

响应面法优化复合咸味剂腌制罗非鱼片的工艺

吴燕燕^{1*}, 赵志霞^{1,2}, 李来好¹, 林婉玲¹, 邓建朝¹, 杨贤庆¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部水产品加工重点实验室, 广东广州 510300;

2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 为开发一种低盐健康新型的使用复合咸味剂腌制罗非鱼片的加工技术, 本研究以罗非鱼片为原料, 通过单因素实验, 考察氯化钠分别与氯化钾、苹果酸钠、白砂糖不同添加量组合对腌制罗非鱼片的感官品质、含盐量、水分含量、蛋白水解指数和质构的影响, 采用Box-Behnken响应面法优化复合咸味剂的最佳配比参数。结果显示, 氯化钾、苹果酸钠、氯化钠添加量对罗非鱼片品质影响显著, 白砂糖添加量对罗非鱼片品质影响不显著; 通过Box-Behnken响应面法优化得到复合咸味剂腌制罗非鱼片的最佳工艺条件: 氯化钾添加量为2.6%、苹果酸钠添加量为1.3%、氯化钠添加量为9.1%、白砂糖添加量为0.5%。优化后产品的感官评分为89, 含盐量为2.81%, 表明实验模型可以用于预测实际值。研究表明, 与对照组相比, 产品的钠含量降低了22.92%, 从而为罗非鱼的加工提供了一种低盐低钠快速腌制的加工新技术。

关键词: 罗非鱼; 复合咸味剂; 腌制; 工艺参数优化; 响应面法

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

罗非鱼(*Oreochromis sp.*)又称非洲鲫鱼、福寿鱼等, 由于适应性强、生长迅速、繁殖能力强、病害少, 且其肉质鲜嫩, 富含蛋白质和多种不饱和脂肪酸, 目前是世界主要养殖鱼类^[1]。中国是罗非鱼养殖大国, 2016年产量达到186.6万t^[2]。罗非鱼已经发展成为中国最具国际竞争力的水产养殖品种之一, 但中国罗非鱼产业过分依赖国际市场, 国内市场容量小, 产品单一, 初级产品占绝大部分, 深加工产品少, 加工技术跟不上, 罗非鱼出口、内销均受到挑战^[3], 急需开发适合国内市场需求罗非鱼加工产品。

腌制是我国历史悠久的鱼类加工保藏的主要方式之一, 操作方便, 可以在短期内处理大量的鱼。传统腌制鱼类产品咸中带香、风味独特、保存期长, 深受消费者喜爱。传统腌制工艺用盐量大, 腌制周期长, 易造成微生物污

染。此外, 传统腌制品含盐量高, 饮食中摄入过多的氯化钠易导致高血压、心血管疾病等, 不易长期食用^[4]。为了满足人们对低盐食品的要求, 高盐腌制品已逐渐向低盐腌制品发展^[5]。

为此, 本研究中使用几种咸味剂如氯化钠、氯化钾、苹果酸钠等腌制罗非鱼片, 通过工艺优化, 获得复合咸味剂腌制罗非鱼片的最佳工艺技术, 为低盐腌制罗非鱼提供新的腌制方法, 提高产品的品质, 为消费者提供健康美味的罗非鱼腌制产品。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与仪器

鲜活罗非鱼(500~600 g/条)和白砂糖均购于广州华润万家超市; 粗盐购于广州海珠区大江苑菜市场; 氯化钾、苹果酸钠, 食品级, 购于

收稿日期: 2018-01-08 修回日期: 2018-03-26

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-46); 国家自然科学基金(31571869); “十二五”国家科技支撑计划(2015BAD17B03-1); “扬帆计划”引进创新创业团队专项(2015YT02H109)

通信作者: 吴燕燕, E-mail: wuyygd@163.com

广州齐云试剂公司;三氯乙酸、硫酸铜、硫酸钾、浓硫酸、硝酸银,国产分析纯,购于广州化学试剂厂。

Titrand 809型自动电位滴定仪(万通公司,瑞士);Kjeltec™ 2300蛋白自动分析仪(FOSS,丹麦);SH220F石墨消解仪(海能,济南);QTS-25质构仪(CNS FARNELL,英国);3-550A高温马弗炉(Ney VULCAN,美国);3K30台式高速冷冻离心机(SigmaSPX-320,德国);IN612C低温恒温培养箱(YAMATO,日本)。

1.2 实验方法

样品制备 鲜活罗非鱼去鳃、鳞、内

脏,用水将体内的残血以及其他脏污清洗干净,沿背脊剖开形成2片鱼片,按照料液比(鱼片质量:腌制液体积)1:3.4(g/mL)、腌制温度15℃的条件进行注射腌制,注射率为4%(V/V)^[6]。

氯化钠分别与氯化钾、苹果酸钠、白砂糖等组合对腌制罗非鱼片品质的影响 第I组:氯化钾+氯化钠;第II组:苹果酸钠+氯化钠;第III组:白砂糖+氯化钠。以氯化钠添加量13.0%(M/V)为对照组,分别研究氯化钾与氯化钠添加量、苹果酸钠与氯化钠添加量、白砂糖与氯化钠添加量对腌制罗非鱼片感官品质、含盐量、水分含量、蛋白水解指数和质构等品质的影响(表1)。

表1 氯化钠分别与氯化钾、苹果酸钠、白砂糖的添加量组合
Tab. 1 The addition of sodium chloride and potassium chloride, sodium malate, white sugar respectively %

组别 groups	氯化钾与氯化钠添加量(第I组) the addition of sodium chloride and potassium chloride (group I)	苹果酸钠与氯化钠添加量(第II组) the addition of sodium chloride and sodium malate (group II)	白砂糖与氯化钠添加量(第III组) the addition of sodium chloride and white sugar (group III)
1	0.0+13.0	0.0+13.0	0.0+13.0
2	1.5+11.5	0.7+12.3	0.5+13.0
3	2.5+10.5	1.4+11.6	1.0+13.0
4	4.0+9.0	2.1+10.9	1.5+13.0
5	5.0+8.0	2.8+10.2	2.0+13.0
6	6.5+6.5	3.5+9.5	2.5+13.0
7	8.0+5.0	4.2+8.8	3.0+13.0
8	9.0+4.0	4.9+8.1	3.5+13.0

响应面法优化复合咸味剂添加量配比参数

根据Box-Behnken中心设计原理,在氯化钠与其他咸味剂复合腌制罗非鱼片,对罗非鱼片的感官品质、含盐量、水分含量、蛋白水解指数和质构影响的单因素实验基础上确定各因素合适的取值范围,应用响应面法优化氯化钠、氯化钾和苹果酸钠3种咸味剂复合腌制罗非鱼片的最优配比,选取氯化钾添加量(A)、苹果酸钠添加量(B)、氯化钠添加量(C)为自变量,以腌制后鱼片含盐量和感官评分作为响应值。其因素水平取值及编码见表2,每个实验重复3次,实验结果取平均值。

1.3 分析方法

含盐量的测定 按照GB 5009.44-2016《食品中氯化物的测定方法-电位滴定法》^[7]测定。

表2 因素水平表

水平 levels	氯化钾添加量 (A) the addition of potassium chloride	苹果酸钠添加量 (B) the addition of sodium malate	氯化钠添加量 (C) the addition of sodium chloride
-1	1.5	1.2	9.0
0	2.5	1.4	10.0
1	3.5	1.6	11.0

钠含量的测定 按照GB 5009.91-2017《食品中钾、钠的测定方法》^[8]测定。

水分含量的测定 按照GB/T 9695.15-2008《食品中水分的测定方法-直接干燥法》^[9]测定。

质构的测定 采用Brookfield QTS-25质构仪,使用P/5平底圆柱形探头。测定条件:测试

模式为质地多面剖析(TPA),测试速度0.5 mm/s,返回速度0.5 mm/s,循环次数2次,触发点负载5 g。每组实验重复10次,去除异常值后求平均值^[10]。

