

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80896

沙丁鱼鱼头蛋白肽脱色工艺优化 及其对风味的影响

王正明¹ 陶宁萍^{1,2} 魏文聪¹ 王逢秋¹

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: [目的] 改善酶法制备的沙丁鱼鱼头蛋白肽的色泽与风味。[方法] 利用分光光度计测出沙丁鱼鱼头蛋白肽的最佳吸收波长; 考察 3 种脱色剂添加量、脱色时间和温度对沙丁鱼鱼头蛋白肽脱色效果的影响; 通过板框过滤放大试验验证脱色剂的脱色及助滤效果。通过电子鼻、电子舌分析沙丁鱼鱼头蛋白肽脱色前后的风味变化。[结果] 沙丁鱼鱼头蛋白肽液的最佳吸收波长为 220 nm; 其最佳脱色工艺条件为活性炭添加量 1%、脱色时间 1 h、脱色温度 40 °C, 此条件下运行板框设备对蛋白肽液进行脱色, 最终板框脱色后的蛋白肽液脱色率达到 36.2%, 蛋白损失率为 8%; 醛类、氯类、胺类与酮类化合物为沙丁鱼鱼头蛋白肽液的主要气味物质; 脱色后蛋白肽液中的苦味明显降低; 苦味氨基酸比例从 72.60% 下降至 60.04%; 肌苷和次黄嘌呤两种苦味核苷酸含量由 (24.85 ± 1.14), (10.14 ± 0.77) mg/mL 分别降低到 (10.66 ± 1.60), (6.90 ± 0.47) mg/mL。[结论] 使用活性炭脱色过程中苦味氨基酸、苦味核苷酸和醛类物质的含量均有所降低, 可以有效改善沙丁鱼鱼头蛋白肽液的风味, 增强其鲜味和甜味, 同时降低苦味成分含量。

关键词: 沙丁鱼头; 蛋白肽; 活性炭; 脱色工艺; 风味

Optimization of decolorization process and its effect on flavor of sardine fish head protein peptide

WANG Zhengming¹ TAO Ningping^{1,2} WEI Wencong¹ WANG Fengqiu¹

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China)

Abstract: [Objective] To improve the color and flavor of enzymatically prepared sardine fish head protein peptide (SFHP). [Methods] The optimal absorption wavelength of the SFHP solution was determined using a spectrophotometer. The effects of three decolorizing agents, including their dosage, decolorization time, and temperature, on the decolorization efficiency of SFHP were investigated. A plate-and-frame filtration pilot-scale test was conducted to validate the decolorizing and filtration-enhancing effects of the decolorizing agents. Flavor profiles before and after decolorization were analyzed using an electronic nose (E-nose) and electronic tongue (E-tongue). [Results] The optimal absorption wavelength of the SFHP solution was 220 nm. The optimal decolorization conditions were determined as 1% activated carbon dosage, 1 h-decolorization time, and 40 °C. Under these conditions, the decolorization rate reached 36.2%, with a protein loss rate of 8%. Key odor-active compounds in SFHP included aldehydes, chlorides, amines, and ketones. After decolorization, the bitterness of the SFHP was significantly reduced. The proportion of bitter amino acids decreased from 72.60% to 60.04%, and the content of bitter nucleotides (inosine and hypoxanthine) decreased from (24.85 ± 1.14) mg/mL and (10.14 ± 0.77) mg/mL to (10.66 ± 1.60) mg/mL and (6.90 ± 0.47) mg/mL, respectively. [Conclusion] The use of activated carbon for decolorization effectively reduced the levels of bitter amino acids, bitter nucleotides, and aldehyde compounds in SFHP. This approach effectively improved the SFHP flavor by enhancing the

基金项目: 校企合作项目(编号: D-8011-21-0005)

通信作者: 陶宁萍(1968—), 女, 上海海洋大学教授, 博士生导师, 教授。E-mail: npta@shou.edu.cn

收稿日期: 2024-09-02 改回日期: 2025-02-18

引用格式: 王正明, 陶宁萍, 魏文聪, 等. 沙丁鱼鱼头蛋白肽脱色工艺优化及其对风味的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 161-169.

Citation: WANG Zhengming, TAO Ningping, WEI Wencong, et al. Optimization of decolorization process and its effect on flavor of sardine fish head protein peptide[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 161-169.

umami and sweet flavors while decreasing the bitterness.

Keywords: sardine fish head; protein peptide; activated carbon; decolorization process; flavor

沙丁鱼 (*Sardina pilchardus*) 生长快、产量大、价格低、蛋白含量高,可作为优质的蛋白及蛋白肽生产原料^[1]。鱼类蛋白中含有丰富的赖氨酸、蛋氨酸和苏氨酸,能够增强免疫力^[2]、降血压^[3]、抗氧化^[4]、抗疲劳^[5]、降血脂^[6]、治疗胰岛素抵抗^[7]与提高记忆^[8]。

酶解法制备的鱼蛋白肽液可能呈棕黄色甚至褐色,会引起消费者的感官不适,需对鱼蛋白肽液进行脱色处理。常见的脱色方式主要通过化学法和物理法,化学法脱色效果往往取决于氧化剂的氧化能力,而其残留物会对样品的品质产生影响。物理法通过吸附剂与色素间的相互作用力,去除色素。活性炭吸附能力强、微孔丰富、化学性质稳定^[9],凭借其优异的吸附性能,可有效去除酶解液中的色素^[10],同时能够滤除水中的有机物,达到除味目的^[11],被广泛应用于水产品的去腥脱色^[12],但存在蛋白质损失。郭玉华等^[13]以蛋白质损失率与感官值作为考察指标,探究了活性炭对鳕鱼皮酶解液的脱色脱腥效果。因此,需对比分析不同脱色剂的效能,筛选出最佳的脱色剂种类。

研究拟以沙丁鱼头蛋白酶解液为原料,探究不同脱色剂对沙丁鱼鱼头蛋白肽液的脱色效果,使用板框设备进行大规模生产的可行性验证,并采用电子鼻、电子舌、有机酸分析、挥发性成分分析等对蛋白肽液脱色前后风味的影响,以期工业化生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与试剂

沙丁鱼头:宁波佳必可食品有限公司;

