

响应面法优化小龙虾烤箱辅助烤制工艺

温丽敏^{1,2}, 诸永志^{2,*}, 罗章¹, 徐为民², 卞欢²

(1.西藏农牧学院食品科学学院, 西藏 林芝 860000; 2.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014)

摘要:以小龙虾为研究对象, 探讨烤箱烤制小龙虾的加工工艺, 以腌制时间、腌制液盐含量、烤制温度和烤制时间为单因素影响因子, 小龙虾的感官评分和弹性为响应值, 进行响应面优化分析。然后对烤制小龙虾的营养成分和风味特征进行测定和分析, 并以鲜虾和水煮虾作为对照。结果表明: 经优化后的小龙虾腌制时间为30 min、腌制液盐含量12 g/100 mL、烤制温度180 °C、烤制时间20 min, 在此工艺条件下小龙虾的感官评分为9.08分、弹性为3.88 mm, 与预测值接近, 表明该烤制工艺合理有效; 烤制处理条件下单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸总含量显著高于鲜虾和水煮虾; 烤制之后的小龙虾必需氨基酸和风味氨基酸含量较鲜虾和水煮虾差异明显, 主要表现在天冬氨酸、甘氨酸、精氨酸和亮氨酸的损失, 其中精氨酸损失最大; 电子舌传感器上的烤虾响应值鲜度、咸味和甜味均显著高于鲜虾和水煮虾。适当的烤制有利于虾肉营养物质的保存和鲜香味的挥发, 同时有利于产品营养与风味的提高。

关键词: 小龙虾; 烤箱; 烤制; 响应面; 工艺优化

Optimizing the Oven Roasting of Crayfish by Response Surface Methodology

WEN Limin^{1,2}, ZHU Yongzhi^{2,*}, LUO Zhang¹, XU Weimin², BIAN Huan²

(1.College of Food Science, Xizang Agriculture and Animal Husbandry College, Nyingchi 860000, China;

2.Research Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The preparation process of oven roasted crayfish was optimized by response surface methodology (RSM). Curing time, brine concentration, roasting temperature, and roasting time were considered as independent variables, and sensory score and springiness as response variables. The nutrient composition and flavor characteristics of roasted crayfish were determined and analyzed using raw and boiled crayfish as controls. The results showed that the optimized conditions were as follows: curing time 30 min, salt concentration 12 g/100 mL, roasting temperature 180 °C, and roasting time 20 min. The sensory score and springiness of the oven roasted crayfish prepared under these conditions were 9.08 points and 3.88 mm, respectively, which were close to the predicted values, indicating that the roasting process is reasonable and valid. The total content of monounsaturated and polyunsaturated fatty acids in the roasted crayfish prepared under these conditions was distinctly higher than that in raw and boiled crayfish, and significant variations were found in the contents of essential and flavor amino acids; more specifically, aspartate, glycine, arginine and leucine were lost, and the loss of arginine was greatest. The electronic tongue responses to the umami, salty and sweet taste of the roasted crayfish were markedly higher than those to raw and boiled crayfish. In summary, moderate roasting is conducive to maintaining the nutrients and umami and aroma release of crayfish while improving the nutritional quality and flavor of the product.

Keywords: crayfish; oven; roast; response surface methodology; process optimization

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20221201-154

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 05-039-10

引文格式:

温丽敏, 诸永志, 罗章, 等. 响应面法优化小龙虾烤箱辅助烤制工艺[J]. 肉类研究, 2023, 37(5): 39-48. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20221201-154. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 江苏现代农业(克氏原螯虾)产业技术体系建设专项(JATS[2022]444);

江苏省农业科技自主创新资金建设专项(CX(21)2030)

第一作者简介: 温丽敏(1997—)(ORCID: 0000-0002-8859-3503), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: wenlimin0828@qq.com

*通信作者简介: 诸永志(1975—)(ORCID: 0000-0002-8529-2035), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为肉品加工与质量安全控制。E-mail: qfge@yzu.edu.cn

WEN Limin, ZHU Yongzhi, LUO Zhang, et al. Optimizing the oven roasting of crayfish by response surface methodology[J]. Meat Research, 2023, 37(5): 39-48. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20221201-154. <http://www.rlyj.net.cn>

克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*)，俗称淡水小龙虾、红螯虾、螯蛄等。小龙虾味道鲜美^[1]，是一种高蛋白、低脂肪、低胆固醇的营养水产品，其中蛋白质含量为17.7%，脂肪含量为0.1%^[2]。但是小龙虾加工企业仍存在加工形式单一、加工方式落后等问题。因此，开发和研究小龙虾新加工工艺对小龙虾产业的发展具有重要意义^[3]。

中华民族的饮食文化博大精深，传统中式烹制肉的方法众多，如蒸、煮、烤、煎和炸。烹饪可以使肉制品具有良好的口感和风味，使其更有利于消化和吸收。烤制是一种容积加热的方法，使肉制品表皮酥脆，并具有一种特殊的香气^[4]。鲁淑彦^[5]研究表明，南美白对虾在一定的烘烤时间下可以提高弹性和品质。李贤良等^[6]研究表明，pH值为5.8时的烤虾可以保持南美白对虾的原有风味。烤制食品不仅能够改善肉制品的风味和降低水分含量，还可以提高贮藏性。小龙虾首先用食盐进行基础调味，然后进行烤制，烤制方式不仅保持了小龙虾原有的鲜香味，同时提高了虾肉的保水性，使肉更加有弹性^[7]。因此，近几年来国内外对于改善烤虾类生产工艺的研究逐渐增多。

目前为止，烤制工艺在肉制品中主要运用在水产品（鱼肉）^[8-9]、大型畜牲（牛羊肉）等^[10]加工中，在小龙虾中应用较少。使用烤箱烤制技术对小龙虾进行加工的相关研究报道还很少。本研究以小龙虾为研究对象，以腌制时间、腌制液盐含量、烤制温度和烤制时间为影响因素，优化烤制小龙虾的工艺参数，为小龙虾的加工工艺应用提供科学的实验依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

小龙虾购自南京淳高水产品市场，剔除死虾后取鲜活小龙虾，体质量（25.00±3.00）g。

食用盐、食用大豆油均购自当地超市。

1.2 仪器与设备

PT3505电烤箱 广东美的厨房电器制造有限公司；TMS-Touch质构仪 美国FTC有限公司；PTX-FA210S分析天平 福州华志科学仪器有限公司；TS-5000Z电子舌 日本Hitachi公司；KQ-300超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司；HD-240L水神次氯酸发生器 旺旺集团有限公司；5810R离心机 德国Eppendorf公司；T25数显匀浆机 德国IKA公司。

