

蚯蚓活动对城市生活污泥重金属的影响

徐轶群^{1,2}, 周 璟², 董秀华², 封 克²

(1.南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 2.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要:采用塑料温棚内垄式堆积污泥培养蚯蚓方式,研究了蚯蚓处理对污泥重金属的影响。结果表明,污泥经蚯蚓处理后,理化性质发生了显著的变化,污泥的 pH 值、有机质、总氮和总磷都有不同程度的降低;蚯蚓能吸收富集污泥中的重金属,其中对重金属 Cd 有较强的富集能力;蚯蚓处理使污泥中重金属含量均出现不同程度的下降,重金属 Cr、Zn、Pb、Cd、Cu、Ni 分别减少 27.98%、31.46%、32.81%、13.85%、23.86%和 22.92%。利用盆栽试验,研究了污泥施用于土壤后生菜体内重金属积累的情况,结果表明,生菜体内重金属 Zn、Cu、Pb 和 Ni 的含量为污泥处理高于蚓粪处理;Cr 和 Cd 则分别为差异不显著和略有降低。

关键词:蚯蚓;城市生活污泥;重金属;生物富集

中图分类号:X799.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2431-05

Effects of Earthworm Activity on Heavy Metals in Sewage Sludge

XU Yi-qun^{1,2}, ZHOU Jing², DONG Xiu-hua², FENG Ke²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095,China; 2.College of Environmental Sciences and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: This study was designed to evaluate the effects of earthworm activity on heavy metals in sewage sludge. Results showed the parameters such as pH, water content, organic carbon, Kjeldahl nitrogen and total phosphorous were lower in case of treated sewage sludge than primary sewage sludge. Earthworms could accumulate heavy metals of sewage sludge. The bio-concentration factor of Cd in earthworm was higher than other heavy metals. The reduction in metal content(as compared to initial level) was in the order: 32.81%(Pb)>31.46%(Zn)>27.98%(Cr)>23.86%(Cu)>22.92%(Ni)>13.85%(Cd). It was clear that heavy metal loss was caused by the presence of earthworms. A pot-culture experiment was conducted to study the concentrations of heavy metals to lettuce, grown in soil amended with sewage sludge with and without earthworm treatment. Zn, Cu, Pb and Ni concentrations in lettuce were higher in case of primary sewage sludge than treated sewage sludge, while Cr had no change and Cd was found to decrease slightly.

Keywords: earthworm; sewage sludge; heavy metals; bio-concentration

城市生活污泥的管理已成为一个世界性的难题。据估计,我国城市污水处理厂每年大概产生约 3 000 万 t 污泥(含水率 80%)。传统的污泥处置方法包括土地填埋、焚烧和农业利用等^[1]。近年来,许多国家包括我国颁布了一系列法规禁止土地填埋,原因是土地填埋浪费土地,填埋场容易产生渗滤液污染,污泥焚烧过程中消耗了大量能源并能导致空气污染。因此,污泥处置的最有效方法是土地利用。污泥农用是土地利

用的一种重要形式,然而,污泥不加任何处置农用将对土壤及其微生物产生不利影响,进而影响植物的生长^[2],所以污泥农用前有必要进行稳定化处理^[3]。

蚯蚓在陆地生态系统中占有非常重要的地位,可以利用蚯蚓进行污泥的稳定化处理。利用蚯蚓处理污泥通常称为蚯蚓堆肥^[4],蚯蚓堆肥是基于蚯蚓和其中微生物的共同作用,使污泥中的营养物质生成更利于植物吸收的形态^[5]。但是,城市生活污泥富含有机物质和营养元素的同时含有大量的有害重金属。由于重金属具有难迁移、易富集、危害大等特点,城市生活污水所含的重金属是限制其农用的主要因素。研究表明,蚯蚓具有富集 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Hg、As、Se 等重金属的能力,且对部分重金属的富集系数较高。以前的研

