

2种表居型蚯蚓处理污泥的比较研究

陈学民, 黄魁, 伏小勇, 倪少仁

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要:用微小双胸蚓(*Bimastus parvus*)和赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)2种表居型蚯蚓处理城市生活污水污泥,研究了污泥理化性质和污泥减量以及蚯蚓生物量的变化,比较2种蚯蚓对污泥的处理效果.结果表明2种蚯蚓对污泥的矿化、降解及减量能力基本一致.接种双胸蚓和爱胜蚓污泥的pH分别降至6.27、7.07,接种双胸蚓使污泥的N、P、K含量分别增加了31.96%、5.76%、17.91%,C/N、C/P降低了44.14%、30.69%;接种爱胜蚓使污泥的N、K含量分别增加了35.48%、11.58%,P含量、C/N、C/P降低了10.12%、46.73%、20.50%.接种双胸蚓和爱胜蚓均能降低污泥中重金属含量,其降低次序分别为Zn > Cu > Pb > Cr和Cu > Zn > Pb > Cr.实验结束后2种蚯蚓的体重、卵数均显著增加,其生长率和生产率分别为76%~86%、156%~131%.

关键词:微小双胸蚓;赤子爱胜蚓;污泥;理化性质;污泥减量;生物量

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1274-06

Comparative Studies on Vermicomposting of Sewage Sludge with Two Epigeic Earthworms

CHEN Xue-min, HUANG Kui, FU Xiao-yong, NI Shao-ren

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A comparative study was conducted two epigeic species earthworms (*Bimastus parvus* and *Eisenia foetida*) for the evaluation of their efficacy in vermicomposting of sewage sludge. The various changes studied during pot experiments were the physiochemical properties of the sewage sludge, sludge reduction and earthworm biomass. Vermicomposting resulted that both epigeic species earthworms showed same capability among sewage sludge mineralization and decomposition rate and reduction. By the end of experiment, the pH value declined to 6.27 with *B. parvus* and 7.07 with *E. foetida*, but both epigeic species earthworms showed same mineralization and decomposition rate. *B. parvus* produced 31.96%, 5.76% and 17.91% increases in nitrogen, phosphorus, and potassium as well as 44.14% and 30.69% decreases in C/N and C/P ratios as compared to initial after 30 days of inoculation. In contrast, *E. foetida* produced 35.48% and 11.58% increases in nitrogen and potassium as well as 10.12%, 46.73% and 20.50% decreases in phosphorus, C/N and C/P ratios as compared to initial after 30 days of earthworm activity. At the same time, both epigeic species earthworms resulted in significant reduction in heavy metal content. The reduction in heavy metal content for *B. parvus* and *E. foetida* was found in the order: Zn > Cu > Pb > Cr and Cu > Zn > Pb > Cr. At the end of experiment, the weight and cocoons of *B. parvus* and *E. foetida* showed significant increase, which the growth rate and the reproductive rate were 76%~86% and 156%~131% respectively.

Key words: *Bimastus parvus*; *Eisenia foetida*; sewage sludge; physiochemical properties; sludge reduction; biomass

随着全球经济的不断发展和人口剧增,市政污水处理厂的建设规模与处理程度也在不断扩大和提高,从而导致剩余污泥的产量与日俱增.如何实现污泥的减量化、稳定化、资源化、无害化,已成为科研工作者关注的课题之一^[1].目前,世界各国普遍采用的污泥处理方式是土地利用,但由于污泥是一种由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体,不仅含有丰富的有机质、N、P、K及其他元素,也含有难降解的有机物、重金属、盐类、少量的病原微生物和寄生虫卵等,处理不当将会对环境造成更为严重的二次污染^[2].

蚯蚓有较强分解有机物的能力和环境适应能力,以表居型蚯蚓最强^[3].利用蚯蚓的这些特性来

处理城市生活污水是一项环保节能的污泥处理方法.赤子爱胜蚓和微小双胸蚓2种表居型蚯蚓在我国分布较广,均为正蚓科,分属爱胜属(*Eisenia*)和双胸属(*Bimastus*),其对有机废弃物均有较强的摄食能力^[4].相关学者用赤子爱胜蚓处理城市污泥做了许多的研究^[5-10],但微小双胸蚓用于实验研究却鲜见报道.由于不同属的蚯蚓有不同的形态和生理特征^[11],所以有必要探讨其对污泥处理的差异.本实验用2种常见的表居型蚯蚓(赤子爱胜蚓和微小双

