

新疆北部不同类型土壤光谱特征及 对有机质含量的预测

范燕敏¹, 武红旗¹, 李美婷², 翁小燕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. 新疆林业科学院造林治沙研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 对北疆地区淡栗钙土、冷钙土、石灰性黑钙土、石膏灰棕漠土等4种土壤类型的反射光谱进行分析, 研究土壤有机质含量与光谱反射率之间的关系。结果表明, 石灰性黑钙土的反射率明显低于其它土壤类型。有机质含量高于 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时光谱反射率与有机质含量呈负相关, 有机质含量很低 ($< 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时, 土壤的光谱反射率与有机质含量之间呈正相关。分别采用 593.6 nm 波段的原始光谱反射率、661 nm 波段的反射率去除包络线和 547.4 nm 波段反射率的一阶微分与土壤有机质含量建立回归模型, 经检验三种模型均能较好地预测有机质的含量, 其中光谱的一阶微分预测精度相对较高, 可较好地预测北疆主要类型土壤的有机质含量。

关键词: 土壤类型; 光谱特征; 土壤有机质; 相关性; 北疆

中图分类号: S153.6⁺21 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)06-0121-06

Hyperspectral characteristics and estimation of organic matter contents of different soil types in North Xinjiang

FAN Yan-min¹, WU Hong-qi¹, LI Mei-ting², WONG Xiao-yan¹

(1. College of Grassland and Environment Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Institute of Afforestation and Sand-harnessing, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830000, China)

Abstract: The hyperspectral characteristics of four soil types (Light chestnut soil, Cold calcic soil, Calcic chernozem, Gypsum gray-brown desert soil) in North Xinjiang and their relationship with soil organic matter content (SOM) were studied. The results showed that the spectral reflectance of Calcic chernozem was significantly lower than other soil types. Negative correlation between the spectral reflectance and SOM was detected as SOM was higher than $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. By contrast, positive correlation existed with low SOM ($< 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Correlation analysis of spectrum reflectance with SOM indicated that SOM correlated with the spectrum reflectance in 593.6 nm band, in 661 nm band by removal of the envelope of reflectance, and in 547.4 nm band through first-order differential of reflectance. In addition, the prediction accuracy of the first-order differential was relatively high, and thus can be used in the estimation SOM of mainly soil types in North Xinjiang.

Keywords: soil type; hyperspectral characteristics; soil organic matter; correlation analysis; North Xinjiang

土壤有机质是评价土壤肥力的重要指标之一, 对促进土壤结构形成、改善土壤物理性质、提高土壤保肥能力具有重要作用。土壤有机质的常规测定方法比较准确, 但测定周期长, 不能有效反映土壤现实的养分水平来指导农业生产。因此, 快速获取土壤有机质状况成为土壤养分诊断与精确管理中的一个研究方向。遥感技术, 尤其是高光谱遥感为土壤有

机质的诊断提供了一个新的途径。

有研究证实土壤有机质含量高低可以影响土壤反射光谱特征^[1-2], 多数研究得出光谱反射率经微分、倒数或导数等处理后可以提高土壤有机质含量估测的精度, 如贺军亮等^[3]采用 450 ~ 750 nm 反射率均值对原始反射率进行标准化比值处理获得有机质诊断指数, 明显降低了环境因素对光谱的影响并

收稿日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(41161051); 新疆维吾尔自治区土壤学重点学科基金资助

作者简介: 范燕敏(1975—), 女, 河南沈丘县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤质量评价的研究。E-mail: ymfant@126.com。

