

# 高水分组织化植物蛋白混料配比设计及优化

樊 焰 徐远芳 杜童申 颜金鑫 张慧恩 曹少谦 杨 华

(浙江万里学院生物与环境学院,浙江宁波 315100)

**摘要:**[目的]优化高水分组织化植物蛋白产品的整体品质。**[方法]**以大豆分离蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白与面粉的添加量为试验因素,硬度、感官评价为指标,通过D-最优混料试验优化植物原料配方,且在最优配方的基础上探究双螺杆挤压的机械参数对高水分组织植物蛋白质构特性的影响。**[结果]**最优混料配方为大豆分离蛋白59%,豌豆蛋白30%,小麦蛋白5%,面粉6%(以粉重计);最优机械参数为物料水分50%,螺杆转速180 r/min。**[结论]**根据最优混料配方及最佳机械参数挤压制作的高水分组织植物蛋白综合品质较好。

**关键词:**高水分;植物蛋白;组织化;D-最优混料试验;机械参数;品质

## Mixing design and quality optimization of high-moisture textured vegetable protein

FAN Jiong XU Yuanfang DU Tongshen YAN Jingxin ZHANG Huien  
CHAO Shaoqian YANG Hua

(College of Biological & Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315100, China)

**Abstract:** [Objective] To optimize the overall quality of high-moisture textured vegetable protein products. [Methods] The addition levels of soybean protein isolate, pea protein, wheat protein, and flour were used as experimental factors, with hardness and sensory evaluation as response indices. A D-optimal mixture design was applied to optimize the plant-based raw material formulation. Based on the optimal formulation, the effects of twin-screw extrusion mechanical parameters on the protein textural characteristics of high-moisture textured vegetable protein were further investigated. [Results] The optimal mixture formulation consisted of 59% soybean protein isolate, 30% pea protein, 5% wheat protein, and 6% flour (based on powder weight). The optimal mechanical parameters were a material moisture content of 50% and a screw speed of 180 r/min. [Conclusion] High-moisture textured vegetable protein produced by extrusion under the optimal formulation and mechanical parameters exhibited good overall quality.

**Keywords:** high-moisture; plant protein; texturized; D-optimal mixture design; mechanical parameters; quality

植物基肉制品是指具有类似肉的感官特性,由植物蛋白制成的食品<sup>[1-2]</sup>。以组织植物蛋白加工而成的植物基肉制品因具有节约资源、健康营养的特点,迅速成为食品产业的新热点<sup>[3-5]</sup>。高水分双螺杆挤压作为效率高、能耗低的新技术,其挤压水分范围为40%~80%<sup>[6-7]</sup>,也称为高水分挤压。与传统单螺杆挤压制备的低水分组织蛋白相比,利用双螺杆挤压生产的高水分组织化蛋白产品具

有可直接食用且无需复水的优势<sup>[8-9]</sup>。同时,高水分组织植物蛋白产品在外观质地、感官风味、营养特性等方面都与“真肉”极为相似,是较优传统动物肉替代品,并能够显著降低因食用动物肉导致过量饱和脂肪摄入而带来的健康风险<sup>[10-11]</sup>。

目前,国内外的研究多集中在单一植物蛋白及添加剂方面,有关多种植物蛋白的复配仍有待深入探究。大

**基金项目:**浙江省重点研发计划项目(编号:2020C02042);浙江省生物工程一流学科资助项目(编号:ZS2022010);浙江省一流学科创新创业项目(编号:CX2022007);宁波市公益项目(编号:202002N3092);宁波市公益类科技计划项目(编号:2022S149)

**通信作者:**杨华(1978—),男,浙江万里学院教授。E-mail: yanghua@zwu.edu.cn

**收稿日期:**2023-01-08 **改回日期:**2023-06-02

**引用格式:**樊焰,徐远芳,杜童申,等.高水分组织化植物蛋白混料配比设计及优化[J].食品与机械,2025,41(12):155-162.

**Citation:**FAN Jiong, XU Yuanfang, DU Tongshen, et al. Mixing design and quality optimization of high-moisture textured vegetable protein[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 155-162.

豆分离蛋白和豌豆蛋白具有良好的溶解性、凝胶性、吸水性及吸油性等加工特性<sup>[12~14]</sup>, 小麦蛋白吸水后具有较优的黏弹性、延伸性和热凝固性, 可以提高挤压产品的弹性和咀嚼性<sup>[15~17]</sup>, 面粉主要作为黏合剂, 黏合各种熔融体。这些材料混合可以有效改善组织蛋白的质构特性和组织化度, 并提高产品的口感和色泽稳定性, 使其更加接近真肉。而生产组织蛋白过程中, 物料水分和螺杆转速对组织蛋白产品理化特性有显著影响<sup>[18~21]</sup>。因此, 研究拟使用双螺杆挤压技术, 在无添加剂的情况下, 通过调整大豆分离蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白的配比, 及挤压机械参数以改善高水分组织化植物蛋白产品的整体品质, 以期为植物基肉制品工业化生产提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料

