



食品工业科技

Science and Technology of Food Industry

ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS



《食品工业科技》网络首发论文

题目：小龙虾肉脯的工艺优化
作者：瞿桂香，马文慧，董志俭，陈玉勇，展跃平
网络首发日期：2020-07-16
引用格式：瞿桂香，马文慧，董志俭，陈玉勇，展跃平. 小龙虾肉脯的工艺优化. 食品工业科技. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200715.1915.040.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

项目来源: 院级课题小龙虾深加工产品开发及常温保鲜技术研究 (NSF201705)

作者简介: 瞿桂香 (1978-), 女, 讲师, 研究方向: 食品加工, E-mail:532633491@qq.com。

*通讯作者: 展跃平 (1963-), 男, 教授, 研究方向: 食品加工, E-mail:534109862@qq.com。

小龙虾肉脯的工艺优化

瞿桂香 马文慧 董志俭 陈玉勇 展跃平*

(江苏农牧科技职业学院 江苏泰州 225300)

摘要: 本文以质构、色差、感官评分为指标, 研究糖盐比、TG 酶添加量、烤制温度、烤制时间对小龙虾肉脯品质的影响。在此基础上, 以感官评分和硬度为响应值, 采用响应面设计优化工艺条件, 得到的最佳工艺参数为: 100 g 小龙虾肉, 糖盐比 7.5: 2.5 (10.0 g)、TG 酶添加量 2.00 U/g、烤制温度 145 °C、烤制时间 9 min, 此工艺加工而成的小龙虾肉脯产品片形整齐, 厚薄均匀, 色泽淡红清亮, 咸甜适宜, 有较好的弹性, 硬度、咀嚼性适中, 所得感官评分 89.00 分, 硬度 540.45 N, 试验结果值与理论预测值误差分别是 0.84%、0.46%, 模型拟合度好, 试验结果可靠。

关键词: 小龙虾肉脯; 工艺优化; 品质

Optimization of Dried Crayfish Slice Processing Technology

Qu Gui-xiang Ma Wen-hui Dong Zhi-jian Chen Yu-yong Zhan Yue-ping*

(Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou 225300 China)

Abstract: In this paper, texture, color difference and sensory score were used as indicators to study the effects of sugar/salt ratio, TG enzyme addition, baking temperature and baking time on the dried crayfish slice. On this basis, the sensory score and hardness as response value, process condition was optimized by using response surface design. The optimum parameters were ratio of sugar/salt 7.5:2.5(10.0 g), TG enzyme amount 2.00 U/g, baking temperature 145 °C, bake time 9 min, that dried crayfish slices were neat in shape, even in thickness, red and bright in color, moderately salty and sweet with good elasticity, hardness and moderate chewability. The sensory score was 89.00 and hardness 540.45 N. The test results and the theory prediction error is 0.84%, 0.46% respectively. The fit of the model is good and the results is reliable.

Keywords: Dried crayfish slice; Optimize; Quality

中图分类号: TS254.4 文献标志码: A

肉脯是我国的传统休闲美食, 具有方便即食、便于保藏、美味可口的特点, 深受广大消费者欢迎^[1]。但是目前市场上的休闲肉脯制品以猪肉、牛肉居多, 其中靖江猪肉脯、自然派牛肉脯颇有名气, 近年来也出现少量的鱼肉脯^[2], 尚未见有小龙虾肉脯。小龙虾肉质鲜美, 风味独特, 具有高蛋白、低脂肪、低热量的优点, 氨基酸种类齐全, 必需氨基酸占总氨基酸的含量达到36%以上, 属于营养价值高的食品^[3]。但是小龙虾的食用形式比较单一, 以新鲜食用为主, 季节性和区域性强, 食用和携带不方便, 消费者食用受限^[4]。因此以小龙虾为原料加工成小龙虾肉脯, 既符合现代人追求的“低脂、低糖、低热量”健康饮食理念^[5], 满足不同消费者对肉脯产品多样化需求^[6], 又为小龙虾产品的深加工开拓了新思路^[7]。传统猪肉脯和牛肉脯的加工, 由于猪肉牛肉肌肉纤维长, 纹理规则, 切片不易破坏, 加工成的肉脯能够保持较好的完整片形。但小龙虾虾肉体积小, 形态弯曲, 肌纤维细而短, 走向不规则, 传

统切片难以成形。本研究在传统肉脯加工的基础上，结合小龙虾肉自身特点，利用谷氨酰胺转氨酶的催化作用，改进加工工艺，制作出感官优良、风味独特的小龙虾肉脯。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

鲜活淡水小龙虾 来自泰州本地养殖场。小龙虾个体大小均匀，单个重量 35.0 g~40.0 g，虾肉净含量在 6.0 g~8.0 g。谷氨酰胺转氨酶（TG 酶） 江苏一鸣生物股份有限公司，酶活力 130 U/g。食盐、白砂糖、色拉油 购自泰州大润发超市。

C21-SDMCB43 苏泊尔电磁炉 浙江苏泊尔股份有限公司；恒温鼓风干燥机 上海大良不锈钢股份有限公司；HY44 六盘烤箱 青岛超群食品机械公司；HB43-S 卤素水份测定仪 上海右一仪器有限公司；FTC/TMS-Touch 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司；WSC-S 数显测色色差仪 上海仪电物理光学仪器有限公司

