

预制“荷塘三宝”工艺优化及模拟冷链条件下品质响应

胡心兰¹, 宾昕琿¹, 林琼², 王宏勋^{3*}, 易阳¹, 侯温甫¹, 路洪艳¹, 闵婷^{1*}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023)(2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

(3. 武汉轻工大学生命科学与技术学院, 湖北武汉 430023)

摘要: 为了优化预制“荷塘三宝”的加工工艺并探究冷链物流条件下产品品质的变化, 本研究通过单因素试验和正交试验确定“荷塘三宝”的最佳加工工艺, 并模拟冷链流通过程, 分析不同物流条件下产品感官品质、菌落总数、总酚、总黄酮和挥发性风味物质的变化。结果表明, 预制“荷塘三宝”的最佳加工工艺为: 食盐 2.00 g、白糖 4.00 g、淀粉 4.00 g、焯水时间 2 min, 在此条件下, “荷塘三宝”综合感官评分达到 96.82 分, 总酚和总黄酮含量保持较高水平。模拟冷链物流结果显示, 全程冷链运输与冷藏待售能有效维持产品品质, 其总酚和总黄酮含量分别达到 20.47 mg kg⁻¹ 和 24.27 mg kg⁻¹, 菌落总数低于 10 CFU/g。同时, 在本研究模拟条件下, 全程冷链处理有助于维持样品感官品质和部分活性成分含量, 并较好地维持了挥发性风味物质的相对含量。本研究可为地方特色菜肴“荷塘三宝”的预制化开发及冷链物流品质控制提供理论依据。

关键词: 荷塘三宝; 预制菜; 工艺优化; 冷链物流; GC-IMS; 挥发性风味物质

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0699

Process Optimization of Prepared “Three Treasures of Lotus Pond” and Quality Responses Under Simulated Cold Chain Conditions

HU Xinlan¹, BIN Xinhui¹, LIN Qiong², WANG Hongxun^{3*}, YI Yang¹, HOU Wenfu¹, LU Hongyan¹, MIN Ting^{1*}

(1.School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2.Institute of Agricultural Products Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

(3.School of Life Sciences and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: To optimize the processing conditions for “Three Treasures of Lotus Pond” and characterize its quality changes during cold-chain logistics, single-factor and orthogonal experiments were conducted to determine the optimal processing conditions. A simulated cold-chain circulation process was then established to evaluate changes in sensory quality, total viable count, total phenolic content, total flavonoid content, and volatile flavor compounds under different logistics conditions. The optimal processing conditions were 2.00 g of salt, 4.00 g of sucrose, and 4.00 g of starch, and a blanching time of 2 min. Under these conditions, the product achieved a comprehensive sensory score of 96.82 while maintaining relatively high total phenolics and total flavonoids contents. The simulated logistics experiments showed that continuous cold-chain transportation followed by refrigerated storage before sale effectively maintained product quality. In the continuous cold-chain group, the total phenolics and total flavonoids contents were 20.47 mg kg⁻¹ and 24.27 mg kg⁻¹, respectively, and the total viable count remained below 10 CFU/g. Under the simulated conditions used in this study, continuous cold-chain treatment also helped maintain sensory quality and the levels of certain bioactive compounds, while effectively preserving the relative contents of volatile flavor compounds. This study provides a theoretical basis for the development of the traditional local dish “Three Treasures of Lotus Pond” and for quality control during cold-chain storage and transportation.

Keywords: three treasures of lotus pond; prepared dish; processing optimization; cold-chain logistics; GC-IMS; volatile flavor compounds

收稿日期: 2026-05-08; 修回日期: 2026-08-28; 接受日期: 2026-08-31

基金项目: 湖北省自然科学基金(创新研究群体项目)(2026AFA037)

作者简介: 胡心兰(2004-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品贮藏与保鲜, E-mail: whpuhuxinlan@qq.com

通讯作者: 闵婷(1987-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后贮藏与保鲜, E-mail: minting1323@163.com; 共同通讯作者: 王宏勋(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: wanghongxunhust@163.com

预制菜是以一种或多种食用农产品及其制品为原料,不添加防腐剂,经工业化预加工制成,配以或不配以调味料包,通过加热或熟制后方可食用的预包装菜肴^[1]。该产品具有标准化生产、品质稳定和食用便捷等特点,契合当代消费群体对快捷食品的需求,同时可为餐饮企业节约成本^[2,3]。近年来,我国预制菜行业正快速发展,2023年市场规模达5 165亿元,预计2026年将突破万亿元^[4]。其中,地方特色菜肴的预制化已成为传统食品产业升级的重要方向。“荷塘三宝”是以莲藕、莲子和菱角为核心原料制成的传统特色菜肴,富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、矿物质及多种生物活性成分,兼具较高的营养价值和药食同源特性^[5]。其传统制作方式以清炒或煮制为主,但由于其主要原料受季节性和地域性限制,难以实现全年稳定供应。因此,将“荷塘三宝”开发为预制菜产品对实现传统特色菜肴标准化生产及产业化发展具有重要意义。

冷链物流是保障预制菜品质的重要环节^[6]。低温环境能够有效抑制微生物繁殖,延缓组织衰败及营养成分流失。但在实际运输过程中,受各种因素的影响,冷链系统可能出现温度波动从而导致产品品质下降。大量研究表明,温度变化对果蔬及即食食品品质具有显著影响。Manthou等^[7]研究发现,不同储藏温度下即食叶菜中的微生物群落结构会发生明显变化,较高温度会促进腐败微生物增殖,加速产品品质劣变。Min等^[8]通过设置莲藕贮藏的不同温度条件,发现低温环境能够延缓莲藕组织软化及营养物质损失,提高贮藏稳定性。张鹏等^[9]则表明,温度调控可影响多酚氧化酶活性及酚类物质代谢过程,从而影响莲藕褐变程度和色泽保持效果。除了微生物和营养品质外,风味变化也是评价预制菜品质稳定性的重要指标之一。在冷链储运过程中,温度波动、氧化反应及微生物代谢均会影响食品中的挥发性风味物质。Yang等^[10]指出,GC-IMS具有快速检测、灵敏度高等优势,已广泛应用于食品风味评价研究。然而,现有关于鲜切果蔬和即食蔬菜冷链品质变化的研究多集中于单一原料,针对传统特色菜肴预制化产品的研究仍较有限。

基于此,本研究以湖北传统特色菜肴“荷塘三宝”为研究对象,在优化加工工艺的基础上,模拟不同冷链运输及流通待售情景,探究预制“荷塘三宝”在储运过程中的感官品质、活性成分及挥发性风味品质的变化规律,明确加工工艺与冷链条件对产品品质保持的影响,以期在传统特色预制菜工业化及冷链物流品质调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜莲藕、莲子、菱角主料,以及食盐、鸡精、玉米淀粉、白醋、白砂糖、食用油、青椒、红椒、生姜、大葱等辅料,美团优选明日达超市;平板计数琼脂(PCA),青岛海博生物技术有限公司;福林酚、亚铁氰化钾、盐酸萘乙二胺均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;所有其他化学试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

FlavourSpec[®]气相离子迁移谱联用仪,德国G.A.S公司;cNOSE便携式行业电子鼻,上海保圣实业发展有限公司;NMI20-040V-I核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;A360紫外分光光度计,上海翱艺仪器有限公司;JZ-300通用色差计,深圳金准仪器设备有限公司;PH5-25数字PH计,杭州东星仪器设备厂;TA. TOUCH质构仪,上海保圣实业发展有限公司;XHF-D高速分散器,宁波新芝生物科技股份有限公司;GL-20G-II高速冷冻离心机,上海安亭科学仪器有限公司;DHG-9013A电热鼓风干燥箱,北京永光明医疗仪器有限公司;IMS-20制冰机,常熟雪科电器有限公司;FW-3190真空封口机,广州新鲜世界电器有限公司;HH-S2恒温水浴锅,上海美谱达仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 “荷塘三宝”工艺流程及操作要点

“荷塘三宝”工艺流程如图1所示。

参照闵婷等^[11]的方法略有修改。根据预试验确定“荷塘三宝”基础配方为莲藕180.00 g、菱角60.00 g、莲子60.00 g、生姜3.00 g、葱白3.00 g、青椒丝5.00 g、红椒丝5.00 g、白醋15.00 g、纯净水100.00 g、鸡精0.50 g,加入适量食盐、白砂糖和淀粉。将莲藕洗净、削去外皮后,切成边长约1.00 cm的小方块待用;新鲜莲子剥去外

壳与内层薄膜后备用；菱角去壳洗净，按大小切分成 2~3 份备用；青椒、红椒和生姜均切成细丝。将处理好的莲藕、莲子和菱角于沸水中焯水 3 min 后捞出；锅加热后倒入植物油（占物料总质量的 5%~8%），依次加入生姜丝、5.00 g 白醋，青椒丝、红椒丝和葱白翻拌均匀；取适量清水，依次加入食盐、鸡精、剩余的 10.00 g 白醋、白砂糖和淀粉，充分搅匀制成水淀粉，将淀粉水淋入锅中，与主料一同在 140~160 ℃温度下翻炒制 3~5 min，至汤汁收浓、芡汁透亮。炒制完成后，样品采用冰水浴快速冷却至中心温度≤25 ℃，随后采用食品级 PE+PA 复合膜包装袋，经真空包装机分装密封后，置于 90 ℃水浴条件下处理 15 min 完成杀菌，处理后置于 4 ℃冰箱中冷藏保存。

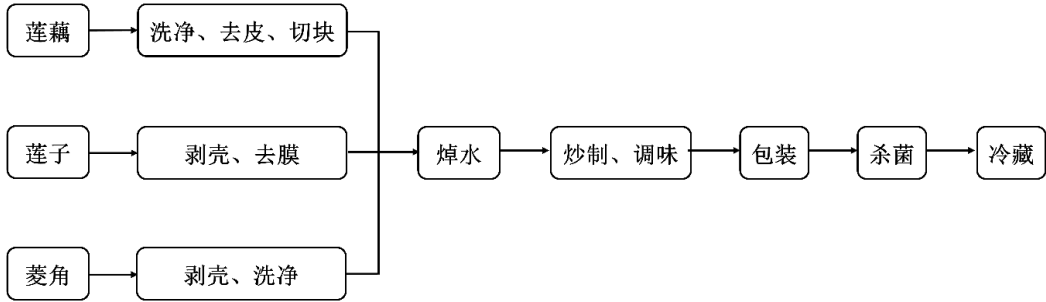


图 1 “荷塘三宝” 工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram of “Three Treasures of Lotus Pond”

1.2.2 单因素试验设计

本试验选取食盐添加量、白糖添加量、淀粉添加量和原料焯水时间四个变量进行单因素试验，探究其对“荷塘三宝”感官评分、色泽、质地、pH 值、总酚和总黄酮含量的影响。单因素试验设计见表 1。

表 1 单因素试验设计表

Table 1 Single factor experimental design table				
水平	因素			
	食盐添加量/g	白糖添加量/g	淀粉添加量/g	焯水时间/min
1	1.00	2.00	2.00	0
2	1.50	3.00	3.00	1
3	2.00	4.00	4.00	2
4	2.50	5.00	5.00	3
5	3.00	6.00	6.00	4

