

中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用

李艳霞, 陈同斌*, 罗 维, 黄启飞, 吴吉夫

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室, 北京 100101)

摘要:土地利用是城市污泥的重要处理处置方法,其有机质和养分含量是土地利用中很受关注的问题。关于中国的城市污泥虽然已有不少研究报道,但不同研究结果之间结论并不一致,且缺乏系统的总结。通过系统搜集了 20 世纪 80 年代以来全国城市污泥相关的文献资料,重点评述中国城市污泥的有机质含量及其土地利用问题。通过 29 个城市污泥组成的统计分析发现,中国城市污泥(不包括工业污泥)的有机质平均含量达到 384g/kg,全氮、全磷和全钾分别为 27、14.3 和 7g/kg;有机质、全氮、全磷比纯猪粪分别高出 1/3~2/3,但全钾比纯猪粪低 1/3。中国城市污泥的有机质含量呈逐年增加的趋势,但氮、磷含量变化规律不明显。研究证明,城市污泥在粮食作物、蔬菜、经济作物及园林绿地上使用,具有明显的肥效和改良土壤的效果。近年来,城市污泥中重金属含量越来越低,这有利于促进城市污泥的土地利用,但中国在有机污染物和病原体的危害方面研究相对较少,对城市污泥土地利用的潜在风险仍缺乏长期的定位试验研究。

关键词:城市污泥;有机质和养分含量;土地利用

Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China

LI Yan-Xia, CHEN Tong-Bin*, LUO Wei, HUANG Qi-Fei, WU Ji-Fu (*Laboratory of Environmental Remediation, Institution of Geographical Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2464~2474.

Abstract: Land application is an important way for treatment of municipal sewage sludge both in China and in the world. Therefore, the contents of organic matter and nutrients in sewage sludges and their effect on promotion of plant growth have been highlighted when they are recycled in lands. There have been some systematic summaries for land application of sewage sludges in developed countries while those have not been reviewed in China though there are some specific research related to their contents of organic matter and major nutrients. Related documents about land application of sewage sludges are summarized in the paper, which focuses on the organic matter and nutrients in sewage sludges and their effects on land application. It shows from the statistical analysis of the contents of organic matter and nutrients in China's municipal sewage sludges from 29 wastewater plants that the average contents of organic matter, total N,

基金项目:北京市自然科学基金重大资助项目(6990002);“九五”国家重点科技攻关资助项目(95-909-01-05)

收稿日期:2002-11-20; **修订日期:**2003-08-20

作者简介:李艳霞(1970~),女,内蒙古包头人,副研究员、博士,主要从事城市污泥处理及土地利用及农业非点源污染研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

Foundation item: Beijing Natural Science Foundation (No. 6990002) and National Science and Technology Project (No. 95-909-01-05)

Received date: 2002-11-20; **Accepted date:** 2003-08-20

Biography: LI Yan-Xian, Ph. D., main research field: municipal sewage sludge disposal and land application, No-point source pollution research.

total P and total K are 385, 27, 14.3 and 7g/kg, respectively, which are 1/3~2/3 higher than their responding contents in pig manure, respectively. It is found that the average contents of organic matter in the sewage sludges have being increased recently in China. Many supported that the sewage sludges can be applied to agriculture, forestry and horticulture because they benefit soil fertility and plant growth. It is also indicated that the contents of heavy metals have being decreased, since the last two decades, which is beneficial for land application of sewage sludges. However, the studies on harmfulness of organic pollutants and pathogens resulting from land application of sewage sludges are still limited and long-term effects of their land application are needed to be understood through long-term experiments in China.

Key words: sewage sludge; land application; organic matter; nutrient content; organic pollutant

文章编号:1000-6332(2003)11-2464-11 中图分类号:X705 文献标识码:A

从1991年开始到2001年的10a间,中国城市污水处理厂的数量增加了347座。到2001年为止,全国已建成和正在兴建的城市污水处理厂约427座,污水处理能力约为113.6亿 $m^3/a^{[1]}$;预计到2010年,中国城市污水处理厂的数量将增加到2000座 $^{[2\sim5]}$ (图1)。城市污水处理量的提高已导致城市污泥产量的连年剧增,以北京市为例(图1),城市污泥的产量在过去45年内增加了143倍 $^{[6]}$ (按污水中污泥含量为0.02%计算)。

我国大量小型污水处理厂的污泥未能得到任何的妥善处理处置就直接农用的约占60%以上 $^{[7]}$,80年代中期以后建设起的大型污水处理厂的污泥多采用中温厌氧消化处理,消化后的污泥稍加脱水后就直接农用。

中国城市污水处理厂数目众多、污水来源广泛,且各污水处理厂的污水和污泥处理处置工艺及处理程度差异很大;不同城市、同一城市的不同污水处理厂污泥有机质和养分含量不同,同一污水处理厂不同时期亦存在差异。尽管,国内外许多学者对特定城市污泥的土地利用情况进行过大量的研究,并充分肯定了污泥的土地利用效果,但是,至今仍少有人对中国不同城市污泥的有机质和养分状况、变化趋势以及土地利用效果进行横向和纵向的比较研究,这不利全面了解中国城市污泥的特性、改进城市污泥的管理。本文对中国大部

分城市污泥的有机质、养分状况和变化趋势的比较研究以及土地利用效果的归纳、总结,为提高中国城市污泥的土地利用效率,减少负面效应提供科学依据。

1 中国城市污泥有机质及养分含量

中国16个城市29个污水处理厂污泥中有机质及养分含量见表1。从表1的统计数据看,不同地区城市污泥的养分含量相差很大。大致而言,城市污泥的组成与污水的来源、处理工艺、城市居民的生活水平和饮食结构等有关。经济欠发达地区城市污泥中有机质、氮、磷、钾含量普遍偏低,而经济发达地区城市污泥中以上物质含量普遍偏高。不同城市污泥的有机质和氮含量变化较大,而钾的含量变化较小。南方城市污泥中磷含量普遍比北方城市污泥高。通过北京、太原两城市9个城市污水处理厂的污泥比较发现,两城市污泥的有机质及养分含量差异十分显著。北京市城市污泥的全氮、全磷、全钾和有机质含量分别为:24.8±6.5g/kg、8.0±3.2g/kg、8.1±3.0g/kg和468±87g/kg,太原市城市污泥的全氮、全磷、全钾和有机质含量分别为:14.2±9.7g/kg、8.1±4.4g/kg、4.4±1.1g/kg和270±130g/kg。除全磷含量基本相当外,北京市城市污泥中全氮、全钾和有机质含量远远高于太原市城市污泥。从有机质含量和养分含量的角度看,北京市城市污泥的资源性要高于太原市的城市污泥。由此表明,经济发达地区城市污泥的土地利用的肥料价值

