

文章编号: 1672-8785(2021)09-0042-07

# 土壤热红外辐射及其偏振辐射特性影响因素分析

张 霞<sup>1,2</sup> 尚国珩<sup>1,2\*</sup> 高彦丽<sup>1,2</sup> 王惠民<sup>1,2</sup> 张永蓉<sup>1,2</sup>

(1. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031;

2. 河北地质大学河北省农业干旱遥感监测国际联合研究中心, 河北 石家庄 050031)

**摘 要:** 针对目前地面目标热红外通道辐射特性及其偏振辐射特性的遥感探测需求, 将五大典型地面目标之一——土壤作为研究对象, 并利用地物热红外多角度偏振遥感测量平台及仪器获取了不同因素影响下的土壤热红外多角度热辐射与偏振辐射数据。分别从探测角、方位角、波段、偏振角和土壤类型五个方面研究了土壤的热辐射特性及其偏振辐射特性。结果表明, 当入射光源固定时, 土壤的辐射亮度和亮度温度均随探测角的增大而增大; 当方位角为 $180^\circ$ 时, 二者均达到最大值; 它们随波段变化呈现不同的规律; 偏振角以及土壤类型对辐射亮度的影响不显著, 而对亮度温度的影响显著。该研究成果可以为开展热红外土壤遥感应用提供新的思路与方法, 并可为热红外遥感和偏振遥感的进一步发展提供重要的理论支撑。

**关键词:** 热红外遥感; 偏振辐射; 多角度; 影响因素; 土壤

中图分类号: TP701 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.09.006

## Analysis of Influence Factors of Soil Thermal Infrared and Polarized Radiation Characteristics

ZHANG Xia<sup>1,2</sup>, SHANG Guo-fei<sup>1,2\*</sup>, GAO Yan-li<sup>1,2</sup>, WANG Hui-min<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-rong<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

2. Hebei International Joint Research Center for Remote Sensing of Agricultural Drought Monitoring, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** Aiming at ground targets thermal infrared and polarization radiation characteristics of remote sensing detection requirements, soil is taken as the research object which is one of the five typical ground targets in this paper. The ground object thermal infrared multi-angle polarization remote sensing measurement platform and instrument are used to obtain the thermal infrared multi-angle thermal radiation and polarization radiation data of soil under the influence of different factors. In addition, the characteristics of soil thermal and polariza-

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0127600); 国家自然科学基金项目(42001300; 42071326)

作者简介: 张霞(1985-), 女, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 主要研究方向为热红外遥感与偏振遥感。

\*通讯作者: E-mail: shangguoifei@hgu.edu.com

tion radiation are studied from five aspects of detection angle, azimuth angle, wave band, polarization angle and soil type. The results show that when the incident light source is fixed, the radiance and brightness temperature of the soil increase with the increase of detection angle. When the azimuth angle is  $180^\circ$ , both of them reach the maximum value. And they show different laws with the change of wave band. The influence of polarization angle and soil type on radiance is not significant, but the influence on brightness temperature is significant. The research results can provide new ideas and methods for the application of thermal infrared soil remote sensing, and provide important theoretical support for the further development of thermal infrared and polarization remote sensing.

**Key words:** thermal infrared remote sensing; polarized radiation; multi-angle; influence factor; soil

## 0 引言

土壤是地表覆盖中最具农业生产力的重要资源。它在维持生态系统平衡和保障人类生存方面发挥着不可忽视的重要作用, 是全球环境变化研究的前提和基础。遥感技术是当前公认的快速准确获取大区域尺度土壤信息的最有效手段, 已广泛应用于土壤资源调查、土壤动态监测以及土壤类型制图等多个领域。作为典型的地面目标之一, 土壤的波谱特性研究是开展其遥感探测的重要组成部分, 也是遥感影像判读的理论基础, 具有十分重要的现实意义。