1.2 实验方法

1.2.1 小龙虾肉脯的生产工艺流程

白砂糖、盐、TG 酶



小龙虾的选择→取虾肉→碾压→腌制→一次摊筛→一次干燥→二次摊筛→二次干燥→烤制熟化→切片→真空包装→成品

1.2.2 操作要点

1.2.2.1 小龙虾选择：挑选个体大小均匀、单个重量 35.0 g~40.0 g、虾肉净含量在 6.0 g~8.0 g 的鲜活小龙虾。

1.2.2.2 取虾肉：小龙虾清洗，放入沸水中热烫 15 s 后捞出，立即过冷水后，去头、去除虾线，剥壳取虾肉。

1.2.2.3 碾压：重力将虾肉碾压成 5.0-8.0mm 厚度，虾肉肌纤维呈自然松散又连结的状态。

1.2.2.4 腌制：处理好的小龙虾肉加入糖、盐和 TG 酶，拌匀，4 ℃腌制 2 h。

1.2.2.5 一次摊筛：竹筛表面均匀涂抹食用植物油，将腌制后的小龙虾肉摊于竹筛上，厚度 5.0~8.0 mm。

1.2.2.6 一次脱水干燥：摊好的竹筛置于温度为 50~60 ℃电热鼓风干燥箱中，脱水干燥 2 h，同时促进 TG 酶催化虾肉蛋白质之间发生共价交联作用。

1.2.2.7 二次摊筛：将一次脱水干燥后的小龙虾肉重新混匀后二次摊筛，摊筛厚度 3.0~5.0 mm。

1.2.2.8 二次脱水干燥：二次摊好的竹筛置于温度为 50~60 ℃电热鼓风干燥箱中，二次脱水干燥 2 h，继续去除水分，最终水分<30%。

1.2.2.9 烤制熟化：将二次脱水干燥后的半成品小龙虾肉脯的正反面刷上植物油置于烤箱中，温度 140 ℃，烤制 10 min。

1.2.2.10 压平、切片：用压平机或重物将小龙虾肉脯压平，切成 3 cm×5 cm 小长块或其他形状。

1.2.2.11 冷却、包装和贮藏：切片后的小龙虾肉脯在冷却后迅速采用真空包装，贮存在通风干燥处。

1.2.3 单因素实验设计

1.2.3.1 TG 酶添加量对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响

小龙虾肉 100 g，糖盐添加总量 10%，糖盐比 7:3，烤制温度 140 °C、烤制时间 10 min，TG 酶的添加量分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 U/g 时对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响。

1.2.3.2 糖盐添加比对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响

小龙虾肉 100 g，糖盐添加总量 10%，TG 酶添加量 2.0 U/g，烤制温度 140 °C，烤制时间 10 min，糖盐添加比分别为 4:6、5:5、6:4、7:3、8:2 时对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响。

1.2.3.3 烤制温度对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响

小龙虾肉 100 g，糖盐添加总量 10%，糖盐比 7:3，TG 酶添加量 2.0 U/g，烤制时间 10 min，烤制温度分别为 110、120、130、140、150 °C 时对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响。

1.2.3.4 烤制时间对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响

小龙虾肉 100 g，糖盐添加总量 10%，糖盐比 7:3，TG 酶添加量 2.0 U/g，烤制温度 140 °C，烤制时间分别为 4、6、8、10、12 min 时对小龙虾肉脯质构、色差和感官评分的影响。

1.2.4 响应面试验设计

在单因素试验基础上，以糖盐比 (A)、TG 酶添加量 (B)、烤制温度 (C) 和烤制时间 (D) 为自变量，以感官评分 (Y_1) 和硬度值 (Y_2) 为响应值，利用 Design Expert 8.0.6 软件，根据 Box-Behnken 响应面中心组合设计响应面试验^[8]，验证因素水平及编码见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken

水平	因素			
	A 糖盐比	B TG 酶添加量 (U/g)	C:烤制温度 (°C)	D:烤制时间 (min)
-1	6:4	1.5	130	8
0	7:3	2.0	140	10
1	8:2	2.5	150	12

1.3 检测指标

1.3.1 感官评定

评分法^[9]对小龙虾肉脯进行感官质量评价。以《感官分析食品感官质量控制导则》^[10]为指导，由 10 位具有一定品评经验的学生和老师组成鉴定组，对小龙虾肉脯的色泽 (20 分)、组织状态 (30 分)、气味 (20 分)、口感 (30 分) 进行评价，满分 100 分，取平均值作为评分结果。小龙虾肉脯的感官评价标准^[11]见表 2。

表 2 小龙虾肉脯感官评分标准

Table 2 Sensory scores of dried crayfish slice

项目	评分标准	分值 (满分 100)
----	------	-------------

形态 (30分)	片形整齐, 厚薄均匀, 可见纹理, 无空洞, 无焦片、生片	26~30
	片形基本整齐, 厚薄基本均匀, 纹理基本清晰, 有微小空洞, 基本无焦片、生片	21~25
	片形不整齐, 厚薄不均匀, 无可见纹理, 有较大空洞, 有较多焦片、生片	0~20
色泽 (20分)	色泽基本均匀, 呈清亮淡红色, 半透明, 油润有光泽	16~20
	色泽不太均匀, 呈淡红色, 微透明, 光泽较差	10~15
	色泽不均匀, 暗红色, 不透明, 暗淡无光泽	0~9
滋味 (20分)	滋味鲜美醇厚, 咸甜适中, 香味纯正, 有小龙虾肉特有的醇香	16~20
	滋味良好, 偏咸或偏甜, 香味稍欠缺	11~15
	滋味差, 口味不适, 香味差	0~10
口感 (30分)	硬度适中, 口感细腻, 有适当弹性, 咀嚼性好	26~30
	硬度较适中, 口感稍差, 弹性一般, 咀嚼性一般	16~25
	硬度较差, 口感欠佳, 弹性差, 咀嚼性差	0~15

