

黑水虻处理有机废弃物技术研究进展

王叶^{1,2} 喻国辉³ 李义勇^{1,2*}

¹ 仲恺农业工程学院资源与环境学院, 广东广州 510225;

² 广东省农业产地环境污染防控工程技术研究中心, 广东广州 510225;

³ 仲恺农业工程学院植物健康创新研究院, 广东广州 510225)

摘要 黑水虻处理有机废弃物是当前有机废弃物处理领域的热点, 近几年相关技术研究与应用都得到了较大发展。本文综述了黑水虻处理畜禽粪便、餐厨垃圾和病死畜禽尸体等的研究现状, 针对存在的问题总结了调节有机废弃物碳氮比、利用细菌协同作用和对有机废弃物预发酵等解决方法, 指出了今后的研究方向, 以期在黑水虻处理有机废弃物的理论与应用研究及产业化发展提供参考。

关键词 黑水虻; 有机废弃物处理; 营养结构; 协同转化; 预发酵

中图分类号 X713 **文献标识码** A

文章编号 1007-5739(2022)10-0129-07

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2022.10.037

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress on Treatment Technology of Organic Wastes by Black Soldier Fly

WANG Ye^{1,2} YU Guohui³ LI Yiyong^{1,2*}

¹ College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou Guangdong 510225;

² Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Agricultural Land Pollution Prevention and Control, Guangzhou Guangdong 510225;

³ Innovative Institute for Plant Health, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou Guangdong 510225)

Abstract The organic waste treatment by black soldier fly is a hot spot in the current organic waste treatment field. In recent years, the related technology research and application have been greatly developed. This paper reviewed the current research situation of the treatment of livestock and poultry manure, kitchen waste, and carcasses of diseased livestock and poultry by black soldier fly. In view of the existing problems, some solutions were summarized, including adjusting carbon-nitrogen ratio of the organic waste, using the bacterial synergism and pre-fermenting organic waste, etc. The further research directions were pointed out, so as to provide references for the theoretical and applied research and industrialization development of the organic waste treatment by black soldier fly.

Keywords black soldier fly; organic waste treatment; nutritional structure; synergistic transformation; pre-fermentation

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昆虫, 广泛分布于全球

基金项目 广东省鸽产业发展关键技术与集成示范项目(2020B0202080002); 仲恺农业工程学院优秀博士人才项目(Y002)。

作者简介 王叶(1995—), 女, 山西晋中人, 在读硕士研究生。研究方向: 固废处理与资源化。

* 通信作者

收稿日期 2021-09-04

热带和亚热带地区^[1-2]。黑水虻为全变态发育, 共经历卵、幼虫、蛹、成虫 4 个虫态。卵为块产, 一般为 500 粒左右, 初产时为乳白色或浅黄色, 之后变成黄色, 27℃条件下 4 d 左右孵化为幼虫。1~5 龄幼虫体色乳白色, 取食活跃, 3~5 龄时具有暴食性; 6 龄虫体呈黑色, 此时口器开始退化且不采食, 被称为预蛹^[3]。预蛹直至羽化为成虫都是依靠消耗前期积累的脂肪

维持生命活动。成虫期 5~8 d,在羽化后 2 d 进行交配和繁殖,羽化 4 d 左右时产卵^[4]。

黑水虻处理有机废弃物是指利用低龄期具有暴食性的黑水虻幼虫处理有机废弃物的方法^[5-6]。处理结束后收获的幼虫体内含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂肪、矿物质等^[7-9],可用作水产、家禽养殖饲料以及生物燃料等^[10-11],筛除幼虫虫体后的残余物是一种高附加值的有机肥料^[12-13]。与其他昆虫相比,黑水虻处理有机废弃物的最大优势在于其行为特征:黑水虻喜栖于室外的草木上而不进入人居环境^[4],不携带病原菌^[5],无营养供应也可交配产卵,还可在一定程度上阻止家蝇产卵,使家蝇幼虫数量减少。此外,黑水虻处理有机废弃物的周期明显低于蝇蛆和蚯蚓的处理周期^[4],且转化率高于蝇蛆和蚯蚓^[17]。因此,以黑水虻作为生物转化的驱动者来处理餐厨垃圾、畜禽粪便等有机废弃物^[18],能在治理环境污染的同时收获高价值产品,具有高效、高值等特点,是一项特色鲜明、优势明显的技术。

