胡传峰, 周明珠, 黄丽琪, 等. 紫苏精油和姜汁腌制处理对烤制武昌鱼冻藏后风味影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 371−380. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120165

HU Chuanfeng, ZHOU Mingzhu, HUANG Liqi, et al. Effects of *Perilla* Essential Oil and Ginger Juice Marination on the Flavor of Wuchang Grilled Fish after Frozen Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 371−380. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120165

· 贮运保鲜 ·

紫苏精油和姜汁腌制处理对烤制武昌鱼冻藏后风味影响

胡传峰[1,2,3], 周明珠[1,2,3], 黄丽琪[1,3], 刘　煊[1,2,3], 乔　宇[1,3,*], 吴文锦[1,3,*], 曹　锋[4], 刘双全[5]

（1.农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064;
2.湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 湖北武汉 430068;
3.湖北省农业科技创新中心农产品加工研究分中心, 湖北武汉 430064;
4.武汉梁子湖水产品加工有限公司, 湖北武汉 430299;
5.中国湖北省武汉市江夏区大桥新区国家农业科技园区, 湖北武汉 430205）

摘　要: 目的：探究紫苏精油和姜汁对烤制武昌鱼鱼肉冻藏后风味影响的作用原理。方法：选用武昌鱼为原料研究紫苏精油、姜汁腌制处理对烤制鱼肉冻藏过程中风味的影响，通过比较加去腥剂（紫苏精油和姜汁）腌制处理组（PG）与未加去腥剂腌制处理组（CK）在冻藏 1、30、60、90、120 d 后挥发性风味化合物、感官的变化并结合 S-曲线、分子对接技术探究紫苏精油和姜汁对鱼肉腥味的影响以及作用原理。结果：冻藏相同时间后 PG 组鱼肉在“香料味”“腥味可接受度”“整体气味可接受度”感官评分均显著高于 CK 组（$P<0.05$），且两组间的电子鼻检测结果差异明显；冻藏过程中鱼肉中主要风味贡献物质为正己醛和正辛醛，芳樟醇在 PG 组中的相对气味活性值（Relative Odor Activity Value，ROAV）远高于 CK 组，芳樟醇在 PG 组鱼肉风味特征中起着重要作用；芳樟醇与正己醛三种比例（1∶1、2∶1、3∶1）混合后混合物的 M 值（实际阈值/理论阈值）分别为（12.00、26.25、5.78）均大于 1，芳樟醇与正己醛间存在掩蔽作用；芳樟醇与 OR1D2 受体结合能为−5.40 kcal·mol^{-1} 远低于正己醛与 OR1D2 受体结合能−4.46 kcal·mol^{-1}，且芳樟醇和正己醛与 OR1D2 受体结合位点重合，芳樟醇能竞争抑制正己醛与 OR1D2 受体结合。结论：紫苏精油和姜汁腌制处理能改善烤制武昌鱼风味，紫苏精油和姜汁腌制处理后生成的芳樟醇能掩蔽正己醛的气味。

关键词: 分子对接, 挥发性化合物, 气味相互作用, 冻藏, S-曲线

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0371−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120165　　本文网刊:

Effects of *Perilla* Essential Oil and Ginger Juice Marination on the Flavor of Wuchang Grilled Fish after Frozen Storage

HU Chuanfeng[1,2,3], ZHOU Mingzhu[1,2,3], HUANG Liqi[1,3], LIU Xuan[1,2,3], QIAO Yu[1,3,*], WU Wenjin[1,3,*], CAO Feng[4], LIU Shuangquan[5]

（1.Key Laboratory of Agricultural Products Cold Chain Logistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-products Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

收稿日期: 2024−12−16

基金项目: 国家重点研发计划课题“预制调理淡水鱼制品腥味消减、绿色加工和定制组合关键技术研究及产业化示范”（2022YFD2100904）; 湖北省技术创新专项（重大项目）揭榜制科技项目“水产智能化加工工程技术研发及装备集成”（2023BEB030）。

作者简介: 胡传峰（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 2268050629@qq.com。

*** 通信作者:** 乔宇（1981−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: qiaoyu412@sina.com。

吴文锦（1982−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 水产品加工与保鲜, E-mail: wuwenjin@hbaas.com。

2.School of Life and Health Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
3.Agro-product Processing Research Sub-center of Hubei Innovation Center of Agriculture Science and Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;
4.Wuhan Liangzihu Aquatic Processing Co., Ltd., Wuhan 430299, China;
5.National Agricultural Science and Technology Park, Daqiao New District, Jiangxia District, Wuhan City, Hubei Province, Wuhan 430205, China)

Abstract: Objectives: To investigate the mechanistic basis of the effects of *Perilla* essential oil and ginger juice on the flavor characteristics of roasted *Megalobrama amblycephala* (Wuchang fish) after frozen storage. Methods: Wuchang fish was selected as raw material to study the effect of *Perilla* essential oil and ginger salt on the flavor of grilled fish after frozen storage. A comparison was made between the treated (PG) and control (CK) groups that were frozen for 1, 30, 60, 90, and 120 d. After cooking and storage, the changes in volatile flavor compounds and sensory aspects combined with the S-curve and molecular docking technology were used to explore the effect of *Perilla* essential oil and ginger juice on fish taste. Results: After frozen storage for the same period, the sensory scores of "spicy taste" "fishy taste acceptability", and "overall odor acceptability" in PG group were significantly higher than those in CK group (P<0.05). In addition, significant differences were observed in the electronic nose detection results of the two groups. During frozen storage, the primary flavor contributors were n-hexanal and n-octanal. The relative odor activity value (ROAV) of linalool in the PG group was notably higher than that in the CK group, and linalool played an important role in the flavor characteristics of the fish in the PG group. The M values (actual threshold value/theoretical threshold value) of the mixtures of linalool and n-hexanal (1∶1, 2∶1, and 3∶1) after mixing was (12.00, 26.25, and 5.78), thus all >1, and a masking effect between linalool and n-hexanal was observed. The binding energy of linalool and the OR1D2 receptor was −5.40 kcal·mol^{-1}, which was significantly lower than the binding energy of n-hexanal and the OR1D2 receptor −4.46 kcal·mol^{-1}. In addition, the binding sites of linalool and n-hexanal and the OR1D2 receptor were coincident; therefore, linalool could competitively inhibit the binding of n-hexanal and the OR1D2 receptor. Conclusions: The flavor of roasted Wuchang fish can be improved by treatment with *Perilla* essential oil and ginger marinade, and the linalool produced by this treatment can mask the smell of n-hexanal.

Key words: molecular docking; volatile compound; odor interaction; frozen storage; S-curve

武昌鱼(*Megalobrama amblycephala*)又名团头鲂,主产于湖北,是我国主要淡水经济鱼类之一[1]。以武昌鱼为原料制作的预制调味鱼也广受好评,但预制淡水水产品发展还受到原有腥味和冻藏中因氧化而风味劣变等因素的影响。

鱼肉在冻藏过程中会因蛋白质和脂质的氧化、内源酶作用的腐败及微生物代谢产物积累等问题,导致新鲜度降低、气味劣变,食用价值和经济效益降低[2−3]。紫苏精油和生姜常被用作去腥剂加入淡水产品加工过程中,且能有较好的去腥效果[4]。在已有的研究中发现萜类物质能掩盖难闻气味是紫苏精油、姜汁中主要的去腥成分。芳樟醇是紫苏精油中主要的挥发性风味物质,能很好地掩盖武昌鱼的腥味[5−6],生姜中的姜醇、姜酚等物质也能针对海参制品的腥味有较好的掩蔽效果[7]。王清政等[8]也在实验中发现紫苏精油作为香料能使细点圆趾蟹在蒸制后获得更丰富的风味。黄丽琪等[5]的研究中发现紫苏精油与姜汁作为去腥剂加入腌料中对武昌鱼进行腌制处理能改善鱼肉在烤制后的风味和滋味,但紫苏精油和姜汁腌制处理对烤制武昌鱼在冻藏期间风味影响还不清楚且紫苏精油和姜汁作为去腥剂加入对水产品的腥味掩盖作用机理尚不明确。

