

可见/近红外土壤湿度的光谱偏振特性实验研究

王新强¹, 孙晓兵², 张丽娟¹, 汪杰君¹, 谢秋蓉¹, 叶松¹

- (1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;
2. 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: 为探讨在更多波段上开展基于光偏振特性土壤湿度检测的可行性, 采用自行搭建的光学系统, 在可见/近红外波段上开展土壤湿度与反射光偏振特性的实验研究。研究表明: 在 600~800 nm 波段, 土壤湿度与反射光偏振度具有相关性, 其中当 $14\% \leq \text{土壤湿度} \leq 30\%$ 时, 反射光偏振度与土壤湿度具有良好的线性关系。对实测数据进行回归分析, 结果显示线性模型平均标准差小于 3%, 优于参考文献[5]中近红外光谱特征方法 10% 的误差结果, 说明在该波段范围, 采用测量光偏振态进行土壤湿度检测的方法具有可行性, 为大范围土壤含水量的偏振遥感探测提供科学依据。

关键词: 土壤湿度; 偏振; 可见/近红外光谱; 实验研究

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3288-05

Experimental study on visible and near-infrared spectrum polarization characteristic of soil moisture

Wang Xinqiang¹, Sun Xiaobing², Zhang Lijuan¹, Wang Jiejun¹, Xie Qiurong¹, Ye Song¹

- (1. Department of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The self-constructed optical system was employed to study soil moisture and reflected light polarization characteristics in visible and near-infrared, to discuss the feasibility of the soil moisture detection based on light polarization property in more wave bands. The study results show: in the band of 600–800 nm, soil moisture and the degree of reflected light polarization have correlation, especially when the soil moisture is more than or equal to 14% and less than or equal to 30%, the degree of reflected light polarization and soil moisture have proper linear relation. According to analysis of regression to measured data, linear model average standard deviation is less than 3%, having an advantage over the method of near infrared spectrum characteristic of 10% obtained in Ref. [5], accounting for the feasibility of the soil moisture detection on the basis of measuring light polarization in this band (600–800 nm), providing scientific basis for polarization remote sensing detection in wide-range soil water content.

Key words: soil moisture; polarization; visible and near-infrared spectrum; experimental study

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(40971196); 广西自然科学基金(2012GXNSFBA053170); 广西教育厅重点项目(ZD2014053); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14108, YQ14101); 桂林电子科技大学创新团队项目

作者简介: 王新强(1977-), 男, 高级实验师, 硕士, 主要从事光学测量和高光谱遥感等方面的研究。Email: xqwang2006@126.com

通讯作者: 叶松(1979-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学遥感方面的研究。Email: yesongmail@sina.com

0 引言

土壤湿度是全球能量和水分循环研究中的重要变量,直接或间接影响着天气与气候的变化,因而受到各国学者的广泛关注^[1-3]。目前土壤湿度的测量方法主要有单点观测和遥感观测两类,单点观测法如:重量测量法、中子散射法、探地雷达和张力计测量等具有精度高,空间代表性差的特点,可作为其它方法的一种检验。遥感观测适合大范围的土壤湿度监测,利用微波及红外波段的土壤湿度遥感是目前较为典型的技术,但限于空间分辨率不高,其反演结果的空间分布精度及数值精度不高^[4-5]。近年来,利用可见/近红外光的偏振特性及角度信息对环境进行监测的研究被国内外越来越多的学者关注和运用^[6-8],由于该波段遥感空间分辨率普遍较高,已成为在农业、生态、气象和水文等领域研究的重要工具。在国内,孙晓兵、张莽等学者针对土壤含水量的偏振特性开展了相关研究。他们采用偏振相机测量数据,重点研究了 2~3 种湿度条件下的土壤偏振态与观测角的关系,对于土壤含水量与偏振态的定量关系没有作过多分析^[9-10]。文中基于偏振光谱仪在实验室条件下对土壤湿度进行偏振特性测量及实验,研究可见/近红外波段土壤湿度与偏振特性的关系,探寻在更多波段上开展基于光偏振特性的土壤湿度检测的可行性。

