

基于清洁标签的植物基鸡排配方优化及蛋白质营养学评价

蒋雨含¹, 张贞炜¹, 余杰¹, 朱美淋¹, 张春容², 贾利蓉^{1*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065)

(2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 四川宜宾 644000)

摘要: 该研究以生产企业现有植物基鸡排配方为基础, 对辅料及食品添加剂进行减量化研究, 以达到清洁标签的目的。采用质构仪测定和感官评价的方法, 研究L-半胱氨酸、亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉、TG酶的不同质量分数对产品质构及感官品质的影响, 形成基于清洁标签的配方如下(质量分数): 大豆拉丝蛋白 12.26%, 花生拉丝蛋白 7.36%, 水 53.96%, 大豆油 14.72%, 大豆分离蛋白粉 3.68%, 谷朊粉 3.07%, L-半胱氨酸 0.1%, TG酶(液态) 0.49%, 复合调味料 4.37%, 盐 0.74%, 白糖 1.47%。该研究将该配方植物基鸡排与鸡肉鸡排进行蛋白质营养价值比较, 其蛋白质消化率为 37.56%, 与鸡肉鸡排(蛋白质消化率为 41.85%)接近; 必需氨基酸含量占总氨基酸含量的比例(EAA/TAA)为 0.41, 必需氨基酸与非必需氨基酸的比例(EAA/NEAA)为 0.71, 均达到FAO/WHO所提出的标准; 氨基酸评分(AAS)为 1.71, 化学评分(CS)为 1.26, 属于优质蛋白质。基于对上述指标的分析, 该研究在保证品质的前提下, 去除原配方中的4种辅料及添加剂(亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉), 为植物基肉制品的标签清洁化和蛋白质营养学评价提供了可靠依据。

关键词: 植物基鸡排; 配方优化; 清洁标签; 营养学评价

文章编号: 1673-9078(2025)05-256-266

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0425

Optimization of Plant-based Chicken Steak Formulation Based on Clean Label and Protein Nutritional Evaluation

JIANG Yuhan¹, ZHANG Zhenwei¹, YU Jie¹, ZHU Meilin¹, ZHANG Chunrong², JIA Lirong^{1*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, China)

Abstract: In this research, a reduction study was carried out on the excipients and food additives was investigated on the basis of the existing plant-based chicken steak formula of the manufacturer to achieve clean label. The effects of different mass fractions of L-cysteine, flaxseed gum, konjac gum, egg white powder, inulin, and TGase on the texture and sensory quality of the product were investigated by texture analyzer and sensory evaluation. The formula based on clean label

引文格式:

蒋雨含,张贞炜,余杰,等.基于清洁标签的植物基鸡排配方优化及蛋白质营养学评价[J].现代食品科技,2025,41(5): 256-266.

JIANG Yuhan, ZHANG Zhenwei, YU Jie, et al. Optimization of plant-based chicken steak formulation based on clean label and protein nutritional evaluation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 256-266.

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 四川大学宜宾市人民政府校市战略合作专项资金项目(2020CDYB-1)

作者简介: 蒋雨含(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 植物基健康食品, E-mail: cooljyh@163.com

通讯作者: 贾利蓉(1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: jialirong@scu.edu.cn

was formed as follows (mass fractions): soybean pullulan protein, 12.26%; peanut pullulan protein, 7.36%; water, 53.96%; soybean oil, 14.72%; soybean isolate protein powder, 3.68%; gluten powder, 3.07%; L-cysteine, 0.1%; TGase (liquid), 0.49%; compound seasoning, 4.37%; salt, 0.74%; white sugar, 1.47%. Then, the protein nutritional value of plant-based chicken steak formulated as above was compared with that of chicken steak. The protein digestibility of the plant-based chicken steak was 37.56%, which was close to that of the chicken steak (protein digestibility: 41.85%); its ratio of essential amino acid content to total amino acid content (EAA/TAA) was 0.41, and the ratio of essential amino acids to non-essential amino acids (EAA/NEAA) was 0.71, both of which met the standards set by FAO/WHO; its amino acid score (AAS) was 1.71 and the chemical score (CS) was 1.26. The results indicated that the plant-based chicken steak was a high-quality source of protein. Based on the analysis of the above indicators, four excipients and additives (flaxseed gum, konjac gum, egg white powder, and inulin) were removed from the original formula under the premise of quality assurance, which provides a reliable basis for label cleaning and protein nutritional evaluation of plant-based meat products.

Key words: plant-based chicken steak; formulation optimization; clean label; nutritional evaluation

清洁标签 (Clean Label) 在全球食品行业中发展迅速, 众多咨询公司、营养专业媒体、市场分析机构都对其有着高度的关注, 并将其列在了食品行业趋势、全球消费者健康趋势、营养健康重要趋势、未来食品研发关键趋势等众多重要趋势排行榜的首位^[1]。清洁标签产品展现的是一种健康的标志, 目前已经成为了消费者在选购产品时的一种趋势, 并在主流消费群中快速获得一席之地^[2], 众多国际、国内品牌均做出了明确转型, 以顺应消费市场的需求。

植物蛋白中的胆固醇、脂肪酸及抗生素的含量非常低^[3], 植物蛋白因其对环境和健康的积极作用而越来越受到消费者的欢迎, 相比于传统肉制品, 植物基肉制品因资源可持续、环境友好、绿色健康、营养丰富等方面的优势, 成为解决传统肉制品供给不足、环境压力等问题的有效方法之一^[4,5]。我国植物基肉制品的生产技术日益成熟, 相比于细胞培养肉, 植物基肉制品的适用消费人群更加广泛, 不仅包括素食主义者、宗教主义者, 还包括希望通过植物性食品来替代肉食品的消费者, 国内植物基肉制品的市场前景是相当可观的。但是, 植物基肉制品也还面临着一些尴尬处境, 在植物基肉制品的研发过程中, 为更好地模拟动物肉类的风味、口感、外观等属性, 往往会使用到各类添加剂, 例如苏复工等^[6]在其素食鸡排配方中使用了甲基纤维素、结冷胶等添加剂; 刘少伟等^[7]在其花生蛋白植物基鸡排配方中使用了结冷胶、卡拉胶、海藻酸钠、甲基纤维素、可得然胶等多种添加剂, 导致产品体系复杂, 标签不够清洁化。目前, 国内外众多科研工作者都着手于开发清洁标签产品, 在产品配料中尽可能不含或者少含添加剂、色素、化学合成成分等, 提倡

环保、自然, 追求绿色、健康等理念^[8,9], 但是对于清洁标签的植物基肉制品的配方和工艺研究较少, 此领域还需要得到更多行业相关人士的关注。

基于生产企业现有植物基鸡排配方, 本研究旨在解决其体系复杂、辅料及添加剂较多的问题, 通过减少辅料及添加剂的种类和含量, 测定产品品质表现及感官品质的变化, 明确各种辅料及添加剂对产品品质的具体影响, 从而去除了非必需添加的辅料及添加剂, 形成了标签清洁化的优化配方, 并对优化后的配方进行了蛋白质营养学评价, 为企业的产品生产提供了可靠依据, 也为该领域的后续研究提供了更客观、科学可靠的技术和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

