

污泥处理与资源化利用现状分析

黄雅曦, 李季, 李国学

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 根据有关资料介绍了国内外污泥处理与处置及资源化利用的状况, 并指明了污泥有效利用的发展策略。

关键词: 污水污泥; 资源化; 有效利用

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2003)06-0765-04

Analysis on Current Treatment and Utilization of Sludge in China

HUANG Ya-xi, LI Ji, LI Guo-xue

(College of resource and environment science, China Agriculture University, Beijing 100094, China)

Abstract: During expansion of development of city, with enhancement of environmental quality standards, and with increase of percentage and deepening of degree of treatment for sewage, the production of sludge increases greatly. How to make the huge amounts of the sludge harmless and how to utilize the treated sludge will become an extraordinary concern. On the basis of related data, the present paper reviews and describes both domestic and abroad situation concerning disposal and utilization ways of sludge and the strategy of effective use for the treated sludge.

Keywords: sewage sludge; utilization; effective use

1 污水污泥处理现状

现代工业社会使生产力和人们生活水平大大提高, 但另一方面生产和生活的废物排放也相应增加。在欧洲, 每年污水处理所产生的干污泥约为 660 万 t。据 1994 年组建的“欧洲污水小组”估计, 由于新环境法规的实施, 8 年间污水生物处理所产生的污泥体积将增加 100%, 即到 2002 年为 1 320 万 t。日本 1996 年产生的干污泥总量为 170 万 t^[1], 1998 年美国产生的污泥 690 万 t 干重^[2]。据统计, 我国 1989 年全国废水排放量达 353 亿 m³, 其中工业废水排放量为 252 亿 m³, 80% 左右未经处理直接排入江河湖海, 我国 532 条河流中已有 436 条河流受到不同程度的污染(中华人民共和国环境与发展报告, 1991)。目前, 随着我国工农业生产的发展, 我国的工业废水排放量正在迅速增加, 1996 年的工业废水排放量达到 500 多亿 m³, 是 1992 年的 2 倍(中国环境状况公告, 1997)^[3]。据不完全统计, 目前全国已经建成运转的城市污水处理厂有 427 余座, 年处理能力为 113.6 亿 t, 今后, 随着城市化的进一步发展, 新的污水处理厂的不断建立, 必将产生更多的城市污水污泥。

污泥是污水处理后的附属品, 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。污泥量占污水量的 0.3% ~ 0.5% (体积) 或为污水处理量的 1% ~ 2%

(质量) 如果进行深度处理, 污泥量会增加 0.5 ~ 1 倍。污水处理效率的提高, 必然导致污泥数量的增加。目前我国污水处理量和处理效率虽然不高(4.5%), 但城市污水处理厂每年排放干污泥大约 30 万 t, 而且还以每年大约 10% 的速度增长^[4]。污泥的成分非常复杂, 除含有大量的水分(93% ~ 99%) 外, 还含有大量的有机质、难降解的有机物、多种微量元素、病原微生物和寄生虫卵、重金属等成分。大量的未经处理的污泥任意堆放, 会对环境造成新的污染, 因此, 如何将产量巨大、成分复杂的污泥无害化、资源化, 已成为环境界瞩目的课题之一。

2 污泥处理与资源化利用的状况

大多数国家的污泥处理较多采用焚烧、填埋、投海和农用等方法。但是前 3 种方法都各有弊端。因此, 将污泥进行稳定化和无害化处理后进行农业利用将具有广阔的前景。美国 1998 年产生污泥约 690 万 t, 60% 得到资源化利用, 40% 被处置。预计到 2005 年将有 760 万 t 的污泥产生后被利用和处置。到 2010 年将会增加到 820 万 t。污泥利用(和处置相比)的比例将从 2000 年的 63% 增长到 2005 年的 66% 和 2010 年的 70%^[2]。

污泥农业利用的途径主要有直接施用和间接施用。

2.1 直接施用

直接施用是将未经处理的污水污泥直接施用在土地上, 如农业用地、林业用地、严重破坏的土地、专用的土地场所, 这是美国及大多数欧共体国家最普遍采用的处理方法^[5]。我国在已