收稿日期:2009-06-12;修订日期:2009-10-27

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-008);甘肃省建设科技攻关项目(JK2008-48)

作者简介:陈学民(1960~),女,教授,主要研究方向为水污染控制工程、废水处理与资源化理论与技术,E-mail: xueminch@sina.com

胸蚓)处理城市生活污水,研究接种不同蚯蚓品种对污泥理化性质和污泥减量的影响以及不同的蚯蚓在污泥中的生物量,旨在为不同地区处理污泥时选用适宜的蚯蚓提供一种借鉴,同时为利用蚯蚓处理城市生活污水技术提供一定的基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓和微小双胸蚓,采自本地,由兰州大学医学院冯孝义教授鉴定。将采集的蚯蚓在实验室用污泥喂养驯化,选用无环带、健康、活性好,体长约 3~5 cm,个体重不大于 0.5 g 的蚯蚓作为实验用蚓。将蚯蚓处理污泥后的蚓粪阴干至含水率 40% 左右,过 4.75 mm 筛,除去大颗粒,捡出蚓卵,使用时将含水率调至 60% 左右。

实验用污泥取自兰州市七里河污水厂污泥脱水车间新鲜的脱水污泥。其含水率(75 ± 0.13)% ,pH (7.82 ± 0.01) ,EC (0.46 ± 0.05) S/m ,Ash (43.89 ± 2.13)% ,TOC (32.32 ± 2.32)% ,TN (36.42 ± 1.30) g/kg ,TP (7.70 ± 0.13) g/kg ,TK (11.22 ± 0.13) g/kg ,C/N (8.88 ± 0.36) ,C/P (42.00 ± 3.38) ,Cu (210.00 ± 24.62) mg/kg ,Zn (1557.67 ± 47.12) mg/kg ,Pb (68.42 ± 3.44) mg/kg ,Cr (125.68 ± 18.28) mg/kg。

1.2 实验方法

取口径 25 cm、深 20 cm,底部有透气孔的塑料盆,盆底部垫一层纱布。在每盆中分别装入 2 kg 的基质土,之后在不同盆中分别接种 100 条爱胜蚓和 100 条双胸蚓,盆上做好标记。平衡 48 h 之后直接在每盆基质土上面放入污泥 700 g,每个处理设 3 个重复。将它们放在阴凉的暗处,盆上套上塑料袋保湿,然后盖上黑色遮光布。室内温度 18~26℃,每盆的湿度控制在 75%~80% 左右,30 d 后,蚯蚓处理污泥完毕,将蚯蚓取出。

1.3 测试方法

实验结束将蚯蚓、小蚯蚓和卵检出,计数,蚯蚓

在滤纸上吐泥后称重。

取 30 g 试样经 10 倍蒸馏水溶解,磁力搅拌 1 h 后,离心,取上层清液直接测定 pH 值及电导率。取 50 g 试样 105℃ 烘干水分,之后在马弗炉中 550℃ 灼烧 5 h 后测定灰分;全氮测定采用凯氏定氮法(GB 11891-1989);全磷测定采用钼锑抗比色法(GB 9837-1988);全钾测定采用火焰光度法(GB 9836-1988);TOC 测定采用重铬酸钾容量法-外加热法。重金属测定采用四酸(HCl-HNO₃-HF-HClO₄)消解法消解试样后,用 IRIS Intrepid II XSP 型电感耦合等离子发射仪(ICP-AES, 美国 Thermo Elemental 公司)测定。

1.4 分析方法

数据分析采用 Statistica 6.0 统计软件,对实验的数据进行单因素方差分析(ANOVA),利用最小显著性差异(LSD)多重比较方法,在 95% 的可靠性下对不同处理之间的差异性进行比较分析。对 2 种蚯蚓的生物量及污泥的减量比较在 95% 的可靠性下进行 *t*-检验。

