

# 晋城市地下水污染调查及修复技术研究

杜超<sup>1</sup>, 黄勋<sup>2</sup>, 胡佳欢<sup>1</sup>, 许芮<sup>1</sup>, 蒋奕冰<sup>1</sup>, 莫奕樟<sup>1</sup>, 黄彩妹<sup>1</sup>, 魏明蓉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

<sup>2</sup>广西桂林市恭城瑶族自治县人民政府, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月17日; 发布日期: 2026年5月19日

## 摘要

本研究针对晋城市地下水污染问题进行了深入的调查, 并探讨了相应的修复技术。研究通过详尽的实地采样、严谨的实验室分析以及先进的数值模拟技术, 对晋城市地下水污染的现状、成因和扩散机制进行了全面而细致的剖析。在此基础上, 本研究详细对比了多种修复技术的可行性与优缺点, 并结合晋城市的具体地质、气候和社会经济条件, 提出了一套针对性强、操作可行的地下水修复方案。经过实证分析, 该方案在实验室条件下能够有效降低地下水污染物浓度, 改善水质, 为晋城市地下水资源的保护和可持续利用提供了科学依据和实践路径。

## 关键词

晋城市, 地下水污染, 调查, 修复技术, 研究

# Investigation and Remediation Technology Study on Groundwater Pollution in Jincheng City

Chao Du<sup>1</sup>, Xun Huang<sup>2</sup>, Jiahuan Hu<sup>1</sup>, Rui Xu<sup>1</sup>, Yibing Jiang<sup>1</sup>, Yizhang Mo<sup>1</sup>, Caimei Huang<sup>1</sup>, Mingrong Wei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

<sup>2</sup>People's Government of Gongcheng Yao Autonomous County, Guilin Guangxi

Received: March 16, 2026; accepted: April 17, 2026; published: May 19, 2026

## Abstract

This study conducted an in-depth investigation into groundwater pollution in Jincheng City and

\*通讯作者。

文章引用: 杜超, 黄勋, 胡佳欢, 许芮, 蒋奕冰, 莫奕樟, 黄彩妹, 魏明蓉. 晋城市地下水污染调查及修复技术研究[J]. 世界生态学, 2026, 15(2): 292-298. DOI: 10.12677/ije.2026.152031

explored corresponding remediation technologies. Through detailed field sampling, rigorous laboratory analysis, and advanced numerical simulation techniques, the current status, causes, and diffusion mechanisms of groundwater pollution in Jincheng City were comprehensively and meticulously analyzed. Based on this, the feasibility and advantages and disadvantages of various remediation technologies were compared in detail. Considering the specific geological, climatic, and socio-economic conditions of Jincheng City, a targeted and feasible groundwater remediation scheme was proposed. Empirical analysis shows that this proposed method can effectively reduce groundwater pollutant concentrations and improve water quality under laboratory conditions, providing a scientific basis and practical approach for the protection and sustainable utilization of groundwater resources in Jincheng City.

## Keywords

Jincheng City, Groundwater Pollution, Investigation, Remediation Technology, Research

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地下水是城市供水的重要水源，尤其在北方缺水地区，其水质安全直接关系到居民健康与生态稳定。国外研究起步较早，20世纪70年代起便构建了“野外采样-实验室分析-数值模拟-污染修复”的一体化技术体系，Visual MODFLOW、FEFLOW等数值模型被广泛用于污染物迁移模拟，原位化学氧化、微生物降解、植物修复等修复技术已实现工程化应用，形成了成熟的城市地下水污染防治理论。国内研究近20年快速发展，聚焦华北、西北等缺水地区，针对城市地下水污染调查、来源解析、修复技术优化开展大量工作，明确了工业排污、农业面源、生活污水是我国北方城市地下水污染的主要来源。

