姜晓东, 张帅中, 彭博, 等. 卤虫饼干研制及其营养与风味分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 260−272. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080046

JIANG Xiaodong, ZHANG Shuaizhong, PENG Bo, et al. Development of *Artemia* Biscuits and Analysis of Their Nutritional and Flavor Characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 260−272. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080046

· 工艺技术 ·

卤虫饼干研制及其营养与风味分析

姜晓东[1,2], 张帅中[1,2], 彭　博[3], 王　颖[1,2,*], 孙元芹[1,2], 李　晓[1,2], 纪　蕾[1,2]

（1.山东省海洋科学研究院, 山东青岛 266104;
2.青岛市水产生物品质评价与利用工程研究中心, 山东青岛 266104;
3.中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266100）

摘　要: 为挖掘卤虫作为食品资源的开发潜力，推进卤虫产业多元化发展并开拓饼干食品市场。本研究以卤虫为原料，采用单因素实验考察卤虫添加量、藜麦粉添加量、烘焙时间和温度对饼干感官评分的影响，结合响应面试验和人工神经网络确定最佳工艺，并通过营养成分、电子舌、顶空固相微萃取气质联用等试验分析卤虫饼干营养和风味特性。结果表明：相较于响应面模型，人工神经网络具有更小的均方根误差 1.8614 和更大的相关系数 0.9602，实测值与预测值之间误差更小，具有更强更稳定的预测和优化能力。采用人工神经网络模型优化得卤虫饼干工艺参数：添加卤虫 13.56 g，藜麦粉 47.26 g、低筋小麦粉 100 g、牛奶 40 g、玉米油 30 g、黄油 60 g、盐 2 g、木糖醇 25 g，于 150 ℃ 上烘烤 20.70 min，此条件下卤虫饼干感官评分最高，为 73.00。卤虫饼干蛋白质含量为 6.46 g/100 g、脂肪含量为 30.30 g/100 g。电子舌分析表明，卤虫饼干滋味以鲜咸为主。气相色谱-质谱结果表明，卤虫饼干含挥发性化合物 48 种，主要为醛类、酸类、酯类和呋喃吡喃类，其中含量与气味活性值最高的化合物均为（E,E）-2,4-癸二烯醛，分别为 103.7 μg/kg 和 3840.74。卤虫饼干的研制丰富了饼干市场产品种类，为卤虫资源在休闲食品领域的开发应用提供了新的渠道和理论参考。

关键词: 卤虫, 饼干, 人工神经网络模型, 工艺, 风味表征, 感官评分
中图分类号: TS254.5　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0260−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080046
本文网刊:

Development of *Artemia* Biscuits and Analysis of Their Nutritional and Flavor Characteristics

JIANG Xiaodong[1,2], ZHANG Shuaizhong[1,2], PENG Bo[3], WANG Ying[1,2,*], SUN Yuanqin[1,2], LI Xiao[1,2], JI Lei[1,2]

（1.Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China;
2.Municipal Engineering Research Center of Aquatic Biological Quality Evaluation and Application, Qingdao 266104, China;
3.College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China）

Abstract: To explore the potential of *Artemia* to be developed as a food resource, promote the diversified development of the *Artemia* industry, and expand the biscuit food market. Biscuits containing *Artemia* flavor were developed. Single-factor experiments were performed to evaluate the effects of the *Artemia* addition, quinoa flour supplementation, and baking time and temperature on the sensory scores of the biscuits. Subsequently, the optimal processing parameters were determined using both response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) modeling. Furthermore, the nutritional and flavor profiles of the *Artemia* biscuits were characterized by means of nutritional composition and electronic tongue analyses as well as headspace solid-phase microextraction-coupled gas chromatography-mass spectrometry (SPME-

收稿日期: 2025−08−11
基金项目: 国家重点研发计划项目（2024YFD2401604）; 山东省虾蟹产业技术体系建设任务项目（SDAIT-13-01）; 山东省海洋科学研究院科研补助经费课题（2024SDMSRI20240404）。
作者简介: 姜晓东（1988−）, 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: dejiaaa@126.com。
*** 通信作者:** 王颖（1971−）, 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 海洋生物资源利用, E-mail: food_rc@sina.com。

GC-MS). Compared with the RSM model, the ANN model exhibited superior predictive and optimization capabilities, as demonstrated by its lower root mean square error (RMSE) of 1.8614, higher correlation coefficient (*r*) of 0.9602, and smaller errors between the measured and predicted values. The ANN-optimized biscuit formulation was as follows: *Artemia* (13.56 g), quinoa flour (47.26 g), low-gluten wheat flour (100 g), milk (40 g), corn oil (30 g), butter (60 g), salt (2 g), and xylitol (25 g), baked at 150 °C for 20.70 min. This optimized process yielded the highest sensory score (73.00). Additionally, the biscuits contained 6.46 g/100 g protein and 30.30 g/100 g fat. Electronic tongue analysis indicated that the taste profile was dominated by umami and saltiness. Moreover, GC-MS identified 48 volatile compounds, primarily aldehydes, acids, esters, furans, and pyrazines, with (E,E)-2,4-decadienal exhibiting the highest content (103.7 μg/kg) and odor activity value (3840.74). The development of *Artemia* biscuits enriches the variety of products in the biscuit market and offers a novel approach and theoretical foundation for utilizing *Artemia* resources in the snack-food industry.

Key words: *Artemi*a; biscuit; artificial neural network model; technique; flavor characteristics; sensory scores

卤虫（*Artemia*），又称丰年虾、盐虫子、盐水丰年虫，是一类广泛分布于全球高盐度水域的小型甲壳类生物[1]。其休眠卵具有易于储存及孵化等特性，被广泛应用于水产养殖业中鱼虾幼苗的活体饵料，对全球水产经济具有重要价值[2]。卤虫营养价值较高，蛋白质含量占干基质量的 50% 以上，且富含不饱和脂肪酸、二核苷多磷酸盐等多种活性功能物质[3]，研究发现卤虫具有促进皮肤细胞的新陈代谢、抗衰老等功效[4−5]。因其营养丰富、味道鲜美，卤虫被广泛应用于食品加工领域。如在新西兰、孟加拉国等地，卤虫被添加至蛋卷、油炸馅饼、烤肉等食品中以增加营养和口感[6]，韩玉谦等[7] 利用卤虫卵研制出一款营养丰富的氨基酸饮料，姜晓东等[8] 利用卤虫研发了一款海鲜风味酱，卤虫已展现出成为新食品原料的巨大潜力[9]。

饼干是以谷物粉（如小麦粉、燕麦粉）为主要原料，添加糖类、油脂、乳制品等辅料，经混合、成型、烘烤或挤压等工艺制成的含水量低、耐储性强的焙烤食品，其营养与风味受原料配比、加工参数及淀粉糊化-老化行为等因素调控[10]。作为全球广泛消费的方便食品，饼干因种类多样及便携性，成为能量补充、休闲消费及应急食品的重要载体。近年来，随着消费者对健康与功能化食品需求的增长，低盐低糖、富含蛋白的饼干创新开发成为研究热点[11]。

神经网络模型（Neural Network Model）是一种受生物神经系统启发的机器学习架构，通过模拟神经元间的连接与信号传递机制，构建多层非线性计算单元以实现复杂数据的特征提取与模式识别，其核心优势在于通过反向传播算法优化权重参数，自动学习数据中的高阶抽象表征，并展现出强大的非线性映射能力，尤其在图像分类、自然语言处理、时序预测等任务中表现卓越[12−13]。其中，人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）作为机器学习领域的经典模型，通过模拟生物神经元间的信息传递机制，构建由输入层、隐藏层与输出层组成的多层前馈结构，利用加权求和与非线性激活函数实现数据的内在模式挖掘，在解决线性不可分问题、处理中小规模结构化数据（如回归预测、模式识别）及可解释性分析方面具有独特优势[14]。近年来，人工神经网络模型已在食品加工领域广泛应用，Kaddou 等[15] 利用 ANN 结合荧光光谱法对热处理牛奶进行鉴别，结果发现模型在区分物种和热处理方式时的准确率为 100%；Meserye 等[16] 研究了基于 ANN 的红外对流干燥对大蒜品质的影响，结果发现 ANN 建模揭示了干燥参数与大蒜质量之间的复杂关系，实现了出色的拟合。

目前，国内外以卤虫为原料开发食品的相关研究较少，而基于人工神经网络开发卤虫饼干的研究尚未见报道。因此，为挖掘卤虫作为食品资源的开发潜力，本研究以卤虫为原料，以感官评分为指标，结合响应面试验（Response Surface Methodology, RSM）和人工神经网络确定卤虫饼干制备工艺，研制一款营养丰富、风味独特的卤虫饼干，并对其营养和风味特征进行分析，以期为卤虫资源在休闲食品领域的开发应用提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

卤虫　滨州铭硕生物科技有限公司；藜麦粉　朝阳泰然科技食品有限公司；低筋小麦粉、牛奶、玉米油、黄油、木糖醇、盐　市售；对照用黄油饼干　福建省星玛食品有限公司；氘代-1,2-二氯代苯　上海麦克林生化科技股份有限公司；所有检测用有机溶剂均为国产分析纯。