硫酸、氢氧化钠、三氯乙酸、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾等:分析纯,上海麦克林生物科技有限公司;

甲醇:色谱纯,上海麦克林生物科技有限公司;

活性炭(100目)、活性白土(100目)、硅酸镁(100目):上海源叶生物科技有限公司;

复合蛋白酶:诺维信生物技术有限公司。

1.1.2 仪器与设备

紫外可见分光光度计:UV-2450型,日本岛津公司;

全自动凯氏定氮仪:Kjeltec8400型,丹麦FOS公司;

台式高速离心机:H1850型,湘仪离心机仪器有限公司;

电子舌:ASTREE型,法国AlpHaMOS公司;

电子鼻:FOX4000型,法国AlpHaMOS公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品前处理 沙丁鱼鱼头解冻至4℃,用冻肉粉碎机切割成2~3 mm小方块,于-40℃贮藏备用。

1.2.2 酶解法制备沙丁鱼鱼头蛋白肽 称取约15.00 g样品于离心管中,加入蒸馏水搅拌均匀,90℃水浴中煮沸,冷却至56℃,添加6%复合蛋白酶酶解3 h,间隔30 min搅拌1 min。酶解结束后,以10 000×g离心20 min,去除上层粗鱼油,得到沙丁鱼鱼头蛋白肽酶解液。

1.2.3 脱色率测定 对沙丁鱼鱼头蛋白肽酶解液进行适当稀释,使200~700 nm处吸光度为0.2~1.0,通过紫外可见分光光度计对沙丁鱼鱼头蛋白肽溶液进行200~700 nm全波长扫描,确定色素的特征吸收波长。测量脱色前后肽溶液的吸光值,并按式(1)计算脱色率。

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

式中:

c ——脱色率,%;

m_1 ——脱色前吸光度值;

m_2 ——脱色后吸光度值。

1.2.4 蛋白保留率测定 按式(2)计算蛋白保留率。

$$D = \frac{m_3}{m_4} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

D ——蛋白保留率,%;

m_3 ——脱色前溶液中蛋白含量,g;

m_4 ——脱色后溶液中蛋白含量,g。

1.2.5 脱色工艺优化

(1) 脱色剂筛选:在5%脱色剂、50℃、1 h条件下,使用活性炭、活性白土和硅酸镁对沙丁鱼鱼头蛋白肽液进行脱色处理,比较添加量为1%、3%、5%、7%、9%时的脱色率,以筛选最佳脱色剂。

(2) 单因素试验:固定活性炭添加量1%、脱色温度50℃、脱色时间1 h。分别考察活性炭添加量(1%、3%、5%、7%、9%)、脱色温度(30、40、50、60、70℃)和脱色时间(0.5、1.5、2.0、2.5 h)对脱色率的影响。

1.2.6 板框设备脱色 将活性炭加入沙丁鱼鱼头蛋白肽溶液中并注入釜体,将温度升至(40±5)℃,使用桨叶转速50×g匀速搅拌后静置30 min,使用泵将待脱色样液抽入板框压滤机中,循环4~5次待滤液澄清后收集脱色液。

1.2.7 游离氨基酸分析 参照Wang等^[14]的方法并稍作修改。取0.5 mL沙丁鱼鱼头蛋白肽液与15 mL 5%的TCA溶液混合,涡旋震荡,超声静置2 h,4℃、10 000×g离心10 min,吸取5 mL上清液,调pH至2.0,定容,过0.22 μm膜,采用氨基酸自动分析仪测试。

1.2.8 电子鼻分析 参照Chen等^[15]的方法稍作修改。将1 mL样品转移到10 mL小瓶中,60℃平衡10 min,用

FOX4000传感器阵列系统进行分析。载气(过滤和干燥的空气)以2400 $\mu\text{L/s}$ 的速率注入传感器室。数据收集时间120 s,系统再次平衡时间1080 s。

1.2.9 电子舌分析 参照Liang等^[16]的方法。

1.2.10 有机酸分析 将酶解液于4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 $\times g$ 离心10 min,取上清液过0.22 μm 膜,取10 μL 滤液进行有机酸分析。在ODS-3/C₁₈柱上分离,检测波长215 nm,洗脱液为超纯水(A)、100%甲醇(B)和50 mmol/L K₂HPO₄·KH₂PO₄缓冲液(C),流速0.21 mL/min,等度洗脱10 min(5% B,95% C)。

1.2.11 呈味核苷酸分析 称取3 mL酶解液,加入10 mL 10%高氯酸溶液混匀,4 $^{\circ}\text{C}$ 离心10 min,上清液冷藏备用。沉淀与5 mL 5%高氯酸溶液混合,重复离心2~3次。调节上清液pH至5.8,静置30 min,稀释至50 mL后过滤,转入进样瓶,使用高效液相色谱仪(HPLC)分析核苷酸。

1.2.12 挥发性成分分析 参照Tan等^[17]的方法。

1.3 数据分析

所有试验重复3次,结果以平均值 \pm 标准偏差表示。使用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示数据间存在显著性差异,使用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 沙丁鱼鱼头蛋白肽溶液的色素特征吸收波长

由图1可知,沙丁鱼鱼头蛋白肽溶液在220 nm处有明显的吸收峰,确定沙丁鱼鱼头蛋白肽溶液中的色素特征吸收波长为220 nm。

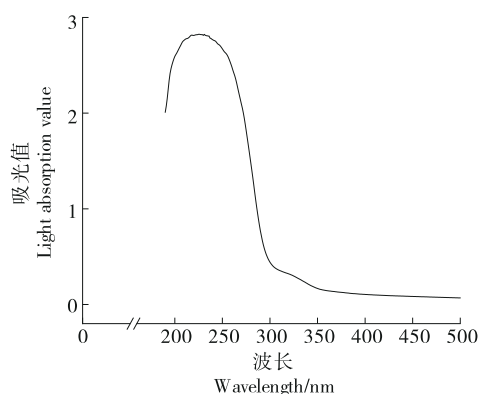


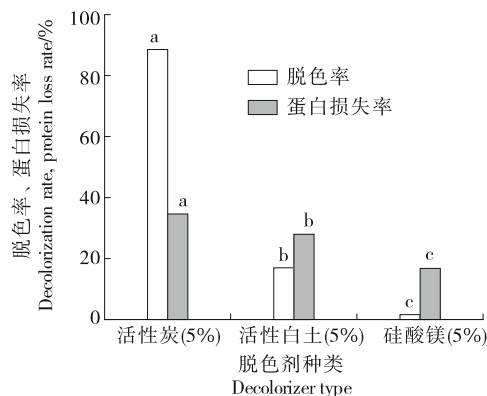
图1 酶解液的可见吸光光谱

Figure 1 Visible absorption spectra of the enzymolysis solution

2.2 脱色工艺优化

2.2.1 脱色剂的筛选 由图2可知,活性炭、活性白土、硅酸镁3种脱色剂中,活性炭的效果最好,脱色率达到88.7%,蛋白损失率为34.6%。由图3可知,3种脱色剂随着添加量的增加,脱色率提升。活性炭的脱色效果显著

