

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

卢艳丽, 白由路, 杨俐苹, 王磊, 王贺

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 土壤有机质含量是反映土壤肥力的重要特征, 利用高光谱技术对耕层土壤有机质(OM)含量进行定量化反演可为土壤信息化管理和精准施肥提供重要的依据。本文利用 ASD FR 2500 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, 分析了东北平原不同土壤类型土壤光谱反射率曲线形状变化及土壤有机质含量的光谱反演模型, 结果表明, 根据土壤光谱反射率曲线变化特点可以初步将东北平原的几种土壤类型划分为三类, 其主要区别在于 460~1350 nm 范围内曲线斜率变化的差异。通过相关分析进一步确定了土壤有机质敏感波段为 650~750 nm, 建立了不同土壤类型的有机质含量回归预测模型, 并且对不同模型的回归系数和截距进行了方差同质性检验。结果显示, 黑土和黑钙土、黑土和暗棕壤的模型没有显著差异, 即可以分别构建同质性模型来简化有机质的预测, 但是预测精度有所降低。

关键词: 高光谱; 有机质; 模型; 同质性检验

中图分类号: S153.6+21; O433.5

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)02-0456-08

Homogeneity of retrieval models for soil organic matter of different soil types in Northeast Plain using hyperspectral data

LU Yan-li, BAI You-lu, YANG Li-ping, WANG Lei, WANG He

(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081*)

Abstract: Organic matter (OM) content is an important index in reflecting soil fertility, and provides important information for soil digital management and precise fertilization if OM can be estimated using hyperspectral technology. In this experiment, visible and near-infrared spectral reflectance of soil was measured using ASD FR 2500 hyperspectral meter. The spectral reflectance curve shapes and the OM prediction models of different soil types were analyzed. The results show that, according to the variation of spectral reflectance curves in the Northeast Plain, those soil types can be divided preliminarily into three categories, and their main differences are the curve slopes in 460-1350 nm. Further, the sensitive bands to soil organic matter were determined as 650-750 nm by correlation analysis. The soil organic matter regression models of different soil types were established using reflectance in the sensitive bands, and the homogeneity of variance is tested for regression coefficients and intercept. The results indicate that black and chernozem, and black and dark brown soil pass the homogeneity test respectively. Both of the two homogenous categories can be predicted using common models, but the predicting accuracy is slightly lower.

Key words: hyperspectral; organic matter; model; homogeneity test

土壤有机质是反映土壤肥力的重要物质, 而高光谱技术为土壤评价与理化性状的监测提供了强有

力的工具, 为定量化监测土壤有机质含量提供了可能。目前, 高光谱技术不仅广泛应用在包括有机质

收稿日期: 2010-05-18

接受日期: 2010-11-29

基金项目: 中国农科院农业资源与农业区划研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2011-1)资助。

作者简介: 卢艳丽(1976—), 女, 内蒙古赤峰市, 博士, 研究方向为作物营养诊断与施肥。Tel: 010-82108664, E-mail: luyyl@caas.net.cn

本文为 2010 中国植物营养与肥料学术年会会议论文。

在内的土壤理化指标的定量反演中,而且也作为土壤分类提供了重要依据。许多学者测量获取了众多类型的大量土壤光谱,并根据光谱曲线形状特征、斜率变化以及吸收波段出现与否划分了土壤反射光谱曲线基本类型^[1-3]。一些研究还根据不同波段反射值进行变换并结合统计分析等方法对部分土壤进行了分类。如徐彬彬^[4]对我国土壤光谱线进行了研究发现,在以 MSS5 和 MSS7 分别为横、纵坐标的二维空间上,土壤光谱点位呈现具有一定宽度的带状分布状态。黄应丰等利用主组元分析的方法对华南主要土壤类型进行了分类。结果表明按照光谱特征分类的结果与按照中国土壤分类系统中代表性土属的划分有一定的吻合性^[5]。东北土壤类型复杂,不同土壤类型由于理化性质不同,其光谱特征也不同^[6]。并且,不同类型土壤有机质含量有差异,即使同一类型土壤,不同成土母质,对其光谱特性也有影响^[7]。沙晋明等^[8]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^[6,9]。前人通过对光谱数据进行各种变换来提高有机质反演精度,但是很少考虑不同土壤类型在预测有机质含量上的差异。本文选择 0—20 cm 耕层土样在室内条件下获取了不同土壤类型光谱反射率及土壤有机质含量,对东北平原几种主要土壤类型进行了初步分类,并且对不同土壤类型有机质光谱反演模型进行了方差同质性检验,目的是确定东北平原几种土壤类型土壤有机质含量的敏感波段,以及不同土壤类型有机质预测的差异性和同质性。

