

某在产企业土壤污染风险评估与风险管控研究

殷 瑶, 张 祥

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 以某在产企业土壤地下水污染为研究对象,开展人体健康风险评估工作。对污染源区面积、污染源区宽度、封闭空间体积/渗透面积比、密闭空间空气交换频率、致癌效应的平均时间等参数结合实际情况进行了调整。风险评估结果表明:土壤和地下水中二氯甲烷对企业员工的健康风险不可接受,需开展管控修复;室内暴露途径是影响人体健康的主要途径;可采取制度控制和工程控制等措施,对密闭空间空气交换频率、成人暴露期、室内暴露频率、封闭空间地下基础层厚度、基础和墙体面积中裂隙部分所占比例等敏感性参数进行调控,降低人体健康风险。

关键词: 在产企业;风险评估;敏感性分析

中图分类号: X5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0337-05

Study on Risk Assessment and Risk Management of Soil Pollution in an Operating Enterprise

YIN Yao, ZHANG Xiang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the soil and groundwater pollution of an operating enterprise as the research object, the risk assessment of human health is carried out. Combined with the practical situations, the parameters such as pollution source-zone area, width of pollution source zone, enclosed spatial volume / infiltration area ratio, air exchange rate of enclosed space, and average time for carcinogenic effect are adjusted. The risk assessment results indicate that the health risk of dichloromethane in soil and groundwater to enterprise employees is unacceptable, and the remediation and risk control measures need to be taken. The indoor exposure pathway is the primary route affecting human health. The institutional and engineering control measures can be taken to regulate the sensitive parameters, including air exchange rate of enclosed space, exposure duration of adults, indoor exposure frequency of adults, thickness of enclosed-space underground foundation layer, and proportion of the cracked parts in the area of the foundation and walls, thereby reducing health risks to humans.

Keywords: operating enterprise; risk assessment; sensitivity analysis

0 引 言

部分在产企业长期的生产过程中,由于生产工艺落后、设备老化、废弃物处理不当等原因,可能发生污染物料泄漏进入土壤和地下水,污染物在土壤和地下水中的迁移扩散对人体健康产生潜在风险^[1]。因此,开展在产企业土壤环境调查和风险评估,对于掌握污染状况、识别潜在风险、制定科学合理的风险管控和修复策略具有重要意义。在产企业的土壤污染风险评估需结合企业实际情况,采取科

学合理的技术方法,优化人体健康风险评估各阶段的工作内容,并制定有效的污染物风险控制措施,为后续企业开展土壤污染防治和环境管理工作提供科学指导^[2]。

由于难以进行参数的实际测定,目前大多数企业在土壤污染风险评估中的参数取值普遍采用默认值,可能导致计算得到的风险偏大,风险控制值过于保守^[3],不符合企业实际情况,也加重了企业控制土壤地下水污染的负担,影响企业正常安全生产。同时,模型参数的不确定性可能对风险评估结果以及后续管控修复目标决策产生不利影响^[4]。因此,本研究以某存在土壤地下水污染的在产企业为研究对象,基于模型参数调整开展人体健康风险评估,并分析模型特征参数取值对人体健康风险的影响和参数

收稿日期: 2025-04-24

基金项目: 上海市生态环境局项目(沪环科(2024)第6号)

作者简介: 殷瑶(1986—),女,博士,高级工程师,从事土壤地下水污染修复研究工作。

敏感性,支撑在产企业基于风险表征实施风险管控措施,以降低土壤地下水污染风险。

1 项目概况

1.1 在产企业生产现状

某在产企业占地面积约 16 000 m²,自 2000 年以来长期进行机械加工制造生产,零件清洗、抛丸除锈、喷漆涂覆等加工过程涉及到有机清洗溶剂的使用。目前该企业仍处于正常生产运营状态,厂房和设备正常使用,未来也继续作为工业用地使用。生产区域室外地面没有全部施作水平防渗,存在防渗层损坏裂缝和裸露土壤,生产过程中含氯清洗剂进入清洗废水中,废水的不当储存和处理可能造成污染物进入土壤和地下水中。对企业土壤和地下水自行监测,发现厂区范围内存在土壤地下水污染,需要开展人体健康风险评估。

