

枇杷内部品质近红外光谱无损检测

Nondestructive detection of internal quality of loquat by near infrared spectroscopy

王茜¹ 吴习宇^{1,2} 庞兰¹ 徐丹¹

WANG Xi¹ WU Xi-yu^{1,2} PANG Lan¹ XU Dan¹

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400716; 2. 西南大学工程技术学院, 重庆 400716)

(1.College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2.College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China)

摘要:利用近红外光谱技术(near infrared spectroscopy, NIRS)对 101 个枇杷样品进行无损检测,测得样品的可溶性固形物(total soluble solid, TSS)、可滴定酸和 Vc 含量,结合偏最小二乘法(partial least squares, PLS)分别建立 TSS、可滴定酸和 Vc 含量的定标模型。采用定标模型分别对 TSS、可滴定酸和 Vc 的验证集样品进行预测,预测决定系数 R_p^2 分别为 0.906, 0.745, 0.554, 预测均方根误差(root-mean-square error of prediction, RMSEP)分别为 0.628, 0.048, 2.230, 且 TSS 的相对分析误差(relative prediction deviation, RPD)为 3.31, 可滴定酸和 Vc 的 RPD 分别为 2.00, 1.52。表明建立的枇杷 TSS 的定标模型可用于实际检测,枇杷的可滴定酸和 Vc 含量可采用近红外光谱进行检测,但检测精度有待于进一步的提高。

关键词:枇杷;近红外光谱;可溶性固形物;可滴定酸;Vc

Abstract: Spectra data of the 101 loquat samples were obtained by using NIRS and the TSS, titratable acid, Vc of the samples were determined by conventional chemical methods. The mathematical pretreatment methods were used as spectral preprocessing options, and then the calibration models of TSS, titratable acid and Vc were established respectively by PLS. By using these models, the TSS, titratable acid and Vc in the validation sets can be predicted. The R_p^2 are 0.906, 0.745, 0.554, RMSEP are 0.628, 0.048, 2.23 respectively, and the RPD of TSS is 3.31. Thus, the calibration model of TSS can be used for the actual detection. The RPD of titratable acid and Vc are 2 and 1.52 respectively. The content of titratable acid and Vc in the loquat can be tested by NIRS. However, the detection accuracy

remains to be improved.

Keywords: loquat; near infrared spectroscopy; soluble solids; titratable acid; ascorbic acid

由于枇杷(*Eriobotrya japonica* Lindl)果实成熟于高温多湿季节,采后生理代谢旺盛,品质下降快;且枇杷皮薄,采运过程中易造成机械损伤,使细胞破裂,营养物质流失,丧失其经济价值。因此,对采摘后进入销售环节的枇杷进行检测及根据其品质分选分级提出了更高的要求。目前,中国枇杷品质检测主要是通过传统的抽样方式进行破坏性检测,制样繁琐且检测成本高,已无法满足枇杷快速分级分选的现实要求^[1]。

近红外光谱技术是一种快速、无污染、简便的无损检测技术,具有测量和分析速度快、精度高、分析成本低、对样品无污染、光谱测试的重现性好、稳定性高等优势^[1-4]。现阶段近红外光谱技术在农业和食品领域获得了较广泛的运用,在水果的内部品质快速检测方面,探索了多种水果不同部位可溶性固形物含量及干物质含量与光谱的相关关系^[5];预测了苹果的可溶性固形物含量^[6]及不同品种苹果的最佳采摘期^[7];此外,还用于桃子^[8]、猕猴桃^[9]、芒果^[10]、梨^[11]等水果内部品质的快速无损检测。在枇杷果实的近红外光谱检测方面,李建平等^[12-13]对白沙枇杷、大红袍枇杷、夹脚枇杷的可溶性固形物含量和 pH 值进行了近红外光谱定量分析,认为近红外光谱检测技术可用于定量分析上述品种枇杷果实的可溶性固形物含量,但对 pH 值的检测效果略差;Fu Xiaoping 等^[14]对大红袍、夹脚两个品种的枇杷进行了产地及品种的近红外光谱鉴定,结果表明 NIRS 结合 PCA-PNN 可用于水果产地溯源和品种鉴别。由于当前国内外对近红外光谱检测枇杷品质的相关报道较少,涉及的内部品质指标仅有可溶性固形物含量和 pH 值,品种也较有限,本试验拟以西南大学选育审定的枇杷新品种“金华 1 号”为试验材料,采用

