

某有机废弃场地土壤化学分析与生态毒性诊断研究

金 鑫^{1,2}, 林玉锁², 徐 建^{1,2}, 张胜田², 田 猛², 张孝飞², 俞 飞², 徐亦钢²,
刘 鹏^{1,2}

(1.南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095; 2.国家环保总局南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘 要:本研究采集了某有机废弃场地不同区域的土壤样品,分析了样品中重金属与半挥发性有机物浓度,并对场地土壤进行了生态毒性试验。结果表明,场地土壤无重金属污染,检出的半挥发性有机物有 5 类 33 种,其中有多种具有强致癌性的多环芳烃类污染物。各样品中,J-2 点污染最为严重,J-3 点、J-5 点次之,其他点各有一种目标污染物检出。场地土壤对植物和蚯蚓均显示出较强的毒性效应,对玉米和小白菜种子发芽根伸长抑制率分别达到了 4.71%~70%和 57.03%~100%,小白菜对场地污染较为敏感。J-2 点、J-3 点、J-5 点的蚯蚓 7 d 死亡率达到了 100%;J-1 点、J-4 点和对照在 28 d 试验期内无死亡,J-1 点、J-4 点 28 d 体重增长抑制率为 45.58%和 50.54%,明显高于对照的 13.93%。研究表明,对于目标污染物不明确的污染场地,将化学分析与生态毒性指标相结合是诊断污染场地环境风险的有效手段。

关键词:废弃场地;污染土壤;生态毒性;蚯蚓;玉米;小白菜

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2216-06

Chemical Analysis and Eco-toxicity Diagnosis on Organics Contaminated Soil from an Abandoned Site

JIN Xin^{1,2}, LIN Yu-suo², XU Jian^{1,2}, ZHANG Sheng-tian², TIAN Meng², ZHANG Xiao-fei², YU Fei², XU Yi-gang², LIU Peng^{1,2}

(1.College of Resource and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Sciences, State Environmental Protection Administration, Nanjing 210042, China)

Abstract: Recently, soil environmental problem of abandoned industrial sites is gradually rising in certain area of China. Research on site/soil investigation and eco-toxicity test will contribute to identification of risks related to site/soil contamination. In this study, soil samples were collected from an organics contaminated site. Soil samples were analyzed for concentrations of heavy metals and semi-volatile compounds. Eco-toxicity test using corn (*Zea mays*), cabbage (*Brassica chinensis*), and earthworm (*Eisenia fetida*), were performed. The results showed that various types of contaminants, including pesticides and some carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons, were detected in the soil samples. Heavy metals concentrations in the soil were well below the related environmental quality standards. Soil samples from the J-2 spot were most seriously contaminated, and samples from the J-3 spot and J-5 spots were less contaminated. Only one contaminant was detected in soil samples from other spots. The soil used in the eco-toxicity test showed significant inhibition effects on plant and earthworm growth. The inhibition rates of root elongation of corn and cabbage were 4.71%~70% and 57.03%~100%, respectively. Cabbage seems to be more sensitive to the contamination. The mortality test showed that death rates of earthworm in soil from the J-2, J-3 and J-5 spots all reached 100% within 7 days, while for the contrast spots, i. e. the J-1 spot and J-4 spot, all the earthworm were alive during a test period of 28 days. For soil from the J-1 and J-4 spots, the inhibition rate for body weight of the earthworms after 28 days were 45.58% and 50.54%, respectively, which are obviously higher than 13.93%, the inhabitation rate of the contrast spot. A general conclusion is that chemical analysis in combination with eco-toxicity test may be an effective approach to identify potential hazard and risks related to contaminated soil/site, and furthermore, provide useful information for decision-making of environmental management.

