

五种食用昆虫蛋白的功能特性及其表观特征

苟梦星^{1*}, 李雅婷¹, 赵雅楠¹, 姚欣雨², 康景阳¹, 田丰滔¹

(1. 郑州工程技术学院食品与健康工程学院, 河南郑州 450044) (2. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 全球蛋白需求激增, 传统畜牧业难以满足, 为了推动新型蛋白资源高值化应用, 对五种昆虫蛋白的功能特性进行测定, 并采用凝胶电泳、氨基酸组成、傅里叶红外及扫描电镜等方法进行结构探究。结果表明: 五组样品中家蟋蟀蛋白含量最高为 67.84%; 东亚飞蝗和家蟋蟀的持水性及持油性较高, 蚱蜢若虫起泡性和泡沫稳定性最高, 家蟋蟀乳化性最高, 东亚飞蝗和黄粉虫乳化稳定性最高。凝胶电泳表明东亚飞蝗和家蟋蟀蛋白分子量 (55~130 kDa) 较大, 而蚱蜢若虫 (10~25 kDa) 较小, 分子量大小与持水及持油性呈正相关; 蚱蜢若虫氨基酸总量最高, 且疏水/亲水氨基酸比例较高, 有助于其较强的起泡和泡沫稳定性; 傅里叶红外显示黄粉虫和家蚕蛹在 2 925 cm⁻¹ 和 1 654 cm⁻¹ 有强吸收, 分别归属于 -CH₂ 不对称伸缩振动和酰胺 I 带, 影响了其功能特性; 扫描电镜显示五组样品微观形貌存在差异, 东亚飞蝗蛋白颗粒最小, 更易形成网络结构, 有利于其持水性。昆虫蛋白结构与其功能特性密切相关, 且家蟋蟀和蚱蜢若虫性能最优。

关键词: 食用昆虫; 昆虫蛋白质; 功能特性; 傅里叶红外; 扫描电镜

文章编号: 1673-9078(2026)07-95-103

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0197

Functional Properties and Apparent Characteristics of Five Edible Insect Proteins

GOU Mengxing^{1*}, LI Yating¹, ZHAO Yanan¹, YAO Xinyu², KANG Jingyang¹, TIAN Fengtao¹

(1. School of Food and Health Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China)

(2. College of Grain, Oil, and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Traditional animal husbandry is struggling to meet the surge in global protein demand. To promote the high-value application of novel protein resources, the functional properties of five insect proteins were determined, and their structural characteristics were investigated using sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE), amino acid composition analysis, Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy, and scanning electron microscopy (SEM). Results indicated that among the five samples, *Acheta domesticus* (house cricket) possessed the highest protein content at 67.84%. *Locusta migratoria manilensis* (Oriental migratory locust) and *A. domesticus* proteins exhibited high water-holding capacity (WHC) and oil-holding capacity (OHC). *Cryptotympana atrata* (black cicada) nymph protein showed the highest foaming capacity and foam stability, *A. domesticus* protein exhibited the highest emulsifying capacity, and *L. migratoria manilensis* and *Tenebrio molitor* (mealworm) proteins achieved the highest emulsion stabilities. SDS-PAGE analysis revealed that *L. migratoria manilensis* and *A. domesticus* proteins had relatively high molecular weights (55~130 kDa), whereas *C. atrata* nymph protein had a lower molecular weight (10~25 kDa); moreover, the molecular weight was positively correlated with WHC and OHC. *C. atrata* nymph protein possessed the highest total amino acid content and a relatively high ratio of hydrophobic to hydrophilic amino acids, contributing to their excellent foaming capacities and foam stabilities. FT-IR spectroscopy showed the presence of strong absorption peaks for *T. molitor* protein

引文格式:

苟梦星,李雅婷,赵雅楠,等. 五种食用昆虫蛋白的功能特性及其表观特征 [J]. 现代食品科技, 2026, 42(7): 95-103.

GOU Mengxing, LI Yating, ZHAO Yanan, et al. Functional properties and apparent characteristics of five edible insect proteins [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 95-103.

收稿日期: 2026-02-04; 修回日期: 2026-04-05; 接受日期: 2026-04-10

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (242300420510); 河南省高等学校重点科研项目 (24B550019); 高层次人才校内科研启动基金项目 (20210036)

作者简介: 苟梦星 (1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品新资源及其加工利用, E-mail: gougoumengxing@126.com

and *Bombyx mori* (domestic silk moth) chrysalis protein at 2925 cm^{-1} and 1654 cm^{-1} , respectively. These peaks corresponded to the $-\text{CH}_2$ asymmetric stretching vibration and the amide I band, respectively, influencing their functional properties. SEM revealed differences in micro-morphology across the five samples. Particle size was smallest in *L. migratoria manilensis* protein, increasing the tendency to form network structures and thereby enhancing its WHC. In conclusion, the structural characteristics of insect proteins are closely related to their functional properties, with *A. domesticus* and *C. atrata* nymph proteins demonstrating the most favorable performance.

