

不同保鲜环境荔枝褐变的理化指标识别方法研究

徐 赛^{1,2} 陆华忠^{1,2} 周志艳^{1,2} 吕恩利^{1,2} 王亚娟^{1,2} 杨 径^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为探究理化指标识别荔枝褐变的可行性, 试验获取了3种常用保鲜环境(常温保鲜、冷鲜柜保鲜和气调保鲜)荔枝贮藏过程中褐变程度, 色差 a^* 、 b^* 、 L^* , 可溶性固形物含量(TSS)和硬度变化。常温、冷鲜柜和气调3种保鲜环境荔枝褐变指数随褐变程度逐渐增大, 其中常温保鲜荔枝增大最快, 冷鲜柜保鲜荔枝其次, 气调保鲜荔枝较慢。理化指标色差 a^* 、 b^* 、 L^* 和硬度均随褐变指数增大呈减小的趋势, TSS随褐变指数增大变化不明显。采用线性判别分析(LDA)对常温、冷鲜柜和气调3种保鲜环境荔枝褐变程度识别正确率分别为96.67%、100%和100%。但冷鲜柜和气调保鲜荔枝4级与5级果LDA分析数据点较近, 实际分类易发生混淆。LDA可较好地识别1级、2级、3级和4~5级荔枝果实。采用偏最小二乘回归(PLSR)建立预测模型同时对3种保鲜环境荔枝褐变程度预测时, 训练集与测试集测试值与实际值的拟合决定系数 R^2 分别为0.85和0.90, 证明了不同保鲜环境荔枝通过同一个模型进行预测的可行性。试验揭示了褐变、理化指标和保鲜时间之间存在的关系, 证明了通过理化指标识别褐变程度的可行性, 可为水果褐变准确识别以及商品价值评价提供参考。

关键词: 荔枝; 褐变程度; 褐变指数; 理化指标; 保鲜环境; 模式识别

中图分类号: S667.1; TS201.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0221-07

Physicochemical Indexes of Browning Identification of Litchi
under Different Storing Environments

Xu Sai^{1,2} Lu Huazhong^{1,2} Zhou Zhiyan^{1,2} Lü Enli^{1,2} Wang Yajuan^{1,2} Yang Jing^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: For exploring the feasibility of litchi browning identification based on physicochemical indexes, the browning indexes, chromatic aberration a^* , b^* and L^* value, total soluble solids content (TSS) and hard degree of litchi in storing under three common used environments (room temperature environment, refrigerator environment and controlled atmosphere environment) were measured. Under the above three environments, browning indexes of stored litchi were increased with the increasing storing time. However, the increasing speed of stored litchi under room temperature environment was the most fast, the refrigerator environment was the second, and the controlled atmosphere environment was the third. Physicochemical indexes, including chromatic aberration a^* , b^* , L^* value, and hard degree, were decreased with the increasing browning indexes. But the change of TSS was not obvious with the increasing browning index. The accuracy of linear discriminant analysis (LDA) for brown degree identification of stored litchi under room temperature environment, refrigerator environment and controlled

收稿日期: 2015-12-08 修回日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571561)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-33-13)和广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(Y92014025)

作者简介: 徐赛(1991—),男,博士生,主要从事农产品冷链物流技术与装备研究,E-mail: 294504658@qq.com

通信作者: 吕恩利(1979—),男,副教授,主要从事农产品冷链物流技术与装备研究,E-mail: txzzlu@sina.cn

atmosphere environment were 96.67% , 100% and 100% , respectively. However, the litchi samples of 4th browning index were similar with those of 5th browning index under both refrigerator environment and controlled atmosphere environment, which may cause confusion in practical classification and identification. Thus, LDA can identify the litchi samples of 1st, the 2nd, the 3rd, the 4th ~ 5th browning index effectively. The results of partial least squares regression (PLSR) for stored litchi under above three environments show that fitting coefficients (R^2) of predicted value and actual value were 0.85 and 0.90, respectively, which proves that litchi could be predicted by using the same model but under different environments. This experiment has revealed the relationships among browning indexes, physicochemical indexes and storing time, which proves the feasibility of physicochemical indexes for litchi's browning identification, and provides a reference for fruit's browning identification and value estimation.

