DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250916011
引用格式: 黄志英, 吕逸文, 霍凯旋, 等. 中小型西瓜和水蜜桃新鲜度评价技术研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(8): 307–318.
HUANG ZY, LV YW, HUO KX, *et al*. Research on freshness evaluation technology of medium- and small-sized *Citrullus lanatus* and *Amygdalus persica* 'Honey Peach' [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 307–318. (in Chinese with English abstract).

中小型西瓜和水蜜桃新鲜度评价技术研究

黄志英[1#], 吕逸文[2#], 霍凯旋[2], 郭 灿[1], 宋一清[1], 刘海燕[1], 司文帅[1], 白 冰[1], 王守英[1*]

(1. 上海市农业科学院农产品质量标准与检测技术研究所, 上海 201403;
2. 上海科立特农产品检测技术服务有限公司, 上海 201403)

摘 要: 目的 建立以消费者为中心的中小型西瓜和水蜜桃新鲜度评价技术体系和分等分级规范。**方法** 以地方性中小型西瓜和水蜜桃代表"8424""金山小皇冠"和"南汇水蜜桃"作为研究对象, 通过感官、理化和无损分析多维度评价方法探究其新鲜度变化规律。**结果** 经西瓜新鲜度评价, 瓜蒂状态、香气与果肉质地权重较高, 瓜蒂评分和失重率与时间拟合良好(r^2>0.90), 番茄红素等理化指标组间差异显著但无明确时间分级规律。水蜜桃在 4 ℃与 25 ℃储藏下, 果面缺陷、干缩程度等感官指标影响突出; 糖酸比、硬度等理化指标组间有差异, 仅维生素 C 含量随时间线性下降。图像特征相关性分析表明西瓜瓜蒂红绿蓝值(red green blue, RGB)、长度等图像特征与时间显著相关($|r^2|$>0.7), 水蜜桃绒毛状比率等 9 项特征亦具强相关性。**结论** 结合相关性、权重、无损特征分析和应用可操作性提出西瓜整瓜(瓜蒂状态、果皮状态、失重率)与剖面(果肉形态、口感、汁水性)各 3 项分级指标, 以及水蜜桃在不同温度下以果皮状态、绒毛状态、质地和维生素 C 含量为核心的分级依据。该评价体系指标清晰、操作简便, 可为地方特色农产品生产与销售标准化提供参考。

关键词: 新鲜度; 感官评价; 理化分析; 图像特征; 地方特色农产品

Research on freshness evaluation technology of medium- and small-sized *Citrullus lanatus* and *Amygdalus persica* Honey Peach

HUANG Zhi-Ying[1#], LV Yi-Wen[2#], HUO Kai-Xuan[2], GUO Can[1], SONG Yi-Qing[1], LIU Hai-Yan[1], SI Wen-Shuai[1], BAI Bing[1], WANG Shou-Ying[1*]

(1. *Institute for Agro-food Standards and Testing Technology*, *Shanghai Academy of Agricultural Sciences*, *Shanghai* 201403, *China*; 2. *Shanghai Co-elite Agri-food Testing Technical Service Co.*, *Ltd.*, *Shanghai* 201403, *China*)

收稿日期: 2025-09-16
基金项目: 上海市农业农村领域标准预研制项目(Y-NA-037-2024, Y-NA-038-2024, Y-NA-040-2024); 科技人才与平台计划(院士专家工作站)项目(202305AF150008)

#黄志英和吕逸文为共同第一作者
第一作者: 黄志英(1976—), 女, 实验师, 主要研究方向为农产品检测技术开发。E-mail: huangzy1126@sina.com
吕逸文(1999—), 女, 研究实习员, 主要研究方向为农产品营养与检测技术。E-mail: even_lute@163.com
***通信作者:** 王守英(1994—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与检测技术。E-mail: magnolia7319@163.com

ABSTRACT: Objective To establish a consumer-centered technical system and grading specification for evaluating the freshness of medium- and small-sized *Citrullus lanatus* and *Amygdalus persica* 'Honey Peach'. **Methods** Representative local medium- and small-sized *Citrullus lanatus* and *Amygdalus persica* 'Honey Peach', including "8424" and "Jinshan Xiaohuangguan" watermelons and "Nanhui honey peach" were selected as research subjects. A multi-dimensional evaluation approach combining sensory, physicochemical and non-destructive analyses was used to investigate changes in freshness. **Results** Stem condition, aroma and flesh texture carried higher weights, stem score and weight loss rate showed strong correlations with time (r^2>0.94) in *Citrullus lanatus* freshness evaluation. While significant differences were observed among groups for physicochemical indicators such as lycopene, no clear time-based grading pattern emerged. For *Amygdalus persica* 'Honey Peach' stored at 4 ℃ and 25 ℃, sensory indicators including surface defects and shrinkage degree were prominent. Physicochemical indicators such as sugar-acid ratio and hardness showed inter-group differences, but only vitamin C content decreased linearly over time. Image feature correlation analysis revealed that *Citrullus lanatus* stem red green blue (RGB) values, length and other image features were significantly correlated with time ($|r^2|$>0.7). The 9 feature indicators, including the fluff ratio of *Amygdalus persica* 'Honey Peach', also exhibited strong correlations. **Conclusion** Based on correlation, weight prioritization, non-destructive feature analysis and practical applicability, 3 grading indicators each are proposed for whole *Citrullus lanatus* (stem condition, peel condition, weight loss rate) and cut *Citrullus lanatus* (flesh morphology, taste, juiciness). For *Amygdalus persica* 'Honey Peach', grading criteria under different storage temperatures are established, focusing on peel condition, fuzz condition, texture and vitamin C content. The evaluation system features clear indicators and simple operation, providing a reference for standardizing the production and sales of regional specialty agricultural products.

KEY WORDS: freshness; sensory evaluation; physicochemical analysis; image feature; regional specialty agricultural products

0 引 言

西瓜作为全球第 5 大果品, 在我国农业经济中占据重要地位, 其种植面积占世界总量的 45%, 产量占比达 60%[1]。以上海为例, 2023 年西瓜种植面积达 4.07 万亩次, 其中中型西瓜"8424"凭借其早熟特性、高糖度(12~14°Bx)和瓤质细松酥脆的品质, 占据 90%的种植份额, 成为消费者追捧的"王牌"品种[2–3]。与此同时, 产业正朝着小型化、精品化方向转型, 以"金山小皇冠"为代表的小型西瓜(单果重 1~2 kg), 因其具有亮黄色果肉、低纤维且糖度高, 风味独特, 种植面积 15 年间激增 30 倍[4–5]。水蜜桃产业同样蓬勃发展, 我国年产量超 900 万 t, 上海浦东新区"南汇水蜜桃"作为国家原产地保护产品, 年产达 3 万余 t, 其蛋白质与铁含量远超常见水果[6]。随着消费升级, 民众对水果的需求已从基础供给转向"高新鲜度、高品质"的深度追求。

水果的商品价值主要由品质与新鲜度共同决定, 果实的品质通常与品种和成熟度密切相关, 而新鲜度则反映果实采后在外观和理化特性保持其自然状态的程度。近年来水果货架期、品质稳定性备受关注, 尽管水果新鲜度很大程度决定了消费者的购买行为, 但它仍是一个不精确定义的概念, 且缺乏以消费者为中心对新鲜度的精准定义[7]。同时, 产业也面临缺乏系统性的新鲜度评价体系的瓶颈。水果新鲜度标准的空白导致市场价格与品质混乱, 既损害优质水果种植者利益, 又影响消费者真实体验。国内外水果的新鲜度或品质评价作为一个综合体系, 通常围绕以下 4 个核心维度展开: 感官品质、理化指标、安全指标、采后生理与新鲜度指标。鲁梦情等[8]对西瓜采后储藏过程的质地、色泽、可溶性固形物、可滴定酸、黄酮及纤维素等进行了系统评价。此外, 水果采后的呼吸强度和细胞膜完整性也被作为生理指标进行考察[9]。NY/T 2316—2013《苹果品质评价规范》中, 除规定外观等级外, 还详细列出了富士系、嘎拉系等主要品种的硬度、可溶性固形物、可滴定酸的参考指标。在国际上 UN/ECE 标准作为影响水果国际贸易最广的系列标准, 主要侧重于外观和商业品质。它将产品分为"特级""一级"和"二级", 对大小、色泽、洁净度、缺陷容忍度有极其具体的规定。目前水果新鲜度的常用评价方法包括感官分析[10–12]、光谱技术[13–14]、机器学习模型[15–17]、新鲜度指示剂[18–19]等。然而这些技术因受封闭式包装限制、识别技术成本等因素, 大多处于实验室理论阶段, 在水果的实际采收与储运过程新鲜度判定仍主要依赖于果农经验, 例如西瓜的听声辨生熟[20–21], 桃子表皮颜色判新鲜度及成熟度。因此, 构建消费者为核心的新鲜度评价技术规范和分级标准, 实现水果的新鲜度的快速、准确判别和新鲜度分等分级仍是当下产业与市场发展的重要挑战之一。