华北岩溶地区作为我国重要的地下水供水区，岩溶含水层具有径流条件复杂、污染易扩散、修复难度大的特征，相关研究多集中于太原、邯郸、石家庄等城市，重点探讨岩溶地下水污染特征与水文地球化学演化规律[1]。晋城市地处晋东南岩溶水文地质单元，境内岩溶水、孔隙水、裂隙水并存，是华北岩溶地下水系统的重要组成部分，但现有研究多侧重区域水文地质特征分析，针对晋城市地下水污染的系统调查、污染扩散机制模拟及本地化综合修复方案研究较为匮乏。

随着工业化与城市化推进，晋城市地下水污染风险持续加剧，开展针对性研究迫在眉睫。本文旨在全面揭示晋城市地下水污染现状与成因，解析污染扩散机制，比选适配本地的修复技术并提出综合方案，为晋城市地下水资源保护及华北同类岩溶地区污染防治提供理论支撑与实践参考。

## 2. 研究背景与意义

晋城市位于山西省东南部，境内地下水资源丰富，岩溶地下水是区域生产生活的核心供水水源。华北地区岩溶含水层分布广泛，具有“埋藏复杂、连通性强、污染后难治理”的典型特征，是我国地下水环境保护的重点区域。前人研究表明，华北岩溶地下水污染以重金属、石油类、无机盐为主要污染物，工业废水直排、农业化肥过量施用、生活污水渗漏是核心污染源，污染迁移受岩溶管道、裂隙结构控制显著。

但针对晋城市的专项研究存在明显短板：一是缺乏全域覆盖的地下水污染系统调查，污染现状与空间分布特征不明确；二是未结合本地复杂地质条件开展污染扩散机制模拟；三是修复技术多照搬其他区

域，未形成适配晋城岩溶 - 孔隙 - 裂隙复合含水层的综合方案。

多年来，晋城市工业化、城市化快速推进，工业废水、生活污水排放及农业面源污染负荷持续增加，加之监管与治理措施相对滞后，污染物通过土壤渗透、地下水径流进入含水层，导致地下水水质逐步恶化，既破坏生态环境，也威胁居民饮用水安全。在此背景下，本研究开展晋城市地下水污染调查及修复技术研究，实践层面可精准识别污染问题、提供可落地的修复方案，保障区域用水安全；理论层面可丰富华北岩溶地区地下水污染防治的技术体系，为同类城市提供借鉴，具有重要的现实与理论意义。

### 3. 研究方法与过程

本研究采用实地采样、实验室分析和数值模拟相结合的方法进行研究。首先在晋城市区域内精心选取了一系列具有代表性的地下水采样点，这些地点考虑了不同土地利用类型、地质条件以及可能的污染源影响范围。在严格遵守相关采样规范和技术要求的前提下，研究团队采集了这些采样点的地下水样品，并对其进行了一系列的实验室化验分析。这些分析项目覆盖了重金属含量、有机物种类与浓度、无机盐成分等多个方面，旨在全面揭示晋城市地下水的污染现状以及具体的污染物种类和浓度水平。

为了更准确地模拟和预测地下水污染的扩散过程及其影响因素，研究借助先进的地理信息系统(GIS)技术和地下水流动模型等数值模拟工具，对晋城市的地下水流动系统进行了深入剖析。这一过程帮助科研人员更好地理解污染物是如何在地层中迁移、转化并最终形成目前观测到的污染格局的。基于对污染现状的深入理解和模拟分析结果，研究进一步探讨了多种地下水修复技术的可行性和优缺点。这一比较分析涵盖了物理修复技术(例如：土壤修复、地下水抽排处理等)、化学修复技术(如：化学氧化还原法、化学沉淀法等)以及生物修复技术(如：微生物降解、植物修复等)。根据晋城市的具体地质条件、污染特征以及环境目标要求，研究最终提出了一套综合性的地下水修复方案。该方案以生物修复技术为主线，并结合适当的物理和化学修复手段，旨在实现高效、低成本且环保的修复目标。

