

复合脱腥联合喷雾干燥处理对牡蛎蛋白酶解产物风味的改良作用

曾 珊¹ 曹文红^{1,2,3,4} 李佳蔚¹ 陈忠琴^{1,2,3,4} 谭明堂^{1,2,3,4}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088; 2. 国家贝类加工技术研发分中心(湛江), 广东 湛江 524088; 3. 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东 湛江 524088; 4. 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东 湛江 524088)

摘要: [目的]以香港牡蛎为原料,探究复合脱腥处理联合喷雾干燥对牡蛎蛋白酶解产物特征风味的改良作用,并高效获得更好风味的牡蛎酶解产物基料。[方法]采用青柠汁、甜叶菊粉、红茶粉3种脱腥剂复配联合喷雾干燥对牡蛎蛋白酶解产物进行处理,以感官评分和得粉率为指标,考察复合脱腥剂的配制比例、复合脱腥剂与酶解液的料液比及喷雾干燥的最优工艺条件,并结合顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用(HS-SPME-GC-MS)法、电子鼻和电子舌辅助感官检验进行风味分析。[结果]最优工艺条件为 $m_{\text{甜叶菊粉}}:V_{\text{青柠汁}}:m_{\text{红茶粉}}=1:3:2$, $m_{\text{复合脱腥剂}}:V_{\text{牡蛎酶解液}}=1:20$, 进风温度 180°C , 蠕动泵转速 10 r/min , 麦芽糊精添加量为 1.5 倍,此时得到的牡蛎酶解产物基料整体滋味和气味更佳。[结论]单独喷雾干燥能使酶解液贝肉香浓郁,滋味咸鲜;而复合脱腥联合喷雾干燥处理后整体滋味呈酸甜,有效减弱了咸鲜味,呈现鱼腥味和哈喇味的醛类物质含量减少,具有花香、果香等令人愉快气味特点的烯烃类物质相对含量增加,风味更佳。

关键词: 香港牡蛎; 喷雾干燥; 风味改良; 酶解产物; 挥发性风味物质

Flavor improvement of oyster protein enzymatic hydrolysates by combined treatment of composite deodorization and spray drying

ZENG Shan¹ CAO Wenhong^{1,2,3,4} LI Jiawei¹ CHEN Zhongqin^{1,2,3,4} TAN Mingtang^{1,2,3,4}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 2. National Research and Development Branch Center for Shellfish Processing (Zhanjiang), Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 4. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

Abstract: [Objective] Using the oyster (*Crassostrea hongkongensis*) as raw material, this study explores the improvement effect of combined treatment of composite deodorization and spray drying on the characteristic flavor of oyster proteolytic products, aiming to efficiently obtain a better-flavored base material of oyster protein enzymatic hydrolysates. [Methods] The oyster protein enzymatic hydrolysates were treated with a combination of three deodorants of lime juice, stevia powder, and black tea powder combined with spray drying. The sensory score and the powder yield were used as indicators to investigate the optimal process conditions for the preparation ratio of the composite deodorant, the solid-liquid ratio of the composite deodorant to enzymatic hydrolysates, and spray drying. The flavor analysis was carried out by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), assisted by electronic nose and electronic tongue sensory testing. [Results] The optimal process conditions are $m_{\text{stevia powder}}:V_{\text{lime juice}}:m_{\text{black tea powder}}$ in $1:3:2$, the solid-liquid ratio $m_{\text{composite deodorant}}:V_{\text{oyster enzymatic hydrolysate}}$ in $1:20$, the inlet air temperature at 180°C , the peristaltic pump speed at

基金项目: 国家贝类产业技术体系(编号:CARS-49); 国家重点研发计划课题(编号:2018YFD0901105); 湛江市科技计划项目(编号:2022A05038)

通信作者: 曹文红(1977—),男,广东海洋大学教授,博士生导师,博士。E-mail: cchunlin@163.com

收稿日期: 2024-06-20 **改回日期:** 2025-01-08

10 r/min, and the maltodextrin addition amount of 1.5 times. Under these conditions, the obtained base material of oyster protein enzymatic hydrolysates has a better overall taste and flavor. **[Conclusion]** Spray drying alone can make the enzymatic hydrolysates rich in oyster meat aroma and salty and delicious. However, the combined treatment of composite deodorization and spray drying produces a sweet and sour taste on a whole, effectively reduces the saltiness, reduces the content of aldehydes that cause fishy and rancid odors, increases the relative content of olefins that have pleasant floral and fruity aromas and produces a better flavor.

Keywords: *Crassostrea hongkongensis*; spray drying; flavor improvement; enzymatic hydrolysates; volatile flavor substances

牡蛎不仅风味独特,还含有丰富的蛋白质、糖原、牛磺酸和锌元素,具有较高的营养价值。牡蛎酶解产物中含有丰富的牡蛎多糖和牡蛎肽,因此其生物活性范围较广,具有增强免疫力、抗氧化、降血压和降血脂等功能作用^[1],在众多领域展现出良好的开发与应用潜力,为研发高效、高性能的牡蛎保健食品、新资源食品或特殊医学用途食品等提供了可能^[2]。然而,酶解过程中脂肪的氧化反应会生成醛类、酮类、醇类等挥发性风味物质,显著增强了牡蛎酶解产物的腥味及哈喇味,尽管牡蛎本身具有独特的海鲜风味,且酶解后的产物滋味鲜美、口感饱满,但作为饮品开发时,这种强烈的腥味与浓郁的鲜味口感并不符合大多数消费者的偏好,严重影响了牡蛎酶解产产品的风味品质,阻碍了其实际应用与产业化进程。

当前,针对牡蛎酶解产物的风味改良主要集中在采用常规的脱腥方法来去除其腥味和苦味,进而通过与其他辅料或添加剂的复配来优化整体滋味。常用的脱腥方法如包埋法、吸附法、发酵法以及联合脱腥法等^[3],虽能有效减轻腥味和苦味,但对鲜味的提升效果有限。李珂等^[4]通过对牡蛎酶解液的发酵工艺进行深入研究,成功提高了产物的鲜味和甜味,对整体滋味有显著改善作用。然而,即便经过脱腥处理和配方复配,市场上现有的牡蛎饮品仍存在鲜味、回味过重的问题。为了掩盖这一鲜味,往往会添加其他辅料或添加剂来丰富整体滋味,但效果并不理想。李婉等^[5]研发的两款果香型牡蛎肽饮料虽然无腥味且口感细腻,但鲜味仍然明显。因此,同时针对牡蛎酶解产物的腥味、苦味以及鲜味等多重风味进行改良的方法仍在积极探索中。喷雾干燥作为一种常用的干燥方式,不仅效率高、能降低生产成本,还能将酶解液在热气流中雾化。较高温度下,这一过程加速了美拉德反应^[6]、Strecker降解^[7]、焦糖化反应、脂肪与脂肪酸的氧化和降解^[8]等一系列化学反应的进行,从而促进了风味物质的释放。热反应使得具有肉香特征香气的醛类、酯类、杂环及芳香烃类化合物含量显著增加。董庆亮等^[9]在制得较低腥味的牡蛎酶解液产品的基础上,采用分子包埋脱腥处理结合喷雾干燥制粉,该方法虽然对腥味、苦味有明显的改善效果,但对鲜味的改良效果尚不明确。

研究拟基于课题组前期优化的酶法制备牡蛎酶解产物的最佳工艺,采用多种脱腥剂对物料进行复合脱腥处理,联合喷雾干燥,同时,运用顶空固相微萃取—气相色

谱—质谱联用(HS-SPME-GC-MS)法^[10-11]对挥发性化合物进行分析鉴定,并结合电子鼻、电子舌以及感官检验进行风味分析,旨在获得风味更佳的牡蛎酶解产物基料,以期为牡蛎风味、营养的各类食品开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香港牡蛎肉:洗净、沥干、分装,于-20℃冷冻贮藏,市售;

红茶粉提取物:陕西汉溯源食品有限公司;

甜叶菊粉、青柠:市售;

动物蛋白酶:10万U/g,南宁庞博生物工程有限公司;

食品用活性炭粉:上海麦克林生化科技有限公司;

氢氧化钠标准溶液:分析纯,上海易恩化学技术有限公司。

1.2 仪器与设备

磁力搅拌水浴锅:SHJ-AB型,常州金坛良友仪器有限公司;

