

基于近红外光谱技术的叶面药液浓度检测^{*}

邱白晶 殷磊

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 提出了一种应用近红外光谱技术快速检测叶面药液浓度的方法。采用漫反射测量方式获取了叶面药液的近红外光谱。选用标准偏差归一化、三点滑动平均滤波和一阶导数为最优组合预处理。通过7种波段方案的对比,得出最优波段为350~1900 nm。采用偏最小二乘法建立了叶面药液质量浓度与光谱反射率的定量分析模型。其预测集相关系数为0.994,预测均方根误差为0.039。结果表明,利用近红外光谱技术检测叶面药液浓度具有实际指导意义。

关键词: 叶面喷雾 药液浓度 漫反射 偏最小二乘法 近红外光谱

中图分类号: O657.33; S481⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0197-05

Measurement of Pesticide Concentration on the Leaf Based on Vis/NIR Spectroscopy

Qiu Baijing Yin Lei

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

Abstract

A method based on Vis/NIR spectral analysis technology was applied to the rapid measurement of pesticide concentration on the leaf. Near infrared spectral data of pesticide concentration on the leaf was acquired by adopting diffuse reflectance spectroscopy. Normalization of standard deviation, moving average smoothing with the segment size 3 and the first derivative combination was the optimal combination pretreatment method. From the seven schemes in contrast, the optimal bands for 350 ~ 1900 nm were obtained. Partial least squares method was used to develop the quantitative analysis model for pesticide concentration with diffuse reflectance spectroscopy. The correlation coefficient between the prediction values and the truth values in the prediction set was 0.994, the root mean square error of cross-validation of the prediction set was 0.039. The result indicated that it is feasible to measure pesticide concentration on the leaf based on the near infrared (NIR) spectroscopy, and the accurate actual pesticide concentration on the leaf can be obtained after spraying pesticides.

Key words Leaf surface spray, Pesticide concentration, Diffuse reflectance, Partial least squares, Near infrared spectra

引言

农作物上喷雾效果的研究目前主要限于雾滴的

覆盖率、沉积密度、均匀性等方面^[1-2]。Derksen^[3]等利用计算机视觉系统表征雾滴的沉积特性,并用水溶性荧光物跟踪雾滴在人工目标物上的沉积,

收稿日期: 2011-10-21 修回日期: 2012-01-04

^{*} 江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA470007)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093227110008)、江苏省农机三项工程项目(NJ2010-15、NJ2010-12)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教[2011]8号)和江苏省农业装备与智能化高技术重点实验室资助项目(BM2009703)

作者简介: 邱白晶,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程与红外光谱技术应用研究,E-mail: qbj@ujs.edu.cn

获得雾滴的形状、雾滴大小分布等特征参数。Ramalingam^[4]等利用多光谱图像技术研究了大容量喷雾在叶面上的覆盖率,指出叶面水层厚度大于0.006 cm时,多光谱图像技术对大容量喷雾覆盖率的评估具有高灵敏度。上述研究均还未涉及到植株叶面药液浓度的表征。所谓叶面药液浓度是指喷雾过程中沉积在作物叶面的药液实际浓度。当前在线混药技术正在发展^[5-8],利用在线混药技术可以实现变量施药,尤其是可以实现可变药液浓度的施药。传统变量喷雾的理念是改变喷雾流量,而不改变浓度。这种改变流量的变量施药方式会受到作物上最大药液残留量的限制。因此变浓度施药是一种值得关注的新型施药技术。利用在线混药器实施混药浓度在线可控的过程,本质上相当于控制工程中的调节控制,通过测量叶面药液浓度并与设定浓度对比,便可以达到评价混药器工作性能的目标。

发展叶面药液浓度的快速检测方法可以针对在线混药喷雾的药液浓度波动和不稳定提供定量的描述,可直接用于混药喷雾产品性能的评定和指导产品改进,并推动在线混药喷雾产品检测标准的制定,弥补当前混药系统检测标准缺少定量指标之不足。近红外光谱分析技术已在多个领域得到广泛的应用^[9-13]。因此理论上近红外光谱也可以检测叶面药液浓度。本文旨在寻找叶面药液浓度与光谱反射率之间的关系,探索近红外光谱分析技术检测叶面药液浓度的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验仪器

