

几种不同类型土壤的 VIS-NIR 光谱特性 及有机质响应波段

纪文君¹, 史舟^{1*}, 周清², 周炼清¹

(1. 浙江大学 农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310058;

2. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 利用高光谱遥感技术估测土壤有机质含量是精准农业发展的必然要求. 本研究测量并分析了7组不同地区不同类型共791个土壤样品在350~2500 nm的光谱反射率及一阶微分曲线, 并对土壤有机质含量和光谱反射率进行相关性分析, 同时对前人研究中有关有机质的光谱响应波段进行了总结. 结果发现, 600~800 nm波段可以作为研究区域内不同类型土壤共同的有机质光谱响应波段, 这对进一步建立不同土壤类型相对统一的有机质预测模型具有一定意义. 研究还发现, 有机质含量高于2%并不是高光谱预测土壤有机质含量必要的前提条件.

关键词: 高光谱; 土壤有机质; 响应波段; 相关分析

中图分类号: S158.2/TP7 **文献标识码:** A

VIS-NIR reflectance spectroscopy of the organic matter in several types of soils

Ji Wen-Jun¹, Shi Zhou^{1*}, Zhou Qing², Zhou Lian-Qing¹

(1. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application,
Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Estimating the content of soil organic matter (SOM) using hyperspectral remote sensing is an inevitable requirement for precision agriculture. In this study, averages of spectral reflectance and first derivative of 791 sample pieces were measured in the visible and near-infrared (350~2500 nm) bands, which belong to five different soil types from four provinces, including phaeozem in Heilongjiang, alluvial soil in Henan, paddy soil in Sichuan and Zhejiang, purple soil in Sichuan and Zhejiang, and seashore saline soil in Zhejiang. The correlation coefficients between organic matter content and spectral reflectance were calculated, while the characteristic spectral bands mentioned in precedent researches were summarized. The results show that 600~800nm can be used as common characteristic bands of these different types of soils from different regions in the study, which is important for building the universal model for soil organic matter with alternative parameters. Another conclusion is that above 2% in SOM is not necessary for predicting SOM.

Key words: hyperspectral; soil organic matter; characteristic bands; correlation analysis

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

引言

土壤有机质(soil organic matter, SOM)是土壤的重要组成部分,在土壤肥力、环境保护和农业可持续发展等方面都有重要的作用和意义. 高光谱遥感技

术监测土壤有机质具有快速、简便、非接触、不破坏等优点,已逐渐成为获取土壤有机质含量的重要手段.

早在1965年, Bowers和Hanks^[1]就在研究中指出,有机质是影响土壤反射率的因素之一. 其中,腐

收稿日期:2010-12-07, 修回日期:2011-05-10

Received date: 2010-12-07, revised date: 2011-05-10

基金项目:国家自然科学基金(40871100), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0694)

Foundation item: supported by National Natural Science Foundation of China(40871100), and program for New Century Excellent Talents in university (NCET-10-0694).

作者简介:纪文君(1987-),女,山西洪洞人,博士研究生,目前主要研究领域为地物高光谱遥感及相关预测模型. E-mail:ji1wen2jun3@163.com.

* 通讯作者: E-mail: shizhou@zju.edu.cn.

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. Krishnan 等^[2]利用逐步多元线性回归和迭代的方法,对采自美国伊利诺斯州的 4 种不同类型土壤的反射光谱进行研究,发现在近红外波段(800 ~ 2400 nm)不存在由土壤有机质引起的吸收峰,可见光波段 623 nm 和 564 nm 才是有机质的敏感波段. Gunsaulis 等^[3]对东阿肯色州三角洲地区的土壤进行研究,发现土壤有机质含量与红光波段的反射率具有较强的相关性. 国内也有许多学者研究了土壤有机质含量与土壤反射率的关系. 徐彬彬和戴昌达^[4]通过对南疆土壤的研究发现,土壤有机质与土壤光谱 600 nm 波段的弓曲差极显著负相关. 程街亮^[5]在对浙江省平湖市所采集的 77 个水稻土样品进行单相关分析后发现,568 nm 处的光谱反射率建立的一元回归方程预测土壤有机质的预测效果较好.

