

豌豆组织化蛋白品质因子分析及工艺优化

张光耀¹, 彭慧慧¹, 张静¹, 王思花¹, 戚明明¹, 任志尚¹, 贺壮壮¹, 马成业^{1,2*}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255000)

(2. 山东省高校农产品功能化技术重点实验室, 山东淄博 255000)

摘要: 利用 Box-Behnken 原理对螺杆转速、机筒温度、水分三因素设计挤压组合试验。对豌豆组织化蛋白硬度、组织化度等指标进行相关分析、因子分析。结果表明: 指标可归结为 4 个主要因子, 因子 1 对硬度、吸水性、 ΔE 起支配作用, 因子 2 对粘结性、感官评价、组织化度起支配作用, 因子 3 对弹性和吸油性起支配作用, 因子 4 对可溶性氮起支配作用, 可溶性氮与其他指标相关性较低。硬度与吸水性之间呈极显著负相关关系, 与 ΔE 之间呈极显著正相关关系; 吸水性与 ΔE 、粘结性与感官评价之间呈极显著负相关关系; 弹性与持油性、粘结性与组织化度之间呈显著负相关关系。豌豆组织化蛋白评价指标及权重为硬度(25%)、组织化度(25%)、感官评价(25%)、吸水性(25%)。对硬度、组织化度、感官评价进行响应面分析, 发现挤压参数对产品品质影响明显, 经优化得出工艺参数为螺杆转速 153 r/min, 机筒温度 170 °C, 水分 56%, 为探寻改善豌豆组织蛋白品质的方法提供基础。

关键词: 组织化; 高水分挤压; 因子分析; 工艺优化

文章编号: 1673-9078(2021)12-153-161

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.12.0109

Quality Factor Analysis and Process Optimization of Textured Pea Protein

ZHANG Guangyao¹, PENG Huihui¹, ZHANG Jing¹, WANG Sihua¹, QI Mingming¹, REN Zhishang¹,
HE Zhuangzhuang¹, MA Chengye^{1,2*}

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

(2. Key Laboratory of Shandong Provincial Universities for Technologies in Functional Products, Zibo 255000, China)

Abstract: Box-Behnken experimental design was employed to investigate the effects of different combinations of screw speed, barrel temperature, and moisture content in a high-moisture textured pea protein extrusion experiment. Correlation analysis and factor analysis were performed on textured pea protein indices such as hardness and degree of texturization. The results showed that the indices could be attributed to four main factors, with factor 1 dominating hardness, water absorption, and ΔE ; factor 2 dominating cohesiveness, sensory evaluation, and degree of texturization; factor 3 dominating springiness and oil holding capacity; and factor 4 dominating soluble nitrogen content. Among the various indices, soluble nitrogen content demonstrated a poor correlation with other indices; hardness demonstrated a highly significant negative correlation with water absorption and highly significant positive correlation with ΔE ; water absorption demonstrated a highly significant negative correlation with ΔE , cohesiveness, and sensory evaluation; and springiness demonstrated a significantly negative correlation with oil holding capacity, cohesiveness, and degree of texturization. The indices for textured pea protein evaluation and the corresponding weights were hardness (25%), degree of texturization (25%), sensory evaluation (25%), and water absorption (25%). Response surface analysis of hardness, degree of texturization, and sensory evaluation revealed that the extrusion parameters exerted a strong impact on product quality. The optimized process parameter values were as follows: screw speed: 153 r/min, barrel temperature: 170 °C, moisture content: 56%. Our results may serve as a basis for further exploration of methods to improve the quality of textured pea protein.

Key words: texture; high-moisture extrusion; factor analysis; process optimization

引文格式:

张光耀, 彭慧慧, 张静, 等. 豌豆组织化蛋白品质因子分析及工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 153-161

ZHANG Guangyao, PENG Huihui, ZHANG Jing, et al. Quality factor analysis and process optimization of textured pea protein [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 153-161

收稿日期: 2021-01-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31471676); 招远工业技术研究院创新基金项目(31471676)

作者简介: 张光耀(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品高值化加工技术与装备, E-mail: 876630918@qq.com

通讯作者: 马成业(1978-), 男, 副教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: mcycn2002@163.com

随着全球人口增长,世界范围内对肉类需求增加,而盲目增加畜牧业会占用大量耕地和造成环境污染,且长期食用动物肉有诱发营养相关疾病和食源性疾病的风险^[1]。植物蛋白组织化产品作为肉类替代品,一定程度上满足人类对蛋白质的需要。豌豆蛋白作为一种优质蛋白,氨基酸组成较平衡,在人体内含有的8种必需氨基酸中,除蛋氨酸外其他氨基酸均达到FAO/WHO推荐值^[2]。豌豆蛋白是生产豌豆淀粉的副产物,绝大部分用来加工饲料,造成很大的资源浪费^[3]。因此,对豌豆蛋白进行挤压改性用于食品加工,开发利用潜力还很大^[4]。

高水分挤压组织化技术具有高效低成本等特点,在食品加工中应用广泛^[5]。植物蛋白高水分挤压组织化产品也被越来越多的人接受^[6-8]。我国豌豆资源丰富,作为无麸质食品中一员,豌豆蛋白不会像大豆一样会造成过敏,也无转基因风险,营养价值高^[9-11],有降低人体胆固醇水平和血压、平衡血糖等功效^[12-13]。近几年来,随着国内外对豌豆蛋白研究不断加深,其作为大豆或动物蛋白的替代品已得到广泛的功能性应用^[14]。Alonso等^[15]发现挤压蒸煮导致豌豆蛋白结构变化,形成具有较高持水性、较低持油性和溶解度的三维网状结构。Osen等^[16]将豌豆蛋白通过挤压形成类似肌肉质地的纤维状产品,发现其制品可以作为肉类的良好替代品。王旭等^[17]、杨震等^[18]研究了豌豆蛋白挤压组织化工艺,并探究了其在肉制品中的应用。对于豌豆蛋白高水分挤压组织化产品的评价,还需要建立一套更为科学的体系,对于评价指标和评价方法,还需要进一步筛选和统一^[19-20]。

