

植物处理后的城市污泥农用对玉米生长的影响

丘锦荣^{1,2}, 刘 雯³, 郭晓方², 卫泽斌², 吴启堂², 许振成¹

(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; 3.仲恺农业工程学院环境科学与工程系, 广州 510225)

摘 要:采用东南景天单种、东南景天与香芋套种对污泥进行植物处理,将植物处理后的污泥作为肥料与上层土壤混合后种植玉米,并设不同的肥料处理来研究对玉米生长的影响。结果表明,利用植物处理后的污泥作为肥料种植玉米,玉米生长良好,且长势和产量明显优于对照和施用化肥的处理,其中单种东南景天处理后的污泥与土壤混合种植的玉米籽粒的产量最高,分别是对照和化肥处理的 3.26 和 2.66 倍;利用植物处理后的污泥作为肥料所生产的玉米籽粒中 Zn、Cd、Cu、Pb 的含量符合国家饲料卫生安全标准,作为饲料是安全的。

关键词:城市污泥; 植物处理; 农用; 玉米

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0990-05

Effect of Agricultural Application of Phyto-treated Municipal Sewage Sludge on Maize Growth

QIU Jin-rong^{1,2}, LIU Wen³, GUO Xiao-fang², WEI Ze-bin², WU Qi-tang², XU Zhen-cheng¹

(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; 3.Department of Environmental Science and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: Agricultural application of municipal sewage sludge (MSS) had been being one of the most promising ways to dispose of MSS all over the world. Fresh MSS were treated by phyto-treatment system, including mono-*Sedum alfredii*, co-planting *Sedum alfredii* and *Alocasia marorrhiza*, then the treated MSS as fertilizer were mixed with the upper soil and maize was planted. The results showed that the growth of maize with application of treated MSS were better than those treated with chemical fertilizer and the control (no fertilizer). The yield of grain in the treatment of MSS treated by mono-*Sedum alfredii* was the highest, which was 3.26 and 2.66 times greater than that of the control and the chemical fertilizer treatment. The concentration of Cu, Zn, Pb, Cd in grain of maize treated with MSS were below the tolerance limit of heavy metals according to the Chinese standards of feeds.

Keywords: municipal sewage sludge; phyto-treatment; agricultural application; maize

随着城市污水处理厂的不断兴建、生活污水处理率的不断提高以及对出水水质要求的不断严格^[1],目前采用较为成熟的活性污泥法处理城市生活污水必然导致城市污泥的急剧增加,城市污泥的出路问题亟待解决,城市污泥的科学有效的处理处置已经成为城

市废物处理处置的最大难题之一^[2-4]。

污泥处理处置基建投资大,运行费用高。目前世界上大多数国家采用填埋、焚烧、投海、土地利用等方法^[5-8]。但前 3 种方法均存在一定的缺陷而未被广泛采用,投海已经禁止,填埋因污泥含水率过高而逐渐不被大多数填埋场接受,焚烧则因成本太高而无法广泛推广。资源化利用,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,是城市污泥处理处置与城市可持续发展的必然要求和发展趋势^[7-9]。

污泥资源化利用的常用方法中,农用资源化具有投资少、能耗低,运行费用低等优点,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,

收稿日期:2009-11-02

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAD89B14);国家自然科学基金(40801115);广东省科技计划项目(2009B030802016, 2009A020101005, 2007A032303001);环境保护部环保公益项目(200809093)

作者简介:丘锦荣(1979—),男,福建长汀人,博士,主要从事污泥资源化及农业面源污染控制研究。E-mail: qiujinrong@scies.org

通讯作者:卫泽斌 E-mail: wehovo@scau.edu.cn

被认为是最具前景的污泥处理处置方式。污泥农用正在成为世界上各国主要的污泥处置方式^[10], 欧洲先进国家污泥农业利用率占污泥总量的一半以上, 美国、法国等主要国家超过 60%^[11-12]。但城市污泥农用受到一些因素的限制, 首先是城市污泥含水量高, 限制了其大范围运输和使用, 而干燥费用大, 通常需要 200 元·t⁻¹; 其次, 城市污泥中重金属含量可超过农用标准, 限制了其直接农用^[13]。

