

城市污泥农用资源化研究进展

丘锦荣¹, 郭晓方², 卫泽斌², 吴启堂²

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:污泥农用具有投资少、能耗低、运行费用低等优点,正在成为世界上各国主要的污泥处置方式,为此综述了城市污泥农用资源化方式的应用特点和发展状况,并通过对目前污泥农用资源化的方法进行分析 and 比较,认为超富集植物和低累积作物/富钾植物进行套种处理城市污泥同时进行农用资源化利用具有明显的优势,将为城市污泥的处理处置提供新的思路。

关键词:城市污泥;处置;农用资源化;套种

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2010)增刊-0300-05

Research Advance in Agricultural Application of Municipal Sewage Sludge

QIU Jin-rong¹, GUO Xiao-fang², WEI Ze-bin², WU Qi-tang²

(1. South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China; 2. College of Natural Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Agricultural application of municipal sewage sludge (MSS) has the advantage of little investment, low energy consume and low management cost, which has been becoming the main method of MSS treatment. This paper summarized the applied characteristic and developing state of the methods of agricultural application of MSS, and analyzed and compared those methods. The method of MSS treatment that co-planting between hyper-accumulator and low accumulative plants (a K-high-accumulating plant) would supply new consider of MSS treatment, for it has obviously advantage during the agricultural application of MSS.

Keywords: municipal sewage sludge (MSS); agricultural application; co-planting

随着污水处理厂的不断兴建以及污水处理程度的提高,城市污泥的产量大幅度增加。据统计,2005年世界主要发达国家的干污泥产量达到惊人的数量,美国为1 260万t,日本为210万t,德国为279万t,英国为158万t,法国为117万t^[1]。

城市污水处理一般会产生占污水体积0.02%的城市污泥^[2]。城市污泥的产生主要受城市污水水质、污水处理各个工艺环节运行情况的影响,同一水质处理工艺不同,其污泥产量差异很大。城市污泥的主要成分是有机质(有机质可达300~600 g·kg⁻¹),另外,

城市污泥中也含有大量的矿质营养(氮、磷分别可达10~40 g·kg⁻¹和6~15 g·kg⁻¹),其含量高于一般的农家肥^[3-4],具有很高的农用价值,但城市污泥通常含有种类繁多的重金属和有机污染物等毒害物质^[5-6],是限制其农用的主要因素。对于重金属和有机污染物超标的城市污泥,降低其中的重金属和有机污染物含量是城市污泥农用资源化的首要任务^[7-8]。与传统的处理污泥方法相比较,植物处理及农业利用是目前城市污泥处理技术的一个新兴领域,具有成本低,无二次污染等优点,已逐步成为国际上研究和开发的热点,应用和推广的前景广阔。

1 城市污泥农用资源化的必要性

污泥处理处置基建投资大,运行费用高。目前国内外大多数国家采用填埋、焚烧、投海、土地利用等实用性方法。在许多国家(欧美国家、中国等),投海处

收稿日期:2009-09-10

基金项目:环境保护部环保公益项目(200809093);国家科技支撑计划项目(2007BAD89B14)

作者简介:丘锦荣(1979—),男,福建长汀人,博士,从事污泥资源化技术及农业面源污染控制技术研究。

E-mail: qiu jinrong@scies.com.cn

通讯作者:吴启堂 E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

置已被明令禁止。填埋所需成本最低,但是占地大,对填埋场周围环境影响大,还有渗滤液和臭气问题,并且污泥简单脱水后含固率低,流动性大,可压缩性差,可能堵塞集气井和排水管,极大地干扰垃圾填埋场的正常运行;焚烧虽然减量化程度很高,但投资运行费用高,且存在烟气污染问题;而资源化利用,尤其是农资源化,可将污泥变废为宝,使其具有生态效益、环境效益、经济效益和社会效益,是城市污泥出路与城市可持续发展的必然要求和发展趋势。