1.3 方法

1.3.1 烤制小龙虾工艺流程

烤制小龙虾工艺流程：鲜活小龙虾→清洗称量→烫漂→冷却→腌制→烤箱烤制

操作要点：1）原料预处理：取鲜活小龙虾，剔除死虾、小虾、超大虾和严重破损的虾，将小龙虾放入含有8 g/100 mL食盐和3 g/100 mL柠檬酸的水中，料液比1:5（m/V），使小龙虾吐出胃中的脏污，清洗过后的小龙虾在90℃的水中烫漂1 min，冷却至室温；2）腌制液配制：在去离子水中加入一定量的食盐，配制成一定质量浓度的腌制液；3）超声波腌制：参考孔金花等^[11]的小龙虾超声波辅助腌制工艺并稍作修改，超声功率210 W，料液比1:2（m/V）。

1.3.2 单因素试验设计

腌制时间：烤制温度180℃，烤制时间20 min，腌制液盐含量12 g/100 mL，腌制时间10、20、30、40、50 min条件下制备烤制小龙虾，对小龙虾进行感官评分，测定其弹性。

腌制液盐含量：烤制温度180℃，烤制时间20 min，腌制时间30 min，腌制液盐含量4、8、12、16、20 g/100 mL条件下制备烤制小龙虾，对小龙虾进行感官评分，测定其弹性。

烤制温度：腌制时间30 min，腌制液盐含量12 g/100 mL，烤制时间20 min，烤制温度150、160、170、180、190℃条件下制备烤制小龙虾，对小龙虾进行感官评分，测定其弹性。

烤制时间：腌制时间30 min，腌制液盐含量12 g/100 mL，烤制温度180℃，烤制时间10、15、20、25、30 min条件下制备烤制小龙虾，对小龙虾进行感官评分，测定其弹性。

1.3.3 响应面优化试验设计

根据单因素试验结果，确定烤制温度为180℃，运用Box-Behnken中心组合试验设计原理，建立3因素3水平模型，确定小龙虾的最佳烤制工艺，试验因素水平见表1。

表1 Box-Behnken试验设计
Table 1 Code and level of independent variables used in Box-Behnken design

水平	A烤制时间/min	B腌制液盐含量/(g/100 mL)	C腌制时间/min
-1	15	8	20
0	20	12	30
1	25	16	40

1.3.4 指标测定

1.3.4.1 感官评价

参照Zhang Xinxiao等^[12]的方法略作修改。由10名食品专业的研究生对烤制小龙虾的色泽（权重25%）、

口感(25%)、气味(25%)、滋味(25%) 4个方面进行感官评分, 9~10分品质最好, 7~8分品质较好, 5~6分品质一般, <5分品质较差。品尝每个样品前需漱口, 评价员相互之间不得进行交流, 最终得分为10名感官评定人员的平均分, 具体评价标准参考表2。

表2 烤制小龙虾感官评价标准
Table 2 Criteria for sensory evaluation of roasted crayfish

因素(权重%)	9~10分	7~8分	5~6分	<5分
色泽(25)	色泽正常, 无杂色	色泽稍暗, 无杂色	色泽不均一, 局部有杂色	色泽不均匀, 有明显变化, 杂色很多
气味(25)	虾鲜味浓, 无腥昧	虾鲜味淡, 无腥昧	虾鲜味一般, 有少许腥昧	没有虾鲜味, 有明显腥昧
滋味(25)	咸淡适中, 滋味鲜美	偏淡或偏咸, 滋味较鲜美	口味较淡或较咸, 滋味一般	无咸味, 没有滋味
口感(25)	富有弹性, 咀嚼性好	弹性和咀嚼性较好	弹性一般, 较软、不耐咀嚼	无弹性, 产品软烂

1.3.4.2 质构测定

将小龙虾第2~3节尾肉切成1 cm×1 cm×0.8 cm块状, 采用质构仪测定烤制小龙虾弹性。选用P/0.5柱形探头, 设定参数: 速率3.0 mm/s, 测试形变量50%, 测定时间间隔5 s, 压缩比40%, 每组样品测试11个平行样, 去掉最大值和最小值, 取平均值^[13-14]。

1.3.4.3 脂肪酸测定

参考吴浩然等^[15]的方法并稍做修改。准确称取5 g切碎虾肉样品于烧杯中, 加入50 mL氯仿-甲醇(2:1, V/V)溶液, 浸提30 min后用滤纸过滤, 重复以上操作, 合并2次上清液于蒸馏瓶中, 并将滤液进行旋蒸, 得到粗脂肪。向装有粗脂肪的蒸馏瓶中加入4 mL 1 mol/L KOH-CH₃OH溶液, 于60℃水浴中皂化20 min, 直至油珠消失, 再加入体积分数12.5% H₂SO₄-CH₃OH溶液40 mL, 于60℃水浴中酯化20 min, 冷却后移至分液漏斗中, 加入40 mL蒸馏水和10 mL正己烷, 振荡混匀, 静置10 min, 移除下层水相, 加入4 mL饱和NaCl溶液, 洗涤3次, 移取上清液, 加入1.0 g NaCO₃, 于4 000~5 000 r/min下离心15 min, 取上清液, 用0.22 μm微孔滤膜过滤, 进行高效液相色谱分析。结果计算公式参考文献^[15]。

1.3.4.4 游离氨基酸测定

采用Lee等^[16]的方法, 加以修改。准确称量3 g切碎虾肉样品, 加入30 mL 0.02 mol/L稀盐酸, 用均质机均质3 min后, 在4℃、10 000 r/min条件下离心15 min, 取其上清液, 重复上述操作, 将上清液定容至50 mL, 然后用直径为0.22 μm的微孔水相滤膜过滤后进样, 上机测定。结果计算公式参考文献^[16]。

1.3.4.5 电子舌测定

采用Aouadi等^[17]的方法, 加以修改。将虾肉切碎, 准确称量10 g虾肉, 加入100 mL去离子水, 用均质机均质1 min, 超声10 min后放入离心机中, 4℃、10 000 r/min离心15 min, 取其上清液用滤纸过滤, 上机测定。

1.4 数据处理

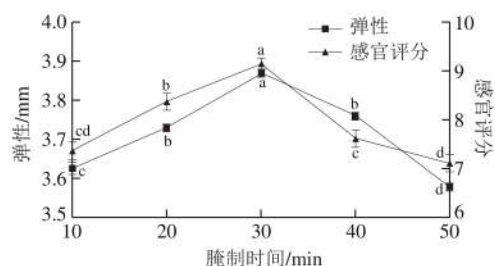
采用SPSS 16.0软件进行数据分析, 均值间采用LSD进

行多重比较, 显著性水平 $P<0.05$, 并采用Origin 8.8作图, 使用Design-Expert 8.0.6软件进行响应面数据分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 腌制时间对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响



小写字母不同, 表示差异显著($P<0.05$)。图2~4同。

图1 腌制时间对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

Fig. 1 Effects of curing time on the sensory score and elasticity of roasted crayfish

