

必需氨基酸平衡的高水分拉丝蛋白制备及物理特性变化

余杰¹, 贾利蓉^{1*}, 张贞炜², 陈燕³, 李顺舟³, 边文洁⁴, 靳贻斌⁴

(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) (3. 四川植得期待生物科技有限公司, 四川成都 611700) (4. 山东真诺智能设备有限公司, 山东济南 251400)

摘要: 为提升高水分拉丝蛋白的营养价值, 研究以世界卫生组织 (WHO) 推荐的人体氨基酸模式为参比, 通过求平方和的数学计算方式构建了一种必需氨基酸评价模型来优化复合植物蛋白原料的配比, 并研究了常用食品添加剂对复合植物蛋白制备的高水分拉丝蛋白物理特性的影响。实验结果表明, 经必需氨基酸评价模型优化的高水分拉丝蛋白配方中各原料的质量分数为大豆蛋白 50%、小麦蛋白 25%、豌豆蛋白 10%、花生蛋白 10%、大米蛋白 5%, 制备的高水分拉丝蛋白质构特性为: 硬度 8.18 kg, 弹性 2.06 g·s, 咀嚼性 8.87 kg·s。优化配方下制备的高水分拉丝蛋白必需氨基酸比例较市售的植物性肉类替代品更接近人体氨基酸模式, 具有更高的营养价值, 并且与鸡肉和猪肉的质构特性相近。该研究对提升高水分拉丝蛋白的营养价值和改善复合植物蛋白制备高水分拉丝蛋白的物理特性提供了新思路, 有助于开发营养美味的植物性肉类替代品。

关键词: 高水分拉丝蛋白; 人体氨基酸模式; 评价模型; 营养价值; 物理特性

文章编号: 1673-9078(2024)11-305-312

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1442

Preparation and Physical Properties of High-moisture Extruded Protein with Balanced Essential Amino Acids

YU Jie¹, JIA Lirong^{1*}, ZHANG Zhenwei², CHEN Yan³, LI Shunzhou³, BIAN Wenjie⁴, JIN Yibin⁴

(1.College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)(2.Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, China)(3.Sichuan Zhide Expectation Biotechnology Co. Ltd., Chengdu 611700, China)(4.Shandong Zhennuo Intelligent Equipment Co. Ltd., Jinan 251400, China)

Abstract: In order to improve the nutritional value of high-moisture extruded protein, the human amino acids pattern recommended by the World Health Organization (WHO) was used as a reference. An essential amino acid evaluation model was created through mathematical calculation of the sum of squared deviations to optimize the ratio of the composite plant protein materials. In addition, the effects of commonly used food additives on the physical properties of high-moisture extruded proteins prepared from composite plant proteins were also studied. The experimental results showed that the

引文格式:

余杰,贾利蓉,张贞炜,等.必需氨基酸平衡的高水分拉丝蛋白制备及物理特性变化[J].现代食品科技,2024,40(11): 305-312.

YU Jie, JIA Lirong, ZHANG Zhenwei, et al. Preparation and physical properties of high-moisture extruded protein with balanced essential amino acids [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 305-312.

收稿日期: 2023-12-02

基金项目: 四川大学-宜宾市校市战略合作专项资金项目(2020CDYB-1)

作者简介: 余杰(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与营养健康, E-mail: 834211314@qq.com

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

mass fractions of each raw material in the high-moisture extruded protein formula optimized by the essential amino acids evaluation model were soybean protein (50%), wheat protein (25%), pea protein (10%), peanut protein (10%), and rice protein (5%). The texture characteristics of the high-moisture extruded protein samples were: hardness 8.18 kg, elasticity 2.06 g·s, and chewiness 8.87 kg·s. The proportion of essential amino acids in the high-moisture extruded proteins prepared under optimized formula was closer to the human amino acids pattern, had higher nutritional value and possessed similar textural characteristics to those of chicken and pork, compared with commercially available plant-based meat substitutes. This study provides new ideas for improving the nutritional value and physical properties of high-moisture extruded proteins prepared from the composite plant proteins, which can help develop nutritious and tasty plant-based meat substitutes.

Key words: high moisture extruded protein; human amino acid patterns; evaluation model; nutritional value; physical properties

植物蛋白通过双螺杆挤压工艺制备的拉丝蛋白, 具有类似动物肌肉的纤维结构, 是生产植物性肉类替代品的重要原料^[1]。拉丝蛋白按照含水量的不同可分为高水分拉丝蛋白(含水量40%~80%)和低水分拉丝蛋白(含水量20%~40%)两类^[2]。高水分拉丝蛋白的纤维结构更接近真肉, 并且其加工过程中营养损失更少, 因此其相关技术的研究逐渐成为当前的热点^[3]。目前对高水分拉丝蛋白的研究主要是分析工艺参数对其外观、质构等品质特性的影响。多数研究仅使用了一种植物蛋白作为原料, 如关家乐等^[4]在对花生蛋白的高水分挤压研究中发现挤压温度和物料水分是影响高水分拉丝蛋白品质的主要因素, 张光耀等^[5]通过对硬度、组织化度等指标分析优化了豌豆蛋白的高水分挤压工艺, Ferawati等^[6]以豌豆蛋白进行高水分挤压时发现物料水分是影响产品质构特性最重要的因素。少数研究以多种植物蛋白为原料, 如肖志刚等^[7]通过将不同比例的大豆蛋白、小麦蛋白和豌豆蛋白混合, 分别制备出与鸡肉和牛肉质构相似的高水分拉丝蛋白。