Key words: litchi; browning degree; browning indexes; physicochemical indexes; storing environment; pattern recognition

引言

荔枝是典型的亚热带水果,其食味鲜美、营养丰富、广受消费者所喜爱^[1-2]。然而,荔枝采后极不耐贮藏,具有“一日色变,二日香变,三日味变,四、五日色香味俱变”的特性^[3],可见其采后质变速度之快。褐变是荔枝采后质变过程中重要特征体现之一,也是消费者选购荔枝的重要评判依据。据研究报道,荔枝通常采后 24 h 内就会发生褐变,大大降低了荔枝果实的商品价值^[4]。周先治等研究表明,随着货架时间的增加,当荔枝表皮的褐变面积从微褐变到 1/4 时,荔枝果肉风味会受到较大影响,果实的可溶性固形物质损失率明显增加,市场售价显著降低^[5]。因此,准确地识别与定位荔枝褐变情况,有助于采后贮运过程中荔枝品质信息实时监测,并为消费者选购荔枝提供一定指导,具有重要意义。

目前已得到运用的荔枝褐变情况识别方法为感官评定法^[6-7],即肉眼借助放大镜对荔枝果实褐变面积进行估算,从而得出单个荔枝的褐变程度,通过抽样调查,可对一批荔枝的褐变指数进行预测。该方法仅能粗略地估算荔枝的褐变程度,且易受到主观因素的干扰。此外,Yang 等^[8]采用高光谱成像技术对荔枝褐变进行了识别。但该研究仅初步证明了高光谱成像技术识别荔枝褐变程度的可行性,且该技术在检测荔枝褐变程度的过程中易受到视场角的限制^[9]。因此,探究荔枝褐变的识别方法仍具有重要意义。

理化指标识别法^[10-11]是目前农产品品质信息检测的主要方法,通过获取农产品的物理和化学指标,从而对农产品的品质进行综合评判。理化指标识别法是一种直观、有效的评判方法,不受主观因素干扰,在荔枝^[12-13]及其他农产品^[14-15]品质信息检

测上已有一定应用。但能否通过理化指标识别荔枝褐变程度尚未见报道。

本文探究理化指标识别荔枝褐变程度的可行性。采用 3 种常用保鲜环境(常温保鲜、冷鲜柜保鲜和气调保鲜)贮藏采后荔枝,并测量荔枝保鲜过程中的褐变程度及其他理化指标变化,为水果褐变准确识别以及商品价值评价提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 保鲜平台

试验分别采用空调、GX 冷柜(中国广州市广翔电气有限公司)和自主设计的气调保鲜试验平台^[16]作为 3 种保鲜环境(常温保鲜、冷鲜柜保鲜和气调保鲜)的试验设备。其中实验室自主设计的气调保鲜试验平台性能可靠,可根据试验需求调节厢体内环境,其结构示意图如图 1 所示。

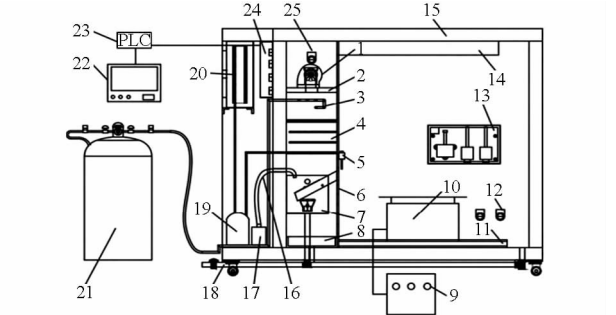


图 1 气调保鲜平台结构示意图

Fig. 1 Structure of controlled atmosphere storage platform
1. 风机 2. 风机安装板 3. 蒸发器 4. 汽化盘管 5. 监测温度传感器 6. 开孔隔板 7. 加湿器 8. 积水槽 9. 振动机控制电箱 10. 振动机工作平台 11. 气流导轨 12. 排气阀 13. 传感器盒 14. 回风道 15. 压差式厢体 16. 进水管 17. 补水箱 18. 排水管道 19. 压缩机 20. 冷凝器 21. 液氮罐 22. 记录仪 23. 可编程控制器 24. 继电器盒 25. 进气阀

该气调保鲜厢体基于压差原理设计,总尺寸为

1. 90 m × 1. 10 m × 1. 50 m, 厢体材料为不锈钢和聚乙烯隔温材料。开孔隔板将厢体分为压力室和保鲜室 2 部分。压力室自上而下分别是风机、汽化盘管、制冷机组的蒸发器和超声波加湿装置。风机运转在回风道形成负压, 在压力室形成正压。在压差作用下, 气流从保鲜室经回风道进入压力室, 然后通过开孔隔板返回保鲜室, 如此循环。液氮充注装置主要包括液氮罐和汽化盘管, 通过往厢体内充注液氮实现调节厢体内的氧气浓度。同时, 由于液氮在汽化过程中会迅速膨胀, 增加厢体内的压力, 故需打开排气阀, 以保证厢体安全。超声波加湿装置主要由水箱和超声波雾化头组成。雾化头将液态水雾化, 水雾在风机气流的驱动下, 通过开孔隔板到达保鲜室, 实现厢体内相对湿度的调节。采用 PLC 对整个贮藏过程中的参数进行控制。