污泥农正在成为世界上各国主要的污泥处置方式(表1)^[9],欧洲先进国家农业利用率占污泥总量的一半以上,美、法等国超过60%^[10-11]。对于污泥农后的环境影响,国内外都有不少的研究,一般认为在一定限度内施用污泥或其堆肥产品,不会污染农作物,也不会对地表和地下水产生不良影响^[12-15]。

表1 部分国家污泥产量和污泥土地利用状况

Table 1 Production and agricultural utilization of municipal sewage sludge in some country

国家	产量(干污泥)/ $10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	土地利用/%
美国	6 900	>60
英国	1 107	55
瑞士	215	50
瑞典	180	45
葡萄牙	200	80
荷兰	282	44
卢森堡	15	81
德国	2 500	25
法国	700	>60

根据我国国情,通过一定的技术对污泥进行处理后的土地利用将是未来污泥处置的最主要方法,具有广泛的应用前景^[16]。

2 城市污泥农资源化方法

城市污泥中含有对土壤植被生态系统有益的化学组分,可分为两类:一类是宏量植物养分和植物、微生物生长必需的微量元素,包括氮、磷、钾及硼、钙、镁、铁、锰、铜、锌、钼等;另一类是腐殖化有机质,主要作用是改善土壤的物理、化学环境条件和结构状况,使土壤的保水、保肥和通透性得以提高。根据资料,我国大部分农田缺乏有机肥成分,城市污泥直接农或堆肥后农农都可以显著提高农产品的产量和品质^[17-18]。

目前,污泥农利用的途径主要有直接施用和间

接施用,以及新兴的直接-间接利用相结合的植物处理技术^[19]。

2.1 城市污泥直接农

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^[20]。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^[21]。

将城市污泥作为肥料,直接撒施在土壤中,再经过机械耕作,与土壤完全混合,最终成为土壤成分之一。试验表明,用消化污泥作为肥料,土壤持水能力、非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%。蔡全英等^[18]研究结果表明,在水稻土、赤红壤、石灰性土和褐土上适量施用污泥盆栽作物,可以显著增加通菜的产量。唐俊等^[17]用盆栽试验研究结果表明,污泥可明显增加生菜和萝卜产量;当污泥施用量为土壤干重的1%时,生菜和萝卜中重金属Zn、Cd、Cr、Cu、Pb含量及硝酸盐和亚硝酸盐含量均符合国家食品卫生标准;当污泥施用量为土壤干重的3%时,生菜中重金属Cd含量超标,萝卜中亚硝酸盐含量超标,超标率分别达20%和15%。因此,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,污泥中重金属含量必须符合农农标准,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农污泥每年不得超过 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且连续施用不得超过20年(GB 4284—1984)。

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。王新等^[22]以沈阳北部污水处理厂污泥为研究对象,开展了污泥土地利用对草坪草及土壤环境影响的研究,结果表明污泥土地利用可提高土壤养分含量特别是土壤中有机质含量,使草坪草获得了良好的生长响应,生物量增加且绿期延长。付华等^[23]研究表明,随着污泥施用量($0.5 \sim 8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)的增加,黑麦草盖度,密度,地上、地下生物量以及叶绿素含量显著增加,污泥施用后黑麦草地上部组织中N、P、K、Mg、Fe、Zn和Cu的含量增加,Mn含量减少,Ca和重金属元素Hg、Ni、Pb、As含量与对照间差异不显著,没有对黑麦草造成重金属毒害。张天红等^[21]在西安市污水污泥林地施用效果的研究中得出,污泥施

用 1 年后,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都明显增加,其增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;虽然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,这可能与污泥施用的时间较短有关。

2.2 城市污泥间接农用

城市污泥在农业上的间接利用,主要有通过堆肥化或制成污泥复合肥之后的农业利用。在国外将污泥堆肥后制成复合肥已相当普遍,近几年,我国也出现了将污泥制成有机肥、有机复合肥等的研究^[24-27]。