本研究基于前人研究植物蛋白组织化技术上,对豌豆组织化蛋白进行研究分析。对螺杆转速、机筒温度、水分根据Box-Behnken中心设计原理制定三因素三水平组合试验,对所得豌豆蛋白组织化产品进行指标测定。进行相关分析,探究指标间相互关系,寻找更好反映产品品质的因子和指标^[21-22]。本研究可拓宽植物蛋白挤压组织化技术研究范围,丰富豌豆蛋白组织化技术研究内容,为完善豌豆蛋白组织化产品评价体系、豌豆蛋白组织化产品质量评测提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 原料

豌豆蛋白粉,购于山东健源生物科技有限公司,基本化学成分为蛋白质75.49%、淀粉7.31%、脂肪0.87%、粗脂肪7.92%、水分4.67%、灰分3.74%。

1.2 试验设备

工程食品双螺杆挤压平台,UVTE36-24型,长沙创享食品科技有限公司;质构仪,FTA-3000M型,美国Brookfield公司;色差计,CM-3600A,日本柯尼卡美能达控股公司;凯氏定氮仪,ATN-300,上海洪记仪器设备有限公司。

本试验中所用工程食品双螺杆挤压平台,由动力系统、挤压单元、温控系统、成型单元及其他辅助单元构成。采用模头为15×45 mm(模孔)的圆形模头,模头连接成型模具:长1000 mm,出料口截面尺寸长170 mm,宽15 mm。

1.3 Box-Behnken 试验设计

根据Box-Behnken中心设计原理对螺杆转速、机筒温度、水分设计三因素三水平组合试验,进行工艺优化。试验设计及结果如表1所示。

其中机筒温度设置,套筒共有五个温区,这里改变主温区,即III区。I区40℃;II区120℃;IV区145℃;V区140℃在挤压过程中保持不变。喂料速度为10 kg/h。原料从固体喂料器以额定速率出料,经进料口进入挤压机输送模块,向前输送过程中,水由液体喂料器泵入挤压机,混合物料在挤压机啮合模块经熔融、剪切、挤压,后经模头进入挤压成型模块,从出料口成型,定时称取产品,保温箱保存,备测。

1.4 评价方法

1.4.1 产品品质指标测定

组织化度:取边长1 cm的正方体样品供测量,相邻两个样品分别测量平行挤出方向和垂直挤出的剪切功。每个样品测定6组。用剪切力大小来表征剪切强度的大小,用横切所做的功与纵切所做的功的比值定量表征组织化程度,即组织化度^[10]。质构仪操作参数:探头BSW,测试前速度1.0 mm/s,测试速度1.0 mm/s,测试后速度2.0 mm/s,剪切程度75%。

$$\text{组织化度} = \frac{\text{横切所做的功(垂直挤出方向)}}{\text{纵切所做的功(平行挤出方向)}}$$

硬度、弹性、粘结性:垂直于挤出平面取直径1 cm的圆柱形样品用质构仪测定。质构仪操作参数:TPA模式,探头P/36R,测试前速度2.0 mm/s,测试速度1.0 mm/s,测试后速度2.0 mm/s,下压程度50%,间隔时间5 s,往复运动两次。

吸水性:将样品切碎成块,60℃条件下在烘箱烘干4 h,用超微粉碎机粉碎,过80目筛。取干燥样品10 g(称重后计为 W_1),60℃复水2 h,取出后置于阴

凉处 5 min 后称重 (重量计为 W_2) 按下述公式计算:

$$\text{吸水率} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\%$$

持油性: 称取与吸水性测定相同的干燥样品 5 g, 放入 100 mL 离心管中并往其中加入 30 mL 植物油, 使用玻璃棒搅拌均匀, 样品静置 3 min 后, 在离心机中以 3500 ×g 的转速离心 15 min。移去离心液中上清液, 使用滤纸将管壁内残油吸干, 然后将离心管与沉淀同时称重, 持油性 (OHC) 按照以下公式进行计算, 每种样品 3 组平行试验求平均值:

$$\text{OHC} = \frac{M_2 - M_1}{M} \times 100\%$$

式中:

M_2 ——离心管与离心后沉淀;

M_1 ——离心管与样品重;

M ——样品重。

可溶性氮含量: 将样品在 60 °C 条件下烘干 4 h, 取 5 g 干燥样品置于 100 mL 蒸馏水中, 在 30 °C 下磁力搅拌器以 120 r/min 搅拌 1~2 h, 过滤定容至 100 mL, 吸取 0.5 mL 样品溶液, 0.5 mL 蒸馏水放入 10 mL 具塞试管中, 用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定氮含量, 氮含量计为 $A^{[23]}$ 。总氮含量采用凯氏定氮法 (GB 5009.5-2016) 进行测定计为 B 。

可溶性氮含量 = $A/B \times 100\%$

色差: 用色差计测定, 测定参数为 L^* 、 a^* 、 b^* 。每

样品重复测量五次取平均值, 按下述公式计算色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_s^*)^2 + (a^* - a_s^*)^2 + (b^* - b_s^*)^2}$$

