

高温目标短波红外光谱辐射亮度方向效应研究

曹宇, 潘军, 蒋立军*, 孙也涵, 卞宇涛

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026

摘要 为探究高温目标短波红外波段(1300~2500 nm)光谱辐射亮度是否具有方向效应, 及光谱辐射亮度与辐射天顶角的关系, 以 500 °C 石墨与金属板(304 不锈钢)为高温目标, 设计了暗室条件下高温目标 0°~70° 辐射天顶角光谱辐射亮度测量实验。利用方差分析研究短波红外波段辐射亮度是否具有方向效应, 采用最小二乘法, 对高温目标的方向光谱辐射亮度进行拟合, 进而探究其变化规律。实验结果显示: 在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的条件下, 石墨板与金属板在不同辐射天顶角的光谱辐射亮度均存在显著差异; 采用最小二乘法, 使用指数函数对高温目标的方向光谱辐射亮度进行拟合, 拟合精度均大于 0.95。研究表明: 金属板较石墨板具有更显著的方向效应; 石墨光谱辐射亮度方向效应不随波长的变化而变化, 金属板光谱辐射亮度方向效应受波长的影响; 两种材质的方向光谱辐射亮度与辐射天顶角(0°~70°)均呈指数关系。

关键词 光谱学; 短波红外; 光谱辐射亮度; 高温目标; 方向效应; 方差分析

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0130001

Directional Effect of Shortwave Infrared Spectroscopy Radiation of High-Temperature Target

Cao Yu, Pan Jun, Jiang Lijun*, Sun Yehan, Bian Yutao

College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China

Abstract This paper explores whether the spectral radiance of high-temperature targets in the shortwave infrared band (1300–2500 nm) has a directional effect and the relationship between the spectral radiance and the radiation zenith angle. Using 500 °C graphite and metal (304 stainless steel) plates as the high-temperature targets, this paper designs an experiment of spectral radiance measurement with 0°–70° radiation zenith angles of the high-temperature targets in a dark room. The variance analysis is applied to study whether the radiance in the shortwave infrared band gives a directional effect, and the least squares method is adopted to fit the directional spectral radiance of the high-temperature targets and thereby explore its variation rules. The experimental results show that under the condition of significance level $\alpha = 0.01$, the spectral radiance at different radiation zenith angles is significantly different for both the graphite plates and the metal plates. In light of the least squares method, the exponential function is used to fit the directional spectral radiance of the high-temperature targets, and the fitting accuracy is greater than 0.95. The results demonstrate that the metal plate has a more prominent directional effect than the graphite plate. The directional effect of the spectral radiance of the metal plate is affected by wavelength whereas that of graphite is not. The directional spectral radiance of both the two materials has an exponential relationship with the radiation zenith angle (0°–70°).

Key words spectroscopy; shortwave infrared; spectral radiance; high-temperature target; directional effect; variance analysis

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-06-18; 录用日期: 2021-07-15

通信作者: *20993059@qq.com

1 引言

高温目标(500 K 以上)是指温度显著高于常温的各类地物,包括自燃煤层、林火、草原火、油井火炬等,高温目标识别及温度反演方法研究对遥感资源调查、环境监测、灾害预警等具有重要的理论意义和实用价值^[1]。已有研究表明,对于高温目标,基于短波红外数据可实现良好的温度反演效果^[2-7]。受到地物空间结构、热特性,以及复杂的空间分布的影响,传感器在不同观测视场和辐射天顶角测得的辐射亮度存在明显的方向效应^[8],因此辐射亮度方向效应是制约温度反演精度的重要参数^[9]。高温目标在短波红外波段方向的光谱辐射亮度与辐射天顶角的关系及其变化规律成为有待于深入研究的科学问题。

国内外学者在热红外波段探究了辐射天顶角与热辐射方向效应的关系。在热辐射方向效应的实验观测(主要包括野外观测和室内实验)方面,Kimes 等^[10-18]通过对植被、土壤、农作物、城市建筑物等进行野外观测,证明地物热辐射方向效应的存在且其受混合像元及天气状况的影响。Labeled 等^[19-23]通过室内实验证明热辐射方向效应与目标物的光学特性、晶粒尺寸、粗糙度和孔隙度有关,且取决于像元组分和像元结构的温差。学者们在确定了热辐射在热红外波段存在方向效应的基础上,展开了热辐射方向效应建模研究,目前研究模型主要包括几何光学模型、辐射传输模型、几何光学-辐射传输混合模型和计算机模拟模型。Li 等^[24]在考虑同温下多次散射的基础上提出了 LSF(Li-Strahle-Friedl)概念模型。王锦地等^[25]根据影响非同温像元热辐射方向效应的主要因素建立了线性方向辐射模型。阎广建等^[26-36]以已有模型为基础进行改进,改进后的模型能较好地拟合农作物、城市,以及植被的热辐射方向效应的变化情况。目前进行的辐射亮度方向效应研究仅局限于热红外波段和常温地物,其是否适用于短波红外波段和高温地物还有待验证。

因此本文在短波红外波段对高温目标方向的光谱辐射亮度及其规律进行研究。石墨材料具有耐高温、导电导热能力强、化学性质稳定等特性,可以保证石墨在较高温条件下仍保持较为稳定的化学性质;金属材料具有耐高温、不易变形等特性,是城市建筑中的主要材料。为探究不同材料光谱辐射亮度的方向效应,选择石墨和金属板等常见材料作为小面元高温目标,使用光谱仪从不同辐射天顶角测量

高温目标纯像元方向的光谱辐射亮度,并利用方差分析探究高温目标的光谱辐射亮度方向效应。采用光谱辐射亮度比探究高温目标是否存在光谱辐射亮度方向效应、不同材质的高温目标各波段光谱辐射亮度是否具有不同的方向效应,以及高温目标光谱辐射亮度与辐射天顶角的关系。高温目标光谱辐射亮度方向效应研究对于提高小面元高温目标反演精度、提高遥感量化水平具有重要意义,丰富了石墨与金属的光谱辐射亮度数据库,并为石墨与金属的辐射测温技术提供了数据支持。

2 多角度观测实验原理与方法

为探究高温目标在短波红外波段范围内是否存在辐射亮度方向效应,及方向光谱辐射亮度与辐射天顶角的关系,首先基于地物辐射原理,推导光谱仪辐射亮度读数与高温目标方向光谱辐射亮度的关系;然后根据辐射亮度测量方法,设计高温目标方向的光谱辐射亮度观测实验以及数据处理方法。

