

基于主成分分析与偏最小二乘法建立芒果成熟度判定指标体系

程建虎^{1,2,3}, 周新群^{2,3}, 刘帮迪^{2,3}, 孙静^{2,3}, 张敏^{2,3}, 刘瑜^{2,3}, 崔宽波^{3,4}, 朱璇^{1*}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830000) (2. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125)

(3. 农业农村部产地初加工重点实验室, 北京 100121)

(4. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 为建立“台农1号”芒果成熟度判定指标体系, 并确定代表性成熟度判定指标, 以不同采收期、不同产地的“台农1号”芒果为研究对象, 分析果实后熟生理指标果肉和果皮色泽、质构(硬度、胶着性、弹性、咀嚼性)、可溶性固形物、可滴定酸的变化, 基于主成分分析与偏最小二乘法方法进行果实后熟生理指标系统研究。结果表明: 在以农户初始采收成熟度相同的条件下, 各批次“台农1号”芒果果实后熟生理指标间存在差异。应用偏最小二乘法方法与主成分分析方法确定了果肉 b^* 、可滴定酸、硬度作为评判果实成熟度的一、二、三级最终指标, 通过三个指标的成熟度判定准确率验证一级指标为 94.34%, 二级指标为 87.21%, 三级指标为 68.09%。综上所述, 基于主成分分析与偏最小二乘法建立芒果成熟度判定指标体系是可行的, 该研究为各地区“台农1号”芒果适时采收及销售提供理论指导和实用价值。

关键词: 芒果; 主成分分析; 成熟度判定; 指标体系

文章编号: 1673-9078(2024)05-255-264

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0555

Index System of Mango Maturity Established by Principal Component Analysis and Least Partial Squares Method

CHENG Jianhu^{1,2,3}, ZHOU Xinqun^{2,3}, LIU Bangdi^{2,3}, SUN Jing^{2,3}, ZHANG Min^{2,3},

LIU Yu^{2,3}, CUI Kuanbo^{3,4}, ZHU Xuan^{1*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

(2. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

(3. Key Laboratory of Agro-Products Primary Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China)

(4. Agricultural Mechanization Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, China)

Abstract: To establish a maturity determination index system for “Tainong No.1” mangoes and determine representative

引文格式:

程建虎,周新群,刘帮迪,等.基于主成分分析与偏最小二乘法建立芒果成熟度判定指标体系[J].现代食品科技,2024,40(5):255-264.

CHENG Jianhu, ZHOU Xinqun, LIU Bangdi, et al. Index system of mango maturity established by principal component analysis and least partial squares method [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 255-264.

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 南京农业大学-新疆农业大学联合基金项目(KYYJ201908); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02018-2); 农业农村部规划设计研究院自主研发项目(QD202115); 农业农村部规划设计研究院科技创新团队项目(CHXTY-2021-08)

作者简介: 程建虎(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品贮藏技术与果蔬采后保鲜生理, E-mail: 2551631191@qq.com

通讯作者: 朱璇(1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 13999877961@126.com

maturity determination indices, mangoes harvested at different times and locations were analyzed for changes in physiological postharvest ripening indicators, including flesh and skin color, texture (hardness, adhesion, elasticity, chewiness), soluble solids, and titratable acidity. A systemic study of postharvest ripening physiological indicators was conducted using principal component analysis and partial least squares methods. The results showed differences in physiological postharvest ripening indicators among batches of “TaiNong No.1” mangoes harvested at the same initial maturity level. Using the partial least squares and principal component analysis methods, flesh b^* , titratable acidity, and hardness were determined to be the first, second, and third final indicators for evaluating fruit ripeness, respectively. The accuracy rates of maturity determination for the three indicators were 94.34%, 87.21%, and 68.09%, respectively. In conclusion, by establishing a comprehensive evaluation index system and determining the corresponding maturity level index values, theoretical guidance and practical value for timely harvesting and sales of “TaiNong No.1” mangoes in different regions were provided.

Key words: mango; principal component analysis; ripeness assessment; standard system

芒果 (*Mangifera indica* L.) 是世界第二大热带水果^[1]。芒果果实属呼吸跃变型水果, 采收上市季节温度较高。为了减少芒果贮运过程中的损失, 保证销售品质, 商业上常采收低成熟度的芒果, 以达到更长的货架周期和更好的货架品质。但目前芒果的成熟度判定均为果农按照经验值进行, 容易造成过量催熟、加速衰老腐烂、商品品质不均一等问题^[2]。为了建立可靠的成熟度指数, 可对果实后熟理化性质进行研究并做指标差异分析, 构建成熟度判定指标体系。Yan 等^[3]通过检测不同成熟期的枣果营养物质质量分数, 分析了枣果成熟过程中营养物质变化规律, 结果可系统、全面地评价枣果的质量且为其适宜采收期提供科学依据。何婉茹等^[4]以陕西千阳地区四个品种整个成熟期的苹果为实验样本, 制备了该四个苹果品种成熟期的碘-淀粉染色图谱, 结果表明, 碘-淀粉染色图谱能客观反映苹果的成熟度。蓝英杰等^[5]通过测定海南黄金百香果不同成熟度下皱缩指数、病情指数等外观指标, 呼吸速率、乙烯释放量、丙二醛等生理指标, 结合贮藏期间百香果各项指标, 建立海南黄金百香果成熟采收标准, 进而指导果实贮藏保鲜。对于芒果, 使用近红外光谱法^[6]、视觉光谱分析^[7], 声学 and 超声波技术^[8]等方法也被报道, 但这些仪器价格昂贵且难以携带到果园。因此, 进行简单、快速、精准评估芒果成熟的指标和方法, 对芒果产业高值化发展和储运减损具有重要意义。

随着果实向成熟期发育, 色泽转变, 比重增加, 可滴定酸质量分数降低, 可溶性固形物质量分数增加等, 每个指标代表的生物学含义及其变化规律纷繁芜杂, 独立分析某一或某些相关指标往往缺乏系统性, 难以全面直观地反映整体差异情况, 不能很