Key words: edible insect; insect protein; functional properties; Fourier-transform infrared spectroscopy; scanning electron microscopy

当前, 全球人口持续增长导致对动物蛋白的需求大幅上升, 预计到 2050 年, 全球肉类消费量将增长约 75%^[1]。传统畜牧业面临环境与资源的多重压力, 已难以满足未来可持续蛋白供给的需求。联合国粮农组织 (FAO) 在 2023 年的报告中明确指出, 迫切需要构建更具韧性、高效和可持续的粮食系统, 以保障未来的粮食安全与营养供给^[2]。在此背景下, 食用昆虫因其营养价值高、饲养效率高、环境足迹小, 被联合国粮农组织推荐为极具潜力的新型蛋白质来源^[3,4]。然而, 由于饮食文化和消费心理等因素, 昆虫蛋白在食品中的规模化应用仍面临很多问题。现有研究多致力于改善风味、优化加工工艺和创新产品形态, 例如通过微生物发酵或脱臭技术可有效掩盖昆虫蛋白的异味并提升其风味^[5], 优化家蟋蟀的提取工艺以提高其蛋白含量与消化率^[6], 以及昆虫蛋白在 3D 打印领域的应用^[7]。在功能特性与生物活性方面, 近年研究表明昆虫蛋白不仅具备良好的乳化、发泡等功能性质, 还具有降血压、抗糖尿病和抗氧化等生物活性。例如, 虫茶中富含蛋白质、脂肪酸及矿物质, 具有清热解毒、抗菌消炎、抗氧化、抗癌、预防高血压和心脑血管疾病等功效^[8], 黄粉虫蛋白水解物具有较强的血管紧张素转化酶抑制活性^[9]。此外, 白星花金龟蛋白提取物对氧化应激诱导的细胞损伤具有较强保护作用^[1]。虽然昆虫蛋白展现出良好的加工潜力, 但由于不同物种间蛋白质的组成与结构差异显著, 其理化性质与功能表现之间的内在联系仍不明确, 导致产品开发缺乏理论指导。基于此, 本研究选取五种典型食用昆虫——家蟋蟀、家蚕蛹、东亚飞蝗、黄粉虫和蚱蜢若虫, 系统分析其近似组成、蛋白质功能特性及结构特征, 旨在全面评估其作为新型蛋白资源的潜力, 为促进昆虫蛋白在食品工业的高值化应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

实验所用昆虫: 家蟋蟀 (*Acheta domesticus*) 选取

成虫期 (羽化后 3~5 d); 家蚕 (*Bombyx mori*) 的蛹选取化蛹后第 3 天的黄白净蛹; 东亚飞蝗 (*Locusta migratoria manilensis*) 选取 5 龄若虫; 黄粉虫 (*Tenebrio molitor*) 选取老熟幼虫 (化蛹前, 约 10-12 龄); 蚱蜢 (*Cryptotympana atrata*) 若虫选取末龄若虫 (即将出土羽化前)。均购自丢丢生态农场, 位于河南省南阳市平舆县万冢镇牛庄村, 并由吉林农业大学刘学军教授鉴定。实验所用试剂氢氧化钠、无水乙醇、牛血清白蛋白、氯化钠、考马斯亮蓝 G-250、盐酸、磷酸等均购自中国上海, 为分析纯级别; 实验用水为去离子水和双蒸水。

1.2 主要仪器与设备

DHG-9053A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; TG16 高速离心机, 上海卢湘仪离心仪器有限公司; LGJ-10 真空冷冻干燥机, 四环福瑞科仪科技发展有限公司; TU1901 紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; Spectrum 100 傅立叶红外光谱仪, 美国珀金埃尔默股份有限公司; DYCZ-24DN 电泳仪, 北京六一生物科技有限公司; A300 型全自动氨基酸分析仪, 德国曼默博尔公司; Apreo 2 扫描电子显微镜, 赛默飞世尔科技公司。

1.3 昆虫粉制备及近似组成测定

全部昆虫禁食约 24 h 以清除胃肠道内食物残渣并冷冻。解冻后用去离子水清洗, 并置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 热风干燥箱中烘干至恒重。干燥虫体经高速粉碎后制备成昆虫粉, 过 80 目筛后密封备用。

昆虫粉的水分、蛋白质、脂肪及灰分含量, 参照 Zhang 等^[10]描述的方法测定。

1.4 昆虫蛋白提取

昆虫蛋白提取参照 Amarender 等^[11]的方法并稍作修改。昆虫粉与质量分数 0.2% 的 NaOH 溶液按 1:10 (m/V) 比例在室温下混合, 调 pH 值至 11, 室温搅拌 1 h, 5 000 g 离心 15 min。收集上清液,

用 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 调 pH 值至 4.5, 沉淀后 5 000 g 离心 15 min, 蛋白沉淀用蒸馏水洗涤 3 次。提取的蛋白经真空冷冻干燥后, 于 -18°C 保存待用。

1.5 功能特性测定

1.5.1 持水性

参照 Zielińska 等^[12]的方法测定, 将样品 (0.5 g) 分散于 20 mL 蒸馏水中, 磁力搅拌器 $1\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 30 min, 5 000 g 离心 15 min。称量沉淀质量并计算前后质量差。结果以每克样品吸水量表示。

1.5.2 持油性

参照 Zielińska 等^[12]的方法测定, 将样品 (0.5 g) 分散于 10 mL 植物油中, 涡旋混合器振荡 30 s, 5 000 g 离心 15 min。称量沉淀质量并计算质量差。结果以每克样品吸油量表示。

1.5.3 起泡性

参照 Zhang 等^[10]的方法测定, 将 20 mL 质量分数 1% 的蛋白粉溶液高速搅拌 2 min, 立即转移至量筒, 均质后 0 min 和 30 min 读取总体积。起泡性和泡沫稳定性计算公式分别如下:

$$P = \frac{V_0 - V}{V} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_1}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

P —起泡性, % 体积分数;

Q —泡沫稳定性, % 体积分数;

V —搅打前体积, mL;

V_0 —搅打后体积, mL;

