

# Study on Risk Identification and Zoning Management of Soil and Groundwater Pollution in Industrial Waste Land

Xiaomeng Li

Hebei Bairun Environmental Testing Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

## Abstract

Under conditions of long-term industrial production and inadequate management, industrial legacy sites are prone to developing complex soil and groundwater contamination dominated by heavy metals and organic pollutants. The associated environmental risks are characterized by concealment, accumulation, and spatial heterogeneity. Focusing on soil and groundwater contamination at industrial legacy sites, this study systematically examines pollution characteristics and mechanisms of risk formation, and establishes a pollution risk identification framework integrating site investigation and monitoring, exposure pathway identification, and indicator-based risk determination. On this basis, a risk classification and spatial zoning approach is proposed to clarify governance priorities and management requirements for areas with different risk levels. The study highlights the critical role of integrated soil-groundwater analysis in risk identification and zoned remediation, providing theoretical support and technical guidance for improving the scientific rigor and precision of environmental risk management at industrial legacy sites.

## Keywords

industrial legacy sites; soil contamination; groundwater contamination; risk identification; zoned remediation

## 工业遗留场地土壤与地下水污染风险识别与分区治理研究

李晓萌

河北百润环境检测技术有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

## 摘要

工业遗留场地在长期生产与管理缺失条件下, 易形成以重金属、有机污染物为主的土壤与地下水复合污染, 环境风险具有隐蔽性、累积性与空间异质性特征。围绕工业遗留场地土壤与地下水污染问题, 系统梳理污染特征与风险形成机制, 构建涵盖调查监测、暴露识别与指标判别的污染风险识别技术体系, 在此基础上提出污染风险分级与空间分区方法, 明确不同风险等级区域的治理重点与管理要求。研究强调土壤与地下水协同分析在风险识别与分区治理中的关键作用, 为提升工业遗留场地环境风险管控的科学性与精准性提供理论依据与技术支持。

## 关键词

工业遗留场地; 土壤污染; 地下水污染; 风险识别; 分区治理

## 1 引言

随着产业结构调整和城市更新进程加快, 大量工业企业搬迁或关停, 遗留下来的工业用地逐步进入再开发利用阶段。受历史生产工艺粗放、污染防治措施不足及监管体系不完善等因素影响, 部分工业遗留场地存在不同程度的土壤与地下水污染问题, 对区域生态安全、公共健康及土地再利用构成现实约束。相较于单一介质污染, 土壤与地下水污染在迁移路径、暴露方式及风险表现上相互耦合, 增加了风险识别与治理决策的复杂性。如何在全面识别污染风险的基础上, 实施差异化、分区化治理, 已成为当前工业遗留场地环境管理的重要议题, 风险识别与空间分区等层面开展系统研

究, 以支撑科学治理与规范管理。

## 2 工业遗留场地污染特征与环境风险形成机制

### 2.1 工业遗留场地类型及其污染源构成

工业遗留场地通常来源于冶金、化工、石油加工、机械制造、电镀、制药及危险废物处置等行业, 场地类型呈现出工业门类多样、用地功能复合、历史沿革复杂等特点。化工与石油加工类场地多与有机溶剂、芳香烃及含卤化合物残留相关, 冶炼及金属加工类场地则以铅、镉、汞、砷等重金属污染为主, 电镀和表面处理行业往往伴随六价铬、镍及氰化物等高风险污染物。部分场地在企业多次转产或扩建过程中形成多污染源叠加格局, 使污染来源难以通过单一工序进行追溯, 进一步加剧了环境风险识别与治理的复杂性。

### 2.2 土壤与地下水污染物种类及迁移转化特征

工业遗留场地土壤与地下水污染物类型以重金属和有

【作者简介】李晓萌(1993-), 女, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事环境检测研究。

机污染物并存为主要特征,二者在理化性质和环境行为上差异显著。重金属在土壤中易与黏土矿物、有机质发生吸附或络合反应,迁移速率相对较慢,但在酸化条件或氧化还原环境变化时可能发生再活化并进入地下水系统。地下水流速、含水层介质结构及污染物降解特性共同影响污染羽的空间形态,部分难降解有机物在厌氧环境中长期存在,导致污染持续时间显著延长。土壤与地下水之间的相互作用使污染呈现出跨介质传递特征,增加了环境风险的不确定性和隐蔽性。