城市污泥通过堆肥化或制成复合肥后作为肥料运用于农业上具有良好的前景,可以明显提高农产品的产量和品质^[1],以及对土壤的理化性质具有明显的改善作用。用污泥制成的有机-无机复合化肥在用在农田的水稻种植,水稻的亩产量增产 11.4%^[28];陈同斌等^[25]通过盆栽和大田试验发现,污泥复合肥对小麦的增产效果和土壤的培肥效果明显优于化肥,等同于市售复合肥,它能促进植株生长发育,提高小麦产量,对土壤速效养分的积累有明显的促进作用。

将城市污泥堆肥用于生产草坪基质的研究结果表明,城市污泥堆肥基质能明显提高黑麦草的地上和地下生物量和叶绿素含量,与不施化肥和施用化肥的对照相比,城市污泥堆肥可以增加土壤有效态氮、磷含量,促进植物叶片对氮的吸收,提高草坪的质量^[29]。李宇庆等^[30]研究了施用污泥堆肥对木槿生长的影响,结果表明,污泥土地利用可显著提高土壤中氮、磷及有机质的含量,污泥不同用量均不同程度地促进了木槿的生长发育,地上生物量比对照有不同程度的提高。王新等^[31]开展了污泥堆肥土地利用对树木生长及土壤环境影响的研究,结果表明,污泥堆肥不同处理与对照树高相比,增加了 11% ~ 25%,径粗增加了 19% ~ 50%,加速了树木生长,缩短了木材的生长周期,增加了木材产量,污泥土地利用提高了土壤中 N、P 及有机质含量,同时也明显增加了土壤中 Cd 元素的含量。

2.3 城市污泥植物处理和直接农用结合

与传统的城市污泥农用(直接和间接农用)不同,吴启堂等^[32]开展了一种新型的污泥农用方法,即将污泥进行植物处理(降低污泥中的重金属和有机污染物)同时进行农用,并可以收获一定量的符合卫生标准的植物产品。

利用传统的间种和套种原理,将两种或两种种以

上的特殊植物同时或间隔一段时间种植在城市污泥上,以达到在植物处理城市污泥的同时收获一定量的植物产品。而所谓特殊植物包括对污泥中的重金属具有超累积作用的植物,如遏蓝菜^[33]、东南景天^[34]、蜈蚣草^[35]等,以及对重金属低累积的作物品种,如玉米^[36]、水稻^[37]、菜心^[38]等。吴启堂等^[32]采用超累积东南景天和低累积玉米套种在铅、锌污染的土壤上进行了大田试验,研究表明,通过套种可以降低土壤中的重金属含量,同时可以收获一定量符合卫生标准的玉米。在锌、镉超标的广州城市污泥上进行的东南景天和玉米套种、东南景天和芋类植物套种的试验表明,套种后城市污泥中的锌、镉含量显著降低,并达到安全农用标准,而同时所收获的植物产品也符合国家饲料标准,可作为动物饲料^[19,39-40]。

2.4 各种农用方式的优劣及可行性

随着城市污泥产量的不断增加,欧美等国家对污泥的有效利用的比例不断增大,其中农用方面的比例也随之增大^[41]。城市污泥的农用方式一般有直接农用、间接农用及特种植物套种后的农用方法。这 3 种污泥农用方式进行了的比较见表 2。

表 2 各种城市污泥农用方法的优劣
Table 2 Superiority and inferiority of different agricultural application of municipal sewage sludge

农用方法	直接农用	间接农用	植物修复和直接 农用结合(套种)
是否需要预处理	否	是	是
是否需要设备	否	是	否
预处理期间是否有收益	-	否	是
农用时是否稳定	否	是	是
重金属含量是否降低	否	否	是