2.1 基本原理

辐射亮度被定义为面辐射源在单位投影面积上、单位立体角内的辐射通量(图 1)。

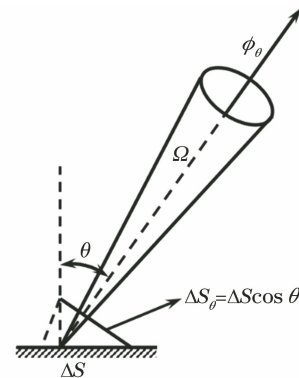


图 1 辐射亮度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiance

方向辐射亮度可表示为

$$L_{\theta} = \frac{\Delta^2 \phi_{\theta}}{\Delta S_{\theta} \cdot \Delta \Omega_{\theta}}, \quad (1)$$

式中: θ 为辐射天顶角; $\Delta \phi_{\theta}$ 为高温目标在 θ 方向上的发射辐射通量; ΔS_{θ} 为高温目标在光谱仪视场范围内在垂直于观测方向 θ 的投影面积; $\Delta \Omega_{\theta}$ 为高温目标在观测方向 θ 的投影面上对光谱仪镜头所张立体角。

黑体的辐射亮度可根据普朗克公式计算:

$$L_b(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/kT\lambda) - 1]}, \quad (2)$$

式中: λ 为波长; T 为目标温度(K); h 是普朗克常

数, $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c 为光速, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$; k 为玻尔兹曼常数, $k=1.381 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

为消除不同波段对高温目标辐射亮度的影响, 引入辐射亮度比这一概念, 辐射亮度比为方向辐射亮度 $L_\theta(\lambda)$ 与法向辐射亮度 $L_0(\lambda)$ 之比, 可表示为

$$R_\theta(\lambda) = \frac{L_\theta(\lambda)}{L_0(\lambda)}. \quad (3)$$

为比较高温目标光谱辐射亮度方向效应的强弱, 引入辐射亮度角度效应指数 F_θ 表示高温目标光谱辐射亮度比从法向到 θ 方向变化程度的大小:

$$F_\theta = \frac{1}{n} \sum_{\theta=\theta_1}^{\theta_n} (|R_\lambda^0 - R_\lambda^\theta|), \quad (4)$$

式中: n 为辐射天顶角数量; θ_1 为起始辐射天顶角; θ_n 为终止辐射天顶角; R_λ^0 为 λ 波段法向光谱辐射亮度比; R_λ^θ 为 λ 波段辐射天顶角 θ 下的光谱辐射亮度比。 F_θ 越接近于 0, 则高温目标光谱辐射亮度方向效应越弱; F_θ 越接近于 1, 则高温目标光谱辐射亮度方向效应越强。

2.2 多角度观测实验原理

黑体是朗伯体, 不受辐射天顶角的影响, 因此可通过测量高温目标在不同辐射天顶角的光谱辐射亮度来探究其是否具有方向效应及其规律。根据辐射亮度定义(图 1), 为测量高温目标方向的光谱辐射亮度, 可选择的方案有: 1) 垂直观测方案, 即固定光谱仪探头, 使其垂直观测高温目标, 通过移动高温目标测量其方向光谱辐射亮度; 2) 圆周观测方案, 即固定高温目标, 以高温目标为圆心, 移动光谱仪探头进行圆周观测, 测量高温目标方向光谱辐射亮度。由于光谱仪的观测范围受光谱仪探头视场角的限制, 因此选择圆周观测方案(图 2)。

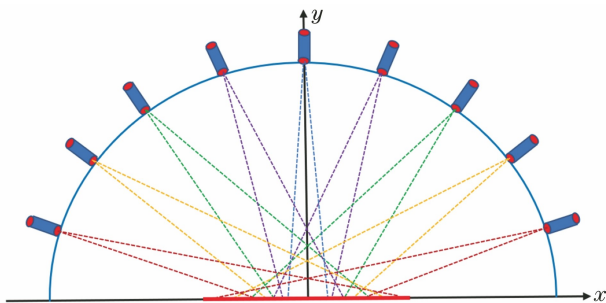


图 2 圆周观测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circular observation

使用光谱仪在不同天顶角测量高温目标光谱辐射亮度时, 观测视场随辐射天顶角的变化而变化, 因此需明确光谱仪读数与高温目标在辐射天顶角 θ 的光谱辐射亮度的关系。

观测目标为高温目标, 光谱仪的镜头转换器面积为 ΔA , 光谱仪镜头的半视场角为 β , 光谱仪的镜头转换器与高温目标上表面中心的距离为 h (图 3), 光谱仪读数为 L , 小面元高温目标在辐射天顶角 θ 方向的光谱辐射亮度为 L_θ 。

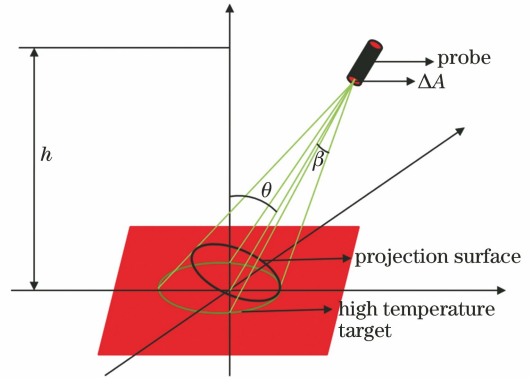


图 3 多角度观测物理模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-angle observation physical model

根据能量守恒定律, 光谱仪视场范围内高温目标在辐射天顶角 θ 的发射辐射通量 $\Delta\phi_\theta$ 等于光谱仪接收的辐射通量 $\Delta\phi$, 其中 $\Delta\phi_\theta$ 可表示为

$$\Delta\phi_\theta = L_\theta \cdot \Delta S_\theta \cdot \Delta\Omega_\theta, \quad (5)$$

其中高温目标在光谱仪视场范围内在垂直于辐射天顶角 θ 的投影面积 ΔS_θ 及其在辐射天顶角 θ 的投影面上对光谱仪镜头所张立体角 $\Delta\Omega_\theta$ 分别可表示为

$$\Delta S_\theta = \frac{\pi \cdot h^2}{(\tan \theta + \cot \beta)^2}, \quad (6)$$

$$\Delta\Omega_\theta = \frac{\Delta A (1 + \tan \theta \cdot \tan \beta)^2}{h^2}. \quad (7)$$

光谱仪接收能量与光谱仪读数的关系可表示为

$$\Delta\phi = L \cdot \Delta A \cdot \Delta\Omega, \quad (8)$$

式中: $\Delta\Omega$ 为光谱仪视场角对应的立体角, 可表示为

$$\Delta\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \beta). \quad (9)$$

