

# 黑土土壤水分反射光谱特征定量分析与预测<sup>\*</sup>

刘洋<sup>丁</sup> 潇 刘焕军<sup>†</sup> 张新乐 曲长祥 胡文 臧红婷

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

**摘要** 选择单一土类黑土作为研究对象, 并准确调配其不同含水量, 实验室测定土壤高光谱反射率, 利用光谱分析与统计方法, 定量描述了不同含水量黑土反射光谱特征, 并建立了黑土含水量反射光谱预测模型。结果表明, 随土壤含水量的增加, 并达到一定阈值 ( $300 \text{ g kg}^{-1}$ ), 反射率存在过饱和现象, 但其倒数对数微分可以有效去除过饱和问题; 土壤反射率倒数对数微分对土壤含水量的响应表现出三个变化阶段, 导致  $1\ 870 \text{ nm}$  波段的倒数对数微分也表现为非线性变化, 需要利用分段函数进行土壤含水量的光谱精确速测。

**关键词** 黑土; 土壤水分; 反射光谱特征; 倒数对数微分

**中图分类号** TP701 **文献标识码** A

土壤含水量的高低对热量平衡、土壤温度、农业墒情等均有重要影响<sup>[1]</sup>。精确的区域土壤理化性质预测模型研究, 可为实现土壤属性速测、揭示土壤理化性质时空变异规律提供理论依据<sup>[2-3]</sup>, 并为土壤理化性质速测仪器研制、土壤制图与退化监测、精准农业实施等提供数据与技术支持<sup>[4-6]</sup>。基于土壤反射光谱特征的土壤属性预测方法具有非破坏性、快速、环保等优点<sup>[7-8]</sup>。由于当前航天高光谱遥感传感器较少, 或精度难以满足要求; 加之多光谱遥感影像不能获取诊断波段, 难以用于土壤属性的遥感反演<sup>[9]</sup>。因此, 当前以实验室或田间土壤反射光谱特性与土壤属性间的关系研究为主, 揭示土壤反射光谱特征及其影响因素, 建立土壤属性预测模型。

土壤水分对光谱反射率的影响早期主要是在实验室内研究的。实验室条件下, 水分吸收波段可以作为土壤反射光谱的水分含量指标。Bowers 和 Hanks<sup>[10]</sup>、Hoffer 和 Johannsen<sup>[11]</sup> 与 Stoner 和 Baumgardner<sup>[12]</sup> 指出: 随土壤含水量的增加, 土壤光谱反射率在整个波长范围内降低, 尤其在  $760$ 、 $970$ 、 $1\ 190$ 、 $1\ 450$ 、 $1\ 940$  和  $2\ 950 \text{ nm}$  等水分吸收波段。

Liu 等<sup>[13]</sup> 发现当土壤含水量达到一定阈值时, 反射率变化反向。Muller 和 Decamps<sup>[14]</sup> 利用 SPOT 影像预测土壤含水量。尽管上述研究均指出土壤光谱反射率随含水量的增加而减小, 或达到一定的含水量, 反射率变化反向, 但光谱反射率与土壤含水量的定量关系还有待进一步的研究。首先, 现有的土壤含水量调控方法需要改进, 获取的土壤含水量梯度样品数较少, 限制了对二者关系的模拟; 此外, 已有研究多以不同类型的土壤为研究对象<sup>[13-14]</sup>, 但土壤反射率不仅受土壤水分的影响, 还受土壤有机质、机械组成、矿物组成、其他土壤成分等内在属性的影响<sup>[15-16]</sup>。不同的土壤, 由于上述属性不同, 土壤的反射光谱特征有较大差异, 不同波段光谱反射率对含水量变化的响应方式不同。因此, 将不同土壤混合研究, 很难定量分析含水量对土壤光谱反射率的影响。

本研究以单一土壤类型——黑土作为研究对象, 精细调配黑土不同含水量, 测定黑土实验室光谱反射率, 分析土壤水分对黑土反射光谱特征的影响, 建立土壤水分反射光谱预测模型, 为土壤含水量遥感速测提供理论依据与技术支持。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40801167)、黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目(1251G010)、哈尔滨市科技局科技创新人才基金项目(RC2010QN002051)和东北农业大学博士启动基金项目(2009RC35)共同资助

