



王理文, 张国言, 任红阳, 王红亮. 不同农业废弃物对黑水虻处理鸡粪过程中碳、氮转化与损失的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12):174-184.  
WANG Liwen, ZHANG Guoyan, REN Hongyang, WANG Hongliang. Effects of different agricultural wastes on the carbon and nitrogen transformation and losses during the process of treating chicken manure with black soldier fly[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12):174-184.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.15

## 不同农业废弃物对黑水虻处理鸡粪过程中碳、氮转化与损失的影响

王理文<sup>1,2</sup> 张国言<sup>1,2</sup> 任红阳<sup>1,2</sup> 王红亮<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 国家农业绿色发展研究院, 北京 100193)

**摘要** 为探究添加不同农业废弃物对黑水虻转化蛋鸡粪便过程中碳、氮养分转化及损失的影响, 选取新鲜豆渣、蔬菜废弃物以及二者 1:1 混合物作为辅料, 按等重比与新鲜蛋鸡粪便混合, 进行黑水虻养殖试验, 共设置 4 个处理: 纯鸡粪组(CK)、添加蔬菜废弃物组(VW)、添加豆渣组(SD)以及添加蔬菜废弃物和豆渣混合组(Mix), 测定各处理鸡粪生物转化、碳氮损失、虫沙养分保留等相关参数。结果表明, 与 CK 相比, VW、SD 和 Mix 可使虫体生物产量升高 15.60%~36.96% ( $P<0.05$ ), 废物减量增加 5.51%~27.30% ( $P<0.05$ ), 生物转化率升高 16.57%~39.35% ( $P<0.05$ )。同时, 虫沙中的总有机碳含量降低 16.94%~42.24%, 全氮含量提升 0.46%~9.63% ( $P<0.05$ ), GI、总腐殖酸和 C/N 等发酵参数均达到有机肥标准。此外, 农业废弃物添加使得底物的  $\text{NH}_3$  挥发降低 12.26%~46.81%,  $\text{N}_2\text{O}$  排放减少 20.23%~42.48%, 且  $\text{CH}_4$  排放减少 49.78%~57.27% ( $P<0.05$ ); VW 与 Mix 的  $\text{CO}_2$  累计排放量较 CK 分别降低 21.50% 和 11.19%, SD 则升高 14.53% ( $P<0.05$ )。综上, 农业废弃物的添加可使全球变暖潜势降低 22.49%~45.27% ( $P<0.05$ ); 其中, Mix 组虫沙腐熟和生物转化效果最佳, 温室气体排放最少, 生物质生产和碳、氮固持能力较好, 适宜蛋鸡养殖中粪便的绿色高效处理。

**关键词** 黑水虻; 鸡粪; 农业废弃物; 生物转化; 碳氮减排

中图分类号 X713

文章编号 1007-4333(2024)12-0174-11

文献标志码 A

## Effects of different agricultural wastes on the carbon and nitrogen transformation and losses during the process of treating chicken manure with black soldier fly

WANG Liwen<sup>1,2</sup>, ZHANG Guoyan<sup>1,2</sup>, REN Hongyang<sup>1,2</sup>, WANG Hongliang<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. National Institute for Green Agricultural Development, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** In order to study the effects of adding different agricultural wastes on the carbon and nitrogen transformation and losses during the process of treating laying hens' manure with black soldier fly, this study selected bean dregs, vegetable waste and their 1:1 combination as auxiliary materials and mixed them with fresh laying hens' manure according to equal weight ratio. Four treatments were set up as follows: chicken manure group (CK), vegetable waste addition group (VW), soybean dregs addition group (SD) and mixed vegetable waste and soybean dregs addition group (Mix). The effects of different agricultural

收稿日期: 2024-05-05

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2021YFD1700902); 浙江省地市局(含县)项目(衢农合 2022-31)(202105510311277)

第一作者: 王理文(ORCID:0009-0009-8230-3905), 硕士研究生, Email:913271865@qq.com

通讯作者: 王红亮(ORCID:0000-0001-7233-4737), 副教授, 主要从事农牧系统养分管理研究, Email:wang\_hl@cau.edu.cn

waste additions on related parameters such as chicken manure biomass conversion, carbon and nitrogen loss and insect sand nutrient retention were determined and compared. The results showed that: Compared with CK, the insect biomass yield of VW, SD and Mix groups significantly increased by 15.60%-36.96% and the waste reduction rate by 5.51%-27.30%, and the biological conversion rate increased by 16.57%-39.35% ( $P < 0.05$ ). In addition, the total organic carbon content in the insect sand decreased by 16.94%-42.24%, and the total nitrogen content increased by 0.46%-9.63% ( $P < 0.05$ ). The fermentation parameters such as GI index, humic substance and C/N reached the organic fertilizer standard. The addition of agricultural waste also reduced 12.26%-46.81% of  $\text{NH}_3$  volatilization, 20.23%-42.48% of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and 49.78%-57.27% of  $\text{CH}_4$  emissions ( $P < 0.05$ ). The cumulative emissions of VW and Mix decreased by 21.50% and 11.19%, respectively, compared with CK, and SD increased by 14.53% ( $P < 0.05$ ). The global warming potential of the agricultural waste addition groups was significantly reduced by 22.49%-45.27% ( $P < 0.05$ ). Among them, the group Mix had the best effect of sand rot and biotransformation, the least greenhouse gas emission, the better biomass production and carbon and nitrogen fixation ability, which was suitable for the green and efficient treatment of feces in laying hens.

**Keywords** black soldier fly; chicken manure; agricultural waste; biotransformation; gas emission reduction

黑水虻(Black Soldier Fly, 学名亮斑扁角水虻, *Hermetia illucens*)是一种腐生昆虫,广泛应用于有机废弃物的处理<sup>[1]</sup>。Beskin 等<sup>[2]</sup>研究显示,经过黑水虻处理可以减少粪污重量的 33%~58%,降低挥发性物质 87% 以上,且处理后的残余物可以作为有机肥料重新进入农业生产。黑水虻幼虫蛋白含量高达 40%,含有丰富的脂肪、必需氨基酸及其他微量元素,可作为优质的禽畜和鱼类饲料<sup>[3]</sup>。因此,黑水虻的高效养殖模式研究对促进我国种植业和养殖业的可持续发展具有重要意义。

我国(不包括香港、澳门地区和台湾省,下同)蛋鸡产量已居世界第一,每年产生约 1.8 亿 t 鸡粪<sup>[4]</sup>。然而由于缺乏适宜的处理方式,加之运输成本较高,养殖户大多采用堆置和自然降解处理粪污<sup>[4]</sup>。未经处理的鸡粪大量堆积,不仅会占据空间,也会对大气、土壤和水体造成严重污染<sup>[5]</sup>。鸡粪具有高蛋白、低纤维和低重金属含量的优点,适合作为黑水虻饲养日粮<sup>[6]</sup>。但已有研究表明,单独使用鸡粪饲喂黑水虻时效果不佳,降解过程中原料中 10% 的氮和 30% 的碳以气体形式逸散损失<sup>[7-8]</sup>,  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$  的累计排放量较堆置分别增加 99.27% 和 20.50%,这可能与基质的养分组成与理化性质有关<sup>[1,9]</sup>。此外,我国乡镇尚有大量的农业废弃物(如豆腐渣、蔬菜废弃物等),其富含蛋白质、脂肪和糖等多种营养物质,但未得到妥善利用<sup>[9-10]</sup>。在堆肥研究中,通过向鸡粪中添加农业废弃物进行好氧堆肥发现,肥料发酵进程和碳、氮固持效果均有明显改善<sup>[11]</sup>。目前,农业废弃物与畜禽粪便混合用于