V_1 —静置后体积, mL。

1.5.4 乳化性

参照 Yu 等^[13]方法测定, 将样品配制成质量分数 1% 的溶液, 取 15 mL 溶液加入 15 mL 大豆油, $1\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 10 min。样品置于离心管中, 5 000 g 离心 5 min, 读取乳化层体积和溶液总体积。将含乳化液的离心管于 80°C 水浴加热 30 min, 冷却至室温, 5 000 g 离心 5 min, 读取乳化层体积。乳化性和乳化稳定性计算公式如下:

$$M = \frac{V_0}{V} \times 100\% \quad (3)$$

$$N = \frac{V_1}{V_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

M —乳化性, % (体积分数);

N —乳化稳定性, % (体积分数);

V —容器中所有物质的总体积, mL;

V_0 —乳化层所占体积, mL;

V_1 —加热后乳化层的体积, mL。

1.6 蛋白质分子量测定

采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis, SDS-PAGE) 分析五种昆虫蛋白分子量分布^[14]。样品 (5 mg) 与 $4\times$ 缓冲液混合物 100°C 加热 8 min, 取上清液 $10 \mu\text{L}$ 上样。分离胶浓度 12% (质量分数), 浓缩胶浓度 5% (质量分数), 电压为 80 V, 电泳为 4~6 h。

1.7 氨基酸组成测定

样品的氨基酸组成测定参照 Yu 等^[13]方法。采用离子交换色谱法分析冻干昆虫蛋白粉氨基酸组成, 并分别计算五种昆虫蛋白的必需氨基酸含量和疏水性氨基酸含量。

1.8 蛋白质分子特征结构分析

昆虫蛋白傅里叶变换红外光谱 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) 分析采用 Bolat 等^[15]的方法。样品 2 mg 与 200 mg 干燥溴化钾混合压片, 在 $4\,000\sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 范围内用 FT-IR 红外光谱仪扫描。

1.9 蛋白质微观形貌分析

将昆虫蛋白放置于真空泵中, -70°C 干燥 24 h, 得到冷冻干燥粉末, 然后使用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 观察昆虫蛋白冷冻干燥后的表面形态, 在靶材上涂一层导电胶后, 取适量样品置于导电胶上, 然后对其进行喷金处理, 而后放入样品箱中, 在 1 kV 加速电压下对昆虫蛋白的外观形态进行观测, 并拍照记录。

1.10 数据分析

所有实验数据重复三次, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差。采用 SPSS 24 (IBM) 软件, 运用单因素方差分析 (单因素 ANOVA 模型) 方法对数据进行统计分析, 并使用 Tukey 检验确定样本之间的均值差异, 采用 $P < 0.05$ 的显著性水平。在进行单因素方差分析前, 经 K-S 检验证实数据符合正态分布, 并利用 Levene 检验开展方差齐性检验。



图 1 五种昆虫原料及其粉末

Fig.1 Five insects and the grindings

表 1 五种昆虫的近似组成分析 (%)

Table 1 Approximate composition analysis of five insects (%)

昆虫	水分	蛋白质	脂肪	灰分
家蟋蟀	3.12 ± 0.20 ^b	67.84 ± 1.80 ^a	30.98 ± 2.10 ^c	4.60 ± 0.06 ^a
家蚕蛹	2.52 ± 0.16 ^c	17.70 ± 1.35 ^d	36.57 ± 2.33 ^a	3.38 ± 0.08 ^c
东亚飞蝗	5.42 ± 0.20 ^a	56.60 ± 1.06 ^b	33.18 ± 2.16 ^b	3.19 ± 0.12 ^c
黄粉虫	3.18 ± 0.22 ^b	42.62 ± 1.06 ^c	29.66 ± 2.51 ^c	2.95 ± 0.28 ^d
蚱蜢若虫	2.80 ± 0.73 ^c	43.87 ± 1.38 ^c	18.69 ± 0.31 ^d	4.18 ± 0.07 ^b

注：同一列不同字母表示数值存在显著差异 ($P<0.05$)；以上 % 均为质量分数。

2 结果与分析

2.1 近似组成结果分析

对五种昆虫粉的近似组成测定结果表明（表 1），家蟋蟀的蛋白质含量在五种昆虫中最高（质量分数 67.84%），Zielińska 等^[16]对不同品种蟋蟀的研究显示其粗蛋白含量的质量分数为 70.00%；家蚕蛹的脂肪含量最高（质量分数 36.57%），Brogan 等^[17]在研究中测得家蚕蛹的脂肪含量的质量分数为 33.30%；东亚飞蝗的蛋白质（质量分数 56.60%）和脂肪（质量分数 33.18%）含量均相对较高；此外，黄粉虫的灰分含量最低（质量分数 2.95%），蚱蜢若虫的脂肪含量最低（质量分数 18.69%）。

2.2 功能特性结果分析

2.2.1 持水性

五种昆虫蛋白的持水性范围为 1.22~3.65 g·g⁻¹，其中蚱蜢若虫最低，东亚飞蝗最高（表 2）。黄粉虫持水性为 1.84 g·g⁻¹，与 Zhao 等^[18]的报道结果（1.87 g·g⁻¹）接近。不同昆虫蛋白持水性的差异可能源于亲水性氨基酸含量^[4]。本研究中，东亚飞蝗持水性最佳，与其

