

城市污泥堆肥处理过程中有机污染物的变化

蔡全英¹, 莫测辉¹, 吴启堂¹, 王伯光²

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642, mocehui@scau.edu.cn;

2. 广州市环境保护科学研究所, 广东 广州 510620)

摘要: 根据国内外研究资料, 综述了城市污泥在堆肥处理过程中氯代酚(CPs)、PCDD/Fs、多环芳烃(PAHs)类、氯苯类(PCBs、CBs)等有机污染物的变化, 提出将城市污泥进行堆肥处理, 可以不同程度降解其中各种有机污染物, 达到农用的目的。有机污染物降解的效果与其种类和性质、污泥的性质、环境因素(包括微生物类型和数量、C/N比、水分含量、温度、通气状况)等有关。

关键词: 城市污泥; 有机污染物; 堆肥处理; 降解

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 0267(2001)03 - 0186 - 04

Variation of Organic Pollutants in Treatment of Sewage Sludge During Composting

CAI Quan-ying¹, MO Ce-hui¹, WU Qi-tang¹, WANG Bo-guang²

(1. College of Resources and Environmental Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;

2. Institute of Guangzhou Environment Protection, Guangzhou 510620 China)

Abstract: Land application of municipal sludge is the most attractive disposal way. However, as the sludge may contain heavy metals, parasite, pathogen, organic pollutants, especially polychlorinated dibenzo-p-dioxins and -furans (PCDD/Fs), polychlorinated biphenyl (PCBs), polyaromatic hydrocarbon (PAHs), chlorophenols (CPs) and chlorobenzenes (CBs), etc, the treatment of municipal sludge on land may cause scare. The present investigation illustrates that some organic pollutants can be degraded and transformed by microorganism during composting. Their degradation was affected by their characteristics, properties of sewage sludge, environment factors, including the type and quantity of microorganism, carbon to nitrogen ratio(C/N), moisture content, temperature and air.

Keywords: municipal sludge; organic pollutants; composting

城市污泥(简称污泥)是城市污水处理厂在污水净化处理过程中产生的沉积物,它含有丰富的氮、磷、钾和有机质,也含有病原体、重金属和毒性有机物等多种污染物,因此,若城市污泥未经处理而直接施用于农业,可能会对生态环境和人畜健康带来负效应。该文通过实验研究,结合国内外研究现状,阐述城市污泥在堆肥处理过程中毒性有机物的变化情况。

1 城市污泥中的有机污染物

城市污泥中有机污染物的种类非常复杂,有氯代酚类(CPs)、多环芳烃类(PAHs)、多氯代二苯并二恶英/呋喃类(PCDD/Fs)、硝基苯类、酞类、胺类、氯代苯类(CBs)、多氯联苯类(PCBs)、卤代烷烃类、邻苯二甲酸酯类、有机氯农药等“优控污染物”,其中有些在环境中稳定、持久、毒性大,部分有致癌、致畸、致突变作用。如PCDD/Fs属于全球性污染物,是目前已

知毒性最大的有机氯化物。PCDFs有135种同系物,PCDDs有75个同系物,其中2,3,7,8-四氯代二苯并二恶英(T,CDD)是已知有机污染物中毒性最强的化合物之一。国外研究表明,一些城市污泥就遭受了PCDD/Fs的严重污染,八氯代二苯并二恶英(OCDD)的浓度超过 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重),其它一些高氯代二恶英的含量也较高^[1]。其它一些主要的有机污染物在城市污泥中的含量为:CBs在 $0.1\text{—}50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,个别高达 $153.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;PCBs在 $1\text{—}20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;PAHs在 $1\text{—}10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;酚类和短链卤代脂肪族类在 $0\text{—}5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;邻苯二甲酸酯类在 $1\text{—}100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;线型烷基苯磺酸盐(LAS)在 $50\text{—}15000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;烷基酚类在 $100\text{—}3000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;芳香胺和烷基胺类在 $0\text{—}1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;有机氯农药类在 $0\text{—}几个 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[2]。最近,作者用气相色谱-质谱仪联机(GC-MS)技术对中国一些主要城市的污泥进行检测表明,有些城市污泥中部分有机污染物含量较高(表1)。若城市污泥未处理直接用于农业,可能会造成土壤-作物-水体系统的有机污染。污染物被作物吸收而进入作物体,甚至在作物体内还可能转化为毒性更大的衍生物^[注、3];土

