

挤压预处理对黑豆粕蛋白质消化率和酱油品质、抗氧化活性的影响

成晓苑¹ 马成业² 李宏军²

(1. 长治职业技术学院, 山西 长治 046000; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049)

摘要: [目的]探究挤压预处理对黑豆粕蛋白质消化率的调控机制,并系统评价其对酱油品质及抗氧化活性的影响。[方法]采用挤压技术对黑豆粕和面粉混合物进行预处理来酿造酱油,选择挤压温度、螺杆转速、面粉添加量、水分含量为主要工艺参数,探究其对蛋白质消化率的影响。在最优挤压条件下制备原料,进一步进行低盐固态酱油模拟发酵,测定氨基酸态氮、总氮、还原糖、pH值、总酸、铵盐、可溶性无盐固形物及抗氧化活性(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除率、总酚含量),评估挤压改性对酱油品质及抗氧化活性的影响。[结果]最佳挤压参数为挤压温度100.0℃,螺杆转速205 r/min,面粉添加量15.5%,水分含量17.8%,此时挤出物蛋白质消化率达85.25%,较未挤压黑豆粕提高49.23%。相较未挤压组,挤压预处理组酱油的氨基酸态氮、总氮含量分别提升50.8%和44.9%,还原糖含量提高36.2%;同时,抗氧化活性显著增强,DPPH自由基清除率由42.6%升至60.3%,总酚含量增加约42.2%。[结论]挤压预处理可显著提高蛋白质消化率,并通过适度变性及淀粉糊化协同效应改善酱油发酵底物的酶解效率与风味前体生成,同时增强产品的抗氧化功能。

关键词: 黑豆粕;挤压预处理;蛋白质消化率;工艺优化;酱油酿造

Extrusion pretreatment improves the protein digestibility of black soybean meal and its effects on the final quality and antioxidant activity of soy sauce

Cheng Xiaoyuan¹ Ma Chengye² Li Hongjun²

(1. Changzhi Vocational and Technical College, Changzhi, Shanxi 046000, China; 2. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract: [Objective] To investigate the regulatory mechanisms of extrusion pretreatment on the protein digestibility of black soybean meal and systematically evaluate its effects on soy sauce quality and antioxidant activity. [Methods] A mixture of black soybean meal and flour was pretreated using extrusion technology for soy sauce brewing. Extrusion temperature, screw speed, flour addition, and moisture content were selected as the main process parameters to investigate their effects on protein digestibility. Under the optimal extrusion conditions, the raw materials were prepared and further subjected to simulated low-salt solid-state soy sauce fermentation. Amino nitrogen, total nitrogen, reducing sugar, pH, total acid, ammonium salt, soluble salt-free solids, and antioxidant activity (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl [DPPH] radical-scavenging rate and total phenolic content) were measured to evaluate the effects of extrusion modification on soy sauce quality and antioxidant activity. [Results] The optimal extrusion parameters were an extrusion temperature of 100.0℃, screw speed of 205 r/min, flour addition of 15.5%, and moisture content of 17.8%. Under these conditions, the protein digestibility of the extrudate reached 85.25%, representing a 49.23% increase compared with that of unextruded black soybean meal. Compared with the unextruded group, the amino nitrogen and total nitrogen contents of soy sauce in the extrusion pretreatment group increased by 50.8% and 44.9%, respectively,

基金项目:山东省重点研发计划项目(编号:2023TZX004)

通信作者:李宏军(1968—),男,山东理工大学教授,博士。E-mail:lsmartlj@sohu.com

收稿日期:2026-03-11 改回日期:2026-07-20

引用格式:成晓苑,马成业,李宏军. 挤压预处理对黑豆粕蛋白质消化率和酱油品质、抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 205-212.

Citation: Cheng Xiaoyuan, Ma Chengye, Li Hongjun. Extrusion pretreatment improves the protein digestibility of black soybean meal and its effects on the final quality and antioxidant activity of soy sauce[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 205-212.

while the reducing sugar content increased by 36.2%. Meanwhile, antioxidant activity was significantly improved, with the DPPH radical-scavenging rate increasing from 42.6% to 60.3% and the total phenolic content increasing by approximately 42.2%. [Conclusion] Extrusion pretreatment can significantly enhances protein digestibility and, through the synergistic effects of moderate denaturation and starch gelatinization, improve the enzymatic hydrolysis efficiency and generation of flavor precursors in soy sauce fermentation substrates, while enhancing the antioxidant function of the product.

