

基于高光谱的土壤有机质含量预测模型的建立与评价

卢艳丽, 白由路, 杨俐苹, 王红娟

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 【目的】土壤有机质含量是反映土壤肥力的重要特征, 利用高光谱技术对有机质(OM)含量进行定量反演为土壤信息化管理和资源评价提供了重要的依据。【方法】利用 ASD2500 高光谱仪在室内条件下测定了风干土壤样品的可见-近红外光谱, 分析了不同区域范围土壤光谱反射率曲线形状变化和土壤有机质含量的变化特点, 并针对东北地区以黑土为主的土样光谱反射率不同变换形式与有机质含量进行了相关性分析。【结果】结果表明, 有机质含量较高的黑土的光谱曲线与其它土壤类型的光谱曲线在形状上有很大差异, 即在 600~900 nm 附近, 以黑龙江土样为代表的东北黑土表现为直缓上升, 而河南和山东的潮土则表现为曲陡上升。相关分析结果表明, 土壤有机质含量与原始光谱反射率在 545~830 nm 呈显著负相关, 其中在 580~738 nm 波段范围内达到极显著负相关。与一阶导数光谱相关性进一步增强, 在 481~598 nm 呈现极显著负相关, 而在 816~932 nm 和 1 039~1 415 nm 波段范围内具有极显著的正相关性。土壤有机质含量与部分波段处的吸收深度和反射峰高度也表现为不同程度的相关性。【结论】利用 570~590 nm 波段的一阶导数光谱和 1 280 nm 处反射峰高度 $P_Depth1280$ 可以较好地预测东北主要土壤类型有机质含量。在此基础上建立了土壤有机质含量的高光谱反演模型并进行了验证。

关键词: 光谱; 有机质; 模型

Prediction and Validation of Soil Organic Matter Content Based on Hyperspectrum

LU Yan-li, BAI You-lu, YANG Li-ping, WANG Hong-juan

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture, Beijing 100081*)

Abstract: 【Objective】The study looked at organic matter (OM) content as an important index in reflecting soil fertility. It provided important information for soil digital management and resource evaluation when OM was estimated using hyperspectral technology. 【Method】In this experiment, NIR-Visible spectral reflectance of soil samples were measured using ASD2500 hyperspectral meter. It was analyzed that there were soil OM changing characteristics and spectral reflectance curve shapes. Furthermore, the correlation analysis between OM and its spectral characteristics was done for soil samples of north-east. 【Result】The results indicated that the spectral reflectance curve shape of the north-east black soil of Heilongjiang is different from the fluvo-aquic soil of Henan and Shandong province. The former ascends in a slow curve, but the latter ascends in a steep curve in 600-900 nm region. The correlation analysis indicated that organic matter (OM) content has a negative correlation with spectral reflectance in 545-830 nm at 0.05 significant level and in 580-738 nm at 0.01 significant level. OM has negative correlation with first derivative spectra in 481-598 nm and positive correlation in 816-932 nm and 1039-1415 nm at 0.01 significant level. Furthermore, the degree of correlation is stronger than the original spectral reflectance. Different spectral characteristic parameters are selected including reflectance and its first derivation, reflected height and absorbed depth, and they are correlated to OM in different degrees. 【Conclusion】The analysis results show that OM can be predicted using first derivative reflectance in 570-590 nm and reflected height in 1280 nm ($P_Depth1280$). The prediction models are practical and feasible. Different models can be made reference to each other in practice.

