

施用污泥堆肥对土壤环境及高羊茅生长的影响

刘 强^{1,2}, 陈 玲¹, 黄 游¹, 邱家洲¹, 赵建夫¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 井冈山大学生命科学学院, 江西 吉安 343009)

摘 要:以上海曲阳水质净化厂污泥堆肥为研究对象, 采用盆栽和土柱模拟的方法研究了污泥堆肥土地利用对土壤环境和植物生长的影响。结果表明, 污泥堆肥和滩涂土混配后可降低土壤 pH 值, 提高土壤养分含量, 增加高羊茅生物量, 同时也增加了土壤 Pb、Cu 和 Zn 3 种重金属元素含量, 但各混合土壤中重金属含量均远低于土壤环境质量 II 类标准。另外, 污泥堆肥混配土壤基本不存在病原菌扩散的风险; 土柱淋溶试验表明, 污泥堆肥施用比例为 10% 时, 不会导致地下水 NO₃-N 和重金属含量超过地下水 II 类标准。综上, 污泥堆肥施用比例只要控制在 10% 以内, 可安全进行土地利用。

关键词:污泥堆肥; 土壤环境; 高羊茅

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)01-0199-05

Effects of Application of Sewage Sludge Compost on Soil Environment and *Festuca arundinacea* Schreb

LIU Qiang^{1,2}, CHEN Ling¹, HUANG You¹, QIU Jia-zhou¹, ZHAO Jian-fu¹

(1. State Key of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Life Sciences, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China)

Abstract: Effects of land utilization of Shanghai Quyang sewage sludge compost on soil environment and tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb) growth were carried out by using pot scale experiments and leakage facilities. The results showed that mixture of sludge compost-soil simulating the application on land decreased pH, increased contents of nutrient elements including total nitrogen, total phosphorus, organic matter and available forms of nitrogen, phosphorus in the soil. Biomass of tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb) during 5.5-month cultivation period was increased by 319.3%, 426.9% and 178.0% with sewage sludge compost application ratios of 5%, 10% and 20%, respectively. In general, mixture of sludge compost-soil significantly increased the level of Pb, Cu, Zn in the soil, but these concentrations were significantly under the 2nd grade national environmental quality standard for soils. In addition, there is no risk of contamination of pathogenic bacteria in mixed soils. Soil column leakage experiments indicated that the contents of NO₃-N and heavy metals do not surpass the 2nd grade national quality standard for groundwater with 10% application rate of sewage sludge compost in the mixed soil. In a word, the sewage sludge compost can be safely applied to land as long as the application rate of sewage sludge compost was controlled fewer than 10%.

Keywords: sewage sludge compost; soil environment; *Festuca arundinacea* Schreb

城市污泥是指城市污水处理过程中产生的固体废物, 是城市污水处理厂的经常性产物。随着城市化的进一步发展及城市污水处理行业的兴起和壮大, 污泥的产生量必将有较大的增长^[1-3], 如何有效处置与利用污泥已成为经济发展中迫切需要解决的问题。目前

国内外常用的污泥处置方法有卫生填埋、焚烧和土地利用, 其中, 污泥土地利用被认为是一种最有发展潜力的处置方法^[4]。

污泥中含有大量的有机质和植物生长所需的营养成分^[5], 也不可避免地含有病原菌、重金属等有害物质^[6]。经堆肥化处理的污泥虽能较有效地杀灭病原菌, 但并不能去除污泥中的重金属, 且污泥中过高的营养成分施入土壤易随雨水淋失而对环境构成潜在的污染危害, 这都将大大限制污泥土地利用的可能和范围^[3]。本研究以上海曲阳水质净化厂污泥堆肥和白龙港码头滩涂土为对象, 探讨污泥堆肥土地利用对土

收稿日期: 2008-03-26

基金项目: 上海市科委清洁生产与资源综合利用关键技术重大项目 (02DZ12101)

作者简介: 刘 强 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水、污泥处理与资源化利用。E-mail:qliu2006@163.com

