

基于美拉德反应的江蓠咸味香精制备工艺优化及风味特征分析

王丽娜, 陈雨欣, 邹文韬, 马景博, 张杰良, 李瑞, 陈建平, 汪卓, 钟赛意

Preparation Process Optimization and Flavor Characteristic Analysis of *Gracilaria* Salty Flavoring Based on Maillard Reaction

WANG Lina, CHEN Yuxin, ZOU Wentao, MA Jingbo, ZHANG Jieliang, LI Rui, CHEN Jianping, WANG Zhuo, and ZHONG Saiyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060292>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

虾蟹漂烫汁酶解液美拉德反应工艺优化及其挥发性物质分析

Optimization of Maillard Reaction Process for Enzymatic Hydrolysate from Shrimp and Crab Boiled Juice and Analysis of Its Volatile Flavor Components

食品工业科技. 2020, 41(16): 140-149 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.023>

兰茂牛肝菌酶解产物调味油美拉德反应增香工艺优化及电子鼻分析

Optimization of Maillard Reaction for Flavor Enhancement and Electronic Nose Analysis of *Lanmaoa asiatica* Enzymatic Hydrolysate Seasoning Oil

食品工业科技. 2024, 45(5): 177-186 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050013>

复合酶法制备小麦面筋蛋白咸味酶解液的工艺优化

Optimization of the Technology for Preparing Salty Wheat Gluten Protein Hydrolysate by Compound Enzyme Method

食品工业科技. 2022, 43(3): 222-230 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080296>

110℃下木糖-半胱氨酸美拉德反应模型风味物质及杂环胺的形成

Development of Flavor Substances and Heterocyclic Amines by Maillard Reaction Models of Xylose-cysteine at 110 °C

食品工业科技. 2020, 41(12): 21-28,34 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.004>

枫槭叶酶解液美拉德反应及其挥发性成分分析

Maillard Reaction and Volatile Components Analysis of Enzymatic Hydrolysate of Maple Leaves

食品工业科技. 2021, 42(3): 222-229 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020187>

美拉德反应产物中三类官能团化合物的质量分布与主体香气特征

Mass Distribution of Three Kinds of Functional Compounds and Main Aroma Characteristics in Maillard Reaction Products

食品工业科技. 2020, 41(24): 256-263,329 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030062>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王丽娜, 陈雨欣, 邹文韬, 等. 基于美拉德反应的江蓠咸味香精制备工艺优化及风味特征分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 240–252. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060292

WANG Lina, CHEN Yuxin, ZOU Wentao, et al. Preparation Process Optimization and Flavor Characteristic Analysis of *Gracilaria* Salty Flavoring Based on Maillard Reaction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 240–252. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060292

· 工艺技术 ·

基于美拉德反应的江蓠咸味香精制备工艺优化及风味特征分析

王丽娜^{1,2}, 陈雨欣^{2,+}, 邹文韬², 马景博², 张杰良², 李 瑞², 陈建平², 汪 卓^{1,2,*}, 钟赛意^{1,2,*}

(1. 广东海洋大学深圳研究院, 广东深圳 518108;

2. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省亚热带果蔬加工科技创新中心, 广东湛江 524088)

摘 要: 开发海藻咸味香精可提高海藻资源利用率和产品附加值, 具有重要意义。本文以江蓠呈味基料为原料, 采用响应面法优化江蓠咸味香精的制备工艺, 并利用电子舌、电子鼻结合固相微萃取-气相色谱-质谱 (SPME-GC-MS) 对比分析呈味特性和风味特性。结果表明, 江蓠咸味香精制备最优工艺条件为: 反应温度 126 °C, 反应时间 39 min, 木糖添加量 5%, 甘氨酸添加量 2.6%, 在此条件下感官评分较高 (75.11±0.53); 电子鼻结合电子舌测定结果可知, 美拉德反应可以提升咸味香精咸鲜味, 降低苦味, 增加硫化物、氮氧化合物含量, 且江蓠咸味香精鲜味更明显, 苦味更低; 气相色谱-质谱 (GC-MS) 分析美拉德反应前后呈味基料与咸味香精挥发性化合物, 结果显示吡嗪类化合物是两种咸味香精主要挥发性化合物, 并且江蓠咸味香精烷基吡嗪含量较高, 醇类、酯类、酸类对协调咸味香精的整体风味有重要影响。该研究可为开发海藻咸味香精提供理论参考。

关键词: 江蓠, 美拉德反应, 咸味香精, 工艺优化, 风味特征

中图分类号: TS201.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)08-0240-13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060292



本文网刊:

Preparation Process Optimization and Flavor Characteristic Analysis of *Gracilaria* Salty Flavoring Based on Maillard Reaction

WANG Lina^{1,2}, CHEN Yuxin^{2,+}, ZOU Wentao², MA Jingbo², ZHANG Jieliang², LI Rui², CHEN Jianping²,
WANG Zhuo^{1,2,*}, ZHONG Saiyi^{1,2,*}

(1. Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518108, China;

2. School of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Provincial Marine Biological Products Engineering Laboratory, Guangdong Subtropical Fruit and Vegetable Processing Science and Technology Innovation Center, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The development of seaweed salty flavoring could improve the utilization rate of seaweed resources and the added value of products, which was of great significance. In this study, the preparation process of *Gracilaria* salty flavoring was optimized by response surface method using *Gracilaria* flavoring base as raw material, and the taste and flavor characteristics of *Gracilaria* salty flavoring were analyzed by electronic tongue and electronic nose combined with solid

收稿日期: 2024-06-21 +并列第一作者

基金项目: 深圳市科技重大专项 (可持续发展专项) (KCXFZ20240903094014019) 广东省重点领域研发计划资助 (2020B1111030004); 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室开放基金 (2024 农 006-2); 国家重点研发计划 (2020YFD0901101); 广东海洋大学大学生创新团队项目 (CXTD2023005); 广东省高校科技创新团队项目 (2021KCXTD021)。

作者简介: 王丽娜 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 海藻食品加工, E-mail: 1944298993@qq.com。

陈雨欣 (2003-), 女, 本科, 研究方向: 海藻食品加工, E-mail: 13979298786@163.com。

* 通信作者: 汪卓 (1993-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品营养与健康、海洋功能食品开发, E-mail: wz202206@gdou.edu.cn。

钟赛意 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与健康、农产品营养与功能化开发, E-mail: zsy1xc@126.com。

phase microextraction-gas-chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS). The results showed that the optimal process conditions for the preparation of *Gracilaria* salty flavoring were as follows: Reaction temperature of 126 °C, reaction time of 39 min, xylose content of 5%, and glycine content of 2.6%, and the sensory score was higher under this condition (75.11 ± 0.53). The results of electronic nose combined with electronic tongue showed that Maillard reaction could improve the salty and umami taste of salty flavoring, reduce its bitter taste, increase the content of sulfide and nitrogen oxide, and the umami taste of *Gracilaria* salty flavoring was more obvious and the bitter taste was lower. The volatile compounds of flavoring base and salty flavoring before and after the Maillard reaction were analyzed by GC-MS. The results showed that pyrazine compounds were the main volatile compounds of two kinds of salty flavoring, and the content of alkyl pyrazines in *Gracilaria* salty flavoring was higher. Moreover, alcohols, esters, and acids played an important role in coordinating the overall flavor of salty flavoring. This study can provide a theoretical reference for the development of seaweed salty flavoring.

Key words: *Gracilaria*; Maillard reaction; salty flavoring; process optimization; flavor characteristic

江蓠(*Gracilaria*)是我国一种分布范围广、生长周期短、人工养殖技术成熟的大型经济海藻,其富含多糖、蛋白质、膳食纤维、矿物质等营养物质,属于可食用优质海藻^[1-2]。江蓠中海藻蛋白所含氨基酸与人体所需的必需氨基酸比较接近^[3],被认为是具有前景的蛋白质替代来源^[4-5]。近年来国内外关于江蓠的报道主要集中于多糖化学结构^[6]、生物活性^[7]、药理功能^[8]的研究,关于江蓠风味开发利用方面的研究鲜有报道。

美拉德反应是一种非酶促、涉及氨基酸和醛或酮物质之间的反应,生成具有浓郁香味的化合物^[9],并受到多种反应条件影响^[10]。咸味香精主要是利用动、植物氨基酸与还原糖制备的具有肉香味或者海鲜风味的食用香精^[11],其主要用途是对食品增香。目前以动物蛋白水解物^[12]、植物蛋白水解物^[13]、酵母抽提物^[14]、类脂物质^[15]等各种天然原料制备咸味香精的研究较多。Laohakunjit 等^[16]以海藻酶解液为原料,利用美拉德反应制备具有海鲜风味的咸味香精。Huang 等^[17]以豆粕水解液和木糖为原料,通过美拉德反应研发出肉香味浓郁的咸味香精。Eric 等^[18]以葵花籽蛋白水解物和木糖为原料制备的美拉德产物具有肉香味、鲜味浓郁等特点。美拉德反应可以有效保留原料的特色风味,并改善产品的不良风味,具有香气浓郁、滋味醇厚等特点,在调味料、香精香料、烘焙食品中得到广泛应用^[19]。随着人们对海藻营养价值和健康益处认知的深入,利用食用海藻蛋白质水解物开发天然香料香精是当前的研究热点^[20]。

江蓠是我国沿海地带重要的经济海藻,原料来源丰富,其在我国内主要用于提取琼脂和作为养殖动物饲料,以江蓠为原辅料的食物有即食凉拌菜、江蓠挂面、江蓠方便食品等初级产品^[21-23],对江蓠的精深加工研究较少,造成江蓠资源的浪费,限制了江蓠产业的高值化利用。前期研究发现,江蓠营养丰富,干制江蓠蛋白质含量为 20% 以上,鲜味氨基酸丰富^[24],可作为开发海藻咸味香精的原料。以江蓠为原料通过美拉德反应制备江蓠咸味香精,既可提高江蓠附加值,又可开发新型的海藻咸味香精,具有广阔的应用前景和 market 价值。