式中:

L_s^* 、 a_s^* 、 b_s^* ——标准白色板的测定值, 取值分别为 98.69、-0.08、-0.40;

ΔE ——样品与白色板的色差, 值越小表示颜色越接近白色板。

1.4.2 感官评价

豌豆组织化蛋白感官评价从颜色、组织化、质构性、味道四个方面进行^[18], 总分 100 分, 每项占 25 分。颜色: 色泽呈褐色且发黑 0~10 分, 微黄且色泽不均 10~18 分, 黄色且色泽均匀 18~25 分。组织化: 存在粉状、部分结为小块 0~10 分, 过度蓬松且没有粉状以及块状 10~18 分, 略微蓬松且没有粉状以及块状 18~25 分。质构性: 较脆并且受力成渣 0~10 分, 弹性较好且受力呈现部分纤维状 10~18 分, 弹性较好且受力呈现纤维状 18~25 分。味道: 腥味严重 0~10 分, 存在轻微腥味 10~18 分, 无腥味 18~25 分。

1.4.3 数据处理

用 SAS 9.3 进行统计量分析、相关性分析、因子分析, 用 Design-Expert 8.0.6 进行响应面分析。

2 结果与分析

2.1 正交实验结果

表 1 Box-Behnken 试验设计和结果

Table 1 Box-Behnken experiments design and result

x_1 [螺杆转速/(r/min)]	x_2 (机筒温度/°C)	x_3 (水分/%)	硬度/g	弹性	粘结性	吸水性/%	持油性/%	可溶性氮/%	感官评价	组织化度	ΔE
1(170)	0(170)	1(60)	9747.11	0.85	0.70	179.42	36.53	2.54	62.00	1.27	58.07
0(150)	-1(160)	1	9231.54	0.84	0.65	161.20	42.78	2.92	68.00	1.15	53.72
-1(130)	1(180)	0(55)	15190.55	0.87	0.67	134.43	37.49	3.95	63.00	1.17	61.47
-1	0	1	10839.34	0.84	0.63	167.85	39.98	3.18	65.00	1.16	59.09
0	1	-1(50)	17262.90	0.84	0.71	147.84	40.86	3.79	52.00	1.02	60.37
0	0	0	13289.57	0.83	0.59	155.02	38.33	3.36	74.00	1.72	61.37
1	1	0	16531.36	0.87	0.67	125.69	34.61	3.63	70.00	1.22	62.61
1	-1	0	16900.91	0.86	0.63	153.04	43.44	2.85	66.00	1.33	61.01
0	0	0	14708.27	0.85	0.62	136.60	45.29	3.20	78.00	1.49	61.41
0	1	1	13094.08	0.86	0.66	182.26	37.97	3.32	69.00	1.13	53.89
0	0	0	14825.01	0.84	0.71	158.48	45.96	3.25	74.00	1.65	62.28
0	0	0	14900.91	0.86	0.63	147.29	40.11	3.26	79.00	1.55	62.36
0	0	0	14100.94	0.84	0.63	146.62	43.25	3.23	80.00	1.60	62.56
-1	0	-1	17385.11	0.84	0.71	149.46	46.64	3.57	54.00	1.02	57.27
0	-1	-1	18354.14	0.85	0.69	139.63	41.96	2.98	53.00	1.39	67.98
1	0	-1	16650.25	0.84	0.70	134.44	42.85	3.81	60.00	1.15	66.61
-1	-1	0	15757.98	0.84	0.62	132.62	45.66	2.96	65.00	1.34	62.41

2.2 描述统计量

表2 样品表述统计量

Table 2 Descriptive statistics of the quality properties

变量	均值	标准差	中位数	变异系数
硬度/g	14633.53	2677.92	14900.91	18.30
弹性	0.85	0.01	0.84	1.44
粘结性	0.66	0.04	0.66	5.81
吸水性/%	150.11	16.10	147.84	10.72
持油性/%	41.39	3.57	41.96	8.62
可溶性氮/%	3.28	0.38	3.25	11.50
感官评价	66.59	8.78	66.00	13.18
组织化度	1.32	0.22	1.27	16.66
ΔE	60.85	3.72	61.41	6.11

不同挤压样品的硬度、弹性、粘结性、吸水性、吸油性等9项指标平均值、标准差、中位数和变异系数如表2所示。变异系数消除了量纲影响和测量尺度,反映了指标离散程度。由表2可知,变异系数按从大至小顺序排列,依次为硬度、组织化度、感官评价、可溶性氮、吸水性、持油性、 ΔE 、粘结性、弹性。

2.3 相关性分析

豌豆组织化蛋白各指标相关性分析结果如表3所示。硬度与吸水性之间呈极显著负相关关系,与 ΔE 之间呈极显著正相关关系,说明硬度小的挤压产品具有更好的网状结构,具有更好的保水性。吸水性与 ΔE 之间呈极显著负相关关系。这说明较高保水性的网状需要与更多的水分反应形成,颜色也偏浅,这与Alonso等^[15]的研究结果一致。硬度较小时,水分含量较高,吸水性好。同时水分的高低影响 ΔE ,水分升高, ΔE

变小,水分降低, ΔE 变大。弹性与持油性之间呈显著负相关关系。粘结性与感官评价呈极显著负相关关系,与组织化度之间呈显著负相关关系。这说明粘结性大时,产品组织化度变小,感官评价低。组织化度高低,对产品口感影响较大,组织化度越大口感越好,因此感官评价与组织化度之间呈极显著正相关关系。