收稿日期: 2007-01-15; 接受日期: 2007-04-25

基金项目: 科技攻关项目“粮食丰产工程”(2006BAD02A14)

作者简介: 卢艳丽(1976-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究方向为高光谱遥感技术在精准农业中的应用。Tel: 010-68918676; luy1@caas.net.cn。
通讯作者白由路(1961-), 男, 河南温县人, 研究员, 博士, 研究方向为土壤物理和精准农业。Tel: 010-68918673; E-mail: ylbai@caas.ac.cn

Key words: Spectral; Organic matter; Model

0 引言

【研究意义】土壤信息化是精确农业中精确施肥、精确管理的前提。利用光谱技术对土壤特性进行采集和分析是土壤信息量化研究的重点。土壤有机质是反映土壤肥力的重要物质,而高光谱技术的发展为监测土壤有机质含量提供了更为精确和详细的信息。【前人研究进展】高光谱数据提供了连续窄带短波红外光谱信息,为土壤评价与理化性状的监测提供了强有力的工具。该技术已经被广泛应用在土壤中矿物成分定量鉴别、土壤湿度、土壤有机质等方面^[1~7]。早在 1965 年 Bowers 和 Hanks^[8]就指出,影响土壤反射的因素主要有土壤质地、表面粗糙度、氧化铁含量、土壤水分含量和有机质含量。而腐殖质是影响土壤色调进而影响光谱反射特性的一个重要因素。Gunsaulis 等^[9]研究结果表明,土壤有机质含量与红光波段的反射率具有较强的相关性,决定系数 R^2 可达 0.609。沙晋明等^[10]对八个不同环境条件下形成的土壤样本剖面上的各个土层进行光谱测量,发现有机质含量与土壤光谱在紫外区的 376.8 nm 波段、可见光区的 616.5 nm 波段和近红外区的 724.1 nm 波段附近有较好的负相关性。还有一些研究也确定了有机质影响波段范围在 600~800 nm 附近^[11,12]。何挺等^[13]运用光谱微分技术、逐步回归分析等方法研究了土壤光谱反射特性与土壤有机质之间的关系,结果表明反射率对数的一阶微分对土壤有机质含量最为敏感并建立了相应的回归预测模型。前人对土壤的光谱特性的研究除了利用野外采集的土壤光谱数据进行分析外,室内高光谱分析技术因其影响因素较野外更易控制也得以广泛应用。在室内土壤光谱信息的采集技术上,分光光度计法如日立 UV-340 型分光光度计,可以获取 400~2 500 nm 波段的光谱信息,此法可以较精确的获取样品光谱信息,避免外界环境因素的干扰,但是测定起来比较麻烦,速度慢。高光谱仪测定法采用的是美国 ASD2500 高光谱仪,可以获取 350~2 500 nm 波段光谱信息,此法不仅适用于野外土壤光谱信息的采集,同时还可以进行室内土样的测定。对于室内测定土壤光谱特性在光源、探头与土样的距离、角度等几何条件的界定方面也有不少报导。如 Krishnan 等^[14]发现随着土样与传感器间距离的增加,外界光对传感器的输出产生了显著的影响;周清等^[15]还提出了室内测定土壤光谱的最佳

测量几何条件。【本研究切入点】尽管在利用 ASD2500 高光谱仪获取土壤光谱特征的研究上也有不少报道,但是针对东北地区大量土壤样品光谱信息采集和土壤有机质量化预测模型的构建的报道还很少。【拟解决的关键问题】本文通过比较不同地区土壤光谱反射率以及土壤有机质含量的变化特点,继而选择适宜的土壤样本群体来研究有机质与光谱反射率及其特征参量的相关关系。目的是确定土壤有机质含量的敏感波段和可以预测有机质含量的最佳光谱特征参量,并构建土壤有机质含量的高光谱预测模型。

1 材料与方 法

1.1 土样采集与制样

采用 GPS 定位进行网格采样,供试土样主要来源于东北平原(包括黑龙江、吉林和辽宁)以及山东和河南两个省共 873 个土样。所有土壤样品采样深度均为 0~20 cm。样品经风干、研磨并通过 2 mm 孔筛,采用四分法取样,分两份,一份用于实验室有机质测定,另一份用于土壤光谱的测量。

