

中波红外土壤含水量的光谱偏振特性

张 荞, 孙晓兵, 洪 津, 王 涵, 梁天全

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要:采用中波红外光谱偏振探测手段,对不同含水量的土壤表面进行了观测,结果表明,含水土壤表面自身热辐射的偏振特性很弱,其偏振特性主要是由太阳光反射所引起,并在太阳光较强的波段上,土壤表面的偏振度与土壤含水量存在单调递增关系,为土壤含水量的中波红外偏振遥感技术发展提供了科学依据。

关键词:偏振;遥感;中波红外;土壤含水量

中图分类号:O436.3;P407.6 **文献标识码:**A

Polarization spectral characteristics of soil surface moisture in the mid-wave infrared range

ZHANG Qiao, SUN Xiao-Bing, HONG Jin, WANG Han, LIANG Tian-Quan

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The surfaces of soil with different moisture contents had been surveyed by the spectral polarimetry in the mid-wave infrared range. The results indicate that the thermal radiation from the water-bearing soil surface is almost unpolarized, and the polarization characteristic of the soil surface is mainly caused by the reflection of solar light. Especially in the strong sunshine spectral range, the degree of polarization increases monotonically with the increase of soil moisture. This quantitative relationship provides basis for soil moisture monitoring by the remote sensing of the polarization of light in the mid-wave infrared range.

Key words: polarization, remote sensing, mid-wave infrared, soil moisture

PACS: 29.25. Pj, 93.85. Pq, 95.85. Hp

引言

土壤含水量是气候、水文、生态、农业等领域最重要参数之一,土壤含水量的监测一直是遥感研究的前沿领域,采用遥感技术可以实现大范围的土壤含水量监测,并且时效性强. 由于受到数据精度、大气吸收和散射作用、反演难度大等因素的限制,土壤含水量的监测也是世界性研究难题之一.

中波红外($2\ 000 \sim 3\ 300\ \text{cm}^{-1}$)是常见的大气窗口,是遥感中广泛使用的波段,主要采用传统的辐射测量方法. 近些年来,随着偏振遥感技术的发展,红外偏振遥感也开始被人们所关注. 地表的中波红外辐射既有来自太阳光和大气热辐射的反射,也有地

表自身的热辐射. 太阳光经反射后具有偏振特性,是偏振遥感的主要机理;可见光的偏振反射已被用于研究土壤含水量, Curran^[1-3]、Genda 和 Okayama^[4-5]、Breon^[6]、宋开山^[7]、Zhang^[8] 等都对土壤含水量与偏振特性之间的关系进行了研究. 而对于热辐射的偏振特性研究, Sandus^[9] 通过实验发现,物体自身热辐射的偏振现象比人们预计的更加显著; Shaw 等^[10-11] 通过观测发现,自然地表中只有水体的自发热辐射具有偏振特性,水面自发热辐射的偏振度可达 4%~10%; Cooper 等^[12] 指出船只的热辐射偏振特性较弱,而海面热辐射产生较强的垂直偏振现象,所以,采用热红外水平偏振探测方式,可以提高船只与海面的对比度;在国内,汪震等^[13] 利用热红外偏振成

收稿日期:2012-03-27,修回日期:2013-04-02

基金项目:国家自然科学基金(40971196,40671135)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(40971196,40671135)

作者简介(Biography):张荞(1985-),男,四川平昌人,博士研究生,主要研究领域为光学偏振遥感. E-mail: qiaozh@mail.ustc.edu.cn

Received date: 2012-03-27, revised date: 2013-04-02

像探测手段,提高了金属目标板及红外伪装遮障与背景之间的对比度;袁越明等^[14]采用热红外偏振差分方法,对水面溢油进行了有效探测。

本文采用光谱偏振手段,对不同含水量土壤表面的中波红外辐射进行了观测,分别对含水土壤表面热辐射和外界反射能量的偏振特性进行了分析。

1 中波红外偏振探测机理

在地球大气系统中,中波红外波段能量包含地表热辐射、太阳光以及大气层热辐射的贡献,且均不能忽略,所以,在偏振探测时,遥感器探测到的辐射能量比较复杂。图 1 描述了中波红外波段上土壤表面的偏振辐射传输情况。

