

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.029

绿茶杀青叶料含水率可见-近红外光谱检测*

胡永光 陈培培 赵梦龙

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为实现绿茶杀青叶料含水率的快速无损检测,基于可见-近红外光谱分析建立含水率的预测模型。使用FieldSpec 3型便携式地物光谱仪,采集192个杀青叶料样品的漫反射光谱信息,基于 $X-Y$ 共生距离的样本划分算法SPXY,确定144个样本的校正集和48个样本的预测集。进行一阶微分和移动平滑滤波预处理后,采用相关系数法优选出11个特征波段,建立了含水率检测的偏最小二乘回归、主成分回归、人工神经网络及其组合的模型。结果表明,选用5个主成分的偏最小二乘回归模型最佳,其校正和预测模型的相关系数分别为0.990和0.819,均方根误差分别为0.011和0.037,预测含水率的平均相对误差为3.30%。

关键词: 绿茶杀青叶料 含水率 可见-近红外光谱 无损检测 偏最小二乘回归模型

中图分类号: S571.1; O433.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0174-06

Determination of Water Content in De-enzyming Green Tea Leaves Based on Visible-near Infrared Spectroscopy

Hu Yongguang Chen Peipei Zhao Menglong

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To determine the moisture content in de-enzyming green tea leaves rapidly and nondestructively, prediction models were established based on visible-near infrared spectroscopy. Diffuse reflection spectra of 192 samples were collected with a portable field spectrometer (FieldSpec 3, ASD), among which 144 samples were partitioned to a calibration set and 48 samples to a prediction set using the sample set partitioning method based on joint $X-Y$ distance. 11 sensitive bands were selected with correlation coefficient method, and then moisture content models of partial least squares and principal component regression, artificial neural network and their combination were established with the preprocessing methods of the first derivative and moving average filter. The model comparison showed that the prediction model of partial least squares regression was the best when 5 principal components were adopted. The calibration and prediction correlation coefficients were 0.990 and 0.819 respectively, and the root mean square errors of calibration and prediction were 0.011 and 0.037 respectively, and the mean error of predicted moisture content was 3.30%.

Key words: De-enzyming green tea leaves Moisture content Visible-near infrared spectroscopy Nondestructive detection Partial least squares regression

引言

杀青工艺作为优质绿茶清洁化加工的第一道工

序,通过短时高温,使叶内水分散发、内含物发生化学反应^[1],对绿茶品质的形成起着决定性的作用。杀青叶料失水过多、过快,揉捻难以成条,产生焦叶,

收稿日期: 2013-03-11 修回日期: 2013-03-28
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A508)、国家自然科学基金资助项目(31101089)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2010326)和江苏省农业科技自主创新资金资助项目(CX(12)3025)
作者简介: 胡永光,副教授,博士,主要从事设施农业装备与技术研究,E-mail: deerhu@163.com

易断碎;杀青叶料失水过少、过慢,产生红梗红叶,不利于水蒸气和青气散发^[2]。在实际生产中,往往凭借眼观、手摸等人工经验,来把握杀青的质量,判断稍有失误,即会造成杀青叶料的浪费;而传统的干燥称量法耗时长,会破坏样本,不能对杀青叶料含水率进行实时监测。

近红外光谱分析技术因其快速、无损和成本低等优点,在农业物料含水率检测上的应用较多^[3~5],在茶叶成分检测^[6~8]、品质评价^[9~10]以及种类和产地识别^[11~13]方面的研究比较集中。也有学者利用近红外光谱分析技术,对茶叶的含水率检测进行模型研究和仪器开发^[14~18]。

为提高绿茶加工中杀青叶料含水率的检测精度,本研究在波长 350 ~ 2 500 nm 范围内,现场实时获取更多样本表面的漫反射光谱信息,建立杀青叶料含水率的预测模型,从而为优质绿茶清洁化生产中叶料含水率的在线监测与反馈控制提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 样品选择