1.2 分析测试

1.2.1 土壤有机质含量测定 采用油浴加热重铬酸钾氧化—容量法测定。在加热条件下,用过量的重铬酸钾—硫酸溶液氧化土壤有机碳,多余的重铬酸钾用硫酸亚铁铵标准溶液滴定,以样品和空白消耗重铬酸钾的差值计算出有机碳量。将测得的有机碳乘以校正系数 1.1,再乘以常熟 1.724 即为土壤有机质含量。

1.2.2 光谱仪 ASDFR2500 便携式光谱仪光谱范围为 350~2 500 nm。在 350~1 000 nm 范围内采样间隔为 1.4 nm,在 1 000~2 500 nm 范围内为 2 nm,输出波段数为 2 150(重采样间隔为 1 nm)。

1.2.3 土壤反射率测量 将处理好的土样置于直径 10 cm 深 2.0 cm 的容器中,装满后将土壤表面刮平,进行室内光谱反射率的测量,操作过程在四周为漆黑的实验室进行,5°视场角的光纤探头固定在支架上,探头距土壤样本表面 30 cm。光源为能够提供平行光的 1 000 W 卤光灯,距土壤表面 50 cm,光源天顶角为 15°。每个土样测定 10 条光谱反射率曲线,去掉异常线后取平均作为该土样的光谱反射率值。以白色参考板获取绝对反射率。

1.2.4 光谱特征参量计算

①反射峰高度 反射峰高度的定义表达式为:

$$P_Depth_i = 1 - \left(\frac{R_{Si} \times (\lambda_{Ei} - \lambda_{Si}) + (R_{Ei} - R_{Si}) \times (\lambda_{Ci} - \lambda_{Si})}{R_{Ci} \times (\lambda_{Ei} - \lambda_{Si})} \right) \quad (1)$$

式中, R_{Ci} , R_{Si} , R_{Ei} 分别为反射峰特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率, λ_{Ci} , λ_{Si} , λ_{Ei} 分别为反射峰

特征中心点、起点和结束点处的波长。

②吸收深度 吸收深度的定义表达式为:

$$Depth_i = 1 - \frac{R_{ci} \times (\lambda_{Ei} - \lambda_{si})}{R_{si} \times (\lambda_{Ei} - \lambda_{si}) + (R_{Ei} - R_{si}) \times (\lambda_{ci} - \lambda_{si})} \quad (2)$$

式中, R_{ci} , R_{si} , R_{Ei} 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率, λ_{Ci} , λ_{Si} , λ_{Ei} 分别为吸收特征中心点、起点和结束点的波长。

1.3 模型的建立及验证

模型的建立和验证所用土壤样本全部来源于东北平原。其中建模样本共 440 个, 另外选择建模样本以外的 160 个样本用来验证。为评价预测值与实测值之间的拟合效果, 笔者选择了以下指标进行评价:

决定系数 R^2 : 即相关系数 r 的平方值, 用来说明用预测值解释实测值变差的程度。其计算公式为:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

总均方根差 $RMSE$: 检验模拟值和实测值的符合度。其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型光谱反射率变化

表 1 给出了土壤有机质测定结果的统计特性。山东和河南的潮土有机质含量基本上都在均值附近, 标准差也较小; 而黑龙江的黑土变化较大, 具有较大的

标准差, 这有利于建立模型。从 350~2 500 nm 波段范围的光谱反射率来看(图 1), 有机质含量较高的东北黑土的光谱曲线与其它土壤类型的光谱曲线在形状上有很大差异, 突出表现在 600~900 nm 附近, 取自东北的土壤样品土壤类型属于黑土, 其光谱反射率在 600~900 nm 范围内表现为直缓上升; 而山东和河南两地土壤样品土壤类型属于潮土, 其光谱反射率表现为曲陡上升。由此可见, 在该波段范围内与有机质含量有关, 这在后面分析中将进一步证实。