本文针对广州市的城市污泥, 利用特种植物进行处理^[14-21], 将植物处理后的城市污泥作为肥料进行农业利用, 研究其对植物生长的影响及污泥中的重金属在植物中的累积情况, 为城市污泥的安全农业利用提供参考。

1 供试材料

1.1 供试污泥

供试污泥: 取自广州市大坦沙污水处理厂未消化污泥, 该厂采用 A²/O 法污水处理方法, 污泥采用压滤法进行脱水。污泥的基本理化性质见表 1。

表 1 污泥的主要理化性质

Table 1 Main characteristics of the studied sludge

主要指标	新鲜城市污泥
pH (土:水=1:2.5)	7.05
有机质/g·kg ⁻¹	442±10
含水量/g·kg ⁻¹	804±1
全 N/g·kg ⁻¹	34.6±1.1
全 P/g·kg ⁻¹	16.1±0.2
全 K/g·kg ⁻¹	9.71±0.34
全 Zn/mg·kg ⁻¹	1 831±12
全 Cu/mg·kg ⁻¹	295±9
全 Cd/mg·kg ⁻¹	15.2±0.1
全 Pb/mg·kg ⁻¹	117±3

1.2 供试植物

超积累植物东南景天 (*Hyperaccumulating Sedum*

alfredii H) 取自浙江衢州古老铅锌矿。植物移至华南农业大学环境科学与工程系玻璃温室, 在装有营养土的育苗板上扦插繁殖, 培育新苗, 供试验用。

香芋 (*Fragrant Taro*) 取自福建长汀。试验开始前先对处于休眠状态的香芋块根进行培育催芽, 选择 20 颗大小较均一的香芋块根, 用自来水撒湿, 用黑布盖住, 放于 25 ℃ 的培养箱中培养数日至萌发新芽。选取出芽较为一致的 16 颗种植到污泥上, 试验期间不施肥, 干燥时适当浇水。

玉米 (*Zea mays* var. *yunshi-5*) 种子购买于云南农科院育种中心。

1.3 试验设计

试验在华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系的实验基地进行, 用 PVC 板将用地隔成 4 个区组, 每区组设置 4 个小区, 各小区间从土壤以下 20 cm 处隔开, 每小区面积为长 2 m、宽 1 m, 各处理随机排列。具体试验设计见表 2。

玉米种植采用直播方式, 按照 50 cm×50 cm 密度种植, 每穴播 3 棵玉米种子, 等玉米长出 3 片叶时间苗, 每穴只留 1 棵。在玉米生长期浇水, 按常规方法进行管理。玉米种植 100 d 后收获。

1.4 样品分析

收获时, 将植物分成不同的器官分别用自来水和去离子水洗净, 吸水纸吸干表面水, 测定鲜重。首先将样品置于烘箱内 110 ℃ 杀青 30 min, 然后 75 ℃, 48 h 烘干, 记录干重。干样用玛瑙粉碎机粉碎过 0.25 mm 的尼龙网筛, 备测 N、P、K 和重金属含量。植物全氮、全磷、全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法, 重金属含量测定采用干灰化-原子吸收光谱法, 其具体测定参照《土壤农化分析》^[22]。

1.5 数据分析

数据用 Excel2003 处理, 采用 SAS8.1 软件对数据进行多重比较。

表 2 试验设计

Table 2 Design of experiments

前期试验(污泥的植物处理)	本试验(植物处理后污泥农用)
只将土壤翻耕(1)	对照处理: 无污泥无化肥, 只将土壤翻耕, 种植玉米
只将土壤翻耕(2)	化肥处理: 按传统耕作施用化肥, 种植玉米
翻耕土壤+覆盖城市污泥(30 cm)	污泥处理: 将污泥与上层土壤混匀后, 种植玉米
翻耕土壤+覆盖城市污泥(30 cm)+单种重金属超累积作物东南景天, 种植密度为 10 cm×10 cm	污泥+景天单种处理: 将单种东南景天处理的污泥处理与上层土壤混匀后, 种植玉米
翻耕土壤+覆盖城市污泥(30 cm)+套种香芋和超累积东南景天, 香芋种植密度为 50 cm×50 cm, 东南景天种植密度为 10 cm×10 cm	污泥+景天香芋套种处理: 将香芋和东南景天套种处理后的污泥与上层土壤混匀后, 种植玉米