使用不同种类植物蛋白复合的原料, 不仅有助于高水分拉丝蛋白质构的改善, 同时还可以提升其营养价值, 但目前相关的研究比较缺乏。制备高水分拉丝蛋白常用的植物蛋白与动物蛋白相比, 某些必需氨基酸的含量相对缺乏, 如豆类蛋白缺乏含硫氨基酸, 谷物蛋白缺乏赖氨酸^[8]。世界卫生组织(WHO)公布的人体氨基酸模式, 揭示了人体必需氨基酸的比例^[9], 若食物中蛋白质的必需氨基酸比例越接近人体氨基酸模式, 则其蛋白质的营养价值也就越高^[10]。对不同种类的植物蛋白复合, 如利用豆类蛋白和谷类蛋白在必需氨基酸组成上的互补作用^[11], 可以提升高水分拉丝蛋白的营养价值; 同时调节球蛋白与谷蛋白的含量占比还有利于提升植物

蛋白的消化特性^[12], 将有助于促进居民营养健康水平的提高^[13]。

本研究从提升高水分拉丝蛋白的营养价值出发, 以人体氨基酸模式为标准, 利用求差平方和的数学计算方式构建了一种必需氨基酸评价模型, 对不同复合蛋白原料的必需氨基酸比例进行评价, 优化了高水分拉丝蛋白的原料配比。同时, 研究还分析了多种食品添加剂对高水分拉丝蛋白质构等理化特性的影响, 以期制备出营养且具有优良质构的产品。本研究为多种植物蛋白复合原料制备高水分拉丝蛋白的研究提供了新思路, 有助于开发营养美味的植物性肉类替代品。

1 材料与方法

1.1 原料

大豆蛋白(蛋白质含量85.8%), 山东万得福生物科技有限公司; 小麦蛋白(蛋白质含量79.3%), 陕西省扶风县谷物蛋白厂; 豌豆蛋白(蛋白质含量81.9%), 山东省烟台双塔食品股份有限公司; 花生蛋白(蛋白质含量53.9%), 山东省乳山市金果食品股份有限公司; 大米蛋白(蛋白质含量79.7%), 江苏省无锡金农生物科技有限公司; L-半胱氨酸, 浙江一诺生物科技有限公司; 三聚磷酸钠, 保康楚烽化工有限责任公司; 食用小苏打, 天津渤化永利化工股份有限公司; 植物蛋白小酥肉, 四川植得期待生物科技有限公司; 鸡胸肉, 市售; 猪里脊肉, 市售。

1.2 主要仪器设备

AHT36-32D 双螺杆挤压机, 山东真诺智能设备有限公司; CM-5 型色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; TA.XT Plus 型质构仪, 英国 Stable Micro System 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 高水分拉丝蛋白的制备

双螺杆挤压机温区 2~8 的温度分别设置为 40、60、80、120、150、150、120 °C，冷却区段的温度设置为 60 °C 和 40 °C，螺杆转速为 420 r/min，粉料进料速度为 10 kg/h，进水速度为 15 L/h。

1.3.2 必需氨基酸评价模型构建

以 WHO 推荐的人体氨基酸模式为参比标准，利用求差平方和的数学计算方式，新构建一种对食物中必需氨基酸分析评价的模型。必需氨基酸评价模型的详细设计如下所示。

设使用的蛋白原料比例为 b_i ($i=1,2,\dots,n$)， $b_i \in (0,1]$ ，且 $\sum_{i=1}^n b_i=1$ 。以色氨酸含量记为 1，其余 7 种必需氨基酸的比例 $a_i=[x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}]^{-1}$ 。

$$A=[a_1, a_2, \dots, a_i] \quad (1)$$

$$B=[b_1, b_2, \dots, b_i]^{-1} \quad (2)$$

$$C=BA=[c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7]^{-1} \quad (3)$$

$$D=[d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7]^{-1} \quad (4)$$

$$E=(c_j-d_j)^2 \quad (5)$$

$$F=\sum_{j=1}^7 (c_j-d_j)^2 \quad (6)$$

式中：

A——蛋白原料中 7 种必需氨基酸的比例，%；

B——蛋白原料的使用比例，%；

C——配方蛋白原料 7 种必需氨基酸比例，%；

D——人体氨基酸模式中 7 种必需氨基酸比例，%；

E——食物或配方的单种必需氨基酸评分；

F——食物或配方整体的必需氨基酸评分。

食物或配方整体的必需氨基酸评分数值越接近于 0，则其必需氨基酸比例越接近 WHO 推荐的人体氨基酸模式。

1.3.3 质构参数测定

质构参数测定参考安红周等^[14]的方法并稍作修改，将高水分拉丝蛋白样品切割成 2 cm×2 cm×0.5 cm（长×宽×高）的形状，使用质构仪测定样品的硬度、弹性和咀嚼性等质构参数。

