脆肉鲩鱼片酸渍过程中的传质动力学分析及品质变化

梁书悦[1]，李汴生[1,2*]，阮征[1,2]，李丹丹[1]，谭志斌[3]，张海德[3]，谭启炎[3]，李锐枝[3]

（1.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）（2.广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室，广东广州 510640）（3.中山宝利食品有限公司，广东中山 528425）

摘要：为探究鱼片酸渍过程中的传质规律及品质变化规律，该文以脆肉鲩鱼片为试验材料，研究不同质量分数醋酸（3%~9%）和酸渍时间（1~5 h）对脆肉鲩鱼片酸渍过程中传质成分及品质变化情况。动力学模型分析发现，3%~9%质量分数醋酸酸渍过程中醋酸变化量、水分变化量和质量变化量与酸渍时间的开方根均呈良好的线性关系。随着醋酸质量分数由3%增加至9%，扩散系数D_e值先上升后下降，且在质量分数为6%达到最大值6.11×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$，说明此时传质驱动力最大。综合考虑传质动力学理论研究结果及感官、理化品质测定结果，鱼片的最佳酸渍工艺条件为6%质量分数醋酸酸渍1 h，此时鱼片中醋酸含量、水分含量和水溶性蛋白含量分别为22.64、740.30、46.68 $mg\cdot g^{-1}$，质量变化量和持水力分别升高至17.05%和70.65%，菌落总数降低至4.20 lg CFU/g，感官总得分为55.12，纤维结构较为紧密。综上，6%质量分数醋酸酸渍1 h能使脆肉鲩鱼片在保持较高酸渍液传质速率的同时提高感官及理化品质，这为实际生产中食品酸渍工艺的优化控制提供实践支持和理论参考。

关键词：脆肉鲩鱼片；酸渍；传质动力学；品质变化

文章编号：1673-9078(2026)07-171-182 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0452

Mass Transfer Kinetics and Quality Changes of Crisp Grass Carp Fillets during Acid Marination

LIANG Shuyue[1], LI Biansheng[1,2*], RUAN Zheng[1,2], LI Dandan[1], TAN Zhibin[3], ZHANG Haide[3], TAN Qiyan[3], LI Ruizhi[3]

(1.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) (2.Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China) (3.Zhongshan Baoli Food Co. Ltd., Zhongshan 528425, China)

Abstract: The effects of different acetic acid mass fractions 3%~9% and marination time (1~5 h) on the mass transfer components and quality changes of crisp grass carp (CGC) fillets during marination were analyzed. Kinetic model analysis showed that during acid marination at a mass fraction of 3%~9%, the changes in acetic acid, moisture, and mass exhibited good linear relationship with the square root of acid marination time. As acetic acid mass fraction increased from 3% to 9%, diffusion coefficient D_e value first increased and then decreased, reaching a maximum value of 6.11×10^{-9} m^2/s at a mass fraction of 6%, indicating the largest driving force of mass transfer. Results of the theoretical study on mass transfer kinetics and measurements of the sensory and physicochemical qualities of CGC fillets identified optimal conditions for the acid marination of CGC fillets as 6% acetic acid mass fraction marinated for 1 h, which provided acetic acid, moisture, and water-soluble protein contents of 22.64, 740.30 and

引文格式：

梁书悦,李汴生,阮征,等.脆肉鲩鱼片酸渍过程中的传质动力学分析及品质变化[J].现代食品科技,2026,42(7):171-182.

LIANG Shuyue, LI Biansheng, RUAN Zheng, et al. Mass transfer kinetics and quality changes of crisp grass carp fillets during acid marination [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 171-182.

收稿日期：2025-03-31；修回日期：2025-05-14；接受日期：2025-05-16

基金项目：广东省重点领域研发项目（2019B020219002）

作者简介：梁书悦（2000-），女，硕士研究生，研究方向：食品加工与保藏，E-mail：940779932@qq.com

通讯作者：李汴生（1962-），男，博士，教授，研究方向：食品加工与保藏，E-mail：febshli@scut.edu.cn

466.75 mg·g^{-1}, respectively, in CGC fillets. Conversely, mass change and water-holding capacity increased to 17.05% and 70.65%, respectively, total colony count decreased to 4.20 lg CFU/g, total sensory score was 55.12, and the fiber structure was relatively compact. In conclusion, marination with a 6% acetic acid mass fraction for 1 h improved the sensory and physicochemical qualities of CGC fillets and maintained a high mass transfer rate of acid marination liquid. These findings provide practical support and theoretical reference for the optimal control of food acid marination in actual production.

Key words: crisp grass carp fillets; acid marination; mass transfer kinetics; quality changes

脆肉鲩（*Ctenopharyngodon idellus* C. et V）为草鱼经过蚕豆饲喂后脆化得到的鱼类，其肉质紧实脆爽、不易煮烂[1]。由于水分含量高、易腐败变质[2]，脆肉鲩加工过程中希望既能抑制微生物的繁殖，也能保留脆肉鲩肉质特点。近年来，随着预制菜热度增加，酸性调味鱼产品成为预制菜爆品之一，预计 2025 年酸味鱼产品市场规模或超 200 亿元。

酸渍是将食品物料浸泡在酸性腌渍液中，利用酸渍液中一定质量分数的酸性物质产生的高渗透压作用，使酸性物质等向食品物料内部迁移的一种加工工艺[3]。在实际生产中，常以酸渍来抑制微生物生长繁殖[2,4]、嫩化肉质[5]、抑制脂质氧化[6]等。常用于酸渍的有机酸有醋酸、乳酸、柠檬酸等，酸渍液中酸的质量分数和酸渍时间是影响酸渍效果的关键因素[7]。根据部分学者对于酸渍或发酵水产品[2,4]、肉制品[8]、果蔬制品[9]等研究结果，常用于酸渍的有机酸质量分数为 0.5%~10% 之间。Augustynska 等[10]将鸡胸肉在 pH 值为 4.53 的乳清和柠檬汁中分别浸泡 24 h，结果表明酸渍后鸡胸肉的嫩度和多汁性均显著提高。Sallam 等[2]研究发现，2% 乙酸结合 12% 氯化钠混合腌渍秋刀鱼能抑制贮藏过程中微生物的生长繁殖，并将货架期延长至 90 d 以上。Han 等[11]研究发现，采用 2%~4% 乳酸处理能显著降低牛肉的菌落总数。Birk 等[12]研究发现，添加 2%~10% 酒石酸能使鸡肉中空肠弯曲杆菌数量减少 0.5~2 个对数级。

酸渍过程的本质是传质过程，也是扩散和渗透相结合的过程，传质的推动力是不同浓度产生的渗透压差。当酸液和食品物料中的组分存在浓度差时，该组分便自渗透压高的一相扩散和渗透入渗透压低的一相中；当渗透压差逐渐降低至消失时，扩散和渗透过程达到平衡[2]。菲克第二定律是目前研究传质分析的主要方法之一，可以根据物质的扩散和水分的渗出情况来计算物质的有效扩散系数 *D* 值。近年来，关于传质动力学的研究成果主要集中在盐渍上。吕飞等[13]研究了食盐添加量对盐渍草鱼传质动力学的影响，发现当食盐质量分数为 5% 和 20% 时，盐有效扩散系数 *D* 值最高为 3.14×10^{-9} m^2·s^{-1}。瞿丞等[14]研究了鸡肉湿腌过程中传质动力学变化，发现当食盐质量分数为 15% 时 *D* 值最大为 7.50×10^{-10} m^2·s^{-1}。但目前，对于酸渍食品传质动力学变化规律的研究较少。为探究脆肉鲩鱼片酸渍过程的传质规律变化及品质变化规律，本研究采用醋酸溶液进行酸渍，通过测定不同质量分数醋酸（3%~9%）及酸渍时间（1~5 h）酸渍时，脆肉鲩鱼片中的传质组分（醋酸、水分和水溶性蛋白等）、感官、质构（硬度和剪切力等）、菌落总数和微观结构的变化，研究总结其品质变化规律和传质动力，以期对酸渍和其他腌渍工艺的优化控制提供实践支持和理论参考。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

原料：脆肉鲩购买于广州市象鲜科技有限公司，取鱼身两侧去骨带皮鱼肉，切成 6 cm×2.5 cm×0.7 cm 的鱼片，于 4 ℃冷藏备用。醋酸（质量分数为 9%），购买于海天调味食品股份有限公司。

