

## 林地施用污泥对杨树生长和土壤环境的影响

王良梅, 张焕朝, 杨 丽

(南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 以江苏省无锡市卢村污水处理厂厌氧消化的脱水污泥为林地施用的有机肥源, 采用土培盆栽试验的方法研究了不同用量污泥施用后南林-95 无性系杨树 *Populus deltoides* 'Lus' × *P. euramericana* I-45/51 的生长情况及对土壤环境质量的影响。试验设计 5 种处理, 分别为污泥施用量占土质量的 0 (不施污泥, 对照处理), 30, 60, 120 和 240 g·kg<sup>-1</sup>。结果表明, 黄棕壤上不同用量污泥施用后, 杨树的树高、地径和生物量都有一定的增加, 以 30 g·kg<sup>-1</sup> 处理的效果最好; 而潮土上 30 g·kg<sup>-1</sup> 污泥用量的处理对杨树生长有促进作用, 其余处理都表现为抑制作用。结果还表明, 污泥施用后不仅明显提高了土壤中养分元素及有机质, 土壤中交换态铜、交换态锌的质量分数也都有明显的提高, 污泥用量与交换态金属含量之间呈显著的正相关关系。图 1 表 4 参 15

**关键词:** 土壤学; 污泥; 杨树; 土壤养分; 重金属元素

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)03-0385-06

## A pot experiment for poplar growth and soil quality with sewage sludge application

WANG Gen-mei, ZHANG Huan-chao, YANG Li

(College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** To study the influence of sewage sludge on poplar (*Populus deltoides* 'Lus' × *P. euramericana* I-45/51) growth and on soil environmental quality, a greenhouse, pot experiment was conducted with anaerobically digested, dewatered sludge obtained from the Wuxi Lucun Wastewater Treatment Plant in Jiangsu Province. A two factor gradient test design with five treatments (rates of sludge application expressed as sludge to soil ratio) of 0(control), 30, 60, 120, and 240 g·kg<sup>-1</sup> and two soil types(calcareous soil and yellow brown soil) with 3 replications was established to test height, diameter, biomass, and concentrations of heavy metals, Cu and Zn. Results showed that for calcareous soil, poplar growth was promoted with the 30 g·kg<sup>-1</sup> sludge treatment, whereas the other treatments all restrained growth; and for yellow brown soil, poplar growth of all treatments were promoted, but 30 g·kg<sup>-1</sup> sludge treatment was better than the others. In addition, soil total and available N and P as well as organic matter increased ( $P < 0.05$ ). After sewage sludge application, exchangeable Cu and Zn also increased, and there was a positive relationship ( $r_{0.05} = 0.811$ ) between sludge ratio and exchangeable metal concentration. Thus, compared with no sewage sludge application, a 3% sludge treatment could promote growth and production of poplar [Ch, 1 fig. 4 tab. 15 ref.]

**Key words:** soil science; sewage sludge; poplar; soil nutrition; heavy non-ferrous metals

中国是世界上发展人工林最为突出的国家, 约占世界人工林面积的 1/4。然而, 随着人工林栽培

收稿日期: 2009-04-15; 修回日期: 2009-06-02

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2007219); 江苏省高校自然科学基金资助项目(07KJB220047)