1.2 试验材料

试验所用的荔枝品种为桂味, 均收获于中国广州市从化荔枝果园, 成熟度为 8 ~ 9 成。采摘后 3 h 内运回华南农业大学用于试验。去除果枝, 挑选无损伤荔枝果实, 采用冰块调制的冷水(水温 4 ~ 5℃)对冷鲜柜和气调保鲜的荔枝果实预冷 5 min^[17]。由于在预冷后升温会加速荔枝的衰变^[18], 因此用于常温保鲜的荔枝果实不做预冷处理。将荔枝果实用开孔率为 5% 的聚乙烯袋(300 mm × 200 mm × 0.05 mm)包装, 每袋 30 颗荔枝果实。将包装好的荔枝放置在塑料筐中(440 mm × 320 mm × 110 mm), 再存放在不同保鲜环境中。气调保鲜厢体调节参数为: 温度 3 ~ 5℃, 相对湿度 90% ~ 95%, 氧气体积分数 3% ~ 6%; 冷柜保鲜参数为: 温度 3 ~ 5℃; 常温保鲜条件为: 室温 25℃。

1.3 理化指标测量

据报道, 常温保鲜荔枝褐变速度较快, 通常采后约第 6 天便会完全褐变^[5]。冷鲜柜和气调保鲜可在一定程度上抑制荔枝褐变, 延长荔枝保鲜时间。因此, 试验对常温保鲜荔枝 0 ~ 5 d 的理化指标变化每天检测 1 次, 对冷鲜柜和气调保鲜荔枝 0 ~ 16 d 的理化指标变化每 2 d 检测 1 次。各理化指标测量时, 均从不同保鲜环境中随机取出 20 颗荔枝果实进行检测。

1.3.1 褐变程度与褐变指数

试验参考 ZHANG 等^[19]提出的果皮褐变指数测定方法。将荔枝褐变程度分为 5 个等级: 1 级果为褐变面积小于果皮面积 1/4 的荔枝果实, 2 级果为褐变面积大于等于果皮面积 1/4 小于果皮面积 1/2 的荔枝果实, 3 级果为褐变面积大于等于果皮面积 1/2 小于果皮面积 3/4 的荔枝果实, 4 级果为褐变面积大于等于果皮面积 3/4 的荔枝果实, 5 级果为完

全褐变的荔枝果实。褐变程度可较好地表达单颗荔枝的褐变情况。

褐变指数 R 通常用于表达一批荔枝整体的褐变情况, 其计算公式为

$$R = \sum \frac{LN_L}{M} \quad (1 \leq L \leq 5)$$

式中 L ——荔枝褐变级数
 N_L ——第 L 级荔枝样本数
 M ——调查果实总数

1.3.2 色差 a^* 、 b^* 和 L^*

采用日本美能达 CR-400 型全自动色差仪获取荔枝果实的色差值, 包括 L^* 、 a^* 和 b^* 。其中 L^* 越大则果皮越亮, 反之越暗; a^* 越大则果皮越红, 反之越绿; b^* 越大则果皮越黄, 反之越蓝。在荔枝果实的赤道两面各测 1 次色差, 每个样本重复检测 3 次。

1.3.3 可溶性固形物含量(TSS)

进行荔枝果肉硬度检测前, 剥除荔枝果皮并采用洁净纱布对荔枝果肉取汁, 搅拌均匀后备用。采用数字折射计(PR-32α 型, 日本爱拓中国分公司)测量每颗荔枝样本的可溶性固形物含量。剥除荔枝果皮后对果肉进行挤压取汁, 搅拌均匀后进行检测, 每次测量重复 3 次。

1.3.4 果肉硬度

剥去荔枝果皮, 留取果肉待测。试验参考罗静等^[20]采用的果肉硬度测量方法获取荔枝果实样本的果肉硬度。果实硬度计为 GY 系列便携式果实硬度计(中国乐清市艾德堡仪器有限公司)。每颗荔枝果实重复测量 3 次。