黑水虻饲养的效果,尤其是碳、氮减排方面的研究鲜见报道。本试验在鸡粪中添加豆渣、蔬菜废弃物以及二者混合物用于饲喂黑水虻,测定分析最终虫体和虫沙的碳、氮含量及全过程碳、氮气体排放特征,旨在探究不同农业废弃物添加对黑水虻处理鸡粪过程中养分分配及转化的影响,以期在黑水虻绿色高效处理鸡粪提供理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验鸡粪取自河北省曲周县某蛋鸡养殖场,豆渣在曲周县豆腐加工厂收集,蔬菜废弃物(芹菜、甘蓝、豆角、西兰花的质量比为 3.5:3.0:2.0:1.5)取自曲周县大河道乡某蔬菜集市,所用木屑购自当地建材市场,各试验原料的基本理化性质见表 1。所有废弃物粉碎均匀,保存在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,使用前解冻并沥干水分。黑水虻虫卵购自河南省郑州阔程生态农业科技有限公司,在  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  恒温 and 相对湿度(RH) 30% 的条件下孵化,至出现明显流动性后转移至含水率为 70% 的粗麦麸中继续培养。

### 1.2 试验设计

本试验在中国农业大学饲料中心实验室进行。设置鸡粪与蔬菜废弃物 1:1(质量比,下同)的混合组(VW),鸡粪与豆渣 1:1 的混合组(SD)以及鸡粪、豆渣、蔬菜废物 2:1:1 的混合组(Mix)3 个处理,以新鲜鸡粪作为对照组(CK)。所有材料均按照干基重添加。添加木屑将各处理碳氮质量比调节至 20:1,含水率统一调节至 75%,养殖周期为 13 d。

表1 试验原料基础理化特性

Table 1 Basic physical and chemical properties of test materials

| 原料<br>Material           | 含水率/%<br>Moisture content | pH   | 电导率/(ms/cm)<br>Electric conductivity | 有机碳/(g/100 g)<br>Organic matter | 全氮/(g/100 g)<br>Total nitrogen |
|--------------------------|---------------------------|------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 鸡粪<br>Chicken manure     | 74.21                     | 5.81 | 6.16                                 | 31.59                           | 2.64                           |
| 蔬菜废弃物<br>Vegetable waste | 88.84                     | 6.05 | 2.27                                 | 42.82                           | 1.75                           |
| 豆渣<br>Soybean dregs      | 76.02                     | 4.22 | 4.15                                 | 46.25                           | 5.72                           |
| 木屑<br>Wood chip          | 9.27                      |      |                                      | 52.54                           | 0.23                           |

使用自制培养容器(长×宽×高为21.0 cm×19.0 cm×9.5 cm)进行养殖,容器上设置气体收集装置(图1)。将1.2 kg底物(干基)平铺在底部,分别接种20 g的6日龄黑水虻幼虫,每个处理设置3个重

复。接种完毕后,将容器置于人工气候箱(20 ℃、RH 75%)中,敞口避光培养。当50%的幼虫达到预蛹期时,收获全部虫体与虫沙并称重,所有样品保存在-4 ℃的冰箱中用于后续理化指标的测定。

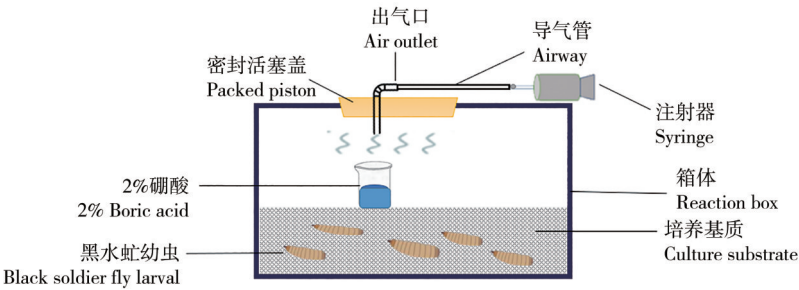


图1 黑水虻培养和气体收集装置

Fig. 1 Black soldier fly cultivation and gas collection device

1.3 理化指标测定

虫体、虫沙样品在105 ℃烘至恒重测定含水率<sup>[12]</sup>。采用凯式定氮法<sup>[13]</sup>测定虫体和虫沙的全氮(TN)含量,粗蛋白为全氮含量×6.25,有机质含量采用重铬酸钾容量法<sup>[13]</sup>测定,总有机碳(TOC)含量=有机质含量/1.724计算。 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N含量采用1 mol/L  $\text{CaCl}_2$ 提取,过连续流动分析仪(BRAN+LUEBBE,德国)测定。新鲜虫沙用蒸馏水1:10(m/V)浸提,滤液过碳氮分析仪(vario MARCRO CN,德国)测定可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)<sup>[14]</sup>。使用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾氧化-容量法<sup>[15]</sup>对虫沙样品中总腐殖酸含量进行测定。发芽指数(Germination index, GI)参照张国言等<sup>[16]</sup>的方法测定,并利用式(1)进行

计算:

$$\text{GI}=\text{RSG}\times\text{RRG}\times100\%$$
 (1)

式中:RSG为新鲜虫沙样品浸提液的种子发芽率与平均根长之比;RRG为蒸馏水浸润后的种子发芽率和平均根长之比。

黑水虻的废物减量率(WR)及生物转化率(BCR)分别采用式(2)和(3)计算:

$$\text{WR}=\frac{\text{DM}_0-\text{DM}_1}{\text{DM}_0}\times100\%$$
 (2)

$$\text{BCR}=\frac{\text{DM}_2}{\text{DM}_0-\text{DM}_1}\times100\%$$
 (3)

式中:DM<sub>0</sub>为初始添加基质的干重,g;DM<sub>1</sub>为培养结束剩余虫沙的干重,g;DM<sub>2</sub>为培养结束后黑水虻虫体的干重,g。

CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的浓度采用美国安捷伦公司的气相色谱仪(型号7890A)进行测定,其气体样品的采集在每天的8:00—9:00和18:00—19:00完成,期间将容器密封1 h,用50 mL聚丙烯塑料注射器从培养容器顶部取气,并转移至100 mL气袋中避光保存。气体单日排放速率和累计排放量如式(4)和(5)所示:

$$F_i = \frac{[c_1 + c_2] \times HV \times \rho}{[t_1 + t_2] \times m \times R} \times 24 \quad (4)$$

$$E = \sum_{i=0}^n (F_i + F_{i+1}) / 2 \times (T_{i+1} - T_i) \quad (5)$$

式中: $F_i$ 为气体排放单日排放量,mg/(kg·d); $\rho$ 为标准大气压下气体的密度,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O对应分别为1 960、716和1 960 mg/L;HV为采样容器顶端空间容积,L; $c$ 为目标气体的体积浓度,ml/L; $m$ 为底物质量,kg; $i$ 为采样次数; $t$ 为采样时间,h;( $c_1 + c_2$ )和( $t_1 + t_2$ )分别代表两次采样时气体浓度和时间之和; $R$ 为气体常数0.082 1;24为小时数,h; $E$ 为气体累计排放量,mg/kg;( $T_{i+1} - T_i$ )表示相邻2次采气时间间隔,d; $i$ 为采样天数,其中*i*=0为初始大气测定值。