目前, 国内外的科研人员已经对土壤在可见光-近红外通道的反射以及偏振反射特性进行了大量研究, 并有了令人满意的规律性发现<sup>[1]</sup>。其中, 桂林电子科技大学利用可见光波段的反射偏振遥感探测方法研究了土壤湿度与偏振波谱之间的对应关系<sup>[2]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了土壤湿度偏振遥感反演研究。他们通过探测自然光入射条件下土壤表面的反射偏振信息, 研究了不同湿度土壤样品表面的反射偏振特征, 并利用偏振度反演了土壤湿度<sup>[3]</sup>。东北师范大学将完全线偏振光作为入射光源, 通过测量不同角度、不同湿度下土壤样品的反射偏振信息研究了不同湿度土壤的反射偏振特性<sup>[4-10]</sup>。为了定量描述土壤的偏振特性, 西北工业大学在大量实验的基础上提出了基于偏振度分量的多项式模型, 并分析了偏振度与探测角之间的定量关系<sup>[11]</sup>。相比较而言, 国内外对土壤在热红外波段辐射特性及其偏振辐射特性开展的研究较少, 且有价值

的研究发现并不多<sup>[4]</sup>。

8~14  $\mu\text{m}$  的热红外波段是极其重要的大气窗口, 主要用于探测地球表面自身发射电磁波的热辐射特征。传统的热红外土壤遥感主要基于土壤辐射特性变化来识别土壤类型和反演土壤参数性质。作为一种新兴的遥感探测技术, 偏振探测是对传统遥感探测的有益补充, 可为遥感探测提供更丰富的目标地物信息<sup>[5]</sup>。相比于传统方法只能获取地物辐射强度信息的缺陷, 偏振遥感还可以同时获取地物的偏振辐射信息, 进一步提高了地物探测的效率。因此可以借鉴在可见光-近红外波段研究地物反射特性和偏振反射特性的思路和方法来测量源自非朗伯体表面热红外辐射的多角度、多波段和偏振特性。目前, 多光谱、多角度以及偏振信息的结合已经成为热红外遥感新的研究方向。

本文通过土壤热红外辐射及其偏振辐射实验测量, 从探测角、方位角、波段、偏振角和土壤类型等五个方面对土壤的热红外偏振辐射特性进行研究, 并分析不同因素对其热红外辐射特性及其偏振辐射特性的影响, 以期对土壤热红外偏振遥感的定量研究提供理论参考依据。

## 1 具体实验

### 1.1 实验平台与仪器

本文所用的平台来自于东北师范大学地物空间偏振高光谱实验室。我们对 CE312-1b 型热红外辐射计(见图 1(a))与地物多角度测量平台(见图 1(b))进行了升级改造, 从而获得多个观测角以及多个方位的地物热红外辐射信息。

