

基于 LED 组合光源的水晶梨可溶性固形物和大小在线检测

刘燕德, 彭彦颖, 高荣杰, 孙旭东, 郝勇

(华东交通大学机电学院光机电技术及应用研究所, 南昌 330013)

摘要: 该文探讨了近红外光谱技术结合发光二极管(LED)组合光源探头在线检测水晶梨的可溶性固形物和大小的可行性。试验中采用 850、880 和 940 nm 3 盏 LED 组成组合光源探头, 每个水晶梨在均匀成单列的输送线上以每秒 5 个梨的速度运动, 采用漫反射方式采集水晶梨的漫反射光谱。应用偏最小二乘(PLS)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)方法建立了可溶性固形物和大小 2 个理化参数的校正模型, 同时对不同光谱预处理方法(平滑、一阶微分、二阶微分)建立的模型的预测性能进行了对比分析, 并通过外部验证来检验模型预测的准确性。利用平滑处理光谱建立偏最小二乘(PLS)模型的预测效果最优, 可溶性固形物和大小的相关系数分别为 0.86 和 0.90, 预测均方根误差分别为 0.58% 和 1.93 mm。试验研究表明: 应用近红外光谱技术结合 LED 组合光源探头在线检测水晶梨可溶性固形物和大小具有可行性。**关键词:** 近红外光谱, 大小分布, 农产品, 在线检测, 可溶性固形物

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.057

中图分类号: O435.5, S661.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0338-06

刘燕德, 彭彦颖, 高荣杰, 等. 基于 LED 组合光源的水晶梨可溶性固形物和大小在线检测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 338—343.

Liu Yande, Peng Yanying, Gao Rongjie, et al. Online detection of soluble solids content and size of crystal pear based on LEDs light source-detector[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 338—343. (in Chinese with English abstract)

0 引言

水晶梨由于其果肉细, 汁多、味甜, 且具有很高的营养价值一直深受消费者的喜爱, 可溶性固形物是梨的主要内部品质指标之一, 而大小也是决定梨外部品质的主要因素之一。在以梨为产业支柱地区分级工作目前基本仍靠人工完成, 劳动量大、生产率低, 迫切需要一种快速无损的在线检测与分选技术。

近红外光谱技术因其快速无损、可同时测量多组分等优点, 已广泛用于水果营养内部品质的无损检测和水果品质自动化在线分级中如苹果^[1-2]、柑桔^[3]、脐橙^[4-5]等。微型光谱仪因其廉价、耐用、对振动不敏感等优点, 已被用于水果营养成分的快速测量^[6-8]。目前国内外已有专家开始利用近红外光谱技术对梨的品质做了相应研究报道, 刘燕德等利用可见/近红外漫反射光谱检测梨的表面色泽^[9]。韩东海等利用近红外光谱结合遗传算法对砂梨的糖度进行了检测研究^[10]。纪淑娟等测量了南国梨的可溶性固形物^[11]。应义斌等利用近红外漫反射对香梨类别进行了定性研究^[12]。孙通等在线测量梨可溶性固形物含量, 模型的相关系数为 0.95^[13]。Paz 等利用 3 种不同的光谱扫描仪对梨的内部品质进行了检测^[14]。Nicolai 等对梨的可溶性固形物含量和坚实度进行了检测研究^[15]。上

述对于梨的可溶性固形物检测研究报道, 仍以静态检测为主, 在线检测的研究报道相对较少。本研究中应用近红外光谱技术结合发光二极管(light emitting diode, LED)组合光源探头在线检测水晶梨的可溶性固形物含量和大小, 并对不同建模算法进行对比分析, 为实现梨品质近红外光谱在线检测装置研制提供一定的参考, 同时为实现水果样品在线分级成可能提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验所采用的水晶梨(新高品种芽变)样品分 3 次从水果批发市场购买来, 将购买的梨表皮清理干净, 依次编号, 并置于 20℃, 60% 相对湿度的实验室内环境下 24 h, 待测样品温度达到室温(20℃)后, 采集在线光谱, 光谱采集时尽量避免擦伤或伤疤等缺陷部位。共 200 个试验样品分为校正集和预测集, 其中 136 个样品作为校正样品集, 剩余 64 个未参与建模的样品作为预测样品集, 用于评价模型的预测能力和稳定性。

