

添加碎米粉对双螺杆挤压制备“植物蛋白肉”的影响



佟万兵^{1,2}, 孙鹏¹, 高思今¹, 胡哲鑫³, 金慧¹, 任传顺¹, 安红周¹, 罗琼¹, 黄泽华^{1,*}

¹河南工业大学小麦和玉米深加工国家工程研究中心粮油食品学院, 河南郑州 450001

²上海新麦食品工业有限公司, 上海 201900

³河南工业大学国际教育学院, 河南郑州 450001

摘要:近年来, 国内外“植物蛋白肉”产品相继推出。本实验以大米加工的副产物“碎米”制备植物蛋白肉, 不仅使植物蛋白肉具备大米的营养与风味, 还有利于碎米资源的综合利用。本论文以实验室前期成熟的植物蛋白肉配方为对照, 按照原料质量百分比设置 24.67%、20.67%、16.67%、12.67%、8.67% 五个梯度添加碎米制备“碎米”植物蛋白肉, 分析了其质构、组织化度以及持水持油等功能特性等指标。与对照相比, 碎米植物蛋白肉的硬度和咀嚼性等质构指标得到有效提升, 硬度范围为 15.40 kg~19.14 kg (对照组 9.84 kg), 咀嚼性范围为 12.94 kg~15.66 kg (对照组 5.8 kg), 组织化度 1.93~2.66 (对照组 1.53); 持水性、持油性随碎米含量增加呈递减趋势; 相较于持油性, 持水性随碎米含量变化影响较大。最佳配方为 4, 此时植物蛋白肉的口感与真肉更接近, 具有最佳的质构特性、功能特性和外观形态, 感官评价可接收度良好, 可用在青团制作中, 具有良好的市场前景。

关键词: 碎米; 植物蛋白肉; 双螺杆挤压; 青团

DOI: 10.57237/j.wjfs.2023.02.002

Effect of Adding Broken Rice Flour on Preparation of Plant-textured Proteins by Twin-screw Extrusion

Tong Wanbing^{1,2}, Sun Peng¹, Gao Sijin¹, Hu Zhixin³, Jin Hui¹, Ren Chuanshun¹, An Hongzhou¹, Luo Qiong¹, Huang Zehua^{1,*}

¹National Engineering Research Center for Wheat and Corn Deep Processing, College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

²Shanghai Xinmai Food Industry Co., Ltd., Shanghai 201900, China

³International Education College, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: In recent years, domestic and foreign "plant protein meat" products have been launched one after another. In this experiment, the by-product "broken rice" of rice processing was used to prepare vegetable meat, which not only made the vegetable meat have the nutrition and flavor of rice, but also was beneficial to the comprehensive utilization of

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFD2101400); 河南工业大学博士启动基金 (2020BS003);
小麦和玉米深加工国家工程研究中心开放课题 (NL2022011);
2022 年大学生创新创业训练计划项目 (202210463001, 202210463002, 202210463003).

*通信作者: 黄泽华, huang_zehua@qq.com

收稿日期: 2023-04-19; 接受日期: 2023-06-16; 在线出版日期: 2023-06-29

<http://www.wjfs.com>

broken rice resources. In this paper, taking the mature tissue protein formula in the early stage of the laboratory as a control, according to the mass percentage of raw materials, 24.67%, 20.67%, 16.67%, 12.67%, 8.67% were added in a gradient to prepare "broken rice" vegetable meat, and its texture was analyzed, organization degree and functional properties such as water and oil holding capacity. Compared with the control, the texture indexes such as hardness and chewiness of the plant textured protein of broken rice were effectively improved. The water holding capacity and oil holding capacity showed a decreasing trend with the increase of broken rice content; compared with the oil holding capacity, the water holding capacity had a greater impact with the change of broken rice content. The best formula is formula 4. At this time, the textured protein tastes closer to real meat, has the best texture properties, functional properties and appearance, and the sensory evaluation is acceptable.

Keywords: Broken Rice; Vegetable Protein Meat; Twin Screw Extrusion; Sweet Green Rice Ball

1 引言

植物蛋白肉又称组织蛋白 [1], 俗称人造肉, 是在高温高压条件下、经挤压膨化等工艺将植物蛋白原料加工为具备肉类纤维状结构和口感的高蛋白食品[2, 3]。植物蛋白肉具有蛋白含量高、低脂肪、零胆固醇的营养特性, 其蛋白质含量一般在 50%以上, 生产过程不添加抗生素等有害成分[4], 在人体内消化吸收生物价 93%-97% [5]。这些营养特性使得植物蛋白肉成为高血压、高血脂、冠心病等人群较理想的肉类替代食品[6]。

