

## 砂姜黑土土壤有机碳高光谱特征与定量估算模型的研究

杨红飞<sup>1,2,3</sup>, 郑黎明<sup>1</sup>, 郅中要<sup>1</sup>, 王若澜<sup>1</sup>, 王友保<sup>1,2,3</sup>

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000; 2. 皖江城市带退化生态系统的恢复与重建安徽省协同创新中心, 芜湖 241000; 3. 重要生物资源保护与利用研究安徽省省级重点实验室, 芜湖 241000)

**摘要:** 有机碳作为衡量土壤肥力的重要指标, 其量化快速监测成为精确农业研究的热点。以安徽淮北平原区宿州市采集的砂姜黑土为研究对象, 进行室内理化分析、预处理与室外光谱测量等一系列工作, 在土壤原始光谱反射率的基础上, 采用去包络线和波段深度提取突出吸收特征, 剖析土壤光谱响应特征。基于原始光谱和 8 种变换形式, 分析不同变换光谱形式与有机碳含量的相关性, 结合有机碳光谱响应特征分析和光谱特征参量挑选, 确定诊断土壤有机碳含量的最佳敏感波段, 利用逐步回归方法建立了土壤有机碳高光谱的预测模型。结果表明, 550~750 nm 波段范围是典型砂姜黑土有机碳的主要光谱响应区域。去包络线和波段深度处理突出了土壤有机碳光谱吸收特征, 随着有机碳含量的降低, 吸收值呈现下降趋势。在不同光谱变换形式中, 归一化比值指数 ( $R/R_{M(450-750)}$ ) 的变换形式与土壤有机碳相关性最强, 最敏感波段分别出现在 451 nm 和 644 nm 处, 相关系数分别达 0.80 和 -0.90。相关性最好的波段范围主要集中在 600~700 nm 波段附近。基于相关分析与逐步回归分析方法, 确定了 606、637 和 644 nm 波段处的归一化比值指数为诊断土壤有机碳含量的最佳敏感波段, 基于最佳敏感波段的归一化比值指数 ( $R_{606}/R_{M(450-750)}$ ,  $R_{637}/R_{M(450-750)}$  和  $R_{644}/R_{M(450-750)}$ ) 建立的高光谱预测土壤有机碳模型具有良好的预测效果, 模型的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.81, 均方根误差 ( $RMSE$ ) 为 0.14, 展现了较好的稳定性和预测精度。

**关键词:** 砂姜黑土; 高光谱; 土壤有机碳; 光谱特征; 反演模型

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)01-0101-09

### Hyperspectral characteristics and quantitative estimation model of soil organic carbon in the Shajiang black soil

YANG Hongfei<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Liming<sup>1</sup>, GAO Zhongyao<sup>1</sup>, WANG Ruolan<sup>1</sup>, WANG Youbao<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000;

2. Collaborative Innovation Center of Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang City Belt, Anhui Province, Wuhu 241000;

3. Anhui Provincial Key Lab of the Conservation and Exploitation of Biological Resources, Wuhu 241000)

**Abstract:** As an important indicator of soil fertility, quantitatively and rapidly monitoring soil organic carbon has become a hot spot in precision agriculture research. In this paper, Shajiang black soil samples were collected from Huaihe plain area of Anhui Province to conduct a series of experiments, including physical and chemical analysis, pretreatment and outdoor spectral measurement. Based on the original spectral reflectance of the soil, the characteristic of soil spectral response was analyzed by extracting the prominent absorption characteristics using Continuum removal (CR) and Band-depth (BD). The correlation between different spectral forms and organic carbon content (SOC) was analyzed based on the original spectra and eight transformations. Meanwhile, combined with spectral response characteristics of SOC and the selection of spectral characteristic parameters, best sensitive bands of soil organic carbon were determined for establishment of the hyperspectral prediction model of SOC by the stepwise regression method. The results showed that the main response wave bands between SOC and spectral reflectance were distributed in the range of 550-750 nm for the Shajiang black soil. CR and BD obviously highlighted the spectral absorption characteristics, and the absorption value showed a downward trend with a decrease of SOC content. In different spectral transformations, the normalized ratio index ( $R/R_{M(450-750)}$ ) exhibited the strongest correlation with

收稿日期: 2017-04-21

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1508085QC68), 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2015A127), 安徽师范大学科研培育基金(2013rcpy40)和皖江城市带退化生态系统的恢复与重建安徽省协同创新中心项目共同资助。

作者简介: 杨红飞, 博士, 副教授。E-mail: hongfeiy@ahnu.edu.cn

SOC, and the most sensitive bands appeared at 451 nm and 644 nm, with the correlation coefficients of 0.80 and -0.90, respectively. The best correlation bands were mainly in the 600-700 nm. Based on the correlation analysis and stepwise regression analysis, the normalized ratio index at 606 nm, 637 nm and 644 nm bands was determined as the best sensitive band for diagnosing SOC content. Furthermore, the hyperspectral prediction of SOC model established by the normalized ratio index ( $R_{606}/R_{M(450-750)}$ ,  $R_{637}/R_{M(450-750)}$  and  $R_{644}/R_{M(450-750)}$ ) showed a good predictive effect, with the coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.81 and the root mean square error (RMSE) of 0.14. Overall, the hyperspectral inversion model showed good stability and prediction accuracy, which can provide a reference for remote sensing monitoring of the soil fertilizer information in the Shajiang black soil.

