

李 恒, 龙 柱, 冯群策. 废纸脱墨污泥蚯蚓生物处理效应[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(9): 358–360.

# 废纸脱墨污泥蚯蚓生物处理效应

李 恒, 龙 柱, 冯群策

(江南大学纺织服装学院造纸研究室/江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122)

**摘要:**探讨采用大平 2 号蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥的最佳工艺条件、污泥重金属和肥效等变化, 以及蚯蚓对污泥重金属的吸收或富集作用, 结果表明, 在脱墨污泥: 大豆秸秆: 稻壳(大豆秸秆、稻壳为辅料)质量比为 100: 1: 1 条件下, 蚯蚓生物处理脱墨污泥的最佳培养时间为 30 d, 最佳蚯蚓投放量为 20 g/500 g 污泥; 最佳工艺条件下, 蚯蚓生物处理污泥 Cu、As 的去除率分别达到 43%、57%, 污泥全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量分别上升 25%、75%、10%; 蚯蚓对于污泥中 Cu 的吸收系数  $K=0.47$ , 对 As 的富集系数  $K=1.73$ , 蚯蚓对脱墨污泥中重金属的去除能力  $As > Cu$ 。

**关键词:**脱墨污泥; 蚯蚓; 重金属; 肥效; 富集作用

**中图分类号:** X793 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)09-0358-03

废纸资源的循环利用是我国造纸工业发展的一大特色, 废纸造纸的兴起推动了我国造纸工业的快速发展; 但是, 从目前我国造纸生产的运行情况 & 环境保护角度来看, 造纸工业主要固体废弃物——废纸脱墨污泥的无害化处理与资源化利用是造纸工业亟待解决的重大问题。据中国造纸协会调查资料显示, 2012 年全国纸浆生产总量为 7 867 万 t, 其中, 废纸浆 5 983 万 t, 较 2011 年增长 5.71%<sup>[1]</sup>。另据统计, 2012 年全国废纸脱墨污泥的产量为 200 万~250 万 t。随着国家对环保的要求越来越高, 废纸循环利用的比例进一步增大, 废纸脱墨污泥的产量也将会更加巨大。目前, 对废纸脱墨污泥的处理主要是堆积填埋和焚烧。堆积填埋的缺点是占用大量土地、

不能根治污染; 焚烧处理的缺点是投资运营费用较高, 易产生尾气污染<sup>[2]</sup>。Hartenstein 最早提出的蚯蚓生物处理技术具有成本低廉、二次污染少等特点, 可以有效降低污泥中重金属含量, 提高污泥肥效, 使处理后的脱墨污泥可以应用于农业生产, 成为优质的有机肥, 实现污泥的“减量化、无害化、资源化”<sup>[3]</sup>。国内外对于利用蚯蚓生物处理造纸污泥的研究已有少量报道。刘鸿雁等对蚯蚓生物处理竹浆造纸污泥后污泥的肥效和重金属 Pb、Zn、Cu 的变化进行了研究<sup>[4]</sup>; 李丹等研究了蚯蚓生物处理造纸活性污泥过程中蚯蚓的生长繁殖情况<sup>[5]</sup>; Banu 等对生物处理造纸废水污泥的蚯蚓种类及接种密度进行了研究<sup>[6]</sup>。对于利用蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥的研究还未见报道。为此, 本试验对大平 2 号蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥的最佳工艺条件、污泥重金属和肥效等变化, 以及蚯蚓对污泥重金属的吸收或富集作用等进行研究, 为蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥的开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

废纸脱墨污泥来自广西某造纸厂, 利用 100% 废纸生产

收稿日期: 2013-11-19

基金项目: 江苏省科技支撑计划(编号: BE2012427); 江苏高校优势学科建设工程。

作者简介: 李 恒(1989—), 男, 江苏无锡人, 硕士, 从事造纸工业固体废弃物的资源化利用研究。E-mail: liyuheng1989@126.com。

通信作者: 龙 柱, 博士, 教授, 博士生导师, 从事制浆造纸技术、纤维功能材料和生物资源综合利用研究。E-mail: longzhu@jiangnan.edu.cn。

[3] Howarth R B, Farber S. Accounting for the value of ecosystem services[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 421–429.