本试验于 2012 年 4 月在丹阳市迈春茶场的制茶车间内进行,杀青茶叶的品种为龙井 43。从摊青结束至杀青结束,配戴橡胶手套对杀青叶料进行现场取样,蓬松铺放于玻璃皿中。通过改变杀青时间和加热温度,获取样品较大的含水率变化范围,并使其按照一定梯度均匀分布。试验共采集 200 个茶叶杀青叶料样品。

1.2 光谱采集

1.2.1 光谱仪

使用美国 ASD(Analytical Spectral Device)公司的 FieldSpec 3 型便携式地物光谱仪采集光谱,其光谱波长范围为 350 ~ 2 500 nm,其中在 350 ~ 1 000 nm波段的采样间隔和分辨率分别为 1.4 nm 和 3 nm,在 1 000 ~ 2 500 nm 波段的采集间隔和分辨率分别为 2.0 nm 和 10 nm,采样频率 10 Hz。该光谱仪通过无线网络由计算机操作控制。

1.2.2 光谱采集

使用卤素灯人工光源(Lowell 公司,色温 3 100 K,14.5 V/50 W),距离样品约 35 cm。为避免背景光的干扰,在制茶车间内,搭建一个不透光的工作间。采用 25°视场角的光纤探头,距离样品表面 20 cm,使光谱扫描视场在样品范围内,测量方式为漫反射。测定前进行系统配置优化和白板校正。把杀青叶料样品迅速拿到工作间,进行扫描光谱,每个样品重复测量 3 次。然后对其称量,并密封在干燥的信封中

保存。杀青叶料样品的光谱采集试验场景,如图 1 所示。

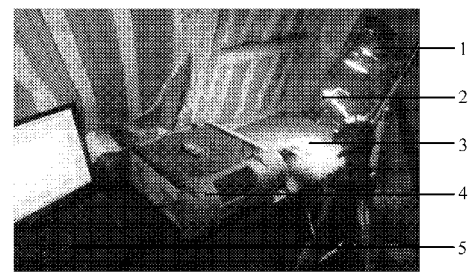


图 1 茶叶杀青叶料漫反射光谱采集
Fig. 1 Collection of diffuse reflection spectrum for de-enzyming tea leaf samples
1. 光源 2. 光纤 3. 样品 4. 光谱仪 5. 计算机

1.3 杀青叶料含水率测定

含水率的测定使用 DZF-6050 型真空干燥箱(控温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)和 BS210S 型电子天平(称量精度 0.000 1 g)。根据国家标准 GB/T 8304—2002,将杀青茶叶试样连同干燥皿置于 $(103 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 干燥箱内加热 4 h,取出置于干燥器内,冷却至室温称量。再置于干燥箱中加热 1 h,取出置于干燥器内冷却,称量(准确至 0.001 g)。重复加热 1 h 的操作,直至连续 2 次称量差不超过 0.005 g,即为恒质量,以最小称量为准。含水率的测定,进行 3 次重复。

含水率计算公式为^[19]

$$M = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M ——茶叶含水率, %
 M_1 ——茶叶试样和干燥皿干燥前质量, g
 M_2 ——茶叶试样和干燥皿干燥后质量, g
 M_0 ——茶叶试样质量, g

本试验使用 200 个绿茶杀青叶料样品,其含水率范围为 41% ~ 75%。

2 结果与分析

2.1 可见-近红外光谱波段分析

对采集的所有漫反射光谱,首先经 ASD ViewSpec Pro 软件进行有效性检查,剔除测量粗大误差的样本,最终确定 192 个有效样本;然后对 3 次重复测量的光谱数据,经平均运算后作为各样本的光谱测量值,最后以文本格式导出,用于数据预处理和建模。

绿茶杀青叶料的典型光谱曲线如图 2 所示。由图可知,杀青叶料漫反射光谱特征与绿色植物光谱响应基本一致^[20],350 ~ 490 nm 波段主要是叶绿素和类胡萝卜素的强吸收带,其平均反射率不超过 10%;490 ~ 700 nm 波段是可见光的一个活性带,光

