颉延东,田维平,王周强,等.黑水虻协同处理城镇污泥效能及其对氮素转化的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6726-6736.
Xie Y D, Tian W P, Wang Z Q, et al. Performance evaluation of synergistic treatment of municipal sludge with black soldier fly larvae and its effects on nitrogen transformation [J]. China Environment Science, 2025,45(12):6726-6736.

黑水虻协同处理城镇污泥效能及其对氮素转化的影响

颉延东[1],田维平[1*],王周强[1],孙海钊[2],简于玲[1],刘 媛[1] (1.兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070；2.甘肃湛蓝环保科技有限公司,甘肃 庆阳 745000)

摘要：为探究黑水虻协同处理城镇污泥的效能及其对氮素转化的影响,以不同麦麸添加比例(0%、10%、30%)的污泥混合底物构建处理组(T2 ~ T4),无黑水虻处理(T1)作为对照,系统评估了黑水虻在污泥处理过程中的生长性能、生物转化效果及氮素转化特征.结果表明,黑水虻联合麦麸处理显著提高了黑水虻幼虫(BSFL)的生物转化效率(20.13% ~ 35.24%)以及虫体粗脂肪(19.69% ~ 26.77%)与蛋白质含量(16.26% ~ 24.26%),其中麦麸添加比例为 30%的处理组(T4)在生长性能和营养积累方面最佳.黑水虻处理显著降低了底物含水率(7.49%~7.65%),有机质(16.33%~28.50%)和溶解性有机碳(DOC)(25.53%~47.06%),同时提高了 pH 值(8.42~8.63)和电导率(EC)(635~1110μS/cm).氮素形态分析显示,黑水虻能够有效加速底物有机氮组分的降解,进而推动了氨化进程;处理结束后,污泥总氮(TN)含量下降 36.45% ~ 51.09%、NH_4^+ - N 显著升高,而 NO_3^- - N 含量始终维持在较低水平.冗余分析(RDA)结果表明,脲酶活性与 NH_4^+ - N 、EC 及 pH 值呈正相关,黑水虻可通过调控脲酶和脱氢酶活性促进底物有机氮向无机氮的转化过程,同时蛋白酶活性与有机质含量密切相关,且在底物可利用性降低过程中逐渐减弱.表明黑水虻可通过影响关键水解酶活性,提高污泥的碳氮代谢能力,进而优化其中氮素的转化路径.

关键词：黑水虻；城镇污泥；氮素转化；酶活性；污泥稳定化
中图分类号：X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6726-11

Performance evaluation of synergistic treatment of municipal sludge with black soldier fly larvae and its effects on nitrogen transformation. XIE Yan-dong[1], TIAN Wei-ping[1*], WANG Zhou-qiang[1], SUN Hai-zhao[2], JIAN Yu-ling[1], LIU Yuan[1] (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China；2.Gansu Zhanlan Environmental Protection Technology Co, Qingyang 745000, China). *China Environment Science*, 2025,45(12)：6726~6736

Abstract：The synergistic treatment of municipal sludge with black soldier fly larvae (BSFL) and its effects on nitrogen transformation were investigated in this study. Sludge-based substrates with 0%, 10%, and 30% wheat bran (T2~T4) were used for BSFL treatment, with T1serving as the BSFL-free control. BSFL performance, bioconversion efficiency, and nitrogen transformation characteristics during the sludge treatment were systematically evaluated. Results indicated that the combined application of BSFL and wheat bran significantly enhanced biotransformation efficiency (20.13%~35.24%), alongside increases in crude fat (19.69%~ 26.77%) and protein content (16.26%~24.26%). The best growth performance and nutrient accumulation were observed in the treatment group (T4) with a 30% addition of wheat bran. Moreover, a notable reduction in substrate moisture (7.49%~7.65%), organic matter (16.33%~28.50%), and dissolved organic carbon (DOC) (25.53%~47.06%) were achieved, while pH (8.42~8.63) and electrical conductivity (635~1110μS/cm) were increased by BSFL treatment. Analysis of nitrogen fractions revealed that substrate organic nitrogen degradation was significantly accelerated by BSFL, thereby promoting the ammonification process. A 36.45%~51.09% reduction in total nitrogen (TN) was measured in the post-treatment sludge, accompanied by a marked increase in NH_4^+-N, and consistently low NO_3^--N levels. Redundancy analysis (RDA) revealed that urease activity was positively correlated with NH_4^+-N, EC, and pH, suggesting that urease and dehydrogenase activities were regulated by BSFL to facilitate the conversion of organic to inorganic nitrogen forms. Furthermore, protease activity exhibited a close relationship with organic matter content, gradually diminishing as substrate availability decreased. These findings demonstrate that BSFL enhance carbon-nitrogen metabolism by modulating key hydrolytic enzymes, thereby optimizing nitrogen transformation pathways in sludge.

Key words：black soldier fly；municipal sludge；nitrogen transformation；enzymatic activity；sludge stabilization

收稿日期：2025-04-28
基金项目：甘肃省级均衡性转移支付强科技奖补助资金项目(NXKJ2023-003);甘肃省高校研究生“创新之星”项目(2025CXZX-694);兰州交通大学教学改革研究项目(JGZ202512)

* 责任作者, 副教授, wpt801@sina.com

随着我国经济的快速增长和城镇化进程的加快,城市污水处理效率及处理深度不断提高,城镇污泥产量急剧上升.据统计,2023 年以来我国城镇污泥年产量超 8.0×10^7t,且呈持续增长趋势,但 80%的污泥仍未实现规范化处理与资源化利用[1].未经稳定化和无害化处理的污泥中通常含有重金属、病原微生物等污染物,可能通过生物富集、淋溶迁移等途径成为二次污染源,威胁水体、土壤和大气环境质量,进而对生态安全和人类健康构成潜在风险.然而,污泥富含有机质及氮、磷、钾等营养元素,具有资源化利用价值,经有效处理后可用于土壤改良、污泥农用及环保材料(如可降解塑料)制作等方面[2].尽管如此,其高效资源化利用仍面临重金属残留、产品稳定性不足,以及处理与资源化成本较高等挑战,亟需开发经济可行、环境友好的处理与资源化技术.

传统污泥处理处置方法各具优势,但也存在一定局限性.卫生填埋受限于选址要求高、占地面积大,并可能导致重金属浸出及土壤污染[3];干化焚烧虽然能保证高效污泥减量和病原菌灭活,但设备投资和维护成本高且会产生二噁英、硫氧化物等难降解污染物;好氧堆肥和厌氧消化作为资源化回收途径,受污泥性质影响较大,难以大规模推广使用[4].相较于传统污泥处理工艺,近年来黑水虻生物转化技术体系因其处理成本低、占地需求小、营养物质转化率高及温室气体排放量低等优势,在污泥资源化利用方面展现出广阔应用前景[5-6].黑水虻是一种适应性强的环境资源昆虫,具备食谱广泛、营养需求低、生长周期短、对有机污染物耐受性高等特性[7].然而,黑水虻对污泥的处理效能受到多种因素的综合影响,包括底物的营养组成(如蛋白质含量)、环境温度、水分水平以及碳氮比等.其中,底物中的氮素含量是决定黑水虻幼虫生长性能和废弃物转化效率的关键因素之一.已有研究表明,若底物氮素含量过高时,碳源供能不足将抑制微生物活性,延缓有机质降解,并导致氨气(NH_3)挥发,造成氮素损失;反之,氮含量偏低则限制幼虫蛋白合成与生长发育,进而降低生物转化效率[8-9].Bohm 等[10]和 Cai 等[11]通过添加麦麸或鸡粪优化了污泥的氮素供给,从而有效提升了黑水虻对污泥的生物转化效率、蛋白质积累水平以及废弃物减量效果.现有研究虽已初步揭示底物氮源对黑水虻生长与转化性能的调控作用,但其在城镇污泥处理过程中所介导的氮素转化路径与代谢机制尚未明晰.因此,深入揭示黑水虻如何调控氮素代谢以促进有机质降解,将为优化其在污泥资源化过程中的应用提供理论支撑.

