

黑水虻生物转化有机废物的研究进展

吴盛阳, 吴启凡, 彭帅帅, 马冬杰, 张现海, 王 臣, 刘思洋, 张德慧, 侯靖哲, 蒋世友

安徽浩悦再生资源利用有限责任公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年2月16日; 录用日期: 2025年3月14日; 发布日期: 2025年3月21日

摘 要

有机废弃物具有资源性和危害性的双重属性, 如不合理处置, 不仅会造成生态环境的污染, 还会造成资源浪费。黑水虻是一种世界上广泛分布的双翅目昆虫, 它能采食有机废弃物, 将其转化为虫体蛋白和脂肪, 剩余的虫粪还可以作为有机肥利用。目前, 利用黑水虻处理有机固体废弃物的生物转化技术已受到越来越多的关注, 研究人员针对黑水虻处理有机废弃物及其资源价值等问题开展了大量研究。本文综述了近年来利用黑水虻处理有机废弃物、黑水虻的资源价值以及产业化应用等方面的研究进展, 并对今后的研究和发展方向进行了展望。

关键词

黑水虻, 生物转化, 有机废弃物, 资源化

Research Progress of Biotransformation of Organic Wastes by *Hermetia illucens*

Shengyang Wu, Qifan Wu, Shuaishuai Peng, Dongjie Ma, Xianhai Zhang, Chen Wang, Siyang Liu, Dehui Zhang, Jingzhe Hou, Shiyou Zhang

Anhui Haoyue Renewable Resources Utilization Co., Ltd., Anhui Hefei

Received: Feb. 16th, 2025; accepted: Mar. 14th, 2025; published: Mar. 21st, 2025

Abstract

Organic waste has the dual attributes of resource and harmfulness. If it is not disposed reasonably, it will not only cause pollution of the ecological environment, but also cause waste of resources. The black soldier fly is a widely distributed dipteran insect in the world. It can feed on organic waste and convert it into insect protein and fat. The remaining insect manure can also be used as organic fertilizer. At present, the biotransformation technology of treating organic solid waste by black

文章引用: 吴盛阳, 吴启凡, 彭帅帅, 马冬杰, 张现海, 王臣, 刘思洋, 张德慧, 侯靖哲, 蒋世友. 黑水虻生物转化有机废物的研究进展[J]. 农业科学, 2025, 15(3): 259-270. DOI: 10.12677/hjas.2025.153032

soldier fly has attracted more and more attention. Researchers have carried out a lot of research on the treatment of organic waste by black soldier fly and its resource value. In this paper, the research progress in the treatment of organic waste by black soldier fly, the resource value and industrial application of black soldier fly in recent years are reviewed, and the future research and development direction are prospected.

Keywords

Black Soldier Fly, Biotransformation, Organic Waste, Resource Utilization

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

随着我国城市化进程的加快和规模化畜禽养殖产业的迅速发展,产生的厨余垃圾、畜禽粪污等有机废弃物引起的环境污染风险日益增加[1]。目前,有机废弃物通常用填埋、堆肥或焚烧方法处理[2]-[4]。然而,这些传统的处理有机废弃物的方法存在许多的弊端,例如填埋会占用宝贵的土地资源导致病原生物的传播,产生恶臭气味以及导致温室气体的排放[5]。此外,被填埋的有机废物需要很长一段时间才能被完全分解[6]。现在,在发展中国家的许多城市仍然普遍使用上述的传统方法处理有机废弃物,由于缺乏对有机废弃物收集、分离和处理的方法,导致有机废弃物与日俱增,这可能会对环境 and 人类健康造成一定的危害[4]。近年来,一些研究人员一直在探索寻求一种高效、绿色的处理有机废弃物的方法。许多研究表明使用黑水虻幼虫可以处理有机废物,通过自身的消化系统将有机废弃物转化为蛋白质和油脂,从而实现有机废弃物的高效、绿色的治理[3] [7]-[12]。尽管黑水虻在有机废物处理中的潜力此前已由许多的研究人员研究,但是目前仍然缺乏关于黑水虻在有机废物处理中的系统理论知识[10] [13]-[15]。黑水虻属于双翅目,属于水虻科,固有地生活在温带热带地区[11]。在 Ibadurrohman 等[16]人进行的一项研究中表明,黑水虻具有较高的生物转化有机废弃物的能力,可将 4 kg 餐厨有机废物生物转化后产生 800 g 左右的黑水虻幼虫。对黑水虻的生物学特性和环境安全性评估发现,其对人类完全无害且对环境非常安全,其成虫既不携带病菌,也不侵入人类的居住环境,并且对农作物也不形成危害[17]。

2. 黑水虻生物转化有机废弃物

有机废弃物处理已成为世界难题,传统方法处理具有能源消耗高、处理效果不佳、产品效益较差等缺点[18]。黑水虻可以取食禽畜养殖产生的粪便以及各种生活垃圾,将废弃物转化为蛋白质、多肽以及油脂,用于畜禽饲料、医药合成等领域[19],在生物转化处理废弃物领域具有广阔的应用前景[20]。

黑水虻幼虫通过口器摄食有机废弃物,将其破碎成细小颗粒,增加表面积,便于微生物附着和分解。幼虫肠道内的微生物分泌多种酶,如蛋白酶、脂肪酶和纤维素酶,将复杂的有机物分解为小分子物质。幼虫吸收小分子营养物质,用于自身生长和发育,同时将部分有机物转化为昆虫蛋白和脂肪。未被吸收的有机物和微生物代谢产物以虫粪形式排出,进一步转化为有机肥。为了优化其生物转化有机废弃物的效果,黑水虻须在适宜的环境条件下养殖,包括湿度、营养成分、物理性质、温度等参数[11] [12] [14] [21]。在饲养条件中,温度对黑水虻的生长有显著影响,最佳饲养温度为 25℃~30℃ [9]。此外,有机废弃物的类型对黑水虻的生物转化活性至关重要[22]-[25]。如图 1 所示黑水虻生物转化有机废弃物示意图。

