

不同干制蚕豆化学成分差异与蛋白功能特性变化的关联性分析

卢晓航¹, 韩丽娟^{2*}, 吕晓燕^{1,2}, 赵玉欣²

(1. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海西宁 810016)

(2. 青海大学农牧学院, 青海西宁 810016)

摘要: 为了明确五种不同干制(真空干燥、真空冷冻干燥、鼓风干燥、自然风干、炒干)蚕豆化学成分和蛋白功能特性的影响差异。以新鲜蚕豆为原料,采用上述5种方法对蚕豆进行干制,分析各方法对蚕豆粗纤维、多糖、必需氨基酸、总多酚等化学成分含量及蛋白质溶解性、起泡性、乳化稳定性、持水力和粘度等功能特性的影响。结果表明,真空干燥干制蚕豆产品中粗纤维含量、多糖含量、必需氨基酸含量占比最大,分别为3.79%、3.75 mg/g、20.37%;炒干干制产品总多酚含量最高,为3.83 mg/g;真空冷冻干燥方式下的可溶性蛋白含量最多,达到12.77%。此外,真空冷冻干燥对蚕豆蛋白的功能特性影响最小,其溶解性(0.087 mg/mL)、起泡性(27.95%)、吸油性(10.00 mg/mL)和持凝胶性(19.17 g)均显著优于其他四种干燥方法($P<0.05$)。研究揭示了真空干燥在营养成分保留和真空冷冻干燥在蛋白质功能维持方面的差异化优势,为豆类加工中干燥技术的精准选择提供了科学依据,同时为功能性蚕豆制品的定向开发奠定了理论基础。

关键词: 蚕豆; 干制方法; 化学成分; 蛋白质功能; 食品加工

文章编号: 1673-9078(2025)04-25-36

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0189

Correlation Between Differences in Chemical Composition and Protein Functionality in Broad Beans Dried by Different Methods

LU Xiaohang¹, HAN Lijuan^{2*}, LYU Xiaoyan^{1,2}, ZHAO Yuxin²

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

(2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Fresh broad beans were processed to clarify the differential effects of five drying methods (vacuum drying, vacuum freeze-drying, blow drying, natural air drying, and pan drying) on the chemical composition and protein functionality. The effects on chemical components (including crude fiber, polysaccharides, essential amino acids, and total polyphenols) and protein functionality (including solubility, foaming capacity, emulsifying stability, water-holding capacity, and viscosity)

引文格式:

卢晓航,韩丽娟,吕晓燕,等.不同干制蚕豆化学成分差异与蛋白功能特性变化的关联性分析[J].现代食品科技, 2025,41(4):25-36.

LU Xiaohang, HAN Lijuan, LYU Xiaoyan, et al. Correlation between differences in chemical composition and protein functionality in broad beans dried by different methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 25-36.

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 青海大学国家重点实验室自主课题(2024-ZZ-06); 青海省“昆仑英才高端创新创业人才”计划项目

作者简介: 卢晓航(1988-),男,博士,助理研究员,研究方向:生物工程, E-mail: luxiaohang@qhu.edu.cn

通讯作者: 韩丽娟(1988-),女,博士,副教授,研究方向:食品科学, E-mail: 2016990034@qhu.edu.cn

were systematically analyzed. The vacuum-dried products demonstrated the highest contents of crude fiber (3.79%), polysaccharides (3.75 mg/g), and essential amino acids (20.37%). Pan-dried samples exhibited the highest maximum total polyphenol level (3.83 mg/g), whereas vacuum freeze-dried beans demonstrated the highest soluble protein content (12.77%). Vacuum freeze-drying minimally affected protein functionality, resulting in products that demonstrated superior solubility (0.087 mg/mL), foaming capacity (27.95%), oil absorption (10.00 mg/mL), and gel retention (19.17 g) compared to beans dried using other methods ($P < 0.05$). There are distinct advantages to using vacuum drying for nutrient preservation, as well as vacuum freeze-drying for maintaining protein functionality. The findings of this study provide scientific guidance for selecting appropriate drying technologies in bean processing and establish the theoretical foundation for targeted production of functional broad bean products.

Key words: broad beans (*Vicia faba* L.); drying methods; chemical composition; protein functionality; food processing

蚕豆 (*Vicia faba* L.), 又称罗汉豆、胡豆, 富含蛋白质、糖类、脂质、膳食纤维以及多种矿物质和维生素, 是一种营养丰富的豆类作物^[1,2]。其蛋白质含量可高达 22%~36%^[3], 在豆类中仅次于大豆, 是重要的植物蛋白资源^[4]。随着对植物蛋白需求的增加, 蚕豆在食品、饲料及医药等领域的应用前景广阔。尤其是青海地区, 由于其籽大、优质的蚕豆品种, 已成为主要的出口型农作物之一。

然而, 尽管蚕豆的营养价值高, 但其新鲜种子水分含量大, 易腐烂变质, 存储和运输成本较高。为解决这一问题, 干制处理被广泛应用于蚕豆的加工中, 不仅可以延长保存期, 还能保持其营养成分的稳定性。不同的干制方法对蚕豆的影响不同, 干制过程中化学成分的变化以及蛋白质功能特性的变化^[5,6], 对蚕豆的食品应用具有重要意义。

目前, 关于蚕豆的干制方法研究大多集中在单一干燥方式下的工艺优化和干燥特性方面^[7,8], 但不同干制方法对蚕豆化学成分及蛋白质功能特性的综合影响研究较为缺乏。干燥过程中, 温度、湿度及干燥时间的变化会影响蚕豆中的营养成分, 特别是蛋白质的功能特性, 如溶解度、乳化性、凝胶性等^[9], 这些变化会直接影响蚕豆在食品加工中的应用表现。因此, 该研究旨在通过对比五种不同干制方法(真空干燥、真空冷冻干燥、鼓风干燥、自然风干和炒干)对蚕豆的影响, 分析不同干制方法下蚕豆化学成分及蛋白质功能特性的变化, 评估其优劣, 为蚕豆的干制工艺优化及其食品应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与试剂

新鲜蚕豆(去皮), 2019年8月采集于青海大

通; 石油醚、无水乙醇, 天津富宇精细化工有限公司; 考马斯亮蓝 G-250、福林酚, 北京索莱宝科技有限公司; 牛血清蛋白标准品, 南京都莱生物科技有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯胍, 梯稀爱(上海)化成工业发展公司; 过硫酸钾, 天津市致远化学试剂有限公司; 没食子酸标准品等均为市售分析纯。

1.1.2 仪器

U/V-1780 紫外可见分光光度计, 日本岛津; DHG-9070A 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; GS55-9 真空冷冻干燥机, 丹麦 Labogene; DZX-6020B 真空干燥机, 上海福玛; FW-100 高速万能粉碎机, 天津泰斯特; CT3-10K 质构仪, 美国 Brookfield; H/T16MN 台式高速离心机, 湖南赫西仪器装备有限公司; HS-3C pH 计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; HH-6 数字恒温水浴锅, 常州荣华仪器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料处理

