

## 近红外光谱法测定土壤全氮和碱解氮含量

吴金卓, 孔琳琳, 李颖, 徐浩凯, 林文树\*

(东北林业大学工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为探寻采用近红外光谱技术在野外快速测定土壤全氮和碱解氮含量的方法, 采集土壤光谱信号, 结合偏最小二乘法和主成分分析法, 分别建立土壤全氮和碱解氮含量测定的定标模型。结果表明, 采用 PLS 方法建模时, 土壤全氮和碱解氮含量测定定标模型的精度较高。为提高模型的预测精度, 采用多元散射校正、标准归一化、基线校正、卷积平滑和小波变换 5 种方法对光谱信号进行预处理, 当用小波变换法对光谱信号进行去噪处理, 并与 PLS 方法结合时, 模型的预测精度最高, 土壤全氮样品校正模型的相关系数为 0.838 5, 均方根误差为 0.153 1, 对应验证模型的相关系数为 0.754 9, 均方根误差为 0.184 2, 校正集和验证集土壤全氮含量预测值( $y$ )与实测值( $x$ )之间的关系模型分别为  $y=0.685 8x+0.198 0$  和  $y=0.621 4x+0.237 9$ ; 土壤碱解氮样品校正模型的相关系数为 0.866 5, 均方根误差为 0.007 7, 对应验证模型的相关系数为 0.796 1, 均方根误差为 0.009 4, 校正集和验证集土壤碱解氮含量预测值( $y$ )与实测值( $x$ )之间的关系模型分别为  $y=0.749 8x+0.019 4$  和  $y=0.700 7x+0.023 3$ 。综合分析结果表明, 应用近红外光谱技术对土壤全氮和碱解氮含量进行定量预测是可行的, 且应用小波变换方法对光谱冗余信息进行预处理后, 再与偏最小二乘法相结合可有效地提高模型的精度。

**关键词:** 土壤; 全氮含量; 碱解氮含量; 野外测定; 小波去噪; 近红外光谱技术

中图分类号: S153.6; S714.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2016)01-0091-06

## Prediction models of total and available soil nitrogen based on near-infrared spectroscopy

Wu Jinzhuo, Kong Linlin, Li Ying, Xu Haokai, Lin Wenshu\*

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** To explore the feasibility of measuring total and available soil nitrogen by using near-infrared spectroscopy in the field, the calibration models were respectively established on the basis of soil spectrum signals, as well as partial least squares method (PLS) and principal components analysis (PCA). The results showed that the models of total and available soil nitrogen established by using PLS approach were more accurate. To further improve the precision of the models, five different pretreatment methods were adopted to process the spectrum signals, including multiplicative scatter correction, standard normalization, baseline correction, convolution, smoothing, and wavelet transformation. The highest precision model was derived from wavelet denoising combined with PLS. The correlation coefficient ( $R$ ) and the root mean square error ( $RMSE$ ) of the calibration model for total soil nitrogen were 0.838 5 and 0.153 1, respectively. The correlation coefficient and the root mean square error of the corresponding verification model were 0.754 9 and 0.184 2, respectively. The relationship models between the predicted and measured values of total soil nitrogen for the calibration data set and the verification data set were:  $y=0.685 8x+0.198 0$  and  $y=0.621 4x+0.237 9$ , where  $x$  is the measured total soil nitrogen value,  $y$  is the predicted value of total soil nitrogen. In the calibration model of available soil nitrogen,  $R$  and  $RMSE$  were 0.866 5 and 0.007 7, respectively, and the corresponding values for the verification model were 0.796 1 and 0.009 4, respectively. The relationship models between the predicted and measured values of available soil nitrogen for the calibration data set and the verification data set were  $y=0.749 8x+0.019 4$  and  $y=0.700 7x+0.023 3$ , where  $x$  is the measured available soil nitrogen value,  $y$  is the predicted value of available soil nitrogen. Therefore, it is feasible to apply

收稿日期: 2015-01-09

修回日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400539); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572015CA01); “十二·五”国家科技支撑计划项目(2012BAC01B033)

作者简介: 吴金卓(1980—), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 主要从事森林作业与环境研究; \*通信作者, 林文树, 博士, 副教授, 主要从事森林作业与环境研究, linwenshu@126.com

NIR spectroscopy technology in quantitative determination of total and available soil nitrogen, and the wavelet transformation preprocessing method in combination with PLS can effectively improve the accuracy of the prediction models.

