

李庆,秦文杰,曹秀芳,等.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.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.019

基于黑水虻转化的畜禽粪便资源化利用研究进展

李庆^{1,2},秦文杰^{1,2},曹秀芳¹,后德家²,江洪¹

1. 华中农业大学理学院,武汉 430070; 2. 生猪健康养殖省部共建协同创新中心,武汉 430070

摘要 随着集约化养殖业的快速发展,我国每年会产生约38亿t畜禽粪便,造成了畜禽粪便的累积和环境污染,是构成我国面源污染的主要来源之一。同时我国饲料蛋白原料严重短缺,80%以上依赖进口,年进口价值超过2000亿元,是全球蛋白原料最大进口国。昆虫可高效转化畜禽粪便,同时消减温室气体排放,并产生优异的虫体蛋白、脂肪和虫沙,实现养分流动循环和畜禽粪便资源化利用。以黑水虻为代表的昆虫生物转化畜禽粪便具有低耗能、低排放及良好社会、生态、经济效益,是治理畜禽粪便污染、解决这一困境的最有潜力的策略之一。近年来,黑水虻转化畜禽粪便产业发展迅速,本文从畜禽养殖带来的环境及资源问题、黑水虻生物转化产生的有益资源利用等方面进行了分析、阐述,并对其未来的发展方向进行了展望,以期为发展黑水虻转化畜禽粪便这一低碳畜牧产业提供借鉴。

关键词 黑水虻;昆虫转化;畜禽粪便;低碳畜牧;温室效应气体

中图分类号 X713 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0169-07

联合国经济和社会事务部预测,2050年世界人口将达到93亿^[1]。随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,全球人均肉类消费量和肉类消费总量正在上升,未来对动物性食品的需求也将不断增加^[2]。畜牧业目前占用世界70%的农业用地,动物性食品需求的增长将进一步增加土地压力^[3]。此外,畜牧业的快速发展导致了饲料紧缺,尤其是蛋白质饲料原料长期供应不足,所以寻找新型的替代蛋白质来源迫在眉睫。诸如黑水虻(*Hermetia illucens*)等资源型昆虫已被提议进行产业化养殖^[4]。黑水虻幼虫具有优良的营养价值,且可以在各种畜禽粪便中持续快速生长。同时,黑水虻幼虫可以将低价值的有机废物转化为自身的生物质,经过加工可以得到高质量的蛋白质和脂肪等产品。鉴于昆虫将被欧盟授权为猪和家禽饲料,畜牧业规模在未来几年可能会快速增长^[5]。集约化规模化畜牧养殖模式产生了大量的畜禽粪便,这些粪便若得不到妥善处理,将会造成严重的环境污染和温室气体排放问题。因此,在畜牧业生产过程中,必须对畜禽粪便进行合理处理实现资源化利用,以减少对环境和人类的危害,从

而实现畜牧业的可持续发展。针对目前畜牧业生产中存在的问题,有研究者提出了一种低碳、低能耗、低排放兼具良好社会效益、生态效益、经济效益的新型低碳畜牧业模式,这一模式将为和谐生态体系构建打下坚实基础,从而助力绿色可持续发展战略目标的达成^[6]。本综述重点关注畜牧业发展带来的环境问题,并倡导发展昆虫转化畜禽粪便,在解决畜牧业对环境带来的负面效应的同时实现物质循环,生产高附加值的产品,变废为宝,助力发展绿色低碳畜牧。

1 传统畜禽养殖模式存在的环境污染及资源短缺问题

我国是畜牧业养殖大国,随着畜牧业的不断发展,国家对畜牧业的资源投入不断增加,虽然促进了畜牧业经济的发展,但也对生态系统和气候环境造成了一定的负面影响。畜禽养殖过程中产生的大量粪便以及动物饲料资源紧缺已成为目前畜牧业亟需解决的重要问题,这是我国畜牧业实现健康可持续发展的关键。

收稿日期:2022-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(42177100);湖北洪山实验室开放课题(2021hskf011)