* 通信作者: 武红旗(1974—), 男, 副教授, 主要从事土壤调查与评价教学与科研工作。E-mail: hqwu7475@126.com。

大大提高反演模型的精度;刘磊等^[4]对土壤反射率光谱进行一阶微分和倒数的对数两种变换后,建立了土壤有机质含量的估算模型;张娟娟等^[5]分析中国中、东部地区 5 种不同类型土壤样本有机质含量与光谱反射率之间的关系,表明与土壤有机质含量相关程度最高的光谱参数是在 554 nm 和 1 398 nm 两个波段的一阶导数组合而成的差值指数。目前,多数学者针对某一种土壤类型进行光谱预测土壤有机质研究效果较好^[4-7],而针对多种类型土壤有机质含量的预测研究还较少,主要是由于不同区域和不同土壤类型的水热条件变化大,土壤有机质的分解水平各不相同,土壤光谱特性也存在很大差异^[2,8]。在一定区域内,由于主导成土因素不同,土壤类型也多种多样,若考虑土壤类型来建立有机质含量的光谱估测模型,将会给实际工作带来很多麻烦,因此,本研究以新疆北部地区的淡栗钙土、冷钙土、石灰性黑钙土、石膏灰棕漠土等 4 种土壤类型为

对象,研究土壤有机质反射光谱特征,尝试构建适合于多种类型组合的区域土壤有机质含量光谱估测模型,为快速、无损地预测北疆土壤有机质含量提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 土样采集与处理

采集新疆北部地区的 4 种土壤类型,包括淡栗钙土、冷钙土、石灰性黑钙土、石膏灰棕漠土,样点分布及有机质含量情况如表 1。每种土壤类型挖取 5 个典型剖面,采集 0~5、5~10、10~20、20~30、30~50、50~70、70~100 cm 的土样,剔除土壤中的侵入体(如植物残茬、石粒、砖块等杂质)和新生体(如铁锰结核和石灰结核等),于实验室自然风干后磨细,过 2 mm 筛,用于土壤样品的反射光谱特征测定。

采用重铬酸钾容量—外加热法分析有机质含量。

表 1 土样基本信息

Table 1 Basic properties of soil samples

土壤类型 Soil type	采样地点 Location	样本数 Sample number	采样深度 Depth/cm	有机质含量/(g·kg ⁻¹) SOM contents
冷钙土 Cold calcic soil	托克逊县 Toksun County	20	0~30	22.33~61.68
淡栗钙土 Light chestnut soil	巴里坤哈萨克自治县、木垒县 Barkol Kazakh Autonomous County, Mori Kazakh Autonomous County	17	0~50	14.88~50.47
石膏灰棕漠土 Gypsum gray-brown desert soil	富蕴县 Fuyun County	33	0~100	2.05~7.04
石灰性黑钙土 Calcic chernozem	乌鲁木齐市、奇台县 Urumqi City, Qitai County	33	0~100	16.38~133.31

1.2 土壤反射光谱的测定及处理

用美国 SVC HR-768 便携式光谱仪将处理好的土样置于直径 10 cm、深 1.5 cm 的塑料盘中,进行室内光谱反射率的测量。测定在四周为漆黑的实验室进行,光源为能够提供模拟太阳光的美国 SVC HR-768 光谱仪配套 50 W 标准光源,光源天顶角为 15°,光谱仪镜头为 4°视场角,距土壤样本表面 40 cm。以白色参考板获取绝对反射率,每次测定前对仪器进行白板校对,每个土样旋转 3 次,每个角度测定 3~4 次,共测定 10 条光谱反射曲线,去掉异常曲线后取平均值作为该土样的反射光谱特征曲线。

反射光谱曲线经以下方式处理:(1)对光谱数据进行 10 点加权移动平均去噪处理,以消除外界环境的干扰引起的高频噪声的影响。(2)对土壤光谱曲线进行包络线去除,以有效突出光谱曲线的吸收

特征,光谱的吸收特征被归一化到一致的光谱背景上,有利于与其它光谱曲线进行特征数值的比较^[9],且可以有效地抑制噪音。这一处理在 ENVI 软件中完成。(3)对土壤光谱反射率进行一阶微分变换,使原始光谱反射率中一些比较隐含的信息经过变换放大而突现出来。其变换计算公式为:

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_i) - \rho(\lambda_{i-1})]/\Delta\lambda$$

式中, λ_i 为波长等于 i nm 的波段, $\rho(\lambda_i)$ 为波段 λ_i 处的光谱反射率, $\rho'(\lambda_i)$ 为反射率在波段 λ_i 处的一阶微分, $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_{i-1}$ 。