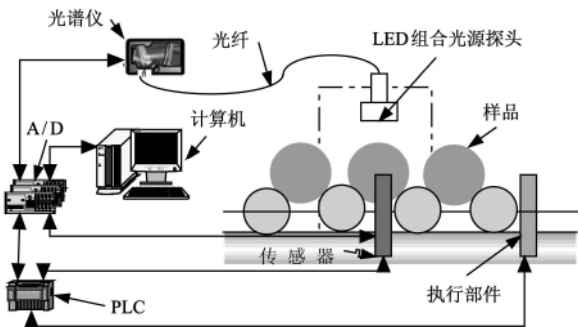
1.2 试验装置及光谱采集

试验中近红外在线检测装置(如图 1a 所示)主要包括: 光纤光谱仪 USB 4000(美国海洋光学公司)、LED 组合光源探头、光纤、可编程控制器(programmable logic controller, PLC)、可移动样品输送线。经前期研究工作得出^[16], 其输送线传送速度约每秒 5 个梨, 由变频器和异步电动机控制。LED 组合光源探头(如图 1b 所示)由 4 个波长分别为 620、850、880 和 940 nm 的 LED 光源组成^[17], 每个 LED 3 W, 信号收集通道位于探头中心, 且 LED 组合光源探头是由光电接近开关控制触发电源的开/闭, 来触发光谱仪采集样品的漫反射光谱, 波长采集

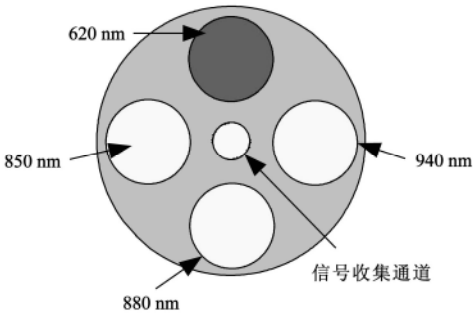
收稿日期: 2010-05-18 修订日期: 2010-11-04

基金项目: 国家科技支撑计划(2008BAD96B04); 江西省自然科学基金(2008GQN0029, 2007GZN0266); 江西省学主要学科学术和技术带头人培养对象计划(2009DD00700); 江西省对外科技合作计划(2009BHB15200)
作者简介: 刘燕德(1967—), 女, 江西泰和人, 教授, 主要从事农产品智能无损检测技术研究。南昌 华东交通大学机电学院光机电技术及应用研究所, 330013。Email: jxliuyd@163.com.

范围为：840~950 nm。LED 组合光源的半峰全宽（full width at half maxima, FWHM）如图 2 所示，经试验测量 620、850、880 和 940 nm 4 盏 LED 对应的半峰全宽（FWHM）分别为 15.07、38.43、44.99 和 64.83 nm，其中波长为 620 nm 的 LED 照射样品后的漫反射光强超出了光谱仪的接收范围，因而后期建模及模型预测中未应用该段光谱。在测量水果光谱前先采集参比和暗电流光谱，以聚四氟乙烯材质的白板（6.5 mm 厚度）为标准参比；样品在均匀成单列的输送线上随机放置，每个样品在相同光源下重复采集 3 次光谱，再取 3 次的平均光谱作为每个样品的最终光谱，样品、参比和暗电流的积分时间均为 20 ms，且光谱仪参数设置、数据采集和存储均利用 Spectrasuite（美国海洋光学公司）软件。本试验获取的光谱以每个波长下的吸光度值表示。



a. 近红外在线检测装置总体布置



b. LED 组合光源探头

图 1 近红外在线检测装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of near infrared on-line detector