好地判断果实的成熟度^[9,10]。近年来, 偏最小二乘法判别分析 (Partial Least Squares-Discriminant Analysis, PLS-DA) 与主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 在果蔬贮藏品质方面多有应用^[11-13]。在理论上, 果实最佳生理成熟度可能与消费者感官偏好的最佳成熟期有差异, 因此需要结合消费者的感官分析进行研究^[14]。本研究通过对不同批次“台农1号”芒果成熟过程中色泽、质构、可滴定酸、可溶性固形物等指标进行系统研究。针对不同批次芒果果实指标的变化, 对各指标进行相关性分析, 通过PCA方法结合多次重复实验建立“台农1号”芒果成熟度判定指标体系, 确定代表性成熟度判定指标。通过双盲实验验证了指标体系的准确率, 进而指导生产, 为各地区“台农1号”芒果适时采收及销售提供理论指导和实用价值。

1 材料与方法

1.1 实验材料

以“台农1号”芒果 (*Mangifera indica* L. ‘Tainong No.1’) 为原料, 选取2021年10月采摘自四川 (批次1)、2022年1月采摘自海南 (批次2)、2022年4月采摘自云南 (批次3) 产地的三批次芒果为原料。三批次芒果成熟度均为青熟 (根据花后120 d, 商业6~7成熟^[15]), 进行试验前未经任何催熟处理。为保证试验材料的随机性, 采取无挑选、无差别取样的原则, 因此芒果的选取上仅剔除了病、坏、腐、颜色成熟度差异大的果实。芒果果实用0.1%的次氯酸钠溶液喷洒表面, 自然晾干后待用。

1.2 仪器与设备

TSC 电子天平, FAYA- 深圳市飞亚衡器有限公司; CHROMA METER SC-10 精密色差仪, 日本柯尼卡美能达传感公司; PAL-BX ACID F5 型数显糖度计, 日本 ATAGO 公司; Rapid-TA 质构仪, 上海腾拔仪器科技有限公司。

1.3 自然环境成熟实验

将芒果以 10 个果实为一组, 置于保鲜箱内, 设置箱体内环境湿度 $75.00\% \pm 5.00\%$, 温度 $(20.0 \pm 0.1) ^\circ\text{C}$, 开展贮藏实验。设定贮藏时间为 9 d, 每天取样测定果实果皮 (L^* 、 a^* 、 b^*)、果肉 (L^* 、 a^* 、 b^*)、硬度、弹性、咀嚼性、胶着性, 并留取果皮、果肉样品, 每组三个重复, 液氮冷冻 $-40 ^\circ\text{C}$ 冰箱保存, 用于可溶性固形物、可滴定酸的测定。

1.4 芒果成熟相关指标的测定

1.4.1 可溶性固形物质量分数的测定

参考自辛奇等^[16]方法测定, 称取冻样 1 g, 置于研钵中, 加入蒸馏水进行研磨, 将研磨液全部转移至离心管中。于 $80 ^\circ\text{C}$ 水浴锅中加热 30 min, 4 000 r/min 离心 10 min, 上清液转移至 25 mL 容量瓶中, 残渣继续加入蒸馏水水浴后离心, 该过程重复 2 次, 合并上清后, 容量瓶定容。取 1 mL 加入 19 mL 蒸馏水混匀后取 0.5 mL 加 1.5 mL 蒸馏水, 再加 5 mL 蒽酮-硫酸试剂, 显色后于波长 630 nm 下测定吸光度值, 参照标准曲线查出相应的蔗糖微克数 ($y=112.12x+0.2923$, $R^2=0.9995$), 按下式计算组织中可溶性固形物质量分数 (%)。

$$H = \frac{h \times V \times p}{m_{\text{样}} \times 10^6} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

H —可溶性糖质量分数, %;

h —标曲所得糖量, μg ;

V —提取液体积, mL;

p —稀释倍数;

$m_{\text{样}}$ —样品质量, g。

1.4.2 可滴定酸质量分数的测定

参考自刘帮迪等^[17]的方法, 略作修改。称取冻样 5 g, 置于研钵中进行充分研磨, 将果实匀浆全部转移到 100 mL 容量瓶中, 并用蒸馏水定容至刻度, 摇匀, 静置 30 min 后过滤; 取 600 μL 滤液进行测定, 折算系数以苹果酸计可滴定酸质量分数 (%), 重复 3 次。

1.4.3 色泽的测定

参考自周新群等^[18]的方法, 略作修改。采用 SC-10 精密色差仪对芒果果皮、果肉的 L^* 、 a^* 和 b^* 值进行测定, 其中 L^* 代表亮度值, a^* 代表红绿值, b^* 代表黄蓝值。

1.4.4 质构的测定

参考自冯欣欣等^[19]的方法, 略作修改。选择各果实赤道附近 1 cm 厚度果实切块, 利用质构仪测定果实硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性。测定条件: 探头型号为 P/10 柱形探头, 模式为 TPA, 压缩量 30%, 测试速率 1 mm/s, 触发点负荷为 100 g。每组测定 10 个果实, 硬度单位为 g, 测定结果取平均值。

1.5 分析模型构建

PLS-DA 是一种有监督的判别分析统计方法。该方法可建立指标与样本类别之间的关系模型, 来实现对样本类别的预测。PLS-DA 得分图有二维和三维两种展示形式。在二维得分图中横坐标 PC1 表示第一主成分。纵坐标 PC2 表示第二主成分, 百分比表示该主成分对数据集的解释率, 圆圈表示 95% 的置信区间; 图中的每个点表示一个样品。同一个组的样品使用同一种颜色表示, Group 为不同的分组; PLS-DA 得分图可以让我们非常直观地看出各个样本之间的相似性。在一张 PCA 得分图中, 数个样本的点聚在一起, 那么就说明这几个样本之间的相似性非常高, 反之, 如果几个样本的点非常分散, 则说明这几个样本之间的相似性比较低。本研究运用 Metabo Analyst 5.0 基于各指标物质应用 PLS-DA 方法分析指标在不同批次间的差异, 得到得分图可直观显示各批次指标在空间的投射聚类特征, 进行批次果实样本差异识别并获得差异指标。