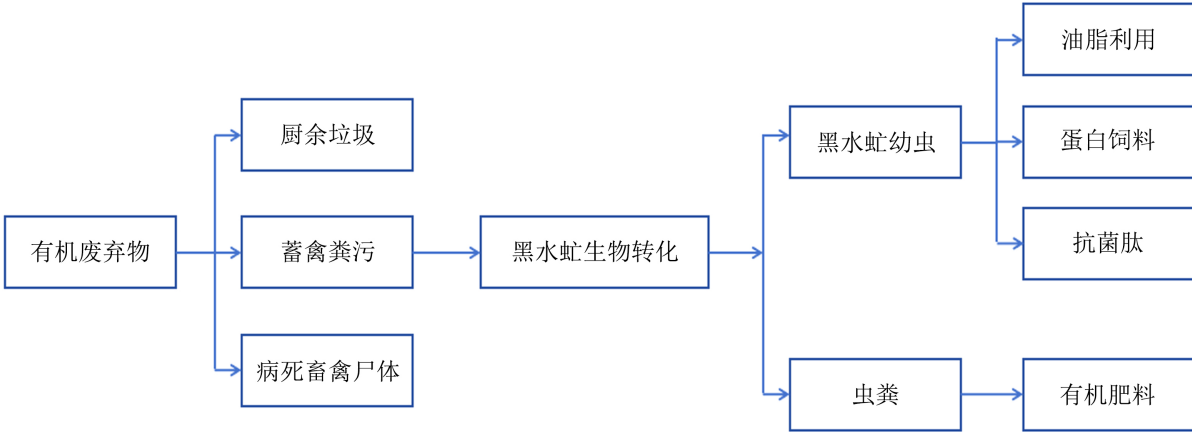


Figure 1. Schematic diagram of black soldier fly biotransformation of organic waste
图 1. 黑水虻生物转化有机废弃物示意图

2.1. 黑水虻生物转化厨余垃圾

厨余垃圾具有高含水率(约 75%~85%)、高有机质含量(占干质量 75.1%~90.1%)、高盐分(占湿质量 0.5%~3.0%)和高油脂含量(占湿质量 2.0%~17.0%)的特性[26]，如得不到及时处理不仅会造成环境污染，还容易滋生蚊蝇和病原微生物，对人类健康造成危害。利用黑水虻生物转化厨余垃圾，可充分实现减量化、资源化、无害化、生态化的目标。研究表明，在 75%含水率时，黑水虻生物转化厨余垃圾的减量率可达到 65% [27]；10 t 餐厨垃圾经黑水虻处理后剩余物仅为 3346 kg，同时还能产生 300 kg 黑水虻干虫 [28]。在厨余垃圾中添加适当比例的麦麸，可以改善黑水虻幼虫虫体中脂肪和蛋白质的含量，为产出不同要求的虫体蛋白提供了理论指导[29]。污泥的添加可以改善黑水虻幼虫的品质，25%污泥和 75%餐厨垃圾为最佳混合比例，该比例培养的黑水虻粗蛋白、粗脂肪和微量元素含量较高[30]，重金属污染风险最小 [31]。利用黑水虻生物转化厨余垃圾是一种新型绿色处理方式，该方式将为厨余垃圾再利用和黑水虻养殖提供新的思路[32]。

2.2. 黑水虻生物转化畜禽粪便

畜禽粪便目前主要采用厌氧发酵和好氧堆肥等方法进行资源化利用，但是发酵和堆肥时间长、效率低并造成较严重的土壤、水体和空气的污染。黑水虻幼虫处理畜禽粪便，不仅能有效对粪堆进行减量，还能减少粪便中的病原体[33]，同时降低恶臭气味的排放量[34]。黑水虻幼虫可以有效处理猪、奶牛和蛋鸡等畜禽粪便，经转化后的猪粪、奶牛粪、鸡粪的干物质量分别减少 46.0%、40.1%和 48.4% [35]，同时可降低粪便中 N、P、K、Ca、Mg 等元素含量[36]。黑水虻幼虫肠道中存在着复杂的微生物群落，这些微生物能够帮助幼虫快速高效地消化畜禽粪便中的营养物质[37]。经黑水虻处理过的畜禽粪便中的抗生素、病原微生物和恶臭气体等有害物质含量显著降低。黑水虻还能够有效降低基质中四环素和土霉素的含量 [38] [39]。粪便中营养物质的含量[40]是影响黑水虻幼虫对畜禽粪便生物转化效率的重要因素。王聪等[41]人的研究表明，不同畜禽粪便养分均可满足黑水虻正常生长，猪粪与鸡粪处理组的黑水虻虫体鲜重(189.23 g 和 193.45 g)显著高于牛粪与鸭粪处理组(167.68 g 和 178.18 g)。黑水虻对猪粪、鸡粪的减量率和生物转化率较高，分别为 63.23%和 65.49%、33.66%和 35.09%，处理牛粪的减量率和生物转化率最低，分别为 40.98%和 20.48%。猪粪以及鸡粪的可溶性有机碳含量分别为 39.71 g/kg、32.85 g/kg，显著高于牛粪和鸭粪，并且测定铵态氮及硝态氮结果类似，表明猪粪、鸡粪中易被吸收利用的养分物质高于其他处理组，推测可能是猪粪与鸡粪黑水虻处理体系优于牛粪及鸭粪黑水虻处理体系的原因。黑水虻对畜禽粪便的转

化效率会受到品种、饲养密度、粪便种等因素的影响，黑水虻对牛、羊等草食性家畜的粪便转化效率较低，这可能是由于其肠道中缺乏能分解木质纤维素的微生物，若利用黑水虻协同木质纤维素外源性细菌，可提高粪便的降解率[42] [43] (表 1)。

Table 1. The protein and fat content of black soldier fly after biotransformation of different poultry manures

表 1. 黑水虻生物转化不同蓄禽粪便后的蛋白质和脂肪含量[41]

采食底物	蛋白质%	脂肪
鸡粪	39.26	28.26
猪粪	38.65	27.65
鸭粪	35.46	26.46
牛粪	35.47	23.47

2.3. 黑水虻处理病死畜禽尸体

黑水虻幼虫可用于处理病死畜禽尸体，使其无害化。由于黑水虻的生存环境中经常接触大量病原微生物，诱导其产生许多抗菌肽、蛋白酶、水解酶等抗菌物质[44]。黑水虻幼虫食用带病原菌的饲料后，其虫体内并未检测到相应的病原菌，排泄物中也未检测出病原菌，说明饲料中的病原菌经过黑水虻幼虫采食后被完全杀灭。对黑水虻幼虫体表浸泡洗涤后的溶液检测相应病原，结果呈阴性[39]，说明黑水虻虫体表可能富含抗菌肽类物质，对接触的病原菌有抑制或者杀灭作用[45]。研究表明，黑水虻处理后能够彻底灭活物料中的大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌，99%灭活金黄色葡萄球菌[46]。利用黑水虻幼虫高效处理病死猪并实施生物转化，将为非洲猪瘟病死猪处理开辟新途径。以上研究结果初步说明，通过黑水虻的采食和消化能够对物料中的病原微生物起到杀灭作用，是一种潜在的病死畜禽无害化处理方式。

黑水虻生物转化有机废弃物过程中，有机废弃物中的营养物质如蛋白质、脂肪、矿物质等对黑水虻的生物转化活性至关重要。蛋白质和脂肪的类型和含量能显著影响黑水虻的重量、养分含量以及生物转化效率[47]。黑水虻生长发育阶段需要蛋白质以及脂肪的参与，但废弃物中蛋白质含量不足，导致其生长发育迟缓，存活率和活动能力下降，甚至影响产卵繁殖[48] [49]。一般而言，在蛋白质含量较高的废弃物上生长的黑水虻具有较高的幼虫重量、生物转化率以及较短的发育时间[12] [50]。脂肪作为黑水虻体内重要储能形式之一，也是虫体细胞膜重要构成物质之一以及激素合成的前体物质[51]。废弃物转化过程中，黑水虻幼虫肠道脂肪酶将脂质分解成脂肪酸，为变态发育以及成虫羽化提供能量基础[52]。当黑水虻饲喂一些缺乏营养的有机废弃物时，生长将会受到影响。如果在营养缺乏的废物中添加廉价的高营养基质，如豆腐渣，可以促进黑水虻生长[15]。

