

施用辐照处理的污泥对环境影响的研究

赵永富^{1,2}, 郑 正¹, 牟艳艳¹, 袁守军¹

(1.南京大学环境学院, 江苏 南京 210093; 2.江苏省农业科学院原子能研究所, 江苏 南京 210014)

摘 要:采用田间试验及土柱试验方法,研究了液态污泥辐照后直接施用于菜地对环境的影响,结果表明,土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷的含量皆随着污泥施用量的增加而增加,辐照处理还能增加速效氮的含量。田间持水量随着污泥施用量的增加而增加,而容重、pH 值则下降。污泥施用对土壤盐分的增加最明显,田间试验污泥用量为 80 t·hm⁻² 的土壤电导率比对照增加 3 倍,盆栽试验则增加 24 倍。施用污泥使土壤 pH 降低,土壤重金属的积累量增加,污泥用量为 80 t·hm⁻² 时,土壤中 Cu、Zn、Cd 的含量皆超过二级环境质量标准。淋溶模拟试验表明,当污泥用量为 80 t·hm⁻² 时,淋溶液的 NO₃⁻-N、P 含量超过 I、II 类地面水标准,但用量达 120 t·hm⁻² 时并未超过 III 类地面水标准。施用辐照处理污泥能加剧上述趋势。

关键词:污泥; 辐照; 土壤; 有效氮; 地下水; 重金属; 电导率

中图分类号:X825 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)04-0737-05

Effects of Utilization of Irradiated Sewage Sludge on Environment

ZHAO Yong-fu^{1,2}, ZHENG Zheng¹, MU Yan-yan¹, YUAN Shou-jun¹

(1. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Institute of Atomic Energy, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Both field trial and pot experiment were conducted for 3 years to study the effects of irradiated sewage sludge on some soil properties. The results obtained from the field trial showed that contents of soil organic matters, total N, total P, available N and available P increased with the increment of the irradiated sewage sludge added to field, and the contents of available N in sewage sludge also increased after irradiation. The water holding capacity for the soil increased with the increment of sewage sludge applied, but it was adverse for the bulk density and pH of the soil. The amount of sewage sludge applied had a markedly influence on salt contents of the soil, while the electronic conductivity of the soil with sewage sludge applied at 80 t·hm⁻² were three times in field trial and 24 times in pot experiment higher than that for the control treatment (without sewage sludge). It has also been found that application of sewage sludge could decrease soil pH and increase the concentrations of heavy metals in soil, as the concentrations of Cu, Zn and Cd in soil were discovered to exceed the second category of the environment quality standard. Another eluviated experiment was conducted in PVC tubes for 12 weeks to simulate the effect of swage sludge on the quality of underground water, the results gained indicated that contents of NO₃⁻-N and P in percolate exceeded the first and second categories of surface water quality standard when sewage sludge was applied at 80 t·hm⁻², but it did not exceed the third category when the amount of sewage sludge was raised to 120 t·hm⁻². Application of irradiated swage sludge could amplify this trend.

Keywords: sewage sludge; irradiation; soil; available nitrogen; underground water; heavy metals electronic conductivity

由于污泥填埋、投海、焚烧等处置方式对生态环境产生不利影响,人们越来越重视污泥的农业利用。这种利用使污泥中所含的大量有机质、植物所需营养

成分重新进入自然的物质能量循环中,是一种行之有效的资源再生化技术。但是污泥的农业利用必须满足的一个前提条件是:其中所含的有害成分不能超过土壤环境所能承受的容量范围。污泥是城市污水处理后废物集聚库,其中有害物如重金属、病原菌、有机污染物等成分复杂,因此,人们寻求各种无害化预处理方法,来降低污泥中易腐化的发臭物,去除重金属,杀死

收稿日期:2004-08-30

基金项目:江苏省环保科技计划项目

作者简介:赵永富(1963—),男,副研究员,博士研究生,主要从事环境科学及核技术应用工作。E-mail: rdszyf@sina.com

病原物,减少污泥农业利用风险,提高污泥施用效率。辐照处理就是其中一种。国外的许多研究证实,污泥经辐照后可完全杀灭其中的病原物,在某些土壤上施用,还可以提高污泥养分供应能力,使水稻、番茄、玉米等作物增产。然而关于施用辐照污泥对土壤养分、结构、盐基状况、地下水质的影响研究国内还很欠缺。

