

城市污泥的蚯蚓分解处理技术研究进展*

高红莉 周文宗 张 砾 李洪涛

(河南省科学院地理研究所 郑州 450052)

摘 要 城市污泥成分复杂,其中有机质、N、P、K含量丰富,Ca、Mg、Fe等矿物营养成分含量较高,此外还有许多重金属(Zn、Cu、Cd、Cr、Pb、Ni、Hg、As、Sn等)、有机有害成分以及病原菌。本文分析了国内外关于污泥处理处置的主要方法及其优缺点,重点讨论了一种新兴城市污泥处理技术,即城市污泥的蚯蚓分解处理技术(Vermicomposting),利用蚯蚓处理城市污泥,不仅可以将污泥中的重金属富集于蚯蚓体内、去除病原菌、转移消化有机有害物,而且可将城市污泥转化为富含营养物质的有机肥,是一种无害化处理城市污泥的有效途径。最后,总结了目前城市污泥蚯蚓分解处理技术研究中存在的问题,并展望了其研究发展趋势。

关键词 蚯蚓 城市污泥 重金属 生物分解处理技术

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2008)03-0788-06

Development of earthworm as a potential municipal sewage sludge disposal source

GAO Hong-Li, ZHOU Wen-Zong, ZHANG Luo, LI Hong-Tao

(Institute of Geography, Henan Province Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China)

Abstract Sewage sludge is a complex waste that contains abundant organic matter, nutrient elements (N, P, K, Ca, Mg, Fe, etc.), heavy-metals (Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, Ni, Hg, As, Sn, etc.), and harmful organic pollutants and pathogens. This paper reviews major traditional methods of treating and disposing municipal sewage sludge and compares the merits and demerits of the methods. Following the review, we emphasize a new disposal method — application of earthworm in municipal sewage sludge biodegradation or vermicomposting. Earthworm enriches heavy-metals (Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, etc.), eliminates pathogens, transfers and digests organic pollutants in vermicomposting, and the final sewage sludge product can easily be processed into nutritional organic fertilizer. Though vermicomposting is an effective method for harmlessly disposing sewage sludge, this paper highlights the problems associated with vermicomposting municipal sewage sludge and suggests that future studies focus on these problems to further understand and enhance the technology.

Key words Earthworm, Municipal sewage sludge, Heavy-metal, Vermicomposting

(Received Oct. 8, 2006; accepted April 29, 2007)

随着我国社会经济和城市化的发展,城市污水的产生及其数量在不断增长。到2001年为止全国已建成运转和正在兴建的城市污水处理厂约427个,年处理能力为113.6亿t^[1,2]。城市污泥是污水处理后的附属品,污泥量通常占污水量的0.3%~0.5%(体积),或约为污水处理量的1%~2%(质量),它是一种由有机残片、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,城市污泥处置及其对环境的影响已成为我国新

兴的环境问题之一,受到广泛的关注。2002年底,我国产生干污泥260万t,脱水污泥(含水量80%)1300万t。根据有关预测,我国城市污水量还会有较大增长,2020年城市脱水污泥年排放量将达到3000万t以上,可产生600万t干污泥。如何解决城市污泥是一个十分紧迫的问题^[3-5]。

1 城市污泥处理处置技术的国内外进展

通常把污水厂污泥的稳定和脱水(一般脱水至含水率达70%~80%)称作污泥的处理;将污泥的堆肥、填埋、干化和加热处理及最终利用,称为污泥的处置。从世界范围看,目前一些发达国家对于污

* 河南省属科研单位社会公益类项目预研专项(0641071002)资助

高红莉(1969~),女,硕士,高级工程师,主要从事食物链与食品安全研究。E-mail: hong4800@yahoo.com.cn

收稿日期:2006-10-08 接受日期:2007-04-29

泥处置的方法大致采用污泥焚烧、卫生填埋、海洋倾倒、污泥堆肥、污泥农用等^[1]。美国20世纪80年代末污泥以填埋为主,约占42%;1996年美国约有570万t干污泥,其中大约36%(210万t)用于农田,1998年约59%用于农田。日本由于国土面积较小,污泥焚烧约占63%,土地利用22%,填埋5%,其他约10%。欧盟各成员国的侧重不尽相同,目前卢森堡、丹麦和法国主要以污泥农用为主,丹麦、荷兰及芬兰等国污泥的农业利用分别占总量的43%、53%和40%(1990年),爱尔兰、芬兰和葡萄牙等国污泥农用的比例还会逐步增加,而法国、卢森堡、德国和荷兰则计划加大焚烧的比例。即使一个国家的不同地区污泥处置也有所侧重,如在英国北部大型工业城市,由于污泥中重金属含量较高且含有一些有毒成分,因此焚烧比例较大,约占50%;英国的其他城市则以污泥农业利用为主,1998年100万t污泥中的55%被用于农田,到2002年150万t污泥的61%被用于农田^[6-9]。

污泥处理和处置技术在我国起步较晚,针对我国国情,污泥干化焚烧工艺工程投资和运行费用相对较高,在大城市、大型城镇群以及用地紧张地区比较适用;污泥堆肥必须结合用户的需求,在市场调研的基础上,可以考虑推广应用^[2,10]。目前,我国在各种污泥处置方法中,农用约占44.8%,陆地填埋约占31%,其他处置约占10.5%,另有大约13.7%的城市污泥未经任何处理便重新回到自然界中。污泥的农田利用由于既能为作物提供营养成分、改良和培肥土壤,又能大量处理污泥,从而受到国内外的普遍重视,若将污泥加以利用,每年可得到价值相当于9500万美元的商品化肥^[11,12]。

