

同时估测土壤全氮、有机质和速效氮含量的光谱指数研究*

张娟娟^{1,2} 田永超¹ 姚霞¹ 曹卫星¹ 马新明² 朱艳^{1†}

(1 南京农业大学国家信息农业工程技术中心,江苏省信息农业高技术重点实验室,南京 210095)

(2 河南农业大学信息与管理科学学院,郑州 450002)

摘要 通过系统分析我国中、东部地区 5 种不同类型土壤风干样本的有机质、全氮及速效氮含量与近红外(1 000 ~ 2 500 nm)光谱反射率之间的关系,进而构建了适合同时估测这 3 种养分含量的光谱参数及定量估算模型。结果表明,同时与 3 种养分指标相关较高的波段范围为 1 879 ~ 1 890 与 2 050 ~ 2 100 nm,其中 1 881 和 2 070 nm 两个波段的反射率经多元散射校正及 Savitzky-Golay 平滑处理并构建而成的差值指数 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 与土壤有机质、全氮及速效氮含量具有良好的线性相关性。独立的观测资料检验显示,基于 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 的估测模型对全氮、有机质和速效氮的预测决定系数 R^2 分别为 0.83、0.79 和 0.72,均方根误差(RMSE)分别为 0.20 g kg⁻¹、4.71 g kg⁻¹ 和 23.96 mg kg⁻¹,相对分析误差(RPD)分别为 2.56、2.30 和 2.93。表明 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 是一种可同时估测土壤中 3 种养分含量的良好光谱指数。

关键词 土壤;近红外光谱;有机质;全氮;速效氮;差值指数 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

利用光谱分析技术建立土壤养分参数的快速估测模型对于实时获取土壤养分状况和作物精确施肥管理具有重要意义。已有较多研究表明,利用光谱分析技术能快速估测土壤养分状况。如 Hummel 等^[1]分析了土壤有机质与近红外光谱之间的关系,利用多元逐步回归方法建立了土壤有机质预测模型。彭玉魁等^[2]研究表明土壤有机质、全氮含量与近红外光谱之间存在良好的相关关系。而 Dalal 等^[3]用近红外光谱 1 744、1 870 和 2 052 nm 波段的反射率有效的估测了全氮的含量。于飞健等^[4]应用近红外光谱技术估测了土壤中的全氮和碱解氮含量。李伟等^[5]利用 PLS 和 BP 神经网络等方法分别建立了风干黑土碱解氮、速效磷和速效钾含量的预测模型。张娟娟等^[6]利用近红外光谱分析技术建立了基于光谱指数的土壤有机质光谱估测模型。沈润平等^[7]利用多元线性逐步回归法和人工神经网络法建立了土壤有机质含量的反演模型。但大多研究仅针对单个土壤养分指标进行了研究,目前还鲜有综合考虑土壤养分之间的关联性,进而实现

对几种养分含量同时估测的研究,且以往较多研究多采用全波段进行数学统计分析后建模^[8-9],而通过筛选土壤养分含量的近红外特征波段并构建适宜的敏感光谱指数的研究还较少报道,此外,基于不同类型土壤的养分近红外光谱特性及光谱估测模型研究较少。

农田土壤中,有机质含量常与全氮、速效氮等含量之间存在较密切的相关关系^[10-11]。水稻土耕层有机质含量乘以换算系数 0.065 可得到全氮的近似含量,而一般旱田土壤耕层的换算系数为 0.05 ~ 0.06。另外也有研究表明土壤有机质含量与速效氮含量之间存在极显著的相关关系^[11]。本研究的目的是基于 5 种不同类型土壤样本的近红外光谱特征曲线和有机质、全氮以及速效氮含量数据,系统分析 1 000 ~ 2 500 nm 范围内两波段组合而成的光谱指数与上述指标之间的关系,以期构建一种能同时估测土壤有机质、全氮及速效氮含量的最佳光谱参数及定量估测模型,从而为土壤养分状况的快速获取提供技术支撑。

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0797)、国家自然科学基金项目(30900868)、江苏省科技支撑计划项目(BE2010395)资助

† 通讯作者, E-mail: yanzhu@njau.edu.cn

作者简介:张娟娟(1979—),女,讲师,博士,主要从事农田土壤监测方面的研究。E-mail:zhangjuan_2003@126.com

收稿日期:2010-08-16;收到修改稿日期:2011-02-18

1 材料与方法

1.1 土样采集和制备

为了获得具有较大养分差异的土壤样品,结合 2006~2008 年在不同生态点设置的 7 个试验,包括江苏南京和大丰的水稻田间试验、浙江杭州的水稻

田间试验、河南郑州和滑县的小麦田间试验、安徽宿州的小麦测土配方试验和上海黄埔区精确水稻生产管理技术示范试验等,获取了不同土层的土壤样本共 460 个,涉及 5 种主要土壤类型,见表 1。所有样品为基于梅花法 5 点采集的混合样本,经自然风干后,用木棒压磨后粗略去除沙砾及植物残体,然后过 20 目筛混合均匀,供光谱测试和化学分析用。

表 1 土样基本信息
Table 1 Basic properties of soil samples

试验地点 Location	取样年份 Sampling year	经纬度 Longitude & latitude	土壤类型 Soil type	样本数 Sample number	取样深度 Sample depth (cm)
郑州 Zhengzhou	2006	E113°35', N34°52'	潮土 Fluvo-aquic soil	121	0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100, 100~120
滑县 Huaxian	2007	E114°35', N35°34'	潮土 Fluvo-aquic soil	45	0~10, 10~20, 20~30
宿州 Suzhou	2007	E116°33', N33°58'	砂浆黑土 Black soil with lime concretion	76	0~20, 20~40
南京 Nanjing	2006	E118°59', N31°56'	水稻土 Paddy soil	128	0~10, 10~20, 20~30, 30~50
杭州 Hangzhou	2008	E119°57', N30°03'	水稻土 Paddy soil	48	0~10, 10~20, 20~30, 30~50
大丰 Dafeng	2007	E120°28', N33°31'	盐潮土 Salinized fluvo-aquic soil	24	0~20, 20~40
上海 Shanghai	2007	E121°31', N31°11'	盐土 Saline soil	18	0~10, 10~20