Keywords: black soybean meal; extrusion pretreatment; protein digestibility; process optimization; soy sauce brewing

酱油是中国传统酿造调味品的典型代表,是以植物性蛋白为原料,加上淀粉类辅料,在一定盐分浓度条件下,经微生物发酵和复杂的生化反应,使蛋白质和糖类分解成多肽、氨基酸、有机酸和糖醇等多元风味化合物,呈现出独特的色香味和流变性质^[1]。传统酱油一般用黄豆或其豆粕作为主要原料,经过多道工序制成,而《本草纲目》中早有记载,大豆有黑、白、黄、褐、青、斑等多种颜色,其中黑豆可入药^[2-4]。相较于黄豆,黑豆的种皮富含具有降低餐后血糖功效的原花青素及花色苷等活性物质,同时黑豆中的总黄酮、维生素、总酚及总花色苷等营养成分含量均高于黄豆^[5-7]。以黑豆为原料酿造的酱油,其总氮、氨基态氮、还原糖含量及抗氧化活性均显著优于黄豆酱油,且醇、酯及醛酮类等主要挥发性风味成分比例均衡,风味协调性更佳。黑豆粕呈淡青或浅褐色的不规则硬块状,作为黑豆榨油后的副产品带有独特的烤豆类香气,蛋白质含量高达 40%~50%^[8-9]。目前,黑豆粕主要被用作蛋白饲料,造成优质植物蛋白资源的严重浪费。

酱油原料的预处理过程直接影响原料蛋白质的消化率,进而对后续制曲过程中的蛋白酶活力及成品酱油的氨基态氮含量产生关键影响。与传统蒸煮工艺相比,挤压预处理能够使原料蛋白质变性更均匀,其结构更易被酶水解,从而为后续发酵过程创造有利条件。试验拟以黑豆粕为主原料,面粉为辅料,采用挤压工艺进行加工。在单因素试验的基础上,采用中心复合设计(CCD)响应面分析法对挤压温度、螺杆转速、面粉添加量、水分含量等主要参数的影响机制进行系统探究。同时,在优化挤压参数的基础上,将挤压改性黑豆粕应用于酱油模拟发酵,阐明其对氨基酸态氮、总氮、还原糖及抗氧化活性的影响,为拓展黑豆粕在酱油制造中高值化应用场景提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料和试剂

黑豆粕:蛋白质含量 37.03%,水分含量 10.17%,招远市温记食品有限公司;

面粉:蛋白质含量 11.31%,淀粉含量 73%,水分含量 12.66%,五得利面粉有限公司;

米曲霉:酶活,上海迪发酿造生物制品有限公司;

胃蛋白酶(猪胃黏膜,高纯 1:10 000,酶活 10 000 U/g)、胰蛋白酶(猪胰,生物试剂 1:250,酶活 250 U/mg):上海源

叶生物科技有限公司;

其余试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

单螺杆挤压机:YJP200 型,配备自动控制系统,螺杆外径 77 mm,螺杆长径比 16.4:1,模孔直径 10 mm,山东理工大学农产品深加工实验室自制;

全自动凯氏定氮仪:K9860 型,山东海能科学仪器有限公司;

植物粉碎机:FZ-102 小型,天津市泰斯特仪器有限公司;

立式压力蒸汽灭菌锅:XQ-LS-50SII 型,上海博迅实业有限公司;

恒温培养箱:LRH-250F 型,上海一恒科学仪器有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV-1800 型,日本岛津公司;

台式 pH 计:FE28 型,瑞士梅特勒—托利多公司;

台式高速离心机:TG16-WS 型,长沙湘仪离心机有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

黑豆粕→粉碎(过 40 目筛)→添加面粉(10%~26%)→调节水分(14%~30%)→混匀→挤压预处理(挤压温度 75~115 °C,螺杆转速 130~250 r/min,喂料速度 20 kg/h,模头压力 3~5 MPa)→冷却晾干(风速 1.5 m/s,30 min)→二次粉碎(过 60 目筛)→指标测定及酿造

1.3.2 单因素试验 参照文献[10-12]及预试验,固定挤压温度 95 °C、螺杆转速 190 r/min、面粉添加量 18%、水分含量 22%。分别考察挤压温度(75, 85, 95, 105, 115 °C)、螺杆转速(130, 160, 190, 220, 250 r/min)、面粉添加量(10%, 14%, 18%, 22%, 26%)及水分含量(14%, 18%, 22%, 26%, 30%)对挤压后物料蛋白质消化率的影响。

1.3.3 CCD 试验设计 根据单因素试验结果,选取挤压温度、螺杆转速、面粉添加量和水分含量为变量,以挤出物蛋白质消化率为响应值,采用 Design-Expert 13 软件进行响应面中心复合设计(CCD)试验。

1.3.4 指标测定

(1) 水分含量:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 粗蛋白、总氮含量:按 GB 5009.5—2016 执行,氮折算系数为 6.25。

(3) 蛋白质消化率:采用胃蛋白酶—胰蛋白酶两步体外消化法^[13]。

(4) 氨基酸态氮含量:按 GB 5009.235—2016 执行。

(5) 还原糖含量:采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法,以葡萄糖计。

(6) DPPH 自由基清除能力:采用分光光度法。

(7) 总酚含量:采用福林酚法^[14],以没食子酸计。

(8) pH 值:按 GB 5009.237—2016 执行。

(9) 总酸含量:按 GB 5009.235—2016 执行,以乳酸计。

(10) 铵盐含量:采用半微量定氮法。

(11) 可溶性无盐固形物含量:采用烘干称重法,表征酱油中除氯化钠外的可溶性物质含量。

1.3.5 酱油模拟发酵 每批使用原料(黑豆粕+面粉混合物)200 g,于 500 mL 三角瓶中进行低盐固态发酵,同时以未挤压组为对照。

(1) 润水:原料中加入 40% 蒸馏水,室温静置 30 min。

(2) 蒸料:121 °C(0.1 MPa)蒸煮 15 min(不含升降温时间),自然冷却至 35 °C。

(3) 接种:取 1×10^6 CFU/mL 的米曲霉分生孢子悬液,以 11 mL/kg 原料进行接种,使用喷雾装置将菌悬液均匀喷洒于冷却至室温的熟料表面。

(4) 制曲:将接种后物料平铺于无菌搪瓷盘中,厚度约 2 cm,30 °C、相对湿度为 85%~90% 的恒温培养箱中培养 72 h;其间于 24,48 h 各翻曲一次。