[4] 欧阳芳, 赵紫华, 戈 峰. 昆虫的生态服务功能[J]. *应用昆虫学报*, 2013, 50(2): 305–310.

[5] Nee S. More than meets the eye: earth's real biodiversity is invisible, whether we like it or not[J]. *Nature*, 2004, 429: 804–805.

[6] 申效诚. 河南昆虫名录[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.

[7] 田 华. 河南昆虫资源的研究现状及展望[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(9): 113–115.

[8] Chee Y. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services[J]. *Biological Conservation*, 2004, 120: 549–565.

[9] 赵景柱, 肖 寒, 吴 刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290–292.

[10] Losey J, Vaughan M. The economic value of ecological services provided by insects[J]. *BioScience*, 2006, 56(4): 311–323.

[11] Dadour I, Allen J. Control of bush flies by dung beetles[EB/OL].

(2006-02-16)[2013-10-01]. <https://www.agric.wa.gov.au/land-use/control-bush-flies-dung-beetles>.

[12] SAS Institute. SAS/STAT user's guide[R]. Release Cary (NC), 1992.

[13] Bai M. Ecological value and conservation significances of dung beetles. [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2010, 47(1): 39–46.

[14] Anderson J R, Merritt R W, Loomis E C. The insect-free cattle dropping and its relationship to increased dung fouling of rangeland pastures[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1984, 77: 133–141.

[15] Gillard P. Coprophagous beetles in pasture ecosystems[J]. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 1967, 33: 30–34.

[16] Fincher G. The potential value of dung beetles in pasture ecosystems [J]. *Journal of the Georgia Entomological Society*, 1981, 16: 301–316.

[17] 河南省统计局. 河南统计年鉴: 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

新闻纸,所用废纸由 85% 的 8#美国废纸和 15% 的 10#美国废纸组成。供试的蚯蚓品种为日本大平 2 号蚯蚓,购于无锡市某养殖场。

1.2 试验设计

1.2.1 蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥最佳培养时间和最佳蚯蚓投放量的单因素试验 (1)最佳培养时间:将蚯蚓放于装有脱墨污泥的花盆中,置于阴暗处培养,每个花盆中污泥重量为 500 g,蚯蚓投放量为 20 g,培养时间分别设定为 15、30、60 d;(2)最佳蚯蚓投放量:设置 3 个不同的蚯蚓投放量,蚯蚓和污泥的质量比分别为 1:50、1:25、1:12.5,即每 500 g 脱墨污泥中分别投放 10、20、40 g 蚯蚓,培养时间为 30 d。培养温度均为 25~30 ℃,污泥湿度均为 70%~85%<sup>[7]</sup>。根据蚯蚓生物分解脱墨污泥重金属去除效果,确定最佳的培养时间和蚯蚓投放量。

1.2.2 蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥添加辅料对照试验 在原始脱墨污泥中添加辅料,辅料为大豆秸秆和稻壳,辅料与污泥质量比为:脱墨污泥:大豆秸秆:稻壳=100:1:1,培养时间和蚯蚓投放量根据单因素试验得到的最佳培养时间和最佳投放量进行设定。

表 1 脱墨污泥中重金属含量与农用污泥污染物控制标准(GB 4284—1984)

名称	含量(mg/kg)						
	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	As
农用污泥控制标准	269	328	40	214	235	0.06	114
酸性土壤控制标准	250	500	100	600	300	5	75
碱性土壤控制标准	500	1 000	200	1 000	1 000	20	75