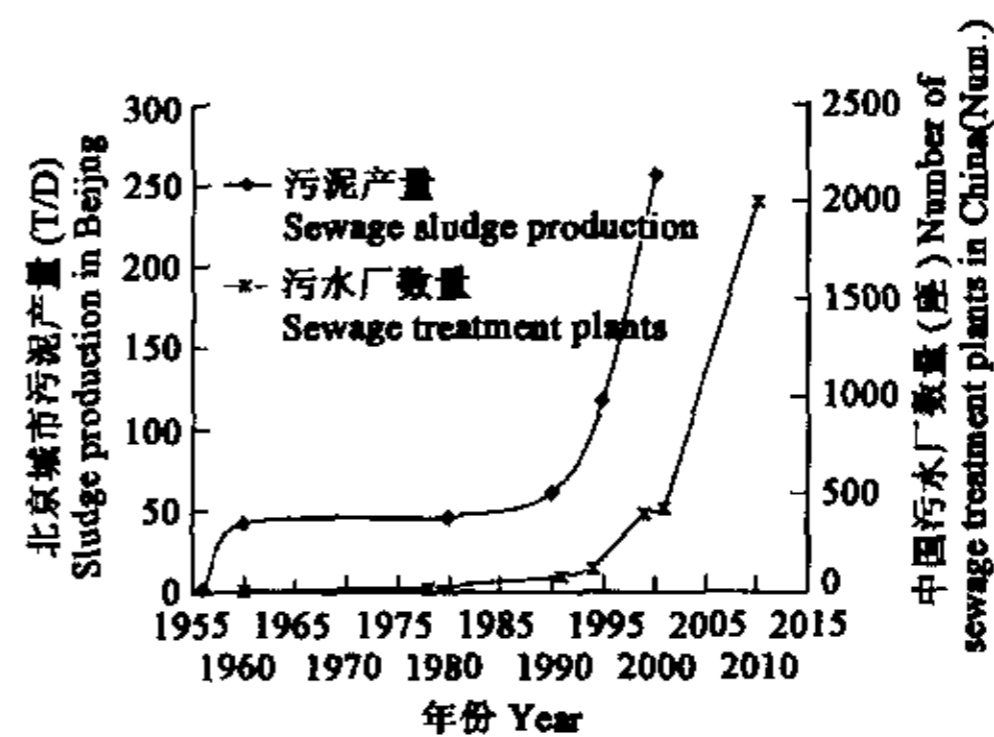


图1 中国城市污水处理厂的数量及北京市城市污泥的产量

Fig. 1 Number of sewage treatment plants in China and production of sewage sludge in Beijing

相对较大。

表 1 中国城市污泥中有机质及养分含量

Table 1 Organic matter and nutrient contents in municipal sewage sludge in China

城市 City	污水处理厂 Sewage treatment plants	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
北京 Beijing	高碑店 Gaobeidian ^{[8-11]*}	482	29.4	7.1	7.0
	酒仙桥 Jiuxianqiao ^{[9,11,12]*}	467	20.2	5.2	6.0
	方庄 Fangzhang ^[11]	568	—	12.6	7.0
	北小河 Beixiaohe ^[11]	356	—	6.9	12.5
山西太原 Taiyuan, Shanxi	杨家堡 Yangjiabao ^[13]	281	14.2	4.7	3.4
	北郊 Beijiao ^[13]	403	27.6	10.4	4.9
	殷家堡 Yinjiabao ^[13]	305	18.9	10.6	3.5
	镇城底 Zhenchengdi ^[13]	—	2.5	12.5	4.3
	古交 Gujiao ^[13]	92	7.8	2.2	6.1
江苏苏州 Suzhou, Jiangsu	城西 Chengxi ^[14]	387	48.2	13.0	4.4
	新区 Xinqu ^[15]	379	32.6	6.9	5.7
安徽合肥 Hefei, Anhui	王小郢 Wangxiaoye ^[16]	381	48.0	12.0	—
	琥珀山庄 Huposhanzhang ^[16]	696	33.0	7.0	—
江苏常州 Changzhou, Jiangsu	城西 Chengxi ^[15]	595	48.3	6.6	4.8
	城北 Chengbei ^[17]	311	51.6	17.8	3.2
广西桂林 Guilin, Guangxi	七里店 Qilidian ^{**}	635	—	—	—
	桂林市 Guilin ^[18]	396	48.3	21.1	8.5
云南昆明 Kunming, Yunnan	第一 Disi ^[19]	379	34.0	51.3	9.0
	第二 Di'er ^[19]	352	26.2	16.0	10.5
	第四 Disi ^[19]	322	29.0	46.1	4.3
浙江杭州 Huangzhou, zhejiang	四堡 Sibiao ^[7]	318	11.0	11.5	7.4
江苏无锡 Wuxi, Jiangsu	无锡市 Wuxi ^[15]	333	21.7	10.5	5.8
广东广州 Guangzhou, Guangdong	大坦沙 Datansha ^[20-22]	317	18.0	4.9	7.4
广东佛山 Fuoshan, Guangdong	镇安 Zhengan ^[23]	290	29.6	18.4	10.3
深圳 Shenzhen, Guangdong	滨河 Binhe ^[23]	262	19.9	12.2	12.4
辽宁沈阳 Shenyang, Liaoning	北部 Beibu ^[24]	356	22.6	15.1	8.2
天津 Tianjin	纪庄子 Jizhuangzi ^{[25,26]*}	414	32.6	14.0	9.1
香港 Hongkong	大浦 Dapu ^[27]	453	12.9	34.0	—
陕西西安 Xi'an, Shanxi	北郊 Beijiao ^{[28-31]*}	222	15.2	9.6	—
总计 Total	平均值±标准差 Mean±SD	384±127	27.1±13.5	14.3±11.6	6.9±2.7
美国 United States	城市污泥 ^[32-34]	534	26.0	8.1	4.0
	Mean of sewage sludge				
中国 ** China	纯猪粪平均值 ^[35]	714	20.7	9.0	11.2
	Mean of pig manure				
中国 ** China	猪厩肥平均值 ^[35]	302	9.4	4.7	9.5
	Mean of pig manure compost				

