

添加剂对豌豆蛋白高水分组织化挤出物品质的影响及复配配方优化

彭慧慧, 王思花, 张静, 宋佳琳, 岳明慧, 王鑫, 马成业

Effects of Additives on the Quality of Pea Protein High-moisture Textured Extrudates and Optimization of Compound Formula

PENG Huihui, WANG Sihua, ZHANG Jing, SONG Jialin, YUE Minghui, WNAG Xin, and MA Chengye

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

豌豆蛋白面包的制作工艺优化及其品质

Optimization of Preparation Process of Pea Protein Bread and Its Quality Characteristics
食品工业科技. 2020, 41(11): 194–199

高湿挤压技术制作松柏复合素肉的工艺研究

Study on textured protein from pine nut dregs by high moisture extrusion technology
食品工业科技. 2017(05): 258–263

豌豆蛋白挤出物制备抗氧化肽工艺优化

Optimization of separation technology and properties of antioxidant peptides from pea protein extrudate
食品工业科技. 2018, 39(6): 165–169

豌豆蛋白的添加对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响

Effect of Pea Protein Addition on Gel Properties of Pork Salt-soluble Protein
食品工业科技. 2019, 40(14): 31–36,41

基于因子分析和Box-Behnken响应面提高冷冻淮山紫薯球品质

Improving the Quality of Frozen Purple Sweet Potato Ball with Chinese Yam by Factor Analysis and Box-Behnken Response Surface
食品工业科技. 2021, 42(2): 146–153,160

豌豆蛋白对猪肉盐溶蛋白理化性质的影响

Effect of Pea Protein on Physicochemical Properties of Salt-soluble Protein of Pork
食品工业科技. 2019, 40(8): 31–36



关注微信公众号，获得更多资讯信息

彭慧慧, 王思花, 张静, 等. 添加剂对豌豆蛋白高水分组织化挤出物品质的影响及复配配方优化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 188–195. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070204

PENG Huihui, WANG Sihua, ZHANG Jing, et al. Effects of Additives on the Quality of Pea Protein High-moisture Textured Extrudates and Optimization of Compound Formula[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 188–195. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070204

· 工艺技术 ·

添加剂对豌豆蛋白高水分组织化挤出物品质的影响及复配配方优化

彭慧慧¹, 王思花¹, 张 静¹, 宋佳琳¹, 岳明慧¹, 王 鑫², 马成业^{1,*}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255000;

2. 山东健源生物工程股份有限公司, 山东烟台 265400)

摘要: 以豌豆蛋白为原料, 基于因子分析的综合评分法及 Box-Behnken 响应面法探究海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐添加量对组织化豌豆蛋白的配方优化。因子分析结果表明, 可将组织化豌豆蛋白制品的 15 项评价指标分为质构因子、色泽因子、吸附因子、溶解性因子及感官因子等五个相互独立的公因子, 根据各样本因子得分及因子权重计算出综合得分。前五个特征值的累积贡献率为 78.588%, 因此, 可将因子分析作为组织化蛋白品质的一种评价方法。以综合得分为目标参数, 应用响应面法对三种添加剂的添加量进行分析, 结果表明最佳的配方条件为: 海藻酸钠添加量 0.32%, L-半胱氨酸添加量 0.08%, 复合磷酸盐添加量 0.31%, 经极差标准化后的综合评分为 0.92, 在此配方条件下产品的组织化度及质构等方面都得到了改善。

关键词: 高水分挤压, 豌豆蛋白, 添加剂, 因子分析, 响应面法

中图分类号: TS214.9

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)08-0188-08

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2021070204](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070204)

本文网刊:



Effects of Additives on the Quality of Pea Protein High-moisture Textured Extrudates and Optimization of Compound Formula

PENG Huihui¹, WANG Sihua¹, ZHANG Jing¹, SONG Jialin¹, YUE Minghui¹, WNAG Xin², MA Chengye^{1,*}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Jianyuan Bioengineering Co., Ltd., Yantai 265400, China)

Abstract: Pea protein was used as raw material, the synthetic scoring method based on factor analysis and Box-Behnken response surface method were used to explore the formula optimization of sodium alginate, L-cysteine, and compound phosphate added on the process of textured pea protein. The results of factor analysis showed that the 15 evaluation indexes of textured pea protein products could be divided into five independent common factors, that were texture factor, color factor, adsorption factor, solubility factor and sensory factor, then the comprehensive scores were calculated according to the score of each sample factor multiplied the factor weight. The cumulative contribution rate of the first five eigenvalues was 78.588%. Therefore, factor analysis could be used as an evaluation method of textured protein quality. The response surface method was applied to analyze the added amount of the three additives with the comprehensive score as the target parameter. The optimal formula conditions were as follows: 0.32% sodium alginate, 0.08% L-cysteine and 0.31% compound phosphate. There was an improvement intexturization degree and texture characteristics of the product and the comprehensive scores of the standardized product was 0.92 under these conditions.

