

地下水污染风险评价研究现状与展望

徐蓓艺¹, 王 策¹, 周光扬², 周鹏鹏²

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要:【背景】全球经济社会的迅速发展加剧了地下水资源危机和水污染问题, 地下水污染风险评价成为污染防治与修复的关键基础。【进展】系统总结了国内外相关研究, 综述地下水污染风险评价理论的发展及其体系的建立。基于“源-路径-受体”的评价体系, 归纳污染源载荷风险评价、地下水脆弱性评价和污染危害评价 3 个部分的不同研究方法。地下水污染风险评价已从最初的单一维度定性评估, 发展为注重污染机理和后果的定量过程模型, 并融合水文地球物理、地质随机方法和机器学习等现代技术, 以增强模型可靠性。当前研究中的主要问题包括: 污染源叠加效应解析不足、复合污染物在复杂含水系统中的动态迁移机制不清、受体风险评价不全面、模型不确定性较大等。不同污染物在多变地质环境下的迁移机制与过程研究, 是亟需解决的关键科学问题。【展望】针对矿区多源污染、复杂地质条件及半人工化生态系统, 对矿区地下水污染风险进行精细化过程评价, 是矿山生态治理和修复的重要基础。未来研究应重点关注以下几个方面: 多源数据融合的全周期污染水文地质监测、复杂含水系统中污染物在自然与人为影响下的迁移动态及风险响应、跨学科的风险评价与决策等。上述研究将有助于提高地下水污染风险识别与预测的精度, 实现地下水科学管理, 保障水资源的安全与可持续利用。

关键词: 地下水污染风险评价; 源-路径-受体; 污染源载荷风险; 地下水脆弱性; 地下水功能价值; 污染物反常迁移; 矿山地下水污染风险

中图分类号: TD80; X523 **文献标志码:** A

Current status and prospects of research on groundwater contamination risk assessments

XU Beiyi¹, WANG Ce¹, ZHOU Guangyang², ZHOU Pengpeng²

(1. College of Transportation Engineering of Nanjing Tech, Nanjing 211816, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: [Background] Rapid global socio-economic development has intensified the resource crisis and contamination of groundwater, rendering groundwater contamination risk assessments critical to contamination prevention, control, and remediation. [Progress] Through a systematic summary of domestic and international studies, this study reviews the development of theories on groundwater contamination risk assessments and the formation of the theoretical system. Based on the source-pathway-receptor assessment system, this study presents a summary of the research methods for the assessments of contamination source load risks, groundwater vulnerability, and contamination hazards. Groundwater contamination risk assessments have evolved from unidimensional qualitative assessments to quantitative process models highlighting contamination mechanisms and consequences. To enhance the reliability of these models, modern technologies such as hydrogeophysics, geological stochastic methods, and machine learning have been incorporated. Primary issues in current research include the inadequate analysis of the superposition effects of contamination sources, undefined dynamic transport mechanisms of compound contaminants in complex aquifer systems, incomplete assessments of receptor risks, and high model uncertainty. Exploring the transport mechanisms and processes of various contaminants in changeable geologic environments has become a critical scientific issue to be addressed urgently. [Prospects] Given the multi-source contamination, complex geologic conditions, and semi-artificial ecosystems in mining areas, conducting fine-scale process assessments of groundwater contamination risks in the areas serves as an essential foundation for ecosystem management and restoration of mines. Future research should focus on the full-cycle hydrogeologic monitoring of contamination through the fusion of multi-source data, the dynamic transport and risk responses of contaminants in complex aquifer systems under natural and anthropogenic influences, and interdisciplinary risk assessment and decision-making. This study will assist in enhancing the identification and prediction accuracy of groundwater contamination risks, achieving scientific groundwater management, and ensuring the safe and sustainable utilization of water resources.

