DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250928001
引用格式: 蒲荣新, 高梦祥, 陈万超, 等. 大球盖菇可溶性蛋白制备、理化特性分析及风味评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 134–141.
PU RX, GAO MX, CHEN WC, *et al*. Preparation, physicochemical properties analysis and flavor evaluation of soluble protein from *Stropharia rugosoannulata* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 134–141. (in Chinese with English abstract).

大球盖菇可溶性蛋白制备、理化特性分析及风味评价

蒲荣新[1,2], 高梦祥[1*], 陈万超[2], 杨 焱[2], 张 忠[2], 吴 迪[2],
刘 朋[2], 李 文[2*]

(1. 长江大学生命科学学院, 荆州 434023; 2. 上海市农业科学院食用菌研究所,
农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室, 国家食用菌工程技术研究中心, 上海 201403)

摘 要: 目的 探究大球盖菇可溶性蛋白的制备工艺、理化特性及其风味特征。**方法** 采用超声辅助法提取大球盖菇可溶性蛋白, 通过单因素及响应面实验优化超声功率密度、提取时间、提取温度及料液比等关键工艺参数; 采用氨基酸分析仪、圆二色谱、差示扫描量热仪及感官评价等方法, 表征蛋白提取物的氨基酸组成、二级结构、热稳定性及鲜味强度。**结果** 通过工艺优化, 获得了可溶性蛋白提取物的最优制备工艺为: 超声功率密度 375 W/L, 超声提取时间 10 min, 超声提取温度 30 ℃, 料液比 1:30 (g:L)。在此条件下, 提取物中蛋白含量为(431.20±2.67) mg/g, 蛋白中必需氨基酸含量为(99.10±0.26) mg/g, 鲜味氨基酸谷氨酸占比为 27.56%。可溶性蛋白的 *α*-螺旋占比和无规则卷曲增加, 蛋白变性温度为 108.06 ℃。鲜味评价结果显示, 8 mg/mL 的可溶性蛋白提取物与 2 mg/mL 的谷氨酸钠具有等效鲜味强度。**结论** 本研究可为大球盖菇可溶性蛋白产品的开发应用提供理论依据。

关键词: 大球盖菇; 可溶性蛋白; 超声提取; 理化特性; 鲜味评价

Preparation, physicochemical properties analysis and flavor evaluation of soluble protein from *Stropharia rugosoannulata*

PU Rong-Xin[1,2], GAO Meng-Xiang[1*], CHEN Wan-Chao[2], YANG Yan[2],
ZHANG Zhong[2], WU Di[2], LIU Peng[2], LI Wen[2*]

[1. *School of Life Sciences*, *Yangtze University*, *Jingzhou* 434023, *China*; 2. *Institute of Edible Fungi*, *Shanghai Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Edible Fungi Resources and Utilization* (*South*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China*, *National Engineering Research Center of Edible Fungi*, *Shanghai* 201403, *China*]

ABSTRACT: Objective To investigate the preparation process, physicochemical properties and flavor

收稿日期: 2025-09-28
基金项目: 上海现代农业产业技术体系项目[沪农科产字(2026)第 9 号]
第一作者: 蒲荣新(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食用菌蛋白制备及构效关系研究。E-mail: 3227924618@qq.com
***通信作者:** 高梦祥(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为微生物发酵技术。E-mail: mgao@yangtzeu.edu.cn
李文(1982—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食用菌精深加工。E-mail: liwen@saas.sh.cn

characteristics of soluble proteins from *Stropharia rugosoannulata*. **Methods** Ultrasound-assisted extraction was employed to prepare soluble protein from *Stropharia rugosoannulata*. The key process parameters-including ultrasonic power density, treatment time, extraction temperature and solid-to-liquid ratio-were optimized using single-factor and response surface methodology. The resulting protein extracts were systematically characterized in terms of amino acid composition (analyzed with an amino acid analyzer), secondary structure (determined by circular dichroism), thermal properties (measured via differential scanning calorimetry) and umami intensity (evaluated through sensory analysis). **Results** After process optimization, the optimal conditions for preparing the soluble protein extract were determined: An ultrasonic power density of 375 W/L, an ultrasonic treatment time of 10 minutes, an ultrasonic extraction temperature of 30 ℃, and a feedstock-to-liquid ratio of 1:30 (g:L). Under these conditions, the protein content in the extract reached (431.20±2.67) mg/g, with essential amino acids accounting for (99.10±0.26) mg/g, and the umami amino acid glutamate accounted for 27.56%. The proportion of α-helix and random coils increased, and the denaturation temperature was 108.06 ℃. Umami evaluation results showed that the 8 mg/mL soluble protein extract exhibited equivalent umami intensity to 2 mg/mL monosodium glutamate. **Conclusion** The research can provide theoretical basis for the development and application of soluble protein products of *Stropharia rugosoannulata.*

KEY WORDS: *Stropharia rugosoannulata*; soluble protein; ultrasonic extraction; physicochemical properties; umami evaluation

0　引　言

大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata*), 又称皱环球盖菇, 属担子菌门、层菌纲、伞菌目、球盖菇科、球盖菇属[1−2], 是一种营养与风味兼备的食用菌。大球盖菇子实体干品中粗蛋白含量为 20%~31%[3], 氨基酸种类齐全, 是开发高蛋白食品和营养风味食品的重要菌菇资源。