本研究以实验前期制曲发酵得到的江蓠呈味基料为原料^[25],以褐变程度、低分子香味中间体生成量和感官评分为指标,探究江蓠咸味香精制备工艺,并对比分析添加江蓠对咸味香精风味特性、呈味特性的影响,旨在进一步加强江蓠的精深加工研究,为江蓠咸味香精开发应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜异枝江蓠(*Gracilaria bailinae*) 产自湛江市东海岛;黄豆粉 购自人民营养食品厂;面粉 购自金沙河面业有限公司;食盐 购自广东省盐业集团广州有限公司;氢氧化钠、氯化钾 购自罗恩试剂有限公司;酒石酸 购自麦克林试剂有限公司;乙醇 购自阿拉丁试剂有限公司;木糖、葡萄糖、甘氨酸、谷氨酸、硫胺素、半胱氨酸均为食品级 购自浙江一诺生物科技有限公司;米曲霉 3.042 广东微生物菌种保藏中心提供;黑曲霉 CICC2475 中国工业微生物菌种保藏中心提供;鲁氏酵母菌 QJ-05 广东海洋大学微生物实验室提供。

Thermo Scientific 多功能酶标仪公司; PHS-3E 型 pH 计 上海雷磁仪器厂; LDZX-50KBS 型立式蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂; TS-5000Z 电子舌 日本 INSENT 公司; AIRSENSE PEN3 电子鼻 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; TQ8050NX 气相色谱质谱联用仪 日本岛津公司; THZ-702A 恒温培养箱 常州金坛精达仪器制造公司; SW-TFG-18 超净工作台 苏州净化设备有限公司; DXY-2H 油浴锅 日本三量器具中国有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 咸味香精制备工艺 参照王丽娜等^[25]的制曲方式制备江蓠曲和传统酱油曲,按照前期实验探索得到的发酵条件制备呈味基料。

呈味基料:称取 100 g 传统酱油曲与 12.3% 盐水(w:w)按 1:1.6 混合到发酵瓶中,在 37 °C 培养箱中发酵 5 d,加入 0.3% 酵母菌(10^6 CFU/ mL)(w:v),然后继续发酵 21 d,121 °C 灭菌 15 min 后离心,过滤,获得呈味基料,置于 4 °C 冰箱储存。

表 1 江蓠咸味香精的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for *Gracilaria* salty flavoring

指标	分值				
	2	4	6	8	10
藻腥味	腥味偏重	腥味一般	腥味	较弱腥味	无腥味
鲜味	无鲜味	鲜味不明显	鲜味一般	鲜味较浓郁	鲜味浓郁
咸味	无咸味	咸味不明显	咸味一般	咸味较明显	咸味明显
醇厚风味	无醇厚味	醇厚味不明显	醇厚味一般	醇厚味较明显	醇厚味明显
焦香味	焦糊味很明显	焦糊味明显	焦香味一般	焦香味较明显	焦香味明显
肉香味	无肉香味	肉香味不明显	肉香味一般	肉香味较明显	肉香味明显
苦味	苦味很明显	明显苦味	苦味	轻微苦味	无苦味
可接受性	不能接受	勉强接受	一般	能接受	完全接受

江蓠呈味基料:以江蓠曲替换传统酱油曲,其余实验条件方法同呈味基料。

咸味香精主要制备流程:呈味基料→加料调配→拌均→美拉德反应→快速冷却→咸味香精。

咸味香精制作工艺:准确量取 100 mL 的呈味基料作为美拉德反应底物,添加外源还原糖和氨基酸等反应原料,搅拌均匀后,用 1 mol/L 的氢氧化钠溶液调节反应液 pH 为 7.0,用透气膜封口,设置反应参数,置于油浴锅反应,结束后立即用冰块冷却待用。

江蓠咸味香精制作工艺:以江蓠呈味基料替换呈味基料,其余实验条件方法同咸味香精。

1.2.2 美拉德反应原料的筛选

1.2.2.1 还原糖的筛选 取 20 mL 江蓠呈味基料,固定还原糖添加量 3%,在 110 ℃,初始 pH 为 7.0,反应为 30 min,考察木糖、葡萄糖以及木糖与葡萄糖添加比例分别为 1:1、1:2、2:1 对美拉德反应液褐变度 $A_{420\text{ nm}}$ 和低分子香味中间体含量 $A_{294\text{ nm}}$ 的影响。

1.2.2.2 氨基酸、硫胺素的筛选 取 20 mL 江蓠呈味基料,氨基酸添加量为 1%,考虑到原料的成本问题,半胱氨酸及硫胺素的添加量分别为 0.5% 及 0.2%,考察谷氨酸、甘氨酸、半胱氨酸、硫胺素对美拉德反应液褐变度 $A_{420\text{ nm}}$ 和低分子香味中间体含量 $A_{294\text{ nm}}$ 的影响。

1.2.3 褐变程度和中间产物的测定 以美拉德反应前液体为参比,将美拉德反应产物稀释 20 倍后,测定其在 420 nm 处的吸光值 $A_{420\text{ nm}}$;将美拉德反应产物稀释 100 倍后,测定其在 294 nm 处的吸光值 $A_{294\text{ nm}}$ [26]。

1.2.4 感官评定 参照 Xia 等 [27] 的方法略作修改。取 0.5 g 江蓠咸味香精加入 0.5% 食盐和 1.0% 谷氨酸钠的混合溶液,在 50 ℃ 下加热 10 min,使风味更加明显。感官评价之前,选 10 名受过培训的食品专业人员(男女各半)组成感官评价小组,评价指标为藻腥味、鲜味、咸味、苦味、醇厚风味、焦香味、肉香味、可接受性(异味),以美拉德反应前的江蓠呈味基料为对照,小组成员根据感官评价表(表 1)对美拉德反应后的江蓠咸味香精进行评价。

1.2.5 江蓠咸味香精制备单因素实验 分析反应温度(90、100、110、120、130 ℃)、反应时间(10、20、30、40、50 min)、甘氨酸添加量(1%、1.5%、2%、2.5%、3%)、木糖添加量(2%、3%、4%、5%、6%)对江蓠咸味香精褐变度 $A_{420\text{ nm}}$ 、低分子香味中间体含量 $A_{294\text{ nm}}$ 及感官评分的影响。

1.2.6 响应面试验 在单因素实验的基础上,以反应温度、反应时间、木糖添加量、甘氨酸添加量 4 个因素为自变量,以感官评分为响应值,根据 Box-Behnken 试验设计原理进行 4 因素 3 水平试验设计(表 2),并进行数据拟合优化美拉德制备江蓠咸味香精工艺。

表 2 Box-Behnken 试验设计因素水平表
Table 2 Factors and levels of response surface design

水平	因素			
	A 反应温度(℃)	B 反应时间(min)	C 木糖添加量(%)	D 甘氨酸添加量(%)
-1	110	30	4	2
0	120	40	5	2.5
1	130	50	6	3

1.2.7 添加江蓠对咸味香精呈味特性的影响

1.2.7.1 电子舌测定 参考路怀金等 [28] 的方法,略作修改。称取 5 mL 样品于烧杯中,按照 1:30 体积比加入蒸馏水稀释,过 0.45 μm 水系滤膜,滤液装入电子舌专用杯中进行测定。以参比溶液为空白,0.5% 食盐和 1.0% 谷氨酸钠的混合溶液为对照,测定每个样品的酸味、苦味、鲜味、咸味、鲜回味、苦回味重复测定 4 次,删去第一次测定的结果,保留 3 组测定值进行处理和分析。

1.2.8 添加江蓠对咸味香精风味特性的影响

1.2.8.1 电子鼻测定 参照罗美燕 [29] 的方法,略作修改。准确称取 2 mL 样品置于 10 mL 顶空瓶中,立即加盖密封,37 ℃ 平衡 30 min,将电子鼻探头插入瓶中检测挥发性气味物质。程序设置:样品准备时间为 5 s,电子鼻检测时间为 120 s,传感器清洗时间为 120 s,进样流量为 400 mL/min,样品信号采集时间选定为 89~93 s,每个样品重复测定 3 次。

1.2.8.2 SPME-GC-MS 测定 取 1 mL 样品置于 40 mL 顶空瓶中,加入 1 μL 内标物环己酮溶液 (0.947 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$) 和 0.45 g NaCl 中,放入 50 $^{\circ}\text{C}$ 磁力水浴锅中恒温萃取 30 min,将 SPME 纤维 (PDMS/DVB, 50/30 μm) 插入 GC 进样口在 240 $^{\circ}\text{C}$ 下解吸 5 min。

GC 条件: 载气为氦气,流速为 1.0 mL/min,进样器不分流。程序升温:起始柱温 40 $^{\circ}\text{C}$,保留 2 min,再以 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温到 120 $^{\circ}\text{C}$,保留 1 min,以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 加热到 230 $^{\circ}\text{C}$,保留 10 min。

MS 条件: 电子能量 70 eV,离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$,接口温度 240 $^{\circ}\text{C}$,质量扫描范围为 50~480 m/z。