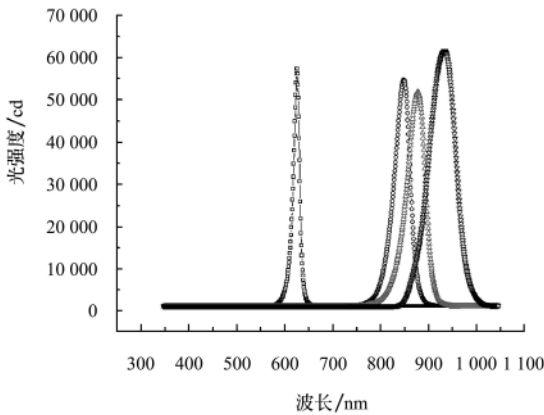


图 2 LED 组合光源半峰全宽

Fig.2 Full width at half maxima of the LEDs light source

1.3 理化参数测量

1.3.1 大小测量

水晶梨大小的真实值测定使用游标卡尺。样品购买后运输放置于实验室，待样品温度达到室温 20℃，60% 相对湿度后，再使用游标卡尺测定每个水晶梨的大小，在每个样品横径最大处测量 3 次并取平均值为样品大小的真实值。

1.3.2 可溶性固形物测量

水晶梨的可溶性固形物含量测定使用折射式数字糖度计 LB32T（广州名睿电子科技有限公司）。每个样品待光谱采集完后，将样品切成块放入榨汁机（ML218 型）榨汁过滤，取一滴果汁滴于折射式数字糖度计 LB32T 的测试窗口上，重复取样测量 3 次取平均值作为样品可溶性固形物含量的真实测量值。

1.4 数据处理及模型评价

采用 Excel2003 和化学计量学软件 unscrambler8.0(挪威 CAMO 公司)，最小二乘支持向量机（least squares support vector machine, LS-SVM）工具箱^[18]进行数据处理。模型采用外部验证对其性能进行评价，由相关系数（*R*）、建模均方根误差（*RMSEC*）和预测均方根误差（*RMSEP*）进行评价。模型的相关系数越高，建模均方根误差和预测均方根误差越小，且建模和预测均方根误差越接近，模型的预测能力和稳定性越强。

2 结果与分析

2.1 理化参数分析

表 1 为水晶梨的可溶性固形物和大小的测量分析结果。通过表 1 可见，样品的可溶性固形物含量范围在 7.50%~12.87% 之间，大小范围在 66~88 mm 之间。且 2 种所测的理化参数下预测集样本范围都处在校正集样本之内，从而校正集建立的模型预测范围能较好用来预测预测集的理化参数值范围，且 2 种理化参数下样品校正集的平均值基本接近整个校正集范围的中间值。可见利用样品校正集所建立的模型效果较好，能较好的适用于预测集。

表 1 校正集和预测集样品可溶性固形物及大小真实值分布
Table 1 True value distribution of size and soluble solids contents for calibration and prediction samples

理化参数	样品集	数量	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
可溶性固形物/%	校正集	136	12.87	7.50	10.37	1.08	10
	预测集	64	12.47	8.10	10.16	1.14	11
大小/mm	校正集	136	88	66	75.85	3.99	5
	预测集	64	85	67	75.17	4.08	6

2.2 光谱预处理

样品大小及样品在线运动都会引起光程的变化，以及电噪声和杂散光等都会影响到光谱基线漂移和信噪比。本试验采用 5 点移动窗口平滑处理、一阶微分（17 点，Savitzky Golay）、二阶微分（23 点，Savitzky Golay）3 种方法对原始光谱进行预处理，尽可能剔除与样品自身无关的信息，提高数学模型的预测能力和稳定性，结果如表 2 所示。经不同的预处理方法处理后，分别采用偏

最小二乘法 (partial least squares, PLS) 和最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 在 840~950 nm 波长范围内建立梨的可溶性固形物和大小的数学模型, 并采用 64 个未参与建模的样品预测模型的性能。

从表 2 中数据显示可知, PLS 方法建模中, 几种预处理方法与原始光谱相比, 利用移动窗口平滑处理的效果比较明显, 平滑处理消除了随机噪声, 使得校正集中可溶性固形物含量的相关系数从 0.85 提高到 0.88, 建模均方根误差 (RMSEC) 从 0.57% 降到 0.51%; 大小的相关系数从 0.90 提高到 0.92, 建模均方根误差 (RMSEC) 从 1.80 mm 降到 1.66 mm。

利用 LS-SVM 方法建模中, 移动窗口平滑预处理效

果也明显优于其他几种预处理方法。使得校正集中可溶性固形物含量的相关系数从 0.81 提高到 0.83, 建模均方根误差 (RMSEC) 从 0.65% 降到 0.62%; 大小的相关系数从 0.86 提高到 0.89, 建模均方根误差 (RMSEC) 从 2.48 mm 降到 2.25 mm。

