

黑水虻生物转化有机废弃物研究进展

孙运奇, 苗金辉, 周田田, 侯瑾, 任继波, 袁文鹏*

(齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院菏泽分院, 山东省生物工程技术创新中心, 山东菏泽 274000)

摘要 随着我国经济社会的快速发展, 日益增长的有机废弃物带来的环境污染问题越来越严重。黑水虻作为一种营腐生性的水虻科昆虫, 其幼虫可以将餐厨垃圾、畜禽粪便等有机废弃物快速转化为优质的虫体蛋白和脂肪等营养物质, 在消除环境污染的同时, 有效提升有机废弃物资源化利用效率。近年来, 黑水虻的研究开发利用得到了快速发展, 对黑水虻的生物学特性、有机废弃物处理研究进展、黑水虻产业化发展过程中存在的问题等进行了综述, 以期对黑水虻产业发展提供参考。

关键词 黑水虻; 生物转化; 废弃物处理; 产业化

中图分类号 X174 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)15-0010-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.15.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

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

SUN Yun-qi, MIAO Jin-hui, ZHOU Tian-tian et al (Heze Branch, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Biological Engineering Technology Innovation Center of Shandong Province, Heze, Shandong 274000)

Abstract With the rapid development of economy and society in China, the environmental pollution problem caused by the growing organic waste is becoming more and more serious. As a saprophytic insect of Tabanidae, the larvae of *Hermetia illucens* can quickly transform organic wastes such as kitchen waste and livestock and poultry feces into high-quality nutrients such as protein and fat, and effectively improve the efficiency of resource utilization of organic wastes while eliminating environmental pollution. In recent years, the research, development and utilization of *Hermetia illucens* has been rapidly developed. The biological characteristics of *Hermetia illucens*, the research progress of organic waste treatment and the problems existing in the development of *Hermetia illucens* industrialization were reviewed in order to provide references for the development of *Hermetia illucens* industry.

Key words *Hermetia illucens*; Biotransformation; Waste management; Industrialization

随着我国经济社会的快速发展, 日益增长的有机废弃物带来的环境污染问题越来越严重。为解决餐厨垃圾、畜禽粪便等有机废弃物带来的环境污染问题, 开发其资源价值, 国内外研究人员先后开发了包括填埋处理、焚烧及生物质能转化^[1]、好氧堆肥^[2]、厌氧消化^[3]及饲料化^[4]等在内的多种技术方案, 但以上处理方法存在能耗和处理成本高、处理周期较长或易产生二次污染等问题。

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的一种腐食性昆虫^[5], 其幼虫也称为“凤凰虫”, 是与黄粉虫、大麦虫和蝇蛆等齐名的资源昆虫, 在全球热带、亚热带及温带的大部分地区都有分布。黑水虻作为一种营腐生性的水虻科昆虫, 其幼虫可以将餐厨垃圾、畜禽粪便等有机废弃物快速转化为优质的虫体蛋白和脂肪等营养物质, 在消除环境污染的同时, 有效提升有机废弃物资源化利用效率。自20世纪七八十年代以来, 国内外学者陆续对黑水虻开展了诸多基础和应用研究, 特别是近年来黑水虻的研究与开发利用得到了快速发展^[6-9]。笔者对黑水虻的生物学特性、有机废弃物处理研究进展、黑水虻产业化发展过程中存在的问题等进行了综述, 以期对黑水虻产业发展提供参考。

1 黑水虻的生物学特性

黑水虻是一种完全变态昆虫, 其生活史一般分为卵、幼

虫、蛹、成虫4个阶段, 通常世代周期30~35 d。黑水虻幼虫分为6个龄期, 自3龄期后食量开始明显增大, 6龄预蛹体表颜色从乳白色逐步变为深褐色, 并从食料中迁出, 寻找隐蔽、干燥和有缝隙的地方等待化蛹^[10]。黑水虻成虫口器退化, 不取食, 不进入人类居室。研究发现, 黑水虻是一种日行性昆虫, 阳光是诱导黑水虻成虫交配的重要环境因素, 而气味则是引诱黑水虻雌性成虫寻找适宜产卵场所的重要因素^[11-12]。

黑水虻幼虫阶段营腐生生活, 繁殖速度快, 消化能力强, 食谱范围广, 抗逆性强, 不携带病菌, 可以高效地将餐厨垃圾、畜禽粪便、废弃果蔬等在内的众多有机废弃物营养吸收转化为自身营养物质^[13-15]。相关试验显示, 黑水虻幼虫可减少约65%的餐厨垃圾^[16]、50%以上猪粪和鸡粪^[17]的堆积问题, 可减少养牛场30%~50%的氮排放和60%~70%的磷排放^[18]。在生物转化过程中, 黑水虻幼虫的机械蠕动使有机废弃物始终处于有氧环境中, 水分蒸发速度加快, 难闻气味和病原微生物载体根本性减少, 并能通过生存竞争有效控制家蝇等双翅目昆虫的滋生^[19]。此外, 研究表明黑水虻幼虫的营养组成具有一定的可塑性, 其体内特定营养组分的含量高低可通过调节其采食的有机废弃物的营养来实现^[20-23]。分析表1数据可知, 黑水虻烘干虫粉中粗脂肪、钙和灰分的含量受到采食底物的影响较大, 而蛋白质和氨基酸组成则相对比较稳定。