较高的亲水性氨基酸含量相符^[19]。这些功能特性为其在烘焙及肉制品等需高持水性食品中的应用提供了重要依据。

2.2.2 持油性

持油性是烘焙产品和混合粉配方等替代品在食品中应用的重要衡量指标^[20,21]。五种昆虫蛋白中，家蟋蟀和东亚飞蝗的持油性最高（分别为 3.59 g·g⁻¹ 和 3.55 g·g⁻¹），其次为家蚕蛹和黄粉虫，蚱蜢若虫的持油性最差（1.59 g·g⁻¹）。此外，关于黄粉虫的持油性，本研究的测定结果（2.64 g·g⁻¹）与国外文献报道的 2.33~2.74 g·g⁻¹ 区间高度相符^[12,18]。这种稳定的持油能力表明，黄粉虫蛋白在肉制品或高油乳化食品中具有作为优良脂肪载体的应用潜力。不同样品之间持油性的差异，与蛋白质分子量、密度及疏水性氨基酸组成密切相关^[22,23]。研究还表明持油性也取决于脂肪酸结合的疏水性氨基酸侧链数量，而非仅仅是疏水性氨基酸总数^[18]。

2.2.3 起泡性

起泡性和泡沫稳定性的高低对蛋白原料在食品工业中的应用影响较大。五种昆虫蛋白中，蚱蜢若虫的起泡性和泡沫稳定性最高，分别是体积分数 117.74% 和 99.78%；其次是家蟋蟀，分别是体积分数 98.33%

和 92.57%，而黄粉虫、东亚飞蝗和家蚕蛹相对较低。Zielińska 等^[12]采用相似方法测得的家蟋蟀起泡性和泡沫稳定性分别为体积分数 99% 和 92%，起泡性受到多种因素影响，如蛋白质的构象、表面疏水性、氨基酸残基位置、巯基含量等。有研究表明，当样品中球状蛋白含量较高时，能够降低其包裹气泡的能力，从而导致起泡性较低^[16]。黄粉虫起泡性和泡沫稳定性低，可能是糖含量较高从而削弱了蛋白质的相互作用，进而形成了较弱的界面膜。因此，家蟋蟀和蚱蜢若虫两种蛋白原料，作为极具潜力的新型昆虫蛋白资源，均有望在食品工业中作为发泡剂使用。

2.2.4 乳化性

乳化性反映蛋白质协助溶液体系形成乳液的能力。由实验结果可知，五种昆虫蛋白的乳化性均表现良好，其中家蟋蟀的体积分数为 70.66%，家蚕蛹的体积分数为 68.53%，东亚飞蝗的体积分数为 67.50%，黄粉虫的体积分数为 65.02%，蚱蜢若虫的体积分数为 58.61%。而乳化稳定性为东亚飞蝗和黄粉虫最高，分别为 51.59% 和 51.07%（体积分数），家蚕蛹最低为 37.74%（体积分数）。这一测定结果与 Yu 等^[13]所测得的数据相差较大，特别是在乳化稳定性方面，原因可能是样品前处理的差距和实验方法上的不同而导致。乳化性与样品的蛋白质含量、蛋白质表面两性等因素密切相关，有研究表明，疏水性氨基酸残基可显著影响油水界面乳化层的稳定性^[10]。同时，蛋白样品中含糖也可增加溶液体系粘度进而提高乳化稳定性^[17]。此外，蛋白尺寸的大小对乳化特性也有较大影响^[23]。

2.3 蛋白质分子量测定分析

五种昆虫蛋白的 SDS-PAGE 图谱差异显著（图 2），家蟋蟀的蛋白条带集中在 50~100 kDa 和 10~15 kDa 范围内。据报道，家蟋蟀的蛋白包含分子量为 52.5 kDa 与 50 kDa 的亚基，这为其在 50~100 kDa 区间存在特异性蛋白条带提供了直接证据^[24]。而蚱蜢若虫蛋白条带主要集中在 10~25 kDa 范围，这些小分子蛋白很可能是分布在 8.5~13 kDa 范围的抗冻蛋白，包括血淋巴

蛋白（12 kDa）^[25]。东亚飞蝗在 55~130 kDa 范围内的蛋白条带最宽，说明其蛋白分子量较大，且蛋白水解程度较弱。家蚕蛹在 27 kDa 处有明显的特征蛋白条带，这在其他研究中也观察到类似现象，并证明其为表皮蛋白，是与甲壳素相互作用构成昆虫外骨骼的结构材料^[17]。黄粉虫在 100 kDa 处有明显条带，在黄粉虫的蛋白质组学分析中，不同发育阶段的蛋白质谱存在明显差异，例如黄粉虫蛹期的蛋白质分子量多集中在 10~200 kDa 这一区间^[26]。

结合本研究的结果发现，蛋白质分子量大小与其功能特性密切相关，特别是与持水性和持油性均呈正相关。例如家蟋蟀和东亚飞蝗的分子量较大（55~130 kDa），二者的持水性能（3.18 g·g⁻¹ 和 3.65 g·g⁻¹）和持油性能（3.59 g·g⁻¹ 和 3.55 g·g⁻¹）在五组样品中均为最高；而蚱蜢若虫蛋白质分子量最低为 10~25 kDa，其持水性和持油性均最差（1.22 g·g⁻¹ 和 1.59 g·g⁻¹）。虽然在起泡性与乳化性等界面特性上，较小的蛋白质分子量更具优势^[12]。但这些特性并非仅由分子量决定，还取决于蛋白质表面亲水氨基酸与疏水氨基酸的比例^[27]。在本研究中，蚱蜢若虫极高的起泡性（117.74%）与其较低的分子量分布（10~25 kDa）密切相关，这种较小的分子结构使其在搅打过程中能更有效地构建稳定的气液界面。