分子对接技术能计算机模拟大分子蛋白与小分子配体的结合,在医药领域,药物设计等领域使用广泛,目前在食品风味形成的机理研究中也有较多应用。嗅觉受体(Olfactory Receptors, Ors)属于 G 蛋白偶联受体(G Protein-Coupled Receptors, GPCRs),属于膜蛋白,嗅觉受体具有七个跨膜 α-螺旋结构[9],嗅觉受体的 N 端往往位于细胞膜外,羧基端往往位于细胞膜内[10−11],气味物质通过与嗅觉受体膜外的口袋相结合而识别气味物质[12],分子对接模拟气味分子与嗅觉受体结合,能预测气味分子与受体结合难易程度并预测结合位点,能很好地用于推测气味分子间相互作用关系[13−14]。

因此,本实验通过比较加入紫苏姜汁腌制处理和未加紫苏精油姜汁腌制处理的烤制鱼肉在冻藏 1、30、60、90、120 d 后的电子鼻、挥发性风味物质、感官变化并结合 S-曲线、分子对接技术分析紫苏精油和姜汁对鱼肉腥味的掩盖作用原理,为预制鱼肉风味改善提供新方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

武昌鱼(500±5 g) 2023 年 5 月购于湖北省武汉市白沙洲水产品批发市场;无水甲醇 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;芳樟醇、正己醛 纯度大于 99%,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;仲辛醇 质谱纯,阿拉丁上海试剂有限公司;食盐 湖北盐业集团有限公司;乙基麦芽酚 广东省肇庆香料有限公司;酵母提取物 安琪酵母股份有限公司;复合磷酸盐 徐州添安食品添加剂有限公司;纯净水

娃哈哈集团；紫苏精油　雪麦龙食品香料有限公司；姜汁　青州姜正源农产品有限公司。

7890A-5975C GC-MS 气相色谱质谱联用仪　美国 Agilent Technologies 公司；PEN 3 型电子鼻　德国 Airsense 公司；7890 A 高效液相色谱、DB-WAX 色谱柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）　安捷伦科技（中国）有限公司；PT3540 烤箱　美的集团；SHJ-4CD 水浴恒温磁力搅拌器　济南欧莱博技术有限公司；CPA225D 型电子分析天平　赛多利斯科学仪器（北京）有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　鱼肉前处理　参考黄丽琪等[5] 方法，鲜活武昌鱼屠宰后去鱼鳞、去鱼鳃和内脏，流水清洗，切花刀后用厨房纸将表面水分擦拭干净，将调料混合搅拌均匀，涂抹在鱼的全身，放置在 4 ℃ 冰箱中腌制 2 h。调料包括基础腌制液（1% 食盐、0.05% 乙基麦芽酚、0.1% 酵母提取物、0.05% 复合磷酸盐、1% 水）和去腥剂（0.05% 紫苏精油和 2% 姜汁）（腌制液各物质添加量以鱼肉质量计算）。将腌制后的武昌鱼表面水分用厨房纸擦干后置于烤箱中，烤箱温度和时间为 200 ℃ 和 25 min，烤制结束后取出，放置室温后用聚乙烯袋真空密封包装，放置于−18 ℃ 冰箱冻藏。分别取冻藏 1、30、60、90、120 d 后样品置于 25 ℃ 解冻 25 min 后对各项指标进行检测分析，分别记为 1D、30D、60D、90D、120D。

CK 组：腌制阶段只加入基础腌料腌制。

PG 组：腌制阶段加入基础腌料和去腥剂腌制。

1.2.2　感官评价　参考王婧[15] 和胡传峰等[16] 的方法略作修改，为降低复热处理对鱼肉风味的影响，将解冻后的武昌鱼分别置于沸腾后的蒸锅中蒸制 10 min 后用于感官实验。感官评价小组由男女比例为 1∶1 的 8 位无饮食偏见和过敏反应、经验丰富的学生组成，参与评价的人员年龄处于 20~24 岁，感官评价小组成员根据冷冻不同时间的烤制武昌鱼的烤香、香料味、腥味可接受度和整体气味可接受度进行综合评分，总分 100 分，分值越大，特征越强。感官评价总分按加权评分计算，具体评分标准如表 1 所示。

1.2.3　电子鼻测定　参考姚晓波等[17] 的方法并稍作修改，取 2.0 g 解冻后鱼肉搅碎放入 20 mL 进样瓶里，在温度为 40 ℃ 的水浴锅中平衡 30 min 后进行测定。PEN 3 电子鼻检测参数：清洗时间 100 s，测试时间 120 s，气体流量 150 mL/min，每组三个平行，特征值提取时间点 115~116 s。电子鼻的 10 个传感器对应名称及性能描述见表 2。

1.2.4　挥发性风味物质测定　参考陈芳雪等[18] 的方法并稍作修改，取 2.0 g 解冻后鱼肉搅碎置于 20 mL 顶空瓶中，放入磁力搅拌器在 40 ℃ 下平衡 15 min，然后将 70 μm Carboxen/PDMS 的 SPME 针管插入顶空瓶中吸附 40 min 后插入气相色谱质谱联用仪进样口解吸 5 min。在 DB-WAX 色谱柱上进行分离。

表 1　感官评定标准

Table 1　Sensory evaluation criteria

项目	评价标准	分数
烤香（20）	烤香味浓郁	16~20
	较明显烤香味	11~15
	较淡烤香	6~10
	无烤香味	0~5
香料味（20）	香料味适中	16~20
	香料味较淡	11~15
	微弱的香料味	6~10
	无香料味	0~5
腥味可接受度（30）	无腥味	24~30
	有较淡腥味	17~23
	有较明显腥味	9~16
	特别浓烈腥味	0~8
整体气味可接受度（30）	香气浓郁无异味	24~30
	淡淡香味，无明显异味	17~23
	有淡淡异味	9~16
	异味浓烈	0~8

表 2　PEN3 型电子鼻传感器对应的敏感物质

Table 2　Sensitive substances corresponding to the PEN3 electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分、苯类
2	W5S	灵敏度大、对氮氧化合物灵敏
3	W3C	芳香成分、氨类
4	W6S	主要对氢化合物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇、醛、酮类灵敏
9	W2W	芳香成分，对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

定量分析：将 50 μL 内标物仲辛醇（质量浓度为 0.8×10^{-6} g/mL）加入到上述样品中，各挥发性化合物的含量通过待测挥发物与仲辛醇峰面积的比值得出。定性分析：结果用谱库（NIST08）匹配，选取匹配度为 60% 以上的物质确定挥发性气味物质种类。

仪器参数：DB-WAX 色谱柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）。载气氦气的恒定流速为 1.0 mL/min，进样器温度为 250 ℃，离子源温度为 230 ℃。温度程序如下：烘箱温度保持在 40 ℃，以 2 ℃/min 的速度升至 100 ℃，然后以 5 ℃/min 的速度升至 180 ℃，最后再以 8 ℃/min 升至 250 ℃，保持 5 min。涂层纤维在进样口 250 ℃ 下解吸 5 min。质谱扫描在 30~400 amu 的范围内进行，并且全扫描模式，不分流。

1.2.5　相对气味活性值 ROAV 计算　表明风味化合物贡献大小的物理量可以通过气味活性值（Odor Activity Value，OAV）呈现，也可表示挥发性物质对整体风味的贡献值，对风味有较大贡献的挥发性物质 OAV 值大于 1，并且 OAV 值越大表明该组分对