采集叶面药液光谱数据的光谱仪选用美国ASD(analytical spectral device)公司的FieldSpec 3便携式光谱分析仪。该光谱仪采样间隔在350~1 000 nm范围内为1.4 nm,在1 000~2 500 nm范围内为2 nm。光源使用与光谱仪配套的卤素灯。实际试验中采样频率选10 Hz。

1.2 试验样品

1.2.1 药液类型

在农药喷雾效果评价中,采用模拟农药替代农药是常用的方法^[14-15]。试验选用刚果红作为模拟农药,其化学式为 $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$,分子结构如图1所示。从图上可知刚果红分子中含有C—H、N—H基团,选用刚果红作为模拟农药主要基于近红外光谱对C—H、N—H、O—H和C—O等基团有敏感性^[16-18],因而该物质在近红外区信息敏感。

1.2.2 药液质量浓度

质量浓度范围为0.10~1.00 g/L,间隔为

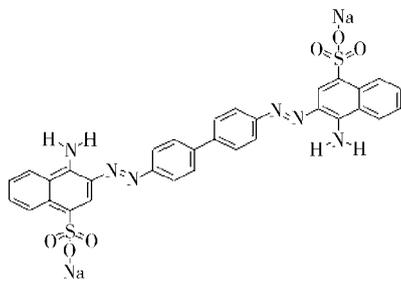


图1 刚果红的分子结构

Fig. 1 Congo red molecular structure

0.02 g/L,共设置46种质量浓度,每种质量浓度配制3次。

1.3 叶面药液浓度的形成方法

1.3.1 叶片类型

考虑到不同叶片差异对光谱特性的影响,试验选用单个叶片。具体叶片类型为八角金盘植株的上层叶片,植株来自江苏大学实验田。

1.3.2 叶面药液浓度形成

采用喷雾方式形成叶面药液浓度,具体质量浓度见1.2.2节。由于喷雾在单个叶片上进行,因此在相邻两次喷雾之间,需要对叶面用清水冲洗,并用吸水纸将叶面吸干,自然风吹2 min,再进行下一个浓度药液的喷雾。每次喷雾形成叶面药液后,按1.4节方法获得叶面药液质量浓度样本反射率数据。对于1.2.2节所述46种药液质量浓度,共可获得反射率样本46个。其中36个样本入选校正集,10个样本入选预测集。为保证所建模型的预测精度,规定最低质量浓度和最高质量浓度样本均入选校正集。获取46个光谱反射率样本的时间约为4 h。为排除温度和湿度的影响,试验在室内进行,并控制室温为26.5℃,相对湿度为80%。

1.4 叶面药液光谱反射率的采集

1.4.1 光谱采集的参数设定

光谱仪探头视场角选用8℃视场角,探头与样本表面距离为3~4 cm,以确保视场域范围在叶片上。样本重复测量5次,每条谱线扫描次数取10次。单个样本测量5次光谱取平均值,作为单个样本的原始光谱。

1.4.2 白板校正

由于采集样本光谱的总时间较长,因此在46个样本的采集前和采集后分别进行白板校正。此外在46个样本采集过程中,每采集完6个样本光谱数据后校正一次白板。

1.4.3 光谱数据的处理软件

光谱数据通过江苏大学研发的NIRSA软件系统分析,该系统专门用于近红外光谱数据分析和建模。

2 结果和分析

2.1 叶面药液浓度样本的近红外光谱特性比较

2.1.1 叶面药液光谱特性

图2是46个叶面药液样本的原始光谱图,为叶面药液样本的原始光谱特征曲线。在可见光波段反射率较低,大约在558 nm处有一反射峰;在可见光波段与近红外的过渡处(700~750 nm),反射率急剧增加,形成红边,是绿色植物独有的特性^[19-20]。原始光谱图存在着基线漂移。图2中可得如下直观结论:波峰之间的差异较大;水分具有很强的特征吸收,光谱曲线在1450 nm和1940 nm处表现为吸收谷。为了消除基线漂移对光谱特性的影响,需要选择一种合适的预处理方法。光谱曲线大致分为3个波段区间,即可见光波段(350~700 nm)、近红外波段(700~1900 nm)、水分的强吸收波段(1900~2500 nm)。