<sup>†</sup> 通讯作者, 刘焕军(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地物高光谱与农业遥感研究。E-mail: huanjunliu@yeah.net

作者简介: 刘洋(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业遥感研究。E-mail: liuyang0525@yeah.net

收稿日期: 2013-10-30; 收到修改稿日期: 2014-03-06

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

2009 年 5 月 22 - 26 日,于作物播种后、出苗前,在黑龙江省典型黑土区(北安市南部、海伦市中部、绥化市东部、绥棱县西南部、望奎县中部)采集不同有机质含量的 8 个土样各 15 kg,实验室风干、研磨、过 2 mm 筛;采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定土壤有机质含量(见表 1)。

### 1.2 土壤水分含量调配试验

已有土壤水分光谱反射率研究中,可能由于每个土壤样品的数量有限,土壤水分含量的调配一般将土壤样本放置于容器中,然后缓缓从容器边缘注入蒸馏水直至土壤达到过饱和状态。在土壤表面的自由水消失后,土壤自然变干的过程中频繁对土壤反射率进行测量,土壤含水量用称重法测定。该方法存在三方面问题:一是由于土壤含水量过饱和,造成土壤水分对被测土壤物理结构的破坏,不同物理结构的土壤的光谱反射率是不同的,从而造成误差;二是土壤在干燥过程中会出现裂缝,影响光谱反射率精度;三是在土壤自然变干的过程中,容器边缘较中心、土壤表层较下部变干的速度快,

造成容器边缘与中心、土壤表层与下部的土壤含水量不同,此时用称重法得到的土壤含水量存在一定的误差。

为避免出现上述问题,本研究咨询有关土壤专家后,确定以下土壤含水量调配方法:首先确定各有机质含量土壤设定的土壤重量含水量间隔为  $25 \text{ g kg}^{-1}$  和各有有机质含量土壤的饱和含水量,利用饱和含水量除以含水量间隔,确定各有机质含量土壤需要调配不同含水量的个数;按每份 300 g,将不同有机质含量风干土样分成含水量调配所需的个数(见表 1“观测数”列),基于间隔含水量  $25 \text{ g kg}^{-1}$  计算出每个已称重的土样的需水量( $W_i$ );其次确定各有机质含量土壤需要调配不同含水量的个数;测定喷壶每次的喷水量( $C$ ),计算  $W_i$  与  $C$  的比值,得到每个调配土样的喷水次数;为防止局部过饱和,在密封效果好的塑料袋中,对每个土样喷蒸馏水,边喷水边混拌,使土壤与蒸馏水充分混合;喷水后,将每个土样密封、在  $4 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$  下放置 24 h,使土壤充分均匀吸收水分。最后对其进行光谱测试,每个土样测试后,取容器中部的土壤装入已称重小烧杯,称鲜重;放入烘箱,在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  下放置 8 h,确定恒重后,计算土壤重量含水量(表 1)。

表 1 不同有机质含量土壤调配含水量的描述统计量

Table 1 Descriptive statistics of soil moisture in soils different in organic matter contents ( $\text{g kg}^{-1}$ )

有机质含量 OM content ( $\text{g kg}^{-1}$ )	土壤调配含水量 Soil moisture							
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 SD	峰度 Skewness	偏度 Kurtosis	极差 Range	观测数 <i>n</i>
30.6	68.4	392.4	209.6	96.9	-2.3	3.9	324.0	11
31.8	51.6	286.7	172.0	84.5	-15.9	-0.1	235.1	15
32.6	49.1	355.6	184.3	96.2	-12.6	3.6	306.5	15
36.9	72.0	409.5	230.8	106.5	-10.3	1.6	337.4	12
39.2	55.5	415.0	187.7	104.1	1.1	5.8	359.5	14
39.5	62.2	372.8	197.8	87.8	0.1	2.5	310.6	12
50.0	62.1	409.6	212.6	109.6	-9.6	1.9	347.5	12
51.8	53.4	445.4	217.2	126.4	-9.4	3.3	391.9	11