谱曲线呈现“一峰两谷”,该波段对植物水分有一定的吸收;700 ~ 750 nm 波段有水的弱吸收谷,但被植物反射率的急剧增高(红边效应)所掩盖,反应不明显;在 750 ~ 1 300 nm 波段,由于光线在叶片内多次散射,且色素和纤维素在该波段内几乎是透明的,故只在 960 nm 和 1 120 nm 波长附近出现水的 2 个较强吸收谷;在 1 300 ~ 2 500 nm 波段,由于叶片内部液态水分的强烈吸收作用,在 1 450 nm 和 1 940 nm 附近出现明显的低谷^[21]。此外,由于空气中水分的吸收作用,在 2 400 nm 波长以后出现了强烈的干扰,在光谱曲线上形成了大量的垂直线,从而产生大量噪声;为保证模型预测精度,建模时去除 2 400 ~ 2 500 nm 波段。

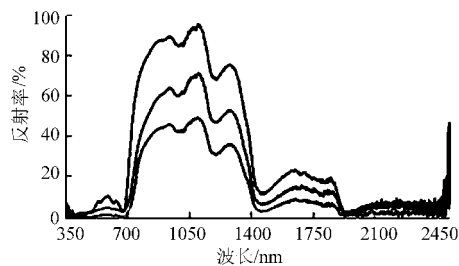


图2 绿茶杀青叶样本的典型光谱曲线
Fig.2 Typical visible-near infrared reflection spectra of de-enzyming tea leaf samples

2.2 建模

数据预处理和建模采用江苏大学自主开发的 NIRSA 软件系统(计算机软件著作权登记号 2007SR06801)。该软件专门用于近红外光谱数据分析和建模,可提供多元线性回归(Multivariate linear regression, MLR)、逐步回归(Stepwise regression, SWR)、偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)、主成分回归(Principal component regression, PCR)、人工神经网络(Artificial neural network, ANN)及其组合的多种建模算法。

2.2.1 样品集划分

选择具有良好代表性的样品构成校正集,不但可减少重复建模的工作量,而且能增强模型的精度,因此依据样本光谱差距挑选样本集,同时又要保证样本按照理化值距离均匀分布。基于 $X - Y$ 共生距离的样本划分算法(Sample set partitioning based on joint $X - Y$ distance, SPXY)是一种基于统计基础的样本集选择方法,用光谱-理化值共生距离作为划分依据,能最大程度表征样本分布,从而提高模型稳定性^[22~23]。本研究选用 SPXY 算法,将所有样本按 3:1 划分成 144 个样本的校正集和 48 个样本的预测集。

2.2.2 预处理方法

为了消除来自高频随机误差、基线漂移、样品不

均匀、光散射和光程变化等对光谱响应产生的影响和干扰,利于建模时有用信息的提取,以及提高模型的稳健性,需要对样本的光谱数据进行预处理。本文采用了微分、平滑、归一化和标准正态变量变换等预处理方法^[24],建立 PLSR 模型,进行预处理方法的研究。

基于各种预处理算法建模结果,对预测集中的样本进行预测和验证;通过综合比较校正和预测模型的相关系数(R_C 、 R_p)以及均方根误差(RMSEC、RMSEP),确定相关系数高且均方根误差小的模型为最佳模型。不同预处理方法 PLSR 模型及其预测的结果,如表 1 所示。

表 1 不同预处理光谱 PLSR 建模预测结果
Tab.1 PLSR models based on different preprocessing methods

预处理方法	校正模型		预测模型	
	R_C	RMSEC	R_p	RMSEP
原始光谱	0.811	0.041	0.917	0.041
一阶微分 + MAF	0.985	0.013	0.895	0.035
二阶微分 + MAF	0.976	0.017	0.778	0.050
一阶微分 + MAF + 归一化	0.972	0.017	0.829	0.047
二阶微分 + MAF + 归一化	0.976	0.016	0.896	0.037
一阶微分 + MAF + SNV	0.956	0.021	0.878	0.039
二阶微分 + MAF + SNV	0.964	0.019	0.809	0.051