由图1可知, 小龙虾的感官评分随着腌制时间的延长呈先上升后下降的趋势。当腌制时间为30 min时, 小龙虾的感官评分达到最大值9.13分, 此时小龙虾色香味俱全、咸淡适中、肉质紧致、富有弹性。当腌制时间超过30 min时, 小龙虾的感官评分开始下降, 腌制时间50 min时感官评分只有7.13分, 这是由于腌制时间过长, 虾肉会吸收过多的腌制液, 导致小龙虾味道太咸、滋味下降、肉质松软、不具有明显弹性。超声时间过长, 导致虾肉蛋白质发生变性, 影响虾肉蛋白质的感官评分^[18]。因此选择腌制时间30 min最为合适。小龙虾的弹性随着腌制时间的延长呈先上升后下降的趋势, 当腌制时间为30 min时, 小龙虾的弹性达到最大值3.87 mm, 此时的小龙虾肉质鲜香、饱满、富有弹性。当腌制时间为50 min时, 小龙虾的弹性为3.58 mm, 主要原因是将腌制的虾肉进行烤制处理后, 蛋白质分子性质发生变化, 导致虾肉内部结构不稳定^[19]。所以腌制30 min时虾肉弹性最大, 口感最好。

2.1.2 腌制液盐含量对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

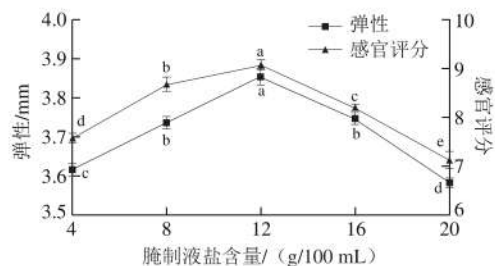


图2 腌制液盐含量对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

Fig. 2 Effect of salt concentration on the sensory score and elasticity of roasted crayfish

由图2可知,小龙虾的感官评分随着腌制液盐含量的增加呈先上升后下降的趋势。当腌制液盐含量为12 g/100 mL时,小龙虾的感官评分达到最高值9.08分,此时小龙虾滋味鲜美、鲜咸适中。由于小龙虾的外壳比较坚硬,当腌制液盐含量低时,渗透到虾肉中的盐较少,咸味不足。当腌制液盐含量超过12 g/100 mL时,感官评分只有7.13分。这是由于腌制液盐含量越高,渗透压越大,因此盐的扩散系数也随着越大,腌制速率越快^[20]。腌制液盐含量增加,小龙虾的弹性呈先上升后下降的趋势。腌制液盐含量为12 g/100 mL时弹性达到3.92 mm,此时的小龙虾肉质紧致、有弹性、咸味适中、味道鲜美。随着盐含量的增加,弹性开始明显下降。主要是由于虾肉脱水和食盐渗透作用,在渗透压的作用下虾体水分渗出的同时盐分渗入,肌肉组织收缩,水分流失,弹性下降。也可能是由于随着腌制液盐含量增大,盐溶性蛋白也随之增加,并且在加热条件下形成凝胶,从而提高其水合性,使虾肉的弹性降低^[21]。

2.1.3 烤制温度对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

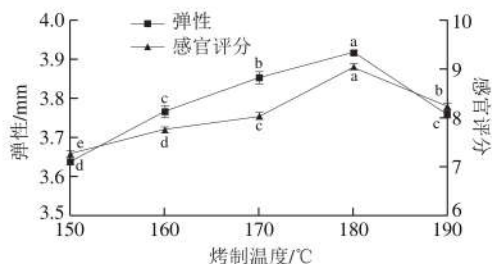


图3 烤制温度对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

Fig. 3 Effects of roasting temperature on the sensory score and elasticity of roasted crayfish

由图3可知,小龙虾的感官评分随着烤制温度的升高呈先上升后下降趋势,当烤制温度为180 °C时,小龙虾的感官评分达到最大值9.05分,此时的小龙虾滋味鲜美、虾香味十足,当温度加热到190 °C时,感官评分开始下降。原因是温度过高时,虾肉中水分挥发快,虾肉变干硬、肉质变老甚至变焦。也可能是由于烤制温度较高,虾肉的组织结构遭到破坏,使硬度和咀嚼性上升,导致口感变差,表面光泽度也随之降低。小龙虾的弹性呈先上升后下降的趋势,当烤制温度为180 °C时,小龙虾弹性最好,肉质持水能力较强,这与感官评分结果一致。原因可能是由于热溶性胶原蛋白形成可溶性明胶,而肌原纤维也因收缩而紧密,导致弹性最大^[22]。其次还可能是由于虾肉经过加热弹性逐渐增加,因为肌肉纤维内外充满了热凝固的蛋白质,这加强了肌肉纤维的连接,从而增强了虾肉内部组织,防止了肉质崩塌^[23]。随着温度的增加,弹性开始下降,主要原因是烤箱内温度过高,

导致表面水分加快流失,肉质紧缩,大大降低虾肉的口感,增加咀嚼感。

2.1.4 烤制时间对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

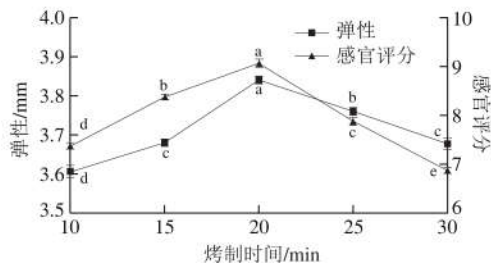


图4 烤制时间对烤制小龙虾感官评分和弹性的影响

Fig. 4 Effects of roasting time on the sensory score and elasticity of roasted crayfish

由图4可知,小龙虾的感官评分随烤制时间的延长呈先上升后下降的趋势,当烤制时间为20 min,感官评分达到最大值,此时的小龙虾在加热过程中,虾肉中的蛋白质迅速变化和凝固,形成良好的口感,同时也可以防止水分和风味物质在小龙虾肉质中的扩散,因此,加热时间直接影响小龙虾的风味和口感^[24]。当烤制时间为30 min时,感官评分下降。这可能是由于过长的烤制时间会使虾肉内部水分大量流失,蛋白质急剧降解,而引起虾肉形态发生劣变,时间越长,劣变越明显^[25]。小龙虾的弹性随烤制时间的延长呈先上升后下降的趋势。当烤制时间为20 min时,弹性达到最大值,此时的小龙虾肉质弹性达到烤制时最佳状态,说明热处理条件可以改善虾肉的弹性,这也与感官评定结果一致,且烤制时间20 min时品质最佳。随着烤制时间的延长,弹性开始下降。这也说明加热时间延长,虾肉中的水分含量不断下降,蛋白质发生显著变化,蛋白质三级、四级网状结构也遭到严重破坏^[26]。

单因素试验结果中,4种处理的感官评分和弹性均出现了明显转折区间,经分析确定小龙虾的较适烤制温度为180 °C,烤制时间15、20、25 min,腌制液盐含量8、12、16 g/100 mL,腌制时间20、30、40 min,以此方案继续进行响应面试验。