2 种建模方法中利用其他的几种预处理方法效果都不太明显, 反而有所偏低, 由于本试验中光谱间隔约为 0.2 nm, 相邻光谱波长点间的吸光度值很接近, 光谱经过一阶或二阶微分预处理后, 可能在一定程度上放大了噪声, 有用信息被掩盖, 因而效果不理想。移动窗口平滑预处理处理方法能更有效地剔除无关信息的干扰, 增强模型的预测能力。

表 2 不同光谱预处理下对应不同建模方法和预测结果

Table 2 Results of different modeling method and prediction with different pre-processing methods

测量指标	建模方法	预处理方法	参数	校正集		预测集	
				相关系数 R	建模均方根误差 $RMSEC$	相关系数 R	预测均方根误差 $RMSEP$
可溶性固形物/ %	PLS	原始光谱	$P=6$	0.85	0.57	0.85	0.62
		平滑	$P=5$	0.88	0.51	0.86	0.58
		一阶	$P=5$	0.90	0.47	0.81	0.68
		二阶	$P=2$	0.79	0.66	0.78	0.72
	LS-SVM	原始光谱	$\gamma=19.24, \sigma^2=29.38$	0.81	0.65	0.82	0.65
		平滑	$\gamma=12.46, \sigma^2=30.31$	0.83	0.62	0.83	0.64
		一阶	$\gamma=1.57, \sigma^2=27.58$	0.80	0.64	0.81	0.68
		二阶	$\gamma=5.64, \sigma^2=21.04$	0.79	0.68	0.80	0.69
大小/ mm	PLS	原始光谱	$P=8$	0.90	1.80	0.88	2.31
		平滑	$P=6$	0.92	1.66	0.90	1.93
		一阶	$P=5$	0.90	1.74	0.86	2.51
		二阶	$P=5$	0.88	1.91	0.76	3.21
	LS-SVM	原始光谱	$\gamma=17.75, \sigma^2=25.97$	0.86	2.48	0.88	2.32
		平滑	$\gamma=12.46, \sigma^2=27.36$	0.89	2.25	0.89	2.33
		一阶	$\gamma=9.55, \sigma^2=21.24$	0.88	2.43	0.89	2.40
		二阶	$\gamma=11.62, \sigma^2=22.38$	0.71	3.59	0.70	3.45

注: PLS 为偏最小二乘法; LS-SVM 为最小二乘支持向量机; P 为主成分因子数; γ 为回归误差权重; σ^2 为径向基核函数的核参数。

2.3 数学模型建立及优化

2.3.1 偏最小二乘法数学模型建立及优化

根据预处理方法评价可知平滑处理方法预测结果较优, 平滑处理下偏最小二乘法 (PLS) 方法所建立的可溶性固形物 (soluble solids content, SSC) 和大小模型中主成分因子数分布情况由图 3 所示。

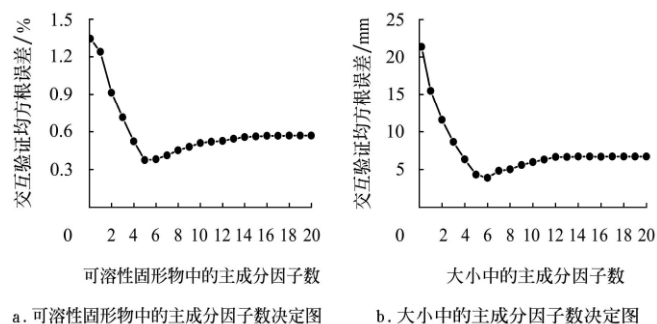


图 3 主成分因子数决定图

Fig.3 Number of principal components determination

由于建立模型时使用的主成分数过少, 就不能完全反映未知样品被测组所产生的光谱数据变化, 其模型预测准确度就会降低, 易出现“欠拟合”现象。而使用过多的主成分建立模型, 会将一些代表噪音的主成分加到模型中, 使模型的预测能力下降, 易出现“过拟合”现象。因而必须选择合适的主成分数来建立相应模型。表 3 为平滑预处理下利用 PLS 方法在不同主成分数下的建模和预测结果。