大豆分离蛋白: 山东嘉华保健品股份有限公司;  
豌豆蛋白: 烟台双塔食品股份有限公司;  
小麦蛋白: 枣庄东粮生物科技发展有限公司;  
面粉、大豆食用油、娃哈哈纯净水: 市售;  
企业生产组织化蛋白样品: 宁波素莲食品有限公司。

### 1.2 仪器与设备

双螺杆挤压膨化机: MT65-V 型, 济南赛信机械有限公司;  
食品多功能拌料机: TMJX 型, 诸城市鑫悦诚机械科技有限公司;  
食品真空包装机: 260C 型, 苏州康鸣包装设备有限公司;  
物性分析仪: TMS-PRO 型, 美国 FTC 公司;  
电子天平: JE1002 型, 上海浦春计量仪器有限公司;  
冷场高分辨扫描电镜: SEM-7 型, 日本 Hitachi 公司;  
数显恒温水浴锅: DK-98 型, 国华常州仪器制造有限公司;  
智能恒温恒湿培养箱: HS-100SC 型, 宁波赛福实验仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 挤压制作方法 参考魏益民等<sup>[22]</sup>的方法, 按照参数(挤压温度 150 °C, 螺杆转速为 200 r/min, 物料水分含量 55%, 喂料速度 9 kg/h, 升温区间分别为 60, 80, 120, 140, 160 °C, 冷却温度 40 °C, 冷却区间为 120~40 °C)生产组织蛋白样品, 挤压成型的样品经冷却后, 切割成块, 真空密封于-20 °C贮藏备用。

### 1.3.2 组织植物蛋白混料配方的确定

(1) 单因素试验: 分别添加不同的大豆分离蛋白(45%, 50%, 55%, 60%, 65%)、豌豆蛋白(15%, 20%, 25%, 30%, 35%)、小麦蛋白(3%, 6%, 9%, 12%, 15%)及一定量的面粉来制备高水分组织化蛋白, 每个试验组中大豆分

离蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白与面粉的总量为 100%, 探究不同原料粉添加量对组织蛋白品质的影响。

(2) 混料试验设计: 根据单因素试验, 以大豆分离蛋白添加量、豌豆蛋白添加量、小麦蛋白添加量为因素, 以组织蛋白的硬度及感官评价为指标, 采用 Design-Expert V10.0.3 中的 D-optimal 进行设计, 优化组织植物蛋白混料配方。

1.3.3 机械参数的确定 在最优混料配方的基础上, 探究物料水分(40%, 45%, 50%, 55%, 60%)、螺杆转速(90, 120, 150, 180, 210 r/min)等机械参数条件对高水分组织蛋白产品的弹性及感官评分的影响。

### 1.3.4 组织蛋白的品质测定

(1) 质构特性(TPA): 参考彭慧慧等<sup>[23]</sup>的方法并修改。将样品于 40 °C 解冻 60 min, 切割成 5 cm×5 cm 肉块, 采用 P/1000 探头, 应变为 1 N, 探头下降速度为 60 mm/min, 形变量为 50%, 室温下每个样品测定 10 次, 取平均值。

(2) 组织化度: 取肉块样品, 剪切力模式下用 HDP/BS 探头对其进行剪切力测试, 测试速度 60 mm/min, 每个样品平行测定 10 次, 并按式计算组织化度<sup>[24]</sup>。

$$z = \frac{n_1}{n_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$z$ —组织化度, %;

$n_1$ —横向截切力;

$n_2$ —纵向截切力。

(3) 感官评价: 参考蒋华彬<sup>[25]</sup>的方法。随机选取 20 名经过食品感官评价培训的学生志愿者(男性 10 名, 女性 10 名)按表 1 进行感官评价, 间隔期间使用双蒸馏去离子水清洁口腔。

(4) 扫描电镜分析: 参考袁德保<sup>[14]</sup>的方法, 将样品沿纵向切割成 2 mm×2 mm×3 mm 的片状, 冷冻干燥 48 h, 对样品表面进行喷金处理, 并固定在样品台上, 使用扫描电镜观察其微观结构。

1.3.5 数据处理 所有数据均取平均值±标准差( $n \geq 3$ ), 采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行显著性分析, 采用 GraphPad Prism 8 软件作图。

## 2 结果分析

### 2.1 蛋白添加量对组织化蛋白质构参数的影响

2.1.1 大豆分离蛋白添加量 由图 1 可知, 随着大豆分离蛋白添加量的增加, 硬度值先逐渐降低后趋于平缓, 弹性先增加后降低。当大豆分离蛋白添加量为 60% 时, 组织化蛋白的硬度值最小, 弹性值最大。大豆凝胶被挤压混入组织蛋白中, 凝胶连接了部分分散的其他蛋白质颗粒, 增加了整体的弹性<sup>[26]</sup>。而大豆分离蛋白添加量过高则会产生分散的凝胶, 从而使组织蛋白弹性有所降低。