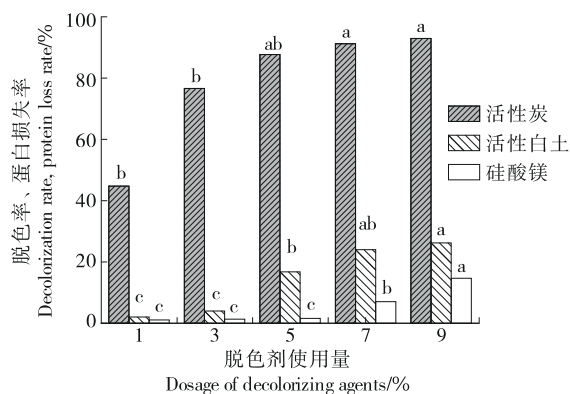
优于活性白土和硅酸镁。活性炭疏松多孔,与蛋白肽液有更大的接触面积,能够更好地吸附色素分子,提高脱色效果。当活性炭添加量为9%时,脱色率可达93.1%,显著高于其他吸附剂的。



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图2 3种脱色剂对脱色率及蛋白损失率的影响

Figure 2 Effect of three decolorizing agents on decolorization rate and protein loss



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图3 3种脱色剂添加量对沙丁鱼鱼头蛋白肽脱色率的影响

Figure 3 Effect of three decolorizing agents on the decolorization rate of sardine fish head protein peptide

2.2.2 活性炭添加量 由图4可知,当活性炭添加量为1.0%~9.0%时,随着活性炭添加量的提升,蛋白肽溶液的脱色效果明显增强,蛋白质的损失率升高。当活性炭添加量为1.0%时,蛋白损失率仅为4.7%;当活性炭添加量提升至3.0%时,脱色率上升至77.75%,蛋白损失率为22.2%。适度增加活性炭的量会扩大吸附表面积,从而提高对色素的吸附效率,脱色效果得到提升^[18]。活性炭脱色时会吸附溶液中的部分蛋白肽,增加活性炭用量,蛋白损失率会提升^[19]。因此,取活性炭添加量1.0%作为后续试验条件。

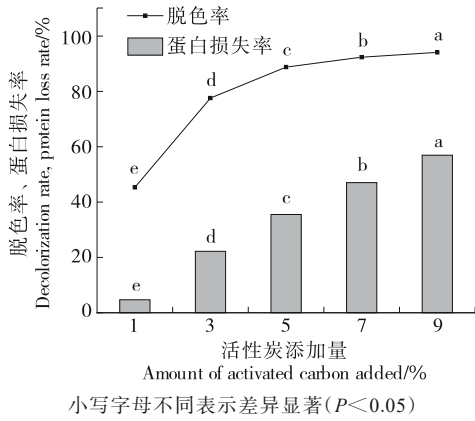


图 4 活性炭添加量对脱色率及蛋白损失率的影响

Figure 4 Effect of activated carbon addition on the decolorization rate and protein loss rate

2.2.3 脱色温度 由图 5 可知,当脱色温度为 30~40 °C 时,蛋白肽液的脱色率随着脱色温度的升高而提升;当脱色温度 > 40 °C 时,脱色率显著降低。一定温度范围内,蛋白肽液中的分子热运动加剧,导致色素分子快速扩散到活性炭的微孔结构中^[20];随着脱色温度的升高,活性炭与色素分子之间的相互作用发生变化,色素分子的运动能量增大,促进其在活性炭表面的吸附和解析达到平衡,脱色效果趋于稳定。脱色温度过高,解析概率增加,可能降低脱色效果^[21]。在 30~70 °C 下对蛋白肽液进行脱色处理,蛋白损失率均在 10% 以下,蛋白损失较少,且 40 °C 时的脱色率最高,故选用 40 °C 进行后续试验。

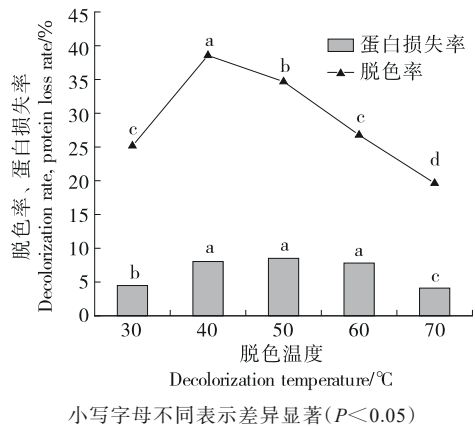


图 5 脱色温度对脱色率及蛋白损失率的影响

Figure 5 Effect of decolorization temperature on the decolorization rate and protein loss rate

2.2.4 脱色时间 由图 6 可知,当脱色时间为 0.5~2.5 h 时,沙丁鱼鱼头蛋白肽的脱色效果随着脱色时间的延长而降低;当脱色时间 > 2.0 h 时,脱色率的降低速度有所减缓。延长脱色时间会提高发生解吸的可能性,进而削弱蛋白肽液的脱色效果^[22]。在初始阶段,活性炭的吸附位

点充足,蛋白质和色素分子同时接触活性炭,发生竞争性吸附。活性炭孔隙中的小分子色素吸附不完全,部分较小的蛋白肽片段进入孔隙并被吸附。随着微孔逐渐被色素分子填充,蛋白质分子重新折叠或聚集,减少了活性位点的暴露,因相对分子质量大而无法有效进入孔隙,导致吸附率显著降低;延长脱色时间会引起色素分子的解吸,重新释放吸附位点,蛋白质分子再次被吸附到活性炭表面或孔隙中,损失率显著升高。综合考虑,选取脱色时间 1.0 h 进行后续试验。