质构仪参数：探头 P/10，测试前速度 2.0 mm/s，测试中速度 1.0 mm/s，测试后速度 4.0 mm/s，应变 75%，触发力 5.0 g。每个样品做 5 次平行试验。

1.3.4 组织化度测定

组织化度可以表征样品的纤维化程度。组织化度的测定参考关家乐等^[4]的方法并稍作修改，将样

品裁剪成如图 1 所示的形状，厚度为 5 mm，通过测定横向剪切力（垂直于挤出方向）所做的功与纵向剪切力（平行于挤出方向）所做的功的比值求出组织化度。

质构仪参数：剪切模式，探头 HDP/BSK，测试前速度 2.0 mm/s，测试中速度 1.0 mm/s，测试后速度 4.0 mm/s，位移 3.0 mm，触发力 40.0 g。每个样品做 5 次平行试验。

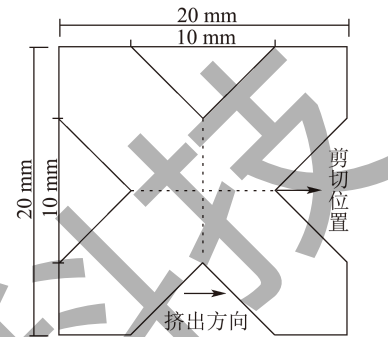


图 1 组织化度测定样品形状示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample shape for fiber degree determination

1.3.5 剪切力测定

将样品裁成图 2 所示形状，厚度为 5 mm，通过测定样品中部被切断过程中所受到的最大剪切力来表征样品的纤维强度，单位用牛顿 (N) 表示

质构仪参数：剪切模式，探头 HDP/BSK，测试前速度 2.0 mm/s，测试速度 1.0 mm/s，测试后速度 4.0 mm/s，位移 20.0 mm，触发力 40.0 g。每个样品做 5 次平行试验。

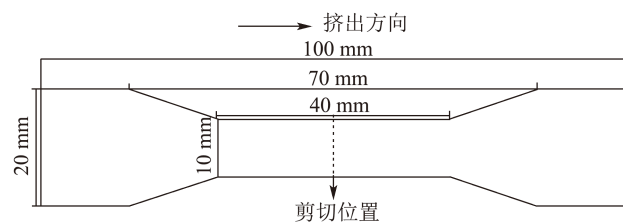


图 2 剪切力测定样品形状示意图

Fig.2 Schematic diagram of sample shape for shear force determination

1.3.6 真肉前处理

参考张立彦等^[15]对鸡肉的前处理方法并适当修改，将市售鸡胸肉和猪里脊肉在冷冻条件下裁剪出测定物理特性参数对应的形状，解冻后用密封袋封装，在 70 °C 条件下水浴加热 30 min。样品冷却至室温后用于物理特性参数的测定。

1.3.7 必需氨基酸测定

参照 GB/T 18246-2019 对 5 种植物蛋白原料、高水分拉丝蛋白及植物蛋白小酥肉进行色氨酸含量的测定, 参照 GB 5009.124-2016 对 5 种植物蛋白原料、高水分拉丝蛋白及植物蛋白小酥肉进行其余 7 种必需氨基酸含量的测定。

1.4 数据处理与分析

所得的试验结果数据使用格拉布斯准则去除异常值。采用 Excel 2016 计算平均值与标准差, SPSS 27 对实验数据进行差异显著性分析 ($P < 0.05$), Origin 2022 和 PowerPoint 2016 绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 必需氨基酸评价模型分析

对食物中必需氨基酸分析评价常用的方法有氨基酸评分 (AAS) 法^[9]、氨基酸比值系数 (RC) 法和氨基酸比值系数分 (SRC) 法^[16]等。其中 AAS 法、RC 法适用于对单种必需氨基酸含量高低的分析评价, SRC 法能对食物中必需氨基酸整体比例作分析评价。构建的必需氨基酸模型较已有的必需氨基酸分析评价方法不仅可对食物中单个必需氨基酸含量