PCA 是一种从众多原始指标之间相互关系入手, 寻找少数综合指标以概括原始指标信息的多元统计方法, 它根据在初选的特征量间可能存在的相关性, 找到一种空间变换方式, 通过对经标准化后的原始特征变量进行线性组合, 形成若干个新的特征矢量, 要求它们之间相互正交, 它既保留了原始指标的主要信息, 且又互不相关。

1.5.1 主成分分析数据标准化

设进行主成分分析的指标变量有 m 个, X_1, X_2, \dots, X_m , 共有 n 个评价对象, 第 i 个评价对象的第 j 个指标的取值为 X_{ij} , 将各指标值 X_{ij} 转换成标准化指标 \tilde{X}_{ij} 。

芒果成熟度判定问卷

问题 1. 您需判定的果实编号分别为 ()、()、()、()、()。
 问题 2. 对应问题 1 中果实编号, 您选择评判的指标分别为 ()、()、()、()、()。
 A 果肉 b^* B 可滴定酸 C 硬度
 问题 3. 对应问题 1 中果实编号, 该果实成熟度判定等级分别为 ()、()、()、()、()。
 A 1 级成熟 B 2 级成熟 C 3 级成熟 D 4 级成熟

具体感官评测方法:

评鉴员色泽快速判定方法: 将果实平铺放置, 距果皮 1 cm 处横切, 采用 SC-10 精密色差仪测定果肉 b^* 并进行成熟度判定;

评鉴员可滴定酸快速判定方法: 取果肉 5 g, 置于研钵中进行充分研磨, 将研磨后的浆液摇匀后静置 30 分钟, 取 600 μ L 上清液用水果糖酸度计 -PAL-BX/ACID F5 测定可滴定酸并进行成熟度判定;

评鉴员硬度快速判定方法: 利用 Rapid-TA 质构仪测定果实硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性。仪器参数: 探头型号为 P/10 柱形探头, 模式为 TPA, 压缩量 30%, 测试速率 1 mm/s, 触发点负荷为 100 g。选择各果实赤道附近测定 3 次, 取平均值。

图 1 芒果成熟度判定问卷

Fig.1 Mango maturity determination questionnaire

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (3)$$

$$S_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (4)$$

式中:

\tilde{X}_j, S_j ——分别为第 j 个指标的样本均值和样本标准差; 对应的称为标准化指标变量。

$$\tilde{X}_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{S_i} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (5)$$

1.5.2 建立变量之间的相关系数矩阵R

$$R = (r_{ij})_{m \times m} \quad (6)$$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \tilde{X}_{ki} \cdot \tilde{X}_{kj}}{n-1} \quad (i,j=1,2,\dots,m) \quad (7)$$

式中:

r_{ij} ——第 i 个指标与第 j 个指标的相关系数。

1.6 芒果成熟度指标判定准确率验证的感官评测

感官评测实验在北京的实验室开展。邀请 100 位消费者参与感官评测实验, 参与实验的人群包括商超和市场售卖人员 25 人, 食品专业研究人员和研究生 25 人, 普通消费者 50 人; 按年龄比例, 30~50 岁青年消费者 50 人, 大于 50 岁的老年消费者 30 人, 15~30 岁的青少年消费者 20 人。

成熟度指标体系的验证采用消费者双盲感官评测实验的方式开展: 进行成熟度判定验证的芒果样品

有 4 种成熟度, 分别为 1 级成熟、2 级成熟、3 级成熟、4 级成熟。随机将所有芒果切分后分为 100 份, 每份含 5 个样品, 在每个果实上贴有编号便签, 每份果实附一份成熟度判定指标卡和填写问卷。每个参与验证的消费者需评价 5 个果实样品, 通过本研究结果提出的芒果成熟度快速判定指标, 使用相应仪器测定, 进行成熟度判定。感官评测现场有多位研究人员引导消费者进行实验, 可根据我们提供的成熟度判定指标卡来判定自己手中所编号的芒果的成熟度。

1.7 数据分析

采用 Excel 2012 软件对所有数据进行统计, 计算平均值、标准差并绘图, 使用 MetaboAnalyst 5.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>) 进行偏最小二乘判别分析, 应用 SPSS 26.0 软件对实验数据进行相关性分析和 PCA, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同批次果实贮藏期理化指标的变化

色泽是判断果实成熟度以及果实品质的重要指标之一^[20]。图 2 显示了不同批次果实色泽随着贮藏时间的变化, L^* 值表示果实的亮度, a^* 值表示红绿值, 由负值到正值表示果皮颜色由绿色到红色或黄色转变, b^* 值表示黄蓝值, 由负值到正值表示果皮颜色由蓝色到黄色的转变。由图可知, 在自然成熟条件下, 初始采收成熟度一样的条件下, 不同批次果实色泽存在着差异, 尤其为 L^* 和 b^* , 批次 3 果肉 L^* 可达 78.60, 而批次 1 果肉 L^* 为 36.80。此

外, 随着贮藏时间的延长, 不同批次间果实果肉和果皮色泽的转变也存在差异。批次3果实果肉 L^* 在 65.00~75.00 区间波动, 而批次1果实果肉 L^* 在 36.00~50.00 区间, 且对于不同批次果实果肉 b^* 变化趋势也存在着差异。综上可推断出, 果农用于商业的果实成熟度判断方法存在偏差与误导性, 而大多基于种植经验或目测的成熟度判断方法采收的果实在后续的销售中会受到影响。因此, 只依靠果实转色现象经验来判断果实成熟度是有限的。

