

煤矿区土壤有机碳含量的高光谱预测模型

孙问娟^{1,2}, 李新举^{1,2}

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 可见—近红外光谱已被证明是一种快速、及时、有效的土壤有机碳含量预测工具。利用 Field Spec4 对济宁鲍店矿区的 104 个土壤样品进行光谱测量, 采用 Savitzky-Golay 卷积平滑 (SG)、多元散射校正 (MSC) 及数学变换等多种方式组合对光谱预处理, 并运用偏最小二乘回归分析建立土壤有机碳含量预测模型, 进而探讨煤矿区土壤有机碳含量的高精度预测方法。结果表明: (1) 不同的光谱预处理方法对建模结果影响差异较大, 建模结果以 SG 加 MSC 预处理再结合光谱反射率的一阶微分变换最优, 建模 $R^2 = 0.86$, RMSE = 2.0 g/kg, 验证 $R^2 = 0.78$, RMSE = 1.81 g/kg, RPD = 2.69。 (2) 倒数和倒数的对数与土壤有机碳含量的相关性曲线接近重合, 与反射率曲线成反比, 但是建模效果远低于反射率; 光谱反射率的一阶微分能明显提高 500~600 nm 波段相关性。 (3) 光谱反射率随土壤有机碳的含量减少而增大, 当有机碳含量较低时, 其波谱的近红外波段反射率响应能力也随之降低, 反射率直接建模难度加大。

关键词: 煤矿区; 光谱预处理; 土壤有机碳; 偏最小二乘回归

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0346-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.054

Hyperspectral Prediction Model of Soil Organic Carbon Content in Coal Mining Area

SUN Wenjuan^{1,2}, LI Xinju^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018;

2. National Engineering Laboratory of Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Visible-near infrared (Vis-NIR) spectroscopy has been proved to be a rapid, timely and efficient tool for predicting content of soil organic carbon (SOC). In this study, FieldSpec4 was used to measure 104 soil samples collected from the Baodian mining area of Shandong province. Vis-NIR reflectance spectra and SOC content were measured under laboratory conditions. The spectral data were first denoised using the Savitzky-Golay (SG) convolution smoothing method, the multiple scattering correction (MSC) method, after which the spectral reflectance was subjected to reciprocal, reciprocal logarithm and differential transformations to improve spectral sensitivity. Finally, regression models for estimating the SOC content by the spectral data were constructed using partial least squares regression (PLSR). The results showed that: (1) Different spectral preprocessing methods had great influence on the modeling results, and the modeling results performed best when the spectral reflectance was preprocessed by Savitzky-Golay (SG) smoothing coupled with multiple scattering correction (MSC) and first-order differential transformation (modeling $R^2 = 0.86$, RMSE = 2.00 g/kg, verification $R^2 = 0.78$, RMSE = 1.81 g/kg, RPD = 2.69). (2) The correlation curve between reciprocal and SOC content was similar to the correlation curve between the logarithm of the reciprocal and SOC content. They were inversely proportional to the reflectivity curve, and the modeling effect was far lower than the reflectivity; the first-order differential of spectral reflectance could significantly improve the correlation of the 500 ~ 600 nm band. (3) The spectral reflectance increased with the decreasing of SOC content. In addition, when the SOC content was low, the sensitivity of the spectrum especially that in the near-infrared band of the original reflectance to the change of SOC content decreased, and the direct

收稿日期: 2018-04-10

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41771324); 山东省重点研发计划项目 (2016ZDJS11A02)

第一作者: 孙问娟 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤遥感研究。E-mail: wenjuansun123@foxmail.com

通信作者: 李新举 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地复垦及土壤生态研究。E-mail: lxj0911@126.com

modeling difficulty of the reflectance increased.