总体风味贡献越大。ROAV 用于评估单个化合物对整体香气的贡献，ROAV 的大小能确定关键风味成分[19]。计算公式如下：

$$OAV_i = \frac{C_i}{OT_i} \quad 式（1）$$

$$ROAV_i = 100 \times \frac{OAV_i}{OAV_{max}} \quad 式（2）$$

式中：C_i 为被测挥发性化合物的质量浓度，ng/g；OT_i 为被测香气化合物在水中的气味阈值，ng/g；OAV_i 为被测香气成分的气味活性值；OAV_{max} 为所有香气成分中气味活性最大值。

1.2.6 烤鱼中特异风味物质的气味相互作用关系 气味阈值测定：基于 ROAV 值筛选出的 CK 组与 PG 组中特异性风味物质（芳樟醇和正己醛），用三点选配法（3-AFC）和 S-曲线法测定其气味阈值。参考 CZERNY 等[20] 和 ZHANG 等[21] 的方法略作修改[20−21]，将待测定芳樟醇和正己醛标准品分别用甲醇 1∶1 混合溶解，通过预实验选取合适浓度，并以该浓度作为嗅闻的起始最高浓度然后以 2 倍浓度梯度设置 12 个嗅闻浓度进行嗅闻。依次将每个梯度的溶液与另外两个空白溶剂装入随机编号的棕色小瓶中，同时呈递给审评人员进行嗅闻，评价人员需从三个小瓶中选出刺激性气味更大的样品。感官小组由 10 名训练有素的专业人员组成，其中男性 5 名，女性 5 名，年龄：20~24 岁。

香气二元协同作用测定：根据 GC-MS 检测结果中芳樟醇与正己醛浓度比，分别配制不同质量比（1∶1、2∶1、3∶1）的二元混合物（芳樟醇∶正己醛），用甲醇 1∶1 溶解，通过预实验选取合适浓度，并以该浓度作为嗅闻的起始最高浓度然后以 2 倍浓度梯度设置 12 个嗅闻浓度进行嗅闻。依次将每个梯度的溶液与另外两个空白溶剂装入随机编号的棕色小瓶中，同时呈递给审评人员进行嗅闻，评价人员需从三个小瓶中选出刺激性气味更大的样品。利用 Origin 软件对样品浓度和校正后检测概率进行 S-曲线（3）拟合，当嗅觉检测概率为 0.5 时，即为待测组分气味实际阈值。二元混合物的理论检测概率根据 Feller 加和公式（5）计算得到，当实际阈值与理论阈值的比值 M>1 时，则表现出掩盖作用；当 M=1 时，则为折中作用；当 1>M>0.5 时，则为加成作用；当 M≤0.5 时，则为协同作用[22−23]。

$$P_e = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-1}{D}}} \quad 式（3）$$

$$P_d = \frac{3}{2}P_e - \frac{1}{2} \quad 式（4）$$

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) \quad 式（5）$$

式中：P_d 为校正后的检测概率；P_e 为实际嗅觉检测概率；x 为待测组分浓度的对数值，单位为 lg(ng/g)；D 为每种待测物的参数特征；P(AB) 为检测混合物理论嗅觉检测概率；P(A) 为化合物 A 嗅觉检测概率；P(B) 为化合物 B 的嗅觉检测概率。

实验小组由遵循《GB/T 22366-2008：感官分析方法学 采用三点选配法（3-AFC）测定嗅觉、味觉和风味觉察阈值的一般导则》的男女比例为 1∶1 的 20 位学生组成。

1.2.7 嗅觉受体蛋白与气味分子 3D 结构数据获得与分子对接 嗅觉受体蛋白 OR1D2 的结构来自 uniport 数据库[24]（https://www.uniprot.org/），气味小分子正己醛、芳樟醇的结构来自 Pubchem 数据库[25]（https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/）。下载的气味小分子和受体蛋白分子经过 Chem3D 能量最小化处理后输出为 PDB 格式。对接前利用 Autodock 软件[26] 对蛋白进行去水加氢处理后选择为受体并导出为 PDBQT 格式，对小分子进行加氢选择为配体并设置扭转键后导出为 PDBQT 格式。通过 https://proteins.plus/网站预测蛋白活性口袋设置对接盒子[27]，选取受体的 N 端活性口袋进行 100 次半柔性对接，利用含有氢键的、结合能较低的对接结果，选取该次对接配体分子周围最近 5 个氨基酸为蛋白质柔性区间和柔性对接的对接盒子。再利用 Autodock 进行 50 次柔性对接，选择能量最低且含有氢键的构象为最佳构象，利用 Pymol 软件[28] 绘制对接结果三维图，再利用 Ligplot+软件[29] 分析二维相互作用力。

1.3 数据处理

采用 SPSS 27 对实验所得数据进行单因素方差分析，采用 Origin 2022、TB tools 和 SIMCA 14.1 进行 PCA 分析和作图。

2 结果与分析

2.1 感官评价

CK 组与 PG 组鱼肉在冻藏后感官得分如表 3 所示，在多种气味分子的共同影响下相同冻藏时间的 PG 组“气味可接受度”得分显著高于 CK 组（$P<0.05$），冻藏相同时间后 PG 组鱼肉在“香料味”“腥味可接受度”“整体气味可接受度”指标评分均远高于 CK 组，这证明 PG 组中香料气味掩盖了鱼肉原本的腥味，经过紫苏精油和姜汁腌制处理后的鱼肉气味可接受度显著升高（$P<0.05$）。冻藏 60 d 后 CK 组与 PG 组“烤香”得分差异显著（$P<0.05$），但其他冻藏时间 CK 组与 PG 组鱼肉“烤香”得分在相同冻藏时间并未有明显差异。经过紫苏精油和姜汁腌制处理的鱼肉有较明显的香料香味，使 PG 组“香料味”得分远高于 CK 组。蛋白质与脂肪在冻藏过程中氧化产生的醛类物质会加重鱼肉的腥味，使鱼肉的“腥味可接受度”评分随着冻藏时间延长而呈下降趋势，冻藏相同时间后 CK 组鱼肉的“腥味可接受度”评分远低于 PG 组，这可能是紫苏精油或姜汁延缓了鱼肉在冻藏过程中的氧化，此外，紫苏精油与姜汁中可能存在某种挥发性风味物质抑制了鱼肉腥味的形成。

表 3　不同处理对烤鱼感官的影响

Table 3　Influence of different treatments on the sensory properties of grilled fish

组别		指标			
		烤香	香料味	腥味可接受度	整体气味可接受度
CK	1D-CK	12.83±0.75^{ab}	5.67±1.21^{e}	15.67±1.21^{bc}	21.17±1.47^{bc}
	30D-CK	12.17±1.47^{bc}	7.67±1.21^{cd}	15.13±0.23^{c}	20.16±1.41^{cd}
	60D-CK	10.83±0.75^{d}	7.14±0.89^{d}	13.33±1.03^{de}	16.83±1.17^{e}
	90D-CK	9.50±0.55^{e}	6.83±0.75^{d}	12.67±1.21^{e}	13.33±1.63^{f}
	120D-CK	7.67±0.82^{f}	5.50±1.05^{e}	10.10±1.67^{f}	12.83±0.75^{f}
PG	1D-PG	13.5±0.55^{a}	14.33±1.03^{ab}	22.67±2.94^{a}	24.17±2.56^{a}
	30D-PG	11.67±1.21^{cd}	15.17±0.75^{a}	21.5±1.38^{a}	24.83±2.64^{a}
	60D-PG	11.83±0.75^{c}	15.33±1.51^{a}	17.07±2.14^{b}	22.17±0.98^{b}
	90D-PG	9.67±0.52^{e}	13.5±1.05^{b}	17.17±1.17^{b}	19.24±0.89^{d}
	120D-PG	8.50±0.55^{f}	8.67±0.82^{c}	14.83±1.17^{cd}	16.17±0.98^{e}