本研究选择了上海市地方特色的季节性消费水果, 南汇 8424 西瓜、金山小皇冠西瓜和南汇水蜜桃为代表, 拟

从视觉、听觉、触觉、味觉和理化指标等方面综合评价西瓜和水蜜桃的新鲜度变化趋势, 并从中筛选易辨别且科学性的关键性感官指标和理化指标, 作为高品质中小型西瓜和水蜜桃新鲜度分等分级的重要依据。根据产品的生产和销售特性, 建立中小型西瓜与水蜜桃的精准化新鲜度评价技术与分等分级体系, 为“产地好产品”向“消费端好味道”的路径转化提供技术支撑, 对保障生产者利益、引导消费升级、推动产业标准化发展具有迫切现实意义。

1　材料与方法

1.1　仪器与试剂

ACQUITY® Arc™ UPLC 超高液相色谱系统、Waters XbridgeC$_{18}$色谱柱(4.6 mm×150 mm, 5 μm)(美国 Waters 公司); Sorvall16R 高速冷冻离心机(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); AX224ZH 电子分析天平(感量 0.01 g, 奥豪斯仪器有限公司); JA22002 电子天平(感量 0.1 g, 上海上天精密仪器有限公司); EOFU-BTV-100 500~2500 r/min 多管涡旋混合仪(上海安谱实验科技股份有限公司); SK2200H 超声波仪(上海科导超声仪器有限公司); TA.XT Plus 质构仪(英国 Surface Measurement Systems 公司); Eclipse 45-02 手持折射仪 Brix (0%~30%)(英国 Bellingham+Stanley 公司)。

乙腈、甲醇、甲酸(色谱纯, 德国 Merck 公司); 纯水(杭州娃哈哈集团有限公司); 乙酸胺(色谱纯, 上海安谱实验科技股份有限公司); 番茄红素、胡萝卜素、叶黄素标准对照品(纯度>98%, 天津阿尔塔科技有限公司); 氢氧化钠、盐酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 0.22 μm 尼龙微孔滤膜(美国 PALL 公司)。

1.2　试验方法

1.2.1　样品收集

实验样品均从当地基地选购当天采摘的新鲜南汇 8424 西瓜、金山小皇冠、南汇水蜜桃, 其表面光滑无损伤。其中西瓜每个品种 35 个样本, 同一品种为相同生产批次且选取标准一致, 中小型西瓜分别放置于室温[(22.0±2.5) ℃]、相对湿度 35%~70%储藏。水蜜桃共 100 个样品, 分成 2 个温度[室温(22.0±2.5) ℃和冷藏(4±2) ℃]储藏。

1.2.2　感官分析

通过观察、品尝和触碰来评价西瓜和水蜜桃的外观、质地、滋味和气味等特征。其中西瓜以表皮光泽与缺陷、瓜蒂状态、果肉颜色、表皮触感、果肉质地、果肉口感、汁水性、果肉香气、瓜蒂香气 9 个指标为评价标准进行打分。水蜜桃给定了绒毛光泽度、果皮色泽、果面缺陷状态、果蒂干缩程度、果皮干缩程度、绒毛均匀度、缝合线深浅、褐变程度、触摸手感、品尝质地、汁水性、香气程度 12 个细分指标进行打分。综合评价西瓜和水蜜桃感官新鲜度随时间变化的规律, 分值越高代表新鲜度越高, 打分由 10 个评价人员完成。评分的参考按照 8~10 分、5~7 分、≤4 分给出相应的判定性描述, 以减少不同人员间的主观评分误差。

1.2.3　理化指标分析

通过行业标准 NY/T 2923—2016《桃种质资源描述规范》、NY/T 2387—2013《农作物优异种质资源评价规范 西瓜》得知, 与红壤西瓜新鲜度有关的营养品质包括糖酸比、番茄红素、维生素 C (vitamin C, VC)和胡萝卜素等, 黄瓤西瓜相关的有糖酸比、胡萝卜素、叶黄素和 VC。与西瓜新鲜度相关的物理性指标选择了硬度和脆度进行考量。水蜜桃新鲜度相关的理化指标包括硬度、糖酸比和 VC。因新鲜度极大程度上反应新鲜水果水分的变化, 且西瓜个体较大, 失水后重量变化明显[22], 因此本研究将西瓜的重量变化作为新鲜度变化的指标之一进行测试分析。鉴于果实的表面积/体积比是影响失重速率的关键物理因素, 本研究为避免将果型差异误判为新鲜度差异, 在数据分析时按果型分组处理, 并为不同果型建立独立评价模型。

番茄红素、胡萝卜素、叶黄素指标采用液相色谱仪, 参照 GB/T 41133—2022《番茄制品中番茄红素、叶黄素、胡萝卜素含量的测定 超高效液相色谱法》进行分析测定。色谱条件: 色谱柱 XbridgeC$_{18}$ (4.6 mm×150 mm, 5 μm); 柱温: 40 ℃; 进样量: 10 μL; 有机相(A)为甲醇:二氯甲烷=97:3 (*V*:*V*), 水相(B)为纯水; 流速为 1.0 mL/min; 梯度洗脱程序为: 0.0~13.0 min, 92% A; 13.0~34.0 min, 100% A; 34.0~35.0 min, 92% A。VC 采用 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中的测定方法进行测定。硬度、脆度度通过质构仪进行测定, 糖酸比由可溶性固形物与总酸的比值而得, 可溶性固形物含量通过折射仪测定, 酸度按照 GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》进行测定。

1.3　数据处理

物性实验结果均平行测定 6 次, 理化实验结果均平行测定 3 次, 采用 Office Excel 2016 进行原始数据输入和整理, 利用 SPSS 26.0 做显著性分析, 组间比较使用单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)及多重比较的 *t* 检验, $P<0.05$ 认为差异具有统计学意义, 利用 Origin 2024 和 GraphPad Prism 8.0 软件进行作图。西瓜和水蜜桃图片的多特征提取(涵盖颜色纹理、表面形态等)以及特征指标的筛选、相关性分析等由 Python 代码实现。

2　结果与分析

2.1　感官指标的变化

2.1.1　中小型西瓜感官指标的变化

将感官评价结果进行热图分析(图 1A~1B), 可以看出,

小型西瓜 1~3 d，指标颜色为暖色，其指标值较高，表明新鲜度较好；5~10 d，指标颜色变冷，其指标数值逐渐降低，新鲜度可能开始下降，12 d 后各指标颜色均为冷色，可能已经不是很新鲜。中型西瓜 1~5 d，指标颜色为暖色，表明新鲜度较好；7~12 d，指标颜色变冷，新鲜度可能开始下降，15 d 后指标除汁水性以外颜色均为冷色，已经不新鲜。

根据感官评价实验结果，分别对中小型西瓜进行储藏天数与二级指标得分的散点图绘制及相关性拟合(图 1C~1D)。结果表明：两个品种除果肉口感与储藏天数均呈现最佳指数负相关性(小型西瓜 r^2=0.8993，中型西瓜 r^2=0.8071)外，其余指标均符合对数相关模型。其中小型西瓜的瓜蒂香气、表皮触感、瓜蒂状态、果肉香气相关性最显著(r^2 分别为 0.9781、0.9688、0.9007、0.8860)，中型西瓜则以瓜蒂状态、表皮触感、表皮光泽与缺陷相关性最优(r^2 分别为 0.9493、0.8643、0.8143)。为了检验各感官指标随时间变化的显著性差异，以时间为自变量、感官评分为因变量进行 ANOVA 分析，当 P<0.05 时，采用 Tukey 法进行事后多重比较，经检验中小型西瓜的各个感官指标 P 均小于 0.001，表明各感官指标随时间变化非常显著。

将每种感官指标的变化率(%)按照如下公式(1)进行计算。95%置信区间(confidence interval，CI)通过极值法与误差传播近似计算得到(假设评分误差±0.1)。对各个感官指标进行 ANOVA 分析，多重比较 t 检验分析得出 p，并按公式(2)计算显著性强度(S)，显著性强度越大，表明该指标在排序中更优先；通过主成分分析(principal component analysis，PCA)，按累计方差贡献率大于 75%选取主成分，按公式(3)计算每个感官指标的综合载荷权重(P)，载荷绝对值之和越大，表明该指标在总体变异中贡献越高。