分别采用真空干燥、真空冷冻干燥、鼓风干燥、自然风干和炒干五种干制方法, 将同一批次等品质的去皮新鲜蚕豆干燥至水分含量 12%~15% 左右。其中真空干燥设置加热温度设为 0 °C, 真空度为 0.1 MPa, 干燥大约 18 h 后粉碎机粉碎, 并用 60 目筛过滤; 真空冷冻干燥将蚕豆样品置于 -80 °C 的冷冻柜中进行预冻 10 h, 后转入 -51 °C 真空冷冻干燥机, 干燥 25 h 后粉碎机粉碎, 并用 60 目筛过滤; 鼓风干燥设置加热温度为 40 °C, 风速为 2 m/s, 干燥大约 21 h 后粉碎机粉碎, 并用 60 目筛过滤; 自然风干在室温为 20~25 °C 的自然环境中风干, 干燥大约 4 d 后粉碎机粉碎, 并用 60 目筛过滤; 炒干是将铁锅放在电磁炉上预热至 200 °C 左右, 放入蚕豆样品不断翻炒

大约 25 min 后粉碎机粉碎，并用 60 目筛过滤。

1.2.2 水分含量测定

样品水分含量 (wt.%) 采用直接干燥法^[10]。

$$w_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

w_1 —水分含量, %;

m_1 —称量瓶和样品的质量, g;

m_2 —称量瓶和样品干燥后的质量, g;

m_3 —称量瓶的质量, g。

1.2.3 粗纤维含量测定

粗纤维含量 (wt.%) 采用酸碱化学法^[11]。

$$w_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

w_2 —粗纤维含量, %;

m_1 —坩埚和样品干燥后的质量, g;

m_2 —坩埚干燥后的质量, g;

m_3 —蚕豆样品的质量, g。

1.2.4 蛋白质含量测定

蛋白质含量 (wt.%) 的测定采用凯氏定氮法 (GB5009.5-2010), 蛋白质系数为 6.25。

1.2.5 灰分含量测定

蚕豆灰分含量 (wt.%) 采用恒重法^[12]。

$$w_3 = \frac{C - A}{B - A} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

w_3 —粗灰分含量, %;

A —已恒重空坩埚的质量, g;

B —坩埚加试样的质量, g;

C —灰化坩埚和灰分的质量, g。

1.2.6 多酚含量测定

多酚含量采用没食子酸法^[13], 根据标准曲线测定样品多酚含量。

$$w_4 = \frac{C \times V \times N}{m} \quad (4)$$

式中:

w_4 —总多酚含量, mg/g;

C —根据标准曲线计算所得溶液多酚质量浓度, mg/mL;

V —滤液定容体积, mL;

N —稀释倍数;

m —样品质量, g。

1.2.7 黄酮含量测定

黄酮含量采用亚硫酸钠-硝酸铝比色法^[14]。

蚕豆总黄酮含量的测定: 取 4.0 mL 滤液于试管, 其余步骤同芦丁标准曲线的制备。据公式得出蚕豆样品总黄酮含量。

$$w_5 = \frac{C \times V \times N}{m} \quad (5)$$

式中:

w_5 —总黄酮含量, mg/g;

C —根据标准曲线计算所得溶液黄酮质量浓度, mg/mL;

V —滤液定容体积, mL;

N —稀释倍数;

m —样品质量, g。

1.2.8 多糖含量测定

多糖含量采用苯酚-硫酸法^[15], 绘制葡萄糖标准曲线测定蚕豆样品出多糖的含量。

$$w_6 = \frac{C \times V \times N}{m} \quad (6)$$

式中:

w_6 —粗多糖含量, mg/g;

C —根据标准曲线计算所得溶液粗多糖质量浓度, mg/mL;

V —滤液定容体积, mL;

N —稀释倍数;

m —样品质量, g。

1.2.9 可溶性蛋白含量测定

可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[16], 得到可溶性蛋白标准曲线, 测得样品中可溶性蛋白的含量。

1.2.10 氨基酸含量测定

氨基酸含量采用液相色谱质谱法^[17]。其中高效液相色谱采用 Agilent 1290 Infinity LC 超高效液相色谱系统分离, 自动进样器进样, 且其柱温 40 °C, 流速为 250 μ L/min, 进样量 1 μ L。质谱分析采用 5500 QTRAP 质谱仪进行质谱分析。ESI 源条件如下: source Tem 500 °C, iGas1:40, Ion Gas2:40, CUR:30, ISVF:5 500 V。

1.2.11 脂肪酸含量的检测

1.2.11.1 标准品配制

40 种脂肪酸甲酯混合标准液制成混合标准浓度梯度, 取 500 μ L 混合标准品, 并加 25 μ L 正十九酸

甲酯作内标, 混匀后进 GC-MS 检测。

1.2.11.2 代谢物提取

取 100 mg 样品于离心管, 加 1 mL 氯仿甲醇溶液后超声 30 min, 取上清液并加 1% 硫酸及甲醇溶液 2 mL, 水浴甲酯化半小时后加 1 mL 正己烷萃取, 萃取结束后洗涤并取上清液 500 μ L, 加 25 μ L 水杨酸甲酯作内标后进样 GC-MS 检测。

1.2.11.3 色谱-质谱分析

气相色谱条件: 样品采用 Agilent DB-WAX 毛细管柱气相色谱系统进行分离。

质谱分析: 采用 Agilent 7890/5975C 气-质联用仪进行质谱分析, 其进样口温度 280 $^{\circ}$ C; 离子源温度 230 $^{\circ}$ C; 传输线温度 250 $^{\circ}$ C。

1.2.12 蚕豆蛋白质的提取

根据张英蕾等^[18]方法, 将蚕豆粉与水 (1:15) 的比例配成悬浮液, 调 pH 值至 8.0。将悬浮液置于 50 $^{\circ}$ C 水浴锅中搅拌加热 1 h 后, 采用 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清液并将其 pH 值调至 4.8。静置沉淀 1 h 后, 4 000 r/min 离心 10 min 并将沉淀冷冻干燥 (20 MPa, -50 $^{\circ}$ C, 30 h)。

1.2.13 蚕豆蛋白质溶解性测定

根据秦艳等^[19]方法, 配置提取蛋白上清液。考马斯亮蓝法测定上清液中蛋白质的含量, 蛋白质的溶解性用氮溶解指数 (NSI) 来表示。

$$D = \frac{C \times V_T}{1\ 000 \times V_S \times W_F} \quad (7)$$

式中:

D —氮溶解指数 (NSI), mg/g;

C —查标准曲线值, g;

V_T —提取液总体积, mL;

W_F —样品鲜重, g;

V_S —测定时加样量, mL。

1.2.14 蚕豆蛋白质起泡性及泡沫稳定性测定

根据参考文献^[20], 取 5 mL, 0.01 g/mL 蛋白溶液后振荡 3 min, 记录均质停止时泡沫高度以及均质停止 30 min 后泡沫高度, 计算蚕豆蛋白的起泡性 (w_7) 和泡沫稳定性 (w_8)。

$$w_7 = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

w_7 —起泡性, % (体积分数);

