



姜姝, 叶小梅, 张茹菊, 奚永兰, 马秋琴, 孔祥平, 朱飞. 黑水虻虫粪的营养价值及应用研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 462-471. JIANG Shu, YE Xiao-Mei, ZHANG Ru-Ju, XI Yong-Lan, MA Qiu-Qin, KONG Xiang-Ping, ZHU Fei. Research progress on the nutritional value and applications of black soldier fly larvae frass [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 462-471.

黑水虻虫粪的营养价值及应用研究进展

姜姝¹, 叶小梅^{1,2*}, 张茹菊², 奚永兰², 马秋琴², 孔祥平², 朱飞²

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212000; 2. 江苏省农业科学院畜牧研究所, 南京 210000)

摘要: 黑水虻 *Hermetia illucens* L. 是一种广泛应用于废弃物管理及资源化利用的昆虫, 其幼虫能迅速降解和转化有机废弃物, 同时产生一种高价值副产品——虫粪。黑水虻虫粪不仅富含氮、磷、钾等多种营养成分, 且含有大量有机质及微量元素, 有较高的肥料潜力。此外, 虫粪中的生物活性物质在改善土壤结构、提升土壤微生物活性以及促进植物生长等方面均具有显著效果。目前, 关于虫粪的研究取得了诸多进展, 包括虫粪的理化性状、活性物质组成、作为添加剂辅料的应用现状以及生物稳定性的改良方式等, 但虫粪中抗菌肽以及潜在的新型污染物 (微塑料、抗生素及抗性基因) 对环境的影响仍未被充分研究, 亟需进一步探索。为此, 本文综述了黑水虻虫粪的营养成分、应用现状及其资源化应用技术的进展, 并对虫粪资源化过程中的挑战与发展方向进行了深入分析, 尤其是针对虫粪中可能存在的环境污染物及其潜在危害, 提出了未来研究应关注的重点领域, 以期为今后黑水虻虫粪的深入研究及应用提供参考。

关键词: 黑水虻虫粪; 营养价值; 有机肥料; 后处理

中图分类号: Q969.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0462-10

Research progress on the nutritional value and applications of black soldier fly larvae frass

JIANG Shu¹, YE Xiao-Mei^{1,2*}, ZHANG Ru-Ju², XI Yong-Lan², MA Qiu-Qin², KONG Xiang-Ping², ZHU Fei²
(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, Jiangsu Province, China; 2. Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210000, China)

Abstract: Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L., BSFL) are increasingly utilized in waste management and resource recovery due to their remarkable ability to rapidly degrade and convert organic waste into high-value by-products, particularly larvae frass. This frass is rich in various essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium, as well as substantial amounts of organic matter and trace elements, thereby exhibiting significant potential as a sustainable fertilizer. Moreover, bioactive compounds present in the frass have been reported to enhance soil structure, stimulate soil microbial activity and promote plant growth. Recent researches have made substantial progress in characterizing the physicochemical properties of BSFL frass, identifying its bioactive components, application status as a soil amendment or supplement, and developing strategies to improve its biological stability. However, potential environmental concerns associated with the presence of antimicrobial peptides and emerging

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD17020034); 江苏省农业科技自主创新资金 (CX (23) 2006)

作者简介: 姜姝, 女, 硕士研究生, 研究方向为农业废弃物的资源化利用, E-mail: 19951076785@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 叶小梅, 女, 博士, 研究员, 研究方向为养殖废弃物生物转化生产新型蛋白饲料研发, E-mail: yexiaomei@jaas.ac.cn

收稿日期 Received: 2024-12-17; 修回日期 Revision received: 2025-01-20; 接受日期 Accepted: 2025-01-20

contaminants—such as microplastics, antibiotics and antibiotic resistance genes—remain insufficiently studied and warrant further investigation. Therefore, this review provides a comprehensive overview of the nutritional composition, current applications and recent technological advancements in the valorization of BSFL frass. It also critically examines the challenges and future directions in its recycling and resource utilization, with particular emphasis on potential environmental pollutants and their hazards. Suggestions are offered to guide future research and promote the sustainable development of BSFL frass-based applications.

Key words: Black soldier fly larvae frass; nutritional value; organic fertilizer; post-treatment

黑水虻 *Hermetia illucens* L., 是一种广泛应用于废弃物管理及资源化利用的昆虫。其生命周期为40~43 d, 包括卵、幼虫、预蛹、蛹和成虫5个阶段, 受温度、湿度及物料等因素影响 (Basri *et al.*, 2022; Suryati *et al.*, 2023)。由于黑水虻幼虫具有腐食性, 可通过生长发育过程实现废弃物的高效转化, 将蔬菜尾菜、动物粪便及其他农业废弃物等转化为蛋白质、脂肪、氨基酸和几丁质等高品质物质 (Salomone *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2019)。此外, 幼虫还能显著提升转化后废弃物的营养价值, 增强其腐殖化程度并提升微量元素含量 (Da and Hesselberg, 2020; Liu *et al.*, 2021)。与传统堆肥相比, 黑水虻幼虫转化有机废弃物具有更高的转化效率, 可实现有机废弃物快速减量并抑制病原菌传播 (Amrul *et al.*, 2022; Basri *et al.*, 2022)。目前, 由于黑水虻幼虫生物转化废弃物技术具有养殖周期短、技术成本低等优势, 因而成为一种理想的废弃物处理和资源回收方式 (Rehman *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2021)。