**Keywords:** soil; total nitrogen; available nitrogen; field measurement; wavelet denoising; near infrared spectroscopy

土壤中全氮和碱解氮是林木生长的必需营养元素,其含量的丰缺直接影响林木的生长及林产品的品质<sup>[1-2]</sup>,测定其含量的传统方法主要有凯式蒸馏法和碱解扩散法。这些检测方法的检测结果较为准确,但检测时间长,过程繁琐复杂,不适于田间或森林野外作业,因此,建立一种能在野外快速测定土壤中全氮、碱解氮含量的方法对于林业发展具有重要意义。近红外光谱技术(NIRS)以其高效、无损、低成本等优点受到广泛重视<sup>[3]</sup>。近红外光谱所表达的信息丰富,已在食品、制药、烟草、石油化工等领域得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>。在林业领域,郝斯琪等<sup>[8]</sup>将近红外光谱技术与 BP 神经网络技术结合,定量预测了落叶松木材的含水率;李耀翔等<sup>[9]</sup>将近红外光谱技术结合非线性偏最小二乘法对落叶松密度进行了精确预测;张慧娟等<sup>[10]</sup>对不同波段红松含水率的近红外光谱进行研究,得出了所建模型预测效果最好的波长范围;田永超等<sup>[11]</sup>探寻了应用近红外光谱技术快速测定不同类型土壤有机质含量的方法;李伟等<sup>[12]</sup>运用 PLS 建模方法和 BP 神经网络法建立了土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量预测分析的模型,研究结果表明,运用近红外光谱技术预测土壤碱解氮含量的精度明显高于预测速效磷和速效钾含量的精度。笔者对测定森林土壤全氮和碱解氮含量的近红外光谱法进行研究,现将结果报道如下。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于吉林省蛟河市林业实验区管理局林场(北纬 43°57.524'~43°58.042',东经 127°44.111'~127°44.667'),海拔高度 459~517 m。土壤剖面层次分化明显,为肥力较高的森林暗棕色土壤,其暗色腐殖质层土壤的有机质含量高,具有良好的团粒结构;腐殖质层水热条件稳定,具有明显的因残积黏化而形成的棕黄色黏化层;土体中下部有由铁锰胶膜淀积形成的棕色淀积层。该区域属于温带大陆性

山地气候,年均气温为 3.8 ℃,年均降水量为 700~800 mm<sup>[13]</sup>。

### 1.2 土壤样品的采集与制备

研究样地为吉林省蛟河市林业实验区管理局内 4 个不同演替阶段的针阔混交林样地(中龄林、近熟林、成熟林、老龄林),样地面积分别为 20、21、42、30 hm<sup>2</sup>。采用蛇形取样法,在每个样地均匀选取 18 个样点进行剖面挖掘与取样,用容积为 100 cm<sup>3</sup> 的环刀采集表层 0~20 cm 的土壤样品,最终获得 72 个土壤样品。将土壤样品带回室内用于土壤物理性质分析,同时,在环刀采样的相近位置取约 1 kg 土带回实验室,在自然条件下风干,筛除粗砂粒和植物残体,使用木棒研磨,然后过 0.045 cm 孔径土壤筛,均匀混合后用于土壤养分含量测定及近红外光谱分析。土壤全氮含量采用半微量凯式法进行测定,测定方法参见 GB7173—87;土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定,具体测定方法参见 GB7849—87。