$$R/\%=\frac{\text{最高分}-\text{最低分}}{\text{最高分}}\times 100\% \quad (1)$$

$$S=1-p \quad (2)$$

$$P=a_1X_1+a_2X_2+\cdots+a_pX_p \quad (3)$$

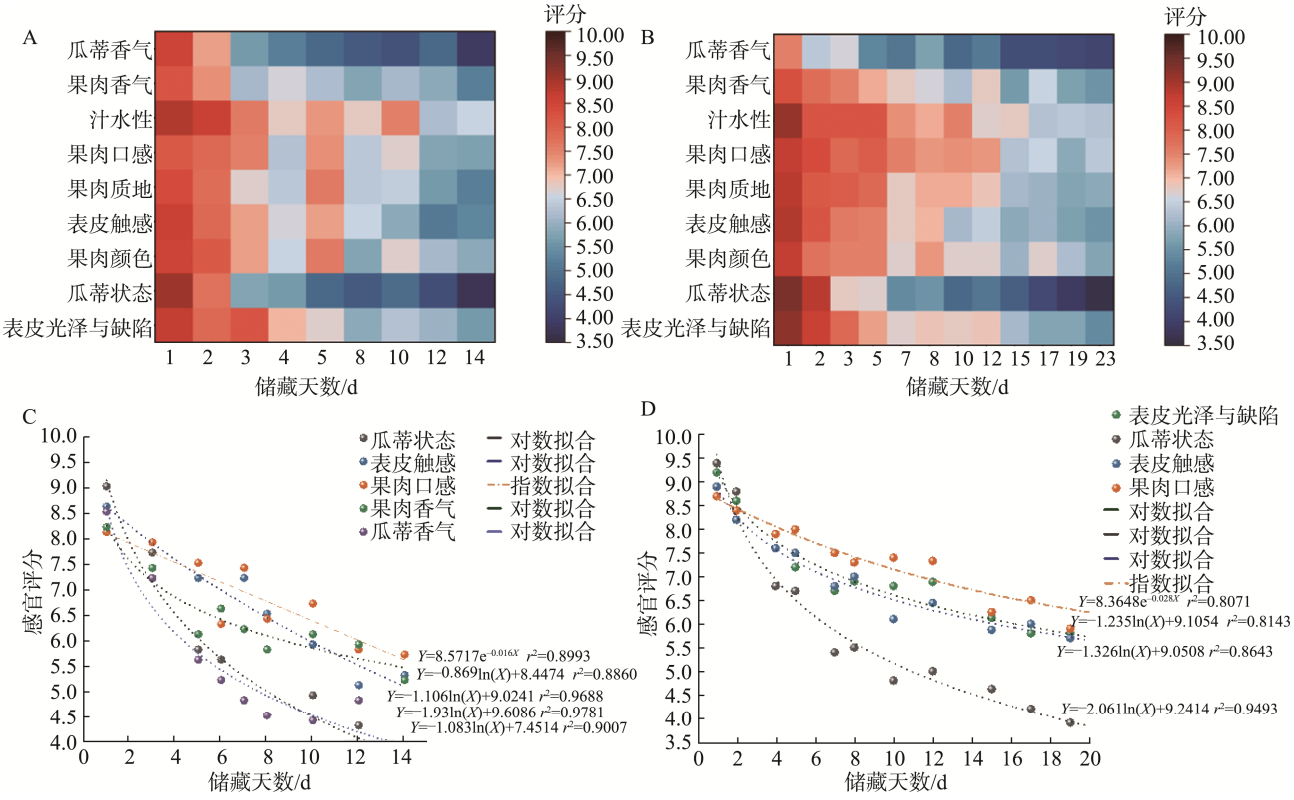
式中：a_p 为第 p 个主成分的方差贡献率；X_p 为指标 p 在该主成分上的载荷。

指标的优先级得分(S_i)按照公式(4)线性加权合计算而得，3 项度量均采用 Min-Max 归一化到[0,1]后，设定归一化 R'、S'、P'的权重系数分别为 w_r=0.4，w_s=0.3，w_p=0.3，加权求和得到综合得分 S_i，S_i 得分越高，优先级越高。对不同权重组合进行了敏感性分析，结果排序总体稳定。

$$S_i=w_rR'+w_sS'+w_pP' \quad (4)$$

式中：w 为权重系数；R'、S'、P'为归一化变化率、显著性强度、PCA 载荷贡献。

中小型西瓜的视觉评价、触觉评价、味觉评价和嗅觉评价的变化率如表 1 所示，对各指标变化率进行双尾检验 p≈0，分析表明各指标变化差异显著。结合评分变化率分析，显著性差异强度和 PCA 载荷贡献的指标优先级分析，瓜蒂



注：A、C. 小型；B、D. 中型。

图 1 西瓜感官变化热图和感官得分相关性拟合

Fig.1 Heat map of sensory changes of *Citrullus lanatus* and correlation fitting with sensory scores

表 1　西瓜感官评价的变化率

Table 1　Change rates of sensory evaluation of *Citrullus lanatus*

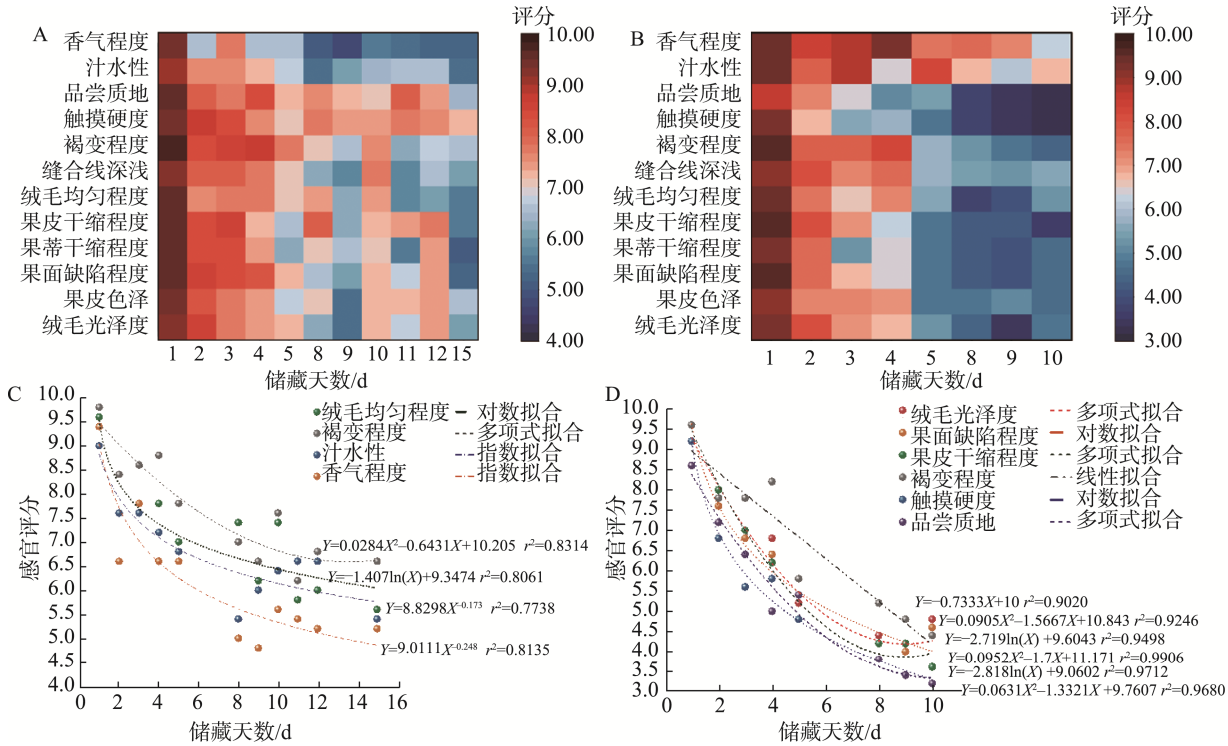
感官维度	指标	小型西瓜				中型西瓜			
		R/%	*R*’	*P*’	S_i	*R*/%	*R*’	*P*’	S_i
视觉评价	表皮光泽与缺陷	35.6±2.7	0.205	0.099	0.412	41.6±2.5	0.341	0.030	0.445
	瓜蒂状态	58.9±2.4	1.000	0.708	0.912	61.4±2.2	1.000	0.812	0.944
	果肉颜色	31.8±2.8	0.073	0.448	0.464	33.9±2.7	0.086	0.719	0.550
触觉评价	表皮触感	40.7±2.6	0.378	0.300	0.541	38.2±2.6	0.229	0.251	0.467
味觉评价	果肉质地	38.1±2.7	0.289	0.993	0.713	34.1±2.7	0.092	1.000	0.637
	果肉口感	29.6±3.0	0.000	1.000	0.600	32.2±2.7	0.029	0.602	0.492
	汁水性	30.3±2.7	0.024	0.523	0.467	31.3±2.6	0.000	0.000	0.300
嗅觉评价	果肉香气	36.6±2.8	0.238	0.000	0.395	33.7±2.8	0.080	0.051	0.347
	瓜蒂香气	54.1±2.5	0.837	0.634	0.825	45.0±3.0	0.454	0.518	0.637

状态指标在不同果型西瓜中均表现最大优先级得分, 其次香气与果肉质地(S_i>0.6), 表明该指标对储藏时间变化最敏感, 瓜蒂随着时间不断卷曲干缩, 适宜作为关键评价指标之一。其次为瓜蒂气味指标(小型西瓜: 0.825, 中型西瓜: 0.637), 后续为简化指标描述, 将瓜蒂状态和瓜蒂气味合并为瓜蒂状态。此外, 中型和小型西瓜的果肉质地的优先级排序均为第 3, 通过该优先级评分为最终的指标确定提供了依据。

2.1.2　水蜜桃感官指标的变化

将感官评价结果进行热图分析(图 2), 可以看出, 4 ℃下 1~4 d, 指标颜色为暖色, 其指标值较高, 表明新鲜度较好; 5~11 d, 指标颜色变冷, 其指标数值逐渐降低, 新鲜度可能开始下降, 12 d 后大部分指标颜色为冷色, 可能已经不是很新鲜。25 ℃下 1~2 d, 指标颜色为暖色, 表明新鲜度较好; 3~4 d, 指标颜色变冷, 新鲜度可能开始下降, 5 d 后大部分指标颜色变为冷色, 已经不新鲜。

根据感官评价实验结果, 分别对水蜜桃进行储藏天数与二级指标得分的散点图绘制及相关性拟合(图 2C~2D)。结果表明: 在 4 ℃下储存时, 水蜜桃的褐变程度与储藏天数呈现最佳二次多项式负相关性(r^2 为 0.8314), 汁水性和香气程度与天数均呈现指数负相关性, 绒毛均匀程度符合