**Key words:** Shajiang black soils; hyperspectral; soil organic carbon; spectral characteristics; inversion model

土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 含量作为土壤质量的一个重要指标, 经常被用来进行温室气体碳通量的估算<sup>[1]</sup>。作为植物和微生物生命活动所必需的营养, 土壤有机碳含量的多少是衡量和评价土壤肥力高低的一个重要特征性指标。因此, 土壤有机碳的定量化研究对于土壤管理, 土壤制图以及土壤固碳等具有重要意义。砂姜黑土是发育于河湖相沉积物、低洼潮湿和排水不良环境, 经前期草甸潜育化过程和后期旱耕熟化过程, 所形成的一种古老耕作土壤<sup>[2-4]</sup>, 主要分布于我国的淮北平原 (皖北和苏北)、山东半岛西部、河南省西南部和湖北省北部等地区<sup>[5]</sup>。砂姜黑土作为我国主要的粮食作物产区的重要土壤类型, 其土壤有机碳的定量研究对于该区域土壤质量和土壤肥力监测至关重要。

农田土壤环境监测和土壤肥力研究需要高质量和低成本的数据。然而, 传统的土壤分析方法昂贵且耗时且范围有限, 无法满足精准施肥技术、精准农业对土壤养分时空变异状况的要求<sup>[6]</sup>。此外, 传统方法通常是有害或有污染的, 而且难以在野外田间直接测定<sup>[7]</sup>。近年来高光谱定量分析技术在土壤学上的研究与应用为监测土壤 SOC 含量提供了一个有效途径。而土壤有机质为微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称, 其中的碳元素含量即为土壤有机碳。国内外许多学者对于土壤有机碳或基于土壤有机碳的有机质高光谱预测进行了研究。如 Tian 等<sup>[8]</sup>采用实验室室内可见和红外光谱波段, 结合 3 种定量模拟方法成功对中国中东部 5 种土壤有机质进行了预测研究。Kishnan 等<sup>[9]</sup>研究发现 623 和 564 nm 波段是土壤有机碳响应的光谱敏感波段, 在近红外区域没有有机碳响应的反射峰和吸收谷, 结果显示利用可见光波段探测土壤有机碳要优于近红外区域。Galvão 等<sup>[10]</sup>研究证实了反射率在可见光波段 (550~700 nm) 处的吸收峰主要由土壤有机质引起。此外, Viscarra Rossel 和 Hicks<sup>[11]</sup>针对澳大利亚土壤, 利用可见和近红外波段进行了土壤有机碳不同组含量的预测研究。Cambou 等<sup>[12]</sup>

利用野外光谱对土壤有机碳进行了预测研究, 模型的决定系数  $R^2$  达到 0.75。国内研究方面, 卢艳丽等<sup>[13]</sup>以东北黑土为对象, 在室内条件下测定了可见-近红外光谱, 发现在 545~830 nm 波段范围内, 土壤有机质含量与原始光谱反射率呈显著负相关。于雷等<sup>[14]</sup>以江汉平原公安县土壤为研究对象, 利用 4 种光谱变换形式构建有机质高光谱预测模型, 发现基于连续统去除变换构建的模型预测较好。谢伯承等<sup>[15-16]</sup>以褐潮土为研究对象, 采用 600~800 nm 波段范围内的特征吸收面积来评价与有机质的关系, 相关性达到 0.01 显著水平。众多研究表明, 探测土壤有机碳含量最佳波段范围介于 400~1 000 nm, 可见光区域要优于近红外区域<sup>[9-10, 15-16]</sup>。

迄今为止我国对砂姜黑土有机碳高光谱预测模型的研究尚少, 所涉及的光谱特征分析不足。此外, 由于大多数土壤有机碳高光谱估算研究是基于室内反射光谱数据, 但由于室内土壤光谱获取过程尚无统一的方法, 测试过程中的条件, 如光源功率、距离和照射角度等的差异, 增加了光谱测定数据的不确定性, 从而限制了土壤属性光谱预测定量研究<sup>[17]</sup>。因此, 本研究以我国淮北平原广泛分布的砂姜黑土为研究对象, 通过对土壤样品进行预处理, 采用室外实测光谱手段, 分析砂姜黑土光谱特征, 挖掘有机碳的光谱响应敏感波段, 通过光谱形式变换突出相关特征, 最终通过数理统计方法建立基于反射光谱特征的土壤有机碳高光谱预测模型, 以期对砂姜黑土土壤有机碳的高光谱快速测定提供研究依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

淮北平原地处安徽省北部, 属华北平原的一部分, 东接江苏省, 南临淮河, 西与河南省交界, 北部与山东省接壤。面积为 37 411 km<sup>2</sup>, 占安徽省面积的 26.8%, 地理位置见图 1。淮北平原由黄河、淮河历次泛滥堆积作用形成, 除东北部零散低山分

布外, 其余均为松散沉积物所覆盖。淮北平原位于我国南北气候过渡带, 为暖温带半湿润气候, 年平均气温在 14~15℃之间, 由南向北递减, 年际变化不大。夏热多雨, 冬寒晴燥, 年平均降水量 869.6 mm。土壤类型主要包括砂姜黑土、潮土、褐土和棕壤, 其中以砂姜黑土为主。

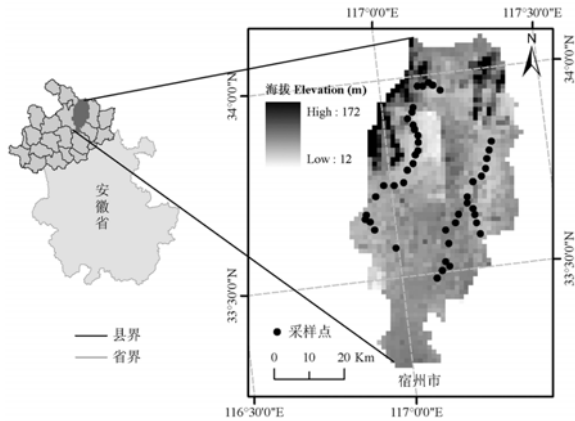


图 1 研究区地理位置和采样点分布

Figure 1 Geographical location of the study area and distribution of sampling sites

## 1.2 土样采集与处理

本研究所需土壤样品采自耕作层土样, 采样点主要分布于淮北平原区的宿州市境内(图 1)。本研究共采得样品 45 个, 土壤类型主要为砂姜黑土。采样同时考虑土壤类型和交通的便利性, 采用梅花采样法, 每个样点采集 5 点的混合样品, 深度为 0~20 cm, 剔除植物根系与石块等异物, 同时用 GPS 记录经纬度信息。样品风干后磨碎, 过 2 mm 孔筛。每个样品分成两份, 分别用于高光谱数据采集和土壤农化分析测试。其中, 土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法测定<sup>[20]</sup>。砂姜黑土有机碳含量测定结果统计值见表 1。