旋转蒸发器:Eyela型,东京理化器械株式会社;

电子分析天平:FB224型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

超声波清洗器:KQ-500DE型,昆山市超声仪器有限公司;

高速落地离心机:Thermo Lynx6000型,美国Thermo公司;

电子鼻:PEN3型,德国AIRSENSE公司;

电子舌:SA402B型,日本Insent公司;

气相色谱—质谱联用仪:TQ8050NX型,日本岛津公司;

喷雾干燥机:FY-PWGGZ1000B型,杭州菲跃仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 牡蛎酶解样品的制备

(1) 牡蛎酶解液^[12]:

香港牡蛎肉→破碎匀浆→称重,按料液比1:4(g/mL)加水→均质(5200 r/min,6 min)→超声处理10 min→调节pH至6.5→加动物蛋白酶(牡蛎匀浆肉质量的1.6%)→灭酶(100℃,20 min)→冷却→过滤取上清液→牡蛎酶解液

(2) 牡蛎酶解粉:

牡蛎酶解液→浓缩(可溶性固形物含量为30%)→麦芽糊精包埋→喷雾干燥制粉→牡蛎酶解粉

(3) 牡蛎酶解产物基料:

牡蛎酶解液→加入复合脱腥剂→调节 pH 至 6.5→加入活性炭(牡蛎匀浆肉质量的 1%)→水浴脱腥(50℃, 60 min)→离心(9 000 r/min, 20 min, 4℃)→过滤取上清液→浓缩(可溶性固形物含量为 30%)→麦芽糊精包埋→喷雾干燥制粉→牡蛎酶解产物基料

1.3.2 复合脱腥剂最佳比例的确定 将甜叶菊粉、青柠汁和红茶粉混匀组成复合脱腥剂,固定 $m_{\text{复合脱腥剂}}:V_{\text{牡蛎酶解液}}$ 为 1:10,选择 $m_{\text{甜叶菊粉}}:V_{\text{青柠汁}}:m_{\text{红茶粉}}$ 为 1:1:2, 1:2:2, 1:3:1, 1:3:2, 1:4:2, 以感官评价为指标,确定最佳比例;固定复合脱腥剂的最适比例,选择 $m_{\text{复合脱腥剂}}:V_{\text{牡蛎酶解液}}$ 为 1:10, 1:12.5, 1:15, 1:20, 1:25, 以感官评价为指标,确定最佳比例。

1.3.3 牡蛎酶解蛋白粉基料喷雾干燥工艺优化

(1) 单因素试验:固定进风温度 150℃,麦芽糊精添加量 0.5 倍(牡蛎浓缩液中可溶性固形物含量的 0.5 倍),蠕动泵转速 7 r/min,分别考察进风温度(150, 160, 170, 180, 190℃)、麦芽糊精添加量(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 倍)、进料流速(7, 9, 11, 13, 15 r/min)对感官评分和得粉率为影响。可溶性固形物含量测定使用手持折光仪进行测定,并按式(1)计算得粉率。

$$Y = \frac{m_1}{C \times V + m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y ——得粉率,%;

m_1 ——喷雾干燥后收集粉末质量,g;

C ——牡蛎浓缩液中可溶性固形物含量,%;

V ——牡蛎浓缩液体积,L;

m_2 ——麦芽糊精质量,g。

(2) 正交试验:在单因素试验基础上,进行三因素三水平正交试验设计,以感官评分和得粉率为指标,确定最优工艺条件。

1.3.4 产品品质分析

(1) 感官评价:参照香江等^[13]的方法稍作修改。将制得的样品按 $m_{\text{样品}}:V_{\text{水}}$ 为 1:50 用温水冲调,相同的冲泡条件下,根据 GB/T 16291.1—2012 选择 10 名接受过感官评价培训的人员组成感官评定小组,要求在 12 h 内不吸烟、不喝酒、不吃辛辣刺激性食物,分别对随机编号的样品进行品尝,按表 1 进行评分。

(2) 风味剖面法:参照谢成城等^[14]的方法稍作修改。感官评定人员对酶解液、酶解粉及牡蛎酶解产物基料进行嗅闻及品尝,从所有收集到的描述词中筛选出高频气味和滋味描述词,最终确定气味描述词汇为鱼腥味、青草味、哈喇味、贝肉香和水果香;口感滋味描述词为酸、甜、咸、鲜、苦。感官评定人员针对气味和滋味的描述词进行感官强度评分,分值为 0~5 分(由弱到强),最终结果取样

品平均分。

表 1 牡蛎酶解样品的感官评价

Table 1 Sensory evaluation of oyster enzymatic hydrolysate samples

项目	评价标准	分值
外观	颜色为黄色或黄橙色,溶液澄清透明	17~25
	颜色为淡黄色或黄色,溶液较澄清透明	9~16
	颜色为黄色或黄绿色,溶液浑浊	0~8
气味	无明显牡蛎腥味	17~25
	有较淡的牡蛎腥味	9~16
	有较明显的牡蛎腥味	0~8
口感	顺滑,无涩口感	17~25
	较为顺滑,在口中有些许涩口	9~16
	粗糙,涩口感明显	0~8
滋味	酸甜适中,咸、鲜、苦味较弱,回味后味较淡	17~25
	偏酸,咸、鲜、苦味较明显,回味后味明显	9~16
	咸、鲜、苦味明显,回味后味重	0~8

1.3.5 电子舌分析 参照杨志伟等^[15]的方法。

1.3.6 电子鼻分析 参照王治军等^[16]的方法。

1.3.7 SPME-GC-MS 风味分析 参照杨祺福等^[17]的方法稍作修改。向 20 mL 顶空进样瓶中装入质量浓度为 0.5 g/mL 的待测样品,萃取针于 250℃老化 30 min 后插入固相萃取瓶中,平稳放置,70℃水浴吸附 40 min,迅速将萃取针插入气相进样口,解析温度 250℃,解析时间 5 min。

(1) 气相色谱条件:参照杨心怡等^[18]的方法并修改。色谱柱为 Inert CapPure-WAX 石英毛细柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);载气为高纯度氦气;流速 1.0 mL/min,分流比 4:1,进样口温度 250℃,进样量 1 μL,不分流进样。色谱柱升温程序:40℃保持 5 min,以 5℃/min 升至 110℃,保持 5 min,以 10℃/min 升至 230℃,保持 10 min。

(2) 质谱条件及数据处理:采用 EI 离子源,接口温度 250℃,离子源温度 230℃,扫描范围 m/z 33~550,采用 GC-MS solution 工作站的质谱数据库 NIST17.L 自动检索各组分质谱数据,分析匹配度>80%的化合物,用峰面积归一化法确定物质的相对含量。

(3) 相对气味活性值(ROVA):参照杜晓兰等^[19]的方法。样品总体风味贡献最大的组分为相对气味活性值 $R_{\max}=100$,按式(2)计算其他组分的相对气味活性值(ROVA)。

$$ROVA \approx \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C_i ——挥发性化合物的相对含量,%;

T_i ——其他化合物的感觉阈值,mg/kg;

$C_{\max}$ ——贡献最大的挥发性成分的相对含量,%;

$T_{\max}$ ——贡献最大的挥发性成分的感觉阈值,mg/kg。

1.3.8 数据统计与分析 多样本差异性采用 IBM SPSS Statistics 27.0.1 进行单因素方差分析(ANOVA),采用 Duncan 法进行多重比较评判样品间的差异性,采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 复合脱腥处理对感官评分的影响

由图 1 可知,随着青柠汁和红茶粉添加比例的增加,牡蛎酶解粉基料的感官评分呈先上升后下降趋势,表明复合脱腥剂的添加对牡蛎酶解液的风味处理在口感与气味上具有显著改善效果。这可能是青柠汁的添加增强了牡蛎粉的酸味口感,而酸味对咸味具有一定的消减作用,显著减弱了牡蛎粉特有的咸鲜味口感。有研究^[20]表明,柠檬汁参与牡蛎水解过程可有效降低牡蛎酶解液的腥味