注: A、C: 4 ℃; B、D: 25 ℃。

图 2　水蜜桃感官变化热图和感官得分相关性拟合

Fig.2　Heat maps of sensory changes in *Amygdalus persica* ‘Honey Peach’ and correlation fitting with sensory scores

对数相关模型(r^2=0.8061)。而在 25 ℃下储存时,各个感官指标以绒毛光泽度、果面缺陷程度、果皮干缩程度、褐变程度、触摸硬度、品尝质地的时间相关性最显著(r^2 分别为 0.9246、0.9498、0.9906、0.9020、0.9712、0.9680)。此外,与 25 ℃下储存相比,在 4 ℃下储存的水蜜桃各项感官指标与储藏天数的相关性较弱,也说明了低温冷藏对水蜜桃采后的保鲜作用。LIU 等[23]对采摘后 4 ℃保存 8 d 的白凤水蜜桃进行了香气组学研究,发现桃果采后在 4 ℃下保存 2~4 d,其风味最优。本研究则是在 25 ℃,储存 3~4 d 时,通过感官分析得出香气程度十分丰富,且伴随的口感以软糯和多汁为主,而相同时间 4 ℃组的香气一般,口感以脆甜为主。说明温度对桃果香气的影响差异也与品种有关。为了检验各感官指标随时间变化的显著性差异,以时间为自变量、感官评分为因变量进行 ANOVA 分析,当 P<0.05 时,采用 Tukey 法进行事后多重比较,经检验,4 ℃储存时水蜜桃的汁水性和香气程度指标 P<0.01,其余感官指标 P 均<0.001;25 ℃储存时水蜜桃触摸硬度指标 P<0.05,汁水性指标 P<0.01,其余感官指标 P 均<0.001,表明不同温度储藏水蜜桃各感官指标随时间变化显著。

基于以上两组试验结果,将每种感官指标的变化率亦按照公式(1)进行计算,并按公式(2)~(4)计算得到优先级得分 S_i。结果如表 2 所示,各指标变化率的双尾检验 P≈0,表明各指标变化差异显著。可以看出,4 ℃组的视觉指标变化最大的为果蒂干缩程度,之后依次为果面缺陷程度、果皮色泽、绒毛均匀度、果皮干缩程度、绒毛光泽度。25 ℃组的视觉指标变化最大的为果皮干缩程度,变化率为 62.5%,这可能是因为在室温下水蜜桃失水较快,导致果皮干缩较明显。之后变化由大到小依次为:绒毛均匀程度、果蒂干缩程度、褐变程度、果面缺陷程度。从指标优先级分析,不同温度下果面缺陷程度、果皮干缩程度和绒毛均匀度均排名较靠前(S_i≥0.826),4 ℃组的水蜜桃香气程度在 1~15 d 发生了较大的变化,而其余指标变化相对较小;25 ℃组的水蜜桃的触摸手感在 1~10 d 变化较为显著,变化率为 65.2%。本研究观察到,与 4 ℃冷藏相比,25 ℃常温下水蜜桃的软化速率显著加快。这一现象与采后生理学中经典的温度效应高度吻合。前人研究普遍认为,在常温下,水蜜桃作为典型跃变型果实会启动乙烯的自我催化并激活一系列细胞壁降解酶,从而导致果胶等细胞壁组分的分解,最终引发果实软化[24–25]。尽管本研究未直接测定乙烯及相关的酶活性,但观察到的温度依赖性软化趋势,与上述文献所阐述的生理路径一致。考虑到消费者在购买水蜜桃时首先会通过视觉来评判新鲜度,其次为触摸和嗅,最后再是品尝。综合两组试验结果,发现果面缺陷程度、果皮干缩程度、绒毛均匀度可作为评判水蜜桃新鲜度的关键指标,而绒毛光泽度和果皮色泽是评判水蜜桃新鲜度的辅助指标。

2.2 物性变化

2.2.1 中小型西瓜物性变化

重量和硬度脆度分别利用称重法和质构仪测试了不同储藏时间下,中小型西瓜的重量变化,经分析计算结果见图 3。在储藏的 23 d 时间内,记录的温度在 18.3~24.4 ℃之间,湿度在 54.5%~84.1%范围内,由图 3 可知,重量的变化与储藏时间分别呈现良好的对数相关性和线性相关性,中型西瓜和小型西瓜的 r^2 分别为 0.9825、0.9965。中型西瓜在 5 d 内的重量损失率为 0.54%,10 d 内的重量损失率 0.77%,18 d 后重量损失率超过 1%。小型西瓜 3 d 内的重量损失率为 0.67%,10 d 内的重量损失率为 2.15%,16 d 后重量损失率超过了 3%。从拟合趋势来看,

表 2 水蜜桃感官评价的变化率

Table 2 Change rates of sensory evaluation of *Amygdalus persica* 'Honey Peach'

感官维度	指标	4 ℃				25 ℃			
		R/%	R'	P'	S_i	R/%	R'	P'	S_i
视觉评价	绒毛光泽度	41.3±2.5	0.674	0.779	0.803	47.8±2.4	0.442	0.803	0.718
	果皮色泽	42.6±2.4	0.727	0.695	0.799	48.9±2.4	0.476	0.716	0.705
	果面缺陷程度	45.8±2.3	0.867	0.968	0.938	52.3±2.2	0.712	1.000	0.885
	果蒂干缩程度	47.9±2.3	0.956	0.061	0.701	56.5±2.3	0.721	0.978	0.882
	果皮干缩程度	41.7±2.4	0.689	0.833	0.826	62.5±2.2	0.913	0.987	0.961
	绒毛均匀程度	41.7±2.4	0.689	0.899	0.846	59.6±2.2	0.819	0.882	0.892
	缝合线深浅	37.0±2.5	0.488	1.000	0.795	42.2±2.5	0.262	0.625	0.592
	褐变程度	36.7±2.4	0.479	0.000	0.491	54.2±2.2	0.646	0.929	0.837
触觉评价	触摸硬度	25.5±2.6	0.000	0.786	0.529	65.2±2.3	1.000	0.965	0.989
味觉评价	品尝质地	33.3±2.5	0.333	0.525	0.590	62.8±2.4	0.922	0.595	0.847
	汁水性	40.0±2.5	0.618	0.698	0.756	36.2±2.5	0.068	0.000	0.325
嗅觉评价	香气程度	48.9±2.3	1.000	0.910	0.973	34.0±2.5	0.000	0.376	0.410

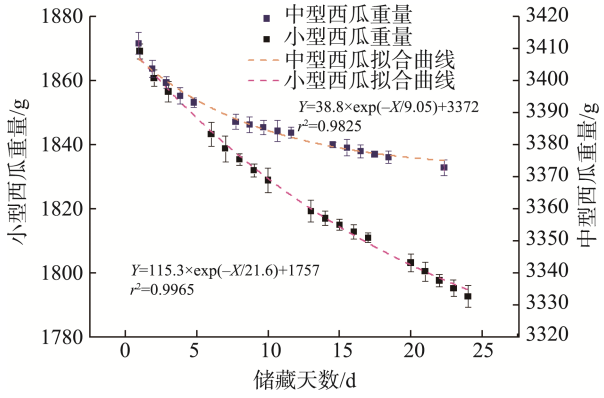


图 3　中小型西瓜重量变化趋势及相关性拟合

Fig.3　Weight variation trend and correlation fitting of medium- and small-sized *Citrullus lanatus*

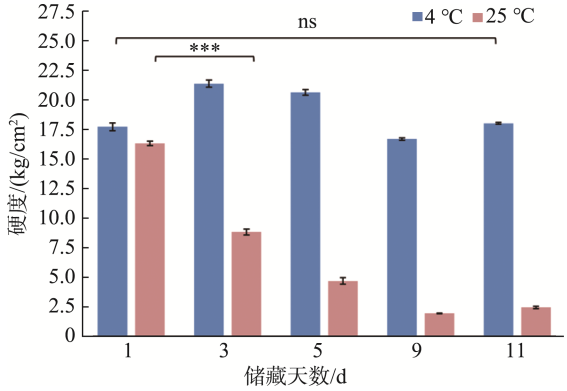
小型西瓜因表面积/体积比更大, 失水率更高。因此, 本研究针对中小型西瓜新鲜度评价设置了不同的失重率阈值, 可有效校正由果实初始物理特性所导致的失重速率差异, 从而确保评价结果能够更准确地反映西瓜采后的实际品质衰变情况。

经质构仪穿刺法测定了中小型西瓜果皮的表面硬度, 表面脆度、果皮白瓤硬度、果皮白瓤脆度及果肉的表面硬度, 表面脆度、果肉内部硬度和果皮内部脆度, 果皮穿刺深度 5 mm, 果肉穿刺深度 10 mm。结果表明中型西瓜的果皮和果肉及小型西瓜的果皮脆度、硬度变化与储藏时间无显著的相关性, 而是在一定范围呈现振荡波动。部分原因是样品个体导致的误差, 且中型西瓜因果肉的特殊性, 中型西瓜通过触摸和品尝所评价的表皮弹性和果肉的脆性在储藏较长时间后, 变化并不显著, 这与质构分析表现出一致性。