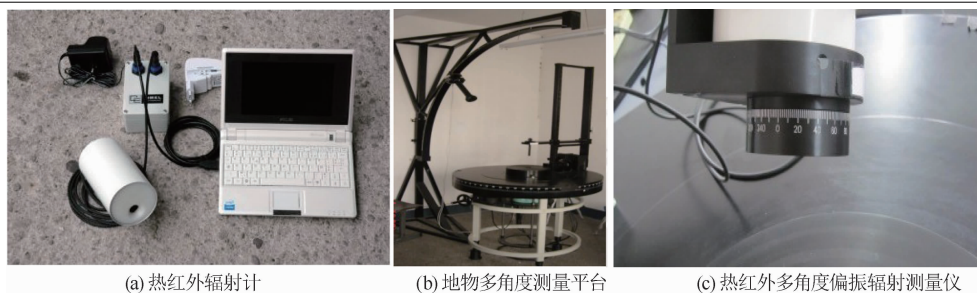


图 1 测量平台与仪器

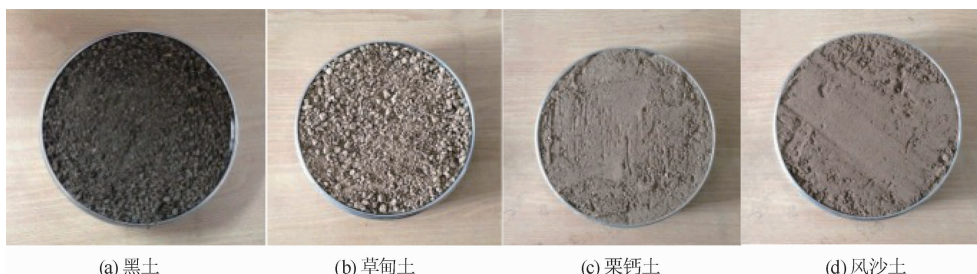


图 2 实验样本

地物多角度测量平台可以调节和控制光源入射角、探测角和方位角。其中,入射角和探测角的变化范围均为 $0^{\circ}\sim\pm 90^{\circ}$ ,探测精度为 $12'$ ;方位角的变化范围为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,探测精度为 $0.5^{\circ}$ 。CE312-1b型热红外辐射计的视场角为 $10^{\circ}$ ,温度分辨率为 $0.01^{\circ}\text{C}$ ,工作波段为 $8.2\sim 9.2\ \mu\text{m}$ 、 $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ 、 $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 。该通道设置与大多数遥感卫星搭载的热红外传感器的波段一致。此外,本研究中还配备了热红外偏振探头(波段范围为 $3\sim 15\ \mu\text{m}$ ),可以实现 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 任意角度的自由旋转(探测精度为 $1^{\circ}$ )。升级改造后的热红外多角度偏振辐射测量仪(见图1(c))可以测量地物的热红外辐射特性及偏振辐射特性。

### 1.2 实验材料

本实验所用样本包括草甸土、栗钙土、风沙土和黑土等四种土壤类型(见图2)。其中,草甸土、栗钙土和风沙土采自吉林省大布苏狼牙坝自然保护区,黑土采自东北师范大学校园内的 $15\sim 20\ \text{cm}$ 土层。采集完成后,将样品放置在通风条件下风干至恒重,然后剔除样品中的碎屑杂物,制成干燥土壤的样品。将上述土壤样品均匀地放入样品盒中,并用毛玻璃轻压使其与盖口相平,再用毛玻璃进一步把土壤表

面刮匀、压平。承载土壤的容器是直径为 $25\ \text{cm}$ 、深度为 $5\ \text{cm}$ 的铝制样品盒。由于常温条件下铝的平均比辐射率为 $0.04$ ,采用该方法可以最大限度地控制测量过程中由容器本身辐射引起的误差。

### 1.3 实验方法

将被测样本置于地物多角度测量平台中心,并调整好水平的位置和测量高度,以确保在不同条件下探测时均保持在样品的同一位置。在测量过程中,控制实验室内的温度不变,可以有效避免由样品位置摆放不同及实验条件变化导致的实测数据差异。实验时的环境温度为 $22^{\circ}\text{C}$ ,仪器测量高度为 $19\ \text{cm}$ 。为了避免偶然误差并提高数据的探测精度,本实验要求每次测量6组以上数据,在剔除无效数据并对有效数据进行加权平均后再进行对比和分析。

本实验旨在分析探测角、方位角、波段、偏振角和土壤类型对土壤热红外辐射及其偏振辐射特性的影响。每组测量数据均是在其它因素固定的情况下获得的。为了保证实验顺利开展,在实验开始前已对其进行了科学合理的设计,包括实验样本的选取及制作、实验过程的设计以及实验数据的处理和分析等,从而保证



了数据的科学有效。

#### 1.4 数据处理

利用 RadioClimat 软件可对 CE312-1b 型热红外辐射计在 4 个波段的热红外辐射进行测量, 从而获取目标的热红外辐射值 (Digital Count, DC)。利用各块滤光片的定标系数  $a$ 、 $b$ 、 $d$ 、 $n$  和  $s$  并结合 ASTP Win 软件, 可以获得目标的辐射亮度和亮度温度<sup>[1]</sup>。具体步骤如下:

(1) 利用辐射计测量探测器的头部温度  $T_{det}$ ;

(2) 计算探测器内部的辐射亮度  $L_{idet}$ ;

(3) 利用  $DC_{filter}$  (滤光片的 DC 值) 和  $DC_{mirror}$  (镀金反射镜的 DC 值) 计算出被测地物的辐射亮度和亮度温度<sup>[1]</sup>:

$$L_i(T) = \frac{DC_{filter(i)} - DC_{mirror(i)}}{S_i} + \frac{a_i}{\exp\left(\frac{b_i}{T_{det}^n}\right) - d_i} \quad (1)$$

$$T_i = \left[ \frac{b_i}{\log\left(\frac{a_i}{L_i(T)} + d_i\right)} \right]^{1/n} \quad (2)$$