* 数据为多份资料的汇总和平均值 Average value of data from several references; ** 内部资料 Unpublished data

中国城市污泥与美国城市污泥和中国传统的农家肥——猪粪和猪厩肥相比,具有作为有机肥使用的价值。中国城市污泥中的有机质含量最高达 696 g/kg,平均值为 384 g/kg (表 1),相当于纯猪粪有机质平均含量的 54%;其中 82%的城市污泥的有机质含量超过猪厩肥,其有机质的平均含量比猪厩肥高 27.2%。但是,中国城市污泥中有机质平均含量低于美国城市污泥的平均值。

城市污泥不仅含有大量的有机质,同时也含有一些植物所需要的养分,对化肥能够起到部分替代作用。对全国 29 个城市污水处理厂的统计显示(表 1),中国城市污泥含有较丰富的氮、磷、钾等养分,且平均

值皆高于美国城市污泥,尤其是磷、钾含量普遍较高。但是在城市污泥的土地利用方面,中国与美国相比还有很大差距。城市污泥的土地利用在美国占有相当大的比例。美国国家环保局公布的数据表明^[34],1998年美国城市污泥堆肥及土地利用占其污泥产量的53%,美国政府鼓励各州政府与科研及污水处理厂合作,推动污泥的土地利用,预计到2010年美国城市污泥的利用率要达到70%,而焚烧和填埋等将降低到30%。目前中国污水处理厂对污泥的处置比较随机。据了解,绝大部分的污水处理厂仍不具备合适的城市污泥处理、处置技术和设备。

从养分的角度考虑,与纯猪粪和猪厩肥相比,城市污泥作为肥料使用具有一定的价值和潜在的优势。我国城市污泥氮、磷、钾总养分含量平均达到48.3g/kg,全氮和全磷含量比纯猪粪高31%和59%,比猪厩肥高188%和204%;钾的含量较低,相比纯猪粪和猪厩肥低38%和62%。以一个日产污泥50t(湿重)的污水厂为例,若干污泥的含氮量为20g/kg,该厂的污泥每年相当于提供氮素110t,折合成硫酸铵化肥520t,可供174hm²农田使用^[7]。城市污泥作为肥料提供氮、磷可以优于猪粪及猪厩肥,但是全钾含量偏低是其相对的缺憾,因此,施用城市污泥时应补充钾肥。

2 不同年代城市污泥中有机质及养分含量的变化

通过对中国同一污水厂不同时期城市污泥样品中的养分含量统计分析(表2)显示,全氮和全磷含量的变化规律性不明显。但是,据近年来对丹麦、德国、法国以及芬兰等国城市污泥组成变化的研究结果显示,其氮、磷含量呈逐年增加的趋势^[57~59],其主要原因是这些国家城市污水处理厂相继采用了更有效的污水处理技术。从长远来看,中国城市污泥中氮、磷的含量将随着脱氮脱磷等二级污水处理工艺的增加而增加,这将有利于城市污泥土地利用和堆肥处理。

表2 不同时期中国城市污泥中养分及有机质含量(%)

Table 2 Organic matter and nutrient contents in sewage sludge in different years

城市污水厂 Wastewater treatment plants	文献出处及时间 Reference and time of publication	全氮 Total-N	全磷 Total-P (g/kg)	有机质 Organic matter
陕西西安北郊 Beijiao, Xi'an City, Shanxi Province	1989.6 ^[28]	15.5	8.3	185
	1989.9 ^[28]	15.2	7.7	193
	1990.1 ^[28]	15.8	7.9	202
	1994 ^[30]	15.1	6.5	248
	1997 ^[29]	15.2	6.1	—
北京高碑店 Gaobeidian, Beijing City	2000 ^[31]	—	—	282
	1982 ^[8]	33.1	—	160~200
	1993 ^[37]	—	—	357
	1996 ^[38]	—	—	399
天津纪庄子 Jizhuangzi, Tianjin City	2000 ^[10,39]	26.7	7.1	540
	1995 ^[26]	22.9	13.8	356
	1997 ^[25]	42.0	—	469

由表2还可发现,不同年代城市污泥中的有机质含量逐年增加,上升幅度达0.9%~5.7%,污泥的资源性越来越强;但是从城市污泥处置利用角度来讲,要求其污泥消化或稳定化的前处理时间相应延长,如果进行堆肥化处理,其处理过程参数如C/N比、通气量等需要根据有机质及氮素含量的变化而进行调整。

3 城市污泥的土地利用

3.1 城市污泥农用对土壤有机质的影响

50年代初,全国有机肥料的施用占总用肥量的99%以上,几乎是提供土壤养分的唯一来源。近年来,由于土地经营管理不善和依重化肥,有机肥用量占总用肥量的比例有所下降,使土质日趋恶化,土壤肥力降低。据1998~2000年对全国监测点有机肥施用情况的调查表明,全国施用的有机肥占总施肥量的百分率已下降到35%^[40]。

