

莱州湾海岸带土壤光谱分析与有机质反演研究

李勇志^{1,2}, 唐家奎^{1,2*}, 王德强¹, 王春磊³, 张成雯^{1,2}

(1. 中国科学院海岸带环境过程重点实验室/山东省海岸带环境过程重点实验室/中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 河北联合大学, 河北 唐山 063009)

摘要: 利用土壤光谱反射率预测海岸带典型土壤有机质含量。对莱州湾海岸带典型地区 97 个土壤样本的光谱反射率特性进行分析, 把光谱曲线划分为 4 个区域, 提取每个区域的代表性特征参数, 与土壤有机质含量进行相关性分析, 最终选用 458~587.1 nm 区间的挠度(相关系数达 0.87)作为自变量进行模型回归, 并利用均方根误差(RMSE)和预测残差(RPD)进行模型检验与评价。结果表明, 以 458~587.1 nm 区间的挠度作为自变量建立的对数函数预测模型具有较高的精度和稳定性, 经验证计算出其 RMSE 为 0.39, RPD 为 2.5, 该模型应用效果较好。

关键词: 海岸带; 土壤有机质; 高光谱; 挠度

中图分类号: S153.2; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1672-0504(2012)04-0079-04

0 引言

土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)对于促进土壤结构形成、改善土壤物理性质、提高土壤的保肥能力具有重要作用, 是作物产量的主要限制因子^[1,2]。海岸带地区为海洋和陆地相互作用的地带, 研究海岸带土壤有机质含量可为海岸带农业发展及土壤生物资源研究提供基础支撑。通过传统的方法获取较大区域土壤有机质含量大都借助于野外采集样本点, 经实验室土壤化学或物理分析后内插得到, 该过程耗时、费力且不经济^[3]。相关研究表明: 土壤有机质在可见光及近红外波段具有独特的光谱特性, 其含量可通过土壤的反射率光谱反映^[4]。

Krishnan 等实验得出可见光光谱与土壤有机质含量紧密相关, 在波长 564 nm、623 nm 处相关性较高, 可用来预测土壤有机质^[5]。Henderson 等提出同母质材料的土壤中, 可见光波段与土壤有机质相关性非常强^[6]。徐彬彬等比较脱有机质前后的土壤光谱反射曲线, 发现有机质的影响主要是在可见光和近红外波段, 而影响最大的是在 600~800 nm 波段^[7]。Galvao 等验证了土壤反射光谱在 550~700 nm 波段吸收峰主要是由土壤有机质引起^[8]。彭玉魁等研究发现, 土壤有机质与其红外光谱的相关系数高达 0.921^[9]。Karneili 等研究发现, 土壤有机质吸收特征主要表现在 1 720 nm、2 180 nm、2 309 nm

处^[10]。徐彬彬等研究发现, 土壤有机质含量与其在 600 nm 处的弓曲差(即光谱反射率曲线上, 550 nm 和 650 nm 的光谱反射率平均值与 600 nm 处的光谱反射率之差值)密切相关, 并利用弓曲差得出土壤预测的幂函数模型^[11]。高光谱遥感技术为快速准确提取土壤有机质含量提供一种有效途径。但以往研究多是对反射率数据进行微分、对数、倒数等变换^[12-15], 然后建立模型估算土壤有机质含量, 仅徐彬彬等利用光谱曲线本身的特征(600 nm 处的弓曲差)作为特征变量对土壤有机质含量进行反演。

本文以莱州湾典型海岸带地区主要土壤野外实测反射率光谱曲线为研究对象, 考虑到土壤有机质含量对整个光谱曲线的影响, 根据光谱曲线特征, 把光谱反射率曲线划分为 4 个区域, 计算每个区域最能表达其光谱曲线特征的参数, 如吸收指数、挠度(曲线弯曲变形时横截面形心沿与轴线垂直方向的线位移)、曲线斜率等, 分析各个特征与土壤有机质含量的相关性, 从而提取最佳参数并建立反演模型, 最后用 R^2 、RMSE 和 RPD 检验预测精度并评价模型的预测能力, 为基于高光谱遥感提取土壤有机质含量奠定理论基础。