2 黑水虻生物转化有机废弃物研究

利用黑水虻处理有机废弃物作为一种新兴的废弃物资源化利用技术, 具有良好的市场应用前景。目前研究人员已经对黑水虻生长繁育所需的适宜温度^[24]、空气相对湿度^[25]、

基金项目 山东省科学院菏泽分院科研人才提升项目(801521010100000002)。

作者简介 孙运奇(1986—), 男, 山东临沂人, 研究实习员, 硕士, 从事有机废弃物资源化利用和产业化推广研究。*通信作者, 副研究员, 博士, 从事生物医药产品开发研究。

收稿日期 2021-03-10

光照^[26-27]、饲料含水量^[28]、抗逆性^[29-30]等基础条件进行了研究,产业化应用技术研究也在快速推进。

表 1 采食不同底物黑水虻与鱼粉和豆粕的营养成分含量比较^[23]

Table 1 Comparison of nutritional contents of <i>Hermetia illucens</i> with different substrates, fish meal and soybean meal							%
原料 Raw material		干物质 Dry matter	粗蛋白质 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	钙 Calcium	磷 Phosphorus	粗灰分 Crude ash
黑水虻虫粉 <i>Hermetia illucens</i> powder	麦糠鸡粪	97.2	33.1	30.0	5.13	1.16	19.8
	饲料	97.4	30.1	35.6	2.49	0.93	16.5
	纯鸡粪	93.5	36.3	15.3	7.54	1.37	28.3
	餐余垃圾	96.5	34.2	33.1	5.51	0.75	17.2
豆粕 Soybean meal		88.0	48.0	1.0	0.34	0.25	6.0
鱼粉 Fish meal		90.0	65.0	9.7	3.96	3.05	14.5

原料 Raw material		必需氨基酸(占总蛋白质的含量) Essential amino acids (content of total protein)								
		精氨酸 Arginine	组氨酸 Histidine	异亮氨酸 Isoleucine	亮氨酸 Leucine	赖氨酸 Lysine	蛋氨酸 Methi- onine	苯丙氨酸 Phenyl- alanine	苏氨酸 Threonine	缬氨酸 Valine
黑水虻虫粉 <i>Hermetia illucens</i> powder	麦糠鸡粪	4.99	3.57	3.48	5.71	6.05	1.51	3.56	2.27	7.65
	饲料	4.38	3.32	3.32	5.51	5.61	1.33	3.32	2.19	6.40
	纯鸡粪	5.02	3.50	3.58	5.76	6.37	1.54	3.50	2.45	7.11
	餐余垃圾	4.65	3.39	3.42	5.41	5.64	1.40	3.39	2.16	7.28
豆粕 Soybean meal		7.50	5.52	4.53	7.67	6.19	1.31	5.52	2.80	4.62
鱼粉 Fish meal		5.47	3.91	4.10	7.29	7.55	2.71	3.91	3.56	4.81

2.1 黑水虻处理餐厨垃圾 随着人民生活水平的提高和城市化进程的加快,城市餐厨垃圾也呈快速增长的趋势,大量的餐厨垃圾如处理不当会严重影响人们的身体健康和生态环境。与其他废弃物相比,餐厨垃圾营养更丰富,具有较高的生物转化价值。任立斌^[31]研究发现,黑水虻能够承受 6% 的渗透压,黑水虻幼虫最适生长含水率为 70%,最适 pH 为 3,最适含油量 2%。尹靖凯等^[32]研究表明,经过黑水虻幼虫 8 d 的转化,餐厨垃圾干物质可减少率为 74.0%,干物质转化率为 33.9%;转化后黑水虻虫体内的粗蛋白和脂肪含量分别为 45.1% 和 48.1%,分别是原餐厨垃圾中蛋白和脂肪总量的 61.3% 和 64.0%。熊彩虹等^[33]研究显示,餐厨垃圾养殖黑水虻鲜虫产率达 12%~20%,虫沙得率为 15%~20%;黑水虻幼虫干粉中共有 17 种氨基酸,其中必需氨基酸有 9 种,并以缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸和精氨酸为主,而脂肪酸以月桂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸为主,且幼虫干粉中月桂酸含量最高。任立斌等^[34]还构建了以黑水虻为核心的新型餐厨垃圾处理系统,为实现餐厨垃圾处理区域点、面源全覆盖,促进居民垃圾分类的积极性和责任感,提高餐厨垃圾的回收和资源化利用提供思路和解决方案。

