

# 利用乡村有机废弃物进行蚯蚓养殖的种类筛选及配比优化研究

刘科<sup>1,3</sup>, 韦秀丽<sup>1,3\*</sup>, 郭萧<sup>1,3</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 唐宁<sup>1,2</sup>, 李平<sup>2</sup>, 杨玉鹏<sup>1,2</sup>

(1. 重庆市农业科学院, 重庆 401329; 2. 农业部农村可再生能源开发利用南方科学观测实验站, 重庆 401329; 3. 农业废弃物资源化利用技术与设备研发重庆市重点实验室, 重庆 401329)

**摘要:** 蚯蚓过腹生物处理技术可以提高有机肥的腐殖质含量、养分有效性和微生物活性, 可实现乡村有机废弃物的资源化利用, 对我国生态产业的可持续发展带来极大的促进作用。以畜禽粪便、秸秆、蔬菜尾菜和杂草等乡村有机废弃物作饲料培养蚯蚓, 筛选出适合用于蚯蚓养殖的废弃物种类, 通过探讨不同粒径、不同碳氮比、不同配比混合物料对蚯蚓生长的影响, 以及处理后蚓粪种子发芽率的差异, 总结得出利用乡村有机废弃物养殖蚯蚓的最优原料配比, 为农业废弃物的无害化与资源化利用技术提供参考。

**关键词:** 乡村有机废弃物; 种类筛选; 蚯蚓过腹处理; 配比优化

中图分类号: S216.4; X705; X713 文献标志码: B 文章编号: 1000-1166(2022)04-0050-05

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022040050

**Study on the Species Selection and Proportion Optimization of Earthworms Culture Using Rural Organic Waste / LIU Ke<sup>1,3</sup>, WEI Xiuli<sup>1,3\*</sup>, GUO Xiao<sup>1,3</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, TANG Ning<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>2</sup>, YANG Yupeng<sup>1,2</sup> / (1. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; 2. Southern Scientific Observation and Experimental Station for the Development and Utilization of Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Chongqing 401329, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Waste Resource Utilization Technology and Equipment Research and Development, Chongqing 401329, China)**

**Abstract:** The technology of biological treatment by earthworms can improve the humus content, nutrient availability and microbial activity of organic fertilizer. Using this technology can carry out the resource utilization of rural organic waste, and greatly promote the sustainable development of ecological industry in China. This study utilized the rural organic wastes, such as animal manure, straw, vegetable tail and weeds to cultivate earthworms, and finally selected the suitable wastes for breeding earthworm. By discussing the effects of different particle sizes, different carbon-nitrogen ratios, and different proportions of mixed materials on the growth of earthworms, as well as the difference in the germination rate of vermicompost seeds after treatment, the study summarized the optimal raw material proportions for using rural organic wastes to cultivate earthworms, thus providing reference for the harmless and resource utilization of rural organic wastes.

**Key words:** Rural organic wastes; species selection; transabdominal treatment of earthworm; proportion optimization

随着我国农业向集约化、规模化、多元化的趋势发展, 农业有机固体废弃物逐年增长, “固废资源化”成为了我国废弃物处置的主要方式。据统计每年我国畜禽粪便超 38 亿 t、农作物秸秆超 9 亿 t、废弃尾菜 2.6 亿 t, 已成为我国面源污染的重要来源之一<sup>[1]</sup>。近年来, 以蚯蚓过腹为代表的固废生物处理技术迅速发展, 规模日益扩大, 以蚯蚓作为天然的

“生物反应器”降解固废同时, 还可获得蚯蚓活体和蚯蚓粪, 以实现废弃物无害化、减量化、和资源化再利用。与传统好氧堆肥相比, 蚯蚓过腹生物处理技术可以提高有机肥的腐殖质含量、养分有效性和微生物活性<sup>[2-4]</sup>。在经济效益及环境友好方面, 成为现代农村农民实现脱贫致富的重要手段, 对我国生态产业的可持续发展带来极大的促进作用<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2021-11-10 修回日期: 2022-04-02

项目来源: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2019jcsx-gksbX0158); 重庆市农业农村委 2021 年专项资金项目; 重庆市农业科学院农业发展资金项目 (NKY-2021AB002)。