在这一过程中, 黑水虻幼虫消化有机废弃物产生的排泄物——虫粪, 也展现了良好的应用前景。黑水虻虫粪可视为一种新型肥料资源, 与传统堆肥、厌氧发酵等常规农业废弃物资源化利用路径相比, 虫粪在营养价值、土壤生态调节及环境可持续性方面具备独特优势。第一, 虫粪的应用经济价值较高。除了生产堆肥产品, 虫粪还能保留黑水虻幼虫在转化有机废弃物过程中生成的大量营养元素, 尤其是氮 (N) 和磷 (P), 以及蛋白质、脂质等活性物质 (Chia *et al.*, 2019; Jose, 2023)。第二, 虫粪在改善土壤健康方面具有重要作用。虫粪的添加可以显著优化土壤微生态环境, 促进有益微生物的繁殖, 同时抑制土壤病原菌的生长 (Poveda *et al.*, 2019; Beesigamukama *et al.*, 2021b; 王小波等, 2021)。特别是虫粪中富含的

几丁质等昆虫衍生物, 不仅能刺激植物的免疫防御机制, 还能作为根际放线菌属、镰刀菌属的碳源, 进一步提升土壤生态系统的稳定性 (Nardi *et al.*, 2017; Beesigamukama *et al.*, 2020)。最后, 从环境可持续性角度来看, 虫粪的生产和应用过程相较于传统有机肥料生产过程具有更低的环境代价。虫粪的生产和使用能减少土壤和水体的酸化作用, 并降低温室气体的排放量 (Salomone *et al.*, 2017; Smetana *et al.*, 2019)。目前已有大量关于虫粪营养成分、活性物质组成等方面的研究, 但在其营养成分的差异性、潜在污染物 (如抗生素、抗性基因等) 的长期生态影响等方面仍缺乏系统总结。因此, 本文对虫粪的营养价值展开了细致的讨论, 深入剖析了虫粪的理化性质及其营养成分, 详细阐述了虫粪在农业、环保等领域的开发利用现状。最后, 探讨了虫粪资源的高值化应用技术的未来发展前景, 为其进一步的开发利用提供前瞻性思路与建议。本综述为进一步研究虫粪的营养价值与应用方法提供了理论依据, 对提升环境昆虫黑水虻资源化转化废弃物的技术发展具有至关重要的作用。

1 黑水虻虫粪营养价值

1.1 基本成分与理化性质

虫粪的质量和成分主要受到饲养过程中使用的物料以及后处理的影响 (Klammsteiner *et al.*, 2020)。鉴于幼虫可以消耗多种摄食物料, 虫粪的理化性质也会变化 (Lomonaco *et al.*, 2024) (表1)。

虫粪的含水率通常较高, 初始情况下可达70%~80%。具体的含水率会受到饲养环境、幼虫的代谢水平以及喂养物料特性的影响。由于虫粪与幼虫常混合在一起, 为了有效筛分虫粪, 起始

物料水分含量通常保持在 70%~75% 之间。此外, 当黑水虻幼虫能够将虫粪水分含量降低到 50% 左右时, 虫粪的分离效果更好 (Cheng *et al.*, 2017)。由于高含水量的虫粪具有粘土状质地, 因此很难在湿虫粪中分离并收集黑水虻幼虫。一种从湿虫粪中收获黑水虻幼虫的方法是通过流水冲洗 (Dortmans *et al.*, 2017)。然而, 这种方法会清洗掉虫粪, 进而造成浪费并排放大量高浓度污水, 在生产上不建议采纳。

虫粪的 pH 值通常保持在 7.0~8.0, 这是促进植物生长 (Surendra *et al.*, 2020) 和为有益细菌群落提供理想环境的适应范围 (Choi and Hassanzadeh, 2019)。虫粪的 pH 值主要受物料的初始 pH 值的影响 (Menino *et al.*, 2021)。Ma *et al.* (2018) 发现, 当物料初始 pH 值为 6.0、7.0、8.0 和 10.0 时, 幼虫摄食阶段结束后的虫粪 pH 值介于 8.0~8.5; 而在初始 pH 值为 2.0 和 4.0 的物料中, 获得的虫粪的 pH 值为 6.0。黑水虻幼虫对底物 pH 的影响可能与肠道微生物产生有机酸有关。另一方面, 底物 pH 值的增加可能与铵离子 (NH_4^+) 和氨气释放引起的碱化作用有关 (Feng *et al.*, 2020)。

虫粪的碳氮比 (C/N) 通常受到物料种类、培养条件和处理工艺的影响, 其范围通常在 8 : 1~27 : 1。植物对 N 的利用率受肥料的 C/N 大小影响较大, C/N 越低通常养分释放越快, 从而促进植物快速吸收 (Sheng *et al.*, 2021)。然而, C/N 过低的肥料可能会导致毒性并引发硝酸盐浸出问题。例如, 在 C/N 为 7.2 时, 生菜生长不良, 这可能与营养物质的快速矿化有关 (Chiam *et al.*, 2021)。Beesigamukama *et al.* (2021b) 用锯末对 C/N 为 11 的啤酒渣进行改性, 获得了 C/N 为 15、20、25 和 30 的物料。结果表明, C/N 为 15~30 的物料所产生的虫粪堆肥中不含植物毒性物质, 适合作为有机肥料用于田间施用。