CRTF38 烤箱　广东佛山市伟仕达电器实业有限公司；AR323CN 电子分析天平　奥豪斯仪器有限公司；JYL-C91T 厨房料理机　九阳股份有限公司；KT8400 全自动蛋白测定仪　慈溪市华徐衡器实业有限公司；BPG-9156A 鼓风干燥箱　上海一恒科技有限公司；5110 电感耦合等离子体光谱仪、7890B-5977B GC-MS 气质联用仪　安捷伦科技有限公司；TS-5000Z 电子舌系统　日本 insent 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　工艺流程　原辅料准备→黄油打发→添加卤虫→面粉过筛→搅拌→裱花→烘烤→冷却→成品。

1.2.2　操作要点

1.2.2.1　原辅料准备　卤虫：清洗、沥干后，利用厨房料理机将其匀浆至糊状，置 60 ℃ 烘箱内烘干 200 min，备用。

牛奶、玉米油：将牛奶与玉米油混合后，充分搅拌为乳白色，备用。

1.2.2.2 黄油打发 将提前软化的黄油与木糖醇、盐搅拌均匀，用打蛋器高速打发至颜色发白，体积膨胀。随后加入牛奶和玉米油的混合物，一边加入一边打发，待每次充分打发均匀再加入下一次，直至混合物呈乳膏状。

1.2.2.3 添加卤虫 将烘干后的卤虫少量多次添加至打发后的混合物中，翻拌均匀。

1.2.2.4 面粉过筛 将藜麦粉和低筋小麦粉过 60 目筛添加至上述混合物中。

1.2.2.5 搅拌 用刮刀采用压拌，翻拌，切拌的方法，将原辅料混合均匀，至搅拌均匀没有干粉和颗粒物。

1.2.2.6 裱花 在烤盘中铺好锡纸，裱花袋垂直于烤盘，挤出直径约为 2 cm 的圆形。

1.2.2.7 烘烤、冷却 提前打开烤箱预热，根据实验设计设置烘烤温度和烘烤时间，烘烤完成后取出，冷却至室温后即为成品。

1.2.3 单因素实验设计 根据国内外研究[17−18]和预实验结果，饼干基础配方与工艺为：卤虫 20 g、藜麦粉 40 g、低筋小麦粉 100 g、牛奶 40 g、玉米油 30 g、黄油 60 g、盐 2 g、木糖醇 25 g，在 160 ℃ 下烘烤 20 min。固定基础配方与工艺中其他条件不变，分别改变卤虫添加量（10、15、20、25、30 g）、藜麦粉添加量（25.0、32.5、40.0、47.5、55 g）、烘烤温度（140、150、160、170、180 ℃）、烘烤时间（16、18、20、22、24 min），进行单因素实验。

1.2.4 响应面试验设计 在单因素实验基础上，选择卤虫添加量、藜麦粉添加量、烘烤时间、烘烤温度为自变量，以感官评分为响应值，设计 4 因素 3 水平的 Box-Benhnken 中心组合试验。因素水平表见表 1。

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Response surface test factors and levels

水平	A卤虫添加量(g)	B藜麦粉添加量(g)	C时间(min)	D温度(℃)
−1	12	44	19	145
0	15	47.5	20	150
1	18	51	21	155

1.2.5 人工神经网络模型 参照 Zhang 等[19]的方法并略作修改，创建 3 层（输入层、隐含层、输出层）的误差反向传播 ANN 模型优化卤虫饼干加工工艺，模型网络结构如图 1 所示。以卤虫添加量、藜麦粉添加量、烘烤时间、烘烤温度作为网络 4 个输入神经元，以感官评分作为网络输出神经元，隐含层为单层，选取 S 型函数为激活函数。隐含层神经元范围参考经验公式并结合实际实验确定。为提高模型精度并避免过拟合，将响应面试验所获的 29 组数据随机排列后，按 70%∶15%∶15% 的比例划分为训练集、验证集和测试集。使用遗传算法（Genetic Algorithm, GA）进行全局寻优，寻找使感官评分最高的最优工艺参数组合[20]。以均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）和相关系数（r）[21]大小作为模型优劣的评价标准。RMSE 越低，r 越接近 1，则表明所建立的 ANN 模型越稳健。根据计算得到的统计学指标，比较 RSM 法和 ANN 法的预测响应值。

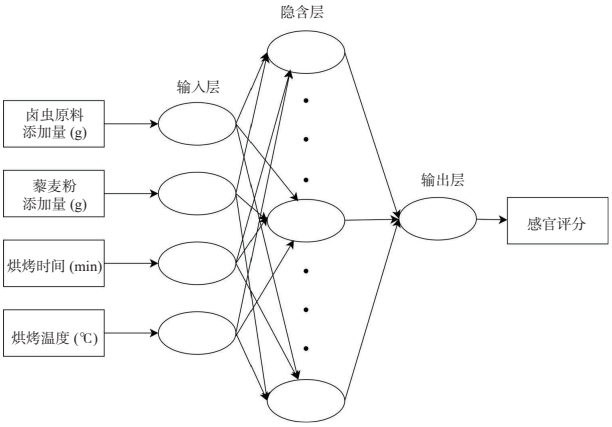


图 1 ANN 模型网络结构

Fig.1 ANN model network structure

隐含层神经元个数计算公式：

$$P = \sqrt{N+Q}+Z$$

式中，P 为隐含层神经元个数；N 为输入层神经元个数；Q 为输出层神经元个数；Z 为经验值。

1.2.6 感官评分 饼干的感官评价方法参考《饼干质量通则》（GB/T 20980-2021），分别对饼干的色泽、形态、香气、滋味、口感等进行评分。组织 10 名经过感官评定训练的食品相关专业人员（男：女比例为 1∶1，年龄在 20 至 40 岁之间），如表 2 所示，从色泽、形态、香气、滋味、口感方面进行感官评价，总分为 100 分，结果取平均值。

表 2 卤虫饼干感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for *Artemia* biscuit

项目	评分标准	分值
色泽（20分）	色泽浅淡、颜色不均匀、边缘焦糊发暗	0~6
	色泽浅黄色、颜色整体均匀、无焦糊过白现象	7~14
	色泽金黄、颜色均匀、整体无焦糊现象	15~20
形态（15分）	外形不完整、薄厚不均匀、严重收缩变形、表面裂纹较多、底部凹陷	0~5
	外形基本完整、薄厚均匀、略有变形、表面略有裂纹、底部凹陷较浅	6~10
	外形完整、薄厚均匀、无变形、表面无裂纹、底部无凹陷	11~15
香气（20分）	有糊味或腥味，苦味严重	0~6
	鲜香味略淡、无焦糊异味	7~14
	香味浓、无异味、具有卤虫特有的风味	15~20
滋味（25分）	滋味偏咸或偏甜，有异味	0~9
	滋味一般，比较酥松	10~17
	入口味道浓郁，滋味微甜或微咸，酥松可口	18~25
口感（20分）	饼干口感过硬或松软、粘牙、过于油腻	0~8
	较为松软、略为粘牙、油腻适中	9~15
	口感较为酥脆、不粘牙、口感细腻	16~20

1.2.7　酸价和过氧化值测定　酸价：参照《食品安全国家标准食品中酸价的测定》(GB 5009.229-2016)中冷溶剂指示剂滴定法测定；过氧化值：参照《食品安全国家标准食品中过氧化值的测定》(GB 5009.227-2023)中指示剂滴定法测定。

1.2.8　能量和营养成分测定　能量：参照《食品安全国家标准预包装食品营养标签通则》(GB 28050-2011)计算；水分：参照《食品安全国家标准食品中水分的测定》(GB 5009.3-2016)中直接干燥法测定；粗蛋白：参照《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5-2016)中凯氏定氮法测定；脂肪：参照《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》(GB 5009.6-2016)中酸水解法测定；灰分：参照《食品安全国家标准食品中灰分的测定》(GB 5009.4-2016)第一法测定；碳水化合物：参照《食品安全国家标准预包装食品营养标签通则》(GB 28050-201)测定；钠：参照《食品安全国家标准食品中钾、钠的测定》(GB5009.91-2017)中电感耦合等离子体发射光谱法测定。

1.2.9　电子舌分析　将市售黄油饼干作为对照品。将卤虫饼干与市售黄油饼干在研钵中捣碎，称取 30 g 样品于烧杯中，添加 120 mL 40 ℃ 的纯净水，置于超声波清洗机中超声 10 min，倒入离心机中 4000 r/min 离心 10 min，取上清液用于测试。参照 Liu 等[22] 的方法，利用 TS-5000Z 电子舌系统测定样品酸味、甜味、苦味、咸味、鲜味和涩味及回味。

1.2.10　SPME-GC-MS 分析　样品准备：分别称取卤虫饼干和市售黄油饼干各 2 g，溶于 100 mL 纯净水，备用。

萃取方法[23]：在 20 mL 的顶空进样瓶中装入 1.00 g 待测样品，随即加入 10 μL 浓度为 100 μg/mL 的内标物氘代-1,2-二氯代苯，旋紧瓶盖后将萃取针于 250 ℃ 老化 20 min，插入固相萃取瓶中，平稳放置在 65 ℃ 水浴锅中吸附 40 min，结束后立即将萃取针插入气相进样口，250 ℃ 温度下解吸 10 min。