1 材料与方 法

1.1 土样采集

采用 GPS 定位进行网格采样,供试土样来源于东北平原(包括黑龙江、吉林和辽宁三省,其经纬度范围为 N 44° 93' 19" ~ 48° 48' 89", E 122° 54' 67" ~ 134° 30' 00")共 8 种土壤类型 418 个样点(图 1)。所有土壤样品采样深度均为 0—20 cm,采样时间 2005 年 3 月下旬至 6 月上旬,采集好的土样立即带回实验室,样品经风干、研磨并通过 1 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(测

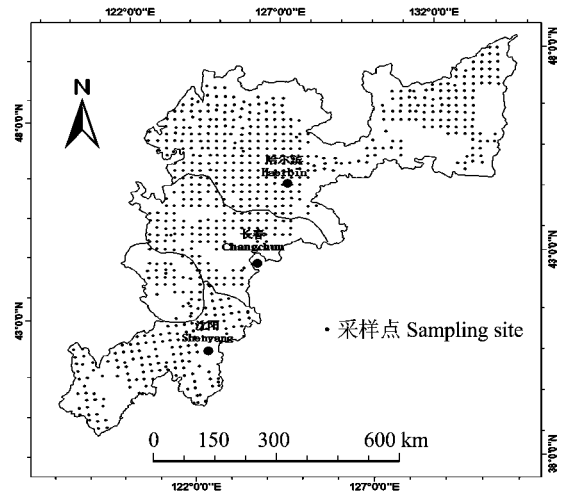


图 1 东北平原采样分布点

Fig. 1 The distribution of sampling sites in the Northeast plain of China

定时间为 2005 年 4 月至 8 月),另一份用于土壤光谱的测量(测定时间为 2005 年 9 月)。不同类型土壤的一些基本状况如表 1。

1.2 分析测定

1.2.1 土壤有机质含量的测定 采用油浴加热重铬酸钾氧化—容量法: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矫正系数 1.1,再乘以常数 1.724,即为土壤有机质含量^[10]。

1.2.2 土壤反射率测量 采用美国 ASD 公司的 FieldSpec Pro FR2500 便携式光谱仪进行土壤反射率测量。该仪器的光谱范围为 350 ~ 2500 nm。在 350 ~ 1000 nm 范围内采样间隔为 1.4 nm,在 1000 ~ 2500 nm 范围内为 2 nm,输出波段数为 2150 nm (重采样间隔为 1 nm)。

将处理好的土样置于直径 10 cm、深 20 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,操作过程在四周均被完全遮光的实验室进行,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 1000W 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,模型建立均采用原始光谱反射率。