在黑水虻生物转化过程中,幼虫通过取食和消化吸收直接降解底物中氮素,并与微生物相互作用,分泌多种酶类介导氮素转化[12].研究表明,黑水虻幼虫可通过肠道定殖作用提高底物脲酶和蛋白酶活性,从而高效分解尿素和蛋白质等大分子有机氮化合物,促进有机氮的进一步矿化[13].黑水虻处理垃圾渗滤液和畜禽粪便过程中,能够通过调控底物关键酶(如脲酶、β-葡萄糖苷酶及脱氢酶等)的活性,进而影响碳氮代谢转化和产物稳定性[14-15],表明其在有机质降解与氮素转化中的重要调控作用.然而,针对黑水虻在城镇污泥转化过程中的酶活性响应机制及其对污泥稳定性和生化特性的影响,目前仍缺乏系统而深入的研究.

综上,本文以城镇污泥及添加不同比例麦麸(10%、30%)的麦麸污泥-污泥混合底物为对象,开展黑水虻处理实验.系统评估处理过程中幼虫生长性能和污泥处理效率.重点解析氮素形态(NH_4^+-N、NO_3^--N、TN)转化机制,结合底物关键水解酶类(脱氢酶、脲酶、蛋白酶)活性变化,探讨其与底物氮素循环代谢之间的相互关系,进一步揭示黑水虻驱动的氮素转化路径,为其在污泥稳定化及资源化利用中的应用提供理论支撑.

1　材料与方法

1.1　实验材料

供试黑水虻虫卵购于贵州某黑水虻养殖基地.将黑水虻虫卵和麦麸置于恒温恒湿培养箱(温度为(25±2)℃、湿度为(60±5)%)中进行孵化培育,孵化至 6 日龄后,选择生长状态良好的黑水虻幼虫(BSFL)转入外源添加不同比例麦麸的城镇污泥中进行实验.实验所用城镇污泥取自兰州市某污水厂的污泥脱水车间,人工造粒为 5mm 污泥颗粒.污泥含水率为 69.22%±1.33%,pH=6.55±0.51, 电导率(EC)为(127±2.36)μS/cm,有机质为 71.35%±1.44%,溶解性有机碳(DOC)为(0.59±0.04)g/kg, 总氮(TN)为(13.25±0.10)g/kg, NH_4^+-N 为(0.58±0.03)g/kg,NO_3^--N 为(0.92±0.11)g/kg,脱氢酶活性为(6.22±0.40)mg/g·h (以

TPF 计),脲酶活性为(4.32±0.32)U/g,蛋白酶活性为(0.67±0.01)U/g.麦麸购于甘肃省兰州市某农贸市场.

1.2 实验设计

向各反应器中放入 20g 6 日龄 BSFL 和 200g 预处理底物,实验共设为 4 个处理组:T1 组(原污泥+无 BSFL)、T2 组(原污泥+BSFL)、T3 组(原污泥+10%麦麸+BSFL)、T4 组(原污泥+30%麦麸+BSFL).所有反应器顶部覆盖尼龙布,保证充足通气并防止幼虫逃逸.实验在温度为(28±2)℃、湿度为(65±5)%的恒温恒湿培养箱中进行.根据幼虫生长状况,每天补充底物,直至 50%幼虫达到预蛹期,随后停止喂食,并放置 24h 以清空虫体肠道,终止实验.每 3d 测定底物理化性质及酶活性指标.试验结束后,通过人工筛分法将虻粪与黑水虻虫体分离,虫体置于 65℃烘箱中烘干至恒重测定水分含量,样品保存在−40℃冰箱中以备后续分析;部分样品自然风干、粉碎、过 100 目筛后密封并保存,用于后续理化参数的测定.

1.3 测定方法

1.3.1 虫体生长发育指标测定 每天随机挑取各组 5 条幼虫,置于培养皿中,洗净幼虫表面附着物,吸干水分后,测其虫长与虫重.虫体蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定[16].虫体粗脂肪含量采用索氏提取法测量.分别测量记录黑水虻幼虫初始虫重、最终虫重和平均虫重(干重),计算黑水虻幼虫存活率(SR)、相对生长率(RGR).

1.3.2 理化指标测定 样品的含水率和有机质用灼烧减量法测定,pH、电导率按照水土比 50:1(mL/g)溶解,磁力搅拌 30min,4000r/min 离心 5min,取上清液测定 pH 值(PHS−3C 型)和电导率(DDS−307A 型).DOC 采用硫酸−重铬酸钾氧化法测定[17].NH_4^+−N 采用氯化钾提取−纳氏试剂分光光度法.NO_3^-−N 参考氯化钾提取−紫外分光光度法.TN 采用碱性过硫酸钾消解−紫外分光光度法测定.

1.3.3 底物减量化相关指标测定 从废弃物减少率(WRR)、生物转化率(BCR)和饲料转化率(FCR)三个方面对黑水虻幼虫处理污泥效果进行评价,计算公式如下:

$$\mathrm{BCR}(\%)=\frac{W_{\mathrm{P}}}{W_{\mathrm{sub}}}\times 100 \tag{1}$$

$$\mathrm{FCR}=\frac{W_{\mathrm{sub}}}{W_{\mathrm{P}}} \tag{2}$$

$$\mathrm{WRR}(\%)=\frac{W_{\mathrm{sub}}-W_{f}}{W_{\mathrm{sub}}}\times 100 \tag{3}$$

式中:W_{P} 为幼虫最终重量,g;W_{sub} 为饲喂底物总重量,g;W_{f} 为最终虫粪重量,g.

1.3.4 酶活性分析 采用 TTC(2,3,5−氯化三苯基四氮唑)还原法[18]测定脱氢酶活性,具体步骤如下:称取过 1.25mm 筛的 2g 新鲜底物于 50mL 容量瓶中,加入 2mL 0.4% TTC 溶液及 2mL 蒸馏水,在 37℃避光培养 2h.反应结束后,加入 1mL 甲醛终止反应,再加入 5mL 丙酮震荡,并于 37℃下水浴保温 10min,以 4000r/min 离心 5min.取上清液,在 485nm 处测定吸光度.

脲酶采用苯酚钠−次氯酸钠比色法[18]测定,称取 5g 虻粪样品于 50mL 具塞三角瓶中,加 1mL 甲苯振荡均匀,静置 15min 后,加 10mL 10%尿素溶液和 20mL pH 值为 6.7 柠檬酸盐缓冲溶液,摇匀后于 37℃恒温箱培养 24h.培养结束后,过滤所得 3mL 滤液转入 50mL 容量瓶,依次加入 4mL 苯酚钠溶液和 3mL 次氯酸钠溶液,随加随摇匀.20min 后显色并定容.在 1h 内于 578nm 处比色测定.

蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定[18].具体步骤为:称取 4.00g 2mm 筛分风干土样于 50mL 聚丙烯离心管中,加入 20mL 1%酪素溶液及 1mL 甲苯,摇匀后转于(30.0±0.5)℃恒温培养箱中培养 24h.反应终止后,样品经真空抽滤,取 10mL 澄清滤液与 20mL 无水乙醇混合,以 10000r/min 离心 5min.取 1.00mL 上清液,与 2%茚三酮显色剂混合,定容至 5mL,沸水浴 10min,冷却至室温后于 570nm 处比色.

1.4 统计分析

所有统计数据均重复 3 次,并进行方差分析(ANOVA)检验($P<0.05$).黑水虻生长曲线、虫体营养成分、底物理化性质变化、酶活性变化由 Origin 2017 软件绘制.使用 Canoco 5.0 软件对理化性质与酶活性进行冗余分析.

2 结果与讨论

2.1 黑水虻生长发育性能

2.1.1 幼虫生长变化 图 1 为各处理组黑水虻生长变化图,发现前期(1~3d)黑水虻幼虫逐渐适应底物生长环境;黑水虻利用进食和翻堆能力分解底物并进入生长代谢旺盛时期(3~12d);T2 组幼虫在

12~27d,T3 和 T4 组幼虫 12~15d 内趋于老熟阶段,取食量下降,生长速度减慢;虫体由乳白色变为灰褐色,虫重下降,这与黑水虻口器退化,停止进食,消耗自身脂肪和蛋白质供其生长有关[6].底物类型对黑水虻的生长发育起着重要作用,底物中的营养成分,特别是蛋白质和碳水化合物含量,直接影响幼虫的生长性能[19].较高蛋白质含量的底物能够提高黑水虻的存活率并缩短发育时间[20].本研究中不同处理组幼虫的发育时间、存活率和相对生长率存在显著差异.具体来说,T2 组幼虫发育时间为 27d,存活率 77.20%,相对生长率 11.12%;而 T3 和 T4 组幼虫发育时间为 15d,幼虫存活率为 87.90%和 96.20%,相对生长率为 22.02%和 22.75%.说明随着麦麸比例的增高,发育时间大幅缩短,存活率和相对生长率均提高.

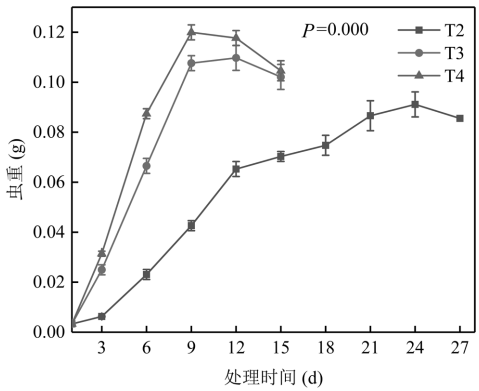


图 1　黑水虻生长变化

Fig.1　The growth trend of black soldier fly

T2 组底物为纯城镇污泥,其蛋白质含量较低且含有持久性有机污染物,导致黑水虻幼虫长期处于贫营养环境,从而发育时间较长、存活率较低[6,19].相比之下,T3、T4 组为富含易吸收的碳水化合物、蛋白质及少量矿物质的麦麸与脱水污泥混合底物.Nguyen 等[21]和 Oonincx 等[22]发现,饲喂高蛋白质蔬菜副产品的黑水虻幼虫发育时间(21d)明显短于饲喂低蛋白质底物的幼虫(37d),这与本研究结果相似.由表 1 可知,T2~T4 组黑水虻虫长为 14.93~16.83mm,虫重(干重)分别为 T2(184g)、T3(251g)、T4(317g),表明虫重随着底物中麦麸含量的增加而增加.可能是由于底物中碳水化合物的含量影响幼虫的生长质量[19].

2.1.2　黑虫体营养成分分析　黑水虻可消化多种腐败的有机物质为食,如动物粪便、人类粪便、酒糟、鱼内脏、城市有机垃圾、食物垃圾及果蔬废弃物等[23-24],并将其转化为营养丰富的生物质.图 2 为各处理组黑水虻幼虫的蛋白质、脂肪、灰分含量.其中,T2~T4 组的虫体蛋白质含量分别为 16.26%、16.89%、24.26%,粗脂肪含量分别为 19.69%、21.47%和 26.77%.饲料质量及营养成分显著影响幼虫营养积累[20].Scala 等[25]用废谷物饲喂的幼虫比果蔬废弃物为食的幼虫蛋白质含量高 15%;Spranghers 等[26]研究表明预蛹的粗脂肪与底物中的非纤维性碳水化合物含量之间存在很强的相关性,此外 Li 等[27]发现,随着饲料中葡萄糖和木糖含量的增加,黑水虻幼虫中的脂质含量也会增加.本研究中随着麦麸比例的增加,黑水虻虫体蛋白质和脂肪含量同步增加,这是因为麦麸的添加调节了底物的蛋白质:碳水化合物(P:C)比例,提升黑水虻对底物的消化率和养分利用率;同时污泥的造粒处理和麦麸的添加提高了底物孔隙率,使得环境温度随着黑水虻幼虫的生理活动的增强而上升,从而诱导黑水虻肠道中蛋白酶和脂肪酶水解活性的增强.本研究结果表明,随着麦麸比例的增加,黑水虻虫体中蛋白质和脂肪含量显著提升,增强了其作为优质饲料蛋白源和油脂源的开发潜力.

表 1　各处理组黑水虻生长状况

Table 1　Growth performance of black soldier fly in different treatment groups

处理组	虫长(mm)	虫重 (鲜重 g)	虫重 (干重 g)	存活率 (%)	相对生长率 (%)
T2	14.68±0.19	406±0.04	184±0.02	77.20	11.15
T3	15.93±0.24	544±0.08	251±0.06	87.90	22.02
T4	16.83±0.37	610±0.07	317±0.09	96.20	22.75

与蛋白质和脂肪含量变化趋势不同,各处理组幼虫体内灰分含量随麦麸添加比例的增多呈下降趋势,其中 T2~T4 组的灰分含量分别为 13.21%、12.76%、10.82%.这一现象可能与底物中无机组分含量的差异有关.Spranghers 等[26]发现底物的无机组分含量显著影响幼虫的灰分积累.本研究中,T2 组采用纯污泥作为底物,其无机组分含量相对较高,可能是导致该组幼虫灰分水平最高的主要原因.此外,底物中碳水化合物含量的变化也可能间接影响灰分的积累.随着麦麸比例降低,混合底物中碳水化合物相应减少,幼虫可能通过增加摄食量来维持能量平

衡.在无机组分较高的条件下,摄食增加可能导致无机物摄入量随之上升,进而提升体内灰分含量.因此,底物组成不仅直接影响虫体蛋白质和脂肪含量,也可能通过间接路径如摄食行为对灰分水平产生调控作用.