注：同列不同字母表示有显著性差异（P<0.05）。

2.2　电子鼻分析

为探究紫苏精油和姜汁对冻藏后武昌鱼鱼肉风味影响的作用原理，利用电子鼻检测冻藏不同时间后鱼肉中气味。电子鼻能反映样品风味的基本轮廓，对不同冻藏时间的武昌鱼电子鼻响应值进行主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）能反映出不同冻藏时间后鱼肉的气味差异，结果如图 1A 所示，主成分 PC1 贡献率为 0.508、PC2 贡献率为 0.34，前两个主成分的贡献率之和为 0.848，能很好地反映样品间的气味差异。由主成分分析可知各样品间气味成分在 PC1 上出现显著性差异，冻藏 1、30、60、90 d 的样品主要分布在 PC1 的右侧，冻藏 120 d 的样品分布在 PC1 的左侧，这表明样品挥发性风味物质在冻藏 90 d 至 120 d 的过程中产生了显著的变质。如图 1B 和 C 所示，PG 组在 W5S（对氮氧化物敏感）、W1W（对硫化物敏感）传感器上的响应值大于 CK 组，这与陈晓婷等[30] 的研究结果一致。在整个冻藏期中 CK 组和 PG 组在 W5S 上响应值先升高后降低，在冻藏 60 d 时最高，这可能与冻藏过程中蛋白质变化有关，具体物质变化过程还需要对挥发性气味成分进一步探究。

2.3　挥发性风味物质分析

采用顶空固相微萃取结合气相色谱质谱联用仪（Gas Chromatography-Mass Spectrometry，GC-MS）技术分析鉴定不同冻藏时间挥发性物质。如表 4 所示，所有样品中共检测出 39 种挥发性风味物质，其中包括醛类 5 种、酮类 6 种、醇类 9 种、萜类物质 15 种和其他化合物 4 种。不同处理的样品挥发性风味物质成分和含量存在明显差异，在储藏过程中总体挥发性风味物种类呈现下降趋势；在已有的研究中认为，萜类物质能很好改善食品风味，紫苏精油和姜汁中含有丰富的柠檬烯、芳樟醇、紫苏醛、紫苏酮、姜烯、姜黄烯等萜类物质[31−32]，使 PG 组中的莰烯、桉叶醇、异冰片、芳樟醇等萜类化合物在冻藏 1 至

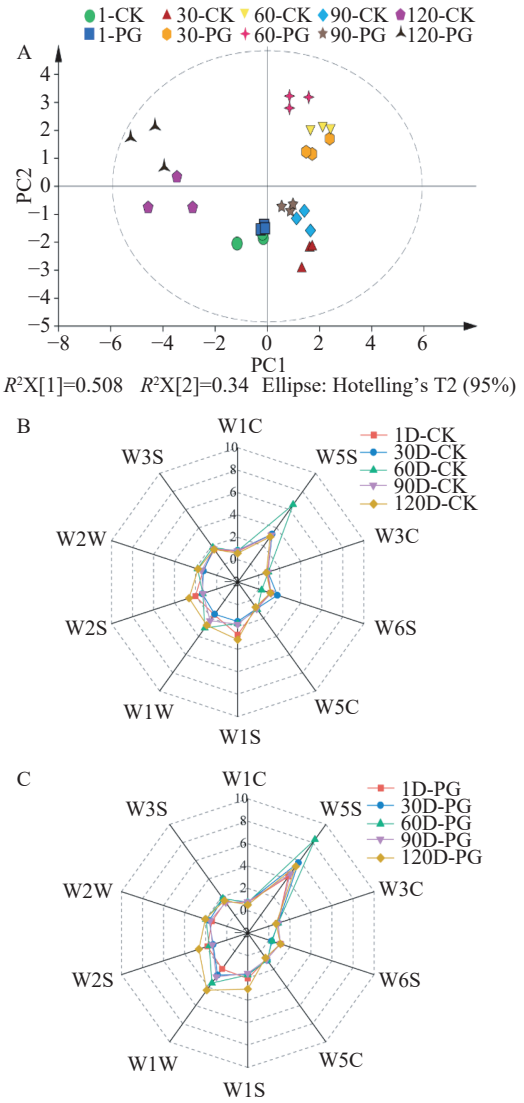


图 1　冻藏不同时间后鱼肉电子鼻主成分分析（A）和雷达图（B、C）

Fig.1　Principal component analysis (PCA) (A) and radar chart (B, C) of fish after different freezing periods using the electronic nose

120 d 样品中均有较大检出且显著高于 CK 组（P<0.05）；醛类物质是鱼肉中的主要腥味来源之一，图 2A 显示，冻藏过程中鱼肉中醛类物质呈动态变化，在冻藏第 60 d CK 组与 PG 组醛类物质含量均出现显著性增大，醛类物质主要来源于脂质氧化和氨基酸代谢[33]。在冻藏第 90 d 后醛类物质又呈下降趋势，这可能是醛类物质氧化成羧酸所致[34]；酮类物质因其阈值较高，在整体风味贡献较小；醇类物质在鱼肉风味形成中起着较重要作用，1-辛烯-3-醇是鱼肉中主要的腥味物质之一，1-戊醇通常认为是甜美的气味，能对改善食品风味，在 PG 组中含量明显高于 CK 组。在多种挥发性风味物质相互影响下形成 CK 组与 PG 组鱼肉的不同风味。

为了探究表征不同样品在储藏过程中风味的变化，利用 ROAV 评价关键风味物质成分来确定不同冻藏时间的主要风味贡献物质。一般认为 ROAV>1 的物质才对整体风味有贡献，ROAV 越大对风味贡

