

白芸豆植物基酸奶的制备工艺优化与品质特性研究

王佳雪^{1, 2}, 胡一晨¹, 王 蕾¹, 邹 亮^{1*}, 任贵兴^{1, 2*}

(1.成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106; 2.山西大学生命科学学院, 山西太原 030006)

摘 要: [目的]本研究以白芸豆熟粉为原料, 探究料液比对白芸豆植物基酸奶的理化性质、感官评价和抗氧化活性的影响。[方法]通过设置不同的料液比(1:6、1:8、1:10、1:12、1:14), 探究酸奶的pH值、持水力、粒径、zeta电位、总黄酮含量、抗氧化活性(DPPH与ABTS⁺自由基清除率)和感官评价变化。[结果]随着料液比的降低, 酸奶中总可溶性固形物和总黄酮含量及其抗氧化活性均呈下降趋势, 并在料液比为1:14时降至最低。当料液比为1:10时, 体系表现出最佳稳定性与感官品质, 具体表现为: pH值为4.48、持水力为43.60%, 粒径为481.1 nm, zeta电位为25.59 mV, 感官评价为81.7 分。[结论]料液比为1:10的条件下制备的白芸豆酸奶, 其理化稳定性、感官品质及抗氧化活性达到最优平衡。

关键词: 白芸豆; 植物基酸奶; 料液比; 抗氧化活性; 稳定性

文章编号: 1671-4393(2026)06-0117-10

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.15

Optimization of Preparation Process and Quality Characteristics of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

WANG Jiaxue^{1, 2}, HU Yichen¹, WANG Lei¹, ZOU Liang^{1*}, REN Guixing^{1, 2*}

(1.College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan 610106;
2.School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006)

Abstract: [Objective]This study used white kidney bean cooked powder as the raw material to investigate the effects of the ratio of ingredients on the physicochemical properties, sensory evaluation, and antioxidant activity of white kidney bean plant-based yogurt.[Method]By setting different ratios of ingredients (1:6, 1:8, 1:10,

基金项目: 四川省高层次人才引进计划-天府学者项目(2022-17)

作者简介: 王佳雪(2002-), 女, 山西忻州人, 在读硕士, 研究方向为杂粮营养与功能;

胡一晨(1987-), 女, 浙江杭州人, 博士, 教授, 研究方向为食品营养与加工特性分析;

王 蕾(1996-), 女, 四川绵阳人, 博士, 副研究员, 研究方向为杂粮加工与原料高值化利用。

通信作者: 邹 亮(1979-), 男, 四川成都人, 博士, 二级教授, 博士生导师, 研究方向为杂粮的营养功能与大健康产品开发;

任贵兴(1963-), 男, 山西兴县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为杂粮营养与功能。

1 : 12, 1 : 14) , the pH value, water holding capacity, particle size, zeta potential, total flavonoid content, antioxidant activity (DPPH and ABTS⁺ free radical scavenging rate) , and sensory evaluation of yogurt were explored.[Result]As the ratio of ingredients decreased, the total soluble solids and total flavonoid contents in the yogurt and its antioxidant activity showed a downward trend, and reached the lowest level at a ratio of 1 : 14. When the ratio of ingredients was 1 : 10, the system exhibited the best stability and sensory quality, specifically: pH value of 4.48, water holding capacity of 43.60%, particle size of 481.1 nm, zeta potential of 25.59 mV, and sensory evaluation of 81.7 points.[Conclusion]The white kidney bean yogurt prepared under the condition of a 1 : 10 ratio of ingredients achieved the optimal balance in terms of physicochemical stability, sensory quality, and antioxidant activity.

Keywords: white kidney bean; plant-based yogurt; solid-to-liquid ratio; antioxidant activity; stability

近年来,随着消费者健康意识的觉醒与饮食结构的多元化升级,乳糖不耐受人群扩大,素食主义兴起,“控糖减脂”需求增长,传统动物源乳制品的局限性逐渐凸显,其中含有的乳糖、胆固醇等成分难以满足特定人群需求。在此背景下,植物基发酵食品凭借无乳糖、低胆固醇、环境友好等优势,成为食品工业的研发热点^[1]。在众多植物基原料中,豆类因富含优质蛋白、膳食纤维及功能性成分,是植物基酸奶的理想原料来源。其中,白芸豆作为典型药食同源豆类作物,凭借其突出的资源优势与功能特性脱颖而出。数据显示,白芸豆在亚洲地区的产量占比高达45.44%^[2]。我国作为其主产区之一,种植区域主要集中于云南^[3]。白芸豆营养成分均衡全面,不仅富含人体必需氨基酸、优质蛋白质及多种维生素等基础营养素,还含有多糖、多酚等功能性成分^[4]。上述成分赋予白芸豆抗氧化、降血糖、降血脂等显著生物活性^[5],使其成为心脏病、高血脂及动脉硬化患者的理想食材。尤为关键的是,白芸豆中特有的 α -淀粉酶抑制剂,能有效阻断人体对食物中淀粉的分解转化,抑制其转化为葡萄糖,增强胰岛素受体的反应^[3],有效降低人体餐后血糖水平,对肥胖症、糖尿病等代谢性疾病具有良好的防治效果。