GC 条件：色谱柱为 HP-INNOWax(60 m×250 μm×0.5 μm)；载气为氦气(纯度≥99.999%)，流速为 1 mL/min；不分流进样；升温程序：40 ℃ 保持 5 min，5 ℃/min 的速率升至 180 ℃ 后保持 3 min，10 ℃/min 的速率升至 230 ℃ 后保持 12 min。

MS 条件：离子源为电子轰击离子源；电子能量 70 eV；离子源温度为 230 ℃，四级杆温度为 150 ℃；电子倍增器工作电压为 1985 V；质量扫描范围为 35~350 m/z。

定性：基于 NIST 谱库物质进行匹配，选取匹配度大于 80% 的物质作为定性结果。

定量：采用内标半定量法计算样品中挥发性化合物的含量，即根据化合物峰面积及内标峰面积比值计算。

1.2.11　气味活性值(Odor Activity Value, OAV)的计算

$$OAV = \frac{C}{T}$$

式中，C 为挥发性气味化合物的含量，μg/kg；T 为该化合物在水中的阈值，μg/kg。

1.3　数据处理

每组实验重复 3 次，结果以平均值±标准差表示，采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析，采用 Matlab R2015b、Design expert 8.0.6 和 Excel 2007 对实验数据进行处理和分析。

2　结果与分析

2.1　单因素实验

2.1.1　卤虫添加量对卤虫饼干感官评分的影响　卤虫添加量对卤虫饼干感官评分的影响见图 2。

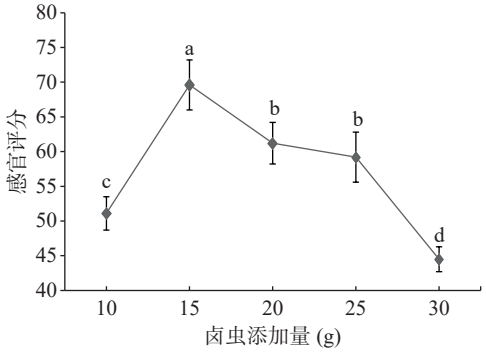


图 2　卤虫添加量对饼干感官评分的影响

Fig.2　Effect of *Artemia* addition on biscuit sensory score

注：小写字母不同表示差异显著(P<0.05)；图 3~图 5 同。

卤虫的添加有助于提高饼干的营养价值并赋予其独特的风味。由图 2 可知，随着卤虫添加量的增加，卤虫饼干的感官评分呈先上升后下降的趋势，当卤虫原料添加量为 15 g 时，感官评分显著高于其他实验组(P<0.05)。此时产品具有较显著且适宜的卤虫特殊风味。当添加量过大时，卤虫中的鲜味物质会掩盖饼干原有的香甜气味，饼干色泽也变得更加黝黑、表面容易开裂。因此，选择卤虫添加量 15 g 进行后续实验。

2.1.2　藜麦粉添加量对卤虫饼干感官评分的影响　藜麦粉添加量对卤虫饼干感官评分的影响见图 3。

藜麦富含维生素、多酚、黄酮类、皂苷和植物甾醇类物质，具有多种健康功能[24]，将藜麦粉添加到饼干中，不仅可以提高饼干的营养价值，还能赋予饼干独特的风味和口感。由图 3 可知，随着藜麦粉添加量不断增加，饼干感官评分呈先上升后下降的趋势。当添加量为 47.5 g 时，感官评分显著高于其他实验组(P<0.05)。此时饼干不仅保留了自身风味，还融入了藜麦的独特风味，口感丰富且有层次感。当添加量过高时，藜麦粉的风味过于突出，掩盖了饼干原有的风味，同时会使饼干质地变得粗糙，影响食用口感。

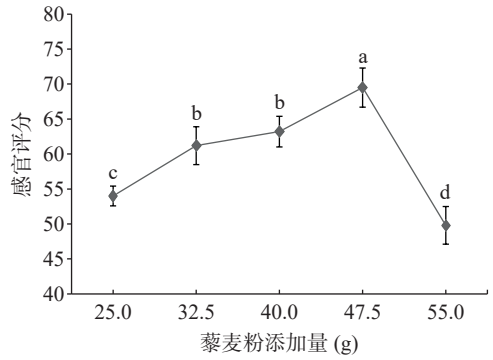


图 3 藜麦粉添加量对饼干感官评分的影响

Fig.3 Effect of quinoa flour addition on biscuit sensory score

因此, 综合考虑饼干风味和口感, 选择藜麦粉添加量 47.5 g 进行后续实验。

付丽红等[25] 研究了紫薯藜麦饼干的配方, 结果发现当低筋粉与藜麦粉比例为 16∶7 时, 饼干感官评分最高, 本研究中低筋小麦粉与藜麦粉的比例约为 2∶1, 与该结论相近; 王颖等[26] 研究发现藜麦粉添加量占小麦粉 20% 以上时, 饼干的风味会产生显著变化, 本研究与该结论一致。本研究中藜麦粉添加量的不同显著影响卤虫饼干色泽、口感等感官指标, 添加量过高或过低时都会导致感官评分下降, 这是因为藜麦中多酚、黄酮等色素含量较高, 从而在加工过程中影响饼干色泽; 此外藜麦中不含面筋蛋白, 其添加量改变时会导致面团中面筋蛋白含量变化, 从而影响面筋蛋白网络结构连续性, 改变饼干的质地与口感。

2.1.3 温度对卤虫饼干感官评分的影响 温度对卤虫饼干感官评分的影响见图 4。

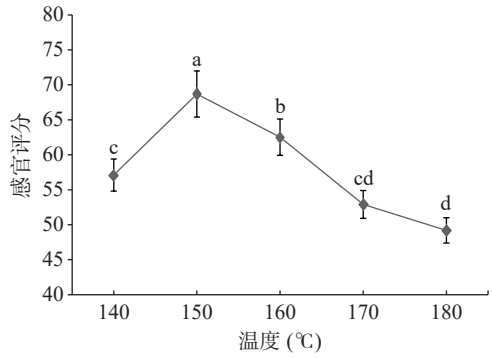


图 4 温度对饼干感官评分的影响

Fig.4 Effect of temperature on biscuit sensory score

温度会影响饼干在烘焙过程中美拉德反应、淀粉糊化等化学反应的速度和程度, 从而对饼干的色泽、香气和口感产生重要影响。由图 4 可知, 随着烘焙温度的上升, 饼干的感官评分呈先上升后下降的趋势。当温度为 150 ℃ 时, 感官评分显著高于其他实验组(P<0.05)。此温度下, 饼干表面能够形成良好的色泽和香气, 内部组织结构也较为理想。当温度继续升高时, 感官评分逐渐下降。这是由于高温会使饼干表面迅速焦糖化, 产生焦糊味, 同时内部水分快速蒸发, 导致饼干质地干硬, 口感变差。因此, 选择温度 150 ℃ 进行后续实验。

2.1.4 时间对卤虫饼干感官评分的影响 时间对卤虫饼干感官评分的影响见图 5。

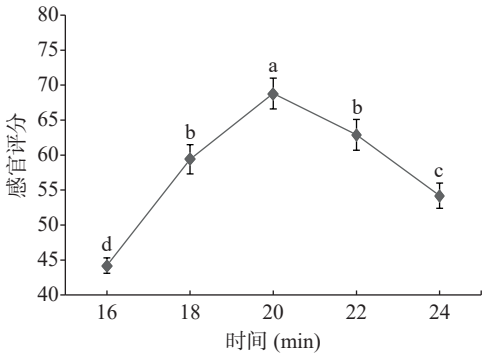


图 5 时间对饼干感官评分的影响

Fig.5 Effect of baking time on biscuit sensory score

烘烤时间的长短直接关系到饼干内部水分的蒸发程度、表面色泽的形成以及风味物质的产生等, 不同的烘烤时间会使饼干呈现出不同的品质特征。由图 5 可知, 随着时间的延长, 饼干的感官评分呈先上升后下降的趋势。当烘烤时间为 20 min 时, 感官评分显著高于其他实验组(P<0.05)。此条件下饼干的色泽、口感和风味都达到了最佳状态。烘烤时间过短, 饼干内部水分蒸发不充分, 口感发软, 缺乏酥脆感; 而烘烤时间过长, 饼干表面会过度焦糖化, 产生焦糊味, 同时内部质地变得干硬, 影响食用品质。因此, 选择时间 20 min 进行后续实验。

2.2 响应面试验结果

以卤虫添加量、藜麦粉添加量、时间和温度为因素, 采用 4 因素 3 水平 Box-Benhnken 中心组合试验, 以 Y 感官评分为响应值, 试验结果和方差分析见表 3 和表 4。