和必需氨基酸整体比例作分析评价, 还可以设计出接近人体氨基酸模式的原料配方。

2.2 复合蛋白配方设计分析

5 种高水分挤压常见的蛋白原料的必需氨基酸比例及必需氨基酸评分如表 1 所示。从 5 种蛋白原料的必需氨基酸比例来看, 谷类蛋白 (大米蛋白、小麦蛋白) 的赖氨酸较豆类蛋白 (豌豆蛋白、大豆蛋白、花生蛋白) 要低并且与人体氨基酸模式差异更大, 但蛋氨酸较豆类蛋白中的豌豆蛋白和花生蛋白要高, 通过谷类蛋白和豆类蛋白的互补^[11]有助于调节复合蛋白必需氨基酸的平衡。从必需氨基酸评分来看, 豌豆蛋白和大豆蛋白的必需氨基酸比例与人体氨基酸模式相对接近, 故复合蛋白配方主要以豌豆蛋白和大豆蛋白为主。

分别以豌豆蛋白和大豆蛋白作为主要原料 (占比 50%), 参考已有的复合蛋白配方经验^[17,18], 并通过必需氨基酸评价模型优化, 设计出两组基础试验配方。两组基础试验配方的蛋白原料使用比例及必需氨基酸评分如表 2 所示, 复合蛋白配方相较于主要原料的必需氨基酸比例更接近人体氨基酸模式, 说明不同蛋白原料的复合可以提高蛋白质的利用率^[10]。

表 1 蛋白原料必需氨基酸比例及必需氨基酸评分表

Table 1 Protein raw materials essential amino acid ratio and essential amino acid score table

项目	异亮氨酸	亮氨酸	赖氨酸	蛋氨酸	苯丙氨酸	苏氨酸	缬氨酸	色氨酸	必需氨基酸评分
人体氨基酸模式	5.00	9.80	7.50	3.70	6.30	3.80	6.50	1.00	0
豌豆蛋白	5.29	10.47	9.12	1.04	11.03	4.47	5.75	1.0	33.59
大豆蛋白	3.77	6.98	5.36	2.08	9.90	3.30	3.87	1.0	36.77
花生蛋白	3.20	6.78	3.76	0.86	8.59	2.92	4.04	1.0	46.40
大米蛋白	3.11	6.65	2.61	1.82	8.25	2.89	4.55	1.0	49.37
小麦蛋白	3.50	7.21	1.82	1.41	8.64	2.68	3.83	1.0	60.40

注: 必需氨基酸的比例以色氨酸的含量为 1 求出; 必需氨基酸评分越接近 0 则必需氨基酸比例越接近人体氨基酸模式。

表 2 基础试验配方及必需氨基酸评分

Table 2 Basic test formula and essential amino acid score

配方	豌豆蛋白/%	大豆蛋白/%	花生蛋白/%	大米蛋白/%	小麦蛋白/%	必需氨基酸评分
配方 1	50.00	25.00	10.00	5.00	10.00	25.17
配方 2	10.00	50.00	10.00	5.00	25.00	36.57

注: 必需氨基酸评分越接近 0 则必需氨基酸比例越接近人体氨基酸模式。

表3 复合蛋白原料与高水分拉丝蛋白样品的蛋白质与必需氨基酸含量对比

Table 3 Comparison of protein and essential amino acid content between composite protein raw materials and high moisture extruded protein samples

样品	蛋白质	异亮氨酸	亮氨酸	赖氨酸	蛋氨酸	苯丙氨酸	苏氨酸	缬氨酸	色氨酸
复合蛋白原料/ (g/100 g)	30.82 ± 0.38	1.23 ± 0.01	2.37 ± 0.01	1.51 ± 0.01	0.38 ± 0.00	1.70 ± 0.01	1.05 ± 0.01	1.32 ± 0.01	0.33 ± 0.01
高水分拉丝蛋白/ (g/100 g)	30.00 ± 0.40	1.19 ± 0.01	2.16 ± 0.01	1.49 ± 0.01	0.32 ± 0.00	1.51 ± 0.01	1.00 ± 0.01	1.24 ± 0.01	0.27 ± 0.01
差异度/%	2.67	3.25	8.86	1.99	15.79	11.18	4.76	6.06	18.18

