

长江三角洲地区城市污泥对蚯蚓的急性毒性效应^①

申荣艳^{1,2}, 骆永明¹, 李振高¹, 滕 应¹, 章钢娅¹

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要: 应用滤纸法和自然土壤法测定了长江三角洲地区城市污泥及其与青紫泥混合后对蚯蚓的急性致死效应及慢性毒性效应。结果表明: 滤纸法测定的污泥对蚯蚓的毒性症状出现快且严重, 不同污泥对蚯蚓的毒性大小差别较大, 致死中浓度(LC₅₀)相对应的污泥与水比值($R_{sw}-LC_{50}$)范围在 0.0010~0.0242 之间。在供试的城市污泥中, 上海贮泥池污泥对蚯蚓的毒性最大, 上海脱水污泥 5 对蚯蚓的毒性最小。自然土壤法测定的污泥与土壤作用后对蚯蚓的毒性结果为: 所有处理蚯蚓死亡率均为 0, 各污泥处理对蚯蚓体重增长率的影响差别不大, 个别污泥处理蚯蚓体重增长率比对照处理低, 即对蚯蚓的体重有负增长影响。与滤纸法各处理相比, 中毒症状较轻微, 仅极个别中毒症状较明显。与污泥的水浸液相比, 污泥与土壤作用后对蚯蚓的毒性大大降低。

关键词: 城市污泥; 农用; 蚯蚓; 急性毒性

中图分类号: X825

随着城市污水排放量的增加, 污泥的产生量日渐增大, 人们开始注意到它对环境可能造成的危害。一般的无害化处理(如干燥、堆肥等)难以彻底去除其中的重金属和难降解的有毒有机污染物, 这些难降解的有毒物质在放置期间或施用到田地以后扩散到周围环境, 部分有毒物质还可随地表径流进入水域, 对生态系统造成很大危害。污泥的这种二次污染问题已引起人们的广泛关注^[1-5]。其中, 污泥的重金属污染已有较多研究^[6], 对污泥中有毒有机物质的研究也有报道, 主要集中在化学分析^[1-2, 7-13], 但由于污泥成分高度复杂, 单纯的化学分析难以表征污泥及其土壤利用后的毒性。

蚯蚓是土壤非常活跃的一个重要组成部分, 是陆生生物与土壤生态系统环境信息传递的桥梁。当土壤被各类有毒物质污染时, 蚯蚓的生存、生长和繁殖将受到不利的影响, 甚至死亡。因此, 利用蚯蚓指示土壤污染状况, 已作为土壤污染生态毒理诊断的一个重要手段^[14-16]。目前, 国内外有关毒物对蚯蚓生态毒理效应的研究, 主要侧重于农药、重金属及部分有机污染物毒性的研究上^[17-21], 但在国内城市污泥对蚯蚓的急性毒性效应的研究还未见报道, 国外学者的注意力也主要放在污泥对蚯蚓的长期毒性效应研究上及蚯蚓对污泥中有毒物质的生物有效性的研究上^[22-24]。本试验研究了我国长江三角洲地区对发光细菌急性毒性较

大的 12 个城市污泥^[25]对蚯蚓的急性毒性效应, 以便为科学地评价城市污泥的总体毒性及其农用的生态安全性提供参考。

1 材料与方法

1.1 污泥样品的采集与处理

污泥样品采自长江三角洲地区的南京、上海、常州、无锡和宁波等城市的污水处理厂, 共 12 个。其具体来源和类型见表 1。将污泥样品风干、磨碎、过 2 mm 筛, 并采用 HCl-HNO₃ 消解、Varian Spectr AA 220 FS 火焰原子吸收分光光度计测定重金属含量, 然后用蒸馏水浸提, 水平振荡 24 h, 离心、过滤, 取滤液备用。