(5) 盐水发酵:配制 12 °Bé 盐水(121 °C 灭菌 15 min),冷却后按料水比 1:1.2 (g/mL) 加入成曲中,混匀后分装至 500 mL 三角瓶,用 8 层纱布封口,40 °C 恒温静置发酵 20 d。

(6) 压榨与灭菌:发酵结束后用双层纱布压榨过滤,生酱油于 80 °C 水浴灭菌 30 min,冷却后检测氨基酸态氮、总氮、还原糖、pH 值、总酸、铵盐、可溶性无盐固形物、DPPH 自由基清除能力、总酚含量等指标。

1.3.6 数据处理与统计分析 每个样品设置 3 次平行试验取平均值。单因素试验数据用 Origin 2024 软件绘制折线图;CCD 试验用 Design-Expert 13 进行试验设计和数据分析,建立回归模型并进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 挤压温度对蛋白质消化率的影响 由图 1 可知,随着挤压温度的升高,蛋白质消化率呈先升高后降低趋势。当挤压温度为 95 °C 时,蛋白质消化率达到最高值 84.25%。在较低挤压温度范围内,随着挤压温度的升高,蛋白质空间结构作用力逐渐减弱,蛋白质发生适度变性,其内部的酶解位点得以暴露^[15-17],从而使消化率逐步提

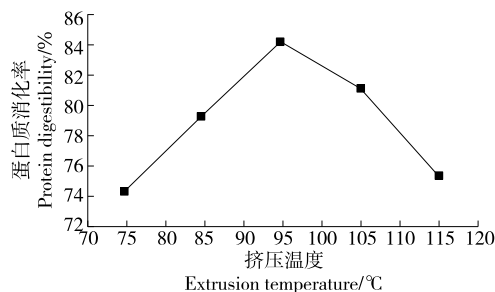


图 1 挤压温度对蛋白质消化率的影响

Figure 1 Effect of extrusion temperature on protein digestibility

高;但挤压温度持续升高,蛋白质会发生过度变性,分子间发生聚集反应,导致其难以被消化酶水解,消化率随之下降。

2.1.2 螺杆转速对蛋白质消化率的影响 由图 2 可知,螺杆转速对蛋白质消化率的影响呈先升高后降低的趋势。当螺杆转速为 190 r/min 时,蛋白质消化率达到峰值 84.16%。螺杆转速决定了物料在挤压机腔体内的停留时间和所受到的剪切力强度。螺杆转速 < 190 r/min 时,随着螺杆转速的提升,物料受到的剪切力逐渐增大,蛋白质分子空间结构逐步展开,因而消化率增大;螺杆转速持续加快时,物料在腔体内停留时间明显缩短,高强度剪切力会使蛋白质的疏水基团暴露,蛋白质分子发生聚集,从而使蛋白质变性时间不足,最终导致消化率下降。

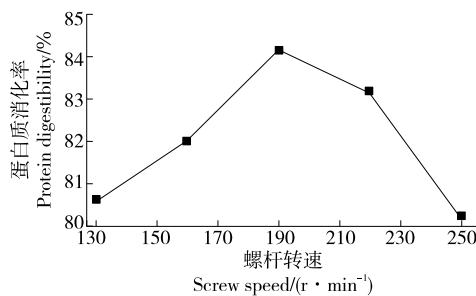


图 2 螺杆转速对蛋白质消化率的影响

Figure 2 Effect of screw speed on protein digestibility

2.1.3 面粉添加量对蛋白质消化率的影响 由图 3 可知,随着面粉添加量的增加,蛋白质消化率呈先升高后降低趋势,在面粉添加量为 18% 时达到最高值 84.15%。挤压过程中,物料的膨化程度主要依靠淀粉的糊化作用,适当提高面粉添加量能够增大物料膨化度,使蛋白质溶出更多,从而提高消化率;但面粉添加量过高,淀粉糊化会增大挤压机腔体内黏度^[18],蛋白质分子被淀粉包裹,酶与蛋白质的接触减少,从而导致消化率降低。

2.1.4 水分含量对蛋白质消化率的影响 由图 4 可知,水分含量对蛋白质消化率的影响也呈先升高后降低趋势,

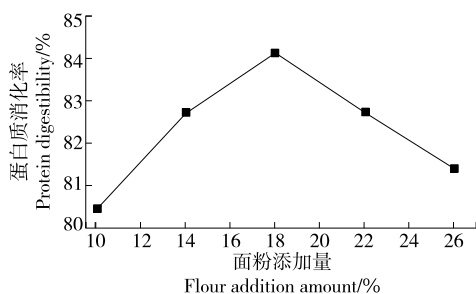


图3 面粉添加量对蛋白质消化率的影响

Figure 3 Effect of flour addition on protein digestibility

当水分含量为 22% 时,消化率达到最高值 84.35%。水分会影响挤压过程中物料的羰氨反应速率^[19],适度提高水分含量可一定程度上抑制羰氨反应^[20],降低氨基酸损耗,从而提高蛋白质消化率;但挤压机腔体内水分含量过高,润滑度增加,物料受到的摩擦、剪切作用减弱,蛋白质变性不充分,从而使消化率显著下降。