李庆,E-mail:liqing@mail.hzau.edu.cn

通信作者:江洪,E-mail:jianghong@mail.hzau.edu.cn

1.1 传统的畜禽养殖模式产生水体、土壤及大气污染

我国畜牧业正处在向现代化转型的关键时期,畜禽粪便产生的污染问题严重制约了畜牧业的绿色健康可持续发展。畜禽粪便历来被视为优良的有机肥及土壤的改良剂,既可以补充N、P、K等营养元素,还可以维持土壤物理特性,如土壤结构以及持水能力。据资料显示,2019年我国养殖动物每年产生38亿t动物粪便,大约为工业固体废料的3.5倍,更为严重的是我国畜禽养殖所产生的氨氮、总磷等超标20倍以上^[7]。尤其是在集约化牧场附近,畜禽粪便量大且集中,排泄到土壤中的量超出了作物需求,导致土壤中N、P、K等宏观养分盈余,从而向大气及水体流失。同时我国畜牧业集约化程度高的地区已面临着严重的地下水污染问题,而畜禽粪便是水生生态系统中抗生素以及氮磷污染的主要来源^[8]。抗生素的滥用导致其残留物和代谢物在畜禽粪便以及地表水、地下水等环境中普遍存在,严重威胁人类健康^[9]。氮和磷是具有巨大农艺价值的2种营养元素,当动物粪尿中的养分超过农作物吸收最大限度后,氮和磷在土壤中积累直至饱和。土壤在养分饱和状态下会浸出流失养分至地表水或地下水中,引起水体富营养化、毒藻类大量繁殖和生物多样性丧失,水污染是目前限制我国畜牧业高质量发展的首要环境因素^[10]。

目前人类活动造成的气候破坏将会导致在未来40~75 a内全球平均气温上升4℃^[11]。就农业生产而言,这种气候变化将导致目前肥沃的土地水分蒸发直至表面干涸。从而导致可利用耕地大面积减少、农作物减产,致使农业生产能力大幅降低。畜禽养殖被认为是所有人类活动中最具生态危害的活动之一,牲畜直接或间接地产生3种主要的温室效应气体:甲烷(CH₄)、二氧化碳(CO₂)和氧化亚氮(N₂O),据统计畜牧业所排放的这3种气体已经分别占据人类活动排放总量的9%、65%和37%,其温室气体排放总量分别占农业温室气体排放总量和人类活动温室气体排放总量的57%和18%^[12]。其中CH₄和N₂O温室效应潜力值分别为CO₂的21和310倍^[13],因此,这2种温室效应气体目前备受关注。CH₄主要是畜禽粪便在微生物的作用下厌氧发酵产生和排放,而N₂O主要是由于粪便中的氮素通过反硝化作用产生和排放^[14]。畜牧业产生的温室气体会加剧全球变暖和环境质量恶化,对人类生存产生严重威胁。因此,中国作为全球最大的畜牧生产国,降低温室气

体排放已成为中国经济与环境协调发展、应对全球气候变化的重要科学问题。

1.2 畜牧业面临蛋白资源短缺的战略安全问题

随着畜牧产品的需求量日益增长,饲养畜禽所需要的蛋白质资源日益紧张。近年来,中美贸易摩擦对国内豆粕供给形势产生了重大影响,充分暴露了国产饲料资源供需严重失衡的重大问题。因此,食品和饲料部门面临的主要挑战之一是应对蛋白质需求的不断增加^[15]。而且预计将来食品和饲料生产之间的竞争将进一步加剧。畜禽养殖最常用的蛋白添加源是豆粕,这种植物性蛋白最大的缺点是生产过程需要大量的土地和水资源。中国农工民主党中央2019年的两会提案指出,我国饲料原料供需矛盾主要表现为以下3个方面:一是蛋白饲料原料消耗增速高。2012年以来,我国肉蛋奶总产量年均递增0.3%,国内豆粕资源难以满足需求,2017年进口依赖度高达95%。二是价格受贸易形势影响大。2017—2018年度,我国大豆进口量9554万t,占全球贸易量62.9%。自美国等国的进口量占比达94.6%。一旦出现双边贸易问题,大豆进口将受较大影响。三是替代资源获取难度大。农业农村部统计数据显示,近年来我国进口的大豆总量占总需求量的90%以上^[16],所以豆粕作为蛋白质来源是不可持续的,满足不了我国畜牧业快速增长的需求。鱼粉作为动物性蛋白对养殖业来说,其氨基酸构成比例更能满足动物生长需求,虫粉蛋白氨基酸构成比例与鱼粉非常接近,是鱼粉的优异替代来源。开辟虫粉替代蛋白资源作为鱼粉替代物,有效缓解养殖业蛋白质原料供求矛盾、降低饲料成本,是促进畜牧业可持续发展的有效途径。

