

王 聪,叶小梅,奚永兰,等. 蚯蚓梯级利用餐厨垃圾及黑水虻虫粪研究[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):242-247.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.20.039

# 蚯蚓梯级利用餐厨垃圾及黑水虻虫粪研究

王 聪,叶小梅,奚永兰,杜 静,孔祥平,王 莉,张应鹏

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/废弃物厌氧处理与昆虫转化研究室,江苏南京 210014)

**摘要:**为解决有机废弃物预处理后依然存在高盐分、腐熟不完全以及存在有害物质等问题,探究利用蚯蚓堆肥处理餐厨垃圾与黑水虻虫粪的可行性。试验利用蚯蚓处理餐厨垃圾与黑水虻虫粪,对不同处理的蚯蚓生物学性状以及物料养分的变化情况进行比较分析。结果表明,蚯蚓堆肥处理后,处理组蚯蚓的日增质量倍数以及日增殖倍数均显著低于对照组( $P < 0.05$ );2种物料的 pH 值趋于中性,并且电导率显著下降( $P < 0.05$ );餐厨垃圾和黑水虻虫粪的有机质、铵态氮含量等均显著下降( $P < 0.05$ );总磷、总钾、腐殖酸的含量均显著上升( $P < 0.05$ )。黑水虻虫粪的总氮含量上升,而餐厨垃圾的总氮含量下降;黑水虻虫粪和餐厨垃圾的种子发芽指数分别为 86.67%、81.33%。通过对物料腐殖酸与种子发芽指数的测定,表明 2 种物料经过蚯蚓处理后,可用于农。

**关键词:**蚯蚓堆肥;梯级利用;黑水虻虫粪;餐厨垃圾;物料养分

**中图分类号:** S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)20-0242-06

随着经济的发展以及人民生活水平的提高,在社会生产、流通以及消费的过程中,生活性有机废弃物(餐厨垃圾等)、农业生产性有机废弃物(畜禽粪便等)的产生量增多,严重影响生态环境以及居民的身体健康<sup>[1]</sup>。如何以无害化的方式对各种有机废弃物进行针对性处理是人们关注的重点之一。

有机废弃物的增加,导致处理难题日益凸显。

收稿日期:2021-02-22

基金项目:江苏现代农业产业技术体系专项资金[编号:JATS(2020)391]。

作者简介:王 聪(1992—),男,江苏南京人,硕士,研究实习员,主要从事废弃物昆虫高效转化研究。E-mail:823658947@qq.com。

通信作者:叶小梅,博士,研究员,主要从事养殖场污染控制及有机废弃物资源化利用研究。E-mail:yexiaomei610@126.com。

其中,餐厨垃圾的养分含量高,是城市生活垃圾中有机废弃物的主要成分,也是一种可再利用的有机资源。目前所采用的餐厨垃圾处理手段为焚烧法、填埋法、堆肥法、厌氧处理等,但都存在不同程度的不足,比如处理之后依然存在高盐分、腐熟不完全以及含有有害物质(重金属)等问题,影响了餐厨垃圾的高效利用<sup>[2-5]</sup>。利用黑水虻等资源型昆虫进行有机废弃物处理,可以减少工厂能耗以及污染物排放等问题<sup>[6-7]</sup>。但黑水虻处理后的残留物生化稳定性较低,依旧存在水分含量高、氨气等恶臭气体排放量大、堆体易发酵发热等缺点<sup>[8-9]</sup>。若将黑水虻虫粪直接作为有机肥施用于农田,容易在土壤环境中再次降解与发酵,从而引起土壤产热,导致作物根系损伤<sup>[10-11]</sup>。

[7]罗永忠,成自勇,郭小芹. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征[J]. 生态学报,2011,31(1):221-229.

[8]邢兰芹,姚众众. 江苏省 1971—2010 年气候生产潜力变化特征[J]. 水土保持通报,2018,222(1):252-255.

[9]卢玢宇,杨 波,裴占江,等. 黑龙江省气候生产潜力时空演变特征研究[J]. 生态环境学报,2017,26(10):1659-1664.

