

基于表层土壤光谱的耕层土壤有机质间接估测

钟 浩, 李西灿*, 翟浩然, 周 钰, 曹雪松

(山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018)

摘 要: 为解决遥感技术在监测耕层土壤有机质方面的应用问题, 利用表层土壤光谱对耕层土壤有机质含量进行估测。以山东省济南市章丘区的表层、耕层各 76 个土壤样本为研究对象, 首先对表层光谱数据进行小波变换去噪、剔除异常样本等处理, 然后对处理后的光谱反射率进行一阶微分等 10 种数学变换, 在对数倒数一阶微分和对数一阶微分变换后的反射率数据中选取 43 个与土壤有机质含量相关系数较高的波段, 通过主成分分析以累计贡献率大于 90% 的标准选取 5 个主成分作为反演因子, 利用 BP 神经网络 (BPNN)、支持向量机回归 (SVR) 和多元线性回归 (MLR) 方法建立耕层土壤有机质含量间接估测模型。结果表明, 耕层土壤与表层土壤有机质含量之间决定系数 R^2 达到 0.839, 显著性 $P < 0.01$, 存在着较强的相关性 BPN 估测模型的精度最优, 决定系数 R^2 为 0.845, 平均相对误差为 7.642%, $RMSE$ 分别为 $1.622\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究表明, 利用表层土壤光谱信息间接估测耕层有机质含量是可行有效的, 为耕层土壤有机质的估测问题提供了一种新思路。

关键词: 土壤有机质; 高光谱遥感; 间接估测; 估测模型; 主成分分析

中图分类号: S153.621; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)03-0421-06

Indirect estimation of organic matter content in plough layer based on topsoil spectrum

ZHONG Hao, LI Xican, ZHAI Haoran, ZHOU Yu, CAO Xuesong

(College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018)

Abstract: In order to solve the application of remote sensing technology in monitoring the organic matter of plough layer, the topsoil spectrum was used to estimate the organic matter content of plough layer. Taking 76 soil samples from the surface layer and 76 soil samples from the plough layer collected in Zhangqiu District of Jinan city of Shandong Province as the research object. First, the surface spectral data was processed using wavelet noise reduction and eliminate abnormal samples. Then, 10 kinds of mathematical transformations such as first-order differential were performed on the processed spectral reflectance. In the data after the first-order differential and log-first differential transformation of the logarithm, 43 bands with high correlation coefficient with soil organic matter content were selected, and we used the principal component analysis to obtain 5 principal components as inversion factors that their cumulative contribution rate is greater than 90%. Finally, using topsoil spectral information, an indirect estimation model for the organic matter content of cultivated soil was established with BP neural network, SVR and MLR. The results showed that the R^2 between the plough layer soil and the surface soil organic matter content reached 0.839, and the significance $P < 0.01$. There is a strong correlation between the plough layer soil and the surface soil organic matter content. The estimation accuracy of the BP neural network was higher. R^2 , MRE and $RMSE$ are 0.845, 7.642 % and $1.622\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The researchers showed that it was feasible and effective to estimate the organic matter content in plough layer indirectly using hyperspectral information of topsoil. It provides a new solution to the problem that estimating the organic matter content of plough layer.

Key words: soil organic matter; hyperspectral remote sensing; indirect estimation; estimation model; principal component analysis