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2013BAD02B02-1);国家星火计划(编号:2013GA811001);西南大学食品科学学院“本科生创新基金”项目(编号:spy201403)

作者简介:王茜,女,西南大学在读本科生。

通讯作者:吴习宇(1978-),女,西南大学讲师,在读博士。

E-mail:xiyu.w@163.com

收稿日期:2016-01-25

近红外光谱检测技术进行快速无损检测,除了对其可溶性固形物含量进行测定以外,还对总酸含量和 Vc 含量进行定量分析,较全面地反映枇杷果实的品质,旨在为“金华 1 号”枇杷近红外分级技术的实际应用提供依据。

1 材料及方法

1.1 材料

枇杷:品种金华 1 号,采自西南大学果树学重点实验室枇杷资源圃。从中挑选出无病虫害、无机械损伤的枇杷共 101 个,当天即在室温(22 ℃)条件下对所有样品分别进行近红外光谱采集,采集完成后用 PP 食品保鲜袋进行包装和编号;置于温度为 7 ℃的冰柜保存 2 h 后,于 24 h 内完成全部样品的理化性质测定。

1.2 光谱采集

枇杷的近红外光谱由 MPA 型傅里叶近红外光谱仪(德国 Bruker 公司)及附带的 OPUS 软件进行采集。扫描分辨率和扫描次数分别为 8 cm⁻¹和 32 次,扫描谱区为 4 000~12 500 cm⁻¹,采用漫反射模式。光谱采集时,先将仪器预热 30 min,在室温条件下,首先采集背景谱,然后分别将每个样品放在测试台上进行光谱扫描,采集过程中,用黑布对试样进行遮光以防止外部光源的干扰;同时,为减少光谱漂移误差,每个样品在横径最大处每隔 120°采集光谱,共采集 3 次,取平均光谱。

1.3 样品理化性质测定

- 1.3.1 可溶性固形物的测定 阿贝折光仪测定。
- 1.3.2 可滴定酸的测定 按 GB/T 12456—90 执行。
- 1.3.3 Vc 的测定 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[15]。

1.4 数据处理及建模方法

光谱中存在的异常样本会严重影响到模型的预测精度,光谱和化学值其中一者异常,则称为“奇异”样本,应从样本集中剔除^[16]。本试验采用 OPUS 7.0 及 Matlab 2012a 软件进行数据处理,对 101 个枇杷样品的近红外光谱做交叉检验,光谱的异常采用马氏距离(mahalanobis distance, MD)判定,马氏距离表示数据的协方差距离,它是一种有效计算两个未知样本集的相似度的方法^[17]。若样品进行交叉检验时验证模型中马氏距离 MD>3 k/n , (其中 k 为主成分数, n 为所用样品数),则为异常点^[16]。化学值的异常根据残差法判定,残差是指观测值与预测值(拟合值)之间的差,即实际观察值与回归估计值的差。残差的阈值设为样本平均值的 3 倍,若是大于该阈值则判定该样本化学值异常^[16]。

通过回归分析波长信息与枇杷可溶性固形物、滴定酸、Vc 含量之间的关系,建立近红外光谱定量分析校正模型。建模时分别按照样品可溶性固形物、可滴定酸和 Vc 含量的大小升序排列,每 3 个样品中选一个作为验证集,并保证将含量最小和最大的样品设置到定标(校正)集中,进行验证集检验。为消除光谱信号的基线漂移和随机噪声,采用了原始光谱、一阶导数、二阶导数预处理方法,为消除样本粒度分布不均匀引起的散射,采用了无散射处理、多元散射校正(mul-

tipple scattering correction, MSC)、矢量归一化(standard normal variate, SNV)、最大最小归一化 4 种方法,利用偏最小二乘法作为建模算法,通过比较定标集的决定系数(R_c^2)、定标集均方根误差(root-mean-square error of calibration, RMSEC)、验证集决定系数(R_p^2)、验证集均方根误差(root-mean-square error of prediction, RMSEP)和模型相对分析误差(relative prediction deviation, RPD)选择最优的预处理方法,再将谱区设置为多个谱区,选择最佳谱区进行模型优化。各项相关系数越大、标准误差越小,表明模型的定标效果越好,预测精度越高。此外,采用 RPD 对预测精度进行进一步的验证,若 RPD>3,则说明预测精度高,所建立的近红外模型可用于实际检测中^[18-19]。

