

## 过腹转化有机废弃物对蚯蚓及蚯蚓粪的影响研究

李妍, 石岩, 吴迪

(天津市农业科学院农业资源与环境研究所, 天津 300384)

**摘要:** 为研究污泥、腐熟秸秆和牛粪不同比例经蚯蚓过腹转化后对蚯蚓和蚯蚓粪的影响, 进行了为期 60 d 的堆肥实验, 测定了蚯蚓粪和蚯蚓的理化性状以及蚯蚓肠道细菌群落结构组成情况。结果表明, 蚯蚓能够消纳污泥、污泥+牛粪和污泥+腐熟秸秆不同配比原料, 尤其以 100% 污泥和 70% 污泥+30% 牛粪的消纳效果最好, 蚯蚓增殖率最高, 而 50% 污泥+50% 腐熟秸秆的效果最差; 当污泥中添加牛粪和腐熟秸秆均能够降低蚯蚓粪的 pH 和有机质含量, 使电导率升高; 不同原料配比影响蚯蚓肠道微生物群落结构组成, 喂食 100% 污泥的蚯蚓肠道内细菌以厚壁菌门 (*Firmicutes*) 为主; 随着原料中牛粪比例的增加, 厚壁菌门减少而变形菌门 (*Proteobacteria*)、放线菌门 (*Actinobacteria*)、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 占比逐渐增加; 添加腐熟秸秆后, 肠道内变形菌门成为绝对优势菌。

**关键词:** 蚯蚓堆肥; 污泥; 牛粪; 腐熟秸秆; 细菌多样性

**中图分类号:** X701; S141.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022.04.014

## Study on effect of transformation of organic wastes on earthworm and vermicompost

LI Yan, SHI Yan, WU Di

(The Institute of Agriculture Resources and Environmental Sciences, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different ratios of sludge, decomposed straw and cow dung on earthworms and vermicompost after the abdominal transformation of earthworms, a 60-day experiment was conducted. The physicochemical properties of earthworm and vermicompost, and the bacterial diversity of earthworm intestine were tested. The results showed that the earthworms could decompose sludge, sludge+cow dung and sludge+decomposed straw with different proportions, especially 100% sludge and 70% sludge+30% cow dung had the best absorption effect with a highest proliferation rate of the earthworm. However the worst result was occurred with 50% sludge + 50% decomposed straw. Adding cow dung and decomposed straw compost to the sludge could reduce the pH and organic matter contents of the vermicompost and increase the EC value. Different ratios of raw materials affected the composition of the intestinal microbial community of earthworms. The bacteria in the intestine of earthworms fed with 100% sludge was mainly *Firmicutes*. With the increasing of cow dung in the raw materials, the number of *Firmicutes* decreased, while the proportions of *Proteobacteria*, *Actinomycetes* and *Bacteroides* gradually increased. After adding decomposed straw to the sludge, the *Proteobacteria* in the intestinal tract became the absolute dominant bacteria.

**Keywords:** vermicompost; sewage sludge; cow dung; decomposed straw; bacteria diversity

**CLC number:** X701; S141.4

随着我国人民生活质量的极大提高,生活和农业生产所产生的有机类废弃物的规模也逐年增多,形成了巨大的环境压力。2020年6月8日,生态环境部、国家统计局、农业农村部联合发布的《第二次全国污染源普查公报》<sup>[1]</sup>显示:2017年,全国干污泥产生量 1 026.71 万 t,处置量为 1 000.59 万 t;秸秆产生量为 8.05 亿 t,秸秆利用量 5.85 亿 t;畜禽养殖排放化学需氧量 604.83 万 t。废弃资源的安全高

