

单海斌, 蒋平安, 颜安, 等. 基于高光谱数据的北疆绿洲农田灰漠土有机质反演[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 276-282.

SHAN Hai-bin, JIANG Ping-an, YAN An, et al. Inversion of Organic Matter Content in Grey Desert Soil of Northern Xinjiang Oasis Farmland Based on Hyper-spectral Data[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 276-282.

基于高光谱数据的北疆绿洲农田灰漠土有机质反演

单海斌¹, 蒋平安^{1,2}, 颜安^{1,2*}, 朱磊^{1,2}, 郭星¹

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为了探寻快速、准确估测土壤有机质含量的方法以推动精准农业化进程,以北疆绿洲农田灰漠土为研究对象,通过野外实地调查收集土壤样品,室内化学分析测得土壤样品有机质含量,暗室内利用 SVC HR-768 高光谱仪测定土壤样品光谱反射率。通过对土壤光谱反射率进行倒数、对数、一阶微分、倒数的一阶微分、对数的一阶微分变换,运用单相关分析法提取土壤光谱特征波段,采用多元逐步方法对土壤有机质含量定量反演,分析研究土壤有机质含量和室内土壤光谱的特征关系。结果表明,在波长 567、1 697 nm 和 2 221 nm 处,采用反射率对数的一阶微分建立的土壤有机质含量反演模型预测精度最高,模型决定系数达到 0.82。北疆绿洲农田灰漠土土壤有机质含量高光谱反演模型的建立为土壤有机质的快速测定提供了新的途径。

关键词:高光谱;土壤有机质;反演;模型;北疆

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2018)03-0276-07 doi: 10.13254/j.jare.2017.0256

Inversion of Organic Matter Content in Grey Desert Soil of Northern Xinjiang Oasis Farmland Based on Hyper-spectral Data

SHAN Hai-bin¹, JIANG Ping-an^{1,2}, YAN An^{1,2*}, ZHU Lei^{1,2}, GUO Xing¹

(1.College of Grassland and Environment Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.Xinjiang Key Lab of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China)

Abstract: This study aimed to explore a rapid and accurate method for estimating soil organic matter content and promote the process of precision agriculture. In this study, forty-six soil samples were collected from the Northern Xinjiang Oasis farmland in China. The soil organic matter of these samples was determined in laboratory. Meanwhile, the spectral reflectance of samples was measured at the indoor dark environment by the SVC HR-768 hyper-spectral spectrometer. The spectral reflectance data was transformed to several spectral indices to analyze the relationship with soil organic matter content and extract sensitive bands with correlation analysis. Quantitative inversion model of soil organic matter content was carried out by using the stepwise multiple linear regression. The results indicated that the inversion model was the best when using spectral reflectance logarithm of the first derivate for estimation at bands of 567, 1 697 nm and 2 221 nm. The coefficient of determination was 0.82. The hyper-spectral inversion model of grey desert soil organic matter content of Northern Xinjiang Oasis farmland provides a new approach for rapid soil organic matter monitoring.

Keywords: hyper-spectral; soil organic matter; inversion; model; Northern Xinjiang

土壤有机质是土壤的重要组成部分,是衡量土壤肥力高低的重要指标^[1]。快速、准确地估测土壤中有机质含量对了解土壤肥力状况、提高作物产量具有重要

意义^[2-3]。传统的土壤有机质含量测定方法主要是通过野外采集土样、实验室内化学分析方法测定。此种方法虽然精度高,但费时、费力,且为点状信息数据,不能及时监测土壤中有机质含量,难以满足现代农业快速发展的要求^[4]。通过分析土壤高光谱遥感数据与土壤有机质含量,可知土壤有机质和土壤光谱反射率存在定量关系,因此利用高光谱遥感数据可以快速、有效地动态监测一定区域土壤有机质含量^[5]。

收稿日期:2017-10-24 录用日期:2017-12-28

基金项目:新疆自治区重点研发计划项目(2016B063041-1);农业部“引进国际先进农业科学技术”项目(2016-X44)

作者简介:单海斌(1989—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事数字化农业方面的研究。E-mail: cwbb0408@163.com