作者简介: 王良梅, 副教授, 博士, 从事土壤环境污染化学和林木营养与施肥等研究。E-mail: wangyinmei920@yahoo.com.cn

面积和产业化进程的加快,人工林地力衰退问题日益突出,尤其是人工纯林的多代连作导致的土壤质量问题。在林业发达国家如瑞典、芬兰、美国、新西兰等对人工林进行施肥已成为提高人工林土壤肥力和生产力的一种常用经营措施<sup>[1-3]</sup>。由于人工林的栽培面积大,且通常所用的肥料多为化肥、微肥以及微生物菌肥,受成本的限制,中国尚难进行大面积推广<sup>[4]</sup>。目前,世界各地对城市发展过程中产生的污泥予以高度重视<sup>[5]</sup>。污泥含有丰富的氮、磷等营养元素和有机质,是良好的有机肥资源。城市污泥的肥料资源化也是当前国际上污泥的重要处置途径之一,尤其是在农地上的应用<sup>[6]</sup>。然而污泥中的有毒有害物质如重金属的存在,直接限制了污泥作为肥料在农地中的施用<sup>[1]</sup>。而污泥林地施用具有农田施用不可替代的优势<sup>[7]</sup>。如脱离食物链;污泥与人畜的接触机会较少;污泥在林地上可全年使用,且林地承纳的污泥量很大;林地土壤通常较农田贫瘠。在中国,近几年来污泥在森林与园林绿地、矿区植被恢复与高速公路绿化带等方面的应用得到了发展<sup>[8-10]</sup>。然而,施用污泥来提高人工林土壤肥力的同时,污泥中重金属是否会对林地生态系统构成威胁?这直接影响到污泥林地施用的可行性。为此,笔者以南林-95无性系杨树 *Populus deltoides* 'Lus' × *P. euramericana* I-45/51 人工林地土壤为研究对象,通过盆栽试验探究污泥施用对杨树生长、土壤性质以及土壤中重金属活性的影响,以期速丰林地力衰退的防治提供理论和技术支撑,并为污泥林地处置的可行性和环境风险评价提供一些技术参数和科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤、污泥和树木

供试土壤为2种:一种为潮土,采自江苏省宿迁市杨树丰产林生态示范园区表层(0~20 cm);另一种为黄棕壤,采自南京林业大学北后山杨树林地。土壤取回后,风干,大部分磨细过4 mm尼龙筛,供盆栽试验用,小部分过20目和100目筛供各种化学分析。供试污泥取自江苏省无锡市芦村污水处理厂,污泥采回风干后不绣钢粉碎机粉碎,过60目筛备用。供试土壤和污泥的基本理化性质见表1。实验选择的树木品种为南林-95无性系杨树为盆栽实验材料。插穗长度为10.0 cm,粗约1.0~1.5 cm。

表1 供试土壤和污泥的基本理化性质

Table 1 Fundamental physic-chemical properties of the selected soils and sewage sludge

土壤	pH	电导率(1:5)/(mS·m <sup>-1</sup> )	有机质/	全氮/	全磷/	碱解氮/	速效磷/	阳离子交换量/	
			(g·kg <sup>-1</sup> )	(g·kg <sup>-1</sup> )	(g·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(cmol·kg <sup>-1</sup> )	
黄棕壤	6.81	0.88	12.79	1.081	0.536	64.17	7.42	19.86	
潮土	5.96	0.78	26.24	1.397	0.495	91.78	5.72	36.52	
污泥	6.19	3.04	337.84	29.290	16.740	4 323.00	3 183.00		
土壤	质地/%			全铜/	全锌/	全铅/	交换态铜/	交换态锌/	交换态铅/
	>0.050	0.050~0.002	<0.002 mm	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )
黄棕壤	15.31	59.18	25.51	15.1	42.58	—	0.18	0.34	
潮土	35.71	46.94	17.35	8.8	35.28	—	0.12	0.20	
污泥				753.7	788.80	73.50	16.13	42.59	6.27
农用污泥控 制标准	pH<6.5			250.0	500.00	300.00			
	pH>6.5			500.0	1 000.00	1 000.00			

说明:符合上述标准的污泥应避免施在菜地上,在农地上施用不超过3万t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,连续施用不超过20a(GB 4284-1984)。

### 1.2 盆栽试验

盆栽试验在南京林业大学温室内进行。2种土壤中污泥投入量均设5个处理水平,分别为对照处理(ck,不添加污泥)、污泥添加量为土质量的3%(30 g·kg<sup>-1</sup>),6%(60 g·kg<sup>-1</sup>),12%(120 g·kg<sup>-1</sup>)和24%(240 g·kg<sup>-1</sup>)。设置3重复·处理<sup>-1</sup>,共5个处理×2种土壤×3个重复=30个盆钵。采用3.0 kg