效利用已成为当前研究的热点之一。蚯蚓被达尔文称之为“世界上最有价值的动物”。蚯蚓作为一种养殖成本低、营养价值丰富、产量高、经济效益好的动物,具有很大的推广应用前景,在我国广大农村和城市进行蚯蚓的养殖及开发利用市场十分广阔。蚯蚓在生态系统中的功能主要表现在:1)影响所在环境中有机质分解和养分循环等关键过程;2)影响所在环境的理化性质;3)通过挖掘、吞食和

收稿日期: 2021-01-01

基金项目: 天津市科技支撑项目(20YFZCSN00740; 19YFZCN00450)

作者简介: 李妍(1979-),女,硕士。研究方向:农业废弃物处理与资源化利用。liyanweb@126.com

引用格式: 李妍,石岩,吴迪.过腹转化有机废弃物对蚯蚓及蚯蚓粪的影响研究[J].环境保护科学,2022,48(4):84-88.

排泄作用,与所在环境中的植物、微生物及其他动物相互影响<sup>[2]</sup>。在蚯蚓-微生物共生系统中,蚯蚓主要起调控作用,通过肠道消化,尤其可加速污染物的降解,影响系统中微生物量、活性及群落结构<sup>[3-4]</sup>。蚯蚓堆肥是利用蚯蚓和微生物,将有机类废弃物进行快速有效地分解并将其转换成腐殖质的一种生态环境友好的堆肥技术,被应用于污泥、畜禽废弃物和秸秆等废弃物治理领域<sup>[5-7]</sup>,可有效降低固体废弃物对环境带来的危害和风险<sup>[8]</sup>。在蚯蚓堆肥过程中为保证其生长与繁殖环境,常添加各种物料来改善污泥等废弃物的理化性质,主要采用的物料有牛粪、生物炭、水稻壳、粉煤灰和甘蔗渣等<sup>[9-12]</sup>,还有的采用沸石、膨润土等化学调理剂<sup>[13]</sup>。现有参考文献常用牛粪驯化养殖后的蚯蚓来开展不同物料配比消纳试验研究,而利用污泥驯化后的蚯蚓作为试验研究对象较少提及。因此,本研究以污泥驯化后的大平2号蚓作为供试蚯蚓,探讨了腐熟秸秆、牛粪和污泥的不同配比对蚯蚓和蚯蚓粪理化性质、蚯蚓生长繁殖和蚯蚓肠道群落结构组成的影响,为蚯蚓堆肥技术提供技术参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试蚯蚓为经喂食污泥驯化的大平2号,取自

天津市某蚯蚓养殖场;污泥取自天津市静海区某污水处理厂;牛粪取自天津市武清区某奶牛养殖场;腐熟秸秆是由蔬菜尾菜和玉米秸秆经高温好氧发酵过程,经二次腐熟后过2 mm筛制得,取自天津市现代农业创新基地废弃物资源化试验站。实验装置为顶部无盖、底部无孔洞蓝色周转箱(670 mm×420 mm×175 mm)以利于蚯蚓的全量收集。

### 1.2 试验日期及地点

本次试验于2019年7月~2020年3月在天津市现代农业创新基地进行。试验结束后取样,在实验室进行检测分析。

### 1.3 试验方法

将3种物料按照比例(质量分数)将牛粪和腐熟秸秆分别与污泥进行混合,每箱加入30.00 kg物料,用去离子水使混合物料含水率达到60%,每个处理重复3次。向每个处理加入大小均匀总质量1.00 kg带有明显环带的蚯蚓,物料比例见表1。

将所有装置整齐摆放在温室避光处,进行为期60 d的堆肥处理。实验期间控制温度在(22±5)℃,并且定期向物料喷水,保证含水率在60%左右。培养结束后,把所有蚯蚓从混合物中分离出来,观察生长状况,统计蚯蚓收集量,称重,并测定相关指标。混合后不同处理的物料理化性状,见表2。

表1 不同处理原料配比

处理1 (T1)	处理2 (T2)	处理3 (T3)	处理4 (T4)	处理5 (T5)
100%污泥	50%污泥+50%腐熟秸秆	50%污泥+50%牛粪	70%污泥+30%牛粪	70%污泥+30%腐熟秸秆