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对玉米生长和产量的影响

将植物处理后的污泥作为肥料与土壤混合后种植玉米,玉米生长良好,没有出现不适症状。除了测定玉米的生物量外,在玉米生长过程中测定了株高、茎粗和叶绿素含量等指标,综合各指标分析玉米的生长状况。

从表 3 可以看出,对照处理和化肥处理的玉米茎叶和籽粒的生物量都要显著低于污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理,这表明施用污泥可以明显使玉米增产,且优于化肥,蔡全英等^[20]的研究得出相一致的结果;另外,污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理间玉米生物量并无显著差异,但从数据上看污泥+景天单种处理后污泥农用种植的玉米茎叶和籽粒产量高于污泥和污泥+景天香芋套种处理,而污泥+景天香芋套种处理后的污泥农用种植的玉米生物量最低,这可能由于套种处理种植了东南景天和香芋(香芋生物量大),消耗了污泥中较多的养分,而单种处理只种植了东南景天(生物量较小),不但没有消耗大量的养分,反而有可能通过本身的生物覆盖减少对污泥中的养分的流失。

表 3 玉米生物量和生物学指标

Table 3 Biomass and other biological indexes of maize

处理	玉米抽穗期生物学指标			生物量/g·plot ⁻¹ DW	
	株高/cm	茎粗/cm	叶绿素 spad 值	茎叶	籽粒
对照(无肥)	211±15a	2.13±0.15a	48.8±1.8a	206±45a	205±54a
化肥	210±29a	2.33±0.25a	51.2±4.6ab	225±36a	251±95a
污泥	224±15ab	2.82±0.34b	57.7±2.8c	340±80b	636±159b
污泥+景天单种	243±6b	2.84±0.36b	56.5±3.4bc	375±59b	669±173b
污泥+景天香芋套种	220±10ab	2.52±0.06ab	54.6±0.9bc	301±12ab	606±172b

注:根据 Duncan 检验($P=0.05$),带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$ 。

从表 3 还可以看出玉米在各处理中的生长状况。根据所测得的株高、茎粗和叶绿素含量,可知污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理比对照和化肥处理的长势好,达到显著差异性,表明污泥的肥效好,农用价值高,这与上述不同处理中玉米生物量的差异具有一致性。

2.2 不同施肥处理对玉米籽粒、茎叶和根中重金属含量的影响

从表 4 可以看出,污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种处理的玉米籽粒中 Zn、Cd、Cu 和 Pb 的

表 4 玉米籽粒、茎叶和根的重金属含量(mg·kg⁻¹ DW)

Table 4 Concentration of heavy metals in different tissues of maize (mg·kg⁻¹ DW)

项目	处理	Zn	Cd	Cu	Pb
籽粒	对照(无肥)	39.21±6.22a	0.111±0.06a	2.57±0.48a	0.415±0.16a
	化肥	39.19±6.78a	0.103±0.06a	2.71±0.36a	0.435±0.07a
	污泥	43.52±7.04a	0.074±0.02a	2.21±0.42a	0.407±0.10a
	污泥+景天单种	43.16±2.62a	0.080±0.03a	2.51±0.51a	0.516±0.04a
	污泥+景天香芋套种	40.47±2.59a	0.068±0.03a	1.98±0.71a	0.472±0.16a
茎叶	对照(无肥)	63.10±8.18a	0.393±0.12a	6.71±1.22a	2.68±0.54b
	化肥	49.14±4.51a	0.433±0.14a	5.18±0.31a	2.80±0.71b
	污泥	200.66±16.72b	0.829±0.18b	8.82±1.14b	2.31±0.75ab
	污泥+景天单种	203.90±41.59b	0.838±0.12b	6.82±1.29ab	1.47±0.19a
	污泥+景天香芋套种	235.15±8.75b	0.748±0.32b	7.20±1.41ab	2.37±0.08ab
根	对照(无肥)	419±37a	0.75±0.51a	17.74±8.66a	1.96±0.43a
	化肥	424±113a	0.71±0.56a	20.27±2.53a	1.96±0.57a
	污泥	1140±255b	1.01±0.18a	31.32±16.46a	2.69±0.87a
	污泥+景天单种	1060±252b	1.15±0.67a	22.21±4.32a	2.63±0.61a
	污泥+景天香芋套种	1373±420b	1.01±0.72a	31.11±4.58a	2.59±0.39a
标准	饲料卫生标准最高限量标准代码	NP	0.5 GB 13078—2001	NP	5.0 GB 13078—2001
	有机肥料标准最高限量标准代码	NP	3 NY 525—2002	NP	100 NY 525—2002