V_1 —泡沫及液体总体积, mL;

V_2 —搅打前体积, mL。

$$w_8 = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% \quad (9)$$

式中:

w_8 —泡沫稳定性, % (体积分数);

V_1 —30 min 后泡沫体积, mL;

V_2 —均质停止时泡沫体积, mL。

1.2.15 蚕豆蛋白质乳化性及乳化稳定性测定

配置 0.01 g/mL 的蛋白质溶液后均质, 加入 5 mL 植物油并 2 700 r/min 离心 5 min, 记录乳化层高度, 将所得混合液置于 80 $^{\circ}$ C 并水浴 30 min, 冷却后 2 700 r/min 离心 5 min, 最后, 记录乳化层高度, 计算蚕豆蛋白质的乳化性及乳化稳定性^[20]。

$$w_9 = \frac{h_1}{h_2} \times 100\% \quad (10)$$

式中:

w_9 —乳化性, %;

h_1 —离心管中乳化层的高度, cm;

h_2 —离心管中液体总高度, cm。

$$w_{10} = \frac{h_1}{h_2} \times 100\% \quad (11)$$

式中:

w_{10} —乳化稳定性, %;

h_1 —30 min 后乳化层的高度, cm;

h_2 —初始时的乳化层高度, cm。

1.2.16 蚕豆蛋白质持水力和吸油性测定

配置 0.01 g/mL 蛋白质溶液后混匀, 静置 20 min 并 4 000 r/min 离心 30 min, 弃去上清液, 称量离心管和残留物的总质量, 并计算蚕豆蛋白的持水力^[20]。

$$w_{11} = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中:

w_{11} —持水力, %;

m_0 —蚕豆蛋白质质量, 0.05 g;

m_1 —塑料离心管的质量, g;

m_2 —弃去上清液后离心管的质量, g。

根据参考文献^[21], 取 0.05 g 蚕豆蛋白质, 加入 5 mL 植物油后搅拌均匀, 将样品水浴 30 min 后静置 30 min, 4 000 r/min 离心 30 min 并记录游离油的体积。

$$w_{12} = \frac{V_0 - V_1}{m_0} \times 100\% \quad (13)$$

式中:

w_{12} —吸油性, %;

V_0 —加入的植物油体积, 为 5 mL;
 m_0 —蚕豆蛋白质质量, 0.05 g;
 V_1 —离心后游离油的体积, mL。

1.2.17 蚕豆蛋白质凝胶性和粘度测定

根据郑文彬等^[22]的研究方法, 配制质量分数为 15% (wt.%) 的蚕豆蛋白溶液, 90 °C 水浴 30 min 后冷却至室温, 于 4 °C 冰箱内放置 12 h 并制得凝胶, 用质构仪对凝胶质构进行测定。

配置浓度为 15% (wt.%) 的蚕豆蛋白溶液用 NDJ-8S 型粘度计测定蚕豆蛋白的粘度^[23]。

1.3 数据分析

实验统计数据以平均值 ± 标准差 ($\bar{X} \pm SD$) 表示, 所有的数据均采用 SPSS 25.0 以及 Excel 2016 软件进行单因素方差分析, 多组间均数的比较采用单因素方差分析。以 $*P < 0.05$ 表示差异显著, 以 $**P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与讨论

2.1 不同干制方式对蚕豆化学成分的影响

2.1.1 蚕豆常规营养成分的变化

五种不同干制方法对蚕豆常规营养成分的影响如表 1 和表 2。由表 1 可知, 不同干制方法对蚕豆水分含量的影响各不相同。炒干方法干制蚕豆所需时间最短, 其干制后蚕豆水分含量为 11.22%; 自然风干方法干制蚕豆所需时间最长, 干制后蚕豆水分含量为 14.75%; 真空干燥后蚕豆的水分含量为 13.10%, 与真空冷冻干燥相比增加了 3%, 这可能与试验过程中所使用的真空干燥设备无法达到较高的真空度且不能将真空室的水分及时抽走有关; 而真空冷冻干燥后期的干燥速率缓慢, 可能与样品预冻有关, 采取的慢冻方式产生了较大的冰晶, 在解析干燥阶段导致解析速率变慢。

表 1 五种不同干制方法下蚕豆水分含量变化

干燥方式及时间	炒干 25 min	真空干燥 18 h	鼓风干燥 21 h	真空冷冻干燥 25 h	自然风干 4 d
水分含量 %	11.07 ± 0.04	11.47 ± 0.06	15.97 ± 0.03	13.10 ± 0.19	14.75 ± 0.25

表 2 五种不同干制方法下蚕豆常规营养含量变化

物质含量/(g/100 g)	炒干	真空干燥	鼓风干燥	自然风干	真空冷冻干燥
灰分含量	3.31 ± 0.17	3.16 ± 0.14	3.04 ± 0.21	3.13 ± 0.08	3.43 ± 0.15
粗纤维	1.16 ± 0.10*	3.79 ± 0.11**	2.37 ± 0.58**	1.44 ± 0.26	4.14 ± 0.24**
蛋白质含量	5.34 ± 0.21	13.04 ± 0.95	13.3 ± 31.35	10.4 ± 1.31	14.99 ± 1.24

注: $*P < 0.05$ 表示差异性显著, $**P < 0.01$ 表示差异性极显著。

采用不同干制方法处理蚕豆, 其 5 种干燥方法下蚕豆粗纤维含量的大小依次为: 真空干燥 > 真空冷冻干燥 > 鼓风干燥 > 自然风干 > 炒干。炒干产品粗纤维含量显著降低 ($*P < 0.05$ vs 自然风干), 为 1.16%, 而真空干燥、鼓风干燥、真空冷冻干燥三种干制产品粗纤维含量极显著提高 ($**P < 0.01$ vs 自然风干), 分别为 3.73%、2.37% 和 2.76%, 5 种干燥方法中真空干燥蚕豆产品的粗纤维含量最高, 略低于豌豆粗纤维含量 (4.38%)^[24]。

五种不同干制方法对蚕豆蛋白质含量的影响如表 2 所示, 采用不同干制方法处理蚕豆, 其蛋白质含量大小依次为: 自然风干 > 真空冷冻干燥 > 鼓风干燥 > 真空干燥 > 炒干。其中炒干方法干制的蚕豆产品蛋白质含量降低最明显 ($P > 0.05$ vs 自然风干), 为 5.34%, 自然风干干制的蚕豆产品中蛋白质含量最大, 为 14.76%, 明显低于高小丽等研究的豌豆中蛋白质含量 (22.71%)。

五种不同干制方法对蚕豆灰分的影响如表 2 所示, 采用不同干制方法处理蚕豆, 其灰分含量大小依次为: 炒干 > 自然风干 > 真空冷冻干燥 > 鼓风干燥 > 真空干燥。4 种干燥方法 (除自然风干) 所得蚕豆产品中灰分含量差异不显著 ($P > 0.05$ vs 自然风干), 其中炒干方式所得蚕豆灰分含量最高为 3.31%。

