# 不同水分含量制备大豆组织蛋白性质比较及素食火腿肠品质分析

赵刚，朱丽莹，胡东升，高丽莹，白露，左锋*
（黑龙江八一农垦大学食品学院，黑龙江大庆 163319）

**摘要：**为探究水分含量对挤压处理制备组织蛋白结构、理化性质及素食火腿肠品质特性的影响，该文采用大豆蛋白为主要原料，探究了不同水分含量对组织化大豆蛋白的色度、组织化度、质构特性、微观结构、二级结构以及素食火腿肠的感官品质和质构特性的变化。研究发现，随着水分含量的提高，组织化度呈现先升高后下降的趋势并在 50%（*m/m*）含水量时达到最高（1.55），硬度与咀嚼性由 40%（*m/m*）水分含量的 3 423.12 g 和 2 135.44 g 显著降低至 50%（*m/m*）的 886.37 g 和 417.44 g（$P<0.05$）。扫描电镜显示，在水分含量 50%（*m/m*）下制备的组织蛋白具有更多的纤维结构，同时，水分含量的提高促进了 *β*-转角向-*β* 折叠转变。利用 50%（*m/m*）水分含量制备的组织蛋白制备素食火腿肠感官品质与肉肠较为接近。综合比较，利用水分含量 50%（*m/m*）时制备的大豆组织蛋白制备的素食火腿肠与肉肠具有相似的感官品质。该研究为深入了解组织蛋白形成机理以及相关产品开发提供了理基础。

**关键词：**水分含量；挤压膨化；大豆组织蛋白；素食火腿肠

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0680

# Comparison of Protein Properties of Soybean Tissues Prepared with Different Moisture Contents and Quality Analysis of Vegetarian ham Sausage

**ZHAO Gang, ZHU Liying, HU Dongsheng, GAO Liying, BAI Lu, ZUO Feng***
(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of moisture content on the structure, physical and chemical properties of tissue protein prepared by extrusion and the quality characteristics of vegetarian ham, this paper used soybean protein as the main raw material to explore the changes of color, organization, texture properties, microstructure, secondary structure of organized soybean protein and the sensory quality and texture characteristics of vegetarian ham with different moisture content. The results showed that with the increase of water content, the degree of organization showed a trend of first increasing and then decreasing, and reached the highest (1.55) when the water content was 50% (*m/m*). Hardness and chewiness decreased significantly from 3 423.12 g and 2 135.44 g of 40% (*m/m*) moisture content to 886.37 g and 417.44 g of 50% (*m/m*) moisture content ($P<0.05$). Scanning electron microscopy showed that the tissue protein prepared at 50% water content (*m/m*) had more fiber structure, and the increase of water content promoted the transition from *β*-turn to -*β* fold. The sensory quality of vegetarian ham sausage prepared by tissue protein with 50% (*m/m*) moisture content was similar to that of meat sausage. In general, the organoleptic quality of ham sausage prepared with soybean tissue protein prepared at 50% moisture content (*m/m*) was similar to that of meat sausage. This study provides a theoretical basis for further understanding of the formation mechanism of tissue proteins and the development of related products.

**Key words:** water content; extrusion and puffing; soybean tissue protein; vegetarian ham sausage

由于世界人口数量的增长，使得肉制品的需求不断上涨，导致肉制品供应缺口逐渐增大[1,2]。同时，由于肉制品的大量摄入使得“三高”人群比例逐年攀升[3]。因此促进了植物蛋白的综合利用以及素肉的开发。与动物蛋白相

收稿日期：2025-05-15；修回日期：2025-07-22；接受日期：2025-07-28

基金项目：黑龙江省大学生创新创业训练计划项目（201910223034）

作者简介：赵刚（2005-），男，本科，研究方向：食品营养与健康，E-mail：3205543390@qq.com

通讯作者：左锋（1979-），男，博士，教授，研究方向：植物蛋白及农副产品加工利用，E-mail：zuofeng-518@126.com

比，植物蛋白具有来源广泛、价格低廉、绿色环保等优点，并且其在组成上几乎不含有胆固醇，因此受到广大消费者的欢迎[4-6]。目前应用最为广泛的素肉原料是组织化大豆蛋白，并且随着技术的进步素肉口感与肉制品口感逐渐接近[7,8]。在市场的大量需求下人们饮食结构可能迎来新的变革。