运行污水处理厂中, 污泥未经任何处理直接农用的约占 60% 以上^[6]。

2.1.1 农田施用

污泥中富含的氮、磷、钾是农作物必需的肥料成分, 有机腐殖质(初次沉淀污泥含 33%, 消化污泥含 35%, 腐殖污泥含 47%) 是良好的土壤改良剂。土壤施用污泥后可明显提高土壤肥力, 具体表现在改善土壤物理性质, 增加土壤有机质和氮磷水平, 并增加土壤生物活性, 因此作物产量较高, 且可满足后茬作物生长的营养需求。但污泥中的重金属以及病原菌含量仍是不可小觑的问题, 如蔬菜对重金属的富集使污泥对人体造成间接危害, 以及污泥中的硝酸盐污染地下水的问题。

有试验表明, 用消化污泥作为肥料, 土壤持水能力、非毛细管孔隙率和离子交换能力均可提高 3% ~ 23%, 有机质提高 35% ~ 40%, 总氮含量增加 70%。但考虑到污泥中所含的重金属对作物的影响, 应合理地施用污泥, 一般以作物对氮的需要量为污泥施用量的限度, 污泥中的重金属含量必须符合农用污泥标准以及污泥施用区土壤重金属含量不得超过允许标准。我国规定施用符合污染物控制标准的农用污泥每年不得超过 30 t · hm⁻², 且连续施用不得超过 20 a (GB 4284—84)。

2.1.2 林地施用

污泥在森林与园林绿地(包括林地、草地、市政绿化、高速公路的隔离带、育苗基地、高尔夫球场、草坪等非食物链植物生长的土地)施用可促进树木、花卉、草坪的生长, 提高其观赏品质, 并且不易构成食物链污染的危害。张天红在西安市污水污泥林地施用效果的研究中, 将试验设 5 个处理: CK(处理 I), 干污泥 2.25 kg · m⁻²(处理 II), 干污泥 4.50 kg · m⁻²(处理 III), 干污泥 6.75 kg · m⁻²(处理 IV) 和化肥(磷酸铵) 0.07 kg · m⁻²(处理 V)^[7]。1991 年 1 月初施于土地表面, 年底采样测定土壤的理化性质和重金属的变化。测定结果表明, 污泥施用 1 a 后, 试验地土壤 0 ~ 20 cm 中的全氮、速效氮、全磷、有机质及阳离子代换量的含量都明显增加, 增加的量随试验污泥用量的增加而增大。同时, 土壤的容重、持水量和孔隙度等物理性质也有一定程度的改善。同等深度土壤中的硝态氮和重金属含量比对照有所增加, 但并没有对土壤造成较大程度污染。可能与污泥施用的时间较短有关。

2.1.3 退化土地的修复

用污泥对干旱、半干旱地区的贫瘠土壤进行改良, 也取得良好效果。我国内蒙古西部的包头地区属典型干旱、半干旱荒漠地带。该区气候干燥, 降雨少且分布不均匀, 生态环境脆弱, 植被易遭破坏, 水土流失十分严重。污泥对于防止土壤沙化、整治沙丘及被二氧化硫破坏地区的植被恢复均为一种优质材料。将污泥与粉煤灰、水库淤积物以一定比例混合施用, 可改善土壤的保温、保湿、透气的性质, 同时污泥中的有机营养物质强化了废弃物组合体的微生物作用, 使整个土壤加速腐殖化, 达到增加土壤有机质含量的作用。

另外污泥还可以施用于各种严重扰动的土地, 如过采煤矿、尾矿坑、取土坑, 以及已退化的土地、垦荒地、滑坡与其他因自然灾害而需要恢复植被的土地。C. Lue - Hing 等在美国芝加

哥富尔顿的煤矿废弃地上施用污泥, 改善了土壤耕性, 增加了土壤透水性, 提高了土壤 CEC 值, 并提供了作物生长所需的有效养分^[8]。

2.2 间接施用

2.2.1 污泥消化后农用

对污泥进行厌氧消化处理, 可以达到污泥减量化的目的, 而且可以回收一部分能源, 也可为后续处理减轻负担。近年日本的污泥消化技术进一步提高, 如机械浓缩和高浓度消化的有机结合、搅拌和热效的改善、完全的厌氧二项消化法(发酵工艺 + 甲烷发酵工艺的分离法), 使发酵时间大大缩短, 甲烷发生量和消化率提高。国内约有 40% 的污水处理厂把污泥进行消化脱水后农用, 一方面可以产生部分能源回用, 另一方面可以减少污泥中的部分有害细菌, 增加污泥的稳定性^[9]。这样, 污泥在农用中其负面影响相对小一些。

