

# Hydrogeological Research on Soil Pollution Control in Environmental Engineering

Liqiong Xu<sup>1</sup> Gonglong Li<sup>2</sup>

1. Gansu Nuclear Geology Brigade 212, Wuwei, Gansu, 733000, China

2. Gansu Nenghua Jinchang Energy Chemical Development Co., Ltd., Jinchang, Gansu, 737100, China

## Abstract

Regional hydrogeological conditions are determined by four key elements—topography, geomorphology, stratigraphy, and lithology—whose interactions govern the system's overall functionality. The dynamic interplay between groundwater and soil water influences pollutant behavior through water migration and solute exchange. Effective soil remediation requires precise quantification of critical parameters, including groundwater dynamics, aeration zone characteristics, aquifer properties, and boundary conditions, to accurately predict pollution transport patterns. Tailored remediation strategies should be implemented based on specific hydrogeological scenarios: in aquifer zones, prioritize in-situ combined techniques; in confined aquifers, adopt a hybrid approach of chemical oxidation and hydraulic control; and in aeration zone anomalies, apply stratified remediation. By optimizing in-situ restoration parameters and integrating ex-situ remediation with groundwater protection, a governance system tailored to local hydrogeological conditions can be established.

## Keywords

Environmental Engineering; Soil Pollution; Remediation Measures; Practical Strategies

## 环境工程中土壤污染治理的水文地质研究

许丽琼<sup>1</sup> 李功龙<sup>2</sup>

1. 甘肃省核地质二一二大队, 中国·甘肃 武威 733000

2. 甘肃能化金昌能源化工开发有限公司, 中国·甘肃 金昌 737100

## 摘要

区域水文地质条件由地形地貌、地层岩性等四大要素构成, 其相互耦合决定系统整体功能, 地下水与土壤水的交互作用通过水分运移和溶质交换影响污染物形态与活性。土壤污染治理需聚焦地下水动力条件、包气带特性、含水层特征及边界条件, 精准量化关键参数以研判污染迁移规律。基于不同水文地质场景, 筛选适配治理技术, 潜水含水层区优先原位组合技术, 承压含水层区采用化学氧化与水力控制结合模式, 包气带厚度异常区实施分层治理。通过优化原位修复参数、协同异位修复与地下水保护, 构建适配水文地质条件的治理体系。

## 关键词

环境工程; 土壤污染; 治理措施; 实践策略

## 1 引言

在工业化以及城市化进程不断加速的背景之下, 土壤污染的问题变得越发明显, 重金属以及有机污染物借助多种渠道渗透到土壤中, 对地下水环境产生影响, 对生态安全以及人体健康构成威胁。土壤—地下水系统污染的治理成为生态保护方面的关键课题, 水文地质条件作为调控污染物迁移转化的核心要素, 其复杂程度直接决定了污染治理的难度以及成效。在当前的治理实践过程中, 由于对水文地质要素耦合作用的认识不够充分, 并且技术与地质条件的适配性较

差, 经常会出现治理不彻底以及二次污染等问题。

## 2 水文地质核心理论

### 2.1 区域水文地质条件构成

区域水文地质条件是由地形地貌、地层岩性、地质构造以及地下水赋存运动特征这几个方面共同组合而成, 其中地形地貌在很大程度上主导着水流的路径以及汇水的范围, 地层岩性可决定介质的渗透性以及吸附能力, 地质构造会依靠改变含水层的连续性来对污染物迁移通道产生影响, 而地下水的赋存类型与运动规律则为污染治理提供了十分关键的水文动力依据<sup>[1]</sup>。

### 2.2 地下水与土壤水交互作用机制

地下水和土壤水之间的交互作用, 其核心驱动力是水

【作者简介】许丽琼(1985-), 女, 中国甘肃康县人, 本科, 工程师, 从事地质勘探水文地质研究。

势差。在基质势和重力势的作用下,土壤水向下渗透,补给地下水,而地下水可借助毛细作用向上运动,补给土壤水,在此过程中,污染物的迁移也会同时受到驱动,土壤胶体所有的吸附解吸、离子交换以及微生物转化等作用,会让污染物的形态和活性发生改变,对污染范围以及治理难度产生直接影响。

### 3 土壤污染治理中水文地质要素分析

#### 3.1 地下水动力条件分析

地下水动力条件作为调控污染物迁移扩散的关键要素,其核心分析参数囊括水流速度、流向、水力梯度以及渗透系数,水流速度对污染物迁移速率起着直接决定性作用<sup>[2]</sup>。高速水流易于推动污染羽迅速扩散,而低速水流则有利于污染物在孔隙之中进行沉积吸附,流向和水力梯度可精确地预判污染扩散路径,为阻隔工程的选址提供相应依据。渗透系数的空间异质性会致使污染迁移呈现出非均一性,砂层与粘性土层之间的系数差异有可能形成局部污染富集区域,还需要结合补给排泄条件,探究其对污染物稀释程度以及扩散范围所产生的影响,以此为控污治污策略的制定提供动力方面的支撑。