收稿日期: 2000-04-07; 修订日期: 2000-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(39870435)、广东省自然科学基金(970011)、广东省环保科技研究开发基金(粤环1997-16)、广州市科委重点攻关项目和美国Rockefeller兄弟基金项目联合资助

作者简介: 蔡全英(1974—),女,华南农业大学资源环境学院97级在读硕士研究生。

[注]: 莫测辉. 城市污泥的农业利用研究[D]. 广州: 华南农业大学博士后研究工作报告, 1998.

表 1 中国城市(地区)污泥中 PAHs 和邻苯二甲酸酯类有机污染物含量(mg · kg⁻¹)Table 1 Contents of PAHs and phthalates in municipal sludges from some cities of China(mg · kg⁻¹)

化合物	广州污泥	佛山污泥	珠海污泥	北京污泥	无锡污泥	甘肃污泥	西安污泥	香港污泥
多环芳烃类	31.110	18.500	78.410	33.635	15.698	143.806	2.271	5.155
邻苯二甲酸酯类	18.097	10.466	35.232	114.166	23.406	22.695	11.669	29.688

注:各地污泥来源分别为:广州污泥——广州市大坦沙污水处理厂;佛山污泥——佛山市镇安污水净化厂;珠海污泥——珠海市香洲污水净化厂;北京污泥——北京市高碑店污水处理厂;无锡污泥——南京市无锡污水处理厂;甘肃污泥——甘肃七里河污水处理厂;西安污泥——西安市北石桥污水处理厂;香港污泥——香港大埔污水处理厂

壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PAHs 等有机污染物的含量随城市污泥施用量的增加而增加,比对照高数倍至十余倍^[4,5];一些有机污染物可从土壤中被淋溶到地下水,造成二次污染^[6]。因此,必须对农用城市污泥进行堆肥等处理,使其中有机污染物稳定化和无害化。

2 城市污泥在堆肥处理过程中有机污染物的变化

2.1 氯代酚(CPs)的变化

对城市固体废物、城市固体废物/城市污泥的堆肥产物进行分析表明,CPs 化合物如三氯代酚(T₃CP)、四氯代酚(TeCP)、五氯酚(PCP)等,其含氯原子数越多,含量越高,显示了低氯原子数的 CPs 化合物较易降解,而高氯原子数的 CPs 化合物较难降解的特征^[7]。但是,五氯酚(PCP) 同分异构体分布发生了变化,并转化为 PCDDs,在堆肥产物中 PCPs 与 PCDDs 的浓度比降低了两个数量级。Minna Laine(1997)进行了稻草、污泥和木屑的堆肥研究,也得出类似的结论。同时还显示了在堆肥过程中,CPs 化合物的浓度随时间的变化情况较为复杂,与堆肥材料有关^[6]。如表 2 所示,只有在木屑堆肥中,CPs 化合物的浓度随堆肥时间而降低,降解或转化较为明显;而在污泥和稻草堆肥中,到第 9 周后 CPs 化合物的浓度反而显著提高,到第 25 周后又显著降低,但与初始浓度相比,有的降低明显,有的则不明显,甚至还会提高。

2.2 PCDD/Fs 的变化

在堆肥过程中,PCDD/Fs 较难降解,而且含氯越多的化合物越难降解,在堆肥产物中含量就越高。堆肥原料中的某些化合物如 CPs,通过微生物的作用可转化为 PCDD/Fs^[8],从而使污泥中的 PCDD/Fs 在堆肥过程中不仅没有降低,反而提高了(表 3)^[7]。污泥中的 CPs 化合物尤其是 PCP 的浓度越高,在堆肥过程中转化为 PCDD/Fs 的可能性就越大^[9]。在庭院废物、城市固体废物和城市固体废物/污水污泥堆肥过程中,PCDD/Fs 化合物特别是六氯代二苯并英(HxCDD)、HpCDD、OCDD 同分异构体的浓度都有提高^[4]。