纯净水; 片状大豆拉丝蛋白, 四川植得期待生物科技有限公司; 片状花生拉丝蛋白, 青岛长寿食品有限公司; 大豆油, 益海嘉里金龙鱼粮油股份有限公司; 大豆分离蛋白粉, 河南万邦化工科技有限公司; 谷朊粉, 河南蜜丹儿商贸有限公司; L-半胱氨酸, 河北华阳生物科技有限公司; 亚麻籽胶, 河南万邦实业有限公司; 魔芋胶, 湖北一致魔芋生物科技股份有限公司; 蛋清粉, 河南万邦实业有限公司; 菊粉, 山东百龙创园生物科技有限公司; 谷氨酰胺转氨酶 (EC2.3.2.13, Transglutaminase, TG), 济南青瑞生物科技有限公司; 硫酸 (分析纯), 四川西陇科学有限公司; 溴酚蓝、甲基红, 上海泰坦科技有限公司; 胆酸钠、胃蛋白酶、胰酶, 上海源叶生物科技有限公司; 鸡胸肉、竹笋, 市售。

表 1 植物基鸡排感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of plant-based chicken steak

得分	外观	组织状态	多汁性
8.1~10	外形完整, 成型性好	组织均匀, 咀嚼感好, 肉感强烈	口感适宜, 鲜嫩多汁
6.1~8.0	外形较完整, 成型性较好	组织较均匀, 咀嚼感较好, 肉感较强烈	口感较适宜, 较鲜嫩多汁
3.1~6.0	外形完整度较差, 成型性较差, 表面略不平整	组织均匀度较低, 咀嚼感较差, 肉感不足	口感稍差, 肉质较柴, 多汁感较差
0~3.0	外形不完整, 成型性差, 表面不平整	组织不均匀, 咀嚼感差, 无肉感	口感差, 肉质柴, 无多汁感

1.2 仪器及设备

JY1002 电子秤, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; FP3010 多功能食品加工机, 德国 Braun GmbH 公司; 不锈钢压肉饼机、油炸炉、DW-60W151EU1 低温冷冻柜, 青岛海尔特特种电冰柜有限公司; TA.XT Plus 型质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; SQP 型电子天平, 北京赛多利斯科学仪器有限公司; FD-1A-50 型冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; WK-150 超微粉碎机, 山东精诚医药设备制造有限公司; SN-HJ-4A 多联加热磁力搅拌器, 上海尚普仪器设备有限公司; TG16-WS 型台式高速离心机, 长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司; C22-WH2206 型多功能电磁炉, 广东美的生活电器制造有限公司; HYP-308 型消化炉, 上海纤检仪器有限公司; KDN-19F 型自动型定氮仪, 上海纤检仪器有限公司。

1.3 植物基鸡排样品制备

植物基鸡排初始配方由植物基肉制品生产企业提供, 各组分质量分数如下: 大豆拉丝蛋白 11.96%, 花生拉丝蛋白 7.18%, 水 52.64%, 大豆油 14.36%, 大豆分离蛋白粉 3.59%, 谷朊粉 2.99%, L-半胱氨酸 0.1%, 亚麻籽胶 0.2%, 魔芋胶 0.1%, 蛋清粉 1.2%, 菊粉 0.96%, TG 酶(液态) 0.48%, 复合调味料 4.26%, 盐 0.72%, 白糖 1.44%。

按照上述配方, 分别先将粉状物料、油相物料配制混合, 将粉状物料倒入多功能食品加工机, 选用塑料刀片, 加水后中速搅拌至均匀, 随后倒入油相物料, 中高速搅拌 180 s, 搅拌均匀后加入液态 TG 酶并高速搅拌 20 s, 再加入复水后的片状大豆拉丝蛋白与片状花生拉丝蛋白, 高速斩拌 120 s, 将拉丝蛋白拆丝后制得混合物料; 使用压肉饼机将所得混合物料压制成型后装入真空袋, 放入低温冷冻柜(-18℃)冷冻 24 h 以上; 取冷冻后的样品在油温 120℃条件下熟制 6 min, 用于质构测定及感官评价。

1.4 质构测定

参考张贞炜等^[10]的方法, 将样品切割成 4 cm×4 cm×1.5 cm 的长方体, 通过质构仪测定样品的硬度、弹性、黏聚性和咀嚼性等质构数据。

仪器参数设置如下: TPA 模式; P/10 型号探头; 满负荷压力 25 kg; 测前速度 2.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 2.0 mm/s; 目标模式为应变, 50%, 3 s; 触发力为 5 g。每个样品进行 6 次平行测定, 结果取平均值进行分析。

1.5 感官评价

邀请 5 位专业审评员, 根据各因素对植物基鸡排感官品质的影响程度制定感官评价标准如表 1 所示, 各指标的权重相等。

参照 T/CIFST 001-2020^[11], 将样品切成 2 cm×2 cm×1.5 cm 的块状, 并置于干净的白色瓷盘中, 对产品进行随机编号并打乱摆放位置, 挑选 8 名经过感官训练的专业人员组成品评小组, 在自然光下, 对样品进行感官评分, 每评定一组后进行清水漱口, 结果取平均值。

1.6 体外消化模拟试验

采用 1.3 的工艺, 制备植物基鸡排和鸡肉鸡排样品, 参考刘潇等^[12]的研究方法并稍作修改进行体外消化模拟试验。将待测样品切成小块, 使用多功能食品加工机斩拌 1~2 min, 将样品斩碎成 3 mm 左右的微粒, 用以模拟咀嚼过程; 取 30 g 微粒状样品加入烧杯中, 添加 200 mL 蒸馏水混合, 用 1 mol/L 的 HCl 溶液将 pH 值调节至 2.0。加入 15 mL 人工胃液(5 g 胃蛋白酶溶解于 250 mL 0.1 mol/L HCl 溶液中), 将混合物在 37℃条件下保温搅拌, 1 h 后用 1 mol/L 的 NaOH 溶液将 pH 值调至 7.0 灭酶以终止胃消化过程; 在胃消化模拟阶段结束之后, 用 1 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液将 pH 值调节至 7.2, 随后加入 15 mL 的胆酸钠和胰酶混合溶液(1.2 g 胆酸钠和 0.2 g 胰

酶溶解于 100 mL NaHCO₃ (0.1 mol/L) 及 15 mL NaCl/KCl 混合溶液 (质量浓度 7.02 g/L NaCl、质量浓度 0.37 g/L KCl), 在 37 °C 条件下保温搅拌, 1 h 后将样品在沸水中加热 5 min 灭酶以终止肠消化过程。

