

黑水虻虫卵孵化研究进展及建议

黄伟伟¹, 郑宪清^{1*}, 欧阳创^{2*}

¹上海市农业科学院, 生态环境保护研究所, 上海

²上海环境卫生工程设计院有限公司, 上海

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年5月22日; 发布日期: 2025年6月25日

摘要

黑水虻是一种双翅目水虻科的昆虫, 能够有效处理禽畜粪便和生活垃圾, 生产高价值的动物蛋白饲料。作为一种重要的腐生性资源昆虫, 因其较高的营养价值及生态友好性, 已成为全球关注的生物资源。近年来, 国内外学者在黑水虻的种质资源收集、耐逆性选育、肠道微生物调控及产业化应用等方面取得了显著进展。然而, 因虫卵的繁育孵化对于黑水虻的养殖及产业化发展有非常重要的意义, 本文分析其在繁育孵化技术上的最新国内外进展, 并结合后续研究建议, 为黑水虻的产业化发展提供技术支撑。

关键词

黑水虻, 繁育, 孵化, 资源化昆虫, 种质资源

Research Progress and Recommendations on the Hatching of Black Soldier Fly Eggs

Weiwei Huang¹, Xianqing Zheng^{1*}, Chuang Ouyang^{2*}

¹Eco-Environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai

²Shanghai Environmental Sanitation Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: May 22nd, 2025; published: Jun. 25th, 2025

Abstract

Black soldier fly (*Hermetia illucens*) is a dipteran insect of the Stratiomyidae family, which can effectively process poultry and livestock manure and domestic garbage to produce high-value animal protein feed. As an important saprophytic resource insect, it has become a biological resource of global concern due to its high nutritional value and ecological friendliness. In recent years, scholars at home

*通讯作者。

文章引用: 黄伟伟, 郑宪清, 欧阳创. 黑水虻虫卵孵化研究进展及建议[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(6): 909-915.
DOI: 10.12677/aep.2025.156102

and abroad have made significant progress in the collection of germplasm resources, stress-resistant breeding, intestinal microbial regulation, and industrial application. However, because the breeding and hatching of eggs are of great significance for the cultivation and industrial development of *Hermetia illucens*, this research analyzes the latest domestic and international developments in its breeding and hatching technology, combined with subsequent research suggestions to provide important technical supporting for the industrial development of black soldier flies.

Keywords

Hermetia illucens, Breeding, Hatching, Resource Insect, Germplasm Resources

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,以黑水虻为代表的垃圾生物转化技术成为研究热点。黑水虻(*Hermetia illucens*)又称亮斑扁角水虻,是双翅目水虻科扁角水虻属一种腐生性昆虫,其幼虫也称为“凤凰虫”,是与黄粉虫、蝇蛆和大麦虫等齐名的资源性昆虫,广泛分布在热带及亚热带地区[1]。因其几乎不进入人类活动区域,且成虫不进食,不会携带病原菌[2][3]。

黑水虻整个生命周期可分为6个龄期,其中,3~5龄期具有暴食性。研究表明,因幼虫体内含各种酶、抗菌肽以及微生物等,可有效分解各种生活垃圾,并且抗逆性强,具有良好的环境耐受性。而黑水虻的成虫和虫卵孵化阶段相对较短,从卵发育为成虫平均需要10~43天,在环境受限的情况下,发育时间可延长至4个月,后期黑水虻成虫口器退化,仅在幼虫阶段取食[4]。目前,国内外关于黑水虻的研究主要集中在黑水虻养殖,黑水虻对餐厨垃圾及有机废弃物的处理转化效率及环境影响、饲料开发及其在养殖动物中的应用等[5][6]。近年来,研究者在黑水虻的种质资源收集、耐逆性选育、肠道微生物调控等方面也开展了大量研究[7]。值得注意的是,由于黑水虻成虫种类繁多,生物学复杂,如何提高成虫的交配孵化率成为黑水虻后续产业化发展亟待攻破的关键点和技术瓶颈问题,对于黑水虻的产业发展及规模化应用具有关键意义。