表2 不同处理原物理化性状

处理指标	总养分/%	有机质/%	pH	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
T1	7.19	44.23	7.14	1 679
T2	4.44	53.17	7.50	3 740
T3	5.79	41.10	7.95	4 570
T4	6.77	44.23	7.14	1 679
T5	5.44	41.23	8.40	3 600

### 1.4 检测指标及数据处理

原料、蚯蚓、蚯蚓粪的有机质、总养分(N%+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>%+K<sub>2</sub>O%)、pH和电导率等测定采用农业化学常规分析方法<sup>[14]</sup>。粪大肠菌群数测定采用多管发酵法,蛔虫卵死亡率测定采用滤膜法。蚯蚓肠道微生物群落结构组成采用百迈客生物科技公司的高通量测序技术进行测定分析。试验结果采用Excel

进行数据处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 蚯蚓粪理化性状分析

蚯蚓堆肥过程结束后蚯蚓粪的理化性状,见表3。T1~T5蚯蚓粪的容重在0.49~0.55 g/cm<sup>3</sup>之间,粪大肠菌群值和蛔虫卵死亡率均达到《有机肥料:NY/T525—2021》标准。对比表2、表3数据可知,经蚯蚓过腹转化后,蚯蚓粪只有T1、T4总养分含量增加,T2、T3和T5总养分含量均低于初始值,且以T5降低最多。DOMINGUEZ et al<sup>[15]</sup>研究表明,原料的养分含量、配比会影响蚯蚓的进食和消化,促使蚯蚓的粪便、黏液、体液和酶等进入到物料中,并加速养分矿化,从而使蚯蚓粪养分增加,反之则降低。与初始值相比,不同处理组的蚯蚓粪有

机质、pH 均呈下降趋势,且 pH 后期接近中性,而电导率均呈升高趋势。KHARRAZI et al<sup>[16]</sup> 认为蚯蚓在堆肥过程中通过自身活动加速了有机质的分解与矿化,在此过程中,促进了原料中矿物盐和无机离子的释放,以及形成一些中间产物,从而会导致有机质降低,pH、电导率升高。NDEGWA et al<sup>[17]</sup> 研究认为,蚯蚓粪 pH 的变化与氮、磷矿化和产生

有机酸有关。本试验蚯蚓粪的有机质、pH 和电导率的降幅与增幅变化并不规律,可能是由于原料理化性状差异所导致。总体来看,蚯蚓对纯污泥(T1)的过腹转化使有机质降低最多,pH 降幅最大,蚯蚓粪的养分含量增加最多。与 T1 纯污泥组对比,秸秆和牛粪的添加不利于蚯蚓生物过腹转化,其中添加秸秆的处理养分转化效果最差。

表 3 不同处理蚯蚓粪理化性状

处理指标	容重/g·cm <sup>-3</sup>	总养分/%	有机质/%	pH	电导率/μS·cm <sup>-1</sup>	粪大肠菌群数/个·g <sup>-1</sup>	蛔虫卵死亡率/%
T1	0.55±0.02	7.95±0.16	41.05±2.66	6.18±0.06	3 230±5.66	≤100	100
T2	0.49±0.03	4.37±0.22	47.45±1.74	6.86±0.09	4 110±8.29	≤100	100
T3	0.54±0.01	5.71±0.09	34.95±0.96	7.00±0.14	6 130±9.57	≤100	100
T4	0.54±0.06	7.52±0.87	39.92±1.32	6.32±0.12	6 550±3.28	≤100	100
T5	0.55±0.03	5.36±1.00	34.12±1.11	7.59±0.18	5 250±6.46	≤100	100