表 1 感官评价标准表

Table 1 Sensory evaluation criteria table

项目	分值标准
色泽	色泽均匀,光泽充足(15~20分);色泽发暗,光泽不足(10~14分);无光泽或色泽异常(0~9分)
气味	具有产品应有的香气,无豆腥味及其他异味(10分);具有产品应有的香气,基本无异味(7~9分);产品无香味,略有豆腥味(4~6分);有强烈豆腥味(1~3分)
外观结构	表面光滑,结构紧密,质地均匀(20~25分);表面光滑,结构密实,质地均匀性稍差(14~19分);表面有少量杂乱的斜纵向裂纹,易分散(7~13分);表面有较多杂乱的斜纵向裂纹,分散严重(0~6分)
组织结构	明显均匀纤维结构,拉丝较细,无缺陷(20~25分);较明显纤维化结构,拉丝粗,无缺陷(14~19分);纤维化结构少,拉丝较粗,有层流或气泡(7~13分);无纤维化结构(0~6分)
口感	口感细腻,有咬劲,富有弹性(15~20分);口感较硬,咬劲弱,弹性不足(10~14分);口感粗糙,咬劲差,弹性较差(0~9分)

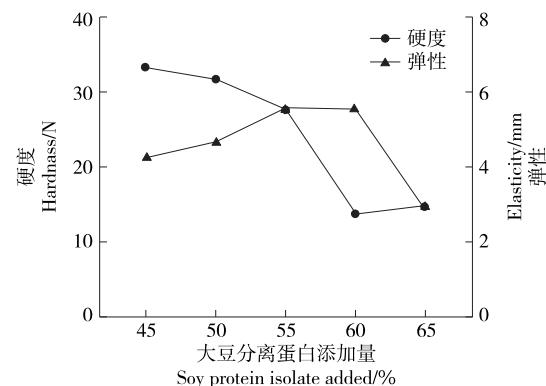


图 1 大豆分离蛋白添加量对组织化蛋白质构参数的影响

Figure 1 Effect of soy protein isolate addition level on structural parameters of tissue protein

2.1.2 豌豆蛋白添加量 由图2可知,随着豌豆蛋白添加量的增加,硬度值先降低后增加,弹性先增加后降低。当豌豆蛋白添加量为30%时,硬度值最小,弹性值最大。豌豆蛋白可以使组织蛋白的口感更软、更嫩,其在高温剪切过程中形成的蛋白聚集体弹性比大豆分离蛋白凝胶的更强<sup>[27]</sup>,与大豆分离蛋白凝胶相互作用,使组织蛋白的弹性更强。

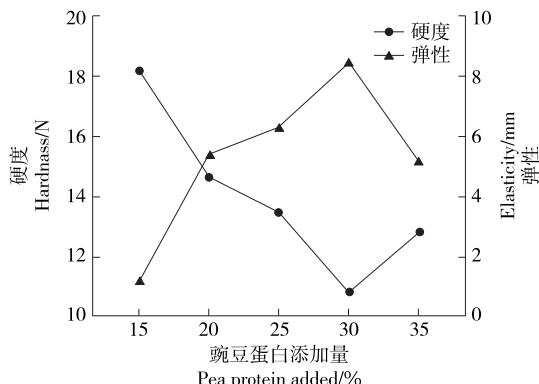


图 2 豌豆蛋白添加量对组织化蛋白质构参数的影响

Figure 2 Effect of pea protein addition level on structural parameters of tissue protein

2.1.3 小麦蛋白添加量 由图3可知,随着小麦蛋白添加量的增加,硬度值逐渐增加,弹性逐渐下降。当小麦蛋白添加量为3%时,硬度值最小,弹性值最大。当小麦蛋白添加量为15%时,硬度最高且与其他组差异显著( $P < 0.05$ ),继续增加小麦蛋白添加量会导致挤压机器中的螺杆无法正常转动,同时样品开裂严重无法在冷却模口成型。Zhang等<sup>[28]</sup>研究发现,小麦蛋白在挤压过程中会吸水形成结构较粗糙的熔融体。小麦蛋白添加量的提升,促使更多熔融组织体生成。这些组织体逐渐充盈于三维网状结构的空隙中,增强了结构的致密性与连续性,因而提高了最终产品的组织化程度和硬度。

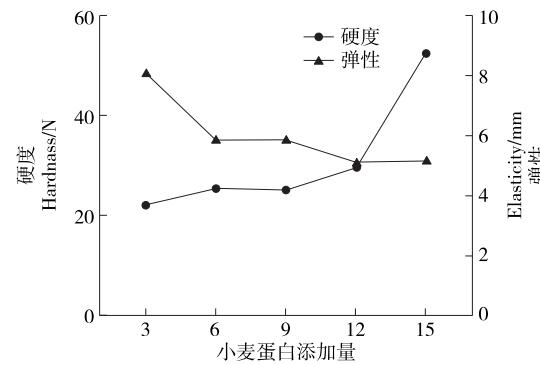


图 3 小麦蛋白对组织化蛋白质构参数的影响

Figure 3 Effects of wheat protein addition level on structural parameters of tissue protein

