

基于变量选择的堆肥胡敏酸含量近红外光谱分析

李自刚^{1,2} 岳晓禹¹ 李长滨¹ 张春辉^{2,3} 魏庆葆¹ 刘世亮⁴

(1. 河南牧业经济学院包装与印刷工程学院, 郑州 450011;

2. 河南牧业经济学院河南省生猪疾病防控工程技术研究中心, 郑州 450011;

3. 澳大利亚动物卫生实验室, 吉朗 3220; 4. 河南农业大学资源环境学院, 郑州 450002)

摘要: 为探讨基于选择的近红外光谱变量定量判别堆肥腐熟度的可能性, 为堆肥发酵终点判定及开发相应的近红外漫反射光谱控制设备提供理论基础, 采集了 100 份堆肥样本, 用湿化学方法分析了堆肥样本中的胡敏酸含量, 采集范围为 4 000 ~ 9 000 cm⁻¹ 波段的光谱, 进而利用该近红外光谱进行预处理方法的优化研究及堆肥胡敏酸感变量的优选研究, 以偏最小二乘的方法建立了基于近红外光谱分析的堆肥胡敏酸定量模型。结果表明: 小波变换充分提取了近红外光谱的信息; 利用 C⁴ 小波系数对 58 个堆肥样本进行建模, 对 42 个预测集样本进行预测, 预测集均方根误差和 R² 分别为 0.113 8% 和 0.926 6, 优于原始光谱直接建模的 0.167 2% 和 0.834 8。对近红外光谱数据进行小波变换, 利用处理后的小波系数, 采用偏最小二乘法预测了堆肥中胡敏酸的含量, 建立了小波变换与近红外光谱技术结合用于测定堆肥样品中胡敏酸测定的模型。基于小波系数的模型优于传统的近红外光谱全谱模型, 对于堆肥胡敏酸的测定取得了较为准确的预测结果。

关键词: 堆肥; 品质控制; 腐熟度评价; 胡敏酸; 近红外光谱; 小波变换

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0300-05

Near Infrared Spectral Modeling Analysis Based on Variable Selection of Compost Humic Acid Content

LI Zigang^{1,2} YUE Xiaoyu¹ LI Changbin¹ ZHANG Chunhui^{2,3} WEI Qingbao¹ LIU Shiliang⁴

(1. College of Packaging and Printing Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450011, China

2. The Henan Province Pig Engineering Technology Research Center for Disease Control and Prevention, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450011, China

3. The Australian Animal Health Laboratory (AAHL), Geelong 3220, Australisa

4. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Composting treatment is a key method of processing organic solid waste, especially for agricultural organic solid waste. Aiming to study the feasibility of several selected variables from near infrared spectroscopy to quantify humic acid in compost, determine composting fermentation and develop corresponding control equipment to provide theoretical basis by near-infrared diffuse reflection spectrum. Totally 100 composting samples were collected, including 58 samples for calibration and 42 samples for validation. On the one hand, the humic acid of these samples were analyzed by using the International Humic Substances Society standard of humic acid method, on the other hand, those were scanned to obtain near infrared spectra with the wavelength range of 4 000 ~ 9 000 cm⁻¹. Both of spectroscopic pre-treatment method and sensitive variables were optimized, and then the model was built by partial least squares regression method. The results indicated that humic acid in compost can be determined by near-infrared (NIR) spectral technique, because they were combined with organic groups with NIR absorption. A method for the determination of humic acid in compost samples was established based on the combination of discrete wavelet transform (DWT) and NIR technique. In the proposed method, the

收稿日期: 2016-11-20 修回日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1404332)和河南省重点科技发展计划项目(112102110034)

作者简介: 李自刚(1970—),男,副教授,博士,主要从事环境生物工程技术研究,E-mail: ziganli@163.com

通信作者: 刘世亮(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事环境生物工程技术研究,E-mail: shlliu70@163.com

raw NIR data and their wavelet coefficients were used for modeling and prediction of the contents of humic acid in compost by partial least square method (PLS). The model based on wavelet coefficients was better than that based on the full NIR spectral range. With the improved method, accurate prediction can be achieved.