2 结果与讨论

2.1 2 种蚯蚓处理污泥理化性质的变化

如表 1 所示,接种蚯蚓后,污泥的 pH 均显著降低且表现为极显性差异($p < 0.001$);接种双胸蚓污泥 pH 降低至 6.27,接种爱胜蚓污泥 pH 降低至 7.07,接种不同蚯蚓污泥的 pH 有显著的差异($p < 0.05$)。蚯蚓处理后污泥 pH 的降低,与污泥在降解过程中产生的 CO₂ 和有机酸有关^[12]。蚯蚓调节 pH 的能力与蚯蚓食道分布的钙腺有密切关系,钙腺能分泌过剩的钙或碳酸盐,中和有机酸,调节体内的酸碱平衡,钙腺可以自动调节外部环境和食物条件^[4]。据对国内不同类型土壤经蚯蚓活动形成的团聚体 pH 值测定,北方碱性或微碱性土壤 pH 值一般都略有下降趋势,而微酸性土壤的 pH 值大部分都略有提高^[4],可见蚯蚓确有调节 pH 值的作用。污泥经双胸蚓处理后 pH 值 < 7,与其喜欢偏酸性的生活环境是一致的^[11]。

表 1 2 种蚯蚓处理污泥 pH、EC、Ash 和 TOC 变化¹⁾

Table 1 Variation in pH, EC, Ash and TOC of vermicomposting of sewage sludge using two species earthworms

处理	pH	EC/S · m ⁻¹	Ash/%	TOC/%
原污泥	7.83 ± 0.10a	0.46 ± 0.05a	43.89 ± 2.13a	32.32 ± 2.32a
接种双胸蚓污泥	6.27 ± 0.25b	2.02 ± 0.02b	57.10 ± 1.90b	23.83 ± 1.06b
接种爱胜蚓污泥	7.07 ± 0.06c	2.03 ± 0.02b	57.81 ± 1.43b	23.44 ± 0.80b
F 值	60.56 ***	2471.60 ***	54.22 ***	31.86 **

1)表中数据为 Mean ± SD, n = 3; 同列中不同字母表明不同组间存在显著性差异; *** 表示 $p < 0.001$; ** 表示 $0.001 < p < 0.01$; * 表示 $0.01 < p < 0.05$; 下同

从表 1 可以看出,接种蚯蚓后,污泥的 EC、Ash 均显著增加,且表现出极显著性差异($p < 0.001$),而 TOC 则显著降低,且表现出极显著性差异($p < 0.001$);相比之下,对于 EC、Ash 和 TOC 含量在接种 2 种蚯蚓污泥之间均没有达到显著水平($p > 0.05$),表明 2 种蚯蚓对污泥的矿化能力和有机物降解能力基本一致.与原污泥相比,接种双胸蚓和接种爱胜蚓污泥的 EC 均增加了 4.39 倍, Ash 分别增加了 30.10%、31.71%; TOC 分别降低了 26.27%、27.48%. Khwairakpam 等^[13]用 3 种不同科的蚯蚓 (*E. fetida*、*E. eugeniae* 和 *P. excavatus*) 处理污泥后,也有相似的结果.接种蚯蚓后 EC、Ash 显著增加是由于蚯蚓及其体内微生物的活动致使有机物分解,提高了污泥的矿化度,释放出的矿物盐(如磷、铵、钾)和无机离子等所致^[13,14]. 污泥 TOC 的降低可能是蚯蚓和微生物的协同作用的结果,蚯蚓的作用更多的是改善基质中微生物的生存条件和氧的供应,促进微生物对有机物的降解^[15]. 蚯蚓肠道对微生物的群体结构及生物活性具有调节作用,提高生长快的微生物种群的繁殖速度及其呼吸代谢活性^[16]在一定程度上也强化微生物降解有机物的作用,提高了有机物的降解效率.

2.2 2 种蚯蚓处理污泥营养元素的变化

如表 2 所示,接种蚯蚓后,污泥中 N 的含量均显著增加,且表现出极显著性差异($p < 0.001$);接种双胸蚓和接种爱胜蚓的污泥比原污泥 N 含量分别增加了 31.96%、35.48%,但接种 2 种蚯蚓的污泥之间 N 含量没有显著的差异($p > 0.05$). 接种蚯蚓后污泥 N 含量增加可能是由于蚯蚓活动过程中微生物对氮转化的媒介作用增加了有机氮的矿化,从而使有机氮转变成硝态氮保留在基质中,同时蚯蚓自身分泌的粘液、尿液、生长素和酶也会引起 N 含量的增加^[17,18]. 接种 2 种蚯蚓的污泥之间 N 含量没有显著差异则表明双胸蚓和爱胜蚓对氮的转化能力相当. 肾管为寡毛类排泄的主要器官,大部分正蚓类具有相似的肾管结构^[11],这也是 2 种蚯蚓排泄物(粘液、尿液、生长素、和酶)性质无差异的因素之一.