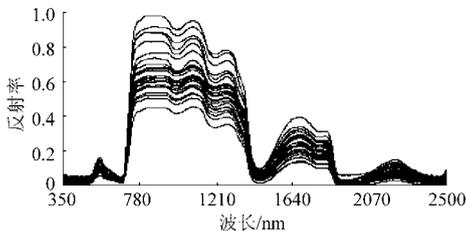


图2 叶面药液样本的原始光谱

Fig.2 Original spectra of pesticide on the leaf samples

2.1.2 建模波段选取方案

根据2.1.1节所述波段区间,波段选取方案:①首先在350~700 nm波段建模,然后建模波段范围逐步扩大(350~1900、350~1950、350~2000、350~2500 nm),主要为说明波段范围的扩大是否会增大光谱信息贡献值。②在700~1900 nm波段建模,主要反映在光谱分辨率高的波段建模效果。③在1900~2500 nm波段建模,旨在揭示水分对光谱的影响。

2.1.3 建模波段效果的比较

对各波段内光谱数据进行PLS建模,在建模之前需对光谱数据进行标准偏差归一化、三点滑动平均滤波和一阶导数组合预处理。以预测集相关系数 R_p 越大越好和预测均方根误差(RMSEP)越小越好作为波段优选标准,并列出相应波段的主成分数(PCC)。各波段区间建模预测效果如表1所示。

从表1可知,在350~1900 nm波段,预测集相关系数较大,预测均方根误差最小,表明在此波段内药液浓度对光谱信息的贡献最大、光谱预测效果最好。随着建模波段的扩大,即在350~1950 nm、350~2000 nm、350~2500 nm波段,预测集相关系

表1 不同波段下模型的预测效果

Tab.1 Prediction effect of the model in the different wave bands

波段/nm	PCC	R_p	RMSEP
350~700	12	0.973	0.059
350~1900	6	0.994	0.039
350~1950	5	0.992	0.040
350~2000	7	0.992	0.042
350~2500	5	0.984	0.047
700~1900	5	0.995	0.054
1900~2500	5	0.792	0.153

数逐渐变小,预测均方根误差逐渐变大,同时光谱的预测效果变差。

在350~700 nm波段,预测均方根误差较大,主成分数大,光谱数据处理的运算量大,此波段不宜作为最优建模波段。在700~1900 nm波段,预测集相关系数较大,但预测均方根误差不是最小。在1900~2500 nm波段,预测均方根误差较大,说明水分的强吸收和其他非目标因素对光谱特性有影响。

根据建模波段的效果比较,故350~1900 nm为建模的最优波段。本文以下所建模型都是在350~1900 nm波段进行的。

2.2 光谱数据的预处理方法比较

2.2.1 预处理方案

2.1.1节所述原始光谱图存在基线漂移。为了消除基线漂移需要选取合适的预处理方法。仅用一种光谱预处理方法往往不能得到较好的结果^[21-22],这时可将不同的预处理方法结合使用,以获得较好的预测结果。采用一阶导数^[23](1D)、二阶导数(2D)、三点滑动平均滤波(MAF)和标准偏差归一化(SNV)不同组合方式获得较好的预处理效果。

2.2.2 不同预处理组合比较

在350~1900 nm波段下采用PLS回归分析,不同预处理组合建模结果如表2所示。

表2 不同预处理方法的结果

Tab.2 Results of different preprocessing methods

预处理方法	主成分数	R_p	RMSEP
1D	5	0.967	0.064
2D	3	0.934	0.104
MAF+1D	5	0.979	0.047
SNV+1D	4	0.978	0.077
MAF+2D	4	0.972	0.062
SNV+MAF+1D	6	0.994	0.039

从表2中可知,6种不同的光谱预处理方法均

提高了 NIR 光谱的建模效果。以 R_p 和 RMSEP 作为评价最优组合的标准,当 R_p 较大和 RMSEP 较小时,组合方法选为最优组合预处理方法。其中 SNV + MAF + 1D 组合效果好于其他预处理方式,且建模能力最好。原始谱图经过该组合预处理后的光谱曲线如图 3 所示。预处理后的光谱图表现出高的分辨率,也凸显了更多的特征波峰。