Key words: high moisture extrusion; pea protein; additives; factor analysis; response surface methodology

收稿日期: 2021-07-19

基金项目: 招远工业创新基金 (2018281)。

作者简介: 彭慧慧 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: penghuihui2021@126.com。

* 通信作者: 马成业 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: meycn2002@163.com。

随着全球经济发展及个人收入水平的增加, 人们对肉制品的消耗也在持续上升^[1-2], 由此引发出相关的环境和动物道德等问题也在逐渐加剧^[3]。因此寻找新的肉类替代品成为一个新的思路^[4]。人造肉主要分为两类, 即动物细胞培养肉和植物基肉制品^[5]。目前植物基肉制品主要是以植物蛋白如大豆蛋白、花生蛋白等为原料, 通过高水分挤压(物料水分含量>40%)等重组工艺所生产的一种与肉类似的制品, 使其具有真实肉类的纤维结构及口感^[6], 可满足人们的食肉欲望, 所以备受青睐^[7]。植物基肉制品正成为食品研究中最热门的主题之一^[8]。

豌豆中蛋白质含量为 23%~25%, 氨基酸含量较为均衡, 是一种优质的蛋白资源。豌豆蛋白由于转基因问题较少、不存在过敏原等问题越来越多的受到关注^[9]。近年来, 相关的学者一直在不断探索豌豆蛋白的工艺研究。研究发现, 55% 的水分含量能够使豌豆蛋白形成类似肌肉的纤维状制品^[10], 表明豌豆蛋白高水分挤压成为可能。陆续有学者采用不同的研究方法以探究组织化蛋白的工艺条件, 设计正交试验以优化挤压机操作参数对组织化豌豆蛋白的影响规律^[11]。采用主成分分析法对组织化豌豆蛋白产品进行综合评价, 在正交试验基础上优化出相应的工艺参数^[12]。以综合评价为目标参数构建回归方程以优化出组织化大豆蛋白的工艺条件^[13]。有关挤压机操作参数对组织化蛋白挤出制备技术的研究已经较为成熟。然而, 目前高水分组织化蛋白存在咀嚼感差、纤维化程度不够等问题。研究发现, 添加剂有利于改善组织化制品的品质, 海藻酸钠能够增强组织化小麦蛋白的纤维状结构^[14]。L-半胱氨酸通过与蛋白质二硫键作用, 不仅提高了组织化大豆蛋白的组织化度^[15], 还显著影响小麦蛋白挤出物的微观结构和功能特性, 增加其咀嚼度及硬度^[16]。在小麦蛋白中引入磷酸根基团后溶解度、乳化度及其稳定性等都明显改善^[17]。加入添加剂有利于改善组织化大豆及小麦蛋白等制品的品质已经得到了尝试并验证, 但由于组织化蛋白制品的评价指标及方法还未进行科学的筛选及统一, 多数研究内容主要集中在单个添加剂及添加剂复配对不同目标参数的影响, 多目标参数的处理给工艺参数的优化带来困难。另外, 由于不同来源的植物蛋白原料对产品的最终特性不同, 有关各种添加剂对组织化豌豆蛋白的改善作用的研究鲜有报道, 还需要进一步的探索与研究。

本试验以豌豆蛋白为原料, 探究海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白的品质改良, 在各项指标综合评价的基础上通过 Box-Behnken 响应面优化出最佳的添加剂复配配方, 以期拓宽豌豆蛋白高水分挤压技术的研究内容, 改善组织化豌豆蛋白的品质, 为豌豆蛋白的开发及利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

豌豆蛋白(水分 6.68%, 蛋白质 71.23%, 淀粉 7.26%) 山东健源生物工程股份有限公司; 海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐 浙江一诺生物科技有限公司。

UVTE36-24 型(螺杆长 960 mm, 长径比 27.4:1, 设备最大产能 50 kg/h, 成型模具长 1000 mm)双螺杆挤压机 长沙创享食品科技有限公司; XA.XTplus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司; CM-3600A 色差计 日本柯尼卡美能达控股公司; K9860 全自动凯氏定氮仪 山东海能科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 组织化豌豆蛋白挤出物的制备 预先将豌豆蛋白粉与海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐等三种添加剂以不同添加量混合, 后进行挤压。挤压机的操作参数如下: 螺杆转速 162 r/min, 物料水分含量 54%, 喂料速度 10 kg/h, 温区(I~V 区)设置为: 40、120、169、145、140 °C, 其中 III 区为主要温区, 冷却模具为 50 °C, 待机器稳定后, 收集样品, 用于复水性、质构、组织化度及感官评价指标的测定。待样品冷却至室温时, 切成粒状后于 55 °C 烘 8 h, 后粉碎过 60 目, 继续烘干 2 h, 备用。

1.2.2 响应面试验设计 在前期的单因素实验中, 分别以海藻酸钠(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)、L-半胱氨酸(0.03%、0.06%、0.09%、0.12%、0.15%)、复合磷酸盐(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)添加量为实验因素, 以复水性、持水性、持油性、氮溶解指数、质构(硬度、弹性、咀嚼性、粘聚性、回复性)、组织化度、色差(*L*、*a*、*b*、 ΔE)、感官评价为考察指标, 根据单因素实验结果综合考察不同种类添加剂的添加量对组织化豌豆蛋白的品质改良效果。在单因素实验的基础上, 确定本实验以海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐添加量为考察因素, 以复水性、持水性、持油性、氮溶解指数、质构(硬度、弹性、咀嚼性、粘聚性、回复性)、组织化度、色差(*L*、*a*、*b*、 ΔE)、感官评价等 15 项指标的综合评分为响应值, 采用 Box-Behnken 设计出响应面试验, 具体实验安排见表 1。

