

基于 FY-2G 红外卫星资料反演我国陆地区域的地表发射率

韩露^{1,2}, 崔生成^{1*}, 杨世植¹, 陆文强^{1,2}, 石建军^{1,2}, 赵强³

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

³安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601

摘要 利用 FY-2G(风云二号 G 星)静止气象卫星中红外和热红外通道白天/夜晚数据进行我国陆地区域地表发射率的反演。采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的温湿度、臭氧等大气廓线数据,基于辐射传输模型 MODTRAN 进行遥感影像的大气校正;选用修正后的 Minnaert 双向反射分布函数计算中红外通道地表方向的半球反射率,基于与温度无关的热红外光谱指数(TISI),最终得到我国不同地表植被类型下白天和夜晚的地表发射率分布特征;然后选取 MODIS 地表发射率产品对我国陆地区域的影像进行地表发射率反演结果的验证,结果显示:白天和夜晚的地表发射率反演结果与 MODIS 现有地表发射率产品吻合得较好,白天热红外通道 IR1、IR2 地表发射率反演的绝对误差分别为 -0.0057、-0.0068,均方根误差分别为 0.0095、0.0103;夜晚的绝对误差分别为 -0.0010、-0.0035,均方根误差分别为 0.0094、0.0096。同时对同一天不同时刻的地表发射率反演结果进行分析,结果表明,夜间的地表发射率略低于白天。

关键词 遥感; 红外; 地表发射率; 反演; 与温度无关的热红外光谱指数; FY-2G

中图分类号 P237

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1228003

Inversion of Land Surface Emissivity in China Based on FY-2G Infrared Satellite Data

Han Lu^{1,2}, Cui Shengcheng^{1*}, Yang Shizhi¹, Lu Wenqiang^{1,2},
Shi Jianjun^{1,2}, Zhao Qiang³

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China,
Hefei, Anhui 230031, China;

³School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract In this study, we present the inversion of land surface emissivity (LSE) in the China land area based on the mid-infrared and thermal infrared channel day/night data received by the FengYun-2G (FY-2G) geostationary meteorological satellite. The atmospheric correction of the FY-2G data is based on MODTRAN, which is a radiation transfer model, using the atmospheric profile data, including data with respect to the temperature, humidity, and ozone, provided by the European Centre for Median-range Weather Forecast (ECMWF). The modified Minnaert's bidirectional reflection distribution function model is used to calculate the hemispherical reflectivity of the mid-infrared channel in the surface direction. Further, the LSE distribution characteristics can be obtained with respect to the different surface vegetation types in China based on the temperature-independent thermal infrared spectral index. Finally, the LSE inversion results obtained from the images of China's land area are verified by selecting the surface emissivity products from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The daytime and nighttime results are observed to be in good agreement with the existing LSE products in MODIS. The absolute

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-06-02; 录用日期: 2019-06-11

基金项目: 十三五装备预研共用技术项目(41416030204)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA17010104)、安徽省自然科学基金(1508085SQD208)

* E-mail: csc@aiofm.ac.cn

LSE inversion errors of the hot infrared channels 1 and 2 during daytime are -0.0057 and -0.0068 , respectively, and the root mean square errors (RMSEs) are 0.0095 and 0.0103 , respectively. Furthermore, the absolute LSE inversion errors of the hot infrared channels 1 and 2 during nighttime are -0.0010 and -0.0035 , respectively, and the RMSEs are 0.0094 and 0.0096 , respectively. Simultaneously, the LSE inversion results at different time slots on the same day are analyzed. These results indicate that the LSE at nighttime is lower than that at daytime.

Key words remote sensing; infrared; land surface emissivity; inversion; temperature-independent thermal infrared spectral index; FY-2G

OCIS codes 280.4991; 280.6780; 260.3060; 240.6700

1 引 言

地表发射率(LSE)是物体的辐射出射度与相同温度下黑体的辐射出射度的比值,是影响地表辐射收支的重要参数,其数值与表面材质组成、表面粗糙度、湿度以及观测角度有关^[1]。在红外反演中,地表发射率的反演精度直接影响地表温度的反演精度。有研究表明,在热红外波段,0.01的地表发射率误差可造成约0.6 K的地表温度反演误差^[2]。在利用红外遥感数据反演大气温湿廓线时,视地表发射率为固定值会给参数反演引入较大误差,因此提高地表发射率的精度具有重要的应用意义。

在被动红外遥感中,地表辐射项是地表温度、地表发射率和大气下行辐射的耦合结果。在红外通道地表发射率的反演中,假设卫星传感器有 N 个通道观测值,那么就会有 $N+1$ 个未知数(N 个通道发射率和 1 个地表温度),因此反演问题是不适定的^[3]。为解决该问题,许多学者基于不同的假设和限制条件提出了多种不同的地表发射率反演算法,主要分为三大类:半经验法、多通道法以及基于物理的地表发射率反演方法(PBMs)^[4]。较常用的半经验法有基于归一化植被指数(NDVI)的地表发射率反演方法,该方法基于热红外通道的地表发射率与 NDVI 的高度相关性,建立两者之间的关系式,并将已知的发射率光谱作为先验知识进行地表发射率的约束反演^[5-6]。常用的多通道法有参考通道法、温度发射率分离(TES)算法以及温度独立光谱指数(TISI)法等。参考通道法先假定某一光谱通道内目标物的发射率可由先验知识获得,则目标的真实温度可通过观测该通道的辐射亮度得到,从而可相应求出其他通道的发射率^[7]; TES 算法则是基于目标发射率波谱性质的某种先验知识,根据不同的先验知识约束条件建立方程,从而得到发射率光谱信息^[8-9]; TISI 法则假设与温度无关的地表发射率光谱指数(TISIE)从白天到夜晚无明显变化,并通过引入中红外通道信息来降低热红外辐射方程间的相

关性来反演地表发射率^[10-11]。PBMs 法中的典型算法有根据中分辨率成像光谱仪(MODIS)传感器特征设计的同步反演地表和大气参数的日夜法,该算法中所需的大气参数可通过辐射传输模式准确获得,也可借助 MODIS 大气廓线产品,采用 7 个与地表温度有关的通道和昼夜观测数据进行地表发射率、地表温度以及大气廓线的同时反演^[12]。

现有的方法大多是利用极轨卫星数据进行地表发射率的反演,其空间分辨率比较适中,但时间分辨率不足以获取连续性的时间序列结果^[13]。静止卫星对同一地区的观测角度几乎不变,观测的时间间隔较短,相较于极轨卫星具有更高的时间分辨率,同一时间内的观测区域更广,因此非常适用于大区域长时间序列的地表发射率的反演^[14]。国内新一代静止气象卫星凭借其高时间分辨率以及同一时间覆盖全国区域的观测视场,为建立长时间序列大区域尺度的地表参数反演提供了可能。FY-2G 静止气象卫星是中国第一代静止气象卫星的 03 批业务星,定轨于 105°E 上空,于 2015 年 7 月正式投入运行,其搭载的探测器 VISSR 包括一个可见光通道、一个中红外通道、一个水汽通道以及两个热红外通道,其对地球进行全圆盘扫描的间隔为 1 h,汛期扫描间隔为 0.5 h^[15-16]。本文针对 FY-2G 静止卫星可对同一区域进行连续多次观测的特点,选用与温度无关的热红外光谱指数法进行地表发射率的反演研究。