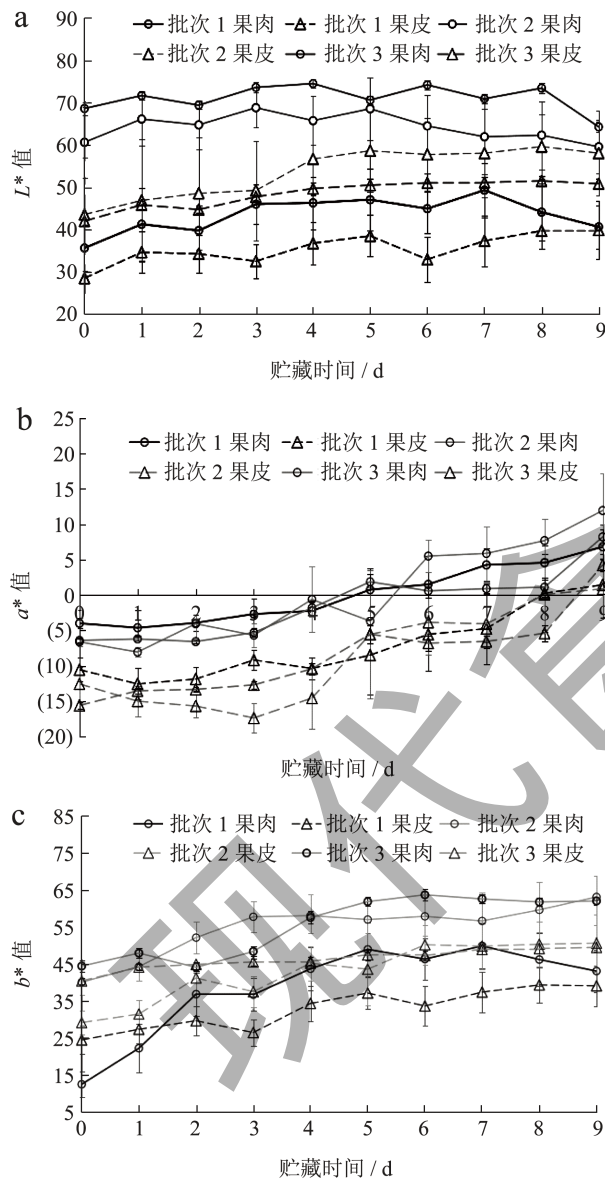


图2 不同产地及时间段“台农1号”芒果果肉和果皮色泽的变化曲线

Fig.2 Change curve of pulp and peel of "Tainong No.1" mango in different origin and time periods

果实质构是判断果实质地, 反映果实贮藏性和衡量贮藏效果, 判断成熟状况的主要指标之一^[21]。而可溶性固形物和可滴定酸也是反应果实成熟度, 衡量果实后熟进程的重要指标^[22,23]。同一成熟度不同批次果实设定贮藏条件下质构、可溶性固形物与可滴定酸质量分数的变化如图3所示。各批次果实初始的硬度及其他质构存在差异。各批次果实硬度在贮藏过程中均迅速下降, 其中批次2与批次3果实硬度下降速率较快于批次1, 且批次3果实硬度始终低于其他批次, 而批次2与批次1果实硬度在2~5 d处于相同值, 之后批次2果实硬度下降速率加快趋于批次3。此外, 由图3e、f可知, 不同批次果实可溶性固形物与可滴定酸质量分数在贮藏过程中的变化差异并不显著, 其中三批次果实可溶性固形物质量分数在第6天时具有相同的值, 而可滴定酸在第7天时具有相同的值。此外, 不论可溶性固形物或可滴定酸质量分数, 三批次果实均有近似相同的变化趋势及变化速率。综上分析, 对于果实化学指标参数的变化, 依靠简洁的经验判断法并不能作为支撑成熟度判定的方法, 建立科学的成熟度评判方法, 将采收及销售成熟度与市场需求相应, 可有效促进果实产业链。

2.2 贮藏期各指标的相关性分析

变量间是否存在相关性是判断原始变量是否适用于PCA的前提^[20]。对不同批次芒果贮藏期间的各生理指标进行相关性分析, 结果如表1所示。果皮 L^* 与果皮 a^* 、果肉 a^* , 可溶性固形物与果皮 a^* 、果肉 b^* 显著正相关 ($P < 0.05$), 果皮 L^* 与果肉 b^* 、果皮 b^* , 果皮 a^* 与果皮 b^* 、果肉 a^* 、果肉 b^* 、可溶性固形物, 果肉 a^* 与果肉 b^* 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 硬度与果皮 L^* 、果皮 a^* 、果皮 b^* 、果肉 a^* 、果肉 b^* 、可溶性固形物, 可滴定酸与果皮 L^* 、果皮 a^* 、果皮 b^* 、果肉 a^* 、果肉 b^* 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明果皮 L^* 、果皮 a^* 、果皮 b^* 、果肉 L^* 、果肉 a^* 、果肉 b^* 、硬度、可滴定酸、可溶性固形物均可反应芒果贮藏期间的成熟等级。各生理指标之间存在一定的相关性, 且各指标之间表现的信息出现交叉重叠。应用PCA的方法来尝试对不同批次果实指标进行数据结构简化, 提高成熟度指标判定的准确性。