表 1 土样土壤有机碳含量特征统计

Table 1 Descriptive statistics of organic carbon content of soil collected

| 最小值/%   | 最大值/%   | 均值/% | 标准差  |
|---------|---------|------|------|
| Minimum | Maximum | Mean | SD   |
| 0.12    | 1.23    | 0.56 | 0.28 |

## 1.3 光谱测定

土壤光谱反射率的测定采用美国 ASD (analytical spectral devices) 公司开发生产的 ASD FieldSpec Pro 地物光谱仪。波长范围 350~1 050 nm, 覆盖了可见光和部分近红外光谱范围, 重采样间隔为 1 nm。测定步骤如下: 将处理好的土样置于直径 15 cm 深 2.5 cm 的容器中, 容器底部垫一张黑

色胶垫, 装满后表面刮平待测。为消除环境因素的影响, 如光照、云等, 野外地物光谱测试选择在晴朗天气进行, 无风天气下, 在室外自然光照条件下, 采用 5° 视场角探头, 距土壤样品表面垂直上方 15 cm 处进行光谱采集, 时间控制在 11:00—13:00。采用标准参考板同步测量太阳辐射光谱。为减小随机误差影响, 每个土样测定 10 次, 取均值作为该土壤样品的实际反射光谱数据。

## 1.4 光谱数据预处理与数学变换

每份土样去除噪声较大的边缘波段 (350~399 nm 和 1 000~1 050 nm) 在光谱分析时被去除。为消除背景噪音的影响, 采用 Savitzky-Golay 平滑 (SG 平滑)<sup>[21]</sup>方式对土壤光谱进行预处理。采用该方法进行滤波可有效去除噪声, 同时较好地保存了光谱曲线的总体特征。为变非线性关系为线性关系, 故将原始光谱进行了 7 种形式的数学变换来增强特征波段的提取, 分别是反射率一阶微分 (First order differential reflectance, FDR)、二阶微分 (Second order differential reflectance, SDR)、倒数 (1/R)、对数 (lnR)、连续统去除 (Continuum removal, CR)、波段深度 (Band-depth, BD) 和归一化处理 (Normalization) 的形式。经过处理后分别得到 R、R'、R''、lnR、(lnR)'、1/R、(1/R)'、R/R<sub>M(450-750)</sub>和 (R/R<sub>M(450-750)})'9 种光谱形式。</sub>

## 1.5 波段深度提取

波段深度处理是将土壤原始光谱反射率全部归一到相同的土壤背景中去, 便于突出其吸收特征, 波段深度的计算公式如下所示:

$$BD_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} / \rho C_{\lambda} \quad (1)$$

式 (1) 中:  $BD_{\lambda}$  为波段深度,  $\rho_{\lambda}$  为光谱反射率,  $\rho C_{\lambda}$  为光谱反射率包络线。

## 1.6 光谱数据归一化处理

为了消除不同土样光谱测试过程中可能存在的各种随机误差, 需要对土壤光谱反射数据进行归一化处理。归一化的计算公式如下:

$$N(\lambda_i) = R(\lambda_i) / R_M(\lambda_{450-750}) \quad (2)$$

式 (2) 中,  $\lambda_i$  为波段  $i$  的波长值;  $N(\lambda_i)$  为波段  $i$  的归一化反射率值;  $R(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  的反射率;  $R_M(\lambda_{450-750})$  为波段  $\lambda_{450}$  至  $\lambda_{750}$  反射率的平均值;  $i = 400, 401, \dots, 1 000$  nm。

## 1.7 显著性波段的选择

在土壤有机碳含量高光谱数据建模过程中, 敏感波段往往通过土壤有机碳含量与光谱反射率不同变换形式的相关分析进行确定, 相关性越高, 波段响应越敏感。因此, 运用数理统计的相关分析的方

法,对经过预处理后得到的  $R$ 、 $R'$ 、 $R''$ 、 $\ln R$ 、 $(\ln R)'$ 、 $1/R$ 、 $(1/R)'$ 、 $R/R_{M(450-750)}$ 和 $(R/R_{M(450-750)})'$  9种光谱形式与土壤有机碳含量进行相关系数分析。

### 1.8 模型建立与验证

利用 31 个建模样本,采用相关分析、多元线性逐步回归方法对原始样本光谱数据及其数学变换形式进行分析,建立 SOC 含量高光谱预测模型;用 14 个检验样本光谱数据对模型进行检验。相关数理统计分析采用 SPSS 13.0 软件和 Origin8.0 软件完成。本研究采用决定系数 ( $R^2$ ) 评价模型的稳定性,总均方根误差 (root mean square error,  $RMSE$ ) 用于评价模型的反演质量。决定系数和均方根误差同时应用可以评价模型的精度。从模型的稳定性和预测精度两个方面对模型进行检验。模型的稳定性用决定系数  $R^2$  的大小检验,  $R^2$  越大,说明模型稳定性越好;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、估算能力越好。

$RMSE$  的计算公式如下所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $X_i$  为土壤有机碳的实测值,  $Y_i$  为土壤有机碳的预测值,  $n$  为土壤样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 砂姜黑土光谱特征分析

为清晰地反映不同有机碳含量的砂姜黑土原始光谱曲线的特征,按照土壤有机碳含量分布范围,选取土壤有机碳含量最大值、中间值及最小值所对应的 5 条原始光谱曲线进行分析 (如图 2)。从图 2 可以看出,整个波段范围 (400~1 000 nm) 光谱曲线总体走势一致,光谱反射率集中在 0.06~0.37 之间。总体上,随着波段增加光谱反射率迅速增加,当在 900~1 000 nm 波段范围内,曲线趋于平缓。在 400~550 nm 波段范围内,土壤有机碳含量为 0.12% (soc0.12) 的光谱反射率要明显高于有机碳含量为 0.28% (soc0.28) 的反射率,总体上,光谱反射率随有机碳含量的升高,反射率呈下降趋势,其余 3 条不同有机碳含量 (soc0.47、soc0.75 和 soc1.23) 的光谱反射率差异不明显。此外,在 400~550 nm 波段范围内, soc0.47、soc0.75 和 soc1.23 光谱出现了交叉和缠绕的现象,除 soc0.75 反射率略高于 soc1.23,但差异不明显。随着波段增加,在 550~900 nm 波段范围内,土壤光谱反射率表现为 soc0.12>soc0.28>soc0.47>soc0.75>soc1.23,均表现随着有机碳含量的升高,反射率呈依次下降的趋势。