表 2 2 种蚯蚓处理污泥营养元素(N、P、K)的变化/ $g \cdot kg^{-1}$

Table 2 Variation in nutrients (N, P, K) during vermicomposting of sewage sludge using two species earthworms/ $g \cdot kg^{-1}$

处理	N	P	K
原污泥	36.55 ± 1.30a	7.70 ± 0.13ab	11.22 ± 0.13a
接种双胸蚓污泥	48.23 ± 3.63b	8.26 ± 0.83a	13.23 ± 0.30b
接种爱胜蚓污泥	49.51 ± 0.12b	7.02 ± 0.23b	12.52 ± 0.71b
F 值	25.38**	4.56	15.47**

如表 2 所示,接种蚯蚓的污泥与原污泥 P 含量没有表现出显著性差异($p > 0.05$);相比而言,接种不同蚯蚓污泥的 P 含量有显著的差异($p < 0.05$),接种双胸蚓污泥的 P 含量较接种爱胜蚓高 17.66%,这种差异可能是 2 种蚯蚓在生长过程中对 P 的需求差异所致.磷是动物机体含量最多的元素之一,主要作为磷蛋白、核酸、磷脂以及含磷的酶类的构成成分而发挥极其重要的生理作用^[19]. 有学者的研究表明^[20~22],蚯蚓处理后,污泥的 P 含量是增加的,并把这种变化归于有机质的矿化、细菌转化和蚯蚓粪便中磷酸酶的活动.

如表 2 所示,接种蚯蚓后,污泥中 K 含量均显著增加,且表现为显著性差异($0.001 < p < 0.01$);接种双胸蚓污泥和接种爱胜蚓污泥的 K 含量之间则无显著性差异($p > 0.05$). Pramanik 等^[23]和 Sharma^[24]认为,污泥 K 含量的提高的主要机制是由于污泥分解过程中微生物产酸(碳酸和硝酸等)致使污泥中不溶性钾转化为可溶性钾,同时,蚯蚓肠道中大量微生物种群的存在,也会对 K 含量的提高起着重要的作用.另外,蚯蚓处理污泥过程中有机质的损失造成污泥总体质量减少,可能也是蚓粪中 N、P、K 等营养物质单位质量高于原污泥的原因之一.

2.3 2 种蚯蚓处理污泥 C/N、C/P 的变化

如图 1 所示,接种蚯蚓后,污泥的 C/N、C/P 均显著降低, C/N 表现出极显著性差异($p < 0.001$), C/P 表现出显著性差异($0.001 < p < 0.01$). 接种双胸蚓与接种爱胜蚓污泥的 C/N 和 C/P 无显著性差异($p > 0.05$). 各种有机残体,无论 C/N 大小如何,在微生物的反复作用下, C/N 迟早会稳定在一定的范围^[25]. 由于植物本身不能矿化有机物质,所以污

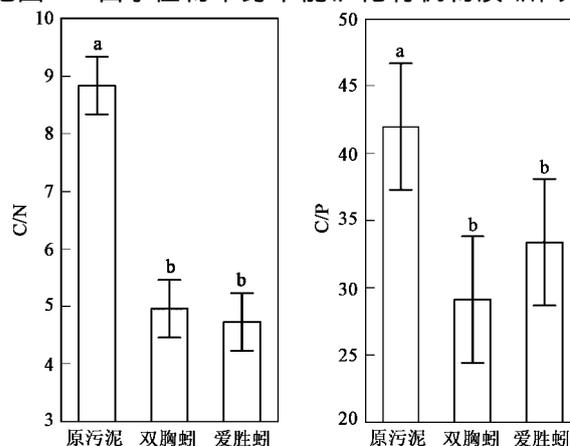


图 1 2 种蚯蚓处理污泥 C/N 和 C/P 的变化

Fig. 1 Variation in C/N and C/P during vermicomposting of sewage sludge using two species earthworms

泥如果不进行任何处理直接农用,可引起植物和土壤的毒性反应,且有抑制土壤中微生物新陈代谢的作用^[13]。接种蚯蚓污泥 C/N、C/P 降低表明蚯蚓处理后污泥中的 N、P 更容易被植物吸收。

