

香菇蛋白的提取工艺优化、功能特性及氨基酸评价

王梓杭^{1,2}, 范秀芝^{2,3}, 姚芬^{2,4}, 殷朝敏^{2,4}, 史德芳^{2,4}, 高虹^{2,5*}, 沈汪洋^{1*}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023)(2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)(3. 湖北金盆岭菌业有限公司, 湖北谷城 441700)

(4. 湖北省林下经济工程研究中心, 湖北武汉 430064)(5. 湖北省香菇产业技术研究院, 湖北随州 441300)

摘要: 该研究采用响应面优化超声波辅助提取香菇蛋白工艺, 确定蛋白质的最佳提取条件为料液比 1:50 (*m/V*)、pH 值 12, 在功率 90 W、50 °C 条件下超声提取 16 min, 蛋白提取率为 28.56%, 蛋白质纯度为 61.70%。通过扫描电镜、傅里叶变位红外光谱对香菇蛋白结构特性进行分析, 后对香菇蛋白的功能特性进行测定, 并对香菇蛋白氨基酸组成进行分析和评价。结果表明, 香菇蛋白呈颗粒状且表面较为粗糙, 具有明显的蛋白特征官能团吸收峰; 持水性在 70 °C 时最好, 为 436.73%, 在 40 °C 持油性最佳, 为 179.47%, 起泡性、乳化性与蛋白质量浓度呈正相关。氨基酸分析发现香菇蛋白中含有 17 种氨基酸, 必需氨基酸占氨基酸总量的比值 (*E/T* 值) 和必需氨基酸与非必需氨基酸的比值 (*E/N* 值) 均高于 FAO/WHO 理想蛋白质标准, 是一种优质的蛋白质, 且具有较高的营养价值。该研究为香菇蛋白的利用奠定了基础。

关键词: 香菇蛋白; 功能特性; 氨基酸评价

文章编号: 1673-9078(2023)06-186-194

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.6.0627

Optimization of Extraction, Functional Characteristic, and Amino Acid

Evaluation of *Lentinula edodes* Protein

WANG Zihang^{1,2}, FAN Xiuzhi^{2,3}, YAO Fen^{2,4}, YIN Chaomin^{2,4}, SHI Defang^{2,4}, GAO Hong^{2,5*}, SHEN Wangyang^{1*}

(1.College of Food Science and Technology, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2.Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (3.Hubei Jinpenling Mushrooms Industry Co. Ltd., Gucheng 441700, China)

(4.Hubei Provincial Engineering Research Center of Under-forest Economy, Wuhan 430064, China)

(5.Hubei Xianggu Mushroom Industrial Technology Research Institute, Suizhou 441300, China)

Abstract: Response surface methodology was used to optimize the ultrasonic-assisted extraction of *Lentinula edodes* protein (LEP). The optimal extraction conditions determined were solid-liquid ratio 1:50 (*m/V*), pH 12, and ultrasonic extraction at 90 W and 50 °C for 16 min. The extraction rate and purity of protein extracted were 28.56% and 61.7%, respectively. The structural characteristics of LEP were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR); additionally, the functional characteristics were determined and the amino acid composition was analyzed. The SEM results showed that the surface of LEP is granular and rough, and FT-IR spectra demonstrated obvious absorption peaks indicative of characteristic functional groups of protein. The functional property analysis suggested that the water holding capacity is highest (436.73%) at 70 °C while the oil holding capacity peaks (179.47%) at 40 °C. Meanwhile, the foaming and emulsifying properties were positively correlated with protein concentration. Amino acid analysis identified 17 kinds of amino acids in LEP. Both the ratio of essential amino acids to total amino

引文格式:

王梓杭,范秀芝,姚芬,等.香菇蛋白的提取工艺优化、功能特性及氨基酸评价[J].现代食品科技,2023,39(6):186-194.

WANG Zihang, FAN Xiuzhi, YAO Fen, et al. Optimization of extraction, functional characteristic, and amino acid evaluation of *Lentinula edodes* protein [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 186-194.

收稿日期: 2022-05-18

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2022BBA0024); 湖北省食用菌产业技术体系项目 (HBHZDZB-2021-023)

作者简介: 王梓杭 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食用菌功能食品开发, E-mail: wzh0101@foxmail.com

通讯作者: 高虹 (1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食用菌功能食品开发, E-mail: highong@163.com; 共同通讯作者: 沈汪洋 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: wangyangshen@126.com

acids (E/T) and the ratio of essential amino acids to nonessential amino acids (E/N) were higher than the FAO/WHO ideal protein standards, indicating the high-quality of LEP. Moreover, LEP exhibited a high nutritional value on amino acid evaluation. This study thus lays a foundation for the improved utilization of LEP.

Key words: *Lentinula edodes* protein; functional characteristics; amino acid evaluation

香菇 (*Lentinula edodes*), 是一种具有较高食用价值的大型真菌, 其味道鲜美口感好, 是我国生产区域最广、总产量最高的食用菌类, 其产量和出口量稳居世界第一。据古籍记载香菇味甘性平, 具有“益气不饥, 治风破血和益胃助食”的功效^[1]。现代研究表明, 香菇中含有丰富的蛋白质、氨基酸、核苷酸、维生素和矿物质等营养物质, 以及多糖、膳食纤维、麦角甾醇和香菇嘌呤等活性物质, 具有增强免疫、抗氧化、预防糖尿病、防癌抗癌和预防心脑血管疾病等功效^[2]。此外, 香菇中还含有钙、铁、锰、镁、硒等矿物质和多种维生素, 是开发膳食补充剂或营养保健品的优质原料。目前, 香菇作为优质的食品原料, 已应用于健康食品的开发, 市场上出现的香菇纤维饼干、香菇多糖胶囊、香菇多糖口服液等保健品受到消费者的青睐, 但目前无香菇蛋白相关产品上市。