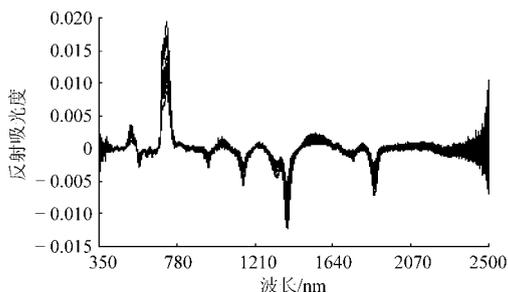


图 3 经过 SNV + MAF + 1D 预处理的样本光谱图

Fig. 3 Spectra through combination preprocessing methods

通过以上 6 种预处理方法比较,选用 SNV + MAF + 1D 为最优组合预处理方法。

2.3 预测模型的精度检验

根据 2.1.3 节所述的 350 ~ 1 900 nm 为最优波段,以 SNV + MAF + 1D 为预处理方法,采用偏最小二乘法(PLS)建立校正模型。校正集 36 个样本的实际叶面药液质量浓度与所建回归模型预测质量浓度相关性如图 4 所示。 $R^2 = 0.999 5$ 表示实际值与预测值之间拟合度大,校正集所建模型较稳健。另外校正均方根误差(RMSEC)为 0.006。

为了检验所建立模型的预测精度,用模型对预测集叶面药液质量浓度进行预测。其预测平均绝对误差为 0.035,预测平均相对误差为 8.27%。预测集 10 个叶面药液实际质量浓度与所建回归模型预测质量浓度相关性如图 5,从图 5 中可以看出,预测质量浓度与叶面药液实际质量浓度基本一致,预测集中样本的预测值与实际值之间的相关系数为 0.994,预测均方根误差为 0.039。模型的预测精度表明该模型可以满足实际测量的应用要求。

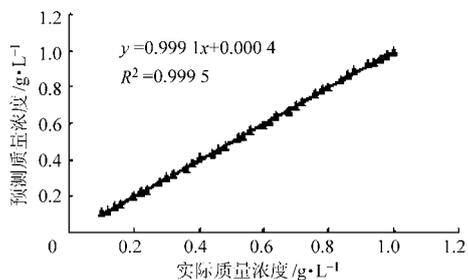


图 4 校正集样本实际质量浓度与预测质量浓度相关图

Fig. 4 Correlation between the measured concentration and predicted concentration values of thirty six samples

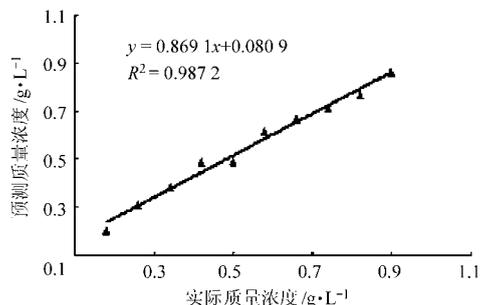


图 5 预测集样本实际质量浓度与预测质量浓度相关图

Fig. 5 Correlation between the measured concentration and predicted concentration values of ten samples

3 结论

(1)通过 7 种波段方案的对比,以预测集相关系数、预测均方根误差、主成分数为指标,得出最优波段为 350 ~ 1 900 nm。

(2)选取最优波段 350 ~ 1 900 nm,比较 6 种不同组合预处理方法,得出 SNV + MAF + 1D 为最优组合预处理方法。

(3)选取最优波段 350 ~ 1 900 nm,以 SNV + MAF + 1D 为预处理方法,采用偏最小二乘法建立校正模型。所建模型预测叶面药液质量浓度平均相对误差为 8.27%,预测集相关系数为 0.994,预测均方根误差为 0.039。模型的预测精度表明该模型可以满足实际测量的应用要求。

参 考 文 献

- 1 汤伯敏,梁建,杨德水,等. 塑料温室内的雾滴沉积分布研究[J]. 农业机械学报,2004,35(3):72~75.
Tang Bomin, Liang Jian, Yang Deshui, et al. Distribution of droplets deposition in plastic greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 72~75. (in Chinese)
- 2 邱白晶,沙俊炎,汤伯敏,等. 密闭空间雾滴沉积状态参数的显微图像解析[J]. 农业机械学报,2008,39(2):54~58.
Qiu Baijing, Sha Junyan, Tang Bomin, et al. Analysis of droplets deposition parameters based on micrograph in airtight space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 54~58. (in Chinese)
- 3 Derksen R C, Jiang C. Automated detection of fluorescent spray deposits with a computer vision system [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(6): 1 647~1 653.
- 4 Ramalingam N, Ling P P, Derksen R C, et al. Background reflectance compensation and its effect on multispectral leaf surface moisture assessment [J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(1): 375~383.

