



田 铃, 华南农业大学动物科学学院教授、博士生导师, 蚕丝科学系主任。目前主要以鳞翅目家蚕和双翅目黑水虻等为对象, 研究资源昆虫的发育调控及种质资源开发利用。近年以通信作者或第一作者在 *Nature Communications* (2025)、*Waste Management* (2024、2025)、*Environmental Pollution* (2025)、*Autophagy* (2021、2016、2013)、*BMC Biology* (2025)、*Cell Death Discovery* (2021)、*Journal of Agricultural and Food Chemistry* (2022)、*IBMB* (2023、2025) 等 SCI 期刊上发表论文 20 余篇。主持国家自然科学基金面上项目、广东省自然科学基金重点项目等 10 余项。现任中国昆虫学会昆虫发育与遗传专业委员会委员、国家特种经济动物科技创新联盟理事、广东省蚕学会理事、广东省畜禽遗传资源委员会其他动物专业委员会委员、广东省昆虫学会资源昆虫专业委员会委员等。曾被评为中国科学院“青年创新促进会”会员, 2020 年获得广东省自然科学一等奖(排名第三), 2024 年获得广东省蚕学会“科技创新奖”。

## 黑水虻的主要生物学特性及其作为模式生物的开发应用前景

刘 松<sup>1</sup>, 莫倩茹<sup>1</sup>, 王 瑾<sup>1</sup>, 崔 颖<sup>1</sup>, 田 铃<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学动物科学学院, 广州 510640; 2. 广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室, 河池学院, 河池 546300)

**[摘要]** 黑水虻 (*Hermetia illucens* L.) 作为一种全球广泛分布的资源昆虫, 原生于美洲热带区域, 现经自然扩散与人为传播, 已在中国广东省、海南省等多地稳定分布。近年来, 因为黑水虻环境适应性强、资源转化效率高, 在生态与生物资源领域价值突出, 同时在有机废弃物转化和高价值生物产品开发中也展现出显著优势, 使其成为生物资源领域的研究热点。本文首先概述黑水虻的生物学特性与地理分布, 明确其研究基础与资源潜力; 其次介绍其高效稳定的繁殖体系与饲养基质优化技术, 为标准化繁育和生长性能提升提供技术支撑。随后, 进一步系统性综述黑水虻源性生物活性成分的医学与健康应用潜力, 重点聚焦于其幼虫与蛹中提取的抗菌肽、功能性脂肪酸、壳聚糖、蛋白水解肽等活性物质具有广谱抗菌、抗氧化、抗炎, 以及良好的生物相容性等特性。本文综合阐述了黑水虻的生物活性成分在多重耐药菌感染防治、抗炎抗氧化、癌症化学预防、组织修复和痤疮护理的化妆品等领域的应用研究进展。同时, 阐释了黑水虻作为一种新型的无脊椎实验动物模型的优势, 也阐述了其具有高效、可控且富有深度的特点, 探讨了黑水虻在宿主-微生物相互作用、内源病毒进化等基础医学研究中的独特价值, 为连接进化生物学、微生物生态学、免疫学及预防医学等多个学科提供了交叉研究平台。最后, 本文分析了目前黑水虻研究与产业化进程中所面临的技术瓶颈, 并且对未来产品开发策略、未来多学科交叉与临床转化方向进行了评述与展望, 以期为该资源的深度开发和高效利用提供系统性参考。

**[关键词]** 黑水虻; 抗菌肽; 抗炎抗氧化; 实验动物模型

**[中图分类号]** Q95-33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5817(2025)06-0803-07



## Main Biological Characteristics of *Hermetia illucens* L. and Its Potential Applications as a Model Organism

LIU Song<sup>1</sup>, MO Qianru<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, CUI Ying<sup>1</sup>, TIAN Ling<sup>1,2</sup>

(1. College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Sericulture Ecology and Applied Intelligent Technology, Hechi University, Hechi 546300, China)

**[基金项目]** 广西现代蚕桑丝绸协同创新中心开放课题“家蚕核型多角体病毒 BmNPV 对宿主转录调控机制研究”(2023GXCSSC13); 广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室开放课题“黑水虻在蚕桑废弃物资源化利用中的应用研究”(2024GXKLSEAIT02)

**[第一作者]** 刘 松(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 可食用蛋白昆虫。E-mail: 20243139061@stu.scau.edu.cn

**[通信作者]** 田 铃(1980—), 女, 博士, 教授, 研究方向: 资源昆虫开发与利用。E-mail: tianling@scau.edu.cn. ORCID: 0000-0002-6670-3062

Correspondence to: TIAN Ling (ORCID: 0000-0002-6670-3062), E-mail: tianling@scau.edu.cn