尽管白芸豆的功能潜力已获广泛认可,但其在酸奶领域的应用仍存挑战:一方面是原料含植物凝

集素(PHA)等抗营养因子,若未经煮熟即食用,易损伤肠道黏膜、降低消化酶活性,因此需通过湿热处理、酶解等工艺进行脱毒处理^[6];另一方面,原料自身豆腥味(源于己醛、庚醛等羰基化合物)及高淀粉含量易导致的酸奶体系分层,会严重影响其感官品质与产品稳定性,并最终制约消费者接受度^[7]。目前,白芸豆相关产品多以粗提物用于减肥胶囊、控糖片剂,或作为辅料添加至饼干、果冻中^[2],针对其全组分利用的酸奶研究较少,且现有工艺常依赖牛乳/乳粉复配改善风味,未能充分发挥其植物基优势。发酵技术作为改善植物原料品质的关键途径,不仅能通过乳酸菌代谢降低抗营养因子含量、去除不良风味,还可将大分子蛋白水解为小分子肽与游离氨基酸,提升营养吸收率^[8]。研究证实,乳酸菌发酵可减少大豆豆腥味并提高 γ -氨基丁酸含量^[1];植物乳杆菌与嗜热链球菌复合发酵能改善豌豆基酸奶持水力、降低析水率^[9]。上述研究表明,使用复合乳酸菌发酵,有望解决白芸豆原料品质缺陷并强化功能性。然而,当前对于白芸豆直接发酵制备纯植物基酸奶的研究仍较为匮乏,尤其是料液比作为重要工艺参数对酸奶品质的调控规律尚未明确。

基于此,本研究以白芸豆熟粉为原料,通过乳酸菌发酵工艺制备纯植物基白芸豆酸奶,重点探究料液比(1 : 6、1 : 8、1 : 10、1 : 12、1 : 14)对产品pH值、总可溶性固形物含量、持水力、粒

径、zeta电位、总黄酮含量及抗氧化活性（DPPH与ABTS⁺自由基清除率）的影响，结合感官评价筛选最优工艺参数，旨在明确料液比的调控规律，为该产品工业化生产提供数据与理论支撑，同时丰富植物熟粉直接发酵的植物基产品品类。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

白芸豆粉，江苏绿濠食品有限公司；12菌型酸奶发酵剂，安琪酵母股份有限公司；饮用纯净水，华润怡宝饮料（中国）有限公司；白砂糖，山西居来香调味食品有限公司。

氢氧化钠，天津市北辰区方正试剂厂；盐酸，河南省千灯化工有限公司；1, 1-二苯基-2-苦基肼（1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH）、ABTS二铵盐[2, 2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐]，美国Sigma公司。

1.2 仪器与设备

DJM 50LA胶体磨、GYB-40-10SX高压均质机，上海东华高压均质机厂；YXQ-LB-100SII 立式压力蒸汽灭菌锅，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；LK-118SNJ乐创酸奶机，广东乐创电器有限公司；PAL-1数字式糖度计折射仪，日本Atago爱拓公司；FE28-Standard pH计，梅特勒托利多公司；百特纳米粒度电位分析仪，丹东百特仪器有限公司；MS-H-ProA磁力搅拌器，大龙兴创实验仪器（北京）股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 白芸豆植物基酸奶制作方法

（1）熟粉过筛：将白芸豆粉过80目筛。

（2）原料混合：取过筛后的白芸豆熟粉，按预设比例与纯净水混合，采用MS-H-ProA磁力搅拌器连续搅拌20 min，确保物料分散均匀。

（3）胶磨：使用DJM 50LA胶体磨对混合物料进行胶磨，重复3次，每次3 min。

（4）高压均质：将物料进行高压均质，30 MPa压力下均质处理5 min，重复1次（共循环2次），以

细化颗粒、提升体系均一性。

（5）灭菌处理：将均质完成的物料放置于立式压力蒸汽灭菌锅中，80℃保温15 min灭菌。

（6）分装与接种：在无菌条件下，将灭菌后的物料分装至300 mL PET瓶中，接入12菌型酸奶发酵剂，轻轻摇匀。

（7）发酵：将接种后的酸奶原料置于42℃ LK-118SNJ乐创酸奶机中发酵7 h。

（8）发酵结束后转移至4℃冰箱中进行后熟处理，7 h后待体系pH值降至5.0以下，即得白芸豆植物基酸奶成品。

1.3.2 pH值的测定

待酸奶完成发酵与后熟处理后，先充分摇匀样品，再使用pH计进行pH值测定，每个样品平行测定3次，最终结果以3次测定的平均值表示。

1.3.3 总可溶性固形物含量的测定

采用PAL-1数字式糖度计折射仪测定白芸豆酸奶总可溶性固形物含量，单位为Brix。测定前用蒸馏水对仪器调零校准，然后用一次性滴管吸取3 mL酸奶样品滴于折射仪棱镜表面，静置3 s后读数，以保证测定的准确性。每个样本进行至少3次读数，计算平均值。

1.3.4 持水力的测定

参考侯文娟等^[9]的方法并略有改动，取15 g样品于50 mL离心管中，5 000 r/min离心10 min，去除上清液，将离心管倒置10 min，立即称重。

计算公式如下：

$$\text{持水力} = \frac{M_1}{M_0} \times 100\%$$

式中， M_1 为离心后的沉淀物质量（g）， M_0 为样品重量（g）。

1.3.5 粒径的测定

取1 mL样品于PS样品池中，使用百特纳米粒度电位分析仪测量样品的平均粒径。检测参数为：样品折射率为1.47，吸收率为0.01，分散介质为水，折射率为1.33，黏度为0.893 6 mPa·s（cP），温度为25℃，