3. 黑水虻的资源价值

3.1. 黑水虻虫粉作为饲料替代蛋白源

目前，世界范围内鱼粉和豆粕产量呈现下降趋势，出现了价格上涨和供应不稳定等现象，急需能够替代鱼粉和豆粕等传统原料，且具有高营养、低成本、可持续等特征的新型蛋白来源[53]。黑水虻幼虫体内蛋白质含量较高，其粗蛋白含量达到 47%~50%，与水生和畜禽动物相当，且含有丰富的维生素、矿物质和氨基酸等多种生物活性成分，可作为水产和畜禽养殖领域中鱼粉和豆粕的良好替代品[54]。目前，研究者已将黑水虻用于鸡、鸭、鱼虾、生猪和宠物等多种动物的饲料中。动物取食添加适量的黑水虻幼虫

饲料后,能有效提高机体抗氧化能力和免疫力,增强动物肠道有益菌群丰度和改善肠道健康,提高动物生产能力[55]。赵燕等[56]研究发现在蛋鸡日粮中添加适量黑水虻虫粉对其产蛋率、平均合格蛋重和畸形蛋率均有改善趋势,对鸡蛋的风味有提高作用[57],能够提升鸡营养消化速率及可消化氨基酸含量[58]。将黑水虻虫粉与蜂胶混合物加入肉鸡饲料,肉鸡的生长速度和鸡肉品质显著提升[59]。谢飞[60]以黑水虻幼虫粉替代 50%日粮饲喂断奶仔猪,结果表明仔猪日增重和饲料转化率均有所提高,对仔猪的生长发育有较明显的促进作用。鲍晓伟将黑水虻虫粉加入建水黄褐鸭饲料,鸭肉品质及氨基酸含量、产蛋量显著提升[61]。胡俊茹等[62]研究了黑水虻幼虫粉替代鱼粉对凡纳滨对虾幼虾生长性能、体组成、血清生化指标和抗氧化能力的影响,发现其可显著增强凡纳滨对虾幼虾血清中抗氧化酶的活性,进而提高机体抗氧化能力,并对幼虾的生长性能有一定的促进作用。肖杨波等[63]发现,在饲料中添加 20%的黑水虻虫粉替代鱼粉,合方鲫的生长速率显著提升。使用黑水虻虫粉饲喂鲑鱼,能够提升鲑鱼的生产性能及其对蛋白质、氨基酸的消化率[64]。在鳟鱼饲料中添加黑水虻虫粉,鳟鱼背部鱼片干物质和粗脂肪含量呈上升趋势[65]。黄颡鱼饲料中添加含量 30%的黑水虻虫粉,黄颡鱼血清指标、鱼肉粗蛋白含量、必需氨基酸和呈味氨基酸含量显著上升[66]。在斑马鱼饲料中添加黑水虻虫粉替代鱼粉,能够增强其体内酶活性[67]。在克氏原螯虾饲料中添加 34.25%的黑水虻虫粉替代鱼粉,克氏原螯虾的生长性能、机体免疫能力及部分血淋巴免疫酶活性显著提升[68]。在尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* 饲料中添加 75%含量的黑水虻虫粉替代鱼粉,能够显著改善尼罗罗非鱼鱼苗的生长性能,促进其肝脏和肠道器官健康,饲料损耗率降低 30%[69]。使用黑水虻虫粉饲喂虹鳟鱼,可显著增加肠道乳酸菌丰度和微生物多样性[70][71]。黑水虻幼虫饲料制品受高脂肪含量等因素的影响,只能部分替代传统饲料,高替代或完全替代会导致饲养动物生长性能下降[72]。因此,需要进一步研究目标物种的营养成分、消化率,以及幼虫的处理方法等[73]。

3.2. 黑水虻幼虫油脂开发利用

黑水虻油脂理化性质分析表明,黑水虻幼虫油酸价及其过氧化值都低于饲料中常使用的猪油、豆油等国际上的饲用油脂标准[74]。黑水虻脂肪含量高达 22%~24%,具有促进肠道健康和生长性能,以及提高抗氧化、免疫能力和调节脂质代谢的作用,是饲料中一种潜在油源。黑水虻幼虫体内的脂肪含量高、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的比例合适,可用于开发航空、工业和农业领域用油[75]。使用硫酸作为催化剂,在甲醇中通过酯交换反应,能够将黑水虻幼虫脂质合成为脂肪酸甲酯生物柴油[76]。将黑水虻幼虫油和柴油作为混合燃料,发动机的氮氧化物排放量呈下降趋势[77]。以 6.43%黑水虻幼虫油与 93.57%柴油混合作为发动机燃料,发动机性能达到最大值[78]。黑水虻油脂在工业领域中应用广泛。黑水虻粗油脂可作为润滑油的添加剂,虫体油脂衍生物有助于形成润滑保护膜,显著提升油品的摩擦学性能[79]。通过硫化反应和酯交换反应,以黑水虻幼虫油脂制备的润滑油,能显著增加摩擦学性能、黏温性能及氧化稳定性[80]。通过酶促甘油降解,能够利用黑水虻幼虫油脂制备单酰甘油[81]。

3.3. 黑水虻幼虫提取抗菌肽

抗菌肽(antimicrobial peptides, AMPs)是昆虫在受到微生物感染或意外伤害时,由脂肪体内合成并释放到血淋巴中的一类小分子活性多肽,在体液免疫防御中发挥了重要作用。AMPs 具有强碱性、热稳定性和广谱抗菌活性,并对真菌、病毒、寄生虫及癌细胞也具有一定的杀灭作用[82][83]。由于 AMPs 具有广泛的生物学活性,尤其是对某些耐药性病原菌也有一定的杀灭作用,因此被认为是理想的抗生素替代物,在畜牧业、食品医药和化妆品等领域都具有巨大应用价值和市场潜力[84]。目前动物饲料中已被严令禁止加入抗生素,急需开发抗生素的替代品。昆虫免疫系统产生的抗菌肽,具有良好抑菌性,具有替代抗生素的潜能[85]。黑水虻幼虫体内具有丰富的抗菌肽,可激活宿主的防御系统,杀死病原体[86]。黑水虻幼