收集未经消化模拟处理的样品以及经过体外消化模拟过程后的沉淀物, 冻干后称重并使用超微粉碎机粉碎成粉末, 过 80 目筛后收集用于蛋白质含量的测定。

1.7 蛋白质消化率测定

参照 GB 5009.5-2016 中的凯氏定氮法测定 1.6 中收集得到的消化前、后冻干粉末样品的蛋白质含量, 并通过如下公式计算蛋白质消化率:

$$D = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——蛋白质消化率, %;

m_0 ——消化前样品的蛋白质量, g;

m_1 ——消化后样品的蛋白质量, g。

1.8 氨基酸含量测定

采用 1.3 的工艺制备植物基鸡排和鸡肉鸡排样品, 参照 GB 5009.124-2016 的方法测定样品的 16 种氨基酸含量。

1.9 氨基酸评价

根据联合国粮食及农业组织 (FAO) / 世界卫生组织 (WHO) 所推荐的氨基酸评估模型以及中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所提出的鸡蛋蛋白质氨基酸评估模型计算氨基酸评分 (Amino Acid Score, AAS) 和化学评分 (Chemical Score, CS)。

1.10 数据处理

所得的试验结果数据使用 Microsoft Excel 2021 计算平均值与标准差, 使用格拉布斯准则去除异常值, 使用 IBM SPSS Statistics 26 对实验数据进行差异显著性分析 ($P < 0.05$), 使用 Origin 2018 和 Microsoft PowerPoint 2021 绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 植物基鸡排配方减量化研究

2.1.1 L-半胱氨酸质量分数减量试验结果

L-半胱氨酸中含有巯基 (-SH), 它会影响到蛋白质中的巯基以及二硫键的含量, 从而对蛋白质的聚

集行为以及网状结构造成影响。Zhao 等^[13]研究发现 L-半胱氨酸可以降低蛋白的变性温度, 提升蛋白凝胶的保水性; Peng 等^[14]研究发现 L-半胱氨酸能够促进蛋白网络结构的生成, 从而提高蛋白凝胶的强度、咀嚼性。

保持 1.3 的植物基鸡排基础配方中其他物质组分及质量分数不变, 将 L-半胱氨酸质量分数分别设置为 0.1%、0.075%、0.05%、0.025%、0%, 采用 1.3 的工艺制备样品, L-半胱氨酸质量分数对样品质构和感官评分的影响分别如表 2 和图 1 所示。由表 2 可知, 随着 L-半胱氨酸质量分数的减少, 样品的硬度和咀嚼性指标逐渐降低, 弹性指标有些许波动, 变化不大, 黏聚性指标无显著性变化; 由图 1 可知, 随着 L-半胱氨酸质量分数的减少, 样品的外观、组织性、多汁性得分有所降低, 差异性显著 ($P < 0.05$), 感官评价总分反映该产品的整体可接受度, 随着 L-半胱氨酸质量分数的减少, 感官评价总分逐渐降低, 差异性显著 ($P < 0.05$)。L-半胱氨酸中的巯基 (-SH) 对该食品体系中蛋白质的交联有着积极影响, 并且 L-半胱氨酸提升了蛋白凝胶的保水性, 使得产品保持了良好的质构和感官表现。对质构指标和感官评价的单项得分、总分进行综合分析, L-半胱氨酸对产品整体品质的贡献较大, 若去除 L-半胱氨酸会对产品质地造成显著的不良影响。

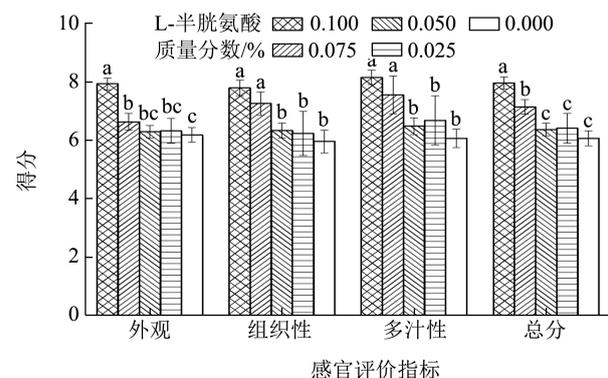


图 1 L-半胱氨酸质量分数对样品感官评分的影响

Fig.1 Effect of mass fraction of L-cysteine on the sensory score of plant-based chicken steak

注: 图中不同小写字母代表同一组中不同质量分数的样品之间具有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 亚麻籽胶质量分数减量试验结果

亚麻籽胶具有弱凝胶性能, 在食品体系中常作为增稠剂、乳化剂和稳定剂使用^[15]。由于亚麻籽胶的凝胶性能属于弱凝胶性, 在植物基鸡排的体系中, 亚麻籽胶可能对产品的凝胶特性并未起到较突出的

作用。Vieira 等^[16]研究发现温度会显著影响亚麻籽胶的结构和功能特效，随着温度从 30 °C 升高到 90 °C，亚麻籽胶的吸水率显著降低。

保持 1.3 的植物基鸡排基础配方中其他物质组分及质量分数不变，将亚麻籽胶质量分数分别设置为 0.2%、0.15%、0.1%、0.05%、0%，采用 1.3 的工艺制备样品，亚麻籽胶质量分数对样品质构和感官评分的影响分别如表 3 和图 2 所示。由表 3 可知，随着亚麻籽胶质量分数的减少，样品的硬度、黏聚性、咀嚼性指标逐渐升高，弹性指标呈现波动，但变化不大。由图 2 可知，随着亚麻籽胶质量分数的减少，样品的外观、组织性、多汁性呈现小范围的波动；感官评价总分反映该产品的整体可接受度，随着亚麻籽胶质量分数的减少，感官评价总分呈现小范围波动，略有上升。由于植物基鸡排在油炸熟

制过程中会丢失一部分水分，亚麻籽胶的吸水率可能也在此环节中受到影响，导致其保水作用并未在此食品体系中得到良好的发挥。

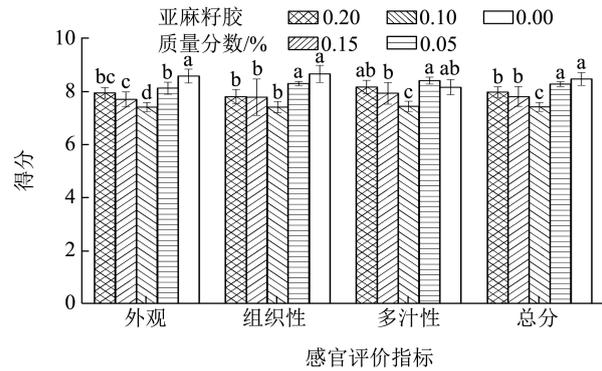


图 2 亚麻籽胶质量分数对样品感官评分的影响

Fig.2 Effect of mass fraction of flaxseed gum on the sensory score of plant-based chicken steak

表 2 L-半胱氨酸质量分数对样品质构的影响

Table 2 Effect of mass fraction of L-cysteine on the texture of plant-based chicken steak