以上几种方法,焚烧法的技术与设备复杂,能耗大,投资高,并伴有大气污染问题;填埋法受到用地的限制,且填埋场周围的环境也会恶化;投海会污染海洋,对海洋生态系统和人类食物链造成威胁,国际公约已明令禁止;用堆肥法处理后的城市污泥进行农业利用,具有经济简便、可资源化等优点,但重金属和病原菌、有机物等有毒有害污染物在土壤中的累积是污泥堆肥使用中的一个重大障碍。近年来发达国家已就促进厌氧消化进程技术和污泥减量技术展开研究。通过各种预处理(如热解法、水解酸化法、碱处理等)来提高污泥的厌氧消化性能;通过臭氧氧化、超声波技术、解耦联代谢、生物分解处理等措施进行污泥减量化处理。利用蚯蚓及微生物的生命活动来处理城市污泥是一项古老而又年轻的生物技术。美国CBS公司开发和拥有的城市垃圾生化处理系统,是利用高科技对城市生活垃圾和污泥进行有机合成,既解决了城市垃

圾堆放和填埋所带来的问题,又生产出急需的有机肥料,使城市的生态进入良性循环^[13]。国内也有一些科研机构开展了利用蚯蚓处理污泥的试验研究^[14,15]。剩余污泥经蚯蚓稳定处理后,可全部被生态系统吸收利用和转化。

2 城市污泥的生态处理——蚯蚓生物分解处理技术(Vermicomposting)

蚯蚓分解污泥的研究起源于20世纪70年代,Hartenstein等^[16,17]将利用蚯蚓分解处理污泥的方法称为蚯蚓生物分解处理技术。此后陆续有些实验室进行了相关研究,认识到蚯蚓可消化好氧污泥,排出蚓粪,在此过程中污泥被分解和稳定化的速度比不用蚯蚓处理的对照组快3倍,尤其是蚓粪中的微生物分解污泥速度更快,且臭味消失快,病原微生物如沙门氏菌、埃希氏菌和其他病原菌显著减少^[18,19]。

2.1 蚯蚓分解处理城市污泥的基础研究

城市污泥中含有大量的N、P、K及有机质,还有大量的Fe、Al、Ca、Mg、S、Na等元素,同时污泥中还有许多动植物所必需的微量元素,可以缓慢释放,具有长效性^[5,20]。我国污水处理厂脱水污泥有机质为215~667 g·kg⁻¹,平均335 g·kg⁻¹;总氮为11~48 g·kg⁻¹,平均26 g·kg⁻¹;总磷为6.1~17.5 g·kg⁻¹,平均10.3 g·kg⁻¹;总钾为3.3~14.9 g·kg⁻¹,平均8.6 g·kg⁻¹^[11];不同污水处理厂的污泥样品中矿质元素Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Mn和B的总量存在明显差别,同一种元素在不同污水处理厂的污泥中含量相差明显,如Ca为1.6%~5.7%,Mg为0.6%~1.3%,Fe为2.3%~6.6%,Zn为846.54~6718.87 mg·kg⁻¹,Cu为245.70~2051.26 mg·kg⁻¹,Mn为217.29~1221.29 mg·kg⁻¹,B为2.54~41.81 mg·kg⁻¹^[20,21]。Sommers^[22]研究认为污泥中养分元素含量变化很大,如铵态氮为5~67600 mg·kg⁻¹,硝态氮为2~4900 mg·kg⁻¹,总磷为1.0~14.3 g·kg⁻¹,总钾为0.2~26.4 g·kg⁻¹。污泥是一种富含有机质(但C/N较低,一般低于10)、高氮、高磷而低钾的有机混合物,pH为中性或偏酸性,其养分含量高于一般的禽畜粪便。

鉴于工农业的发展和蓬勃的城镇化建设,工农业废水和生活污水的排放猛增,污水处理厂所产生的污泥如何稳定是亟待解决的一个大问题。国际上提倡采用蚯蚓养殖作为稳定污泥和其他有机废物的方法。污泥蚯蚓稳定法是把污泥和固体城市垃圾、泥炭、秸秆、树皮和锯末等混合在一起,用蚯蚓加以处理^[23],节省了焚烧垃圾所需的能源,避免对大气与水源造成二次污染。

蚯蚓分解污泥的基础研究多集中于蚯蚓在污泥中的生长条件研究包括污泥和其他配料的配比、温度、密度、日粮水平等,以及蚯蚓在此环境中的生长速度和繁殖状况。Hartenstein 等^[17]进行了蚯蚓分解处理活性污泥试验,结果发现大约 1 g 蚯蚓 5 d 可分解 4 g 活性污泥;Neuhauser 等^[24]研究认为,蚯蚓日摄食水平与摄食种类有关,蚯蚓的最佳生长密度马粪中为 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,活性污泥中 $2.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;Datar 等^[25]研究结果显示,随蚯蚓密度的增加,蚯蚓在城市固体废弃物中的生长速度降低;Dominguez 等^[26]研究了废纸、废纸箱、杂草、松针、锯末和食品废弃物与城市污泥混合物(1:1 干重)对蚯蚓生长和繁殖的影响,结果表明:蚯蚓在污泥和食品废弃物混合物中生长速度最快,可达 $18.6 \pm 0.6 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,在污泥与锯末混合物中生长速度最慢,为 $11.0 \pm 0.7 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,在废纸、纸箱与污泥混合物中繁殖速度较快,分别为 2.82 ± 0.39 只蚓茧 \cdot 周 $^{-1}$ 和 3.19 ± 0.30 只蚓茧 \cdot 周 $^{-1}$,单独喂养污泥的对照组只有 0.05 ± 0.01 只蚓茧 \cdot 周 $^{-1}$ 。波兰的一些工厂利用蚯蚓处理污泥,得到一种无气味、类腐殖质、含有高营养值的产品,研究表明蚯蚓能破坏污泥的含脂块状物质,生产一种适合作植物生长培养基的有机肥料^[27]。