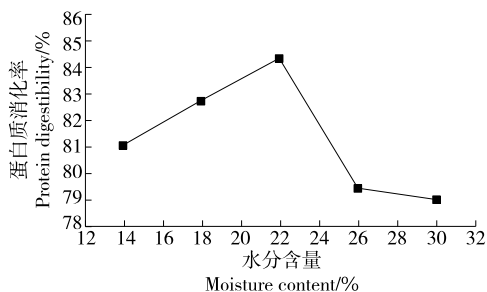


图4 水分含量对蛋白质消化率的影响

Figure 4 Effect of moisture content on protein digestibility

2.2 CCD 试验

2.2.1 回归模型的建立与显著性检验 CCD 试验因素水平表见表 1,试验设计及结果见表 2。

利用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行多元回归拟合分析,建立蛋白质消化率与各影响因素的二次回归模型:

$$Y = 84.424 + 0.321A + 0.081B - 0.090C - 0.029D - 0.527AB - 0.271AC + 0.352AD - 0.247BC - 0.893BD + 0.672CD - 1.153A^2 - 0.882B^2 - 0.363C^2 - 0.691D^2 \quad (1)$$

由表 3 可知,模型 F 值为 131.45 ($P < 0.0001$),失拟项 F 值为 0.943 ($P = 0.533$),回归模型极显著而失拟项不显著,说明该模型能够较好地拟合试验数据。模型决定系数 $R^2 = 0.9887$,校正决定系数 $R^2_{Adj} = 0.9812$,预测决定系数 $R^2_{Pre} = 0.9628$,表明模型的拟合精度高,稳定性与预测性俱佳,可用于基于蛋白质消化率的黑豆粕酱油原料挤压参数优化。影响蛋白质消化率的因素主要有一次项 A,交互项 AB、AC、AD、BC、BD、CD 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2

表 1 CCD 试验因素与水平表

Table 1 Factors and levels of CCD

水平	A 挤压温度/℃	B 螺杆转速/(r·min ⁻¹)	C 面粉添加量/%	D 水分含量/%
-2	90	150	14	16
-1	95	170	16	18
0	100	190	18	20
1	105	210	20	22
2	110	230	22	24

($P < 0.01$)。根据 F 值,各因素对蛋白质消化率的影响由强到弱依次为挤压温度>面粉添加量>螺杆转速>水分含量。

2.2.2 各因素交互作用对蛋白质消化率的影响 由图 5 可知,在保持螺杆转速不变的情况下,随着挤压温度的升高,蛋白质消化率先升高后降低,在 100℃ 时达到峰值;当挤压温度不变时,随着螺杆转速的增大,蛋白质消化率先增大后减小,在 190 r/min 时达到最大。挤压温度为影响蛋白质变性的重要因素之一^[21],其适宜范围可以很好地促进蛋白质的变性过程以及淀粉的糊化反应^[22]。合理的螺杆转速则保证了物料在腔体内的停留时间和剪切效果^[23-24],两者协同作用可实现蛋白质消化率的最大化;若挤压温度过高或螺杆转速过快,可能会导致蛋白质化学键完全被破坏,且与高聚碳水化合物交联而过度变性^[25],或者由于停留时间不足而导致变性不充分,均会降低消化率。

当挤压温度固定,随着面粉添加量的增加,蛋白质消化率先升高后降低,并在 18% 时达到峰值;当面粉添加量固定时,蛋白质消化率随挤压温度的升高而先升高后降低,并在 100℃ 时达到峰值。面粉中的淀粉在挤压过程中糊化,与蛋白发生相互作用^[26-27],适度的面粉添加量可提高物料膨化度,促进蛋白质溶出^[28];但面粉添加量过多会包裹蛋白质,而挤压温度过高则会导致蛋白质与淀粉形成难以消化的复合物,均会降低消化率。在固定挤压温度下,水分含量对蛋白质消化率的影响呈先增后减的趋势,在 22% 时达到最大值;当水分含量不变时,随着挤压温度的逐渐升高,蛋白质消化率也表现出先升后降的趋势,峰值出现在 100℃ 时。水分含量过低会导致腔体内物料流动性低、摩擦阻力大,蛋白质挤压变性效果不佳;水分含量过高则会减弱剪切作用,且物料持水量增加而水分蒸发程度差,会降低蛋白质变性程度;适宜的挤压温度与水分含量搭配,能够为蛋白质变性创造最佳条件,从而提高消化率。螺杆转速不变时,随着面粉添加量的增加,蛋白质消化率先升后降,在 18% 时达到最高点;面粉添加量不变时,增加螺杆转速也会造成蛋白质消化率先升后降,在 190 r/min 时也有峰值。螺杆的高速转动产生的高