1.2.3 正交试验设计

基于单因素试验结果，选取食盐添加量、白糖添加量、淀粉添加量和焯水时间 4 个因素，以感官评分作为核心评价指标，使用 L⁹（3⁴）的正交表，设置 9 组试验组合，开展四因素三水平的正交试验，确定“荷塘三宝”最佳工艺条件。

1.2.4 感官评价

感官评价小组由 10 名 20~30 岁经过感官评定培训的食品专业的 5 男 5 女组成，所有成员均无食物过敏史，并签署知情同意书。本研究仅进行食品感官品质评价，不涉及人体医学干预。样品采用三位随机数字编码，并通过盲评方式进行评价。评价员依据感官评价标准（表 2），从色泽、气味、滋味、组织状态对样品进行独立评分，在评价前用纯水漱口，每份样品评价 1 次，最终结果取 10 名评价员评分的均值。

表 2 “荷塘三宝” 感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for the “Three Treasures of Lotus Pond”			
项目	权重	评价标准	评分
色 泽	25%	整体色泽鲜亮通透，藕丁、莲子、菱角颜色洁白饱满，物料大小均匀一致	21~25
		整体色泽较鲜亮，物料颜色偏白，大小相对均匀	16~20
		色泽有轻微暗沉，物料颜色偏白，稍饱满，整体较为均匀	11~15
		色泽暗沉无光，物料颜色发灰，大小不均匀	6~10
		整体色泽发灰发暗，物料颜色浑浊不匀，无光泽	0~5

气 味	25%	食材本味浓郁, 香气协调自然, 无任何异味	21~25
		香味较为浓郁, 整体气味融合度较好, 无刺激性异味	16~20
		香味偏淡, 气味融合度一般, 无刺激性异味	11~15
		香味寡淡, 气味融合度较差, 无刺激性异味	6~10
		无食材本身香气, 气味杂乱不融合, 伴有异味	0~5
滋 味	25%	口感鲜嫩适口, 酸甜风味协调, 咀嚼口感佳	21~25
		咸度、酸度以及甜度稍有偏差, 整体咀嚼口感较好	16~20
		咸酸风味偏差较明显, 咀嚼口感一般	11~15
		风味过咸、过酸或过于寡淡, 咀嚼口感差	6~10
		无正常咀嚼口感, 风味杂乱不协调, 食用体验极差	0~5
组 织 状 态	25%	藕丁脆爽弹牙, 莲子清甜软糯, 菱角鲜嫩适口	21~25
		藕丁口感偏硬或偏软, 莲子脆嫩度尚可, 菱角口感偏嫩	16~20
		藕丁口感偏硬或偏软, 莲子脆嫩度一般, 菱角嫩度不足	11~15
		藕丁口感过硬或软烂, 莲子口感偏硬或偏软, 菱角发面或发硬	6~10
		藕丁、莲子和菱角软烂不成形, 物料完全失去原有口感	0~5

1.2.5 色泽、质构和 pH 值的测定

色泽指标测定参考 Liu 等^[12]的方法, 使用色差仪测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 随机选择物料表面颜色均匀处, 每组随机选取 6 个随机点测定并取平均值 ($n=6$)。

质构特性测定参考 Li 等^[13]的方法。将物料切成长、宽、高均约 1.00 cm 的方块, 采用质构仪 TPA 模式进行测定, 配套 P/45 探头, 设置触发力为 100.00 g, 初始速度为 10.00 mm s⁻¹, 下压速度为 0.50 mm s⁻¹、结束上行速度为 10.00 mm s⁻¹, 两次压缩的间隔时间为 5 s, 样品压缩形变量为 35%。

pH 值测定参考 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品中 pH 值的测定》^[14]。

1.2.6 总酚、总黄酮的测定

总酚含量测定使用 Min 等^[15]的方法。预制“荷塘三宝”样品充分混合后剪碎研磨, 称取 3.00 g 样品, 加入 30.00 mL 60% (φ) 乙醇溶液, 冰浴匀浆 6 min, 10 000 r min⁻¹ 离心 10 min 后取上清液。取 0.125 mL 上清液与 0.50 mL 蒸馏水充分混匀, 空白对照组只加入 0.625 mL 蒸馏水, 各组均加入 0.125 mL 福林酚试剂, 涡旋混匀后室温下放置 6 min。加入 1.25 mL 7 wt.% Na₂CO₃ 溶液与 1.00 mL 蒸馏水, 充分摇匀后于 25 °C 避光静置 90 min。采用分光光度计在 760 nm 波长处测定各组吸光度值。以没食子酸为标准品绘制标准曲线, 总酚含量以没食子酸当量表示, 结果以鲜样质量计, 单位为 mg kg⁻¹, 每组样品均设置 3 次平行测定。

总黄酮含量测定参考 Min 等^[15]的方法。预制“荷塘三宝”充分混匀后剪碎, 称取 5.00 g 样品置于离心管中, 加入 50.00 mL 60% (φ) 乙醇溶液, 10 000 r min⁻¹ 冰浴匀浆 2 min, 匀浆完成后置于 10 000 r min⁻¹ 中离心 10 min, 取上清液作为黄酮提取液备用。取 4.00 mL 上清液和 0.30 mL 5 wt.% NaNO₂ 溶液混合均匀静置 6 min, 加入 0.30 mL 10 wt.% 的 Al(NO₃)₃ 溶液, 摇匀后继续静置 6 min, 随后加入 4.00 mL 1.0 mol L⁻¹ NaOH 溶液, 用 60% (φ) 的乙醇溶液定容至 10.00 mL, 涡旋混匀后室温避光静置 15 min, 采用分光光度计在 510 nm 波长处测定吸光度。以芦丁为标准品绘制标准曲线, 计算样品总黄酮含量, 以芦丁当量表示, 结果以鲜样质量计, 单位为 mg kg⁻¹, 每组样品均设置 3 次平行测定。

1.2.7 模拟冷链物流温度的测定

参考何晓彤^[16]的方法, 结合预制菜实际流通过程中的温度控制特点, 将冷链运输和流通待售阶段进行模拟。设置 4 °C 作为稳定冷链条件, 25 °C 作为温控失效条件, 用于评价不同温度环境下“荷塘三宝”品质变化规律。将水浴杀菌后的“荷塘三宝”预制菜置于 4±1 °C 环境中充分冷却, 然后将样品与冰袋一同装入铝箔 PE 珍珠棉材质的自封保温袋, 均匀放入相同规格的泡沫箱内, 用胶带密封箱体, 设置如下试验组别:

(1) 冷藏待运组 (D1): 4 °C 条件下放置 24 h, 模拟预制菜成品冷库待运环节;

(2) 运输模拟组: 常温运输组 (C) 为 25 °C 放置 48 h, 冷链运输组 (L) 为 4 °C 放置 48 h。

(3) 流通待售模拟组: 共设置 4 组, 分别为冷链运输+冷藏待售组 (L+L, 4 °C 48 h+4 °C 24 h); 冷链运输+常温待售组 (L+C, 4 °C 48 h+25 °C 24 h); 常温运输+冷藏待售组 (C+L, 25 °C 48 h+4 °C 24 h); 常温运输+常温

待售组 (C+C, 25 °C 48 h+25 °C 24 h)。

将温度计探头固定于泡沫箱内的保温袋中,每隔 8 h 测定并记录一次箱内温度。本研究中 4 °C 和 25 °C 分别为模拟冷链运输和常温运输的设定温度,实际检测温度以包装体系内部环境温度为准。

1.2.8 菌落总数的测定

菌落总数的测定参考 Li 等^[17]的方法。在无菌超净工作台内,取 25.00 g 剪碎混匀的预制“荷塘三宝”样品,加入 225.00 mL 无菌生理盐水,经均质机均质后用无菌生理盐水做梯度稀释,吸取 0.10 mL 适宜稀释度的菌悬液置无菌培养皿中,倒入平板计数琼脂 (PCA) 培养基,待培养基冷却凝固后,倒置放入 37 °C 培养箱培养 48 h 后,采用平板计数法统计菌落数。

1.2.9 挥发性风味物质的测定

电子鼻测试参考苗泽钰^[18]的方法,称取 3.00 g 混匀切碎的样品置于顶空瓶中,压盖密封后室温静置 30 min。电子鼻开机预热 30 min,用纯净干燥空气清洗系统 10 min 后,将探头插入顶空瓶内开始检测。单个样品测试时间为 120 s,每测试完一个样品后需要启动清洗程序清洗 60 s。采用电子鼻自带的件对检测数据进行主成分分析 (PCA)。

使用气相色谱-离子迁移谱联用仪测定“荷塘三宝”中挥发性风味物质。取 3.00 g 混匀切碎的预制菜样品于 20.00 mL 顶空进样瓶中,在 80 °C 下孵育 5 min。以进样量 500 μ L 注射进样,孵育速度设置为 500 r min⁻¹,进样针温度为 85 °C。采用色谱柱为 Multi-capillary-column, coated OV-5,柱温设置为 40 °C,初始流速 5.00 mL min⁻¹ 运行 2 min,2~10 min 内线性升至 100 mL min⁻¹,10~20 min 内线性升至 150 mL min⁻¹,总运行时间为 20 min。漂移管长度为 98 mm,管温度为 45 °C,管内电场强度为 500 V cm⁻¹,流速为 150 mL min⁻¹,以高纯度 N₂ ($\geq 99.999\%$) 作为漂移气体。挥发性化合物采用 GC-IMS Library Search 软件进行初步定性,根据化合物的保留指数 (RI) 和相对迁移时间与软件数据库进行匹配。采用 Gallery Plot 插件获取各特征峰的峰高,并通过峰高归一化法计算各挥发性化合物的相对含量,即单一特征峰峰高占该样品所选全部特征峰峰高总和的百分比。每个处理设置 3 个独立平行样品 ($n=3$),结果以平均值 $\pm$ 标准误差表示。PCA 分析由 GC-IMS 分析软件配套插件完成。

1.2.10 数据分析

除特殊说明外,理化指标均设置 3 个独立平行样品 ($n=3$),结果以平均值 $\pm$ 标准误差表示。通过方差分析 (ANOVA) 进行组间平均值的比较,然后进行 Duncan 检验。采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行分析,在 $P<0.05$ 时差异显著。采用 Pearson 相关性分析评价感官评分、总酚、总黄酮及挥发性风味物质等指标间的线性相关关系,计算变量间的 Pearson 相关系数 (r),采用双尾检验。用 OriginPro 2021 软件完成绘图,并使用 Correlation Plot 插件将 Pearson 相关性分析结果以热图形式呈现。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 食盐添加量对“荷塘三宝”品质的影响