在我国,杨健采用蚯蚓生态滤池对生物膜污泥进行分解稳定性试验,吴敏、杨健利用由蚯蚓和微生物共同组成的人工生态系统对污水处理厂剩余污泥进行了为期半年的脱水和稳定处理,结果表明蚯蚓和微生物可以将污泥作为生长营养源,对其进行分解和吸收^[14,28,29]。以上研究表明城市污泥通过蚯蚓的消化系统,在各种酶的作用下能迅速分解、转化,成为自身或其他生物易于利用的营养物质,既可生产优良的动物蛋白,又可生产肥沃的复合有机肥。

2.2 城市污泥中的重金属和其他有毒有害物对蚯蚓生长的影响

2.2.1 城市污泥中的重金属和其他有毒有害物

城市污泥来源于各种工业和生活污水,不可避免含有一些对环境和生物有害的物质。其中的重金属由于具有难迁移、易富集、危害大等特点一直是限制污泥利用的最主要因素。周立祥等^[30]发现,污泥中的重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As) 66% ~ 84% 存在于污泥的生物絮凝体组分中,生物絮凝体组分是污泥中有效重金属的主要提供者;Tessier 等^[31]采用分级提取的办法,将重金属分为交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残余态 5 个组分。许多研究结果证明^[32-34],施用污泥增加了土壤和作物中的重金属含量,对土壤中的

蚯蚓等小型生物和微生物的种群数量和密度也有影响,因此许多国家都对可农业利用污泥的重金属含量做了明确规定,关注的重点主要放在 Cd、Pb、As、Cu、Zn 等一些对环境、生物和人类健康有严重危害的元素。

美国环境工作署 1988 年的调查结果表明,污泥中含有甲苯、氯苯,且每个样品中至少发现了 42 种杀虫剂中的 2 种,许多这类有机化合物对人体及动物有毒。城市污泥中还含有大量的病原菌及致癌物质,其中病原菌在堆肥处理过程中能被有效降低。虽然有部分病原菌在一定条件下会再生,但施入土壤后,土著微生物有阻止这些病原菌再生的作用,所以经堆肥化或消化处理的污泥施入土壤中不会引起病原菌的污染^[9,35]。如果先将污泥进行短期堆肥,然后引入蚯蚓消化分解污泥,既可减少污泥中的病原菌,又可达到污泥减量化和资源化的目的^[35]。

2.2.2 蚯蚓富集重金属和有毒有害物的相关研究

在生态系统中,某些有机元素、重金属及其化合物,通过食物链会逐渐在生物体内浓缩,呈现出营养级越高,浓度越来越大的现象,这种随食物链浓缩的作用称为生物富集作用或生物扩大作用(Biological magnification)。国内外研究表明^[36,37],蚯蚓对农药和重金属的积聚能力强,例如对 BHC(即六六六)、DDT(即二二三)、PCB(即多氯联二苯)等农药的积聚能力比外界大 10 倍,对重金属 Cd、Pb、Hg 等的积聚能力比土壤大 2.5 ~ 7.2 倍,对 Cu 的富集系数为土壤的 2.4 ~ 51.2 倍。蚯蚓具有富集 Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、Se 等重金属的能力,对部分重金属的富集系数较高。在金属元素含量的 Spearman 秩相关分析中发现,蚯蚓对各元素的富集系数 K 值排序为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb}$,有些蚯蚓组织含 Cu 量相当于体重的 0.14%。戈峰等^[38]报道了蚯蚓对 Cu 和 Se 元素的富集;牛明芬等^[39]通过研究蚯蚓处理垃圾及纳污河流底泥,发现蚯蚓可选择吸收并富集垃圾及底泥中的 Cd,但对其他重金属元素 Pb、Cu、Zn 等并无此种富集吸收现象。这些研究说明蚯蚓对不同重金属有着不同的忍受能力。

Morgan 等^[40]研究发现蚯蚓体内重金属含量与土壤中的 Cd、Cu、Pb、Zn 浓度呈正相关关系,并且土壤有机质、pH、Ca 含量对这些金属的吸收有显著影响;Kruse 等^[41]以蚯蚓为指示物,研究了蚯蚓对城市污泥和肥料中重金属 Cd、Cu、Pb 的富集作用,发现添加重金属后,蚯蚓体内 Cd 含量是对照组 and 无机肥处理组的 9 倍,Cu、Pb 的浓度也显著高于无机肥处理组和对照组;Kizilkaya^[42]研究了蚯蚓对施用城