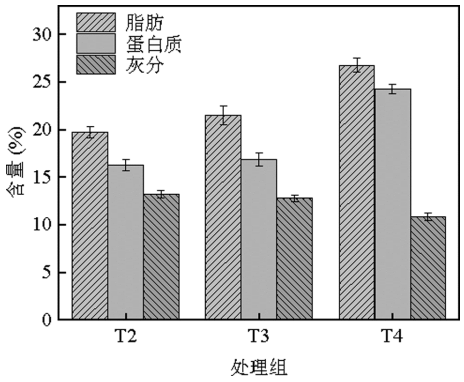


图 2 虫体粗脂肪、蛋白质、灰分含量

Fig.2 Crude fat, protein, and ash contents of larvae from different treatment groups

2.2 城镇污泥处理效果分析

2.2.1 理化特性变化 pH 值对黑水虻的生长和存活具有重要影响[5],本研究中初始和最终底物的 pH 如图 3(a)所示.未接种黑水虻的污泥处理组的 pH 值未发生显著变化;而在经黑水虻生物转化的各处理组中,pH 值显著升高(8.42~8.63),增幅为 19.9%~30.95%.这一变化可能源于黑水虻肠道产生的内肽酶和外肽酶,它们能够分解底物中大量蛋白质,并产生氨作为代谢产物,从而导致 BSFL 虫粪的 pH 值升高[6,28].含水率是影响黑水虻幼虫和微生物正常生命活动的关键因素之一,直接关系到生物处理过程的效率.本研究中,T0 组含水率为 64.81%~69.22%.处理后,T1~T4 底物的含水率降低了 3.67%~7.65%(图 3(c)),这与黑水虻幼虫的取食和蠕动行为密切相关,其中部分水分用于维持幼虫自身代谢活动,另一部分水分则因幼虫蠕动增加了底物孔隙度而损失.此外,黑水虻幼虫的蠕动导致底物温度上升高,促进水分蒸发,进一步导致了黑水虻处理组含水率显著下降.

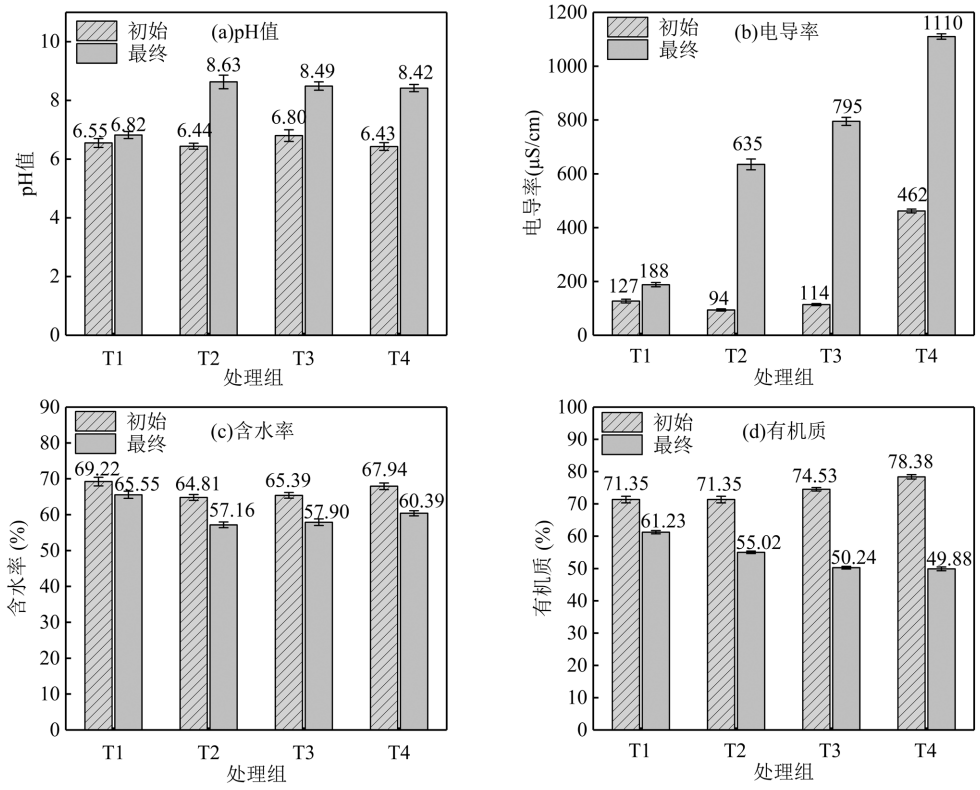


图 3 黑水虻处理前后各组物理化学性质变化

Fig.3 Physicochemical property changes in different groups before and after black soldier fly treatment

电导率(EC)是反映污泥和虫粪中的无机离子含量以及污泥矿化程度的重要指标.T0 组的 EC 值为 94~462μS/cm.经过黑水虻消化后的底物电导率显著升高至 635~1110μS/cm,而对照组 EC 值无明显

变化(图 3(b)),表明黑水虻幼虫能够显著加快污泥的矿化过程.这一变化主要归因于黑水虻利用自身代谢活动降解有机质,释放 NH_4^+、PO_4^{3-}、NO_3^-等无机离子和铵盐、磷酸盐、钾盐等矿物盐,从而提升底物电导率[29].

有机质的有效矿化与稳定化是污泥实现农用的重要基础,本研究结果显示,T2~T4 处理组有机质含量与对照组相比下降了 16.33%~28.50%(图 3(d)),表明黑水虻介导的协同转化机制显著加速了底物有机物的矿化.已有研究指出,黑水虻与底物微生物共同作用促进了大分子有机物的快速分解,并加快其向易于被微生物降解的小分子有机物或最终矿化产物的转化[28].此外,本研究中麦麸的添加改善了底物氧环境,提高了单位体积内黑水虻幼虫的生物量,从而加快了污泥降解速率.

DOC 是反映堆肥过程速率和微生物活性的关键参数[30].黑水虻堆肥过程中 DOC 含量变化如图 4 所示,T2~T4 组堆肥初期(1~6d)DOC 含量显著升高,分别为 19.38(g/kg)、28.51(g/kg)、37.30(g/kg),这与黑水虻自身生长发育促进了底物复杂有机化合物的分解有关.第 6d 后,黑水虻分解底物 DOC 作为能量来源供其生长进入代谢旺盛期,同时幼虫摄食与代谢活动通过改变底物微环境(如孔隙度、温度)增强微生物种群丰度与代谢强度[31],从而利用污泥水解产生的可溶性糖作为能量来源[32],导致黑水虻处理过程中底物 DOC 的大量损失.堆肥结束时各处理组 DOC 含量分别下降至 10.26g/kg、21.23g/kg、26.26g/kg,本研究中额外添加麦麸含量越高,DOC 损失越大,表明额外添加麦麸有利于黑水虻和微生物快速降解底物中有机质.此外,黑水虻利用麦麸中大量的可溶性糖和易消化物质维持自身生长使底物 DOC 含量下降[5].T1 组 DOC 含量无显著变化的原因可能是污泥的低适口性和有限的可溶性碳源.

2.2.2　处理效果评价　BSFL 处理技术中,WRR、BCR 和 FCR 是评估处理效果和资源转化效率的重要指标[5,33].各处理组生物转化率、饲料转化率、废弃物减量率见表 2.T2~T4 组的 WRR 和 BCR 分别为 36.52%~54.68%;20.13%~35.24%,随着底物中污泥比例的增加,WRR 降低,而 BCR 上升.

BCR 和 FCR 共同反映了黑水虻对底物的转化效率.BCR 代表单位重量的底物所产生的幼虫生物量,FCR 衡量单位生物量形成所需消耗的底物量,二者呈负相关的关系.T2~T4 组的 FCR 为 4.17~8.07,且随麦麸添加比例上升而逐渐降低.麦麸含有丰富的可溶性碳水化合物和蛋白质,有利于黑水虻对有机组分的利用效率,从而 BCR 升高,FCR 降低.其中 T4 组 FCR 最低,BCR 最高,表明黑水虻不仅能高效地消耗有机质,还具备较强的营养转化能力.已有研究表明,将低营养废弃物与其他富营养底物混合来提高营养平衡,从而提高黑水虻生物转化能力[28,34].Bohm 等[10]通过添加麦麸提升污泥底物的碳氮比和蛋白质含量,BCR 和蛋白质转化率分别提升至 6.76%和 5.04%.本研究中 T4 组取得了最佳的 BCR 与 FCR 组合值,进一步验证了该策略的有效性.