由图 1 可见,在 0~30 d 内,脱墨污泥中重金属 Cu 和 As 的含量逐步减少,30 d 时 Cu 和 As 的含量降至最低,这主要是由蚯蚓对脱墨污泥的摄食及其体表对重金属的被动扩散吸收<sup>[11]</sup>所致;在 30~60 d 内,污泥中重金属 Cu 和 As 均有小幅增加,这可能是由于蚯蚓的排泄等所致,使蚯蚓吸收污泥中的重金属重新转移到脱墨污泥中。因此,蚯蚓生物处理脱墨污泥的最佳培养时间为 30 d,此时,脱墨污泥中重金属 Cu 和 As 的去除率分别高达 37% 和 51%。

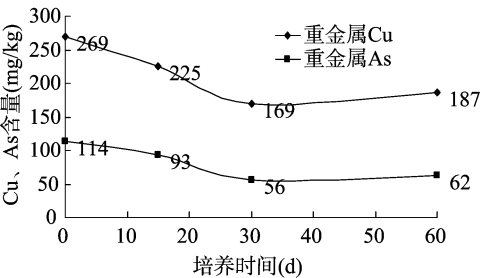


图 1 脱墨污泥中重金属 Cu、As 含量随培养时间的变化

由图 2 可见,随着蚯蚓投放量的增大,脱墨污泥中重金属 Cu 含量先减小再增大;在蚯蚓投放量为 20 g 时,脱墨污泥中重金属 Cu 含量降至最低;当蚯蚓投放量继续增大,重金属 Cu 含量反而升高,这可能是由于过多的蚯蚓投放量导致蚯蚓的种内竞争剧烈,蚯蚓吸收重金属 Cu 的能力下降;随着蚯蚓投放量的增加,重金属 As 含量逐步降低,蚯蚓投放量为 20~40 g 时,脱墨污泥中重金属 As 的去除效果无明显差异。因

1.3 测定方法与仪器

污泥和蚯蚓金属含量参考相关文献<sup>[8-9]</sup>,采用原子吸收分光光度计法进行测定;污泥有机质、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、pH 值测定方法参考土壤农业化学分析方法<sup>[10]</sup>。

试验仪器包括原子吸收分光光度计(美国 Varian 公司,型号 Spectr AA-220/220Z)、元素分析仪(德国 Elementar 公司,型号 Vario EL III)、可见分光光度计(日本岛津公司,型号 UV-2450)等。

2 结果与分析

2.1 不同培养天数和蚯蚓投放量对废纸脱墨污泥产金属的去除效果

废纸脱墨污泥是废纸在浮选脱墨过程中形成的固体废物。本试验脱墨污泥中主要含有 8#美国废旧报纸中的填料和涂料以及 10#美国废旧杂志纸中的颜料、胶黏剂、助剂等,另外还含有细小纤维、短纤维、粗渣、油墨粒子和杂质等。由表 1 可见,农用污泥中 As 含量控制标准超过酸性土壤和碱性土壤,Cu 含量控制标准超过了酸性土壤,As 和 Cu 是污泥主要的污染控制源。

此,蚯蚓生物处理脱墨污泥的最佳蚯蚓投放量为 20 g/500 g 污泥,此时,蚯蚓对污泥中重金属 Cu 和 As 的去除效果最好。

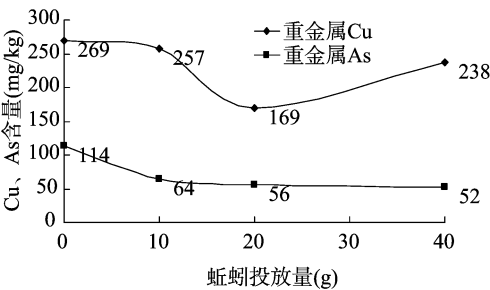
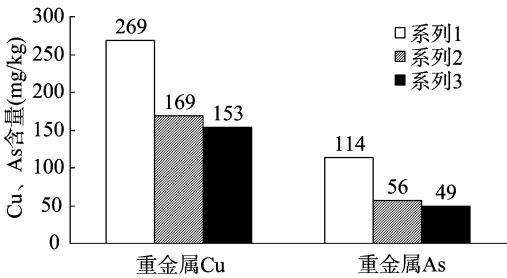