## 2.2 蛋白添加量对组织化蛋白感官评分的影响

由表2可知,随着大豆分离蛋白添加量的增加,感官评分先升高后下降,但变化幅度较小,说明大豆分离蛋白添加量对组织化蛋白感官评分的影响较小,其豆腥味较强,影响了整体评分。大豆分离蛋白的添加改变了组织化蛋白的外观结构与组织结构,相比未优化组,组织化蛋白裂纹减少,表面更加光滑,纤维化程度更高。当大豆分离蛋白添加量为60%时,产品的色泽、外观结构、组织结构及口感最佳。

表 2 蛋白添加量对组织化蛋白感官评分的影响  
Table 2 Effect of protein addition level on sensory score of textured tissue proteins

蛋白种类	添加量/%	色泽	气味	外观结构	组织结构	口感	总分
大豆蛋白	45	15	8	14	20	14	71
	50	15	8	14	21	15	73
	55	18	8	15	20	18	79
	60	18	5	21	20	18	82
	65	16	3	21	17	17	74
豌豆蛋白	15	15	7	14	19	18	73
	20	16	8	15	18	18	75
	25	16	8	17	21	19	81
	30	15	8	20	22	19	84
	35	15	8	21	20	17	83
小麦蛋白	3	16	8	22	16	17	79
	6	16	8	24	17	18	80
	9	17	8	23	18	17	83
	12	15	8	21	20	10	74
	15	17	8	23	20	5	73

豌豆蛋白的添加主要体现在口感与外观结构上,豌豆蛋白与大豆凝胶混合,使组织化蛋白的表面更加光滑,同时提高了弹性,使口感更加细腻,一定程度上改善了组织化蛋白的豆腥味。当豌豆蛋白添加量为 30% 时,产品组织结构与口感评分优异。小麦蛋白的添加主要体现在组织结构上,添加了小麦蛋白的组织化蛋白纤维结构与拉丝更加明显,同时使组织化蛋白的结构更加紧实,当小麦蛋白添加量为 12% 和 15% 时,组织蛋白口感下降严重,影响感官评分总分。

### 2.3 混料设计结果

D-最优混料设计方案及结果见表 3。

#### 2.3.1 基于硬度的分析

(1) 回归方程的建立与方差分析:运用 Design-Expert 软件对硬度进行回归拟合,可得硬度模型:

$$Y=23.84A+74.23B+1405.77C+9.54D+144.33AB-1663.84AC+78.79AD-1767.39BC+208.52BD-1685.66CD-359.07ABC-1120.14ABD-227.73ACD-417.56BCD. \quad (2)$$

由表 4 可知,模型  $P<0.0001$ ,显著;失拟项  $P=0.1300>0.05$ ,说明此模型对组织蛋白硬度的优化有实际意义。相关系数  $R^2=0.9979$ , $R_{\text{Adj}}^2=0.9932$ ,说明该模型与试验组拟合良好且能较好地考察指标与配方之间的关系。

(2) 原料比例变化对组织蛋白硬度的影响:由图 4 可知,在正常添加范围内,随着大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白添加量的上升,感官评分先上升后下降;随着豌豆蛋白、小麦蛋白添加量的增大,硬度先下降后上升。

表 3 D-最优设计方案及试验结果

Table 3 D-optimal design scheme and test results

A 大豆分离蛋白添加量/%	B 豌豆蛋白添加量/%	C 小麦蛋白添加量/%	D 面粉添加量/%	硬度/N	感官评分
61	25	4	10	16.600	89.43
58	28	3	11	40.500	85.27
61	30	4	5	49.443	88.76
55	34	3	8	90.640	83.83
55	25	5	15	16.125	88.34
55	25	5	15	21.000	86.39
61	30	4	5	49.593	89.96
57	35	3	5	85.220	81.14
61	25	4	10	17.000	87.03
65	26	3	6	38.900	73.36
58	28	6	8	52.633	75.19
64	25	6	5	45.003	75.33
55	34	6	5	63.050	85.67
56	26	3	15	28.267	78.33
61	27	5	7	32.340	82.36
58	31	6	5	75.726	86.66
55	31	4	10	63.167	84.53
55	31	4	10	63.100	82.44
63	25	3	9	36.040	87.74
58	28	6	8	52.567	76.07