式中,  $L_i$  代表地物的辐射亮度,  $T_i$  代表地物的亮度温度,  $a$ 、 $b$ 、 $n$ 、 $d$  和  $s$  是定标系数,  $i$  表示不同的探测波段。

## 2 影响因素分析

本文分别从探测角、方位角、波段、偏振角以及土壤类型等五个方面分析了实验结果。由于土壤自身的热红外辐射能量相对较弱, 为了提高对比度, 在实验中增设入射光源 (光源入射角固定为  $40^\circ$ ) 来模拟白天太阳光照射下土壤的热红外辐射及其偏振态。

### 2.1 探测角的影响

本实验所选的土壤样本为黑土, 方位角设定为  $180^\circ$ , 探测波段选取  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ , 无偏振片。图 3 所示为土壤的热红外辐射亮度和亮度温度随探测角的变化情况。其中, 横坐标代表探测角的变化, 范围为  $0^\circ \sim 60^\circ$ , 变化步长为  $10^\circ$ ; 纵坐标分别代表辐射亮度 (单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ) 和亮度温度 (单位为  $^\circ\text{C}$ )。

从图 3 中可以看出, 土壤在热红外波段的辐射亮度和亮度温度随探测角的变化呈现出基本一致的规律: 随着探测角的逐渐增大, 土壤的辐射亮度和亮度温度均呈现出明显的上升趋势。当探测角在  $0^\circ \sim 30^\circ$  之间变化时, 增长较快; 而当探测角大于  $30^\circ$  时, 增长速度逐渐减缓。对比图 3(a) 和图 3(b) 后发现, 土壤亮度温度的变化幅度更为明显, 最大变化量约为  $0.8^\circ\text{C}$ ; 而辐射亮度的最大变化量仅为  $0.03 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。这并不代表探测角对亮度温度的影响较辐射亮度更为显著, 因为亮度温度和辐射亮度属于具有不同量纲和标准的参数, 二者不可直接对比。为了比较和判断探测角对土壤辐射亮度和亮度温度影响的显著性, 本文采用相对极差 (绝对极差/数值平均值) 进行分析。经过计算, 土壤辐射亮度的相对极差为  $0.0132$ , 而亮度温度的相对极差为  $0.0306$ 。由此可见, 在入射角固定的情况下, 探测角的变化对土壤在  $2\pi$  空间内的热辐射特征有显著影响。与辐射亮度相比, 它对亮度温度的影响更加显著。