作者简介: 刘科 (1982-) 男, 重庆人, 工程师, 主要从事农业生物环境与能源工程研究等工作, E-mail: 47867885@qq.com

通信作者: 韦秀丽, E-mail: 77703863@qq.com

蚯蚓过腹生物处理技术通过蚯蚓的取食、消化、排泄和掘穴等活动,改变有机物料的生物、化学和物理特征,从而将废弃物转化为无害的、高品质的肥料。在堆制过程中,蚯蚓吞食大量有机物料,不仅促进了有机废弃物分解过程的水汽循环,加速其充分混合,而且通过肠道机械研磨和各种酶的生物化学作用,将有机物、无机盐类分解并部分矿化,转化为氨、尿素、碳酸、尿嘌呤以及速效性的磷钾矿物质。这些代谢产物大部分以蚓粪的形式排泄出来。目前利用蚯蚓堆肥处理牛粪<sup>[6]</sup>、猪粪<sup>[7]</sup>、鸡粪<sup>[8]</sup>、餐厨垃圾<sup>[9]</sup>等有机废弃物均有较为系统的研究,其中牛粪不仅可以单独用于蚯蚓堆肥,还可以作为其他废弃物处理的“引料基料”,提高蚯蚓对物料的适口性,是蚯蚓堆肥的最佳物料。而秸秆、瓜果、蔬菜等原料需经好氧堆肥预处理后方可作为蚯蚓过腹的基料或者添加料,并对堆肥效果产生明显的促进作用<sup>[10-11]</sup>。然而目前缺乏不同种类秸秆对蚯蚓生长影响和堆肥适应性的系统研究,适合蚯蚓堆肥的最佳粪料配比也尚不明晰,本文以畜禽粪便、秸秆、蔬菜尾菜和杂草等乡村有机废弃物作饵料培养蚯蚓,筛选出适合用于蚯蚓养殖的废弃物种类;通过探讨不同粒径、不同碳氮比、不同配比混合物料对蚯蚓生长的影响,以及处理后蚓粪种子发芽率的差异,总结出利用乡村有机废弃物养殖蚯蚓的最优原料配比,为农业废弃物的无害化与资源化利用技术提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

水稻秸秆、杂草、叶菜、瓜果、辣椒、水葫芦来自重庆市璧山区七塘镇喜观村某农场。

大平二号蚯蚓:取自某生态农业开发有限公司,所用蚯蚓均为大小一致,身体健康的幼年蚓。

塑料花盆:规格大小为 28 cm(上端直径) × 22 cm(高) × 20 cm(底端直径)。

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 物料预处理

##### 1.2.1.1 单一原料

将水稻秸秆分别粉碎至 2 cm、5 cm、10 cm,分别装入大小一致的塑料箱进行初步的发酵,发酵起始向装有各个物料的箱内加入配制好的 EMS 菌剂,统一添加量为 10% 的菌液  $10 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,调节各发酵箱物料含水量约为 60%,进行为期 15 d 好氧堆肥预

处理,期间每 5 d 对各个发酵箱内物料进行翻堆 1 次,排除有害气体,使物料发酵更为均匀,正常发酵直至腐熟。

##### 1.2.1.2 多种原料

对尾菜、杂草、水稻秸秆等材料进行粉碎,秸秆、杂草、叶菜类粒径不超过 2 cm,瓜果类粉碎粒径 3 ~ 5 cm,装入发酵塑料箱后按上述方法进行好氧堆肥预处理。

### 1.2.2 蚯蚓养殖

#### 1.2.2.1 不同原料

将好氧堆肥后的多原料分别放置于塑料花盆中,每盆中放置物料 500 g(干物质约 200 g),调节物料水分至 60%,接种蚯蚓 20 条,每条蚓均为健康幼蚓,体表光滑、色泽红润、活泼好动、体重一致,每种样品做 3 组重复实验,接种蚯蚓后每盆底部放置托盘及双层纱布,防止蚯蚓漏失,将花盆放置于恒温室,温度维持在  $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ ,因为蚯蚓具有避光性,所以要使花盆避免受到阳光直射,将花盆顶端用黑色透气塑料覆盖,营造黑暗环境,但不限制蚯蚓从中爬出。利用 TDR-300 便携式土壤水分速测仪于每天 18:00 测定物料含水量,使水分始终维持在 60% 左右。