虫体内含有多种生物活性物质,如几丁质等,饲喂黑水虻幼虫的动物肠道内菌群丰度显著提升[55]。黑水虻幼虫抗菌肽可以防治沙门氏菌的侵染[87]。黑水虻抗菌肽粗提取物(0.25 mg/L)对曲霉和沙门氏菌具有良好的抑菌效果[88]。黑水虻抗菌肽能够有效降低大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌等病原菌活性[89]。黑水虻 HI-3 抗菌肽具有调控 RAW264.7 细胞免疫的功能,RAW264.7 细胞的抗氧化能力和吞噬能力随着抗菌肽浓度增加而显著提升[90]。黑水虻体内的 HI-3 抗菌肽能够促进结肠癌 HCT-8 细胞的凋亡[91]。黑水虻体内可生产抗菌肽等具有高附加值的产品,对黑水虻养殖业带来了新的发展。黑水虻抗菌肽不仅具有广谱抗菌效果,还具备抗病毒、抗寄生虫、抗肿瘤细胞和抗炎等活性,与传统抗生素相比有很大的优势,在饲料、食品、医药与化妆品领域具有广泛的应用前景,成为了目前生物活性肽的研究热点之一。但黑水虻抗菌肽天然提取难度较大,化学合成成本过高,基因工程表达量偏低,其制备技术制约了其大规模的生产,此外,黑水虻抗菌肽体内活性机制也有待进一步研究明确。

3.4. 黑水虻幼虫提取抗菌肽

黑水虻虫粪也叫虫沙,是黑水虻采食有机固体废弃物后的排泄物与剩余残渣的混合物,富含有机质和微量元素,可用于开发高档生物有机肥[92][93]。研究表明,黑水虻处理后的畜禽粪便腐殖酸含量增加,能够促进植物次生根的生长,增加植物活力[35]。施用 4%黑水虻虫粪能提高土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾的含量,增强土壤酶活性,从而提高水稻产量和稻米营养[94]。袁华冠等[95]的研究发现,施用 20%的黑水虻虫沙可显著提高土壤有机质和养分含量,提高红苋菜、木耳菜和菠菜等蔬菜的叶绿素含量、株高和鲜重等指标,改善蔬菜品质。赵毅等[96]的研究发现,添加 6%的黑水虻虫粪能提高植烟土壤的养分和土壤酶活性,促进烟草的生长和生理代谢。以上研究结果表明,黑水虻虫粪是一种极具开发潜力的新型有机肥,但不同作物的最佳施用量差别较大,需要开展更为广泛的研究。

4. 黑水虻生物转化有机废弃物技术存在的问题及解决方法

黑水虻幼虫对多种有机废弃物均具有分解转化的可行性,但有机废弃物来源和性质不同导致了黑水虻幼虫对部分有机废弃物的处理效果不佳。其原因如下:大部分有机废弃物本身营养结构不均衡,导致黑水虻幼虫转化率以及有机废弃物减量率较低;有机废弃物中直接降解菌不占优势或辅助黑水虻幼虫生物转化的功能菌活力不够[97],不利于黑水虻幼虫对有机废弃物的分解转化;有机废弃物中大分子物质较多,不利于黑水虻幼虫采食和消化[98]。因此,要使黑水虻幼虫处理有机废弃物达到较好效果,首先,要保证有机废弃物中的营养均衡,以满足黑水虻幼虫的采食需求[99][100];其次,微生物在分解转化过程中发挥着重要的作用,调节菌群关系可促进黑水虻幼虫对有机废弃物的处理[101];最后通过加入辅助物料进行发酵,改善有机废弃物营养结构和空间结构,可促进黑水虻幼虫摄食和粪便转化。

4.1. 调节有机废弃物营养成分(碳氮比)

不同种类有机废弃物之间的营养成分有差异,将之混合调节至适宜的碳氮比,可有效促进黑水虻幼虫分解转化有机废弃物。麦力文[102]等为了探明黑水虻幼虫对不同碳氮比鸡粪的生物转化效果开展模拟转化试验。将玉米粉按照 0%、5%、10%、15%的比例添加至鸡粪与菌渣混和的底料中调节混合物的 C/N 为 10.30、11.52、12.67、13.81 (设为 CK、T05、T10、T15 组),接入 4 日龄黑水虻幼虫,14 d 后测定黑水虻生物转化效率。结果表明适宜的玉米粉添加比例提高鸡粪菌渣混合底料 C/N 可以提供均衡的营养组成,从而促进黑水虻的生长发育、优化虫体营养组成及提升虫粪腐殖化程度。

4.2. 有机废弃物预处理

一般认为,预发酵可杀灭有害的寄生虫卵和致病微生物,同时减少臭味产生和养分损失,还可提高

饲料适口性和吸收效率。这点也适用于黑水虻幼虫处理有机废弃物,即对有机废弃物进行预发酵处理可促进黑水虻对有机废弃物的转化[103]。王涛[104]等采用不同组合益生菌对餐厨垃圾进行预发酵,以强化黑水虻转化餐厨垃圾合成虫体蛋白。结果表明,乳酸菌、枯草芽孢杆菌和酵母菌协同预发酵显著提高了餐厨固渣可溶性蛋白含量,促进了虫体的生长发育和蛋白合成。虫体生物量含量、虫体蛋白产率和有机质减量率分别达到 27.82%、162.7 mg/g-TS 和 74.1%,较对照组分别提高了 74.7%、1.0 倍和 1.2 倍。

5. 展望

黑水虻作为一种新型资源昆虫,具有很好的生物能源开发、转化、饲料替代潜能,其体内抗菌肽在医疗领域表现出广阔的应用前景,受到了产业界的广泛关注。但值得注意的是,目前黑水虻产业化应用和生产过程中还存在着许多需要关注的问题。由于产业化发展滞后,黑水虻的大规模养殖仍处于探索阶段,其巨大的资源价值尚未得到充分利用。为充分发挥黑水虻的资源价值,促进其产业化发展,未来的研究可以围绕以下 3 个方面展开。

黑水虻高附加值产品的开发:黑水虻在处理有机固体废弃物的同时,能够产生虫体和虫粪两种副产品,若能基于此研发出其他高附加值产品,则可以在很大程度上提高经济效益,推动其产业化发展。这方面的研究包含以下几个方向:黑水虻蛋白、活性肽的作用机理研究,及其功能性产品的开发;黑水虻脂类的提取及其在化妆品和生物燃料方面的应用;黑水虻虫粪的施用对不同作物育苗期的影响,及其育苗基质的开发。

黑水虻人工繁育和大规模饲养技术及设备的开发:黑水虻产业化发展离不开源源不断的虫卵供应,因此,如何实现黑水虻的人工繁育,尤其是在北方寒冷地区的人工繁育,成为当前急需解决的关键问题。此外,为实现黑水虻处理有机废弃物的工业化生产,在其大规模饲养技术和自动化、机械化设备方面还需要投入更多研究。例如,黑水虻虫卵孵化及低龄幼虫饲养管理的技术规程、黑水虻立体化饲养设备和虫粪分离设备等。

