

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.021

北京地区粘壤土全氮含量的光谱预测模型

赵燕东^{1,2} 皮婷婷^{1,2}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083)

摘要: 为实现快速准确地测量土壤的全氮含量,以北京地区粘壤土为样本,对其进行化学测量和光谱分析。利用波长为 350~2500 nm 的光谱数据与实际测得的全氮含量进行相关性分析,选取相关性最大的特征波段构建土壤全氮含量的估算模型。将原光谱反射率和吸光度分别进行一阶微分、二阶微分变换,力求建立精准优化的土壤全氮含量预测模型。结果表明:反射率和吸光度与土壤全氮含量的相关性低,无法用于构建土壤全氮含量预测模型。在其他变换形式中,反射率二阶微分和吸光度二阶微分与土壤全氮含量的相关性最显著,相关系数的绝对值最大分别为 0.868 和 0.846。相关性最大的特征波段为 425~527 nm、819 nm、1390~1391 nm 和 2200~2219 nm。采用一元线性回归和多元逐步回归建立预测模型,最终得到土壤全氮含量最优估算模型以吸光度二阶微分为自变量的多元逐步回归模型,说明光谱结合多元逐步回归法预测土壤全氮含量的方法是可行的。最优模型决定系数 R^2 为 0.829, 统计量 F 为 86.377, 均方根误差 RMSE 为 0.104。该模型可用于预测北京地区粘壤土的土壤全氮含量。

关键词: 粘壤土; 北京地区; 全氮; 光谱; 多元逐步回归; 一元线性回归

中图分类号: S151.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)03-0144-06

Spectral Prediction Model of Soil Total Nitrogen Content of Clay Loam Soil in Beijing

Zhao Yandong^{1,2} Pi Tingting^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to quickly and accurately measure the soil total nitrogen content (STNC), 72 soil samples were collected from Beijing City for chemical measurements and spectral analysis. By correlation analysis of the actual measured nitrogen content with spectral data which wavelength is 350~2500 nm, the most relevant characteristic wave bands were selected to build the STNC estimation models. To establish accurate and optimized predictive model of STNC, the spectral reflectance and absorbance were converted into first-order differential and second-order differential. The results showed that both spectral reflectance and absorbance had a low correlation with STNC, so they could not be used to build prediction model. Their correlations were improved by transforming them to the first-order differential and the second-order differential. In various transformation of reflectance, the second-order differential and the second-order differential of absorbance were the most relational with STNC. The maximum absolute values of correlation coefficient were 0.868 and 0.846. The most relevant characteristic bands were 425~527 nm, 819 nm, 1390~1391 nm and 2200~2219 nm. STNC models were built through linear regression and multivariate stepwise regression. The reciprocal logarithm second-order differential model based on multivariate stepwise regression was the optimal model among the 10 prediction models established in this article. This conclusion proved that it is feasible to use multivariate stepwise method for predicting STNC. The R^2 of the optimal model was 0.829, statistics value was 86.377 and the RMSE was 0.104. This model can be used to predict the STNC of clay loam soil in Beijing City.

Key words: clay loam soil; Beijing area; total nitrogen; spectrum; multivariate stepwise regression; linear regression

收稿日期: 2015-09-29 修回日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371537)和北京市共建项目专项

作者简介: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

引言

“精细农业”^[1]旨在快速准确地采集影响农作物生长的变量信息,其中土壤肥力为优先考虑的变量。土壤氮素是土壤肥力的重要组成部分。土壤中氮含量的丰缺影响着作物的生长情况、产量以及作物品质^[2]。传统的化学测定方法例如 Kjeldahl 法和 Bremner 法虽然仍被大范围应用于测量土壤中的全氮含量,但是这类方法都有耗时、繁琐、会产生污染物等缺点,而且无法在田地直接测定。光谱分析技术因为快速、便捷、无污染和不破坏样本等优点,被认定为可高效准确测定土壤全氮含量的测定方法^[3]。