Key words: groundwater contamination risk assessment; source-pathway-receptor; contamination source load risk; groundwater vulnerability; functional value of groundwater; anomalous contaminant transport; groundwater contamination risk in mines

地下水是重要的淡水资源, 具有水量稳定、水质洁净、分布广泛等特点。全国约 400 个城市和超过 70% 的人口依赖地下水作为饮用水源^[1]。随着工业化和城市化的发展, 污染排放及过度开采等导致地下水污染风险不断增加。全球约 80% 的废水未经充分处理就被

排放, 超过 8 亿人缺乏安全饮用水, 约一半的发展中国家人口可能接触到有害的污染水源^[2]。在我国, 化工生产、采矿冶炼和农业活动导致地下水, 特别是浅层地下水的水质恶化, 威胁饮用水安全和水生生态文明建设^[3-4]。全面评估场地和流域的地下水污染风险,

收稿日期: 2024-05-14; 接收日期: 2024-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41807189, 42172271)

第一作者: 徐蓓艺, 1991 年生, 女, 江苏南通人, 博士, 讲师。E-mail 地址: xuby0102@njtech.edu.cn

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

是实现分区防治、管理和修复的基础。

地下水污染风险评价理论基于地下水脆弱性发展而来，并不断完善^[5]。目前广泛接受的地下水污染风险概念是指在一定的时间和空间范围内，存在可能导致地下水污染的潜在危险，以及这种污染事件对人类健康和环境的负面影响的可能性和程度^[6]，该概念综合考虑了污染物的类型、浓度、迁移途径和污染危害等因素。同时，地下水风险评价体系逐步完善，从早期的水质现状评估和含水层防污性能评价，转向关注污染过程机理和后果的定量模型。自 20 世纪 80 年代以来，风险理论被引入地下水污染领域，综合考虑污染物的性质、迁移途径和受体敏感性等因素，评估地下水系统的承受能力^[7-9]。此后，“源-路径-受体”（source-pathway-target）评价模型在国内外地下水污染风险评价研究中广泛应用，综合考虑了污染源风险、地下水脆弱性和污染危害（地下水功能价值或损伤）^[10-11]。2023 年，生态环境部联合相关部门修订发布了《地下水污染防治重点区划定技术指南（试行）》（环办土壤函〔2023〕299 号），梳理了包含地下水污染源荷载评估、地下水脆弱性评估和地下水功能价值评估的地下水污染风险评价流程，优化了管控类区域地下水污染防治的分区管理技术体系^[12]，跨生态、经济等多学科的多维度评价体系和生态经济价值评估方法初步建立^[13]。同时，现代探测技术和人工智能、大数据

驱动等技术逐渐融合，增强了相关评价模型的可靠性^[5]。

尽管地下水污染风险评价体系与方法在近 30 年得到快速发展和完善，但当前研究中仍存在一些不足，例如：对较大尺度非均质含水层中复合污染物的相互作用与迁移过程的精确量化不足，对地下水功能价值评估和污染导致的生态损伤研究不充分，模型的结构和参数存在较大不确定性等问题^[14-16]。笔者旨在阐述国内外地下水污染风险评价的研究现状，包括概念及发展历程；系统介绍基于“源-路径-受体”模型的地下水污染风险评价方法，涵盖污染荷载、脆弱性和危害评价，并阐述数据驱动技术在模型优化中的应用；指出当前研究中的不足和重点；最后展望地下水污染风险评价的未来趋势，以期推动评价方法的创新和应用。

1 地下水污染风险的概念及属性

地下水污染风险的概念基于地下水脆弱性概念不断发展而形成。SSD. Forster^[17]在 1987 年指出，地下水污染风险源自含水层的脆弱性以及人类活动所带来的污染负荷。此后，对地下水污染风险的研究不仅关注地下水污染的发生概率，还考虑其对人体健康和生态环境的危害^[18]（表 1）。

表 1 地下水污染风险概念发展

Table 1 Concept evolution of groundwater contamination risks

时间	地下水污染风险概念	来源
1987	由于含水层的脆弱性和人类活动导致的污染负荷而引起的潜在损害的可能性	SSD. Foster ^[17]
1994	由于人类活动对地下水环境的干扰导致的可能发生地下水污染或过度开采等损害的概率	T. Bonomi 等 ^[19]
1997	潜在污染源释放污染物导致地下水受到污染的可能性，以及污染对风险受体造成的潜在损害程度	M. Civita 等 ^[20]
2000	由自然环境或人类活动产生的污染，通过地下含水层介质传播，对社会环境及生态环境产生的不利后果的概率	胡二邦 ^[21]
2005	“源-路径-受体”模式，污染源释放物质，通过特定的传输途径进入地下水体系，可能对地下水受体造成潜在的危害	N. Goldscheider ^[22]
2006	含水层中地下水由于其人类活动而遭受污染到不可接受水平的可能性	B. Morris 等 ^[23]
2008	由污染源的灾害分级、地下水易污性和地下水价值因素综合评估后，确定地下水受到污染威胁的程度	周仰效等 ^[24]
2013	潜在污染危害性、发生概率、以及对环境和人类健康可能造成的损害程度	N. Somaratne 等 ^[25]
2014	地下水系统受到污染物侵入后遭受损害的可能性和污染物对经济、环境和人类健康方面的潜在影响	M. W. M. Simpson 等 ^[6]
2020	在一定的时间和空间范围内，存在可能导致地下水受到污染的潜在危险，以及这种潜在的污染事件对人类健康和环境造成的实际损害程度	H. E. Massone 等 ^[8]