### 1.3 光谱测定

采用美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices, ASD) 生产的野外便携式高光谱仪 ASD FieldSpec  $\text{\textcircled{R}}$  3 对处理后的土壤进行光谱测试,光谱测量在一个能控制光照条件的暗室内进行。土壤样本分别放置于直径 12 cm、深 1.8 cm 的盛样皿内,

用直尺将土样表面刮平。光源为 50 W 的卤钨灯,距土壤样品表面 110 cm,天顶角  $30^\circ$ ,减小土壤粗糙度造成阴影的影响。采用  $8^\circ$  视场角的传感器探头置于离土壤样本表面 10 cm 的垂直上方。测试之前先去除辐射强度中暗电流的影响,再以白板进行定标。每个土样采集 10 条光谱曲线,算术平均后得到

该土样的实际反射光谱数据。

#### 1.4 数据处理方法

光谱数据预处理:采用 9 点加权移动平均法对光谱曲线进行平滑去噪处理。对光谱数据以 5 nm 为间隔、利用高斯模型进行光谱重采样。对反射光谱曲线进行微分、倒数对数微分 (DDW) 等数学变换。

#### 1.5 模型建立与验证

采用相关分析、数理统计方法对反射率及反射率数学变换等光谱指数进行分析,建立土壤水分光谱预测模型。从模型的稳定性、预报能力、精度等方面进行检验。模型的稳定性用决定系数  $R^2$  检验,  $R^2$  越大,模型越稳定;模型的预测能力用总均方根差 (RMSE) 来检验, RMSE 越小,模型精度越高、预测能力越强。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同含水量黑土的反射光谱响应波段差异

图 1 为有机质含量等于  $31.8 \text{ g kg}^{-1}$  黑土不同

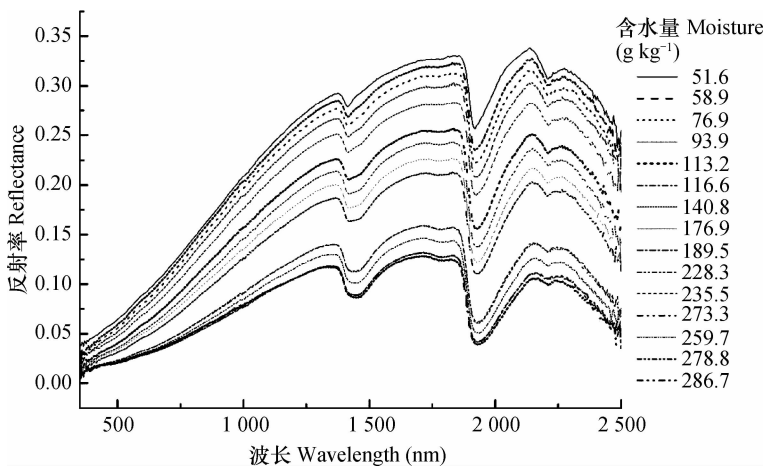


图 1 不同含水量黑土(有机质含量为  $31.8 \text{ g kg}^{-1}$ )的反射光谱曲线

Fig. 1 Reflectance curves of black soils different in soil moisture (soil organic matter  $31.8 \text{ g kg}^{-1}$ )

图 2 为不同有机质含量黑土  $2060 \text{ nm}$  光谱反射率随土壤含水量变化的散点图。 $2060 \text{ nm}$  光谱反射率随土壤含水量增加而降低,达到一定临界值后,随土壤含水量的增加而增加。综合不同有机质含量黑土进行考虑,临界含水量大致为  $300 \text{ g kg}^{-1}$ 。

### 2.2 光谱反射率与土壤含水量的定量关系

图 3 为土壤含水量与光谱反射率及其倒数对数微分 (DDW) 之间的相关系数。可以看出,含水量与土壤光谱反射率在  $350 \sim 2500 \text{ nm}$  的光谱范围内均呈现极显著负相关,在整个波谱范围,相关系数均