L-半胱氨酸质量分数/%	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
0.1	633.90 ± 49.91 ^a	0.86 ± 0.05 ^{bc}	0.62 ± 0.01 ^a	341.92 ± 42.92 ^a
0.075	562.81 ± 58.80 ^{ab}	0.92 ± 0.04 ^a	0.63 ± 0.01 ^a	328.57 ± 35.47 ^a
0.05	609.90 ± 101.72 ^a	0.87 ± 0.02 ^{ab}	0.60 ± 0.01 ^b	319.51 ± 41.78 ^a
0.025	445.94 ± 54.83 ^c	0.87 ± 0.04 ^{ab}	0.62 ± 0.01 ^a	243.41 ± 32.01 ^b
0	496.36 ± 95.29 ^{bc}	0.80 ± 0.04 ^c	0.62 ± 0.01 ^a	242.77 ± 40.55 ^b

注：同一列中不同小写字母代表不同样品间具有显著性差异 (P<0.05)。表 2~8 同。

表 3 亚麻籽胶质量分数对样品质构的影响

Table 3 Effect of mass fraction of flaxseed gum on the texture of plant-based chicken steak

亚麻籽胶质量分数/%	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
0.2	633.90 ± 49.91 ^b	0.86 ± 0.05 ^b	0.62 ± 0.01 ^c	341.92 ± 42.92 ^b
0.15	670.30 ± 67.85 ^b	0.94 ± 0.06 ^a	0.65 ± 0.01 ^b	399.01 ± 58.30 ^b
0.1	693.24 ± 75.94 ^b	0.87 ± 0.03 ^{ab}	0.65 ± 0.01 ^b	423.92 ± 81.42 ^b
0.05	858.22 ± 48.90 ^a	0.89 ± 0.05 ^{ab}	0.68 ± 0.01 ^a	529.98 ± 33.16 ^a
0	951.77 ± 142.33 ^a	0.86 ± 0.03 ^b	0.69 ± 0.01 ^a	560.38 ± 79.17 ^a

表 4 魔芋胶质量分数对样品质构的影响

Table 4 Effect of mass fraction of konjac gum on the texture of plant-based chicken steak

魔芋胶质量分数/%	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
0.1	633.90 ± 49.91 ^c	0.86 ± 0.05 ^b	0.62 ± 0.01 ^a	341.92 ± 42.92 ^c
0.075	729.81 ± 35.73 ^b	0.96 ± 0.04 ^a	0.64 ± 0.01 ^{ab}	431.43 ± 37.12 ^b
0.05	848.17 ± 54.07 ^a	0.91 ± 0.05 ^{ab}	0.65 ± 0.01 ^b	474.42 ± 55.58 ^{ab}
0.025	824.62 ± 41.81 ^a	0.89 ± 0.03 ^b	0.66 ± 0.01 ^{bc}	489.99 ± 24.92 ^a
0	744.64 ± 78.25 ^b	0.90 ± 0.03 ^{ab}	0.64 ± 0.01 ^c	425.79 ± 29.12 ^b

2.1.3 魔芋胶质量分数减量试验结果

魔芋胶含有 60%~70% 魔芋葡苷聚糖，是一种非离子型水溶性多糖^[17,18]，魔芋胶自身可形成微弱的分子间聚集，其溶液常表现出类似于弱凝胶的特点，但这样的结构容易被剪切应力破坏而产生流动性^[19]。

保持 1.3 的植物基鸡排基础配方中其他物质组分及质量分数不变，将魔芋胶质量分数分别设置为 0.1%、0.075%、0.05%、0.025%、0%，采用 1.3 的工艺制备样品，魔芋胶质量分数对样品质构和感官评分的影响分别如表 4 和图 3 所示。由表 4 可知，随着魔芋胶质量分数的减少，样品的硬度、黏聚性、咀嚼性指标先下降后上升，弹性指标有些许波动，变化不大。由图 3 可知，随着魔芋胶质量分数的减少，样品的外观、多汁性得分呈现小范围波动，组织性得分无显著变化；感官评价总分反映该产品的整体可接受度，随着魔芋胶质量分数的减少，感官评价总分呈现小范围波动，但无显著变化。在植物基鸡排加工工艺中，斩拌混料的过程提供了较大的剪切应力，此作用力可能导致了魔芋胶形成的弱凝胶结构被破坏，因此在本研究体系中，魔芋胶对产品质地并未起到明显改善作用。

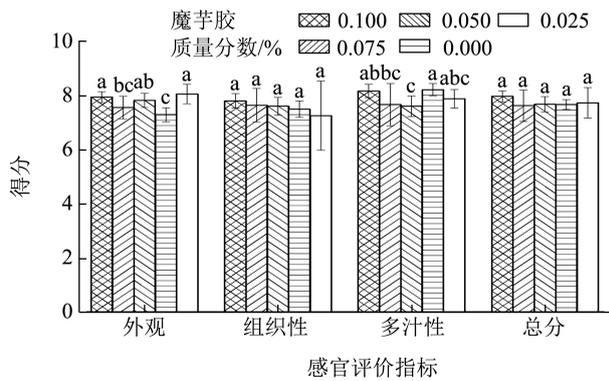


图 3 魔芋胶质量分数对样品感官评分的影响

Fig.3 Effect of mass fraction of konjac gum on the sensory score of plant-based chicken steak

2.1.4 蛋清粉质量分数减量试验结果

蛋清粉是一种由蛋清经喷雾干燥制成的粉状物，主要成分是蛋白质，它与蛋清液一样，能够形成凝胶。有研究表明，蛋清粉可以提高蛋白制品的持水性，高温烹饪时也可降低产品的水分析出^[20]。

保持 1.3 的植物基鸡排基础配方中其他物质组分及质量分数不变，将蛋清粉质量分数分别设置为 1.2%、0.9%、0.6%、0.3%、0%，采用 1.3 的工艺制备样品，蛋清粉质量分数对样品质构和感官评分的

影响分别如表 5 和图 4 所示。由表 5 可知，随着蛋清粉质量分数的减少，样品的硬度、黏聚性、咀嚼性指标逐渐升高，弹性指标有些许波动，变化不大。由图 4 可知，随着蛋清粉质量分数的减少，样品的外观得分先升高后降低，变化较小，组织性、多汁性得分无显著性变化；感官评价总分反映该产品的整体可接受度，随着蛋清粉质量分数的减少，感官评价总分在小范围内波动，无显著性变化。植物基鸡排在高温油炸工艺下，蛋清粉能够降低产品的水分流失，从而影响了产品质构中的硬度指标，但是从感官评价的结果可知，硬度的变化并未造成感官评分的显著变化，均在可接受的范围之内，因此，在本研究的食品体系中，蛋清粉并未对产品质地起到明显改善作用。