1.2.9 挥发性化合物的鉴定与定量分析 通过 Wiley07 和 NIST05 数据库进行检索,并结合化合物 RI 来定性;根据正构烷烃 ($\text{C}_5\sim\text{C}_{32}$) 在相同样品分析条件下的出峰时间计算挥发性化合物的 RI;采用内标法对挥发性化合物的含量进行测定。

$$\text{RI} = 100 \times \left(\frac{t_x - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right) + n \quad \text{式 (1)}$$

$$C_i = F_i \frac{A_i}{A_s \times V_i} \times V_s \quad \text{式 (2)}$$

式中: t_x 、 t_n 和 t_{n+1} 分别为待测挥发性化合物、含 n 个碳原子正构烷烃和 $n+1$ 个碳原子正构烷烃的保留时间,其中 $t_n < t_x < t_{n+1}$; C_i 为挥发性化合物的浓度 ($\mu\text{g}/\mu\text{L}$), A_i 和 A_s 分别为挥发性化合物 i 的峰面积与内标化合物 s 的峰面积, V_i 为样品的体积, V_s 为内标物的体积, F_i 为挥发性化合物 i 的响应因子 (设定为 1)。

1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次,数据结果以平均值 $\pm$ 标准差形式呈现,使用 Design-Expert 13 响应面设计软件、Origin 2022 和 IBM SPSS Statistics 25 进行数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 美拉德反应原料的确定

2.1.1 还原糖配比对美拉德反应的影响 还原糖是影响美拉德反应产物香气的重要物质,木糖和葡萄糖与氨基酸反应可以产生良好的风味,且价格低廉易得,因此本实验选择木糖和葡萄糖作为还原糖^[30]。如图 1 所示,添加单一木糖的美拉德反应产物在吸光度 294 nm 和 420 nm 处较葡萄糖及不同比例的木糖和葡萄糖高。可能原因是美拉德反应的反应速度依赖于糖的开链程度,木糖比葡萄糖更具反应活性^[31]。此外,Eric 等^[18] 研究发现添加木糖作为外源氨基酸可以显著改善美拉德反应产物品质。综上,选用木糖作为美拉德反应还原糖原料。

2.1.2 氨基酸、硫胺素对美拉德反应的影响 氨基酸、硫胺素是美拉德反应产生香味的常见前体物质。氨基酸种类会影响美拉德反应速率和美拉德反

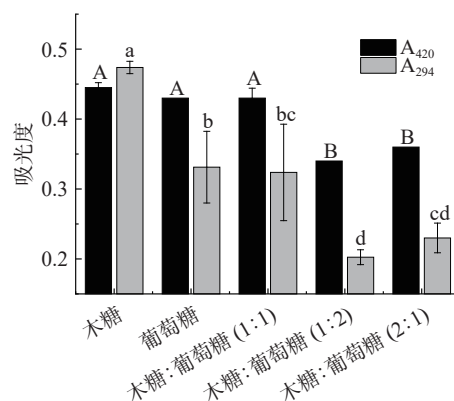


图 1 不同还原糖配比对美拉德反应产物褐变程度和中间产物生成量的影响

Fig.1 Effect of different ratio of reducing sugar on the browning degree of Maillard reaction and the production of intermediates

注: 不同大写字母代表 A_{420} 差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母代表 A_{294} 差异显著 ($P < 0.05$), 图 2~图 6 同。

应产物风味物质。而硫胺素是一种重要的肉味前体化合物,可以改善反应产物色泽和风味^[32]。本试验比较甘氨酸、谷氨酸、半胱氨酸、硫胺素作为美拉德反应底物对美拉德反应产物褐变程度和中间产物生成量的影响。如图 2 所示,添加甘氨酸的美拉德反应产物褐变程度和低分子香味中间体生成量较谷氨酸、半胱氨酸、硫胺素大 ($P < 0.05$)。可能原因是甘氨酸具有较好的反应活性,对美拉德反应程度影响较大^[33]。此外,前人研究发现添加外源甘氨酸可以赋予美拉德反应产物肉香味,显著改善美拉德产物风味^[33-34]。综上,选用甘氨酸作为美拉德反应氨基酸原料。

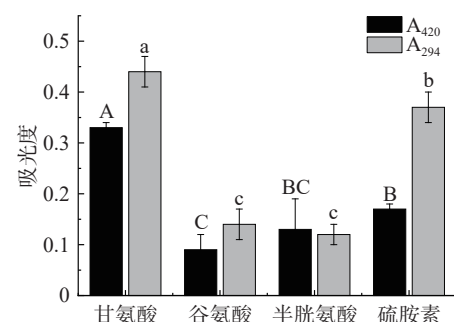


图 2 不同氨基酸、硫胺素对美拉德反应产物褐变程度和中间产物生成量的影响

Fig.2 Effect of different amino acids and thiamine on the browning degree of Maillard reaction and the production of intermediates

2.2 美拉德反应单因素实验结果

2.2.1 木糖添加量 如图 3 所示,木糖添加量为 2%~6% 时,美拉德反应产物在 294 nm 及 420 nm 波长下的吸光度值逐渐上升 ($P < 0.05$),表明该反应体系中类黑精物质和低分子香味中间体的生成量随着木糖添加量的增加而增加,继续增加木糖添加量至 6% 时没有显著提高反应产物低分子香味中间体含

量($P>0.05$)。这可能是因为适量的木糖添加量可以加速美拉德反应进程,促进小分子香味物质形成^[35]。结合感官评价图 3 可知,当木糖添加量为 5% 时,该美拉德反应体系的焦香味、肉香味和咸味、鲜味、总体可接受性的感官评分最高,藻腥味减弱。综上,选择 5% 作为木糖添加量优化试验中心值。

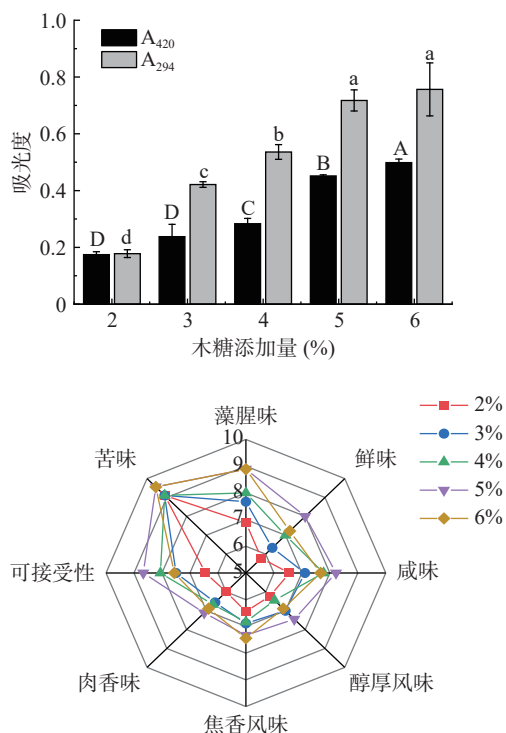


图 3 木糖添加量对美拉德反应褐变程度、中间产物生成量及感官评分的影响

Fig.3 Effects of xylose addition on the degree of browning, the production of intermediates and sensory score of Maillard reaction

2.2.2 甘氨酸添加量 如图 4 所示,甘氨酸添加量为 1%~3% 时,美拉德反应产物在 420 nm 波长下的吸光度值逐渐上升($P<0.05$),表明该反应体系中类黑精物质随着甘氨酸添加量的增加而增加;美拉德反应产物在 294 nm 先增加后降低,表明低分子香味中间体的生成量先增加后降低;氨基酸添加量较高时对美拉德反应产物的褐变程度有显著影响^[36]。结合感官评价图 4 可知,当甘氨酸添加量较小时,美拉德反应产物咸味和鲜味不足,当甘氨酸添加量为 2.5% 时,美拉德反应体系的焦香味、肉香味和咸味、鲜味、总体可接受性的感官评分最高。综上,选择 2.5% 作为甘氨酸添加量优化试验中心值。

2.2.3 反应时间 如图 5 所示,反应时间为 10~50 min,美拉德反应体系褐变程度先增加($P<0.05$)后平缓,低分子香味中间体的生成量先增加后降低。结合感官评价图 5 可知,反应时间为 10 min 时,美拉德反应不充分,藻腥味明显,鲜味不足。反应时间为 40 min 时,总体可接受性良好,焦香味、肉香味、咸味合适,感官评分均最佳。当反应时间超过 40 min,美

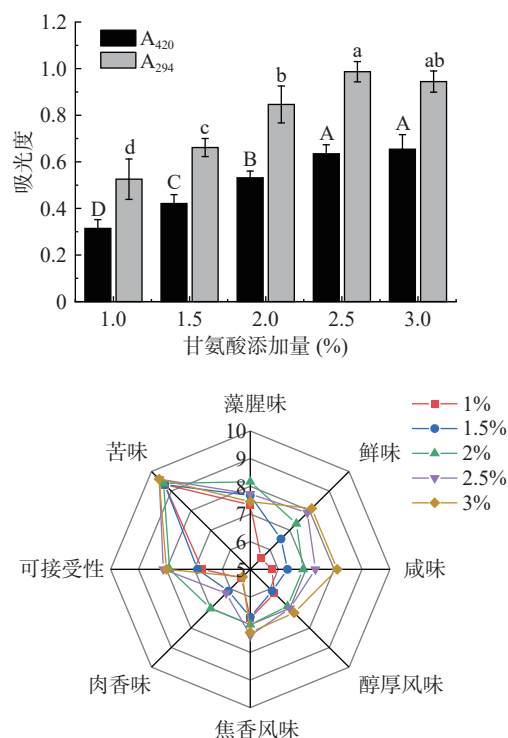


图 4 甘氨酸添加量对美拉德反应褐变程度、中间产物生成量及感官评分的影响

Fig.4 Effects of glycine addition on the degree of browning, the production of intermediates and sensory score of Maillard reaction