Keywords: coal mining area; spectral pretreatment; soil organic carbon; partial least-squares regression

与土壤养分农化分析的低效率、高成本^[1]相比,具有精细光谱线的高光谱数据已成为一种快速、及时、有效的土壤成分监测工具^[2]。迄今为止,已有诸多学者在多种土壤理化性质方面做了相关研究,如土壤含盐量^[3-4]、土壤含水量^[5]、土壤养分^[6]等。上述研究表明,高光谱数据能够很好的弥补传统方法的不足。

高光谱在土壤有机碳(SOC)的研究领域中,主要用于光谱特征分析与有机碳含量定量预测。已有研究^[7-9]表明,可见光及近红外波段与SOC含量有较好的统计关系。光谱预处理方式在定量预测中至关重要,侯艳军等^[6]提出光谱反射率经过微分及倒数的对数等数学变换能显著提高荒漠SOC含量模型的预测精度。南峰等^[10]研究表明,反射率倒数的对数变换可以有效提高黄土高原矿区复垦农田SOC含量的建模精度。陈华舟等^[11]通过光谱曲线的SG平滑和MSC的组合显著改善了广东农田土壤有机质的近红外波段分析效果。Mouazen等^[12]研究表明,适当的光谱预处理方法可以有效提取敏感波段进而提高土壤全碳及SOC含量的预测精度。然而当前通过多种预处理方法交叉组合提高模型预测精度的研究较少。

煤炭资源的开发与利用带动了经济发展的同时,带来了严重的地表塌陷问题,直接导致土壤质量的下降^[13]。程静霞等^[14]研究表明,采煤造成的塌陷土地的表面SOC含量减少和空间变异性增大。土地复垦,可以有效改善土体结构及土壤理化性质,提高土壤质量^[15]。SOC不仅是一种微生物生长的碳源,也是一个重要的生态因子,能保持良好的土壤物理结构和生物多样性^[16]。因此,SOC虽然仅占土壤总量的极小比例,但对土壤质量及功能的调节起着关键作用。SOC含量的快速监测与评估对矿区的复垦模式以及管理措施具有指导意义^[17]。以此为切入点,在矿区范围内采集土样进行实验室SOC含量分析与高光谱数据测定,光谱数据进行SG平滑、MSC并结合多种数学变换,利用偏最小二乘回归对变换后的数据进行建模并优选,探究提高高光谱预测模型的方法,以实现研究区SOC含量的监测与评估,为矿区复垦方向提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鲍店矿区是邹城西部煤矿区的重要组成部分,地理坐标为35°23′13.2″—35°28′8.4″N,116°48′7.2″—116°52′26.4″E,总体面积近35.76 km²。矿区气候

四季分明,属于温带大陆季风性气候。区域内作物种类丰富,地形以平原为主。土壤类型主要是潮土和砂姜黑土,土地利用方式以耕地为主,有少量的林地和草地。采矿用地位于整个矿区的中央,有主干道贯穿,便于煤炭运输。此外,煤矿于1986年投入生产,长期的采煤活动已经造成了严重的地面塌陷问题,塌陷形成的水域面积占整个矿区面积的1/8。

1.2 土样采集与分析

在2017年6月初,首先进行了野外调查踏勘,在此基础上进行室内样点布设。在耕地、林地、草地、采矿用地等多种地类中共采集土样104个,每个样点均通过Geo7x进行定位,同时记录周围植被覆盖、周围环境等因素,并用相机记录。每份土样是在10 m×10 m的范围内按照梅花取样法采表层0—20 cm土壤,并将土壤中明显的植物根系、石子砖块、小动物等侵入物去除,然后根据四分法将5处土样均匀混合后取约2 kg作为土壤样本,并一分为二装入自封袋中做好标记,一份用于土壤样本备份储存,另一份用于SOC含量分析及高光谱测定。

土样带回实验室后,晾干并研磨后使其分别过20,100目筛(过20目筛的土样用于光谱测量),过100目筛的土样用于土壤有机碳含量测定,采用重铬酸钾氧化法测定^[18]。

1.3 土壤光谱的测定与处理

光谱的测定在暗室内进行,采用美国ASD Field Spec4地物光谱仪,光谱范围为350~2 500 nm,探头视场角为15°。测量时,光源入射角调为30°,光源到土壤表面的距离为50 cm,探头垂直,到土壤表面的距离为15 cm^[19],土壤装在铝盒里,铝盒下面垫吸光布,避免地面反射光的影响。土壤过20目筛,粒径为1 mm,测量时装满土的铝盒表面采用刮平处理^[20],每份土样采集光谱曲线10条。