对表 3 中数据拟合分析, 得到回归方程: $Y=65.78-0.44A-2.07B+0.15C-0.69D+0.20AB-3.77AC-7.90AD+0.63BC+3.43BD-3.55CD-4.05A^2-7.86B^2+2.44C^2-3.45D^2$。

由表 4 可知, 模型 P<0.01, 表明所得方程极显著。失拟项 P=0.2408>0.05, 表明该模型拟合效果较好, 不存在显著误差, 具有高度可靠性。校正决定系数 R^2_{adj}=0.7838, 表明无明显过拟合现象; 信噪比 RSN=9.087>4, 表明试验信号受噪声干扰少, 数据可靠性高; 变异系数 5.04%<10%, 说明结果稳定, 数据分布均匀。方程一次项 B 为显著因素(P<0.05), A、C 和 D 不显著(P>0.05); 二次项中 AD 为极显著(P<0.01), AC、BD 为显著(P<0.05), 而 AB、BC 和 CD 不显著(P>0.05); 平方项中 B^2 为极显著(P<0.01), A^2、D^2 为显著(P<0.05), 而 C^2 不显著(P>0.05)。各因素对响应值的影响大小排序为 B 藜麦粉添加量>D 温度>A 卤虫添加量>C 时间。最佳理论条件为: 卤虫添加量 16.35 g, 藜麦粉添加量 46.44 g, 时间 20.99 min, 温度 144.99 ℃, 感官评分最大预测值为 70.73。

表 3　Box-Benhnken 试验设计方案与结果

Table 3　Program and results of Box-Benhnken design

试验号	A	B	C	D	Y感官评分
1	0	0	−1	−1	61.70
2	−1	0	0	−1	50.30
3	0	−1	0	−1	64.90
4	0	1	0	−1	52.00
5	1	0	0	−1	62.50
6	0	0	1	−1	67.80
7	−1	0	−1	0	62.70
8	0	−1	−1	0	60.70
9	0	1	−1	0	56.50
10	1	0	−1	0	67.80
11	−1	−1	0	0	53.80
12	−1	1	0	0	50.00
13	0	0	0	0	63.80
14	0	0	0	0	63.90
15	0	0	0	0	67.80
16	0	0	0	0	64.80
17	0	0	0	0	68.60
18	1	−1	0	0	56.80
19	1	1	0	0	53.80
20	−1	0	1	0	68.80
21	0	−1	1	0	62.80
22	0	1	1	0	61.10
23	1	0	1	0	58.80
24	0	0	−1	1	68.30
25	−1	0	0	1	69.70
26	0	−1	0	1	50.80
27	0	1	0	1	51.60
28	1	0	0	1	50.30
29	0	0	1	1	60.20

表 4　感官评分回归模型方差分析

Table 4　Variance analysis of the regression model for sensory score

来源	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值
模型	1072.35	14	76.60	8.25	0.0002**
A	2.34	1	2.34	0.25	0.6234
B	51.25	1	51.25	5.52	0.0340*
C	0.27	1	0.27	0.029	0.8670
D	5.74	1	5.74	0.62	0.4448
AB	0.16	1	0.16	0.017	0.8974
AC	57.00	1	57.00	6.14	0.0266*
AD	249.64	1	249.64	26.89	0.0001**
BC	1.56	1	1.56	0.17	0.6878
BD	46.92	1	46.92	5.05	0.0412*
CD	50.41	1	50.41	5.43	0.0569
A^2	65.36	1	65.36	8.09	0.0353*
B^2	400.82	1	400.82	43.17	<0.0001**
C^2	38.59	1	38.59	4.16	0.0608
D^2	77.13	1	77.13	8.31	0.0121*
残差	129.97	14	9.28		
失拟项	109.53	10	10.95	2.14	0.2408
纯误差	20.45	4	5.11		
总值	1202.33	28			
R^2=0.8919	R^2_{adj}=0.7838		RSN=9.087		C.V.%=5.04

注：*表示影响显著（*P*<0.05），**表示影响极显著（*P*<0.01）。

响应面图能反映各因素间的交互作用，AC、AD、BD 交互作用对感官评分影响的响应面图见图 6。

响应面坡度的陡峭程度反映了响应值对于操作条件的敏感程度。由图 6 可知，图 6(a)(b)(c)中各因素交互作用的曲面较为陡峭，表明它们对感官评分有明显影响，这与表 4 中方差分析得出的 AD 交互作用极显著，AC、BD 交互作用显著的结论相吻合。图 6(c)中，沿藜麦粉添加量方向较烘烤温度方向的曲面陡，说明藜麦粉添加量对感官评分的影响较烘烤温度显著。

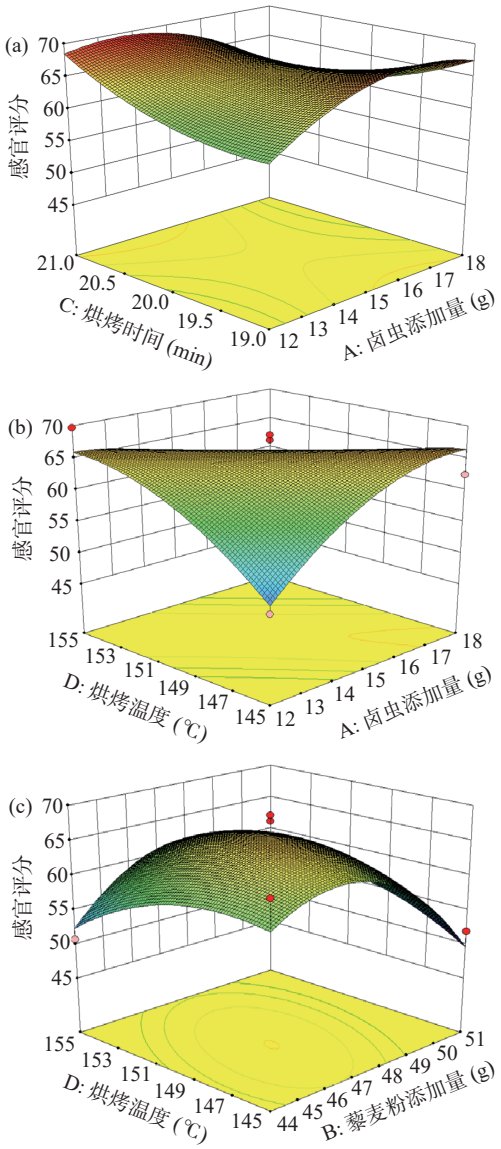


图 6　因素交互作用对卤虫饼干感官评分的影响

Fig.6　Influence of factor interaction on sensory evaluation of *Artemia* biscuits

2.3　ANN 模型结果

2.3.1　隐含层神经元数量的确定　隐含层神经元个数与 ANN 模型的预测结果密切相关，隐含层神经元数量对 ANN 模型性能的影响见图 7。

参考隐含层神经元个数经验公式并结合实际实验，选择 3~20 个隐含层神经元个数进行实验。由图 7 可知，当隐含层神经元个数为 15 时，ANN 模型预测 RMSE 最小，为 1.8617，准确性最高，因此选择隐含层神经元个数为 15 进行后续实验。

2.3.2　卤虫饼干感官评分 ANN 模型　将隐含层神经

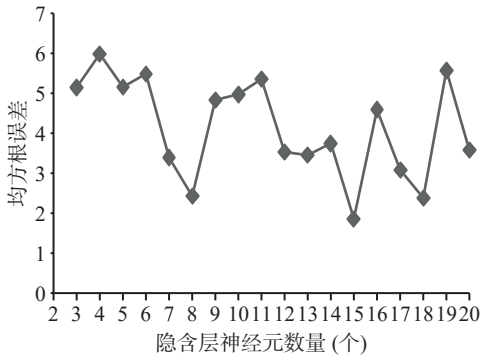


图 7 隐含层神经元数量对 ANN 模型性能的影响

Fig.7 Effects of the number of hidden layers on the performance of ANN model

元个数设定为 15, 设定训练目标误差为 0.0001, 学习率为 0.01, 最大训练步数为 5000, 开始训练网络[27]。感官评分网络训练曲线见图 8、ANN 模型训练适配曲线见图 9。