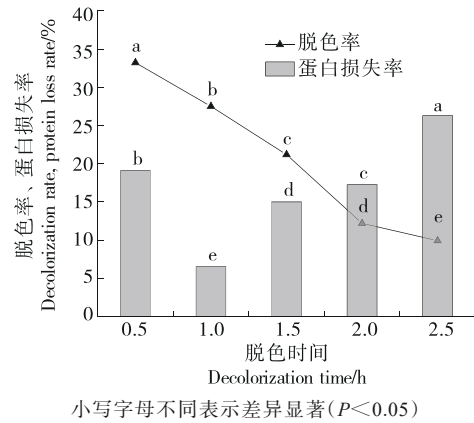


图 6 脱色时间对脱色率及蛋白损失率的影响

Figure 6 Effect of decolorization time on decolorization rate and protein loss rate

2.3 游离氨基酸分析

游离氨基酸(FAA)具有的味道以及与其他风味物质之间的相互作用能够促进食品呈现出独特的口感^[23],其组成及数量与蛋白质水解产物的滋味密切相关^[24]。由表 1 可知,经活性炭脱色处理后,蛋白肽液中的总游离氨基酸(TFAA)含量与原蛋白肽液相比显著下降($P < 0.05$),且使用板框设备进行脱色后 TFAA 含量最低,这可能是板框脱色过程中,在一定的压力下,使得活性炭的缝隙更加紧密,提高了对游离氨基酸等物质的吸附效率。经板框脱色处理后,蛋白肽溶液中的游离氨基酸含量、呈味氨基酸(DAA)含量降低,但 DAA 占比无显著变化。谷氨酸和天冬氨酸为鲜味游离氨基酸,其中谷氨酸最为常见。脱色处理后,蛋白肽液中的鲜味氨基酸比例由 7.00% 提升至 10.54%;甜味氨基酸,包括苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸,占比从 20.01% 增加至 28.83%,其中丙氨酸的占比尤为突出。缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸和精氨酸为与苦味感知相关的氨基酸。有研究^[25]表明,肽链中疏水性氨基酸残基会随着蛋白质水解暴露出来,使蛋白肽液产生苦味。脱色后蛋白肽液的苦味氨基酸占比由 72.60% 下降至 60.04%,其主要成分为组氨酸。无味氨基酸对食品风味影响较小。它们通常在食物中起到中性作用,或其味

表1 活性炭脱色对游离氨基酸含量的影响[†]

Table 1 Effect of decolorization of activated carbon on free amino acid content mg/100 g

类别	呈味氨基酸	原样	活性炭脱色	板框	
鲜味	天冬氨酸	7.12±0.16	5.12±0.41	10.13±0.13	
	谷氨酸	52.85±0.91	39.02±3.23	43.63±0.51	
	苏氨酸	29.54±0.48	21.96±1.89	26.57±0.26	
甜味	丝氨酸	19.48±0.34	14.41±1.21	0.46±0.05	
	甘氨酸	30.07±0.51	22.24±1.94	30.73±0.25	
	丙氨酸	75.31±1.36	55.59±4.91	73.43±0.59	
脯氨酸	脯氨酸	17.12±0.04	11.27±0.8	15.84±3.19	
	苦味	缬氨酸	36.64±0.42	26.96±2.26	37.19±0.28
	蛋氨酸	23.18±0.24	17.26±1.50	22.72±0.19	
苦味	异亮氨酸	19.04±0.22	14.06±1.18	18.42±0.13	
	亮氨酸	50.38±0.57	37.29±3.14	49.71±0.33	
	酪氨酸	14.52±0.32	10.08±0.57	13.80±0.15	
	苯丙氨酸	37.95±0.45	27.90±2.17	35.67±0.26	
	赖氨酸	70.43±0.81	52.07±4.20	3.79±0.02	
	组氨酸	217.86±3.90	269.4±21.58	124.63±0.97	
	精氨酸	12.35±0.19	9.30±0.79	0.25±0.01	
	无味	半胱氨酸	3.36±0.06	2.42±0.21	2.95±0.03
	鲜味游离氨基酸	59.97±1.07 ^a	44.14±3.34 ^b	53.76±0.64 ^c	
	甜味游离氨基酸	171.51±2.72 ^a	125.46±9.14 ^c	147.02±4.33 ^b	
苦味游离氨基酸	622.35±7.11 ^a	464.33±37.35 ^b	306.19±2.31 ^c		
呈味氨基酸	853.84±10.89 ^a	633.93±50.13 ^b	506.97±7.28 ^c		
总游离氨基酸	857.20±10.95 ^a	636.35±50.33 ^b	509.92±7.31 ^c		

[†] 同行字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

贡献被其他风味物质掩盖。综上,板框脱色可有效改善蛋白肽液的风味,一定程度上提升鲜味与甜味,且具有脱苦作用。

2.4 电子鼻分析

由图7可知,蛋白肽液脱色前后的响应值区域未产生重叠现象,起到了很好的区分作用。主成分PC1、PC2贡献率分别为83.15%、16.66%,累计贡献率为99.81%。各组样品之间能够显著区分,表明PC1、PC2两个主成分几乎包含了蛋白肽液的所有信息,反映了其挥发性物质的特征。同时,脱色前后蛋白肽液中的气味成分具有相互独立性,进一步体现了脱色过程对气味特征的重要影响。

由图8可知,蛋白肽液脱色前后的电子鼻雷达图具有一定的差异。脱色前后样液主要在T30/1、PA/2、P30/2上拥有较高响应值,这些传感器主要对醛类、氯类、胺类、酮类化合物敏感^[26],表明醛类、氯类、胺类与酮类化合物可能为沙丁鱼鱼头蛋白肽液的主要气味物质。脱色后这些传感器感应值明显降低,说明使用活性炭同时可有效去除部分蛋白肽液中的挥发性气味。

