

典型滴滴涕废弃生产场地污染土壤的人体健康风险评估研究*

罗 飞^{1,2} 宋 静^{1,2} 潘云雨^{1,2} 韦 婧^{1,2} 黄玉娟¹ 吴春发¹ 骆永明^{1,2†}

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所),南京 210008)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要 对我国典型滴滴涕(DDT)废弃生产场地的疑似重污染区进行环境调查、污染土壤人体健康风险评估和土壤修复建议目标值计算。结果表明,该场地污水处理池周边的关注污染物主要为 *p*, *p'*-DDT、*p*, *p'*-DDD、*p*, *p'*-DDE、1,4-二氯苯、氯仿和氯苯,临近污水处理池北侧和东侧的区域土壤中污染物垂向迁移明显,其他区域土壤污染物主要分布于 0~50 cm 土层。前 5 种关注污染物的致癌风险均超过 10^{-6} ,部分点位 *p*, *p'*-DDT 和氯苯的非致癌危害指数大于 1。不确定性分析表明,半挥发性有机物 *p*, *p'*-DDT、*p*, *p'*-DDD 和 *p*, *p'*-DDE 经口腔摄入土壤和皮肤接触土壤暴露途径对总风险的贡献率超过 98%,挥发性有机物氯苯、1,4-二氯苯和氯仿经吸入室内空气暴露途径对总风险的贡献率高达 99% 以上。土壤颗粒密度、土壤容重和土壤含水率是敏感参数。*p*, *p'*-DDT、*p*, *p'*-DDD、*p*, *p'*-DDE、氯苯、1,4-二氯苯和氯仿的土壤修复建议目标值分别为 5.84、6.19、4.36、36.2、0.55 和 0.02 mg kg⁻¹。

关键词 健康风险评估;DDT;工业场地;土壤修复建议目标值

中图分类号 X825 **文献标识码** A

滴滴涕,化学名为二氯二苯三氯乙烷(dichlorodiphenyltrichloroethane,简称 DDT),曾广泛用于农业虫害防治、控制传播疟疾和斑疹伤寒等病原微生物。20 世纪 40 年代以来,世界范围内累计生产使用 DDT 约 180 万 t^[1-2]。由于其具有高残留、难降解、高毒性等持久性有机污染物(POPs)的典型特征,20 世纪 70 年代早期,各国纷纷开始禁用 DDT^[3-4]。我国是生产和使用 DDT 的大国,累计用量约 46.4 万 t^[5],占国际用量的 25.8%。1983 年起,我国开始停止生产和限制使用 DDT 杀虫剂,为了履行《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》(POPs 公约),国内绝大多数生产厂家已经停产关闭,目前仅剩 4 家企业进行 DDT 原粉生产和粉剂加工,DDT 仅被容许作为封闭生产三氯杀螨醇的中间体,或用于控制疟疾^[6-7]。

DDT 生产企业在过去数十年的工业活动中,其生产场地、有害废弃物堆放和处理场地、产品存放仓库等均可能受到严重污染。污染土壤若未经清

理或妥善安全地处置,DDT 能够通过环境介质或食物链,最终在人体内蓄积,严重影响身体健康。为了更好地履行 POPs 公约,加强对废弃 DDT 生产场地的有效监管,开展 DDT 废弃生产场地环境调查和风险评估工作显得尤为重要。西方发达国家已经有 30 多年的污染场地调查风险评估和修复的经验,近年来我国学者也开展了污染土壤风险评估的系列工作^[8],并进行了基于人体健康风险评估制定土壤环境质量指导值和标准的研究^[9-10]。但目前国内对于区域环境或场地中 DDT 农药的研究,大多数集中于 DDT 在环境中的迁移转化规律或分布特征,而针对 DDT 工业污染场地人体健康风险评估的研究少有报道。

因此,本文以我国某典型 DDT 废弃生产场地为研究对象,通过资料收集、人员访谈和场地勘察开展场地环境调查。在此基础上,通过布点、采样与分析,掌握了场地中污染物类型、污染程度以及污染物在土壤中的空间分布情况。依据我国环境保

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q02-02)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)创新学者攀登项目(BK2009016)、环保部公益性行业科研专项(2010467016)联合资助

† 通讯作者,E-mail:ymluo@issas.ac.cn

作者简介:罗 飞(1986—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事场地风险评估与修复研究。E-mail:feiluo@issas.ac.cn

收稿日期:2010-08-22;收到修改稿日期:2011-01-18

护部编制的《污染场地风险评估技术导则》(征求意见稿)^[11],结合未来可能的土地利用方式,对场地土壤进行了人体健康风险评估,并分析了暴露途径和模型参数的不确定性,提出了基于风险评估的场地土壤修复建议目标值。以期为我国开展类似工业污染场地土壤的健康风险评估和修复工作提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 场地描述

本研究选择的 DDT 废弃生产场地始建于 20 世纪 60 年代,从 1970 年开始采用三氯乙醛与氯苯缩

合工艺生产 DDT,1983 年停产。DDT 生产车间为水泥地面,占地面积约 150 m²,周边土质地面空地约 1 100 m²。DDT 缩合楼产生的污水通过有毒废水管进入污水处理池(深度约 3 m),经酸碱中和及沉降处理后汇入厂区污水总管网。

由于场地所在区域的地层中存在多层砾石和卵石层,且浅层地下水已经缺失,承压水在数十米深度,故该场地环境调查主要考虑土壤的污染。

1.2 样品采集与分析

根据前期环境调查结果,运用专业判断与网格布点相结合的方法在场地最有可能受到污染的污水处理池周边(约 1 100 m²)布设 8 个采样点位,采样位置如图 1 所示。