相比于大豆等植物蛋白, 大米蛋白抗营养因子较少, 高营养且刺激性低, 不会产生过敏反应[7]。由于大米加工技术的限制, 加工过程中不可避免地产生 10%~15% 的碎米[8]。与整米相比, 碎米出售所得效益低。碎米中含淀粉约为 75%, 含蛋白质约为 8% [9]。对碎米资源综合利用, 主要在于开发利用其中含量较高的淀粉和蛋白质。淀粉能显著提高植物蛋白肉的组织化度和色泽, 随着淀粉添加含量的不同, 植物蛋白肉的质构特性(硬度、弹性、咀嚼性和回复性等)将随之发生变化[10]。大米蛋白分为谷蛋白、球蛋白、水溶性蛋白和醇溶性蛋白, 其中以米谷蛋白为主[11]。大米谷蛋白与淀粉之间存在相互作用, 对米制品的凝胶特性有重要影响。豁银强[12]等的研究表明, 大米谷蛋白导致淀粉凝胶的黏聚性、黏性及回弹性升高, 从而使植物蛋白肉的质构特性发生变化。除了对质构的影响之外, 淀粉通过物理方式与蛋白质、脂肪和水结合, 使植物蛋白肉成型性更佳, 易形成稳定的块状结构[13], 利于植物蛋白肉整体形状的稳定[14]。因此, 合理利用碎米能有效替代植物蛋白肉原料中的淀粉成分, 并赋予产品新的质构和风味特性。

本课题通过分析不同碎米添加量的对对双螺杆挤压制备植物组织化蛋白产品的质构、感官等品质指标,

持水、持油性等功能特性, 以及不同原料配方对植物蛋白肉二硫键形成特性的影响, 从而获得利用碎米生产营养健康、绿色环保的植物组织化蛋白产品的最优配方, 并运用于传统美食如青团等加工制作中。

2 材料及方法

2.1 原料与试剂

谷朊粉, 河南飞天农业开发股份有限公司; 禹王大豆蛋白粉, 山东禹王生态食业有限公司; 禹王大豆分离蛋白, 山东禹王生态食业有限公司; 食用小麦淀粉, 中纺汇泽生物科技(德州)有限公司; 象州小丝苗米, 广州岭南穗粮谷物有限责任公司; 氨基乙酸, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 三(羟甲基)氨基甲烷, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 溴酚蓝指示剂, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 十二烷基磺酸钠, 天津市天力化学试剂有限公司; 过硫酸铵, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; 冰乙酸, 天津市天力化学试剂有限公司产; 无水乙醇天津市天力化学试剂有限公司; 丙三醇, 天津市天力化学试剂有限公司产; 甲醇, 天津市天力化学试剂有限公司产; 2-硝基苯甲酸, 上海麦克林生化科技有限公司产; 三氯乙酸, 天津市科密欧化学试剂有限公司产; SDS-PAGE 凝胶试剂盒, 武汉博士德生物工程有限公司产。

2.2 仪器与设备

CLESTRAL Ev025 型双螺杆挤压机, 法国克莱斯特罗有限公司产; WN-200 型万能粉碎机, 广州市旭朗机械设备有限公司产; VFMB-20 型立式食品搅拌机, 郑州通

力食品机械有限公司; 80目-100目筛子, 浙江上虞市五四仪器筛具厂; TA-XT PLUS 型物性测试仪, 英国 Stable Micro Systems 公司产; CR-400 型色彩色差仪, Konica Minolta 公司产; Sartorius BSA224S 型电子天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司产; FOSS Kjeltec8400 型全自动凯氏定氮仪, 丹麦 FOSS 福斯仪器有限公司产; 马弗炉, 温州市鹿城区黄龙华能机械厂产; FW-100 型高速万能粉碎机, 北京市永光明医疗器械有限公司产; LXJ-IIB 型高速离心机, 上海安亭科学仪器厂产; 101 型电热鼓风干燥箱, 北京市永光明医疗器械有限公司产; Sx2-8-10N 型箱式电阻炉, 上海齐欣科学仪器有限公司产; DY CZ-24DN 型电泳仪, 北京六一生物科技有限公司产; PHS-3E 型 pH 计浙江纳德科学仪器有限公司产。

2.3 实验方法

2.3.1 植物蛋白肉配方及挤压工艺

(i) 配方

选用实验室已研究成熟的高湿植物蛋白肉制备配方: 谷朊粉: 大豆分离蛋白: 豆粕: 淀粉=4:3:3:2 (淀粉含量为 16.67%) [15]。固定每种配方中谷朊粉、大豆分离蛋白和脱脂豆粕的质量百分含量不变, 在此基础上设置碎米添加量分别为 8.67%, 12.67%, 16.67%, 20.67%, 24.67% 共五组实验配方。

(ii) 挤压工艺

植物蛋白肉的制备由 CLEXTRAL EV05 型双螺杆挤压机进行[16]。挤压工艺参数设定为: 物料含水率为 57.80%, 螺杆转速 280 r/min, 机筒温度(从喂料端到挤出端) 30/90/120/140/150/160 °C, 挤压出口安装冷却模具温度设定 60 °C, 挤出产品冷却至室温后, 真空密封备用[17, 18]。每种配方取 6 份样品做平行实验, 除去数据异常值, 其余数据取平均值。