注: 差异度百分比的计算以复合蛋白原料为基准。

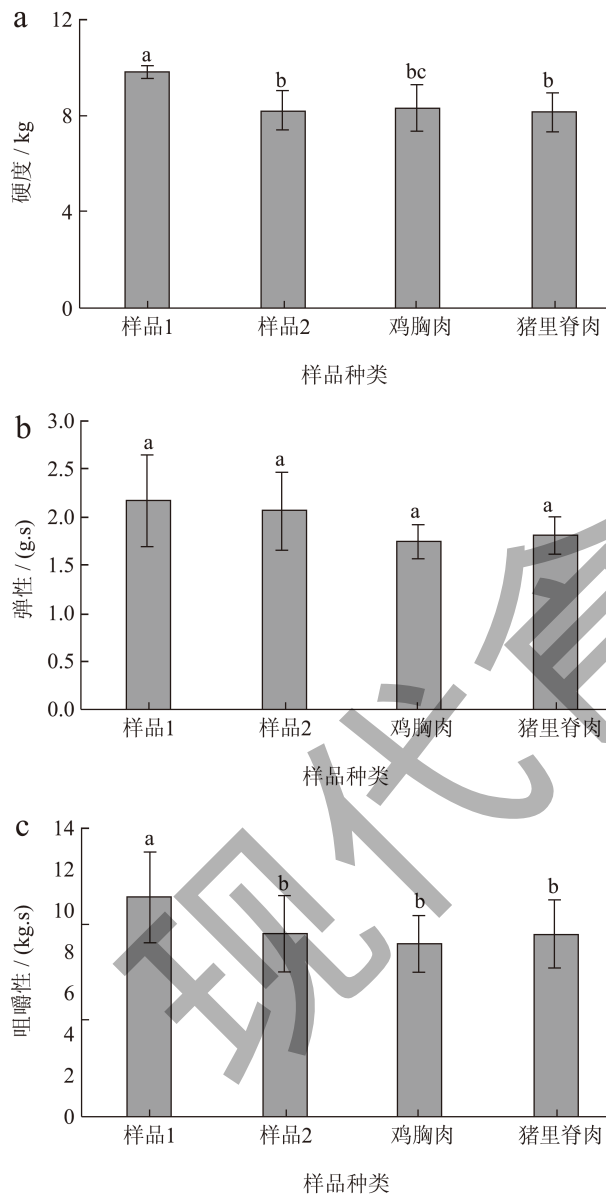


图3 基础配方样品和真肉的质构特性

Fig.3 Texture characteristics of basic formula samples and real meat

注: 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$), 下图同。

由基础配方制备的样品和真肉的质构特性参数如图3所示, 样品2相较于样品1在硬度和咀嚼性

上更接近真肉的质构。基础配方2制备的样品有提升营养价值的效果, 并且具有较为接近真肉的质构, 后续实验中以基础配方2制备的样品为研究材料。

2.3 必需氨基酸评价模型的适用性分析

2.3.1 蛋白质与必需氨基酸含量变化分析

复合蛋白原料与高水分拉丝蛋白样品的蛋白质和必需氨基酸含量如表3所示。从表中可以看出, 经过高水分挤压之后, 蛋白质总量及各必需氨基酸含量均有所降低, 其中蛋白质的含量降低了约2.67%, 多数必需氨基酸含量下降幅度较小 ($< 10\%$), 蛋氨酸、苯丙氨酸和色氨酸的含量降低了10%~20%, 这与Sandra等^[19]对以大豆蛋白为原料制备高水分拉丝蛋白的研究相似, 说明高水分挤压会使样品的蛋白质和必需氨基酸发生一定程度的损耗, 但蛋白质总量和多数必需氨基酸损耗较少, 表明必需氨基酸评价模型用于对复合蛋白原料制备高水分拉丝蛋白的必需氨基酸比例的分析评价是具有可行性的。

2.3.2 必需氨基酸评价模型使用效果分析

AAS法、RC法和必需氨基酸评价模型对高水分拉丝蛋白样品和植物蛋白小酥肉的单种必需氨基酸的分析评价如表4所示。从表中可以看出, AAS法和RC法的分析结果显示高水分拉丝蛋白样品和植物蛋白小酥肉蛋氨酸的评分值与1差值最大, 是最缺乏的第一限制氨基酸; 必需氨基酸评价模型的分析结果显示高水分拉丝蛋白样品和植物蛋白小酥肉中蛋氨酸评分与0的差值最大, 说明两种样品中的蛋氨酸的比例与人体氨基酸模式的差异最大。与AAS法和RC法相比, 必需氨基酸评价模型通过对单种必需氨基酸含量的评价可以寻找到差异性最大的氨基酸, 但不能表示单种氨基酸的含量是相对过剩还是相对不足, 因此其在单种氨基酸含量评价上还有一定的局限性。

表 4 不同评价方法对单种必需氨基酸的评价

Table 4 Evaluation of single essential amino acids by different evaluation methods

评价方法	样品	必需氨基酸							
		异亮氨酸	亮氨酸	赖氨酸	蛋氨酸	苯丙氨酸	苏氨酸	缬氨酸	色氨酸
AAS 法	高水分拉丝蛋白	1.32	1.22	1.10	0.48	1.32	1.45	1.06	1.50
	植物蛋白小酥肉	1.24	1.10	0.91	0.26	1.15	1.33	1.00	1.43
RC 法	高水分拉丝蛋白	1.12	1.03	0.93	0.41	1.12	1.23	0.90	1.27
	植物蛋白小酥肉	1.18	1.04	0.87	0.25	1.10	1.26	0.95	1.36
必需氨基酸评价模型	高水分拉丝蛋白	0.35	3.24	4.07	6.32	0.50	0.01	3.64	0.00
	植物蛋白小酥肉	0.44	5.04	7.41	9.20	1.41	0.06	3.78	0.00

