

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.04.037

D-最优混料设计优化复配淀粉紫薯粉条配方

Optimization on the formula of the compound vermicelli from
purple potato starch by D-optima mixture design

曾雪丹¹ 张 灿¹ 王章英² 蒋光阳¹

ZENG Xue-dan¹ ZHANG Can¹ WANG Zhang-ying² JIANG Guang-yang¹

申光辉¹ 吴贺君¹ 陈安均¹ 黎杉珊¹ 张志清¹

SHEN Guang-hui¹ WU He-jun¹ CHEN An-jun¹ LI Shan-shan¹ ZHANG Zhi-qing¹

(1. 四川农业大学食品学院, 四川 雅安 625014; 2. 广东省农业科学研究院作物研究所, 广东 广州 510000)

(1. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. Crops Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

摘要:采用 D-最优混料设计复配紫薯淀粉、红薯淀粉、木薯淀粉、马铃薯淀粉及紫薯渣粉 5 种原料, 结合主成分分析和无量纲标准化方法对紫薯粉条质量进行了综合评分。分别用质构特性综合品质(T_1)、蒸煮特性综合品质(T_2)和感官特性综合品质(T_3) 3 个综合评分作为响应值在混料设计中构建线性回归模型。结果表明, 5 种主要原料及其之间的交互作用对紫薯粉条的 T_1 和 T_3 影响极显著 ($R^2 = 0.921 1, P < 0.001; R^2 = 0.883 8, P = 0.005 3$)。根据指标的相关性分析和模型拟合情况最终选定 T_1 和 T_3 作为混料设计优化响应值。优化得到配方为: 紫薯淀粉 35.0%、红薯淀粉 15.0%、木薯淀粉 18.5%、马铃薯淀粉 9.5%、紫薯渣粉 22.0%。由该配方制得的粉条口感爽滑、色泽鲜亮。

关键词:紫薯; 粉条; 混料设计; 淀粉

Abstract: In order to optimize the quality of vermicelli of purple potato starch, the formula of five kinds of starch from purple potato, sweet potato, tapioca, potato and purple potato residue powder, were investigated with the D-optimal mixture design. The principal component analysis and dimensionless normalization method were used to comprehensively assess the quality of vermicelli from purple potato starch. During the mixture design experiment, the linear regression models were built based on the response values of the three synthesis scores of

the texture characteristics (T_1), cooking characteristics (T_2) and sensory characteristics (T_3). The results indicated that the effects of the five components and their interactions on the texture characteristics (T_1) and sensory characteristics (T_3) were significant ($R^2 = 0.921 1, P < 0.001; R^2 = 0.883 8, P = 0.005 3$). According to the relative results of indicators correlation analysis and the model fitting, T_1 and T_3 values were selected as the optimal indices of the mixture design. The final optimized formula was found to contain the different kinds of starch with 35.0% from purple potato, 15.0% from sweet potato, 18.5% from tapioca, 9.5% from potato, and 22.0% from purple potato residue powder. This new vermicelli of purple sweet potato tasted smooth with bright color. The research provided a technology support for the processing new type of purple potato vermicelli.

Keywords: purple sweet potato; vermicelli; mixing design; starch

紫薯 (*Ipomoea batatas* L. Poir) 是一种富含维生素 (A、B₁、B₂、C、E)、矿物质 (Ca、Mg、K、Zn) 和膳食纤维的重要农作物, 由于其含有丰富的花青素, 相比普通甘薯具有更高的食用价值和营养价值^[1-2]。近年来, 紫薯精深加工产品类型日益丰富多样, 如发酵紫薯醋、紫薯酒以及传统薯类加工品等。其中, 以淀粉为主要原料的粉条是最主要的利用方式之一, 作为中国传统食品, 粉条也需要逐步走向多元化研发。陈兵等^[3]将新鲜菠菜榨汁后添加到甘薯淀粉中研制了一种菠菜粉条, 产品具有很好的可接受性。赵萌等^[4]用高直链淀粉含量的绿豆淀粉与红薯淀粉复配生产粉条, 结果表明绿豆淀粉添加量为 40% 时所得粉条的蒸煮品质与感官品质最佳。邢丽君等^[5-6]研究

基金项目: 广东省应用型科技研发专项 (编号: 2016B020233003); 校院合作项目 (编号: 060H0304)

作者简介: 曾雪丹, 女, 四川农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 张志清 (1976—), 男, 四川农业大学教授, 博士。

E-mail: zqzhang721@163.com

收稿日期: 2018-11-30

了全粉添加量和制作工艺对粉条质量的影响,结果表明在紫薯全粉添加量为 12% 时甘薯粉条品质较好。但以上研究主要集中于单一或 2 种原料的基础上,原料综合营养价值不充分,对紫薯原料(淀粉、废渣)的利用率不高。课题组前期研究^[7],将富含花青素的紫薯汁液用于紫薯饮料开发或提取花青素;同时,利用过滤后获得的紫薯渣及紫薯汁液中提取的紫薯淀粉作为紫薯粉条原料,与其它淀粉复配加工形成新型复配淀粉紫薯粉条。由于紫薯渣和紫薯淀粉中富含不溶性膳食纤维,其粉条口感和蒸煮特性均不理想,亟待对配方和工艺进行优化。