#### 3.1. 采样方案设计

##### 3.1.1. 采样点数量与类型

共布设 42 个地下水代表性采样点，按埋深划分：浅层地下水(埋深 < 50 m) 30 个、深层地下水(埋深 50~200 m) 12 个；按污染风险与功能区划分：工业区 12 个、农业区 15 个、生活区 10 个、市级饮用水源地 5 个。

##### 3.1.2. 布局依据

以水文地质单元(孔隙水、裂隙水、岩溶水分布)、污染源空间分布(工业企业、农田、污水管网)、土地利用类型、地下水主导流向为核心依据，覆盖晋城市城区、泽州、高平、阳城、陵川、沁水 6 个县域单元，保证采样代表性与空间均衡性。

##### 3.1.3. 典型采样点经纬度坐标

典型采样点经纬度坐标如下表 1。

Table 1. Coordinates of sampling points

表 1. 采样点坐标

地点	经度	纬度
城区饮用水源地	112.85°E	35.48°N
泽州工业区	112.92°E	35.51°N

续表

高平农业区	112.98°E	35.72°N
阳城生活区	112.45°E	35.32°N
沁水岩溶水区	112.18°E	35.65°N

### 3.2. 采样与样品保存标准流程

全程执行 HJ/T164-2020《地下水环境监测技术规范》，流程如下。

洗井：潜水泵抽取 3~5 倍井管储水量，待水温、pH、电导率等参数稳定后采样；

现场测定：哈希 HQ40d 便携式多参数仪实测 pH、水温、电导率、溶解氧；

样品采集：重金属用聚乙烯瓶、有机物用棕色玻璃瓶、微生物用无菌瓶，平行双样采集率  $\geq 10\%$ ；

样品保存：4℃冷藏避光，重金属加硝酸调 pH < 2，有机物加抗坏血酸除余氯；

运输交接：冷藏箱密闭运输，24 h 内送达实验室，建立完整溯源台账。

### 3.3. 污染物检测仪器与国标方法

所有检测依据国家水质/生活饮用水检测标准，仪器与方法如下。

重金属(铅、汞、镉)；

分析仪器：安捷伦 ICP-MS 7900 电感耦合等离子体质谱仪；

检测方法：GB/T 5750.6-2023《生活饮用水标准检验方法 第 6 部分：金属和类金属指标》；

<http://down.foodmate.net/standard/sort/3/137085.html>

有机污染物(石油类、卤代烃)；

分析仪器：安捷伦 GC-MS 7890A-5975C 气相色谱 - 质谱联用仪、JL BG-120 红外测油仪；

检测方法：HJ 637-2018《水质石油类和动植物油类的测定红外分光光度法》、HJ 620-2011《水质挥发性卤代烃的测定顶空气相色谱》；

无机盐(硫酸盐、氯化物)；

分析仪器：赛默飞 ICS-600 离子色谱仪；

检测方法：GB/T5750.5-2023《生活饮用水标准检验方法 第 5 部分：无机非金属指标》。

<http://down.foodmate.net/standard/sort/3/137078.html>

### 3.4. 数值模拟模型构建与参数校准

#### 3.4.1. 模型名称

Visual MODFLOW Flex 7.0 地下水三维流动与溶质运移模型，耦合 ArcGIS 10.8 空间分析。

#### 3.4.2. 模型构建过程

水文地质概念模型：垂向分 3 层(浅层孔隙含水层、中层裂隙弱含水层、深层岩溶含水层)；侧向为隔水边界，上边界接受大气降水入渗，下边界为弱透水层。

数学模型：采用三维非稳定地下水流方程 + 溶质对流 - 弥散方程；

网格剖分：平面 100 m × 100 m 矩形网格，共 1256 个计算单元，垂向分层加密。

## 4. 研究结果与分析

### 4.1. 地下水污染现状

通过对晋城市地下水采样点的详细分析，本研究发现该地区的地下水污染问题相当严重。采集的水

样检测结果显示出多种污染物超出了安全标准,其中包括重金属(如铅、汞、镉等)、有机污染物(如石油类物质和合成有机化合物)以及无机盐(如硫酸盐和氯化物)。其中,重金属污染尤为突出,其来源主要是工业生产过程中的废水排放以及农业生产活动中化肥和农药的不合理使用所导致的土壤侵蚀和径流带入。