1.3.2 质构的测定

采用质构仪对样品进行质构剖面分析 (TPA), 测试小龙虾肉脯的硬度、弹性、咀嚼值。将小龙虾肉脯切成约 1cm×2 cm 的长条, 在室温下进行 3 次平行实验, 取平均值^[12]。测定参数如下: 力量感量程为 2500 N; 起始力 2 N; 检测速度 60 mm/min; 形变白分量 80%; 回程速度 80 mm/min; 探头回升到样品表面上面的高度 15 mm; 探头为圆柱探头。

1.3.3 色差的测定^[13]

采用 WSC-S 数显测色色差仪测定小龙虾肉脯 L*、a*、b*, 其中 L*值表示亮度, a*表示红绿度, 值越大越偏向红色, b*表示黄蓝度, 值越大, 越偏向黄色。色差仪使用前用白板进行校准, 每组测 3 份样品, 每份测 3 次, 取平均值。

1.4 数据分析

单因素试验数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 并采用 SPSS Statistics20.0 统计分析软件进行显著性分析, $P < 0.05$ 时认为差异显著^[14]。采用 Design-Expert 软件进行响应面设计与分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 TG 酶添加量对小龙虾肉脯品质的影响

表 3 TG 酶添加量对小龙虾肉脯品质的影响

Table 3 Effect of TG enzymy amount on dried crayfish slice

指标	TG 酶添加量 (U/g)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
硬度/N	482.61±0.54 ^c	545.77±0.50 ^c	576.43±1.85 ^b	605.33±0.78 ^a	608.15±0.04 ^a
弹性/mm					

咀嚼性/mj	0.76±0.01 ^c	0.88±0.02 ^b	0.92±0.02 ^b	1.02±0.02 ^a	0.90±0.00 ^b
L*值	187.20±2.50 ^d	194.68±0.76 ^c	220.78±0.31 ^b	250.17±1.15 ^a	253.64±0.70 ^a
a*值	31.00±0.74 ^b	31.30±1.09 ^b	37.25±0.95 ^a	34.02±0.33 ^{ab}	35.29±0.23 ^a
b*值	39.39±2.50 ^a	39.29±0.33 ^a	38.21±0.43 ^a	39.04±0.19 ^a	39.62±0.71 ^a
感官评分(分)	30.12±1.61 ^{ab}	30.22±0.30 ^a	28.05±0.49 ^{ab}	27.70±0.66 ^{ab}	24.63±0.70 ^b
	74.05±0.21 ^d	75.55±0.78 ^d	82.80±0.28 ^c	90.17±0.24 ^a	84.90±0.14 ^b

注：同行小写字母不同，表示差异显著（ $P<0.05$ ），表4~表6同。

硬度是人触觉的反应，硬度越大说明内部结构越紧密^[15]，咀嚼性是咀嚼食物所需的能量，是硬度、弹性共同作用的结果，咀嚼性越高，口感上对应的“咬感”越好^[16]。由表3可知，随着TG酶添加量的增加，小龙虾肉脯的硬度和咀嚼性显著增加（ $P<0.05$ ），在添加量为2.5 U/g时，达到最大值，但与添加量2.0 U/g比较，增加幅度小，差异不显著（ $P>0.05$ ）。小龙虾肉脯的弹性随TG酶添加量的增加先呈现显著上升趋势，在2.0 U/g时达到最大，而后显著下降（ $P<0.05$ ）。这是由于TG酶可催化蛋白质发生转酰胺基反应，形成稳定的凝胶网络^[17]，使得肉脯硬度增加，咀嚼性增强，弹性提高，但随着酶的添加量继续增加，蛋白质底物不足，硬度和咀嚼性增加受限，同时由于硬度的进一步增加，肉脯的弹性也相应显著降低（ $P<0.05$ ）。TG酶的添加量对小龙虾肉脯的a*值影响不显著（ $P>0.05$ ），L*值先上升后下降，在1.5 U/g时最大，b*值呈下降趋势，在2.5 U/g时最低，下降明显。这可能是由于TG酶催化的共价交联作用，使小龙虾肉脯在后续的加工过程中结构更紧密均匀，从而使肉脯亮度增加，黄度值下降，小龙虾肉脯呈现更好的色泽。结合感官评分，TG酶添加量在2.0 U/g左右时适宜。

2.1.2 糖盐比对小龙虾肉脯品质的影响

表4 糖盐比对小龙虾肉脯品质的影响

Table 4 Effect of sugar/salt ratio on dried crayfish slice

指标	糖盐添加比				
	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2
硬度/N	540.62±0.54 ^d	546.16±0.97 ^c	571.11±1.11 ^b	591.68±1.10 ^a	590.55±0.78 ^a
弹性/mm	0.71±0.03 ^b	0.83±0.01 ^b	0.95±0.07 ^b	1.32±0.14 ^a	1.24±0.02 ^{ab}
咀嚼性/mj	225.27±0.14 ^c	243.81±0.79 ^b	248.35±0.66 ^a	251.05±0.21 ^a	249.25±0.66 ^a
L*值	24.71±0.21 ^c	27.64±0.52 ^c	32.97±0.98 ^b	37.00±0.25 ^a	37.29±0.86 ^a
a*值	27.68±0.62 ^b	32.05±1.15 ^b	38.04±1.33 ^a	42.94±0.99 ^a	44.25±0.92 ^a
b*值	29.76±0.06 ^a	28.89±1.25 ^b	26.31±0.44 ^{bc}	24.13±0.19 ^c	22.08±0.12 ^c
感官评分(分)	73.80±0.57 ^d	78.63±0.53 ^c	83.50±0.71 ^b	90.63±1.17 ^a	87.86±0.37 ^a