1.2 土壤养分含量测定

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定,全氮含量采用凯氏定氮法测定,速效氮含量采用碱解扩散法测定^[12]。

1.3 土壤光谱的测量

运用美国 Thermo Nicolet 公司生产的 Antaris 型傅立叶变换近红外光谱仪进行土壤光谱采集,光谱范围为 1 000~2 500 nm。测试时将土壤均匀放置于旋转样品池中,保持土层厚度为 2 cm,这样通过反复旋转样品池,积分球可扫描样品池中不同点光谱值,每个样品经过反复装样 3 次连续扫描,每次扫描 64 遍,然后计算平均吸收光谱作为此土样的光谱值。

1.4 光谱的预处理

不同土壤类型由于矿物组成等内在性质的不同,在测试时样品虽经过风干,粉碎,过筛等处理,

但样品的颗粒大小仍会有细微差别,在近红外区域表现出差异性光谱曲线,影响吸光度的大小从而干扰有效信息的分析和提取。本文利用 Savitzky-Golay 7 点平滑^[13]移除噪音对光谱曲线的影响。还对光谱进行了附加散射校正,以校正吸收基线并降低样品散射作用对光谱的影响,降低样品的不均匀性带来的光谱差异^[14-15]。

1.5 数据分析

对于 3 种养分指标,首先,对 7 个地点采集的不同类型土壤分别进行分析,均将样本随机分为两组,一组用于建模,一组用于检验,具体见表 2。其次,将所有样本(460 个)放在一起分析,样本随机分成两组,一组用于建立模型(建模样本,共 331 个),另一组用于验证模型的可靠性(测试样本,共 129 个)。本文基于 1 000~2 500 nm 波段的近红外光谱反射率,系统构造了经光谱预处理的两波段比值

光谱指数 (RI) (式 1)、差值光谱指数 (DI) (式 2) 和归一化光谱指数 (NI) (式 3), 其中 CR 为经多元散射校正及 Savitzky-Golay 平滑方法处理后的光谱反射率, λ_1 和 λ_2 为 1 000 ~ 2 500 nm 范围内任意两波段。进一步分析其与土壤有机质、全氮及速效氮含量的关系, 并进行方程拟合, 计算相应的决定系数, 绘制决定系数 (R^2) 的等势线图, 根据建模的精度, 确立最佳光谱参数。估测模型的预测精度采用预测值和实际值的决定系数 R^2 、根均方差 RMSE 和相对预测偏差 RPD 来衡量。 R^2 越大, RMSE 越小说明模型的精度越高。此外, 当 $RPD > 2$ 时表明模型具有极好的预测能力, 当 $1.4 < RPD < 2$ 表明模型可对样品作粗略估测, 而 $RPD < 1.4$ 则表明模型无法对样品进行预测^[16]。数据分析利用 Matlab7.0^[17] 编程实现。

$$RI = CR_{\lambda_1} / CR_{\lambda_2} \quad (1)$$

$$DI = CR_{\lambda_1} - CR_{\lambda_2} \quad (2)$$

$$NI = (CR_{\lambda_1} - CR_{\lambda_2}) / (CR_{\lambda_1} + CR_{\lambda_2}) \quad (3)$$

表 2 不同类型土壤养分含量统计特征

Table 2 Statistic characteristics of nutrient contents of different types of soils

取样地点 Sampling location	样本个数 Sample number	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 TN (g kg ⁻¹)	速效氮 AN (mg kg ⁻¹)
郑州 Zhengzhou	121	2.42 ~ 12.62	0.35 ~ 1.14	10.44 ~ 101.4
滑县 Huaxian	45	2.85 ~ 14.63	0.58 ~ 1.14	24.77 ~ 68.29
宿州 Suzhou	76	11.49 ~ 30.96	0.75 ~ 2.02	52.57 ~ 137.2
南京 Nanjing	128	4.98 ~ 24.81	0.62 ~ 1.69	26.44 ~ 29.17
杭州 Hangzhou	48	11.69 ~ 57.2	0.91 ~ 3.04	36.21 ~ 286.4
大丰 Dafeng	24	8.57 ~ 20.66	0.68 ~ 1.20	40.34 ~ 106.7
上海 Shanghai	18	16.15 ~ 37.47	0.96 ~ 2.19	61.16 ~ 159.6
全部样本 Total samples	460	2.42 ~ 57.20	0.35 ~ 3.04	10.44 ~ 286.4
建模样本 Calibration	331	2.42 ~ 57.20	0.35 ~ 3.04	10.44 ~ 286.4
检验样本 Validation	129	2.63 ~ 56.42	0.42 ~ 2.99	12.14 ~ 268.9

2.2 土壤全氮、有机质及速效氮含量与两波段光谱指数的关系

首先, 利用上述不同类型土壤样本资料分别计算出不同类型土壤建模数据集内 1 000 ~ 2 500 nm 波段范围内任意两两波段比值指数 RI 、差值指数 DI 及归一化指数 NI 与有机质、全氮和速效氮含量的决定系数 (R^2), 其中有机质建模结果见表 3。从表 3 可以看出, 不同类型土壤选取的有机质光谱指数波段区域相对集中, 其中以水稻土、盐土、盐潮土结果表现较好, 建模和检验决定系数均达到 0.8 以上, 其次为潮土, 建模和检验决定系数达到 0.68 以上, 表现较差的是从宿州获取的砂浆黑土。不同类型土壤全氮、速效氮的敏感区域和建模结果与有机质类似, 从而说明有可能构建不同类型土壤有机质、全氮和速效氮的共用光谱指数。