大量研究表明,黑水虻幼虫对畜禽粪便、餐厨垃圾和病死畜禽尸体等有机废弃物处理均具有可行性,但其处理效率较低,限制了黑水虻处理有机废弃物的产业化应用。本文从黑水虻处理有机废弃物的现状和问题出发,着重探讨其可能的解决办法,以期黑水虻处理有机废弃物的产业化发展提供参考。

1 黑水虻处理有机废弃物现状

黑水虻幼虫具有食谱广、食量大、营养需求低、安全性高等特点,因而拥有巨大的有机废弃物处理潜力^[19]。黑水虻幼虫为腐食性^[20],在自然界中以动物粪便^[21]和腐烂有机物为食,如鸡粪^[22]、牛粪^[23],腐烂的水果、蔬菜和肉类^[24],腐败的海产品及病死畜禽尸体等。据不完全统计,目前黑水虻幼虫可处理的有机废弃物达 78 种(包括混合有机废弃物)^[25]。黑水虻幼虫对单一有机粪便的处理率为 20%~50%;对餐厨垃圾的处理率较高,达 50%~70%^[26];对畜禽尸体的研究热点集中在病原菌抑制方面,对其减量的具体数据还鲜有报道。

1.1 黑水虻处理畜禽粪便

黑水虻幼虫采食新鲜粪便,摄取其中的营养物

质转化为自身的蛋白质和脂肪,对粪便减量化的同时可消除粪便的臭味^[27-28]。袁橙等^[29]研究了黑水虻处理规模化猪场粪便的效果,发现 4 日龄(孵化后 4 d)黑水虻幼虫对料堆厚度为 15 cm 的新鲜猪粪减量率最高,达 65.33%,获得的虫重最大。余峰等^[30]探讨了黑水虻幼虫处理不同养殖模式来源鸭粪的效果,发现黑水虻对 3 种鸭粪的减量率约为 30%,粪便的有机质含量是影响黑水虻预蛹产量和转化效果的一个重要因素,且处理后鸭粪臭味明显消除。El-Dakar 等^[31]研究了黑水虻幼虫处理鸟类粪便与哺乳动物粪便的效果,黑水虻在猪粪、鹌鹑粪、羊粪、鸡粪中达到预蛹周期分别约需要 36、30、26、26 d;达到预蛹期之后,黑水虻对鸟类粪便的减量率为 35.04%±1.44%,对哺乳动物粪便的减量率为 30.95%±2.11%。这说明鸟类粪便的营养成分以及结构相对于哺乳动物粪便更适合黑水虻幼虫转化分解。Moula 等^[32]开展了试验,以马粪饲养黑水虻幼虫,并将收获的幼虫用于饲喂当地家禽,同时检测了幼虫及家禽肉类的脂肪酸谱。结果表明,马粪饲养的黑水虻幼虫含有丰富的脂肪酸,其喂养的家禽肉脂肪酸含量与专用饲料喂养的无统计学差异,说明马粪—黑水虻—家禽的资源化利用模式是可行的。此外,黑水虻幼虫对人类粪便也有较好的处理效果,减量率可达 25.8%^[33]。可见,黑水虻幼虫对粪便的处理具有广适性和环境友好性^[34]。

1.2 黑水虻处理餐厨垃圾

餐厨垃圾包括家庭、学校、食堂及餐饮行业等产生的食物加工下脚料(厨余)和食用残余(泔脚),其成分复杂,主要是油、水、果皮、蔬菜、米面、鱼肉等多种物质的混合物。我国餐厨垃圾数量十分巨大,并呈快速上升趋势^[35]。黑水虻幼虫对易腐餐厨垃圾的取食与消化能力非常强,可充分实现对餐厨垃圾的无害化、减量化和资源化处理^[36]。Cheng 等^[37]研究表明,黑水虻幼虫可处理较高含水量的餐厨垃圾,且含水率为 75%时处理效果最佳,黑水虻幼虫对餐厨垃圾减量率约为 65%,这与 Lalander 等^[38]利用黑水虻幼虫处理高含水率物料的研究结果一致。Salomone 等^[39]利用黑水虻幼虫处理餐厨垃圾,使 10 t 的餐厨垃圾