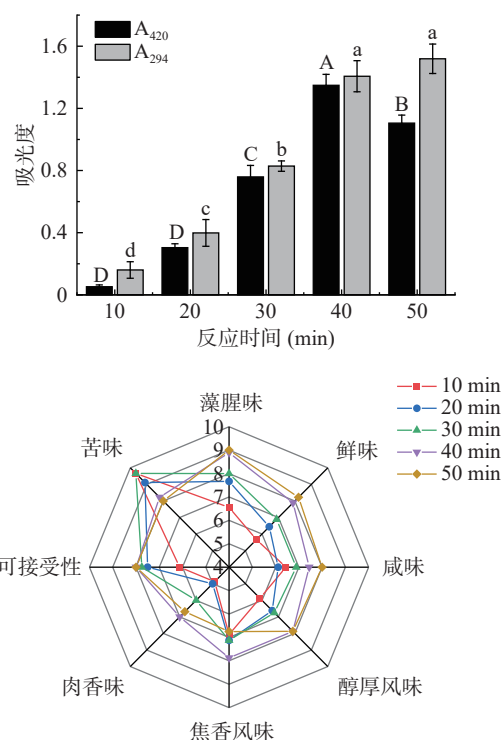


图 5 反应时间对美拉德反应褐变程度、中间产物生成量及感官评分的影响

Fig.5 Effects of reaction time on the degree of browning, the production of intermediates and sensory score of Maillard reaction

拉德体系出现鲜味下降、咸味过重,明显焦糊味,可能是反应时间过长使美拉德反应褐变程度过高,易产

生其他副产物,影响风味^[17]。综上,选择反应时间为 40 min 作为优化试验中心值。

2.2.4 反应温度 如图 6 所示,反应温度为 90~130 ℃,美拉德反应体系在 420 nm 和 294 nm 处的吸光度不断增大($P<0.05$),表明该反应体系中类黑精物质和低分子香味中间体的生成量不断累积。结合感官评价图 6 可知,反应温度从 90~120 ℃ 时焦香味、醇厚、肉香味和美拉德反应产物的整体可接受性均有所提高,反应温度为 120 ℃ 时,总体可接受性好,焦香味、肉香味和咸味、鲜味合适。当反应温度升高至 130 ℃ 时,420 nm 处的吸光度显著上升($P<0.05$),导致褐变程度加速,该美拉德反应体系肉香醇厚味、鲜味下降,苦味上升。研究表明,美拉德反应温度过高易产生丙烯酰胺、羟甲基糠醛等有害物质^[37]。综上,选择 120 ℃ 作为反应温度优化试验中心值。

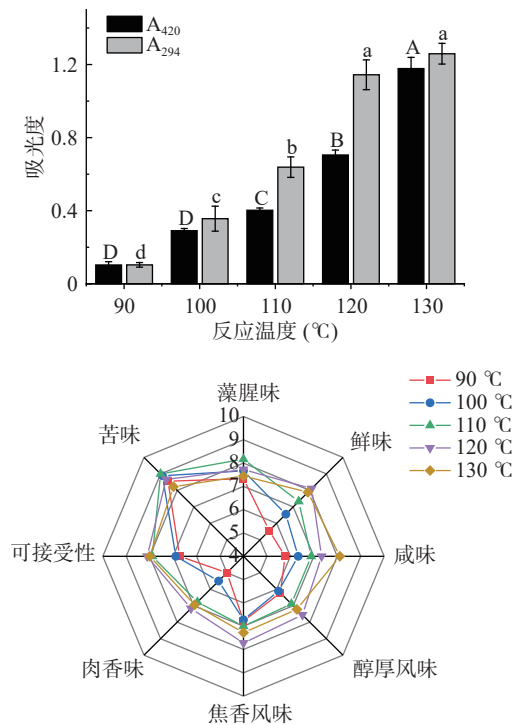


图 6 反应温度对美拉德反应褐变程度、中间产物生成量及感官评分的影响

Fig.6 Effect of reaction temperature on the degree of browning, the production of intermediates and sensory score of Maillard reaction

2.3 美拉德反应响应面试验结果

以木糖添加量、甘氨酸添加量、反应时间、反应温度为因素,感官评分为响应值进行美拉德反应工艺优化试验,响应面 Box-Behnken 试验设计及结果见表 2,回归模型和方差分析结果见表 3 和表 4。

由表 4 可知,模型极显著($P<0.0001$),失拟项不显著($P>0.05$),表示模型能合理描述木糖添加量、甘氨酸添加量、反应时间、反应温度与感官评分之间的关系。试验数据得到二次多元回归方程为:感官

表 3 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 3 Box-Behnken experimental design and result

试验号	反应温度 A(°C)	反应时间 B(min)	木糖添加量 C(%)	甘氨酸添 加量D(%)	感官评分
1	120	40	5	2.5	74.20
2	120	40	4	3	69.57
3	130	30	5	2.5	71.57
4	130	40	5	3	73.13
5	130	40	5	2	73.88
6	120	40	5	2.5	73.00
7	110	40	5	2	71.13
8	110	40	4	2.5	69.57
9	120	50	6	2.5	69.25
10	120	50	5	2	68.17
11	120	40	6	2	71.60
12	120	30	5	2	71.38
13	120	40	5	2.5	74.29
14	120	50	4	2.5	63.50
15	130	40	4	2.5	72.00
16	110	50	5	2.5	66.38
17	120	30	5	3	72.38
18	120	50	5	3	70.50
19	120	40	5	2.5	74.67
20	120	30	6	2.5	67.50
21	110	30	5	2.5	70.13
22	130	40	6	2.5	71.75
23	120	40	5	2.5	75.14
24	110	40	6	2.5	68.13
25	120	30	4	2.5	73.50
26	110	40	5	3	70.29
27	120	40	4	2	70.25
28	120	40	6	3	72.29
29	130	50	5	2.5	72.83

表 4 基于感官评价的回归方程分析

Table 4 Variance analysis of regression model based on sensory evaluation

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
Model	183.62	14	13.12	11.87	<0.0001	***
A	31.79	1	31.79	28.77	<0.0001	***
B	20.88	1	20.88	18.9	0.0007	***
C	0.38	1	0.38	0.34	0.5679	
D	0.26	1	0.26	0.23	0.6382	
AB	6.28	1	6.28	5.68	0.0319	*
AC	0.35	1	0.35	0.32	0.5803	
AD	2.025×10^{-3}	1	2.025×10^{-3}	1.833×10^{-3}	0.9665	
BC	34.52	1	34.52	31.24	<0.0001	***
BD	0.44	1	0.44	0.4	0.5372	
CD	0.47	1	0.47	0.42	0.5252	
A ²	9.75	1	9.75	8.83	0.0101	**
B ²	56.02	1	56.02	50.7	<0.0001	***
C ²	47.68	1	47.68	43.15	<0.0001	***
D ²	3.69	1	3.69	3.34	0.0892	
残差	15.47	14	1.1			
失拟项	12.93	10	1.29	2.04	0.2565	不显著
纯误差	2.53	4	0.63			
总和	199.09	28				

注: * $P<0.05$ 为有差异; ** $P<0.01$ 为差异显著; *** $P<0.001$ 为差异极显著。

评 价 = $74.26+1.63A-1.32B+0.18C+0.15D+1.25AB+0.3AC+0.022AD+2.94BC+0.33BD+0.34CD-1.23A^2-2.94B^2-2.71C^2-0.75D^2$, 感官评价分析表回

归系数 R^2 为 0.9223, 表明该模型相关度好。反应温度(A)、反应时间(B)对样品感官评分的影响极显著($P<0.001$), 木糖添加量(C)与反应时间(B)之间的交互作用对样品感官评分的影响极显著($P<0.001$), 反应温度(A)与反应时间(B)之间的交互作用对样品感官评分的影响有差异($P<0.05$), 根据 F 值可以看出, 由四个因素对经美拉德反应后样品感官评分的影响是 A(反应温度) $>$ B(反应时间) $>$ C(木糖添加量) $>$ D(甘氨酸添加量)。

3D 曲面图的陡峭程度及等高线图的椭圆程度可以反映各因素的交互作用。由图 7(a)可看出, 反应温度(A)与反应时间(B)的坡度陡峭, 等高线具有椭圆特征, 表明反应温度(A)与反应时间(B)之间的交互作用有差异($P<0.05$)。当反应温度不变而反应时间增加时, 样品感官评分呈先增加后显著降低趋势; 当反应时间不变而反应温度增加时, 样品感官评分呈先增加后缓慢降低趋势。由图 7(b)可看出, 木糖添加量(C)与反应时间(B)的坡度最陡峭, 且等高线椭圆特征明显, 表明木糖添加量(C)与反应时间(B)发生改变时对样品感官评分的响应灵敏程度高($P<0.001$)。当木糖添加量(C)与反应时间(B)分别保持不变时, 随着木糖添加量(C)与反应时间(B)的分别增加, 样品感官评分均呈现出先显著增加后又显著降低的趋势。综上所述, 木糖添加量(C)与反应时间(B)的交互作用最为明显, 其次是反应温度(A)与反应时间(B)的交互作用, 与表 4 结果一致。

通过拟合方程及响应面分析得出的最佳反应条件为: 反应温度 126.38 $^{\circ}\text{C}$, 反应时间为 39.37 min, 木糖添加量为 5.04%, 甘氨酸添加量为 2.55%, 在此条件下, 感官评分为 74.83。考虑到实际操作的可性, 将反应工艺调整为: 反应温度 126 $^{\circ}\text{C}$, 反应时间为 39 min, 木糖添加量为 5%, 甘氨酸添加量为 2.6%, 在此条件下重复三次验证实验, 实测感官评分为 75.11 ± 0.53 , 与预测值 74.83 分无显著性差异, 证明了该模型的可行性。