2 基本原理与方法

在局部热力学平衡下,不考虑大气散射效应,在大气层顶卫星接收到的辐射包括大气上行辐射以及地表辐射项^[17],即

$$L_i(T_{B,i}) = \tau_i L_{G,i} + L_{\text{atm}\uparrow i}, \quad (1)$$

式中: L_i 为大气层顶处卫星接收到的通道辐射值; $T_{B,i}$ 为大气层顶的通道辐射亮温; $L_{G,i}$ 为通道 i 的地表辐射项; τ_i 为观测方向的通道透过率; $L_{\text{atm}\uparrow i}$ 为大气上行辐射项,下标 i 表示 FY-2G 的 1、2、4 通道。

通道辐射可用通道辐射亮温的黑体辐射值与通道光谱响应函数进行表示,即

$$L_i(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{f_i(\lambda)C_1}{\lambda^5 \{ \exp[C_2/(\lambda T_{B,i})] - 1 \}} d\lambda, \quad (2)$$

式中: T 为通道辐射亮温; λ 为波长; $f_i(\lambda)$ 为通道光谱响应函数; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为通道光谱范围; C_1 为第一辐射常数, $C_1 = 1.19106 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{sr}^{-1}$; C_2 为第二辐射常数, $C_2 = 1.43883 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。中红外波段(文中为 FY-2G 中红外通道 4)夜间的地表辐射以及热红外波段的地表辐射包括地表自身热辐射和反射的大气下行辐射,可描述为

$$L_{G,4} = \epsilon_4(\theta_v)B_4(T_s) + [1 - \epsilon_4(\theta_v)]L_{\text{atm}\downarrow 4}, \quad (3)$$

式中: $B_4(T_s)$ 为地表温度下的黑体辐射值,其中 T_s 为地表温度; $\epsilon_4(\theta_v)$ 为地表发射率; θ_v 为观测天顶角; $L_{\text{atm}\downarrow 4}$ 为大气下行辐射项,定义为大气下行辐射照度除以 π 。对于中红外波段,白天的地表辐射还包括反射的太阳辐射项,则此种情况下地表辐射项可表示为

$$L_{G,4}^{\text{day}} = \epsilon_4(\theta_v)B_4(T_s) + [1 - \epsilon_4(\theta_v)]L_{\text{atm}\downarrow 4} + \rho_4(\theta_v, \theta_s, \varphi)E_{\text{sun},4}, \quad (4)$$

式中: ρ_4 为地表双向反射率; θ_s 为太阳天顶角; φ 为相对方位角; $E_{\text{sun},4}$ 为入射至地表上的太阳直接辐照度; $L_{\text{atm}\downarrow 4}$ 为 FY-2G 中红外通道 4 的大气下行辐射项。

表 1 FY-2G 红外通道 IR1、IR2、IR4 的参数拟合结果

Table 1 Fitting results of FY-2G IR channels IR1, IR2, and IR4

FY-2G channel	m_i	n_i	SSE	R^2	RMSE
IR1(10.3-11.3 μm)	4.859×10^{-11}	4.561	0.0671700	0.9998	0.014990
IR2(11.662-12.662 μm)	6.860×10^{-10}	4.081	0.0435800	0.9999	0.012070
IR4(3.5-4.0 μm)	4.565×10^{-33}	12.91	0.0009223	0.9998	0.001756

根据 Becker 和 Li 对与温度无关的热红外光谱指数的定义^[17]可知,引入校正因子后,两通道的热红外发射率光谱指数(T_{TISE})可表示为

$$T_{\text{TISE},4,j}^n = T_{\text{TISE},4,j}^n \cdot \frac{C_4^n}{(C_j^n)^{n_4/n_j}} = \left(\frac{L_{G,4}^n}{m_4 C_4^n} \right)^{1/n_4} \left(\frac{L_{G,j}^n}{m_j C_j^n} \right)^{-1/n_j}, \quad (9)$$

式中:参数 m_4 、 m_j 为拟合系数,根据(6)式拟合得到, j 表示 FY-2G 热红外通道 1 或 2; T_{TISE} 与温度无关, $T_{\text{TISE},4,j}^n = (\epsilon_4)^{1/n_4} (\epsilon_j)^{-1/n_j}$,上标 n 表示夜间;参数 C 的定义如(5)式所示,其值取决于地表发射率、地表温度以及大气状况。假设白天和夜晚的 T_{TISE} 不变,即 $T_{\text{TISE},4,j}^n = T_{\text{TISE},4,j}^d$ (上标 n 和 d 分别表示夜间和白天),基于红外通道的辐射传输方程可

针对一般的地表辐射项(不考虑太阳辐射的情况),引入校正因子 $C_i = 1 + [1 - \epsilon_i(\theta_v)] / [\epsilon_i(\theta_v)B_i(T_s)]$,则地表辐射可表示为

$$L_{G,i} = \epsilon_i(\theta_v)B_i(T_s)C_i. \quad (5)$$

根据普朗克能量守恒近似,定义一个参考温度 $T_{g,i}$,则通道辐射可由参考温度表示为

$$L_i(T) = m_i T_{g,i}^{n_i}, \quad (6)$$

式中: m_i 和 n_i 与仪器通道的光谱响应函数有关。设置拟合参考温度范围为 $T = 280 \sim 310 \text{ K}$,根据通道黑体辐射定义[(2)式]计算不同温度下的通道辐射值,并结合(6)式对参数 m_i 和 n_i 进行拟合。表 1 中给出了参数 m_i 和 n_i 的拟合结果以及拟合的误差平方和 (SSE)、确定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE)。中红外通道波段范围大于 $1 \mu\text{m}$,不能将其当成窄通道处理。根据 Jiang 等^[10]的研究,对中红外通道引入通道平均透过程

$$\tau_4(\theta_v, T_{g,4}) = \frac{\int_0^\infty f_4(\lambda)L_{G,4}(\theta_v, T_{g,4}, \lambda)\tau_4(\theta_v, \lambda)d\lambda}{\int_0^\infty f_4(\lambda)L_{G,4}(\theta_v, T_{g,4}, \lambda)d\lambda}. \quad (7)$$

中红外通道的通道平均辐射亮度的计算公式为

$$L_4(\theta_v, T_4) = \tau_4(\theta_v, T_{g,4})L_{G,4}(\theta_v, T_{g,4}) + L_{\text{atm}\uparrow 4}(\theta_v). \quad (8)$$

得地表双向反射率 ρ_b 为

$$\rho_b = \frac{L_{G,4}^d - L_{G,4}^n \cdot \left(\frac{L_{G,j}^n}{L_{G,j}^d} \right)^{a_j} \cdot \frac{C^d}{C^n} \cdot \frac{M^n}{M^d}}{E_{\text{sun}}}, \quad (10)$$

式中: E_{sun} 为太阳直接辐射;参数 a_j 和 M^n/M^d 均与仪器的光谱响应特征有关,当所有数据均来自同一传感器时, $M^n/M^d = 1$, a_j 满足 $n_4 a_4 + n_j a_j = 0$,参数 $C^d/C^n = [C_4^d \cdot (C_j^d)^{a_j}] / [C_4^n \cdot (C_j^n)^{a_j}]$; $L_{G,j}^d$ 和 $L_{G,j}^n$ 分别为通道 j 的地表辐射值。FY-2G 静止气象卫星每小时获取一组地面观测数据,利用白天的多组观测数据以及一组夜晚数据可获取不同时刻下的地表双向反射率。