2.2 土壤有机质含量与光谱反射率及其一阶导数相关性分析

如图 2 所示, 土壤有机质含量与原始光谱反射率在 545~830 nm 呈显著负相关关系, 其中在 580~738 nm 波段范围内达到极显著负相关。这也进一步证实了前面提到的不同土壤类型光谱反射率形状的变化与有机质有关的推测。因此, 550~830 nm 波段是土壤有机质的敏感波段。土壤有机质含量与一阶导数光谱在 481~598 nm 波段范围内呈极显著负相关关系, 而在 816~932 nm 和 1 039~1 415 nm 波段范围内表现为极显著的正相关关系。由此可见, 对原始光谱求导数后对土壤有机质含量的变化敏感程度增强。

2.3 土壤有机质含量高光谱反演模型的建立和比较

根据前面确定的土壤有机质含量的敏感波段, 本文选择了 600 nm 原始光谱反射率、570~590 nm 以

表 1 3 种土壤有机质含量测定结果

Table 1 Soil organic matter (OM) content in different soil

取样地点 Sampling place	经纬度范围 Longitude and latitude	样本数 Number of sample	土壤有机质含量 OM		
			变化范围 Variational scope (%)	平均值 Mean (%)	标准差 Standard deviation
黑龙江 Heilongjiang	N: 44°93'19"~48°48'89" E: 122°54'67"~134°30'00"	145	1.031~8.075	3.828	1.269
山东 Shandong	N: 34°58'94"~37°95'23" E: 115°10'31"~118°85'11"	98	0.554~2.738	1.273	0.318
河南 Henan	N: 32°22'95"~36°10'15" E: 111°87'01"~115°61'48"	175	0.405~2.735	1.446	0.427

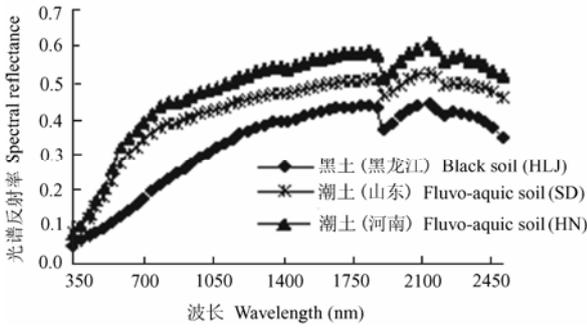


图1 不同土样光谱反射率曲线比较
Fig. 1 Comparison of spectral reflectance in different soil samples

及 1 380~1 400 nm 的一阶导数光谱平均值、560 和 1 280 nm 光谱反射峰高度、670 和 1 450 nm 吸收深度等

共 7 个光谱特征值 (表 2)。这几个光谱特征参数与土壤有机质含量具有较好的相关性。其中,以 570~590 nm 的一阶导数光谱和 1 280 nm 反射峰高度 $P_Depth1280$ 与土壤有机质含量相关性较好。而 $P_Depth1280$ 与有机质含量呈现较好的线性关系 (图 3)。从模型类型来看,原始光谱反射率与土壤有机质含量之间以对数形式拟合较好。一阶导数光谱、反射峰高度和吸收深度各特征值均以多项式形式曲线模拟最佳,但是从散点图上点的分布来看,570~590 nm 的一阶导数光谱与土壤有机质含量的相关性以对数形式拟合较好,并且其对数形式和多项式形式模拟的复相关系数 R^2 相差很小。因此本文确定 570~590 nm 的一阶导数光谱与土壤有机质含量以对数关系为最佳。同样道理, $P_Depth1280$ 与有机质含量以线性拟合最佳。