表 1 响应面试验设计

Table 1 Response surface test design

水平	A 海藻酸钠(%)	B L-半胱氨酸(%)	C 复合磷酸盐(%)
-1	0.2	0.06	0.2
0	0.3	0.09	0.3
1	0.4	0.12	0.4

1.2.3 指标测定方法

1.2.3.1 复水性 依据 Onwulata 等^[18]的方法并做适当修改。取 5 g 左右的组织化豌豆蛋白样品(质量计为 M_1), 25 °C 复水(过量水中)30 min, 沥 20 min 后

称重(M_2)。

$$\text{复水率}(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

1.2.3.2 持水性 依据 Li 等^[19]的方法,精确称取 1 g 组织化豌豆蛋白粉末于离心管中,加入 20 mL 的去离子水,于混匀仪上混匀,静置 15 min 后 4500 r/min 离心 20 min,弃去上清液,将离心管倒置 3 min 并擦干管口,称重。

$$\text{持水性}(\%) = \frac{\text{样品吸水的质量}}{\text{样品质量}} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.2.3.3 持油性 依据 Li 等^[19]的方法,精确称取 1 g 组织化豌豆蛋白粉末于离心管中,加入 10 mL 花生油,于混匀仪上混匀,静置 15 min 后 4500 r/min 离心 20 min,弃去上清液,将离心管倒置 3 min 并擦干管口,称重。

$$\text{持油性}(\%) = \frac{\text{样品吸油的质量}}{\text{样品质量}} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

1.2.3.4 质构特性 使用取样器截取样品(高 15 mm 直径 13 mm 的圆柱),使用 XA.XTplus 质构仪,P/36R 探头测定组织化豌豆蛋白的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性、回复性^[20]。具体参数设置为:测试前速度 2 mm/s,测试速度 1 mm/s,测试后速度 2 mm/s,下压程度为 50%,往复 2 次,每个样品取 4~6 次平行。

1.2.3.5 组织化度 取长方体样品(12 mm×12 mm×15 mm),HDP/BS 探头对其进行剪切测试,具体参数设置为:测试前速度 1 mm/s,测试速度 1 mm/s,测试后速度 2 mm/s,剪切程度为 75%,每个样品平行 4~6 次。横向剪切力与纵向剪切力所做的功的比值被定义为组织化度^[21]。

1.2.3.6 色泽特性 CM-3600A 色差计测定样品的色泽特性,测定 L , a , b , 标准白色板取 $L^*=98.68$, $a^*=-0.09$, $b^*=-0.4$, ΔE 为色差,计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \quad \text{式 (4)}$$

1.2.3.7 氮溶解指数 NSI 准确称取 1 g 粉碎后的组织化豌豆蛋白粉末于离心管中,加入 40 mL 的去离子水,在 30 ℃ 恒温条件下以 200 r/min 振荡 1 h,将抽滤后的液体定容至 100 mL,取 1 mL 液体采用考

马斯亮蓝法测得上清液中蛋白质的含量,凯氏定氮法测总蛋白含量。

$$\text{NSI}(\%) = \frac{\text{上清液中蛋白质的含量}}{\text{蛋白质总含量}} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

1.2.3.8 感官评价 由 10 名经过培训的评价员组成评价小组,其中男女比例为 4:6,如表 2 提出相应的权重,其中组织形态(0.4),色泽、外观、咀嚼性及风味(0.15),感官评分得分计算如下^[22]:

$$\text{产品感官得分} = \frac{\sum(\text{各项目得分} \times \text{对应权重})}{10} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

1.2.3.9 豌豆蛋白组织化产品的综合评价方法 豌豆蛋白挤压组织化产品综合评价采用因子分析法,构造因子模型($X=AF+e$):

$$X_1=A_{11}F_1+A_{12}F_2+A_{13}F_3+\cdots+A_{1m}F_m+e_1$$

$$X_2=A_{21}F_1+A_{22}F_2+A_{23}F_3+\cdots+A_{2m}F_m+e_2$$

.....

$$X_n=A_{n1}F_1+A_{n2}F_2+A_{n3}F_3+\cdots+A_{nm}F_m+e_n$$

式中: F_i 表示公共因子; A 为因子载荷矩阵,表示 X 与 F 的紧密程度; e_i 是 X_i 的特殊因子。根据原始数据计算出特征值及累积贡献率,当特征值的累积贡献率>75% 时,选择公因子的个数,取 $A=(A_1, A_2, \dots, A_n)$ 为因子载荷矩阵。将公因子表成变量的线性组合,应用载荷矩阵计算出样本的因子得分,再通过对应的方差贡献率表示因子权重系数,与各个样本因子得分加权求和可得到各个样本的综合评分^[23]。

1.3 数据处理

指标测定中每组试验重复至少三次。SPSS22.0 对试验数据进行因子分析及综合评价,Design-Expert8.0.6 进行 Box-Behnken 响应面分析。

2 结果与分析

2.1 响应面试验结果

Box-Behnken 响应面设计及指标结果见表 3。

2.2 因子分析

因子分析根据相关性把变量分组,使得组间相关性较差,组内相关性较好,每组变量代表了一个基本单元,即公共因子。针对多指标所构成的某种问题可用最少数公共因子的线性关系与因子之和来表示不同分量,因子之间需相互独立。如此既可以避免不

表 2 组织化蛋白感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of textured protein