减量 70%,收获幼虫总干重达 300 kg。Meneguz 等^[40]比较了黑水虻幼虫对变质水果、腐烂蔬菜、啤酒厂副产物和红酒厂副产物等 4 种有机废弃物的转化效果,对变质水果和腐烂蔬菜的减量率分别为 65.20% 和 70.80%,均高于对两种酒厂废弃物的处理率(53.0%和 42.5%),表明黑水虻幼虫对易腐垃圾的转化分解效果更佳。另有研究表明,黑水虻幼虫处理餐厨垃圾时,可强效杀灭垃圾中的病原菌,从而阻断毒蛋白在食物链中的传播。由此可见,黑水虻处理餐厨废弃物具有显著优势^[41]。

1.3 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。有研究表明,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^[42],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^[43]。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。可见,黑水虻幼虫可实现病死畜禽尸体的无害化,在安全处理病死畜禽尸体方面具有应用潜力。

2 黑水虻处理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^[44],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^[45]。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^[46-47];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^[48];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。

2.1 调节有机废弃物碳氮比

如表 1 所示,鸡粪的碳氮比约为 10,氮含量高于人类粪便和牛粪,黑水虻幼虫对鸡粪的减量率为 49.23%,高于对其他废弃物的减量率^[49];人类粪便的碳氮比约为 22,氮含量的初始水平较低,且随着幼虫对有机废弃物采食,体系内营养成分氮含量减少,碳氮比更加不平衡,抑制了幼虫对底料的采食^[50];牛粪的碳氮比为 24 左右,也存在着碳氮比失衡的情况,减量率相对较低,约为 14.30%。可见,黑水虻幼虫对牛粪、人类粪便等碳氮比失衡的有机废弃物减量率相对较低^[20]。为了提高有机废弃物的减量率,可将有机废弃物碳氮比调节至适宜值^[51]。此外,有机废弃物营养不均衡还会导致处理周期相对延长。

表 1 黑水虻幼虫对不同有机废弃物的处理情况

有机废弃物种类	处理周期/d	碳氮比	减量率/%	参考文献
猪粪	14	14.00	41.00	[27]
羊粪	10~14	24.98	25.00±1.80	[31]
鹌鹑粪	30		30.95±2.10	[31]
鸡粪	14	10.00	49.23	[49]
牛粪	23	24.00	14.30	[52]
人类粪便	21	21.77	22.90	[53]

注:鹌鹑粪与鸡粪均属于鸟类粪便,但具体营养成分差异较大(尤其是在脂肪酸组成上),导致两者减量率不同。

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(表 2)。Gold 等^[52]研究表明,日料中非纤维碳水化合物:蛋白质为 1:1 时可有效促进黑水虻幼虫对有机废弃物的分解转化。郭孝结^[54]以稻壳粉为营养载体,确定黑水虻幼虫的最佳碳源和氮源配方为葡萄糖 0.306 3 g/头、胰蛋白粉 0.120 7 g/头。人类粪便碳氮比较高,鸡粪碳氮比相对较低(表 1)。将两者以 2:3 的比例混合可有效平衡底料的碳氮比,使减量率提高至 41.98%^[33]。豆粕是大豆提取油脂后的残留物,由于绝大部分含碳物质进入豆油中,故残留物中的氮较多,其碳氮比约为 5^[55]。将之添加到人类粪便中后,再用黑水虻幼虫进行处理,可使减量率提高至 56.50%^[53]。屠宰场废弃物主要包括待宰圈清理产生的粪便、屠宰车间生产过程中割