每日采气前,在培养容器内部放置盛有2%(w/V)硼酸的小烧杯,用以吸收NH<sub>3</sub>。密封60 min后取出烧杯,滴加甲基红-溴甲酚绿指示剂,再用1%(V/V)的硫酸溶液进行滴定,计算NH<sub>3</sub>排放速率和累积排放量<sup>[17]</sup>。

全球变暖潜能势(Global warming potential,

GWP)的计算如式(6)<sup>[17]</sup>所示:

$$GWP = E_{CH_4} \times 34 \times 10^{-3} + E_{N_2O} \times 298 \times 10^{-3} + E_{NH_3} \times 298 \times 1\% \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: $E_{CH_4}$ 为CH<sub>4</sub>累积排放量,mg/kg; $E_{N_2O}$ 为N<sub>2</sub>O累积排放量,mg/kg; $E_{NH_3}$ 为NH<sub>3</sub>累积排放量,mg/kg,1%为NH<sub>3</sub>的间接N<sub>2</sub>O排放系数;CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的全GWP分别为34和298,CO<sub>2</sub>的全球变暖潜能值为1<sup>[18]</sup>。

1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2019软件进行统计分析,绘图图像采用Origin 2021软件进行绘制。采用SPSS 20.0软件对各指标的结果进行单因素方差分析(ANOVA),LSD法进行差异显著性检验, $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同农业废弃物添加对黑水虻鸡粪消减及生物物质产量的影响

由表2可知,添加豆渣处理(SD)的黑水虻总产量和粗蛋白含量最高,与纯鸡粪组(CK)相比分别升高32.05%和14.22%( $P < 0.05$ )。添加蔬菜废弃物处理(VW)的废物减量率最高,添加蔬菜废弃物和豆渣混合处理(Mix)次之,分别比CK升高27.30%和16.79%( $P < 0.05$ )。VW、SD和Mix的生物转化率均显著高于CK;其中,Mix最高,增加39.36%( $P < 0.05$ )。

表2 鸡粪添加不同农业废弃物对黑水虻生产性能的影响

Table 2 Effect of chicken manure supplemented with different agricultural wastes on production performance of black soldier fly

| 处理<br>Treatment | 总产量/g<br>Gross production | 粗蛋白/(g/100 g)<br>Crude protein | 废物减量率/%<br>Waste reduction rate | 生物转化率/%<br>Bioconversion rate |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| CK              | 67.74±0.10 <sup>b</sup>   | 40.93±0.02 <sup>d</sup>        | 41.57±0.86 <sup>d</sup>         | 10.62±0.02 <sup>c</sup>       |
| VW              | 78.31±1.13 <sup>c</sup>   | 42.96±0.35 <sup>c</sup>        | 52.92±1.24 <sup>a</sup>         | 12.38±0.19 <sup>b</sup>       |
| SD              | 92.78±1.81 <sup>a</sup>   | 46.75±0.58 <sup>a</sup>        | 43.86±0.57 <sup>c</sup>         | 14.80±0.80 <sup>a</sup>       |
| Mix             | 92.46±1.03 <sup>a</sup>   | 44.10±0.97 <sup>b</sup>        | 48.55±0.84 <sup>b</sup>         | 14.73±0.17 <sup>a</sup>       |

注:CK,新鲜鸡粪组,对照;VW,鸡粪与蔬菜废弃物质量比1:1的混合组;SD,鸡粪与豆渣质量比1:1的混合组;Mix,鸡粪、豆渣、蔬菜废弃物质量比2:1:1的混合处理。同列数据不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: CK, fresh chicken manure, control group; VW, chicken manure and vegetable waste mass ratio of 1:1 mixed group; SD, mixed group of chicken manure and soybean dregs with a mass ratio of 1:1; Mix, a mixed group of chicken manure, soybean dregs and vegetable waste with a mass ratio of 2:1:1. Different letters in the same column data indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). The same below.

2.2 不同农业废弃物添加对黑水虻虫沙品质参数的影响

由表3可知,养殖结束后,SD和Mix含水率较CK分别降低16.77%和10.97% ( $P<0.05$ ),而VW比CK升高7.46% ( $P<0.05$ )。与CK相比,VW、SD和Mix虫沙的DOC和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均显著降低,Mix降幅均最大,分别为15.67%和58.78%

( $P<0.05$ )。硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )含量显著升高,CV增幅最大,为38.01% ( $P<0.05$ )。VW的总腐殖酸比CK降低34.55%,而SD和Mix分别升高40.86%和49.63% ( $P<0.05$ ),可见其腐熟程度较高,有机质转化更完全;发芽指数的增幅由高到低为Mix(36.34%)>SD(35.43%)>VW(19.44%),各试验组均达到完全腐熟标准。

表3 黑水虻处理鸡粪后的虫沙品质  
Table 3 Quality of insect sand from chicken manure treated by black soldier fly

| 处理<br>Treatment | 含水率/%<br>Moisture content | 溶解性有机碳/<br>(g/kg)<br>Dissolved organic carbon | $\text{NO}_3^-\text{-N}/$<br>(mg/kg)<br>Nitrate nitrogen | $\text{NH}_4^+\text{-N}/$ (g/kg)<br>Ammonium nitrogen | 总腐殖酸/<br>(g/100 g)<br>Humic substance | 发芽指数/%<br>Germination index |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| CK              | 65.18±0.45 <sup>b</sup>   | 24.67±0.36 <sup>a</sup>                       | 347.54±0.91 <sup>d</sup>                                 | 1.43±0.12 <sup>a</sup>                                | 9.35±0.24 <sup>b</sup>                | 69.15±0.36 <sup>c</sup>     |
| VW              | 70.04±0.28 <sup>a</sup>   | 20.23±0.74 <sup>b</sup>                       | 479.63±1.01 <sup>a</sup>                                 | 1.32±0.06 <sup>b</sup>                                | 9.22±0.25 <sup>b</sup>                | 82.59±0.87 <sup>b</sup>     |
| SD              | 54.25±0.95 <sup>d</sup>   | 12.33±0.48 <sup>c</sup>                       | 380.28±0.81 <sup>c</sup>                                 | 1.20±0.11 <sup>c</sup>                                | 13.17±0.42 <sup>a</sup>               | 93.65±0.44 <sup>a</sup>     |
| Mix             | 58.03±0.16 <sup>c</sup>   | 10.17±0.25 <sup>d</sup>                       | 393.45±0.01 <sup>b</sup>                                 | 1.11±0.10 <sup>d</sup>                                | 13.99±0.78 <sup>a</sup>               | 94.28±0.16 <sup>a</sup>     |