收稿日期:2010-06-26

基金项目:江苏省高校自然科学基金基础研究计划项目(08KJD610004)

作者简介:徐轶群(1974—),男,江西丰城人,在读博士,讲师,主要从事固体废物处理及资源化利用方面的研究。

E-mail: qunxyq@163.com

通讯作者:封 克 E-mail: fengke@yzu.edu.cn

究多集中在蚯蚓与土壤中重金属的关系,利用蚯蚓处理城市生活污水的研究也多为实验室模拟研究,而利用蚯蚓直接处理污泥的研究鲜有报道,原因是蚯蚓在污泥中不易存活。本研究通过垄式培养蚯蚓,采用渐进式处理的方法,克服了蚯蚓的存活问题,达到污泥的稳定化处理效果。本研究的目的是在野外垄式培养下,研究蚯蚓处理对污泥及其重金属的影响,为城市生活污水的资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所选用的蚯蚓品种为大平 2 号(即赤子爱胜蚓 *Eisenia fetida*)成体,平均体重 0.18 g 左右。该种蚯蚓源自日本,具有惊人的食量和强大的吞食有机废物的能力。蚯蚓取自江苏省农业环境安全服务中心扬州大学环境科学与工程学院实验基地,蚯蚓以牛粪作为繁殖原料。

试验污泥取自扬州汤汪污水处理厂,为城市生活污水处理剩余污泥,污泥经运输与自重压实成深黑色稠糊状,含水率为 80.90%。

盆栽土壤取自扬州大学实验农牧场,为菜园土,其基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical characteristics of the soil used

指标	均值±偏差
pH	6.84±0.04
有机质/%	5.25±0.37
总氮/g·kg ⁻¹	2.41±0.24
总磷/g·kg ⁻¹	2.53±0.15
Cr/mg·kg ⁻¹	47.01±2.36
Zn/mg·kg ⁻¹	78.49±1.42
Pb/mg·kg ⁻¹	41.05±1.75
Cd/mg·kg ⁻¹	1.44±0.13
Cu/mg·kg ⁻¹	24.93±1.66
Ni/mg·kg ⁻¹	37.71±1.59

1.2 试验设计

蚯蚓对污泥的处理试验在塑料温棚中进行,污泥堆成(长×宽×高=200 cm×50 cm×35 cm)一系列垄,垄与垄之间保持约 30 cm 的距离。带有蚓粪的蚯蚓接种于垄间,黑色遮阳网覆盖于污泥上面,使污泥温度保持在(18±2)℃,此温度较适合蚯蚓的生长;试验同时设置对照。试验期间,每隔 3 d 调节 1 次污泥水分,使之维持在一个相对恒定湿度以利蚯蚓生长。15 d 后,蚯蚓体形显著增大,平均达 0.45 g 左右,被蚯蚓处

理过的污泥无明显异味,可以认为污泥被蚯蚓消化完全。此时,从上到下采集适量的污泥(包括对照),保存在 4℃冰箱中,直到实验分析。收集其中的蚯蚓,留待测定分析。

分别称取 200 g 蚯蚓处理前后的污泥(以干重计),加入 1 800 g 土壤,混合均匀后,置于塑料培养钵中,加入去离子水,使含水率达到 70%左右。将适量生菜种子平铺在培养钵中,再在上面均匀铺洒一层薄土。盆栽试验在温棚中进行,培养期间定时补充水分,以利植物生长。每个污泥样品设置 3 个平行,同时设置 3 个对照(不加污泥)。2 个月后,采集生菜。

1.3 测定方法

1.3.1 污泥营养物质的测定

污泥基本理化性质采用常规分析法测定^[6],其中有机质用重铬酸钾容量法;全氮用半微量凯氏法;全磷用高氯酸-硫酸-钼锑抗比色法。

1.3.2 污泥中重金属含量的测定

首先将污泥风干,磨细过筛,待用。过筛后的土壤和污泥采用 H₂SO₄-HClO₄ 消化,定容后经 0.45 μm 滤膜过滤,采用原子吸收分光光度计(Thermo Solar MK II-6)测定。