注:根据 Duncan 检验($P=0.05$),带有相同字母的同一列数据间无显著差异, $n=3$;NP 为没有颁布。

含量与对照和化肥处理相比没有显著差异。通过玉米籽粒中重金属含量与饲料卫生标准(GB 13078—2001)对相应重金属限量的比较,玉米籽粒中 Pb 和 Cd 含量低于动物饲料标准中对 Pb 和 Cd 的最高限量,Zn 和 Cu 没有颁布标准,因此玉米籽粒可以安全作为动物饲料,这对解决城市污泥农用中重金属超标这一限制因素有一定的效果^[24]。另外,污泥+景天香芋套种处理后种植的玉米籽粒中 Zn、Cd、Cu 和 Pb 的含量比污泥和污泥+景天单种处理的低,可见,套种处理后的污泥更有利于农业利用。

玉米的茎叶可以作为有机肥料应用于农业生产中。从表 4 可以看出,污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理种植的玉米茎叶中 Zn、Cd、Cu 和 Pb 的含量均高于对照处理和化肥处理,其中玉米茎叶中 Zn 和 Cd 含量差异达到显著水平。这是由于污泥中 Zn 和 Cd 的含量较高,和土壤混合后显著增加了它们在土壤中的含量,最后导致玉米茎叶中 Zn 和 Cd 的含量也较高。但从所测得的数据分析,根据有机肥料行业标准(NY 525—2002)中对重金属(Pb 和 Cd)的最高限量,污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理种植的玉米茎叶中 Cd 和 Pb 的含量均没有超出有机肥标准所规定的 Cd 和 Pb 最高限值,而有机肥料行业标准没有颁布 Zn 和 Cu 作为肥料的最低限量。因此,玉米茎叶可安全作为有机肥或制作有机肥的原料使用。

从表 4 还可以看出,污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理种植的玉米根中的 Zn 含量显著高于对照处理和化肥处理,这是由于污泥 Zn 含量较高,从而造成污泥和土壤混合后 Zn 含量显著高于无污泥处理。玉米根中的 Cd、Cu 和 Pb 3 种重金属在 5 个处理中无显著差异,

2.3 不同施肥处理对玉米茎叶中 N、P、K 含量的影响

由表 5 可知,各处理的玉米茎叶中 N、P、K 的含量均没有显著差异,但从所测得的数据看,污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理种植的玉米茎叶中 N、P、K 的含量略高于对照处理和化肥处理,这是由于污泥含有丰富的有机质和氮磷钾等营养元素,施用污泥可以提高植物中营养元素的含量。污泥+景天香芋套种处理的玉米茎叶钾含量在污泥、污泥+景天单种和污泥+景天香芋套种 3 个处理中处于最低水平,这主要是由于套种处理在前一阶段的植物处理期间种植了钾的富集植物香芋,吸收了污泥和土壤中的钾。

表 5 玉米茎叶氮磷钾含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW)

Table 5 Concentration of N P K in shoots and leaves of maize($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW)

处理	N	P	K
对照(无肥)	15.9±1.01	2.21±0.27	11.1±4.16
化肥	16.3±0.42	2.63±0.42	10.1±4.13
污泥	17.0±1.90	3.56±1.27	14.8±7.22
污泥+景天单种	16.8±1.15	3.17±0.43	14.3±2.67
污泥+景天香芋套种	16.9±3.94	3.23±0.51	11.3±2.66

3 结论

(1)植物处理后的城市污泥作为肥料和土壤混合后种植玉米,玉米长势良好,玉米的生物量显著高于对照处理和化肥处理,其中污泥+景天单种处理后的污泥农用所种植的玉米籽粒生物量最高,分别是对照处理和化肥处理的 3.26 倍和 2.66 倍。

(2)植物处理后污泥作为肥料使用生产的玉米籽粒中 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量均符合国家饲料卫生安全标准,可作为饲料使用;植物处理后的污泥作为肥料利用所种植的玉米茎叶中 N、P、K 含量较高,而且玉米茎叶中 Pb、Cd 的含量低于有机肥料标准的最低限制,可以作为有机肥料或有机肥料的原料使用。可见,污泥通过植物处理后农用可有效解决污泥农用中重金属超标这一限制因素。