N、P 和钾 (K) 等常量营养素对于植物生长的影响与阳光、 CO_2 和 H_2O 同等重要 (Jose, 2023)。虫粪中的 N、P 和 K 的含量会随饲喂幼虫的物料而变化。用家庭城市垃圾和啤酒厂废谷物喂养幼虫时, 虫粪中 N 含量较高, 约为 2% (Kawasaki *et al.*, 2020), 而用玉米秸秆喂养幼虫时, 产生的虫粪具有较高的 P 含量和 K 含量 (Gao *et al.*, 2019), 如表 1 所示。

表 1 投喂不同废弃物后产生的虫粪理化性质

Table 1 Physicochemical properties of frass from larvae fed different wastes

虫粪来源 Sources of frass	幼虫密度 (m^{-2}) Larval density	含水率 (%) Moisture content	酸碱度 pH	碳氮比 C : N	总氮 (%) Total nitrogen	总磷 (%) Total phosphorus	总钾 (%) Total kalium	参考文献 References
水果和蔬菜 Fruits and vegetables	-	10.0	5.58	26.6 : 1	1.83	-	-	Klammsteiner <i>et al.</i> , 2020
家庭食物垃圾 Household food waste	12 000	55.6	7.40	16.6 : 1	2.16	0.05	0.07	Kawasaki <i>et al.</i> , 2020
玉米秸秆 Corn straw	-	38.2	8.03	-	0.63	2.54	2.08	Gao <i>et al.</i> , 2019
厨余垃圾 Food waste	-	63.0	7.40	17.0 : 1	-	-	-	Liu <i>et al.</i> , 2020
城市食物垃圾 Urban food waste	2 000	63.0~65.0	7.30	8.00 : 1	-	-	-	Sarpong <i>et al.</i> , 2019
啤酒厂废谷物 Brewery spent grains	-	30.1	7.70	16.8 : 1	-	1.16	0.17	Beesigamukama <i>et al.</i> , 2020

作为肥料代替品, 虫粪的 N、P、K 含量符合各国对肥料中 N、P、K 含量的规定和限制。根据马来西亚标准, 有机肥料中的 N 含量不应低于 1.5%。菲律宾的肥料标准规定土壤改良剂或堆肥

的 NPK 总量为 2.5%~5%, 有机肥料为 5%~7%。韩国官方肥料标准建议的范围更广, N : P : K 的施用量为 5%~20%, 其中 N 的施肥量超过 4%, P 和 K 的施肥量超过 1% (Kala *et al.*, 2011)。对于我国

的新有机肥行业标准 (NY/T 525-2021), 要求有机肥料的总养分 (N、P₂O₅、K₂O) 的质量分数不得低于4%。因此, 虫粪不仅能够满足多个国家的肥料标准, 且在中国的新标准下也具备了作为合格有机肥料的可能性, 展现出其作为可持续农业资源的优势。

除了N、P、K外, 为促进植物的最佳生长, 还需要微量营养素, 包括钙 (Ca)、镁 (Mg)、钠 (Na)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、铜 (Cu) 和锌 (Zn)。在虫粪中这些微量元素含量相对较低, 其含量主要受黑水虻幼虫所消化的有机物来源及其物料成分的影响 (表2)。

表2 投喂不同废弃物后产生的虫粪所含有的重金属含量
Table 2 Heavy metal content in frass from larvae fed different biomass

物料 Substrate	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)	Na (g/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	参考文献 References
蔬菜 Vegetables	15.0	7.0	0.3	896	19.0	149	137	Menino <i>et al.</i> , 2021
啤酒酒糟 Brewer's spent grains	9.7	1.0	-	310	25.0	109	182	Anyega <i>et al.</i> , 2021
麦粒 Barley grains	6.4	2.2	0.2	4 100	12.8	100	100	Fuhrmann <i>et al.</i> , 2022
大麻废料 Hemp waste	19.2	4.6	7.3	1 111	26.1	164	187	Banavar <i>et al.</i> , 2022
盖恩斯维尔饮食 Gainesville diet	8.9	5.2	0.9	507	9.8	66.0	58.2	Seyedalmoosavi <i>et al.</i> , 2023
麦麸 Wheat bran	-	0.3	-	15.0	8.9	19.4	15.0	Watson <i>et al.</i> , 2021

1.2 其他生物活性物质

虫粪富含多种生物活性物质, 如氨基酸、腐殖酸和几丁质等 (Xu and Geelen, 2018), 不仅为植物提供矿物营养, 参与植物营养的信号传导, 提高植物对逆境 (如干旱、盐碱、低温等) 的耐受性, 还能改善土壤结构与功能, 促进土壤中微生物的活性, 提升养分循环效率等 (Nardi *et al.*, 2017; Yakhin *et al.*, 2017; Beesigamukama *et al.*, 2020; Yildirim-Aksoy *et al.*, 2020a)。

Yildirim-Aksoy *et al.* (2020a) 在虫粪中检测到多种氨基酸, 包括精氨酸 Arginine、组氨酸 Histidine、异亮氨酸 Isoleucine、亮氨酸 Leucine、赖氨酸 Lysine、蛋氨酸 Methionine、苯丙氨酸 Phenylalanine、苏氨酸 Threonine 和缬氨酸 Valine 等, 其含量范围为 0.5%~1.5%。其中, 酪氨酸 Tyrosine 的含量最高, 达 3.7%。作为一种重要的生物碱代谢物, 酪氨酸可以帮助植物抵御环境压力和病虫害。