试剂：溶液、氯化钾、氯化钠、氢氧化钠、磷酸、乙醇、酚酞、牛血清蛋白、考马斯亮蓝 G-250、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠均为分析纯，购于国药化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

TG16-WS 高速离心机，长沙湘锐离心机有限公司；752N 紫外可见分光光度计，上海精密科学仪器有限公司；TA-XT Plus 物性测试仪，英国 Stable Micro System 有限公司；DHG-9240A 恒温水浴锅，上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 实验与分析方法

1.3.1 酸渍处理

鱼片分为 5 组，按照 1:1.5 的固液比，分别放入质量分数为 3%、4.5%、6%、7.5%、9%（*m/m*）的醋酸酸渍液中，置于 4 ℃下酸渍 5 h，分别于 1、2、3、4、5 h 时进行取样；以未酸渍的脆肉鲩鱼片为空白对照。酸渍过程中采用密封处理以防止醋酸挥发。酸渍生鱼片取样后用吸水纸吸去表面水分作为测定样品，熟鱼

片置于高温蒸煮袋中，经 90 ℃热水熟化 5 min 后测定。

1.3.2 酸渍过程中传质成分的含量测定

（1）醋酸含量：醋酸含量 M^{A} 以总酸含量表示，测定参照 GB 12456-2021《食品安全国家标准食品中总酸的测定》。

（2）水分和质量：水分含量 M^{W} 的测定参考 GB 5009.3《食品安全国家标准食品中水分的测定》，采用直接干燥法测定；质量 M^{C} 的测定采用称重法测定，数值精确至 0.000 1 g。

（3）水溶性蛋白质：水溶性蛋白质 M^{P} 的测定参考唐小航等[15]的方法并稍作修改。称取 2 g 经组织匀浆的样品，加入 20 mL 磷酸缓冲液（0.01 mol/L，pH 值 7.0），均质 1 min，离心 20 min（10 000 r·min^{-1}，4 ℃），重复提取 2 次，合并上清液即为水溶性蛋白质测定样品；使用 Bradford 蛋白浓度测定试剂盒测定其蛋白含量。

1.3.3 酸渍过程的传质动力学分析

（1）传质组分的选取和计算：进行传质动力学分析时，选取基于初始质量的传质成分变化量为分析指标，由于水溶性蛋白质变化量很小，本文未对其进行分析。参考 Yao 等[16]研究腌渍金枪鱼的方法，以鱼片中醋酸、水分和质量的变化量 M^{A}_{t}、M^{W}_{t} 和 M^{C}_{t} 为动力学分析的变量，可通过公式（1）~（3）计算。

$$M^{A}_{t}=\frac{M^{C}_{t}\times X^{A}_{t}-M^{C}_{0}\times X^{A}_{0}}{M^{C}_{0}}\times 100\% \quad (1)$$

$$M^{W}_{t}=\frac{M^{C}_{t}\times X^{W}_{t}-M^{C}_{0}\times X^{W}_{0}}{M^{C}_{0}}\times 100\% \quad (2)$$

$$M^{C}_{t}=\frac{M^{C}_{t}-M^{C}_{0}}{M^{C}_{0}}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

X^{A}_{t}——酸渍 t 时刻肉片的醋酸含量，%；

X^{A}_{0}——酸渍 0 时刻肉片的醋酸含量，%；

X^{W}_{t}——酸渍 t 时刻鱼片的水分含量，%；

X^{W}_{0}——酸渍 0 时刻鱼片的水分含量，%；

M^{C}_{t}——酸渍 t 时刻鱼片的质量，g；

M^{C}_{0}——酸渍 0 时刻鱼片的质量，g。

（2）传质动力学模型建立：参考 Li 等[17]研究得到的数学模型可知，酸渍过程中，鱼片质量和酸渍时间的平方根有关，计算公式如下。

$$M^{i}_{t}=k_1+k_2\times t^{0.5} \quad (4)$$

式中：

M^{i}_{t}——鱼片中醋酸、水分和质量的变化量，%；

k_1——截距，反映了酸渍初始阶段的情况，受到表面传质系数的影响；

k_2——斜率，与扩散机制的传质动力学有关。

1.3.4 水相中醋酸含量的计算

通过下式计算脆肉鲩鱼片水相中的醋酸含量。

$$Z^{A}=\frac{X^{A}}{X^{W}+X^{A}} \quad (5)$$

式中：

Z^{A}——鱼片水相中醋酸含量，%；

X^{A}——鱼片醋酸含量，%；

X^{W}——鱼片水分含量，%。

1.3.5 酸渍平衡方程

当酸渍达到平衡点时，可以认为鱼片水相中的醋酸含量（Z^{A}_{e}）近似等于酸渍液中的醋酸含量（y^{A}_{e}）。参考 Li 等[17]的方法，理论平衡值可以式（6）计算，将实际平衡值 Z^{A} 与理论平衡值 Z^{A}_{e} 进行比较，判断是否达到酸渍终点。

$$Z^{A}_{e}=y^{A}_{e}=\frac{\frac{M^{A}_{0}}{M^{S}_{0}}X^{A}_{0}+y^{A}_{0}}{\frac{M^{A}_{0}}{M^{S}_{0}}(X^{W}_{0}+X^{A}_{0})+(y^{W}_{0}+y^{A}_{0})} \quad (6)$$

式中：

$\frac{M^{A}_{0}}{M^{S}_{0}}$——酸渍初始时鱼片与酸渍液的质量比；

X^{A}_{0}——0 h 时鱼片中的醋酸含量，%；

y^{A}_{0}——0 h 酸渍液中的醋酸含量，%；

X^{W}_{0}——0 h 时鱼片中的水分含量，%；

y^{W}_{0}——0 h 时酸渍液中的水分含量，%。

1.3.6 有效扩散系数（D_e）

根据菲克第二定律（式 7），通过 Z^{A} 和 y^{A} 可以得出脆肉鲩鱼片在酸渍过程中的有效扩散系数 D_e。

$$1-y^{A}_{t}=1-\frac{Z^{A}_{t}-y^{A}_{t}}{Z^{A}_{0}-Z^{A}_{e}}=2\times\left(\frac{D_e\times t}{\pi\times l_i}\right)^{0.5}+K \quad (7)$$

式中：

Z^{A}_{0}——酸渍 0 h 时鱼片中水相醋酸含量，%；

Z^{A}_{t}——酸渍 t 时刻鱼片中水相醋酸含量，%；

Z^{A}_{e}——酸渍平衡点时鱼片中水相醋酸含量，%；

y^{A}_{t}——酸渍液在酸渍 t 时刻时的醋酸含量，%；

D_e——有效扩散系数，m^2/s；

l_i——鱼片厚度，cm；

K——独立项，用于校正酸渍刚开始时的任何热力学机制或其他传质现象。

1.3.7 感官评价

感官评价小组由 10 名经过培训的专业人员组成，感官场所干净整洁、无异味。感官评价时提供纸巾和清水，感官评价小组成员根据生鱼片的完整性、鱼腥味和多汁性，熟鱼片的色泽、酸味、脆性和嫩度对样品进行评定，每项指标满分均为 10 分，小组成员之间不进行交流。感官评价的评分标准如表 1 所示。

表 1 酸渍脆肉鲩鱼片感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria of crispy grass carp fillets

项目		评分标准和分值/分		
		1~3	4~7	8~10
生鱼片	完整性	鱼肉边缘破碎	鱼肉略有破碎	鱼肉形态完整
	鱼腥味	有明显鱼腥味及其他不良杂味	略有鱼腥味或其他不良杂味	没有鱼腥味
熟鱼片	色泽	有明显褐变	略有褐变	无褐变
	酸味	酸味过低或过高，味道较差	酸味较淡或较重，味道较和谐	酸味适中，味道和谐
	脆性	鱼肉软烂或发柴	鱼肉较脆	鱼肉脆爽弹牙
	嫩度	鱼肉发柴，口感粗糙，咬开有阻力	鱼肉较嫩，较易咬开	鱼肉嫩滑，可以筒单咬开
	多汁性	鱼肉汁液较少	鱼肉汁液较多	鱼肉汁液多

1.3.8 硬度及剪切力的测定

硬度的测定：将鱼片切成 1 cm×1 cm×0.7 cm 的大小，采用 TA-XT Plus 物性测定仪，使用 P/36R 探头进行测试，测试条件如下：测前速度 2 mm/s，测试速度 1 mm/s，测后速度 2 mm/s，两次测试间隔 5 s，压缩比 50%；触发值 5 g，每个试验进行 5 次平行。