### 1.3 土壤样品近红外光谱的采集与分析

土壤样品近红外光谱采集仪为美国 ASD 公司生产的 LabSpe<sup>®</sup>Pro FR/A114260,可采集的光谱波长为 350~2 500 nm,分辨率为 3 nm×700 nm,10 nm×1 400 nm 和 10 nm×2 100 nm。近红外仪预热后,将用商用聚四氟乙烯制成的白板放在旋转样品杯上进行空白校准,然后将土壤样品放在旋转样品杯上,再用强光照照射土壤样品,采集近红外光谱。每次采集的土壤光谱为扫描 30 次后的平均值,每 9 个样品进行 1 次背景校正<sup>[10]</sup>。试验全程在恒定温度和恒定湿度下进行。

### 1.4 光谱预处理与数学模型构建方法

在采集土壤样品光谱时,高频噪声、基线漂移、土壤样品颗粒大小、杂散光等都会不同程度地干扰光谱与土壤化学组分之间的关系,因此,在数据分析之前对光谱进行减弱或消除外在因素的影响是十分必要的。光谱预处理方法较多,没有统一的标

准。笔者首先应用多变量统计分析软件 Unscrambler 9.7 读取土壤光谱数据，然后采用多元散射校正、标准归一化、基线校正、卷积平滑 4 种方法对土壤光谱进行预处理，并与 PLS 和 PCR 建模方法结合，获得土壤样品的校正模型和验证模型。当光谱的预处理方法相同时，不同建模方法获得的校正模型和验证模型的参数也不同<sup>[14-15]</sup>，因此，本研究中将 PLS 建模方法与 PCR 建模方法进行比较，以便确定较好的建模方法和预处理方法。

为了进一步提高模型的精度，本研究中应用小波变换对土壤光谱进行预处理，以寻求最佳的预处理方法。将小波变换去噪光谱预处理方法下的建模结果与上述确定的预处理方法下的建模结果进行比较，进而确定最优的土壤全氮和碱解氮含量定量预测模型。

### 1.5 模型评价方法

采用相关系数 $R$ 、均方根误差 $RMSE$ 、校正标准差 $SEC$ 、验证标准差 $SEP$ 等对所建立的土壤全氮和碱解氮含量近红外光谱测定模型进行评价<sup>[16]</sup>，其中， $R$ 取值越接近1，表明模型拟合性越好，预测精度越高； $RMSE$ 、 $SEC$ 和 $SEP$ 越接近0，模型的拟合性越好，预测精度越高。

以光谱信号的信噪比( $SNR$ )和均方根误差( $RMSE$ )为计算标准来衡量小波阈值去噪的效果<sup>[17]</sup>(信噪比为样品吸光度与仪器吸光度噪声的比值， $SNR$ 越大， $RMSE$ 越小，表明小波去噪的效果越好)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤样品实测值及近红外光谱数据

试验中测得土壤全氮含量为 0.277 0~1.504 5 g/kg，平均含量为 0.632 8 g/kg；土壤碱解氮含量为 0.027 8~0.109 4 g/kg，平均含量为 0.070 6 g/kg。图 1 为应用光谱扫描仪采集的土壤样品近红外光谱。

由图 1 可见，土壤样品在 1 410、1 912、2 203 nm 处有较明显的吸收峰。本研究结果与文献[18]、[19]土壤近红外光谱研究结果较为类似，但峰值出现的位置有较小的差异，在 1 912 nm 处有很明显的吸收峰与文献[19]的研究结果(1 900 nm 处光谱的吸收峰与 N-H 键有光)相吻合，表明本研究中利用近红外光谱技术测定土壤中的全氮含量和碱解氮含量是可行的。