本研究拟采用被广泛应用于材料、食品、精油、饲料等各类产品^[8-9]配方优化中使用的混料设计试验,以紫薯渣粉、紫薯淀粉复配红薯淀粉、马铃薯淀粉、木薯淀粉为原料,以质构特性、蒸煮特性、感官特性综合评分为判定指标,通过相关性分析筛选出能表征粉条质量的综合指标,探讨优化新型复配紫薯粉条的复配淀粉配方,旨在进一步提高紫薯原料的利用率,为多淀粉复配紫薯粉条生产提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 材料与试剂

紫薯渣粉、紫薯淀粉:从新鲜紫薯中提取(课题组自制);
紫薯:购于四川省雅安市雨城区;
红薯淀粉:泗水利丰食品有限公司;
木薯淀粉:老挝高盛有限公司;
马铃薯淀粉:宁夏雪冠淀粉有限公司;
乙醇、柠檬酸(一水)、氢氧化钠、盐酸、硫酸、硫酸铜、硫酸钾、酒石酸钠钾:分析纯,成都市科龙化工试剂厂;
石油醚(沸程为 60~90 °C):分析纯,成都金山化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

色差仪:NR10QC 型,三恩驰科技有限公司;
物性分析仪:TA.XT Pluse 型,超技仪器公司;
扫描电镜:Ultra 型,卡尔·蔡司股份公司;
九阳榨汁机:JYL-C16T 型,九阳股份有限公司;
电热鼓风干燥箱:101 型,北京市永光明医疗仪器有限公司;
凯氏定氮仪:B324 型,雷磁—上海仪电科学仪器股份有限公司;
漏粉机:YL90L1-4 型,上海意洋机电有限公司。

1.2 方法

1.2.1 紫薯粉条加工工艺

混合原料粉→调浆→打芡→和面→漏粉→冷却→自然晾干

按照试验设计比例称取原料,并加入 0.1% 的食盐,

混匀。将原料混匀取 15% 混合原料,加入一定体积的水调浆打芡,与剩余面粉混匀进行和面,在沸水中漏粉。漏粉后预煮、冷却,再自然晾干。

1.2.2 紫薯粉条原料配比试验设计 根据对淀粉凝胶特性的探究及预试验经验所得,在 Design expert 8.0 软件中,每个试验组 5 种原料粉(紫薯淀粉、红薯淀粉、木薯淀粉、马铃薯淀粉、紫薯渣粉)占比总和为 1,详见表 1,以粉条的质构特性、蒸煮特性、感官特性综合评分为指标进行混料设计。

1.2.3 原料淀粉相关指标的测定

(1) 水分:根据 GB 5009.3—2016 标准中的恒重法测定。

(2) 灰分:根据 GB 5009.4—2016 标准中的马弗炉法测定。

(3) 粗蛋白含量:根据 GB 5009.5—2016 标准中的标

表 1 D-混料最优设计试验设计

Table 1 The mixture design of optimal on raw material proportions

试验号	A 紫薯淀粉	B 红薯淀粉	C 木薯淀粉	D 马铃薯淀粉	E 紫薯渣粉
1	0.301	0.261	0.167	0.051	0.220
2	0.326	0.289	0.195	0.050	0.140
3	0.286	0.350	0.147	0.069	0.148
4	0.314	0.346	0.100	0.100	0.140
5	0.250	0.350	0.100	0.089	0.211
6	0.350	0.150	0.200	0.100	0.200
7	0.325	0.284	0.111	0.061	0.220
8	0.284	0.280	0.154	0.100	0.182
9	0.284	0.280	0.154	0.100	0.182
10	0.335	0.237	0.113	0.095	0.220
11	0.309	0.236	0.200	0.075	0.180
12	0.350	0.193	0.177	0.061	0.220
13	0.350	0.293	0.117	0.100	0.140
14	0.286	0.350	0.147	0.069	0.148
15	0.250	0.321	0.187	0.050	0.192
16	0.350	0.196	0.200	0.100	0.154
17	0.335	0.238	0.150	0.091	0.187
18	0.309	0.236	0.200	0.075	0.180
19	0.250	0.315	0.200	0.095	0.140
20	0.265	0.222	0.199	0.094	0.220
21	0.335	0.237	0.113	0.095	0.220
22	0.350	0.254	0.164	0.089	0.143
23	0.289	0.340	0.101	0.050	0.220
24	0.265	0.222	0.199	0.094	0.220
25	0.350	0.316	0.100	0.058	0.177

准凯氏定氮法测定。

(4) 粗脂肪含量:根据 GB 5009.6—2016 标准中的索氏抽提法测定。

(5) 淀粉凝胶强度:利用质构仪测定^[10]。质构仪参数:探头为 P/0.5;测定速度 0.5 mm/s;下压距离 8.0 mm。

1.2.4 紫薯粉条感官评定 评定方法参照 GB/T 23587—2009 和赵萌等^[4]的评定标准稍有改动。经浸泡蒸煮后的紫薯粉条由食品专业学生组成的 12 人品尝小组,并参照表 2 粉条感官评定表进行评分。