1.2 主要仪器设备

可控环境培养箱、培养皿、1000 ml 三角瓶、定性滤纸。

1.3 试验动物

蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetide*), 购自蚯蚓养殖场。选择具有环带的健壮成体进行实验, 蚯蚓大小和重量相近。

1.4 试验方法

蚯蚓急性毒性实验是蚯蚓生态毒理学研究的一部分。由于使用蚯蚓不同, 各地土壤成分不同等不确定因素, 使得毒性试验的结果差异较大, 可比性较差。

①基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40432005)、国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410810)和中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-429)资助。

作者简介: 申荣艳(1977—), 女, 黑龙江佳木斯人, 博士研究生, 主要从事污泥的农业资源化利用研究。E-mail: ryshen1204@yahoo.com.cn

为此欧共体对此作了规定,建立了蚯蚓急性毒性实验的标准方法而向各国推荐^[26],其中主要方法有:滤纸接触法(contact filter paper test, OECD-guideline No.207)、人工土壤法(artificial soil test, OECD-guideline No.207)和人造土壤法(Artsol test)等。本文使用滤纸接触法和自然土壤法两种方法进行了实验。

表 1 供试污泥的来源和类型

Table 1 Origins and types of the tested sludges

污泥来源	污泥类型	污水处理工艺
宁波脱水污泥	生活污水为主	A ² /O
宁波贮泥池污泥	工业污水为主	活性污泥
上海脱水污泥 1	生活污水为主	活性污泥
上海脱水污泥 2	生活污水为主	活性污泥
上海脱水污泥 3	工业污水为主	活性污泥
上海脱水污泥 4	混流污水	活性污泥
上海脱水污泥 5	生活污水为主	活性污泥
无锡脱水污泥	生活污水为主	A ² /O
常州脱水污泥 1	生活污水为主	A ² /O
常州脱水污泥 2	生活污水为主	A ² /O
上海贮泥池污泥	生活污水为主	A ² /O
南京企业污泥	工业污水为主	活性污泥

A²/O: 厌氧-缺氧/好氧处理。

1.4.1 滤纸接触法 ①清肠:取 5 个烧杯,在底部铺上 1 层滤纸,加少量水,以刚浸没滤纸为宜。挑选具有环带的健壮蚯蚓,放在滤纸上,用塑料薄膜封口,并用镊子扎孔,将烧杯放入温度为 20℃ ± 1℃、湿度约 75% 的人工气候箱内,清肠 1 天。②处理:在直径 15 cm 的培养皿底铺衬滤纸,以刚好遮住皿底为宜。取适量城市污泥浸提液及其一系列不同倍数的稀释液倒入培养皿中,以刚好湿润浸没滤纸为宜。③放入蚯蚓:将清肠后的蚯蚓冲洗干净,并用滤纸吸干蚯蚓体表的水分,放入培养皿中。每一处理放入蚯蚓 10 条。用塑料薄膜封口,并用镊子扎孔。④培养:将培养皿放入人工气候箱中培养,箱中为标准实验条件:温度为 20℃ ± 1℃,湿度为 (75 ± 7)%,光照为 1333 lx (间歇光照,即 12 h 光照、12 h 黑暗)。⑤观察:24 h、48 h 各计数 1 次,记录死亡数及中毒症状,蚯蚓对针刺无反应判为死亡,48 h 后结束试验。每一处理和对照各设 3 个重复。

1.4.2 自然土壤法 供试土壤为嘉兴双桥农场湖相沉积物发育的青紫泥。土壤采集后在阴凉处风干、磨细,过 20 目筛,采用常规方法^[27]测定其基本理化性质(表 2)。称取土壤 500 g,分别按 10 g/kg 土、20 g/kg 土(我国规定的每年每千克土壤允许施用的最

大污泥量)将污泥与土壤充分混匀。调节土壤含水量为最大持水量的 60%,然后将土壤与污泥混匀后放入烧杯中。以下放入蚯蚓、培养、观察及设置重复等各步骤与滤纸法相似,只是将观察时间设为 7 天和 14 天,14 天后实验结束。