项目	评分(分)			
	1~3	4~6	7~9	10
色泽	色泽异常	发暗	微黄, 色泽不均	黄色, 色泽均一
外观	表面有较多杂乱的斜纵向裂纹	表面有少量斜纵向裂纹	表面光滑无裂纹, 结构紧密, 质地均匀性较差	表面光滑, 质地均一
组织形态	无纤维结构	纤维结构弱	较好的纤维结构	纤维结构明显
咀嚼性	无弹性且过硬	弹性不足或不易咀嚼	有一定的弹性和咀嚼性	弹性及咀嚼性良好
风味	有异味	稍有异味	基本无异味	香气和滋味, 无其他异味

表 3 Box-Behnken 响应面试验设计及结果
Table 3 Design and results of Box-Behnken response surface experiment

序号	A	B	C	复水性 (%)	持水性 (%)	持油性 (%)	NSI (%)	硬度 (g)	弹性	粘聚性 (g)	咀嚼性	回复性	组织化度	L	a	b	ΔE	感官评分
1	-1	-1	0	37.92	211.00	87.98	4.84	7698	0.76	0.57	3545	0.21	1.65	45.79	6.57	19.24	58.96	61.5
2	1	-1	0	38.24	216.32	89.18	5.46	7439	0.76	0.44	3037	0.22	1.88	48.00	7.05	22.42	56.22	76.5
3	-1	1	0	55.05	222.25	83.11	4.83	6112	0.74	0.51	2796	0.19	1.67	47.00	5.95	22.37	56.94	66.0
4	1	1	0	46.58	232.64	89.47	5.60	7831	0.74	0.51	2745	0.20	1.82	53.1	6.08	22.86	53.88	74.0
5	-1	0	-1	55.84	225.04	85.29	5.36	5525	0.68	0.38	1622	0.15	1.68	49.57	5.57	21.34	54.69	67.5
6	1	0	-1	43.26	216.80	88.64	5.91	7167	0.73	0.57	2807	0.17	1.76	52.82	6.31	23.5	54.39	80.0
7	-1	0	1	51.88	250.37	85.56	3.98	8644	0.75	0.50	3033	0.20	1.73	46.96	6.36	20.76	55.91	71.0
8	1	0	1	34.49	238.40	87.56	5.37	6416	0.72	0.50	2589	0.22	1.93	47.45	6.35	21.89	56.85	77.0
9	0	-1	-1	43.28	223.15	85.72	3.80	6334	0.73	0.47	2327	0.20	2.03	43.71	6.88	21.00	59.41	78.0
10	0	1	-1	35.27	249.07	90.33	4.31	7297	0.73	0.45	2057	0.20	1.82	48.74	5.95	21.18	55.12	78.5
11	0	-1	1	38.85	244.20	87.46	4.42	5073	0.75	0.40	1759	0.21	1.72	47.52	6.58	22.02	55.76	70.0
12	0	1	1	38.74	253.75	88.31	3.31	5316	0.71	0.56	2514	0.20	1.67	47.83	6.53	21.81	55.59	73.0
13	0	0	0	37.29	245.38	88.92	5.33	6138	0.73	0.47	2084	0.20	1.75	45.9	6.31	22.39	57.62	74.0
14	0	0	0	38.01	246.64	88.05	5.44	6109	0.79	0.49	2165	0.19	1.84	44.16	6.99	21.96	58.88	74.5
15	0	0	0	38.68	244.68	89.32	5.02	6201	0.74	0.50	2132	0.18	1.69	45.79	6.92	22.84	56.33	80.0
16	0	0	0	36.43	246.18	89.19	5.74	6039	0.73	0.50	1996	0.18	1.77	46.92	5.75	22.35	57.04	74.0
17	0	0	0	37.46	243.85	88.53	5.37	6179	0.73	0.46	2151	0.17	1.71	46.26	5.76	22.93	58.63	75.5

注: A、B、C 分别表示海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐添加量; A、B、C 中 -1、0、1 三个水平值分别代表实际添加量(%)为 0.2、0.3、0.4、0.06、0.09、0.12、0.2、0.3、0.4。

同指标之间的信息重叠, 还起到了降维的目的, 更易于抓住主要矛盾, 解决实际问题^[24]。本试验共测定 15 个指标以反映组织化豌豆蛋白的品质特性, 指标众多的同时给工艺参数的优化带来困难, 针对本研究的多目标优化问题, 运用因子分析的方法将指标进行综合评价后转化为单一目标, 从而探究添加剂对组织化豌豆蛋白的优化配方。

根据响应面数据结果即表 3 计算特征值及累积贡献率以确定公因子的个数, 一般选取特征值大于 1 的特征根, 且要求累计贡献率高于 75%, 即可反映原始数据的绝大部分信息^[25-26]。采用最大方差法变换因子载荷矩阵更加明确解释各因子的意义, 计算出各个样本的因子得分后即可对数据进行综合评价。

表 4 中有 5 个特征值大于 1, 前 5 个特征值的累计方差贡献率为 78.588%>75%, 表明可将原始的

15 个指标归属为 5 个相互独立的公共因子, 可反映出原始数据的绝大部分信息。取前 5 个公共因子构建因子载荷矩阵, 通过最大正交旋转的方法得到简化后的因子载荷矩阵如表 5 所示。