过去,我国的城市污水处理厂很少,城市污泥的产量较少,因此城市污泥土地利用仅限于极个别地区。但是,如果从中国最早的城市污水处理厂开始计算,城市污泥作为有机肥源,在中国有近 30a 的施用历史^[11]。北京市高碑店污水处理厂所处的高碑店乡,20 世纪 80 年代农田污泥施用量很大,面积约有 100hm²,近年来已缩小到约 53.3hm²。对高碑店乡施用污泥的土壤和不施污泥的对照区调查发现,有机质含量提高 36.8%~141%,且施用污泥的时间越长,土壤有机质含量越高^[41]。这与国外的长期定位试验结果类似,在连续施用污泥 20a 后,土壤的有机碳含量从 1.9%增至 4.8%,提高了 1.5 倍^[42]。

3.2 城市污泥农用对土壤微生物的影响

土壤微生物通过其代谢活动参与和促进土壤中的物质循环,影响土壤肥力。城市污泥农用不仅能带入大量有机质和矿质养分,为土壤中的微生物提供养分,而且城市污泥本身含有丰富的微生物,提高了土壤微生物的数量。姜城等^[43]在白浆土/草甸土和轻碱土上试验,施用城市污泥及污泥复合肥后,土壤中脲酶、过氧化氢酶及磷酸酶活性都有一定程度的提高,与对照相比分别提高了 12.6%~80.3%、5.04%~25.2% 和 6.4%~84.4%。另有研究表明^[14],连续施用城市污泥大大增加了土壤中细菌和放线菌的数量。在相同施用量的前提下,城市污泥处理是畜粪处理中细菌和放线菌总量的 4.44~6.97 倍。同时,施用城市污泥可以改变土壤微生物的种群结构,提高土壤硝化细菌的比例,提高酶活性,使土壤的基础肥力和土壤腐殖质含量的提高。

3.3 城市污泥农用对土壤物理性质的影响

土壤容重、孔隙度和持水量是表征土壤结构的重要物理指标,它们对作物产量有直接的影响。城市污泥的有机质含量较高,可使土壤的容重降低,同时城市污泥中的有机质可促进团粒结构形成,提高土壤孔隙度,改善土壤结构,提高土壤的持水能力^[44]。城市污泥作为有机肥施用的有些改土效果是化肥所无法达到的,不同学者的研究基本上支持这一观点(表 3)。

表 3 城市污泥施用对土壤物理性状的改变

Table 3 Soil physical properties improvement after the land application of sewage sludge

	施用时间 Experimental period(a)	容重减少(%) Decrease in bulk density	孔隙度增加(%) Increase in porosity	持水量增加(g/kg) Increase in water holding capacity
农田 Crop land ^[45]	2~3	18	12.9	4.9
林地 Forest land ^[46]	1	4.1	2.0~3.5	8~16
草坪草 Turfgrass ^[47]	1	5.67~35.5	9.7~10.1	29~580

3.4 城市污泥对土壤养分的促进作用

施用有机肥和化肥是保持土壤肥力的基本手段。城市污泥及其堆肥施入土壤后不仅能提高土壤的有机质含量,改变土壤的物理性状,还能带入氮、磷和多种微量元素。

在蔬菜和粮食作物的栽培试验中^[9,48],无论是施用城市污泥还是城市污泥与化肥配合施用,均可提高土壤的氮、磷养分含量,达到培肥地力的效果。每公顷土地施用 60t 新鲜城市污泥,土壤中的全氮和有效磷含量比空白对照和化肥对照增加 20.3%~54.3% 和 7.4%~54.4%;但是有效钾的含量却比对空白和化肥对照减少 5.7mg/kg 和 10mg/kg。由于城市污泥中钾含量低(如前所述),施污泥处理作物产量高,被作物吸收利用的养分多,造成了土壤中有效钾减少。在林地施用污泥 1a 后,土壤全磷含量增幅达 0.18g/kg,有效氮增加了 73mg/kg^[49]。

3.5 城市污泥农用的增产效果

施用城市污泥对作物的增产作用,已有大量的研究报道。涉及到粮食作物经济作物、园林绿地和林木。

3.5.1 粮食作物 陈同斌等^[48]应用城市污泥堆肥制备复混肥后进行小区和田间试验证明,小麦产量以城市污泥复混肥最高,比化肥对照增产 11%~17%。施用城市污泥及污泥复混肥对当季的玉米籽粒增产 11%~27%,与对照差异达极显著水平^[43]。将城市污泥与化肥复混制备成复混肥,与同养分的化肥复合肥具有同等的增产效果。城市污泥及复混肥对当季作物的增产作用是毋庸置疑的,同时还具有显著的后效。

施用城市污泥后的第二季小麦增产 289%~308%,后效极为显著^[50]。说明城市污泥复混肥中污泥带人的养分具有良好的增产效果,同时表明城市污泥是一种长效肥料。

由于城市污泥所含的养分种类较多,在产量上可表现出显著的正交互作用,而且有改善某些农产品质量的作用。甚至在施用等量化肥的条件下,其改善产品质量的效果也很明显。施用城市污泥后,种植的水稻糙米蛋白质含量提高 6%~10%,小麦籽粒蛋白质提高 9.7%,玉米籽粒蛋白质提高 14.5%~23.7%^[51]。

3.5.2 经济作物 施用城市污泥的处理生菜增产达 61%,而且菜茎较对照短,叶片数增多^[20]。根据金燕等人的研究结果^[52],施用城市污泥复合肥对生菜、菜花和莴笋有明显的增产作用,其增产效果相当于或略高于等养分的化肥和等氮量的市售复合肥,比对照增产 19.8%~306%。与农家肥相比较,施用等量城市污泥的处理中,番茄各部位氮、磷、钾含量高于农家堆肥;从其对养分的吸收总量看,亦呈同样的趋势^[38]随污泥施用量增加,青菜地上部组织中氮、磷、钾、镁含量明显增加^[27]。

桑树施用城市污泥后,从第二年起开始显出肥效。春叶增产 113%~118%,秋叶增产 128%~132%,污泥复混肥和化肥复混肥之间的增产效果无明显差异^[51]。