Minna Laine(1997) 对表 2 中 4 种堆肥处理也进行了

表 3 污泥堆肥过程中 PCDD/Fs 的含量变化(ng · kg⁻¹)^[7]Table 3 The content variation of PCDD/Fs in sewage sludge composting(ng · kg⁻¹)

时期	PCDDs	PCDFs	OCDD	OCDF	2, 4, 7, 8 - TCDD	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 - HpCDD	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 - HpCDF
堆肥前	96.9	48.7	68.2	24.2	<0.1	15.2	3.9
堆肥中期	227.5	58.8	207.7	30.0	<0.1	38.7	6.1
堆肥后	521.2	71.9	375.7	36.2	<0.1	96.3	5.8

表 2 氯代酚(CPs)在堆肥处理过程中的浓度变化(mg · kg⁻¹)^[6]Table 2 The concentration variation of CPs during composting (mg · kg⁻¹)

堆肥种类	化合物	开始	第 9 周	第 25 周
稻草堆肥	总 CPs	43 ± 2	770 ± 70	34 ± 3
	TeCP	240 ± 2	520 ± 50	19 ± 2
	PCP	17 ± 0.2	190 ± 10	12 ± 0.6
稻草接种堆肥	总 CPs	45 ± 4	680 ± 10	42 ± 0.4
	TeCP	23 ± 2	440 ± 10	21 ± 1
	PCP	19 ± 0.6	180 ± 4	19 ± 0.7
污泥堆肥	总 CPs	43 ± 5	110 ± 40	67 ± 30
	TeCP	24 ± 0.4	640 ± 20	27 ± 4
	PCP	16 ± 0.3	350 ± 10	38 ± 22
木屑堆肥	总 CPs	1 800 ± 60	440 ± 50	200 ± 20
	TeCP	1 200	240 ± 30	120 ± 2
	PCP	260 ± 3	180 ± 20	200 ± 20

PCDD/Fs 的研究,堆肥前,堆肥 1、2、4 的 PCDD/Fs 总浓度分别为 7 mg · kg⁻¹、10 mg · kg⁻¹ 和 7 mg · kg⁻¹,在堆肥过程中堆肥 1、2 的 PCDD/Fs 浓度基本保持不变,最后分别为 9 mg · kg⁻¹ 和 8 mg · kg⁻¹;堆肥 4 的 PCDD/Fs 浓度变大,由 7 mg · kg⁻¹ 增加到 12 mg · kg⁻¹。而且绝大部分是 HxCDD/F、HpCD/F、OCDD/F,其中 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 - HpCDFs、1, 2, 3, 4, 6, 8, 9 - HpCDFs、八氯代二呋喃(OCDF)的浓度增加最显著,分别由 2.7 mg · kg⁻¹、1.8 mg · kg⁻¹ 和 2.0 mg · kg⁻¹ 增加到 4.8 mg · kg⁻¹、3.4 mg · kg⁻¹ 和 2.6 mg · kg⁻¹, 2, 3, 7, 8 - TcCDD 的浓度低于检测限^[6]。至于堆肥中出现 HxCDF、HpCDF、OCDF 浓度比较高的原因,尚需进一步研究。

2.3 多环芳烃(PAHs)类的变化

在污泥的堆肥过程中,PAHs 是一类相对较易被生物降解的有机污染物。如作者研究结果表明,西安污泥堆肥前其 PAHs 含量为 2.271 mg · kg⁻¹,堆肥后降为 0.603 mg · kg⁻¹,降解率达 73%。而且,大多数的化合物降解都较明显,降解率在 50% 以上(表 4)。Ronald 等(1993)在反应器中将污泥与被杂酚油污染的土壤混合(3:7, V/V),通过搅拌、曝气和温控等措施进行了为期 12 周试验,PAHs 的平均降解率达(93.4 ± 3.2)%;其

表4 堆肥作用对城市污泥中 PAHs 化合物的降解效 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 4 Degradation effects of PAHs in municipal sludge by composting ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