表2 CCD试验设计及结果

Table 2 CCD experimental design and results					
试验号	A	B	C	D	蛋白质消化率/%
1	-1	-1	-1	-1	80.05
2	1	-1	-1	-1	81.77
3	-1	1	-1	-1	83.56
4	1	1	-1	-1	83.33
5	-1	-1	1	-1	79.70
6	1	-1	1	-1	80.25
7	-1	1	1	-1	82.15
8	1	1	1	-1	80.36
9	-1	-1	-1	1	79.88
10	1	-1	-1	1	83.03
11	-1	1	-1	1	79.85
12	1	1	-1	1	80.45
13	-1	-1	1	1	82.01
14	1	-1	1	1	83.88
15	-1	1	1	1	80.78
16	1	1	1	1	81.05
17	2	0	0	0	79.32
18	-2	0	0	0	80.11
19	0	2	0	0	80.55
20	0	-2	0	0	81.05
21	0	0	2	0	82.98
22	0	0	-2	0	82.77
23	0	0	0	2	81.68
24	0	0	0	-2	81.45
25	0	0	0	0	84.35
26	0	0	0	0	84.25
27	0	0	0	0	84.16
28	0	0	0	0	84.45
29	0	0	0	0	84.25
30	0	0	0	0	84.22
31	0	0	0	0	84.15
32	0	0	0	0	84.57
33	0	0	0	0	85.01
34	0	0	0	0	84.67
35	0	0	0	0	84.64
36	0	0	0	0	84.37

剪切力和高摩擦力对淀粉糊化和蛋白质变性有促进作用,但由于螺杆转速过快,物料停留时间过短,淀粉糊化不充分,膨化效果变差;适宜的面粉添加量与螺杆转速协同,可实现蛋白质消化率达到最高。

2.2.3 最优挤压参数的确定与验证 通过 Design-Expert 13 软件进行优化,得到最优挤压工艺参数为挤压温度

表3 二次模型的方差分析[†]

Table 3 ANOVA for quadratic model						
来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	118.47	14	8.46	131.45	<0.000 1	**
A	2.48	1	2.48	38.57	<0.000 1	**
B	0.16	1	0.16	2.49	0.129 8	
C	0.19	1	0.19	3.02	0.096 9	
D	0.02	1	0.02	0.32	0.579 3	
AB	4.45	1	4.45	69.16	<0.000 1	**
AC	1.18	1	1.18	18.29	0.000 3	**
AD	1.99	1	1.99	30.88	<0.000 1	**
BC	0.98	1	0.98	15.22	0.000 8	**
BD	12.78	1	12.78	198.53	<0.000 1	**
CD	7.24	1	7.24	112.40	<0.000 1	**
A ²	42.58	1	42.58	661.43	<0.000 1	**
B ²	24.91	1	24.91	386.94	<0.000 1	**
C ²	4.23	1	4.23	65.69	<0.000 1	**
D ²	15.28	1	15.28	237.37	<0.000 1	**
残差	1.35	21	0.06			
失拟项	0.62	10	0.06	0.94	0.533 0	
纯误差	0.73	11	0.07			
校正总和	119.83	35				

[†] **表示极显著 ($P<0.01$); $R^2=0.988\ 7$, $R_{Adj}^2=0.981\ 2$, $R_{Pre}^2=0.962\ 8$ 。

99.75℃、螺杆转速 205.18 r/min、面粉添加量 15.49%、水分含量 17.83%,该条件下蛋白质消化率的理论预测值为 85.4%。为了检验生产应用的可行性,将最优工艺参数修正为挤压温度 100℃、螺杆转速 205 r/min、面粉添加量 15.5%、水分含量 17.8%,此时蛋白质消化率平均值为 85.25% ($n=3$),与理论预测值相差 0.18%,很好地体现了建立的回归模型准确性和拟合效果。经挤压加工后,黑豆粕蛋白质消化率较未挤压的提高了 49.23%,原料的营养价值和经济价值均有明显的提高。

2.3 最优挤压参数验证及对酱油发酵的影响

由表 4 可知,挤压组氨基酸态氮含量为 0.92 g/100 mL,较对照组提高 50.8%;总氮含量由 1.09 g/100 mL 升至 1.58 g/100 mL,提升 44.9%;还原糖含量由 2.43 g/100 mL 升至 3.31 g/100 mL,提升 36.2%。表明挤压处理不仅通过提高蛋白质消化率增强了蛋白酶可及性,还促进了淀粉的糊化与糖化进程,为美拉德反应及风味形成提供了充足的还原糖底物。于寒松等^[29]研究表明,市售酱油中还原糖含量为 0.49~3.56 g/100 mL,试验中挤压组还原糖含量处于此范围的上限水平,充分体现了挤压淀粉糊化对糖化效率的提升效应。