由图 2 可知,随着食盐添加量的增加,“荷塘三宝”的感官评分呈先升高后下降趋势,其中食盐添加量为 2.00 g 时感官评分显著高于其他处理组 ($P<0.05$),且达到较高水平。说明适量食盐能够增强产品咸鲜味,改善莲藕、莲子和菱角之间的风味协调性。同时,总酚和总黄酮含量均随食盐添加量增加呈先升高后降低趋势,并表现出显著差异 ($P<0.05$)。盐的添加能够改变蔬菜加工过程中多酚类物质的迁移和保留情况,不同盐浓度对植物多酚含量具有显著影响^[19]。本研究中,适量食盐可能通过改变组织渗透环境促进部分结合态酚类物质释放,而过高盐浓度可能影响酚类物质稳定性,导致活性成分含量下降。总酚和总黄酮含量变化趋势与感官评分基本一致,说明活性成分保持可能与产品综合品质具有一定相关性。此外,由表 3 可知,不同食盐添加量处理下样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值以及咀嚼性、硬度均无显著差异 ($P>0.05$),表明在本研究添加范围内,食盐主要影响产品风味及活性成分保持,而对色泽和质构特性的调控作用有限。综合感官评价及活性成分变化结果,确定食盐添加量为 2.00 g 作为后续正交试验水平。

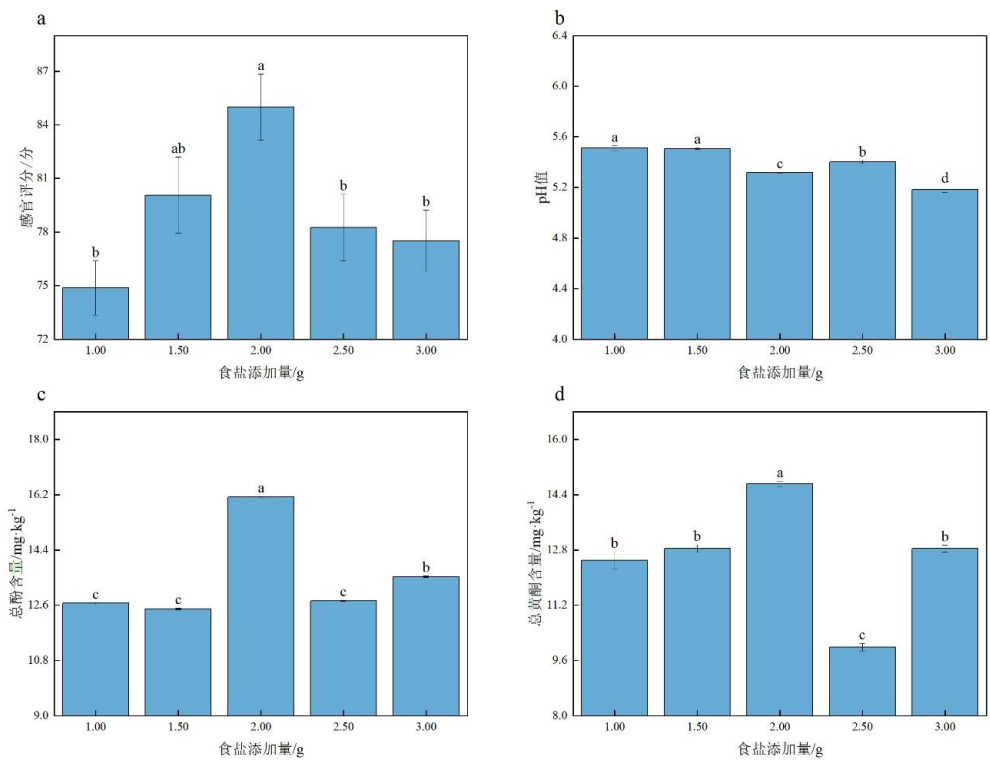


图2 食盐添加量对“荷塘三宝”感官评分 (a)、pH 值 (b)、总酚 (c) 和总黄酮 (d) 含量的影响

Fig.2 Effects of salt addition on sensory scores (a), pH value (b), total phenolic content (c) and total flavonoid content (d) in “Three Treasures of Lotus Pond”

注：图中不同小写字母表示不同处理组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)，相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下图同。

表 3 食盐添加量对“荷塘三宝”色泽和质构的影响

烹调工艺		色泽			质构	
水平		L*值	a*值	b*值	咀嚼性	硬度
食盐添加量/g	1.00	68.07±2.84 ^a	-2.28±0.37 ^a	10.70±1.46 ^a	51.20±6.13 ^a	77.79±5.66 ^a
	1.50	67.75±2.73 ^a	-2.57±0.21 ^a	11.08±1.69 ^a	46.09±3.63 ^a	73.00±6.07 ^a
	2.00	65.35±0.98 ^a	-2.37±0.32 ^a	10.10±0.83 ^a	44.33±4.81 ^a	66.91±4.60 ^a
	2.50	68.37±2.53 ^a	-2.07±0.30 ^a	11.78±1.44 ^a	42.70±7.56 ^a	71.16±7.74 ^a
	3.00	66.82±1.92 ^a	-2.40±0.30 ^a	10.63±1.07 ^a	50.26±4.86 ^a	82.57±5.96 ^a

注：同列不同小写字母表示不同处理组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)，相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下表同。

2.1.2 白糖添加量对“荷塘三宝”品质的影响

白糖作为菜肴加工过程中常用的调味剂，能够改善产品甜味特征，协调酸、咸等滋味之间的平衡。由图 3 可知，随着白糖添加量的增加，“荷塘三宝”的感官评分呈先升高后下降趋势，当白糖添加量为 4.00 g 时感官评分达到最高，表明适量白糖有利于提升产品综合色泽和风味协调性。与此同时，总酚和总黄酮含量均呈先升高后降低的变化趋势，并在白糖添加量为 4.00 g 时达到较高水平，而 pH 值随白糖添加量增加呈缓慢下降趋势。可能是糖分与植物组织中的水分相互作用，可在一定程度上减缓细胞内容物损失^[20]。当白糖添加量继续增加时，较高的糖浓度可能改变酚类物质稳定性，降低部分活性成分的提取效率，并且过强的甜味会掩盖“荷塘三宝”原本的清甜风味，使整体滋味失衡，导致感官评分下降。由表 4 可知，不同白糖添加量处理组的 L^* 、 a^* 、 b^* 值均无显著差异 ($P > 0.05$)，说明白糖添加量对产品综合色泽影响较小；而质构会受到一定影响，其中 5.00 g 处理组的咀嚼性和硬度较高，可能与较高糖浓度增强组织保水能力有关。然而，该处理组的官评分低于 4.00 g 处理组。因此，综合感官品质、活性成分含量及质构特性，确定白糖添加量为 4.00 g 作为后续正交试验水平。

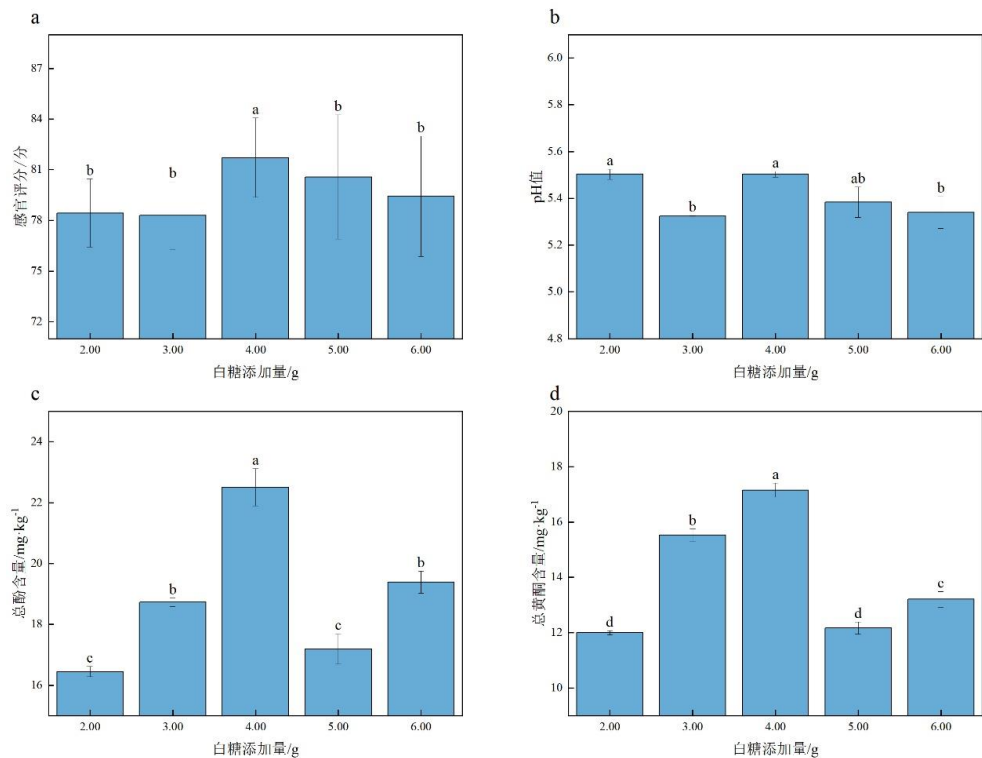


图 3 白糖添加量对“荷塘三宝”感官评分 (a)、pH 值 (b)、总酚 (c) 和总黄酮 (d) 的影响

Fig.3 Effects of white sugar addition on sensory scores (a), pH value (b), total phenolic content (c) and total flavonoid content (d) in “Three Treasures of Lotus Pond”

表 4 白糖添加量对“荷塘三宝”色泽和质构的影响

Table 4 Effects of white sugar addition on the color and texture of “Three Treasures of Lotus Pond”

烹调工艺	水平	色泽			质构	
		<i>L</i> [*] 值	<i>a</i> [*] 值	<i>b</i> [*] 值	咀嚼性	硬度
白糖添加量/g	2.00	62.28±1.47 ^a	1.13±0.28 ^a	3.40±0.64 ^a	79.74±4.51 ^{ab}	100.51±4.05 ^b
	3.00	64.62±0.45 ^a	1.62±0.35 ^a	5.30±0.62 ^a	63.34±7.58 ^b	91.14±5.21 ^b
	4.00	64.67±0.58 ^a	1.40±0.43 ^a	4.50±0.88 ^a	57.93±7.61 ^b	85.10±6.33 ^b
	5.00	64.68±0.58 ^a	1.58±0.51 ^a	5.12±0.67 ^a	101.28±11.62 ^a	122.92±8.78 ^a
	6.00	64.10±1.65 ^a	2.25±0.42 ^a	5.75±0.55 ^a	64.29±9.18 ^b	89.78±6.71 ^b

2.1.3 淀粉添加量对“荷塘三宝”品质的影响

淀粉在菜肴加工过程中不仅能够改善汤汁黏稠度和口感，还可通过糊化作用在食材表面形成保护层，减少加工过程中水分迁移和风味物质损失。由图 4 可知，随着淀粉添加量的增加，“荷塘三宝”的感官评分呈先升高后降低趋势，并在淀粉添加量为 4.00 g 时达到最高值，说明适量淀粉有利于改善产品整体品质。与此同时，总酚含量随淀粉添加量增加呈先升高后降低趋势，并在 4.00 g 时达到最大值；总黄酮含量则表现为先基本稳定后下降的变化规律。可能是因为淀粉在加热过程中发生糊化，可提高体系黏度，并通过氢键作用和物理吸附与部分酚类物质结合，减少了加工过程中的氧化损失及水溶性成分流失，从而有利于活性成分保持^[21,22]。当淀粉添加量进一步增加时，过量淀粉可能增强对酚类和黄酮类物质的吸附作用，使部分活性成分形成难以被提取的结合状态^[23]，导致测定含量下降。由表 5 可知，不同淀粉添加量处理组的 *L*^{*}、*a*^{*}、*b*^{*} 值以及咀嚼性和硬度均无显著差异 (*P*>0.05)，说明在本试验范围内，淀粉添加量对产品色泽及质构影响有限，其主要作用体现在改善风味协调性和活性成分保持方面。因此，综合感官评分、总酚和总黄酮含量变化，确定淀粉添加量为 4.00 g 作为后续正交试验水平。