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(41271235)资助。

作者简介: 钟 浩, 硕士研究生。E-mail: 260919837@qq.com

* 通信作者: 李西灿, 教授。E-mail: lxc@sdau.edu.cn

有机质是土壤的重要组成部分,为农作物的生长提供必要的营养成分,具有涵养水源、改良土壤等作用,其含量也是衡量土壤质量的重要指标之一。因此,快速、准确地对土壤有机质含量进行监测,具有重要的实践意义。传统的土壤有机质含量测定方法需要在野外采集土壤样品,通过化学方法测定与分析,该方法时效低、成本高、代表性不足,会对土壤造成一定的伤害,无法做到快速、无损地监测区域土壤有机质含量^[1]。高光谱遥感技术凭借其大尺度、快速、精准、无损等优势,为实现土壤养分的监测,提供了新的思路^[2]。许多学者已在土壤光谱特性分析^[3-7]、光谱数据变换^[8-11]、估测因子提取^[12-16]、估测建模^[17-24]等方面取得了丰富成果。管延龙等^[25]采集 0~20 cm 深度土样对天山北麓土壤有机质含量进行高光谱建模估测。于雷等^[26]采集湖北省 20 cm 深度的耕层土样高光谱数据通过小波变换构建土壤有机质含量反演模型。李西灿等^[27]通过在陕西省横山县采集到的 0~20 cm 深度土样采用模糊识别方法进行土壤有机质含量估测。陈奕云等^[28]采用江汉平原滨湖地区的 0~20 cm 耕层土壤开展顾及土壤湿度的土壤有机质高光谱预测模型传递研究。目前大部分成果是基于深度为 0~20 cm 的耕层土壤数据进行研究,由于航空及航天遥感仅能获得深度为 0~5 cm 的表层土壤高光谱数据,使得当前的很多研究成果无法与航空及航天遥感数据结合起来,这制约着遥感技术在监测耕层土壤有机质方面的应用。一般情况下,表层土壤水含量通常低于耕层土壤水含量(除农田灌溉、雨后等特殊情况),而土壤水含量低时,土壤水分与有机质的交互作用较弱,且土壤反射光谱受土壤水分的影响较小,有利于土壤有机质含量的估测^[29]。耕层土壤与表层土壤的有机质含量并不相同,但二者同属于土壤浅部,具有密切的联系,存在一定的相关性。因此,利用表层土壤与耕层土壤有机质含量的内在关联性,基于表层土壤光谱信息实现耕层土壤有机质含量间接估测具有重要实践意义。本研究利用在山东省济南市章丘区采集的表层与耕层各 76 个土壤样本数据,基于表层土壤光谱信息,借助 BP 神经网络(back propagation neural network, BPNN)、支持向量机回归(support vector regression, SVR)、多元线性回归(multiple linear regression, MLR)建模估测方法,实现对耕层土壤有机质含量的间接估测。旨在为利用光学卫星遥感技术快速估测耕层土壤有机质含量等土壤性状指标提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究试验区选在济南市章丘区。章丘区(36°25'~37°09'N, 117°10'~117°35'E)位于济南市市区东约 50 km 处,地处泰沂山区北麓,地势自东南向西北倾斜,属暖温带季风区的大陆性气候,光照资源丰富,年均降水量一般为 500 mm~700 mm 之间。境内土壤共分 4 个土类,11 个亚类,20 个土属,87 个土种。其中褐土和潮土分别占总利用面积的 70.2%和 27.6%。

1.2 光谱测量与样本采集

数据采集时间为 2017 年 3 月,在试验区选择地势平坦、土壤裸露的田地。在无云无风的正午时间段,采用美国的 ASD FieldSpec FR 便携式野外光谱仪进行反射光谱测定。光谱仪的波长范围为 350~2 500 nm,采集时探头与土壤保持 15 cm 距离,用 3°视场角进行垂直照射,350~1 000 nm 之间的光谱分辨率为 3 nm,1 000 nm~2 500 nm 之间的光谱分辨率为 10 nm。经过自动内插,光谱重采样间隔为 1 nm。

土壤反射率测量完毕后,分别采集样点表层和耕层土壤样本各 76 个用于化验土壤有机质含量,并用手持 GPS 仪进行同步定位。土壤样本类型均为褐土,取样农田的农作物类型为冬小麦。采样点空间分布如图 1 所示。