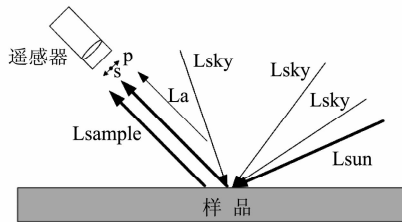


图 1 中波红外波段上土壤表面的偏振辐射传输情况
Fig. 1 The process of radiative transfer on the soil surface in mid-wave infrared

在图 1 中,遥感器分别在垂直于观测平面和平行于观测平面的两个偏振方位角上对土壤表面进行观测,每个偏振分量的能量为,

$$L^{s,p} = \tau_a \varepsilon_{\text{sample}}^{s,p} L_{\text{sample}} + L_a + \tau_a (R_{\text{sample}}^{s,p} L_{\text{sun}} + \int_{2\pi} R_{\text{sample}}^{s,p} L_{\text{sky}} d\Omega) \quad (1)$$

式(1)中, L_{sample} 为来自土壤样品的热辐射能量, L_a 为样品与探测器之间的大气程辐射能量, L_{sky} 为天空背景各个方向上的热辐射能量, L_{sun} 为太阳光能量, τ_a 为样品与探测器之间大气的透率, R_{sample} 为土壤样品表面的反射率, $\varepsilon_{\text{sample}}$ 为土壤样品表面的发射率,上标 s 和 p 分别代表在垂直于观测平面和平行于观测平面的偏振方位角上观测。

由于主要工作都是在地面上完成的,所以,样品与探测器之间大气的程辐射 L_a 可以忽略,并且将 τ_a 近似为 1. 简化式(1),得式(2),

$$L^{s,p} = \varepsilon_{\text{sample}}^{s,p} L_{\text{sample}} + R_{\text{sample}}^{s,p} L_{\text{sun}} + \int_{2\pi} R_{\text{sample}}^{s,p} L_{\text{sky}} d\Omega \quad (2)$$

对于土壤表面辐射量的传输情况,通过测量辐射亮度的方式加以定量描述. 并且可以采用偏振差分亮度的方法表征其偏振特性,偏振差分亮度是 s

分量与 p 分量的差值,

$$\Delta L^{\text{pol}} = L^s - L^p = (\varepsilon^s - \varepsilon^p) L_{\text{sample}} + (R^s + R^p) L_{\text{sun}} + \int_{2\pi} (R^s + R^p) L_{\text{sky}} d\Omega \quad (3)$$

但是,采用偏振差分亮度描述土壤表面的偏振特性时,偏振差分亮度依赖于外界光照强弱和土壤自身温度高低情况,无法在不同条件下,对土壤表面的偏振特性进行定量研究. 而偏振度则不受这些条件的影响,与土壤表面辐射能量的绝对大小无关,可以定量描述土壤含水量与其偏振特性之间的相关关系. 偏振度定义为:

$$DLP = \frac{L^s - L^p}{L^s + L^p} \quad (4)$$

偏振差分亮度与偏振度存在固定的关系,即,

$$DLP = \frac{\Delta L^{\text{pol}}}{L^s + L^p} = \frac{\Delta L^{\text{pol}}}{L} \quad (5)$$

式(5)中, L 为对土壤表面观测到的总辐射亮度。

2 观测仪器及定标

在含水土壤表面的中波红外偏振试验中,探测仪器采用偏振傅里叶变换红外光谱仪(简称偏振 FTIR 光谱仪),偏振 FTIR 光谱仪由一台傅里叶变换红外光谱仪(简称 FTIR 光谱仪)和一块检偏器组成,FTIR 光谱仪采用从德国 Bruker 公司购买的 OPAG33FTIR 光谱仪,检偏器采用从美国 Thorlabs 公司购买的 WP50H-Z 金属线栅偏振片,偏振 FTIR 光谱仪的主要参数及其性能见表 1 中。