[10]张 波,谷晓平,古书鸿. 1961—2015 年贵州省气候生产潜力估算及趋势分析[J]. 中国农业资源与区划,2018,242(2):114-122.

[11]刘大锋,李海花. 1961—2011 年阿勒泰地区的气候生产潜力变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,38(2):25-28.

[12]张 娟,李剑萍,王誉陶,等. 西北干旱地区气候变化及其对草地生产潜力的影响[J]. 生态科学,2020,147(3):182-192.

[13]李晓东,胡爱军,祁栋林,等. 近 53 年青海省气候变化与粮食产量及气候生产潜力特征[J]. 草业科学,2015,264(7):1061-1068.

[14]张嘉琪,任志远. 1977—2010 年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势[J]. 资源科学,2014,36(10):2103-2112.

[15]王发科,雷玉红,韩廷芳,等. 柴达木盆地气候生产潜力变化及其敏感性分析[J]. 青海草业,2019,112(4):37-41,28.

[16]魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:37-59.

[17]汤国安,杨 昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2012.

[18]李 林,李红梅,申红艳,等. 青藏高原气候变化的若干事实及其年际振荡的成因探讨[J]. 冰川冻土,2018,40(6):1079-1089.

蚯蚓堆肥处理是一种传统方式和生物方式相结合的新手段,因其绿色环保、可持续性被人们所关注<sup>[12]</sup>。如今,人们采用的蚯蚓是一种繁殖能力强、便于人工养殖的一类赤子爱胜蚓,即大平 2 号。通过这种堆肥处理方式可以实现更为良好的综合效益。蚯蚓利用其消化道分泌的蛋白酶、脂肪酶等多种酶类与环境微生物协同作用加速分解和转化有机物质,对有机废弃物进行无害化处理。蚯蚓粪同样可以作为优质的有机肥料,而蚯蚓自身也可以通过提取手段制作成生物制剂等<sup>[13-14]</sup>。本研究通

过研究蚯蚓梯级转化有机废弃物的养分变化情况,以期为进一步的工程实践提供科学的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地点为江苏省农业科学院农业资源与环境研究所内,时间为 2020 年 3—5 月。试验材料有赤子爱胜蚓(*Eisenia fetid*)、新鲜牛粪、黑水虻虫粪、餐厨垃圾(高温发酵 24 h)等。废弃物的初始理化性质见表 1。

表 1 有机废弃物初始理化性质

试验材料	EC 值 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH 值	有机质含量 (%)	总氮含量 (%)	总钾含量 (%)	总磷含量 (%)
新鲜牛粪	248.33	8.06	41.27	1.63	2.31	1.58
餐厨垃圾	384.33	4.81	53.78	5.48	2.89	3.01
黑水虻虫粪	168.67	6.83	38.85	1.51	2.18	2.11

### 1.2 试验方法

本次试验过程中,采用上口尺寸为 30 cm,下底 22 cm,高度 25 cm 的塑料花盆,在花盆底部设置透水孔。花盆底部放置细纱网,防止蚯蚓逃逸。加入 75% 含水量的菜园土于细纱网上,厚度约为 8 cm,接种 10 条生长均一(蚯蚓质量大约为 0.28 g/条)、具有生殖环带的蚯蚓。将粗纱网(孔径 6 mm)置于菜园土上方,以便分离物料和蚯蚓自由穿梭取食。以新鲜牛粪为对照组,黑水虻虫粪以及餐厨垃圾为处理组。将 75% 含水量的物料(干物质量为 200 g)置于粗纱网上,每组重复 3 次,试验周期为 40 d。

### 1.3 测试指标

蚯蚓日增质量倍数 = (试验完成后蚯蚓质量 - 初始质量) / (初始质量 × 堆制时间);日增值倍数 = (试验完成后蚯蚓数量 - 初始数量) / (初始数量 × 堆制时间)。