而小型西瓜果肉的表面硬度、表面脆度、内部硬度与储藏时间之间有随时间硬度与脆度下降的明显趋势, 经过 ANOVA 和 t 检验, 这 3 种指标 P 均小于 0.001; 且在感官评价过程中, 通过触摸和品尝所评价的果肉脆性在储藏较长时间后, 变化显著。将果肉的表面硬度(g)、表面脆度(mm)、果肉内部硬度(g)与储藏时间进行拟合, 发现表面硬度(g)、果肉内部硬度(g)与时间呈线性相关, r^2 分别为 0.8162、0.9058, 表面脆度与时间呈对数相关性, r^2 为 0.9113, 但经仪器测定脆度的下降幅度较小。因此将果肉内部硬度可作为小皇冠为代表的小型西瓜新鲜度评价的评价指标之一。随着西瓜成熟, 果胶在果胶酶和其他相关酶的作用下不断发生水解, 使瓜瓤细胞开始解聚, 构成细胞壁的纤维素不断溶解, 导致西瓜的果肉逐渐软化, 果肉内部硬度下降[8,26]。

2.2.2　水蜜桃物性变化

在每个水蜜桃赤道部位均匀地选取 4 个点, 去皮后用质构仪测量果肉硬度, 取其平均值。图 4 显示了不同温度、不同保存时间下水蜜桃的硬度变化, 4 ℃条件下, 水蜜桃的硬度呈现振荡波动, 可能由多方面因素共同导致: 一方面, 冷链恒温环境存在轻微的局部温度波动, 可能对果实生理代谢产生微量影响; 另一方面, 水蜜桃天然的个体差异及采样过程中的随机误差, 也可能造成硬度检测值的小幅度震荡。而 25 ℃条件下水蜜桃的硬度表现出逐渐下降的趋势, 这与感官评价时触摸手感呈现相同的趋势。此外, 为了检验硬度随时间变化的显著性差异, 以时间为自变量、硬度为因变量进行 ANOVA, 结果显示 4 ℃下水蜜桃的硬度在第 1 d 和第 11 d 差异不显著(P>0.05), 而 25 ℃下第 1 d 和第 3 d 具有强极其显著性差异(P<0.001)。4 ℃和 25 ℃下硬度的变化区别较大, 由于要同时考虑两种不同温度下的新鲜度指标, 因此硬度未被纳入评判新鲜度的关键指标。



注: ns 表示无统计学意义(P>0.05), ***表示差异强极显著(P<0.001), 图 5~6 同。

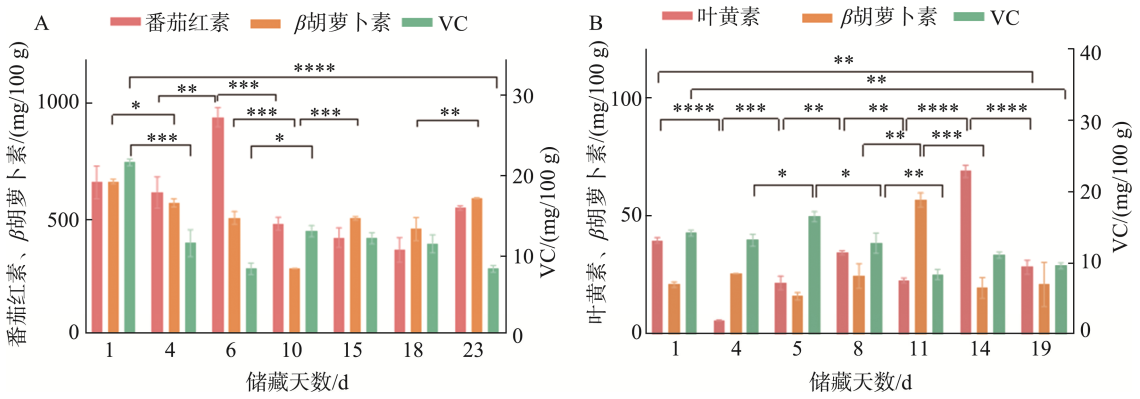
图 4　不同温度下水蜜桃果肉硬度随时间的变化趋势

Fig.4　Change trend of *Amygdalus persica* 'Honey Peach' flesh hardness over time at different temperatures

2.3　营养品质变化

2.3.1　中小型西瓜营养品质变化

类胡萝卜素的组分组成及含量差异决定了西瓜瓜瓤呈现不同颜色[27]。作为重要的营养品质参数, 中小型西瓜的叶黄素、番茄红素、β-胡萝卜素、VC 含量变化趋势如图 5 所示。其中, 小型西瓜 VC 含量呈振荡式变化, 而中型西瓜的果肉中 VC 含量随时间变化呈现波动式的下降, 根据 ANOVA 和 t 检验, 1 d 与 23 d 中型西瓜的 VC 差异极高显著(P<0.0001), 1 d 与 19 d 小型西瓜的 VC 差异极显著(P<0.01), 与向兰婷等[28]的研究结果基本一致; 而小型西瓜的叶黄素、β-胡萝卜素和中型西瓜的番茄红素、β-胡萝卜素在观察时间范围内, 均呈现振荡式变化, 无显著线性关系, 主要与样品的个体差异有关。经检验, 虽在不同果型中番茄红素、叶黄素、β-胡萝卜素、VC 含量在不同储藏时间下, 存在显著性差异, 如中型西瓜 1 d 和 4 d 件的 VC 差异强极显著(P<0.001), 小型西瓜叶黄素 1 d 和 4 d 之间, 11 d 和 14 d 之间, 14 d 和 19 d 之间差异极高显著(P<0.0001), 而从整个储藏时间考虑, 仅小型西瓜的叶黄素 1 d 和 19 d 的含量变化存在显著性差异。在以时间为自变量时, 相邻时间



注: A. 中型; B. 小型。*表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01), ****表示极高差异显著(P<0.0001), 图 6 同。

图 5 中小型西瓜营养品质随时间的变化趋势

Fig.5 Change trend of nutritional quality of medium- and small-sized *Citrullus lanatus* over time

分组的显著差异并不存在明显的关联性, 从而增加了以营养品质的变化阈值划分新鲜度等级的难度。另外考虑到番茄红素、叶黄素、β-胡萝卜素的测定成本, 未将其作为新鲜度评价指标。

2.3.2 水蜜桃营养品质变化

对水蜜桃的糖酸比和 VC 含量均进行 3 次平行样品的测定, 结果显示所有指标的相对标准偏差均小于 5%, 表明该测定方法具有良好的重复性和可靠性。两种温度下, 水蜜桃 VC 含量变化趋势如图 6 所示, 两种温度下水蜜桃的 VC 含量从第 1 d 到第 11 d 均呈现近线性的下降趋势, 有助于分等分级的阈值划分。ANOVA 结果表明, 4 ℃下水蜜桃 VC 含量在第 1 d 和第 9 d 差异强极显著(P<0.001); 25 ℃下水蜜桃 VC 含量在第 1 d 和第 5 d 同样具有强极显著性差异(P<0.001)。这可能是因为水蜜桃含有抗坏血酸氧化酶, 该酶催化 VC 与氧气反应, 加速了 VC 的氧化分解。VC 含量越高, 水蜜桃越新鲜。因此, 可以将 VC 含量作为辅助性指标。

而两种温度下水蜜桃的糖酸比都呈现波动趋势, 在程丽林等[29]对气调包装对水蜜桃品质的影响研究中, 其 4 ℃对照组的可滴定酸呈现先下降后上升, 再下降的趋势, 可溶性固形物则呈现先下降后上升趋势, 与本研究 4 ℃的糖酸比波动趋势较为一致。这种非线性的变化将加大分级判定的难度, 进一步的 ANOVA 分析显示, 4 ℃下水蜜桃糖酸比在第 1 d 和第 11 d 差异不显著(P>0.05); 25 ℃下水蜜桃糖酸比在第 1 d 和第 3 d 具有强极显著性差异(P<0.001), 第 5 d 和第 9 d 具有极显著性差异(P<0.01), 第 3 d 和第 5 d、第 9 d 和第 11 d 差异不显著(P>0.05)。整体看来, 糖酸比的显著性差异规律不明显, 因此, 未将糖酸比纳入评判新鲜度指标。

2.4 可视化无损评价

2.4.1 西瓜可视化无损评价

本研究对瓜蒂的状态每天固定时间段进行拍摄, 下图记录了不同时间的中小型西瓜瓜蒂的新鲜程度和状态。结果见图 7。通过图片显示, 小型西瓜在 3 d 内瓜蒂的颜色和弯曲状态仍保持大于 80%的青绿色和自然弯曲。6 d 后, 瓜蒂末端发生轻微褐变。13 d 后瓜蒂完全干缩, 且瓜蒂靠近果皮的连接处褐变逐渐增大。中型西瓜在 4 d 内瓜蒂的颜色和弯曲状态仍保持大于 80%的青绿色和自然弯曲。5 d 后, 瓜蒂末端发生明显萎缩。8 d 后瓜蒂完全干缩, 且瓜蒂靠近果皮的连接处发生褐变。不同时间的西瓜图像经精准分割后, 进行红绿蓝值(red green blue, RGB)提取、颜色统计和形状特征提取等处理, 得到了西瓜区域的整体 R 均值、瓜蒂 R 均值、