根据基尔霍夫定律,热力学平衡状态下不透明介质的地表发射率和地表方向半球反射率 $\rho_h(\theta_v)$ 的

关系为

$$\epsilon_4(\theta_v) = 1 - \rho_h(\theta_v), \quad (11)$$

因此地表方向半球反射率 $\rho_h(\theta_v)$ 的表达式为

$$\rho_h(\theta_v) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho_b(\theta_v, \theta_s, \varphi) \sin(\theta_s) \cos(\theta_s) d\theta_s d\varphi. \quad (12)$$

地表并非理想情况下的朗伯表面,其辐射也并非各向同性的,由于卫星数据的角度变化范围有限而地表半球反射率是地表双向反射率对角度的积分,因此引入双向反射分布函数(BRDF)来得到地表半球反射率 $\rho_h(\theta_v)$ 。考虑到本文中研究区域地表类型丰富,因此选用修正的 Minneart 地表 BRDF 来计算地表半球反射率^[18-19]。BRDF 的数学描述为

$$\rho_b(\theta_v, \theta_s, \varphi) = \rho_0 [\cos(\theta_v) \cos(\theta_s)]^{k-1} \times [1 + \gamma \sin(\theta_v) \sin(\theta_s) \cos(\varphi)], \quad (13)$$

$$\rho_h(\theta_v) = \frac{2\pi}{k+1} \rho_0 \cos^{k-1}(\theta_v), \quad (14)$$

式中: ρ_b 为地表双向反射率; ρ_h 为地表半球反射率; 参数 ρ_0 为观测天顶角和太阳天顶角均为 0° 时的地表反射率值; 参数 k 为常数,取值范围为 $0 \sim 1$,对于朗伯表面 k 取 1; 参数 $\gamma = b(1 - k^2)$ 为各向异性因子, b 为系数。利用多组 FY-2G 白天/夜晚观测数据通过(10)式得到多组不同时刻下的地表双向反射率,将多组不同时刻下的地表双向反射率代入(13)式通过最小二乘法进行拟合,得到每个像元点对应的 BRDF 模型参数 ρ_0 、 k 和 γ ,然后根据(14)式即可得到地表半球反射率。

引入 BRDF 模型后,根据(11)式所示的地表半球反射率和地表发射率的关系式可知,中红外通道的方向地表发射率则可由 BRDF 模型参数表示为

$$\epsilon_4(\theta_v) = 1 - \frac{2\pi}{k+1} \rho_0 \cos^{k-1}(\theta_v). \quad (15)$$

根据与温度无关的热红外光谱指数的定义可知,热红外通道的地表发射率 $\epsilon_j(\theta_v)$ 可以根据中红外通道的发射率以及 T_{TISIE} 推导得到,即

$$\epsilon_j(\theta_v) = \frac{[\epsilon_4(\theta_v)]^{n_j/n_4}}{(T_{TISIE,4,j})^{n_j}}, \quad j = 1 \text{ or } 2. \quad (16)$$

3 数据和预处理

我国位于亚洲东部,领土辽阔,为世界第三大领土大国,仅次于俄罗斯和加拿大。我国地势西高东低,呈阶梯状分布,东西跨越的经度超过 60° ,南北跨越的纬度近 50° ,大部分在温带,小部分在热带。研究表明, FY-2G 红外通道 IR1($10.8 \mu\text{m}$) 和

IR3($6.95 \mu\text{m}$) 每月的亮温平均定标偏差低于 1 K,红外通道 IR2 ($12 \mu\text{m}$) 每月的定标偏差接近 -2.3 K 。FY-2G 有一个可见光通道 VIS,4 个红外通道 IR1、IR2、IR3 和 IR4,其中 IR2 通道由于冷偏差效应的影响,其通道向右偏移了 $0.162 \mu\text{m}$,因此偏移后其通道的中心波长为 $12.162 \mu\text{m}$ 。红外通道的通道波段范围、分辨率、信噪比(SNR)和等效噪声温差(NE ΔT)如表 2 所示^[20-21]。本文选取 2015 年 10 月 15 日全天的 FY-2G 观测数据对我国陆地区域范围的地表发射率进行反演。

表 2 FY-2G 红外通道参数的基本信息
Table 2 Basic information of infrared channel parameters of FY-2G

Channel	Band width / μm	SNR@NE ΔT	Resolution / km
IR1	10.3-11.3	0.2-0.4 K@300 K	5
IR2	11.662-12.662	0.2-0.4 K@300 K	5
IR3	6.3-7.6	0.3-0.6 K@260 K	5
IR4	3.5-4.0	0.3-0.6 K@300 K	5

在进行地表发射率反演之前,利用 FY-2G 的云检测产品对数据进行去云处理,从而得到完全晴空的像元。图 1 所示为 FY-2G IR1 通道在大气层顶接收到的辐射亮温经过云检测后在我国陆地区域的 Lambert 投影影像,数据时间为 2015 年 10 月 15 日 UTC 03:00。图 1 中卫星影像数据覆盖范围为我国陆地区域附近,具体研究区域为我国陆地区域,同时对研究区域进行了植被类型分区,其中我国陆地区域边界和植被类型分区边界参考的是由中国科学院资源环境科学数据中心提供的中国陆地植被类型矢量数据(中国区域植被类型分区数据网址 <http://www.resdc.cn/>),图 1 中的数字编号表示不同的区域地表植被类型,1~6 分别为温带荒漠区域、青藏高原高寒植被区、亚热带常绿阔叶林区域、暖温带落叶阔叶林区域、温带草原区域、温带针叶落叶阔叶混交林区域,文中所有我国陆地区域影像的分区与图 1 相同。由于探测器在大气层顶接收到的通道辐射是地表辐射和大气辐射共同作用的结果,为去除大气成分对辐射的影响,需要进行大气校正。利用欧洲气象中心 ECMWF 提供的温度、水汽、臭氧等大气廓线数据并结合中国科学院资源环境科学数据中心提供的 1 km 分辨率的我国区域高程信息数据,通过辐射传输模型 MODTRAN 5 进行大气透过率、大气上行辐射、大气下行辐照度以及太阳直接

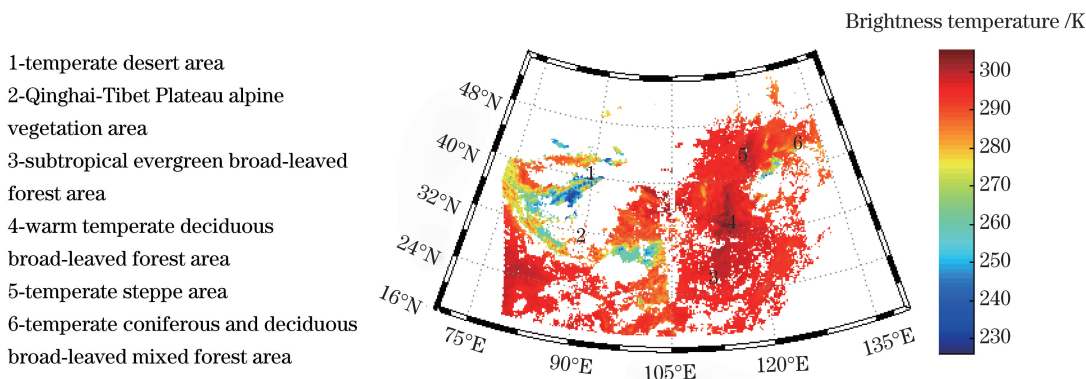


图 1 Lambert 投影下云检测后 FY-2G IR1 通道数据(2015-10-15 UTC 03:00)