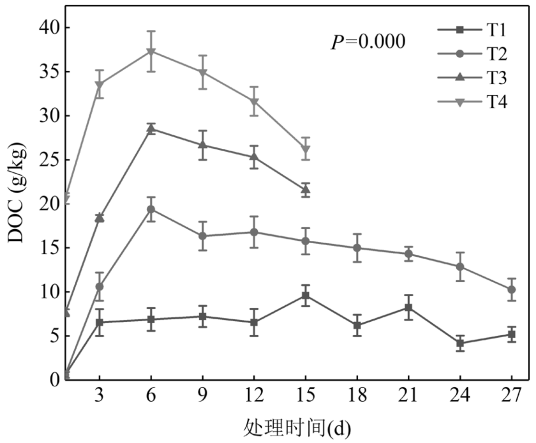


图 4　黑水虻处理过程中各组 DOC 变化

Fig. 4　Changes in DOC in different treatment groups during black soldier fly treatment

表 2　各处理组生物转化率、饲料转化率、废弃物减量率

Table 2　Biological conversion rate , feed conversion rate, and waste reduction rate in each treatment group

处理组	生物转化率 BCR%	饲料转化率 FCR	废弃物减量率 WRR%
T2	20.13	8.07	54.68
T3	24.82	6.44	47.85
T4	35.24	4.17	36.52

WRR 主要受底物组成的影响.由于污泥底物中蛋白质和碳水化合物含量较低,且胞外聚合物(EPS)可能抑制黑水虻对有机质的利用,导致其消化效率下降.此外,在营养不平衡的底物中,黑水虻可能通过“代偿反应”行为增加摄食量以满足其生长发育需求[35].因此,虽然 T2 组 WRR 最高,表明污泥减量显著,

但其 BCR 相对较低,说明仅有少量污泥被转化为生物量.

2.3 黑水虻对城镇污泥生物转化过程中氮转化的影响

2.3.1 城镇污泥生物转化过程中的氮素形态转化特征 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是表征黑水虻堆肥过程中氮素迁移转化特征并评估其腐熟度的关键指标.黑水虻处理组(T2~T4)的 NH_4^+-N 含量在堆肥过程中表现出明显上升趋势(图 5(a)),初始底物 NH_4^+-N 含量为 0.58g/kg,0~12d 内,在黑水虻肠道机械破碎、酶解及微生物协同作用下,有机氮迅速氨化, NH_4^+-N 迅速升高,峰值达 18.23~19.26g/kg.这可能归因于黑水虻促进蛋白质降解,并增强氨化细菌增殖[36].12d 后,堆肥进入稳定期, NH_4^+-N 含量下降(降幅 40%~50%),该趋势与 Wang 等[32]研究结果一致.其主要机制包括:1)虫体同化作用[37]: NH_4^+-N 通过同化作用转化为虫体蛋白质,导致 NH_4^+-N 含量降低的同时,虫体蛋白质增加.2) NH_3 挥发:堆肥稳定期(>12d) pH 值(8.05~8.63)持续升高打破 NH_4^+/NH_3 平衡,促进氮损失.Ravindran 等[38]证实了较高浓度的 NH_4^+-N 可能是导致氨气挥发增加,加剧氮素损失的主要原因之一.相比之下,污泥自然堆肥组(T1)的 NH_4^+-N 含量变化平缓,可能由于未接种黑水虻,导致底物环境不利于氨化微生物存活,从而限制氨化过程.

各处理组 NO_3^--N 含量变化幅度较小(图 5(b)),这与 Mishra 等[28]的研究结果存在差异.他们在研究黑水虻对污泥-水果垃圾混合物堆肥的影响时发现,在 pH 值适宜时(6.85~7.15),硝化微生物可有效氧化 NH_4^+-N 为 NO_3^--N,从而显著提高堆肥产物的硝氮含量.然而,本研究中堆肥结束时,T1、T2、T3 和 T4 组的 NO_3^--N 含量分别为 0.09、0.08、0.2 和 0.22g/kg.未呈显著增加,表明黑水虻堆肥过程中硝化作用受限.这可能是由于堆肥初期(0~12d),黑水虻处理组 NH_4^+-N 的积累导致底物 pH 值升高,从而抑制硝化细菌活性,阻碍 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化[39].同时,黑水虻肠道微生物可能通过定殖作用改变底物微生物群落,竞争性抑制硝化细菌功能,协同削弱硝化过程[13].

各处理组总氮(TN)含量变化如图 5(c)所示.试验初期(0~3d)黑水虻处理组 TN 含量呈下降趋势,这主要是因为底物 pH 值升高与温度上升促使 NH_4^+-N 与 NH_3 间的化学平衡向气态氮方向偏移,导致氨氮通过挥发途径损失[8].随着黑水虻生物转化过程的推进,底物中氮素开始积累,从第 3d 至第 12d,T2、T3 和 T4 组 TN 含量分别增加至 12.47g/kg、11.50g/kg、12.65g/kg.这一增长主要与含氮化合物的降解和底物质量的“浓缩效应”有关[40].

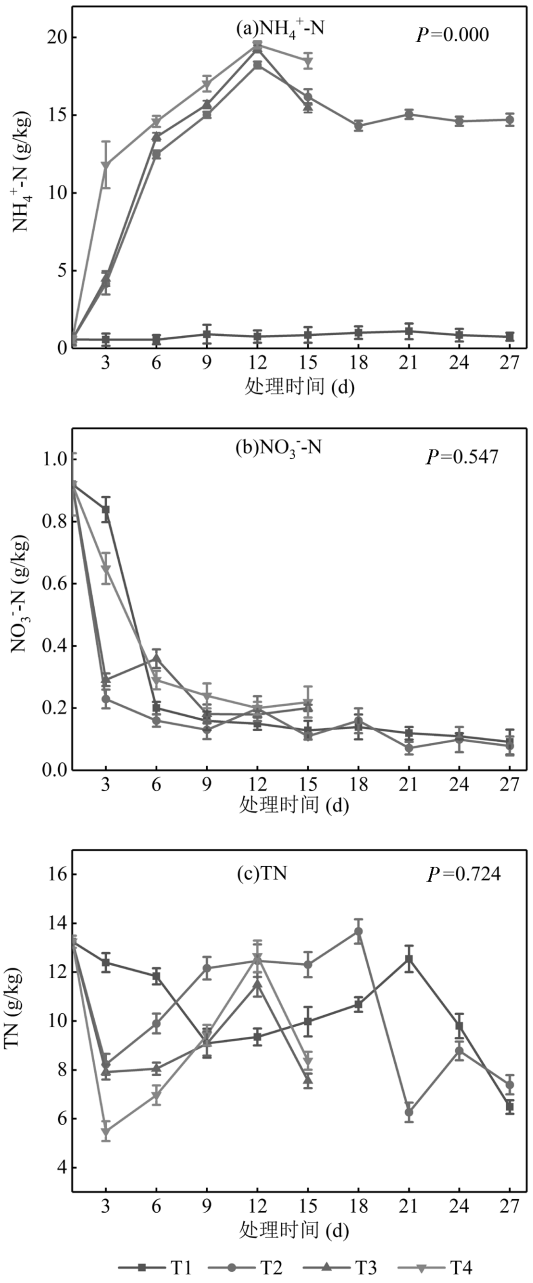


图 5 黑水虻处理过程中各组氮素含量动态变化

Fig.5 Dynamic variations in nitrogen content in different treatment groups during black soldier fly treatment

然而,从第 12d 直至实验结束,T2~T4 组呈现出明显的 TN 下降趋势,降幅分别为 40.7%、34.3%和

33.8%.实验结束后,T1~T4 组总氮在 6.48~8.37g/kg 范围内,减少率分别为 36.83%~51.09%.TN 含量下降的原因可能与处理后期底物质量的稳定性变化所导致的稀释效应有关.Liu[8]等人研究发现黑水虻转化畜禽粪便后底物总氮水平降低,与本研究结果一致.此外,黑水虻处理组总氮含量变化区别于自然堆肥组,主要由于黑水虻幼虫在代谢和发育过程中消耗了大量有机氮[41],改变了氮素的转化路径和分布,从而显著影响总氮的动态变化.