利用餐厨垃圾饲养黑水虻养殖周期短、虫体产量高、饲料转化率和幼虫存活率高,具有较好的经济效益^[35-36]。虽然不同地区饮食习惯差异造成餐厨垃圾成分含量的差异化^[37],但研究表明黑水虻对饥饿、pH、辣度和盐度等环境条件具有良好的耐受性^[38-39],这为利用餐厨垃圾实现规模化黑水虻养殖提供了有力支撑。

2.2 黑水虻处理畜禽粪便 畜禽粪便处理难一直制约着整个养殖产业的良性和可持续发展,黑水虻转化畜禽粪便时,

不仅可以减少粪便的积累,消除粪便的恶臭气味,降低环境污染,同时还可以降低粪便中的有害微生物含量,如粪便中的大肠杆菌、沙门氏菌和金黄色葡萄球菌等^[19]。

解慧梅等^[40]评价了黑水虻规模化处理猪场粪便的可行性及处理效果,发现 4 日龄黑水虻幼虫、鲜猪粪、堆料厚度 15 cm 的组合处理效果较好,这为黑水虻处理规模化猪场粪便提供了试验依据。马加康等^[41]探讨了黑水虻幼虫对新鲜鸭粪的处理能力及粪便转化的效果,结果显示鸭粪可以作为黑水虻幼虫的饲料,添加量以 60% 为宜,饲养效果较为理想。Craig 等^[7]研究表明,黑水虻可以以 8% 的转化率将鸡粪(干重)转化为粗蛋白和脂肪,比重分别为 42% 和 35%。郭会茹等^[42]试验显示,鸡粪饲养的黑水虻幼虫含水量为 69.1%,粗蛋白、粗脂肪、粗灰分分别占干物质含量的 37.60%、36.00%、5.46%;黑水虻幼虫总氨基酸含量达 32.27%,赖氨酸占粗蛋白质的 5.80%,总游离脂肪酸含量为 22.39%,高效抗菌物质月桂酸的含量高达 8.88%。St-Hilaire 等^[43]研究显示以牛粪饲喂黑水虻幼虫,在预蛹前加入 28% 的鱼加工废弃物混合饲喂 24 h,可以显著提高黑水虻预蛹的 σ -3 脂肪酸的含量。此外,研究显示黑水虻对畜禽粪便中的重金属也有解毒作用^[44]。利用黑水虻在自然界采食粪便的生物学特性,用来大规模地生物转化畜禽粪便,是有效解决畜禽粪便无害化、资源化利用的一种重要途径。

2.3 黑水虻处理其他有机废弃物 黑水虻不属于任何形式的农业害虫、卫生害虫或入侵生物种类,用豆渣、玉米渣等食品级原料饲养的黑水虻是可以放心使用的饲料级或食品级的蛋白质和脂肪来源^[23]。魏亚茹^[45]利用黑水虻对城市剩余脱水污泥的生态处理研究显示,污泥干重减量与污泥比例呈

正相关,在污泥含量 60%时去除率最大,达到 14.72%,黑水虻虫体蛋白质含量为 13.72%~17.71%,这为更深入探究黑水虻对有机污泥的生态削减与控制提供了科学依据。杨燕等^[46]以黑水虻为媒介处理猪伪狂犬病和猪高致病性蓝耳病 2 种疫病致死猪病料,检测结果表明,收获的黑水虻虫体中这 2 种疫病菌核酸检测都呈阴性,初步提示黑水虻可以用于病死畜禽尸体的无害化处理。

3 黑水虻处理有机废弃物产业存在的问题

我国的高校、科研院所等从欧美发达国家引进黑水虻已有十几年,但大多还停留在理论研究^[47-49]以及小规模产业化技术研发^[50-52]层面上,真正能够实现规模化生产并能够持续运转的企业并不多,业界还没有实现黑水虻生物转化有机废弃物产业化的快速突破,存在的主要问题概括如下。

3.1 黑水虻人工种虫繁育困难 黑水虻种虫交配产卵稳定是实现黑水虻养殖产业化的前提,尽管黑水虻单雌成虫产卵量很高^[10],但因在自然条件下种虫交配率低、形成受精卵的比例低,特别是冬春两季,导致收获的虫卵无法满足生产所需。黑水虻种虫交配繁育困难成为制约黑水虻产业化快速发展的关键。