1.2 在产企业水文地质条件

该企业所在区域地层以粉质黏土层为主,地面水泥防渗层向下 12.0 m 依次为杂填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土。企业占地范围内地下水埋深约 0.73 m,整体流向为自西北向东南。该企业南侧紧邻河流,地下水与地表水存在补给排泄关系,污染物存在扩散至厂区外污染地表水的可能性。企业内土壤理化性质特征参数如表 1 所示。

表 1 土壤理化性质参数	
参数	分析结果
含水率/(kg·kg ⁻¹)	0.31
容重/(kg·dm ⁻³)	1.46
颗粒密度/(g·cm ⁻³)	2.73
有机质含量/(g·kg ⁻¹)	10.3
孔隙水体积比	0.452
孔隙空气体积比	0.014

1.3 土壤地下水污染特征

该企业自行监测结果显示生产车间地下土壤中二氯甲烷最大浓度为 3.0×10⁴ mg/kg,污染深度为 0.5~4.0 m,污染面积约 400 m²;地下水中二氯甲烷最大浓度为 1.2×10⁴ mg/L,污染深度为地下水埋深至 10.0 m,污染面积约 3 300 m²。土壤地下水存在复合污染特征,污染分布范围如图 1 所示。

1.4 研究方法

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)的相关要求,结合实际情况选择合适的模型参数,基于公开的《污染场地风险评估电子表格》最新版本^[5],以该企业土壤地下水中超过土壤

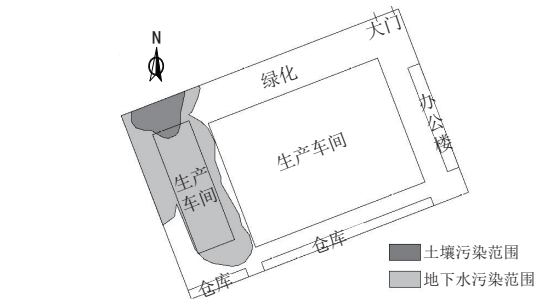


图 1 企业占地平面布置与土壤地下水污染空间分布

污染筛选值和地下水质量标准的污染物作为关注污染物,对该在产企业地块进行土壤地下水污染的人体健康风险评估和不确定性分析。

2 人体健康风险评估

2.1 危害识别

危害识别包括企业信息资料收集和关注污染物确定,核心是确定关注污染物^[6]。通过资料收集和现场踏勘确定了企业污染区域的土壤地下水污染分布、土壤理化性质分析数据、水文地质特征信息、敏感人群活动信息、建筑物信息等。根据调查结果,确定土壤和地下水中关注污染物均为超标的二氯甲烷,超标倍数分别为 47.7 倍和 23 999 倍。该企业维持生产运营状态,敏感人群为企业内工作人员。

2.2 暴露评估

该企业仍维持在产状态,污染区域为生产车间,考虑生产运行状态下工作人员在污染区域活动的暴露情景。关注污染物二氯甲烷为挥发性有机物(volatile organic compound, VOC),污染介质为表层以下土壤和地下水。一般建设用地风险评估中保守考虑最恶劣情况,计算全部 5 种土壤暴露途径和 2 种地下水暴露途径的暴露量^[7]。在产企业正常运营阶段不涉及开挖施工,不涉及地下水开采,因此本案例中企业工作人员的暴露途径只考虑来自表层以下土壤和地下水的气态污染物,包括吸入室外空气中气态污染物(途径 1)、吸入室内空气中的气态污染物(途径 2)共 2 种土壤污染物暴露途径和吸入室外空气中的气态污染物(途径 3)、吸入室内空气中的气态污染物(途径 4)共 2 种地下水污染物暴露途径。现场踏勘未见企业员工佩戴呼吸防护用具,不考虑个人防护用品对暴露量的影响^[8]。