2.3 不同农业废弃物添加对黑水虻处理鸡粪过程中碳、氮转化的影响

由表4可知,养殖开始后的前6 d,随着养殖时间延长,基质中氮素含量下降。养殖结束时(第13天),VW、SD和Mix的全氮均高于CK,Mix的增幅最大,比CK增加12.74% ( $P<0.05$ );CK的全氮持续降低,

最终降幅为9.54%。VW、SD和Mix的有机碳含量均持续降低,且养殖过程中前期降幅远高于后期。转化后,SD的降幅最大,有机碳含量较CK降低40.70% ( $P<0.05$ )。此外,第13天VW、SD和Mix的C/N均显著低于CK ( $P<0.05$ ),降幅由高到低为:Mix(40.56%)>SD(39.36%)>VW(17.35%)。

表4 黑水虻处理后鸡粪的碳、氮变化  
Table 4 Changes of total nitrogen and organic carbon content of chicken manure treated by black soldier fly at different time

| 参数<br>Parameter                       | 处理时间/d<br>Treatment time | 处理 Treatment            |                         |                          |                         |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                                       |                          | CK                      | VW                      | SD                       | Mix                     |
| 全氮/(g/100 g)<br>Total nitrogen        | 0                        | 2.41±0.09 <sup>a</sup>  | 2.02±0.04 <sup>c</sup>  | 2.15±0.04 <sup>b</sup>   | 2.12±0.16 <sup>b</sup>  |
|                                       | 7                        | 2.28±0.25 <sup>a</sup>  | 1.95±0.23 <sup>b</sup>  | 1.84±0.32 <sup>c</sup>   | 1.91±0.16 <sup>b</sup>  |
|                                       | 13                       | 2.18±0.02 <sup>c</sup>  | 2.19±0.01 <sup>c</sup>  | 2.26±0.03 <sup>b</sup>   | 2.39±0.10 <sup>a</sup>  |
| 有机碳/(g/100 g)<br>Total organic carbon | 0                        | 48.63±1.80 <sup>a</sup> | 41.43±1.13 <sup>c</sup> | 42.95±0.81 <sup>bc</sup> | 44.02±0.72 <sup>b</sup> |
|                                       | 7                        | 44.28±0.65 <sup>a</sup> | 36.23±0.72 <sup>b</sup> | 31.26±0.74 <sup>d</sup>  | 35.19±0.95 <sup>c</sup> |
|                                       | 13                       | 41.84±0.83 <sup>a</sup> | 34.62±0.91 <sup>b</sup> | 24.81±0.15 <sup>d</sup>  | 27.17±1.18 <sup>c</sup> |
| C/N                                   | 13                       | 19.13±0.41 <sup>a</sup> | 15.81±0.56 <sup>b</sup> | 11.60±0.58 <sup>c</sup>  | 11.37±0.59 <sup>c</sup> |

2.4 不同农业废弃物添加对黑水虻处理鸡粪过程碳氮损失的影响

由图2可知,除CK外,VW、SD和Mix的 $\text{CH}_4$

排放速率在养殖初期略有上升,随后迅速降至较低水平,并在第10天出现波动形成第二个峰值。CK的 $\text{CH}_4$ 排放速率随时间缓慢增加,在第6天达

到峰值,随后波动下降直至养殖结束。4个处理的CH<sub>4</sub>累计排放量在10.97~25.65 mg/kg,其中Mix的累计排放量最低,比CK降低55.08% ( $P < 0.05$ )。养殖初期,CO<sub>2</sub>的排放速率快速增长,在第6—7天达到峰值。VW的峰值比CK低

12.44% ( $P < 0.05$ ),而SD则升高17.36% ( $P < 0.05$ )。在养殖8 d后,VW、SD、Mix和CK的排放速率持续下降直至养殖结束。养殖结束后,VW的CO<sub>2</sub>累计排放量最低,较CK降低21.50%。

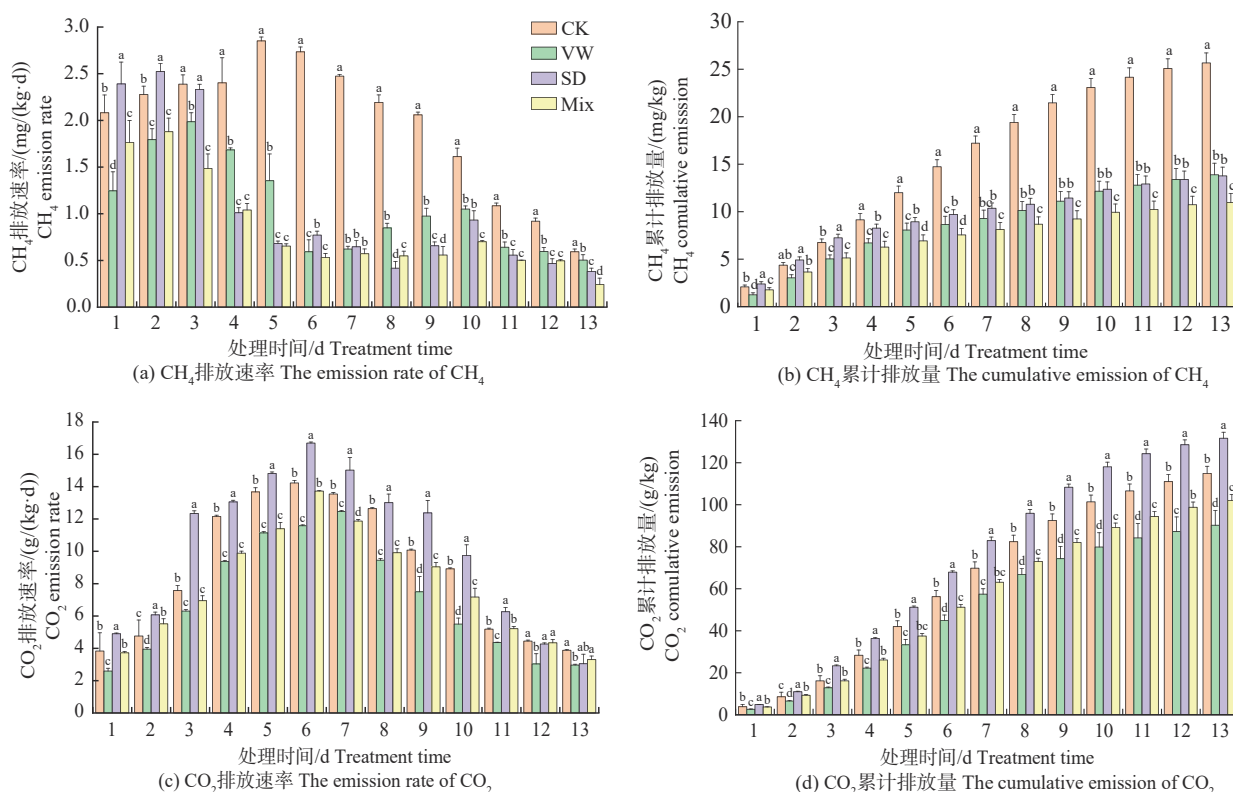


图2 黑水虻生物转化中CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的单日排放速率和累积排放量

Fig. 2 Emission rate and cumulative emission of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> during the biotransformation of black soldier fly