*通信作者:颜安 E-mail: yanana@xjau.edu.cn

高光谱遥感测定土壤有机质含量的方法主要是利用土壤高光谱曲线随土壤有机质含量高低的变化规律进行定量反演^[6]。前人已经开展了利用可见光-近红外光谱技术估测土壤有机质含量方面的大量工作,有机质含量可以从土壤反射光谱中得到一定程度的反映^{[7,66-70][8-9]}。Galvao等^[10]研究证实土壤反射光谱的有机质敏感波段主要集中在550~700 nm波段。Krishnan等^[11]研究发现土壤反射光谱可见光波段与有机质含量相关性较强,近红外区域与有机质含量相关性相对较弱。Lin等^[12]研究发现土壤有机质吸收光谱波段主要集中在400~1 006 nm。Gunsaulis等^[13]研究发现,土壤有机质敏感波段主要集中在红波段。徐彬彬等^[14]认为有机质影响较大的波段为600~800 nm范围内。谢伯承等^[15]研究发现,在400~1 200 nm波段范围内土壤有机质含量与土壤光谱反射率有较强的相关性。张娟娟等^[16]对潮土和水稻土研究发现,土壤有机质和土壤原始光谱曲线在685 nm处相关性最强。刘焕军等^[17]研究东北黑土,认为有机质含量高光谱多元线性逐步回归估测模型精度较高、稳定性好,可用于黑土有机质含量的速测。

以往学者多针对不同土壤类型,进行高光谱估测土壤有机质含量的研究,但土壤的光谱反射率是土壤内在理化特性的综合反映,不同土壤类型具有不同的理化性质,因此其光谱特征也有所差异^[8]。由于不同土壤类型的土壤有机质反演模型不具有普遍适用性。因此,通过研究不同土壤类型的光谱特征反演得到有机质含量估测模型,在估测某一种特定土壤类型有机质时,会出现一定的偏差^[16]。灰漠土是北疆绿洲农田典型的土壤类型之一,有机质质量分数大多低于2%,有机质对光谱反射率的吸收大幅减弱^[19]。因此利用高光谱估算灰漠土土壤存在一定的难度,针对灰漠土土壤高光谱反演有机质含量的研究较少^[20]。本文针对北疆绿洲农田灰漠土土壤类型,明确土壤有机质含量与土壤光谱反射率及其不同变换形式的特征关系,建立灰漠土土壤有机质含量的高光谱估测模型,为快速估测北疆绿洲农田灰漠土土壤有机质含量提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆克拉玛依市乌尔禾区境内(北纬46°5'56"~46°7'47",东经85°38'11"~85°41'59"),该区域属于典型大陆性北温带干旱气候区,干旱少雨,年平均气温8.4℃,年平均降水量96.4 mm,土壤类型主

要是灰漠土。

1.2 土壤样本采集与处理

本研究于2017年4月1—3日在乌尔禾镇境内进行野外采样,共采集46个农田耕层(0~20 cm)土样,实验室内自然风干,研磨,过0.5 mm筛,风干含水率为2%左右。实验室内土壤有机质含量测定利用重铬酸钾氧化-外加热法。采用四分法取样,一式两份,一份用于实验室内有机质含量测定,一份用于土壤光谱测定。70%的样点数据(31个样点)用于建立模型,30%(15个样点)用于模型验证。分析结果显示,有机质含量最大值是22.94 g·kg⁻¹,最小值是6.25 g·kg⁻¹,平均值是13.29 g·kg⁻¹,标准差4.38 g·kg⁻¹,变异系数为33%。46个样本中超过90%的样本有机质质量分数小于2%。

1.3 光谱测定

土壤光谱反射率测定采用美国SVC HR-768便携式光谱仪,波段范围在350~2 500 nm,通道数768,光谱分辨率在350~1 000 nm范围内≤3.5 nm,在1 000~1 500 nm和1 500~2 500 nm范围≤16 nm,最小积分时间1 ms。在可控光源的暗室内进行光谱测定。采用25°视场角探头和50 W标准光源,将土壤样品放置于直径12 cm、深2 cm的黑色盛样皿中,探头距土壤样本表面10 cm,光源距离样本60 cm^[7,20-21]。测定之前先去辐射强度中暗电流的影响,然后进行白板测定,每个土壤样本测定10条光谱反射曲线,去除异常曲线,算术平均后作为该土样的光谱反射率值^[21]。

1.4 光谱预处理

利用SVC HR-768光谱仪配套软件对光谱原始数据进行处理,去除重叠部分。用九点加权移动平均法对光谱曲线进行平滑去噪处理。为提高有机质对光谱的敏感程度,消除或减弱无关噪声的影响,对原始光谱反射率进行倒数、对数、一阶微分、倒数的一阶微分、对数的一阶微分的变换,用于建立模型^[22]。