虫粪中的腐殖酸、腐殖酸代谢及其与土壤微生物的相互作用会释放多种生物激素, 如生长素和细胞分裂素 (Li *et al.*, 2023)。腐殖酸还能增强土壤持水能力 (Nardi *et al.*, 2017), 通过沉淀重金属来减少植物对重金属的摄入 (Wu *et al.*, 2017)。

黑水虻幼虫在其多个发育阶段都会经历蜕皮

过程。因此, 富含几丁质的幼虫壳会在虫粪中不断积累。几丁质在土壤中显示出抑制植物病害的功能, Postma and Schilder (2015) 以甜菜为试验植物, 研究了不同有机土壤改良剂对立枯丝核菌 AG 2-2IIIB 病害抑制的功效, 发现用酵母或几丁质以 0.3% (w/w) 的速率改良未消毒的土壤后, 病害传播显著减少, 分别减少至 86%、83%、52% 和 48%。几丁质存在于线虫卵壳和大多数植物病原真菌的细胞壁中, 将这些材料施用于土壤中, 可以增加土壤中几丁质溶解微生物的数量及其几丁质酶活性, 从而有效地防治土壤线虫和病原真菌的危害。

总之, 虫粪的营养价值与其物料及处理工艺密切相关。虫粪富含 N、P、K 等主要营养元素, 以及氨基酸、腐殖酸和几丁质等生物活性物质。这些成分不仅促进植物生长, 提高植物抗逆性, 还能改善土壤结构和功能。

2 虫粪的应用

随着对虫粪的研究不断深入, 其在农业、养殖业及其他行业的多样化应用逐渐获得关注, 如: 土壤改良剂、有机肥料、饲料添加剂、食用菌培养基等 (图1), 推动了虫粪资源的高效利用。



图1 黑水虻虫粪的应用

Fig. 1 Applications of black soldier fly frass

2.1 土壤改良剂

使用虫粪作为土壤改良剂，主要有以下几个原因：虫粪的物理特性有助于改善土壤的结构，增加土壤的通气性和排水性，减少土壤的压实现象，从而促进根系生长；虫粪中含有大量微生物和有机物质，有助于土壤微生物的繁殖 (Beesigamukama *et al.*, 2020)，提高土壤的生物活性；此外，虫粪能够改善土壤的酸碱度和缓冲能力，帮助稳定土壤环境，使其更适合植物生长 (Schmitt and De Vries, 2020)。Beesigamukama *et al.* (2021a) 发现使用虫粪的土壤改良剂增加了细菌和真菌的数量，降低了土壤酸度，并增加了 P (2 倍) 和 Mg (2~4 倍) 的释放。王小波等 (2021) 将不同浓度的虫粪 (0%、2%、4%、6% 和 8%) 添加到盆栽土壤中，发现虫粪的添加提高了土壤的 pH、有机质含量，土壤 pH 两年中分别由 6.46、6.51 提升到 7.13、7.14，有机质含量提高了 7.1%~32.5%。Menino *et al.* (2021) 的研究发现，在黑麦草生长试验中土壤脱氢酶活性 (DHA) 随着虫粪使用量的增加而显著增加，表明整体土壤微生物活性增加，展示了其对长期土壤健康的潜在益处。

2.2 有机肥料

用不同的物料饲喂黑水虻幼虫，生成的虫粪与商业化的有机肥料具有相似的效果，常用物料包括城市有机固体废弃物 (Sarpong *et al.*, 2019)、酿酒厂废弃谷物 (Beesigamukama *et al.*, 2020)、食物垃圾 (Salomone *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020)、粪便 (Xiao *et al.*, 2018)、以及各种混合废弃物，如家禽、酿酒厂废弃物和绿色市场废弃物的混合物 (Quilliam *et al.*, 2020)，猪粪、狗食

和人类粪便的混合物 (Lalander *et al.*, 2015) 和发酵玉米秸秆 (Gao *et al.*, 2019) 等。

李卫娟等 (2016) 在盆栽试验中，发现添加 20% 黑水虻转化新鲜猪粪制备的虫粪能够显著促进白菜生长；吴翔等 (2019) 将黄粉虫虫粪、黑水虻虫粪、白星花金龟粪 3 种虫粪和鸡粪用作番茄生长的有机肥，经试验对比发现黑水虻虫粪显著提高了番茄株高、总酸度、叶绿素的含量，番茄产量和维生素 C 分别提高 28.54%、19.36%；Barragan-Fonseca (2022) 研究发现，使用少量虫粪的黑甘蓝表现出 4 种相互关联的改善，即植株生长更大、开花更多、吸引的传粉昆虫更多，最终种子数量也更多；Agustiyani *et al.* (2021) 在小白菜中添加 5%、10% 和 15% 的虫粪，与对照土壤相比，35 d 后添加虫粪的植物总重分别为 19.8 g、23.3 g 和 20.7 g，而对照土壤的植物总重仅有 0.9 g。

2.3 饲料添加剂

虫粪中含有甲壳素和有益微生物等物质，这些物质不仅可以改善鱼类的性能和免疫系统，还能对某些鱼的肠道健康起积极作用 (Yildirim-Aksoy *et al.*, 2020a)。