1 研究区与研究方法

本文选择山东省烟台市莱州湾海岸带(东经 119°33'~120°18', 北纬 36°59'~37°28')作为研究区, 该区地处山东半岛西北部, 西濒渤海, 东临招远

收稿日期: 2012-02-11; 修订日期: 2012-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801124); 山东省中青年科学家科研奖励基金(2010BSA06013); 中科院创新团队国际合作伙伴计划“海岸带典型环境过程和资源效应”; 中科院数字地球重点实验室开放基金(2011LDE015); 中科院研究生院院长基金

作者简介: 李勇志(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感。*通讯作者 E-mail: jktang@gucas.ac.cn

市,东南与莱西市接壤,南连平度市,西南与昌邑市相望,海岸线 108 km,总面积约 1 878 km²,地势自东南部低山向西北部沿海低地呈台阶式下降;属北温带东亚季风区大陆性半湿润气候,为典型的海岸带农业耕作区,主要作物为小麦、玉米、蔬菜,被命名为“国家绿色农业示范区”,研究土壤有机质含量分布对莱州典型海岸带农业生产有重要指导作用。

2011 年 11 月上旬,在横贯莱州地区中部裸露农田设计 97 个样点,在晴天或少云的 10:00—14:00 时段采集表层土(深约 10 cm),烟台海岸带研究所分析测试中心利用完全燃烧法测定土壤有机质含量。光谱测量采用 AvaField-3 便携式高光谱地物波谱仪(波谱范围 350~1 060 nm,光谱采样间隔 0.5 nm,光谱分辨率 2.4 nm,波长精度±0.1 nm),每个样本测量 10 次,取其平均值得到土壤反射率。由于受各方面因素影响,土壤反射率光谱曲线在一定程度上产生了噪声,需要对其进行平滑去噪预处理。本研究采用移动加权平均法^[16],能在去除噪声的同时保留更多的原始信息,处理好的土壤样本的光谱反射率曲线如图 1 所示(97 条曲线代表 97 个土壤样本)。土壤有机质反演研究流程如图 2 所示。

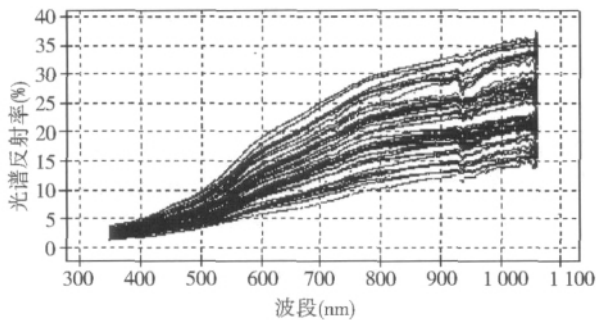


图 1 平滑之后的光谱反射率曲线
Fig. 1 The spectral reflectance curves after smoothing

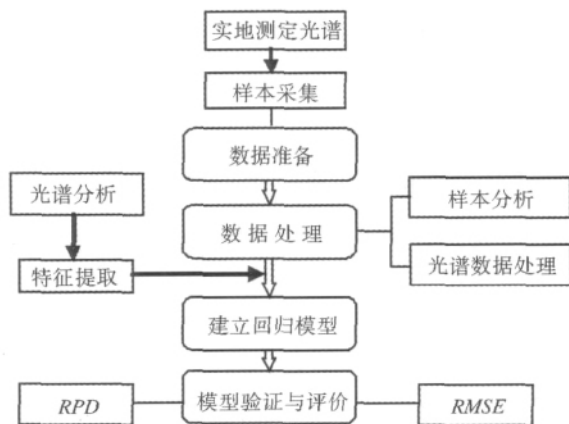


图 2 土壤有机质反演研究流程
Fig. 2 The flowchart of soil organic matter inversion based on soil spectrum