光谱仪辐射亮度读数与高温目标纯像元在辐射天顶角 θ 的光谱辐射亮度关系式为

$$L_\theta = L \cdot 2 \cdot (1 - \cos \beta) / \tan^2 \beta. \quad (10)$$

实验中光谱仪镜头转换器的半视场角 β 为 1.5° , 则有

$$L_\theta = 0.999L. \quad (11)$$

根据(11)式, 高温目标在辐射天顶角 θ 的光谱辐射亮度近似等于光谱仪读数, 因此可直接使用光谱仪测量结果作为实验数据。

2.3 实验观测方案

1) 实验设备

为精确测量高温目标的方向光谱辐射亮度, 设

计了多角度观测平台(图 4),其主要由观测支架、光谱仪,以及电加热板三部分组成。为消除反射辐射对高温目标发射光谱辐射亮度的影响,本实验在无风、室温的暗室条件下进行。观测支架高度为 1.2 m,光谱仪探头到高温目标上表面距离的可调节范围为 0.1~1.2 m,辐射天顶角的可调节范围为 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。通过调节观测距离与辐射天顶角,测量高温目标纯像元的方向光谱辐射亮度。实验使用的光谱仪为 ASD FieldSpec4 光谱仪,测量范围为可见光到近红外(350~2500 nm)波段。测量光谱辐射亮度时,需要启动光谱仪,预热至少 1 h 以使其达到稳定状态,可将 3° 镜头转换器搭载在光谱仪探头上,用于测量高温目标纯像元的光谱辐射亮度,此时高温目标充满光谱仪视场,且视场内高温目标均匀分布,温度恒定。电加热板配备了比例、积分和微分(PID)智能控温仪作为加热源,加热板表面长宽与高温目标一致,加热范围为 $0\sim 700^{\circ}\text{C}$,保持加热温度稳定。高温目标为石墨/金属板(已充分氧化),目标大小为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 1\text{ cm}$,表面平整均匀。

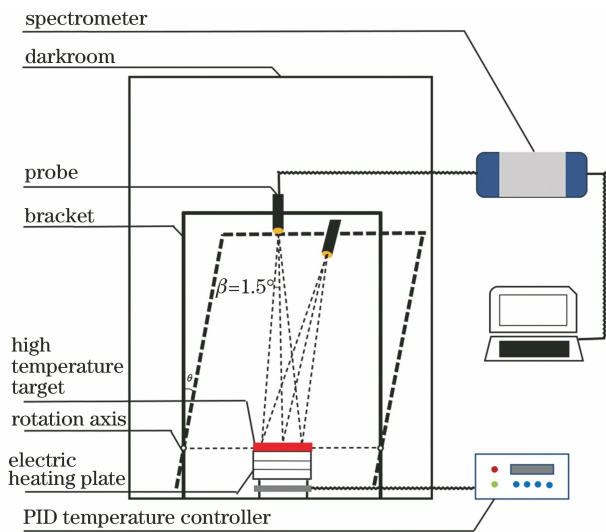


图 4 多角度观测平台

Fig. 4 Multi-angle observation platform

2) 观测方案设计

将高温目标放在光谱仪视场中心,使用光谱仪搭载 3° 镜头转换器测量高温目标光谱辐射亮度,考虑到镜头转换器的直径为 2.21 cm,使镜头转换器与高温目标上表面的距离为 0.15 m,此时光谱仪的视场范围内高温目标为纯像元。以高温目标中心为圆心,辐射天顶角范围为 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$,以 5° 为固定观测步长,从法向旋转多角度观测支架直至 70° ,将测量 15 次所获得的高温目标方向的光谱辐射亮度数据

作为 1 组实验数据。

2.4 实验观测流程设计

在实验准备阶段,应先将光谱仪预热 30 min 后打开电热板对高温目标进行加热,温度设置为 500°C ,经过 30 min 后光谱仪达到稳定工作状态,此时高温目标温度也处于稳定状态。

在实验测量阶段,按观测方案设计测量高温目标方向的光谱辐射亮度,辐射天顶角范围为 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$,以 5° 为固定观测步长,每个角度测量 10 条光谱曲线,重复上述流程,反复测量 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 高温目标的方向光谱辐射亮度 50 组。

2.5 数据处理方案

1) 数据预处理

本次实验共测得 50 组 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 辐射天顶角方向的光谱辐射亮度数据,为减小测量误差,求取光谱仪测量结果的平均值。

2) 方差分析

为检验方向光谱辐射亮度比是否具有显著差异,将辐射天顶角设置为分组条件,利用方差分析方法分析不同辐射天顶角下光谱辐射亮度的差异性;为探究高温目标各波段光谱辐射亮度比是否具有不同的方向效应,将波段设置为分组条件,利用方差分析方法分析不同波段光谱辐射亮度比的差异性。

3) 函数关系

为探究方向光谱辐射亮度与辐射天顶角的关系,以 5° 为固定观测步长,利用最小二乘法对高温目标各个波段的方向光谱辐射亮度均值与辐射天顶角进行拟合。

3 实验结果分析

根据实验方案,以石墨与金属板作为高温目标,按照实验流程测量 50 组高温目标的方向光谱辐射亮度数据,按照实验数据处理方案对测得的方向光谱辐射亮度数据进行处理,对实验数据处理结果进行分析。

3.1 原始数据分析

为减小误差,计算了测得的 $0^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 辐射天顶角光谱辐射亮度数据的均值,图 5 展示 $0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}, 40^{\circ}, 50^{\circ}, 60^{\circ}, 70^{\circ}$ 辐射天顶角的光谱辐射亮度曲线,高温目标在 350~1000 nm 波段范围内的方向光谱辐射亮度较低,接近于 0,且在测量过程中受到噪声影响,信噪比较低,因此图 5 仅显示 1000~2500 nm 波段范围内的方向光谱辐射亮度。

短波红外波段范围为 1300~2500 nm,考虑光

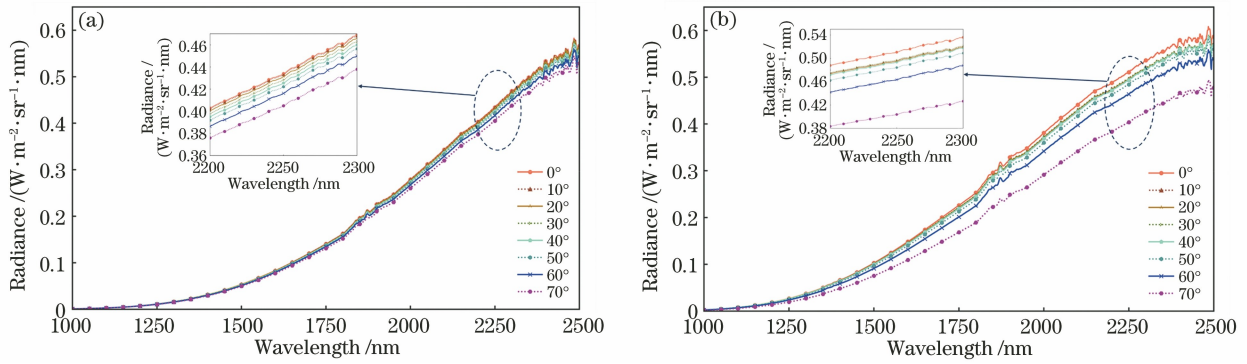


图 5 不同材质高温目标光谱辐射亮度的均值。(a) 石墨;(b) 金属板

Fig. 5 Mean spectral radiance of high temperature targets for different materials. (a) Graphite; (b) metal plate