组织化大豆蛋白是利用脱脂豆粕、大豆蛋白等制备的高密度纤维结构的植物蛋白制品，其通常是利用双螺杆或三螺杆挤压设备制备而成。其原理是利用挤压膨化设备在水分、压力和剪切力的作用下使蛋白分子沿挤压方向发生膨胀和定向重排，使其形成均匀的纤维状结构产品[8,9]。挤压过程中工艺参数（如水分含量、温度、螺杆转速）的协同作用对产品结构和功能性质具有显著影响。例如：较高的挤压温度可以提高蛋白质组织化程度，形成更加致密有序的纤维结构，使其更加接近肉的质感[10,11]，有研究发现当挤压温度大于 140 ℃时，蛋白质开始出现明显的纤维化，当大于 150 ℃时，组织化蛋白的硬度、弹性等显著提高[12,13]；当螺杆转速提高时制备的组织化蛋白具有细密的纤维结构，Gun 和 Ryu 研究发现，在较高的螺杆转速下制备的产品具有良好的质构特性[14]。

其中水分含量被认为是调控蛋白质变性、分子交联及纤维结构形成的关键因素。已有研究表明，水分含量直接影响挤压机腔体内的剪切力、熔体流变特性及蛋白质分子链的展开与重组行为，进而决定终产物的孔隙率、纤维化程度和复水性能，从而调控组织蛋白的感官特性[15,16]。但针对不同水分梯度下制备的组织化大豆蛋白的结构-功能关系缺乏研究，并且探究不同水分含量下对于素食火腿肠的相关研究较少。因此本研究以大豆分离蛋白为原料，将其调整为不同水分含量后进行挤压膨化，探究不同水分含量下制备的大豆组织蛋白结构及理化特性变化，并将其制备素食火腿肠，探究对其感官品质影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白（蛋白质含量为 91.38%），购自哈尔滨高科大豆食品有限责任公司；谷朊粉，购自新乡市新都粉业有限公司。

### 1.2 仪器与设备

SX2000-80 型双螺杆挤压膨化机，济南赛信机械有限公司；TA3000 型质构仪，山东赛成仪器有限公司；CR-410 色度仪，日本 Konca Minolta 公司；SU8020 扫描电子显微镜，日本 Hitaci 公司；TENSORII 傅里叶红外光谱仪，天津市金贝尔科技有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

首先将原料按照大豆分离蛋白:谷朊粉:玉米淀粉:油=43:28:16:13 的比例将原料进行混合均匀，称取相对应的水喷洒与物料表面，将其水分含量调整为 40%、50%和 60%，室温下静置过夜。

将挤压机的 5 区温度分别设置为：60、80、130、150 和 160 ℃，设置进料速率为 18 kg $h^{-1}$，螺杆转速为 240 r $min^{-1}$。在此加工条件下将上述不同水分含量的物料进行挤压膨化处理。

#### 1.3.2 色度测定

参照 Marzec 等[17]方法并进行一定修改：首先将样品裁成 20 mm×20 mm×2 mm 的试样，使用全自动色差仪对试样进行亮度（*L**）、红度（*a**）和黄度（*b**）的测定。标准板的 *L**、*a**、*b**分别为 89.77，-0.75 和 1.83。按照公式（1）计算总色差。每个样品测定三次取平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2+(a-a^*)^2+(b-b^*)^2} \quad (1)$$

式中:

*L*、*a*、*b*——为样品的色度数值;

*L**、*a**和 *b**——为标准白板色度值。

#### 1.3.3 组织化度的测定

参照袁钦杰[18]的方法并进行一定修改：将样品裁成边长为 20 mm 的正方体，使用 A-CKB 探头分别在垂直方

向和水平方向进行剪切并记录其数值。测试前、中、后速度分别为 2.0、1.0、和 2.0 mm $s^{-1}$。形变程度为 75%。按公式（2）计算组织化度（TD）。

$$TD = \frac{W_s}{W_h} \quad (2)$$

式中:

$W_s$——为竖切所做的功;

$W_h$——为横切所做的功。

### 1.3.4 质构特性

将样品切割成边长为 25 mm 的正方体，采用质构仪 TPA 程序对样品质构特性进行测定，选用直径为 35 mm 的 P/35 探头，测试前、中、后速度分别为 2.0、1.0 和 2.0 mm $s^{-1}$，形变程度为 50%。每个样品测定 10 次，去除最大值与最小值后取平均值。