2.4 2 种蚯蚓处理污泥重金属的变化

如表 3 所示 2 种蚯蚓处理后,污泥中的 Cu、Zn 和 Cr 含量均显著降低(Cu: $p < 0.001$; Zn: $0.001 < p$

< 0.01 ; Cr: $p < 0.05$) ,而 Pb 含量降低但未达到显著水平($p > 0.05$) ,接种双胸蚓重金属含量降低次序为 Zn > Cu > Pb > Cr ,接种爱胜蚓重金属含量降低次序为 Cu > Zn > Pb > Cr. 接种双胸蚓污泥与接种爱胜蚓污泥比较,除金属 Cu 含量有显著性差异($p < 0.05$) 外,Zn、Pb 和 Cr 均未达到显著水平($p > 0.05$) .

表 3 2 种蚯蚓处理污泥重金属(Cu、Zn、Pb、Cr)的变化/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Variation in heavy metal concentrations (Cu, Zn, Pb, Cr) during vermicomposting of sewage sludge using two species earthworms/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	Cu	Zn	Pb	Cr
原污泥	210.00 ± 24.62a	1 557.67 ± 47.12a	68.42 ± 3.44a	125.68 ± 18.28a
接种双胸蚓污泥	163.79 ± 8.81b	971.00 ± 86.60b	53.45 ± 7.18a	101.84 ± 1.52ab
接种爱胜蚓污泥	118.93 ± 18.12c	891.83 ± 99.22b	48.38 ± 14.61a	94.63 ± 11.88b
F 值	75.15 ***	24.10 **	2.55	4.97*
农用标准(GB 4284-1984) pH ≥ 6.5	500	1 000	1 000	1 000
农用标准(GB 4284-1984) pH < 6.5	250	500	300	600

上述结果表明,接种 2 种表居型蚯蚓均能显著降低污泥中的重金属含量,接种蚯蚓污泥的重金属含量降低是由于蚯蚓对重金属有较强的富集能力所致.然而同种蚯蚓对污泥中不同重金属的富集量不同(见表 3),则是蚯蚓对重金属富集的选择性造成^[26].黄色细胞和酶对蚯蚓富集重金属有着至关重要的影响^[27-28],由于双胸蚓和爱胜蚓肠道中的黄色细胞和酶有一定的差异,这可能也是造成 2 种蚯蚓对重金属富集差异的原因之一.另外,不同蚯蚓体内复杂的金属动力学也会影响重金属的富集机制^[29].有学者认为蚯蚓对重金属的富集主要是通过皮肤和肠道的吸收^[29],必不可少的微量元素如 Zn 和 Cu 能

够促进蚯蚓的生理调节^[30],因此,蚯蚓对污泥中 Zn 和 Cu 富集量较大;相反,Pb 和 Cr 是不必要的元素,不能够为机体利用,蚯蚓对其会产生一定的排斥作用^[31].根据国家污泥农用标准(GB 4284-1984),2 种蚯蚓处理污泥后,蚯蚓粪均可作为有机肥直接施用,但当施用的土壤 pH < 6.5 时,蚓粪中 Zn 的含量超标,然而考虑到 Zn 是作物生长所需的重要微量元素,且我国土壤缺 Zn 比较普遍,因此蚯蚓处理后的污泥可以作为含 Zn 的缓释肥料^[32].

2.5 2 种蚯蚓对污泥减量的影响

实验结束后,污泥质量减量和污泥有机物的消减量见表 4.

表 4 双胸蚓和爱胜蚓对污泥减量的影响

Table 4 Effects of sewage sludge reduction during vermicomposting by *B. parvus* and *E. foetida*

蚯蚓	系统质量 ¹⁾ /g		系统质量减量/%	有机物含量/%		有机物消减量/%
	处理前	处理后		处理前 ²⁾	处理后 ³⁾	
双胸蚓	2 700.00 ± 8.31	2 513.33 ± 7.48	26.67 ± 0.72	56.11 ± 3.02	42.89 ± 1.91	23.56 ± 0.14
爱胜蚓	2 700.00 ± 8.31	2 510.00 ± 6.73	27.14 ± 0.61	56.11 ± 3.02	42.19 ± 1.43	24.81 ± 0.23
t-value	0.00	0.32	-0.32	0.00	0.51	-0.52