Key words: composting; quality control; maturity evaluation; humic acid; near infrared spectroscopy; wavelet transform

引言

堆肥是在多种微生物的作用下,将有机固体废弃物进行矿质化、腐殖化、稳定化以及无害化的发酵过程,腐熟的堆肥不仅可以提高作物的产量,改善农产品的品质,还能改善土壤的物理化学性质,是一种优质的有机肥^[1-4]。堆肥发酵生产有机肥时,发酵终点判定或堆肥腐熟度评价是该领域的研究热点^[4-10]。

养分含量、含水率、pH 值、电导率等理化指标常用于堆肥发酵终点的判定或腐熟度评价^[8-14],在堆肥发酵过程中,腐殖质类物质是堆肥腐熟度评价的重要指标,胡敏酸(Humic acid, HA)是腐殖质类物质的主要组成物质,其通常是判定有机肥品质及农田施用效果的主要指标^[1,14-15]。胡敏酸结构组成及性质与土壤的保肥和供肥性能相关^[16-17],近年来,胡敏酸的光谱学分析大都集中在红外光谱或红外光谱与热重分析联用领域^[18-20],有关近红外光谱(Near infrared reflectance spectroscopy, NIRS)分析技术在该领域的研究报道并不多见。

在建模快速分析领域,NIRS 分析技术已被应用于工业、农业、环境等领域^[21-26]。进入 21 世纪以来,随着计算机技术软硬件的发展,NIRS 分析技术在堆肥发酵控制领域显示出广阔的应用前景^[27-28]。

本文以胡敏酸为目标物,利用 NIRS 和偏最小二乘法建立堆肥发酵腐熟度评价方法,以期利用 NIRS 技术控制堆肥发酵过程设备研发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

Bruker MPA FT-NIR 型光谱仪(Bruker Optics Inc.),石英分束器,积分球检测附件(漫反射),PbS 检测器;AA3 型连续流动分析仪(德国 Bran + Lubbe 公司);胡敏酸(色谱纯,美国 Sigma-Aldrich 公司);NaOH、Na₄P₂O₄、HCl(均为分析纯,中国医药集团上海化学试剂公司)。

1.2 堆肥方法及取样

堆肥试验于 2013 年 5 月 1 日—2014 年 5 月 1 日在中荷河南奶业培训示范中心基地(河南省郑州

市花园口镇六堡村)生态堆肥厂进行,堆肥原材料主要有锯木屑(A)、稻糠(B),购自于六堡村家具加工厂和碾米厂;新鲜奶牛粪便(C)收集自中荷河南奶业培训示范中心基地奶牛养殖棚;成品有机肥(D)由中荷河南奶业培训示范中心基地生态堆肥厂生产。其中 A、B、D 用于调整 C 起始时的水分,堆肥发酵时堆肥原料的起始湿度为(65±0.5)%。堆肥发酵终点(堆肥腐熟稳定判定)采用 DOU 等^[29]所推荐的方法判定,堆肥结束后,从堆肥堆体的不同位置点(位置点个数大于 10)各平行取样 3 次,每次 250 g,并将分批次取得的样品充分混匀,之后再从中平行取样 3 次,每次 250 g,取样后将样品于 0~5℃ 冰箱冷藏贮存以供分析。取回后的样品放入真空冷冻干燥器于-59℃ 条件下真空冷冻干燥 24 h 后,碾磨成粉状,过 40 目筛后封装在牛皮纸袋中,保存于干燥器内以避免吸收空气中水分而受潮,保存样品以备后续试验。

1.3 堆肥样品中胡敏酸的提取

根据国际腐殖质协会的标准方法对堆肥样品中的胡敏酸样品进行提取与纯化^[30]。具体操作如下:称取 1.2 节中的堆肥样品 20 g(干基),将其溶于 150 mL 胡敏酸提取液(胡敏酸提取液由 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L Na₄P₂O₄溶液按 1:1 的体积比配制而成)中,室温((25±1)℃)下振荡 24 h,然后于 8 000 r/min 离心条件下离心 10 min 后取上清液进行酸化并静置 12 h,酸化环境为 6 mol/L HCl,pH 值为 2.0;然后离心取絮状褐色沉淀,用超纯水冲洗沉淀直至冲洗液无 Cl⁻检出,将其沉淀冻干保存,用于近红外光谱测定与分析。