近年来在光谱测量土壤全氮含量方面的研究日益增多。土壤全氮含量的光谱反射率会受到许多因素的影响,例如土壤水分、粒度、松紧程度和均匀性等。用光谱预处理对原始光谱反射率进行滤波,能在一定程度上消除其他土壤因素引起的误差,提高光谱分析的准确度。以不同地区的土壤和不同类型的土壤为样本得到光谱反射率的敏感波段不同,构建的高光谱预测模型也有区别。土壤类型的差异和环境差异都会影响土壤全氮含量的光谱特征波段以及光谱最终的估算模型。DALAL 等^[4]发现预测土壤全氮含量的光谱敏感波段为 1 700 ~ 2 100 nm。彭玉魁等^[5]首次利用近红外光谱(NIRS)分析法对我国黄土地区的土壤总氮含量进行分析,构建的预测模型相关系数高达 0.942。于飞健等^[6]测定了 2 mm 和 0.15 mm 粒度风干土的近红外光谱,并用偏最小二乘法建立了估算模型,模型决定系数高达 0.88 和 0.90。赵锁芳等^[7]对我国的黄土区土壤总氮进行光谱分析,并利用多元回归法建立数学模型且定标的相关系数高达 0.94。CHANG 等^[8]使用偏最小二乘回归构建了土壤全氮含量的近红外光谱预测模型,且经过交叉验证其测量值和预测值间的相关系数全部高于 0.86。张娟娟等^[9]发现土壤全氮含量的敏感波段为 500 ~ 900 nm 和 1 250 ~ 1 490 nm,并利用 BP 神经网络等方法构建了土壤全氮含量的估算模型。LEE 等^[10]在研究土壤特性和光谱特性过程中,发现土壤类型和土壤取样深度不同,土壤全氮含量的特征波段会有差异。张雪莲等^[11]用近红外光谱构建了 5 个不同地区土壤总氮预测模型,但模型在地区间土壤交叉分析结果很差,表明预测模型会受土壤类型的影响。徐永明等^[12]在得到土壤高光谱曲线后发现敏感波段为 2 160 ~ 2 280 nm 和 2 448 ~ 2 476 nm,并得到反射率的一阶导数和其倒数的对数所建立的回归模型准确度更高的结论。卢艳丽等^[13]以东北黑土为

研究对象,通过归一化光谱指数方法建立了全氮含量的估计模型,并得出该地区土壤全氮含量对应的光谱建模的最佳敏感波段为 550 nm 和 450 nm 结论。吴明珠等^[14]以亚热带地区的红壤为研究对象,认为对于该地区的土壤全氮含量光谱反射率的敏感波段为 665 ~ 688 nm,并利用多元逐步回归法建立了福州市红壤土全氮含量的估算模型。研究表明利用光谱对土壤的全氮含量进行预测建模具有可行性^[15],但是土壤全氮的估算模型受到地区和土壤类型的影响,同一模型无法精准估算不同地区的土壤全氮。所以对于不同地区的不同土壤要具体分析,本研究选取北京地区典型的土壤类型粘壤土为研究对象,利用 PSR-3500 型地物波谱仪(美国 Spectral Evolution 公司)采集土壤样本的光谱数据,并用多种方式建立土壤全氮含量的估算模型,以求得到准确预测北京地区土壤全氮含量的光谱预测模型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京市海淀区,地理位置为 115°25′ ~ 117°30′ E, 39°26′ ~ 41°03′ N。该地区处于北温带,属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。地势呈西北高,东南低。年平均气温在 12.8℃,年平均降水量为 578.9 mm。地区土壤主要为粘壤土。

1.2 样本采集

选取在北京市海淀区八家实验基地具有不同培肥历史的土壤,五点取样法采集 0 ~ 20 cm 的土壤表层样本,等量混合后组成混合样本共 72 个,每个样本约 700 g。样本在实验室经过自然风干、去除砂砾和植物残体后,用木棒压磨后过 20 目筛。每个样本分为 2 份,每份质量为 300 g,一份用于化学分析,另一份用于光谱分析。土壤样本的全氮含量测定方法使用传统化学方法凯氏定氮法,结果如表 1 所示。测定结果表明,全氮质量分数在 0.01% ~ 0.3% 之间,变化幅度较大,将该样本用于建模具有良好的代表性,且满足土壤中总氮质量分数用于光谱估算的要求。为消除水分不同对光谱反射率产生的影响,在土壤样本中均匀加入蒸馏水,用干燥法测定土壤含水率^[16-18],将样本的含水率统一为 15%。随机选取 54 个样本用于建立模型,其他 18 个用于模型验证。