从表 3 可知, 可溶性固形物中 PC3、PC4 下建模和预测结果明显低于 PC5、PC6、PC7、PC8, 而 PC5 下尽管建模的相关系数 R 值和 PC6、PC7、PC8 的相比不是最高, 但是在 PC5 中建模与预测的相关系数 R 值最接近, 且建模均方根误差 (RMSEC) 和预测均方根误差 (RMSEP) 最接近, 因而在主成分 PC5 下建立的可溶性固形物 (SSC) 模型预测能力和稳定性相比其他主成分下更强。

在大小方面, PC3、PC4、PC5 下建模和预测效果明显低于 PC6、PC7、PC8, 尽管 PC7、PC8 下建模的相关系数 R 值要高于 PC6 下建模的相关系数 R 值, 但 PC7、

PC8 下建模结果的建模均方根误差 (*RMSEC*) 和预测均方根误差 (*RMSEP*) 相差较大, 且模型预测结果相关系数与建模结果相关系数也相差较大。相比下 PC6 建模和预测结果最优, 即在主成分 PC6 下建立的大小模型预测

能力和稳定性更强。
由上述表明可以选用前 5 个主成分作为 PLS 方法建立可溶性固形物 (SSC) 的模型优化特征集, 前 6 个主成分作为 PLS 方法建立大小模型的优化特征集。

表 3 不同主成分数下对应的建模和预测结果
Table 3 Results of different prediction with different principal components

主成分数	可溶性固形物/%				大小/mm			
	校正集		预测集		校正集		预测集	
	相关系数 <i>R</i>	建模均方根误差 <i>RMSEC</i>	相关系数 <i>R</i>	预测均方根误差 <i>RMSEP</i>	相关系数 <i>R</i>	建模均方根误差 <i>RMSEC</i>	相关系数 <i>R</i>	预测均方根误差 <i>RMSEP</i>
PC3	0.69	0.78	0.63	0.90	0.65	3.18	0.75	2.94
PC4	0.77	0.69	0.77	0.76	0.78	2.60	0.82	2.52
PC5	0.88	0.51	0.86	0.58	0.88	1.96	0.88	2.12
PC6	0.90	0.47	0.86	0.62	0.91	1.71	0.90	1.93
PC7	0.94	0.35	0.83	0.64	0.94	1.30	0.89	2.20
PC8	0.97	0.25	0.82	0.67	0.97	0.90	0.87	2.24

2. 3. 2 最小二乘支持向量机数学模型建立及优化
最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 是对经典支持向量机 SVM 的一种改进^[19]。LS-SVM 参数选择的是否合理决定着其性能的优劣。本研究采用径向基核函数 (*RBF*), 它需要调节 2 个参数: σ^2 (*RBF* 核函数的核参数) 和 γ (回归误差的权重)。 σ^2 的值太小, 会对样本数据造成过学习现象; σ^2 的值太大, 会对样本数据造成欠学习现象。LS-SVM 采用二次格点搜索法 (Two-grid searching technique) 和外部验证对训练集进行训练以得到最佳参数。试验中在预处理效果最佳的移动窗口平滑处理下经过网格搜索和外部验证训练结果为: 可溶性固形物中 $\gamma=12.46$, $\sigma^2=30.31$; 大小中

$\gamma=12.46$, $\sigma^2=27.36$; 对应参数下的 LS-SVM 方法在移动窗口平滑预处理下对校正集建模结果为可溶性固形物中 $R=0.83$, $RMSEC=0.62\%$; 大小中 $R=0.89$, $RMSEC=2.25\text{ mm}$ 。表明 LS-SVM 方法可以用于梨的预测建模方法。
2. 4 数学模型验证
试验采用外部验证的方法对所建立的模型预测效果进行验证, 选取 64 个具有代表性的样品组成预测集。通过对各种光谱预处理方法下对应不同建模方法的预测结果评价可知移动窗口平滑处理效果最佳, 利用偏最小二乘法 (PLS) 和最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 方法在移动窗口平滑处理下建模的外部验证结果如图 4 所示。

