

王富强, 王海波, 张禹, 等. 蚯蚓-木薯渣联合作用对热带城市污泥中重金属含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 437-441.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.126

# 蚯蚓-木薯渣联合作用对热带城市污泥中重金属含量的影响

王富强<sup>1,3</sup>, 王海波<sup>2,3</sup>, 张禹<sup>1,3</sup>, 程华民<sup>2,3</sup>, 赵洪伟<sup>1,3</sup>, 刁晓平<sup>2,3</sup>

(1. 海南大学环境与植物保护学院, 海南海口 570228; 2. 海南大学农学院, 海南海口 570228;

3. 海南省海口市环境毒理学重点实验室, 海南海口 570228)

**摘要:**通过蚯蚓-木薯渣联合作用与单一蚯蚓作用处理热带城市污泥试验, 比较研究了蚯蚓生物量、污泥理化性质及重金属含量变化情况, 并对污泥农用做了潜在生态风险评价, 比较2种处理方式对污泥的处理效果。结果表明: 蚯蚓-木薯渣联合作用不仅能够同时处理2种热带农业废弃物, 而且在增加蚯蚓生物量、降低污泥重金属含量及潜在生态风险方面的效果优于单一蚯蚓作用。联合组蚯蚓个体平均质量增幅115.33%, 高于单一组的106.33%, 总产茧量85.33个也高于单一组的76.33个。pH值分别下降0.47、0.80, 电导率分别增加793、1668  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 有机质分别降低15.5%、13.52%, 联合组全氮含量显著下降20.18%, 单一组降低不明显。联合组与单一组污泥中重金属含量降低次序分别为Pb、Cr、Zn、Ni、Cu和Pb、Zn、Cr、Ni、Cu, 联合组在Cr、Cu、Ni3种元素的降低效果中优于单一组, 处理后污泥重金属总量相对更低; 蚯蚓体内重金属富集次序分别为Cr、Ni、Pb、Cu、Zn和Ni、Cr、Cu、Pb、Zn, 联合组蚯蚓对Cr、Pb、Zn、Ni4种重金属的富集效果优于单一组, 富集重金属总量也高于单一组。通过Hakanson生态风险评估, 联合作用污泥处理后由中等风险变为低风险, 单一蚯蚓作用处理前后均为中等风险。

**关键词:**热带地区; 城市污泥; 赤子爱胜蚓; 木薯渣; 重金属

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)05-0437-05

城市污泥是污水处理的必然产物, 随着中国城市化的迅

速发展, 污水处理厂的数量日益增长, 大量的城市污泥也随之产生<sup>[1-2]</sup>。由于城市污泥中含有各种有机污染物、重金属、病原体等, 不经过恰当的处理会对环境造成严重污染<sup>[3]</sup>。

污泥的常规处理手段, 如露天堆置、卫生填埋、好氧和厌氧消化以及焚烧会造成更加严重的环境问题, 例如土壤和植物中毒, 地表和地下水污染及空气污染等等。一种新的人工湿地技术是基于人工湿地对污泥的可持续处理技术<sup>[4-6]</sup>, 但这种方法由于占用土地面积大、对气候要求高以及后续仍需净化处理而受到限制<sup>[7]</sup>; 污泥堆肥是另一个生态和经济可持

收稿日期: 2015-12-02

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2014BAD02B00); 海南省研究生创新课题(编号: hys2014-11); 海南大学环境毒理学研究生创新中心项目(编号: 01J1N10001003)。

作者简介: 王富强(1991—), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生, 从事固体废物资源化利用研究。E-mail: wangfuqiang1991@126.com。