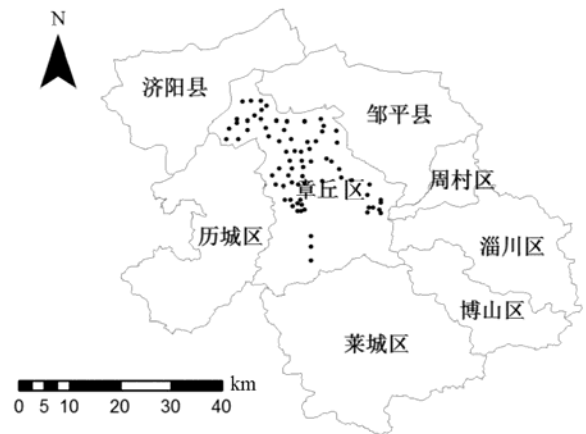


图 1 土壤样本空间分布图

Figure 1 Spatial distribution map of soil samples

从图 1 可见,除东南和西南山区外,采样点空间分布均匀,采样区覆盖章丘大部分地区。

1.3 土壤有机质含量的测定

在实验室内,采用重铬酸钾-外加热法对土壤样本有机质含量进行测定,其统计特征如表 1 所示。

表 1 土壤有机质含量统计特征

特征指标	表层土样	耕层土样
Characteristic index	Topsoil sample	Plough layer sample
最小值/g·kg ⁻¹	9.626	7.765
Minimum value		
最大值/g·kg ⁻¹	29.387	23.647
Maximum value		
平均值/g·kg ⁻¹	20.761	15.794
Average value		
标准差/g·kg ⁻¹	5.114	4.096
Standard deviation		
变异系数/%	24.635	25.932
Coefficient of variation		

由表 1 可见, 对比两类土壤样本有机质含量的平均值、最大值与最小值, 耕层土壤样本有机质含量总体上低于表层土壤样本。

1.4 光谱数据预处理

利用 View Spec Pro 软件对光谱数据的断点处进行修正。由于多种因素的影响, 光谱曲线存在大量细小噪声。研究表明, 原始光谱经过微分变换后, 高频噪声会被放大, 遮蔽微分变换后的波形轮廓, 使试验结果精度降低^[30]。为了使数据更加平稳便于分析, 通过 MATLAB 2014b 编程实现光谱反射率的小波去噪。经过反复试验最终选择小波基函数为 db5, 分解层数为 3, 使用 wrcoef 函数 TYPE 类型为 a, 重构数据得到去噪之后的光谱反射率。

1.5 异常样本的剔除

由于光谱测量受到研究区环境、光谱测试条件、人为干扰和土壤理化性状等因素的影响, 使得某些样本光谱数据出现异常, 会对估测结果产生较大影响, 因此剔除异常数据。根据光谱反射率与土壤有机质含量成负相关的关系^[31], 按照土壤有机质含量对 76 个样本排序, 绘制光谱曲线图, 综合考虑土壤含水量与其他因素的影响, 观察曲线走势, 剔除光谱曲线明显异常的样本。其方法如图 2 所示。

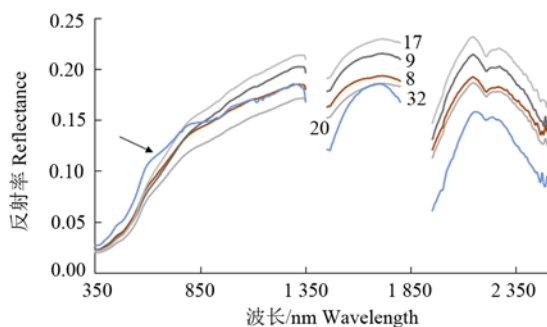


图 2 异常样本剔除

Figure 2 Exclusion of abnormal samples

图 2 中, 5 个样本有机质含量较为接近, 但箭头所示 32 号样本的光谱曲线明显异常, 故予以剔除。使用以上方法, 本研究共剔除了 5 个异常样本, 其样本号分别为: 12、32、57、60、64。

1.6 光谱数据变换

为了增强原始光谱数据中不明显的特征差异, 提高表层土壤光谱数据与耕层土壤有机质含量之间的相关性, 利用反射率一阶微分、平方根的一阶微分、对数倒数的一阶微分等 10 种数学变换方法对原始光谱反射率进行变换, 取 $\Delta\lambda = 10$ nm。其中, 对数倒数一阶微分、对数的一阶微分的变换效果最好, 平方根倒数一阶微分和一阶微分变换在少部分有机质敏感波段处相关系数能接近 0.6, 但是在相同波段下, 对数倒数一阶微分或对数的一阶微分相关系数更高, 其他变换方法相关系数相对于原始光谱并没有提高, 因此选择变换效果最好的两种方法做变换前后的相关系数如图 3 所示。

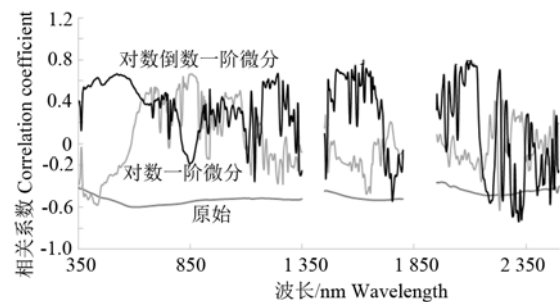


图 3 表层光谱与耕层有机质含量的相关系数曲线

Figure 3 Correlation coefficient curve between topsoil spectral data and organic matter content of plough layer