2.2 响应面优化试验结果及分析

2.2.1 响应面试验设计、结果及回归模型的分析

将小龙虾感官评分(Y_1)和弹性(Y_2)设置为响应值,以烤制时间(A)、腌制液盐含量(B)和腌制时间(C)为自变量,进行响应面优化实验,根据Box-Behnken设计原理进行17组试验,具体试验方案及结果见表3。使用Design-Expert 8.0.6软件对试验结果进行多元回归拟合分析,得出二次方程模型为 $Y_1=9.08+0.40A+0.29B-0.41C+0.14AB-0.56AC-0.29BC-1.37A^2-0.70B^2-0.90C^2$ 、 $Y_2=3.91+0.08A+0.05B+0.09C+0.10AB-0.03AC+0.06BC-0.12A^2-0.16B^2-0.07C^2$ 。

表3 响应面试验设计及结果

试验号	A烤制时间/min	B腌制液盐含量/(g/100 mL)	C腌制时间/min	Y_1 感官评分	Y_2 弹性/mm
1	1	0	-1	8.25	3.75
2	1	0	1	6.75	3.88
3	0	-1	1	7.05	3.67
4	-1	-1	0	6.55	3.62
5	0	0	0	9.00	3.87
6	0	0	0	9.15	3.89
7	-1	0	-1	6.55	3.51
8	0	1	-1	8.50	3.58
9	0	-1	-1	7.23	3.61
10	1	1	0	7.75	3.85
11	0	1	1	7.15	3.87
12	0	0	0	8.95	3.92
13	0	0	0	9.05	3.90
14	-1	0	1	6.75	3.74
15	0	0	0	9.25	3.91
16	1	-1	0	7.00	3.56
17	-1	1	0	6.75	3.52

表4 感官评价回归模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	19.73	9	2.19	157.63	<0.000 1
A	1.28	1	1.28	92.04	<0.000 1
B	0.67	1	0.67	48.38	0.000 2
C	1.34	1	1.34	96.70	<0.000 1
AB	0.08	1	0.08	5.44	0.052 5
AC	1.27	1	1.27	91.01	<0.000 1
BC	0.34	1	0.34	24.61	0.001 6
A^2	7.89	1	7.89	567.21	<0.000 1
B^2	2.06	1	2.06	147.82	<0.000 1
C^2	3.40	1	3.40	244.55	<0.000 1
残差	0.10	7	0.01		
失拟项	0.04	3	0.01	0.90	0.513 3
纯误差	0.06	4	0.02		
总和	19.83	16			

由表4可知,模型的 $F=157.63$,且 $P<0.01$,说明该二次多元回归模型极显著。同时,该模型的失拟项 $F=0.90$, $P>0.05$ ($P=0.513\ 3$),因此失拟项不显著,说明该模型拟合良好,能够对烤制小龙虾的感官评分进行分析和预测,在实验应用中具有统计学意义。一次项A、B、C对感官评分影响极显著($P<0.01$),二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对感官评分影响极显著($P<0.01$),交互因素中,AC和BC对感官评分影响极显著($P<0.01$),AB对感官评分影响不显著。根据F值得出,各单因素对感官评分影响大小顺序为腌制时间(C)>烤制时间(A)>腌制液盐含量(B),二次项因素影响顺序为 $A^2>C^2>B^2$ 。

表5 弹性回归模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.39	9	0.04	123.36	<0.000 1
A	0.05	1	0.05	150.59	<0.000 1
B	0.02	1	0.02	46.19	0.0003
C	0.06	1	0.06	179.67	<0.000 1
AB	0.04	1	0.04	95.23	<0.000 1
AC	0.00	1	0.00	7.13	0.032 0
BC	0.01	1	0.01	37.71	0.0005
A^2	0.06	1	0.06	168.59	<0.000 1
B^2	0.10	1	0.10	292.17	<0.000 1
C^2	0.02	1	0.02	64.86	<0.000 1
残差	0.002	7	0.004		
失拟项	0.002	3	0.005	2.39	0.209 9
纯误差	0.009	4	0.002		
总和	0.390	16			

由表5可知,模型的 F 值=123.36,且 $P<0.01$,说明该二次多元回归模型极显著。同时,该模型的失拟项 $F=2.39$, $P>0.05$ ($P=0.209\ 9$),因此失拟项不显著,说明该模型拟合良好,能够对烤制小龙虾的弹性进行分析和预测,在实验应用中具有统计学意义。一次项A、B、C对弹性影响极显著($P<0.01$),二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对弹性影响极显著($P<0.01$),交互项因素中,AB和BC对弹性的影响极显著($P<0.01$),AC对弹性的影响显著($P<0.05$)。根据F值得出,各单因素对弹性的影响大小顺序为 $C>A>B$,交互项因素影响大小顺序为 $AB>BC>AC$,二次项因素影响大小顺序为 $B^2>A^2>C^2$ 。

2.2.2 各因素交互作用分析

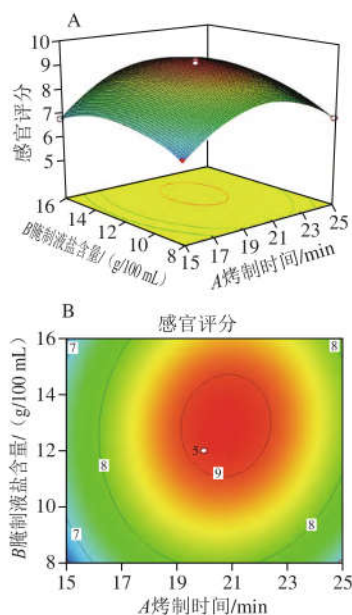


图5 烤制时间与腌制液盐含量交互作用烤制小龙虾感官评分影响的响应面图和等高线图

Fig. 5 Response surface plots and contour plots showing the interactive effects of roasting time and salt concentration on sensory score of roasted crayfish

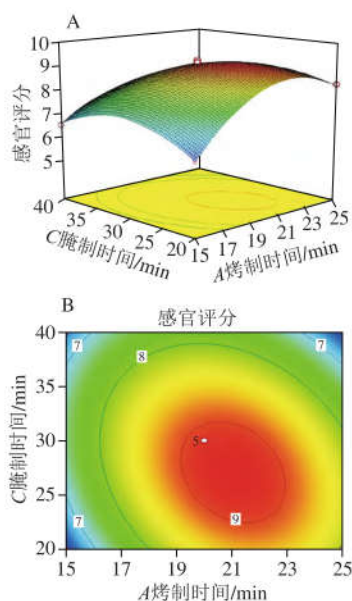


图6 烤制时间与腌制时间交互作用对烤制小龙虾感官评分影响的响应面图和等高线图

Fig. 6 Response surface plots and contour plots showing the interactive effects of roasting time and curing time on sensory score of roasted crayfish

