

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90189

基于相关性和时序分析的鲜食黄桃安全贮藏期的确定及品质预测

Prediction of safe storage period and quality of fresh yellow peach based on correlation and time series analysis

周慧娟^{1,2} 高晓飒³ 叶正文^{1,2} 冯子耀³ 苏明申^{1,2}

ZHOU Hui-juan^{1,2} GAO Xiao-feng³ YE Zheng-wen^{1,2} FENG Zi-yao³ SU Ming-shen^{1,2}

杜纪红^{1,2} 张夏南^{1,2} 李雄伟^{1,2} 张明昊^{1,2}

DU Ji-hong^{1,2} ZHANG Xia-nan^{1,2} LI Xiong-wei^{1,2} ZHANG Ming-hao^{1,2}

(1. 上海市农业科学院林木果树研究所, 上海 201403; 2. 上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403; 3. 上海交通大学数学科学学院, 上海 200204)

(1. Forest and Fruit Tree Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Shanghai 201403, China; 3. School of Mathematical Sciences of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200204, China)

摘要:目的:建立鲜食黄桃安全贮藏期预测模型,实现贮藏品质的预警预测。方法:以锦绣黄桃为试材,对3个采摘期入库果实的带皮硬度、果肉组织硬度、果实色差、可溶性固形物含量等指标进行测定,并对果实质地、色泽、风味和香气4个感官模块进行评分,利用相关性和时序分析技术进行安全贮藏期的确定及品质预测。结果:利用轮廓曲线图确定了最佳聚类数为4,主要表现为果实硬度、可溶性固形物含量及果实红绿色差的差异,与消费者关注的质地、风味和色泽感官模块一致;果实质地、色泽和风味3个感官评分模块间有较强共线性,贮藏时间与果实硬度和果肉组织硬度呈负相关,与果实红绿色差呈正相关;果实红绿色差与果实带皮硬度和果肉组织硬度呈负相关,可作为硬度无损检测的表征因子之一。结论:温度(10.0±0.5)℃、相对湿度80%~85%条件下,建立了非线性果实带皮硬度和果肉组织硬度预测数学模型 $f[T,(a,k,b)]=a \times \exp(k \times T)+b$ 和线性果实红绿色差预测数学模型 $f(x)=kx+b$,两个预测模型的预测误

差较低($R^2>0.9$,平均误差 <0.2)。

关键词:时序分析;相关性分析;鲜食黄桃;安全贮藏期;品质

Abstract: Objective: In order to study the correlation between fruit firmness, total soluble solids, red and green color, sensory scores of fresh yellow peaches, a prediction model of safe storage period of yellow peach was established to realize early warning and prediction of fruits quality. **Methods:** Solute Jinxiu peach was used as test material, firmness with skin, firmness without skin, fruit color difference, soluble solid content and other indexes of the fruits in storage in three picking periods were measured, and sensory scores were made in four modules: fruit texture, color, flavor and aroma. The correlation analysis and time series analysis techniques were used to evaluate and establish a mathematical prediction model. **Results:** The best cluster number determined by contour curve is 4, which mainly showed the differences of fruit firmness, red-green color and soluble solids content, it was consistent with the three module features of texture, color and flavor that consumers paid attention to. There is strong collinearity among sensory scores of the three modules of fruit firmness, color and flavor. Storage time is negatively correlated with fruit with skin and firmness without skin, and positively correlated with fruit red-green color difference. The red-green color of fruit is negatively correlated with fruit with skin and firmness without skin, which can be used as one of the characterization factors for nondestructive testing of firmness. **Conclusion:**

基金项目:上海市农委项目(编号:沪农科推字[2020]第2-14号);农业农村部科技教育司—国家桃产业技术体系项目(编号:CARS-31);上海市农委重点攻关项目(编号:沪农科推字[2018]第1-7号)

作者简介:周慧娟,女,上海市农业科学院副研究员,博士。

通信作者:叶正文(1963—),男,上海市农业科学院研究员,博士。

E-mail: yezhengwen1300@163.com

收稿日期:2021-12-21 **改回日期:**2022-04-08

At a temperature of $(10.0 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $80\% \sim 85\%$, a nonlinear prediction model of fruit with skin and firmness without skin was established: $f[T.(a, k, b)] = a \times \exp(k \times T) + b$; The linear prediction model of red-green color of fruit was established: $f(x) = kx + b$. The verification results show that the prediction error of the above two prediction models is low ($R^2 > 0.9$, average error < 0.2).

Keywords: time-series analysis; correlation analysis; fresh yellow peach; safe storage period; quality

桃属于蔷薇科植物,其果实尤其是溶质桃,为典型的呼吸跃变型果实,质地柔软,采后易腐烂变质^[1]。低温可延长果实的保鲜期,但长期的低温($< 8 ^\circ\text{C}$)冷藏易使果实产生木质化、絮败、果肉褐变、糖酸比失调、固有芳香成分丧失、有害挥发性物质生成等品质劣变症状^[2-3],影响其品牌化的建立^[4]。筛选果品品质表征评价因子,研究评价因子与感官评价的相关性,提高表征评价因子预测果实安全贮藏期的科学性和准确性,预警预测果品安全贮藏期及品质,是保障贮藏品质和效益的有效措施。

张海英等^[5]将桃果实单果重、硬度、水分含量、固酸比和风味作为品质评价的主要表征因子;李丽娜等^[6]报道,苹果 TPA 参数与感官指标之间存在一定的相关性,尤其与口感质地和手感质地间呈极强正相关;果实硬度、黏性、弹性、内聚性、耐咀性、回复性与感官评定指标的外观、气味、风味、口感质地、手感质地及感官评定总分间存在显著相关性。目前,贮藏期间果实品质的常规检测方法为有损抽检,既损坏了果实的商品性,又无预见性,不能做到对果实品质及安全贮藏期的预警预测,一定程度上影响了果实的商品价值,增加了贮藏风险性。目前,利用数学模型预警预测果实安全贮藏期和果品质量成为研究的热点。关于果品品质评价的数学模型包括堆叠式自动编码器和全连接神经网络、线性判别分析、主成分分析、多元聚类分析、因子分析以及偏最小二乘回归等^[7-11]。傅泽田等^[12]根据感官评分确定了蓝莓的货架期;Varela 等^[13]研究表明应根据消费者是否对苹果有购买意愿来决定苹果的货架期;侯晓蕾等^[14]建立了基于模糊鉴别主成分分析的生菜贮藏时间鉴别模型,其准确度高达 93.33%。其中,Tareen 等^[15-17]通过聚类分析对桃和苹果果实颜色进行了分类;Beaudry 等^[18]通过冲击力学建立了恢复系数和冲击下能量吸收率与蓝莓果实硬度之间的关系;朱娜等^[19]利用电子鼻与消费者的感官评估相结合对‘霞辉 5 号’桃果实品质进行了预测;于怀智等^[20]利用近红外光谱实现了对蒙阴黄桃硬度和可溶性固形物含量的在线无损检测。