## 4.2. 地下水污染成因与扩散机制

借助地理信息系统(GIS)强大的空间分析和可视化功能,以及构建的地下水流动模型模拟技术,本研究深入剖析了晋城市地下水污染的成因及其扩散机制。研究表明,晋城市的地下水污染主要源于工业生产活动产生的废水直排或非法倾倒行为;农业生产环节中过量施用化肥和农药引发的面源污染;以及城市生活污水排放系统的不完善或超负荷运行导致的污水下渗。

## 4.3. 修复技术的可行性分析

研究团队对多种地下水修复技术进行了详细的可行性分析,考虑了技术的适用范围、效果、成本及操作难易程度等方面的因素。具体分析如下:

### 1) 物理修复技术

- 地下水抽排处理: 该技术通过抽取污染地下水并进行地面处理,去除污染物后再回灌地下。该方法适用于污染较为严重且污染层次较深的地下水,但处理成本高且需长期运行。
- 土壤修复: 包括土壤气相抽提、热脱附等方法,通过物理手段去除土壤中吸附的污染物,间接减少地下水污染。这种方法适用于地表污染源较明显的区域。

### 2) 化学修复技术

- 化学氧化还原法: 通过向地下水中注入氧化剂(如过硫酸盐、过氧化氢)或还原剂(如亚硫酸盐),改变污染物的化学形态,使其转化为无害物质。该方法对有机污染物特别有效,但需考虑化学药剂的环境影响。
- 化学沉淀法: 利用化学反应使污染物沉淀,从而减少地下水中的污染物浓度。适用于处理重金属污染,但需谨慎控制反应条件,防止二次污染。

### 3) 生物修复技术

- 微生物降解: 利用特定微生物的代谢活动分解污染物,达到净化地下水的目的。该方法环保、成本低,但需选择适合的微生物种类和生长环境。
- 植物修复: 种植特定植物,通过植物的吸收、转化和降解能力,去除土壤和地下水中的污染物。该技术对轻度污染区域有效,但修复周期较长。

## 5. 讨论

### 5.1. 研究结果的环境意义

本研究首次系统完成晋城市全域地下水污染调查,明确重金属、有机物、无机盐复合污染为区域核心污染特征,其中重金属污染占主导,精准识别了工业排污、农业面源、生活污水下渗三大污染源,为晋城市地下水污染精准防控提供了基础数据支撑。

研究构建的GIS耦合地下水流动模型,可量化解析污染物在岩溶-孔隙-裂隙复合含水层中的迁移规律,弥补了晋城地区污染扩散机制研究的空白,为污染预警、源头管控提供了技术依据。提出的“污染源控制+物理-化学快速控污+生物长期修复”综合方案,兼顾治理效率、成本与生态安全性,实验室验证效果显著,既适配晋城地质条件,也符合北方岩溶城市地下水修复的需求,对保障区域饮用水

安全、维系岩溶生态系统稳定具有重要现实意义。

## 5.2. 与前人研究对比

与华北岩溶地区已有研究对比,本研究结果与太原、邯郸等城市高度契合,均证实工业源、农业面源是华北岩溶地下水污染的主要来源,重金属为首要污染物,验证了区域污染的共性规律,说明北方岩溶城市地下水污染受人类活动与地质条件双重控制。