光谱辐射亮度数据在 1380 nm 与 1870 nm 附近出现的波动起伏是由水蒸气的吸收作用引起的,在 2400~2500 nm 波段范围内出现的波动起伏是由光谱仪的镜头转换器引起的,因此在数据分析过程中仅分析 1300~2400 nm 波段范围内的方向光谱辐射亮度。石墨的方向光谱辐射亮度随辐射天顶角的增大而缓慢降低,变化极不明显;随着辐射天顶角的增大,金属板的方向光谱辐射亮度明显降低。

高温目标在 0°~70° 辐射天顶角范围内的方向光谱辐射亮度比随辐射天顶角的变化趋势为(图 6):在同一波段,高温石墨板的光谱辐射亮度比从法向随辐射天顶角的增大有微弱减小;高温金属板的

光谱辐射亮度比在 0°~45° 之间随辐射天顶角的增大变化很小,辐射天顶角大于 45° 后随辐射天顶角的增大而迅速降低,高温金属板的光谱辐射亮度比的变化规律呈现类似氧化金属的特性,这一现象与吕斯骅^[37]得到的氧化金属的光谱辐射亮度比随辐射天顶角的变化规律大致相同。对比各波段方向光谱辐射亮度比数据可以发现石墨光谱辐射亮度的方向效应不随波长变化;金属板光谱辐射亮度的方向效应随波长的增加而减弱。为证明高温石墨与金属板的光谱辐射亮度均存在一定的方向效应,且金属板的光谱辐射亮度方向效应较石墨更为显著,以及各波段方向效应是否存在差异,需要进行方差分析。

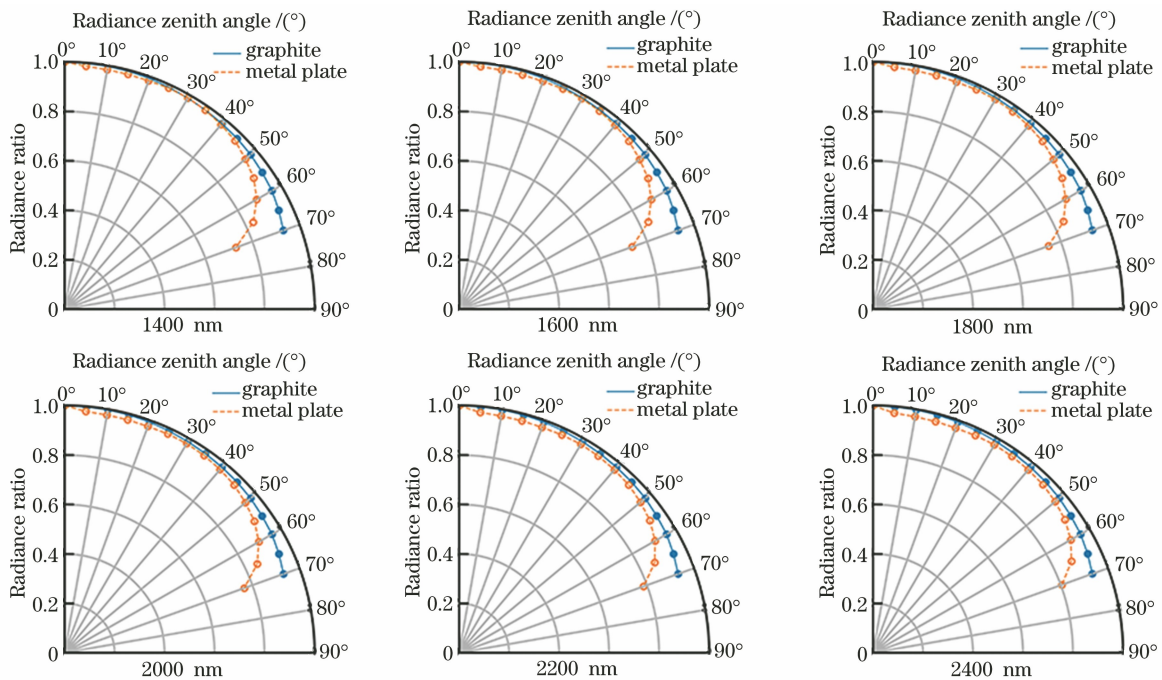


图 6 不同波长下的光谱辐射亮度比与辐射天顶角的关系

Fig. 6 Relationship between spectral radiance ratio and radiance zenith angle for different wavelengths

3.2 不同辐射天顶角下光谱辐射亮度比差异性分析

方差分析是检验某因素变化引起的系统误差是

否显著大于随机误差的统计方法。若不同辐射天顶角/波段光谱辐射亮度差异(组间离差)显著大于同

辐射天顶角/波段内光谱辐射亮度数据差异(组内离差),则认为各组差异显著,即辐射天顶角/波段影响显著,否则认为辐射天顶角/波段的影响不显著。可引入可分性度量评价指标 F 进行评价。

$$\Delta\Omega = \frac{Q_A f_c}{Q_e f_A}, \quad (12)$$

式中: Q_A 表示组间离差; Q_e 表示组内离差; f_A 表示组间自由度; f_c 表示组内自由度。建立零假设,假设各组均值相等,给定显著性水平,查表获取临界值 $F_\alpha(f_A, f_c)$ 。如果 $F > F_\alpha(f_A, f_c)$,则在显著性水平 α 下拒绝原假设,即各组均值不相等,否则接受原假设,认为影响不显著。

分析同一波段不同辐射天顶角光谱辐射亮度比的差异性,若方向光谱辐射亮度差异性显著,则光谱辐射亮度存在方向效应,否则不存在。以 2200 nm 为例(图 7),先对 0° 与 70° 两个最大角度间隔分组组合进行方差分析,探究方向光谱辐射亮度差异性是否显著;然后对 $0^\circ \sim 70^\circ$ 之间的 15 个角度进行分组

组合,并进行方差分析,以探究其整体方向光谱辐射亮度差异性是否显著;再对相邻角度进行分组组合,并进行方差分析,以探究辐射天顶角变化较小时方向光谱辐射亮度比的差异性是否仍然显著(表 1 和表 2)。