研究拟以长三角广泛种植的锦绣黄桃为试材,选取品质表征因子及品质评价指标进行测定,通过主成分分析、聚类分析和相关性分析相结合,探究锦绣黄桃冷藏和

货架期间品质变化的差异性,品质表现特征因子与感官评价的相关性,建立安全期预测模型,旨在对果实安全贮藏期及品质进行预警预测,实现减损增效。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验材料

鲜食黄桃:锦绣黄桃,分别于 2020 年度和 2021 年度分 3 批采摘入库贮藏,果品采摘于上海市奉贤区黄桃种植基地(北纬 $31^{\circ}14'N$,东经 $121^{\circ}29'$),行株距 $4\text{ m} \times 5\text{ m}$,树龄 8 年,三主枝型,常规栽培管理,果实套单层内黑外黄袋。每批果实于固定的 50 株树冠外围高 1.5 m 处随机采摘向阳面果实,每株随机采摘 50 个成熟度一致(入库果实带皮硬度为 $2.5 \sim 7.0\text{ kg/cm}^2$,果肉硬度为 $1.3 \sim 6.0\text{ kg/cm}^2$,可溶性固形物含量为 $8.8\% \sim 14.5\%$)、大小均一、色泽均匀、无病虫害、无机械损伤的果实,采摘后立即运至基地冷库进行分装处理。3 批次果实的入库品质见表 1,以 2021 年度的数据进行分析。

表 1 3 批次桃果实入库品质(2021 年度)

Table 1 Storage quality of three batches of peaches

批次	带皮硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	果肉组织硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	可溶性固形物 含量/%
第 1 批	2.69~6.83	1.88~5.51	8.85~13.20
第 2 批	2.62~6.46	2.31~5.96	8.80~14.45
第 3 批	2.58~5.99	1.35~5.83	9.75~13.40

1.1.2 仪器与设备

防雾保鲜袋:0.03 mm,零度包装科技有限公司;
质构仪:TA, XT, Plus 型,英国 SMS 公司;
色差计:CR-400 型,日本产美能达公司;
折光仪:ATAGO-1 型,日本 ATAGO 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理 将分选好的果实放置于外衬 0.03 mm 防雾保鲜袋、内带凹槽的塑料筐中,单层摆放,温度为 $(10.0 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $80\% \sim 85\%$ 的冷库中贮藏 16 d。每 2 d 取 30 个果实,对果实带皮硬度、果肉组织硬度、可溶性固形物含量、果实色差等指标进行测定;并对同一批次果实的质地、风味、色泽、香气 4 个模块进行人工感官评分。

1.2.2 指标测定

(1) 单果重:按式(1)计算。

$$M = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_{30}}{30} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

m_i ——第 i 个果实的单果重($i = 1, 2, \dots, 30$),g;

M ——平均单果重,g。

(2) 果实纵横径:分别按式(2)、式(3)进行计算。

$$N = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_{30}}{30} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

n_i ——第 i 个果实的纵径($i=1,2,\dots,30$),cm;

N ——平均纵径,cm。

$$C = \frac{c_1 + c_2 + c_3 + \dots + c_{30}}{30} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

c_i ——第 i 个果实的横径($i=1,2,\dots,30$),cm;

C ——平均横径,cm。

(3) 色差:参照周慧娟等^[21]的方法并改善,选取每个时期的 10 个果实,采用“Hunter Lab”表色系统测定果实缝合线对称两侧处 L 值、 a^* 值、 b^* 值及色角度 h 。每处理测定 10 个果实,设 3 次重复。

(4) 质构:圆柱形探头(P/5)直径 5 mm,测前速度 60 mm/min,测试速度 120 mm/min,测后速度 600 mm/min,触发力 0.5 N。第 1 次下压距离 3 mm,测定参数为果皮硬度;第 2 次下压距离 20 mm,测定参数为果肉组织硬度。

(5) 可溶性固形物含量:取左右赤道对称部位果肉,20 °C 下,用手持阿贝折光仪测定未经稀释的汁液的可溶性固形物含量,每次随机取 30 个果实进行测定。

(6) 感官评价:感官检验鉴定小组由 15 人组成,检验内容分别为色泽、质地、糖酸、香气 4 个评分模块,各项目均以高分者为优,每项最高分 100 分,最低分 0 分。为缩小感官评分的误差,选一个品质中等的桃果实作对照,先品尝对照,计算其各模块得分作为待鉴定项目模块的参考。每个贮藏时间点取 30 个果实,品尝样品时,每个果实取中缝线对称两侧的果肉,取中间部位,切片,装盘,每个时间点每人品尝两次。将各模块评分结果进行方差分析和差异显著性比较。

1.3 数据处理

采用统计软件 R(版本 3.5.0)对指标的相关性和时间序列进行分析;采用 K-means 聚类使聚类内的方差最小(欧氏距离的平方),计算轮廓曲线的系数四类最佳聚类数;数据显著性差异水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 黄桃机械指标和感官评价结果

贮藏期间,共采集 3 批次贮藏的 870 个桃果实的机械指标数据。由表 1 可知,果实带皮硬度、果肉组织硬度、可溶固形物含量、单果重和果实红绿色差显示了较大的变异度,带皮硬度变异范围为 0.44~6.83 kg/cm²,果肉组织硬度变异范围为 0.18~5.96 kg/cm²,红绿色差变异范围为 -11.78~28.44,可溶固形物含量变异范围为 7.35%~15.95%。这种较高的变异度能够较好地反映桃