我国幅员辽阔,土壤类型众多,深入了解和研究全国范围内不同地区不同类型土壤属性对于农业发展有着深远的意义. 但是,目前国内有关土壤有机质的光谱预测研究多是针对某一地区或某种土壤类型进行研究,通过光谱数据的各种变换,采用不同的分析和建模方法,来提高土壤有机质的反演精度. 然而,即使拥有精度很高的反演模型,在进行区域尺度上的土壤属性调查时,不同模型的更换必然会对不同地区不同类型土壤有机质含量的估测带来新的误差,从而影响预测精度. 研究不同地区不同类型土壤的光谱特征,建立并简化适用于多个地区多种类型乃至全国范围的土壤有机质含量光谱预测模型还鲜有报道.

本文将 7 组采自 4 个地区 5 种不同类型共 791 个土壤样品作为研究对象,分析并比较其原始光谱反射曲线和一阶微分变换曲线,通过对有机质含量与光谱反射率的相关性分析,尝试提取研究区域内不同类型土壤共同的有机质光谱响应波段,为后续更多类型更多地区乃至全国范围的土壤有机质普适性模型的建立提供可行方法.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

实验土样为 7 组采自 4 个地区 5 种不同类型的耕层(0 ~ 20 cm)土壤. 每个样品经风干、研磨并通过 2 mm 孔筛,分别供化学分析和光谱测试用.

表 1 为供试土壤样品的有机质含量统计特征,可以看出不同土壤样品有机质含量差异较大. 有机

质含量高低为:黑龙江黑土 > 四川水稻土 > 浙江水稻土 > 四川紫色土 > 浙江滨海盐土 > 浙江紫色土 > 河南潮土.

表 1 土样有机质含量的统计特征

Table 1 Statistic characteristics of SOM content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

地点 Locations	土壤类型 Soil types	样本数 Samples	有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Soil organic matter content			
			最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	均方差 Mean square error
浙江	水稻土	448	58.8	4.5	25.1	12.1
浙江	滨海盐土	58	35.1	6.3	13.7	5.5
浙江	紫色土	12	28.5	1.2	13.2	9.9
河南	潮土	48	15.6	8.0	11.8	1.7
四川	水稻土	78	44.1	10.0	26.8	6.7
四川	紫色土	56	38.9	9.4	23.8	7.5
黑龙江	黑土	91	58.6	7.9	29.3	8.3
所有样本	/	791	58.8	1.2	23.8	9.4

1.2 光谱数据的获取

1.2.1 光谱测试

采用美国 ASD 公司的 FieldSpec 3 型光谱仪进行土壤测试,其波长范围是 350 ~ 2500 nm,采样间隔为 1.4 nm(350 ~ 1000 nm 区间)和 2 nm(1000 ~ 2500 nm 区间),重采样间隔为 1 nm. 该光谱仪是由 3 个光谱仪组合而成的,分别为:UV-VNIR(350 ~ 1100 nm)、SWIR1(1000 ~ 1800 nm)和 SWIR2(1700 ~ 2500 nm). 在 1000 nm、1800 nm 附近的接缝处以及边缘波段 350 ~ 399 nm、2451 ~ 2500 nm 处噪声较大,其他波段信噪比高,约为 1000:1. 光源是功率为 50 W 的卤素灯,距土壤样品表面 70 cm,天顶角 30°,探头位于土壤样本表面垂直上方 15 cm 处. 采用 25°视场角探头,测试之前先进行白板校正. 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.

1.2.2 光谱数据预处理

每个土样的光谱曲线去除噪声较大的边缘波段 350 ~ 399 nm 和 2451 ~ 2500 nm 波段. 采用小波去噪法对土壤光谱进行滤波去噪,小波去噪由 MATLAB 软件实现. 数据的一阶微分变换处理及相关分析等具体过程由 Unscrambler 9.5 和 SPSS 18.0 来实现.