1.3.3 蚯蚓中重金属含量的测定

蚯蚓放入搪瓷盘中吐泥 2 d,用蒸馏水洗净,冰冻致死,于烘箱中 60℃烘干,取出后冷却研磨,制成粉备用。称取 0.5 g 蚯蚓粉末于 250 mL 三角瓶中,加浓硝酸 20 mL,放置过夜。加少量高氯酸,在通风橱中加热消解,直至白烟赶尽为止。若样品未溶解完全,冷却后再加浓硝酸和高氯酸,加热,直至消解液澄清。冷却后加 1 mL 浓硝酸和少量超纯水,转入 50 mL 容量瓶中,定容后经 0.45 μm 滤膜过滤。原子吸收分光光度法测定。

1.3.4 生菜中重金属的测定

洗净的生菜用吸水纸吸干表面水分后,称取一定量(10~30 g)剪碎的生菜叶于 100 mL 锥形瓶中,加 10 mL 浓硝酸,浸泡过夜。再加 5 mL 高氯酸,摇匀,置电热板上逐渐升温加热至干、白烟赶尽,取出冷却,转移至 25 mL 容量瓶中,2%硝酸定容,原子吸收分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓对污泥基本理化性质的影响

污泥经蚯蚓处理后,理化性质发生了显著的变

化,结果如表 2 所示。结果表明,污泥的 pH 值、有机质、总氮和总磷都有不同程度的降低。pH 值由 6.86 降为 6.35 左右,可能的原因是蚯蚓处理过程中,其中的微生物分解有机物产生了有机酸导致污泥 pH 值下降^[5,7]。这和前人的研究结果相一致^[8-10]。当 pH 值较低时,污泥中重金属的迁移和淋溶作用增强;随着 pH 值的升高,污泥中重金属的活性及其生物有效性降低。经过蚯蚓约 15 d 的处理,污泥中有机质的含量降为处理前的一半左右,表明在堆肥过程中,蚯蚓可以使有机物质的矿化作用增强,从而以 CO₂ 的形式导致 C 的损失。蚯蚓的处理使污泥全氮(凯氏氮)的量大幅下降,可能的原因是蚯蚓利用污泥中的有机质合成了自身的成分。

表 2 污泥和蚓粪基本理化性质

Table 2 Physico-chemical characteristics of sewage sludges and earthworm cast

指标	污泥	蚓粪
pH	6.86±0.03	6.35±0.02
有机质/%	31.97±1.76	15.98±0.93
总氮/g·kg ⁻¹	66.7±0.20	39.1±0.6
总磷/g·kg ⁻¹	6.1±0.10	4.4±0.10

2.2 重金属在蚯蚓体内的积累

蚯蚓处理污泥后,体重发生了显著的变化,由平均体重 0.18 g 增长到 0.45 g。蚯蚓体内重金属的含量变化如表 3 所示。相对于处理前,蚯蚓体内重金属 Cr、Zn、Pb、Cd、Cu、Ni 的含量分别增加了 4.61、0.02、0.10、3.75、7.30、66.09 倍,重金属含量的增加强度依次为 Ni>Cu>Cr>Cd>Pb>Zn。

2.3 蚯蚓处理对污泥重金属含量的影响

污泥经蚯蚓处理后,重金属的含量发生了较显著的变化,其结果如表 4 所示。污泥经蚯蚓处理后,重金

属含量均出现不同程度的减少。6 种重金属 Cr、Zn、Pb、Cd、Cu、Ni 分别减少 27.98%、31.46%、32.81%、13.85%、23.86%和 22.92%。