**[ABSTRACT]** The black soldier fly (*Hermetia illucens* L.), a globally distributed resource insect native to the tropical regions of the Americas, has become stably established in several regions of China, such as Guangdong and Hainan Provinces, through both natural dispersal and human-mediated introduction. In recent years, owing to its strong environmental adaptability, high resource conversion efficiency, and prominent value in ecology and biological resources, as well as its remarkable advantages in organic waste conversion and high-value bioproduct development, it has emerged as a research hotspot in the field of biological resources. This paper first outlines the biological characteristics and geographical distribution of *Hermetia illucens* L., clarifying its research basis and resource potential. Subsequently, its efficient and stable breeding system and rearing substrate optimization techniques are introduced, which provide technical support for standardized breeding and growth performance improvement. Further, this paper systematically reviews the medical and health application potential of bioactive components derived from *Hermetia illucens* L., with a focus on active substances extracted from its larvae and pupae, such as antimicrobial peptides, functional fatty acids, chitosan, and protein hydrolysates, which exhibit broad-spectrum antibacterial, antioxidant, anti-inflammatory, and good biocompatibility. It comprehensively elaborates on the application research progress on the application of these bioactive components of *Hermetia illucens* L. in fields such as prevention and treatment of multidrug-resistant bacterial infections, anti-inflammatory and antioxidant effects, cancer chemoprevention, tissue repair, and cosmeceuticals for acne care. Moreover, this paper elucidates the advantages of *Hermetia illucens* L. as a novel invertebrate laboratory animal model, highlighting its high productivity, controllable growth patterns, and suitability for in-depth individual research. It also explores its unique value in fundamental medical research, such as host-microbe interactions and endogenous virus evolution, providing an interdisciplinary research platform that bridges evolutionary biology, microbial ecology, immunology, and preventive medicine. Finally, the paper analyzes the technical bottlenecks faced in the current research and industrialization process of *Hermetia illucens* L., and reviews and prospects product development strategies, interdisciplinary integration, and clinical translation directions, aiming to offer a systematic reference for the in-depth development and efficient utilization of this resource.

**[Key words]** *Hermetia illucens* L.; Antimicrobial peptides; Anti-inflammatory and antioxidant; Laboratory animal model

黑水虻 (*Hermetia illucens* L.) 属双翅目水虻科扁角水虻属, 作为一种完全变态昆虫, 其生命周期包括卵、幼虫、蛹和成虫4个阶段 (图1)。分子进化研究表明, 黑水虻的原生区域为中美洲和南美洲北部, 后通过自然扩散与人为传播 (如航运活动), 逐渐分布于南北纬40°之间的热带、亚热带及温带地区<sup>[1]</sup>。目前, 黑水虻在中国广东、海南、云南等多个省份均有分布<sup>[2]</sup>。黑水虻主要以有机废弃物为食, 幼虫阶段表现出极强的生物学优势: 食性广泛 (可处理餐厨垃圾、畜禽粪便等多种有机废弃物)、转化效率高 (干物质转化率可达40%~60%)、抗逆性强 (耐受pH值为4~10的环境)<sup>[3]</sup>。从营养学角度分析, 黑水虻幼虫 (black soldier fly larvae, BSFL) 富含优质蛋白质和脂肪 (分

别占干重的42%~61%和7%~39%), 干物质中蛋白质含量高达40%~45%, 其氨基酸组成与鱼粉相似, 必需氨基酸含量均衡, 尤其是赖氨酸和亮氨酸含量突出, 因此可替代豆粕、鱼粉, 有助于缓解饲料蛋白短缺的压力<sup>[4-5]</sup>。此外, 黑水虻产业的价值也在不断向高附加值领域延伸。其幼虫体内富含的抗菌肽、月桂酸、甲壳素等生物活性物质, 在生物医药领域展现出抗炎、抗菌、抗凝血和镇痛等多种药理活性<sup>[6]</sup>, 为新型功能性保健品、医用材料和药物开发提供了原料, 提升了该产业的潜在经济效益和市场前景。