1.3 光谱测定

土壤样本光谱反射率的测定采用美国 Spectral Evolution 公司生产的 PSR-3500 型野外便携式地

表1 土壤全氮质量分数统计特征

Tab.1 Statistical characteristics of soli total nitrogen content

样本个数	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差
72	0.285	0.012	0.132	0.087

物波谱仪。该波谱仪波段范围为350~2500 nm,其中波段范围在350~1000 nm内,光谱采样间隔为1.5 nm,光谱分辨率为3.5 nm;波段范围在1000~1900 nm内,光谱采样间隔为3.8 nm,光谱分辨率为3.8 nm;波段范围在1900~2500 nm内,光谱采样间隔为2.5 nm,光谱分辨率为7 nm。光谱测量在室内进行,将土壤样本置于长16 cm、宽10 cm、高3.5 cm的长方体盛样皿中,保持土样表面平整。测量前先进行白板标定,测量时光谱仪探头垂直于土样表面进行接触式测量,每个土壤样本测量5次,利用光谱仪自带的DARWin SP软件观察光谱曲线,剔除异常曲线^[19]后保存光谱曲线,取光谱反射率的平均值作为该土壤样本的代表曲线。

1.4 光谱变换

为了减小数据分析的误差,首先对光谱曲线进行滤波以消除噪声。本研究采用Savitzky-Golay平滑法对光谱曲线进行平滑处理^[20]。滤波后的光谱曲线作为土壤样本用于光谱建模分析的原始反射率光谱曲线。为了进一步消除其他因素对光谱信息的影响,将原始光谱反射率和吸光度都进行了一阶微分和二阶微分2种变换。分别将反射率、吸光度及其变换形式作为输入光谱进行光谱分析。利用一元线性回归法、多元逐步回归法2种建模方法建立土壤全氮含量的光谱估算模型。

2 结果与分析

2.1 原始光谱曲线

图1为剔除干扰波段后的原始光谱曲线,其中每条曲线为一个采样数据,共72个样本数据。由图可以看出土壤的原始光谱反射率曲线中,虽然反射率各不相同,但是在整体的趋势上都有共同特征。由于本研究将土壤样本的土壤含水率统一配比为15%,所以在光谱曲线图中,由于水分导致在1400 nm、1900 nm以及2200 nm附近有3个明显的水吸收带,尤其以1900 nm附近的水吸收带最为明显,这符合BOWERS等^[21]的研究结论。光谱曲线在400~1900 nm区域内,除去水吸收带,整体呈上升趋势;2100~2300 nm区域内呈下降趋势,且下降幅度较大。在800~1900 nm波段内光谱反射率较高,但随着波长的增加反射率上升速度较缓慢;在400~800 nm波段内光谱反射率虽相对较小,但随波长的

增加上升速度相对较快。各个样本光谱曲线形态非常相似,在400~2300 nm中光谱曲线具有波动性,近红外光区域对应的光谱反射率基本高于可见光区域。

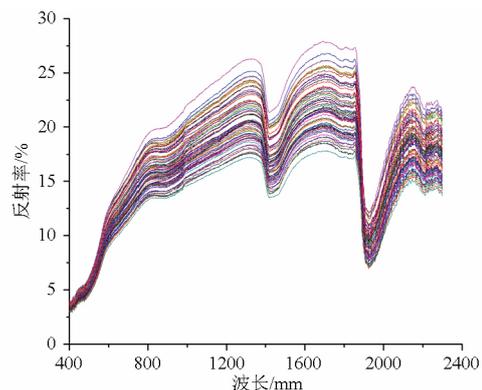


图1 土壤样本光谱反射率曲线

Fig.1 Spectral reflectance curves of soil samples

2.2 土壤全氮含量与光谱的相关性分析

将土壤的原始反射率(R)、反射率一阶微分(R')、反射率二阶微分(R'')、吸光度(A)、吸光度一阶微分(A')、吸光度二阶微分(A'')分别和化学方法测得的土壤全氮含量(STNC)进行相关性分析^[22],结果如图2~4所示。