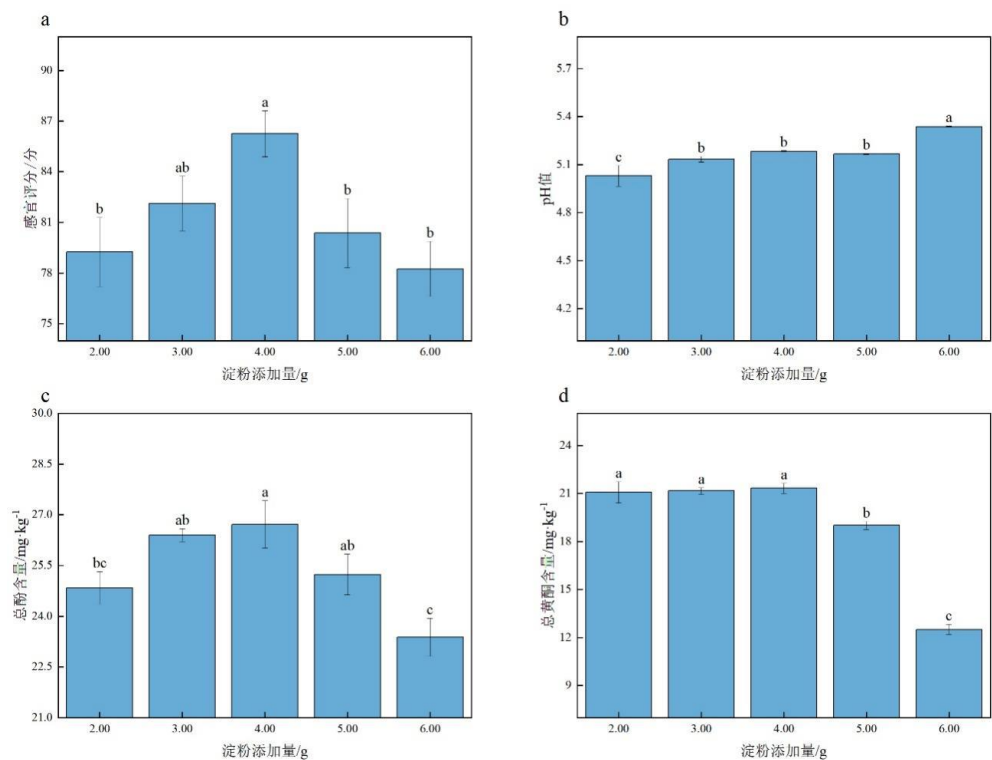


图 4 淀粉添加量对“荷塘三宝”感官评分 (a)、pH 值 (b)、总酚 (c) 和总黄酮 (d) 的影响

Fig.4 Effects of starch addition on sensory scores (a), pH value (b), total phenolic content (c) and total flavonoid content (d) in “Three Treasures of Lotus Pond”

表 5 淀粉添加量对“荷塘三宝”色泽和质构的影响

Table 5 Effects of starch addition on the color and texture of “Three Treasures of Lotus Pond”

烹调工艺	水平	色泽			质构	
		<i>L</i> [*] 值	<i>a</i> [*] 值	<i>b</i> [*] 值	咀嚼性	硬度
淀粉添加量/g	2.00	63.97±0.39 ^a	3.70±0.48 ^a	3.57±0.44 ^a	60.81±6.35 ^a	83.78±6.91 ^a
	3.00	64.33±0.80 ^a	3.10±0.30 ^a	4.27±0.55 ^a	55.52±6.18 ^a	77.87±8.06 ^a
	4.00	65.23±0.68 ^a	3.40±0.57 ^a	5.07±0.48 ^a	51.26±5.33 ^a	74.84±5.74 ^a
	5.00	64.38±0.43 ^a	3.35±0.38 ^a	4.65±0.49 ^a	63.66±4.97 ^a	90.40±2.42 ^a
	6.00	63.13±0.94 ^a	3.02±0.21 ^a	3.92±0.33 ^a	63.38±7.81 ^a	88.34±4.25 ^a

2.1.4 焯水时间对“荷塘三宝”品质的影响

焯水是蔬菜加工过程中常用的预处理方式，能够通过热作用降低酶活性、改善组织状态，并影响产品最终品质。由图 5 可知，随着焯水时间的延长，“荷塘三宝”的感官评分呈先升高后降低趋势，在焯水时间为 2 min 时达到最高值，表明适宜焯水时间有利于提升产品综合品质。随着焯水时间的延长，样品 pH 值、总酚和总黄酮含量均呈下降趋势，并表现出一定程度的显著变化。这可能是由于酚类和黄酮类物质具有一定水溶性，焯水时间越长，酚类物质的溶出就越多；同时，持续热处理可能改变植物细胞结构，并影响多酚类物质稳定性，从而导致总酚和总黄酮含量降低^[24]。另一方面，适度焯水能够促进原料组织软化，提高莲藕、莲子和菱角之间的口感协调性，而焯水时间过短可能导致原料组织状态不足，影响最终食用品质。由表 6 可知，不同焯水时间处理组的 *L*^{*}、*a*^{*}、*b*^{*}值差异均不显著 (*P*>0.05)，说明在本试验范围内，焯水时间对产品综合色泽影响有限；而质构特性受到一定影响，其中焯水 2 min 时样品咀嚼性和硬度表现较优，说明适度热处理有利于维持产品组织结构。综合感官评价、活性成分保持及质构特性，确定焯水时间为 2 min 作为后续正交试验水平。

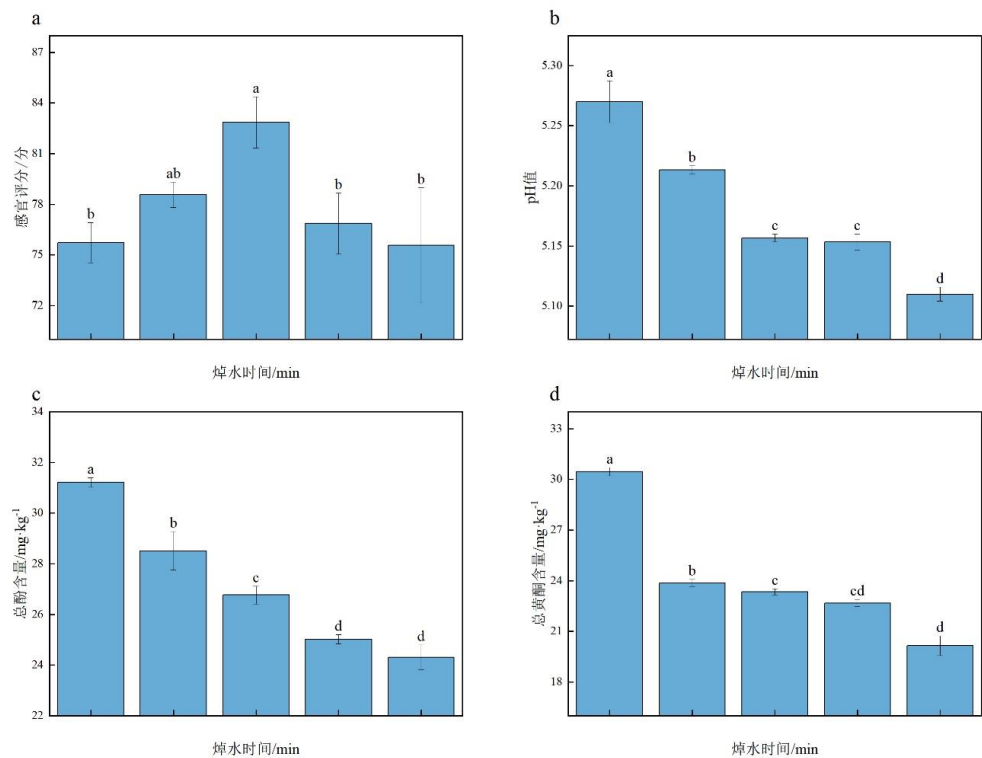


图 5 焯水时间对“荷塘三宝”感官评分 (a)、pH 值 (b)、总酚 (c) 和总黄酮 (d) 的影响

Fig.5 Effects of blanching time on sensory scores (a), pH value (b), total phenolic content (c) and total flavonoid content (d) in “Three Treasures of Lotus Pond”

表 6 焯水时间对“荷塘三宝”色泽和质构的影响

Table 6 Effects of blanching time on the color and texture of “Three Treasures of Lotus Pond”

烹调工艺	水平	色泽			质构	
		L*值	a*值	b*值	咀嚼性	硬度
焯水时间/min	0	63.32±0.54 ^a	3.32±0.08 ^a	5.52±0.27 ^a	70.63±8.84 ^{ab}	88.86±6.70 ^{ab}
	1	62.73±0.38 ^a	3.37±0.20 ^a	4.98±0.35 ^a	46.71±3.83 ^b	79.23±5.48 ^b
	2	64.52±0.51 ^a	3.32±0.17 ^a	5.28±0.60 ^a	72.22±3.20 ^a	98.69±3.18 ^{ab}
	3	63.38±0.70 ^a	3.38±0.17 ^a	5.62±0.55 ^a	64.26±9.91 ^{ab}	94.45±6.30 ^a
	4	63.57±0.56 ^a	3.42±0.36 ^a	5.33±0.54 ^a	55.09±10.21 ^{ab}	85.66±5.89 ^{ab}

2.2 正交试验结果与分析

对“荷塘三宝”食盐添加量、白糖添加量、淀粉添加量、原料焯水时间四个工艺关键操作要点进行正交试验，设计 L⁹ (3⁴) 四因素三水平的正交试验。依据表 7 的试验设计，开展正交优化试验。

表 7 “荷塘三宝”正交水平表

Table 7 Orthogonal horizontal table for the “Three Treasures of Lotus Pond”

水平	因素			
	A 食盐添加量/g	B 白糖添加量/g	C 焯水时间/min	D 淀粉添加量/g
1	1.50	3	1	3
2	2.00	4	2	4
3	2.50	5	3	5

由表 8 结果可知，食盐添加量 (A)、白糖添加量 (B)、焯水时间 (C)、淀粉添加量 (D) 四个因素对“荷塘三宝”的感官评分影响主次顺序为 A>B>C>D。以感官评分为单一评价指标进行极差分析，各因素的较优水平组合为 A₂B₂C₂D₃，其中 D₃ 的感官评分均值 (k₃=92.14) 高于 D₂ (k₂=87.80)，然而 D 因素的极差值 (R=4.34) 在四