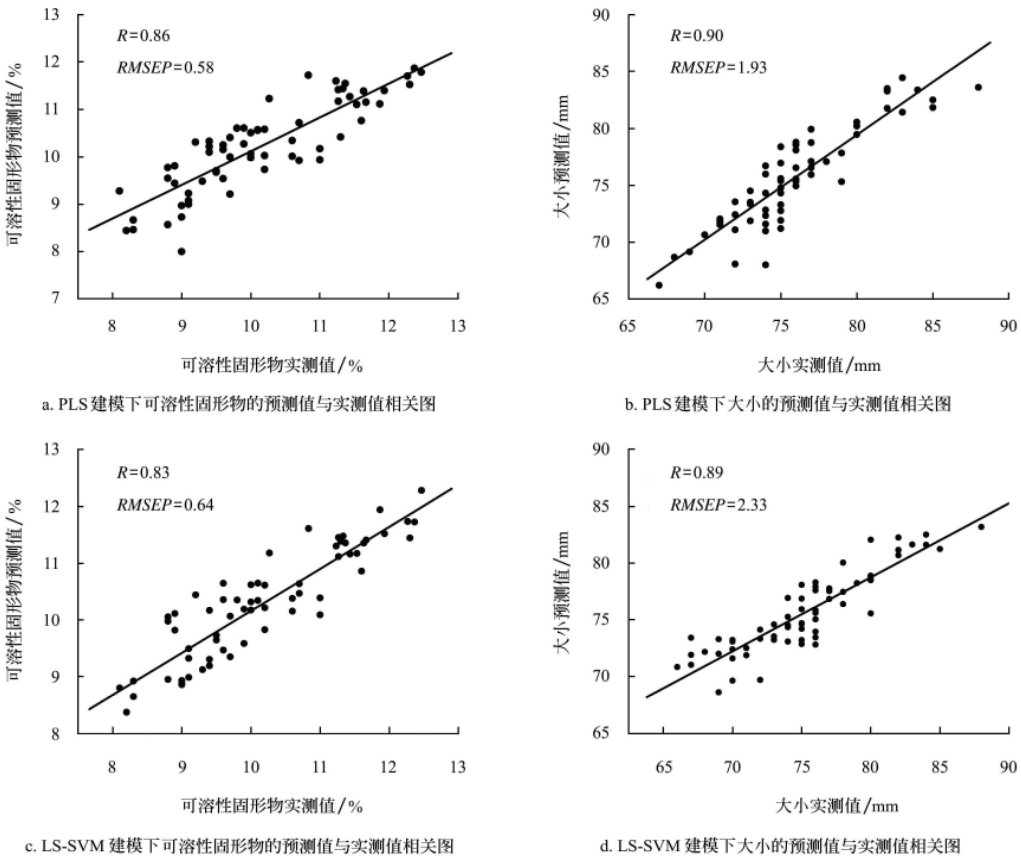


图 4 PLS、LS-SVM 建模下预测集梨的 SSC 和大小预测值与实际值相关图
Fig.4 Correlation of predicted values and actual values of pear in prediction set for soluble solids content and size using PLS and LS-SVM

从图 4 可以得知, 2 种建模方法中可溶性固形物的预测值与实测值的相关系数都达到了 0.80 以上, 大小的预测值与实测值的相关系数都接近 0.90, 表明 PLS、LS-LSM 2 种建模方法都可以用来对未知样品指标进行预测。2 种建模方法预测结果: 可溶性固形物相关系数分别为 0.86 和 0.83, $RMSEP$ 分别为 0.58% 和 0.64%; 大小的相关系数分别为 0.90 和 0.89, $RMSEP$ 分别为 1.93 和 2.33 mm。2 种模型对比, PLS 建模预测结果不仅相关系数高, 且预测均方根误差也小于 LS-SVM 的建模预测结果, 可知 PLS 建模预测结果要优于 LS-SVM。