为此, 本文进一步利用所有建模样本数据分析

2 结果与分析

2.1 不同类型土壤养分含量统计特征与相关分析

表 2 显示了不同采样地点获取的土壤样本有机质、全氮及速效氮含量特征。由表可知不同地区养分含量差异较大, 3 种养分指标的最大值均出现在杭州, 依次为 57.20 g kg⁻¹、3.04 g kg⁻¹ 和 286.41 mg kg⁻¹, 其次为宿州, 最小值出现在郑州, 分别为 2.42 g kg⁻¹、0.35 g kg⁻¹ 和 10.44 mg kg⁻¹。由于样品取样深度不统一, 对不同地点获取的 3 种养分数据进行了整理, 对 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 的样品的 3 种养分含量进行了相关分析, 其中 0 ~ 20 cm 深度有机质、全氮、速效氮三者间相关系数分别达到 0.94、0.91 和 0.95, 20 ~ 40 cm 深度三者间相关系数分别为 0.94、0.78 和 0.65, 可以看出不同生态点获取的样品 3 种养分之间存在一定的相关性。

了 1 000 ~ 2 500 nm 波段范围内任意两两波段比值指数 RI 、差值指数 DI 及归一化指数 NI 与有机质、全氮及速效氮含量的相关性, 以筛选共同的指数来分别估测上述养分含量。结果表明, 3 种养分与上述 3 种光谱参数相关性较好的区域主要集中在 1 820 ~ 1 900 和 2 000 ~ 2 150 nm, 用等高线展示 (图 1, 图 2, 图 3)。从图可以看出, 经多元散射校正后光谱在全波段范围内组合而成的比值、差值及归一化指数与土壤有机质、全氮及速效氮含量相关性较好的敏感区域范围表现基本一致, 主要集中在 1 879 ~ 1 890 与 2 050 ~ 2 100 nm 范围内, 但 3 种养分指标在上述区域决定系数表现出一些差异, 原因可能是由于近红外光谱反应的是 C-H、N-H 键在光谱上的吸收, 由于不同物质吸收存在较大差别, 因此 3 种养分含量的敏感波段区域表现出一定差别^[18]。

表 3 分类型建立的土壤有机质光谱指数模型
Table 3 Soil OM spectral models based on different soil type

土壤类型 Soil type	取样地点 Sampling location	归一化指数 Normalized indices				差值指数 Difference indices				比值指数 Ratio indices			
		NI (1880-2060)/(1880+2060)	建模方程 Calibration equation	建模决定系数 R^2	检验决定系数 R^2	DI 1880-2060	建模方程 Calibration equation	建模决定系数 R^2	检验决定系数 R^2	RI 1880/2060	建模方程 Calibration equation	建模决定系数 R^2	检验决定系数 R^2
水稻土 Paddy soil	杭州 Hangzhou	(1880-2060)/(1880+2060)	$y = 6.782x - 45.33$	0.94	0.99	1880-2060	$y = 114.7x - 45.37$	0.95	0.96	1880/2060	$y = 3.310x - 3.355$	0.94	0.99
水稻土 Paddy soil	南京 Nanjing	(1864-2110)/(1864+2110)	$y = 7.352x - 108.0$	0.81	0.66	1880-2470	$y = 17.88x - 58.82$	0.83	0.71	1880/2470	$y = 418.4x - 474.1$	0.83	0.71
潮土 Fluvo-aquic soil	郑州 Zhengzhou	(1880-2071)/(1880+2071)	$y = 4.268x - 18.03$	0.61	0.75	1880-2470	$y = 17.18x - 66.05$	0.67	0.68	1880/2470	$y = 416.8x - 482.5$	0.68	0.70
潮土 Fluvo-aquic soil	滑县 Huaxian	(1880-2060)/(1880+2060)	$y = 3.081x - 18.29$	0.61	0.83	1880-2060	$y = 55.05x - 19.18$	0.64	0.84	1880/2060	$y = 1.512x - 1.530$	0.61	0.83
盐潮土 Salinized fluvo-aquic soil	大丰 Dafeng	(1863-2115)/(1863+2115)	$y = 0.000x + 0.013$	0.85	0.87	1880-2060	$y = 38.08x - 7.562$	0.78	0.96	1880/2060	$y = 1.223x - 1.232$	0.75	0.96
盐土 Saline soil	上海 Shanghai	(1810-2120)/(1810+2120)	$y = 6.800x - 110.5$	0.83	0.89	1810-2120	$y = 131.3x - 125.4$	0.87	0.88	1810/2120	$y = 3.264x - 3.371$	0.83	0.99
砂浆黑土 Black soil with lime concretion	宿州 Suzhou	(1889-2024)/(1889+2024)	$y = 2.859x + 9.97$	0.62	0.53	1720-2200	$y = 31.95x + 4.951$	0.65	0.62	1720/2200	$y = 895.0x - 890.1$	0.65	0.58