采用 105 ℃ 烘干法测定含水率;采用玻璃电极法测定 pH 值;采用电导仪测定电导率(EC 值);采用重铬酸钾外加热法测定总有机质相对含量;采用凯氏定氮法测定总氮相对含量;采用钒钼黄比色法测定总磷相对含量;采用火焰光度计法测定总钾的相对含量;通过 Skalar San ++ 连续流动分析仪装置测定铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )与硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )相对含量;利用总有机碳分析仪(TOC)仪测定腐殖酸含量;种子发芽率:选取 25 粒小白菜种子在恒温培养箱中培养 96 h 测定发芽指数(GI),由以下公式计算:

$$GI = (\text{堆肥浸提液种子的发芽率} \times \text{根长均值}) / (\text{蒸馏水种子的发芽率} \times \text{根长均值}) \times 100\%$$

### 1.4 数据分析

数据通过 SPSS 23 工具进行处理,同时完成显著性差异分析。借助 OriginPro 2018 完成绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 物料以及蚯蚓生物学性状的变化情况

由表 2 可知,经过 40 d 蚯蚓处理后,对照组干物质减少了 54.59%,餐厨垃圾和黑水虻虫粪处理组干物质分别减少了 48.22%、39.49%,与对照组有显著性差异( $P < 0.05$ )。餐厨垃圾与黑水虻虫粪处理组中蚯蚓生物量分别增加了 29.61%、40.63%,而对照组中蚯蚓生物量增加了 70.53%,与处理组有显著性差异( $P < 0.05$ )。对照组的日增殖倍数为 0.013 5,而餐厨垃圾与黑水虻虫粪处理组日增殖倍数分别为 0.006 3、0.007 3。处理组的生物量、日增质量倍数、日增殖倍数均低于对照组。餐厨垃圾与黑水虻虫粪经过预处理,使得可利用养分含量低于对照组,不能满足蚯蚓正常生长与繁殖的营养需求<sup>[15]</sup>。

### 2.2 蚯蚓处理对有机废弃物理化性质的影响

2.2.1 蚯蚓处理对物料电导率的影响 由图 1 可知,40 d 后与试验前相比,对照组 EC 值从 248.33  $\mu\text{S}/\text{cm}$  降低到 148.33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,下降了 40.27%。餐厨垃圾和黑水虻虫粪处理组的 EC 值分别下降了 35.29%、25.85%,电导率减少量与对

表 2 蚯蚓生物学性状变化的情况

处理	干物质消耗量 (g)	蚯蚓生物量 (g)	日增质量倍数 (倍)	蚯蚓数量 (条)	日增殖倍数 (倍)
接种前	600.00	6.72		24	
新鲜牛粪	327.53 ± 1.643a	11.46 ± 1.021a	0.017 6 ± 0.002 1a	37 ± 0.019a	0.013 5 ± 0.000 1a
餐厨垃圾	289.32 ± 1.20 1b	8.71 ± 0.982b	0.007 4 ± 0.001 4b	30 ± 0.023b	0.006 3 ± 0.000 2b
黑水虻虫粪	236.94 ± 1.311b	9.45 ± 1.129b	0.003 5 ± 0.002 3b	31 ± 0.001b	0.007 3 ± 0.000 1b

注:数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

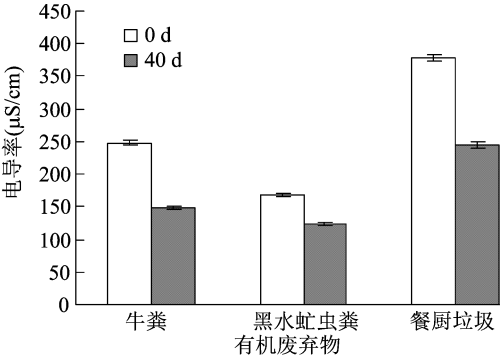


图1 有机废弃物电导率变化情况

对照组相比有显著性差异( $P < 0.05$ )。因为在蚯蚓堆制过程中,蚯蚓通过自身消化系统富集物料中的盐离子,也可以与微生物对盐离子发生络合作用,因此各试验组的 EC 值降低<sup>[16]</sup>。