2.3.2　黑水虻处理城镇污泥过程中氮素矿化相关酶活性变化　在黑水虻生物转化有机废弃物过程中,底物有机质的分解和矿化由多种水解酶共同催化完成[12].本研究测定了与氮代谢相关的脲酶、蛋白酶和脱氢酶活性,结果如图 6 所示.脲酶和蛋白酶活性分别反映了氮素的矿化和蛋白质降解过程,而脱氢酶活性则与有机质降解密切相关.脲酶和脱氢酶活性在各处理组均呈先升高后降低的趋势,黑水虻处理组的酶活性波动幅度大于自然堆肥处理.该结果与刘涛[15]关于黑水虻处理畜禽粪便的研究一致.蛋白酶活性则呈现持续下降趋势.

脲酶在黑水虻生物转化有机废弃物过程发挥重要作用,特别是在尿素水解和有机氮矿化过程中,促进氮素的转化[42].T2~T4 组脲酶活性在第 12d 达到峰值,分别为 11.7、7.42、9.64U/g,而 T1 组的脲酶活性则在第 9 天达到峰值(5.81U/g).黑水虻处理组脲酶活性升高可能归因于:1)黑水虻幼虫对含氮有机物的摄食和降解活动增强了氮素矿化过程,同时促进了相关微生物对有机氮的快速转化[43];2)麦麸作为碳源和结构调节剂,改善了污泥的孔隙结构与碳氮比,从而为微生物生长和酶类合成提供了更适宜的环境条件[30];3)黑水虻肠道菌群与底物微生物群落之间的交互作用改变了微生物结构和代谢活性,进一步增强了系统中水解酶的分泌与有机质的分解效率[39].脲酶活性的下降通常反映底物含氮物质的矿化分解[44].T2 至 T4 组脲酶活性从第 12d 起呈下降趋势,堆肥结束时分别为 4.64、5.82、8.09U/g(图 6(a)).这可能是因为黑水虻与微生物的相互作用促使底物中氮素分解加速,导致后期微生物可利用的氮源减少,从而脲酶活性减弱[12].此外,当底物中碳源不足时,黑水虻与微生物对有限碳源的竞争加剧,抑制了微生物群落的多样性与丰富度,进而影响脲酶活性[45].本研究观察到的脲酶活性呈现先升高后下降的变化趋势.这一变化规律与 Gong 等[46]和 Wang 等[47]在利用蚯蚓堆肥技术处理有机废弃物过程中所观察到的脲酶活性变化特征相似.

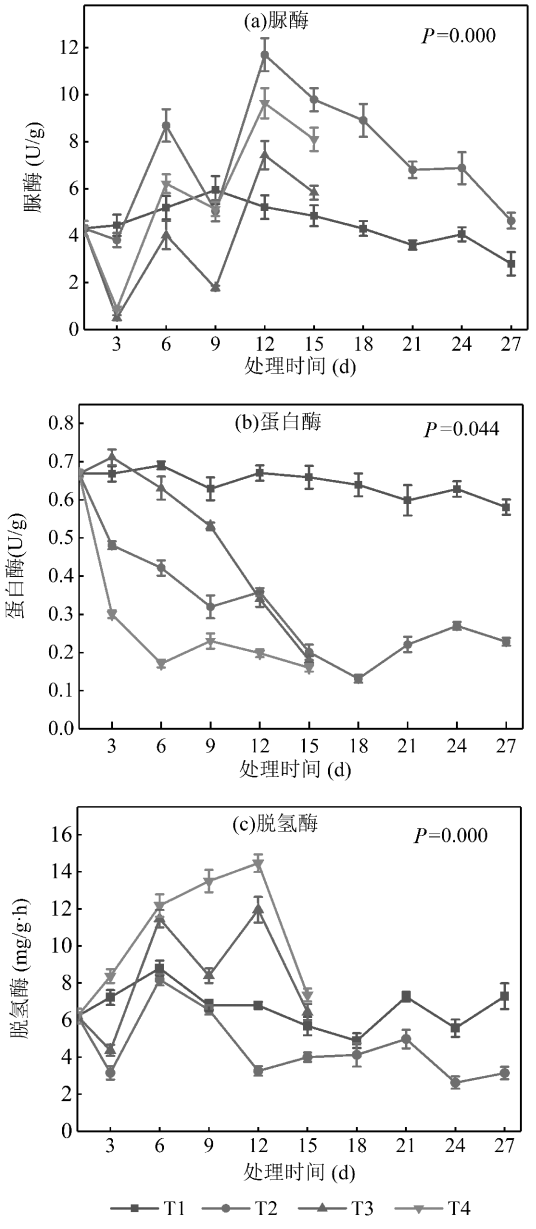


图 6　黑水虻处理过程中各组酶活性变化

Fig.6　Changes in enzyme activities in different treatment groups during black soldier fly treatment

蛋白酶通过催化蛋白质分解为多肽、氨基酸和铵,从而释放可利用的氮源[48].蛋白酶活性的下降通常反映底物蛋白质含量的减少及微生物群落的减少.本研究中,原污泥蛋白酶活性为 0.67U/g,处理结束后,T1~T4 底物的蛋白酶活性降低了

13.43%~ 76.12%,其中 T1 降幅最小(13.43%),T4 降幅最大(76.12%)(图 6(b)).底物的生物可利用性是影响蛋白酶活性的重要因素[44],随着黑水虻生物转化过程的进行,幼虫的生理活动如肠道机械扰动加速了蛋白质等有机氮的降解,从而降低了底物的生物可利用性,导致蛋白酶活性随之下降.Villar 等[49]在蚯蚓堆肥研究中亦发现,底物的生物可利用性降低会抑制微生物活性及蛋白酶表达水平.此外,处理前期,黑水虻处理组氨氮含量快速积累,可能对底物中优势微生物群落产生毒害作用,进而抑制蛋白酶活性[50].

脱氢酶的活性与微生物呼吸代谢和有机质的降解密切相关[45].各处理组的脱氢酶活性在第 6d(T1、T2 组)和第 12d(T3、T4 组)达到峰值,分别为 8.80、8.18、11.95 和 14.46mg/g·h (图 6(c)).脱氢酶活性的增加可能是因为黑水虻幼虫通过促进底物微生物及其分泌酶的活性,加速有机质的降解.脱氢酶活性的逐步降低则表明底物中有机质趋于稳定[32].试验结束时,T2~T4 处理组脱氢酶活性分别为 3.14、6.43 和 7.35mg/g·h.

这些结果表明,在评估底物水解酶类(脲酶、蛋白酶、脱氢酶)活性对氮素形态转化的作用时,需综合考虑底物微生物对氮素代谢机制的影响及底物与 BSFL 肠道微生物之间的动态变化和相互作用,以期揭示微生物调控及酶活性优化加速有机物降解的作用机制.