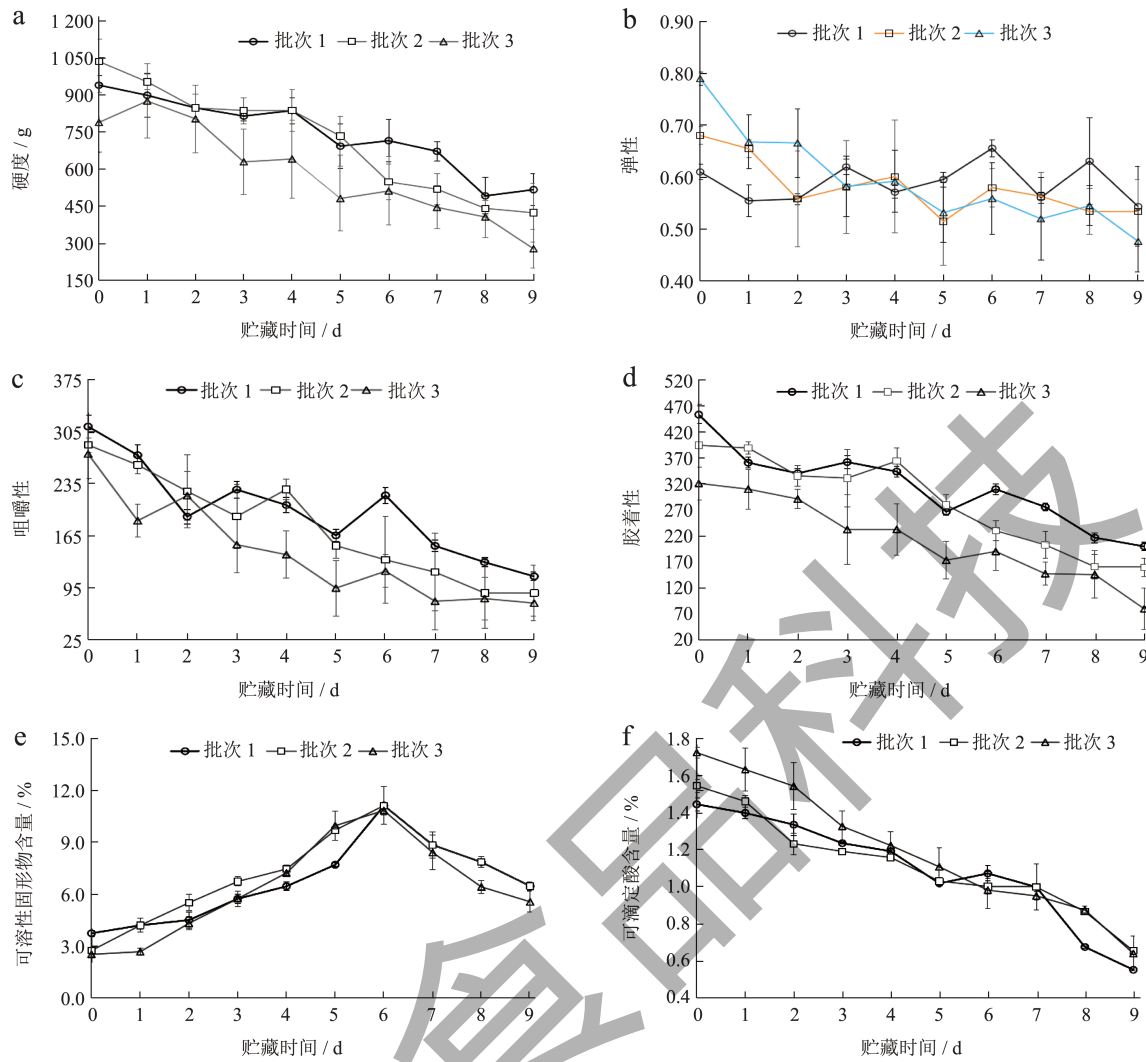


图3 不同批次“台农1号”芒果质地、可溶性固形物、可滴定酸的变化曲线

Fig.3 Change curves of the texture, soluble solids, and titratable acids in different batches of “Tainong No.1” mango

表1 各生理指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of each physiological index

	果皮 L^*	果皮 a^*	果皮 b^*	果肉 L^*	果肉 a^*	果肉 b^*	硬度	弹性	咀嚼性	胶着性	可滴定酸	可溶性固形物
果皮 L^*	1											
果皮 a^*	0.74*	1										
果皮 b^*	0.77**	0.86**	1									
果肉 L^*	0.48	0.32	0.58	1								
果肉 a^*	0.71*	0.96**	0.90**	0.34	1							
果肉 b^*	0.83**	0.94**	0.95**	0.48	0.97**	1						
硬度	-0.83**	-0.94**	-0.96**	-0.57	-0.94**	-0.99**	1					
弹性	-0.33	0.01	0.02	0.13	-0.02	-0.02	-0.02	1				
咀嚼性	-0.89**	-0.85**	-0.87**	-0.49	-0.84**	-0.90**	0.92**	0.19	1			
胶着性	0.33	0.41	0.13	0.04	0.20	0.27	-0.30	0.40	-0.32	1		
可滴定酸	-0.82**	-0.93**	-0.95**	-0.43	-0.92**	-0.97**	0.97**	-0.07	0.91**	-0.39	1	
可溶性固形物	0.52	0.67*	0.82**	0.77**	0.71*	0.76*	-0.82**	0.37	-0.63	0.20	-0.73*	1

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关, *表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。

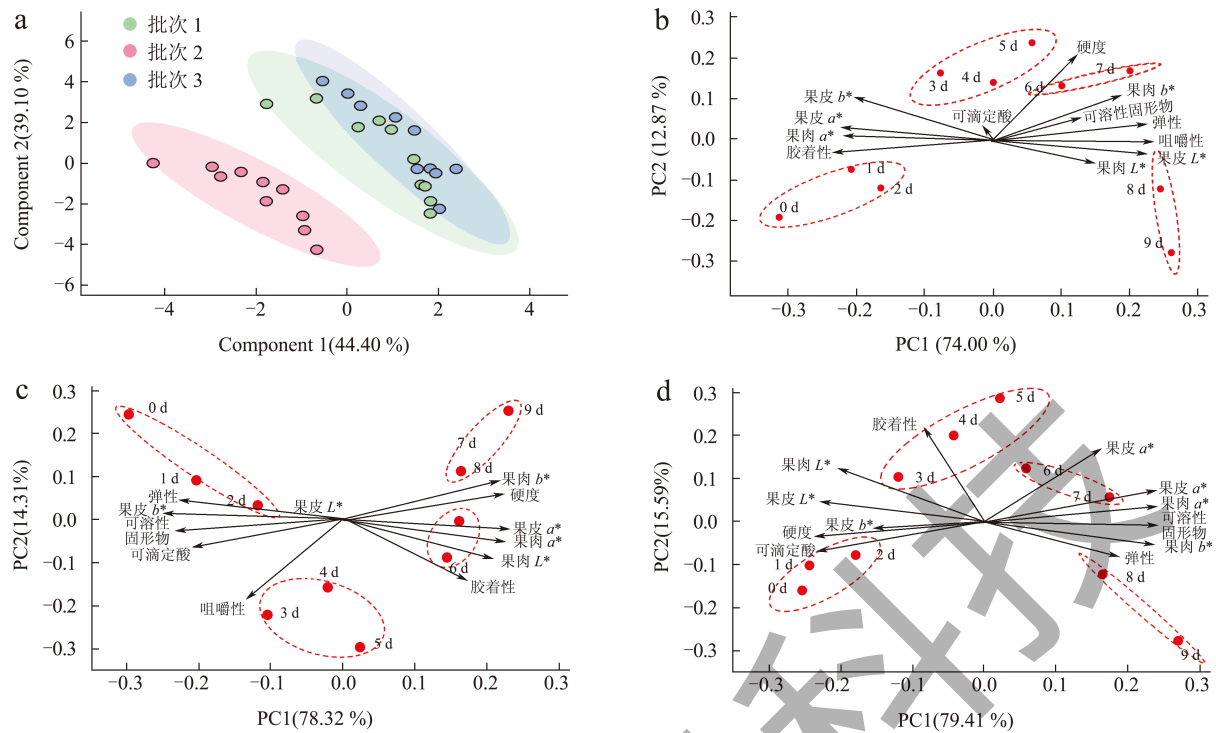


图4 三批次果实指标 PLS-DA 评分图 (a) 及品质参数和贮藏周期 PCA 聚类图

Fig.4 PLS-DA score chart (a) and PCA cluster diagram of quality parameters and storage period