2 结果与分析

2.1 不同类型土壤的光谱特征分析

图 1 和图 2 分别比较了 7 组供试土壤样品反射光谱曲线和对应的一阶微分曲线,其中每条反射曲线是每组土样 n 条光谱曲线取平均值得到的. 图

1(a)和图2(a)分别比较了7组土壤全波段400~2450 nm的光谱反射率及一阶微分曲线,图1(b)和图2(b)分别比较了可见光波段400~800 nm的光谱反射率及一阶微分曲线。

结合表1,黑龙江黑土、四川水稻土的有机质含量较高,光谱反射曲线位于较低的位置,河南潮土的有机质含量均值最小,光谱反射率最高。一般情况下,随着土壤有机质含量的增加,光谱反射率减小。从400~2450 nm全波段范围的光谱反射率及一阶微分曲线来看,7组土壤的光谱曲线在1400、1900、2200 nm附近都存在明显的水分吸收谷。

黑龙江黑土土壤颜色较深,中细结构。从光谱曲线来看,可见光波段范围光谱反射率较低在1400和1900 nm附近存在明显的水分吸收谷。根据Stone和Baumgardner^[6]所归纳的5类土壤反射光谱曲线,其光谱曲线属于富含有机质类型,这与黑龙江黑土富含有机质这一情况十分符合。结合一阶微分曲线可以看出,在可见光波段有机质含量最高的黑龙江黑土一阶微分曲线最低,反射光谱曲线是平缓上升的,而其他类型土壤的曲线变化较大,反射光谱曲线是陡峭上升的。