1) 系统质量指基质土与污泥两者的质量和; 2) 处理前有机物含量指原污泥有机物含量; 3) 处理后有机物含量指蚓粪的有机物含量

如表 4 所示 2 种蚯蚓处理污泥后,污泥的质量和有机物含量均明显减少;其中,接种双胸蚓污泥和接种爱胜蚓污泥的质量分别减少了 26.67% 和 27.14% ,双胸蚓和爱胜蚓对污泥有机物消减量分别为 23.56% 和 24.81% .可见,2 种蚯蚓对污泥质量减量和有机物消减量的能力基本一致,这可能与 2 种蚯蚓具有相同的摄食习性和单一、发达的砂囊有

关^[33].蚯蚓对污泥的减量和有机物的消减作用是通过微生物和蚯蚓的协同作用实现的^[34].蚯蚓先通过砂囊对污泥研磨,然后利用蚓体分泌的多种酶和肠道内的微生物将污泥消化,最终转化为自身的增殖及排泄物——蚯蚓粪^[16].

2.6 2 种蚯蚓处理污泥生物量的变化

由表 5 可以看出,实验结束时 2 种蚯蚓的生长

表 5 双胸蚓和爱胜蚓处理污泥生物量的变化

Table 5 Biomass of *B. parvus* and *E. foetida* during vermicomposting of sewage sludge

蚯蚓	初始蚓重/g	最终蚓重/g	卵数/个	生长率/ $g \cdot (d \cdot 条)^{-1}$	生产率/ $个 \cdot (d \cdot 条)^{-1}$
微小双胸蚓	43.73 ± 2.32	66.53 ± 4.25	37.00 ± 5.56	0.76 ± 0.15	1.56 ± 0.20
赤子爱胜蚓	48.33 ± 1.21	74.10 ± 2.31	31.33 ± 1.57	0.86 ± 0.05	1.31 ± 0.09
t-value	-3.04*	-2.71	1.75	-0.94	2.15

率[增重/(天数)·条]和生产率[卵数/(天数)·条]均无显著差异($p > 0.05$),爱胜蚓表现出略高的生长率,双胸蚓则表现出略高的生产率。

一般而言,研究蚯蚓的生物量能够更好地反映蚯蚓对污泥的适应和分解能力,实验中发现2种蚯蚓都能够在基质中很好地存活。2种蚯蚓在污泥中均有较高的生长率和生产率,这与污泥是一种富含氮的有机物有关。Edwards等^[33]研究食物对蚯蚓产卵量的影响表明,蚯蚓取食腐烂的动物性有机物比取食植物性有机物产卵量大,取食富含氮的食物其生长速度和产卵量都较快。实验过程中蚯蚓食物丰富,其生长繁殖不受食物匮乏限制,因此可以推论2种表居型蚯蚓的生理需求基本一致。

3 结论

(1)2种蚯蚓对污泥的矿化能力和有机物降解能力基本一致。除pH、P和Cu外,处理后污泥的EC、Ash、TOC、N、K、Zn、Pb、Cr均无显著差异。接种双胸蚓污泥pH低于接种爱胜蚓污泥的pH,但接种双胸蚓污泥的P、Cu含量较接种爱胜蚓高。

(2)2种蚯蚓处理污泥后,污泥的质量和有机物含量均明显减少,但2种蚯蚓之间无显著差异。

(3)2种蚯蚓的体重、卵数增加显著,但生长率、生产率均无显著差异。

(4)实验表明,爱胜蚓与双胸蚓均可成为处理城市生活污水的适宜蚓种。

参考文献:

[1] 郝晓地,张璐平,兰荔. 剩余污泥处理/处置方法全球概览[J]. 中国给水排水, 2007, 27(20):1-5.

[2] 高红莉,周文宗,张砾,等. 城市污泥的蚯蚓分解处理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):788-793.

[3] 邱江平. 蚯蚓与环境保护[J]. 贵州科学, 2000, 18(1-2):116-133.

[4] 黄福珍. 蚯蚓[M]. 北京:农业出版社, 1982. 75-79, 107-110.

[5] 孙颖,桂长华,孟杰,等. 利用蚯蚓活动改善污泥性状的实验研究[J]. 环境化学, 2007, 26(3):343-346.

[6] 白春节. 低繁殖量蚯蚓养殖法处理剩余污泥的可行性研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(6):9-12.

[7] 吴敏,杨健. 蚯蚓生态床处理剩余污泥[J]. 中国给水排水, 2003, 19(5):59-60.