表 2 供试土壤的基本理化性质

Table 2 Basic properties of the tested soil

有机质 (g/kg)	有效 N (mg/kg)	有效 P (mg/kg)	有效 K (mg/kg)	EC (mS/cm)	pH	黏粒 < 2 μm (g/kg)
11.3	142	10.6	216	0.20	6.18	169.0

2 结果与讨论

目前还没有污泥及污泥农用于土壤中蚯蚓的毒性安全评价标准,因此本试验参考化学农药或者其它有毒物质环境安全评价试验准则^[28],国内一般采用以下方法来评价农药或其它化学物质对蚯蚓的安全性:以致死中浓度(LC₅₀)的大小来划分,LC₅₀ > 10⁻⁵ 为低毒级;LC₅₀ 在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁵ 之间为中毒级;LC₅₀ < 10⁻⁶ 为高毒级^[28]。

参考文献[29]中所用方法作标准曲线,以蚯蚓死亡率为横坐标,以污泥:水为纵坐标,得回归方程后计算相关系数,然后求出滤纸接触法测得的半数致死浓度(LC₅₀)相对应的污泥与水比值(R_{sw}-LC₅₀)。本试验中滤纸接触法测得的供试污泥的 R_{sw}-LC₅₀ 值均在 10⁻² ~ 10⁻³ 之间,相当于 g/kg 土壤级,远远大于 mg/kg 土壤级,因此都属于低毒级。

故用以上方法作为参考来衡量污泥对蚯蚓的毒性,供试城市污泥大多对蚯蚓的急性毒性都较低。

2.1 滤纸接触法

具体实验结果见表 3。中毒症状主要有:身体变软,环带膨大,身体红肿充血,有黄色液体渗出,严重者身体变形、充血、腐烂。未死者也出现部分症状,蠕动力减弱。

从表 3 可以看出,不同污泥对蚯蚓的毒性大小差别较大,R_{sw}-LC₅₀ (污泥:水)范围在 0.0010 ~ 0.0242 之间,即污泥和水的比在 0.0010 ~ 0.0242 之间时,各供试污泥对蚯蚓的致死率为 50%。污泥毒性越大,其 R_{sw}-LC₅₀ 越低,由此可以看出,在供试的城市污泥中,上海贮泥池污泥对蚯蚓的毒性最大,上海脱水污泥 5 对蚯蚓的毒性最小。城市污泥的浸提液原液对蚯蚓的中毒症状都很明显,未被稀释的污泥浸提液原液处理的蚯蚓 2 ~ 3 h 就开始剧烈弹跳、扭动,环带很快膨大,身体红肿充血,有黄色液体渗出,严重者身体变形、充血、腐烂,死亡率为 100%。被稀释低倍数(10

倍)的较高浓度浸提液处理的蚯蚓 3~4 h 后开始有扭动反应, 随时间延长蚯蚓身体变柔软, 环节松弛, 部分身体糜烂, 并失去逃避能力, 直至死亡; 大部分城市污泥浸提液原液 10 倍稀释液处理蚯蚓 24 h 死亡率达 90%, 48 h 死亡率则为 100%。被稀释高倍数(50 倍和 100 倍)的较低浓度浸提液处理的蚯蚓绝大部分 12 h 后才开始慢慢有反应, 大部分中毒症状也相对较轻, 死亡率介于 0~100% 之间。