1.4 近红外光谱测定方法

用 AA3 型连续流动分析仪测试堆肥样品中胡敏酸含量,作为标准值。

用 Bruker MPA FT-NIR 型光谱仪测试粉状堆肥样品的 NIR 光谱,近红外光谱的测定条件为:光谱采集范围为 4 000~9 000 cm⁻¹;分辨率为 4 cm⁻¹;扫描次数为 64 次;温度为室温;实验室经除湿处理 100 个堆肥样品的 NIR 光谱如图 1 所示,100 个堆肥样品 NIR 光谱的每条谱线由 1 298 个数据点构成。

1.5 数据处理

利用小波变换对获得的 NIR 光谱数据进行处

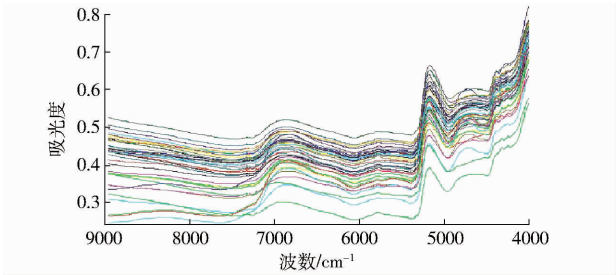


图 1 堆肥样品的近红外光谱图谱

Fig.1 NIR spectra of 100 compost samples

理,小波变换是在傅里叶变换基础上发展起来的,可用于数据压缩、多组分信号重叠解析、基线校正。小波分析是基于离散小波变换 (Discrete wavelet transform,DWT) 的多尺度信号分解 (Multiresolution signal decomposition, MRSD) 算法,核心算法为

$$C^j(n) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(2n-l)C^{j-1}(l) \quad (l \in \mathbf{Z}) \quad (1)$$

$$D^j(n) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(2n-l)C^{j-1}(l) \quad (l \in \mathbf{Z}) \quad (2)$$

式中 C^0 ——仪器测试得到的 NIR 数据
 C^j ——低频系数 D^j ——高频系数
 n ——试验数据的点数
 $\tilde{h}(2n-l)$ 、 $\tilde{g}(2n-l)$ ——对应于小波函数、尺度函数的滤波器

由 C^j 和 D^j 可以重构 C^0 。

$$C^{j-1}(n) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}^*(2l-n)C^j(l) + \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}^*(2l-n)D^j(l) \quad (3)$$

其中 $\tilde{h}^*$ 和 $\tilde{g}^*$ 分别是 $\tilde{h}$ 和 $\tilde{g}$ 的共轭滤波器。从式(1)、(2) 得知 C^j 和 D^j 的数据点数均为 C^{j-1} 的 1/2,因此进行尺度 j 的多尺度信号分解所得到小波系数的总数据点数与原始信号相同,但由于在小波系数中有大量的系数数值很小,忽略这些系数不会带来信息的丢失,因此离散小波变换是一种高效的数据压缩方法。

偏最小二乘法 (Partial least square method, PLS) 对化学量测矩阵 $\mathbf{Y}$ 和浓度矩阵 $\mathbf{X}$ 同时进行主成分分解,并以主因子进行回归。利用压缩后的小波系数进行 PLS 建模,进一步提高了方法的计算速度和可靠性。

2 结果与分析

2.1 小波分解尺度选择与预测模型确定

以上述获得的原始 NIR 数据以及 1~7 阶离散小波变换处理后得到的小波系数 ($C^0 \sim C^7$; $D^1 \sim D^7$) 分别建模和预测堆肥样品中的胡敏酸含量,以预测

与试验测定值之间的决定系数 R^2 考察预测模型,结果如表 1 所示。本文选择的小波函数为 Daubechies。

表 1 不同尺度效应下的建模和预测结果
Tab.1 Modeling and prediction in different scales

尺度 j	低频系数 C^j			高频系数 D^j			数据 点数
	均方根 误差/%	R^2	成分 数	均方根 误差/%	R^2	成分 数	
0	0.152	0.920	10				1 184
1	0.177	0.917	11	0.422	0.531	1	746
2	0.163	0.919	8	0.443	0.529	2	384
3	0.152	0.920	11	0.383	0.677	3	184
4	0.128	0.928	11	0.270	0.842	4	99
5	0.179	0.912	12	0.178	0.909	5	85
6	0.200	0.898	13	0.168	0.921	6	39
7	0.222	0.877	9	0.183	0.900	7	17