1 理论

光的偏振测量中目标偏振信息的表示可由 Stokes 参量(I_i, Q_i, U_i, V_i)^T 描述,要获取目标完整的偏振信息需要同时测量 0°、45°、90°、135° 4 个偏振方向上的光强。为了测量上的简单化,采用 Mueller 矩阵可以得到简化的偏振测量公式:

$$I(a) = \frac{1}{2}(I_i + Q_i \cdot \cos 2a + U_i \cdot \sin 2a) \quad (1)$$

式中: I_i 为总光强; Q_i 为水平与垂直方向的线偏振光强之差; U_i 为 45° 与 135° 方向的线偏振光强之差,只要选择在 0°、60°、120° 3 个偏振方向上测量光强 $I(0^\circ)$ 、 $I(60^\circ)$ 、 $I(120^\circ)$ 就可以从公式(1)中解出 I_i, Q_i, U_i , 目标的偏振信息可表示为:

$$\begin{cases} I_i = \frac{2}{3}(I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)) \\ Q_i = \frac{2}{3}(2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)) \\ U_i = \frac{2}{\sqrt{3}}(I(60^\circ) - I(120^\circ)) \end{cases} \quad (2)$$

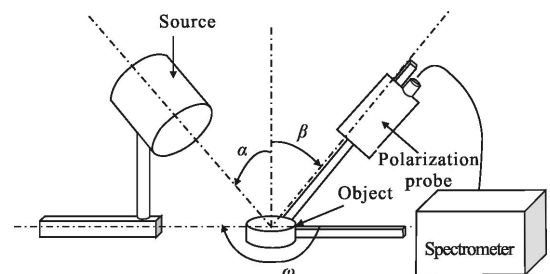
由公式(2)可以得出目标的偏振度为:

$$P = \frac{\sqrt{Q_i^2 + U_i^2}}{I_i} \quad (0 \leq P \leq 1) \quad (3)$$

偏振度是由目标本身特性决定的一个光学参量,其大小不随环境光的变化而发生改变,能有效表征目标的偏振信息。

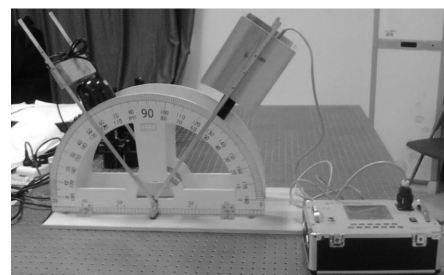
2 测量系统及材料

采用自行搭建的测量系统进行数据采集,如图 1 所示,包括光源(钨灯 100 W),中国科学院安徽光学精密机械研究所生产的 ISI920VF-512 可见/近红外波段野外地物光谱辐射计改进得到的偏振光谱仪(光谱范围为 380~1 050 nm,光谱分辨率为 2 nm,视场角为 3°)。测量样品为桂林本地典型的红壤土。先将样品烘干,然后采用重量百分数法配置成各种不同湿度的测试样本(土壤湿度包括:0%、5%、10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%、26%、28%、30%、35%)。观测条件为入射角 α 为 30°、40°,探测角 β 为 30°、40°,方位角 ω 为 180°。测量 0°、60°、120° 3 个偏振角的目标光强,从而进行偏振信息的提取。



(a) 原理图

(a) Schematic diagram



(b) 实物图

(b) Measurement system

图 1 测量系统结构图

Fig.1 Structure diagram of measurement system

3 数据处理与分析

采用3次测量取平均作为最终的实验数据进行处理。根据入射角与观测角两两组合,计算出目标的偏振度。为了减少随机噪声的影响进行了一次平滑滤波处理,各种湿度土壤的偏振光谱如图2所示。

从图2可以看出,不同观测条件下,目标的偏振特性不同,当光源入射角及观测角发生变化时,偏振度对观测角的变化更为敏感,观测角在 40° 附近有较强响应;土壤的含水量较低时其偏振特性较差,偏振度在测量波段上变化不明显,随着含水量的增加目标的偏振度逐渐增大;在波长小于 600 nm 的区间,四种观测条件下的偏振度与湿度的关系比较混乱,当波长大于 800 nm 时,目标的偏振度在所有土