2.4 主因子分析

对实验结果进行主因子分析,得出相关系数矩阵特征值及累计方差贡献率。前4个主因子累计方差贡献率达83.51%,说明前4个因子的信息特征量占总体信息的83.51%,可反映9个指标数据的大部分信息。因此,前4个因子被保留,得出因子载荷阵,将其进行方差最大正交旋转,使因子载荷阵结构更加清晰,结果如表4所示。

由表4可知原始指标与新构造综合因子的相关程度。各指标在不同因子中载荷值的最大值将该指标归属于不同因子,同一因子中各指标间存在紧密联系^[24]。因子1中,硬度、吸水性、 ΔE 载荷值较大,说明因子1对这3个因素起支配作用,主要反映产品的质地和色泽。因子2中,粘结性、感官评价、组织化度载荷值较大,说明因子2对此三个因素起支配作用,主要反映产品感官品质。因子3中,弹性和吸油性载荷值较大,说明因子3对此两个因素起支配作用,主要反映产品弹性和吸附能力。因子4中只有可溶性氮载荷值较大,说明可溶性氮指标相对独立,与其他指标其他指标相关性较低。

综合考虑指标间相互关系、该指标变异系数大小和各指标在其公共因子中载荷值大小,豌豆组织化蛋白的评价指标权重可暂定为硬度(25%)、组织化度(25%)、感官评价(25%)、吸水性(25%)。

表3 豌豆蛋白组织化指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of pea textured protein indexes

项目	硬度/g	弹性	粘结性	吸水性/%	持油性/%	可溶性氮/%	感官评价	组织化度	ΔE
硬度/g	1.00	0.13	0.30	-0.68**	0.28	0.47	-0.35	-0.04	0.64**
弹性		1.00	0.05	-0.10	-0.49*	0.09	0.10	-0.21	-0.01
粘结性			1.00	0.05	0.06	0.29	-0.68**	-0.51*	0.07
吸水性/%				1.00	-0.18	-0.47	0.04	-0.08	-0.69**
持油性/%					1.00	-0.14	-0.02	0.14	0.12
可溶性氮/%						1.00	-0.18	-0.30	0.20
感官评价							1.00	0.72**	-0.06
组织化度								1.00	0.39
ΔE									1.00

注: **代表 $\alpha=0.01$, *代表 $\alpha=0.05$ 。

表4 特征值与方差最大正交旋转后的因子载荷阵

Table 4 The eigen value and the factor loading matrix after revolving counterchange

项目	因子1	因子2	因子3	因子4
硬度	0.84	-0.29	-0.06	0.22
弹性	0.14	-0.05	0.90	-0.02
粘结性	0.12	-0.86	-0.01	0.01
吸水性	-0.81	-0.09	0.03	-0.41
持油性	0.23	-0.04	-0.82	-0.13
可溶性氮	0.27	-0.18	0.09	0.90+
感官评价	-0.09	0.92	0.08	-0.04
组织化度	0.29	0.79	-0.18	-0.35
ΔE	0.92	0.08	-0.02	-0.08
特征值	2.87	2.32	1.55	0.78
方差贡献	31.86	25.80	17.22	8.63
累计贡献	31.86	57.66	74.88	83.51

注: 因子5~9的方差贡献率分别为6.84、5.44、2.67、1.16、

0.38, 合计为16.49。

2.5 响应面法优化制备工艺

根据分析结果, 现将硬度、组织化度、感官评价作为主要指标, 进行响应面分析。

以螺杆转速 (x_1)、机筒温度 (x_2)、水分 (x_3) 为自变量, 以硬度 (R_1)、组织化度 (R_2)、感官评价 (R_3)、吸水性 (R_4) 分别为响应值, 通过软件 Design-Expert 进行数据分析, 建立模型如下:

$$R_1=14364.94+82.08x_1+229.29x_2-3342.54x_3+49.47x_1x_2-89.34x_1x_3+1238.44x_2x_3+450.02x_1^2+1280.24x_2^2-1159.51x_3^2$$

$$R_2=1.60+0.035x_1-0.084x_2+0.016x_3+0.015x_1x_2-0.005x_1x_3+0.087x_2x_3-0.18x_1^2-0.16x_2^2-0.27x_3^2$$

$$R_3=77.00+1.37x_1+0.25x_2+5.63x_3+1.50x_1x_2-2.25x_1x_3+0.50x_2x_3-5.63x_1^2-5.38x_2^2-11.12x_3^2$$

$$R_4=148.80+1.03x_1+0.47x_2+14.92x_3-7.29x_1x_2+6.65x_1x_3+3.21x_2x_3-6.15x_1^2-6.21x_2^2+15.14x_3^2$$

方差分析见表5。

表5 方差分析表

Table 5 Variance analysis

来源	硬度			组织化度			感官评价			吸水性		
	F 值	Prob>F	显著性	F 值	Prob>F	显著性	F 值	Prob>F	显著性	F 值	Prob>F	显著性
模型	14.38	<0.01	*	9.71	<0.01	*	11.09	<0.01	*	3.83	0.04	*
A(螺杆转速)	0.06	0.81		1.20	0.31		1.31	0.29		0.09	0.78	
B(机筒温度)	0.50	0.50		6.89	0.03	*	0.04	0.84		0.02	0.89	
C(水分)	106.26	<0.01	*	0.26	0.63		21.94	<0.01	*	17.83	<0.01	*
AB	0.01	0.92		0.11	0.75		0.78	0.41		2.13	0.18	
AC	0.04	0.85		0.01	0.91		1.76	0.23		1.77	0.22	
BC	7.29	0.03	*	3.76	0.10		0.09	0.78		0.41	0.54	
A2	1.01	0.35		16.71	<0.01	*	11.55	0.01	*	1.59	0.24	
B2	8.20	0.02	*	12.79	<0.01	*	10.55	0.01	*	1.62	0.24	
C2	6.73	0.036	*	38.32	<0.01	*	45.17	<0.01	*	9.66	0.02	*
失拟	2.93	0.16		1.08	0.45		2.03	0.25		1.90	0.27	