剪切力的测定：将鱼片切成 2 cm×1 cm×0.7 cm 的大小，采用 TA-XT Plus 物性测定仪，选用 BSW 探头进行测试，测试条件如下：探测器从阻力点降低 30 mm，测前速度 1 mm/s，测后速度 5 mm/s，每组样品平行测定 5 次。

1.3.9 持水力的测定

持水力（WHC）的测定，用吸水纸吸干鱼片表面水分后，称取 3 g 左右样品，包裹于双层滤纸中心置于 30 mL 离心管中，在转速 8 000 r·min^{-1} 的条件下室温离心 10 min，根据公式（8）得出持水力。

$$W=1-\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \quad (8)$$

式中：

W——持水力，%；

m_1——离心前鱼片的质量，g；

m_2——离心后鱼片的质量，g。

1.3.10 微观结构的测定

将样品顺着肌纤维方向切成 5 mm×5 mm×3 mm（长 × 宽 × 高）的块状，加入没过肉样的 2.5% 的戊二醛溶液，置于避光环境中固定 48 h。用磷酸盐缓冲液（0.1 mmol·L^{-1}，pH 值 7.4）冲洗 3 次，室温下放置 3 h 后用蒸馏水冲洗，冲洗完成后用四组质量分数（25%、50%、75%、100%）的乙醇进行梯度脱水，每次脱水 10 min，其中质量分数为 100% 的乙醇需 2 次脱水。随后将肉样置于真空冻干机中冻干 48 h 后备用。真空喷金后即可用扫描电子显微镜观察微观结构。采用的放大倍数为 300 倍、600 倍和 2 000 倍。

1.3.11 数据处理

采用 Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 24 软件处理数据并计算实验数据的平均值与标准差，采用 SPSS 22.0 进行 Duncan 差异显著性分析，$P<0.05$ 表示差异显著，采用 Origin 2018 进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 酸渍对脆肉鲩鱼片醋酸含量、水分含量和水溶性蛋白含量的影响

酸渍过程中发生迁移的组分主要包括醋酸、水分和水溶性蛋白质，前两者向鱼片内部迁移，后者向酸渍液迁移。实验中测定了不同醋酸质量分数酸渍时脆肉鲩鱼片中醋酸含量（M^A）、水分含量（M^W）和水溶性蛋白含量（M^P）随酸渍时间的变化如图 1a~1c 所示。

由图 1a 可知，相同时间下，醋酸质量分数越高，鱼片中醋酸含量也越高。酸渍 5 h 时，3% 酸渍组醋酸含量最低，为 17.42 mg·g^{-1}，9% 酸渍组醋酸含量最高，为 52.44 mg·g^{-1}。这是因为高浓度酸渍时，酸渍液与鱼片之间的浓度差较大，醋酸分子向鱼片内部扩散的动力更强，在相同时间内扩散进入鱼片中的醋酸量也就更多[14]。相同质量分数下，随着酸渍时间的增加，鱼片醋酸含量始终呈正增长，但增幅逐渐减小。其中，在酸渍 1~2 h 时，各组鱼片的醋酸含量增速最快；酸渍 3 h 后，3%、4.5% 和 6% 酸渍组鱼片的醋酸含量逐渐趋于稳定；酸渍 5 h 后 7.5% 和 9% 的处理组也基本达到稳定。这是因为酸渍初期，酸渍液和鱼肉之间酸含量差异较大，在高渗透压的作用下，醋酸自酸渍液中扩散入鱼肉组织内的速率较快，且质量分数越高，醋酸传递速率越大，酸渍动力越强[8]。随着酸渍时间

的延长，内外渗透压减小，酸的扩散和水分的渗透逐渐在鱼肉和酸渍之间达到平衡，平衡即扩散渗透过程的结束，传质净值趋近于 0，鱼片的醋酸含量趋于稳定[18]。瞿丞等[14]对盐渍鸡肉传质动力学的研究中发现，盐渍 24 h 内鸡肉中的 NaCl 含量迅速上升，而后逐渐趋于平缓。根据前人对于酸渍产品的研究结果[2,4,8,9]，图 1a 中虚线范围表示人们偏好的酸味产品中醋酸含量范围普遍处于 10~30 mg·g^{-1} 之间。因此，3% 和 4.5% 质量分数酸渍 5 h 的过程中均可使鱼片的酸味保持在较优范围内，而 6% 和 7% 质量分数的醋酸的适宜酸渍时间为 1~2 h 和 1 h。

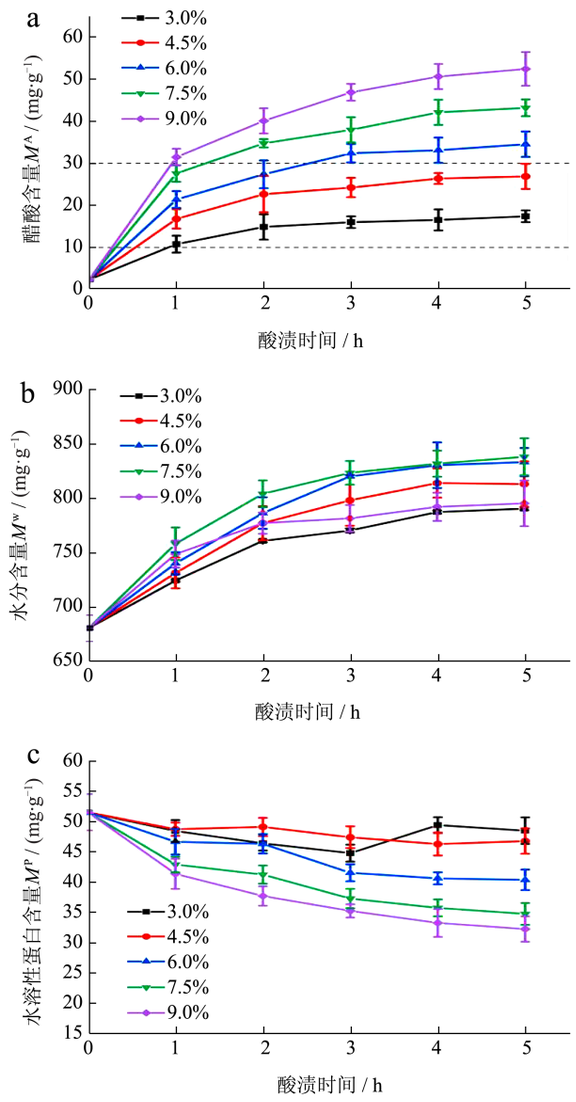

图 1 酸渍过程中脆肉鲩鱼片醋酸含量（M^A）、水分含量（M^W）和水溶性蛋白含量（M^P）的变化

Fig.1 Changes of acetic acid content (M^A), moisture content (M^W) and water-soluble protein content (M^P) of crisp grass carp fillets during marination

鱼肉嫩滑多汁，较强的蛋白质静电相互作用和毛细血管力使其保持较高的水分含量。由图 1b 所示，恒定醋酸质量分数下，鱼片的水分含量随时间的延长不断增加。但不同质量分数醋酸处理组之间变化量差异显著（$P<0.05$），在酸渍 1 h 时，各组水分含量增速最快，这与酸渍初期酸渍液和鱼片间的高渗透压有关，酸渍 4 h 后，鱼片和酸渍液中水分迁移逐渐达到平衡，水分含量变化幅度变小。恒定酸渍时间下，鱼片中的水分含量随醋酸质量分数的增加先升高后降低。酸渍 5 h 时，鱼片水分含量最高的是 7.5% 酸渍组，为 838.4 mg·g^{-1}，最小的是 3% 酸渍组，为 790.6 mg·g^{-1}；而 9% 酸渍组的增长量与 3% 和 4.5% 酸渍组相近，为 795.6 mg·g^{-1}。这可能是因为高浓度醋酸使鱼片细胞脱水、蛋白质变性，阻碍了水分的正常进入。Ke 等[8]发现使用 0.01 mol/L 和 0.025 mol/L 柠檬酸酸渍后牛肉水分含量均增加，且前者增量大于后者。因此，3%~7.5% 质量分数醋酸酸渍 1~4 h 鱼片有利于对酸渍液的吸收，而 9% 醋酸酸渍 1 h 后鱼片对酸渍液的吸收减小。