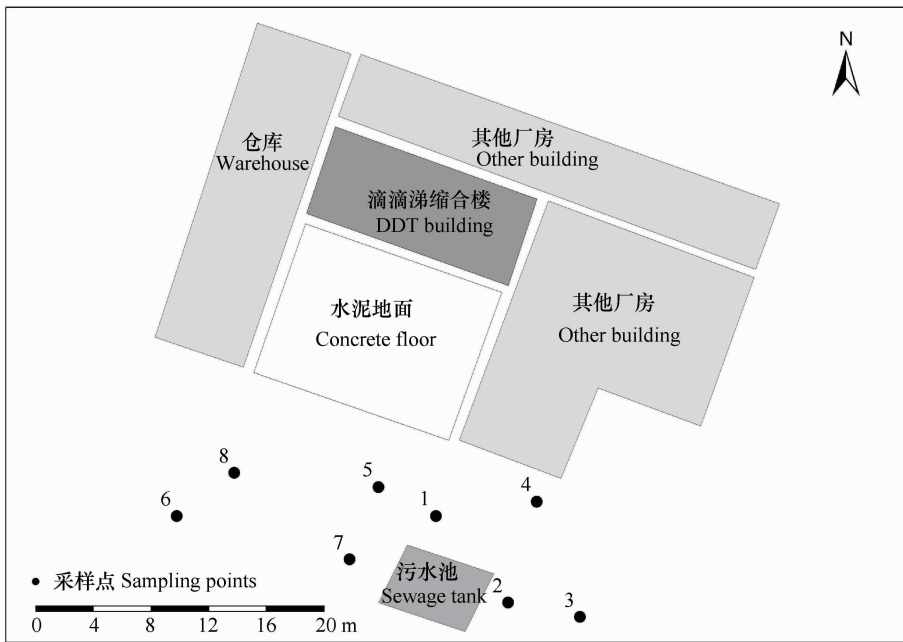


图 1 采样布点图

Fig. 1 Layout of soil sampling points

采用车载回转钻机干法钻孔,直至碰到无法钻进的卵石层为止。钻孔记录表明,该场地 100 cm 以上是填土,夹杂少量砾石,101 ~ 400 cm 为砂质粉土,接着为 100 cm 左右的粉土夹砾石层,501 ~ 800 cm 以砂质粉土为主,800 cm 以下为砾石和卵石层。在表层(0 ~ 20 cm)、亚表层(40 ~ 50 cm)、土壤质地或地层发生变化的层次、有明显污染迹象的层次、污染层次上下的土层以及地下构筑物底部所在的层次等采集土壤样品共 59 个,现场用便携式光离子化检测器(Photo Ionization Detector, PID, 美国华瑞科学仪器

公司)检测挥发性有机污染物(VOCs)。样品装入玻璃瓶后密封,置于低温箱中保存并及时送至实验室分析。首先对 1 号点位的所有样品进行污染物全扫描分析,确定土壤中污染物的种类,作为其他样品分析项目选择的参考依据。污染物的分析方法及检出限如表 1 所示。此外,在 6 号点位 200 ~ 220 cm 深度采集原状土柱样品 1 个,参照《土壤农业化学分析方法》测定土壤的基本理化性质^[12],测得土壤有机质含量为 4.80 g kg⁻¹、土壤容重为 1.69 kg dm⁻³、土壤含水率为 14.44%、土壤颗粒密度为 2.44 kg dm⁻³。

表 1 污染物的分析方法与检出限

Table 1 Analytical methods and detection limits of contaminants

污染物类型 Pollutants	分析项目 Analysis items	分析方法 Analysis methods	检出限 Detection limits
挥发性有机物 VOCs	单环芳烃、卤代脂肪烃、卤代芳烃、三卤甲烷、萘等 Monocyclic aromatics, halogenated aliphatics, halogenated aromatics, trihalomethanes, naphthalene, etc.	USEPA 8260C	0.05 mg kg ⁻¹
半挥发性有机物 SVOCs	苯酚类、多环芳烃类、酞酸酯类、卤代醚类、氯化烃、有机磷/有机氯类农药等 Phenols, polycyclic aromatics, phthalates, halogenated ethers, chlorinated hydrocarbons, organophosphorus / organochlorine pesticides, etc.	USEPA 8270D	0.01 mg kg ⁻¹

2 结果

2.1 危害识别

场地环境调查、布点、采样和分析结果表明,场地土壤受到不同程度的污染,与 DDT 生产有关的主

要污染物为 DDT 及其衍生物、氯苯类和氯仿等。各采样点位污染物的浓度情况如表 2 所示。

选择典型的采样点位分析 DDTs 的垂直空间分布,分别在距污水处理池较远的区域(采样点位与污水池边沿距离 ≥ 5 m)选取 5 号和 6 号点位,在距处理池较近区域(采样点位与污水池边沿距离 < 5 m)

表 2 土壤样品中污染物的浓度

Table 2 Concentrations of pollutants in soil samples (mg kg⁻¹)

点位 Points	<i>p, p'</i> -滴滴涕 <i>p, p'</i> -DDT		<i>o, p'</i> -滴滴涕 <i>o, p'</i> -DDT		<i>p, p'</i> -滴滴涕 <i>p, p'</i> -DDD		<i>p, p'</i> -滴滴涕 <i>p, p'</i> -DDE	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
1	$ND_1^{2)}$ ~ 1 300	355	ND_1 ~ 285	77.5	ND_1 ~ 259	51.5	0.01 ~ 343	67.8
2	0.69 ~ 2 190	463	0.34 ~ 565	82.5	0.13 ~ 247	71.7	ND_1 ~ 221	78.7
3	0.13 ~ 306	102	0.18 ~ 104	35.0	ND_1 ~ 58.5	20.6	ND_1 ~ 114	30.1
4	18.2 ~ 5 280	1 026	2.28 ~ 1 720	301	5.49 ~ 496	162	1.07 ~ 329	72.2
5	0.05 ~ 2 440	304	0.01 ~ 780	119	ND_1 ~ 193	25.0	ND_1 ~ 38.0	4.90
6	0.02 ~ 944	195	ND_1 ~ 223	46.2	ND_1 ~ 446	90.8	ND_1 ~ 108	22.1
7	0.03 ~ 183	54.8	0.01 ~ 40.4	13.1	ND_1 ~ 66.6	23.5	ND_1 ~ 99.2	24.7
8	0.02 ~ 0.14	0.05	ND_1 ~ 0.04	0.01	ND_1	0.01	ND_1 ~ 0.04	0.02

