

文章编号: 1672-8785(2016)08-0033-08

东北农田区土壤的偏振高光谱 反射特征及肥力分析

潘 倩 韩 阳 王凌志

(东北师范大学地理科学学院, 吉林长春 130024)

摘 要: 以东北农田区土壤的偏振高光谱反射率为研究对象, 从探测天顶角、探测方位角和偏振状态等方面分析研究了土壤的反射光谱特征及其与土壤肥力的关系。结果表明, 多角度测量会影响土壤的反射光谱特征, 影响主要体现在偏振反射比值上。180° 方位角和 90° 偏振测量时土壤接收的能量多, 土壤的偏振反射比大。土壤的肥力与土壤的偏振反射比具有明显的相关性。土壤的肥力综合指数越大, 土壤的偏振反射比越低。本实验在保证农田土壤最优的遥感观测状态下, 对土壤肥力的质量做了初步判断。这为土壤的多角度偏振高光谱的深入研究提供了一定的理论与实践基础, 并能为农作物平衡施肥、精准农业和土壤定量遥感的相关研究提供参考。

关键词: 高光谱; 偏振度; 多角度; 土壤肥力

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.08.007

Analysis of Fertility and Reflectance Characteristics of Polarized Hyperspectra of Farmland Soil in Northeast China

PAN Qian, HAN Yang, WANG Ling-zhi

(School of Geography Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Taking the polarized hyperspectral reflectance of the farmland soil in northeast China as the object to be studied, the reflective spectral characteristics of soil and their relations with soil fertility are analyzed in terms of zenith angle, incident angle, polarization and so on. The results show that multi-angle measurement may affect the reflective spectral characteristics of soil. This is mainly reflected in the polarized reflection ratio. When the measurement is carried out at the azimuth angle of 180° and the polarizing angle of 90°, the soil would receive more energy so that its polarized reflectance is higher. The soil fertility is obviously correlated with the polarized reflectance of soil. The greater the composite index of soil fertility is, the lower the polarization reflectance of soil is. Under the best remote sensing observation condition of farmland soil, the quality of soil fertility is judged preliminary. This provides a certain theoretical and practical basis for the further study of multi-angle polarized hyperspectra of soil and can provide a reference for the related study of balanced fertilization of crops, precision farming and quantitative remote sensing of soil.

Key words: hyperspectrum; polarization; multi-angle; soil fertility

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301364); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120043120013); 吉林省科技发展计划项目 (20150520067JH); 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目; 中央高校基本科研业务费资助项目 (2412016KJ027)

作者简介: 潘倩 (1995-), 女, 重庆人, 本科, 主要从事偏振遥感与定量遥感研究。

E-mail: 595147962@qq.com

0 引言

吉林省是中国农作物的主产地之一, 在中国农作物产业中具有重要地位。近年来, 由于人类不合理的生产经营活动, 土壤的质量严重下降, 农作物出现了单位面积减产趋势。土壤肥力作为评价土壤质量的重要指标, 对其的正确认识和科学客观的评价能揭示土壤为作物供应营养的程度。因此, 快速准确地掌握土壤及其肥力的时空信息, 对于防治土壤退化、推动农业生产与可持续发展具有重要意义。

近年来对土壤的分析研究中, 高光谱遥感作为主要的遥感技术已被人们广泛使用。相对于传统遥感, 它具有波段选择丰富、对地物的分辨识别能力强和光谱空间分辨率高等特点, 能够在传统遥感不可进行的方向实现应用。偏振遥感技术是一种新型的侦查手段^[1]。地表和大气中的任何目标体在反射、散射和透射电磁辐射时, 均会产生由自身性质决定的偏振特征, 这种特征能为遥感目标的识别提供新的信息, 具有很高的利用价值。因此, 偏振遥感在国际上已成为一个快速发展的领域^[2]。

有很多学者在土壤的高光谱遥感和偏振遥感应用方面^[3-6]进行了深入研究, 但鲜有学者将高光谱遥感和偏振遥感技术结合起来对土壤进行定性定量研究。本实验将通过结合土壤的高光谱信息与偏振信息的方式实现多波段和多角度遥感的融合, 提取更多的光谱信息, 对土壤及其肥力进行更全面的分析, 从而为实现土壤肥力的速测提供理论基础, 为农作物平衡施肥、精准农业和土壤定量遥感的研究提供服务。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区与数据采集