2.2 DWT 对 NIR 光谱信息的提取

为进一步考察 DWT 对 NIR 光谱信息的提取能力,图 2 给出了 20 号堆肥样品 NIR C^4 直接重构的结果。从图 2 可以看出,虽然由 C^4 直接重构后的图谱与 NIR 光谱的形状具有一定差别,但这些系数包含了被测成分测定的主要信息,扣除了一定的噪声信号。此结果充分说明了 DWT 对 NIR 有用信息的提取能力。

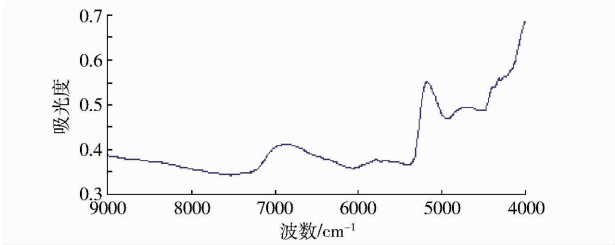


图 2 20 号堆肥样品的近红外光谱图谱

Fig.2 NIR spectra reconstructed from C^4 coefficient
for No. 20 compost samples

2.3 堆肥样品中胡敏酸含量的预测

胡敏酸是堆肥发酵腐熟度 (堆肥品质) 的重要指标之一^[1,11,14-15,31],在样品预处理方法为一阶导数结合多元散射校正处理的情况下,主成分数选择 4 时,从 100 个堆肥样品中均匀选取 58 个作为 PLS 建模的校正集,另外 42 个作为预测集,直接用全谱建模,相应的结果如图 3 所示,校正集预测均方根误差为 0.465 3%,预测集均方根误差为 0.167 2%, R^2 为 0.834 8,预测结果的相对误差在 -3.77%~3.56% 之间。以 C^4 建模预测,胡敏酸含量质量分数的预测值与试验测定值如图 4 所示,校正集均方根误差为 0.352 5%,预测集均方根误差为 0.113 8%, R^2 为 0.926 6,预测结果的相对误差在 -2.87%~2.57% 之间,可以满足堆肥胡敏酸化学分析中对胡敏酸测

定的要求。

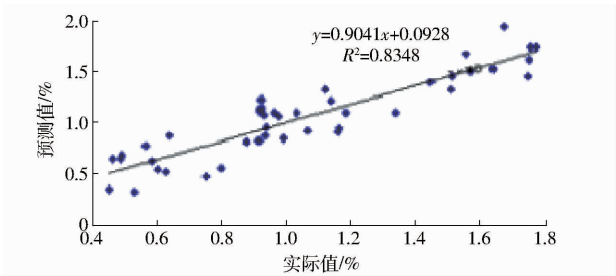


图 3 堆肥样品中胡敏酸质量分数实际值与预测值的 DWT 交叉验证

Fig. 3 Cross-validation of predicted and actual humic acid (HA) contents with DWT method

3 结束语

相比于堆肥腐殖质另一组成成分富里酸,胡敏酸在结构方面具有持续性和稳定性^[1,10-14,31],研究表明 NIR 技术可以用于堆肥样品中胡敏酸含量的测定。基于一定分解尺度 DWT 处理后得到小波系数的 PLS 预测模型优于传统的 NIR 全谱处理模

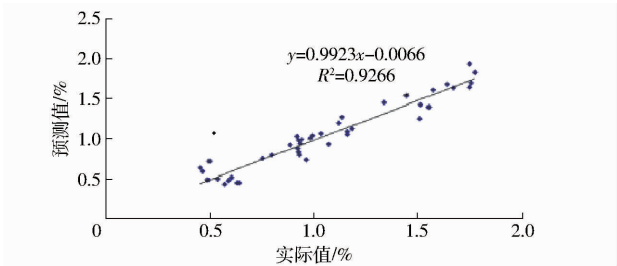


图 4 堆肥样品中胡敏酸质量分数实际值与预测值的近红外分析交叉验证

Fig. 4 Cross-validation of predicted and actual humic acid (HA) contents with raw spectra

型,可以改善堆肥发酵腐熟度评价方法的预测准确度。由于应用 NIR 技术对堆肥样品中胡敏酸含量进行预测使得对胡敏酸繁琐的常规化学分析变得简便易行。本文所提出的方法,为近红外光谱分析技术在堆肥发酵终点判定及堆肥腐熟度评价、组分含量测定、品质评价以及应用近红外光谱分析技术研发堆肥发酵过程控制设备提供了理论基础,有望成为堆肥发酵腐熟度评价方法中的一种有效方法。

参 考 文 献

1 付强,袁野,崔嵩. 农村固体废弃物堆肥胡敏酸还原土壤 Fe³⁺ 矿物研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(10):202-208. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161026&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.026.