在模拟技术上,前人多采用单一水文地质模拟[2],本研究耦合 GIS 空间分析与三维溶质运移模型,更适配晋城复杂含水层结构,模拟精度与空间可视化效果更优;在修复技术上,前人多采用单一物理或化学修复,存在成本高、易二次污染的问题[3],本研究的综合修复方案兼顾快速治理与生态修复,更符合低碳环保的治理理念,填补了华北岩溶地区地下水综合修复研究的不足。

针对晋城市的专项研究中,既往成果仅聚焦局部区域水文地质或污染初步调查,本研究实现了全域调查、机制解析、方案研发的全链条研究,填补了晋城市地下水污染系统研究的空白。

## 5.3. 研究不足之处

采样覆盖局限性:虽覆盖不同土地利用与地质单元,但受现场条件限制,偏远岩溶山区、小型污染源周边采样点密度不足,可能遗漏局部污染热点。

模拟精细度不足:采用区域水文地质参数,未对岩溶管道、裂隙等微观结构进行精细刻画,污染物迁移模拟的微观精度有待提升。

修复验证不充分:仅完成实验室条件下的方案验证,未开展野外原位中试试验,方案在实际工程中的适配性、长期稳定性未得到检验。

污染溯源定性化:仅通过污染特征定性解析来源,未采用同位素示踪、指纹图谱等技术开展定量溯源,污染源贡献解析精度不足。

## 5.4. 未来研究方向

完善监测网络:加密偏远岩溶区、重点污染源周边采样点,构建长期动态监测体系,实现污染实时追踪。

精细化数值模拟:结合高精度岩溶地质勘察数据,构建耦合岩溶管道、裂隙的三维精细模型,提升污染迁移预测精度。

原位中试优化:选取典型污染区开展综合修复方案原位中试,优化工艺参数,形成工程化技术规范。

定量溯源研究:采用环境同位素、污染物指纹图谱技术,定量解析各类污染源贡献比例,支撑精准控源。

智慧防控体系:融合 GIS、大数据、物联网技术,构建“监测-预警-修复-管控”一体化智慧平台,提升地下水管理效率。

## 6. 综合修复方案及其验证

基于上述技术的优缺点分析,结合晋城市的地质、气候和污染特征,提出一套综合修复方案:

1) 污染源控制:加强对工业废水排放、农业面源污染和城市污水处理的监管,减少新的污染物进入地下水系统。

2) 物理-化学修复联合应用:在污染严重区域,采用地下水抽排处理与化学氧化还原法相结合,快速降低地下水中污染物浓度。

3) 生物修复长期应用:在污染程度较轻的区域,通过微生物降解和植物修复,逐步改善地下水质量。

4) 监测与评估：建立地下水质量监测系统，定期评估修复效果，及时调整修复方案。

研究团队在实验室条件下对综合修复方案进行了验证。结果显示，采用上述方案后，污染地下水中主要污染物的浓度显著降低，水质得到明显改善。这一结果为晋城市地下水修复提供了科学依据和实践指导。

## 7. 结论与展望

本研究通过对晋城市地下水污染的系统调查，深入分析了其污染现状、成因和扩散机制，并提出了一套切实可行的修复技术方案。研究表明，综合应用物理、化学和生物修复技术，能够有效降低地下水中的污染物浓度，改善水质。同时，强化污染源控制和地下水监测，对于保护地下水资源、保障居民饮用水安全具有重要意义。

未来，晋城市应继续加大对地下水污染治理的投入，进一步优化修复技术，加强环保宣传和公众参与，结合本研究提出的未来方向开展精细化研究，构建智慧化防控体系，共同维护地下水环境的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 郭淑凝. 山西省地下水污染现状与防治对策研究[J]. 能源与节能, 2023(2): 96-98.
- [2] 吴汾奇, 祝凯, 马偲尧, 等. 地下水污染修复技术及其国内工程应用进展[J]. 科技通报, 2024, 40(3): 1-8+27.
- [3] 蒲生彦, 王宇, 王朋. 地下水循环井修复技术与应用: 关键问题、主要挑战及解决策略[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(3): 78-86.