表 1 偏振 FTIR 光谱仪的主要参数

Table 1 The main specifications of polarimetric FTIR spectrometer

探测器	光谱范围	噪声等效温差	光谱分辨率	波数精确度	视场角	偏振片消光比
Insb 探测器 (液氮制冷)	2 000 ~ 3 300 cm^{-1} (5 ~ 3 μm)	0.08 K	约 2.0 cm^{-1}	优于 0.01 cm^{-1}	30 mrad	22.04 ~ 24.15 dB (3 ~ 5 μm)

对探测仪器的定标,采用上海福源光电技术有限公司生产的 HFY-300A 型黑体. 采用黑体对偏振 FTIR 光谱仪进行定标:一是可以消除偏振 FTIR 光谱仪的偏振敏感差异性;二是可以得到目标辐射量的绝对数值。

由于偏振 FTIR 光谱仪探测器在动态范围内的响应函数满足线性函数,可以利用线性回归的方法,求解出偏振 FTIR 光谱仪的定标系数,黑体辐射能量与偏振 FTIR 光谱仪响应值之间的关系为

$$L_B(\nu, T, \alpha) = C_1(\nu, \alpha) R(\nu, T, \alpha) + C_2(\nu, \alpha) \quad (6)$$

式(6)中, $R(\nu, T, \alpha)$ 为偏振 FTIR 光谱仪的响应值, $L_B(\nu, T, \alpha)$ 为在某一偏振方位上黑体辐射亮度, $C_1(\nu, \alpha)$ 和 $C_2(\nu, \alpha)$ 为两个定标系数, ν 代表光谱仪的响应波数, T 代表黑体的绝对温度, α 代表偏振探测方位角.

由于黑体是无偏辐射源, 各个偏振方位角上的辐射亮度相等, 并且, 任一偏振方位角上的黑体辐射亮度大小等于黑体总辐射亮度的一半, 即,

$$L_B(\nu, T, \alpha) = L_B(\nu, T)/2 \quad (7)$$

根据普朗克黑体辐射公式, 黑体的总辐射亮度为

$$L_B(\nu, T) = \frac{D_1 \nu^3}{\exp(D_2 \nu/T) - 1} \quad (8)$$

式(8)中, 辐射亮度 $L_B(\nu, T)$ 的单位为 $(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$, $D_1 = 3.741\ 844 \times 10^{-6} (\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1})$, $D_2 = 1.438\ 786 (\text{cm} \cdot \text{K})$.

结合式(6) ~ 式(8), 分别在 s 和 p 方位角上对不同温度下的黑体进行测量, 考虑到偏振 FTIR 光谱仪的响应特性和黑体的温度精确性, 最终选择黑体的温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $100\text{ }^\circ\text{C}$. 通过线性回归的方法, 求得 s 和 p 方位上的定标系数, 通过定标计算出土壤表面的光谱偏振辐射亮度 $L_{\text{soil}}(\nu, \alpha)$.

$$L_{\text{soil}}(\nu, \alpha) = C_1(\nu, \alpha)R(\nu, \alpha) + C_2(\nu, \alpha) \quad (9)$$

3 测量结果及讨论

3.1 土壤表面的辐射传输

图 1 呈现了中波红外波段上土壤表面的辐射传输情况. 为了准确分析土壤表面的光谱偏振特性, 首先, 需要对土壤表面辐射的来源和过程进行分析; 其次根据产生的过程和机制来划分. 在中波红外波段内, 土壤表面的辐射能量包含反射能量和自身热辐射.

反射能量源自土壤表面对外界入射能量的反射, 外界入射能量包括太阳光和天空背景大气的热辐射两部分. 地表处, 太阳光的辐照度可以采用 MODTRAN 4.0 进行模拟计算, 计算结果如图 2 所示.