污泥农用到土壤中以后, 其中的有毒物质浓度相对变小, 相当于被土壤稀释, 我国规定污泥每年农用的最

大量标准为 20 g/kg 土, 即相当于被土壤稀释 50 倍, 如果折算为污泥水比, 相当于污泥水比为 1:50, 即 0.02, 因此从表 3 结果综合来看, 如果污泥农用的话, 仅上海脱水污泥 4 和上海脱水污泥 5 的 $R_{sw-LC50}$ 大于 0.02, 也就是毒性最小, 其余污泥毒性都很大, 这可能与其中含有较高浓度的各种有毒重金属有很大关系(图 1)。如宁波污泥含有较高浓度的 Cu、Zn、Ni、Cr, 杭州污泥含有较多的 Zn 等。同时由于污泥成分高度复杂, 其中的多种有机污染物及其总有机碳(TOC)含量都有可能对污泥所产生的毒性产生不同程度的影响。

表 3 滤纸接触法的蚯蚓急性毒性试验结果

Table 3 Acute toxicity on earthworm of contact filter paper test

污泥	原液 (1:10)	稀释 10 倍		稀释 50 倍		稀释 100 倍		$R_{sw-LC50}$ (污泥:水)
	24 h 及 48 h	24 h 死亡率	48 h 死亡率	24 h 死亡率	48 h 死亡率	24 h 死亡率	48 h 死亡率	
	死亡率(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
对照	0	0	0	0	0	0	0	-
宁波脱水污泥	100	100	100	80	90	0	10	0.0175
宁波贮泥池污泥	100	100	100	100	100	20	30	0.0104
上海脱水污泥 1	100	100	100	70	80	20	40	0.0012
上海脱水污泥 2	100	100	100	100	100	40	40	0.0068
上海脱水污泥 3	100	100	100	50	60	0	20	0.0119
上海脱水污泥 4	100	90	100	10	20	0	10	0.0223
上海脱水污泥 5	100	100	100	30	30	0	10	0.0242
无锡脱水污泥	100	100	100	60	60	20	30	0.0115
常州脱水污泥 1	100	100	100	90	90	0	10	0.0175
常州脱水污泥 2	100	100	100	30	50	30	40	0.0088
上海贮泥池污泥	100	100	100	100	100	50	50	0.0010
南京企业污泥	100	100	100	90	90	50	50	0.0013