食用菌中蛋白质含量约占干质量的 10%~63%, 且与蛋类和肉类食物中的蛋白质相比, 食用菌蛋白的脂肪以及胆固醇含量较低, 有助于人体快速消化吸收^[3], 是公认的减肥食物。此外, 与动物和植物蛋白质相比, 食用菌蛋白具有独特的生物活性, 如专一的水解活性和高效的降解活性, 和较强的热稳定性和耐酸碱性, 有利于投入工业化生产^[4]。为丰富蛋白质资源, 并实现食用菌蛋白资源的开发和利用, 目前已有杏鲍菇、白灵菇、双孢蘑菇、大球盖菇等食用菌蛋白提取及功能特性研究的报道, 以及香菇菌柄蛋白功能特性的研究报道, 但香菇蛋白中的氨基酸评价研究尚未深入。

因此, 本研究通过响应面优化超声辅助香菇蛋白提取工艺, 研究香菇蛋白的结构及功能特性, 并对其氨基酸进行分析评价, 为香菇蛋白高附加值产品开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

香菇: 优选的高蛋白含量香菇原料^[5], 来自湖北长久菌业有限公司, 样品在恒温干燥箱中 50 °C 烘干至恒重后, 粉碎过 80 目筛, 备用。

考马斯亮蓝 G-250 购自 Solarbio 公司; 溴化钾(光谱纯) 购自 Sigma 公司。

1.2 主要仪器与设备

KQ-5200DE 超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; FD5-3P 真空冷冻干燥机, 美国金西蒙公司; UV-1800、紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; Nexus 470 型傅里叶红外光谱仪, 美国 Nicolet 公司; AZtecLive Ultim Max 100 扫描电镜, 牛津仪器有限公司; 全自动氨基酸分析仪, 英国 Biochrom 公司。

1.3 方法

1.3.1 香菇蛋白提取步骤

将香菇粉与蒸馏水按一定比例加入烧杯中, 搅拌均匀后调节 pH 值, 超声, 离心后将上清液的 pH 值用 1 mol/L HCl 调节至香菇蛋白等电点, 静置沉淀, 将沉淀反复水洗至中性, 冷冻干燥得到香菇粗蛋白。按公式 (1) 计算蛋白质提取率。

$$E = \frac{cv}{mw} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

E ——蛋白质提取率, %;

c ——上清液中蛋白浓度, g/mL;

v ——上清液体积, mL;

m ——香菇粉质量, g;

w ——凯氏定氮法测定香菇粉中蛋白质含量, g/100 g。

1.3.2 香菇蛋白等电点的测定

取香菇粉在料液比 1:50 (m/V)、pH 值 12, 超声功率 150 W, 30 °C 条件下浸提 20 min, 离心取上清液 100 mL, 分成 10 份, 并调节 pH 值至 3.2、3.4、3.6、3.8、4.0、4.2、4.4、4.6、4.8、5.0, 静置沉淀 30 min 后离心 20 min, 采用考马斯亮蓝染色法测定上清液中蛋白质含量^[6]。

1.3.3 单因素试验

在 1.3.2 给出试验条件基础上, 进行单因素优化试验, 其中, 料液比设置为 1:20、1:30、1:40、1:50、1:60、1:70 (m/V); pH 值 8.0、9.0、10.0、11.0、12.0、13.0; 超声功率 30、90、150、210、270 W; 超声温度 30、40、50、60、70 °C; 超声时间 5、10、15、20、25、30 min。

1.3.4 超声法提取香菇蛋白的响应面试验设计

表 1 试验因素水平及编码表

Table 1 Variables and levels in Box-Benhnken experimental

因素	水平		
	超声功率/W	超声时间/min	超声温度/°C
1	60	10	45
0	90	15	50
-1	120	20	55

运用 Box-Benhnken 原理进行 3 因素 3 水平试验设计, 以蛋白质提取率为响应值, 超声功率、超声时间、超声温度为自变量进行响应面试验 (表 1)。

1.3.5 香菇蛋白外观特性和官能团分析

(1) 扫描电镜分析: 将香菇蛋白固定在样品基底上, 置于离子溅射装置中, 在成像前图上一层薄金, 然后在 2 000、5 000 和 20 000 倍下观察香菇蛋白外观特性^[7]。

(2) 红外光谱分析: 取干燥样品 1.00 mg 与 100 mg KBr 混合研磨, 放入仪器中扫描, 区间为 400~4 000 cm⁻¹^[8]。

1.3.6 香菇蛋白功能特性分析

香菇蛋白的溶解性、持水性和持油性参考 Gadalkar 等^[9]所述方法测定。起泡性、泡沫稳定性、乳化性和乳化稳定性参考 Wani 等^[10]的试验方法。

1.3.7 香菇蛋白氨基酸组成分析及评分

香菇蛋白的氨基酸组成及含量测定参考 GB 5009.124-2016^[11]的方法。根据测定的必需氨基酸含量分别按公式 (2)~(6) 计算香菇蛋白氨基酸评分、氨基酸化学评分、EAA 比值 (RAA)、氨基酸比值系数 (RC) 和比值系数分 (SRC):

$$AAS = \frac{L}{K} \times 100\% \quad (2)$$

$$AAC = \frac{L}{N} \times 100\% \quad (3)$$

$$RAA = \frac{L_p}{K_p} \quad (4)$$

$$RC = \frac{RAA}{RAA} \quad (5)$$

$$SRC = 100 - CV \times 100$$

$$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RC_i - \bar{RC})^2}{n-1}} / RC \quad (6)$$

式中:

AAS—氨基酸评分, 分;

L—香菇蛋白中某种氨基酸含量, mg/g;