注:表中数值为平均值±样本标准偏差。

## 2.2 蚯蚓理化性状分析

不同处理组所收集的蚯蚓体含水率在 78.36%~79.37%,差异不大。养分变化范围在 11.76%~12.31%,pH 5.40~6.05,添加秸秆的处理组(T2、T5)>添加牛粪处理组(T3、T4)>纯污泥处理(T1)。蚯蚓收集质量从高到低依次是 T1>T4>T5>T3>T2,T1、T4 蚯蚓体收集量最多,分别达到了 3.11 和 3.07 kg,相较于初始蚯蚓投放量,增量超过了 2 倍。蚯蚓个体的长度和直径也优于其他处理,长度分别达到了 6.01 和 5.43 cm,蚯蚓体直径也分别达到了 3.16 和 2.83 mm,见表 4。

LIM et al<sup>[18]</sup> 和蔡玉琪等<sup>[19]</sup> 认为利用新鲜污泥堆肥效果不佳。李英凯等<sup>[20]</sup> 研究表明高比例的污泥会对蚯蚓的生长起到抑制作用,甚至发生死亡现象,而从本试验 5 组不同处理得出相反结果,以纯污泥饲养的蚯蚓收集量最高。可能是由于投放的

蚯蚓经过纯污泥驯化,已适应污泥的理化性状,纯污泥和高比例的污泥(T1、T4)配方中的养分及环境条件适宜蚯蚓的生长与繁殖,而其他处理可能由于添加了牛粪和腐熟秸秆,改变了原有食源性状,导致蚯蚓过腹转化速率降低,繁殖能力下降。刘佳等<sup>[21]</sup> 认为只有当可利用、易分解的物质被完全降解后,蚯蚓才会利用较难降解的有机物作为营养物质,如纤维素含量较高的有机物,因此添加腐熟秸秆对蚯蚓的繁殖影响较大,蚯蚓繁殖能力最低。

## 2.3 蚯蚓肠道微生物群落结构组成变化

蚯蚓肠道是蚯蚓堆肥发生的主要场所<sup>[22]</sup>。本次试验对收集的蚯蚓体进行肠道剥离,分析了不同处理的蚯蚓肠道中微生物种群的组成,考察不同食源对蚯蚓肠道内微生物群落组成的影响。

2.3.1 细菌 OTU 分析 在 97% 的相似度水平下,得到了每个样品的 OTU 个数,见图 1。

表 4 不同处理蚯蚓体理化性状

处理指标	含水率/%	蚯蚓质量/kg	蚯蚓长度/cm	蚯蚓直径/mm	总养分/%	pH	电导率/μS·cm <sup>-1</sup>
T1	78.94±0.67	3.11±0.05	6.01±0.12	3.16±0.03	11.76±0.13	5.40±0.02	4 990±7.95
T2	78.80±0.42	1.77±0.09	5.29±0.14	1.90±0.04	12.23±0.09	6.05±0.01	6 200±4.32
T3	78.53±0.85	2.10±0.10	5.22±0.09	2.04±0.07	12.03±0.11	5.47±0.03	6 810±8.61
T4	79.37±0.39	3.07±0.08	5.43±0.17	2.83±0.09	12.06±0.08	5.53±0.01	4 190±5.6
T5	78.36±0.66	2.21±0.09	5.08±0.07	2.01±0.02	12.31±0.16	5.75±0.04	4 300±6.27