Yildirim-Aksoy *et al.* (2020b) 研究了虫粪作为动物饲料对杂交罗非鱼 *Hybrid tilapia* 生长的影响。该研究将 5 种含有不同虫粪比例的饲料 (0%、5%、10%、20%、30%) 作为豆粕、小麦短粕和玉米粕混合物的部分替代品，并在同等蛋白质基础上进行了试验。结果显示，饲料中含有 5%~30% 虫粪的蛋白质效率略高于对照组饲料，杂交罗非鱼的生长改善可能与虫粪的高蛋白含量有关。此外，Yildirim-Aksoy *et al.* (2020a) 还研究了虫粪饲料对太平洋白虾 *Litopenaeus vannamei* 的影响，研究发现，采用含有 30% 虫粪的虾饲料饲喂试验组，太平洋白虾的生长性能、身体成分、血淋巴参数并未受到影响。Romano *et al.* (2023) 在为期 56 d 的试验中研究了含有或不含 10% 虫粪的水生饲料对斑点鲶鱼 *Ictalurus punctatus* 的影响。结果发现与饲喂对照饮食的鱼相比，喂食含有 10% 虫粪的饲料的斑点鲶鱼生长得明显更快。上述试验结果均表明，虫粪可以作为一种有效的动物饲料替代品。

2.4 食用菌培养基

近年来，食用菌种植行业面临着一个显著的挑战，即培养料成本的不断攀升。棉籽壳作为食用菌最常用的培养基质之一，因其良好的吸水性、

通气性和丰富的有机质含量，长期以来一直是食用菌栽培的首选材料。然而，随着棉籽壳价格的持续上涨，食用菌种植者的生产成本大幅增加，直接影响了行业的盈利能力 (Xiao *et al.*, 2019; Dukare *et al.*, 2024)。

因此，寻找一种或多种廉价且高效的替代材料显得尤为重要。虫粪富含多种营养物质，相较于棉籽壳，其成本较低，且在食用菌培养中具有潜在应用场景 (夏梦宁等, 2021)。通过利用虫粪制备食用菌培养基 (图2)，不仅能够有效降低培养料的成本问题，还能拓宽其在农业和其他领域的应用前景，保持食用菌种植业在农业经济中的重要地位。尽管夏梦宁等 (2021) 发明的食用菌培养基专利在虫粪应用研究中取得重大突破，其实际应用的探索和研究方面仍然存在不足，需进一步深入探索和开发。



图2 虫粪制备食用菌培养基的流程图

Fig. 2 Flowchart for preparing insect frass-based mushroom cultivation medium

3 未来发展前景

3.1 餐厨垃圾的预处理

餐厨垃圾作为黑水虻幼虫养殖的单一物料，其高含水量和营养成分不均衡常常导致虫粪品质较差。餐厨垃圾的含水量通常超过80% (Lalander *et al.*, 2020)，在潮湿、厌氧条件下产出的虫粪含水量超过45%。含水量过高的虫粪可能导致植物氧气供应不足，影响植物根系的正常生长 (Klammsteiner *et al.*, 2020)。因此，必须对餐厨垃

圾进行适当的预处理，以调节水分含量，确保最终含水量控制在成熟水平 (30%~45%) (Basri *et al.*, 2022)。常见的预处理手段包括添加富含纤维素或吸水性较强的辅料 (如木屑、稻壳、麸皮) (Song *et al.*, 2017)，以降低物料的自由水分含量，改善通气性和物料结构。此外，菌酶添加是一种有效的调节手段 (Liu *et al.*, 2023; Shao *et al.*, 2024)。通过引入特定的微生物菌株和降解酶，可以加速有机质的分解和转化，减少厌氧条件下有害物质的积累，提升虫粪的营养含量和稳定性。这种生物强化技术有助于改善虫粪的物理化学特性，增加有益微生物群落的多样性，进一步提高虫粪的价值。未来的研究应进一步探讨不同预处理方法的协同效应，优化工艺参数，以实现餐厨垃圾对虫粪的高品质生产。

3.2 二次堆肥

虫粪的稳定性是加速有机质分解和促进营养盐矿化的关键因素之一 (Abd *et al.*, 2024)。不稳定的堆肥通常具有高水平的植物毒性，与成熟的堆肥相比，对植物生长具有抑制作用。Bohm *et al.* (2023) 发现，植物毒性在很大程度上取决于饲喂黑水虻幼虫的有机废物的初始化学成分。在未成熟的堆肥中，常见的植物毒素包括重金属、酚类成分、有机酸和盐积累等 (Luo *et al.*, 2018)。

为了提高虫粪的稳定性、降低植物毒性并促进有机质降解，二次堆肥是有效的处理方式。通过控制温度和时间，二次堆肥可以进一步降解有机物，提升堆肥的腐熟度。腐熟度是堆肥质量的重要指标，也是评估虫粪在土壤中稳定性的关键因素之一 (Klammsteiner *et al.*, 2020; Ji *et al.*, 2023)。此外，二次堆肥还能改善堆肥的孔隙率和物理结构，提升其作为有机肥料的效果。

因此，在将虫粪用作土壤改良剂和有机肥料之前，应进行充分的分析和必要的二次处理，以确保其质量和稳定性。未来的研究应重点探讨二次处理过程 (如嗜热堆肥) 的影响，包括嗜热、嗜温和成熟阶段的持续时间、达到的温度，以及这些因素在降低植物毒性和促进腐殖质形成中的作用。