在 1 350~1 450 nm 和 1 800~1 950 nm 波长范围内, 因光谱反射率受大气水汽吸收的影响强烈, 光谱噪声大, 故予以剔除。

由图 3 可见, 光谱反射率变换值与有机质含量的相关性较原始相关性有了较大提高, 在 550 nm 附近、1 200~1 300 nm、1 500~1 650 nm、2 000~2 130 nm 与 2 290~2 340 nm 波长范围内, 对数倒数一阶微分变换后相关系数均有明显的提高, 相关系数最高达到 0.80 左右。在 800~900 nm 处对数一阶微分变换后相关系数提高, 最高处接近 0.7。

1.7 估测因子提取

在对数倒数一阶微分和对数的一阶微分变换后的光谱反射率中, 以相关系数高于 0.5 为原则, 尽可能离散地选取 43 个特征波段, 部分波段如表 2 所示。

表 2 特征波段

Table 2 Characteristic band			
对数倒数一阶微分 Logarithmic reciprocal first order differential		对数一阶微分 Logarithmic first order differential	
波段/nm Band	相关系数 R^2	波段/nm Band	相关系数 R^2
376	0.543	691	0.551
396	0.560	856	0.665
438	0.630	819	0.642
524	0.667		
...	...		
2317	-0.759		

主成分分析在处理大数据方面具有显著优势，可以诊断自变量间的共线性，在保留原有信息的基础上达到降维的效果^[32]。因此，使用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行主成分分析，结果如表 3 所示。

表 3 PCA 特征值及贡献率

Table 3 PCA eigenvalue and contribution rate

主成分 Principal component	特征值 Characteristic value	方差贡献率/% Variance contribution rate	累计贡献率/% Accumulated contribution rate
1	29.943	69.635	69.635
2	3.969	9.230	78.864
3	2.300	5.348	84.213
4	1.727	4.016	88.228
5	1.073	2.495	90.723

2 结果与分析

2.1 耕层土壤与表层土壤有机质之间的内在关系

虽然耕层土壤与表层土壤同属于土壤浅部，但表层土壤与耕层土壤在温度、湿度、光照、通风、微生物等条件存在较大差异，因此二者的有机质含量并不相同。一般耕层土壤有机质更容易被微生物分解，因此在正常情况下耕层土壤有机质含量会低于表层土壤。本研究区耕层土壤与表层土壤有机质含量之间存在的关系，如图 4 所示。

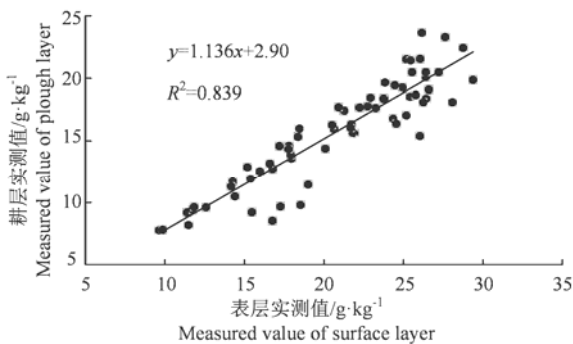


图 4 表层与耕层土壤有机质的实测值关系图

Figure 4 Relationship between measured values of soil organic matter in surface layer and plough layer

如果特征值小于 1，说明这个主成分的影响程度还不如一个基本的变量。从表 3 可见，前五个成分的特征值均大于 1 且累计贡献率达到 90%，因此选取前五个主成分作为建模的估测因子。

1.8 建模方法

由于土壤有机质含量与光谱数据之间存在非线性关系，而 BPNN 模型对解决非线性问题具有较强的能力，因此本研究主要利用 BPNN 方法建立估测模型，并与 SVR、MLR 方法作对比分析。耕层土壤有机质间接估测的基本思路是基于耕层土壤有机质含量与表层土壤光谱信息的间接关联性，利用基于表层土壤光谱提取的估测因子建立耕层土壤有机质含量估测模型，从而实现耕层土壤有机质含量光谱估测。利用决定系数 R^2 、平均相对误差 (mean relative error, MRE) 和均方根误差 (root mean squared error, $RMSE$) 评定模型的估测精度。