2 昆虫生物转化畜禽养殖废弃物助力低碳畜牧

畜牧业现在正朝着低碳、低能耗、低排放、有机、绿色且兼具良好经济效益的方向发展,低碳畜牧业是未来畜牧业的一种发展模式,不仅为节能减排、发展循环经济、构建和谐社会提供了操作性诠释,还将促进能源和资源利用技术创新、制度创新和可持续发展。因此,实现养殖废弃物的资源化利用,包括回收和增值,成为当前处理畜牧业废弃物的主要趋势。低碳绿色畜牧业通过技术创新、产业转型及资源循环利用、降低能耗和碳排放,尽可能减少能耗和碳排放,实现畜牧业发展与生态环境保护双赢。以

黑水虻为代表的昆虫生物转化养殖废弃物策略近年来备受研究者关注,这一模式将有助于实现传统畜牧业向现代畜牧业转变、应对全球新的畜牧业科技革命。

2.1 黑水虻生物学特性

亮斑扁角水虻,俗称黑水虻,属双翅目(Diptera)水虻科(Hydrotabanidae)完全变态型昆虫,其生命周期包括5个阶段:卵、幼虫、预蛹、蛹和成虫^[17]。水虻生命周期短,形态变化过程及转化畜禽粪便系统如

图1所示。黑水虻广泛分布于全球温带、亚热带和热带地区,在我国主要分布在中部、华南以及西南地区。黑水虻的生命周期为40~43 d,幼虫阶段主要以各种类型的有机废弃物为食,其中包括餐厨垃圾、动物尸体、畜禽粪便、污水污泥和果蔬废弃物等^[18]。黑水虻成虫没有口器,它们无法像家蝇或蚊子那样叮咬人类或牲畜,仅以一些露水或植物汁液为食,从而降低了疾病传播的风险,因此,对人类和动物而言黑水虻是一种无害昆虫^[19]。

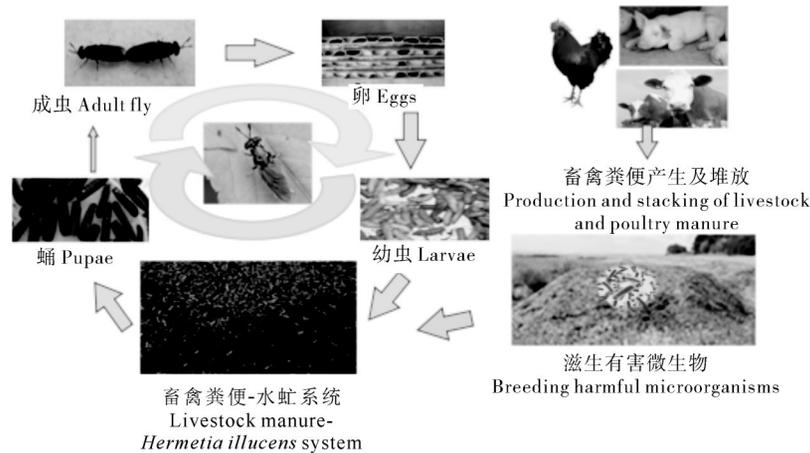


图1 水虻的生命周期及转化畜禽粪便系统

Fig.1 Life cycle of black soldier fly and its transformation system of livestock and poultry feces