通信作者: 刁晓平, 教授, 从事生态毒理学和废弃物资源化研究。

E-mail: diaoxip@hainu.edu.cn。

去除率升高, 当投加量达到0.6g左右时, 去除率趋于稳定, 其中以污泥和花生壳混合活性炭的效果最佳, 去除率达到88%; 在对铜的处理中, 只有商品活性炭有效, 在投加量达到0.5g时出现最低值, 去除率达到87%, 投加其余秸秆基活性炭时, 铜含量基本不随投加量变化, 甚至还有上升趋势, 这可能是污泥中含有的铜析出。综上研究, 添加秸秆基活性炭对生活污水中COD和磷酸盐有较好的处理效果, 其处理效果普遍高于商品活性炭, 其中污泥和花生壳混合制备的活性炭处理生活污水的效果最佳, 具体内部结构特征正在进一步研究, 初步证实果壳类提高活性炭性能明显。因此, 利用剩余污泥和农业废弃物混合制备活性炭具有很大的应用前景。

## 参考文献:

[1] 周品, 谷麟, 饶姗姗, 等. 秸秆-污泥复合基活性炭的制备及其对1,2,4-酸氧体的吸附特性[J]. 环境化学, 2013, 32(1): 106-111.

[2] 舒威. 污泥秸秆活性炭制备及参数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[3] Monsalvo V M, Mohedano A F, Rodriguez J J. Activated carbons from sewage sludge: Application to aqueous phase adsorption of 4-chlorophenol[J]. Desalination, 2011, 277(1/2/3): 377-382

[4] Ros A, Lillo-Rodenas M A, Fuente E, et al. High surface area materials prepared from sewage sludge-based precursors[J]. Chemosphere, 2006, 65(1): 132-140.

[5] Ahmadpour A, Do D D. The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation[J]. Carbon, 1997, 35(12): 1723-1732.

[6] 陈良霞, 陈亦然, 宋晓锋, 等. 玉米芯活性炭的制备及其吸附性能的实验研究[J]. 广州化工, 2013, 41(23): 82-85.

[7] 章圣祥. 城市污水污泥活性炭的制备技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.

[8] 宁桂兴, 刘晓静, 姜安平, 等. 两级MBR在垃圾渗滤液处理工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(19): 117-119.

续发展的处理技术,多年来应用较广<sup>[8-10]</sup>,但它存在耗时长、翻堆频繁、营养元素损失等问题<sup>[11]</sup>,仍有所制约。

蚯蚓堆肥处理<sup>[12]</sup>是在蚯蚓和微生物的共同作用下对有机物质进行生物降解的复杂过程,它可以将有有机废弃物快速、高效地转换成对植物和土壤有营养价值的产品,同时还可以收获大量蚯蚓,目前在世界各地已经成功用于处理各种类型的工业污泥与城市污泥<sup>[13-16]</sup>。

目前污泥农用仍然受到重金属难迁移、易富集、危害大等特点的制约<sup>[17]</sup>。以前的研究认为新鲜的城市污泥必须经过预处理后蚯蚓才能利用<sup>[12]</sup>,蚯蚓直接处理热带城市污泥的研究鲜有报道,而木薯渣由于含有氢氰酸、单宁和植酸等抗营养因子,再利用一直受到限制。本研究通过室内模拟试验,比较研究了蚯蚓-木薯渣联合作用与单一蚯蚓作用处理对热带城市污泥重金属含量的影响,并运用 Hakanson 潜在生态危害指数法对处理前后污泥农用潜在生态风险进行评价,旨在为热带地区同时处理 2 种有机废弃物提出新思路,为热带地区开展城市污泥与农业废弃物共同资源化利用提供基础数据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 供试材料

试验选用蚯蚓品种为赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*),饲养原料为牛粪,取自海南大学农学院蚯蚓养殖基地,选择环带明显、体质量在 300 mg 左右的成熟蚯蚓。污泥为取自海口白沙门污水处理厂二期的脱水污泥,呈灰黑色黏稠状,有异味,含水率约为 85% 左右。木薯渣取自琼中县某淀粉厂,自然风干,经粉碎机研磨过 2 mm 尼龙筛备用。