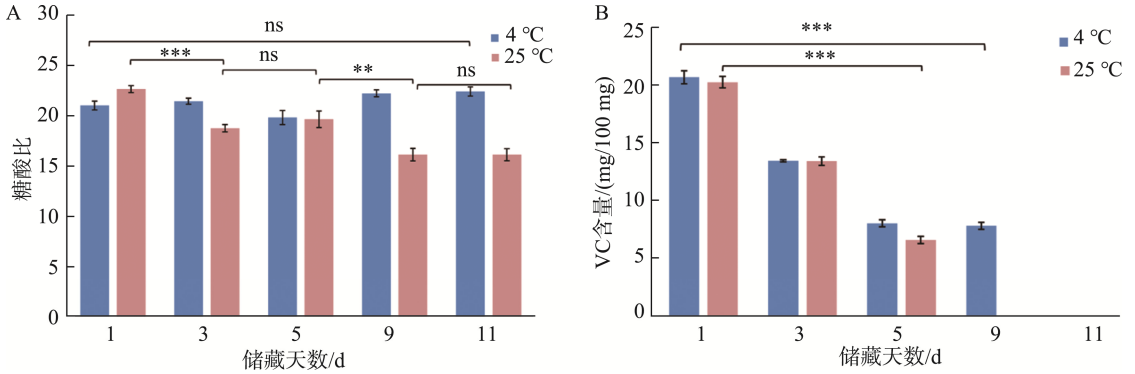
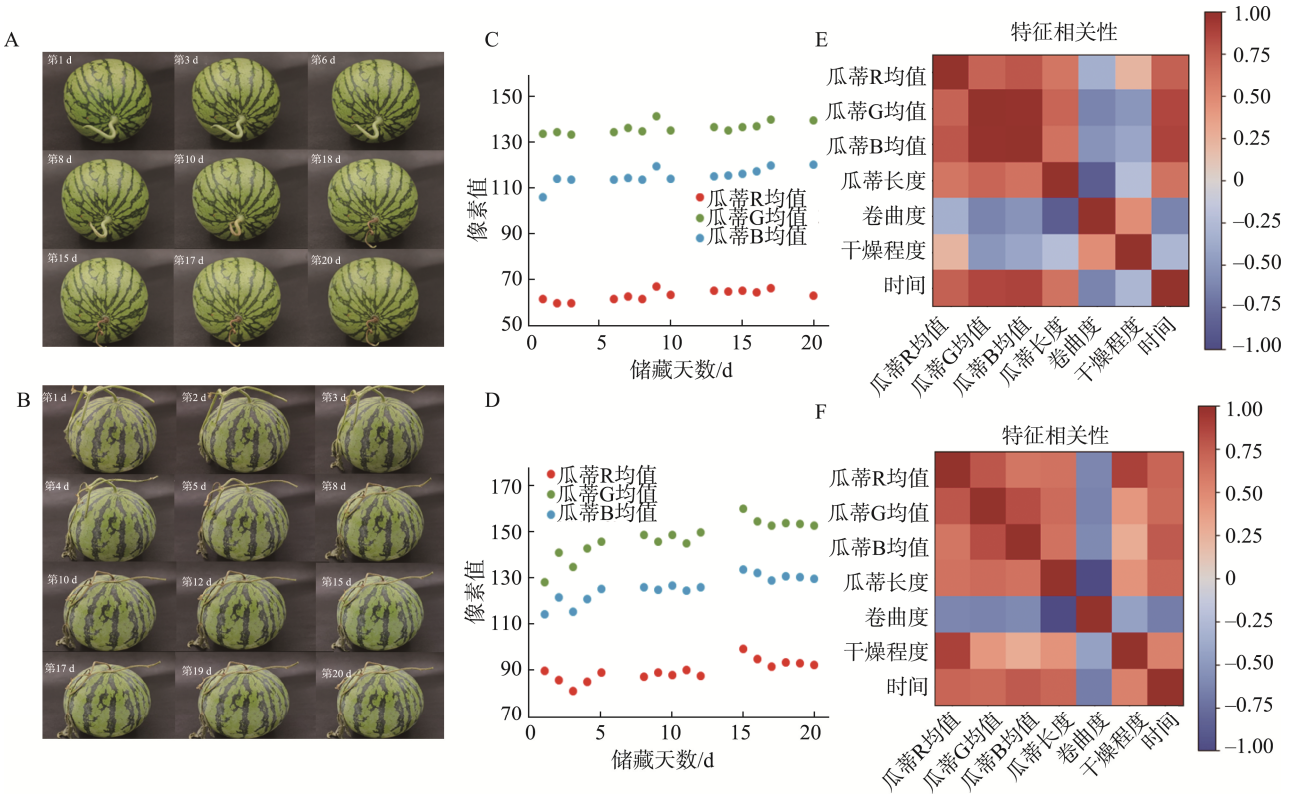


图 6 水蜜桃糖酸比(A)和 VC 含量(B)变化趋势

Fig.6 Change trend of sugar-acid ratio (A) and VC content (B) in *Amygdalus persica* 'Honey Peach'



注: A. 小型西瓜的外观变化; B. 中型西瓜的外观变化; C. 小型西瓜瓜蒂 RGB 变化; D. 中型西瓜瓜蒂 RGB 变化; E. 小型西瓜瓜蒂特征相关性; F. 中型西瓜瓜蒂特征相关性。

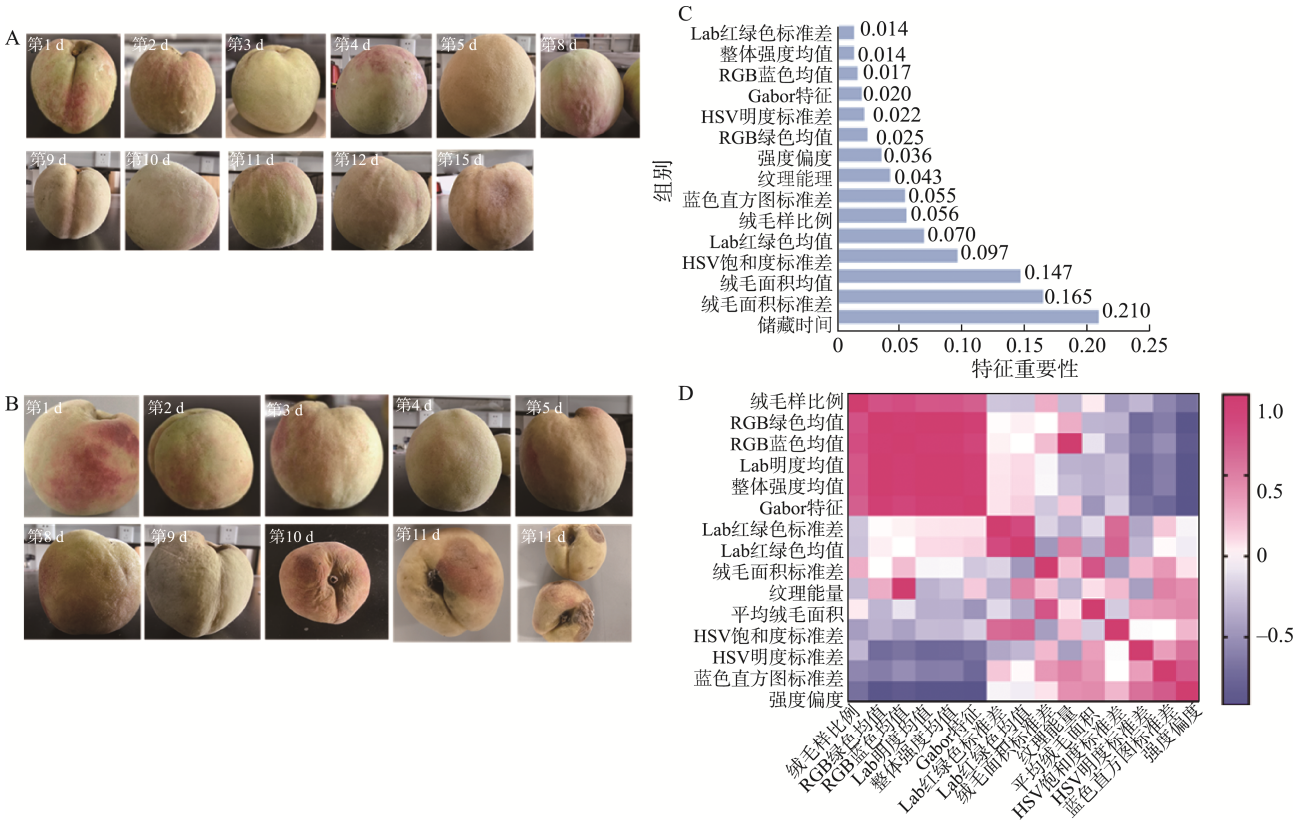
图 7　小型和中型西瓜的外观变化、瓜蒂 RGB 变化和瓜蒂特征相关性

Fig.7　Appearance changes, changes in the RGB values of stem, and feature correlations of medium- and small-*Citrullus lanatus*