个因素中最小,说明淀粉添加量对感官评分的影响相对较小,且正交试验中 D₃ 的较高均值可能受其他因素交互作用的干扰。进一步结合单因素试验结果(图 4)发现,淀粉添加量为 4.00 g 时样品的感官评分达到最高水平,显著高于 5.00 g 处理 ($P<0.05$),同时,4.00 g 处理组的总黄酮含量显著高于 5.00 g 处理 ($P<0.05$),总酚含量也高于 5.00 g 处理,且均保持在最高水平,有利于产品活性成分保持。因此,综合考虑感官品质、活性成分保持及实际加工适用性,选择 D₂ 作为最佳水平,最终确定最佳工艺配方为 A₂B₂C₂D₂。对优化后的工艺条件进行验证试验,所得感官评分为 96.82±1.38 分,相对误差仅 1.09%,表明该方案具有较好的可靠性和稳定性。

表 8 “荷塘三宝” 正交试验表

Table 8 Orthogonal experiment table for the “Three Treasures of Lotus Pond”

试验号	因素				感官评分结果
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	83.50
2	1	2	2	2	90.60
3	1	3	3	3	86.80
4	2	1	2	3	96.30
5	2	2	3	1	96.80
6	2	3	1	2	88.00
7	3	1	3	2	84.80
8	3	2	1	3	93.33
9	3	3	2	1	89.50
K ₁	260.90	264.60	261.00	296.80	
K ₂	281.10	280.73	276.40	263.40	
K ₃	267.63	264.30	268.40	276.43	
k ₁	86.97	88.20	87.00	89.93	
k ₂	93.70	93.58	92.13	87.80	
k ₃	89.21	88.10	89.47	92.14	
R	6.73	5.48	5.13	4.34	
因素主次	R _A >R _B >R _C >R _D				
最优方案	A ₂ B ₂ C ₂ D ₃				

2.3 模拟冷链物流中“荷塘三宝”的品质变化

2.3.1 模拟冷链物流的温度变化

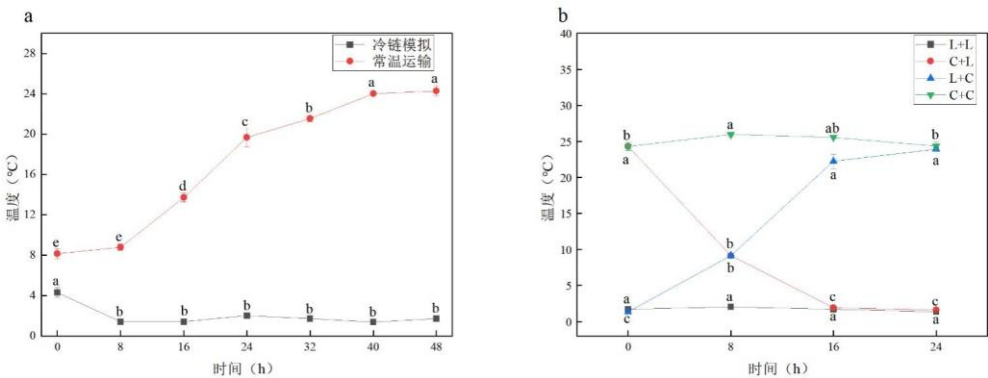


图 6 模拟冷链物流的温度变化

Fig.6 Simulating temperature changes in cold chain logistics

模拟冷链流通过程中包装体系内部温度变化如图 6 所示。随着模拟流通时间延长,常温运输组(C)箱内温度持续升高,并在运输结束阶段达到 25℃左右,而冷链运输组(L)箱内温度始终维持在 2℃附近,与设定冷链

运输温度 4℃ 存在一定差异,可能是由于冰袋辅助降温作用导致包装体系内部环境温度低于设定温度。结果表明保温包装体系能够有效保持低温运输环境。在模拟待售阶段, L+L 组温度始终保持稳定,而 L+C 组经历了由低温向常温的升温过程, C+L 组则经历由常温向低温的降温过程, C+C 组全程维持 25℃ 左右。上述结果表明,本研究建立的模拟冷链物流体系能够较好模拟实际预制菜运输及销售过程中的温度变化,为后续分析不同温度条件对“荷塘三宝”品质响应的影响提供实验基础。

2.3.2 模拟冷链物流中“荷塘三宝”感官评分和微生物变化

温度是影响预制菜品质保持的重要因素,其变化不仅影响微生物生长繁殖,还会进一步影响产品感官接受度。由图 7 可知,运输阶段冷链运输组 (L) 的感官评分显著高于常温运输组 (C),说明低温环境能够有效延缓运输过程中品质劣变。在模拟待售阶段, L+L 组感官评分最高,而 C+C 组最低,表明持续高温暴露会加速产品品质下降。菌落总数测定结果显示,模拟待售阶段, C+L 组和 C+C 组检测到少量菌落,菌落总数分别为 80 CFU/g 和 70 CFU/g,而其他处理组均未检测出菌落,低于检测限 (<10 CFU/g)。C+L 组和 C+C 组均经历了常温运输阶段,而采用冷链运输的处理组菌落总数均低于检测限,表明运输阶段的温度条件可能影响产品的微生物水平。与常温运输相比,冷链运输能够在一定程度上抑制微生物生长,从而降低后续待售过程中微生物污染风险。

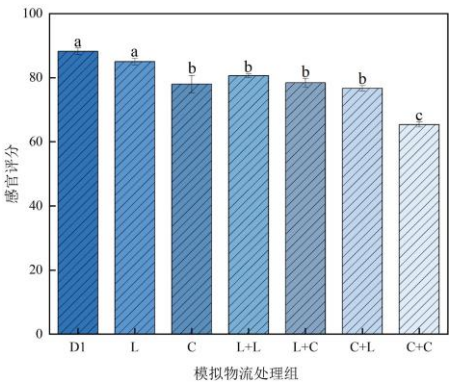


图 7 模拟冷链物流中“荷塘三宝”的感官评分

Fig.7 Sensory evaluation of the “Three Treasures of Lotus Pond” in simulated cold chain logistics

表 9 模拟冷链物流中“荷塘三宝”的菌落总数

Table 9 Total colony count of “Three Treasures of Lotus Pond” in simulated cold chain logistics

组别	菌落总数/(CFU/g)
D1	< 10
L	< 10
C	< 10
L+L	< 10
L+C	< 10
C+L	80
C+C	70

注: 当样品菌落数低于检测限时,以“< 10 CFU/g”表示。

2.3.3 模拟冷链物流中“荷塘三宝”总酚和总黄酮变化

总酚和总黄酮是植物性食品中重要的活性成分,与加工及贮藏过程中氧化反应密切,相关含量变化也能够反映产品营养品质变化。如图 8 所示,运输阶段不同温度处理对“荷塘三宝”总酚和总黄酮含量产生明显影响,冷链运输组 (L) 的总酚和总黄酮含量均高于常温运输组 (C),且具有显著性差异 ($P<0.05$), Liu 等^[25]也通过模拟冷链温度变化研究发现,温度升高会导致果实总酚和总黄酮含量下降。说明低温运输有利于活性成分保持。其原因可能与低温条件下氧化代谢速率降低有关。在模拟待售阶段, L+L 组总酚含量最高,且显著高于其他处理组 ($P<0.05$), C+C 组最低;总黄酮含量也表现出相似变化趋势,其中 L+L 组显著高于其他处理组,表明连续冷链环境能够有效维持“荷塘三宝”中活性成分含量。而常温运输或常温待售过程中的温度升高可能促进氧化酶活化,加速酚类物质氧化及黄酮类物质降解,导致活性成分进一步降低。图中显示总酚和总黄酮在不同处理下的变化趋势并非完全一致,这可能与这两类成分在细胞中分布位置不同及热加工中稳定性差异有关。结合感官评价结果可知, C+C 组不仅表现出较低的总酚和总黄酮含量,同时感官评分最低,说明活性成分损失可能与产品品质劣变存

在一定关系。综上, 冷链运输结合冷藏待售能够最大程度保持“荷塘三宝”中总酚和总黄酮含量, 是维持预制产品品质稳定的重要措施。

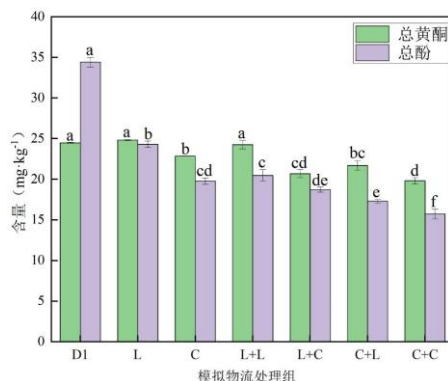


图8 模拟冷链物流中“荷塘三宝”总酚和总黄酮变化

Fig.8 Changes in total phenols and total flavonoids in the “Three Treasures of Lotus Pond” during simulated cold chain logistics

2.3.4 模拟冷链物流中“荷塘三宝”挥发性风味物质变化

采用电子鼻和 GC-IMS 技术对不同模拟冷链物流条件下“荷塘三宝”的挥发性风味变化进行分析, 其中电子鼻传感器的具体性能参数见表 10^[26]。由电子鼻和 PCA 分析结果可知, PC1 和 PC2 累计贡献率达到 92.70%, 不同处理组样品可通过 PCA 主成分分析实现有效区分, 说明温度条件变化能够引起产品挥发性风味组成发生改变。GC-IMS 检测结果显示, 模拟冷链物流过程中共检测到 42 种挥发性风味物质, 经定性鉴定确认了 25 种, 主要包括醇类、醛类、酮类、酯类、吡嗪类、萜烯类和烯炔类物质。其中, 醇类物质是样品中种类较丰富的挥发性成分, 具有清香和植物特征气味^[27,28]。运输阶段, 冷链组中部分醇类物质含量高于常温运输组, 说明低温环境有助于降低挥发性成分损失, 维持产品原有风味特征。待售阶段, 全程冷链组 (L+L) 中部分特征醇类物质保持较高水平, 而常温处理组中部分具有油脂气味的醇类物质增加, 可能与温度升高促进脂质氧化有关。

醛类物质是食品中重要的挥发性风味成分之一, 其形成与脂质氧化降解过程密切相关^[29]。本研究鉴定出的醛类物质主要包括己醛、庚醛、壬醛和苯甲醛, 其中己醛、庚醛和壬醛主要来源于不饱和脂肪酸氧化降解。待售阶段, C+C 组中己醛、庚醛、壬醛及苯甲醛含量增加, 而 L+L 组含量最低, 说明常温条件可能促进脂质氧化相关反应, 使部分醛类物质相对含量增加, 从而影响产品风味品质。已有研究表明, 温度升高可加速脂质氧化过程, 促进不饱和脂肪酸氧化裂解并产生醛类等挥发性物质^[29]。此外, 温度变化可能影响脂质氧化程度以及挥发性物质形成的反应途径, 导致不同处理组中部分挥发性物质呈现不同变化。