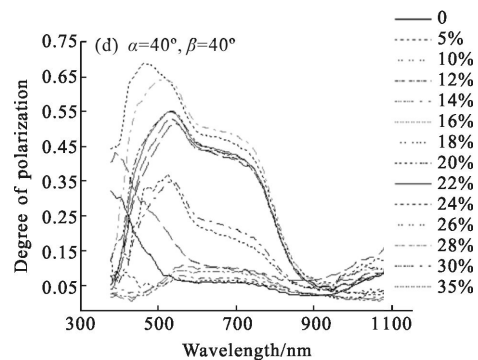
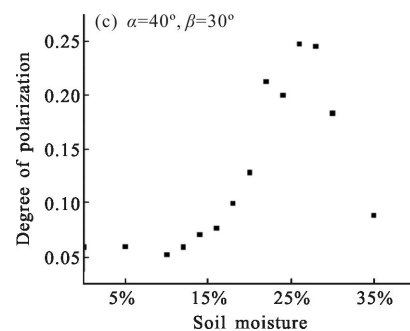
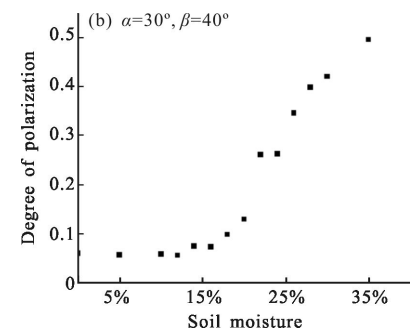
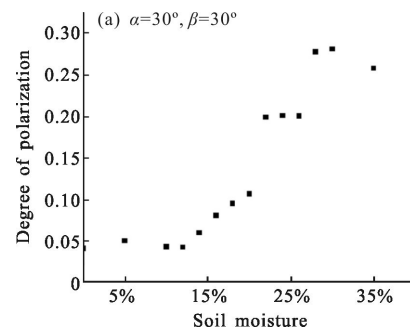
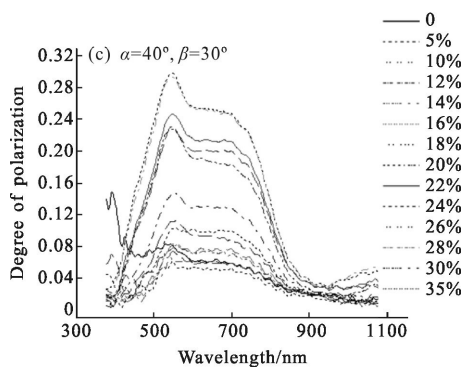
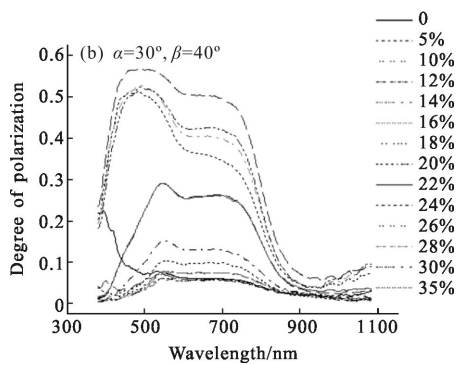
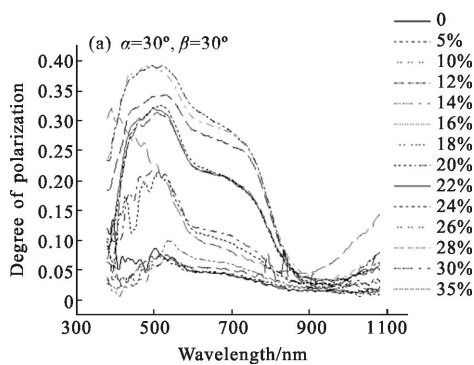


图2 不同含水量土壤的偏振光谱

Fig.2 Polarization spectrum of different water-content soil

壤湿度下都变得较低,不利于定量分析,只有在 $600\sim 800\text{ nm}$ 区间,四种观测情况下偏振度与土壤湿度体现出了较稳定的关系。为了找出相应的定量关系,分别选择 $600\sim 610\text{ nm}$, $695\sim 705\text{ nm}$, $790\sim 800\text{ nm}$ 3个子波段的数据作进一步分析,以各子波段的偏振度平均值作为该波段的响应结果,分析与土壤湿度的对应关系。



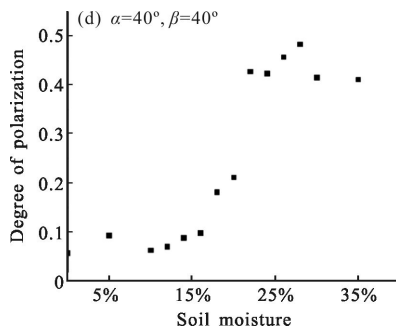


图 3 695~705 nm 波段土壤湿度与偏振度关系

Fig.3 Relation between soil moisture and degree of polarization in 695-705 nm band