### 1.3.5 微观结构测定

将样品进行切割后固定在样品台上进行喷金处理，使用扫描电子显微镜对样品的微观结构进行观察，扫描电子显微镜参数为：加速电压 3 kV，真空度 6E.0 Pa。

### 1.3.6 二级结构测定

将样品冻干处理后粉碎，过 80 目筛后，取 2 mg 样品和 200 mg KBr 在研钵中进行研磨后压片。以空气为空白，扫描样品在 400~4 000 $cm^{-1}$ 下的吸收峰的变化，分辨率为 2 $cm^{-1}$。使用 OMNIC 软件对结果进行二阶导数和去卷积分析[19]。

### 1.3.7 素食火腿肠的制备

素食火腿肠馅料的物料比例按表 1 进行制备，同时将大豆组织蛋白替换为猪肉制备火腿肠进行对比。

（1）首先将制备的组织化大豆蛋白进行复水处理，将其浸泡至没有硬心后，在 0.2 Mpa 下压榨 2 min 脱水后备用。（2）将调味料、水、复水组织蛋白、大豆油等放入斩拌机进行斩拌直至馅料形成均匀的混合状态。（3）使用全自动灌肠机进行灌肠并进行分节。（4）将罐装的肠进行煮制熟化和杀菌处理（85 ℃，30 min）。（5）将熟化后的肠冷却至室温后即得到成品。

**表 1 素食火腿肠原料比例**

**Table 1 Proportion of vegetarian ham sausage ingredients**

| 原料 | 素食火腿肠原料比例/% | 猪肉肠原料比例/% |
|---|---|---|
| 复水大豆组织蛋白/猪肉 | 30 | 65 |
| 水 | 35 | 15 |
| 油 | 17 | 10 |
| 淀粉 | 17.5 | 9.5 |
| 魔芋胶 | 0.5 | 0.5 |
| 红曲红 | 适量 | 适量 |

### 1.3.8 感官评定

将制备的素食火腿肠均匀切片后进行感官评价，评价员为 10 位食品领域的研究人员构成，依据表 2 对素食火腿肠的感官品质进行打分。

**表 2 素食火腿肠感官评分表**

**Table 2 Sensory rating scale for vegetarian ham sausage**

| 项目 | 标准 | 分值 |
|---|---|---|
| 外观 | 肠体均匀饱满，表面无损伤，无内容物流出。 | 20 |
| 组织状态 | 表皮光滑，内部组织致密，富有弹性，无密集气孔 | 20 |
| 口感 | 咀嚼性良好，口味适宜，弹性良好。 | 30 |
| 风味 | 咸淡适宜，无显著豆腥味。 | 20 |
| 颜色 | 色泽均一。 | 10 |

### 1.3.9 质构特性

方法同 1.3.4。

### 1.4 数据处理

所有结果采用平均值±标准差表示，使用 SPSS 26 对数据进行显著性分析，用于单因素方差分析（ANOVA），$P<0.05$ 表示差异显著。使用 Origin 2021 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分含量对大豆组织蛋白色度的影响

表 3 不同水分含量对大豆组织蛋白色度的影响

**Table 3 Effect of different moisture contents on soybean tissue protein color**

| 水分含量/% | *L** | *a** | *b** | *ΔE* |
|---|---|---|---|---|
| 40 | 41.37±0.63$^{b}$ | 2.03±0.38$^{b}$ | 14.35±0.28$^{b}$ | 48.51±0.64$^{a}$ |
| 50 | 61.78±0.32$^{a}$ | 3.47±0.42$^{a}$ | 19.84±0.42$^{a}$ | 33.55±0.63$^{b}$ |
| 60 | 61.23±0.44$^{a}$ | 3.65±0.27$^{a}$ | 20.43±0.38$^{a}$ | 34.35±0.48$^{b}$ |