超声技术是一种高效环保的物理提取方法, 具有空化效应、热效应和机械效应。超声技术能减少溶剂消耗, 缩短成分提取时间, 有效保留及提升产品的活性和营养价值[4−6]。LI 等[7]采用超声辅助提取大球盖菇活性肽, 获得的降压肽含量达到 11.04%~23.02%, 证明了该技术在促进功能性成分活性肽释放方面的潜力; SUN 等[8]采取超声辅助碱提取花生蛋白, 花生蛋白提取时间缩短了 1.5 h, 体现了其在提高蛋白提取效率上的显著效果; PURDI 等[9]对螺旋藻蛋白进行超声辅助提取研究, 蛋白含量提高至 76.83%, 并显著改善了蛋白的乳化性、稳定性和消化率, 从多方面印证了超声技术对蛋白质提取率及理化特性的综合提升作用。由于食用菌中纤维素含量高, 蛋白和纤维素交联导致蛋白难释放, 提取率较低。利用超声物理场的空化效应和机械效应, 可以有效促进蛋白释放[10], 同时该技术的温和处理特性还有助于保持蛋白质的天然结构完整性和功能活性[11−12]。因此, 本研究利用超声提取技术, 以蛋白含量为评价指标, 优化超声提取大球盖菇可溶性蛋白工艺条件, 并对得到的蛋白提取物中的成分组成和鲜味强度进行评价, 以期为大球盖菇可溶性蛋白开发利用提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

大球盖菇子实体鲜菇(上海国森生物科技有限公司)。

二喹啉甲酸(bicinchoninic acid, BCA)蛋白含量测定试剂盒(苏州梦犀生物医药科技有限公司); 谷氨酸钠(纯度≥98%, 北京索莱宝科技有限公司); 总巯基含量测定试剂盒(北京盒子生工科技有限公司); 氯化钾、氯化银、无水乙醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 酒石酸(纯度 98%, 上海安谱璀世标准技术服务有限公司)。

1.2　仪器与设备

VCX-1500 超声波细胞破碎仪(宁波新芝生物科技有限公司); L-8900-2 全自动氨基酸分析仪(美国日立公司); TG/TDTA7300 差示扫描量热分析仪(日本精工株式会社); Nano ZS90 Zeta 电位分析仪(英国 Malvern 公司); ChirascanV100 圆二色光谱仪[Applied Photophysics Ltd. (APL)公司]; SA402B 电子舌(北京盈盛恒泰科技有限责任公司); SQP 电子天平(精度 0.1 mg, 赛多利斯科学仪器北京有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　超声提取大球盖菇可溶性蛋白

将新鲜大球盖菇清洗后置于 55 ℃烘箱中干燥至恒重, 研磨机粉碎过 60 目筛网备用。设置超声处理功率密度(225、300、375、450、525 W/L), 超声提取时间(5、10、

15、20、25 min), 超声提取温度(20、30、40、50、60 ℃)和料液比(1:15、1:20、1:25、1:30、1:35 g:L)四因素五水平的蛋白提取实验组, 考察各个因素对大球盖菇可溶性蛋白提取的影响。基于单因素结果选择响应面因素及设置水平范围, 响应面 Box-Behnken Design 方法设计实验参数如表 1 所示。各实验组下超声处理样品量均为 1 L。超声提取蛋白样品以 8000 r/min、4 ℃离心 15 min, 收集上清液定容至 1 L。取适量上清液进行蛋白含量分析, 余下样品冷冻干燥后用于氨基酸组成及结构分析。以料液比 1:20 (g:L)、提取温度 30 ℃、提取时间 30 min 的水浴提取样品作为水提对照组。

表 1 响应面实验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experimental

因素	编码	水平		
		–1	0	1
超声功率密度/(W/L)	*A*	300	375	450
超声提取时间/min	*B*	5	10	15
超声提取温度/℃	*C*	20	30	40
料液比(g:L)	*D*	1:25	1:30	1:35

1.3.2 大球盖菇可溶性蛋白含量测定方法

大球盖菇蛋白质含量测定采用 BCA 法。根据试剂盒方法配制工作液, 蛋白样品与试剂盒工作液 60 ℃反应 30 min 后, 于 562 nm 处测定样品吸光值。根据试剂盒方法计算提取物中可溶性蛋白含量。

1.3.3 大球盖菇可溶性蛋白粒径测定方法

通过马尔文激光粒度分析仪进行大球盖菇可溶性蛋白粒径测定。采用磷酸盐缓冲液(pH 7.4)配制 1 mg/mL 大球盖菇可溶性蛋白溶液, 4500 r/min 离心 20 min, 上清液过 0.45 μm 膜, 上机测定。粒度设置范围: 0.1~10000.0 nm, 氦氖激光器波长: 633 nm。蛋白分子粒径以平均粒径值表示。

1.3.4 大球盖菇可溶性蛋白巯基含量测定方法

按照试剂盒方法进行大球盖菇可溶性蛋白巯基含量测定。称取 0.1 g 冻干样品, 加入 1 mL 试剂盒提取液后冰浴匀浆, 10000 r/min、4 ℃离心 10 min。取上清液 30 μL, 加入试剂盒反应液, 于 412 nm 处测定样品吸光值。根据试剂盒方法计算可溶性蛋白中巯基含量。

1.3.5 大球盖菇可溶性蛋白二级结构测定方法

采用圆二色谱仪(circular dichroism spectrometer, CD)对大球盖菇可溶性蛋白的二级结构进行测定。称取 5 mg 冻干样品, 加入 1 mL 纯水溶解后, 4500 r/min 离心 20 min, 上清液过 0.22 μm 膜后上机分析。样品池光径 1 mm, 扫描波长范围 190~260 nm, 扫描速度 500 nm/min, 记录 CD 光谱数据, 计算样品中蛋白不同二级结构的比例。