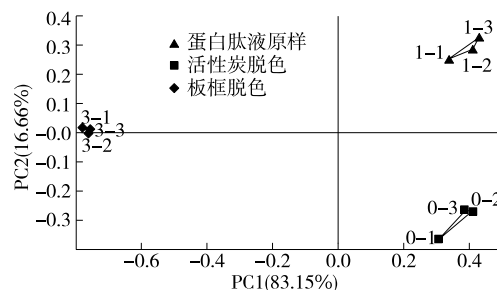


图7 电子鼻PCA分析图

Figure 7 PCA of electronic nose

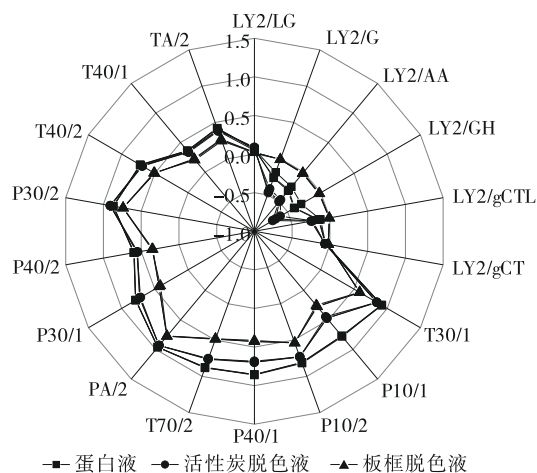


图8 电子鼻雷达图

Figure 8 Electronic nose radar diagram

2.5 电子舌分析

由图9可知,脱色前后各组样品的组成成分在PCA图中分布于不同的区域,进一步证明了其滋味存在明显差异,体现了良好的区分能力。具体而言,脱色前后主要成分PC1、PC2的贡献率分别为98.17%、1.22%,整体累计贡献率高达99.39%。此外,板框脱色组与蛋白肽液原样本之间的距离较为显著,反映出其滋味差异较大。

由图10可知,蛋白肽液对酸味、苦味、甜味的响应值较高,其中苦味的响应值最高。苦味的响应值离散程度较大,表明在区分不同样品方面具有较强的有效性^[27]。经脱色处理后,5种味道感应值均有所下降,板框脱色后的蛋白肽液感应值最少,有效地去除了样品中的苦味物质。

2.6 有机酸与呈味核苷酸分析

酒石酸和苹果酸具有独特的酸味,可以使蛋白肽液产生特殊“鲜味”。由表2可知,脱色前后所有样品组中的酒石酸与柠檬酸含量无显著差异($P>0.05$)。活性炭脱色组的乳酸含量比脱色前的增加了2.16%,可能是脱色过程中丙酮酸发生转换形成了左旋乳酸;使用板框脱色时,乳酸含量降低了1.76%,表明蛋白肽液通过活性炭滤饼时损

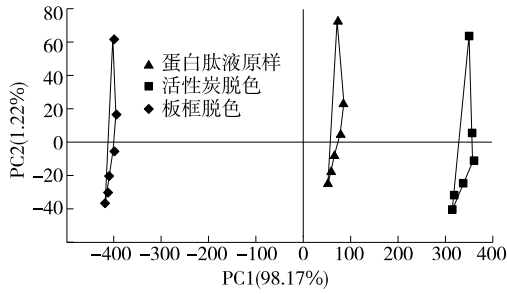


图 9 电子舌 PCA 分析图

Figure 9 PCA of electronic tongue

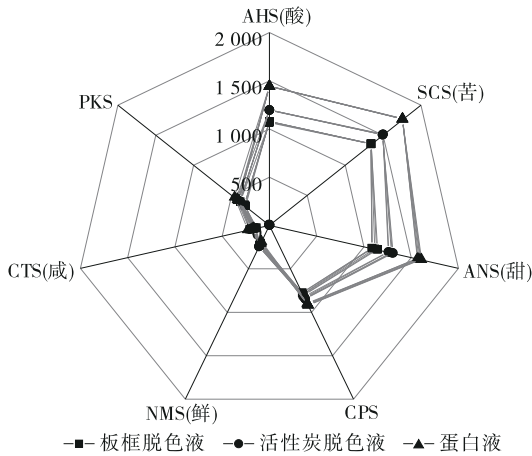


图 10 电子舌雷达图

Figure 10 Electronic tongue radar map

失了部分乳酸。Zhao 等^[28]指出,乳酸是水产品中的有机酸,样品中风味的形成与乳酸含量的增加有关,乳酸可以与其他化合物发生反应,形成一些新的风味化合物,如酯类化合物、吡嗪、呋喃等。乳酸含量的降低可以减少后续挥发性物质的产生。

表 2 活性炭脱色对有机酸含量的影响[†]

Table 2 Effect of decolorization of activated carbon on organic acid content mg/mL

有机酸	沙丁鱼鱼头蛋白肽液	活性炭脱色	板框脱色
酒石酸	3.33±0.47	3.25±0.21	3.29±0.26
苹果酸	3.07±0.22 ^a	3.03±0.19 ^a	2.48±0.36 ^b
乳酸	21.24±0.10 ^b	23.40±0.67 ^a	19.48±0.27 ^c
柠檬酸	20.95±0.12	18.46±2.37	17.65±3.11
丁二酸	1.12±0.14 ^a	0.70±0.09 ^b	0.91±0.20 ^{ab}

[†] 同行字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

由表 3 可知,次黄嘌呤核苷酸与腺苷单磷酸可呈现出鲜味,常被用作风味增强剂^[29]。经活性炭脱色后无明显变化,但板框设备脱色后其含量明显降低,在板框脱色后未发现次黄嘌呤核苷酸,腺苷单磷酸含量降低至

1.59 mg/mL,使得蛋白肽液中鲜味减弱。而肌苷和次黄嘌呤为次黄嘌呤核苷酸的降解产物,会产生苦味^[30]。蛋白肽液经脱色处理后次黄嘌呤与肌苷含量显著降低($P<0.05$),表明活性炭可以有效减少蛋白肽液中的苦味物质。

表 3 活性炭脱色对呈味核苷酸含量的影响[†]

Table 3 Effect of decolorization of activated carbon on flavor nucleotide content mg/mL