黑水虻处理有机废弃物的过程中不可避免地接触一些有毒有害物质,因此黑水虻用作蛋白质饲料的安全性问题一直备受关注。虽然黑水虻的处理能去除大部分病原微生物、农药、抗生素,但在某些条件下也会造成重金属元素的富集[105],但与常见的水产类食物相比其风险并不高[106]。大规模饲养黑水虻可能会增加地下水、土壤和周围环境中重金属和有机物污染的风险。这主要是由于黑水虻在分解有机物的过程中,可能会产生或富集某些污染物。黑水虻对有机物的分解会产生大量的氨、二氧化碳等有害气体,这些气体如果处理不当,有可能对环境 and 人类健康造成负面影响。当前随着自动化程度的提高,许多自动化智能养殖设备被开发用于有机废弃物养殖黑水虻,养殖过程中对环境的影响也会大幅度降低。

昆虫生物转化技术是新兴产业,能耗低、效率高、产品附加值高,但实现规模化生产还难以实现,仍然需要技术的支撑,未来还需不断加大研发力度,推进昆虫生物转化进一步发展。

参考文献

- [1] Siddiqui, S.A., Harahap, I.A., Osei-Owusu, J., Saikia, T., Wu, Y.S., Fernando, I., *et al.* (2024) Bioconversion of Organic Waste by Insects—A Comprehensive Review. *Process Safety and Environmental Protection*, **187**, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.122>
- [2] Kim, C., Ryu, J., Lee, J., Ko, K., Lee, J., Park, K.Y., *et al.* (2021) Use of Black Soldier Fly Larvae for Food Waste Treatment and Energy Production in Asian Countries: A Review. *Processes*, **9**, Article 161. <https://doi.org/10.3390/pr9010161>
- [3] Kinasih, I., Putra, R.E., Permana, A.D., Gusmara, F.F., Nurhadi, M.Y. and Anitasari, R.A. (2018) Growth Performance of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) Fed on Some Plant Based Organic Wastes. *HAYATI Journal of Biosciences*, **25**, 79. <https://doi.org/10.4308/hjb.25.2.79>

- [4] Kinasih, I., Suryani, Y., Paujiah, E., Ulfa, R., Afiyati, S., Adawiyah, Y., *et al.* (2020) Performance of Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, Larvae during Valorization of Organic Wastes with Changing Quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **593**, Article 12040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/593/1/012040>
- [5] Footprint, F.W. (2013) Food Wastage Footprint: Impacts on Natural Resources: Summary Report. Food & Agriculture Organization of the UN (FAO).
- [6] Chun, C.Y., Yoong, L.S., Kim, L.P., Hock, T.L. and Ling, L.J. (2019) Comparison of *Hermetia illucens* Larvae and Pre-Pupae as Potential Aqua Feed Derived from the Biotransformation of Organic Waste. *AIP Conference Proceedings*, Perak, 23-26 April 2019, Article 20008. <https://doi.org/10.1063/1.5126543>
- [7] Lalander, C., Diener, S., Zurbrugg, C. and Vinnerås, B. (2019) Effects of Feedstock on Larval Development and Process Efficiency in Waste Treatment with Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production*, **208**, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>
- [8] Mahmood, S., Bari Tabinda, A., Ali, A. and Zurbrugg, C. (2020) Reducing the Space Footprint of Black Soldier Fly Larvae Waste Treatment by Increasing Waste Feeding Layer Thickness. *Polish Journal of Environmental Studies*, **30**, 771-779. <https://doi.org/10.15244/pjoes/122618>
- [9] Shumo, M., Khamis, F.M., Tanga, C.M., Fiaboe, K.K.M., Subramanian, S., Ekesi, S., *et al.* (2019) Influence of Temperature on Selected Life-History Traits of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Reared on Two Common Urban Organic Waste Streams in Kenya. *Animals*, **9**, Article 79. <https://doi.org/10.3390/ani9030079>
- [10] Kim, C., Ryu, J., Lee, J., Ko, K., Lee, J., Park, K.Y., *et al.* (2021) Use of Black Soldier Fly Larvae for Food Waste Treatment and Energy Production in Asian Countries: A Review. *Processes*, **9**, Article 161. <https://doi.org/10.3390/pr9010161>
- [11] Singh, A. and Kumari, K. (2019) An Inclusive Approach for Organic Waste Treatment and Valorisation Using Black Soldier Fly Larvae: A Review. *Journal of Environmental Management*, **251**, Article 109569. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109569>
- [12] Lu, Y., Zhang, S., Sun, S., Wu, M., Bao, Y., Tong, H., *et al.* (2021) Effects of Different Nitrogen Sources and Ratios to Carbon on Larval Development and Bioconversion Efficiency in Food Waste Treatment by Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*). *Insects*, **12**, Article 507. <https://doi.org/10.3390/insects12060507>
- [13] da Silva, G.D.P. and Hesselberg, T. (2019) A Review of the Use of Black Soldier Fly Larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), to Compost Organic Waste in Tropical Regions. *Neotropical Entomology*, **49**, 151-162. <https://doi.org/10.1007/s13744-019-00719-z>
- [14] Purkayastha, D. and Sarkar, S. (2021) Sustainable Waste Management Using Black Soldier Fly Larva: A Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **19**, 12701-12726. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03524-7>
- [15] Raksasat, R., Lim, J.W., Kiatkittipong, W., Kiatkittipong, K., Ho, Y.C., Lam, M.K., *et al.* (2020) A Review of Organic Waste Enrichment for Inducing Palatability of Black Soldier Fly Larvae: Wastes to Valuable Resources. *Environmental Pollution*, **267**, Article 115488. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115488>
- [16] Ibadurrohman, K., Gusniani, I., Hartono, M.D. and Suwartha, N. (2020) The Potential Analysis of Food Waste Management Using Bioconversion of the Organic Waste by the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae in the Cafeteria of the Faculty of Engineering, Universitas Indonesia. *Evergreen*, **7**, 61-66. <https://doi.org/10.5109/2740946>
- [17] 孙运奇, 苗金辉, 周田田, 侯瑾, 任继波, 袁文鹏. 黑水虻生物转化有机废弃物研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(15): 10-13+17.
- [18] 胡法挺. 利用黑水虻养殖处理鸡粪的技术试验研究[J]. 浙江畜牧兽医, 2023, 48(4): 4-6.
- [19] Liu, C., Wang, C. and Yao, H. (2019) Comprehensive Resource Utilization of Waste Using the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae). *Animals*, **9**, Article 349.
- [20] 陈奕珊, 李秋红, 杨阳, 徐娜. 基于黑水虻转化厨余垃圾的经济影响分析[J]. 山西农经, 2023(12): 133-135.
- [21] Diener, S., Studt Solano, N.M., Roa Gutiérrez, F., Zurbrugg, C. and Tockner, K. (2011) Biological Treatment of Municipal Organic Waste Using Black Soldier Fly Larvae. *Waste and Biomass Valorization*, **2**, 357-363. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9079-1>
- [22] Fadhillah, N. and Bagastyo, A.Y. (2020) Utilization of *Hermetia Illucens* Larvae as a Bioconversion Agent to Reduce Organic Waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **506**, Article 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012005>
- [23] Nyakeri, E.M., Ogola, H.J., Ayieko, M.A. and Amimo, F.A. (2017) An Open System for Farming Black Soldier Fly Larvae as a Source of Proteins for Small-Scale Poultry and Fish Production. *Journal of Insects as Food and Feed*, **3**, 51-56. <https://doi.org/10.3920/jiff2016.0030>
- [24] Shumo, M., Osuga, I.M., Khamis, F.M., Tanga, C.M., Fiaboe, K.K.M., Subramanian, S., *et al.* (2019) The Nutritive