的塑料盆钵,装土 2.5 kg。土样和污泥充分混匀装盆,土壤水分调节至田间持水量的 70%,放置 1 d。栽植杨树插穗 2 株·盆<sup>-1</sup>,成活后定植,留 1 株。试验期间用称量法补充水分,保持土壤水分控制在田间持水量的 70%左右。试验的时间为 2008 年 3 月 25 日 - 2008 年 9 月 21 日,共 180 d。分地上部和地下部收获,分析树木的生物量、株高和地径;同时采集土壤样品分析养分状况和重金属质量分数。

### 1.3 分析方法

土壤有机质测定采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法;全氮采用半微量凯氏定氮法;全磷采用浓硫酸和高氯酸消化,钼锑抗比色法;水解性氮采用碱解扩散法;速效磷采用双酸浸提-钼锑抗比色法。盐分采用电导法测定,阳离子交换量采用乙酸铵法。所有项目的测定方法见参考文献[11]。

重金属采用硝酸和高氯酸消化,电感耦合等离子体光谱法(inductively coupled plasma, ICP)测定(美国 PE 公司生产, Optima 4300DV),交换态采用 Xian 提出的方法[12]。

植物中铜和锌的测定:采用干灰化法<sup>[11]</sup>(于 550 °C 灰化 8 h),1:1 的盐酸溶解灰分,ICP 法测定(美国 PE 公司生产, Optima 4300DV)测定铜和锌质量分数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污泥施用对杨树生长的影响

表 2 从树高、地径和生物量等 3 个方面列出了污泥不同用量处理对杨树生长的影响。可以看出,污泥施用量对杨树的树高、地径和生物量都存在明显的影响,且 3 种土壤上影响效果也不同。总体上,污泥施用后对黄棕壤上杨树的树高增加有促进作用,在试验的污泥用量范围内,平均比对照增加了 32.50%,尤其是 30 和 60 g·kg<sup>-1</sup> 污泥用量的处理,树高比对照增加 48.14% ~ 54.46%;而在潮土上除了 30 g·kg<sup>-1</sup> 污泥用量处理的树高比对照高 19.88%外,其他污泥用量处理都表现为降低了杨树的树高,且随着污泥用量的增加,杨树生长越矮。不同污泥处理对 2 种土壤上杨树地径和杨树生物量变化的影响规律与树高变化规律相同。表 2 还列出了污泥用量与各项指标的相关性,发现 2 种土壤上污泥用量除了与潮土上地径有显著相关外,与树高、生物量都没有显著相关性。

表 2 不同污泥用量对杨树生长的影响

Table 2 Effect of sewage sludge utilization on populus growth

污泥添加量/(g·kg <sup>-1</sup> )	黄棕壤			潮土		
	树高/cm	地径/cm	生物量/(g·株 <sup>-1</sup> )	树高/cm	地径/cm	生物量/(g·株 <sup>-1</sup> )
ck	69.63 ± 1.53 b	0.74 ± 0.049 b	11.53 ± 1.73 d	81.75 ± 7.71 a	0.78 ± 0.017 a	17.03 ± 0.89 b
30	103.15 ± 18.60 ab	0.84 ± 0.057 a	27.34 ± 0.88 a	98.00 ± 12.73 a	0.79 ± 0.078 a	23.35 ± 3.37 a
60	107.55 ± 2.33 a	0.83 ± 0.054 b	14.55 ± 0.53 c	84.50 ± 10.82 a	0.76 ± 0.042 a	16.17 ± 1.00 b
120	81.47 ± 22.46 b	0.76 ± 0.161 b	11.86 ± 3.71 cd	64.60 ± 5.09 b	0.70 ± 0.141 a	10.41 ± 1.24 c
240	76.90 ± 14.40 b	0.76 ± 0.101 b	20.38 ± 0.26 b	62.75 ± 14.50 b	0.69 ± 0.107 a	15.59 ± 1.64 b
与污泥用量相关性	0.406 5	0.491 4	0.117 0	0.791 1	0.887 9	0.438 4