通讯作者: 陈 玲 E-mail:chenling@mail.tongji.edu.cn

壤环境、园林植物及地下水的影响,为城市水质净化厂污泥的合理有效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为上海白龙港滩涂土。污泥堆肥由上海曲阳水质净化厂的脱水污泥(含水率 80%)经过快速好氧堆肥处理得到,具体堆肥工艺参数见文献[7],该污泥堆肥产品表观性状为:结构松散,颗粒细而均匀,呈黄褐色,无臭味,并呈泥土气味。滩涂土及污泥堆肥的基本理化性质见表 1。

表 1 滩涂土及污泥堆肥基本理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of bottomland and sewage sludge compost

理化指标	滩涂土	污泥堆肥
pH	8.95	7.12
有机质/g·kg ⁻¹	8.0	686
全氮/g·kg ⁻¹	0.64	30.2
氨态氮/mg·kg ⁻¹	17.1	3930
硝态氮/mg·kg ⁻¹	17.2	1620
全磷/g·kg ⁻¹	0.571	6.44
速效磷/mg·kg ⁻¹	7.90	410

供试植物为上海市常用园林植物高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb)。高羊茅种子按照 40 g·m⁻² 的密度均匀撒播到含 0(对照)、5%、10%、20%污泥混配土壤的聚乙烯花盆中(型号 AB230,上下口径分别为 16、12 cm,高 14 cm),每盆装 1.2 kg 混配栽培土。以种子发芽后(种植 0.5 个月)开始计算,在种植 1.5、2.5、3.5 和 5.5 个月后分别进行采样,风干,称重测定植物生物量。

1.2 试验方法

1.2.1 混配土试验

将污泥堆肥和滩涂土分别铺于塑料薄膜自然风干,研磨过 2 mm 筛后,按照污泥堆肥在混配土壤中的干重比例分别为 0、5%、10%和 20%进行混配,得到一系列混配土壤。

1.2.2 混配土淋溶柱试验

混配土淋溶柱试验栽种植物为高羊茅,栽培密度为 40 g·m⁻²,于 2005 年 4 月 2 日植入。混配土壤柱具体结构:土柱下部为直径 11.7 cm、高 40 cm 的 PVC 管,上部接型号为 AB230 的聚乙烯花盆(上下口径分别为 16、12 cm,高 14 cm),胶水粘牢接口处,再在接

口处外边粘贴防水胶布以免淋溶时水从接口处流出。PVC 管底铺一层 2 cm 厚的碎石(便于接水),在其上装填高 35 cm 的滩涂土,上部花盆内(上下口径分别为 16、12 cm)装填高 7 cm 的 10%的混配土,分别压实使其容重为 1.28 g·cm⁻³。

模拟降雨:通过参考上海地区自然降雨在中到大雨时的淋出量及降雨频率,估算出模拟降雨的加水量及频率。分别于 2005 年 5 月 27 日、6 月 21 日、7 月 11 日、7 月 25 日、8 月 21 日、9 月 13 日、9 月 23 日和 9 月 29 日(分别为第 1 至第 8 次淋溶)实施模拟降雨,土柱淋溶时调节淋溶速度为 100 mL·h⁻¹,连续淋溶,每次淋溶总量为 1 000、1 200 或 1 300 mL,其相当于一次中到大雨的淋溶效果,收集模拟降雨柱淋出液,测定 NO₃-N 和各重金属含量。

自然降雨:分别于 2005 年 5 月 6 日、5 月 14 日、7 月 8 日、7 月 11 日、8 月 11 日、9 月 13 日、9 月 23 日(分别为第 1 至第 7 次降雨)自然降雨量较大时,收集自然降雨柱淋出液,测定 NO₃-N 和各重金属含量。

1.3 分析方法

pH 采用电位法;土壤有机质、全氮和全磷分别采用重铬酸钾氧化-外加热法、半微量凯氏法、碱熔-钼锑抗比色法测定^[8];速效氮和速效磷分别采用碱解扩散法和碳酸氢钠浸-钼锑抗比色法^[8]。土壤及污泥堆肥样品经浓硝酸-高氯酸-氢氟酸消解处理后,取上清液用 ICP 分析测定重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量。污泥及污泥堆肥的病原菌测试,参照 GB4789—1994 食品卫生微生物学检验标准,采用法国生物梅里埃公司生产的 API 生物鉴定仪进行细菌鉴定。