2 结果与分析

2.1 光谱分析

由图 1 可知,样品在近红外谱区均有多处吸收峰,并且不同样品由于组分含量有细微差别使其吸收峰大小不同,每个样品光谱不完全重合,但谱图的变化趋势大致相同,在 4 000~12 500 cm⁻¹谱区内有多个呈递增或递减趋势的吸收峰,说明枇杷大量含氢基团在倍频区、合频区被强烈吸收,如 10 400 cm⁻¹(960 nm)处的吸收与 O—H 伸缩振动的二倍频相关,5 200 cm⁻¹(1 940 nm)处的吸收与 O—H 伸缩振动的合频相关,8 400 cm⁻¹(1 190 nm)处的吸收与 C—H 的二倍频相关。这些特征的吸收区段将作为下一步进行的建模筛选光谱区段的依据。

2.2 枇杷各组分含量的理化分析

表 1 中列出了理化检测得到的金华 1 号枇杷果实可溶性固形物、可滴定酸和 Vc 含量的最大值、最小值、平均值和

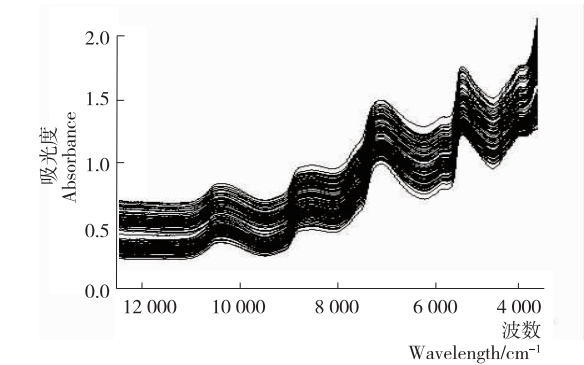


图 1 101 个枇杷样品的光谱图
Figure 1 Near infrared spectra of 101 loquat samples

表 1 枇杷果实各组分含量[†]
Table 1 Soluble solid, titratable acid and Vc contents of loquat samples

组分	可溶性固形物/%	可滴定酸/%	Vc/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)
最小值	3.700	0.033	1.396
最大值	15.190	0.396	38.045
平均值	8.654	0.186	8.166
标准偏差	2.146	0.101	6.748

[†] 样品数 101。

标准差,从中可看出:所选样品的可溶性固形物、可滴定酸和 Vc 含量范围较广,基本符合正态分布曲线,样品具有一定代表性。

2.3 枇杷各组分含量的近红外光谱定量模型的建立

对 101 个枇杷样品的近红外光谱做交叉检验,利用 1.4 节所述采用马氏距离判定,有 1 个样品光谱异常,这可能是光谱采集过程中操作不当造成的,将此样品剔除。采用残差法判定,有 3 个枇杷样品可溶性固形物浓度异常;2 个枇杷样品可滴定酸浓度异常;Vc 浓度异常样品有 9 个。排除这些异常样品后将剩余样品按照含量的大小升序排列,分为校正集和验证集两部分,方法为每隔 2 个取 1 个样品为验证集,保证全部验证集的化学值均在校正集的范围,可溶性固形物校正集样本为 65,验证集样本为 32;可滴定酸校正集样本为 66,验证集样本为 32;Vc 校正集样本为 61,验证集样本为 30。

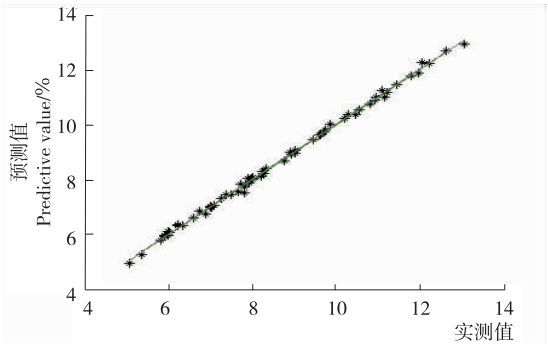
对所有光谱进行均值中心化处理,在全光谱区内采用 PLS 法建立金华 1 号枇杷可溶性固形物、可滴定酸和 Vc 的预测模型,进一步结合 MSC、SNV、最小—最大归一化、一阶导数等预处理后建模,比较不同预处理方法对模型精度及稳定的影响。枇杷可溶性固形物近红外光谱检测结果见表 2。由表 2 可知,在全光谱范围内,最佳的优化方法为 MSC,此时可溶性固形物的含量校正集模型 R_c^2 为 0.977, RMSEC 为 0.338;验证集 R_p^2 为 0.891, RMSEP 为 0.676, RPD 为 3.04。再进行谱区优化(最优谱区:9 403.7~6 098.2 cm^{-1}),模型性能得到显著地优化,此时可溶性固形物的含量校正集决定系数 R_c^2 为 0.998, RMSEC 降低为 0.094,验证集决定系数 R_p^2 提高到 0.906, RMSEP 降低为 0.628,其校正模型的相对分析误差 RPD 升高到 3.31,模型稳定性增强。在优化谱区内所建立的枇杷可溶性固形物含量的近红外模型见图 2,可得到较好的预测结果。