2.3.2 原料基本组成成分的测定

依据食品安全国家标准, 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016、食品中粗蛋白测定: GB5009.5-2016、食品中灰分的测定: GB 5009.4-2016。

2.3.3 质构的测定

将植物蛋白肉产品冷却至室温后, 选取产品中心厚度均匀部分切割成 2 cm×2 cm×0.5 cm 的方块, 放置在物性测试仪正中心, 选用 P50 探头, 设定应变力 50%,

测前速度 2.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 2.0 mm/s, 触发力 5 g。

2.3.4 组织化度的测定

将植物蛋白肉产品冷却至室温后, 选取产品中心厚度均匀部分切割成 2 cm×2 cm×0.5 cm 的方块, 使用物性测试仪, 选用 A-ECB 探头, 设定应变力 50%, 测前速度 2.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 2.0 mm/s, 触发力 5 g, 分别测定高水分植物蛋白肉的横向剪切力和纵向剪切力, 通过比值得出组织化度的大小[19]。

2.3.5 色差的测定

将植物蛋白肉冷冻干燥粉碎后取粉末置于色彩色差仪中进行色差测定[20]。每种配方分别取三次样品进行测定并记录数据, 测定结果取均值。选用的标准白板色值为 L*=95.21, a*=0.59, b*=4.15, ΔE 的计算公式:

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

2.3.6 持水性的测定

取植物蛋白肉冷冻干燥样品粉末 4g (M_1) 放入重量 M_2 的离心管中。在离心管中加入 20 ml 蒸馏水, 用旋涡振荡器搅拌均匀, 静置 30 min, 再以 4500 r/min 离心 5 min, 倒去离心管中的上清液, 称量离心管和沉淀的总重量 (M_3), 每个样品重复三次, 计算平均值, 持水性的计算公式:

$$\text{持水性 (g/g)} = (M_3 - M_1 - M_2) / M_1$$

2.3.7 持油性的测定

植物蛋白肉样品持油性的测定方法, 除离心管中加入 20 ml 蒸馏水替换为加入 16 ml 植物油外, 其余方法同“持水性的测定”。

持油性的计算公式:

$$\text{持油性 (g/g)} = (M_3 - M_1 - M_2) / M_1$$

2.3.8 游离巯基的测定

本实验采用 Ellman 试剂法进行游离巯基的测定[21, 22]配置 Tris-甘氨酸-EDTA 缓冲液, 1L 水中加入 10.4 g 氨三丁醇、6.9 g 甘氨酸和 1.2 g EDTA, 以盐酸调 pH 至 8.0。配置 DTNB 溶液, 称取 200 mg DTNB 加入上述 Tris-甘氨酸-EDTA 缓冲液定容至 50 ml。准确称取 3 mg 蛋白样品, 加入 5 ml Tris-甘氨酸-EDTA 缓冲液, 在 25 °C 反

应 30 分钟，随后加入 40 μL DTNB 溶液再在 25 $^{\circ}\text{C}$ 反应 30 分钟，测定上清液在 412 nm 处的吸光度。以不加入蛋白样品的作为空白对照组。根据公式计算游离巯基含量：

$$\text{游离巯基含量 } (\mu\text{M/g}) = \frac{73.53 \times A \times D}{c}$$

式中：A-吸光度

D-稀释倍数

C-样品质量浓度 (mg/mL)

2.3.9 产品感官评价分析

将植物蛋白肉切割为 2 cm \times 2 cm \times 0.5 cm 的方块，每个配方取约 15 块。通过外观、硬度、咀嚼性、残渣、组织状态五个指标进行感官评价分析。感官评分设计如下，组织化蛋白感官评价标准见表 1。

表 1 植物蛋白肉感官评价标准

Table 1 Standard for sensory evaluation of plant-textured proteins

指标	评价内容	评价标准	分数
硬度	咬断样品时所需力量的大小	样品软硬适中	8-10
		样品较硬	4-7
		样品较软	0-3
咀嚼性	样品通过咀嚼达到可以吞咽状态的次数	20 次咀嚼	8-10
		10 次咀嚼	4-7
		少于 10 次或多余 30 次	0-3
残渣	样品通过咀嚼达到吞咽状态的组织程度	成纤维状且基本无残渣	8-10
		存在少量残渣且成团	4-7
		成糊状或碎块状	0-3
外观	样品色泽是否均一、表面是否光滑	色泽均一表面光滑	8-10
		表面较光滑或有少量毛刺	4-7
		色泽不均一，表面粗糙	0-3
组织状态	样品沿竖直方向撕开的组织化程度	纤维状结构明显	8-10
		纤维状结构明显，但过于紧密或疏松	4-7
		纤维状结构不明显，且过于疏松	0-3