及异味,其风味改善的原因之一是引入柠檬自身具有的香味,丰富了整体气味从而掩蔽了不良气味。

随着复合脱腥剂与牡蛎酶解液料液比的增加,牡蛎酶解粉基料的感官评分先逐渐上升后缓慢下降,当 $m_{\text{复合脱腥剂}}:V_{\text{牡蛎酶解液}}$ 为 1:20 时,感官评分达到峰值。这可能是复合脱腥剂中各组分自带的花果香特征风味物质对牡蛎酶解液中的腥味等不良气味起到了有效的掩蔽作用。同时,考虑到牡蛎原料的主要滋味体现在鲜味和甜味上,经过酶解处理后,咸鲜苦味变得尤为明显。复合脱腥剂在水浴处理过程中产生的柠檬酸^[20]、甜菊糖苷^[21]和茶多酚^[22]等物质,在有效掩盖腥味的同时,也丰富了酶解液的整体滋味,增添了甜味、酸味等风味元素。由于各种滋味的相互作用,甜味和酸味可能对咸味、苦味具有一定的缓解作用。因此,多种脱腥剂联合脱腥通过其除腥、掩味、调味等多重作用的有机结合,对牡蛎酶解液的滋味和气味展现出了显著的改良效果。

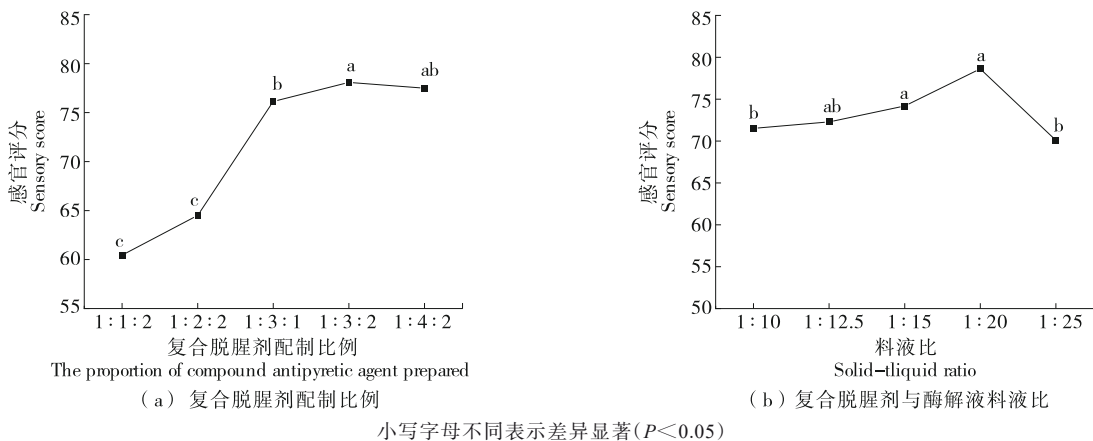


图 1 复合脱腥处理对感官评分的影响

Figure 1 Effect of composite deodorization treatment on sensory evaluation scores

2.2 牡蛎酶解产物基料喷雾干燥工艺优化

2.2.1 单因素试验 由图 2(a)可知,牡蛎酶解产物基料的感官评分和得粉率呈先上升后持续下降趋势。进风温度较低时,由于不能完全迅速雾化干燥且含糖量较高,导致大量物料黏附在壁上;当温度升至 190 °C 时,水分散失速度过快,使得牡蛎粉中的杂质和变性蛋白质含量增多^[23],同时高温喷雾导致颗粒破碎,包埋效果降低,苦味增强。当温度为 180 °C 时,所得样品的评分较高,因此,选择进风温度 170, 175, 180 °C 进行正交试验。

随着蠕动泵转速的增加,雾滴颗粒变大,雾化效果不佳^[24]。由图 2(b)可知,随着蠕动泵转速的增大,感官评分和得粉率先上升达到顶峰后逐渐下降。蠕动泵转速过小时,由于雾滴过细过轻,未能被旋风分离器有效分离,而是直接黏附在内壁上;蠕动泵转速过快则会使雾滴变大,在系统供给的热量一定的情况下,水分蒸发不彻底,出现

粘壁现象,且干燥不完全,挥发性物质不能完全释放。因此,选择进料速度 9, 10, 11 r/min 进行正交试验。

由图 2(c)可知,随着麦芽糊精添加量的增加,其作为甜味剂、香味剂、填充剂和色素的优良载体,能够有效保证被承载物质的纯正风味。麦芽糊精能够对牡蛎浓缩液的香气、色素以及生物活性物质起到包埋保护作用^[25],使香味持久。此外,麦芽糊精在高温下会产生甜香的气味,有助于改善牡蛎浓缩液的腥味和苦味。但可溶性固形物含量过高可能会导致黏度过大,造成入料困难。因此,选择麦芽糊精添加量为 1.25, 1.50, 1.75 倍进行正交试验。

2.2.2 正交试验 在单因素试验基础上进行三因素三水平正交试验,试验因素水平见表 2,试验设计及结果见表 3。

由表 3 可知,各因素对牡蛎酶解产物基料的感官评分和得粉率的影响程度依次为 $A > B > C$, 两个优先方案

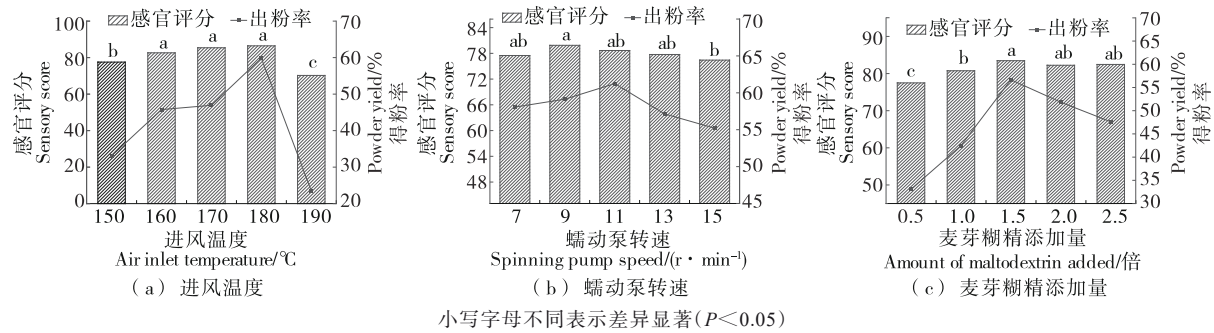


图2 喷雾干燥条件对基料感官评分和得粉率的影响

Figure 2 Effect of different spray drying conditions on sensory scores and powder yields of base material

表2 正交试验因素水平表

水平	A 进风温度/°C	B 蠕动泵转速/(r·min ⁻¹)	C 麦芽糊精添加量/倍
1	170	9	1.25
2	175	10	1.50
3	180	11	1.75

表3 正交试验设计及结果

试验号	A	B	C	空列	感官评分	得粉率/%
1	1	1	1	1	86.64	71.95
2	1	2	2	2	88.34	73.35
3	1	3	3	3	87.12	74.65
4	2	1	2	3	87.73	75.02
5	2	2	3	1	88.69	77.82
6	2	3	1	2	87.43	75.98
7	3	1	3	2	89.27	78.24
8	3	2	1	3	90.10	80.61
9	3	3	2	1	89.74	76.95
感官评分 k_1	87.367	87.880	88.057	88.357		
k_2	87.950	89.043	88.603	88.347		
k_3	89.703	88.097	88.360	88.317		
R	2.337	1.163	0.547	0.040		
得粉率 k_1	73.317	75.070	76.180	75.573		
k_2	76.273	77.260	75.107	75.857		
k_3	78.600	75.860	76.903	76.760		
R	5.283	2.190	1.797	1.187		

($A_3B_2C_2$ 和 $A_3B_2C_3$) 中进风温度和蠕动泵转速条件相同。为验证两个优先方案的有效性,进行3次验证实验,测得 $A_3B_2C_2$ 的感官评分为 90.24 ± 2.12 ,得粉率为 84.15%; $A_3B_2C_3$ 的感官评分为 89.48 ± 1.86 ,得粉率为 85.64%。综合考虑,确定最佳优化条件为 $A_3B_2C_2$,即进风温度 180 °C,

蠕动泵转速 10 r/min,麦芽糊精添加量为 1.5 倍,该条件不仅可以显著改善风味,还能高效获得风味更佳的牡蛎酶解产物基料。冲泡后基料呈澄清透亮的橙黄色,色泽鲜艳,溶解性良好。