将测得的土壤光谱反射数据用自带的View Spec Pro进行简单的处理,每份土样取10条曲线的均值波谱作为样本实测曲线,然后导出到Excel,去除噪声较大的起始波段(350~499 nm)和尾部波段(2 451~2 500 nm)以及受环境水汽影响较大的1 300~1 450,1 800~1 950 nm波段。然后对光谱数据做SG、MSC、SG加MSC处理,并对其处理结果进行倒数、倒数的对数、一阶微分和二阶微分等数学变换。进一步通过SOC含量与光谱反射率进行相关性分析,去除相关性较差的变换方式。

1.4 土壤高光谱特征分析

根据全国第二次土壤普查中土壤有机质的分级标准,把 SOC 划分为相对应的 6 个含量级别(表 1)。

表 1 土壤有机质含量与土壤有机碳含量转换表 单位:g/kg

指标	I	II	III	IV	V	VI
土壤有机质含量	>40	30~40	20~30	10~20	6~10	<6
土壤有机碳对应含量	>23.20	17.40~23.20	11.60~17.40	5.80~11.60	3.48~5.80	<3.48

1.5 偏最小二乘回归分析

以光谱反射率及其变换形式为自变量,由于波段窄而多,且相邻波段往往具有较高的相关性,这样自变量一方面数目上远大于样本,另一方面自变量内部存在高度的自相关性。偏最小二乘法(PLS)集主成分分析、典型相关分析和普通最小二乘回归三者的优点,能有效解决自变量大于样本量以及存在的严重多重共线性问题^[21]。

建模通过软件 R 完成,模型精度用决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE 及相对预测偏差 RPD 进行评估。 R^2 越大,模型拟合度越好;RMSE 越小,模型预测能力越好;RPD 越大(大于 2),模型越稳健。综上, R^2 和 RPD 越大、RMSE 越小,模型越可靠。

2 结果与分析

2.1 土样有机碳统计特征

采用 K—S 算法对样本自变量划分训练集与验证集,64 个样本用于建模,40 个样本用于验证,由表 2 可知,研究区 SOC 的含量范围为 0.79~27.72 g/kg,平均值为 11.34 g/kg,表明研究区 SOC 含量总体偏低,处于中等偏下水平;标准差与变异系数分别为 5.09 g/kg 和 44.96%,表明样本具有一定的离散性。训练集与验证集的均值和标准差都与样本总体相近,具有建模的可靠性。

表 2 土壤样本有机碳的统计参数

土壤 样本	最小值/ (g·kg ⁻¹)	最大值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异 系数/%
样本总集	0.79	27.72	11.34	5.09	44.86
训练集	1.19	27.72	11.55	5.14	44.50
验证集	0.79	27.33	10.97	5.01	45.88

2.2 土壤有机碳的光谱特征

由图 1 可知,光谱反射率随着 SOC 含量的降低而增加,二者负相关,级别 I,II,III 之间较为明显,但是 SOC 含量较低的级别 IV,V 之间光谱反射率变化较小;不同 SOC 含量级别的光谱曲线在形态上较为一致,大体呈上升趋势,在可见光波段(400~760 nm)上升较快,在短波近红外及部分长波近红外波段(780~1 300 nm)相对较缓,在长波近红外的 1 600~

对样本进行级别分组,以每组的平均波谱值为代表,进行不同级别 SOC 含量的光谱特征分析,光谱范围为除噪声较大波段后的 400~2 400 nm 波段。

1 800 nm 波段形成了一个较高的反射率高台,在 2 100 nm 之后反射率开始下降;在 1 400,1 900 nm 附近形成了 2 个吸收谷,是由环境水汽及土壤水分在此波段强烈吸收电磁波引起的;在 2 150 nm 附近出现了反射峰,达到反射率的最大值。