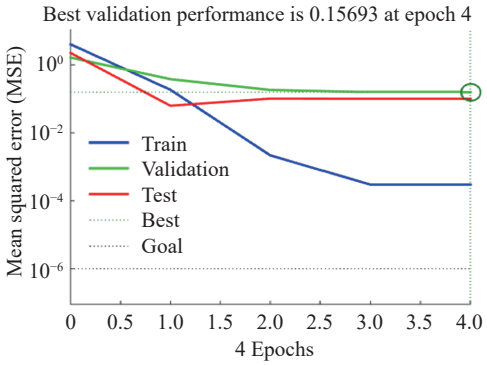


图 8 卤虫饼干感官评分网络训练过程

Fig.8 Network training process for *Artemia* biscuit sensory scores

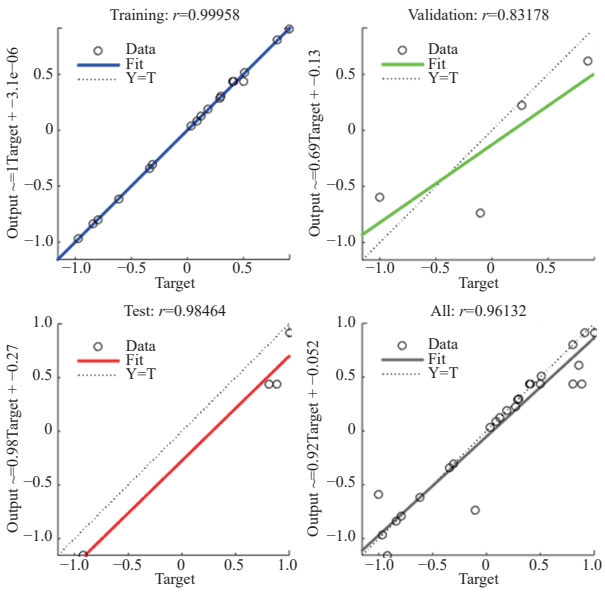


图 9 ANN 模型训练适配曲线

Fig.9 Training fit curve for ANN model

由图 8、图 9 可知, 训练样本、测试样本以及验证样本与其对应预测值高度吻合, 全部数据拟合结果的相关系数为 0.96132, 说明所建立的 ANN 模型预测性好, 准确度高, 可以将其应用到卤虫饼干加工工艺优化中。

2.3.3 GA 寻优 GA 是一种模拟自然选择过程的优化算法, 其核心操作包括选择、交叉和变异。本研究中, 设定最大进化迭代数为 100, 种群规模为 20, 交叉概率为 0.4, 变异概率为 0.05。适应度曲线见图 10。

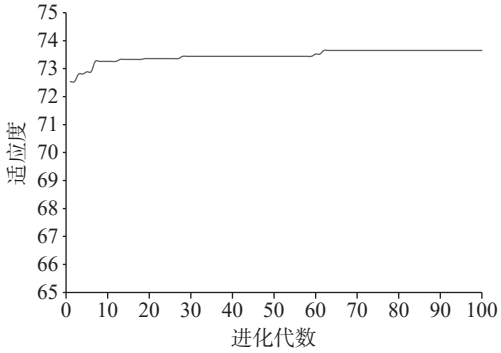


图 10 适应度曲线

Fig.10 Fitness curve

以 ANN 构建的模型Y = net(x)为适应度函数, 以感官评分为适应度。利用 GA 进行全局寻优, 以寻找使感官评分最高的最优工艺参数组合。经过 62 代后达到最佳适应度, 其感官评分达到最大值, 随后基本不变。此时感官评分最大预测值为 73.65, 其适应的条件为: 卤虫原料 13.56 g, 藜麦粉 47.26 g, 烘烤温度 149.95 ℃, 烘烤时间 20.68 min。

2.4 验证实验结果和 RSM 与 ANN 模型对比

按 RSM 和 ANN 模型给出的理论条件进行验证实验。为便于实际操作, 将工艺条件修正为: RSM: 卤虫添加量 16.35 g, 藜麦粉添加量 46.44 g, 时间 21.00 min, 温度 145 ℃; ANN: 卤虫添加量 13.56 g, 藜麦粉 47.26 g, 烘烤温度 150 ℃, 烘烤时间 20.70 min。按上述工艺进行验证, RSM 和 ANN 模型制作的卤虫饼干感官评分实际值分别为 69.90±0.20 和 73.00±0.20, 实际值与各自预测值相近且 ANN 模型感官评分更高。

对比 RSM 和 ANN 两种模型对卤虫饼干感官评分的优化和预测能力, 即感官评分的预测值和实测值, 计算 r 和 RMSE 值, 结果见图 11。

由图 11 可知, 与 RSM 相比, ANN 模型有更大的 r 值 0.9602 和更小的 RMSE 值 1.8614, 说明 ANN 模型对感官评分的优化能力更强, 预测误差更小, 具有更高的拟合效果和更优良的预测性能。因此, 选择人工神经网络优化工艺进行后续实验。

食品加工通常涉及的参数体系属于非线性或不稳定的系统, 而 ANN 技术作为预测复杂系统输出响应的方法在食品工业中发挥着重要的作用[28]。Zhang 等[19] 将 Box-Behnken 试验获取的 29 组数据随机排列, 采用交叉验证训练网络确定 ANN 模型用于优化螃蟹内脏匀浆液中镉离子脱除工艺, 结果发现 ANN 模型具有稳定的预测和优化能力; 王仪等[29] 以

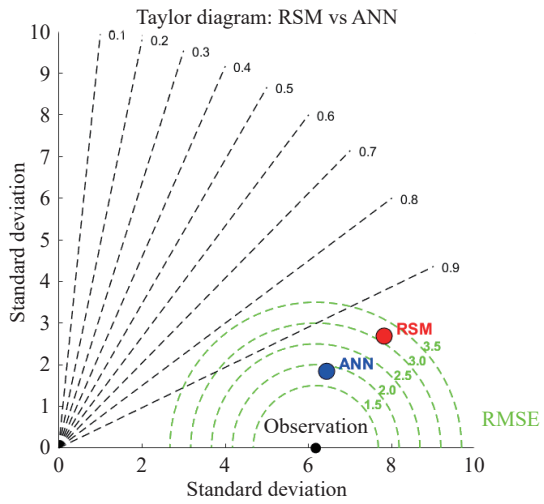


图 11　RSM 和 ANN 模型的泰勒图

Fig.11　Taylor diagram of RSM and ANN models

Box-Behnken 试验得到的 17 组数据为训练样本，利用 ANN 模型优化肉葡萄球菌高密度培养基配方，结果发现 ANN 模型能够精确地预测培养基配方对肉葡萄球菌活菌数的影响。上述研究表明利用 RSM 数据建立的 ANN 模型，具有较高的稳定预测和优化能力。本研究利用 29 组 RSM 试验数据训练和建立 ANN 模型，在节省试验成本与时间的同时，实现了预测卤虫饼干的最佳工艺的目的。

2.5　产品安全指标

卤虫饼干酸价与过氧化值见表 5。

表 5　卤虫饼干酸价和过氧化值

Table 5　Acid value and peroxide value of *Artemia* biscuit

项目	酸价(mg/g)	过氧化值(g/100 g)
卤虫饼干	2.40±0.30	0.097±0.004
国家标准要求	≤5	≤0.25

酸价和过氧化值是评价脂质氧化酸败的关键指标，可用于判断饼干在加工过程中脂质的氧化程度。由表 5 可知，卤虫饼干酸价为 2.40 mg/g，过氧化值为 0.097 g/100 g，符合《食品安全国家标准饼干》(GB 7100-2015)中酸价、过氧化值的限量要求，表明本产品脂质氧化程度低，新鲜度和品质优良，饼干的烘焙工艺有利于延长货架期，保障消费者食用时的口感与品质。

2.6　产品营养指标

卤虫饼干营养成分见表 6。

由表 6 可知，卤虫饼干蛋白质含量为 6.46 g/100 g，高于市售饼干 4.40 g/100 g。蛋白质是人体重要的营养物质，参与人体众多生理过程，卤虫饼干蛋白质含量较高能提供更充足的优质蛋白来源，满足机体生长、修复等需求。卤虫饼干脂肪含量为 30.30 g/100 g，低于市售饼干的 34.20 g/100 g。研究表明杂粮富含的膳食纤维具有吸水性和持油性，可降低饼干的脂肪含量[11]，本研究在卤虫饼干中添加了一定量的

表 6　卤虫饼干营养成分(湿重)

Table 6　Nutrients of *Artemia* biscuits (wet weight)

项目	能量 (kJ/100 g)	蛋白质 (g/100 g)	脂肪 (g/100 g)	碳水化合物 (g/100 g)	钠 (mg/100 g)
卤虫饼干	2192	6.46±0.48	30.30±1.25	56.50±1.15	283±26
市售黄油饼干	2313	4.40	34.20	57.20	346
石斑鱼骨饼干[30]	–	6.13	26.31	–	–
油橄榄果渣曲奇饼干[31]	–	–	33.29	–	–
方竹笋曲奇饼干[32]	–	4.99	27.60	–	–

注：–表示未检测，市售黄油饼干数据引自产品包装营养成分表，石斑鱼骨饼干等数据引自文献[30−32]。

藜麦粉，有助于降低饼干中脂肪含量。随着人们健康意识提升，对高脂肪食品的摄入愈发谨慎，卤虫饼干较低的脂肪含量符合健康饮食趋势。卤虫饼干钠含量为 283 mg/100 g，较市售饼干更低。高钠饮食与高血压等疾病相关，卤虫饼干的低钠特点使其更适宜追求低盐饮食以及患有高血压等慢性疾病的人群。在能量供应方面，卤虫饼干能量为 2192 kJ/100 g，低于市售饼干的 2313 kJ/100 g，在满足饱腹感的同时，可减少消费者能量摄入，有助于维持能量平衡。