Keywords: abandoned site; contaminated soil; eco-toxicity; earthworm; corn; cabbage

收稿日期:2008-01-10

作者简介:金 鑫 (1978—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事污染场地的调查与修复方面的研究。E-mail:jx_12369@yahoo.com.cn

通讯联系人:林玉锁

长江三角洲地区是我国重要的化工基地，特别是在上世纪 80 和 90 年代，以小化工、小农药、小印染为代表的乡镇企业数量众多、分布广泛。这类企业通常规模小、工艺落后、设备简易且大多无相应的环保设施，长时间的生产造成的场地污染及对周边环境的污染问题十分严重。近年来，随着产业结构的调整及环保要求的提高，这些企业纷纷搬迁或被关停，而遗留的污染场地，由于可能存在较大的环境安全隐患，急待有效的管理和修复。我国污染场地的相关研究还处于初步探索阶段，在场地的污染及其环境风险诊断上缺乏统一、适用的技术规范和评价标准^[1-2]。

场地土壤的污染诊断作为场地管理决策的重要依据，通常依靠场地样品的化学分析数据，但污染场地往往由于生产历史复杂且无可供参考的资料，无法明确目标污染物，给化学分析带来一定的难度，且单纯依靠化学污染物含量也无法对污染物的环境风险做出准确评价^[3]，国内外将化学分析与生态毒性指标相结合来诊断土壤污染已多有应用^[4-9]，许多国家已将生态毒性指标作为污染场地管理决策的重要的参数^[10]。本研究是在某有机废弃场地的初步调查中，结合化学分析和生态毒性方法对场地不同区域的污染状况及环境风险进行初步诊断，并以期探讨该类污染场地的污染快速诊断方法。

1 材料与方法

1.1 供试土壤样品采集

本研究的污染场地原为旧桶交易和处置的加工场地，加工过程中产生的刷洗废液和废渣长期蓄积造成了场地污染。根据现场察看，整个场地污染状况分为不同的区域：洗桶车间区、废桶堆放区和废液废渣堆存区等。分别设置 5 个采样点，采样布点见图 1。场地土壤均为素填土，去除表面覆盖的碎石，采集 0~20 cm 表层混合样，在采样过程中 J-2 号、J-3 号点、J-5 号点均有刺激性气味。采集场地西侧较远的清洁农田土(0~20 cm)为对照。所有样品过 5 mm 筛，在试验前于 4℃保存。

1.2 土壤样品中污染物的化学分析

由于该场地污染状况极为复杂，无法明确污染物种类，在初步调查时选择分析了土壤中主要重金属污染物的含量(方法标准为 EPA 6020A)，及半挥发性有机物(SVOCs)(方法标准除有机磷农药采用 USEPA 8141A，其他污染物均采用 USEPA 8270D)。

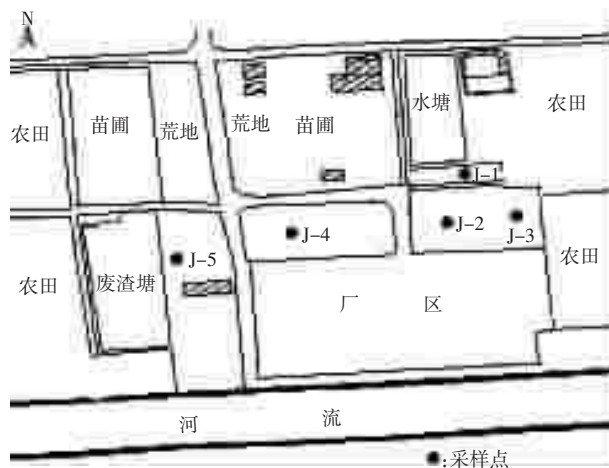


图 1 污染场地采样布点图

Figure 1 Contaminated site sampling location

1.3 植物毒性试验

参照 ISO 和 OECD 指南^[11-13]。试验植物种类为谷类作物与蔬菜，分别选取玉米(*Zea mays*)和小白菜(*Brassica chinensis*)为代表。供试种子购自南京农业大学神州种业公司。挑选外观完好，粒径相似的种子供试验用。试验开始前进行种子发芽率实验，种子发芽率均 $\geq 95\%$ 。

试验时，称取 50 g 供试土壤和对照土壤铺于 9 cm 玻璃培养皿，加入适量去离子水使土壤达到最大持水量的 50%(WHC)。选取 10 粒大小均匀的种子种植其中，盖好玻璃皿，在自然光下培养，温度控制为 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。对照土壤中种子初生根达 2~3 cm 长后终止试验。根据初始试验结果确定玉米根伸长试验周期为 55 h，小白菜为 60 h。终止试验后，计算种子发芽率，并测定根长。样品和对照发芽试验均为 3 个重复。