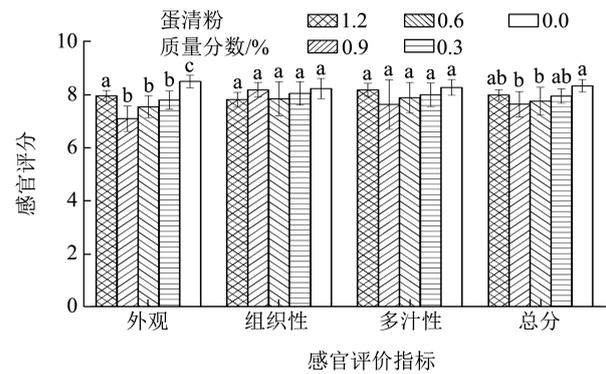


图 4 蛋清粉质量分数对样品感官评分的影响

Fig.4 Effect of mass fraction of egg white powder on the sensory score of plant-based chicken steak

2.1.5 菊粉质量分数减量试验结果

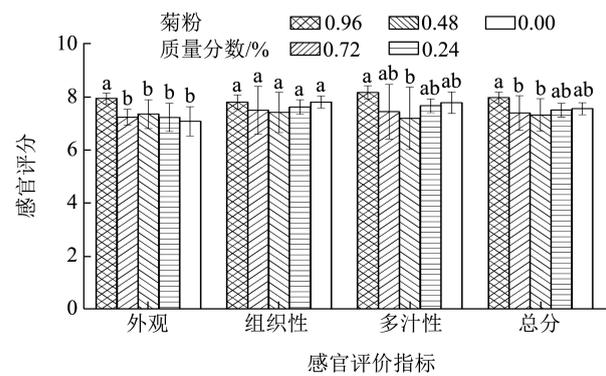


图 5 菊粉质量分数对样品感官评分的影响

Fig.5 Effect of mass fraction of inulin on the sensory score of plant-based chicken steak

菊粉遇水会相互凝结形成类似脂肪的良好口感，因此常作为脂肪替代物添加到肉制品中^[21]。研究表明，菊粉作为一种低分子多糖，可以增强蛋白质的疏水键和氢键作用力，提高肉制品的嫩度^[22]。

保持 1.3 的植物基鸡排基础配方中其他物质组分及质量分数不变, 将菊粉质量分数分别设置为 0.96%、0.72%、0.48%、0.24%、0%, 采用 1.3 的工艺制备样品, 菊粉质量分数对样品质构和感官评分的影响分别如表 6 和图 5 所示。由表 6 可知, 随着菊粉质量分数的减少, 样品的硬度和咀嚼性指标先下降后上升, 弹性、黏聚性指标在小范围内先下降后上升, 变化不大。由图 5 可知, 随着菊粉质量分数的减少, 样品的外观、多汁性得分在小范围内波动, 组织性得分无显著性变化; 感官评价总分反映该产品的整体可接受度, 随着菊粉质量分数的减少, 感官评价总分在小范围内波动, 无显著性变化。植

物基鸡排的感官评价是以真肉鸡排作为参考对象, 该食品体系中对于其脂肪含量和嫩度的考察并不是最主要的, 因此菊粉在该体系条件下对质地的影响不大。

2.1.6 TG酶质量分数减量试验结果

TG 酶属于酰基转移酶的一种, 能催化蛋白质分子内部和分子之间的交联、蛋白质与氨基酸之间的交联, 它能够通过催化大豆蛋白的谷氨酰胺残基上的 γ -酰胺基和赖氨酸基上的 ϵ -(- γ 谷氨酰基) 赖氨酸共价键, 使原辅料之间形成良好的凝胶结构, 赋予蛋白质特有的质构和口感^[23,24]。

表 5 蛋清粉质量分数对样品质构的影响

Table 5 Effect of mass fraction of egg white powder on the texture of plant-based chicken steak

蛋清粉质量分数/%	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
1.2	633.90 ± 49.90 ^d	0.86 ± 0.05 ^{ab}	0.62 ± 0.01 ^b	341.92 ± 42.92 ^{cd}
0.9	667.18 ± 65.07 ^c	0.91 ± 0.04 ^a	0.65 ± 0.01 ^b	400.60 ± 44.55 ^c
0.6	799.01 ± 79.59 ^b	0.93 ± 0.06 ^{ab}	0.65 ± 0.01 ^b	471.17 ± 75.51 ^b
0.3	917.44 ± 96.92 ^d	0.91 ± 0.01 ^b	0.66 ± 0.02 ^c	565.29 ± 72.95 ^d
0	1105.70 ± 100.04 ^a	0.94 ± 0.03 ^a	0.69 ± 0.01 ^a	706.46 ± 67.18 ^a

表 6 菊粉质量分数对样品质构的影响

Table 6 Effect of mass fraction of inulin on the texture of plant-based chicken steak

菊粉质量分数/%	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
0.96	633.90 ± 49.90 ^b	0.86 ± 0.05 ^b	0.62 ± 0.01 ^b	341.92 ± 42.92 ^d
0.72	653.81 ± 62.20 ^b	0.89 ± 0.04 ^{ab}	0.64 ± 0.00 ^{ab}	386.91 ± 12.36 ^d
0.48	703.29 ± 71.06 ^b	0.91 ± 0.04 ^a	0.64 ± 0.02 ^{ab}	423.13 ± 58.42 ^{bc}
0.24	919.40 ± 86.96 ^a	0.91 ± 0.03 ^{ab}	0.64 ± 0.01 ^a	558.25 ± 72.58 ^a
0	854.26 ± 164.48 ^a	0.89 ± 0.02 ^{ab}	0.64 ± 0.02 ^{ab}	507.00 ± 93.36 ^{ab}

表 7 TG酶质量分数对样品质构的影响

Table 7 Effect of mass fraction of TGase on the texture of plant-based chicken steak

TG 酶质量分数/%	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
0.48	633.90 ± 49.90 ^a	0.86 ± 0.05 ^c	0.62 ± 0.01 ^a	341.92 ± 42.92 ^{ab}
0.36	626.20 ± 73.36 ^a	0.87 ± 0.03 ^{bc}	0.63 ± 0.01 ^a	355.46 ± 42.25 ^a
0.24	590.92 ± 99.34 ^a	0.93 ± 0.03 ^{ab}	0.63 ± 0.01 ^a	339.30 ± 85.54 ^{ab}
0.12	461.83 ± 64.19 ^b	0.96 ± 0.07 ^a	0.59 ± 0.02 ^b	273.36 ± 38.99 ^b
0	234.44 ± 60.50 ^c	0.71 ± 0.04 ^d	0.55 ± 0.02 ^c	87.90 ± 26.71 ^c