2.2.2 蚯蚓处理对物料 pH 值的影响 由图 2 可知,经过蚯蚓处理后,餐厨垃圾和黑水虻虫粪处理组的 pH 值分别由 4.81、6.83 上升到 7.14、7.26。对照组的 pH 值由 8.06 降低至 7.43。试验结束后,各组物料环境中 pH 值逐渐转变为中性。因为物料的通气性状况因为蚯蚓的生理活动而得到改善,这样的环境对硝化细菌的生长和繁殖起到了促进作用,促使铵态氮往更稳定的硝态氮转化,使得物料环境趋于中性;并且蚯蚓和微生物在转化物料的同时产生了大量的  $\text{CO}_2$  和其他小分子有机酸性物质,促使物料 pH 值改变<sup>[17]</sup>。

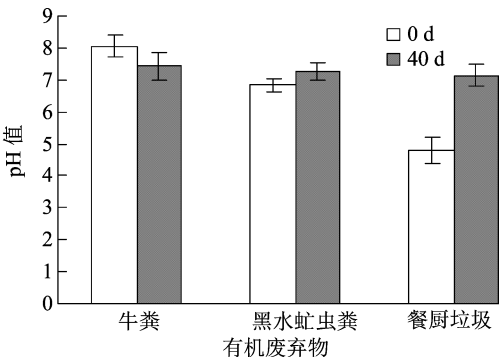


图2 物料 pH 值变化的情况

2.2.3 蚯蚓处理对物料有机质含量的影响 由图 3 可知,经过蚯蚓处理后,餐厨垃圾和黑水虻虫粪的有机质含量分别由 53.78%、38.85% 下降到 37.67%、28.52%。而对照组的有机质含量从 41.27% 下降到 22.64%,下降了 45.14%,其有机质含量减少量与处理组相比有显著性差异( $P < 0.05$ )。因为一方面在转化过程中蚯蚓与微生物通过利用有机质满足自身的生长繁殖需求,另一方面蚯蚓和微生物发生协同反应,促进了有机物质的矿化过程,导致一些有机质通过  $\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{CO}_2$  的形式被消耗,所以有机质的相对含量下降<sup>[18-19]</sup>。

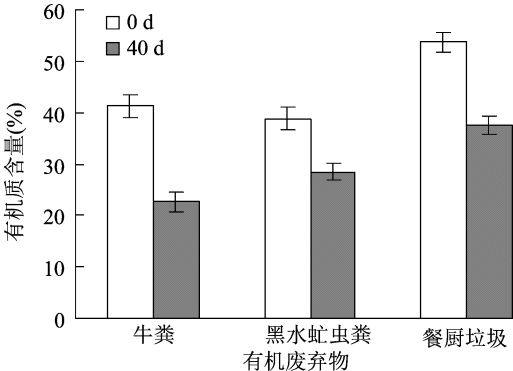


图3 物料有机质含量变化的情况

2.2.4 蚯蚓处理对物料总氮含量的影响 由图 4 可知,餐厨垃圾处理组的总氮相对含量由 5.48% 下降至 4.37%,而黑水虻虫粪组的总氮相对含量由 1.51% 上升至 2.09%。对照组总氮相对含量由 1.63% 上升至 2.36%。转化后总氮含量升高的原因可能有以下几种:物料中  $\text{NH}_4^+$  在硝化细菌的作用下被氧化成更加稳定的  $\text{NO}_3^-$  减少氮损失,并且蚯蚓和微生物加速了物料有机质的矿化分解速度,有机碳以  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的形式损失,引起了物料总量的减少。氮损失量小于总物料总量的减少量,所以使得氮的相对含量升高;蚯蚓堆制产物中总氮相对含量的增加主要以蚯蚓黏液、含氮排泄物等方式增加<sup>[20-21]</sup>。而餐厨垃圾预处理后未完全腐熟,在蚯蚓堆制过程中有大量铵态氮的释放,导致餐厨垃圾处