光谱波段范围达 900nm 以上, soc0.47、soc0.75 和 soc1.23 反射率趋于紧凑,差异性降低,而 soc0.12 和 soc0.28 反射率依然处于高位,变化不大。总体上,5 条光谱曲线基本相似都呈现上凸趋势。

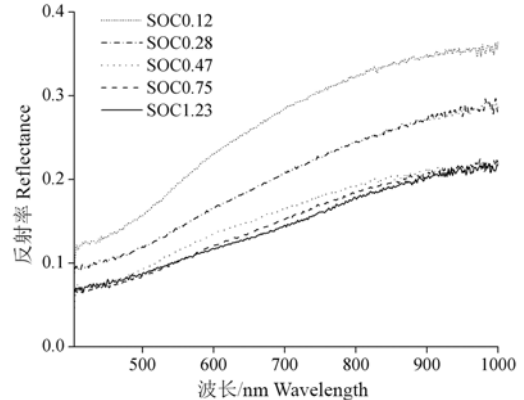


图 2 砂姜黑土不同有机碳含量的土壤光谱反射率曲线  
Figure 2 Reflectance curves of soil samples with different SOC contents of Shajiang black soil

土壤光谱的去包络线可以去除土壤中由于特定物质内化学键内电子跃迁引起的特征吸收带以后的吸收特征,经过连续统去除以后,光谱曲线都归一化到一致的光谱背景上,对土壤样本的吸收特征分析有重要的意义。不同土壤有机碳含量的光谱曲线差异性被凸显出来,光谱曲线的吸收峰更加明显 (如图 3)。在 400~550 nm、600~800 nm 和 900~1 000 nm 范围内各存在吸收峰,而这些特征依据土壤原始光谱反射曲线的难以分辨。对土壤光谱进行去包络线处理后,土壤有机碳影响的光谱波段主要处在 550~750 nm 范围内。有机碳含量越高,反射率越低,下凹程度越大。从图 3 可以明显看出,550~750 nm 波段范围内,有机碳含量最高的 SOC1.23 的光谱曲线的吸收谷要明显深于其余有机碳含量相对较低的 4 组光谱。因此,进行连续统去除变换后,土壤光谱曲线的特征吸收带更加突出,不同有机碳含量光谱曲线之间的异质性特征得到了改善。波段深度凸显了有机碳典型响应波段的光谱曲线,放大了光谱特性。图 4 显示的是不同有机碳含量光谱的波段深度吸收值,通过波段深度变化,可以明显的将吸收特征凸显出来。尤其是在 550~750 nm 特征吸收波段范围内,有机碳含量最高的光谱 (soc1.23) 曲线在此波段范围内吸收值要明显高于其他 4 条光谱的吸收值,总体上表现出,随着有机碳含量降低,吸收值依次呈现下降的趋势,即 soc1.23>soc0.75>soc0.47>soc0.12。总体上,去包络线和波段深度处理可以有效突出土壤有机碳光谱吸收特征,凸显光谱异质性,从而辨识有机碳光谱响应敏感波段。

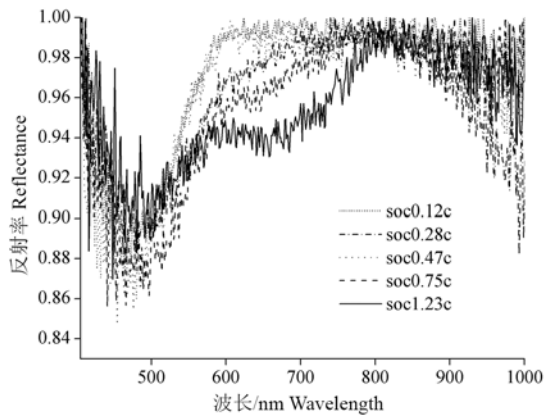


图 3 砂姜黑土不同有机碳含量光谱反射率的去包络线结果  
Figure 3 Spectral continuum removed curves of soil samples with different SOC contents of Shajiang black soil

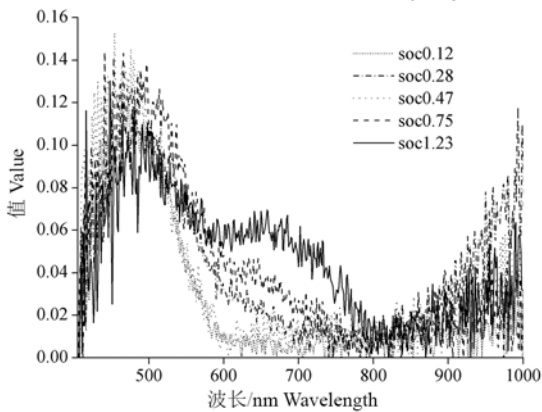


图 4 砂姜黑土土壤光谱的波段深度

Figure 4 Band depth of soil samples with different SOC contents of Shajiang black soil

## 2.2 土壤有机碳含量与光谱反射率的相关性分析

通过分别计算土壤有机碳含量与  $R$ 、 $R'$ 、 $R''$ 、 $\ln R$ 、 $(\ln R)'$ 、 $1/R$ 、 $(1/R)'$ 、 $R/R_{M(450-750)}$  和  $(R/R_{M(450-750)})'$  之间的相关系数, 其相关性分析结果如图 5 所示。由图 5 得出,  $R$  和  $\ln R$  与有机碳含量呈负相关, 相关系数整条曲线比较平滑, 相关系数介于  $-0.44 \sim -0.65$  之间;  $1/R$  与有机碳含量呈正相关, 整条曲线比较平滑, 相关系数介于  $0.4 \sim 0.65$  之间, 并与  $R$  和  $\ln R$  的相关系数绝对值变化趋势基本一致。其余变换形式与有机碳的相关系数变化起伏较大, 处于正负值之间波动, 某些特定波段 ( $400 \sim 500$  nm、 $800 \sim 900$  nm) 与原始光谱  $R$  的相关系数相比相关性有所增强。总体上, 不同变换形式的光谱指数均与土壤有机碳含量在部分波段达到较好的相关性。在所有的变换形式中, 反射率的归一化比值指数 ( $R/R_{M(450-750)}$ ) 与 SOC 相关性最好。与原始光谱反射率相比, 在可见光范围内与 SOC 的相关系数显著提高, 其中  $400 \sim 500$  nm 和  $600 \sim 700$  nm 波段范围是整个波段中相关性最好的波段范围, 最敏感