2.2.2 制成复合肥料使用

污泥与城市垃圾、通沟污泥等堆肥后农用。污泥经过堆肥发酵后, 可以杀死污泥和垃圾中绝大部分有害细菌, 还可以增加和稳定其中的腐殖质, 应用风险性较小。这种方式解决了污泥在使用中科技含量不高的问题, 存在的问题是应用量较少, 国内也有一些报道, 但目前推广应用程度还远远不够^[6]。

2.2.2.1 污泥堆肥

要求污泥的含水率要低于 70%, 所以污泥要预先做干化处理。另外要加入堆熟后的污泥或木屑作分散剂。木屑与污泥的重量比为 1:5, 孔隙率 1.56%, 堆高 2 ~ 4 m, 底部布气管间距 2 m, 通风速率 17 ~ 28 L · kg⁻¹ · h⁻¹, 堆肥周期 12 ~ 15 d, 堆肥温度可达 55 °C ~ 60 °C, 污泥体积可减少 25%^[10]。堆肥温度达 55 °C ~ 60 °C 时, 持续 5 ~ 7 d 可有效的杀灭各种病原菌与寄生虫卵, 无恶臭。堆肥成品仍保持原污泥的水平。

2.2.2.2 污泥与城市垃圾混合堆肥

污泥与垃圾混合堆肥的体积比为 4:7^[11], 含水率和孔隙率约为 50%, 有机质含量约 20% 时, 堆肥的效果较好, 周期较短。污泥与垃圾混合高温堆肥的工艺流程分预处理、一次堆肥、二次堆肥和后处理 4 个阶段^[12]。

一次发酵——在发酵仓内进行, 污泥与垃圾的混合比为 1:3.5 ~ 2.8, 混合料含水率 50% ~ 60%, C/N 为 30 ~ 40:1, 通气量为 3.5 m³ · m⁻³ · h⁻¹, 堆肥周期 7 ~ 9 d。

二次发酵——经过一次发酵后, 从发酵仓取出, 自然堆放, 堆成 1 ~ 2 m 高的堆垛进行二次发酵, 使其中一部分易分解和大量难分解的有机物腐熟, 温度稳定在 40 °C 左右即达腐熟, 此过程大概一个月。腐熟后物料呈褐黑色, 无臭味, 手感松散, 颗粒均匀。

后处理——去除杂质, 破碎, 装袋。

2.2.2.3 污泥与粉煤灰混合堆肥

脱水污泥按 1:0.6 的比例掺混粉煤灰, 降低含水率, 可使污泥的含水量降至 20%^[13]。然后自然堆肥发酵, 其中加有锯末和秸秆作为膨胀剂。肥料可做成 5 mm 柱状, 在大葱、芥菜等蔬菜田上试用效果明显。

2.2.2.4 污泥与化肥制作复混肥

新鲜污泥饼经自然风干,使含水率降至 15% 左右,将干化污泥与 1.5 到 4 倍体积的氯化铵、过磷酸钙、氯化钾等养分单价较低的化肥混合,用链磨机破碎、过筛,按配方分别称量和混匀,然后造粒。造粒采用圆鼓滚动法、圆盘滚动法和挤压法进行造粒,前两者属团聚造粒,物料加水增湿下滚动造粒、烘干、筛分、冷却,合格部分装袋入库,粉料回转到前道工序重新破碎造粒。挤压法则将粉料直接输入挤压造粒机,使用强力挤压成圆柱状,再切成 5 mm 长的段。相对来说,挤压法的成粒率、含水量和平均抗压强度较好,且加工成本低。复混肥在盆栽试验中比化肥有增产效果,但在水稻与小麦的田间试验中增产效果相同^[14]。