1.5 估测模型的建立与检验

运用SPSS 20.0软件,建立多元逐步回归方程。采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)来评估模型的有效性。利用15个验证样本对估测模型进行检验,决定系数越大,均方根误差越小,模型精度越高。

2 结果与分析

2.1 土壤光谱特征分析

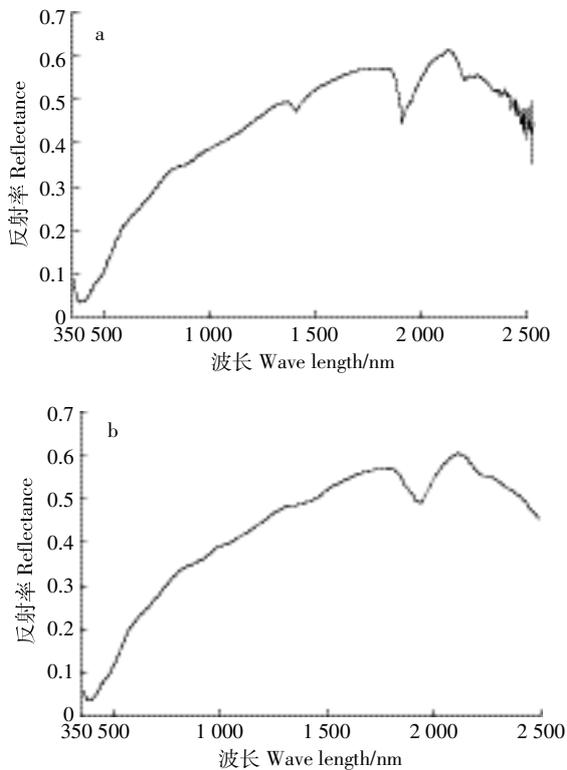
由于高光谱仪在不同光谱波段之间存在能量响应的差异性,采集的光谱反射率曲线存在高频噪声,

表现为光谱反射率曲线出现细小毛刺，因此需要对光谱反射率曲线进行平滑处理。利用光谱仪配套软件去除重叠部分，再用九点加权平均移动法使光谱曲线趋于平滑(图 1)。从图 1 中可以看出，在可见光和近红外波段，反射率斜率较大，光谱反射率变化较快；除在 1 400、1 900、2 200 nm 附近存在水分吸收峰，土壤光谱曲线整体表现平滑，并无较大波动。

前人相关研究表明，土壤有机质对光谱具有一定的吸收作用，具体表现为降低土壤光谱反射率。本研究中土壤有机质含量>10.98 g·kg⁻¹时，随着有机质含量的增加，反射率在可见光波段呈下降趋势，土壤光谱反射率与有机质含量呈负相关。图 2 为土壤不同有机质含量的光谱特征曲线。由图 2 分析可知，在 800~2 400 nm 范围内当有机质含量<10.98 g·kg⁻¹时，土壤光谱反射率与有机质含量呈正相关。

2.2 土壤有机质含量与光谱相关性分析

将土壤有机质含量与光谱反射率 R 、倒数 $1/R$ 、对数 $\lg R$ 、一阶微分 R' 、二阶微分 R'' 、倒数的一阶微分 $(1/R)'$ 、对数的一阶微分 $(\lg R)'$ 做相关性分析图 3



a.重叠去除后的反射率 b.九点加权平均移动后的反射率
a.The reflectance after the overlap is removed
b.The reflectivity of the average after 9-weighted moving average

图 1 室内土壤光谱反射率去噪平滑

Figure 1 Soil spectral reflectance smoothing

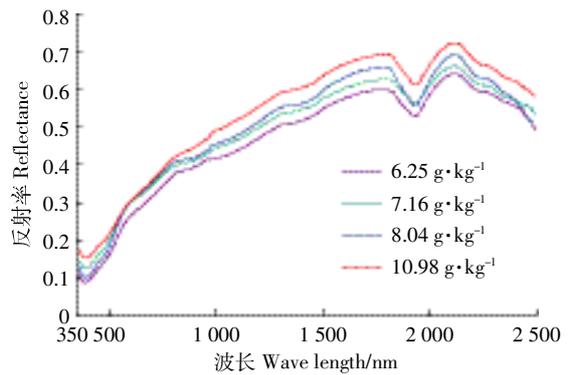


图 2 不同土壤有机质含量的光谱特征

Figure 2 The spectral characteristics of different soil organic matter contents

所示，寻找土壤有机质敏感光谱波段进行土壤有机质含量反演。相关系数公式为：

$$r_i = \frac{\sum_{n=1}^N (x_{ni} - \bar{x}_i)(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_{ni} - \bar{x}_i)^2 \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2}}$$