注: (b) 批次 1 PCA 聚类; (c) 批次 2 PCA 聚类; (d) 批次 3 PCA 聚类。

2.3 偏最小二乘法与主成分分析

采用监督 PLS-DA 和无监督 PCA 方法进行三批次指标数据统计分析。图 4a 显示了三批次指标的 PLS-DA 评分图。三批次的 PC1 和 PC2 解释了总方差的 44.40% 和 39.10%。在分数图中, 批次 2 与批次 3 样本点置信椭圆大面积区域重叠, 而单个样本点间却有离散; 批次 2、批次 3 与批次 1 置信椭圆位置接近但不重叠, 说明各批次样本点间具有一定的差异, 但不显著。对三批次果实贮藏期综合表现进行 PCA 聚类发现 (图 4), 三批次果实品质变化模式相近, 各批次 10 个贮藏时间点均可聚成 4 簇 (红色虚线范围所示), 0~2 d、3~5 d、6~7 d、8~9 d。这也说明三批次果实贮藏品质变化模式均可分为 4 个阶段, 分别可代表不同成熟度阶段, 即 1 级成熟、2 级成熟、3 级成熟、4 级成熟, 成熟等级数值越大成熟度越高。

为直观的展示三批次芒果采后指标性能的优劣, 根据 PCA 得到的数据计算 3 批次果实采后成熟度评判指标的综合得分。由表 2 可知, 将各批次间的 12 项指标均转化为 2 个主成分。批次 1 前两个主成分的贡献率分别为 74.00%、12.78%, 累积方差贡献率为 86.87%, 批次 2 前两个主成分的贡献率分

别为 78.32%、14.31%, 累积方差贡献率为 92.63%, 批次 3 前两个主成分的贡献率分别为 79.41%、15.59%, 累积方差贡献率为 95.00%, 且三批次主成分特征值大于 1, 累积方差率大于 85.00%, 所以前两个主成分可以代表各指标的大部分的信息。因此, 选取前两个主成分作为芒果采后成熟度判定指标的主要成分。以特征向量为系数构建各批次前两个主成分的线性方程, 如下:

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{Z_{ij}}{\sqrt{\alpha_{in}}} \\ Y_2 = \frac{Z_{ij}}{\sqrt{\alpha_{in}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

Z_{ij} ——第 i 个主成分第 j 个指标对应的因子;

α_{in} ——第 i 个主成分第 n 个特征值, 其中 $i \in [1,2]$,

$j \in [1,2,\dots,11,12]$, $n \in [1,2]$ 。

将前两个主成分的方差贡献率作为系数带入, 得到综合得分评价方程为:

$$Y = \frac{100Y_1\theta_{im} + 100Y_2\theta_{im}}{\theta_{im} + \theta_{im}} \quad (9)$$

式中:

θ_{im} ——第 i 个主成分第 m 个方差贡献率。

将对应数值带入上述方程，计算不同批次指标的综合得分 Y ， Y 值越大则说明指标越具代表性。三批次果实指标得分如图 5 所示。

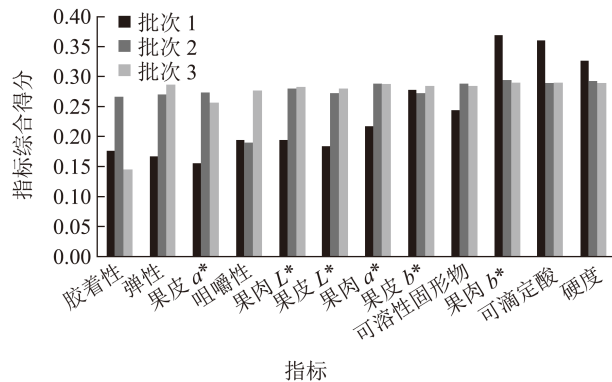


图 5 各批次指标综合得分

Fig.5 Comprehensive score of each batch of indicators

由图 5 可知，批次 1 中较高得分指标依次为果肉 b^* 、可滴定酸、硬度、果皮 b^* 、可溶性固形物，批次 2 中得分较高的依次有果肉 b^* 、硬度、可滴定酸、硬度、果肉 L^* ，批次 3 中得分较高的依次有可滴定酸、果肉 b^* 、硬度、果肉 a^* 、可溶性固形物。现以每批次果实指标前三者得分按 10 分计，选取得分由高到低的指标，依次按 5:3:2 的占比选取作为芒果采后成熟度判定的指标。综合三批次得分为 f ，即：

$$f = \frac{\varepsilon + \rho + \varphi}{3} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

ε 、 ρ 、 φ ——分别为该指标在批次 1、2、3 中的占比。

最终得到果肉 b^* 、可滴定酸、硬度，分别占为 43.33%、33.33%、23.33%。

综上所述，可将评判“台农 1 号”芒果成熟度的指标分为三个等级，即选取果肉 b^* 作为一级指标，可滴定酸为二级指标，硬度为三级指标。根据（图 4b、c、d）PCA 聚类将芒果整个贮藏期划分为 4 个成熟时期，选取各时期指标最佳质量分数来表示等级取值。如表 3，成熟等级为一级时，一级评判指标果肉 b^* 取值为 12.00~19.00，二级指标可滴定酸质量分数为 1.53%~1.73%，三级指标硬度为 8 040.00~9 300.00 g。成熟等级为二级时，一级评判指标果肉 b^* 取值为 20.00~33.00，二级指标可滴定酸质量分数为 1.22%~1.53%，三级指标硬度为 5 790.00~8 039.00 g。成熟等级为三级时，一级评判指标果肉 b^* 取值为 34.00~48.00，二级指标可滴定酸质量分数为 0.89%~1.22%，三级指标硬度为 3 426.00~5 789.00 g。成熟等级为四级时，一级评判指标果肉 b^* 取值为 49.00~66.00，二级指标可滴定酸质量分数为 0.49%~0.89%，三级指标硬度为 456.00~3 425.00 g。