3.2 黑水虻周年化和规模化养殖技术尚不成熟 黑水虻的养殖受环境条件(尤其是温度)的影响很大,在国内不同地区、不同气候环境条件下实现黑水虻周年化、规模化养殖,首先要满足黑水虻生长各阶段过程中对温度、湿度和光照等环境因素的需求,使黑水虻在最适条件下生长;其次还要加大对黑水虻养殖自动化、机械化设备的研发力度,如立体养殖设备和虫粪分离设备等,以减少用工数量和工人劳动强度,提高生产效率,降低生产成本;此外,还需要实现整个养殖工艺的模块化、标准化,并培养足够数量的专业技术人才。目前国内外都加大了对黑水虻周年化和规模化养殖技术开发的投入,从对黑水虻处理有机废弃物项目中盈利的预期导致了许多公司的成立,但这些企业不得不面临黑水虻养殖生产稳定性差、生产效率低等问题^[53],所以黑水虻周年化和规模化养殖技术尚不成熟。

3.3 黑水虻在水产和畜禽动物养殖领域应用进展缓慢 豆粕和鱼粉产量增长受限,多依赖进口,价格波动较大,加剧了养殖饲料蛋白的短缺,寻找质优价廉的替代蛋白产品已迫在眉睫^[54]。黑水虻作为一种可持续供给的新型动物蛋白原料,能够提供水产和畜禽动物所需的蛋白和能量。目前黑水虻在国外的产品形式多为脱脂虫粉,而国内有全脂虫干、脱脂虫干、虫油和虫浆发酵产品等应用形式,并且未有统一的产品质量标准。尽管黑水虻的营养价值已经被许多研究和工程实践所证实^[55-57],但由于绝大多数水产和畜禽养殖界的营养学家和配方设计人员都没有接触过黑水虻这种新型蛋白原料,故需要建立起更多研究、试验数据支撑的黑水虻饲用效果数据库,才能逐步实现黑水虻标准化、大规模的应用和推广,进一步提升其饲用价值。黑水虻养殖产业化刚刚起步,市场供应链不完善,目前大部分养殖企业均还处在做市场探索的阶段,黑水虻产品销售市场渠道还未打通。黑水虻

作为有机废弃物资源化利用的下游产物,在水产和畜禽养殖领域的推广应用需要产学研紧密合作,共同努力推动才能逐步达成。

4 展望

以黑水虻为生物媒介的有机废弃物生物转化系统,打破了常规以微生物降解为核心的固有处理技术格局。自从欧盟 2015/2283 和 2017/893 号条例允许在水产养殖饲料中使用黑水虻作为饲料蛋白源以来,全球食品和饲料行业对以黑水虻为代表的资源昆虫的开发利用越来越关注,黑水虻产业进入了快速发展阶段^[5]。为了充分发挥黑水虻作为有机固废处理新模式和新型饲料原料的优势,未来可围绕以下几个方面开展相关研究。

4.1 聚焦黑水虻人工种虫繁育技术研究 黑水虻虫源不足一直是规模化生产中亟需解决的问题,而解决虫源不足的关键是找到一种可以促进黑水虻稳定交配产卵的人工光源^[25,58],从而解决连续阴雨天及室内大规模养殖时所需的光照问题,打破困扰多年的黑水虻人工育种繁殖困难的技术瓶颈。近期已有研究人员研制出低能耗、长寿命的 LED 补光灯,通过不同光层模拟太阳光照,促进黑水虻交配产卵,可显著提高黑水虻人工种虫繁育效率^[59]。

4.2 建立标准化生产模式,逐步实现黑水虻工厂化生产 黑水虻工厂化生产是集自动化、机械化、规模化和标准化于一体的,不受季节影响的连续、高效养殖模式。随着劳动力成本不断上升、对黑水虻产品供应需求的增加以及对黑水虻产品品质要求的提升,黑水虻工厂化生产将成为黑水虻养殖产业发展的必由之路。未来需要持续加大研发投入,突破各环节技术难题,逐步建立完整的黑水虻人工繁育、环境控制^[60]、防病防疫等技术体系,使黑水虻全产业链能够实现标准化和可控操作,从而为后续固体有机废弃物规模化处置、黑水虻产品开发和深加工以及市场的大范围推广奠定坚实的基础。

4.3 加大黑水虻在水产和畜禽饲料产品中的研究和开发力度 黑水虻幼虫和预蛹作为具有生物活性的优质功能蛋白和脂肪来源,可作为鱼粉、豆粕和血浆蛋白粉等传统饲料蛋白源的补充。未来的研究重点包括:①在满足黑水虻存储和运输要求的前提下,加强黑水虻幼虫产品加工工艺的研究,如酶解和发酵工艺,以提高其在水产和畜禽动物中的应用效果;②进一步探究黑水虻制品在水产和畜禽动物中使用时的营养成分消化效率和能值,为其作为蛋白饲料源应用提供更多基础数据;③充分考虑配方的氨基酸平衡和脂肪酸组成,探究黑水虻不同制品在水产和畜禽不同品种或生长阶段中的最佳应用形式与添加量;④探究黑水虻制品及其不同组分在水产和畜禽动物中的应用效果和作用机制,特别是在免疫保护和抗应激方面的作用,为其深度应用提供理论依据和技术支持^[23]。