### 3 工业遗留场地土壤与地下水污染风险识别技术体系

#### 3.1 污染调查与监测数据获取方法

工业遗留场地污染风险识别以系统、规范的调查与监测数据为基础,调查过程通常包括历史资料核查、现场踏勘、采样布点与实验室分析等环节。历史资料调查重点收集企业生产年限、主要工艺流程、原辅材料种类与年用量、废水废渣产生及处置方式等信息,在部分老旧工业场地中,完整生产资料保存率不足70%,需通过访谈和现场痕迹综合判定污染线索。现场调查阶段按照污染源分布和水文地质条件布设采样点位,土壤采样深度一般设置为0.0—0.5 m、0.5—2.0 m、2.0—5.0 m等层级,重点区域可延伸至10.0 m以上;地下水监测井埋深通常为10—30 m,每1 hm<sup>2</sup>布设1—3口监测井。监测指标包括铅、镉、汞、砷等重金属8—12项,以及苯、甲苯、三氯乙烯、多环芳烃等有机污染物20项以上。实测结果显示,部分场地表层土壤中铅浓度达到420 mg/kg,超过建设用地筛选值120 mg/kg;地下水中苯浓度为0.12 mg/L,显著高于Ⅲ类地下水标准限值0.01 mg/L。多轮监测数据通过时间序列分析,为污染风险识别提供可靠的数据基础<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 污染物暴露途径与受体识别

污染物暴露途径与受体识别需结合场地利用现状、规划用途及周边环境敏感目标进行综合分析。工业遗留场地土壤污染的主要暴露途径包括经口摄入污染土壤、皮肤直接接触以及吸入含污染物的扬尘或挥发性气体。研究表明,在居住用地情景下,儿童土壤摄入量一般取100 mg/d,成人取50 mg/d,暴露差异显著。地下水污染则主要通过饮用水、生活杂用水和灌溉用水等途径进入暴露体系,假定饮水量为2.0 L/d时,苯浓度0.12 mg/L对应的日暴露剂量达到0.24 mg/d。受体类型除不同年龄阶段人群外,还包括周边农田作物、地表水体及水生生物,部分场地地下水向河流补给后,河水中镉浓度监测值为0.008 mg/L,接近地表水Ⅲ类标准限值0.01 mg/L。明确暴露途径和受体特征,有助于准确识别污染风险的实际承载对象<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 风险识别指标体系与判别原则

工业遗留场地污染风险识别通常构建由污染强度、暴

露条件和受体敏感性组成的综合指标体系。污染强度指标以污染物浓度、超标倍数及污染面积比例为核心,例如某场地重金属超标点位占比达到65%,污染影响面积约为2.4 hm<sup>2</sup>。暴露条件指标主要包括暴露频率、暴露持续时间及土地利用方式,在居住用地情景下,年暴露频率一般取350 d,暴露年限取30 a。受体敏感性指标则根据人群年龄结构及生态系统承受能力进行赋值。风险判别采用定量评价方法,非致癌风险以危害指数(HI)≤1.0作为可接受水平,致癌风险以 $1.0 \times 10^{-6}$ 作为控制阈值。当计算结果显示某污染物致癌风险为 $3.5 \times 10^{-5}$ ,明显高于控制值时,该区域即被判定为高风险区。通过指标体系与判别原则的量化应用,可实现工业遗留场地土壤与地下水污染风险的清晰识别与科学分级。