2.4 冗余分析

本研究采用 RDA 法对各处理组理化性质和水解酶活性进行比较.RDA 结果显示,污泥中接种黑水虻幼虫的解释率最高为 85.99%,且 T2、T3、T4 组 RDA 值均高于 T1 组(图 7),表明黑水虻幼虫的接种显著增强了理化性质与酶活性之间的相关性.

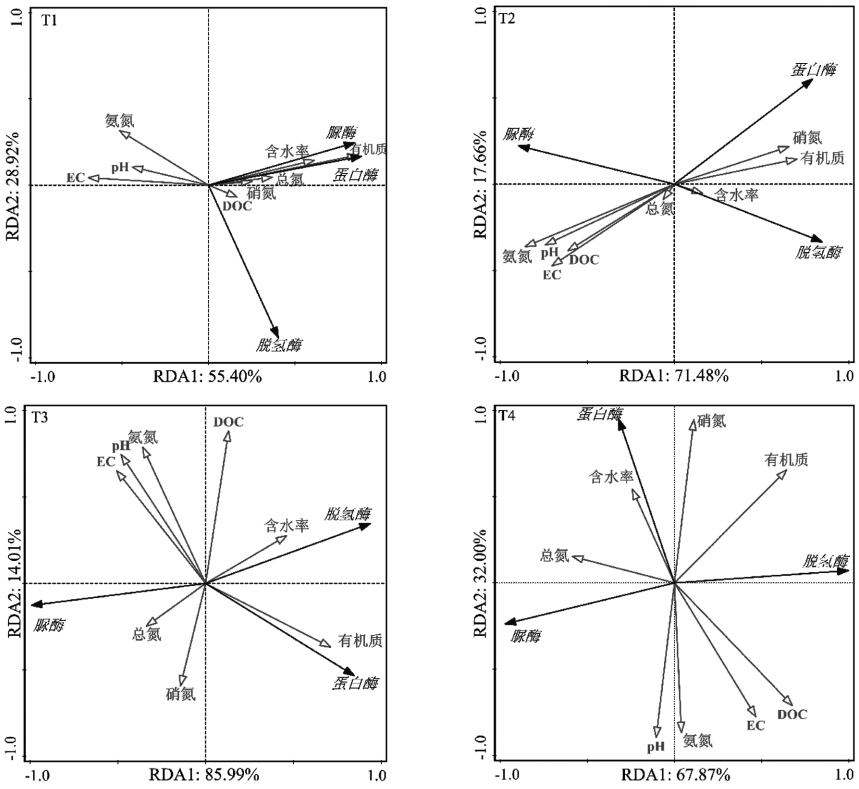


图 7 各处理组理化性质和水解酶活性冗余性分析

Fig.7 Redundancy analysis of physicochemical properties and hydrolytic enzyme activities among treatment groups.

在黑水虻污泥堆肥体系中,氨氮、总氮、pH 值和 EC 与脲酶活性呈正相关,而有机质和硝氮则与蛋白酶活性呈正相关(图 7).值得注意的是,蛋白酶活性与氨氮呈负相关.这是因为底物有机质含量较高时,可利用的底物增多,促进有机氮的矿化,导致铵态氮在体系中加速积累.此外,DOC 与脱氢酶及脲酶活性也表现出显著相关性.本研究结果表明,体系中酶活性的变化主要与底物中的 DOC 和有机质含量密切相

关,这与 Liu 等[51]的研究结论一致.分析其原因,在“幼虫-微生物-酶”这一独特的综合生物反应系统中,黑水虻幼虫通过取食、蠕动、排泄等生命活动扰动底物环境,促进微生物活性及其水解酶的分泌,从而加速底物中木质素和多糖等难降解有机组分的分解,并可能影响抗性基因的迁移与降解过程[52].此外, Jiang 等[43]研究表明,黑水虻幼虫通过其消化、免疫防御及生理活动,可改变底物的代谢过程和细菌群落结构,从而增强体系酶活性,加速底物中有机质的稳定化.

3　结论

3.1　黑水虻幼虫营养转化能力及污泥减量化效果随麦麸比例增加而显著提高,同时显著降低了污泥含水率、有机质及碳素含量,有效提升了污泥处理效能.

3.2　黑水虻处理加速了有机氮的氨化过程,促进了氮素矿化,但削弱了硝态氮的积累;幼虫同化作用与氨挥发共同导致总氮下降,表明黑水虻可通过改变氮素转化路径,加快堆肥体系稳定化进程.

3.3　黑水虻通过调控底物水解酶活性影响有机氮矿化-氨化进程,其中 DOC 与脱氢酶、脲酶活性呈显著相关性,蛋白酶活性与氨氮呈负相关,表明接种黑水虻有助于增强污泥中碳氮代谢能力,优化氮素转化机制.

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部编.中国城乡建设统计年鉴 2023 [M]. 北京:中国城市出版社, 2024.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (Ed.). China urban-rural construction statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China City Press, 2024.

[2] Ramdani N, Hamou A, Lousdad A, et al. Physicochemical characterization of sewage sludge and green waste for agricultural utilization [J]. Environmental Technology, 2015,36(12):1594-1604.

[3] Lynn C J, Dhir R K, Ghataora G S. Environmental impacts of sewage sludge ash in construction: Leaching assessment [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018,136:306-314.

[4] Qu J, Wang H, Wang K, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019,13:1-7.

[5] 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.

[6] 田维平,邢　宇,王周强,等.黑水虻处理城镇污泥和餐厨垃圾的性能评价 [J]. 中国环境科学, 2024,44(8):4425-4431.
Tian W P, Xing Y, Wang Z Q, et al. Performance evaluation for the treatment of municipal sludge and kitchen waste via black solider fly larvae [J]. China Environmental Science, 2024,44(8):4425-4431.

[7] Singh A, Kumari K. An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using Black Soldier Fly larvae: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2019,251:109569.

[8] Liu T, Awasthi M K, Chen H, et al. Performance of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) for manure composting and production of cleaner compost [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251:109593.

[9] Ge M, Zhou H, Shen Y, et al. Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure composting [J]. Bioresource Technology, 2020,304:122928.

[10] Bohm K, Hatley G A, Robinson B H, et al. Black Soldier Fly-based bioconversion of biosolids creates high-value products with low heavy metal concentrations [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022,180:106149.

[11] Cai M, Hu R, Zhang K, et al. Resistance of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to combined heavy metals and potential application in municipal sewage sludge treatment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25:1559-1567.

[12] Tao X H, Xiang F M, Khan F Z A, et al. Decomposition and humification process of domestic biodegradable waste by black soldier fly (Hermetia illucens L.) larvae from the perspective of dissolved organic matter [J]. Chemosphere, 2023,317:137861.

[13] Xiang F M, Zhang Q, Xu X H, et al. Black soldier fly larvae recruit functional microbiota into the intestines and residues to promote lignocellulosic degradation in domestic biodegradable waste [J]. Environmental Pollution, 2024,340:122676.

[14] Ruan M, Li Y, Ma C, et al. Treatment of landfill leachate by black soldier fly (Hermetia illucens L.) larvae and the changes of intestinal microbial community [J]. Journal of Environmental Management, 2024,360:121193.

[15] 刘　涛.黑水虻联合好氧堆肥对畜禽粪便无害化及资源化的研究 [D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2022.
LIU T. The sanitation and resource of livestockmanure during black soldier fly larvaeconversion combined with compostin [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2022.