参考文献

- [1] 刘一秀,柴宝华,李文涛,等.城市生活垃圾和餐厨垃圾能源化利用现状分析[J].西北水电,2020(S2):96-100.
- [2] 周营.餐厨垃圾好氧堆肥微生物强化及复混肥制备的研究[D].广州:

- 华南理工大学,2018;10-13.
- [3] 刘安琪,夏港,关昊,等.餐厨垃圾厌氧消化的研究进展和趋势[J].绿色科技,2020(22):94-96.
- [4] 韩端丹,洪琦,江阳.固态发酵处理餐厨垃圾制备饲料的研究[J].湖北农业科学,2021,60(1):92-95.
- [5] NGUYEN T T X, TOMBERLIN J K, VANLAERHOVEN S. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste [J]. Environmental entomology, 2015, 44(2): 406-410.
- [6] NEWTON G L, BOORAM C V, BARKER R W, et al. Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine [J]. Journal of animal science, 1977, 44(3): 395-400.
- [7] CRAIG SHEPPARD D, LARRY NEWTON G, THOMPSON S A, et al. A value added manure management system using the black soldier fly [J]. Bioresource technology, 1994, 50(3): 275-279.
- [8] 李天昊,李茂盛,张超然,等.黑水虻研究与应用的文献计量分析[J].安徽农业科学,2017,45(33):230-234.
- [9] GOLD M, TOMBERLIN J K, DIENER S, et al. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review [J]. Waste management, 2018, 82: 302-318.
- [10] 安新城,吕欣.黑水虻的生物学特性及营养价值[J].养殖与饲料,2007(11):67-68.
- [11] 周海泳,阮明君,李楚君,等.光照节律及强度对黑水虻成虫行为及繁殖能力的影响[J].广东饲料,2020,29(8):26-30.
- [12] 周凯灵,李芷瑜,周琼.黑水虻对气味物质的嗅觉反应及其体表超微感器研究[J].华中昆虫研究,2018,14(00):349.
- [13] 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].杭州:浙江大学,2018;5-7.
- [14] 安新城.黑水虻生物处置餐厨废弃物的技术可行性分析[J].环境与可持续发展,2016,41(3):92-94.
- [15] 杨树义,李卫娟,刘春雪,等.发酵猪粪对黑水虻转化率的影响及黑水虻幼虫和虫沙营养成分测定[J].安徽农业科学,2016,44(21):69-70,73.
- [16] 李武,郑龙王,李庆,等.亮斑扁角水虻转化餐厨剩余物工艺及资源化利用[J].化学与生物工程,2014,31(11):12-17.
- [17] TAMI B. Evaluation of the economic, social, and biological feasibility of bioconverting food wastes with the black soldier fly (*Hermetia illucens*) [D]. Texas: University of North Texas, 2004: 25-38.
- [18] MYERS H M, TOMBERLIN J K, LAMBERT B D, et al. Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure [J]. Environmental entomology, 2008, 37(1): 11-15.
- [19] BESKIN K V, HOLCOMB C D, CAMMACK J A, et al. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions [J]. Waste management, 2018, 74: 213-220.
- [20] BARROSO F G, SÁNCHEZ-MUROS M J, SEGURA M, et al. Insects as food: enrichment of larvae of *Hermetia illucens*, with omega 3 fatty acids by means of dietary modifications [J]. Journal of food composition and analysis, 2017, 62: 8-13.
- [21] 申高林.黑水虻饲养条件优化及其富硒研究[D].南昌:南昌大学,2016:12-17.
- [22] 许丰孟,王国霞,黄仙德,等.黑水虻规模化生产及其在水产动物饲料中的应用进展[J].动物营养学报,2020,32(12):5606-5613.
- [23] 王斌,邹仕庚,彭远智,等.黑水虻在畜禽饲料中的应用研究进展[J].中国畜牧杂志,2021,57(6):8-15.
- [24] TOMBERLIN J K, ADLER P H, MYERS H M. Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature [J]. Environmental entomology, 2009, 38(3): 930-934.
- [25] HOLMES L A, VANLAERHOVEN S L, TOMBERLIN J K. Relative humidity effects on the life history of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) [J]. Environmental entomology, 2012, 41(4): 971-978.
- [26] 黄蓉.不同光源对黑水虻生活史的影响及其对猪粪的转化[D].武汉:华中农业大学,2008:7-9.
- [27] ZHANG J B, HUANG L, HE J, et al. An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *Hermetia illucens* [J]. Journal of insect science, 2010, 10: 1-7.
- [28] CAMMACK J A, TOMBERLIN J K. The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. Insects, 2017, 8(2): 1-14.
- [29] GAO Q, WANG X Y, WANG W Q, et al. Influences of chromium and cadmium on the development of black soldier fly larvae [J]. Environmental science and pollution research, 2017, 24(9): 8637-8644.