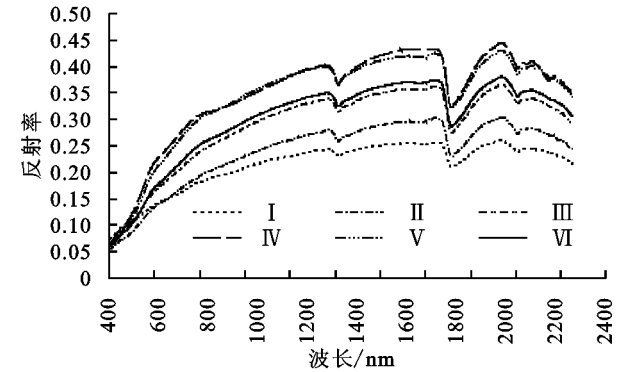


图 1 不同有机碳含量等级的光谱反射率曲线

2.3 相关性分析

由图 2 可知,总体上光谱原始反射率、倒数和倒数的对数与 SOC 含量的相关性较好且三者系数曲线之间有明显的数学关系,倒数和倒数的对数两条曲线近乎重合,且与原始反射率有一定的反比例关系;相关性系数绝对值在大部分波段都高于 0.4,甚至高于 0.5,在 400~550,1 900 nm 波段左右相关性相对较差。一阶微分和二阶微分总体上相关性不高,低于 0.4,尤其是二阶微分,集中在 0.2 以内;而在 500~600,1 400,1 900 nm 左右的波段范围内,一阶微分与 SOC 含量的相关性最高能达到 0.6,明显高于其他变换方式。因此,除去二阶微分,本研究采用原始反射率及反射率的倒数、倒数的对数和一阶微分与其他预处理方式组合进行建模。

2.4 土壤有机碳含量高光谱预测模型

由表 3 可知,光谱的不同处理方式互相组合共产生 12 组建模数据。软件 R 的偏最小二乘回归建模结果表明,反射率的倒数、倒数的对数虽然在相关性上都接近于反射率,但是建模结果都明显劣于反射率直接建模;相反,反射率的一阶微分变换则能提高模型精度;SG 预处理的数据,一阶微分变换建模结果最好;MSC 预处理的数据,原始反射率建模结果最好,且优于 SG 的建模结果;同时进行 SG 和 MSC 处理的数据,原始反射率和经

过一阶微分变换建模结果较好,尤其是一阶微分变换结果,建模决定系数达到了 0.86 的同时,预测模型的决定系数达到了 0.78, RMSE 也在几种模型中最小, $RPD=2.69>2.0$, 模型可靠性最好(表 3)。

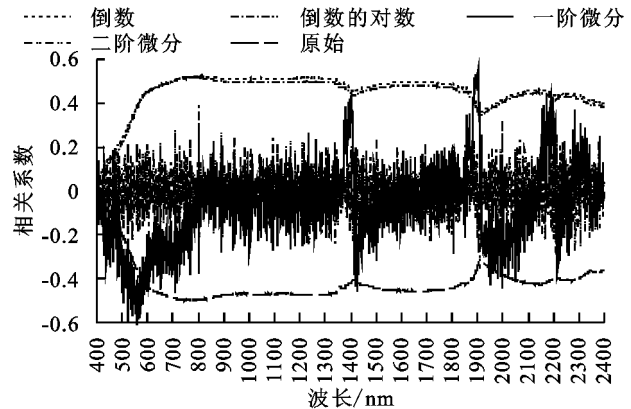


图 2 土壤有机碳含量与不同数学变换方式的相关性

表 3 土壤有机碳的高光谱建模结果

模型	参数	SG	MSC	SG+MSC
F(R)	训练集 R^2	0.64	0.84	0.80
	训练集 RMSE	3.21	2.11	2.36
	验证集 R^2	0.35	0.72	0.71
	验证集 RMSE	3.53	2.04	2.27
F(1/R)	训练集 R^2	0.55	0.44	0.75
	训练集 RMSE	2.70	4.37	2.97
	验证集 R^2	0.28	0.18	0.39
	验证集 RMSE	4.23	4.01	4.75
F(lg(1/R))	训练集 R^2	0.52	0.23	0.46
	训练集 RMSE	2.87	4.93	4.16
	验证集 R^2	0.36	0.12	0.21
	验证集 RMSE	3.78	4.17	3.68
F(R')	训练集 R^2	0.71	0.68	0.86
	训练集 RMSE	2.92	2.30	2.00
	验证集 R^2	0.66	0.24	0.78
	验证集 RMSE	1.91	5.64	1.81
	RPD	2.44	1.01	2.69