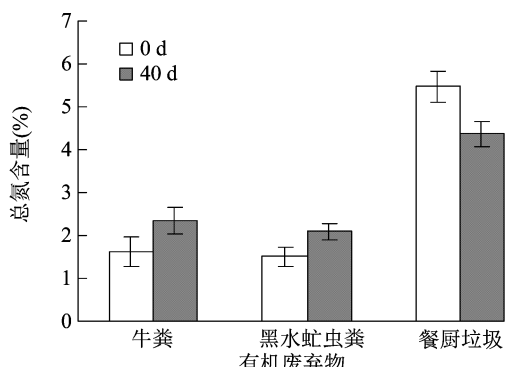


图4 物料总氮含量变化的情况

理组的总氮相对含量降低。

#### 2.2.5 蚯蚓处理对物料总磷和总钾含量的影响

由图 5、图 6 可知,蚯蚓处理 40 d 后,餐厨垃圾与黑水虻虫粪的总磷含量分别从 3.01%、2.11% 上升到 3.23%、2.19%,对照组的总磷含量从 1.58% 上升至 1.72%。餐厨垃圾与黑水虻虫粪的总钾含量分别从 2.89%、2.18% 上升至 3.02%、2.46%,对照组的总钾含量从 2.31% 上升至 2.59%。蚯蚓转化过程中因为有机质的矿化和物料总量的减少,使物料中总磷跟总钾的相对含量升高。

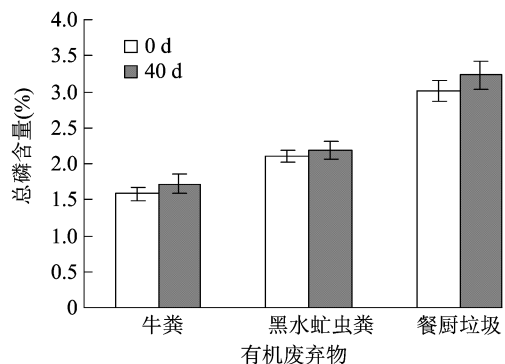


图5 物料总磷含量变化的情况

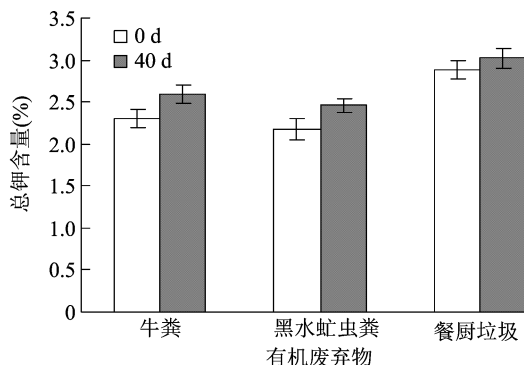


图6 物料总钾含量变化的情况

#### 2.2.6 蚯蚓处理对物料铵态氮与硝态氮的影响

由图 7、图 8 可知,蚯蚓处理后物料中的铵态氮含量下降,黑水虻虫粪与餐厨垃圾的铵态氮含量分别从

0.68%、2.18% 下降至 0.26%、1.17%,分别下降了 61.76%、46.33%,铵态氮含量减少量与对照组相比均有显著性差异( $P < 0.05$ )。各组物料中硝态氮的含量明显上升,黑水虻虫粪的硝态氮含量由 0.74% 上升至 1.38%,上升了 86.49%,餐厨垃圾的硝态氮含量由 1.84% 上升至 2.31%,上升了 25.54%,均与对照组有显著性差异( $P < 0.05$ )。因为蚯蚓的生理活动可以促进物料的硝化作用,使得硝化细菌的活性和数量增加,从而促进氮元素的矿化,促使更多的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