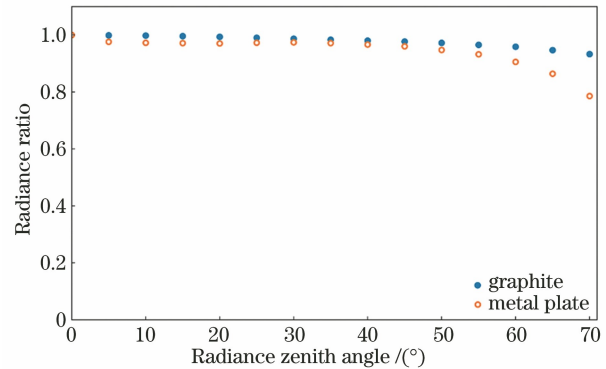


图 7 不同材料的方向光谱辐射亮度比(2200 nm)
Fig. 7 Directional spectral luminance ratio for different materials (2200 nm)

表 1 $0^\circ \sim 70^\circ$ 石墨方差分析结果

Table 1 Results of graphite variance analysis at $0^\circ \sim 70^\circ$

Angle group	F	$F_\alpha(\alpha=0.01)$	Angle group	F	$F_\alpha(\alpha=0.01)$
$(0^\circ, 70^\circ)$	1555.206	6.90077	$(30^\circ, 35^\circ)$	4.761	6.90077
$0^\circ \sim 70^\circ$	390.972	3.09148	$(35^\circ, 40^\circ)$	4.826	6.90077
$(0^\circ, 5^\circ)$	9.628	6.90077	$(40^\circ, 45^\circ)$	9.567	6.90077
$(5^\circ, 10^\circ)$	9.017	6.90077	$(45^\circ, 50^\circ)$	18.480	6.90077
$(10^\circ, 15^\circ)$	11.379	6.90077	$(50^\circ, 55^\circ)$	11.291	6.90077
$(15^\circ, 20^\circ)$	11.420	6.90077	$(55^\circ, 60^\circ)$	0.697	6.90077
$(20^\circ, 25^\circ)$	4.719	6.90077	$(60^\circ, 65^\circ)$	35.337	6.90077
$(25^\circ, 30^\circ)$	9.206	6.90077	$(65^\circ, 70^\circ)$	29.666	6.90077

表 2 $0^\circ \sim 70^\circ$ 金属板方差分析结果

Table 2 Results of metal plate variance analysis at $0^\circ \sim 70^\circ$

Angle group	F	$F_\alpha(\alpha=0.01)$	Angle group	F	$F_\alpha(\alpha=0.01)$
$(0^\circ, 70^\circ)$	1760.334	6.90077	$(30^\circ, 35^\circ)$	0.941	6.90077
$0^\circ \sim 70^\circ$	535.972	3.09148	$(35^\circ, 40^\circ)$	3.947	6.90077
$(0^\circ, 5^\circ)$	312.369	6.90077	$(40^\circ, 45^\circ)$	5.607	6.90077
$(5^\circ, 10^\circ)$	3.341	6.90077	$(45^\circ, 50^\circ)$	26.139	6.90077
$(10^\circ, 15^\circ)$	0.122	6.90077	$(50^\circ, 55^\circ)$	34.236	6.90077
$(15^\circ, 20^\circ)$	0.149	6.90077	$(55^\circ, 60^\circ)$	54.336	6.90077
$(20^\circ, 25^\circ)$	0.629	6.90077	$(60^\circ, 65^\circ)$	75.687	6.90077
$(25^\circ, 30^\circ)$	0.261	6.90077	$(65^\circ, 70^\circ)$	153.523	6.90077

由方差分析结果可知:在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的情况,除 $(20^\circ, 25^\circ), (30^\circ, 35^\circ), (35^\circ, 40^\circ), (55^\circ, 60^\circ)$ 之外,石墨在其余的角度分组组合下均有 $F > F_\alpha$, 石墨的方向光谱辐射亮度比数据在统计学意义上表现出一定的差异性,即高温石墨光谱辐射亮度存在方向效应;金属板的最大角度间隔下 $F(0^\circ, 70^\circ)$ 以及整体 $F(0^\circ \sim 70^\circ)$ 均大于 F_α , 当辐射天顶角在 $5^\circ \sim 45^\circ$ 时,相邻角度的方向光谱辐射亮度比分组组合的方差分析结果均小于 F_α , 可认为金属板的方向光谱辐射亮度比在 $5^\circ \sim 45^\circ$ 的辐射天顶角范围内

差异性不显著,其余方向光谱辐射亮度比分组组合的方差分析结果均大于 F_α , 可认为当辐射天顶角大于 45° 时,金属板的方向光谱辐射亮度比差异性显著,就其整体而言,可认为金属板的方向光谱辐射亮度比数据存在差异性,即光谱辐射亮度存在方向效应。

根据(4)式,在 1300~2400 nm 的波长范围内,以 100 nm 为步长,分别计算石墨与金属板的法向天顶角与 70° 辐射天顶角的辐射亮度角度效应指数 F_{70}^G 与 F_{70}^M (表 3)。

表 3 石墨与金属板的辐射亮度效应指数 F_{70}^G 与 F_{70}^M

Table 3 Radiance effect indexes F_{70}^G and F_{70}^M of graphite and metal plate

Wavelength /nm	F_{70}^G	F_{70}^M	Wavelength /nm	F_{70}^G	F_{70}^M
1300	0.023353	0.059971	1900	0.022980	0.060926
1400	0.023044	0.060332	2000	0.022957	0.060625
1500	0.022667	0.061155	2100	0.022978	0.060003
1600	0.022670	0.061679	2200	0.022742	0.059146
1700	0.022475	0.062024	2300	0.022334	0.058149
1800	0.022189	0.062009	2400	0.022378	0.056742

根据表 3,金属板各个波段的辐射亮度效应指数均明显大于石墨,这表明金属板较石墨具有更显著的方向效应,出现此现象的原因是:石墨为碳单质而金属板已经被充分氧化,其表面状态有所变化,二者表面物理属性差异明显。

3.3 不同波段方向光谱辐射亮度比的差异性分析

探究石墨板与金属板不同波段的方向光谱辐射亮度比差异(图 8)。使用方差分析对各波段的方向光谱辐射亮度比数据进行差异性分析。在 1400~2400 nm 波段范围内,先对高温目标的 1400 nm 与

2400 nm 两个最大波长间隔作方差分析,探究不同波段光谱辐射亮度比的差异性是否显著;然后在 1400~2400 nm 之间,以 200 nm 为步长,对该范围内的 6 个波长分组组合进行方差分析,探究其整个波段的光谱辐射亮度比差异性是否显著;再以 200 nm 为步长,对相邻波段的光谱辐射亮度比分组组合进行方差分析,探究相邻波段在同一辐射天顶角下的光谱辐射亮度比差异性是否显著。方差分析结果如表 4、5 所示。