子 10 °C 贮藏条件下品质变化的全过程,果实带皮硬度、果肉组织硬度、可溶固形物含量、果实红绿色差为(10.0±0.5) °C 贮藏条件下的关键品质变化表征因子,与苹果和蓝莓感官评价中的关键品质表征因子有一定差异^[12,22]。

2.2 相关性分析

2.2.1 品质表征因子相关性分析 皮尔逊(Pearson)相关系数表示不同指标间的线性相关程度,绝对值<0.3 表示不相关,0.3~0.7 表示弱相关,0.7~1.0 表示强相关。由图 1 可知,贮藏时间与果实带皮硬度呈强负相关(PCC=-0.71),与果肉组织硬度呈弱负相关(PCC=-0.53),进一步说明了果实质地是影响果实商品性的重要参数^[2,18];贮藏时间与果实红绿色差呈弱正相关(PCC=0.47),说明果实色泽的保持是贮藏技术研发的重要因素^[15];(10.0±0.5) °C 下,可溶性固形物含量随贮藏时间的延长变化差异较大,相关性较弱(PCC=0.34);失重率随贮藏时间的延长呈下降趋势(失水),但无相关性(PCC=-0.24),说明通过保鲜袋包装已解决了果实失水的问题^[1]。果实带皮硬度和果肉组织硬度呈强正相关;果实红绿色差与果实带皮硬度和果肉组织硬度呈弱负相关,说明果实色泽的变化可作为硬度无损检测的表征变化因子之一^[18]。可溶性固形物含量与果实硬度、果肉组织硬度、果实红绿色差、黄蓝色差等指标均无相关性。综上,带皮硬度、果肉组织硬度、可溶性固形物含量、果实重量、红绿色差 5 个机械测定指标为(10.0±0.5) °C 下的关键品质变化表征因子。

2.2.2 品质表征因子与感官评分的 Spearman 相关性分析 由图 2 可知,3 个模块(果实质地、色泽和风味)的感官评分之间有较强的相关性,说明感官评分时,对 3 个模块的辨别能力不是很强,基本上是由第一感觉决定的,后续需进一步划分辨别模块。果实质地、风味、香气、色泽 4 个感官评分模块与贮藏时间呈弱负相关,Spearman 相关性分别为-0.49,-0.27,-0.38,-0.57,进一步说明随着贮藏时间的延长,果实风味失调和质地降低,综合口感变差,其中可溶性固形物含量随贮藏时间的延长劣变不显著,不是(10.0±0.5) °C 下贮藏导致风味变差的主要因素,与果实采后冷藏期间存在后熟现象和在一定贮藏时间内可溶性固形物及糖含量呈上升趋势有关^[1]。

果实色泽模块感官评分与果实带皮硬度、果肉组织硬度以及质地、风味和香气 3 个模块均呈正相关(相关系数分别为 0.60,0.47,0.75,0.63,0.68),与果皮的红绿色差呈负相关(相关系数为-0.42);果实质地模块评分与果实带皮硬度和果肉组织硬度呈正相关(相关系数分别为 0.54,0.42),与果皮的红绿色差呈负相关(相关系数为-0.47);果实风味和香气两个模块评分均与果实硬度呈弱相关(相关系数为 0.38,0.31)。4 个模块的感官评分均与果实硬度有一定的相关性,进一步说明果实硬度指标

表2 贮藏期间3批次果实品质的变化

Table 2 Changes of fruit quality in three batches during storage

批次	贮藏时间/d	带皮硬度/(kg·cm ⁻²)		去皮硬度/(kg·cm ⁻²)		可溶性固形物含量/%		红绿色差	
		平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
第1批	0	4.97±0.97	2.69~6.83	3.33±0.54	1.88~5.51	11.14±1.43	8.85~13.20	246.04±4.32	-10.96~2.70
	2	3.84±0.75	2.85~4.79	3.14±0.43	1.49~4.66	12.14±1.15	11.05~13.80	273.02±3.27	-10.65~-2.27
	4	2.92±0.55	1.77~4.29	1.62±0.41	0.52~3.16	12.26±1.13	11.55~14.25	261.83±4.51	-11.79~-0.55
	6	2.69±0.53	1.92~3.40	2.19±0.16	0.38~3.41	11.82±1.38	10.45~13.75	293.32±1.75	-5.45~-1.57
	8	1.87±0.47	1.25~2.39	1.47±0.38	0.94~2.73	12.85±0.71	12.10~13.65	250.46±3.32	-7.23~1.26
	10	2.69±0.56	1.30~4.03	1.86±0.34	0.47~2.97	13.24±0.61	12.50~14.20	231.27±2.78	-6.51~0.02
	12	1.87±0.34	1.11~3.17	1.56±0.42	0.59~3.16	13.00±1.02	11.20~13.65	238.49±9.61	-2.60~19.85
	14	1.59±0.47	0.83~2.51	0.84±0.07	0.25~1.76	14.50±0.71	13.70~15.40	246.95±2.12	-5.26~0.11
第2批	16	1.45±0.37	1.17~2.03	0.89±0.17	0.45~1.66	12.76±0.94	11.75~14.05	238.03±1.66	-5.03~-0.46
	0	3.99±0.67	2.62~6.46	4.04±1.07	2.31~5.96	12.44±1.92	8.80~14.45	260.93±1.85	-7.11~-1.87
	2	3.29±0.72	1.84~5.39	2.64±0.88	0.90~4.72	11.73±0.51	10.95~12.15	252.93±2.70	-8.76~-1.57
	4	2.81±0.52	1.89~4.20	1.53±0.17	0.70~3.49	11.48±1.37	9.95~12.85	243.26±2.48	-7.07~-0.86
	6	2.20±0.19	0.93~3.96	1.81±0.15	0.57~3.12	13.44±1.11	11.90~14.90	230.29±3.46	-11.02~-2.13
	8	1.68±0.48	0.88~2.04	0.95±0.15	0.52~1.90	12.29±1.38	10.25~14.05	228.54±9.61	-2.60~19.85
	10	1.50±0.38	0.97~2.01	0.70±0.17	0.20~1.38	12.77±0.54	12.00~13.40	243.65±1.83	0.25~4.56
	12	1.03±0.38	0.76~1.68	0.66±0.21	0.30~0.90	12.75±2.14	9.95~14.60	237.47±0.77	-0.86~0.99
第3批	14	0.90±0.26	0.59~1.27	0.25±0.03	0.23~0.30	13.44±0.59	12.65~14.30	246.35±2.03	-2.17~3.49
	16	1.12±0.54	0.63~2.03	0.28±0.06	0.18~0.33	12.08±1.39	9.75~13.45	262.09±3.92	-0.33~8.85
	0	3.68±0.64	2.58~5.99	1.30±0.19	1.35~5.83	11.60±1.03	9.75~13.40	251.29±10.24	-7.74~28.44
	2	2.61±0.69	1.93~3.44	2.18±0.46	0.33~5.02	11.15±0.74	10.15~11.80	238.42±2.15	-9.04~-3.90
	4	2.11±0.49	1.66~2.83	0.92±0.24	0.47~1.27	11.85±2.00	9.30~14.00	252.23±3.65	-6.41~3.63
	6	1.99±0.66	1.14~2.84	1.05±0.34	0.41~1.88	11.02±1.65	8.95~12.90	219.52±9.61	-2.60~19.85
	8	1.24±0.42	0.44~2.35	0.39±0.14	0.22~0.89	12.05±2.74	7.35~14.35	246.30±0.84	-0.68~1.39
	10	1.51±0.37	0.79~2.58	0.88±0.21	0.42~1.54	11.08±1.15	9.50~12.70	209.38±7.10	-4.53~12.94
12	1.35±0.52	0.65~1.95	0.94±0.14	0.40~1.83	11.55±1.73	9.85~14.05	233.27±1.88	-0.81~3.65	
14	0.77±0.18	0.58~0.97	2.15±0.69	0.24~3.87	12.14±1.74	10.10~14.10	222.46±2.53	-3.36~3.38	
16	1.09±0.27	0.73~1.43	0.46±0.15	0.31~0.62	14.06±1.47	12.60~15.95	230.04±2.63	-1.18~5.56	