2 相关性分析

2.1 光谱波形分析

由图 1 可以明显看出,在 350~1 060 nm 波段范围内,随着波长的增加,土壤反射率不断增强。在 350~457.5 nm 区域,光谱反射率曲线缓慢上升;458~587.1 nm 区域,曲线上升趋势有所变化,土壤吸收加强,并呈现一定弧度;587.6~802.9 nm 区域,继续平稳上升;803.5~1 059 nm 区域,光谱反射率随波长增加上升趋势减缓,并有所波动。因此,将整个波谱区域划分为 350~457.5 nm、458~587.1 nm、587.6~802.9 nm、803.5~1 059 nm 4 个区域(图 3),并计算每个区域内光谱反射率特征因子:1 区为平均反射率、斜率;2 区为平均反射率、吸收指数、挠度(在此近似等于 458 nm 与 587.1 nm 处的反射率平均值减去 522.5 nm 处的反射率);3 区为反射率均值、曲线斜率;4 区为反射率均值、标准差(测定光谱曲线波动大小)。

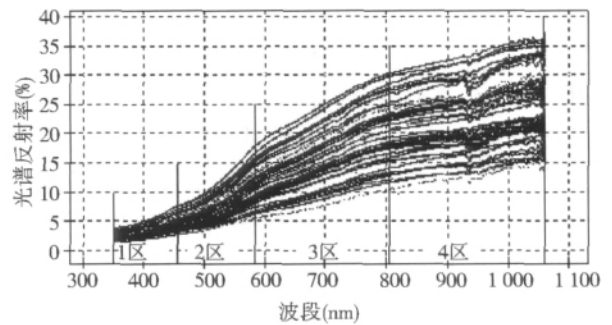


图 3 反射率光谱曲线分区
Fig. 3 Reflectance spectra zoning map

2.2 土壤有机质含量分析

用本文测定的 97 个土样有机质含量(表 1)与土壤反射率及分区后提取的各特征值逐一进行相关性分析,计算每个特征值与有机质含量的相关系数 R (表 2)。由表 2 可知,在 2 区域的吸收指数、挠度及 3 区域的反射率值、光谱曲线斜率都有较强的相关性。在 458~587.1 nm 波段挠度与土壤有机质含量的相关性最大(0.87),在 350~1 059 nm 波段土壤反射率与有机质含量呈负相关,在 803.5~1 059 nm 波段光谱反射率曲线的波动性与土壤有机质含量相关性最小(0.04)。所以利用 458~581.1 nm 波段的挠度作为变量进行回归分析,并建立土壤有机质含量反演方程。

表 1 土壤有机质含量统计分析
Table 1 Statistical analysis of soil organic matter content

平均值	最大值	最小值	标准差	方差	峰度	偏度
1.30%	2.44%	0.48%	0.44	0.19	0.14	0.48

表 2 相关性分析结果
Table 2 Correlation analysis results

分区	1 区		2 区		3 区		4 区		
特征因子	反射率均值	光谱曲线斜率	反射率均值	吸收指数	挠度	反射率均值	光谱曲线斜率	反射率均值	反射率标准差
相关系数 R	-0.36	-0.44	-0.50	-0.72	0.87	-0.62	-0.62	-0.57	0.04

3 回归分析

根据相关性分析结果,选择具有较高相关系数值的最佳特征用于回归分析,组成预测方程。97 个样本随机分为两组,一组(73 个)用于建立回归模型(图 4),另一组(24 个)用于验证已建立的回归模型(图 5)。预测精度用 24 个验证样本的 RMSE 来检验,用 RPD 评价模型预测能力^[17]:如果 $RPD > 2$,模型可以用来预测反演; $1.4 \leq RPD \leq 2$,模型经过改进后可以预测; $RPD < 1.4$,模型预测能力较弱。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2} \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2} \quad (2)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (3)$$