1.3.6 大球盖菇可溶性蛋白变性温度测定方法

采用差示扫描量热分析仪(differential scanning calorimeter, DSC)进行大球盖菇可溶性蛋白热稳定性测定。称取 10 mg 冻干样品, 溶解于 10 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH 8.0), 密封于铝制坩埚中, 4 ℃冰箱中静置 12 h, 放入差示扫描量热分析仪进行测试。氮气流量为 50 mL/min、压力为 0.1 MPa, 10 ℃恒温 3 min 后, 程序升温至 200 ℃, 升温速率 10 ℃/min, 记录 DSC 曲线, 分析样品变性温度。

1.3.7 大球盖菇可溶性蛋白的氨基酸组成分析

参考高琛等[13]的方法进行大球盖菇可溶性蛋白的氨基酸组成及含量分析。称取 0.1 g 冻干样品, 酸水解后于全自动氨基酸分析仪进行分析。样品水解条件及氨基酸分析仪器设置参数同文献。

1.3.8 大球盖菇可溶性蛋白提取物鲜味评价方法

采用电子舌对大球盖菇可溶性蛋白提取物进行鲜味评价。称取 5 g 冻干样品溶于 500 mL 蒸馏水, 逐级稀释为质量浓度 10、8、6、4、2 mg/mL 的样品溶液, 相同浓度梯度的谷氨酸钠溶液作为鲜味对照。

1.3.9 大球盖菇可溶性蛋白提取物感官评价方法

感官评价参照 CHEN 等[14]方法。感官小组由 11 名经培训的评价员组成, 采用 0~10 分制对谷氨酸钠及样品鲜味强度进行评分。谷氨酸钠质量浓度 2~10 mg/mL 分别匹配到上述鲜味强度评分值后再进行样品鲜味感官评价打分。样品与谷氨酸钠按 1.3.8 节方法配制。实验在(25±1) ℃感官实验室内进行, 样品随机编号, 感官评价员每份样品尝量≥5 mL, 于口中保留 10 s 后吐出, 品评间隔以超纯水漱口并休息 2 min。

1.4 数据处理

采用 SPSS 27 软件分析进行实验检测数据方差分析, Graphpad prim 10 软件进行数据绘图, 所有实验均重复平行 3 次。

2 结果与分析

2.1 大球盖菇可溶性蛋白的超声提取工艺研究结果

由图 1A 可知, 不同超声功率密度(300~525 W/L)处理的大球盖菇提取液中蛋白含量与水提对照组相比, 均具有显著性差异(P<0.05), 且在 300 W/L 超声功率密度提取的样品中, 蛋白含量最高, 达到 14.91 mg/mL。超声可以破坏大球盖菇细胞壁, 加快胞内蛋白溶出, 提高提取液中蛋白含量[15]。CAO 等[16]证实该功率能有效改善香菇蛋白的理化特性。因此, 选择 300 W/L 作为后续超声提取时间筛选的功率密度。

如图 1B 所示, 不同超声时间(5、10、15 min)处理的大球盖菇提取液中蛋白含量均较高, 与对照组相比具有显著性差异(P<0.05)。在超声处理 10 min 时, 大球盖菇提取液中蛋白含量最高。超声空化效应使大球盖菇蛋白在短时

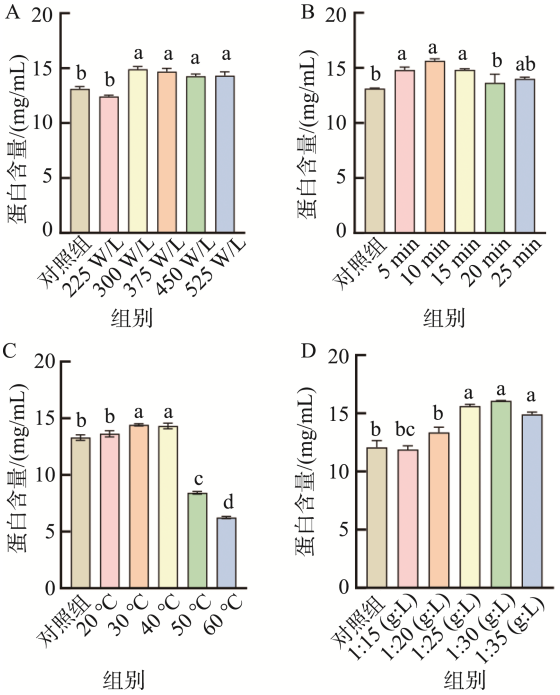
间内快速溶出, 蛋白含量提高明显; 进一步延长超声处理时间, 溶出蛋白发生降解或聚集沉淀, 蛋白含量降低[17]。PATRICIA 等[18]采用探头式超声在 40%振幅、配合 10 min 提取条件下, 实现了 Duckweed 蛋白的最佳释放。该结果与本研究结果具有一致性。因此, 选择超声作用时间 10 min 进行后续超声提取温度水平筛选。

由图 1C 可知, 与对照组相比, 在 20~40 ℃提取温度下, 随着温度的升高, 大球盖菇提取液中可溶性蛋白含量增加, 30 ℃下蛋白含量最高, 达到 14.42 mg/mL。在适宜提取温度范围内, 升温可增强大球盖菇细胞壁通透性, 超声机械作用加速分子运动, 使蛋白质更快向溶剂扩散, 蛋白含量显著提高[19]。进一步增加提取温度, 蛋白分子无序性增加, 聚集可能性上升[19]。上述提取温度对大球盖菇蛋白释放变化规律的影响, 与文献[20]报道的在桑叶蛋白提取中观察到的温度效应一致。因此, 选择 30 ℃进行后续超声提取料液比水平筛选。