由表 1 可知,经过光谱预处理的模型均优于原始光谱,其中基于一阶微分与移动平滑滤波(Moving average filter, MAF)相结合预处理的模型最佳,其校正相关系数为 0.985,校正均方根误差为 0.013,预测相关系数为 0.895,预测均方根误差为 0.035。但在增加归一化和标准正态变量变换(Standard normal variate transformation, SNV)预处理方法后,模型结果并未得到优化,预测精度反而有所下降。本研究采用一阶微分与 MAF 相结合的预处理方法。

2.2.3 建模波段优选

本研究的光谱信息覆盖了可见-近红外光谱的全部波段,信息量大,但也包含了部分冗余信息,会在一定程度上影响模型的预测精度。经波长优选剔除不相关或线性相关变量,建立的模型更简化,预测能力和稳健性更好。

采用相关系数法进行波段优选,绿茶杀青叶样本预处理光谱相关系数如图 3 所示。在图中选定相关系数绝对值大于 0.2 的波长为优选波长^[25],共计包括 11 个特征波段,分别为 501 ~ 588、594 ~ 645、651 ~ 673、706 ~ 756、785 ~ 973、1 121 ~ 1 153、1 218 ~ 1 223、1 273 ~ 1 395、1 409 ~ 1 597、1 823 ~ 1 877 和 1 887 ~ 1 971 nm。

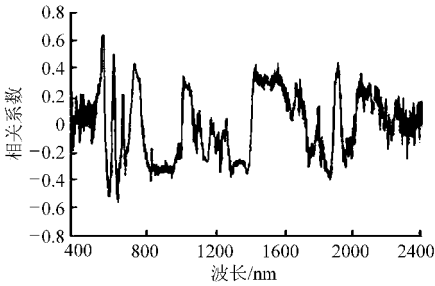


图3 波长-相关系数关系

Fig. 3 Relationship between wavelength and correlation coefficient

2.2.4 模型的建立与预测

MLR 和 SWR 算法在分析样品组分时,仅使用部分特征波长点的光谱信息,易造成其他波长点光谱信息的丢失,产生模型的过适应性。PLSR 算法的显著特点是利用了全部光谱信息,可以压缩所需样品数量,将高度相关的波长点归入一个独立变量中,根据为数不多的独立变量建立回归方程,通过内部检验来防止过拟合现象^[26~28]。PCR 算法通过降低光谱矩阵维数,消除共线性问题,而 ANN 可较好地处理非线性问题。本研究采用 PLSR、PCR、ANN 及其组合的方法建立模型并进行比较分析。

表2给出了经一阶微分与MAF相结合的预处理方法,不同算法在全波段和优选波段上的建模结果。综合比较校正模型和预测模型的相关系数、均方根误差等指标可知,选不同算法建模效果差别较大。由表2可知,PLSR模型的结果最佳,采用波段优选进一步提高了PLSR模型的预测精度。该模型的主成分分析如图4所示,可知主成分数为5时,预测残差平方和(PRESS)达到最小,模型结果最佳,其校正相关系数为0.990,校正均方根误差为0.011。

对建立的含水率检测模型,使用48个未知样品进行预测验证,预测值与实测值之间的关系如图5所示。经回归拟合知,二者之间的相关系数为0.819,预测均方根误差为0.037,预测含水率的平均相对误差为3.30%。

3 结束语

针对绿茶加工杀青叶料含水率难于快速无损检

表2 不同算法建模结果

Tab. 2 Model results with different algorithms

建模算法		校正模型		预测模型	
		R_C	RMSEC	R_p	RMSEP
全波段	PLSR	0.960	0.012	0.799	0.039
	PCR	0.811	0.042	0.659	0.045
	PCA + ANN	0.985	0.013	0.626	0.055
	PLS + ANN	0.985	0.013	0.701	0.035
优选波段	PLSR	0.990	0.011	0.819	0.037
	PCR	0.851	0.043	0.797	0.039
	PCA + ANN	0.985	0.012	0.812	0.043
	PLS + ANN	0.986	0.013	0.779	0.044