#### 2.3.2 基于感官评分的分析

(1) 回归方程的建立与方差分析:运用 Design-Expert 软件对感官评分的试验值进行回归拟合,可得感官评分模型:

$$Y=68.77A+90.56B-408.47C+70.04D-43.57AB+654.21AC+87.77AD+608.89BC-13.59BD+705.85CD+478.31ABC+145.97ABD-628.17ACD-226.35BCD. \quad (3)$$

由表 5 可知,模型  $P<0.01$ ,显著;失拟项为  $P=0.4260>0.05$ ,说明此模型对组织蛋白感官评分的优化有实际意义。相关系数  $R^2=0.9819$ , $R_{\text{Adj}}^2=0.9428$ ,说明该模型与试验组拟合良好且能较好地考察指标与配方之间的关系。

(2) 原料比例变化对组织蛋白感官评分的影响:由图 4 可知,在正常添加范围内,随着大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白添加量的上升,感官评分先上升后下降。

### 2.4 配方优化

经 Design-Expert 软件优化得到组织蛋白的最佳配方为大豆蛋白添加量 59.490%,豌豆蛋白添加量 29.712%,小麦蛋白添加量 4.467%,面粉添加量 6.332%,此配方下硬度为 32.332 N,感官评分为 91.079。考虑到试验的可行性,调整最优工艺条件为大豆分离蛋白添加量 59%,豌豆

表4 硬度回归模型方差分析<sup>†</sup>

Table 4 Analysis of variance of hardness regression model

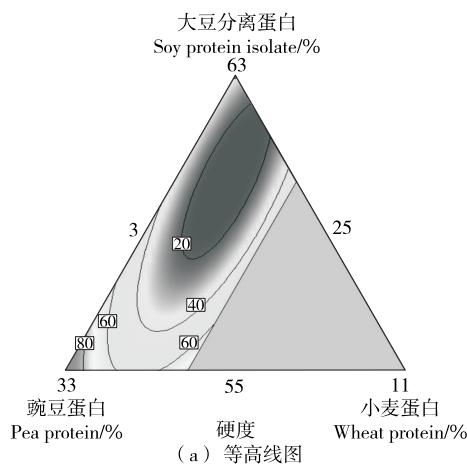
变异源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	9 274.93	13	713.46	215.86	<0.000 1	***
线型混合模型	7 818.03	3	2 606.01	788.44	<0.000 1	***
AB	9.81	1	9.81	2.97	0.135 7	
AC	137.03	1	137.03	41.46	0.000 7	**
AD	27.32	1	27.32	8.27	0.028 2	*
BC	193.93	1	193.93	58.67	0.000 3	**
BD	42.63	1	42.63	12.90	0.011 5	*
CD	138.64	1	138.64	41.94	0.000 6	**
ABC	2.44	1	2.44	0.74	0.423 6	
ABD	51.13	1	51.13	15.47	0.007 7	**
ACD	7.20	1	7.20	2.18	0.190 4	
BCD	6.94	1	6.94	2.10	0.197 5	
残差	19.83	6	3.31			
失拟项	7.85	1	7.85	3.28	0.130 0	
纯误差	11.98	5	2.40			
总变异	9 294.77	19				

† \*P<0.05, \*\*P<0.01, \*\*\*P<0.000 1; R<sup>2</sup>=0.997 9, R<sub>Adj</sub><sup>2</sup>=0.993 2。

蛋白添加量30%,小麦蛋白添加量5%,面粉添加量6%,并进行验证实验(*n*=3),得到实际硬度为32.833 N,感官评分为91.231,符合模型预测值。

## 2.5 机械参数对组织化蛋白质构的影响

由图7可知,随着物料水分的增加,硬度先升高后下降,当物料水分>50%时,组织蛋白的硬度和弹性均下降,推断物料水分的增加会降低挤压熔融体的黏度<sup>[29]</sup>,导致蛋白混合物受到的挤压剪切力下降,进一步降低蛋白



(a) 等高线图

图4 原料比例变化对组织蛋白硬度影响的等高线图及3D响应面图

Figure 4 Contour plot and 3D response surface plot for effect of raw material proportion change on the hardness of textured protein

表5 感官评分回归模型方差分析<sup>†</sup>

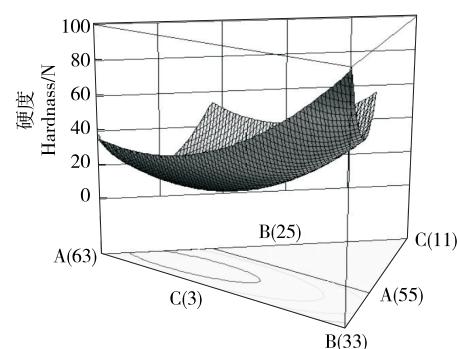
Table 5 Analysis of variance of sensory score regression model