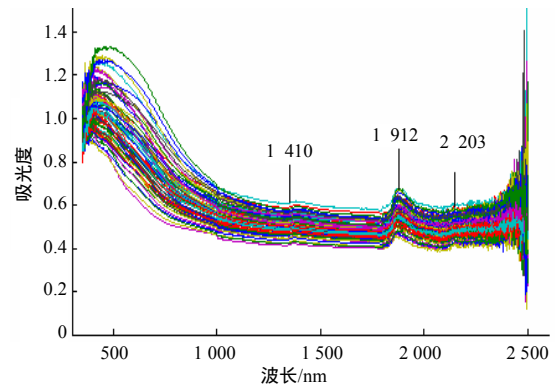


图 1 原始土壤样品近红外光谱  
Fig.1 NIR spectrum of original soil sample

### 2.2 多元散射校正等光谱预处理方法的建模结果

由表 1 可见，不论用何种方法进行预处理，也不论用何种方法建模，土壤样品全氮和碱解氮含量测定校正模型和预测模型的相关系数都有较明显的提高，均方根误差、标准差均降低，因此，所建立的光谱模型精度随光谱预处理方法的使用而提高，但不同光谱预处理方法对建模效果的提高程度略有差异。与 PCR 建模方法相比，采用 PLS 方法建立模型的精度较高。这是因为 PCR 建模方法主要是将具有冗余信息的相关性变量重新整合成一种反映原变量绝大部分信息的新变量，而 PLS 建模方法是多元线性回归分析、典型相关分析与主成分分析的结合，模型所包含的信息更加全面。

表 1 不同预处理方法下土壤全氮含量和碱解氮含量定标模型的评价指标

Table 1 Evaluation indices of the calibration models of soil TN and soil AN by using different pretreatment methods

建模方法	模型	光谱处理方法	全氮含量模型的评价指标				碱解氮含量模型的评价指标			
			$R$	$RMSE$	$SEC/SEP$	$Bias$	$R$	$RMSE$	$SEC/SEP$	$Bias$
PLS	校正集	未处理	0.697 6	0.198 3	0.199 7	$1.385 0 \times 10^{-8}$	0.676 5	0.241 4	0.243 1	$1.788 0 \times 10^{-7}$
		多元散射校正	0.754 9	0.182 9	0.184 3	$-1.209 1 \times 10^{-8}$	0.787 9	0.201 8	0.203 3	$1.523 1 \times 10^{-7}$
		标准归一化	0.710 4	0.196 3	0.197 7	$-1.512 0 \times 10^{-8}$	0.726 3	0.225 3	0.226 9	$1.589 0 \times 10^{-7}$
		基线校正	0.709 1	0.196 6	0.198 1	$-1.555 0 \times 10^{-8}$	0.707 1	0.231 8	0.233 4	$1.987 1 \times 10^{-7}$
		13 点卷积平滑	0.746 8	0.185 4	0.186 8	$1.166 0 \times 10^{-8}$	0.777 0	0.206 3	0.207 8	$1.921 0 \times 10^{-7}$

表 1(续)