1 材料与方法

1.1 田间试验

表 1 供试土壤基本理化特性

Table 1 Physical and chemical characteristics of the soil studied

土壤	全 N	全 P	OM /%	速效 N	速效 P	速效 K	Cu	Zn	Cd	Pb	pH
	/g·kg ⁻¹										
黄泥土	0.81	0.17	0.57	73.0	7.6	170.3	—	—	—	—	7.08
菜园土	2.05	1.36	2.96	222.1	123.9	166.3	42.1	128	0.23	26.8	7.22

表 2 辐照处理对污泥理化特性的影响

Table 2 Effects of Irradiation on physical and chemical characteristics of sewage sludge

处理	全 N	全 P	OM /%	速效 N	速效 P	速效 K	Cu	Zn	Cd	Pb	EC	pH
	/g·kg ⁻¹										/dS·m ⁻¹	(1:1)
对照	43.0	11.2	41.4	3 778b	415.6	713.9	227	1 348	5.5	83	92.3	6.68
辐照	47.3	10.3	41.0	4 344 ^a	472.5	694.0	205	1 320	5.2	80	91.4	6.87

供试作物:青菜,品种为矮脚黄。

试验设计:试验于 2001 年—2003 年在江苏省农科院内进行。设不施肥(CK₀),施当地常规复合肥(N-P₂O₅-K₂O 为 10-6-9,代号为 CK₁)、施未辐照污泥(代号为 SS₁、SS₂、SS₃、SS₄),施辐照污泥(代号为 IS₁、IS₂、IS₃、IS₄)共 10 个处理(未辐照和辐照污泥施用量依次皆为 20、40、60、80 t·hm⁻²),每处理 4 次重复,共 40 个小区,随机区组排列,每小区面积为 2.2 m×8 m。试验采用裂区设计,主区为辐射污泥、未辐射污泥,副区为不同施肥水平。所有污泥和复合肥均作基肥于栽培 2 周前施入。采集每区根层土壤(0~15 cm),风干磨细,过 20 目尼龙筛,用来测定全量及速效养分。

1.2 盆栽试验

试验于 2001 年—2003 年在江苏省农科院原子能所内进行。试验的每个处理设计同田间试验。辐照与未辐照污泥施用量相等。每处理 4 次重复。采用 1.5 kg 的塑料盆,每盆装土 1.2 kg。青菜栽培前及收获后,每盆取 100 g 鲜土,阴干,备用。

1.3 地下水影响的模拟试验(土柱试验)

在高 110 cm、直径 10 cm 的 PVC 管内进行,管底部铺尼龙沙网并装填 5 cm 原细砂以利滤水和防止土壤随水排出,其上再装填 80 cm 过筛(孔径为 1 cm)的

供试土壤:江苏省农科院内菜园土及黄泥土,供试土壤基本理化特性见表 1。

供试污泥:采自南京市锁金村污水处理厂。生活污水二级处理后,生污泥及剩余污泥沉淀于湿污泥池中。抽取该池内(深度 2.0~3.0 m)湿污泥,作为试验污泥。污泥的理化特性见表 2。

污泥辐照:液态污泥放置辐照场内,辐照时间为 5 h,采用重铬酸银剂量计测量吸收剂量,辐照剂量为 5kGy。

耕层土壤,表层 20 cm 装入已分别混入污泥量为 40、80、120 t·hm⁻² (施未辐照污泥的代号依次为 SS₁、SS₂、SS₃,施辐照污泥的代号依次为 IS₁、IS₂、IS₃)的土壤。在 1~12 周内,每日定时加入柱内 300 mL 自来水。经过 2、4、6、8、10、12 周时,分别在管柱底采集流出液,测定溶液中硝酸盐及磷含量。硝酸盐测定采用氨缓冲液浸提法。