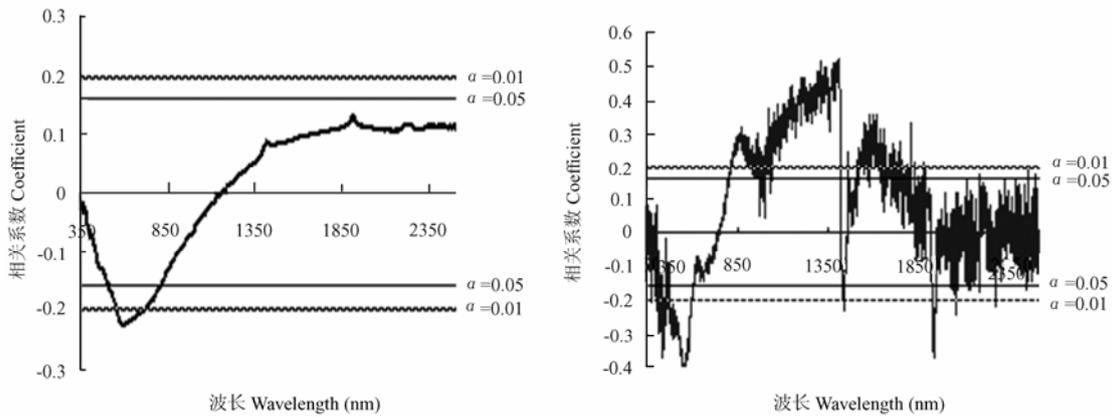


图2 土壤有机质含量与原始光谱反射率和一阶导数光谱相关分析
Fig. 2 Correlation analysis of organic matter content and original reflectance and its first derivation

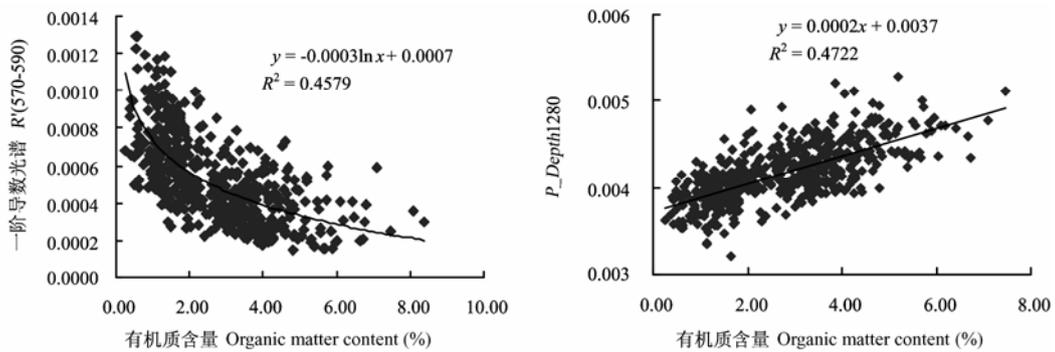


图3 土壤有机质含量与 570~590 nm 波段光谱反射率一阶导数 $[R'(570-590)]$ 、1280nm 光谱反射峰高度 ($P_Depth1280$) 的关系
Fig. 3 Correlation between soil organic matter content and the first derivative reflectance in 570-590nm $[R'(570-590)]$ and reflected height in 1280nm ($P_Depth1280$)