注：数值采用平均值±标准差表示，不同字母表示同列间数据差异显著（$P<0.05$）。

大豆组织蛋白色度是消费者直观感受的重要影响因素，同时也是衡量产品品质的一个重要因素。其中 *L**越大表示产品亮度越高，*a**越大表示产品红度大小，*b**表示产品黄度大小。Δ*E* 表示样品与白板间色度的差异[20]。不同水分含量下制备大豆组织蛋白色度如表 3 所示。由表可以看出，随着水分含量的提高，亮度逐渐提高，由 40%的 41.37 提高至 60%的 61.23，同时 *a**、*b**也呈现出相同的趋势。Δ*E* 呈现出逐渐下降的趋势，由 40%的 48.51 降低至 60%的 34.35。这可能是由于当水分含量较低时，物料在筒体内移动速度较低，使得热处理时间较长，美拉德反应加剧，因此使得物料颜色较深，与标准白板色度具有较大差异；随着水分含量的提高，物料在筒体内移动速度加快，同时熔融体密度较低，导致美拉德反应程度下降，褐变程度较小，与标准白板色度相差较小[21]。因此使得色度呈现出先升高后稳定的趋势。

### 2.2 不同水分含量对大豆组织蛋白组织化度影响

表 4 不同水分含量对大豆组织蛋白组织化度和质构特性影响

**Table 4 Effects of different moisture contents on the degree of organization and texture of soybean tissue protein**

| 水分含量/% | 组织化度 | 硬度/g | 弹性 | 咀嚼度/g |
|---|---|---|---|---|
| 40 | 1.23±0.04$^{c}$ | 3423.12±52.33$^{a}$ | 0.84±0.02$^{a}$ | 2135.44±33.46$^{a}$ |
| 50 | 1.55±0.02$^{a}$ | 2554.33±74.65$^{b}$ | 0.81±0.01$^{a}$ | 1293.54±61.42$^{b}$ |
| 60 | 1.43±0.06$^{b}$ | 886.37±59.47$^{c}$ | 0.75±0.02$^{b}$ | 417.44±60.22$^{c}$ |

注：数值采用平均值±标准差表示，不同字母表示同列间数据差异显著（$P<0.05$）。

组织化度表示物料在挤出方向上纤维化程度，组织化度与产品纤维化程度呈正相关。在不同水分含量下制备的大豆组织蛋白组织化度如表 4 所示。由表可以看出，随着水分含量的提高，制备的大豆组织蛋白组织化度呈现出先升高后下降的趋势，在 50%含水量时达到最大，为 1.55。这是由于水分在挤压过程中可以起到增塑、润滑等作用[22]，因此在增加水分含量时，蛋白质在筒体内的流动性增强，使得蛋白质在挤压时受剪切力发生定向重排，使得组织化度提高。但是水的促进作用不是无限的，高水分含量时蛋白质网络被稀释，蛋白质流动速度过快，所受到的剪切力降低，导致产品纤维化程度下降，导致组织化度下降[23]。

### 2.3 不同水分含量对大豆组织蛋白质构特性影响

不同水分含量下制备的大豆组织蛋白质构特性如表 4 所示。由表可以看出，随着水分添加量的增加，产品的硬度、弹性和咀嚼度均呈现下降趋势。这是由于随着水分含量的提高，导致蛋白质流动性增强，同时水将蛋白质网络进行稀释，导致蛋白质硬度、弹性和咀嚼性下降。Chen 等[22]和 Tingle 等[23]研究发现随着水分含量的提高物