鱼类肌肉中的水溶性蛋白主要是肌浆蛋白，主要包含一些参与代谢的蛋白酶和肌红蛋白等，约占肌肉中总蛋白组分的三分之一。由图 1c 可知，当醋酸质量分数为 3%~6% 时，随着酸渍时间的延长，鱼片水溶性蛋白含量的变化较小，在酸渍 5 h 时分别降低至 48.50、46.8、40.38 mg·g^{-1}，较对照组相比蛋白溶出较少，这是因为低浓度酸渍条件较为温和，不会使蛋白质大量变性；当质量分数为 7.5%~9% 时，水溶性蛋白含量随时间的延长显著下降（$P<0.05$），这可能是由于醋酸质量分数的增加导致肌浆蛋白发生凝聚和沉淀，同时由于在长时间的酸性环境中，蛋白质过度水解，溶出到酸渍液中[18]。在相同酸渍时间下，随着醋酸质量分数的升高，水溶性蛋白含量减少。Goli 等[18]和 Gault 等[19]分别采用不同质量分数的醋酸溶液酸渍鸡胸肉和牛肉，研究结果也表明随着醋酸质量分数的升高，鱼片中提取到的蛋白含量降低。综上可知，7.5%~9% 质量分数醋酸酸渍对鱼片中蛋白质影响较大，而 3%~6% 醋酸酸渍可以减缓鱼片水溶性蛋白的溶出，保持鱼片的营养品质。

2.2 酸渍对脆肉鲩鱼片醋酸、水分和质量的变化量的影响

脆肉鲩鱼片酸渍过程中，醋酸、水分和蛋白质是主要的传质成分。其中，由于水溶性蛋白质含量变化较小，在传质分析时可以忽略不计。醋酸、水分和质量的变化量共同揭示了酸渍过程中物质交换规律，直接影响鱼片的酸渍效率。图 2 中 a、b 和 c 分别表示了

酸渍对脆肉鲩鱼片醋酸变化量（ΔM_t^A）、水分含量变化量（ΔM_t^W）和质量变化量（ΔM_t^C）的影响。

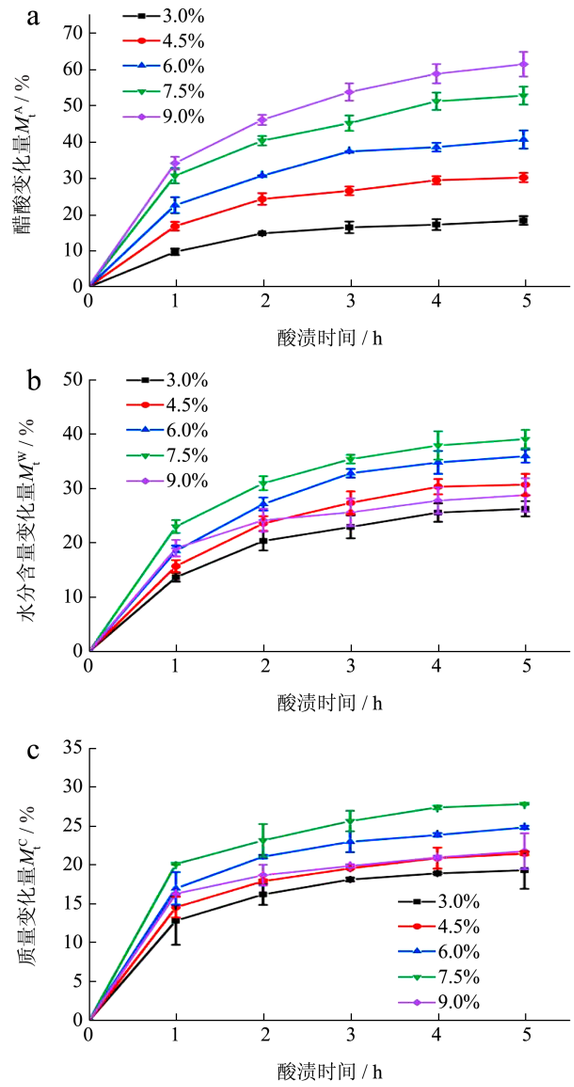

图 2 酸渍过程中脆肉鲩鱼片醋酸变化量（ΔM_t^A）、水分含量变化量（ΔM_t^W）和质量变化量（ΔM_t^C）的变化

Fig.2 Changes in acetic acid changes (ΔM_t^A), moisture content changes (ΔM_t^W) and mass changes (ΔM_t^C) of crispy grass carp fillets during marination

醋酸变化量反映了鱼片中醋酸的渗透和扩散规律，若变化量较小，则酸渍程度不足；若变化量较大，可能导致鱼片过度酸化，严重影响口感。水分变化量体现了水分的迁移和流失，质量变化量则综合反映了醋酸、水分及其他成分的传质动态。如图 2a 所示，醋酸变化量在酸渍过程中持续上升，且增速逐渐下降，说明醋酸向鱼片内部扩散的速率逐渐变慢。如图 2b 所示，与对照组相比，酸渍导致脆肉鲩鱼片质量变化呈正增长，提高了出品率。随着酸渍时间的延长，质量分数越高的酸渍组对应的质量变化就越大，但 9% 酸渍组的质量变化量与 3% 和 4.5% 酸渍组类似，这可能是因为过高的渗透压破坏了鱼片肌肉细胞的结构[20]，从而影响了酸渍液中的水分和其他物质的进一步进入。如图 2c 所示，水分含量变化与质量变化基本趋势一致，Goli 等[20]采用醋酸酸渍鸡胸肉，发现鸡肉中水分含量变化和质量变化趋势一致，说明鱼片质量变化的主要来源是水分的渗入，这使得鱼片更加饱满多汁，优化了鱼片的口感。

2.3 运用预测模型描述脆肉鲩在酸渍过程中的变化

传质动力学是对传质过程的速率和机制进行定量描述和分析的研究，通过实验和数学模型来研究传质速率和传质规律，常用的模型有菲克第二定律、斯托克斯定律等[21]，其中，菲克第二定律聚焦于物质扩散，适用于描述酸渍过程中的物质扩散规律。通过研究传质速率和传质规律，可以确定最佳的加工条件和参数，提高食品的酸渍效率和品质。根据 Li 等[17]研究得到的数学模型，在非稳态扩散中，物质扩散量与时间的开方根有关。酸渍时醋酸、水分向脆肉鲩鱼片内的扩散过程也符合此规律，因此用 $t^{0.5}$ 作为横坐标，能让醋酸、水分、质量变化量与之呈更直观的线性关系。图 3 中 a~c 分别是脆肉鲩鱼片醋酸变化量（ΔM_t^A）、水分变化量（ΔM_t^W）和总质量变化（ΔM_t^C）与酸渍时间开方根（$t^{0.5}$）的回归曲线，表 2 反映了脆肉鲩在酸渍过程中的总质量、水分含量和醋酸含量变化的动力学参数值（k_1 和 k_2）及其相关系数。

如表 2 所示，除了 7.5%、9% 酸渍组质量变化的 R^2 低于 0.9 外，其余均为 0.9 以上，说明酸渍时间与总质量、水分含量和醋酸含量变化有良好相关性，拟合度较高，因此该模型适用于预测脆肉鲩鱼片在酸渍过程中的传质变化与时间的关系。表 1 中，k_2 为回归方程的斜率，反映了指标随时间变化的速率。随着醋酸质量分数的升高，鱼片醋酸含量变化（ΔM_t^A）的 k_2 值逐渐升高，而水分含量变化（ΔM_t^W）、质量变化 ΔM_t^C）的 k_2 值呈先增高后下降的趋势，说明过高质量分数的酸渍液对脆肉鲩鱼片酸渍过程中质量及水分含量变化有抑制作用。k_1 为方程的截距，为酸渍开始时情况，k_1 呈先上升后下降的趋势，说明一定范围内醋酸质量分数越高，酸渍速率越快，而醋酸质量分数过高反而降低酸渍速率，与前文实验结果一致。