与其他研究相比，卤虫饼干的蛋白质含量高于石斑鱼骨饼干、方竹笋曲奇饼干，而脂肪含量低于油橄榄果渣曲奇饼干，高于石斑鱼骨饼干、方竹笋曲奇饼干，营养组成的差异可能与不同饼干所用原料、配方、制备工艺等有关。本研究发现，卤虫饼干具有蛋白质含量高、低盐低脂等特点，在营养与健康层面表现较好，在休闲食品市场中具备较大的发展潜力。

2.7　产品风味表征

2.7.1　电子舌分析　卤虫饼干电子舌结果见图 12。

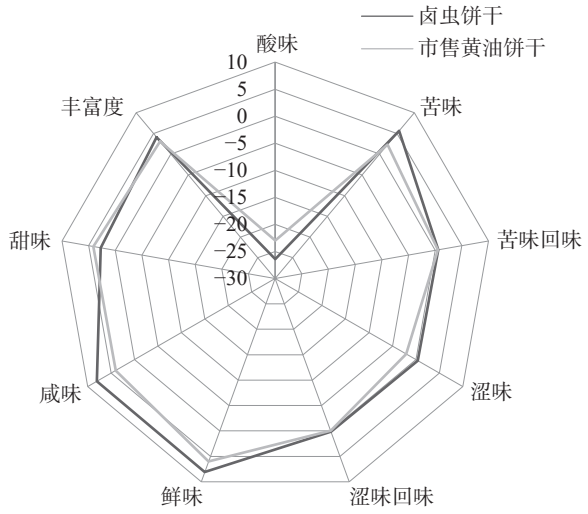


图 12　卤虫饼干电子舌雷达图

Fig.12　*Artemia* biscuit electronic tongue radar image

由图 12 可知，卤虫饼干未呈现出酸味特征，其涩味、苦味回味以及涩味回味的强度均处于较低水平，接近或低于无味点，其鲜味、咸味、苦味、甜味、丰富度(鲜味回味)等味觉指标均表现出显著的响

应。与市售黄油饼干相比，本产品的鲜味、咸味、苦味和丰富度较高，而甜味则略低于对照样，说明本产品味道整体以鲜咸为主，在风味层次上较对照样展现出更复杂多样的味觉体验，滋味更为丰富。若需在后续开发中降低产品苦味，可添加葡萄糖、蔗糖等进行美拉德反应，从而提高饼干鲜香感。

2.7.2 SPME-GC-MS 分析 卤虫饼干挥发性风味物质结果见表 7。

表 7 卤虫饼干挥发性风味成分分析

Table 7 Analysis of volatile flavor components in *Artemia* biscuits

类别	物质名称	阈值[33]（mg/kg）	卤虫饼干		市售黄油饼干	
			含量(μg/kg)	OAV	含量(μg/kg)	OAV
醇类	乙醇	950	14.4±0.8	0.00002	ND	/
	1-戊醇	0.1502	3.6±0.2	0.02	ND	/
	1-庚醇	0.0054	1.5±0.1	0.28	ND	/
	1-辛烯-3-醇	0.0015	6.0±0.3	4	ND	/
	4-甲基2-庚醇	n	ND	/	8.1±0.4	/
	3,4,4-三甲基-1-戊-3-醇	n	ND	/	6.9±0.4	/
	(S)-(+) -5-甲基-1-庚醇	n	1.5±0.1^{b}	/	2.7±0.2^{a}	/
合计			27.0		17.7	
醛类	戊醛	0.012	43.5±2.3	3.63	ND	/
	(E)-2-庚醛	0.04	8.7±0.4	0.22	ND	/
	壬醛	0.0011	10.6±0.6	9.64	ND	/
	(E)-2-辛烯醛	0.003	9.7±0.3	3.23	ND	/
	(E)-2-壬烯醛	0.00019	5.5±0.2	28.95	ND	/
	(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.000027	103.7±5.8	3840.74	ND	/
	苯甲醛	0.75089	9.7±0.7^{a}	0.01	8.0±0.3^{b}	0.01
	苯乙醛	0.0063	29.9±1.6	4.75	ND	/
	2,5-二甲基苯甲醛	0.2	ND	/	2.9±0.1	0.01
合计			221.3		10.9	
酮类	2-庚酮	0.14	ND	/	12.6±0.4	0.09
	2-壬酮	0.041	26.4±1.7^{b}	0.64	52.0±3.7^{a}	1.27
	2-十一烷酮	0.0055	26.7±0.9^{b}	4.85	52.0±2.9^{a}	9.45
	2-十三烷酮	n	10.2±0.6^{b}	/	25.7±1.4^{a}	/
	2,2,5-三甲基-3,4-己二酮	n	0.7±0.1^{b}	/	2.4±0.2^{a}	/
	羟基丙酮	10	2.4±0.2^{a}	0.0002	2.3±0.3^{a}	0.0002
	环丁酮	0.9	2.1±0.2^{a}	0.002	1.7±0.2^{a}	0.002
合计			68.5		148.7	
酸类	乙酸	99	20.3±0.7^{b}	0.0002	29.2±2.9^{a}	0.0003
	丙酸	2.19	1.2±0.1	0.001	ND	/
	丁酸	2.4	12.5±0.4^{a}	0.01	10.6±1.1^{a}	0.004
	戊酸	11	1.8±0.1	0.0002	ND	/
	己酸	0.89	55.9±3.6^{b}	0.1	82.6±4.7^{a}	0.09
	辛酸	3	38.0±2.7^{b}	0.01	79.6±3.4^{a}	0.03
	壬酸	4.6	30.2±1.8^{b}	0.01	48.0±2.4^{a}	0.01
	癸酸	10	19.5±0.4^{b}	0.002	28.0±1.6^{a}	0.003
	丙酸酐	3.4*	3.8±0.2	0.001	ND	/
合计			183.2		278	
酯类	辛酸甲酯	0.2	6.8±0.3^{a}	0.03	4.3±0.7^{b}	0.02
	癸酸甲酯	0.0043	5.9±0.4	1.37	ND	/
	壬酸乙酯	0.377	ND	/	1.8±0.2	0.005
	癸酸乙酯	0.005	ND	/	32.9±3.1	6.58
	乙酸丙酯	2	ND	/	14.4±0.8	0.01
	丙酮酸丙酯	n	14.3±0.6^{a}	/	14.0±0.4^{a}	/
	2-丙烯酸丁酯	0.002	80.6±4.5	40.30	ND	/
	乳酸叶醇酯	n	ND	/	14.7±0.9	/
	对叔丁基苯乙酸甲酯	n	ND	/	6.6±0.2	/
	2 - 乙基己基亚硫酸酯	n	ND	/	6.2±0.6	/
	S-甲基硫代丁酸酯	0.14*	ND	/	1.9±0.2	0.01

续表 7

类别	物质名称	阈值[33]（mg/kg）	卤虫饼干		市售黄油饼干	
			含量（μg/kg）	OAV	含量（μg/kg）	OAV
	2-氧代丙酸甲酯	n	1.2±0.2	/	ND	/
合计			108.8		96.8	
呋喃吡喃类	2-戊基呋喃	0.0058	5.1±0.3^{a}	0.88	1.9±0.1^{b}	0.33
	2-呋喃甲醇	4.5005	28.8±1.1^{a}	0.01	32.3±2.4^{a}	0.007
	糠醛	9.562	ND	/	10.8±1.5	0.001
	2-乙酰基呋喃	15.0252	ND	/	1.8±0.2	0.0001
	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(4H)-吡喃酮	35	28.2±2.3^{b}	0.001	64.3±4.8^{a}	0.002
	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	0.0223	5.7±0.6	0.26	ND	/
	2H-吡喃-2,6（3H）-二酮	n	ND	/	1.7±0.2	/
	麦芽酚	1.24	36.4±3.4^{b}	0.03	166.0±12.2^{a}	0.13
	异麦芽酚	n	0.8±0.1^{b}	/	1.9±0.2^{a}	/
	乙基麦芽酚	n	ND	/	67.6±5.3	/
	γ-丁内酯	1	3.4±0.2^{a}	0.003	1.7±0.5^{b}	0.002
	δ-辛内酯	0.42	4.8±0.5	0.01	ND	/
	γ-壬内酯	0.0097	ND	/	209.6±17.8	21.61
	δ-壬内酯	2.6#	12.6±1.1	0.005	ND	/
	γ-癸内酯	0.0011	ND	/	50.9±2.4	46.27
	δ-癸内酯	0.066	ND	/	382.7±19.7	5.80
	δ-十二内酯	0.053	ND	/	45.3±3.1	0.85
	四氢糠醇丙酸酯	n	2.3±0.3	/	ND	/
合计			128.1		1038.5	
其它	2-(5-甲基噻唑-4-基)乙基醋酸酯	n	ND	/	113.5±9.4	/
	5-(2-羟乙基)-4-甲基噻唑	0.1#	ND	/	48.8±2.7	0.49
	丁基醚	0.4*	5.5±0.5	0.01	ND	/
	1-(己氧基)-5-甲基-己烷	n	10.6±0.7	/	ND	/
	(d)-柠檬烯	0.034	7.5±0.4	0.22	ND	/
	4-(1-甲基丙基)苯酚	n	9.5±0.5	/	ND	/
	2-甲氧基-5-乙烯基苯酚	0.00015	1.1±0.1	7.33	ND	/
合计			34.2		162.3	