市污泥的土壤中 Cu、Zn 的富集作用。因此可利用蚯蚓富集污泥重金属、去除有毒有害物。通过蚯蚓的水平或垂直运动,还可对污染物起疏散、降解作用。美国 Florida 州 Orange 市利用蚯蚓每天可消耗其体重 2 倍的有机生物废弃物,并把生物废弃物中的致病微生物减少到远低于美国环保局提出的评价指标,达到 A 级肥料标准^[43]。城市污泥中的重金属、有机废弃物和病原物是否可以通过蚯蚓的取食和消化减少到安全范围,有待于进一步的研究报道。

2.2.3 城市污泥中重金属和有毒有害物对蚯蚓生长的影响

重金属对生物体具有一定的毒性,不同种蚯蚓对重金属污染程度的忍受力不同。有关重金属对蚯蚓的毒性试验的报道有^[44-46]:重金属污染的土壤中蚯蚓体内重金属生物积累对蚯蚓胃肠道黏膜上皮细胞超微结构的毒害作用,致使蚯蚓胃肠道黏膜上皮细胞发生不同程度的病理性变化。不同重金属对蚯蚓产生的急性毒性效应以及相关毒性毒理研究。土壤重金属污染对蚯蚓的急性毒性效应研究,测定了 Cu、Zn、Pb、Cd 单一/复合污染对蚯蚓的急性致死及亚致死效应,结果表明 Cu、Pb 浓度与蚯蚓死亡率显著相关($\alpha=0.05$, $R_{Cu}=0.86$, $R_{Pb}=0.87$), Cu 浓度与生长抑制相关($\alpha=0.05$, $R_{Cu}=0.84$),其他供试重金属浓度与蚯蚓死亡率和生长抑制率相关性不显著;蚯蚓金属毒性的耐受程度差别较大,在 Cu、Zn、Pb、Cd 单一污染引起大于 10% 蚯蚓死亡的浓度下复合污染导致 100% 蚯蚓死亡,表明复合污染极强的协同效应,蚯蚓对重金属复合污染的毒性响应远比单一污染条件下敏感。Spurgeon 等^[47]报道了重金属污染土壤对蚯蚓种群及其生长繁殖效应的影响,发现蚯蚓的分布密度与土壤中的金属浓度呈负相关。由此可以推断城市污泥重金属和有毒有害物也将对蚯蚓生长造成一定影响。

2.3 蚯蚓对城市污泥的处理效果

有关城市污泥重金属和其他污染物处理的研究多集中于化学方法,即通过向污泥中添加生石灰、粉煤灰、磷矿石、沸石、草炭等吸收其中的重金属、减少病原菌,使其有效态减少,并达到减量化的目的。利用生物方法处理污泥重金属有生物吸附法和生物浸滤法,生物吸附利用小型生物吸附截获剩余活性污泥重金属使二沉池污泥重金属明显减少;生物浸滤通过细菌、微生物对污泥中铁和硫的氧化作用使污泥中氧化还原电位(Eh)升高,pH 值降低,从而使重金属发生溶解,将溶解的重金属淋滤出来,就可降低重金属含量。与传统的化学方法

相比,生物处理过程可使成本减少 80%^[48]。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,可利用蚯蚓去除污泥重金属污染。

蚯蚓消化吸收污泥中的有机质产生的蚯蚓粪便含有大量微生物群落和复杂的有机化学成分,并具有特殊的物理结构,可改善污泥的各种理化结构,消除污泥臭味,在此过程中既有物理/机械作用(污泥好氧消化、混合、粉碎),也有生物化学过程(污泥在蚯蚓消化道的生物分解消化)。吴敏、杨健^[14,29]利用蚯蚓和微生物对污水处理厂剩余污泥进行处理,结果表明蚯蚓生态系统集浓缩、调理、脱水、稳定、处置和综合利用等多种功能于一身,可将污泥全部进行分解和吸收;向迎洪等^[49]进行了有关蚯蚓处理剩余污泥影响因素的实验研究,结果表明,采用人工养殖蚯蚓的方式处理剩余污泥是可行的。国外利用蚯蚓处理污泥也有相关报道,Dominguez 等^[50]和 Kaushik 等^[51]研究了蚯蚓处理污泥的条件,认为蚯蚓可以降低污泥碳氮比,蚯蚓处理后污泥剩余物中总氮、总磷、总钾、总钙都得到提高,脱水污泥可直接喂蚯蚓,不需堆肥发酵或老化,分析污泥来料的污染水平并依此与清洁的有机物混合后饲喂蚯蚓,可使蚯蚓脱落物达到 A 级或 B 级稳定标准。蚯蚓处理剩余污泥无论在能耗、物耗还是二次污染物的数量方面均体现了最小化的优势(蚯蚓的增殖和蚓粪的积累在长期生态循环中并不明显)。总之蚯蚓消化城市污泥是可行的,可以利用蚯蚓将富含有机质的城市污泥转化为高效的生物有机肥——蚓粪,为污泥资源化和产业化提供技术支持。

3 蚯蚓分解处理城市污泥研究中的问题与展望

利用蚯蚓处理城市污泥的效果非常明显,目前的研究多集中在污泥碳氮比的调整、蚯蚓密度的选择、试验温度的控制、蚯蚓生长繁殖状况、蚯蚓生物反应器指数以及污泥减量效果等方面。目前尚存在的问题一是蚯蚓富集城市污泥重金属、分解其中病原物、有毒有害物的相关研究未见报道。蚯蚓处理城市污泥时,因不同种蚯蚓的食性不同,在富集重金属、分解病原物 and 有毒有害物时也具有选择性,这方面的研究对城市污泥无害化非常关键。二是城市污泥中重金属、有毒有害物对蚯蚓的毒性试验研究较少。通过毒性试验研究,可以选择蚯蚓品种、调节污泥碳氮比、添加辅助填料从而将污泥对蚯蚓的毒害作用减少,达到有效处理污泥、减少污染的目的。三是富集了城市污泥重金属和污染物