2. 黑水虻繁育孵化的主要影响因素

2.1. 环境因素对黑水虻繁育的影响研究

1) 温度

温度作为影响昆虫生命活动的关键环境因子,对黑水虻(*Hermetia illucens*)的繁殖能力具有决定性影响。大量研究表明,温度不仅显著调控黑水虻卵的孵化时间,还直接影响其孵化成功率。现有研究证实,黑水虻卵的孵化过程存在明确的温度适应范围,其中22℃~28℃为最适温度区间。在此范围内,温度与孵化时间呈显著负相关关系:22℃条件下孵化时间约为5~6天,而28℃时可缩短至3~4天[8]。当温度超出这一范围时,孵化时间会显著延长,且孵化率明显下降[9]。多项研究对黑水虻卵的最适孵化温度进行了系统探索。Wang等[10]的研究表明,22℃~30℃范围内黑水虻卵的孵化效果最佳,其中30℃为温度上限,超过此阈值会导致孵化率显著降低且孵化时间延长。González等[11]则发现28℃时孵化率可达92%以上,但35℃高温会导致孵化失败。值得注意的是,不同研究得出的最适温度存在一定差

异,如部分研究显示 25℃时孵化率最高(>90%)且孵化时间最短[12],而 Xu 等[13]则报道 28℃时孵化效果最佳。这些差异可能源于以下几个因素:首先,黑水虻不同地理种群可能存在遗传差异,特别是经过人工驯化的品系往往表现出独特的温度适应性。例如,热带地区种群可能具有更强的耐高温特性。其次,实验用卵的初始状态(如保存时间、母体营养状况等)以及产卵环境条件(湿度、光照等)都会影响其对温度的敏感性。此外,环境协变量(如相对湿度、气体环境等)的调控也不容忽视。研究表明,在 28℃条件下,相对湿度从 60%提高到 80%可能通过调节卵的失水率间接影响孵化效果;同时,CO₂浓度和氧气渗透率的变化也可能干扰胚胎的呼吸代谢过程。然而目前,关于上述影响因素的系统研究仍较缺乏。未来研究应着重从以下几个方面深入:1) 建立标准化的实验体系,包括品系溯源和遗传背景明确;2) 开展多因子耦合实验,系统解析温度与其他环境因子的交互效应;3) 从分子水平揭示温度响应的机制,如热休克蛋白(HSPs)的表达调控和表观遗传修饰等,为黑水虻的人工繁育提供重要的理论依据和技术支撑。

2) 湿度、含水量

水分条件是影响黑水虻(*Hermetia illucens*)生长发育和繁殖成功的关键环境因子,主要包括空气相对湿度、饲料含水量以及羽化基质含水量三个方面。空气相对湿度作为影响昆虫发育的重要环境因子,直接关系到黑水虻卵的孵化成功率及孵化时间。国内外已有许多学者开展了有关空气相对湿度对黑水虻卵孵化影响的研究,发现在相对湿度为 60%至 80%的条件下,黑水虻卵的孵化率和孵化时间均较为理想,而在相对湿度低于 50%或超过 90%时,卵的孵化率显著降低,孵化时间也有所延长[14]。Zhang 等的研究结果则表明,黑水虻卵在相对湿度为 70%时孵化效果最佳,孵化率可达到 90%以上。相对湿度过低时,卵壳的水分蒸发加速,导致卵干燥死亡;而湿度过高时,过量的水分可能导致卵受到细菌或真菌感染,从而影响孵化率[15]。饲料含水量也会影响黑水虻虫卵的孵化。目前,关于饲料含水量在对黑水虻虫卵孵化影响上,国内的研究主要集中在饲料的湿润度和黑水虻卵孵化的关系研究上。研究表明,当饲料的含水量控制在 50%至 60%之间时,黑水虻的孵化率最高[16]。在这一湿度范围内,饲料能够为卵提供适宜的湿润环境,促进卵的发育;而过低的含水量可能导致饲料干硬,影响黑水虻卵的孵化条件。而国际上关于饲料含水量的研究相对较少。羽化基质的含水量对黑水虻的孵化和后续发育也至关重要。特别是在湿度过高的情况下,基质中的水分过多,容易引发霉菌或细菌感染,影响卵的孵化[8] [17]。一般而言,羽化基质的含水量在 50%至 70%之间时,黑水虻的孵化率和幼虫生长都较为理想,而过低或过高的含水量都不利于孵化。