2.4 添加江蓠对咸味香精呈味特性的影响

由电子舌雷达图 8(a)可知, 美拉德反应可以提升咸味香精咸味和鲜味, 降低苦味, 且江蓠咸味香精鲜味最明显, 苦味最弱, 这可能是因为疏水性氨基酸和苦味肽、鲜味肽经热反应降解, 导致苦味降低, 鲜味提升^[38], 表明美拉德反应可以改善咸味香精整体风味^[39]。由咸味香精主成分分析图 8(b)可知, PC1 和 PC2 累计贡献率为 81.2%, 能反映美拉德反应前后样品的绝大部分信息。苦味和丰富度与 PC1 呈正相关, 咸味和鲜味与 PC1 呈负相关, 呈味基料、咸味香精、江蓠呈味基料、江蓠咸味香精与对照组(0.5% 盐+1% 谷氨酸钠)的呈味特征可以区分但存在部分重叠。说明了美拉德反应对咸味香精的呈味特征有影响, 且呈味基料、咸味香精、江蓠呈味基料与江蓠咸味香精之间的呈味特征不同。

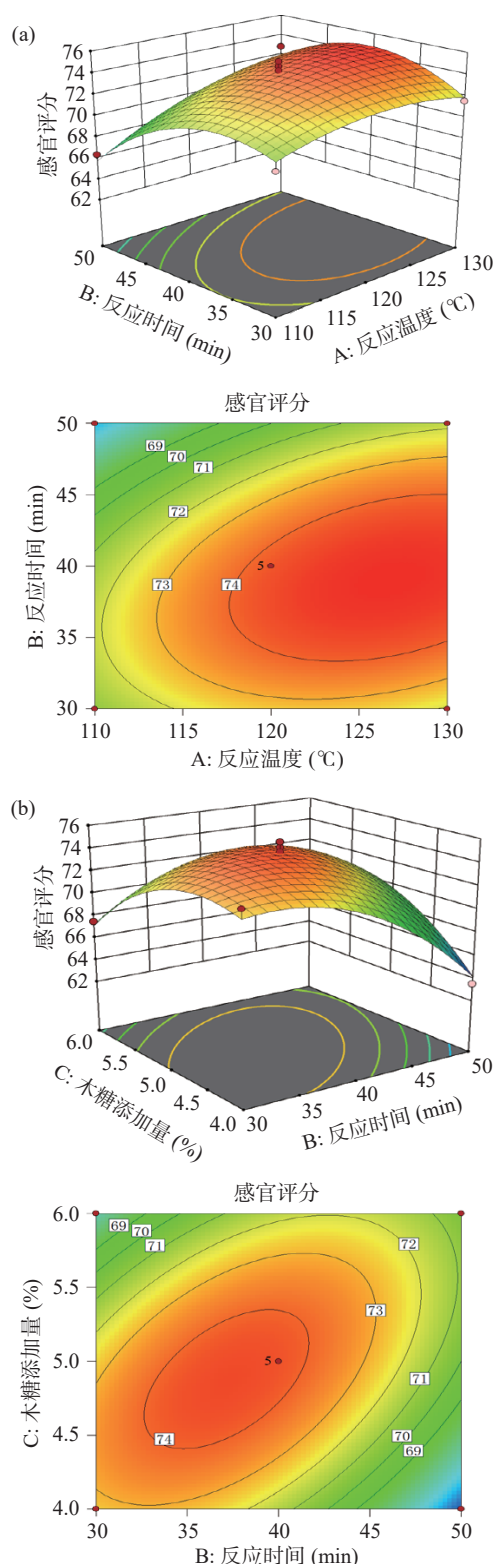


图 7 反应温度与反应时间(a)、木糖添加量与反应时间(b)对样品感官评分影响的响应面和等高线图

Fig.7 Response surface and contour plots of the effect of reaction temperature versus reaction time (a) and xylose addition versus reaction time (b) on the sensory score of samples

2.5 添加江蓠对咸味香精风味特性的影响

2.5.1 电子鼻分析

由电子鼻雷达图 9(a)可知, 美拉德反应后咸味香精的 W1W(硫化物)和 W5S(氮氧化合物)的响应值较高, 美拉德反应可以提高咸味香

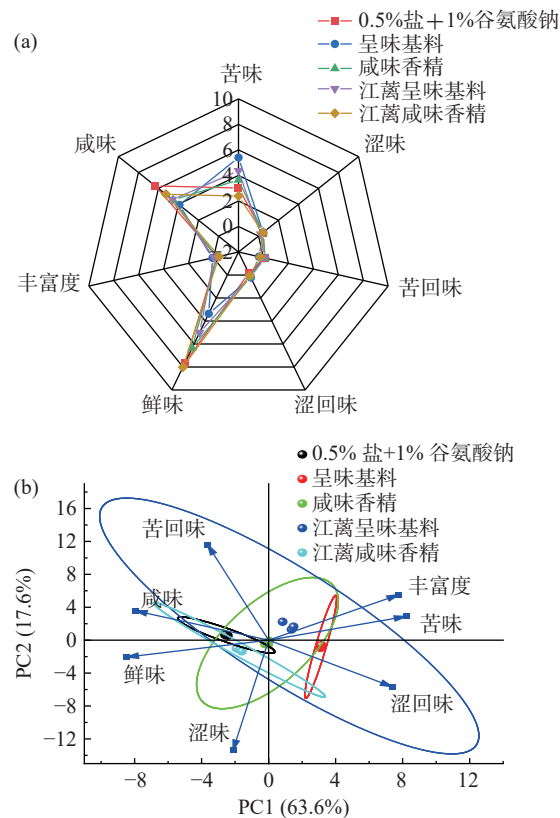


图 8 咸味香精的电子舌雷达图(a)和主成分分析图(b)

Fig.8 Electronic tongue radar diagram (a) and principal component analysis diagram (b) of salty flavoring

精硫化物、氮氧化合物含量,且江蓠咸味香精硫化物、氮氧化合物含量较咸味香精高。由 PCA 主成分分析图 9(b)可知,第一主成分和第二主成分的累计贡献率为 93.1%,包含了样品大部分信息。由图可知,美拉德反应前后呈味基料与咸味香精的香气差异主要体现在 PC1 上。

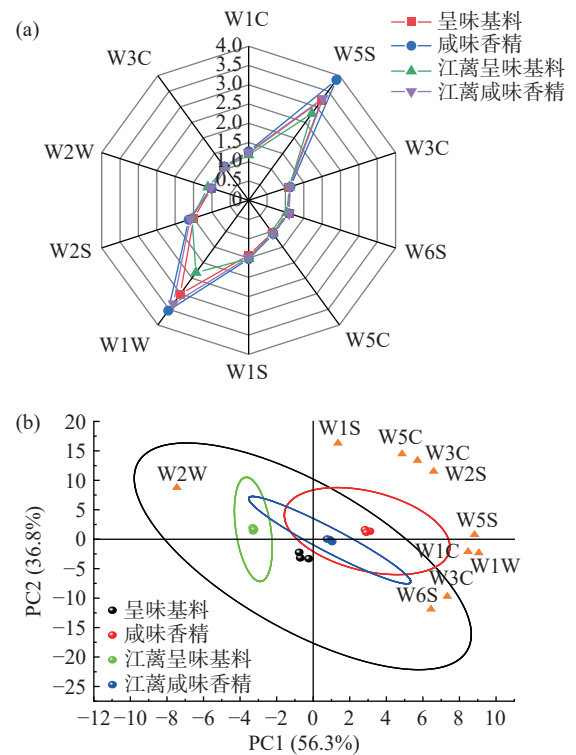


图 9 咸味香精的电子鼻雷达图(a)和主成分分析图(b)

Fig.9 Electronic nose radar diagram (a) and principal component analysis diagram (b) of salty flavoring

2.5.2 SPME-GC-MS 分析 样品风味特性与挥发性化合物种类与含量有关。如表 5 所示,4 个样品中共鉴定出 122 种挥发性化合物,包括 4 种吡啶类、21 种吡嗪类、9 种醇类、3 种酚类、7 种呋喃类、3 种腈类、3 种硫化物、15 种醛类、酸类 22 种、酮类 21 种、酯类 10 种、其他类 4 种。美拉德反应可以丰富食品风味,其产物可呈现不同的风味特征,显著改

表 5 呈味基料与咸味香精的挥发性风味物质分析

Table 5 Volatile compounds detected in flavor base material and salty flavoring

中文名称	保留指数RI	含量(μg/μL)			
		呈味基料	咸味香精	江蓠呈味基料	江蓠咸味香精
吡啶	1164	—	435.56±33.67	—	—
2-乙酰基吡啶	1576	—	—	41.11±43.96 ^a	18.33±1.44 ^b
2,4,6-三甲基吡啶	1355	—	38.97±9.67 ^a	—	16.07±1.54 ^b
3,5-二甲基吡啶	1395	—	—	—	8.96±1.25
(E)-2-甲基-5-(1-丙烯基)吡嗪	1689	—	—	26.09±3.2 ^a	26.11±5.55 ^a
1-甲基吡咯并[1,2-a]吡嗪	1972	—	41.2±5.69	—	—
2,5-二甲基-3-异丙基吡嗪	1445	—	177.83±16.79 ^a	—	86.32±12.06 ^b
2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	1421	—	2059.95±60.99 ^a	65.49±6.55 ^b	—
2-异丙基吡嗪	1329	—	63.87±11.18 ^a	45.79±11.47 ^b	23.73±4.59 ^c
2-甲基-3-异戊基吡嗪	1389	30.79±1.61 ^c	245.15±13.71 ^a	—	94.37±12.27 ^b
吡嗪	1189	79.25±9.74 ^c	134.2±15.72 ^b	174.67±19.41 ^a	167.18±10.31 ^a
2,3-二甲基吡嗪	1321	—	92.41±6.65 ^{ab}	73.69±9.14 ^c	110.04±25.88 ^a
2,5-二甲基吡嗪	1299	257.73±23.12 ^d	700.01±50.08 ^a	392.85±46.81 ^c	602.46±73.44 ^b
2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)吡嗪	1634	—	—	—	23.05±4.24
2,6-二乙基吡嗪	1439	—	561.4±26.39 ^b	31.96±8.35 ^c	1012.44±175.98 ^a
2,6-二甲基吡嗪	1305	293.8±25.63 ^b	559.92±52.12 ^a	552.15±81.69 ^a	578.12±40.01 ^a
2-乙烯基-6-甲基吡嗪	1463	—	26.14±4.6 ^a	—	11.28±3.66 ^b