2.1.2 蚕豆化学成分的变化

五种不同干制方法对蚕豆化学成分的影响如表 3 所示。采用不同干制方法处理蚕豆, 其总多酚含量大小依次为: 炒干 > 真空干燥 > 自然风干 > 真空冷冻干燥 > 鼓风干燥。其中炒干干制的蚕豆产品总多酚含量显著提高 ($*P < 0.05$ vs 自然风干), 为 3.83 mg/g, 鼓风干燥干制的蚕豆产品总多酚含量显著降低 ($*P < 0.05$ vs 自然风干), 为 2.75 mg/g, 5 种干燥方法中炒干干制的蚕豆产品总多酚含量最高。与林海峰^[25]研究的豌豆相比, 该研究中蚕豆总多酚含量明显高于豌豆 (0.66%~2.66%)。

表 3 五种不同干燥方式对蚕豆化学成分的影响

Table 3 Effects of five different drying methods on chemical components of broad bean ($\bar{X} \pm SD, n=3$)

化学成分/(mg/g)	炒干	真空干燥	鼓风干燥	自然风干	真空冷冻干燥
总多酚含量	3.83 ± 0.11*	3.40 ± 0.06	2.75 ± 0.33*	3.26 ± 0.03	3.57 ± 0.13
总黄酮含量	0.54 ± 0.06*	1.13 ± 0.11*	1.23 ± 0.22*	1.27 ± 0.03	1.18 ± 0.04*
粗多糖含量	1.23 ± 0.13*	3.75 ± 0.13	2.38 ± 0.41*	1.72 ± 0.03	1.60 ± 0.03*
可溶性蛋白含量	3.72 ± 0.10*	8.91 ± 0.25*	9.85 ± 0.34*	12.03 ± 0.35*	12.77 ± 0.28*

注: * $P < 0.05$ 表示差异性显著。

表 4 五种不同干制方法下蚕豆氨基酸含量变化

Table 4 Changes of amino acid content of broad bean under five different drying methods ($\bar{X} \pm SD, n=3, \text{mg/g}$)

氨基酸 种类	不同干制方法				
	自然风干	真空干燥	真空冷冻干燥	鼓风干燥	炒干
丙氨酸	0.074	0.034	0.022	0.040	0.024
精氨酸	0.077	0.076	0.139	0.080	0.063
天冬氨酸	0.007	0.012	0.020	0.00	0.029
瓜氨酸	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001
半胱氨酸	0.012	0.000	0.000	0.000	0
胱氨酸	0.02	0.005	0.003	0.005	0.000
谷氨酸	0.034	0.026	0.026	0.038	0.025
甘氨酸	0.024	0.015	0.005	0.017	0.003
组氨酸	0.025	0.019	0.010	0.018	0.002
羟脯氨酸	0.00	0.000	0.000	0.001	0.000
异亮氨酸	0.00	0.003	0.001	0.003	0.001
亮氨酸	0.004	0.004	0.003	0.004	0.002
赖氨酸	0.035	0.021	0.011	0.022	0.003
蛋氨酸	0.002	0.003	0.000	0.002	0.000
鸟氨酸	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
苯丙氨酸	0.014	0.01	0.008	0.012	0.003
脯氨酸	0.004	0.004	0.003	0.000	0.002
丝氨酸	0.028	0.02	0.007	0.022	0.005
苏氨酸	0.032	0.020	0.008	0.022	0.004
色氨酸	0.007	0.006	0.003	0.005	0.001
酪氨酸	0.021	0.015	0.008	0.016	0.006
缬氨酸	0.010	0.008	0.005	0.009	0.004
丙氨酸	0.074	0.034	0.022	0.040	0.024
精氨酸	0.077	0.076	0.139	0.080	0.063
天冬氨酸	0.007	0.012	0.020	0.00	0.029
瓜氨酸	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001
半胱氨酸	0.012	0.000	0.000	0.000	0
胱氨酸	0.02	0.005	0.003	0.005	0.000
谷氨酸	0.034	0.026	0.026	0.038	0.025
甘氨酸	0.02	0.015	0.005	0.017	0.003
组氨酸	0.025	0.019	0.010	0.018	0.002
氨基酸总含量 (TAA)	0.452	0.319	0.295	0.334	0.190 5
必需氨基酸含量 (EAA)	0.087	0.065	0.036	0.061	0.023
非必需氨基酸含量 (NEAA)	0.365	0.254	0.258	0.273	0.168
EAA/TAA/%	19.247	20.376	12.203	18.263	12.074
EAA/NEAA/%	23.836	25.591	13.954	22.344	13.691

表 5 五种不同干制方法下蚕豆脂肪酸含量变化

Table 5 Changes of fatty acid content of broad bean under five different drying methods ($\bar{X} \pm SD$, $n=3$, $\mu\text{g/g}$)

脂肪酸种类	不同干制方法				
	自然风干	真空干燥	真空冷冻干燥	鼓风干燥	炒干
十三烷酸	0.18	0.16	0.04	0.09	0.12
肉豆蔻酸	6.15	6.52	5.01	5.99	7.02
肉豆蔻烯酸	2.34	2.5	2.72	8.13	12.66
十五烷酸	9.06	8.36	7.9	8.38	9.38
顺-10-戊二烯酸	9.66	9.42	10.57	8.22	9.34
棕榈酸	709.33	640.12	605.29	678.63	718.73
棕榈油酸	0.32	0.6	1.56	0.74	0.87
十七碳酸	8.71	8.64	8.2	8.57	9.56
硬脂酸	70.83	65.98	58.31	66.81	73.39
油酸	861.76	881.19	878.13	923.86	924.69
亚油酸	3 325.17	3 241.9	3 227.85	3 181.32	3 610.37
亚麻酸	212.26	230.8	196.27	207.15	246.47
花生酸	45.65	44.85	44.37	46.12	48.64
顺 11-二十碳烯酸	20.27	17.17	16.79	18.38	19.98
顺 11,14-二十碳二烯酸甲酯	5.83	6.07	6.01	5.97	6.72
二十烷酸	9.16	9.13	9.05	8.64	9.32
顺 11,14,17-二十碳三烯酸	7.89	11.05	16.07	6.7	11.06
顺 5,8,11,14,17-二十碳五烯酸	9.22	9.56	9.11	9.4	9.44
顺式 13,16-二十二碳二烯酸	1.89	1.74	4.41	1.35	2.09
十三烷酸	11.85	12.7	13.07	11.71	13.49
十二烷酸	2.7	2.61	5.42	2.08	2.8
脂肪酸总含量 (TFA)	5 330.24	5 206.07	5 120.13	5 208.25	5 046.15
饱和脂肪酸含量 (SFA)	870.93	791.46	751.24	834.94	189.66
不饱和脂肪酸含量 (UFA)	4 459.31	4 414.61	4 368.89	4373.3	4 856.49
单不饱和脂肪酸 (MUFA)	894.35	910.88	909.76	959.33	967.54
多不饱和脂肪酸 (PUFA)	3 564.96	3 503.73	3 459.13	3 413.97	3 888.95
脂肪酸含量/%	0.18	0.16	0.04	0.09	0.12
SFA/TFA/%	11.34	15.20	14.67	16.03	3.76
UFA/TFA/%	83.66	84.80	85.33	83.97	96.24
MUFA/TFA/%	16.78	17.50	17.77	18.42	19.17
PUFA/TFA/%	66.88	67.30	67.56	65.95	77.07