Fig. 1 FY-2G IR1 channel data after cloud detection under Lambert projection on Oct 15, 2015, UTC 03:00

辐照度的计算^[22]。由于 ECMWF 的大气廓线数据分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,因此需要对 MODTRAN 5 的计算结果进行空间插值(插值算法使用最近邻法),使得到的大气参数空间分辨率与 FY-2G 红外数据空间分辨率一致。

FY-2G 静止卫星红外通道的空间分辨率为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$,像元覆盖范围较大,对应空间分辨率的测量数据较难获取,因此本文通过交叉对比法对地表发射率反演结果进行验证。MODIS 通道 31 和 32 的地表发射率产品精度接近 $0.01^{[14]}$,且 MODIS 热红外通道 31 和 32 与 FY-2G 的 IR1、IR2 最为接近,对应通道的光谱响应函数如图 2 所示,因此选用 MODIS 的地表发射率产品进行交叉对比验证。在 MODIS 地表发射率产品中,MOD11_L2 为 1 km 分辨率每 5 min 扫描 1 次的地表发射率产品,MOD11B1 为 6 km 分辨率的每日地表发射率产品。由于 MOD11B1 中无夜间热红外波段的地表发射率结果,因此选用 MOD11B1 地表发射率产品来验证 FY-2G 白天的地表发射率反演结果;选取 MOD11_L2 地表发射率产品来验证夜间的地表发射率反演结果。

地物光谱会受到波长的影响。从图 2 所示的 MODIS 和 FY-2G 对应红外通道的光谱响应函数曲线可以看出,两者通道之间存在差异,直接进行地表发射率对比验证会导致验证结果存在误差。采用 ASTER 地物光谱库提供的地物光谱数据并分别结合 MODIS 和 FY-2G 的通道光谱响应函数求出各地物光谱对应的通道发射率,然后拟合出 FY-2G 通道 IR1、IR2 和对应 MODIS 通道 31、32 地表发射率之间的线性关系,以消除通道差异对地表发射率验证结果的影响。拟合结果为

$$\begin{cases} \epsilon_{31} = 1.001\epsilon_1 - 0.001385 \\ \epsilon_{32} = 1.006\epsilon_2 + 0.0005958 \end{cases}, \quad (17)$$

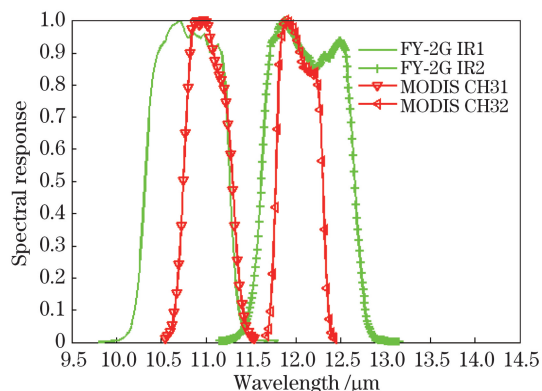


图 2 FY-2G 热红外通道 IR1、IR2 和 MODIS 热红外通道 31、32 的光谱响应函数

Fig. 2 Spectral response functions of FY-2G thermal infrared channels IR1 and IR2 and MODIS thermal infrared channels 31 and 32

式中 ϵ_{31} 、 ϵ_{32} 分别对应 MODIS 卫星 31 和 32 通道的地表发射率。

4 反演结果与分析

卫星数据经过预处理以及大气校正后,根据(1)式就可以得到地表辐射值。两通道的与温度无关的热红外光谱指数(TISIE)可以根据一个中红外通道(IR4)和一个热红外通道(IR1 或 IR2)夜晚数据的组合得到[(9)式],由于算法假设 $T_{\text{TISIE},i,j}^d = T_{\text{TISIE},i,j}^n$,因此计算时选取 2015 年 10 月 15 日 UTC 19:00 的夜晚数据进行 $T_{\text{TISIE},i,j}$ 的计算。图 3 所示为分别利用 IR4/IR1 和 IR4/IR2 通道组合得到的与温度无关的热红外光谱指数 $T_{\text{TISIE},4,1}$ 和 $T_{\text{TISIE},4,2}$,地理投影方式为 Lambert 投影。图中通过 IR4 和 IR1 通道数据组合得到的 $T_{\text{TISIE},4,1}$ 数值为 $1.01 \sim 1.09$,而通过 IR4 和 IR2 通道数据组合得到的 $T_{\text{TISIE},4,2}$ 数值为 $1.02 \sim 1.12$,在大多数情况下 $T_{\text{TISIE},4,2}$ 的值略高于 $T_{\text{TISIE},4,1}$ 。

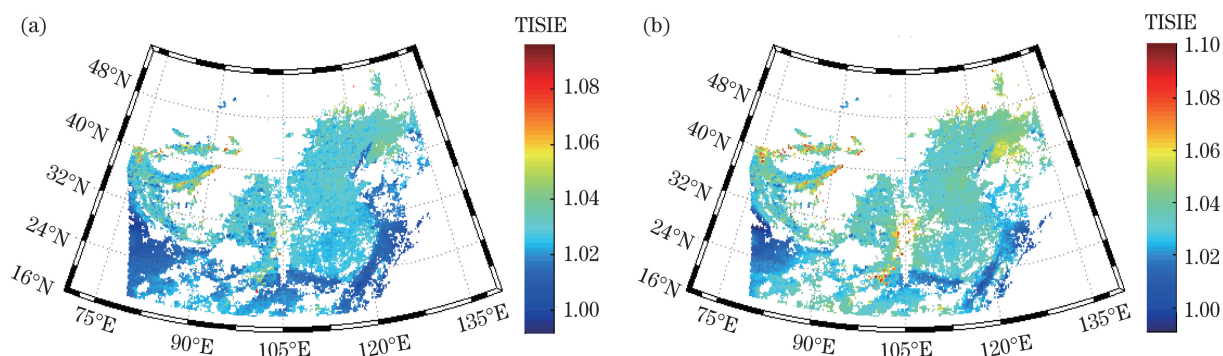


图3 与温度无关的热红外光谱指数的反演结果(2015-10-15 UTC 19:00)。(a) 通道4与通道1组合得到的 $T_{TISIE,4,1}$; (b)通道4与通道2组合得到的 $T_{TISIE,4,2}$

Fig. 3 Temperature-independent thermal infrared spectral indices on Oct 15, 2015, UTC 19:00. (a) $T_{TISIE,4,1}$ obtained by combining channel 4 with channel 1; (b) $T_{TISIE,4,2}$ obtained by combining channel 4 with channel 2

根据(10)式计算 2015 年 10 月 15 日白天各时刻的地表双向反射率值(对于本文的研究区域,各像元点对应白天的数据有 7 组),将计算得到的多组地表双向反射率值代入 BRDF 模型[(13)式]中即可通过拟合得到 BRDF 模型参数,从而根据(14)式即得到中红外通道的地表发射率,再结合计算得到的 $T_{TISIE,i,j}$ 根据(16)式就可得到热红外通道的地表发

射率。热红外通道 IR1 和 IR2 的地表发射率(LSE)反演结果如图 4 所示,图中空白像元为有云像元,在反演前已将其扣除。选取 2015-10-15 UTC 03:00 和 UTC 14:00 这两个时间进行分析,主要是因为该时刻的白天和夜晚数据时间与 MODIS 的地表发射率产品时间最为接近。白天(UTC 03:00)和夜晚(UTC 14:00)的热红外通道 IR1、IR2 的地表发射