#### 3.2 包气带水文地质特性

包气带处于土壤和地下水的过渡地带,它的特性对污染物在系统中的迁移转化有着直接影响,孔隙度、含水率以及渗透率可决定水分下渗以及溶质运移的能力。孔隙度和渗透率较高的话会加快污染物向地下水渗透的速度,土壤颗粒组成和矿物成分主导着吸附、离子交换以及氧化还原的能力,粘性颗粒含量越高,对重金属和有机物的截留效果就越好。包气带的气体运动对污染物转化有影响,有氧环境有利于有机污染物降解,厌氧环境则有可能使重金属形态发生改变,它的厚度和结构异质性也很关键,薄的包气带容易让污染物穿透,分层结构或许会形成天然迁移屏障。

#### 3.3 含水层水文地质特征

含水层的水文地质特征可决定污染物的迁移范围、速率以及富集程度。这对于治理难度起着关键的决定性作用,其中岩性组成属于核心指标,砂质含水层的颗粒较为粗大,孔隙比较大,渗透性也很强,污染物在其中迁移速度快、范围广,并且截留作用较弱,治理难度较高,而粘性含水层的渗透性较差,虽然可阻滞污染物,但容易形成局部累积<sup>[3]</sup>。含水层的厚度、分布面积以及埋藏深度会对污染羽的规模产生影响,浅层含水层受到污染后容易依靠水循环进行扩散,深层含水层的修复周期长,且难度较大,富水性与水背景值可决定稀释能力与治理阈值,富水性较强时可以降低污染浓度,背景值较低则需要提高修复精度。

#### 3.4 水文地质边界条件的影响

水文地质边界条件对于界定研究区域的水文地质系统范围起着关键作用,同时也是调控水流以及污染物迁移的关

键因素。其类型和特性会直接对土壤污染治理的范围划定以及方案设计产生影响,边界条件主要囊括补给边界、排泄边界、隔水边界以及弱透水边界这几种,不同的边界在对污染物迁移的调控作用方面存在着明显差异。补给边界像河流、大气降水入渗区这类,可为系统给予水分补给,可能把外部污染物带入研究区域,或对内部污染物浓度起到稀释作用,排泄边界比如泉、地下水溢出带,会将含有污染物的地下水排出系统,使得污染影响范围得以扩大。隔水边界可阻挡水流与污染物的迁移,形成封闭或者半封闭的污染区域,这对于开展原位修复较为有利。弱透水边界则有可能形成污染物的缓慢渗透通道,造成污染出现跨区域扩散的情况,精确识别边界的类型、位置以及渗透性,是合理划定污染治理范围、防止治理不彻底或过度治理的关键前提条件。

### 4 基于水文地质条件的土壤污染治理技术优化

#### 4.1 不同水文地质条件下治理技术筛选

##### 4.1.1 潜水含水层区土壤污染治理技术

潜水含水层区域由于水位埋藏深度较浅,并且与大气降水以及地表水体之间联系紧密,使得水流交换较为活跃,需要筛选出有控制污染以及防止扩散功能的治理技术,优先选用原位修复技术。例如,可渗透反应墙与地下水曝气技术的组合模式,可渗透反应墙是依据含水层的渗透系数来确定墙体的厚度以及填充材料的,借助吸附、沉淀等作用来截留迁移的污染物,适配潜水流流动性较强的特点。地下水曝气技术需要结合水力梯度来优化曝气的点位以及强度,以此加速挥发性有机污染物的脱附与降解。同时,还要避免曝气扰动致使污染羽扩散,对于污染范围较小但浓度较高的区域,可以搭配抽出处理技术,控制抽水量与速率来维持地下水位的稳定,防止地表沉降以及周边水体倒灌,实现治理效果与水文地质环境的协同保护。

##### 4.1.2 承压含水层区土壤污染治理技术

承压含水层区域受到上覆隔水层的限制,水流速度较为缓慢,但污染也不容易扩散开来,治理的时候要同时考虑穿透隔水层的精准程度以及避免出现二次污染的情况。核心选择将原位化学氧化技术和水力控制技术相结合的方案,化学氧化药剂借助专用注射井精确地输送到污染区域,药剂的用量需要根据含水层的孔隙度、渗透系数来进行计算,以此保证药剂可均匀地扩散,并且与污染物充分发生反应。水力控制技术借助构建抽注水井网,对含水层内的水流方向调控,促使污染物朝着处理井迁移并聚集起来,提高治理的效率,需要严格把控抽注水量的平衡,避免隔水层因为受力变形而引发渗漏现象,还要监测含水层水质的变化情况,及时对药剂投放量及水流调控参数做出调整,防止治理过程对含水层结构造成破坏。