- [30] 滕星,张永锋,温嘉伟,等.黑水虻生物特性及其人工养殖的影响因素研究进展[J].吉林农业大学学报,2019,41(2):134-141.
- [31] 任立斌.黑水虻生物转化餐厨垃圾试验的研究[D].兰州:兰州交通大学,2020:23-24.
- [32] 尹靖凯,龚小燕,孙丽娜,等.黑水虻对餐厨垃圾养分转化研究[J].中国农业科技导报,2021,23(6):154-159.
- [33] 熊彩虹,刘清笑,雷鸣,等.黑水虻协同厌氧发酵处理餐厨垃圾的可行性分析[J].广东化工,2020,47(10):98-100.
- [34] 任立斌,杨军,白圆.以黑水虻为核心的新型餐厨垃圾处理系统的构建[J].甘肃科技,2020,36(15):54-57.
- [35] OONINCX D G A B, VAN HUIS A, VAN LOON J J A. Nutrient utilisation by black soldier flies fed with chicken, pig, or cow manure [J]. Journal of insects as food and feed, 2015, 1(2): 131-139.
- [36] NGUYEN T T X, TOMBERLIN J K, VANLAERHOVEN S. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste [J]. Environmental entomology, 2015, 44(2): 406-410.
- [37] 熊婷,霍文冕,窦立宝,等.城市餐厨垃圾资源化处理必要性研究[J].环境科学与管理,2010,35(2):148-152,190.
- [38] 邓文辉,吴家园,陈天阳,等.黑水虻幼虫的耐力力及饥饿幼虫复食后的生物学特性[J].昆虫学报,2019,62(4):461-467.
- [39] 姬超,任德珠,叶明强,等.黑水虻对饲料中pH值、辣度及盐度的耐受性[J].应用与环境生物学报,2018,24(3):636-639.
- [40] 解慧梅,程汉,魏冬霞,等.黑水虻处理规模化猪场粪便效果及工艺研究[J].中国畜牧杂志,2020,56(4):165-168.
- [41] 马加康,郭浩然,王立新.新鲜鸡粪对黑水虻幼虫生长发育及粪便转化率的影响[J].安徽科技学院学报,2016,30(1):12-18.
- [42] 郭会茹,王清华,刘奇凡,等.黑水虻幼虫处理鸡粪后虫体饲料和鸡粪肥料的评价[J].中国畜牧杂志,2020,56(8):213-217.
- [43] ST-HILAIRE S, CRANFILL K, MCGUIRE M A, et al. Fish offal recycling by the black soldier fly produces a foodstuff high in omega-3 fatty acids [J]. Journal of the world aquaculture society, 2007, 38(2): 309-313.
- [44] 胡俊茹,何飞,莫文艳.采食不同有机废弃物黑水虻幼虫饲料价值分析[J].猪业观察,2019(21):76-80.
- [45] 魏亚茹.黑水虻对剩余污泥生态处理技术研究[D].泰安:山东农业大学,2020:6-7.
- [46] 杨燕,严欢,赵智勇,等.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.
- [47] BENJAMIN KUMAR MINTAH. Effect of conventional and ultrasonic processes on the functionality and antioxidative efficacy of protein preparations and hydrolysates from comestible insect (*Hermetia illucens*) [D]. Xuzhou: Jiangsu University, 2020: 32-33.
- [48] 柳琳. Cu²⁺胁迫对黑水虻幼虫抗氧化酶和细胞凋亡影响的研究[D].遵义:遵义医学院,2017:8-9.
- [49] 陈晓璇,胡俊茹,王国霞,等.黑水虻幼虫粉替代鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能、肌肉品质及血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2019,31(6):2788-2799.
- [50] 蔡鑫华.黑水虻处理鸡粪和泰来菌素药渣的效果及虫体饲料价值的研究[D].广州:华南农业大学,2018:15-16.
- [51] 朱剑峰.微生物发酵法分解羽毛工艺优化以及养殖黑水虻幼虫效果[D].广州:华南农业大学,2016:33-34.
- [52] 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].广州:华南农业大学,2016:11-12.
- [53] 张杰,温逸婷,高正辉,等.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.
- [54] HUANG C, FENG W L, XIONG J, et al. Impact of drying method on the nutritional value of the edible insect protein from black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae: Amino acid composition, nutritional value evaluation, *in vitro* digestibility, and thermal properties [J]. European food research and technology, 2019, 245(1): 11-21.
- [55] WETHTHASINGHE P, HANSEN J Ø, NØKLAND D, et al. Full-fat black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) meal and paste in extruded diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effect on physical pellet quality, nutrient digestibility, nutrient utilization and growth performances [J/OL]. Aquaculture, 2021, 530 [2020-11-20]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735785>.
- [56] YU M, LI Z M, CHEN W D, et al. *Hermetia illucens* larvae as a potential dietary protein source altered the microbiota and modulated mucosal immune status in the colon of finishing pigs [J]. Journal of animal science and biotechnology, 2019, 10(4): 990-1004.