1.4 样品分析

土壤:全氮采用浓硫酸、重铬酸钾消化,蒸馏法测定;全磷采用浓硫酸、高氯酸消化,钼锑抗比色法分析;速效氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 提取,钼锑抗比色法测定。重金属 Cu、Zn、Cd、Pb 采用 HF-HNO₃ 消煮,原子吸收分光光度法测定。电导率(EC)采用中科院土壤所研制的电导仪测定,水土比为 1:1。田间持水量 WHC 和容重 BD 按《土壤物理性质测定法》(科学出版社,1978)进行。

污泥:全氮、全磷、速效磷、重金属的测定方法同土壤。速效氮(NH₄⁺和 NO₃⁻-N)采用 2 mol·L⁻¹ KCl 直接浸提湿污泥,比色法测定。

1.5 数据处理

采用 Duncan 法对各处理结果进行统计分析,检

验是否有显著差异。

2 结果与分析

2.1 施用污泥对土壤养分积累的影响

图 1 可见，施用污泥能显著提高黄泥土中全氮、全磷、速效氮、速效磷的含量。对污泥施用量与土壤养分进行相关分析表明，土壤养分的积累量与施用污泥量（20~80 t·hm⁻²）高度相关且达显著水平（ $r^2_{\text{全氮 IS}}=$

0.994, $P<0.01$; $r^2_{\text{全磷 IS}}=0.996, P<0.01$; $r^2_{\text{速效氮 IS}}=0.987, P<0.01$; $r^2_{\text{速效磷 IS}}=0.987, P<0.01$)。因此,污泥确具有培肥地力的效果。与不施污泥的对照(CK₀)相比,施用辐照污泥 80·hm⁻²(IS₄)土壤全氮、全磷的含量分别增加 2.0 和 2.2 倍,而速效氮、速效磷的含量分别增加 4.1 倍和 3.8 倍。说明污泥不但能培肥地力还能提供速效养分,是一种肥效迟速兼备的有机肥。

污泥辐射处理后再施用,对土壤中全氮、全磷、有

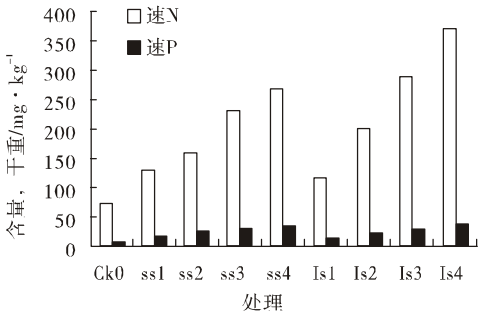
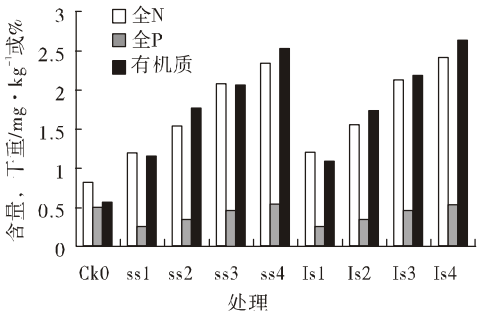


图 1 施用污泥对土壤(黄泥土)养分积累的影响

Figure 1 Effect of normal and irradiated sewage sludge at various levels on nutrients of soil (loess)



机质、速效磷积累的影响不明显。但从速效养分氮的累积看,尽管施用低量污泥(20 t·hm⁻²)累积量较小(即 IS₁<SS₁,这也许与所谓新鲜污泥引起的“激发效应”有关),但施用高量污泥(40~80 t·hm⁻²)累积量却显著增加。Guang Wen et al (1995)^[1]的试验结果是:在 DISS(辐照污泥)中 NH₄⁺-N 的浓度分别高于 DSS(未辐照污泥) 290%(1990 年)和 40%(1991 年),尽管每一批样品中 NH₄⁺-N 不同,但 NH₄⁺-N 的增加大都可以归因于辐射作用。辐射处理能增加污泥中有效态 N,主要是因为辐射能使氮从断裂的蛋白质链中释放出来,增加了污泥的 NH₄⁺-N 浓度(Vysotskaya et al, 1986)^[2]。辐射化学反应受含水量的影响较大(Butler et al, 1984)^[3],本研究采用直接辐射液态污泥的方法,它可以使辐射比不辐射污泥中的速效 N 增加 15%,见表 2。辐射处理又可使水溶性有机物(DOM)向小分子方