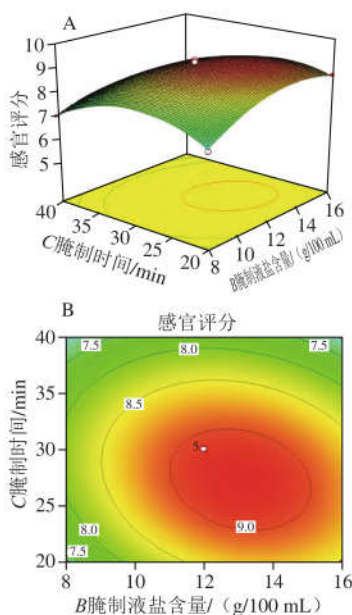


图7 腌制液盐含量与腌制时间交互作用对烤制小龙虾感官评分影响的响应面图和等高线图

Fig. 7 Response surface plots and contour plots showing the interactive effects of salt concentration and curing time on sensory score of roasted crayfish

根据响应值的回归方程得到响应面图和等高线图,可以直观地显示各因素之间的交互作用^[27]。响应面3D图坡度越陡,说明等高线图椭圆,表明各因素之间的交互作用越强^[28]。由图5~7可知,烤制时间和腌制时间、腌制液盐含量和腌制时间的3D图坡度较陡,等高线图趋近于椭圆,说明二者之间交互作用较强。烤制时间和腌制液盐含量的3D曲面图较平坦且等高线偏圆形,表明二者之间交互作用弱,这也与上表方差分析的结果相符。由

图5可知,当烤制时间不变时,随着腌制液盐含量的增加,小龙虾感官评分先升后降;由图6可知,当烤制时间不变时,随着腌制时间的延长,小龙虾的感官评分先升后降;由图7可知,当腌制液盐含量不变时,随着腌制时间的延长,小龙虾感官评分呈先升后降的趋势。在小龙虾腌制过程中,空化作用不仅加速了蛋白降解,而且提高了虾蛋白的溶解度。同时,扩大肌纤维组织间隙,提高了虾肉的持水力,也提高了虾肉的保水性和品质。

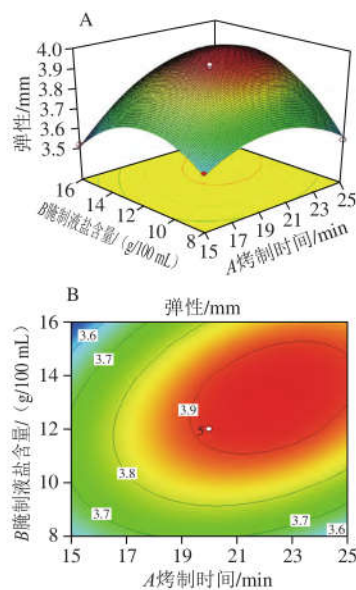


图8 烤制时间与腌制液盐含量交互作用对烤制小龙虾弹性影响的响应面图和等高线图

Fig. 8 Response surface plots and contour plots showing the interactive effects of roasting time and salt concentration on elasticity of roasted crayfish

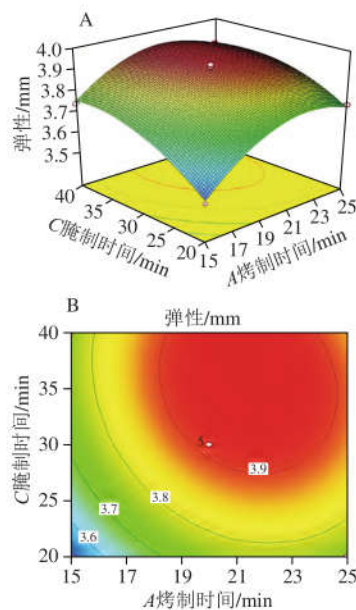


图9 烤制时间与腌制时间交互作用对烤制小龙虾弹性影响的响应面图和等高线图

Fig. 9 Response surface plots and contour plots showing the interactive effect of baking time and curing time on elasticity of roasted crayfish

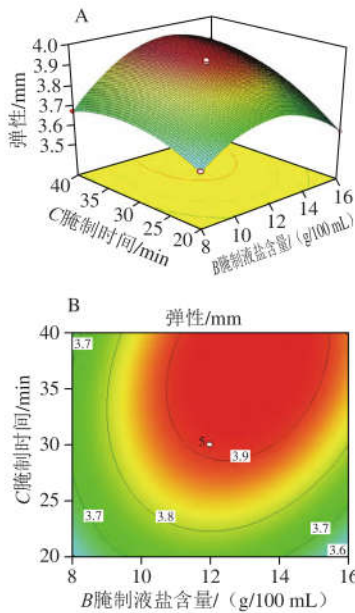


图10 腌制液盐含量与腌制时间交互作用对烤制小龙虾弹性影响的响应面图和等高线图

Fig. 10 Response surface plots and contour plots showing the interactive effect of salt concentration and curing time on elasticity of roasted crayfish

由图8~10可知,烤制时间与腌制液盐含量、腌制液盐含量与腌制时间的3D图坡面较陡,等高线图趋近于椭圆,说明二者之间交互作用较强。烤制时间与腌制时间的3D曲面图较平坦,且等高线偏圆形,表明二者之间交互作用较弱,这也与上表方差分析的结果相符。由图8可知,当烤制时间固定不变时,随着腌制液盐含量的增加弹性逐渐增大,在腌制液盐含量12 g/100 mL时达到最大值,随后继续增加腌制液盐含量,弹性逐渐下降。在整个腌制过程中,随着腌制液盐含量的增加,腌制后的小龙虾水分含量降低,且腌制液的盐含量越高,水分含量下降越显著^[29],所以导致弹性呈下降趋势。由图9可知,当烤制时间不变时,随着腌制时间的延长,弹性呈先上升后下降的趋势。这可能是由于腌制时间太久,肌肉组织发生不可逆的劣变,导致虾肉弹性下降^[30]。也可能是虾肉本身蛋白质发生了变性。由图10可知,当腌制液盐含量不变时,随着腌制时间的延长,弹性逐渐增大,后缓慢下降。原因可能是虾肉在腌制液中浸泡时间太长,使虾肉糜烂,弹性下降。还有一个原因可能是虾肉内富含的肌原纤维蛋白易受热变性,在较高温度下虾肉肌原纤维蛋白会形成异肽键,导致弹性下降^[31]。

2.2.3 最佳腌制工艺及实验验证

采用Design-Expert 8.0.6软件对烤制小龙虾工艺条件进行优化,得到最佳烤制工艺为烤制时间21.29 min、腌制液盐含量12.91 g/100 mL、腌制时间30.09 min,在此工艺条件下,小龙虾的感官评分预测值为9.12分,弹性为3.92 mm。考虑到生产车间的可实际操作性,将最佳工艺

调整为烤制时间20 min、腌制液盐含量12 g/100 mL、腌制时间30 min,进行验证实验,3次实验后取其平均值。

表6 验证实验结果

Table 6 Experimental verification of the optimized process					
加工方式	A烤制时间/min	B腌制液盐含量/(g/100 mL)	C腌制时间/min	感官评分	弹性/mm
烤制加工(预测)	21.29	12.91	30.09	9.12	3.92
烤制加工(实际)	20.0	12.0	30.0	9.08	3.88