注: $F(x)$ 是一个以 x 为自变量的模型, $x=R, 1/R, \lg(1/R), R'$ 。

由图 3 可知, 以下 4 个模型具有较好的拟合度, 均能够稳定实现 SOC 含量的定量预测, 尤其是经过 SG、MSC 预处理再结合一阶微分变换的拟合线 C。

3 讨论

研究表明, SOC 含量与光谱反射率呈负相关关系, 在 MSC 或者 SG+MSC 预处理条件下可直接用于 SOC 含量的高光谱建模, 模型精度最高可达 0.84, 说明光谱

反射率与 SOC 含量有较好的负相关性; 经过 SG 或者 SG+MSC 预处理的光谱反射率的一阶微分变换建模精度较好, 汪洪涛^[22]通过对森林 SOC 的研究也得到了类似的结果。可以看出直接用光谱反射率建模, SG 处理建模精度不高, MSC 处理的模型精度都较好; 用光谱反射率的一阶微分建模, 结果与反射率建模相反, MSC 处理的建模精度不高, SG 处理的模型精度较好, 由此推测 SG 加一阶微分处理能较好的增强光谱特征, 与杨爱霞等^[23]的研究相符, MSC 处理则适用于原始反射率直接建模, 且模型精度优于 SG 加一阶微分建模结果, 这与陈华舟^[11]的研究结果有所不同, 可能是由区域环境及土壤类型差异引起的光谱特征差异^[24]。

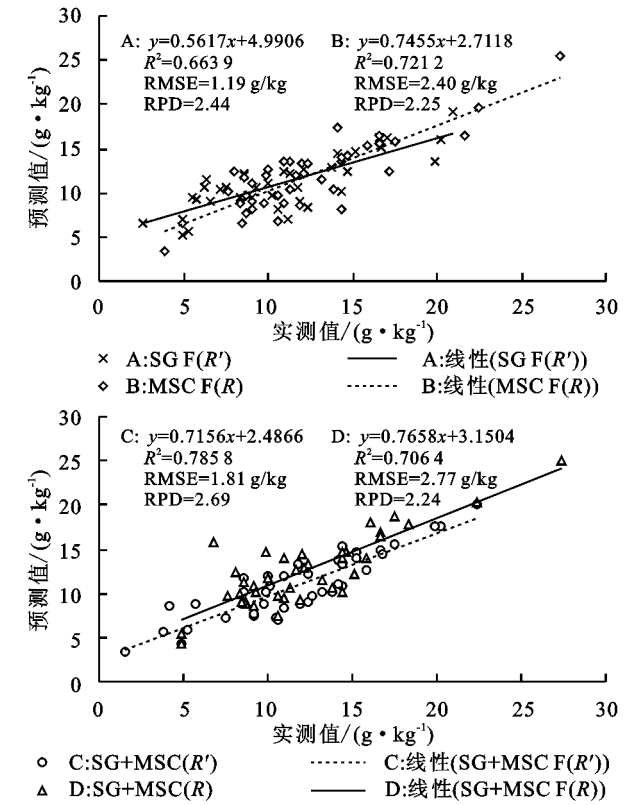


图 3 土壤有机碳含量预测值与实测值的拟合

研究发现, 当 SOC 含量降低到一定程度时, 光谱反射率增加的趋势不再明显, 推测可能是 SOC 含量较低时, SOC 的光谱特征信息被土壤光谱中的其他信息掩盖。为了进一步探究推测是否正确, 将样本数据按有机碳含量高低平均分成两组, 进行相关性分析, 结果表明(图 4), 在 400~800 nm 波段, 低含量组的相关性略高于高含量组; 在 800~2 400 nm 波段(不包含 1 300~1 450, 1 800~1 950 nm 波段), 高含量组相关性远高于低含量组, 说明上述推测有一定的可靠性, 当 SOC 含量较低时, 其对光谱反射率的敏感性较低, 不宜直接建模。具体当有机碳含量低到什么程度, 还需要进一步研究。