卷曲度、干燥度等 15 个特征维度, 以提取到的特征, 将储藏时间作为标签进行随机森林数据集训练, 测到的测试集准确率不足 20%。进一步聚焦提取到的数据, 发现小型西瓜瓜蒂长度和弯曲度变化率超过 30%, 中型西瓜超过 50%, 小型瓜和中型瓜的瓜蒂 R 均值、G 均值 B 均值变化均较明显(图 7C 和 7D)。因此, 将特征范围聚焦到瓜蒂特征, 使用提取到的 6 个果柄特征重新训练判别模型, 得到小型西瓜以 AAA 级(<6 d), AA 级(6~10 d), AAA 级(>10 d)的 3 分类, 中型西瓜以 AAA 级(<7 d), AA 级(7~13 d), AAA 级(>13 d)的 3 分类, 在现有样本集上果柄特征预测的准确率可达到 100%。瓜蒂的特征相关性分析表明中型和小型瓜蒂 RGB 均值、长度、卷曲度均与时间存在显著正相关或负相关, $|r^2|$>0.7(图 7E 和 7F), 进一步说明其作为新鲜度关键评价指标的必要性。虽然通过瓜蒂特征的预测准确率较高, 但该分类模型在实际应用中很大程度依赖采摘过程标准化的瓜蒂长度, 后期还需要通过增加大量样本的训练以提高预测模型鲁棒性和分类准确性。目前基于高光谱成像无损分析和深度学习算法虽已在水产、畜禽和蔬菜新鲜度评价广泛应用[30−32], 但实际操作的专业性、便携性和成本考虑, 在西瓜、水蜜桃等产业链中应用仍存在一定困难, 后期可通过挖掘简单且低成本的手机拍照识别分类技术, 更有利于生产、运输、消费等场景化应用。

2.4.2　水蜜桃可视化无损评价

水蜜桃在不同温度储存下每日拍摄照片如图 8A 和图 8B 所示。4 ℃冷藏保存条件下, 水蜜桃在第 1~12 d 外观状态下没有发现明显的区别, 第 15 d 才开始有略微的塌陷。25 ℃室温保存条件下, 可以看出水蜜桃从第 9 d 开始果皮出现明显的干缩, 一直到第 11 d 出现明显的软烂。考虑到水蜜桃为同一品种, 将两种温度下的外观同时进行特征提取, 包括 RGB 颜色、灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)纹理、局部二值模式(local binary pattern, LBP)特征、褶皱边缘、光泽度、绒毛密度等多维度特征, 采用 ANOVA、*F* 检验、随机森林重要性评分和递归特征消除法相结合的方法, 识别出 15 个关键外观特征, 以关键特征和储藏时间构建新鲜度判别模型, 特征重要性分析见图 8C, 最重要的特征包括储藏时间, 绒毛面积标准差和绒毛平均面积等(大于 0.14)。对关键特征进行聚类相关性分析(图 8D), 绒毛样比例、RGB 绿色均值, RGB 蓝色均值、颜色模式(Lab)明度均值、整体强度均值等之间存在强正相关性(r^2>0.7), 而与 HSV 亮度变化、强度偏度、蓝色直方图标准差呈现显著负相关。使用提取到的 15 个关键外观特征训练判别模型和调整分组标准, 得到水蜜桃以 4 ℃下 AAA 级(≤4 d), AA 级(5~9 d), AAA 级(≥10 d), 25 ℃下 AAA 级(≤2 d), AA 级(3~4 d), AAA 级(≥5 d)的分类标准,



注: A. 4 ℃下水蜜桃外观变化; B. 25 ℃下水蜜桃外观变化; C. 特征重要性; D. 特征相关性热图。色相饱和度亮度模型(hue, saturation, value, HSV)。

图 8 4 ℃和 25 ℃下水蜜桃外观变化、特征重要性和特征相关性热图

Fig.8 Appearance changes of *Amygdalus persica* 'Honey Peach' at 4 ℃ and 25 ℃ , feature importance and feature correlation heatmap

基于随机森林特征预测的准确率可达到 75%, 但由于样本集较少, 准确率的反应仍具有一定偶然性。因此, 此分类标准仅将其作为最终新鲜度等级划分的参考之一。

2.5 最佳的新鲜度分级指标

经研讨和分析, 为使中小型西瓜和水蜜桃新鲜度的判别指标清晰, 消费者和生产过程操作简便, 本研究将中小型西瓜新鲜度根据整瓜和切开状态进一步简化了新鲜度判别的指标, 其中整瓜保留了瓜蒂状态、表皮触感为评价指标, 切开状态以果肉形态、果肉口感、汁水性为评价指标。水蜜桃新鲜度的判别指标简化为果皮状态、绒毛状态、触摸手感。西瓜和水蜜桃感官新鲜度评价指标及容许度分别见表 3 和表 4。此外, 为降低分级评价的误差, 增加可操作性, 对地产西瓜和水蜜桃感官或理化的分级指标划分等级后, 进行新鲜度等级定义时可结合实际界定需满足分级指标的数量要求, 以及根据场景需要选择整瓜或剖面, 或整瓜与剖面结合的方进行分级评价。

表 3 中小型西瓜感官观新鲜度评价指标及容许度分级参考

Table 3 Sensory freshness evaluation indicators and allowable degree grading reference for medium- and small-sized *Citrullus lanatus*

项目		等级		
		AAA 级	AA 级	A 级
整瓜	瓜蒂状态	瓜蒂呈青绿色或有轻微干缩	瓜蒂干缩长度大于 50%, 且瓜蒂连接处无自然褐变	瓜蒂干缩长度大于 90%, 或瓜蒂连接处有自然褐变
	表皮触感	表面光滑、有蜡质感, 且硬实有弹性	表皮光泽不明显, 无蜡质感, 硬实, 按压后无凹陷	表皮失去光泽, 出现细纹, 按压后回弹缓慢或留下凹陷
	失重率(中型)/%	<0.5	0.5~1.0	>1.0
	失重率(小型)/%	<1.0	1.0~2.0	>2.0
剖面	果肉形态	色泽均匀无渐变, 瓜籽与果肉连接紧密	瓜籽边缘有轻微渐变或瓜籽周围果肉轻微空化	瓜籽边缘渐变明显或瓜籽周围果肉空化明显
	果肉口感	果肉清脆, 无沙化	果肉轻微沙化或发绵	果肉沙化或发绵明显
	汁水性	汁水丰富	汁水较丰富	汁水一般

表 4　水蜜桃感官和理化新鲜度评价指标及容许度分级参考

Table 4　Evaluation indicators for sensory and physicochemical freshness and allowable degree grading reference for *Amygdalus persica* 'Honey Peach'

项目	等级		
	AAA 级	AA 级	A 级
果皮状态	色泽鲜艳, 无干缩皱皮	色泽较鲜艳, 轻微干缩皱皮	色泽暗淡, 中度干缩皱皮
绒毛状态	绒毛均匀细密、不易脱落, 具有品种成熟时绒毛正常的色泽	绒毛局部略有脱落、但整体覆盖完好, 绒毛光泽一般	绒毛变短且贴附果皮, 但仍可见, 小面积脱落, 绒毛光泽暗淡
触摸手感	硬, 按压后快速回弹	微软, 按压后缓慢回弹	较软, 按压后不回弹
VC 含量/(mg/100 g)	>12	8~12	<8

根据本研究中小型西瓜和水蜜桃在常见储藏条件下的感官和理化变化, 可得出在室温条件为(22.0±2.5) ℃, 湿度 40%~80%, 以小皇冠为代表的地方小型西瓜的新鲜度等级划分的参考时间节点为: 4 d 内为 AAA 级, 5~8 d 为 AA 级, 9 d 以上为 A 级, 以 8424 为代表的地方中型西瓜的新鲜度等级划分的参考时间节点为: 6 d 内为 AAA 级, 7~13 d 为 AA 级, 14 d 及以上为 A 级。水蜜桃的新鲜度等级划分的参考时间节点为: 4 ℃储藏下 4 d 内为 AAA 级, 5~11 d 为 AA 级, 12 d 及以上为 A 级; 25 ℃储存下 2 d 内为 AAA 级, 3~4 d 为 AA 级, 5 d 及以上为 A 级。该时间节点可用于指导规范化的生产运输和新鲜度质量控制的重要依据。

3　结　论

本研究围绕地方特色中小型西瓜及水蜜桃采后新鲜度变化趋势和评价体系开展多维分析, 构建了以感官为核心、理化和图像特征为补充的分级指标体系, 具有较好的实用性与可操作性。研究发现, 西瓜的新鲜度变化中果蒂状态最为敏感, 其次为果肉质地与香气。理化指标虽存在组间差异, 但缺乏明确的时间分级规律, 因此未纳入分级体系。水蜜桃在 4 ℃与 25 ℃储存下, 果面缺陷程度、果皮干缩程度与绒毛均匀度均为关键感官指标, 且 VC 含量随储藏时间线性下降, 可作为客观辅助指标。结合感官权重、理化变化及图像无损分析结果, 本研究提出了操作简便的分级指标: 西瓜的整瓜以果蒂状态、果皮状态、失重率评价, 剖面以果肉形态、果肉口感、汁水性评价。水蜜桃则以果皮状态、绒毛状态、质地为主要感官指标, 辅以 VC 含量, 并区分不同储藏温度下的分级时间节点。该体系指标清晰、方法简便, 可为地方特色农产品的标准化采收、贮运与销售提供可靠依据, 助力品质控制与消费者选购。然而, 研究仍存在一定局限性, 如本研究聚焦于特定地方品种, 样本量有限。后续可扩大样本规模, 涵盖更多产区与品种, 增强评价体系的普适性与稳健性。其次, 虽初步验证了图像特征与新鲜度的相关性, 但基于手机拍照的识别模型仍依赖标准化拍摄条件, 实际应用中易受环境干扰。未来需进一步优化算法、开发轻量化工具, 提升其在非标准场景下的稳定性和易用性。随着图像处理、传感器技术及无损检测技术的快速发展, 未来水果新鲜度评价体系将逐步由传统的感官评价与有损检测转向基于多模态信号的无损检测手段。

参考文献

[1] 宋宇, 张艺洋, 陈聪, 等. 南瓜砧木嫁接对秋季中果型西瓜生长发育和果实品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(8): 1–15.
SONG Y, ZHANG YY, CHEN C, *et al*. Effects of different pumpkin rootstocks on the growth, development and fruit quality of medium-size grafted watermelon in autumn [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(8): 1–15.