向转化,有利于有机物的矿化。因此辐射后污泥土壤速效 N 的累积量显著高于未辐射污泥。

2.2 施用污泥对土壤物理性质的影响

郭郛兰等^[4]报道,施用污泥堆肥,土壤容重减小,总团粒结构有增加趋势,土壤含水量、田间持水量、土壤孔隙度、毛孔隙度提高。本研究施用的辐照和未辐照污泥,土壤物理性质也得到类似改善。容重(BD)是反映土壤松紧度的一个重要指标,受土壤的质地结构性能影响而变化。田间持水量(WHC)是指土壤所能稳定保持的最高土壤水含量。由表 3 可见,随着污泥施用量的增加,WHC 逐渐升高,而 BD 却逐渐下降。

施用辐照污泥与未辐照污泥相比,有改善土壤 WHC、BD 的趋势,但差异不显著($P>0.05$)。统计分析表明,田间持水量与土壤有机质的积累呈显著正相关($B_{IS}=0.089, r^2_{IS/WHC}=0.943, P<0.01$),而容重与土壤有

表 3 施用污泥对土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of normal and irradiated sewage sludge at various levels on the physical and chemical characteristics of the soil

处理	CK ₀	CK ₁	SS ₁	SS ₂	SS ₃	SS ₄	IS ₁	IS ₂	IS ₃	IS ₄
污泥用量/t·hm ⁻²	0	0	20	40	60	80	20	40	60	80
WHC(田间)/%	27.2	28.1	30.2	30.8	32.6	33.5	30.5	30.8	33.6	34.5
BD/g·cm ⁻³	1.30	1.32	1.28	1.23	1.19	1.18	1.27	1.21	1.16	1.05
EC(田间)/dS·m ⁻²	3.12	3.5	5.4	6.6	8.0	9.4	5.2	6.5	7.8	9.2
EC(盆栽)/dS·m ⁻²	4.80	50.5	57.8	75.0	97.9	114.2	56.2	78.3	98.5	118.1
pH(田间)	6.97	6.90	6.85	6.60	6.50	6.41	6.75	6.70	6.50	6.45
pH(盆栽)	7.05	7.08	6.36	6.20	6.12	5.96	6.36	6.20	6.10	5.85

注:P=0.05

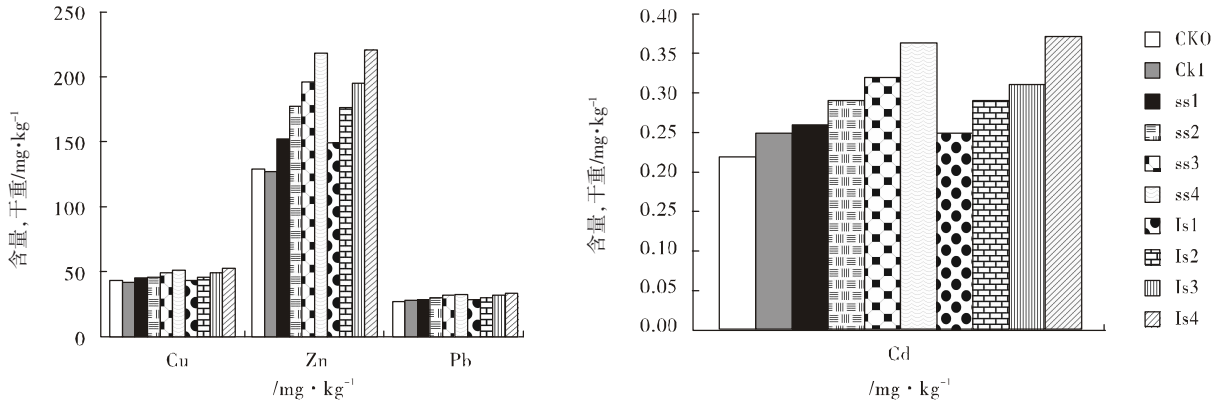


图2 施用污泥对土壤重金属积累的影响

Figure 2 Effect of normal and irradiated sewage sludge at various levels on heavy metal accumulation of soil