表2 黑水虻幼虫对不同种类有机废弃物混合物的处理情况

有机废弃物种类	比例	碳氮比	减量率/%	参考文献
人类粪便+鸡粪	2:3	13.50	41.98	[33]
人类粪便+豆粕	2:3	11.71	56.50	[53]
豆粕+人类粪便+牛粪+蔬菜废弃物	23:16:11:50	8.66	64.10	[52]
豆渣+屠宰场废物+牛粪	65:22:12	10.00	56.60	[52]

下的碎肉及碎骨、畜血和病死畜禽等,氮源丰富^[56],碳氮比相对较低。将之添加到人类粪便以及牛粪中,再用黑水虻幼虫进行处理,可使减量率提高至64.1%。由此可见,适宜的碳氮比可明显促进黑水虻幼虫分解转化有机废弃物^[52]。

2.2 细菌协同作用

共生菌在昆虫生长、肠道微生物菌群发育和消

化酶生产中起着关键作用^[57]。与黑水虻幼虫共生的微生物可有效促进幼虫采食有机废弃物(表3)。江承亮^[44]研究了黑水虻幼虫肠道菌群对餐厨垃圾生物降解的机制,结果表明,黑水虻幼虫在分解转化餐厨垃圾过程中将餐厨垃圾中的部分菌作为共生菌帮助自身生长发育。这些菌主要包括芽孢杆菌、肠杆菌和乳酸菌等。

表3 不同菌株与黑水虻幼虫协同转化有机废弃物的减量率

有机废弃物种类	不加菌减量率/%	菌株	加菌减量率/%	参考文献
鸡粪	49.23	考克氏菌	50.73	[49]
	49.23	奇异变形杆菌	50.43	[49]
	49.23	枯草芽孢杆菌	53.58	[49]
鸡粪+人类粪便	41.98	枯草芽孢杆菌	48.77	[33]
豆渣残留物	49.00	布氏乳杆菌	55.70	[58]

注:接种量为1%。

Mazza等^[49]从黑水虻虫卵以及幼虫内道分离得到10株内生菌,探究其对黑水虻幼虫处理鸡粪的影响,结果表明,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)处理组效果最佳,鸡粪减量率为53.58%;考克氏菌(*Kocuria marina*)与奇异变形杆菌(*Porteus mirabilis*)处理组效果次之,鸡粪减量率分别为50.73%和50.43%;藤黄细球菌(*Micrococcus luteus*)、戈登氏菌(*Gordonia sihwensis*)处理组效果最差,鸡粪减量率分别为47.00%和46.66%,且低于不加菌处理组(减量率为49.23%)。以上说明不同细菌对黑水虻幼虫处理鸡粪体系的影响有所差异,其中枯草芽孢杆菌可用于强化黑水虻幼虫的转化作用。这与Xiao等^[59]的研究结果一致。Somroo等^[58]研究表明,外源布氏乳杆菌可有效促进黑水虻幼虫生物转化大豆加工副产物,对大豆副产物的减量率由49.00%提高至55.70%。同时,Rehman等^[33]研究了外源添加5株芽孢杆菌对黑水虻幼虫降解鸡粪与人类粪便混合物的影响,接种组的混合物减量率为45.49%,而不加菌处理组为41.98%,两者有显著差异,说明外源枯草芽孢杆菌也可有效促进黑水虻幼虫处理有机废弃物。上述外源

枯草芽孢杆菌与内源枯草芽孢杆菌均可有效促进黑水虻幼虫对粪便的减量降解,因而推测其与枯草芽孢杆菌本身的性质有关^[60]。其作用机理可能包括以下方面:首先,枯草芽孢杆菌菌体生长过程中产生的枯草菌素、短杆菌肽等活性物质对致病菌有明显的抑制作用,避免了因黑水虻染病后种群数量减少而引起的有机废弃物减量率降低;其次,枯草芽孢杆菌能够迅速消耗肠道中的游离氧,使肠道处于低氧环境,促进有益厌氧菌生长,从而促进黑水虻将有机废弃物中营养成分转化为自身物质;最后,枯草芽孢杆菌菌体自身合成 α -淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶、纤维素酶等酶类,在消化道中与黑水虻体内的消化酶协同发挥作用^[61]。