表 2 土壤有机质含量光谱预测模型建立

Table 2 Prediction models of soil organic matter content

波段 Waveband (nm)	光谱变换形式 Types of spectral parameters	相关模型 Correlation model	R^2
600	反射率 Reflectance	$y = -0.0162x + 0.202$	0.329**
		$y = -0.0423\ln x + 0.1932$	0.377**
		$y = 0.0026x^2 - 0.0335x + 0.2241$	0.369**
570~590	反射率的一阶导数 The first derivative reflectance	$y = -1E-04x + 0.0008$	0.412**
		$y = -0.0003\ln x + 0.0007$	0.458**
		$y = 2E-05x^2 - 0.0002x + 0.001$	0.477**
1380~1400	反射率的一阶导数 The first derivative reflectance	$y = 8E-05x - 0.0008$	0.417**
		$y = 0.0002\ln x - 0.0008$	0.418**
		$y = -9E-06x^2 + 0.0001x - 0.0009$	0.434**
560	反射峰高度 The reflected height	$y = -0.2387x + 1.5138$	0.265**
		$y = -0.597\ln x + 1.3639$	0.278**
		$y = 0.0379x^2 - 0.4898x + 1.8355$	0.296**
670	吸收深度 The absorbed depth	$y = 0.008x - 0.0135$	0.331**
		$y = 0.0192\ln x - 0.0079$	0.324**
		$y = -0.0009x^2 + 0.0138x - 0.0209$	0.350**
1280	反射峰高度 The reflected height	$y = 0.0002x + 0.0037$	0.472**
		$y = 0.0004\ln x + 0.0039$	0.453**
		$y = -1E-05x^2 + 0.0002x + 0.0036$	0.476**
1450	吸收深度 The absorbed depth	$y = -0.005x + 0.0504$	0.234**
		$y = -0.0112\ln x + 0.0463$	0.199**
		$y = 0.0001x^2 - 0.0057x + 0.0514$	0.234**

**表示在 0.01 水平上显著 **denotes significant at 0.01 level

2.4 模型预测效果评价

利用 $P_Depth1280$ 可以用来反演土壤有机质含量, 经验证, $R^2=0.721$, $RSME=0.639$; 而利用 570~590 nm 一阶导数光谱进行预测时得到 3 个参数分别为: $R^2=0.755$, $RSME=0.563$ 。相对来讲, 利用 570~

590 nm 一阶导数光谱进行预测得到较高的 R^2 和较小的 $RSME$ 值。两个模型斜率均偏低, 导致预测值偏低。由此可见, 用这两个参量预测土壤有机质含量均有一定效果, 但同时又各有优缺点。在实际应用中可以相互参考。

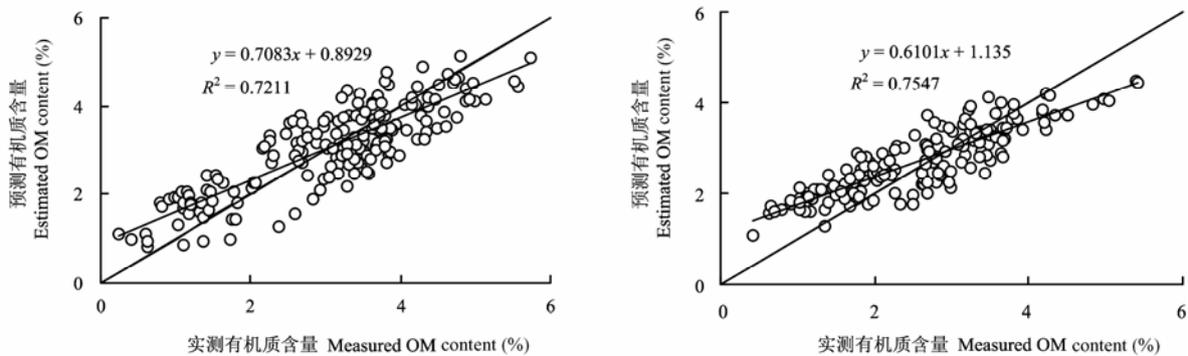


图 4 $P_Depth1280$ (左) 与 570~590 nm 一阶导数光谱 (右) 对有机质含量的预测值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of measured OM and the values estimated by $P_Depth1280$ (left) and the first derivate in 570-590 nm (right)