说明:  $r_{0.05} = 0.811$ ; 小写字母不同表示在  $\alpha = 0.05$  水平上处理间差异显著。

污泥施入土壤后对树木生长影响有 2 个方面,一方面污泥中含有大量的养分元素,施用后提高了土壤中可供树木吸收的养分元素,同时也能改善土壤物理性能(如质地),促进树木的生长;另一方面污泥中含有有害有毒物质如重金属、寄生虫卵和病原物等,施用后抑制树木生长。因此,林地施用污泥对树木生长的影响是这 2 个方面的综合效果。

2 种土壤上污泥施用后杨树生长响应存在一定的差异。在黄棕壤上,随着污泥用量的增加,与 30 g·kg<sup>-1</sup> 处理相比,虽然各项指标值都存下降的趋势,但总体都是比对照处理要生长得好。而在潮土上,除 30 g·kg<sup>-1</sup> 处理外,其余施用污泥处理的树高、地径、生物量都小于对照处理。主要原因可能与污泥对土壤质地影响的效果差异,从表 1 基本性质可知,黄棕壤中 <0.05 mm 粒级的土粒比例

(84.69%)要高于潮土上的比例(64.29%)。所以污泥加入后对黄棕壤的改善效果要好。

表2还清楚的显示,总体上 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污泥用量和其他污泥用量对杨树的生长的各项指标的差异也很明显。这可能是因为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污泥用量中有毒有害物质对杨树生长的抑制效果小于养分元素的提高和土壤物理性能的改善对杨树生长的促进作用,而随着污泥用量的增加,有毒有害物质超过了杨树对其忍耐限度,进而表现出杨树生长不如 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污泥用量处理,在潮土上甚至比对照处理的生长都差。本盆栽试验的结果显示,对于杨树来讲可能容许的污泥一次施用量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 2.2 施用污泥对林地土壤肥力的影响

污泥是极具资源化价值的废弃物,施用后对林地土壤有很好的改良作用。表3列出了黄棕壤和潮土上施用不同用量污泥后,土壤各肥力因素的变化结果。总体上,2种土壤上各理化因子的变化都呈现出相类似的变化规律,即随着污泥用量的增加,各养分元素都有明显的增加趋势。在试验的用量范围内,2种土壤上有机质质量分数与对照相比分别增加了1.65~3.27倍(黄棕壤)和1.36~3.23倍(潮土),尤其是污泥用量为 $120\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $240\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理增加幅度明显。方差分析结果显示,在黄棕壤上施用量为 $120\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $240\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理与其他处理间存在极显著差异,而潮土上所有处理间都存在显著性差异。土壤全氮、碱解氮、全磷和速效磷也都比对照有明显的增加。方差分析结果表明,不同污泥施用量之间,土壤全氮和碱解氮质量分数存在显著性差异,全磷和速效磷质量分数在低污泥用量处理间差异不如高用量处理间差异显著。

从表2还清楚地看出,2种土壤上杨树种植后对照处理的养分都比原始土略有下降,其他施用污泥的处理都比原始土增加。这主要是因为杨树生长从土壤中吸收养分,故对照处理的养分会下降,而其他处理由于污泥施用带入了大量的养分元素,超过杨树生长所需求的养分所致。

由于污泥是生活污水的沉淀物,故其中含有一定的盐分,施入土壤后对土壤盐分的影响可用电导率来反应。从本试验中污泥施用后测定的土壤电导率值可以看出,污泥施用后电导率值都比对照有所增加,但所有值都小于 $2\text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ ,根据电导率与盐分和作物生长的关系<sup>[13]</sup>,发现本试验中污泥施用后土壤的盐分质量分数都小于 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对杨树生长不产生盐害。