- 5 刘志壮,徐汉虹,洪添胜,等.在线混药式变量喷雾系统设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(12):93~96.
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):93~96. (in Chinese)
- 6 邱白晶,徐溪超,邓斌,等.射流混药装置面积比对混药均匀性的影响[J].农业机械学报,2011,42(10):95~100.
Qiu Baijing, Xu Xichao, Deng Bin, et al. Effect of area ratio on mixing homogeneity in jet-mixing apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):95~100. (in Chinese)
- 7 邱白晶,徐溪超,杨宁,等.射流混药装置结构参数对混药性能影响的模拟分析[J].农业机械学报,2011,42(6):76~79.
Qiu Baijing, Xu Xichao, Yang Ning, et al. Simulation analysis of structure parameters of jet-mixing apparatus on jet-mixing performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):76~79. (in Chinese)
- 8 邱白晶,徐溪超.射流混药装置二维和三维流场对比分析[J].排灌机械工程学报,2011,29(5):441~445.
Qiu Baijing, Xu Xichao. Contrast and analysis between 2D and 3D flow field of jet-mixing apparatus [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(5):441~445. (in Chinese)
- 9 邱白晶,陈国平,程麒文,等.水稻白背飞虱虫害的冠层光谱特性与虫害反演[J].农业机械学报,2008,39(9):92~99.
Qiu Baijing, Chen Guoping, Cheng Qiwen, et al. Canopy spectral reflectance feature of rice infected with *sogatella furcifera* and insect number inversion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):92~99. (in Chinese)
- 10 陈斌,王豪,林松,等.基于相关系数法与遗传算法的啤酒酒精度近红外光谱分析[J].农业工程学报,2005,21(7):99~102.
Chen Bin, Wang Hao, Lin Song, et al. Analysis of near infrared spectroscopy of beer alcohol content by correlation coefficients and genetic algorithms [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7):99~102. (in Chinese)
- 11 张洪艳,丁东,宋立强,等.血糖无创监测中近红外漫反射光谱技术的研究[J].光谱学与光谱分析,2005,25(6):882~885.
Zhang Hongyan, Ding Dong, Song Liqiang, et al. Achievement of the noninvasive measurement for human blood glucose with NIR diffusion reflectance spectrum method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(6):882~885. (in Chinese)
- 12 石雪,蔡文生,邵学广,等.局部建模方法用于烟草样品的近红外光谱定量分析[J].光谱学与光谱分析,2008,28(11):2561~2564.
Shi Xue, Cai Wensheng, Shao Xueguang, et al. A local regression method for near infrared spectral quantitative analysis of tobacco samples [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(11):2561~2564. (in Chinese)
- 13 笕逢宇,霍守亮,席北斗,等.近红外光谱技术快速测定湖泊沉积物营养组分研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(10):2624~2627.
Zan Fengyu, Huo Shouliang, Xi Beidou, et al. Rapid determination of nutrient components in lake sediments using near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(10):2624~2627. (in Chinese)
- 14 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,等.喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J].农业机械学报,2011,42(1):59~63.
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Song Jianli, et al. Influence of spray operating parameters on spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):59~63. (in Chinese)
- 15 何雄奎,曾爱军,何娟,等.果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究[J].农业工程学报,2002,18(4):75~77.
He Xiongkui, Zeng Aijun, He Juan, et al. Effect of wind velocity from orchard sprayer on droplet deposit and distribution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4):75~77. (in Chinese)
- 16 秦冲,陈雯雯,何雄奎,等.近红外光谱分析中建模校正集的选择[J].光谱学与光谱分析,2009,29(10):2661~2664.
Qin Chong, Chen Wenwen, He Xiongkui, et al. Study on a method of selecting calibration samples in NIR spectral analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(10):2661~2664. (in Chinese)
- 17 闻明,吉海彦.基于LED的便携式近红外整粒小麦成分测量仪的研制[J].光谱学与光谱分析,2004,24(10):1276~1279.
Wen Ming, Ji Haiyan. Development of portable LED-based NIR integrity wheat component measuring apparatus [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(10):1276~1279. (in Chinese)
- 18 Aditya U Vanarase, Manel Alcalá, Jackeline I Jerez Rozo, et al. Real-time monitoring of drug concentration in a continuous powder mixing process using NIR spectroscopy [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(21):5728~5733.
- 19 陈树人,栗移新,毛罕平,等.水稻中稗草光谱分析与识别[J].农业机械学报,2008,39(9):96~99.
Chen Shuren, Li Yixin, Mao Hanping, et al. Distinguishing barnyard-grass from rice using spectrum analysis technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):96~99. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 Bar-Cohen Y. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles-reality, potential and challenges[M]. Bellingham, Washington: SPIE, 2001.
- 2 Carpi F, Rossi D De, Kornbluh R, et al. Dielectric elastomers as electromechanical transducers[M]. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- 3 Zhang Rui, Kunz Andreas, Lochmatter Patrick, et al. Dielectric elastomer spring roll actuators for a portable force feedback device[C]//Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006: 347 ~ 353.
- 4 Nguyen Huu Chuc, Jong Kil Park, Nguyen Huu Lam Vuong, et al. Multi-jointed robot finger driven by artificial muscle actuator[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 587 ~ 592.
- 5 Carpi F, Rossi De D De. Dielectric elastomer cylindrical actuators; electromechanical modeling and experimental evaluation [J]. Materials Science and Engineering: C, 2004,24(4): 555 ~ 562.
- 6 Gabor Kovacs, Lochmatter Patrick, Wissler Michael. An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(2): 306 ~ 317.
- 7 Ogden R W. Large deformation isotropic elasticity-on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids[J]. Proc. Roy. Soc. Lond. A, 1972, 326(1567): 565 ~ 584.
- 8 Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon-black filled rubber vulcanizates[J]. Rubber Chem. Technol., 1990, 63(5): 792 ~ 805.
- 9 Luo Huan, Wang Huaming, Zhu Jianying, et al. Characterization of hyperelastic dielectric elastomer based on biaxial tensile bench [C] // 2009 International Conference on Manufacturing Science and Engineering, Manufacturing Science and Engineering I. Germany, Trans. Tech. Publications, 2010: 884 ~ 888.
- 10 吴孟,王化明,朱银龙,等. 圆柱形介电弹性体驱动器的试验与分析[J]. 机器人,2010,32(6):754 ~ 758.
Wu Meng, Wang Huaming, Zhu Yinlong, et al. Experiments and analysis of cylindrical dielectric elastomer actuators[J]. Robot, 2010,32(6):754 ~ 758. (in Chinese)