含水量的反射光谱曲线,结果表明土壤光谱反射率随含水量的增加不断降低;但含水量达到一定阈值时,土壤光谱反射率降低速率变小;近红外波段范围内土壤光谱反射率随含水量变化显著大于可见光波段,含水量对土壤近红外波段光谱反射率的影响作用明显强于可见光波段;在相同的土壤含水量变化范围内,近红外波段光谱反射率的变化范围远大于可见光波段的变化范围,  $2050 \text{ nm}$  光谱反射率的标准差是  $500 \text{ nm}$  的 6.69 倍,可见光波段的反射率对土壤含水量变化易出现饱和现象。可见光波段,水分的唯一作用是改变土壤颗粒表面的相对折射率,随着土壤含水量的增加,水分先被吸收至土壤颗粒表面,然后依次填充至小的和较大的孔径中<sup>[17]</sup>。因此,一旦绝大多数的土壤颗粒表面吸收了足够的水分,剩余的水分填充至较大的孔隙里,这对可见光波段的反射率几乎没有影响<sup>[18]</sup>。相反,近红外波段光谱反射率随着土壤水分的增加而发生较大变化;因此,以近红外波段黑土光谱反射率为准,定量分析土壤水分对光谱反射率的影响。

大于 0.8;土壤含水量光谱预测建模采用大于  $1300 \text{ nm}$  的近红外波段。不同含水量土壤,经过 DDW 处理后,土壤反射光谱数据在土壤有机质光谱响应波段的相关性明显降低,在水分吸收波段及其肩部相关性显著提高。

### 2.3 土壤含水量反射光谱预测模型

表 2 为土壤含水量光谱预测模型,从各模型的决定系数  $R^2$  和均方根误差 RMSE 来看:以 DDW 为自变量的模型精度高于反射率模型,因为在含水量  $> 350 \text{ g kg}^{-1}$  时,反射率存在明显的过饱和现象;土

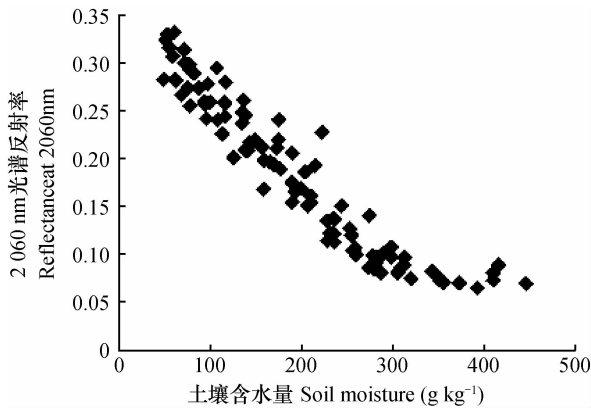


图2 土壤 2 060 nm 光谱反射率随土壤含水量变化散点图

Fig. 2 Scattergram of soil reflectance at 2 060 nm as affected by soil moisture ( $n = 102$ )

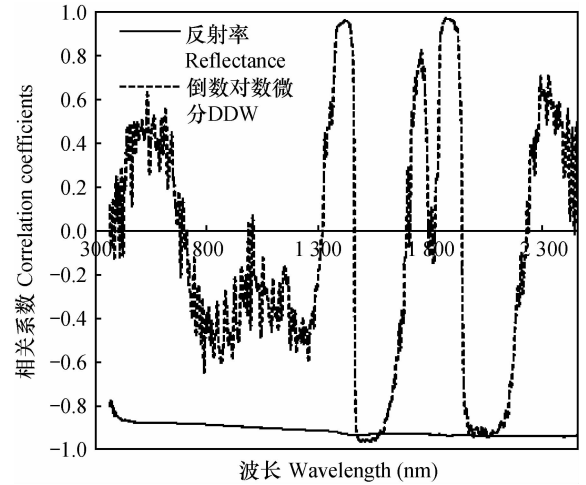


图3 土壤含水量与光谱反射率及其倒数对数微分之间的相关性

Fig. 3 Correlation of soil moisture with spectral reflectance and derivative of log-transformed reflectance