表 4 冻藏不同时间后鱼肉中挥发性物质含量

Table 4 Contents of volatile substances in fish after different freezing periods

类别	编号	中文	英文名	CAS	RT（min）	阈值[35]（ng/g）	气味描述	含量(ng/g)									
								1D-CK	1D-PG	30D-CK	30D-PG	60D-CK	60D-PG	90D-CK	90D-PG	120D-CK	120D-PG
醛类	1	壬醛	Nonanal	124-19-6	19.9784	0.34	腊味, 豌豆味	9.66±1.70	7.07±4.33	4.51±0.55	8.64±0.75	2.16±0.48	2.43±0.20	nd	nd	nd	nd
	2	正庚醛	Heptanal	111-71-7	12.8921	0.18	脂肪气味、腥味	1.81±0.33	2.22±0.78	1.62±0.52	nd	1.74±0.13	1.70±0.20	0.77±0.14	2.10±0.36	0.87±0.16	nd
	3	正己醛	Hexanal	66-25-1	10.2056	0.28	腥味、刺鼻的气味	4.24±0.56	11.06±1.80	15.08±4.05	13.08±1.87	83.15±4.51	57.75±2.72	16.65±1.316	27.03±2.13	20.06±3.66	16.29±8.27
	4	正戊醛	Pentanal	110-62-3	7.9605	0.41	发酵面包味果味	nd	8.11±0.62	nd	nd	nd	3.43±0.34	nd	nd	nd	nd
	5	正辛醛	Octanal	124-13-0	16.1061	0.01	腥味、脂肪味	1.28±0.20	1.64±0.48	1.19±0.17	2.19±0.22	nd	nd	nd	nd	nd	0.51±0.05
酮类	6	2,3-辛二酮	2,3-Octanedione	585-25-1	17.1741	2.52	草本味道	1.84±0.18	nd	nd	nd	nd	1.64±0.11	nd	nd	0.99±0.11	nd
	7	2-壬酮	2-Nonanone	821-55-6	19.8681	15	草本气味	nd	nd	nd	0.49±0.07	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	8	3-甲基环戊烷-1,2-二酮	3-Methyl-1,2-cyclopentanedione	765-70-8	39.178		木香	nd	0.51±0.06	0.95±0.16	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	9	3-羟基-2-丁酮	3-Hydroxy-2-oxobutane	513-86-0	16.1957	259	黄油味	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.83±0.06	1.25±0.33	0.46±0.05	nd
	10	3-辛酮	3-Octanone	106-68-3	14.999	28	果香	0.86±0.06	1.26±0.06	0.40±0.07	0.85±0.25	nd	0.44±0.15	nd	nd	nd	nd
	11	甲基环戊烯醇酮	2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopentenone	80-71-7	39.178	26	焦糖枫糖浆气味	0.52±0.09	nd	nd	0.66±0.02	nd	nd	nd	0.35±0.07	nd	nd
醇类	12	1-己醇	1-Hexanol	111-27-3	18.435	6	温和的甜味	11.84±0.62	1.72±0.28	2.58±0.24	3.32±0.22	1.59±0.04	7.20±0.33	1.12±0.10	0.96±0.07	1.4±0.13	2.2±0.36
	13	1-戊醇	1-Pentanol	71-41-0	14.9478	0.1	愉快气味	1.05±0.15	2.66±1.68	0.53±0.12	0.92±0.03	3.45±0.08	4.02±0.25	1.68±0.04	1.92±0.05	0.82±0.09	1.00±0.09
	14	1-戊烯-3-醇	1-Penten-3-ol	616-25-1	12.1893	1	热带果香	nd	1.78±0.13	nd	nd	2.21±0.23	nd	0.53±0.05	nd	0.60±0.03	0.42±0.16
	15	1-辛醇	1-Octanol	111-87-5	27.2156	2.7		0.76±0.15	0.83±0.05	nd	0.75±0.12	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	16	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	3391-86-4	22.249	1	生鸡肉味、腥味	10.28±1.48	8.51±1.84	5.35±0.77	7.01±0.50	9.42±0.40	8.46±0.36	3.05±0.44	4.92±0.34	4.62±1.54	3.23±0.4
	17	2-庚醇	2-Heptanol	543-49-7	17.1534	100	新鲜柠檬味, 花果味	nd	1.26±0.49	nd	2.30±0.28	nd	0.85±0.25	nd	1.31±0.24	nd	0.97±0.02
	18	2-乙基己醇	2-Ethylhexanol	104-76-7	24.0434	13	甜香味	1.03±0.32	0.69±0.16	nd	nd	nd	0.49±0.04	0.52±0.09	0.60±0.03	nd	nd
	19	乙醇	Ethanol	64-17-5	7.1339	8	甜味、果味	0.89±0.05	3.04±0.32	nd	nd	2.49±0.52	4.64±0.81	0.76±0.126	0.77±0.07	nd	2.76±1.14
	20	正庚醇	1-Heptanol	111-71-7	22.5566	4.8	微弱酒精味	0.87±0.12	nd	nd	nd	0.55±0.01	0.72±0.06	nd	nd	nd	nd
萜类	21	(1R)-(+)-α蒎烯	(+)-α-Pinene	7785-70-8	8.9314	4	薄荷味	nd	1.32±0.85	nd	nd	nd	1.90±1.16	nd	4.32±0.08	0.45±0.16	0.90±0.26
	22	β-石竹烯	β-Caryophyllene	87-44-5	29.3865	0.2	丁香味	nd	nd	nd	5.12±0.54	nd	nd	nd	2.82±0.48	nd	nd
	23	α-水芹烯	α-Phellandrene	99-83-2	12.2442		柑橘气味	nd	nd	nd	0.93±0.16	nd	nd	nd	0.93±0.46	nd	0.33±0.02
	24	2-蒎烯	2-Pinene	80-56-8	8.9316	18	泥土气息的木香	nd	1.40±0.57	nd	3.58±0.60	nd	nd	nd	nd	nd	1.58±0.6
	25	β-水芹烯	β-Phellandrene	555-10-2	13.7312	36	薄荷味、松节油味	nd	nd	nd	nd	nd	1.52±0.26	nd	4.63±2.42	nd	2.44±0.51
	26	α-姜黄烯	α-Curcumene	644-30-4	37.3721		草药的气味	nd	1.60±0.14	nd	5.11±0.68	nd	nd	nd	1.02±0.04	nd	nd
	27	β-蒎烯	β-Pinene	18172-67-3	10.9152	140	树脂香, 清香	nd	nd	nd	nd	nd	0.58±0.05	nd	0.68±0.08	nd	0.89±0.17
	28	莰烯	Camphene	79-92-5	9.9025	880	樟脑味	nd	5.69±1.47	nd	13.74±2.19	nd	8.63±1.45	nd	14.02±0.81	nd	3.20±0.72
	29	月桂烯	β-Myrcene	123-35-3	12.0721	36	胡椒香	nd	0.87±0.23	nd	2.89±0.36	nd	nd	nd	2.02±0.11	0.57±0.11	1.37±0.53
	30	4-萜烯醇	3-Cyclohexen-1-ol	562-74-3	29.5402	4.4	胡椒木质混合味	nd	1.03±0.05	nd	1.10±0.08	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	31	桉叶醇	Eucalyptol	470-82-6	13.7886	59.7	桉树、草药、樟脑味	nd	16.87±3.53	0.36±0.03	31.58±1.86	nd	18.77±4.31	nd	28.34±2.11	nd	9.68±1.06
	32	异冰片	Isoborneol	10385-78-1	34.5864		木香、樟脑味	nd	7.00±1.73	nd	10.06±0.55	nd	6.03±1.04	nd	8.5±0.9	nd	3.48±0.68
	33	芳樟醇	Linalool	78-70-6	26.6197	0.4	柑橘花香、甜玫瑰气味	nd	28.71±15.52	0.48±0.03	43.46±2.74	nd	16.42±2.21	nd	39.51±4.98	nd	16.44±2.92
	34	2-莰酮	Bornan-2-one	464-49-3	25.7609	1.5	刺激性芳香味	nd	1.47±0.06	nd	nd	nd	0.88±0.15	nd	1.09±0.06	nd	nd

续表 4

类别	编号	中文	英文名	CAS	RT（min）	阈值[35]（ng/g）	气味描述	含量(ng/g)									
								1D-CK	1D-PG	30D-CK	30D-PG	60D-CK	60D-PG	90D-CK	90D-PG	120D-CK	120D-PG
其他	35	α-松油醇	α-Terpineol	10482-56-1	34.2598	330	松木香	nd	1.98±1.05	nd	3.65±0.001	nd	nd	nd	1.82±0.14	nd	0.77±0.19
	36	4-异丙基甲苯	p-Cymene	99-87-6	15.5136		温和，愉快香味	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.95±0.14	4.17±0.1
	37	二氯甲烷	Methylene Chloride	27639	6.9824	160000		nd	nd	4.46±3.73	10.27±1.59	1.98±0.49	nd	nd	nd	nd	nd
	38	邻异丙基甲苯	o-Cymene	527-84-4	15.5481	150		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.84±0.64
	39	三氯甲烷	Trichloromethane	67-66-3	8.7526			nd	1.13±0.13	nd	nd	0.78±0.09	0.49±0.03	nd	nd	nd	nd