2.3 电子舌检测及人工感官评定结果

以参比溶液的味觉值为对照,当酸、咸味觉值分别低于 -13 和 -6 时,其余味觉指标以 0 及以下界定为无味点。感官评价所采用的口感滋味描述词包括酸、甜、咸、鲜、苦,具体评分结果如图 3 所示。

牡蛎原料的滋味主要体现在鲜、甜,酶解处理后,咸鲜苦味变得更为明显。电子舌检测结果显示,牡蛎酶解液的主要呈味为咸、苦、鲜、甜,呈味值分别为 -5.58, 7.51, 1.17, 4.53。相比之下,喷雾干燥后的牡蛎酶解粉苦味值降低了 3.37,甜味提高了 9.67,而鲜、咸味值降至无味点以下。人工感官评定结果显示,牡蛎酶解粉的整体滋味仍以咸鲜为主。这可能是由于高温制粉过程中,呈味核苷酸的不稳定性导致其分解,产生苦味氨基酸。但由于采用麦芽糊精作为包埋剂,高温处理后增加了甜味。甜味对咸味与苦味有减弱作用,对鲜味有增强作用。综上,高温喷雾干燥能减弱咸味和苦味,但整体滋味仍以咸鲜为主。

采用复合脱腥处理后联合喷雾干燥制粉,得到牡蛎酶解产物基料,电子舌检测结果显示主要呈味为酸、苦、甜、涩。其中,酸味值明显高于呈味点,与酶解粉相比提高了 24.24,而苦味、甜味分别降低了 1.48 和 7.26,鲜味和咸味值均低于无味点。人工感官评定结果显示,整体滋味以酸甜味为主。这可能是复合脱腥剂中的物质在脱腥处理时提供了甜味和酸味等滋味。由于各种滋味混合时可能发生变化,甜味和酸味对咸味、苦味有缓解作用。与牡蛎酶解粉整体滋味以咸鲜为主相比,引入复合脱腥剂中的酸味有效减弱了咸鲜味,使整体滋味效果更佳。

2.4 电子鼻检测及人工感官评定结果

由图 4 可知,PC1 的贡献率为 92.1%,PC2 的贡献率为 7.2%,累计贡献率达到 99.3%,表明 PCA 分析能够准确反映 3 种牡蛎酶解样品的总体香气差异。以感官评价为指

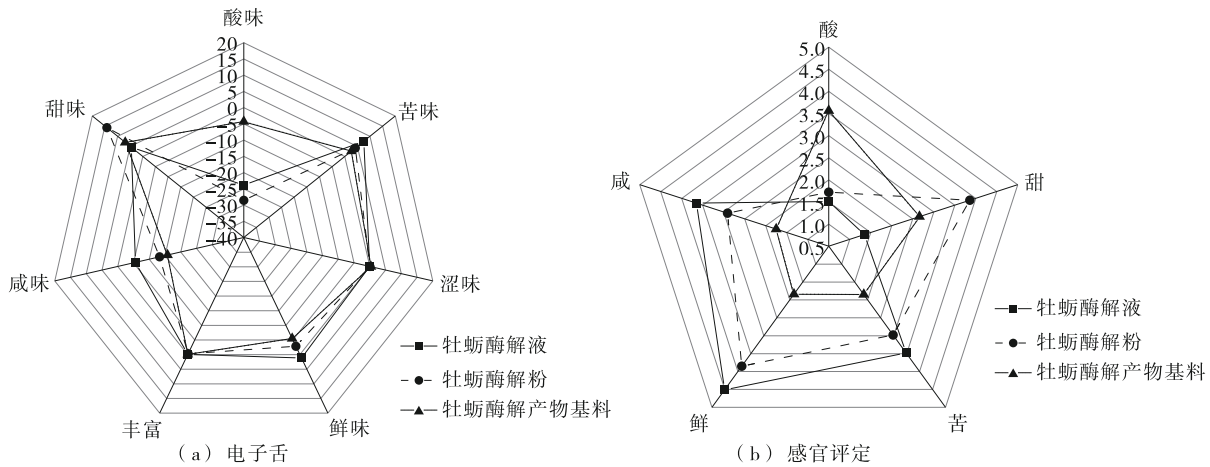


图3 复合脱腥联合喷雾干燥处理前后电子舌检测与人工感官评定味觉雷达图

Figure 3 Taste radar of electronic tongue detection and artificial sensory evaluation before and after the combined treatment of composite deodorization and spray drying

标进行气味对比,得到的气味描述词汇包括鱼腥味、青草味、哈喇味、贝肉香和水果香。牡蛎原料的气味体现为黄瓜味,同时带有鱼腥味以及贝肉香等风味特征。经动物蛋白酶水解后,牡蛎蛋白发生降解,藻类物质被分离并除去,从而释放出更多牡蛎原有的腥物质^[26-27],主要呈现为鱼腥味和哈喇味。3种样品的雷达图轮廓相似,其中W5S(氮氧化合物)传感器的响应值最高,其次是W1W(含硫化化合物)传感器,其余传感器的检测值较小,表明喷雾干燥的牡蛎酶解粉与牡蛎酶解液的特征气味物质主要

为氮氧化合物和含硫化化合物,其区别在于含量的高低。经复合脱腥结合喷雾干燥处理后得到的牡蛎酶解产物基料中,W1W和W5S的值最低,分别为2.37和2.80。其中,硫化物是与牡蛎相关的特征性挥发物质,可能对风味产生负面影响。这与牡蛎酶解粉的感官评价结果一致,即呈现鱼腥味和哈喇味。喷雾干燥的牡蛎酶解粉由于经过高温处理,贝肉香明显增强;而经复合脱腥结合喷雾干燥改良后,水果香与青草香得到增强。因此,需进一步结合GC-MS对挥发性物质进行明确和分析。

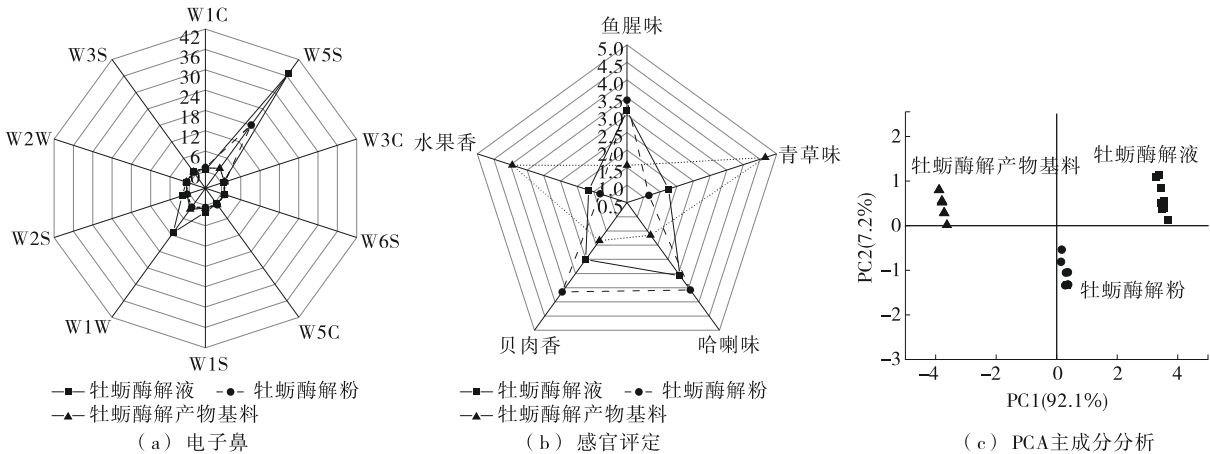


图4 复合脱腥联合喷雾干燥处理前后电子鼻分析与人工感官评定气味雷达图及电子鼻主成分分析图

Figure 4 Odor radar of electronic nasal analysis and artificial sense assessment as well as principal component analysis before and after combined treatment of composite deodorization and spray drying

2.5 SPME-GC-MS挥发性风味分析

感官评价能够对整体风味特征进行描述,但无法清晰揭示样品经不同处理后挥发性风味物质的组成及含量的具体变化。醛类物质在牡蛎气味中与其呈现的鱼腥

味、黄瓜味以及草腥味紧密相关。由表4可知,与牡蛎酶解液相比,喷雾干燥后的酶解粉中醛类物质的相对含量增加了21.99%,然而,其他具有不愉快气味的醛类物质种类减少,转而呈现油脂香与贝肉香,这可能与高温促进脂