在图 2 的计算过程中, 大气模式选择了中纬度冬季模式, 大气路径选择太阳光入射角为 55° , 这与试验观测时太阳光的入射角一致. 从图 2 可以看出, 大气层对太阳光的吸收具有波段选择性, 在 $2\ 200 \sim 2\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 光谱范围, 太阳光的能量完全被大气吸收.

图 3 是采用 FTIR 光谱仪对太阳光和天空背景

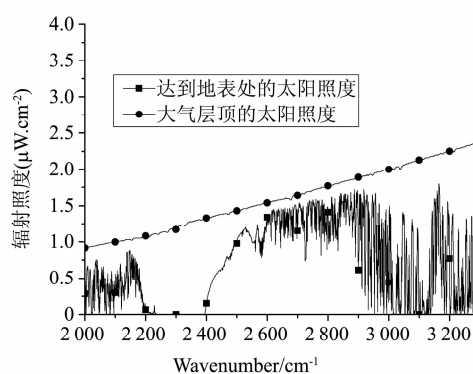


图 2 太阳光入射大气层顶及透过大气层后的辐照度
Fig. 2 The solar irradiance at the top of atmosphere and the transmitted irradiance on the ground surface

大气热辐射的测量结果, 观测地点在合肥市郊(东经: 117.2° , 北纬: 31.9°); 环境温度为 $6 \sim 10\text{ }^\circ\text{C}$; 太阳天顶角为 55° . 曲线 a 是对太阳直射光及天空背景大气辐射总能量的观测结果, 曲线 b 是仅对天空背景大气热辐射进行测量的结果.

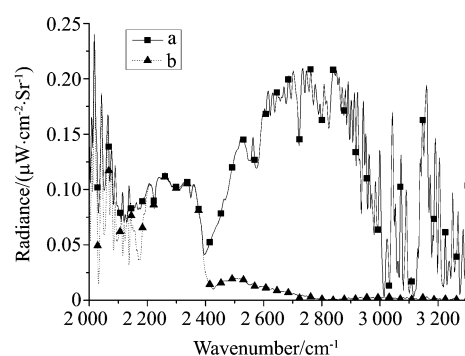


图 3 地面观测到的冬季太阳光及天空背景大气热辐射的中波红外辐射亮度
Fig. 3 A comparison of radiance of solar light and thermal radiation by atmosphere in mid-wave infrared on the ground surface

从图 2 和图 3 得知, 外界辐射到土壤表面的能量中: 在 $2\ 400 \sim 3\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 光谱范围内, 主要是来自太阳光的照射, 天空背景大气热辐射的贡献可以忽略; 在 $2\ 200 \sim 2\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 光谱范围内, 太阳光完全被大气所吸收, 入射能量完全来自于天空背景大气的热辐射; 在 $2\ 000 \sim 2\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 光谱范围内, 入射能量既有太阳光的贡献, 又有天空背景大气热辐射的贡献.

在完成对外界照射能量的分析之后, 需进一步分析反射能量和土壤自身热辐射在不同波长上的比例. 图 4 是不同太阳光照射条件下红砂土样品表面

的辐射亮度.

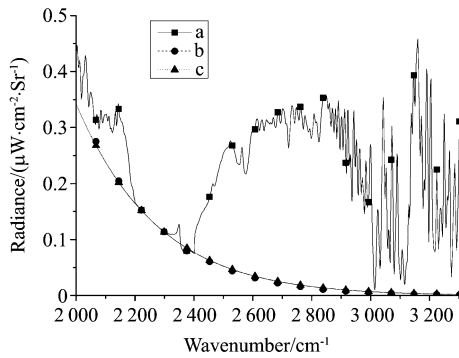


图 4 不同光照条件下土壤表面的中波红外辐射亮度
 Fig. 4 A comparison of mid-wave infrared radiance from soil surface under different illumination

图 4 中,太阳入射角为 55°, FTIR 光谱仪在太阳入射的镜面方向上观测. 曲线 a 和 b 分别是在太阳照射和遮蔽太阳光时对土壤表面的观测曲线, 土壤样品的水分饱和度为 79%; 曲线 c 是由普朗克黑体辐射公式计算得到的土壤辐射亮度, 计算过程中, 土壤温度采用当时的环境温度 10 °C, 并将此土壤样品视为发射率为 0.93 的灰体, 0.93 是一定含水量土壤表面的近似发射率^[15].