注：同一行中不同小写字母不同表示差异性显著（P<0.05）；ND表示未检出，n表示阈值不明确，*表示该化合物在空气中阈值，#表示该化合物在其它介质中阈值。

由表 7 可知，卤虫饼干共检测出挥发性化合物 48 种，其中醇类 5 种、醛类 8 种、酮类 6 种、酸类 9 种、酯类 5 种、呋喃吡喃类 10 种和其他 5 种，较对照品市售黄油饼干（43 种）、布拉迪酵母发酵麸皮饼干（35 种）[34]、香菇豆沙曲奇饼干（28 种）[35] 和松茸曲奇饼干（25 种）[36] 更多，略低于薏仁运动营养饼干（51 种）[37]，表明卤虫的添加极大地丰富了饼干中挥发性化合物的种类，使得卤虫饼干风味复杂多样、富有层次。

卤虫饼干中主要的挥发性化合物为醛类、酸类、呋喃吡喃类和酯类，其含量分别为 221.3、183.2、128.1 和 108.8 μg/kg，是形成卤虫饼干风味的重要组分。与对照品市售黄油饼干相比，卤虫饼干与黄油饼干共有的挥发性风味物质共 22 种，包括醇类 1 种、醛类 1 种、酮类 6 种、酸类 6 种、酯类 2 种和呋喃吡喃类 6 种，其中羟基丙酮、环丁酮、丁酸、丙酮酸丙酯、2-呋喃甲醇 5 种物质的含量在两类饼干之间无显著差异（P>0.05），其余 17 种物质的含量均存在显著差异（P<0.05）。卤虫饼干特有的挥发性风味物质有 26 种，黄油饼干特有的挥发性风味物质 21 种，说明卤虫的添加对饼干的风味物质组成产生了极大影响，使得卤虫饼干形成了区别传统黄油饼干的独特风味特征。

醛类化合物大多具有令人愉悦的清新青草味和淡水果香味，是美拉德反应的主要产物。卤虫饼干中醛类含量占比最高，为 28.69%，这与猴头菇酥性饼干[23]、香菇豆沙曲奇饼干[35] 和薏仁饼干[37] 等研究中醛类含量最高的结果一致。卤虫饼干中醛类物质主要包括(E,E)-2,4-癸二烯醛（103.7 μg/kg）、戊醛（43.5 μg/kg）、苯乙醛（29.9 μg/kg）等，醛类物质主要是不饱和脂肪氧化、氨基酸降解和基于斯特雷克氨基酸合成反应的美拉德初级产物降解还原等反应形成[38]。卤虫不饱和脂肪酸和氨基酸含量丰富，推测可能是在高温烘烤过程中，卤虫等原料中的不饱和脂肪酸发生了氧化、氨基酸发生了降解，因此释放了较多的醛类物质。酸类物质是由氨基酸降解后经氧化还原作用产生。卤虫饼干中酸类含量占比为 23.76%，主要包括己酸（55.9 μg/kg）、辛酸（38.0 μg/kg）、壬酸

(30.2 μg/kg)等。酸类阈值较大,其对产品整体气味的贡献较小,但酸类物质可与其他风味物质产生协同效应,从而使卤虫饼干气味更加丰富和强烈。呋喃类化合物通常在焦糖化和糖降解中产生,对食品的整体香味有较好的修饰作用。卤虫饼干中呋喃类化合物含量占比为 16.61%,主要包括麦芽酚(36.4 μg/kg)、2-呋喃甲醇(28.8 μg/kg)、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(4H)-吡喃酮(28.2 μg/kg)等,这些呋喃类化合物可强化卤虫饼干的焦糖香气特征,对其整体风味品质起到优化与改善作用。酯类物质在饼干中主要提供不同花香、果香,是饼干整体香味形成的重要组成。卤虫饼干中酯类含量占比为 14.11%,其中 2-丙烯酸丁酯具有明显的水果香味,其含量最高,为 80.6 μg/kg,占酯类物质总量的 74.08%,是影响卤虫饼干酯类香气特征的主要因素。

不同的挥发性化合物具有不同阈值,可利用 OAV 评价样品中挥发性化合物对整体风味的贡献,当 OAV>1 时,表明其对样品的整体风味有显著贡献。卤虫饼干中 OAV>1 的挥发性化合物共有 11 种,包括醛类 6 种、酯类 2 种、醇类 1 种、酮类 1 种、甲氧基苯酚类 1 种,由高到低依次为(E,E)-2,4-癸二烯醛(脂肪香、鸡肉香)、2-丙烯酸丁酯(水果香味)、(E)-2-壬烯醛(清香味)、壬醛(脂肪味、柑橘味、青草味、玫瑰味)、2-甲氧基-5-乙烯基苯酚(坚果香、丁香)、2-十一烷酮(油脂香、芸香、桃香)、苯乙醛(浆果香、坚果香、蜂蜜香)、1-辛烯-3-醇(土壤香、油脂香、蘑菇香)、戊醛(高浓度时有辛辣、刺激气味,低浓度时有面包味、果香)、(E)-2-辛烯醛(青草香、果香、脂肪香)和癸酸甲酯(花香、果香)[39−40],其中(E,E)-2,4-癸二烯醛 OAV 最高,为 3840.74,占卤虫饼干挥发性化合物 OAV 贡献的 97.19%,2-丙烯酸丁酯和(E)-2-壬烯醛 OAV 次之,分别为 40.30 和 28.95,其余 8 种物质的 OAV 在 1 至 10 之间。(E,E)-2,4-癸二烯醛天然存在于橙皮、柠檬、草莓、烤鸡等食物的挥发性成分当中,其阈值很低,具有油味和鸡肉香味,本研究发现(E,E)-2,4-癸二烯醛对卤虫饼干的肉香和脂肪气息具有显著贡献。市售黄油饼干 OAV 最高的挥发性化合物为具有水果味、桃子味的 γ-癸内酯(46.27)和具有椰子味的 γ-壬内酯(21.61),可见相较于市售黄油饼干,卤虫饼干肉香、油香明显。

3 结论

比较响应面和人工神经网络模型,人工神经网络模型具有更强更稳定的预测和优化能力。采用人工神经网络模型优化卤虫饼干工艺参数为:添加卤虫 13.56 g,藜麦粉 47.26 g、低筋小麦粉 100 g、牛奶 40 g、玉米油 30 g、黄油 60 g、盐 2 g、木糖醇 25 g,于 150 ℃ 上烘烤 20.70 min,此条件下卤虫饼干感官评分最高,为 73.00。卤虫饼干蛋白质含量为 6.46 g/100 g、脂肪含量为 30.30 g/100 g,蛋白质含量较高。电子舌分析表明卤虫饼干滋味以鲜咸为主。挥发性风味成分分析表明,卤虫饼干含挥发性化合物 48 种,主要为醛类、酸类、酯类和呋喃吡喃类,其中含量与气味活性值最高的化合物均为(E,E)-2,4-癸二烯醛。卤虫饼干的研制丰富了饼干市场产品种类,为卤虫资源在休闲食品领域的开发应用提供了新的渠道和理论参考。

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

参考文献

[1] JUNMOL, CHEOL B C, SOO J P. Transcriptomic analysis of brine shrimp *Artemia franciscana* across a wide range of salinities [J]. Marine Genomics, 2022, 61: 100919.

[2] 刘贤华, 许越. 卤虫的研究与应用[J]. 中国水产, 2023, 570(5): 73−74. [LIU X H, XU Y. Research and application of *Artemia*[J]. China Fisheries, 2023, 570(5): 73−74.]

[3] 邱楚雯, 王韩信. 轮虫、卤虫营养强化研究进展[J]. 水产科技情报, 2019, 46(6): 354−358. [QIU C W, WANG H X. Research progress on nutritional enhancement of rotifers and brine worms[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2019, 46(6): 354−358.]

[4] VASELIH, DEEZAGIA, SHAHRAKI M K. Anti-aging effects of the proteins from *Artemia* extract on human fibroblasts cell proliferation and collagen expression in induced aging conditions[J]. Annals of Biotechnology, 2018, 1(3): 1−7.

[5] DEEZAGIA, CHASHNIDEL A, VASELIHAGH N, et al. The effects of purified *Artemia* extract proteins on proliferation, differentiation and apoptosis of human leukemic HL-60 cells[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2016, 17(12): 5139−5145.

[6] MARINA S M, GERCENDE V D C, JAVIER F R, et al. Effect of HUFA in enriched *Artemia* on growth performance, biochemical and fatty acid content, and hepatopancreatic features of *Penaeus vannamei* postlarvae from a commercial shrimp hatchery in Santa Elena, Ecuador[J]. Aquaculture Nutrition, 2023, 2023: 7343070−7343070.

[7] 韩玉谦, 冯晓梅, 姜守磊, 等. 卤虫卵氨基酸饮料的研制[J]. 食品科学, 2003, 24(12): 78−81. [HAN Y Q, FENG X M, JIANG S L, et al. Study on the amino-acid beverage of brine shrimp eggs[J]. Food Science, 2003, 24(12): 78−81.]