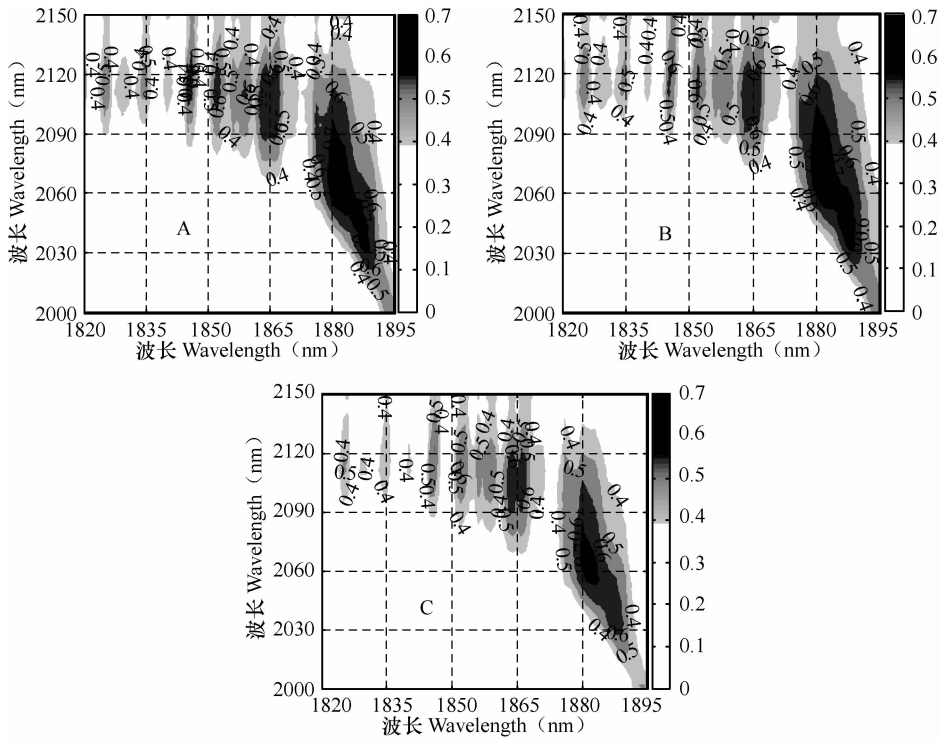


图1 土壤有机质(A)、全氮(B)、速效氮含量(C)与预处理光谱反射率组成的比值指数之间的相关性

Fig. 1 Correlations of soil OM (A), TN (B) and AN contents (C) with the ratio index formed of spectral reflectance corrected with MSC and SG smoothing methods

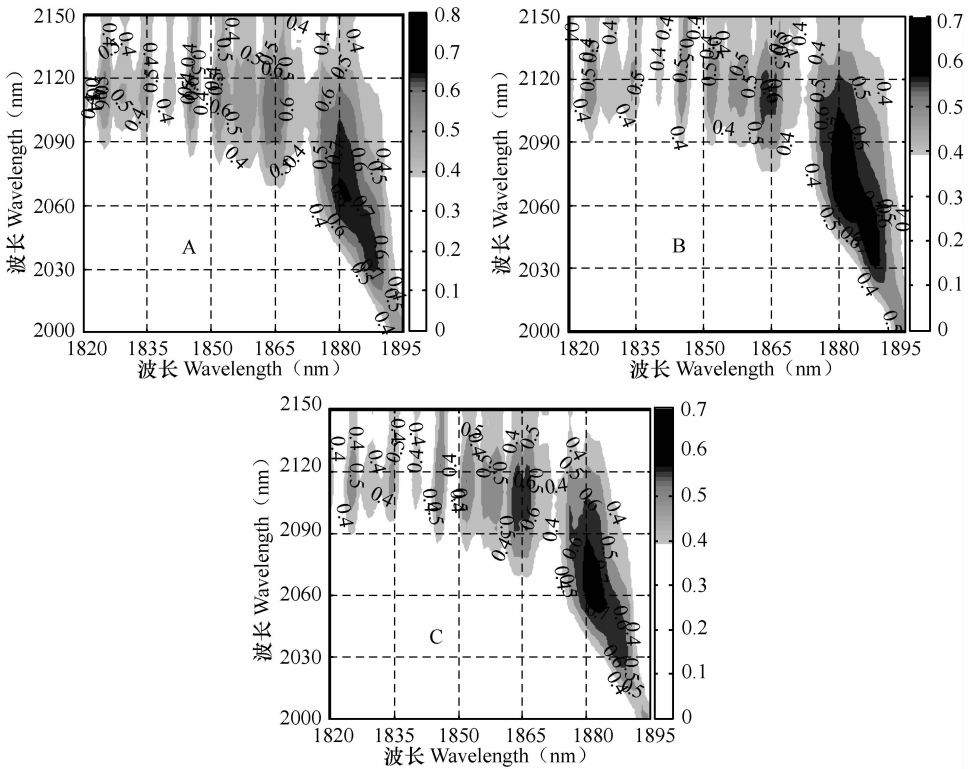


图2 土壤有机质(A)、全氮(B)、速效氮含量(C)与预处理光谱反射率组成的差值指数之间的相关性

Fig. 2 Correlations of soil OM (A), TN (B), AN contents (C) with the difference index formed of spectral reflectance corrected with MSC and SG smoothing methods