点位 Points	DDTs ¹⁾		氯苯 Chlorobenzene		1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzen		氯仿 Chloroform	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
1	0.09 ~ 1 722	552	6.29 ~ 94.7	27.1	3.51 ~ 109	38.9	$ND_2^{3)}$	0.03
2	1.58 ~ 3 743	696	ND_2 ~ 1 670	76.1	ND_2 ~ 881	195	ND_2	0.03
3	0.52 ~ 468	188	—	—	—	—	—	—
4	27.0 ~ 7 825	1 561	ND_2 ~ 0.98	0.2	ND_2 ~ 0.79	0.26	ND_2 ~ 8.71	1.11
5	0.06 ~ 3 451	454	ND_2 ~ 1.03	0.23	ND_2 ~ 0.77	0.19	ND_2	0.03
6	0.03 ~ 1 720	354	—	—	—	—	—	—
7	0.06 ~ 390	116	—	—	—	—	—	—
8	0.03 ~ 0.23	0.08	—	—	—	—	—	—

注:1) DDTs = *p, p'*-滴滴涕 + *o, p'*-滴滴涕 + *p, p'*-滴滴涕 + *p, p'*-滴滴涕; 2) $ND_1 < 0.01$; 3) $ND_2 < 0.05$ Notes: 1) DDTs = *p, p'*-DDT + *o, p'*-DDT + *p, p'*-DDD + *p, p'*-DDE. 2) $ND_1 < 0.01$. 3) $ND_2 < 0.05$

选取 1 号和 2 号点位,分析土壤中 DDTs 含量的变化趋势,如图 2 所示。结果表明,距污水处理池较远的区域的表层和亚表层土壤受到不同程度的污染,但 50 cm 以下的污染物浓度随土壤深度增加而急剧下降。如 6 号点位表层土壤中 DDTs 浓度高达 $1\ 720\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,50 cm 处浓度降至 $48.2\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,150 cm 处已降为 $0.1\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$;5 号点位表层和亚表层土壤中 DDTs 浓度分别为 $3\ 451$ 和 $1\ 466\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,但 100 cm 处已经降至 $1.5\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,表明 DDT 及其衍生物的垂直迁移并不显著。但距污水处理池较近的区域土壤中 DDTs 存在明显的垂向迁移,处理池的北侧(1 号点位)和东侧(2 号点位)200 ~ 600 cm 深层土壤呈黑褐色且有明显刺鼻气味,污染较重。2 号点位在 450 cm 处土壤中 DDTs 的浓度高达 $3\ 743\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$;1 号点位 550 cm 处土壤中 DDTs 的浓度为 $1\ 722\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,此点位在 800 cm 深处还能检测出 DDTs,浓度达 $25.7\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,可见 DDTs 已造成深层土壤污染。有机污染物在土壤中的环境行为包括吸附与解吸、渗滤、挥发和降解,污染物的迁移过程与污染物自身特性以及土壤有机质类型和含量、水分含量、温度等有关^[13]。本研究场地土壤中 DDTs 的垂向分布可能与污水处理池泄漏有关,在水力作用下促使 DDT 及其衍生物向深层土壤迁移。丛鑫等对某农药企业搬迁遗留场地调查发现,在深度为 500 cm 以下的土壤样品中 DDTs 已低于检出限^[14];但赵娜娜等对 POPs 污染场地中 DDT 的空间分布研究表明,800 cm 深处土壤中 DDTs 平均含量为 $2.21\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,1 000 cm 深处平均含量为 $3.31\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ^[15]。本研究中 1 号点位在 800 cm 深处 DDTs 浓度达到 $25.7\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,可见在污染场地,深层土壤中 DDTs 的浓度也可能处于较高水平,

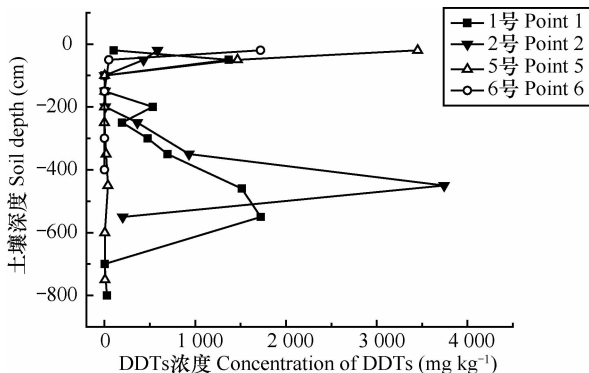


图 2 典型采样点位土壤中 DDTs 浓度的垂向分布图

Fig. 2 Distribution of DDTs concentrations in soil profiles at selected sampling points

在场地环境调查和污染修复中应给予重视。此外,距污水池较近区域的深层土壤中也检测出较高浓度的氯苯、1,4-二氯苯和氯仿。如在 1 号点位 350 cm 深度土壤中 1,4-二氯苯的浓度为 $109\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,2 号点位 450 cm 处土壤中氯苯和 1,4-二氯苯的浓度分别高达 $1\ 670$ 和 $881\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$,4 号点位 350 cm 处氯仿含量为 $8.71\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 。

由于我国环境保护部 2009 年组织编制的《污染场地风险评估技术导则》(征求意见稿)(以下简称《导则》(征求意见稿))中只有部分污染物的土壤筛选值(缺少滴滴涕和滴滴依的筛选值),且尚未正式发布,因此本研究以美国环境保护局工业用地情景下的区域筛选值(Regional Screening Levels, RSL)作为启动场地风险评估的土壤筛选值。区域筛选值的前身为初步修复目标值(Preliminary Remediation Goals, PRGs),它由美国第九区的初步修复目标值与第三区及第六区基于风险的筛选值统一整合而成^[16]。根据 RSL 筛选出进行风险评估的关注污染物(Chemicals of Concern, COCs)为 p 、 p' -DDT、 p 、 p' -DDD、 p 、 p' -DDE、氯苯、1,4-二氯苯和氯仿。各关注污染物的土壤筛选值分别为 7.03 、 7.18 、 5.07 、 $1\ 410$ 、 12.2 和 $1.48\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 。