式中： r_i 为土壤有机质含量与光谱反射率 R 的相关系数； i 为波段序号； x_{ni} 为第 n 个土壤样本第 i 波段的光谱反射率值； \bar{x}_i 为 N 个土壤样本在 i 波段光谱反射率的平均值； y_n 为第 n 个土壤样本的有机质含量； \bar{y} 为 N 个土壤样本有机质含量的实测平均值； N 为土壤样本总数。

由图 3 可知，原始反射率、反射率的倒数和反射率的对数与土壤光谱反射率呈单一相关性，并且相关系数曲线变化趋势较为平缓。原始反射率和反射率的对数与土壤光谱反射率呈单一正相关，反射率的倒数与土壤光谱反射率呈单一负相关。反射率的一阶微分、反射率倒数的一阶微分和反射率对数的一阶微分与土壤光谱反射率的相关系数曲线呈现上下波动，并不是单一相关性，但是相关系数波动剧烈的光谱波段范围基本相同。根据光谱反射率曲线特征划分波段范围，选择特征波段范围内相关系数最大的波段为敏感波段。以 0.01 水平上显著相关性判断：原始曲线的敏感波段在 444、801、1 086 nm 和 1 290 nm 附近；一阶微分变换后的曲线的敏感波段在 385、871、1 719 nm 和 2 304 nm 附近；倒数变换后的曲线的敏感波段在 420、540、911 nm 和 1 086 nm 附近；对数变换后的曲线的敏感波段在 455、506、1 922 nm 和 2 380 nm 附近；倒数的一阶微分变换后的曲线的敏感波段在 563、1 266、1 675 nm 和 1 872 nm 附近；对数的一阶微分变换后的曲线的敏感波段在 567、866、1 697 nm 和

2 221 nm 附近(表 1)。

2.3 土壤有机质含量高光谱反演模型的建立

利用选取的原始光谱反射率及其变换形式的敏感波段作为自变量,样本的实测值作为因变量,选择变量方差贡献水平 0.05 作为入选和剔除变量标准,建立逐步回归方程,选择每种变换形式决定系数较大、均方根误差较小的方程,作为最终每种变换形式的土壤有机质含量最佳反演模型,见表 2。由于一元线性回归模型的精度较差,决定系数普遍较低,不能准确、有效估算土壤有机质含量,不在此展示及验证。由表 2 可知,6 种模型中,原始反射率、倒数和对数的模型中决定系数较低,经过一阶微分变换后的模型,决定系数显著提高。反射率的一阶微分、对数的一阶微分所建立的多元回归方程的决定系数分别达到 0.87 和 0.86,比原始反射率所建立的回归方程的决定系数分别提高 0.37 和 0.36。

2.4 模型估测效果评价

为检验模型的估测效果和稳定性,利用随机选取

建模样本剩余后的 15 个验证样本进行土壤有机质含量实测值与估测值的对比验证,由于倒数、对数的反演模型精度较差,不能有效、准确地估测土壤有机质含量,不在此展示,其他对比拟合如图 4 所示。模型稳定性用估测值与实测值之间的决定系数和均方根误差来检验,决定系数越大,均方根误差越小,表明模型的拟合效果越好。反演模型均通过显著性水平 0.05 的 F 值检验。经过一阶微分变换后得到的 3 个模型明显优于未经一阶微分变换的 3 个模型,决定系数均出现不同程度的提高,原因可能是光谱反射率在经过一阶微分变换后,能够降低噪声影响敏感度,消除其他背景的干扰^[23]。其中,对数的一阶微分方程表现最优,决定系数达到 0.82。

3 讨论

高光谱传感器技术在反演土壤养分含量上得到广泛应用,但由于不同的土壤类型有不同的理化性质,因此其光谱特性也有所差异。彭杰等^[24]研究新疆南部 4 种主要土壤类型的高光谱特征,发现反射率在