注: “Prob>F”<0.05 为显著, 用*表示。

2.5.1 硬度响应面分析

由表5可知, 自变量与因变量之间回归模型显著 ($p<0.05$), 失拟项不显著 ($p>0.05$)。方差分析显示, 模型拟合度 R^2 值为0.9847, 校正拟合度 Adj R^2 值为0.8827, 回归模型可信。响应面分析表明 (图1a~c), 当机筒温度一定时, 产品硬度受螺杆转速的总体影响不大, 呈现先减小后增大的小范围变化。较低螺杆转速下, 物料在挤压机中滞留时间长, 受热增加, 产品硬度变大。而螺杆升高至适当转速时, 挤压模块与成型模块压力、出料速度吻合, 挤压机状态稳定, 压力变小, 产品硬度变小。而在较高的螺杆转速下, 物料

在模头处停留时间加长, 受到压力增大, 硬度增大。当螺杆转速固定, 随着机筒温度上升, 产品硬度先减小后增大。较低的温度下, 物料和水在挤压机中的熔融反应不充分, 挤压出的产品有板结成块的趋势, 组织化程度低, 硬度大。随着温度升高, 水和物料的熔融反应逐渐充分, 升温给予水足够能量且不至其过量蒸发, 更多水分会被固定在产品中, 产品硬度降低。当温度再升高时, 水分蒸发作用明显, 产品颜色变深, 有焦糊的趋势, 硬度变大。水分是影响硬度最大的因素, 水分升高硬度降低, 为负效应, 但水分过高, 产品呈散碎状而很难成型。较大水分和较高机筒温度可

降低产品硬度，这与康立宁等人对大豆蛋白研究结果一致^[25]。螺杆转速和机筒温度对硬度的影响相对较小，与挤压原料不同存在一定关系。根据实验结果，硬度取最小值 9231.54 g 的与最大值 18354.1 g 的中间值 13792.8 g 为目标值，进行工艺优化。

由表 5 中 F 值大小可知，操作参数的影响大小为：C>B>A，即水分>机筒温度>螺杆转速。在目标值下得到的最佳工艺参数为螺杆转速 148.32 r/min，机筒温度 169.73 °C，水分 55.79%。