料在料筒中流动速度加快，质构特性降低。

## 2.4 不同水分含量对大豆组织蛋白微观结构影响

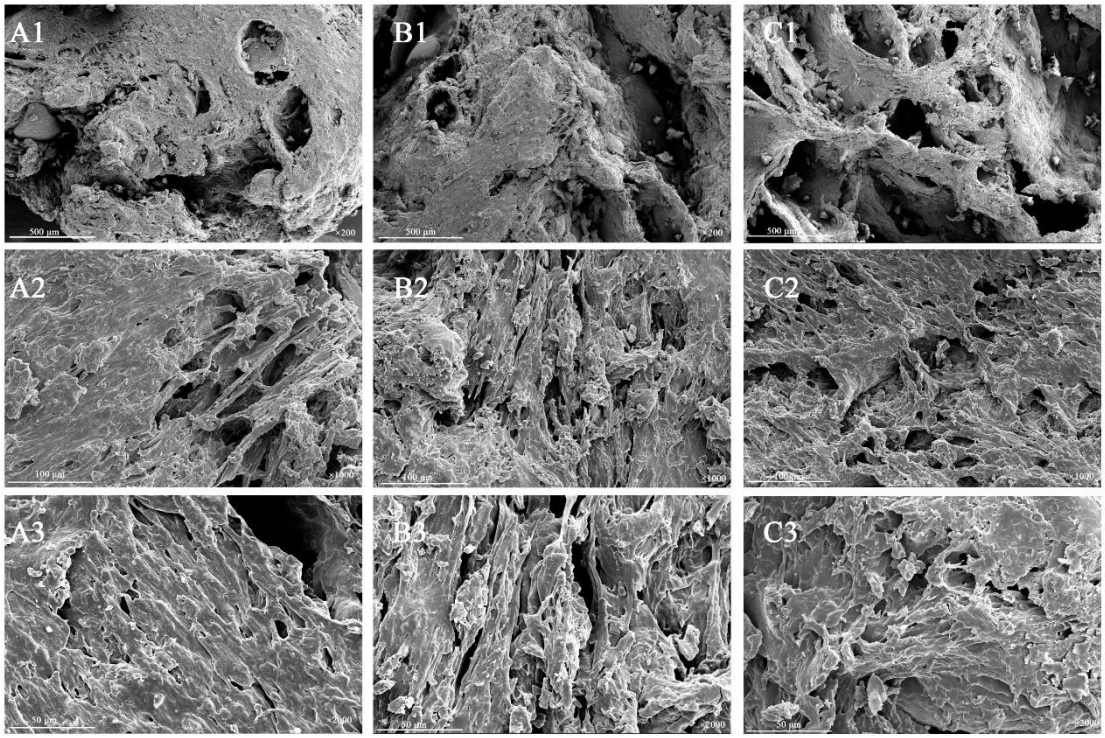


图 1 不同水分含量下大豆组织蛋白微观结构

**Fig.1 Microstructure of soybean tissue protein under different moisture contents**

注：A、B 和 C 分别表示水分含量 40%、50%和 60%时制备的产品。1、2、3 分别表示放大倍数为 200 倍、1 000 倍和 2 000 倍。

不同水分含量下制备的大豆组织蛋白扫描电子显微镜图如图 1 所示。由图可以看出，在 40%水分含量时制备的产品表面致密，又少许孔洞结构，在 1 000 倍 2 000 倍时呈现出一定层状结构。随着水分含量的增加，大豆组织蛋白表面孔洞数量及大小呈现出增加的趋势。Wu 等[24]也发现了类似的结果，随着水分含量的增加使得孔洞结构增加。当水分含量为 50%时在放大倍数为 2 000 倍时呈现出明显的纤维结构，当水分含量为 60%时，孔洞结构增加，整体呈现出不规则结构。这是由于物料在挤压膨化时物料通过模具孔时其中的水分会发生汽化作用，使其形成一定的孔状结构[25]。在低水分含量时，汽化程度有限，因此使其结构较为致密，硬度较大；当水分含量增加时，在模具孔处汽化程度提高，导致其孔洞数量提高，使得产品呈现出疏松多孔结构，在一定程度上会破坏形成的纤维状结构，使其组织化度下降，这与组织化度和质构特性研究结果一致。

## 2.5 不同水分含量对大豆组织蛋白二级结构影响

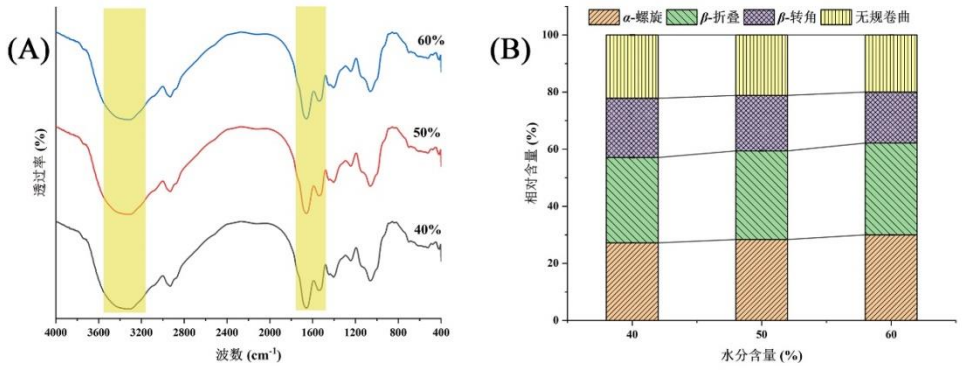


图 2 不同水分含量下制备的大豆组织蛋白 FT-IR 图谱和二级结构含量

**Fig.2 FT-IR profiles and secondary structure content of soybean tissue proteins prepared at different moisture contents**