2.4 污泥施用对重金属在生菜体内积累的影响

盆栽结果如图 1 所示。和对照相比,污泥和蚓粪的施用使生菜体内 Zn 的含量上升,污泥处理组 Zn 的含量增加更为显著;生菜体内 Zn 的含量在对照、蚓粪和污泥处理间的差异达到极为显著的水平($P<0.01$)。Cu 和 Pb 在生菜体内的含量规律和 Zn 相似,依次为:污泥处理>蚓粪处理>对照处理,且各处理之间差异显著($P<0.05$)。对于重金属 Ni 来说,相对于对照处理,污泥的施用可以显著提高 Ni 在生菜体内的含量($P<0.01$),而蚓粪的施用不能改变 Ni 在生菜体内的含量。生菜体内重金属 Cr 的含量在不同处理之间无显著性差异($P>0.05$),而 Cd 在生菜体内的含量为污泥处理稍低于对照和蚓粪处理。

3 讨论

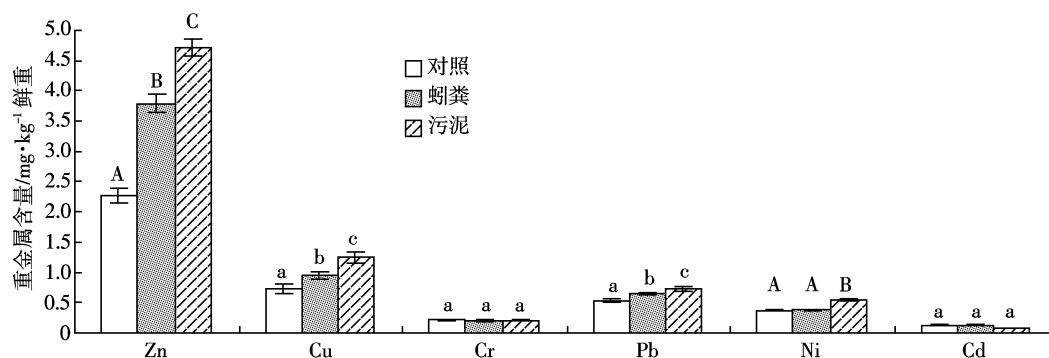
根据蚯蚓体内重金属的含量与供试污泥中重金属含量的比值 K 可判断蚯蚓对重金属离子吸收或富集的情况。当 $K\leq 1$ 时称为吸收系数,表明蚯蚓对某种重金属能够吸收但不富集; $K>1$ 时为富集系数,说明蚯蚓不仅能吸收某种重金属离子而且可以通过自身机制富集重金属。本研究中,蚯蚓对重金属 Cr、Zn、Pb、Cu、Ni 的吸收系数 K 分别为 0.02、0.1、0.06、0.05、0.19,而对 Cd 的富集系数 K 为 1.18。可以看出,蚯蚓对 Cd 有较强的富集能力,而对其他重金属的富集能力相对较弱,这与刘小丽等^[11]的研究结果基本一致,而与 Neuhauser 等^[12]的研究结果稍有不同,Neuhauser 等的研究表明,蚯蚓对 Cd 和 Zn 有较强的富集能力,对 Cu、Pb 和 Ni 的富集能力相对较小。邓继福等^[12]研究发现蚯蚓体内的 Cd、Pb、As 的含量与土壤中

表 3 蚯蚓体内重金属的含量(mg·kg⁻¹)Table 3 Concentration of heavy metals in earthworm(mg·kg⁻¹)

	Cr	Zn	Pb	Cd	Cu	Ni
未处理蚯蚓	4.76±0.01	113.52±1.41	6.98±0.23	0.60±0.01	1.53±0.26	0.23±0.01
处理蚯蚓	26.71±1.68	116.34±0.12	7.69±0.12	2.85±0.13	12.71±2.1	15.43±0.32

表 4 污泥和蚓粪重金属的含量(mg·kg⁻¹)Table 4 Concentration of heavy metals in sewage sludge and earthworm cast(mg·kg⁻¹)