在400~900 nm波段,浙江紫色土与四川紫色土的光谱反射率虽然在数值上有所差异,但是二者的一阶微分曲线几乎是缠绕在一起的,可见两者的

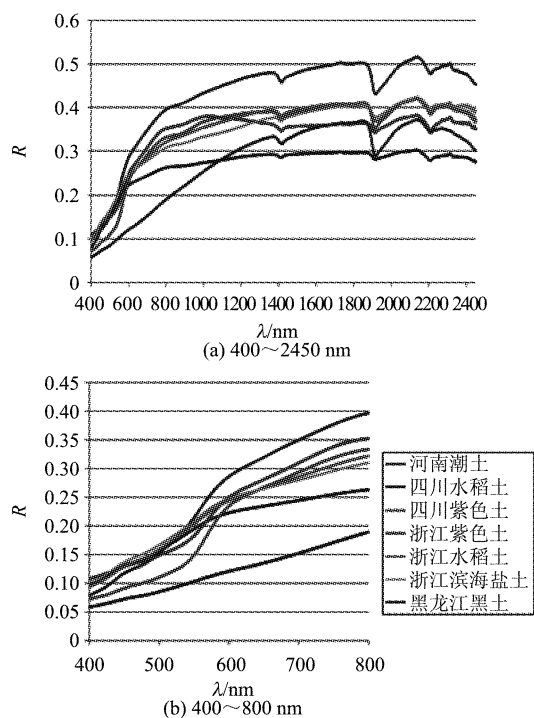


图1 供试土壤的反射率均值曲线比较
Fig. 1 Spectral reflectance of different types of soils

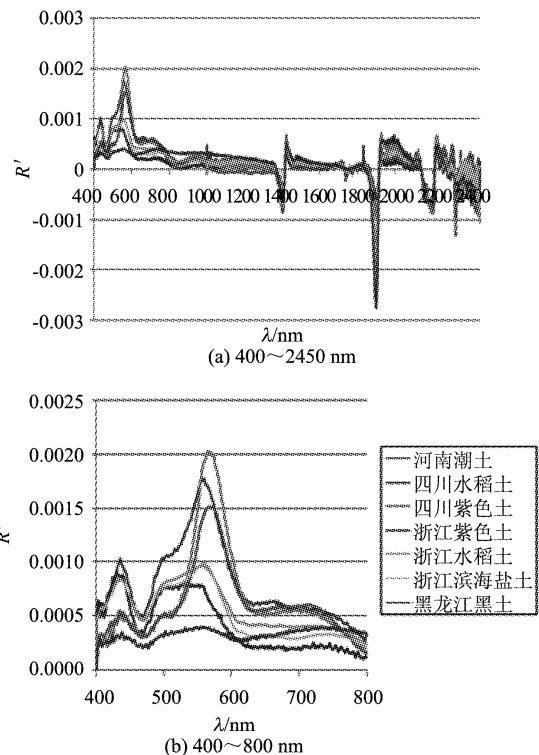


图2 供试土壤的反射率一阶微分均值曲线比较
Fig. 2 First derivative reflectance of different types of soils

反射光谱曲线形状大致相似:在可见光波段陡峭上升,在700 nm附近有轻微铁氧化物吸收波段,900 nm处有较强的铁吸收波段特征。这些光谱特征与紫色土的形成过程有关。紫色土是由地质形成时期,颗粒或结构表面包被了铁锰胶膜的紫红色砂、页岩等风化发育形成的。因发育时间相对其他土壤较短,紫色土含大量矿质营养元素^[7]。然而从全波段来看,浙江紫色土反射光谱进入近红外波段后,随着波长的增加,一阶微分值变为负数,反射率缓慢下降,1400 nm和1900 nm处的水吸收波段深度和其他曲线相比明显要小很多。由此推断,浙江紫色土属于铁影响类型^[6],这类土壤有机质含量较低,铁含量中等。不同的是,四川紫色土在进入近红外波段后,光谱曲线基本持平,略有上升。同为紫色土,两者的反射率光谱曲线却有差别,一方面是因为四川紫色土的有机质含量($23.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)要远高于浙江紫色土($13.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 小于 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1[2]}$),使得有机质可能掩盖了铁的影响,而成为影响光谱反射率的主要因素;另一方面也可能是由于两地的紫色土在发育程度、机械组成等方面的不同而造成的。

河南潮土的光谱曲线从550 nm开始就显著高于其他土壤类型,且一阶微分曲线在400~600 nm最高,说明光谱原始反射率曲线增幅最快。高的光谱反

射率主要有以下三方面的原因,一是潮土水、热、通气状况良好,微生物活动强烈,有机质分解快;二是这些地区耕垦历史悠久,土壤中的有机质积累少,栽培作物残体的大部分随收获而带走;另外,河南潮土的颜色较浅,也是造成光谱反射率较高的一个原因。

在一阶微分曲线的全波段范围内,四川水稻土和浙江水稻土的曲线走势基本一致,这说明四川水稻土和浙江水稻土在全波段范围的反射光谱曲线形状基本一致.曲线形状在 450 ~ 600 nm 处稍下凹,但在 600 nm 以后又稍稍向上凸起.这两种水稻土属于有机质影响类型^[6],有机质含量较高.然而,浙江水稻土的光谱反射曲线整体要远远高于四川水稻土,这很可能是由于两地水稻土成土母质不同造成的^[8].浙江滨海盐土的光谱曲线在 400 ~ 550 nm 波段与河南潮土一样,位于最顶层,在 550 nm 之后基本位于 7 组土样光谱曲线的中间位置.浙江滨海盐土分布于现代滩涂,在现代海水作用下经历盐分积累过程,土壤含盐量高(以氯化物为主),有机质积累较少。

从 400 ~ 2450 nm 一阶微分曲线来看,不同类型的土壤在可见光波段显示出较大的差异,进入近红外波段后一阶微分曲线相互缠绕、形状大体相似,说明在近红外波段范围内 7 组土壤的反射率曲线走势相近.并且,在 1000 nm 波段以后一阶微分曲线噪声明显增大,不利于分析.研究区域内不同类型土壤的光谱分析表明,为预测有机质含量,可见光光谱区域比近红外光谱区域更实用。