变异源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	504.81	13	38.83	25.10	0.000 4	**
线型混合模型	23.83	3	7.94	5.13	0.042 8	*
AB	0.89	1	0.89	0.58	0.476 0	
AC	21.18	1	21.18	13.69	0.010 1	*
AD	33.90	1	33.90	21.91	0.003 4	**
BC	23.02	1	23.02	14.88	0.008 4	**
BD	0.18	1	0.18	0.12	0.743 9	*
CD	24.31	1	24.31	15.71	0.007 4	**
ABC	4.32	1	4.32	2.79	0.145 7	
ABD	0.87	1	0.87	0.56	0.482 1	
ACD	54.78	1	54.78	35.40	0.001 0	**
BCD	2.04	1	2.04	1.32	0.294 6	
残差	9.28	6	1.55			
失拟项	1.21	1	1.21	0.75	0.426 0	
纯误差	8.07	5	1.61			
总变异	514.09	19				

† \*P<0.05, \*\*P<0.01, \*\*\*P<0.000 1; R<sup>2</sup>=0.981 9, R<sub>Adj</sub><sup>2</sup>=0.942 8。

质亚基聚合交联的程度,蛋白聚集程度降低,是硬度弹性降低的原因。综合评定,当物料水分为50%时,组织蛋白的品质最佳。

随着螺杆转速的提升,蛋白原料停留时间减小,硬度和弹性显著改变,螺杆产生的截切力使蛋白质颗粒破裂<sup>[30]</sup>,当螺杆转速为180~210 r/min时,弹性和咀嚼性降低,随着螺杆转速的增加,原料停留时间过短,还未完全



(b) 3D响应面图

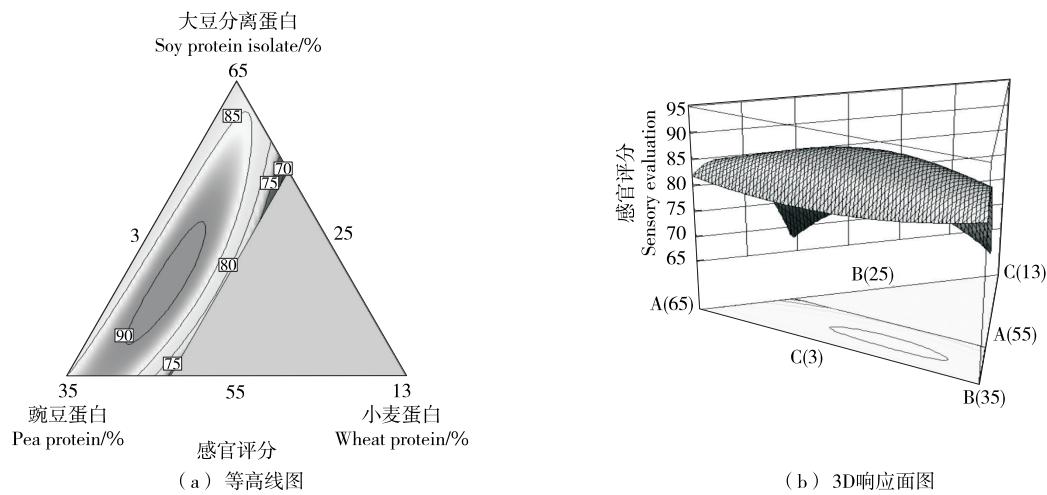


图 5 原料比例变化对组织蛋白感官评分影响的等高线图及 3D 响应面图

Figure 5 Contour plot and 3D response surface plot for effect of raw material proportion change on the sensory score of textured protein

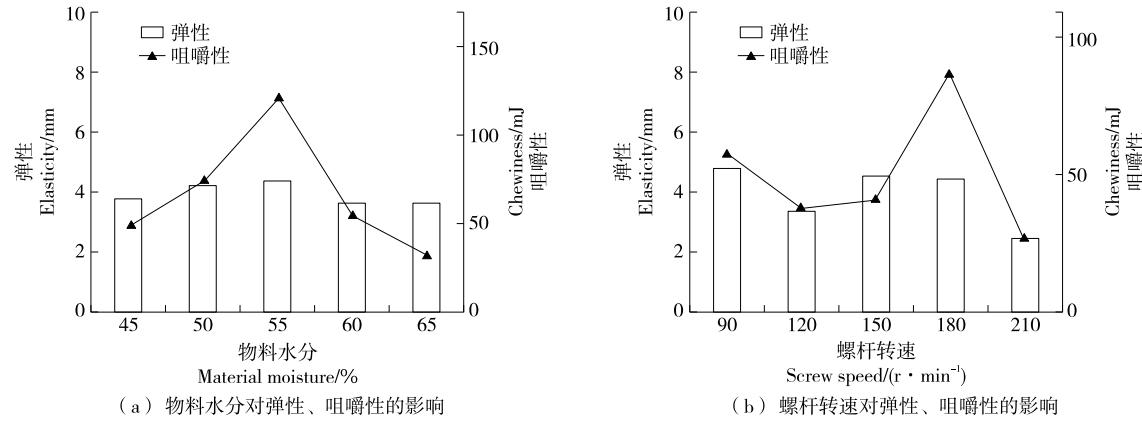


图 6 机械参数对组织蛋白的影响

Figure 6 Effect of mechanical parameters on textured protein

熔融就进入冷却阶段,影响了组织化过程,同时更高的螺杆转速也对蛋白产生更严重的破坏,形成分子量较大的聚合物<sup>[31]</sup>,弹性和咀嚼性显著降低。综合评定,当螺杆转速为 180 r/min 时,组织蛋白的品质最佳。