前期场地环境调查表明,该场地初步规划为独立工业用地,因此在工业用地情景下敏感受体为厂区内的职工,开展风险评估时以成人作为敏感人群评估致癌风险和非致癌风险。

2.2 暴露评估

场地作为工业用地时,工厂的职工为敏感人群,主要暴露途径包括:(1)口腔摄入污染表层土壤;(2)皮肤接触污染表层土壤;(3)吸入受污染表层土壤扩散到室内外的土壤颗粒物;(4)吸入受污染表层土壤挥发至室外的蒸汽;(5)吸入受污染下层土壤挥发至室外的蒸汽;(6)吸入受污染下层土壤挥发至室内的蒸汽。其中,经口腔摄入土壤的暴露量($O_{\text{ISER}}, \text{kg}\ \text{kg}^{-1}\ \text{d}^{-1}$)、皮肤接触土壤的暴露量($D_{\text{CSER}}, \text{kg}\ \text{kg}^{-1}\ \text{d}^{-1}$)、吸入土壤颗粒物的土壤暴露量($P_{\text{ISER}}, \text{kg}\ \text{kg}^{-1}\ \text{d}^{-1}$)、吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量($I_{\text{OVER1}}, \text{kg}\ \text{kg}^{-1}\ \text{d}^{-1}$)、吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量($I_{\text{OVER2}}, \text{kg}\ \text{kg}^{-1}\ \text{d}^{-1}$)、吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物对应的土壤暴露量($I_{\text{IVER}}, \text{kg}\ \text{kg}^{-1}\ \text{d}^{-1}$)可分别用式(1)~式(6)中的模型进行计算^[11]。

$$O_{\text{ISER}} = \frac{O_{\text{SIRa}} \times E_{\text{Da}} \times E_{\text{Fa}} \times A_{\text{BSO}}}{B_{\text{Wa}} \times A_{\text{T}}} \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$O_{\text{CSER}} = \frac{S_{\text{AEa}} \times S_{\text{SARa}} \times E_{\text{Fa}} \times E_{\text{Da}} \times E_{\text{V}} \times A_{\text{BSd}}}{B_{\text{Wa}} \times A_{\text{T}}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$P_{\text{ESER}} = \frac{T_{\text{SP}} \times D_{\text{AIRa}} \times E_{\text{Da}} \times P_{\text{IAF}} \times (f_{\text{spo}} \times E_{\text{FOa}} + f_{\text{spi}} \times E_{\text{Fla}})}{B_{\text{Wa}} \times A_{\text{T}}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$I_{\text{oVER1}} = V_{\text{Fsuoa}} \times \frac{D_{\text{AIRa}} \times E_{\text{FOa}} \times E_{\text{Da}}}{B_{\text{Wa}} \times A_{\text{T}}} \quad (4)$$

$$I_{\text{oVER2}} = V_{\text{Fsuboa}} \times \frac{D_{\text{AIRa}} \times E_{\text{FOa}} \times E_{\text{Da}}}{B_{\text{Wa}} \times A_{\text{T}}} \quad (5)$$

$$I_{\text{iVER}} = V_{\text{Fsubia}} \times \frac{D_{\text{AIRa}} \times E_{\text{Fla}} \times E_{\text{Da}}}{B_{\text{Wa}} \times A_{\text{T}}} \quad (6)$$

式中, O_{SIRa} : 成人每日摄入土壤量, $100 (\text{mg d}^{-1})$; E_{Da} : 成人暴露周期, $25 (\text{a})$; E_{Fa} : 成人暴露频率, $250 (\text{d a}^{-1})$; A_{BSO} : 经口摄入吸收效率因子, 无量纲; B_{Wa} : 成人平均体重, $53.1 (\text{kg})$; A_{Tca} : 致癌效应平均时间, $26\ 280 (\text{d})$; A_{Tnc} : 非致癌效应平均时间, $9\ 125 (\text{d})$; S_{AEa} : 成人暴露皮肤表面积 $2\ 734 (\text{cm}^2)$; S_{SARa} : 成人皮肤表面土壤黏附系数, $0.2 (\text{mg cm}^{-2})$;

E_{V} : 每日皮肤接触事件频率, $1 (\text{次 d}^{-1})$; A_{BSd} : 皮肤吸收效率因子, 无量纲; T_{SP} : 空气中总悬浮颗粒物含量, $0.3 (\text{mg m}^{-3})$; D_{AIRa} : 成人每日空气呼吸量, $15 (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$; P_{IAF} : 吸入土壤颗粒物在体内滞留比例, 0.75 ; f_{spo} : 室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 0.5 ; E_{FOa} : 成人室外暴露频率, $62.5 (\text{d a}^{-1})$; f_{spi} : 室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 0.8 ; E_{Fla} : 成人室内暴露频率, $187.5 (\text{d a}^{-1})$; V_{Fsuoa} : 表层土壤中污染物挥发对应的室外空气中的土壤含量 (kg m^{-3}); V_{Fsuboa} : 下层土壤中污染物挥发对应的室外空气中的土壤含量 (kg m^{-3})。

模型参数从场地获取的有: 表层土壤 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 中污染物浓度、表层污染土壤下表面到地表距离、下层土壤 (污染物最大浓度所对应的土层) 中污染物浓度、下层污染土壤上表面到地表距离、土壤有机质含量、土壤容重、土壤含水率、土壤颗粒密度和土壤污染区近地面年平均风速 (当地气象资料值为 330 cm s^{-1}), 其余参数全部采用《导则》(征求意见稿) 中的推荐默认值。

2.3 毒性评估

通过查询《导则》(征求意见稿) 获得关注污染物的毒性参数, 见表 3 所示。

表 3 关注污染物的毒性参数
Table 3 Toxicity parameters of the COCs

参数 Parameters	单位 Unit	污染物名称 Pollutants					
		<i>p</i> , <i>p'</i> -滴滴涕 <i>p</i> , <i>p'</i> -DDT	<i>p</i> , <i>p'</i> -滴滴滴 <i>p</i> , <i>p'</i> -DDD	<i>p</i> , <i>p'</i> -滴滴依 <i>p</i> , <i>p'</i> -DDE	氯苯 Chlorobenzene	1,4-二氯苯 1, 4-dichlorobenzen	氯仿 Chloroform
经口摄入致癌斜率因子 Oral slope factor	kg d mg^{-1}	3.40E-01	2.40E-01	3.40E-01	—	5.40E-03	3.10E-02
呼吸吸入致癌斜率因子 Inhalation slope factor	kg d mg^{-1}	3.40E-01	2.42E-01	3.40E-01	—	3.85E-02	8.05E-02
皮肤接触致癌斜率因子 Dermal slope factor	kg d mg^{-1}	3.40E-01	2.40E-01	3.40E-01	—	5.40E-03	3.10E-02
经口摄入参考剂量 Oral reference dose	$\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$	5.00E-04	—	—	2.00E-02	7.00E-02	1.00E-02
呼吸吸入参考剂量 Inhalation reference dose	$\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$	5.00E-04	—	—	1.43E-02	2.29E-01	2.80E-02
皮肤接触参考剂量 Dermal reference dose	$\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$	5.00E-04	—	—	2.00E-02	7.00E-02	1.00E-02
皮肤吸收效率因子 Dermal absorption factor	无量纲 Unitless	0.03	0.1	0.1	0.1 ¹⁾	0.1 ¹⁾	0.1 ¹⁾
口摄吸收效率因子 Oral absorption factor	无量纲 Unitless	1	1	1	1	1	1