### 1.2 试验方法

本试验设蚯蚓-木薯渣联合作用(80%污泥+20%木薯渣)与单一蚯蚓作用(100%污泥)2组,根据污泥与木薯渣含水率按干物质质量 150.0 g 配比(湿质量大于 500 g),每个处理称量后混合均匀再装入盒。调整含水率至 70% 左右,放入规格为:上口 16.5 cm × 10.0 cm,下底 13.5 cm × 8.0 cm,高

6.5 cm 的 PVC 塑料盒中,每盒接种 15 条个体质量在 300 mg 左右、环带明显的赤子爱胜蚓。试验于室内自然条件下进行,试验期间不再补充水分。每个处理设 3 个重复,35 d 后处理结束,将蚯蚓及蚓茧用手全部取出。

### 1.3 分析方法

试验结束后用手将蚯蚓与蚓茧挑出计数,蚯蚓用去离子水洗净后滤纸擦干称质量。部分鲜样用于测定含水率、pH 值、电导率、有机质,其余部分冷冻干燥后研磨过 100 目筛,留作其他指标测定用;蚯蚓放入搪瓷盆中吐泥 2 d 后用蒸馏水洗净,液氮冷冻致死,于烘箱中 60 °C 烘干,取出后冷却研磨过 100 目筛待测重金属。

pH 值和电导率按干物质和水 1:10 混合后分别用 pH 值酸度计、电导率仪测定;有机质在 550 °C 马弗炉中灼烧 60 min 测定<sup>[18]</sup>;全氮测定采用凯氏定氮法(GB 11891—1989);污泥与蚯蚓体内重金属含量采用 USEPA 3050B 方法消解<sup>[19]</sup>,电感耦合等离子发射仪(美国 Thermo Elemental)测定。

### 1.4 数据处理与分析

试验结果表示为平均数 ± 标准偏差 ( $\bar{x} \pm s$ ),数据分析采用 SPSS 20.0 完成,对试验数据进行单因素方差分析,通过 *t* 检验分析组间的差异性,显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同处理方式对蚯蚓生物量的影响

由表 1 可以看出,试验结束时 2 种处理方式蚯蚓存活率相同且均高于 80%,表明蚯蚓能够适应热带城市污泥的环境,直接处理可行。试验结束蚯蚓-木薯渣联合作用处理组(简称联合组)与单一蚯蚓作用处理组(简称单一组)蚯蚓个体净增质量分别为 349.65、356.24 mg,联合组增幅 115.33%,高于单一组的 106.33%,总产茧量 85.33 个也高于单一组的 76.33 个,表明蚯蚓-木薯渣联合作用更有利于污泥处理过程中蚯蚓生物量的增加,效果更好。

表 1 蚯蚓的生物量变化

组别	初始蚓质量 (mg)	终末蚓质量 (mg)	增质量幅度 (%)	存活率 (%)	总产茧量 (个)
联合组	303.17 ± 8.65	652.82 ± 107.53	115.33	84.44 ± 0.47	85.33 ± 23.01
单一组	335.03 ± 27.33	691.27 ± 93.53	106.33	84.44 ± 0.47	76.33 ± 20.07

### 2.2 不同处理方式对污泥理化性质的影响

由表 2 可见,2 种方式处理后城市污泥理化性质均发生了显著的变化,pH 值、有机质均有不同程度降低,电导率(EC)都有提高,单因素方差分析表明处理前后均出现显著性差异( $P < 0.05$ )。联合组 pH 值由 6.27 降低至 5.78,EC 值增加 793  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,有机质降低了 15.5%,全氮含量降低 20.18% 而且表现出极显著差异( $P < 0.001$ );单一组 pH 值由 6.46 降低至 5.66,EC 值增加 1 668  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,有机质降低了 13.52%,全氮含量降低不明显。联合组处理前有机质含量 75.05% 显著高于对照的 59.61% 是由于添加了植物残体木薯渣引起的。

pH 值下降可能是由于在蚯蚓转化过程中产生了  $\text{CO}_2$  及有机酸,以及有机态的氮和磷在微生物作用下被矿化成硝酸盐、亚硝酸盐和磷酸盐引起的<sup>[11]</sup>,处理前后 pH 值都在最适宜