[8] 姜晓东, 孙元芹, 赵旭东, 等. Plackett-Burman 设计与模糊数学联用优化卤虫风味酱制备工艺[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 138−146. [JIANG X D, SUN Y Q, ZHAO X D, et al. Optimization of *Artemia* flavor sauce formula by Plackett-Burman design and fuzzy mathematics[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 138−146.]

[9] 姜晓东, 王颖, 张帅中, 等. 卤虫作为新食品原料的可行性分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(7): 203−209. [JIANG X D, WANG Y, ZHANG S Z, et al. Feasibility analysis of *Artemia* as a new food raw material[J]. Food Research and Development, 2025, 46(7): 203−209.]

[10] 刘美琪, 郑龙华, 孙越, 等. 功能性代餐饼干的研究发展[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(4): 41−45. [LIU M Q, ZHENG L H, SUN Y, et al. Research and development of functional meal substi-

tute biscuits[J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(4): 41−45.]
[11] 杜亚军, 郭尚. 杂粮饼干研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(4): 1−3. [DU Y J, GUO S. Research progress of cereal biscuits[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(4): 1−3.]
[12] WALCZAKS. Artificial neural networks[M]. Encyclopedia of Information Science and Technology, Fourth Edition. IGI Global Scientific Publishing, 2018: 120-131.
[13] HEYDARI G, MAHDAVI M, MALA H. A review on secure inference from neural networks[J]. SN Computer Science, 2025, 6(6): 668−668.
[14] ŚWIETLICKAA A. Survey on artificial neural networks in human-robot interaction[J]. Neural Computation, 2025, 37(7): 61−63.
[15] KADDOUA A, ABDELBAKYM H, HAMDYM S, et al. Discrimination of thermally treated milk using fluorescence spectroscopy combined with PCA and artificial neural networks[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 146: 107952.
[16] MESERYE S H, QENAWY M, LI J, et al. Predictive modeling of garlic quality in hybrid infrared-convective drying using artificial neural networks[J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 145: 226−238.
[17] IBEPC, AGU H O, IKEGWU T M, et al. Effect of dough thickness and baking temperatures on the proximate composition of optimized cookies from wheat-white yam flour using response surface methodology[J]. Applied Food Research, 2025, 5(2): 101134−101134.
[18] 段亮亮, 郑思晴, 赵柏雅, 等. 脱脂大豆粉曲奇饼干配方优化及对小鼠脂代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 198−206. [DUAN L L, ZHENG S Q, ZHAO B Y, et al. Optimization of recipe of defatted soybean flour cookies and its effect on lipid metabolism in mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 198−206.]
[19] ZHANG S Z, YUAN Y K, LIU C Z, et al. Modeling and optimization of porous aerogel adsorbent for removal of cadmium from crab viscera homogenate using response surface method and artificial neural network[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 150: 111990.
[20] HUANG Y Q, KANGAS L J, RASCO B A. Applications of artificial neural networks (ANNs) in food science[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007, 47(2): 113−126.
[21] 郑飞洋, 戴志远, 尹雪莲, 等. 基于响应面和神经网络模型优化鱼油脱色工艺[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 249−259. [ZHENG F Y, DAI Z Y, YIN X L, et al. Optimization of fish oil decolorization process based on response surface methodology and artificial neural network models[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(3): 249−259.]
[22] LIU T H, WANG Y, YU X Q, et al. Effects of freeze-drying and spray-drying on the physical and chemical properties of *Perinereis aibuhitensis* hydrolysates: Sensory characteristics and antioxidant activities[J]. Food Chemistry, 2022, 382(Jul.15): 132317.1−132317.8.
[23] 周明, 朱晓娟, 尧梅香, 等. 猴头菇-低筋小麦混合面团流变学特性及猴头菇酥性饼干挥发性风味成分的分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 192−203. [ZHOU M, ZHU X J, YAO M X, et al. Rheological properties of *Hericium erinaceus*-low-gluten wheat mixed flour dough and volatile flavor components of derived crisp cracke[J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(2): 192−203.]
[24] RUSHDA AM, SARITA S, NAVIN C S. Formulation of quinoa incorporated protein-rich biscuits and numerical optimization of its process parameters[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 46(1): 1−9.
[25] 付丽红, 唐琳清. 紫薯藜麦饼干配方的研制[J]. 食品研究与开发, 2018(9): 57−61. [FU H L, TANG L Q. Study on the formulation of purple potato-quinoa biscuits[J]. Food Research and Development, 2018(9): 57−61.]
[26] 王颖, 张新一, 于博, 等. 藜麦全粉添加量对饼干品质及血糖生成指数的影响[J]. 食品与机械, 2025(6): 150−156. [WANG Y, ZHANG X Y, YU B, et al. Effects of whole quinoa flour addition on biscuit quality and glycemic index[J]. Food & Machinery, 2025(6): 150−156.]
[27] BHAGYA R G V S, DASH K K. Comprehensive study on applications of artificial neural network in food process modeling [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 62(10): 21−28.
[28] CHEN Y, WU M, XU X, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from Akebia fruit using an artificial neural network model: Characteristics and antioxidant activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 120: 107447.
[29] 王仪, 祝超智, 白雪原, 等. 基于人工神经网络耦联遗传算法优化肉葡萄球菌高密度培养基配方[J]. 肉类研究, 2025, 39(5): 1−9. [WANG Y, ZHU Z C, BAI X Y, et al. Optimization of high-density culture medium for *Staphylococcus carnosus* based on artificial neural network-genetic algorithm[J]. Meat Research, 2025, 39(5): 1−9.]
[30] 袁华标, 黎铸毅, 刘美娇, 等. 猕猴桃风味石斑鱼骨高钙饼干的制备及品质分析[J]. 食品研究与开发, 2025(3): 152−159. [YUAN H B, LIN Z Y, LIU M J, et al. Preparation and quality analysis of kiwi-flavor grouper bone high-calcium biscuits[J]. Food Research and Development, 2025(3): 152−159.]
[31] 樊亮, 叶文斌, 胡文斌, 等. 响应面结合模糊数学感官评价法优化油橄榄果渣曲奇饼干的配方及其品质测定[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 282−295. [FAN L, YE W B, HU W B, et al. Response surface methodology and fuzzy mathematics sensory evaluation were used to optimize the preparation process and quality assessment of olive pomace cookies[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(2): 282−295.]
[32] 张洪礼, 龚飘飘, 杨芬, 等. 响应面法优化方竹笋超微粉制作曲奇饼干的关键配方及品质评价[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(6): 103−115. [ZHANG H L, GONG P P, YANG F, et al. Key formula and quality evaluation of cookies made from superfine powder of *Chimonobambusa quadrangularis* shoots optimized by response surface method[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2024, 52(6): 103−115.]
[33] 向晨曦, 钟明慧, 徐新星, 等. 蒸制鲟鱼肉特征性滋味组分的鉴定[J]. 肉类研究, 2024, 52(6): 103−115. [XIANG C X, ZHONG M H, XU X X, et al. Identification of characteristic taste components of steamed sturgeon[J]. Meat Research, 2024, 52(6): 103−115.]
[34] 丁长河, 魏书音, 刘倩倩, 等. 布拉迪酵母发酵麸皮对饼干品质及风味的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 83−91. [DING C H, WEI S Y, LIU Q Q, et al. Effect of

bran fermentation by *Saccharomyces boulardii* on the quality and flavor of biscuit[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 83−91.]
[35] 刘志云, 胡秋辉. 香菇粉和豆沙复配曲奇特征风味物质分析[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 95−101. [LIU Z Y, HU Q H. Analysis of characteristic flavor components of cookies formulated with bean paste *Lentinus edodes*[J]. Food Science, 2016, 37(20): 95−101.]
[36] 陶虹伶, 杨文建, 裴斐, 等. 松茸曲奇特征风味成分分析鉴定[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 128−134. [TAO H L, YANG W J, PEI F, et al. Identification and analysis of characteristic flavor components of *Tricholoma matsutake* cookies[J]. Food Science, 2016, 37(16): 128−134.]
[37] 田质全, 李东斌. 薏仁运动营养饼干的研制及风味物质分析[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(2): 96−100. [TIAN Z Q, LI D B. Preparation and flavor analysis of coix seed sports nutrition biscuit [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(2): 96−100.]
[38] LIU C, HOU Y R, SUN R N, et al. Effect of dietary probiotics supplementation on meat quality, volatile flavor compounds, muscle fiber characteristics, and antioxidant capacity in lambs[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(8): 2646−2658.
[39] 朱寅, 滕健. 小麦制品中挥发性成分的研究综述[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 436−444. [ZHU Y, TENG J. A review of volatile components in wheat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 436−444.]
[40] 王海丽, 关鑫, 唐源, 等. 热反应牛骨香精酶解工艺优化及关键气味化合物鉴定[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(1): 126−142. [WANG H L, GUAN X, TANG Y, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process of thermal reaction bovine bone flavoring and identification of key odor compounds[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(1): 126−142.]