表 1 所选土壤基本理化性状信息
Table 1 Physicochemical characters of the selected soil samples

土壤类型 Soil type	样本数 Sample number	土壤基本信息 Soil information	有机质 Organic matter(%)	
			范围 Range	平均值 Mean
沙土 Sandy soil	35	受成土作用少,风沙移动堆积形成的土壤 Soil formed by the movement and accumulation of sandwind with little affect of pedogenesis	0.37 ~ 2.39	1.14
褐土 Cinnamon soil	37	有明显粘淀层与假菌丝状钙积层,B层呈棕褐色 With clear argillic horizon and calcic horizon with pseudo-mycelium, the B layer is brow	0.59 ~ 1.84	0.95
潮土 Fluro-quick soil	55	表层有机质含量低,底土形成锈色斑纹和小型铁子 The content of organic matter in the surface layer is low, the rust color streak and the small section of iron were formed in the subsoil	0.53 ~ 3.56	1.41
黑钙土 Chernozem	97	具有深厚均腐殖质层和碳酸钙淋溶淀积层的土壤 With the soil of deep humus layer and calcium carbonate leaching illuvial horizon	1.61 ~ 6.39	3.66
黑土 Black soil	88	具有深厚均腐殖质层的无石灰性黑色土壤 Non-calcareous black soil with deep humus layer	1.51 ~ 6.71	3.43
暗棕壤 Dark brown soil	20	明显有机质富集和弱酸性淋溶的土壤 Low-acid leaching soil with obvious organic matter enrichment	1.88 ~ 5.89	3.56
白浆土 Albic soil	30	表层为有机质层,其下为灰白色白浆土层 The surface layer is the organic matter layer, the under is offwhite albic soil layer	1.47 ~ 5.81	3.91
草甸土 Meadow soil	56	有明显腐殖质累积,下层具有锈色斑纹的土壤 With obvious organic matter accumulation, the lower level has rust color streak soil	1.98 ~ 5.46	3.21

1.3 模型的统计检验

1.3.1 不同模型同质性检验 不同土壤类型有机质预测模型均可写成直线回归形式。即,

$$Y_n = a_n + b_n X_n (n = 1, 2, \dots, 8) \quad (1)$$

式中: Y_n 代表有机质含量; X_n 为光谱变量; a_n 和 b_n 分别为方程截距和回归系数。对 8 条回归直线进行两两比较,即检验总体截距和斜率之间是否有显著差异。假设两个回归方程方差是同质的,则两个回归方程所用样本回归估计的合并方差为:

$$S = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{df_1 + df_2}} \quad (2)$$

其中, s_1^2 和 s_2^2 分别为两个样本的回归平方和, df_1 和 df_2 分别为两个样本的自由度。

首先,对 b 进行 t 检验:

$$t = \frac{b_1 - b_2}{\sqrt{\frac{1}{\sum (X_1 - \bar{x}_1)^2} + \frac{1}{\sum (X_2 - \bar{x}_2)^2}}} \quad (3)$$

式中, b_1 和 b_2 分别为方程 1 和 2 的回归系数; X_1, \bar{x}_1 和 X_2, \bar{x}_2 分别为方程 1 和 2 的光谱特征参量及其平均值。若 $t > t_{0.05}$, 则说明两个回归系数之间存在显著差异; 若不显著, 则说明 b_1 和 b_2 之间没有显著差异, 可以合并为同一个 b 值即 b_1 和 b_2 的加权平均数。

同样道理,截距 a 的 t 检验公式为:

$$t = \frac{a_1 - a_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{\bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2}{\sum (X_1 - \bar{x}_1)^2 + \sum (X_2 - \bar{x}_2)^2}}} \quad (4)$$

式中, n_1 和 n_2 分别为方程 1 和 2 涉及的样本数量,其它变量同前;检验方法同回归系数 b 的检验。

只有当 a 和 b 均无显著性差异时,说明两个线性方程在预测土壤有机质含量时没有显著差异,可以将两组样本合并建立一个通用模型。以上公式及检验方法参考文献[11-12]。

1.3.2 模型的验证 为评价预测值与实测值之间的拟合效果,采用了均方根差(RMSE, Root Mean Square Error)法对模拟值和实测值的符合度进行了检验。其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型光谱反射率变化