建模方法	模型	光谱处理方法	全氮含量模型的评价指标				碱解氮含量模型的评价指标			
			<i>R</i>	<i>RMSE</i>	<i>SEC/SEP</i>	<i>Bias</i>	<i>R</i>	<i>RMSE</i>	<i>SEC/SEP</i>	<i>Bias</i>
PCR	验证集	未处理	0.666 4	0.206 6	0.208 1	$-1.604 1 \times 10^{-3}$	0.643 1	0.251 1	0.252 8	$-5.013 1 \times 10^{-3}$
		多元散射校正	0.733 9	0.189 5	0.190 9	$-7.250 1 \times 10^{-4}$	0.711 3	0.230 8	0.232 4	$1.991 0 \times 10^{-3}$
		标准归一化	0.648 1	0.213 0	0.214 6	$-3.400 0 \times 10^{-4}$	0.631 4	0.255 4	0.257 1	$-1.042 0 \times 10^{-3}$
		基线校正	0.659 4	0.209 9	0.211 5	$-1.637 1 \times 10^{-3}$	0.616 1	0.258 8	0.260 6	$-8.810 0 \times 10^{-4}$
		13点卷积平滑	0.692 1	0.202 1	0.203 6	$-9.840 1 \times 10^{-4}$	0.721 3	0.227 7	0.229 2	$4.476 0 \times 10^{-3}$
	校正集	未处理	0.696 7	0.198 6	0.199 9	$1.721 0 \times 10^{-8}$	0.655 0	0.247 7	0.249 4	$1.788 0 \times 10^{-7}$
		多元散射校正	0.753 8	0.183 2	0.184 6	$-1.296 0 \times 10^{-8}$	0.764 3	0.211 4	0.212 8	$1.854 0 \times 10^{-7}$
		标准归一化	0.693 6	0.200 9	0.202 3	$-1.512 0 \times 10^{-8}$	0.678 5	0.240 8	0.242 5	$1.656 1 \times 10^{-7}$
		基线校正	0.692 8	0.201 1	0.202 6	$-1.425 0 \times 10^{-8}$	0.678 3	0.240 8	0.242 5	$1.656 0 \times 10^{-7}$
		13点卷积平滑	0.740 0	0.187 6	0.188 9	$-1.728 0 \times 10^{-8}$	0.771 5	0.208 5	0.210 0	$1.788 1 \times 10^{-7}$
	验证集	未处理	0.664 1	0.205 7	0.207 1	$-3.690 1 \times 10^{-4}$	0.615 7	0.258 4	0.260 2	$3.300 1 \times 10^{-4}$
		多元散射校正	0.732 4	0.189 0	0.191 4	$-2.859 0 \times 10^{-3}$	0.719 6	0.227 7	0.229 2	$-3.222 0 \times 10^{-3}$
		标准归一化	0.662 5	0.209 0	0.210 4	$-0.680 1 \times 10^{-4}$	0.647 3	0.249 9	0.251 6	$-6.115 0 \times 10^{-3}$
		基线校正	0.667 1	0.207 8	0.209 3	$-9.020 1 \times 10^{-4}$	0.621 0	0.257 1	0.258 9	$-3.350 1 \times 10^{-4}$
		13点卷积平滑	0.687 3	0.203 3	0.204 8	$-1.300 1 \times 10^{-4}$	0.736 2	0.222 0	0.223 6	$2.375 0 \times 10^{-3}$

由表 1 可知,当采用 PLS 建模方法时,由不同光谱预处理方法获得的校正集和验证集的结果有较大差别。土壤全氮和碱解氮含量校正集的相关系数 *R* 均大于验证集的相关系数,均方根误差和标准误差则相反;校正模型和验证模型的相关系数由小到大依次为未处理、基线校正、标准归一化、13 点卷积平滑、多元散射校正。由此可知,与其他光谱预处理方法相比,经多元散射校正处理后的土壤全氮含量和碱解氮含量近红外光谱在采用 PLS 建模方法时得到的校正集和验证集的相关系数均最大,均方根误差、标准误差均最小。

由上述分析结果可见,对土壤全氮和碱解氮含量进行近红外光谱测定时,采用多元散射校正光谱预处理方法与偏最小二乘建模法相结合,可以有效地提高建模精度。

### 2.3 小波变换去噪光谱预处理结果

由图 2 可知,土壤近红外光谱经小波分析去噪处理后,可以有效地区别出信号中的突变部分和噪声部分,对非平稳信号进行去噪,最终得到的近红外光谱图更为集中,吸收峰更加明显。