研究区位于吉林省东南部白山市长白山西麓。该区域农田土壤的黑土层较厚, 有机质含量高, 土壤肥沃, 因此该区域是研究农田土壤肥力的典型地区之一。2015 年 8 月中旬, 项目组对处于生长期的玉米地进行了土壤样品的采集。采样时以田块为采样单元, 五点采样方式的混合

土样为一个样本, 总计采样 30 个, 并对每个采样点的中心进行了 GPS 定位。土样经风干处理后过 1 mm 筛以进行样本制作。将所得样本一分为二, 一份用于光谱测量实验, 另一份用于土壤理化分析。

1.2 样品分析方法

土壤有机质分析采用重铬酸钾-硫酸溶液-沙浴法; 土壤全氮分析采用半微量开氏法; 土壤全磷分析采用氢氧化钠熔融-分光光度法; 土壤有效磷分析采用碳酸氢钠浸提法; 土壤有效钾分析采用乙酸铵-分光光度法; 土壤含水量分析采用烘干法; 土壤 PH 值分析采用酸度计测定法。

1.3 实验环境与仪器

实验在东北师范大学空间偏振高光谱实验室内进行。测量光谱时采用双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 地物光谱多角度测试平台, 该平台由东北师范大学赵云升教授课题组与中国科学院长春光学精密机械研究所联合研发。测试平台主要由光源系统、探测系统和控制系统 3 部分组成。光谱数据由美国 ASD 光谱仪器公司生产的 ASD FiledSpec R3 野外便携式高光谱仪获取。实验所用仪器如图 1 所示。

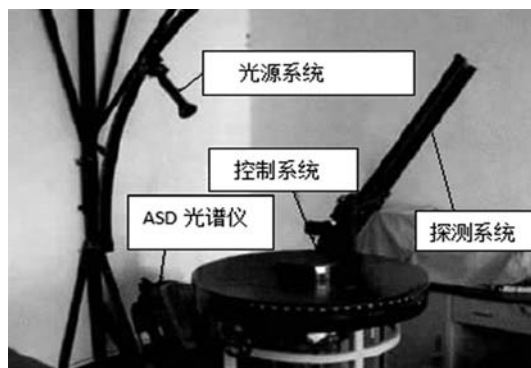


图 1 BRDF 平台与 ASD FiledSpec R3 野外便携式高光谱仪

本实验主要测量土壤的偏振光谱曲线, 用光纤将偏振镜头装置、ASD FiledSpec R3 野外便携式高光谱仪和 BRDF 测试平台连接起来, 以作为完整的偏振高光谱测量仪使用。光谱测量前

先将仪器预热 30 min, 再关闭灯源使实验在暗室环境中进行。光谱测量时需进行白板定标。对每个土样采集 5 条光谱曲线, 对这些曲线进行算术平均, 然后将其当作该土样的反射光谱数据。

2 土壤肥力质量评价指标体系的选择与评价方法

土壤肥力是指土壤在整个生态系统内部所表现出的促进生物生产力、维持动植物健康以及提高环境质量的能力^[7]。土壤肥力是多个因子共同作用的结果, 在对土壤肥力的评价中, 因子的选取尤为重要。本实验在满足土壤的物理、化学、生物特性的前提下, 选择全氮、全磷、全钾、速效磷、pH 值、含水量和有机质等九个理化指标作为评价指标, 这些指标构成了土壤肥力的评价体系。然后, 根据模糊数学和多元统计的原理分别计算各肥力评价指标的隶属度和权重, 再利用乘法原则得出综合肥力指标值

(Integrated Fertility Index, IFI)。IFI 的取值范围为 0~1, 其值越高, 表明土壤肥力的质量越好。其数学表达式为

$$IFI = \sum q_i \times w_i \quad (1)$$

式中, q_i 表示第 i 种养分指标的隶属度; w_i 表示第 i 种养分指标的权重系数。

研究过程中, 经 excel 整理数据后, 用 SPSS19.0 软件对评价指标进行因子分析的主成分分析。本文基于土壤属性本身内在的联系, 利用主成分分析法得到代表各土壤评价指标对土壤肥力总体变异贡献的公因子方差, 计算各公因子方差占公因子方差总和的百分数, 将其作为各评价指标的权重。权重值为 0~1.0 的数值, 其值越高, 表明该指标对土壤肥力质量的影响越大。各指标的权重值见表 1。