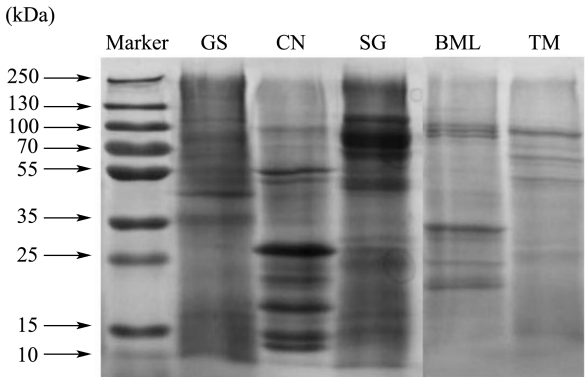


图 2 五种昆虫蛋白的 SDS-PAGE 图谱

Fig.2 SDS-PAGE profiles of five insect proteins

注：Marker：标准品；GS：家蟋蟀；CN：蚱蜢若虫；SG：东亚飞蝗；BML：家蚕蛹；TM：黄粉虫。

表 2 五种昆虫蛋白质的功能特性测定结果

Table 2 Determination results of functional properties of five insect proteins

昆虫	持水性/(g·g ⁻¹)	持油性/(g·g ⁻¹)	起泡性/%	泡沫稳定性/%	乳化性/%	乳化稳定性/%
家蟋蟀	3.18 ± 0.22 ^b	3.59 ± 0.16 ^a	98.33 ± 0.78 ^b	92.57 ± 1.19 ^b	70.66 ± 0.86 ^a	41.36 ± 1.17 ^c
家蚕蛹	2.38 ± 0.14 ^c	2.75 ± 0.10 ^b	23.54 ± 0.43 ^e	29.95 ± 0.53 ^d	68.53 ± 1.32 ^b	37.74 ± 0.82 ^d
东亚飞蝗	3.65 ± 0.09 ^a	3.55 ± 0.08 ^a	38.59 ± 0.97 ^d	26.96 ± 0.43 ^c	67.51 ± 1.08 ^b	51.59 ± 0.83 ^a
黄粉虫	1.84 ± 0.08 ^d	2.64 ± 0.06 ^c	45.56 ± 0.60 ^c	41.03 ± 0.38 ^c	65.03 ± 0.43 ^c	51.07 ± 1.20 ^a
蚱蜢若虫	1.22 ± 0.12 ^e	1.59 ± 0.03 ^d	117.74 ± 1.16 ^a	99.78 ± 0.65 ^a	58.61 ± 0.48 ^d	43.86 ± 0.95 ^b

注：具有不同字母的列中的均值存在显著差异（P<0.05）；以上 % 均为体积分数。

表 3 五种昆虫蛋白的氨基酸组成 (g/100 g)

Table 3 Amino acid composition of five insect proteins (g/100 g)

氨基酸	家蟋蟀	家蚕蛹	东亚飞蝗	黄粉虫	蚱蝉若虫
缬氨酸 #*	4.66 ± 0.03	1.62 ± 0.05	5.22 ± 0.02	5.02 ± 0.03	7.09 ± 0.02
异亮氨酸 #*	4.12 ± 0.19	1.05 ± 0.07	4.47 ± 0.02	4.47 ± 0.05	2.72 ± 0.05
亮氨酸 #*	7.06 ± 0.20	1.76 ± 0.03	7.38 ± 0.04	8.14 ± 0.01	3.90 ± 0.13
苯丙氨酸 #*	3.42 ± 0.05	1.41 ± 0.20	3.55 ± 0.03	3.66 ± 0.05	2.23 ± 0.09
甲硫氨酸 #*	1.42 ± 0.06	0.61 ± 0.10	1.41 ± 0.12	1.02 ± 0.06	0.69 ± 0.07
色氨酸 #*	0.90 ± 0.12	0.38 ± 0.02	1.03 ± 0.10	1.03 ± 0.12	1.03 ± 0.06
苏氨酸 #	3.45 ± 0.03	1.19 ± 0.04	3.63 ± 0.05	3.93 ± 0.01	3.56 ± 0.08
赖氨酸 #	5.38 ± 0.10	2.35 ± 0.03	4.63 ± 0.07	4.51 ± 0.09	3.52 ± 0.02
组氨酸 #	1.65 ± 0.06	1.34 ± 0.06	1.61 ± 0.20	1.62 ± 0.05	4.37 ± 0.04
半胱氨酸	0.61 ± 0.08	0.25 ± 0.08	0.91 ± 0.04	0.76 ± 0.06	0.35 ± 0.01
天冬氨酸	7.94 ± 0.05	2.79 ± 0.13	8.21 ± 0.09	8.92 ± 0.02	6.54 ± 0.04
谷氨酸	12.15 ± 0.11	3.48 ± 0.01	11.52 ± 0.07	13.10 ± 0.14	8.01 ± 0.06
丝氨酸	3.00 ± 0.05	1.08 ± 0.03	3.48 ± 0.10	3.04 ± 0.06	3.45 ± 0.12
甘氨酸	4.13 ± 0.02	5.83 ± 0.09	3.60 ± 0.15	5.09 ± 0.02	4.26 ± 0.05
精氨酸	5.78 ± 0.08	2.77 ± 0.04	4.55 ± 0.04	4.73 ± 0.05	4.37 ± 0.09
酪氨酸	4.00 ± 0.06	1.92 ± 0.06	5.02 ± 0.07	6.81 ± 0.07	12.36 ± 0.03
脯氨酸 *	4.32 ± 0.14	1.91 ± 0.15	4.24 ± 0.06	3.89 ± 0.02	7.80 ± 0.06
丙氨酸 *	6.71 ± 0.08	1.98 ± 0.09	4.89 ± 0.03	5.38 ± 0.04	13.18 ± 0.05
总氨基酸	80.70	33.72	79.35	85.12	89.43
总必需氨基酸	32.06	11.71	32.93	33.40	29.11
总疏水氨基酸	32.61	10.72	32.19	32.61	38.64
总亲水氨基酸	48.09	22.01	47.16	52.51	50.79