表 2 紫薯粉条感官评分表

Table 2 Sensory evaluation reference of starch vermicelli

项目	评分标准	分值
色泽	粉条呈明显紫红色,外形整齐均匀,有光泽	16~25
	粉条紫红色较明显,外形较为整齐均匀,有光泽	11~15
	粉条紫红色不明显,外形较整齐均匀,无光泽	6~10
	粉条紫红色浅淡,外形不均匀,无光泽	0~5
气味	紫薯清香明显,气味正常,无异味,	16~25
	紫薯清香较明显,气味正常,无异味,	11~15
	紫薯清香味不明显,气味正常,无异味	6~10
	紫薯清香味不明显,气味不正常,有异味	0~5
组织状态	光滑,黏弹性好,组织紧密,轻微断条	16~25
	光滑,黏弹性较好,组织稍松散,断条较少	6~15
	不光滑,黏弹性差,组织松散,断条较多	0~5
口感	软硬适中,嚼劲足,不粘牙,口感爽滑	21~25
	软硬适中,嚼劲较大,轻微粘牙,口感较爽滑	16~20
	质地较软,嚼劲一般,口感较爽滑	11~15
	质地软,嚼劲差	6~10
	质地过软,无嚼劲	0~5

1.2.5 紫薯粉条质构测定 将浸泡后的粉条在沸水中煮 10 min 进行质构测定。

(1) 拉伸强度的测定:参照和赵萌等^[5]方法并做如下修改。用游标卡尺测量并计算粉条横截面积。测试参数:探头 ASPR;感应力 10 g;拉伸距离 50.0 mm;测试前、中、后的速度分别是 2.0,1.0,2.0 mm/s。拉伸强度按式(1)计算:

$$P_1 = F_1 \div S, \quad (1)$$

式中:

P_1 ——拉伸强度, g/mm^2 ;

F_1 ——最大拉力, g ;

S ——粉条的横截面积, mm^2 。

(2) TPA 模式测定及剪切参数的测定:测试参数:探头 A/LKB-F;感应力 20 g;测试应变 90%;测试速度 1.7 mm/s,测试前后速度 2.0 mm/s。测定并记录 TPA 数据(黏性、弹性、凝结力、胶黏性、咀嚼性、回复力)及剪切应力按式(2)计算:

$$P_2 = F_2 \div S, \quad (2)$$

式中:

P_2 ——剪切应力, g/mm^2 ;

F_2 ——最大剪切应力, g ;

S ——粉条的横截面积, mm^2 。

1.2.6 紫薯粉条蒸煮测定

(1) 断条率的测定:取 20 根浸泡后的粉条置于 500 mL 沸水中煮制 20 min,挑出并数清断条的根数,按式(3)计算熟粉条断条率。

$$D = N \div 20 \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

D ——断条率, %;

N ——断条根数。

(2) 蒸煮损失的测定:称取 1 g 左右干基粉条,记重为 α 。将预泡后的粉条放入 100 mL 沸腾的蒸馏水中煮 10 min。将粉条放于坩埚中,测定其重量;将粉条放入 105 °C 烘箱烘干至衡重,测定其重量;再将干粉条取出称量。膨胀系数及蒸煮损失^[11]分别按式(4)、(5)进行计算:

$$E = (W_1 - W_2) \div W_3 \times 100\%, \quad (4)$$

$$L = (\alpha - W_3) \div \alpha \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

E ——膨胀系数, %;

L ——蒸煮损失, %;

α ——原干粉条重量, g ;

W_1 ——煮后粉条与坩埚的总质量, g ;

W_2 ——恒重后粉条与坩埚的总质量, g ;

W_3 ——恒重后粉条的重量, g 。

1.2.7 紫薯粉条色泽测定 使用色差仪测定浸泡后的紫薯粉条色泽。结果以亮度值(L^*)、红绿值(a^*)、黄蓝值(b^*)表示,比较不同试验组制作粉条之间的色泽差异^[12]。

1.2.8 紫薯粉条微观结构扫描电镜观察 使用扫描电镜(ESEM)观察粉条微观结构^[5],分别制备浸泡后的紫薯粉条、浸泡后并煮制 10 min 粉条及煮制 20 min 后的粉条作为测试样品。

1.2.9 数据处理 采用 Design-Expert 8.0.6 对试验进行设计,采用 SPSS 23 统计软件中的 Duncan 法进行方差分析和相关性分析;若无特殊说明,所有数据都是 3 次测试所取的平均值。

2 结果与分析

2.1 紫薯粉条原料的测定与分析

紫薯渣粉和紫薯淀粉的水分、蛋白质、脂肪、灰分的

测定结果分别为: 6.788%、4.120%、0.857 g/100 g、0.956 g/100 g; 10.033%、0.939%、0.755 g/100 g、0.224 g/100 g。粉条是一种以淀粉为主要原料制成的产品, 淀粉中的蛋白质、脂肪等元素也能影响粉条的营养价值^[13], 紫薯渣粉丰富的膳食纤维能增强紫薯粉条的营养价值。