1.4 蚯蚓毒性试验

蚯蚓毒性试验参照国际标准方法组织草案^[14]。供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)，由南京浦口蚯蚓养殖场提供，是国际上常用的毒性试验的品种，对污染物具有中等的敏感性。试验前在清洁的土壤中预养一段时间后，选择大小相近，个体质量为 (300 ± 10) mg，环带明显的成蚯蚓进行试验。

将试验用蚯蚓放置于湿润试纸上清肠 2 h，取 10 条称质量后放入装有 500 g 供试土壤的 1 L 塑料烧杯中，盖上医用纱布并用橡皮筋套紧。试验前加入适量去离子水保持土壤湿度为最大持水量的 60%，试验过程中定期称质量补水。整个试验期间不投加食物。于试验 3、7、14、28 d 分别记数每个处理的活蚯蚓数并

测定活蚯蚓质量, 移除死亡蚯蚓并计算蚯蚓死亡率。试验设 3 个重复,对照土壤与供试样品同步进行。

2 结果与讨论

2.1 场地土壤中主要污染物种类

由表 1 可见,场地土壤重金属接近背景值,均未超出国家标准,无重金属污染。从现场丢弃的废桶标识可知,废桶的来源多种多样,因此造成场地土壤污染物构成复杂,经过化学分析能检出的半挥发性有机污染物就有 5 大类 33 种之多(见表 2)。从污染物构成来看,其污染应具有同源性。场地 5 个点的土壤样品中均有污染物的检出,其中 J-2 号点检出的污染物种类最多,其次是 J-3 号和 J-5 号点,J-1 号和 J-4 号点最少,只检出 1 种污染物。根据场地资料,J-2 号样点原为洗桶废液倾倒点,应是污染最严重区域。J-5 号点地势较低洼且靠近原厂区排污沟和废液废渣塘,雨天较易被污水漫灌,导致污染物在土壤中沉积,这可能是检出污染物种类较多的原因。从检出污染物种类来看,多为有毒有害物质,其中有 14 种属我国环境优先控制污染物,检出的多环芳烃类中,大部分属强致癌物质,应引起重视。

表 1 土壤样品中重金属含量 (mg•kg ⁻¹)							
Table 1 Content of heavy metal in soil							
采样点	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Cr
J-1	13.3	55.9	1.4	<0.1	24.5	0.2	49.8
J-2	12.9	70.1	1.6	0.2	38.4	0.1	48.8
J-3	11.0	47.6	0.9	<0.1	24.9	0.1	50.5
J-4	21.7	76.0	2.3	0.1	33.4	0.2	57.3
J-5	17.7	62.5	1.8	0.1	29.3	0.2	57.9

2.2 场地土壤的植物毒性效应

2.2.1 场地土壤对种子发芽率影响

从场地采集的土壤样品对植物种子的发芽试验结果见表 3。种子的萌发,除了外界水分这一限制因子,主要依赖自身胚乳内的养分,而且种子对外界的毒害因素有一定的防范功能,只有外界的污染胁迫作用很大,发芽才能被抑制,这在许多毒性试验中已得到证实^[15-16]。由表 3 可知,5 个供试土壤样品对玉米发