如图 1D 图所示, 在料液比 1:15~1:30 (g:L)范围内, 大球盖菇提取液中可溶性蛋白含量随着料液比增加而增加。折算到与对照组同一水平投料量时, 可以发现, 在 1:30 (g:L)料液比下, 可溶性蛋白含量达到最高, 为 16.08 mg/mL。由此说明, 增加菇粉与水溶液接触面积, 有助于蛋白分子溶出[21]。该料液比与白玉菇蛋白提取研究中所确定的料液比条件一致[22]。

2.2　Box-Behnken Design 响应面实验结果

如表 2、图 2 所示, 经过响应面实验分析, 响应面模型预测得到的大球盖菇可溶性蛋白超声提取最优制备工艺条件为: 超声功率密度 375 W/L, 超声提取时间 10 min, 超声提取温度 30 ℃, 料液比 1:30 (g:L)。采用上述工艺条件, 验证实际工艺制备的提取物中蛋白含量与预测蛋白含量之间的差异程度。经验证, 上述工艺条件制备的大球盖菇提取液中实际蛋白含量平均值为(16.39±0.2) mg/mL, 与模型预测理论蛋白含量相对误差为 0.9%。蛋白含量预测值与观测值之间具有一致性, 模型预测最优超声提取可溶性蛋白工艺参数可信。样品经冷冻干燥后测得的可溶性蛋白含量为 (431.2±2.67) mg/g, 较水提样品中蛋白含量提高了 20%。本研究与文献[23]报道的超声辅助碱提大球盖菇蛋白含量基本一致。



注: 不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)。

图 1　不同超声提取因素对大球盖菇可溶性蛋白含量的影响(n=3)

Fig.1　Effects of different ultrasonic extraction factors on soluble protein content of *Stropharia rugosoannulata* (n=3)

2.3　大球盖菇可溶性蛋白结构表征分析结果

由图 3A 可知, 与水提对照组相比, 超声提取的大球盖菇可溶性蛋白粒径分布增加, 为(221.6±2.91) nm, 分散指数为 0.13±0.03。蛋白分子粒径增加, 可能是由于超声处理导致蛋白分子形成了聚集体[24]。采用低功率密度超声提取蛋白时, 空化作用引起的湍流、微流作用, 加速了蛋白分子的颗粒碰撞, 分子在非共价相互作用力驱动下, 形成不稳定的聚集体, 分子粒径增大[25–26]。本研究与文献[27]报道的超声处理蛋清蛋白样品结果具有一致性, 蛋白都呈现粒径增大的趋势。

如图 3B 可知, 与水提对照组相比, 超声提取的大球盖菇可溶性蛋白质中巯基含量有所增加, 达到 0.35 μmol/g。超声提取过程中产生的机械力影响了蛋白分子结构, 导致巯基暴露、亚基解离和二硫键断裂, 引起蛋白质中巯基含量的增加[28–29]。

表 2　响应面实验回归模型及显著性检验结果

Table 2　Response surface experiment regression model and significance test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
回归模型	43.75	14	3.1300	13.56	<0.0001
残基	3.25	14	0.2324		
失拟项	2.99	10	0.2991	5.08	0.0655
纯误差	0.2353	4	0.0588		
总和	46.98	28			