FU Qiang, YUAN Ye, CUI Song. Structure evolution of compost-derived HAs from rural solid waste and corresponding reduction of Fe³⁺ mineral from soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10):202-208. (in Chinese)

2 徐鹏翔,孙敏捷,李季. 规模化肉牛场粪污收集与堆肥处理工艺设计[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):213-217.

XU Pengxiang, SUN Minjie, LI Ji. Feces collection and composting technological design on scaled beef cattle farms[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp.2):213-217. (in Chinese)

3 李丹阳,李恕艳,李国学,等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):260-267.

LI Danyang, LI Shuyan, LI Guoxue, et al. Effects of additive on nitrogen loss during composting of pig manure and corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp.2):260-267. (in Chinese)

4 李恕艳,李吉进,张邦喜,等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):268-274.

LI Shuyan, LI Jijin, ZHANG Bangxi, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp.2):268-274. (in Chinese)

5 曹云,常志州,黄红英,等. 添加腐熟猪粪对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(21):220-226.

CAO Yun, CHANG Zhizhou, HUANG Hongying, et al. Effect of compost inoculation on pig manure composting[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(21):220-226. (in Chinese)

6 李春萍,李国学,李玉春,等. 北京南宫静态堆肥隧道仓不同区间的垃圾堆肥腐熟度模糊评价[J]. 农业工程学报,2007,23(2):201-206.

LI Chunping, LI Guoxue, LI Yuchun, et al. Fuzzy mathematics-based evaluation of municipal solid waste compost maturities in different spaces in static tunnel from Nangong compost plant[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(2):201-206. (in Chinese)

7 王敦秋,潘盛. 模糊综合评价法在评价堆肥腐熟度中的应用[J]. 农业环境科学学报,2005,24(增刊1):212-215.

WANG Dunqiu, PAN Sheng. Application of fuzzy mathematics assessment in the compost maturity evaluation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005,24(Supp.1):212-215. (in Chinese)

8 潘玲阳,李国学,李春萍,等. 不同粒径生活垃圾对腐熟度影响统计分析(简报)[J]. 农业工程学报,2008,24(10):209-213.

PAN Lingyang, LI Guoxue, LI Chunping, et al. Statistics analysis of the effects from different sized municipal solid wastes on compost maturities[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(10):209-213. (in Chinese)

9 QIAN X, SHEN G, WANG Z. Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. Waste Management, 2014, 34(2):530-535.

10 秦莉,李玉春,李国学,等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报,2006,22(12):189-194.

QIN Li, LI Yuchun, LI Guoxue, et al. Maturity indexes and operational parameters during composting municipal solid waste[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(12):189-194. (in Chinese)

11 钱晓雍,沈根祥,黄丽华,等. 畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(3):549-554.

QIAN Xiaoyong, SHEN Genxiang, HUANG Lihua, et al. An index system for evaluating the maturity of animal manure composting[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009,28(3):549-554. (in Chinese)