采用不同干制方法处理蚕豆，其总黄酮含量大小依次为：真空冷冻干燥>鼓风干燥>真空干燥>自然风干>炒干。其5种干制方法中炒干干制的蚕豆产品总黄酮含量显著降低提高 (* $P < 0.05$ vs 自然风干)，为 0.54 mg/g，而真空干燥、鼓风干燥、真空冷冻干燥干制的蚕豆产品中总黄酮含量依次显著提高 (* $P < 0.05$ vs 自然风干)，分别为 1.13、1.21

和 1.23 mg/g，5种干燥方法下真空冷冻干燥干制蚕豆产品总黄酮含量最大，与豌豆中总黄酮含量接近 (0.74%~1.88%)。

采用五种不同干制方法处理蚕豆后，蚕豆中粗多糖含量大小依次为：真空干燥>真空冷冻干燥>鼓风干燥>自然风干>炒干，其炒干干制的蚕豆产品粗多糖含量显著降低 (* $P < 0.05$ vs 自然风干)，

为 1.23%，而鼓风干燥和真空冷冻干燥干制的蚕豆产品粗多糖含量显著提高（* $P < 0.05$ vs 自然风干），分别为 2.38 和 2.81 mg/g，其中真空干燥干制的蚕豆产品粗多糖含量最高，为 3.75 mg/g。

五种不同的干燥方式对蚕豆可溶性蛋白的含量差异均显著（* $P < 0.05$ ）。其中真空冷冻干燥方式下的可溶性蛋白含量最多，为 12.77%；炒干方式下蚕豆可溶性蛋白含量最低，为 3.72%。

2.1.3 蚕豆氨基酸含量的变化

经超高效液相色谱-质谱进行分析测定，以外标法计算样品含量。五种不同干制方法对蚕豆氨基酸含量的影响如表 4 所示，不同干制方法处理后蚕豆中含有 22 种氨基酸，包括 8 种必需氨基酸和 14 种非必需氨基酸。其中必需氨基酸含量比氨基酸总含量中真空干燥产品比例最高为 20.37%，炒干产品比例最低为 11.83%，自然风干和鼓风干燥产品中比例差异不大分别为 19.32% 和 18.27%，真空冷冻干燥产品比例仅高于炒干产品为 12.39%；必需氨基酸含量比非必需氨基酸含量中真空干燥产品比例最高为 25.58%，炒干产品比例最低为 13.41%，自然风干和鼓风干燥差异不大，真空冷冻干燥产品仅高于炒干产品。

2.1.4 蚕豆脂肪酸含量的变化

经超气相色谱-质谱进行分析测定，五种不同干制方法对蚕豆脂肪酸含量的影响如表 5 所示。五种不同干制方法处理的蚕豆含有 21 种脂肪酸，包括 9 种饱和脂肪酸、5 种单不饱和脂肪酸和 7 种多不饱和脂肪酸。五种干制方法处理下，炒干蚕豆中饱和脂肪酸比例远低于其他 4 种干制产品的比例，只有 3.76%，而不饱和脂肪酸比例远高于其他 4 种干制产品，为 96.24%，其他 4 种产品的比例差异不大；单不饱和脂肪酸中炒干产品比例最高为 19.17%，其他 4 种干制产品比例由大到小依次为鼓风干燥、真空冷冻干燥、真空干燥、自然风干；多不饱和脂肪酸中炒干产品比例最高，其他 4 种干制产品比例差异不大。

2.2 不同干燥方式对蚕豆化学成分的影响

本次采用的 5 种干制方法中，炒干是一种较为传统的干制方法，炒干不仅使蛋白质结构发生变化^[26]，也会产生较多的特异性香气物质^[27]。为了找到最佳的干制方法，该研究添加了传统炒干实验组。

从蚕豆营养物质方面来看，5 种干制方法产品

中炒制产品灰分含量最大，其中 4 种干燥方法得到的灰分含量差异不大，而真空干燥、鼓风干燥、真空冷冻干燥、自然风干干制产品的水分、粗纤维、蛋白质含量都高于炒制产品，推测可能是因为水分含量以及干燥温度差异较大导致的。5 种干制方法对新鲜蚕豆的粗纤维含量影响较大，说明高温对蚕豆中粗纤维物质具有明显破坏作用。虽然自然风干干燥温度较低，但处理时间过长，蚕豆长期暴露在空气中，受到长时间氧化作用，从而增加了粗纤维的损失。不同干制方法对粗蛋白含量影响较为明显，蛋白质的空间结构容易受到温度影响，在低温时蛋白质的活性降低，但是不会变性。而高温会破坏蛋白质的空间结构，当温度达到 40 °C 左右时，蛋白质就开始变性，且蛋白质的受热时间越长，变性越严重。

对不同干制品的总多酚含量分析发现，炒干和真空冷冻干燥所得蚕豆总多酚含量较高，一方面可能是高温促进了组织细胞破碎和共价键的断裂和酚类物质的释放^[28]，另一方面可能低温条件有效的避免了多酚的热降解^[29]。而自然风干与鼓风干燥相比较，干燥温度较低，干燥时间长，抑制了酚类物质的释放，但其干燥环境中的空气流速比鼓风干燥低的多，酚类物质氧化缓慢，导致这两种方法处理所得蚕豆总多酚含量差异不显著。对比不同干制品的总黄酮含量发现，高温对蚕豆中黄酮类物质破坏显著，导致炒制产品中黄酮含量最低。而真空干燥、真空冷冻干燥、鼓风干燥以及自然风干处理下的样品中总黄酮含量差异不显著。不同干制品的粗多糖含量分析发现，高温对多糖类物质影响也很大，经高温炒干的蚕豆粗多糖含量最少。真空干燥温度适中，干燥时间短，干燥过程无氧气接触，因此粗多糖含量最高。

对不同干制品的氨基酸含量来看，高温对蚕豆氨基酸物质的破坏是较显著的，炒干后的蚕豆所含氨基酸含量最低。真空干燥、真空冷冻干燥、鼓风干燥三种处理后的产品中氨基酸含量差异不大。自然风干、真空干燥、鼓风干燥中必需氨基酸占比差异不显著。5 种干制品脂肪酸含量的测定结果远低于菜豆中脂肪酸含量（11.22~25.76 mg/g）^[30]，不饱和脂肪酸含量占比高于豇豆中不饱和脂肪酸含量的占比（62%）^[31]，多不饱和脂肪酸含量占比高于麻花苋种子的比例，单不饱和脂肪酸相比于脂肪酸总含量差异不显著。