3 讨论

土壤反射光谱特性是土壤的基本特征之一,它与土壤的物理性质有着密切的关系^[16]。土壤有机质通过影响土壤理化特性和生物特性来影响土壤肥力,是衡量土壤肥力的重要指标之一^[17]。土壤有机质对土壤反射率的影响在视觉上表现为暗黑色的土壤比亮色的土壤有机质含量更高,这表明了土壤有机质含量与可见光波段光谱反射率之间的关系^[18,19]。国外很早就有关于土壤有机质光谱反演波段选择和预测的报道^[20,21]。中国学者戴昌达,徐彬彬等都对土壤光谱特性做过大量的研究工作^[22,23]。室内高光谱分析技术因其影响因素较野外更易控制而得以广泛应用于土壤资源环境评价中。国内外学者对室内光谱测试过程影响较明显的因素如土壤水分含量、土壤有机质含量等进行了研究^[1,3,24,25],取得了很好的效果。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。利用不同形式光谱特征参量可以较好地反映土壤有机质含量。当然,影响土壤反射的因素除了有机质含量以外还有很多,如土壤质地、氧化铁含量以及土壤水分含量等。本文选择的是东北的土壤样本,土样经过风干处理,可以认为土壤含水量影响很小或者各个土样处于较一致的条件。并且,该区域范围的土壤有机质含量普遍偏高并且变化较大,适合于土壤有机质含量的预测。但是有机质含量偏低的土壤如南方土壤,则又会因为土壤中含有较高的有色金属氧化物等而降低甚至掩盖了土壤有机质的光谱效应。因此,在下一步工作中还需要对不同地区和不同类型的土壤进一步研究,并且为了提高有机质预测模型的可靠性和普适性,还需要进一步摸清影响有机质含量预测的因素。

4 结论

本试验在室内几何条件基本一致的条件采集了不同土壤样本高光谱反射率数据。研究发现土壤有机质含量较高的东北黑土的光谱曲线与其它土壤类型的光谱曲线在形状上有很大差异,突出表现在600~900 nm附近,黑土表现为直缓上升,而另一类则表现为曲陡上升。相关分析确定了土壤有机质的敏感波段范围,即土壤有机质含量在580~738 nm波段范围内达到极显著负相关。土壤有机质含量与一阶导数光谱相关性进一步增强,在可见光波段和近红外波段均表现为极显著相关关系。并且,利用570~590 nm的一阶导数

光谱和1280 nm处反射峰高度 $P_{Depth1280}$ 可以较好地预测土壤有机质含量。经验证,两个模型均会导致预测值偏低。但相对而言,利用570~590 nm波段的一阶导数光谱进行预测得到较高的 R^2 值和较小的RSME值。

References

- [1] Demattê J A M, Campos R C, Alves M C, Fiorio P R, Nanni M R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. *Geoderma*, 2004, 121: 95-112.
- [2] Hummel J W, Sudduth K A, Hollinger S E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 32: 149-165.
- [3] Liu W, Baret F, Gu X, Tong Q, Zheng L, Zhang B. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 238-246.
- [4] Galvao L S, Vitorello I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and color of brazilian tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19: 1969-1979.
- [5] Demattê J A M, Sousa A A, Alves M C, Nanni M R, Fiorio P R, Campos R C. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. *Geoderma*, 2006, 135: 179-195.
- [6] 彭玉魁, 张建新, 何绪生, 卢恩双. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究. *土壤学报*, 1998, 35: 553-559.
Peng Y K, Zhang J X, He X S, Lu E S. Analysis of soil moisture, organic matter and total nitrogen content in loess in China with near infrared spectroscopy. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35: 553-559. (in Chinese)
- [7] Brown D J, Brickleymer R S, Miller P R. Validation requirements for diffuse reflectance soil characterization models with a case study of VNIR soil C prediction in Montana. *Geoderma*, 2005, 129: 251-267.
- [8] 汪周伟, 钱淑萍. 东北主要土壤反射光谱特性. *土壤通报*, 1984, 5: 209-211.
Wang Z W, Qian S P. Soil spectral reflectance characteristics in north-east. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984, 5: 209-211.
- [9] Gunsaulis F R, Kocher M F, Griffis C L. Surface structure effects on close-range reflectance as a function of soil organic matter content. *American Society of Agricultural Engineer*, 1991, 34: 641-649.
- [10] 沙晋明, 陈鹏程, 陈松林. 土壤有机质光谱响应特性研究. *水土保持研究*, 2003, 10(2): 21-24.
Sha J M, Chen P C, Chen S L. Characteristics analysis of soil spectrum response resulted from organic material. *Research of Soil and Water*