K—FAO/WHO 模式中该氨基酸含量, mg/g;

AAC—氨基酸化学评分, 分;

N—鸡蛋蛋白中该氨基酸含量, mg/g;

RAA—样品中某一必需氨基酸的含量/模式谱相应必需氨基酸的含量;

L_p—香菇蛋白中某种必需氨基酸含量, mg/g;

K_p—WHO/FAO 模式中相应必需氨基酸含量, mg/g;

RC—氨基酸比值系数;

SRC—比值系数分;

CV—RC 的变异系数。

1.4 统计分析

所有试验重复 3 次, 结果以“平均值±标准差”表示。使用 Design-Expert.V 8.0.6 和 Origin 2021 对试验数据进行分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 香菇蛋白等电点测定

由图 1 可知, 调整香菇提取液的 pH 值在 3.2~5.0 范围内时, 当 pH 值为 3.8 时上清液中蛋白质含量最低, 因此, 确定等电点为 3.8。

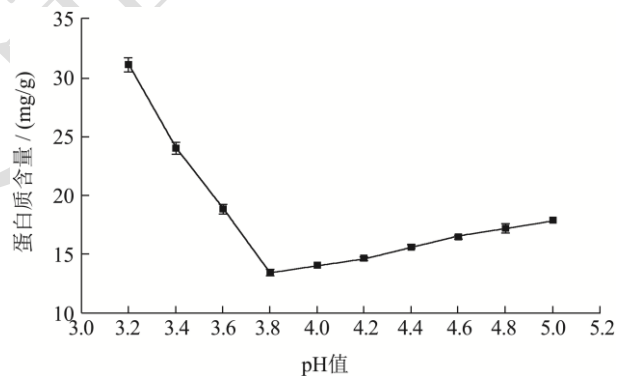


图 1 香菇蛋白等电点

Fig.1 Isoelectric point of *L. edodes* protein

2.2 单因素试验结果

由图 2a 可知, 随溶剂量的增加, 香菇蛋白提取率持续增大, 当料液比为 1:50 (m/V) 时提取率达到最高, 为 24.71%, 之后开始降低。可能是由于溶剂量的不断增加, 有利于蛋白质从溶剂中溶出, 而当溶剂达到一定量这种有利作用逐渐减弱^[12]。结合单因素结果及后续实验可操作性, 固定响应面优化时料液比为 1:50。

香菇蛋白提取率随 pH 值增加, 逐渐提高并趋于稳定, 当 pH 值为 12 时蛋白提取率 (21.66%) 与 pH 值为 13 时 (21.87%) 差异不显著 (图 2b)。在后续响应面优化时固定 pH 值为 12。

香菇蛋白提取率随超声波功率的增加呈先上升后下降的趋势(图 2c),原因可能是超声波产生的空化效应,显著增加传质效率,随功率的增高,空化效应也随之增加,但当功率较高时,空化强度导致蛋白质降解,从而使提取率降低^[12]。选择超声功率为 90 W 开展后续研究。

香菇蛋白的提取率在 50 °C 时达到最高,为 28.00%,之后开始降低(图 2d),这可能是由于温度过高导致蛋白质变性,从而导致提取率降低^[13]。

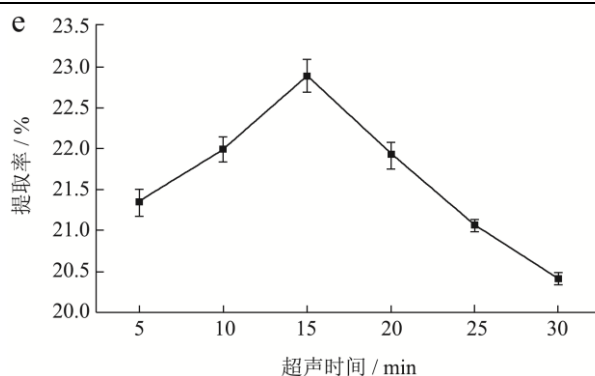
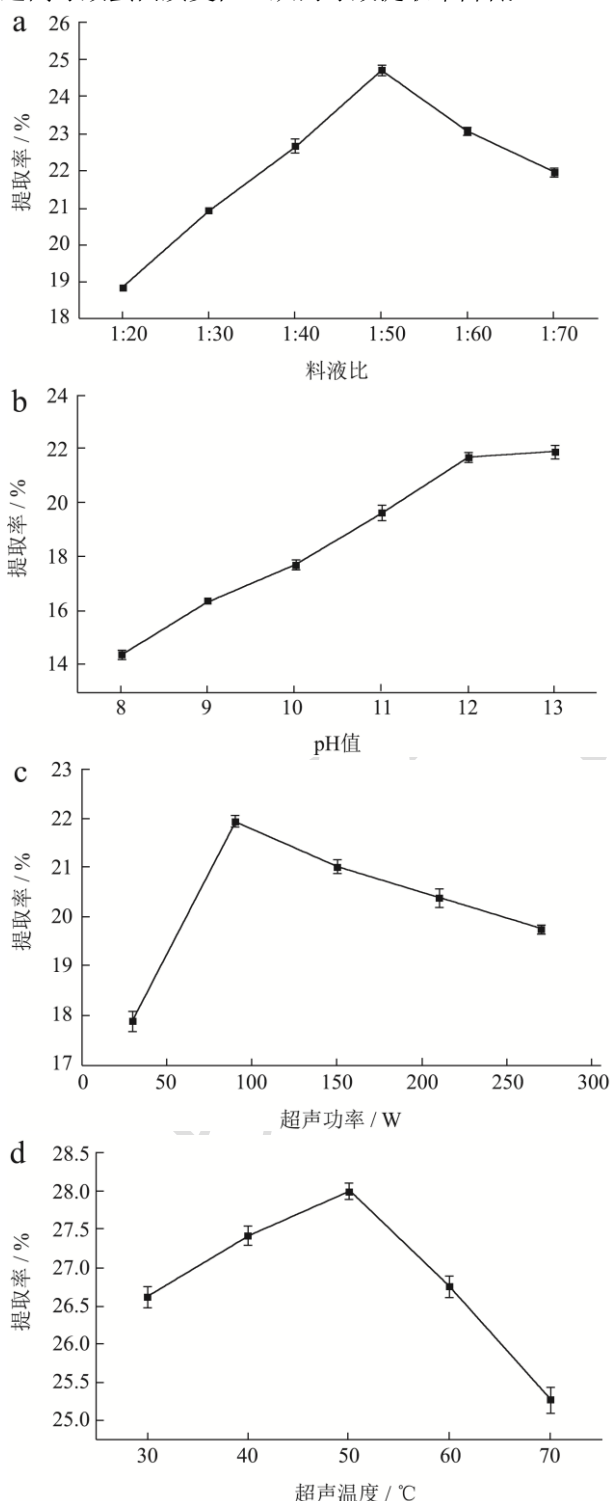