2.3 不同干制方式对蚕豆蛋白质功能特性的影响

2.3.1 蚕豆蛋白质溶解性的变化

如图1所示,蚕豆蛋白质的溶解性在pH值2~4时,随着pH值的增大而减小,到达等电点pH值4.8时达到最小值,等电点过后溶解性又随pH值的增大而增大。蚕豆蛋白质的溶解性(平均值)从高至低依次为:真空冷冻干燥(0.087)>真空干燥(0.078)>鼓风干燥(0.054)>炒干(0.053)>自然风干(0.014 mg/mL)。

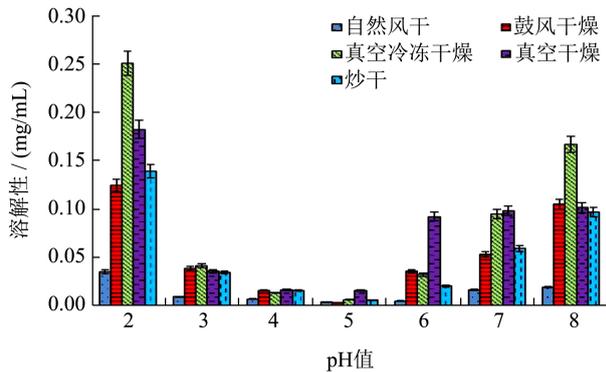


图1 不同干燥方式对蚕豆蛋白质溶解性的影响

Fig.1 Effect of different drying methods on the solubility of broad bean protein

2.3.2 蚕豆蛋白质起泡性及泡沫稳定性的变化

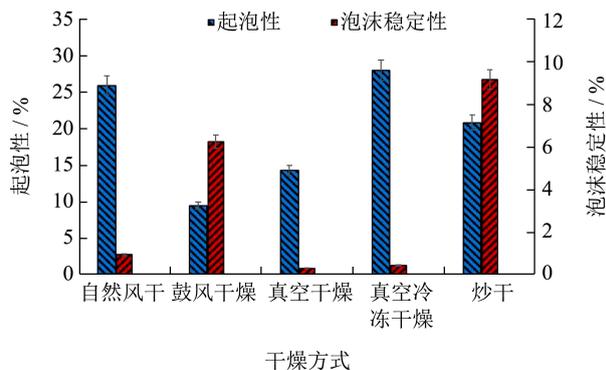


图2 不同干燥方式对蚕豆蛋白起泡性和乳化稳定性的影响

Fig.2 Effect of different drying methods on foaming and emulsion stability of broad bean protein

如图2所示,真空冷冻干燥的蚕豆蛋白质起泡性有小幅度的上升,鼓风干燥、真空干燥、炒干的蚕豆蛋白质起泡性显著下降($P < 0.05$)。蚕豆蛋白质的起泡性从高至低依次为:真空冷冻干燥(27.95%)>自然风干(25.92%)>炒干(20.82%)>真空干燥(14.29%)>鼓风干燥(9.47%)。炒干的泡沫稳定性最大,是自然风干的10倍。蚕豆蛋

白质的泡沫稳定性从高至低依次为:炒干(9.15%)>鼓风干燥(6.25%)>自然风干(0.95%)>真空冷冻干燥(0.46%)>真空干燥(0.32%)。

2.3.3 蚕豆蛋白质乳化性及乳化稳定性的变化

如图3所示,鼓风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、炒干方式的蚕豆蛋白质均有显著提高($P < 0.05$)。蚕豆蛋白质乳化性从高至低依次为:真空干燥(0.14%)>鼓风干燥(0.13%)>炒干(0.12%)>真空冷冻干燥(0.06%)>自然风干(0.04%)。与自然风干比较,鼓风干燥的蚕豆蛋白质乳化稳定性有较小幅度的升高,其他三种方式的蚕豆蛋白质乳化稳定性均有小幅度的下降。蚕豆蛋白质乳化稳定性从高至低依次为:鼓风干燥(61%)>自然风干(55%)>真空冷冻干燥(50%)>真空干燥(45%)>炒干(35%)。

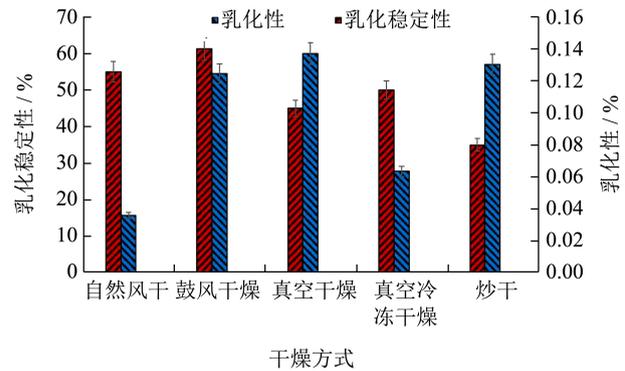


图3 不同干燥方式对蚕豆蛋白乳化性和乳化稳定性的影响

Fig.3 Effect of different drying methods on the emulsification and stability of broad bean protein

2.3.4 蚕豆蛋白质持水力和吸油性的变化

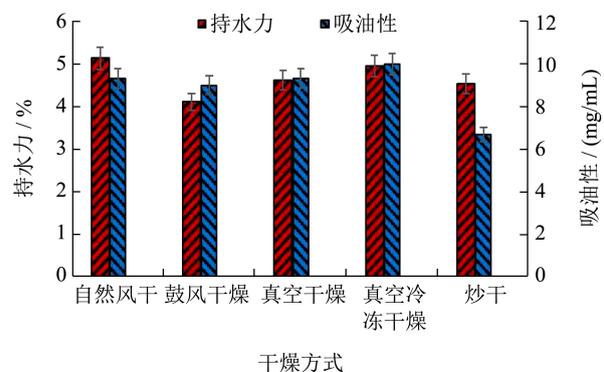


图4 不同干燥方式对蚕豆蛋白质持水力和吸油性的影响

Fig.4 Effect of different drying methods on water holding capacity and oil absorption of broad bean protein

与自然风干比较(图4),四种干燥方式的蚕豆蛋白质持水力均有较小幅度的下降。蚕豆蛋白

质持水力从高至低依次为：自然风干 (5.13%)>真空冷冻干燥 (4.96%)>真空干燥 (4.63%)>炒干 (4.54%)>鼓风干燥 (4.11%)。与自然风干比较，真空冷冻干燥的蚕豆蛋白质吸油性有较小幅度的升高，其他三种方式的蚕豆蛋白质吸油性均有较小幅度的下降。蚕豆蛋白质吸油性从高至低依次为：真空冷冻干燥 (10.00)>自然风干 (9.33)>真空干燥 (9.32)>鼓风干燥 (9.00)>炒干 (6.67 mg/mL)。

2.3.5 蚕豆蛋白质凝胶性和粘度的变化

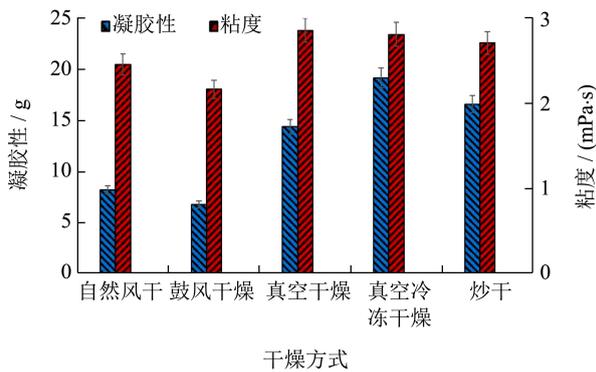


图 5 不同干燥方式对蚕豆蛋白质凝胶性和粘度的影响
Fig.5 Effect of different drying methods on gel property and viscosity of broad bean protein