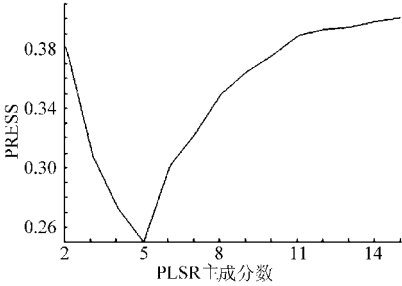


图4 不同主成分下的PRESS值

Fig. 4 PRESS values with different principal components

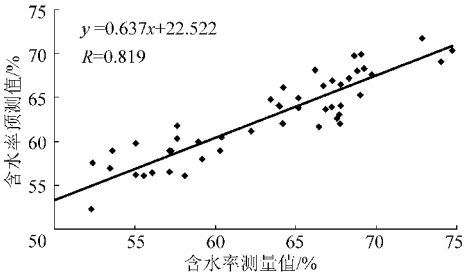


图5 PLSR模型预测值与测量值关系

Fig. 5 Relationship between predicted value of PLSR model and measured value

测的现状,提出了一种基于可见-近红外光谱分析的检测方法。在波段350~2500nm范围内,获取茶叶杀青叶料漫反射光谱信息,利用一阶微分与移动平滑滤波相结合的预处理方法,提取出5个主成分,建立了偏最小二乘回归模型,其预测相关系数为0.819,均方根误差为0.037,预测含水率的平均相对误差为3.30%。

参 考 文 献

1 龚雪蛟,杜晓. 炒青绿茶自动化生产线加工过程中品质成分变化[J]. 四川农业大学学报,2012,30(1):73~77.
Gong Xuejiao, Du Xiao. The variations of main biochemical components during the production process of roasted green tea by automatic production line[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(1): 73~77. (in Chinese)

2 金心怡,陈济斌,吉克温. 茶叶加工工程[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

3 Cecilia S, Luis R S. Application of NIR and MIR spectroscopy in quality control of potato chips[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2009, 22(6): 596~605.

4 孙红,李民赞,张彦娥,等. 不同施氮水平下玉米冠层光谱反射特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 715~719.