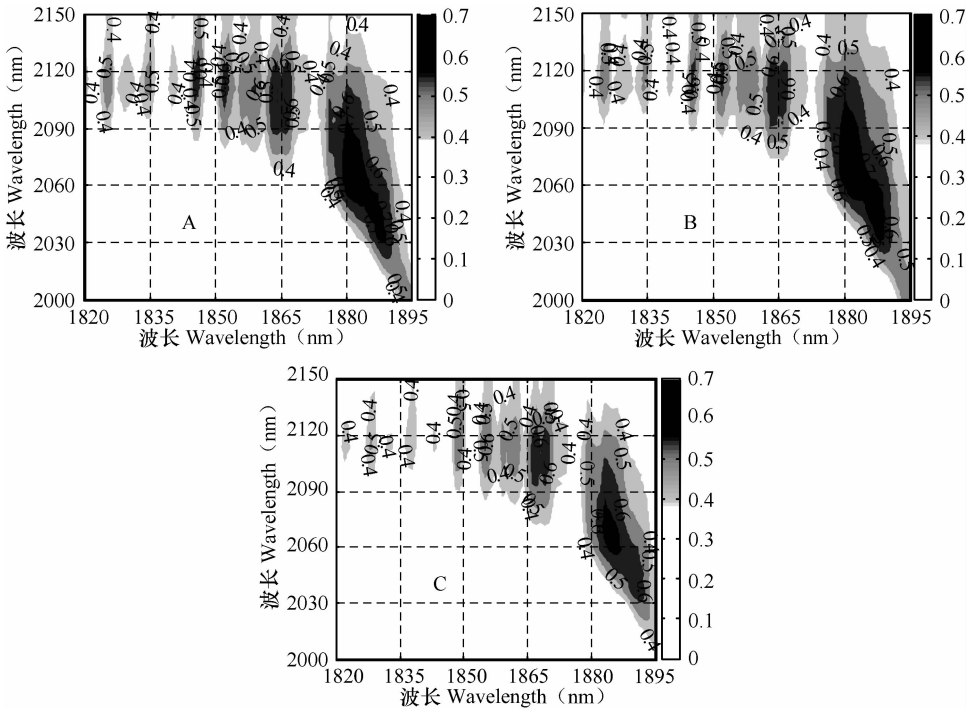


图3 土壤有机质(A)、全氮(B)、速效氮含量(C)与预处理光谱反射率组成的归一化指数之间的相关性

Fig. 3 Correlations of soil OM (A), TN (B), AN contents (C) with the normalized index formed of spectral reflectance corrected with MSC and SG smoothing methods

2.3 同时估算土壤有机质、全氮及速效氮的最佳光谱指数及定量估测模型

从上述相关性较好的波段范围内选择与3种养分含量相关性最好的比值指数、差值指数及归一化指数,比较后发现,对于比值指数和差值指数,估测3种养分含量最好的光谱参数均是由1881 nm与2070 nm两个波段组合而成,差值指数优于比值指数。基于差值指数建立的定量估测模型分别为 $y_{\text{SOM}} = 79.73x - 1.43$, $y_{\text{TN}} = 3.91x - 0.49$ 和 $y_{\text{AN}} = 363.6x - 73.97$, 建模决定系数分别为0.79、0.78和0.75。而与比值指数建立的定量估测模型分别为 $y_{\text{SOM}} = 2280x - 2297$, $y_{\text{TN}} = 112.8x - 113.3$ 和 $y_{\text{AN}} = 10141x - 10213$, 建模决定系数分别为0.77、0.77和0.71。对于归一化指数,同时估测3种养分的最好的光谱参数是由1884和2066 nm两个波段组合而成,建立的定量估测方程分别为 $y_{\text{SOM}} = 3853x + 0.32$, $y_{\text{TN}} = 191.2x + 0.316$ 和 $y_{\text{AN}} =$

$20234x - 9.41$, 建模决定系数分别为0.71、0.72和0.75。图4为展示了基于最佳差值光谱指数 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 与不同类型土壤有机质、全氮及速效氮样本拟合的方程。

进一步利用独立于建模样本以外的资料对上述估测模型进行了测试和检验,结果表明仍以差值指数 $DI(CR_{1881}, CR_{2065})$ 表现最好(见图5),对有机质的预测决定系数 R^2 为0.79,均方根误差 RMSE 为 4.71 g kg^{-1} , 相对分析误差 RPD 为2.30,而对全氮和速效氮的预测决定系数 R^2 分别为0.83和0.72, RMSE 和 RPD 分别为 0.20 g kg^{-1} 和 23.96 mg kg^{-1} 、2.56和2.93。而比值指数和归一化指数表现次之,对有机质、全氮、速效氮的预测决定系数分别为0.73、0.79、0.65和0.70、0.76、0.65。表明 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 可作为一种可同时估测土壤中3种养分含量的良好光谱指数。