相比于自然风干条件下 (图 5)，鼓风干燥的蚕豆蛋白质凝胶性显著下降 ($P<0.05$)，其他方式均有显著升高 ($P<0.01$)，其中真空冷冻干燥的是自然风干的 2 倍。蚕豆蛋白质的凝胶性从高至低依次为：真空冷冻干燥 (19.17)>炒干 (16.60)>真空干燥 (14.40)>自然风干 (8.20)>鼓风干燥 (6.77 g)。鼓风干燥的蚕豆蛋白质粘度显著下降 ($P<0.05$)，其他方式的蚕豆蛋白质粘度均有显著升高 ($P<0.01$)。蚕豆蛋白质粘度从高至低依次为：真空干燥 (2.86)>真空冷冻干燥 (2.81)>炒干 (2.71)>自然风干 (2.46)>鼓风干燥 (2.17 mPa·s)。

2.4 蚕豆化学成分与蛋白功能特性的相关性分析

为进一步探索蚕豆化学成分与蛋白功能之间的关系，该研究对蚕豆各成分进行了相关性分析。结果如图 6 所示，其中粗纤维与蛋白质呈现显著负相关关系 ($P<0.05$)、与 UFA 呈现显著负相关关系 ($P<0.05$)；蛋白质与 UFA 呈现极显著正相关关系 ($P<0.01$)、与 PUFA 呈现显著负相关关系 ($P<0.05$)；多酚与 NEAA 呈现显著负相关关系 ($P<0.05$)、与乳化稳定性呈现极显著负相关关系

($P<0.01$)、与超氧离子清除率呈现显著正相关关系 ($P<0.05$)；黄酮含量与 TAA、TFA 以及 SFA 显著正相关关系 ($P<0.05$)、与 NEAA 呈现极显著正相关关系 ($P<0.01$)。

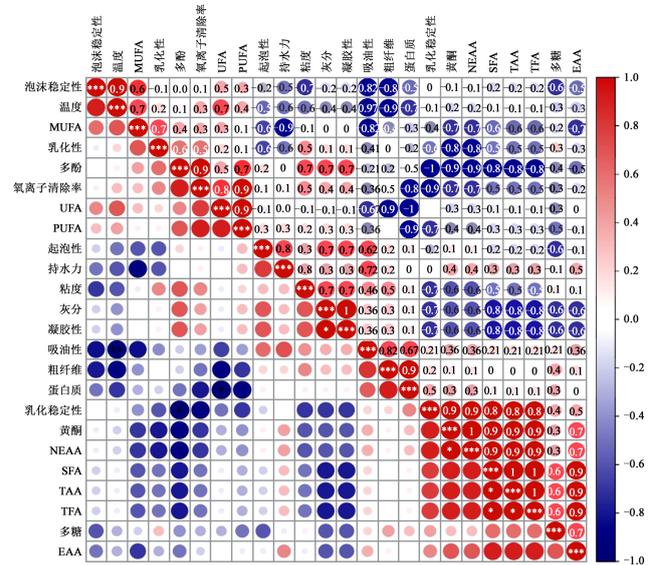


图 6 蚕豆化学成分与蛋白功能相关性矩阵图

Fig.6 Correlation matrix between chemical components and protein functions of broad bean

2.5 不同干燥方式对蚕豆蛋白质功能特性的影响

蛋白质的功能性质影响食品的感官性质，也对食品 and 食品成分在制备、加工或贮藏过程中的物理特性起主要的作用^[32]。本试验五种干制方式均对蚕豆蛋白质功能特性产生了一定影响，其中 pH 值是影响蛋白质溶解性的因素之一，蚕豆蛋白质的溶解性在等电点 pH 值 4.8 时达到最小值，随着 pH 值的增大溶解性逐渐增大；蚕豆蛋白质形成凝胶的最小浓度为 14%，本试验在蛋白质浓度为 15% 时凝胶性达到 8.20%~19.17%，这一结果与宋晓敏^[33]研究结果相似。五种干制方式蚕豆蛋白的起泡性达到 9.47%~27.95%、乳化稳定性达到 35%~61.25%、持水力达到 4.11%~5.13%、吸油性达到 6.67%~10%。且真空冷冻干燥的溶解性、起泡性、吸油性、持水力、凝胶性、粘度均比其他四种干制方式较高，这一结果与孔慧广^[34]研究结果相同。推测其原因可能是真空冷冻干燥直接将蚕豆蛋白中的水升华脱出，保持了蚕豆蛋白原有的结构状态，没有经过高温作用而产生大量空隙，使得蛋白样品内部结构疏松，能更好地与水形成氢键溶解到水中，使溶解度增大，而溶解度的增大导致粘度的增大^[30]；蛋白质经过真空

冷冻干燥后能更多固定油中的脂肪,从而使得乳化性降低。鼓风干燥的吸油性、溶解性、起泡性、持水力、粘度比其他四种干制方式较低,推测可能是温度过高、热处理时间过长会使蛋白热变性而聚集成不可溶解的大分子^[34];鼓风干燥热处理时间相对较长,蛋白质的构象发生变化,蛋白质分子之间互相作用产生凝聚,而使持水力减小^[35]。该研究蚕豆化学成分中,发现多酚与乳化稳定性和超氧离子清除率都具有一定相关性。前人^[36]研究发现,多酚作为一种天然抗氧化剂,其结构和浓度对乳化稳定性有显著影响,乳化液的粒径会随着多酚含量的增加而减小,多酚可能与蛋白质的功能性结构发生互作作用,导致乳化剂的表面活性变化,从而影响乳化稳定性。但多酚在清除超氧离子方面有显著作用,多酚可以通过 π - π 相互作用与超氧自由基结合,从而模仿超氧化物歧化酶(SOD)的活性。这种相互作用有助于氧化超氧自由基,并将其转化为氧气分子,这与SOD的作用机制相似^[37]。此外,多酚在清除超氧离子时能够再生自身,使其能够进行多次清除循环,这进一步增强了其抗氧化能力^[38]。

3 结论

不同的干制方法对蚕豆化学成分和营养物质的影响较大,从化学成分及其含量而言,真空干燥方法和真空冷冻干燥方法最优;从营养物质及含量而言,真空干燥干制方法最优。对于蚕豆蛋白质功能特性而言,真空冷冻干燥高于其他四种干燥方式。因此真空冷冻干燥可以作为蚕豆干制的较优干燥工艺。