式中: Y_i 和 Y'_i 分别代表测定值和预测值, Y 为样本均值, n 为样本数。

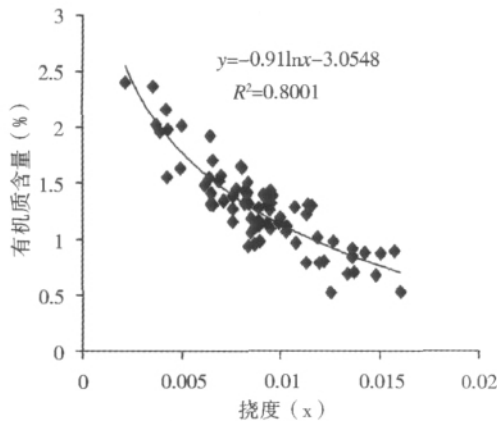


图 4 模型建立
Fig. 4 Building of regression analysis model

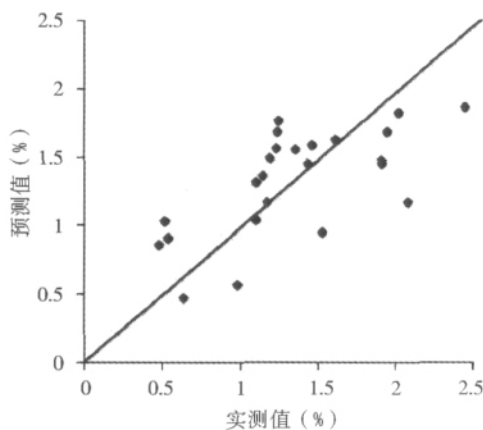


图 5 模型检验
Fig. 5 Testing of the model

回归分析在 SPSS 统计软件中进行,利用 73 个建模样本的土壤有机质含量与土壤光谱反射率曲线 458~587.1 nm 处的挠度拟合模型,分别进行了线性函数、二次函数、对数函数、幂函数、指数函数等回归,并根据建立的模型,利用 24 个验证样本对所建模型逐一进行检验;根据检验结果,利用式(1)对 5 个模型进行精度评定,利用式(3)对所建模型的预测能力进行评价(表 3)。可以看出,利用 458~587.1 nm 区间的挠度作为特征变量所建的函数模型均具有较小的 RMSE(0.4 左右)。其中对数函数模型的 RPD 最大(2.55),能够用来进行土壤有机质含量的预测反演;二次函数模型、幂函数模型、指数函数模型 RPD 值均为 1.4~2,模型需经过一定的改进才能够进行土壤有机质含量预测;线性函数模型 RPD 最小,为 1.29(小于 1.4),其反演能力较弱。由此可得,以土壤光谱反射率曲线 458~587.1 nm 区间的挠度作为自变量建立的对数函数模型具有较高的精度和稳定性,说明对数函数模型可用于反演研究区土壤有机质含量。

表 3 模型回归结果
Table 3 Model regression results

模型类型	模型方程	R^2	RMSE	RPD
线性函数	$Y = -111.29x + 2.2969$	0.76	0.43	1.29
二次函数	$Y = 6.609.6x^2 - 234.8x + 2.8093$	0.80	0.39	1.74
对数函数	$Y = -0.91\ln x - 3.0548$	0.80	0.39	2.55
幂函数	$Y = 0.0456x^{-0.6898}$	0.73	0.38	1.77
指数函数	$Y = 2.7422e^{-88.73x}$	0.76	0.40	1.62