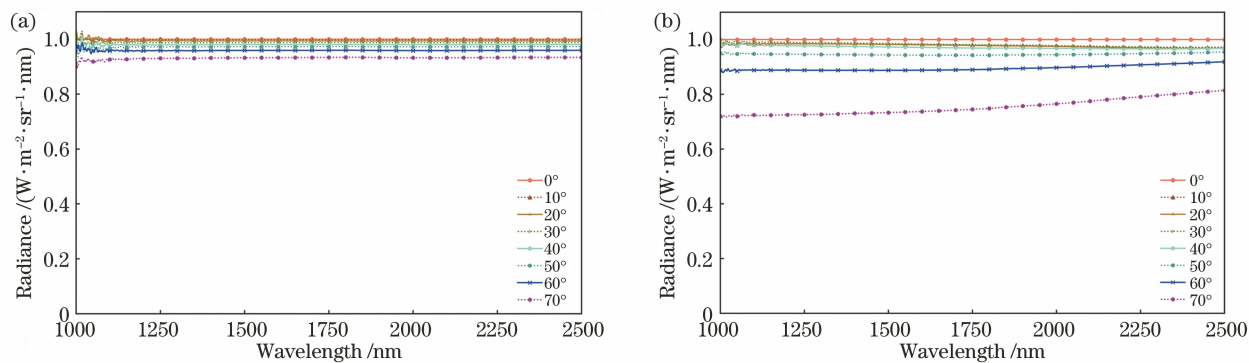


图 8 不同材质高温目标的光谱辐射亮度比。(a)石墨;(b)金属板

Fig. 8 Spectral radiance ratio of high temperature targets with different materials. (a) Graphite; (b) metal plate

在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的情况下,对于石墨在相邻各波段的方向光谱辐射亮度比分组组合,最大波长

间隔组合下 $F(1400 \text{ nm}, 2400 \text{ nm})$ 均有 $F < F_\alpha(1, 98)$, 且整体方差分析结果 $F(1400 \sim 2400 \text{ nm}) < F_\alpha(5, 294)$,

表 4 石墨各波段的方向光谱辐射亮度比方差分析

Table 4 Variance analysis of directional spectral radiance ratio of graphite for different bands

Angle / (°)	$F(1400\text{ nm}, 1600\text{ nm})$	$F(1600\text{ nm}, 1800\text{ nm})$	$F(1800\text{ nm}, 2000\text{ nm})$	$F(2000\text{ nm}, 2200\text{ nm})$	$F(2200\text{ nm}, 2400\text{ nm})$	$F(1400\text{ nm}, 2400\text{ nm})$	$F(1400\text{--}2400\text{ nm})$	F_{α} (1, 98)	F_{α} (5, 294)
5	0.031	0.017	0.000	0.028	0.032	0.106	0.056	6.901	3.091
10	0.001	0.047	0.110	0.004	0.050	0.026	0.041	6.901	3.091
15	0.015	0.018	0.068	0.000	0.022	0.007	0.034	6.901	3.091
20	0.005	0.005	0.139	0.000	0.001	0.049	0.057	6.901	3.091
25	0.014	0.060	0.145	0.003	0.002	0.012	0.042	6.901	3.091
30	0.068	0.086	0.225	0.011	0.054	0.171	0.092	6.901	3.091
35	0.028	0.122	0.179	0.044	0.116	0.356	0.118	6.901	3.091
40	0.076	0.111	0.229	0.071	0.241	0.678	0.194	6.901	3.091
45	0.044	0.129	0.546	0.099	0.288	0.359	0.185	6.901	3.091
50	0.026	0.189	0.717	0.097	0.292	0.267	0.203	6.901	3.091
55	0.086	0.208	0.806	0.065	0.383	0.426	0.257	6.901	3.091
60	0.095	0.158	0.782	0.050	0.207	0.212	0.213	6.901	3.091
65	0.152	0.260	0.631	0.050	0.409	0.797	0.311	6.901	3.091
70	0.182	0.265	0.571	0.051	0.321	0.823	0.323	6.901	3.091

表 5 金属板各波段的方向光谱辐射亮度比方差分析

Table 5 Variance analysis of directional spectral radiance ratio of metal plate for different bands

Angle / (°)	$F(1400\text{ nm}, 1600\text{ nm})$	$F(1600\text{ nm}, 1800\text{ nm})$	$F(1800\text{ nm}, 2000\text{ nm})$	$F(2000\text{ nm}, 2200\text{ nm})$	$F(2200\text{ nm}, 2400\text{ nm})$	$F(1400\text{ nm}, 2400\text{ nm})$	$F(1400\text{--}2400\text{ nm})$	F_{α} (1,98)	F_{α} (5,294)
5	0.362	0.842	1.672	4.254	1.974	31.500	10.634	6.901	3.091
10	0.346	0.755	1.441	3.419	2.027	28.024	9.265	6.901	3.091
15	0.263	0.525	0.760	1.898	1.161	17.999	5.632	6.901	3.091
20	0.513	0.732	0.773	1.917	1.099	21.737	6.515	6.901	3.091
25	0.936	1.191	0.905	2.284	1.148	29.125	8.641	6.901	3.091
30	1.136	1.249	0.599	1.611	0.744	24.785	7.215	6.901	3.091
35	1.387	1.403	0.282	1.087	0.299	18.931	5.690	6.901	3.091
40	0.991	0.758	0.030	0.255	0.000	6.345	2.163	6.901	3.091
45	0.704	0.280	0.008	0.018	0.502	0.441	0.667	6.901	3.091
50	0.147	0.001	0.386	1.248	2.655	4.274	2.288	6.901	3.091
55	0.054	0.095	1.031	2.576	4.459	12.224	5.318	6.901	3.091
60	0.002	0.306	1.538	3.138	3.676	19.516	7.499	6.901	3.091
65	0.096	0.733	2.687	5.462	5.795	40.779	14.375	6.901	3.091
70	0.395	1.252	3.900	7.434	7.441	59.999	20.512	6.901	3.091

高温石墨在相邻波段的方向光谱辐射亮度比数据差异并不显著,同时结合表 3 中石墨各波段的辐射亮度方向效应指数 F_{α}^G ,以及图 8(a)中石墨板的方向

光谱辐射亮比随波长的变化曲线可以看出,石墨各波段的光谱辐射亮度方向效应强度大致相同;对于金属板而言,在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的情况下,其最

大波长间隔组合 $F(1400\text{ nm}, 2400\text{ nm}) > F_{\alpha}(1, 98)$, 整体波段的方差分析结果为 $F(1400\sim 2400\text{ nm}) > F_{\alpha}(5, 294)$ 。同时结合表 3 中金属板在各波段的辐射亮度方向效应指数 F_{70}^M , 以及图 8(b) 中金属板的方向光谱辐射亮度比随波长的变化曲线, 可看出高温金属板的光谱辐射亮度方向效应强度在 1300~2400 nm 波段范围内随波长的增加而减弱。这可能是由石墨板与金属板的材质不同所致。