- 12 李承强,魏源送,樊耀波,等.堆肥腐熟度的研究进展[J].环境科学进展,1999,7(6):1-12.
LI Chengqiang, WEI Yuansong, FAN Yaobo, et al. Advances in study of compost maturity[J]. Advances in Environmental Science, 1999, 7(6): 1-12. (in Chinese)
- 13 KHAN N, CLARK I, SANCHEZ-MONEDERO M A, et al. Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar[J]. Bioresource Technology, 2014, 168: 245-251.
- 14 SHAN Y N, CHEN J H, WANG L, et al. Influences of adding easily degradable organic waste on the minimization and humification of organic matter during straw composting[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2013, 48(5): 384-392.
- 15 朱青藤,申连玉,钱黎慧,等.有机物料对白土土壤胡敏酸结构特征的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):396-403.
ZHU Qingteng, SHEN Lianyu, QIAN Lihui, et al. Effects of organic material application on the structures of humic acids in low yield paddy soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 396-403. (in Chinese)
- 16 窦森,李凯,崔俊涛,等.土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J].土壤学报,2008,45(6):1148-1158.
DOU Sen, LI Kai, CUI Juntao, et al. Dvancement in the study on formation, transformation and structural characteristics of soil humic substances[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(6): 1148-1158. (in Chinese)
- 17 SHINDO H, YOSHIDA M, YAMAMOTO A, et al. $\delta^{13}\text{C}$ values of organic constituents and possible source of humic substances in Japanese volcanic ash soils[J]. Soil Science, 2005, 170(3): 175-182.
- 18 吴景贵,王明辉,姜亦梅,等.玉米秸秆还田后土壤胡敏酸变化的谱学研究[J].中国农业科学,2005,38(7):1394-1400.
WU Jinggui, WANG Minghui, JIANG Yimei, et al. Study on humic acids in the soil applied with corn stalk by spectroscopy measurements [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(7): 1394-1400. (in Chinese)
- 19 曹莹菲,张红,刘克,等.不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):212-219.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160930&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.030.
CAO Yingfei, ZHANG Hong, LIU Ke, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 212-219. (in Chinese)
- 20 徐砚,朱群益,宋绍国.采用热重与红外光谱联用研究玉米秸秆热解[J].热能动力工程,2012,27(1):126-129,142.
XU Yan, ZHU Qunyi, SONG Shaoguo. Study of the pyrolysis of corn stalk by combining the thermogravimetric method with the infrared spectrum one [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(1): 126-129, 142. (in Chinese)
- 21 吕程序,姜训鹏,张银桥,等.基于变量选择的小麦粗蛋白含量近红外光谱检测[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):340-346.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s052&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.052.
LÜ Chengxu, JIANG Xunpeng, ZHANG Yinqiao, et al. Variable selection based near infrared spectroscopic quantitative analysis on wheat crude protein content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 340-346. (in Chinese)
- 22 郑晓春,李永玉,彭彦昆,等.基于可见/近红外光谱的牛肉品质无损检测系统改进[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):332-339.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s051&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.051.
ZHENG Xiaochun, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Improvement of nondestructive detection system of beef quality based on visible/near infrared spectroscopy [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 332-339. (in Chinese)
- 23 田海清,应义斌,陆辉山,等.可见/近红外光谱漫透射技术检测西瓜坚实度的研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(6):1113-1117.
TIAN Haiqing, YING Yibin, LU Huishan, et al. Study on predicting firmness of watermelon by Vis/NIR diffuse transmittance technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(6): 1113-1117. (in Chinese)
- 24 葛晓雯,王梦,李耀翔.近红外技术在土壤化学组分预测中的应用研究综述[J].森林工程,2013(6):72-76.
GE Xiaowen, WANG Meng, LI Yaoxiang. Review on the NIR-based modeling of soil chemical constituents [J]. Forest Engineering, 2013(6): 72-76. (in Chinese)
- 25 隋世江,叶鑫,隗英华.近红外光谱技术在土壤成分检测中的研究进展[J].农业科技与装备,2012(1):14-16,19.
SUI Shijiang, YE Xin, JUAN Yinghua. Study on application of near infrared spectroscopy in determination of soil components [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(1): 14-16, 19. (in Chinese)
- 26 LIU F, HE Y. Use of visible and near infrared spectroscopy and least squares-support vector machine to determine soluble solids content and pH of cola beverage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(22): 8883-8888.
- 27 CEN H, HE Y, HUANG M. Measurement of soluble solids contents and pH in orange juice using chemometrics and vis-NIRS [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(20): 7437-7443.
- 28 黄光群,韩鲁佳,樊霞,等.近红外光谱分析技术在畜禽粪便堆肥研究中的应用[J].中国农业大学学报,2006,11(3):93-97.
HUANG Guangqun, HAN Lujia, FAN Xia, et al. Application survey of an archically technique of near infrared spectroscopy on studies of livestock manure compost[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(3): 93-97. (in Chinese)
- 29 DOU Z, ZHANG G Y, STOUT W L, et al. Efficacy of alum and coal combustion by-products in stabilizing manure phosphorus [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32: 1409-1479.
- 30 STEVENSON F J. Humus chemistry—genesis, composition, reactions[J]. Journal of Geology, 1994, 135(2): 129-130.
- 31 SCOTT D T, MCKNIGHT D M, BLUNT-HARRIS E L, et al. Quinone moieties act as electron acceptors in the reduction of humic substances by humics-reducing microorganisms[J]. Environment Science & Technology, 1998, 32(19): 2984-2989.