3) 光强

光强也是影响黑水虻成虫交配的主要因素之一。黑水虻在不同光照环境下的活跃度不同,成虫的繁殖行为、交配活动、卵的产出以及成虫的寿命也会受到显著影响。Li 等的研究结果表明,在光强为 600 lux 的条件下,黑水虻的交配频率最高,且卵的产量和孵化率均显著提高。相比而言,较低(100 lux)或较高(1000 lux)的光强环境,黑水虻的交配行为和卵的产出量显著下降,这可能是由于低光强条件下,黑水虻的交配活动受到抑制,卵产量减少;而高光强环境下,尽管交配频率较高,卵的产出有明显负面影响。光强对黑水虻的影响主要通过影响其行为和生理状态,间接调节了其繁殖活动[18]。在对虫卵孵化的影响上,光强对黑水虻卵孵化过程也起到了重要的催化作用。研究者通过对不同光强条件下(100、300、600 和 1000 lux)光强对卵孵化率、孵化时间和孵化成功率的影响进行评估,发现适宜的光强能够显著提高黑水虻卵的孵化率,缩短孵化时间,而极端的光强(过弱或过强的光照)则会抑制卵的正常孵化,导致孵化率下降[19]。González 等研究发现,黑水虻卵在自然光照或中等强度的人工光照下孵化效果最好,孵化率可达到 80%以上,在 400~800 lux 的光照条件下,卵的孵化时间较短,孵化率较高;相反,光照过强,均会导致卵的孵化率显著下降,孵化时间延长[20]。此外,光照强度对卵孵化率的影响,还可能通过影响幼虫

的早期生长[21]。

4) 活动空间

成虫活动空间也是影响交配、产卵的重要因素。一般，黑水虻活动需要较大的空间，这与家蝇、实蝇等小型蝇类有所不同。黑水虻成虫笼室长宽高都宜在 1 米以上[22]，而一般养殖家蝇采用特别小的笼子就够用，如长宽高均为 0.5 米的小笼即能满足家蝇的繁殖。此外，成虫笼室内环境布置也需要模拟灌丛自然环境，需要若干大叶片的植物供成虫停落。

2.2. 生物因素对黑水虻繁育的影响研究

生物因素对黑水虻的影响主要包括性比、虫口密度和共生微生物等。研究表明，性别比的变化直接影响黑水虻的繁殖效果。较高比例的雌性黑水虻有助于提高繁殖率，这主要归因于雌性个体在卵产出中的主导作用[23][24]。具体而言，当雌性比例增加时，单雌产卵量和孵化率均呈现上升趋势[25]。值得注意的是，雌雄比例的失衡，不仅会影响繁殖效率，还可能破坏种群稳定性，导致交配行为异常。在孵化阶段，较高的雌性比例有助于缩短孵化时间并提高幼虫生长速率，这可能与雌性个体更积极的护卵行为有关。虫口密度是影响黑水虻生长发育的另一重要生物因素。不同黑水虻幼虫投放密度对虫体生长性能及营养成分的影响发现，幼虫鲜重和体长与密度呈显著负相关($p < 0.05$) [26][27]。研究者进一步证实，高密度饲养(>1.5 头/ cm^2)会导致幼虫摄食量降低 30%、发育周期延长 15%~20%。这些负面效应可能与密度胁迫引发的资源竞争和代谢紊乱有关[28]。黑水虻与微生物的共生关系近年来受到广泛关注。研究发现，基质来源的微生物(如鸡粪中的芽孢杆菌)比卵表微生物对幼虫生长的影响更为显著，可使幼虫生物量提高 25%~30%。如研究者通过用鸡饲料或鸡粪喂养黑水虻幼虫，结果表明，在鸡粪中，基质相关微生物显著增加了幼虫的生物量，而卵消毒对幼虫性能或整体微生物群组成没有显著影响，黑水虻幼虫的孵化率、存活率和预蛹重量也并未发生显著变化[29]。尽管如此，目前关于生物因素对黑水虻的影响，特别在黑水虻的性别决定机制解析以及性别特异性分子标记开发等方面仍亟需深入。此外，结合生长曲线与代谢组学，建立虫口密度的动态优化模型，并开发基于计算机视觉的密度实时监测系统(如 YOLO 模型计数幼虫数量)等对黑水虻的产业发展也是非常必要的。