[8] Kocik A, Truchan M, Rozen A. Application of willows (*Salix viminalis*) and earthworms (*Eisenia foetida*) in sewage sludge treatment [J]. Soil Biol, 2007, 43: 327-331.

[9] Ndegwa P E, Thompson S A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids [J]. Bioresour Technol, 2001, 76(2): 107-112.

[10] Gupta R, Mutiyar P K, Rawat N K, et al. Development of a water hyacinth based vermireactor using an epigeic earthworm *E. foetida* [J]. Bioresour Technol, 2007, 98: 2605-2610.

[11] 爱德华兹 C A, 洛夫蒂 J R. 蚯蚓生物学[M]. 北京:科学出版社, 1984. 1-34, 22-25, 138-141.

[12] Haimi J, Huhta V. Capacity of various organic residues to support adequate earthworm biomass for vermicomposting [J]. Biol Fert Soils, 1986, 2: 23-27.

[13] Khwairakpam M, Bhargava R. Vermitechnology for sewage sludge recycling [J]. J Hazard Mater, 2009, 161: 948-954.

[14] Gupta R, Garg V K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting [J]. J Hazard Mater, 2008, 153: 1023-1030.

[15] Gunadi B, Edwards C A. The effect of multiple application of different organic wastes on the growth, fecundity and survival of *Eisenia foetida* [J]. Pedobiologia, 2003, 47: 321-330.

[16] 吴敏, 娄山杰, 杨健, 等. 蚯蚓生物滤池的污泥减量化效果及其影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 514-518.

[17] Viel M, Sayag D, Andre L. Optimization of agricultural, industrial waste management through in-vessel composting [A]. In: de Bertoldi M (ed.). Compost: Production, Quality and Use [C]. Elsevier Applied Science, Essex, 1987. 230-237.

[18] Hartenstein R, Hartenstein F. Physico-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida* [J]. J Environ Quality, 1981, 10: 377-382.

[19] 霍启光. 动物磷营养与磷源[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2002. 4-5.

[20] Satchell J E, Martein K. Phosphate activity in earthworm faeces [J]. Soil Biol Biochem, 1984, 16: 191-194.

[21] Garga V K, Kaushik P, Dilbaghi N. Vermiconversion of wastewater sludge from textile mill mixed with anaerobically digested biogas plant slurry employing *Eisenia foetida* [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2006, 65: 412-419.

[22] Garg P, Gupta A, Satya S. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study [J]. Bioresour Technol, 2006, 97: 391-395.

[23] Pramanik P, Ghosh G K, Ghosal P K, et al. Changes in organic-C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost

- of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants [J]. *Bioresour Technol*, 2007, **98**: 2485-2494.
- [24] Sharma K S. Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms [J]. *Bioresour Technol*, 2003, **90**: 169-173.
- [25] 李志洪, 赵兰坡, 龚森. 土壤学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 44-45.
- [26] 伏小勇, 秦赏, 杨柳, 等. 蚯蚓对土壤中重金属的富集作用研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(1): 78-83.
- [27] Vijver M G, Wolterbeek H T, Vink J P M, *et al.* Surface adsorption of metals onto the earthworm *Lumbricus rubellus* and the isopod *Porcellio scaber* is negligible compared to absorption in the body [J]. *Sci Total Environ*, 2005, **340**: 271-280.
- [28] Morgan A J, Stürzenbaum S R, Winters C, *et al.* Differential metallothionein expression in earthworm (*Lumbricus rubellus*) tissues [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2004, **57**: 11-19.
- [29] Kamitani T, Kaneko N. Species-specific heavy metal accumulation patterns of earthworms on a floodplain in Japan [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2007, **66**: 82-91.
- [30] Lanno R, Wells J, Conder J, *et al.* The bioavailability of chemicals in soil for earthworms [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2004, **57**: 39-47.
- [31] Nahmani J, Hodson M E, Black S. A review of studies performed to assess metal uptake by earthworms [J]. *Environ Pollut*, 2007, **145**: 402-424.
- [32] 李明. 高温堆肥与蚯蚓堆肥对城市污泥重金属形态的影响 [J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(10): 1407-1412.
- [33] Edwards C A, Lofty J R. *Biology of Earthworm* [M]. London: Chapman and Hall, 1977. 58-59, 163-164.
- [34] Suthar S. Potential utilization of Guar gum industrial waste in vermicompost production [J]. *Bioresour Technol*, 2006, **97**: 2474-2477.