植物生长的 5.65 之间<sup>[20]</sup>,适于农用;EC 增加可能是由于有机质的损失以及蚯蚓处理可以将无机离子和矿物盐(如磷酸盐、铵盐、钾离子)从污泥中释放出来所引起的<sup>[21]</sup>。前人的研究已经证明蚯蚓能够加速不溶有机物质向可利用形态转变<sup>[22]</sup>,而且处理后 EC 值均未超过 3.0 mS/cm,均满足污泥农用 EC 值要求。pH 值的降低和 EC 值的增加与其他人研究蚯蚓处理污泥时的结论<sup>[12,15,23]</sup>一致。

杨文霞等发现蚯蚓加速有机质的矿化导致其含量降低<sup>[24]</sup>,根据前人的研究,转化过程中蚯蚓和微生物活动引起的 C 元素损失也会导致有机质降低<sup>[25]</sup>,而新陈代谢与矿化作用产生  $\text{CO}_2$ <sup>[26]</sup> 与  $\text{CH}_4$ <sup>[27]</sup> 是 C 元素损失的形式之一,蚯蚓处理过程中将污泥中的有机物质同化用于自身生长繁殖也会降低有机质含量<sup>[28]</sup>。联合组较单一组全氮含量降低显著可能与

表2 不同处理污泥 pH 值、EC、有机质和全氮变化

组别	pH 值	EC 值 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	有机质 (%)	全氮 (g/kg)
联合组处理前	6.27 $\pm$ 0.09	1 700.33 $\pm$ 24.95	75.05 $\pm$ 4.84	41.63 $\pm$ 0.12
联合组处理后	5.78 $\pm$ 0.10	2 493.33 $\pm$ 356.98	59.55 $\pm$ 1.85	33.23 $\pm$ 0.24
<i>F</i> 值	26.26 **	14.73 *	17.91 *	1 984.50 ***
单一组处理前	6.46 $\pm$ 0.07	1 308.33 $\pm$ 26.40	59.61 $\pm$ 0.19	41.17 $\pm$ 0.39
单一组处理后	5.66 $\pm$ 0.03	2 976.67 $\pm$ 96.70	46.09 $\pm$ 3.41	40.80 $\pm$ 0.92
<i>F</i> 值	234.20 ***	119.50 ***	31.36 **	0.27

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示同一处理前后在 0.001、0.01、0.05 水平上差异显著。下表同。

木薯渣促进了蚯蚓的吸收利用有关<sup>[29]</sup>,Hobson 曾报道氮含量的减少与蚯蚓消化道内的脱氮作用有关,国内也有研究发现污泥经蚯蚓处理后全氮含量下降可能是蚯蚓在处理过程中利用污泥中的有机质用于自身生长繁殖<sup>[30]</sup>,这与有机质含量变化结果相符。

### 2.3 不同处理方式对污泥中重金属含量的影响

由表3可见,联合组重金属 Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 含量分别减少了 25.56%、31.52%、6.03%、19.23% 和 18.54%,单一组

分别减少 17.12%、38.75%、5.39%、34.80% 和 15.72%,联合组重金属含量降低次序为: Pb、Cr、Zn、Ni、Cu,单一组为: Pb、Zn、Cr、Ni、Cu。2 种处理方式单因素方差分析结果表明 Pb、Zn、Ni 3 种重金属元素含量均显著下降( $P < 0.05$ ),联合组 Cr 含量极显著降低( $P < 0.01$ )而单一降低不显著( $P > 0.05$ ),2 组 Cu 含量处理前后差异均不显著( $P > 0.05$ )。联合组在 Cr、Cu、Ni 3 种元素的降低效果中优于单一组,处理后污泥重金属总量相对更低,更适合农用。