2.3 污泥制作饲料

污泥中含有大量有价值的有机质(蛋白质和脂肪酸等),据报道污泥中含有 28.7% ~ 40.9% 粗蛋白, 26.4% ~ 46.0% 灰分,其中 70% 的粗蛋白以氨基酸形式存在,以蛋氨酸、胱氨酸、苏氨酸为主,各氨基酸之间相对平衡,是一种非常好的饲料蛋白^[15]。据日本科学技术厅资源调查会的报告,当污水来源是有机性工业废水以及食品加工、酿造工厂和畜牧厂的废水时,剩余污泥中含有大量细菌类和原生动物,很有希望作为鱼、蟹的饲料。采用活性污泥法处理,污泥经过灭菌等过程,制成饲料,污泥与饲料成品的投入产出比为 1:0.6^[16]。如果都用嗜气性微生物制成饲料,将成为水产养殖业的丰富的饲料来源。因污泥中含有蛋白质、维生素和痕量元素,利用净化的污泥或活性污泥加工成含蛋白质的饲料用来喂鱼,或与其他饲料混合饲养鸡等,可提高产量,但肉质稍差^[17]。

另外,污泥还可用做建材、合成燃料和吸附剂等,但相关技术还有待于进一步研究和完善。

3 长期施用污泥的环境影响

3.1 对土壤理化性质的有利影响

研究表明,施用适量污泥后,明显地增加了土壤有机质的含量,有效地改善了土壤结构、水力学性质及化学性质,由此带来的容重降低,孔隙度、团聚体稳定度以及持水量和导水性的增加,对农业生产起到了积极的作用^[18~23]。土壤环境的改善为土壤微生物的活动提供了条件,土壤微生物活动又反过来进一步促进土壤肥力的提高。土壤微生物的活动参与并促进了土壤中的物质循环,因此,施用城市污泥还能促进土壤微生物的活动,从而改变土壤结构,促进土壤团粒形成,增大土壤抗冲性,减少径流冲刷,最终达到控制水土流失的目的^[24]。

3.2 城市污泥农用的问题

城市污泥是良好的有机肥料资源,农用资源化前景广阔。但是如果污泥中污染物含量超标,或使用不当,可能会使作物生长不良,产量下降,甚至会造成土壤-水体-植物的污染^[25]。

3.2.1 盐分的影响

污泥中的盐分会明显提高土壤的电导率,但过高的盐分会破坏养分之间的平衡,抑制植物对养分的吸收,甚至会对植物根系造成直接的危害。离子之间的拮抗作用也会加速有效养分如 K^+ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等的淋失^[26]。

3.2.2 病原体 and 有机物

未经处理的污泥中含有较多的病原微生物和寄生虫卵^[27],它们可通过各种途径传播,污染土壤、空气、水源,并通过皮肤接触、呼吸和食物链危及人畜健康,也能在一定程度上加速植物病害的传播。

城市污泥中的有机污染物近年来日益引起人们的关注,但对其中有机污染物的种类和含量进行全面检测的报道尚属鲜见^[28]。国外报道较多的主要是 PAHs、HCNs、PCDD/Fs、PCBs、CBs 和杀虫剂等^[29]。这些物质在污水和污泥的处理过程中会得到一定程度的降解,但一般难以完全除去,在污泥农用时还需考虑其可能产生的危害。

3.2.3 对水体的污染

污泥中通常含有丰富的 N、P 等各种养分,如果在降雨量较大地区的土质疏松土地上大量施用,有机物分解速度大于植物对 N、P 的吸收速度,就很可能随水流失^[26]。污泥中的有机物和氨、氮将大量消耗水体中的氧,造成水体水质恶化,严重影响水生生物的生存。污泥中的营养物质进入地表水又会造成水体的富营养化,致使藻类恶性繁殖,造成水体的赤潮和绿潮现象,严重地影响了生活用水和工农业用水,并导致渔业产量下降。污泥的渗滤液进入地下会引起地下水的硝酸盐污染。

3.2.4 重金属的污染

重金属是限制污泥大规模土地利用的最重要因素。由于我国城市污水中工业废水比重较大,所以污水中的重金属含量较高,经二级处理后,相当一部分重金属转移到污泥中去,影响污泥的利用。重金属不像有机物可以通过降解除去。而且,重金属一般溶解度很小,在污泥中性质较稳定,较难除去。