2 结果与讨论

2.1 施用污泥堆肥对土壤养分含量的影响

污泥堆肥施入土壤后可改变土壤的物理、化学及微生物特性。由表 1 可知,污泥堆肥呈中性,滩涂土呈弱碱性,两者按不同比例混合后可降低土壤的 pH 值,当污泥堆肥含量为 20%时,pH 值由 8.95 降至 7.66(表 2),符合上海市建议种植土壤标准值(<7.8),有利于植物生长。表 1 分析结果还显示,污泥堆肥中含有大量有机质和 N、P 等营养成分,按不同比例与滩涂土混合后,极大地改善了土壤肥力,非常适合土地利用。但在最适施用比例上,由于污泥堆肥含有重金属、游离氨等有害物质,且混配土壤中过高的 N、P 含量易通过渗透及地表径流形式造成地下水、地表水的污染,因此宜从植物生长、地下水污染等方面来综合考虑。

表 2 不同比例混合土壤肥力性状比较

Table 2 Comparison of fertility properties among mixed soils with different ratios of sewage sludge compost

理化指标	污泥堆肥含量/%				上海市建议种植土壤标准值
	0	5	10	20	
pH	8.95	8.25	7.97	7.66	<7.8
有机质/g·kg ⁻¹	8.0	20.9	37.8	68.8	>15
全氮/g·kg ⁻¹	0.645	1.50	2.39	3.66	0.5~1.5
氨态氮/mg·kg ⁻¹	17.1	228	397	774	>150
硝态氮/mg·kg ⁻¹	17.2	56.2	81.2	150	
全磷/g·kg ⁻¹	0.571	0.692	0.863	1.22	0.2~0.5
速效磷/mg·kg ⁻¹	7.90	21.6	50.8	62.7	>65

2.2 施用污泥堆肥对土壤重金属含量的影响

污泥堆肥施入土壤的同时使重金属元素也随之进入土壤。随着污泥施用量的增加,土壤中重金属元素含量基本呈递增趋势^[9]。本研究中,污泥堆肥按不同比例与滩涂土混合后其重金属含量变化见表 3。由表 3 可知,随污泥堆肥施用比例的增加,混合土壤中 Cu、Zn 含量分别增加 16.5%~97.7%、8.43%~94.5%; Pb 含量由低于检测限值增加到 0.94~5.42 mg·kg⁻¹; Ni 含量无显著变化(滩涂土与污泥堆肥 Ni 含量相近); Cr 含量减少 4.63%~10.5%; Cd 因含量低未检出。当污泥堆肥施用比例为 20% 时,混合土壤中各重金属含量均远低于我国土壤环境质量 II 类(GB 15618—1995)标准(为保障农业生产,维护人体健康的土壤限定值),因此可安全进行土地利用。

表 3 不同比例混合土壤中的重金属含量比较

Table 3 Comparison of heavy metal contents among mixed soils with different ratios of sewage sludge compost

重金属/ mg·kg ⁻¹	污泥堆肥含量/%					土壤环境质量 II 标准(pH≥7.5)
	0	5	10	20	100(堆肥)	
Cd	nd	nd	nd	nd	0.4	≤0.6
Cr	56.2	53.6	53.0	50.3	32.4	旱地≤250
Cu	17.6	20.5	26.6	34.8	152	果园≤200
Ni	22.5	21.8	22.9	20.3	21.9	≤60
Pb	nd	0.94	4.48	5.42	50.5	≤350
Zn	61.7	66.9	86.3	120	1 089	≤300