的波段出现在  $644$  nm 处, 相关系数达  $-0.90$  ( $P < 0.01$ ), 在近红外区也有部分敏感波段出现 (图 5 和表 2)。由表 2 可知, 不同光谱变换指数与有机碳含量的最大和最小相关系数表现如下: 原始光谱  $R$  与有机碳的最小负相关波段出现在  $684$  nm 处, 相关系数为  $-0.63$ 。  $R'$  与有机碳的最大正相关波段出现在  $880$  nm 处, 相关系数为  $0.70$ ; 最小负相关波段出现在  $622$  nm 处, 相关系数为  $-0.75$ 。  $R''$  与有机碳的最大正相关波段和最小负相关波段分别出现在  $990$  nm 和  $451$  nm 处, 相关系数分别为  $0.75$  和  $-0.68$ 。  $\ln R$  与有机碳的最小负相关波段出现位置与  $R$  相同, 为  $684$  nm 处, 相关系数为  $-0.65$ 。  $(\ln R)'$  与有机碳的最大正相关波段出现在  $880$  nm 处, 相关系数为  $0.75$ ; 最小负相关波段出现在  $878$  nm 处, 相关系数为  $-0.65$ 。  $1/R$  与有机碳的最大正相关波段出现位置在  $684$  nm 处, 相关系数为  $0.65$ 。  $(1/R)'$  与有机碳的最大正相关波段和最小负相关波段分别出现在  $989$  nm 和  $880$  nm 处, 相关系数分别为  $0.63$  和  $-0.78$ 。 归一化比值指数 ( $R/R_{M(450-750)}$ ) 与 SOC 相关性最好, 最大正相关波段和最小负相关波段分别出现在  $451$  nm 和  $644$  nm 处, 相关系数分别为  $0.80$  和  $-0.90$ 。 归一化比值指数的一阶导数  $(R/R_{M(450-750)})'$  与 SOC 的最大正相关波段和最小负相关波段分别出现在  $880$  nm 和  $452$  nm 处, 相关系数分别为  $0.75$  和  $-0.65$ 。

由此可见, 对原始光谱反射率进行不同变换形式处理之后, 其与土壤有机碳相关性得到了明显增强。说明变换处理后可以原本湮没在原始土壤光谱数据中的一些微弱有机碳光谱吸收特征信息被释放出来。