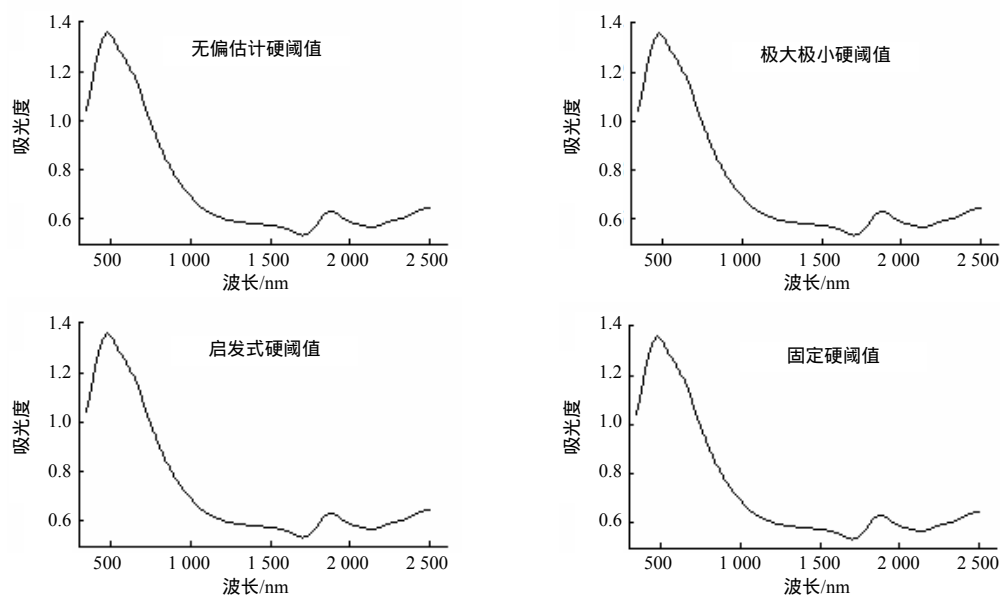


图 2 不同小波阈值去噪下吸光度与波长的关系

Fig.2 Relationship between wave length and absorbance at different thresholds for denoising

由表 2 可知,经 4 种自适应阈值处理土壤近红外光谱得到的信噪比和均方根误差各不相同,按信噪比从小到大排序依次为无偏估计硬阈值、极大极小硬阈值、固定硬阈值、启发式硬阈值,均方根误差则反之,这表明启发式硬阈值对土壤样本近红外光谱信号去噪的效果优于其他 3 种阈值。

表 2 不同小波阈值去噪信噪比和均方根误差

Table 2 SNR and RMSE under different wavelet thresholds

小波阈值	SNR	RMSE
无偏估计硬阈值	18.323 2	0.023 8
极大极小硬阈值	18.829 1	0.020 9
启发式硬阈值	19.028 1	0.019 8
固定硬阈值	18.924 7	0.020 0

2.4 多元散射校正与小波变换去噪光谱预处理方法建模结果的比较

由表 1 和表 2 可知,多元散射校正和小波变换对土壤近红外光谱信号均有良好的处理效果,且由表 1 已得出采用多元散射校正光谱预处理方法与 PLS 建模方法相结合,其建模精度优于与 PCR 建模方法相结合的结果,因此,本研究在 PLS 建模方法下将这 2 种光谱预处理方法进行比较,从而获得土壤近红外光谱的最佳处理方法。土壤全氮和碱解氮含量的模型评价结果如表 3 所示。

表 3 PLS 建模方法下 2 种预处理方法得到的土壤全氮和碱解氮含量定标模型的评价指标

Table 3 Evaluation indices of the calibration models of soil TN and AN by two pretreatment methods combined with PLS modeling approach

建模对象	模型	光谱预处理方法	R	RMSE
全氮含量	校正集	多元散射校正	0.754 9	0.182 9
		小波去噪	0.838 5	0.153 1
	验证集	多元散射校正	0.733 9	0.189 5
		小波去噪	0.754 9	0.184 2
碱解氮含量	校正集	多元散射校正	0.787 9	0.201 8
		小波去噪	0.866 5	0.007 7
	验证集	多元散射校正	0.711 3	0.230 8
		小波去噪	0.796 1	0.009 4

由表 3 可知,基于小波处理后的全波段光谱数据,结合 PLS 方法建立的土壤全氮和碱解氮含量的近红外光谱模型,其校正集和验证集的相关系数均高于经多元散射校正处理的近红外光谱,均方根误差则反之,表明小波变换的去噪效果优于多元散射校正的去噪效果。结合 2 种处理方法的原理进行分析,可以看出对土壤光谱噪声部分直接进行去噪以