酮类和酯类物质的变化也反映了不同温度条件下风味品质的差异。常温处理条件下部分酮类物质含量升高, 可能与温度升高导致氧化反应增强以及微生物代谢变化有关; 同时, 不同温度条件下还原糖、氨基酸等风味前体物质的转化过程可能存在差异^[30], 从而影响部分挥发性物质的形成。综合来看, 冷链运输结合冷藏待售能够有效减缓挥发性风味物质的降解和异常风味物质形成, 维持“荷塘三宝”的风味稳定性; 而常温运输及常温待售会促进氧化反应和风味劣变, 最终降低产品感官接受度。为进一步揭示模拟冷链物流过程中不同品质指标之间的关系, 对温度、感官评分、菌落总数、总酚、总黄酮及关键挥发性风味物质进行了 Pearson 相关性分析, 结果如图 11 所示。由图可知, 温度与感官评分、总酚和总黄酮呈负相关, 而与菌落总数呈正相关, 说明温度升高可能加速微生物增长并促进活性成分损失, 从而影响产品整体品质。感官评分与总酚、总黄酮呈正相关, 与菌落总数呈负相关, 表明活性成分保持和微生物控制可能共同影响消费者感官接受度。此外, 部分挥发性风味物质与温度及感官评分表现出显著相关性, 其中己醛与温度呈正相关, 而与感官评分呈负相关, 说明脂质氧化相关挥发物积累可能参与产品风味劣变过程。相关性分析进一步明确了模拟冷链过程中温度变化、微生物水平、活性成分保持、挥发性风味特征及感官品质之间的关系, 为建立预制“荷塘三宝”冷链条件下的品质响应评价体系提供了理论依据。

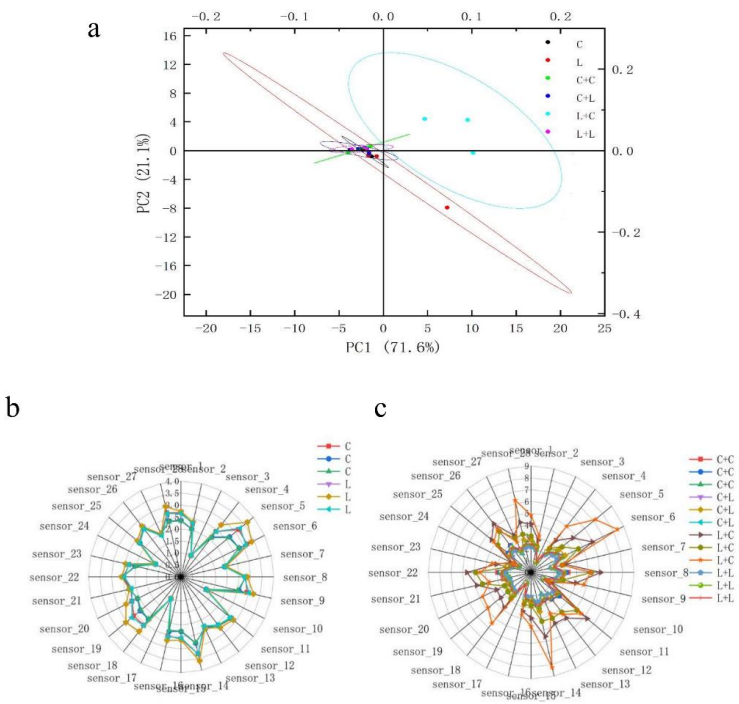


图 9 模拟冷链物流中“荷塘三宝”挥发性风味物质的电子鼻检测结果

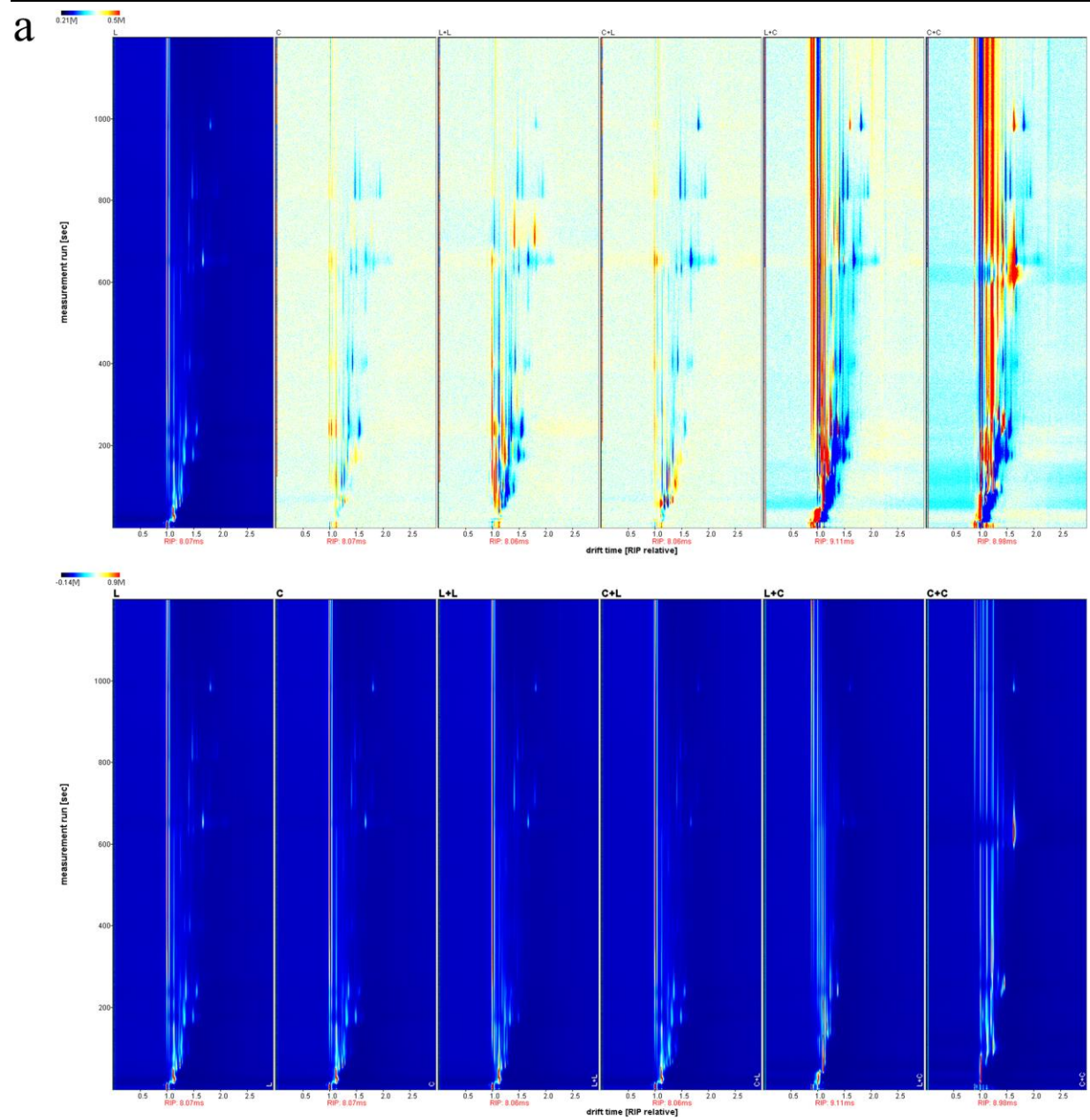
Fig.9 Electronic nose detection of volatile aroma compounds in “Three Treasures of Lotus Pond” during simulated cold chain logistics

注：（a）PCA 主成分分析图；（b）运输阶段（L 组与 C 组）电子鼻雷达图；（c）待售阶段（L+L、L+C、C+L、C+C 组）电子鼻雷达图。

表 10 电子鼻传感器性能表

Table 10 Performance table of electronic nose sensor		
传感器	响应物质	性能描述
S1	短链烷烃	丙烷、烟雾等
S2	含碳物质等	酒精、烟雾、异丁烷、甲醛等
S3	氢气	氢气，含氢气体等
S4	硫化物	硫化氢，硫化物等
S5	含氮类物质	氨气，胺类等
S6	醛酮类	甲苯、丙酮、乙醇、氢气等
S7	短链烷烃类可燃性气体	甲烷、天然气、沼气等
S8	液化气	液化气
S9	烷烃，醇类、酮类等	甲苯、甲醛、苯、酒精、丙酮等
S10	氢气，含氢物质	氢气等
S11	烷烃，一氧化碳等	液化气，烷烃等
S12	部分有机溶剂	液化气，甲烷等
S13	短链烷烃类	甲烷等
S14	短链烷烃	甲烷，燃气，烟雾等
S15	对含氮类物质敏感	氨气，胺类等
S16	对硫化物敏感	硫化氢，硫化物等
S17	含氢类物质	氢气等含氢物质
S18	酒精，部分有机溶剂等	芳香烃类，脂肪烃类，脂环烃类，卤化烃类，醚类，酯类，二醇衍生物，乙腈，吡啶，苯酚等

S19	对醇类, 醛类, 酮类, 苯类敏感	醇类, 酮类, 醛类, 芳香族化合物等
S20	对短链烷烃类敏感	甲烷, 沼气, 天然气等
S21	可燃性气体等	可燃性气体等
S22	VOC	苯酚, 酮类, 乙酸乙酯, 环己酮, 氯苯, 甲基苯, 醚等
S23	对烷烃, 烯烃, 芳烃等敏感	液化气, 天然气, 煤气, 丙烷, 丙烯, 丁烷, 丁烯等
S24	对烷烃, 烯烃, 氢气等敏感	液化气, 可燃性气体等
	对烷烃, 一氧化碳, 烯醛类、醇类、氮	
S25	氧化物、 酮类、醛类等敏感	烷烃, 酒精, 天然气, 烟雾等
S26	对部分有机溶剂敏感	醇类, 醚类, 酯类, 酮类, 芳香烃类, 脂肪烃类, 脂环烃类, 卤化烃类
S27	硫化物, 氮化物, 碳化物, 碳氢化合物 以及氮氧化合物等	烟气, 烹调臭味等
S28	对短链烷烃敏感	甲烷, 燃气等