甜和咸是食品加工中不可缺少的两种基本味觉，甜咸的合理搭配对产品起到非常积极的作用。从表4可以看出，小龙虾肉脯的质构和感官评分随糖盐比的增大显著上升后下降，但下降不明显，亮度值L*和红度值a*显著上升（ $P<0.05$ ），b*值显著下降（ $P<0.05$ ）。这是因为肉脯水分含量少，糖含量的增加能促进产品形成硬脆感^[18]。同时由于糖的焦糖化作用和美拉德反应使烤制的肉脯亮度和红度值显著增加^[19]，呈油润光亮红色。适宜的糖盐比能起到提鲜、平衡风味的作用，但盐所占比例过高会引起适口性差。结合感官评分，糖盐合适比例在7:3左右。

2.1.3 烤制温度对小龙虾肉脯品质的影响

表 5 烤制温度对小龙虾肉脯品质的影响

Table 5 Effect of baking temperature on dried crayfish slice

指标	烤制温度 (°C)				
	110	120	130	140	150
硬度/N	500.56±0.55 ^d	549.95±0.24 ^c	596.93±0.28 ^b	598.07±0.24 ^b	601.06±0.25 ^a
弹性/mm	0.80±0.01 ^b	0.90±0.01 ^b	1.11±0.02 ^a	1.01±0.04 ^a	0.89±0.02 ^b
咀嚼性/mj	241.90±1.10 ^c	248.93±1.01 ^b	252.78±0.31 ^b	261.01±0.63 ^a	257.64±0.70 ^a
L*值	21.81±0.27 ^d	27.60±0.66 ^c	35.85±0.38 ^b	38.82±0.90 ^a	37.04±0.13 ^{ab}
a*值	36.67±1.34 ^b	39.89±0.24 ^{ab}	42.25±0.37 ^a	43.64±0.76 ^a	37.56±0.62 ^b
b*值	28.60±0.54 ^{ab}	29.72±1.01 ^a	26.91±1.12 ^{ab}	24.65±0.74 ^b	23.57±0.80 ^b
感官评分(分)	77.95±0.64 ^d	82.56±0.62 ^c	88.02±0.14 ^b	91.69±0.63 ^a	86.85±1.03 ^b

一定温度是促进小龙虾肉脯熟化、形成诱人色泽和产生特有风味的关键因素。由表 5 可知,小龙虾肉脯的硬度和咀嚼性随烤制温度的升高而升高,弹性则呈现先升高后下降的趋势,这是由于高温引起水分蒸发、蛋白质变性熟化,赋予了小龙虾肉脯一定的硬度和弹性,但是随着温度的升高,水分蒸发越多,肉脯质地变硬,弹性降低,咀嚼性增强,130 °C时弹性最好,140 °C时咀嚼性最好。高温使小龙虾肉自身的虾青素被氧化成虾红素^[20],同时由于美拉德反应使小龙虾肉脯的L*值、a*值先上升后下降,b*值下降,在140 °C时L*值、a*值最高,小龙虾肉脯呈鲜亮红色,但温度达到150 °C时,温度过高,肉脯出现糊焦,颜色变暗褐色。感官评分在140 °C时最高,因此,适宜的烤制温度在140 °C左右。

2.1.4 烤制时间对小龙虾肉脯品质的影响

表 6 烤制时间对小龙虾肉脯品质的影响

Table 6 Effect of baking time on dried crayfish slice

指标	烤制时间 (min)				
	4	6	8	10	12
硬度/N	496.33±0.94 ^d	521.01±0.16 ^c	589.72±1.01 ^b	612.99±1.40 ^a	609.46±0.94 ^a
弹性/mm	0.73±0.01 ^b	0.82±0.03 ^b	0.98±0.03 ^{ab}	1.17±0.07 ^a	1.02±0.03 ^a
咀嚼性/mj	220.28±0.87 ^d	240.05±1.29 ^c	242.98±1.13 ^c	251.67±0.66 ^b	258.92±0.28 ^a
L*值	24.12±0.62 ^c	29.54±0.66 ^b	31.92±0.91 ^b	37.65±0.66 ^a	35.90±0.31 ^a
a*值	28.56±0.79 ^c	32.99±1.23 ^{bc}	36.61±0.72 ^b	41.85±0.86 ^a	40.25±0.92 ^{ab}
b*值	29.96±0.23 ^a	28.06±0.40 ^{ab}	25.28±0.39 ^b	22.17±0.25 ^{bc}	21.00±1.41 ^c
感官评分(分)	72.99±0.58 ^c	75.88±1.07 ^c	81.18±1.33 ^b	87.73±1.03 ^a	82.87±1.03 ^a

温度一定的情况下,烤制时间的长短直接影响小龙虾肉脯的色泽和质构。由表 6 可知,烤制时间低于10 min时,小龙虾肉脯的硬度、弹性、咀嚼性、L*值、a*值、感官评分均随着烤制时间的增加而上升,10 min时,除咀嚼性外,其他各指标均达到最大值,当烤制时间继续增加至12 min时,咀嚼性达到最大值,其他各指标值均开始降低,但差异并不显著(P>0.05)。b*值随着烤制时间的增加而下降,12 min时达到最小值,但与10 min时差异不显著(P>0.05)。这说明在10 min时,小龙虾肉脯已经达到熟化,并呈现良好色泽,继续增加时间,肉脯过干,弹性降低,此时肉脯呈现一定的脆性引起硬度减低,咀嚼性增强。同时时间过长,肉脯色泽也由鲜亮红色向焦糖色转变。因此,烤制时间10 min最佳。