是检验果实商品性的重要且不可或缺的指标之一^[18]。果实红绿色差与果实带皮硬度、果肉组织硬度呈强负相关(相关系数分别为-0.73,-0.82),可作为硬度无损检测的发展目标指数之一,表明颜色和质地基本上是决定感官评分的第一印象^[19-20]。

2.3 聚类分析

2.3.1 最佳聚类数 为了区分3批入库桃果品质整个贮藏期间的品质群体差异情况,根据相关性分析结果,选取果实硬度、可溶性固形物含量、重量、红绿色差4项指标作为特征表征因子。利用轮廓曲线图确定最佳聚类数,结果见图3。由图3可知,4为最佳聚类数,其平均轮廓宽度最高,后续将以4为聚类数进行聚类分析。

2.3.2 聚类分析 利用轮廓曲线图将桃子聚类成4类,为了可视化聚类结果,使用PCA(主成分分析)进行降维。

由图4可知,第4类果实与其他组间的差异主要体现在红绿色差,说明第4类果实色泽偏红。维度1(X轴)为硬度的差异变化,维度2(Y轴)为可溶性固形物含量和红绿色差的差异变化,与消费者关注的质地、色泽和风味3个模块特征一致^[19]。

2.3.3 主成分分析 由图5可知,在贮藏时间上,前3类出现了明显的差异,可以将聚类后的桃子分为早(3)、中(2)、晚(1)期3个贮藏时间段。贮藏时间与果实硬度和红绿色差相关性高,贮藏早期(3)的果实硬度最高,红绿色差值最低;贮藏晚期(1)的果实硬度最低和红绿色差值最高,进一步说明了随着贮藏时间的延长,果实硬度降低、色泽变红,与果实衰老的症状一致^[23]。

除表征因子单果重外,其他因子均显著($P < 0.05$)。第4类主要是根据其红绿色差值进行聚合,均呈较强红

色,但其余特征均处于平均水平,未与红色产生较强联系。从数值大小解释了前 3 类主要是随贮藏时间的逐渐增加,硬度变低,可溶性固形物含量变高,颜色变红分为不同程度 3 类,对应贮藏过程中的 3 种状态。

2.4 机械指标的时序分析

2.4.1 果实带皮硬度的时间回归模型建立 根据相关性

分析结果可知,果实带皮硬度和果肉组织硬度与贮藏时间呈强负相关,建立时间变化模型较易。前人^[5]报道,桃果实的硬度在成熟过程中随贮藏时间呈指数变化,但拟合形式较粗糙,缺乏精确性。因此,采用非线性指数模型模拟贮藏期间的果实硬度变化。对第 1、2 批次采摘的果实带皮硬度进行非线性指数模型的拟合,第 3 批果实进