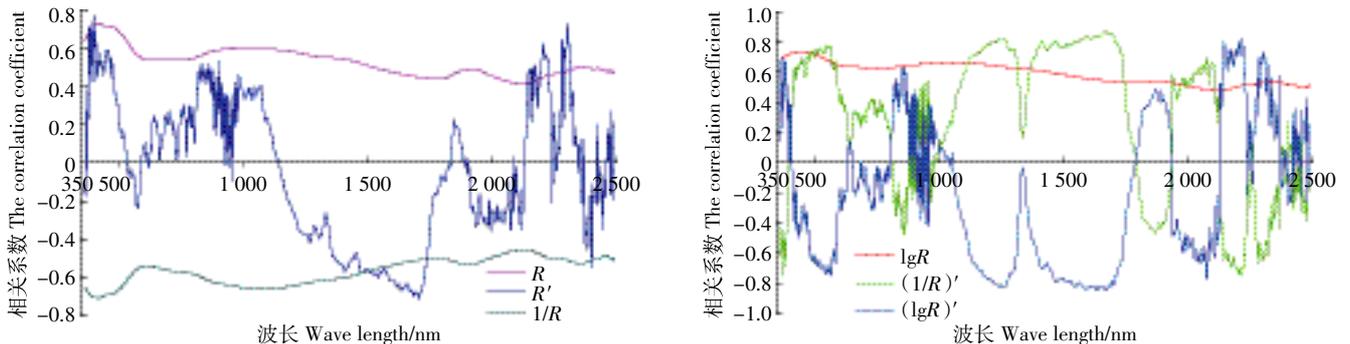


图 3 反射率的不同变换形式与土壤有机质含量的相关系数

Figure 3 The correlation coefficients of different forms of reflectance and soil organic matter content

表 1 反射率不同变换形式的有机质特征波段位置和相关系数

Table 1 The position and correlation coefficients of organic matter features in different forms of reflectivity

光谱变量 Spectral variables	光谱波段 Spectral band/nm	相关系数 Correlation coefficient	光谱变量 Spectral variables	光谱波段 Spectral band/nm	相关系数 Correlation coefficient
R	444	0.729	lgR	455	0.728
	801	0.654		506	0.715
	1 086	0.514		1 922	0.536
	1 290	0.526		2 380	0.528
R'	385	0.713	$(1/R)'$	563	0.775
	871	0.485		1 266	0.813
	1 719	-0.707		1 675	0.865
	2 304	0.727		1 872	-0.476
$1/R$	420	0.708	$(lgR)'$	567	-0.737
	540	0.544		866	0.598
	911	-0.655		1 697	-0.785
	1 086	-0.525		2 221	0.828

600.5 nm 和反射率的一阶微分在 539.2 nm 处建立的估测模型精度较高, 决定系数分别达到 0.72 和 0.87。侯艳军等^[25]以荒漠土壤作为研究对象, 认为有机质质量分数低于 2% 的土壤在 640~790 nm 波段比较敏感。卢艳丽等^[26]研究东北地区黑土的光谱特征, 发现土壤有机质含量与原始光谱反射率在 580~738 nm 范围内呈极显著负相关, 与一阶微分光谱在 481~598 nm 范围内呈极显著负相关。本研究结果表明, 在波段 567、1 697、2 221 nm 附近, 原始反射率对数一阶微分的相关性较好, 能够较好地估测土壤有机质含量。

以往研究表明, 土壤光谱反射率与有机质含量呈负相关^[9]。本研究当中有机质含量 < 10.98 g·kg⁻¹ 时, 土

壤光谱反射率与有机质含量呈正相关, 与范燕敏等^[27]研究土壤有机质含量 < 8 g·kg⁻¹ 的石膏灰棕漠土结果一致。原因可能是有机质质量分数较低, 有机质并不能成为土壤反射光谱特征的主导因素, 土壤其他组成物质(如铁、锰)光谱反射特性的能力有所增强, 并不能被有机质的光谱反射特性完全覆盖^[20]; 其次, 土壤样本研磨过 0.5 mm 筛, 土壤径粒相对较大造成物体表面曲率增大, 引起光谱散射现象, 光谱反射率会不同程度降低, 有机质的反射特性被扰乱^[28]。高志海等^[20]研究质量分数高于 2% 荒漠化土壤建立的有机质最优估测模型的决定系数是 0.88, 侯艳军等^[25]建立的估算质量分数低于 2% 荒漠土壤有机质的最优估测模型的决

表 2 有机质含量逐步回归方程
Table 2 The regression equation of organic matter content

R 变换形式 Transform form	回归方程 The regression equation	决定系数 R ²	均方根误差 RMSE/g·kg ⁻¹
原始曲线 The original curve	$Y = -11.635 + 1.824K_{447}$	0.50	4.12
一阶微分 The first order differential	$Y = 24.07 + 189.75K_{385} + 734K_{871} - 1\ 622.07K_{1\ 719} + 444.72K_{2\ 304}$	0.87	4.77
倒数 The reciprocal	$Y = 35.143 - 272.79K_{420}$	0.48	4.09
对数 The logarithm	$Y = -50.97 + 56.78K_{455}$	0.51	3.51
倒数的一阶微分 The first derivative of the reciprocal	$Y = 31.03 + 3\ 452\ 149.82K_{1\ 675}$	0.74	4.24
对数的一阶微分 The first derivative of the logarithm	$Y = 42.29 - 11\ 308.81K_{567} - 116\ 024K_{1\ 697} + 46\ 559K_{2\ 221}$	0.86	4.12