图 2 脱墨污泥中重金属 Cu、As 含量随蚯蚓投放量的变化

2.2 蚯蚓生物处理脱墨污泥中添加辅料对重金属的去除效果

大豆秸秆和稻壳中富含 N、P、K 等营养元素,通过在脱墨污泥中添加一定量的大豆秸秆和稻壳,不仅可以调节污泥的碳氮比例(C/N),促进蚯蚓生长繁殖<sup>[12]</sup>,还可以调节污泥中水分含量和透气性,使蚯蚓在脱墨污泥中的生存环境得以改善。由图 3 可见,脱墨污泥中添加大豆秸秆和稻壳后,污泥中重金属 Cu、As 的去除率分别高达 43%、57%,处理效果均高于未添加辅料的,这与 Lee 的研究结果一致<sup>[13]</sup>。

由表 2 可见,通过蚯蚓+辅料生物处理脱墨污泥,脱墨污泥中的 TN、TP、TK 含量均有不同程度增加,增长幅度分别为 25%、75%、10%,含量均高于国家一级土壤养分标准,污泥肥效增加的主要原因是蚯蚓有着丰富的酶系统,通过蚯蚓与微



系列1为未处理脱墨污泥，系列2为蚯蚓处理脱墨污泥，  
系列3为蚯蚓+辅料处理脱墨污泥

图3 脱墨污泥添加辅料对重金属Cu、As的含量变化

生物的共同作用，可以促进污泥中 N、P 的转化，蚯蚓排泄的蚯蚓粪中富含蛋白质、磷脂等有机养分<sup>[14]</sup>，另一个原因是大豆秸秆和稻壳的加入，增加了污泥中 TN、TP、TK 的总量；污泥中有机质含量有所降低，这主要是由于蚯蚓的生物分解作用，使污泥中的有机碳向无机碳进行转化，小分子有机和无机气体会不断排出<sup>[15]</sup>；污泥 pH 值变化不明显，pH 值由处理前的 7.7 增加至 7.9，这可能是由于蚯蚓消化道产生了一定的氨、蚯蚓体内钙腺还会分泌一定量的碳酸钙<sup>[16]</sup>所致。

表 2 添加辅料对照试验中污泥肥效及其他理化性质变化

处理	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有机质 (g/kg)	pH 值
未处理污泥	2.8	1.2	81	295	7.4
蚯蚓处理污泥	2.9	1.5	83	269	7.7
蚯蚓 + 辅料处理污泥	3.5	2.1	89	254	7.9
一级土壤养分标准	2	1	25	40	-

2.3 蚯蚓对脱墨污泥重金属的吸收或富集作用

根据蚯蚓体内重金属含量浓度与脱墨污泥中重金属含量浓度比值  $K$  的大小，可以分析蚯蚓对脱墨污泥中重金属的吸收或富集能力。当  $K$  小于等于 1 时，称其为吸收系数，说明蚯蚓对某种重金属有吸收作用，但是没有富集作用；当  $K$  大于 1 时，称其为富集系数，说明蚯蚓对某种重金属有吸收富集作用<sup>[17]</sup>。对添加辅料的脱墨污泥进行蚯蚓生物处理试验，试验前蚯蚓体内重金属 Cu 和 As 的本底值分别为 25 mg/kg 和 53 mg/kg，试验结束后蚯蚓体内 Cu 和 As 含量分别为 72 mg/kg 和 85 mg/kg。经计算，蚯蚓对重金属 Cu 的吸收系数  $K = 0.47 (< 1)$ ，只具有吸收作用，不具有富集作用，这说明蚯蚓可能会在吸收重金属 Cu 的过程中，当 Cu 浓度超过其耐受极限后，会把一部分 Cu 排出体外；蚯蚓对于重金属 As 的富集系数  $K = 1.73 (> 1)$ ，不仅具有吸收作用，还可以通过其消化系统富集重金属 As，这说明蚯蚓对于 As 有很高的耐受极限，As 可以在蚯蚓体内不断累积，蚯蚓对 As 有更好的吸收富集作用。