## 2.3 土壤有机碳模型的建立与验证

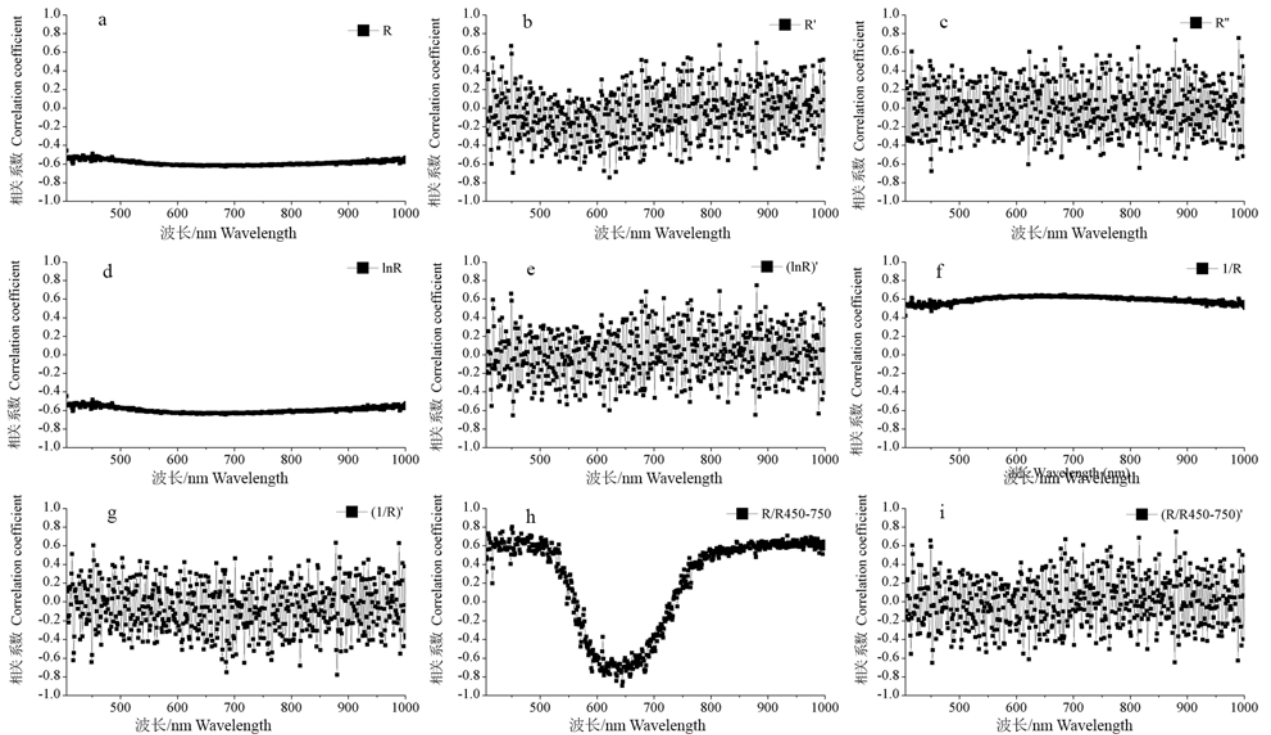
### 2.3.1 基于多元线性逐步回归的土壤有机碳预测模型的构建

通过相关分析发现, 光谱归一化比值指数变换形式 ( $R/R_{M(450-750)}$ ) 与土壤有机碳相关性最好, 为了建立土壤有机碳高光谱预测最优模型, 结合与土壤有机碳最相关光谱指标分析, 通过光谱归一化比值指数和相关分析初步筛选了 43 个土壤有机碳 SOC 的敏感波段, 分别为:  $409$ 、 $410$ 、 $430$ 、 $434$ 、 $450$ 、 $451$ 、 $452$ 、 $467$ 、 $482$ 、 $483$ 、 $485$ 、 $590$ 、 $591$ 、 $605$ 、 $606$ 、 $607$ 、 $612$ 、 $613$ 、 $614$ 、 $615$ 、 $619$ 、 $620$ 、 $623$ 、 $633$ 、 $634$ 、 $635$ 、 $637$ 、 $638$ 、 $641$ 、 $642$ 、 $643$ 、 $644$ 、 $645$ 、 $651$ 、 $656$ 、 $657$ 、 $658$ 、 $659$ 、 $663$ 、 $683$ 、 $684$ 、 $685$  和  $934$  nm (变量形式为  $R/R_{M(450-750)}$ )。逐步回归分析是多元线性回归模型中选择回归变量的一种常用的数学方法, 它表明事物之间相互依赖、相互制约的关系, 主要用于分析单个因变量是如何

受一个或多个自变量影响<sup>[19]</sup>。由于反射率的归一化比值指数与 SOC 的相关性最好,因此将该筛选出的 43 个敏感波长位置的归一化比值指数值 ( $R/R_{M(450-750)}$ ) 作为自变量,而 SOC 为因变量,通过多元逐步回归分析,获取模型最优预测波段。逐步回归结果显示,最终对模型的贡献达到显著水平而被留在模型中的只有  $R_{606}/R_{M(450-750)}$ ,  $R_{637}/R_{M(450-750)}$  和  $R_{644}/R_{M(450-750)}$ ,即位于 606、637 和 644 nm 波段处的归一化比值指数是模型的最优参数。逐

步回归最终结果如表 3 所示。经过对逐步回归建立的方程进行方差分析 (ANOVA),达到  $P<0.01$  的极显著水平。由此可见,无论是回归方程还是方程中的各回归系数,均达到了显著的回归效果,说明方程是有效的,可作为砂姜黑土土壤有机碳 (SOC) 的高光谱预测模型 (见式 (4))。利用归一化比值指数来预测土壤有机碳含量 (%) 的最终模型确定为:

$$SOC_{\text{content}}=22.58-37.98R_{644}/R_{M(450-750)}+22.74R_{637}/R_{M(450-750)}-4.33R_{606}/R_{M(450-750)} \quad (R^2=0.97, P<0.05) \quad (4)$$



a: SOC 与 R 的相关系数; b: SOC 与 R' 的相关系数; c: SOC 与 R'' 的相关系数; d: SOC 与 lnR 的相关系数; e: SOC 与 (lnR)' 的相关系数; f: SOC 与 1/R 的相关系数; g: SOC 与 (1/R)' 的相关系数; h: SOC 与 R/R450-750 的相关系数; i: SOC 与 (R/R450-750)' 的相关系数  
a, b, c, d, e, f, g, h and i represent the correlation coefficient of SOC between R, R', R'', ln, (lnR)', 1/R, (1/R)', R/R<sub>450-750</sub> and (R/R<sub>450-750</sub>)', respectively

图 5 砂姜黑土 SOC 含量与光谱反射率及其变换形式的相关分析

Figure 5 Correlation analysis of soil organic carbon content of Shajiang black soil and original reflectance and its different transformation forms

表 2 不同光谱指标与 SOC 的最大相关波段分析结果

Table 2 Correlation analysis between SOC and different spectral indexes

| 光谱指标<br>Spectral indexes | 最大正相关 Maximum positive correlation |                   |                          | 最小负相关 Minimum negative correlation |                   |                          |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------|
|                          | 波段/nm<br>wavelength                | 系数<br>Coefficient | 显著水平<br>Confidence level | 波段/nm<br>Wavelength                | 系数<br>Coefficient | 显著水平<br>Confidence level |
| R                        | -                                  | -                 | -                        | 684                                | -0.63             | *                        |
| R'                       | 880                                | 0.70              | **                       | 622                                | -0.75             | **                       |
| R''                      | 990                                | 0.75              | **                       | 451                                | -0.68             | *                        |
| lnR                      | -                                  | -                 | -                        | 684                                | -0.65             | *                        |
| (lnR)'                   | 880                                | 0.75              | **                       | 878                                | -0.65             | *                        |
| 1/R                      | 684                                | 0.65              | *                        | -                                  | -                 | -                        |
| (1/R)'                   | 989                                | 0.63              | *                        | 880                                | -0.78             | **                       |
| $R/R_{M(450-750)}$       | 451                                | 0.80              | **                       | 644                                | -0.90             | **                       |
| $(R/R_{M(450-750)})'$    | 880                                | 0.75              | **                       | 452                                | -0.65             | *                        |

表 3 土壤有机碳含量 (SOC) 与其反射率的归一化比值指数 ( $R/R_{M(450-750)}$ ) 逐步回归结果  
Table 3 Results from stepwise regression for soil organic carbon content and normalized ratio index of reflectance

| 参数<br>Parameters         | 回归系数<br>Regression coefficient | 标准系数<br>Standardized regression coefficients | P 值<br>P value |
|--------------------------|--------------------------------|--|----------------|
| 常数 Constant              | 22.58                          | -  | $P < 0.001$    |
| $R_{644}/R_{M(450-750)}$ | -37.98                         | -1.85  | $P < 0.001$    |
| $R_{637}/R_{M(450-750)}$ | 22.74                          | 1.18   | $P < 0.001$    |
| $R_{606}/R_{M(450-750)}$ | -4.33                          | -0.20  | $P < 0.05$     |

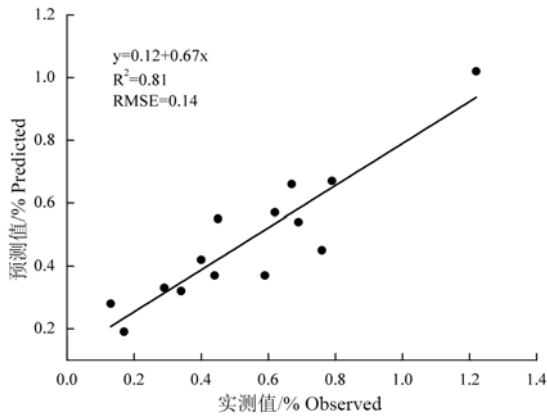


图 6 砂姜黑土土壤有机碳含量模型预测值与实测值比较  
Figure 6 Comparisons of predicted and observed values of soil organic carbon (SOC) developed with the prediction model of Shajiang black soil