使用单一的紫薯淀粉与紫薯渣粉制作的紫薯粉条易断条、质地较差。本研究结合其它薯类淀粉复配得到紫薯粉条新配方, 优化了紫薯粉条的品质。结果表明, 红薯淀粉的凝胶强度最大, 为(257.57±2.91) g, 木薯淀粉[(215.72±3.20) g]与紫薯淀粉[(143.97±3.06) g]次之, 马铃薯淀粉[(84.73±4.27) g]最小。淀粉凝胶的形成是由于淀粉颗粒在糊化冷却过程中会通过氢键交联聚合, 形成三维网络凝胶结构^[14], 而且淀粉凝胶强度与粉条的品质存在显著关系^[15], 因此根据不同淀粉凝胶强度的高低初步确定添加量范围: 红薯淀粉添加量大于木薯淀粉, 马铃薯淀粉添加量最小, 紫薯淀粉和紫薯渣粉作为紫薯风味的原料粉, 在保证粉条质量的条件下尽可能多的添加。

2.2 紫薯粉条综合品质评分

对优化设计试验中 25 组配方加工制成的紫薯粉条的质构特性、蒸煮特性、感官特性进行测定, 并做综合评分。

紫薯粉条质构特性采用主成分分析法进行综合评分, 将 25 组试验组的 8 项质构指标(拉伸强度、剪切应力、黏性、弹性、凝结力、胶黏性、咀嚼性、回复力)在 SPSS 软件中做主成分方差分析, 分析结果如表 3 所示, 根据累积贡献率>85%的原则, 选取前 4 个主成分。将 25 组试验组各成分得分(F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4)在质构综合得分公式 $T_1 = F_1 \times 0.50965 + F_2 \times 0.18292 + F_3 \times 0.12312 + F_4 \times 0.09402$ 中计算得 T_1 , 如表 4 所示。 T_1 值越大表明粉条的质构指标越好, 该复合配方越适合生产紫薯粉条。王永强等^[16]在鲜湿米粉的质构分析中同样采用了主成分分析法, 最终提取 5 个主成分, 相比而言本研究更加精炼地提取了主成分。

紫薯粉条蒸煮特性综合评分, 为消除指标间值域范围不同对客观评分的影响, 先使用 SPSS 标准化将蒸煮特性指标(断条率、膨胀度、蒸煮损失)通过描述标准化得到

断条率标准值 Z_1 、膨胀度标准值 Z_2 、蒸煮损失标准值 Z_3 。由于粉条断条率和蒸煮损失与粉条品质呈负相关, 膨胀度与粉条质量呈正相关, 因此按照 $T_2 = -Z_1 + Z_2 - Z_3$ 计算蒸煮特性的综合评分, 结果见表 4。当断条率和蒸煮损失值越小及膨胀度越大时, T_2 值越大, 紫薯粉条的蒸煮特性也就越好, 越适合用于生产优质的紫薯粉条。

感官特性得分由 12 位食品专业人员品尝打分汇总求其平均分所得, 感官得分如表 4 所示。感官总评分为综合评分 T_3 。其中, 外形(G_1)、气味(G_2)、组织状态(G_3)、口感(G_4)的感官评分项能够代表不同的感官质量, 总分 T_3 能代表总体感官质量。

2.3 原料配方模型的建立

借助 Design-Expert 8.0 分别以质构特性综合品质(T_1)、蒸煮特性综合品质(T_2)和感官特性综合品质(T_3)作为表 1 中 25 组配方试验的响应值, 以紫薯淀粉(A)、红薯淀粉(B)、木薯淀粉(C)、马铃薯淀粉(D)、紫薯渣粉(E)原料的添加量为自变量, 进行回归拟合, 拟建立 3 个综合品质的回归模型。但响应值蒸煮特性的综合品质(T_2)未能构建合适模型(模型不显著); 而鲜湿米粉^[16]的蒸煮特性最终能构建合适的模型, 可能是挑选的蒸煮特性测定指标不同造成的。又将质构特性综合品质、蒸煮特性综合品质、感官特性综合品质及色泽中的各测定指标做了相关性分析, 最终结果如表 5 所示。

通过测定指标的相关性分析, 蒸煮特性指标与感官特性综合品质和质构特性综合品质均表现出相关性, 粉条各指标间很多交互之处。因此, 在评价粉条总体品质时可简化测定指标, 就本研究的紫薯粉条而言, 其蒸煮特性的相关指标能够从质构特性综合品质、感官特性综合品质中体现。25 组试验配方粉条断条率为 0.00%~0.15%, 蒸煮损失为 4.66%~6.92%, 膨胀率为 198.8%~317.3%, 参考前人^[17-18]研究的粉条蒸煮特性, 显示其粉条的蒸煮特性均为良好。综上所述, 质构特性综合品质和感官特性综合品质这 2 个响应值能较全面地代表粉条的质量。

最终选取质构特性综合品质(T_1)、感官特性综合品质(T_3)为响应值建立回归模型并得到最优配方。对质构特性综合品质(T_1)进行方差分析和多项回归拟合, 拟合所得二次多项式回归方程:

表 3 相关矩阵特征值、方差贡献率及成分系数

Table 3 The eigenvalues and cumulative percentage of correlation matrix

成分	特征值	贡献率	咀嚼性	凝结力	黏性	弹性	胶黏性	拉伸强度	剪切应力	回复力
1	4.077	50.965	0.935	0.904	0.900	0.772	0.719	0.594	-0.096	0.345
2	1.463	18.292	0.056	-0.189	0.167	-0.364	-0.120	0.462	0.919	0.436
3	0.985	12.312	-0.080	-0.168	-0.291	0.359	0.232	-0.361	0.020	0.754
4	0.752	9.402	-0.275	-0.279	-0.203	0.107	0.585	0.429	-0.008	-0.195