注: 1) 由于《导则》(征求意见稿) 缺乏氯苯、1,4-二氯苯和氯仿的皮肤吸收效率因子的数据, 以上数值参考我国台湾《土壤及地下水污染场址健康风险评估评析原则》中相关规定, 针对挥发性有机物取值均为 $0.1^{[17]}$ Note: 1) Due to the lack of data of dermal absorption factor of chlorobenzene, 1,4-dichlorobenzen and chloroform in *Technical Guidelines for Risk Assessment of Contaminated Sites (draft)*, the related data in the table are cited for reference from *Principles for Health Risk Assessment of Soil and Groundwater in Contaminated Sites*, Taiwan, China. For all the volatile organic compounds, the set values are 0.1

2.4 风险表征

2.4.1 风险值计算 对关注污染物浓度高于土壤筛选值的点位进行风险值计算,单一污染物经所有暴露途径的致癌风险值(C_{Rn} ,无量纲)和非致癌危害指数(H_{Qn} ,无量纲)可分别通过式(7)和式(8)计算,所有关注污染物经所有暴露途径的总致癌风险值(C_{Rsum} ,无量纲)和非致癌危害指数(H_{Qsum} ,无量纲)可分别通过式(9)和式(10)计算。

$$C_{Rn} = C_{sur} \times (O_{ISER} \times S_{Fo} + D_{CSER} \times S_{Fd} + P_{ISER} \times S_{Fi} + I_{oVER1} \times S_{Fi}) + C_{sub} \times (I_{oVER2} + I_{iVER}) \times S_{Fi} \quad (7)$$

$$H_{Qn} = C_{sur} \times \left(\frac{O_{ISER}}{R_{IDo}} + \frac{D_{CSER}}{R_{IDd}} + \frac{P_{ISER}}{R_{IDi}} + \frac{I_{oVER1}}{R_{IDi}} \right) + C_{sub} \times \left(\frac{I_{oVER2}}{R_{IDi}} + \frac{I_{iVER}}{R_{IDi}} \right) \quad (8)$$

$$C_{Rsum} = \sum_1^n C_{Rn} \quad (9)$$

$$H_{Qsum} = \sum_1^n H_{Qn} \quad (10)$$

式中, C_{sur} :表层土壤中污染物浓度(mg kg^{-1}); C_{sub} :下层土壤中污染物浓度(mg kg^{-1}); S_{Fo} :经口摄入致癌斜率因子(kg d mg^{-1}); S_{Fi} :呼吸吸入致癌斜率因子(kg d mg^{-1}); S_{Fd} :皮肤接触致

癌斜率因子(kg d mg^{-1}); R_{IDo} :经口摄入参考剂量($\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$); R_{IDd} :呼吸吸入参考剂量($\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$); R_{IDi} :皮肤接触参考剂量($\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)。污染场地关注污染物的致癌和非致癌风险值分别如表4和表5所示。

计算结果表明,污水处理池东侧2号点位,4号、5号和6号点位的致癌和非致癌风险较高。污染场地内每个点位(8号除外,因为污染物浓度低于土壤筛选值,未计算风险)土壤中的 p 、 p' -DDT、 p 、 p' -DDD和 p 、 p' -DDE经所有暴露途径的致癌风险均已超过可接受风险水平(10^{-6});污水处理池东侧(2号)和北侧(1号)土壤中检出1,4-二氯苯和氯仿,其致癌风险也不同程度地超过 10^{-6} 。场地内所有关注污染物经所有暴露途径的总致癌风险均远远超出可接受风险水平(10^{-6}),最高达到 5.07×10^{-4} (2号点位)。

污水处理池东侧2号点位,4号、5号和6号点位土壤中 p 、 p' -DDT经所有暴露途径的非致癌危害指数超过可接受风险水平(1);2号点位土壤中检出氯苯,其非致癌危害指数也大于1。其余点位土壤中的 p 、 p' -DDT、1,4-二氯苯和氯仿的非致癌风险均在可接受范围内。场地内所有关注污染物经所有暴露途径的非致癌危害指数部分超过可接受风险水平,最大值为12.9(2号点位)。

表4 污染场地关注污染物的致癌风险值

Table 4 Carcinogenic risks of the COCs at the contaminated site

污染物 Pollutants	点位编号 Sampling points						
	1	2	3	4	5	6	7
p 、 p' -滴滴涕 p 、 p' -DDT	8.62E-06	5.89E-05	3.05E-05	7.79E-05	4.18E-04	1.62E-04	3.13E-05
p 、 p' -滴滴滴 p 、 p' -DDD	1.05E-06	1.13E-05	6.95E-06	5.87E-06	3.11E-05	7.20E-05	1.08E-05
p 、 p' -滴滴依 p 、 p' -DDE	4.79E-06	2.34E-05	2.61E-05	3.89E-06	8.70E-06	2.47E-05	2.26E-05
1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzen	6.52E-05	4.14E-04	—	—	—	—	—
氯仿 Chloroform	—	—	—	1.36E-04	—	—	—
总致癌风险 Total cancer risk	7.97E-05	5.07E-04	6.35E-05	2.23E-04	4.58E-04	2.58E-04	6.48E-05

表5 污染场地关注污染物的非致癌风险值

Table 5 Non-carcinogenic risks of the COCs at the contaminated site

污染物 Pollutants	点位编号 Sampling points						
	1	2	3	4	5	6	7
p 、 p' -滴滴涕 p 、 p' -DDT	1.46E-01	9.97E-01	5.17E-01	1.32E+00	7.08E+00	2.74E+00	5.31E-01
氯苯 Chlorobenzene	—	1.18E+01	—	—	—	—	—
1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzen	2.13E-02	1.35E-01	—	—	—	—	—
氯仿 Chloroform	—	—	—	1.73E-01	—	—	—
非致癌危害指数 Hazard index	1.67E-01	1.29E+01	5.17E-01	1.49E+00	7.08E+00	2.74E+00	5.31E-01