3.4 光谱辐射亮度比与辐射天顶角的关系模型

为探究方向光谱辐射亮度比与辐射天顶角间的函数关系, 在 2200 nm 波段处, 以 5° 为步长, 利用最小二乘法对高温目标方向光谱辐射亮度比与辐射天顶角进行曲线拟合(图 9), 拟合函数为 $f = a \exp(b\theta) +$

$c \exp(d\theta)$, 拟合参数与确定系数(R^2)见表 6。

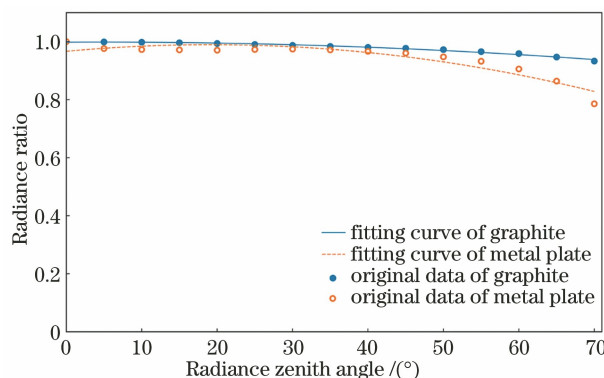


图 9 不同材料的高温目标曲线拟合(2200 nm)

Fig. 9 High temperature target curve fitting for different materials (2200 nm)

表 6 不同材料的高温目标曲线的拟合精度对比

Table 6 Comparison of fitting accuracy of high temperature target curves for different materials

Wavelength / nm	Graphite					Metal plate				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	R^2
1300	2.862	-0.0051	-1.865	-0.0079	0.978	0.9915	-0.0001	-0.0003	0.0969	0.997
1400	3.755	-0.0053	-2.757	-0.0073	0.978	0.9915	-0.0001	-0.0003	0.0973	0.997
1500	3.598	-0.0053	-2.600	-0.0074	0.979	0.9912	-0.0002	-0.0003	0.0981	0.997
1600	36.880	-0.1364	-35.900	-0.1396	0.979	0.9908	-0.0002	-0.0002	0.0994	0.997
1700	139.100	-0.1374	-138.100	-0.1383	0.979	0.9902	-0.0003	-0.0002	0.1012	0.996
1800	46.180	-0.1357	-45.190	-0.1382	0.979	0.9895	-0.0003	-0.0002	0.1038	0.996
1900	2.647	-0.1120	-1.663	-0.1662	0.980	0.9884	-0.0003	-0.0001	0.1055	0.995
2000	13.920	-0.1344	-12.940	-0.1431	0.981	0.9873	-0.0004	-0.0001	0.1081	0.994
2100	22.040	-0.1359	-21.050	-0.1413	0.981	0.9858	-0.0004	-0.0001	0.1119	0.992
2200	64.080	-0.1375	-63.090	-0.1394	0.980	0.9842	-0.0004	-0.0001	0.1167	0.989
2300	45.210	-0.1371	-44.230	-0.1397	0.980	0.9826	-0.0004	-0.0001	0.1214	0.986
2400	2.612	-0.1126	-1.627	-0.1686	0.979	0.9817	-0.0004	-0.0001	0.1256	0.953

表 6 中 a 、 b 、 c 、 d 表示拟合曲线指数函数的系数。石墨和金属板的方向光谱辐射亮度比数据随辐射天顶角的变化曲线的拟合结果中确定系数(R^2)均大于 0.95, 说明高温目标的方向光谱辐射亮度比与辐射天顶角呈指数关系; 石墨与金属板的指数函数的各系数相差较大的原因可能是材质不同。

4 结 论

高温目标存在光谱辐射亮度方向效应: 石墨的光谱辐射亮度在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 辐射天顶角范围内的方向效应较弱; 高温金属板的光谱辐射亮度比在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间随辐射天顶角的增大变化很小, 当辐射天顶角

大于 45° 后, 光谱辐射亮度比迅速下降, 其变化规律呈现出类似氧化金属的特性, 且金属板的光谱辐射亮度的方向效应较石墨板更为显著。波长对高温目标辐射亮度方向效应的影响为: 高温石墨面辐射源在短波红外波长范围内光谱辐射亮度的方向效应大致相同; 高温金属板面辐射源光谱辐射亮度的方向效应受波长的影响, 在 1300~2400 nm 波段范围内随波长的增大而减弱。石墨板与金属板的光谱辐射亮度与辐射天顶角($0^\circ \sim 70^\circ$)呈指数关系。重点讨论高温材料的方向性问题, 采用指数拟合方式达到较高精度, 但其物理解释有待于更深入的研究。此外, 以纯视域观测简化问题时, 因实际中多存在非同