2.3.10 碎米植物蛋白肉青团制作

新鲜艾叶取叶片，洗净焯水去除苔味，挤干水分后捣碎或用榨汁机搅碎，用滤网包裹挤出艾草汁液。取澄面、猪油、糯米粉、艾草汁和糖适量制作青团面团，馅料选用咸蛋黄、蛋黄酱和植物蛋白肉制作的肉松。将馅包好后放入蒸笼中煮熟，表面刷油。

2.4. 实验结果及数据处理

采用 Office 2019 软件对数据进行整理和绘图；采用 SPSS 13.0 软件在 $p < 0.05$ 检验水平上选取 Duncan 分析对数据进行方差分析 (ANOVA)。结果用平均值 \pm 标准差的形式表示。

3 结果与讨论

3.1 原料基本成分分析

原料基本成分指标如表 2 所示。碎米的灰分较少，

粗蛋白含量平均值为 7.30%，变幅为 7.47%~7.13%，变异系数为 2.33%，符合碎米的理论蛋白含量。

表 2 原料基本成分表

Table 2 Basic ingredient list of raw materials

原料名称	灰分/%	水分/%	粗蛋白/%
大豆分离蛋白	5.01 \pm 0.02	6.48 \pm 0.20	91.15 \pm 0.35
谷朊粉	1.33 \pm 0.58	7.77 \pm 0.34	85.95 \pm 0.64
豆粕	5.85 \pm 0.33	6.67 \pm 0.27	55.54 \pm 0.98
淀粉	0.47 \pm 0.30	11.99 \pm 0.38	0.66 \pm 0.01
碎米粉	0.32 \pm 0.01	12.42 \pm 0.47	7.30 \pm 0.17

注：表中灰分、水分、粗蛋白含量均为干基



图 1 不同配方植物蛋白肉外观图 (从左到右依次为对照、配方 1~5)

Figure 1 Appearance diagram of tissue protein with different formulas (control, formula 1-5 from left to right)

3.2 碎米植物蛋白肉色泽及持水性和持油性分析

色泽作为植物蛋白肉外观的重要评判标准,能有效反映产品的均一程度和外观属性[20, 23]。图 1 为五种配方及对照组植物蛋白肉表面状态图。其中配方 5 与配方 4 表面最为光滑,起皮较少。而配方 1 与配方 2 表面起皮严重,表面粗糙。由表 7 可知,添加碎米的配方的 L*值显著小于对照组, a*值显著小于对照组(配方 5 除外), b*值显著大于对照组。五种配方 L*的平均值为 78.88, 变幅 79.18~78.58, 变异系数为 3.75%; ΔE 的平均值为 25.16, 变幅 25.43~24.89, 变异系数为 1.08%。分析色差结果可知,与对照组相比,添加碎米制备的

植物组织化蛋白色泽偏绿,偏黄,进而导致整体白度和亮度降低。

植物蛋白肉的功能特性包括持水性和持油性,是指受到外界影响时保持原有水分和油脂的能力[24],是动物肉质的重要评判标准之一,能反映出肉类的滋味、香气、多汁性、营养成分、嫩度、外观等食用品质。因此探究植物蛋白肉的持水性和持油性可与真肉形成对比,对“人造肉”的仿肉特性提供参考价值。如表 3 所示,持水性最高的为配方 1,最低的为配方 3;持油性最高的为配方 5,最低的为配方 3。相较于对照组,样品的持油性没有显著差异;配方 3 和配方 4 的持水性则显著低于对照组。由此可见,添加碎米有可能对挤压制备植物组织化蛋白的持水性产生影响。

表 3 五种配方植物蛋白肉功能特性

Table 3 Five formula plant-textured proteins functional properties

配方	L *	a *	b *	ΔE	持水性 (g/g)	持油性 (g/g)
配方 1	79.40±0.00 ^b	5.60±0.02 ^b	12.79±0.02 ^d	24.74±0.01 ^d	1.87±0.04 ^{ab}	0.83±0.05 ^a
配方 2	78.80±0.01 ^d	5.67±0.00 ^a	12.93±0.01 ^c	25.27±0.00 ^b	1.84±0.03 ^{ab}	0.84±0.06 ^a
配方 3	78.65±0.01 ^e	5.69±0.02 ^a	12.68±0.01 ^e	25.22±0.01 ^b	1.72±0.02 ^b	0.81±0.03 ^a
配方 4	78.99±0.01 ^c	5.55±0.01 ^c	12.76±0.01 ^d	25.02±0.00 ^c	1.78±0.02 ^b	0.86±0.06 ^a
配方 5	78.57±0.02 ^e	5.39±0.01 ^e	13.11±0.00 ^b	25.56±0.01 ^a	1.85±0.03 ^{ab}	0.88±0.02 ^a
对照	81.99±0.09 ^a	5.48±0.01 ^d	13.63±0.02 ^a	23.54±0.04 ^e	1.97±0.05 ^a	0.94±0.06 ^a