由表 5 可知原始指标和新构成公因子的相关性, 原始指标在某一个公因子下的载荷值越大表明与某公因子紧密相关, 其中载荷的正负值表现为正负相关。结果如下: 公因子 f_1 对产品咀嚼性、硬度、粘聚性起支配作用, 这些指标主要反应的是产品的质构特征, 称之为质构因子; 公因子 f_2 对 ΔE 、L 起支配作用, 表示产品的色泽特性, 称之为色泽因子; 公因子 f_3 对复水性和持水、油性载荷较大, 称之为吸附因子; 公因子 f_4 对 NSI 起支配作用, 称之为溶解性因子; 公因子 f_5 对组织化度和感官起支配作用, 反映产品感官品质, 称之为感官因子。

表 4 特征值及累计贡献率
Table 4 Eigenvalues and cumulative contribution rate

因子	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	3.604	24.024	24.024	3.604	24.024	24.024
2	2.955	19.703	43.728	2.955	19.703	43.728
3	2.566	17.108	60.836	2.566	17.108	60.836
4	1.409	9.393	70.229	1.409	9.393	70.229
5	1.254	8.359	78.588	1.254	8.359	78.588
6	0.876	5.839	84.427			
7	0.787	5.245	89.672			
8	0.657	4.380	94.052			
9	0.450	3.000	97.052			
10	0.200	1.335	98.387			
11	0.141	0.937	99.324			
12	0.057	0.382	99.706			
13	0.031	0.208	99.914			
14	0.011	0.073	99.987			
15	0.002	0.013	100.000			

表 5 旋转因子载荷矩阵

Table 5 Load matrix of rotation factor

指标	因子f ₁	因子f ₂	因子f ₃	因子f ₄	因子f ₅
复水性	-0.052	-0.361	-0.822	-0.009	-0.167
持水性	-0.453	-0.052	0.638	-0.364	-0.179
持油性	0.152	-0.132	0.863	0.203	0.115
NSI	0.101	-0.046	0.051	0.902	0.013
硬度	0.784	-0.248	-0.068	-0.073	0.191
弹性	0.544	0.503	0.250	-0.029	0.098
粘聚性	0.698	0.046	0.174	0.034	-0.286
咀嚼性	0.940	0.031	-0.196	-0.107	-0.011
回复性	0.460	0.218	0.224	-0.605	0.235
组织化度	0.005	0.122	0.034	-0.017	0.928
L	0.213	-0.891	-0.004	0.302	-0.028
a	0.327	0.479	0.208	-0.206	0.472
b	-0.234	-0.297	0.329	0.660	0.138
△E	0.009	0.944	-0.058	-0.030	0.030
感官	-0.172	-0.180	0.550	0.252	0.641

2.3 综合评价

依据表 5 因子载荷矩阵计算可得到样本因子得分,以对应的方差贡献率表示因子权重系数,再与各个样本因子得分加权求和得到各个样本的综合评分,即 $F(\text{综合得分}) = -0.240F_1 + 0.197F_2 + 0.171F_3 + 0.0940F_4 + 0.0836F_5$ 。对于高水分挤压组织化豌豆蛋白产品来说,人们期望产品的硬度及咀嚼度小,持水持油性尽可能大^[13],因此,将公因子 f₁ 定为负权,表示该数值越小越好,其他公因子保持正权不变。再通过极差标准化法对得到的综合评分标准化。如表 6 所示。

2.4 基于综合评分的响应面分析

对综合评分拟合可得相应的回归方程:

$$R_1 = 0.88 + 0.10A - 0.1B - 0.024C - 0.13AB + 0.19AC - 0.017BC - 0.47A^2 - 0.19B^2 - 0.078C^2$$

由表 7 可知,影响组织化豌豆蛋白综合评分的因素主次顺序为 L-半胱氨酸>海藻酸钠>复合磷酸

表 6 各样本因子得分及综合评价

Table 6 Scores and comprehensive evaluation of each sample factor

序号	A	B	C	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	综合得分	标准化后综合得分
1	-1	-1	0	2.2772	1.4187	-0.5962	-0.4794	-1.5354	-0.54	0.08
2	1	-1	0	1.0176	0.0812	-0.0619	0.4138	1.7616	-0.05	0.50
3	-1	1	0	0.1574	0.2447	-1.9259	0.1968	-0.9859	-0.38	0.22
4	1	1	0	1.0953	-1.8118	0.1977	0.5062	0.3856	-0.51	0.11
5	-1	0	-1	-1.8816	-1.1086	-2.1236	0.4816	-0.6032	-0.13	0.43
6	1	0	-1	1.0307	-1.2996	0.0347	1.9833	0.2306	-0.29	0.29
7	-1	0	1	0.9000	-0.6656	-0.6733	-1.7005	-0.2382	-0.64	0.00
8	1	0	1	0.0523	-0.0158	0.2890	-0.1805	1.0666	0.11	0.63
9	0	-1	-1	-0.5996	1.1759	-1.2578	-0.8014	2.2639	0.27	0.76
10	0	1	-1	-0.2996	-1.1161	1.1423	-1.1549	0.4731	-0.02	0.52
11	0	-1	1	-1.0715	0.1593	0.3542	-0.8606	-0.1700	0.25	0.75
12	0	1	1	-0.2964	-0.6088	1.0312	-1.7017	-1.0651	-0.12	0.44
13	0	0	0	-0.5742	0.4987	0.6693	0.2836	-0.2762	0.35	0.83
14	0	0	0	-0.0520	1.8511	0.5825	0.5568	0.2916	0.55	1.00
15	0	0	0	-0.3701	0.3289	1.0593	0.4925	-0.1011	0.37	0.85
16	0	0	0	-0.5823	0.2186	0.7846	0.8419	-0.7261	0.34	0.82
17	0	0	0	-0.8033	0.6492	0.4939	1.1224	-0.7721	0.45	0.92