#### 1.2.2.2 不同 C/N

将原料 1.2.1.1 好氧堆肥结束后,在堆肥中添加尿素,调节碳氮比为 15、20、25、30、35。然后进行蚯蚓养殖,实验方法同 1.2.2.1。

将 1.2.1.1 中经过前处理的物料按纯腐熟猪粪、腐熟猪粪:水稻秸秆 = 2:1、腐熟猪粪:水稻秸秆 = 1:1、腐熟猪粪:水稻秸秆 = 1:2、纯牛粪(牛粪可直接用于蚯蚓养殖,无需发酵处理)、牛粪:秸秆 = 2:1、牛粪:水稻秸秆 = 1:1、牛粪:水稻秸秆 = 2:1 分别放置于塑料花盆中,3 个重复。养殖方法同 1.2.2.1。

#### 1.2.3 样品采集

养殖时间 40 d,期间每 10 天对各个花盆蚯蚓进行体重测量,体重称量时先将物料全部倒出,将蚯蚓轻轻从物料中分离出来,置于湿润光滑的避光器皿中,让蚯蚓先自行爬行 30 s,后用羽毛轻轻擦去蚯蚓体表物料,用电子天平称重并记录。

### 1.3 蚯蚓生长指标检测

蚯蚓平均体重 = 测定时蚯蚓总重 / 蚯蚓条数,试验数据在 Excel 2013 软件初步整理后,采用 SPSS 23.0 进行单因素 ANOVA 方差分析。

### 1.4 种子发芽指数检测

取 20 g 水稻秸秆与猪粪、牛粪按不同比例混合蚯蚓养殖的产物(蚯蚓粪)鲜样,加入 200 mL 蒸馏水振荡 20 min,30℃下浸提 1 昼夜,上清液用慢速滤纸过滤,滤液待用;在 9 cm 培养皿内铺入相应大小的滤纸一张,均匀放进 20 粒颗粒饱满大小接近的白菜种子,用移液管取 5.0 mL 堆肥浸提液于培养皿,并以蒸馏水作对照实验。每个处理作 3 次重复;将培养皿放置在 25℃±1℃、80% 湿度培养箱中培养 24 h;测种子发芽率和根长,并计算 GI。

$$GI(\%) = (\text{堆肥浸提液的种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{蒸馏水的种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100$$

当 GI > 50% ,则可认为基本腐熟,当 GI 达到 80% ~ 85% 时,这种堆肥就可以认为已经完全腐熟,对植物没有毒性。

## 2 结果与分析

### 2.1 乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖基料筛选

蚯蚓平均重量作为评价蚯蚓生长状况的重要指标,能够较为直观的反应蚯蚓在各个环境下的真实

生长状况<sup>[12-13]</sup>。由表 1 可知,水葫芦、辣椒堆肥后养殖蚯蚓在 10 d 时堆肥中已无蚯蚓,其原因是用水葫芦、辣椒堆肥后养殖蚯蚓出现蚯蚓逃逸、死亡现象,可见水葫芦、辣椒不适宜于蚯蚓养殖。而杂草、叶菜、水稻秸秆、瓜果类堆肥后饲养蚯蚓,蚯蚓平均重量在各个废弃物中都呈现先逐步增加后微弱减少的趋势,在 20 ~ 30 d 内,蚯蚓平均重量增加最快,在第 30 天达到峰值,杂草、叶菜、水稻秸秆及瓜果 4 类样品中蚯蚓的平均重量分别较 20 d 时提高 56.7%、47.5%、61.5% 和 50%。30 ~ 40 d 期间,蚯蚓平均重量呈现下降趋势,4 类样品分别较 30 d 下降 6.9%、5.1%、9.5%、8.3%。进一步分析得到,养殖初始各个处理中接种的蚯蚓均为幼蚓,20 d 后蚯蚓较小,取食量有限,生长速度较慢;20 ~ 30 d 期间,蚯蚓处于生长发育旺盛时期,蚯蚓平均重量增加幅度较大,30 d 后,蚯蚓平均体重呈现缓慢降低趋势,主要是由于蚯蚓已经成长为成年蚯蚓,开始大量产茧,成年蚯蚓所获得的大量营养物质一部分用于产茧,一部分用于自身生长,故而导致蚯蚓平均体重出现缓慢降低现象。

表 1 不同乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖情况

原 料	蚯蚓平均体重/(g·条 <sup>-1</sup> )				
	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d
杂草	0.18 ± 0.01a	0.28 ± 0.03a	0.37 ± 0.02b	0.58 ± 0.02b	0.54 ± 0.02a
叶菜	0.19 ± 0.02a	0.29 ± 0.01b	0.40 ± 0.04a	0.59 ± 0.03a	0.56 ± 0.01a
水葫芦	0.18 ± 0.02a	—	—	—	—
水稻秸秆	0.17 ± 0.01a	0.31 ± 0.05a	0.39 ± 0.01b	0.63 ± 0.02a	0.57 ± 0.01b
瓜果类	0.18 ± 0.01a	0.29 ± 0.02b	0.40 ± 0.02a	0.60 ± 0.01b	0.55 ± 0.04a
辣椒	0.19 ± 0.01a	—	—	—	—