注：AAS 法和 RC 法中单种必需氨基酸的评价值 > 1 表明该种氨基酸相对过剩，评价值 < 1 表明该种氨基酸相对缺乏；必需氨基酸评价模型中，评分越接近 0 表明该种氨基酸越接近人体氨基酸模式的比例。

SRC 法和必需氨基酸评价模型对高水分拉丝蛋白样品和植物蛋白小酥肉的必需氨基酸整体比例的分析评价如表 5 所示。从表中可以看出，SRC 法和必需氨基酸评价模型都能表明高水分拉丝蛋白样品较植物蛋白小酥肉的必需氨基酸比例更接近于人体氨基酸模式，说明必需氨基酸模型在分析评价食物中必需氨基酸整体比例时是具有较好的适用性的，同时也说明了利用必需氨基酸评价模型设计和优化配方后的高水分拉丝蛋白较已有的一些植物性肉类替代品具有更高的营养价值。

表 5 不同评价方法对必需氨基酸整体比例的评价

Table 5 Evaluation of the overall ratio of essential amino acids by different evaluation methods

样品	评价方法	
	SRC 法	必需氨基酸评价模型
高水分拉丝蛋白	68.20	18.14
植物蛋白小酥肉	61.24	27.35

注：SRC 法中评分越接近 100 表明食物中必需氨基酸比例越接近人体氨基酸模式；必需氨基酸评价模型中，评分越接近 0 表明食物中必需氨基酸比例越接近人体氨基酸模式。

2.4 食品添加剂对样品物理特性的影响

在植物蛋白的挤压组织化加工过程中，使用一定的食品添加剂有助于改善挤出物的品质^[20]。海藻酸钠能使蛋白纤维结构变得紧密^[21,22]；L-半胱氨酸通过与蛋白质二硫键相互作用，可以改善样品的纤维结构^[23]；三聚磷酸钠具有较好的保水效果，能增强蛋白质加热之后网状结构的紧密度^[20]；食用小苏打加热分解产生的 CO₂ 气体会影响蛋白纤维结构的排列^[21]。借鉴已有的研究经验^[24]，在复合蛋白原料中添加含量占比 0.4% 的上述 4 种食品添加剂，研

究其对高水分拉丝蛋白物理特性的影响。

2.4.1 食品添加剂对样品质构特性的影响

不同食品添加剂对样品质构特性的影响如图 4 所示。添加海藻酸钠和 L-半胱氨酸的样品硬度降低，添加食用小苏打的样品弹性和咀嚼性降低。与研究结果不同的是杨文等^[21]和 Li 等^[23]以小麦蛋白为原料研究发现，海藻酸钠和 L-半胱氨酸能够增大样品的硬度，马宁等^[25]研究发现碳酸盐能增大组织化小麦蛋白样品的弹性和咀嚼性。可能原因是复合蛋白原料较单种蛋白原料的组分存在差异，使得食品添加剂对样品质构的影响与已有的一些研究结果有所不同。如刘艳香等^[24]对以小麦蛋白为主体的复合蛋白原料的研究发现，碳酸盐添加较多时，产生大量的 CO₂ 气体会降低样品的咀嚼性，这与研究结果相同，但和马宁等的研究结果相反。

2.4.2 食品添加剂对样品组织化度的影响

不同食品添加剂对样品组织化度的影响如图 5 所示。使用海藻酸钠和 L-半胱氨酸的样品较空白要低，使用三聚磷酸钠和食用小苏打的样品较空白要高，但 4 种食品添加剂对样品的组织化度无明显的影响。可能原因是同种食品添加剂对不同植物蛋白的作用有所差异，如李诚^[26]和 Camire 等^[22]分别以小麦蛋白和大豆蛋白为原料研究 L-半胱氨酸对样品组织化度的影响的作用效果相反；另一方面，同种食品添加剂对样品组织化度的影响还与含量相关，如刘艳香等^[24]发现适量 L-半胱氨酸，有利于加强蛋白质之间的交联，增大组织化度，但过量的 L-半胱氨酸也会破坏蛋白质之间的二硫键，导致组织化度降低。由于蛋白种类的不同和食品添加剂含量的差异会对样品组织化度产生不同的作用效果，使得

在试验条件下食品添加剂对样品组织化度的作用效果不明显，因此在后续研究中还应分析食品添加剂含量对样品组织化度的影响。

2.4.3 食品添加剂对样品剪切力的影响

不同食品添加剂对样品剪切力的影响如图6所示。添加三聚磷酸钠和食用小苏打的样品的剪切力增大，这可能是由于在挤压过程中，三聚磷酸钠使样品沿挤出方向形成了紧密的片状结构，而食用小苏打受热分解后使样品沿挤出方向产生较为均匀的气腔^[21]，由此使样品沿挤出方向的结构强度增加，从而导致样品的剪切力测定结果增大。