## 2.6 组织化蛋白产品的微观结构对比

由图 7 可知,组织化蛋白产品的横截面较为平整,未优化组(企业生产样品)的纤维结构不明显,挤压形成的规则组织结构较少,主要是原料比例未优化。最优配方组的表面呈不规则形态,表现出类似肉的纤维结构。最优配方+机械参数组具有层状和纤维状的纹理,三维交联网络,与“真肉”的肌肉纤维结构更为接近。

## 3 结论

通过优化高水分组织化植物蛋白中蛋白原料配比得到大豆分离蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白和面粉的最佳添加

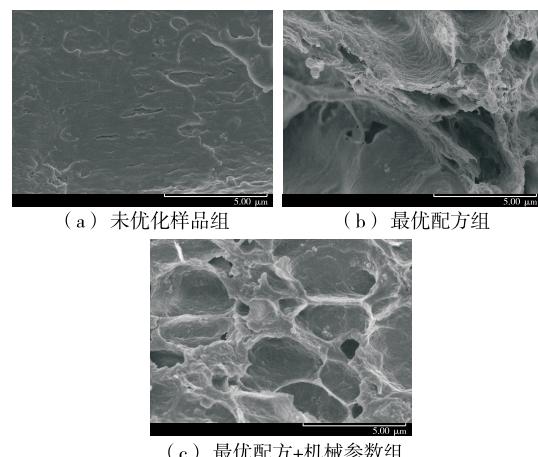


图 7 不同种类组织蛋白的微观结构对比

Figure 7 Comparison of microstructures of different textured proteins

量,最优配方为大豆分离蛋白59%,豌豆蛋白30%,小麦蛋白5%,面粉6%,此配方下的高水分组织化植物蛋白具有良好的口感,相对于未优化植物组织蛋白质构特性和纤维结构有较大提升。同时综合评定物料水分为50%和螺杆转速为180 r/min挤压机械条件下制备的组织化蛋白整体品质最佳。组织化植物蛋白的贮藏特性等方面还需要进一步研究。最后,开发以组织化植物蛋白为原料的其他即食食品的应用也有待进一步探索。

### 参考文献

- [1] 江连洲,张鑫,窦薇,等.植物基肉制品研究进展与未来挑战[J].中国食品学报,2020,20(8):1-10.  
ZHANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Research progress and future challenges of plant-based meat products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(8): 1-10.
- [2] 关家乐.不同淀粉对高水分组织花生蛋白品质影响及机理研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2022: 4.  
GUAN J L. Effects of different starches on qualities and mechanisms of high-moisture tissue peanut[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2022: 4.
- [3] WARNER R D. Review analysis of the process and drivers for cellular meat production[J]. Animal, 2019, 13(12): 3 041-3 058.
- [4] VAN VLIET S, BURD N A, VAN LOON L J C. The skeletal muscle anabolic response to plant versus animal-based protein consumption[J]. The Journal of Nutrition, 2015, 145(9): 1 981-1 991.
- [5] KUMAR P, CHATLI M K, MEHTA N. Meat analogues Health promising sustainable meat substitutes[J]. International Journal of Food and Fermentation Technology, 2017, 57(5): 923-932.
- [6] 康立宁.大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2007: 13.  
KANG L N. Study on technology and mechanism of high moisture extrusion of soybean protein[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2007: 13.
- [7] 吴元浩,徐婧婷,刘欣然,等.植物基仿肉原料的应用与加工现状[J].食品安全质量检测学报,2020,11(17): 5 955-5 963.  
WU Y H, XU J T, LIU X R, et al. Application and processing status of plant-based meat analogue ingredients[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(17): 5 955-5 963.
- [8] 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): 280-286.  
ZHU H, LIU L, ZHANG J C, et al. Research progress in the regulation and evaluation of high water extruded plant protein quality[J]. Food Science, 2018, 39(19): 280-286.
- [9] 王逢秋节,栾滨羽,高扬,等.改良剂对高水分挤压植物蛋白产品品质调控的研究进展[J].食品科学,2023,44(19): 350-358.  
WANG F Q J, LUAN B Y, GAO Y, et al. Research progress on quality regulation of high-moisture extruded plant protein products by modifiers[J]. Food Science, 2023, 44(19): 350-358.
- [10] 豆康宁,赵永敢,金少举,等.植物基肉制品的研究进展[J].食品与机械,2022,38(11): 230-235.  
DOU K N, ZHAO Y G, JING S J, et al. Research progress of plant-based meat products[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 230-235.
- [11] 赵婧,宋弋,刘攀航,等.植物基替代蛋白的利用进展[J].食品工业科技,2021,42(18): 1-8.  
ZHAO Q, SHONG G, LIU P H, et al. Advances in the utilization of plant-based Alternative protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 1-8.
- [12] DIJKINK B H, LANGELAAN H C. Milling properties of peas in relation to texture analysis: part I: effect of moisture content [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 51(2): 99-104.
- [13] BOYE J I, AKSAY S, ROUFKI S, et al. Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques[J]. Food Research International, 2010, 43(2): 537-546.
- [14] 袁德保.大豆蛋白热聚集行为及其机理研究[D].广州:华南理工大学,2010: 12.  
YUAN D B. Heat-induced aggregation of soy proteins and its mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 12.
- [15] 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. Effects of different sources of protein on the properties of extruded tissue products of gluten[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(3): 17-22.
- [16] 杨立新,张华,徐素玲.谷朊粉对鸡肉丸品质的影响[J].食品工业,2014,35(8): 136-138.  
YANG L X, ZHANG H, XUE S L. Influence of vital wheat gluten on the quality of chicken meatball[J]. The Food Industry, 2014, 35(8): 136-138.
- [17] 吕佳琪.谷朊粉对五种杂粮面团特性和面条品质的影响[D].石家庄:河北经贸大学,2021: 18.  
LUE J Q. Effects of gluten on dough characteristics and noodle quality of five kinds of coarse cereals[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2021: 18.
- [18] 朱秀清,栾滨羽,黄雨洋,等.挤压对大豆蛋白构象及其组织化结构的影响研究进展[J].食品科学,2022,43(3): 1-9.  
ZHU X Q, LUAN B Y, HUANG Y Y, et al. Recent progress in understanding the effect of extrusion on the conformation and structure of soybean proteins[J]. Food Science, 2022, 43(3): 1-9.
- [19] 陈锋亮,魏益民,张波.物料含水率对大豆蛋白挤压产品组织化质量的影响[J].中国农业科学,2010,43(4): 805-811.  
CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B. Effect of moisture content