参考文献:

- [1] 陈同斌,郑国砥,高 定,等.城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J].中国给水排水,2009,25(9):104-108.
CHEN T B, ZHENG G D, GAO D, et al. Key problem s in municipal sludge composting and its industrialization process [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(9):104-108.
- [2] 孙苏宁,李艳霞,张增强,等.城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态变化[J].环境科学学报,2009,29(9):1836-1841.
SUN X N, LI Y X, ZHANG Z Q, et al. Extractable forms of heavy metals produced during municipal sludge composting [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29 (9):1836-1841.
- [3] 唐鸣放,王白雪,郑怀礼.城市污泥处理与绿化利用[J].土木建筑与环境工程,2009,31(4):103-106.
TANG M F, WANG B X, ZHENG H L. Sludge treatment and application in greening[J]. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(4):103-106.
- [4] 吴臣军,黄少武,张建设.超声波在低声能密度下处理污泥的实验研究[J].环境科学与技术,2009,32(9):170-172.
WU C J, HUANG S W, ZHANG J S. Experimental study on sludge disposal using ultrasonic technology in low power density[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(9):170-172.

- [5] 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 Z W, QIN H. Resource reuse of municipal sewage sludge and utilization of wastewater in farmland (in Chinese)[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [6] 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 G M, ZHANG X F, ZHANG P Y. Technology progress of resource reuse of municipal sewage sludge[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2006.
- [7] 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 N, CHEN L, HE P S, et al. Study on resource reuse of municipal sewage sludge[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 86–89.
- [8] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- ZHAO Q X. Technology of sewage sludge resource (in Chinese)[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002.
- [9] 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 C H, WU Q T, CAI Q Y, et al. Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 157–160.
- [10] 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 Q. Sewage sludge treatment and disposition and equipment (in Chinese)[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2003.
- [11] ADEME (法国环境与能源中心). Les boues d'épuration municipales [EB/OL]/http://www.ademe.fr/htdocs/actualite/dossier/boues.htm#top. 2006.
- [12] NRC (National Research Council of USA). Biosolids Applied to Land: Advancing standards and practices[M]. Washington: National Academy Press, 2002: 13–79.
- [13] Walter I, Martinez F, Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139: 507–514.
- [14] 黑 亮. 减少重金属污染的污泥植物处理与利用技术研究 [D]. 广州: 华南农业大学博士学位论文, 2005.
- HEI L. Phytotreatment and reuse technology of heavy metals contaminated sewage sludge[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2005.
- [15] Wu Q T. Sewage sludge treatment in China[C]//Proceedings of the 1st international conference on soils of urban, industrial, traffic, and mining areas, Essen, Germany, 2000, July 12–18: 371–374.
- [16] Wu Q T, Samake M, Mo C H, et al. Simultaneous sludge stabilization and metal removal by metal hyper-accumulator plants[C]. Transactions of 17th World Congress of Soil Sci. Bangkok, 2002: 355–364.
- [17] Samake M, Wu Q T, Mo C H. 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.
- [18] Liu X M, Wu Q T, 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.
- [19] Liu X M, Wu Q T, Banks M K. Effect of simultaneous establishment of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on heavy metal accumulation in plants[J]. *Intl J Phytoremediation*, 2005, 7: 43–53.
- [20] Wu Q T, Hei L, Wong J W C, et al. Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1954–1960.
- [21] Wu Q T, Wei Z B, Yang Y O. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *sedum alfredii* H: Effects of Chelator and Co-planting[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2007, 180: 131–139.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- LU R K. Analytical methods of soil and agri-chemistry (In Chinese) [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] 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 Q Y, MO C H, WU Q T. Effects of municipal sludge before and after composting on yields of *Ipomoea Aquatic* and *Brassica Campestris* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(1): 52–55.
- [24] 王 芳, 吴启堂, 卫泽斌, 等. 城市污泥植物处理系统与污泥中转处理场建设[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1309–1313.
- WANG F, WU Q T, WEI Z B, et al. Phyto-treatment system of municipal sewage sludge and transitional disposal site[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1309–1313.