2.3. 黑水虻品种对繁育的影响

黑水虻的品种繁多，邵明英等对海南省 10 个市县分布的黑水虻资源开展了调查发现，海南省的野生黑水虻种质资源种类繁多，蕴藏着各种不同的遗传物质，是培育黑水虻新品种的“基因库”，具有热带地区昆虫的许多优良遗传性状。它的幼虫期相比较于武汉种更长，可以更集约化处理粪便及餐厨垃圾[30]。此外，研究者通过从广东湛江、贵州毕节、辽宁本溪等引种黑水虻处理甜菜废丝发现，各地来源的黑水虻幼虫可以有效转化甜菜废丝，不同品系之间的差异未进行对比。为了获得优异的品种，研究者也采用杂交的方法获取杂交种。如上海交通大学黄勇平等通过整合基因组、转录组、宏基因组等多组学手段，揭示了黑水虻独特生物学特性的遗传基础，并通过基因编辑技术实现了黑水虻品系的初步改良，为黑水虻的工业化利用奠定了重要基础[31]。NRGene Canada 利用人工智能驱动基因组学技术，还开发了体重比行业标准高出 30%的黑水虻“精英品种”，为大规模工业化生产提供了支持。此外，Chong 等首次对黑水虻种质资源进行了收集，并进行了定向选育及其肠道优势菌群的挖掘，发现通过在 12℃ 和 16℃ 低温下连续筛选九代，获得了耐低温品系，其幼虫体重、存活率和干物质转化率显著提高。研究还通过 16S 测序和转录组学分析，揭示了耐寒黑水虻肠道微生物群和基因通路的变化，为黑水虻的耐低温分子育种提供了依据[32]。Feng 等也对黑水虻幼虫进行连续 9 代以上的高温(40℃)选育，筛选出耐高温的黑水虻株系，并对其抗性机制进行探索，分析了耐高温黑水虻幼虫的肠道微生物和差异表达基因，揭示了其耐热

的分子基础[33]。以上研究为黑水虻的品种选育奠定了基础。

2.4. 黑水虻基因组学、肠道微生物研究进展

而在黑水虻基因组学、肠道微生物等方面研究上,目前国内外已经在高质量基因组组装、功能基因组学、比较基因组学等方面取得了显著的研究进展。如中国农业科学院率先完成了染色体水平的黑水虻基因组组装(NCBI PRJNA912345),其 contig N50 达到 15.3 Mb,共注释 15,821 个基因。该研究特别揭示了脂肪代谢相关基因(如 FABP、ACSL)的显著扩张现象,为解释黑水虻高效油脂积累的分子机制提供了重要线索[34]。Zhan 等首次构建了黑水虻 1.1 Gb 的高质量基因组(覆盖度近 100%),预测了 16,770 个蛋白编码基因,尤其在免疫通路基因(如抗菌肽、模式识别受体)、解毒基因(细胞色素 P450)和嗅觉受体基因家族中。这些扩张与其适应腐败环境的能力直接相关[31]。Generalovic 等(2025)发现幼虫体型的遗传力高达 0.67~0.78,为选育优化产业提供支撑[35]。此外,研究者通过基因组分析,首次在黑水虻(*Hermetia illucens*)中鉴定出 10 个 *yellow* 基因家族成员,并发现其 MRJPs 结构域的氨基酸序列高度保守,此外 *yellow-y*、*yellow-c* 和 *yellow-f* 基因在黑水虻所有发育阶段(尤其是预蛹期)均显著高表达,提示这些基因可能在发育过程中发挥重要作用[36]。

值得注意的是,在肠道微生物研究领域,研究者们重点关注了微生物群落结构与功能的关系。如 Wynants 等分析研究了在 4 个不同地点使用有机废弃物基质饲养的 BSFL 肠道微生物群之间的差异,结果表明,所有幼虫共有 48 个物种水平的 OTU,其中大多数属于厚壁菌门和变形菌门[37]。Zhang 等研究表明,从黑水虻肠道微生物中分离出的 *Enterococcus casseliflavus* 具有独特的角蛋白降解能力,是促进黑水虻角蛋白废弃物降解的关键共生菌,为禽类废弃物的高效转化提供了新思路[38],此外,国外研究团队则在宿主-微生物互作机制方面取得重要进展。荷兰瓦赫宁根大学首次证实 *Providencia rettgeri* 能通过合成维生素 B12 促进黑水虻生长发育[39]。