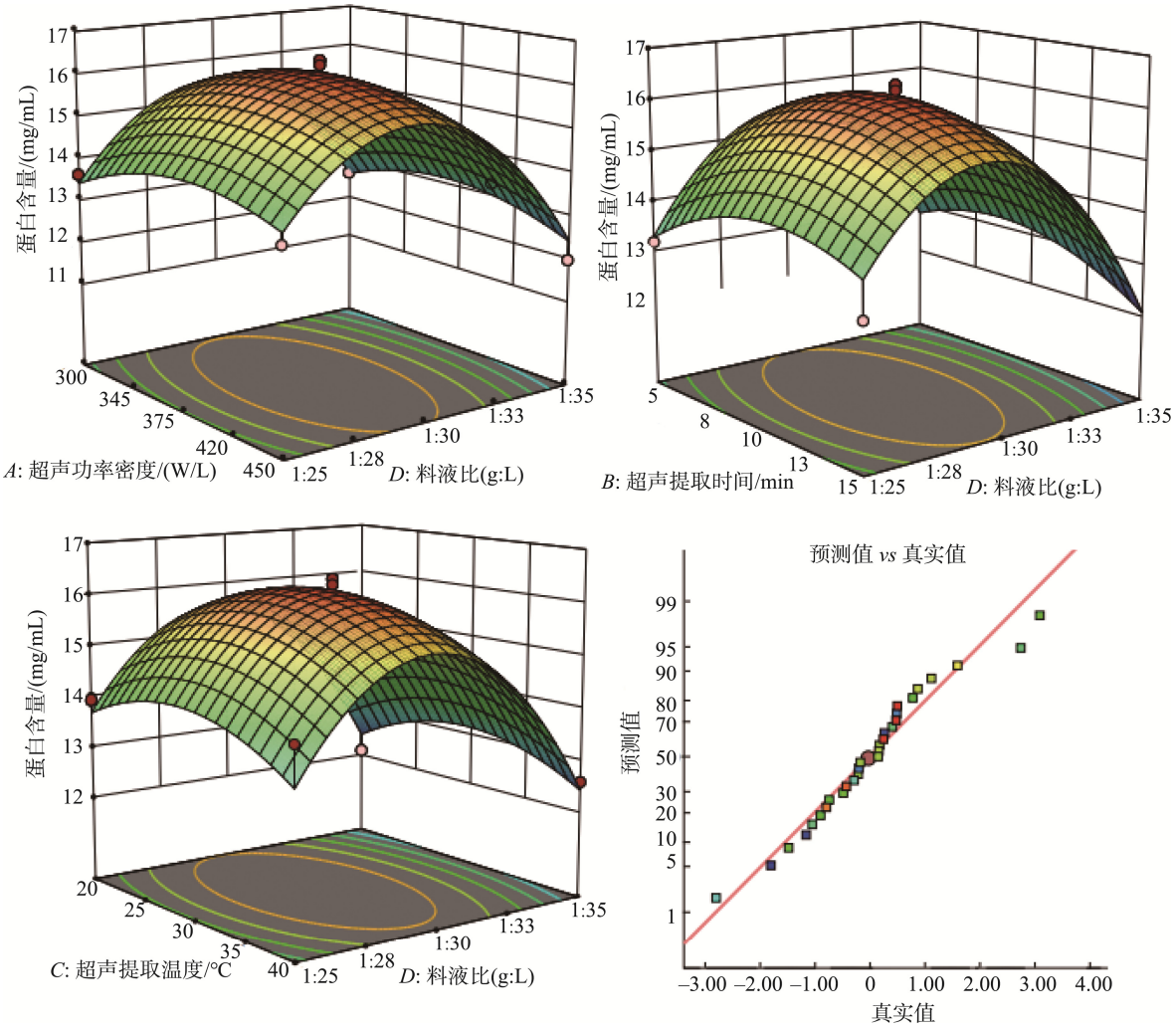


图 2 超声提取大球盖菇可溶性蛋白响应面优化图

Fig.2 Response surface optimization diagram of soluble protein extraction from *Stropharia rugosoannulata* by ultrasound

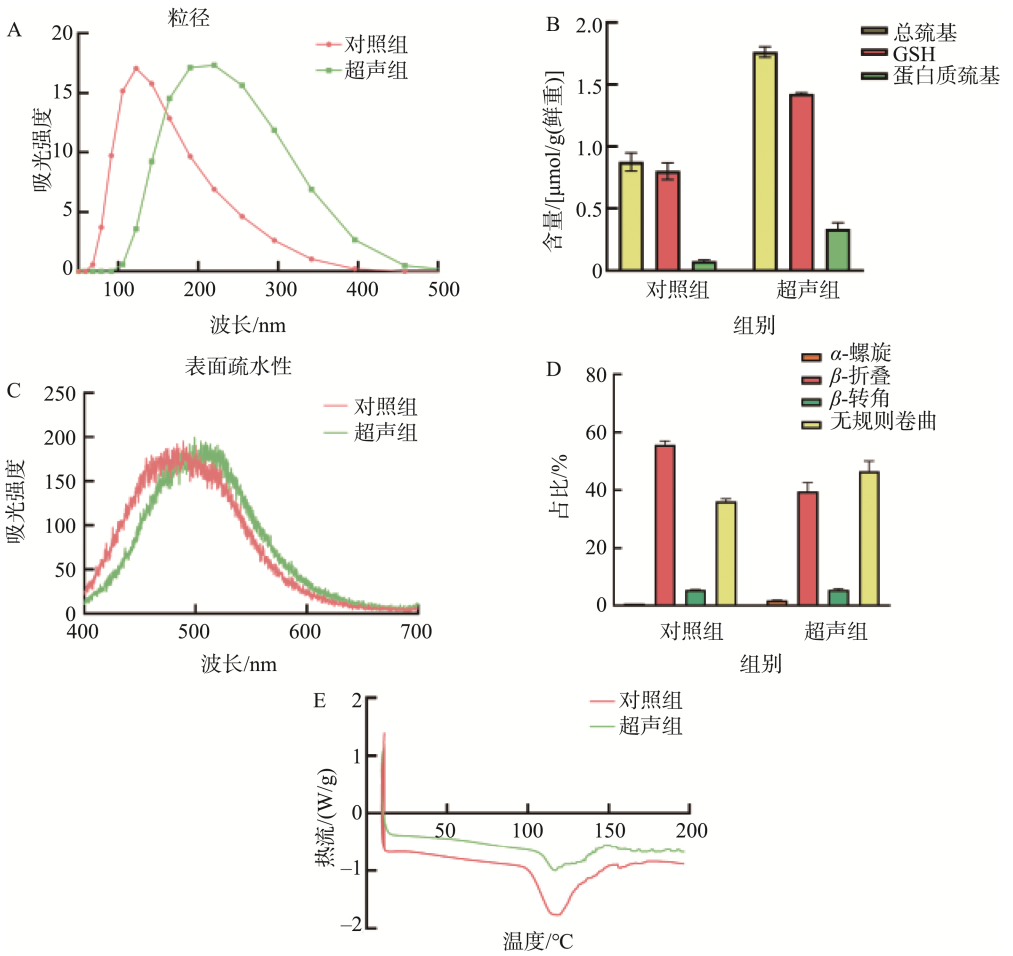
表面疏水性是蛋白质分子与极性水环境接触时，表征表面疏水基团含量的重要指标。表面疏水性是蛋白质折叠的主要驱动力，影响蛋白质的结构和功能[30]。由图 3C 可知，与水提对照组相比，超声提取的大球盖菇可溶性蛋白表面疏水性增大，主要是由于超声空化作用促使蛋白质分子内部的疏水基团和相关区域暴露在分子表面[31−32]。