表3 不同处理污泥重金属含量的变化

组别	污泥重金属含量(mg/kg)				
	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni
联合组处理前	144.59 $\pm$ 2.92	51.27 $\pm$ 3.69	182.33 $\pm$ 4.92	1 287.67 $\pm$ 26.96	19.85 $\pm$ 0.77
联合组处理后	107.64 $\pm$ 6.88	35.11 $\pm$ 1.87	171.33 $\pm$ 4.92	1 040.00 $\pm$ 14.35	16.17 $\pm$ 1.25
<i>F</i> 值	48.79 **	30.47 **	4.99	131.50 ***	12.69 *
幅度	25.56%	31.52%	6.03%	19.23%	18.54%
单一组处理前	166.31 $\pm$ 10.24	57.99 $\pm$ 2.85	222.67 $\pm$ 6.02	1 681.00 $\pm$ 73.70	22.20 $\pm$ 0.87
单一组处理后	137.83 $\pm$ 11.84	35.52 $\pm$ 1.21	210.67 $\pm$ 7.59	1 095.93 $\pm$ 92.77	18.71 $\pm$ 0.27
<i>F</i> 值	6.62	105.20 **	3.07	48.81 **	29.68 **
幅度	17.12%	38.75%	5.39%	34.80%	15.72%

微量元素在较低含量可能会促进植物生长,但含量过高则会对植物生长产生不利影响<sup>[31]</sup>,同时还容易引起环境污染,这也是限制污泥农用的主要因素之一。前人研究中重金属含量既有上升的结果<sup>[26]</sup>,也会出现下降的结论<sup>[25]</sup>,这是由于有机质的降低会导致相对质量减少引起重金属含量上升,蚯蚓对重金属元素的富集作用<sup>[32]</sup>与间接作用(分泌物对 pH 值和重金属产生作用)<sup>[33-34]</sup>则会导致其含量下降,本试验中 2 种方式重金属含量均出现下降,表明蚯蚓对重金属元素的生物积累与间接作用效果大于其相对质量损失的效果,与 Suthar 的研究结果<sup>[35]</sup>相似。联合组中的木薯渣对蚯蚓的摄食及肠道微环境必然会产生影响,而蚯蚓对重金属的富集与蚯蚓黄色细胞和肠道中的酶密切相关<sup>[36-37]</sup>,因此可能会导致试验中降低次序不同的结果出现。

根据海南省土壤背景 pH 值<sup>[38]</sup>,2 种方式处理后污泥粪中除了 Zn 其余元素含量均低于国家污泥农用标准(GB 4284—1984)<sup>[39]</sup>,Zn 含量联合组更低,均略微高于标准值,考虑到 Zn 是植物生长普遍需要的微量元素之一,而且海口市土壤中 Zn 含量较低<sup>[38]</sup>,因此热带城市污泥经处理后可以作为含 Zn 的缓释肥<sup>[40]</sup>。

### 2.4 不同处理方式蚯蚓体内重金属水平的变化

2 种处理方式处理结束后蚯蚓体内重金属含量变化如表 4 所示,联合组与单一组蚯蚓体内 Cr、Pb、Cu、Ni 含量均极显

著增加( $P < 0.01$ ),Zn 含量增加均不显著( $P > 0.05$ )。联合组蚯蚓富集次序为: Cr、Ni、Pb、Cu、Zn,单一组富集次序为: Ni、Cr、Cu、Pb、Zn。联合组蚯蚓对 Cr、Pb、Zn、Ni 这 4 种重金属的富集效果优于单一组,富集重金属总量也高于单一组。

蚯蚓体内重金属含量的上升可能是由于蚯蚓表皮对可溶性元素的吸附作用及肠道的消化作用导致的<sup>[41]</sup>,之前的研究已经证实蚯蚓能够富集受污染的有机废弃物但与其物种特异性和摄取物料不同有关系<sup>[42]</sup>,本试验中联合组与单一组蚯蚓体内富集重金属含量的大小和次序不同的结果与之一致。