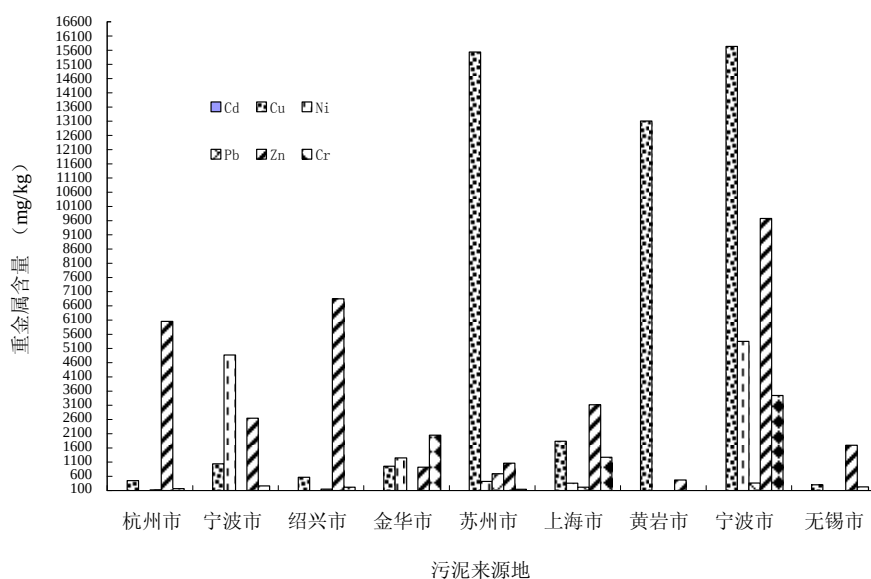


图 1 部分供试污泥中主要重金属的含量

Fig. 1 Contents of heavy metals in tested municipal sludges

2.2 自然土壤法

实验结果见表 4。中毒症状：仅个别有身体萎缩、断裂现象，有的断成多节或节间沟深陷，整条蚯蚓成串珠状，极个别有出血现象、身体变软、环带肿大、充血、有黄色液体渗出。

从表 4 可以看出，所有自然土壤法处理蚯蚓死亡率均为 0，也就是说污泥农用到土壤中对蚯蚓短期内无致死效应，中毒症状与滤纸法处理相比较轻微，仅极个别中毒症状比较明显，出血、黄色液体渗出、环带肿大和断裂。整体来看，各污泥处理对蚯蚓体重增长率的影响差别不是很大，个别污泥处理体重增长率比对照处理低，即对蚯蚓的体重有负增长影响，如宁波贮泥池污泥、上海脱水污泥 1（10 g/kg 土）、上海脱水污泥 5（10 g/kg 土）和常州脱水污泥 2（10 g/kg

土），也就是说这些污泥土壤处理后对蚯蚓表现出毒性较大，其余污泥处理对蚯蚓体重的影响均表现出增加效应。对同一污泥来说，污泥用量增加，对蚯蚓体重增长率影响不同。如宁波脱水污泥、宁波贮泥池污泥、无锡脱水污泥、上海贮泥池污泥和南京企业污泥，随着污泥用量的增加，蚯蚓体重增长率也降低；但上海脱水污泥 1、上海脱水污泥 2、上海脱水污泥 3、上海脱水污泥 4、上海脱水污泥 5、常州脱水污泥 1 和常州脱水污泥 2 则随着污泥用量的增加，蚯蚓体重增长率升高。因此，由以上结果可以看出，由于各种污泥成分复杂，其农用于后对土壤中蚯蚓的影响结果也大不相同。但结合滤纸接触法可以总体看出各种污泥农用于后对土壤中蚯蚓潜在的毒性效应及各种污泥对蚯蚓的毒性大小顺序。

表 4 自然土壤法的蚯蚓急性毒性试验结果

Table 4 Acute toxicity on earthworm of natural soil test

污泥	污泥用量	7 天体重增长率 (%)	14 天体重增长率 (%)	7 天死亡率 (%)	14 天死亡率 (%)
对照	-	-0.072	-0.138	0	0
	-	-0.068	-0.140	0	0
宁波脱水污泥	10 g/kg 土	-0.021	-0.060	0	0
	20 g/kg 土	-0.033	-0.063	0	0
宁波贮泥池污泥	10 g/kg 土	-0.075	-0.149	0	0
	20 g/kg 土	-0.081	-0.141	0	0
上海脱水污泥 1	10 g/kg 土	-0.106	-0.211	0	0
	20 g/kg 土	0.050	0.134	0	0
上海脱水污泥 2	10 g/kg 土	-0.019	-0.054	0	0
	20 g/kg 土	0.017	0.031	0	0
上海脱水污泥 3	10 g/kg 土	-0.053	-0.120	0	0
	20g/kg 土	0.157	0.217	0	0
上海脱水污泥 4	10 g/kg 土	-0.069	-0.125	0	0
	20 g/kg 土	0.095	0.171	0	0
上海脱水污泥 5	10 g/kg 土	-0.082	-0.190	0	0
	20 g/kg 土	0.041	0.094	0	0
无锡脱水污泥	10 g/kg 土	-0.001	-0.009	0	0
	20 g/kg 土	-0.027	-0.084	0	0
常州脱水污泥 1	10 g/kg 土	0.040	0.124	0	0
	20 g/kg 土	-0.020	-0.060	0	0
常州脱水污泥 2	10 g/kg 土	-0.101	-0.236	0	0
	20g/kg 土	0.039	0.089	0	0
上海贮泥池污泥	10 g/kg 土	0.058	0.096	0	0
	20 g/kg 土	0.046	0.073	0	0
南京企业污泥	10 g/kg 土	0.748	0.174	0	0
	20 g/kg 土	0.597	0.163	0	0