保持 1.3 的植物基鸡排基础配方中其他物质组分及质量分数不变, 将 TG 酶质量分数分别设置为 0.48%、0.36%、0.24%、0.12%、0%, 采用 1.3 的工艺制备样品, TG 酶质量分数对样品质构和感官评分的影响分别如表 7 和图 6 所示。由表 7 可知, 随着 TG 酶质量分数的减少, 样品的硬度、黏聚性、咀嚼性指标逐渐降低, 弹性指标在小范围内先上升后显著下降。由图 6 可知, 随着 TG 酶质量分数的减少, 样品的外观、组织性、多汁性得分逐渐降低且差异性显著 ($P < 0.05$); 感官评价总分反映该产品的整体可接受度, 随着 TG 酶质量分数的减少, 感官评价总分逐渐降低, 差异性显著 ($P < 0.05$)。在该食品体系中, TG 酶有效地催化了蛋白质的交联, 使原辅料之间形成了强度较好地凝胶结构, 从而为产品赋予了良好的质构表现和感官特性, 对质构指标和感官评价的单项得分、总分进行综合分析, TG 酶对产品品质起到了及其积极且重要的作用, 若去除 TG 酶则会造成产品质地的显著降低。

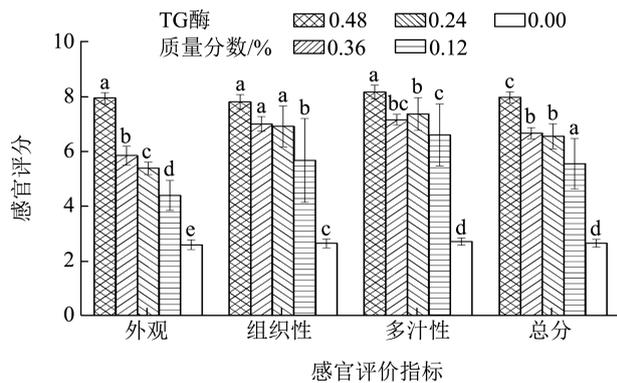


图 6 TG 酶质量分数对样品感官评分的影响

Fig.6 Effect of mass fraction of TGase on the sensory score of plant-based chicken steak

2.1.7 优化配方的确定及其与初始配方的对比

通过研究 L-半胱氨酸、亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉、TG 酶等 6 种添加剂辅料对植物基鸡排质构表现和感官评分的影响, 本研究发现, L-半胱氨酸、TG 酶对产品起到了积极的作用, 而亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉在不断减少添加量的过程中, 产品在质构和感官的综合表现上并未产生较为显著的变化, 因此, 本研究将亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉从初始配方中去除, 形成新的优化配方, 并与初始配方进行对比, 其质构表现和感官评分分别如表 8、图 7 所示, 从表 8 可知, 优化配方的弹性、黏聚性与初始配方无显著差异, 硬度和咀

嚼性较初始配方有所提高; 从图 7 可知, 优化配方与初始配方在感官评分上无显著差异。由于植物基鸡排在油炸熟制过程中会丢失一部分水分, 亚麻籽胶、蛋清粉的去除, 使得优化配方的产品在此过程中丢失的水分较初始配方的产品更多, 导致产品的硬度增加, 但从感官评价的结果可知, 硬度变化并未造成感官评分的显著变化, 均在可接受的范围之内, 因此, 优化配方的植物基鸡排依然拥有良好的质地。

最终, 本研究形成了基于清洁标签的优化配方, 各组分质量分数如下: 大豆拉丝蛋白 12.26%, 花生拉丝蛋白 7.36%, 水 53.96%, 大豆油 14.72%, 大豆分离蛋白粉 3.68%, 谷朊粉 3.07%, L-半胱氨酸 0.1%, TG 酶(液态) 0.49%, 复合调味料 4.37%, 盐 0.74%, 白糖 1.47%。

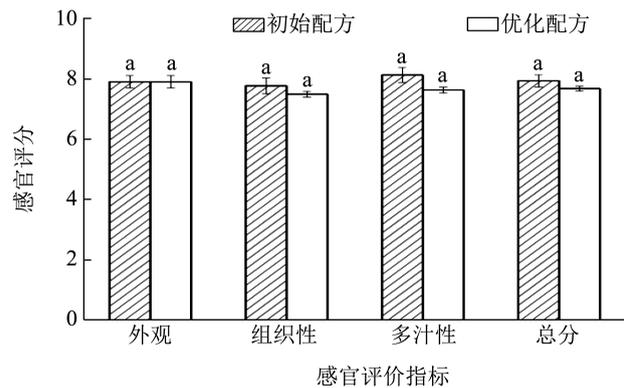


图 7 优化配方与初始配方感官评分的对比

Fig.7 Comparison of the sensory score of the optimized formulation with that of the initial formulation

2.2 植物基鸡排蛋白质营养学研究

2.2.1 蛋白质消化率分析

大豆蛋白作为植物基鸡排的主要蛋白质来源, 其生物价较高、具备的生物学价值与肉、蛋、奶相似, 蛋白质消化吸收率高达 84%~98%, 属于全价蛋白^[25], 对人体而言是一种较为理想的蛋白质来源。

采用 1.3 的工艺, 制备植物基鸡排和鸡肉鸡排样品, 其中, 植物基鸡排配方各组分质量分数为: 大豆拉丝蛋白 12.26%, 花生拉丝蛋白 7.36%, 水 53.96%, 大豆油 14.72%, 大豆分离蛋白粉 3.68%, 谷朊粉 3.07%, L-半胱氨酸 0.1%, TG 酶(液态) 0.49%, 复合调味料 4.37%, 盐 0.74%, 白糖 1.47%; 鸡肉鸡排配方为: 保持上述配方中其他物质组分及质量分数不变, 将大豆拉丝蛋白和花生拉丝蛋白质

量分数均设置为 0%，设置鸡胸肉（以干重计）的质量分数为 19.62%。植物基鸡排和鸡肉鸡排体外消化过程的蛋白质含量如表 9 所示，表中鸡-原样、植-原样分别代表消化前的鸡肉鸡排、植物基鸡排样品，鸡-消化、植-消化则分别代表消化后的鸡肉鸡排、植物基鸡排样品。以蛋白质质量作为评价标准，计算植物基鸡排和鸡肉鸡排的蛋白质消化率可知，鸡肉鸡排样品的蛋白质消化率为 41.85%，植物基鸡排样品的蛋白质消化率为 37.56%，与鸡肉鸡排接近，这是因为本研究中植物基鸡排所使用的大豆分离蛋白、小麦蛋白等均是纯化的植物蛋白来源，去除了抗营养因子，植物蛋白的消化率提高，与动物蛋白相似^[26,27]。

2.2.2 蛋白质营养学评价

采用 1.3 的工艺，配方同 2.2.1，制备植物基鸡排和鸡肉鸡排样品并测定其氨基酸含量，两种产品的氨基酸组成分析、氨基酸评分及化学评分分别如表 10、表 11 所示。