散射角度为90°，平衡时间为100 s，对每个样品进行3次重复。

1.3.6 zeta电位的测定

参考Kong等^[10]的研究，分别称取于4℃条件下贮藏、具有不同料液比的酸奶样品各1 mL，用去离子水稀释200倍，在25℃下用百特纳米粒度电位分析仪测定。

1.3.7 总黄酮含量的测定

参考Zhou等^[11]的方法，将5 g样品与30 mL甲醇-水（70%，v/v）溶液在圆锥形烧瓶中混合，65℃下水浴孵化2 h，提取物通过滤纸进行抽滤。将滤液转移至100 mL容量瓶中，并用70%甲醇溶液将体积调整至100 mL，4℃条件下保存，留取待用。将1 mL提取物与2 mL 10%氯化铝（AlCl₃）、3 mL 1mol/L醋酸钾（CH₃COOK）和5 mL 70%的甲醇（CH₃OH）混合，在室温下孵化40 min后，于415 nm波长下测量吸光度值。通过芦丁溶液的标准校准计算总黄酮含量，并以每克样品中芦丁等效物的微克数表示（μg/g）。标准校准的浓度分别为12.8、25.6、38.4、51.2和64 μg/mL。以吸光度值为纵坐标，浓度为横坐标，得到标准曲线：y=0.004 6x+0.052 2，R²=0.999 9，该结果表明测得结果与目标分析物浓度之间呈现良好的线性关系，符合定量分析的要求。

1.3.8 抗氧化活性的测定

（1）DPPH自由基清除率的测定

参考马荣琨等^[12]的方法，并在其基础上略有改动。

0.2 mmol/L DPPH溶液制备：称取0.019 7 g DPPH，用无水乙醇溶解，转移至容量瓶，定容至250 mL，于4℃冰箱中保存。使用前需提前从冰箱中拿出并放置至室温。

样品处理：将酸奶与无水乙醇按1：10（v/v）稀释并充分混匀，在3 500 r/min离心15 min，重复2次使乳清完全分离，取上清液准备进行抗氧化测试。

样品组：取上清液与0.2 mmol/L DPPH溶液各2 mL于离心管中；

对照组：取上清液与无水乙醇各2 mL于离心

管中；

空白组：取0.2 mmol/L DPPH溶液与无水乙醇各2 mL于离心管中。避光条件反应30 min，在517 nm波长下测定吸光度，试验重复3次平行，并按如下公式计算：

$$\text{DPPH自由基清除率（\%）} = \left(1 - \frac{M_1 - M_2}{M_0}\right) \times 100\%$$

式中：M₁为样品组的吸光度，M₀为空白组的吸光度，M₂为对照组的吸光度。

（2）ABTS⁺自由基清除率的测定

ABTS⁺溶液制备：将5 mmol/L过二硫酸钾与14 mmol/L ABTS⁺溶液1：1（v/v）混合并充分搅拌，避光保存过夜形成ABTS⁺母液，用无水乙醇稀释母液直至稀释液的吸光度在波长734 nm处维持在0.700±0.005，即得ABTS⁺工作液。

样品处理：将酸奶样品与无水乙醇1：10（v/v）稀释并充分混匀后，在3 500 r/min离心15 min，重复2次使上清液和沉淀完全分离，取上清液于4℃条件下保存以备后续试验。

样品组：取0.5 mL上清液与4.0 mL ABTS⁺工作液混匀，黑暗条件下反应20 min，于波长734 nm处读取吸光度。

对照组：取0.5 mL无水乙醇与4.0 mL ABTS⁺工作液混匀，条件同样品组，读取吸光度。按如下公式计算ABTS⁺自由基清除率：

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率（\%）} = \frac{B_0 - B_1}{B_0} \times 100\%$$

式中，B₁是样品组的吸光度值，B₀是对照组的吸光度值。

1.3.9 感官评价

参照《GB 19302—2025食品安全国家标准 发酵乳》^[13]的相关标准规定，建立白芸豆植物基酸奶的感官评价细则（表1）。本试验随机选取经专业感官评价培训合格的10人对白芸豆植物基酸奶进行感官评价，结果取其平均值。

表 1 白芸豆植物基酸奶感官评价细则
Table 1 Sensory Evaluation Criteria for White Kidney Bean Plant-based Yogurt

感官指标	评分标准	评分（分）
色泽 (15 分)	色泽不均匀，光泽度差	0 ~ 3
	色泽较均匀，光泽度略差	4 ~ 10
	色泽均匀，有光泽	11 ~ 15
组织形态 (20 分)	组织粗糙，裂纹，气泡，有颗粒	0 ~ 5
	组织粗糙，裂纹，无气泡	6 ~ 12
	组织均匀细腻，表面光滑，无气泡	13 ~ 20
风味 (20 分)	豆腥味较重，无发酵风味	0 ~ 5
	稍有豆腥味，有发酵风味	6 ~ 12
	浓郁的豆香味以及发酵风味	13 ~ 20
滋味 (20 分)	过酸或过甜，风味不适	0 ~ 5
	酸甜较为适中	6 ~ 12
	酸甜适中	13 ~ 20
口感 (25 分)	口感不细腻	0 ~ 7
	口感稍细腻	8 ~ 16
	口感细腻	17 ~ 25

1.3.10 数据处理

通过Excel 2021、SPSS stastistics 27、orign2022等软件进行数据统计和处理。

2 结果与分析

2.1 pH 值

酸奶发酵过程中，乳酸菌通过分解碳水化合物产生乳酸，影响酸奶的酸碱度，进而影响蛋白质的变性、交联和凝固^[14]，因此酸奶的pH值是检验酸奶发酵特性和品质的重要指标之一。