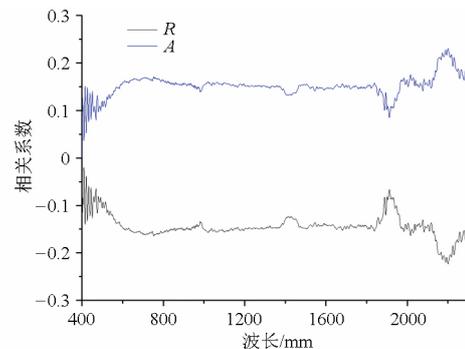


图2 反射率和吸光度与土壤全氮含量的相关系数

Fig.2 Correlation of soil total nitrogen content with R and A

由图2可见,原始光谱反射率与土壤全氮含量的相关系数在-0.223~-0.020之间,波长为2185~2205 nm处相关系数的绝对值最大,为负相关;吸光度与土壤全氮含量的相关系数在0.036~0.230之间,波长为2203~2219 nm处相关系数最大,为正相关。总体来说,两者与土壤全氮含量的相关系数都太低,不足以筛选出敏感波段并建立回归模型。

由图3可见,将反射率和吸光度分别进行一阶微分变换后,二者与土壤全氮含量的相关系数明显增大,都通过了显著性检验。反射率一阶微分与土壤全氮含量的相关系数在-0.787~0.753之间,波段为471~472 nm时,相关系数的绝对值最大,可选取此波段为构建模型的特征波段;吸光度一阶微分

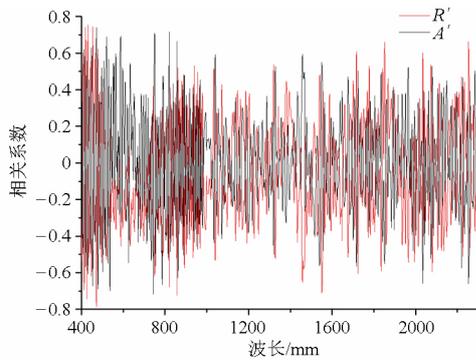


图 3 反射率一阶微分和吸光度一阶微分与土壤全氮含量的相关系数

Fig.3 Correlation of soil total nitrogen content with R' and A'

与土壤全氮含量的相关系数在 $-0.717 \sim 0.741$ 之间,波长为 472 nm 和 819 nm 时,相关系数的绝对值最大,可选取这 2 个波长为构建模型的特征波长。

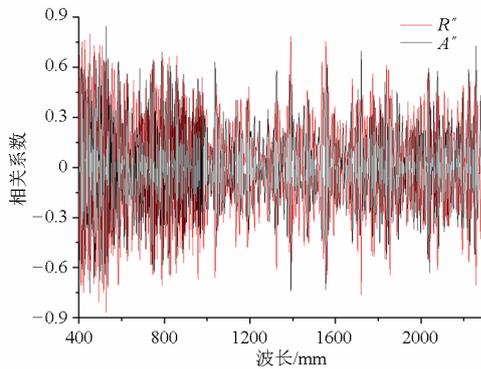


图 4 反射率二阶微分和吸光度二阶微分与土壤全氮含量的相关系数

Fig.4 Correlation of soil total nitrogen content with R'' and A''

由图 4 可见,将反射率和吸光度进行二阶微分变换后,二者与土壤全氮含量的相关系数比一阶微分略有提高,也通过了显著性检验。反射率二阶微分与土壤全氮含量的相关系数在 $-0.868 \sim 0.800$ 之间,波长为 527 nm、492 nm、452 nm 和 1 391 nm 时,相关系数的绝对值最大;吸光度二阶微分与土壤全氮含量的相关系数在 $-0.756 \sim 0.846$ 之间,波长为 527 nm、452 nm、1 391 nm 和 1 555 nm 时,相关系数的绝对值最大,因此选取上述波长为构建模型的特征波长。

2.3 土壤全氮含量的回归模型

2.3.1 一元线性回归模型

将土壤全氮含量作为因变量,选取相关性分析中相关系数绝对值最大的敏感波段,将其对应的反射率变换形式作为自变量,建立一元线性回归模型,结果如表 2 所示。反射率及吸光度构建的回归模型决定系数 R^2 低,仅为 0.031 和 0.035,说明二者无法构建预测土壤全氮含量的回归模型。反射率一阶微分和吸光度一阶微分构建的一元回归模型决定系数