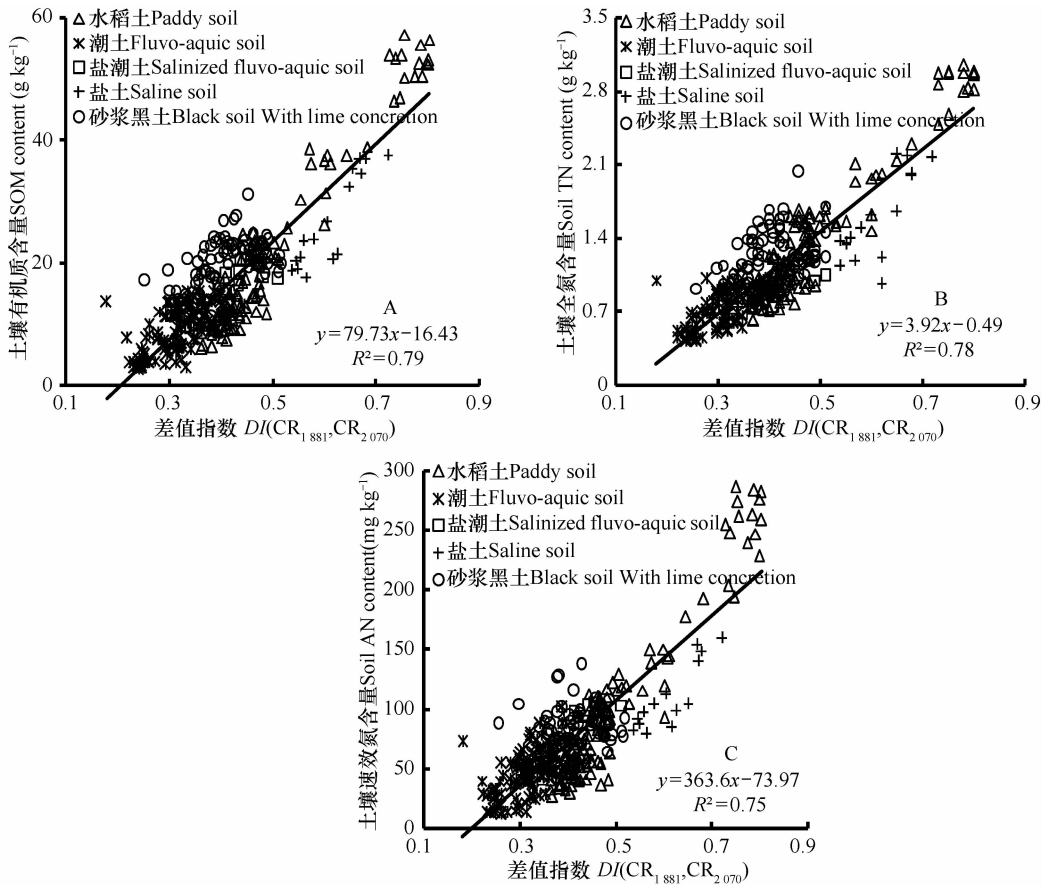


图4 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 与土壤有机质(A)、全氮(B)及速效氮含量(C)的关系

Fig. 4 Correlations of soil OM (A), TN (B) and AN (C) contents with $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$

3 结论与讨论

Dalal 等^[3]用近红外光谱 1 744、1 870 和 2 052 nm 波段的反射率预测了土壤有机碳和全氮含量。徐永明等^[19]利用土壤的室内反射率光谱,运用一阶导数(FDR)、倒数(1/R)、反射率倒数的对数(log(1/R))以及波段深度(Band depth)与总氮含量进行逐步回归运算,确定与氮元素关系比较密切的吸收带为 2 160~2 280 nm 和 2 448~2 476 nm,用可见光/近红外反射光谱指数具有快速估算土壤中氮元素含量的潜力。张娟娟等^[6]利用近红外光谱技术建立了估测土壤有机质含量的差值指数 $DI(CR_{1883}, CR_{2065})$ 。上述研究多是基于单一类型土壤或混合土壤样本进行研究。本文分析了 5 种不同类型土壤之间的差异性,通过分别研究不同类型土壤有机质等养分与反射光谱的关系,结果显示不同类型土壤选取的有机质光谱指数波段虽有些不同,但不同类型土壤有机质较好的光谱指数相对集中在相同区域,土

壤全氮、速效氮的敏感光谱也位于相同区域,这表明利用共同的光谱指数预测不同养分状况是可能的。本文研究结果证实了这一点,表明同时与 3 种养分指标相关性最高的敏感波段为 1 879~1 890 与 2 050~2 100 nm,同时估测 3 种养分的最佳光谱参数为由近红外合频区 1 881 和 2 070 nm 两个波段的反射率经多元散射校正及 Savitzky-Golay 平滑后构建而成的差值指数 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$,该指数可以同时估测土壤 3 种养分指标,而与分类型建立的模型相比,并没有显著降低精度,可以作为一种可同时估测土壤中 3 种养分含量的良好光谱指数。

此外,以往较多研究多基于全波段的信息来估测土壤的多种养分信息。如于飞健等^[4]用 NIRS 预测土壤碱解氮、总氮的交互检验结果最佳预测所需波段数分别为 4 和 5,2 mm 风干土预测值和测定值的相关决定系数碱解氮为 0.92,全氮为 0.88;0.15 mm 土样全氮为 0.90。李伟等^[5]利用 PLS 和 BP 神经网络等方法分别建立了风干黑土碱解氮、速效磷和速效钾含量的预测模型。上述研究由于采用全波段建模,