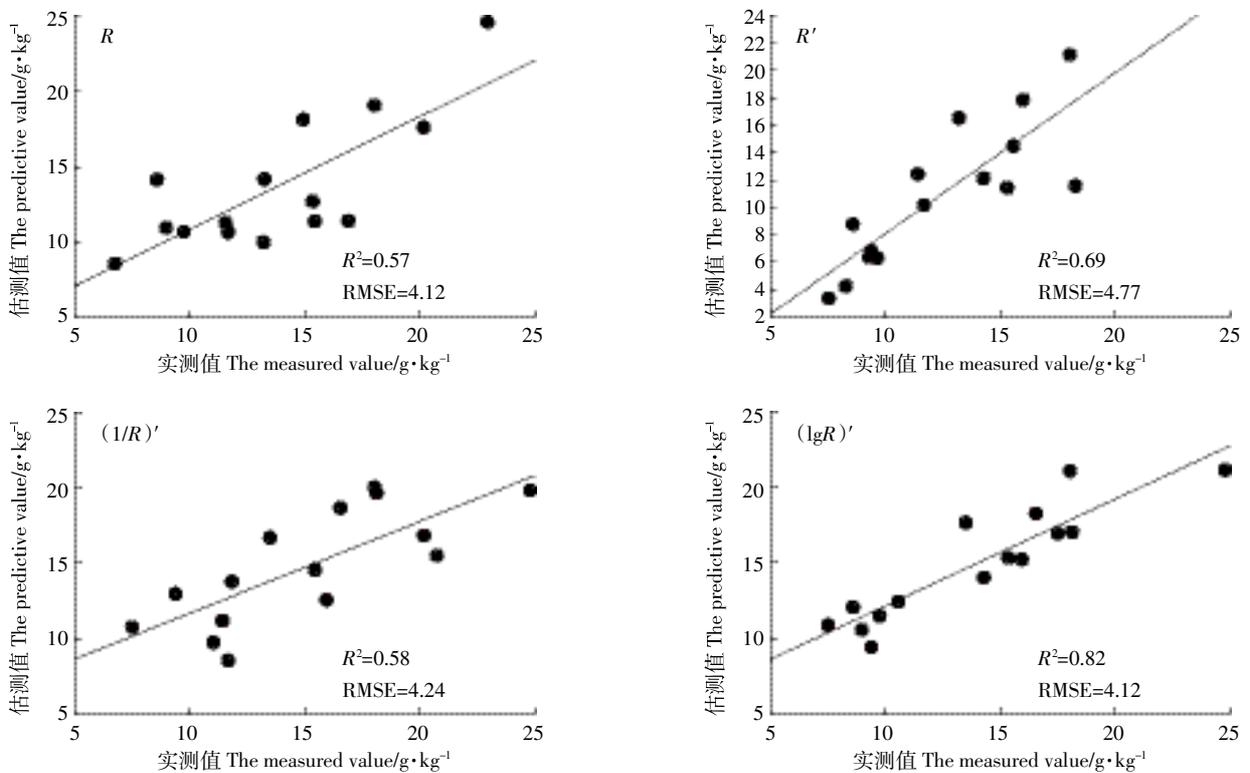


图 4 有机质含量逐步回归模型实测值与估测值比较

Figure 4 The measured value of organic matter compared with the predicted value

定系数是 0.76。本研究建立的最优估测模型决定系数是 0.82,比高志海等的最优估测模型低了 0.06,比侯艳军等的最优估测模型高了 0.06,符合高志海等研究发现的当土壤有机质质量分数较低时,预测值都高于实测值,而有机质较高时,预测值基本接近实测值的规律。于雷等^[29]研究发现水分对土壤近红外波段光谱反射率的影响比较明显,本研究建立的土壤有机质含量最优估测模型包含 2 221 nm 波段,此波段在水分吸收峰 2 200 nm 波段附近。因此本研究中的 2 150~2 380 nm 范围内敏感特性是由有机质本身特性造成的还是水分造成的有待进一步验证。