注：（A）：FT-IR 图谱；（B）蛋白质二级结构相对含量。

FT-IR 光谱可以反映物质化学键的振动，可用来检测蛋白质分子构象的变化，是测定蛋白质二级结构有效手段。1 700~1 600 $cm^{-1}$ 处为酰胺I带的伸缩振动有关，其中包含大量与蛋白质结构有关的信息[26,27]。利用 Peakfit 4.12 对酰胺I带进行拟合可得到蛋白质二级结构相对含量，其中包括 $\alpha$-螺旋（1 664~1 646 $cm^{-1}$）、$\beta$-折叠（1 637~1 615 $cm^{-1}$、1 700~1 682 $cm^{-1}$）、$\beta$ 转角（1 681~1 664 $cm^{-1}$）和无规卷曲（1 645~1 637 $cm^{-1}$）[28]。蛋白质二级结构相对含量如图 2B 所示。由图可以看出，随着水分含量的增加，制备的大豆组织蛋白中 $\alpha$-螺旋和 $\beta$-折叠含量呈现上升的趋势，$\alpha$-螺旋由 W-40（水分含量 40%）的 27.21%提高至 W-60 的 30.01；$\beta$-折叠由 W-40 的 29.88%提高至 W-60 的 32.13%，而 $\beta$-转角和无规卷曲含量呈现下降趋势。这是由于在挤压时使得蛋白质结构被破坏后进行重组，驱动肽链平行排列，促进蛋白质发生定向排列，因此使得蛋白质 $\alpha$-螺旋和 $\beta$-折叠含量上升，由于在挤压过程中蛋白质结构被破坏，导致维持 $\beta$-转角的氢键同时被破坏，使得肽链伸展，导致 $\beta$-转角向-$\beta$ 折叠转变[29]。有研究表明，$\beta$-转角向 $\beta$-折叠转变有利于纤维结构的形成，纤维结构形成的基础是 $\beta$-折叠结构[30]。研究结果与组织化度研究结果一致。

## 2.6 素食火腿肠感官评定

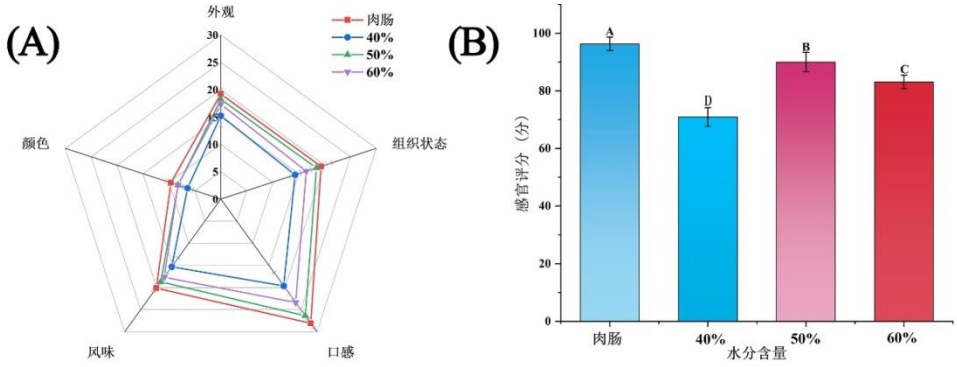


图 3 不同火腿肠感官品质评价

**Fig.3 Sensory score of ham gut**

注：（A）：不同火腿肠在不同模块所得分值；（B）：不同火腿肠感官评价总分。

不同水分含量下制备的大豆组织蛋白替代肉制备素食火腿肠感官评价如图 3 所示。由图 3A 可以看出，肉肠在外观、口感、组织状态等方面具有良好的表现。素食火腿肠随着组织蛋白制备时水分含量的提高呈现出先升高后下降的趋势，并且在 50%时各方面与肉肠较为接近。由于在 40%水分含量下制备的大豆组织蛋白颜色较暗，因此制备的素食火腿肠的颜色评分低于其余两组，同时其组织化度较低，硬度较大，因此在制备的素食火腿肠在口感、组织状态等方面均最低。当水分含量为 50%时，大豆组织蛋白的组织化度提高，硬度等质构特性下降，使其在口感上与猪肉较为接近，因此其感官评分最高，当水分含量达到 60%时，其组织化度降低、硬度等特性降低，使其与肉的口感相差较大，因此整体呈现出先升高后下降的趋势。（图 3B）。因此在 50%含水量下制备的大豆组织蛋白可以在一定程度上替代肉类开发健康食品。