pH 值方面,挤压组酱油 pH 值为 5.34,显著高于对照

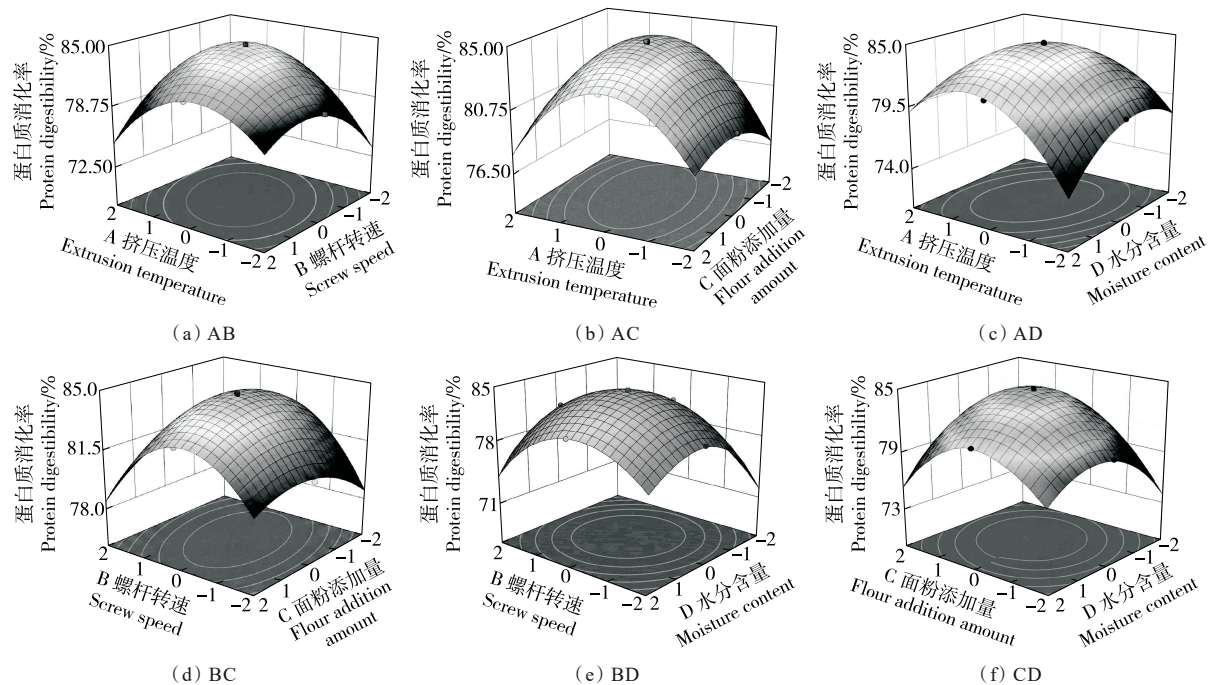


图 5 各因素交互对蛋白质消化率的影响

Figure 5 Interaction effects of different factors on protein digestibility

组($P<0.01$)。适宜的 pH 环境有利于酱油风味的协调性——pH 值过低(<4.8)易导致酸味突出、鲜味感知减弱,而过高(>5.8)则可能抑制酶解进程并影响保存稳定性。蒋琦等^[30]研究表明,优质酱油 pH 值通常为 4.8~5.8,挤压组 pH 值位于此黄金区间。pH 值的提升可能与以下因素有关:① 挤压预处理使蛋白质适度变性,发酵过程中肽段和游离氨基酸的释放模式发生变化,羧基与氨基的解离平衡趋于中性;② 还原糖含量增加促进了美拉德反应初期的羰氨缩合,氨基的消耗减少使体系 pH 下降趋势得到缓冲;③ 铵盐的相对增加对酸性代谢产物起到一定中和作用。

总酸含量方面,挤压组的总酸含量略高于对照组,与姚建华等^[31]的结果一致,说明适度的总酸有助于酱油风味的醇厚感与协调性。铵盐含量方面,挤压组和对照组的铵盐含量均远低于国家标准“不超过氨基酸态氮含量 28%”的限量(挤压组占比 15.2%),表明发酵过程正常,蛋白质分解未过度,无掺假风险。可溶性无盐固形物含量方面,挤压组的可溶性无盐固形物含量明显高于对照组,表明挤压处理有助于更多蛋白质、肽类及多糖等非盐溶性物质溶出,提升了酱油的浓厚感和体态。

抗氧化活性方面,DPPH 自由基清除能力由 42.6% 显著增至 68.3%,总酚含量由 1.87 mg/g 提升至 2.66 mg/g,增幅 42.2%。挤压过程破坏了黑豆粕细胞壁结构,使结合态酚类物质(原花青素、花色苷等)得以释放,在挤压剪切和热处理作用下部分游离,进而提升酱油的抗氧化功能。

试验发现,挤压预处理后蛋白质消化率与氨基酸态氮显著正相关($r=0.96,P<0.01$),消化率的提升意味着蛋白质分子更易被米曲霉蛋白酶系水解为小分子肽和游离氨基酸,进而贡献于鲜味及总氮积累。同时,还原糖的提高源于淀粉糊化后酶解效率增强,为美拉德反应及风味形成提供底物。此外,挤压过程破坏了细胞壁,黑豆中结合态酚类物质释放,与蛋白/淀粉形成可溶性复合物,使酱油抗氧化能力增强^[32]。该协同增效机制优于传统蒸煮

表 4 最优挤压预处理对黑豆粕酱油主要品质指标的影响
Table 4 Effect of optimal extrusion pretreatment on key quality indicators of black soybean meal soy sauce