表 2 土壤样品中检出的半挥发性有机污染物种类及浓度(mg•kg ⁻¹)						
Table 2 Detected concentration of SVOCs in soil(mg•kg ⁻¹)						
检出项目		土壤样品采集点位				
		J-1	J-2	J-3	J-4	J-5
苯酚类	苯酚	ND	3.52	ND	ND	ND
	2-甲基苯酚	ND	0.38	ND	ND	ND
	3&4-甲基苯酚	ND	2.06	ND	ND	ND
	2,4-二氯苯酚	ND	0.18	ND	ND	ND
	2,3,4,6-四氯苯酚	ND	2.32	ND	ND	ND
	2,4,6-三氯苯酚	ND	0.27	ND	ND	ND
	2,4,5-三氯苯酚	ND	0.25	ND	ND	ND
多环芳烃类	萘	ND	1.89	0.026	ND	ND
	2-甲基萘	ND	2.12	ND	ND	ND
	萘烯	ND	0.57	ND	ND	ND
	萘	ND	2.7	ND	ND	ND
	芴	ND	2.46	ND	ND	ND
	菲	ND	6.8	0.028	ND	ND
	蒽	ND	1.32	0.019	ND	ND
	荧蒽	ND	6.75	0.21	ND	0.021
	芘	ND	6.62	0.23	ND	0.046
	苯并(a)蒽	ND	3.58	0.091	ND	0.025
	屈	ND	3.88	0.16	ND	0.07
	7,12-二甲基苯并(a)蒽	ND	0.2	ND	ND	ND
	苯并(b)&(k)荧蒽	ND	5.46	0.32	ND	0.084
	苯并(a)芘	ND	3.36	0.083	ND	0.059
氯化烃	茚并(1,2,3-cd)芘	ND	3.38	0.19	ND	0.071
	二苯并(a,h)蒽	ND	0.5	0.074	ND	0.038
	苯并(g,h,i)芘	ND	1.38	0.13	ND	0.055
	1,3-二氯苯	ND	0.12	ND	ND	ND
	1,4-二氯苯	ND	0.20	ND	ND	ND
	1,2-二氯苯	ND	0.33	ND	ND	ND
	1,2,4-三氯苯	ND	0.42	ND	ND	ND
	五氯苯	ND	0.71	ND	ND	ND
	1,2,4,5-四氯苯	ND	0.15	ND	ND	ND
	六氯苯	ND	0.51	ND	ND	ND
酞酸酯类	邻苯二甲酸二(2-乙基己酯)	13.5	717	25.7	0.66	1.78
有机磷农药	对硫磷	ND	30.8	ND	ND	ND

注:ND 表示未检出。

芽无明显影响,发芽率均为 100%;除 J-2 号、J-3 号点外,其他土壤对小白菜的发芽率基本正常。J-2 号土壤样品对小白菜发芽率影响最大,为 0%;J-3 号土壤样品次之,发芽率低于 80%。J-2 号点的小白菜发芽受到

表 3 各样点的植物发芽率(与对照发芽数之比)					
Table 3 Percent germination of plant with different site in soil					
植物种类	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5
玉米(55 h)	100%±0	100%±0	100%±0	100%±0	100%±0
小白菜(60 h)	92.59%±6.42%	0±0	77.78%±11.11%	92.59%±6.42%	92.59%±6.42%

完全的抑制,说明该点土壤受到严重污染,具有极强的植物毒性。玉米的发芽对该场地污染不敏感。

2.2.2 场地土壤对植物根伸长的抑制作用

场地污染土壤对植物根伸长试验结果见图 2 所示。

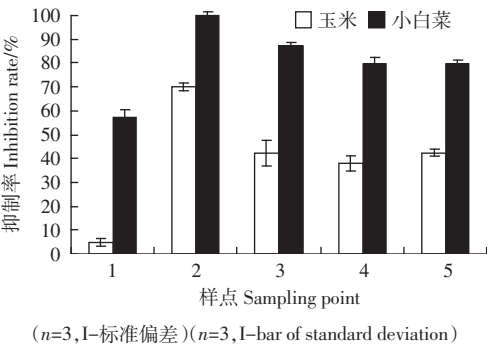


图 2 土壤对植物的根伸长抑制率
Figure 2 Inhibition rate of soil on root elongation of plant

由图 2 可见,所有的土壤样品都对玉米和小白菜的根伸长产生了抑制作用,玉米为 4.71%~70%,小白菜为 57.03%~100%。其中由于 J-2 号点小白菜无种子发芽,所以抑制率为 100%。植物根由于直接接触土壤中污染物,因此敏感性较强。有研究者以土壤投加污染物方式进行的植物毒性试验表明,多环芳烃(PAHs)、氯代烃等有机污染物均对植物的根伸长有明显的抑制作用,抑制率与污染物浓度呈显著线性或对数相关,复合污染表现为协同作用^[16-18]。在实验室试验中单一污染物浓度通常都很高,如茈对小麦根伸长的 IC_{50} 为 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,当茈为 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、菲为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、1,2,4-三氯苯为 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,对白菜根伸长的抑制率分别为 10%、9.3%、14.9%,而复合污染下, $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 茈、 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 菲、 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 1,2,4-三氯苯对白菜根长抑制率为 18.3%,复合污染毒性大大增强。从表 2 知,场地土壤中污染物含量较实验室模拟污染的含量低很多,但呈现的植物毒性却更大,不考虑试验条件的差异,一方面可能是因为场地检出污染物较多,协同作用导致毒性更强,另一方面也可能是因为实际的场地土壤污染情况更复杂,因为本场地研究只分析了半挥发性有机物,很可能存在其他植物毒性更强的污染物,需进一步分析确认。