2.2 黑水虻转化生物废弃物

黑水虻生物转化过程中初始底物的碳和氮的流向有3条路径:一是作为气体排放损失,二是转化为幼虫生物质,三是保留在虫粪残渣中。大量的畜禽粪便及其营养成分可以通过昆虫的消化作用在短时间内实现减量化。黑水虻平均可减少鸡粪(49.6 ± 9.8)%、猪粪(42.45 ± 9.6)%和牛粪(44.2 ± 8.4)%的干物质,鸡粪中干物质的减少量高于猪粪和牛粪,这是因为鸡粪中含有更多的营养物质^[20]。幼虫发育时间和减少废物的能力在很大程度上取决于粪便中的微生物群落结构,在Banks等^[21]报道中,幼虫能够减少37%~38%的残留物。除了营养物质含量与微生物因素外,黑水虻减少畜禽粪便的潜力还取决于木质纤维素的含量。与木质素含量高的牛粪相比,黑水虻对鸡粪的转化率更高。饲喂量和幼虫密度也是显著影响幼虫发育以及减少底物和养分量的参数^[22],使用最高的饲喂量会导致牛粪和养分减少比例较低,但幼虫生物质的产量较高。因此,黑水虻在处理有机固体废弃物的同时,还可以收获高附加值的产品,用以处理有机固废的优势突显,已逐渐成为该领域的关注焦点。

黑水虻可以显著影响不同有机废弃物在生物转化过程中的温室气体排放。Matos等^[23]通过引入黑水虻和不引入黑水虻生物转化餐厨垃圾过程,对比温室气体排放情况,发现黑水虻生物转化过程只用了7 d,而无黑水虻仅靠微生物分解需要45 d才能剩余同样的残渣量。在接种黑水虻的情况下,底物中最初存在的碳有29%以CO₂的形式流失到大气中,黑水虻将41%的饲料碳转化为自身的生物质。而在不接种黑水虻的情况下有49%的碳排放到大气中。利用黑水虻对生物废弃物和畜禽粪便进行转化时产生的温室气体排放水平很低。黑水虻幼虫在生物废弃物转化过程中产生的CH₄和N₂O排放结果与空气中这些气体的含量接近^[24]。与传统堆肥相比,黑水虻对餐厨垃圾的生物转化可以实现减排温室气体99.1%~99.9%,对于猪粪与玉米芯混合物的生物转化可以分别减排72.6%~99.9%的CH₄和99.6%~99.9%的N₂O^[25]。这种高水平的温室气体减排是由于黑水虻的不停蠕动形成许多孔洞及隧道,极大地增强了废弃物中氧气浓度,CH₄和N₂O通常是在厌氧条件下由微生物产生,因此抑制了这2种温室效应气体的产生。

2.3 黑水虻转化粪便后的产品及应用

黑水虻营腐生生活,幼虫阶段主要以各种类型的有机废弃物为食,用于畜禽粪便等有机废弃物处理时,可以将畜禽粪便快速无害化处理,转化为自身的虫体蛋白和脂肪等营养物质,在消除环境污染的同时,又产生了动物蛋白饲料,有效提升了有机废弃物资源化利用效率。

1)转化粪便后的虫体蛋白及应用。黑水虻在转化有机废弃物的同时也能生产昆虫生物质,这种昆虫生物质中含有丰富的蛋白质、脂肪和氨基酸,因此具有很高的饲用价值。黑水虻生物质包含32%~58%的蛋白质和15%~39%的脂质,可以作为畜禽、宠物和水产养殖的饲料,甚至在一些食物来源匮乏的地区被人类当作食物^[26]。有研究报道用黑水虻蛋白粉替代部分鱼粉喂养大西洋鲑、欧洲鲈、彩虹鳟等鱼类,食用黑水虻蛋白粉与传统鱼粉的鱼类生长性能并无明显差异^[27]。与其他昆虫相比,黑水虻的氨基酸组成与常规鱼粉及豆粕饲料基本一致,并且最常见的限制性氨基酸含量高于或等于市售动物饲料,是理想的动物饲料的蛋白质来源,其价值可与商业饲料相媲美^[28]。因此,黑水虻也可以代替大豆或鱼粉用于家畜饲料。在肉鸡生产中用黑水虻蛋白替代55%的蛋白源,相对于传统饲喂方案可以使成本效益比提高16%,投资回报率提高25%^[29];在猪饲料里添加2.5%黑水虻虫粉不影响生长猪的生长性能,可以替代生长猪基础饲粮中的豆粕,而且可以提高生猪的代谢水平和免疫力^[30];在山羊饲料里用黑水虻虫粉替代部分豆粕后,山羊的体质量与血液各项指标没有显著差异^[31]。通过在传统畜禽饲料和水产饲料中添加黑水虻粉,替代价格逐渐上涨的商业饲料以降低生产成本,已经成为相关领域的研究热点之一。总之,以黑水虻用作家畜饲料的蛋白含量等营养价值更高,安全系数更大,同时可在一定程度上有效提高家畜的代谢水平。