枇杷可滴定酸和 Vc 近红外光谱检测结果见表 3、4,在全光谱范围内,可滴定酸和 Vc 的 PLS 模型最佳的优化方法也均为 MSC,此时可滴定酸含量校正集模型 R_c^2 为 0.703, RESEC 为 0.056,预测验证集决定系数 R_p^2 为 0.761, RESEP 为 0.047, RPD 为 2.12。再进行谱区优化(最优谱区:7 502.2~

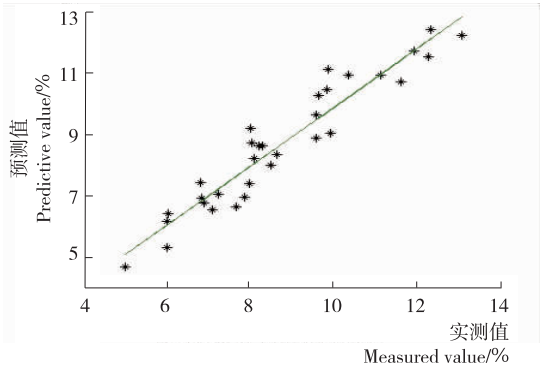
表 2 光谱预处理方法对金华 1 号枇杷可溶性固形物 PLS 模型的影响

Table 2 Results of TSS calibration and validation models by PLS with different mathematical pretreatments on spectra

预处理方法	主成分	校正集($n=65$)		验证集($n=32$)		RPD
		R_c^2	RESEC	R_p^2	RESEP	
无预处理	13	0.973	0.368	0.867	0.748	2.75
SNV	10	0.951	0.485	0.876	0.723	2.84
MSC	12	0.977	0.338	0.891	0.676	3.04
最大最小归一化	13	0.979	0.325	0.875	0.726	2.82
一阶导数+ SNV	7	0.894	0.692	0.847	0.804	2.55
一阶导数+ MSC	7	0.897	0.683	0.839	0.823	2.49



(a) 校正集预测值



(b) 验证集预测值

图 2 金华 1 号枇杷可溶性固形物校正集与验证集中实测值与预测值的关系(谱区 9 403.7~6 098.2 cm^{-1})

Figure 2 Prediction results for TSS content of loquat using NIR spectroscopy

表 3 光谱预处理方法对金华 1 号枇杷可滴定酸 PLS 模型的影响

Table 3 Results of titratable acid calibration and validation models by PLS with different mathematical pretreatments on spectra

预处理方法	主成分	校正集($n=66$)		验证集($n=32$)		RPD
		R_c^2	RESEC	R_p^2	RESEP	
无预处理	6	0.867	0.038	0.751	0.047	2.03
SNV	3	0.704	0.056	0.760	0.047	2.12
MSC	3	0.703	0.056	0.761	0.047	2.12
最大最小归一化	4	0.770	0.049	0.717	0.051	1.99
一阶导数+SNV	4	0.763	0.050	0.725	0.050	1.95
一阶导数+MSC	4	0.760	0.051	0.726	0.050	1.95

表 4 光谱预处理方法对金华 1 号枇杷 Vc 的 PLS 模型的影响

Table 4 Results of Vc calibration and validation models by PLS with different mathematical pretreatments on spectra

预处理方法	主成分	校正集($n=61$)		验证集($n=30$)		RPD
		R_c^2	RESEC	R_p^2	RESEP	
无预处理	9	0.774	1.62	0.506	2.34	1.44
SNV	8	0.764	1.64	0.488	2.39	1.43
MSC	8	0.767	1.63	0.503	2.35	1.45
最大最小归一化	7	0.765	1.62	0.508	2.34	1.44
一阶导数+SNV	12	0.982	0.471	0.502	2.36	1.42
一阶导数+MSC	11	0.973	0.574	0.505	2.35	1.43