壤含水量超过一定范围,土壤反射率的变化较小,难以预测土壤含水量。总体而言,黑土的土壤含水

量阈值为  $300 \text{ g kg}^{-1}$ ;与光谱反射率相比,其倒数对数微分可以有效去除过饱和问题。

表2 土壤含水量反射光谱预测模型

Table 2 Soil spectral reflectance-based model for prediction of soil moisture

处理 Treatment	含水量 Moisture ( $\text{g kg}^{-1}$ )	模型 Model	$R^2$	RMSE
反射率 Reflectance	所有区间 All Range ( $n = 102$ )	$y = 584.7e^{-6.82 \times R_{2060}}$	0.911	2.980
	< 300	$y = -1011.1 \times R_{2060} + 370.51$	0.924	2.091
反射率倒数对数微分 DDW	< 300	$y = 24894 \times DDW_{1870} + 27.059$	0.945	2.330
	< 300	$y = 131.02 \times \ln(DDW_{1870}) + 865.07$	0.938	1.932
	< 200	$y = 29463 \times DDW_{1870} + 8.755$		1.845
	$200 \leq Mo < 300$	$y = 13070 \times DDW_{1870} + 134.56$		1.845
	> 300	$y = 29419 \times DDW_{1870} - 23.338$		1.845

注:  $R_{2060}$  为 2 060 nm 光谱反射率,  $DDW_{1870}$  为 1 870 nm 倒数对数微分,  $Mo$  为含水量 Note:  $R_{2060}$  is the reflectance at 2 060 nm,  $DDW_{1870}$  is the DDW at 1 870 nm,  $Mo$  is moisture.

随含水量的增加,土壤反射率 DDW 的响应表现出三个阶段的变化:(1)  $0 \sim 200 \text{ g kg}^{-1}$ , DDW 变化较快;(2)  $200 \sim 300 \text{ g kg}^{-1}$ , DDW 变化变慢;(3)  $> 300 \text{ g kg}^{-1}$ , DDW 变化加快。1 870 nm 波段为 1 910 nm 水分吸收谷的肩部,随含水量的增加,1 910 nm 波段土壤反射光谱吸收谷肩部曲线的变化速率不同(见图 1),导致 1 870 nm 波段的倒数对数微分也表现出非线性变化。表 2 中列出的 1 870 nm 波段的土壤含水量倒数对数微分分段模型,其 RMSE 更低,说明基于土壤含水量与光谱反射率变化速率的关系,需要采用分段函数进行土壤含水量的光谱精确速测。

### 3 结 论

本研究选取了 8 个黑土土样作为研究对象,采用改进的土壤水分调配方法,得到 102 个不同含水量土样,测定其高光谱反射率,利用光谱分析与统计方法,定量描述了不同含水量黑土反射光谱特征,并建立了黑土含水量反射光谱预测模型。当含水量达到  $300 \text{ g kg}^{-1}$  以上时,反射率存在过饱和现象,但其倒数对数微分可以有效去除过饱和问题;当含水量小于  $300 \text{ g kg}^{-1}$  时,可以利用基于反射率线性模型进行预测;要准确预测所有含水量土壤,