2 结果分析

2.1 土壤反射光谱曲线特征

2.1.1 不同类型土壤反射光谱曲线变化特征 土壤类型是地球陆地表面土壤种类的分异和组合。比

较0~5、5~10、10~20、20~30 cm深度土样的反射光谱曲线(图1)可以看出,在可见光波段,光谱反射率变化快,曲线斜率大;在近红外波段(780~980 nm)反射光谱曲线变化平缓,不同类型土壤反射光谱曲线变化总体趋势一致。土壤光谱曲线在1 420、1 912 nm和2 206 nm附近存在水分吸收峰。0~5 cm深度四种土壤类型的反射光谱曲线几乎平行,石膏灰棕漠土的反射率最高,石灰性黑钙土的反射率最低;在可见光范围淡栗钙土反射率稍高于冷钙土,但是在近红外波段则相反。5~10 cm深度,在可见

光波段土壤类型的反射率为石膏灰棕漠土>冷钙土>淡栗钙土>石灰性黑钙土,在近红外波段土壤反射率为冷钙土>石膏灰棕漠土>淡栗钙土>石灰性黑钙土。10~20 cm冷钙土的反射率最高,石灰性黑钙土的反射率最低,淡栗钙土与石膏灰棕漠土的反射光谱差异较小,仅在800~1 740 nm淡栗钙土反射率明显高于石膏灰棕漠土。20~30 cm石灰性黑钙土的反射率最低,其它三种类型土壤光谱反射率在可见光波段差异不大,在近红外波段差异明显,但是相互交错。