重金属含量在蚯蚓体内的上升与在污泥中的降低结果表明蚯蚓的生物积累是降低污泥中重金属含量的主要原因,而且联合组富集效果更好。

### 2.5 污泥处理前后重金属潜在生态风险评估

热带城市污泥经过蚯蚓堆肥处理的最终目的是实现安全农用,考虑到施用后不同重金属污染的复合效应及其对土壤、农作物及人体健康的危害不同,在多种重金属元素风险评估方法中选择了 Hakanson 于 1980 年提出的潜在生态危害指数法<sup>[43]</sup>,此法能够综合考虑土壤重金属背景值、污泥重金属污染程度与环境效应,比单一的含量评价更能客观反映污泥重金属潜在危害。其计算公式如(1)所示:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i (C_s^i / C_n^i) \quad (1)$$

表4 不同处理蚯蚓体内重金属含量的变化

组别	蚯蚓体内重金属含量(mg/kg)				
	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni
处理前	1.85 ± 0.06aA	0.72 ± 0.01aA	10.50 ± 0.58aA	102.33 ± 1.89aA	1.52 ± 0.03aA
联合组处理后	6.36 ± 0.18cB	0.92 ± 0.04bB	12.23 ± 0.48bB	113.67 ± 6.13aA	5.14 ± 0.06cB
富集程度	244.00%	27.78%	16.47%	11.08%	238.16%
单一组处理后	5.02 ± 0.09bB	0.89 ± 0.01bB	13.52 ± 0.40cB	107.67 ± 6.94aA	4.79 ± 0.02bB
富集程度	171.35%	23.61%	28.76	5.22%	215.32%
F值	695.30***	32.75**	18.94**	2.16	4 299.90***

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ );不同大写字母表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

式中: $C_s^i$ 为污泥中重金属*i*的实测值; $C_n^i$ 为重金属*i*的参比值,本研究考虑实际情况及其他参考文献选取了我国土壤环境质量一级标准值<sup>[44]</sup>(表5); $T_i^i$ 为重金属*i*的毒性系数,根据Hakanson的标准化响应系数为标准(表5); $E_r^i$ 为单因子*i*的潜在生态危害指数。 $RI$ 为多种重金属复合生态危害指数。污泥潜在生态风险评价标准如表6所示。

蚯蚓处理前后热带城市污泥重金属潜在生态危害评价结果如表7所示,5种重金属的潜在生态危害指数( $E_r^i$ )大小顺序均为:Cu、Zn、Pb、Cr、Ni,毒性危害最强的是Cu,最大危害指数达到144.2(单一组处理前)。蚯蚓处理后5种重金属元素危害指数均下降,联合组复合生态危害指数( $RI$ )处理后风险程度由中等风险降低至低风险,单一组处理前后均为中等风险。因此,在热带地区蚯蚓-木薯渣联合作用处理城市污泥较蚯蚓单一蚯蚓处理更能降低处理后污泥农用的潜在生态风险。

表5 重金属的参比值和毒性系数

重金属	参比值(mg/kg)	毒性系数
Cr	26.57	2
Pb	26.44	5
Cu	7.72	5
Zn	47.10	1
Ni	6.38	2

表6 重金属潜在生态危害评价标准

$E_r^i$	$RI$	潜在生态危害程度
≤40	≤150	低
41~80	150~300	中等
81~160	301~600	重
161~320	601~1 200	严重
>320	>1 200	极严重

表7 热带城市污泥重金属潜在生态危害评价

组别	$E_r^i$					$RI$	风险程度
	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni		
联合组处理前	10.9	3.9	118.1	27.3	6.2	166.4	中等
联合组处理后	8.1	2.7	111.0	22.1	5.1	149.0	低
单一组处理前	12.5	4.4	144.2	35.7	7.0	203.8	中等
单一组处理后	10.4	2.7	136.4	23.3	5.9	178.7	中等