如图 3D 所示，大球盖菇可溶性蛋白中以 *β*-折叠和无规则卷曲为其主要二级结构，超声提取促使蛋白的 *α*-螺旋结构和无规则卷曲占比增加(占比分别为 1.89%、49.82%)，*β*-折叠占比减少(占比为 42.38%)。超声提取大球盖菇可溶性蛋白的 *α*-螺旋占比较水提样品略有增加，可能与蛋白重聚形成新的 *α*-螺旋结构有关。超声影响了蛋白分子内相互作用力，蛋白质折叠区域展开后导致无序性增加，无规则卷曲占比增加[33]。本研究与文献[34]报道的超声预处理重组乳清蛋白产生的结构影响结果一致，超声处理增加了重组乳清蛋白的 *α*-螺旋占比，减少了 *β*-折叠占比。

在 DSC 图谱中，最大峰对应的温度代表蛋白质变性时的转化温度，变性温度能反映蛋白质的热稳定性及蛋白质分子的聚集程度。如图 3E 所示，水提对照组和超声提取样品组的蛋白质变性温度分别为 100.14 ℃和 108.06 ℃。超声提高了大球盖菇可溶性蛋白的变性温度，使得大球盖菇蛋白变得更加稳定[35]。

2.4 大球盖菇可溶性蛋白氨基酸组成分析结果

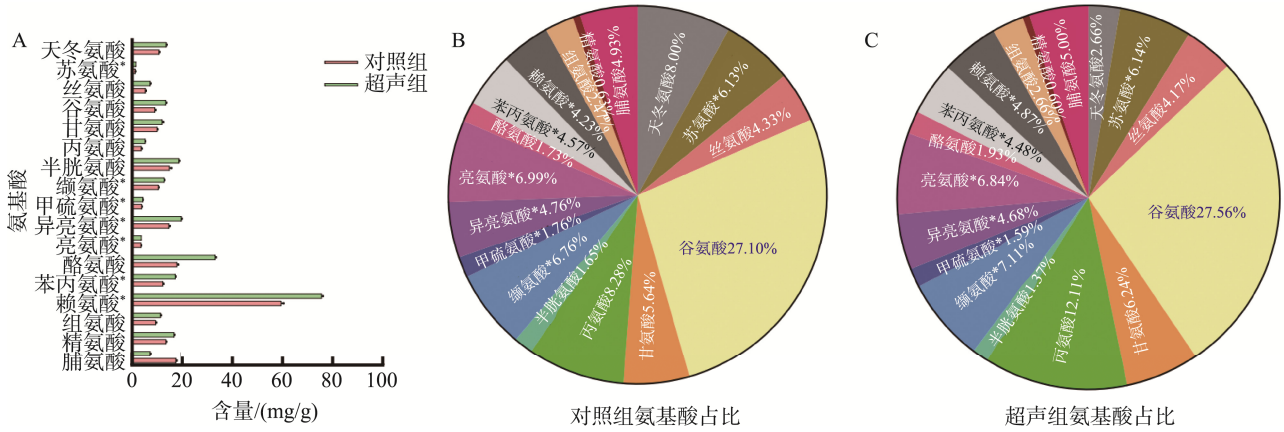
由图 4A 可以看出，大球盖菇可溶性蛋白中检出 17 种氨基酸，超声提取蛋白的水解氨基酸总量为(276.07±0.10) mg/g、必需氨基酸含量为(99.10±0.26) mg/g，均高于水提样品组[分别为(220.02±2.78) mg/g 和(77.30±1.20) mg/g]，氨基酸含量与可溶性蛋白含量结果趋势一致。鲜味氨基酸谷氨酸是大球盖菇可溶性蛋白中的主要氨基酸(图 4B、C)，在超声提取的蛋白样品中，谷氨酸占比达到 27.56%，略高于水提样品中谷氨酸占比。本研究与文献[36–37]报道的大球盖菇蛋白氨基酸结果一致，鲜味氨基酸的占比较高。



注：还原型谷胱甘肽(reduced glutathione, GSH)。

图 3　大球盖菇蛋白质结构表征(n=3)

Fig.3　Protein structure characterization of *Stropharia rugosoannulata* (n=3)



注：*代表必需氨基酸。

图 4　大球盖菇可溶性蛋白的氨基酸组成和含量(n=3)

Fig.4　Amino acid composition and content of soluble protein in *Stropharia rugosoannulata* (n=3)

2.5　大球盖菇可溶性蛋白提取物鲜味评价结果

如表 3 所示，超声提取的大球盖菇可溶性蛋白(4~10 mg/mL)具有鲜味呈味特性，鲜味强度呈现浓度依赖性。感官评价与电子舌评价分析结果一致，在 10 mg/mL 的质量浓度下，蛋白提取物鲜味评价值超过 4。鲜味等效强度分析结果表明，8 mg/mL 蛋白提取物与 2 mg/mL 谷氨酸钠溶液的鲜味强度接近，说明大球盖菇蛋白提取物具备作为天然鲜味剂的开发潜力。

表 3 大球盖菇可溶性蛋白与谷氨酸钠的鲜味强度评价(*n*=3)

Table 3 Evaluation of umami flavor intensity of soluble protein and monosodium glutamate in *Stropharia rugosoannulata* (*n*=3)