2.2 不同类型土壤的光谱反射率与有机质含量的相关性分析

2.2.1 光谱响应波段汇总

近几年来,国内的学者在利用土壤的高光谱特性估测土壤有机质含量方面进行了许多卓有成效的研究^[8-20].总结不同的研究发现,不同地区不同类型土壤的有机质光谱响应波段不尽相同.这可能是由以下原因造成的:(1)土壤光谱是土壤内在理化特性的综合反映.不同类型的土壤,由于其理化特性不同,光谱的响应波段也不相同.(2)同一类型不同地区的土壤,由于各地所处的地理环境及气候条件的不同,造成了成土条件的差异^[8],从而导致了光谱响应波段的差异。

为了提取共同的光谱响应波段,对不同研究中的有机质光谱响应波段进行总结(图 3),发现大部分的光谱响应波段都集中在 600 ~ 800 nm 之间.同时,由于可见光波段能量辐射密度大,将这一波段用

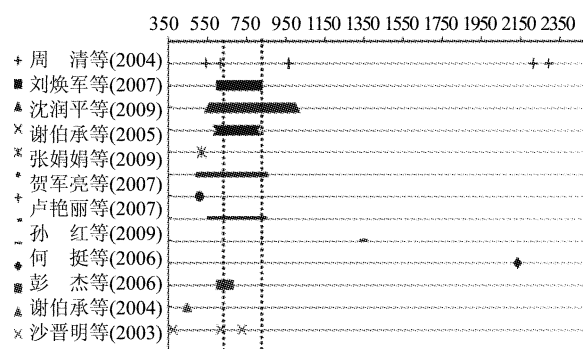


图 3 不同研究中有机质的光谱响应波段汇总

Fig. 3 Summary of spectral characteristic bands of SOM in different researches

作共同的有机质响应波段进行测量时,仪器响应系数相对较高,有利于提高测量精度。

2.2.2 土壤有机质含量与光谱反射率的相关性分析

图 4 为供试土壤有机质含量与光谱反射率的相关系数曲线图,其中图 4(a)是 7 组土壤在全波段范围(400 ~ 2500 nm)有机质含量与光谱反射率的相关系数曲线,图 4(b)为可见光波段(400 ~ 800 nm)的相关系数曲线.一般情况下,在可见-近红外波段土壤有机质含量与光谱反射率成负相关^[2,4].从图 4(a)可知,除浙江紫色土和四川紫色土的相关系数出现正值,其他 5 组土壤的相关系数曲线均为负值.除浙江紫色土外,其他 6 组土壤类型的相关系数均在 600 ~ 800 nm 附近达到最大值,其中浙江滨海盐土的最大响应波段稍靠前(478 nm, $r = -0.347$),四川紫色土的稍靠后(1010 nm, $r = -0.346$),并且,7 组土壤在 600 ~ 800 nm 波段处的有机质含量与光谱反射率均呈负相关.对这批样品的研究表明可以用 600 ~ 800 nm 范围的反射率来反演这 7 组土壤的有机质含量,与 2.2.1 中总结的不同研究中土壤有机质共同的光谱响应波段相一致。

600 ~ 800 nm 光谱反射率与土壤有机质的相关系数绝对值从大到小依次为:浙江水稻土、黑龙江黑土、河南潮土、四川水稻土、四川紫色土、浙江滨海盐土、浙江紫色土.结合有机质含量的大小顺序可以看出,黑龙江黑土、浙江水稻土的有机质含量高,相关系数也高.当 SOM 含量大于 2% 时,其在描述土壤光谱反射特性中起主要作用;当 SOM 含量在 2% 以下时,在可见光波段 SOM 遮蔽其他土壤组成物质(如铁、锰)光谱反射特性的能力有所减弱^[2].浙江滨海盐土、浙江紫色土、河南潮土的有机质含量均在 2% 以下,在可见光波段范围内其光谱特征极易被其他成分(如铁氧化物)光谱所掩盖.这可以解释滨海