不同料液比的白芸豆植物基酸奶pH值变化如图1所示。当料液比为1：6时，酸奶的pH值为4.52±0.01。当料液比由1：6递减至1：14时，酸奶的pH值随料液比的降低呈现先降后升的趋势。当料液比为1：10时，酸奶的pH值为4.48，达到最低值。此时，乳酸菌添加量与白芸豆原料添加量达到最优配比。白芸豆可为乳酸菌发酵提供碳源和氮源，其作为底物提供的碳源（如葡萄糖、麦芽糖）与氮源（如小分子肽、游离氨基酸）可利用浓度配比，恰好匹配乳酸菌的代谢需求。该配比既避免了碳源过量导致的代谢紊乱，也防止了氮源不足引发的菌体增殖受限，从而有效促进了乳酸的高效合成。当料

液比为1：6和1：8时，发酵前期碳源丰富，乳酸菌增殖代谢旺盛、产酸速率较快，造成发酵体系pH值快速降低；当酸度超出乳酸菌的耐受范围后，菌体受到自身产酸引发的酸胁迫损伤，代谢与产酸活性被抑制^[15, 16]；而当料液比为1：12和1：14时，酸奶的pH值分别为4.61和4.64，体系则因为碳源不足，产酸量减少，表现出pH值升高的趋势^[17]。谭丽丽等^[18]研究表

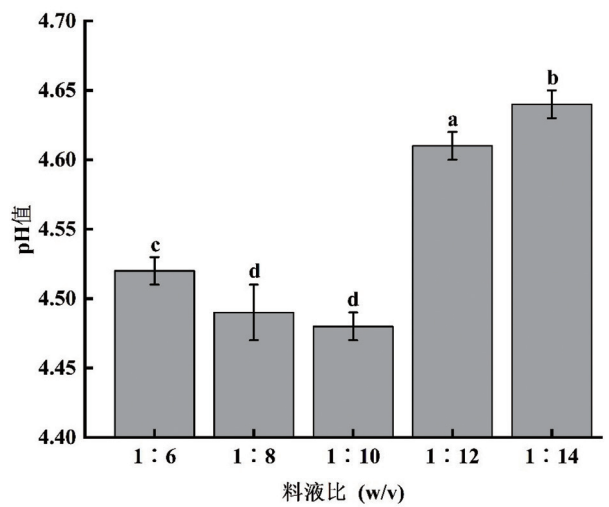


图 1 料液比对白芸豆植物基酸奶 pH 值的影响
Figure 1 Effect of Solid-to-Liquid Ratio on pH Value of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

注：不同的小写字母（a~d）表示不同样品中存在显著差异（P <0.05），下同

明，大豆酸奶的感官评价得分在pH值为4.40~4.55之间时达到最大值，由此印证，该pH值区间适配植物基酸奶的感官需求。

2.2 总可溶性固形物含量

图2显示，5组样品的总可溶性固形物含量（平均含量为1.08%~3.73%），其中料液比为1：6的样品总可溶性形物含量最高，平均含量为3.73%，显著高于其他种类（ $P<0.05$ ）；其次是料液比为1：8的样品，平均含量为2.22%；含量最低的是料液比为1：14的样品，平均含量为1.08%。白芸豆粉中含有丰富的可溶性固形物，包括碳水化合物（如蔗糖、葡萄糖、低聚糖）、可溶性蛋白、小分子肽及矿物质（如钾、镁）等。上述成分构成了酸奶发酵体系中总可溶性固形物含量的初始物质基础。随着料液比的降低，体系内单位体积的白芸豆粉添加量相应减少，导致总可溶性固形物含量呈现下降趋势。

2.3 持水力

持水力，即酸奶中三维网络结构对水的保持能力，主要与植物基酸奶凝胶网络结构及空间网络孔隙有关^[19]，是评估酸奶品质的重要指标之一。持水力越强，酸奶越稳定，较高的持水力可有效抑制水

分析出，并显著降低乳脂层发生分层的风险。由图3可知，随料液比从1：6降至1：14，体系持水力呈现先升后降趋势。当料液比为1：10时，体系持水力最高，为43.60%，表明在该料液比下，底物中的营养物质能更充分地地为乳酸菌所利用并产生胞外多糖、小分子肽和氨基酸，增加了酸奶的稳定性。

值得注意的是，任卫文^[20]研究表明，大豆植物基酸奶的持水力>70%。相比之下，本研究制备的白芸豆植物基酸奶的持水力（43.60%）显著较低，这可能与原料中蛋白质含量的差异有关。白芸豆蛋白质含量为19.29%^[21]，大豆的蛋白质含量为40%~50%^[22]，更高的蛋白质含量有助于形成更为致密和连续的三维凝胶网络，从而有效截留与固定水分，因此大豆植物基酸奶能形成更稳定的网络结构，其持水力显著更高。刘晋琦等^[23]探究绿豆品种对发酵乳的影响发现，由12个绿豆品种制备的发酵乳持水力普遍为40.00%~50.00%，其中，K1品种所制发酵乳的持水力最低（仅39.20%）；马文艺等^[24]在豌豆酸奶研究中发现，未经烫漂、去胚芽等预处理的豌豆浆经发酵后，所得酸奶的持水力仅为35.15%。上述结果表明白芸豆植物基酸奶的持水力处于同类植物基发酵产品的常见范围之内。

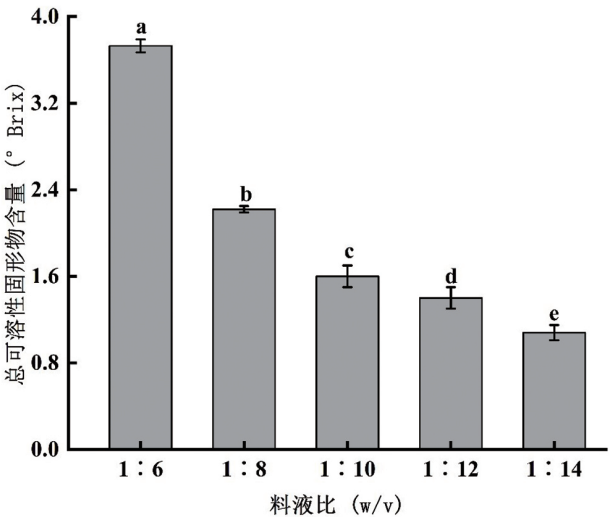


图2 料液比对白芸豆植物基酸奶总可溶性固形物含量的影响

Figure 2 Effect of Solid-to-Liquid Ratio on the Total Soluble Solid Content of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