综合种子发芽率和根伸长抑制率试验结果表明,场地污染土壤的植物毒性强度依次为:J-2 号点>J-3 号点>J-5 号点>J-4 号点>J-1 号点。试验同时表明,不同的植物对污染物的耐受性有较大的差别,本试验中小白菜对场地污染的敏感性明显高于玉米,因此可

以选择小白菜作为本场地土壤污染诊断和修复效果检验的生物诊断敏感物种。

2.3 场地土壤对蚯蚓的毒性效应

2.3.1 场地土壤对蚯蚓的致死效应

试验分别测定了 3、7、14、28 d 的蚯蚓致死率,结果见表 4。

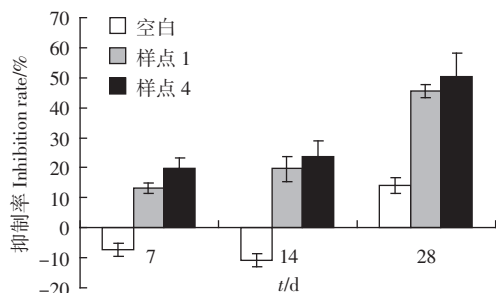
表 4 土壤中蚯蚓死亡率				
Table 4 Morality rate of earthworms in soil				
采样点	死亡率(3 d)	死亡率(7 d)	死亡率(14 d)	死亡率(28 d)
J-1	0	0	0	0
J-2	100%±0	—	—	—
J-3	20%±10%	100%±0	—	—
J-4	0	0	0	0
J-5	6.67%±5.77%	100%±0	—	—

由表 4 可见,有 3 组土壤对蚯蚓产生了极强的致死效应,其他点位及对照在试验期内的蚯蚓死亡率均为零。其中 J-2 号点 3 d 蚯蚓死亡率、J-3 号点及 J-5 号点的 7 d 死亡率均达到了百分之百。由表 2 知,对蚯蚓产生极强致死效应的土壤均有较多种类的污染物检出。研究者以投加单一有机污染物进行的实验室分析结果显示,蚯蚓致死浓度均很高,菲含量为 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时死亡率才达到 10%,茈的浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时仅有 5%的蚯蚓死亡,1,2,4-三氯苯和菲的 IC_{100} 分别为 $350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[19]。而在场地土壤中检出的上述目标污染物含量都很低,不可能产生如此强的急性毒性,其他检出的有机物如苯酚类、邻苯二甲酸二(2-乙基己酯)、对硫磷等物质缺乏相应的对蚯蚓的毒性数据,也无法判断是否为蚯蚓的致死原因,且 J-3 号点、J-5 号点并无苯酚类、对硫磷的检出,也具有强致死毒性,这表明致死毒性可能不是由上述检出污染物造成。由于场地污染除了旧桶所残留的污染物,还有洗桶所用的有机溶剂所致,因此只分析 SVOCs 是不充分的。这 3 个样品具有刺激性气味,也说明样品可能含有其他高毒性的有机溶剂残留,需进一步的分析。

2.3.2 场地土壤对蚯蚓体重增长的抑制效应

试验分别测定了 7、14、28 d 的蚯蚓个体体重变化,计算了其抑制率,结果见图 3 所示。

由图 3 可见,对照土壤中蚯蚓的个体质量在 7、14 d 试验期内有所增长,增长率为 7.31%和 0.85%。但 28 d 整个试验结束后,个体质量降低了 13.93%。其他的 2 个点,蚯蚓个体质量在整个试验期间,均表现为持续下降趋势,28 d 时的个体质量降低率分别达到