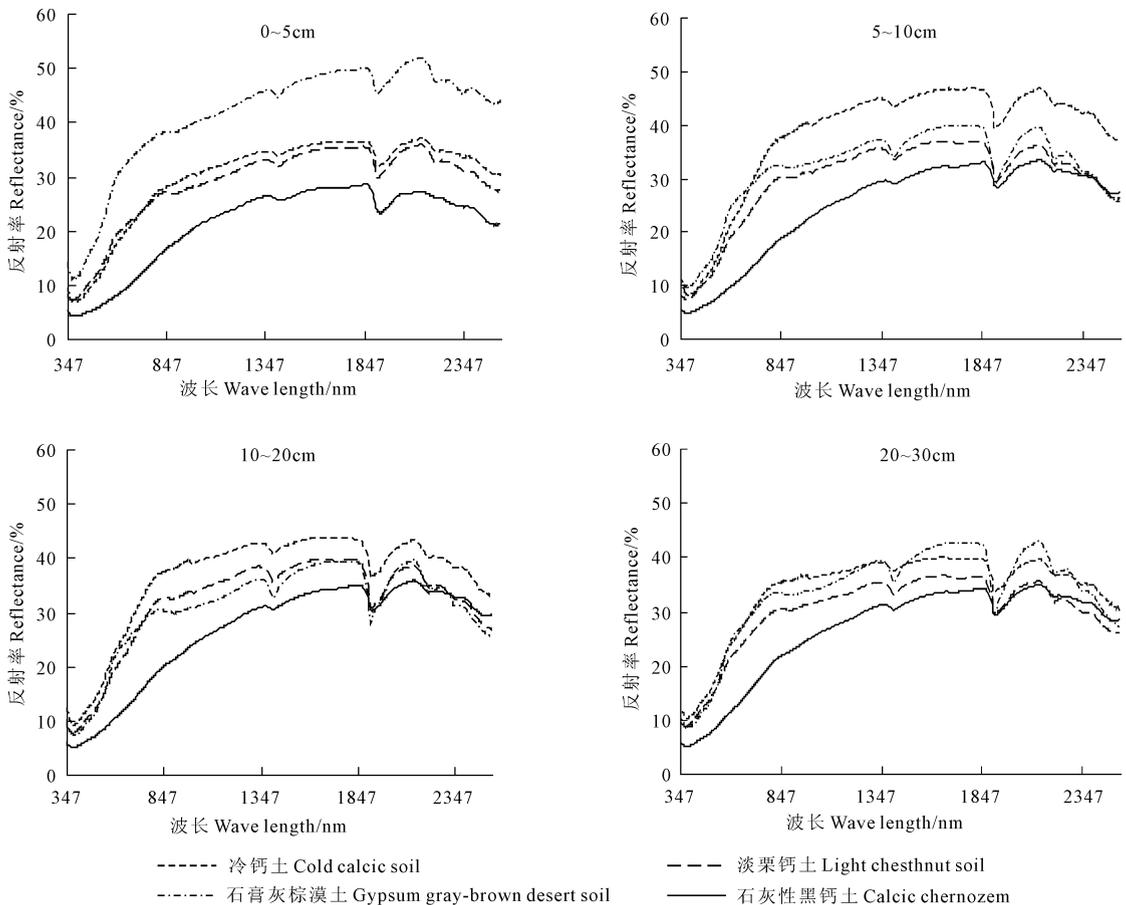


图1 不同深度不同类型土壤反射光谱曲线

Fig.1 Spectrum characteristics of different soil types

2.1.2 土壤有机质含量对土壤反射光谱的影响
已有的相关研究表明,土壤有机质对光谱具有吸收作用,表现为降低土壤光谱反射率。图2为各土壤类型不同有机质含量的反射光谱曲线。由图2分析可知,冷钙土、淡栗钙土和石灰性黑钙土有机质含量在14~127 g·kg⁻¹之间,随着有机质含量升高,在可见光波段反射率呈下降趋势,表明土壤光谱反射率与有机质含量呈负相关,有机质含量增加反射率降低,尤其是石灰性黑钙土在可见光及近红外波段均

有此规律。石膏灰棕漠土有机质含量<8 g·kg⁻¹,在340~580 nm有机质含量与反射率呈正相关,在近红外波段反射光谱曲线与其它类型土壤有机质的反射光谱类似。