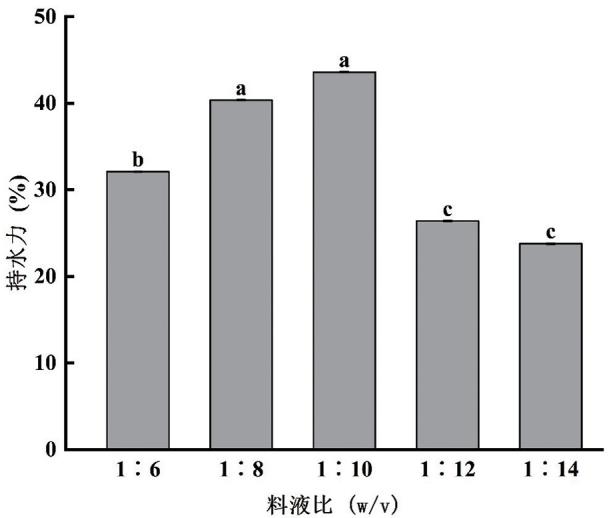


图3 料液比对白芸豆植物基酸奶持水力的影响

Figure 3 Effect of Solid-to-Liquid Ration Water Retention Capacity of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

2.4 粒径

由图4可知，不同料液比的白芸豆植物基酸奶粒径为480.00~600.00 nm。随着料液比的降低，酸奶粒径呈先降后升的变化趋势，在料液比为1：10时达最小值，为481.10 nm。在此料液比条件下，白芸豆蛋白质在体系中分散均匀，可为乳酸菌分泌的蛋白酶提供更充分的作用界面，有效促进蛋白质水解成小分子肽和氨基酸^[25]，减少大分子蛋白质的聚集，进而削弱分子间作用力以减小酸奶粒径；同时，料液比为1：10时，发酵体系的pH值、离子强度等理化性质处于适宜区间。该条件不仅能保障乳酸菌维持高代谢活性，其代谢产生的有机酸可诱导蛋白质变性并凝聚成小而均一的颗粒；同时，适宜的离子强度能进一步抑制蛋白质分子的过度聚集^[26]，最终在上述两种机制的共同作用下，该料液比下制备的白芸豆酸奶呈现出最小粒径。

2.5 zeta 电位

zeta电位可用于测量粒子之间的吸引力或排斥力强度。其绝对值越高，表明酸奶体系越稳定，反之则体系越不稳定，易产生絮凝现象^[25]。白芸豆植物基酸奶体系的zeta电位测定值均呈现负值，表明体系中粒子间存在排斥力，该排斥力可有效对抗由范德华力等作用诱导的粒子聚集趋势，从而有助于维持

体系的稳定性^[27]。由图5可知，zeta电位绝对值随着料液比的降低呈现先升后降趋势。其中，当料液比为1：10时，所制备的酸奶样品的zeta电位绝对值最大，为(25.59±0.60) mV。当料液比分别为1：6和1：8时，所制备的酸奶因可溶性固形物含量较高，一方面导致体系中粒子间距缩小、范德华力增强；另一方面，充足的乳酸菌底物促使产酸较多，致使体系中离子强度升高，引发双电层压缩效应。过量的正离子会挤压白芸豆蛋白质粒子表面双电层中的扩散层，导致扩散层变薄，静电排斥力的有效作用范围大幅缩短。上述双重因素共同导致体系稳定性下降且易发生絮凝现象，同时表现为zeta电位绝对值较低；当料液比分别为1：12和1：14时，体系的zeta电位绝对值低于料液比为1：10时，但高于1：6和1：8时，可能是所制备的酸奶样品中可溶性固形物含量过低，致使乳酸菌代谢受限、产酸减少、体系中离子强度降低，进而导致蛋白质粒子负电荷密度下降；同时，粒子间距的增大使范德华力减弱，因此，当前体系的zeta电位绝对值介于料液比为1：6与1：10的体系之间。综上所述，当料液比为1：10时，酸奶体系的粒径较小、zeta电位绝对值较高，表明在此料液比条件下，白芸豆植物基酸奶体系最为稳定。

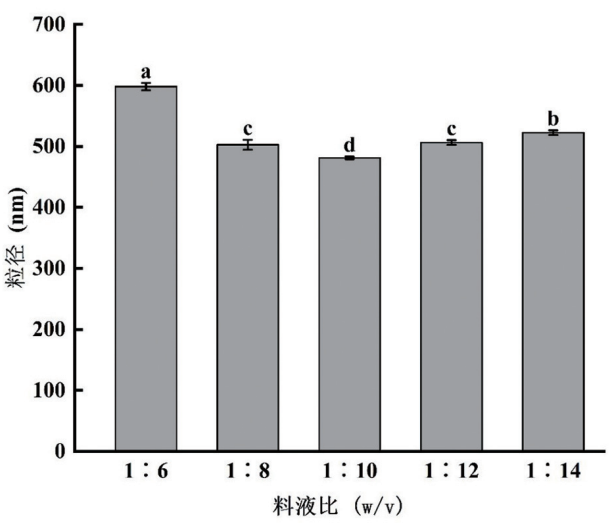


图 4 料液比对白芸豆植物基酸奶粒径的影响
Figure 4 Effect of Solid-to-Liquid Ratio on the Particle Size of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