地下水污染风险具有隐蔽性、动态性和不确定性等特征。隐蔽性指地下水的埋藏特征使得地下水污染不易察觉。动态性则是指地下水污染风险受地下水系统、污染源状态、环境条件和管理措施等因素的影响，具有时空变异性^[26]。不确定性是指污染物在地下水系统中的运移、转化和降解过程中，受多种因素影响，

导致污染发生概率和严重程度难以确定。

地下水污染风险的隐蔽性意味着污染情况难以被直接观测，需要依赖高精度监测技术如远程传感技术或监测井网络实现实时监测^[27-28]。动态性要求长期监测水量和水质参数的季节性波动变化，并结合模型分析污染物迁移和地下水流动的空间变异特征^[29]。不确

定性则要求采用统计学、敏感性分析和数据驱动等技术,合理量化不确定因素,以优化风险评价模型^[30]。

2 地下水污染风险评价体系

针对不同空间尺度和地下水风险管理目标,从大尺度的流域和平原的风险初筛,到局域和场地尺度的风险分级与重点管控,地下水风险评价的精度逐渐提高。在大尺度流域,常采用考虑污染暴露和污染危害的“相对风险模型”^[31]来圈定高风险区域。而在高风

险和重点管控区域,如工业园区、矿区、农业面源污染区和多水源地集中供水区,地下水污染风险分级和分区则依据“源-路径-受体”控制模型进行评价。

地下水污染风险的“源-路径-受体”评价模型由 N. Goldscheider 等^[22]提出,涵盖了污染源危害(源)、地下水脆弱性(路径)和地下水污染危害(受体)三大环节的全过程管理及综合风险评估^[32-33](图1)。具体包括:

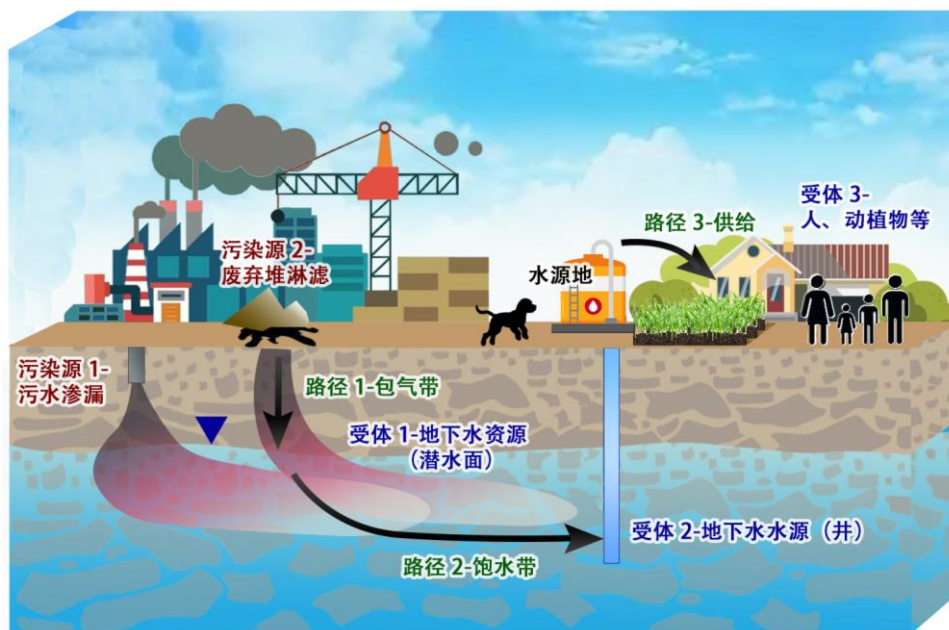


图1 地下水污染风险“源-路径-受体”模型

Fig.1 Source-pathway-receptor model of groundwater contamination risks

1) 污染源荷载风险评价:表征潜在污染源的分布、污染释放量和污染物危害性。

2) 地下水脆弱性评价:评估地下水系统对污染的防护能力,包括含水层的本质脆弱性和针对特定污染物迁移特性的特殊脆弱性。

3) 污染危害评价:评估地下水功能价值(如开发利用的重要性)或污染对敏感受体(如人体健康、生态环境等)的损害。

在实际地下水污染风险评价工作中,评价对象包括水资源(Resource,污染物到达地下水水面的风险)和水源(Source,污染物到达供水井、泉、水库、河湖等水源的风险)。水资源评价的主要任务是评估地下水系统的脆弱性和对特定污染物的易损性^[36]。对水源的评估则侧重于水质状况的稳定性、安全开采量的界定和保护区的划定^[37]。

基于“源-路径-受体”的风险评价体系如图2所示。各环节的评价指标常采用指标相乘的方法进行叠加,以反映各环节耦合作用对污染风险结果的综合影响,公式如下:

$$R_I = S_I \times V_I \times W_I \quad (1)$$

评估结果通常基于GIS平台绘制地下水风险等级图,通过不同颜色、层次或标记展示各区域的风险程度。基于“源-路径-受体”框架的地下水污染风险评价体系突出对潜在污染源、污染过程和地下水受体的综合关注;指标方法和物理模型方法的结合有助于量化地下水污染过程、系统分析风险成因、厘清多要素耦合的地下水污染风险调控机制,在国内外地下水污染风险评估、风险分级和分区管控、污染修复等方面应用广泛^[38]。

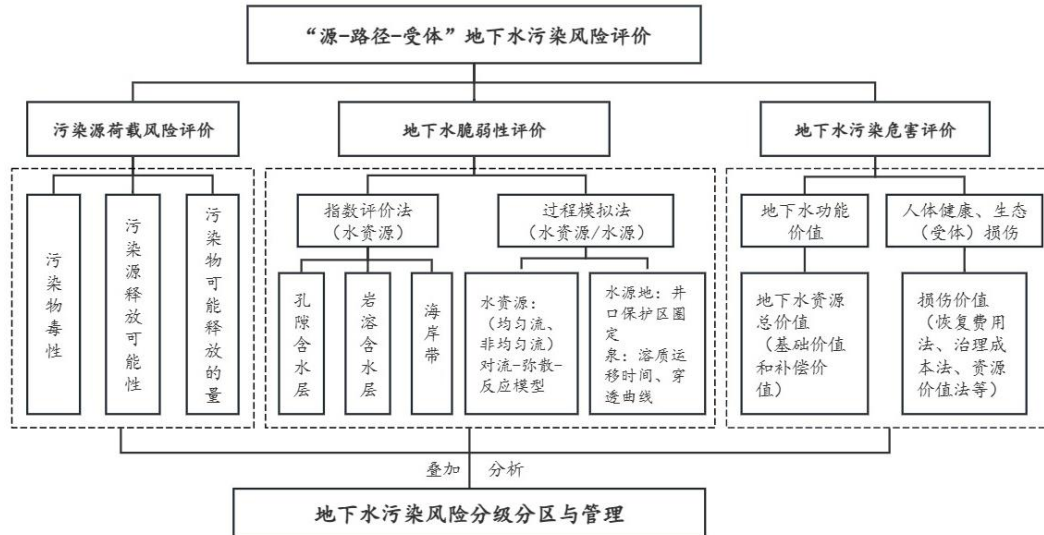


图 2 基于“源-路径-受体”的地下水污染风险评价 (据文献[32,34-35,38]修改)

Fig.2 Groundwater contamination risk assessment based on the source-pathway-receptor framework (modified after references [32,34-35,38])

3 “源-路径-受体”污染风险评价方法

基于“源-路径-受体”的地下水污染风险评价方法的综述，主要围绕污染源荷载风险评价、地下水脆弱性评价、污染危害评价 3 方面的研究方法展开。具体评价方法的选择应考虑地下水用途、模型复杂度、评价对象特性、研究区域水文地质特征和数据量等多因素进行^[26]。基本方法包括指标评级、过程模拟、数据驱动的风险概率预测等。