参考文献

- [1] FERREIRA C D, ZIEGLER V, SCHWANZ GOEBEL J T, et al. Changes in phenolic acid and isoflavone contents during soybean drying and storage [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(4): 1146-1155.
- [2] 李亚欢,田平平,王杰,等.干燥方式对银耳加工与贮藏过程中品质的影响[J].*中国农业科学*,2016,49(6):1163-1172.
- [3] ASHRAF Z U, GANI A, SHAH A, et al. Identification of antidiabetic peptides from broad bean protein: Sequencing using LC-MS-QTOF and *in-vitro* confirmative studies [J]. *Food Bioscience*, 2024, 61: 104903.
- [4] 陈雪,陶永霞,马钰泰,等.不同制干方法对库买提杏香气的影响[J].*保鲜与加工*,2020,20(2):186-194.
- [5] UEBERSAX M A, CICHY K A, GOMEZ F E, et al. Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security-A review [J]. *Legume Science*, 2023, 5(1): e155.
- [6] CAMPOS-VEGA R, BASSINELLO P Z, SANTIAGO R de A C, et al. Chapter 20-Dry Beans: Processing and Nutritional Effects [M]. GRUMEZESCU A M, HOLBAN A M. *Therapeutic, Probiotic, and Unconventional Foods*. Academic Press, 2018: 367-386.
- [7] WU H, ZHUO C, JIANG N, et al. Optimization of vacuum microwave drying of broad bean [J]. *Food Science*, 2013, 34(14): 100-103.
- [8] ELSHAMY A F, ROSENTRATER K A, GHNIMI S, et al. High-moisture meat analogs produced from dry-fractionated faba bean, yellow pea, and functional soy proteins: Effects of mixture design and extrusion parameters on texture properties [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2025, 100: 103927.
- [9] BÜHLER J M, DEKKERS B L, BRUINS M E, et al. Modifying faba bean protein concentrate using dry heat to increase water holding capacity [J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1077.
- [10] 马晓年,董玉英,张瑞雨,等.大豆粉中水分含量测定的研究[J].*安徽农业科学*,2016,44(28):99-101.
- [11] LI C, YU S, LU Y. Study on extraction of dietary fiber from potato peel by acid-base chemical method [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 267(5): 052028.
- [12] NOLLET L M L. *Handbook of Food Analysis: Volume 1: Physical Characterization and Nutrient Analysis* [M]. CRC Press, 2004.
- [13] FERNANDES F H A, SALGADO H R N. Gallic acid: review of the methods of determination and quantification [J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2016.
- [14] 薛红,邓蓉,徐忠惠,等.亚硝酸钠-硝酸铝比色法检测黔中金荞麦黄酮含量的分析试验[J].*贵州畜牧兽医*,2020, 44(6):9-11.
- [15] NIELSEN S S. Phenol-Sulfuric Acid Method for Total Carbohydrates [M]. NIELSEN S S. *Food Analysis Laboratory Manual*. Boston, MA: Springer US, 2010: 47-53.
- [16] GRINTZALIS K, GEORGIU C D, SCHNEIDER Y J. An accurate and sensitive Coomassie Brilliant Blue G-250-based assay for protein determination [J]. *Analytical Biochemistry*, 2015, 480: 28-30.
- [17] 王蓉蓉,胡争艳,吴平谷,等.超高效液相-串联质谱分析法同时测定蕲蛇提取物中核苷及氨基酸的含量[J].*中国卫生检验杂志*,2020,30(15):1793-1797,1803.
- [18] 张英蕾,姚鑫淼,卢淑雯,等.碱溶酸沉法提取黑豆蛋白工艺优化[J].*中国食品添加剂*,2019,30(1):60-68.

- [19] 秦艳,刘建福,谭斌,等.木瓜蛋白酶控制水解蚕豆水溶性蛋白及水解度对蚕豆蛋白功能性质的影响[J].食品工业科技,2012,33(19):162-164,172.
- [20] 杨希娟,党斌,吴昆仑,等.青稞蛋白的超声波辅助提取工艺及其功能特性研究[J].中国食品学报,2013,13(6):48-56.
- [21] 李雪琴,裘爱泳.蚕豆生理活性物质研究进展[J].粮食与油脂,2002,7:34-35.
- [22] 郑文彬,韩晶,王颖,等.黑龙江省芸豆主栽品种蛋白质功能性质分析[J].中国粮油学报,2017,32(2):6-12.
- [23] 房天琪.液态浓缩乳清蛋白的制备与功能特性修饰及应用研究[D].长春:吉林大学,2020.
- [24] 高小丽,黄海皎,杨文才,等.西藏地区不同豌豆品种(系)营养品质的综合评价[J].中国种业,2020,12:64-68.
- [25] 林海峰.不同品种豌豆的营养成分、体外抗氧化活性研究及豌豆凉粉开发[D].南昌:南昌大学,2021.
- [26] 黄亮亮,蒋康辉,李琪,等.炒制对青稞中蛋白质结构及性质影响的研究[J].粮油食品科技,2025,33(1):105-112.
- [27] 王艳娜,孟学成,赵荻,等.四个香榧品种种仁炒制加工后香气物质分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(3):169-176.
- [28] SUN Y, SHEN Y, LIU D, et al. Effects of drying methods on phytochemical compounds and antioxidant activity of physiologically dropped un-matured citrus fruits [J]. LWT -Food Science and Technology, 2015, 60(2, Part 2): 1269-1275.
- [29] 施英,张超,邱新容,等.不同干燥方式对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2024,45(12):198-204.
- [30] RODRÍGUEZ MADRERA R, CAMPA NEGRILLO A, FERREIRA FERNÁNDEZ J J. Fatty acids in dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.): A contribution to their analysis and the characterization of a diversity panel [J]. Foods, 2024, 13(13): 2023.
- [31] BAPTISTA A, PINHO O, PINTO E, et al. Characterization of protein and fat composition of seeds from common beans (*Phaseolus vulgaris* L.), cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and bambara groundnuts (*Vigna subterranea* L. Verdc) from Mozambique [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2017, 11(2): 442-450.
- [32] PHILLIPS L G. Structure-function Properties of Food Proteins [M]. Academic Press, 2013.
- [33] 宋晓敏.蚕豆蛋白的提取、功能特性及酶水解研究[D].天津:天津商业大学,2013.
- [34] 孔慧广,田少君.两种干燥方式对亚麻籽分离蛋白功能性质的影响研究[J].中国油脂,2018,43(4):20-24.
- [35] 马利华,秦卫东,陈学红,等.不同干燥方式对槐花蛋白加工特性及抗氧化性能的影响[J].食品科技,2014,39(9):104-108.
- [36] XIE H, WEI X, LIU X, et al. Effect of polyphenolic structure and mass ratio on the emulsifying performance and stability of emulsions stabilized by polyphenol-corn amylose complexes [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95: 106367.
- [37] FRANCESCO C, SANDRA I, JENS P, et al. Aromatic polyphenol π - π Interactions with superoxide radicals contribute to radical scavenging and can make polyphenols mimic superoxide dismutase activity [J]. Current Issues in Molecular Biology, 2022, 44(11): 5209-5220.
- [38] YU S, FRANCESCO C, STUART B, et al. Scavenging of superoxide in aprotic solvents of four isoflavones that mimic superoxide dismutase [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(4): 3815.