从图 2 可以看出,按照其光谱反射率在 460 ~ 1350 nm 波段范围内曲线的变化可以将不同土壤类型初步分为三类。一类是整个波段变化均比较平缓的平直型土壤。在这里,黑土和黑钙土属于这一类型,其在可见光波段其斜率小并且变化不大,接近于一条直线,而在红外波段曲线稍有抬升,但变幅一般不大。第二类是曲线在 460 ~ 610 nm 波段上升最快,斜率急剧增加。但斜率变化不均匀,形成几个波折,在 610 ~ 850 nm 波段斜率变小,在 850 nm 波段以后曲线则更加平缓。以褐土表现为该特点最为明显。此外,有机质含量相对较低的风沙土和潮土也表现为类似的变化特点。第三类是在可见光波段曲线具有缓缓抬升的特点,在 1350 nm 之前光谱反射率曲线斜率明显地高于第一类,暗棕壤、白浆土和草甸土属于这一类。在 1350 nm 以后三类曲线接近平行。

2.2 土壤有机质光谱响应敏感波段的确定

选择不同波段土壤光谱反射率与土壤有机质含量进行相关分析,结果见表 2。不同土壤类型由于土壤特性不同,与有机质的相关性也有所差异,在 650 ~ 750 nm 波段范围内相关性比较好,并且几种土壤类型均在此波段范围内达到极显著相关水平。因此,650 ~ 750 nm 波段光谱反射率可以作为不同土壤类型的有机质预测模型光谱变量。

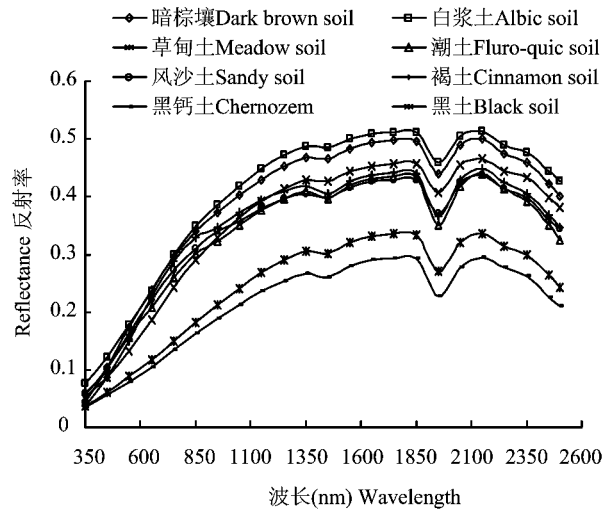


图 2 同土壤类型光谱反射率曲线比较

Fig. 2 Comparison of spectral reflectance of different soil types

2.3 不同土壤类型有机质预测模型建立及同质性检验

在确定了土壤有机质敏感波段以后,分别建立了不同土壤类型土壤有机质含量统计模型,如下所示:

$$\text{风沙土 } y = -7.723x + 2.928 \quad (n = 35, R^2 = 0.561) \quad (1)$$

$$\text{黑钙土 } y = -14.691x + 5.296 \quad (n = 97, R^2 = 0.750) \quad (2)$$

$$\text{褐土 } y = -5.611x + 2.637 \quad (n = 37, R^2 = 0.453) \quad (3)$$

$$\text{白浆土 } y = -9.642x + 6.332 \quad (n = 30, R^2 = 0.666) \quad (4)$$

$$\text{暗棕壤 } y = -14.282x + 7.296 \quad (n = 20, R^2 = 0.818) \quad (5)$$

$$\text{潮土 } y = -10.89x + 4.061 \quad (n = 55, R^2 = 0.573) \quad (6)$$

$$\text{草甸土 } y = -15.571x + 6.839 \quad (n = 56, R^2 = 0.702) \quad (7)$$

$$\text{黑土 } y = -14.31x + 6.047 \quad (n = 88, R^2 = 0.723) \quad (8)$$

其中, x 代表 650 ~ 750 nm 光谱反射率的平均值, y 为土壤有机质含量的预测值。

利用前面介绍的 t 检验方法对以上 8 种土壤类型有机质预测模型进行同质性检验,回归系数和截距的方差同质性检验均通过两组样本可以合并,即可以用一个共同模型来反演有机质含量,检验结果见表 3。从表 3 可以看出,能够合并的有两组模型,