组别	质量浓度				
	2 mg/mL	4 mg/mL	6 mg/mL	8 mg/mL	10 mg/mL
谷氨酸钠电子舌响应值	3.64±0.10	5.79±0.20	6.55±0.18	7.08±0.16	7.48±0.13
超声组电子舌响应值	–0.28±0.14	1.67±0.08	3.21±0.04	3.87±0.04	4.28±0.07
谷氨酸钠感官评分	3.11±0.90	4.22±0.83	5.44±0.53	6.44±0.53	7.78±0.67
超声组感官评分	1.67±0.97	2.78±0.67	3.56±0.53	4.33±0.50	4.89±0.60

3 结 论

本研究通过响应面法确定了超声提取大球盖菇可溶性蛋白的最优工艺，即超声功率密度 375 W/L，超声提取时间 10 min，超声提取温度 30 ℃，料液比 1:30 (g:L)。在此条件下，较水提样品组，超声提取物中可溶性蛋白含量提高了 20%。超声处理减少了蛋白的 β-折叠占比，增加了 α-螺旋和无规则卷曲占比。超声提取提升了大球盖菇可溶性蛋白的稳定性，蛋白变性温度达到 108.06 ℃。超声提取的大球盖菇可溶性蛋白氨基酸种类齐全且必需氨基酸含量增加，鲜味氨基酸谷氨酸占比最高。鲜味评价结果显示，8 mg/mL 的大球盖菇蛋白提取物与 2 mg/mL 的谷氨酸钠具有相同的鲜味强度。大球盖菇蛋白可作为开发兼具营养与风味的蛋白产品原料。

参考文献

[1] 黄年来. 大球盖菇的分类地位和特征特性[J]. 食用菌, 1995(6): 11.
HUANG NL. Classification status and characteristics of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Edible Fungi, 1995(6): 11.

[2] 高欢, 包怡红. 大球盖菇保健功能与保鲜加工研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(12): 277–282.
GAO H, BAO YH. Research progress on health functions and preservation processing of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 43(12): 277–282.

[3] 李文, 冯杰, 马海乐, 等. 基于靶向代谢产物分析解析大球盖菇发酵特征性风味物质及其呈味特性[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2736–2744.
LI W, FENG J, MA HL, *et al*. Characteristic flavor compounds and their taste profiles in *Stropharia rugosoannulata* fermentation based on targeted metabolite analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(9): 2736–2744.

[4] 李文, 陈万超, 马海乐, 等. 大球盖菇肽基料超声制备及其食药特性分析[J]. 食用菌学报, 2022, 29(3): 81–94.
LI W, CHEN WC, MA HL, *et al*. Ultrasonic preparation of polypeptide-based substrate for oyster mushroom and analysis of its edible and medicinal properties [J]. Journal of Edible Fungi, 2022, 29(3): 81–94.

[5] ROMANINI EB, RODRIGUES LM, FINGER A, *et al*. Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from BRS violet grape pomace followed by alginate-Ca^{2+} encapsulation [J]. Food Chemistry, 2021(338): 128101.

[6] CHUEADOEM T, AENGLONG C, KITSANAYANYONG L, *et al*. Effect of heat and ultrasonic-assisted extraction on nutritional characteristics, functional properties, and bioactivities of tuna liver protein concentrate powders [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025(22): 102106.

[7] LI W, CHEN WC, MA HL, *et al*. Structural characterization and angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory mechanism of *Stropharia rugosoannulata* mushroom peptides prepared by ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022(88): 106074.

[8] SUN XY, ZHANG W, ZHANG LF, *et al*. Effect of ultrasound-assisted extraction on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2020, 101(3): 1150–1160.

[9] PURDI TS, SETIOWATI AD, NINGRUM A. Ultrasound-assisted extraction of *Spirulina platensis* protein: Physicochemical characteristic and techno-functional properties [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 5474–5486.

[10] AHMED T, SUZAUDDULA M, AKTER K, *et al*. Green technology for fungal protein extraction—A review [J]. Separations, 2024, 11(6): 186.

[11] KUMAR M, DAHUJA A, TIWARI S, *et al*. Recent trends in extraction of plant bioactives using green technologies: A review [J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129431.

[12] SAFWA SM, AHMED T, TALUKDER S, *et al*. Applications of non-thermal technologies in food processing industries—A review [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 100917. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100917

[13] 高琛, 李文, 陈万超, 等. 3 种食用菌蛋白质-多糖复合物的体内外降血脂作用[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 117–127.
GAO C, LI W, CHEN WC, *et al*. Lipid-lowering effects of three edible fungi protein-polysaccharide complexes *in vitro* and *in vivo* [J]. Food Science, 2024, 45(24): 117–127.

[14] CHEN WC, LI W, WU D, *et al*. Characterization of novel umami-active peptides from *Stropharia rugosoannulata* mushroom and *in silico* study on action mechanism [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 104530.

[15] 董红敏, 牛小勇, 沈丽雯, 等. 响应面设计优化川明参蛋白提取工艺[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 276–281.
DONG HM, NIU XY, SHEN LW, *et al*. Optimization of protein extraction process for Sichuan ginseng by optimizing response surface design [J]. Food Industry Science and Technology, 2015, 36(2): 276–281.

[16] CAO Q, DU H. High-intensity ultrasound treatment of shiitake mushroom protein isolate: Effects on physicochemical, structural properties, and functional performance [J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 105: 3463–3473.

[17] 马素敏, 何立超, 李成梁, 等. 猪血红蛋白超声提取工艺响应面优化及超声对其结构的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 184–190, 216.
MA SM, HE LC, LI CL, *et al*. Optimization of ultrasonic extraction process response surface for pig hemoglobin and its structural effects [J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(6): 184–190, 216.