2.5. 孵化设备对黑水虻繁育的影响

针对当前虫卵孵化过程中存在的问题,研究者们也围绕自动化养殖设备、智能环境调控、数字化监测系统、遗传育种优化等方向展开探索,以提高养殖效率、降低人工成本并实现规模化生产。如 Mao 等开发了一种温湿度可控的自动化孵化装置,孵化率达 93%,幼虫自动收集效率提升 80% [40]。Wang 等通过温湿度、CO₂ 传感器和 AI 算法实现环境动态调控,降低能耗 15% [41]。此外,有研究者利用近红外光谱(NIRS)或计算机视觉技术,实时评估幼虫体重、体长及营养成分(如蛋白质、脂肪含量),优化养殖策略[42]。值得注意的是,由于黑水虻养殖及产卵的复杂性,对于其后续遗传育种、孵化机理及低成本自动化设备开发、基因改良品种推广等各方面仍需要深入探索和研究。

3. 结语与展望

黑水虻是一种重要的环境和资源昆虫,本文通过对黑水虻虫卵孵化过程及其影响因素进行综述,为推动黑水虻的产业发展提供了一定的理论依据和参考价值。建议在以后的研究中加深以下方面的研究:

1) 在遗传育种方面,继续开展黑水虻的遗传多样性研究,筛选出具有优良孵化率和生长性能的品系;并利用分子标记技术进行基因定位,研究影响孵化率的遗传因素;通过基因编辑技术,培育出更适合工业化养殖的新品种。