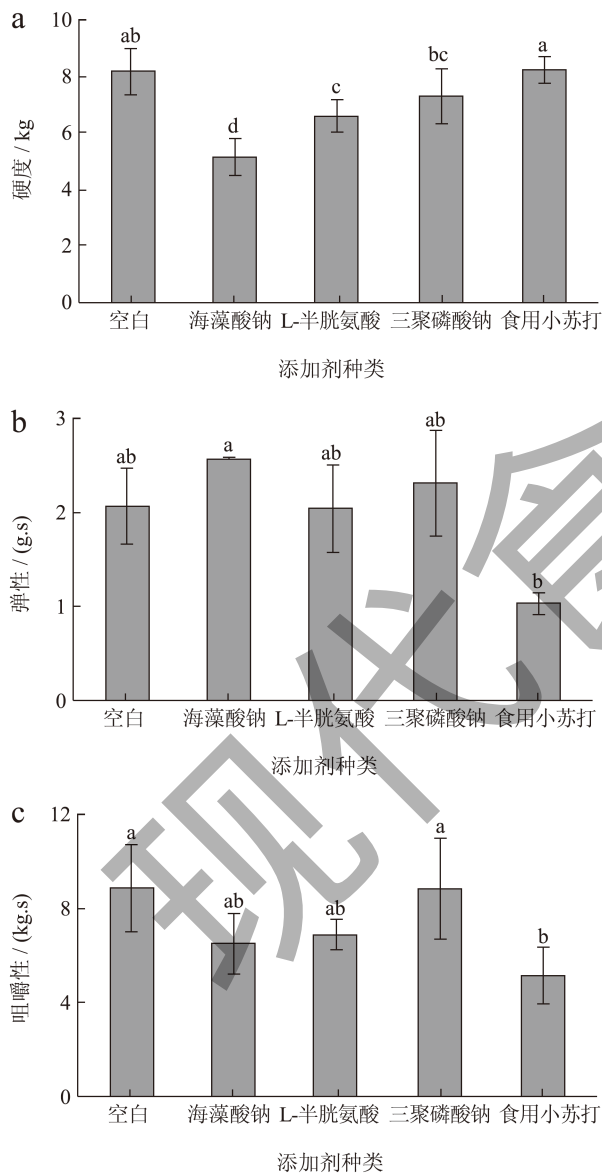


图4 不同食品添加剂对样品质构特性的影响

Fig.4 Effect of different food additives on the texture characteristics of samples

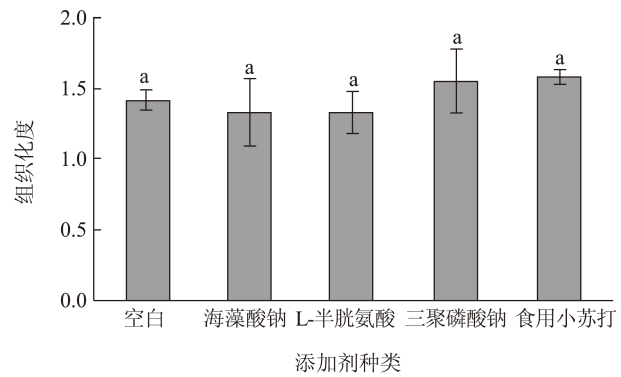


图5 不同食品添加剂对样品组织化度的影响

Fig.5 Effect of different food additives on the fiber degree of samples

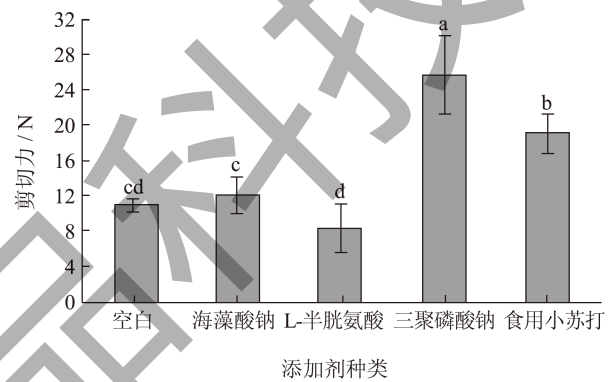


图6 不同食品添加剂对样品剪切力的影响

Fig.6 Effect of different food additives on the shear force of samples

4种食品添加剂对复合蛋白样品的物理特性影响较单种蛋白原料具有一定的差异，由于不同种类的植物蛋白原料的特性不同，食品添加剂与复合蛋白原料的作用更为复杂，同时食品添加剂的作用效果还与其含量相关，因此有关食品添加剂对复合蛋白样品物理特性的影响还需进一步研究。

3 结论

本研究以复合蛋白原料制备高水分拉丝蛋白，通过构建必需氨基酸评价模型提升了样品的营养价值，并就常用食品添加剂对样品物理特性的影响做了研究。研究结果如下。经过必需氨基酸评价模型优化的试验配方为大豆蛋白50%、小麦蛋白25%、豌豆蛋白10%、花生蛋白10%、大米蛋白5%，此配方下制备的高水分拉丝蛋白必需氨基酸较市售的植物蛋白小酥肉更接近人体氨基酸模式，蛋白质营养价值更高。制备的高水分拉丝蛋白质构特性为：