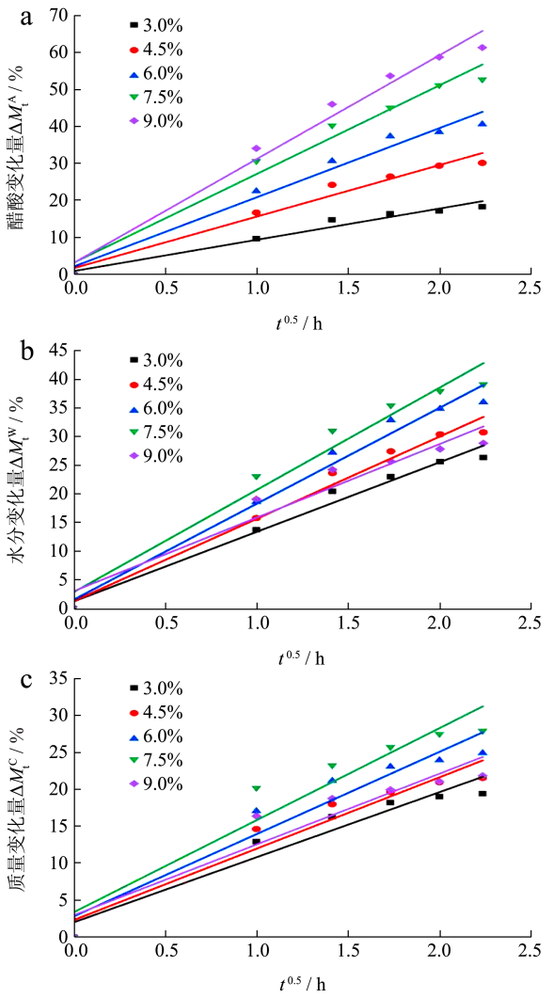

图 3 脆肉鲩鱼片醋酸变化量（ΔM_t^A）、水分变化量（ΔM_t^W）和质量变化（ΔM_t^C）与酸渍时间开方根（$t^{0.5}$）的回归关系曲线

Fig.3 The regression relationship curves of acetic acid changes (ΔM^A_t) moisture changes (ΔM^W_t) and mass changes (ΔM^C_t) of crisp grass carp fillet with marination time ($t^{0.5}$)

2.4 有效扩散系数（D_e）的计算

有效扩散系数反映了酸渍时物质在食品和酸渍液中的扩散能力与速率。根据式 5 和式 6，图 4 为不同质量分数醋酸酸渍过程中脆肉鲩鱼片水相中醋酸含量变化，表 3 反映了不同质量分数醋酸酸渍终点的理论值和实际值。结合图 4 和表 3，可知理论酸渍终点 Z^A_e 与本实验中实际酸渍终点 Z^A 值相近，即可以认为在酸渍 5 h 时基本已达到酸渍平衡点。根据菲克第二定律（式 7），可得图 5 中传质驱动力相关的回归曲线与表 6 中的有效扩散系数 D_e 值。由表 4 可知，D_e 值在醋酸质量分数为 6% 时最大，为 6.11×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$，即在此条件下酸渍扩散效率最快，可缩短酸渍时间；但随着酸渍液浓度降低或增大，D_e 值都会降低，是因为鱼片在酸渍过程中的传质驱动力与肌肉中的水分、蛋白质结构等变化有关，影响了酸渍液的扩散速率。当醋酸质量分数为 6% 时，适度酸化使蛋白部分变性，暴露出更多的亲水基团，形成贯穿肌纤维的渗透通道；当醋酸质量分数继续升高至 9% 时，过高浓度的 H^+ 导致肌纤维间隙缩小，阻碍了醋酸的渗透。除此之外，D_e 值还与食品种类、腌渍方式等有关，如刘佳利等[21]研究发现 NaCl 扩散系数随超声功率的增加而增加，且在功率为 1 000 W 时最高，为 1.77×10^{-5} $m^2\cdot s^{-1}$。Rodriguez 等[22]采用甜叶菊－盐－水三元混合溶液腌渍南瓜，结果表明在浓度为 40% 时候扩散系数最高，为 2.91×10^{-3} m^2/s。综上，6% 质量分数的醋酸酸渍脆肉鲩鱼片可以产生较大的传质驱动力，缩短酸渍时间。

表 2 脆肉鲩鱼片质量、水分含量和醋酸含量变化的动力学参数值及其相关系数

Table 2 Kinetic parameter values and correlation coefficients of changes in mass, moisture content and acetic acid content of crisp grass carp fillets

变量	醋酸质量分数/%	k_2	k_1	R^2
ΔM^A_t	3	8.457 03	1.015 75	0.957 99
	4.5	13.939 34	1.800 01	0.961 55
	6	18.721 76	2.230 37	0.965 91
	7.5	23.991 41	3.254 72	0.967 73
	9	28.073 33	3.219 56	0.974 51
ΔM^W_t	3	12.211 42	1.344 99	0.973 83
	4.5	14.439 76	1.375 21	0.974 01
	6	16.831 02	1.421 17	0.972 85
	7.5	17.948 14	2.723 83	0.956 09
	9	12.909 29	2.923 36	0.918 95
ΔM^C_t	3	8.812 23	1.985 51	0.916 69
	4.5	9.662 25	2.292 99	0.913 17
	6	11.139 94	2.785 24	0.903 05
	7.5	12.459 34	3.348 63	0.893 30
	9	9.585 20	2.938 96	0.866 25

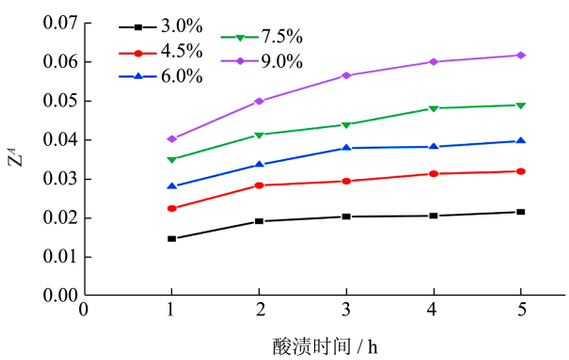

图 4 酸渍过程中脆肉鲩鱼片水相中醋酸含量变化

Fig.4 Changes in acetic acid content in the aqueous phase of crisp grass carp fillets during marination

表 3 不同质量分数醋酸酸渍终点的理论值和实际值

Table 3 Theoretical and actual values of the marinating endpoint at different acetic acid concentrations

醋酸质量分数/%	理论酸渍终点 Z_e^A	实际酸渍终点 Z^A
3	0.021 6	0.021 6
4.5	0.031 9	0.032 0
6	0.042 3	0.039 8
7.5	0.052 6	0.049 0
9	0.062 8	0.061 8

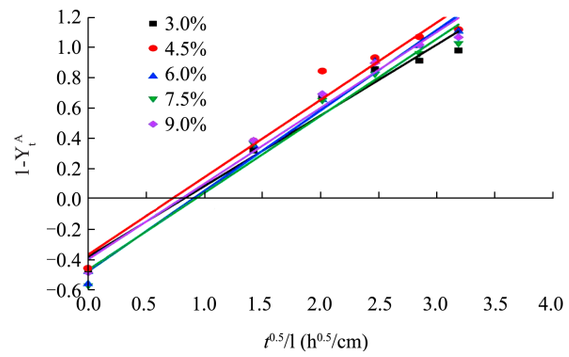

图 5 传质驱动力与 $t^{0.5}/l$ 的回归曲线

Fig.5 Driving force ($1-Y_t^A$) versus $t^{0.5}/l$

2.5 酸渍对脆肉鲩鱼片感官评价的影响

感官评价能直接反应水产品的新鲜度和质量优劣。鱼腥味通常是醛类、醇类、三氯乙酸、土腥素等多种物质协同作用的结果，而醋酸可以溶解脂肪，萃取三甲胺等物质，形成无胺味的铵盐，从而增强去腥效果[23]。图 6 表示了醋酸质量分数和酸渍时间对鱼片及熟鱼片感官评价的影响，图 7 表示了 6% 醋酸酸渍过程中鱼片及熟鱼片的外观变化。

表 4 脆肉鲩鱼片在不同质量分数醋酸酸渍过程中的理论动力学参数值

Table 4 Theoretical kinetic parameters of crisp grass carp fillets during marinating at different acetic acid concentrations

醋酸质量分数/%	$D_e/(10^{-9}m^2/s)$	K	R^2
3	4.72	−0.383 0	0.961 0
4.5	5.65	−0.367 7	0.955 9
6	6.11	−0.477 8	0.978 3
7.5	5.60	−0.468 2	0.965 4
9	5.42	−0.399 3	0.971 0