图 4 中, 曲线 b 和 c 几乎重合, 说明在土壤表面的辐射能量中, 天空背景大气热辐射的贡献可以忽略. 因此, 式(3)可以简化为:

$$\Delta L^{pol} = (\varepsilon^s - \varepsilon^p)L_{sample} + (R^s - R^p)L_{sun} \quad (12)$$

在分析土壤表面的偏振观测结果时, 仅需考虑土壤自身热辐射和太阳直射光的贡献.

根据图 4, 2 200 ~ 2 400 cm⁻¹ 波段范围内, 土壤表面的能量基本上由土壤热辐射所贡献; 在 2 000 ~ 2 200 cm⁻¹ 和 2 400 ~ 3 300 cm⁻¹ 波段范围内, 土壤表面的辐射能量既有土壤表面的自身热辐射, 又有反射太阳光的能量.

3.2 含水土壤表面的中波红外光谱偏振特性

根据前面分析, 由于大于 3 000 cm⁻¹ 的波段中包含有许多大气的吸收波长, 在对不同含水量土壤表面进行光谱偏振探测时, 波段只选取在 2 000 cm⁻¹ ~ 3 000 cm⁻¹ 范围内.

试验观测时, 太阳光的入射角保持在 55° ~ 62°, 在太阳光入射主平面内, 通过改变偏振 FTIR 光谱仪的观测天顶角度, 完成对不同含水量的土壤样品的多角度观测. 由于土壤表面的中波红外偏振特性受到多个因素的影响, 为了突出土壤含水量变化对土壤表面中波红外偏振特性的影响, 对除了土壤

水分以外的其它因素(包括土壤表面的粗糙度情况、土壤样品种类、土壤表层温度)进行了限制. 土壤样品由红砂土制成, 不同含水量土壤样品表面的土粒状态基本一致, 进而简化了土壤表面粗糙度因素对观测结果的影响. 土壤的含水量采用与体积相关的饱和度来表示, 饱和度是指土壤水的容积 (V_w) 与土壤孔隙总容积的比值^[16].

在多角度观测结果中, 只有太阳光镜面反射方向附近观测的结果能够较好地反映出土壤含水量的变化, 所以, 只在图 5 和图 6 中给出了 55° 和 65° 观测到的结果.