### 2.2 方位角的影响

本实验所选的土壤样本是黑土, 探测角固

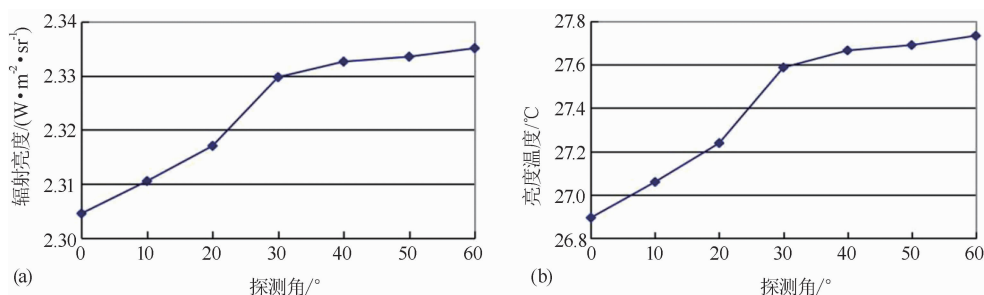


图 3 辐射亮度(a)和亮度温度(b)随探测角的变化

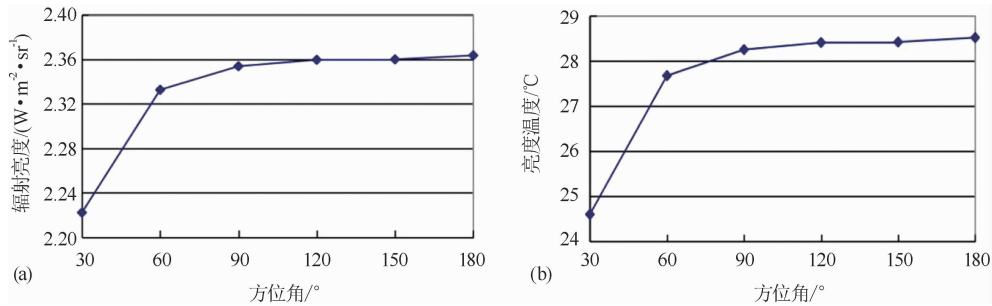


图4 辐射亮度(a)和亮度温度(b)随方位角的变化

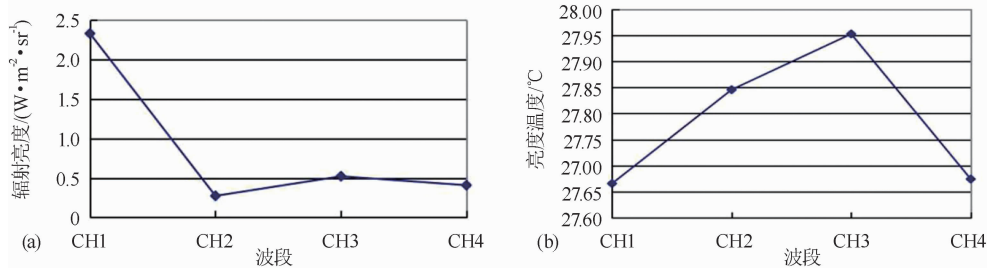


图5 辐射亮度(a)和亮度温度(b)随波段的变化

定为  $40^\circ$ ，选取的探测波段为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ，无偏振片。图4所示为土壤热红外辐射亮度和亮度温度随方位角的变化规律。方位角的变化范围为  $30^\circ\sim 180^\circ$ ，变化步长为  $30^\circ$ 。

由图4可知，土壤在热红外波段的辐射亮度和亮度温度随方位角的变化也基本一致，均随方位角的增大而增大。当方位角为  $30^\circ$  时，两者达到最小值；当方位角为  $180^\circ$  时，两者达到最大值。变化趋势如下：方位角在  $30^\circ\sim 60^\circ$  之间时增长较快，在  $60^\circ\sim 90^\circ$  之间时增速减缓，在  $90^\circ\sim 180^\circ$  之间时增长最慢。从不同方位角下的变化量来看，土壤的辐射亮度和亮度温度在  $30^\circ\sim 90^\circ$  之间时的变化较大，辐射亮度的最大变幅为  $0.14\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ ，亮度温度的最大变幅为  $3.7^\circ\text{C}$ 。通过计算相对极差发现，土壤辐射亮度的相对极差为  $0.0607$ ，而亮度温度的相对极差为  $0.1416$ ，该差异更为明显，表明增加入射光源对土壤热红外辐射特性产生了显著影响。在入射光的镜面反射方向上探测到的辐射亮度和亮度温度最高，而在入射方向上探测到的辐射亮度和亮度温度最低。该结论与传统地物反射测量结果一致，为热红外土壤遥感探测提供了理论依据：白天太阳入射光线的方位角为  $180^\circ$  时热红外传感器获取的能量最

强，辐射亮度和亮度温度最高，识别效果也最明显。

### 2.3 波段的影响

本实验所选的土壤样本为黑土，探测角固定为  $40^\circ$ ，方位角为  $180^\circ$ ，无偏振片。CE312-1b型热红外辐射计的四个波段分别为CH1 ( $8\sim 14\ \mu\text{m}$ )、CH2 ( $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ )、CH3 ( $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ ) 和CH4 ( $8.2\sim 9.2\ \mu\text{m}$ )。图5所示为土壤的辐射亮度和亮度温度在不同波段的变化情况。

由图5可知，在不同的热红外波段，土壤的辐射亮度和亮度温度呈现不同的变化趋势。在图5(a)中，土壤的辐射亮度在第一波段达到最大(约为  $2.4\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ )，而在后三个波段较小，特别是在第二波段最小(约为  $0.25\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ )。最大差异达到  $2.15\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ ，差异极其显著。这是因为第一波段波长最宽，探测的能量最多。在图5(b)中，土壤的亮度温度在第三波段达到最大，在第一和第四波段极为接近。四个波段亮度温度的最大差异为  $0.3^\circ\text{C}$ ，差异较为明显。经计算，不同波段土壤辐射亮度的相对极差为  $2.3311$ ，差异极为明显。而亮度温度的相对极差为  $0.0103$ 。由此可见，波段的变化对土壤的辐射亮度和亮度温度