3.5.3 园林和绿化 采用城市污泥堆肥作为草皮基质,经过 6 个月的栽培,黑麦草的长势始终最好,比化肥处理生物量大,且有明显的后效。无论是城市污泥用作堆肥基质还是城市污泥复合肥,均明显促进黑麦草的生长,叶绿素和黑麦草对养分的吸收,均高于化肥空白及化肥对照^[53,54]。张增强等^[47]对几种草坪草的试验也证明,施用城市污泥堆肥的处理,黑麦草分蘖率提高,较空白及化肥对照提高 28%和 15%,生物量也以城市污泥堆肥处理最高。这说明对园林绿地植物而言,城市污泥与其它肥料具有同等的肥效,甚至优于等量化肥。

李艳霞等人^[55]对城市污泥堆肥作为林木容器育苗基质进行了研究。在基质中添加 1/2~2/3 的城市污泥堆肥,可以使国槐和刺槐的株高及地径增加 34.1%~51.3%和 8.3%~20.8%,叶片的叶绿素含量提高 9.9%~26.7%,同时绿色期延长。张天红等^[46,49]研究发现,施用污泥 1a 后,杨树、泡桐和小油松的树高和地径比对照增长了 9.2%~41.2%和 5.6%~20.8%。

城市污泥的林地利用在国外较为普遍,尤其是美国直接将污泥浆施入森林。但是由于存在运输困难等问题,中国还未见将城市污泥泥浆直接用于林地的报道。

3.6 城市污泥土地利用的负面效应

城市污泥土地利用的负面效应主要是由于重金属污染、病原体、难降解有机物及盐分、N、P 的流失等因素导致。目前对重金属的污染研究较多,主要集中在污泥农用后土壤耕作层重金属的变化,作物各部位富集量,存在形态及其影响等。陈同斌等人对中国城市污泥重金属的大量统计研究表明,近十几年来,中国城市污泥中重金属含量呈下降趋势^[36],这与发达国家的结果基本一致^[56~58]。产生这种现象的主要原因是近年来各国先后采用了更严格的工业污水排放标准和更有效的污水处理技术。Jones 和 Berg 总结了污泥中病原体的种类和数量,并指出常见的具有潜在危害的病原体主要是沙门氏菌、蛔虫、绦虫卵和肠道病毒^[59~60]。目前,国内外在这方面的研究工作相对缺乏。

城市污泥中有机污染物主要有多环芳烃、邻苯二甲酸酯、多氯代二苯并二噁英/呋喃(PCDD/Fs)、多氯联苯(PCBs)、氯苯、氯酚等。一些国家对城市污泥中有机污染物的特征及其在农业环境中的行为、生态效应和调控措施等方面的研究表明,通过根部的吸收和在植物中转移的 PCDD/Fs 及 6 种重要的 PCBs 很少;即使土壤中 PCDD/Fs 含量很高,城市污泥过量施用也没有表现出明显的危害。尽管如此,部分西方发达国家对城市污泥土地利用过程中 PCBs、PCDD/Fs 的浓度等还是提出了一些限制。我国在这方面的研究相对较少,除苯并(a)芘外,至今仍未制订出完善的城市污泥有机污染物限制标准^[61,62]。

关于城市污泥施用后养分迁移对环境的影响需要长期的定位监测研究,国外对此已开展过研究^[9]。到目前为止,在城市污泥土地利用潜在的风险评价方面,我国仍缺乏长期的定位试验研究。

城市污泥的土地利用在很大程度上取决于各国政府有关的法律、法规和污染控制状况,同时也与各国的自然条件、经济水平和农林业发展状况有关。大多数国家通过立法的方式来降低污泥的土地利用带来的负面效应。欧共体通过了“欧洲议会 1986 年 6 月 12 日关于环境保护,特别是在污泥农用中的土地保护准

则”。德国污泥农用条例规定在 3a 期内每公顷土地最多施用 5t 干污泥；欧共体污泥农用准则规定了 10a 内每公顷土地的污泥施用量。德国污泥农用条例还禁止在永久牧场和林业用地上施用污泥^[6]。美国联邦政府对城市污泥土地利用有严格的规定，并将污泥分为 A 和 B 两大类。A 类可作为农作物肥料、园林植物，生活垃圾填埋场覆盖土等；B 类污泥，只能用于林业，不直接用于粮食作物。目前我国已经制订了“农用污泥中污染物控制标准”(GB4284~84)，为我国城市污泥的土地利用提供了依据，但是这一标准还存在许多不够完善的地方^[36]。

随着环保法规的不断完善，污水处理技术不断提高，城市污泥的重金属含量将不断降低^[36]、有机养分含量将不断提高，城市污泥农用的可行性及前景将更加广阔。

4 结语

对中国不同城市污泥(不包括工业污泥)的统计表明，中国城市污泥的有机质平均含量达到 384g/kg，比猪厩肥中有机质高 27.2%，全氮、全磷比纯猪粪高出 31% 和 59%，但与纯猪粪和猪厩肥相比，全钾的含量分别低 38% 和 62%。我国经济发达地区城市污泥中有机质、氮、磷含量普遍偏高。近年来我国城市污泥的有机质含量呈逐年增加的趋势，但氮、磷含量变化没有明显的规律。从长远来看，我国污水厂污泥中氮、磷的含量将随污水处理技术的提高而增加，这将有利于城市污泥的土地利用。

大量的研究充分肯定了城市污泥土地利用在粮食作物、蔬菜、经济作物及园林绿地上的明显效果。但是应该特别指出的是，本文所述的有关观点主要是针对城市污水处理厂所排放的城市污泥而言；至于对其他类型的污泥(工业污泥)而言，由于其污染物含量较高，不主张采用农用的方式进行资源化利用，以避免造成次生环境问题。由于我国对城市污泥处置及土地利用的研究工作开展相对晚于发达国家，研究的理论深度和系统性均有待加强。目前，中国对城市污泥中有机污染物质和病原体的危害研究较少；对城市污泥土地利用潜在的风险评价，至今仍缺乏长期的定位试验结果。

References:

- [1] Cio X Q, Chen. Analysis on problems of sludge disposal in wastewater treatment plant. *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture*, 2002, 18(1): 1~4.
- [2] Ge N F, Ma S F, Qin H Y, et al. The components of dewatered sewage sludge and its value used as manure. *Agro-Environmental Protection*, 1995, 14(5): 202~206.
- [3] Jin R L. Discussion of sludge treatment of urban wastewater plant in China. *Wuhan Urban Construction Institute*, 1994, 11(2): 1~12.
- [4] Zhou L X, Zhang X Y, Zhan X H, et al. Land application of steam exploded sludge and the sludge compound fertilizer. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(1): 95~100.
- [5] Li Y X. The present situation of municipal solid wastes and the resoucelization in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998, 14(supplement): 279~284.
- [6] Tian N N, Wang K J, Yang L P, et al. Technology evaluation on disposal and utilization of excess activated sludge. *Environmental Protection*, 2000, 2:18~20.
- [7] Xue W Y. The approaches of sewage sludge process and treatment. *China Water and Wastewater*, 1992, 1(8): 41~46.
- [8] Yang J R, Wang S F, Jin Y H. Soil pollution with heavy metals among sludge and an approach to its control. *Environmental Science*, 1982, 3(3): 9~13.
- [9] Liu S J, Xu J M, Li Y X. A preliminary study on application of sewage sludge in Chinese cabbage. *Beijing Agricultural Science*, 1994, 12(6): 22~24.
- [10] Li G X, Meng F Q, Jiang H, et al. Studies on effect of stabilizing materials to the status of heavy metals(Cu, Zn, Mn) during composting of sewage sludge. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 105~111.
- [11] Li Y X, Wang M J and Wang J S. Heavy Metal in Contemporary China Sewage Sludges. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 1999, 69:229~240.

- [12] Yang Y F, Xue C Z, Yuan H X, *et al.* Discuss on commercial application of municipal sludge compost. *Agro-environ. And Develop.*, 2000, **17**(1): 6~8.
- [13] Guo M L, Wang K, Zhang Q X, *et al.* The research of agricultural utilization of sewage sludge in Taiyuan. *Agro-environmental Protection*, 1993, **12**(6): 258~262, 285.
- [14] Zhou L X, Hu A T, Ge N F. Effect of employing city household sludge on farmland on soil fertility. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, **25**(3): 126~129.
- [15] Qiao X L, Luo Y M. Chemical composition and its relation to criteria for agriculture use of sewage sludge from several cities in China. *Soils*, 2001, **33**(4): 205~209.
- [16] Yuan S J, Zhu J H. On disposal ways of sewage sludge of Hefei city. *Journal of Hefei University of Technology*, 2001, **24**(4): 538~542.
- [17] Zhou L X, Zhang X Y, Zhan X H, *et al.* Effectiveness, constrains and scientific perspectives of land application of sewage sludge in the Southern Jiangsu Province. *The World Science Research and Development*, 2000, **22**: 91~96.
- [18] Xie Q L, Wang D Q, Li J C. The agricultural application of sewage sludge in Guilin city. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2000, **16**(3): 131~134.
- [19] Xu Y, Han X M, Huang Z. Fertility efficiency and utilization of sludge in municipal sewage of Kunming. *Yunnan Environmental Sciences*, 1999, **18**(3): 44~46.
- [20] Liao Z W, Lin D J, Wang D R, *et al.* A preliminary study on agricultural utilization of the sludge and garbage of Guangzhou city. *Journal of Natural Resources*, 1994, **9**(3): 247~251.
- [21] Liao Z W, Wang W H, Wang D R, *et al.* Study on the factors affecting the content of heavy metals in lettuce (*Lactuca sativa* var. Longifolia) growing on mixed sludge medium. *Environmental Science*, 2002, **15**(2): 49~52.
- [22] Zhong X G, Lin Y, Zhang C R, *et al.* A preliminary study on the effect of direct application of municipal sewage sludge on agricultural ecosystem. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1992, **1**(2): 91~97.
- [23] Mo C H, Wu Q T, Cai Q Y, *et al.* Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **11**(1): 157~160.
- [24] Wang X, Chen T, Liang R L, *et al.* Effects of land utilization of sewage sludge. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(2): 163~166.
- [25] Zhou L X, Hu A T, Hu Z M. Mineralization of organic nitrogen in anaerobically digested sludge. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(3): 359~364.
- [26] Zhang Z Q, Xue C Z. Growth response of some trees and shrubs to composted sewage sludge. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis*, 1995, **23**(6): 47~51.
- [27] Li G X, Huang H Z, Huang M H. Heavy metal accumulation in Chinese cabbage (*Brassica Chinensis*) grown in soil amended with sewage sludge compost. *Journal of China Agricultural University*, 1998, **3**(1): 113~118.
- [28] Wang P X. The chemical forms and translocations of copper and nickel in loessial soil amended with sludge. *Agro-environmental Protection*, 1993, **12**(1): 14~16, 13.
- [29] Xue C Z, Ma Y, Zhang Z Q, *et al.* The production of compound organic fertilizer using municipal sewage sludge. *Agro-environmental Protection*, 1997, **16**(1): 11~15, 31.
- [30] Liu J H, Zhang T H, Xue C Z. Study on the bio-availability of elements in sewage by using rye seeding method. *Shanxi Environment*, 1994, **1**(1): 1~4.
- [31] Ma Y, Meng Z F, Gao K R, *et al.* The application of sludge produced from Xian sewage treatment plant on loam soil. *Agro-environmental Protection*, 2000, **19**(2): 76~78.
- [32] USEPA. 2000. Guide to field storage of biosolids. EPA/832-B-00-007, 114.
- [33] Wang M J and Jones K C. Uptake of chlorobenzene by carrots from spiked and sewage sludge-amended soil. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, **28**: 1260~1267.
- [34] USEPA. Biosolids generation, use, and disposal in the United States. EPA530-R-99-009, 1999. 35.
- [35] National Agricultural Technology Extension and Service Center. *The compilation of organic fertilizer of China*.