4 结论

本研究在大量野外测试数据基础上,对土壤光谱曲线进行分区研究,提取各个区域内光谱特征因子,并与土壤有机质含量进行相关性分析,确定其较高相关性的特征,最后通过数理统计方法建立土壤有机质含量反演模型。研究结果表明,土壤有机质含量与 458~587.1 nm 区间光谱反射率的挠度具有较强的相关性。土壤有机质成分对土壤光谱的影响为利用高光谱技术测定土壤成分含量奠定了理论基础,也为探测仪器的改进及基于高光谱技术的土壤成分反演提供了理论依据。利用土壤光谱曲线的挠度代替土壤反射率或者通过反射率的简单变换建立土壤有机质含量预测模型,考虑了土壤有机质含量对一定范围内光谱的影响,提高了模型的稳定性。

需强调的是,本研究测试的土壤为莱州湾典型海岸带土壤,所建立的模型对其他类型土壤是否适用有待进一步验证。今后需要对模型进行改进,提高可移植性,以应用于高光谱遥感影像土壤有机质含量反演,进而适应于其它地区相关研究。

参考文献:

- [1] 高祥照,胡克林,郭焱,等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. 中国农业科学,2002,35(6):660-666.
- [2] 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.
- [3] WETTERLIND J, STENBERG B, SÖDERSTRÖM. Increased sample point density in farm soil mapping by local calibration of visible and near infrared prediction models[J]. Geoderma, 2010, 156(3-4):152-160.
- [4] HENDERSON T L, SZILAGYI A, BAUMGARDNER M F, et al. Spectral band selection for classification of soil organic matter content[J]. Soil Science Society of America, 1989, 53(6):1778-1784.
- [5] KRISHNAN P, ALEXANDER J D, BUTLER B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(6):1282-1285.
- [6] HENDERSON T L, BAUMGARDNER M F, FRANZMEIER D P, et al. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3):865-872.
- [7] 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[J]. 遥感学报,1991,6(2):142-151.
- [8] GALVAO L S, VITORELLO Í. Variability of laboratory measured soil lines of soils from southeastern Brazil[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(2):166-181.
- [9] 彭玉魁,张建新,何绪生. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究[J]. 土壤学报,1998,35(4):554-559.
- [10] KARNIELI A, VERCHOVSKY I, HALL J K, et al. Geographic information system for semi-detailed mapping of soils in semi-arid region[J]. Geocarto International, 1998, 13(3):29-43.
- [11] 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[J]. 科学通报,1980(6):282-284.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 何挺,王静,林宗坚,等. 土壤有机质光谱特征研究[J]. 武汉大学学报,2006,31(11):975-979.
- [15] 刘焕军,张柏,刘志明,等. 松嫩平原主要土壤光谱特征分析[J]. 中国科学院研究生院学报,2007,24(4):439-445.
- [16] 何挺,王静,程焯,等. 土壤氧化铁光谱特征研究[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(2):30-34.
- [17] CHANG C, LAIRD D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. Soil Science, 2002, 167(2):110-116.

Spectral Analysis and Retrieval of Soil Organic Matter in Coastal Zone of Laizhou Bay

LI Yong-zhi^{1,2}, TANG Jia-kui^{1,2}, WANG De-qiang¹, WANG Chun-lei³, ZHANG Cheng-wen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Chinese Academy of Sciences/Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes/Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: Organic matter content of typical soil in coastal zone was retrieved by using soil spectral reflectance. Spectral reflectance characteristics of 97 coastal soil samples of Laizhou Bay were analyzed. The spectral curves were divided into four regions. In each region, typical characteristic parameters were picked up to make a correlation with soil organic matter content. Finally, regression analysis model was made with the deflection in the range of 458~587.1 nm as independent variable. The model was evaluated by Root-Mean-Square Error (RMSE) and RPD (the ratio between the stand deviation of the reference method against that of the RMSE). RMSE and RPD of the logarithm function model were 0.39 and 2.5 respectively, which demonstrated that the regression analysis prediction model can be applied to retrieve coastal organic matter content with good accuracy and stability.

Key words: coastal zone; soil organic matter; hyperspectrum; deflection