土壤污染风险评估的概念模型涉及参数包括“污染源”的土壤和地下水污染分布和理化性质参数、“途径”的污染扩散迁移的控制参数和“受体”的敏感人群暴露参数。在产企业地块土壤及地下水性

质参数尽可能地取地块实测值,污染扩散迁移控制参数和敏感人群暴露参数等结合实际情况调整,如表 2 所列。封闭空间体积/渗透面积比根据污染范围所在生产车间实际结构进行调整^[9]。污染源区面积采用二氯甲烷超标区域面积总和,污染源区宽度采用二氯甲烷超标区域与风向垂向交界面长度^[10]。密闭空间空气交换频率根据机械工业厂房换气次数设计要求进行调整^[11-12]。致癌效应的平均时间根据企业所在地区平均寿命进行调整。其余参数采用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)附录 G 的推荐值。

表 2 风险评估模型参数调整

参数	推荐取值	调整取值	取值说明
污染源区面积/ cm ²	1.6×10 ⁷	3.3×10 ⁷	二氯甲烷超标区域面积
污染源区宽度/cm	4 000	4 200	二氯甲烷超标区域与风向垂向交界面长度
封闭空间体积/渗透面积比/cm	300	600	污染区域生产车间实际高度
密闭空间空气/交换频率/(次·d ⁻¹)	20	40	工业厂房通风次数不少于 5 次/h,按每天 8 h 计算
致癌效应的平均时间/d	27 740	30 295	企业所在地平均寿命

经计算,实际暴露途径下土壤和地下水对企业员工的暴露量如表 3 所示。

表 3 暴露量计算结果

毒性效应	土壤暴露量(土壤/体重)/ [kg·(kg·d) ⁻¹]		地下水暴露量/ [L·(kg·d) ⁻¹]	
	途径 1	途径 2	途径 3	途径 4
致癌	4.46×10 ⁻⁷	3.71×10 ⁻⁶	1.35×10 ⁻⁷	1.54×10 ⁻⁶
非致癌	1.48×10 ⁻⁶	1.23×10 ⁻⁵	4.49×10 ⁻⁷	5.10×10 ⁻⁶

2.3 毒性评估

土壤和地下水关注污染物均为二氯甲烷,属于国际癌症研究署最新致癌分类清单(agents classified by the IARC monographs, volumes 1 - 136)确定的 2A 类致癌物质,同时具有致癌效应和非致癌效应,其毒性参数(包括经口摄入致癌斜率因子、呼吸吸入单位致癌风险、呼吸吸入参考浓度等)和理化性质参数(包括无量纲亨利常数、空气和水中扩散系数、分配系数等)取值采用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019)附录 B 的推荐值。

2.4 风险表征

污染物评估浓度保守考虑选取土壤和地下水中二氯甲烷的最大浓度。对于二氯甲烷,最大可接受

的致癌风险值为 10⁻⁶,最大可接受的危害商为 1。计算得到的企业员工健康风险表征结果如表 4 所示,并与常规建设用地风险评估过程(除实际土壤地下水性质参数和空气中颗粒物参数外均采用推荐值,并保守考虑所有土壤暴露途径)的风险表征结果对比。结果表明,该企业土壤中二氯甲烷对企业员工的致癌风险大于 10⁻⁶,非致癌危害商大于 1,地下水中二氯甲烷的非致癌危害商大于 1,因此该企业的土壤地下水污染风险不可接受。与常规建设用地风险表征结果对比,采用实际暴露途径和模型参数的风险评估可在确保风险可控的基础上有效降低风险控制要求,降低在产企业实施风险管控修复的投入,实现绿色低碳管控修复。土壤中二氯甲烷风险控制值为 3 370 mg/kg,地下水中二氯甲烷风险控制值为 8 370 mg/L。唐志等^[13]的研究也表明,结合污染地块实际建筑物结构参数的污染暴露模型的评估结果更具客观性和经济性,可以大幅降低修复方量和费用投入。