- Sun Hong, Li Minzan, Zhang Yan'e, et al. Spectral characteristics of corn under different nitrogen treatments[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 715 ~ 719. (in Chinese)
- 5 孙俊, 毛罕平, 羊一清, 等. 基于冠层光谱特性的水稻叶片含水率模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 133 ~ 136.
- Sun Jun, Mao Hanping, Yang Yiqing, et al. Model of moisture content of paddy rice leaf based on canopy spectral reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 133 ~ 136. (in Chinese)
- 6 胡永光, 李萍萍, 母建华, 等. 基于可见/近红外光谱技术预测茶鲜叶全氮含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(12): 2 821 ~ 2 825.
- Hu Yongguang, Li Pingping, Mu Jianhua, et al. Determination of total nitrogen content in fresh tea leaf using visible-near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(12): 2 821 ~ 2 825. (in Chinese)
- 7 张淑芳. 一种测定茶叶中茶多酚的光谱新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(7): 1 630 ~ 1 632.
- Zhang Shufang. Determination of polyphenols in tea by a new method spectrophotometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(7): 1 630 ~ 1 632. (in Chinese)
- 8 牛智有, 林新. 茶叶定性和定量近红外光谱分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2 417 ~ 2 420.
- Niu Zhiyou, Lin Xin. Qualitative and quantitative analysis method of tea by near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(9): 2 417 ~ 2 420. (in Chinese)
- 9 陈全胜, 赵杰文, 蔡建荣, 等. 基于近红外光谱和机器视觉的多信息融合技术评判茶叶品质[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 5 ~ 10.
- Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Cai Jianrong, et al. Inspection of tea quality by using multi-sensor information fusion based on NIR spectroscopy and machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 5 ~ 10. (in Chinese)
- 10 孙通, 徐惠荣, 应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 122 ~ 126.
- Sun Tong, Xu Huirong, Ying Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(1): 122 ~ 126. (in Chinese)
- 11 Chen Q S, Zhao J W, Lin H. Study on discrimination of roast green tea (*Camellia sinensis* L.) according to geographical origin by FT-NIR spectroscopy and supervised pattern recognition [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 72: 845 ~ 850.
- 12 林新, 牛智有. 基于近红外光谱茶叶种类的快速识别[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(2): 326 ~ 330.
- Lin Xin, Niu Zhiyou. Fast discrimination of tea species based on near infrared spectroscopy (NIRS) [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 326 ~ 330. (in Chinese)
- 13 顾小红, 冯宇, 汤坚. 偏最小二乘法在红外光谱识别茶叶中的应用[J]. 分析科学学报, 2008, 24(2): 131 ~ 135.
- Gu Xiaohong, Feng Yu, Tang Jian. Discrimination of tea varieties by mid-infrared spectroscopy combined with PLS[J]. Journal of Analytical Science, 2008, 24(2): 131 ~ 135. (in Chinese)
- 14 林新, 牛智有, 马爱丽. 不同近红外光谱仪在绿茶水分检测应用中的比较研究[J]. 现代科学仪器, 2008(3): 29 ~ 31.
- Lin Xin, Niu Zhiyou, Ma Aili. Comparative study on application of measuring moisture content of tea using two different types of near-infrared spectrometers[J]. Modern Scientific Instruments, 2008(3): 29 ~ 31. (in Chinese)
- 15 陈潇潇, 曹远生, 谢兴尧, 等. 基于光纤光谱仪测量茶叶表面颜色的研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 750 ~ 752.
- Chen Xiaoxiao, Cao Yuansheng, Xie Xingyao, et al. Tea color measurement with fiber spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 750 ~ 752. (in Chinese)
- 16 吕进, 赵鑫祥, 刘辉军, 等. 基于近红外光谱的茶叶成分检测仪的软件研制[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2 411 ~ 2 416.
- Lü Jin, Zhao Xinxang, Liu Huijun, et al. Software development of tea content analysis based on near infrared spectrometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2 411 ~ 2 416. (in Chinese)
- 17 刘青, 陈运德, 刘平波. WSHF-101 型红外水分仪的研制[J]. 分析仪器, 1994(1): 5 ~ 9.
- Liu Qing, Chen Yunde, Liu Pingbo. Development of infrared moisture meter (WSHF-101) [J]. Analytical Instrumentation, 1994(1): 5 ~ 9. (in Chinese)
- 18 李晓丽, 程术希, 何勇. 基于漫反射光谱的初制绿茶含水率无损检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 195 ~ 201.
- Li Xiaoli, Cheng Shuxi, He Yong. Nondestructive measurement of moisture content of green tea in primary processing based on diffuse reflectance spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 195 ~ 201. (in Chinese)
- 19 GB/T 8304—2002 茶 水分测定[S].
- 20 赵钊, 李霞, 尹业彪, 等. 荒漠植物含水量的光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2 500 ~ 2 503.
- Zhao Zhao, Li Xia, Yin Yebiao, et al. Analysis of spectral features based on water content of desert vegetation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2 500 ~ 2 503. (in Chinese)
- 21 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 22 Galvão R K, Araújo M C, José G E, et al. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67(4): 736 ~ 740.
- 23 Tan C, Li M L, Qin X. Random subspace regression ensemble for near-infrared spectroscopic calibration of tobacco samples [J]. Analytical Sciences, 2008, 24(5): 647 ~ 653.
- 24 高荣强, 范世福, 严衍禄, 等. 近红外光谱的数据预处理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(12): 1 563 ~ 1 565.

Gao Rongqiang, Fan Shifu, Yan Yanlu, et al. Preprocessing of near infrared spectroscopic data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(12): 1 563 ~ 1 565. (in Chinese)

25 徐宁, 魏萱, 任冰, 等. 发酵冬虫夏草菌粉水分腺苷的近红外光谱定量分析及波段选择[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1 762 ~ 1 765.

Xu Ning, Wei Xuan, Ren Bing, et al. Near-infrared spectroscopy analysis of adenosine and water in fermentation cordyceps powder and wavelength assignment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1 762 ~ 1 765. (in Chinese)

26 王凤花, 朱海龙, 戈振扬. 近红外光谱数据建模方法的研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(1): 56 ~ 61.