1.4 模式识别方法

1.4.1 线性判别分析

线性判别分析(LDA)是一种运用降维进行模式识别的线性识别方法。LDA 分析法能从所有传感器中收集数据信息, 每一个类别通过一个特殊的向量化变换得到, 使得样本内的分布凝聚而样本间的分布疏远^[21]。

1.4.2 偏最小二乘回归分析

偏最小二乘回归分析(PLSR)是一种多元回归分析, 它根据变量的不同权重, 计算各变量的回归系数, 建立回归方程, 根据回归方程计算出预测结果^[22]。

1.5 统计与分析软件

试验数据采用 Excel 2007 软件和 Matlab 7.0 软件进行统计与数据分析。

2 结果与讨论

2.1 不同保鲜环境荔枝褐变指数变化

3 种保鲜环境荔枝褐变指数随保鲜时间变化如

图 2 所示。常温保鲜荔枝果皮褐变指数随保鲜时间的增加迅速上升,并在第 5 天接近 5。冷鲜柜保鲜与气调保鲜荔枝褐变指数相对常温保鲜荔枝褐变指数上升较慢,在 0~8 d 变化较小。8 d 后,冷鲜柜保鲜荔枝褐变指数增大较快,在第 16 天达到 4.35,气调保鲜荔枝褐变指数增加速度仍较慢,在第 16 天仅为 2.5。因此,试验采用的 3 种保鲜方式对果皮褐变抑制效果由好到差依次为气调保鲜、冷鲜柜保鲜和常温保鲜。

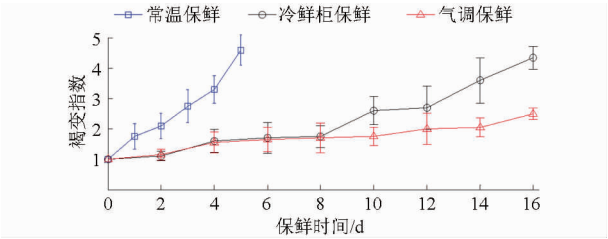


图 2 不同保鲜环境荔枝采后褐变指数变化
Fig. 2 Browning index changes of different storing environments

2.2 荔枝褐变指数与其他理化指标的变化关系

2.2.1 褐变指数与色差 a^* 的变化关系

3 种保鲜环境荔枝果皮色差 a^* 与褐变指数之间的变化关系如图 3 所示。荔枝果皮色差 a^* 随着褐变指数的增大呈下降的趋势。冷鲜柜保鲜和气调保鲜 2 种环境荔枝的果皮色差 a^* 下降速度较为相近,且上述 2 种保鲜方式荔枝 a^* 相对常温保鲜下降速度较慢。这种差异可能是因为冷鲜柜保鲜和气调保鲜能够较好地保存荔枝果皮中的水分,即便在相同的褐变程度,冷鲜柜保鲜和气调保鲜荔枝依然比常温保鲜荔枝含水量丰富而造成的色泽偏差所致。气调保鲜荔枝在第 16 天色差 a^* 平均值约为 27.6,冷鲜柜保鲜荔枝色差 a^* 值达到 27.6 的时间为 10~12 d,常温保鲜荔枝达到该值的时间为 0~1 d。

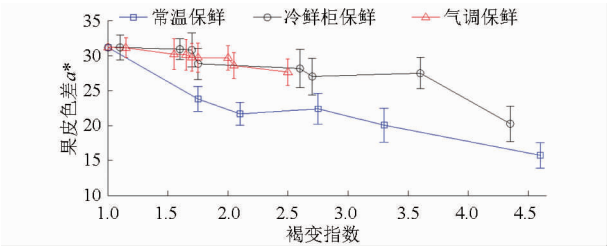


图 3 不同保鲜环境荔枝果皮 a^* 与褐变指数的关系
Fig. 3 Relationship between a^* value and browning index of different storing environments

2.2.2 褐变指数与色差 b^* 的变化关系

图 4 为 3 种不同保鲜环境荔枝果皮褐变指数与色差 b^* 之间的变化关系。果皮色差 b^* 随着褐变指数的增大而不断减小。褐变指数从 1 到 1.75 阶段,3 种保鲜环境荔枝变化速率较为一致。1.75 后,常

温保鲜荔枝色差 b^* 减少幅度较冷鲜柜保鲜和常温保鲜荔枝大,可能是因为冷鲜柜保鲜和气调保鲜能够较好地保存荔枝果皮中的水分所致。气调保鲜荔枝在第 16 天色差 b^* 平均值约为 23.9,冷鲜柜保鲜荔枝色差 b^* 达到 23.9 的时间为 14 d 左右,常温保鲜荔枝色差 b^* 达到该值的时间为 2~3 d。