图 2 各因素对香菇蛋白提取率的影响

Fig.2 Individual effects of factors on the extraction rate of *L. edodes* protein

超声时间在 5~15 min 时,香菇蛋白的提取率随着时间的延长呈现先增大后减小的趋势(图 2e),在 15 min 时提取率达到最大,为 22.89%。这可能是因为在规定时间内超声产生的冲击波使溶剂渗透到细胞中,使蛋白质溶出量增加,但时间过长,空化效应导致蛋白质变性,使提取率降低^[14]。

2.3 响应面优化试验

2.3.1 响应面试验结果

回归方程为:

$$\text{提取率} = 28.33 - 0.38A + 0.41B + 0.15C + 0.045AB + 0.064AC - 0.01BC - 2.92A^2 - 1.19B^2 - 1.23C^2$$

响应面试验设计及试验结果见表 2。

表 2 响应面分析方案与试验结果

Table 2 Response surface analysis program with test results

试验号	A	B	C	蛋白提取率/%
1	55	15	60	23.58
2	50	15	90	28.33
3	55	20	90	24.29
4	50	15	90	28.78
5	45	20	90	24.89
6	45	15	120	24.67
7	50	15	90	27.83
8	45	10	90	24.26
9	50	15	90	28.57
10	50	20	120	26.53
11	45	15	60	24.55
12	55	10	90	23.48
13	50	15	90	28.15
14	55	15	120	23.95
15	50	10	120	25.64
16	50	10	60	25.28
17	50	20	60	26.21

表3 回归模型方差分析结果

Table 3 Analysis of variance analysis of regression model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-value Prob>F	
Model	55.09	9	6.12	73.27	<0.000 1	significant
A-超声温度	1.18	1	1.18	14.08	0.007 1	
B-超声时间	1.33	1	1.33	15.95	0.005 2	
C-超声功率	0.17	1	0.17	2.04	0.195 8	
AB	8.010E-3	1	8.010E-3	0.096	0.765 8	
AC	0.016	1	0.016	0.19	0.672 4	
BC	4.000E-4	1	4.000E-4	4.788E-3	0.946 8	
A ²	35.79	1	35.79	428.45	<0.000 1	
B ²	5.97	1	5.97	71.42	<0.000 1	
C ²	6.34	1	6.34	75.87	<0.000 1	
Residual	0.58	7	0.084			
Lack of Fit	0.036	3	0.012	0.087	0.963 2	not significant
Pure Error	0.55	4	0.14			
Cor Total	55.68	16				

R²: 0.989 5

由表3 回归模型显著性分析可知,影响蛋白质提取率的3个因素主次顺序为:B>A>C。回归模型P<0.01,R²为0.989 5,说明该方程具有良好的拟合性,可用该方程对进行试验分析。

2.3.2 响应面和等高线分析

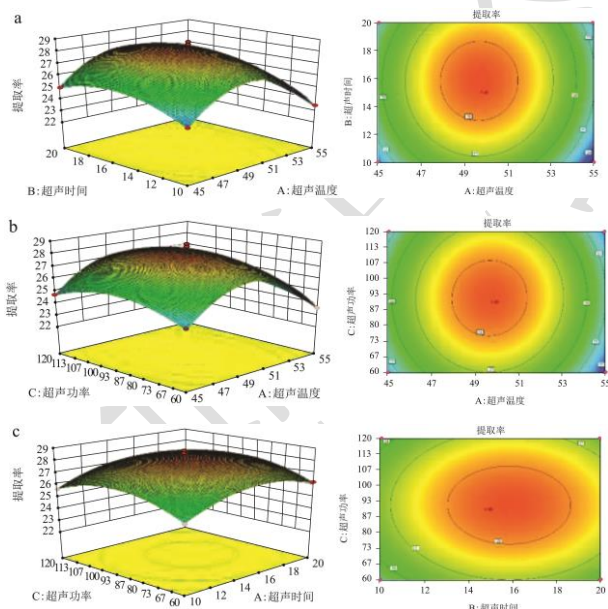


图3 响应面与等高线分析图

Fig.3 Response surface and contour analysis diagram

注: a: 超声时间和超声温度; b: 超声温度和超声功率; c: 超声时间和超声功率。

从图3a、和3b可以看出,蛋白质提取率存在最高点,曲面较陡峭,等高线越圆,表明其交互作用越显著^[13]。而随超声功率的增加,蛋白质响应值增幅较

小,且图中曲面较平滑,等高线越椭圆(图3c),说明其交互作用越不显著。因此,适当增加超声功率和超声温度可提高其蛋白质提取率。

2.3.3 验证试验

根据实验模型的典型分析,得到香菇蛋白的最优提取条件为:超声温度49.68℃、超声时间15.85 min、超声功率91.73 W,预测的提取率为28.38%。为了验证模型的真实性和准确性,将上述条件结合实际调整为:超声温度50℃、超声时间16 min、超声功率90 W。验证试验获得提取率为28.56%,与理论值差异不显著,由此可见该模型较好地预测了试验结果。