[18] PATRICIA M, SARA C, TULLIA T, *et al*. Optimization of protein extraction from duckweed using different extraction processes [J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(6): 1–22.

[19] 刘小红, 田星慧, 周雨琪, 等. 超声辅助碱法提取豆粕蛋白工艺优化及其功能特性[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(7): 119–123, 133.
LIU XH, TIAN XH, ZHOU YQ, *et al*. Optimization of ultrasound assisted alkaline extraction process for soybean meal protein and its functional characteristics [J]. Grain and Oil, 2023, 36 (7): 119–123, 133

[20] 周一晨, 卫旭彪, 李震震, 等. 桑叶蛋白超声辅助提取新工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 动物营养学报, 2025, 37(4): 2716–2727.
ZHOU YC, WEI XB, LI ZZ, *et al*. Optimization of a new ultrasonic-assisted extraction process for mulberry leaf protein and its antioxidant activity [J]. Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(4): 2716–2727.

[21] 蔡路昀, 刘长虹, 曹爱玲, 等. 巴西松籽蛋白超声辅助超滤提取工艺及功能特性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(10): 70–75.
CAI LY, LIU CH, CAO AIL, *et al*. Study on the ultrasonic-assisted ultrafiltration extraction process and functional characteristics of Brazilian pine seed protein [J]. China Journal of Grain and Oil Science, 2012, 27(10): 70–75.

[22] 郑文祺. 白玉菇蛋白的提取优化与理化性质研究及其 3D 打印应用[D]. 新乡: 河南科技学院, 2023.
ZHENG WQ. Optimization of white tricholoma protein extraction and physicochemical properties research and its 3D printing application [D]. Xinxiang: Henan University of Science and Technology, 2023.

[23] 崔晓瑞, 王丽, 石菲菲, 等. 超声波辅助碱法提取大球盖菇蛋白质工艺的优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(20): 7536–7543.
CUI XR, WANG L, SHI FF, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted alkaline extraction process for protein in *Stropharia rugosoannulata* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(20): 7536–7543.

[24] MITUSINSKA K, RACZYNSKA A, BZOWKA M, *et al*. Applications of water molecules for analysis of macromolecule properties [J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2020, 18: 355–365.

[25] TANG CH, WANG XY, YANG YQ, *et al*. Formation of soluble aggregates from insoluble commercial soy protein isolate by means of ultrasonic treatment and their gelling properties [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 92(4): 432–437.

[26] JIANG LZ, WANG J, LI Y, *et al*. Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black bean protein isolates [J]. Food Research International, 2014(62): 595–601.

[27] ARZENI C, PEREZ O, PILOSOF A. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 308–316.

[28] 王怡婷, 杨恒, 张新笑, 等. 超声波辅助提取鹅肝蛋白质及其物化性质和结构[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(18): 240–246.
WANG YT, YANG H, ZHANG XX, *et al*. Ultrasonically assisted extraction of *Foie gras* protein and its physicochemical properties and structure [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(18): 240–246.

[29] ZHOU CS, MA HL, XIAO JY, *et al*. Pretreatment of defatted wheat germ proteins (by-products of flour mill industry) using ultrasonic horn and bath reactors: Effect on structure and preparation of ACE-inhibitory peptides [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2013, 20(6): 1390–1400.

[30] NOMAN A, WANG YX, ZHANG C, *et al*. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymolysis of hybrid sturgeon (*Huso dauricus×Acipenser schrenckii*) protein and the structural, functional, and antioxidant properties of hydrolysates [J]. LWT, 2023(188): 115421.

[31] 赵康妤, 杨萍, 马俊坤, 等. 超声协同热处理对菜籽蛋白结构及溶解性的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 100–107.
ZHAO KY, YANG P, MA JK, *et al*. Effects of ultrasonic-assisted heat treatment on the structure and solubility of canola protein [J]. Journal of Food Science, 2025, 46(1): 100–107.

[32] 邓楠楠. 不同超声模式对芡实蛋白结构、功能特性及其酶解物抗氧化活性的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
DENG NN. Effects of different ultrasound modes on the structure and functional characteristics of water caltrop protein and the antioxidant activity of its enzymatic hydrolysate [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.

[33] JIN J, MA HL, WANG K, *et al*. Effects of multi-frequency power ultrasound on the enzymolysis and structural characteristics of corn gluten meal [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2015, 24: 55–64.

[34] CHANDRAPALA J, ZISU B, PALMER M, *et al*. Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2010, 18(5): 951–957.

[35] CHAKRAVORTY P, DAS AB. Impact of ultrasound-assisted extraction on functional, thermal, and structural properties of *Parkia timoriana* seed protein [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 5288–5298.

[36] 李淑荣, 王丽, 倪淑君, 等. 大球盖菇不同部位氨基酸含量测定及营养评价[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(8): 95–99.
LI SR, WANG L, NI SJ, *et al*. Amino acid content determination and nutritional evaluation of different parts of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Food Research and Development, 2017, 38(8): 95–99.

[37] 熊碧, 许文远, 杨清清, 等. 13 种常见食用菌的氨基酸组成特征及营养评价[J]. 农产品质量与安全, 2023(3): 15–21.
XIONG B, XU WY, YANG QQ, *et al*. Amino acid composition characteristics and nutritional evaluation of 13 common edible fungi [J]. Agricultural Product Quality and Safety, 2023(3): 15–21.

(责任编辑: 于梦娇　韩晓红)