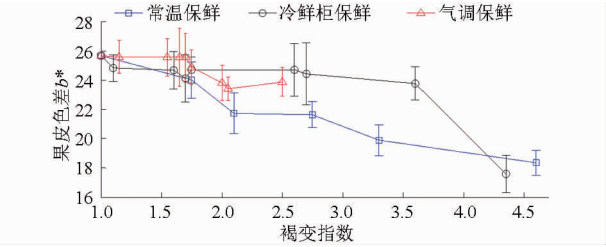


图 4 不同保鲜环境荔枝果皮 b^* 与褐变指数的关系
Fig. 4 Relationship between b^* value and browning index of different storing environments

2.2.3 褐变指数与色差 L^* 的变化关系

不同保鲜环境荔枝褐变指数与色差 L^* 的变化关系如图 5 所示。荔枝果皮色差 L^* 随褐变指数的增大逐渐下降,且 3 种保鲜环境荔枝果皮色差 L^* 下降速度较为一致。气调保鲜荔枝在第 16 天色差 L^* 平均值约为 34.6,冷鲜柜保鲜荔枝色差 L^* 达到 23.9 的时间为 14~16 d,常温保鲜荔枝色差 L^* 达到该值的时间为 5~6 d。

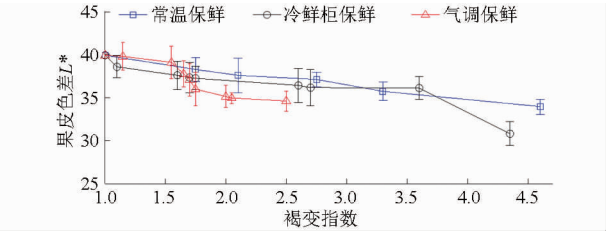


图 5 不同保鲜环境荔枝果皮 L^* 与褐变指数的关系
Fig. 5 Relationship between L^* value and browning index of different storing environments

2.2.4 褐变指数与可溶性固形物含量的变化关系

3 种保鲜环境荔枝褐变指数与可溶性固形物含量的变化关系如图 6 所示。由图可知,3 种保鲜环境荔枝可溶性固形物含量与褐变指数的变化较为一

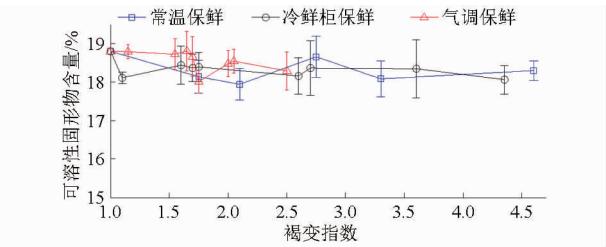


图 6 不同保鲜环境荔枝可溶性固形物含量与褐变指数的关系
Fig. 6 Relationship between TSS and browning index of different storing environments

致,但变化趋势不明显,是因为在荔枝采后保鲜过程中可溶性固形物含量变化幅度较小所致。因此,理化指标可溶性固形物含量对荔枝褐变的关联效果较差。

2.2.5 褐变指数与果肉硬度的变化关系

3 种不同保鲜环境荔枝褐变指数与果肉硬度的变化关系如图 7 所示。随着荔枝褐变指数的增大,荔枝果肉硬度逐渐变小。当褐变指数达到 2.7 附近后,果肉硬度变化减小。常温保鲜、冷鲜柜保鲜和气调保鲜荔枝在第 5、16 和 16 天的果肉硬度平均值分别为 0.154、0.162、0.157 MPa,常温保鲜荔枝果肉硬度减小较快。

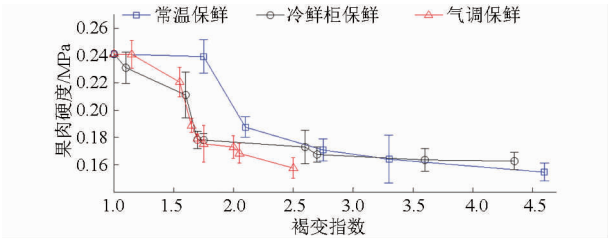


图 7 不同保鲜环境荔枝果肉硬度与褐变指数的关系
Fig.7 Relationship between firmness and browning index of different storing environments

2.3 不同保鲜环境荔枝褐变程度的 LDA 识别

由于理化指标可溶性固形物含量对荔枝褐变表征的效果较差,为进一步探究理化指标对荔枝褐变识别的可行性,试验采用随褐变指数变化较明显的色差 a^* 、 b^* 、 L^* 和果肉硬度作为 LDA 分析的输入特征,从 3 种保鲜环境荔枝中分别挑选不同褐变程度荔枝样本各 10 个,对荔枝的褐变程度进行分类识别。