蛋白质水解指数 总氮(TN)的测定:按照GB 5009.5-2010《食品中蛋白质的测定-凯氏定氮法》^[11]测定。非蛋白氮(NPN)的测定:精确称取绞碎的肉5 g(精确到0.001 g),加入5倍体积预冷的10%三氯乙酸,高速分散器匀浆1 min(10 000 r/min),4℃放置过夜。然后匀浆液以5 000 r/min离心5 min,弃去沉淀,上清液用中速

滤纸过滤,取5 mL到消化管中进行消化(方法同TN的测定),冷却至室温,然后用自动定氮仪测定,并按照公式(1)计算蛋白水解指数(PI)^[12]。

$$PI = \frac{NPN}{TN} \times 100\% \quad (1)$$

感官评定 罗非鱼片腌制完成,将其蒸熟后对其进行感官评定,感官评定小组由10名经过感官评定培训的成员组成,对产品的外观、气味、滋味、质地4个方面进行评价,总分为100分,评判标准如表3所示^[13-14]。

表3 感官评分标准

Tab. 3 Sensory evaluation criteria

评价指标	evaluation index	标准	criteria	感官评分	sensory evaluation
外观	appearance	肌肉组织致密完整,纹理清晰,色泽正常		25~20	
		肌肉组织致密,纹理较清晰,色泽较暗淡		19~15	
		肌肉组织不致密,纹理不清晰,色泽暗淡		<15	
气味	odor	无异味		25~20	
		有腥味,无其他异味		19~15	
		腥味明显,有异味		<15	
滋味	taste	适宜,无苦味、不适感		25~20	
		咸味稍重(轻),有苦味、不适感		19~15	
		咸味重(轻),苦味重,口感不适		<15	
质地	texture	鱼肉结实,咀嚼性好,弹性好		25~20	
		鱼肉较结实,咀嚼性较好,弹性较好		19~15	
		鱼肉较软烂,咀嚼性较差,弹性较差		<15	

1.4 数据分析

实验数据采用Excel 2013进行整理,用Design Expert 8.0.6、SPSS 20软件进行统计分析。

2 结果

2.1 氯化钾与氯化钠添加量对罗非鱼片品质的影响

对罗非鱼片感官品质和含盐量的影响 随着氯化钾添加量的增加,氯化钠添加量的减少,鱼肉的含盐量呈现下降的趋势(图1)。第I组中添加量1.5%+11.5%和2.5%+10.5%相比,二者的鱼肉含盐量无显著性差异($P>0.05$),添加量为4.0%+9.0%、5.0%+8.0%时,鱼肉的含盐量显

著低于未添加氯化钾组($P<0.05$)。当氯化钾添加量为4.0%、5.0%、6.5%时,样品吸收 K^+ 较慢,样品中含盐量呈现下降的趋势。咸味是腌制品的基本风味,这主要源于产品中的NaCl含量。在部分替代氯化钠的研究中,存在的主要问题为随着氯化钠添加量的降低而导致咸味下降。随着氯化钾添加量的增加,鱼肉的感官评分显著降低($P<0.05$)。当添加量超过6.5%时,鱼肉有轻微的苦味(图1)。

对罗非鱼片水分的影响 鱼肉的水分含量整体呈现先上升后下降的趋势(图2)。这与Aliño等^[15]的部分替代干腌猪腰肉的研究结果类似,研究发现氯化钾替代氯化钠能降低水分含量的损失。鱼肉的水分含量也受含盐量的影响,

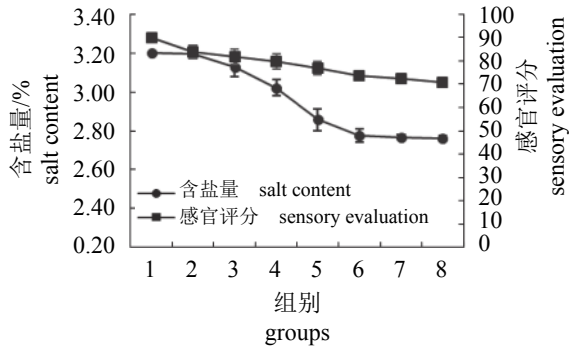


图1 氯化钾与氯化钠添加量对罗非鱼片含盐量、感官评分的影响

图中横坐标中组1~8与表1相对应, 下同

Fig. 1 Effects of addition of potassium chloride and sodium chloride on salt content and sensory evaluation of tilapia fillets

In the figure, the abscissas 1-8 indicate the groups of addition to Tab. 1, the same below

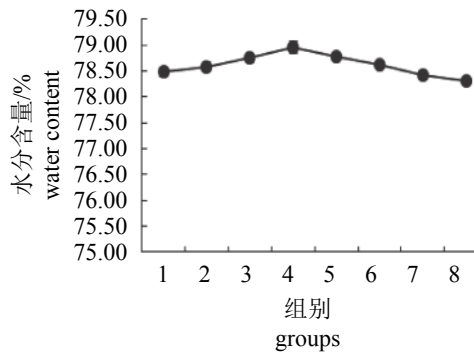


图2 氯化钾与氯化钠添加量对罗非鱼片水分含量的影响

Fig. 2 Effects of addition of potassium chloride and sodium chloride on water content of tilapia fillets

鱼肉质地发生变化, 蛋白质变性, 持水力下降。数据分析可知, 当添加量为(2.5%+10.5%)~(6.5%+6.5%)时, 鱼肉的水分含量无显著性差异(P>0.05)。

对罗非鱼片蛋白质水解指数的影响 蛋白质水解是腌肉制品加工过程中的重要反应, 蛋白质水解程度通常用PI表示。添加不同比例氯化钾与氯化钠的鱼片, 其蛋白质水解指数无显著性差异(P>0.05)(表4)。在未添加氯化钾时, 鱼片的蛋白质水解指数为9.70%, 随着氯化钾含量的增加, 蛋白质水解指数逐渐下降, 随后大致呈现上升的趋势。

对罗非鱼片质构的影响 鱼片在腌制过程中由于渗透作用和蛋白质变性等使质构发生变

表4 氯化钾与氯化钠添加量对鱼片蛋白质水解指数的影响
Tab. 4 Effects of addition of potassium chloride and sodium chloride on proteolysis index of tilapia fillet %

组别 (groups)	PI
1	9.70±0.05 ^a
2	9.53±0.20 ^a
3	9.00±0.03 ^a
4	9.50±0.10 ^a
5	9.22±0.20 ^a
6	9.34±0.31 ^a
7	9.37±0.09 ^a
8	9.41±0.07 ^a

注: 同一列数值上不同字母表示差异显著(P<0.05), 下同
Notes: values with different letters in the same column have significant difference(P<0.05), the same below

化。随着氯化钾添加量的增加, 氯化钠添加量的减少, 鱼肉的硬度呈现先下降后上升的趋势, 这可能与鱼肉的水分含量有一定的关系, Toyohara等^[16]研究发现盐水腌制会造成鱼肉中的肌浆蛋白大量沉淀, 从而导致鱼肉质构发生变化, 且腌制后鱼肉水分含量的减少也会导致硬度的增大。当氯化钾添加量≤6.5%时, 不同比例的氯化钾对鱼片的硬度无显著影响(P>0.05)(表5)。数据分析可知, 不同比例的氯化钾对鱼片弹性无显著性影响(P>0.05)。不同比例的氯化钾对鱼片的咀嚼性有显著性影响(P<0.05), 随着氯化钾添加量的增加, 氯化钠添加量的减少, 鱼肉的咀嚼性呈现先下降后上升的趋势, Szymczak等^[12]研究发现腌制可以提高鱼片的咀嚼性。腌制过程中的渗透作用在提高产品的硬度和咀嚼性的同时, 也引起了多汁性和嫩度的下降^[17]。