需要利用其倒数对数微分线性模型进行预测;土壤反射率倒数对数微分对水分具有三个明显响应区域,导致 1 870nm 波段的倒数对数微分也表现为非线性变化,因此利用分段函数进行土壤含水量光谱速测更加精确。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 何挺,王静,程焯,等. 土壤水分光谱特征研究. 土壤学报, 2006, 43(6): 1027—1032. He T, Wang J, Cheng Y, et al. Spectral features of soil moisture (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 1027—1032
- [ 2 ] Stevens A, van Wesemael B, Bartholomeus H, et al. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils. Geoderma, 2008, 144 ( 1 ): 395—404
- [ 3 ] 周涛,史培军,罗巾英,等. 基于遥感与碳循环过程模型估算土壤有机碳储量. 遥感学报, 2007, 11(1): 127—136. Zhou T, Shi P J, Luo J Y, et al. Estimation of soil organic carbon based on remote sensing and process model (In Chinese). Journal of Remote Sensing, 2007, 11(1): 127—136
- [ 4 ] Summers D, Lewis M, Ostendorf B, et al. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. Ecological Indicators, 2011, 11(1): 123—131
- [ 5 ] 李晋阳,左月明,张军. 基于反射光谱特性的土壤有机质含量测定仪设计. 农业机械学报, 2007, 38(8): 116—119. Li J Y, Zuo Y M, Zhang J. Design on measuring gauge for soil organic matter content based on reflectance spectra characteristic (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2007, 38(8): 116—119
- [ 6 ] 刘炜,常庆瑞,郭曼,等. 不同尺度的微分窗口下土壤有机质的一阶导数光谱响应特征分析. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 316—321. Liu W, Chang Q R, Guo M, et al. Analysis on derivative spectrum feature for SOM under different scales of diferential window (In Chinese). Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(4): 316—321
- [ 7 ] Martin P, Malley D, Manning G, et al. Determination of soil organic carbon and nitrogen at the field level using near-infrared spectroscopy. Canadian Journal of Soil Science, 2002, 82(4): 413—422
- [ 8 ] 彭杰,周清,张杨珠,等. 有机质对土壤光谱特性的影响研究. 土壤学报, 2013, 50(3): 517—524. Peng J, Zhou Q, Zhang Y Z, et al. Effect of soil organic matter on spectral characteristics of soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 517—524
- [ 9 ] Margate D E, Shrestha D P. The use of hyperspectral data in identifying “desert-like” soil surface features in tabernas area, southeast spain. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 2001: 9
- [ 10 ] Bowers S, Hanks R. Reflection of radiant energy from soils. Soil Science, 1965, 100(2): 130—138
- [ 11 ] Hoffer RM, Johannsen C J. Ecological potential in spectral signatures analysis//Johnson P C. Remote Sensing in Ecology. Athens: University of Georgia Press, 1969
- [ 12 ] Stoner E R, Baumgardner M. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1161—1165
- [ 13 ] Liu W D, Baret F, Xingfa G, et al. Relating soil surface moisture to reflectance. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 238—246
- [ 14 ] Muller E, Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 173—180
- [ 15 ] Mattikalli N M. Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of landsat sensors using laboratory spectral measurements. Remote Sensing of Environment, 1997, 59(1): 14—28
- [ 16 ] Volkan Bilgili A, van Es H, Akbas F, et al. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of turkey. Journal of Arid Environments, 2010, 74(2): 229—238
- [ 17 ] Hillel D. Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. London, UK: Academic Press, 1998
- [ 18 ] Lobell D B, Asner G P. Moisture effects on soil reflectance. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 722—727

## QUANTITATIVE ANALYSIS OF REFLECTANCE SPECTRUM OF BLACK SOIL AS AFFECTED BY SOIL MOISTURE FOR PREDICTION OF SOIL MOISTURE IN BLACK SOIL

Liu Yang Ding Xiao Liu Huanjun<sup>†</sup> Zhang Xinle Qu Changxiang Hu Wen Zhang Hongting  
(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract** To study effect of soil moisture on soil reflection spectrum, Black soil, as a single soil class, was selected as subject for the study. Soil samples were collected and prepared to have different water contents. And then, hyperspectral reflectances of the samples was obtained in lab for analysis, statistics and quantitative description. On such a basis, a reflection spectrum-based model for prediction of soil moisture in black soil was established. Results show that with more

water added to a certain threshold ( $300 \text{ g kg}^{-1}$ ), the phenomenon of oversaturation would appear with soil reflectance. However, the problem could be solved with its derivative of log-transformed reflectance (DDW), of which the response to soil moisture displayed a 3-phased variation, thus resulting in nonlinear variation of DDW at 1 870 nm. It is, therefore, essential to use piecewise functions to rapidly and accurately predict soil water content with spectral data.

**Key words** Black soil; Soil moisture; Hyperspectral; Derivative of log-transformed reflectance

(责任编辑:檀满枝)