2.2 Box- Behnken 试验结果与分析

2.2.1 Box- Behnken 试验结果

在单因素试验基础上，设计了四因素三水平的响应面分析试验，试验结果见表 7。

表 7 响应面试验结果

Table 7 Results of response surface experiments

试验号	A	B	C	D	感官评分/分	硬度/N
1	-1	-1	0	0	85.0±0.71	575.87±1.41
2	1	-1	0	0	84.3±0.35	573.46±0.71
3	-1	1	0	0	82.5±0.07	576.7±0.12
4	1	1	0	0	80.7±0.21	537.11±0.15
5	0	0	-1	-1	80.0±0.28	468.67±0.64
6	0	0	1	-1	81.6±0.07	439.26±0.14
7	0	0	-1	1	78.9±0.21	580.79±0.71
8	0	0	1	1	82.2±0.28	628.03±0.21
9	-1	0	0	-1	79.5±0.71	453.66±0.28
10	1	0	0	-1	82.2±0.21	454.36±0.35
11	-1	0	0	1	81.9±0.14	596.72±0.14
12	1	0	0	1	81.8±0.28	599.48±0.71
13	0	-1	-1	0	83.3±0.35	548.28±0.21
14	0	1	-1	0	80.8±0.35	568.61±0.13
15	0	-1	1	0	84.1±0.14	569.41±0.21
16	0	1	1	0	83.0±0.07	519.48±0.43
17	-1	0	-1	0	85.3±0.42	570.88±1.20
18	1	0	-1	0	88.8±0.35	567.08±0.14
19	-1	0	1	0	90.2±0.21	579.42±0.35
20	1	0	1	0	83.9±0.07	520.83±1.13
21	0	-1	0	-1	80.1±0.14	451.46±0.57
22	0	1	0	-1	76.4±0.57	445.07±1.20
23	0	-1	0	1	79.8±0.28	608.08±0.14
24	0	1	0	1	80.3±0.35	609.35±0.71
25	0	0	0	0	94.7±0.49	656.07±1.27
26	0	0	0	0	93.6±0.57	627.48±0.57
27	0	0	0	0	94.9±0.14	648.61±0.42
28	0	0	0	0	95.9±0.42	648.58±0.49

运用 Design expert V8.0.6 对表 7 中感官评分和硬度分别进行多元回归拟合，得回归方程：

$$\text{感官评分 } Y_1 = 94.71 - 0.23A - 1.09B + 0.67C + 0.42D - 0.26AB - 2.41AC - 0.69AD + 0.34BC + 1.04BD + 0.45CD - 3.96A^2 - 7.20B^2 - 4.47C^2 - 9.13D^2,$$

$$\text{硬度 } Y_2 = 645.19 - 8.41A - 5.86B - 3.99C + 75.83D - 9.29AB - 13.70AC + 0.51AD - 17.56BC + 1.91BD + 19.18CD - 40.32A^2 - 43.16B^2 - 45.92C^2 - 74.14D^2,$$

对上述回归方程进行方差分析，结果见表 8、表 9。

表 8 感官评分方差分析结果

Table 8 Variance analysis results of sensory score

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
------	-----	-----	----	-----	-----	-----

模型	719.34	14	51.38	33.38	< 0.0001	**
A	0.63	1	0.63	0.41	0.5334	
B	14.19	1	14.19	9.22	0.0095	**
C	5.33	1	5.33	3.47	0.0854	
D	2.17	1	2.17	1.41	0.2566	
AB	0.28	1	0.28	0.18	0.6791	
AC	23.28	1	23.28	15.13	0.0019	*
AD	1.89	1	1.89	1.23	0.2878	
BC	0.46	1	0.46	0.30	0.5956	
BD	4.31	1	4.31	2.80	0.1183	
CD	0.81	1	0.81	0.53	0.4810	
A ²	94.11	1	94.11	61.14	< 0.0001	**
B ²	310.86	1	310.86	201.97	< 0.0001	**
C ²	119.71	1	119.71	77.77	< 0.0001	**
D ²	500.05	1	500.05	324.88	< 0.0001	**
残差	20.01	13	1.54			
失拟项	17.76	10	1.78	2.37	0.2591	
纯误差	2.25	3	0.75			
总和	739.34	27				

R²=0.9729 R²_{Adj}=0.9438

注：*表示差异显著（P<0.05）**表示差异极显著（P<0.01），表9同。

表9 硬度方差分析结果

Table9 Variance analysis results of hardness

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	115680.28	14	8262.88	52.65	< 0.0001	**
A	848.99	1	848.99	5.41	0.0368	*
B	411.37	1	411.37	2.62	0.1294	
C	190.64	1	190.64	1.21	0.2904	
D	69010.61	1	69010.61	439.73	< 0.0001	**
AB	345.59	1	345.59	2.20	0.1617	
AC	750.49	1	750.49	4.78	0.0476	*
AD	1.06	1	1.06	0.01	0.9359	
BC	1234.12	1	1234.12	7.86	0.0149	*
BD	14.67	1	14.67	0.09	0.7647	
CD	1470.72	1	1470.72	9.37	0.0091	**
A ²	9753.41	1	9753.41	62.15	< 0.0001	**
B ²	11174.23	1	11174.23	71.20	< 0.0001	**
C ²	12649.24	1	12649.24	80.60	< 0.0001	**
D ²	32981.18	1	32981.18	210.15	< 0.0001	**
残差	2040.21	13	156.94			
失拟项	1585.01	10	158.50	1.04	0.5500	
纯误差	455.21	3	151.74			
总和	117720.49	27				