(n=3, I-标准偏差) (n=3, I-bar of standard deviation)

图3 土壤中蚯蚓个体体重抑制率变化

Figure 3 Variation of weight of earthworms in soil

了45.58%和50.54%。在自然土壤法的蚯蚓毒性试验中,饥饿状态和污染胁迫是影响蚯蚓个体质量的2个主要因素^[9]。对照样品排除污染胁迫因素,蚯蚓个体质量在2周内持续增加,随后由于食物缺乏,饥饿因素导致在28 d 试验周期结束后个体质量下降。而J-1号点和J-4号点的蚯蚓个体质量在试验期内持续下降,且个体质量抑制率明显高于对照,应该是这两种因素的双重胁迫。

综合蚯蚓毒性试验结果,该场地污染土壤对蚯蚓均呈现出一定毒性,不具备适合蚯蚓生长的条件。毒性最强的点位为J-2号点、J-3号点和J-5号点,应将其列为重点调查区域。

2.4 土壤污染物与生物毒性的相关性

场地土壤的无重金属污染,污染土壤的生物毒性应主要受到有机污染物的影响。从场地土壤的SVOCs分析结果来看,以J-2号点的污染物种类最多,含量相对较高,J-3、J-5号点次之,与只有一种污染物检出的J-1、J-4号点比较,表现出污染种类越多、含量越高,其生物毒性就越高,生态毒性试验结果与该点的实际污染状况较为一致。

场地土壤中检出的菲、芘、1,2,4-三氯苯等污染物已通过试验室模拟污染试验证实其单一或复合污染对动植物都具有一定的毒性效应,但产生较强的毒性如对植物根伸长的高抑制率和蚯蚓的强急性致死时,其所需浓度较该场地土壤中的污染物的检出浓度要高的多,原因可能有以下几点:一是对场地土壤污染物的分析项目不充分,场地可能还存在其他毒性更强的污染物;二是实际污染情况较室内投加污染物模拟污染更为复杂,即使各污染物单一浓度较低,但因污染种类更多,复合毒性也就更大。这也说明如果仅以检出的污染物的化学指标来判断其可能造成的环境危害,会有偏差。

3 结论及建议

(1)化学分析结果表明场地土壤存在较多种类的有机污染物,检出污染物种类较多的区域为J-2号点、J-3号点所在的原洗桶车间和J-5点所在的西废渣塘东侧区域。检出污染物中,以多环芳烃类污染物为多,有些具有强致癌性。污染土壤的生物毒性试验表明,场地土壤普遍具有较强的生物毒性,由于场地紧邻居民区和农田,一方面污染物可通过直接接触和进入食物链对人体健康产生危害,另一方面由于场地土壤已不适宜动植物的生长,存在很大的生态危害,应尽快对污染严重区域采取措施,控制污染的转移,并加强对其他环境介质的监控。场地土壤污染可能存在的其它毒性更强的污染物,需进一步调查分析,尤其是挥发性有机溶剂类化合物。

(2)对该类污染情况较复杂,目标污染物不明确的污染场地的初步诊断过程可以看出,若单纯以有限的化学分析数据来判断污染风险存在明显的不足,而结合一定的生态毒性指标会使诊断结果更为准确。

(3)毒性试验方法的优点是快捷、简单、费用低,在污染场地的初步调查阶段应用这一方法可迅速摸清场地污染边界,由于毒性效应能较为直观地反映场地存在的环境风险,根据环境风险大小确定优先调查区域,提高对污染场地的管理效率。下一步可总结实验室模拟污染的毒性试验结果,进一步筛选敏感物种或引入特征生物标记物指标对场地污染进行更为精确的诊断,最终建立系列的污染场地风险诊断的生态毒性试验标准规范。

参考文献:

- [1] 张胜田,林玉锁,等.中国污染场地管理面临的问题及对策[J].环境科学与管理,2007,32(6):5-7.
ZHANG Sheng-tian, LIN Yu-suo, et al. The facing problems and countermeasures of Chinese contaminated site management[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6):5-7.
- [2] 林玉锁.土壤环境安全及其污染防治对策[J].环境保护,2007,1A:35-38.
LIN Yu-suo. Soil environmental security and countermeasures of pollution prevention and control[J]. *Environmental Protection*, 2007, 1A:35-38.
- [3] 孙铁衍,宋玉芳.土壤污染的生态毒理诊断[J].环境科学学报,2002,22(6):689-694.
SUN Tie-heng, SONG Yu-fang, et al. Eco-toxicological diagnosis of soil pollution[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(6):689-694.
- [4] 宋玉芳,周启星,等.石油污灌渠底泥生态毒性诊断研究[J].应用生态学报,2005,16(1):175-179.

SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Eco-toxicity diagnosis on sediments of petroleum wastewater irrigation channel[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 175-179.

[5] 宋玉芳, 周启星, 等. 石油污灌土壤污染物的残留与生态毒理 [J]. 生态学报, 2004, 23(5): 61-66.

SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Pollutants residue in soil and the eco-toxicity after irrigation with petroleum wastewater[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 61-66.

[6] 宋玉芳, 周启星, 等. 污灌土壤的生态毒性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 638-641.

SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Eco-toxicity of soils irrigated with wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 638-641.

[7] 宋玉芳, 周启星, 等. 土壤整体质量的生态毒性评价[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 130-134.

SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Evaluation of eco-toxicity of integral quality of soils[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 130-134.

[8] Peter K Hankard, Jacob G Bundy, et al. Establishing principal soil quality parameters influencing earthworms in urban soils using bioassays[J]. *Environmental pollution*, 2005, 133: 199-211.

[9] Bertrand Brohon, Cecile Delolme, et al. Complementarity of bioassays and microbial activity measurements for the evaluation of hydrocarbon-contaminated soils quality[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 883-891.

[10] Cathy J Keddy, Joseph C Greene. Review of whole-organism bioassays: soil, freshwater sediment, and freshwater assessment in Canada[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1995, 30: 221-51.

[11] 国家环境保护总局《化学品测试方法》编委会. 化学品测试方法[M]. 北京: 环境科学出版社, 2004.

Editorial Committee of The Guidelines for the testing of chemical. The Guidelines for the testing of chemical[M]. Beijing: Environmental press of China, 2004.

[12] International Organization for Standardization (ISO), 1993. Soil quali-

ty-Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth. ISO11269-1.

[13] OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, 2000. Proposal for Updating Guideline 208; Terrestrial (Non-Target) Plant Test 208A-Seeding Emergence and seeding growth Test. Paris, France.

[14] International Organization for Standardization (ISO), 1993. Soil quality-Determination of the effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*)-part 1: Determination of acute toxicity using artificial soil substance, 11268-1.

[15] Philip B Dorn, Tim E Vipond, et al. Assessment of the acute toxicity of crude oils in soils using earthworms, microtox, and plants[J]. *Chemosphere*, 1998, 37: 845-860.

[16] 刘 宛, 宋玉芳, 周启星, 等. 氯苯胁迫对小麦种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 65-68.

LIU Wan, SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Effect of chlorobenzene-stress on seed germination and seedling growth of wheat[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(2): 65-68.

[17] 万寅婧, 占新华, 等. 土壤中芘、菲、萘、苯对小麦的生态毒性影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 563-566.

WAN Yin-jing, ZHAN Xin-hua, et al. Influence of pyrene, phenanthrene, naphthalene and benzene in soil to wheat[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 563-566.

[18] 宋玉芳, 周启星, 等. 菲、芘、1, 2, 4-三氯苯对土壤高等植物根伸抑制的生态毒性效应[J]. 生态学报, 2002, 22(11): 1946-1949.

SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Eco-toxicological effects of phenanthrene, pyrene and 1, 2, 4-trichlorobenzene in soils on the inhibition of root elongation of higher plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1946-1949.

[19] 宋玉芳, 周启星, 等. 菲、芘、1, 2, 4-三氯苯对蚯蚓的急性毒性效应[J]. 农村生态环境, 2003, 19(1): 6-9.

SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, et al. Effect of acute toxicity of phenanthrene, pyrene and 1, 2, 4-trichlorobenzene on earthworms in soils[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(1): 6-9.