4 246.7 cm^{-1}),校正模型性能得到显著地优化,此时可滴定酸含量校正集模型决定系数 R_c^2 上升到 0.846, RMSEC 降低为 0.042, 预测验证集决定系数 R_p^2 略降低, 为 0.745, RMSEP 为 0.048, RPD 为 2。经 MSC 预处理后, Vc 含量的校正集模型 R_c^2 为 0.767, RMSEC 为 1.63, 验证集决定系数 R_p^2 为 0.503, RMSEP 为 2.35, RPD 为 1.45。进行谱区优化, 最优谱区为 4 424.1~4 246.7 cm^{-1} , 模型性能得到一定的优化, 此时 Vc 含量校正集模型相关系数 R_c^2 为 0.768, RMSEC 降低为 1.62, 预测验证集相关系数 R_p^2 略升高, 为 0.554, RMSEP 为 2.23, RPD 上升到 1.52。谱区优化后所建立的枇杷可滴定酸、Vc 含量的近红外模型见图 3、4。

3 结论

本研究以金华 1 号枇杷果实为对象, 利用近红外光谱技术快速检测其可溶性固形物、可滴定酸和 Vc 含量。结果表明: 通过光谱预处理和谱区优化后的定标模型优于全光谱、未预处理的定标模型, 通过多元散射校正光谱预处理, 在谱区 9 403.7~6 098.2 cm^{-1} 所建立的金华 1 号枇杷可溶性固形物的近红外模型相关系数较高, 定标效果良好, 预测精度高; 金华 1 号枇杷果实可滴定酸的近红外模型效果不如可溶性固形物, 这与文献[13]的结论是一致的。Vc 含量的近红外模型预测结果不够理想, 光谱预处理和谱区优化对 Vc 含量的近红外模型改善作用较小, 这可能是枇杷果实中 Vc 含量较低, 造成 NIRS 检测精度不高。综上所述, 采用 NIRS 技术对金华 1 号品种枇杷果实的可溶性固形物、可滴定酸含量

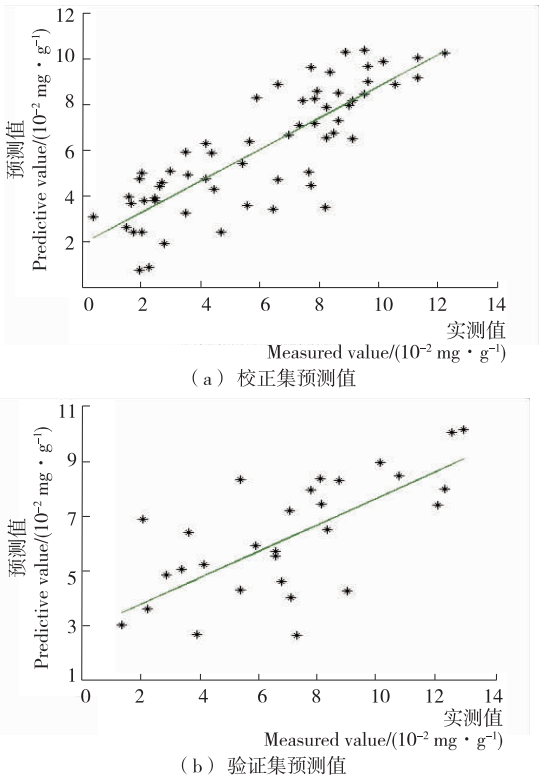


图 4 金华 1 号枇杷 Vc 校正集与验证集中实测值与预测值的关系(谱区 4 424.1~4 246.7 cm^{-1})

Figure 4 Prediction results for Vc content of loquat using NIR spectroscopy

进行定量分析是可行的, Vc 含量的检测精度还有待提高。在进一步的研究中, 可考虑增加样品数量提高其预测精度, 同时, 还可引入一些其他算法来优化模型。

参考文献

[1] 应义斌, 刘燕德. 水果内部品质光特性无损检测研究及应用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(2): 125-129.

[2] 刘燕德, 应义斌, 傅霞萍. 近红外漫反射用于检测苹果糖度及有效酸度的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(11): 1 793-1 796.