$$R^2=0.9827 \quad R^2_{Adj}=0.9640$$

由表8、表9可知，两个模型 $P<0.0001$ ，说明两个回归模型极显著，具有统计学意义。其中两个失拟项 P 值均 > 0.05 不显著，说明两个回归模型有较高可靠性，误差极小。由表8方差分析可知，各因素对小龙虾肉脯感官评分影响大小依次为： B （TG酶添加量） $>C$ （烤制温度） $>D$ （烤制时间） $>A$ （糖盐比），其中，一次项 B 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对小龙虾感官评分结果影响极显著（ $P<0.01$ ），交互项 AC 对结果影响显著（ $P<0.05$ ）。模型 $R^2=0.9739$ ， $R^2_{Adj}=0.9459$ ，说明自变量与响应值之间线性关系显著，模型与试验的拟合度良好，可信度高，可用于分析和预测小龙虾肉脯感官评分。由表9方差分析可知各因素对小龙虾肉脯硬度影响主次顺序为： D （烤制时间） $>A$ （糖盐比） $>B$ （TG酶添加量） $>C$ （烤制温度），其中，一次项 D 、二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 和交互项 CD 对小龙虾肉脯硬度影响极显著（ $P<0.01$ ），一次项 A 和交互项 AC 、 BC 影响显著（ $P<0.05$ ）。模型的 $R^2=0.9823$ ， $R^2_{Adj}=0.9633$ ，说明该模型与实际试验吻合，可用于分析和预测小龙虾肉脯硬度值。

2.2.2 响应面分析

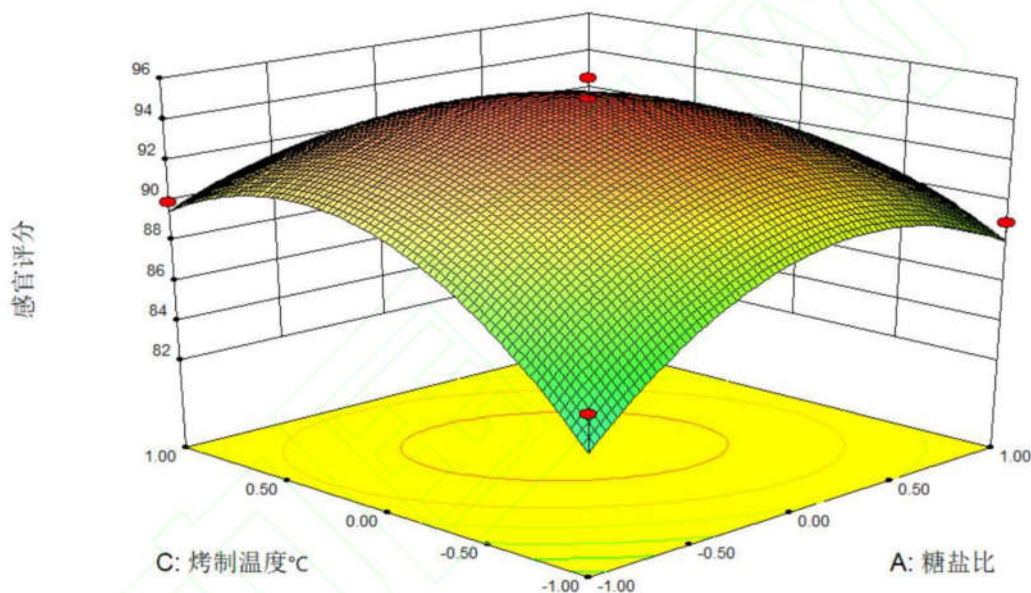


图1 糖盐比和烤制温度交互作用响应面

Fig.1 Response surface between sugar/salt ratio and baking temperature

由表8和图1可知，TG酶添加量和烤制时间在零点时，糖盐比和烤制温度交互作用对小龙虾肉脯感官评分的影响显著。当糖盐比一定时，小龙虾肉脯的感官评分随烤制温度的升高先呈现幅度较大的上升，在 $140\sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间，感官评分达到最大值，而后开始平缓下降。当烤制温度一定时，小龙虾肉脯感官评分随糖盐比的增加先呈现大幅度上升的趋势，当糖盐比增加到一定比例时，感官评分开始下降，但趋势较缓和，在7:3附近感官评分最高。同时从等高线疏密程度来看，烤制温度对感官评分的影响高于糖盐比。