(上接第 201 页)

- 20 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)
- 21 李庆波,黄彦文,张广军,等. 基于可见-近红外光谱的植物叶绿素含量无损检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009,29(12):3 275 ~ 3 278.
Li Qingbo, Huang Yanwen, Zhang Guangjun, et al. Chlorophyll content nondestructive measurement method based on vis/NIR spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(12):3 275 ~ 3 278. (in Chinese)
- 22 Li Xiaoli, He Yong, Wu Changqing, et al. Nondestructive measurement and fingerprint analysis of soluble solid content of tea soft drink based on vis/NIR spectroscopy [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3):316 ~ 323.
- 23 郑咏梅,张铁强,张军,等. 平滑、导数、基线校正对近红外光谱 PLS 定量分析的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004,24(12):1 546 ~ 1 548.
Zheng Yongmei, Zhang Tieqiang, Zhang Jun, et al. Influence of smooth, 1st derivative and baseline correction on the near infrared spectrum analysis with PLS [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(12):1 546 ~ 1 548. (in Chinese)
- 24 陈志刚,张启甲,邱白晶,等. 基于酶传感器的农药浓度便携式实时测量装置[J]. 农业机械学报,2011,42(11): 178 ~ 182.
Chen Zhigang, Zhang Qijia, Qiu Baijing, et al. Portable and real-time device for measuring concentration of pesticides used with enzyme sensing electrode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):178 ~ 182. (in Chinese)