肪氧化有关。牡蛎酶解产物基料中,(*E,E*)-2,4-庚二烯醛的相对含量从6.46%显著下降至0.39%,同时己醛、庚醛、辛醛、(*E*)-2-辛烯醛等消失,而具有愉快气味的醛类物质,如苯乙醛、(*Z*)-2-癸烯醛、可卡醛的相对含量分别增至2.57%,4.34%,0.23%。由于醛类物质的阈值较低或可能产生风味重叠效果,因此即使痕量存在也能对风味产生显著贡献^[29],为整体风味贡献了柑橘味、鸡肉香味、花香等愉快气味,与感官气味描述结果一致。

牡蛎酶解液中最丰富的醇类物质为(*E,Z*)-3,6-壬二烯-1-醇,主要呈现绿色蔬菜的清香,1-辛烯-3-醇主要呈现蘑菇味和油脂味。喷雾干燥对这些醇类物质的含量无显著影响,但醇类物质的种类有所减少。牡蛎酶解产物基料中出现了一些由醛类、酮类物质和脂质的氧化及还原产生的新的醇类物质,如山梨醇、芳樟醇、 β -桉叶醇

等,这些物质为整体风味增添了薄荷和清凉香味。烯烃类物质为柠檬类重要的挥发性风味成分,牡蛎酶解产物基料中*D*-柠檬烯的相对含量较高(41.25%),为整体风味贡献了令人愉快的甜香、柑橘和柠檬香气,表明牡蛎酶解基料中增加的烯烃类芳香物质主要来自复合脱腥剂中青柠汁所具有的单萜烯类挥发性化合物,这些化合物对不良风味起到掩蔽作用,与Allegre等^[30]的研究结果一致。

酮类物质主要产生于牡蛎肉中多不饱和脂肪酸的降解反应,牡蛎酶解液的腥味强度部分来源于此。喷雾干燥后,具有花果香、油脂香气、烟草味的3,5-辛二烯-2-酮、3-癸烯-2-酮、2-壬酮均增强,但在牡蛎酶解产物基料中却消失。由于酮类的阈值远大于醛类物质,因此,酮类物质一般仅作为辅助风味成分。

表4 挥发性气味成分分析[†]

Table 4 Composition analysis of volatile odors

种类	化合物	气味描述	相对含量/%		
			酶解液 ^[28]	酶解粉	基料
醛类	(<i>E,Z</i>)-2,6-壬二烯醛	黄瓜味	2.48±0.36 ^b	4.82±0.42 ^a	0.35±0.01 ^c
	(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	鱼腥味、蘑菇味	6.46±0.25 ^b	16.35±1.52 ^a	0.39±0.03 ^c
	己醛	油脂味	3.83±0.33	3.10±0.30	ND
	辛醛	脂味、蘑菇味	2.24±0.30	2.75±0.25	ND
	苯甲醛	杏仁味	6.41±0.42	ND	0.98±0.05
	(<i>E</i>)-2-辛烯醛	青草味、蛤蚧味	2.87±0.65	ND	ND
	2-己烯醛	水果香味	1.24±0.30	2.05±0.30	ND
	(<i>E</i>)-2-戊烯醛	青草味、蜡香	0.92±0.08	ND	0.11±0.01
	(<i>E</i>)-2-壬烯醛	肉香、蘑菇	0.47±0.10 ^b	2.10±0.17 ^a	0.08±0.00 ^c
	2-辛烯醛	黄瓜和鸡肉香味	ND	4.66±0.65	ND
	壬醛	脂肪香	1.65±0.17	ND	0.54±0.03
	(<i>E,E</i>)-2,4-壬二烯醛	花果和油脂	ND	0.78±0.03	ND
	正丙醛	刺激性气味	0.30±0.13	ND	ND
	巴豆醛	肉桂和丁香味	0.18±0.05	ND	ND
	癸醛	海味	0.81±0.03 ^b	0.99±0.05 ^a	0.34±0.03 ^c
	(<i>E</i>)-2-甲基-2-丁烯醛	清香和醚类气味	0.26±0.03	ND	ND
	4-乙基苯甲醛	苦杏仁气味	ND	0.71±0.03	ND
	对乙基苯甲醛	芳香气味	0.83±0.07	ND	ND
	十二醛	脂肪、松叶、橙油香气	ND	0.52±0.01	ND
	异戊醛	油脂味	0.94±0.12	12.43±1.02	ND
	(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛	蜡香、醛香	0.20±0.01	2.41±0.17	ND
	月桂醛	花香	0.45±0.07	ND	ND
	2-十二烯醛	芳香气味	ND	0.26±0.03	ND
	糠醛	焦苦及涩味	0.23±0.03	ND	1.14±0.03
	肉豆蔻醛	油脂香	ND	0.26±0.06	ND
	十六醛	有花和蜡的弱香气	ND	0.35±0.02	ND
	十三醛	肥皂味、柑橘味	0.25±0.01	ND	ND

续表 4

种类	化合物	气味描述	相对含量/%		
			酶解液 ^[28]	酶解粉	基料
醛类	苯乙醛	花果香气	0.27±0.03 ^c	1.42±0.17 ^b	2.57±0.25 ^a
	十一醛	脂蜡气	0.42±0.06	ND	ND
	(Z)-2-癸烯醛	柑橘味及鸡肉香味	ND	ND	4.34±0.45
	(E,E)-2,4-辛二烯醛	青草香、脂肪香	0.63±0.12	ND	ND
	可卡醛	芳香气味	ND	ND	0.23±0.03
	2-甲基丁醛	—	0.25±0.17	ND	ND
	2-十一烯醛	—	0.49±0.03	ND	ND
	E-2-庚醛	—	0.51±0.14	ND	ND
	2-苯基巴豆醛	—	0.11±0.01	ND	ND
	3,5-二甲基苯甲醛	—	0.33±0.02	ND	0.22±0.01
醇类	山梨醇	清凉甜味	ND	ND	3.72±0.65
	甲基苯甲醇	—	ND	0.55±0.03	ND
	4-萜烯醇	—	ND	0.15±0.02	ND
	α-松油醇	—	ND	0.58±0.02	ND
	芳樟醇	木香、果香气	0.45±0.03	ND	0.24±0.03
	反式-2-十二烯-1-醇	芳香香气	ND	ND	0.09±0.00
	γ-桉树醇	樟脑气息和清凉草药香	ND	ND	0.18±0.01
	1-戊烯-3-醇	土腥味	0.96±0.05	0.60±0.01	ND
	正辛醇	可用作香料	0.56±0.03	ND	ND
	(E,Z)-3,6-壬二烯-1-醇	绿色蔬菜的清香	5.19±0.65	ND	ND
	1-壬醇	—	0.22±0.03	ND	ND
	(E)-2-辛烯-1-醇	—	1.11±0.09	ND	ND
	1-辛烯-3-醇	蘑菇香、花香、果香	1.81±0.26	1.11±0.09	ND
	(Z)-2-戊烯-1-醇	黄瓜味	0.63±0.01	0.40±0.01	ND
	香芹醇	—	0.98±0.04	ND	ND
	苏合香醇	淡栀子花香味	ND	0.55±0.05	ND
	正庚醇	黄瓜味	1.13±0.28	ND	ND
	正己醇	似樟脑气味	0.37±0.04	ND	ND
	2,4-癸二烯-1-醇	—	1.26±0.12	ND	ND
	二环丙基甲醇	—	0.34±0.05	ND	ND
	10-十一炔-1-醇	—	0.40±0.02	ND	ND
	正戊醇	水果香气	0.38±0.02	ND	ND
酸类	乙酸	刺激、尖酸气息	0.23±0.01	ND	ND
	己酸	—	0.63±0.03	0.32±0.01	ND
	庚酸	—	0.29±0.03	ND	ND
	异戊酸	—	0.40±0.04	0.80±0.05	ND
	棕榈酸	—	ND	0.70±0.05	ND
	丙酸	刺激、尖酸气息	0.97±0.05	0.41±0.01	ND
	2-异丙基-5-甲基己酯乙酸	—	2.86±0.26	ND	ND
	苯甲酸	—	ND	0.27±0.01	0.25±0.01
	棕榈酸	—	ND	0.70±0.05	ND
	正辛酸	—	ND	0.08±0.00	ND
	十五烷酸	—	ND	0.25±0.05	ND