- Value of Black Soldier Fly Larvae Reared on Common Organic Waste Streams in Kenya. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 10110. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46603-z>
- [25] Lalander, C., Diener, S., Zurbrugg, C. and Vinnerås, B. (2019) Effects of Feedstock on Larval Development and Process Efficiency in Waste Treatment with Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production*, **208**, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>
- [26] Tanga, C.M., Waweru, J.W., Tola, Y.H., Onyoni, A.A., Khamis, F.M., Ekesi, S., *et al.* (2021) Organic Waste Substrates Induce Important Shifts in Gut Microbiota of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.): Coexistence of Conserved, Variable, and Potential Pathogenic Microbes. *Frontiers in Microbiology*, **12**, Article 635881. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.635881>
- [27] Cheng, J.Y.K., Chiu, S.L.H. and Lo, I.M.C. (2017) Effects of Moisture Content of Food Waste on Residue Separation, Larval Growth and Larval Survival in Black Soldier Fly Bioconversion. *Waste Management*, **67**, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.046>
- [28] Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S. and Savastano, D. (2017) Environmental Impact of Food Waste Bioconversion by Insects: Application of Life Cycle Assessment to Process Using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, **140**, 890-905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.154>
- [29] Yildirim-Aksoy, M., Eljack, R. and Beck, B.H. (2020) Nutritional Value of Frass from Black Soldier Fly Larvae, *Hermetia illucens*, in a Channel Catfish, *Ictalurus punctatus*, Diet. *Aquaculture Nutrition*, **26**, 812-819. <https://doi.org/10.1111/anu.13040>
- [30] 邹修为. 黑水虻幼虫肠道微生物 y4-39 抗菌活性测定及其比较基因组学分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [31] 姚佳兴. 黑水虻的营养价值评定及其对蛋鸡饲喂效果的影响[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [32] Gold, M., Tomberlin, J.K., Diener, S., Zurbrugg, C. and Mathys, A. (2018) Decomposition of Biowaste Macronutrients, Microbes, and Chemicals in Black Soldier Fly Larval Treatment: A Review. *Waste Management*, **82**, 302-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>
- [33] Pang, W., Hou, D., Chen, J., Nowar, E.E., Li, Z., Hu, R., *et al.* (2020) Reducing Greenhouse Gas Emissions and Enhancing Carbon and Nitrogen Conversion in Food Wastes by the Black Soldier Fly. *Journal of Environmental Management*, **260**, Article 110066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110066>
- [34] 李庆, 秦文杰, 曹秀芳, 后德家, 江洪. 基于黑水虻转化的畜禽粪便资源化利用研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 169-175.
- [35] 牛世华, 廖新梯, 邢斯程. 黑水虻对畜禽粪便的生物转化作用研究进展[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(11): 1-7.
- [36] 喻国辉, 陈燕红, 喻子牛, 程萍. 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.
- [37] 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>
- [38] Cai, M., Ma, S., Hu, R., Tomberlin, J.K., Yu, C., Huang, Y., *et al.* (2018) Systematic Characterization and Proposed Pathway of Tetracycline Degradation in Solid Waste Treatment by *Hermetia illucens* with Intestinal Microbiota. *Environmental Pollution*, **242**, 634-642. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.105>
- [39] Liu, C., Yao, H., Chapman, S.J., Su, J. and Wang, C. (2020) Changes in Gut Bacterial Communities and the Incidence of Antibiotic Resistance Genes during Degradation of Antibiotics by Black Soldier Fly Larvae. *Environment International*, **142**, Article 105834. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105834>
- [40] Seyedalmoosavi, M.M., Mielenz, M., Veldkamp, T., Daş, G. and Metges, C.C. (2022) Growth Efficiency, Intestinal Biology, and Nutrient Utilization and Requirements of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Compared to Monogastric Livestock Species: A Review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, **13**, Article No. 31. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00682-7>
- [41] 王聪, 叶小梅, 杜静, 王莉. 黑水虻对不同畜禽粪便生物转化效果研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(12): 95-100.
- [42] Liu, T., Awasthi, S.K., Qin, S., Liu, H., Awasthi, M.K., Zhou, Y., *et al.* (2021) Conversion Food Waste and Sawdust into Compost Employing Black Soldier Fly Larvae (Diptera: Stratiomyidae) under the Optimized Condition. *Chemosphere*, **272**, Article 129931. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129931>
- [43] 毕峰. 社区易腐垃圾就地成肥设备中试及其臭气排放特征研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [44] 张杰, 温逸婷, 高正辉, 雷朝亮, 朱芬. 黑水虻的资源化利用研究现状[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(5): 997-1006.
- [45] 杨燕, 严欢, 赵智勇, 陈吉红, 信爱国. 以黑水虻为媒介处理两种疫病致死猪的安全性检测[J]. 养猪, 2016(4): 85-86.