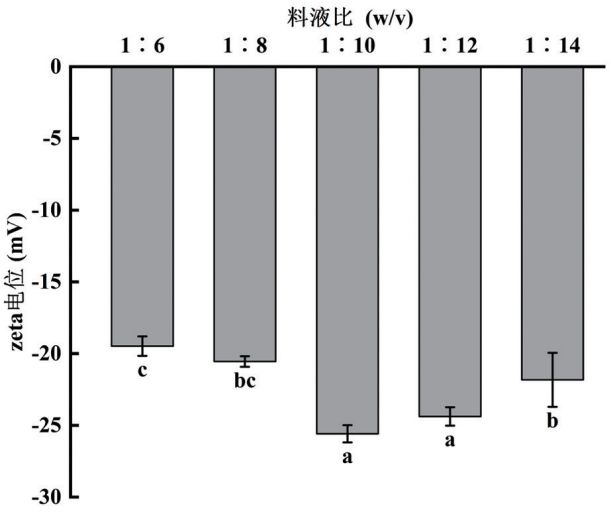


图 5 料液比对白芸豆植物基酸奶 zeta 电位的影响
Figure 5 Effect of Solid-to-Liquid Ratio on the Zeta Potential of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

2.6 总黄酮含量

不同的料液比对白芸豆植物基酸奶的总黄酮含量的影响存在显著差异。由图6可知，当料液比由1：6逐渐降至1：14时，白芸豆植物基酸奶的总黄酮含量呈现显著下降趋势（ $P<0.05$ ），从（ 74.29 ± 0.49 ） $\mu\text{g/g}$ 降至（ 56.77 ± 1.02 ） $\mu\text{g/g}$ 。上述变化的主要原因是随着料液比的降低，酸奶体系中的白芸豆粉比例相应降低，从而导致黄酮类物质的总体含量下降。阚丽娇^[28]研究发现，来自山西、陕西和吉林的3种白芸豆，其总黄酮含量为0.78~1.33mg/g。相较而言，本研究制备的白芸豆植

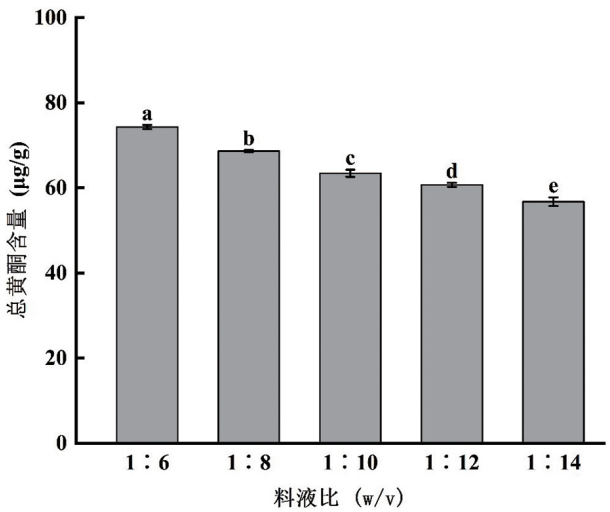


图6 料液比对白芸豆植物基酸奶总黄酮含量的影响
Figure 6 Effect of Solid-to-Liquid Ratio on the Total Flavonoid Content of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

物基酸奶中总黄酮含量较低，可能是由于发酵过程中产生的多酚氧化酶对黄酮类化合物产生了分解作用，从而导致其含量显著下降^[29]。

2.7 抗氧化活性

白芸豆植物基酸奶的抗氧化活性如图7所示。随着料液比的降低，酸奶样品对DPPH和ABTS⁺自由基的清除率均呈下降趋势，这主要归因于样品中白芸豆粉含量的减少。当料液比为1：6时，样品对DPPH和ABTS⁺自由基的清除率最高，分别为（ 44.99 ± 1.55 ）%和（ 56.51 ± 0.71 ）%。白芸豆中富含生育酚，特别是 γ -生育酚和 δ -生育酚，同时含有较高浓度的多糖、黄酮等多种生物活性成分，使白芸豆植物基酸奶具有良好的抗氧化活性。此外，研究发现，白芸豆提取物对大鼠糖尿病模型具有治疗效应，并可提升其心脏组织总抗氧化活性。具体而言，该提取物可显著降低氧化应激标志物水平，即超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活性，同时，可降低心肌胶原沉积，进而降低糖尿病相关心脏并发症的发生风险^[30]。Micheli等^[31]研究发现，高脂肪饮食可导致血浆中蛋白羰基化（蛋白质氧化损伤）水平显著升高45.00%，而补充白芸豆提取物能够有效抑制这一氧化损伤过程，使血浆蛋白质羰基化水平恢复至与对照组相当的水平。Chen等^[32]发现，相较于原料乳，酸奶中的总酚类物质和肽含量均显著提升，进而细胞抗氧化活性也显著增强。