3 小结

在培养时间为 30 d、蚯蚓投放量为 20 g/500 g 污泥的试验条件下，利用日本大平 2 号蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥（添加一定量辅料），蚯蚓对污泥中 Cu、As 的去除率分别达到 43%、57%，污泥中超标重金属 Cu、As 含量均能符合国标

（GB 4284—1984）要求；处理后污泥肥效有所增加，TN、TP、TK 增幅分别为 25%、75%、10%，其含量均高于国家一级土壤养分标准；蚯蚓对 Cu 的吸收系数  $K = 0.47$ ，对 As 的富集系数  $K = 1.73$ ，蚯蚓对脱墨污泥中重金属 As 的去除能力大于 Cu。

利用蚯蚓生物处理废纸脱墨污泥，不仅可以降低脱墨污泥对环境的污染风险，保护生态环境，还可以把处理后的污泥应用于农业生产，作为有机肥料使用，变废为宝，这为发展循环经济，为造纸工业主要固体废弃物——废纸脱墨污泥的处理处置和资源化利用提供了经济、便捷、有效的途径。

参考文献：

[1] 中国造纸协会. 中国造纸工业 2012 年度报告[J]. 中华纸业, 2013, 34(11): 10-16.

[2] 王玉峰, 石葆莹. 脱墨污泥的处理与资源化利用研究进展[C]//中国造纸学会第十五届学术年会论文集. 北京: 中国造纸学会, 2012: 378-382.

[3] Hartenstein R, Hartenstein F. Physico-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida* [J]. Journal of Environmental Quality, 1981, 10(3): 377-381.

[4] 刘鸿雁, 郭端华, 范敏, 等. 造纸污泥蚯蚓生物处理效应研究[J]. 贵州化工, 2009, 34(5): 33-35.

[5] 李丹, 王德汉, 曾婷, 等. 接种蚯蚓堆制处理造纸污泥的试验研究[J]. 中国造纸学报, 2010, 25(1): 22-26.

[6] Banu J R, Logakanthi S, Vijayalakshmi G S. Biomanagement of paper mill sludge using an indigenous (*Lampito mauritii*) and two exotic (*Eudrilus eugineae* and *Eisenia foetida*) earthworms[J]. Journal of Environmental Biology, 2001, 22(3): 181-185.

[7] 贾辉. 利用蚯蚓处理污水厂活性污泥过程中蚯蚓生长繁殖的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008: 2-3.

[8] 袁琳, 周小春. 火焰原子吸收分光光度法测量土壤中铜、锌的含量[J]. 江西化工, 2010(1): 98-100.

[9] 伍曼娇, 吴湘江, 罗能, 等. 原子吸收法测定污泥蚯蚓中的镉、铜、铬、锌、铅[J]. 化学分析计量, 2008, 17(1): 55-56.

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106-137.

[11] 黄春, 郭端华, 段建军, 等. 蚯蚓对造纸污泥中重金属的处理效应研究[J]. 贵州化工, 2010, 35(5): 5-8.

[12] Pius M, Ndegwa S A, Tompson. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids[J]. Bioresource Technology, 2000, 75(1): 7-12.

[13] Lee K E. Some trends and opportunities in earthworm research or: Darwin's children - the future of our discipline[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1992, 24(12): 1705-1711.

[14] Cortez J, Hameed R, Bouche M B. C and N transfer in soil with or without earthworms fed with <sup>14</sup>C- and <sup>15</sup>N- labelled wheat straw [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1989, 21(4): 491-497.

[15] 桂长华. 蚯蚓堆制处理污泥过程中有机质降解效果、影响因素及其机制探讨[D]. 上海: 上海大学, 2007.

[16] 成杰民, 解敏丽, 朱宇恩. 赤子爱胜蚓对 3 种污染土壤中 Zn 及 Pb 的活化机理研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 91-97.

[17] 牛明芬, 崔玉珍. 蚯蚓对垃圾与底泥中镉的富集现象[J]. 农村生态环境, 1997, 13(3): 53-54.