注:nd 表示该重金属含量在方法检出限以下,下同。

2.3 施用污泥堆肥对高羊茅生物量的影响

污泥堆肥施入土壤后,有机质、养分含量等与滩涂土相比发生了显著的变化(表 2),从而必然影响到作物生物量。不同比例污泥施入土壤后对园林植物高

羊茅生物量的影响见图 1。由图 1 可知,0 污泥堆肥配比土壤本身由于有机质含量低,养分缺乏,高羊茅生物量最低;当污泥堆肥含量为 5% 和 10% 时,高羊茅在整个生育期内生长迅速,至种植 5.5 个月,其生物量分别是 0 污泥堆肥配比的 4.2 倍和 5.3 倍;当污泥堆肥含量为 20% 时,苗期(0.5~1.5 个月)由于可能受污泥堆肥中游离氨、小分子有机酸等抑制性物质^[10]的影响,生长最为缓慢,后期生长才逐渐加快,但最终生物量还是显著低于 5% 和 10% 污泥堆肥配比,仅高于 0 污泥堆肥配比。因此,从污泥堆肥施用对高羊茅生物量的角度来看,10% 污泥堆肥(干重比)应是理想施加量。

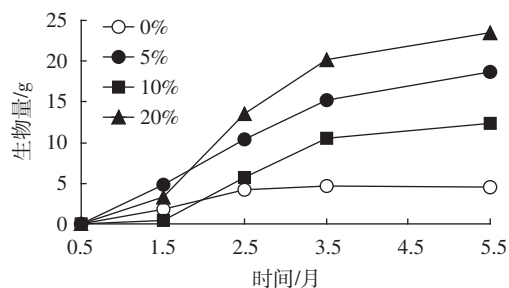


图 1 不同比例污泥堆肥施用对高羊茅生物量的影响

Figure 1 Effects of different ratios of sewage sludge compost on biomass of *Festuca arundinacea* Schreb

2.4 施用污泥堆肥对土壤病原菌含量的影响

未经处理的污泥中含有较多的病原微生物和寄生虫卵。在污泥的土地利用中,它们可通过各种途径传播,污染土壤、空气、水源,并通过皮肤接触、呼吸和食物链危及人畜健康,也能在一定程度上加速植物病毒的传播。而堆肥处理可有效地杀死病原菌,其处理前后污泥中病原菌含量变化列于表 4。从原污泥病原体细菌检测结果来看,原污泥中的大肠菌群一直维持在 24 000 MPNs·100 g⁻¹ 的高含量,且病原体种类也相对较多,直接农用存在潜在的生态风险。而经过快速好氧堆肥处理后,污泥中的大肠菌群降低至 30 MPNs·100 g⁻¹,完全满足污泥农用标准(大肠菌群<10 000 MPNs·100 g⁻¹ 湿泥),且病原体种类也大大减少。由于污泥堆肥混配土壤中的病原菌含量较纯污泥堆肥产品更少,所以污泥堆肥混配土壤进行土地利用时,基本不存在病原菌扩散的风险。

2.5 施用污泥堆肥对地下水 NO₃-N 含量的影响

在充分利用污泥中 N 素资源的同时,应注意防止 N 素,尤其是 NO₃-N 的淋失。由于 NO₃-N 不易被

表 4 曲阳污泥堆肥处理前后病原体监测结果

Table 4 Analysing results of pathogen in Quyang sewage sludge before and after composting

细菌种类		处理前	处理后
病类原体种	大肠杆菌	+	+
	嗜水气单胞菌	+	+
	蜂房哈夫尼亚菌	-	-
	腊样芽孢杆菌	+	-
	阿氏肠杆菌	-	-
	普城沙雷氏菌	+	-
	溶血巴斯德菌	-	-
	普通变形杆菌	+	-
	弗氏柠檬酸杆菌	+	-
	温和气单胞菌	+	-
	肺炎克雷伯氏菌	+	-
	产碱普罗威登斯菌	-	-
	奇异变形杆菌	-	-
	细菌菌落总数/g 湿泥	1.9×10 ⁶	1.8×10 ⁷
	大肠菌群/MPNs·100 g ⁻¹ 湿泥	≥24 000	30
	腊样计数/g 湿泥	1.0×10 ⁴	未检出