表 7 综合评分的显著性检验表及方差分析结果

Table 7 Significance test and analysis of variance of comprehensive score

来源	平方和	自由度	均方	F值	Prob > F	显著性
模型	1.5517	9	0.17	31.5882	<0.0001	**
A	0.0797	1	0.08	14.5955	0.0065	**
B	0.0814	1	0.08	14.9044	0.0062	**
C	0.0047	1	0.00	0.8555	0.3858	
AB	0.0679	1	0.07	12.4332	0.0096	**
AC	0.1462	1	0.15	26.7845	0.0013	**
BC	0.0011	1	0.00	0.2070	0.6629	
A ²	0.9233	1	0.92	169.1598	<0.0001	**
B ²	0.1502	1	0.15	27.5167	0.0012	**
C ²	0.0253	1	0.03	4.6359	0.0683	
回归	0.0382	7	0.01			
失拟	0.0161	3	0.0054	0.9729	0.4884	
误差	0.0221	4	0.0055			
总和	1.5899	16				

注: *: $P<0.05$, 差异显著; **: $P<0.01$, 差异极显著。

盐。模型中 A、B、AB、AC、 A^2 、 B^2 对综合评分极显著。其他不显著。对回归模型分析可知, 模型的决定系数 $R^2=0.9760$, 说明该方程的预测精度较高, 拟合效果好。响应面总模型显著, 失拟不显著。

图 1 表示为三种添加剂交互作用对综合得分的影响。由图 1(a) 可知, 当 L-半胱氨酸添加剂量一定时, 海藻酸钠添加量对综合得分的影响呈先上升后下降趋势, 从等高线图可发现两种添加剂的交互作用显著。海藻酸钠可以吸收大量的水分, 形成粘弹性胶体, 使得产品的结构更为细腻, 具有较好的凝胶作用和增稠作用^[27-28]。适量添加海藻酸钠会显著提高组织化产品的粘弹性和组织化度, 有利于纤维取向^[14], 但继续添加海藻酸钠后, 不利于组织化豌豆蛋白品质改善。当海藻酸钠添加剂量一定时, L-半胱氨酸添加量对综合得分的影响呈先上升后下降趋势。适量添加 L-半胱氨酸能够增强组织化蛋白制品的交联度, 使其结构更加紧密。由于 L-半胱氨酸中的巯基在高温及高湿环境下通过反应生成二硫键, 使得组织化产品纤维结构增强^[29-30]。另外添加 L-半胱氨酸能够显著影响产品的色泽, 这是由于 L-半胱氨酸能够参与美拉德反应, 使得产品色泽加深, 导致综合评分下降^[31]。由图 1(b) 可知, 当海藻酸钠添加量一定时, 复合磷酸盐的综合得分先上升后下降, 从等高线图可发现两种添加剂的交互作用显著。磷酸盐是亲水性很强的水分保持剂, 使得食品中的水分稳定下来, 可促进蛋白在加热状态下形成紧密的网状结构, 改善组织化产品的粘结性, 改善其质构^[32]。当继续添加复合磷

酸盐是制品的硬度咀嚼度上升, 产品的综合评分也随之下降。由图 1(c) 可知, L-半胱氨酸与复合磷酸盐添加量对综合得分的影响均呈现出抛物线趋势, 从等高线图可发现两种添加剂的交互作用不显著。

2.5 验证试验

据响应面分析结果可得到最佳的配方参数为: 海藻酸钠添加量 0.32%, L-半胱氨酸添加量 0.08%, 复合磷酸盐添加量 0.31%。在此配方条件下测定出组织化蛋白产品的指标特性, 再将 15 项评价指标带入上述因子分析评价体系中, 进行综合评价, 并对综合评分进行极差标准化可得到在优化配方参数下组织化豌豆蛋白制品的综合得分为 0.92, 响应面的预测条件与实际条件保持一致, 其预测值为 0.91。当将未添加三种添加剂的原料组织化豌豆蛋白的指标数值带入因子分析评价体系中, 结果表示综合得分为 0.19, 表明该添加剂配方有利于改善组织化豌豆蛋白制品的品质。

2.6 产品宏观结构观察

组织化豌豆蛋白、三种添加剂(海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐)、优化后产品的样品如图 2 所示。加入此三种添加剂后, 组织化豌豆蛋白产品的外观发生变化。海藻酸钠和复合磷酸盐使得产品表面整齐光滑, L-半胱氨酸加入后产品表面粗糙。通过响应面优化后的组织化豌豆蛋白制品表面平整, 色泽均一, 且图 2(f) 中可观察到形成较明显的纤维状形态。