2.2 苹果酸钠与氯化钠添加量对罗非鱼片品质的影响

对罗非鱼片感官品质和含盐量的影响 随着苹果酸钠添加量的增加, 氯化钠添加量的减少, 鱼肉的含盐量呈现下降的趋势, 数据分析可知, 苹果酸钠添加量对鱼肉的含盐量有显著性影响(P<0.05), 而第II组的添加量为0.7%+12.3%和1.4%+11.6%的鱼肉含盐量无显著性差异(P>0.05)(图3)。添加苹果酸钠的鱼肉含盐量显著低于未添加苹果酸钠组(P<0.05)。咸味是腌制

表 5 氯化钾与氯化钠添加量对鱼片质构的影响(n=10)

Tab. 5 Effects of addition of potassium chloride and sodium chloride on texture of tilapia fillets

组别 groups	硬度/g hardness	弹性/mm elasticity	咀嚼性/mJ chewiness
1	67.00±3.20 ^b	2.40±0.05 ^{ab}	1.13±0.10 ^{bc}
2	63.67±1.01 ^{ab}	2.38±0.03 ^{ab}	1.02±0.04 ^{bc}
3	60.50±1.76 ^{ab}	2.37±0.05 ^{ab}	0.98±0.05 ^{ab}
4	57.17±0.93 ^{ab}	2.26±0.01 ^a	0.80±0.02 ^a
5	65.50±2.84 ^b	2.28±0.01 ^a	1.01±0.03 ^{bc}
6	66.33±1.42 ^b	2.33±0.02 ^{ab}	1.09±0.02 ^{bc}
7	73.83±3.89 ^c	2.43±0.06 ^b	1.19±0.02 ^{bc}
8	74.83±1.59 ^c	2.45±0.03 ^{ab}	1.22±0.07 ^c

品的基本风味,这主要源于产品中氯化钠含量。在部分替代氯化钠的研究中,存在的主要问题为随着氯化钠添加量的降低而导致咸味下降^[18]。随着苹果酸钠添加量的增加,鱼肉的感官评分显著降低($P<0.05$)(图3)。

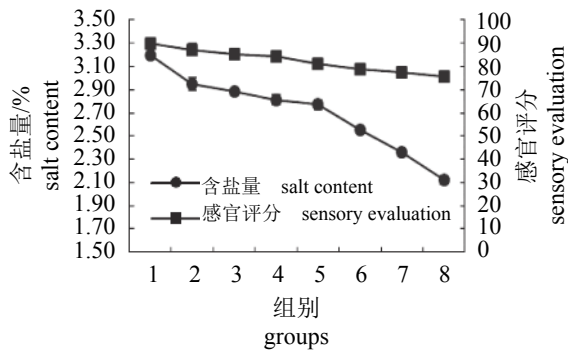


图 3 苹果酸钠与氯化钠添加量对罗非鱼片含盐量、感官评分的影响

Fig. 3 Effects of addition of sodium malate and sodium chloride on salt content and sensory evaluation of tilapia fillets

对罗非鱼片水分含量的影响 鱼肉的水分含量整体呈现上升的趋势,苹果酸钠与氯化钠添加量对鱼肉的水分含量有显著性影响($P<0.05$)(图4)。数据分析可知,当苹果酸钠添加量为0.7%~2.8%时,与未添加苹果酸钠相比,鱼肉的水分含量无显著性差异($P>0.05$)。

对罗非鱼片蛋白水解指数的影响 添加不同比例苹果酸钠与氯化钠的鱼片蛋白质水解指数无显著性差异($P>0.05$)(表6),说明苹果酸钠在腌肉制品加工过程中对内源性蛋白酶活性无影响。

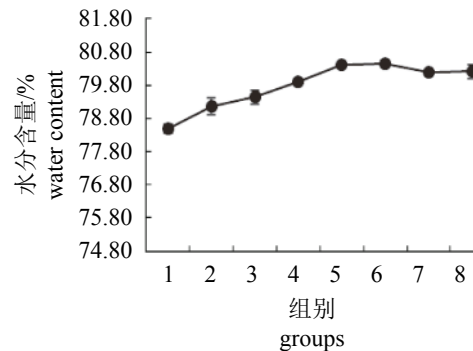


图 4 苹果酸钠与氯化钠添加量对罗非鱼片水分含量的影响

Fig. 4 Effects of addition of sodium malate and sodium chloride on water content of tilapia fillets

对罗非鱼片质构的影响 鱼片在腌制过程中由于渗透作用和蛋白质变性等使质构发生变化。随着苹果酸钠添加量的增加,氯化钠添加量的减少,鱼肉的硬度呈现先下降后上升的趋势,这可能和鱼肉的水分含量有一定的关系,当苹果酸钠添加量为1.4%、2.1%、2.8%时,与对照组相比,苹果酸钠对鱼片的硬度有显著影响($P<0.05$)(表7)。数据分析可知,不同比例的苹果酸钠对鱼片弹性无显著性影响($P>0.05$)。不同比例的苹果酸钠对鱼片的咀嚼性有显著性影响($P<0.05$),随着苹果酸钠添加量的增加,鱼肉的咀嚼性呈现先下降后上升的趋势,这可能也和鱼肉的水分含量有一定的关系。

2.3 白砂糖与氯化钠添加量对罗非鱼片品质的影响

对罗非鱼片感官品质和含盐量的影响 在

表 6 苹果酸钠与氯化钠添加量对罗非鱼片蛋白质水解指数的影响

Tab. 6 Effects of addition of sodium malate and sodium chloride on proteolysis index of tilapia fillets %

组别 groups	PI
1	9.70±0.13 ^a
2	9.80±0.15 ^a
3	9.85±0.14 ^a
4	9.79±0.01 ^a
5	9.95±0.08 ^a
6	10.00±0.08 ^a
7	9.96±0.08 ^a
8	9.95±0.16 ^a

氯化钠添加量一定的条件下, 随着白砂糖添加量的增加, 鱼肉的含盐量呈现略微下降的趋势, 数据分析可知, 白砂糖添加量对鱼肉的含盐量无显著性影响($P>0.05$)(图5)。随着白砂糖添加量的增加, 鱼肉的感官评分呈现先升高后下降的趋势, 当第Ⅲ组的添加量为0.5%、1.0%、1.5%时, 鱼片的感官评分显著高于对照组($P<0.05$)(图5)。

对罗非鱼片水分含量的影响 在氯化钠添加量一定的条件下, 随着白砂糖添加量的增加, 鱼肉的水分含量整体呈现先下降后略上升的趋势, 白砂糖添加量对鱼肉的水分含量有显著性影响($P<0.05$)。数据分析可知, 当白砂糖的添加量为0.5%时, 与未添加白砂糖相比, 鱼肉的水分含量无显著性差异($P>0.05$)(图6)。

表 7 苹果酸钠与氯化钠添加量对罗非鱼片质构的影响

Tab. 7 Effects of addition of sodium malate and sodium chloride on texture of tilapia fillets

组别 groups	硬度/g hardness	弹性/mm elasticity	咀嚼性/mJ chewiness
1	67.00±3.20 ^a	2.40±0.05 ^a	1.13±0.10 ^a
2	66.55±2.33 ^{ab}	2.39±0.06 ^a	1.09±0.05 ^{abc}
3	65.75±2.36 ^c	2.22±0.10 ^a	0.93±0.08 ^{bc}
4	64.88±3.04 ^{cd}	2.25±0.16 ^a	1.02±0.13 ^{ab}
5	54.38±4.21 ^e	2.30±0.11 ^a	1.10±0.11 ^c
6	71.13±3.59 ^{bc}	2.28±0.06 ^a	1.19±0.08 ^{abc}
7	77.25±2.50 ^{bc}	2.30±0.16 ^a	1.23±0.07 ^{abc}
8	88.13±5.01 ^{de}	2.40±0.14 ^a	1.43±0.18 ^c