呈味核苷酸	沙丁鱼鱼头蛋白肽液	活性炭脱色	板框脱色
次黄嘌呤核苷酸	2.10±1.49	2.73±0.81	—
腺苷单磷酸	2.95±0.30 ^a	3.56±1.87 ^a	1.59±0.08 ^b
次黄嘌呤	24.85±1.14 ^a	18.46±1.80 ^b	10.14±0.77 ^c
肌苷	10.66±1.60 ^a	7.73±0.82 ^b	6.90±0.47 ^b

[†] 同行字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

2.7 挥发性成分分析

由表 4 可知,沙丁鱼鱼头蛋白肽液脱色前后共检出 35 种挥发性成分,包括 10 种醛类、2 种酮类等。醛类和酮类作为水产品气味的重要特征,源自鱼蛋白质的降解,且醛类气味阈值较低^[31],对水产品风味贡献较大。由表 5 可知,脱色前后醛类物质的种类与含量均最高,所占比例较大,为蛋白肽液挥发性风味的主要贡献物质。糠醛、苯甲醛、(E)-2-己烯醛含量较高,主要呈甜杏味、坚果香味、苦杏仁味、花香与果香味,脱色前含量分别为(419.59±5.31),(710.54±315.13),(158.06±28.73) ng/g,其中苯甲醛含量最高,持有苦味,但由于其阈值较高,对蛋白肽的风味贡献不大,经活性炭脱色、板框脱色后醛类物质含量显著降低($P<0.05$)。大部分酮类化合物的阈值较高,对蛋白肽整体风味贡献不大,试验中仅检出两种酮类物质,且阈值高。醇类物质是脂肪酸氧化酶作用于多不饱和脂肪酸和羰基化合物的还原产物^[32]。多数醇类化合物风味阈值较高,蛋白肽液中 1-己醇含量较高,但因其风味阈值过高而对整体风味影响较小。烃类物质源于脂肪酸的烷基自由基分裂,因其阈值较高,对蛋白肽液的风味贡献有限^[33]。挥发性物质中,2-乙基呋喃含量较高,呋喃类物质主要由美拉德反应和硫胺素热降解产生,通常具有浓烈的肉香味^[34]。

3 结论

对沙丁鱼鱼头蛋白肽酶解液进行 200~700 nm 波长扫描,确定酶解液中色素吸收波长为 220 nm。沙丁鱼鱼头蛋白肽的最佳脱色工艺条件为活性炭添加量 1%、脱色时间 1 h、脱色温度 40 °C,经板框设备脱色后,蛋白肽液脱色率达到 36.2%,蛋白损失率为 8.6%。脱色后,蛋白肽液中总游离氨基酸含量显著减少,而呈味氨基酸占总游离氨基酸的比例无明显变化,为 97.56%。表明通过板框活性炭过滤脱色

表4 沙丁鱼鱼头蛋白肽液脱色前后挥发性成分含量的变化[†]

Table 4 Changes of volatile components in sardine fish head protein peptide solution before and after decolorization		μg/g				
种类	化合物	阈值	沙丁鱼鱼头蛋白肽液	活性炭脱色	板框脱色	气味特征
醛类	庚醛	3	419.59±5.31 ^a	18.40±1.21 ^b	—	甜杏、坚果香味
	辛醛	0.8	107.12±35.72 ^a	34.75±1.01 ^b	55.24±31.84 ^{ab}	脂香味、辛辣味
	癸醛	0.1	22.75±7.50 ^a	7.36±2.83 ^b	—	蜡香、柑橘香味
	苯甲醛	350	710.54±315.13 ^a	130.35±25.58 ^b	348.52±152.43 ^{ab}	苦杏仁味、花香味
	苯乙醛	4	16.83±8.44 ^a	4.28±0.55 ^b	7.41±4.36 ^{ab}	青草味
	(E)-2-辛烯醛	3	81.12±25.64 ^a	15.72±6.27 ^b	23.60±13.67 ^b	脂香味、鱼腥味
	(E)-2-癸烯醛	0.3	40.94±12.91	—	—	—
	(E)-2-己烯醛	19.2	158.06±28.73 ^a	42.64±9.99 ^b	—	果香、清香味
	(E)-2-甲基-2-丁烯醛	500	85.69±11.95 ^a	—	11.90±5.67 ^b	清香味、辛辣味
	3-乙基苯甲醛		96.64±19.34 ^a	—	21.24±10.32 ^b	—
	小计		1 739.26±430.81 ^a	253.50±45.07 ^b	467.91±212.11 ^b	—
酮类	苯乙酮	65	43.49±10.69 ^a	6.26±0.64 ^b	6.30±1.03 ^b	甜香、苦杏仁味
	2,6-双(1,1-二甲基乙基)-2,5-环己二烯-1,4-二酮		5.32±1.32 ^a	2.57±0.09 ^b	3.49±1.92 ^b	—
	小计		48.81±11.40 ^a	8.82±0.55 ^b	9.79±2.55 ^b	—
醇类	1-己醇	1 000	283.14±47.93 ^a	74.46±1.88 ^b	46.10±22.20 ^b	果香、清香、甜香
	1-庚醇	400	138.67±32.87	—	—	清淡油脂香、酒香
	1-辛醇	130	221.04±52.57 ^a	9.68±1.06 ^b	5.39±0.84 ^b	强烈油脂气味,并带有柑橘、玫瑰气味
	1-壬醇	50	90.47±14.16	—	—	强烈的玫瑰、橙子香气,油脂味
	苯甲醇		9.81±1.91 ^a	4.76±0.54 ^b	—	—
	雪松醇		5.56±0.69 ^a	4.84±0.61 ^{ab}	3.15±1.17 ^b	—
	小计		748.69±120.69 ^a	93.73±0.73 ^b	54.64±24.04 ^b	—
酯类	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯		19.48±0.98 ^{ab}	7.20±1.99 ^b	40.41±19.47 ^a	—
	邻苯二甲酸癸基异丁酯		4.67±0.49 ^a	2.52±0.39 ^b	3.88±1.48 ^{ab}	—
	小计	—	24.16±1.31 ^{ab}	9.73±2.35 ^b	44.29±20.94 ^a	—
酸类	十二烷酸		10.45±0.84	—	—	—
	十四烷酸		11.08±3.21	—	—	—
	3-甲基丁酸		21.03±4.51 ^a	—	3.38±0.49 ^b	—
	正十六烷酸	10 000	13.12±1.26 ^a	—	4.26±2.47 ^b	—
	小计		55.68±6.46 ^a	—	7.63±2.96 ^b	—
烃类	十二烷		10.82±0.17 ^b	4.47±1.40 ^{ab}	41.18±28.21 ^a	—
	十四烷		14.04±0.83 ^a	4.76±0.19 ^c	9.16±3.11 ^b	—
	十六烷		21.28±2.69 ^a	5.64±1.66 ^b	7.54±3.41 ^b	—
	十七烷		12.54±3.11 ^a	5.10±0.70 ^b	6.70±3.30 ^b	—
	十八烷		5.42±0.15 ^a	6.51±7.37 ^a	1.90±0.88 ^b	—
	4-乙基癸烷		22.10±3.55 ^a	12.73±1.95 ^b	48.59±2.63 ^c	—
	小计		86.20±2.88 ^a	39.22±4.99 ^b	115.08±36.52 ^a	—
其他	2-乙基呋喃	2.3	367.65±198.53 ^a	—	60.04±1.52 ^b	辛辣味、奶油味
	4-乙基苯酚		15.11±2.68	—	—	—
	(E)-2-(2-戊烯基)呋喃	260	82.97±29.12 ^a	—	41.47±5.81 ^b	—
	1,3-双(1,1-二甲基乙基)苯		37.91±3.77 ^a	13.41±0.37 ^b	—	—
	2,4-二叔丁基苯酚		261.66±1.39 ^a	165.91±11.30 ^b	75.75±64.38 ^c	—
	小计		765.30±201.95 ^a	179.32±11.67 ^b	177.27±65.69 ^b	—