注：“nd”表示未检出；气味描述来源于http://www.perflavory.com/index.html。

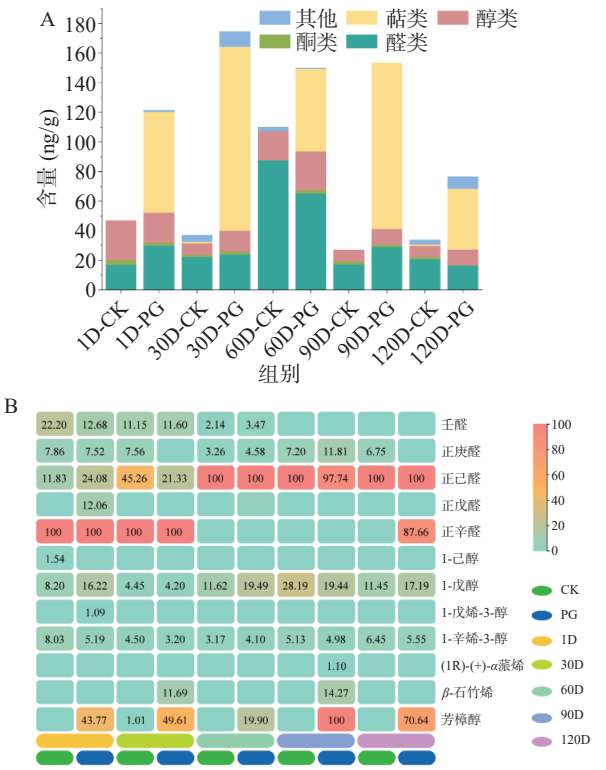


图 2　冻藏不同时间后鱼肉中挥发性物质含量变化(A)和 ROAV 变化(B)

Fig.2　Changes in volatile substance contents (A) and relative odor activity value (ROAV) (B) in fish after different freezing periods

献越大，利用 ROAV>1 的物质绘制热图，如图 2B，鱼肉样品中最主要的风味贡献物为壬醛(腊味，豌豆味)、正庚醛(脂肪气味、腥味)、正己醛(腥味、刺鼻的气味)、正辛醛(腥味、脂肪味)、1-戊醇(愉快气味)、1-辛烯-3-醇(生鸡肉味、腥味)、芳樟醇(柑橘花香、甜玫瑰气味)，鱼肉中主要的风味物质气味特征为腥味，其中正己醛与正辛醛的 ROAV 值最高是鱼肉中最主要的气味物质；1-戊醇与芳樟醇为愉悦性气味，芳樟醇在 PG 组中含量较高、阈值较低，使其气味贡献值远大于 CK 组，与感官评价结果一致，这表明紫苏精油与姜汁提供的芳樟醇能在一定程度上改善鱼肉风味使 PG 组烤制武昌鱼在冻藏过程中气味感官更好。

2.4　芳樟醇与正己醛气味识别阈值的测定

为探究紫苏精油与姜汁加入对烤制鱼肉在冻藏期间风味改善的作用机制，选取 ROAV 较高的两种挥发性气味物质芳樟醇和正己醛利用 S-曲线法测定其气味阈值，结果如图 3A 和 B。正确识别概率为 0.5 时所对应的浓度为该物质识别阈值，芳樟醇拟合 S-曲线的识别阈值为 0.51 ng/g；正己醛拟合 S-曲线的识别阈值为 1.32 ng/g，且芳樟醇与正己醛的拟合 R^2 分别为 0.9956、0.9906，具有较高准确性。实验所得的正己醛和芳樟醇识别阈值与已报道的识别阈值结果不一致，这可能源于不同个体对气味敏感度的差异。

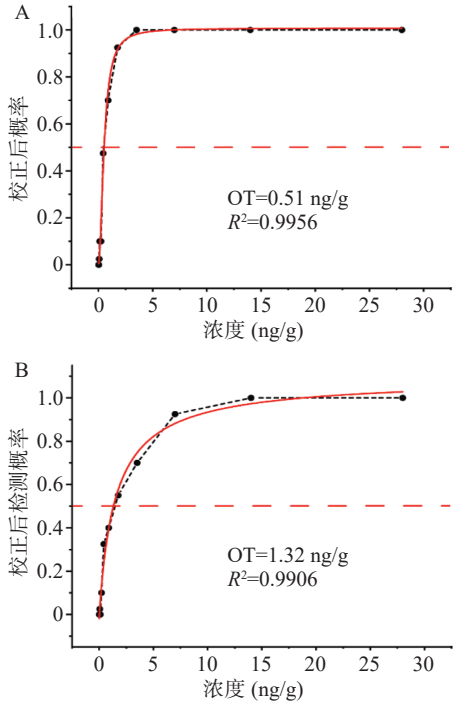


图 3　芳樟醇(A)与正己醛(B)的阈值 S-曲线

Fig.3　S-curve of threshold values for linalool (A) and n-hexanal (B)

2.5　不同浓度比的芳樟醇与正己醛二元协同作用分析

通过 S-曲线和 Feller 添加模型得出的不同比例的芳樟醇与正己醛的相互作用 S-曲线如图 4，实际阈值和理论阈值如表 5，芳樟醇：正己醛=1∶1 时理论阈

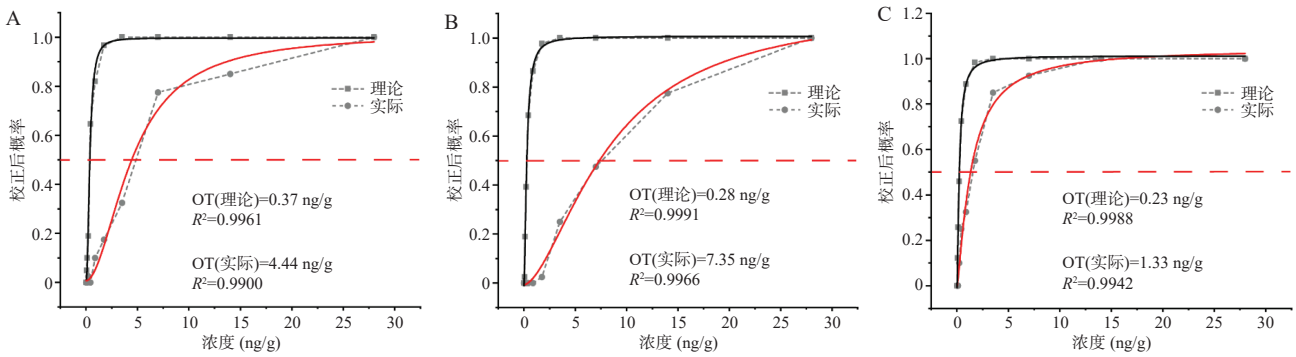


图 4　芳樟醇与正己醛不同浓度比的气味协同 S-曲线

Fig.4　S-curves of odor synergy for different concentration ratios of linalool to n-hexanal

注:(A)芳樟醇:正己醛=1:1;(B)芳樟醇:正己醛=2:1;(C)芳樟醇:正己醛=3:1。

表 5　芳樟醇与正己醛混合物的理论阈值和实际阈值

Table 5　Theoretical and measured threshold values for the mixture of linalool and n-hexanal

芳樟醇:正己醛	理论阈值(ng/g)	实际阈值(ng/g)	M(实际阈值/理论阈值)	效果
1:1	0.37	4.44	12.00	掩盖
2:1	0.28	7.35	26.25	掩盖
3:1	0.23	1.33	5.78	掩盖