从全球趋势来看, 中国的黑水虻养殖规模逐渐扩大, 其中在饲料领域、环保废弃物处理领域、生物有机肥、生物医药等生物应用领域的市场规模有望持续

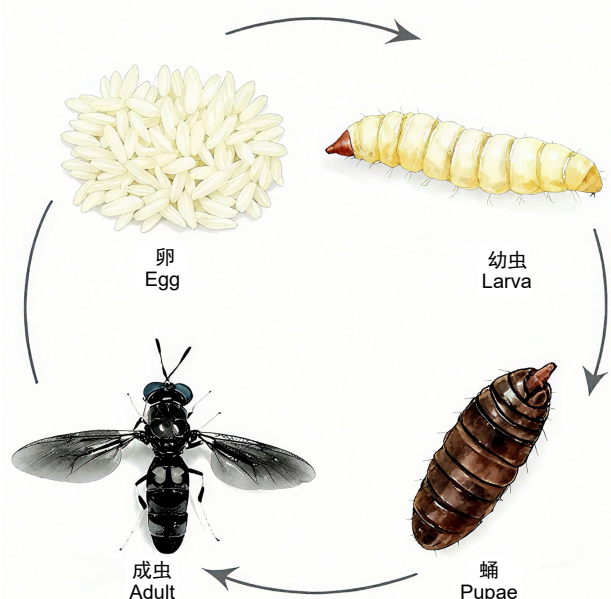


图1 黑水虻不同虫态示意图

Figure 1 Diagram of different life stages of *Hermetia illucens* L.

增长, 并成为全球市场的重要组成部分。然而, 在这一巨大发展潜力的背后, 中国畜禽养殖业面临双重挑战。一方面, 养殖规模的持续扩大导致饲料蛋白供需矛盾日益突出, 数据显示, 中国蛋白饲料缺口持续超过 2 000 万吨, 其中 70% 的豆粕长期依赖于进口, 对国家粮食安全构成压力<sup>[7]</sup>; 另一方面, 农业废弃物资源化利用的水平亟待提升, 虽然全国畜禽粪污综合利用率已突破 80%, 但仍存在区域发展不均衡、技术转化效率不高等问题<sup>[8]</sup>。黑水虻的生物转化特性为应对上述挑战提供了极具前景的解决方案。在此背景下, 黑水虻生物转化技术的规模化应用, 成为破解环境对有机废弃物资源化的约束、推动农业绿色转型的关键路径, 同时开辟了黑水虻在医药健康领域应用的新赛道, 也为产业可持续发展注入了新的动力。

## 1 面向医药利用领域的黑水虻物质生产与安全保障基础

### 1.1 以稳定生产为导向的环境与繁殖调控

温度与湿度是保障黑水虻正常生长发育与繁殖的基础环境因子, 也是保障生物质稳定供应和初始生物安全的关键因素。黑水虻在不同发育阶段对温度的需求存在显著差异, 幼虫期最适生长温度区间为 27~30 °C, 在此区间内, 其新陈代谢旺盛, 生长速率与物质转化效率均达到峰值<sup>[3]</sup>。Ikram 等<sup>[9]</sup> 研究证实, 在

(27±2) °C 的温度条件下, 黑水虻成虫繁殖性能最优: 单雌产卵量可达 923 个。湿度管理则需结合特定发育阶段的生理需求, 进行精准控制。虫卵孵化期要求维持相对湿度 (relative humidity, RH) 在 70%~75%, 此时虫卵孵化率可稳定保持在 85% 以上; 若环境湿度过低 (RH<60%), 易导致虫卵的干瘪率上升至 30%; 环境湿度过高 (RH>80%) 则极易滋生霉菌, 构成传播病原微生物的潜在风险<sup>[10]</sup>。De Smet 等<sup>[11]</sup> 通过实验证实, 高湿环境 (如 RH 为 60%) 会加剧沙门氏菌 (*Salmonella* spp.) 等病原菌通过气溶胶传播, 尤其在含水量高的基质中风险更为突出。因此, 湿度管理应兼顾发育需求与卫生防控, 实现“促生”与“控险”的平衡。

以上研究为黑水虻的高效繁育提供了可靠方案。从医学视角看, 该体系通过精准环境控制有效抑制了沙门氏菌等病原微生物的传播风险, 保障了饲料蛋白的生物安全。黑水虻及其共生微生物可作为未来新型抗菌肽和免疫活性物质的宝贵资源库, 同时在病原传播动力学研究方面, 具备成为理想实验模型的潜力。该技术体系也为实现“One Health”理念下食品安全与公共卫生的协同保障, 提供了新的创新路径。

### 1.2 医用原料导向的饲养基质优化技术

基质的理化特性直接影响幼虫的生长性能与转化效率。Memon 等<sup>[12]</sup> 的研究表明, 将微生物发酵蚕沙废弃物后的产物作为基质饲喂 BSFL, 发现幼虫的生长性能和转化效率得到显著提升。虽然该研究未直接与其他不同基质的营养成分进行对比, 但其研究逻辑 (优化基质可提升生长性能) 与基质类型对幼虫营养产生影响的观点一致。更为深入的研究表明, 基质不仅通过营养成分直接影响幼虫, 还通过改变其肠道微生物群落的功能, 进而间接调控幼虫的生长性能。Ijdema 等<sup>[13]</sup> 利用宏基因组测序技术对比发现, 饲喂人工模拟超市食物废弃物的幼虫, 其肠道微生物中与山梨醇代谢相关的基因显著富集, 这与该基质中山梨醇含量较高有关; 而饲喂鸡饲料的幼虫肠道中, 与氨基酸和碳水化合物代谢相关的微生物功能更为活跃。此外, 该研究还发现幼虫的生长性能与肠道中特定微生物基因组 (如潜在的益生菌 *Scrofmicrobium* sp.) 的丰度呈正相关<sup>[13]</sup>。