由图 6 可知，酸渍后的鱼片感官得分均高于对照组，且鱼腥味、酸味、嫩度、脆性、多汁性的得分变化显著，这几个指标也是导致感官得分总分差异的原因。酸渍时间恒定时，随着质量分数的升高，生鱼片的鱼腥味下降，熟鱼片的酸味上升，可见酸渍有一定的去腥作用。鱼片的多汁性随酸渍时间和质量分数的增加而不断增加，这可能与鱼片水分含量的变化有关。结合图 7 可知，醋酸质量分数恒定时，随着酸渍时间的延长，生鱼片逐渐卷曲破碎，导致完整性得分下降；而熟鱼片的色泽得分降低，这是因为长时间酸渍导致鱼片氧化褐变。其中，4.5% 和 6% 醋酸酸渍过程中感官得分的各个指标在酸渍初期都保持在较高水平，但随着酸渍时间延长得分逐渐下降，可能是因为长时间酸渍渍导致鱼片受到生物酶分解和微生物繁殖等影响，加剧了脂质氧化分解、褐变等反应[23]。综上，酸渍可以有效去除鱼腥味，提高鱼片口感，且在 4.5% 和 6% 质量分数下酸渍 1 h 时感官得分最高。

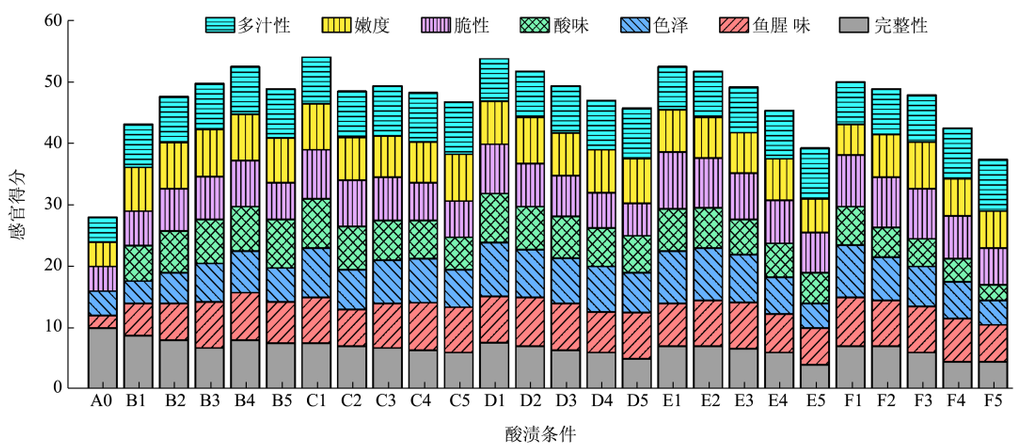

图 6 酸渍过程中脆肉鲩鱼片感官得分的变化

Fig.6 Changes in the sensory scores from crisp grass carp fillets during marination

注：“A0”表示未经酸渍处理的样品；“B1~B5”分别表示 3% 质量分数醋酸酸渍 1~5 h 的样品；“C1~C5”分别表示 4.5% 质量分数醋酸酸渍 1~5 h 的样品；“D1~D5”分别表示 6% 质量分数醋酸酸渍 1~5 h 的样品；“E1~E5”分别表示 7.5% 质量分数醋酸酸渍 1~5 h 的样品；“F1~F5”分别表示 9% 质量分数醋酸酸渍 1~5 h 的样品。

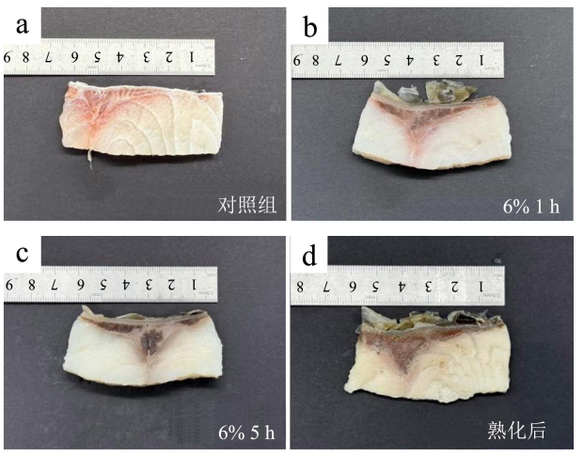

图 7 6% 醋酸腌渍脆肉鲩鱼片及熟鱼片外观的变化

Fig.7 Changes in the appearance of crispy grass carp fillets and cooked fish fillets during 6% acetic acid marination

2.6 酸渍对脆肉鲩鱼片硬度和剪切力的影响

脆肉鲩和草鱼在脆度上存在差异。脆肉鲩在养殖脆化过程中，随着肌浆蛋白和肌原纤维蛋白结构变化，硬度和剪切力逐渐增加[24]。于泓鹏等[25]也提出，硬度和剪切力可以间接反映出食品的脆性。图 8 表示了酸渍对脆肉鲩鱼片硬度和剪切力的影响。

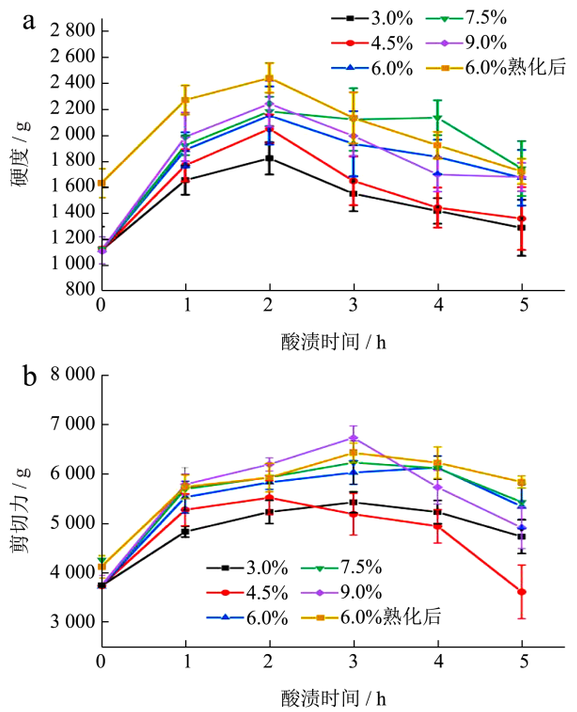

图 8 酸渍过程中脆肉鲩鱼片硬度和剪切力的变化

Fig.8 Changes in the hardness and shear force from crisp grass carp fillets during marination

由图 8 可知，随着醋酸质量分数和酸渍时间的增加，鱼片硬度和剪切力呈先上升后下降的趋势，在 2~3 h 时达到最高值。通过对比熟化与未熟化的样品的测定结果发现，酸渍处理后的鱼片经熟化仍能保持良好的硬度和剪切力，由图 8 可知，熟化样品的硬度与剪切力变化趋势与未熟化样品基本一致，表明酸渍工艺不仅能改善原料鱼片的脆性，还能提升烹饪后的食用口感，这与图 6 感官评分中脆性的变化趋势一致。随着酸渍时间持续增加至 4 h 以上，鱼片硬度和剪切力均显著下降（$P<0.05$），这可能是因为酸性环境促进了组织蛋白酶活性升高，导致蛋白溶解度提高，组织结构弱化、纤维松散，机械强度降低[26]，与图 1c 中水溶性蛋白含量下降的结果一致。Goli 等[20]的研究中也显示酸渍鸡胸肉的剪切力和硬度随酸渍时间的延长先升高后下降，且在乙酸酸渍 20 min 时达到最大值 4 112 g，与本文变化趋势一致。综合而言，短时酸渍有助于提高鱼片的硬度和剪切力，赋予鱼片较好的脆性品质，而长时酸渍会导致质地被破坏。

2.7 酸渍对脆肉鲩鱼片持水力的影响

酸渍可以直接弱化肌原纤维和胶原纤维，从而提高鱼肉持水力。图 9 反映了酸渍对脆肉鲩鱼片持水力的影响。

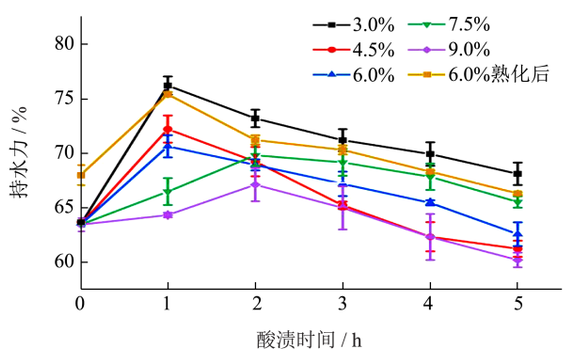

图 9 酸渍过程中脆肉鲩持水力的变化

Fig.9 Changes in the water-holding capacity from crisp grass carp during marination