有了明显提高。决定系数 R^2 分别为 0.612 和 0.541,具有一定的可靠性。而反射率二阶微分和吸光度二阶微分的回归模型比一阶微分的决定系数又略有提高,分别为 0.749 和 0.711,说明变换形式中二阶微分的准确度最高。所有一元线性回归模型中决定系数最高只有 0.749,因此该类回归模型并不能用于精准地预测土壤全氮含量。

表 2 土壤全氮含量一元线性回归模型

Tab.2 Simple linear regression model for soil total nitrogen content

变换形式	回归模型	调整后 R^2	统计量 F	均方根误差 RMSE
R	$y = 0.283 - 0.009x$	0.031	2.686	0.018
R'	$y = 0.081 - 6.568x$	0.612	84.494	0.230
R''	$y = 0.251 - 57.663x$	0.749	158.796	0.280
A	$y = 0.591 + 0.369x$	0.035	2.916	0.020
A'	$y = 0.067 + 72.21x$	0.541	63.360	0.204
A''	$y = 0.225 + 766.504x$	0.711	131.101	0.266

2.3.2 多元逐步回归模型

为了得到比一元线性回归模型准确度更高的模型,将土壤全氮含量作为因变量,依据变量的方差显著水平 $P < 0.05$ 为标准来选择敏感波段,将其对应的反射率一阶微分、反射率二阶微分、吸光度一阶微分和吸光度二阶微分作为自变量,建立多元逐步回归模型,结果如表 3 所示。反射率一阶微分和吸光度一阶微分经过多元回归之后,决定系数没有明显提高,分别为 0.624 和 0.612。反射率二阶微分和吸光度二阶微分的多元逐步回归模型,调整后的决定系数分别达到了 0.823 和 0.829, RMSE 分别为 0.103 和 0.104,准确率较一元回归模型有了明显的提高。多元回归优于一元回归,说明多个波段比单个波段能更好地反映土壤全氮含量的光谱信息,因此得到的回归模型可以更好地预测土壤的全氮含量。

表 3 土壤全氮含量多元逐步回归模型

Tab.3 Multiple stepwise linear regression model for soil total nitrogen content

变换形式	回归模型	调整后 R^2	统计量 F	均方根误差 RMSE
R'	$y = 0.117 - 4.675R_{472} - 1.89R_{425}$	0.624	45.033	0.119
R''	$y = 0.167 - 32.078R_{527} - 10.343R_{492} + 4.199R_{452}$	0.823	82.996	0.103
A'	$y = -0.274 - 450.749R_{819} + 45.478R_{472}$	0.612	42.834	0.117
A''	$y = 0.254 - 432.646R_{527} + 51.907R_{452} - 845.099R_{1391}$	0.829	86.377	0.104

注:表中 R_{472} 表示波长 472 nm 时的反射率,其余类推。

利用检验样本对多元逐步回归模型进行检验^[23],由图5可知反射率一阶微分和吸光度一阶微分的样本值较分散,尤其在1:1线右侧的点偏离1:1线^[24]的程度较大,二者模型检验的相关系数分别为0.612和0.561, RMSE分别为0.057和0.061。反射率二阶微分和吸光度二阶微分的检验样本值大多集中于1:1线附近,决定系数分别为0.790和0.826,

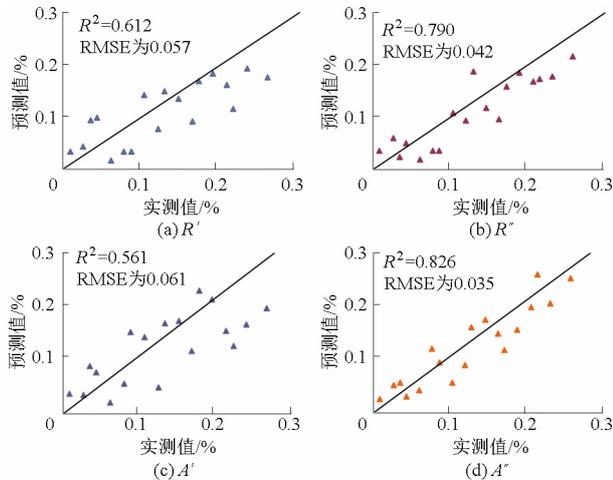


图5 全氮含量多元逐步回归模型预测值与实测值的比较

Fig. 5 Comparison of measured TN values and estimated TN values by using multiple stepwise linear regression model