表 4 质构、蒸煮及感官综合得分表[†]

Table 4 Comprehensive value of textural, cooking and sensory properties

试验组	F_1	F_2	F_3	F_4	Z_1	Z_2	Z_3	G_1	G_2	G_3	G_4	T_1	T_2	T_3
1	-0.585	-1.702	0.682	-0.206	-0.771	-0.349	-1.894	17.92	15.73	19.58	20.19	-0.545	2.316	73.42
2	-0.203	-0.461	0.397	0.244	-0.771	-0.316	-0.801	16.35	15.73	18.89	18.66	-0.116	1.256	69.63
3	1.159	0.246	-0.293	-0.301	-0.083	1.925	-1.154	18.07	17.31	20.61	22.43	0.571	3.162	78.42
4	-0.126	-1.523	0.892	0.320	-0.771	0.787	-0.386	16.15	16.98	19.44	20.10	-0.203	1.945	72.67
5	-1.203	0.175	-0.615	1.198	-0.771	-0.030	-1.094	17.40	16.67	21.25	22.13	-0.544	1.835	77.45
6	22.440	-0.618	0.906	-2.197	-0.083	-0.561	-1.744	19.90	16.46	22.22	22.13	1.036	1.265	80.71
7	1.107	1.109	-1.180	-0.039	-0.083	0.918	0.476	19.48	17.40	20.14	19.63	0.618	0.525	76.65
8	-0.348	-0.272	0.326	1.010	-0.083	1.219	1.330	17.50	16.98	19.31	19.68	-0.092	-0.029	73.47
9	-0.315	-0.254	0.271	0.987	-0.083	1.207	1.329	16.46	17.92	19.58	19.21	-0.081	-0.040	73.17
10	0.606	-0.667	-0.758	0.641	-0.771	0.212	1.144	20.01	17.92	20.56	21.20	0.154	-0.161	79.69
11	-1.951	-0.076	0.028	-2.394	0.606	-1.816	-1.065	19.87	15.31	20.51	19.03	-1.230	-1.357	74.72
12	-0.589	-0.618	0.138	0.434	-0.771	-1.011	0.839	18.44	17.71	19.86	20.97	-0.355	-1.079	76.98
13	-1.157	1.808	-1.077	0.565	2.671	0.066	0.628	18.13	16.77	21.25	21.16	-0.338	-3.230	77.31
14	1.252	0.186	-0.336	-0.456	-0.083	1.925	-1.176	18.13	17.19	20.14	22.04	0.588	3.184	77.50
15	-0.551	0.516	-0.389	-0.158	2.671	-0.973	0.487	20.03	19.17	21.25	22.13	-0.249	-4.132	82.58
16	0.764	-0.659	-0.593	0.436	-0.771	0.672	-0.334	17.40	16.46	19.86	21.76	0.237	1.777	75.48
17	-0.484	-1.236	0.592	1.249	-0.771	-0.436	0.338	18.13	15.73	20.42	20.46	-0.283	-0.003	74.74
18	-1.892	-0.047	0.011	-2.358	0.606	-1.811	-1.034	19.79	16.46	20.69	21.44	-1.193	-1.384	78.38
19	0.491	-0.158	0.213	0.124	-0.083	0.054	0.712	16.15	16.04	20.69	20.51	0.259	-0.575	73.39
20	0.664	1.722	-0.719	-0.264	1.294	-0.549	0.690	20.83	19.17	21.94	21.57	0.540	-2.532	83.51
21	0.423	-0.726	-0.767	0.691	-0.771	0.211	1.122	19.17	16.98	20.03	21.46	0.053	-0.140	77.64
22	0.126	-0.094	0.002	0.199	-0.771	0.728	-0.330	16.35	16.67	19.58	21.11	0.066	1.829	73.71
23	0.028	2.458	3.694	0.688	-0.771	-0.919	0.956	19.58	18.44	20.97	18.98	0.984	-1.104	77.97
24	-0.243	0.892	-1.484	0.011	0.606	-0.495	0.710	19.58	17.50	21.81	21.16	-0.142	-1.811	80.05
25	0.587	-0.001	0.061	-0.425	0.606	-0.661	0.250	17.81	17.50	21.94	20.23	0.266	-1.518	77.48

[†] F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别为质构综合指标主成分分析提取出的 4 个主成分得分, T_1 为质构特性综合品质综合得分; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为断条率、膨胀度、蒸煮损失的标准值, T_2 为蒸煮特性的综合评分; G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 分别为感官评分中的外形、气味、组织状态、口感, T_3 为感官综合评分。

$$T_1 = 21.276 71A + 61.805 81B - 115.628 30C + 511.011 34D + 182.330 35E - 71.140 28AB + 108.831 23AC - 662.189 34AD - 254.144 07AE + 109.787 04BC - 865.897 92BD - 368.809 42BE - 51.620 22CD - 159.922 48CE - 744.462 23DE. \quad (6)$$

对感官特性综合品质(T_3)进行方差分析和多项回归拟合,拟合所得二次多项式回归方程:

$$T_3 = 445.675 96A + 319.274 98B + 424.375 29C - 4 652.108 96D + 227.533 10E - 994.398 96AB - 1 764.519 82AC + 6 105.813 24AD - 1 137.220 24AE - 485.528 47BC + 4 095.239 09BD - 410.762 59BE + 5 013.617 28CD + 198.577 55CE + 5 559.488 27DE. \quad (7)$$