### 3 结论

2种处理方式蚯蚓均能适应热带城市污泥的环境,蚯蚓-木薯渣联合作用更能促进蚯蚓生物量增加。

联合作用与单一蚯蚓作用在对热带城市污泥的矿化能力和有机物降解能力上基本一致,pH值、有机质、全氮含量均有不同程度降低,EC值均显著增加,联合作用对污泥全氮矿化作用更好。

蚯蚓处理使污泥中重金属含量均有所下降,联合作用在Cr、Cu、Ni 3种元素的降低效果中优于单一蚯蚓作用,处理后污泥重金属总量相对更低;联合作用蚯蚓对Cr、Pb、Zn、Ni这4种重金属的富集效果优于单一蚯蚓作用,富集重金属总量也较高,生物积累是污泥中金属含量降低的主要原因。

联合作用能够降低污泥农用的潜在生态风险等级,处理后污泥重金属潜在生态危害程度由中等风险降低至低风险,而单一蚯蚓作用则仍属于中等风险。

### 参考文献:

- [1]张丽丽,李花粉,苏德纯.我国城市污水处理厂污泥中重金属分布特征及变化规律[J].环境科学研究,2013,26(3):313-319.
- [2]王强,吴悦颖,文字立,等.中国污水处理设施建设现状与存在问题研究[J].环境污染与防治,2015,37(3):94-97.
- [3]Lasheen M R, Ammar N S. Assessment of metals speciation in sewage sludge and stabilized sludge from different wastewater treatment plants, Greater Cairo, Egypt[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2-3):740-749.
- [4]Peruzzi E, Macci C, Doni S, et al. Phragmites australis for sewage sludge stabilization[J]. Desalination, 2009, 246(1):110-119.
- [5]Uggetti E, Llorens E, Pedescoll A, et al. Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds; characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(17):3882-3890.
- [6]P. Melidis, Gikas G, Akrotos C, et al. Dewatering of primary settled urban sludge in a vertical flow wetland[J]. Desalination, 2010, 250(1):395-398.
- [7]Zwara W, Obarska - Pempkowiak H. Polish experience with sewage sludge utilization in reed beds[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(1):65-68.
- [8]Fang M, Wong J W. Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting[J]. Environmental Pollution, 1999, 106(1):83-89.
- [9]Zhou H B, Ma C, Gao D, et al. Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting[J]. Bioresource technology, 2014, 152:329-336.
- [10]Nikaen M, Nafez A H, Bina B, et al. Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting[J]. Waste Management, 2015, 39:104-110.