由表6可知,验证实验结果为感官评分为9.08分,弹性为3.88 mm,与预测值无显著差异,证明响应面分析法对于烤制小龙虾工艺的优化结果可靠,具有使用价值。

2.3 烤制对小龙虾脂肪酸含量的影响

表7 不同加工方式小龙虾脂肪酸含量的比较

Table 7 Comparison of the fatty acid content of raw, boiled and roasted crayfish

		%		
脂肪酸类别	脂肪酸名称	鲜虾	水煮虾	烤虾
SFA	C _{14:0}	0.37±0.06 ^a	0.77±0.02 ^a	0.21±0.03 ^a
	C _{15:0}	0.48±0.01 ^a	0.53±0.03 ^a	0.21±0.01 ^a
	C _{16:0}	15.36±0.47 ^c	17.41±0.35 ^b	11.35±0.35 ^a
	C _{17:0}	0.87±0.01 ^a	0.61±0.03 ^a	0.43±0.00 ^a
	C _{18:0}	8.29±0.28 ^c	6.11±0.05 ^b	5.68±0.10 ^a
	C _{20:0}		0.31±0.00 ^a	0.30±0.00 ^a
	C _{24:0}	9.86±0.41 ^c	5.46±0.25 ^b	4.84±0.04 ^a
	总量	35.21±0.39 ^c	31.17±0.07 ^b	23.01±0.52 ^a
MUFA	C _{16:1}	1.91±0.14 ^a	3.63±0.16 ^b	1.06±0.07 ^a
	C _{17:1}	0.35±0.01 ^a	0.32±0.00 ^a	0.21±0.02 ^a
	C _{18:1 n-7}	0.28±0.03 ^a	0.21±0.00 ^a	
	C _{18:1 n-9c}	18.92±0.78 ^c	21.87±0.99 ^b	28.25±0.30 ^a
	C _{20:1}	0.66±0.12 ^b	0.59±0.12 ^c	0.81±0.18 ^a
	总量	22.12±0.76 ^c	26.61±1.03 ^b	30.31±0.21 ^a
PUFA	C _{18:2 n-6c}	14.47±0.03 ^c	23.03±0.28 ^b	28.68±0.52 ^a
	C _{18:3 n-3}	4.01±0.10 ^c	3.92±0.09 ^b	4.55±0.18 ^a
	C _{20:2}	1.36±0.06 ^b	0.85±0.01 ^a	0.68±0.00 ^a
	C _{20:3 n-3}	0.52±0.02 ^a	0.25±0.00 ^a	0.32±0.00 ^a
	C _{20:4 n-6}	5.39±0.13 ^c	2.85±0.08 ^b	2.95±0.10 ^a
	C _{22:6}	4.21±0.18 ^c	2.81±0.07 ^b	1.98±0.02 ^a
	总量	29.95±0.52 ^c	33.71±0.55 ^b	39.18±0.56 ^a

注:鲜虾.生虾肉;水煮虾.水沸腾下锅,煮制8 min捞出;同列小写字母不同,表示差异显著($P<0.05$);表8同。SFA.饱和脂肪酸(saturated fatty acid); MUFA.单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid); PUFA.多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid)。

动物机体的能量来源和储能物质之一是脂质,脂质在一定程度上影响细胞膜的结构和功能,PUFA是生物生长和繁殖所必需的^[32]。由表7可知,不同加工方式小龙虾中共检出18种脂肪酸,其中SFA 7种、MUFA 5种、PUFA 6种,烤虾中MUFA和PUFA的含量分别大于SFA。可能是小龙虾的脂肪在高温加热过程中发生一系列化学反应,如水解、氧化、断裂等,由于受到高温、时间等因素的影响,形成的不饱和脂肪酸含量增加^[33]。众所周知,不饱和脂肪酸是一种主要的膳食脂肪酸,具有

调节血脂、保护视力等作用。烤虾中的MUFA主要以反油酸($C_{18:1\ n-9c}$)为主,相对鲜虾和水煮虾来说,烤虾的反油酸($C_{18:1\ n-9c}$)含量显著高于二者。PUFA主要以亚油酸($C_{18:2\ n-6c}$)和亚麻酸($C_{18:3\ n-3}$)为主。亚油酸可以降低血浆胆固醇水平,在皮肤和伤口中有愈合作用^[34]。Ren Shuang等^[35]研究发现,鲈鱼烘干制作成熟过程中PUFA和MUFA含量呈上升趋势,与本研究结果一致。

2.4 烤制对小龙虾氨基酸含量的影响

表8 不同加工方式小龙虾游离氨基酸含量的比较

Table 8 Comparison of the free amino acid content of raw, boiled and roasted crayfish

氨基酸	鲜虾	水煮虾	烤虾
天冬氨酸	1.53 ± 0.00^a	1.65 ± 0.02^a	1.75 ± 0.02^a
苏氨酸	0.87 ± 0.00^a	0.74 ± 0.00^a	0.64 ± 0.00^a
丝氨酸	0.52 ± 0.00^a	0.46 ± 0.02^a	0.35 ± 0.01^a
谷氨酸	2.47 ± 0.01^a	3.54 ± 0.02^a	2.36 ± 0.00^a
甘氨酸	0.51 ± 0.00^a	0.73 ± 0.02^a	0.81 ± 0.00^a
丙氨酸	1.09 ± 0.00^a	1.03 ± 0.00^a	1.05 ± 0.00^a
脯氨酸	0.10 ± 0.00^a	0.07 ± 0.00^a	0.06 ± 0.00^a
缬氨酸	0.61 ± 0.00^a	0.51 ± 0.00^a	0.71 ± 0.00^a
蛋氨酸	0.40 ± 0.00^a	0.33 ± 0.02^a	0.47 ± 0.00^a
异亮氨酸	0.70 ± 0.00^a	0.61 ± 0.00^a	0.77 ± 0.01^a
亮氨酸	1.24 ± 0.02^a	0.88 ± 0.02^a	1.26 ± 0.00^a
酪氨酸	0.43 ± 0.01^a	0.51 ± 0.00^a	0.58 ± 0.00^a
苯丙氨酸	0.41 ± 0.00^a	0.39 ± 0.00^a	0.62 ± 0.01^a
赖氨酸	1.47 ± 0.00^a	1.57 ± 0.00^a	1.41 ± 0.00^a
组氨酸	0.31 ± 0.00^a	0.27 ± 0.02^a	0.39 ± 0.01^a
精氨酸	1.65 ± 0.04^a	1.65 ± 0.00^a	1.84 ± 0.02^a
脯氨酸	0.53 ± 0.03^a	0.44 ± 0.04^a	
总氨基酸	14.81 ± 0.08^a	15.77 ± 0.05^a	14.98 ± 0.04^a
必需氨基酸	5.71 ± 0.00^a	5.02 ± 0.04^a	5.88 ± 0.00^a
风味氨基酸	5.59 ± 0.01^a	6.05 ± 0.02^a	6.86 ± 0.02^a

注:必需氨基酸包括苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸;风味氨基酸包括天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸和丙氨酸。