2)转化粪便后的虫体脂质及应用。脂质作为黑水虻虫体的第二大成分也有着广阔的应用前景。黑水虻不管是幼虫还是预蛹的脂质含量都显著高于家蝇、苍蝇和马蝇等的幼虫^[32]。在黑水虻体内提取出来的虫油作为润滑剂添加剂时表现出优异的摩擦性能^[33]。虫油经过酯交换反应后生产出来的生物柴油符合欧洲生物柴油的标准且具有良好的燃烧特性,生物柴油替代部分化石柴油之后对柴油发动机的性能没有负面影响,因此,黑水虻虫体脂质的开发与利

用可以很大程度地减少不可再生燃料的使用^[34]。

3)转化粪便后的虫体甲壳素及应用。黑水虻表皮中的甲壳素及其脱乙酰化衍生物壳聚糖可用于农业、生物医药、化妆品、食品、纺织和废水处理整合剂等领域。在医学和食品等领域也具有较高的应用价值。此外,黑水虻虫体甲壳素具有较大的药用价值潜力,经过诱导,黑水虻可产生溶菌酶、抗菌肽、凝集素等多种免疫成分^[35]。

4)转化粪便后的虫沙及应用。生产黑水虻生物质作为畜禽饲料可能为传统畜禽养殖业提供更环保的替代方案。黑水虻转化畜禽粪便后会产生大量残留的基质和虫沙,由于黑水虻的营养和微生物特性,这种产品有可能被制作成高价值的生物肥料。Chavez等^[36]监测了不同的虫沙处理对黑麦草生产力的影响,没有观测到土壤总碳和氮或黑麦草生物量的任何差异。Choi等^[37]将黑水虻虫沙与具有相似营养成分的商业肥料分别应用于卷心菜的培养,比较卷心菜的叶片数量、叶长和叶宽及养分积累,二者并没有显著性差异。Kawasaki等^[38]评估了黑水虻虫沙作为生物肥用于芸苔属植物的施肥潜力,并建议施用相对于土壤量的1/20~1/30的虫沙。该用量有利于生长,实验发现鸡粪衍生的虫沙肥效最好。此外,当使用虫沙和化学N、P、K复合肥料时,植物的生长状况更好。总而言之,黑水虻转化后的产品经济价值更高,同时也更加环保。

3 总结与展望

3.1 畜牧产业发展伴生下的新型昆虫产业

我国的肉类市场是世界上最大的,畜牧业的发展水平在国民经济生活建设中占据举足轻重的战略地位。我国人口基数大,土地和水资源紧张,养殖饲料紧缺,尤其是蛋白质原料长期供应不足,制约着畜牧业的发展。黑水虻是目前已经实现可规模化生产的食腐性昆虫。与传统养殖业相比,食腐性昆虫用途更大,养殖更容易,且不分季节,四季可养殖。利用这些腐食性的昆虫,能够将畜禽粪便中残留的营养成分转化为昆虫自身的生物质,从而降低畜禽粪便造成的环境污染,同时获得昆虫蛋白、脂肪等可利用的资源。以食腐性的昆虫为原料,可加工生产动物蛋白饲料、生物燃料、几丁质及抗菌肽等高附加值产品。昆虫排出的虫沙和转化之后的残留物可以用来生产复合有机肥料。

3.2 发展昆虫产业,解决畜牧产业环境问题

从环境和资源的角度来看,黑水虻将大自然腐烂的有机物进行转化,实现生态循环,在这一过程中发挥了重要作用。应用生态学原理构建腐生生物链是发展畜牧业循环经济和减轻环境污染的重要措施,在这个生态转化过程中,物质只是在一个小的生态系统内的生物循环,而不是大的地质循环,相对应的秸秆还田和秸秆燃烧等,按照物质循环来说只是地球物质的大循环。当前国家乃至全世界都在开发这种低碳绿色循环的生物技术,黑水虻符合这样的生态意义,且不与民争粮,不与民争地。推进昆虫产业发展对实现资源循环再利用和低碳畜牧业具有重要意义。