表 2 不同土壤类型土壤有机质含量与光谱反射率相关分析

Table 2 Correlation analysis between soil organic matter content and the reflectance of different soil types

波段范围 Band range (nm)	风沙土 Sandy soil (n=35)	黑钙土 Chernozem (n=97)	褐土 Cinnamon soil (n=37)	白浆土 Albic soil (n=30)	暗棕壤 Dark brown soil (n=20)	潮土 Fluro-queic soil (n=55)	草甸土 Meadow soil (n=56)	黑土 Black soil (n=88)
350~450	-0.265	-0.308**	-0.103	-0.356	-0.324	-0.435**	-0.318*	0.015
450~550	-0.395*	-0.427**	-0.194	-0.416*	-0.417	-0.513**	-0.449**	-0.112
550~650	-0.508**	-0.546**	-0.405*	-0.444*	-0.569**	-0.538**	-0.505**	-0.197
650~750	-0.749**	-0.866**	-0.673**	-0.816**	-0.904**	-0.757**	-0.838**	-0.850**
750~850	-0.629**	-0.604**	-0.485**	-0.412*	-0.649**	-0.570**	-0.491**	-0.208
850~950	-0.681**	-0.606**	-0.459**	-0.386*	-0.402	-0.591**	-0.463**	-0.154
950~1050	-0.727**	-0.612**	-0.436**	-0.355	-0.337	-0.595**	-0.428**	-0.125
1050~1150	-0.459**	-0.618**	-0.394*	-0.316	-0.259	-0.576**	-0.387**	-0.100
1150~1250	-0.467**	-0.611**	-0.347*	-0.293	-0.199	-0.544**	-0.352**	-0.075
1250~1350	-0.369*	-0.601**	-0.310	-0.276	-0.145	-0.507**	-0.315*	-0.051
1550~1650	-0.272	-0.577**	-0.252	-0.248	-0.043	-0.420**	-0.223	0.000
1650~1750	-0.274	-0.574**	-0.249	-0.244	-0.025	-0.406**	-0.202	0.007
1750~1850	-0.277	-0.573**	-0.244	-0.241	-0.010	-0.389**	-0.182	0.015
2050~2150	-0.287	-0.573**	-0.248	-0.254	-0.007	-0.346*	-0.159	0.019
2150~2250	-0.189	-0.568**	-0.248	-0.259	0.000	-0.341*	-0.142	0.026
2250~2350	-0.190	-0.573**	-0.258	-0.258	-0.005	-0.331*	-0.143	0.024
2350~2500	-0.179	-0.564**	-0.200	-0.264	-0.023	-0.281	-0.150	0.028

注(Note): *表示在 0.05 水平上差异显著 Indicated significant at 0.05 level; **表示在 0.01 水平上显著 Indicated significant at 0.01 level.

一组是黑土和黑钙土,另一组是暗棕壤和黑土。但是黑钙土和暗棕壤虽然回归系数 b 通过了同质性检验,但是截距 a 却还是存在差异,因此两项不能使用共同的模型,这是以后在应用中应该注意的问题。而其它几种土壤类型均表现为两两之间有显著差异,不能通过同质性检验。这也说明了由于成土条件、成土过程以及土壤属性的差异很难找到一个通用模型来模拟不同土壤类型的有机质含量。

2.4 同质模型建立与预测效果评价

经同质性检验 a 和 b 均无显著差异的两个或多个模型可合并建立一个同质模型。表 4 列出了合并后所建立的同质模型及验证结果。由表中结果可见,采用合并后的模型决定系数 R^2 略有降低,但是通过验证,模型的预测效果还是比较满意。