根据 FAO/WHO 所提供的参照模型，优质蛋白质的必需氨基酸与总氨基酸的比例（EAA/TAA）应达到 0.4 以上，必需氨基酸与非必需氨基酸的比例（EAA/NEAA）应达到 0.6 以上^[28]。从表 10 可知，在本研究中，植物基鸡排样品中必需氨基酸的含量为 59.81 mg/g，占总氨基酸含量的比例（EAA/TAA）为 0.41，高于 0.4，其必需氨基酸与非必需氨基酸的

比例（EAA/NEAA）为 0.71，高于 0.6，植物基鸡排和鸡肉鸡排的 EAA/TAA、EAA/NEAA 值几乎一致，说明本研究中的食品体系通过将大豆蛋白与花生蛋白、小麦蛋白进行复配，改善了植物基鸡排的氨基酸模式。植物基鸡排产品的谷氨酸、天门冬氨酸等呈味氨基酸含量较高，分别是 36.28 mg/g 和 12.01 mg/g，两者含量之和占总氨基酸含量的 33.56%，使得产品具有鲜美的味道；必需氨基酸中亮氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸含量较高，分别为 12.32、8.24、8.08 mg/g，均与鸡肉鸡排接近，研究表明，亮氨酸、缬氨酸与异亮氨酸一起协同作用可以控制血糖、促进肌肉的合成与修复，亮氨酸具有调节哺乳动物的脂肪代谢的作用，促进肌肉的合成^[29]，在治疗肥胖、糖尿病等疾病中能够发挥重要作用。

食品的蛋白质模式与人体蛋白质模式的接近程度直接关系到人体对必需氨基酸的利用率^[30]。如表 11 所示，植物基鸡排的必需氨基酸总含量均高于 FAO/WHO 标准和全鸡蛋蛋白质模式，氨基酸评分（AAS）为 1.71，化学评分（CS）为 1.26，产品营养价值丰富；从单个氨基酸的含量来看，植物基鸡排与鸡肉鸡排的蛋氨酸均低于全鸡蛋蛋白质模式，但是均达到了 FAO/WHO 标准，对于植物基鸡排而言，这是由于豆类食物中蛋氨酸含量较少导致的，所以在复配配方中，作为谷类食物来源的小麦蛋白在一定程度上弥补了产品蛋氨酸的缺失。

表 8 优化配方与初始配方质构的对比

Table 8 Comparison of the texture of the optimized formulation with that of the initial formulation

配方	硬度	弹性	黏聚性	咀嚼性
初始配方	633.90 ± 49.90 ^a	0.86 ± 0.05 ^a	0.62 ± 0.01 ^a	341.92 ± 42.92 ^a
优化配方	920.95 ± 52.73 ^b	0.85 ± 0.02 ^a	0.66 ± 0.07 ^a	518.22 ± 57.91 ^b

表 9 植物基鸡排与鸡肉鸡排消化过程的蛋白质含量

Table 9 Protein content of the digestive process of plant-based chicken steak and chicken steak

样品指标	消化样品			
	鸡-原样	鸡-消化	植-原样	植-消化
样品质量/g	24.12 ± 0.15	10.64 ± 0.32	26.60 ± 0.27	11.13 ± 0.37
蛋白质相对含量/%	46.07 ± 0.74	60.70 ± 0.95	37.75 ± 0.13	56.33 ± 1.81
蛋白质质量/g	11.11 ± 0.24	6.46 ± 0.29	10.04 ± 0.13	6.27 ± 0.06

表 10 植物基鸡排与鸡肉鸡排的氨基酸组成分析 (mg/g)

Table 10 Amino acid composition of plant-based steak and chicken steak

氨基酸	鸡肉鸡排	植物基鸡排
天门冬氨酸	16.72 ± 0.14 ^a	12.01 ± 0.29 ^b
丝氨酸	8.10 ± 0.05 ^a	5.51 ± 0.11 ^b
谷氨酸	36.23 ± 0.19 ^a	36.28 ± 0.41 ^a
甘氨酸	7.98 ± 0.09 ^a	4.86 ± 0.10 ^b
丙氨酸	9.72 ± 0.04 ^a	4.66 ± 0.11 ^b
组氨酸	5.67 ± 0.02 ^a	2.46 ± 0.01 ^b
精氨酸	11.82 ± 0.03 ^a	8.72 ± 0.22 ^b
脯氨酸	10.12 ± 0.01 ^a	9.93 ± 0.35 ^a
缬氨酸*	8.80 ± 0.01 ^a	8.08 ± 0.09 ^a
蛋氨酸*	4.60 ± 0.05 ^a	3.57 ± 0.18 ^b
异亮氨酸*	8.60 ± 0.06 ^a	7.33 ± 0.09 ^b
亮氨酸*	15.01 ± 0.02 ^a	12.32 ± 0.11 ^b
酪氨酸*	6.55 ± 0.01 ^a	6.31 ± 0.01 ^b
苯丙氨酸*	8.50 ± 0.04 ^a	8.24 ± 0.17 ^a
赖氨酸*	14.03 ± 0.07 ^a	7.67 ± 0.07 ^b
苏氨酸*	8.11 ± 0.04 ^a	6.30 ± 0.05 ^b
必需氨基酸 (EAA)	74.21 ± 0.04 ^a	59.81 ± 0.41 ^b
非必需氨基酸 (NEAA)	106.35 ± 0.02 ^a	84.42 ± 1.61 ^b
总氨基酸(TAA)	180.56 ± 0.06 ^a	144.23 ± 2.01 ^b
EAA/TAA	0.41	0.41
EAA/NEAA	0.70	0.71

注: * 表示该氨基酸为必需氨基酸, 同一行中不同小写字母代表不同样品间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

表 11 植物基鸡排与鸡肉鸡排的氨基酸评分和化学评分 (分)

Table 11 Amino acid score and chemical score of plant-based steak and chicken steak

氨基酸	推荐值	卵清蛋白	鸡肉鸡排			植物基鸡排		
			AA	AAS	CS	AA	AAS	CS
缬氨酸	5	6.6	8.80	1.76	1.33	8.08	1.62	1.22
蛋氨酸	3.5	5.7	4.60	1.32	0.81	3.57	1.02	0.63
异亮氨酸	4	5.4	8.60	2.15	1.59	7.33	1.83	1.36
亮氨酸	7	8.6	15.01	2.14	1.75	12.32	1.76	1.43
苯丙氨酸 + 酪氨酸	6	9.3	15.05	2.51	1.62	14.6	2.43	1.56
赖氨酸	5.5	7	14.03	2.55	2.00	7.67	1.39	1.10
苏氨酸	4	4.7	8.11	2.03	1.73	6.30	1.57	1.34
必需氨基酸总量	35	47.3	74.21	2.12	1.57	59.81	1.71	1.26