注:同一时期不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平,下同。

可见,杂草、叶菜、水稻秸秆、瓜果类堆肥后饲养蚯蚓在同一时间周期内,以水稻秸秆养殖的蚯蚓生长情况最佳,其次分别为瓜果类、叶菜、杂草,且在瓜果类、叶菜发酵处理时为调节含水率加入了部分水稻秸秆,由此可见在乡村种植废弃物中,水稻秸秆发酵后最适宜于蚯蚓养殖。

### 2.2 乡村种植有机废弃物 C/N 对蚯蚓生长的影响

以水稻秸秆为原料,探明不同 C/N 对蚯蚓生长的影响,其中 N 的来源为好氧堆肥时添加的尿素。由图 1 可知,蚯蚓的整体生长规律与 2.1 相似,即接种后 20 ~ 30 d 为蚯蚓生长巅峰期,而后体重逐渐下降。同时好氧堆肥中物料初始 C/N 比对随后蚯蚓

过腹转化阶段具有重要影响<sup>[14-15]</sup>,在接种蚯蚓后的 30 d 后,不同 C/N 蚯蚓堆肥样品中蚯蚓平均体重分别较初始提高 166%、194%、227%、216%、183%,可见堆肥物料 C/N 为 25 时,蚯蚓生长状态最佳,其次分别为 C/N = 30 和 C/N = 20 样品,C/N = 35 和 C/N = 15 样品蚯蚓生长次之。因此,利用乡村秸秆有机废弃物养殖蚯蚓时,在好氧预处理阶段将物料 C/N 调至 20 ~ 30 最有利于后续蚯蚓养殖。低于 20 或高于 35 会导致蚯蚓生长缓慢。

### 2.3 乡村种植有机废弃物粒径对蚯蚓生长的影响

以水稻秸秆为原料,研究不同粒径好氧堆肥后对蚯蚓生长的影响。由图 2 可知,在同一时间周期

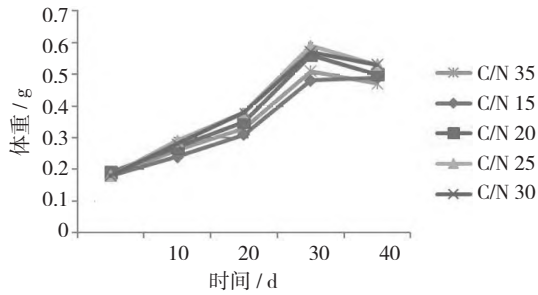


图1 不同 C/N 水稻秸秆蚯蚓养殖蚯蚓生长情况

内,以 2 cm 物料养殖的蚯蚓生长情况最佳,其次分别为 5 cm、15 cm 的对照样品实验蚯蚓。在 30 d 的蚯蚓生长旺盛期内,三样品中蚯蚓平均体重分别增加了 244%、216% 和 188%,由此可见乡村种植有机废弃物粒径越小,蚯蚓养殖效果越好,可能是因为原料粒径越小,好氧堆肥过程中纤维素、半纤维素等有机物降解得越充分,后期蚯蚓养殖阶段可为其提供的食料也越优质。但是原料粒径越小,在秸秆粉碎过程中所需的能耗越高,考虑到预处理的费用问题,建议选取 5 cm 的为宜。