注:表中数值为平均值±样本表中偏差。蚯蚓长度和直径为自然状态下统一标准测量。



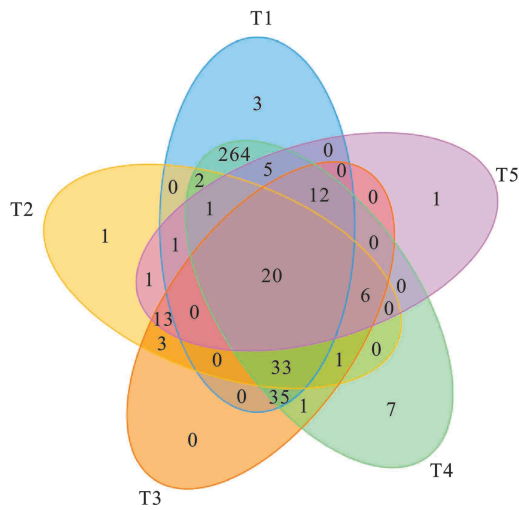


图 1 OTU Venn 图

图 1 展示了 5 个处理之间共有、特有 OTU 数目,表现出样品间 OTU 的重合情况。特有 OTU 数  $T4 > T1 > T2 = T5 > T3$ , 而 T2、T3 和 T5 的 OTU 数目均低于 1 个。

2.3.2 Alpha 多样性指数分析 使用 Mothur(version v.1.30)软件,对样品 Alpha 多样性指数进行评估。各样品 Alpha 多样性指数值统计,见表 5。

表 5 Alpha 多样性指数统计

处理指标	OTU	Chaol	Shannon	Coverage
T1	736	738.333 3	4.647 4	0.999 8
T2	82	230.2	1.194 1	0.999 1
T3	484	561.153 8	1.776	0.997 9
T4	747	757.111 1	5.530 7	0.999 6
T5	60	249.0	1.737 7	0.999 4

注: Chaol 为丰富度估计量; Shannon 为香农-威纳多样性指; Coverage 为覆盖深度。

表 5 可知,测序覆盖深度均在 0.99 以上,说明测序结果代表了样本中微生物的真实情况。Chaol 指数常用来估计物种总数,即指数越大菌群丰度越高。Chaol 指数  $T4 > T1 > T3 > T5 > T2$ , 表明 T4、T1 蚯蚓肠道细菌物种丰度要高于 T3、T5 和 T2。Shannon 指数指示了样品的细菌多样性程度,数值越高,表明细菌群落的物种多样性越高,分布越均匀。5 个处理的 Shannon 指数从高到低依次为  $T4 > T1 > T3 > T5 > T2$ 。T4 对蚯蚓肠道的细菌的物种丰度和物种多样性高于其他处理,而以 T2 喂食蚯蚓则最低,这与张莹<sup>[23]</sup>的研究结果基本一致。