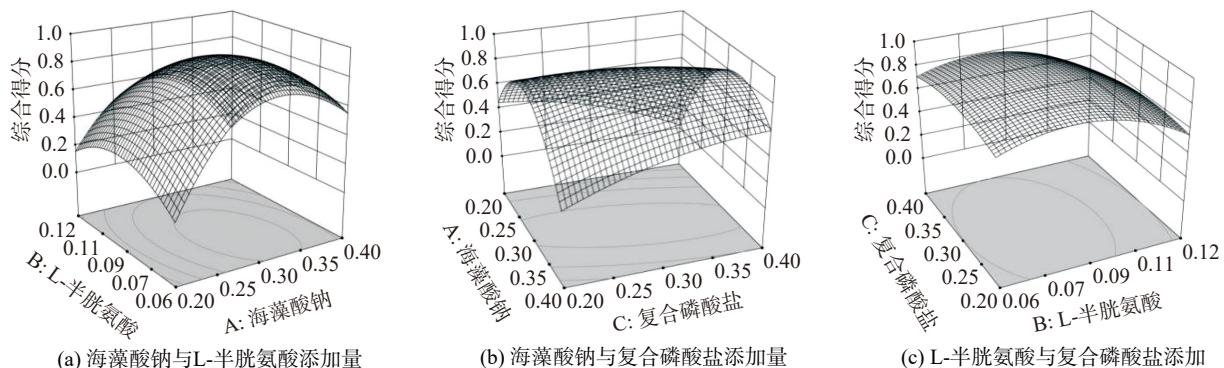


图 1 各添加剂交互作用对综合得分的影响

Fig.1 Interaction of various additives on comprehensive score

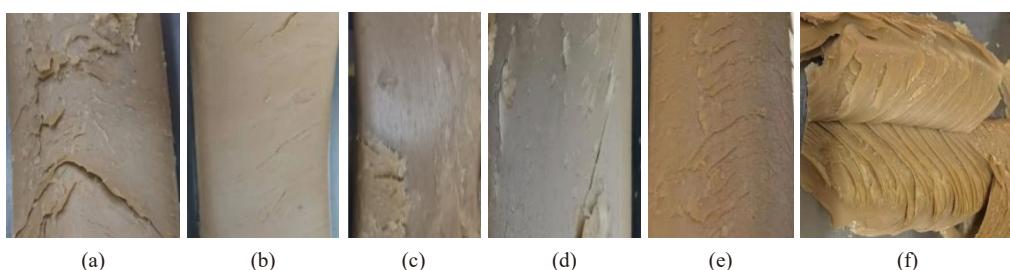


图 2 不同添加剂组织化豌豆蛋白样品

Fig.2 Samples of textured pea protein with different additives

注: (a): 组织化豌豆蛋白; (b): 0.3% 海藻酸钠; (c): 0.09% L-半胱氨酸; (d): 0.3% 复合磷酸盐; (e)、(f): 优化后产品的外观及内部图。

3 结论

以豌豆蛋白为原料,通过对高水分组织化豌豆蛋白制品的质构、组织化度、吸水吸油、氮溶解指数等指标进行综合评价及响应面分析,探究海藻酸钠、L-半胱氨酸、复合磷酸盐三种添加剂对其品质的最佳配方参数。通过因子分析将评价组织化豌豆蛋白制品的15项指标归结为5个公因子,即质构因子、色泽因子、吸附因子、溶解性因子及感官因子来尽可能多地反映出绝大部分信息。根据各样本因子得分及因子权重计算出综合得分,然后以综合得分为目标参数应用响应面法优化出最佳的配方条件为:海藻酸钠添加量0.32%,L-半胱氨酸添加量0.08%,复合磷酸盐添加量0.31%。在优化配方参数下组织化豌豆蛋白制品的综合得分为0.92。通过探索添加剂对组织化豌豆蛋白品质的研究,以期为豌豆蛋白的开发及利用,拓宽豌豆蛋白高水分挤压技术的研究内容提供一定的参考。