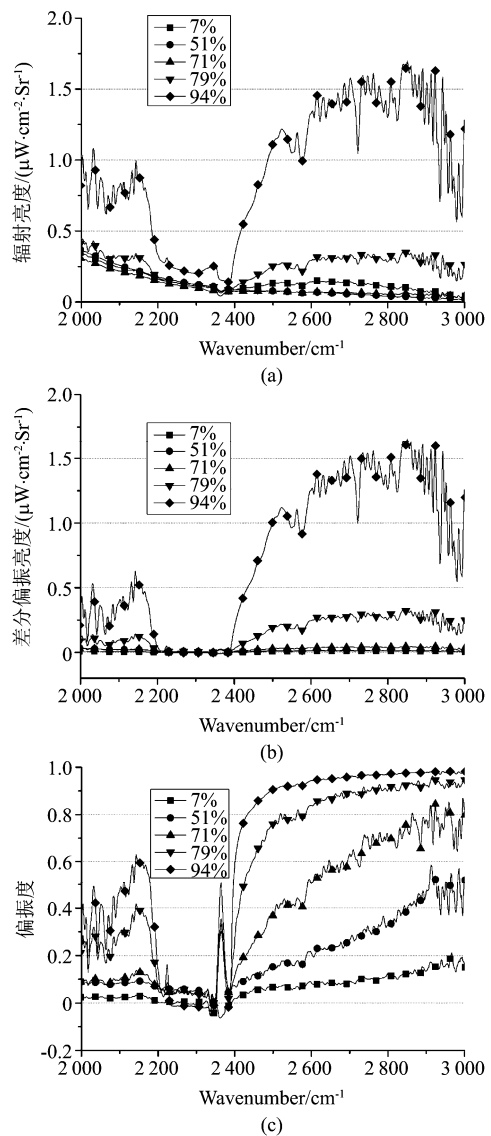


图 5 55° 观测角上不同含水量土壤表面的测量结果 (a) 辐射亮度曲线, (b) 偏振差分亮度曲线, (c) 偏振度曲线
 Fig. 5 Results of measurement from of surfaces soil with different moisture contents at viewing angle of 55° (a) radiance, (b) differential polarimetric radiance, and (c) degree of polarization

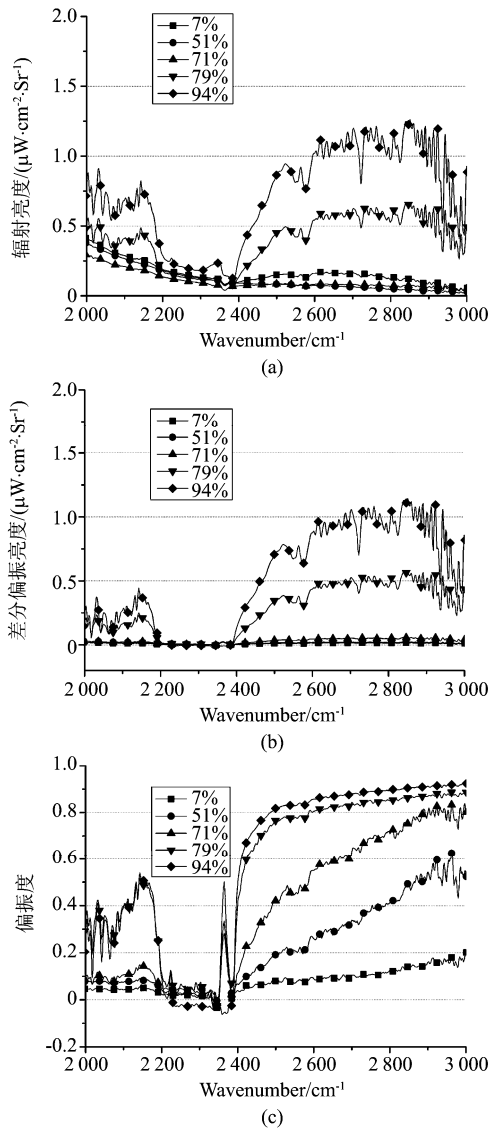


图6 65°观测角上不同含水量土壤的测量结果 (a) 辐射亮度曲线, (b) 偏振差分亮度曲线, (c) 偏振度曲线
 Fig. 6 Results of measurement from of surfaces soil with different moisture contents at viewing angle of 65° (a) radiance, (b) differential polarimetric radiance, and (c) degree of polarization

在图5和图6中, (a)图是不同含水量土壤表面的辐射亮度光谱曲线, (b)图是不同含水量土壤表面的偏振差分亮度光谱曲线, 由垂直于观测平面与平行于观测平面的辐射亮度之差求得, (c)图是不同含水量土壤表面的偏振度的光谱曲线, 为偏振差分亮度与辐射亮度之比。

图5和图6中, 不同含水量土壤表面的观测结果是在不同时间、不同光照条件下获取的, 所以, 不同辐射亮度曲线之间, 以及不同偏振差分亮度曲线之间, 不具有可比性。但是, 从各条偏振差分亮度光谱曲线可以看出, 在2 200~2 400 cm^{-1} 波段上, 土壤