由图3可知,N<sub>2</sub>O的单日排放速率在反应开始时迅速增加,于第5—7天达到峰值,然后持续下降至0.002 51~0.005 81 mg/(kg·d),并保持稳定。VW、SD和Mix峰值较CK降低24.47%~49.53% ( $P < 0.05$ )。N<sub>2</sub>O最终累计排放量范围在0.33~0.56 mg/kg,VW、SD和Mix较CK下降20.86%~42.48% ( $P < 0.05$ ),SD处理的降幅最大。VW、SD和Mix的NH<sub>3</sub>排放速率先增加后降低,并在第6—7天达到峰值。VW、SD、Mix的峰值分别比CK降低6.11%~44.12% ( $P < 0.05$ ),VW的降幅最大,且在第8天出现波动并形成第二个峰。养殖结束时,各添加农业废弃物处理的NH<sub>3</sub>累计排放量均低于CK,其中VW最低,比CK低46.81% ( $P < 0.05$ )。

由表5可知,4个处理底物的总有机碳损失量在12.27%~23.61%,VW、SD、Mix损失量较CK分

别降低20.80%~48.03% ( $P < 0.05$ ),VW降幅最大。底物中有约5.94%~8.36%的有机碳以CO<sub>2</sub>形式逸散,是有机碳损失的主要途径,而CH<sub>4</sub>形式损失的碳极低。SD和VW均显著提升了物料中有机碳在虫体和残余物中的分布比例,较CK分别增加37.27%和12.94% ( $P < 0.05$ )。VW、SD、Mix的总氮损失比例较CK下降26.69%~79.01% ( $P < 0.05$ ),SD的降幅最大。氮素的损失形式主要以NH<sub>3</sub>为主,而N<sub>2</sub>O形式损失的氮素极低。VW中以NH<sub>3</sub>形式损失的氮在所有处理中最低,较CK减少36.43% ( $P < 0.05$ ),而SD保存在虫体和残余物中的氮素分别升高75.37%和11.66%,显著高于其他3个试验组 ( $P < 0.05$ )。经过黑水虻处理,鸡粪中大部分有机碳(70.30%~79.40%)和氮素(51.04%~59.01%)被保留在虫沙中。

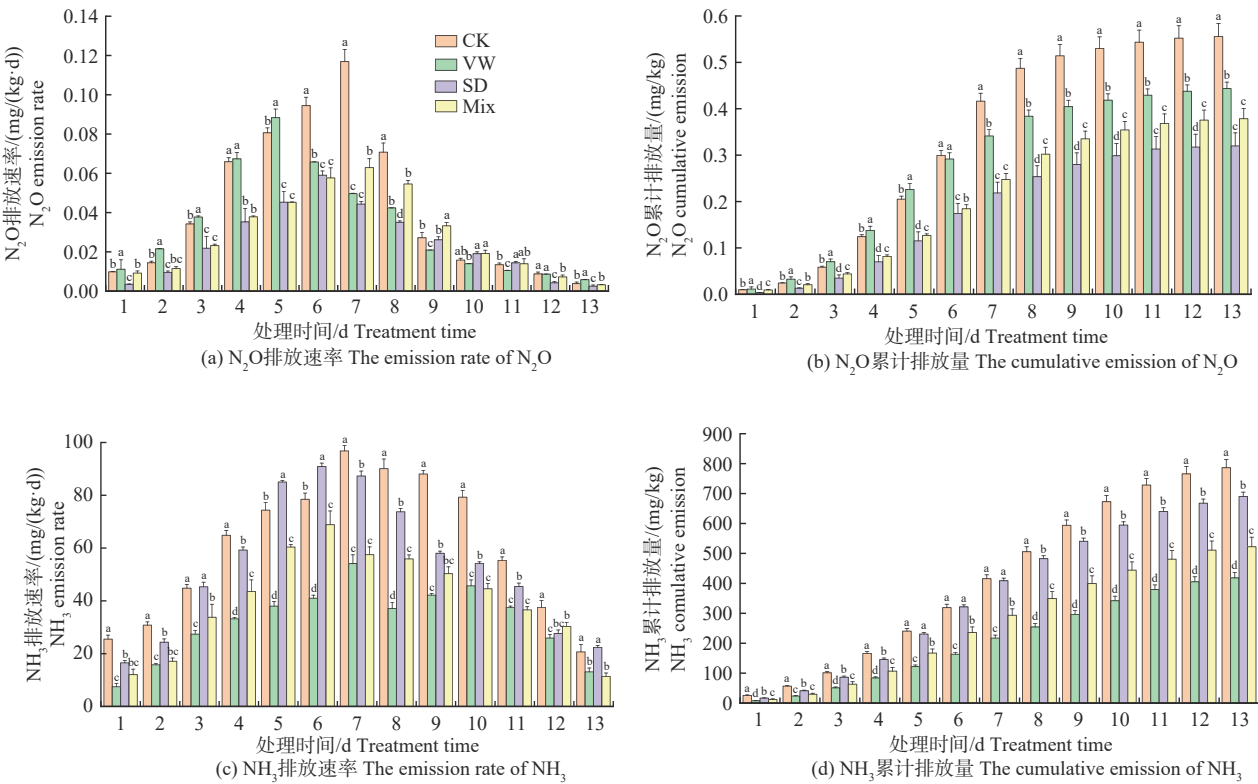


图3 黑水虻生物转化中 $N_2O$ 、 $NH_3$ 的排放速率和累计排放量

Fig. 3 Emission rate and cumulative emission of  $N_2O$  and  $NH_3$  during the biotransformation of black soldier fly

表5 黑水虻处理鸡粪前后碳、氮平衡

Table 5 Carbon and nitrogen balance of chicken manure before and after treated by black soldier fly

%

| 处理<br>Treatment | 碳平衡 Carbon balance |                   |                   |                    |                       |                      |
|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
|                 | $CH_4$ -C          | $CO_2$ -C         | 幼虫碳<br>BSFL-C     | 残余物碳<br>Residue-C  | 其他碳损失<br>Other C loss | 总碳损失<br>Total C loss |
| CK              | 0.00 <sup>a</sup>  | 6.44 <sup>b</sup> | 6.09 <sup>c</sup> | 70.30 <sup>d</sup> | 17.16 <sup>a</sup>    | 23.61 <sup>a</sup>   |
| VW              | 0.00 <sup>b</sup>  | 5.94 <sup>d</sup> | 8.33 <sup>b</sup> | 79.40 <sup>a</sup> | 6.33 <sup>d</sup>     | 12.27 <sup>d</sup>   |
| SD              | 0.00 <sup>b</sup>  | 8.36 <sup>a</sup> | 9.93 <sup>a</sup> | 72.43 <sup>b</sup> | 9.28 <sup>c</sup>     | 17.64 <sup>c</sup>   |
| Mix             | 0.00 <sup>c</sup>  | 6.32 <sup>c</sup> | 9.54 <sup>a</sup> | 71.76 <sup>c</sup> | 12.38 <sup>b</sup>    | 18.70 <sup>b</sup>   |