2.3 有机废弃物预发酵

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^[62]。Isibika等^[63]研究表明,接种*Trichoderma reesei*以及添加非蛋白氮(NH_3)至破碎处理的香蕉皮体系中,经过14d发酵

后再加入黑水虻幼虫进行处理,可有效提高黑水虻幼虫对香蕉皮的采食量和转化率。其作用机理:首先, NH_3 的加入有效地平衡了香蕉皮的碳氮比,促进了黑水虻采食;其次,发酵过程中,微生物将香蕉皮中的大分子物质分解为更容易被黑水虻幼虫摄食的小分子物质,促进了黑水虻采食;最后,肠道菌群可将外来非蛋白氮转化为单细胞蛋白供黑水虻利用。Elsayed 等^[64]将秸秆与鸡粪以不同比例混合之后进行厌氧发酵,再利用黑水虻幼虫处理厌氧发酵所产生的黑色固体。当幼虫与黑色固体比值为 0.75、处理周期为 15 d 时,每条虫子增重约 144 mg,与其他试验组均有显著性差异。综上所述,预发酵之后的底料消化率得到提高,更利于黑水虻幼虫的生物转化,从而提高了有机废弃物的减量率。

3 展望

利用黑水虻幼虫处理畜禽粪便、餐厨垃圾和病死畜禽尸体等有机废弃物均具有可行性。在生物转化过程中,按照一定比例混合有机废弃物至适宜碳氮比、投加菌剂、预发酵处理等措施均可显著促进黑水虻幼虫对有机废弃物的分解转化。其进一步的技术研究方向有以下方面。

3.1 用好碳氮比

诸多研究表明,调节碳氮比可有效促进黑水虻幼虫处理有机废弃物。据此探究更多种类有机废弃物的适宜混合比例可有效促进黑水虻处理有机废弃物,不仅可以增强黑水虻对有机废弃物的处理能力,还可获得更多的黑水虻生物量。

3.2 用好产业副产物

诸多产业副产物尚未得到高效利用。粮食和豆类加工厂废弃物、屠宰场废弃物等均可作为辅助物料补充底料的营养成分和改善底料的空间结构,在提高黑水虻幼虫对底料转化率的同时,实现产业副产物的高值化利用。

3.3 用好生物强化手段

微生物在黑水虻幼虫处理有机废弃物过程中发挥着重要的作用,参与物料分解和肠道消化等过程。通过添加外源或内源菌剂来调节黑水虻体系中的微生物群落结构,使体系内的降解功能菌成为优势种

群,可促进黑水虻幼虫对有机废弃物的分解转化。

随着上述技术的不断发展,黑水虻处理有机废弃物产业化将日显规模,为有机废弃物的无害化、减量化和资源化提供有力支撑,为我国生态文明建设做出应有贡献。

4 参考文献

- [1] 柴志强,王付彬,郭明昉,等.水虻科昆虫及其资源化利用研究[J].广东农业科学,2012,39(10):182-185.
- [2] MAKKAR H P S,TRAN G,HEUZÉ V,et al.State-of-the-art on use of insects as animal feed [J].Animal Feed Science and Technology,2014,197:1-33.
- [3] 萧鸿发,王国霞,彭凯,等.黑水虻生物学特点及其应用研究进展[J].广东畜牧兽医科技,2020,45(2):27-33.
- [4] ZHENG L Y,HOU Y F,LI W,et al.Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes[J].Energy,2012,47(1):225-229.
- [5] 刘宏宇,喻国辉,夏婧.黑水虻研究进展[J].养殖与饲料,2015(12):4-7.
- [6] 安新城,李军,吕欣.黑水虻处理养殖废物的研究现状[J].环境科学与技术,2010,33(3):113-116.
- [7] 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.
- [8] 许彦腾,张建新,宋真真,等.黑水虻幼虫蛋白质的制备及体外抗氧化活性[J].核农学报,2014,28(11):2001-2009.
- [9] 高俏,刘馨桢,李逵,等.亮斑扁角水虻高附加值产品开发的研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(34):102-104.
- [10] 易昌金,胡俊茹,胡毅,等.凡纳滨对虾对黑水虻幼虫粉营养物质的表观消化率[J].饲料工业,2018,39(4):21-26.
- [11] KROECKEL S,HARJES A G E,ROTH I,et al.When a turbot catches a fly:evaluation of a pre-pupae meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute-growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*) [J].Aquaculture,2012,364/365:345-352.
- [12] 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.
- [13] 吴翔,胡从勇,蔡瑞婕,等.虫粪有机肥对番茄生长及品质的影响[J].北方园艺,2019(3):60-64.
- [14] SHEPPARD D C,NEWTON G L,THOMPSON S A,et al.A value added manure management system using the black soldier fly[J].Bioresource Technology,1994,50(3):275-