综上, 在实际养殖中可依据废弃物特性与产品目标进行基质配伍与预处理, 并且需要关注基质对幼虫肠道微生态的塑造作用, 同时也提示市场不可忽视黑水虻在经济、医学等领域的巨大潜力。

## 2 黑水虻在生物医学领域的应用潜力与实验价值

### 2.1 功能活性成分发现及其医学用途

不同发育阶段的黑水虻（幼虫、预蛹、成虫）均富含抗菌肽、功能性油脂及甲壳素/壳聚糖等生物活性成分。这些成分具有广谱抗菌、抗炎、抗氧化及生物相容性等特性，已成为生物医用领域的研究热点，为新型药物、医用材料及化妆品研发提供了天然资源支撑。目前，相关研究已从单一活性成分分离，拓展至复合体系构建与多场景应用验证，在多重耐药菌感染治疗、创面修复及环境消毒等领域取得显著进展<sup>[14-17]</sup>。

#### 2.1.1 游离脂肪酸多重耐药菌的抑制作用

Mohamed等<sup>[17]</sup>系统揭示了BSFL脂肪中的游离脂肪酸（free fatty acid, FFA）对多重耐药革兰氏阴性菌——高黏液性肺炎克雷伯菌（*hypermucoviscous Klebsiella pneumoniae*）的强效杀菌作用。采用酸性水-甲醇连续提取法获得的FFA提取物对临床分离和标准菌株均表现出显著的浓度依赖性抑菌活性，而受试菌株未对其产生耐药性，表明其具有规避传统抗生素耐药性发展的潜力。细胞毒性试验证实，获得的FFA提取物对人胚肾细胞的半数抑制浓度为266.1  $\mu\text{g/mL}$ ，远高于其杀菌浓度，且显示出良好的生物安全性<sup>[17]</sup>。气相色谱-质谱联用技术（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）分析显示，BSFL的FFA提取物中的主要抗菌成分包括饱和脂肪酸（如月桂酸、棕榈酸）和不饱和脂肪酸（如顺式油酸、棕榈油酸）。该研究为开发基于黑水虻脂肪酸不易诱导耐药性的新型抗菌制剂提供了理论依据和实验支撑<sup>[17]</sup>。

除了幼虫自身合成的抗菌脂质，黑水虻肠道微生物也是活性抗菌物质的重要来源。Ijdema等<sup>[13]</sup>通过宏基因组分析发现，黑水虻肠道微生物中存在编码多种抗菌肽（如细菌素 gassericin E/T）和具有广谱抗菌活性的非核糖体肽（如 $\epsilon$ -聚赖氨酸）的生物合成基因簇。这些基因簇主要存在于 *Lactiplantibacillus*、*Corynebacterium* 等菌属中，其丰度受饲养基质影响。例如，上述提到的2个编码非核糖体肽合成酶的基因簇家族、1个编码聚酮合酶的基因簇家族和2个归类为“其他”的基因簇家族，均含有在鸡饲料饲养的幼虫宏基因组中显著富集的生物合成基因簇，在饲喂鸡饲料

的幼虫肠道中显著富集<sup>[13]</sup>；同时，也揭示了黑水虻肠道是一个蕴藏着丰富微生物源抗菌物质的“活性库”，为基于“虫菌共生”体系开发新型抗菌剂提供了新思路 and 基因资源。