续表 5

中文名称	保留指数RI	含量(μg/μL)			
		呈味基料	咸味香精	江蓠呈味基料	江蓠咸味香精
2-乙基-5-甲基吡嗪	1369	102.65±11.31 ^c	363.54±18.39 ^b	—	494.83±44.24 ^a
2-乙基-6-甲基吡嗪	1362	66.02±4.9 ^c	210.4±6.64 ^a	135.83±18.95 ^b	214.5±54.07 ^a
3,5-二乙基-2-甲基-吡嗪	1490	—	42.87±6.0 ^b	—	51.1±13.16 ^a
2-乙,烯哌嗪	1411	—	—	20.93±2.56	—
2-乙基吡嗪	1311	84.03±8.03 ^b	142.01±13.5 ^a	167.08±21.44 ^a	151.87±35.34 ^a
2-甲基吡嗪	1243	371.12±37.3 ^c	563.76±61.45 ^b	718.61±78.79 ^a	570.31±39.7 ^b
2,3,5,6-四甲基吡嗪	1452	—	77.33±7.01 ^b	—	136.95±34.52 ^a
2,3,5-三甲基吡嗪	1382	103.16±12.14 ^c	409.63±22.9 ^a	213.38±24.23 ^b	472.16±66.3 ^a
1-辛烯-3-醇	1448	781.58±100.59	—	—	—
异丁醇	1078	—	—	28.26±5.14	—
3-甲硫基丙醇	1739	—	—	166.71±39.58 ^b	249.29±37.06 ^a
3-呋喃甲醇	1648	1230.99±176.24 ^a	1194.88±171.42 ^a	1031.59±114.63 ^a	1051.71±201.43 ^a
乙醇	931	59.03±9.43 ^c	231.07±16.12 ^a	138.16±39.56 ^b	—
呋喃醇	1989	—	—	—	43.26±1.55
甲醇	901	—	440.97±2.09 ^a	—	359.41±23.43 ^b
仲辛醇	1419	1745.7±373.34 ^a	1126.66±140.77 ^b	—	1740.4±305.86 ^a
苯乙醇	1939	—	—	254.45±47.43 ^b	356.97±29.05 ^a
苯酚	1961	—	—	40.04±20.35	—
邻甲氧基苯酚	1822	195.51±20.31 ^a	131.47±11.55 ^b	132.78±10.64 ^b	53.72±1.88 ^c
邻甲酚	1959	157.53±19.7 ^b	236.57±29.16 ^a	—	—
2-丙酰呋喃	1546	106.75±10.08 ^a	53.5±8.24 ^b	26.64±3.30 ^c	—
2,5-二甲酰基呋喃	1580	36.68±17.48	—	—	—
5-甲基-2-乙酰基呋喃	1585	34.46±5.78	—	—	—
2,3-苯并呋喃	1479	61.79±13.89 ^a	43.51±4.29 ^a	—	—
2-乙酰基呋喃	1475	359.27±34.05 ^a	221.53±9.36 ^b	162.93±14.15 ^c	62.67±3.09 ^d
2-戊基呋喃	1211	—	25.49±7.32 ^a	—	22.95±4.77 ^a
2-苯基呋喃	1819	151.19±16.85 ^a	145.3±11.60 ^a	66.62±3.34 ^b	48.11±6.8 ^b
1-甲基-1H-吡咯-2-乙腈	1621	—	—	—	37.61±6.25
苯乙腈	1890	251.01±40.15 ^b	121.11±8.92 ^c	308.06±21.56 ^a	86.6±5.79 ^c
4-乙酰氨基苯乙腈	2073	—	—	—	15.55±1.67
二甲基二硫醚	1057	—	29.26±5.90	—	—
二甲基三硫醚	1358	53.28±9.82 ^b	79.27±1.58 ^a	—	—
噻唑	1226	—	—	30.79±1.33	—
5-氨基吡啶	2065	—	—	—	19.22±2.83
1,4,6-甲烯-1H-2,5-二氧杂环戊并茚	1873	90.29±18.56	—	—	—
2-乙酰基吡咯	1931	517.9±55.54 ^a	418.79±87.9 ^a	116.48±10.47 ^b	91.73±14.03 ^b
均三甲苯	1313	—	—	24.36±0.3	—
2-吡咯甲醛	1982	546.35±74.88 ^a	137.42±19.15 ^{bc}	194.16±16.73 ^b	62.53±3.83 ^c
1-乙基-1H-吡咯-2-甲醛	1582	40.81±14.92	—	—	—
5-甲基呋喃醛	1543	1039.06±87.45 ^a	26.76±1.5 ^c	322.95±27.41 ^b	24.16±1.77 ^c
(E)-2-壬烯醛	1510	—	—	—	12.22±2.69
3-糠醛	1433	2705.13±183.38 ^a	622.04±39.52 ^b	486.88±69.2 ^{bc}	569.74±69.69 ^{bc}
5-甲基-2-噻吩甲醛	1776	—	—	135.5±67.93	—
苯甲醛	1496	793.8±61.84 ^a	53.12±9.24 ^d	654.11±51.32 ^b	160.88±16.31 ^c
2,4-二甲基苯甲醛	1781	173.91±23.58 ^a	—	90.18±38.42 ^b	—
苯乙醛	1613	471.57±29.87	—	—	—
2-苯基巴豆醛	1894	80.75±13.58 ^a	—	42.85±4.17 ^b	—
2-甲基丁醛	906	517.14±185.23	—	—	—
5-甲基-2-异丙基-2-己烯醛	1337	—	27.59±2.34	—	—
5-甲基-2-苯基-2-己烯醛	1988	175.84±36.47 ^a	76.74±10.7 ^b	39.71±1.07 ^c	—
4-甲基-2-苯基-2-戊烯醛	1905	54.18±10.7	—	—	—
3-甲硫基丙醛	1431	—	—	199.15±18.83	—
十七烷酸	2524	—	135.31±12.68	—	—

续表 5

中文名称	保留指数RI	含量(μg/μL)			
		呈味基料	咸味香精	江蕙呈味基料	江蕙咸味香精
4-己基-2,5-二氧化呋喃-3-乙酸	2059	288.6±45.44 ^a	—	69.08±4.78 ^b	—
4-羟基-7-甲基-1,8-萘啉-3-羧酸	2020	—	—	—	16.43±3.48
(9E)-9-十八碳烯酸	2142	—	—	—	226.67±98.16
9-十八碳烯酸	2122	—	—	234.61±12.32 ^a	183.16±8.56 ^b
乙酸	1405	4143.51±362.46 ^a	—	605.3±41.37 ^b	49.5±2.88 ^c
苯甲酸	2374	43.42±2.93	—	—	—
丁酸	1592	101.34±10.59 ^a	—	41.79±12.6 ^b	—
异戊酸	1633	781.55±77.86 ^a	—	211.87±21.36 ^b	—
巴豆酸	1731	110.3±11.68	—	—	—
甲酸	1467	28.33±1.87	—	—	—
庚酸	1908	45.54±6.87	—	—	—
己酸	1804	137.04±19.75 ^a	—	33.76±3.46 ^b	—
癸酸	2220	41.2±13.43	—	—	—
十八烷酸	2171	1050.81±102.7 ^b	1380.69±154.42 ^a	448.94±100.79 ^c	238.67±12.87 ^d
辛酸	2012	104.27±14.5 ^a	—	46.61±1.07 ^b	—
油酸	2117	—	264.37±25.45 ^a	—	258.38±32.91 ^a
3-甲基戊酸	1753	44.08±7.36	—	—	—
4-甲基戊酸	1763	257.41±37.2 ^a	—	43.72±3.45 ^b	—
丙酸	1501	45.19±5.23 ^a	—	35.4±3.17 ^b	—
2-甲基丙酸	1532	164.68±17.5 ^a	—	152.02±13.29 ^a	—
肉豆蔻酸	2644	80.23±10.67 ^a	81.86±4.72 ^a	51.83±4.76 ^b	33.85±4.90 ^c
1-(1H-吡唑-1-基)-2-丙酮	1489	57.45±13.53	—	—	—
2,2,6-三甲基-1,4-环己酮	1745	—	—	52.33±5.74 ^b	276.01±34.35 ^a
1-苯基-1-戊酮	1622	81.87±7.25 ^a	32.05±5.65 ^b	—	—
2-庚酮	1165	—	—	—	42.65±8.25
5,6-二氢-6-甲基-2H-硫吡喃-3(4H)-酮	1718	36.94±7.18 ^a	—	36.11±3.67 ^a	—
2-壬酮	1364	112.54±19.43 ^a	115.45±21.24 ^a	60.05±5.68 ^b	67.46±7.69 ^b
2-辛酮	1263	—	—	—	47.86±3.76
羟基丙酮	1277	—	133.48±5.61 ^b	50.86±0.03 ^c	286.74±39.08 ^a
4-羟基-5-甲基-3-呋喃酮	2070	—	—	16.29±2.39	—
2,6-二甲基-3-庚酮	1253	48.25±7.21 ^a	33.66±5.36 ^b	—	35.13±5.98 ^b
3-壬烯-2-酮	1390	—	—	109.94±5.79	—
3-辛酮	1234	196.5±40.21 ^b	—	290.59±20.45 ^a	37.84±4.36 ^c
5-甲基-4-己烯-3-酮	1941	—	—	18.72±2.55 ^b	833.4±67.82 ^a
4-甲基-2(H)-呋喃酮	1851	—	—	—	9.94±1.06
苯基丙酮	1694	52.97±7.48 ^a	36.08±4.64 ^b	—	—
3-丁基环己酮	1530	—	—	23.63±2.98 ^a	18.45±1.93 ^a
2-羟基环十五烷酮	2309	—	30.95±1.84 ^b	—	47.83±7.31 ^a
3-丁基环戊酮	1558	34.87±0.82	—	—	—
1-(3,5-二甲基吡嗪基)乙酮	1659	—	—	—	35.5±2.25
2,2-二甲基-5-(1-甲基丙基)四氢呋喃	1607	373.8±105.98 ^a	293.51±1.08 ^a	—	—
异佛尔酮	1571	—	—	63.84±10.71 ^a	39.49±5.78 ^b
gamma-己内酯	1671	—	46.93±3.44	—	—
2-戊烯-4-内酯	1177	—	—	122.44±6.35	—
乙酸糠酯	1504	40.75±2.58 ^a	40.41±7.86 ^a	—	20.22±5.06 ^b
4-羟基丁酸乙酰酯	1599	78.67±9.54	—	—	—
2,2-二甲基丁酸乙烯酯	1233	—	75.99±16.25	—	—
邻苯二甲酸二乙酯	2323	37.94±4.27 ^b	33.06±7.43 ^{bc}	25.32±4.97 ^c	39.01±3.65 ^a
酞酸二甲酯	2252	—	—	16.24±2.14 ^b	28.81±1.75 ^a
2-甲氧基乙酸乙酯	1262	—	—	20.77±3.25	—
辛酸甲酯	1888	—	—	—	24.95±0.4
4-甲基戊酸甲酯	1883	617.23±100.13 ^a	—	265.43±0.82 ^b	19.76±1.50 ^c