注: 同列 P<0.05 时差异性显著。持水性、持油性结果皆为干基

3.3 产品质构特性分析

植物蛋白肉的质构特性包括硬度、弹性、内聚性和咀嚼性等检测指标,能直接反映植物蛋白肉样品在物理质构上的差异,从而作为分析不同配方植物蛋白肉质构特性的重要参考依据[25]。由表 4 植物蛋白肉质

构特性分析可得,添加碎米制备的植物组织化蛋白硬度、弹性、回复性、咀嚼性等指标均大于对照组。不同配方(碎米添加量)不同的样品质构特性存在较大差异,其中硬度、咀嚼性最大的为配方 4,硬度最低的为配方 1。五种配方的回复性和内聚性接近。

表 4 五种配方植物蛋白肉质构特性

Table 4 Five formulas plant-textured proteins structure properties

配方	硬度 kg	回复性%	内聚性	弹性%	粘性 kg	咀嚼性 kg
配方 1	15.40±0.95 ^b	49.36±1.13 ^b	87.9±0.29 ^{ab}	95.42±1.81 ^a	13.54±0.85 ^b	12.94±0.92 ^b
配方 2	17.32±0.90 ^a	51.94±0.56 ^a	88.7±0.33 ^a	92.89±2.66 ^a	15.35±0.74 ^a	14.33±1.07 ^{ab}
配方 3	18.71±0.76 ^a	51.00±0.46 ^{ab}	87.8±0.16 ^{ab}	90.88±2.56 ^a	16.42±0.64 ^a	14.97±0.95 ^{ab}
配方 4	19.14±0.38 ^a	51.46±0.25 ^a	87.92±0.18 ^{ab}	92.96±1.24 ^a	16.83±0.32 ^a	15.66±0.48 ^a
配方 5	18.79±0.20 ^a	50.13±0.36 ^{ab}	87.08±0.21 ^b	92.18±2.34 ^a	16.36±0.16 ^a	15.08±0.40 ^{ab}
对照	9.84±0.22 ^c	27.75±0.63 ^c	72.1±0.83 ^c	82.12±2.70 ^b	7.09±0.17 ^c	5.84±0.29 ^c

注: 同列 P<0.05 时差异性显著。

组织化度作为植物蛋白肉紧密程度和纤维程度的重要评价标准,对植物蛋白肉的质构特性具有重要影

响[26]。同时，剪切力作为剪切时的最大应力，能够反映出植物蛋白肉内部紧密程度，结合横竖方向剪切力的差别可以体现植物蛋白肉内部蛋白质纤维的延伸方向和紧密程度。二者相互联系，共同构成植物蛋白肉内部质构的评价指标。

由表 5 可知，样品横向及纵向剪切力均呈现递增趋势，组织化度差异显著。其中，组织化度最高的为

配方 5，平均值为 2.66，变幅 2.87~2.45，变异系数 7.93%；组织化度最低的为配方 1，平均值为 1.93，变幅 2.01~1.85，变异系数 10.03%。五种配方的横向剪切力与对照组接近，但纵向剪切力明显低于对照组，从而导致组织化度远高于对照组的组织化度。其原因可能由于双螺杆挤压机的喂料量导致。

表 5 五种配方植物蛋白肉剪切特性及组织化度

Table 5 Shearing properties and degree of texturization in five plant-textured proteins formulations

配方	横向剪切力 kg	横向单位高度硬度 kg/mm	纵向剪切力 kg	纵向单位高度硬度 kg/mm	组织化度
配方 1	1.41±0.04 ^b	0.29±0.01 ^b	0.73±0.03 ^b	0.15±0.01 ^b	1.93±0.08 ^b
配方 2	1.40±0.03 ^b	0.29±0.01 ^b	0.75±0.04 ^b	0.16±0.01 ^b	1.98±0.15 ^b
配方 3	1.44±0.03 ^{ab}	0.29±0.01 ^b	0.75±0.03 ^b	0.15±0.01 ^b	1.98±0.09 ^b
配方 4	1.59±0.08 ^{ab}	0.33±0.02 ^a	0.67±0.04 ^{bc}	0.14±0.01 ^{bc}	2.38±0.04 ^a
配方 5	1.62±0.09 ^a	0.33±0.02 ^{ab}	0.62±0.02 ^c	0.12±0.00 ^c	2.66±0.21 ^a
对照	1.54±0.04 ^{ab}	0.29±0.01 ^b	1.02±0.05 ^a	0.19±0.01 ^a	1.53±0.05 ^c

注：同列 P<0.05 时差异性显著。

3.4 产品及原料蛋白游离巯基浓度变化分析

蛋白质中的半胱氨酸和谷胱甘肽含有巯基，具有很强的反应活性。两个半胱氨酸缩合可形成胱氨酸，产生二硫键，对维持蛋白质结构的稳定具有重要作用。因此检测游离巯基及总巯基，推算出二硫键含量对蛋