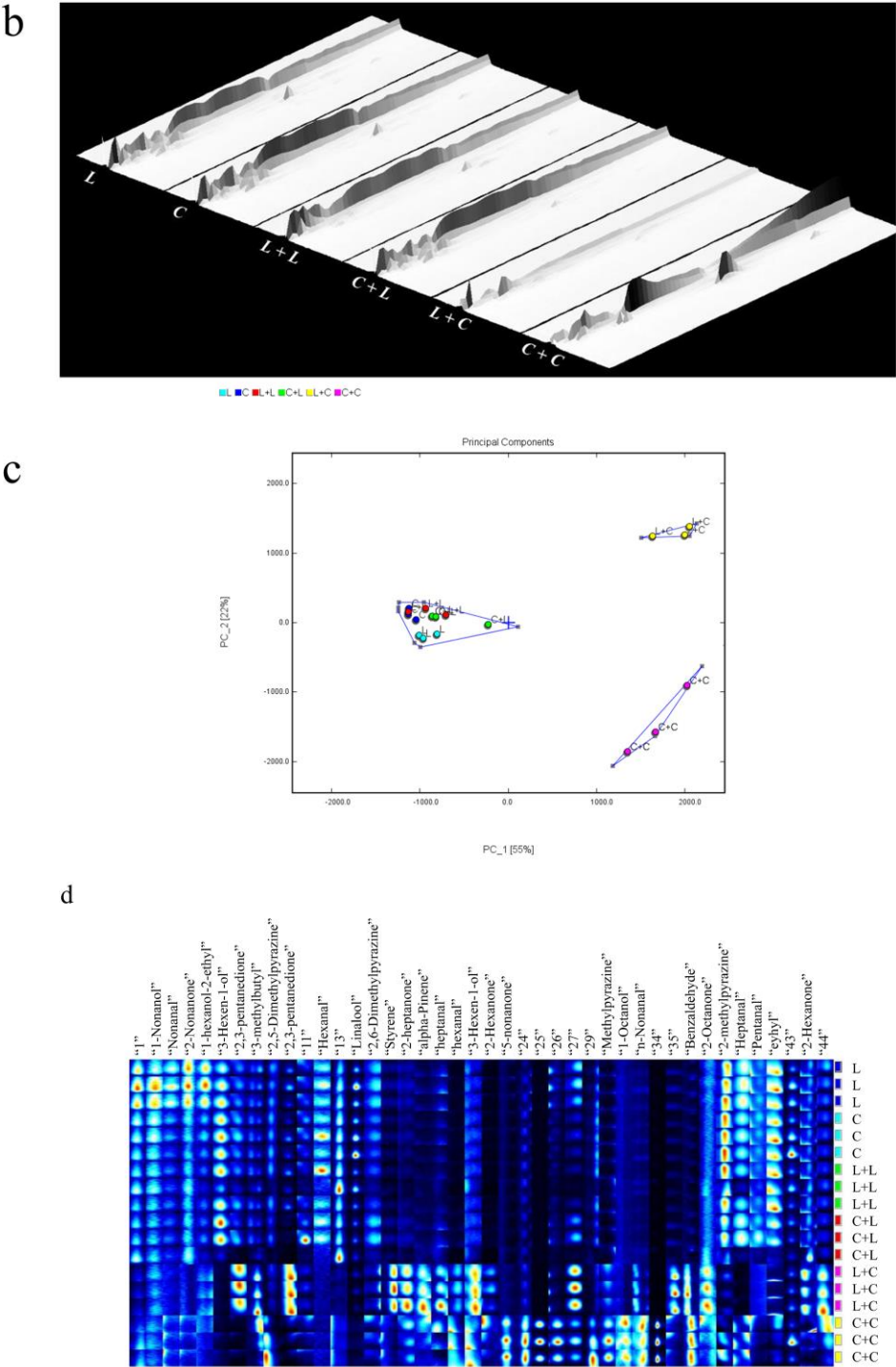


图 10 模拟冷链物流中“荷塘三宝”的 GC-IMS 二维图 (a)、三维图 (b)、PCA 分析图 (c) 和指纹图谱 (d)

Fig.10 GC-IMS two-dimensional (a), three-dimensional (b), PCA score plot (c), and fingerprint (d) of the “Three Treasures of Lotus Pond” under simulated cold chain logistics

注: d 图中 L:冷链运输组; C: 常温运输组; L+L:冷链运输+冷藏待售组; L+C:冷链运输+常温待售组; C+L:常温运输+冷藏待售组; C+C:常温运输+常温待售组。

表 11 基于 GC-IMS 的模拟冷链物流中“荷塘三宝”中挥发性化合物的识别

Table 11 Identification of volatile compounds in the “Three Treasures of Lotus Pond” during simulated cold-chain logistics via GC-IMS

名称	CAS 号	分子式	分子量	保留指数	保留时间/s	相对迁移时间/ms
1-Nonanol	C143088	C ₉ H ₂₀ O	144.3	1157.0	841.385	1.555 8
Nonanal	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1086.1	635.226	1.487 8

2-Nonanone	C821556	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1087.0	637.803	1.399 2
1-hexanol-2-ethyl	C104767	C ₈ H ₁₈ O	130.2	1002.3	409.740	1.427 0
3-Hexen-1-ol	C928961	C ₆ H ₁₂ O	100.2	847.0	182.966	1.4888
2,3-pentanedione(M)	C600146	C ₅ H ₈ O ₂	100.1	704.0	67.002	1.284 4
3-methylbutyl acetate(M)	C123922	C ₇ H ₁₄ O ₂	130.2	845.7	181.677	1.310 2
2,3-pentanedione(D)	C600146	C ₅ H ₈ O ₂	100.1	704.0	67.002	1.225 8
2,5-Dimethylpyrazine	C123320	C ₆ H ₈ N ₂	108.1	872.0	208.736	1.126 0
Hexanal(M)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	816.8	154.619	1.253 6
Linalool	C78706	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	1089.6	645.534	1.681 7
2,6-Dimethylpyrazine	C108509	C ₆ H ₈ N ₂	108.1	897.0	237.082	1.522 2
Styrene	C100425	C ₈ H ₈	104.2	887.1	225.486	1.393 4
2-heptanone	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	901.6	242.523	1.279 6
alpha-Pinene	C80568	C ₁₀ H ₁₆	136.2	935.7	288.061	1.270 6
Heptanal(M)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	934.0	285.664	1.358 4
Hexanal(D)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	802.7	142.036	1.241 5
(Z)- 3-Hexen-1-ol(M)	C928961	C ₆ H ₁₂ O	100.2	838.1	174.306	1.240 6
2-Hexanone(M)	C591786	C ₆ H ₁₂ O	100.2	791.6	132.442	1.206 6
5-nonanone	C502567	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1072.7	596.270	1.332 3
2-Methylpyrazine(M)	C109080	C ₅ H ₆ N ₂	94.1	844.6	180.647	1.052 3
1-Octanol	C111875	C ₈ H ₁₈ O	130.2	1075.1	603.061	1.437 1
n-Nonanal	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1105.8	692.705	1.440 0
Benzaldehyde	C100527	C ₇ H ₆ O	106.1	957.3	321.904	1.128 5
2-Octanone	C111137	C ₈ H ₁₆ O	128.2	992.6	388.455	1.303 9
2-methylpyrazine(D)	C109080	C ₅ H ₆ N ₂	94.1	821.7	159.073	1.119 8
Heptanal(D)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	904.6	246.237	1.348 9
(Z)-3-Hexenol-ol(D)	C928961	C ₆ H ₁₂ O	100.2	848.2	184.133	1.234 3
Pentanal	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	708.7	69.731	1.196 1
ethyl propionate	C105373	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	690.7	59.925	1.170 4
2-Hexanone(D)	C591786	C ₆ H ₁₂ O	100.2	799.1	138.945	1.172 9
3-methylbutyl acetate(D)	C123922	C ₇ H ₁₄ O ₂	130.2	844.3	180.389	1.329 7

注：M 和 D 分别表示同一化合物在 GC-IMS 检测中形成的单体离子峰和二聚体离子峰。

表 12 模拟冷链物流的不同处理组中“荷塘三宝”的挥发性化合物相对含量

Table 12 Relative contents of volatile compounds in the “Three Treasures of Lotus Pond” across different treatment groups under simulated cold chain logistics

物质/组别	L	C	L+L	C+L	L+C	C+C
1-Nonanol	1.51 ±0.10 ^a	1.27 ±0.14 ^a	1.23 ±0.17 ^a	1.47 ±0.22 ^a	0.43 ±0.04 ^b	0.43 ±0.03 ^b
Nonanal	1.93 ±0.11 ^a	1.08 ±0.12 ^b	1.01 ±0.02 ^b	1.20 ±0.17 ^b	0.29 ±0.03 ^c	1.30 ±0.43 ^b
2-Nonanone	1.51 ±0.06 ^a	0.69 ±0.11 ^{cd}	0.82 ±0.14 ^{bc}	1.18 ±0.30 ^{ab}	0.28 ±0.00 ^d	0.47 ±0.06 ^{cd}
1-hexanol-2-ethyl	2.37 ±0.05 ^a	1.18 ±0.10 ^b	0.95 ±0.16 ^b	1.21 ±0.09 ^b	0.53 ±0.03 ^c	0.28 ±0.03 ^c
3-Hexen-1-ol	5.51 ±0.66 ^a	7.03 ±0.31 ^a	5.94 ±0.97 ^a	7.70 ±2.03 ^a	0.28 ±0.01 ^b	0.72 ±0.13 ^b
2,3-pentanedione(M)	4.97 ±0.25 ^{ab}	6.20 ±0.40 ^b	4.93 ±0.83 ^{ab}	4.78 ±1.58 ^{ab}	11.24 ±0.45 ^c	2.68 ±0.43 ^b
3-methylbutyl acetate	5.49 ±0.59 ^{ab}	6.62 ±0.44 ^{ab}	7.79 ±1.10 ^{ab}	9.06 ±1.20 ^b	13.76 ±1.16 ^c	4.80 ±1.94 ^a
2,5-Dimethylpyrazine	4.11 ±0.19 ^{ab}	4.23 ±0.16 ^{ab}	3.09 ±1.15 ^a	3.23 ±1.05 ^a	2.10 ±0.15 ^a	6.16 ±1.29 ^b
2,3-pentanedione(D)	18.77 ±1.95 ^{ab}	15.89 ±2.08 ^{ac}	20.83 ±1.56 ^b	6.92 ±0.82 ^d	17.37 ±0.71 ^{abc}	14.01 ±0.67 ^c
Hexanal(M)	1.07 ±0.06 ^a	1.21 ±0.20 ^a	1.19 ±0.39 ^a	1.25 ±0.29 ^a	0.27 ±0.01 ^b	0.27 ±0.04 ^b