**2.3.2 模型的预测效果评价** 利用 14 个验证样本对模型的预测效果进行验证。采用模型预测值与实测值之间的拟合度  $R^2$  和总均方根差 (RMSE) 法来分析。图 6 显示的是实测值与模型预测值之间的对比关系, 可知砂姜黑土土壤有机碳的模型预测值与其实测值之间具有较好的相关性。该高光谱有机碳预测模型的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.81, 总均方根差 (RMSE) 为 0.14。表明该模型具有较强的稳定性, 具备较好的预测能力和预测质量。由此可见, 对于砂姜黑土类型, 土壤有机碳含量与归一化比值指数的线性回归模型是比较可靠的, 且具有较小的误差和较好的预测效果的特点。

### 3 讨论

土壤有机碳直接影响到土壤肥力的大小, 是衡量土壤质量和肥力的重要特征性指标。土壤反射光谱特征与土壤的物理性质有着密切的关系, 土壤有机碳含量影响到光谱的吸收特征。国内外已有土壤有机碳光谱反演敏感波段挑选和有机碳预测模型的研究报道<sup>[9-10, 12, 20]</sup>, 但大量的研究集中于室内可控条件下获取的可见-近红外波段光谱数据。虽然室内条件下测定土壤的光谱属性对于保证数据稳定性和提高预测精度具有重要作用, 但由于室内土壤光谱获取

过程尚无统一的方法, 测试过程中的条件, 如光源功率、距离和照射角度等的差异, 增加了光谱测定数据的不确定性, 从而限制了土壤属性光谱预测定量研究<sup>[17, 21]</sup>。大量研究表明, 土壤有机碳影响光谱的差异特征敏感波段主要位于可见光部分<sup>[22-24]</sup>。本研究在野外条件下, 在土壤预处理的基础上, 利用自然土壤反射光谱, 结合相关数理统计手段, 充分挖掘响应敏感波段, 研究结果显示砂姜黑土有机碳响应最敏感波段处在 694 nm 处, 证实了土壤有机碳含量反演的光谱敏感波段位于可见光区, 这与前人研究表明可见光波段光谱对土壤有机碳含量的估算精度要高于近红外波段的结果基本一致<sup>[9-10, 15-16]</sup>。本研究中可见光区域的有机碳重要建模波段与前人研究认为的 520~535 和 560~800 nm 波段范围相类似<sup>[25-27]</sup>。

由于土壤理化性质以及测试环境变动会对土壤反射光谱产生影响<sup>[28]</sup>, 而对土壤样本进行风干、研磨和过筛等处理, 可部分消除非有机碳特性对土壤光谱的影响。导数变换处理可以去除部分线性或接近线性的背景值干扰<sup>[29]</sup>, 有助于降低低频噪声对光谱的影响, 突显细微信息差异的变化, 而土壤有机碳信息的敏感波段多数集中在 600~800 nm 波段范围内<sup>[9]</sup>。贺军亮等<sup>[28]</sup>研究表明, 对土壤原始光谱数据进行变换处理, 尤其是采用能量透射率较高的 450~750 nm 可见光波段反射率均值  $R_{M(450-750)}$  对原始反射率  $R$  进行标准化比值处理, 可明显降低环境因素对光谱的影响, 并明显地提高反演模型的精度。本研究结果表明光谱数据归一化比值处理可以明显增强与土壤有机碳之间的相关性, 相较于原始光谱和其他光谱转换形式, 明显地突出了有机碳光谱敏感特征响应波段, 这与贺军亮等<sup>[28]</sup>采用可见光波段反射率均值获得的有机质诊断指数 (OII) 可提高土壤有机质含量的估算精度结果基本一致。本研究中对原始光谱数据进行变换处理, 尤其是采用以有机碳响应敏感波段范围均值作标准化比值处理获得归一化比值指数, 在此基础上进一步获取特征波段归一化比值指数取代原始敏感波段反射率, 增强



了反射率能量,获得相关性最为敏感的波段,可明显降低非有机碳等环境因素对光谱的影响,建立反演土壤有机碳含量的预测模型,并大大提高了预测模型的精度和稳定性。

基于有机碳特征性敏感波段的归一化比值指数建立的土壤有机碳含量的预测模型取得了较好的精度和模型稳定性。由于土壤反射光谱特征的影响因素较多,如何进一步消除其他因素的综合影响,同时结合光谱获取的便捷性和稳定性,进一步提高有机碳高光谱模型的预测能力,有待于进一步的研究。此外,本研究以淮北平原广泛分布的砂姜黑土为供试样本,基于自然光谱所建立的估测模型是否适用其他土壤类型,尚待于进一步研究与验证。区域土壤有机碳含量定量反演模型,可为建立基于野外实地土壤有机碳含量高光谱预测模型提供理论基础,也可作为宏观尺度的航空、航天遥感影像的大范围应用提供所需的反演基础数据和参考。

#### 4 结论

土壤有机碳的高光谱响应特征研究为土壤肥力的快速监测提供了新的方法。基于有机碳光谱响应敏感波段分析,采用不同光谱处理方法,重点突出了有机碳响应特征性差异和敏感波段,运用去包络线和波段深度处理,突显了有机碳特征吸收范围,基于相关分析和逐步回归方法构建了砂姜黑土土壤有机碳含量的高光谱预测模型,并对模型进行了精度检验,明确了可见光范围的归一化比值指数可以作为反演有机碳模型的最佳形式,基于特征波段的归一化比值指数构建的反演模型具有较好的预测精度。具体结论如下:

(1) 550~750 nm 波段范围是典型砂姜黑土有机碳的主要光谱响应区域,有机碳含量越高,反射率越低,下凹程度越大。波段深度凸显了有机碳典型响应波段的光谱曲线,放大了光谱特性。去包络线和波段深度处理可以有效突出土壤有机碳光谱吸收特征,凸显光谱异质性。在 550~750 nm 特征吸收波段范围内,有机碳含量较高的土壤光谱吸收值要明显高于较低有机碳含量的吸收值,总体上表现出,随着有机碳含量的降低,吸收值依次呈现下降的趋势。