2.3.3 细菌多样性分析 蚯蚓肠道菌群对蚯蚓稳定自身身体机能、参与元素循环以及重金属、农药

等污染物的降解转化发挥着非常重要的作用<sup>[24]</sup>。门水平上丰度水平前十的物种,见图 2。

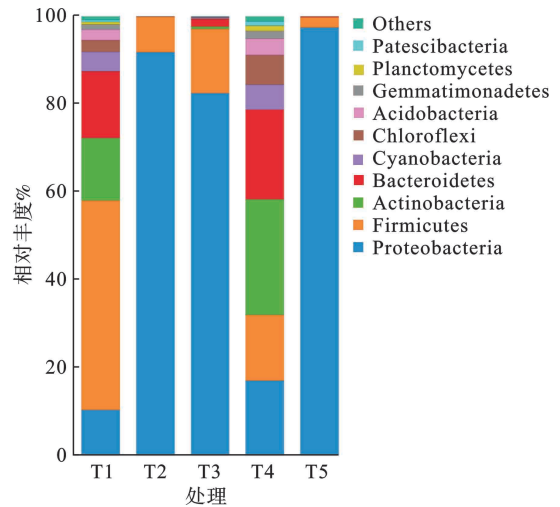


图 2 门水平上的物种分布

图 2 可知,5 个处理的主要优势细菌为变形菌门(*Proteobacteria*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和蓝细菌门(*Cyanobacteria*)。黄魁等<sup>[24]</sup>的研究结果认为以城市污泥为原料的蚯蚓肠道主要以变形菌门为主,可能由于厚壁菌门参与代谢活动增强,因而成为肠道内优势物种<sup>[25]</sup>。随着原料中牛粪比例的增加,厚壁菌门减少,而变形菌门、放线菌门和拟杆菌门占比逐渐增加,这与 YASIR et al<sup>[26]</sup>的研究结果一致。当原料中添加了不同比例的腐熟秸秆,蚯蚓肠道内变形菌门占据绝对优势,其次为厚壁菌门,变形菌门随着腐熟秸秆添加量的增加而略有减少。有研究表明,蚯蚓能够通过增加群落生物量来增加纤维素的降解效率<sup>[27]</sup>,蚯蚓消化道微生物和分泌的黏液、酶也能够促进纤维素的降解<sup>[28-30]</sup>。邓艳芹等<sup>[31]</sup>认为蚯蚓体表液对纤维素降解菌抑制作用较小而肠液促进作用较大时,该纤维素降解菌株在蚯蚓肠道内数量较多。从本研究的结果来看,蚯蚓在食用添加腐熟秸秆的原料后,蚯蚓肠道内变形菌门为绝对优势菌,有可能主要为纤维素降解菌,这类菌及某些因素可能抑制了其他菌的生存,导致肠道内生态失调,引起蚯蚓肠道菌群处于失衡状态,而导致这一结果的原因还有待进一步研究。

### 3 结论

(1) 蚯蚓对 5 种不同配比的原料能够进行过腹生物转化,尤其以 100% 污泥和 70% 污泥+30% 牛粪的消纳效果最好。污泥中添加牛粪和腐熟秸秆

均能够降低蚯蚓粪的有机质和 pH,而使电导率升高。蚯蚓过腹转化纯污泥和 70% 污泥+30% 牛粪能够使蚯蚓粪总养分含量增加。

(2) 5 个处理的蚯蚓收集量以蚯蚓采食 100% 污泥后增殖量最高, 50% 污泥+50% 腐熟秸秆蚯蚓则最低。在污泥中添加一定比例的牛粪和腐熟秸秆, 蚯蚓均能够繁殖, 添加牛粪的处理要高于添加腐熟秸秆的处理, 且投加腐熟秸秆比例达到 50% 效果最差, 因此添加腐熟秸秆不宜比例过大。

(3) 添加牛粪和腐熟秸秆会引起蚯蚓肠道微生物群落组成的变化。70% 污泥+30% 牛粪处理 OTU 数高于其他处理, 而 50% 污泥+50% 腐熟秸秆处理则最低。喂食 100% 污泥的蚯蚓肠道内细菌以厚壁菌门为主; 随着原料中牛粪比例的增加, 厚壁菌门减少而变形菌门、放线菌门和拟杆菌门占比逐渐增加; 而添加腐熟秸秆的原料后, 肠道内变形菌门成为绝对优势菌。