## 2.7 素食火腿肠质构特性分析

表 5 不同火腿肠质构特性

**Table 5 Texture characteristics of different ham intestines**

| 名称 | 硬度/g | 弹性 | 粘性 | 咀嚼性/g |
|---|---|---|---|---|
| 肉肠 | 2 942.44±42.21$^{b}$ | 0.88±0.01$^{a}$ | 0.75±0.02$^{ab}$ | 2 029.39±35.26$^{b}$ |
| 40% | 3 524.21±36.44$^{a}$ | 0.82±0.02$^{b}$ | 0.77±0.02$^{a}$ | 2 432.61±42.32$^{a}$ |
| 50% | 2 705.63±52.26$^{c}$ | 0.84±0.02$^{b}$ | 0.71±0.02$^{bc}$ | 1 815.52±44.36$^{c}$ |
| 60% | 2 572.21±33.21$^{d}$ | 0.82±0.01$^{b}$ | 0.70±0.03$^{c}$ | 1 716.32±21.35$^{d}$ |

注：数值采用平均值±标准差表示，不同字母表示同列间数据差异显著（$P$<0.05）。

不同火腿肠质构特性如表 5 所示，由表可以看出，随着水分含量的提高，硬度、粘性和咀嚼性呈现下降的趋势，这是由于在进行挤压膨化时，40%的水分含量时由于水分含量过低，因此在挤压时无法充分组织化，因此导

致组织化程度较低，硬度较大（3 524.21 g），因此制备的素食火腿肠具有较高的硬度，使其口感较差，当制备组织蛋白时的水分含量达到 50%时，大豆蛋白组织化程度提高，因此其制备的素食火腿肠具有较好的口感；当水分含量达到 60%时，物料在筒体内移动速度过快，导致物料无法充分挤压形成纤维结构，其硬度较低，因此添加至素食火腿肠中导致整体口感较软，无法达到肉肠的口感。素食火腿肠弹性均低于肉肠，这可能是由于植物蛋白凝胶网络弹性要低于动物蛋白的凝胶弹性，因此使得素食火腿肠弹性均低于肉肠。感官评定中也发现在口感上肉肠要优于素食火腿肠。

## 3 结论

本研究以大豆分离蛋白为主要原料，探究不同水分含量对制备的大豆组织蛋白结构与理化特性的影响，并制备素食火腿肠，探究对素食火腿肠品质变化。研究发现，随着挤压原料水分含量的提高，组织化大豆蛋白的亮度逐渐增强，组织化度呈现出先升高后下降的趋势，硬度、弹性等呈现出下降的趋势，同时，大豆组织蛋白的 $\alpha$-螺旋和 $\beta$-折叠含量呈现上升的趋势，而 $\beta$-转角和无规卷曲含量呈现下降趋势，表明随着水分含量的提高，物料在螺杆中流动速度加快，抑制了美拉德反应，同时促进了纤维结构的形成。当水分含量大于 50%时，蛋白质流动速度过快，使得纤维结构的形成被抑制。将三种组织蛋白制备素食火腿肠时，水分含量 50%时制备的组织蛋白时感官评定和质构特性均显示与肉肠具有相似的感官特性。本研究有助于了解水分对于挤压处理制备大豆组织蛋白的性质影响，为今后组织蛋白的制备及相关产品开发提供理论支持。

## 参考文献


[1] ZHANG Y L, SHAO F, WANG X, et al. Effects of rapeseed protein addition on soybean protein-based textured protein produced by low-moisture extrusion: changes in physicochemical attributes, structural properties and barrel flow behaviors [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109631.

[2] YANG L Y, YING Z W, LI H, et al. Extrusion production of textured soybean protein: the effect of energy input on structure and volatile beany flavor substances [J]. Food Chemistry, 2022, 405(PA): 134728.

[3] LARY S O, LAURA Z, ALBERTO G M, et al. Comparative dynamic sensory profile of meat and plant-based meat analogs [J]. LWT, 2025, 223: 117788.