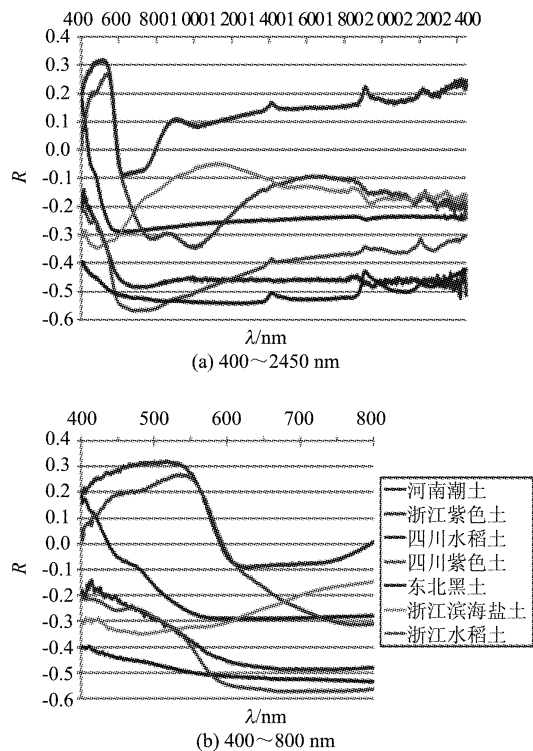


图4 供试土壤的有机质含量与光谱反射率的相关系数曲线
Fig.4 The correlation coefficient between SOM content and spectral reflectance of different types of soils

盐土和浙江紫色土在 600 ~ 800 nm 范围内有机质含量与反射率的相关系数绝对值小于 0.3 这一现象. 特殊的是, 河南潮土的有机质含量均值最小(仅为 $11.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但其有机质含量与光谱反射率的相关系数在 400 ~ 2450 nm 波段范围很高, 甚至在近红外波段要略高于可见光波段. 已有研究表明, 当有机质含量小于 2% 时, 它在近红外范围内光谱特征要比氧化铁、水等物质对土壤光谱的影响更为明显^[5], 故在近红外波段有机质与光谱反射率的相关系数更大. 河南潮土的相关性分析表明, 有机质含量高于 2% 并不是高光谱预测土壤有机质必要的前提条件. 如果土壤中其他成分对有机质的影响不能遮盖有机质的光谱特性时, 有机质仍是影响光谱反射率的主要因子. 但这个判断还需要更多类似的土壤样本来进一步的验证.

图4中, 7组土壤中浙江紫色土和四川紫色土的相关系数曲线相对特殊, 二者在 400 ~ 600 nm 波段范围的相关系数为正. 这与紫色土的成土过程有关, 紫色土在形成过程中由于铁锰胶体的附着使得紫色土中含有较高的铁和各种铁的化合物, 如氧化铁、氧化亚铁等, 一般来说, 土壤中氧化铁含量增加, 会导致可见光波段土壤反射率明显下降^[21]. 较高含

量的铁及铁氧化物, 导致土壤光谱曲线在可见光波段降低, 使得低有机质含量的浙江紫色土和四川紫色土在 400 ~ 600 nm 波段的相关系数为正.

3 结论与展望

在对以往用反射光谱估测土壤有机质含量的研究进行总结后发现, 尽管不同地区不同类型土壤的有机质响应波段有所不同, 但大部分响应波段集中在 600 ~ 800 nm 附近, 这说明用 600 ~ 800 nm 波段对多种土壤类型进行有机质含量分析具有普适性. 将本次采集的 7 组土壤的有机质含量对光谱反射率作相关性分析, 结果发现除浙江紫色土外, 其他 6 种土壤样品的有机质最大响应波段均在 600 ~ 800 nm 附近. 并且, 7 组土壤在 600 ~ 800 nm 波段处的有机质含量与光谱反射率均呈负相关. 这说明 600 ~ 800 nm 范围的反射率同样也可以用来反演本次实验所采集的这 7 组土壤样品.