- [46] 姜慧敏, 王文霞, 任苗苗, 金宁, 路延, 张守玉, 许建强, 徐卫平. 黑水虻转化厨余垃圾过程中病原菌灭活规律的研究与综合评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1011-1022.
- [47] Gobbi, P., Martínez-Sánchez, A. And Rojo, S. (2013) The Effects of Larval Diet on Adult Life-History Traits of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *European Journal of Entomology*, **110**, 461-468. <https://doi.org/10.14411/eje.2013.061>
- [48] Hoc, B., Noël, G., Carpentier, J., Francis, F. and Caparros Megido, R. (2019) Optimization of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Artificial Reproduction. *PLOS ONE*, **14**, e0216160. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216160>
- [49] Le Gall, M. and Behmer, S.T. (2014) Effects of Protein and Carbohydrate on an Insect Herbivore: The Vista from a Fitness Landscape. *Integrative and Comparative Biology*, **54**, 942-954. <https://doi.org/10.1093/icb/icu102>
- [50] Liu, X., Chen, X., Wang, H., Yang, Q., ur Rehman, K., Li, W., et al. (2017) Dynamic Changes of Nutrient Composition Throughout the Entire Life Cycle of Black Soldier Fly. *PLOS ONE*, **12**, e0182601. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182601>
- [51] Macavei, L.I., Benassi, G., Stoian, V. and Maistrello, L. (2020) Optimization of *Hermetia illucens* (L.) Egg Laying under Different Nutrition and Light Conditions. *PLOS ONE*, **15**, e0232144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232144>
- [52] Li, X., Zhou, Z., Zhang, J., Zhou, S. and Xiong, Q. (2021) Conversion of Mixtures of Soybean Curd Residue and Kitchen Waste by Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.). *Insects*, **13**, Article 23. <https://doi.org/10.3390/insects13010023>
- [53] 吉红, 夏濛, 胡泽超. 黑水虻作为水产饲料蛋白质原料的研究进展[J]. 饲料工业, 2023, 44(16): 1-16.
- [54] 张慧洁, 夏嫻. 黑水虻幼虫在饲料及无害化处理应用领域研究进展[J]. 饲料工业, 2024, 45(4): 137-144.
- [55] 仲崇华, 桂福星, 曹立亭, 郭荣富. 黑水虻对猪禽肠道健康和肠道菌群影响的研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2022, 49(10): 29-37.
- [56] 赵燕, 宋斌, 侯凤香, 金俊杰, 陈晓勇, 李紫薇, 张雅文, 卢立志. 黑水虻幼虫粉替代豆粕对蛋鸡产蛋性能, 血清指标及免疫功能的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(3): 240-246.
- [57] 易鑫, 徐丹, 陈芬, 赵小玲, 陈勇, 韩雪, 舒刚. 黑水虻, 黄粉虫对蛋鸡生产性能, 蛋品质及蛋风味的影响[J]. 饲料工业, 2022, 43(18): 8-12.
- [58] Schiavone, A., De Marco, M., Martínez, S., Dabbou, S., Renna, M., Madrid, J., et al. (2017) Nutritional Value of a Partially Defatted and a Highly Defatted Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) Meal for Broiler Chickens: Apparent Nutrient Digestibility, Apparent Metabolizable Energy and Apparent Ileal Amino Acid Digestibility. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, **8**, Article No. 51. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0181-5>
- [59] Kinasih, I., Julita, U., Suryani, Y., Cahyanto, T., Annisa, D.S., Yuliawati, A., et al. (2018) Addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) and Propolis to Broiler Chicken Performance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **187**, Article 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/187/1/012026>
- [60] 谢飞. 仔猪对几种非常规蛋白原料有效能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [61] 鲍晓伟, 杨仁灿, 沙茜, 胡清泉, 张汝, 常雅洁, 张斌, 陈吉红, 赵智勇. 黑水虻幼虫粉替代豆粕对建水黄褐鸭肌肉氨基酸、脂肪酸水平的影响[J]. 中国饲料, 2023(16): 85-89.
- [62] 胡俊茹, 王国霞, 黄文庆, 赵红霞, 莫文艳, 黄燕华. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对凡纳滨对虾幼虾生长性能、体组成、血清生化指标和抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(11): 5292-5300.
- [63] 肖扬波, 曹申平, 敖青, 黄康, 莫郁坚, 张欣然, 郑欣怡, 童晓念, 毛庄文, 樊均德, 刘臻, 唐建洲. 低鱼粉饲料中黑水虻幼虫粉替代鱼粉对合方鲫生长性能、消化能力、血浆生化指标及相关基因表达的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(9): 1363-1373.
- [64] Papuc, T., Boaru, A., Ladosi, D., Struti, D. and Georgescu, B. (2020) Potential of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Alternative Protein Source in Salmonid Feeds—A Review. *Indian Journal of Fisheries*, **67**, 160-170.
- [65] Renna, M., Schiavone, A., Gai, F., Dabbou, S., Lussiana, C., Malfatto, V., et al. (2017) Evaluation of the Suitability of a Partially Defatted Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Larvae Meal as Ingredient for Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) Diets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, **8**, Article No. 57. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0191-3>
- [66] 蔺玉珍, 王伟伟. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、血清生化指标、肉品质的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(18): 44-49.
- [67] Fronte, B., Licitra, R., Bibbiani, C., Casini, L., de Zoysa, M., Miragliotta, V., et al. (2021) Fishmeal Replacement with *Hermetia illucens* Meal in Aquafeeds: Effects on Zebrafish Growth Performances, Intestinal Morphometry, and Enzymology. *Fishes*, **6**, Article 28. <https://doi.org/10.3390/fishes6030028>