值为 0.37 ng/g, 实际阈值为 4.44 ng/g, M=12.00; 芳樟醇:正己醛=2:1 时理论阈值为 0.28 ng/g, 实际阈值为 7.35 ng/g, M=26.25; 芳樟醇:正己醛=3:1 时理论阈值为 0.23 ng/g, 实际阈值为 1.33 ng/g, M=5.78。3 种浓度比的芳樟醇与正己醛混合物的实际阈值与理论阈值比值 M 均大于 1, 为掩盖作用。3 种不同比例的芳樟醇与正己醛混合物实际阈值均高于正己醛和芳樟醇检测阈值, 这证明正己醛与芳樟醇气味相互间存在掩蔽作用。随着芳樟醇占比增大, M 先增后减, 这可能是因为在低比例时, 芳樟醇对正己醛气味掩蔽效果较差, 随着比例增大芳樟醇对正己醛掩蔽效果也逐渐增强, 当芳樟醇对正己醛掩蔽效果增至最强后继续增大芳樟醇占比, 正己醛对芳樟醇掩蔽作用便会降低。

芳樟醇与正己醛二元协同作用 S-曲线结果与感官评价结果相同, 如表 6 所示, PG 组鱼肉腥味得分与 M 值的变化趋势一致, 在冻藏 30 d PG 组鱼肉腥味更淡。鱼肉整体风味轮廓由多种气味物质共同组成, 伴随着冻藏时间延长, 鱼肉中烤香味、香料味减淡且鱼肉中蛋白质、脂质等氧化产生异味[3], 使鱼肉整体感官变差。但在冻藏过程中 PG 组鱼肉芳樟醇与正己醛比值远高于 CK 组, 芳樟醇能很好地掩盖鱼肉中正己醛产生的腥味, 使 PG 组在冻藏后风味更好。

表 6　冻藏过程 PG 组中鱼肉芳樟醇与正己醛比值

Table 6　Ratio of linalool to n-hexanal in fish in the *Perilla* essential oil and ginger salt-treated (PG) group during the freezing process

组别	气味物质		比值
	芳樟醇(ng/g)	正己醛(ng/g)	
1D-CK	0	4.24	0
1D-PG	28.71	11.06	2.60
30D-CK	0.48	15.08	0.03
30D-PG	43.46	13.08	3.32
60D-CK	0	83.15	0
60D-PG	16.42	57.75	0.28
90D-CK	0	16.65	0
90D-PG	39.51	27.03	1.46
120D-CK	0	20.06	0
120D-PG	16.44	16.29	1.01

2.6　分子对接模拟正己醛和芳樟醇与 OR1D2 受体结合

利用分子对接技术模拟正己醛和芳樟醇与 OR1D2 受体结合, 进一步探究正己醛和芳樟醇相互作用关系, 结果见图 5A 和 B。结合能大小反映了受体和配体间结合的可能性, 结合能越低, 受体与配体间结合稳定性越高、受体和配体的构象越稳定[36]。正己醛与 OR1D2 受体 259 TYR 和 182 TYR 氨基酸残基间生成氢键, 氢键键长均为 2 Å, 且结合能为 −4.46 kcal·mol^{-1} 能形成稳定对接; 芳樟醇与 OR1D2 受体 182 TYR 和 180 GLU 氨基酸残基间生成氢键, 氢键键长分别为 1.9 Å和 1.8 Å, 结合能为−5.40 kcal·mol^{-1} 能形成稳定对接。芳樟醇和正己醛均能与

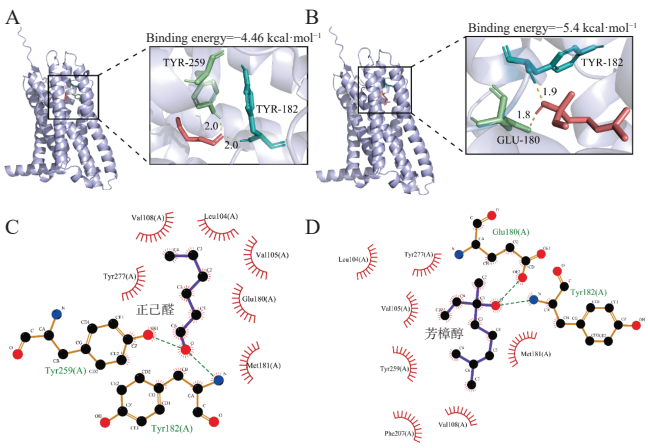


图 5　OR1D2 与正己醛(A、C)和芳樟醇(B、D)的分子对接图

Fig.5　Molecular docking diagram of OR1D2 with n-hexanal (A, C) and linalool (B, D)

OR1D2 受体上 182 TYR 氨基酸残基形成氢键，芳樟醇与 182 TYR 氨基酸残基结合氢键键长更短，且芳樟醇与 OR1D2 对接能远小于正己醛。将 Autodock 结果导入 ligplot+软件绘制正己醛和芳樟醇与 OR1D2 受体对接的二维图，图中红色睫毛状符号表示疏水作用力、绿色虚线表示氢键。如图 5C 和 D 所示，正己醛和芳樟醇对接结果中均受到 277 TYR、108 VAL、104 LEU、105 VAL、181 MET 氨基酸残基的疏水力作用，证明芳樟醇与正己醛在与 OR1D2 结合时存在竞争抑制，芳樟醇更易抢占正己醛与 OR1D2 嗅觉受体结合位点，使正己醛气味识别阈值增大。

3　结论

本研究选用武昌鱼为原料研究紫苏精油和姜汁腌制处理对烤制鱼肉在冻藏过程中的影响，比较了加去腥剂（紫苏精油和姜汁）腌制处理（PG）组与未加去腥剂腌制处理（CK）组在冻藏 1、30、60、90、120 d 后挥发性风味化合物、感官的变化并结合 S-曲线、分子对接技术分析紫苏精油和姜汁对鱼肉腥味的掩盖作用原理，并探究冻藏不同时间对烤制武昌鱼风味影响。结果发现烤制后鱼肉中共检测出 39 种挥发性风味物质，其中包括醛类 5 种、酮类 6 种、醇类 9 种、萜类 15 种和其他化合物 4 种，且不同组别气味成分差异明显；感官评价结果中相同冻藏时间 PG 组鱼肉气味显著优于 CK 组；ROAV 显示正己醛是鱼肉中主要的腥味物质，芳樟醇是 PG 组鱼肉中的气味掩蔽物质；分子对接结果中芳樟醇和正己醛与 OR1D2 受体结合位点重合，且芳樟醇结合能更低为 −5.40 kcal·mol^{-1} 能抑制正己醛与 OR1D2 受体的结合而降低正己醛气味识别阈值，使紫苏精油和姜汁腌制处理后的鱼肉风味更好。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHANG C N, RAHIMNEJAD S, LU K L, et al. Molecular characterization of p38 MAPK from blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) and its expression after ammonia stress, and lipopolysaccharide and bacterial challenge[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 84: 848−856.

[2] 赵茜, 陈剑, 李欢, 等. 水产预制食品品质控制及智能监测技术研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 312−318. [ZHAO Xi, CHEN Jian, LI Huan, et al. Research advances in quality control and intelligent monitoring technologies for aquatic prepared products[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 312−318.]

[3] YARNPAKDEE S, BENJAKUL S, NALINANON S, et al. Lipid oxidation and fishy odour development in protein hydrolysate from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle as affected by freshness and antioxidants[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1781−1788.

[4] 姚正颖, 孙力军, 侯北伟, 等. 紫苏精油对白鲢鱼丸的脱腥工艺研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(7): 94−98. [YAO Zhengying, SUN Lijun, HOU Beiwei, et al. Study on deodorization process of silver carp balls with *Perilla* essential oil[J]. China Condiment, 2022, 47(7): 94−98.]

[5] 黄丽琪, 胡传峰, 鲁怡婷, 等. 紫苏精油和姜汁对烤武昌鱼的风味影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 193−202. [HUANG Liqi, HU Chuanfeng, LU Yiting, et al. Effects of *Perilla* essential oil and ginger juice on flavor of roasted Wuchang fish[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(7): 193−202.]