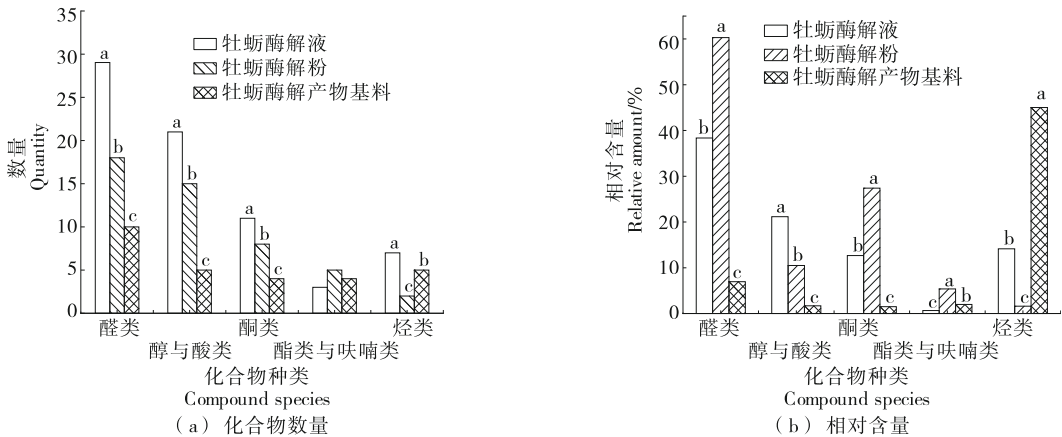
续表4

种类	化合物	气味描述	相对含量/%		
			酶解液 ^[28]	酶解粉	基料
酮类	1-戊烯-3-酮	—	0.28±0.02	ND	ND
	2,5-二甲基-3-己酮	—	2.87±0.32	ND	ND
	2-壬酮	花果香、油脂香	0.73±0.02	3.10±0.52	ND
	3,5-辛二烯-2-酮	脂肪味	1.79±0.21	16.92±1.86	ND
	2,3-戊二酮	坚果香	0.12±0.01	ND	ND
	异佛尔酮	青香、樟脑果香	0.15±0.02	ND	ND
	2-十一酮	柑橘类香气	ND	ND	0.59±0.05
	(<i>E,E</i>)-3,5-辛二烯-2-酮	蛤蜊味	2.26±0.32	ND	ND
	2,5-己二酮	—	0.43±0.04	ND	ND
	3-癸烯-2-酮	烟草味	3.68±0.42	ND	5.27±0.72
	5-羟基-4-辛酮	—	0.21±0.03	ND	ND
	2-环己基环己酮	—	ND	ND	0.18±0.01
	3-辛烯-2-酮	—	0.14±0.01	ND	ND
	1-(3-环己烯-1-基)乙酮	—	ND	0.55±0.02	ND
	5,6-二氢-2 <i>H</i> -吡喃-2-酮	—	ND	0.27±0.01	ND
	壬-3,5-二烯-2-酮	—	ND	0.68±0.03	ND
	香叶基丙酮	青草香、果香、蜡香	ND	0.26±0.01	ND
	二环[3.3.1]壬烷-2,6-二酮	—	ND	0.36±0.01	ND
	6-甲氧基-1-萘满酮	—	ND	ND	0.33±0.01
	2-苯基环己酮	—	ND	ND	0.40±0.01
酯类	乙酸烯丙酯	—	0.13±0.02	ND	ND
	乙酸香叶酯	玫瑰和薰衣草香气	ND	0.29±0.02	1.55±0.05
	壬酸甲酯	具有葡萄酒、椰子香气	ND	ND	0.04±0.00
	乙酸香茅酯	柠檬鲜果香气	ND	ND	0.10±0.00
	乙酸癸酯	橙香、玫瑰香、菠萝果香	ND	ND	0.30±0.02
呋喃与烯炔类	2-戊基呋喃	脂肪香、蜡香	0.15±0.05	0.33±0.02	ND
	2-乙基呋喃	豆香、面包香、麦芽香	0.38±0.03	ND	ND
	反式-2-(2-戊烯基)呋喃	—	ND	1.29±0.42	ND
	反式-2-(3-戊烯基)呋喃	—	ND	1.68±0.49	ND
	2-(2-丙烯基)呋喃	—	ND	1.79±0.21	ND
	3,5,5-三甲基-2-己烯	—	5.91±0.49	ND	ND
	5-甲基-1,2-己二烯	—	0.11±0.01	ND	ND
	<i>D</i> -柠檬烯	新鲜橙子香气	ND	ND	41.25±2.72
	3-乙基-3-庚烯	—	0.07±0.00	ND	ND
	柠檬烯	—	ND	ND	2.84±0.29
	乙酰基环己烯	—	0.46±0.05	0.32±0.03	ND
	1,1-五亚甲基-1,2-戊二烯	—	0.63±0.04	ND	ND
	顺-菖蒲烯	草木香气	ND	ND	0.63±0.05
	1-十二烯-3-炔	—	6.63±0.64	ND	0.18±0.01
其他类	氯化新戊烷	—	0.34±0.03	ND	ND
	2-(己氧基)-庚烷	—	2.48±0.36	1.28±0.64	ND
	苯酚	—	6.46±0.25 ^a	4.82±0.42 ^b	0.12±0.01 ^c

† ND为未检出;同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由图 5 可知,酶解后的牡蛎酶解液中共检出 71 种挥发性风味化合物,经喷雾干燥得到的牡蛎粉中共检出 48 种挥发性风味化合物,其中醛类和酮类分别减少了 9,3 种,但其相对含量分别上升了 21.99%,14.75%。经复合脱腥处理结合喷雾干燥处理得到的牡蛎酶解产物基料中共检出 28 种挥发性风味化合物,与酶解液和酶解粉相比,醛类分别减少了 19,8 种,相对含量分别减少了 31.36%,53.35%;烃类分别减少了 2 种和增加了 5 种,相对含量分别增加了 30.87%,43.42%。综上,牡蛎酶解液及喷雾干燥后的样品中均含有丰富的挥发性风

味化合物。牡蛎酶解粉中醛类物质种类减少,但呈现油脂香的醛类物质含量增多,可能是与牡蛎酶解粉在高温喷雾干燥制粉过程中发生了美拉德反应和热反应,促进了脂肪氧化,从而快速形成了具有油脂香和贝肉香的醛类物质。牡蛎酶解产物基料中,呈现较好风味的化合物含量增加,而腥味物质等异味化合物的种类和含量减少。这可能与引入了脱腥剂中的愉快气味烯烃类芳香物质有关,这些物质可能通过气味掩盖作用结合高温热反应,从而减少了具有腥味及异味气味的醛类物质的形成。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 5 复合脱腥联合喷雾干燥处理前后风味物质种类及相对含量变化

Figure 5 Types and relative content of flavor substances before and after combined treatment of composite deodorization and spray drying

结合水中感觉阈值对表 4 中的挥发性风味成分进行分析对比,确定每种挥发性风味成分的气味活度值(ROAV)及最大气味活度值($ROAV_{max}$)所对应的物质。通常认为, $ROAV>1$ 的挥发性物质为样品中的关键风味物质, $0.1<ROAV<1$ 的物质对整体香味轮廓起修饰作用。为了进一步探究样品间的差异性,结合 $ROAV>1$ 的样品中的关键风味物质绘制主成分分析图。由图 6 可知,PC1 的方差贡献率为 59.1%,PC2 的方差贡献率为 40.8%,累计方差贡献率达 99.9%。3 个样品具有较好的区分度,均匀地分散在 3 个区域,共有 19 种成分的 $ROAV>1$ 。其中,*D*-柠檬烯为牡蛎酶解产物基料中贡献最大的物质,辛醛、(*E*)-2-壬烯醛为牡蛎酶解液和喷雾干燥后的酶解粉中贡献最大的物质。