3.3 新型污染物

虫粪作为有机肥料被广泛应用于农业中，但其潜在的污染物 (如抗生素、抗性基因和微塑料等) 对土壤健康、植物生长和环境安全的影响仍

需关注。

基于现有文献, 尽管目前关于虫粪中微塑料的研究较为有限, 但结合黑水虻幼虫在处理有机废弃物过程中对微塑料的摄取和排泄特性, 其肠道系统不能完全降解微塑料, 部分微塑料会随虫粪排出, 成为潜在的环境污染源 (Lievens *et al.*, 2023; Grossule *et al.*, 2024)。Chen *et al.* (2022) 研究表明, 虫粪中的四环素抗性基因能够在根际土壤和菜心的内生菌中传播, 可能导致抗药性基因在土壤微生物群落中的积累, 进而威胁到土壤生态系统和植物健康。此外, 虫粪中潜在的抗生素残留也可能通过土壤-植物-微生物体系持续影响土壤生态, 改变微生物群落的多样性和功能。

未来的环境安全评估应综合考虑这些污染物的传播途径和可能影响, 以确保虫粪作为有机肥料的应用不会对生态系统造成负面影响。

3.4 黑水虻虫粪中抗菌肽的研究展望

近年来, 黑水虻幼虫的抗菌肽研究取得了显著进展, 其在抑制细菌和真菌生长方面显示出良好的抗微生物活性 (Pimchan *et al.*, 2024)。抗菌肽还被提议作为抗生素替代品, 特别是在牲畜养殖中, 能够有效减少抗生素耐药性问题 (Xia *et al.*, 2021; Van *et al.*, 2022)。研究还表明, 黑水虻幼虫的饮食对抗菌肽的表达具有显著影响, 不同的物料来源可能导致不同的抗菌肽谱的生成, 这为其应用提供了多样化的选择 (Moretta *et al.*, 2020)。

然而, 虫粪作为一个农业副产品, 是否同样富含抗菌肽, 以及其在农业应用中的潜在价值尚未得到充分研究。虫粪作为土壤改良剂或有机肥料时, 可能将这些天然抗菌肽的有益特性带入土壤生态系统。未来的研究应探讨虫粪中的抗菌肽是否能在不同环境条件下保持活性, 及其对土壤健康和植物生长的长远影响。这些研究将为黑水虻及其衍生产品在农业领域的应用提供更为科学和全面的理论支持。

4 总结

黑水虻虫粪作为一种新兴的生物资源, 具备丰富的营养成分, 并具有显著的环境应用潜力。然而, 虫粪的高含水量和不同物料的变化对其质量和功能性产生了影响, 限制了其资源化应用的

广泛性。此外, 虫粪中可能残留的新型污染物, 尤其是抗生素和微塑料的积累, 亦是制约其作为肥料和土壤改良剂的关键因素。尽管如此, 随着虫粪资源化潜力的不断认识及相关技术的发展, 虫粪在动物饲料、农业废弃物循环利用及食用菌栽培等领域已取得一定的应用成果。未来, 亟需进一步改进虫粪的腐熟度与处理技术, 同时加强对新型污染物的监测与去除。推动虫粪资源化、无害化和高效利用的技术研究, 将为农业可持续发展 and 环境保护提供更为有效的解决方案。

参考文献 (References)

- Abd Manan F, Yeoh YK, Chai TT, *et al.* Unlocking the potential of black soldier fly frass as a sustainable organic fertilizer: a review of recent studies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 367: 121997.
- Agustiyani D, Agandi R, Arinafril, *et al.* The effect of application of compost and frass from black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) on growth of Pakchoi (*Brassica rapa* L.) [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 762 (1): 012036.
- Amrul NF, Ahmad IK, Basri NEA, *et al.* A review of organic waste treatment using black soldier fly (*Hermetia illucens*) [J]. *Sustainability*, 2022, 14 (8): 4565.
- Anyega AO, Korir NK, Beesigamukama D, *et al.* Black soldier fly-composted organic fertilizer enhances growth, yield, and nutrient quality of three key vegetable crops in Sub-Saharan Africa [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 680312.
- Banavar A, Amirkolaei SK, Duscher L, *et al.* Nutritional evaluation of black soldier fly frass as an ingredient in Florida Pompano (*Trachinotus carolinus* L.) diets [J]. *Animals*, 2022, 12 (18): 2407.
- Barragan-Fonseca KY. Insect Trash is a Plant's Treasure: Effects of Insect Exuviae as Soil Amendment on Pollinator Performance and Plant Reproduction [D]. Wageningen: Wageningen University and Research, 2022.
- Basri NEA, Azman NA, Ahmad IK, *et al.* Potential applications of frass derived from black soldier fly larvae treatment of food waste: a review [J]. *Foods*, 2022, 11 (17): 2664.
- Beesigamukama D, Mochoge B, Korir NK, *et al.* Exploring black soldier fly frass as novel fertilizer for improved growth, yield, and nitrogen use efficiency of maize under field conditions [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 574592.
- Beesigamukama D, Mochoge B, Korir NK, *et al.* In situ nitrogen mineralization and nutrient release by soil amended with black soldier fly frass fertilizer [J]. *Scientific Reports*, 2021a, 11 (1): 14799.
- Beesigamukama D, Mochoge B, Korir NK, *et al.* Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly [J]. *Waste Management*, 2021b, 119:

- 183–94.
- Bohm K, Hatley GA, Robinson BH, *et al.* Analysis of chemical and phytotoxic properties of frass derived from black soldier fly-based bioconversion of biosolids [J]. *Sustainability*, 2023, 15 (15): 11526.
- Chen JY, Cai YF, Deng WK, *et al.* Transmission of tetracycline resistance genes and microbiomes from manure-borne black soldier fly larvae frass to rhizosphere soil and pakchoi endophytes [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1014910.
- Cheng JYK, Chiu SLH, Lo IMC. 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: 315–23.
- Chia SY, Tanga CM, Van Loon JJA, *et al.* Insects for sustainable animal feed: Inclusive business models involving smallholder farmers [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 41: 23–30.
- Chiam ZY, Lee JTE, Tan JKN, *et al.* Evaluating the potential of okara-derived black soldier fly larval frass as a soil amendment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: 112163.
- Choi S, Hassanzadeh N. BSFL frass: A novel biofertilizer for improving plant health while minimizing environmental impact [J]. *The Canadian Science Fair Journal*, 2019, 2: 41–46.
- Da Silva GDP, Hesselberg T. A review of the use of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), to compost organic waste in tropical regions [J]. *Neotropical Entomology*, 2020, 49 (2): 151–162.
- Dortmans B, Diener S, Bart V, *et al.* Black Soldier Fly Biowaste Processing: A Step-by-step Guide [M]. Dübendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2017.
- Dukare A, Sharma K, Nadanathangam V, *et al.* Valorization of cotton seed hulls as a potential feedstock for the production of thermostable and alkali-tolerant bacterial xylanase [J]. *BioEnergy Research*, 2024, 17 (1): 173–186.
- Feng H, Fan X, Miller AJ, *et al.* Plant nitrogen uptake and assimilation: regulation of cellular pH homeostasis [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71 (15): 4380–4392.
- Fuhrmann A, Wilde B, Conz RF, *et al.* Residues from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae rearing influence the plant-associated soil microbiome in the short term [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 994091.
- Gao ZH, Wang WQ, Lu XH, *et al.* Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 974–80.
- Grossule V, Conti GO, Rapisarda P, *et al.* Treatment of biowaste commingled with biodegradable bioplastic films using black soldier fly larvae: generation and fate of micro-plastics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122768.
- Ji Z, Zhang L, Liu Y, *et al.* Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta-analysis [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 886: 163929.
- Jose JV. Physiological and Molecular Aspects of Macronutrient Uptake by Higher Plants [M]. New York: Academic Press, 2023: 1–21.
- Kala D, Rosenani A, Fauziah C, *et al.* Commercial organic fertilizers and their labeling in Malaysia [J]. *Malaysian Journal of Soil Science*, 2011, 15: 147–157.
- 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]. *Sustainability*, 2020, 12 (12): 4920.
- Klammsteiner T, Turan V, Fernandez-Delgado Juarez M, *et al.* Suitability of black soldier fly frass as soil amendment and implication for organic waste hygienization [J]. *Agronomy-Basel*, 2020, 10 (10): 1578.
- Lalander CH, Fidjeland J, Diener S, *et al.* High waste-to-biomass conversion and efficient *Salmonella* spp. reduction using black soldier fly for waste recycling [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35 (1): 261–271.
- Lalander C, Diener S, Zurbrugg 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.
- 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.
- Li WJ, Zhou WJ, Yang SY, *et al.* Effects of *Hermetia illucens* sandworm on the growth performance of cabbage [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44 (10): 111–112. [李卫娟, 周文君, 杨树义, 等. 黑水虻虫沙对白菜生长性能的影响 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44 (10): 111–112]
- Li Y, Li J, Chang Y, *et al.* Comparing bacterial dynamics for the conversion of organics and humus components during manure composting from different sources [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1281633.
- Lievens S, Vervoort E, Bruno D, *et al.* Ingestion and excretion dynamics of microplastics by black soldier fly larvae and correlation with mouth opening size [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13 (1): 4341.
- Liu C, Wang C, Yao H, *et al.* Pretreatment is an important method for increasing the conversion efficiency of rice straw by black soldier fly larvae based on the function of gut microorganisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 144118.
- Liu C, Wang C, Yao H. Comprehensive resource utilization of waste using the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Animals*, 2019, 9 (6): 349.
- Liu T, Awasthi MK, Awasthi SK, *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.
- Liu X, Chen X, Wang H, *et al.* Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12 (8): e0182601.
- Lomonaco G, Franco A, De Smet J, *et al.* Larval frass of *Hermetia*