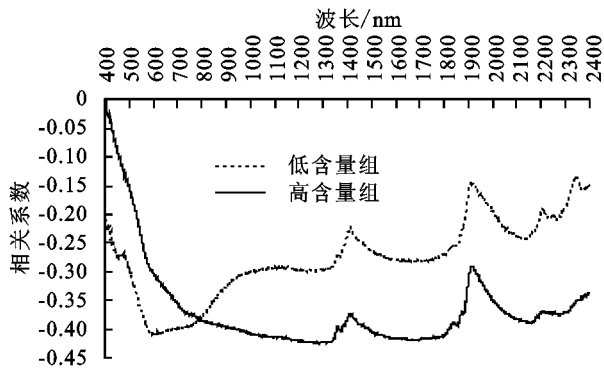


图 4 不同土壤有机碳含量与光谱反射率的相关性

此外,研究区 SOC 含量集中在 0.79~27.72 g/kg,平均值为 11.34 g/kg,表明矿区 SOC 含量普遍较低(低于 SOC 含量级别 III),变异性较大。推测采煤引起的地表沉降会干扰 SOC 的分布,导致 SOC 含量的下降和区域差异,与前人^[25]研究结果类似。

4 结论

(1)研究区土壤有机碳含量普遍较低(低于土壤有机碳含量第 III 级),且变异性较大。

(2)倒数和倒数的对数与土壤有机碳含量的相关性曲线接近重合,与反射率曲线成反比,但是建模效果远低于反射率;此外光谱反射率的一阶微分能明显提高 500~600 nm 波段的相关性。

(3)不同有机碳含量的光谱反射率曲线在形态特征上较一致,光谱反射率随土壤有机碳含量的下降而增大,但当有机碳含量减少到一定程度时,光谱反射率的增大趋势不再明显,土壤有机碳含量与光谱反射率的相关性下降,特别是近红外波段。

(4)高光谱通过偏最小二乘回归分析建模能够稳健的实现煤矿区土壤有机碳的定量预测,最高建模 R^2 为 0.86,验证 R^2 为 0.78,相对预测偏差 RPD 为 2.69。

(5)不同光谱处理方式的建模结果不同,Savitzky-Golay 卷积平滑结合反射率的一阶微分、多元散射校正结合反射率、Savitzky-Golay 卷积平滑加多元散射校正或者 Savitzky-Golay 卷积平滑加多元散射校正再结合反射率的一阶微分 4 种处理方式下,建模结果较优,其中 SG+MSC 预处理条件下 $F(R')$ 建模结果预测能力最强。

参考文献:

[1] Rossel R A V, Webster R. Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(6): 848-860.

[2] 王静,何挺,李玉环. 基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(4): 438-445.

[3] 张丽,蒋平安,武红旗,等. 北疆典型土壤反射光谱特征研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 273-276.

[4] 刘庆生,刘高焕,张敏,等. 翅碱蓬野外光谱对土壤化学性质的响应[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 207-210.

[5] 李萍,赵庚星,高明秀,等. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1262-1272.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Bartholomeus H M, Schaepman M E, Kooistra L, et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification [J]. *Geoderma*, 2008, 145(1): 28-36.

[9] 申艳,张晓平,梁爱珍,等. 近红外光谱分析法测定东北黑土有机碳和全氮含量[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 109-114.

[10] 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.

[11] 陈华舟,潘涛,陈洁梅. 多元散射校正与 Savitzky-Golay 平滑模式的组合优选应用于土壤有机质的近红外光谱分析[J]. *计算机与应用化学*, 2011, 28(5): 518-522.

[12] Mouazen A M, Maleki M R, Baerdemaeker J D, et al. On-line measurement of some selected soil properties using a VIS - NIR sensor [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(1): 13-27.

[13] 陈孝杨,王芳,王长垒,等. 砂姜黑土区采煤塌陷坡耕地水蚀输沙过程研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 32-35.

[14] 程静霞,聂小军,刘昌华. 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2495-2500.