压缩光谱数据的方法比消除散射引起的基线平移现象相比更有效。

将经 db7 小波 7 层分解启发式硬阈值处理后的土壤近红外光谱数据和土壤全氮含量、碱解氮含量的实测值导入 Unscrambler 软件中,结合 PLS 方法建立预测模型,用完全交互验证法进行模型验证,得到模型实测值和预测值的关系如图 3 和图 4 所示。土壤全氮样品校正集  $R=0.838 5$ ,  $RMSE=0.153 1$ ,土壤全氮含量预测值(y)与实测值(x)的关系模型为  $y=0.685 8x+0.198 0$ ; 对应验证集的  $R=0.754 9$ ,  $RMSE=0.184 2$ ,土壤全氮含量预测值(y)与实测值(x)的关系模型为  $y=0.621 4x+0.237 9$ 。土壤碱解氮样品校正集的  $R=0.866 5$ ,  $RMSE=0.007 7$ ,土壤碱解氮含量预测值(y)与实测值(x)的关系模型为  $y=0.749 8x+0.019 4$ ; 对应验证集的  $R=0.796 1$ ,  $RMSE=0.009 4$ ,土壤碱解氮含量预测值(y)与实测值(x)的关系模型为  $y=0.700 7x+0.023 3$ 。以上结果表明,土壤全氮含量和碱解氮含量的实测值与预测值显著相关,所建模型有良好的稳定性和预测性。与其他 5 种预处理方法(未处理、多元散射校正、标准归一化、基线校

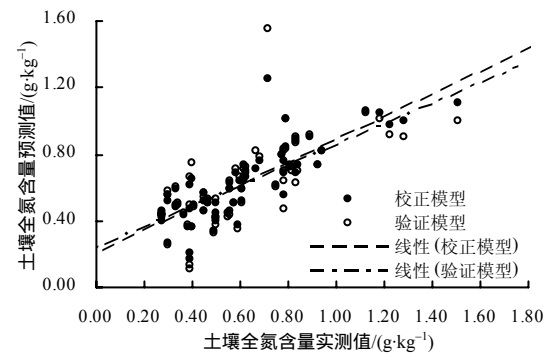


图 3 土壤全氮含量预测值与实测值的关系

Fig.3 Relationship between predicted and measured values of soil total nitrogen

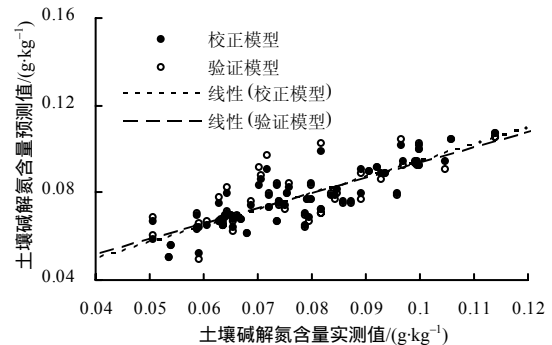


图 4 土壤碱解氮含量预测值与实测值的关系

Fig.4 Relationship between predicted and measured values of soil available nitrogen

正、卷积平滑)相比较,小波变换对近红外光谱处理的效果最好,将土壤全氮校正集  $R$  由 0.697 6 提高到 0.838 5,  $RMSE$  降低了 0.094 6;土壤碱解氮校正集  $R$  由 0.655 0 提高到 0.866 5,  $RMSE$  降低了 0.233 7。