[3] 孙素琴, 汤俊明, 袁子民, 等. 道地山药红外指纹光谱和聚类分析的鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 3(2): 258-261.

[4] 何勇, 李晓丽, 邵咏妮. 基于主成分分析和神经网络的近红外光谱苹果品种鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(5): 850-853.

[5] Peiris K H S, Dull G G, Leffler R G, et al. Spatial variability of soluble solids or dry-matter content within individual fruits, bulbs, or tubers: Impications for the development and use of NIR spectrometric technique[J]. HortScience, 1999, 34(1): 114-118.

[6] 陆辉山, 陈鹏强, 闫宏伟, 等. 基于近红外光谱漫透射技术的苹果可溶性固形物含量在线检测[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 40-42.

[7] Peirs A, Lammertyn J, Ooms K, et al. Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS/NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 21(2): 189-199.

(下转第 97 页)

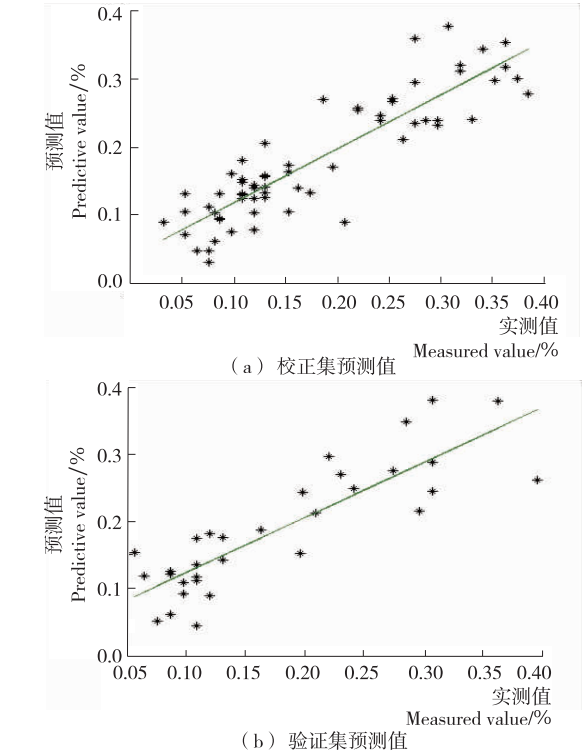


图 3 金华 1 号枇杷可滴定酸校正集与验证集中实测值与预测值的关系(谱区 7 502.2~4 246.7 cm^{-1})

Figure 3 Prediction results for titratable acid content of loquat using NIR spectroscopy

贝壳有破损率仅为 1%，满足损伤率低于 2%的设计要求，2 h 后扇贝存活率为 98%。试验证明无论是除杂程度，还是损伤率均满足要求，而且能够保持海湾扇贝的活性。

4 结论

本试验针对国内外扇贝清洗现状及海湾扇贝生物特点，设计一种上下层毛刷辊交错布置，结合高压喷气装置的扇贝清洗机。通过正交试验对影响清洗效果的主要参数进行了优化，得到了上下两层相邻毛刷辊的辊芯距为 111 mm，下排两边毛刷辊的转速 v_1 为 120 r/min，下排中间毛刷辊的转速 v_2 为 360 r/min，上排毛刷辊的转速 v_3 为 200 r/min 的最优参数组合。该机采用双层毛刷辊和高压喷气，解决了采用高压水清洗扇贝存活率降低的问题，充分保证了扇贝在后续加工中的鲜活性，符合节能、节水的设计要求。对扇贝清洗设备的研制具有现实意义。

参考文献

[1] 农业部渔业局. 中国渔业年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2010：630-632.

[8] Slaughter D C. Nondestructive determination of internal quality in peaches and nectarines[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(2): 617-623.

[9] 陈香维. 猕猴桃近红外光谱无损检测技术研究[D]. 陕西：西北农林科技大学，2009：119-129.

[10] Schmilovitch Z, Mizrach A, Hollmun A, et al. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry [J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 5(19): 245-252.

[11] 李东华, 纪淑娟, 重腾和明. 南国梨糖、酸度近红外光谱模型适用的贮藏研究[J]. 农业工程学, 2009, 25(4): 270-275.

[12] 李建平, 傅霞萍, 周莹, 等. 近红外光谱定量分析技术在枇杷可溶性固形物无损检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1 605-1 609.