3 讨论

预处理方法最佳的移动窗口平滑下利用偏最小二乘 (PLS) 方法建模的预测结果为: 可溶性固形物测量结果中 $R=0.86$, $RMSEP=0.58\%$; 大小测量结果中 $R=0.90$, $RMSEP=1.93$ mm, 其他的预测方法下建模预测效果不明显。孙通等^[13]在线测量梨可溶性固形物 (SSC) 含量的研究中也是利用 PLS 模型在 5 点窗口平滑预处理下预测效果最好, 试验结果为: $R=0.95$, $RMSEP=0.55\%$ 。对比可知, 其检测效果要优于本试验, 首先可能由于本研究中应用的自制发光二极管 (LED) 组合光源探头对水果在线检测针对性稍存欠缺; 其次其采用了 2 个 300 W 的卤灯作为光源, 光源强度明显高于本试验中 LED 光源提供的光源强度, 这对样品的光谱采集也会有一定的差异影响; 再者本研究中 USB4000 光谱仪的暗电流噪声变化范围较大, 对在线检测结果也存有一定影响, 需要在进一步研究中对光路设计环节加入反馈回路, 以实施校正暗电流。潘璐等^[10]对 3 种砂梨建立混合模型预测可溶性固形物 (SSC) 含量的结果为 $R=0.86$, $RMSEP=0.64\%$, 其效果与本研究所得结果较接近, 可见在线检测也可以达到与静态检测相似的效果。Paz 等^[14]利用 3 种不同的光谱扫描仪对梨的可溶性固形物 (SSC) 含量检测相关系数范围为: 0.39~0.76, 与本研究所得结果相比其效果要差。

从上述模型验证结果可知, 获得最佳预测结果的有用信息量来自 840~950 nm 波段范围内, 而此波段范围有用信息量已包含了参与建模的 850、880 和 940 nm 单一波长的有用信息量, 且是这几个单一波长有用信息量的组合, 因而建模预测效果优于利用单一波长有用信息量建模预测效果, 可知利用组合光源检测效果要优于单一光源检测效果。可见利用自制 LED 组合光源探头对于梨的品质检测具有一定的可行性。

4 结论

本研究应用了 850、880 和 940 nm 3 盏发光二极管 (LED) 自制了一个 LED 组合光源探头用于在线 (每秒 5 个梨) 测量梨的可溶性固形物和大小, 在不同光谱预处理下建立了偏最小二乘法 (PLS) 和最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 2 种校正模型, 并通过外部验证的方法检验了模型预测的准确性。试验结果表明, 在预处理方法最佳的移动窗口平滑下利用偏最小二乘法 (PLS) 方法建模的预测效果较优, 其预测结果中可溶性固形物和大小测

量相关系数 R 分别为 0.86 和 0.90, 预测均方根误差 $RMSEP$ 分别为 0.58% 和 1.93 mm。试验研究表明应用近红外光谱技术结合自制 LED 组合光源在线测量水晶梨可溶性固形物和大小是具有可行性的, 可以应用于水果在线分级等检测技术中。

参考文献

- [1] Fan Guoqiang, Zha Jianwen, Du Ran, et al. Determination of soluble solids and firmness of apples by Vis/NIR transmittance[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(4): 416—420.
- [2] Shenderoy C, Shmulevich I, Alchanatis V, et al. NIRs detection of moldy core in apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(1): 79—86.
- [3] Cayuela J A. Vis/NIR soluble solids prediction in intact oranges (*Citrus sinensis* L)cv. Valencia Late by reflectance[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47(1): 75—80.
- [4] Sun Xudong, Zhang Hailiang, Gong Zhiyuan, et al. Spectral pretreatment and wavelength selection for soluble solids content in Gannan navel orange[J]. Sensor Letters, 2010, 8(1): 140—144.
- [5] Liu Yande, Sun Xudong, Ouyang Aiguo. Nondestructive measurement of soluble solid content of navel orange fruit by visible-NIR spectrometric technique with PLSR and PCA-BPNN[J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(4): 602—607.
- [6] Flores K, Sánchez M-T, Pérez-Marín D, et al. Feasibility in NIRS instruments for predicting internal quality in intact tomato[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 311—318.
- [7] Liu Yande, Sun Xudong, Zhang Hailiang, et al. Nondestructive measurement of internal quality of Nanfeng mandarin fruit by charge coupled device near infrared spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(Supp1): S10—S14.
- [8] Liu Yande, Sun Xudong, Zhou Jianmin, et al. Linear and nonlinear multivariate regressions for determination sugar content of intact Gannan navel orange by Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2010, 51(11/12): 1438—1443.
- [9] 刘燕德, 陈兴苗, 欧阳爱国. 梨表面色泽的可见/近红外漫反射光谱无损检测研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(4): 266—268.
Liu Yande, Chen Xingmiao, Ouyang Aiguo. Non-destructive measurement of surface color of pear by visible/near-infrared diffuse reflectance spectra[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(4): 266—268. (in Chinese with English abstract)
- [10] 潘璐, 王加华, 韩东海, 等. 砂梨糖度近红外光谱波段遗传算法优化[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1246—1250.
Pan Lu, Wang Jiahua, Han Donghai, et al. Region optimization of SSC model for *Pyrus pyrifolia* by genetic algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1246—1250. (in Chinese with English abstract)
- [11] 纪淑娟, 柏兰, 重藤和明, 等. 南国梨糖度近红外光谱无