表面的偏振差分亮度接近于0, 由于此波段上的能量几乎全部来自土壤自身热辐射的贡献, 由此判断, 自身热辐射对土壤表面偏振特性的贡献很小, 可以忽略, 即, 在中波红外谱段上含水土壤表面的偏振特性主要是由太阳光反射所引起。

由于偏振度的大小不依赖于土壤表面辐射量的绝对大小, 可以在不同光照条件和不同温度情况下, 对不同含水量土壤表面的偏振特性进行比较。在两个观测角度上的偏振度曲线中, 2 400~3 000 cm^{-1} 波段上, 随着土壤含水量的增加, 偏振度依次增大, 土壤含水量与偏振度之间存在单调递增关系; 而2 000~2 200 cm^{-1} 波段上, 两个观测角度上的偏振度曲线对土壤湿度的区分度小于2 400~3 000 cm^{-1} 波段的。因此, 当仪器观测角接近太阳镜面反射方向时, 可以在2 400 cm^{-1} ~3 000 cm^{-1} 波段上, 利用土壤含水量与土壤表面偏振度之间的这种单调递增关系, 建立土壤含水量与偏振度之间的相关关系, 为土壤含水量的中波红外偏振反演提供理论基础。

3.3 讨论

对于中波红外的反射偏振机理, 根据 Torrance 和 Sparrow 关于粗糙表面反射的理论^[17], 将粗糙表面的反射机制划分为镜面反射和漫反射, 并将粗糙表面视作由无数微面元组成, 镜面反射由这些微面元的反射产生, 漫反射由微面元之间的多次反射以及内部散射导致。干土表面的微面元朝向比较杂乱, 土壤表面的反射主要是漫反射, 随着土壤含水量的增大, 土壤表面的空隙逐渐被水体填充, 在土壤表面, 微面元的镜面反射比例增大, 而镜面反射通常被认为是自然目标表面产生偏振现象的主要机理^[6]。所以, 在合适的观测条件下, 土壤表面的偏振度将随土壤含水量的增加而增大。

从2 200~2 400 cm^{-1} 波段上的偏振差分亮度曲线分析得到, 不同湿度土壤表面的偏振差分亮度几乎为零, 说明不同含水量土壤表面的偏振现象均不显著。尽管已有的研究表明, 光滑金属和水面的热辐射具有一定的偏振特性, 但含水土壤表面的粗糙度比较大, 土壤内部的热辐射穿透表面后, 其偏振特性很弱, 接近于非偏振的。

4 结论

在中波红外大气窗区, 采用光谱偏振探测手段对不同含水量土壤表面的光谱偏振特性进行了观测和分析。结果表明, 虽然土壤表面的能量, 既有自身的热辐射, 也包括太阳光和天空背景大气辐射的反

射能量,但天空背景大气的辐射能量较弱,可以忽略.土壤自身热辐射的偏振特性很弱,含水土壤表面的偏振特性主要是太阳光的反射作用所引起,其中,2 400 ~ 3 000 cm^{-1} 波段内太阳光的能量较强,在一定太阳光照射和仪器观测条件下,土壤表面的偏振度随含水量增加而增大,可以建立土壤含水量与偏振度之间的相关关系,为土壤含水量的遥感反演提供一种新方法.