2.4 香菇蛋白结构特性分析

2.4.1 扫描电镜结果分析

扫描电镜(图4) SEM结果显示,香菇蛋白呈片状(图4a、4b),表面粗糙,蛋白质颗粒均匀分布(图4c)。

2.4.2 红外光谱分析结果

由图5可以看出,香菇蛋白具有由N-H伸缩振动、C-N伸缩和N-H的弯曲振动产生的蛋白质典型的酰胺I带(1655 cm⁻¹)和酰胺III带(1234 cm⁻¹)特征峰^[15]。3300 cm⁻¹处有蛋白质链与水分子氢键形成的吸收带。3088 cm⁻¹处具有烯烃类-C-H-伸缩振荡吸收峰,2927 cm⁻¹处的吸收带是烷烃类的-C-H-反对称的伸缩振荡引起的,1535 cm⁻¹和1074 cm⁻¹处具有酰胺II带中NH₂的面内变形振荡和NH面内弯曲振荡引起的吸收峰^[16]。

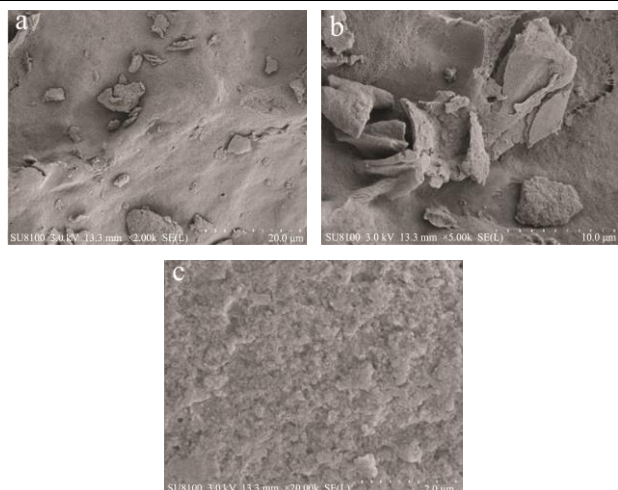


图4 扫描电镜图像

Fig.4 SEM photographs

注: a: ×2 000, b: ×5 000, c: ×20 000。

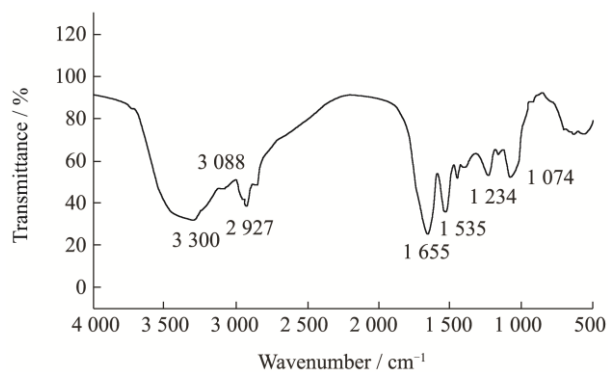


图5 香菇蛋白红外光谱图

Fig.5 Infrared spectrum of *L. edodes* protein

2.5 香菇蛋白功能特性分析

2.5.1 溶解性

pH 值在 4~7 范围内蛋白质的溶解度较低, 随 pH 值增加溶解度逐渐增加 (图 6a), 这可能与香菇蛋白较低的等电点有关, 在 pH 值接近等电点范围内蛋白质聚集析出, 影响其溶解度。由图 6b 可知, 香菇蛋白的溶解度随温度的升高呈现先增加后降低的趋势, 70 °C 溶解度最高为 57.37%, 分析原因可能是适当的升温有助于蛋白质分子的溶解, 而当温度过高导致蛋白质变性, 溶解度降低^[17]。

2.5.2 持水性和持油性

香菇蛋白的持水性在 70 °C 时达到最大, 为 436.73% (图 7a); 而香菇蛋白的持油性在 40 °C 时达到最大, 为 179.47%, (图 7b), 显著低于红小豆(202%)和大豆(231%)^[18]等豆类蛋白, 因此, 香菇蛋白可替代豆类蛋白用于低脂健康食品的开发。

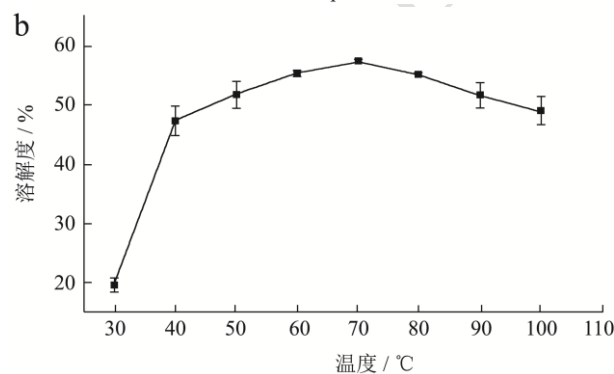
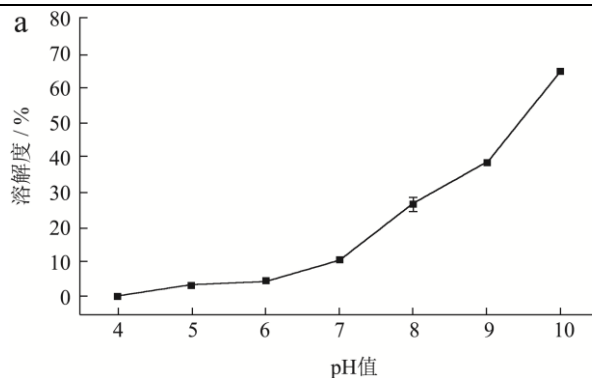