注:“+”检出;“-”未检出。

土壤吸附且移动性强,因此污泥堆肥如施用不当,将有可能对地下水构成威胁^[11]。为此,本研究开展了模拟及自然降雨条件下 0 和 10%污泥混配土柱淋溶试验,探讨施用污泥堆肥对地下水的污染情况。

由图 2 可知,模拟降雨条件下,只有第 1 次 10%污泥混配土和第 5 次 0 污泥混配土淋出液中 NO₃-N 含量超过地下水Ⅱ类水质标准(5 mg·L⁻¹),但均远低于地下水Ⅲ类(以人体健康基准值为依据)水质标准(20 mg·L⁻¹,GB/T 标准 14848—1993),其他次数淋出液中 NO₃-N 含量基本处于地下水Ⅱ类标准以内。自然降雨条件下,各淋出液中 NO₃-N 含量均处于地下水Ⅱ类标准以内,只有第 4 次 10%污泥混配土淋出液 NO₃-N 含量大大超过地下水Ⅱ类标准,但未超过地下水Ⅲ类标准。分析其原因,由于第 4 次是在大雨伴随着狂风带来的巨大冲击下收集的,这样将使更多的土壤颗粒物质和微生物随淋溶水淋出,从而造成此次淋出液 NO₃-N 含量偏高。综合模拟及降雨条件下淋出液中 NO₃-N 含量变化的情况,分析认为,当污泥堆肥施加比为 10%时,不会导致 NO₃-N 对地下水的不良影响。

2.6 施用污泥堆肥对地下水重金属含量的影响

模拟酸雨土壤淋溶柱试验发现,淋出液中重金属含量随污泥堆肥施用量的增加而增加,除 Cr 未检出

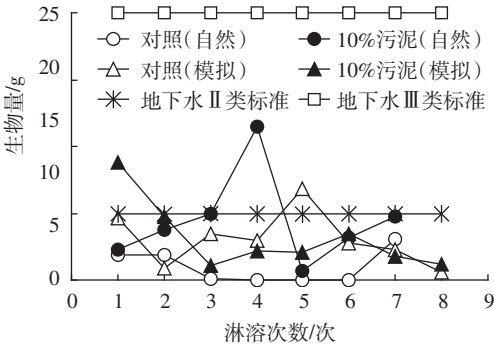


图 2 模拟及自然降雨淋出液中硝态氮含量的变化
Figure 2 Changes of NO₃-N content in the leachates under artificial and natural rainfall conditions

外,Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 均在淋出液中发现^[12]。本研究主要考虑在自然条件下,污泥堆肥施入土壤后对地下水重金属含量的影响。模拟及自然降雨条件下,0 和 10%污泥堆肥配比所有淋出液中均未检测出 Cr、Ni、Pb 和 Cd 几种重金属(Cr、Ni、Pb、Cd 的检出限分别为 0.007 1、0.015、0.042、0.002 7 mg·L⁻¹)。当污泥堆肥含量为 10%时,模拟及自然降雨条件下,仅在少数淋出液中检测到 Cu、Zn 两种重金属(表 5),且其含量均远低于地下水Ⅱ类标准。

表 5 模拟及自然降雨条件下 10%污泥堆肥
配比淋出液中重金属含量

Table 5 Content of heavy metals in the leachates under artificial and natural rainfall conditions with 10% ratio of sewage sludge compost

淋溶次数	Cu/mg·L ⁻¹		Zn/mg·L ⁻¹	
	模拟降雨	自然降雨	模拟降雨	自然降雨
1	nd	0.023	nd	0.000
2	0.027	0.010	0.073	0.028
3	nd	nd	nd	0.055
4	0.074	0.020	nd	nd
5	nd	nd	nd	nd
6	nd	nd	nd	0.111
7	nd	nd	nd	0.141