游离氨基酸不仅是水产品的主要风味成分之一,也是人体所必需的营养物质,其种类和含量会直接影响水产品的风味和口感。食物中的氨基酸通常有不同的味道,如酸、甜、苦等,根据呈味特点可分为3类:甜味氨基酸、鲜味氨基酸、苦味氨基酸。天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸这几种氨基酸是虾类典型的呈味氨基酸。由表8可知,不同加工方式下游离氨基酸总量均呈现波动变化的趋势,但变化并不明显。其原因可能是加热处理会引起含氮物质成分的变化^[36]。烤虾的天冬氨酸、甘氨酸、缬氨酸分别占总氨基酸的11.7%、5.4%、4.7%,而且天冬氨酸和甘氨酸与盐结合后,会产生明显的鲜味,所以烤虾的精氨酸含量显著高于鲜虾和水煮虾。这也表明小龙虾具有明显的海产虾类的鲜美品质,也进一步证明小龙虾具有较好的氨基酸平衡作用,是一种优质的动物蛋白源^[37]。有研究表明,天冬氨酸可以治疗心脏病、高血压和肝病,改善肝功能,对心肌也

有一定的保护作用^[38]。烤虾中天冬氨酸、甘氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸含量均显著高于鲜虾和水煮虾($P < 0.05$),随着烤虾的烤制温度升高、烤制时间延长,虾肌肉组织中的蛋白水解酶和氨肽酶的分解作用会使虾肉中的蛋白质发生裂解,从而游离氨基酸含量上升^[39]。孙鲁浩等^[40]指出,在加热过程中随着加热温度的增加,天冬氨酸、甘氨酸含量呈增加的趋势。说明经过高温烤制可以充分发挥虾本身的鲜香味。

2.5 烤制对小龙虾滋味特征的影响

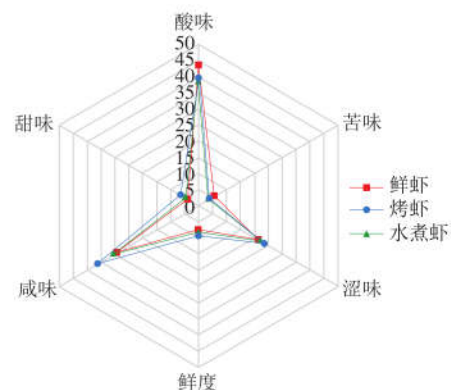


图11 不同加工方式对小龙虾电子舌滋味特征的影响

Fig. 11 Effect of different cooking methods on the electronic tongue taste characteristics of crayfish

通过电子舌技术对鲜虾、水煮虾及烤虾产品的滋味进行评价。SA402B电子舌共有5个传感器,根据不同的加工方式在5个传感器上的响应值绘制味觉雷达图。由图11可知,鲜虾、水煮虾和烤虾肉产品滋味轮廓存在显著差别($P < 0.05$),尤其是烤虾的鲜度、咸味、甜味都显著高于鲜虾和水煮虾。这可能是因为烤虾经过高温处理,促进了虾体蛋白质和多肽的分解,从而积累了鲜味氨基酸,如谷氨酸和赖氨酸^[41],以及甜味氨基酸,如苏氨酸、甘氨酸和丝氨酸等^[42]。这与许丹等^[43]研究加工方式对金枪鱼鱼糜制品中的结论一致。而在酸味和苦味上,鲜虾显著高于烤虾和水煮虾,说明不同的加热条件使甜味氨基酸积累的程度也不同。因此导致鲜虾和水煮虾与烤虾味道上的差异很大。其次,烹饪方式不同也可能导致小龙虾之间的滋味存在差距,这可能是由于不同处理对虾肉游离氨基酸的影响,从而导致美拉德反应程度的差异。虾肉在烤制时会产生香气的主要原因是虾肉中含有丰富的蛋白质,而这些蛋白质在温度的影响下会使美拉德反应更剧烈,香味物质倍增。

3 结论

对小龙虾烤制工艺进行研究,通过单因素试验得到较适烤制温度为180℃。根据响应面试验得出,各因素对



感官评价影响大小为腌制时间(C) > 烤制时间(A) > 腌制液盐含量(B), 对弹性影响大小为腌制时间(C) > 烤制时间(A) > 腌制液盐含量(B)。经优化后的小龙虾烤制条件为烤制时间20 min、腌制液盐含量12 g/100 mL、腌制时间30 min, 此方案可使小龙虾感官评分达到9.08分, 弹性达到3.88 mm。验证实验结果与模型预测结果无显著差异。在最优工艺条件下进行脂肪酸分析、氨基酸组成分析和电子舌测定。结果表明, 烤虾含有丰富的MUFA和PUFA及各种氨基酸, 不仅是重要的营养成分, 也是重要的风味前体物质, 为美拉德反应和脂质热降解提供了丰富的底物。通过对滋味的测定, 发现适当的高温烤制可以激发小龙虾甜味和鲜香味。本研究可为小龙虾即食产品提供研究基础, 为提高水产品利用率提供技术支持。

参考文献:

- [1] 李楚君, 涂宗财, 温平威, 等. 中国小龙虾产业发展现状和未来发展趋势[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 463-470. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021040290.
- [2] 吴晨燕, 王晓艳, 王洋, 等. 熟制麻辣小龙虾冷藏和冻藏条件下的品质变化[J]. 肉类研究, 2018, 32(5): 52-56. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201805009.
- [3] LI Yingchang, LI Mingyang, LI Chao, et al. Optimized maxent model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China[J]. Forests, 2020 11(3): 302. DOI:10.3390/f11030302.
- [4] YU W, SHI C, GU Y, et al. The culture influence on the collectivism of Chinese customers behavior in the fast-food industry[J]. Energy Procedia, 2011, 13(10): 4055-4062. DOI:10.1016/j.egypro.2011.11.584.
- [5] 鲁淑彦. 软烤虾工艺条件与贮藏性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [6] 李贤良, 杨亮时, 郭全友, 等. 水分活度及pH值对高水分烤虾品质和贮藏性的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11709-11711. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2009.24.049.
- [7] 涂敏建, 迟海, 杨宪时, 等. 水分含量对南极磷虾烤虾品质影响及货架期分析[J]. 海洋渔业, 2013, 35(3): 358-363. DOI:10.13233/j.cnki.mar.fish.2013.03.003.
- [8] 高轶楠, 李喜宏, 田光娟, 等. 微波高水分多口味烤鱼工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(3): 71-75. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.03.013.
- [9] RAJKOWSKA-MYSLIWIEC M, POKORSKA-NIEWIADA K, WITCZAK A, et al. Health benefits and risks associated with element uptake from grilled fish and fish products[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(3): 957-964. DOI:10.1002/JSFA.11429.
- [10] LIU Huan, HUI Teng, FANG Fei, et al. Characterization and discrimination of key aroma compounds in pre- and postrigor roasted mutton by GC-O-MS, GC E-nose and aroma recombination experiments[J]. Foods, 2021, 10(10): 2387. DOI:10.3390/foods10102387.
- [11] 孔金花, 葛庆丰, 诸永志, 等. 响应面法优化小龙虾超声波辅助腌制工艺[J]. 肉类研究, 2021, 35(3): 23-29. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210309-061.
- [12] ZHANG Xinxiao, WANG Huhu, LI Nuo, et al. High CO₂-modified atmosphere packaging for extension of shelf-life of chilled yellow-feather broiler meat: a special breed in Asia[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1123-1129. DOI:10.1016/j.lwt.2015.07.039.
- [13] 曹荣, 刘淇, 殷邦忠, 等. 虾仁TPA质构分析及不同熟制加工方式对其品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(6): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2010.06.001.
- [14] 张瑞萍, 朱永禄, 朱效兵. 内蒙古临河地区牛肉干质构与感官分析[J]. 现代食品, 2021(22): 206-209. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2021.22.057.
- [15] 吴浩然, 林琳, 程华峰, 等. 河蟹分割加工边角料的营养成分分析及品质评价[J]. 肉类工业, 2019(6): 31-36; 57.
- [16] LEE T H, HAU C H, ALIA A N, et al. Amino acid determination by HPLC combined with multivariate approach for geographical classification of Malaysian edible bird's nest[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104399. DOI:10.1016/j.jfca.2022.104399.
- [17] AOUADI B, ZAUUKU J, VITALIS F, et al. Historical evolution and food control achievements of near infrared spectroscopy, electronic nose, and electronic tongue: critical overview[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5479. DOI:10.3390/s20195479.
- [18] MCDONNELL C K, ALLEN P, MORIN C, et al. The effect of ultrasonic salting on protein and water-protein interactions in meat[J]. Food Chemistry, 2014, 147(15): 245-251. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.09.125.
- [19] JIANG S T, HWANG B S, MOODY M W, et al. Thermostability and freeze denaturation of grass prawn (*Penaeus monodon*) muscle proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(11): 1998-2001. DOI:10.1021/jf00011a024.
- [20] DU Lei, ZHOU Guanghong, XU Xinglian, et al. Study on kinetics of mass transfer in water-boiled salted duck during wet-curing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(4): 578-584. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2009.08.034.
- [21] 王艳芳, 林捷, 郑华, 等. 腌制条件对三黄鸡品质的影响[C]//食品工业新技术与新进展学术研讨会暨2014年广东省食品学会年会论文集. 广州: 广东省食品学会, 2014: 130-135.
- [22] HUANG Hailin, YAO Houshan, WANG Yi, et al. Proteomic identification of tumor biomarkers associated with primary gallbladder cancer[J]. World Journal of Gastroenterology, 2014, 20(18): 5511-5518. DOI:10.3748/wjg.v20.i18.5511.
- [23] 吴燕燕, 李金星, 王悦齐, 等. 加热温度对海鲈鱼肌肉品质的影响[J]. 渔业现代化, 2020, 47(6): 49-57.
- [24] 于晓慧. 即食小龙虾保鲜剂的复配及其抑菌机理的初步研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [25] 丁国微, 胡小松, 李瑶, 等. 杀菌条件对即食醉制虾仁品质的影响[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(7): 58-62. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2012.07.015.
- [26] 郭全友, 王晓晋, 姜朝军. 南美白对虾即食虾仁常温贮藏品质变化与货架期研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 121-126. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.06.026.
- [27] SOBHANI A, NOORMOHAMMADI N, MORADI K, et al. Optimization of heat and ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from *Echinacea purpurea* using response surface methodology[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2022, 31: 100399. DOI:10.1080/19476337.2019.1659418.
- [28] CHEN Zhi, ZENG Jun, ZHANG Zhibo, et al. Preparation and application of polyethyleneimine-modified corn cob magnetic gel for removal of Pb(II) and Cu(II) ions from aqueous solution[J]. RSC Advances, 2022, 12: 1950-1960. DOI:10.1039/D1RA08699E.
- [29] 陈实, 柳琳, 王逸鑫, 等. 不同盐度腌制下青鱼品质变化[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(6): 1153-1163. DOI:10.12024/jsou.20200102915.

- [30] 王逸鑫, 吴涵, 黄海源, 等. 超声波辅助腌制对青鱼腌制品品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 142-146; 160. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024650.
- [31] 黄亚明. 克氏原螯虾高温劣变机理及质构保护研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020. DOI:10.27131/d.cnki.ghugc.2020.001111.
- [32] 刘志东, 陈雪忠, 曲映红, 等. 南极冰鱼与南极磷虾营养成分分析及比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 228-233. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.02.047.
- [33] 魏宁果, 范芳芳, 贾亦森, 等. 加热处理对4种植物油的脂肪酸组成的影响[J]. 粮食与食品工业, 2022(5): 29. DOI:10.3969/j.issn.1672-5026.2022.05.003.
- [34] SINCLAIR A J. 世界食物供应中亚油酸含量高对人体健康的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(3): 10. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.03.003.
- [35] REN Shuang, LI Pengpeng, GENG Zhiming, et al. Lipolysis and lipid oxidation during processing of chinese traditional dry-cured white amur bream (*Parabramis pekinensis*)[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2017, 26: 719-730. DOI:10.1080/10498850.2016.1276112.
- [36] LIU Ying, HUANG Fan, YANG Hong, et al. Effects of preservation methods on amino acids and 5'-nucleotides of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 221-225. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.142.
- [37] 张高静, 韩丽萍, 孙剑锋, 等. 南美白对虾营养成分分析与评价[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 254-260.
- [38] QI L, MARTIN-SANDOVAL M S, MERCHANT S, et al. Aspartate availability limits hematopoietic stem cell function during hematopoietic regeneration[J]. 2021, 28(11): 1982-1999.e8. DOI:10.1016/j.stem.2021.07.011.
- [39] BAI J, BAKER G L, BAKER S M, et al. Simultaneous determination of amino acids and biogenic amines in tuna and mahi-mahi by reversed-phase ultra-high performance liquid chromatography[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2019(2): 1-13. DOI:10.1080/10498850.2019.1652715.
- [40] 孙鲁浩, 毛伟杰, 吉宏武, 等. 贮藏时间和加热温度对凡纳滨对虾虾仁ATP关联化合物及品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(1): 78-86. DOI:10.3969/j.issn.1673-9159.2020.01.011.
- [41] YU Zilin, JIANG Hongrui, GUO Roongcan, et al. Taste, umami-enhance effect and amino acid sequence of peptides separated from silkworm pupa hydrolysate[J]. Food Research International, 2018, 108: 144-150. DOI:10.1016/j.foodres.2018.02.047.
- [42] 黄启红, 熊娟, 伍玲燕. 不同烹调方法对食品营养素的影响[J]. 食品工程, 2013(1): 62-64. DOI:10.3969/j.issn.1673-6044.2013.01.021.
- [43] 许丹, 朱剑, 严忠雍, 等. 加工方式对金枪鱼鱼糜制品氨基酸组成和营养价值影响研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(11): 74-80. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2020.11.016.