2.3.1 常温保鲜荔枝褐变程度 LDA 识别

图 8 为常温保鲜荔枝褐变程度 LDA 识别结果。第 1 线性判别因子(LD1)的贡献率为 91.93%,第 2 线性判别因子(LD2)的贡献率为 7.17%,LD1 和 LD2 的总贡献率为 99.1%。1~5 级荔枝在 LD1 方向呈从右至左分布。褐变程度 4 级有 1 个数据点与 5 级荔枝样本数据点重叠,无法较好地分类识别,其余褐变程度级荔枝果实均无重叠现象,可以被区分开来,识别正确率为 96.76%。

2.3.2 冷鲜柜保鲜荔枝褐变程度 LDA 识别

冷箱柜保鲜荔枝褐变程度 LDA 识别结果如图 9 所示。LD1 的贡献率为 97.02%,LD2 的贡献率为 1.89%,LD1 和 LD2 的总贡献率为 98.91%。1~5 级荔枝在 LD1 方向呈从左至右分布。各褐变程度荔枝样本均无重叠现象,可以较好地进行区分,识别正确率为 100%。但 4 级果和 5 级果距离较近,实际分类中易发生混淆。

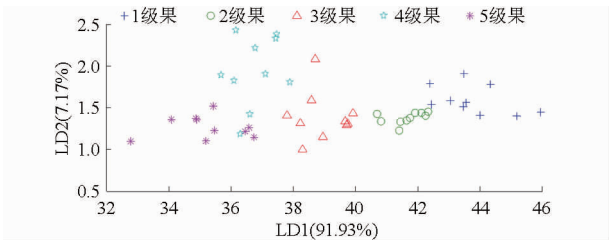


图 8 常温保鲜环境荔枝褐变程度的 LDA 识别结果
Fig.8 LDA for browning classification of room temperature storing environments

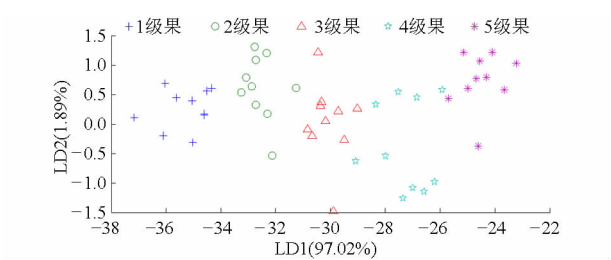


图 9 冷鲜柜保鲜环境荔枝褐变程度的 LDA 识别结果
Fig.9 LDA for browning classification of refrigerator storing environments

2.3.3 气调保鲜荔枝褐变程度 LDA 识别

气调保鲜荔枝褐变程度 LDA 识别结果如图 10 所示。第 1 线性判别因子(LD1)的贡献率为 98.05%,第 2 线性判别因子的贡献率为 1.61%,LD1 和 LD2 的总贡献率为 99.66%。1~5 级荔枝在 LD1 方向呈从右至左分布。各褐变程度荔枝样本均无重叠现象,可以较好地进行分类识别,识别正确率为 100%。但 4 级果和 5 级果距离较近,实际分类中易发生混淆。

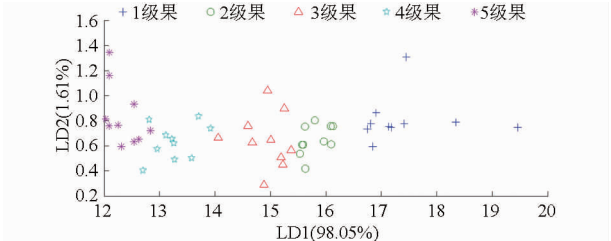


图 10 气调保鲜环境荔枝褐变程度的 LDA 识别结果
Fig.10 LDA for browning classification of controlled atmosphere storing environments

2.4 荔枝褐变程度的偏最小二乘回归分析

根据 LDA 对不同保鲜环境荔枝褐变程度分析结果可知,理化指标对各级果均具有较好分类识别效果。但 3 种保鲜环境的褐变程度是否能被同一模型所识别,从而为实际分类有效地简化识别过程、节约识别时间,需进一步探究。为此,从不同保鲜环境荔枝中随机选择 5 种褐变程度荔枝各 24 个作为训练集,各 6 个作为测试集,获得训练集样本数 120 个,测试集样本数 30 个。