REFERENCES

- [1] Curran P J. A photographic method for the recording of polarised visible light for soil surface moisture indications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1978, **7**(4): 305 - 322.
- [2] Curran P J. The use of polarized panchromatic and false-color infrared film on the monitoring of soil surface moisture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, **8**(3): 249 - 266.
- [3] Curran P J. Remote sensing: the use of polarized visible light (PVL) to estimate surface soil [J]. *Applied Geography*, 1981, **1**: 41 - 53.
- [4] Genda H, Okayama H. Simulator for remote sensing and its application to soil moisture measurements[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(5): 807 - 813.
- [5] Genda H, Okayama H. Estimation of soil moisture and components by measuring the degree of spectral polarization with a remote sensing simulator[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(21): 3439 - 3443.
- [6] Breon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: Measurements and Models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(2): 487 - 499.
- [7] SONG Kai-Shan, ZHAO Yun-Shen, ZHANG Bo. The polarized reflectance characteristics of some soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science* (宋开山, 赵云升, 张柏. 土壤偏振反射特性的多角度测量与研究. *土壤通报*), 2004, **35**(4): 420 - 425.
- [8] Zhang Q, Sun X B, Li Y N, et al. Quasi-quantitative relationship between soil moisture and polarization characteristics[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, **14**(6): 1067 - 1073.
- [9] Sandus O. A review of emission polarization[J]. *Applied Optics*, 1965, **4**(12): 1643 - 1652.
- [10] Shaw J A. Degree of linear polarization in spectral radiances from water-viewing infrared radiometers[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(15): 3157 - 3166.
- [11] Shaw J A. Infrared polarization in the natural earth environment[J]. *Proc. Of SPIE*, 2002, **4819**: 129 - 138.
- [12] Cooper A W, Lentz W J, Walker P L. Infrared polarization ship images and contrast in the mapipt experiment [J]. *Proc. Of SPIE*, 1996, **2828**: 85 - 96.
- [13] WANG Zhen, QIAO Yan-Li, HONG Jin, et al. Detecting camouflaged objects with thermal polarization imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering* (汪震, 乔延利, 洪津, 等. 利用热红外偏振成像技术识别伪装目标. *红外与激光工程*), 2007, **36**(6): 853 - 856.
- [14] YUAN Yue-Ming, XIONG Wei, FANG Yong-Hua, et al. Detection of oil spills on water by differential polarization FTIR spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (袁越明, 熊伟, 方勇华, 等. 差分偏振 FTIR 光谱法探测水面溢油污染. *光谱学与光谱分析*), 2010, **30**(08): 2129 - 2132.
- [15] ZHANG Jian-Qi, FANG Xiao-Ping. *Infrared physics* [M]. Xi'an: Xidian University Publishing House (张建奇, 方小平. *红外物理*). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 71.
- [16] SHAO Ming-An, WANG Quan-Jiu, HUANG Ming-Bin. *Soil physics* [M]. Beijing: Higher Education press (邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*). 北京: 高等教育出版社, 2006: 56.
- [17] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the optical society of America*, 1967, **57**(9): 1105 - 1114.
- [10] Celik T. Change detection in satellite images using a genetic algorithm approach[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **17**(2): 386 - 390.
- [11] Hardie R C, Baxley F, Brys B, et al. Scene-based non-uniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. *Optical Express*, 2009, **17**(17): 14918 - 14933.
- [12] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays[J]. *The Journal of the Optical Society of America A* 2003, **20**(3): 470 - 480.
- [13] Torres S N, Vera E M, Reeves R A, et al. Adaptive scene-based nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays[J]. *SPIE Conference on Infrared Imaging Systems: Design Analysis, Modeling, and Testing XIV*, Orlando, Florida, 2003, **5076**: 75 - 80.
- [14] Vera E M, Torres S N. Fast adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array detectors[J]. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing* 2005, **13**: 1994 - 2004.

(上接 497 页)

using local constant statistics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(6): 1444 - 1453.

- [5] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive non-uniformity correction in infrared focal-plane arrays [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(3): 470 - 480.
- [6] Shehadeh M, Kuybeda O. Robust nonuniformity correction in infrared images [J]. *Proc. IEEE Int. Conf. Electrical and Electronics Engineers, Israel*, 2008: 275 - 279.
- [7] Qian W X, Chen Q, Gu G-H. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction Algorithm[J]. *Optical Review*, 2010, **17**(11): 24 - 29.
- [8] Qian W X, Chen Q, Gu G-H, et al. Correction method for stripe nonuniformity[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(10): 1764 - 1773.
- [9] Parker D R, Gustafson S C, Oxley M E, et al. Development of a Bayesian framework for determining uncertainty in receiver operating characteristic curve estimates [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2010, **22**(1): 31 - 45.