2.4.2 暴露风险贡献率分析 参考《导则》(征求意见稿)中相关规定,计算了每个点位单一污染物经不同暴露途径的风险贡献率。结果表明,贡献率根据关注污染物类型不同而呈现不同的规律。表6给出了2号与4号典型点位关注污染物经不同暴露途径的致癌和非致癌风险贡献率。对于 DDT 及其衍生物等半挥发性有机氯农药,经口腔摄入土壤和皮肤接触土壤暴露途径对总风险的贡献率超过 98%。 p, p' -DDT 经口腔摄入土壤暴露途径的风险贡献率在 84% 左右, p, p' -DDD 和 p, p' -DDE 经

口腔摄入土壤暴露途径的风险贡献率为 63% 左右,经皮肤接触土壤暴露途径的贡献率大于 35%。而对于氯苯、1,4-二氯苯和氯仿等挥发性有机物,经吸入室内空气暴露途径对总风险的贡献率高于 99%。因此,对该污染场地进行风险控制与管理时,应避免或减少 p, p' -DDT、 p, p' -DDD 和 p, p' -DDE 通过口腔摄入和皮肤接触土壤途径而暴露,氯苯、1,4-二氯苯和氯仿通过吸入室内空气途径而暴露,从而降低以上关注污染物对人体的健康风险。

表 6 单一污染物经不同暴露途径的致癌和非致癌风险贡献率

Table 6 Contribution of individual exposure pathway to the carcinogenic and non-carcinogenic risks of COCs (%)

贡献率类别 ¹⁾ Contribution type	p, p' -滴滴涕 ²⁾ p, p' -DDT	p, p' -滴滴涕 ²⁾ p, p' -DDD	p, p' -滴滴涕 ²⁾ p, p' -DDE	氯仿 ³⁾ Chloroform
P_{CROIS}	84.06	63.09	63.00	0.00
P_{CRDCS}	14.28	35.72	35.67	0.00
P_{CRPIS}	1.03	0.78	0.77	0.00
P_{CRloV}	0.10	0.09	0.10	0.06
P_{CRHv}	0.53	0.32	0.45	99.94

贡献率类别 Contribution type	p, p' -滴滴涕 ²⁾ p, p' -DDT	氯苯 ²⁾ Chlorobenzene	1,4-二氯苯 ²⁾ 1,4-dichlorobenzen	氯仿 ³⁾ Chloroform
P_{HQOIS}	84.06	0.00	0.00	0.00
P_{HQDCS}	14.28	0.00	0.00	0.00
P_{HQPIS}	1.03	0.00	0.00	0.00
P_{HQloV}	0.10	0.05	0.05	0.06
P_{HQHv}	0.53	99.95	99.95	99.94

注:1) P_{CROIS} (P_{HQOIS}) 表示单一污染物经口摄入土壤暴露途径的致癌(非致癌)风险贡献率, P_{CRDCS} (P_{HQDCS}) 表示单一污染物经皮肤接触土壤暴露途径的致癌(非致癌)风险贡献率, P_{CRPIS} (P_{HQPIS}) 表示单一污染物经吸入土壤颗粒物暴露途径的致癌(非致癌)风险贡献率, P_{CRloV} (P_{HQloV}) 表示单一污染物经吸入室外空气暴露途径的致癌(非致癌)风险贡献率, P_{CRHv} (P_{HQHv}) 表示单一污染物经吸入室内空气暴露途径的致癌(非致癌)风险贡献率;2) 污染物来自 2 号点位;3) 污染物来自 4 号点位 Notes: 1) P_{CROIS} (P_{HQOIS}) means contribution of the exposure pathway of oral ingestion of an individual contaminant to the carcinogenic (non-carcinogenic) risk, P_{CRDCS} (P_{HQDCS}) means contribution of the exposure pathway of dermal contact with an individual contaminant to the carcinogenic (non-carcinogenic) risk, P_{CRPIS} (P_{HQPIS}) means contribution of the exposure pathway of particle inhalation of an individual contaminant to the carcinogenic (non-carcinogenic) risk, P_{CRloV} (P_{HQloV}) means contribution of the exposure pathway of outdoor air inhalation of an individual contaminant to the carcinogenic (non-carcinogenic) risk, P_{CRHv} (P_{HQHv}) means contribution of the exposure pathway of indoor air inhalation of an individual contaminant to the carcinogenic (non-carcinogenic) risk. 2) Pollutants came from Sampling Point 2. 3) Pollutant came from Sampling Point 4

2.4.3 模型参数敏感性分析 《导则》(征求意见稿)中采用敏感性比例表征模型参数的敏感性,对单一暴露途径风险贡献率超过 20% 的暴露途径,进行相关参数的敏感性分析。根据 2.4.2 节中不同暴露途径的风险贡献率,选择具有代表性的有机氯

农药 p, p' -DDT 对经口腔摄入土壤暴露途径、 p, p' -DDE 对经皮肤接触土壤暴露途径的模型参数进行分析;选择挥发性有机物氯仿对吸入室内空气暴露途径的模型参数进行分析。不同模型参数对致癌和非致癌风险值的敏感性比例如表 7 所示。

表 7 模型参数对致癌和非致癌风险值的敏感性比例

Table 7 Parameter sensitivity ratios of carcinogenic and non-carcinogenic risks

污染物 Pollutants	暴露途径 Exposure pathways	参数名称 ¹⁾ 及敏感性比例 Parameters and sensitivity ratios								
p, p' -滴滴涕 p, p' -DDT	口腔摄入土壤 Oral ingestion	E_{Da}	E_{Fa}	O_{SIRa}	B_{Wa}	A_{Tca}	A_{Tnc}			
		1.00	1.00	1.00	-0.95 ²⁾	-0.95 ²⁾	-0.95 ²⁾			
p, p' -滴滴依 p, p' -DDE	皮肤接触土壤 Dermal contact	E_{Da}	E_{Fa}	E_v	S_{ERa}	S_{SARa}	A_{Tca}	B_{Wa}	H_a	
		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-0.95 ²⁾	-0.47 ²⁾	0.41	
氯仿 Chloroform	吸入室内空气 Indoor air inhalation	ρ_s	ρ_b	P_{ws}	E_{Da}	E_{Fla}	D_{AIRa}	A_{Tca}	A_{Tnc}	
		29.42	-18.15 ²⁾	-8.68 ²⁾	1.00	1.00	1.00	-0.95 ²⁾	-0.95 ²⁾	
		L_B	E_R	B_{Wa}	f_{om}	θ_{acrack}	η	L_{crack}	θ_{wcrack}	
		-0.95 ²⁾	-0.95 ²⁾	-0.95 ²⁾	-0.40 ²⁾	0.17	0.05	-0.05 ²⁾	0.00	