白质组分分析具有重要意义[27]。

原料及产品游离巯基浓度如表 6 和表 7 所示，五种配方的游离巯基含量均高于对照组，除去配方 1 和配方 4 数据可能存在一定偏差外，配方 1~5 游离巯基呈递减趋势，说明加入碎米能够在一定程度上降低游离巯基含量。这也与原料游离巯基测定结果中，碎米粉游离巯基浓度大于谷朊粉、豆粕、大豆分离蛋白游离巯基浓度的结果相符合。

表 6 植物蛋白肉游离巯基浓度测定

Table 6 Determination of plant-textured proteins free sulfhydryl concentration

样品	谷朊粉	豆粕	大豆分离蛋白	淀粉	碎米
游离巯基浓度 μM/g	2.57±0.05 ^{bc}	2.1±0.03 ^c	3.85±0.07 ^b	6.73±0.38 ^a	5.47±0.97 ^a

注：同列 P<0.05 时差异性显著。

表 7 原料游离巯基浓度测定

Table 7 Determination of free sulfhydryl concentration of raw materials

样品	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4	配方 5	对照
游离巯基浓度 μM/g	11.68±0.10 ^a	8.56±0.41 ^b	6.93±0.04 ^d	7.84±0.05 ^c	6.6±0.03 ^d	5.63±0.09 ^e

注：同列 P<0.05 时差异性显著。

3.5 相关性分析

对植物蛋白肉产品质构特性与功能特性进行相关性分析，分析结果如表 8 所示，硬度与咀嚼性等质构

指标与蛋白质功能特性具有密切的相关性。硬度与咀嚼性同为质构特性指标，两指标间呈极显著正相关 (P<0.01)，两指标与持水性呈显著负相关 (P<0.05)，与持油性的相关性不强。L*与ΔE 同为功能特性中色泽

指标, 呈极显著负相关 ($P<0.01$), L^* 与硬度和咀嚼性呈极显著负相关性 ($P<0.01$), ΔE 与硬度和咀嚼性呈极显著正相关性 ($P<0.01$)。因此六种配方的产品质构特性与功能特性之间相关性显著。

表 8 质构特性与功能特性相关性分析

Table 8 Correlation analysis between plant-textured proteins and functional properties

	硬度	咀嚼性	组织化度	持水性	持油性	L^*	ΔE
硬度	1						
咀嚼性	0.99**	1					
组织化度	0.81	0.76	1				
持水性	-0.86*	-0.84*	-0.46	1			
持油性	-0.71	-0.77	-0.23	0.81	1		
L^*	-0.97**	-0.98**	-0.74	0.80	0.80	1	
ΔE	0.95**	0.95**	0.80	-0.73	-0.69	-0.98**	1

* 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著。

** 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。

3.6 产品感官评价分析

五种配方及对照组植物蛋白肉成品感官评价综合总分如图 2 所示。感官评价总分高低顺序为: 配方 4>配方 3>配方 5>对照>配方 1>配方 2, 变化幅度为 35.58~36.67 分 (满分为 50 分)。根据与对照组的总分比较可知, 配方 3、配方 4 和配方 5 感官评价总分较高, 且与对照组相近, 由于感官评价存在一定主观误差, 因此三种配方均可作为最优配方。