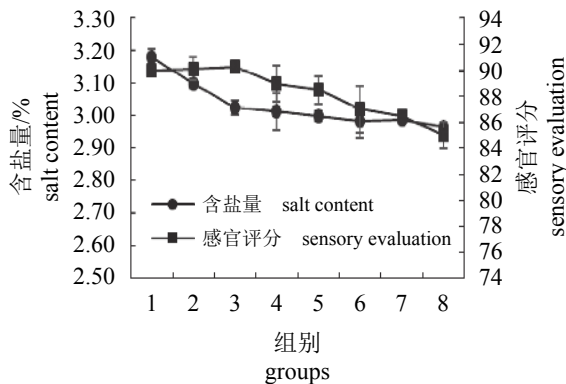


图 5 白砂糖与氯化钠添加量对罗非鱼片含盐量、感官评分的影响

Fig. 5 Effects of addition of white sugar and sodium chloride on salt content and sensory evaluation of tilapia fillets

对罗非鱼片蛋白水解指数的影响 添加不同比例白砂糖的鱼片蛋白质水解指数无显著性差异($P>0.05$)(表8)。未添加白砂糖时, 鱼片的蛋白质水解指数为9.70%, 随着白砂糖添加量的增加, 蛋白质水解指数大体呈现下降的趋势。

对罗非鱼片质构的影响 在氯化钠添加量一定的条件下, 随着白砂糖添加量的增加, 鱼肉的硬度大体呈现先上升后下降的趋势。当白砂糖的添加量为0.5%、1.0%、1.5%时, 与对照组相比, 白砂糖对鱼片的硬度无显著影响($P>0.05$)。不同比例的白砂糖对鱼片弹性无显著性影响($P>0.05$); 不同比例的白砂糖对鱼片的咀嚼性有显著性影响($P<0.05$), 随着白砂糖添加量的增加, 鱼肉的咀嚼性大体呈现先升高后下降的趋

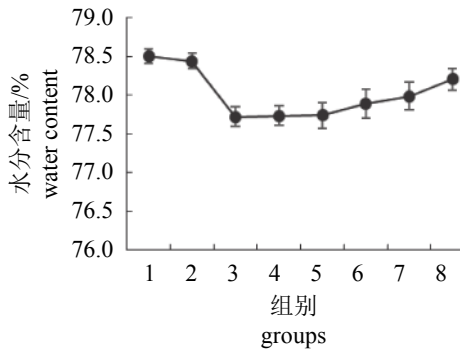


图6 白砂糖与氯化钠添加量对罗非鱼片水分含量的影响

Fig. 6 Effects of addition of white sugar and sodium chloride on water content of tilapia fillets

表8 白砂糖与氯化钠添加量对罗非鱼片蛋白质水解指数的影响

Tab. 8 Effects of addition of white sugar and sodium chloride on proteolysis index of tilapia fillets %

组别 groups	PI
1	9.70±0.09 ^a
2	9.41±0.08 ^a
3	9.46±0.18 ^a
4	9.66±0.14 ^a
5	9.60±0.11 ^a
6	9.51±0.18 ^a
7	9.44±0.16 ^a
8	9.50±0.15 ^a

势, 因白砂糖易氧化成酸, 使肉的酸度增加, 有利于胶原的松软和膨润(表9)。

2.4 响应面法优化复合咸味剂腌制罗非鱼片的配比参数

响应面法实验结果分析 根据Box-Behnken中心设计原理, 在单因素实验基础上, 选取影响较大的因素, 以氯化钾添加量(A)、苹果酸钠添加量(B)、氯化钠添加量(C)为自变量, 以腌制后鱼片含盐量和感官评分作为响应值设计响应面实验(表10)。

响应面模型建立及方差分析 利用Design Expert软件对表10实验数据进行多元拟合回归分析, 得到感官评分的二次多项回归方程:

$$Y_1 = 81.20 - 4.31A - 2.06B - 1.50C - 0.50AB + 0.88AC + 0.38BC - 0.73A^2 - 0.48B^2 + 0.15C^2 \quad (2)$$

对感官评分的回归方程进行方差分析及显著性检验(表11)。在响应面方差分析中, 该回归模型 $P < 0.001$, 表明该模型达到极显著水平, 失拟项不显著($P = 0.4075 > 0.05$), 表明实验结果和模型拟合良好, 可以用来分析和预测鱼片的感官评分^[19]。相关系数(R^2)和校正决定系数(R_{Adj}^2)可以验证模型的拟合度, $R^2 = 0.9576$, $R_{Adj}^2 = 0.9032$, 表明该模型能较好地反映鱼片的感官评分与氯化钾、苹果酸钠和氯化钠添加量之间的关系。回归方程中各变量对响应值影响的显著性由 F 检验来判定, P 越小, 相应变量的显著程度越高。氯化钾、苹果酸钠和氯化钠添加量的 $P < 0.05$, 说明氯化钾、苹果酸钠和氯化钠添加量对响应值有显著性影响。根据 F 值大小, 各个因素对鱼片中的含盐量的影响顺序: $A > B > C$ 。

Design Expert软件拟合实验结果, 得出感官评分最佳工艺: 氯化钾添加量2.60%、苹果酸钠添加量1.30%、氯化钠添加量9.1%, 其感官评分理论值为88.73分。

利用Design Expert软件对表10实验数据进行多元拟合回归分析, 得到含盐量的二次多项回归方程:

$$Y_2 = 2.49 - 0.072A - 0.13B - 0.0065C + 0.048AB + 0.10AC - 0.0014BC + 0.037A^2 + 0.058B^2 - 0.12C^2 \quad (3)$$

对含盐量的回归方程进行方差分析及显著性检验(表12)。在响应面方差分析中, 该回归模型 $P < 0.001$, 表明该模型达到极显著水平, 失拟项不显著($P = 0.4357 > 0.05$), 表明实验结果和模型拟合良好, 可以用来分析和预测鱼片中的含盐量^[19]。相关系数(R^2)和校正决定系数(R_{Adj}^2)可以验证模型的拟合度, $R^2 = 0.9824$, $R_{Adj}^2 = 0.9598$, 表明该模型能较好地反映鱼片中的含盐量与氯化钾、苹果酸钠和氯化钠添加量之间的关系。回归方程中各变量对响应值影响的显著性由 F 检验来判定, P 越小, 相应变量的显著程度越高。氯化钾和苹果酸钠添加量的 $P < 0.05$, 说明氯化钾和苹果酸钠添加量对响应值有显著性影响。根据 F 值大小, 各个因素对鱼片中的含盐量的影响顺序: $A > B > C$ 。

Design Expert软件拟合实验结果, 得出含盐量的最佳工艺为氯化钾添加量2.69%、苹果酸钠添加量1.32%、氯化钠添加量9.5%, 其含盐量理论值为2.85%。

响应面交互作用分析与优化 采用Design

表 9 白砂糖与氯化钠添加量对罗非鱼片质构的影响

Tab. 9 Effects of addition of white sugar and sodium chloride on texture of tilapia fillets

组别 groups	硬度/g hardness	弹性/mm elasticity	咀嚼性/mJ chewiness
1	67.00±3.20 ^a	2.40±0.05 ^a	1.13±0.10 ^{ab}
2	60.75±4.13 ^a	2.42±0.16 ^a	0.85±0.13 ^a
3	67.50±1.78 ^a	2.43±0.05 ^a	1.15±0.05 ^{abc}
4	77.63±6.45 ^b	2.47±0.04 ^a	1.32±0.05 ^{bc}
5	79.50±5.20 ^b	2.41±0.03 ^a	1.40±0.11 ^{ab}
6	91.50±3.36 ^c	2.43±0.02 ^a	1.45±0.07 ^c
7	76.00±4.41 ^b	2.36±0.03 ^a	1.19±0.05 ^{abc}
8	77.25±3.10 ^b	2.42±0.03 ^a	1.20±0.03 ^b