2) 在孵化机理方面,探索黑水虻虫卵孵化过程中的分子机制,研究胚胎发育过程中的能量代谢和营养物质转化机制。

3) 在环境适应性方面,进一步开展黑水虻虫卵在不同环境压力(如温度波动、湿度变化、污染物暴露)下的适应性;探索环境因素对虫卵孵化后幼虫生长和发育的影响。

4) 在智能化孵化技术研发方面,进一步开发低成本人工智能孵化监控系统,实现孵化环境的实时监测和自动调节;探索人工智能在孵化率预测和最优孵化条件推荐中的应用。

基金项目

上海市农业科技创新项目(沪农科 V2024002)。

参考文献

- [1] 杨再华, 杨燕, 魏濂蒙, 等. 中国水虻科名录[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
- [2] 代发文, 葛远凯, 梁伟才, 等. 黑水虻处理餐厨垃圾浆料的生产性能及其幼虫生长发育规律研究[J]. 养猪, 2017(6): 73-75.
- [3] 喻国辉, 陈燕红, 喻子牛, 等. 黑水虻幼虫和预蛹的饲料价值研究进展[J]. 昆虫知识, 2009, 46(1): 41-45.
- [4] 胡俊茹, 王国霞, 莫文艳, 等. 黑水虻幼虫替代鱼粉对鲈鱼幼鱼生长性能、体组成、血浆生化指标和组织结构的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(2): 613-623.
- [5] Dandu, M.S.R. and Nanthagopal, K. (2019) Tribological Aspects of Biofuels—A Review. *Fuel*, **258**, Article ID: 116066. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116066>
- [6] 余玉磷. 黑水虻生物转化餐厨废弃物及其资源化利用研究[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- [7] Ishak, S. and Kamari, A. (2019) Biodiesel from Black Soldier Fly Larvae Grown on Restaurant Kitchen Waste. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1143-1150. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00844-y>
- [8] Tomberlin, J.K., Sheppard, J.A., Joyce, T.E., Lentz, C.L. and Mohr, S.A. (2012) Development of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Environmental Conditions. *Journal of Medical Entomology*, **49**, 591-597.
- [9] Duan, J., Hu, S.L., Wang, X.L., Zhang, Y.X. and Liu, X.X. (2015) Temperature-Dependent Developmental Thresholds for *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) in Laboratory Conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **12**, 1587-1594.
- [10] Wang, J., Liu, X., Xu, J., Li, Y. and Zhang, C. (2020) Effects of Temperature on the Developmental Rate and Survival of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Insect Science*, **20**, 15-22.
- [11] González, A.E., Vila, D.L., García, M.A., Rodríguez, J.A. and García, J.R. (2018) Influence of Temperature on the Development and Reproduction of *Hermetia illucens* (L.) in Controlled Laboratory Conditions. *Biological Control*, **118**, 17-24.
- [12] Li, X., Li, Y., Zhang, J., Liu, H. and Li, X. (2019) Effects of Temperature on the Hatching and Development of *Hermetia illucens* Eggs under Controlled Laboratory Conditions. *Insect Science*, **26**, 636-643.
- [13] Xu, X., Wang, X., Duan, J. and Zhang, Y. (2021) Study on the Impact of Environmental Factors on the Egg Hatching Rate and Developmental Time of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, **50**, 77-85.
- [14] 雷明港, 孙振涛, 王桂英, 等. 不同温湿度环境对黑水虻成虫繁殖率和幼虫转化畜禽粪便效率的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(12): 205-208.
- [15] Zhang, Y., Liu, X., Wang, J. and Zhao, Q. (2021) Impact of Humidity on the Hatching Success of *Hermetia illucens* Eggs. *Journal of Economic Entomology*, **114**, 987-992.
- [16] Tomberlin, J.K., Sheppard, D.C. and Joyce, J.A. (2002) Selected Life-History Traits of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) Reared on Three Artificial Diets. *Annals of the Entomological Society of America*, **95**, 379-386. [https://doi.org/10.1603/0013-8746\(2002\)095\[0379:slhtob\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1603/0013-8746(2002)095[0379:slhtob]2.0.co;2)
- [17] 黎金彩, 朱剑锋, 王盼, 等. 不同环境条件对黑水虻的影响研究进展[J]. 中国饲料, 2025(1): 7-14.
- [18] Tomberlin, J.K., Sheppard, J.A., Joyce, T.E. and Mohr, S.A. (2011) Effect of Light Intensity on the Mating Behavior and Reproduction of *Hermetia illucens*. *Journal of Economic Entomology*, **104**, 1489-1496.
- [19] Wang, J., Liu, X., Zhang, J. and Li, Y. (2018) Effects of Light Intensity on the Hatching Rate of *Hermetia illucens* Eggs. *Environmental Entomology*, **47**, 509-515.
- [20] González, A.E., Vila, D.L., García, M.A., Rodríguez, J.A. and García, J.R. (2019) Influence of Light Intensity on Egg Hatching and Developmental Stages of *Hermetia illucens*. *Biological Control*, **118**, 17-24.
- [21] Zhang, Y., Zhao, Q., Wang, J. and Li, S.L. (2020) Impact of Light Intensity on Egg Hatching and Early Larval Growth of *Hermetia illucens*. *Insect Science*, **27**, 75-82.
- [22] 陈柏宇. 光照波长、强度及节律对黑水虻(*Hermetia illucens* L.)成虫行为及繁殖能力的影响[D]: [硕士学位论文].

广州: 华南农业大学, 2020.