[4] 王瑞环,孔欣欣,蒋华彬,等.不同植物蛋白对植物肉品质特性的影响[J].食品与发酵科技,2024,60(3):14-20.

[5] 郭志伟,杨进洁,边文洁,等.酵母抽提物对植物蛋白肉品质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(22):9-14.

[6] LORENZO L, SARA C, CLAUDIO E, et al. Tailoring texture and functionality of vegetable protein meat analogues through 3D printed porous structures [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110611.

[7] LEE J S, KIM S, JEONG Y J, et al. Impact of interactions between soy and pea proteins on quality characteristics of high-moisture meat analogues prepared via extrusion cooking process [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108567.

[8] 王莉芬.仿牛肉大豆组织蛋白的食用品质评价及改良[D].郑州:河南工业大学,2021.

[9] 全鹏飞.盐离子对高水分组织蛋白品质的影响及机理研究[D].郑州:河南工业大学,2024.

[10] 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.

[11] 徐红华,申德超.不同挤压参数对大豆粕蛋白质结构的影响[J].农业工程学报,2007,7:267-271.

[12] 张金闯.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.

[13] 郎珊珊,阎树田,石戴卫.操作参数对挤压组织化花生蛋白质构特性的影响[J].中国油脂,2014,39(12):23-26.

[14] CHEVANAN N, ROSENTRATER K A, MUTHUKUMARAPPAN K. Effect of ddgs, moisture content, and screw speed on physical properties of extrudates in single-screw extrusion [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(2): 132-139.

[15] ANNA H, HUAN Z, FENG G, et al. Three-dimensional porous fibrous structural morphology changes of high-moisture extruded soy protein under the effect of moisture content [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110600.

[16] 梁会会.大豆分离蛋白流变学特性对组织蛋白品质的影响[D].郑州:河南工业大学,2021.

[17] M A, K J, D E, et al. Characteristics of dough rheology and the structural, mechanical, and sensory properties of sponge cakes with sweeteners [J]. Molecules, 2021, 26(21): 6638.

[18] 袁钦杰.基于高湿挤压及不同组织化蛋白对植物肉品质特性影响研究[D].杭州:浙江农林大学,2024.

[19] YASAR S, TOSUN R, SNMEZ Z .Fungal fermentation inducing improved nutritional qualities associated with altered secondary protein structure of soybean meal determined by FT-IR spectroscopy [J]. Measurement, 2020, 161: 107895.

[20] LI D, ZHANG T, GAO F, et al. The study of numerical simulation and texture of soybean protein based on high moisture extrusion with different screw elements [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2024, 92: 103560.

[21] ZHANG Y, SHAO F, WAN X, et al. Understanding the mechanism for sodium tripolyphosphate in improving the physicochemical properties of low-moisture extrusion textured protein from rapeseed protein and soybean protein blends [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 272(P1): 132656.

[22] CHEN F, WEI Y, ZHANG B, et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 96(2): 208-213.

[23] TINGLE C, MCCLINTIC K, ZERVOUDAKIS A, et al. Texturization of pea protein isolate by micro compounding [J]. Food Research International, 2023, 163: 112250.

[24] QI W, ZHANG X, GAO F, et al. Study on the residence time and texture prediction of pea protein extrusion based on image analysis [J]. Foods, 2023, 12(24): 4408.

[25] 陈锋亮.植物蛋白挤压组织化过程中水分的作用[D].北京:中国农业科学院,2010.

[26] 张茵,袁钦杰,胡浩,等.转谷氨酰胺酶对高水分挤压大豆组织蛋白结构特性及品质的影响[J].食品工业科技,2025,46(20):41-47.

[27] 杨盼盼,赵贺开,袁兵兵,等.剪切预处理对大豆蛋白纳米纤维形成及结构特征的影响[J].食品工业科技,2025,46(22):95-102.

[28] XU Z, SHAN G, HAO N, et al. Structure remodeling of soy protein-derived amyloid fibrils mediated by epigallocatechin-3-gallate [J]. Biomaterials, 2022, 283: 121455.

[29] 梁春艳.高水分挤压组织化花生蛋白制备及其应用研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2022.

[30] NIU M, XIONG L, ZHANG, et al. Comparative study on protein polymerization in whole-wheat dough modified by transglutaminase and glucose oxidase [J]. LWT, 2018, 90: 323-330.