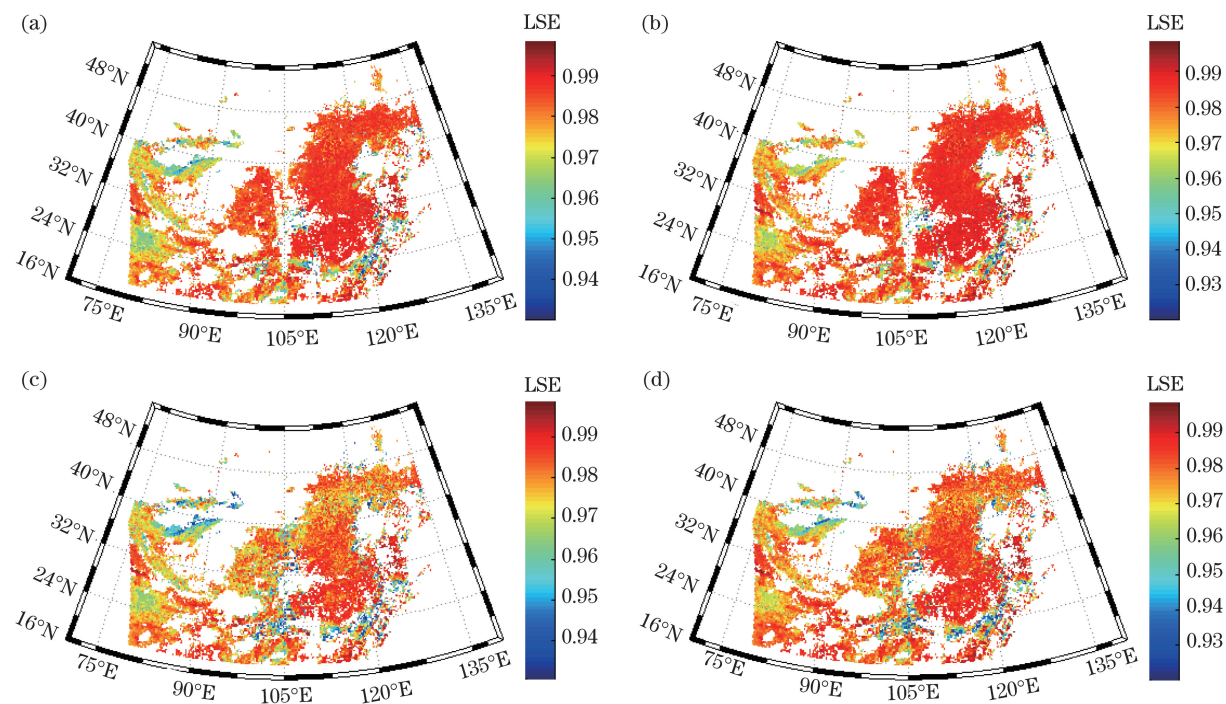


图4 地表发射率的反演结果。(a) FY-2G 热红外通道 IR1 的地表发射率(2015-10-15 UTC 03:00);(b) FY-2G 热红外通道 IR2 的地表发射率(2015-10-15 UTC 03:00);(c) FY-2G 热红外通道 IR1 的地表发射率(2015-10-15 UTC 14:00); (d) FY-2G 热红外通道 IR2 的地表发射率(2015-10-15 UTC 14:00)

Fig. 4 Inversion results of LSE. (a) LSE of FY-2G IR1(Oct 15, 2015, UTC 03:00); (b) LSE of FY-2G IR2(Oct 15, 2015, UTC 03:00); (c) LSE of FY-2G IR1(Oct 15, 2015, UTC 14:00); (d) LSE of FY-2G IR2(Oct 15, 2015, UTC 14:00)

率反演结果范围多分布在 0.9~1.0 之间,分别占总像元数的 92.68% 和 93.33% (白天), 96.12% 和 96.42% (夜晚)。整体来看,相比于我国中东部区域(地表类型多为植被),西部区域(地表类型多为裸土、沙漠)的地表发射率值偏低。图 5 所示为 FY-2G

热红外通道 IR1 和 IR2 白天和夜晚的地表发射率之差,从图中可以看出,在 1、2、5 植被类型区域,白天/夜晚通道 IR1 的地表发射率均低于 IR2 的地表发射率值;在 3、4、6 区域,白天/夜晚通道 IR1 的地表发射率值均高于通道 IR2。

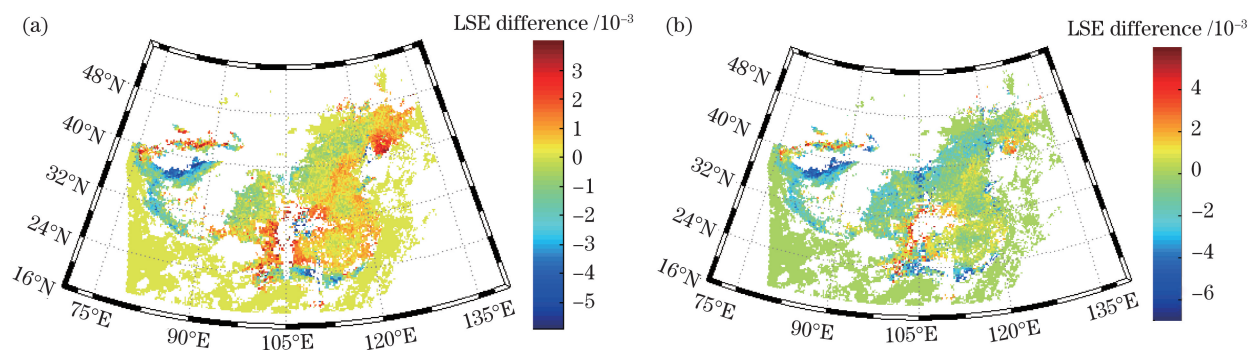


图 5 FY-2G 通道 IR1、IR2 地表发射率之差。(a)UTC 03:00(白天)的发射率之差;
(b)UTC 14:00(夜晚)的发射率之差

Fig. 5 Difference between LSEs of FY-2G channels IR1 and IR2. (a) LSE difference at UTC 03:00 (daytime);
(b) LSE difference at UTC 14:00 (nighttime)

选择 2015 年 10 月 15 日同一天的 MODIS 地表发射率产品进行验证,考虑到 MODIS 与 FY-2G 数据时间的一致性,白天数据选择 MOD11B1 地表发射率产品,夜晚数据选择 MOD11_L2 地表发射率产品。由于 MODIS 的 MOD11B1 和 MOD11_L2 产品的分辨率分别为 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ 和 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$, 因此利用最近邻法进行插值,这样可使 MODIS 的地表发射率产品与 FY-2G 红外通道的空间分辨率相匹配。同时,将反演得到的 FY-2G 热红外通道的地表发射率根据(17)式计算对应的 MODIS 通道的地表发射率,将此地表发射率与 MODIS 的地表发射率产品进行对比,以消除光谱通道差异对对比结果的影响。图 6 为 FY-2G 在整个研究区域的地表发射率反演结果与 MODIS 的发射率产品的对比,其中图 6(a)、(b)分别为 FY-2G 热红外通道 IR1、IR2 与 MOD11B1 通道 31、32 的白天(UTC 03:00)地表发射率对比结果,图 6(c)、(d)分别为 FY-2G 热红外通道 IR1、IR2 与 MOD11B1 通道 31、32 的夜晚(UTC 14:00)地表发射率的对比结果。分析结果表明:白天时(UTC 03:00),FY-2G 热红外通道 IR1 与 MODIS 通道 31 地表发射率之间的绝对误差为 -0.0038 ,均方根误差(RMSE)为 0.0110;FY-2G 热红外通道 IR2 的地表发射率与 MODIS 通道 32 地表发射率之间的绝对误差为 0.0014, RMSE 为 0.0095。夜晚时(UTC 14:00),FY-2G 热红外通道