[2] 吴穷, 吴敬忠, 孙灿, 等. 2023 年闵行区耐湿热中型西瓜新品种比较试验初报[J]. 上海农业科技, 2024(2): 86–88.
WU Q, WU JZ, SUN C, *et al*. Preliminary report on comparative trial of new medium-sized watermelon varieties with heat and humidity tolerance in minhang district in 2023 [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2024(2): 86–88.

[3] 张保东, 江姣, 邱孟超, 等. 不同葫芦嫁接砧木对中果型西瓜品质及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2016, 29(1): 30–33.
ZHANG BD, JIANG J, QIU MC, *et al*. Influence on quality and yield of medium-sized watermelon with different gourd grafting stock [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2016, 29(1): 30–33.

[4] 靳凯业, 于琪, 贾文红, 等. 优质绿皮红肉小果型西瓜"L600"设施高效栽培技术[J]. 北方园艺, 2023(23): 153–156.
JIN KY, YU Q, JIA WH, *et al*. High-efficiency cultivation techniques for "L600" small-sized watermelon with green skin and red flesh in protected facilities [J]. Northern Horticulture, 2023(23): 153–156.

[5] 姚春军, 姚莉英, 陆世钧. 关于"金山小皇冠"西瓜产业发展中存在问题及应对措施的思考[J]. 上海农业科技, 2023(3): 45–46, 49.
YAO CJ, YAO LY, LU SJ. Reflections on the problems and countermeasures in the development of "Jinshan small crown" watermelon industry [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2023(3): 45–46, 49.

[6] 胡留申, 张耀良, 王建明, 等. 上海南汇水蜜桃历史与产业展望[J]. 落叶果树, 2023, 55(4): 10–13.
HU LS, ZHANG YL, WANG JM, *et al*. Historical origin and industrial prospect of Shanghai Nanhui honey peach [J]. Deciduous Fruits, 2023, 55(4): 10–13.

[7] JAEGER SR, ANTÚNEZ L, ARES G. An exploration of what freshness in fruit means to consumers [J]. Food Research International, 2023, 165: 112491.

[8] 鲁梦情, 高哲, 李婷, 等. 西瓜贮藏期品质变化与综合评价[J]. 北方园

艺, 2025(8): 35–41.
LU MQ, GAO Z, LI T, *et al*. Quality change and comprehensive evaluation of watermelon during the storage period [J]. Northern Horticulture, 2025(8): 35–41.

[9] 侯田莹, 宋曙辉, 李武, 等. 不同品种西瓜常温贮藏期间品质变化及贮藏特性研究[J]. 现代食品科技, 2011, 27(3): 242–245.
HOU TY, SONG SH, LI W, *et al*. Quality changes and storage characteristics of different watermelon varieties during ambient temperature storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(3): 242–245.

[10] 冯建英, 李鑫, 原变鱼, 等. 智能感官技术在水果检测中的应用进展及趋势[J]. 南方农业学报, 2020, 51(3): 636–644.
FENG JY, LI X, YUAN BY, *et al*. Progress and trend of fruit detection by intelligent sensory technology [J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(3): 636–644.

[11] 王大江, 张乐, 王孝娣, 等. 基于消费者视角的典型水果感官属性重要性评价和感官性状偏好分析[J]. 果树学报, 2025, 42(12): 2961–2977.
WANG DJ, ZHANG L, WANG XD, *et al*. Importance evaluation of typical fruits sensory attributes and preferences analysis of sensory trait from the consumer perspective [J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(12): 2961–2977.

[12] 沈海军, 张汤磊, 许振兴, 等. 基于 Fisher 判别分析对苹果新鲜度的识别研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 361–368.
SHEN HJ, ZHANG TL, XU ZX, *et al*. Research on apple freshness identification based on fisher discriminant analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 361–368.

[13] NEKVAPIL F, BREZESTEAN I, BARCHEWITZ D, *et al*. Citrus fruits freshness assessment using Raman spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2018, 242: 560–567.

[14] 马佳佳, 王克强. 水果品质光学无损检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 427–437.
MA JJ, WANG KQ. Research progress of optical nondestructive testing technology for fruit quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 427–437.

[15] 张寅升, 宋曾林, 王海燕. 基于注意力机制的水果新鲜度检测可解释模型[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 28–36.
ZHANG YS, SONG ZL, WANG HY. Fruit freshness detection explainable model based on attention mechanism [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 28–36.

[16] 裴东霞, 张婧瑶. 基于机器学习的水果新鲜度预测模型构建与验证[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2024(12): 255–259.
PEI DX, ZHANG JY. Construction and validation of fruit freshness prediction model based on machine learning [J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text Edition) Natural Science, 2024(12): 255–259.

[17] ZHANG Y, YANG X, CHENG Y, *et al*. Fruit freshness detection based on multi-task convolutional neural network [J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100733.

[18] 韩晓雪, 司军, 武俊峰, 等. 食品智能包装新鲜度指示剂研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(7): 173–181.
HAN XX, SI J, WU JF, *et al*. Research progress on freshness indicators for food intelligent packaging [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(7): 173–181.

[19] WAN X, HE Q, WANG X, *et al*. Water-soluble chitosan-based indicator label membrane and its response behavior to carbon dioxide [J]. Food Control, 2021, 130: 108355.

[20] 孙素成. 西瓜成熟度测定及适时收获的方法[J]. 安徽农学通报, 2004, 10(6): 51.
SUN SC. Methods for determining watermelon maturity and timely harvesting [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2004, 10(6): 51.

[21] 王世强, 王砚明. 西瓜成熟如何判断[J]. 吉林农业, 2006(8): 18.
WANG SQ, WANG YM. How to determine watermelon ripeness [J]. Agriculture of Jilin, 2006(8): 18.

[22] 李婷, 宋曙辉, 张超, 等. 不同品种西瓜在贮藏过程中的品质变化[J]. 北方园艺, 2025(4): 45–52.
LI T, SONG SH, ZHANG C, *et al*. Quality changes of different varieties of watermelon during storage [J]. Northern Horticulture, 2025(4): 45–52.

[23] LIU G, BI J, CHEN Q. Impact of postharvest ripening on peach quality: Aroma release and formation mechanism [J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143743.

[24] JIN CH, SUO B, KAN J, *et al*. Changes in cell wall polysaccharide of harvested peach fruit during storage [J]. Zhi Wu Sheng Li Yu Fen Zi Sheng Wu Xue Xue Bao, 2006, 32(6): 657–664.

[25] 聂自胜. 温度对水蜜桃保鲜的影响研究[J]. 华东科技(综合), 2020(11): 41–44.
NIE ZS. Effect of temperature on the storage of fresh peach fruit [J]. East China Science and Technology (Comprehensive Edition), 2020(11): 41–44.

[26] 刘景安, 何洪巨, 郭绍贵, 等. 西瓜果实成熟软化的生理生化机制[J]. 果树学报, 2013, 30(5): 813–818.
LIU JAN, HE HJ, GUO SG, *et al*. Physiological and biochemical mechanism for watermelon fruit ripening and softening [J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(5): 813–818.

[27] BANG H, DAVIS AR, KIM S, *et al*. Flesh color inheritance and gene interactions among canary yellow, pale yellow, and red watermelon [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2010, 135(4): 362–368.

[28] 向兰婷, 宋曙辉, 刘立娟, 等. 不同贮藏温度对京彩 1 号西瓜品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(9): 137–145.
XIANG LT, SONG SH, LIU LJ, *et al*. Effect of different storage temperatures on quality of Jingcai 1 watermelon [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(9): 137–145.

[29] 程丽林, 范金建, 高建菲, 等. 不同厚度包装自发气调对水蜜桃品质的影响[J/OL]. 食品工业科技, 2025, 1–16. [2025-07-08]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030389
CHENG LL, FAN JJ, GAO JF, *et al*. Effect of spontaneous atmosphere modification of packaging with different thicknesses on the quality of honey peaches [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–16. [2025-07-08]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030389

[30] ATWA EM, XU S, RASHWAN AK, *et al*. Advances in emerging non-destructive technologies for detecting raw egg freshness: A comprehensive review [J]. Foods, 2024, 13(22): 3563.

[31] HE M, LI C, CAI Z, *et al*. Leafy vegetable freshness identification using hyperspectral imaging with deep learning approaches [J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 138: 105216.

[32] WU X, CHU Y, WANG Z, *et al*. Quality non-destructive sorting of large yellow croaker based on image recognition [J]. Journal of Food Engineering, 2024, 383: 112227.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)