4 结论

本文主要分析了北疆绿洲农田灰漠土有机质高光谱曲线特征,建立了灰漠土有机质含量高光谱反演估测模型。结果表明:土壤有机质敏感光谱波段主要在 400~570、1 173~1 390、1 549~1 700、2 150~2 380 nm 范围内;原始光谱反射率及其倒数、对数的变换形式经过一阶微分变换后,反演精度有所提高;原始反射率的对数一阶微分方程反演土壤有机质效果最佳,实测值和估测值的拟合最优,决定系数达到 0.82。本研究为基于高光谱分析土壤有机质含量运用到实际生产奠定基础。

参考文献:

- [1] 刘 炜,常庆瑞,郭 曼,等.小波变换在土壤有机质含量可见/近红外光谱分析中的应用[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):241-246.
LIU Wei, CHANG Qing-rui, GUO Man, et al. Application of wavelet transformation in detection of organic matter content based on visible/near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5):241-246. (in Chinese)
- [2] 武彦清,张 柏,宋开山,等.松嫩平原土壤有机质含量高光谱反演研究[J].中国科学院研究生院学报,2011,28(2):187-194.
WU Yan-qing, ZHANG Bo, SONG Kai-shan, et al. Retrieval of soil organic matter content from hyper-spectra in Songnen Plain[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2011, 28(2): 187-194. (in Chinese)
- [3] 向红英,柳维扬,彭 杰,等.基于连续统去除法的南疆水稻土有机质含量预测[J].土壤,2016,48(2):389-394.
XIANG Hong-ying, LIU Wei-yang, PENG Jie, et al. Predicting organic matter content in paddy soil using method of continuum removal in southern Xinjiang[J]. *Soils*, 2016, 48(2):389-394. (in Chinese)
- [4] 陈奕云,齐天赐,黄颖菁,等.土壤有机质含量可见-近红外光谱反演模型校正集优选方法[J].农业工程学报,2017,33(6):107-114.
CHEN Yi-yun, QI Tian-ci, HUANG Ying-jing, et al. Optimization method of calibration dataset for VIS-NIR spectral inversion model of soil organic matter content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6):107-114. (in Chinese)
- [5] 于 雷,洪永胜,周 勇,等.高光谱估算土壤有机质含量的波长变量筛选方法[J].农业工程学报,2016,32(13):95-102.
YU Lei, HONG Yong-sheng, ZHOU Yong, et al. Wavelength variable selection methods for estimation of soil organic matter content using hyperspectral technique[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(13):95-102. (in Chinese)
- [6] 刘 磊,沈润平,丁国香.基于高光谱的土壤有机质含量估算研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(3):762-766.
LIU Lei, SHEN Run-ping, DING Guo-xiang. Studies on the estimation of soil organic matter content based on hyper-spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(3):762-766. (in Chinese)
- [7] 史 舟.土壤地面高光谱遥感原理与方法[M].北京:北京出版社,2014.
SHI Zhou. Principle and method of soil surface hyperspectral remote sensing[M]. Beijing:Beijing Press, 2014. (in Chinese)
- [8] Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L. Reflectance properties of soils [J]. *Advances in Agronomy*, 1985, 38(4):1-44.
- [9] Galvao L S. Variability of laboratory measured soil lines of soils from southeastern Brazil[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 63(2): 166-181.
- [10] Galvao L S, Pizarro M A, Epiphanyo J C A N. Variation in reflectance of tropical soil:Spectral chemical composition relationships from AVIRIS data[J]. *Remote Sensing Environment*, 2001, 75(2):245-255.
- [11] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. *Soil Society of American Journal*, 1980, 44(6):1280-1285.
- [12] Lin L X, Wang Y J, Teng J Y, et al. Hyperspectral analysis of soil organic matter in coal mining regions using wavelets, correlations, and partial least squares regression[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2016, 188(2):1-11.
- [13] Gunsaulis F R, Kocher M F, Griffis C L. Surface structure effects on close-range reflectance as a function of soil organic matter content[J]. *American Society of Agricultural Engineer*, 1991, 34(2):641-649.
- [14] 徐彬彬,戴昌达.南疆土壤光谱反射特性与有机质含量的相关分析[J].科学通报,1980(6):282-284.
XU Bin-bin, DAI Chang-da. Correlation analysis of soil spectral reflectance and organic matter content in southern Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980(6):282-284. (in Chinese)
- [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.
XIE Bo-cheng, XUE Xu-zhang, WANG Ji-hua, et al. Spectral characteristics of brown-humid soil and estimation of soil organic matter content by soil reflectivity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4):391-395. (in Chinese)
- [16] 张娟娟,余 华,乔红波,等.基于高光谱特征的土壤有机质含量估测研究[J].中国生态农业学报,2012,20(5):566-572.
ZHANG Juan-juan, YU Hua, QIAO Hong-bo, et al. Soil organic matter content estimation based on hyperspectral properties[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5):566-572. (in Chinese)