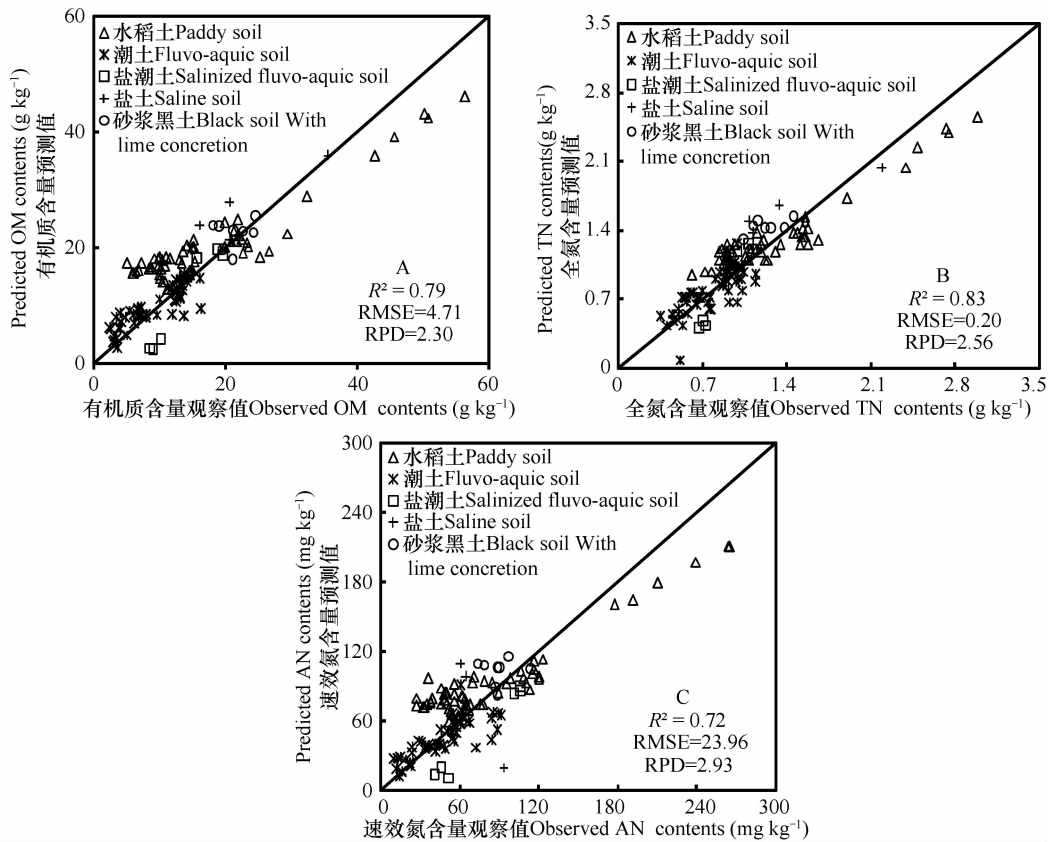


图 5 基于 $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ 的土壤有机质(A)、全氮(B)及速效氮含量(C)估测模型的检验

Fig. 5 Validation of OM(A), TN(B) and AN(C) contents assessed with the prediction model based on $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$

但当估测的各指标之间存在相关关系时,利用光谱技术估测的机理并不明确。本文系统分析了3种不同养分在近红外光谱1000~2500 nm范围内的敏感波段,揭示了3种养分由于C-H、N-H键在光谱上的吸收差异。且构建的差值光谱指数 $DI(CR_{1883}, CR_{2065})$ 只需要2个波段的信息,所建模型相对简单,对于估测3种土壤养分在所涉及的不同土壤类型样本中有较好表现,可以满足生产的需要,为土壤养分的快速测定提供了一种快速途径。然而,本文虽采集了大量样本,但对于其他差异较大的土壤类型如红壤土、东北黑土等是否适用,还有待于进一步研究核实。

参考文献

- [1] Hummel J W, Sudduth K A, Hollinger S E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 32: 149—165
- [2] 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. *土壤学报*, 1998, 35(4): 553—

559. Peng Y K, Zhang J X, He X S, et al. Analysis of soil moisture, organic matter and total nitrogen content in loess in China with near infrared spectroscopy (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 553—559
- [3] Dalal R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near-infrared reflectance spectrophotometry. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 120—123
- [4] 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. *分析实验室*, 2002, 21(3): 49—51. Yu F J, Min S G, Ju X T, et al. Determination the content of nitrogen and organic substance in dry soil by using near infrared diffusion reflectance spectroscopy (In Chinese). *Analytical Laboratory*, 2002, 21(3): 49—51
- [5] 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. *农业工程学报*, 2007, 23(1): 55—59. Li W, Zhang S H, Zhang Q, et al. Rapid prediction of available N, P and K content in soil using near-infrared reflectance spectroscopy (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(1): 55—59
- [6] 张娟娟, 田永超, 朱艳, 等. 一种预测土壤有机质含量的近红外光谱参数. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1896—1904. Zhang J J, Tian Y C, Zhu Y, et al. A novel spectral index for

- estimating soil organic matter content using near-infrared spectroscopy (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1 896—1 904
- [7] 沈润平, 丁国香, 魏国栓, 等. 基于人工神经网络的土壤有机质含量高光谱反演. 土壤学报, 2009, 46(3): 391—397. Shen R P, Ding G X, Wei G S, et al. Retrieval of soil organic matter content from hyperspectrum based on ANN (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 391—397
- [8] Chang C W, Laird D A, Mausbach M J, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analysis of soil properties. Soil Science Society America Journal, 2001, 65: 480—490
- [9] Viscarra Rossel R A, Walvoort D J J, McBratney A B, et al. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, 2006, 131: 59—75
- [10] 陈伟, 杨国锋, 赵云, 等. 金佛山地区不同生境下土壤有机质与全氮含量及其相关性. 草业科学, 2009, 26(6): 25—28. Chen W, Yang G F, Zhao Y, et al. Contents and relationships of soil organic matter and total nitrogen under different habitats in Jinfo Mountain (In Chinese). Patacultural Science, 2009, 26(6): 25—28
- [11] 赵云, 陈伟, 李春鸣, 等. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤有机质含量及其与主要养分的关系. 草业科学, 2009, 26(5): 20—25. Zhao Y, Chen W, Li C M, et al. Relationships with main nutrients content of soil organic matter and its on degraded alpine meadow in Eastern Qilian Mountains (In Chinese). Patacultural Science, 2009, 26(5): 20—25
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30—34. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1999: 30—34
- [13] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures. Analytical Chemistry, 1964, 36: 1 627—1 639
- [14] Gei A P, Macdou G, Martens H. Linearization and scatter-correction for near infrared reflectance spectral of meat. Applied Spectroscopy, 1985, 39: 491—500
- [15] 赵强, 张工力, 陈星旦. 多元散射校正对近红外光谱分析定标模型的影响. 光学精密工程, 2005, 13(1): 53—58. Zhao Q, Zhang G L, Chen X D. Effects of multiplicative scatter correction on a calibration model of near infrared spectral analysis (In Chinese). Optics and Precision Engineering, 2005, 13(1): 53—58
- [16] Chang C W, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. Soil Science, 2002, 167: 110—116
- [17] 李强, 赵伟. MATLAB 数据处理与应用. 北京: 国防工业出版社, 2001. Li Q, Zhao W. Data processing and application in MATLAB (In Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2001
- [18] 李民赞. 光谱分析技术及其应用. 北京: 科学出版社, 2006. Li M Z. Spectral analysis technology and application (In Chinese). Beijing: Science Press, 2006
- [19] 徐永明, 蔺启忠, 王璐, 等. 基于高分辨率反射光谱的土壤营养元素估算模型. 土壤学报, 2006, 43(9): 709—716. Xu Y M, Lin Q Z, Wang L, et al. Model for estimating soil nutrient elements based on high resolution reflectance spectra (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(9): 709—716