对荔枝褐变程度的 PLSR 识别结果如图 11 所

示。拟合决定系数 R^2 为评判预测结果与实际值之间相关性的重要指数, R^2 越接近于 1, 说明预测值与实际值线性相关越强, 预测效果越好, 反之, 预测效果越差。通常, R^2 大于 0.8, 代表预测结果与实际值具有较强的相关性。PLSR 对训练集识别的预测值与实际值的 R^2 为 0.85。PLSR 对测试集识别的预测值与实际值的 R^2 为 0.90。因此, 采用理化指标识别荔枝褐变程度是可行的 (R^2 均大于 0.8)。

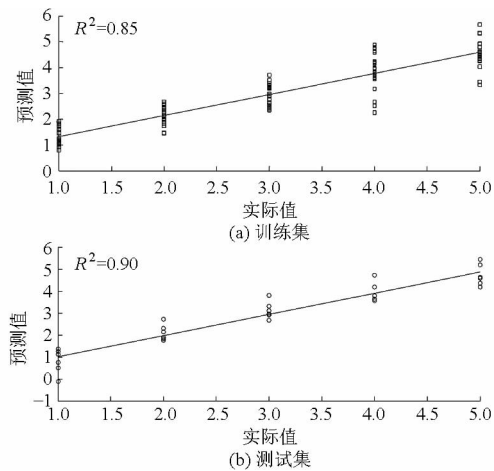


图 11 荔枝褐变程度的 PLSR 识别结果
Fig. 11 PLSR for browning classification of litchi

3 结论

- (1) 试验验证了荔枝理化指标与褐变之间存在一定的变化关系, 采用理化指标对荔枝褐变进行识别是可行的。
- (2) 常温、冷鲜柜和气调 3 种保鲜环境荔枝褐变指数随褐变程度增大逐渐增大, 其中常温保鲜荔枝增大最快, 冷鲜柜保鲜荔枝其次, 气调保鲜荔枝较慢。理化指标色差 a^* 、 b^* 、 L^* 和硬度均随褐变指数增大呈减小的趋势。可溶性固形物含量随褐变指数增大变化不明显。
- (3) LDA 对常温、冷鲜柜和气调 3 种保鲜环境荔枝褐变程度识别正确率分别为 96.67%、100% 和 100%。但冷鲜柜和气调保鲜荔枝 4 级与 5 级果 LDA 分析数据点较近, 实际分类易发生混淆。因此, LDA 可较好地识别 1 级、2 级、3 级和 4~5 级荔枝果实。
- (4) 采用偏最小二乘回归 (PLSR) 建立预测模型同时对 3 种保鲜环境同荔枝褐变程度预测时, 训练集与测试集测试值与实际值的拟合决定系数 R^2 分别为 0.85 和 0.90, 证明了不同保鲜环境荔枝通过同一个模型进行预测的可行性。

参 考 文 献

1 JIANG Y, DUAN X, JOYCE D, et al. Advances in understanding of enzymatic browning in harvested litchi fruit[J]. Food Chemistry, 2004, 88(3): 443-446.

2 YANG Y, SUN D, WANG N, et al. Real-time evaluation of polyphenol oxidase (PPO) activity in lychee pericarp based on weighted combination of spectral data and image features as determined by fuzzy neural network[J]. Talanta, 2015, 139: 198-207.

3 袁艳春. 荔枝保鲜原理与技术[J]. 中国南方果树, 1997, 26(3): 30-31.

4 张昭其, 庞学群. 采后荔枝果皮褐变的研究[J]. 热带作物学报, 1997, 18(2): 53-58.

ZHANG Zhaoqi, PANG Xuequn. Pericarp browning of postharvest litchi fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 1997, 18(2): 53-58. (in Chinese)

5 周先治, 陈阳, 唐建阳, 等. 荔枝褐变损失估计研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(8): 1403-1408.

ZHOU Xianzhi, CHEN Yang, TANG Jianyang, et al. Loss estimation of litchi fruit due to pericarp browning[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(8): 1403-1408. (in Chinese)

6 张昭其, 庞学群. 荔枝果皮褐变过程中花色素苷含量的变化及测定[J]. 华南农业大学学报, 2002, 23(1): 16-19.

ZHANG Zhaoqi, PANG Xuequn. Change of anthocyanin content and it's determination during lychee pericarp browning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2002, 23(1): 16-19. (in Chinese)

7 SCOTT K J, BROWN B I, CHAPLIN G R, et al. The control of rotting and browning of litchi fruit by hot benomyl and plastic film[J]. Scientia Horticulturae, 1982, 16(3): 253-262.