2.2 土壤有机质含量与土壤光谱反射率的相关性分析

本研究共采集土样103个,从中随机抽取81个用于土壤有机质的高光谱特征分析及模型建立,22个用于模型精度检验。

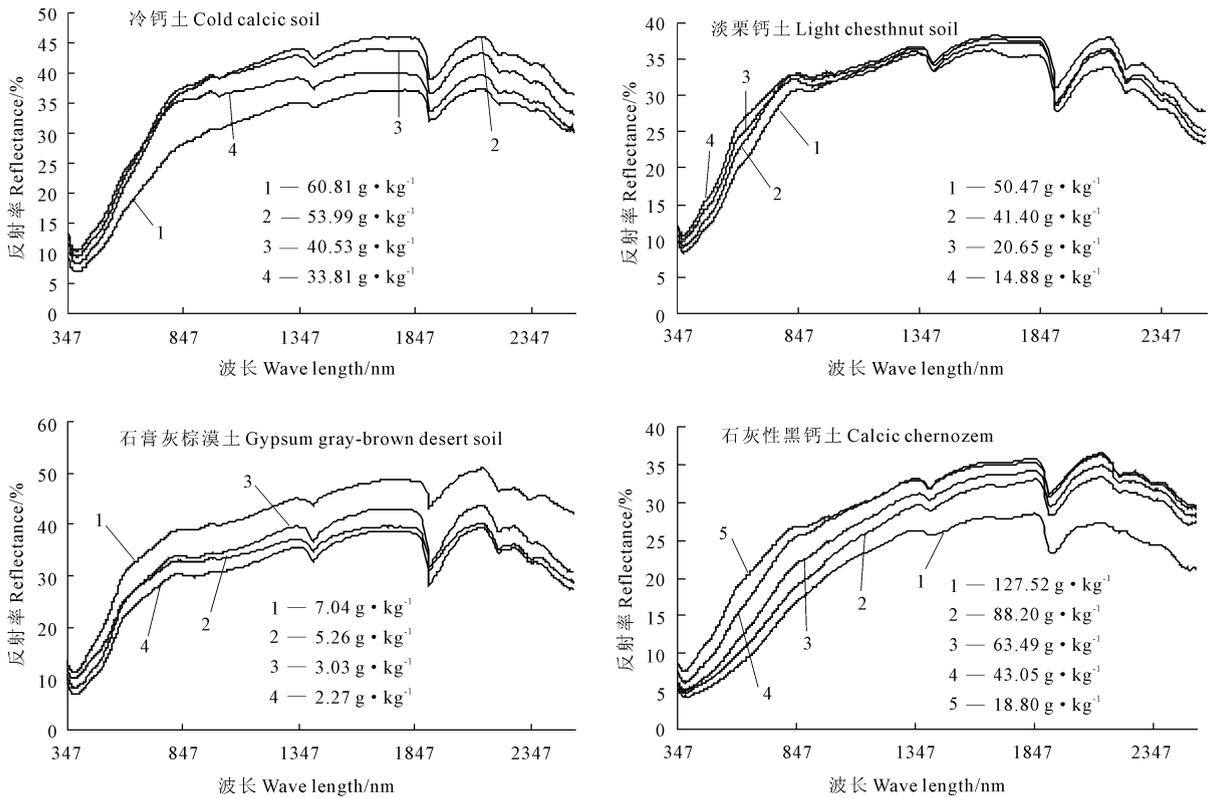


图 2 不同土壤类型有机质的反射光谱特征

Fig.2 Spectrum characteristics of different soil types with different SOM contents

2.2.2.1 土壤有机质反射光谱特征波段的确定 将土壤有机质的原始光谱反射率、包络线去除光谱反射率、一阶微分光谱反射率与土壤有机质含量进行相关性分析,以获取对土壤有机质敏感的光谱波段。

由表 2 可以看出,在特定的波段土壤光谱反射率经数学变换后与有机质含量呈较好的负相关。与原始光谱反射率相比,经过变换后,特征波段不同,光谱反射率与有机质含量之间的相关性有所提高。由此可见,在利用土壤光谱提取土壤有机质含量信息时进行数学变换是极为有效和必要的。

表 2 不同变换形式与土壤有机质含量
相关系数及波段范围Table 2 Max correlation coefficient between different
transformation and SOM and band range

变换形式 Transformation	最大相关系数 Maximum correlation coefficient	波段范围/nm Band range
原始光谱反射率 Reflectance	-0.866**	586.5 ~ 596.5
去包络线 Removal of the envelope	-0.942**	661.0 ~ 667.9
反射率的一阶微分 First-order differential	-0.885**	538.6 ~ 547.4

注: ** 表示在 0.01 水平下相关性显著。

Note: ** represent significantly correlation at the 0.01 level.

2.2.2.2 基于光谱反射率的土壤有机质估测模型的建立与精度检验 通过相关性确定了与有机质含量密切相关的原始反射光谱、包络线去除反射光谱和一阶微分变换反射光谱的特征波段分别为 586.5 ~ 596.5、661 ~ 667.9、538.6 ~ 547.4 nm,因此在敏感波段范围内选取相关系数较高的波段建立对应的有机质预测模型(表 3)。

表 3 光谱反射率不同变换形式与土壤
有机质含量的回归分析Table 3 Regression analysis between different reflectance
transformation and SOM

光谱变换形式 Transformation	预测模型 Prediction model	R^2
原始光谱反射率 Reflectance	$Y = -4.944X_{593.6} + 135.824$	0.766
去包络线 Removal of the envelope	$Y = -452.772X_{661} + 466.847$	0.691
反射率的一阶微分 First-order differential	$Y = -906.305X_{547.4} + 116.131$	0.802

表 3 方程式中, X 为特征波段的土壤光谱反射率, Y 为土壤有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由表 3 可知,光谱反射率的一阶微分的预测模型相关系数最大。