† 同行字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

表 5 蛋白肽液脱色前后挥发性化合物种类及含量占比[†]

Table 5 Types and proportion of volatile compounds in protein peptide solution before and after decolorization

种类	沙丁鱼鱼头蛋白肽液		活性炭脱色		板框脱色	
	种类	含量占比/%	种类	含量占比/%	种类	含量占比/%
醛类	10	50.15±0.11 ^{ab}	7	43.39±0.78 ^b	6	53.38±0.43 ^a
酮类	2	1.41±0.68 ^a	2	1.52±0.11 ^a	2	1.12±0.11 ^b
醇类	6	21.59±0.31 ^a	4	16.04±0.37 ^b	3	6.23±0.20 ^c
酯类	2	0.70±0.04 ^c	2	1.66±0.20 ^b	2	5.05±0.39 ^a
酸类	4	1.61±0.12 ^a	—	—	2	0.87±0.08 ^b
烃类	6	2.49±0.11 ^c	6	6.71±0.09 ^b	6	13.13±0.12 ^a
其他	5	22.07±0.26 ^b	2	30.69±0.95 ^a	2	20.22±0.19 ^b

† 同行字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

可以有效改善沙丁鱼鱼头蛋白肽液的风味,增强其鲜味和甜味,同时降低苦味成分含量。醛类化合物、氯类化合物、胺类化合物与酮类化合物可能是沙丁鱼鱼头蛋白肽液的主要气味物质。脱色后蛋白肽液中的苦味明显降低。次黄嘌呤与肌苷两种苦味核苷酸数量减少,进一步说明活性炭脱色可以去除蛋白肽中的苦味物质,改善蛋白肽的风味。综上,醛类物质为蛋白肽液的主要挥发性风味物质,活性炭可以有效减少蛋白肽液中的挥发性物质。该研究仅说明活性炭脱色过程中可以有效减少苦味物质和挥发性物质,未阐明活性炭对苦味物质(如次黄嘌呤、肌苷)及挥发性醛类化合物的吸附机制。未来的研究中可通过分子对接模拟或代谢组学技术,进一步揭示活性炭与目标物质(苦味成分、醛类)的吸附作用机制。

参考文献

- [1] LABONNE M, MASSKI H, TALBA S, et al. Major population's separation area for sardine (*Sardina pilchardus*) and hake (*Merluccius merluccius*) revealed using otolith geochemistry on the Atlantic coast of Morocco[J]. Fisheries Research, 2022, 254: 106415.
- [2] RAVALLEC-PLÉ R, VAN WORMHOUDT A. Secretagogue activities in cod (*Gadus morhua*) and shrimp (*Penaeus aztecus*) extracts and alcalase hydrolysates determined in AR4-2J pancreatic tumour cells[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2003, 134(4): 669-679.
- [3] FAHMI A, MORIMURA S, GUO H C, et al. Production of angiotensin I converting enzyme inhibitory peptides from sea bream scales[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(10): 1 195-1 200.
- [4] BOUGATEF A, NEDJAR-ARROUME N, MANNI L, et al. Purification and identification of novel antioxidant peptides from enzymatic hydrolysates of sardinelle (*Sardinella aurita*) by-products proteins[J]. Food Chemistry, 2010, 118(3): 559-565.
- [5] WU R B, WU C L, LIU D, et al. Antioxidant and anti-freezing

peptides from salmon collagen hydrolysate prepared by bacterial extracellular protease[J]. Food Chemistry, 2018, 248: 346-352.

- [6] YATHISHA U G, BHAT I, KARURSAGAR I, et al. Antihypertensive activity of fish protein hydrolysates and its peptides[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2 363-2 374.
- [7] MADANI Z, LOUCHAMI K, SENER A, et al. Dietary sardine protein lowers insulin resistance, leptin and TNF- α and beneficially affects adipose tissue oxidative stress in rats with fructose-induced metabolic syndrome[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2012, 29(2): 311-318.
- [8] LU Z Q, YANG J Q, XU X M, et al. Regulation mechanisms of sea cucumber peptides against scopolamine-induced memory disorder and novel memory-improving peptides identification [J]. European Journal of Pharmacology, 2024, 968: 176430.
- [9] AZAM K, SHEZAD N, SHAFIQ I, et al. A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes[J]. Chemosphere, 2022, 306: 135566.
- [10] BIAN Q Q, ZHANG W J, CHEN L J, et al. Preparation and characterization of fish gelatin polypeptides with low phenylalanine contents using enzymatic hydrolysis and activated carbon adsorption[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111153.
- [11] WANG T Y, LIANG H, BAI L M, et al. Adsorption behavior of powdered activated carbon to control capacitive deionization fouling of organic matter[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123277.
- [12] 张萌, 王宝周, 陈俊, 等. 脱色工艺对鱼皮胶原蛋白品质的影响 [J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 212-217, 259. ZHANG M, WANG B Z, CHEN J, et al. Effect of decoloring process on the quality of fish skin collagen peptides[J]. Food & Machinery, 2015, 31(4): 212-217, 259.
- [13] 郭玉华, 李钰金, 吴新颖, 等. 鲑鱼皮胶原蛋白肽酶解液脱色脱腥工艺的研究[J]. 中国食品添加剂, 2010(4): 125-128. GUO Y H, LI Y J, WU X Y, et al. Study on decolorizing and deodorization of cod skin enzymolysis collagen peptide liquid