- Beijing: China Agriculture Press, 1999. 6~29.
- [36] Chen T B, Huang Q F, Gao D, *et al.* The status and changing trend of heavy metal concentrations in Chinese sewage sludge. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(5): 561~569.
- [37] Yang Z Y, Wang H K. Crops lead pollution by sludge land application. *Environmental Science*, 1993, **14**(6): 8~11, 37.
- [38] Liu S J. The application of sewage sludge on tomato. *Beijing Agricultural Science*, 1996, **14**(1): 43~441.
- [39] Zhou L X, Shen Q R, Chen T B, *et al.* Distribution and chemical form of heavy metals in the principal components of undigested sludge. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(3): 269~274.
- [40] National Agricultural Technology Extension and Service Center. *Paper collection on monitoring of arable soil in China*. Beijing: China Agriculture Press, 2003. 9~14.
- [41] Ouyang X H, Cui J, Dong Q. Effects of long-term application waste sludge on soils and crops in agriculture. *Agro-environmental Protection*, 1994, **13**(6): 271~274.
- [42] Yang L Z, Mao J D. Rational use of sewage sludge in agricultre. *Progress in Soil Science*, 1995, **23**(6): 43~47.
- [43] Jiang C, Yang J, Cheng Z T, *et al.* Study on agricultural application of sewage sludge and sewage sludge compound fertilizer. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1996, **18**(2): 46~50.
- [44] Chen T B, Gao D, Li X B. Effects of sewage sludge compost on available nutrients and water retention ability of planting substrate. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(6): 802~807.
- [45] Shi C W, Guo M L. The agricultural application of sewage sludge. *Soil Resources and Environment*, 1993, 37~39.
- [46] Zhang T H, Xue C Z, Wang X Q, *et al.* The feasibility of municipal sewage sludge application to city gardens. *Journal of Environment*, 1994, **10**(1): 44~46.
- [47] Zhang Z Q, Xue C Z. Responses of some turfgrasses to sewage sludge compost. *Acta Prataculturae Sinica*, 1997, **6**(1): 57~65.
- [48] Chen T B, Li Y X, Jin Y, *et al.* The effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on NPK and heavy metals uptake of wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(5): 643~648.
- [49] Zhang T H, Xue C Z. The effects of Xian sewage sludge applied to forest lands. *Acta Univ. Agric. Boreali~occidentalis*, 1994, **22**(2): 67~71.
- [50] Ge N F, Cao H S, Lu C, *et al.* Technology for making compound mixed fertilizer from sludge and chemical fertilizer and its fertilizer efficiency. *Chinese Journal of Soil Science*, 1997, **28**(1): 41~43.
- [51] Lin C Y, Dong K Y, Li P, *et al.* Effects of sewage sludge application to agricultural land on soils and crops. *Agro-environmental Protection*, 1994, **13**(1): 23~25, 33.
- [52] Jin Y, Li Y X, Chen T B, *et al.* The effect of sewage sludge compost and compound fertilizer on vegetable production and heavy metals accumulation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, **8**(3): 288~291.
- [53] Li Y X, Zhao L, Chen T B. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(6): 797~801.
- [54] Zhao L, Li Y X, Chen T B, *et al.* The application of municipal sewage sludge compound fertilizer on turfgrass production. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, **8**(5): 501~503, 506.
- [55] Li Y X, Xue C Z, Chen T B. Use of sewage sludge and refuse compost as medium for sampling cultivation. *Rural Eco-Environment*, 2000, **16**(1): 60~63.
- [56] Report from the Commission; Implementation of Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment, as amended by Commission Directive 98/15/EC of 27 February 1998. 15 January 1999. And for Sweden; Statistics Sweden Na 22 SM 9701, 2000
- [57] Report from the Commission; Implementation of Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment, as amended by Commission Directive 98/15/EC of 27 February 1998. 15 January 1999. Information from ETC/W survey May, 2000.
- [58] Report from Member States to the Commission concerning sewage sludge treatment, November 1998, following

directive 86/278/EEC on sewage sludge and ETC-W survey May, 2000.

- [59] Jones P W. In: *Processing and Using of Sewage Sludge*. In: P. L'Hermite and H. Ott, eds D. Reidel Publishing Company, 1983. 178~185.
- [60] Berg G. *Viral Pollution of the Environment*. CRC Press, 1983.
- [61] Mo C H, Cai Q Y, Wu Q T, et al. Research advances on organic pollutants in municipal sludge. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 273~276.
- [62] Yao G. Sewage sludge treatment, use and disposal in Germany. *Urban Environment and Ecology*, 2000, 13(1): 43~47.

参考文献:

- [1] 曹秀芹, 陈珺. 污水处理厂污泥处理存在问题分析. 北京建筑工程学院学报, 2002, 18(1): 1~4.
- [2] 戈乃芬, 马淑芳, 秦怀英, 等. 脱水污泥的组分和农用评价. 农业环境保护, 1995, 14(5): 202~206.
- [3] 金儒林. 中国城市污水处理厂污泥处理的综述. 武汉城市建设学院学报, 1994, 11(2): 1~12.
- [4] 周立祥, 张雪英, 占新华, 等. 热喷处理污泥及其复混肥的养分效率与生物效应. 环境科学学报, 2001, 21(1): 95~100.
- [5] 李艳霞. 中国城市固体废弃物和资源化形势. 农业工程学报, 1998, 14(增刊): 279~284.
- [6] 田宁宁, 王凯军, 杨丽萍, 等. 污水处理厂污泥处置及利用途径研究. 环境保护, 2000, 2: 18~20.
- [7] 薛文源. 城市污水污泥处理与处置的途径. 中国给水排水, 1992, 1(8): 41~46.
- [8] 杨居荣, 王素芬, 金玉华. 污泥中重金属对土壤的污染及控制途径. 环境科学, 1982, 3(3): 9~13.
- [9] 刘善江, 徐建铭, 李亚星. 污泥在大白菜上的应用的初探. 北京农业科学, 1994, 12(6): 22~24.
- [10] 李国学, 孟凡乔, 姜华, 等. 添加钝化剂对污泥堆肥处理中重金属(Cu、Zn、Mn)形态影响. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 105~111.
- [12] 杨毓峰, 薛澄泽, 袁红旭, 等. 城市污泥堆肥商品化应用问题的探讨. 农业环境与发展, 2000, (1): 6~8.
- [13] 郭媚兰, 王遑, 张青喜, 等. 太原市污水污泥农业利用研究. 农业环境保护, 1993, 12(6): 254~262, 285.
- [14] 周立祥, 胡霭堂, 戈乃芬. 城市生活污水污泥农田利用对土壤肥力性状的影响. 土壤通报, 1994, 25(3): 126~129.
- [15] 乔显亮, 骆永明. 污泥利用及其环境影响. 土壤, 2000, 2: 79~85.
- [16] 袁守军, 朱家华. 合肥市污水处理厂污泥处置途径探讨. 合肥工业大学学报, 2001, 24(4): 538~542.
- [17] 周立祥, 张雪英, 占新华, 等. 苏南地区城市污泥的基本性质及农业利用效果问题与对策. 世界科技研究与发展, 2000, 22: 91~96.
- [18] 解庆林, 王敦球, 李金城, 等. 桂林市污水处理厂污泥农业利用. 广西科学院学报, 2000, 16(3): 131~134.
- [19] 许亚, 韩晓梅, 黄众. 昆明市城市污水污泥的肥效及其资源化利用. 云南环境科学, 1999, 18(3): 44~46.
- [20] 廖宗文, 林东教, 江东荣, 等. 广州市污泥垃圾农用资源化的初步研究. 自然资源学报, 1994, 9(3): 247~252.
- [21] 廖宗文, 王卫红, 汪东荣, 等. 污泥混合基质栽培生菜重金属含量的影响因素研究. 环境科学, 1994, 15(2): 49~52.
- [22] 钟熹光, 林毅, 张纯茹, 等. 城市污泥直接施用对农田的生态效应研究初报. 热带亚热带土壤研究, 1992, 1(2): 91~98.
- [23] 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. 应用生态学报, 2000, 11(1): 157~160.
- [24] 王新, 陈涛, 梁仁禄, 等. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究. 应用生态学报, 2002, 13(2): 163~166.
- [25] 周立祥, 胡霭堂, 胡忠明. 厌氧消化污泥中有机氮的矿化. 环境科学学报, 1997, 17(3): 359~364.
- [26] 张增强, 薛澄泽. 污泥堆肥对几种木本植物生长响应的研究. 西北农业大学学报, 1995, 23(6): 47~51.
- [27] 李国学, 黄焕忠, 黄铭洪. 施用污泥堆肥对土壤和青菜重金属积累特性的影响. 中国农业大学学报, 1998, 3(1): 113~118.
- [28] 王鹏新. 施用污泥娄土中铜和镍的形态及其转化. 农业环境保护, 1993, 12(1): 14~16.
- [29] 薛澄泽, 马芸, 张增强, 等. 污泥制作堆肥及复合有机肥料的研究. 农业环境保护, 1997, 16: 11~15, 31.
- [30] 刘俊华, 张天红, 薛澄泽. 黑麦幼苗法对污泥中元素生物有效性的研究. 陕西环境, 1994, 1(1): 1~4.
- [31] 马芸, 孟昭福, 高坤瑞, 等. 西安市污水处理厂污泥施用于土壤中的探讨. 农业环境保护, 2000, 19(2): 76~78.

- [35] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料养分志. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [36] 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. 环境科学学报, 2003, 23(5): 561~569.
- [37] 杨卓亚, 王宏康. 污泥施肥铅对作物污染的研究. 环境科学, 1993, 14(6): 8~11, 37.
- [38] 刘善江. 污泥在西红柿上的应用. 北京农业科学, 1996, 14(1): 43~44.
- [39] 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. 环境科学学报, 2000, 20(3): 269~274.
- [40] 全国农业技术推广中心. 全国耕地土壤监测论文集. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [41] 欧阳喜辉, 崔晶, 佟庆. 长期使用污泥对农田土壤和农作物影响的研究. 农业环境保护, 1994, 13(6): 71~274.
- [42] 杨林章, 毛景东. 污泥在农业上的合理应用. 土壤学进展, 1995, 23(6): 43~47.
- [43] 姜城, 杨金, 陈振天, 等. 污泥、污泥复合肥农业应用的初步研究. 吉林农业大学学报, 1996, 18(2): 46~50.
- [44] 陈同斌, 高定, 李新波. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响. 生态学报, 2002, 22(6): 802~807.
- [45] 史崇文, 郭媚兰. 污水污泥的农用利用. 土壤资源环境研究, 1993, 37~39.
- [46] 张天红, 薛澄泽, 王秀琴, 等. 市政污泥用于城市绿化的可行性研究. 环境杂志, 1992, 8(1): 44~46.
- [47] 张增强, 薛澄泽. 污泥堆肥对几种草坪草生长的响应. 草业学报, 1997, 6(1): 57~65.
- [48] 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. 生态学报, 2002, 22(5): 643~648.
- [49] 张天红, 薛澄泽. 西安市污水污泥林地施用效果的研究. 西北农业大学学报, 1994, 22(2): 67~71.
- [50] 戈乃芬, 曹洪生, 吕春, 等. 污泥化肥混肥加工工艺和肥效的研究. 土壤通报, 1997, 28(1): 41~43.
- [51] 林春野, 董克虞, 李萍, 等. 污泥农用对土壤及作物的影响. 农业环境保护, 1994, 13(1): 23~25, 33.
- [52] 金燕, 李艳霞, 陈同斌, 等. 污泥及其复合肥对蔬菜产量及重金属积累的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 288~291.
- [53] 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. 生态学报, 2002, 22(6): 797~801.
- [54] 赵莉, 李艳霞, 陈同斌, 等. 城市污泥堆肥在冷季型草皮专用复合肥生产中的应用. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 501~503, 506.
- [55] 李艳霞, 薛澄泽, 陈同斌. 污泥和垃圾堆肥用作林木育苗的研究. 农村生态环境, 2000, 16(1): 60~63.
- [61] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 城市污泥中有机污染物的研究进展. 农业环境保护, 2001, 20(4): 273~276.
- [62] 姚刚. 德国的污泥利用和处置(I). 城市环境与城市生态, 2000, 13(1): 43~46.