3.3 发展昆虫产业,提供替代蛋白资源

面对我国人多地少、耕地资源紧张的国情,未来农业如何保障充足的肉蛋奶等蛋白质的供给? 替代蛋白研究就是寻找一种不依赖现有耕地的蛋白提供方式,是目前缓解土地资源紧张和环境压力的重要途径。昆虫转化有机废弃物,保护了环境,同时提供了蛋白、脂肪和几丁质等昆虫生物质,缓解了我国蛋白资源紧张的压力。从土地、粮食、资源的角度来认识黑水虻,该昆虫将大自然中腐烂的有机物转化到生态循环系统中,体现出其重要的生态调节作用。

3.4 发展畜牧昆虫产业,推进低碳畜牧业

以黑水虻为代表的一类营腐生性昆虫,取食范围广,生物量大,世代周期短,可将有机废弃物快速转化成为高附加值生物质。利用昆虫规模化转化有机废弃物,生产的优质昆虫生物质富含蛋白质、脂肪,可弥补动物饲料原料的短缺。对动物养殖而言,饲养得越密集,产生的碳足迹一般就越低。而黑水虻产业可以实现多层养殖,对土地及水资源要求低、能量溢出少、产出效率高。

目前,科技工作者通过利用腐生性昆虫的生存特点及取食习性来无害化处理畜禽粪便,并在此领域开展了大量的研究工作,但昆虫产业繁育技术的提高、粪便及有机废弃物处理技术的改进和推广、昆虫蛋白食品安全性及黑水虻昆虫蛋白分离效率的提高等问题亟待解决,如何突破产业化瓶颈、规模化利用还需科研人员的不断努力。

3.5 助力绿色低碳畜牧业加速发展

绿色生态型畜牧业是以畜禽养殖为中心,因地制宜开发相关产业,建设绿色低碳畜牧业,形成绿色循环的生产体系,实现资源开发与生态平衡有机结

合。做好畜禽粪污处理和资源化利用,推广高效、经济、适用的畜禽养殖粪污综合利用模式,实现畜禽粪污生产替代蛋白,缓解地球土地资源紧张和环境压力从而实现畜牧业与昆虫转化产业二者要素双向流动,促使农牧业充分耦合、资源高效利用、改善生态环境,降低畜牧业碳排放,从而促进碳达峰和碳中和,实现畜牧业高效绿色低碳发展新模式。科技进步是现代畜牧业建设的驱动力,科学跟踪测算畜牧业碳排放,制定碳达峰和碳中和路径规划,在依靠科技进步提高资源利用率上实现新突破,有助于加快畜牧业高效绿色低碳发展科技创新步伐。

参考文献 References

- [1] TIAN X Y, ENGEL B A, QIAN H Y, et al. Will reaching the maximum achievable yield potential meet future global food demand? [J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2021, 294: 126285 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126285>.
- [2] GODFRAY H C J, AVEYARD P, GARNETT T, et al. Meat consumption, health, and the environment [J/OL]. *Science*, 2018, 361 (6399): eaam5324 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1126/science.aam5324>.
- [3] VAN ZANTEN H H E, MOLLENHORST H, KLOOTWIJK C W, et al. Global food supply: land use efficiency of livestock systems [J]. *The international journal of life cycle assessment*, 2016, 21(5): 747-758.
- [4] TOMBERLIN J K, VAN HUIS A. Black soldier fly from pest to 'crown jewel' of the insects as feed industry: an historical perspective [J/OL]. *Journal of insects as food and feed*, 2020, 6(1): 1-4 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0003>.
- [5] DICKE M. Insects as feed and the sustainable development goals [J]. *Journal of insects as food and feed*, 2018, 4(3): 147-156.
- [6] 沈显顺. 发展低碳畜牧业的必要性及应对措施 [J]. *畜牧兽医科技信息*, 2021(1): 19. SHEN X S. Necessity and countermeasures of developing low-carbon animal husbandry [J]. *Chinese journal of animal husbandry and veterinary medicine*, 2021 (1): 19 (in Chinese).
- [7] 刘然然. 山东省畜禽粪污污染负荷时空特征及预测 [D]. 济南: 山东师范大学, 2018. LIU R R. Temporal and spatial characteristics and forecast of pollution load of livestock and poultry excrement in Shandong Province [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [8] MARTINEZ J, DABERT P, BARRINGTON S, et al. Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability [J]. *Bioresource technology*, 2009, 100 (22): 5527-5536.
- [9] 王智鹏, 孔凡斌, 潘丹. 江西省畜牧产业温室气体排放时空差异分析: 基于LCA方法 [J]. *鄱阳湖学刊*, 2015(3): 26-36. WANG Z P, KONG F B, PAN D. The spatial-temporal changes of greenhouse gases emissions in Jiangxi's graziery sector: base on life cycle analysis (LCA) method [J]. *Journal of Poyang Lake*, 2015(3): 26-36 (in Chinese with English abstract).