表 1 土壤肥力各评价指标的权重值

指标	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	pH	含水量
权重	0.123	0.107	0.097	0.116	0.121	0.105	0.123	0.120	0.086

进行土壤肥力综合评价前首先要对各评价指标的优劣状况进行判断。各肥力指标对总体土壤肥力的贡献其实是一个模糊的概念, 没有准确的界限。因此要对各肥力评价指标建立对应的隶属度函数。一般情况下, 反应各评价指标与植被生长状况之间的效应曲线的隶属度函数可分为梯形型和 S 型两种类型。土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾和碱解氮可采用 S 型隶属函数, pH 值和含水量可采用梯形隶属函数。两种隶属函数的表达式分别为

S 型:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq b \\ 0.9(x-a)/(b-a) + 0.1 & a \leq x < b \\ 0.1 & x < a \end{cases} \quad (2)$$

梯形型:

$$f(x) = \begin{cases} 0.9(x-a)/(c-a) + 0.1 & a < x < c \\ 1.0 & c \leq x \leq d \\ 1.0 - 0.9(x-d)/(b-d) & d < x < b \\ 0.1 & x \leq a \text{ 或 } x \geq b \end{cases} \quad (3)$$

根据本文研究区土壤的理化特点、长期生产实践的总结以及相关文献中曲线转折点的取值^[8-10], 可确定各个函数所属函数的转折点, 结果见表 2。

IFI 是一个反映土壤养分状况的指标, 是各理化参数值的综合, 其值的大小表示土壤综合肥力的高低。经计算, 本实验研究区的土壤肥力的综合指数取值范围为 0.461~0.760, 平均值为 0.705, 标准差为 0.06。参考土壤的产量水

平和相关专家的意见,将研究区域的土壤肥力分为四级 ($IFI>0.75$)、三级 ($0.7<IFI\leq0.75$)、二级 ($0.6<IFI\leq0.7$) 和一级 ($IFI\leq0.6$) 4 个等级。从实验数据可看出,研究区域的土壤质量良好,主要以二、三级的土壤为主,所得结果与李淑杰

[11](2012)、王子龙 [12] 的分析结论一致。结合第二次全国土壤肥力普查数据来看,研究区域的土壤质量等级由三、四级为主转变为以二、三级为主,土壤肥力在不断降低,土壤呈现退化的趋势。

表 2 土壤肥力各指标所归属隶属度函数的类型及其阈值

指标	函数类型	下限 a	最优下限 c	最优上限 d	上限 b
有机质 (g/kg)	S 型函数	10	-	-	48
全氮 (g/kg)		0.5	-	-	3
全磷 (g/kg)		0.5	-	-	0.7
全钾 (g/kg)		15	-	-	25
碱解氮 (mg/kg)		100	-	-	300
速效磷 (mg/kg)		5	-	-	10
速效钾 (mg/kg)	梯形函数	70	-	-	170
pH 值		5	5.5	6.5	7
含水量 (%)		3.5	4.0	4.5	5

3 土壤多角度偏振高光谱的反射特征分析

3.1 光谱数据的预处理

本实验主要进行去噪处理。土壤光谱测量后,对每个土样的光谱曲线进行去除噪声处理,即去除 350~399 nm 和 2401~2500 nm 波段的光谱数据,以增强土壤光谱信息的可信度,保留 400~2400 nm 波段的反射光谱数据以便后续研究。

3.2 土壤偏振高光谱曲线特征分析

图 2 为不同土壤样本的光谱反射率曲线,土壤样本的光谱具有明显的差异,这种差异主要体现在反射率高低有所不同,但整体的变化趋势相同。

由图 2 可以看出,土壤样本的反射率总体介于 0.07~0.65 之间。许多波段之间具有一定的正相关性,较短波段的反射率高时较长波段也具有较高的反射率 [13]。由光谱曲线可看出,在 400 nm 波段土壤的反射率较低,但随波长增加而急剧升高。在 400~800 nm 之间形成一个陡坡; 800~1400 nm 和 1400~1800 nm 波段的反射率较高,但随波长的增加反射率的增速变小,光谱曲线变化平缓; 1900~2100 nm 波段的反射率随波