指标	单位	未挤压组 (对照组)	挤压组 (最优)	提升 率/%
氨基酸态氮含量	g/100 mL	0.61±0.03	0.92±0.02	50.8
总氮含量	g/100 mL	1.09±0.05	1.58±0.04	44.9
pH 值		5.12±0.05	5.34±0.04	
总酸含量	g/100 mL	1.85±0.06	2.12±0.07	14.6
还原糖含量	g/100 mL	2.43±0.10	3.31±0.12	36.2
铵盐含量	g/100 mL	0.11±0.01	0.14±0.01	27.3
可溶性无盐固形物含量	g/100 mL	12.6±0.3	15.4±0.4	22.2
DPPH 自由基清除能力	%	42.6±1.5	68.3±2.1	60.3
总酚含量	mg/g	1.87±0.09	2.66±0.11	42.2

预处理,体现了挤压技术在酿造原料改性中的独特优势。

3 结论

黑豆粕的最优预处理工艺条件为挤压温度 100 °C、螺杆转速 205 r/min、面粉添加量 15.5%、水分含量 17.8%,此时蛋白质消化率高达 85.25%,较未挤压原料提升 49.23%,证实挤压技术可大幅增强黑豆粕蛋白的可消化性。挤压预处理对黑豆粕酱油具有“增鲜—醇解—抗氧”多重增益效应,证实其氨基酸态氮和总氮提升幅度(50%以上)优于常规原料处理工艺。试验仅采用低盐固态模拟发酵,后续应开展高盐稀态工艺的中试验证,并进一步分析挤压—发酵过程中花色苷保留率及风味组学(GC-MS)变化。此外,挤压能耗优化及经济性评估有待建立。未来可结合酶法协同挤压或靶向调控蛋白—多糖交联,实现更高附加值的功能性酿造产品开发。

参考文献

- [1] 冯云子,周婷,吴伟宇,等.酱油风味与功能性成分研究进展[J].食品科学技术学报,2021,39(4):14-28.
Feng Y Z, Zhou T, Wu W Y, et al. Research progress on flavor and functional components of soy sauce[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(4): 14-28.
- [2] Moey C E J, Lau W K. Health benefits of Cyanidin-3-O-glucoside and other supporting natural compounds in black soybean (*Glycine max* (L.) Merrill): a narrative review[J]. Journal of Functional Foods, 2026, 140: 107285.
- [3] Ciou J Y, Hsieh L S, Lee T T, et al. Enhancement of agricultural processed by-products: qualities analysis of fermentation method in gradient salt adding treatment of tuna cooking juice with black bean koji added[J]. Foods, 2020, 9(3): 320.
- [4] 朱水旺,王乐,樊铭聪,等.黑豆壳多酚调节面包消化特性的机理[J].食品与机械,2025,41(11):9-19.
Zhu S W, Wang L, Fan M C, et al. Research on mechanism of polyphenols from black soybean hulls regulating digestion characteristics of bread[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 9-19.
- [5] 徐颖,张雨,喻洁,等.富硒黑豆多肽制备工艺优化及其降血糖活性研究[J/OL].陕西科技大学学报,2026-03-23. <https://doi.org/10.19481/j.cnki.issn2096-398x.20260321.001>.
Xu Y, Zhang Y, Yu J, et al. Study on process optimization of selenium-enriched black soybean peptides and their hypoglycemic activity[J/OL]. Journal of Shanxi University of Science and Technology, 2026-03-23. <https://doi.org/10.19481/j.cnki.issn2096-398x.20260321.001>.
- [6] Zhang Y Y, Qi B R, Li Q N, et al. Dynamic changes on sensory property, nutritional quality and metabolic profiles of green kernel black beans during Eurotium cristatum-based solid-state fermentation[J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139846.
- [7] 于栋,高洋,何新蕾.酶法制备黑豆粕粉多肽的工艺研究[J].中国酿造,2021,40(4):143-147.
- [8] Yu D, Gao Y, He X L. Preparation of polypeptides from black bean meal by enzymatic method[J]. China Brewing, 2021, 40(4): 143-147.
- [9] Sampath V, Lee K, Kim I H. Partial replacement of soybean meal with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larva meal maintains stable reproductive performance and health status of sows and their offsprings[J]. Veterinary Sciences, 2026, 13(1): 2.
- [9] 徐美,李月明,宋佳琳,等.挤压膨化对棉籽粕蛋白质消化率的影响[J].中国调味品,2025,50(2):25-29,36.
Xu M, Li Y M, Song J L, et al. Effect of extrusion on protein digestibility of cottonseed meal[J]. China Condiment, 2025, 50(2): 25-29, 36.
- [10] Lisiecka K, Wójtowicz A, Gancarz M. Characteristics of newly developed extruded products supplemented with plants in a form of microwave-expanded snacks[J]. Materials, 2021, 14(11): 2791.
- [11] 牛丽丽,崔艳,闫志华,等.不同酿造工艺对黑豆酱油理化特性和感官品质的影响[J].食品研究与开发,2023,44(18):88-93.
Niu L L, Cui Y, Yan Z H, et al. Effects of different brewing techniques on physicochemical properties and sensory quality of black bean soy sauce[J]. Food Research and Development, 2023, 44(18): 88-93.
- [12] Phong N V, Wang C Y, Lim S D, et al. Characterization of a new jasmonate derivative and chemotaxonomical significance of secondary metabolites in the seeds of black soybean (*Glycine max*) [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2025, 123: 105060.
- [13] Xie Y T, Liao S L, Li Y M, et al. Insights into physicochemical characteristics, flavor development, and microbial succession during the natural fermentation of Sichuan-style black soybean soy sauce[J]. Foods, 2025, 14(23): 4049.
- [14] Singleton V L, Orthofer R, Lamuela-Raventós R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent[M]//Oxidants and antioxidants part A. Amsterdam: Elsevier, 1999: 152-178.
- [15] 樊炯,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.
Fan J, Xu Y F, Du T S, et al. Mixing design and quality optimization of high-moisture textured vegetable protein[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 155-162.
- [16] Zhao S N, Jiao A Q, Yang Y Y, et al. Modification of physicochemical properties and degradation of barley flour upon enzymatic extrusion[J]. Food Bioscience, 2022, 45: 101243.
- [17] Tang G, Zhang Z, Li W H, et al. Atomistic insights into thermal degradation and multifunctional design of layer-by-layer assembled PA/PEI/AgNWs cotton fabrics[J]. Progress in Organic Coatings, 2026, 216: 110171.