表 10 响应面法优化实验结果

Tab. 10 Experimental results of Box-Behnken design

序号 no.	氯化钾 添加量(A) the addition of potassium chloride	苹果酸钠 添加量(B) the addition of sodium malate	氯化钠 添加量(C) the addition of sodium chloride	感官 评分 sensory evaluati- on	含盐量 /% salt content
1	-1	-1	0	85.0	2.81
2	1	-1	0	78.0	2.59
3	-1	1	0	83.0	2.49
4	1	1	0	74.0	2.46
5	-1	0	-1	88.0	2.60
6	1	0	-1	77.0	2.23
7	-1	0	1	82.5	2.38
8	1	0	1	75.0	2.43
9	0	-1	-1	85.0	2.58
10	0	1	-1	79.0	2.30
11	0	-1	1	82.0	2.57
12	0	1	1	77.5	2.28
13	0	0	0	82.0	2.51
14	0	0	0	80.0	2.45
15	0	0	0	82.0	2.52
16	0	0	0	80.0	2.49
17	0	0	0	82.0	2.49

Expert软件对实验结果进行回归拟合, 绘制三维曲面图。曲面图的陡峭程度可以反映各个因素对响应值的影响, 曲面图中曲线越陡峭, 表明对应因素对响应值的影响越大, 响应值变化越大; 响应图中等高线形状可以反映两个因素之

间交互作用大小, 等高线呈现椭圆形说明两个因素间交互作用显著, 而圆形则说明两个因素间交互作用较弱。等高线和响应面整体趋势图有一致性^[20]。图7显示, 曲面图中曲线较平缓, 表明两个因素间交互作用对鱼片感官评分的影响较小, 即氯化钾和苹果酸钠添加量的交互作用、氯化钾和氯化钠添加量的交互作用、苹果酸钠和氯化钠添加量的交互作用不显著, 这与表11中的方差分析结果一致。氯化钾和苹果酸钠添加量的交互作用、氯化钾和氯化钠添加量的交互作用的响应面坡度较陡, 说明因素间的交互作用对鱼片中的含盐量影响显著, 苹果酸钠和氯化钠添加量的交互作用的响应面坡度较平缓, 说明因素间的交互作用对鱼片中的含盐量影响不显著(图8), 这与表12中的方差分析结果一致。

模型验证 根据Design Expert软件拟合实验分别得出的感官评分和含盐量的最佳工艺, 考虑到实际生产的需要和节约成本, 确定最佳工艺条件: 氯化钾添加量为2.6%、苹果酸钠添加量为1.3%、氯化钠添加量为9.1%、白砂糖添加量为0.5%。为了检验模型预测的准确性, 在此条件下重复3次, 测得优化后的鱼片感官评分为89, 含盐量为2.81%, 较接近模型的预测值, 表明实验模型可以用于预测实际值。根据优化后工艺, 测定了复合咸味剂腌制后鱼片的钠含量为 1.11×10^3 mg/100 g, 对照组只采用氯化钠腌制的鱼片, 钠含量为 1.44×10^3 mg/100 g, 与对照组相比, 钠含量降低了22.92%, 达到了降低钠含量的目的(表13)。

表 11 感官评分回归与方差分析结果

Tab. 11 Analysis of variance for fitted regression model of sensory evaluation

方差来源 source of variance	平方和 sun of squares	自由度 df	均方 mean square	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性 significance
模型 model	208.79	9	23.2	17.58	0.000 5	***
A	148.78	1	148.78	112.74	<0.000 1	***
B	34.03	1	34.03	25.79	0.001 4	**
C	18	1	18	13.64	0.007 7	**
AB	1	1	1	0.76	0.412 9	
AC	3.06	1	3.06	2.32	0.171 5	
BC	0.56	1	0.56	0.43	0.534 7	
A ²	2.21	1	2.21	1.68	0.236 4	
B ²	0.95	1	0.95	0.72	0.424 2	*
C ²	0.095	1	0.095	0.072	0.796 5	
残差 residual	9.24	7	1.32			
失拟项 lack of fit	4.44	3	1.48	1.23	0.407 5	
纯误差 pure error	4.8	4	1.2			
总和 sum	218.03	16				

注: ***. $P < 0.001$, **. $P < 0.01$; *. $P < 0.05$ 。下同

Notes: ***. $P < 0.001$, **. $P < 0.01$; *. $P < 0.05$. The same below

表 12 含盐量回归与方差分析结果

Tab. 12 Analysis of variance for fitted regression model of sensory evaluation of salt content

方差来源 source of variance	平方和 sun of squares	自由度 df	均方 mean square	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性 significance
模型 model	0.30	9	0.033	43.48	<0.000 1	***
A	0.042	1	0.042	54.87	0.000 1	***
B	0.13	1	0.13	171.74	<0.000 1	***
C	3.35E-004	1	3.35E-004	0.44	0.528 3	
AB	9.33E-003	1	9.33E-003	12.25	0.01	*
AC	0.043	1	0.043	56.41	0.000 1	***
BC	7.97E-006	1	7.97E-006	0.01	0.921 4	
A ²	5.63E-003	1	5.63E-003	7.39	0.029 8	*
B ²	0.014	1	0.014	18.43	0.003 6	**
C ²	0.057	1	0.057	74.63	<0.000 1	***
残差 residual	5.33E-003	7	7.61E-004			
失拟项 lack of fit	2.45E-003	3	8.17E-004	1.13	0.435 7	
纯误差 pure error	2.88E-003	4	7.20E-004			
总和 sum	0.3	16				