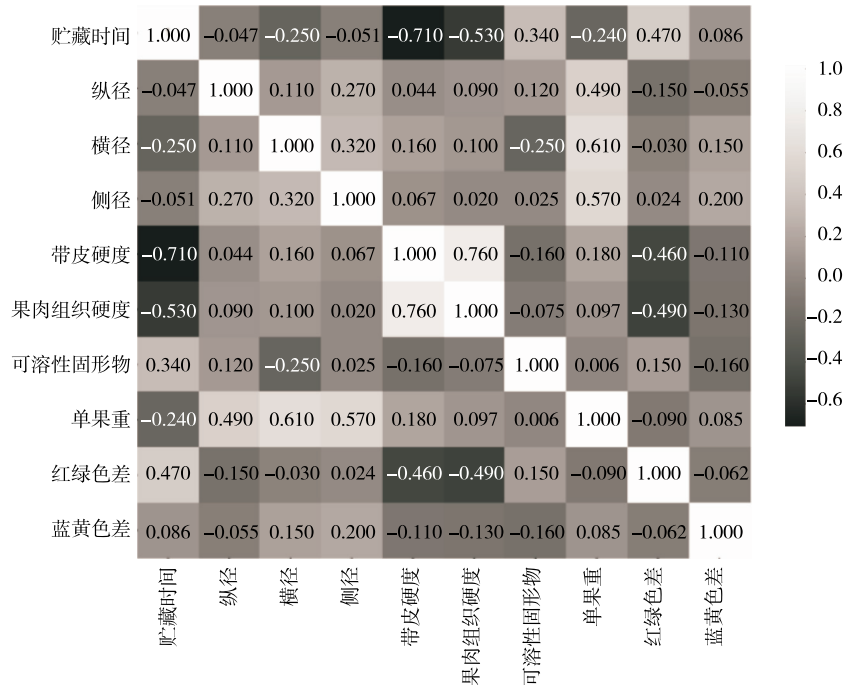


图 1 机械测定指标的相关性分析

Figure 1 Correlation analysis of mechanical measurement indexes

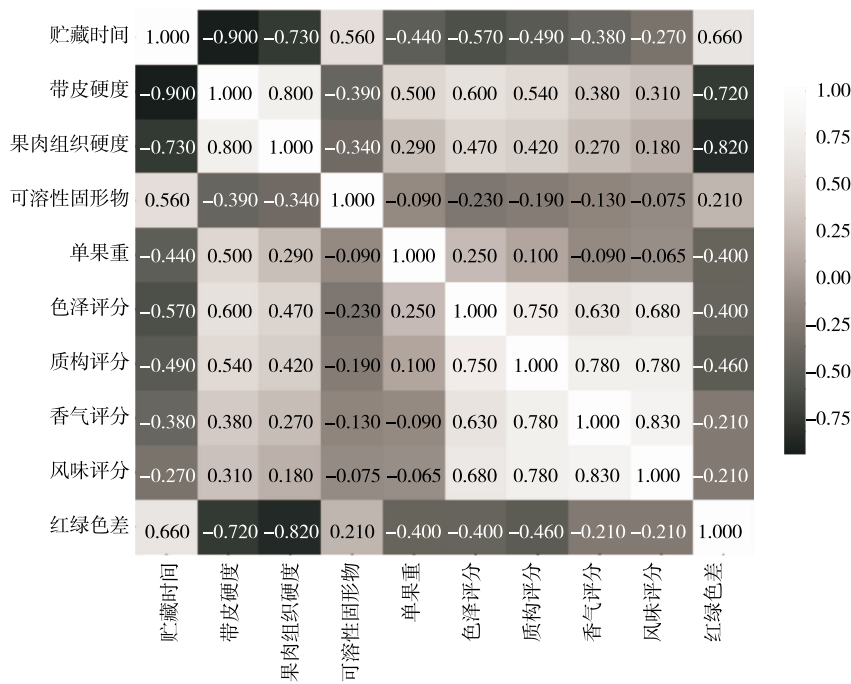


图 2 机械指标与感官评分的相关性分析

Figure 2 Correlation analysis of mechanical index and sensory score

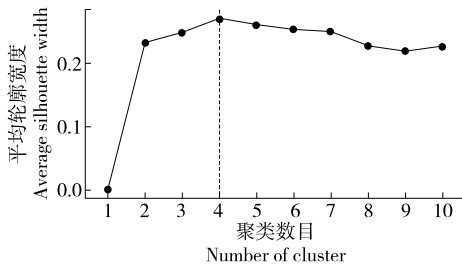


图3 不同簇中的平均轮廓宽度

Figure 3 Average silhouette width in different clusters

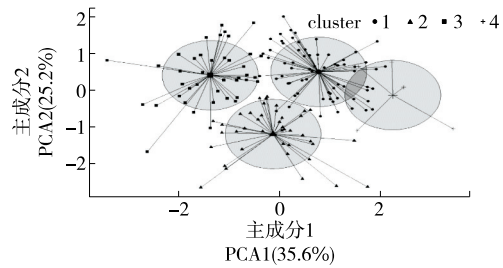
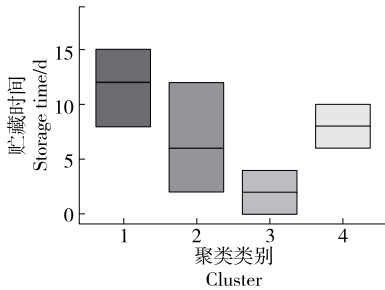
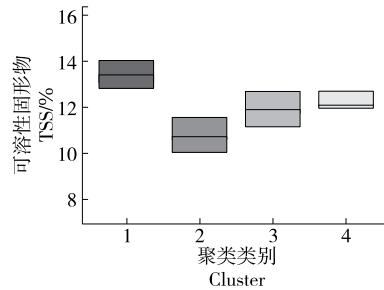


图4 K-均值聚类图

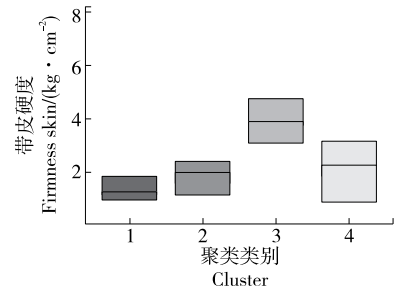
Figure 4 K-means cluster plot ($k=4$)



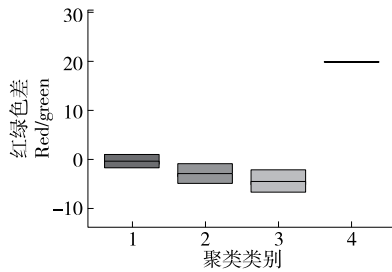
(a) 贮藏时间聚类



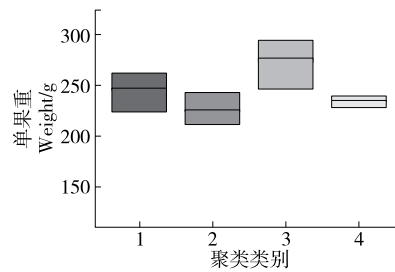
(b) 可溶性固形物含量聚类



(c) 果实硬度聚类



(d) 红绿色差聚类



(e) 单果重聚类

图5 不同表征因子的4个聚类的箱线图

Figure 5 Box plots for the 4 cluster of different features

行验证。建立的数学模型如图6所示,其表达式为:

$$f[T.(a, k, b)] = a \times \exp(k \times T) + b, \quad (4)$$

式中:

f ——硬度, kg/cm^2 ;