2.5.2 组织化度响应面分析

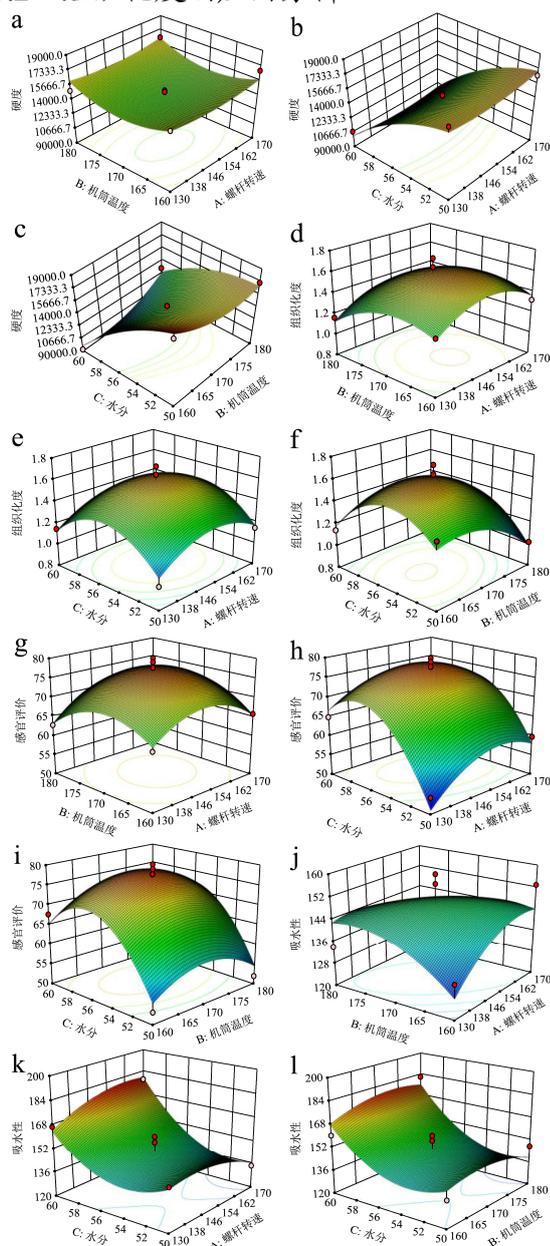


图 1 挤压参数交互作用结果图

Fig.1 Result graph of extrusion parameter interaction

注：螺杆转速和机筒温度交互作用 (a、d、g、j)；螺杆转速和水分交互作用 (b、e、h、k)；机筒温度和水分交互作用 (c、f、i、l)。

由表 5 可知，自变量与因变量之间回归模型显著 ($p<0.05$)，失拟项不显著 ($p>0.05$)。方差分析显示，模型拟合度 R^2 值为 0.9258，校正拟合度 R^2_{Adj} 值为 0.8305，回归模型可信。响应面分析表明 (图 1d~f)，当其中一个操作参数固定时，组织化度会随着另外一个参数的升高先升高再降低。较低的水分会使得原料无法充分熔融，产品组织化程度低，水分过高会使产品呈散碎状。较低的螺杆转速使原料在挤压机中停留时间过长，产品成型过程中挤压过程变长，导致平行挤出方向与垂直挤出方向的纤维差别不明显，组织化度变小，而较大的螺杆转速，原料滞留时间短，在啮合模块成型不够，同时受模头压力影响，物料在模具前端形成不规则的弯曲条纹，组织化度变小。当机筒温度较低时，蛋白质不能充分熔融变性，导致组织化度较低，而温度过高，水分蒸发快，易形成气泡，产品成型变差，组织化度降低，颜色变深，温度偏高或偏低都导致产品组织化度降低，这与孙志欣等人的研究结果是一致的^[26]。

由表 5 中 F 值大小可知，操作参数的影响大小为：B>A>C，即机筒温度>螺杆转速>水分。以组织化度最大值为响应值，预测值为 1.75，通过响应面分析，得到最佳参数为螺杆转速 151.71 r/min，机筒温度 167.34 °C，水分 54.93%。

2.5.3 感官评价响应面分析

由表 5 可知，自变量与因变量之间回归模型显著 ($p<0.05$)，失拟项不显著 ($p>0.05$)。方差分析显示，模型拟合度 R^2 值为 0.9345，校正拟合度 $Adj R^2$ 值为 0.8502，回归模型可信。响应面分析表明 (图 1g-i)，当机筒温度、水分分别固定时，感官评价随着温度的上升先增大后减小，较低温度下，产品成型韧性差无光泽，组织化不明显。当温度过高时，产品容易变硬发黑，口感差，此两种情况感官评价低。温度适当时，产品色泽好，纤维状明显，产品感官评价高。当水分、温度分别固定时，感官评价随螺杆转速的变大先增大后减小，与郎珊珊等^[27]的研究结果一致。较高和较低的转速都不能使物料充分熔融反应，较低转速下物料受热过多压力小，较高转速下物料压力大而受热少，物料成型差，硬度大口感差，感官评价低。当螺杆转速、机筒温度固定时，感官评价随水分增大先升高后降低，变化明显。水分较低时，挤出产品表面粗糙不均匀，硬度大，色泽黯淡，咀嚼感差，感官评价低。水分增大，挤出产品品质改善，色泽变浅，表面光滑，纤维状明显，感官评价高。当水分较大时，挤出产品散碎，感官评价低。总体来说，水分是影响感官评价的主要因素，这与 Lin 等^[28]的研究结果是一致的。

由表 5 中 F 值大小可知,操作参数的影响大小为: C>A>B, 即水分>螺杆转速>机筒温度。以感官评价最大值为响应值,预测值为 80 分,通过响应面分析,得到最佳参数为螺杆转速 151.59 r/min, 机筒温度 170.45 °C, 水分 56.23%。

2.5.4 吸水性响应面分析

由表 5 可知,自变量与因变量之间回归模型显著 ($p<0.05$),失拟项不显著 ($p>0.05$)。方差分析显示,模型拟合度 R^2 值为 0.8313,回归模型可信。响应面分析表明(图 1j-1),当温度处于低水平时,吸水性与螺杆转速呈现正效应。温度处于高水平时,吸水性与螺杆转速呈现负效应。由于在温度和螺杆转速都处于低水平情况下,产品的变性不充分,随着螺杆转速上升,物料受到的剪切力增大,压力也增大,蛋白质变性程度增加,因此吸水性与螺杆转速之间呈现正效应。当机筒温度处于高水平时,水受热运动加快,压力升高,而低螺杆转速可减缓物料流动速度,产品成型好,吸水性高。这与杨勇等^[29]的研究结果不一致,杨勇等^[29]认为当机筒温度固定时,挤压产品吸水性随螺杆转速增大呈现先增大后减小的趋势。当螺杆转速处于低水平时,产品吸水性与机筒温度之间呈正效应。当螺杆转速处于高水平时,产品吸水性与机筒温度之间呈负效应。当水分固定时,产品吸水性随着螺杆转速呈现先升高后降低的趋势,但总体变化幅度不大。而当螺杆转速固定时,产品吸水性随着水分的增加呈上升趋势。由二次回归方程可知,水分因素对吸水性的影响显著。

由表 5 中 F 值大小可知,操作参数的影响大小为: C>A>B, 即水分>螺杆转速>机筒温度。结合产品实际以及参考植物蛋白组织化产品的特点,以中间值 153.9%作为目标值,通过响应面分析,得到最佳参数为螺杆转速 168.82 r/min, 机筒温度 167.20 °C, 水分 56.64%。

以硬度 13792.8 g、组织化度和感官评价的最大值、吸水性 153.9%作为目标值,综合响应面分析结果和操作实际,经优化后的工艺参数为螺杆转速 153 r/min, 机筒温度 170 °C, 水分 56%。在此工艺条件下进行三组平行试验,所得产品指标硬度为 13814.24 g, 组织化度 1.74, 感官评价 79, 吸水性 151.21%, 工艺参数得到了优化。这与王旭等^[18]、杨震等^[19]的研究结果有差异,可能与成型模块结构不同以及原料的差异有关。