[13] Fu Xia-ping, Li Jian-ping, Zhou Ying, et al. Determination of soluble solid content and acidity of loquats based on FT-NIR spectroscopy [J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2009, 10(2): 120-125.

(上接第 85 页)

[10] 管小清, 吕志强. 工业码垛机器人动力学仿真分析与研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 149-151, 176.

[11] 李峰, 张雪松, 程敏, 等. 一种 3R1P 机器人的关节驱动方程及其运动状态研究[J]. 机械工程师, 2015(9): 10-13.

[12] 李宏, 花勇. 机械装甄布料控制系统 PLC 设计[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 114-118.

[13] 杨伯金, 张跃明, 牟宏明, 等. 基于 PLC 刀库控制系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 107-109.

[14] 杨志成, 朱永林, 耿瑞芳, 等. 运用 PLC 的电气控制系统在真空封口机中的应用[J]. 现代制造工程, 2015(2): 131-135.

[15] 李胜多, 尚书旗, 王东伟. 基于 PLC 的种禽料量调节系统的设计[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 141-144, 159.

[2] 滕桂君, 弋景刚, 刘江涛, 等. 毛刷辊式扇贝清洗机[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 168-170.

[3] 弋景刚, 尹欣玲, 孔德刚, 等. 一种扇贝清洗机：中国, CN204104660U[P]. 2015-01-21.

[4] 满桂富, 邓海钦, 熊东生, 等. 一种芒果核清洗机：中国, CN103504451A[P]. 2014-01-15.

[5] 陈培欣, 宋曙光. 一种电磁调速电动机控制装置：中国, CN200953540[P]. 2007-09-26.

[6] 陆玉, 冯立艳. 机械设计课程设计[M]. 4 版. 北京：机械工业出版社, 2011：10-14.

[7] 蔡春园. 新编机械设计手册[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，1993：368.

[8] 三浦宏文. 机电一体化实用手册[M]. 北京：科学出版社，2007：222-232.

[9] 滕桂君, 弋景刚, 李娜, 等. 一种清洗海湾扇贝装置的设计[J]. 农机化研究, 2015(4): 91-94.

[10] 王万中, 崑诗松. 试验的设计与分析[M]. 上海：华东师范大学出版社，1997：37-46.

[11] 汪仁官, 陈荣昭. 试验设计与分析[M]. 北京：中国统计出版社，1998：136-145.

[14] Fu Xia-ping, Ying Yi-bin, Zhou Ying, et al. Application of probabilistic neural networks in qualitative analysis of near infrared spectra: Determination of producing area and variety of loquats[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 598(1): 27-33.

[15] 王元秀, 庄海燕. 微量滴定法测定猕猴桃中维生素 C 的含量 [J]. 济南大学学报：自然科学版, 2001, 15(4): 374-375.

[16] 闵顺耕, 李宁, 张明祥. 近红外光谱分析中异常值的判别与定量模型优化[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(10): 1 205-1 209.

[17] Bedrick E. Graphical modelling and the mahalanobis distance [J]. Journal of Applied Statistics, 2005, 32(9): 959-967.

[18] 牛智有, 韩鲁佳, 苏晓鸥, 等. 鱼粉中肉骨粉含量的近红外反射光谱分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 126-129.

[19] Malley DF, Rönicke H, Findlay D, et al. Feasibility of using near-infrared reflectance spectroscopy for the analysis of C, N, P and diatoms in lake sediments[J]. Journal of Paleolimnology, 1999, 21(3): 295-306.

[16] 余梅, 刘国巍. 基于 PLC 矿用喷涂机械手控制系统设计[J]. 煤炭工程, 2015, 47(1): 130-132.

[17] 韩慧, 倪荣军, 孙计赞. 基于 PLC 食品检测实验室自动加液装置的设计与实现[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 130-132.

[18] 张浩栋, 张燕, 曾小英, 等. 基于 PLC 的香蕉秸秆自动打包机的设计和控制研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 115-118.

[19] S7-200 系列 PLCSTL(语句表)语言[EB/OL]. (2015-01-28) [2016-2-24]. http://www.aitmy.com/news/201501/28/news_78732.html.

[20] 韩浩定, 张燕, 闫二乐. 香蕉秸秆切片装置及其控制系统设计 [J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 106-108.

[21] 廖育武. 基于 PT/PLC 的瓜果去皮生产线智能控制系统设计 [J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 161-164.