均有影响。与亮度温度相比, 它对辐射亮度的影响更加显著。

### 2.4 偏振角的影响

本实验选取的土壤样本为黑土, 探测角为  $40^\circ$ , 方位角为  $180^\circ$ , 探测波段为  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 。图 6 所示为土壤热红外偏振辐射亮度和偏振亮度温度随偏振角的变化情况。

由图 6 可知, 土壤的偏振辐射亮度和偏振亮度温度随偏振角的变化规律基本一致。在偏振角为  $90^\circ$  (即透光轴) 时, 二者达到最大值; 在偏振角为  $0^\circ$  (即消光轴) 时, 二者达到最小值。虽然偏振角不同时土壤的热红外偏振辐射亮度和偏振亮度温度有所不同, 但是差异很小。偏振辐射亮度的最大差异不足 0.02, 与热红外辐射计的温度分辨率相近。对比图 6(a) 和图 6(b) 可以发现, 土壤偏振亮度温度的变化幅度较辐射亮度更为明显, 最大变化量约为  $0.35^\circ\text{C}$ 。经计算, 土壤的偏振辐射亮度的相对极差为 0.0053; 而亮度温度的相对极差为 0.0150, 差异较为显著。可以看出, 偏振角的变化对土壤偏振辐射亮度的影响非常小, 而对偏振亮度温度的影响较大。

### 2.5 土壤类型的影响

本实验选取黑土、草甸土、栗钙土和风沙土等四种类型的土壤样本。探测条件如下: 探测角为  $40^\circ$ , 方位角为  $180^\circ$ , 无偏振片。图 7 所示为四种土壤的热红外辐射亮度和亮度温度在不同波段的变化情况。

由图 7 可知, 不同类型土壤的热红外辐射亮度随波段的变化规律一致, 且不同的土壤类型对热红外辐射亮度的影响不大。四条曲线几乎重合, 仅在第一波段有微小差异。此外, 不同类型土壤的亮度温度随波段的变化规律基本一致, 均在第三波段达到最大值, 且四条曲线没有重合之处。四个波段上亮度温度随土壤类型的变化规律如下: 从大到小依次为草甸土、黑土、栗钙土、风沙土, 最大温差可达  $3.5^\circ\text{C}$ , 最大变化量约为 0.1372, 变化极其显著。总的来说, 不同土壤类型对辐射亮度的影响很小, 而对亮度温度的影响十分显著。

### 3 结论

通过对土壤表面热红外辐射及其偏振辐射特性的影响因素进行分析, 可以得出以下结论:

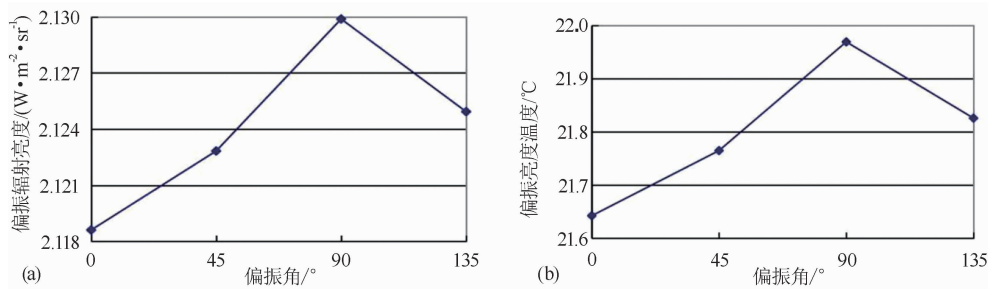


图 6 偏振辐射亮度(a)和偏振亮度温度(b)随偏振角的变化

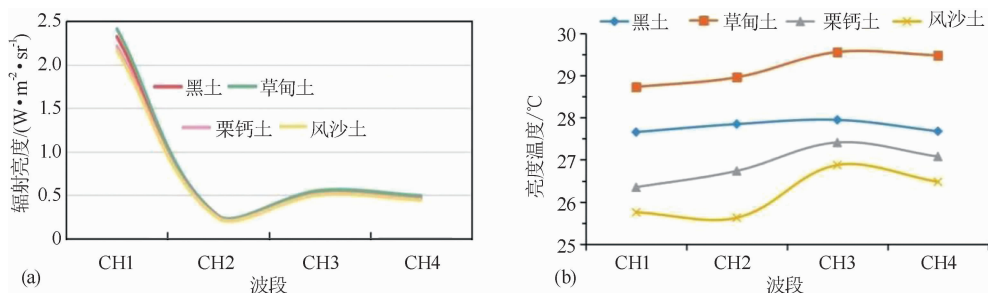


图 7 不同类型土壤辐射亮度(a)和亮度温度(b)随波段的变化

(1)探测角的变化会对土壤的热红外辐射特性产生影响,其辐射亮度和亮度温度均随探测角的增大而增大。它们在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间增长较快,在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间增速变慢,且探测角对土壤亮度温度的影响较辐射亮度更加显著。

(2)增加入射光源会对土壤热红外辐射特性产生显著影响。土壤的辐射亮度和亮度温度在方位角为 $180^{\circ}$ (光源的镜面反射方向)时达到最大。在光源入射角固定的情况下,方位角的变化对土壤热红外辐射亮度和亮度温度的影响都非常显著。

(3)在不同的热红外波段,土壤的辐射亮度和亮度温度呈现不同的变化趋势。波段的变化对二者均有影响,且对辐射亮度的影响极为显著。

(4)偏振角的变化对土壤偏振辐射亮度的影响不显著,而对偏振亮度温度则有显著影响。

(5)不同的土壤类型对热红外辐射亮度影响很小,而对亮度温度则会产生极其显著的影响,且在各波段上均呈现出以下规律:从大到小依次为草甸土、黑土、栗钙土、风沙土。

本研究虽然只是从影响因素分析的角度探讨了土壤的热红外辐射及其偏振辐射特性,但取得的结论已具有一定的实践指导意义,可为土壤遥感识别和土类划分提供重要的参考依据。本文的研究结论可以作为传统热红外遥感探测方法的有益补充。依据本文的成果,可以定量研究热红外土壤遥感识别的最佳探测方案。在设备允许的条件下,根据实际情况选择入射角和探测角。建议采用较大的探测角,同时要考虑方位角的影响。方位角与太阳入射方位角保持 $180^{\circ}$ 且偏振角选取 $90^{\circ}$ ,可以保证土

壤热红外辐射及其偏振辐射的测量效果最好。

### 参考文献

- [1] 石君. 草原典型枯草的热红外偏振影响因子定量分析 [D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [2] 叶松, 邓东锋, 孙晓兵, 等. 偏振光谱的土壤湿度遥感方法实验研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(5): 1434-1439.
- [3] 张莽, 孙晓兵, 洪津, 等. 中波红外土壤含水量的光谱偏振特性 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(6): 502-507.
- [4] Wu T, Zhao Y. The bidirectional polarized reflectance model of soil [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(12): 2854-2859.
- [5] 张霞, 赵云升, 孙天琳, 等. 雪的热辐射多角度偏振特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(1): 186-189.
- [6] 韩阳, 赵云升, 赵乃卓, 等. 森林土壤多角度高光谱偏振反射影响研究初探 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(3): 702-706.
- [7] 韩阳, 赵云升, 王野乔. 不同含水量土壤偏振光谱特征定量分析 [J]. *遥感学报*, 2013, **17**(5): 1077-1086.
- [8] 刘宇, 赵云升, 刘焕军, 等. 影响土壤偏振亮度温度的因子分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(6): 1813-1817.
- [9] 赵乃卓, 张景奇, 赵云升, 等. 黄土偏振反射影响因子交互作用试验分析 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 380-383.
- [10] 赵云升, 金伦, 张洪波, 等. 土壤的偏振反射特征研究 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2000, **46**(4): 98-102.
- [11] 赵永强, 柳丹, 陈超, 等. 基于最小二乘支持向量机回归的背景偏振光谱二向反射分布建模分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1494-1499.