- illucens* as organic fertilizer: Composition and beneficial effects on different crops [J]. *Insects*, 2024, 15 (4): 293.
- Luo Y, Liang J, Zeng G, *et al.* Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects [J]. *Waste Management*, 2018, 71: 109–14.
- Ma C, Huang Z, Feng X, *et al.* Selective breeding of cold-tolerant black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: Gut microbial shifts and transcriptional patterns [J]. *Waste Management*, 2024, 177: 252–65.
- Ma J, Lei Y, Rehman KU, *et al.* Dynamic effects of initial pH of substrate on biological growth and metamorphosis of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2018, 47 (1): 159–165.
- Menino R, Felizes F, Castelo-Branco MA, *et al.* Agricultural value of black soldier fly larvae frass as organic fertilizer on ryegrass [J]. *Heliyon*, 2021, 7 (1): e05855.
- Moretta A, Salvia R, Scieuzo C, *et al.* A bioinformatic study of antimicrobial peptides identified in the Black Soldier Fly (BSF) *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 16875.
- Nardi S, Ertani A, Francioso O. Soil-root cross-talking: the role of humic substances [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2017, 180 (1): 5–13.
- Pimchan T, Hamzeh A, Siringan P, *et al.* Antibacterial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae: mode of action and characterization [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14 (1): 26469.
- Postma J, Schilder MT. Enhancement of soil suppressiveness against *Rhizoctonia solani* in sugar beet by organic amendments [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 94: 72–79.
- Poveda J, Jimenez-Gomez A, Saati-Santamaria Z, *et al.* Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 110–22.
- Quilliam RS, Nuku-Adeku C, Maquart P, *et al.* Integrating insect frass biofertilisers into sustainable peri-urban agro-food systems [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2020, 6 (3): 315–322.
- Rehman KU, 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: 489–98.
- Romano N, Datta SN, Pande GSJ, *et al.* Dietary inclusions of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass enhanced production of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) juveniles, stevia (*Stevia rebaudiana*), and lavender (*Lavandula angustifolia*) in an aquaponic system [J]. *Aquaculture*, 2023, 575: 739742.
- 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.
- Sarpong D, Oduro-Kwarteng S, Gyasi SF, *et al.* Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) larvae [J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2019, 8 (1): 45–54.
- Schmitt E, De Vries W. Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction [J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2020, 25: 100335.
- Seyedalmoosavi MM, Mielenz M, Schleifer K, *et al.* Upcycling of recycled minerals from sewage sludge through black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): Impact on growth and mineral accumulation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118695.
- Shao M, Zhao X, Rehman KU, *et al.* Synergistic bioconversion of organic waste by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and thermophilic cellulose-degrading bacteria [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 14: 1288227.
- Sheng M, Tang J, Yang D, *et al.* Long-term leaf C: N ratio change under elevated CO₂ and nitrogen deposition in China: evidence from observations and process-based modeling [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149591.
- Smetana S, Schmitt E, Mathys A. Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: attributional and consequential life cycle assessment [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 144: 285–296.
- Song S, Ee AWL, Tan JKN, *et al.* Upcycling food waste using black soldier fly larvae: effects of further composting on frass quality, fertilising effect and its global warming potential [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125664.
- Song X, Ma J, Gao J, *et al.* Optimization of bio-drying of kitchen waste: inoculation, initial moisture content and bulking agents [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017, 19: 496–504.
- Surendra K, Tomberlin JK, Van Huis A, *et al.* Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF) [J]. *Waste Management*, 2020, 117: 58–80.
- Suryati T, Julaha E, Farabi K, *et al.* Lauric acid from the black soldier fly (*Hermetia illucens*) and its potential applications [J]. *Sustainability*, 2023, 15 (13): 10383.
- Van Moll L, De Smet J, Paas A, *et al.* In vitro evaluation of antimicrobial peptides from the black soldier fly (*Hermetia Illucens*) against a selection of human pathogens [J]. *Microbiology Spectrum*, 2022, 10 (1): e01664–21.
- Wang XB, Wu X, Guo XQ, *et al.* Effects of black soldier fly frass on rice growth and soil physical and chemical properties [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27 (10): 1874–1882. [王小波, 吴翔, 郭雪琦, 等. 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]
- Watson C, Schloesser C, Voegerl J, *et al.* Excellent excrement? Frass impacts on a soil's microbial community, processes and metal bioavailability [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104110.
- Wu S, Li R, Peng S, *et al.* Effect of humic acid on transformation of soil heavy metals. In: Antonia Seymour, ed. IOP Conference Series:

- Materials Science and Engineering [C]. Bristol: IOP Publishing, 2017, 207 (1): 012089.
- Wu X, Hu CY, Cai RJ, *et al.* Influence of frass organic manure on tomato growth and quality [J]. *Northern Horticulture*, 2019, 3: 60–64. [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]
- Xia J, Ge C, Yao H. Antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming [J]. *Animals*, 2021, 11 (7): 1937.
- Xia MN, He YJ, Wang D. A method for preparing edible fungus culture medium using black soldier fly larvae frass: 201910333083.9 [P]. 2021–02–19. [夏梦宁, 何业俊, 王栋. 一种利用黑水虻虫粪制备食用菌培养基的方法: 201910333083.9 [P]. 2021–02–19]
- Xiao Q, Yu H, Zhang J, *et al.* The potential of cottonseed hull as biorefinery substrate after biopretreatment by *Pleurotus ostreatus* and the mechanism analysis based on comparative proteomics [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 130: 151–161.
- Xiao X, Mazza L, Yu Y, *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.
- Xu L, Geelen D. Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1567.
- Yakhin OI, Lubyantsev AA, Yakhin IA, *et al.* Biostimulants in plant science: a global perspective [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 7: 2049.
- Yildirim-Aksoy M, Eljack R, Beck BH. Nutritional value of frass from black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, in a channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diet [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020a, 26 (3): 812–819.
- Yildirim-Aksoy M, Eljack R, Schrimsher C, *et al.* Use of dietary frass from black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, in hybrid tilapia (Nile × Mozambique, *Oreochromis niloticus* × *O. mozambicus*) diets improves growth and resistance to bacterial diseases [J]. *Aquaculture Reports*, 2020b, 17: 100373.