- [10] TIAN C, CHEN Y. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: based on the application of derivative indicators and TOPSIS [J/OL]. *Journal of natural resources*, 2021, 36 (2): 395 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20210210>.
- [11] 曹玉博, 邢晓旭, 柏兆海, 等. 农牧系统氨挥发减排技术研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (3): 566-580. CAO Y B, XING X X, BAI Z H, et al. Review on ammonia emission mitigation techniques of crop-livestock production system [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2018, 51 (3): 566-580 (in Chinese with English abstract).
- [12] ZHANG X R, GONG Z Q, ALLINSON G, et al. Environmental risks caused by livestock and poultry farms to the soils: comparison of swine, chicken, and cattle farms [J/OL]. *Journal of environmental management*, 2022, 317: 115320 [2022-03-08]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115320>.
- [13] CAI M M, MA S T, HU R Q, et al. Systematic characterization and proposed pathway of tetracycline degradation in solid waste treatment by *Hermetia illucens* with intestinal microbiota [J]. *Environmental pollution*, 2018, 242: 634-642.
- [14] LIU J, GU W Q, LIU Y W, et al. Dynamic characteristics of net anthropogenic phosphorus input and legacy phosphorus reserves under high human activity: a case study in the Jiangnan Plain [J/OL]. *Science of the total environment*, 2022, 836: 155287 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155287>.
- [15] VAN HUIS A. Welfare of farmed insects [J]. *Journal of insects as food and feed*, 2021, 7 (5): 573-584.
- [16] MOTTET A, DE HAAN C, FALCUCCI A, et al. Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate [J]. *Global food security*, 2017, 14: 1-8.
- [17] 马宏伟, 白获, 李静, 等. 中国大豆 2021—2025 年消费量和产量预测分析 [J]. *大豆科学*, 2022, 41 (3): 358-362. MA H W, BAI D, LI J, et al. Prediction and analysis of China's soybean consumption and production in 2021—2025 [J]. *Soybean science*, 2022, 41 (3): 358-362 (in Chinese with English abstract).
- [18] BELGHIT I, LILAND N S, GJESDAL P, et al. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture*, 2019, 503: 609-619.
- [19] 庞万程. 水虻对有机废弃物碳氮转化率及其温室气体减排研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. PANG W C. The research on carbon and nitrogen conversion rate and greenhouse gas emission reduction of organic waste by black soldier fly [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [20] LIU T, KLAMMSTEINER T, DREGULO A M, et al. Black soldier fly larvae for organic manure recycling and its potential for a circular bioeconomy: a review [J/OL]. *Science of the total environment*, 2022, 833: 155122 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155122>.
- [21] BANKS I J, GIBSON W T, CAMERON M M. Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation [J]. *Tropical medicine & international health*, 2014, 19 (1): 14-22.
- [22] 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*, 2014, 37 (1): 11-15.
- [23] MATOS J S, BARBERINO A T M S, DE ARAUJO L P, et al. Potentials and limitations of the bioconversion of animal manure using fly larvae [J]. *Waste and biomass valorization*, 2021, 12 (7): 3497-3520.
- [24] MERTENAT A, DIENER S, ZURBRÜGG C. Black soldier fly biowaste treatment: assessment of global warming potential [J]. *Waste management*, 2019, 84: 173-181.
- [25] PANG W C, HOU D J, CHEN J S, et al. Reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon and nitrogen conversion in food wastes by the black soldier fly [J/OL]. *Journal of environmental management*, 2020, 260: 110066 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110066>.
- [26] 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/OL]. *Science of the total environment*, 2019, 697: 133840 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133840>.
- [27] 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.
- [28] ABDEL-TAWWAB M, KHALIL R H, METWALLY A A, et al. Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal on growth performance, organs-somatic indices, body composition, and hemato-biochemical variables of European Sea bass, *Dicentrarchus labrax* [J/OL]. *Aquaculture*, 2020, 522: 735136 [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735136>.
- [29] SURENDRA K C, OLIVIER R, TOMBERLIN J K, et al. Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming [J]. *Renewable energy*, 2016, 98: 197-202.
- [30] ONSONGO V O, OSUGA I M, GACHUIRI C K, et al. Insects for income generation through animal feed: effect of dietary replacement of soybean and fish meal with black soldier fly meal on broiler growth and economic performance [J]. *Journal of economic entomology*, 2018, 111 (4): 1966-1973.
- [31] 张放, 杨伟丽, 杨树义, 等. 黑水虻虫粉对生长猪生长性能和血清生化指标的影响 [J]. *猪业观察*, 2018 (3): 34-38. ZHANG F, YANG W L, YANG S Y, et al. Effects of blackwater fly powder on growth performance and serum biochemical indexes of growing pigs [J]. *Swine industry outlook*, 2018 (3): 34-38 (in Chinese).
- [32] ASTUTI D A, WIRYAWAN K G. Black soldier fly as feed ingredient for ruminants [J]. *Animal bioscience*, 2022, 35 (2): 356-363.
- [33] REHMAN K U, LIU X, WANG H, et al. Effects of black soldier fly biodiesel blended with diesel fuel on combustion, performance and emission characteristics of diesel engine [J]. *Energy conversion and management*, 2018, 173: 489-498.
- [34] LI Q, ZHENG L Y, CAI H, et al. From organic waste to biodiesel: black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible [J]. *Fuel*, 2011, 90 (4): 1545-1548.
- [35] 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.
- [36] CHAVEZ M, UCHANSKI M. Insect left-over substrate as plant fertiliser [J]. Journal of insects as food and feed, 2021, 7(5): 683-694.
- [37] CHOI Y, CHOI J, KIM J, et al. Potential usage of food waste as a natural fertilizer after digestion by *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)[J]. International journal of industrial entomology, 2009, 19(1):171-174.
- [38] KAWASAKI K, KAWASAKI T, HIRAYASU H, et al. Evaluation of fertilizer value of residues obtained after processing household organic waste with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) [J/OL]. Sustainability, 2020, 12(12): 4920[2022-03-28]. <https://doi.org/10.3390/su12124920>.