- 279.
- [15] SØBERG L C, VIKLANDER M, BLECKEN G T, et al. Reduction of *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* and *Pseudomonas aeruginosa* in stormwater bioretention: effect of drying, temperature and submerged zone[J]. *Journal of Hydrology X*, 2019, 3: 100025.
- [16] 张志剑, 刘萌, 朱军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. *环境科学*, 2013, 34(5): 1679–1686.
- [17] GAO M, LIN Y, SHI G Z, et al. Bioaccumulation and health risk assessments of trace elements in housefly (*Musca domestica* L.) larvae fed with food wastes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 682: 485–493.
- [18] 陆丽珠, 邓盾, 马平, 等. 黑水虻堆肥促畜禽粪便分解的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(8): 110–117.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] BORTOLINI S, MACAVEI L I, SAADOUN J H, et al. *Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121289.
- [22] 何钊, 赵敏, 孙龙, 等. 三种食物喂养的黑水虻幼虫营养测定与比较[J]. *生物资源*, 2018, 40(3): 240–245.
- [23] 字晓, 和培铖, 刘龙, 等. 不同饲养密度对亮斑扁角水虻幼虫生长发育及新鲜牛粪转化率的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2020, 42(2): 282–286.
- [24] LIU T, AWASTHI M K, AWASTHI S K, et al. Effects of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) on food waste and sewage sludge composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 256: 109967.
- [25] BOSCH G, VAN ZANTEN H H E, ZAMPROGNA A, et al. Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: legislation, efficiency and environmental impact[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 355–363.
- [26] LALANDER C, DIENER S, ZURBRÜGG C, et al. Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 211–219.
- [27] 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 (New York, N.Y.)*, 2018, 74: 213–220.
- [28] CHEN J S, HOU D J, PANG W C, et al. Effect of moisture content on greenhouse gas and NH₃ emissions from pig manure converted by black soldier fly [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 133840.
- [29] 袁橙, 魏冬霞, 解慧梅, 等. 黑水虻幼虫处理规模化猪场粪污的试验研究[J]. *畜牧与兽医*, 2019, 51(11): 49–53.
- [30] 余峰, 夏宗群, 管业坤, 等. 黑水虻处理鸭粪效果初探[J]. *江西畜牧兽医杂志*, 2018(2): 15–17.
- [31] EL-DAKAR M A, RAMZY R R, PLATH M, et al. Evaluating the impact of bird manure vs. mammal manure on *Hermetia illucens* larvae [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123570.
- [32] MOULA N, SCIPPO M L, DOUNY C, et al. Performances of local poultry breed fed black soldier fly larvae reared on horse manure [J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(1): 73–78.
- [33] REHMAN K U, UR REHMAN R, SOMROO A A, et al. Enhanced bioconversion of dairy and chicken manure by the interaction of exogenous bacteria and black soldier fly larvae [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237: 75–83.
- [34] WANG Q, REN X N, SUN Y, et al. Improvement of the composition and humification of different animal manures by black soldier fly bioconversion [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123397.
- [35] JANTZEN DA SILVA LUCAS A, MENEGON DE OLIVEIRA L, DA ROCHA M, et al. Edible insects: an alternative of nutritional, functional and bioactive compounds [J]. *Food Chemistry*, 2020, 311: 126022.
- [36] 胡俊茹, 何飞, 莫文艳, 等. 采食不同有机废弃物黑水虻幼虫饲料价值分析 [J]. *中国饲料*, 2017(15): 24–27.
- [37] CHENG J Y K, CHIU S L H, LO I M C. Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion [J]. *Waste Management*, 2017, 67: 315–323.
- [38] LALANDER C, ERMOLAEV E, WIKLICKY V, et al. Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138968.
- [39] SALOMONE R, SAIJA G, MONDELLO G, et al. Environmental impact of food waste bioconversion by insects:

- application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens* [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140: 890–905.
- [40] MENEGUZ M, SCHIAVONE A, GAI F, et al. Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(15): 5776–5784.
- [41] EWALD N, VIDAKOVIC A, LANGELAND M, et al. Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): possibilities and limitations for modification through diet [J]. Waste Management, 2020, 102: 40–47.
- [42] LIU C C, YAO H Y, CHAPMAN S J, et al. Changes in gut bacterial communities and the incidence of antibiotic resistance genes during degradation of antibiotics by black soldier fly larvae [J]. Environment International, 2020, 142: 105834.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 袁志能, 徐浪, 尤珂珂, 等. 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.
- [47] 陈兆强, 缪菲, 孙铮, 等. 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): 7–10.
- [48] Mazu Sabirath Shanti, 林俊宏, 朱剑锋, 等. 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.
- [49] MAZZA L, XIAO X P, UR REHMAN K, et al. Management of chicken manure using black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae assisted by companion bacteria [J]. Waste Management, 2020, 102: 312–318.
- [50] LI Q, ZHENG L Y, QIU N, et al. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production [J]. Waste Management, 2011, 31(6): 1316–1320.
- [51] 王定美, 杨霞, 陈新富, 等. 虹蛆采食不同碳氮比食料的营养物质与能量转化特征 [J]. 中国饲料, 2020(9): 30–37.
- [52] GOLD M, CASSAR C M, ZURBRÜGG C, et al. Biowaste treatment with black soldier fly larvae: increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates [J]. Waste Management, 2020, 102: 319–329.
- [53] REHMAN K U, REHMAN A, CAI M M, et al. Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154: 366–373.
- [54] 郭孝结. 黑水虻幼虫营养配方优化及应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [55] Pobert A. Swick. 测定豆粕的价值 [J]. 饲料工业, 2004, 25(1): 59–62.
- [56] 刘希凤, 张洪银. 屠宰场不同家畜废弃物堆肥的基本性质差异研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2015(2): 117–122.
- [57] MAZMANIAN S K, LIU C H, TZIANABOS A O, et al. An immunomodulatory molecule of symbiotic bacteria directs maturation of the host immune system [J]. Cell, 2005, 122(1): 107–118.
- [58] SOMROO A A, UR REHMAN K, ZHENG L Y, et al. Influence of *Lactobacillus buchneri* on soybean curd residue co-conversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for food and feedstock production [J]. Waste Management, 2019, 86: 114–122.
- [59] XIAO X P, MAZZA L, YU Y Q, et al. Efficient co-conversion process of chicken manure into protein feed and organic fertilizer by *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae) larvae and functional bacteria [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 668–676.
- [60] 刘静, 王军, 姚建铭, 等. 枯草芽孢杆菌 JA 抗菌物特性的研究及抗菌肽的分离纯化 [J]. 微生物学报, 2004, 44(4): 511–514.
- [61] 丁海. 枯草芽孢杆菌对蛋鸡生产性能及盲肠菌群区系影响的研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
- [62] GAO Z H, WANG W Q, LU X H, et al. Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 974–980.
- [63] ISIBIKA A, VINNERÅS B, KIBAZOHI O, et al. Pre-treatment of banana peel to improve composting by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae [J]. Waste Management, 2019, 100: 151–160.
- [64] ELSAYED M, RAN Y, AI P, et al. Innovative integrated approach of biofuel production from agricultural wastes by anaerobic digestion and black soldier fly larvae [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121495.