参考文献

- [1] GODFRAY H C J, AVEYARD P, GARNETT T, et al. Meat consumption, health, and the environment[J]. *Science*, 2018, 361(6399): eaam5324.
- [2] TIM W, NATHAN P. Global trends in meat consumption[J]. *Agricultural Commodities*, 2019, 9(1): 96–99.
- [3] 袁波, 王卫, 张佳敏, 等. 人造肉及其研究开发进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(9): 183–190. [YUAN B, WANG W, ZHANG J M, et al. Research and development of artificial meat[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(9): 183–190.]
- [4] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 299–305. [OU Y J, ZHENG M J, ZENG H L, et al. Research progress of plant protein meat[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(12): 299–305.]
- [5] 张斌, 屠康. 传统肉类替代品——人造肉的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 327–333. [ZHANG B, TU K. Research progress of traditional meat substitute—artificial meat[J]. *Food Industry Technology*, 2020, 41(9): 327–333.]
- [6] CHIANG J H, LOVEDAY S M, HARDACRE A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues[J]. *Food Structure*, 2019, 19: 100102.
- [7] AKDOGAN H. Review high moisture food extrusion[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1999, 34(3): 195–207.
- [8] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102: 51–61.
- [9] SCHREUDERS F, DEKKERS B L, BODNAR I, et al. Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 32–39.
- [10] OSEN R, TOELSTEDE S, EISNER P, et al. Effect of high moisture extrusion cooking on protein–protein interactions of pea (*Pisum sativum* L.) protein isolates[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2015, 50(6): 1390–1396.
- [11] 杨震, 曲超, 贡慧, 等. 豌豆蛋白组织化挤压工艺参数优化及其在肉制品中的应用[J]. 延边大学农学学报, 2016, 38(4): 317–324. [YANG Z, QU C, GONG H, et al. Optimization of textured extrusion process parameters of pea protein and its application in meat products[J]. *Journal of Agronomy of Yanbian University*, 2016, 38(4): 317–324.]
- [12] 王旭, 王克俭, 岑林霞, 等. 豌豆蛋白组织化挤压制备研究[J]. *广东化工*, 2017, 44(13): 5–7, 20. [WANG X, WANG K J, QIN L X, et al. Study on the preparation of pea protein by tissue extrusion[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(13): 5–7, 20.]
- [13] 康立宁. 大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. [KANG L N. Study on texturization technology and mechanism of soybean protein by high moisture extrusion[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2007.]
- [14] 杨文, 秦新生, 马叶胜, 等. 添加剂对组织化小麦蛋白结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(10): 1–7, 15. [YANG W, QIN X S, MA Y S, et al. Effect of additives on the structure of wheat protein[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2017, 32(10): 1–7, 15.]
- [15] CAMIRE M E, CAMIRE A, KRUMHAR K J C R I F S. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1990, 29(1): 35–57.
- [16] LI M, LEE T C. Effect of cysteine on the functional properties and microstructures of wheat flour extrudates[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(7): 1871–1880.
- [17] 李瑜, 尹春明, 周瑞宝. 三聚磷酸钠改性小麦面筋蛋白研究[J]. *粮食与油脂*, 2002(2): 4–5. [LI Y, YIN C M, ZHOU R B. Study on wheat gluten modified by sodium tripolyphosphate[J]. *Grain and Oil*, 2002(2): 4–5.]
- [18] ONWULATA C I, PHILLIPS J G, TUNICK M H, et al. Texturized dairy proteins[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(2): E100–E109.
- [19] LI C P, CHEN D, PENG J, et al. Improvement of functional properties of whey soy protein phosphorylated by dry-heating in the presence of pyrophosphate[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(6): 919–925.
- [20] 耿永然, 李文军, 王奕云, 等. 复合蛋白原料组成对挤压组织化产品特性的影响[J]. 天津科技大学学报, 2016, 31(1): 17–21. [GENG Y R, LI W J, WANG Y Y, et al. Effect of composition of composite protein on properties of extruded textured products[J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2016, 31(1): 17–21.]
- [21] 李婷, 朱科学, 郭晓娜. 加水量对小麦拉丝蛋白品质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(4): 18–22. [LI T, ZHU K X, GUO X N. Effect of water addition on quality of wheat silk drawing protein[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(4): 18–22.]
- [22] 蒋华彬, 刘明, 刘艳香, 等. 不同来源蛋白对谷朊粉挤压组织化产品特性的影响[J]. *粮油食品科技*, 2017, 25(3): 17–22. [JIANG H B, LIU M, LIU Y X, et al. Effect of different protein sources on properties of extruded textured gluten products[J]. *Grain, Oil and Food Science and Technology*, 2017, 25(3): 17–22.]

- [23] 高扬, 卢淑雯, 任传英, 等. 高水分组织蛋白挤压工艺参数对系统参数及其物理特性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 10–13. [GAO Y, LU S W, REN C Y, et al. Effects of high moisture protein extrusion process parameters on the influence of system parameters and its physical characteristics[J]. Food and Machinery, 2016, 32(7): 10–13.]
- [24] 王芳. 主成分分析与因子分析的异同比较及应用[J]. 统计教育, 2003(5): 14–17. [WANG F. Comparison and application of principal component analysis and factor analysis[J]. Statistical Education, 2003(5): 14–17.]
- [25] 李雪, 刘剑飞, 张玲, 等. 伏淡季水果果实内在品质综合评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(12): 24–32. [LI X, LIU J F, ZHANG L, et al. Comprehensive evaluation of inner quality of fruits in summer and low season[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(12): 24–32.]
- [26] 武松, 潘发明. SPSS 统计分析大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 339–344. [WU S, PAN F M. SPSS statistical analysis encyclopedia[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 339–344.]
- [27] YAO J, ZHOU Y, CHEN X, et al. Effect of sodium alginate with three molecular weight forms on the water holding capacity of chicken breast myosin gel[J]. Food Chemistry, 2017, 239(15): 1134–1142.
- [28] 张金阐明. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. [ZHANG J C. Conformational changes and quality control of peanut protein during high moisture extrusion[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.]
- [29] 贾存江, 王英燕, 赵丽丽. L-半胱氨酸的生产方法及应用进展[J]. 齐鲁药事, 2007, 26(9): 553–555. [JIA C J, WANG Y Y, ZHAO L L. Progress in production and application of L-cysteine[J]. Qilu Pharmacy, 2007, 26(9): 553–555.]
- [30] 李诚. 小麦蛋白双螺杆挤压组织化工艺及机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. [LI C. Study on texturization process and mechanism of wheat protein by twin screw extrusion[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2015.]
- [31] 刘艳香, 谭斌, 刘明, 等. 添加剂对高水分挤压组织化复合蛋白理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 294–302. [LIU Y X, TAN B, LIU M, et al. Effect of additives on physicochemical properties of textured composite protein by high moisture extrusion[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 294–302.]
- [32] 杨文. 添加剂对组织化小麦蛋白理化性质及结构影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. [YANG W. Effects of additives on physicochemical properties and structure of textured wheat protein[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2017.]