表 4 人体健康风险表征结果

污染介质	毒性效应	风险控制水平	常规建设用地风险评估表征风险	实际暴露途径和参数表征风险	变化百分比/%
土壤	致癌	1.00×10 ⁻⁶	4.31×10 ⁻⁵	5.32×10 ⁻⁶	-87.66
	非致癌	1.00	49.4	8.91	-81.96
地下水	致癌	1.00×10 ⁻⁶	3.47×10 ⁻⁶	8.55×10 ⁻⁷	-75.36
	非致癌	1.00	5.33	1.43	-73.17

2.5 暴露途径贡献率分析

对于在产企业,在开展污染土壤地下水管控修复的同时,需开展针对主导暴露途径的风险管控措施,降低暴露风险,保护员工健康安全。针对该企业员工的暴露风险贡献率分析结果表明,致癌和非致癌风险均主要来源于吸入室内空气中的气态污染物,即途径 2 和途径 4,如表 5 所示。对于 VOC 污染场地,污染物最主要的暴露途径一般均为吸入室内封闭空间中空气中的气态污染物途径,即蒸气入侵(vapor intrusion)^[14]。因此,该企业需开展防范蒸气入侵的制度控制或工程控制措施,管控来源于吸入室内封闭空间中空气中的气态污染物的暴露风险。

表 5 暴露途径贡献率分布

单位:%

毒性效应	土壤污染暴露途径贡献率		地下水污染暴露途径贡献率	
	途径 1	途径 2	途径 3	途径 4
致癌	0.64	99.36	0.47	99.53
非致癌	0.64	99.36	0.47	99.53

2.6 模型参数敏感性分析

评估模型各参数的取值可对评估结果造成不同程度的影响,敏感程度较高的参数应特别注意其测定方法的规范性及取值合理性,以提高风险评估结果的准确性^[15]。结合本案例企业的实际情况,对实际情景和暴露途径下进行了调整的污染源区面积、污染源区宽度、封闭空间体积/渗透面积比、密闭空间空气交换频率、致癌效应的平均时间,和可能对评估结果产生较大影响的成人暴露期、室内/室外暴露频率、封闭空间地下基础层厚度、基础和墙体面积中裂隙部分所占比例等参数开展了敏感性分析,在现有参数取值基础上上浮10%,结果如表6所示。可以看出,由于室内暴露途径风险贡献率大于99%,封闭空间体积/渗透面积比、密闭空间空气交换频率、成人室内暴露频率、封闭空间地下基础层厚度、基础和

墙体面积中裂隙部分所占比例对致癌效应和非致癌效应的敏感性较强,敏感性比值绝对值均大于50%,其中封闭空间体积/渗透面积比、密闭空间空气交换频率、封闭空间地下基础层厚度与风险呈负相关,成人室内暴露频率、基础和墙体面积中裂隙部分所占比例对与风险呈正相关。致癌效应的平均时间和成人暴露期致癌效应敏感性较强,非致癌效应敏感性低。污染源区面积、污染源区宽度、成人室外暴露频率等参数与室外暴露途径相关,而室外暴露途径风险贡献率小于1%时,因此敏感性较低。有研究表明,土壤含水率、地下水埋深、土壤容重等土壤地下水性质参数对风险表征结果有明显影响^[1,15],但这些参数无法基于制度控制和工程控制的风险管控措施进行参数调控,因此本研究不进行针对性敏感性分析。