污泥土地利用明显增加了土壤有机质质量分数,提高了土壤养分。根据污泥施用对杨树生长影响的结果也可以得出,污泥施用不仅促进杨树生长,同时还提高了土壤养分。这对速生丰产的林木品种连载所带来的地力退还具有很好的防治和改良作用。

表3 施用污泥对土壤各肥力因素的影响

Table 3 Effect of sewage sludge application on soil ingredients of fertility

土壤	污泥添加量/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全氮/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全磷/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	碱解氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效磷/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	电导率/ ( $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ )	阳离子交换量/ ( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
黄棕壤	原始土	6.81	12.79	1.081	0.536	64.17	7.42	0.88	19.89
	ck	7.20 a	11.29 c	0.785 e	0.454 b	47.88 e	5.26 c	0.88 e	20.12 c
	30	6.78 b	18.68 c	1.048 d	0.742 b	85.21 d	16.29 bc	1.31 d	21.59 c
	60	6.43 c	18.75 bc	1.418 c	0.908 b	138.29 c	23.94 b	1.61 c	22.49 bc
	120	5.71 d	25.22 b	1.880 b	1.381 a	317.74 b	34.97 b	1.98 b	24.19 b
	240	5.49 d	36.88 a	2.870 a	1.505 a	482.18 a	75.58 a	2.24 a	23.37 a
潮土	原始土	5.96	26.24	1.397	0.495	91.78	5.72	0.78	36.52
	ck	6.46 a	23.39 d	1.288 d	0.422 c	78.21 d	3.96 c	1.02 c	34.01 c
	30	6.05 b	31.82 c	2.026 c	0.867 c	161.61 c	11.16 e	1.49 b	34.69 bc
	60	5.68 c	35.79 c	2.352 c	1.187 c	171.33 c	9.40 c	1.77 b	36.02 b
	120	5.27 d	47.63 b	3.114 b	2.368 b	583.13 b	24.57 b	2.09 a	37.50 b
	240	5.08 e	75.63 a	5.231 a	3.769 a	1 092.30 a	71.45 c	2.37 a	42.10 a

说明:原始土壤是指杨树种植前没有施用污泥的土样;小写字母不同表示在 $\alpha=0.05$ 水平上处理间差异显著。



### 2.3 污泥林地施用对土壤中交换态铜和交换态锌质量分数的影响

污泥中重金属的存在是其土地资源化利用的重要限制因子,污泥施入林地后其带入的重金属对林地生态系统是否会产生毒害作用,直接受污泥带入的重金属及其形态的影响。重金属形态包括水溶态、交换态、有机态、吸附态和沉淀态。一般水溶态和交换态是植物易吸收部分,而常常水溶态含量很低,对植物有效的主要是交换态金属。

图 1 显示了不同污泥用量处理后土壤中交换态铜和交换态锌的质量分数。总体上,2 种土壤上随着污泥用量的增加土壤中交换态铜和交换态锌的质量分数与对照相比都有显著的增加,且污泥用量与土壤中交换态铜和交换态锌质量分数呈极显著正相关关系(表 4)。从图 1 还清楚看出,虽然污泥中带入的铜和锌质量分数相近(表 1),但土壤中交换态的量则表现为交换态铜显著低于交换态锌的量,各处理交换态铜在土壤中的平均质量分数是交换态锌的 1.89 ~ 12.14 倍(黄棕壤)和 1.83 ~ 10.66 倍(潮土)。这主要可能是由于污泥中交换态铜、交换态锌比例不同引起。一般认为污泥中的交换态铜占总铜的比例(0.2% ~ 2.5%)远低于交换态锌占总锌的比例(3.0% ~ 16.0%)<sup>[14]</sup>。另一方面,污泥中的重金属进入土壤后受土壤理化性质的影响,土壤有机胶体、无机胶体对铜的吸附能力强于对锌的吸附能力,这也有可能导致土壤中交换态铜质量分数低于交换态锌的质量分数。