的蚯蚓的后续利用问题也没有相关研究。用来处理城市污泥的蚯蚓,经过驯化后不仅可以用来处理城市污泥,还可处理造纸污泥、化纤污泥等。我国城市污泥 Pb、Cd、Hg、As 等含量较低,对蚯蚓使用影响较小,主要超标成分 Cu、Zn 等元素被蚯蚓富集以后,可以作为动物蛋白饲料(控制用量)喂养鸡、鸭、鱼、猪等,还可制造强身健体的保健食品、药酒、药膳、口服液等保健品,作为食品、饲料添加剂,在食品、医药、饲料和环保等领域有广泛的应用。蚯蚓分解处理城市污泥的主要产物蚯蚓粪的用途很广,可以作为生物有机肥用在大田作物、蔬菜、果树、花卉上,增加营养,改良土壤,减少土传病虫害,还可替代部分能量饲料喂养猪、肉鸡、蛋鸡等;蚯蚓粪为团粒结构,孔隙大,可以吸附臭气作为除臭剂使用;蚓粪含有多种氨基酸、有益微生物和酶类,还可作为浮游生物培养剂使用。

随着工业进程的发展和人类对蚯蚓研究的不断深入,蚯蚓的生态功能和经济应用价值日趋明显。蚯蚓生物分解处理技术可以实现城市污泥的“三化”(无害化、资源化、产业化)处理目标,对环境不产生二次污染,具有流程简单、管理方便、造价和运行费用低廉、副产物具有经济利用价值、经济效益高等特点,逐渐成为一种新兴的污泥处置方法,为解决城市污水厂污泥的最终处置问题提供了生态利用的新途径。

参考文献

- [1] 李季,吴为中. 国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析[M]//徐强. 污泥处理处置技术及装置. 北京:化学工业出版社,2003:1-11
- [2] 金儒霖,刘永龄. 污泥处置[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985:232-300
- [3] 邹绍文,张树青,王玉军,等. 中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景[J]. 中国农学通报,2005,21(1):198-201
- [4] 胡忻,陈茂林,吴云海,等. 城市污水处理厂污泥化学组分与重金属元素形态分布研究[J]. 农业环境科学学报,2005,24(2):387-391
- [5] 李艳霞,陈同斌,罗维,等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报,2003,23(11):2464-2474
- [6] 薛栋森. 美国污水污泥的研究和利用概况[J]. 国外农业环境保护,1991(1):31-33
- [7] Snyman H. G., De J. M., Aveling T. Stabilization of sewage sludge applied to agricultural land and the effects on maize seeding[J]. Water Science and Technology, 1998,38(2):87-95
- [8] Vasseur L., Shipley W., Anseau C. Potential for municipal sewage sludge application on agricultural lands in southern Quebec[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 1999,34(3):469-480
- [9] 谷平,王睿译. 污泥作肥安全吗[J]. 国外科技动态, 1999(6):17-19
- [10] 赵丽君. 污泥处理与处置技术的进展[J]. 中国给水排水,2001,17(6):23-25
- [11] 谭启玲,胡承孝,赵斌,等. 城市污泥的特性及其农业利用现状[J]. 华中农业大学学报,2002,21(6):587-592
- [12] Wang M. J. Land application of sewage sludge in China[J]. The Science of the Total Environ., 1997,197:149-160
- [13] 丁吉震. CBS 城市垃圾处理方法索引[J]. 煤矿环境保护,2001,15(2):25-27
- [14] 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
- [15] 梁鹏,黄霞,钱易,等. 污泥减量技术的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(1):44-52
- [16] Hartenstein R. The most important problem in sludge management as seen by a biologist[M]// Hartenstein R. Utilization of Soil Organisms in Sludge Management. Springfield, Virginia; Natl. Tech. Inf. Serv., 1978:2-8
- [17] Hartenstein R., Hartenstein F. Physico-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida*[J]. Journal of Environmental Quality, 1981,10(3):377-382
- [18] Neuhauser E. F., Loehr R. C., Malecki M. R. The potential of earthworms for managing sewage sludge[M]// Edwards C. A., Neuhauser E. F. Earthworms in Waste and Environmental Management. The Hague, The Netherlands; SPB Academic Publishing BV, 1988:9-20
- [19] Reinecke A. J., Viljoen S. A., Saayman R. J. The suitability of *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus* and *Eisenia foetida* (Oligochaeta) for vermicomposting in southern Africa in terms of their temperature requirements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992,24:1295-1307
- [20] 胡忻,王超,陈茂林,等. 中国部分城市污泥中矿质元素形态与生物可利用性研究[J]. 环境污染与防治, 2004,26(6):455-457
- [21] 乔显亮,骆永明. 我国部分城市污泥化学组成及其农用地标准初探[J]. 土壤,2001(4):205-209
- [22] Sommers L. E. Chemical composition of sewage sludge and analysis of their potential use as fertilizers[J]. J. Environ. Qual., 1977,6:225-232
- [23] Protopopov N. F. New vermitechnology approach for sewage sludge utilization in northern and temperate climates all year round[J]. Environmental Research Forum, 1996, 5/6:413-416
- [24] Neuhauser E. F., Hartenstein R., Kaplan D. L. Growth of the earthworm *Eisenia foetida* in relation to population density and food rationing[J]. Oikos, 1980,35(1):93-98
- [25] Datar M. T., Rao M. N., Reddy S. Vermicomposting—