将剩余的 22 个检验样本实测的土壤光谱反射

率及变换形式所对应的特征波段反射值,分别代入相应的预测模型计算土壤有机质含量,并将计算结果与实测值进行对比,以此来检验模型精度(表4)。

表4 土壤有机质含量的光谱预测模型精度检验

Table 4 Accuracy check of SOM prediction model based on different reflectance transforms

光谱变换形式 Transformation	相对误差/% Relative error	平均相对误差/% Mean relative error
原始光谱反射率 Reflectance	2.1~26	18.0
去包络线 Removal of the envelope	2.2~28.1	14.2
反射率的一阶微分 First-order differential	1.4~19.9	8.2

分析表4可知,去包络线模型的有机质预测的相对误差变幅最大,而反射率的一阶微分模型的有机质预测的相对误差变幅最小,而且平均相对误差也是三个模型中最低。

图3~图5给出了有机质含量实测值和预测值的比较,理论上检验样点基本上都应分布在1:1线附近。由图3~图5分析可知,预测值和实测值的相关系数均大于0.9,说明三个模型的预测精度均较高。其中,土壤原始光谱反射率模型和包络线去除模型在有机质含量 $< 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时预测精度较高,有机质含量高于此值,预测误差增大;一阶微分模型在有机质含量 $< 120 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时预测精度较高,仅有个别土样的预测精度差。

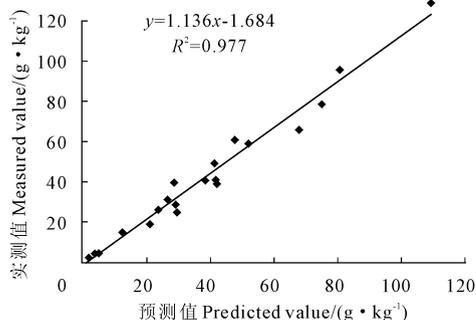


图3 原始光谱反射率模型对有机质含量的实测值与预测值的比较

Fig.3 Comparison of measured SOM and the values estimated by the reflectance model

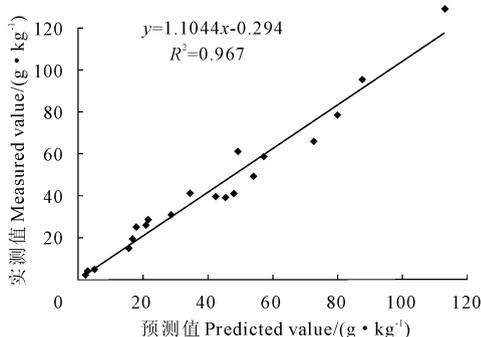


图4 去包络线反射率模型对有机质含量的实测值与预测值的比较

Fig.4 Comparison of measured SOM and the values estimated by the removal of the envelope of reflectance

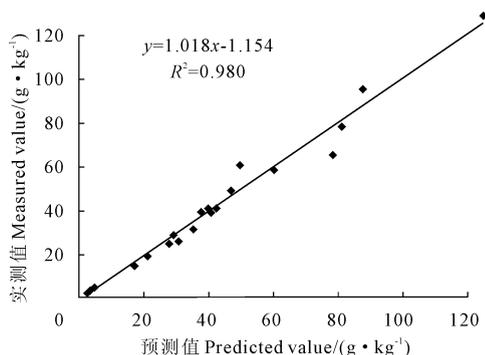


图5 一阶微分变换反射率模型对有机质含量的实测值与预测值的比较

Fig.5 Comparison of measured SOM and the values estimated by first-order differential of reflectance

3 讨论

土壤反射光谱特性是土壤的基本特征之一,不同类型的土壤,由于理化性质不同,其光谱特征也不同^[10]。卢艳丽等^[6]研究发现东北黑土有机质含量

与545~738 nm波段的原始光谱反射率和481~598 nm波段的一阶导数光谱呈极显著负相关;彭杰等^[11]研究南疆地区4种主要土壤的光谱特征,认为用600.5 nm处光谱反射率和在539.2 nm处反射率的一阶微分均能较好的预测土壤有机质含量。本研究结果表明,593.6 nm波段的原始光谱反射率、661 nm波段的反射率去除包络线和547.4 nm波段的反射率一阶微分与有机质含量呈显著线性负相关。可见,土壤类型不同,其反射光谱特征有差异,但是能够反映土壤有机质的波段主要集中在可见光波段。