## 参考文献

- [1] 生态环境部办公厅. 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content\\_5518391.htm?Tdsourcetag=sptim\\_aiomsg](http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm?Tdsourcetag=sptim_aiomsg).
- [2] BLOUIN M, HODSON M E, DELGADO E A, et al. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(2): 161 – 182.
- [3] ZHAO L M, WANG Y Y, YANG J, et al. Earthworm-microorganism interactions: A strategy to stabilize domestic wastewater sludge[J]. *Water Research*, 2010, 44(8): 2572 – 2582.
- [4] VIVAS A, MORENO B, GARCIA-RODRIGUEZ S, et al. Assessing the impact of composting and vermicomposting on bacterial community size and structure, and microbial functional diversity of an olive-mill waste[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(3): 1319 – 1326.
- [5] 周东兴, 李晶, 宁玉翠, 等. 蚯蚓堆制猪粪过程中 Cu、Zn 形态变化与关键酶活性间关系的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1349 – 1356.
- [6] LV B Y, ZHANG D, CUI Y X, et al. Effects of C/N ratio and earthworms on greenhouse gas emissions during vermicomposting of sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 408 – 414.
- [7] 王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 等. 蚯蚓作用下不同 C/N 秸秆还田对土壤 CO<sub>2</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1908 – 1915.
- [8] 金波, 韦建玉, 屈冉. 蚯蚓与微生物、土壤重金属及植物的关系[J]. *土壤通报*, 2009, 40(2): 439 – 442.
- [9] LIM S L, WU T Y, SIM E Y S, et al. Biotransformation of rice husk into organic fertilizer through vermicomposting[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 41: 60 – 64.
- [10] WANG L M, ZHANG Y M, LIAN J J, et al. Impact of fly ash and phosphatic rock on metal stabilization and bioavailability during sewage sludge vermicomposting[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 281 – 287.
- [11] SUTHAR S. Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash using epigeic eisenia fetida (oligochaeta)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(1): 199 – 206.
- [12] SHI Y, GE Y, CHANG J, et al. Garden waste biomass for renewable and sustainable energy production in China: Potential, challenges and development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 432 – 437.
- [13] 蔡琳琳, 李素艳, 康跃, 等. 沸石、膨润土和过磷酸钙对蚯蚓堆肥园林绿化废弃物腐熟效果的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(2): 299 – 309.
- [14] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] DOMINGUEZ J, BRIONES M J I, MATO S. Effect on the diet on growth and reproduction of Eisenia andrei (Oligochaeta, Lumbricidae)[J]. *Pedobiologia*, 1997, 41(6): 566.
- [16] KHARRAZI S M, YOUNESI H, ABEDINI-TORGHABEH J. Microbial biodegradation of waste materials for nutrients enrichment and heavy metals removal: An integrated composting-vermicomposting process[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 92: 41 – 48.
- [17] NDEGWA P M, THOMPSON S A, DAS K C. Effect of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71(1): 5 – 12.
- [18] LIM S L, LEE L H, WU T Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 111: 262 – 278.
- [19] 蔡玉琪, 蔡树美, 倪圣亚, 等. 蚯蚓对秸秆-污泥混合物的消解转化效果[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1284 – 1287.
- [20] 李英凯, 李佳丽, 孙奚悦, 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(1): 197 – 208.
- [21] 刘佳, 李婧男, 文科军, 等. 不同堆肥条件下园林废弃物中有机碳物质的动态变化[J]. *北方园艺*, 2012(24): 174 – 178.
- [22] 庞博文, 李永梅, 徐昆龙, 等. 蚯蚓堆肥影响土壤健康和作物生长的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(12): 29 – 35.
- [23] 张莹. 污泥堆肥中生化特性、重金属转化及微生物多样性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 31.
- [24] 黄魁, 夏慧, 陈景阳. 蚯蚓对城市污泥蚯蚓堆肥过程中微生物特征变化的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(8): 3146 – 3152.
- [25] 杨萍萍, 尹华, 彭辉, 等. 外接种种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3536 – 3543.
- [26] YASIR M, ASLAM Z, KIM S W, et al. Bacterial community composition and chitinase gene diversity of vermicompost with antifungal activity[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(19): 4396 – 4403.
- [27] AIRA M, MONROY F, DOMINGUEZ J. C to N ratio strongly affects population structure of Eisenia fetida in vermicomposting systems[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: 127 – 131.
- [28] 陈玉香, 赵婷婷, 姚月, 等. 蚯蚓黏液促进玉米秸秆分解及其机理分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 234 – 240.
- [29] CARLILE M J, WATKINSON S C, GOODAY G W. Fungal cells and vegetative growth. The Fungi (Second Edition)[M]. London: Academic Press: 85 – 184.
- [30] 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(5): 1779 – 1785.
- [31] 邓艳芹, 吕建平, 罗璇. 蚯蚓体液对纤维素降解菌生长的影响[J]. *贵州师范学院学报*, 2017, 33(12): 9 – 12.