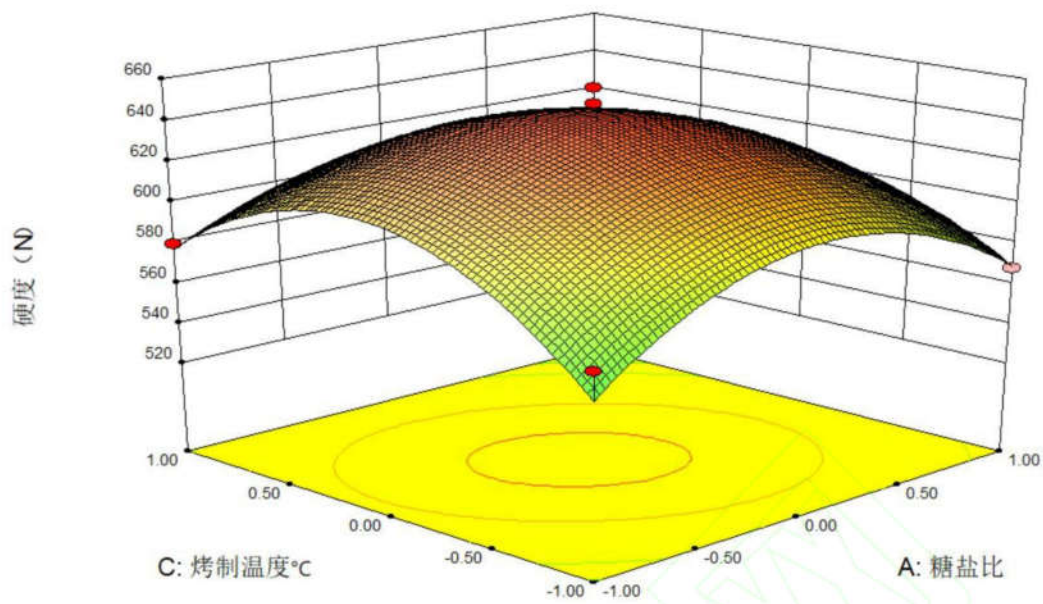


图2 糖盐比和烤制温度交互作用响应面

Fig.2 Response surface between sugar/salt ratio and baking temperature

由表 9 和图 2 分析可知，当 TG 酶添加量和烤制时间在零点时，糖盐比和烤制温度的交互作用对小龙虾肉脯硬度的影响显著。当糖盐比一定时，小龙虾肉脯的硬度随烤制温度的升高先上升，在 140~145 °C 区间，硬度达到最大值，而后开始小幅下降。当烤制温度一定时，小龙虾肉脯硬度随糖盐比的增加先呈现较大幅度上升，在糖盐比 7.5:2.5~8:2 区间达到最大值，而后开始小幅下降。同时从等高线疏密程度来看，烤制温度对感官评分的影响高于糖盐比。

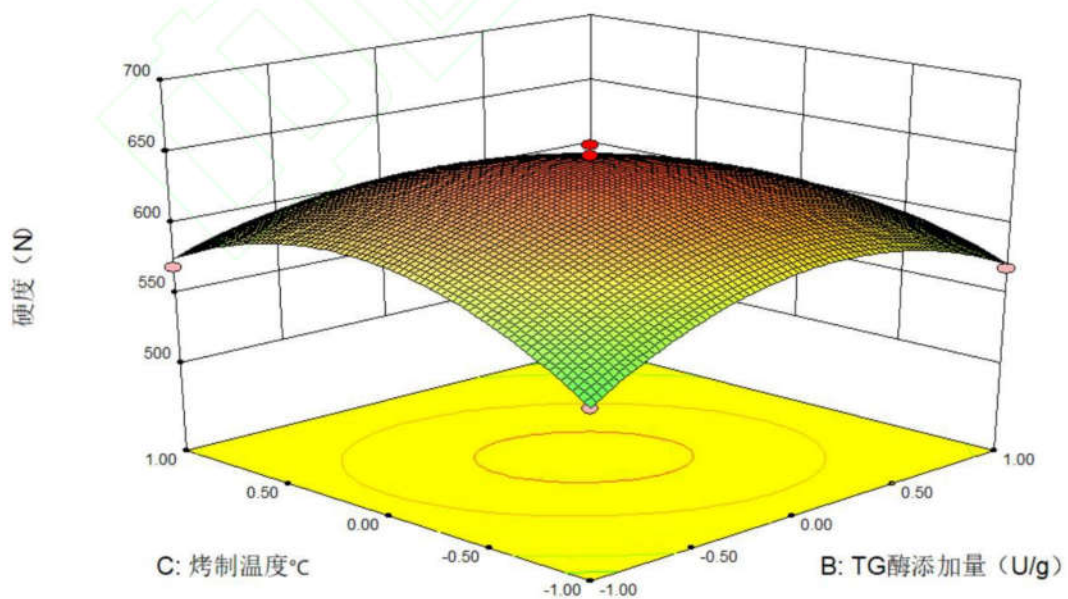


图3 TG 酶添加量和烤制温度交互作用响应面

Fig.3 Response surface between TG enzymy amount and baking temperature

由表 9 和图 3 分析可知，当糖盐比和烤制时间在零点时，TG 酶添加量和烤制温度的交互作用对小龙虾肉脯硬度的影响显著。当 TG 酶添加量和烤制温度分别不变时，硬度随着烤制温度的升高和 TG 酶添加量的增加先增大后减小，但是变化趋势较缓，两者交互作用硬度最高值分布在 TG 酶添加量 2.0 U/g 左右，烤制温度在 145~150 °C。同时从等高线疏密程度来看，TG 酶添加量对小龙虾肉脯的影响高于烤制温度。