- Conservation*, 2003, 10(2): 21-24. (in Chinese)
- [11] Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L, Stoner E R. Spectral reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, 1985, 38: 1-4.
- [12] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究. *土壤*, 2000, (6): 281-287.
Xu B B. Study on spectral reflectance of soil section. *Soil*, 2000, (6): 281-287. (in Chinese)
- [13] 何挺, 王静, 林宗坚, 程焯. 土壤有机质光谱特征研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31: 975-979.
He T, Wang J, Lin Z J, Cheng Y. Spectral features of soil organic matter. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31: 975-979. (in Chinese)
- [14] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, Hummel J W. Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 1282-1285.
- [15] 周清, 张杨珠, 周斌, 胡瑞芝, 王人潮. 室内几何条件对土壤高光谱数据波动性的影响. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2004, 30(1): 29-32.
Zhou Q, Zhang Y Z, Zhou B, Hu R Z, Wang R C. Effect of geometric conditions on soil hyperspectral data fluctuate characteristic in laboratory test. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2004, 30(1): 29-32. (in Chinese)
- [16] 徐金鸿, 徐瑞松, 夏斌, 朱照宇. 土壤遥感监测研究进展. *水土保持研究*, 2006, 13(2): 17-20.
Xu J H, Xu R S, Xia B, Zhu Z Y. Research advances on soil monitoring by remote sensing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(2): 17-20. (in Chinese)
- [17] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 尤琛, 汤浩茹, 胡庭兴. 土壤有机质及其研究方法综述. *世界科技研究与发展*, 2005: 72-78.
Zhang Y, Pang X Y, Bao W K, You C, Tang H R, Hu T X. A review of soil organic matter and its research methods. *Research and Development of the World Technology*, 2005: 72-78. (in Chinese)
- [18] Ben-Dor E, Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 364-372.
- [19] Mutuo P K, Shepherd K D, Albrecht A, Cadisch G. Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 1658-1664.
- [20] Henderson T L, Szilagyi A, Baumgardner M F, Chen C T, Landgrebe D A. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 1778-1784.
- [21] Henderson T L, Baumgardner M F, Franzmeier D P, Stott D E, Coster D C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 865-872.
- [22] 戴昌达. 土壤学中遥感应用的回顾与展望. *土壤通报*, 1985: 44-48.
Dai C D. Review and prospect of remote sensing applied on agrology. *Chinese Journal of Soil Science*, 1985: 44-48. (in Chinese)
- [23] 徐彬彬, 季耿善, 朱永豪. 中国陆地背景和土壤光谱反射特性的地理分区的初步研究. *环境遥感*, 1991, 6(5): 142-152.
Xu B B, Ji G S, Zhu Y H. A preliminary research of geographic regionalization of China land background and spectral reflectance characteristics of soil. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 6(5): 142-152. (in Chinese)
- [24] 贺军亮, 蒋建军, 周生路, 徐军, 蔡海良, 张春耀. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演. *中国农业科学*, 2007, 40: 638-643.
He J L, Jiang J J, Zhou L, Xu J, Cai H L, Zhang C Y. The hyperspectral characteristics and retrieval of soil organic matter content. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40: 638-643. (in Chinese)
- [25] 王人潮, 苏海萍, 王深法. 浙江省主要土壤光谱反射特性及其模糊分类在土壤分类中的应用研究. *浙江农业大学学报*, 1986, 12: 464-471.
Wang R C, Su H P, Wang S F. Study on spectral reflectance of typical soils and its fuzzy category in soil classification in Zhejiang province. *Acta Agriculturae Universitatis Zhejiangensis*, 1986, 12: 464-471. (in Chinese)

(责任编辑 吴晓丽)