Research progress on resource utilization of livestock and poultry manure based on transformation by black soldier fly

LI Qing^{1,2}, QIN Wenjie^{1,2}, CAO Xiufang¹, HOU Dejie², JIANG Hong¹

1. College of Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. The Cooperative Innovation Center for Sustainable Pig Production Co-Sponsored by Province and Ministry, Wuhan 430070, China

Abstract With the rapid development of intensive breeding industry, about 3.8 billion tons of livestock and poultry manure will be produced in China every year, causing the accumulation of livestock and poultry manure and environmental pollution. It is one of the main sources of non-point pollution in China. At the same time, there is a serious shortage of feed protein raw materials in China, and more than 80% of them depend on imports. The annual import value exceeds more than 200 billion yuan, making China the largest importer of protein raw materials in the world. Insects can efficiently transform livestock and poultry manure, reduce greenhouse gas emissions, and produce excellent insect protein, fat and insect sand, so as to realize nutrient circulation and resource utilization of livestock and poultry manure. The biotransformation of livestock and poultry manure insect, represented by black soldier fly, has low energy consumption, low emission and good social, ecological and economic benefits. It will be one of the most potential strategies to solve the dilemma of livestock and poultry manure pollution. In recent years, the transformation industry of livestock and poultry manure by black soldier fly has developed rapidly. In this paper, the environmental and resource problems brought about by livestock and poultry breeding and the beneficial resource utilization generated by black soldier fly biotransformation are analyzed and elaborated, and the future development direction is prospected, in order to provide reference for the development of low-carbon livestock industry of black soldier fly transforming livestock and poultry manure.

Keywords black soldier fly; insect convert; livestock and poultry manure; low-carbon animal husbandry; greenhouse gas

(责任编辑:边书京)