote Sensing, 20(2): 278–289 (吴荣华, 张鹏, 杨忠东, 胡秀清, 丁雷, 陈林. 2016. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测. 遥感学报, 20(2): 278–289) [DOI: 10.11834/jrs.20165155]

Wu Y Z, Besse S, Li J Y, Combe J P, Wang Z C, Zhou X F and Wang C. 2013. Photometric correction and in-flight calibration of chang'E-1 interference imaging spectrometer (IIM) data. Icarus, 222(1): 283–295 [DOI: 10.1016/j.icarus.2012.11.010]

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Yokota Y, Matsunaga T, Ohtake M, Haruyama J, Nakamura R, Yamamoto S, Ogawa Y, Morota T, Honda C, Saiki K, Nagasawa K, Kitazato K, Sasaki S, Iwasaki A, Demura H, Hirata N, Hiroi T, Honda R, Iijima Y and Mizutani H. 2011. Lunar photometric properties at wavelengths 0.5—1.6 μm acquired by SELENE spectral profiler and their dependency on local albedo and latitudinal zones. Icarus, 215(2): 639–660 [DOI: 10.1016/j.icarus.2011.07.028]

Younkin R L. 1970. Optical reflectance of local areas of the moon. Astronomical Journal, 75: 831 [DOI: 10.1086/111028]

Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth

ZHANG Lu[1,2,3], ZHANG Peng[3], HU Xiuqing[3], CHEN Lin[3], WANG Yang[4], WANG Wei[1,3]

1. Chinese Academy of Meteorology Science, Beijing 100081, China;
2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
3. National Satellite Meteorological Center China, Beijing 100081, China;
4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: Lunar is the second largest field-of-angle object near the Earth, and its reflectance can be considered stable to 10^{-8} per year. Thus, lunar is selected as the radiometric standard for the calibration of Earth-orbiting satellite-borne instruments and as the radiance source at night similar to solar at daytime for ground-based and satellite remote sensing. However, the precision of existing lunar irradiance models is insufficient to satisfy application requirements. To improve lunar irradiance models and verify the accuracy of the models, a three-month Earth-based observation of lunar was conducted on December 2015 by the National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration. The hyper-spectral irradiance of lunar ranging from 399 nm to 1060 nm was retrieved by an imaging spectrometer in Lijiang, Yunnan. This study compared Earth-based lunar observations and other models (ROLO and MT2009 models). Results show that the observations are more similar to the ROLO model than to the MT2009 model, and the difference between the two models is larger in the shortwave infrared region than in the visible region. The average relative difference between the ROLO model and ground-based observations is approximately 5.86%. Causes of this difference are discussed in this study, which provides a theoretical foundation for establishing an accurate model of lunar irradiance.

Key words: ROLO, MT2009, lunar irradiance model, Earth-based observation, radiometric calibration

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(No. 2015AA123704)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net