表 6 中对方程(6)进行方差分析表明, $F = 8.33$, $P < 0.001$,说明此模型极显著;失拟项 $F = 1.52$, $P = 0.328 5$,

失拟不显著;确定系数 $R^2 = 0.921 1$ 。其中交互项 BD 、 BE 在提高粉条质构特性上产生了极显著作用,红薯淀粉(B)和马铃薯淀粉(D)的交互作用可整体增强紫薯粉条的质构特性,而红薯淀粉(B)和紫薯渣粉(E)的交互作用可能需要均衡用量来提高紫薯粉条的质量。对方程(7)进行方差分析表明, $F = 5.43$, $P = 0.005 3$,说明此模型极显著;失拟项 F 值为 0.96, P 值为 0.518 6,失拟不显著;确定系数 $R^2 = 0.883 8$ 。其中 AC 、 DE 之间的交互作用在提高粉条感官特性上产生了极显著的作用,紫薯淀粉(A)和木薯淀粉(C)都属于黏性较好的淀粉,在保证紫薯粉条的品质情况下,紫薯淀粉添加量的增加有助于提高粉条的感官品质。同理,紫薯渣粉(E)不利于紫薯粉条的成形,但有助于提高紫薯粉条的感官品质,在能确保粉条成形的条件下提高紫薯渣的添加量有助于提高紫薯粉条的感

官品质。

综上,质构特性和感官特性 2 项综合指标,模型拟合程度较好,可以用此模型较好地反映紫薯粉条的质构综合品质与原料比例的关系。

2.4 紫薯粉条混料配方的优化与验证

在 Design-Expert 8.0 中,用最优混料设定各组分的

变化范围,且设定质构综合品质、感官综合品质目标值为最大值^[16]。运行软件给出最优组合为紫薯淀粉 35.0%、红薯淀粉 15.0%、木薯淀粉 18.5%、马铃薯淀粉 9.5%、紫薯渣粉 22.0%,综合评分预测值质构综合品质 $T_1 = 1.24$ 、感官综合品质 $T_3 = 83.2$,最终验证试验所得试测值 ($T_1 = 1.25 \pm 0.26, T_3 = 82.71 \pm 1.78$)与预测值相近。

表 5 指标的相关性分析[†]

Table 5 Correlation analysis of indicators

相关性	L^*	膨胀	蒸煮损失	断条	黏性	弹性	凝结力	胶黏性	咀嚼性
L^*	1.000								
膨胀	0.386	1.000							
蒸煮损失	-0.310	0.054	1.000						
断条	-0.225	-0.300	0.071	1.000					
黏性	0.190	0.601**	0.258	-0.264	1.000				
弹性	-0.102	0.487*	0.055	-0.406*	0.720**	1.000			
凝结力	-0.193	-0.070	0.142	-0.130	0.256	0.339	1.000		
胶黏性	-0.056	0.360	-0.127	0.081	0.464*	0.604**	0.214	1.000	
咀嚼性	-0.192	-0.136	0.182	-0.139	0.141	0.181	0.973**	0.005	1.000
回复力	-0.206	-0.053	0.087	-0.137	0.226	0.356	0.986**	0.205	0.956**
剪切应力	-0.097	-0.130	0.255	0.535**	-0.137	-0.305	0.330	0.053	0.358
拉伸强度	-0.019	0.500*	0.422*	0.040	0.484*	0.293	0.197	0.615**	0.092
外形	-0.577**	-0.483*	0.074	0.489*	-0.367	-0.201	0.252	0.273	0.214
气味	-0.379	0.067	0.539**	0.417*	0.280	0.022	0.347	0.251	0.319
组织状态	-0.328	-0.386	-0.005	0.570**	-0.073	-0.121	0.254	0.355	0.169
口感	-0.009	0.138	-0.243	0.324	0.136	-0.049	-0.188	0.402*	-0.281
感官总分	-0.460*	-0.248	0.113	0.608**	-0.047	-0.131	0.221	0.431*	0.141
相关性	回复力	剪切应力	拉伸强度	外形	气味	组织状态	口感	感官总分	
L^*									
膨胀									
蒸煮损失									
断条									
黏性									
弹性									
凝结力									
胶黏性									
咀嚼性									
回复力	1.000								
剪切应力	0.249	1.000							
拉伸强度	0.159	0.246	1.000						
外形	0.268	0.244	0.245	1.000					
气味	0.320	0.436*	0.486*	0.415*	1.000				
组织状态	0.240	0.407*	0.281	0.594**	0.355	1.000			
口感	-0.157	-0.105	0.370	0.264	0.230	0.453*	1.000		
感官总分	0.227	0.316	0.459*	0.814**	0.663**	0.798**	0.653**	1.000	

† ** 表示 $P < 0.01$ 水平上相关性显著; * 表示 $P < 0.05$ 水平上相关性显著。

表 6 质构特性和感官特性回归模型及因素的方差分析[†]

Table 6 Variance analysis of textural and sensory properties regress model and factor