3 结论

通过研究 6 种辅料及添加剂对植物基鸡排产品质构和感官评分 (包括单项得分及总体得分) 的影响, 研究发现 L- 半胱氨酸、TG 酶在本植物基鸡排的食品体系中, 对产品的质构做出了较大的贡献, 将其分别去掉都会使得产品整体品质有大幅度的下降; 而亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉这四者的含量变化对产品的影响较小, 可以从原体系中去掉, 以达到清洁标签的目的。最终, 本研究形成了基于清洁标签的优化配方, 各组分质量分数如下: 大豆拉丝蛋白 12.26%, 花生拉丝蛋白 7.36%, 水 53.96%, 大豆油 14.72%, 大豆分离蛋白粉 3.68%, 谷朊粉 3.07%, L- 半胱氨酸 0.1%, TG 酶 (液态) 0.49%, 复合调味料 4.37%, 盐 0.74%, 白糖 1.47%。该配方与生产企业提供的现有配方所制得的植物基鸡排相比, 质构变化在可接受范围内, 感官评分无显著差异, 该配方植物基鸡排样品的蛋白质消化率为 37.56%, 与鸡肉鸡排样品 (蛋白质消化率为 41.85%) 接近; 必需氨基酸的含量占总氨基酸含量的比例 (EAA/TAA) 为 0.41, 必需氨基酸与非必需氨基酸的比例 (EAA/NEAA) 为 0.71, 均达到 FAO/WHO 所提供的参照模型的标准; 氨基酸评分 (AAS) 为 1.71, 达到 FAO/WHO 标准, 化学评分 (CS) 达到 1.26, 高于单一大豆分离蛋白、花生分离蛋白、小麦蛋白的测定及计算结果, 属于优质蛋白质。基于对上述指标的分析, 本研究在保证品质的前提下, 去除原配方中的 4 种辅料及添加剂 (亚麻籽胶、魔芋胶、蛋清粉、菊粉), 为植物基肉制品的标签清洁化和蛋白质营养学评价提供了可靠依据。

参考文献

- [1] 张连慧, 应欣, 王勇. 清洁标签在食品行业中的应用[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 326-330.
- [2] 为何“清洁标签”在全球食品行业这么火? 这要从它的起源说起[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 340.
- [3] BAJAJ R P, TANG J, SABLANI S S. Pea protein isolates: novel wall materials for microencapsulating flaxseed oil [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(12): 2418-2428.
- [4] 孙莹, 王龙, 朱秀清, 等. 植物基蛋白肉的研究现状与挑战[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 438-446.
- [5] 曾志鲁, 黄道武, 罗东辉, 等. 人造肉的研究进展和应用前景[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 337-341.
- [6] 苏复工, 刘少伟, 娜音图. 模糊数学模型在豌豆素食鸡排感

- 官评价中的应用[J].中国调味品,2022,47(5):105-109.
- [7] 刘少伟,周定鹏,娜音图,等.一种花生蛋白植物基鸡排及其干法制备方法[P].上海市:CN112806470A,2021-05-18.
- [8] 冷建新.追求清洁标签是发酵面食健康发展的大趋势[J].现代食品科技,2011,27(10):1291-1293.
- [9] ECHEVERRIAJARAMILLO E, Shin W. Black soybean cooking water (*aquasoya*) powder as a novel clean-label ingredient in plant-based vegan patties [J]. International Journal of Food Science Technology, 2023, 58(10): 5121-5133.
- [10] 张贞炜,贾利蓉,刘淑君,等.原辅料对植物基鸡排质构特性的影响[J].食品科技,2022,47(1):52-60.
- [11] 中国食品科学技术学会.植物基肉制品:T/CIFST 001-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [12] 刘潇,秦鉴新,李江华,等.谷氨酰胺转氨酶对高水分豌豆蛋白挤出物结构及消化特性的影响[J].食品科学,2023, 44(5):1-8.
- [13] ZHAO Z, MU T, ZHANG M, et al. Effects of sulfur-containing amino acids and high hydrostatic pressure on structure and gelation properties of sweet potato protein [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(11): 1863-1873.
- [14] PENG H, ZHANG J, WANG S, et al. High moisture extrusion of pea protein: effect of L-cysteine on product properties and the process forming a fibrous structure [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107633.
- [15] JISOO Y, JUNGHOON K, JIN Y C, et al. Elastic gels based on flaxseed gum with konjac glucomannan and agar [J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(10): 1331-1338.
- [16] VIEIRA J, MANTOVANI R, RAPOSO M, et al. Effect of extraction temperature on rheological behavior and antioxidant capacity of flaxseed gum [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 213: 217-227.
- [17] LIANG S, LI B, DING Y, et al. Comparative investigation of the molecular interactions in konjac gum/hydrocolloid blends: concentration addition method (CAM) versus viscosity addition method (VAM) [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 83(3): 1062-1067.
- [18] 赵谋明,杨园媛,孙为正,等.魔芋胶/瓜尔豆胶对猪肉脯品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(3):121-125.
- [19] FANTOU C, COMESSE S, RENOU F, et al. Hydrophobically modified xanthan: Thickening and surface active agent for highly stable oil in water emulsions [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 205: 362-370.
- [20] CHENG Y, WANG J, CHI Y, et al. Effect of dry heating on egg white powder influencing water mobility and intermolecular interactions on its gels [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(2): 433-440.
- [21] WAQASA, SUMMER R. Functional and therapeutic potential of inulin: a comprehensive review. [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 59(1): 1-13.
- [22] NIETO-NIETO V T, WANG X Y, OZIMEK L, et al. Inulin at low concentrations significantly improves the gelling properties of oat protein—a molecular mechanism study [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 50: 116-127.
- [23] 杨鸿基,钱植龙,李浩,等.TG酶-酪蛋白酸钠-海藻酸钠凝胶体系改善调理牛排品质[J].现代食品科技,2020, 36(11):226-235,254.
- [24] 刘汉灵,黄菊,梁德生,等.高效谷氨酰胺转氨酶在火腿肠加工中的应用研究[J].中国食品添加剂,2009,S1:186-189.
- [25] YUAN B, REN J, ZHAO M, et al. Effects of limited enzymatic hydrolysis with pepsin and high-pressure homogenization on the functional properties of soybean protein isolate [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(2): 453-459.
- [26] ANUM I, SHAFEEQA I, AROOBA S, et al. Plant-based meat analogs: A review with reference to formulation and gastrointestinal fate [J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 973-983.
- [27] STEPHAN V V, A N B, C J L L V. The Skeletal muscle anabolic response to plant-versus animal-based protein consumption. [J]. The Journal of nutrition, 2015, 145(9): 1981-1991.
- [28] 文莉芳,杨超,张学俭,等.不同产地白色藜麦营养成分及氨基酸含量评价[J].食品与发酵工业,2024,50(19):257-264.
- [29] ISHTIYAQ A, IMTIAZ A, SHABIHUL F, et al. Role of branched-chain amino acids on growth, physiology and metabolism of different fish species: a review [J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(5): 1270-1289.
- [30] 王舒璇,王若琼,张裕,等.4种不同产地黑豆营养成分及花青素含量的分析与评价[J].现代食品科技,2023,39(3): 156-163.