图 4 可见，耕层土壤与表层土壤有机质含量之间 R^2 达到 0.839，再利用 IBM SPSS Statistics 23 软件对表层土壤和耕层土壤有机质含量实测值做相关性检验，检验结果中显著性 $P=2.851 \times 10^{-28}$ ，而当 $P < 0.01$ 时，可以说数据间存在显著的相关性。因此，综合考虑 R^2 与 P 值，耕层土壤与表层土壤有机质含量之间存在显著的相关性。这为利用表层土壤光谱信息实现耕层有机质含量的间接估测提供理论支持。

2.2 基于表层土壤光谱特征的耕层土壤有机质间接估测结果

通过 MATLAB 2014b 编程实现 BPNN 建模，将 5 个估测因子与耕层土壤有机质含量作为输入值，当学习速率为 0.001，目标最小误差为 0.001，最大训练次数 1 000 次，隐含层节点个数为 10 个时，模拟试验结果为最优。耕层土壤有机质含量间接光谱估测值与实测值的关系，如图 5 所示。

为对比分析，利用 IBM SPSS Statistics 23 软件建立 MLR 模型，同时利用 MATLAB 2014b 编程建立 SVR 估测模型，分别对耕层土壤有机质含量进行建模估测，三种估测方法的估测结果，如表 4 所示。

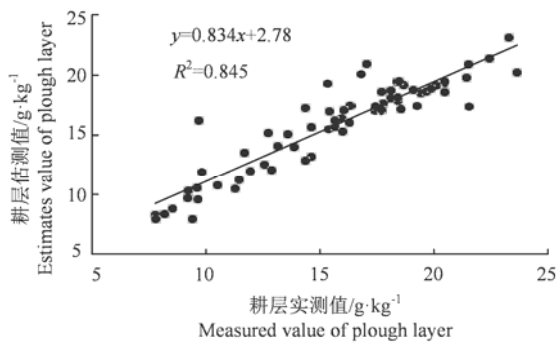


图 5 BPNN 模型估测结果

Figure 5 Estimation results of BPNN

表 4 耕层土壤有机质含量间接估测结果

Table 4 Indirect estimation of organic matter content in plough layer

建模方法 Modeling method	R^2	MRE /%
BPN	0.845	7.642
MLR	0.714	11.871
SVR	0.711	10.748

表 5 耕层土壤有机质含量间接估测结果

Table 5 Indirect estimation of organic matter content in plough layer

建模方法 Modeling method	R^2	MRE /%
BPN	0.789	10.51
MLR	0.717	12.46
SVR	0.725	12.14

由表 4 可见, 三种方法估测结果均较好, 其中 BPNN 模型的估测精度最高, 其 R^2 为 0.845, MRE 为 7.642%, $RMSE$ 为 1.622 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这说明利用表层土壤光谱信息估测耕层土壤有机质含量是可行有效的。

2.3 结果对比

为进一步对比分析, 采用另一种方法对耕层土壤有机质含量进行间接估测, 即基于耕层与表层土壤有机质关系的耕层土壤有机质间接估测方法。其基本思想是: 首先利用基于表层光谱信息提取的估测因子建立表层土壤有机质估测模型, 计算出表层土壤有机质的估测值 \hat{y}_1 ; 然后依据表层、耕层土壤有机质含量的实测数据, 建立耕层与表层土壤有机质含量之间的关系式 $\hat{y}_2 = f(y_1)$, 再将表层土壤有机质的估测值 \hat{y}_1 代入关系式 $\hat{y}_2 = f(y_1)$, 即可计算出土壤耕层有机质含量的估测值。3 种建模方法的估测结果如表 5 所示。

由表 5 可见, 3 种模型的耕层土壤有机质含量估测值与实测值具有较强的相关性, 估测结果均较好, 其中 BPNN 模型的估测结果相对最优, 模型 R^2 为 0.789, MRE 为 10.51%, $RMSE$ 为 1.923 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