8 YANG Y, SUN D, WANG N. Rapid detection of browning levels of lychee pericarp as affected by moisture contents using hyperspectral imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 203-212.

9 张立. 机载推帚式高光谱成像仪实现宽视场的技术途径[J]. 红外, 2002(9): 20-26.

10 BARBA F J, ESTEVE M J, FRIGOLA A. Physicochemical and nutritional characteristics of blueberry juice after high pressure processing[J]. Food Research International, 2013, 50(2): 545-549.

11 PINGRET D, DURAND G, FABIANO-TIXIER A, et al. Degradation of edible oil during food processing by ultrasound: electron paramagnetic resonance, physicochemical, and sensory appreciation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(31): 7761-7768.

12 JAYACHANDRAN L E, CHAKRABORTY S, RAO P S. Effect of high pressure processing on physicochemical properties and bioactive compounds in litchi based mixed fruit beverage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 28: 1-9.

13 GHOSH U, BHATTACHARJEE A, BOSE P K, et al. Physicochemical changes of litchi in modified atmospheric storage[J].

Indian Journal of Chemical Technology, 1998, 5(6): 393 – 396.

14 SALVIA-TRUJILLO L, ROJAS-GRAU A, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Physicochemical characterization and antimicrobial activity of food-grade emulsions and nanoemulsions incorporating essential oils[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 547 – 556.

15 LIU J, RU Q, DING Y. Glycation a promising method for food protein modification: physicochemical properties and structure, a review[J]. Food Research International, 2012, 49(1): 170 – 183.

16 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 荔枝果皮色差 a^* 值与其他品质指标的关联性[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 68 – 73.

GUO Jiaming, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Relationship between color index a^* value and other quality indicators of litchi pericarp during storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(10): 68 – 73. (in Chinese)

17 阮文琉, 刘宝林, 宋晓燕. 荔枝的冷却方式选择[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 352 – 353.

RUAN Wenliu, LIU Baolin, SONG Xiaoyan. Comparion of cooling method for litchi fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 352 – 353. (in Chinese)

18 陈洪国, 王育林, 彭永宏. 冷藏荔枝货架期品质与生理变化[J]. 亚热带植物科学, 2001, 30(3): 11 – 15.

Chen Hongguo, Wang Yulin, Peng Yonghong. Shelf-quality and physiological indices of litchi subjected to cool storage[J]. Subtropical Plant Science, 2001, 30(3): 11 – 15. (in Chinese)

19 ZHANG Z, PANG X, JI Z, et al. Role of anthocyanin degradation in litchi pericarp browning[J]. Food Chemistry, 2001, 75(2): 217 – 221.

20 罗静, 田丽萍, 张超, 等. 加工番茄果实硬度与相关性状间的分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 217 – 220.

LUO Jing, TIAN Liping, ZHANG Chao, et al. Analysis of firmness and related characters of processing tomato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 217 – 220. (in Chinese)

21 SAHOOLIZADEH A H, HEIDARI B Z, DEGHANI C H. A new face recognition method using PCA, LDA and neural network [J]. International Journal of Computer Science and Engineering, 2008, 2(4): 218 – 223.

22 QIU S, WANG J, GAO L. Discrimination and characterization of strawberry juice based on electronic nose and tongue; comparison of different juice processing approaches by LDA, PLSR, RF, and SVM [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(27): 6426 – 6434.

(上接第 220 页)

19 赵春江, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 168 – 173.

ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 168 – 173. (in Chinese)

20 彭润玲, 刘长勇, 徐成海, 等. 生物材料冻干过程分形多孔介质传热传质模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 318 – 322.

PENG Runling, LIU Changyong, XU Chenghai, et al. Simulation of heat and mass transfer in fractal porous media during freeze drying of biological materials[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 318 – 322. (in Chinese)

21 LI S, STAWCZYK J, ZBICINSKI I. CFD model of apple atmospheric freeze drying at low temperature[J]. Drying Technology, 2007, 25(7 – 8): 1331 – 1339.

22 任丽影, 任广跃, 杨晓童, 等. 涡流管制冷常压冷冻干燥怀山药[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 7 – 12.

23 MOHAN V P C, PRABAL T. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(21 – 22): 4638 – 4650.

24 OZTOP H F, AKPINAR E K. Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(2): 169 – 177.

25 AKPINAR E K, BICER Y, CETINKAYA F. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 308 – 315.

26 ZHU A S, SHEN X Q. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 345 – 351.