(2) 通过导数、倒数、对数和归一化比值等方法进行变换,降低非有机碳含量变化而引起的响应特征的影响,结果显示对原始光谱反射率进行不同变换形式处理之后,其与土壤有机碳的相关性得到了明显的增强。其中归一化比值指数 ( $R/R_{M(450-750)}$ )

的转换形式与土壤有机碳相关性最好,更能凸显与有机碳敏感波段的相关性,相关系数最大值和最小值分别出现在 451 nm 和 644 nm 处,分别高达 0.80 和 -0.90。600~700 nm 波段范围是整个波段中相关性最好的波段范围,最敏感的波段出现在 644 nm 处,相关系数达 -0.90 ( $P < 0.01$ )。

(3) 通过相关分析与逐步回归分析方法,确定了 606 nm、637 nm 和 644 nm 波段处的归一化比值指数为诊断土壤有机碳含量的最佳敏感波段,采用位于 606 nm、637 nm 和 644 nm 波段处的归一化比值指数 ( $R_{606}/R_{M(450-750)}$ ,  $R_{637}/R_{M(450-750)}$  和  $R_{644}/R_{M(450-750)}$ ) 作为自变量,建立了砂姜黑土有机碳含量高光谱反演模型,其模型为  $SOC_{\text{content}} = 22.58 - 37.98 R_{644}/R_{M(450-750)} + 22.74 R_{637}/R_{M(450-750)} - 4.33 R_{606}/R_{M(450-750)}$ 。该模型具有简单和变量少的特点,在预测土壤有机碳方面展现了较好的稳定性和预测精度。

#### 参考文献:

- [1] STEVENS A, WESEMAEL B, BARTHOLOMEUS H, et al. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils[J]. Geoderma, 2008, 144(1/2): 395-404.
- [2] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] LIU L W. Formation and evolution of vertisols in the Huaibei Plain[J]. Pedosphere, 1991, 1(1): 3-15.
- [4] 马丽, 张民. 砂姜黑土的发生过程与成土特征[J]. 土壤通报, 1993, 24(1): 1-4.
- [5] 李德成, 张甘霖, 龚子同, 等. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 623-629.
- [6] 刘焕军, 张柏, 赵军, 等. 黑土有机质含量高光谱模型研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 27-32.
- [7] BEN-DOR E, BANIN A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59(2): 364-372.
- [8] TIAN Y, ZHANG J, YAO X, et al. Laboratory assessment of three quantitative methods for estimating the organic matter content of soils in China based on visible/near-infrared reflectance spectra[J]. Geoderma, 2013, 202/203(7): 161-170.
- [9] KRISHNAN P, ALEXANDER J D, BUTLER B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 1282-1285.
- [10] GALVÃO L S, VITORELLO Í. Variability of laboratory measured soil lines of soils from southeastern Brazil[J]. Remote Sens Environ, 1998, 63: 166-181.
- [11] VISCARRA ROSSEL R A, HICKS W S. Soil organic carbon and its fractions estimated by visible-near infrared transfer functions[J]. Eur J Soil Sci, 2015, 66(3): 438-450.



- [12] CAMBOU A, CARDINAEL R, KOUAKOUA E, et al. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field[J]. *Geoderma*, 2016, 261(2):151-159.
- [13] 卢艳丽, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于高光谱的土壤有机质含量预测模型的建立与评价[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1989-1995.
- [14] 于雷, 洪永胜, 耿雷, 等. 基于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 103-109.
- [15] 谢伯承, 薛绪掌, 王纪华, 等. 褐潮土的光谱特性及用土壤反射率估算有机质含量的研究[J]. *土壤通报*, 2004, 35(4): 391-395.
- [16] 谢伯承, 薛绪掌, 刘伟东, 等. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 171-175.
- [17] 刘焕军, 张新乐, 郑树峰, 等. 黑土有机质含量野外高光谱预测模型[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 3355-3358.
- [18] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 等. 土壤有机质及其研究方法综述[J]. *世界科技研究与发展*, 2005, 27(5): 72-78.
- [19] 周萍, 王润生, 阎柏琨, 等. 高光谱遥感土壤有机质信息提取研究[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(5):27-34.
- [20] HENDERSON T L, BAUMGARDNER M F, FRANZMEIER D P, et al. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56(3): 865-872.
- [21] 刘静, 周清, 唐琨, 等. 土壤有机质的光谱反射特性研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2009(2):67-70.
- [22] NOCITA M, KOOISTRA L, BACHMANN M, et al. Predictions of soil surface and topsoil organic carbon content through the use of laboratory and field spectroscopy in the Albany Thicket Biome of Eastern Cape Province of South Africa[J]. *Geoderma*, 2011, 167: 295-302.
- [23] BARTHOLOMEUS H M, SCHAEPMAN M E, KOOISTRA L, et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification[J]. *Geoderma*, 2008, 145(1): 28-36.
- [24] LIU H, ZHANG Y, ZHANG B. Novel hyperspectral reflectance models for estimating black-soil organic matter in Northeast China[J]. *Environ Monit Assess*, 2009, 154(1): 147-154.
- [25] VOHLAND M, LUDWIG M, THIELE-BRUHN S, et al. Determination of soil properties with visible to near-and mid-infrared spectroscopy: Effects of spectral variable selection[J]. *Geoderma*, 2014, 223: 88-96.
- [26] NGUYEN T T, JANIK L J, RAUPACH M. Diffuse reflectance infrared fourier transform (DRIFT) spectroscopy in soil studies[J]. *Soil Res*, 1991, 29(1): 49-67.
- [27] 陈颂超, 彭杰, 纪文君, 等. 水稻土可见-近红外-中红外光谱特性与有机质预测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1712-1716.
- [28] 贺军亮, 蒋建军, 周生路, 等. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 638-643.
- [29] 周清, 周斌, 张杨珠, 等. 成土母质对水稻土高光谱特性及其有机质含量光谱参数模型影响的初步研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41( 6): 905-911.