### 3 结论与讨论

基于近红外光谱技术,应用强光对旋转样品杯上的土壤样品进行照射采集近红外光谱后,经过多元散射校正、标准归一化、卷积平滑、基线校正和小波变换 5 种方法对光谱进行预处理,与偏最小二乘法、主成分分析法 2 种建模方法相结合,建立了土壤全氮和碱解氮含量的校正模型和验证模型。当应用小波变换对土壤光谱进行预处理,并与 PLS 建模方法相结合时,建立的土壤全氮和碱解氮含量校正模型预测效果最佳。其中,土壤全氮样品含量校正集  $R=0.838 5$ ,  $RMSE=0.153 1$ , 对应验证集的  $R=0.754 9$ ,  $RMSE=0.184 2$ ;土壤碱解氮样品校正集的  $R=0.866 5$ ,  $RMSE=0.007 7$ ;对应验证集的  $R=0.796 1$ ,  $RMSE=0.009 4$ 。综合分析结果表明:应用近红外光谱技术对土壤全氮和碱解氮含量进行定量预测是可行的,且将不同的光谱预处理方法与不同的建模方法相结合,可以寻求能够有效剔除光谱冗余信息的适当处理方法。本研究结果可为野外大面积实时、可靠、精准地测定土壤全氮和碱解氮含量提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 周兴,李再明,谢坚,等.紫云英利用后减施化肥对水稻产量和产值及土壤碳氮含量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(3):225-230.
- [2] 罗兰芳,郑圣先,廖育林,等.控释氮肥对稻田土壤微生物的影响及其与土壤氮素肥力的关系[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2007,33(5):608-613.
- [3] 岑益朗,宋韬,何勇,等.基于可见/近红外漫反射光谱的土壤有机质含量估算方法研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2011,37(3):300-306.
- [4] Dalm M, Buxton M W N, Ruitenbeek F J A, et al. Application of near-infrared spectroscopy to sensor based sorting of a porphyry copper ore[J]. Minerals Engineering, 2014, 58: 7-16.
- [5] 刘荔荔,李力.不同种丹参药材的近红外漫反射光谱模式识别法鉴别[J].药学服务与研究,2002(1):23-25.
- [6] 董一威,黄金丽,孙宝利,等.我国苹果栽培区土壤参数的近红外光谱检测[J].光谱学与光谱分析,2009,29(8):2075-2078.
- [7] 陈彬,刘阁.基于近红外光谱的润滑油中含水量 T-S 模糊辨识[J].光子学报,2014,43(2):170-174.
- [8] 郝斯琪,宋博琪,李湃,等.基于近红外光谱与 BP 神经网络预测落叶松木屑的含水率[J].森林工程,2012,28(4):9-11.
- [9] 李耀翔,张鸿富.应用 NIR 及主成分回归预测落叶松密度的研究[J].林业科技,2010,35(2):46-48.
- [10] 张慧娟,李耀翔,张鸿富,等.基于近红外光谱不同波段的红松木材含水率预测分析[J].东北林业大学学报,2011,39(4):83-85.
- [11] 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.
- [12] 李伟,张书慧,张倩,等.近红外光谱法快速测定土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量[J].农业工程学报,2007,23(1):55-59.
- [13] 姜俊,张春雨,赵秀海.吉林蛟河 42 hm<sup>2</sup> 针阔混交林样地植物种面积关系[J].植物生态学报,2012,36(1):30-38.
- [14] 刘雪梅,张海亮.基于近红外光谱的不同建模方法检测土壤有机质和速效 P 含量的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(4):52-56,68.
- [15] 朱登胜,吴迪,宋海燕,等.应用近红外光谱法测定土壤的有机质和 pH 值[J].农业工程学报,2008,24(6):196-199.
- [16] 李耀翔,汪洪涛,耿志伟,等.基于 NIR 及 PLS-PCR-SVR 预测森林土壤有机碳含量[J].安徽农业科学,2014,42(15):4702-4706.
- [17] 李耀翔,徐浩凯.榆树木材基本密度近红外模型优化的研究[J].云南大学学报(自然科学版),2015,37(1):155-162.
- [18] 孙建英,李民赞,唐宁,等.东北黑土的光谱特性及其与土壤参数的相关性分析[J].光谱学与光谱分析,2007,27(8):1502-1505.
- [19] Cozzolino D, Moron A. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics[J]. Journal of Agricultural Science, 2003, 140: 65-71.

责任编辑:王赛群

英文编辑:王 库