RMSE为0.042和0.035。相比之下,二阶微分模型的检验结果决定系数高于一阶微分模型, RMSE小于一阶微分模型,说明2个二阶微分回归模型的预测准确度比一阶微分回归模型的预测准确度高^[25]。其中吸光度的二阶微分的样本值均匀分布在1:1线附近,其样本点的偏离程度比反射率二阶微分样本点偏离程度低,模型检验参数为最优,所以吸光度二阶微分所建立的多元回归模型能较好地预测土壤全氮含量。

3 结论

(1) 北京地区粘壤土的土壤全氮含量对应的光谱敏感波段主要在425~527 nm、819 nm、1390~1391 nm和2200~2219 nm,其中以425~527 nm的相关性最为显著。

(2) 建立的土壤氮含量预测模型中,以吸光度二阶微分为自变量的多元逐步回归模型决定系数为0.829,统计量为86.377,均方根误差为0.104,该模型为本研究构建的10个模型中的最优模型。

(3) 对于北京地区的常见粘壤土,可以利用本研究所构建的吸光度二阶微分的多元逐步回归模型快速预测土壤中的全氮含量。

参 考 文 献

- 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-8.
WANG Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1-8. (in Chinese)
- 刘焕军, 张柏, 杨立, 等. 土壤光学遥感研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1196-1202.
LIU Huanjun, ZHANG Bai, YANG Li, et al. Review of soil optical remote sensing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(6): 1196-1202. (in Chinese)
- BENDOR E, BANIN A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(2): 364-372.
- DALAL R C, HENRY R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(1): 120-123.
- 彭玉魁, 张建新, 何绪生, 等. 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): 553-559.
PENG Yukui, ZHANG Jianxin, HE Xusheng, et al. Analysis of soil moisture, organic matter and total nitrogen content in loess in China with near infrared spectroscopy[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(4): 553-559. (in Chinese)
- 于飞健, 闵顺耕, 巨晓棠, 等. 近红外光谱法分析土壤中的有机质和氮素[J]. 分析试验室, 2002, 21(3): 49-51.
YU Feijian, MIN Shungeng, JU Xiaotang, et al. Determination the content of nitrogen and organic substance in dry soil by using near infrared diffusion reflectance spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2002, 21(3): 49-51. (in Chinese)
- 赵锁劳, 彭玉魁. 我国黄土区土壤水分、有机质和总氮的近红外光谱分析[J]. 分析化学, 2002, 30(8): 978-980.
ZHAO Suolao, PENG Yukui. Analysis of soil moisture, organic matter and total nitrogen content in loess in China with near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2002, 30(8): 978-980. (in Chinese)
- CHANG C W, LAIRD D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. Soil Science, 2002, 167(2): 110-116.
- 张娟娟, 田永超, 姚霞, 等. 基于高光谱的土壤全氮含量估测[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 881-890.
ZHANG Juanjuan, TIAN Yongchao, YAO Xia, et al. Estimating soil total nitrogen content based on hyperspectral analysis technology[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 881-890. (in Chinese)
- LEE W S, RAO S M. Study on soil properties and spectral characteristics in Florida[C]//2001 ASAE Annual International