图6 pH 值 (a) 和温度 (b) 对蛋白质溶解度的影响

Fig.6 Effects of pH value (a) and temperature (b) on solubility of the protein

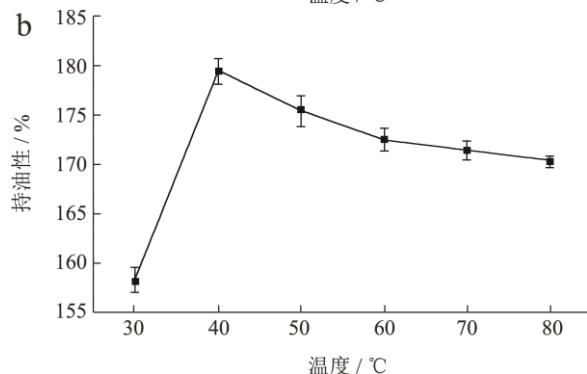
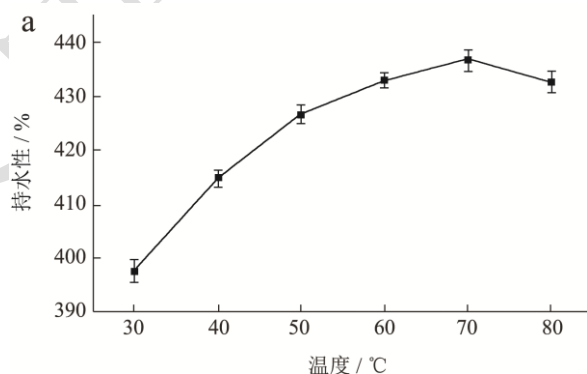


图7 温度对蛋白持水性 (a) 和持油性 (b) 的影响

Fig.7 Effect of temperature on water (a) and oil holding (b) capacity of the protein

2.5.3 起泡性和泡沫稳定性

香菇蛋白的起泡性和泡沫稳定性都随着蛋白质溶液质量浓度的增加而增加(图8),推测可能是随蛋白质浓度的增加,参与搅打成膜的蛋白分子增多,分子间的作用增强,更易互相结合形成稳定的泡沫,且能维持较长时间。

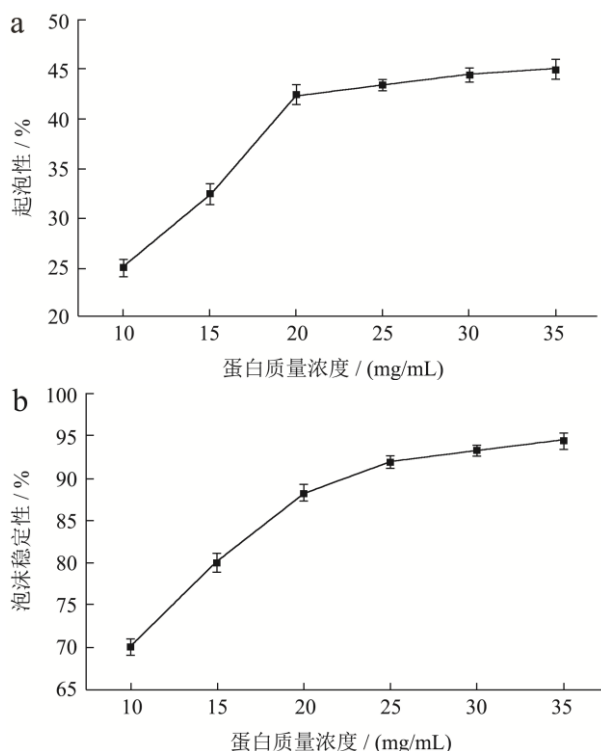


图8 蛋白质量浓度对蛋白起泡性(a)和泡沫稳定性(b)的影响

Fig.8 Effect of protein concentration on foaming capacity (a) and foam stability (b) of the protein

2.5.4 乳化性和乳化稳定性

香菇蛋白的乳化性与蛋白质质量浓度呈正相关,乳化稳定性在质量浓度达到20 mg/mL后趋于稳定(图9)。当质量浓度为35 mg/mL时,香菇蛋白乳化性为56.11%,高于大豆蛋白和红小豆蛋白(47%和46%)^[18],说明香菇蛋白可以在食品加工中作为一种优质的乳化剂。

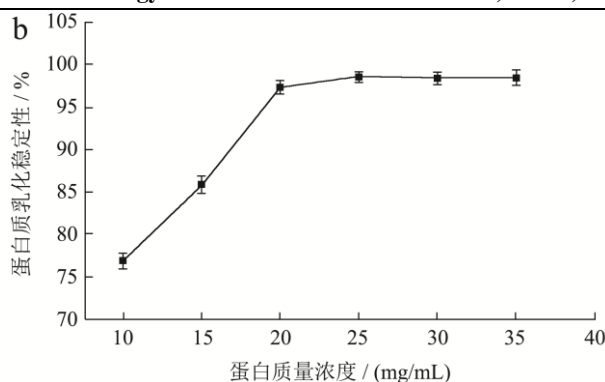
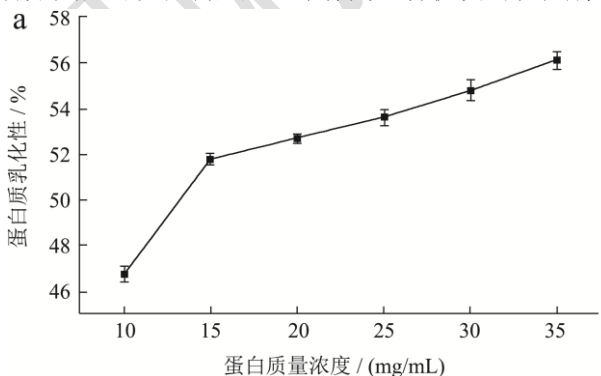