- on quality of texturization of product extruded from soy protein isolate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(4): 805-811.
- [20] 金闯, 刘丽, 刘红芝, 等. 食品挤压技术装备及工艺机理研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 275-283.  
ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 275-283.
- [21] 陈锋亮, 魏益民, 张波, 等. 食品挤压过程中水分的作用及变化研究进展[J]. *食品科学*, 2009, 30(21): 416-419.  
CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B, et al. A review on action and change of water during food extrusion process[J]. *Food Science*, 2009, 30(21): 416-419.
- [22] 魏益民, 赵多勇, 康立宁, 等. 操作参数对组织化大豆蛋白产品特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(6): 20-25.  
WEI Y M, ZHAO Y D, KANG L N, et al. Effect of process parameters on product characteristics of textured soy protein [J]. *Chinese Journal of Grain and Oils*, 2009, 24(6): 20-25.
- [23] 彭慧慧, 王思花, 张静, 等. 添加剂对豌豆蛋白高水分组织化挤压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.  
PENG H H, WANG S H, ZHANG J, et al. Effect of additives on the quality of pea protein extrusion with high moisture content and optimization of compound formula[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 188-195.
- [24] 金鑫. 植物蛋白挤压组织化性质、工艺优化及应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021: 14.  
JIN X. Study on histological properties, process optimization and application of vegetable protein extrusion[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021: 14.
- [25] 蒋华彬. 小麦蛋白高水分挤压组织化特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 8.
- [26] 肖志刚, 霍金杰, 江睿生, 等. 螺杆转速对素肉饼质构特性和结构特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(6): 148-153.  
XIAO Z G, HUO J J, JIANG R S, et al. Effect of screw rotation speed on texture characteristics and structural characteristics of vegetarian meat patty[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(6): 148-153.
- [27] MIERNYK J A, JETT A A, JOHNSTON M L. Analysis of soybean tissue culture protein dynamics using difference gel electrophoresis[J]. *Journal of Proteomics*, 2016, 130: 56-64.
- [28] ZHANG J, LI L, SONG Z, et al. Texturisation behaviour of peanut-soy bean wheat protein mixtures during high moisture extrusion cooking[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(11): 2 535-2 541.
- [29] OSEN R, TOELSTEDE S, WILD F, 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.
- [30] PIETSCH V L, EMIN A , SCHUCHMANN H P. Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 198: 28-35.
- [31] 魏益民, 康立宁, 张波, 等. 高水分大豆蛋白组织化生产工艺和机理分析[J]. *农业工程学报*, 2006(10): 193-197.  
WEI Y M, KANG L N, ZHNAG B, et al. Processing and mechanism of high moisture textured soy protein[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006(10): 193-197.