3 讨论

目前, 低盐腌制品的研究主要集中于发酵

香肠、火腿等, 降低氯化钠含量的研究主要采用类似的氯化盐替代氯化钠, 例如氯化钾、氯化镁、氯化钙等^[21]。Horita等^[22]以不同比例的氯

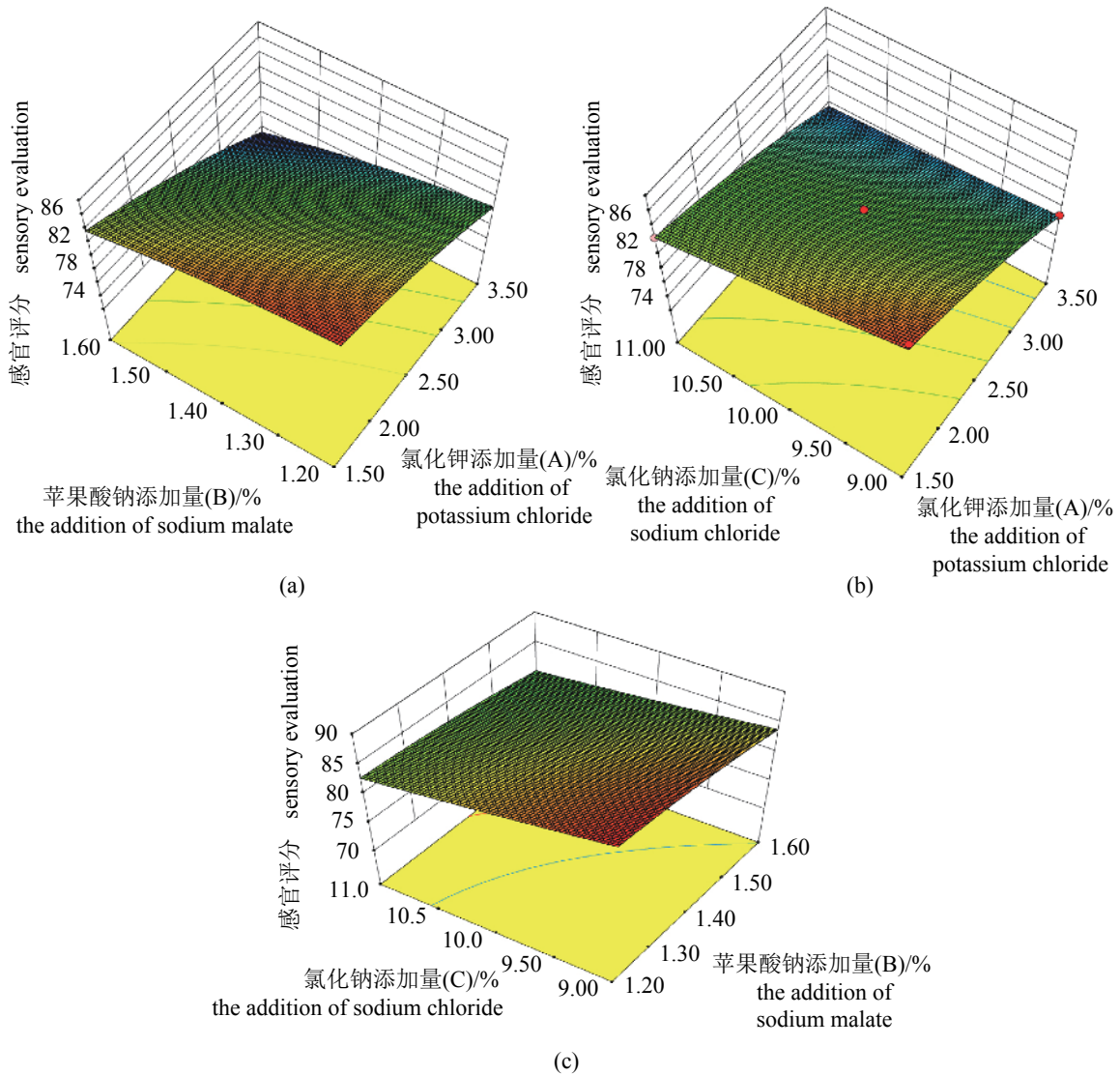


图 7 各因素交互作用对感官评分影响的响应面

Fig. 7 Response surface of interactive effect for every two factors on sensory evaluation

化钾、氯化镁、氯化钙部分替代香肠中的氯化钠, 研究发现50%氯化钠、25%氯化钾、25%氯化钙替代的香肠具有很好的感官品质, 但蒸煮损失、弹性、粘结性、乳化特性都有一定程度的下降; 50%氯化钠、25%氯化钾、25%氯化镁替代的香肠具有良好的乳化稳定性, 但是风味差。Armenteros等^[23]研究发现氯化钾、氯化钙、氯化镁部分替代氯化钠干腌的火腿对产品感官品质有一定的影响, 但50%氯化钾替代氯化钠时除有一定苦味外, 风味良好。刘媛^[24]研究发现当灌肠中用氯化钾替代16%的食盐、鸟胺牛磺酸替代8%的食盐, 谷氨酸钙替代6%的食盐时, 灌肠中食盐含量从2.19%降低到了1.53%, 下降了30%, 低钠盐灌肠与对照组相比, 在货架期内两

组灌肠的菌落总数和挥发性盐基氮均没有显著性差异。以上研究表明, 采用类似氯化钠的其他咸味剂腌制食品, 对产品品质无显著影响, 也能适当降低产品中食盐含量。

当第 I 组氯化钾与氯化钠添加量为4.0%+9.0%、5.0%+8.0%时, 鱼肉的含盐量显著低于未添加氯化钾组($P < 0.05$)。Aliño等^[25]研究发现 K^+ 从固体溶解到水中的速率较慢, 在肌肉中的扩散速率较快; 而 Na^+ 由固体溶解到水中的速率较快, 在肌肉中的扩散速率较慢, 这种规律可能与 K^+ 为胞内盐, Na^+ 为胞外盐有一定的关系。咸味是腌制品的基本风味, 这主要源于产品中氯化钠含量。在部分替代氯化钠的研究中, 存在的主要问题为随着氯化钠添加量的降低而导致

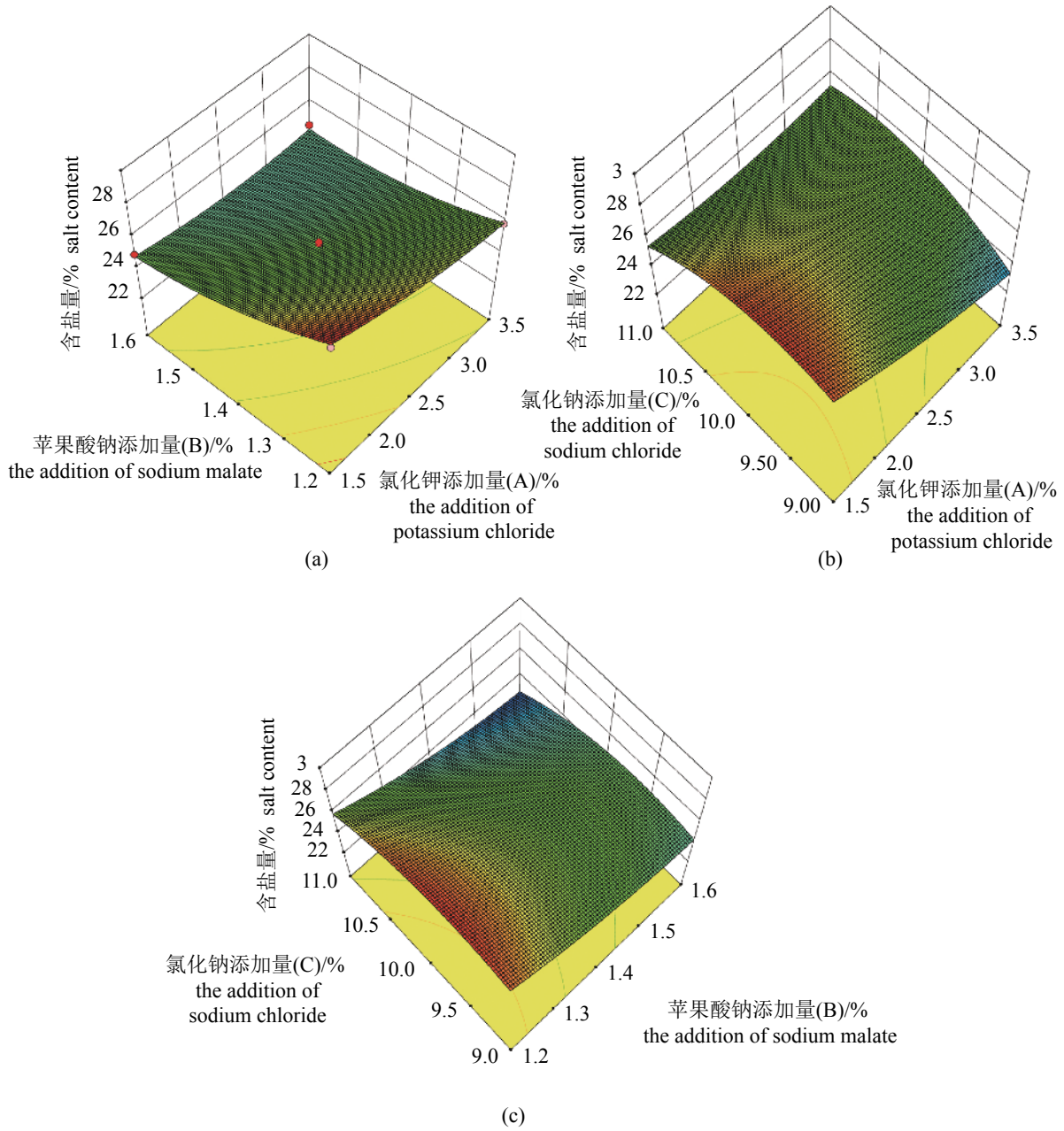


图 8 各因素交互作用对含盐量影响的响应面

Fig. 8 Response surface of interactive effect for every two factors on salt content