| 处理<br>Treatment | 氮平衡 Nitrogen balance |                   |                    |                    |                       |                      |
|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
|                 | $N_2O$ -N            | $NH_3$ -N         | 幼虫氮<br>BSFL-N      | 残余物氮<br>Residue-N  | 其他氮损失<br>Other N loss | 总氮损失<br>Total N loss |
| CK              | 0.00 <sup>a</sup>    | 2.69 <sup>a</sup> | 20.14 <sup>d</sup> | 52.85 <sup>c</sup> | 24.32 <sup>a</sup>    | 27.01 <sup>a</sup>   |
| VW              | 0.00 <sup>b</sup>    | 1.71 <sup>c</sup> | 29.16 <sup>c</sup> | 51.04 <sup>d</sup> | 18.09 <sup>b</sup>    | 19.80 <sup>b</sup>   |
| SD              | 0.00 <sup>d</sup>    | 2.64 <sup>a</sup> | 35.32 <sup>a</sup> | 59.01 <sup>a</sup> | 3.02 <sup>d</sup>     | 5.67 <sup>d</sup>    |
| Mix             | 0.00 <sup>c</sup>    | 2.03 <sup>b</sup> | 33.67 <sup>b</sup> | 58.00 <sup>b</sup> | 6.30 <sup>c</sup>     | 8.33 <sup>c</sup>    |

## 2.5 不同农业废弃物对黑水虻处理鸡粪过程全球变暖潜势的影响

由图 4 可知, VW、SD 和 Mix 组的全球变暖潜势 (GWP) 分别较 CK 降低 45.27%, 22.49% 和 39.64% ( $P < 0.05$ ), 且处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

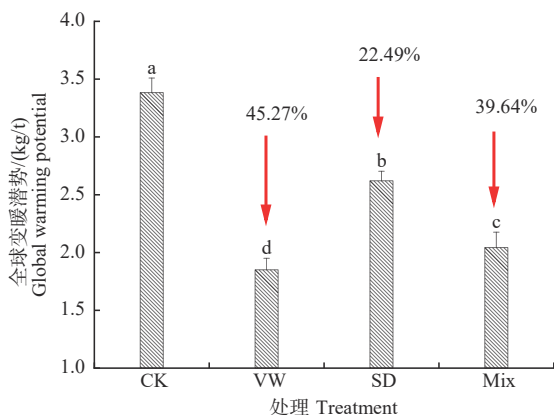


图 4 黑水虻处理添加不同农业废弃物鸡粪的全球变暖潜势

Fig. 4 Global warming potential of chicken manure and different agricultural wastes treated by black soldier fly

## 3 讨论

### 3.1 不同农业废弃物对黑水虻生物转化鸡粪的影响

黑水虻的生物质产量和生物转化率是决定其经济效益的重要因素, 对于产业的可持续发展较为重要<sup>[13]</sup>。蛋白质含量是反映黑水虻品质的重要指标<sup>[19]</sup>。Rehman 等<sup>[19]</sup>对比分析了低蛋白饲料(牛粪)和高蛋白饲料(豆渣)的黑水虻饲喂效果, 发现豆渣饲喂的黑水虻幼虫表现出更高的蛋白质含量和生长速率。本研究中豆渣处理(SD)和鸡粪、豆渣、蔬菜废弃物混合处理(Mix)相较于纯鸡粪组(CK)具有更高的虫体蛋白含量, 这可能得益于饲喂基质中更高的蛋白质含量。废物减量率可以用来反映黑水虻对废弃物的处理能力<sup>[13]</sup>。Taufek 等<sup>[20]</sup>和 Nguyen 等<sup>[21]</sup>研究显示, 蔬菜日粮会减小黑水虻的蛋白含量, 但可以提高废物减量率, 这是由于蔬菜底物的养分浓度较低, 幼虫为维持正常生长, 被迫增大摄食量, 从而促进减废水平的提高; 本研究中蔬菜废弃物处理(VW)和 Mix 的废物减量率更高的原因也可能归于此。从整体角度看, SD 和 VW 对鸡粪降解和生物质生产各有优缺点, 而 Mix 在虫体蛋

白生产和废物消减方面均有较好的表现。

### 3.2 不同农业废弃物对底物碳氮转化及损失的影响

碳、氮是生命活动不可缺少的物质来源<sup>[13]</sup>。在生物转化过程中, 有机态的碳氮被微生物及幼虫联合降解, 一部分用于虫体生物质的生产, 另一部分以气体逸散或渗滤液形式损失<sup>[13]</sup>。Rehman 等<sup>[19]</sup>发现豆腐渣的添加可提高幼虫对底物中有机碳的矿化速率, 本试验中 SD 和 Mix 的矿化速率较高可能归因于此。有机质分解的部分中间产物可用于腐殖酸的合成, 因此底物总腐殖酸含量与发酵程度间存在一定关联<sup>[22]</sup>。CO<sub>2</sub> 排放量高低可用于反映虫体和微生物的生物活性, 也是原料碳素损失的主要源头。本试验中 SD 的 CO<sub>2</sub> 排放速率峰值和累计排放量均最高, 有机碳含量降幅最大, 这与豆渣的养分浓度高, 虫体和微生物活性强, 从而加快有机质矿化有关, 但 CO<sub>2</sub> 排放过高不利于碳素的固持。VW 的腐殖酸含量偏低, 这可能是基质中蔬菜废弃物的纤维素含量较高所致。庞万成<sup>[23]</sup>研究显示, 高纤维基质的有机碳矿化困难, 难以形成腐殖酸。Mix 的 CO<sub>2</sub> 排放速率峰值和累计排放量显著低于 CK, 总腐殖酸含量最高, 且有机碳前后降幅适中, 表现出较强的碳素转化与固持能力。

本研究中, 4 个处理的基质在试验的前 6 d 发酵迅速, NH<sub>3</sub> 挥发速率高, 加之虫体蛋白的构建, 基质氮含量明显下降。而养殖结束时 4 个处理的全氮含量较初始有所提升, 这是由于碳素被消耗更多而产生的底物“浓缩效应”<sup>[13, 16]</sup>, 另一方面可能是有机质分解过程中产生了大量小分子含碳物质, 改善了底物中易降解部分的碳、氮比例, 从而提高了微生物的氮同化能力所致<sup>[24]</sup>。NH<sub>3</sub> 是生物转化过程中氮素损失的主要途径之一, 极易溶于水<sup>[13]</sup>。本试验中蔬菜废弃物处理(VW)的 NH<sub>3</sub> 均显著低于 CK、SD 和 Mix, 这可能是由于蔬菜转化过程中释放组织液溶解 NH<sub>3</sub> 所致<sup>[25]</sup>。养殖后期 NH<sub>3</sub> 排放速率的二次上升可能与含水率降低导致 NH<sub>3</sub> 重新逸散有关。Mix 组的 NH<sub>3</sub> 降幅仅次于 VW, 且最终 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 也相对较低, 可见其氮素固持与氮同化能力更强。与 CK 相比, 添加农业废弃物处理(VW、SD、Mix)的基质在生物转化过程中均表现出更强的碳氮减排潜力, 这或许与复合基质为碳氮固持微生物提供了更好的增殖环境有关<sup>[23]</sup>。