由图 9 可知，不同质量分数醋酸酸渍 1~2 h 时所有样品持水力达到最大值，最大值分别为 76.23%、72.31%、70.65%、69.83%、67.13%。后续随着酸渍时间的增加持水力显著下降（$P<0.05$），说明短时间酸渍可以提高鱼片持水力。熟化后鱼片的持水力与醋酸质量分数呈正相关，且熟化后鱼片持水力高于熟化前的鱼片，是因为热处理过程中鱼肉自由水大量蒸发，

肌肉蛋白中的三维网状结构收缩，从而导致持水力增强。结合前文中水分含量测定结果，可知在酸渍前期，高渗透压环境促进肌肉组织溶胀，蛋白质水合作用增强；而进入后期，虽然总水分含量持续增加，但主要增加的是自由水。这源于酸性环境导致蛋白质变性及醋酸对细胞膜结构的破坏作用[20]。李颖畅等[27]探究了没食子酸对海鲈鱼肌原纤维蛋白的影响，结果表明也随着没食子酸添的提高，鱼肉中肌原纤维蛋白持水力呈先上升后下降趋势，且在添加量为 2 mg·g^{-1} 时持水性最高，约达到 70%。于小斐[28]研究结果也表明，0.5%~2.5% 质量分数的乳酸酸渍猪肉过程中，猪肉的持水力随酸渍时间的延长呈先升高后下降的趋势，在酸渍 1 h 时所有样品持水力达到最大值。综上，低浓度短时间酸渍更有助于保持鱼片的多汁性。

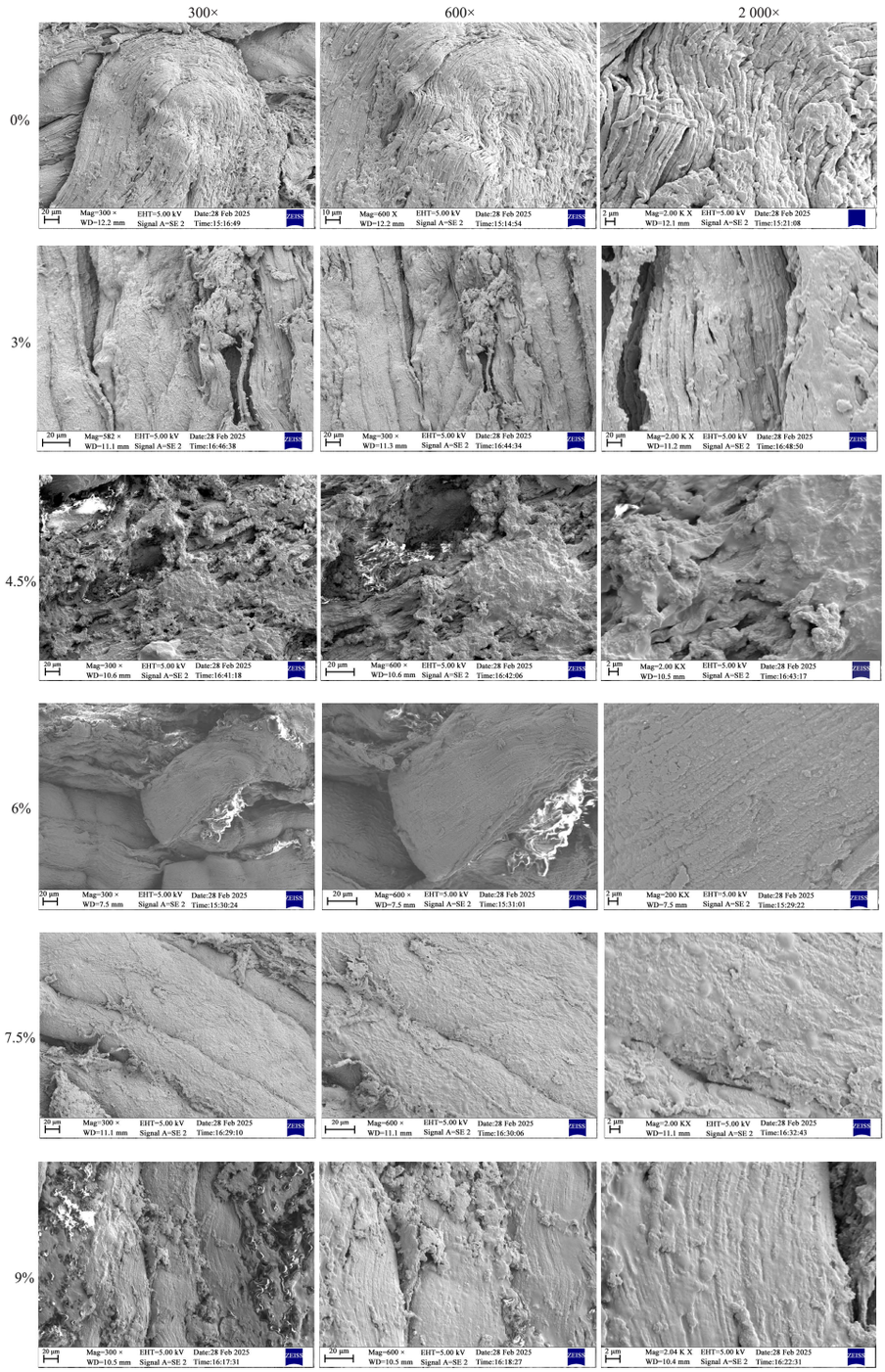

图 10 不同质量分数醋酸酸渍 1 h 后脆肉鲩鱼片微观结构的变化

Fig.10 Changes in microstructure of crisp grass carp fillets after acetic acid marination 1 h with different mass fractions

2.8 酸渍对脆肉鲩鱼片微观结构的影响

微观结构反映了鱼片的肌原纤维收缩或断裂等情况，揭示了鱼片的嫩度、多汁性等特性的改变机制。图 10 为未酸渍及不同浓度醋酸酸渍 1 h 后脆肉鲩鱼片微观结构的变化情况。

由图 10 可知，醋酸质量分数的变化对鱼片肌纤维结构产生显著影响。3% 酸渍组的鱼肉肌原纤维结构呈现松散的状态，纤维束间存在明显间隙，这种结构与对照组未酸渍的鱼肉状态较为接近。当醋酸质量分数继续升高至 6%，纤维之间的间隙逐渐减小，结构更加均匀紧密，纤维排列方向趋向于一致，说明醋酸浓度的提升导致肌肉收缩，这对应着更高的持水性，与图 9 持水力的测定结果一致。另外，此时观察到肌原纤维之间出现相互融合的现象，这可能与蛋白质分子间的交联作用有关。Ke 等[8]研究柠檬酸对牛肉理化品质的影响，也发现随着 pH 值降低，肌肉纤维结构逐渐紧密。当醋酸质量分数为 9% 时，纤维结构又变得略有松散，不利于肌肉结构和水分的保持，引起鱼片持水力下降。Graiver 等[29]的研究也表明低渗透压腌渍会导致猪肉纤维膨胀，而高渗透压腌渍会导致猪肉纤维脱水。

2.9 酸渍对脆肉鲩鱼片菌落总数的影响

微生物的生长与代谢作用是导致鱼类腐败变质的重要原因。有机酸可以抑制微生物生长及有害物质的生成以提高鱼类安全性和货架期[2]。图 11 反映了酸渍对脆肉鲩鱼片菌落总数的影响。

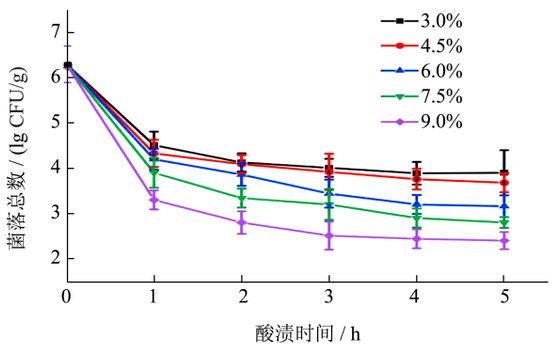

图 11 酸渍过程中脆肉鲩鱼片菌落总数的变化

Fig.11 Changes in the total number of colonies from crisp grass carp fillets during marination