注: 1. # 为必需氨基酸 Essential Amino Acids ; 2.* 为疏水氨基酸 Hydrophobic Amino Acids。

2.4 氨基酸组成结果分析

五种昆虫均含有 9 种人体必需氨基酸 (表 3), 除家蚕蛹外, 另外 4 种昆虫的必需氨基酸含量均超过 WHO 推荐标准 (277 mg·g⁻¹)。其中, 黄粉虫 (33.40 g/100 g)、东亚飞蝗 (32.93 g/100 g) 和家蟋蟀 (32.06 g/100 g) 的总必需氨基酸含量, 均处于 Zielińska 等^[16]报道的昆虫蛋白含量范围内。但是家蚕蛹的总必需氨基酸含量 (11.71 g/100 g) 低于其它报道值^[17,25], 可能源于蛋白提取方法和甲壳素含量上的差异。此外, 亮氨酸、缬氨酸和赖氨酸这三种必需氨基酸的含量相对高于其它必需氨基酸, 而在其它种类昆虫中也存在这一规律^[1,25]。总疏水性氨基酸含量与蛋白质的功能特性密切相关, 在五种昆虫样品中, 蚱蝉若虫的总疏水性氨基酸含量最高 (38.64 g/100 g), 家蚕蛹最低 (10.72 g/100 g), 前期的持水性和乳化稳定性数据也证实了这一结论。

在起泡性方面, 蚱蝉若虫总氨基酸含量最高 (89.43 g/100 g), 疏水氨基酸 / 亲水氨基酸比例也最高, 且含有较多小分子量的蛋白分布, 因此其起泡性

(117.74%) 显著高于另四种样品。然而家蚕蛹的总亲水氨基酸含量最低 (22.01 g/100 g), 疏水氨基酸 / 亲水氨基酸比例也较低, 所以其起泡性也最差 (23.54%); 在泡沫稳定性方面, 疏水作用是维持界面膜稳定的关键^[10], 家蟋蟀和蚱蝉若虫的总疏水氨基酸含量较高 (32.61 g/100 g 和 38.64 g/100 g), 因此二者的泡沫稳定性在五种样品中均较高 (92.57% 和 99.78%)。

2.5 蛋白质分子结构特征分析

五种昆虫蛋白的红外光谱在酰胺 I 带 (1 600~1 700 cm⁻¹) 和酰胺 II 带 (1 530 cm⁻¹) 均有明显吸收 (图 3)。此外, 在 1 070 cm⁻¹ 附近, 除家蚕蛹外其它四种昆虫蛋白均有特征吸收, 该吸收峰归属于 P=O 或 P-O-C 对称伸缩振动, 表明样品中含有半乳糖醛酸或葡萄糖醛酸等成分^[21]。在 1 235 cm⁻¹ 附近, 五种样品均有特征吸收, 该吸收峰归属酰胺 III 带 C-O 伸缩振动。在 1 450 cm⁻¹ 附近, 样品吸收峰均不明显, 该特征峰归属于 -CH₃ 和 -CH₂- 的不对称振动。在 2 920 cm⁻¹ 附近, 黄粉虫的特征吸收峰最强, 该吸收峰归属于 -CH₂-

不对称伸缩振荡。据报道,乳清蛋白在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 附近也有特征吸收^[28],此外其它研究也观察到了黄粉虫的特征峰^[10,15]。在 $3\,300\text{ cm}^{-1}$ 附近,样品的吸收峰主要归于 O-H 伸缩振动和 N-H 伸缩振动^[15,28],峰值的强度越大表示该蛋白质的亲水性越强^[29]。总体上,家蚕蛹的特征吸收峰($3\,299$ 、 $1\,401$ 和 $1\,044\text{ cm}^{-1}$)与其它四种昆虫差异显著,可能源于其较高的甲壳素含量对蛋白质结构测定产生的干扰。

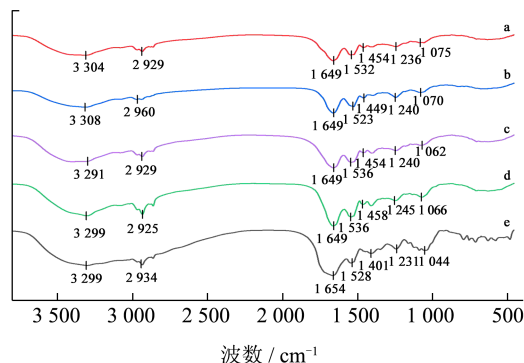


图3 五种昆虫蛋白的 FT-IR 图谱

Fig.3 FT-IR spectra of five insect proteins

注: a: 家蟋蟀; b: 东亚飞蝗; c: 蚱蜢若虫; d: 黄粉虫; e: 家蚕蛹。

虽然黄粉虫和家蚕蛹蛋白质的酰胺 I 带吸收强度都明显高于另三种样品,然而因二者的总氨基酸含量以及亲水氨基酸/疏水氨基酸比例不同,导致了它们在持水性、持油性及起泡性等特性上的差异。这也说明蛋白质的功能特性不仅与分子量大小、蛋白质分子结构有关,还取决于氨基酸的组成及比例,以及蛋白质的颗粒大小和形貌特征。