- a technological option for solid waste management[J]. J. Solid Waste Technol. Mgt., 1997, 24(2): 89-93
- [26] Dominguez 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: 24-32
- [27] 汪洪生. 国外污泥处理技术进展[J]. 污染防治技术, 1998, 11(1): 32-33
- [28] 杨健. 生物滤池污泥的生态稳定试验研究[J]. 上海环境科学, 2002, 21(9): 533-535
- [29] 杨健, 吴敏. 城市污水厂混合污泥的生态稳定处理[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(6): 345-347
- [30] 周立祥, 沈其荣, 陈同斌, 等. 重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 269-274
- [31] Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulated metals[J]. Analysis of Chemistry, 1979, 51(7): 844-851
- [32] 乔显亮, 骆永明, 吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. 土壤, 2000(2): 79-85
- [33] 蒋成爱, 黄国锋, 吴启堂. 城市污水污泥处理利用研究进展[J]. 农业环境与发展, 1999, 16(1): 13-17
- [34] McLaughlin M. J., Haman R. E., McLaren R. G., et al. Review: A bioavailability based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand[J]. Aust. J. Soil Res., 2000, 38: 1037-1086
- [35] Ndegwa P. E., Thompson S. A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids[J]. Bioresource Technology, 2001, 76(2): 107-112
- [36] 伊文英. 中国土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 323
- [37] 陈玉成, 皮广洁, 黄伦先, 等. 城市生活垃圾蚯蚓处理的因素优化及其重金属富集研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2006-2010
- [38] 戈峰, 刘向辉, 江炳缤. 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
- [39] 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
- [40] Morgan J. E., Morgan A. J. Earthworms as biological monitors of cadmium, copper, lead and zinc in metalliferous soils[J]. Environmental Pollution, 1988, 54(2): 123-138
- [41] Kruse E. A., Barrett G. W. Effects of municipal sludge and fertilizer on heavy metal accumulation in earthworms[J]. Environmental Pollution (Series A), 1985, 38(3): 235-244
- [42] Kizilkaya R. Cu and Zn accumulation in earthworm *Lumbricus terrestris* L. in sewage sludge amended soil and fractions of Cu and Zn in casts and surrounding soil[J]. Ecological Engineering, 2004, 22(2): 141-151
- [43] 王友斌, 王俊起. 美国蚯蚓堆肥处理生物废弃物简介[J]. 中国卫生工程学, 2002(14): 251
- [44] 郭永灿, 王振中, 张友梅, 等. 重金属对蚯蚓的毒性毒理研究[J]. 应用与环境生物学报, 1996, 2(1): 132-140
- [45] 贾秀英, 李喜梅, 杨亚琴, 等. Cu、Cr(VI)复合污染对蚯蚓急性毒性效应的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 31-34
- [46] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 土壤重金属污染对蚯蚓的急性毒性效应研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 187-190
- [47] Spurgeon D. J., Hopkin S. P. Effects of metal-contaminated soils on the growth, sexual development, and early cocoon production of the earthworm *Eisenia foetida*, with particular reference to Zinc[J]. Ecotox. Environ. Safety, 1996, 35: 86-95
- [48] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 微生物方法降低城市污泥的重金属含量研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(5): 511-515
- [49] 向洪迎, 张清东, 庄景宏. 污水厂剩余污泥的生物小循环多级处理研究[J]. 西南科技大学学报, 2004, 19(3): 71-74
- [50] Dominguez J., Parmelee R. W., Edwards C. A. Interactions between *Eisenia andrei* (Oligochaeta) and nematode populations during vermicomposting[J]. Pedobiologia, 2003, 47: 53-60
- [51] Kaushik P., Garg V. K. Dynamics of biological and chemical parameters during vermicomposting of solid textile mill sludge mixed with cow dung and agricultural residues[J]. Bioresource Technology, 2004, 94(2): 203-209

城市污泥的蚯蚓分解处理技术研究进展

作者: [高红莉](#), [周文宗](#), [张砾](#), [李洪涛](#), [GAO Hong-Li](#), [ZHOU Wen-Zong](#), [ZHANG Luo](#), [LI Hong-Tao](#)
作者单位: [河南省科学院地理研究所, 郑州, 450052](#)
刊名: [中国生态农业学报](#) 
英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF ECO-AGRICULTURE](#)
年, 卷(期): 2008, 16(3)
被引用次数: 14次

参考文献(51条)