3 讨论与结论

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^[13]。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^[14]。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^[15-16]。不仅如此,在近红外波段不同有机质含量的光谱响应也有差异。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^[17-18]。Gunsaulis 等^[19]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。周清等^[7]曾指出土壤有机质含量(SOM)的光谱特性不仅因 SOM 含量而变化,而且在很大程度上依赖于成土母质。不同类型土壤有机质中胡敏酸和富里酸的含量有所差异,而胡敏酸和富里酸的光谱特性差异很大。另外,即使同一类型土壤,不同成土母质,对其光谱特性也有影响。我国土壤类型复

表 4 模型建立与预测效果评价

Table 4 Constructing and evaluating for prediction models

土壤类型 Soil type	有机质预测模型 Prediction model of organic matter		预测值与实测值比较 Comparison of predicted and measured values	
	模型 Model	R^2	R^2	RSME
风沙土 Sandy soil	$y = -7.723x + 2.928$	0.561 **	0.601 **	0.576
黑钙土 + 黑土 Chernozem and black soil	$y = -17.697x + 6.216$	0.686 **	0.712 **	0.690
褐土 Cinnamon soil	$y = -5.611x + 2.637$	0.453 **	0.421 **	0.478
暗棕壤 + 黑土 Dark brown and black soil	$y = -8.189x + 5.267$	0.625 **	0.560 **	1.131
白浆土 Albic soil	$y = -9.642x + 6.332$	0.666 **	0.574 **	0.574
潮土 Fluro-quit soil	$y = -10.89x + 4.061$	0.573 **	0.580 **	0.430
草甸土 Meadow soil	$y = -15.571x + 6.839$	0.702 **	0.698 **	0.308

注 (Note): RMSE—均方根差 Root mean square error; * 表示在 0.05 水平上差异显著 Indicated significant at 0.05 level; ** 表示在 0.01 水平上显著 Indicated significant at 0.01 level.

杂,不同土壤类型由于理化性质不同,其光谱特征也不同^[6]。东北平原土壤类型多样,并且大部分土壤有机质含量丰富,因此土壤有机质含量对光谱反射率的影响也起着主导作用。

本研究针对东北平原的 8 种土壤类型,按照其光谱反射率曲线的变化,即在 460 ~ 1350 nm 范围内曲线斜率变化的差异进行了初步分类:一类为有机质含量相对丰富的黑土和黑钙土,反射率整体表现较低;另一类尽管也具有较丰富的有机质含量,但是可能受一些其它因素的影响,光谱反射率在 1350 nm 以前具有较快的抬升,在 1350 nm 以后也明显高于前者;第三类则以褐土最明显,在 460 ~ 1350 nm 范围内曲线变化较大,形成明显的波折型,这与其土壤本身颜色有关。以上分类只是以代表性土壤为对象对东北平原几种类型土壤的一个初步分类。另外,本研究通过相关分析确定了几种不同土壤类型与原始光谱反射率的相关敏感波段并建立了线性模型,对模型方差同质性进行检验对于寻找不同类型土壤的有机质敏感波段和简化有机质的预测具有重要作用。检验结果表明,黑土和黑钙土可以用一个模型来进行有机质的预测,但是相对于分别建立模型进行预测的预测精度有所降低。东北的暗棕壤和黑土用一个模型预测的误差相对较大 (RSME = 1.131)。

由于成土条件、成土过程以及土壤属性的差异导致不同土壤类型光谱响应也会有较大的差异,很难找到一个通用模型来模拟不同土壤类型的有机质

含量。但是,由于高光谱在有机质预测中表现出较高的精度和较大的潜力,利用高光谱技术可以将大量的不同类型土壤进行大类的划分,在此基础上,部分土壤类型可建立同质性土壤有机质预测模型,如黑土和黑钙土,其构建的同质性模型尽管预测精度略有降低,但是仍然达到了较好的预测效果。当然,由于影响土壤光谱反射率的因素很多,进一步的工作还需要不断探索土壤光谱的影响因素,提高有机质预测模型的可靠性和普适性。