#### 2.1.2 壳聚糖-金属纳米颗粒复合体的构建与协同效应

黑水虻蛹壳壳聚糖（chitosan from *Hermetia illucens* pupal exuviae, CsE）在生物活性材料领域展现出良好的应用前景。Lagat等<sup>[14]</sup>比较了化学法与生物法获得的CsE的效能，并系统评估了其抗菌活性。研究发现，生物法提取的壳聚糖对大肠杆菌（*Escherichia coli*, *E.coli*）、金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）、铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*）、枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）及白念珠菌（*Candida albicans*）均表现出显著的浓度依赖性抑制效应，尤其在5%浓度下对白念珠菌的抑菌效果最佳，显示出强大的抗真菌潜力<sup>[14]</sup>。Marsico等<sup>[18]</sup>采用激光液相烧蚀法（laser ablation in liquids），在无需化学还原剂的条件下，成功在CsE溶液中合成了银纳米颗粒（silver nanoparticles, AgNPs）和铜纳米颗粒（copper nanoparticles）。该复合材料对 *E.coli* 和黄色微球菌（*Micrococcus flavus*）均表现出强效抗菌活性<sup>[18]</sup>。值得注意的是，CsE与AgNPs复合后表现出比商业壳聚糖（chitosan）更优异的抗菌效果，表明其具有更好的生物相容性与协同抗菌潜力。然而，该研究还发现，尽管铜基复合材料在液态中表现出优异的抗菌性，但在成膜后其抗菌活性显著下降，提示其在固态应用中的局限性<sup>[18]</sup>。

总之，CsE不仅具备广谱抑菌能力，其作为绿色纳米材料载体更具结构适配性与协同增强效应。未来可重点优化CsE与金属纳米颗粒的复合工艺，提升其在固态条件下的抗菌稳定性，推动其在食品包装、生物医用涂层等领域的应用。

#### 2.1.3 在药妆品领域的应用潜力

近年来，黑水虻在化妆与药妆品领域的应用潜力逐渐被发掘。Lai-Foenander等<sup>[16]</sup>系统表述了BSFL提取物及其活性成分（如抗菌肽、月桂酸、抗氧化肽等）在皮肤护理中的多重生物活性，包括抗菌、抗氧化、抗炎和促进伤口愈合等作用。该研究表明，黑水虻提取物对多种皮肤病原菌（如痤疮丙酸杆菌、金黄色葡萄球菌）具有显著抑制效果，并能通过清除自由基、抑制炎症因子〔如肿瘤坏死因子- $\alpha$ 、白细胞介素（interleukin, IL）-1 $\beta$ 〕表达等方式缓解皮肤氧化应激

与炎症反应。此外,黑水虻源性成分(如withaferin A、表没食子儿茶素等植物同源化合物)还显示出抗光老化和皮肤美白的潜力<sup>[16]</sup>。这提示黑水虻成分可实现“防治一体”的皮肤健康管理,尤其适用于开发痤疮护理和抗敏修复类产品。该研究为黑水虻在高附加值化妆品原料开发中的应用提供了科学依据,拓展了其资源化利用路径。

更为重要的是,BSFL活性成分分子作用机制正在被逐步阐明。Riolo等<sup>[19]</sup>最新进行的体外细胞实验表明,黑水虻幼虫蛋白水解物能有效抑制脂多糖诱导的炎症反应和氧化应激。在小鼠成纤维细胞(L-929)模型中,该水解物通过激活关键的抗氧化转录因子(nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2),上调超氧化物歧化酶、血红素氧合酶-1等抗氧化基因的表达,同时抑制促炎转录因子(nuclear factor- $\kappa$ B, NF- $\kappa$ B)的核转位,从而下调肿瘤坏死因子- $\alpha$ 、IL-6等关键炎症介质的产生<sup>[19]</sup>。Praseatsook等<sup>[20]</sup>进一步的研究拓展了其生物活性谱,发现黑水虻幼虫蛋白经Alcalase酶解获得的低分子量肽段,不仅表现出优异的抗氧化活性,还在体外模型中显示出显著的抗炎、抗诱变及抗结肠癌细胞增殖作用,其机制涉及调控S期激酶相关蛋白2/细胞周期蛋白依赖性激酶抑制剂p21基因/细胞周期蛋白D1信号通路(S-phase kinase-associated protein 2/cyclin-dependent kinase inhibitor p21/cyclin D1, SKP2/p21/cyclin D1)细胞周期通路。这一系列发现,从细胞信号通路层面,为黑水虻源性成分在抗炎、抗氧化及皮肤修护类化妆品中的应用,提供了坚实的科学依据,明确了其通过调控Nrf2/NF- $\kappa$ B轴发挥“防治一体”功能的分子基础。

## 2.2 作为实验动物模型在医学研究中的独特价值

黑水虻作为一种生命周期短、易于实验室规模化饲养且具备清晰基因组背景的无脊椎动物,为研究宿主-微生物(包括病原体)相互作用、免疫应答机制以及进化医学等基础生物学问题,提供了一个高效、可控且富有深度的模型系统。

### 2.2.1 作为宿主-病毒长期协同进化研究的“活化石”模型

黑水虻基因组中蕴含着丰富的内源病毒元件(endogenous viral elements, EVEs),这些序列是远古病毒整合到宿主基因组后遗留的分子化石,为探究宿主与病毒的协同进化历程提供了独特的研究视角。