- [J]. *China Food Additives*, 2010(4): 125-128.
- [14] WANG W L, ZHANG L, WANG Z Q, et al. Physicochemical and sensory variables of Maillard reaction products obtained from Takifugu obscurus muscle hydrolysates[J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 40-46.
- [15] CHEN J H, TAO L N, ZHANG T, et al. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose, HS-SPME-GC-MS, and HS-GC-IMS[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 147: 111585.
- [16] LIANG Y F, WANG K, YANG Q F, et al. The antioxidant activities and flavor properties of glycated bighead carp meat hydrolysates produced with galactose and galacto-oligosaccharides [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 158: 113104.
- [17] TAN X Y, QI L B, FAN F J, et al. Analysis of volatile compounds and nutritional properties of enzymatic hydrolysate of protein from cod bone[J]. *Food Chemistry*, 2018, 264: 350-357.
- [18] ZHANG W H, JIA N, ZHU Z H, et al. Changes of antioxidative activities and peptidomic patterns of *Auxenochlorella pyrenoidosa* protein hydrolysates: Effects of enzymatic hydrolysis and decoloration processes[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 152: 112306.
- [19] 吕振磊, 王雨生, 修方珑, 等. 活性炭对紫贻贝蛋白酶解液脱色效果的影响 [J]. *食品与机械*, 2012, 28(3): 32-35, 44.
LU Z L, WANG Y S, XIU F L, et al. Effect on decolorization of mussel protein hydrolysate by activated carbon[J]. *Food & Machinery*, 2012, 28(3): 32-35, 44.
- [20] 付建鑫, 张炳文, 张桂香. 碱蓬活性炭的制备工艺优化及吸附性能研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(9): 216-219.
FU J X, ZHANG B W, ZHANG G X. Study on optimization of preparation of activated carbons from *Suaeda salsa* and its adsorption activity[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(9): 216-219.
- [21] SESSA D J, PALMQUIST D E. Effect of heat on the adsorption capacity of an activated carbon for decolorizing/deodorizing yellow zein[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (14): 6 360-6 364.
- [22] 黎稳, 俞骏, 谢宸伟, 等. 含硅镁型混合脱色剂在鲮鱼油脱色及助滤中的作用[J]. *食品与机械*, 2023, 39(8): 166-174.
LI W, YU J, XIE C W, et al. Decolorization and filter aid effect of silicon-magnesium mixed decolorizer in anchovy oil[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(8): 166-174.
- [23] LUO X Y, XIAO S T, RUAN Q F, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131260.
- [24] CHIANG J H, YEO M T Y, ONG D S M, et al. Comparison of the molecular properties and volatile compounds of Maillard reaction products derived from animal- and cereal-based protein hydrolysates[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132609.
- [25] YAMASAKI Y, MAEKAWA K. A peptide with delicious taste [J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1978, 42(9): 1 761-1 765.
- [26] JIN G Y, ZHU Z S, WU Z L, et al. Characterization of volatile components of microwave dried perilla leaves using GC-MS and E-nose[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103083.
- [27] HWANG J Y, KIM K H, SEO S E, et al. Bioelectronic tongue for identifying and masking bitterness based on bitter taste receptor agonism and antagonism[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(52): 2304997.
- [28] ZHAO J X, JIANG Q X, XU Y S, et al. Effect of mixed kojis on physicochemical and sensory properties of rapid-fermented fish sauce made with freshwater fish by-products[J]. *International Journal of Food Science Technology*, 2017, 52 (9): 2 088-2 096.
- [29] MEYER S, DUNKEL A, HOFMANN T. Sensomics-assisted elucidation of the tastant code of cooked crustaceans and taste reconstruction experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(5): 1 164-1 175.
- [30] 郭金英, 李杰, 吴影, 等. 基于电子舌和色谱技术分析蒸煮猪肉滋味物质[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 32-36.
GUO J Y, LI J, WU Y, et al. Analysis of taste substances of cooked pork based on electronic tongue and chromatographic techniques[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(8): 32-36.
- [31] 芦江会, 陈跃文, 付晶晶, 等. 超声辅助酶解对龙头鱼蛋白肽理化性质及风味特性的影响[J]. *食品与机械*, 2023, 39(11): 38-44.
LU J H, CHEN Y W, FU J J, et al. The effect of ultrasound assisted enzymatic hydrolysis on the physicochemical properties and flavor characteristics of protein peptides from *Harporodon nehereus*[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(11): 38-44.
- [32] 郭正畅, 刘智禹, 方旭波, 等. 超声辅助处理对发酵鲈鱼酶解液风味品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(19): 91-98.
GUO Z C, LIU Z Y, FANG X B, et al. Effect of ultrasonic-assisted treatment on the flavor and quality of fermented mackerel enzymatic hydrolysate[J]. *Food Science*, 2023, 44 (19): 91-98.
- [33] 潘扬, 李涵, 张莹, 等. 解冻、复热方式对冻藏预制调理黄鳝品质及挥发性风味的影响[J/OL]. *食品科学*. (2024-10-29) [2024-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20241029.1424.009.html>.
- [34] 冯美琴, 曾晓庆, 孙健. 基于美拉德反应分析加工过程中酱牛肉风味物质变化[J]. *食品科学*, 2024, 45(24): 139-149.
FENG M Q, ZENG X Q, SUN J. Changes in flavor substances of sauced beef during processing based on the Maillard reaction[J]. *Food Science*, 2024, 45(24): 139-149.