长的增加而迅速升高,增速加快; 2100~2400 nm 波段的反射率随波长的增加而呈下降趋势。1400 nm 和 1900 nm 附近有两个水吸收带,这是由土壤中的少量水分以及空气中的水汽吸收引起的。1400~1800 nm 波段的光谱曲线变化平缓,在 1800 nm 处突然下降,且幅度较大,在 1900 nm 处形成一个明显的吸收谷。在 2200 nm 和 2300 nm 处呈现吸收带特征,这是由土壤中有机化合物含量不同导致的。

3.3 光线的人射角、探测角与土壤偏振高光谱的关系

本实验的光线入射角 α 为 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° ; 偏振角 θ 分别为 0° 和 90° 。偏振高光谱反射比用偏振度来表示。根据光的可逆特性,当入射角 α 为 50° 、探测角 β 为 30° 时的光谱曲线与入射角 α 为 30° 、探测角 β 为 50° 时的光谱曲线一致 [14]。因此,本文在分析时将入射角和探测角一起分析。图 3 为 $IFI=0.711$ 时,入射角 α 为 50° 、探测方位角 ω 为 180° 、偏振角 θ 为 90° 、探测角 β 分别为 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 时土壤样本的偏振高光谱反射曲线。

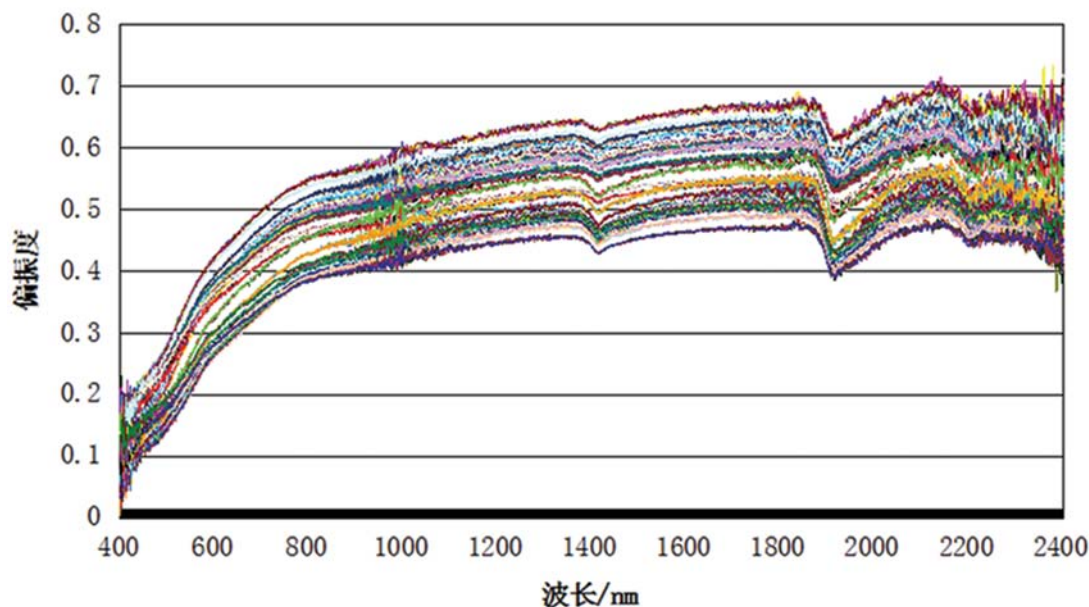
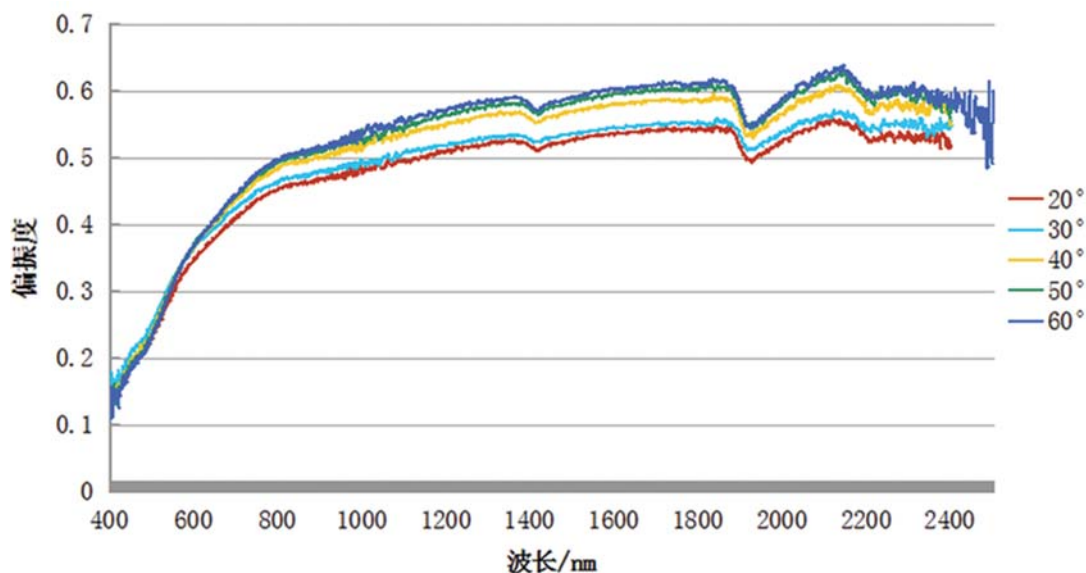