3 结论

国内外对豌豆组织化蛋白的评价主要集中在质

构、色泽和感官评价等指标上,不同工艺的组织化蛋白指标分析中,硬度、组织化度、感官评价变异系数达 40%以上,在反映产品质量时较为重要。通过对产品硬度、组织化度等指标进行相关分析、因子分析。结果表明:硬度、组织化度、感官评价、可溶性氮、吸水性、持油性的变异系数较大。 ΔE 虽然变异系数不大,但在相关分析中,其与硬度和吸水性分别呈极显著正、负相关关系,说明 ΔE 为综合指标,可大体反映产品品质。与 9 项指标可以归结为 4 个主要因子,因子 1 对硬度、吸水性、 ΔE 起支配作用,因子 2 对粘结性、感官评价、组织化度起支配作用,因子 3 对弹性和吸油性起支配作用,因子 4 只对可溶性氮起支配作用,可溶性氮与其他指标联系较少。豌豆组织化蛋白评价指标及权重为硬度(25%)、组织化度(25%)、感官评价(25%)、吸水性(25%)。对硬度、组织化度、感官评价、吸水性进行响应面分析,经优化后的工艺参数为螺杆转速 153 r/min, 机筒温度 170 °C, 水分 56%。本研究为豌豆组织化蛋白的评价提供了参考,优化生产工艺,为豌豆蛋白组织化技术的进一步研究奠定基础。但因为挤压机内部为“黑箱”,物料在其中的化学变化难以描述和测定,还有待继续研究。另外,如何开发更为优质的豌豆蛋白组织化产品,仍有着巨大的研究空间和市场价值。

参考文献

- [1] Bhat Z F, Kumar S, Fayaz H. *In vitro* meat production: challenges and benefits over conventional meat production [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 241-248
- [2] 郭兴凤,莫重文.豌豆蛋白粉的制取研究[J].*郑州粮食学院学报*,1995,3:70-73
GUO Xingfeng, MO Zhongwen. Study on the extract of pea protein powder [J]. *Journal of Zhengzhou Grain College*, 1995, 3: 70-73
- [3] 师伟伟.豌豆粉丝副产物中蛋白质的提取及性能改善[D].无锡:江南大学,2014
SHI Weiwei. The extraction and property improvement of protein from pea starch noodles' by-product [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014
- [4] 马宁,魏姜勉.豌豆蛋白的改性及其开发利用研究进展[J].*中国市场*,2015,(32):231-233
MA Ning, WEI Jiangmian. Research progress on the modification and utilization of pea protein [J]. *China Market*, 2015, (32): 231-233.
- [5] 朱嵩,刘丽,张金闯,等.高水分挤压组织化植物蛋白品质调控及评价研究进展[J].*食品科学*,2018,39(19):287-293

- ZHU Song, LIU Li, ZHANG Jinchuang, et al. Advances in quality control and evaluation of high moisture textured vegetable protein [J]. Food Science, 2018, 39(19): 287-293
- [6] Mullee Amy, Vermeire Leen, Vanaelst Barbara, et al. Vegetarianism and meat consumption: a comparison of attitudes and beliefs between vegetarian, semi-vegetarian, and omnivorous subjects in Belgium [J]. Appetite London, 2017, 114: 299-305
- [7] 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 Yujia, ZHENG Mingjing, ZENG Hongliang, et al. Advance in plant-based meat research [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 299-305
- [8] 高育哲,肖志刚,吴清华,等.大豆组织蛋白素肉产业现状及未来趋势[J].农产品加工,2020,9:78-79
- GAO Yuzhe, XIAO Zhigang, WU Qinghua, et al. Industry status and development tendency of meat analogue-textured soy protein [J]. Farm Products Processing, 2020, 9: 78-79
- [9] Z X Lu, J F He, Y C Zhang, et al. Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(15): 2593-2605
- [10] Miroljub Barac, Slavica Cabrilo, Mirjana Pesic, et al. Profile and functional properties of seed proteins from six pea (*Pisum sativum*) genotypes [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2010, 11(12): 4973-4990
- [11] Kaur Maninder, Kawaljit Singh Sandhu, Narpinder Singh. Comparative study of the functional, thermal and pasting properties of flours from different field pea (*Pisum sativum* L.) and pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) cultivars [J]. Food Chemistry, 2006, 104(1): 259-267
- [12] 葛姣,孙翠霞,Gul Khalid,等.豌豆蛋白在健康功效、功能特性、结构改性及应用方面的研究进展[A].中国食品科学技术学会.中国食品科学技术学会第十六届年会暨第十届中国食品业高层论坛论文摘要集[C].中国食品科学技术学会,2019:188-189
- GE Jiao, SUN Cuixia, Gul Khalid, et al. Research progress on the health benefits, functional properties and utilization of pea protein [A]. Abstracts of Papers of the 16th Annual Meeting of the Chinese Society for Food Science and Technology and the 10th China-US Food Industry High-level Forum [C]. Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019: 188-189
- [13] M F McCarty. Vegan proteins may reduce risk of cancer, obesity, and cardiovascular disease by promoting increased glucagon activity [J]. Medical Hypotheses, 1999, 53(6): 459-485
- [14] Wang T L, Domoney C, Hedley C L, et al. Can we improve the nutritional quality of legume seeds? [J]. Plant Physiology, 2003, 131(3): 886-891
- [15] R Alonso, E Orúe, M J Zabalza, et al. Effect of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean proteins [J]. Optics Communications, 2000, 80(3): 397-403
- [16] Raffael Osen, Simone Toelstede, Florian Wild, et al. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: raw material characteristics, extruder responses, and texture properties [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 127: 67-74
- [17] 王旭,王克俭,岂林霞,等.豌豆蛋白组织化挤出制备研究[J].广东化工,2017,44(13):5-7,20
- WANG Xu, WANG Kejian, QI Linxia, et al. Organization of pea protein by extrusion preparation [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(13): 5-7, 20
- [18] 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].延边大学学报,2016,38(4): 317-324
- YANG Zhen, QU Chao, GONG Hui, et al. Process optimization of pea protein organized extrusion parameters and application in meat products [J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2016, 38(4): 317-324
- [19] Raffael Osen, Simone Toelstede, Peter Eisner, 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 & Technology, 2015, 50(6): 1390-1396
- [20] 刘梦然,毛衍伟,罗欣,等.植物蛋白素肉原料与工艺的研究进展[J].食品与发酵工业,2021,4:293-298
- LIU Mengran, MAO Yanwei, LUO Xin, et al. Reaearch progress on materials and technologies of plant-based meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 4: 293-298
- [21] 帅益武,张波,魏益民.大豆组织化蛋白产品质量因子分析[J].食品研究与开发,2007,8:5-8
- SHUAI Yiwu, ZHANG Bo, WEI Yimin. The factor analysis of quality properties of texturized soy protein [J]. Food Research and Development, 2007, 8: 5-8
- [22] 康立宁,田志刚,刘香英,等.大豆组织蛋白产品品质的因子分析和综合评价研究[J].吉林农业科学,2012,37(2):45-48
- KANG Lining, TIAN Zhigang, LIU Xiangying, et al. Comprehensive evaluation of textured soybean protein quality based factor analysis [J]. Journal of Jilin Agricultural