根据表 2 杨树生物量数据可知,当污泥用量为 30 g·kg<sup>-1</sup> 时,杨树生长最好,之后随着污泥用量增加,虽然土壤中养分会随着污泥用量增加而增加,而生物量却下降,这主要是由于此时土壤中的活性重金属对杨树生长已产生抑制作用。根据二级土壤环境质量标准<sup>[15]</sup>和交换态金属占土壤全量金属的比例可以推算,铜占污泥用量为 60 g·kg<sup>-1</sup> 时已对杨树生长产生影响,而锌则在 120 ~ 240 g·kg<sup>-1</sup> 时产生影响。因此,根据本试验的结果,林地土壤中污泥用量控制在 30 g·kg<sup>-1</sup> 左右较合理。

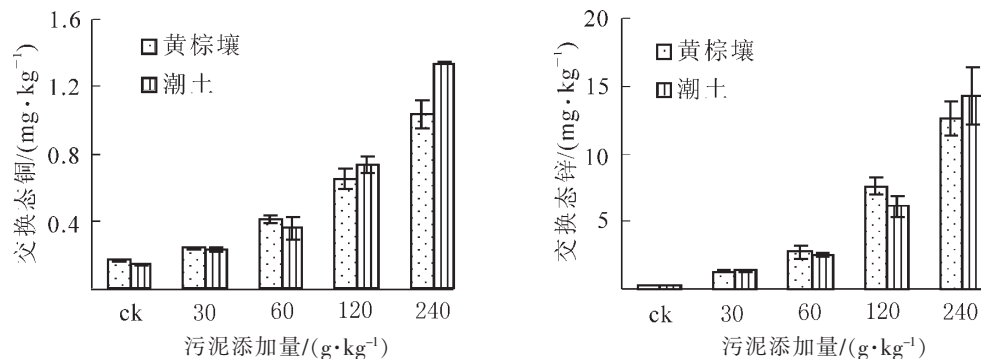


图 1 污泥林地施用后土壤中交换态铜和交换态锌质量分数的变化

Figure 1 Exchangable Cu and Zn concentrations in soil applied with sewage sludge

## 3 结论

污泥施入林地土壤后,对杨树生长的影响受土壤性质的影响。与对照相比,黄棕壤上施用污泥后杨树的树高、地径和生物量都有明显的增加,但与用量之间无正相关关系;潮土上 30 g·kg<sup>-1</sup> 污泥用量的处理对杨树生长有促进作用,其余处理都表现为抑制作用。因此,在本试验条件下,潮土上污泥施用量应控制在 30 g·kg<sup>-1</sup> 范围内。而黄棕壤上,污泥施用量应结合污泥施入土壤后分解矿化行为有关,具体研究还需进一步开展。污泥施用后明显提高了土壤中养分元素及有机质的质量分数,且不会对杨树生长产生盐害。污泥施用提高了土壤中交换态铜和交换态锌的质量分数,且两者之间呈显著的正相关关系。

表 4 污泥用量与土壤中交换态铜和锌的相关性方程

Table 4 Equations of correlation between dosage of sewage sludge applied and exchangable Cu and Zn in sewage sludge applied soil

土壤	金属	方程	相关系数
黄棕壤	铜	$y_1 = 0.037 1x + 0.166 5$	0.995 5
	锌	$y_2 = 0.534 1x + 0.098 8$	0.991 5
潮土	铜	$y_1 = 0.051 8x + 0.093 3$	0.997 1
	锌	$y_2 = 0.596 0x - 0.467 2$	0.994 3