通过 7 组土壤样品的有机质含量与光谱反射率的相关系数曲线可以看出, 尽管河南潮土的有机质含量在 7 组土壤样品中是最低的(仅为 $11.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 小于 2%, 但相关系数却很高. 这说明, 有机质含量高于 2% 并不是高光谱预测土壤有机质必要的前提条件, 但这个判断还需要更多类似的土壤样本来进一步的验证. 尤其对于我国耕地土壤, 近年来形势异常严峻, 有机质平均含量 $< 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22], 远低于发达国家的 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 因此, 对于低有机质含量土壤的高光谱预测模型的建立还需要进行更深入的研究.

当然, 本次研究只涉及了 4 个地区 5 种不同类型土壤的光谱特性研究, 所涵盖土壤类型并不能代表我国全部土壤类型, 对于我国一些典型土壤, 例如荒漠土壤、高寒土壤、红壤等仍然缺乏有效的数据支持, 仍需继续进行及时的后续研究.

作为对区域乃至全国尺度上的一次初步研究, 本次研究结果说明了继续进一步研究全国更多地区更多类型土壤的必要性, 也说明了建立全国范围内土壤有机质通用模型的可能性. 尽管建立普适性模型在一定程度上可能会损失某一类型土壤有机质含量的预测精度, 但在野外速测及大范围监测等方面仍具有重要意义. 而针对某一类型土壤的预测精度还可通过引入相应的校正参数进行提高. 通用模型以光谱响应波段为自变量, 同时包含一个全国不同地区不同类型土壤校正参数的数据库, 通过校正参数的变换, 来提高通用模型预测某一类型土壤的准

确性. 在近地探测方面, 野外便携式有机质含量速测仪只需要采集土壤在 600 ~ 800 nm 波段的光谱反射率, 通过通用模型便可迅速计算出该地区的土壤的有机质含量. 在高空遥感方面, 统一模型的建立减少了由于地区不同土壤类型不同而频繁更换模型带来的新的误差和时间的延误, 使得到数据在一个统一的体系中, 更具有可比性, 同时也为区域乃至全国范围的土壤属性普查的实现提供了可能.