由图 7 可知,牡蛎酶解液中的关键风味化合物($ROAV\geq 1$),如(*E*)-2,6-壬二烯醛、(*E*)-2,4-癸二烯醛、辛醛、(*E*)-2-壬烯醛、壬醛、芳樟醇、(*E*)-3,6-壬二烯-1-醇等,其中辛醛、壬醛、(*E*)-2,4-癸二烯醛等带有油脂香和鱼腥味;而庚醛、癸醛、(*E*)-2,4-庚二烯醛等修饰性风味物质带有腥味,表明经动物蛋白酶酶解,脂肪氧

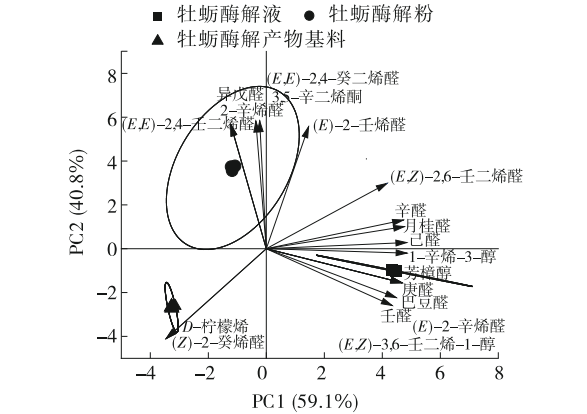


图 6 复合脱腥联合喷雾干燥处理后主成分分析图

Figure 6 Principal component analysis before and after combined treatment of composite deodorization and spray drying

化生成了醛类、酮类、醇类等挥发性风味物质,形成了明显的鱼腥味以及哈喇味,与苏国万等^[31]的结论相似。

喷雾干燥后的牡蛎粉中,(*E*)-2,6-壬二烯醛、辛醛、

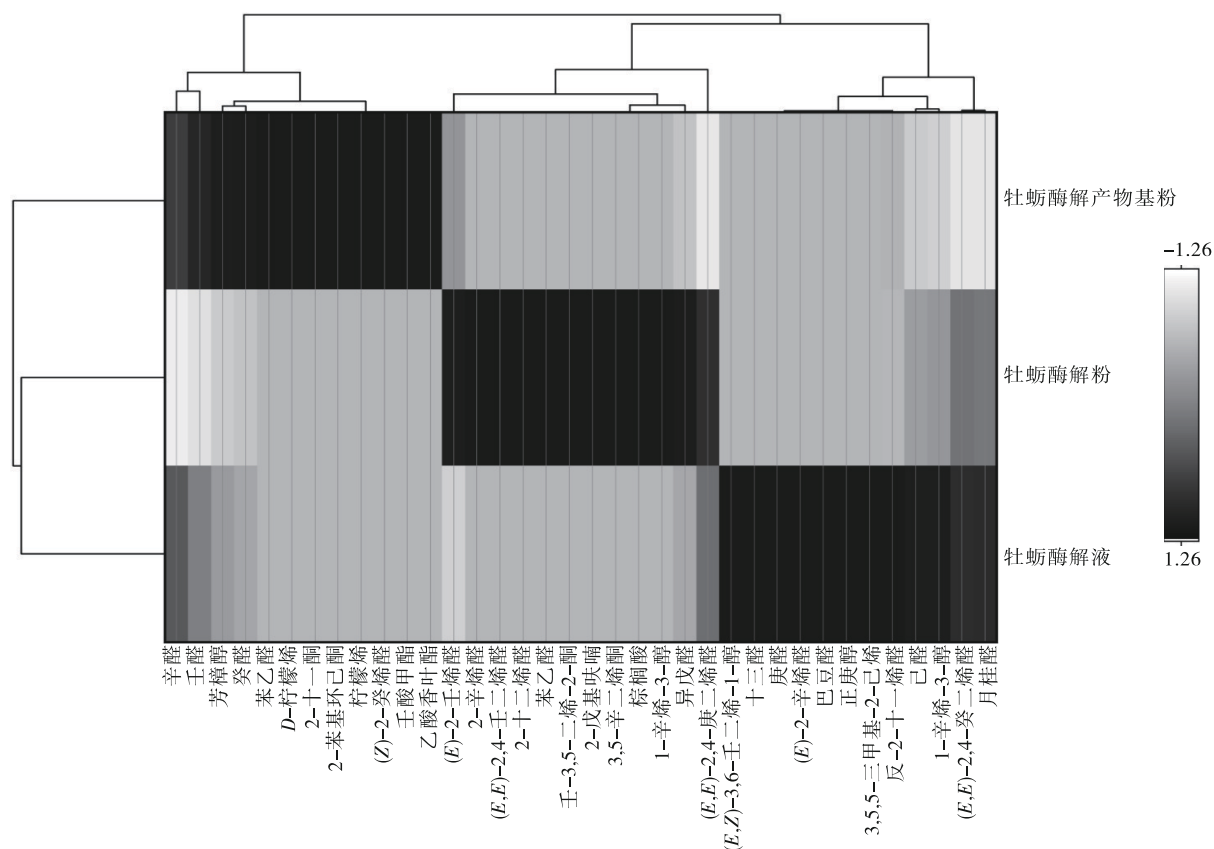


图7 ROAV分析聚类热图

Figure 7 Cluster heatmap of ROAV analysis

(*E*)-2-壬烯醛、2-辛烯醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、异戊醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等主要呈现油脂味。修饰性风味物质除了青草和花果香外,大部分带有油脂味和鱼腥味。表明经喷雾干燥高温制粉后,经过美拉德和热反应增强了牡蛎酶解液的油脂香,与黄健等^[32]的结果类似。

牡蛎酶解产物基料的关键风味化合物中, (*Z*)-2-癸烯醛、*D*-柠檬烯等除了贡献青草和黄瓜香味外,还增添了果香、花香以及清香,其中柑橘的香气最为明显。与牡蛎酶解液相比,牡蛎酶解产物基料中带有鱼腥味的(*E,E*)-2,4-庚二烯醛的ROAV从0.34下降至0.14,说明修饰性气味中的鱼腥味明显减弱。牡蛎酶解产物基料的整体风味以花果香、柑橘香气为主,油脂味和鱼腥味明显减弱。这可能是引入了复合脱腥剂,其中的醇类物质呈现薄荷清凉香味,而烯烃类物质则具有令人愉快的气味,对不良风味起到了掩蔽作用。

3 结论

研究采用多种脱腥剂对牡蛎蛋白酶解产物进行复合脱腥处理,并联合喷雾干燥技术进行风味改良。结果显示,当复合脱腥剂中 $m_{\text{甜叶菊粉}}:V_{\text{青柠油汁}}:m_{\text{红茶粉}}$ 为 1:3:2,

$m_{\text{复合脱腥剂}}:V_{\text{牡蛎酶解液}}$ 为 1:20,进风温度为 180 ℃,蠕动泵转速为 10 r/min,麦芽糊精添加量为 1.5 倍时,牡蛎蛋白酶解产物的改良效果最佳。单独的喷雾干燥处理使牡蛎酶解液的整体滋味以咸鲜为主,带有浓郁的贝肉香味,同时鱼腥味有所减弱。而牡蛎酶解产物基料在滋味上,由于引入了具有酸甜味的复合脱腥剂,有效地减弱了咸鲜味,使得整体滋味更为丰富,效果更佳。最优工艺条件下,牡蛎蛋白酶解产物中呈现鱼腥味和哈喇味的醛类物质减少,而具有花香、果香等愉快风味特点的烯烃类物质的相对含量增加。不良风味挥发性化合物的整体含量减少,从而使风味更佳。研究结果证实,复合脱腥对牡蛎蛋白酶解产物的风味具有显著的改良效果,但复合脱腥剂中各成分间的相互作用机制及其对风味改良的具体贡献尚不明确,后续可深入研究脱腥剂成分间的交互作用,并评估改良产物在不同贮藏条件下的风味稳定性,以提供更为全面的牡蛎蛋白酶解产物风味改良方案。

参考文献

- [1] 章超桦. 牡蛎营养特性及功能活性研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(5): 719-731.