图 2 土壤的反射率曲线

图 3 入射角为 50° 、方位角为 180° 、偏振角为 90° 时不同探测角下土壤的高光谱偏振度曲线

由图 3 可以看出, 入射角、探测角的变化与土壤的偏振度具有正相关性。入射角一定时, 探测角越大, 土壤的偏振反射比就越大; 探测角一定时, 入射角越大, 土壤的偏振反射比也越大。这是因为当入射角增大时, 土壤获得的能量增多, 所以反射比增加。这说明入射角和探测角的变化对土壤在 2π 空间内的光谱特征有重要影响。

3.4 不同探测方位角与土壤偏振高光谱的关系

对以往的土壤偏振反射研究进行分析后得出^[15,16], 地物光谱数据在方位角 180° 两侧成对称分布。因此, 本实验只研究探测方位角小于 180° 的土壤光谱信息。图 4 是在光线入射角 α 和探测角 β 均为 50° 、偏振角为 90° 且探测方位角 ω 分别为 60° 、 90° 、 120° 、 150° 和 180° 时土壤的偏振高光谱反射光谱曲线图。

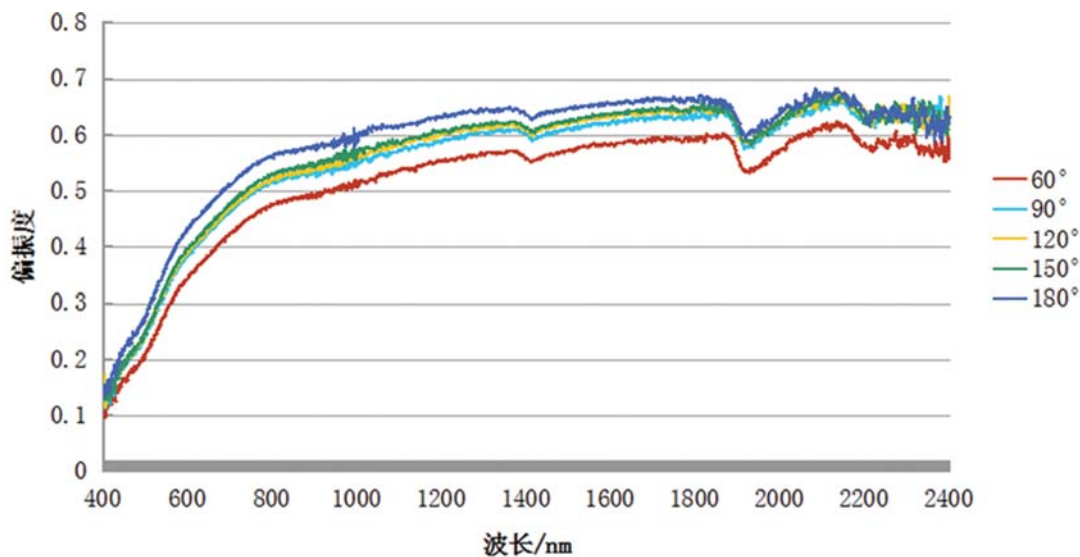


图4 入射角和探测角为 50° 、偏振角为 90° 时不同方位角的土壤高光谱偏振度曲线

由图4可以看出,探测方位角对农田土壤的研究具有一定影响。在不同探测方位角时农田土壤的偏振度有明显差异, 180° 时偏振度最大,这是因为 180° 探测方位是土壤反射的主要反射方向即镜面反射方向,此时土壤可获得最大的反射能量。因此,确定方位角与偏振度的关系能为以后的遥感观测提供参考,在太阳入射光