注: 不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

善食品风味^[40]。美拉德反应前后呈味基料与咸味香精挥发性化合物含量差异如图 10(a)所示,美拉德反应前呈味基料的主要挥发性化合物为醛类、酸类,占挥发性化合物总含量的 61.01%,美拉德反应后咸味香精的主要挥发性化合物为吡嗪类、醇类,占挥发性化合物总含量的 61.66%;江蓠呈味基料的主要挥发性化合物为吡嗪类、醛类,占江蓠呈味基料挥发性化合物总含量的 45.31%,美拉德反应后的江蓠咸味香精主要挥发性化合物为吡嗪类、醇类,占江蓠咸味香精挥发性化合物总含量的 67.1%。吡嗪类物质是美拉德反应产物的主要挥发性风味化合物^[41]。吡嗪类化合物是两种咸味香精主要挥发性化合物,江蓠咸味香精体系烷基吡嗪含量较高,有助于江蓠咸味香精肉香味、坚果味、烤香味的形成^[42]。醛类物质具有较低的阈值,其在美拉德反应之后含量均下降。醇类物质在美拉德反应后含量均上升,酸类、酯类物质均下

降,但由于醇类、酯类、酸类阈值较高,对两种咸味香精的贡献较小,但它们对协调咸味香精的整体风味有重要作用^[43]。根据图 10(b)可知,咸味香精含 57 种风味物质,江蓠咸味香精含 66 种风味物质,说明添加江蓠可以增加咸味香精的风味物质。

变量投影重要度(VIP)是评价变量贡献度的指标,根据图 10(c)可知,在 2 种咸味香精共筛选出 2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、十八烷酸、5-甲基-4-己烯-3-酮、仲辛醇、吡啶、2,6-二乙基吡嗪、苯乙醇、2-乙酰基吡咯、2,2-二甲基-5-(1-甲基丙基)四氢呋喃、2,2,6-三甲基-1,4-环己酮、3-甲硫基丙醇、邻甲酚、乙醇、(9E)-9-十八碳烯酸、9-十八碳烯酸、3-呋喃甲醇、2-乙酰基呋喃、羟基丙酮、2-甲基-3-异戊基吡嗪、十七烷酸等 20 种 VIP>1 的挥发性风味物质,这可能是导致咸味香精与江蓠咸味香精风味差异的主要物质。

3 结论

本研究以江蓠呈味基料为原料,通过外源添加木糖、甘氨酸进行美拉德反应工艺优化,确定制备江蓠咸味香精最优工艺条件为:反应温度 126 ℃,反应时间为 39 min,木糖添加量为 5%,甘氨酸添加量为 2.6%,在此条件下得到的江蓠咸味香精感官评分为 75.11±0.53。江蓠呈味基料经美拉德反应后咸鲜味提升,苦味降低;添加江蓠可以显著提升咸味香精吡嗪类、醇类物质含量,赋予咸味香精浓郁的肉香味,并丰富咸味香精整体风味,表明添加江蓠对改善咸味香精滋味和风味有影响。本研究发现江蓠呈味基料通过美拉德反应处理后不仅可产生浓郁肉香味,同时鲜味也明显增强,但尚未涉及美拉德反应提升江蓠咸味香精鲜味特性的机制研究,在未来可进一步采用元素跟踪、UPLC-MS 等技术对其增鲜机制进行深入研究。综上,本研究以江蓠呈味基料为原料结合美拉德反应制备了一款肉香味浓郁,鲜味明显的江蓠咸味香精,该香精在调味料、菜肴应用上、烧烤食品等方面具有潜在的应用前景,也为以海藻为原料制备海藻基咸味香精提供理论参考,对提高江蓠的附加值具有重要意义。

© The Author(s) 2025. 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] 张淑鑫. 三种藻类饵料对中间球海胆生长、性腺品质及硫酸软骨素积累的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023. [ZHANG S X. Effects of three algal baits on the growth, gonad quality and chondroitin sulfate accumulation of sea urchins[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023.]
- [2] 羌玺, 王旭雷, 牛建峰, 等. 江蓠属不同种质资源中藻胆蛋白和琼胶含量差异及综合提取工艺研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(11): 107-115. [QIANG X, WANG X L, NIU J F, et al. Differences in the contents of algal bile protein and agaric acid in different germplasm resources of *Gracilaria* spp. and the comprehensive ex-

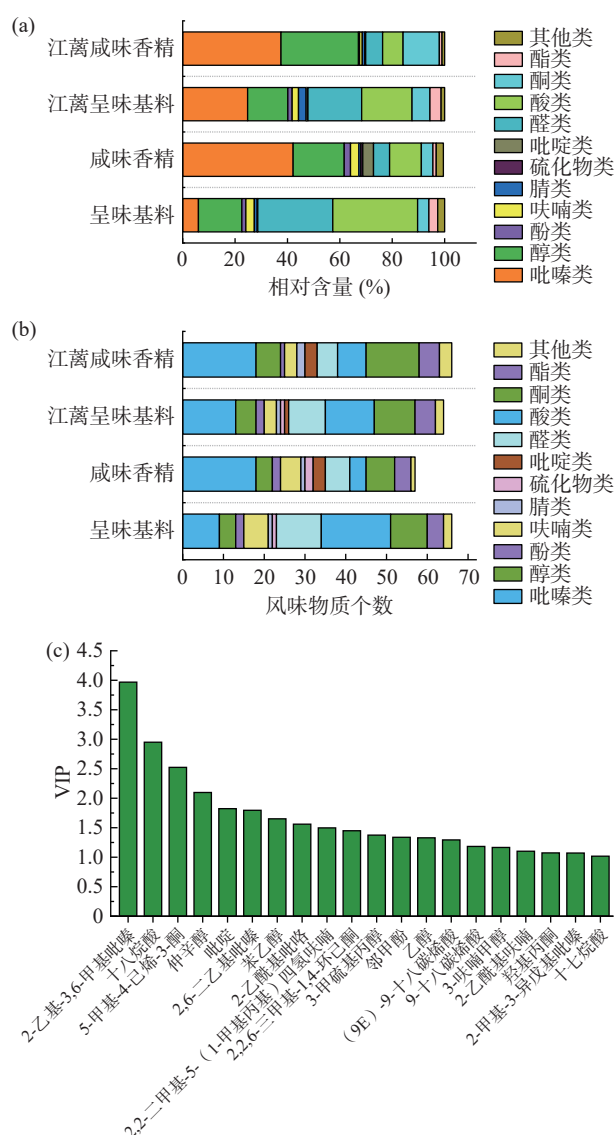


图 10 呈味基料与咸味香精的挥发性风味物质相对含量(a)与风味物质个数(b)、咸味香精与江蓠咸味香精 VIP 图(c)
Fig.10 Relative content (a) and number (b) of volatile flavor compounds in flavor base material and salty flavoring, salty flavoring and *Gracilaria* salty flavoring VIP map (c)