Pienaar等<sup>[21]</sup>的系统性研究发现,黑水虻基因组中稳定整合了来自Totiviridae、Parvoviridae、Partitiviridae、Rhabdoviridae及Xinmoviridae等多个病毒科EVEs。更为重要的是,该研究在同一物种中鉴定出一种目前正在传播的外源托蒂病毒(Hermetia illucens toti-like virus 1, HiTV1),且其基因组与内源性Totivirus属内源性病毒元件T1型(Totivirus-derived endogenous viral element T1, TotiEVE T1)高度同源<sup>[21]</sup>。在某些感染HiTV1的个体中,TotiEVE T1甚至能表达出小分子转录本。

### 2.2.2 作为新型食品与医药原料的免疫安全评估模型

黑水虻作为潜在的新型食品与生物医药原料,其安全性评价至关重要,尤其是在免疫毒理和致敏性方面。由于黑水虻自身可能含有复杂的蛋白质和其他生物活性成分,需要一套严谨的方法评估其引发异常免疫反应(如过敏)的风险。在此背景下,黑水虻也成了一套标准化免疫安全评估范式中的研究对象。Trebukh等<sup>[22]</sup>采用国际认可的、常用于评估转基因食品过敏原潜力的标准方案,系统研究了黑水虻幼虫生物活性成分对大鼠免疫状态的影响;还在大鼠中建立了诱导性全身过敏反应模型,并扩展了评估指标,不仅监测了过敏性休克反应的严重程度,还全面分析了包括IL-4、IL-10、IL-13在内的细胞因子谱、特异性免疫球蛋白的动态变化,并对胸腺、脾脏和肠道派伊尔氏结等免疫器官进行了组织病理学检查。研究结果表明,黑水虻幼虫生物活性成分并未引起显著的致敏反应或免疫器官的病理改变,也未影响大鼠对模型抗原(卵清蛋白)的免疫应答基线。因此,从免疫学角度证实了黑水虻幼虫生物活性成分作为新型蛋白来源的安全性<sup>[22]</sup>。这项研究不仅为黑水虻产品的市场准入提供了关键的安全数据,更重要的是,它验证并示范了一套适用于新型昆虫源食品/原料的综合免疫安全评估体系。该体系整合了行为学观察、体液与细胞免疫指标检测以及组织形态学分析,为未来评估其他新型昆虫、微生物或植物蛋白等创新原料的致敏风险提供了一个科学、严谨的实验模型框架。

综上,将黑水虻系统性地开发为一类新型的无脊椎实验动物模型具有重要的科学价值。该模型突破了传统应用的界限,为连接进化生物学、微生物生态学、免疫学及预防医学等多个学科提供了交叉研究平台。

### 3 黑水虻在生物医药研究领域的产业发展与展望

黑水虻在生物医学领域展现出独特价值。例如,其幼虫脂肪中的游离脂肪酸(如月桂酸)对多重耐药菌具有强效杀菌作用,通过破坏细菌外膜完整性实现杀菌效果且不易诱导耐药性;从蛹壳中提取的壳聚糖与金属纳米颗粒复合后表现出协同抗菌效应,为新型抗菌材料开发提供了新思路;黑水虻源性成分还具有调节肠道健康、增强胰岛素敏感性以及缓解皮肤炎症和氧化应激的作用,显示出其在代谢性疾病管理、皮肤药妆品和功能性食品添加剂领域的应用前景。

未来,黑水虻的研究与产业发展应该更加注重深度和广度的协同推进。在科学层面,亟需深化黑水虻活性成分的作用机制研究,综合利用多组学、结构生物学及分子模拟等手段,系统阐明其免疫调节、代谢干预和组织修复的分子靶点与通路网络。针对蛋白水解物调控 Nrf2/NF- $\kappa$ B 通路的分子细节、抗菌脂质破坏细菌膜的作用模式,以及壳聚糖复合材料与细胞相互作用的界面行为等关键科学问题,亟待从分子与细胞水平开展深入探索,为其在药物设计、医用材料开发及功能性产品应用方面提供坚实的理论依据。在技术层面,应大力发展绿色、高效的提取纯化工艺和新型递送系统,以提升活性成分的稳定性、生物利用度和治疗靶向性,同时系统开展规范的临床前安全性与有效性评价,构建“产-学-研-医”协同的创新链条,加速实验室成果向临床转化。在产业层面,需加强黑水虻专用品系的分子选育和基因编辑,培育具有高活性成分含量和优质性状的黑水虻品系,并建立覆盖从养殖、加工到终产品的全链条质量控制与标准体系,主动对接药品、化妆品监管要求,破解产品在市场准入和政策合规中的瓶颈,为黑水虻源创新产品的市场化扫清障碍。