Wang Fenghua, Zhu Hailong, Ge Zhenyang. Progress of near-infrared spectral data modeling method [J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(1): 56 ~ 61. (in Chinese)

27 邢志娜, 王菊香, 申刚, 等. 近红外光谱分析模型传递简易方法研究[J]. 分析科学学报, 2011, 27(1): 128 ~ 130.

Xing Zhina, Wang Juxiang, Shen Gang, et al. A simple and practical model transfer method for the homotype near infrared spectrometers[J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(1): 128 ~ 130. (in Chinese)

28 刘君动, 叶正良, 李德坤, 等. 近红外漫反射光谱法快速测定注射用丹参多酚酸中的水分[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(4): 91 ~ 94.

Liu Jundong, Ye Zhengliang, Li Dekun, et al. Rapid determination of moisture content in danshen polyphenols acid injection with near-infrared diffused reflection spectroscopy[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2012, 18(4): 91 ~ 94. (in Chinese)

29 胡永翔, 李援农, 张莹, 等. 基于水分胁迫系数的枣树园土壤含水率估算[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 270 ~ 276.

Hu Yongxiang, Li Yuannong, Zhang Ying, et al. Estimation of soil moisture content of jujube orchard in loess plateau based on water stress coefficient from FAO-56[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 270 ~ 276. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 125 页)

49 倪亮, 孙广辉, 罗光恩, 等. 沼液灌溉对土壤质量的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4): 608 ~ 611.

Ni Liang, Sun Guanghui, Luo Guang'en, et al. Effect of marsh gas sewage irrigation on soil quality[J]. Soils, 2008, 40(4): 608 ~ 611. (in Chinese)

50 吴飞龙, 叶美锋, 林代炎, 等. 沼液施用量对象草 N、P 吸收利用效率和土壤 N、P 养分含量的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 26(1): 103 ~ 107.

Wu Feilong, Ye Meifeng, Lin Daiyan, et al. Effects of biogas sludge on N/P utilization of pennisetum purpureum and soil N/P content[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(1): 103 ~ 107. (in Chinese)

51 甘福丁, 魏世清, 覃文能, 等. 施用沼液对玉豆品质及土壤肥效的影响[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 59 ~ 60.

Gan Fuding, Wei Shiqing, Qin Wenneng, et al. Effect of biogas slurry on tabe bean quality and soil fertility[J]. China Biogas, 2011, 29(1): 59 ~ 60. (in Chinese)

52 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(3): 310 ~ 315.

Duan Ran, Wang Gang, Yang Shiqi, et al. Reliminary research of potential pollution on farmland soil after using biogas[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(3): 310 ~ 315. (in Chinese)

53 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 有机肥对土壤 NO<sub>3</sub>-N 累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 197 ~ 200.

Yuan Xinmin, Tong Yanan, Yang Xueyun, et al. Effect of organic manure on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(3): 197 ~ 200. (in Chinese)

54 Matsunaka T, Sawamoto T, Ishimura H, et al. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland[J]. International Congress Series, 2006, 1293: 242 ~ 252.

55 Yadav S N. Formulation and estimation of nitrate nitrogen leaching from corn cultivation[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(3): 808 ~ 814.

56 Chang C, Entz T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in southern[J]. Alberta. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(1): 145 ~ 153.

57 Kandeler E, Eder G, Sobotik M. Microbial biomass, N mineralization, and the activities of various enzymes in relation to nitrate leaching and root distribution in a slurry-amended grassland[J]. Biology and Fertility of Soil, 1994, 18(1): 7 ~ 12.

58 李彦超, 廖新倮, 吴银宝. 施用沼液对杂交狼尾草产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1 527 ~ 1 531.

Li Yanchao, Liao Xindi, Wu Yinbao. Effects of slurry application on biomass of crossbred pennisetum and soil nutrient[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(4): 1 527 ~ 1 531. (in Chinese)

59 姜丽娜, 王强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1 328 ~ 1 336.

Jiang Li'na, Wang Qiang, Chen Dingjiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. Journal of Agro-environment Science, 2011, 30(7): 1 328 ~ 1 336. (in Chinese)