- [11] Ndegwa P M, Thompson S A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids [ J ]. *Bioresource technology*, 2001, 76(2) : 107 – 112.
- [12] Fu X, Huang K, Chen X, et al. Feasibility of vermistabilization for fresh pelletized dewatered sludge with earthworms *Bimastus parvus* [ J ]. *Bioresource technology*, 2015, 175 : 646 – 650.
- [13] Domínguez J, Edwards C A, Webster M. Vermicomposting of sewage sludge: Effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm *Eisenia andrei* [ J ]. *Pedobiologia*, 2000, 44(1) : 24 – 32.
- [14] Vigueros L C, Camperos E R. Vermicomposting of sewage sludge: a new technology for Mexico [ J ]. *Water Science & Technology*, 2002, 46(10) : 153 – 158.
- [15] Gupta R, Garg V K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(3) : 1023 – 1030.
- [16] Negi R, Suthar S. Vermistabilization of paper mill wastewater sludge using *Eisenia fetida* [ J ]. *Bioresource Technology*, 2013, 128 : 193 – 198.
- [17] 高红莉, 周文宗, 张 璐, 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.
- [18] Nelson D, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter [ M ] // Page A L. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Washington D C: Amer Society of Agronomy, 1982 : 539 – 579.
- [19] Edgell K. USEPA method study 37 SW – 846 method 3050 acid digestion of sediments, sludges, and soils [ M ]. US Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, 1989.
- [20] Goh K M, Haynes R. Evaluation of potting media for commercial nursery production of container grown plants: III. Effects of media, fertiliser nitrogen, and a nitrification inhibitor on soil nitrification and nitrogen recovery of *Callistephus chinensis* ( L. ) Nees ‘ Pink Princess ’ [ J ]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1977, 20(3) : 383 – 393.
- [21] Garg P, Gupta A, Satya S. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: a comparative study [ J ]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(3) : 391 – 395.
- [22] Liu J, Lu Z, Yang J, et al. Effect of earthworms on the performance and microbial communities of excess sludge treatment process in vermifilter [ J ]. *Bioresource Technology*, 2012, 117 : 214 – 221.
- [23] Hait S, Tare V. Vermistabilization of primary sewage sludge [ J ]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3) : 2812 – 2820.
- [24] 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.
- [25] Khwairakpam M, Bhargava R. Bioconversion of filter mud using vermicomposting employing two exotic and one local earthworm species [ J ]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(23) : 5846 – 5852.
- [26] Vig A P, Singh J, Wani S H, et al. Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* ( Savigny ) [ J ]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(17) : 7941 – 7945.
- [27] Hobson A, Frederickson J, Dise N B. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in – vessel pre – treatment [ J ]. *Waste Management*, 2005, 25(4) : 345 – 352.
- [28] 冯 磊, 李润东, 李延吉, 等. 城市有机垃圾蚯蚓堆肥处理的实验研究 [ J ]. *江苏环境科技*, 2006, 19(4) : 10 – 12.
- [29] 王丹丹, 李辉信, 胡 锋, 等. 蚯蚓 – 秸秆及其交互作用对黑麦草修复 Cu 污染土壤的影响 [ J ]. *生态学报*, 2007, 27(4) : 1292 – 1299.
- [30] 徐铁群, 周 璟, 董秀华, 等. 蚯蚓活动对城市生活污水重金属的影响 [ J ]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12) : 2431 – 2435.
- [31] Whittle A J, Dyson A J. The fate of heavy metals in green waste composting [ J ]. *Environmentalist*, 2002, 22(1) : 13 – 21.
- [32] Wang L, Zhang Y, Lian 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.
- [33] Brown G G. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? The significance and regulation of soil biodiversity [ M ]. London: Springer, 1995 : 247 – 269.
- [34] Watanabe M E. Phytoremediation on the brink of commercialization [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(4) : 182 – 186.
- [35] Suthar S. Metal remediation from partially composted distillery sludge using composting earthworm *Eisenia fetida* [ J ]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008, 10(9) : 1099 – 1106.
- [36] Vijver M G, Wolterbeek H T, Vink J P, 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 ]. *Science of the Total Environment*, 2005, 340(1) : 271 – 280.
- [37] Morgan A J, Stürzenbaum S R, Winters C, et al. Differential metallothionein expression in earthworm (*Lumbricus rubellus*) tissues [ J ]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 57(1) : 11 – 19.
- [38] 何玉生. 海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估 [ J ]. *生态学杂志*, 2014, 33(2) : 421 – 428.
- [39] GB 4284—1984 农用污泥中污染物控制标准 [ S ].
- [40] 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.
- [41] Yadav A, Garg V. Vermicomposting – An effective tool for the management of invasive weed *Parthenium hysterophorus* [ J ]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10) : 5891 – 5895.
- [42] Suthar S, Singh S. Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge from a distillery industry [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2008, 394(2) : 237 – 243.
- [43] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [ J ]. *Water Research*, 1980, 14(8) : 975 – 1001.
- [44] GB 15618—1995 土壤环境质量标准 [ S ].