### 4 工业遗留场地土壤与地下水污染风险分级与空间分区方法

#### 4.1 污染风险等级划分依据

工业遗留场地污染风险等级划分以定量风险评价结果为核心依据,综合污染物浓度水平、超标幅度、暴露强度及健康风险值进行判定。在实际应用中,可选取典型场地作为分析对象,例如某原化工厂遗留场地面积为5.6 hm<sup>2</sup>,检测到土壤中苯并[a]芘最大浓度为2.8 mg/kg,超过建设用地筛选值0.55 mg/kg的5.1倍;地下水中三氯乙烯浓度为0.18 mg/L,超过Ⅲ类地下水标准0.03 mg/L的6.0倍。在暴露参数取值为年暴露频率350 d、暴露年限30 a、成人体重70 kg条件下,计算得到该污染物对应的致癌风险为 $4.2 \times 10^{-5}$ ,显著高于 $1.0 \times 10^{-6}$ 的可接受阈值,该区域被判定为高风险等级。相对而言,土壤中镍浓度为45 mg/kg、地下水中镍浓度为0.015 mg/L,均低于相关管控值,非致癌危害指数为0.62,对应区域可划为低风险等级。通过污染浓度、风险值与阈值的对比分析,可实现不同风险等级的清晰划分,为后续空间分区奠定基础<sup>[3]</sup>。

#### 4.2 土壤与地下水协同风险分区原则

土壤与地下水协同风险分区以跨介质污染传递关系和综合风险水平为基本原则,强调在同一空间单元内统筹考虑两类环境介质的风险表现。例如在某电镀企业遗留场地调查中,表层土壤六价铬浓度为210 mg/kg,超过风险管控值30 mg/kg的7.0倍,但对应地下水中六价铬浓度仅为0.02 mg/L,略低于Ⅲ类标准限值0.05 mg/L。该区域在土壤介质层面呈现高风险特征,而地下水风险相对较低,在分区时被划定为“土壤主导型中高风险区”,治理重点放在源头阻隔和表层修复。另一示例中,某储罐区地下水中苯浓度为0.25 mg/L,超标25倍,而土壤中苯浓度为0.8 mg/kg,接近筛选值1.0 mg/kg,该区域被识别为“地下水主导型高风险区”。通过对土壤与地下水风险水平进行组合判定,可形成高一高、高一低、低一高和低一低等协同分区类型,确保分区结果与实际风险格局相匹配。

### 4.3 风险分区结果的空间表达与验证

风险分区结果的空间表达通常依托地理信息系统进行可视化呈现,并通过监测数据进行验证。例如在某冶金遗留场地研究中,依据风险等级划分结果,将场地划分为高风险区 1.2 hm<sup>2</sup>、中风险区 2.1 hm<sup>2</sup>、低风险区 1.5 hm<sup>2</sup>,并在 GIS 平台上以不同颜色进行叠加展示。高风险区集中分布于原冶炼车间及渣堆周边,该区域土壤中砷平均浓度为 180 mg/kg,地下水中砷浓度为 0.12 mg/L;中风险区位于厂区边缘,土壤砷浓度均值为 65 mg/kg,地下水浓度为 0.035 mg/L;低风险区则以办公区和绿化区为主,相关指标均低于筛选值。为验证分区合理性,在分区完成后新增 6 个验证性采样点,其中高风险区新增点位地下水砷浓度范围为 0.10—0.15 mg/L,与原判定结果一致,验证了空间分区的可靠性<sup>[4]</sup>。通过空间表达与实测数据对照分析,可有效检验风险分区结果的科学性与可操作性,详见图 1。

分区类型	土壤污染特征数据	地下水污染特征数据	综合风险判定结果
高风险区	苯并[a]芘浓度 2.8 mg/kg, 超过筛选值 0.55 mg/kg 的 5.1 倍; 砷平均浓度 180 mg/kg	三氯乙烯浓度 0.18 mg/L, 超过 III 类标准 0.03 mg/L 的 6.0 倍; 砷浓度 0.12 mg/L	致密风险值 $4.2 \times 10^{-5}$ , 高于 $1.0 \times 10^{-4}$ , 判定为高风险区
中风险区	表层土壤砷浓度 65 mg/kg, 超过筛选值 25 mg/kg; 镉浓度 45 mg/kg	地下水砷浓度 0.035 mg/L, 接近 III 类标准 0.05 mg/L; 镉浓度 0.015 mg/L	非致密危害指数 0.8—1.0, 判定为中风险区
土壤主导型风险区	六价铬浓度 210 mg/kg, 超过风险管控值 30 mg/kg 的 7.0 倍	六价铬浓度 0.02 mg/L, 低于 III 类标准 0.05 mg/L	土壤风险显著, 地下水风险较低, 判定为土壤主导型风险区
地下水主导型风险区	苯浓度 0.8 mg/kg, 接近筛选值 1.0 mg/kg	苯浓度 0.25 mg/L, 超过 III 类标准 0.01 mg/L 的 25 倍	地下水风险突出, 判定为地下水主导型高风险区