温混合像元,其与辐射天顶角的变化关系有待后续研究。

参 考 文 献

- [1] Yu Y F, Pan J, Xing L X, et al. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on Mahalanobis distance [J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(5): 90-94.
于一凡, 潘军, 邢立新, 等. 基于马氏距离的遥感图像高温目标识别方法研究 [J]. *遥感信息*, 2013, 28(5): 90-94.
- [2] Zhu Y J, Xing L X, Pan J, et al. Method of identifying high-temperature target using shortwave infrared remote sensing data [J]. *Remote Sensing Information*, 2011, 26(6): 33-36, 41.
朱亚静, 邢立新, 潘军, 等. 短波红外遥感高温地物目标识别方法研究 [J]. *遥感信息*, 2011, 26(6): 33-36, 41.
- [3] Yu Y F, Pan J, Xing L X, et al. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on factor analysis [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014: 083622.
- [4] Yuan Y, Pan J, Xing L X, et al. Identification of high temperature targets based on Fisher two types discrimination [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(9): 109-113.
袁悦, 潘军, 邢立新, 等. 基于 Fisher 两类判别的高温目标精确识别方法 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(9): 109-113.
- [5] Ji Y, Pan J, Jiang L J, et al. Methods of identifying high temperature target from Landsat8 data using variance analysis [J]. *Global Geology*, 2017, 36(4): 1297-1302.
季悦, 潘军, 蒋立军, 等. 基于方差分析的 Landsat8 数据高温目标识别方法研究 [J]. *世界地质*, 2017, 36(4): 1297-1302.
- [6] Wang P J, Pan J, Jiang L J, et al. Method of remote sensing multispectral recognition index construction for forest fire [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(2): 312-319.
王鹏举, 潘军, 蒋立军, 等. 林火目标遥感多光谱识别指数构建方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(2): 312-319.
- [7] Yu Y F, Xing L X, Pan J, et al. Study of high temperature targets identification and temperature retrieval experimental model in SWIR remote sensing based Landsat8 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 56-62.
- [8] Chen L F, Fan W J, Liu Q H. The study on thermal infrared radiant directionality of non isothermal land surface [J]. *Progress in Geography*, 2001, 20(3): 261-266.
陈良富, 范闻捷, 柳钦火. 地表热辐射方向性研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2001, 20(3): 261-266.
- [9] Zhang X F, Pan J, Jiang L J, et al. Directionality of radiation ratio of high temperature target [J]. *Global Geology*, 2019, 38(2): 522-531.
张雪峰, 潘军, 蒋立军, 等. 高温目标辐射亮度比的方向性研究 [J]. *世界地质*, 2019, 38(2): 522-531.
- [10] Kimes D S, Idso S B, Jr, Pinter P J, et al. View angle effects in the radiometric measurement of plant canopy temperatures [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 10(4): 273-284.
- [11] Balick L K, Hutchinson B A. Directional thermal infrared exitance distributions from a leafless deciduous forest [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(5): 693-698.
- [12] Balick L K, Hutchison B A, Smith J A, et al. Directional thermal infrared exitance distributions of a deciduous forest in summer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1987, GE-25(3): 410-412.
- [13] Chehbouni A, Nouvellon Y, Kerr Y H, et al. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(3): 360-372.
- [14] Harries J E, Russell J E, Hanafin J A, et al. The geostationary earth radiation budget project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(7): 945-960.
- [15] Lian J, Sun H, Lin Q N, et al. Field observations of background thermal radiation directionality in natural forests [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 365-374.
连君, 孙浩, 林起楠, 等. 天然林林下地表热辐射方向性观测 [J]. *遥感学报*, 2017, 21(3): 365-374.
- [16] Xu X R, Zhuang J L, Chen L F. The multi-angle thermal infrared remote sensing and retrieval of component temperatures of mixed pixel [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2000, 36(4): 555-560.
徐希孺, 庄家礼, 陈良富. 热红外多角度遥感和反演混合像元组分温度 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(4): 555-560.
- [17] Zhang R H, Sun X M, Li Z L, et al. The main factors of thermal radiation directivity of ground objects: a new way to improve the accuracy of radiation temperature directivity observation and data

- analysis[J]. *Science in China*, 2000, 30(S1): 39-44.
张仁华, 孙晓敏, 李召良, 等. 地物热辐射方向性影响主因子的揭示: 提高辐射温度方向性观测精度的新途径及数据剖析[J]. *中国科学*, 2000, 30(S1): 39-44.
- [18] Xu X R, Chen L F. The choice of scanning direction of multi-angle thermal infrared remote sensing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2002, 38(1): 98-103.
徐希孺, 陈良富. 关于热红外多角度遥感扫描方向的选取问题[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(1): 98-103.
- [19] Labed J, Stoll M P. Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: laboratory investigations on bare soils [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(11): 2299-2310.
- [20] Rees W G, James S P. Angular variation of the infrared emissivity of ice and water surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(15): 2873-2886.
- [21] Cuenca J, Sobrino J A. Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(23): 4598-4602.
- [22] Su H B, Wang J D, Li X W, et al. Indoor simulation and validation of thermal radiation directionality model for three dimensional surface with heterogeneous temperature [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, s1: 71-80.
苏红波, 王锦地, 李小文, 等. 三维非同温表面热辐射方向性模型的室内模拟实验验证 [J]. *兵工学报*, 2000, s1: 71-80.
- [23] Zhao W M, Li L F, Yuan Z Y, et al. Directional spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0830002.
赵晚梦, 李龙飞, 原泽野, 等. Ti-6Al-4V 合金方向光谱发射率特性研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0830002.
- [24] Li X W, Strahler A H, Friedl M A. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2508-2517.
- [25] Wang J D, Li X W, Sun X M, et al. Inversion of component temperature of non isothermal pixel using thermal radiation directivity model [J]. *Science in China*, 2000, 30(S1): 54-60.
王锦地, 李小文, 孙晓敏, 等. 用热辐射方向性模型反演非同温像元组分温度 [J]. *中国科学*, 2000, 30(S1): 54-60.
- [26] Yan G J, Li X W, Wang J D, et al. Modeling directional effects of thermal emission in wide band measurements [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 189-193.
阎广建, 李小文, 王锦地, 等. 宽波段热红外方向性辐射建模 [J]. *遥感学报*, 2000, 4(3): 189-193.
- [27] Yan G J, Jiang L M, Wang J D, et al. Model and verification of bi directional gap rate of heat radiation in row sown crops [J]. *Science in China*, 2002, 32(10): 857-863.
阎广建, 蒋玲梅, 王锦地, 等. 行播作物热辐射双向间隙率模型及验证 [J]. *中国科学*, 2002, 32(10): 857-863.
- [28] Wang J D, Li X W, Su H B, et al. An analytical thermal emission model on the effect of multiple scattering for 3-D structural pixel and the model validation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(1): 1-7.
王锦地, 李小文, 苏红波, 等. 两组分非同温像元热辐射中多次散射影响的解析模型和验证 [J]. *遥感学报*, 2003, 7(1): 1-7.
- [29] Liu Q, Chen L F, Liu Q H, et al. A radiation transfer model to predict canopy radiation in thermal infrared band [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(3): 161-167.
刘强, 陈良富, 柳钦火, 等. 作物冠层的热红外辐射传输模型 [J]. *遥感学报*, 2003, 7(3): 161-167.
- [30] Duffour C, Lagouarde J P, Roujean J L. A two parameter model to simulate thermal infrared directional effects for remote sensing applications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 250-261.
- [31] Bian Z J, Cao B, Li H, et al. An analytical four-component directional brightness temperature model for crop and forest canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 731-746.
- [32] Tu L L, Qin Z H, Yang L C, et al. Identifying the Lambertian property of ground surfaces in the thermal infrared region via field experiments [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 481.
- [33] Verhoef W, Jia L, Xiao Q, et al. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1808-1822.
- [34] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125-141.
- [35] Ren H Z, Liu R Y, Yan G J, et al. Angular normalization of land surface temperature and emissivity using multiangular middle and thermal

- infrared data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4913-4931.
- [36] Yang G J, Liu Q H, Liu Q, et al. Directional simulation of thermal infrared radiation and 3D radiative transfer model of canopy [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(1): 38-44. 杨贵军, 柳钦火, 刘强, 等. 植被冠层 3D 辐射传输模型及热辐射方向性模拟 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 38-44.
- [37] Lü S H. Basics of remote sensing physics [M]. Beijing: The Commercial Press, 1981. 吕斯骅. 遥感物理基础 [M]. 北京: 商务印书馆, 1981.