REFERENCES

- [1] BOWERS S A, HANKS R J. Reflection of radiant energy from soils[J]. *Soil Sci.*, 1965, **100**(2): 130 - 138.
- [2] 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**(6): 1282 - 1285.
- [3] 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 and Biological Engineers*, 1991, **34**(2): 641 - 649.
- [4] XU Bin-Bin, DAI Chang-Da. Relationship between soil reflectance characteristics and SOM content in south area of Xinjiang Province (In Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin* (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性分析. *科学通报*), 1980, **25**(6): 282 - 284.
- [5] CHENG Jie-Liang. Hyperspectral Remote Sensing Information Extraction and BRDF Model of Soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University (程街亮. 土壤高光谱遥感信息提取与二向反射模型研究. 杭州: 浙江大学), 2008.
- [6] STONE E R, BAUMGARDNER M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**(6): 1161 - 1165.
- [7] HE Yu-Rong. Purple soil in China (2) [M]. Peking: Science Press (何毓蓉. 中国紫色土(下篇). 北京: 科学出版社), 2003, **14**.
- [8] ZHOU Qing, ZHOU Bin, ZHANG Yang-Zhu, *et al.* Influence of parent materials on paddy soil hyperspectral characteristics and SOM spectral-parameter-models [J]. *Acta Pedologica Sinica* (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研究初探. *土壤学报*), 2004, **41**(6): 905 - 911.
- [9] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, ZHAO Jun, *et al.* Spectral models for prediction of organic matter in black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica* (刘焕军, 张柏, 赵军, 等. 黑土有机质含量高光谱模型研究. *土壤学报*), 2007, **44**(1): 27 - 32.
- [10] SHEN Run-Ping, DING Guo-Xiang, WEI Guo-Shuan, *et al.* Retrieval of soil organic matter content from hyperspectrum based on ANN [J]. *Acta Pedologica Sinica* (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. *土壤学报*), 2009, **46**(3): 391 - 397.
- [11] XIE Bo-Cheng, XUE Xu-Zhang, LIU Wei-Dong, *et al.* Hull-curve-method-based extraction and analysis of soil spectral characteristics [J]. *Acta Pedologica Sinica* (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分析. *土壤学报*), 2005, **42**(1): 171 - 175.
- [12] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, LIU Dian-Wei, *et al.* Study on Quantitatively Remote Sensing Typical Soils in Songnen Plain, Northeast China [J]. *Journal of Remote Sensing* (刘焕军, 张柏, 刘殿伟, 等. 松嫩平原典型土壤高光谱定量遥感研究. *遥感学报*), 2008, **12**(4): 647 - 654.
- [13] ZHANG Juan-Juan, TIAN Yong-Chao, ZHU Yan, *et al.* Spectral Characteristics and Estimation of Organic Matter Content of different soil types [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (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. *中国农业科学*), 2009, **42**(9): 3154 - 3163.
- [14] HE Jun-Liang, JIANG Jian-Guo, ZHOU Sheng-Lu, *et al.* The hyperspectral Characteristics and retrieval of soil organic matter content [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (贺军亮, 蒋建国, 周生路, 等. 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**(3): 638 - 643.
- [15] LU Yan-Li, BAI You-Lu, YANG Li-Ping, *et al.* Prediction and validation of soil organic matter content based on hyperspectrum [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (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. *中国农业科学*), 2007, **40**(9): 1989 - 1995.
- [16] SUN Hong, LI Min-Zan, ZHAO Yong, *et al.* Characteristics of soil spectral reflectance and estimation of soil parameters in Fuxin opencast coal mine [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (孙红, 李民赞, 赵勇, 等. 露天煤矿排土场地表的光谱特征和土壤参数分析. *光谱学与光谱分析*), 2009, **29**(12): 3365 - 3368.
- [17] HE Ting, WANG Jing, LIN Zong-Jian, *et al.* Analysis on characteristic of soil organic matter [J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University* (何挺, 王静, 林宗坚, 等. 土壤有机质光谱特征研究. *武汉大学学报(信息科学版)*), 2006, **31**(11): 975 - 979.
- [18] PENG Jie, ZHANG Yang-Zhu, ZHOU Qing, *et al.* Reflecting spectral changes in the depth profile of major soils in Hunan province [J]. *Chinese Journal of Soil Science* (彭杰, 张杨珠, 周清, 等. 湖南省几种主要类型土壤反射光谱的剖面变化特性. *土壤通报*), 2006, **37**(2): 236 - 240.
- [19] 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* (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. *土壤通报*), 2004, **35**(4): 391 - 395.
- [20] SHA Jin-Ming, CHEN Peng-Cheng, CHEN Song-Lin. Characteristics analysis of soil spectrum response resulted from organic material [J]. *Research of Soil and Water Conservation* (沙晋明, 陈鹏程, 陈松林. 土壤有机质光谱响应特性研究. *水土保持学报*), 2003, **10**(2): 21 - 24.
- [21] XU Bin-Bin, JI Geng-Shan. Analysis of the correlation ship between spectral reflectance and soil physical and chemical properties: *Soil remote sensing research album of Ningwu*, 1987 [C]. Peking: Science Press (徐彬彬, 季耿善. 土壤光谱反射特性与理化性状的相关分析. *宁芜土壤遥感研究专辑*, 1987. 北京: 科学出版社), 1987, 66 - 76.
- [22] ZHAO Qi-Guo. Strategic Thinking of Soil Science in China [J]. *Soils* (赵其国. 土壤科学发展的战略思考. *土壤*), 2009, **41**(5): 681 - 688.