IR1 与 MODIS 通道 31 地表发射率之间的绝对误差为 0.0016, RMSE 为 0.0121;FY-2G 热红外通道 IR2 的地表发射率与 MODIS 通道 32 地表发射率之间的绝对误差为 -0.0008 , RMSE 为 0.0112。对比 MODIS 的地表发射率产品可知:对于我国中东部植被区, FY-2G 通道 IR1、IR2 的地表发射率反演结果大多比 MODIS 的地表发射率低;而对于我国西部沙漠裸土区域,通道 IR1、IR2 的地表发射率反演结果大多比 MODIS 的地表发射率高。地表发射率受空间及观测因素的影响较大,为了使对比结果更为可信,选取 MODIS 地表发射率产品的观测时间与 FY-2G 数据观测时间之差不超过 15 min、观测天顶角小于 30° 的 MOD11B1 地表发射率数据进行对比,结果显示:满足上述条件的 FY-2G 热红外通道 IR1、IR2 的白天(满足条件的数据的 UTC 时间为 02:00、03:00 和 04:00)地表发射率反演结果与 MODIS 发射率产品间的绝对误差分别为 -0.0057 和 -0.0068 , RMSE 分别为 0.0095 和 0.0103,夜晚(满足条件的数据 UTC 时间为 13:00、14:00 和 15:00)地表发射率反演结果与 MODIS 发射率产品间的绝对误差分别为 -0.0010 和 -0.0035 , RMSE 分别为 0.0094 和 0.0096。

图 7 所示为热红外通道 IR1、IR2 平均地表发射率($\bar{\epsilon}_1$ 和 $\bar{\epsilon}_2$)的日变化曲线,其中图 7(a)、(b)分别为 6 种植被类型分区(具体分区如图 1 所示)内

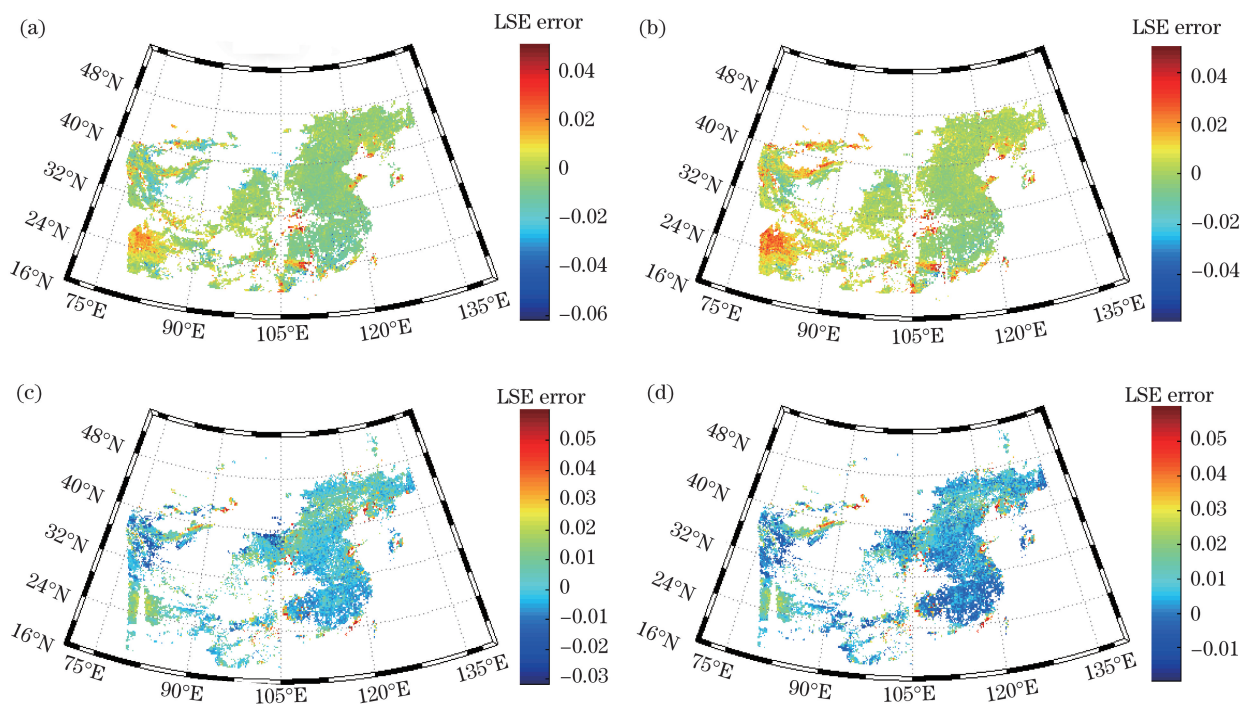


图 6 MOD11B1 LSE 与 FY-2G LSE 交叉对比验证误差。(a) MODIS 通道 31 LSEs 产品与 FY-2G 通道 IR1 LSEs 反演结果对比(UTC 03:00);(b) MODIS 通道 32 LSEs 产品与 FY-2G 通道 IR2 LSEs 反演结果对比(UTC 03:00);(c) MODIS 通道 31 LSEs 产品与 FY-2G 通道 IR1 LSEs 反演结果对比(UTC 14:00);(d) MODIS 通道 32 LSEs 产品与 FY-2G 通道 IR2 LSEs 反演结果对比(UTC 14:00)

Fig. 6 Cross-comparison verification error of MOD11B1 LSE and FY-2G LSE. (a) Comparison of LSEs of MODIS channel 31 and FY-2G IR1 at UTC 03:00; (b) comparison of LSEs of MODIS channel 32 and FY-2G IR2 at UTC 03:00; (c) comparison of LSEs of MODIS channel 31 and FY-2G IR1 at UTC 14:00; (d) comparison of LSEs of MODIS channel 32 and FY-2G IR2 at UTC 14:00

FY-2G 通道 IR1、IR2 的平均地表发射率日变化曲线,图 7(c)为研究区域内所有像元热红外通道 IR1、IR2 的平均地表发射率日变化曲线,图 7(d)为各地表类型下通道 IR1、IR2 平均发射率日变化之差 $\Delta\bar{\epsilon}_1$ 和 $\Delta\bar{\epsilon}_2$ (图中横坐标“1~6”分别表示 6 种地表类型,“all area”表示整个研究区域)。分析图 7 可知,温带荒漠区域的地表发射率明显低于其他地表类型,温带草原区域的地表发射率比其他地表类型偏高。从图 7 中还可以看出,地表发射率值在一天当中并不是恒定不变的,而且夜晚的地表发射率相对于白天的地表发射率值偏低,热红外通道 IR1 的地表发射率值与通道 IR2 相比略低。根据图 7(d)平均地表发射率在一天中的最大值和最小值之差可以看出,对于温带荒漠区域,其在一天中的发射率相较于其他地表类型变化较大,通道 IR1 和 IR2 地表发射率的变化分别为 0.0153 和 0.0141,其他类型地表发射率变化范围在 0.01 附近。