2.3 两种试验方法的对比及污泥对蚯蚓毒性的研究展望

从以上试验结果看，滤纸接触法的 $R_{sw}-LC_{50}$ （污

泥：水）均较低，说明测定其致死中浓度时需要稀释的倍数很大，也就是污泥对蚯蚓的毒性很大。可能是因为虽然蚯蚓暴露的时间较短，但接触的污泥浸提液

的浓度较高,即其中含有的有毒物质的浓度较高,污泥中的有毒物质毒性作用浓度相对较高,因而毒性表现较重。污泥的 $R_{sw}-LC_{50}$ 是以水浸提液的形式测定并以污泥与水比计算出来的,与土壤法不同。滤纸接触试验法虽然方便快捷,并且通过实验结果可以初步了解污泥的固有性和对土壤动物的潜在毒性,但其毒性测试使用浓度偏大,远远大于污泥农用的最高限量,对于污泥的毒性评价往往过高,因而对实际污泥的农用及合理处置的指导意义不是很大。同时还因为在实际环境中,污泥通过接触对蚯蚓产生的毒性不仅取决于污泥中有毒污染物本身的固有性,还与污泥中有毒物质在土壤中的行为及在蚯蚓体内的毒物代谢动力学密切相关。因此,土壤法才最接近自然状况下蚯蚓接触污泥中有毒物质的方式,故以土壤法测定的毒性结果来评价污泥的毒性比滤纸法更客观标准。

滤纸法测定的污泥毒性较自然土壤法高很多,原因也可能是自然土壤中成分复杂,污泥中的有毒物质或者其降解产物与其中的某些成分结合,从而降低了污泥中有毒物质的毒性。

总的来说,滤纸接触法和自然土壤法的实验结果相差很大,经统计检验,两者差异很显著,用自然土壤法的实验结果来反映污泥农用对土壤动物的毒性效应是比较可行的。

从本试验污泥对蚯蚓的 $R_{sw}-LC_{50}$ 实测值来看,并与常见的农药 LC_{50} 比较,污泥的 $R_{sw}-LC_{50}$ 要比农药高得多。根据现有的资料,农药对蚯蚓的 LC_{50} 基本上是在 mg/kg 的水平上,也就是 10^{-6} 水平上,很少达到 g/kg 的水平。如朱鲁生等^[30]报道辛硫磷、甲氰菊酯及其混剂用自然土壤法和滤纸法测得的对蚯蚓的 LC_{50} 分别为 8.0 、 1.08 、 $2.63\ mg/kg$ 土和 18.16 、 7.46 、 $11.69\ mg/L$,这3种农药对蚯蚓的毒性属于中毒级。孔志明等^[15]报道用人工土壤法测定的吡虫啉和抑食肼对蚯蚓的 LC_{50} 分别为 $2.3\ mg/kg$ 和 $1000\ mg/kg$ 。虽然农药是化合物,污泥是混合物,它们之间的毒性不能直接来比较,但我们可以通过它们之间的 LC_{50} 或 $R_{sw}-LC_{50}$ 的差异程度看出两者毒性的差异及潜在的毒性的大小,并进一步评价污泥对生态环境的毒性。本试验的污泥 $R_{sw}-LC_{50}$ 在 $0.0010 \sim 0.0242$ 范围内,相当于 10^{-3} 水平,因此本试验结果表明污泥的毒性要远远小于农药的毒性。农药对蚯蚓的毒性比污泥高,可以从以下几方面来理解。污泥在农用之前大部分经过城市污水处理厂的不同工艺处理,另一方面虽然污泥的成分高度复杂,其中含有许多有毒有害物质,但污泥进入土壤后其中的许多有毒有害物质被土壤吸附,因此一定程度上降低了其毒性,同时污泥每年农用都