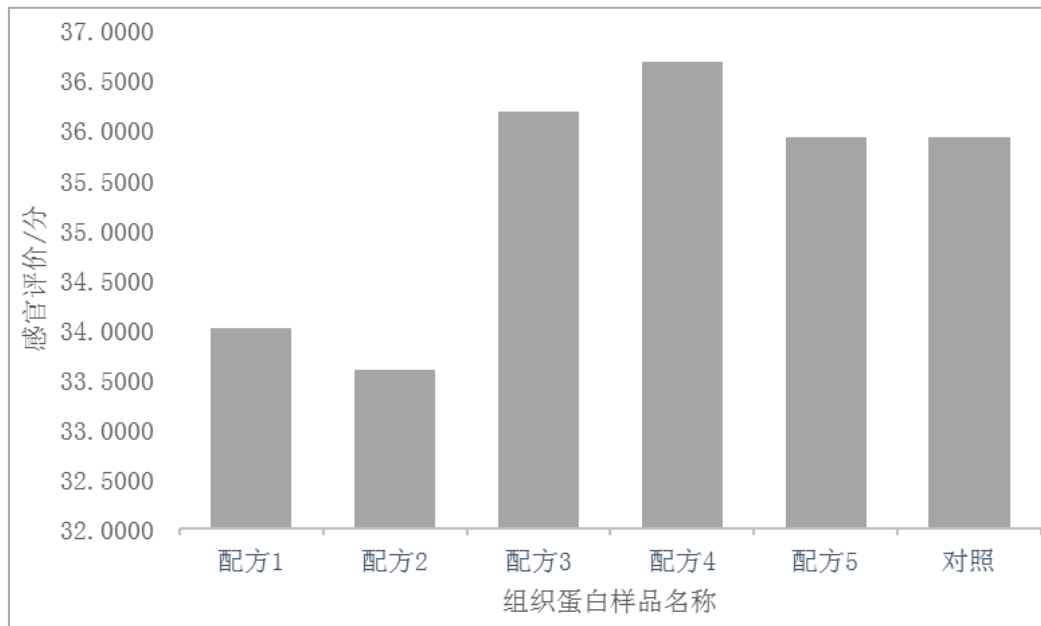


图 2 植物蛋白肉成品感官评价总分

Figure 2 Total score of sensory evaluation of plant-textured proteins products

对五种配方及对照组植物蛋白肉各感官评价指标如硬度、咀嚼度、组织化程度等绘制雷达图, 分析结果如图 3 所示。由图可知, 硬度最佳的组别为配方 5, 咀嚼性和外观最佳的组别为配方 5, 组织化程度和口感最佳的组别为配方 4。虽然配方 5 的硬度最佳, 也与质

构测定时得到的数据相一致, 但由于其余指标尤其是口感和外观评价较低, 导致配方 5 总评分较低。以硬度和咀嚼度作为植物蛋白肉评价最关键的指标, 配方 4 的感官评价结果更佳, 此结果也与质构测定的结果相一致。

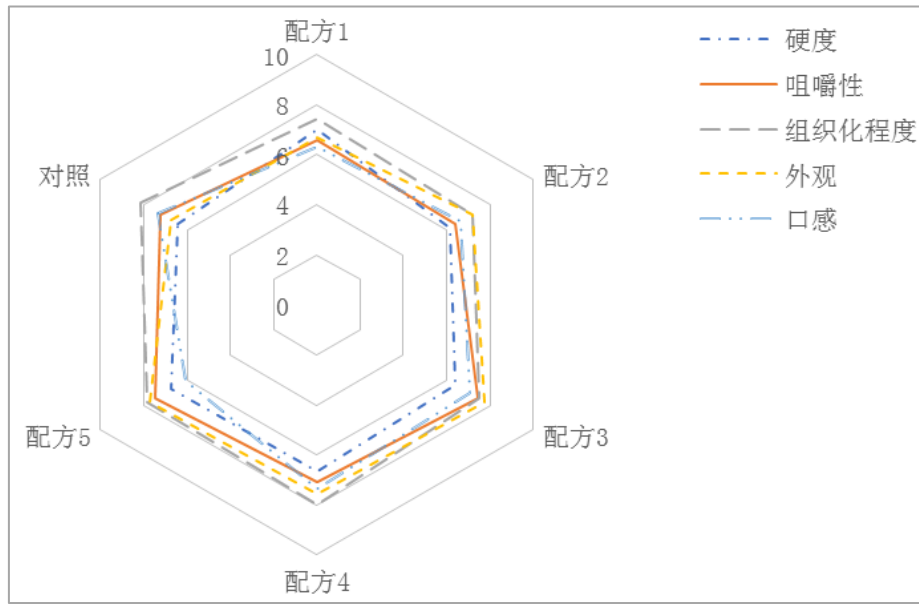


图 3 植物蛋白肉成品感官评价具体指标雷达图

Figure 3 Radar chart of specific indicators for sensory evaluation of plant-textured proteins products

本课题以青团作为应用示例，制成的碎米植物蛋白肉青团外形与一般青团相同，风味清香，色泽均匀明亮，口感软糯有嚼劲，具备植物蛋白肉的风味。



图 4 碎米植物蛋白肉青团的制作及成品

Figure 4 Production and finished product of broken rice plant-textured proteins sweet Green Rice Ball

4 结论

本论文以碎米作为主要研究对象，探究其作为植物蛋白肉原料的可行性，同时分析碎米植物蛋白肉与对照组之间的差异与特性，得出以下结论：(1)在质构方面，碎米植物蛋白肉的硬度和咀嚼性等质构指标与对照组相比得到有效提升，硬度范围为 15.40 kg~19.14 kg (对照组 9.84 kg)，咀嚼性范围为 12.94 kg~15.66 kg

(对照组 5.8 kg)，组织化度 1.93~2.66 (对照组 1.53)；(2)在功能特性方面，持水性、持油性随碎米含量增加呈递减趋势；相较于持油性，持水性随碎米含量变化影响较大。碎米植物蛋白肉亮度和白度随碎米添加含量的增加而呈递减趋势。(3)根据感官评价数据结构分析，配方 4 的感官评价总分及口感和组织化度指标评分最高，并且样品色泽明亮、表面光滑；制备的碎米植物组织化蛋白肉可应用于制作青团等食品中，具有良好的应用潜力。