在黑水虻生物转化废弃物过程中,还有少量碳氮以 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等形式逸散<sup>[25]</sup>。除CK外,VW、SD、Mix大部分 $\text{CH}_4$ 的排放都在养殖的初始阶段(图2)。这可能是由于试验的前期底物粘稠,氧气流通困难,刺激产甲烷微生物快速繁殖,而黑水虻幼虫的蠕动松动底物破坏了厌氧条件,致使 $\text{CH}_4$ 排放量下降。养殖后期的二次上升可能是预蛹后虫体活力减弱,底物内部重新形成厌氧区域所致<sup>[25]</sup>。养殖结束后,Mix的 $\text{CH}_4$ 累计排放量最低,表明其黑水虻活性最佳,底物始终处于好氧状态。本试验中4个处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率均维持在较低水平,这可能是由于基质的温度和氧气含量无法维持反硝化或硝化作用导致的<sup>[25]</sup>。Mertenat等<sup>[26]</sup>提出,黑水虻可以通过在基质内部的蠕动来影响 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放,因此虫体活性对于 $\text{N}_2\text{O}$ 含量影响显著。本研究结果显示,在鸡粪中添加蔬菜废弃物和豆渣混合物处理(Mix)是减少黑水虻转化鸡粪过程中 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的有效方法。VW的GWP最低,这可能与 $\text{NH}_3$ 挥发较少有关。

### 3.3 不同农业废弃物添加对黑水虻虫沙理化性质的影响

含水率是评价有机肥品质的相关指标之一<sup>[13]</sup>。本研究中底物含水率转化后均有降低,这与底物发酵升温促使水分蒸发有关,且幼虫也会从底物中汲取部分水分供给生长<sup>[13]</sup>,这可以解释SD的虫沙含水率降幅最大的现象。VW的含水率降幅较低可能与蔬菜废弃物中结合水分不易蒸发有关<sup>[27]</sup>。Jeon等<sup>[28]</sup>研究发现,黑水虻可利用溶解性有机碳(DOC)合成生物物质,因此DOC降幅可反映养殖过程中黑水虻活性大小。本研究中,SD、VW、Mix的虫沙DOC含量均较CK显著降低,说明农业废弃物的添加可使黑水虻活性提升,其中Mix的效果最佳。Ao等<sup>[29]</sup>研究指出,黑水虻的肠道内含有能够高效合成氨基酸的微生物群落,可消耗 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 转化为虫体蛋白,因此高活性的黑水虻幼虫可有效降低底物 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的浓度,这可能是最终SD和Mix虫沙的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 更低的原因。种子发芽指数(GI)是评价肥料产品腐熟状况的重要指标<sup>[13]</sup>。Beesigamukama等<sup>[30]</sup>研究认为,当 $\text{GI}>50\%$ 时,肥料基本腐熟, $\text{GI}>80\%$ 时,则判断肥料完全腐熟且无植物毒性。本研究中,4个处理的GI均达80%以上。其中Mix最高,表明豆渣、蔬菜废弃物以及鸡粪混合使用时,可以

更好地提高虫沙中活性物质含量,促进种子萌发及根系生长。碳氮比(C/N)可用于反映底物的发酵情况,通常 $\text{C/N}<20$ 时被视为堆肥腐熟<sup>[13]</sup>,本试验虫沙C/N最终均符合标准。今后的研究中应进一步试验验证虫沙的肥力效力。

## 4 结 论

向鸡粪中添加农业废弃物可以增加黑水虻活力,促进鸡粪处理过程中的碳、氮养分固持,可显著减少 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 等气体的排放,并显著提升废弃物减量率、生物转化率及虫体蛋白产量。其中添加蔬菜废弃物和豆渣混合处理(Mix)的废物减量率、虫体总产量、粗蛋白含量较纯鸡粪(CK)均显著升高,各发酵参数接近完全腐熟标准,且 $\text{NH}_3$ 挥发和 $\text{CO}_2$ 排放量较CK分别降低33.61%和11.19% ( $P<0.05$ ),全球变暖潜势(GWP)降低53.24% ( $P<0.05$ ),综合效果最佳,适合中小规模蛋鸡养殖场的粪污处理。

## 参考文献 References

- [1] 黄周轲,王莉,叶小梅.黑水虻生物堆肥处理鸡粪养分转化及气体排放规律研究[J].南京农业大学学报,2024,47(2):292-297  
Huang Z K, Wang L, Ye X M. A study of nutrient transformation and gas emission during chicken manure biocomposting with black soldier fly [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2024, 47(2): 292-297 (in Chinese)
- [2] Beskin K V, Holcomb C D, Cammack J A, Crippen T L, Knap A H, Sweet S T, Tomberlin J K. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) impacts associated volatile emissions[J]. *Waste Management*, 2018, 74: 213-20
- [3] Chu X H, Li M M, Wang G Y, Wang K M, Shang R S, Wang Z Y, Li L S. Evaluation of the low inclusion of full-fatted *Hermetia illucens* larvae meal for layer chickens: Growth performance, nutrient digestibility, and gut health[J/OL]. *Frontiers in Veterinary Science*, (2020-11-27). DOI: 10.3389/fvets.2020.585843
- [4] Awasthi M K, Sarsaiya S, Wainaina S, Rajendran K, Kumar S, Quan W, Duan Y M, Awasthi S K, Chen H Y, Pandey A, Zhang Z Q, Jain A, Taherzadeh M J. A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: Technological challenges, advancements, innovations, and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 115-131
- [5] 焦敏娜,任秀娜,何熠锋,王权,李荣华,李季,张增强.畜禽粪污清洁堆肥:机遇与挑战[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2361-2371  
Jiao M N, Ren X N, He Y F, Wang Q, Li R H, Li J, Zhang Z Q. Opportunities and challenges in a livestock manure cleaner composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2361-2371 (in Chinese)
- [6] 范京辉,李庆海,张雷,张永华.蛋鸡饲料中主要营养物质及重金属流向