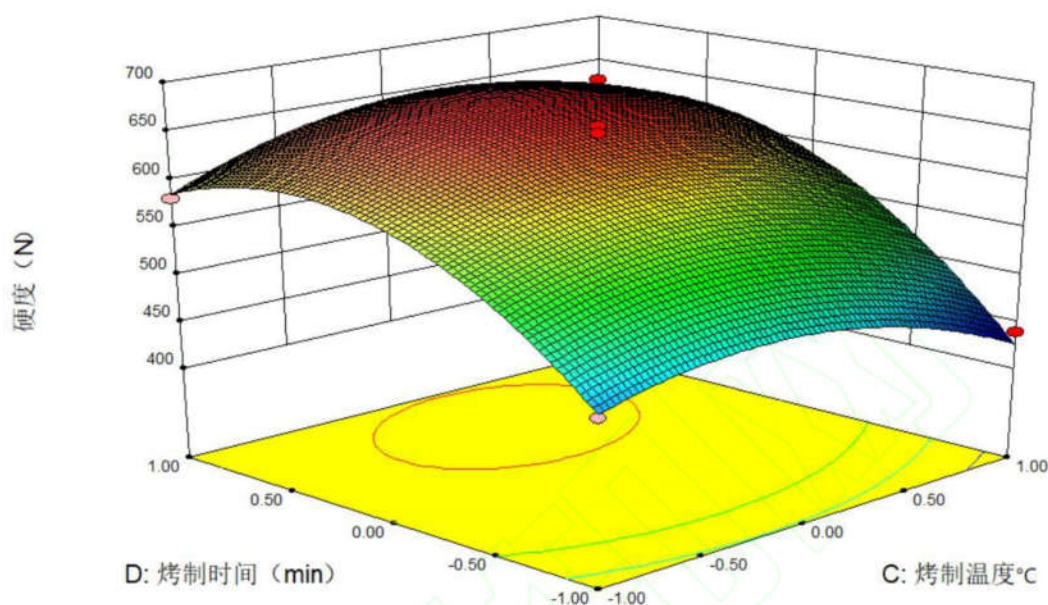


图 4 烤制温度和烤制时间交互作用响应面

Fig.4 Response surface between baking temperature and baking time

由表 9 和图 4 分析可知，当糖盐比和 TG 酶添加量在零点时，烤制温度和烤制时间的交互作用对小龙虾肉脯硬度的影响极显著。当烤制温度不变时，在烤制时间 8~10 min 区间，小龙虾肉脯的硬度随着时间的延长呈较大幅度的增加，10~11 min 区间增加趋势变缓，11 min 左右出现硬度最大值后开始缓慢下降。当烤制时间不变时，虽然小龙虾肉脯的硬度也随烤制温度的升高呈现先上升后下降的趋势，但变化较为平缓，在 145~150 °C 出现最大值。同时从等高线疏密程度来看，烤制时间对小龙虾肉脯硬度的影响高于烤制温度。

2.3 验证实验

利用 Design-expert 响应面分析软件，以感官评分最大、硬度值适中为目标，得到小龙虾肉脯的最优工艺组合是：糖盐比 7.4: 2.6、TG 酶添加量 1.98 U/g、烤制温度 145.78 °C、烤制时间 8.74 min，在此条件下小龙虾肉脯感官评分 89.76 分，硬度是 543.00 N，弹性，咀嚼性。结合实际操作条件，将最优工艺条件调整为：糖盐比 7.5: 2.5、TG 酶添加量 2.00 U/g、烤制温度 145 °C、烤制时间 9 min，进行验证试验，三次平行取平均值，得到小龙虾肉脯的感官评分 89.00 分，硬度 540.45 N，弹性 0.94 mm，咀嚼性 254.45mj，L*值 36.24，a*值 38.25，b*值 22.10，感官评分和硬度值与理论预测值误差分别是 0.84%、0.46%，说明模型拟合度好，得到的最优工艺组合可靠。以最优工艺制得的小龙虾肉脯产品见图 5。



图 5 小龙虾肉脯
Fig.5 Photo of dried crayfish slice

3 结论

在单因素试验基础上,以感官评分和硬度为响应值,根据 Box-Behnken 响应面设计,确定小龙虾肉脯的最佳工艺为:100 g 小龙虾肉,糖盐比 7.5: 2.5(10.0 g)、TG 酶添加量 2.00 U/g、烤制温度 145.00 °C、烤制时间 9.00 min,经验证该模型合理可靠。此条件加工的小龙虾肉脯产品片形整齐,厚薄均匀,有可见纹理,色泽油润,呈清亮淡红色,滋味鲜美醇厚,咸甜适中,有小龙虾肉特有的风味,有较好的弹性,硬度、咀嚼性适中。

参考文献:

- [1]谢意通,黄子鸣,苏伟明等.茶香型乌鱼肉脯的工艺研究及优化[J].2019,5(40):128-129.
- [2]马永强.休闲肉脯的研制及贮藏特性研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [3]徐晨,葛庆丰,诸永志等.不同地区小龙虾营养价值和品质的比较研究[J].肉类研究,2019,33(8):8-9.
- [4]郭力.小龙虾即食产品的研制[D].无锡:江南大学,2010.
- [5]李登龙,吴斌,王玉涛等.金针菇多糖复合重组肉脯的研制[J].2020,1(36):1-2.
- [6]Dimitrakopoulou,M.A,Ambrosiadis,J.A,Zetou,F.K,etal.Effect of salt and transglutaminase(TG)level and processing conditions on quality characteristics of phosphate-free,cooked,restructured pork shoulder[J].Meat Science,2005,70(4):743-749.
- [7]李锐,江祖彬,童光森等.即食麻辣小龙虾加工工艺研究[J].食品研究与开发,2019,354(40):146-151.
- [8]Khuri A I,Mukhopadhyay S.Response surface methodology[J]Wiley Interdisciplinary Reviews:Computational Statistics,2010(2):128-149.
- [9]曹荣.对虾生物保鲜与其熟制品保藏技术的研究[D].山东青岛:中国海洋大学,2009.
- [10]中国国家标准化管理委员会. GB/T 29605-2013 感官分析食品感官质量控制导则[S].北京:中国标准出版社
- [11]中国国家标准化管理委员会. GB/T31406-2015 肉脯[S]. 北京:中国标准出版社
- [12]郭力,过世东,刘海英.盐煮和微波加热对即食龙虾质构的影响[J].食品与生物技术学报,2011,3 (30):376-380.

- [13]Honikel K O. Reference methods for the assessment of physical characteristic of meat [J].Meat Science,1998,49(4):447-457.
- [14]徐晨,葛庆丰,诸永志等. 不同地区小龙虾营养价值和品质的比较研究 [J].肉类研究,2019,33 (8):8.
- [15]Yang J.H.,Park H.J.,Jang H.D.,etal.Measurement of cooked rice stickiness with consideration of contact area in compression test[J].Texture Studies,2018,49(6):639-645.
- [16]王欣欣,宋丽荣,王乐等.不同冻结条件下罗非鱼片的质构分析[J].食品与机械.2012,28(1):205-207.
- [17]战旭梅,刘萍.谷氨酰胺转胺酶在重组鸡排中的应用研究[J].安徽农业科学,2014,42(36):13033-13035.
- [18]李芳,杨海燕,徐洁洁等.马肉脯制作工艺的优化研究[J].食品工业,2014,35(3):205-207.
- [19]姚芳,张静,刘靖等.肉脯加工中风味物质的研究[J].中国调味品,2018,2(43):179-181.
- [20]董志俭,孙丽平,唐劲松,等.不同干燥方法对小龙虾品质的影响[J].食品研究与开发,2017,38(24): 84-87.