表6 参数敏感性分析结果

参数名称	参数		致癌效应敏感性比值/%		非致癌效应敏感性比值/%	
	变化前	变化后	土壤	地下水	土壤	地下水
污染源区面积/cm ²	3.3×10 ⁷	3.63×10 ⁷	10.72	8.09	10.72	8.09
污染源区宽度/cm	4 200	4 620	-9.75	-7.35	-9.75	-7.35
封闭空间体积/渗透面积比/cm	600	660	-81.16	-83.56	-81.16	-83.56
密闭空间空气交换频率/(次·d ⁻¹)	40	44	-81.16	-83.56	-81.16	-83.56
致癌效应的平均时间/d	30 295.0	33 324.5	-90.91	-90.91	0.00	0.00
成人暴露期/a	25.0	27.5	100.00	100.00	0.00	0.00
成人室内暴露频率/(d·a ⁻¹)	187.50	206.25	89.28	91.91	89.28	91.91
成人室外暴露频率/(d·a ⁻¹)	62.50	68.75	10.72	8.09	10.72	8.09
封闭空间地下基础层厚度/cm	35.0	38.5	-69.83	-67.56	-69.83	-67.56
基础和墙体面积中裂隙部分所占比例	0.000 50	0.000 55	74.63	71.44	74.63	71.44

3 针对性风险管控措施

针对以上确定的主导暴露途径和高敏感性参数,提出适用于在产企业风险控制的制度控制和工程控制措施。对于该在产企业,员工的健康风险主要来自于吸入室内封闭空间中空气中的气态污染物途径,因此在实施污染修复措施降低污染物浓度至风险控制值前,需针对该途径和与该途径高度敏感的模型参数进行调控,以降低人体健康风险。

可采取的措施包括:(1)人员活动模式参数的制度控制:在开展污染管控修复阶段,控制人员靠近污染区域,降低成人暴露期和暴露频率,特别是室内暴露频率;(2)建筑物参数的工程控制:采取工程措施提高封闭空间地下基础层厚度并减少墙体地基裂隙,或者施作水平防渗阻隔层,增强室内通风,提高密闭空间空气交换频率。有研究表明施作水平防渗膜,提高地基的防渗效果,可以显著降低吸入室内空

气中污染物的暴露风险^[16]。

4 结 语

该文针对某在产企业土壤地下水污染开展了基于实际暴露情景的人体健康风险评估,并基于暴露途径贡献率分析和模型参数敏感性分析确定主要途径和敏感参数,进而提出风险管控措施,得出以下结论。

(1)土壤中二氯甲烷对企业员工的致癌风险大于10⁻⁶,非致癌危害商大于1,地下水中二氯甲烷的非致癌危害商大于1,现状实际条件下对企业员工的风险不可接受,需进行管控修复,土壤中风险控制值为3 370 mg/kg,地下水中风险控制值为8 370 mg/L。

(2)吸入室内封闭空间中的空气中的气态污染物是影响企业员工健康的主要暴露途径。

(3)封闭空间体积/渗透面积比、密闭空间空气交换频率、成人室内暴露频率、封闭空间地下基础层

厚度、基础和墙体面积中裂隙部分所占比例等参数对室内暴露途径的影响较大,敏感性较高。

(4)可采取制度控制和工程控制等措施调控相关敏感性参数,降低企业员工健康风险。

参考文献:

[1] 杨月明,吴欣甜,魏婷婷,等.地下水中污染物健康风险评价相关参数敏感性分析研究[J].环境保护与循环经济,2023,43(2):29-34.
 [2] 李光辉,李琴琴.在产企业地块土壤污染状况调查及风险评估工作对策思考[J].皮革制作与环保科技,2024,5(19):133-135.
 [3] 李飞,王晓钰,李雪.土壤重金属的健康风险评价及其参数不确定性的量化研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(6):119-126.
 [4] 姜林,梁竞,钟茂生,等.复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J].环境科学研究,2021,34(2):458-467.
 [5] 尧一俊,陈楠.污染场地风险评估电子表格(20241213日更新)[EB/OL].(2024-12-13)[2025-04-24].<http://www.niescq.top>.
 [6] 王冬莹,董如鑫,张清平,等.某油墨生产企业遗留场地污染调查与风险评估研究[J].环境科学与管理,2022,47(6):184-189.
 [7] 吕元飞,宝剑锋,张凌博,等.某石化厂土壤多环芳烃污染特征及