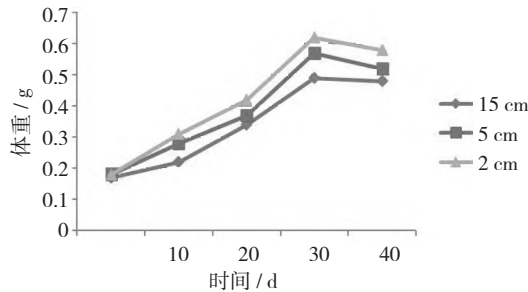


图2 不同粒径水稻秸秆蚯蚓养殖蚯蚓生长情况

#### 2.4 乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖最优配比研究

在开展乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖最优配比研究时需考虑到养殖废弃物(猪粪、牛粪等),根据上述研究结论,这里选取最适宜蚯蚓养殖的水稻秸秆与猪粪、牛粪按不同比例混合开展蚯蚓养殖研究。研究结果显示(见图 3),纯腐熟猪粪养殖蚯蚓在前 20 d 时出现死亡,其原因可能是腐熟猪粪透气性较差,残留的 CH<sub>4</sub> 气体不能及时排出导致蚯蚓窒息死亡<sup>[16]</sup>,可见纯腐熟猪粪不适合蚯蚓养殖。在猪粪与秸秆不同比例混合养殖蚯蚓中,腐熟猪粪:水稻秸秆 = 1:2 的蚯蚓生长情况最佳,在接种后的 30 d 后,其平均体重增长 210%,其次分别为 1:1 和 2:1 的实验样品,其平均体重增长约 200%。在牛粪与秸秆不同比例混合养殖实验结果显示,纯牛粪可直接养殖蚯蚓,且牛粪:水稻秸秆 = 1:1 的样品蚯蚓生长情况

最佳,在接种后的 30 d 后,蚯蚓平均体重增长 244%,其次分别为 2:1 和 1:2 样品。

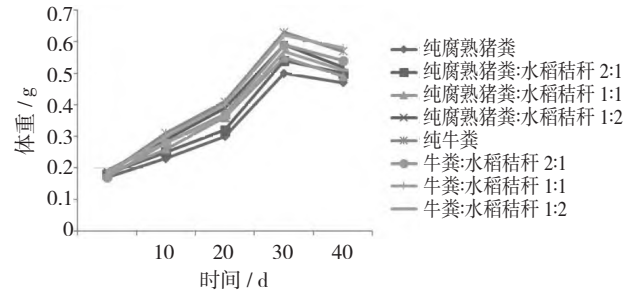


图3 乡村有机废弃物不同配比蚯蚓养殖蚯蚓生长情况

#### 2.5 乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖产物对种子发芽率试验的影响

用水稻秸秆与猪粪、牛粪按不同比例混合蚯蚓养殖的产物(蚯蚓粪)开展种子发芽率试验来衡量蚯蚓处理乡村有机废弃物的效果<sup>[17-18]</sup>。目前种子发芽试验被认为是评价堆腐产品无害腐熟最具说服力的方法。种子发芽指数(GI)综合反映了堆肥的植物毒性,被认为是最敏感、最可靠的堆肥腐熟度评价指标。由表 2 可知,猪粪与秸秆混合蚯蚓养殖的产物(蚯蚓粪)的种子发芽率及种子发展指数中,腐熟猪粪:水稻秸秆 = 1:2 的 GI 值最高,达 81.6%,已经达到完全腐熟标准。其次分别为 1:1、2:1 的样品,腐熟猪粪 GI 值最低,仅 68.6%,但上述样品均已达到基本腐熟标准。以牛粪-秸秆为原料的蚓粪,其种子发芽率、GI 值以牛粪:水稻秸秆 = 1:1 的本样品最大,其次分别为 2:1、1:2 样品,所有样品 GI 值均大于 80%,达到完全腐熟标准。

表 2 乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖

产物影响种子发芽率的情况 (%)

原料(饲养蚯蚓 40 d)	种子发芽率	GI
腐熟猪粪	56	68.6
腐熟猪粪:水稻秸秆 2:1	58	70.4
腐熟猪粪:水稻秸秆 1:1	66	78.1
腐熟猪粪:水稻秸秆 1:2	78	81.6
牛粪	89	87.8
牛粪:水稻秸秆 2:1	87	86.7
牛粪:水稻秸秆 1:1	92	92.4
牛粪:水稻秸秆 1:2	84	83.9

### 3 结论

通过对乡村种植有机废弃物蚯蚓养殖基料的筛

选原料初始 C/N 及废弃物粒径对蚯蚓生长及腐熟度的影响得出如下结论:

(1) 乡村有机废弃物中, 杂草、叶菜、水稻秸秆、瓜果类堆肥后适用于蚯蚓养殖, 以水稻秸秆养殖的蚯蚓生长情况最佳, 其次分别为瓜果类、叶菜、杂草; 而水葫芦、辣椒堆肥不适宜于蚯蚓养殖。

(2) 水稻秸秆好氧堆肥初始 C/N 蚯蚓养殖实验显示, 以 C/N = 20 ~ 30 物料养殖的蚯蚓生长情况最佳, 低于 20 或高于 35 会引起蚯蚓生长缓慢。