直接农用具有最低运用成本的优点,但污泥未经稳定化和重金属的去除,农用后对土壤和植物产生较大的风险;城市污泥间接农用比直接施用干净卫生,成品的污泥肥料外观较松散,无蚊蝇滋生,可减少运输费用等优点,但需要预处理(堆肥化或制复合肥工艺),需要额外投资费用,同时也无法解决污泥中重金属含量超标的问题;而套种(超累积植物和低累积作物)植物处理后污泥的农用,特种植物的套种可以当作污泥农用之前的预处理,以降低污泥中的重金属、有机污染物和病原体等,同时可以收获一定量的符合卫生标准的食品或肥料,套种处理之后的污泥可当作肥料直接和土壤混合,并进行正常的农业耕作^[19]。因此,特种植物套种后的污泥农用方法结合了前两种

方法的优点,同时克服了它们的缺点(表2),在污泥农用方面具有广阔的前景。

3 结论与展望

城市污泥的农用资源化利用具有投资少、能耗低,运行费用低,其中有机物可转化为土壤改良剂的有效成分,符合可持续发展战略等优点,被认为是最有前景的污泥处理处置方式。

在污泥农用的几种方式中,利用重金属的超富集植物和低累积作物/特种植物(如富钾植物等)之间的套种处理城市污泥,既可以在收获一定量符合饲料标准或富钾的植物产品的同时,又可以有效降低城市污泥中重金属的含量,处理后达标的污泥可以和土壤混合实现农用资源化。套种处理污泥的方法综合了污泥直接农业和间接农用的优点,具有明显的优势,可为污泥的农用资源化提供新思路。当然,污泥中的有毒有害物质对外界环境和食品安全具有潜在的危害,在污泥农用时必须进行长期的监测并对污泥农用风险进行评估。

参考文献:

- [1]王绍文,秦 华. 城市污泥资源利用与污水土地处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
WANG Zhao-wen, QIN Hua. Resource reuse of municipal sewage sludge and utilization of wastewater in farmland [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [2]陈同斌,黄启飞,高 定,等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 环境科学学报,2003,23(5):561-569.
CHEN Tong-bin, HUANG Qi-fei, GAO Ding, et al. Heavy metal concentrations and their decreasing trends in sewage sludges of china [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(5): 561-569.
- [3]郭广慧. 我国城市污泥中养分和重金属含量及农用潜力分析[D]. 成都:西南大学硕士论文,2007.
GUO Guang-hui. Heavy metals and nutrients in sewage sludge from different areas in china and its potential argucultural landuse [D]. Chengdu: Maste Dissertation of Southwest University, 2007.
- [4]赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
ZHAO Qing-xiang. Technology of sewage sludge resource [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002.
- [5]莫测辉,蔡全英,王伯光,等. 我国城市污泥中醚类和卤代烃类有机污染物的初步研究[J]. 环境科学学报,2002,22(5):671-676.
MO Ce-hui, CAI Quan-ying, WANG Bo-guang, et al. A preliminary study of ethers and halogenated hydrocarbons in selected municipal sludges of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 671-676.
- [6]莫测辉,蔡全英,吴启堂,等. 我国一些城市污泥中多环芳烃(PAHs)的研究[J]. 环境科学学报,2001,21(5):613-618.
MO Ce-hui, CAI Quan-ying, WU Qi-tang, et al. A study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in municipal sludge of China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(5): 613-618.
- [7]Logan T J, Chaney R L. Utilization of municipal wastewaters and sludge on land metals. //Proceedings of the Workshop on Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land, Denver, CO, 1983: 235-323.
- [8]莫测辉,吴启堂,蔡全英,等. 论城市污泥农用资源化与可持续发展[J]. 应用生态学报,2000,11(1):157-160.