有最高限量标准,这也在一定程度上降低了其中的有毒物质进入土壤造成的危害。城市污泥对蚯蚓的急性毒性低,但并不能就此忽略其对蚯蚓可能的慢性毒性和对环境的影响。已有研究资料显示,城市污泥中含有大量的有机、无机污染物^[1-2, 6-13],蚯蚓对As等无机物有蓄积作用^[31],对POP等持久性有机污染物也有累积作用。而且,我们并不清楚城市污泥的分子毒理学效应。在城市污泥产生量逐年增加的今天,由于污泥农用的潜在优势,已持续向环境中排放大量有机、无机废弃物,而且这个过程还将继续。因而有必要进一步研究城市污泥及其农用后对蚯蚓的慢性毒性或蓄积毒性,以了解污泥对环境生物毒性毒理,并研究如何在污泥农用过程中控制和减少有毒有机、无机污染物及其降解产物的排放,把污泥农用与控制环境污染有效地结合起来。

参考文献:

- [1] Lega R, Ladwig G, Meresz O, Clement RE, Crawford G, Salemi R, Jones Y. Quantitative determination of organic priority pollutants in sewage sludge by GC/MS. *Chemosphere*, 1997, 34(8): 1705-1712
- [2] Schnaak W, Kuchler Th, Kujawa M, Henschel KP, Süßenbach D, Donau R. Organic contaminants in sewage sludge and their ecotoxicological significance in the agricultural utilization of sludge. *Chemosphere*, 1997, 35(1/2): 5-11
- [3] Harrison EZ. Land application of sewage sludge: an Appraisal of the US Regulation. *Intern. Environ. and Pollut.*, 1999, 11(1): 1-36
- [4] 任剑璋,全浩,狄一安. 污泥中潜在的二恶英污染物质. *环境科学研究*, 1998, 11(3): 11-14
- [5] 王虹,孙志东,董京美. 厌氧消化污泥风干后直接施用于农田的实验研究. *给水排水*, 1998, 5: 19-24
- [6] 陈同斌,黄启飞,高定,郑玉琪,吴吉夫. 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
- [7] 莫测辉,吴启堂,蔡全英,李桂荣,蒋成爱. 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
- [8] 莫测辉,蔡全英,吴启堂,李桂荣,王伯光,田凯. 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
- [9] Shen RY, Luo YM, Zhang GY, Teng Y, Li ZG, Wu LH. Contamination of PAHs in sludge samples from the Yangtze River Delta area. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 373-382
- [10] Parker WJ, Monleith HD. Fate of polynuclear aromatic hydrocarbons and heterocyclic nitrogen compounds in municipal treatment plant systems. *Environ. Res.*, 1995, 67(7): 926-934
- [11] 蔡全英,莫测辉,吴启堂,王伯光,朱夕珍. 水稻土施用城市