变异来源	平方和		自由度		均方		F 值		P 值	
	质构	感官	质构	感官	质构	感官	质构	感官	质构	感官
模型	7.01	227.13	14	14	0.50	16.22	8.33	5.43	0.000 9**	0.005 3**
线性混合	0.32	74.22	4	4	0.08	18.55	1.32	6.22	0.328 7	0.008 8**
AB	0.10	20.43	1	1	0.10	20.43	1.74	6.84	0.216 2	0.025 8*
AC	0.12	32.73	1	1	0.12	32.73	2.07	10.96	0.180 3	0.007 9**
AD	0.33	28.08	1	1	0.33	28.08	5.50	9.41	0.041 0*	0.011 9*
AE	0.37	7.42	1	1	0.37	7.42	6.18	2.49	0.032 3*	0.145 9
BC	0.25	4.84	1	1	0.25	4.84	4.12	1.62	0.069 9	0.231 8
BD	0.75	16.81	1	1	0.75	16.81	12.52	5.63	0.005 4**	0.039 1*
BE	1.31	1.62	1	1	1.31	1.62	21.84	0.54	0.000 9**	0.477 8
CD	2.47E-03	23.28	1	1	2.47E-03	23.28	0.04	7.80	0.843 5	0.019 0*
CE	0.17	0.26	1	1	0.17	0.26	2.79	0.09	0.125 9	0.774 6
DE	0.56	31.42	1	1	0.56	31.42	9.39	10.52	0.012 0*	0.008 8**
残差	0.60	29.85	10	10	0.060	2.99				
失拟项	0.36	14.60	5	5	0.073	2.92	1.52	0.96	0.328 5	0.518 6
误差	0.24	15.25	5	5	0.048	3.05				
总和	7.61	256.99	24	24						

[†] ** 表示 P<0.01 水平上相关性显著; * 表示 P<0.05 水平上相关性显著。

2.5 最优配方紫薯粉条的微观表征

对优化后的紫薯粉条进行微观表征,样品分别为 75 °C 浸泡 20 min、沸水煮制 10 min 和沸水煮制 20 min 的粉条。由图 1 可知,浸泡后的粉条通过蒸煮,其孔径变大,粘连部分表面变得光滑紧致。其孔径变大的原因,可能是蒸煮过程中随着吸水粉条膨胀度也随之增加。在蒸煮过程中,随着蒸煮时间延长糊化程度增加,所以粘连部分表面变得光滑紧致,这也与煮 20 min 的粉条更有弹性和韧性相符。但从图 1 中可看出,粉条截面孔径较多并

较大,可对优化后的配方进行工艺改良,从而提高粉条质量。

3 结论

以紫薯渣粉、紫薯淀粉、红薯淀粉、木薯淀粉、马铃薯淀粉为紫薯粉条的基本原料,利用不同原料粉性质不同和彼此间的交互作用,其产品口感爽滑、具有紫薯特有色泽。用 Design-Expert 8.0 软件设计的 25 组试验组,并测定其色泽指标、蒸煮指标、感官指标、质构指标,利用主成分分析法、无量纲标准法对各指标进行综合评分。得到质构特性综合品质(T₁)、蒸煮特性综合品质(T₂)和感官特性综合品质(T₃)为响应值,在 Design-Expert 8.0 软件中进行线性回归拟合并建立模型。根据指标的相关性分析和模型拟合情况最终选定 T₁ 和 T₃ 作为混料设计优化响应值。最终优化得到的配方的添加量为:紫薯淀粉 35.0%、红薯淀粉 15.0%、木薯淀粉 18.5%、马铃薯淀粉 9.5%、紫薯渣粉 22.0%。最终验证实验得到的结果与预测值相符,说明混料设计模型较为准确。此研究开拓了紫薯粉条的研究思路,丰富了紫薯加工产品的种类。在此混料配方的基础上,粉条的工艺有待进一步研究。

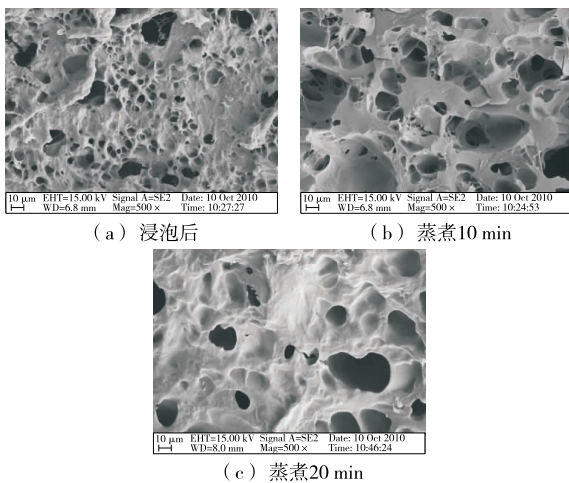


图 1 不同样品的 SEM 图

Figure 1 The SEM photos of different samples

参考文献

[1] HU Yi-jie, DENG Li-qing, CHEN Jin-wu, et al. An analytical pipeline to compare and characterise the anthocyanin antioxidant activities of purple sweet potato cultivars[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 46.