4 污泥有效利用的政策及发展策略

发达国家对于污泥有效利用的管理,主要是制定系统的、高标准的污泥污染控制法规,对污泥农用的标准、施用地点的选择、水源的保护、病原菌的控制、重金属的允许施入量、施用年限、运输等都作了相应规定。许多国家颁布了农用污泥重金属浓度标准、严格的无害化要求,并对单位面积土地污泥的用量也有严格的限制。一些地区针对污泥填埋,要求设计地下水监测装置,以鼓励污泥回收利用的研究和推广;国家和地方政府统筹规划,都有制定相应的污泥管理计划的责任和义务,并且加强在公众中间的宣传教育,以获得人们的理解和支持,有助于污泥产品的推广和使用。

我国的污水处理业起步比较晚,污水处理量和处理率虽然不高(4.5%),但城市污水处理厂每年排放干污泥大约 30 万 t,而且还以每年 10% 的速度增长^[30]。所以建立一套符合中国国情的污泥治理系统刻不容缓。

(1) 首先是要对污泥污染源进行控制,尽可能将工业污水和生活污水分开,以减少污染物在污泥中的浓度。

(2) 建议对城市污泥进行集约化处理,形成规模效应,这样可以提高处理效率,降低单位污泥处理量的占地面积,节约土地,并可以减少因对污泥进行消化、干化、焚烧而引起的环境污染。

(3) 制定严格的污泥农用控制标准。为防止过量施用污泥对环境和作物造成危害, 欧美国家根据各自具体情况制定城市污泥土地利用技术标准。我国于1984年颁布了《农用污泥中污染物控制标准(GB 4284-84)》, 按酸性土壤、中性及碱性土壤分别规定了用于农业的污泥有害物质的控制标准。《标准》规定生污泥须经高温堆腐或消化处理后才能用于农田。施用符合标准的污泥一般每年用量不超过 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以干污泥计)。污泥中任何一项无机化合物接近于标准时, 连续在同一块土壤上施用不得超过 20 a 。

(4) 进一步研究重金属的活动性和移动性的规律, 降低污泥中含量超标重金属, 使之能用于农业生产。化学浸提法和微生物滤取法近年来多有研究^[31~33], 但由于存在成本高、操作麻烦、废液难以处理等问题, 难以用于实际生产。而利用污泥中的重金属具有碱性稳定性的特点, 使重金属钝化的研究正逐步深入, 并逐渐应用于生产。

(5) 堆肥化应是我国污泥稳定化的主要手段。污泥的堆肥化可把污泥化害为利, 是污泥资源化、减害的必然之路。一般污泥经过堆肥化处理, 水浸态重金属的量减少, 交换态和有机结合态重金属的量总的来说有所增加, 而残渣态的量, 不同的重金属变化不同, 但比不同浸提剂所提取的其他形态重金属的总量大得多^[34]。堆肥可以用发酵仓系统在工厂内以机械化自动化来进行, 也可以用无发酵装置以静态通气条垛式来进行。后者还可同时利用农村大量的秸秆及其它有机固体废物, 产生的堆肥还可制成复合颗粒商品肥料。

参考文献:

- [1] Onaka T. Sewage can make Portland cement: a new technology for ultimate reuse of sewage sludge[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(8): 93-135.
- [2] U.S. Environmental Protection Agency Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste EPA530-R-99-009. Biosolids Generation, Use, and Disposal in the United States. September 1999. www.epa.gov.
- [3] 姜华. 污水污泥堆肥化处理过程中控制重金属污染的研究[D]. 硕士论文, 1999.
- [4] 姜泳文. 城市污水处理厂污泥的管道运输[J]. *冶金矿山设计与建设*, 2000, 32(2): 32-36.
- [5] 杨艳茹, 译. David Griffiths. 污泥管理与处理的发展趋势[A]. 给水与废水处理国际会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 680-685.
- [6] 王敦球, 等. 城市污水污泥农用资源化研究[J]. *重庆环境科学*, 1999, 21(6): 50-53.
- [7] 张天红, 等. 西安市污水污泥林地施用效果的研究[J]. *西北农业大学学报*, 1994, 22(2): 67-71.
- [8] Lue-Hing C et al. Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago's Experience on Beneficial Use of Sewage Sludge - Assessing The Impacts Upon Water, Soil And Crops[A]. In: Proc. of 15th World Congress of Soil Science Symp[C]. Mexico: International Society of Soil Science and Mexical Society of Soil Science, 1994, 12(2): 13.
- [9] 薛文源. 城市污水污泥处理与处置的途径[J]. *中国给水排水*, 1992, 1(8): 41-46.
- [10] 李国学, 等. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 232.
- [11] 曲颂华, 等. 城市垃圾与污水厂污泥的混合堆肥研究[J]. *环境保护*, 1998, (10): 15-16.
- [12] 金儒霖. 中国城市污水厂污泥处理的综述[J]. *武汉城市建设学院学报*, 1994, 11(2): 1-12.
- [13] 王虹. 我国污泥制作肥料的试验与生产现状探讨[J]. *城市给排水*, 2000, 26(9): 1-4.
- [14] 戈乃玢, 等. 污泥化肥复混肥加工工艺和肥效研究[J]. *土壤通报*, 1997, 28(1): 41-43.
- [15] 韦朝海, 等. 污泥处理、处置与利用的研究现状分析[J]. *城市环境与城市生态*, 1998, 11(4): 10-14.
- [16] 张肇富, 译. 活性污泥饲料的研究. *科学新闻*, 日本, 1996, 10.
- [17] 蒋成爱, 等. 城市污水污泥处理利用研究进展[J]. *农业环境与发展*, 1999, 1: 13-19.
- [18] 常玉海. 城市污泥对土壤理化性质的影响[J]. *农业环境保护*, 1995, (3): 25-27.
- [19] 张增强, 薛澄泽. 污泥堆肥对几种木本植物生长响应的研究[J]. *西北农业大学学报*, 1995, 23(6): 47-51.
- [20] 张增强, 等. 农业废弃物和城市污泥的无害化与资源化[J]. *农业环境与发展*, 2001, 18(1): 19-21.
- [21] 周立祥, 等. 城市生活污泥农田利用对土壤肥力性状的影响[J]. *土壤通报*, 1994, 25(3): 126-129.
- [22] Sort X, Alacanz J M. Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries[J]. *Land Degradation and Development*, 1996, 7(1): 69-76.
- [23] Sopper W E. Utilisation of sewage sludge in the United States for mine land reclamation[A]. In: Hall J E(ed). *Alternative Uses for Sewage Sludge*[C]. Pergamon Press, 1989, 21-40.
- [24] 莫测辉, 吴启堂, 等. 利用城市污泥防治水土流失[J]. *土壤与环境*, 1999, 8(1): 66-70.
- [25] 莫测辉, 吴启堂, 等. 城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长影响的初步研究[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(6): 645-649.
- [26] 乔显亮, 等. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. *土壤*, 2000, 2: 79-85.
- [27] 周立祥, 等. 污泥农牧地应用中病原物的存活及其控制措施[J]. *农业环境保护*, 1995, 14(3): 128-131.
- [28] 莫测辉, 吴启堂, 等. 论城市污泥资源化与可持续发展[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 157-160.
- [29] Alcock R E. Polychlorinated bihenyls in digested UK sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 1993, 26(12): 2199-2207.
- [30] 周立祥, 等. 城市污泥土地利用研究[J]. *生态学报*, 1999, (2): 185-193.
- [31] Tyagi R D, et al. Bacterial leaching of toxic metals from municipal sludge: influence of sludge characteristics[J]. *Water Environ Res*, 1993, 65(3): 196-204.
- [32] Wu Qitang, Pasasie N, Mo Cehui. Removal of heavy metals from sewage sludge by low costing chemical method and recycling in agriculture[J]. *J Environ Sci*, 1998, 10(1): 122-128.
- [33] Jenkins R L, et al. Metal removal and recovery from municipal sludge[J]. *J Water Pollut Control Tech*, 1981, 53(1): 25-31.
- [34] 张增强, 唐宝新. 污泥堆肥化处理对重金属形态的影响[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(4): 188-190.