线的方位角为 180° 时土壤获取的能量最多,偏振度最大,观测状态最佳。

3.5 不同偏振状态下土壤偏振高光谱特征分析

本文实验选取的偏振角 θ 为 0° 、 45° 和 90° 。图5是土壤在光线入射角 α 和探测角 β 均为 50° 且偏振角 θ 分别为 0° 、 45° 、 90° 时的偏振高光谱反射光谱曲线图。

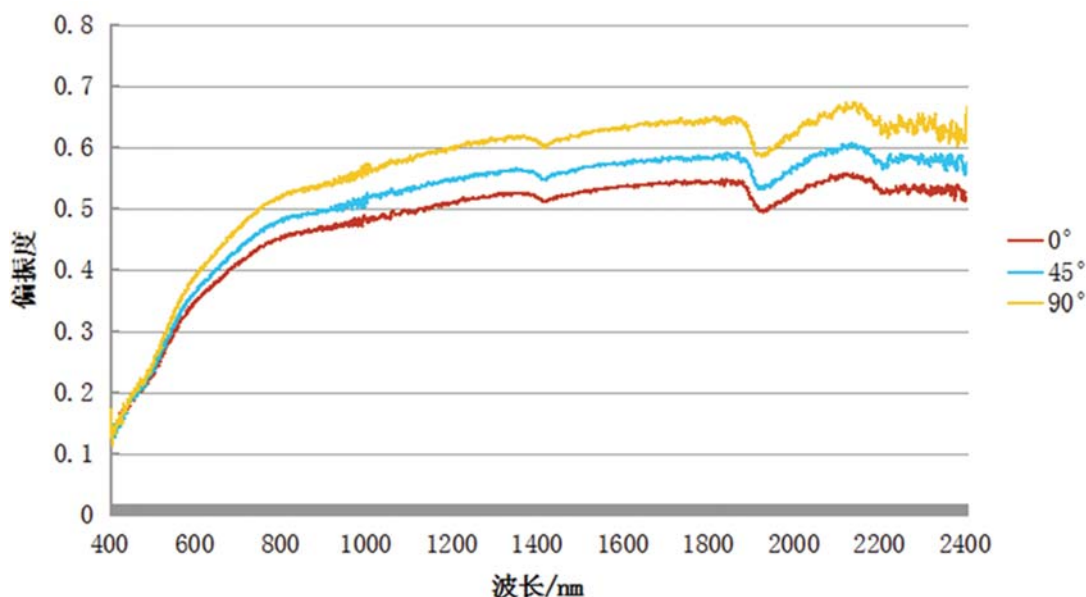


图5 入射角和探测角为 50° 、方位角为 180° 时不同偏振状态下土壤的高光谱偏振度曲线

由图 5 可以看出,随着偏振角的增大,农田土壤的偏振反射比增大。这是因为入射到土壤的光线包含部分偏振光, 0° 偏振时,入射光的振动方向与入射面平行,土壤获得的能量最少; 90° 偏振时,入射光的振动方向与入射面垂直,土壤获得的能量最大,偏振反射比达到最大,有利于区分各因素对农田土壤反射的影响。

3.6 不同土壤肥力与土壤偏振高光谱的关系

本实验重点研究能揭示农田土壤肥力的反射光谱的特征。分别以 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 入射角入射,对不同农田土壤的肥力进行实验。图 6 和图 7 分别为入射角和探测角均为 50° 、方位角为 180° 、偏振角分别为 0° 和 90° 时土壤的高光谱偏振度曲线。