展望未来,黑水虻有望成为连接资源循环利用与生命健康创新的重要枢纽。通过多学科交叉与全产业链整合,黑水虻不仅能为应对耐药菌感染、慢性炎症等全球健康挑战提供新型解决方案,也可以为生物经济、绿色农业与医学的后续发展注入新的科技内涵与产业动能,最终实现从“废弃物转化者”到“健康促进者”的价值跃迁。

#### [作者贡献 Author Contribution]

刘松撰写文章,并参与文献检索和文献数据提取;  
莫倩茹参与文献检索、文献数据提取;  
王瑾参与格式修改、文献数据提取;  
崔颖参与文献检索、文献数据提取;  
田铃负责文章设计、监督进度、安排人员和修订稿件。

#### [利益声明 Declaration of Interest]

所有作者均声明本文不存在利益冲突。

#### [参考文献 References]

- [1] GUILLIET J, BAUDOUIN G, POLLET N, et al. What complete mitochondrial genomes tell us about the evolutionary history of the black soldier fly, *Hermetia illucens*[J]. BMC Ecol Evol, 2022, 22(1): 72. DOI: 10.1186/s12862-022-02025-6.
- [2] SURENDRA K C, TOMBERLIN J K, VAN HUIS A, et al. Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia Illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF)[J]. Waste Manag, 2020, 117: 58-80. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.050.
- [3] 纪佳雨, 邓玲聪, 李广东, 等. 黑水虻的资源价值化及其开发应用研究进展[J]. 经济动物学报, 2021, 25(1): 42-50. DOI: 10.13326/j.jea.2019.1409.  
JI J Y, DENG L C, LI G D, et al. Research advance on resource value, exploitation and application of black soldier fly[J]. J Econ Anim, 2021, 25(1): 42-50. DOI: 10.13326/j.jea.2019.1409.
- [4] 刘彬, 黎梦, 习欠云, 等. 黑水虻的生物学特性及在家禽生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2023, 50(2): 586-597. DOI: 10.16431/j.cnki.1671-7236.2023.02.016.  
LIU B, LI M, XI Q Y, et al. Research progress on biological characteristics of *Hermetia illucens* L. and its application in poultry production[J]. China Anim Husb Vet Med, 2023, 50(2): 586-597. DOI: 10.16431/j.cnki.1671-7236.2023.02.016.
- [5] 姜强, 曲扬华, 孙玉丽, 等. 黑水虻幼虫的营养价值及其在动物生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2025, 37(3): 1503-1515. DOI: 10.12418/CJAN2025.129.  
JIANG Q, QU Y H, SUN Y L, et al. Nutritional value of black soldier fly larvae and its application in animal production[J]. Chin J Anim Nutr, 2025, 37(3): 1503-1515. DOI: 10.12418/CJAN2025.129.
- [6] PENG J, ZHAO X C, TANG Y M, et al. Black soldier fly larvae oil: a functional lipid that improves insulin sensitivity mainly by inhibiting the PPAR and MAPK signaling[J]. Future Foods, 2025, 11: 1-11. DOI: 10.1016/j.fufo.2025.100653.
- [7] 山东省畜牧兽医局. 我国饲料粮需求持续增长 未来压缩饲料蛋白缺口 3110 万吨 [EB/OL]. (2023-07-14) [2025-8-21]. [http://xm.shandong.gov.cn/art/2023/7/14/art\\_24614\\_10325661.html](http://xm.shandong.gov.cn/art/2023/7/14/art_24614_10325661.html). Shandong Veterinary and Animal Husbandry Bureau. China's feed grain demand continues to grow, with a projected reduction of 31.1 million tons in feed protein Gap in the future [EB/OL]. (2023-07-14) [2025-8-21]. <http://xm.shandong.gov.cn/>