图 1 风险分级与空间分区典型数据分析表

## 5 工业遗留场地土壤与地下水分区治理的实施与管理机制

### 5.1 分区治理工程实施模式

工业遗留场地土壤与地下水分区治理工程的实施,应以风险分区结果为依据,形成差异化、针对性的工程组织模式。治理实施过程中,需要统筹考虑污染介质类型、污染空间分布特征以及场地未来利用方向,合理确定修复、管控与管理相结合的工程路径。高风险区域侧重采取工程性修复与源头阻断相结合的方式,通过隔离、削减和稳定等手段降低污染对周边环境的影响;中风险区域更强调风险管控与功能限制,通过工程覆盖、制度约束和用途管制实现风险可控;低风险区域则以管理和监测为主,避免过度工程干预。分区治理工程通常采用分阶段实施模式,先行控制环境风险,再逐步推进修复与功能恢复,以减少施工过程对周边环境和活动的扰动。通过工程措施与管理措施协同推进,可提高分区治理实施的整体效率和可持续性。

### 5.2 治理过程环境风险动态管控

在工业遗留场地分区治理过程中,环境风险具有动态变化特征,治理活动本身可能引发污染物再分配或短期扩

散,因此需建立全过程动态管控机制。治理实施阶段应同步开展环境监测与风险评估,重点关注施工扰动对土壤结构和地下水流场的影响,及时识别潜在风险变化。动态管控强调对关键环节的实时掌控,包括污染土体开挖、转运、暂存及处置过程中的二次污染防治,以及地下水抽排和回灌环节的环境安全控制。通过动态调整施工方案和防控措施,可有效降低突发环境风险发生的可能性。同时,治理过程中的信息记录和风险反馈机制,有助于持续优化治理策略,确保分区治理目标在实施过程中得到有效落实。

### 5.3 治理成效评估与持续管理机制

工业遗留场地分区治理完成后,治理成效评估与持续管理是保障环境安全和土地再利用的重要环节。治理成效评估应围绕风险控制目标展开,重点关注污染水平变化、环境介质稳定性以及风险管控措施的长期有效性。评估结果不仅用于判定治理目标是否实现,也为后续管理决策提供依据。持续管理机制强调在治理完成后维持必要的环境监管,通过制度化、用途管控和长期监测等手段,防止污染风险反弹。对于已完成修复的区域,应结合土地利用性质制定相应的环境管理要求;对实施管控措施的区域,则需明确责任主体和管理周期。通过治理成效评估与持续管理的衔接,可实现工业遗留场地环境风险由工程治理向长效管理的平稳过渡<sup>[5]</sup>。

## 6 结语

工业遗留场地土壤与地下水污染问题具有成因复杂、风险隐蔽和治理周期长等特征,对区域生态安全和土地再利用形成长期约束。通过系统识别污染风险、科学开展空间分区,并在此基础上实施差异化治理与规范化管理,有助于实现环境风险的有效控制与场地功能的有序恢复。分区治理不仅提升了治理措施的针对性与可操作性,也为资源配置和管理决策提供了清晰依据。将工程治理、动态管控与持续管理相结合,是推动工业遗留场地环境安全与可持续利用的重要路径。

### 参考文献

- [1] 门娟,马丽娜,张树强.石油化工企业土壤及地下水监测实例分析[J].精细石油化工,2025,42(05):67-70.
- [2] 叶媛媛.试论工业地块土壤和地下水的环境调查与风险评估[J].皮革制作与环保科技,2025,6(17):184-186.
- [3] 李明明.土壤与地下水污染防治的协调措施思考[J].皮革制作与环保科技,2025,6(16):115-117.
- [4] 赵文浩,高一斐,陈海燕,王君浩,王美英,陈颖,马瑾,吴丰昌.土壤与地下水多要素协同作用人体健康环境基准理论初探[J].生态环境学报,2025,34(11):1788-1801.
- [5] 王帅,吕波,杨慧.土壤与地下水污染防治协调路径分析[J].智慧中国,2025,(07):106-107.