- 背景因素分析[J]. 价格理论与实践, 2019(2): 72-75.
- [3] 张瑛, 赵露. 中美水产品消费需求对比研究及其启示[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2018(5): 77-84.
- [4] 韩建华. 水产养殖废水污染危害及其处理技术探析[J]. 农业与技术, 2018, 38(12): 103, 156.
- [5] RAKOCY J E, HARGREAVES J A. Integration of vegetable hydroponics with fish culture: A review[M] // WANG J K. Techniques for modern aquaculture. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural Engineers, 1993: 112-136.
- [6] 宋红桥, 管崇武. 鱼菜共生综合生产系统的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(20): 63-65.
- [7] YEP B, ZHENG Y B. Aquaponic trends and challenges-A review[J]. J Clean Prod, 2019, 228: 1586-1599.
- [8] 饶伟, 杨卫中, 位耀光, 等. 鱼菜共生水体溶解氧时空变化规律及其影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 374-380.
- [9] 张明华, 丁永良, 杨菁, 等. 鱼菜共生技术及系统工程研究[J]. 现代渔业信息, 2004, 19(4): 7-12.
- [10] GODDEK S, DELAIDE B, MANKASINGH U, et al. Challenges of sustainable and commercial aquaponics[J]. Sustainability, 2015, 7(4): 4199-4224.
- [11] 管鲜. 鱼菜共生系统的成本效益研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [12] 张和顺. 工厂化蔬菜气雾栽培技术[J]. 中国农业信息, 2017(6): 90-91.
- [13] 泮进明. 基于水草共生生态原理的循环流水水产养殖系统植物滤器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [14] 周晴. 清末民国时期珠江三角洲的桑基鱼塘与生态经济环境[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2013, 12(3): 142-150.
- [15] MCMURTRY M R, SANDERS D C, PATTERSON R P, et al. Yield of tomato irrigated with recirculating aquacultural water[J]. J Prod Agric, 1993, 6(3): 428-432.
- [16] MCMURTRY M R, SANDERS D C, CURE J D, et al. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system[J]. J World Aquac Soc, 1997, 28(4): 420-428.
- [17] GOODMAN E R. AQUAPONICS: Community and economic development[D]. Arizona: Arizona State University, 2011.
- [18] 蔡淑芳, 刘现, 王涛, 等. 鱼菜共生系统经济可行性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 5-8.
- [19] LOVE D C, FRY J P, GENELLO L, et al. An international survey of aquaponics practitioners[J]. PLoS One, 2014, 9(7): 1-10.
- [20] 丁永良, 张明华, 张建华, 等. 鱼菜共生系统的研究[J]. 中国水产科学, 1997, 4(5): 70-75.
- [21] 蔡淑芳, 陈永快, 陈敏, 等. 鱼菜共生系统中植物密度对水质及鱼菜生长的影响[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 19-25.
- [22] 蔡淑芳, 陈敏, 陈永快, 等. 种植密度对鱼菜共生系统氮素转化的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 132-137.
- [23] 邹芝娜, 胡振, 张建, 等. 鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4211-4216.
- [24] 丁小涛, 张兆辉, 姜玉萍, 等. 鱼菜共生技术在城市家庭中的应用前景[J]. 上海农业学报, 2015, 31(6): 150-153.
- [25] 宋红桥, 管崇武, 李月, 等. 水培植物对循环水养鱼系统的水质净化研究[J]. 渔业现代化, 2013, 40(4): 18-22.
- [26] 王兴, 李文笙, 孙彩云. 鱼菜共生养殖模式对吉富罗非鱼生长和消化酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(1): 135-142.
- [27] 刘爽, 安诗琦, 严子微, 等. 现代鱼菜共生技术研究进展与展望[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 160-166.
- [28] 徐琰斐, 张宇雷, 顾川川, 等. 鱼菜共生发展历史、典型模式与发展趋势[J]. 渔业现代化, 2020, 47(5): 1-7.
- [29] 邱楚雯, 王韩信, 施永海. 鱼菜共生系统中植物根系微生物及氮转化影响因素研究进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2021, 60(1): 124-132.
- [30] JUNG R, KÖNIG B, VILLARROEL M, et al. Strategic points in aquaponics[J]. Water, 2017, 9(3): 1-9.
- [31] PALM H W, KNAUS U, APPELBAUM S, et al. Towards commercial aquaponics: A review of systems, designs, scales and nomenclature[J]. Aquac Int, 2018, 26(3): 813-842.
- [32] RAKOCY J E, MASSER M P, LOSORDO T M. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture[J]. SRAC publication, 2006, 454: 1-16.
- [33] LENNARD W A. A nutrient dynamic process and the relationship to fish feeds[J]. World Aquac, 2015, 9: 20-23.