图 3 显示了 695~705 nm 波段的数据关系,研究表明随着土壤湿度的增加,目标偏振度的变化可以分为 3 个阶段:第 1 个阶段是当土壤湿度小于 14% 时,在这个阶段土壤反射光的偏振度相对较低,随土壤湿度的变化不明显;第 2 个阶段是当土壤湿度大于 14% 但小于 30% 时,此时反射光偏振度随土壤湿度的变化明显增大。第 3 个阶段是当土壤湿度大于 30% 以后,反射光偏振度不再上升,逐渐趋于稳定,图 3(d)中的这一过程比较明显。通过对实验情况进行分析后发现:在第 1 个阶段,土壤中的含水量较低,此时水分基本上被保存在土壤内部,其对土壤表面的结构或粗糙度改变不大,因此土壤表面可以近似看做朗伯体,光反射后的偏振态基本上与无水时

相当。在第 2 个阶段,随着土壤湿度的增加,水分开始部分溢出土壤表面,水面的高低直接与土壤湿度相关,此时水面的存在对土壤表面的结构或粗糙度产生影响,水面与土壤表面的共同作用使反射光的偏振态发生改变。在第 3 个阶段,随着土壤湿度的继续增加,水面的高度开始超出土壤表面,此时水面对入射光的反射逐渐起主要作用,反射光的偏振态与入射光的偏振态逐渐趋同,不再发生变化。以上的变化过程不仅是 695~705 nm 波段的特例,对于 600~610 nm 波段和 790~800 nm 波段同样具有相同情况。由于第三阶段的测量数据太少,只对 3 个子波段的前两个阶段数据分别进行回归分析,图 4 显示了 695~705 nm 波段, $\alpha=30^\circ, \beta=40^\circ$ 时的回归曲线;其余情况的结果如表 1 所示。

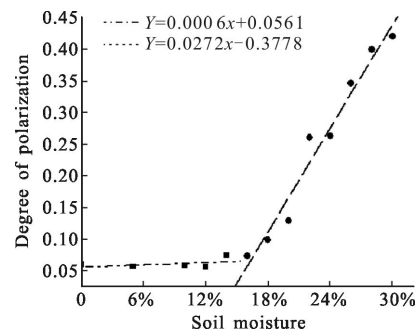


图 4 695~705 nm 波段 $\alpha=30^\circ, \beta=40^\circ$ 的回归曲线

Fig.4 Regression curve in 695-705 nm band when $\alpha=30^\circ, \beta=40^\circ$

表 1 土壤湿度 $\leq 30\%$ 时的分析结果

Tab.1 Analyzed results when soil moisture $\leq 30\%$

Band	α, β	Soil moisture <14%			14% \leq soil moisture \leq 30%		
		Model	SD	R	Model	SD	R
600-610 nm	30, 30	$Y=0.0008x+0.0463$	0.0091	0.5187	$Y=0.0164x-0.1722$	0.0264	0.9463
	30, 40	$Y=0.0004x+0.0576$	0.0091	0.2641	$Y=0.03x-0.4333$	0.03	0.9785
	40, 30	$Y=0.0003x+0.0585$	0.0072	0.2495	$Y=0.0165x-0.1876$	0.0223	0.9615
	40, 40	$Y=0.0005x+0.0725$	0.0266	0.1251	$Y=0.0353x-0.4257$	0.0582	0.9442
695-705 nm	30, 30	$Y=0.0007x+0.042$	0.0079	0.483	$Y=0.016x-0.1855$	0.0249	0.95
	30, 40	$Y=0.0006x+0.0561$	0.0079	0.4454	$Y=0.0286x-0.4054$	0.0272	0.98
	40, 30	$Y=0.0004x+0.0566$	0.0073	0.339	$Y=0.0156x-0.1702$	0.0222	0.9574
790-800 nm	40, 40	$Y=0.001x+0.0661$	0.017	0.3457	$Y=0.0341x-0.4262$	0.0568	0.9434
	30, 30	$Y=-0.0006x+0.0415$	0.02	-0.1814	$Y=0.0091x-0.1029$	0.0162	0.9365
	30, 40	$Y=0.0004x+0.0398$	0.005	0.4609	$Y=0.0166x-0.2329$	0.0172	0.9773
	40, 30	$Y=0.0002x+0.0375$	0.0049	0.2921	$Y=0.0093x-0.101$	0.0129	0.9596
	40, 40	$Y=0.0003x+0.0496$	0.016	0.1287	$Y=0.0205x-0.2557$	0.0335	0.9452