(下转第 222 页)

- 其突变株在降低酱油中氨基甲酸乙酯的应用[J]. 微生物学报, 2017, 57(12): 1 817-1 826.
- [45] SANGER F. Determination of nucleotide sequences in DNA[J]. *Bioscience Reports*, 1981, 1(1): 3-18.
- [46] MARGULIES M, EGHOLM M, ALTMAN W E, et al. Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors[J]. *Nature*, 2005, 437(7 057): 376-380.
- [47] PORRECA G J, ZHANG Kun, LI Jin-billy, et al. Multiplex amplification of large sets of human exons[J]. *Nature Methods*, 2007, 4(11): 931-936.
- [48] BRIAN D O, ANJANA V, KARLA D P, et al. Efficient mapping of applied biosystems SOLiD sequence data to a reference genome for functional genomic applications[J]. *Bioinformatics*, 2008, 24(23): 2 776-2 776.
- [49] 杨悦, 杜欣军, 梁彬, 等. 第三代 DNA 测序及其相关生物信息学技术发展概况[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(10): 143-148.
- [50] 邓杰, 黄治国, 卫春会, 等. 基于高通量测序的浓香型白酒窖池细菌群落结构分析[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 50-55.
- [51] 苗菁, 宗万松, 吕敏, 等. 基于高通量测序技术研究土壤细菌对盐生植被演替的响应[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 602-608.
- [52] YE Dong-dong, LIANG He-bin, ZHOU Wei, et al. Total and active microbial communities in a full-scale system treating wastewater from soy sauce production[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 123: 206-215.
- [53] SONG Zhe-wei, DU Hai, ZHANG Yan, et al. Unraveling core functional microbiota in traditional solid-state fermentation by high-throughput amplicons and metatranscriptomics sequencing[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 1-14.
- [54] 沈馨, 王艳, 代凯文, 等. 基于 Miseq 高通量测序技术的辣椒酱核心细菌类群研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(10): 151-157.
- [55] 李豆南, 王晓丹, 罗小叶, 等. 酱香大曲中链霉菌菌株 FBKL4.005 全基因组测序及序列分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 206-212.
- [56] 周子超, 何岚, 丁月平. 全基因组测序(WGS)在肠杆菌科细菌中的应用研究[J]. 智慧健康, 2019, 5(2): 70-72.
- [57] 许国旺. 代谢组学方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-12.
- [58] 黄强, 尹沛源, 路鑫, 等. 色谱-质谱联用技术在代谢组学中的应用[J]. 色谱, 2009, 27(5): 566-572.
- [59] ZHANG Ji-ran, DU Guo-cheng, CHEN Jian, et al. Characterization of a *Bacillus amyloliquefaciens* strain for reduction of citrulline accumulation during soy sauce fermentation[J]. *Biotechnology Letters*, 2016, 38(10): 1 723-1 731.
- [60] 杨怡敏, 方芳, 周朝晖, 等. 乳酸足球菌精氨酸代谢与瓜氨酸积累[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(3): 247-251.
- [61] GHULAM M K, YUAN Bin, HUSSAIN A I, et al. 13C-NMR-based metabolomic profiling of typical asian soy sauces[J]. *Molecules*, 2016, 21(9): 1 168-1 181.
- (上接第 208 页)
- [2] KIM H W, KIM J B, CHO S M, et al. Anthocyanin changes in the Korean purple-fleshed sweet potato, Shinzami, as affected by steaming and haking[J]. *Food Chemistry*, 2012, 130(4): 966-972.
- [3] 陈兵. 鲜湿菠菜粉条的研制及其保鲜的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 7-8.
- [4] 赵萌, 王珊, 沈群, 等. 红薯淀粉与绿豆淀粉复配粉条的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(12): 58-63.
- [5] 邢丽君, 木泰华, 张苗, 等. 不同低温冷冻条件及干燥温度对紫薯粉条品质的影响[J]. 食品科技, 2015, 40(3): 115-121.
- [6] 邢丽君, 木泰华, 张苗, 等. 紫薯全粉添加量对甘薯淀粉物化特性及粉条性质的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(3): 484-492.
- [7] 蒋阳光, 肖力源, 王章英, 等. 不同基材复配紫薯花青素制备智能指示膜及应用研究[J/OL]. 食品科学.[2018-12-27]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2206.ts.20181018.1501.016.html>.
- [8] LEE D J, PARK J H, KANG M C. Optimization of TiC Content during Fabrication and Mechanical Properties of Ni-Ti-Al/TiC Composites Using Mixture Designs [J]. *Materials*, 2018, 11(7): 1 133.
- [9] 张勋, 张丽霞, 芦鑫, 等. 混料试验与模糊评价结合优化挤压膨化芝麻制品工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 248-253.
- [10] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 22-27.
- [11] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 114-119, 130.
- [12] 钱籽霖, 秦宏文, 刘奕, 等. 制汁工艺对紫薯汁品质及香气成分的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 79-85.
- [13] 宋春春. 马铃薯营养粉丝(条)的研制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013: 7-10.
- [14] MESTRES C, COLONNA P, BULEON A. Characteristics of starch networks within riceflour nnoocles and mungbean starch vermicelli [J]. *Journal of Food Science*, 1988, 53(6): 1 809-1 812.
- [15] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338.
- [16] 王永强, 姚卫蓉, 蔡超, 等. 基于鲜湿米粉品质综合评价的原料配比优化研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 90-94.
- [17] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 114-119, 130.
- [18] 范会平, 李瑞, 王娜, 等. 冷冻工艺对无铝红薯粉条品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8): 142-146.