项目	萘	苊	菲	芴	蒽	萤蒽	芘	苯并(a)蒽	屈	苯并(b)萤蒽	苯并(a)芘	苯并(ghj)芘
西安污泥	0.047	0.012	0.081	0.443	0.066	0.580			0.347	0.166	0.063	0.022
西安污泥堆肥		0.005	0.044	0.192	0.016	0.040			0.005	0.054		0.006
降解率(%)	62	59	46	57	76	93	47	98	99	68		74

注:西安污泥来源同表1。该污泥的堆肥处理由西北农业大学张增强博士等制作。

中,二环和三环的 PAHs 降解了 97.4%,四环—六环的 PAHs 降解了 90.0%^[10]。PAHs 的生物降解是从一个环发生二羟基化和开环开始,进一步降解为丙酮酸和 CO_2 ,然后第二个环以同样方式分解。

2.4 氯苯类(PCBs、CBs)的变化

能以联苯为基质的微生物,通常能把联苯作为基质的诱导物和共氧化剂,代谢各种 PCBs 同系物。因此,在堆肥过程中,微生物可以降解多氯联苯(PCBs)和氯苯类(CBs)。厌氧细菌易导致高氯的 PCBs 发生脱氯作用,而好氧细菌一般限于对 5 或 6 个氯原子的 PCBs 同系物产生脱氯作用。堆肥中的微生物通过共代谢作用及微生物之间的互生关系,使 PCBs 降解矿化。但在上述城市固体废物/污水污泥堆肥中,PCBs 的浓度有变大趋势^[9]。

污泥中的六氯苯(HxCB)能被微生物降解为五氯苯类(PeCB)、1,2,4,5-四氯苯(T₄CB)、1,2,4-三氯苯(T₃CB),在厌氧条件下进一步分解为二氯苯类^[11]。在堆肥过程中,含氯越多的 CBs 化合物特别是六氯苯(HxCBs)和五氯苯(PeCBs),降解效果越差,在堆肥产物中其含量越高^[7]。综上所述,城市污泥在堆肥处理过程中,有机物的变化较复杂,一方面可通过微生物的作用而发生降解,另一方面会衍生其它的有机污染物。如何控制堆肥的条件和采取适当的措施,使原有有机污染物得到最大程度的降解,避免衍生其它的有机污染物等有待进一步研究。

3 影响污泥堆肥过程中有机污染物降解的因素

3.1 有机物的性质

在堆肥过程中,有机污染物的性质是影响其生物降解效果的内在因素,不同化合物降解的效果不同,如 PAHs、PCDDs、PCBs 等的半衰期分别为 10 d—100 d 以上、10a、2—9a 以上。利用活性污泥富集的混合菌种作菌源,对 5 类 32 种芳香化合物进行好氧生物降解结果表明,苯甲酸类、苯酚类(只含羟基)和甲苯是较易降解的;苯和苯的同系物是可降解的;含氮芳香化合物是难降解的;且随着苯环上取代基数量的增加,取代链的加长,生物降解的难度加大,取代基的位置异构化,对生物降解也有影响^[12]。一般说来,环烃比链烃难降解;多环的比低环的难于降解;饱和烃比不饱和烃难降解;高分子量的比低分子量的难于降解;非线性排列的较线性排列的难降解;高浓度的比低浓度的难降解;支链烷基愈多,愈难降解。如对于 PAHs 来说,生物降解性能顺序为:菲>芘>蒽、芴>萤蒽>苯并蒽;双环和三环 PAHs 极易被生物降解,而四环、五环和六环 PAHs 却

很难被生物降解。对于 PCBs,假单胞菌菌株(*stutzeri*)对 PCBs 的降解速率与 PCBs 的氯化程度呈线性关系^[13]。

3.2 微生物的类型和数量

微生物的类型和数量会影响有机物降解效果。微生物种群的数量变化与毒性有机物的降解呈正相关关系^[14]。毒性有机物的降解是以细菌、放线菌为主的微生物综合作用的结果。微生物单独作用时可以降解有机物,但通过接种特殊微生物,利用其互生作用,可以显著提高有机污染物的降解效果。例如,白腐真菌(White rot fungi)通过直接氧化和间接氧化,能降解多环芳烃化合物、氯代芳香族化合物,包括 PCBs、苯酚类、PCDD/Fs、氯代苯胺、农药、染料等基质^[15]。经过驯化的微生物可以更快适应对芳香族化合物的降解,缩短了生物降解的启动期,并且提高了降解速率^[18]。国外采用生物技术对微生物进行改造,研制出新的微生物种群,用以降解难降解的污染物,提高了降解有机物的效率,为污泥的堆肥化处理创造了新的途径。另外,对微生物自身酶体系和质粒进行研究,有助于加快堆肥过程有机污染物的降解。