- 污泥盆栽作物后土壤中多环芳烃(PAHs)的残留. 土壤学报, 2002, 39(6): 887-891
- [12] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 李振高, 滕应, 钱薇. 长江三角洲地区城市污泥中多氯联苯和有机氯农药含量与组分研究. 土壤, 2006, 38(5): 539-546
- [13] Wild SR, Jones KC. Polycyclic aromatic hydrocarbons uptake by carrots grown in sludge-amended soil. J. Environ. Qual., 1992, 21: 217-225
- [14] Puurtinen HM, Martikainen EAT. Effect of soil moisture on pesticide toxicity to an enchytraeid worm, enchytraeus sp. Arch Environ Contam Toxicol., 1997, 33: 34-41
- [15] 孔志明, 臧宇, 崔玉霞, 张迅, 章敏, 钟远. 两种新型杀虫剂在不同暴露系统对蚯蚓的急性毒性. 生态学杂志, 1999, 18(6): 20-23
- [16] 王振中, 张友梅, 胡觉莲, 郑云有, 胡朝阳. 土壤重金属污染对蚯蚓(*Opisthopora*)影响的研究. 环境科学学报, 1994, 14(2): 236-243
- [17] Arnaud C, Saint-Denis M, Narbonne JF, Soler P, Ribera D. Influences of different standardised test methods on biochemical responses in the earthworm *Eisenia fetida andrei*. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 67-73
- [18] John MA, Evans M, Winters C, Gane M, Stuart DM. Assaying the effects of chemical ameliorants with earthworms and plants exposed to a heavily polluted metalliferous soil. European Journal of Soil Biology, 2002, 38(3-4): 323-327
- [19] Spurgeon DJ, Hopkin SP. Tolerance to zinc in population of the earthworm *Lumbricus rubellus* from uncontaminated and metal-contaminated ecosystems. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1999, 37: 332-337
- [20] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 任丽萍, 宋雪英, 龚平. 菲、芘、1, 2, 4—三氯对蚯蚓的急性毒性效应. 农村生态环境, 2003, 19(1): 36-39
- [21] 刘向辉, 戈峰, 徐张红, 廖尚英, 赵永发, 王学志. 亚硒酸钠对蚯蚓的毒性及蚓体富硒作用的研究. 应用与环境生物学报, 2001, 7(5): 457-460
- [22] Pearce TG, Budd T, Hayhoe JM, Sleep D, Clasper PJ. Earthworms of a land restoration site treated with paper mill sludge: The 7th international symposium on earthworm ecology Cardiff Wales 2002. Pedobiologia, 2003, 47(5/6): 792-795
- [23] Elvira C, Goicoechea M, Sampedro L, Mato S, Nogales R. Bioconversion of solid paper-pulp mill sludge by earthworms. Bioresource Technology, 1996, 57(2): 173-177
- [24] Kevin RB. Utilization of solid paper-mill sludge and spent brewery yeast as a feed for soil-dwelling earthworms. Bioresource Technology, 1993, 44(2): 105-107
- [25] 申荣艳, 骆永明, 孙玉焕, 章钢娅, 李振高, 滕应, 钱薇. 长江三角洲地区城市污泥的综合生物毒性研究. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 54-58, 70
- [26] 邱江平. 蚯蚓与环境保护. 贵州科学, 2000, 18(1): 116-133
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [28] 李银生, 曾振灵, 陈杖榴, 邱江平. 三种兽药对蚯蚓的急性毒性试验. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1065-1069
- [29] 江泉观. 基础毒理学. 北京: 化学工业出版社, 1991
- [30] 朱鲁生, 樊德方, 王玉军. 辛硫磷、甲氧菊酯及其混剂对蚯蚓的毒性及安全性评价. 浙江农业大学学报, 1999, 25(1): 77-80
- [31] 戈峰, 刘向辉, 江炳缜. 蚯蚓对金属元素的富集作用分析. 农业环境保护, 2002, 21(1): 16-18

Acute Toxicity of Municipal Sludges on Earthworms in the Yangtze River Delta Area

SHEN Rong-yan^{1,2}, LUO Yong-ming¹, LI Zhen-gao¹, TENG Ying¹, ZHANG Gang-ya¹

(1 Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China; 2 State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The contact filter paper test and artificial soil test were used to determine the effects of acute and chronic toxicities of municipal sludges from the Yangtze River Delta region of China on earthworms in bronze and violet soils. The results indicated that the toxicities of sludges in the contact filter paper test were higher and faster, and the toxic symptoms were very obvious. The ranges of R_{sw} -LC₅₀ (sludge/water) of all sludges to earthworms in this study ranged from 0.0010 to 0.0242. In all sludges, the toxicity of Shanghai mud pond sludge was the highest and Shanghai dehydrated sludge 5 was the lowest. But most toxic symptoms in the artificial soil test were not obvious and the earthworm mortalities of all treatments were 0. The influential differences among different sludge treatments on the growth rate of earthworm weight were small. The toxicity of sludges treated with soils on earthworms abased enormously.

Key words: Municipal sludge, Agricultural application, Earthworm, Acute toxicity