- [68] 韩光明, 张家宏, 吴雷明, 寇祥明, 叶小梅, 覃宝利, 毕建花, 王守红, 徐荣, 马林杰, 张诚信, 杨婷. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对克氏原螯虾生长、体组成及免疫力的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(7): 4495-4506.
- [69] Limbu, S.M., Shoko, A.P., Ulotu, E.E., Luvanga, S.A., Munyi, F.M., John, J.O., *et al.* (2022) Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*, L.) Larvae Meal Improves Growth Performance, Feed Efficiency and Economic Returns of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*, L.) Fry. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, **2**, 167-178. <https://doi.org/10.1002/aff2.48>
- [70] Terova, G., Rimoldi, S., Ascione, C., Gini, E., Ceccotti, C. and Gasco, L. (2019) Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Gut Microbiota Is Modulated by Insect Meal from *Hermetia illucens* Prepupae in the Diet. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **29**, 465-486. <https://doi.org/10.1007/s11160-019-09558-y>
- [71] Rimoldi, S., Antonini, M., Gasco, L., Moroni, F. and Terova, G. (2021) Intestinal Microbial Communities of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) May Be Improved by Feeding a *Hermetia illucens* Meal/Low-Fishmeal Diet. *Fish Physiology and Biochemistry*, **47**, 365-380. <https://doi.org/10.1007/s10695-020-00918-1>
- [72] 孙秋璇. 黑水虻消化生理研究及饲用安全性评价[D]: [硕士学位论文]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2023.
- [73] Barragan-Fonseca, K.B., Dicke, M. and van Loon, J.J.A. (2017) Nutritional Value of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) and Its Suitability as Animal Feed—A Review. *Journal of Insects as Food and Feed*, **3**, 105-120. <https://doi.org/10.3920/jiff2016.0055>
- [74] 徐歆歆, 王文韬, 吉红. 黑水虻油脂的提取及理化性质分析[J]. 饲料工业, 2022, 43(12): 48-52.
- [75] 袁海林, 李向策, 孙秋璇, 高红燕, 黄燕华, 周萌. 黑水虻油的研究与综合利用[J]. 环境昆虫学报, 2023, 45(5): 1174-1182.
- [76] Leong, S.Y., Kutty, S.R.M., Malakahmad, A. and Tan, C.K. (2016) Feasibility Study of Biodiesel Production Using Lipids of *Hermetia illucens* Larva Fed with Organic Waste. *Waste Management*, **47**, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.030>
- [77] Kamarulzaman, M.K., Abdullah, A. and Mamat, R. (2018) Combustion, Performances, and Emissions Characteristics of *Hermetia illucens* Larvae Oil in a Direct Injection Compression Ignition Engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **41**, 1483-1496. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1548524>
- [78] Kamarulzaman, M.K. and Abdullah, A. (2020) Multi-Objective Optimization of Diesel Engine Performances and Exhaust Emissions Characteristics of *Hermetia illucens* Larvae Oil-Diesel Fuel Blends Using Response Surface Methodology. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **47**, 2952-2965. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1849450>
- [79] 吴晗, 冯思静, 胡文敬, 李久盛. 五龄黑水虻油脂衍生物作为润滑油添加剂的性能研究[J]. 摩擦学学报, 2023, 44(1): 87-96.
- [80] 向志雄, 毛金佼, 汪铁林, 熊晶, 王存文. 硫化酯交换黑水虻油脂的制备及其摩擦学特性[J]. 摩擦学学报, 2022, 43(9): 1055-1062.
- [81] Xu, W., Xu, L., Liu, X., He, S., Ji, Y., Wang, W., *et al.* (2021) An Effective Strategy for the Production of Lauric Acid-Enriched Monoacylglycerol via Enzymatic Glycerolysis from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae (BSFL) Oil. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **193**, 2781-2792. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03565-1>
- [82] Li, Y., Xiang, Q., Zhang, Q., Huang, Y. and Su, Z. (2012) Overview on the Recent Study of Antimicrobial Peptides: Origins, Functions, Relative Mechanisms and Application. *Peptides*, **37**, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2012.07.001>
- [83] Yi, H., Chowdhury, M., Huang, Y. and Yu, X. (2014) Insect Antimicrobial Peptides and Their Applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **98**, 5807-5822. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5792-6>
- [84] Józefiak, A. and Engberg, R. (2017) Insect Proteins as a Potential Source of Antimicrobial Peptides in Livestock Production. A Review. *Journal of Animal and Feed Sciences*, **26**, 87-99. <https://doi.org/10.22358/jafs/69998/2017>
- [85] 章启慧, 李昆太, 王会, 王飞, 王雷雨, 陈玉梁, 杨钰妮. 黑水虻抗菌肽研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(4): 996-1004.
- [86] 胡霞, 刘晓琳, 何亮, 杨泽众, 白义川, 谷希树. 黑水虻抗菌肽 dfs1 的克隆与生物信息学分析[J]. 天津农业科学, 2022, 28(5): 9-13.
- [87] Lee, K., Yun, E. and Goo, T. (2020) Antimicrobial Activity of an Extract of *Hermetia illucens* Larvae Immunized with *Lactobacillus Casei* against *Salmonella* Species. *Insects*, **11**, Article 704. <https://doi.org/10.3390/insects11100704>
- [88] 张飞骏, 韩新才, 厉莉, 陈杏洲, 王存文. 黑水虻抗菌肽对曲霉和沙门氏菌的抑制作用及其营养成分研究[J]. 中国饲料, 2023, 1(9): 26-29.
- [89] Auza, F.A., Purwanti, S., Syamsu, J.A. and Natsir, A. (2020) Antibacterial Activities of Black Soldier Flies (*Hermetia illucens*, L.) Extract towards the Growth of *Salmonella typhimurium*, *E.coli* and *Pseudomonas aeruginosa*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **492**, Article 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/492/1/012024>

- [90] 许晓燕, 孙虹霞, 崔会程, 胡紫媛, 夏嫒. 黑水虻抗菌肽 hi-3 对 raw264.7 细胞免疫调控作用研究[J]. 环境昆虫学报, 2023, 45(2): 464-472.
- [91] 冯群, 徐晨露, 崔会程, 孙虹霞, 嫒夏. 黑水虻幼虫抗菌肽 Hi-3 对结肠癌 Hct-8 细胞凋亡影响及其机制研究[J]. 环境昆虫学报, 2023, 45(5): 1375-1384.
- [92] 韩俊彦, 张轩, 李岩, 刘飞虎, 李玉峰. 餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(S2): 346-347.
- [93] 常燕青, 黄慧敏, 赵振振, 殷俊, 张红亮, 张进锋. 餐厨垃圾资源化处理与高值化利用技术发展展望[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(1): 44-51.
- [94] 王小波, 吴翔, 郭雪琦, 陈移波, 王金龙, 徐晓燕. 黑水虻虫粪对水稻生长及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1874-1882.
- [95] 袁华冠, 杨成, 刘刚, 潘远雄, 杨爱爱, 孟凡非, 彭艳. 黑水虻虫沙施用对蔬菜生长, 品质和土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(5): 99-106.
- [96] 赵毅, 耿伟娜, 王小波, 徐晓燕. 黑水虻虫粪肥对土壤理化性质及烟草生长的影响[J]. 湖南农业科学, 2022(7): 31-34.
- [97] 江承亮. 黑水虻幼虫肠道菌群对餐厨垃圾生物降解的影响机制研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [98] 徐健. 发酵饲料对黑水虻生长性能的影响及黑水虻消化酶活和肠道菌群的特征研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [99] 袁志能, 徐浪, 尤珂珂, 王冰洋, 李萍, 黄庭发, 余道坚, 周强. 进境小麦下脚料养殖黑水虻幼虫的饲料配比研究[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(2): 287-293.
- [100] 陈兆强, 缪菲, 孙铮, 李荣, 陈伟, 赵建国. 黑水虻幼虫在不同比例牛粪与麸皮混合基质中生长规律的研究[J]. 热带农业工程, 2018, 42(2): 47-10.
- [101] Shanti, M.S., 林俊宏, 朱剑锋, 朱辉, 李楚君, 庞旭, 董璐, 胡文锋. 酶菌联用降解羽毛工艺优化及降解产物对黑水虻幼虫生长性能的影响[J]. 饲料工业, 2017, 38(22): 41-46.
- [102] 麦力文, 杨霞, 王定美, 李勤奋. 不同初始碳氮比对黑水虻生物转化鸡粪效果的影响[J]. 家畜生态学报, 2023, 44(7): 78-85.
- [103] Gao, Z., Wang, W., Lu, X., Zhu, F., Liu, W., Wang, X., et al. (2019) Bioconversion Performance and Life Table of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) on Fermented Maize Straw. *Journal of Cleaner Production*, **230**, 974-980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.074>
- [104] 王涛, 印婷, 刘轩, 黄振兴. 益生菌预发酵强化黑水虻转化餐厨垃圾合成虫体蛋白[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(5): 157-164.
- [105] 石冬冬, 范志影, 商方方, 李俊. 餐厨废弃物饲养的黑水虻虫干饲用安全性研究[J]. 饲料工业, 2021, 42(20): 50-54.
- [106] 周海泳, 朱剑锋, 祁姣姣, 李楚君, 陈彤, 胡斌, 胡文锋. 食用和饲用昆虫的安全性分析[J]. 广东饲料, 2021, 30(7): 27-31.