- Sciences, 2012, 37(2): 45-48
- [23] 焦洁,考马斯亮蓝 G-250 染色法测定苜蓿中可溶性蛋白含量[J].农业工程技术,2016,36(17):33-34
JIAO Jie. Determination of soluble protein content in alfalfa by Coomassie bright blue G-250 staining [J]. Agricultural engineering technology, 2016, 36(17): 33-34
- [24] 于源,张敏.大豆组织蛋白产品特性指标的因子分析[J].食品科学,2008,4:135-137
YU Yuan, ZHANG Min. Analysis of product characteristic index in soy textured protein [J]. Food Science, 2008, 4: 135-137
- [25] 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 Lining. Texturization technology and mechanism of soy protein by high moisture extrusion [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007
- [26] 孙志欣.高湿挤压技术生产组织化大豆蛋白工艺研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2009
SUN Zhixin. Study on textured soy protein produced by high moisture extrusion technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009
- [27] 郎珊珊,阎树田,石戴卫.高温脱脂花生粕双螺杆挤压组织化的工艺研究[J].中国粮油学报,2011,26(5):83-86
LANG Shanshan, YAN Shutian, SHI Daiwei. Technical study on twin-screw extrusion texturization of high-temperature defatted peanut meal [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(5): 83-86
- [28] S Lin, H E Huff, F Hsieh. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog [J]. Journal of Food Science, 2010, 67(3): 1066-1072
- [29] 杨勇,王中江,陈惠惠,等.大豆蛋白-淀粉基素肉制品高湿挤压工艺优化[J].中国食品学报,2019,19(12):133-144
YANG Yong, WANG Zhongjiang, CHEN Huihui, et al. Optimization of high-moisture extrusion process in producing vegetarian meat products [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 133-144

(上接第 152 页)

- [24] 汤春辉,黄明,樊金山,等.调理鸭胸肉制品滚揉腌制工艺优化[J].食品科学,2013,34(14):63-67
TANG Chunhui, HUANG Ming, FAN Jinshan, et al. Optimization of vacuum tumbling conditions for prepared duck breast fillets [J]. Food Science, 2013, 34(14): 63-67
- [25] 李俊.基于熵权法的粮食产量影响因素权重确定[J].安徽农业科学,2012,40(11):6851-6852,6854
LI Jun. Weight determining of factors influencing grain output based on entropy weight method [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 6851-6852, 6854
- [26] Qingsong W, Xueliang Y, Jian Z, et al. Assessment of the sustainable development capacity with the entropy weight coefficient method [J]. Sustainability, 2015, 7(10): 13542-13563
- [27] 陶菊春,吴建民.综合加权评分法的综合权重确定新探[J].系统工程理论与实践,2001,21(8):43-48
TAO Juchun, WU Jianmin. New study on determining the weight of index in synthetic weighted mark method [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2001, 21(8): 43-48
- [28] 崔国健.发酵兔肉香肠工艺条件及贮藏期品质变化研究[D].重庆:西南大学,2017
CUI Guojian. Study on processing technology of fermented rabbit sausage and the variation of quality during storage [D]. Chongqing: Southwest University, 2017
- [29] Chen F, Zhang Q, Fei S, et al. Optimization of ultrasonic circulating extraction of samara oil from *Acer saccharum* using combination of Plackett-Burman design and Box-Behnken design [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 35(Pt A): 161-175
- [30] Wei Z J, Liao A M, Zhang H X, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of silkworm pupal oil applying the response surface methodology [J]. Bioresource Technology, 2009, 99(18): 4214-4219
- [31] Xu X, Gao Y, Liu G, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of sea buckthorn (*Hippophae thamnoides* L.) oil using response surface methodology [J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(7): 1223-1231
- [32] LIU Deming, LIU Yongxian, WANG Dongmei, et al. Optimization of extraction process of anthocyanins from selenium-enriched purple potato by response surface methodology [J]. Agricultural Biotechnology, 2019, 8(4): 173-177