表 2 主成分载荷矩阵、特征值及方差贡献率

Table 2 Principal component load matrix, eigenvalues, and variance contribution rate

指标	批次 1		批次 2		批次 3	
	主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2
胶着性	-0.99	-0.05	0.74	0.52	-0.13	0.91
弹性	0.99	-0.03	-0.97	-0.01	0.98	-0.18
果皮 a^*	-0.98	0.01	0.96	0.07	0.66	0.64
咀嚼性	0.96	0.11	-0.29	0.94	0.97	0.11
果肉 L^*	0.95	-0.11	0.87	-0.35	-0.82	0.50
果皮 L^*	0.95	-0.08	-0.85	-0.32	-0.97	0.14
果肉 a^*	-0.93	0.17	0.95	0.21	0.98	0.20
果皮 b^*	-0.855	0.33	-0.98	0.01	-0.97	-0.18
可溶性固形物	0.85	-0.26	-0.98	0.14	0.95	-0.22
果肉 b^*	0.79	0.57	0.92	-0.35	0.94	-0.30
可滴定酸	-0.02	0.82	-0.96	0.20	-0.97	-0.22
硬度	0.54	0.56	0.91	0.34	-0.97	-0.22
特征值	8.88	1.54	9.40	1.72	9.53	1.87
方差贡献率/%	12.87	74.00	14.31	78.32	15.59	79.41
累积方差贡献率/%	74.00	86.87	78.32	92.63	79.41	95.00

表 3 芒果成熟度快速判定指标

Table 3 Rapid determination index of mango maturity

指标等级	成熟等级	4	3	2	1
	指标	阈值	阈值	阈值	阈值
一级指标	果肉 b^*	49.00~66.00	34.00~48.00	20.00~33.00	12.00~19.00
二级指标	可滴定酸/%	0.49~0.89	0.89~1.22	1.22~1.53	1.53~1.73
三级指标	硬度/g	456.00~3 425.00	3 426.00~5 789.00	5 790.00~8 039.00	8 040.00~9 300.00

2.4 体系验证

为了判断该指标体系的可靠性及实用性,本研究采用消费者调查问卷式的双盲实验进行验证。调查结果显示,根据我们提供的成熟度指标卡,由图 6 可知,通过三个指标的成熟度判定准确率一级指标为 94.34%,二级指标为 87.21%,三级指标为 68.09%。由最佳模型指标判定准确率验证的感官评测结果可知,进行判断时采用三级指标容易判断错误,而采用一级指标相对容易判别,能够实现“台农 1 号”芒果成熟度的准确判别分类是实现芒果成熟度判别分类的关键。

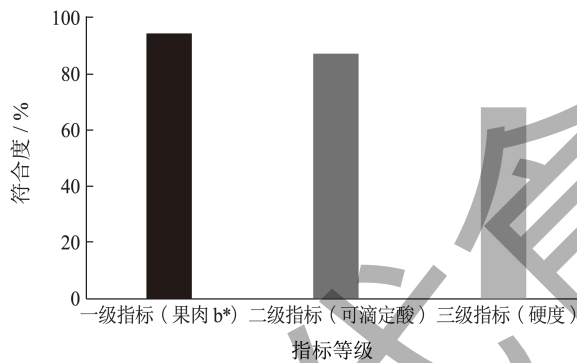


图 6 消费者感官评价结果分析

Fig.6 Analysis of consumer sensory evaluation results

2.5 讨论

从图 2 可知,贮藏初期与贮藏末期的芒果色泽差值比较显著,可以用果皮色泽特征进行判别,但是贮藏中期的芒果果皮色泽差异性较小,较难通过色泽判断进行成熟度的判别。此外,果实成熟度与果实的糖、酸质量分数及硬度也同样密切相关,硬度较低的果实成熟度更高,更加容易腐烂^[24]。本研究选取多个不同时间、产地单一品种果实,参考当地果农经验和水果生长的过程进行选材,从果实内部物质含量及质构变化的角度,应用理化方法分析、探寻芒果成熟过程中硬度、内部物质含量的变化。与以往类似的研究相比,本研究基于一个品种质量指标的预测模型比基于多个品种的预测模型更准确

地确定果实成熟度^[25,26]。

常规分析技术仅能分析不同成熟度果实单个品质指标间的差异,并不能综合表现各个品质指标间的内在关联性和总体差异,这可能导致果实的最佳采收成熟度和最佳贮藏期的误判,有一定主观偏差^[5],PLS-DA 可解释样本之间的确切差异,而 PCA 方法可更加简单有效地呈现原多维数据的差异性^[12],揭示各样品之间的分布趋势。因此,本研究通过 PLS-DA 模型实施了监督分类(图 4a),以监测各批次指标在成熟过程中的差异,利用 PCA 方法,由 PCA 聚类(图 4b、c、d)得到果实成熟度等级体系,进一步进行了判别模型的建立。该成熟度判别模型能适应不同产地和季节,增强了模型的抗背景干扰能力和实用性。与以往的传统方法相比^[27],该体系结合了色泽、酸质量分数、硬度等多指标进行成熟度的判别,提高了判别准确率,可避免一级成熟(颜色呈青色的芒果)的芒果错判为二级成熟的芒果,三级成熟(颜色呈黄色的芒果)的芒果错判为四级成熟的芒果。一般来说,模型的预测准确率越高说明效果越好^[28],本研究对模型的预测准确率分别达到 94.34%、87.21%、68.09%,因此,本研究建立的成熟度判定指标更能体现“台农 1 号”芒果果实成熟度的综合特性和典型特性。