- art/2023/7/14/art\_24614\_10325661.html.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见: 农规发〔2024〕27号[EB/OL]. (2024-12-27) [2025-8-21]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202412/t20241230\\_6468640.htm?articleID=25511514](http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202412/t20241230_6468640.htm?articleID=25511514). Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Guiding opinions on accelerating the comprehensive green transformation of agricultural development and promoting rural ecological revitalization: agricultural planning and development [2024]No. 27[EB/OL]. (2024-12-27) [2025-8-21]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202412/t20241230\\_6468640.htm?articleID=25511514](http://www.moa.gov.cn/govpublic/FZJHS/202412/t20241230_6468640.htm?articleID=25511514).
- [9] IKRAM M, ARIVUDAINAMBI S, JANARTHANAN R. Influence of temperature on the development of black soldier fly *Hermetia illucens*[J]. Indian J Entomol, 2023: 928-930. DOI: 10.55446/ije.2023.1297.
- [10] 黎金彩, 殷咏韬, 戴子奕, 等. 不同环境条件对黑水虻虫卵保种的影响[J]. 饲料工业, 2024, 45(20): 122-129. DOI: 10.13302/j.cnki.fi.2024.20.018.  
LI J C, YIN Y T, DAI Z Y, et al. Effects of different environmental condition on the preservation of black soldier fly eggs[J]. Feed Ind, 2024, 45(20): 122-129. DOI: 10.13302/j.cnki.fi.2024.20.018.
- [11] DE SMET J, VANDEWEYER D, VAN MOLL L, et al. Dynamics of *Salmonella* inoculated during rearing of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)[J]. Food Res Int, 2021, 149: 110692. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110692.
- [12] MEMON F U, ZHU Y Q, CUI Y, et al. Gut microbial communities and transcriptional profiles of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae fed on fermented sericulture waste[J]. Waste Manag, 2025, 194: 158-168. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.01.011.
- [13] IJDEMA F, ARIAS-GIRALDO L M, VERVOORT E, et al. Metagenome-based identification of functional traits of the black soldier fly gut microbiome associated with larval performance[J]. BMC Microbiol, 2025, 25(1): 1-20. DOI: 10.1186/s12866-025-04327-3.
- [14] LAGAT M K, WERE S, NDWIGAH F, et al. Antimicrobial activity of chemically and biologically treated chitosan prepared from black soldier fly (*Hermetia illucens*) pupal shell waste[J]. Microorganisms, 2021, 9(12): 1-15. DOI: 10.3390/microorganisms9122417.
- [15] GIANI M, VALENTINO C, VIGANI B, et al. *Hermetia illucens*-derived chitosan as a promising sustainable biomaterial for wound healing applications: development of sponge-like scaffolds[J]. Int J Biol Macromol, 2025, 304(Pt 2): 140903. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140903.
- [16] LAI-FOENANDER A S, KUPPUSAMY G, MANOGORAN J, et al. Black soldier fly (*Hermetia illucens* L.): a potential small mighty giant in the field of cosmeceuticals[J]. Health Sci Rep, 2024, 7(6): 1-22. DOI: 10.1002/hsr.2.2120.
- [17] MOHAMED H, MARUSICH E, AFANASEV Y, et al. Bacterial outer membrane permeability increase underlies the bactericidal effect of fatty acids from *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae fat against hypermucoviscous isolates of *Klebsiella pneumoniae*[J]. Front Microbiol, 2022, 13: 1-18. DOI: 10.3389/fmicb.2022.844811.
- [18] MARSICO M, GUARNIERI A, CURCIO M, et al. From *Hermetia illucens* pupal exuviae to antimicrobial composites: metal nanoparticles synthesized by laser ablation in sustainable chitosan matrices[J]. Molecules, 2025, 30(16): 1-19. DOI: 10.3390/molecules30163368.
- [19] RIOLO K, FRANCO G A, MARINO Y, et al. Protein hydrolysates from *Hermetia illucens* trigger cellular responses to cope with LPS-induced inflammation and oxidative stress in L-929 cells[J]. Anim Cells Syst, 2024, 29(1): 1-12. DOI: 10.1080/19768354.2024.2442389.
- [20] PRAEATSOOK K, VACHIRAARUNWONG A, TAYA S, et al. Anticancer and antioxidant effects of bioactive peptides from black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)[J]. Nutrients, 2025, 17(4): 1-21. DOI: 10.3390/nu17040645.
- [21] PIENAAR R D, GILBERT C, BELLIARDO C, et al. First evidence of past and present interactions between viruses and the black soldier fly, *Hermetia illucens*[J]. Viruses, 2022, 14(6): 1274. DOI: 10.3390/v14061274.
- [22] TREBUKH M D, TYSHKO N V, SADYKOVA E O, et al. Impact of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae biomass on the immune status of rats[J]. Vopr Pitan, 2024, 93(2): 41-51. DOI: 10.33029/0042-8833-2024-93-2-41-51.

(收稿日期: 2025-08-25 修回日期: 2025-12-03)

(本文编辑: 丁宇菁)

#### [引用本文]

刘松, 莫倩茹, 王瑾, 等. 黑水虻的主要生物学特性及其作为模式生物的开发应用前景[J]. 实验动物与比较医学, 2025, 45(6): 803-809. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2025.141.

LIU S, MO Q R, WANG J, et al. Main biological characteristics of *Hermetia illucens* L. and its potential applications as a model organism[J]. Lab Anim Comp Med, 2025, 45(6): 803-809. DOI: 10.12300/j.issn.1674-5817.2025.141.