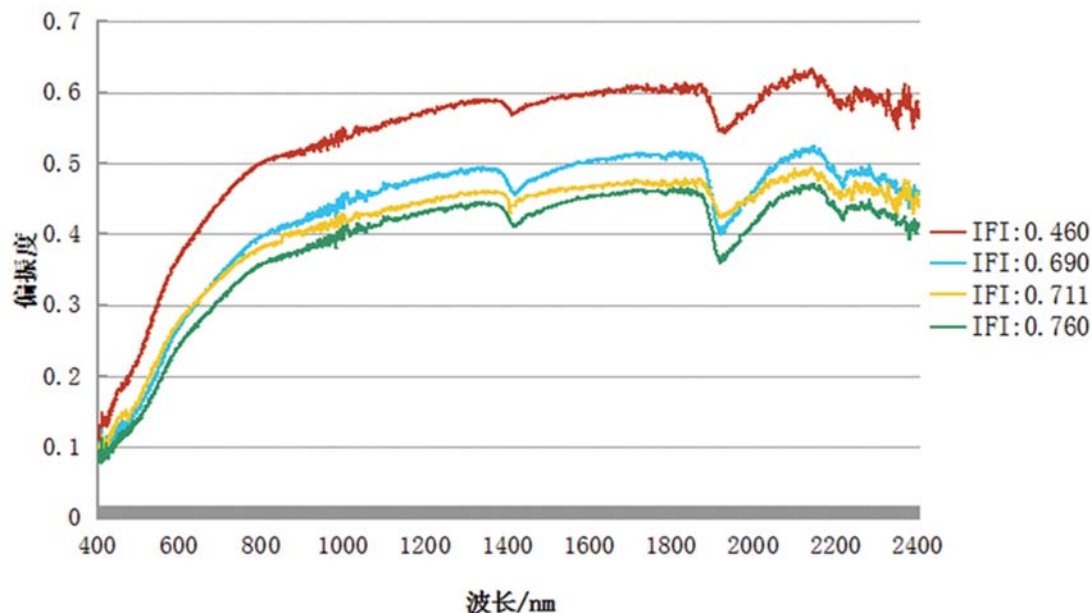


图 6 入射角和探测角为 50° 、方位角为 180° 且偏振角为 0° 时不同肥力土壤的高光谱偏振度曲线

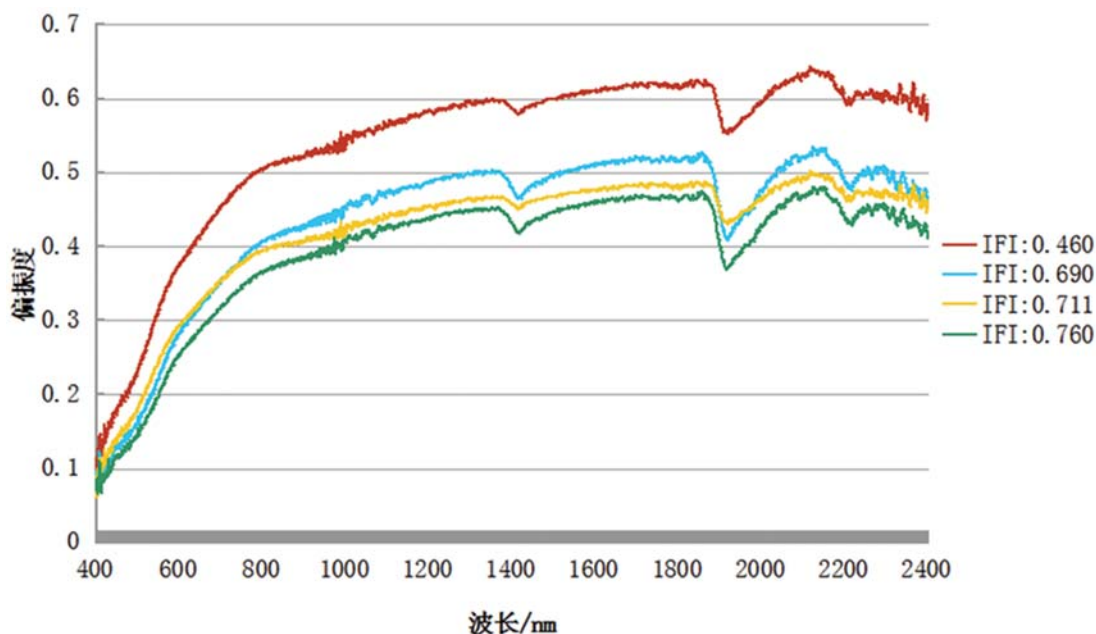


图 7 入射角和探测角为 50° 、方位角为 180° 且偏振角为 90° 时不同肥力土壤的高光谱偏振度曲线

由图 6 和图 7 可以看出,不同肥力土壤的高光谱偏振度曲线形态相似,但土壤的偏振反射比有明显差异。土壤肥力的综合指数越大,土壤的偏振反射比就越低。在其他入射角度下,农田土壤光谱曲线均表现出了相同的规律。这是由土壤含有的化合物含量高低不同引起的。有机质、碱解氮、含水量、速效磷和速效钾的含量是影响土壤肥力的主要因素。以往的研究表明^[17-19],随着有机质、碱解氮和水的含量变高,土壤的反射率呈降低的趋势。速效钾和速效磷的含量在一定程度上对土壤光谱的影响不明显。因此,综合这些影响,土壤的光谱曲线表现为:土壤肥力的综合指数越大,土壤的偏振反射比就越低。同时,偏振角为 90° 时的土壤偏振度大于偏振角为 0° 时的土壤偏振度,从而验证了图 4 规律的正确性。