- [18] Li X J, Li J. The flavor of plant-based meat analogues[J]. *Cereal Foods World*, 2020, 65(4): 259-265.
- [19] Leonard W, Zhang P Z, Ying D Y, et al. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: an overview[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(1): 218-246.
- [20] Zhang P G, Yang A Z, Wang X F, et al. Optimizing soybean production and emission reduction through biogas slurry substitution and straw incorporation: a five-year field study in Northeast China's black soil region[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 393: 109853.
- [21] 任元元, 李宇航, 孟资宽, 等. 挤压膨化结合酶解制备低GI代餐粉及其体外消化率测定[J]. *食品与发酵科技*, 2024, 60(1): 22-29.
- Ren Y Y, Li Y H, Meng Z K, et al. Preparation of meal substitute powder by extrusion combined with enzymatic hydrolysis and evaluation of *in vitro* digestibility[J]. *Sichuan Food and Fermentation*, 2024, 60(1): 22-29.
- [22] Biswas R, Singh N, Tripathy P P. Drying kinetics, quality, and carbon footprint of black cardamom under different drying systems[J]. *Solar Energy*, 2026, 303: 114110.
- [23] Quevedo M, Karbstein H P, Emin M A. Denaturation behavior and kinetics of single- and multi-component protein systems at extrusion-like conditions[J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 2 145.
- [24] 张海静, 杨哲, 张敏, 等. 挤压膨化对酱油渣蛋白消化率的影响[J]. *中国调味品*, 2021, 46(10): 27-31.
- Zhang H J, Yang Z, Zhang M, et al. Effect of extrusion and expansion on protein digestibility of soy sauce residue[J]. *China Condiment*, 2021, 46(10): 27-31.
- [25] Song B, Xu X Y, Hou J Y, et al. Research on corn starch and black bean protein isolate interactions during gelatinization and their effects on physicochemical properties of the blends [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 254: 127827.
- [26] Lin L, Yu X T, Gao Y C, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of wheat starch/rice protein hydrolysate complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107348.
- [27] Seo S W, Kim J Y, Kim T Y, et al. Neuroprotection of fermented small black soybean (*Rhynchosia nulubilis*) on hippocampal neurons through antioxidant effect[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2025, 34(15): 3 681-3 691.
- [28] 程艳秋. 挤压淀粉—蛋白复合物理化性质研究及其对面团品质的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022: 25-26.
- Cheng Y Q. Study on physicochemical properties of extruded starch-protein complex and its effect on dough[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022: 25-26.
- [29] 于寒松, 张伟, 陈今朝, 等. 不同豆浆制备工艺活性成分与 DPPH 自由基清除能力比较研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(15): 63-67.
- Yu H S, Zhang W, Chen J Z, et al. Comparisons of chemical components and DPPH free radical-scavenging capacity of soymilk from different preparation methods[J]. *Food Science*, 2014, 35(15): 63-67.
- [30] 蒋琦, 林丹, 郑泽洋, 等. 酱油中食品安全相关指标设定的探讨[J]. *华南预防医学*, 2023, 49(9): 1 146-1 151.
- Jiang Q, Lin D, Zheng Z Y, et al. Discussion on the setting of relevant indexes of food safety in soy sauce[J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 2023, 49(9): 1 146-1 151.
- [31] 姚建华, 高小妹, 于巍, 等. 酱醅发酵过程中理化特性和风味动态变化研究[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2026-06-11. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045484>.
- Yao J H, Gao X M, Yu W, et al. Dynamic changes of physicochemical properties and flavor about soy sauce mash during fermentation[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*, 2026-06-11. <https://doi.org/1.13995/j.cnki.11-1802/ts.045484>.
- [32] 冯爽, 杨欣瑶, 刘玉哲, 等. 钒对发芽黑豆酚类物质含量及其抗氧化活性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2025, 46(19): 61-67.
- Feng S, Yang X Y, Liu Y Z, et al. Effect of vanadium on the content of phenolic compounds and antioxidant activity in germinated black beans[J]. *Food Research and Development*, 2025, 46(19): 61-67.