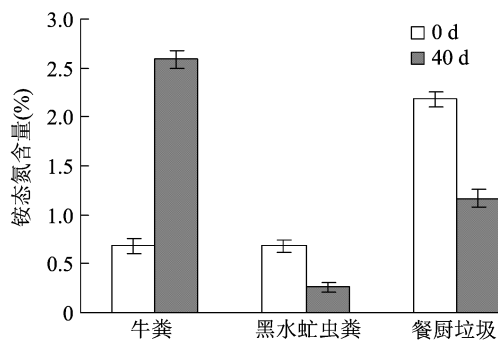


图7 物料铵态氮含量的变化

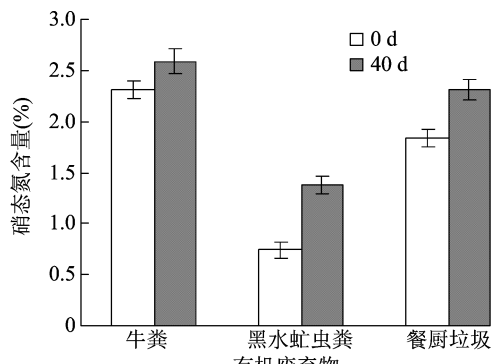


图8 物料硝态氮含量的变化情况

#### 2.2.7 蚯蚓处理对物料腐殖酸的影响

图 9、图 10、图 11 反映了蚯蚓处理过程中物料的总腐殖酸、胡敏酸以及富里酸含量的变化过程。经过蚯蚓 40 d 堆制,黑水虻虫粪的总腐殖酸和胡敏酸含量分别为 47.32、26.79 mg/kg,富里酸含量为 16.23 mg/kg。餐厨垃圾的总腐殖酸和胡敏酸含量分别为 67.64、33.18 mg/kg,富里酸含量为 25.54 mg/kg。40 d 后对照组总腐殖酸与胡敏酸的含量与 0 d 相比分别上升了 19.89%、38.41%,对照组富里酸含量下降了 26.06%。