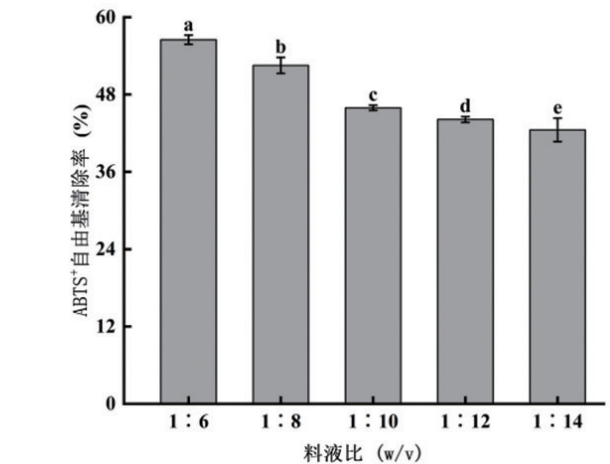
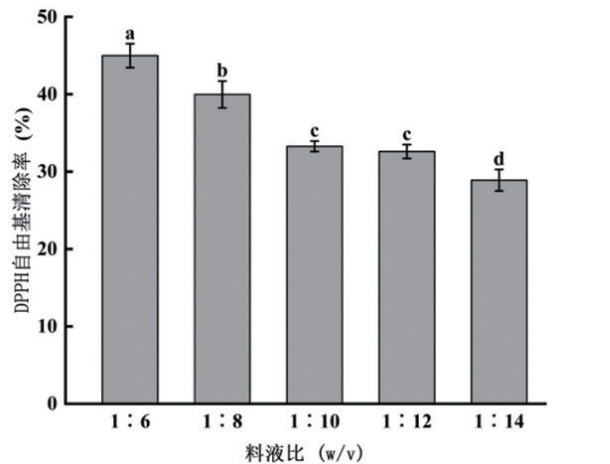


图7 料液比对白芸豆植物基酸奶抗氧化活性的影响
Figure 7 Effect of Solid-to-Liquid Ratio on the Antioxidant Activity of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

2.8 感官评价

白芸豆植物基酸奶的感官评价结果如图8所示。当料液比为1：10时，感官评分最高。在该料液比条件下，酸奶样品色泽均匀，组织光滑细腻，口感酸甜适中，有豆香味和发酵风味。相比之下，当料液比为1：6和1：8时，酸奶样品的口感更加厚实，但出现了分层现象；当料液比为1：12和1：14时，酸奶样品的豆香味较淡，流动性过强，组织不均匀。由此可见，适宜的料液比对酸奶的口感和质地具有显著改善作用，以白芸豆为原料赋予酸奶独特的豆香味，使其酸甜可口。

3 讨论

本研究探究了料液比对白芸豆植物基酸奶多项品质指标的影响，筛选出综合品质最优的原料配比。但研究仅将料液比作为单一变量开展试验，未探究料液比与发酵温度、菌种接种量、发酵时间等关键工艺参数之间的交互作用，整体实验设计维度较为单一。后续可先界定各工艺参数的适宜范围，结合正交试验与响应面设计，探究因素间的相互作用规律，确定多因素协同作用下的优化工艺组合。在此基础上，结合产品风味、质地及功能活性开展综合评判，进一步稳定产品综合品质；还可设置梯

度贮藏试验，持续跟踪产品贮藏期间的品质变化，深入探究不同工艺参数对产品货架期的影响规律，以此延长产品保鲜时长，全面提升白芸豆植物酸奶的综合应用价值。

4 结论

本研究系统探究了不同料液比（1：6、1：8、1：10、1：12、1：14）对白芸豆植物基酸奶品质的影响。结果表明，当料液比为1：10时，制得的白芸豆植物基酸奶的品质最佳。在此工艺参数下制备的酸奶样品，其乳酸菌代谢环境最优、产酸效率最高（pH值4.48），体系稳定性最强，持水力达43.60%，蛋白质凝胶网络均匀稳定，平均粒径最小（481.1 nm）且zeta电位绝对值最大（25.59 mV）；同时产品兼具浓郁豆香与发酵风味，酸甜协调、口感顺滑，感官总分81.7分，组织状态与接受度最佳。此外，研究发现，总黄酮含量与抗氧化活性（DPPH与ABTS⁺自由基清除率）随料液比的降低呈显著下降趋势（ $P<0.05$ ），然而，当料液比为1：6时，酸奶出现分层、口感粗糙现象。综上所述，本研究确定料液比1：10为优化白芸豆植物基酸奶综合品质的关键工艺参数，该结论可为相关产品的工业化生产工艺优化与质量控制提供理论依据，也为植物基酸奶的配方研发提供参考。

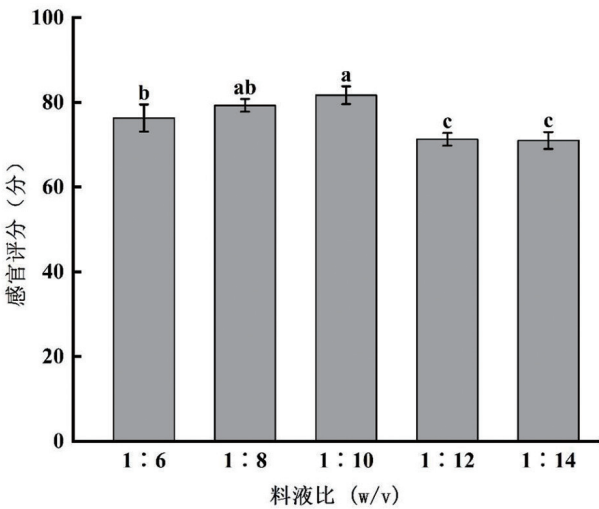


图8 料液比对白芸豆植物基酸奶感官评分的影响
Figure 8 The Effect of Solid-to-Liquid Ratio on the Sensory Scores of White Kidney Bean Plant-based Yogurt

参考文献

[1] 张晓悦, 何杉, 季国志, 等.传统酸奶与植物基酸奶加工工艺与品质对比分析[J].中国乳品工业, 2025, 53 (7): 44-50.