[16] 蒋大程,高　珊,高海伦,等.考马斯亮蓝法测定蛋白质含量中的细节问题 [J]. 实验科学与技术, 2018,16(4):143-147.
Jiang D C, Gao S, Gao H L et al. The details of protein content determination by coomassie brilliant blue staining [J]. Experiment Science and Technology, 2018,16(4):143-147.

[17] 王　梅.重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤中有机碳含量的方法讨论 [J]. 新疆有色金属, 2019,42(6):98-99.
Wang M. Discussion on the potassium dichromate oxidation-external heating method for determining organic carbon content in Soil [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2019,42(6):98-99.

[18] 关松荫,等.土壤酶及其研究法 [M]. 北京:农业出版社, 1986.
Guan S Y, et al. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.

[19] Barragan-Fonseca K B, Gort G, Dicke M, et al. Nutritional plasticity of the black soldier fly (Hermetia illucens) in response to artificial diets varying in protein and carbohydrate concentrations [J]. Journal of Insects as Food and Feed, 2021,7(1):51-62.

[20] Tinder A C, Puckett R T, Turner N D, et al. Bioconversion of sorghum and cowpea by black soldier fly (Hermetia illucens (L.)) larvae for alternative protein production [J]. Journal of Insects as Food and Feed, 2017,3(2):121-130.

[21] Norgren R. Valorization of low value organic waste by the use of black soldier fly larvae–bioconversion of sludge from the pulp and paper industry [D]. Sundsvall: Mid Sweden University, 2022.

[22] Oonincx D G A B, Van Broekhoven S, Van Huis A, et al. Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by–products [J]. PloS one, 2015, 10(12):e0144601.

[23] Parra Paz A S, Carrejo N S, Gómez Rodríguez C H. Effects of larval density and feeding rates on the bioconversion of vegetable waste using black soldier fly larvae Hermetia illucens (L.), (Diptera: Stratiomyidae) [J]. Waste and Biomass Valorization, 2015,6:1059–1065.

[24] 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.

[25] Scala A, Cammack J A, Salvia R, et al. Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of Hermetia illucens (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):19448.

[26] Spranghers T, Ottoboni M, Klootwijk C, et al. Nutritional composition of black soldier fly (Hermetia illucens) prepupae reared on different organic waste substrates [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017,97(8):2594–2600.

[27] Li W, Li M, Zheng L, et al. Simultaneous utilization of glucose and xylose for lipid accumulation in black soldier fly [J]. Biotechnology for Biofuels, 2015,8:1–6.

[28] Mishra A, Suthar S. Bioconversion of fruit waste and sewage sludge mixtures by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae [J]. Environmental Research, 2023,218:115019.

[29] Raksasat R, Lim J W, Kiatkittipong W, et al. A review of organic waste enrichment for inducing palatability of black soldier fly larvae: Wastes to valuable resources [J]. Environmental Pollution, 2020,267:115488.

[30] Awasthi M K, Wang M, Pandey A, et al. Heterogeneity of zeolite combined with biochar properties as a function of sewage sludge composting and production of nutrient–rich compost [J]. Waste Management, 2017,68:760–773.

[31] Huang K, Zhang Y, Xu J, et al. Feasibility of vermicomposting combined with room drying for enhancing the stabilization efficiency of dewatered sludge [J]. Waste Management, 2022,143:116–124.

[32] Wang X, Selvam A, Lau S S S, et al. Influence of lime and struvite on microbial community succession and odour emission during food waste composting [J]. Bioresource Technology, 2018,247:652–659.

[33] 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.

[34] Raksasat R, Kiatkittipong K, Kiatkittipong W, et al. Blended sewage sludge–palm kernel expeller to enhance the palatability of black soldier fly larvae for biodiesel production [J]. Processes, 2021,9(2):297.

[35] Kinasih I, Putra R E, Permana A D, et al. Growth performance of black soldier fly larvae (Hermetia illucens) fed on some plant based organic wastes [J]. HAYATI Journal of Biosciences, 2018,25(2):79–79.

[36] Awasthi M K, Wang Q, Ren X, et al. Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting [J]. Bioresource Technology, 2016,219:270–280.

[37] 马 叶,吴 楠,王小波,等.猪粪、鸡粪经黑水虻转化后碳、氮及微生物变化 [J]. 农业环境科学学报, 2023,42(6):1388–1396.
Ma Y, Wu N, Wang X B et al. Changes in carbon, nitrogen, and microorganisms in pig manure and chicken manure after conversion by black soldier fly larvae [J]. Journal of Agro–Environment Science, 2023,42(6):1388–1396.

[38] Ravindran B, Nguyen D D, Chaudhary D K, et al. Influence of biochar on physico–chemical and microbial community during swine manure composting process [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232:592–599.

[39] 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.
Jiang C L. Effects of gut microbiome of black soldier fly larvae (Hermetia illucens) on the biodegradation of food waste [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[40] Wang Q, Li R, Cai H, et al. Improving pig manure composting efficiency employing Ca–bentonite [J]. Ecological Engineering, 2016, 87:157–161.

[41] Quan J, Wang Y, Wang Y, et al. An efficient strategy to promote food waste composting by adding black soldier fly (Hermetia illucens) larvae during the compost maturation phase [J]. Resources, Environment and Sustainability, 2024,18:100180.

[42] Enebe M C, Erasmus M. Mediators of biomass transformation–a focus on the enzyme composition of the vermicomposting process [J]. Environmental Challenges, 2023,12:100732.

[43] Jiang C L, Jin W Z, Tao X H, et al. Black soldier fly larvae (Hermetia illucens) strengthen the metabolic function of food waste biodegradation by gut microbiome [J]. Microbial Biotechnology, 2019,12(3):528–543.

[44] Hanc A, Hrebeckova T, Pliva P, et al. Vermicomposting of sludge from a malt house [J]. Waste Management, 2020,118:232–240.

[45] Yao Z C, Bai S, Zhang H Y. Intestinal defense system and mechanism of maintenance of microbiota homeostasis in insects [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2018,58(6):1036–1048.

[46] Gong X, Li S, Carson M A, et al. Spent mushroom substrate and cattle manure amendments enhance the transformation of garden waste into vermicomposts using the earthworm Eisenia fetida [J]. Journal of Environmental Management, 2019,248:109263.

[47] Wang Z, Chen Z, Niu Y, et al. Feasibility of vermicomposting for spent drilling fluid from a nature–gas industry employing earthworms Eisenia fetida [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021,214:111994.

[48] Villar I, Alves D, Pérez–Díaz D, et al. Changes in microbial dynamics during vermicomposting of fresh and composted sewage sludge [J]. Waste Management, 2016,48:409–417.

[49] Villar I, Alves D, Mato S. Product quality and microbial dynamics during vermicomposting and maturation of compost from pig manure [J]. Waste Management, 2017,69:498–507.

[50] Gusain R, Suthar S. Vermicomposting of duckweed (Spirodela polyrhiza) by employing Eisenia fetida: Changes in nutrient contents, microbial enzyme activities and earthworm biodynamics [J]. Bioresource Technology, 2020,311:123585.

[51] 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.

[52] Klammsteiner T, Walter A, Bogataj T, et al. The core gut microbiome of black soldier fly (Hermetia illucens) larvae raised on low–bioburden diets [J]. Frontiers in Microbiology, 2020,11:993.

作者简介: 颉延东(2000–),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事固体废弃物处理与资源化研究.发表论文 1 篇.3492783215@qq.com.