图9 蛋白质量浓度对乳化性(a)和乳化稳定性(b)的影响
Fig.9 Effect of protein concentration on emulsifying capacity (a) and emulsion stability (b) of the protein

2.6 香菇蛋白氨基酸组成

表4 香菇蛋白的氨基酸组分

Table 4 Amino acid of *L. edodes* protein

氨基酸组成	香菇蛋白中含量/(mg/g)	FAO/WHO pattern	
		2~5岁儿童	成人
赖氨酸 Lys*	36.98±0.21	58	16
异亮氨酸 Ile*	41.74±0.16	28	13
亮氨酸 Leu*	53.78±0.05	66	19
蛋氨酸 Met*	29.04±0.09	25	17
缬氨酸 Val*	42.45±0.16	35	13
苯丙氨酸 Phe*	29.68±0.25		
苏氨酸 Thr*	28.85±0.23	34	09
组氨酸 His	17.51±0.06	19	16
精氨酸 Arg	32.03±0.13		
天冬氨酸 Asp	55.18±0.22		
脯氨酸 Pro	53.17±0.08		
甘氨酸 Gly	26.79±0.14		
谷氨酸 Glu	66.61±0.17		
丙氨酸 Ala	31.60±0.27		
酪氨酸 Tyr	26.04±0.06		
丝氨酸 Ser	30.79±0.21		
胱氨酸 Cys	4.65±0.00		
氨基酸总量(TAA)	606.88		
必需氨基酸(EAA)	262.53		
非必需氨基酸(NEAA)	344.35		
(E/T)/%	43.26		
E/N	0.76		

注: *为必需氨基酸,表4-6同。

蛋白质的营养价值主要取决于所含必需氨基酸的种类、数量和组成比例^[19]。由表4可知,香菇蛋白的

氨基酸种类齐全, 含有 17 种氨基酸, 其中必需氨基酸 7 种, 非必需氨基酸 10 种, 氨基酸总量为 606.88 mg/g, 高于平菇、金针菇、木耳等食用菌蛋白质中的含量^[20]。香菇蛋白含有成人所需的所有必需氨基酸(表 4), 其含量占氨基酸总量 40% 以上, 且必需氨基酸/非必需氨基酸比值(E/N 值)为 >0.6, 符合 FAO/WHO 提出的理想蛋白质条件^[21]。此外, 香菇蛋白中的异亮氨酸、蛋氨酸、缬氨酸的含量均超过 FAO/WHO 要求的 2~5 岁儿童所需的范围值, 表明香菇蛋白可作为一种很好的成人和儿童营养蛋白质来源。

表 5 香菇蛋白的氨基酸和化学评分

Table 5 Amino acid and chemical scores of *L. edodes* protein

必需氨基酸	香菇蛋白 氨基酸评分	大豆蛋白 氨基酸评分	WHO/FAO 模式评分	香菇蛋白 化学评分	大豆蛋白 化学评分	全鸡蛋 蛋白评分
苏氨酸 Thr*	72.14	75	40	55.41	63.83	47
缬氨酸 Val*	84.90	85	50	100.92	64.39	66
蛋氨酸 Met*+胱氨酸 Cys	96.27	95	35	127.36	60.48	55
异亮氨酸 Ile*	104.36	102	40	102.19	75.5	54
亮氨酸 Leu*	76.83	97	70	61.82	78.95	86
酪氨酸 Tyr+苯丙氨酸 Phe*	92.87	178	60	257.82	114.84	93
赖氨酸 Lys*	67.23	87	55	45.75	68.36	70

根据表 5 中得到的香菇蛋白必需氨基酸评分, 计算出香菇蛋白的 RAA、RC 和 SRC(表 6)。由 RC 值分析可知, 香菇蛋白中的第一限制氨基酸为亮氨酸, 苏氨酸和缬氨酸的 RC 值接近 1, 表明香菇蛋白中这两种氨基酸的组成比例与模式谱中相接近, 酪氨酸+苯丙氨酸则相对不足, 异亮氨酸和蛋氨酸+胱氨酸相对过剩, 根据蛋白质互补理论^[22], 在食用时, 应与其他蛋白合理配比, 以有效发挥香菇蛋白的营养价值。SRC 值越高, 表明蛋白质的营养价值越高^[23]。本研究中, 香菇蛋白的 SRC 值为 67.42, 与大豆蛋白、牛乳(72.60)、奶粉(67.31)核桃(62.65)相接近^[23], 表明香菇蛋白的营养价值较高, 可以对其进行开发利用。

表 6 香菇蛋白中必需氨基酸的 RAA、RC 和 SRC 值

Table 6 RAA, RC, and SRC of essential amino acids of

L. edodes protein

必需氨基酸	香菇蛋白	
	RAA	RC
苏氨酸 Thr*	1.80	0.99
缬氨酸 Val*	1.70	0.93
蛋氨酸 Met*+胱氨酸 Cys	2.75	1.51
异亮氨酸 Ile*	2.61	1.43
亮氨酸 Leu*	1.10	0.60
酪氨酸 Tyr+苯丙氨酸 Phe*	1.55	0.85
SRC	67.42	