(3) 不同粒径水稻秸秆蚯蚓养殖实验显示, 2 cm 粒径的物料养殖蚯蚓生长情况最佳, 其次分别为 5 cm、15 cm 粒径样品, 由此可见原料粒径越小, 蚯蚓养殖效果越好, 考虑到预处理的费用问题, 建议选取 5 cm 的为宜。

(4) 在粪秆混合原料进行蚯蚓养殖时, 腐熟猪粪: 水稻秸秆 = 1: 2 的蚯蚓生长情况最佳, 其次分别为 1: 1 和 2: 1 样品; 纯牛粪可直接养殖蚯蚓, 且牛粪: 水稻秸秆 = 1: 1 时蚯蚓生长情况最佳。

(5) 种子发芽率及种子发展指数显示, 蚯蚓过腹生物处理后的乡村有机废弃物( 蚓粪) 均达到了基本腐熟标准, 腐熟猪粪: 水稻秸秆 = 1: 2 以及牛粪与秸秆混合养殖蚯蚓产物已达到完全腐熟标准, 可直接作为有机肥还田使用。

#### 参考文献:

- [1] 林嘉聪. 蚯蚓堆肥物料特性与蚯蚓-蚯蚓粪分离技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [2] Hao X, Ma X, Zeng B, et al. Efficiency and mechanism of a vermicompost additive in enhancing composting of swine manure [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, DOI: 10.21203/rs.3.rs-160415/v1.
- [3] Cui, Guangyu, Li, et al. Dynamics of bacterial and eukaryotic community associated with stability during vermicomposting of pelletized dewatered sludge [J]. *International Biodeterioration Biodegradation*, 2015, DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.07.015.
- [4] 侯素霞, 雷旭阳, 张辉, 等. 基于 EEM 与 PCR-DGGE 技术分析温度对蚯蚓堆肥处理城镇污泥的影响 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(05): 1060-1068.
- [5] 刘一凡, 杨丽娟, 王红, 等. 蚯蚓粪肥在农业生产中的应用效果及研究进展 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(02): 474-484.
- [6] 李英凯, 李佳丽, 孙溪悦, 等. 添加牛粪和园林废弃物对污泥蚯蚓堆肥的影响 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14(01): 197-208.
- [7] 马晓勇, 岳世林, 姜国均. 猪粪中添加不同比例牛粪对蚯蚓养殖的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(13): 208-211.
- [8] 冉学文, 李宁, 熊晓莉. 腐熟鸡粪养殖蚯蚓可行性及潜在问题 [J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(12): 1632-1638.
- [9] 宋雪英, 郭畔, 宋晗, 等. 利用新鲜餐厨垃圾进行蚯蚓堆肥的试验 [J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2016, 28(06): 452-456.
- [10] 史维丽, 权桂芝. 不同尾菜含量对蚯蚓生长情况的影响 [J]. *河南农业*, 2019(23): 63-64.
- [11] 白洁瑞, 刘庆峰, 于建光, 等. 玉米、三叶草秸秆和蚯蚓堆肥施用对黄河故道潮土理化性状的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(06): 18-24.
- [12] 徐雪东. 四种饵料及配比对蚯蚓生长繁殖及堆肥质量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [13] Li X, Xing M, Yang J, et al. Earthworm eco-physiological characteristics and quantification of earthworm feeding in vermifiltration system for sewage sludge stabilization using stable isotopic natural abundance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 276(jul. 15): 353-361.
- [14] Zhao Y, Zhang Y, Ge Z, et al. Effects of influent C/N ratios on wastewater nutrient removal and simultaneous greenhouse gas emission from the combinations of vertical subsurface flow constructed wetlands and earthworm eco-filters for treating synthetic wastewater. [J]. *Environmental Science Processes Impacts*, 2014, 16(3): 567-575.
- [15] Marichal R, Grimaldi M, Mathieu J, et al. Is invasion of deforested Amazonia by the earthworm *Pontoscolex corethrurus* driven by soil texture and chemical properties? [J]. *Pedobiologia*, 2012, 55(5): 233-240.
- [16] Yang Fan, Li, et al. The Maturity and CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> Emissions from Vermicomposting with Agricultural Waste. [J]. *Compost Science Utilization*, 2017, DOI: 10.1080/1065657X.2017.1329037.
- [17] 史雅静, 徐明, 王振宇, 等. 蚯蚓对菇渣中纤维素和木质素生物转化的研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(05): 1779-1785.
- [18] Atiyeh R M, Arancon N, Edwards C A, et al. Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(3): 175-180.