咸味下降。本研究结果表明随着氯化钾添加量的增加，鱼肉的感官评分显著降低($P < 0.05$)。当添加量超过6.5%时，鱼肉有轻微的苦味(图1)，这与Zanardi等^[26]研究结果一致，即当意大利腊肠中氯化钾含量超过50%时，腊肠出现苦味。低盐腌制过程，罗非鱼肉的水分含量整体呈现先上升后下降的趋势，这是由于在腌制过程中， K^+ 渗透速率较大，且 K^+ 又能阻碍脱水过程，从而导致添加氯化钾的罗非鱼肉中水分含量较高(图2)。腌肉制品加工过程中蛋白质降解主要是由于内

源性蛋白酶的作用，这可能是由于添加氯化钾后， K^+ 和 Na^+ 在腌肉制品加工过程中对内源性蛋白酶有相似的作用^[27]。这与吴海舟等^[28]和Armenteros等^[29]的研究结果一致，氯化钾替代氯化钠腌制猪肉对内源性蛋白酶活性的影响没有差异。罗非鱼片在腌制过程中由于渗透作用和蛋白质变性等使质构发生变化。综合以上分析，氯化钾与氯化钠添加量选择2.5%+10.5%为宜。

本研究发现随着苹果酸钠添加量的增加，

表 13 响应值优化水平

Tab. 13 Optimal concentrations for response values

组别 group	氯化钾添加量(A)/% the addition of potassium chloride	苹果酸钠添加量(B)/% the addition of sodium malate	氯化钠添加量(C)/% the addition of sodium chloride	感官评分 sensory evaluation	含盐量/% salt content	钠含量/(mg/100 g) sodium content
优化组 optimization group	2.6	1.3	9.1	89±1.00	2.81±0.02	1.11×10 ³
对照组 control group	0	0	13.0	85±1.20	3.05±0.04	1.44×10 ³

氯化钠添加的减少, 罗非鱼肉的含盐量呈现下降的趋势(图3)。当化合物中同时含有一价阳离子和一价阴离子时就会有咸味, 如钾、钠的氯化物、溴化物、碘化物等, 由于存在阴阳离子平衡, 通过减少氯化钠的添加量, 进入鱼肉的钠离子、氯离子就会同时减少。咸味是腌制的基本风味, 这主要源于产品中氯化钠的含量。然而, 具有咸味的并不只限于氯化钠一种, 其他一些化合物如氯化钾、溴化钠、碘化钠、苹果酸钠等也具备咸味的性质, 但这些化合物除了呈现咸味外, 还带有一些其他异味, 只有食盐的咸味最为纯正。在部分替代氯化钠的研究中, 存在的主要问题就是随着氯化钠添加量的降低而导致咸味下降^[18]。鱼肉的水分含量整体呈现上升的趋势, 苹果酸钠与氯化钠添加量对罗非鱼肉的水分含量有显著性影响($P<0.05$)(图4); 李雪姣等^[30]研究一种替代磷酸盐达到对牛肉保水嫩化效果的新方法, 研究发现当苹果酸钠浓度达到4%时, 牛肉的保水效果较好, 因此苹果酸钠达到一定浓度时, 对罗非鱼片具有一定的保水作用。当苹果酸钠添加量为1.4%、2.1%、2.8%时, 与对照组相比, 苹果酸钠对鱼片的硬度有显著影响($P<0.05$)(表7), 李雪姣等^[30]研究发现当苹果酸钠浓度达到4%时, 牛肉的剪切力最小, 剪切力越小表明牛肉越嫩, 因此, 一定浓度的苹果酸钠可以降低罗非鱼片的硬度。综合以上分析, 苹果酸钠与氯化钠添加量选择1.4%+11.6%为宜。

当第Ⅲ组的添加量为0.5%、1.0%、1.5%时, 鱼片的感官评分显著高于对照组($P<0.05$)(图5), 白砂糖产生的香味较为柔和, 可以缓解咸味, 改善口感^[31]。添加不同比例白砂糖的鱼片蛋白质水解指数无显著性差异($P>0.05$)(表8)。研究表明在腌制加工过程中, 白砂糖的添加量会略微影响总氮的含量, 但影响不显著^[32]。随着白砂糖添加量的增加, 鱼肉的硬度大体呈现先上

升后下降的趋势, 此结果和谢碧秀^[31]的结果一致, 合适浓度的白砂糖具有保持原料水分的作用, 对腌制品而言可减轻腌制脱水所致的老韧, 可保持肌肉的软嫩, 防止硬板。综合以上分析表明白砂糖的适量添加能缓和产品的咸味, 使产品口感更柔和, 而白砂糖对产品的蛋白水解指数、硬度、弹性均无影响, 0.5%的添加量对咀嚼性有好的影响, 考虑到白砂糖成本, 所以在使用复合咸味剂腌制罗非鱼片时, 选择白砂糖添加量0.5%为宜。

在单因素实验的基础上, 采用响应面法优化了氯化钾、苹果酸钠、氯化钠3种咸味剂复合的添加量配比参数, 确定复合咸味剂腌制罗非鱼片的最佳工艺条件: 氯化钾添加量为2.6%、苹果酸钠添加量为1.3%、氯化钠添加量为9.1%、白砂糖添加量为0.5%。测得优化后的鱼片感官评分为89, 含盐量为2.81%, 表明实验模型可以用于预测实际值。与对照组相比, 鱼片的钠含量下降了22.92%, 达到了降低钠含量的目的, 为生产低盐罗非鱼腌制品提供了新的腌制工艺技术依据。

参考文献:

- [1] 赵志霞, 吴燕燕, 李来好, 等. 我国罗非鱼加工研究现状[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 363-367, 373.
Zhao Z X, Wu Y Y, Li L H, et al. Current research situation of tilapia processing in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(9): 363-367, 373(in Chinese).
- [2] 农业部渔业渔政管理局. 渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
Ministry of Agriculture Fisheries and Fisheries Administration. Yearbook of Fisheries Statistics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017 (in Chinese).
- [3] 陈胜军, 李来好, 杨贤庆, 等. 罗非鱼综合加工利用与质量安全控制技术研究进展[J]. 南方水产科学, 2011, 7(4): 85-90.