3.3 污泥的性质

污泥颗粒的大小、污泥中有机物和重金属的含量、对微生物有毒害作用的氰化物等,都会影响有机污染物的降解。污泥对有机物的吸附/解吸,以及有机物与污泥矿物的相互作用也会影响微生物利用有机物的有效性和降解效果,但污泥中含有表面活性剂,会增加 CBs 和 PAHs 等有机物的溶解度和生物有效性。另外,污泥的有机质提供一些有效的生长介质和营养,有利于提高微生物的活性。但污泥中有联苯和氯代苯甲酸存在时,PCBs 的降解受到抑制,降解率下降^[19]。

3.4 环境因素

环境因素包括温度、湿度、pH 值、通气性以及 C/N 比等,这些因素的调控是堆肥成败的关键。在污泥堆肥过程中,需考虑两方面的条件:一是一般堆肥本身所需要的适宜条件;二是有机污染物降解所需要的最适条件。堆肥过程应结合这两方面考虑,选出最佳的条件。目前对堆肥本身的条件控制已经较为成熟,适宜的堆肥条件见表 5。

另外,通过改变环境条件和污泥性质,可以改变微生物降解 PAHs 的速率,从而得出保持微生物降解活力和 PAHs 降解的最适环境条件^[16](表 6)。将污泥和木屑等混合堆肥处理,高温(50℃—55℃)堆肥条件下反应 6 d,可降解 94% 的石油烃;而在常温(23℃—30℃)堆肥条件下反应 9 d,只降解 45% 的石油烃^[17]。因此研究和探讨其它有机污染物生物降解的最适宜条件,有利于选择最佳堆肥条件。

表6 PAHs降解的最适条件^[16]Table 6 The optimum conditions for degradation of PAHs^[16]

环境因素	湿度	pH值	气含量	养分比例			温度
范围	30%—90%	7.5—7.8	10%—40% O ₂	C/N = 60/1	C/P = 800/1	盐分含量 <4	24 °C—30 °C

表5 堆肥的参数及要求

Table 5 The optimum parameters and conditions for composting

参数	最佳参数值
C/N比	15—30:1
颗粒大小	10 mm 适用于动态堆肥系统和强制通风, 50 mm 适用于长堆和自然通风
水分含量	45%—60% (高含量可能用于大量堆肥时)
空气流动	0.6—1.8 m ³ 空气 · d ⁻¹ · kg ⁻¹ 或含氧量为 10%—18% 适于处理挥发性固体废物
温度	55 °C—60 °C 保持 3 d
搅动情况	简易堆肥周期性翻动而不搅动, 机械系统堆肥时应搅动
pH值控制	一般不必要 (pH值 5.0—8.0)
堆体大小	任意长, 高 1.5 m, 宽 2.5 m, 适于自然通风堆肥; 当采用强制通风时, 堆体大小控制决定于保持温度程度

4 污泥堆肥处理中有待探讨的问题

(1) 研究适合污泥有机污染物降解的堆肥条件, 包括温度、水分含量、通气性、C/N比、膨胀剂和调理剂的种类等。研究不同污泥堆肥条件对有机物降解和转化的影响, 可为堆制高品质的污泥堆肥提供理论指导。

(2) 弄清堆肥过程中降解有机物 (特别是毒性有机污染物) 能力强的优势菌株及其适宜的生长条件, 选育适于单个或混合有机污染物降解的优势种群。研究影响微生物驯化的因素和缩短驯化时间的技术。

(3) 生物工程技术, 目前正朝向构建降解特殊化合物的微生物方向迈进。如何把基因工程技术应用于污泥堆肥方面, 为加快污泥堆肥化处理提供技术支持; 开发酶工程技术, 即通过开发有特殊功能的酶类、酶分子化学修复和酶的分离、提纯等技术, 制备具有高降解能力的制剂, 掺合到污泥堆肥中, 有助于降解有毒有机物。