#### 2.2.8 种子发芽指数变化的情况

通过蚯蚓 40 d 堆制后,对照组的发芽指数提高到 89.33%。黑水虻虫粪的种子发芽指数从 18.67% 上升至 86.67%,

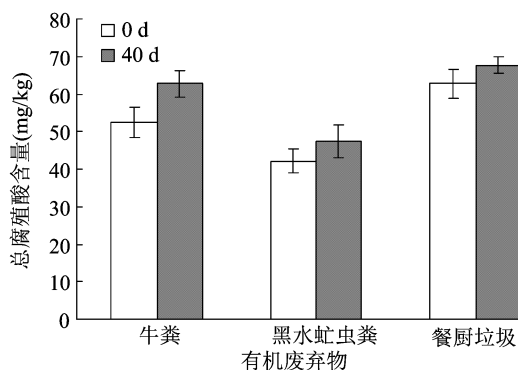


图9 物料总腐殖酸含量变化情况

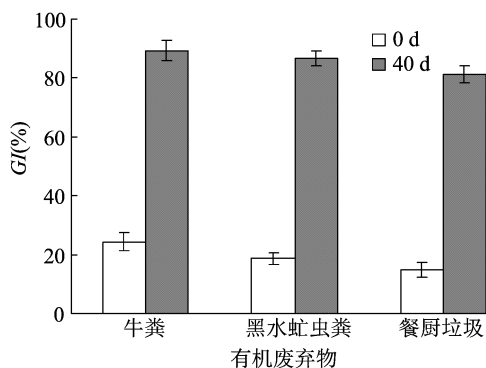


图12 物料种子发芽指数变化情况

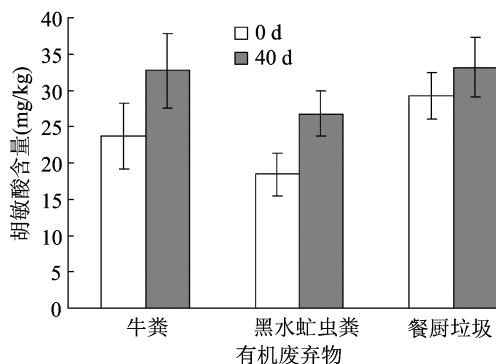


图10 物料胡敏酸含量变化情况

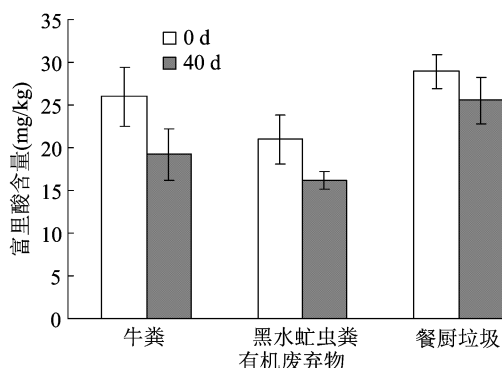


图11 物料富里酸含量变化情况

生成  $\text{CO}_2$ 、水和热量;而氮素转化重点是通过蚯蚓等发挥作用下的矿化过程以及生物固氮来实现的,正是因为蚯蚓的参与促进了物料的分解过程,从而加快了腐殖化<sup>[24]</sup>。

如今人们可运用碳氮比、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  来描述相应的腐熟度指标<sup>[25]</sup>。不过在  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  上人们看法各异,一些学者提出在  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  小于 1 时就可判定堆肥完成;有的则认为堆肥后期  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  应该在 0.5 左右,但具体的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  还应该根据原料作出判断<sup>[26]</sup>。黑水虻虫粪以及餐厨垃圾经过蚯蚓处理后,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$  均小于 1,并且通过对产物的腐殖酸相关成分的测定以及种子发芽指数(黑水虻虫粪为 86.67%、餐厨垃圾为 81.33%)的测定,表明蚯蚓转化的物料已经腐熟完全,对于植物没有毒害作用。

国内外早已将蚯蚓堆肥处理与传统堆肥化处理相结合,联合处理餐厨垃圾、畜禽粪便、城市污泥等固体有机废弃物。蚯蚓堆肥可以再次分选废弃物中没有分开的有机物或者无机物。蚯蚓消化道的代谢作用使得物料中有机物逐步分解,促进物料腐熟化,最终以颗粒状结构排出体外。有研究显示,蚓粪还可以促进硝化-脱氮的过程,并且预处理产物依然存在臭气、重金属等污染环境的因素,通过蚯蚓梯级处理不仅可以节约处理能耗,同时也可以改善环境。蚯蚓作为一种生态毒害指标生物,可以利用蚯蚓为媒介,在转化过程中进行毒理监测<sup>[27-29]</sup>。

本试验证明了蚯蚓可以在黑水虻虫粪以及高温发酵的餐厨垃圾中生存并进行堆肥化处理,为实践生产提供了一定的理论基础。不过蚯蚓生物学指标依然存在问题,所以在早期须要结合发酵工艺,从而制作更加适合的中间物料。

餐厨垃圾的种子发芽指数从 14.67% 上升至 81.33%。而发芽指数是体现堆肥对植物毒性的一个重要指标,另外也可以呈现出堆肥腐熟度的情况<sup>[22-23]</sup>。还有一些学者认为,在该指标实现 80% 时,就可判定堆肥对植物不存在毒性,或者充分腐熟,所以在蚯蚓转化后的物料可以用于正常农用。

### 3 讨论与小结

经过蚯蚓处理后物料的 pH 值呈中性,电导率下降,黑水虻虫粪以及餐厨垃圾的养分满足蚯蚓正常的生理活动需求。蚯蚓堆肥是一个在碳氮循环中的矿质化和腐殖化过程。物料中碳素为微生物和蚯蚓生命活动提供碳源,生物可代谢利用有机碳