说明:  $y_1$  表示土壤中交换铜;  $y_2$  表示土壤中交换态锌;  $x$  表示污泥用量;  $r_{0.05} = 0.811$ 。

## 参考文献:

- [1] 尹守东, 王凤友, 李玉文. 城市污泥堆肥林地应用研究进展[J]. 东北林业大学学报, 2004, **32** (5): 58 - 81.  
YIN Shoudong, WANG Fengyou, LI Yuwen. Application of urban sewage sludge compost to forestland [J]. *J Northeast For Univ*, 2004, **32** (5): 58 - 81.
- [2] 陈礼清, 赵安玖, 陈正清, 等. 人工林地力衰退现状及防治对策[J]. 林业调查规划, 2003, **28** (1): 9 - 12.  
CHEN Liqing, ZHAO Anjiu, CHEN Zhengqing, *et al.* Land capability decline of plantation and its control strategy [J]. *For Inventory Plann*, 2003, **28** (1): 9 - 12.
- [3] 胡曰利, 吴晓芙, 王尚明, 等. 桉树人工林地有机物和养分库的衰退机防治[J]. 中南林学院学报, 2000, **20** (4): 36 - 40.  
HU Yueli, WU Xiaofu, WANG Shangming, *et al.* The degradation and protection of soil organic matter and nutrient pool under artificial *Eucalyptus* forest [J]. *J Central South For Univ*, 2000, **20** (4): 36 - 40.
- [4] 林开敏, 俞新妥. 杉木人工林地力衰退与可持续经营[J]. 中国生态农业学报, 2001, **9** (4): 39 - 42.  
LIN Kaimin, YU Xintuo. Soil degradation and sustainable management of Chinese fir plantation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2001, **9** (4): 39 - 42.
- [5] KROGMANN U, BOYLES L S, WILLIAM J B. Biosolids and sludge management [J]. *Water Environ Res*, 1999, **71** (5): 692 - 714.
- [6] 周立祥. 城市污泥农林地利用中病原体污染及控制[R]//周立祥. 迈向新世纪的有机废弃物管理与利用策略. 南京: 南京农业大学, 2000: 195 - 215.
- [7] BENBRAHIM M, DENAIX L, THOMAS A L, *et al.* Metal concentrations in edible mushrooms following municipal sludge application on forest land [J]. *Environl Pollut*, 2006, **144**: 847 - 854.
- [8] 李贵宝, 尹澄清, 单宝庆. 我国森林与园林绿地污泥的利用及其进展[J]. 北京林业大学学报, 2001, **23** (4): 71 - 74.  
LI Guibao, YIN Chengqing, SHAN Baoqing. Land use and prospect of sewage sludge in forestland and green areas [J]. *J Beijing For Univ*, 2001, **23** (4): 71 - 74.
- [9] 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 Tianhong, XUE Chengze. The effect of Xi'an sewage sludge applied to forest lands [J]. *Acta Univ Agric Boreal-Occident*, 1994, **22** (2): 67 - 71.
- [10] 张增强, 薛澄泽. 污泥堆肥对花卉生长的影响[J]. 环境污染与防治, 1996 (5): 1 - 4.  
ZHANG Zengqiang, XUE Chengze. Study on the response of some ornamental plants to the sewage sludge compost [J]. *Environ Pollut Control*, 1996 (5): 1 - 4.
- [11] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1996: 226 - 228.
- [12] XIAN X Y. Effect of chemical forms of cadmium, zinc and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants [J]. *Plant Soil*, 1989, **113**: 257 - 264.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 87.
- [14] 张雪英. 江苏地区城市污泥的基本性质及其强制通风堆肥技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2001.  
ZHANG Xueying. *Agro-chemical Properties of Sewage Sludge and Forced Aeration Atatic Pile System for Sludge Composting at Jiangsu Region* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2001.
- [15] 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 Qixing. Effects of land utilization of sewage sludge compost on trees growth and soil environment [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2005, **24** (1): 174 - 177.