- Chen S J, Li L H, Yang X Q, *et al.* Research progress on comprehensive processing & utilization and quality & safety control for tilapia[J]. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(4): 85-90(in Chinese).
- [4] Ripollés S, Campagnol P C B, Armenteros M, *et al.* Influence of partial replacement of NaCl with KCl, CaCl₂ and MgCl₂ on lipolysis and lipid oxidation in dry-cured ham[J]. *Meat Science*, 2011, 89(1): 58-64.
- [5] 魏涯, 钱茜茜, 吴燕燕, 等. 栅栏技术在淡腌半干鲈鱼加工工艺中的应用[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(2): 109-120.
- Wei Y, Qian X X, Wu Y Y, *et al.* Application of hurdle technology in light pickled semi-dry processing of bass[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(2): 109-120(in Chinese).
- [6] 赵志霞, 吴燕燕, 李来好, 等. 低盐罗非鱼片快速腌制的工艺研究[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(6): 105-114.
- Zhao Z X, Wu Y Y, Li L H, *et al.* Study on fast brining technology for low-salinity tilapia filets[J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(6): 105-114(in Chinese).
- [7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.44-2016 食品中氯化物的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.44-2016 Determination of chloride in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [8] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.91-2003 食品中钾、钠的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 5009.91-2003 Determination of potassium and sodium in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004 (in Chinese).
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 9695.15-2008 肉与肉制品-水分含量测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 9695.15-2008 Meat and meat products-Determination of moisture content[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [10] He Y F, Huang H, Li L H, *et al.* Freshness and shelf life of air packaged and modified atmosphere packaged fresh tilapia fillets during freezing-point storage[J]. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 2016, 6(6): 564.
- [11] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.5-2010 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 5009.5-2010 National food safety standard determination of protein in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010 (in Chinese).
- [12] Szymczak M, Kołakowski E, Felisiak K. Influence of salt concentration on properties of marinated meat from fresh and frozen herring (*Clupea harengus* L.)[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(2): 282-289.
- [13] 赵品, 林婉玲, 郝淑贤, 等. 酒糟罗非鱼间歇真空糟制工艺研究[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(3): 84-90.
- Zhao P, Lin W L, Hao S X, *et al.* Intermittent vacuum wine lees pickling processing of drunk fish (*Oreochromis mossambicus*)[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(3): 84-90(in Chinese).
- [14] 赵良, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场结合冰温气调保鲜技术对罗非鱼鱼片品质的影响[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(3): 91-97.
- Zhao L, Cen J W, Li L H, *et al.* Effect of high voltage electrostatic field combined with modified atmosphere packaging technology on quality of tilapia fillets[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(3): 91-97(in Chinese).
- [15] Aliño M, Grau R, Baigts D, *et al.* Influence of sodium replacement on the salting kinetics of pork loin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(4): 551-557.
- [16] Toyohara M, Murata M, Ando M, *et al.* Texture changes associated with insolubilization of sarcoplasmic proteins during salt-vinegar curing of fish[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(5): 804-807.
- [17] Bertram H C, Aaslyng M D, Andersen H J. Elucidation of the relationship between cooking temperature, water distribution and sensory attributes of pork—a combined NMR and sensory study[J]. *Meat Science*, 2005, 70(1): 75-81.
- [18] 杨海军. 新型健康咸味剂LONA Salt[J]. *食品安全导刊*, 2012(4): 59.

- Yang X J. New healthy salty agent LONA Salt[J]. *Food Safety Guide*, 2012(4): 59(in Chinese).
- [19] 曾少葵, 刘坤, 吴艺堂, 等. 脱钙罗非鱼鱼鳞明胶提取工艺优化及其理化性质[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(2): 38-44.
- Zeng S K, Liu K, Wu Y T, *et al.* Extraction optimization and physicochemical properties of gelatin from demineralized scale of *Oreochromis nilotica*[J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(2): 38-44(in Chinese).
- [20] 吕军伟, 杨贤庆, 林婉玲, 等. 响应面法优化藻油中抗氧化剂的复配组合[J]. *食品科学*, 2015, 36(6): 91-95.
- Lü J W, Yang X Q, Lin W L, *et al.* Optimization of antioxidant combinations for algal oil by response surface methodology[J]. *Food Science*, 2015, 36(6): 91-95(in Chinese).
- [21] 林静, 刘斌, 李松林. 氯化钾、氯化钙和氯化镁部分替代食盐腌制对风鸡品质影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(3): 105-109.
- Lin J, Liu B, Li S L. Study on the influence of potassium, calcium and magnesium chloride as partial substitute for salt on the quality of air-dried chicken[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(3): 105-109(in Chinese).
- [22] Horita C N, Morgano M A, Celeghini R M S, *et al.* Physico-chemical and sensory properties of reduced-fat mortadella prepared with blends of calcium, magnesium and potassium chloride as partial substitutes for sodium chloride[J]. *Meat Science*, 2011, 89(4): 426-433.
- [23] Armenteros M, Aristoy M C, Barat J M, *et al.* Biochemical and sensory changes in dry-cured ham salted with partial replacements of NaCl by other chloride salts[J]. *Meat Science*, 2012, 90(2): 361-367.
- [24] 刘媛. 低钠盐对灌肠品质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- Liu Y. Effect of low sodium salt on some characteristics of sausages[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [25] Aliño M, Fuentes A, Fernández-Segovia I, *et al.* Development of a low-sodium ready-to-eat desalted cod[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(3-4): 304-310.
- [26] Zanardi E, Ghidini S, Conter M, *et al.* Mineral composition of Italian salami and effect of NaCl partial replacement on compositional, physico-chemical and sensory parameters[J]. *Meat Science*, 2010, 86(3): 742-747.
- [27] 吴燕燕, 曹松敏, 李来好, 等. 蓝圆鲹腌干工艺中组织蛋白酶与游离氨基酸和滋味形成的关系[J]. *食品科学*, 2018, 39(4): 13-19.
- Wu Y Y, Cao S M, Li L H, *et al.* Relationship of cathepsin with free amino acids and flavor substances during salted *Decapterus maruadsi* processing[J]. *Food Science*, 2018, 39(4): 13-19(in Chinese).
- [28] 吴海舟, 张迎阳, 黎良浩, 等. KCl部分替代NaCl腌制对干腌肉制品蛋白质水解和感官品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 39-43.
- Wu H Z, Zhang Y Y, Li L H, *et al.* Influence of potassium chloride as partial substitute for sodium chloride on proteolysis and sensory properties of dry-cured meat products[J]. *Food Science*, 2014, 35(1): 39-43(in Chinese).
- [29] Armenteros M, Aristoy M C, Toldrá F. Effect of sodium, potassium, calcium and magnesium chloride salts on porcine muscle proteases[J]. *European Food Research and Technology*, 2009, 229(1): 93-98.
- [30] 李雪姣, 马悦培, 谌徽, 等. 无磷酸盐制剂对牛肉嫩度和保水性的影响[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(3): 109-111.
- Li X J, Ma Y P, Shen H, *et al.* Effect of preparation except phosphate on the tenderness and water-holding capacity of beef[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(3): 109-111(in Chinese).
- [31] 谢碧秀. 粉蒸肉加工工艺及其产品特性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- Xie B X. Processing technology and product characteristics of steamed pork bacon with rice powder[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese).
- [32] 张喜才. 低盐腊肉的复合腌制剂配方研究[J]. *荆楚理工学院学报*, 2015, 30(2): 25-28.
- Zhang X C. Study on compound salting formulation of low salt bacon[J]. *Journal of Jingchu University of Technology*, 2015, 30(2): 25-28(in Chinese).

Process of optimizing compound salt agent pickled tilapia fillets by response surface methodology

WU Yanyan^{1*}, ZHAO Zhixia^{1,2}, LI Laihao¹, LIN Wanling¹, DENG Jianchao¹, YANG Xianqing¹

(1. Key Lab of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This study aimed to develop a new type of low-salt and healthy compound salt agent for pickled tilapia (*Oreochromis* sp.) fillets processing technology. In this paper, the effects of different additions of sodium chloride and potassium chloride, sodium malate and white sugar on the sensory evaluation, salt content, water content, proteolysis index and texture of marinated tilapia fillets were investigated by single factor experiment with fresh tilapia fillets respectively, and optimization of mixing parameters of compound salt agent by Box-Behnken Response Surface method. Results indicated the effect of potassium chloride, sodium malate, sodium chloride on the quality of tilapia fillets was significant. The best processing technology of compound salt agent pickled tilapia fillets were as follows: the addition of potassium chloride was 2.67%, sodium malate was 1.32%, sodium chloride was 9.1%, white sugar was 0.5%. Under these conditions, the actual sensory evaluation was 89, the actual salt content was 2.81%, and the relative error of the target prediction value was 2.39%, indicating that the experimental model could be used to predict the actual value. Preliminary results indicate that compared with the control group, the sodium content of tilapia fillets decreased by 22.92%, which provided a new fast pickling processing technology of low salt and low sodium for the processing of tilapia.

Key words: tilapia; compound salt agent; pickle; optimization of process parameters; response surface methodology

Corresponding author: WU Yanyan. E-mail: wuyygd@163.com

Funding projects: China Agriculture Research System (CARS-46); National Natural Science Foundation of China (31571869); National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period (2015BAD17B03-1); “Yangfan” Innovative and Entrepreneurial Research Team Project (2015YT02H109)