THE SPECTRAL INDEX FOR ESTIMATING SOIL OM, TN AND AN CONTENT SIMULTANEOUSLY USING NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY

Zhang Juanjuan^{1,2} Tian Yongchao¹ Yao Xia¹ Cao Weixing¹ Ma Xinming² Zhu Yan^{1†}

(1 National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 College of Information and Management, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract Extracting soil nutrient information using spectral analysis technology is very important for precision crop management. Difference indices (DIs), normalized indices (NIs) and ratio indices (RIs) were calculated from all available combinations with reflectance of two random bands between 1000 and 2500 nm, and correlated to soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) content using dried soil samples from five different soil types in central and eastern China, then key spectral index and quantitative models for estimating SOM, TN and AN content were developed. Results show that spectral indices composed of reflectance corrected with multiplicative scatter correction (MSC) and collated with Savitzky-Golay (SG) smoothing method were highly correlated with the three soil nutrient indices. The sensitive wavebands well correlated simultaneously with the three nutrient indices were 1 879 ~ 1 890 and

2 050 ~ 2 100 nm, and $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ composed of the reflectance in wavebands 1 881 nm and 2 070 nm corrected with MSC and SG smoothing methods performed the best. Testing of the estimating models based on $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ with independent datasets from different types of soil samples resulted in validation of R^2 , RMSE and RPD being 0.83, 0.79 and 0.72, 0.20 g kg⁻¹, 4.71 g kg⁻¹ and 23.96 mg kg⁻¹ and 2.56, 2.30 and 2.93 for TN, OM and AN, respectively, which indicates that $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$ might be a good spectral index for estimating contents of the three nutrients simultaneously.

Key words Soil; Near-infrared spectroscopy; OM; TN; AN; Difference spectral index $DI(CR_{1881}, CR_{2070})$

新书《土壤的氧化还原过程及其研究法》介绍

中国科学院南京土壤研究所丁昌璞、徐仁扣等著的《土壤的氧化还原过程及其研究法》一书已于 2011 年 11 月由科学出版社出版。全书 44.8 万字, 327 页, 每册定价 68 元, 共分十三章, 依次是: 氧化还原状况; 铵的氧化-硝化反应; 硝酸盐的还原-反硝化反应; 有机还原性物质; 铁; 锰; 硫; 砷的氧化还原反应; 氧化锰与酚类化合物的氧化还原; 铁、锰的有效性与氧化还原状况; 稻根和钾与还原性物质的相互作用; 氧化还原过程与土壤发生; 氧化还原反应与环境污染。本书是国内目前该研究领域的第一部专著。

氧化还原反应作为诸多元素或无机、有机化合物转化、迁移、积累的化学、生物学动力, 涉及面广, 它不仅是土壤物质循环的关键环节, 也是环境科学、生态学、生物学、生命科学、地学、海洋学、湖泊学等相邻学科中, 物质运动的制约因素。因此, 国内土壤氧化还原研究早在 20 世纪 50 年代初, 即由中国科学院南京土壤研究所于天仁院士开创引领, 经过几代人的不懈努力和长达半个多世纪工作的不断积累, 该研究领域已逐步在研究对象、内容和方法上形成具有一定特色的综合体系。

首先, 本书分别就全国代表性的森林、草被下的自然土壤、农用旱作土壤、渍水耕作水稻土的氧化还原性质予以论述, 构成了一个既有共性、又各具特点的较为完整的土壤氧化还原系统。鉴于氧化还原过程本质上是凭借电子转移实现的, 本书围绕这个核心, 研究了土壤中还原态电子供体和氧化态电子受体对偶之间的化学平衡及其与土壤的相互作用, 从而反映了还原性物质与氧化性物质的依存关系和变化规律, 并以此说明在土壤物质循环中氧化还原过程成为不可或缺的动力所作的巨大贡献。

其次, 由于土壤氧化还原反应的易变性和复杂性, 一些传统的化学方法难以满足工作的需求, 本书始终结合研究进程, 改进或建立多项相应的测试手段, 对某些化学现象进行了定量表达, 拓宽和加深了原来的研究认识。关于这方面取得的进展, 作为相关各章的重要组成部分专辟篇幅给予介绍, 使本书得以将可行操作与基本理论和实际应用完善地融合于一体。

第三, 氧化还原反应可与多门学科渗透, 其中有四章分别与植物营养、土壤发生和环境污染进行了学科的横向延伸, 优势互补, 用以说明相关学科交融已成为现代土壤学科发展的必然趋势, 它所孕育的生命力将有利于研究前景的拓展, 甚至新领域的开辟。

本书是著者近 60 年来的土壤氧化还原过程研究成果的系统总结, 中国科学院南京土壤研究所和国家自然科学基金委员会给予多方支持。大部分编写者为退休多年的研究员, 他们虽已耄耋之年, 仍壮心不已, 将留在手边的研究资料精整成章, 充分体现了他们心系土壤科学事业、乐于奉献的无私情怀; 同时希望透过专著让更多读者了解土壤氧化还原过程的基本特点、学术价值及其与相邻学科的关系, 并对推动和加强这方面进一步研究有所促进。

本书可供从事土壤、农、林、牧、环境、生态、生物、生命科学、地学、海洋、湖泊等学科的研究、教学、工程技术人员参考。