参考文献

- [1] 曾艳, 郝学财, 董婷, 孙媛霞. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (03): 338-345+350. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020030365.
- [2] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46 (12): 299-305.
- [3] Ou Y J, Zheng M J, Zeng H L, et al. Advance in plant-based meat reasearch [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46 (12): 299-305.
- [4] 刘梦然, 毛衍伟, 罗欣, 董鹏程, 张一敏. 植物蛋白素肉原料与工艺的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47 (04): 293-298.
- [5] Day L. Proteins from land plants-potential resources for human nutrition and food security [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 32 (1): 25-24).
- [6] 刘晓荻. 用植物蛋白代替红肉有益于心脏健康 [J]. 基础医学与临床, 2019, 39 (11): 1638.
- [7] Carvalho AV, Mattietto RD, Bassinello PZ, et al. Processing and characterization of extruded breakfast meal formulated with broken rice and bean flour [J]. Cienc Tecnol Aliment, 2012, 32 (3): 515-524.
- [8] 刘英, 陈运中. 碎米综合利用新途径 [J]. 粮食与油脂, 2002 (03): 38-39.
- [9] 周显青, 崔岩珂, 张玉荣, 张志超, 王铃钊. 我国碎米资源及其转化利用技术现状与发展 [J]. 粮食与饲料工业, 2015 (02): 29-34.
- [10] 刘明, 蒋华彬, 谭斌, 刘艳香, 田晓红, 汪丽萍, 郭文杰. 淀粉对高水分挤压组织化小麦蛋白产品特性的影响 [J]. 粮油食品科技, 2018, 26 (01): 7-12. DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2018.01.002.
- [11] 陈达图, 李瑞, 胡官波, 贺喜, 张石蕊. 大米蛋白的营养价值与开发利用 [J]. 中国饲料, 2013 (10): 37-40. DOI: 10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2013.10.011.
- [12] 豁银强, 袁佰华, 汤尚文, 于博, 张宾佳, 赵思明. 大米谷蛋白对大米淀粉凝胶化及凝胶特性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2019, 34 (06): 1-5.
- [13] Anocha Suksomboon et al. Effect of extrusion conditions on the physicochemical properties of a snack made from purple rice (Hom Nil) and soybean flour blend [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46 (1): 201-208.
- [14] Aiquan Jiao, Xueming Xu, Zhengyu Jin. Research progress on the brewing techniques of new-type rice wine [J]. Food Chemistry, 2017, 215.
- [15] 王莉芬. 仿牛肉大豆组织蛋白的食用品质评价及改良 [D]. 河南工业大学, 2021. DOI: 10.27791/d.cnki.ghegy.2021.000330.
- [16] 刘超. 双螺杆挤压膨化方便粥配方及工艺参数优化 [D]. 西南大学, 2020. DOI: 10.27684/d.cnki.gxndx.2020.000547.
- [17] 兰晓光. 挤压膨化技术在粮油副产品深加工中的应用 [J]. 现代食品, 2021 (12): 112-114.
- [18] 胡玉华, 郭祯祥, 王华东, 王大一, 蔡易辉. 挤压膨化技术在谷物加工中的应用 [J]. 粮食与饲料工业, 2014 (12): 37-39.
- [19] Gujral H S, Kaur A, Singh N, et al. Effect of liquid whole egg, fat and textured soy protein on the textural and cooking properties of raw and baked patties from goat meat [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53 (4): 377-385.
- [20] 石永峰. 食品的挤压膨化以及挤压对食品色泽的影响 [J]. 粮食与饲料工业, 1995 (12): 24-27.
- [21] 张雪霁. 总巯基检测试剂比色法研究进展 [J]. 化学分析计量, 2021, 30 (09): 99-103.
- [22] 张力文, 尚中博, 常志显, 祁志冲, 李德亮. 巯基检测方法研究进展 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48 (04): 430-443.
- [23] 张波, 张金闯, 张玮, 魏益民. 原料理化特性对挤压组织化植物蛋白质量的影响 [J]. 中国食品学报, 2017, 17 (12): 155-163. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2017.12.020.
- [24] 施冰心, 董庆利, 刘宝林, 黎园园. 增稠剂提高牛肉持水性的配方研究 [J]. 肉类研究, 2010 (04): 18-20.
- [25] 肖志刚, 李航, 王哲, 田娟娟, 朱文高, 金志扬, 何东, 王娜, 朱旻鹏. 高水分组织化复合蛋白的挤压制备及品质特性研究 [J]. 中国粮油学报, 2022, 37 (01): 72-80+88.
- [26] 安红周, 贾旭, 李盘欣, 韩晓凯. 双螺杆挤压对大豆组织蛋白组织化度的影响研究 [J]. 粮油加工, 2010 (07): 33-35.
- [27] 田悦, 杜军保. 二硫键和巯基在蛋白质结构功能中的作用及分析方法 [J]. 实用儿科临床杂志, 2007 (19): 1499-1501.