参 考 文 献:

- [1] Stoner E R, Baungardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45: 1161-1165.
- [2] 戴昌达. 土壤学中遥感应用的回顾与展望[J]. 土壤通报, 1985, 16(1): 44-48.
Dai C D. Review and prospect of remote sensing applied on agrology[J]. Chin. J. Soil Sci., 1985, 16(1): 44-48.
- [3] 王绍庆. 土壤和水体反射光谱特性及其应用[A]. 童庆禧. 中国典型地物波谱及其特征分析[C]. 北京: 科学出版社, 1990. 611-618.
Wang S Q. The reflectance spectral characteristics and its application of soil and water[A]. Tong Q X. Analysis of typical spectral characteristics in China[C]. Beijing: Science Press, 1990. 611-618.
- [4] 徐彬彬. 我国土壤光谱线之研究[J]. 遥感学报, 1991, 6(1): 61-70.
Xu B B. Research of China's soil spectral line[J]. J. Rem. Sens., 1991, 6(1): 61-70.
- [5] 黄应丰, 刘腾辉. 华南主要土壤类型的光谱特性与土壤分类

- [J]. 土壤学报,1995,32(1): 58-68.
Huang Y F, Liu T H. Spectral characteristics of main types of soils in southern china and soil classification [J]. Acta Pedol. Sin., 1995, 32(1): 58-68.
- [6] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究[J]. 土壤,2000,(6): 281-287.
Xu B B. Study on spectral reflectance of soil section [J]. Soil, 2000, (6): 281-287.
- [7] 周清,张杨珠,周斌,等. 室内几何条件对土壤高光谱数据波动性的影响[J]. 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 *et al.* Effect of geometric conditions on soil hyperspectral data fluctuate characteristic in laboratory test [J]. J. Hunan Agric. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2004, 30(1): 29-32.
- [8] 沙晋明,陈鹏程,陈松林,等. 土壤有机质光谱响应特性研究[J]. 水土保持研究,2003,10(2): 21-24.
Sha J M, Chen P C, Chen S L *et al.* Characteristics analysis of soil spectrum response resulted from organic material [J]. Res. Soil Water Cons., 2003, 10(2): 21-24.
- [9] Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L, Stoner E R. Spectral reflectance properties of soils [J]. Adv. Agron., 1985, 38: 1-4.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社出版, 2000.
Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] Bai J H, Li S K, Wang K R *et al.* Estimating aboveground fresh biomass of different cotton canopy types with homogeneity models based on hyper spectrum parameters [J]. Agric. Sci. China, 2007, 6(4): 437-445.
- [12] 荣廷昭,李晚忱. 田间试验与统计分析 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2001.
Rong T Z, Li W C. Field experiment and statistical analysis [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001.
- [13] 徐金鸿,徐瑞松,夏斌,朱照宇. 土壤遥感监测研究进展 [J]. 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 [J]. Res. Soil Water Cons., 2006, 13(2): 17-20.
- [14] 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.
Zhang Y, Pang X Y, Bao W K *et al.* A review of soil organic matter and its research methods [J]. Res. Devel. World Techn., 2005, 27(5): 72-78.
- [15] 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: 364-372.
- [16] Mutuo P K, Shepherd K D, Albrecht A, Cadisch G. Prediction of carbon mineralization rates from different soil physical fractions using diffuse reflectance spectroscopy [J]. Soil Biol. Biochem., 2006, 38: 1658-1664.
- [17] Henderson T L, Szilagyi A, Baumgardner M F *et al.* Spectral band selection for classification of soil organic matter content [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53: 1778-1784.
- [18] 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: 865-872.
- [19] 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]. Am. Soc. Agric. Eng., 1991, 34: 641-649.