## 参考文献:

- [1] 杨森林, 王科林, 吴善苟, 等. 餐厨垃圾处置设施规划中对餐厨垃圾产生量的预测[J]. 环境卫生工程, 2018, 26(3): 87-90.
- [2] Yang N, Zhang H, Shao L M, et al. Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129: 510-521.
- [3] Luo L W, Kaur G, Wong J W C. A mini-review on the metabolic pathways of food waste two-phase anaerobic digestion system[J]. Waste Management & Research, 2019, 37(4): 333-346.
- [4] 梅冰, 窦法楷, 汪慧莲, 等. 餐厨垃圾处理技术研究进展[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(5): 17-18.
- [5] 高娣, 奚永兰, 刘洋, 等. 江苏徐州沛县大屯街道有机生活垃圾的理化性质分析[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 965-970.
- [6] Nguyen T T X, Tomberlin J K, Vanlaerhoven S. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste[J]. Environmental Entomology, 2015, 44(2): 406-410.
- [7] Lalander C H, 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.
- [8] 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.
- [9] Beskin K V, Holcomb C D, Cammack J A, et al. Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions [J]. Waste Management, 2018, 74: 213-220.
- [10] 贾小红. 有机肥料加工与施用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [11] Qiao C C, Ryan Penton C, Liu C, et al. Key extracellular enzymes triggered high-efficiency composting associated with bacterial community succession [J]. Bioresource Technology, 2019, 288: 121576.
- [12] 张家才, 胡荣桂, 雷明刚, 等. 畜禽粪便无害化处理技术研究进展[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(1): 85-90.
- [13] 陈学民, 黄魁, 伏小勇, 等. 2种表居型蚯蚓处理污泥的比较研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1274-1279.
- [14] 李辉信, 胡锋, 仓龙, 等. 蚯蚓堆制处理对牛粪性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 588-593.
- [15] 杨文霞, 郑金伟, 李志鹏, 等. 果皮、菜叶混合垃圾的蚯蚓堆制处理[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 49-53, 64.
- [16] Elvira C, Sampedro L, Benítez E, et al. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: a pilot-scale study [J]. Bioresource Technology, 1998, 63(3): 205-211.
- [17] Mitchell A. Production of *Eisenia fetida* and vermicompost from feed-lot cattle manure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(3/4): 763-766.
- [18] Garg V K, Gupta R. Optimization of cow dung spiked pre-consumer processing vegetable waste for vermicomposting using *Eisenia fetida* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(1): 19-24.
- [19] 武佳韵, 赵智远, 刘明, 等. 餐厨垃圾与菌渣混合发酵养殖蚯蚓的试验研究[J]. 生物学杂志, 2016, 33(2): 110-112.
- [20] Huang K, Li F S, Wei Y F, et al. Effects of earthworms on physicochemical properties and microbial profiles during vermicomposting of fresh fruit and vegetable wastes [J]. Bioresource Technology, 2014, 170: 45-52.
- [21] Suthar S. Development of a novel epigeic-anecic-based polyculture vermireactor for efficient treatment of municipal sewage water sludge [J]. International Journal of Environment and Waste Management, 2008, 2(1/2): 84.
- [22] 吴银宝, 汪植三, 廖新, 等. 猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 189-193.
- [23] 汤江武, 吴逸飞, 薛智勇, 等. 畜禽固废物堆肥腐熟度评价指标的研究[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(5): 293-296.
- [24] Insam H, Franke-Whittle I, Goberna M. Microbes at Work [M]// Domínguez J, Aira M, Gómez-Brandón M. Vermicomposting: earthworms enhance the work of microbes. Berlin: Springer, 2010: 93-114.
- [25] 仓龙, 李辉信, 胡锋, 等. 蚯蚓堆制处理牛粪的腐熟度指标初步研究[J]. 农村生态环境, 2003, 19(4): 35-39.
- [26] Ko H J, Kim K Y, Kim H T, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure [J]. Waste Management, 2008, 28(5): 813-820.
- [27] 邱江平. 蚯蚓与环境保护[J]. 贵州科学, 2000, 18(1): 116-133.
- [28] 王丹丹, 李辉信, 胡锋, 等. 蚯蚓处理城市生活垃圾的现状与趋势[J]. 江苏农业科学, 2005, 33(4): 4-8.
- [29] 王海英, 郭纪远, 李琳. 蚯蚓的研究与应用[J]. 氨基酸和生物资源, 2002, 24(4): 17-19.