机质的积累呈显著负相关($B_s = -0.03$, $r_{s/BD}^2 = 0.952$, $P < 0.01$)。由于污泥中有机质含量高,且其中腐殖质含量也很高,施用粘土后易形成散碎的团粒,使土壤变得比较松软而不再形成坚韧大块结构,从而改善土壤的透水性、蓄水性及通气性。

2.3 施用污泥对土壤盐分累积及酸度的影响

土壤浸出液的电导率数值能反映土壤含盐量的高低。过高的土壤盐分是抑制植物生长的因素之一。在田间条件下,可溶性盐分由于混合耕作而被稀释并淋溶到底层,但在盆栽试验中,可溶性盐流失较少,当加大污泥施用量时,电导率显著增加。由表3可见,与不施污泥的空白土壤相比,田间试验施用高量污泥($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的土壤的浸出液电导率仅增加3倍,而盆栽试验电导率约增加24倍,导致盆栽的小青菜不能成活或出现枯黄。乔显亮等^[9]人在大棚蔬菜田间试验中曾遇到盐分累积及危害事件,施用污泥土壤盐分表聚形成白色盐斑,所生长的青椒不仅没增产反而出现一定程度的减产。表3还反映施用辐照处理污泥对土壤电导率改变很小。

土壤酸度(pH)对土壤中物质转化、土壤矿物、生物及理化性质有重要影响。由于污泥中有机物的迅速分解及硝化作用,土壤 NO_3^- 浓度上升。 NO_3^- 的大量累积,加之 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 随雨水的淋失使土壤出现酸化现象。表3反映了盆栽试验及田间试验中施用污泥后土壤pH值的变化。随着污泥施用量的增加,pH逐渐降低。田间试验($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)约降低0.5个pH单位,盆栽试验约降低($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)1个pH单位。由于土壤中重金属的生物有效性与pH有关,土壤的酸化会导致重金属迁移性增大,农作物及蔬菜对重金属的吸收增

加,因此控制污泥施用量是污泥农用安全的主要途径。表2反映出污泥的pH值受辐照处理的影响很小,由表3统计分析表明,与未辐照污泥相比,施用辐照污泥的土壤pH值无显著变化($P > 0.05$)。

2.4 施用污泥对土壤重金属积累的影响

试验表明:污泥施用量控制在 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以内,土壤内Cu、Zn、Cd、Pb的全部积累皆在“土壤环境质量标准”二级($\text{pH} \leq 6.5$, $\text{Cu} \leq 200$, $\text{Zn} \leq 200$, $\text{Cd} \leq 0.30$, $\text{Pb} \leq 250$,单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)以内(图2)。本供试污泥的Zn含量超过污泥农用标准,Cd含量超过在 $\text{pH} \leq 6.5$ 土壤上污泥农用标准。当污泥施用量大于 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤Zn积累已接近二级标准限值,污泥施用量达 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤Cd积累已超过二级标准限值($\text{pH} \leq 6.5$)。当污泥施用量达 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤Cu积累也超过二级标准限值($\text{pH} \leq 6.5$)。总之,当供试污泥施用量为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤中Cu、Zn、Cd的含量皆超过二级标准限值。辐照处理对土壤内Cu、Zn、Cd、Pb的全量成分影响不显著($P > 0.05$),污泥辐照后的重金属含量也证实了这一点(表2)。

2.5 施用污泥对地下水水质的影响

污泥中通常含有大量N、P等养分,如果在降雨量较大且土质疏松的土地上施用,有机物分解大于植物对N、P的吸收速度,就可能会随水流失,进入地表水体造成水体的富营养化,进入地下水体引起地下水的硝酸盐和磷素污染。

淋洗模拟试验表明: NO_3^- -N淋失量(峰值或均值)随污泥施用量增加而增加。污泥用量为 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时出水 NO_3^- -N(浓度峰值)已接近I、II类地面水标准(GB3838-88: NO_3^- -N $<10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $P < 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),污