- [34] NGO THUY DIEM T, KONNERUP D, BRIX H. Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems[J]. Aquac Eng, 2017, 78: 95-104.
- [35] VILLARROEL M, JUNGE R, KOMIVES T, et al. Survey of aquaponics in Europe[J]. Water, 2016, 8: 1-7.
- [36] LIANG J Y, CHIEN Y H. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2013, 85: 693-700.
- [37] WILSON L. Aquaponic system design parameters: Fish to plant ratios (feeding rate ratios) fact sheets [R]. Victoria, Australia, 2012.
- [38] PAUDEL S R. Nitrogen transformation in engineered aquaponics with water celery (*Oenanthe javanica*) and koi carp (*Cyprinus carpio*): Effects of plant to fish biomass ratio [J/OL]. Aquaculture, 2020, 520 [2020-09-25]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734971>.
- [39] BITTSÁNSZKY A, UZINGER N, GYULAI G, et al. Nutrient supply of plants in aquaponic systems[J]. Ecocycles, 2016, 2(2): 17-20.
- [40] MAUCIERI C, NICOLETTO C, JUNGE R, et al. Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review[J]. Ital J Agron, 2018, 13: 1-11.
- [41] FORCHINO A A, LOURGUIOUI H, BRIGOLIN D, et al. Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA) [J]. Aquac Eng, 2017, 77: 80-88.
- [42] KÖNIG B, JUNGE R, BITTSÁNSZKY A, et al. On the sustainability of aquaponics[J]. Ecocycles, 2016, 2(1): 26-32.
- [43] GODDEK S, DELAIDE B, MANKASINGH U, et al. Challenges of sustainable and commercial aquaponics[J]. Sustainability, 2015, 7(4): 4199-4224.
- [44] YAVUZCAN YILDIZ H, ROBAINA L, PIRHONEN J, et al. Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-A review[J]. Water, 2017, 9(1): 1-17.
- [45] JOLY A, JUNGE R, BARDOZ T. Aquaponics business in Europe: Some legal obstacles and solutions[J]. Ecocycles, 2015, 1(2): 3-5.
- [46] HOEVENAARS K, JUNGE R, BARDOZ T, et al. EU policies: New opportunities for aquaponics[J]. Ecocycles, 2018, 4(1): 10-15.
- [47] TILLEY D R, BADRINARAYANAN H, ROSATI R, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. Aquac Eng, 2002, 26(2): 81-109.
- [48] HLAVÁČ D, MÁŠÍLKO J, ANTON-PARDO M, et al. Compound feeds and cereals as potential tools for improved carp *Cyprinus carpio* production[J]. Aquacult Environ Interact, 2016, 8: 647-657.
- [49] BADIOLA M, MENDIOLA D, BOSTOCK J. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges[J]. Aquac Eng, 2012, 51: 26-35.
- [50] MCHUNU N, LAGERWALL G, SENZANJE A. Aquaponics in South Africa: Results of a national survey[J]. Aquac Rep, 2018, 12: 12-19.
- [51] MARTINS C I M, EDING E H, VERDEGEM M C J, et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability[J]. Aquac Eng, 2010, 43(3): 83-93.
- [52] 丁永良, 兰泽桥, 张明华. 工业化封闭式循环水养鱼污水资源化——生态循环经济的典范“鱼菜共生系统”[J]. 中国渔业经济, 2010, 28(1): 124-130.
- [53] RAKOCY J E. The status of aquaponics: Part 2[J]. Aquaculture magazine, 1999, 25: 64-70.

(上接第13页)

- [57] MOUTINHO S, PEDROSA R, MAGALHÃES R, et al. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupa larvae meal in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles: Effects on liver oxidative status and fillet quality traits during shelf-life[J/OL]. Aquaculture, 2021, 533 [2020-11-20]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736080>.
- [58] 刘馨桢. 视觉系统在亮斑圆角水虻生殖调控中的作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 8-9.
- [59] 四川中地油科技有限公司. 一种黑水虻成虫用补光灯: CN 201921874640. X [P]. 2020-06-23.
- [60] 河南恩赛姆生物科技有限公司. 一种黑水虻养殖的监测调节一体化装置: CN201920042519. 4 [P]. 2020-04-10.