有研究表明有机质含量与土壤反射光谱呈负相关,本研究中有有机质含量较高的石灰性黑钙土、淡栗钙土和冷钙土在可见光波段符合这一规律,但有机质含量很低的石膏灰棕漠土光谱反射率与有机质含量呈正相关。在不考虑土壤类型的前提下,将有机质含量与土壤反射光谱进行统计分析,有机质含量与土壤反射光谱呈负相关这一规律又得以验证,由此推测,在进行大区域多类型土壤的有机质光谱分析时,可以忽略土壤类型这一影响因素。

国内一些研究尝试利用光谱分析技术结合逐步回归建模方法来预测土壤的养分含量,表现出较好的应用前景^[3,7],刘磊等^[4]认为土壤有机质成分复杂,功能团多样,有机质的光谱特性一般体现为降低整个光谱曲线的反射率值,其光谱特性可能很难用几个波段解释。在本研究中,利用土壤光谱反射率的数学变换形式与土壤有机质含量进行分析,找出最佳单相关波段,建立了一阶线性模型,一阶微分变换模型的相对误差为 8.2%,预测精度较高。可见,影响土壤有机质反射光谱的因素较多,有机质预测方法也各异。

4 结 论

随着科研和生产领域对土壤有机质结果的时效性要求越来越高,高光谱分析为土壤有机质测定提供了一种新方法。本研究分析了淡栗钙土、冷钙土、石灰性黑钙土、石膏灰棕漠土 4 种土壤类型的反射光谱特征,研究光谱反射率与土壤有机质含量的关系,得出:

(1) 在土壤剖面上,石灰性黑钙土的光谱反射率明显低于其它三种土壤。在可见光波段,淡栗钙土、冷钙土和石膏灰棕漠土的反射光谱曲线差异较小,交织在一起;在近红外波段,这三种土壤的光射光谱差异较大。

(2) 分析有机质含量较高的石灰性黑钙土和有机质含量较低的石膏灰棕漠土的光谱反射率发现,在可见光波段,当有机质含量 $> 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤有机质含量与土壤光谱反射率呈负相关;当有机质含量 $< 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤光谱反射率与有机质含量正相关。

(3) 在忽略土壤类型的前提下,对原始光谱反射率,包络线去除后光谱反射率和一阶微分变换与

土壤有机质含量进行相关性分析,确定 586.5 ~ 596.5、661 ~ 667.9、538.6 ~ 547.4 nm 波段分别为三种反射光谱变换的敏感波段范围。在敏感波段建立原始光谱反射率、去包络线、一阶微分变换的土壤有机质含量预测模型,模型的相关系数均在 0.8 以上,平均相对误差分别为 18.0%、14.2%、8.2%,对比分析得出,在 547.4 nm 的一阶微分模型为最优土壤有机质预测模型,可普遍适用于北疆区域的土壤有机质含量估测。

参 考 文 献:

- [1] Galvao L S, Vitorello. Variability of laboratory measured soil lines of soils from southeastern Brazil [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 63(2):166-181.
- [2] Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L, et al. Reflectance properties of soils[J]. *Advances in Agronomy*, 1985, 38:1-44.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 张娟娟,田永超,朱艳,等.不同类型土壤的光谱特征及其有机质含量预测[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9):3154-3163.
- [6] 卢艳丽,白由路,杨俐苹,等.基于主成分回归分析的土壤有机质高光谱预测与模型验证[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6):1076-1082.
- [7] 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.
- [8] Ben-Dor E, Inbar Y, Chen Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400 - 2500 nm) during a controlled decomposition process[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(1):1-15.
- [9] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soils[J]. *Soil Sci*, 1965, 100(2):130-138.
- [10] 徐彬彬.土壤剖面的反射光谱研究[J]. *土壤*, 2000, 24(6):281-287.
- [11] 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.