Linalool	7.3±1.21 ^{ab}	9.44±1.87 ^b	6.24±1.89 ^{ab}	5.34±0.30 ^a	1.50±0.20 ^c	0.58±0.08 ^c
2,6-Dimethylpyrazine	1.91±0.03	1.53±0.10	1.05±0.18	2.07±0.43	1.45±0.64	1.51±0.31
Styrene	1.28±0.09 ^a	1.08±0.08 ^a	1.19±0.12 ^a	2.00±0.14 ^{ab}	7.63±0.30 ^c	3.31±1.21 ^b
2-heptanone	0.55±0.03 ^a	0.51±0.06 ^a	0.48±0.07 ^a	0.78±0.02 ^a	3.13±0.24 ^b	1.74±0.15 ^c
alpha-Pinene	0.71±0.06 ^a	0.58±0.05 ^a	0.53±0.03 ^a	0.73±0.08 ^a	1.72±0.25 ^b	1.17±0.44 ^{ab}
Heptanal(M)	1.17±0.09 ^{abc}	0.80±0.05 ^{ab}	0.61±0.09 ^b	1.47±0.09 ^c	2.10±0.34 ^d	1.31±0.28 ^{bc}
Hexanal(D)	0.88±0.03 ^a	0.48±0.03 ^a	0.78±0.13 ^a	1.30±0.14 ^a	4.04±0.35 ^b	5.36±1.40 ^b
(Z)- 3-Hexen-1-ol	1.09±0.10 ^a	1.10±0.05 ^a	1.46±0.34 ^{ab}	1.95±0.40 ^{bc}	1.60±0.03 ^{ab}	2.44±0.17 ^c
2-Hexanone(M)	1.64±0.86 ^a	1.36±0.47 ^a	0.83±0.04 ^a	0.98±0.13 ^a	5.36±0.85 ^b	8.65±2.28 ^b
5-nonanone	0.34±0.02 ^a	0.42±0.05 ^a	0.48±0.07 ^a	0.63±0.18 ^a	0.27±0.03 ^a	4.67±0.84 ^b
2-Methylpyrazine(M)	1.26±0.12 ^a	1.67±0.32 ^{ab}	1.62±0.5 ^{ab}	3.68±1.22 ^{bc}	2.10±0.10 ^{ab}	5.48±1.02 ^c
1-Octanol	0.28±0.01 ^a	0.33±0.02 ^{ab}	0.36±0.04 ^{ab}	0.47±0.07 ^b	0.27±0.02 ^a	1.31±0.10 ^c
n-Nonanal	0.38±0.01 ^a	0.45±0.03 ^a	0.46±0.08 ^a	0.6±0.16 ^a	0.99±0.10 ^b	1.19±0.12 ^b
Benzaldehyde	2.06±0.12 ^a	1.40±0.13 ^a	1.52±0.26 ^a	4.18±1.34 ^b	3.26±0.30 ^{ab}	6.69±0.22 ^c
2-Octanone	0.41±0.03 ^a	0.36±0.00 ^a	0.44±0.09 ^a	0.67±0.22 ^a	1.29±0.09 ^b	0.87±0.32 ^{ab}
2-methylpyrazine(D)	9.88±0.85 ^{ab}	11.42±0.46 ^a	12.61±1.29 ^a	12.00±0.56 ^a	2.41±0.32 ^c	6.77±3.00 ^{bc}
Heptanal(D)	5.30±0.56 ^a	5.94±0.31 ^a	4.45±0.88 ^a	5.81±1.44 ^a	0.61±0.17 ^b	7.17±1.04 ^a
Pentanal	3.47±1.17 ^a	1.13±0.14 ^b	1.04±0.16 ^b	2.39±0.68 ^{ab}	0.27±0.05 ^b	2.08±0.82 ^{ab}
ethyl propionate	9.85±0.08 ^{ab}	10.66±0.10 ^{ab}	12.54±1.06 ^b	8.29±2.09 ^a	9.01±0.48 ^a	3.73±0.90 ^c
2-Hexanone(D)	2.99±0.15	3.93±0.03	3.53±0.35	6.65±3.35	4.45±0.25	2.87±1.38

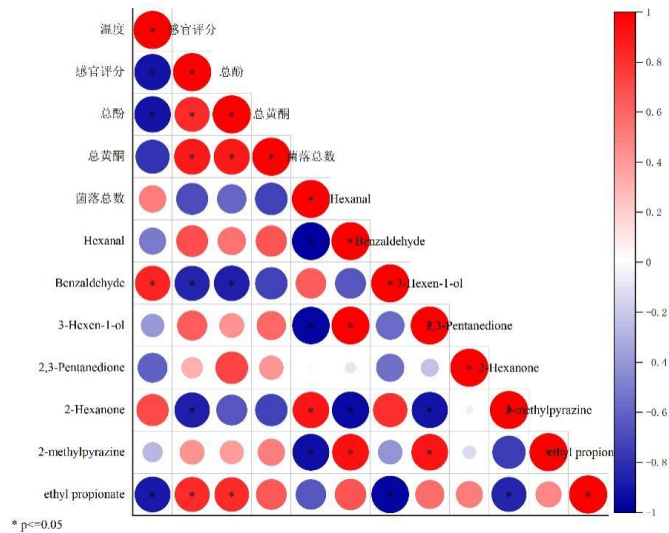


图 11 模拟冷链物流中“荷塘三宝”品质指标与关键挥发性风味物质的 Pearson 相关性分析

Fig. 11 Pearson correlation analysis between quality indicators and key volatile flavor compounds of the “Three Treasures of Lotus Pond” under simulated cold chain logistics

注: 颜色表示相关系数大小, 红色表示正相关, 蓝色表示负相关; 圆点大小表示相关程度; *表示相关性达到显著水平 ($P<0.05$)。

3 结论

本研究通过单因素和正交试验优化了“荷塘三宝”的预制加工工艺, 并探究了在模拟冷链物流条件下其品质变化规律。结果表明,“荷塘三宝”的最佳加工工艺参数为食盐添加量 2.00 g、白糖添加量 4.00 g、淀粉添加量 4.00 g、焯水时间 2 min, 此条件下产品感官评分达到 96.82 分。模拟冷链物流研究表明, 温度是影响预制“荷塘三宝”品质的重要因素。冷链运输结合冷藏待售条件下, 样品的总酚和总黄酮含量分别为 20.47±0.70 mg kg⁻¹ 和 24.27±0.52 mg kg⁻¹, 较常温运输结合常温待售组的 15.74±0.60 mg kg⁻¹ 和 19.81±0.39 mg kg⁻¹ 分别提高了 30.05%和 22.51%。电子鼻和 GC-IMS 分析表明, 不同温度处理也会影响产品挥发性风味组成, 低温条件下部分挥发性风味

物质保持较稳定,而常温条件会加速“荷塘三宝”的氧化反应及风味劣变。因此,建立稳定的冷链流通体系对于延缓预制“荷塘三宝”品质下降、保持营养成分和风味特征具有重要意义。本研究可为传统特色菜肴的工业化加工及冷链品质控制提供理论依据和技术参考。未来可结合相关性分析、主成分分析或多指标综合评价模型,进一步探究冷链条件下预制菜品质变化之间的内在联系。

参考文献

- [1] 市场监管总局,教育部,工业和信息化部,等.关于加强预制菜食品安全监管 促进产业高质量发展的通知[EB/OL].(2024-03-18) [2026-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6940808.htm.
- [2] 杨炎炎,张颢城,祝超然,等.我国预制菜行业发展因素、现存问题及对策建议[J].中国食物与营养,2024,30(12):42-47+68.
- [3] 林日志.预制菜与餐饮业的合作模式及发展前景预测[J].食品安全导刊,2024,34:190-192.
- [4] 钟石新.2025 食品开年趋势:预制菜激增背后的行业密码[J].中国食品工业,2025,2:9-10.
- [5] 张长贵,董加宝,王祯旭,等.莲藕的营养保健功能及其开发利用[J].中国食物与营养,2006,1:22-24.
- [6] LAN W Q, CHEN X N, ZHAO Y N, et al. The effects of ozonated slurry ice treatment on microbial, physicochemical, and quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during cold-chain circulation [J]. Food Control, 2023, 145: 109511.
- [7] EVANTHIA M, GWENDOLINE C, STEPHANE C, et al. Metagenetic characterization of bacterial communities associated with ready-to-eat leafy vegetables and study of temperature effect on their composition during storage [J]. Food Research International, 2022, 158: 111563.
- [8] MIN T, NIU L F, FENG X Y, et al. The effects of different temperatures on the storage characteristics of lotus (*Nelumbo nucifera* G.) root [J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129109.
- [9] 张鹏,颜碧,贾晓昱,等.精准温度处理对鲜切莲藕褐变、生理和品质的影响[J].食品工业科技,2022,43(16):347-354.
- [10] YANG X L, ZHANG T X, YANG D D, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in the analysis of food volatile components [J]. Acta Chromatographica, 2023, 35(1): 35-45.
- [11] 闵婷,王宏勋,侯温甫,等.一种荷塘三宝预制菜及其制备方法:中国,CN202311561794.4[P],2024-02-13.
- [12] LIU X, WANG T, LU Y Z, et al. Effect of high oxygen pretreatment of whole tuber on anti-browning of fresh-cut potato slices during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125287.
- [13] LI S Y, LI X J, HE X, et al. Effect of mild heat treatment on shelf life of fresh lotus root [J]. LWT, 2018, 90: 83-89.
- [14] GB 5009.237-2016.食品安全国家标准 食品 pH 值的测定[S].
- [15] MIN T, XIE J, ZHENG M L, et al. The effect of different temperatures on browning incidence and phenol compound metabolism in fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* G.) root [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 123: 69-76.
- [16] 何晓彤.即食红鱼片及红烧红鱼干预制菜加工工艺及流通品质特性的研究[D].湛江:广东海洋大学,2023.
- [17] LI J S, BAI J, LI S Y, et al. Effect of lactic acid bacteria on the postharvest properties of fresh lotus root [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 110983.
- [18] 苗泽钰.冰温及冰水混合物贮藏对莲藕品质及其卤后品质的影响研究[D].武汉:武汉轻工大学,2023.
- [19] JOANNA D, ADAM F, ROBERT S, et al. Polyphenolic acid content in Brassica vegetables during hydrothermal treatment with salt addition [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 46(2): e16219.
- [20] ARTUR W, MAGDALENA C, KATARZYNA R, et al. The Influence of Polyols on the Process Kinetics and Bioactive Substance Content in Osmotic Dehydrated Organic Strawberries [J]. Molecules, 2022, 27(4): 1376.
- [21] LIU S W, MENG F N, GUO S, et al. Inhibition of α -amylase digestion by a *Lonicera caerulea* berry polyphenol starch complex revealed via multi-spectroscopic and molecular dynamics analyses [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260(P2): 129573.
- [22] CHEN N, FENG Z J, GAO H X, et al. Elucidating the influence and mechanism of different phenols on the properties, food quality and function of maize starch [J]. Food chemistry, 2024, 449: 139191.
- [23] MA Y X, CHEN Z D, WANG Z P, et al. Molecular interactions between apigenin and starch with different amylose/amylopectin ratios revealed by X-ray diffraction, FT-IR and solid-state NMR [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 310: 120737.
- [24] JOANNA D, ADAM F, KINGA D, et al. Hydrothermal Treatment Effect on Antioxidant Activity and Polyphenols Concentration and Profile of Brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*) in an In Vitro Simulated Gastrointestinal Digestion Model [J]. Antioxidants,

2022, 11(3): 446.

- [25] LIU H, LV Z, YANG W B, et al. Virtual Cold Chain Method to Evaluate the Effect of Rising Temperature on the Quality Evolution of Peach Fruit [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(12): 2403.
- [26] 宾昕琿.“荷塘三宝”的工艺优化、预制化与流通稳定性研究[D].武汉:武汉轻工大学,2023.
- [27] QIAN C L, JIANG Y Y, SUN Y, et al. Changes in the Texture and Flavor of Lotus Root after Different Cooking Methods [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(10): 2012.
- [28] GUO S, ZHAO X Y, MA Y, et al. Fingerprints and changes analysis of volatile compounds in fresh-cut yam during yellowing process by using HS-GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130939.
- [29] FERREDOON S, ABUL H. Role of Lipids in Food Flavor Generation [J]. Molecules, 2022, 27(15): 5014.
- [30] DEEPIKA K, HAMID, SUNAKSHI G, et al. Maillard reaction in different food products: Effect on product quality, human health and mitigation strategies [J]. Food Control, 2023, 153: 109911.