- ZHANG C H. Research progress on nutritional characteristics and bioactivities of oysters: a review[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2022, 37(5): 719-731.
- [2] 罗艳, 黄权新, 蔡捷. 牡蛎酶解产物的种类、生物活性及应用研究进展[J]. 中国食物与营养, 2022, 28(11): 49-53.
- LUO Y, HUANG Q X, CAI J. Research advancement on types and enzymatic hydrolysates of oyster and their bioactivities and application[J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(11): 49-53.
- [3] 邓静, 杨菰, 朱佳倩, 等. 水产原料腥味物质的形成及脱腥技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8): 2 097-2 102.
- DENG J, YANG H, ZHU J Q, et al. Research progress in the formation and deodorization technology of fishy odor for aquatic raw material[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(8): 2 097-2 102.
- [4] 李珂, 张建忠, 徐新星, 等. 发酵牡蛎酶解液的工艺探究及其风味成分分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 169-178.
- LI K, ZHANG J Z, XU X X, et al. Process exploration and flavor analysis of oyster enzymatic hydrolysates by *Lactiplantibacillus pentosus* fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 169-178.
- [5] 李婉, 曹文红, 章超桦, 等. 两款果香型牡蛎肽饮料的研制[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 132-139.
- LI W, CAO W H, ZHANG C H, et al. Development of two kinds of fruity oyster peptide beverages[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 132-139.
- [6] ZENG X F, BAI W D, ZHU X W, et al. Browning intensity and taste change analysis of chicken protein-sugar Maillard reaction system with antioxidants and different drying processes[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(2): e13117.
- [7] ARSA S, THEERAKULKAIT C, CADWALLADER K R. Quantitation of three strecker aldehydes from enzymatic hydrolyzed rice bran protein concentrates as prepared by various conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(29): 8 205-8 211.
- [8] SAMBORSKA K, BONIKOWSKI R, KALEMBA D, et al. Volatile aroma compounds of sugarcane molasses as affected by spray drying at low and high temperature[J]. LWT, 2021, 145: 111288.
- [9] 董庆亮, 许雨莉. 分子包埋技术制备脱腥牡蛎粉工艺的优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 186-190.
- DONG Q L, XU L L. Optimization process of molecular embedding technology on preparation of deodorant oyster powder[J]. Food & Machinery, 2016, 32(7): 186-190.
- [10] MA X L, WANG X C, ZHANG J N, et al. A study of flavor variations during the flaxseed roasting procedure by developed real-time SPME GC-MS coupled with chemometrics[J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135453.
- [11] KAWABE S, MURAKAMI H, USUI M, et al. Changes in volatile compounds of living Pacific oyster *Crassostrea gigas* during air-exposed storage[J]. Fisheries Science, 2019, 85(4): 747-755.
- [12] 李佳蔚, 曾珊, 杨君扬, 等. 超声辅助酶法制备富锌低分子牡蛎肽的工艺研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 108-114.
- LI J W, ZENG S, YANG J Y, et al. Study on preparation process of zinc-rich oyster peptides with low molecular weight by ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis method[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 108-114.
- [13] 香江, 刘唤明, 洪鹏志, 等. 中国毛虾酶解工艺优化及其酶解条件对风味的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(2): 96-105.
- XIANG J, LIU H M, HONG P Z, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process of fresh *Acetes chinensis* and effect of enzymatic hydrolysis conditions on flavor[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(2): 96-105.
- [14] 谢成城, 陈佳敏, 曹仲文. 基于感官剖面分析法、熵权法和灰色关联度法的扬州兰花干品质评价[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 198-203.
- XIE C C, CHEN J M, CAO Z W. Quality evaluation of different varieties of Yangzhou orchid dry based on sensory profile analysis, entropy weight method and grey interconnect degree analysis[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 198-203.
- [15] 杨志伟, 包琪, 杨锡洪, 等. 米曲霉发酵牡蛎调味基料的开发及其风味品质分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 271-277.
- YANG Z W, BAO Q, YANG X H, et al. Development of *Aspergillus oryzae* fermented oyster seasoning base and its flavor quality analysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 271-277.
- [16] 王治军, 杨要芳, 李汉琪, 等. 不同干制工艺对牡蛎干特征气味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 289-298.
- WANG Z J, YANG Y F, LI H Q, et al. Effect of different drying processes on characteristic odor of dried oysters[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 289-298.
- [17] 杨祺福, 徐文思, 胡思思, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的小龙虾加工水煮液中挥发性风味成分萃取条件优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 57-63.
- YANG Q F, XU W S, HU S S, et al. Optimization of extraction conditions for volatile flavor compounds in crayfish boiled liquid based on HS-SPME-GC-MS[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 57-63.
- [18] 杨心怡, 赵那娜, 刘荔, 等. 贻贝 (*Mytilus edulis*) 酶解液酵母发酵法脱腥工艺探究及其风味变化分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 319-327.
- YANG X Y, ZHAO N N, LIU L, et al. Optimization of

- deodorization and analysis of flavor change of blue mussel (*Mytilus edulis*) hydrolysate by yeast fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 319-327.
- [19] 杜晓兰, 杨文敏, 黄永强, 等. 基于顶空气相离子迁移谱比较 3 种加工方式对番鸭肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 269-275.
- DU X L, YANG W M, HUANG Y Q, et al. Effects of three processing methods on volatile flavor compounds of Muscovy duck meat as investigated by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2021, 42(24): 269-275.
- [20] 南富心, 赵那娜, 马昱阳, 等. 基于 GC-IMS 和 SPME-GC-MS 分析柠檬汁对太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)酶解液风味的改善作用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 43-54.
- NAN F X, ZHAO N N, MA Y Y, et al. Using GC-IMS and SPME-GC-MS to analysis the flavor improvement of oyster (*Crassostrea gigas*) hydrolysates treated with lemon juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 43-54.
- [21] 黄星宇, 孙海荣, 杨寒璐, 等. 添加甜叶菊渣对绢蒿青贮发酵品质及苦味掩盖(去除)的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(3): 742-749.
- HUANG X S, SUN H R, TANG H J, et al. Study on fermentation quality and bitterness masking effect of mixed storage of *Artemisia sericea* and *Stevia rebaudiana*[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(3): 742-749.
- [22] 张自然, 李雪霜, 游刚, 等. 茶多酚对牡蛎酶解液的风味改善作用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 147-154.
- ZHANG Z R, LI X X, YOU G, et al. Effect of tea polyphenols on flavor improvement of oyster hydrolysates[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 147-154.
- [23] FOERSTER M, GENGENBACH T, WOO M W, et al. The impact of atomization on the surface composition of spray-dried milk droplets[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016, 140: 460-471.
- [24] ZAMANI S, MORRIS A. Effect of droplet collisions on evaporation in spray-drying[J]. Drying Technology, 2022, 40(7): 1 292-1 306.
- [25] 刘伟. 超声波处理对河蚌肉酶解物美拉德反应的影响及其微囊化调味料制备[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 4-6.
- LIU W. Effect of ultrasonic treatment on Maillard reaction of hydrolysate derived from mussel meat and its manufacture of microencapsulated seasoning[D]. Changchun: Jilin University, 2019: 4-6.
- [26] FU B F, CHENG S Z, ZHANG X, et al. Preparation, taste characterization, and evaluation of oyster composite products with increased umami and salty[J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104274.
- [27] WANG Z J, LI H Q, CAO W H, et al. Effect of drying process on the formation of the characteristic flavor of oyster (*Crassostrea hongkongensis*) [J]. Foods, 2023, 12(11): 2 136.
- [28] 李佳蔚. 富锌牡蛎蛋白酶解产物的制备及其产品开发研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2024: 28-31.
- LI J W. Preparation and product development of enzymatic hydrolysis products from zinc rich oysters[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2024: 28-31.
- [29] CHENG H, WANG J F, XIE J. Progress on odor deterioration of aquatic products: characteristic volatile compounds, analysis methods, and formation mechanisms[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102666.
- [30] ALLEGRONE G, BELLIARDO F, CABELLA P. Comparison of volatile concentrations in hand-squeezed juices of four different lemon varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(5): 1 844-1 848.
- [31] 苏国万, 黄可欣, 何伟伟, 等. 酶解前后牡蛎风味变化的对比分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 242-249.
- SU G W, HUANG K X, HE W W, et al. Comparative analysis on flavor changes of oyster before and after enzymatic hydrolysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 242-249.
- [32] 黄健, 王霞, 侯云丹, 等. 加热温度对牡蛎挥发性风味成分的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 311-317.
- HUANG J, WANG X, HOU Y D, et al. Effect of temperature on volatile flavor compounds of oyster[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 311-317.