MO Ce-hui, WU Qi-tang, CAI Quan-ying. Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 157-160.
- [9]徐 强. 污泥处理处置技术及装置[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
XU Qiang. Technology and dvice of sludge treatment [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2003.
- [10]NRC (National Research Council of USA). Biosolids applied to land: Advancing standards and practices[M]. Washington: National Academy Press, 2002: 13-79.
- [11]ADEME, Les boues d'épuration municipales. <http://www.ademe.fr/htdocs/actualite/dossier/boues.htm#top>, 2006.
- [12]曹仁林,霍文瑞,何宗兰,等. 铬渣钙镁磷肥改土对地下水潜在影响[J]. 农业环境与发展,1997,14(4):23-24.
CAO Ren-lin, HUO Wen-rui, HE Zong-lan, et al. Effects of Cd polluted soil amended with CRCMP on ground water [J]. *Agro-Environment and Development*, 1997, 14(4): 23-24.
- [13]郭郦兰,张永平,赵建红,等. 太原市污水厂生活污水污泥性质的调查[J]. 环境卫生工程,1994(2):6-9.
GUO Mei-lan, ZHANG Yong-ping, ZHAO Jian-hong, et al. An characteristics survey of sewage and sludge in Taiyuan [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 1994(2): 6-9.
- [14]王亚伟,关联欣,郭郦兰,等. 城市污水污泥资源化的有效途径[J]. 科技情报开发与经济,1996,6(5):12-14.
WANG Ya-wei, GUAN Lian-xin, GUO Mei-lan, et al. Effective ways of making sewage and sludge resource [J]. *Sci/Tech Information Development & Economy*, 1996, 6(5): 12-14.
- [15]林春野,董克虞,李 萍,等. 污泥农用对土壤及作物的影响[J]. 农业环境保护,1994,13(1):23-33.
LIN Chun-ye, DONG Ke-yu, LI Ping, et al. Effect of utilization of municipal sludge in agriculture to soil and plant [J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(1): 23-33.
- [16]马 娜,陈 玲,何培松,等. 城市污泥资源化利用研究[J]. 生态学杂志,2004,23(1):86-89.
MA Na, CHEN Ling, HE Pei-xiong, et al. Study on resource reuse of municipal sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 86-89.
- [17]唐 俊,郑晓春,李学德,等. 污泥对生菜、萝卜产量及有害物质积累的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(5):1409-1410.
TANG Jun, ZHENG Xiao-chun, LI Xue-de, et al. Effect of sewage sludge on vegetable yields and deleterious substance accumulation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(5): 1409-1410.
- [18]蔡全英,莫测辉,吴启堂. 城市污泥及其堆肥对盆栽通菜和萝卜产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2003,22(1):52-55.
CAI Quan-ying, MO Ce-hui, WU Qi-tang. Effects of municipal sludge before and after composting on yields of ipomoea aquatic and *Brassica Campestris* L [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(1): 52-55.
- [19]WU Qi-tang, HEI L, WONG JWC, et al. Co-cropping for phyto-