上述反演结果是基于通道 IR4/IR2 的地表双向反射率获得的 BRDF 模型参数。根据地表发射

率的反演原理可知,中红外地表发射率的反演结果主要依赖于基于多组地表双向反射率的 BRDF 模型参数的拟合结果[(13)、(15)式]。根据(10)式可知,地表双向反射率是通过中红外通道和一个热红外通道的昼夜地表辐射数据计算得到的。理论上说,不论是利用通道 IR4/IR11 组合得到的地表双向反射率(ρ_1),还是利用通道 IR4/IR2 的组合得到的地表双向反射率(ρ_2),它们对最终的地表发射率的反演结果的影响不大。图 8 为利用 IR4/IR1 和 IR4/IR2 白天/夜晚数据计算得到的地表双向反射率之差($\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$)。从图中可以看出:在我国中东部区域(植被为主), ρ_1 要低于 ρ_2 ,而在我国西部区域(裸土,沙漠为主), ρ_1 要高于 ρ_2 。图 9 所示为分别利用 ρ_1 和 ρ_2 反演得到的各通道地表发射率($\epsilon_4^{(1)}$ 和 $\epsilon_4^{(2)}$,上标用于区分由不同地表双向反射率得到的对应地表发射率,下标表示不同光谱通道)差值的直方图。从图 9 中可以看出:整个研究区域内中红外通道 IR4 的地表发射率之差($\Delta\epsilon_4 = \epsilon_4^{(1)} - \epsilon_4^{(2)}$)绝对值小于 0.02 的像元约占总像元的 95.13%;

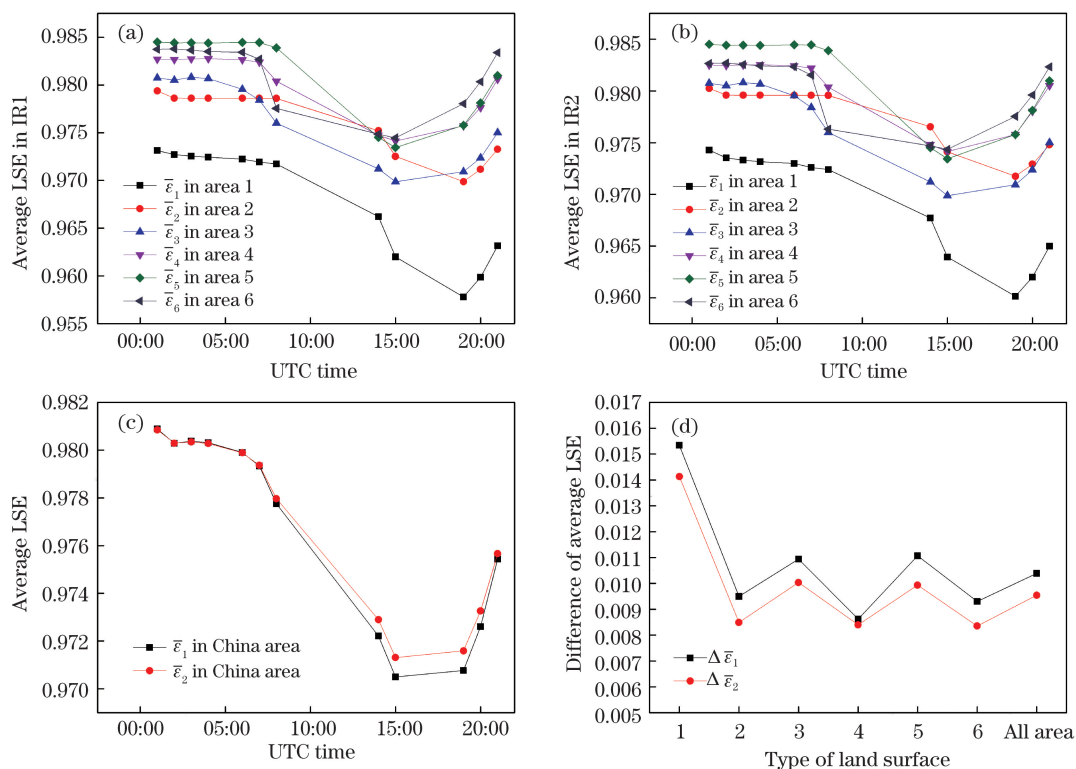


图 7 FY-2G 通道 IR1 和 IR2 平均 LSE 的日变化曲线以及对应的角度信息。(a)6 种地表类型下通道 IR1 平均 LSE 的日变化曲线;(b)6 种地表类型下通道 IR2 平均 LSE 的日变化曲线;(c)研究区域内通道 IR1、IR2 平均 LSE 的日变化曲线;(d)6 种地表类型下通道 IR1、IR2 平均 LSE 之差

Fig. 7 Diurnal variation curves of average LSEs of FY-2G IR1 and IR2 and corresponding angle information. (a) Diurnal variation curves of average LSE of IR1 under six surface types; (b) diurnal variation curves of average LSE of IR2 under six surface types; (c) diurnal variation curves of average LSEs of IR1 and IR2 channels in China region; (d) difference between average LSEs of IR1 and IR2 channels under six surface types

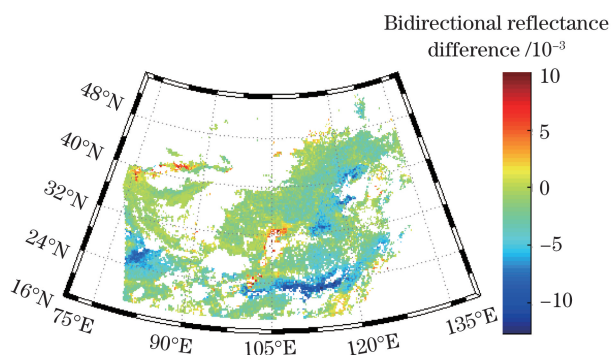


图 8 地表双向反射率之差

Fig. 8 Difference in land surface bidirectional reflectance
对于热红外通道 IR1,地表发射率之差($\Delta\epsilon_1 = \epsilon_1^{(1)} - \epsilon_1^{(2)}$)的绝对值小于 0.01 的像元约占总像元的 97.05%;对于热红外通道 IR2,地表发射率误差($\Delta\epsilon_2 = \epsilon_2^{(1)} - \epsilon_2^{(2)}$)小于 0.01 的像元约占总像元的 97.39%。将 $\epsilon_j^{(1)}$ (j 为通道 IR1 或 IR2)的反演结果与 MODIS 的地表发射率产品在整个研究区域内进行对比,通道 IR1 和通道 IR2 的绝对误差分别为

0.0064 和 0.0004, RMSE 分别为 0.0107 和 0.0078。

5 结 论

本文以我国陆地区域的卫星影像为主要研究对象,采用 FY-2G 中红外和热红外通道观测数据,在 TISI 概念的基础上,发展了基于 FY-2G 静止卫星的地表发射率反演算法,并结合 MODIS 的地表发射率产品对反演结果进行验证。交叉对比验证后可知,白天和夜晚的地表发射率反演结果与 MODIS 发射率产品的吻合度较高,地表发射率绝对误差和 RMSE 均在 0.01 附近。同时,对同一天不同时刻的地表发射率数据进行了分析,结果表明,地表发射率在一天中不是固定不变的,对于不同的地表类型,变化范围略有不同,其中荒漠区域的地表发射率相较于植被区域变化较大。最后,对 TISI 算法在 FY-2G 地表发射率反演中的稳定性进行了验证,结果表明,对于 FY-2G 的热红外通道 IR1、IR2,算法稳定性良好。由于风云静止卫星红外通道的在轨黑体定标并