(4) 在污泥堆肥化过程中, 不同种类有机物降解的难易程度, 有机物间的相互转化规律和控制措施, 值得进一步研究。从有机物降解的角度, 探讨其反应机理, 确定堆肥过程中有机污染物降解的中间和最终产物、反应速率、动力学规律等, 为制定腐熟度指标和污泥农用提供理论基础。

参 考 文 献:

[1] Hagenmaier H. Untersuchungen der Gehalte an polyhalogenated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans und Ausgewählten chlorkohlenwasserstoffen in Klarschlamm. Forschungsbericht 103 03 305. Universität Tübingen 1988.

[2] Smith S R, et al. Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. The United Kingdom. CAB International. 1995, 207—236.

[3] Hans H. Harms. Bioaccumulation and metabolic fate of sewage sludge derived organic xenobiotics in plants[J]. *Sci Total Environ*, 1996, **185**(1/3): 83—92.

[4] Ethel Eljarrat, Caixach J, Rivera J. Effects of sewage sludges contaminated with polychlorinated dibenzodioxins, dibenzofurans, and biphenyls on agricultural soils[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, **31**: 2765—2771.

[5] Kampe W, Leshber R. Occurrence of organic pollutants in soil and plants after intensive sewage sludge application. In: Quaghebeur D., Temmerman I. and Angeletti G. (eds), *Organic Contaminants in Waste Water, Sludge and sediment Occurrence, Fate and Disposal*. Elsevier Applied Science Publishers Ltd, Barking 35—41.

[6] Laine M M, Ahtiainen J, Wagman N, et al. Fate and toxicity of chlorophenols, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans during composting of contaminated sawmill soil[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, **31**: 3244—3250.

[7] Lahl U, Wilken M, Zeschmar-Lahl B, et al. PCDD/PCDF balance of different municipal waste management methods[J]. *Chemosphere*, 1991, **23**: 1481—1489.

[8] Laine M, et al. Straw compost and bioremediated soils as inocula for the bioremediation of chlorophenol-contaminated soil[J]. *Appl & Environ Microbiol*, 1996, **62**(5): 1507—1513.

[9] Malloy T A, Goldfarb T D, Surico M T J. PCDDs, PCDFs, PCBs, chlorophenols (CPs) and chlorobenzenes (CBs) in samples from various types of composting facilities in the United States. *Chemosphere*, 1993, **27**(1—3): 325—334.

[10] Ronald F, Lewis. Site degradation of slurry-phase biodegradation of PAH contaminated soil[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 1993, **43**(4): 503—508.

[11] Fallepare B Z, Tiedje J M, Boyd S A. Reductive dechlorination of hexachlorobenzene to tri- and dichloro benzenes in anaerobic sewage sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, (11): 811—817.

[12] 王菊思, 赵丽辉, 匡欣, 等. 某些芳香化合物生物降解性研究[J]. *环境科学学报*, 1995, **15**(4): 407—415.

[13] Dercova K, Balaz, S, Haluska L, et al. Degradation of PCBs by bacteria isolated from long-time contaminated soil[J]. *J Environ And Chem*, 1994, **58**: 337—348.

[14] 刘余庆, 谢君, 周颖辉, 等. 城市污泥发酵处理中微生物对有机物的降解[J]. *中国环境科学*, 1995, **15**(3): 215—218.

[15] 李慧蓉. 白腐真菌的研究进展[J]. *环境科学进展*, 1996, **4**(6): 69—77.

[16] 孟范平, 吴方正. 土壤的 PAHs 污染及其生物治理技术进展[J]. *土壤学进展*, 1995, **23**(1): 32—41.

[17] 马瑛, 张甲耀, 侯祖林, 等. 堆肥化生物修复技术处理有毒有害固体废物废弃物的模拟研究[J]. *环境科学*, 1997, **18**(4): 65—68.

致谢: 作者十分感谢西北农业大学张增强博士、南京农业大学周立祥博士、甘肃草原生态研究所周志宇副研究员和中国科学院地理研究所陈同斌研究员。