[15] 闵祥宇,李新举. 高潜水位矿区不同复垦方式下土壤热导率及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 176-181.

[16] 章明奎, Waleign D B, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 127-131.

[17] 孙泰森,师学义,杨玉敏,等. 五阳矿区采煤塌陷地复垦土壤的质量变化研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 35-37.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 30-34.

[19] 洪永胜,于雷,耿雷,等. 应用 DS 算法消除室内几何测试条件对土壤高光谱数据波动性的影响[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 50(2): 303-308.

[20] 侯燕平,吕成文,项宏亮,等. 土样处理方式对室内土壤

- 高光谱测试稳定性影响探讨[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 287-291.
- [21] 王国华, 张虎, 魏岳嵩. 偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J]. 统计与决策, 2017(7): 67-71.
- [22] 汪洪涛. 基于近红外光谱技术预测森林土壤有机碳含量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [23] 杨爱霞, 丁建丽. 新疆艾比湖湿地土壤有机碳含量的光谱测定方法对比[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 162-168.
- [24] 刘翥, 杨玉盛, 朱锦懋, 等. 中亚热带 2 种经济林土壤可溶性有机质数量与光谱学特征比较[J]. 水土保持学报, 2014, 28(05): 170-175.
- [25] 郗晨龙, 卞正富, 杨德军, 等. 鄂尔多斯煤田高强度井工煤矿开采对土壤物理性质的扰动[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1448-1456.
- (上接第 340 页)
- [21] 刘键, 张志明, 马筠. 纳米技术与农业低碳经济 1. 纳米碳增效肥应用研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [22] 梁太波, 尹启生, 张艳玲, 等. 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1429-1435.
- [23] 武美燕, 蒿若超, 田小海, 等. 添加纳米碳缓释肥料对超级杂交稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻, 2010, 25(4): 86-90.
- [24] 肖元松, 彭福田, 房龙, 等. 树盘施肥区域大小对¹⁵N 吸收利用及桃幼树生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 957-964.
- [25] Grierson P F, Adams M A. Plant species affect acid phosphatase, ergo sterol and microbial P in a Jarrah (*Eucalyptus marginata* Donn ex Sm) forest in south-western Australia [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1817-1828.
- [26] 肖强, 张夫道, 王玉军, 等. 纳米材料胶结包膜型缓/控释肥料的特性及对作物氮素利用率与氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 779-785.
- [27] Serag M F, Kaji N, Tokeshi M, et al. The plant cell uses carbon nanotubes to build tracheary elements [J]. Integrative Biology, 2012, 4(2): 127-131.
- [28] 刘安勋, 廖宗文. 纳米材料对水团簇的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15780-15781.
- [29] Yuan Z D, Zhang Z, Wang X, et al. Novel impacts of functionalized multi-walled carbon nanotubes in plants: Promotion of nodulation and nitrogenase activity in the rhizobium-legume system [J]. Nanoscale, 2017, 9(28): 9921-9937.
- [30] 乔俊, 赵建国, 解谦, 等. 纳米炭材料对作物生长影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 162-170.
- (上接第 345 页)
- [12] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97-107.
- [13] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 728-739.
- [14] Köhl L, Lukasiewicz C E, Heijden M G A V D. Establishment and effectiveness of inoculated arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils [J]. Plant Cell and Environment, 2016, 39(1): 136-146.
- [15] 邓胤, 申鸿, 郭涛. 丛枝菌根利用氮素研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5627-5635.
- [16] Monica I F D, Saparrat M C N, Godeas A M, et al. The co-existence between DSE and AMF symbionts affects plant P pools through P mineralization and solubilization processes [J]. Fungal Ecology, 2015, 17: 10-17.
- [17] 贺学礼, 郭辉娟, 王银银. 土壤水分和 AM 真菌对沙打旺根际土壤理化性质的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 508-513, 519.
- [18] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634-642.
- [19] Rillig M C, Ramsey P W, Morris S, et al. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change [J]. Plant and Soil, 2003, 253(2): 293-299.
- [20] Rillig M C, Maestre F T, Lamit L J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1257-1260.