[6] 刘兴平, 唐密, 余永, 等. 水煮鱼风味组成与主体风味物质挖掘[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(19): 331−340. [LIU Xingping, TANG Mi, YU Yong, et al. Mining of flavor composition and main flavor substances in boiled fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(19): 331−340.]

[7] 王志龙, 王禹, 段静瑶, 等. 海参制品腥味化合物形成与脱腥技术研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 206−212. [WANG Zhilong, WANG Yu, DUAN Jingyao, et al. Research progress of formation of fishy compounds in sea cucumber products and deodorization technology[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 206−212.]

[8] 王清政, 徐燕如, 刘敏, 等. 葱、姜和紫苏的添加对预制细点圆趾蟹挥发性化合物和 ATP 及关联产物变化的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 268−276. [WANG Qingzheng, XU Yanru, LIU Min, et al. Effect of the addition of scallion, ginger and *Perilla* on the changes in volatile compounds and ATP and related compounds in pre-prepared *Ovalipes punctatus*[J]. Food Science, 2023, 44(18): 268−276.]

[9] BILLESBØLLE C B, de MARCH C A, van der VELDEN W J C, et al. Structural basis of odorant recognition by a human odorant receptor[J]. Nature, 2023, 615(7953): 742−749.

[10] CHOI C, BAE J, KIM S, et al. Understanding the molecular mechanisms of odorant binding and activation of the human OR52 family[J]. Nature Communications, 2023, 14: 8105.

[11] del MÁRMOL J, YEDLIN M A, RUTA V. The structural basis of odorant recognition in insect olfactory receptors[J]. Nature, 2021, 597(7874): 126−131.

[12] BERGHARD A, BUCK L B, LIMAN E R. Evidence for distinct signaling mechanisms in two mammalian olfactory sense organs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(6): 2365−2369.

[13] 安彤, 梁德民, 费婷, 等. 基于 S 曲线和分子对接技术对不同香气物质相互作用研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(6): 119−129. [AN Tong, LIANG Demin, FEI Ting, et al. Study on the interaction between different aroma substances based on s-curve and molecular docking technology[J]. China Food Additives, 2023, 34(6): 119−129.]

[14] ZHU Jiancai, LIU Xiaojie, LIN Yechun, et al. Unraveling the characteristic chestnut aroma compounds in MeiTanCuiYa green tea and their interaction mechanisms with broad-spectrum olfactory receptors using molecular docking[J]. LWT, 2024, 194: 115785.

[15] 王婧. 预包装烤鱼贮藏期间品质变化规律与保鲜剂研发[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2024: 11−12. [WANG J. Thequality-changes of prepackaged grilled fish during storage and the development of preservatives[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2024: 11−12.]

[16] 胡传峰, 邱文兴, 刘煊, 等. 不同熟制方式对克氏原螯虾风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 253−263. [HU Chuanfeng, QIU Wenxing, LIU Xuan, et al. Effect of different cooking methods on the flavor of *Procambarus clarkii*[J]. Science and Tech-

nology of Food Industry, 2025, 46(9): 253−263.]
[17] 姚晓波, 熊光权, 乔宇, 等. 酵母提取物和迷迭香提取物对鲈鱼风味的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(2): 144−150. [YAO Xiaobo, XIONG Guangquan, QIAO Yu, et al. Effect of yeast extract and rosemary extract on bass flavor[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 144−150.]
[18] 陈方雪, 邓祎, 谌玲薇, 等. 预制冷风风干武昌鱼干制过程中的品质变化及香气形成[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 9−17. [CHEN Fangxue, DENG Yi, SHEN Lingwei, et al. Quality change and aroma formation during drying in pre-made cold air-dried Wuchang fish[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 9−17.]
[19] ZHU Yifan, CHEN Jing, CHEN Xingjie, et al. Use of relative odor activity value (ROAV) to link aroma profiles to volatile compounds: Application to fresh and dried eel (*Muraenesox cinereus*)[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 2257−2270.
[20] CZERNY M, CHRISTLBAUER M, CHRISTLBAUER M, et al. Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions[J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 265−273.
[21] ZHANG Xiao, LI Haiyan, WU Dan, et al. Unlocking aroma in three types of vinasse fish by sensomics approach[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140496.
[22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 感官分析方法学 采用三点强迫选择法(3-AFC)测定嗅觉、味觉和风味觉察阈值的一般导则: GB/T 22366-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Sensory analysis-Methodology-General guidance for measuring odour, flavour and taste detection thresholds by a three-alternative forced-choice(3-AFC)procedure: GB/T 22366-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
[23] 徐志强, 熊文, 冯俊俏, 等. 春黄菊干花特征香气成分鉴定及香气协同作用变化评估[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 291−299. [XU Zhiqiang, XIONG Wen, FENG Junqiao, et al. Identification of characteristic aroma components of dried flowers in Huang ju in spring and evaluation of aroma synergy change[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(1): 291−299.]
[24] WANG Yuqi, WANG Qinghua, HUANG Hongzhan, et al. A crowdsourcing open platform for literature curation in UniProt[J]. PLoS Biology, 2021, 19(12): e3001464.
[25] KIM S, CHEN Jie, CHENG Tiejun, et al. PubChem 2023 update[J]. Nucleic Acids Research, 2023, 51(D1): D1373−D1380.
[26] MORRIS G M, HUEY R, LINDSTROM W, et al. AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility[J]. Journal of Computational Chemistry, 2009, 30(16): 2785−2791.
[27] SCHÖNING-STIERAND K, DIEDRICH K, EHRT C, et al. ProteinsPlus: A comprehensive collection of web-based molecular modeling tools[J]. Nucleic Acids Research, 2022, 50(W1): W611−W615.
[28] BRAMUCCI E, PAIARDINI A, BOSSA F, et al. PyMod: Sequence similarity searches, multiple sequence-structure alignments, and homology modeling within PyMOL[J]. Bmc Bioinformatics, 2012, 13(Suppl 4): S2.
[29] LASKOWSKI R A, SWINDELLS M B. LigPlot+: Multiple ligand-protein interaction diagrams for drug discovery[J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2011, 51(10): 2778−2786.
[30] 陈晓婷, 罗朝世禧, 刘淑集, 等. 养殖菊黄东方鲀鱼头汤风味料工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(2): 93−104. [CHEN Xiaoting, LUO Zhaoshixi, LIU Shuji, et al. Process optimization of the flavorings ingredients of cultured *Takifugu flavidus* fish head soup[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(2): 93−104.]
[31] 王馨平, 聂黎行, 康帅, 等. 紫苏叶的化学成分、药理活性和质量控制研究进展[J]. 中国药事, 2023, 37(10): 1193−1212. [WANG Xinping, NIE Lixing, KANG Shuai, et al. Research progress on the chemical constituents, pharmacological activity and quality control of *Perillae folium*[J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2023, 37(10): 1193−1212.]
[32] 马玉莹, 曹银娟, 余群力, 等. 含紫苏精油 Pickering 乳液活性膜的表征及其对冷鲜牛肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 142−150. [MA Yuying, CAO Yinjuan, YU Qunli, et al. Characterization of active film containing *Perilla* essential oil Pickering emulsion for improving storage of chilled beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 142−150.]
[33] YANG Yang, WANG Bing, FU Yu, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds across different production stages of fermented soybean whey tofu[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128880.
[34] 张建润. 南极磷虾油纳米乳的制备及其氧化稳定性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2018: 42−43. [ZHANG Jianrun. Preparation and oxidation stability of Antarctic krill oil nanoemulsio and its oxidative stability[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2018: 42−43.]
[35] VAN G L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Zeist: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
[36] HE Qingmin, LIU Chuan, WANG Xiaohan, et al. Exploring the mechanism of curcumin in the treatment of colon cancer based on network pharmacology and molecular docking[J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1102581.