表 1 结果表明,当土壤湿度 $<14\%$ 时,3 个子波段所有观测条件下的土壤湿度与反射光偏振度不具有明显的相关性,反射光偏振度不能有效表达土壤含水量。当土壤湿度 $>14\%$ 而 $<30\%$ 时,3 个子波段所有观测条件下的土壤湿度与反射光偏振度具有极显著相关性,土壤湿度与反射光偏振度具有良好的线性关系,反射光偏振度能有效表达土壤含水量,特别是在 $\alpha=30^\circ$, $\beta=40^\circ$ 的观测条件下土壤湿度与反射光偏振度的相关系数在 3 个波段上均达到或接近 0.98,标准差 $SD \leq 3\%$,较适合应用在基于土壤的偏振特性进行土壤湿度的测量。

4 结 论

利用光的偏振特性进行土壤湿度的探测,是当前偏振测量新的应用热点。文中基于改进的偏振光谱仪,在可见-近红外波段上开展基于光的偏振探测进行土壤湿度测量可行性的实验研究。结果表明,在 600~800 nm 波段,土壤反射光偏振度与土壤湿度具有一定的相关关系,这种相关关系可以分为 3 个阶段:当土壤湿度较低($<14\%$)时,反射光的偏振度较低,其与土壤湿度的相关性较差,不适合用于土壤湿度探测;随着土壤湿度增大但未达到含水饱和时($14\% \leq$ 土壤湿度 $\leq 30\%$),土壤湿度与反射光偏振度具有较好的线性关系,模型平均标准差小于 3%,优于近红外光谱特征方法最小 10%的平均误差结果^[5],可作为利用偏振探测进行土壤湿度测量的重要依据;当土壤含水量达到饱和以后(土壤湿度 $\geq 30\%$),反射光的偏振态已经不能有效反应含水量的多少,不再适合应用于土壤湿度的测量。由于实验条件有限,研究中考虑的情况不够全面,但初步的研究结果表明利用光的偏振特性进行土壤湿度测量的方法具有一定的实用性,可与其他方法互为补充,有待开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 358-389.
- [2] Vivoni E D, Tai K, Gochis D J. Effects of initial soil moisture on rainfall generation and subsequent hydrologic response during the North American monsoon[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(3): 644-664.
- [3] Li Deqin, Duan Yunxia, Zhang Shuwen. Soil moisture measurement and simulation: a review[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 424-434. (in Chinese)
- [4] 李得勤, 段云霞, 张述文. 土壤湿度观测、模拟和估算研究[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 424-434.
- [5] Gao H, Wood E F, Drusch M, et al. Using a microwave emission model to estimate soil moisture from ESTAR observations during SGP99[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 49-63.
- [6] Li Meiting, Wu Hongqi, Jiang Ping'an, et al. Measuring soil water content by using near infrared spectral characteristics of soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2117-2121. (in Chinese)
- [7] 李美婷, 武红旗, 蒋平安, 等. 利用土壤的近红外光谱特征测定土壤含水量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(8): 2117-2121.
- [8] Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [9] 吴易明, 高立民, 陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 525-529.
- [10] Yuan Yueming, Xiong Wei, Fang Yonghua, et al. Modeling analysis of detection of oil spills on water by differential polarization FTIR spectrometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 408-412. (in Chinese)
- [11] 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的模型分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 408-412.
- [12] Li Ya'nan, Sun Xiaobing, Mao Yongna, et al. Spectral polarization characteristic of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 205-210. (in Chinese)
- [13] 李雅男, 孙晓兵, 毛永娜, 等. 空间目标光谱偏振特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 205-210.
- [14] Zhang Qiao, Sun Xiaobing, Hong Jin. Investigation of polarization characteristics of soil surface with low vegetation cover and different soil moisture [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11): 3086-3092. (in Chinese)
- [15] 张荞, 孙晓兵, 洪津. 不同湿度的低植被覆盖土壤表面偏振特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3086-3092.
- [16] Zhang Qiao, Sun Xiaobing, Hong Jin, et al. A polarization retrieval model of soil moisture and experiment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(6): 708-712. (in Chinese)
- [17] 张荞, 孙晓兵, 洪津, 等. 土壤湿度的偏振反演模型与实验[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(6): 708-712.