1. [李季;吴为中](#) [国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析](#) 2003
2. [金儒霖;刘永龄](#) [污泥处置](#) 1985
3. [邹绍文;张树青;王玉军](#) [中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景](#)[期刊论文]-[中国农学通报](#) 2005(01)
4. [胡忻;陈茂林;吴云海](#) [城市污水处理厂污泥化学组分与重金属元素形态分布研究](#)[期刊论文]-[农业环境科学学报](#) 2005(02)
5. [李艳霞;陈同斌;罗维](#) [中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用](#)[期刊论文]-[生态学报](#) 2003(11)
6. [薛栋森](#) [美国污水污泥的研究和利用概况](#) 1991(01)
7. [Snyman H.G;De J.M;Aveling T](#) [Stabilization of sewage sludge applied to agricultural land and the effects on maize seeding](#)[外文期刊] 1998(02)
8. [Vasseur L;Shipley W;Ansseau C](#) [Potential for municipal sewage sludge application on agricultural lands in southern Quebec](#)[外文期刊] 1999(03)
9. [谷平;王耆](#) [污泥作肥安全吗](#) 1999(06)
10. [赵丽君](#) [污泥处理与处置技术的进展](#)[期刊论文]-[中国给水排水](#) 2001(06)
11. [谭启玲;胡承孝;赵斌](#) [城市污泥的特性及其农业利用现状](#)[期刊论文]-[华中农业大学学报](#) 2002(06)
12. [Wang M.J](#) [Land application of sewage sludge in China](#)[外文期刊] 1997(1/3)
13. [丁吉震](#) [CBS城市垃圾处理方法索引](#)[期刊论文]-[煤矿环境保护](#) 2001(02)
14. [吴敏;杨健](#) [蚯蚓生态床处理剩余污泥](#)[期刊论文]-[中国给水排水](#) 2003(05)
15. [梁鹏;黄霞;钱易](#) [污泥减量化技术的研究进展](#)[期刊论文]-[环境污染治理技术与设备](#) 2003(01)
16. [Hartenstein R](#) [The most important problem in sludge management as seen by a biologist](#) 1978
17. [Hartenstein R;Hartenstein F](#) [Physico-chemical changes affected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida*](#)[外文期刊] 1981(03)
18. [Neuhauser E.F;Loehr R.C;Malecki M.R](#) [The potential of earthworms for managing sewage sludge](#) 1988
19. [Reinecke A.J;Viljoen S.A;Saayman R.J](#) [The suitability of *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus* and *Eisenia fetida*\(Oligochaeta\) for vermicomposting in southern Africa in terms of their temperature requirements](#)[外文期刊] 1992
20. [胡忻;王超;陈茂林](#) [中国部分城市污泥中矿质元素形态与生物可利用性研究](#)[期刊论文]-[环境污染与防治](#) 2004(06)
21. [乔显亮;骆永明](#) [我国部分城市污泥化学组成及其农用标准初探](#)[期刊论文]-[土壤](#) 2001(04)
22. [Sommers L.E](#) [Chemical composition of sewage sludge and analysis of their potential use as fertilizers](#)[外文期刊] 1977

23. [Protopopov N.F](#) [New vermitechnology approach for sewage sludge utilization in northern and temperate climates all year round](#) 1996
24. [Neuhauser E.F](#); [Hartenstein R](#); [Kaplan D.L](#) [Growth of the earthworm *Eisenia foetida* in relation to population density and food rationing](#)[外文期刊] 1980(01)
25. [Datar M.T](#); [Rao M.N](#); [Reddy S](#) [Vermicomposting a technological option for solid waste management](#) 1997(02)
26. [Dominguez J](#); [Edwards C.A](#); [Webster M](#) [Vermicomposting of sewage sludge:effect of bulking materials on the growth and reproduction of the earthworm *Eisenia andrei*](#)[外文期刊] 2000
27. [汪洪生](#) [国外污泥处理技术进展](#) 1998(01)
28. [杨健](#) [生物滤池污泥的生态稳定试验研究](#)[期刊论文]-[上海环境科学](#) 2002(09)
29. [杨健](#); [吴敏](#) [城市污水厂混合污泥的生态稳定处理](#)[期刊论文]-[环境污染与防治](#) 2003(06)
30. [周立祥](#); [沈其荣](#); [陈同斌](#) [重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态](#) 2000(03)
31. [Tessier A](#); [Campbell P.G.C](#); [Bisson M](#) [Sequential extraction procedure for the speciation of particulated metals](#)[外文期刊] 1979(07)
32. [乔显亮](#); [骆永明](#); [吴胜春](#) [污泥的土地利用及其环境影响](#)[期刊论文]-[土壤](#) 2000(02)
33. [蒋成爱](#); [黄国锋](#); [吴启堂](#) [城市污水污泥处理利用研究进展](#)[期刊论文]-[农业环境与发展](#) 1999(01)
34. [Mclaughlin M J](#); [Haman R E](#); [McClaren R G](#) [Review:A bioavailability based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand](#)[外文期刊] 2000(6)
35. [Ndegwa P.E](#); [Thompson S.A](#) [Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids](#)[外文期刊] 2001(02)
36. [伊文英](#) [中国土壤动物](#) 2000
37. [陈玉成](#); [皮广洁](#); [黄伦先](#) [城市生活垃圾蚯蚓处理的因素优化及其重金属富集研究](#)[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2003(11)
38. [戈峰](#); [刘向辉](#); [江炳缜](#) [蚯蚓对金属元素的富集作用分析](#)[期刊论文]-[农业环境保护](#) 2002(01)
39. [牛明芬](#); [崔玉珍](#) [蚯蚓对垃圾与底泥中镉的富集现象](#) 1997(03)
40. [Morgan J.E](#); [Morgan A.J](#) [Earthworms as biological monitors of cadmium, copper, lead and zinc in metalliferous soils](#) 1988(02)
41. [Kruse E.A](#); [Barrett G.W](#) [Effects of municipal sludge and fertilizer on heavy metal accumulation in earthworms](#) 1985(03)
42. [Kizilkaya R](#) [Cu and Zn accumulation in earthworm *Lumbricus terrestris* L. in sewage sludge amended soil and fractions of Cu and Zn in casts and surrounding soil](#)[外文期刊] 2004(02)
43. [王友斌](#); [王俊起](#) [美国蚯蚓堆肥处理生物废弃物简介](#)[期刊论文]-[中国卫生工程学](#) 2002(14)
44. [郭永灿](#); [王振中](#); [张友梅](#) [重金属对蚯蚓的毒性毒理研究](#)[期刊论文]-[应用与环境生物学报](#) 1996(01)
45. [贾秀英](#); [李喜梅](#); [杨亚琴](#) [Cu、Cr\(VI\)复合污染对蚯蚓急性毒性效应的研究](#)[期刊论文]-[农业环境科学学报](#) 2005(01)
46. [宋玉芳](#); [周启星](#); [许华夏](#) [土壤重金属污染对蚯蚓的急性毒性效应研究](#)[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2002(02)
47. [Spurgeon D.J](#); [Hopkin S.P](#) [Effects of metal-contaminated soils on the growth, sexual development, and](#)