2.6 蛋白质微观形貌分析

扫描电镜技术可清晰地观察蛋白样品表面或横截面的微观结构^[30]。昆虫蛋白的扫描电镜图像表明,五种昆虫蛋白颗粒横截面的微观形貌存在显著差异(图4)。东亚飞蝗与其它四种昆虫蛋白相比颗粒较小,且表面相对不光滑;家蚕蛹蛋白呈不规则颗粒聚集态,且大小相对居中,表面较光滑,致密的结构也限制了其持水能力;家蟋蟀蛋白颗粒大小相对均匀,表面光滑,有利于其持油性与乳化能力的提升;蚱蜢若虫蛋白颗粒较大,表面呈不规则凸起,有利于稳定气液界面,从而提升起泡性能与泡沫稳定性;黄粉虫蛋白颗粒大小不均匀,表面呈不规则凸起,但整体较光滑。蛋白的微观形貌决定了其宏观功能特性,这些结构特征为不同种类昆虫蛋白在食品工业中的定向应用(如持水、乳化、起泡等)提供了形态学依据。值得注意的是,近年来关于昆虫来源生物大分子的微观结构研究多集

中在几丁质与壳聚糖的提取与表征上。例如, Sáenz 等^[31]利用 SEM 观察美洲大蠊几丁质,发现了其特有的纳米纤维结构; Cha 等^[32]也通过 SEM 证实了黄粉虫等昆虫的壳聚糖在不同处理下呈现出多孔或层状的微观纹理。相比之下,直接针对昆虫蛋白微观形貌及其与功能特性关联的研究相对较少。本研究通过扫描电镜观察发现,东亚飞蝗蛋白质的颗粒堆积最为紧密,且粒径较小,因此增加了蛋白的比表面积,使得更多的极性基团暴露在颗粒表面,从而增强了其结合水分的能力。此外,这种细小且紧密的颗粒之间可能形成了松散的网络状结构,增强了东亚飞蝗的持水性($3.65\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)。因此,本研究对昆虫蛋白理化性质和微观形貌的详细探讨,对于未来深化昆虫蛋白的高值化利用具有重要的参考价值。

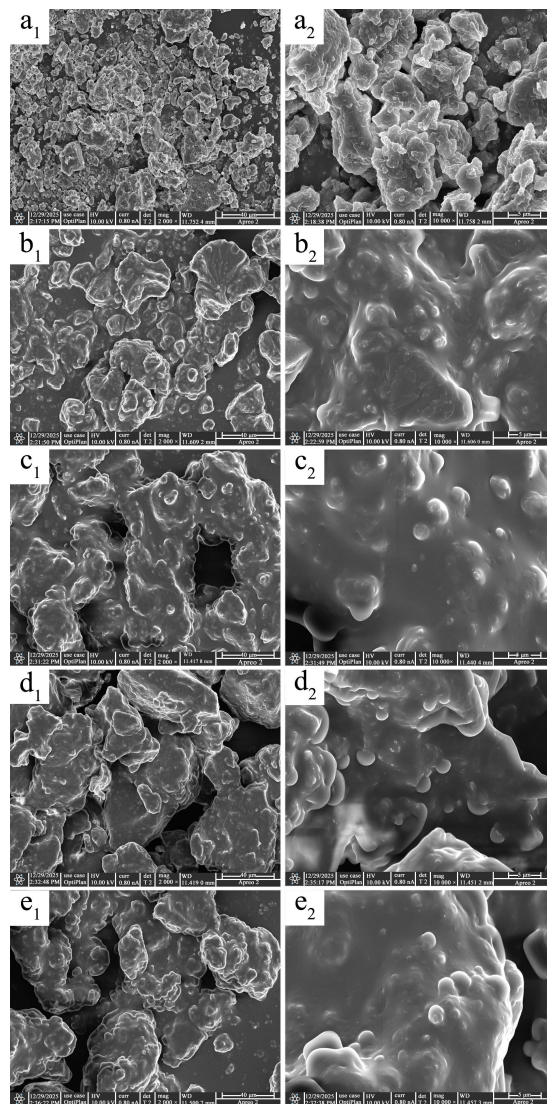


图4 五种昆虫蛋白的扫描电子显微镜图

Fig.4 SEM images of five insect proteins

注: (a) 东亚飞蝗蛋白; (b) 家蚕蛹蛋白; (c) 家蟋蟀蛋白; (d) 蚱蜢若虫蛋白; (e) 黄粉虫蛋白。

3 结论

本研究系统分析了家蟋蟀、家蚕蛹、东亚飞蝗、黄粉虫和蚱蝉若虫五种可食用昆虫蛋白的基础成分、功能特性（持水性、持油性、乳化性及起泡性）及结构特征（分子量、氨基酸组成、二级结构、微观形貌），初步揭示了其功能与结构之间的关联，评估了它们作为新型蛋白资源的潜力。其中家蟋蟀和蚱蝉若虫性能最为突出。在此基础上，下一步计划将深入探究加工工艺优化、蛋白质构效关系、安全性及感官评价，并开展定向产品开发，旨在推动昆虫蛋白在食品工业中的高值化与精准化应用。