3 结论

通过对不同产地、采收时间“台农 1 号”芒果果实各项指标进行综合分析评价,可知初始采收成熟度较一致条件下不同批次果实初始指标存在差异。相关性分析表明,各生理指标之间存在一定的相关性,且各指标之间表现的信息出现交叉重叠。利用 PCA 分析得到,根据果实成熟度变化时间可将果实成熟度分为四个等级,且得到最终成熟度判定指标分为三级,一级指标为果肉 b^* ,二级指标为可滴定酸,三级指标为硬度,通过三个指标的成熟度判定验证准确率一级指标为 94.34%,二级指标为

87.21%，三级指标为 68.09%，说明本研究提出的成熟判定指标体系是可行的，具有较高的准确度。该方法不需要专业的大型设备，具有简单、快捷等优点，尤其随着智能移动设备的发展，在移动端可直接分析果实成熟指标情况后及时反馈果实的成熟度，在生产实践中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] MA X, ZHENG B, MA Y, et al. Carotenoid accumulation and expression of carotenoid biosynthesis genes in mango flesh during fruit development and ripening [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 237: 201-206.
- [2] YAO Y, DENG Y, LIANG Y, et al. Convenient, nondestructive monitoring and sustained-release of ethephon/chitosan film for on-demand of fruit ripening [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 214: 338-347.
- [3] YAN C, SU C X, LIU X H, et al. Study on nutritional properties of 'Xinzhenghong 3' jujube at different maturation stages [J]. *North Horticulturae*, 2019, 5: 65-69.
- [4] 何婉茹, 王俊峰, 李高潮, 等. 不同苹果品种成熟期淀粉染色图谱的建立[J]. *北方园艺*, 2018, 40(2): 52-58.
- [5] 蓝英杰, 谢雅婷, 从心黎. 采收成熟度对海南黄金百香果贮藏效果的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(8): 44-49.
- [6] SYED S A S, AYESHA Z, WAQAR S Q, et al. Mango maturity classification instead of maturity index estimation: A new approach towards handheld NIR spectroscopy [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 115: 103639.
- [7] 陈文悦, 何军, 朱立学, 等. 基于迁移学习的芒果成熟度分类算法研究[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2022, 35(4): 56-61.
- [8] ZHEN O P, HASHIMA N, MARINGGALA B, et al. Quality evaluation of mango using non-destructive approaches: A review [J]. *Journal of Agricultural and Food Engineering*, 2020, 1(1): 0003.
- [9] 占敏宣, 魏清江, 林雄, 等. PCA再分析采收成熟度对桃溪蜜柚贮藏品质变化模式的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(9): 183-190.
- [10] 刘倩倩, 袁瑞琪, 刘喜喜, 等. 乌海产区“美乐”葡萄成熟度控制指标体系的研究[J]. *北方园艺*, 2019, 23: 32-41.
- [11] NOWICKA P, WOJDYLO A, LASKOWSKI P. Principal component analysis (PCA) of physicochemical compounds' content in different cultivars of peach fruits, including qualification and quantification of sugars and organic acids by HPLC [J]. *European Food Research and Technology*, 2019, 245(4): 929-938.
- [12] ALLEGRE A, GALLOTTA A, CARIMI F, et al. Metabolic profiling and post-harvest behavior of "Dottato" fig (*Ficus carica* L.) fruit covered with an edible coating from *O. ficus-indica* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1321.
- [13] KIM T J, HYEON H, PARK N I, et al. A high-throughput platform for interpretation of metabolite profile data from pepper (*Capsicum*) fruits of 13 phenotypes associated with different fruit maturity states [J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127286.
- [14] 童彤. 澳大利亚: 80% 消费者看重芒果成熟度[J]. *中国果业信息*, 2019, 36(9): 31-32.
- [15] RUNGPICHAYAPICHET P, MAHAYOTHEE B, NAGLE M, et al. Robust NIRS models for non-destructive prediction of postharvest fruit ripeness and quality in mango [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 31-40.
- [16] 辛奇, 刘帮迪, 孙静, 等. LED红光照射对四种果实采后成熟的影响[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(11): 20-28.
- [17] 刘帮迪, 范新光, 舒畅, 等. 长时间近冰点温度贮藏对杏果实货架品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 223-230.
- [18] 周新群, 冯欣欣, 孙洁, 等. 脱水预处理对冷冻紫薯花色苷损失的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(13): 32-41.
- [19] 冯欣欣, 刘帮迪, 杨雪峰, 等. 渗透脱水预处理对蓝莓冷冻融化后品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(9): 56-63.
- [20] FAN X, LIU B, CAO J, et al. Dehydrofreezing of peach: Blanching, D-sodium erythorbate vacuum infiltration, vacuum dehydration, and nitrogen packaging affect the thawed quality of peach [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(7): 12830.
- [21] 贾朝爽, 孙世民, 包敖民, 等. 四种特色品种小苹果采后生理及耐贮性比较[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 308-316.
- [22] LIU B D, XIN Q, ZHANG M, et al. Research progress on mango post-harvest ripening physiology and the regulatory technologies [J]. *Foods*, 2023, 12(1): 173.
- [23] YU S, TANG Y, LAN H, et al. Construction method of quantitative evaluation model for the maturity of Korla fragrant pear [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(4): 243-250.
- [24] 高升, 王巧华, 付丹丹, 等. 红提糖度和硬度的高光谱成像无损检测[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 355-364.
- [25] ZHANG B B, CAI Z X, XU J L, et al. Prediction of soluble solid content of Hujingmilu peach based on regression analysis [J]. *Food Science*, 2014, 35: 68-71.
- [26] PINTO C, REGINATO G, SHINYA P, et al. Skin color and chlorophyll absorbance: Indices for establishing a harvest date on non-melting peach [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 192: 231-236.
- [27] 刘志刚, 王丽娟, 喜冠南, 等. 水果成熟度检测技术的现状与发展[J]. *农业与技术*, 2020, 40(8): 17-21.
- [28] 高升, 徐建华. 基于可见/近红外光谱技术的红提成熟度判别模型[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(1): 170-176.