注:1)部分参数的含义参见 2.2 节,其余参数含义如下: H_a :成人平均身高, ρ_s :土壤颗粒密度, ρ_b :土壤容重, P_{ws} :土壤含水率, L_B :室内空间体积与蒸气入渗面积之比, E_R :室内空气交换速率, f_{om} :土壤有机质含量, θ_{acrack} :地基与墙体裂隙中空气体积比, η :地基和墙体裂隙表面积所占比例, L_{crack} :室内地基厚度, θ_{wcrack} :地基或墙体裂隙中水体积比。2)表示参数取值与风险值呈负相关关系 Notes: 1) Please refer to Section 2.2 for definitions of some parameters and definitions of the rest are as follows: H_a : Height for adults; ρ_s : Soil particle density; ρ_b : Soil bulk density; P_{ws} : Soil water content; L_B : Enclosed space volume/infiltration area ratio; E_R : Enclosed-space air exchange rate; f_{om} : Fraction of organic matter in soil; θ_{acrack} : Volumetric air content in foundation/wall cracks; η : Areal fraction of cracks in foundations/walls; L_{crack} : Enclosed space foundation or wall thickness; θ_{wcrack} : Volumetric water content in foundation/wall cracks. 2) Parameter values are negatively correlated with risk values

结果表明,计算经口腔摄入土壤暴露途径的致癌和非致癌风险,以及皮肤接触土壤暴露途径的致癌风险时,模型参数敏感性比例均 ≤ 1 ,参数敏感性较弱,场地风险评估时可选择默认值进行计算;而计算吸入室内空气暴露途径的致癌和非致癌风险时,土壤颗粒密度、土壤容重和土壤含水率参数敏感性比例较大,对风险值的影响显著,因此在进行风险评估时必须从场地本身获取以上参数,其他参数则可选择默认值进行计算。

2.5 确定土壤修复建议目标值

土壤修复建议目标值参考《导则》(征求意见稿)中相关方法计算,单一污染物的可接受致癌风

险为 10^{-6} ,可接受危害商值为 1。分别计算基于致癌风险和非致癌风险的土壤修复建议目标值,两者中的较低者即为场地土壤修复建议目标值。污染场地基于所有暴露途径的致癌和非致癌风险的土壤修复建议目标值如表 8 所示。

计算结果表明,场地所有污染物的土壤修复建议目标值均低于美国环境保护局工业用地情景下的区域筛选值。这是由于我国风险评估的模型选择以及暴露参数取值的差异所造成。例如,我国《导则》(征求意见稿)成人平均体重推荐值为 53.1 kg,致癌效应平均时间为 72 a,而美国计算区域筛选值时相应参数的取值分别为 70 kg 和 70 a^[11,18]。

表 8 场地基于致癌和非致癌风险的土壤修复建议目标值

Table 8 Carcinogenic and non-carcinogenic risk-based recommended remediation goals (mg kg⁻¹)

污染物 Pollutants	p, p' -滴滴涕 p, p' -DDT	p, p' -滴滴滴 p, p' -DDD	p, p' -滴滴依 p, p' -DDE	氯苯 Chlorobenzene	1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzen	氯仿 Chloroform
致癌 Carcinogens	5.84 ¹⁾	6.19 ¹⁾	4.36 ¹⁾	—	0.55 ¹⁾	0.02 ¹⁾
非致癌 Non-Carcinogens	345	—	—	36.2 ¹⁾	1601	16.3

注:1)表示场地中该污染物的土壤修复建议目标值 Note: 1) indicates the recommended remediation goals of the soil at the site

3 结 论

1) 某典型 DDT 废弃生产场地污水处理池周边的关注污染物包括 p, p' -DDT、 p, p' -DDD、 p, p' -DDE、氯苯、1,4-二氯苯和氯仿。由于污水处理池渗

漏,临近处理池北侧和东侧的区域土壤中污染物垂向迁移明显,距处理池较远区域土壤的污染物主要分布于 0~50 cm 土层。

2) 污染场地大部分调查点位的致癌、非致癌风险较高。场地内 p, p' -DDT、 p, p' -DDD、 p, p' -DDE、1,4-二氯苯和氯仿的致癌风险均超过可接受风险水

平(10^{-6})。部分点位的 p , p' -DDT 和氯苯的非致癌危害指数大于 1, 氯仿和 1,4-二氯苯的非致癌风险均在可接受范围内。单一污染物经不同暴露途径的风险贡献率与关注污染物类型有关。对于半挥发性有机氯农药 p , p' -DDT、 p , p' -DDD 和 p , p' -DDE, 经口腔摄入土壤和皮肤接触土壤暴露途径对总风险的贡献率超过 98%; 对于挥发性有机物氯苯、1,4-二氯苯和氯仿, 经吸入室内空气暴露途径对总风险的贡献率高达 99% 以上。

3) 计算经口腔摄入土壤暴露途径的致癌和非致癌风险, 以及皮肤接触土壤暴露途径的致癌风险时, 模型参数可选择默认值; 而计算吸入室内空气暴露途径的致癌风险和非致癌风险时, 土壤颗粒密度、土壤容重和土壤含水率是敏感参数, 应从场地获取。

4) 关注污染物 p , p' -DDT、 p , p' -DDD、 p , p' -DDE、1,4-二氯苯和氯仿的土壤修复建议目标值分别为 5.84、6.19、4.36、36.2、0.55 和 0.02 mg kg^{-1} , 均比美国环境保护局工业用地情景下的区域筛选值严格。