硬度 8.18 kg, 弹性 2.06 g-s, 咀嚼性 8.87 kg-s, 具有与鸡肉和猪肉相近的质构特性。必需氨基酸评价模型与 AAS 法、RC 法和 SRC 法等相比对食物中必需氨基酸的评价分析具有良好的准确性和适用性, 并且能用于复合蛋白原料的配方设计和优化。食品添加剂对复合蛋白原料制备的高水分拉丝蛋白物理特性的影响较单种原料更为复杂, 后续还需进行深入研究。通过对复合蛋白原料制备高水分拉丝蛋白的营养和物理特性的研究优化, 以期开发出更加营养美味的植物性肉类替代品。

参考文献

- [1] ZHANG J, LIU L I, JIANG Y, et al. A new insight into the high-moisture extrusion process of peanut protein: From the aspect of the orders and amount of energy input [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 264: 109668.
- [2] ZHANG J, LIU L, LIU H, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(20): 3267-3280.
- [3] ZHANG J, CHEN Q, KAPLAN D L, et al. High-moisture extruded protein fiber formation toward plant-based meat substitutes applications: Science, technology, and prospect [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 128: 202-216.
- [4] 关家乐, 张一凡, 梁春艳, 等. 挤压工艺对高水分组织化花生蛋白特性的影响[J]. *食品工业*, 2022, 43(3): 140-145.
- [5] 张光耀, 彭慧慧, 张静, 等. 豌豆组织化蛋白品质因子分析及工艺优化[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(12): 153-161.
- [6] FERAWATI F, ZAHARI I, BARMAN M, et al. High-moisture meat analogues produced from yellow pea and faba bean protein isolates/concentrate: Effect of raw material composition and extrusion parameters on texture properties [J]. *Foods*, 2021, 10(4): 843.
- [7] 肖志刚, 李航, 王哲, 等. 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(1): 72-80, 88.
- [8] LANGYAN S, YADAVA P, KHAN F N, et al. Sustaining protein nutrition through plant-based foods [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 772573.
- [9] World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, the United Nations University. Expert Consultation. Protein and amino acid requirements in human nutrition [R]. *World Health Organ Tech Rep Ser*. 2007.
- [10] 孙长颢. 营养与食品卫生学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2017.
- [11] LAM A C Y, KARACA A C, TYLER R T, et al. Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality [J]. *Food Reviews International*, 2018, 34(2): 126-147.
- [12] REKOLA S M, KÅRLUND A, MIKKONEN S, et al. Structure, texture and protein digestibility of high moisture extruded meat alternatives enriched with cereal brans [J]. *Applied Food Research*, 2023, 3(1): 100262.
- [13] 中国食品科学技术学会植物基食品分会. 植物基食品的科学共识(2022年版)[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(10): 450-457.
- [14] 安红周, 查欢欢, 王莉芬, 等. 以猪肉为基准高水分组织化植物蛋白的工艺优化[J]. *食品科技*, 2022, 47(3): 63-70.
- [15] 张立彦, 吴兵, 包丽坤. 加热对三黄鸡胸肉嫩度、质构及微观结构的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(8): 116-121.
- [16] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价: 氨基酸比值系数法[J]. *营养学报*, 1988, 10(2): 187-190.
- [17] CHIANG J H, LOVEDAY S M, HARDACRE A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues [J]. *Food Structure*, 2019, 19: 100102.
- [18] 刘明, 蒋华彬, 刘艳香, 等. 复配蛋白对小麦蛋白挤压组织化产品特性的影响[J]. *粮油食品科技*, 2018, 26(6): 1-6.
- [19] PRUDÊNCIO-FERREIRA S H, ARÊAS J G. Protein-protein interactions in the extrusion of soya at various temperatures and moisture contents [J]. *Journal of Food Science*, 1993, 58(2): 378-381.
- [20] DAY L, AUGUSTIN M A, BATEY I L, et al. Wheat-gluten uses and industry needs [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2006, 17(2): 82-90.
- [21] 杨文, 秦新生, 马叶胜, 等. 添加剂对组织化小麦蛋白结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(10): 1-7, 15.
- [22] CAMIRE M E, CAMIRE A, KRUMHAR K. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1990, 29(1): 35-57.
- [23] LI M, LEE T C. Effect of cysteine on the functional properties and microstructures of wheat flour extrudates [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(7): 1871-1880.
- [24] 刘艳香, 谭斌, 刘明, 等. 添加剂对高水分挤压组织化复合蛋白理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 294-302.
- [25] 马宁, 郭晓娜, 彭伟, 等. 挤压组织化对小麦面筋蛋白结构影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(1): 60-64.
- [26] 李诚. 小麦蛋白双螺杆挤压组织化工艺及机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.