##### 4.1.3 包气带厚度异常区治理技术适配

包气带厚度异常区可细分为厚包气带和薄包气带这两

种类型,针对其不同的厚度特性,需要适配不同的治理技术,厚包气带区域内,水分向下渗透的速度较为缓慢,污染物的迁移也相对滞后,这种情况下优先考虑采用土壤气相抽提技术以及生物通风技术进行协同治理。具体做法是在该区域合理布设抽气井与通风井,对井间距以及抽气速率进行优化,以此加速包气带内挥发性污染物的脱附过程,强化有氧环境,促进微生物对污染物的降解。而薄包气带区域,污染物很容易穿透至地下水层,需要采用表层治理与地下阻隔相结合的技术。在表层治理方面,运用土壤淋洗技术来去除污染物,淋洗液经过处理达到相关标准后才能排放,防止其渗入地下水,在地下,则布设防渗膜与渗透反应带,以此阻断污染物向含水层迁移的路径,同时还要监测包气带的含水率以及污染物浓度的变化情况,根据监测结果动态调整治理工艺参数,最终实现分层精准治理的目标。

## 4.2 治理技术的水文地质优化路径

### 4.2.1 原位修复技术参数优化

原位修复技术参数的优化要把水文地质条件当作核心依据,以此实现技术效能和地质环境的适配。对于不同渗透性的含水层,要对修复药剂投放的浓度以及速率做出调整,砂质含水层的渗透性比较强,可以提高药剂投放的速率并且采用分段投放的模式,以此保证药剂可覆盖污染区域。粘性含水层的渗透性较弱,需要降低投放速率,还要搭配搅拌装置来提升药剂与污染物的接触效率。要对原位修复井网布局进行优化,依据水力梯度以及污染羽分布的形态,来确定井群密度以及布设角度,让修复范围可精确覆盖污染区域,同时结合地下水补给排泄的规律,调整修复时间窗口,避开补给高峰期,减少水流对修复效果的干扰,凭借动态监测污染物浓度以及水文地质参数,建立参数优化模型,实现修复过程的精准调控。

### 4.2.2 异位修复与地下水保护协同优化

异位修复要加强与地下水保护的协同,借助水文地质条件来优化流程设计,以此规避二次污染风险。在污染土壤

开挖前,依据含水层埋深以及隔水层分布情况,划定开挖边界和深度,设置地下水防护沟以及防渗帷幕,阻断开挖过程中污染物向地下水的迁移。同时,监测地下水位的变化,防止基坑突水导致污染扩散。开挖后的土壤运输和处理过程,配备防渗措施,处理场地设置地下水监测井,实时跟踪水质变化,修复后回填土要挑选与原土层水文地质特性相近的材料,控制回填压实度,防止改变包气带与含水层的渗透性。回填后构建表层防渗与排水系统,减少降水入渗对地下水的影响,形成“开挖—处理—回填”全流程的地下水保护体系,实现异位修复与水文地质环境的协调。

## 5 结语

水文地质系统自身具有的复杂性以及要素之间存在的关联性,使得它在土壤污染治理领域占据着基础性且关键性的地位。从核心理论出发,经过要素分析环节,到技术优化阶段,构建起了一套完整的、以水文地质为导向的治理逻辑框架,清晰地明确了各个要素对于污染物迁移扩散所起到的调控机理,可为技术筛选以及参数优化给予科学方面的支撑。在不同的水文地质场景之下所形成的技术适配方案,实现了治理效能与地质环境之间的协同平衡状态。未来,需要加强对水文地质参数精准量化技术的研发工作,结合动态监测所获取的数据来完善参数优化模型,以此提升治理方案的动态调整能力,应当深入开展多要素耦合作用方面的研究,促使治理技术朝着更加高效、环保以及适配性更强的方向不断发展,筑牢土壤与地下水的生态安全防线。

## 参考文献

- [1] 张黎黎. 环境工程中土壤污染修复技术探析 [J]. 绿色中国, 2025, (08): 109-111.
- [2] 郭林, 刘晓宇, 侯荣凯. 环境监测技术在环境保护工程中的应用研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41 (01): 169-171.
- [3] 魏真. 环境工程中土壤污染修复技术与案例分析 [J]. 城市建筑空间, 2024, 31 (S2): 222-223.