3 结论

(1)污泥堆肥与滩涂土混配后,土壤 pH 降低,有利于植物生长。随污泥堆肥施用比例的提高,土壤有机质含量比对照增加 161%~760%、全氮、速效氮比对照分别增加 133%~467%、828%~2 694%,全磷、速效磷比对照分别增加 121%~214%、173%~694%,土壤各种养分含量均呈显著递增的趋势,极大地改善了土壤肥力。

(2)污泥堆肥按不同比例与滩涂土混配后,混合土壤中Cu、Zn含量分别增加16.5%~97.7%、8.43%~94.5%;Pb含量由低于检测限值增加到0.94~5.42 mg·kg⁻¹;Ni含量无显著变化;Cr含量减少4.63%~10.5%;Cd因含量低未检出。不同污泥堆肥施用比例混合土壤中各重金属含量均远低于我国土壤环境质量Ⅱ标准。

(3)不同比例污泥堆肥施用,园林植物高羊茅最终生物量大小依次为:10%>5%>20%>0。

(4)快速好氧堆肥处理后的污泥,大肠菌群降低至30 MPNs·100 g⁻¹,完全满足污泥农用标准(大肠菌群<10 000 MPNs·100 g⁻¹),且病原体种类也大大减少。因此,污泥堆肥土地利用基本不存在病原菌扩散的风险。

(5)当污泥堆肥施用比例为10%时,不会导致NO₃-N和重金属含量对地下水的不良影响。

综合来看,上海曲阳水质净化厂污泥堆肥施用比例控制在10%,不但可最大限度地增加土壤肥力和作物产量,且不会对土壤和地下水构成污染危害,可安全进行土地利用。

参考文献:

- [1] 国家环保总局. 2004年中国环境状况公报. State Environmental Protection Administration of China. Environment Situation Communique in China, 2004.
- [2] 马娜, 陈玲, 熊飞. 我国城市污泥的处置与利用[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 92-95.
MA Na, CHEN Ling, XIONG Fei. Disposal and reuse of city sludge in China[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 92-95.
- [3] 张增强, 殷宪强. 污泥土地利用对环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1182-1187.
ZHANG Zeng-qiang, YIN Xian-qiang. Environmental effects of sludge application on land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1182-1187.
- [4] 乔显亮, 骆永明, 吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. 土壤, 2000, 32(2): 79-85.
QIAO Xian-liang, LUO Yong-ming, WU Sheng-chun. Application of sludge on land and its environmental effects[J]. *Soils*, 2000, 32(2): 79-85.
- [5] 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-Environment Science*, 2006, 25(4): 894-897.
- [6] 周立祥, 胡霁堂, 戈乃珍, 等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 185-193.
ZHOU Li-xiang, HU Ai-tang, GE Nai-fen, et al. Study on utilization of municipal sewage sludge in farmland and forest land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 185-193.
- [7] 陈玲, 赵建夫, 李宇庆, 等. 城市污水厂污泥快速好氧堆肥技术研究[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 192-195.
CHEN Ling, ZHAO Jian-fu, LI Yu-qing, et al. Rapid and high-efficient composting process of municipal sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(5): 192-195.
- [8] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤和农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 67-116.
Agro-Chemistry Professional Committee in Soil Science Society of China, Edit. General analytical method of soil and agro-chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1983: 67-116.
- [9] 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[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 163-166.
WANG Xin, CHEN Tao, LIANG Ren-lu, et al. Effects of land utilization of sewage sludge on crops and soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 163-166.
- [10] 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(6): 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(6): 797-801.
- [11] 孙权, 何振立, 储燕宁, 等. 氮肥对绿洲稻田土壤硝态氮动态的影响及其生物学效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 696-699.
SUN Quan, HE Zhen-li, CHU Yan-ning, et al. Effect of N fertilizer on soil nitrate and its biological impact on a paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 696-699.
- [12] 黄游, 陈玲, 李宇庆, 等. 模拟酸雨对污泥堆肥中重金属形态转化及其环境行为的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1352-1357.
HUANG You, CHEN Ling, LI Yu-qing, et al. Effects of simulated acid rain on form transformation and environmental behaviors of heavy metals in amended sludge compost[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11): 1352-1357.