- [17] 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.
LIU Huan-jun, ZHANG Bo, ZHAO Jun, et al. Spectral models for prediction of organic matter in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):27-32. (in Chinese)
- [18] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究[J]. 土壤, 2000, 32(6):281-287.
XU Bin-bin. Research on the spectral reflectance of soil section[J]. *Soils*, 2000, 32(6):281-287. (in Chinese)
- [19] 刘焕军, 吴炳方, 赵春江, 等. 光谱分辨率对黑土有机质估测模型的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(3):739-742.
LIU Huan-jun, WU Bing-fang, ZHAO Chun-jiang, et al. Effect of spectral resolution on black soil organic matter content predicting model based on laboratory reflectance[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(3):739-742. (in Chinese)
- [20] 高志海, 白黎娜, 王臻瑜, 等. 荒漠化土地土壤有机质含量的实测光谱估算[J]. 林业科学, 2011, 47(6):9-16.
GAO Zhi-hai, BAI Li-na, WANG Beng-yu, et al. Estimation of soil organic matter content in desertified lands using measured soil spectral data[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6):9-16. (in Chinese)
- [21] 沈润平, 丁国香, 魏国栓, 等. 基于人工神经网络的土壤有机质含量高光谱反演[J]. 土壤学报, 2009, 46(3):391-397.
SHEN Run-ping, DING Guo-xiang, WEI Guo-shuan, et al. Retrieval of soil organic matter content from hyper-spectrum based on ANN[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3):391-397. (in Chinese)
- [22] 夏 楠, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于多光谱数据的荒漠矿区土壤有机质估算模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6):263-267.
XIA Nan, Teyip T, DING Jian-li, et al. Estimation model of soil organic matter in desert mining area based on multispectral image data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6):263-267. (in Chinese)
- [23] 陈红艳, 赵庚星, 张晓辉, 等. 去除水分影响提高土壤有机质含量高光谱估测精度[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8):91-100.
CHEN Hong-yan, ZHAO Geng-xing, ZHANG Xiao-hui, et al. Improving estimation precision of soil organic matter content by removing effect of soil moisture from hyperspectra[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8):91-100. (in Chinese)
- [24] 彭 杰, 张杨珠, 庞新安, 等. 新疆南部土壤有机质含量的高光谱特征分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(5):740-746.
PENG Jie, ZHANG Yang-zhu, PANG Xin-an, et al. Hyperspectral features of soil organic matter content in south Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5):740-746. (in Chinese)
- [25] 侯艳军, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16):113-120.
HOU Yan-jun, Teyip T, Sawut M, et al. Estimation model of desert soil organic matter content using hyperspectral data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16):113-120. (in Chinese)
- [26] 卢艳丽, 白由路, 杨俐苹, 等. 东北平原不同类型土壤有机质含量高光谱反演模型同质性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2):456-463.
LU Yan-li, BAI You-lu, YANG Li-ping, et al. Homogeneity of retrieval models for soil organic matter of different soil types in Northeast Plain using hyperspectral data[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2):456-463. (in Chinese)
- [27] 范燕敏, 武红旗, 李美婷, 等. 新疆北部不同类型土壤光谱特征及对有机质含量的估测[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6):121-126.
FAN Yan-min, WU Hong-qi, LI Mei-ting, et al. Hyperspectral characteristics and estimation of organic matter contents of different soil types in north Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2013, 31(6):121-126. (in Chinese)
- [28] 乔星星, 冯美臣, 杨武德, 等. 粒径对土壤光谱特性的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9):1325-1327, 1359.
QIAO Xing-xing, FENG Mei-chen, YANG Wu-de, et al. Effect of particle size on soil spectroscopy characteristics[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(9):1325-1327, 1359. (in Chinese)
- [29] 于 雷, 洪永胜, 朱亚星, 等. 去除土壤水分对高光谱估算土壤有机质含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(7):2146-2151.
YU Lei, HONG Yong-sheng, ZHU Ya-xing, et al. Removing the effect of soil moisture content on hyperspectral reflectance for the estimation of soil organic matter content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7):2146-2151. (in Chinese)