泥用量为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 超过 I、II 类标准,污泥量为 $120 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 超过 I、II 类地面水标准近 1 倍,但皆未超过 III 类地面水标准 (GB3838-88 ; $\text{NO}_3^- \text{-N} < 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{P} < 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。见图

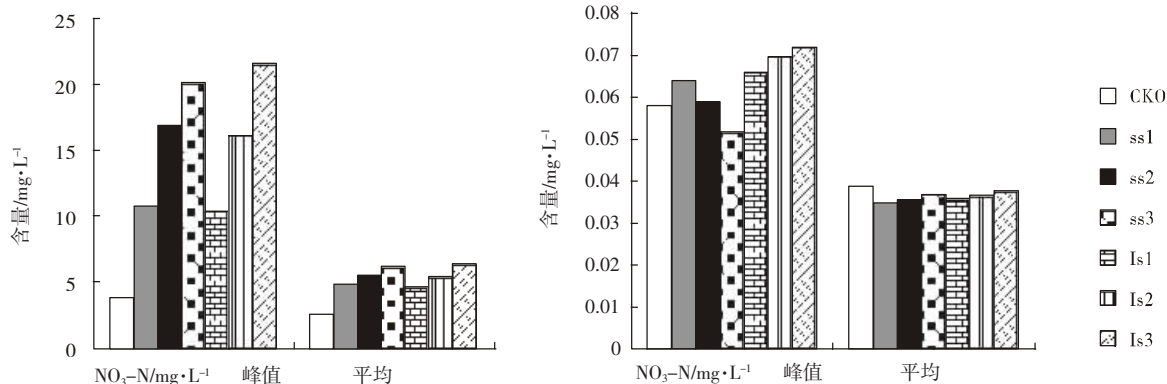


图 3 施用辐照污泥对地下水质的影响

Figure 3 Effect of normal and irradiated sewage sludge at various levels on quality of underground water

皆高于未辐照污泥。这可能与辐照对磷有活化作用,增加了污泥中速效磷成分有关(见表 2)。

3 小结

液态污泥辐照处理后,分散性明显提高,很容易溶入土壤中。随着污泥施用量的增加,土壤变得松软,透气性好,有利于植物生长,而干污泥粘结在一起很难分离,因而施用辐照处理的液态污泥是污泥处置的有效途径之一。污泥经一定剂量辐照后,速效氮含量(氨态+硝态)显著增加,从而提高了污泥的肥效。在一定施用量范围内,随着污泥施用量的增加,土壤的有机质、全 N、全 P、速效 P 含量增加,BD 下降,WHC 上升,有利于作物生长。但当施用高量污泥时会引起土壤盐分、重金属的积累并出现酸化现象,抑制农作物

3。

随污泥施用量增加,磷的淋失量值(峰值或均值)在 12 周内增加不多,由于磷易于被土壤固定,主要聚积于耕层,很难向深层土壤中移动,因此淋溶液中磷含量未发现明显增高。而施用辐照污泥磷的淋失量值

生长,而且地下水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、P 含量增加,造成饮用水和地下水污染。

参考文献:

- [1] Guang Wen, Thomas E. Bates, R. Paul Voroney. Evaluation of nitrogen availability in irradiated sewage sludge, sludge compost and manure compost[J]. *J Environ Qual.*, 1995, 24: 527-534.
- [2] Vysotskaya, N a, L g Shevchuk. Physico-chemical aspects of sewage ionizing radiation treatment[J]. *Radiat Phys Chem*, 1986, 28: 581-584.
- [3] Butler J, Land E J, Swallow A J. Chemical mechanism of the effect of high energy radiation on biological systems[J]. *Radiat Phys Chem*, 1984, 24: 273-281.
- [4] 郭郦兰, 米尔芳, 田若涛, 等. 城市污泥和污泥与垃圾堆肥的农田施用对土壤性质的影响[J]. *农业环境保护*, 1994, 13(5): 204-209.
- [5] 乔显亮, 骆永明, 谢农华, 等. 污泥土地利用研究 V—高铜污泥[J]. *土壤*, 2001, 33(4): 222-224.