2.7 香菇蛋白营养价值评价

与大豆蛋白氨基酸评分相比, 香菇蛋白中异亮氨酸、蛋氨酸和胱氨酸评分高于大豆蛋白, 其中异亮氨酸评分最高(表 5), 因此, 可将香菇蛋白作为异亮氨酸缺乏的食物补充来源。由香菇蛋白化学评分可知, 除苏氨酸、亮氨酸、赖氨酸, 其它氨基酸的化学评分均大于大豆、鸡蛋等蛋白的, 说明其营养价值较高, 有非常大的开发潜力。

3 结论

通过超声辅助碱提酸沉法提取香菇蛋白, 在优化的工艺条件下获得蛋白质提取率 28.56%, 蛋白质纯度为 61.70%, 为实现香菇蛋白的工业化应用奠定了一定的基础。此外, 分析发现香菇蛋白中含有 17 种氨基酸, 其中必需氨基酸占 43.26%, 必需氨基酸和非必需氨基酸的比值为 0.76, 氨基酸组成合理。不同类别氨基酸含量分析发现, 香菇蛋白中含有营养价值高和保健效果好的氨基酸种类, 是一种优质的蛋白, 且氨基酸的化学评分均大于大豆、鸡蛋等蛋白的, 营养价值较高。此外, 香菇蛋白的功能特性结果表明, 其乳化和起泡沫稳定性好, 持油性低, 且乳化性高于大豆蛋白和红小豆蛋白, 这为香菇的精深加工提供新的思路和理论基础, 为香菇产业的发展带来新的契机。

参考文献

- [1] 曹斌. 新冠肺炎疫情长期化背景下我国香菇产业发展趋势分析[J]. 食用菌, 2020, 28(4): 233-237.
- [2] Bisen P S, Baghel R K, Sanodiya B S, et al. *Lentinus edodes*: a macrofungus with pharmacological activities [J]. Current Medicinal Chemistry, 2010, 17(22): 2419-2430.
- [3] Rathore H, Prasad S, Sharma S. Mushroom nutraceuticals for improved nutrition and better human health: A review [J].

- Pharma Nutrition, 2017, 5(2): 35-46.
- [4] Ying X, Ma J, Liang Q, et al. Identification and analysis of the constituents in an aqueous extract of *Tricholoma matsutake* by HPLC coupled with diode array detection/electrospray ionization mass spectrometry [J]. Journal of Food Science, 2013, 78(8): C1173-C1182.
- [5] 王梓杭,范秀芝,姚芬,等.不同纹理香菇内在品质分析及评价[J].食品安全质量检测学报, 2023,14(1):130-137.
- [6] 胡丹慧.香菇柄蛋白质的提取,性质和新型营养面包的开发[D].沈阳:辽宁大学,2019.
- [7] Görgüç A, Özer P, Yılmaz F M. Simultaneous effect of vacuum and ultrasound assisted enzymatic extraction on the recovery of plant protein and bioactive compounds from sesame bran [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 87: 103424.
- [8] 张艳荣,高宇航,刘婷婷,等.白灵菇蛋白提取及功能特性和结构分析[J].食品科学,2018,39(14):42-50.
- [9] Gadalkar S M, Rathod V K. Extraction of watermelon seed proteins with enhanced functional properties using ultrasound [J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2020, 50(2): 133-140.
- [10] Wani A A, Sogi D S, Singh P, et al. Characterization and functional properties of watermelon (*Citrullus lanatus*) seed protein isolates and salt assisted protein concentrates [J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(4): 877-887.
- [11] GB 5009.124-2016,食品安全国家标准食品中氨基酸的测定[S].
- [12] Sun Q, Chen Q, Xia X, et al. Effects of ultrasound-assisted freezing at different power levels on the structure and thermal stability of common carp (*Cyprinu scarpio*) proteins [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 54: 311-320.
- [13] 刘珊,刘晓艳.热变性对蛋白质理化性质的影响[J].中国食品添加剂,2006,6:108-112.
- [14] 谢昊宇,贾冬英,迟原龙,等.青稞蛋白质碱法提取条件的优化研究[J].食品工业科技,2014,35(18):281-283,287.
- [15] López-Monterrubio D I, Lobato-Calleros C, Alvarez-Ramirez J, et al. Huauzontle (*Chenopodium mnuttalliae* Saff.) protein: Composition, structure, physicochemical and functional properties [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106043.
- [16] 王大为,赵鑫,董欣,等.发芽对绿豆皮膳食纤维结构及性质的影响[J].食品科学,2016,37(23):111-117.
- [17] 刘婷婷,吴玉莹,秦宇婷,等.绿豆淀粉工艺废水中蛋白质的功能性质[J].食品科学,2017,38(5):104-110.
- [18] 张波,黄英,薛文通.红小豆分离蛋白功能特性研究[J].食品科学,2012,33(19):71-74.
- [19] 顾可飞,周昌艳.烘干对羊肚菌营养成分影响[J].食品研究与开发,2019,40(6):47-51.
- [20] Li J, Ma J, Fan S, et al. Comparison of the nutritional and taste characteristics of 5 edible fungus powders based on the composition of hydrolyzed amino acids and free amino acids [J]. Journal of Food Quality, 2022, 10: 3618002.
- [21] 岳冬,刘娜,朱为民,等.樱桃番茄与普通番茄部分品质指标及氨基酸组成比较[J].食品科学,2015,36(4):92-96.
- [22] Borad S G, Kumar A, Singh A K. Effect of processing on nutritive values of milk protein [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(17): 3690-3702.
- [23] 王芳,乔璐,张庆庆,等.桑叶蛋白氨基酸组成分析及营养价值评价[J].食品科学,2015,36(1):225-228.
- [24] 李瑞,陆斌,刘云,等.云南 17 种核桃仁氨基酸组成分析及营养价值评价[J].食品与机械,2019,35(1):80-85.