4 结论

对东北农田区土壤在不同状态下的多角度偏振高光谱的反射光谱特征进行了相关分析,并且初探了该区域土壤肥力与土壤光谱曲线的关系,得出:

(1) 探测天顶角、探测方位角和偏振状态对东北农田区土壤的偏振反射比均有影响,但只影响土壤的偏振反射比,土壤的波谱形状基本保持不变。探测角、入射角越大,土壤的偏振反射比就越大;方位角为 180° 时,土壤的偏振反射比值最大;随着偏振角的增大,农田土壤的偏振反射比也随之增大, 90° 偏振时土壤的偏振反射比值达到最大。因此,在采集土壤的光谱时,应选用较大的探测天顶角,入射角等于探测角,方位角保持 180° ,选取 90° 偏振状态,这样能使土壤获得的能量达到最大,有利于区分各因素对土壤反射的影响。

(2) 土壤肥力是多个因子共同作用的结果,有机质、碱解氮和含水量等因子对土壤肥力有巨大的影响,在土壤的光谱曲线上表现为,土壤肥力的综合指数越大,土壤的偏振反射比就越低。同时,偏振角为 90° 时的土壤偏振度大于偏振角为 0° 时的偏振度,但总体规律依旧为土壤肥力质量越高,土壤的偏振反射比就越低。这

个结果为遥感时对土壤肥力的高低做快速初步判断提供了依据,并能为农作物平衡施肥、精准农业和土壤定量遥感的相关研究提供服务。

参考文献

- [1] 张朝阳,程海峰,陈朝辉,等. 偏振遥感的研究现状及发展趋势 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1237-1240.
- [2] 晏磊,相云,李宇波,等. 偏振遥感研究进展 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 162-174.
- [3] 刘伟东. 高光谱遥感土壤信息提取与挖掘研究 [D]. 北京: 中国科学院. 2002: 1-7.
- [4] 刘焕军,张柏,刘殿伟,等. 松嫩平原典型土壤高光谱定量遥感研究 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 647-654.
- [5] 弓洁琼,詹海刚,刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1088-1095.
- [6] 柳丹,赵永强,陈超,等. 土壤偏振光谱二向反射影响研究 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 293-298.
- [7] Doran J W, Oparkin T B. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994 (1): 3-21.
- [8] 马强,宇万太,赵少华,等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1916-1920.
- [9] 汪景宽,李双异,张旭东,等. 20 年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 19-24.
- [10] 付微,李勇,李向越,等. 松嫩平原黑土区农田土壤肥力评价研究 [J]. *土壤与作物*, 2012, 1(3): 166-174.
- [11] 李淑杰. 吉林省土壤质量与土地利用结构优化研究 [D]. 吉林: 吉林农业大学, 2012: 51-52.
- [12] 王子龙,付强,姜秋香. 基于 GIS 与属性识别模型的土壤肥力综合评价 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 76-80.
- [13] 周萍. 土壤高光谱成分信息的量化反演 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2006: 28-39.
- [14] 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.
- [15] 杜嘉,赵云升,宋开山,等. 偏振遥感测量中土壤偏振度随太阳高度角的变化规律初探 [J]. *地理科学*, 2007, 27(5): 707-710.
- [16] 宋开山. 不同土壤的偏振反射特性测量与研究 [D]. 吉林: 东北师范大学, 2002: 27-31.
- [17] Al-Abbas A H, Swain P H, Baumgardner M F. Relating Organic Matter and Clay Content to the Multi-spectral Radiance of Soils [J]. *Soil Science*, 1972, 114(6): 477-485.
- [18] 陈红艳. 土壤主要养分含量的高光谱估测研究 [D]. 山东: 山东农业大学, 2012: 39-40.
- [19] 姚艳敏,魏娜,唐鹏钦,等. 黑土土壤水分高光谱特征及反演模型 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 95-100.