- [J]. 浙江农业科学, 2020, 61(5): 1027-1030
- Fan J H, Li Q H, Zhang L, Zhang Y H. Flow directions main nutrients and heavy metal in the feed for laying hens [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(5): 1027-1030 (in Chinese)
- [7] 马叶, 吴楠, 王小波, 梁嘉琪, 徐晓燕. 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, Liang J Q, Xu X Y. 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 (in Chinese)
- [8] Li R P, Chen S L, Li X J, Saifullah Lar J, He Y F, Zhu B N. Anaerobic codigestion of kitchen waste with cattle manure for biogas production [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(4): 2225-2228
- [9] 湛祺, Kiran Thakur, 胡飞, 章建国, 魏兆军. 豆渣的营养成分功能及其在食品工业中的利用[J]. 农产品加工, 2023(1): 76-80
- Zhan Q, Thakur K, Hu F, Zhang J G, Wei Z J. Nutritional composition function and utilization of okara in food industry [J]. *Farm Products Processing*, 2023(1): 76-80 (in Chinese)
- [10] 蔡影峰, 牛世华, 刘朔, 程增文, 廖新伟, 邢斯程. 黑水虻幼虫处理鸡粪后虫体营养及虫沙评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 2006-2013
- Cai Y F, Niu S H, Liu S, Cheng Z W, Liao X D, Xing S C. Evaluation of growth performance and nutrient composition of black soldier fly larvae treated with laying-hen manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 2006-2013 (in Chinese)
- [11] 田宇, 刘景莹, 吴景贵. 农林废弃物添加对基于 S-90 发酵罐资源化处理鸡粪品质和腐熟度的影响 [J/OL]. 吉林农业大学学报, (2024-04-23). <http://10.13327/j.jjlau.2024.20545>
- Tian Y, Liu J Y, Wu J G. Effect of agricultural and forestry waste addition on the quality of chicken manure treated by S-90 harmless fermentation tank [J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*, (2024-04-23). <http://10.13327/j.jjlau.2024.20545> (in Chinese)
- [12] Nyakeri E M, Ogola H J O, Ayieko M A, Amimo F A. Valorisation of organic waste material: Growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes [J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2017, 3(3): 193-202
- [13] 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], 杨凌: 西北农林科技大学, 2022
- Liu T. The sanitation and resource of livestock manure during black soldier fly larvae conversion combined with composting [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022 (in Chinese)
- [14] Ma J J, Jiang C L, Tao X H, Sheng J L, Sun X Z, Zhang T Z, Zhang Z J. Insights on dissolved organic matter and bacterial community succession during secondary composting in residue after black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L) bioconversion for food waste treatment [J]. *Waste Management*, 2022, 142: 55-64
- [15] 孙桂阳, 张国言, 董元杰. 不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 349-360
- Sun G Y, Zhang G Y, Dong Y J. Composting process of agricultural wastes from different sources and fertilizer efficiency of their products [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 349-360 (in Chinese)
- [16] 张国言, 董元杰, 孙桂阳, 于滨, 徐珂. 复合菌剂对免粪堆肥碳氮转化与损失的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 153-165
- Zhang G Y, Dong Y J, Sun G Y, Yu B, Xu K. Effects of compound bacterial inoculant on the conversion and loss of carbon and nitrogen during rabbit manure composting [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(11): 153-165 (in Chinese)
- [17] 马文林, 吴淑勋, 朱法江, 及晓彤, 曾雪彤, 王越. 玉米田长期施粪肥的温室气体排放研究 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41(10): 168-175, 182
- Ma W L, Wu S X, Zhu F J, Ji X T, Zeng X T, Wang Y. Research on greenhouse gas emissions from long-term application of manure in maize fields [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(10): 168-175, 182 (in Chinese)
- [18] Zhang N N, Bai Z H, Ledgard S, Luo J F, Ma L. Ammonia mitigation effects from the cow housing and manure storage chain on the nitrogen and carbon footprints of a typical dairy farm system on the North China Plain [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, (2021-01-20). DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124465
- [19] Rehman K U, Rehman A, Cai M M, Zheng L Y, Xiao X P, Somroo A A, Wang H, Li W, Yu Z N, Zhang J B. 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
- [20] Nguyen T T X, Tomberlin J K, Vanlaerhoven S. Influence of resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larval development [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2013, 50(4): 898-906
- [21] Taufek N M, Zulkifli N F N M, Hamizah A N. Upcycling of food waste generated from the fresh market by utilising black soldier fly larvae: Influence on growth, bioconversion, and nutritional composition [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, (2024-01-01). DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119467
- [22] Li Y X, An S Y, Zhang F S, Liu X B, Hu B Y. Influence of ligneous bulking agents on the complexation of heavy metals to humic substances formed in pig manure composting [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103(2): 323-329
- [23] 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)
- [24] 李文慧, 王继涛, 安明远, 徐广亚, 尹翠, 游宏建, 曹云娥. 蚯蚓原位堆肥与不同比例生物炭对基质理化性质及番茄品质的作用研究 [J]. 核农学报, 2024, 38(5): 943-954
- Li W H, Wang J T, An M Y, Xu G Y, Yin C, You H J, Cao Y E. A study on the effects of in-situ vermicomposting with different ratios of biochar on physicochemical properties of substrate and tomato quality [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(5): 943-954 (in Chinese)
- [25] Chen J S, Hou D J, Pang W C, Nowar E E, Tomberlin J K, Hu R G, Chen H C, Xie J S, Zhang J B, Yu Z N, Li Q. Effect of moisture content on greenhouse gas and NH<sub>3</sub> emissions from pig manure converted by black soldier fly [J/OL]. *Science of the Total Environment*, (2019-12-20). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133840
- [26] Mertenat A, Diener S, Zurbrugg C. Black Soldier Fly biowaste treatment-Assessment of global warming potential [J]. *Waste Management*, 2019, 84: 173-181
- [27] Polischuk G, Rybak O. Determining bound moisture in carbohydrate-containing vegetable raw materials and ice cream mixtures [J]. *Food Chemistry and Technology (Maisto Chemija ir Technologija)*, 2012, 46(1): 57-64
- [28] Jeon H, Park S, Choi J, Jeong G, Lee S B, Choi Y, Lee S J. The intestinal bacterial community in the food waste-reducing larvae of *Hermetia illucens* [J]. *Current Microbiology*, 2011, 62(5): 1390-1399

- [29] Ao Y, Yang C R, Wang S C, Hu Q Y, Yi L, Zhang J B, Yu Z N, Cai M M, Yu C. Characteristics and nutrient function of intestinal bacterial communities in black soldier fly (*Hermetia illucens* L) larvae in livestock manure conversion[J]. *Microbial Biotechnology*, 2021, 14(3): 886-896
- [30] Beesigamukama D, Mochoge B, Korir N K, Fiaboe K K M, Nakimbugwe

D, Khamis F M, Dubois T, Subramanian S, Wangu M M, Ekesi S, Tanga C M. Biochar and gypsum amendment of agro-industrial waste for enhanced black soldier fly larval biomass and quality frass fertilizer [J/OL]. *PLoS One*, (2020-00-00). DOI: 10.1371/journal.pone.0238154

责任编辑: 吕晓梅



**第一作者简介:** 王理文, 中国农业大学资源与环境学院植物营养学专业的硕士研究生, 先后参与十四五国家重点研发计划(2021YFD1700902-02)和浙江省地市厅(含县)项目(衢农合 2022-31), 曾获得中国农业大学校级研究生二等奖学金。



**通讯作者简介:** 王红亮, 博士, 中国农业大学资源与环境学院副教授, 博士生导师, 主要在农牧系统养分管理、农业废弃物循环利用与减排等方向开展交叉学科研究。担任中国农业大学资环学院生猪、奶牛等多个科技小院首席专家。主持国家自然科学基金、科技部重点研发项目子课题以及地方政府或企业委托项目 7 项, 在 *Environmental Science and Technology*、*Science of the Total Environment* 等国际期刊发表文章 10 余篇。荣获 2023 年第三届全国创新争先奖-中国农业大学科技小院团队(12/15); 入选 2022 年中国农技协“最美科技小院”; 获得 2022 年国家级赛事“中国研究生乡村振兴科技强农+创新大赛”特等奖及优秀指导教师称号; 获得 2022 年曲周县农业科技服务先进个人; 2020 年中国农业大学优秀人才; 担任 *Animal Research and One Health* 青年编委。