这说明第二种间接估测方法也是有效的, 但与第一种估测方法相比精度略低。

3 讨论与结论

众所周知, 表层土壤光谱和表层土壤有机质之间存在关联性, 而在上文中已经证明表层土壤有机质和耕层土壤有机质之间存在密切联系, 具有显著相关性, 因此表层土壤光谱和耕层土壤有机质之间是存在间接联系的。基于耕层与表层土壤有机质关系的耕层土壤有机质间接估测方法使用此种间接关系实现了对耕层土壤有机质含量的间接估测, 这说明利用表层土壤光谱估测耕层土壤有机质含量是可行的。

对比表层土壤与耕层土壤, 土壤的光谱特性受到成土母质、成土环境、土壤类型、有机质含量、水含量、铁含量、结构组成等众多因素的影响。表层土壤与耕层土壤同属土壤浅部, 其区别只是距离地面的深度不同, 因此其特性的差异主要体现在有机质含量和水含量两方面。表层土壤与耕层土壤在温度、湿度、光照、通风、微生物等条件存在不同, 这使表层土壤与耕层土壤有机质含量并不相同, 耕层土壤有机质更容易被分解转化导致耕层土壤有机质含量会低于表层土壤, 本试验中土壤有机质的化验结果也证实了这一点。表层土壤水含量一般低于耕层土壤水含量, 而水含量低时, 水和有机质的交互作用较弱^[29], 因此相对耕层土壤表层土壤光谱受水的影响作用较小, 有利于提高土壤有机质含量的估测精度。

对比两种方法对耕层有机质含量间接估测的结果, 基于表层土壤光谱特征的耕层土壤有机质间接估测效果要优于基于耕层与表层土壤有机质关系的耕层土壤有机质间接估测。其原因是野外环境复杂多变, 且采样与化验过程中的误差是不可避免的, 导致建立的耕层与表层土壤有机质关系模型不是完全精确的关系。本试验区的耕层与表层土壤有机质含量决定系数 R^2 为 0.839, 在使用第二种间接估测方法时会存在误差传递问题, 从而对估测结果造成不利的影 响, 使第二种估测方法的估测精度低于本研究所提出的方法。另外, 在测定光谱和采集土样时尽量选择粒径相近、形态相似, 且状态较为稳定的土壤, 也是降低误差, 提高精度的一种方式。因土壤光谱特性影响因素复杂, 如何进一步消减各种因素对土壤有机质光谱估测的误差, 有待深入研究。

对比多种模型的估测结果, BPNN 模型的估测结果在两种间接估测方法中均为最优, 这说明其在

处理土壤有机质含量与光谱特征之间存在的非线性关系时具有较强的能力。

本研究基于山东省济南市章丘区的表层、耕层土壤样本数据,根据耕层土壤有机质含量与表层光谱的间接关联性,利用表层土壤光谱信息实现了耕层土壤有机质含量的间接估测。试验结果表明这种新方法是可行有效的,并且BPNN模型的估测效果为最优,其 R^2 为0.845, MRE 为7.642%, $RMSE$ 为 $1.622\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。基于表层土壤光谱信息实现耕层土壤有机质含量间接估测,能够充分利用表层土壤含水量相对低的特点,既可有效减小土壤水含量的影响,提高土壤有机质含量的估测精度,又为土壤地面高光谱遥感研究成果的推广应用提供理论基础,为航空及航天光学遥感技术快速估测大范围农田耕层土壤有机质含量等土壤性状指标以及更好应用于精准农业提供技术支持。

参考文献:

- [1] 田永超,张娟娟,姚霞,等.基于近红外光声光谱的土壤有机质含量定量建模方法[J].农业工程学报,2012,28(1):145-152.
- [2] 王延仓,张兰,王欢,等.连续小波变换定量反演土壤有机质含量[J].光谱学与光谱分析,2018,38(11):3521-3527.
- [3] GOMEZ C, LAGACHERIE P, COULOUMA G. Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis-NIR data[J]. Geoderma, 2012, 189: 176-185.
- [4] 卢艳丽,自由路,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[J].中国农业科学,2007,40(9):1989-1995.
- [5] KARNIELI A, VERCHOVSKY I, HALL J K, et al. Geographic information system for semi-detailed mapping of soils in a semi-arid region[J]. Geocarto Int, 1998, 13(3): 29-42.
- [6] 彭小婷,高文秀,王俊杰.基于包络线去除和偏最小二乘的土壤参数光谱反演[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(7):862-866.
- [7] CLOUTIS E A. Review article hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques[J]. Int J Remote Sens, 1996, 17(12): 2215-2242.
- [8] 朱亚星,于雷,洪永胜,等.土壤有机质高光谱特征与波长变量优选方法[J].中国农业科学,2017,50(22):4325-4337.
- [9] 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.
- [10] 林鹏达,佟志军,张继权,等.基于CWT的黑土有机质含量野外高光谱反演模型[J].水土保持研究,2018,25(2):46-52,57.
- [11] Li M L, Li X C, Tian Y, et al. Grey relation estimating pattern of soil organic matter with residual modification based on hyper-spectral data[J]. J Grey Syst-UK, 2016, 28(4):27-39.
- [12] 李明亮,李西灿,张爽.土壤含水量高光谱灰色关联度估测模式[J].测绘科学技术学报,2016,33(2):163-168.
- [13] MIAO C H, LI X C, LU J H, et al. The modified model of soil organic matter grey relation estimating pattern based on hyper-spectral data[J]. J Grey Syst-UK, 2019, 31(2):51-64.
- [14] 彭杰,周清,张杨珠,等.有机质对土壤光谱特性的影响研究[J].土壤学报,2013,50(3):517-524.
- [15] NOCITA M, STEVENS A, NOON C, et al. Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy[J]. Geoderma, 2013, 199: 37-42.
- [16] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J].农业工程学报,2014,30(16):113-120.
- [17] 徐夕博,吕建树,吴泉源,等.基于PCA-MLR和PCA-BPN的莱州湾南岸滨海平原土壤有机质高光谱预测研究[J].光谱学与光谱分析,2018,38(8):2556-2562.
- [18] 沈润平,丁国香,魏国柱,等.基于人工神经网络的土壤有机质含量高光谱反演[J].土壤学报,2009,46(3):391-397.
- [19] 黄婷.基于支持向量机的土壤基础肥力评价和土壤有机质含量预测研究[D].南京:南京农业大学,2015.
- [20] 洪永胜,于雷,朱亚星,等.基于EPO算法去除水分影响的土壤有机质高光谱估算[J].土壤学报,2017,54(5):1068-1078.
- [21] 文锡梅,兰安军,易兴松,等.基于高光谱的喀斯特地区典型农田土壤有机质含量反演[J].西南农业学报,2018,31(8):1649-1654.
- [22] 谭琨,张倩倩,曹茜,等.基于粒子群优化支持向量机的矿区土壤有机质含量高光谱反演[J].地球科学,2015,40(8):1339-1345.
- [23] 李西灿,赵庚星,陈红艳,等.土壤有机质含量区间值高光谱估测[J].测绘科学技术学报,2014,31(6):593-597.
- [24] LI X C, YU T, WANG X, et al. The soil organic matter content grey relationship inversion pattern based on hyper-spectral technique[J]. Grey Syst: Theory Appl, 2011, 1(3): 261-267.
- [25] 管延龙,王让会,李成,等.天山北麓土壤有机质高光谱特征分析[J].环境科学与技术,2015,38(9):1-6.
- [26] 于雷,洪永胜,周勇,等.连续小波变换高光谱数据的土壤有机质含量反演模型构建[J].光谱学与光谱分析,2016,36(5):1428-1433.
- [27] 李希灿,王静,王芳,等.基于模糊识别的土壤性质指标光谱反演[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(2):324-327.
- [28] 陈奕云,漆锟,刘耀林,等.顾及土壤湿度的土壤有机质高光谱预测模型传递研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(6):1705-1708.
- [29] 尚璇,李西灿,徐邮邮,等.土壤水与有机质对高光谱的作用及交互作用规律[J].中国农业科学,2017,50(8):1465-1475.
- [30] 刘炜,常庆瑞,郭曼,等.小波变换在土壤有机质含量可见/近红外光谱分析中的应用[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):241-246.
- [31] 南锋,朱洪芬,毕如田.黄土高原煤矿区复垦农田土壤有机质含量的高光谱预测[J].中国农业科学,2016,49(11):2126-2135.
- [32] 章涛,于雷.土壤有机质高光谱估算模型研究进展[J].湖北农业科学,2017,56(17):3205-3208.