- 损检测模型的建立[J]. 食品工业科技, 2008, 29(4): 281—286.
- Ji Shujuan, Bai Lan, Shigefuji Kazuaki, et al. Establishment of non-destructive determination model of sugar content in 'Nanguo' pear by near infrared spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(4): 281—286. (in Chinese with English abstract)
- [12] 马本学, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于近红外漫反射光谱的香梨类别定性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3288—3290.
- Ma Benxue, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Qualitative analysis of fragrant pear class based on near infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(12): 3288—3290. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙通, 应义斌, 刘魁武, 等. 梨可溶性固形物含量的在线近红外光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11): 2536—2539.
- Sun Tong, Ying Yibin, Liu Kuiwu, et al. Online detection of soluble solids content of pear by near infrared transmission spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(11): 2536—2539.
- [14] Paz P, Sánchez M-T, Pérez-Marín D, et al. Instantaneous quantitative and qualitative assessment of pear quality using near infrared spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69: 24—32. (in Chinese with English abstract)
- [15] Nicolai B M, Verlinden B E, Desmet M, et al. Time-resolved and continuous wave NIR reflectance spectroscopy to predict soluble solids content and firmness of pear[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47(1): 68—74.
- [16] Pan Yuanyuan, Sun Xudong, Dong Xiaoling, et al. Nondestructive measuring soluble solid contents and weight of intact pears based on on-line near-infrared spectroscopy[C]//5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing, Dalian, 2010, 7656, DOI: 10.1117/12.864224.
- [17] Miller W M, Zude-Sasse M. NIR-Based sensing to measure soluble solids content of florida citrus[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(3): 321—327.
- [18] Suykens J A K, Gestel T V, Brabanter J D, et al. Least Squares Support Vector Machines[M]. Singapore, World Scientific, 2002.
- [19] 吴桂芳, 何勇. 应用可见/近红外光谱进行纺织纤维鉴别的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 331—335.
- Wu Guifang, He Yong. Identification of varieties of textile fibers by using Vis/NIR infrared spectroscopy technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 331—335. (in Chinese with English abstract)

Online detection of soluble solids content and size of crystal pear based on LEDs light source-detector

Liu Yande, Peng Yanying, Gao Rongjie, Sun Xudong, Hao Yong

(Institute of Optics-Mechanics-Electronics Technology and Application (OMETA), East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Online detection method of soluble solids content (SSC) and size of crystal pear using LEDs light source-detector based on near infrared spectroscopy was studied. LEDs light source-detector with wavelengths of 850 nm, 880 nm and 940 nm were used to irradiate crystal pear in this experiment. The crystal pear was homogeneously arranged on conveyor line at the speed of 5 pears per second. Spectra was measured in near infrared diffuse reflectance mode. Three pre-processing methods including average smoothing, first and second derivatives were applied to improve the predictive ability of the models. Partial least squares (PLS) and least squares support vector machine (LS-SVM) were used to develop calibration models. The prediction set was used to evaluate the predictive ability of the models. The results showed that the best model was obtained by PLS with the pre-processing method of average smoothing. The correlation coefficient (R) and root mean square error of prediction ($RMSEP$) was (0.86, 0.58%) and (0.90, 1.93 mm) for soluble solids content and size, respectively. The results showed that online detection of soluble solids content and size of crystal pear based on near infrared diffuse reflectance spectroscopy combined with LEDs light source-detector was feasible.

Key words: near infrared spectroscopy, size distribution, agricultural products, online detection, soluble solids content