参考文献

- [1] LEE J H, KIM T K, KIM Y J, et al. Structural, physicochemical, and immune-enhancing properties of edible insect protein isolates from *Protaetia brevitarsis* larvae [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100722.
- [2] UNICEF. The state of food security and nutrition in the world 2023 [M]. Rome, FAO, 2023.
- [3] MISHYNA M, KEPPLER J K, CHEN J. Techno-functional properties of edible insect proteins and effects of processing [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2021, 56: 101508.
- [4] XU X, FENG M, WEI T, et al. Edible insects as future proteins: nutritional value, functional properties, bioactivities, and safety perspectives [J]. Nutrients, 2025, 17(19): 3165.
- [5] CASTRO-LÓPEZ C, SANTIAGO-LÓPEZ L, VALLEJO-CORDOBA B, et al. An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective [J]. Food Research International, 2020, 137: 109750.
- [6] 徐佳豪,肖珊,胡文锋.黑水虻幼虫蛋白质的超声波辅助碱法提取及营养价值分析[J].现代食品科技,2024,40(12):309-318.
- [7] EZE F N, MUANGRAT R, JIRARATTANARANGSRI W, et al. Towards sustainable production of edible cricket protein concentrates: Impact of different defatting pre-treatments and extraction methods on the structural, physicochemical, and techno-functional properties of *Acheta domesticus* L. proteins [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 322(part3): 146929.
- [8] 李莉,曾祥谓,周永红,等.虫茶营养成分及功能特性研究进展[J].林产化学与工业,2025,45(1):162-172.
- [9] BRAI A, TRIVISANI C I, VAGAGGINI C, et al. Proteins from *Tenebrio molitor*: An interesting functional ingredient and a source of ACE inhibitory peptides [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133409.
- [10] ZHANG F, XU Y, KONG B, et al. Comparative study of two types of pre-extraction treatment (drying or non-drying) on physicochemical, structural and functional properties of extracted insect proteins from *Tenebrio molitor* larvae [J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1570-1580.
- [11] AMARENDER R V, BHARGAVA K, DOSSEY A T, et al. Lipid and protein extraction from edible insects-Crickets (*Gryllidae*) [J]. Lwt, 2020, 125: 109222.
- [12] ZIELIŃSKA E, KARAŚ M, BARANIAK B. Comparison of functional properties of edible insects and protein preparations thereof [J]. Lwt, 2018, 91: 168-174.
- [13] YU X, OH E, KIM Y. A comparative study on the functional properties of mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae and soybean protein isolates and hydrolysates [J]. International Food Research Journal, 2021, 28(4): 816.
- [14] KIM T K, LEE M H, YU M H, et al. Thermal stability and rheological properties of heat-induced gels prepared using edible insect proteins in a model system [J]. Lwt, 2020, 134: 110270.
- [15] BOLAT B, UGUR A E, OZTOP M H, et al. Effects of high hydrostatic pressure assisted degreasing on the technological properties of insect powders obtained from *Acheta domesticus* & *Tenebrio molitor* [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 110359.
- [16] ZIELIŃSKA E, BARANIAK B, KARAŚ M, et al. Selected species of edible insects as a source of nutrient composition [J]. Food Research International, 2015, 77: 460-466.
- [17] BROGAN E N, PARK Y L, MATAK K E, et al. Characterization of protein in cricket (*Acheta domesticus*), locust (*Locusta migratoria*), and silk worm pupae (*Bombyx mori*) insect powders [J]. LWT, 2021, 152: 112314.
- [18] ZHAO X, VÁZQUEZ-GUTIÉRREZ J L, JOHANSSON D P, et al. Yellow mealworm protein for food purposes-extraction and functional properties [J]. PloS One, 2016, 11(2): e0147791.
- [19] 庞锋,高杨超,李育川,等.高蛋白烘焙产品中蛋白原料及其应用挑战的研究进展[J].食品工业科技,2025,46(11):411-421.
- [20] KOWALSKI S, MIKULEC A, MICKOWSKA B, et al. Wheat bread supplementation with various edible insect flours. Influence of chemical composition on nutritional and technological aspects [J]. Lwt, 2022, 159: 113220.
- [21] KIM T K, LEE M H, YONG H I, et al. Effect of interaction between mealworm protein and myofibrillar protein on the rheological properties and thermal stability of the prepared emulsion systems [J]. Foods, 2020, 9(10): 1443.
- [22] YANG C, LI A, GUO T, et al. Novel organic-inorganic composite pea protein silica food-grade aerogel materials: Fabrication, mechanisms, high oil-holding property and curcumin delivery capacity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 273: 132832.
- [23] GRAVEL A, DOYEN A. The use of edible insect proteins in food: Challenges and issues related to their functional properties [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59: 102272.
- [24] 金建雅,王世贵,徐彩娣,等.红褐斑腿蝗卵黄蛋白的分离纯化及性质分析[J].昆虫学报,2008,4:372-378.
- [25] YI L, LAKEMOND C M, SAGIS L M, et al. Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species [J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 3341-3348.
- [26] LAOSAM P, SINSRANOI S, YUE Y, et al. Thermally induced

protein modifications in mealworm: Gastrointestinal digestibility and derived bioactive peptides with antioxidants and ACE/DPP-IV inhibitory activities [J]. Food Research International, 2025, 227(5): 118298.

[27] GOULD J, WOLF B. Interfacial and emulsifying properties of mealworm protein at the oil/water interface [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 57-65.

[28] OZEL B, AYDIN O, GRUNIN L, et al. Physico-chemical changes of composite whey protein hydrogels in simulated gastric fluid conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(36): 9542-9555.

[29] 车前,欧全宏,田雪,等.青稞的傅里叶变换红外光谱鉴别研究[J].光谱学与光谱分析,2020,40(S1):65-66.

[30] 黄文洁,陈中健,谭深源,等.基于扫描电镜技术的甜玉米食味品质鉴别研究[J].广东农业科学,2021,48(11):126-132.

[31] SÁENZ-MENDOZA A I, ORTIZ-RIVERA Y, ZAMUDIO-FLORES P B, et al. Physicochemical, rheological, and biological properties of insect chitosans (*Zophobas morio* and *Tenebrio molitor*) with different molecular weights produced by physical depolymerization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 345: 150616.

[32] CHA J Y, KIM Y J, KIM J H, et al. Edible insect larvae as sustainable sources of chitosan: Influence of species and drying method on functional and structural properties [J]. Food Chemistry: X, 2025: 103133.