T ——贮藏时间, d ;

a, k, b ——函数参数。

由图6可知,两批次果实对方程式互相验证的效果较佳, R^2 分别为 0.98, 0.94, 符合非线性指数模型条件。整个贮藏期间,两批次果实硬度均随贮藏时间的延长呈下降趋势,分为贮藏前期(0~8 d)的快速下降阶段和贮藏后期(10~18 d)的缓慢下降阶段,8~10 d为果实硬度变化速率的关键时间点。贮藏期间,两批次采摘果实的带皮硬度下降速率差异不显著,说明 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 贮藏条件下,采摘时间与果实硬度的下降速度无关。各回归函数的系数基本接近,表明不同采收期桃硬度变化的相似性,进一步证明了方程式的可信度。综上,非线性指数模型可预测 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 贮藏条件下果实带皮硬度的变化速率及不同贮藏时

间点的硬度范围,根据果实硬度的状态,以较佳的商品状态决定果品出库的时间,可降低损耗。

2.4.2 果肉组织硬度的时间回归模型建立 对第1、2批次采摘的果实果肉组织硬度进行非线性指数模型的拟合,第3批果实进行验证。建立的数学模型与果实带皮硬度一致,参数有所变化。由图7可知,3批次果实对方程式互相验证的效果较佳, R^2 分别为 0.82, 0.97, 符合非线性指数模型条件。具体表达形式见式(4)。

贮藏期间,两批次采摘果实的果肉组织硬度下降速率差异不显著,说明 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 贮藏条件下,采摘时间与果肉组织硬度的下降速度无关。各回归函数的系数基本接近,表明不同采收期桃硬度变化的相似性,进一步证明了方程式的可信度。综上,非线性指数模型可预测 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 贮藏条件下果肉组织硬度的变化速率及不同贮藏时间点的硬度范围,根据果实硬度的状态,以较佳的商品状态决定果品出库的时间,可实现减损增效。

2.4.3 红绿色差时间序列分析 根据相关性分析结果可

知,贮藏时间与果实红绿色差呈弱正相关,说明随着贮藏时间的延长,果实底色由绿转乳白转红色,与果实成熟衰老的现象一致。对第 1、2 批次采摘的果实进行线性拟合方程,第 3 批果实进行验证,拟合结果见图 8,其表达式为:

$$f(x)=kx+b, \quad (5)$$

式中:

$f(x)$ ——红绿色差的具体值(正值为红,负值为绿色);

x ——贮藏时间,d。

2.4.4 其他质量指标的拟合分析 采用线性或非线性回

归对其他质量指标和贮藏时间进行拟合分析,但可溶性固形物含量随贮藏时间变化的拟合并无一个普适性的变化规律且拟合的方程较为复杂,未达到较为满意的模型精度,可能是由于桃果实在冷藏期间物质与细胞结构随贮藏时间变化差异较大导致的,需进一步进行验证分析,这与苹果的建模结论一致^[24]。

3 结论

结果表明,温度(10.0±0.5)℃、相对湿度 80%~85%条件下,果实硬度、可溶性固形物含量、果实红绿色

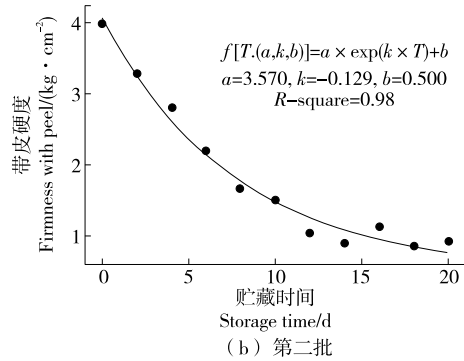
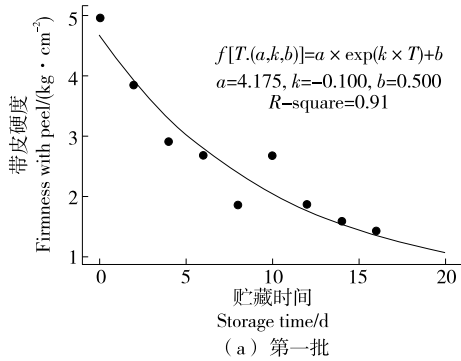


图 6 果实带皮硬度与贮藏时间的拟合结果

Figure 6 Fitting results of fruit firmness with skin and storage time

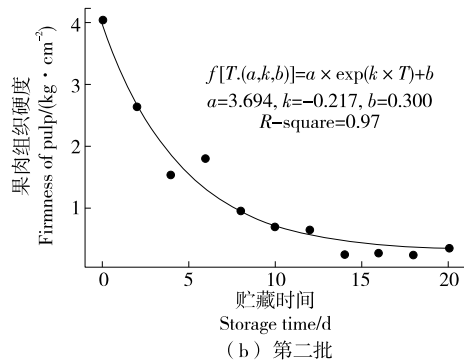
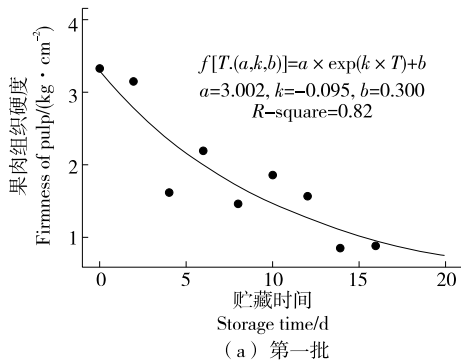