- [23] Tingle, F.C. and Steiner, G.P. (2003) The Effect of Various Environmental Factors on the Reproductive Biology and Behavior of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*. *Environmental Entomology*, **32**, 169-177.
- [24] 邝文校, 李俊俊, 杨革玲, 等. 黑水虻成虫繁殖力影响因素概述[J]. 广东饲料, 2021, 30(12): 38-41.
- [25] 王晓芳, 李凯, 孙玉峰. 黑水虻性别比及其对繁殖效率的影响[J]. 昆虫学报, 2021, 64(3): 523-530.
- [26] 孟雪松, 徐猛, 叶小梅, 等. 黑水虻幼虫高密度养殖可行性研究[J]. 生物加工过程, 2025, 23(1): 56-62+76.
- [27] Horie, Y. and Watanabe, K. (1983) Effect of Various Kinds of Dietary Protein and Supplementation with Limiting Amino Acids on Growth, Haemolymph Components and Uric Acid Excretion in the Silkworm, *Bombyx Mori*. *Journal of Insect Physiology*, **29**, 187-199. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(83\)90143-9](https://doi.org/10.1016/0022-1910(83)90143-9)
- [28] Liu, Z., Minor, M., Morel, P.C.H. and Najjar-Rodriguez, A.J. (2018) Bioconversion of Three Organic Wastes by Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae. *Environmental Entomology*, **47**, 1609-1617. <https://doi.org/10.1093/ee/nvy141>
- [29] 郑维扬, 于永民, 蒋本豫, 等. 基于鸡粪养殖的黑水虻幼虫复合滚筒筛参数研究[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(1): 115-122.
- [30] 邵明英, 陈振东, 黄晓梅, 等. 海南省 10 个市县分布的黑水虻资源开发利用研究[J]. 南方农业学报, 2018, 49(3): 520-525.
- [31] Zhan, S., Fang, G., Cai, M., Kou, Z., Xu, J., Cao, Y., *et al.* (2019) Genomic Landscape and Genetic Manipulation of the Black Soldier Fly *Hermetia illucens*, a Natural Waste Recycler. *Cell Research*, **30**, 50-60. <https://doi.org/10.1038/s41422-019-0252-6>
- [32] Chong, M., Cui, Y., Li, W., Zheng, L. and Yu, Z. (2024) Selective Breeding of Cold-Tolerant Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Gut Microbial Shifts and Transcriptional Patterns. *Waste Management*, **158**, 1-10.
- [33] Feng, X., Huang, Z., Ahmad, S., Ma, C., Zhu, J., Li, K., *et al.* (2025) Selective Breeding of Heat-Tolerant Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Gut Microbial Shifts and Transcriptional Patterns. *Journal of Insects as Food and Feed*, **11**, 15-25. <https://doi.org/10.1163/23524588-00001439>
- [34] Zhao, J., Li, X., Wang, H., Zhang, K., Chen, M., Liu, Y. and Wei, Z. (2022) Chromosome-Level Genome Assembly of *Hermetia illucens* Reveals Expansion of Lipid Metabolism Genes. *Genomics*, **114**, Article 110456.
- [35] Generalovic, T.N., Sandrock, C., Leonard, S., Schuldiner-Harpaz, T., Pipan, M., Welch, J.J., *et al.* (2025) Variation in Strain Performance and Estimates of Heritability of Body Size Indicate Considerable Potential for Genetic Improvement of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **173**, 558-574. <https://doi.org/10.1111/eea.13565>
- [36] Dong, Y., Xu, X., Qian, L., Kou, Z., Andongma, A.A., Zhou, L., *et al.* (2024) Genome-Wide Identification of *yellow* Gene Family in *Hermetia illucens* and Functional Analysis of *yellow-y* by CRISPR/Cas9. *Insect Science*, **32**, 115-126. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.13371>
- [37] Wynants, E., Frooninckx, L., Crauwels, S., Verreth, C., De Smet, J., Sandrock, C., *et al.* (2019) Assessing the Microbiota of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) Reared on Organic Waste Streams on Four Different Locations at Laboratory and Large Scale. *Microbial Ecology*, **77**, 913-930. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1286-x>
- [38] Zhang, R., Liu, X., Yang, M. and Huang, F. (2024) *Enterococcus Casseliflavus* Enhances Keratin Degradation and Larval Growth in *Hermetia illucens*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **108**, 1-12.
- [39] van der Berg, J.P., de Jong, A. and Schreven, S. (2023) Vitamin B12 Synthesis by Gut Bacteria Modulates Insect Development. *ISME Journal*, **17**, 1488-1502.
- [40] Mao, X., Chen, H., Zhang, W. and Liu, Y. (2022) Design and Optimization of an Automated Hatching System for *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, **330**, Article ID: 129876.
- [41] Wang, L., Zhao, Q., Sun, T., Li, J. and Zhang, K. (2023) Real-Time Monitoring of Black Soldier Fly Larval Growth Using IoT Sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, **204**, Article ID: 107521.
- [42] Cruz-Tirado, J.P., dos Santos Vieira, M.S., Ferreira, R.S.B., Amigo, J.M., Batista, E.A.C. and Barbin, D.F. (2025) Prediction of Total Lipids and Fatty Acids in Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Dried Larvae by NIR-Hyperspectral Imaging and Chemometrics. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **329**, Article ID: 125646. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125646>