致谢 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室的徐正国和刘增俊也参与了本研究的部分工作, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological profile for DDT, DDE, and DDD. 2002 - 09 - 01 [2010 - 07 - 02]. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp35.html>
- [2] Wikipedia. DDT. 2010 - 06 - 09 [2010 - 07 - 02]. <http://en.wikipedia.org/wiki/DDT>
- [3] Turusov V, Rakitsky V, Tomatis L. Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT): Ubiquity, persistence, and risks. *Environmental Health Perspectives*, 2002, 110(2): 125—128
- [4] 姜安玺, 刘丽艳, 李一凡, 等. 我国持久性有机污染物的污染与控制. *黑龙江大学自然科学学报*, 2004, 21(2): 97—101. Jiang A X, Liu L Y, Li Y F, et al. Pollution and control of persistent organic pollutant in China (In Chinese). *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2004, 21(2): 97—101
- [5] 韩文亚, 黄俊, 余刚, 等. 我国持久性有机污染物类废弃杀虫剂库存的清单调查方法学研究. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5): 1 615—1 618. Han W Y, Huang J, Yu G, et al. The inventory methodology for obsolete pesticide stocks of persistent organic pollutants (POPs) in China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1 615—1 618
- [6] 余刚, 黄俊, 张彭义. 持久性有机污染物: 备受关注的全球性环境问题. *环境保护*, 2001(4): 37—39. Yu G, Huang J, Zhang P Y. Persistent organic pollutants: One of the important global environmental problems (In Chinese). *Environmental Protection*, 2001(4): 37—39
- [7] 易爱华. DDT 在污染场地中的迁移分布规律研究. 陕西: 西北农林科技大学, 2007. Yi A H. Research on DDT transport and transform in contaminated soil (In Chinese). Shaanxi: Northwest A&F University, 2007
- [8] 骆永明. 中国主要土壤环境问题与对策. 南京: 河海大学出版社, 2008: 10—18. Luo Y M. Soil environmental problems and solutions in China (In Chinese). Nanjing: Hohai University Press, 2008: 10—18
- [9] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 II. 污染土壤的健康风险评估. *土壤学报*, 2006, 43(1): 142—151. Li Z B, Luo Y M, Song J, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards II. Health risk assessment of polluted soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 142—151
- [10] 王国庆, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 IV. 保护人体健康的土壤苯并[a]芘的临界浓度. *土壤学报*, 2007, 44(4): 603—611. Wang G Q, Luo Y M, Song J, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards IV. Soil Benzo[a]pyrene threshold concentrations based on human health risk assessment (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 603—611
- [11] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则 (征求意见稿). 2009 - 09 - 29 [2010 - 07 - 02]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/200910/t20091022_175070.htm. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites (draft) (In Chinese). 2009 - 09 - 29 [2010 - 07 - 02]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/200910/t20091022_175070.htm
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106—109, 266—290. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 106—109, 266—290
- [13] 胡泉, 樊耀波, 王敏健. 影响有机污染物在土壤中的迁移、转化行为的因素. *环境科学进展*, 1999, 7(5): 14—22. Hu X, Fan Y B, Wang M J. Factors affecting behavior and fate of organic pollutants in soil (In Chinese). *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(5): 14—22
- [14] 丛鑫, 朱书全, 薛南冬, 等. 有机氯农药企业搬迁遗留场地土壤中污染物的垂向分布特征. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 351—355. Cong X, Zhu S Q, Xue N D, et al. Vertical distribution of pollutants in soils of a former organochlorine pesticide manufacturing field (In Chinese). *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(3): 351—355
- [15] 赵娜娜, 黄启飞, 王琪, 等. 滴滴涕在我国典型 POPs 污染场地中的空间分布研究. *环境科学学报*, 2007, 27(10): 1 669—1 674. Zhao N N, Huang Q F, Wang Q, et al. Spatial distribution of DDT in a typical contaminated site (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(10): 1 669—1 674

- [16] USEPA. Regional screening levels (RSL) for chemical contaminants at superfund sites. 2010-03-01 [2010-07-02]. <http://www.epa.gov/region09/superfund/prg/index.html>
- [17] “行政院环境保护署”. 土壤及地下水污染场址健康风险评估评析原则. EPA-93-G102-02-211. 中国台北, 2005. “Environmental Protection Administration Executive Yuan”.
- Principles for health risk assessment of soil and groundwater in contaminated sites (In Chinese). EPA-93-G102-02-211. Taipei, China, 2005
- [18] USEPA. Regional screening table-User's guide. 2010-03-01 [2010-07-02]. http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration_table/usersguide.htm

HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT OF CONTAMINATED SOIL: A CASE STUDY OF A FORMER DDT MANUFACTURING SITE

Luo Fei^{1,2} Song Jing^{1,2} Pan Yunyu^{1,2} Wei Jing^{1,2} Huang Yujuan¹ Wu Chunfa¹ Luo Yongming^{1,2†}

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Site investigation, human health risk assessment and derivation of recommended soil remediation goal were conducted in suspected DDT polluted area of a former DDT manufacturing site in China. It was found that the chemicals of concern (COCs) in the area around the wastewater treatment tank of the plant were mainly *p*, *p'*-DDT, *p*, *p'*-DDD, *p*, *p'*-DDE, 1,4-dichlorobenzene, chloroform and chlorobenzene. In the soil on the north and east sides of the tank vertical translocation of COCs was obvious, whereas in other parts of the site COCs were only found in the 0~50 cm soil layer. Of the first five COCs, carcinogenic risk was beyond 10^{-6} . At some points non-carcinogenic hazard index of *p*, *p'*-DDT and chlorobenzene exceeded 1. Uncertainty analysis shows that soil ingestion and dermal contact accounted for more than 98% of the total risk of semi-volatile organic compounds such as *p*, *p'*-DDT, *p*, *p'*-DDD and *p*, *p'*-DDE, whereas, indoor air inhalation for more than 99% of the total risk of volatile organic compounds such as chlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene and chloroform. Soil particle density, soil bulk density, and soil water content were sensitive parameters. The recommended soil remediation goal of *p*, *p'*-DDT, *p*, *p'*-DDD, *p*, *p'*-DDE, chlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene, and chloroform are 5.84, 6.19, 4.36, 36.2, 0.55, and 0.02 mg kg⁻¹, respectively.

Key words Human health risk assessment; DDT; Industrial site; Recommended soil remediation goal