图 7 果肉组织硬度与贮藏时间拟合结果

Figure 7 Fitting results of firmness without skin and storage time

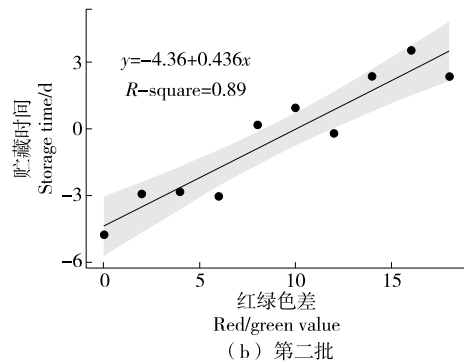
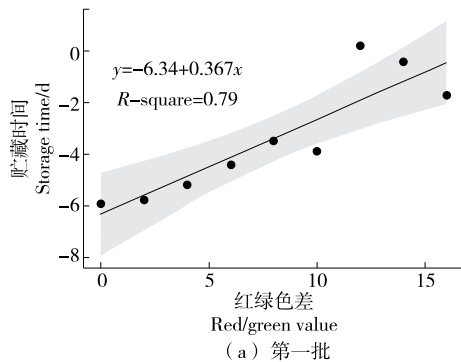


图 8 红绿色差与贮藏时间拟合结果

Figure 8 Fitting result of red color difference and storage time

差为桃果实品质的关键表征因子。桃果实的最佳聚类数为4,主要表现为果实硬度、可溶性固形物含量及果实红绿色差的差异,与消费者关注的质地、风味和色泽3个模块特征一致;果实质地、色泽和风味3个模块感官评分间有较强共线性,贮藏时间与果实硬度和果肉组织硬度呈负相关,与果实红绿色差呈正相关;果实红绿色差与果实带皮硬度和果肉组织硬度呈负相关,可作为硬度无损检测的表征因子之一。贮藏时间与可溶性固形物含量的相关性较弱,拟合的方程较为复杂,未达到模型精度,需进一步进行验证分析。使用指数方程能较好地拟合硬度的变化,线性方程能够较好地描述红绿色差的变化。建立的非线性果实带皮硬度和果肉组织硬度预测模型为 $f[T,(a,k,b)]=a \times \exp(k \times T)+b$,线性果实红绿色差预测模型为 $f(x)=kx+b$,两个预测模型的预测误差较低。

参考文献

- [1] 周慧娟,叶正文,张夏南,等. 1-MCP 处理结合不同低温条件对水蜜桃风味质地及生理的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 139-146.
ZHOU H J, YE Z W, ZHANG X N, et al. Effect of 1-MCP combined with low temperature storage on flavor, texture and physiology of honey peach[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 139-146.
- [2] 陈伟,苏新国,邵海燕,等. 低温对桃果实采后冷害及其内源激素的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(8): 1 173-1 178.
CHEN W, SU X G, GAO H Y, et al. Effects of low temperature storage on chilling injury and endogenous hormones of postharvest peach fruit[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(8): 1 173-1 178.
- [3] YANG A P, CAO S F, YANG Z F, et al. γ -Aminobutyric acid treatment reduces chilling injury and activates the defence response of peach fruit[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1 619-1 622.
- [4] ZHOU H J, ZHANG X N, SU M S, et al. Effects of ultraviolet-c pretreatment on sugar metabolism in yellow peaches during shelf life[J]. Hort Science, 2020, 55(4): 416-423.
- [5] 张海英,韩涛,王友年,等. 桃果实品质评价因子的选择[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 235-239.
ZHANG H Y, HAN T, WANG Y N, et al. Selection of factors for evaluating peach(*Prunus persica*) fruit quality[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 235-239.
- [6] 李丽娜,赵武奇,曾祥源,等. 苹果的质构与感官评定相关性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 37-45.
LI L N, ZHAO W Q, ZENG X Y, et al. Correlation between texture and sensory evaluation of apple[J]. Food & Machinery, 2017, 33(6): 37-45.
- [7] YU X, LU H, DI W. Development of deep learning method for predicting firmness and soluble solid content of postharvest Korla fragrant pear using Vis/NIR hyperspectral reflectance imaging[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2018, 141: 39-49.
- [8] SHARMA A, PALIWA K K. Linear discriminant analysis for the small sample size problem: An overview[J]. International Journal of Machine Learning & Cybernetics, 2015, 6: 443-454.
- [9] CAO Y, JIANG Y M, GAO H Y, et al. Development of a model for quality evaluation of litchi fruit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 106: 49-55.
- [10] NAMBI V E, THANGAVEL K, JESUDAS D M. Scientific classification of ripening period and development of colour grade chart for Indian mangoes (*Mangifera indica* L.) using multivariate cluster analysis[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 193: 90-98.
- [11] 郭家刚,杨松,伍玉菡,等. 基于主成分与聚类分析的蓝莓品质综合评价研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 53-60.
GUO J G, YANG S, WU Y H, et al. Comprehensive evaluation of blueberry quality based on principal component and cluster analysis[J]. Food Research and Development, 2020, 41(12): 53-60.
- [12] 傅泽田,高乾坤,李新武,等. 基于气体传感信息的蓝莓贮藏货架期预测方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 308-315.
FU Z T, GAO Q K, LI X W, et al. Blueberry shelf life prediction method based on sensor information stored gas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 308-315.
- [13] VARELA P, SALVADOR A, FISZMAN S. Shelf-life estimation of 'Fuji' apples: Sensory characteristics and consumer acceptability[J]. Postharvest Biology & Technology, 2005, 38(1): 18-24.
- [14] 侯晓蕾,武小红,武斌,等. 基于模糊鉴别主成分分析的生菜贮藏时间鉴别[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 119-123.
HOU X L, WU X H, WU B, et al. Discrimination of lettuce storage time based on fuzzy discriminant principal component analysis[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 119-123.
- [15] TAREEN M J, ABBASI N A, HAFIZ I A. Postharvest application of salicylic acid enhanced antioxidant enzyme activity and maintained quality of peach cv. "Flordaking" fruit during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142: 221-228.
- [16] COCETTA G, BEGHI R, MIGNANI I, et al. Nondestructive apple ripening stage determination using the delta absorbance meter at harvest and after storage[J]. Hort Technology, 2017, 27(1): 54-64.
- [17] GIRALDO E, DÍAZ A, CORRAL J M, et al. Applicability of 2-DE to assess differences in the protein profile between cold storage and not cold storage in nectarine fruits[J]. Journal of Proteomics, 2012, 75(18): 5 774-5 782.
- [18] BEAUDRY R M, CAMERON A C, SHIRAZI A, et al. Modified atmosphere packaging of blueberry fruit: Effect of temperature on package oxygen and carbon dioxide[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1992, 117(3): 436-441.
- [19] 朱娜,潘磊庆,邬慧颖,等. 基于电子鼻检测‘霞晖5号’桃果实的冷害[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 95-100.
ZHU N, PAN L Q, WU H Y, et al. Detection of chilling injury in 'Xiahui No.5' peach by electronic nose[J]. Food Science, 2014, 35(4): 95-100.