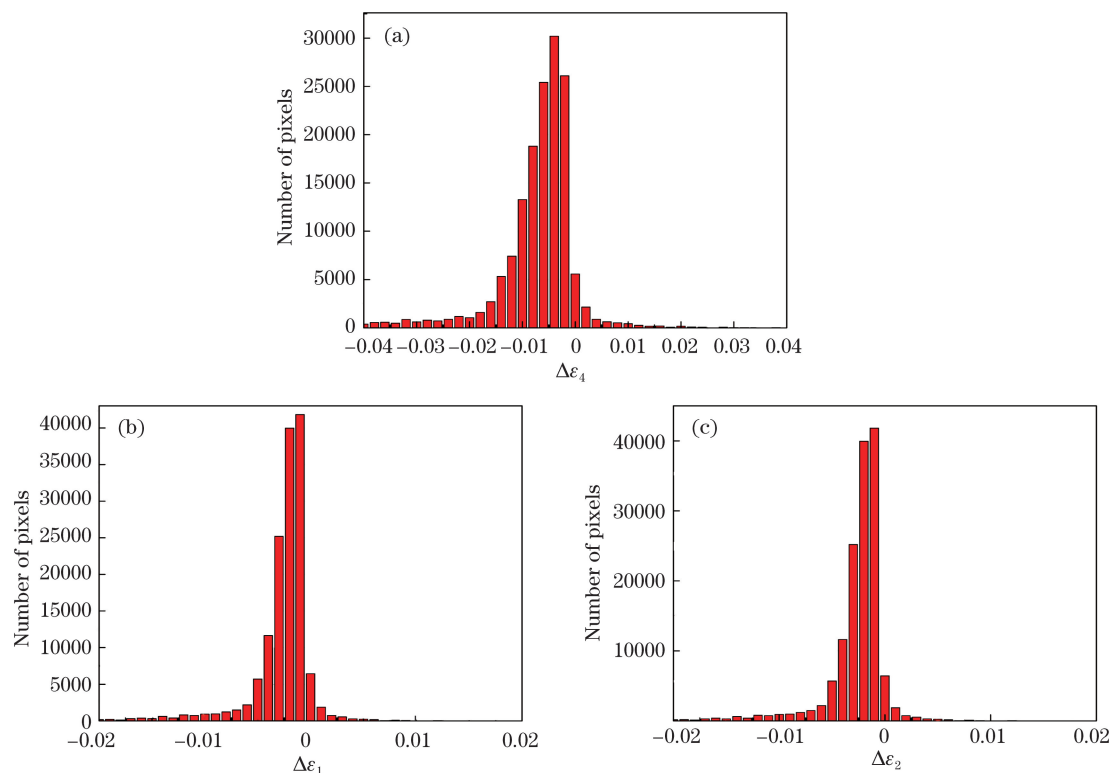


图 9 各通道地表发射率差值。(a)通道 IR4 的地表发射率之差;(b)通道 IR1 的地表发射率之差;
(c)通道 IR2 的地表发射率之差

Fig. 9 Difference in LSE of each channel. (a) Difference in LSE of channel IR4; (b) difference in LSE of channel IR1;
(c) difference in LSE of channel IR2

非全光路定标,因此引入以极轨卫星为基准的交叉辐射定标来提高 FY-2G 热红外通道数据的定标精度是下一步的工作重点。

参 考 文 献

- [1] Yao Z H, Qiu X F, Shi G P, *et al.* Emissivity spatial distribution characteristics over China region[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1234-1240.
姚镇海, 邱新法, 施国萍, 等. 中国比辐射率空间分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1234-1240.
- [2] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D22): 4688.
- [3] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996.
- [4] Li Z L, Wu H, Wang N, *et al.* Land surface emissivity retrieval from satellite data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(9/10): 3084-3127.
- [5] Kahle A B, Rowan L C. Evaluation of multispectral middle infrared aircraft images for lithologic mapping in the East Tintic Mountains, Utah [J]. Geology, 1980, 8(5): 234-239.
- [6] Tang B H, Bi Y Y, Li Z L, *et al.* Generalized split-window algorithm for estimate of land surface temperature from Chinese geostationary FengYun meteorological satellite (FY-2C) data [J]. Sensors, 2008, 8(2): 933-951.
- [7] Chen H Y, Niu Z, Bi H B. A comparison of two split-window algorithms for retrieving land surface temperature from MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(2): 174-181.
陈瀚阅, 牛铮, 毕海波. MODIS 数据地表温度反演劈窗算法比较[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 174-181.
- [8] Hulley G C, Hook S J, Manning E, *et al.* Validation of the atmospheric infrared sounder (AIRS) version 5 land surface emissivity product over the Namib and Kalahari deserts [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D19): D19104.
- [9] Xu Z, Zhao H J. A thermal infrared temperature and emissivity inversion algorithm based on correction of Wien approximation [J]. Acta Optica Sinica, 2009,

- 29(2): 394-399.
徐州, 赵慧洁. 基于维恩近似修正的热红外温度和发射率反演算法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 394-399.
- [10] Jiang G M, Li Z L, Nerry F. Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(4): 326-340.
- [11] Gao C X, Li Z L, Qiu S, *et al.* An improved algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from MSG-2/SEVIRI data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3175-3191.
- [12] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996.
- [13] Zhang X Y, Wang J. Estimation of surface soil moisture from onboard FY-2D satellite multi-temporal data[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 882-887.
张霄羽, 王娇. 风云二号静止气象卫星数据估算土壤表面水分方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 882-887.
- [14] Qian Y G, Qiu S, Wang N, *et al.* Land surface temperature and emissivity retrieval from time-series mid-infrared and thermal infrared data of SVISSR/FY-2C[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(3): 1552-1563.
- [15] Hui W, Guo Q, Wu Q, *et al.* Image quality evaluation of FY-2G meteorological satellite[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 1902-1910.
惠雯, 郭强, 吴琼, 等. FY-2G 静止气象卫星遥感图像质量评价[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 1902-1910.
- [16] Li Y, Zhang Y, Liu J J, *et al.* Calibration of the visible and near-infrared channels of the FY-2C/FY-2D GEO meteorological satellite at radiometric site[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 41-46.
李元, 张勇, 刘京晶, 等. 风云二号静止气象卫星可见光通道辐射校正场定标方法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 41-46.
- [17] Becker F, Li Z L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 32(1): 17-33.
- [18] Petitcolin F, Nerry F, Stoll M P. Mapping directional emissivity at 3.7 μm using a simple model of bi-directional reflectivity[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(17): 3443-3472.
- [19] Huang X, Bai L, Wu Z S. BRDF model of bare surface over rugged terrain[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0129001.
黄珣, 白璐, 吴振森. 裸露起伏地表的 BRDF 模型[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0129001.
- [20] Liu J, Cui P, Xiao M. The bias analysis of FY-2G cloud fraction in summer and winter[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(2): 177-188.
刘健, 崔鹏, 肖萌. FY-2G 卫星冬夏云量产品偏差分析[J]. 应用气象学报, 2017, 28(2): 177-188.
- [21] Guo Q, Feng X. In-orbit spectral response function correction and its impact on operational calibration for the long-wave split-window infrared band (12.0 μm) of FY-2G satellite[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 553.
- [22] Zhang F, Qi L L, Ji W, *et al.* Influence of atmosphere in different areas on middle-far infrared radiation transmission[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0401002.
张芳, 齐琳琳, 吉薇, 等. 不同地域大气对中远红外辐射传输的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0401002.