- separation of zinc and potassium from sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1954–1960.
- [20] 王敦球, 解庆林, 李金城, 等. 城市污水污泥农用资源化研究[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(6): 50–52.
- WANG Dun-qiu, XIE Qing-lin, LI Jing-cheng, et al. Study on agricultural utilization of the sludge disposal of municipal wastewater [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1999, 21(6): 50–52.
- [21] 张天红, 薛澄泽. 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.
- ZHANG Tian-hong, XUE Cheng-ze. The effects of Xi'an sewage sludge applied to the forest lands [J]. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 1994, 22(2): 67–71.
- [22] 王新, 周启星, 陈涛, 等. 污泥土地利用对草坪草及土壤的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 50–53.
- WANG Xin, ZHOU Qi-xing, CHEN Tao, et al. Effects of land utilization of sewage sludge on grass and soils [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(2): 50–53.
- [23] 付华, 王玉梅, 周志宇, 等. 苜蓿施用污泥效果的研究 II: 对土壤理化性质及元素含量的影响[J]. 草业学报, 2002, 11(4): 57–61.
- FU Hua, WANG Yu-mei, ZHOU Zhi-yu, et al. Studies on effects of application of sewage sludge on alfalfa II: Effects on physical and chemical character, element accumulation of the soil [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2002, 11(4): 57–61.
- [24] 张桥. 未消化城市污泥与稻草堆肥处理研究[D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2002.
- ZHANG Qiao. Study on co-composting of undigested sewage sludge with rice straw [D]. Guangzhou: Maste dissertation of South China Agricultural University, 2002.
- [25] 陈同斌, 李艳霞, 金燕, 等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 644–648.
- CHEN Tong-bin, LI Yan-xia, JIN Yan, et al. The effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on n p k and heavy metals uptake of wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 644–648.
- [26] 黄启飞, 高定, 黄泽春, 等. 鼓风对城市污泥好氧堆肥温度变化的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 742–746.
- HUANG Qi-fei, GAO Ding, HUANG Ze-chun, et al. Temperature changes during sewage sludge composting as influenced by aerating [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 742–746.
- [27] 张光明, 张信芳, 张盼月. 城市污泥资源化技术进展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- ZHANG Guang-ming, ZHANG Xin-fang, ZHANG Pan-yue. Technology progress of resource reuse of municipal sewage sludge [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2006.
- [28] 聂锦旭, 肖贤明. 污水厂污泥堆肥及制作化肥技术研究与应 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(8): 117–120.
- NEI Jin-xu, XIAO Xian-ming. Making compost and fertilizer from sewage plant sludge [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(8): 117–120.
- [29] 李艳霞, 赵莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 797–801.
- LI Yan-xia, ZHAO Li, CHEN Tong-bin. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 797–801.
- [30] 李宇庆, 陈玲, 赵建夫. 施用污泥堆肥对木槿生长的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 894–897.
- LI Yu-qing, CHEN Ling, ZHAO Jian-fu. Effects of application of sewage sludge compost on hibiscus syriacus [J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2006, 25(4): 894–897.
- [31] 王新, 周启星. 污泥堆肥土地利用对树木生长和土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 174–177.
- WANG Xin, ZHOU Qi-xing. Effects of land utilization of sewage sludge compost on trees growth and soil environment [J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(1): 174–177.
- [32] 吴启堂. 环境生物修复技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- WU Qi-tang. Environmental biological remediation technology [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2007.
- [33] 孟庆强. 利用超富集植物处理重金属污染土壤和污泥[D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2003.
- MENG Qing-qiang. Using hyperaccumulators to treat heavy metal contaminated soil and sewage sludge [D]. Guangzhou: Maste Dissertation of South China Agricultural University, 2003.
- [34] 杨肖娥, 龙新亮, 倪吾钟, 等. 东南景天 (*Sedum alfredii* H) 一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003–1006.
- YANG Xiao-e, LONG Xin-lian, NI Wu-zhong, et al. *Sedum alfredii* H is a new zinc hyper-accumulation plant [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(13): 1003–1006.
- [35] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2001, 47(3): 207–210.
- CHEN Tong-bin, WEI Chao-yang, HUANG Ze-chun. Arsenic hyperaccumulation plant (*Pteris vittata* L) and the characteristic of accumulation arsenic [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(3): 207–210.
- [36] Samake M, WU Qi-tang, MO Ce-hui. Plants grown on sewage sludge in South China and its relevance to sludge stabilization and metal removal [J]. *Journal of Environmental Science*, 2003, 15(5): 622–627.
- [37] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 104–107.
- WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 104–107.
- [38] 吴启堂, 陈卢, 王广寿, 等. 化肥种类对不同品种菜心吸收累积 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(1): 103–106.
- WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou, et al. Effect of chemical fertilizer sources on uptake and accumulation of Cd by *Brassica chinensis* cultivars [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(1): 103–106.
- [39] Liu Xiao-mei, WU Qi-tang, Banks M K, et al. Phytoextraction of Zn and Cu from sewage sludge and impact on agronomic characteristics [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2005, 40: 823–838.
- [40] Liu Xiao-mei, WU Qi-tang, Banks M K. Effect of simultaneous establishment of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on heavy metal accumulation in plants [J]. *Int J Phytoremediation*, 2005, 7: 43–53.
- [41] 张辰. 污泥处理处置技术与工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- ZHANG Chen. Technology and engineering example of sewage sludge treatment [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2006.