[early cocoon production of the earthworm Eisenia foetida, with particular reference to Zinc 1996](#)

48. [莫测辉;蔡全英;吴启堂](#) [微生物方法降低城市污泥的重金属含量研究进展](#)[期刊论文]-[应用与环境生物学报](#) 2001(05)
49. [向洪迎;张清东;庄景宏](#) [污水厂剩余污泥的生物小循环多级处理研究](#)[期刊论文]-[西南科技大学学报](#) 2004(03)
50. [Dominguez J;Parmelee R.W;Edwards C.A](#) [Interactions between Eisenia andrei\(Oligochaeta\) and nematode populations during vermicomposting](#)[外文期刊] 2003(1)
51. [Kaushik P;Garg V.K](#) [Dynamics of biological and chemical parameters during vermicomposting of solid textile mill sludge mixed with cow dung and agricultural residues](#)[外文期刊] 2004(02)

本文读者也读过(1条)

1. [高红莉.周文宗.张砾.李洪涛](#) [城市污泥的蚯蚓分解处理技术研究进展](#)[会议论文]-2006

引证文献(15条)

1. [陈婷.霍苗.李义波.郭然.李亚东](#) [不同稳定剂对污泥蛋白发泡特性的影响研究](#)[期刊论文]-[环境工程学报](#) 2010(5)
2. [刘顺会.陈大志.林秋奇.吴艳](#) [不同接种密度蚯蚓堆肥处理有机垃圾混合剩余污泥的比较研究](#)[期刊论文]-[工业安全与环保](#) 2012(3)
3. [徐加庆.于瑞莲.郑建山](#) [城市污水厂脱水污泥施用对马尼拉草生长及其对重金属迁移转化的影响](#)[期刊论文]-[环境化学](#) 2011(6)
4. [杜敏敏.黄卫](#) [以污染源普查结果讨论环境问题与对策建议](#)[期刊论文]-[环境监控与预警](#) 2010(3)
5. [黄春.郭端华.段建军.王小利.付海美.杨林.郑新茂](#) [蚯蚓对造纸污泥中重金属的处理效应研究](#)[期刊论文]-[贵州化工](#) 2010(5)
6. [陈学民.黄魁.伏小勇.倪少仁](#) [2种表居型蚯蚓处理污泥的比较研究](#)[期刊论文]-[环境科学](#) 2010(5)
7. [郭一令.孟斌.王森.戚伟康](#) [蚯蚓生物滤池对小城镇污泥处理效果](#)[期刊论文]-[环境工程学报](#) 2014(2)
8. [丁哲利.朱骏杰.赵和平.叶子期.曾峥.吴呈显.Muhammad Tariq Rafiq.杨肖娥](#) [珍珠岩对蚯蚓同步处理污泥-狐尾藻的研究](#)[期刊论文]-[环境科学学报](#) 2014(5)
9. [臧兰兰.张松林](#) [西北半干旱区蚯蚓堆肥对污泥理化性质的影响](#)[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2013(34)
10. [陈大志.刘顺会.林秋奇.吴艳](#) [蚯蚓堆肥处理剩余污泥混合有机垃圾的效率研究](#)[期刊论文]-[农业环境科学学报](#) 2012(6)
11. [高红莉.张砾.李洪涛.周文宗](#) [黄粉虫幼虫对城市污泥重金属的积累作用](#)[期刊论文]-[中国生态农业学报](#) 2011(1)
12. [袁星.黄敏儿.杭维](#) [蚯蚓处理剩余污泥的研究现状及展望](#)[期刊论文]-[科技与生活](#) 2011(10)
13. [卢辉.邵承斌.敖黎鑫](#) [畜禽粪便处理技术的研究动态](#)[期刊论文]-[重庆工商大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(6)
14. [刘顺会.陈大志.林秋奇.吴艳](#) [利用餐厨和绿化垃圾提高蚯蚓堆肥效率处理剩余污泥的研究](#)[期刊论文]-[生态环境学报](#) 2012(1)
15. [徐哲.杨健.邢美燕](#) [污泥的蚯蚓处理技术研究进展](#)[期刊论文]-[四川有色金属](#) 2011(4)

引用本文格式: [高红莉.周文宗.张砾.李洪涛.GAO Hong-Li.ZHOU Wen-Zong.ZHANG Luo.LI Hong-Tao](#) [城市污泥的蚯蚓分解处理技术研究进展](#)[期刊论文]-[中国生态农业学报](#) 2008(3)