	Cr	Zn	Pb	Cd	Cu	Ni
污泥	1 312.75±9.72	1 177.62±5.65	137.94±0.31	2.41±0.11	251.52±0.31	79.68±0.14
蚓粪	981.49±23.19	807.15±16.31	92.67±4.77	2.07±0.06	191.51±5.12	61.42±3.23



柱型图上不同大小写字母分别表示在概率水平 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 上达到极显著和显著差异,柱型图上棒长短表示标准误差大小。

图 1 不同处理生菜体内重金属含量

Figure 1 Concentration of heavy metals in lettuce as affected by sewage sludge with and without earthworm treatment

含量呈显著正相关,且生物富集系数的大小顺序为 $Cd>Hg>As>Zn>Cu>Pb$,其中Cd的生物富集系数较大,表现为强富集作用。但戈峰等^[13]研究发现,蚯蚓对Cu和Se有富集作用,这表明蚯蚓对重金属的吸收和富集受到多种因素的影响。重金属可以通过蚯蚓的吸收作用而在蚯蚓体内富集,进而在食物链中传递和生物放大^[14],其过程取决于化合物的两个主要化学性质,即持久性和可富集性^[15-16]。蚯蚓可以通过两种途径富集污染物:被动扩散作用(Passivediffusion)和摄食作用(Resorption)。前者是重金属等污染物从土壤、污泥溶液穿过体表进入蚯蚓的体内;而后者则是蚯蚓通过吞食作用使污染物进入蚯蚓体内,并在内脏器官内完成吸收作用。这两种吸收途径的贡献取决于蚯蚓的品种和类型,以及污染物的理化性质^[17]。

国内外诸多研究表明,蚯蚓对污泥进行处理后,污泥中的重金属的量将减少,减少的原因一方面是由于蚯蚓的直接吸收富集作用,蚯蚓体内积累了一部分重金属,使污泥中重金属的量减少;另外的原因可能是蚯蚓的间接作用,蚯蚓具有很强的吞食能力,其消化道分泌的酶类物质、碳酸盐类物质和胶粘物质,分别可对绝大多数有机废弃物、pH值和重金属产生作用^[18-19]。大多数研究表明,污泥经蚯蚓处理后,pH值将显著降低,这将有损于重金属从污泥中的淋出,但也有研究发现蚯蚓处理污泥后其pH值上升或变化不大^[20-21]。本研究中,污泥经蚯蚓处理后,pH值稍有降低,由6.85降为6.35,这对重金属淋出的影响较小。所以本研究中污泥经蚯蚓处理后重金属含量下降的原因主要是蚯蚓的直接作用。

本研究中,经过蚯蚓处理后的污泥(蚓粪)施用于土壤后,相对于未处理污泥的施用,生菜中的重金属含量除Cd、Cr外都显著降低,产生这种现象的主要原

因是蚯蚓的作用使污泥中重金属的含量下降;而不同处理生菜体内Cr没有显著差异可能的原因是,相对于其他重金属,Cr容易发生迁移进入土壤深层而难于被植物根系吸收;重金属Cd在生菜体内的含量为污泥处理稍低于蚓粪处理,产生这种现象的可能原因是其他重金属对Cd吸收的拮抗作用。另外,由于污泥富含植物生长所需营养成分,植物生物量更大,造成了重金属在植物体内的所谓稀释效应,和其他重金属相比较,本研究中生菜对重金属Cd、Cr的吸收量相对较低,植物体内重金属含量的稀释效应更为显著,表现出来的现象就为不同处理Cr和Cd在生菜体内的量差异不显著,当然,这需通过实验进一步证实。

4 结论

污泥经蚯蚓处理后,理化性质发生了显著的变化,污泥的pH值、有机质、总氮和总磷都有不同程度的降低。

蚯蚓能吸收富集污泥中的重金属,其中对重金属Cd有较强的富集能力;蚯蚓处理使污泥中重金属的量均出现不同程度的下降。

生菜体内重金属Zn、Cu、Pb和Ni的含量污泥处理高于蚓粪处理;而重金属Cr和Cd的量则差异不显著和降低。

参考文献:

- [1] Zheng G D, Chen T B, Gao D, et al. Dynamic of lead speciation in sewage sludge composting[J]. *Water Science Technology*, 2004, 50:75-82.
- [2] Ayusho M, Pascual J A, Garcia C, et al. Evaluation of urbanwastes for agricultural use[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1996, 42:105-111.
- [3] Spinosa L, Vesilind P A. Sludge into biosolids[M]//Processing, Disposal, Utilization. IWA Publishing, London, UK, 2001.

- [4] Neuhauser E F, Cukic Z V, Malecki M R, et al. Bioconcentration and biokinetics of heavy metals in the earthworm[J]. *Environmental Pollution*, 1995, 89:292-301.
- [5] Ndegwa P M, Thompson S A, Das K C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 71:5-12.
- [6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1981:62-142.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analytical methods of soil physics and chemistry[M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Press, 1981:62-142.
- [7] Elvira C, Sampedro L, Benitez E, et al. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot scale study[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 63:205-211.
- [8] Mitchell. Production of *Eisenia foetida* and vermicompost from feedlot cattle manure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29:763-766.
- [9] Khwairakpam M, Bhargava R. Vermitechnology for sewage sludge recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161:948-954.
- [10] Suthar S. Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash using epigeic *Eisenia fetida* (Oligochaeta)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163:199-206.
- [11] 刘小丽. 蚯蚓处理对城市污泥肥效及重金属生物有效性的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2003.
LIU Xiao-li. The effects of earthworm treatment on the fertility and heavy metal bioavailability of sewage sludge[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2003.
- [12] 邓继福, 王振中, 张友梅, 等. 重金属污染对土壤动物群落生态的影响研究[J]. 环境科学, 1996, 17(2):1-5.
DENG Ji-fu, WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei, et al. A research on the ecological effect of the soil animals community by the heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1996, 17(2):1-5.
- [13] 戈峰, 刘向辉, 江炳缜. 蚯蚓对金属元素的富集作用分析[J]. 农业环境保护, 2002, 21(1):16-18.
GE Feng, LIU Xiang-hui, JIANG Bing-zhen. Accumulation of several metals in earthworm (*Eisenia foetida*)[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(1):16-18.
- [14] Edwards C A, Bohlen P J. The biology and ecology of earthworms (3rd Edition)[M]. Publ. Chapman & Hall, London, 1996.
- [15] Philipp E P, Römbke J, Meller T, et al. Bioaccumulation of lindane and hexachlorobenzene by tubificid sludgeworms (*Oligochaeta*) under standardised laboratory conditions[J]. *Chemosphere*, 1997, 35(4):835-852.
- [16] Loonen H, Muir D C G, Parson J R, et al. Bioaccumulation of polychlorinated dibenzodioxins in sediment by oligochaetes: Influence of exposure pathway and contact time[J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 1997, 16:1518-1525.
- [17] Belfroid A, Van Den Berg M, Seinen W, et al. Uptake, bioavailability and elimination of hydrophobic compounds in earthworms (*Eisenia andrei*) in field-contaminated soil[J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 1995, 14(4):605-612.
- [18] Brown G G. How do earthworm affect microfloral and faunal community diversity?[J]. *Plant and Soil*, 1995, 170(1):209-231.
- [19] Watanabe M E. Phytoremediation on the brink of commercialization[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(1):182-186.
- [20] Liu X L, Hu C X, Zhang S Z. Effects of earthworm activity on fertility and heavy metal bioavailability in sewage sludge[J]. *Environment International*, 2005, 31:874-879.
- [21] Agnieszka K, Monika T, Anna R. Application of willows (*Salix viminalis*) and earthworms (*Eisenia fetida*) in sewage sludge treatment[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(suppl):327-331.