健康风险评估研究[J].环境科学与管理,2022,47(2):169-174.
 [8] 孙云凤,黄沪涛,张超,等.呼吸防护装备的工作场所防护因数研究进展[J].职业卫生与应急救援,2024,42(5):695-698.
 [9] ASTM E2081—2000 (R2015), Standard Guide for Risk-Based Corrective Action:E2081[S].
 [10] DB 4401/T 102.7—2023,建设用地土壤污染防治第7部分 土壤污染风险评估技术规范[S].
 [11] 吕琳,胡泊.再论职业卫生评价中有关通风参数的设计要求及应用[J].中国卫生工程学,2019,18(6):955-957.
 [12] 许居鹁.机械工业采暖通风与空气调节设计手册[M].上海:同济大学出版社,2007:222-223.
 [13] 唐志,李义连,宁宇,等.基于住宅用地规划及建筑结构暴露模型的场地健康风险评估[J].安全与环境工程,2018,25(3):111-116.
 [14] 王月,钟茂生,陈楠,等.污染地块地下水入侵建筑的健康风险评估[J].环境保护,2021,49(23):65-70.
 [15] 陈晨.地块特征参数对土壤污染风险评估的影响[J].环境科技,2022,35(6):25-30.
 [16] 关亮.关于挥发性有机污染物原位阻隔膜中气体扩散系数的讨论[J].当代化工研究,2022(8):79-81.

(上接第 327 页)

用[J].现代矿业,2024,40(4):10-12;16.
 [18] 徐渝杰,舒向阳,陶敏,等.基于无人机和机器学习的川西北修复沙地植被信息提取[J].四川农业大学学报,2024,42(1):181-187.
 [19] 徐春,刘迪,沈琪.基于机器学习的高精度无人机影像滑坡自动识别研究[J].云南电力技术,2023,51(5):46-50;60.
 [20] 魏艳平,马青山,刘朝武.无人机航测技术在管道智能工地中的应用[C]//石油天然气勘察技术中心站第三十一次技术交流研讨会论文集.淮安:中国石油学会石油工程专业委员会,2024.
 [21] 张文献.无人机倾斜摄影测量在水库巡检中的应用[J].测绘与空间地理信息,2024,47(9):172-174.
 [22] 李万润,范博源,赵文海,等.基于无人机及YOLOX视觉算法的大跨度钢结构吊装过程位移监测[J].振动与冲击,2024,43(17):61-70.
 [23] Liu Y, Nie X, Fan J, *et al.* Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction[J].Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(5): 511-529.
 [24] Mozghan DM, Ali K, David L. Color-space analytics for damage

detection in 3D point clouds[J].Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 18(6): 775-788.
 [25] Vetrivel A, Gerke M, Kerle N, *et al.* Identification of damage in buildings based on gaps in 3D point clouds from very high resolution oblique airborne images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 10(5): 61-78.
 [26] 江路路,尹轶,孟姿含,等.基于YOLO v5的探地雷达地下空洞与管线图像自动识别技术[J].国防交通工程与技术,2024,22(5):7-11.
 [27] 王文瑾.面向无人机遥感的枯死松木的识别[D].福州:福建农林大学,2023.
 [28] Akca D. 3d Modeling of cultural heritage objects with a structured light system[J]. Mediterranean Archaeology and Archaeometry, 2012, 12(1): 139-152.
 [29] 邵万里.Agisoft PhotoScan在立面测量中的应用[J].城市勘测,2019(2):74-76.
 [30] 殷红霞.无人机遥感技术在实景三维模型构建中的应用[J].河南科技,2022,41(18):25-31.