由图 11 可知，醋酸质量分数越高、酸渍时间越长，杀菌效果越显著。在酸渍 1 h 时，五个处理组菌落总数均减少了 1 个对数级以上；酸渍 5 h 时，3% 醋酸处理组菌落总数约下降了 1.79 个对数级，而 9% 醋酸处理组下降了 3 个对数级。这是因为在酸性环境下，H^+ 离子浓度增加，微生物细胞内外渗透压不平衡，细胞内部水分外流，胞内环境稳态被破坏；细胞内环境 pH 值的波动还会使酶失活、损伤 DNA、破坏蛋白质结构等，从而灭活微生物[30]。另外，相较于 3%~6% 醋酸酸渍 5 h，9% 醋酸酸渍 1 h 即可表现出更为显著的抑菌效果，这与总酸含量的测定结果一致，可见总酸含量越高，酸渍的抑菌效果越好。Manzoor 等[31]使用 2%、4%、6% 乳酸酸渍牛肉 1 h 后，发现牛肉菌落总数分别下降 0.73、0.99、1.34 个对数级。综上，各酸渍组在前 1 h 的抑菌效果最显著，且较高质量分数醋酸酸渍处理的抑菌效果更好，可以提高鱼片的安全性。

3 结论

醋酸质量分数和酸渍时间对脆肉鲩鱼片的传质过程、感官和理化品质影响显著。醋酸质量分数相同时，延长酸渍时间会增加鱼片的醋酸和水分含量；相同酸渍时间下，提高醋酸质量分数使醋酸和水分含量先升后降。动力学模型分析发现，3%~9% 质量分数的醋酸酸渍过程中醋酸变化量、水分变化量和质量变化量与酸渍时间的开方根均呈良好的线性关系。酸渍 5 h 时，理论酸渍终点 Z_e^A 值与本实验中实际酸渍终点 Z^A 值相近，可以认为此时基本已达到酸渍平衡点。有效扩散系数 D_e 值在醋酸质量分数为 6% 时达到最大值 6.11×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$，说明该浓度下传质驱动力最大。随着醋酸质量分数的升高或酸渍时间的延长，鱼片的水溶性蛋白含量和菌落总数呈下降趋势，而硬度、剪切力和持水力先上升后下降，纤维结构先紧密后松散。综合考虑传质动力学研究结果及品质测定结果，鱼片的最佳酸渍工艺为 6% 醋酸酸渍 1 h，此时鱼片中醋酸含量、水分含量和水溶性蛋白含量分别为 22.64、740.30、46.68 $mg\cdot g^{-1}$，质量变化量和持水力分别升高至 17.05% 和 70.65%，菌落总数降低至 4.20 lg CFU/g，感官总得分为 55.12。综上，6% 质量分数醋酸酸渍 1 h 能使脆肉鲩鱼片在保持较高酸渍液传质速率的同时提高感官及理化品质。

参考文献

[1] YU E, FU B, WANG G, et al. Proteomic and metabolomic basis for improved textural quality in crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C.et V) fed with a natural dietary pro-oxidant [J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126906.

[2] SALLAM K I, AHMED A M, ELGAZZAR M M, et al. Chemical quality and sensory attributes of marinated Pacific saury (*Cololabis saira*) during vacuum-packaged storage at 4 ℃ [J]. Food Chemistry, 2007, 102(4): 1061-1070.

[3] SIMPSON R, RAMIREZ C, BIRCHMEIER V, et al. Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field [J]. Journal of Food

Engineering, 2015, 166: 204-211.
[4] KILINC B, CAKLI S. Chemical, microbiological and sensory changes in thawed frozen fillets of sardine (*Sardina pilchardus*) during marination [J]. Food Chemistry, 2004, 88: 275-280.
[5] EILERS J D, MORGAN J B, MARTIN A M, et al. Evaluation of calcium chloride and lactic acid injection on chemical, microbiological and descriptive attributes of mature cow beef [J]. Food Chemistry, 1994, 38: 443-451.
[6] KARAGEORGOU A, PAVELI A, GOLIOMYTIS M, et al. The effects of yoghurt acid whey marination on quality parameters of pork and chicken meat [J]. Foods, 2023, 12(12): 2360.
[7] 于小斐,魏文松,艾鑫,等.有机酸处理对肉类品质影响的研究进展[J].食品工业科技,2021,42:387-393.
[8] KE S, HUANG Y, DECKER E A, et al. Impact of citric acid on the tenderness, microstructure and oxidative stability of beef muscle [J]. Meat Science, 2009, 82(1): 113-118.
[9] 冯志强,张宇,田维志,等.乳酸菌发酵前后山药汁营养功能成分及风味物质的变化[J].现代食品科技,2024,40(8):294-301.
[10] AUGUSTYNSKA P A, ORMIAN M, KLUZ M, et al. Effect of using acid whey for marinating chicken breast muscles in organic production [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2019, 31(4): 281-287.
[11] HAN J, LUO X, ZHANG Y, et al. Effects of spraying lactic acid and peroxyacetic acid on the bacterial decontamination and bacterial composition of beef carcasses [J]. Meat Science, 2020, 164: 108104.
[12] BIRK T, GRONLUND A C, CHRISTENSEN B B, et al. Effect of organic acids and marination ingredients on the survival of Campylobacter jejuni on meat [J]. Journal of Food Protection, 2010, 73(2): 258-265.
[13] 吕飞,刘然,刘书来,等.食盐添加量对草鱼腌制动力学的影响[J].中国食品学报,2013,13(5):139-144.
[14] 瞿丞,贺稚非,王兆明,等.鸡肉湿腌过程中的传质动力学研究[J].食品与发酵工业,2019,45(11):106-112.
[15] 唐小航,姜启兴,陈校辉.即食酸汤鲴鱼酸化及杀菌关键技术研究[D].无锡:江南大学,2022.
[16] YAO Y, HAN R, LI F, et al. Mass transfer enhancement of tuna brining with different NaCl concentrations assisted by ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85: 105989.
[17] LI J, SHI J, WANG T, et al. Effects of pulsed electric field pretreatment on mass transfer kinetics of pickled lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151(4): 112205.
[18] GOLI T, BOHUON P, RICCI J, et al. Mass transfer dynamics during the acidic marination of turkey meat [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(1): 161-168.
[19] GAULT N F S. The relationship between water-holding capacity and cooked meat tenderness in some beef muscles as influenced by acidic conditions below the ultimate pH [J]. Meat Science, 1985, 15(1): 15-30.
[20] GOLI T, RICCI J, BOHUON P, et al. Influence of sodium chloride and pH during acidic marination on water retention and mechanical properties of turkey breast meat [J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1133-1140.
[21] 刘佳利,和郁春,余秋雨,等.超声波辅助煮制牛肉传质动力学分析及品质变化研究[J].食品与发酵工业,2025,51(14):245-252.
[22] RODRIGUEZ M J A, TORREGROZA E A M, SALGADO O R D. Kinetics of mass transfer during osmotic dehydration of auyama (*Caribbean pumpkin*) in ternary solutions [J]. DYNA, 2019, 86(209): 120-125.
[23] 卢祺,刘津延,刘方芳,等.鱼类腥味物质及脱腥技术研究进展[J].食品工业科技,2019,40(8):285-291.
[24] YANG S, LI L, QI B, et al. Quality evaluation of crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. et V) based on instrumental texture analysis and cluster analysis [J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(8): 2107-2114.
[25] 于泓鹏,曾庆孝.脆度的研究方法及其控制参数[J].食品与发酵工业,2004,30(3):85-89.
[26] LEE S, STEVENSON-BARRY J M, KAU R G. Effect of ion fuid injection on beef tenderness in association with calpain activity [J]. Meat Science, 2000, 56(3): 301-310.
[27] 李颖畅,师丹华,张馨元,等.超声波辅助没食子酸改善海鲈鱼肌原纤维蛋白的凝胶性能[J].食品科学,2022,43(11):82-91.
[28] 于小斐.乳酸腌制结合热处理对猪肉品质的影响[D].北京:中国农业科学院,2022.
[29] GRAIVER N, PINOTTI A, CALIFANO A, et al. Diffusion of sodium chloride in pork tissue [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 910-918.
[30] ALVARADO C, MCKEE S. Marination to improve functional properties and safety of poultry meat [J]. Journal of Applied Poultry Research, 2007, 16(1): 113-120.
[31] MANZOOR A, JASPAL M H, YAQUB T, et al. Effect of lactic acid spray on microbial and quality parameters of buffalo meat [J]. Meat Science, 2020, 159: 107923.