(下转第 226 页)

- phospholipase hydrolysate[J]. *Journal of Chinese Food*, 2015, 15(11): 41-47.
- [21] DYBOWSKA B E. Properties of milk protein concentrate stabilized oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 88(4): 507-513.
- [22] 刘晨, 李宇健, 陈复生, 等. 烘烤对水酶法提取花生油品质及乳状液稳定性的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 45(6): 1-5.
LIU C, LI Y J, CHEN F S, et al. Effect of baking quality and emulsion stability of aqueous enzymatic extraction of peanut oil[J]. *Chinese Journal of Oils and Fats*, 2020, 45(6): 1-5.
- [23] LIN C, HE G H, LI X C, et al. Freeze/thaw induced demulsification of water-in-oil emulsions with loosely packed droplets [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 56(2): 51-61.
- [24] FANG C S, CHANG B K L, LAI P M C, et al. Microwave demulsification[J]. *Chemical Engineering Communications*, 1988, 73(1): 227-239.
- [25] LIU W, XIAO B, YANG G L, et al. Rapid salt-assisted microwave demulsification of oil-rich emulsion obtained by aqueous enzymatic extraction of peanut seeds[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2020, 122(2): 31-40.
- [26] DENG B X. Using short-wave infrared radiation to improve aqueous enzymatic extraction of peanut oil: Evaluation of peanut cotyledon microstructure and oil quality[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(2): 30-38.
- [27] NAGAO S, TAKAHASHI T, SHONO A, et al. Effects of high-pressure carbon dioxide on the demulsification of O/W emulsion[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 17(1/2/3): 44-45.
- [28] 李杨, 齐宝坤, 隋晓楠, 等. 水酶法提取花生油高压蒸汽破乳工艺研究[J]. *大豆科技*, 2019(S1): 425-428.
LI Y, QI B K, SUI X N, et al. Study on high pressure steam demulsification of peanut oil extracted by aqueous enzymatic method[J]. *Soybean Science and Technology*, 2019 (S1): 425-428.
- [29] HOME D S. Protein-stabilized emulsions[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 1996(6): 305-313.
- [30] MCCLEMENTS D J. *Food emulsions: Principles, practices, and techniques*, second edition [M]. Boca Raton: CRC Press, 2004: 23-30.
- [31] ZHOU L Z, CHEN F S, LIU K L, et al. Combination of Alcalase 2.4L and CaCl₂ for aqueous extraction of peanut oil[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(6): 71-80.
- [32] ZHANG S B, WANG T. Destabilization of emulsion formed during aqueous extraction of peanut oil: Synergistic effect of tween 20 and pH[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2016, 93(11): 1 551-1 561.
- [33] 何秋实. 响应面优化无机盐破乳工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(24): 304-306.
HE Q S. Study on the optimization of the demulsification process of inorganic salt with response surface[J]. *Food Industry Technology*, 2012, 33(24): 304-306.
- [34] 迟延娜, 张文斌, 杨瑞金, 等. 顽固乳状液的破乳处理提高花生游离油提取率[J]. *农业工程报*, 2014, 30(8): 257-264.
CHI Y N, ZHANG W B, YANG R J, et al. Demulsification of stubborn emulsion improves the extraction rate of peanut free oil[J]. *Acta Agriculturae Engi Sinica*, 2014, 30(8): 257-264.
- [35] NIU R H, CHEN F S, ZHAO Z T, et al. Effect of papain on the demulsification of peanut oil body emulsion and the corresponding mechanism[J]. *Journal of Oleo Science*, 2020, 69(6): 617-625.
- [36] ZHANG S B, LIU X J, LU Q Y, et al. Enzymatic demulsification of the oil rich emulsion obtained by aqueous extraction of peanut seeds[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2013, 90(8): 1 261-1 270.
- [37] LI P F, ZHANG W B, HAN X, et al. Demulsification of oil-rich emulsion and characterization of protein hydrolysates from peanut cream emulsion of aqueous extraction processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 204: 67-72.
- [38] CHEN Y M. A two-chain aspartic protease present in seeds with high affinity for peanut oil bodies[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 443-451.
-
- (上接第 151 页)
- [20] 于怀智, 陈东杰, 姜沛宏. 近红外光谱对蒙阴黄桃硬度和可溶性固形物的在线检测[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 216-221.
YU H Z, CHEN D J, JIANG P H, et al. Online prediction of soluble solids and firmness of Mengyin peaches based on Vis/NIR diffuse-transmission spectroscopy [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 216-221.
- [21] 周慧娟, 杜纪红, 苏明申, 等. 水蜜桃果皮中色素和芳香物质变化与其内在品质的相关性[J]. *经济林研究*, 2019, 37(1): 1-10.
ZHOU H J, DU J H, SU M S, et al. Relationship of content changes of pigments and aromatic compounds in pericarp with internal quality of honey peach fruits[J]. *Non-Wood Forest Research*, 2019, 37(1): 1-10.
- [22] 曹梦珂. 六个品种苹果采后品质变化表征因子及低温货架期预测模型研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 21-24.
CAO M K. Research on characterization factors of postharvest quality change and low temperature shelf life prediction model of six apple varieties [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021: 21-24.
- [23] 周慧娟, 苏明申, 叶正文, 等. 桃果实采后生理生化及冷害研究进展[J]. *果树学报*, 2017, 34(9): 1 204-1 212.
ZHOU H J, SU M S, YE Z W, et al. Advances in the research into physiological and biochemical characteristics and chilling injury of peach fruits after harvest[J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(9): 1 204-1 212.
- [24] 张博. 苹果贮藏期动态品质及最佳贮藏时间预测模型研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 31.
ZHANG B. Study on the prediction model of dynamic quality and optimal storage time of apple[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021: 31.