- traction process[J]. *Marine Science*, 2022, 46(11): 107–115.]
- [3] BLEAKLEY S, HAYES M. Algal proteins: Extraction, application, and challenges concerning production[J]. *Foods*, 2017, 6(5): 33–39.
- [4] KAMALESH R, VIJAYASRI K, THIRUVENGADAM S. Seaweeds, an aquatic plant-based protein for sustainable nutrition - A review[J]. *Future Foods*, 2022(5): 100142.
- [5] DAMAN R, JEFF C, SCOTT E, et al. Seaweed proteins are nutritionally valuable components in the human diet[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2022, 116(4): 855–861.
- [6] LONG X S, HU X, LIU S C, et al. Insights on preparation, structure and activities of *Gracilaria lemaneiformis* polysaccharide[J]. *Food Chemistry: X*, 2021, 12: 100153.
- [7] LIU Q M, YANG Y, MALEKI S J, et al. Anti-food allergic activity of sulfated polysaccharide from *Gracilaria lemaneiformis* is dependent on immunosuppression and inhibition of p38 MAPK[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(22): 4536–4544.
- [8] COSTA L E C, BRITO T V, DAMASCENO R O S, et al. Chemical structure, anti-inflammatory and antinociceptive activities of a sulfated polysaccharide from *Gracilaria intermedia* algae[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 159: 966–975.
- [9] SONG N, TAN C, HUANG M G, et al. Transglutaminase cross-linking effect on sensory characteristics and antioxidant activities of Maillard reaction products from soybean protein hydrolysates[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(1): 144–151.
- [10] 侯莉, 梁晶晶, 赵健, 等. pH 值对“半胱氨酸-木糖-甘氨酸”体系肉香味形成的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(8): 129–138. [HOU L, LIANG J J, ZHAO J, et al. Influence of pH on the formation of meat flavor in "cysteine-xylose-glycine" system[J]. *Food Science*, 2017, 38(8): 129–138.]
- [11] 郑家伦, 李晨, 陆利霞, 等. 美拉德反应制备咸味香精研究进展[J]. *中国调味品*, 2016, 41(12): 129–133. [ZHENG J L, LI C, LU L X, et al. Progress in the preparation of savory flavor by melad reaction[J]. *China Flavorings*, 2016, 41(12): 129–133.]
- [12] 穆红, 罗瑞明, 李亚蕾. 热处理对牛骨酶解液美拉德反应产物呈味物质及挥发性成分的影响[J]. *中国食品学报*. 2023: 181–191. [MU H, LUO R M, LI Y L. Influence of heat treatment on the flavor presenting substances and volatile components of the enzyme hydrolysis products of bovine bone[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*. 2023: 181–191.]
- [13] ZHENG Z L, ZHANG L H, ZHANG M, et al. Maillard reaction products of pea protein hydrolysate as a flavour enhancer for beef flavors: Effects on flavor and physicochemical properties[J]. *Food Chemistry*, 2023(417): 135769.
- [14] 卢苙虹, 崔春, 赵谋明. 啤酒酵母抽提物制备非肉源肉香型香精及模糊数学评价[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(1): 57–62. [LU J H, CUI C, ZHAO M M. Preparation of non-meat-derived meat flavors from brewer's yeast extracts and fuzzy mathematical evaluation[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2011, 37(1): 57–62.]
- [15] 马雪平, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于 GC-MS、DSA 结合 PLSR 研究羊脂处理方式对热反应体系风味形成的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 194–201. [MA X P, ZHAN P, TIAN H L, et al. Study on the effect of mutton fat treatment on flavor formation in thermo reactive system based on GC-MS, DSA combined with PLSR[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 194–201.]
- [16] LAOHAKUNJIT N, SELAMASSAKUL O, KERDCHO-ECHUEN O. Seafood-like flavour obtained from the enzymatic hydrolysis of the protein by-products of seaweed (*Gracilaria* sp.)[J]. *Food Chemistry*, 2014, 158: 162–170.
- [17] HUANG X H, WANG P, XUE W L, et al. Preparation of meaty flavor additive from soybean meal through the Maillard reaction[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 19: 100780.
- [18] ERIC K, RAYMOND L V, HUANG M, et al. Sensory attributes and antioxidant capacity of Maillard reaction products derived from xylose, cysteine and sunflower protein hydrolysate model system[J]. *Food Research International*, 2013, 54(2): 1437–1447.
- [19] 吴瑞婕, 卢方云, 黄瑾, 等. 美拉德反应制备动物源副产物调味品的研究进展[J]. *肉类研究*, 2021, 35(11): 50–56. [WU Y J, LU F Y, HUANG J, et al. Progress in the preparation of animal-derived by-product flavorings by the Merad reaction[J]. *Meat Research*, 2021, 35(11): 50–56.]
- [20] JENSEN S, ÓLAFSDÓTTIR A, EINARSDÓTTIR B, et al. New wave of flavours – On new ways of developing and processing seaweed flavours[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2022, 29: 100566.
- [21] 潘江球, 李思东. 江蓠的资源开发利用新进展[J]. *热带农业科学*, 2010, 30(10): 47–50, 89. [PAN J Q, LI S D. New progress in resource exploitation and utilization of *Gracilaria*[J]. *Tropical Agricultural Science*, 2010, 30(10): 47–50, 89.]
- [22] 李来好, 李刘冬, 杨贤庆, 等. 江蓠方便食品的加工工艺及毒理的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2003(7): 10–13. [LI L H, LI L D, YANG X Q, et al. Processing and toxicology of *Gracilaria* spp. convenience food[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2003(7): 10–13.]
- [23] 胡振强, 刘良忠, 常宪辉, 等. 江蓠挂面的研制及其品质评价[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(7): 94–98. [HU Z Q, LIU L Z, CHANG X H, et al. Development and quality evaluation of *Gracilaria japonica* noodles[J]. *Grain and oil*, 2023, 36(7): 94–98.]
- [24] KAZIR M, ABUHASSIRA Y, ROBIN A, et al. Extraction of proteins from two marine macroalgae, *Ulva* sp. and *Gracilaria* sp., for food application, and evaluating digestibility, amino acid composition and antioxidant properties of the protein concentrates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 194–203.
- [25] 王丽娜, 汪卓, 高原, 等. 添加江蓠对酱油制曲及成曲品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(10): 40–47. [WANG L N, WANG Z, GAO Y, et al. Effects of the addition of *Edelweiss* on the quality of soy sauce brewing and brewing[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(10): 40–47.]
- [26] ZHANG N N, FAN D M, ZHAO Y L, et al. Dielectric loss mediated promotion of microwave heating in the Maillard reaction[J]. *LWT*, 2019(101): 559–566.
- [27] XIA B, NI Z J, HU L T, et al. Development of meat flavors in peony seed-derived Maillard reaction products with the addition of chicken fat prepared under different conditions[J]. *Food Chemistry*, 2021(363): 130276.
- [28] 路怀金, 刘通讯, 赵谋明, 等. 2 株米曲霉的特色酶系对酱油理化指标及品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(5): 230–237. [LU H J, LIU T X, ZHAO M M, et al. Effects of characteristic enzyme systems of two strains of *Aspergillus oryzae* on the physicochemical indexes and quality of soy sauce[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(5): 230–237.]
- [29] 罗美燕. 虾酱快速发酵工艺的优化及微生物多样性和风味分析研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022. [LUO M Y. Optimization of rapid fermentation process and analysis of microbial diversity and flavor of shrimp paste[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean

University, 2022.]

[30] 袁林, 查锋超, 姚烨, 等. 牡蛎酶解产物与还原糖美拉德反应工艺优化及挥发性风味物质分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(24): 1-9. [YUAN L, CHA F C, YAO Y, et al. Process optimization of oyster enzyme digestion products and reducing sugar meridian reaction and analysis of volatile flavor substances[J]. *Food Chemistry*, 2015, 36(24): 1-9.]

[31] HAN J R, YAN J N, SUN S G, et al. Characteristic antioxidant activity and comprehensive flavor compound profile of scallop (*Chlamys farreri*) mantle hydrolysates-ribose Maillard reaction products[J]. *Food Chemistry*, 2018, 261: 337-347.

[32] 刘美娇, 黎铸毅, 陈秋翰, 等. 酶解-美拉德反应制备金鲳鱼调味基料的工艺研究及风味分析[J]. *中国调味品*, 2024, 49(6): 83-90, 118. [LIU M J, LI Z Y, CHEN Q H, et al. Study on preparation process of seasoning basic Material of trachinotus ovatus by enzymatic hydrolysis-Maillard reaction and flavor analysis[J]. *China Flavorings*, 2024, 49(6): 83-90, 118.]

[33] CAO C C, XIE J C, HOU L, et al. Effect of glycine on reaction of cysteine-xylose: Insights on initial Maillard stage intermediates to develop meat flavor[J]. *Food Research International*, 2017, 99: 444-453.

[34] 钱敏, 白卫东, 赵文红, 等. 不同氨基酸和糖对美拉德反应产物的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(13): 31-35. [QIAN M, BAI W D, ZHAO W H, et al. Effects of different amino acids and sugars on the products of the Melad reaction[J]. *Food Science*, 2016, 37(13): 31-35.]

[35] 吴靖娜, 靳艳芬, 陈晓婷, 等. 鲍鱼蒸煮液美拉德反应制备海鲜调味基料工艺优化[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 69-76. [WU J N, LE Y F, CHEN X T, et al. Optimization of preparation of seafood flavor condiment base from cooked abalone juice by Mail-

lard reaction[J]. *Food Science*, 2016, 37(22): 69-76.]

[36] 李惠芳. 大黄鱼鱼卵蛋白粉制备工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. [LI H F. Research on the preparation process of protein powder from rhubarb fish eggs[D]. Fuzhou: Agriculture and Forestry University, 2017.]

[37] CHEN W J, MA X B, WANG W J, et al. Preparation of modified whey protein isolate with gum acacia by ultrasound maillard reaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 298-307.

[38] ZHANG Z Z, ELFALLEH W, HE S D, et al. Heating and cysteine effect on physicochemical and flavor properties of soybean peptide Maillard reaction products[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 2137-2146.

[39] RHYU M R, SONG A Y, KIM E Y, et al. Kokumi taste active peptides modulate salt and umami taste[J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1198.

[40] SUN A, WU W, SOLADOYE O P, et al. Maillard reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: A review[J]. *Food Research International*, 2022(151): 110823.

[41] ZOU T T, LIU J B, SONG H L, et al. Discovery of amadori-type conjugates in a peptide maillard reaction and their corresponding influence on the formation of pyrazines[J]. *Journal of food science*, 2018, 83(6): 1588-1595.

[42] REN A, ZHANG Y, BIAN Y, et al. Pyrazines in food samples: Recent update on occurrence, formation, sampling, pretreatment and analysis methods[J]. *Food Chemistry*, 2024(430): 137086.

[43] CAI L Y, LI D M, DONG Z J, et al. Change regularity of the characteristics of Maillard reaction products derived from xylose and Chinese shrimp waste hydrolysates[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 65: 908-916.