[2] 郑虹君, 朱叙丞, 李耀基, 等.白芸豆功能成分、生物活性及其产品开发研究进展[J].中国粮油学报, 2022, 37 (12): 277-285.

[3] 申茹晓, 唐浩国, 杨同香, 等.白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响[J].食品工业科技, 2025, 46 (14): 136-143.

[4] 张芸溪, 刘童, 王颖, 等.白芸豆蛋白源降脂肽的提取工艺优化及体外降血脂活性研究[J].食品工业科技, 2025, 46 (23): 271-282.

[5] 邢君梅, 朱仕珍, 姬晓敏, 等.白芸豆黄豆植物奶酪的研制[J].轻工科技, 2024, 40 (4): 39-45.

[6] 范夏蒲, 徐程宇, 鄂天姣, 等.豆类凝集素研究进展[J].饲料

工业, 2024, 45 (15) : 22-27.

[7] 于海燕, 敖婷, 廖晗雪, 等.不同乳酸菌对发酵芸豆乳风味特征的影响[J].食品科学, 2024, 45 (22) : 180-188.

[8] 刘定坤, 怀玉, 徐艺, 等.响应面法优化豌豆多肽凝固型酸奶的工艺研究[J].当代化工研究, 2024 (3) : 160-162.

[9] 侯文娟, 秦洋, 张丹, 等.豌豆蛋白发酵乳的工艺优化及产品特性研究[J].食品工业科技, 2024, 45 (2) : 175-182.

[10] Kong X, Xiao Z, Du M, et al.Physicochemical, textural, and sensorial properties of soy yogurt as affected by addition of low acyl gellan gum[J].Gels, 2022, 8 (7) : 453.

[11] Zhou J, Zhang Z, Qiao J, et al.Investigating the effect of different contents of mung beans on the structure and function of extruded buckwheat noodles[J].Applied Food Research, 2024, 4 (2) : 100501.

[12] 马荣琨, 李望铭.奇亚籽希腊式酸奶的工艺优化研究[J].食品安全质量检测学报, 2022, 13 (2) : 388-394.

[13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局.GB 19302—2025 食品安全国家标准 发酵乳: [S].

[14] 李真, 张钰, 蔡杰, 等.燕麦 β -葡聚糖对凝固型酸奶发酵特性及贮藏品质的影响[J].轻工学报, 2025, 40 (2) : 23-30.

[15] 吴重德, 黄钧, 周荣清.调控乳酸菌酸胁迫抗性研究进展[J].微生物学报, 2014, 54 (7) : 721-727.

[16] 宋晓宁, 姜静雅, 曾剑华, 等.乳酸萃取支撑液膜的构建及其在乳酸菌液态培养中的应用[J].食品与发酵工业, 2024, 50 (24) : 9-17.

[17] 刘勇勇.藜麦酸奶的制备及其营养与品质研究[D].上海: 上海理工大学, 2022.

[18] 谭丽丽, 高元.纯植物基大豆酸奶的风味改善[J].中国食品工业, 2025, (15) : 107-109.

[19] 谢丽清, 王昊鹏.番石榴汁对酸奶品质的影响及模糊数学感官评价[J].中国乳业, 2025 (5) : 115-121.

[20] 任卫文.基于流变学和摩擦学研究羧甲基纤维素对大豆酸奶口感的影响[D].武汉: 华中农业大学, 2024.

[21] 瞿艳.白芸豆中活性蛋白及多肽的制备与研究[D].太原: 山西大学, 2015.

[22] 刘新旗, 涂丛慧, 张连慧, 等.大豆蛋白的营养保健功能研究现状[J].北京工商大学学报 (自然科学版), 2012, 30 (2) : 1-6.

[23] 刘晋琦, 朱童, 邢莉那, 等.绿豆品种对发酵绿豆乳质构特性与感官品质的影响[J].食品科学, 2025, 46 (5) : 106-113.

[24] 马文艺.豌豆酸奶制备工艺及产品品质影响因素研究[D].无锡: 江南大学, 2021.

[25] 赵婷.藜麦蛋白酸奶的研制及贮藏期品质分析[D].晋中: 山西农业大学, 2024.

[26] 孟昂, 栾滨羽, 郭波莉, 等.碱提酸沉参数影响大豆分离蛋白变性、聚集和流变特性的研究进展[J].食品科学, 2024, 45 (10) : 342-354.

[27] Wang J, Zheng H, Zhang S, et al.Improvement of protein emulsion stability through glycosylated black bean protein covalent interaction with (-)-epigallocatechin-3-gallate[J].RSC Advances, 2021, 11 (4) : 2546-2555.

[28] 阚丽娇.不同豆类营养成分及抗氧化组分研究[D].南昌: 南昌大学, 2017.

[29] 龚绵红, 陈小娟, 兰彦润, 等.一种具有体外抗氧化豆类酸奶的研制[J].农产品加工, 2025 (1) : 18-22, 26.

[30] Oliveira R J S, de Oliveira V N, Deconte S R, et al.Phaseolamin treatment prevents oxidative stress and collagen deposition in the hearts of streptozotocin-induced diabetic rats[J].Diabetes & Vascular Disease Research, 2014, 11 (2) : 110-117.

[31] Micheli L, Lucarini E, Trallori E, et al.Phaseolus vulgaris L. Extract: Alpha-amylase inhibition against Metabolic Syndrome in mice[J].Nutrients, 2019, 11 (8) : 1778.

[32] Chen Y, Zhang H, Liu R, et al.Antioxidant and anti-inflammatory polyphenols and peptides of common bean (Phaseolus vulga L.) milk and yogurt in Caco-2 and HT-29 cell models[J].Journal of Functional Foods, 2019 (53) : 125-135.