- Meeting. ASAE Paper 01-1179 2001.
- 11 张雪莲, 李晓娜, 武菊英, 等. 不同类型土壤总氮的近红外光谱技术测定研究[J]. 光谱学与光谱分析 2010, 30(4): 906 – 910.
ZHANG Xuelian, LI Xiaona, WU Juying, et al. Study on the determination of total nitrogen(TN) in different types of soil by near-infrared spectroscopy(NIS) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis 2010, 30(4): 906 – 910. (in Chinese)
 - 12 徐永明, 蒯启忠, 黄秀华, 等. 利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 19 – 22.
XU Yongming, LIN Qizhong, HUANG Xiuhua, et al. Experimental study on total nitrogen concentration in soil by VNIR reflectance spectrum[J]. Geography and Geo-Information Science 2005, 21(1): 19 – 22. (in Chinese)
 - 13 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 黑土土壤中全氮含量的高光谱预测分析[J]. 农业工程学报 2010, 26(1): 256 – 261.
LU Yanli, BAI Youlu, WANG Lei, et al. Determination for total nitrogen content in black soil using hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 256 – 261. (in Chinese)
 - 14 吴明珠, 李小梅, 沙晋明. 亚热带红壤全氮的高光谱响应和反演特征研究[J]. 光谱学与光谱分析 2013, 33(11): 3111 – 3115.
WU Mingzhu, LI Xiaomei, SHA Jinming. Spectral inversion models for prediction of red soil total nitrogen content in subtropical region (Fuzhou) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis 2013, 33(11): 3111 – 3115. (in Chinese)
 - 15 李民赞, 郑立华, 安晓飞, 等. 土壤成分与特性参数光谱快速检测方法及其传感技术[J]. 农业机械学报 2013, 44(3): 73 – 87.
LI Minzan, ZHENG Lihua, AN Xiaofei, et al. Fast measurement and advanced sensors of soil parameters with NIR spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2013, 44(3): 73 – 87. (in Chinese)
 - 16 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量灵敏度分析[J]. 农业工程学报 2002, 18(2): 5 – 8.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Analysis of sensitivity of soil moisture measurement based on standing-wave ratio [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 5 – 8. (in Chinese)
 - 17 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报 2002, 33(4): 109 – 111, 121.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4): 109 – 111, 121. (in Chinese)
 - 18 孙宇瑞, 汪懋华, 赵燕东. 一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 37 – 41.
SUN Yurui, WANG Maohua, ZHAO Yandong. A kind of determinations of soil dielectric constant using the principle of standing-wave ratio [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(2): 37 – 41. (in Chinese)
 - 19 闵顺耕, 李宁, 张明祥. 近红外光谱分析中异常值的判别与定量模型优化[J]. 光谱学与光谱分析 2004, 24(10): 1205 – 1209.
MIN Shungeng, LI Ning, ZHANG Mingxiang. Outlier diagnosis and calibration model optimization for near infrared spectroscopy analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(10): 1205 – 1209. (in Chinese)
 - 20 STEINIER J, TERMONIA Y, DELTOUR J, et al. Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure [J]. Analytical Chemistry, 1972, 44(11): 1906 – 1909.
 - 21 BOWERS S A, HANKS R J. Reflection of radiant energy from soils [J]. Soil Science, 1965, 100(2): 130 – 138.
 - 22 李硕, 汪善勤, 张美琴. 基于可见-近红外光谱比较主成分回归、偏最小二乘回归和反向传播神经网络对土壤氮的预测研究[J]. 光学学报 2012, 32(8): 830001-4 – 830001-5.
LI Shuo, WANG Shanqin, ZHANG Meiqin. Comparison among principal component regression, partial least squares regression and back propagation neural network for prediction of soil nitrogen with visible-near infrared spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 830001-4 – 830001-5. (in Chinese)
 - 23 袁石林, 马天云, 宋韬, 等. 土壤中总氮与总磷含量的近红外光谱实时检测方法[J]. 农业机械学报 2009, 40(增刊): 150 – 153.
YUAN Shilin, MA Tianyun, SONG Tao, et al. Real-time analysis of soil total N and P with near infrared reflectance spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2009, 40(Supp.): 150 – 153. (in Chinese)
 - 24 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.
HOU Yanjun, TASHPOLAT·Tiyip, MAMAT·Sawut, et al. Estimation model of desert soil organic matter content using hyperspectral data [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 113 – 120. (in Chinese)
 - 25 陈鹏飞, 刘良云, 王纪华, 等. 近红外光谱技术实时测定土壤中总氮及磷含量的初步研究[J]. 光谱学与光谱分析 2008, 28(2): 295 – 298.
CHEN Pengfei, LIU Liangyun, WANG Jihua, et al. Real-time analysis of soil N and P with near infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis 2008, 28(2): 295 – 298. (in Chinese)