3.1 污染源荷载风险

污染源荷载风险评价主要评估人类活动和污染源对地下水系统的污染负荷，识别研究区内潜在污染源的性质，如表层污染物的分布、污染方式、毒性和迁移能力等，并估计该污染源对地下水的潜在污染程度，这是地下水污染风险评价的首要环节^[39]。国内外污染源荷载风险评价方法见表 2。

表 2 污染源荷载风险评价方法

Table 2 Methods for assessing contamination source load risks

方法	主要标准/参数	来源
污染源荷载评分指数法	污染物毒性、污染源释放可能性和污染物可能释放量	地下水污染防治重点区划定技术指南 ^[12]
优先级设置方法	污染源危害、暴露途径、受体脆弱性	Z. Tleuova 等 ^[40]
陆域污染源荷载综合评估法	污染源荷载监测、地理信息系统分析、已有研究成果分析	M. Tomic 等 ^[41]
分类判别法	排放形式和排放规律	环境影响评价技术导则地下水环境 ^[42]
固定和移动污染源风险分类	危险物质、滞留池、安全屏障、泄漏检测系统、警报系统和运移物质的数量	A. Rebelo 等 ^[43]

目前，国内常依据《地下水污染防治重点区划定技术指南》^[12]中的单个及污染源荷载综合指数计算方法进行风险等级划分。单个地下水污染源荷载风险计算公式如下：

$$P_i = T_i \times L_i \times Q_i \quad (2)$$

以单个污染源荷载风险计算结果为基础，叠加区域复合污染源进行综合风险指数计算，判别不同区域污染源荷载的风险级别。污染源荷载综合指数计算公式如下：

$$PI = \sum P_i \times W_i \quad (3)$$

基于上述方法的污染源荷载评价研究，综合考虑了地表污染源类型、污染物毒性和污染物产生量等人

类活动因素对地下水污染风险的影响，对于流域及更大尺度的污染源荷载评估具有实际意义^[36]。然而，这些方法通常提供定性的评估结果，无法准确量化特定污染物的迁移过程，且在基础资料覆盖度较差和数据精度不高的区域，其应用可能受到限制^[44]。

3.2 地下水脆弱性

地下水脆弱性，最初被定义为“含水层系统对人为污染的相对敏感性”，目前较为公认的定义是“污染物从含水层上方某位置进入并到达地下水系统特定位置的趋势或可能性”^[45]。地下水脆弱性反映了地下水系统对外界污染荷载的响应程度和防污能力，是地下水风险评价的重要环节。地下水脆弱性分为本质脆弱

性和特殊脆弱性，前者侧重地下水系统的物理特性引起的防污性能，忽略污染物的生物化学属性；后者则考虑了特定污染物在含水层中的迁移能力^[46]。

3.2.1 指数评级

基于指数模型的脆弱性评价方法操作简便且数据需求量较小，但需要根据不同含水层系统类型选取合适的评价因子并构建合理的指数模型进行计算（表3）。王淼淼等^[47]调查了草原区和大型露天煤矿复杂的水文地质条件，增设了距采场中心距离和矿区土地类

型两项指标，构建了适用于该场地的 DRTIC-SL 地下水脆弱性评价模型。Wang Yanxin 等^[48]提出了一种改进的 DRAMIC 模型用于评估地下水脆弱性，其中剔除了地形和土壤介质因子，增加了含水层厚度和污染物的影响，并利用 GIS 绘制了湖北武汉市地下水脆弱性地图。Yin Leihao 等^[49]构建了改进的 PIssR 指数模型，对中国北方覆盖型岩溶水进行脆弱性评估，考虑了地下水流系统分布对污染物迁移的影响。

表 3 地下水脆弱性评价的指数模型方法
Table 3 Index-based models for groundwater vulnerability assessment

类型	模型	评价指标	应用
孔隙水	DRASTIC	地下水位埋深、净补给量、含水层介质、土壤介质、地形坡度、包气带影响、渗透系数	徐颖等 ^[52]
	GOD	含水层类型、覆盖岩性、地下水埋深	原若溪等 ^[53]
	SINTACS	地下水位埋深、有效入渗、非饱和带、土壤介质、含水层介质、渗透系数、地形坡度	A. Razavi Dizaji 等 ^[54]
	AVI (Aquifer Vulnerability Index)	潜水面以上各地层厚度、渗透系数	S. Iswahyudi 等 ^[55]
岩溶水	SI (Susceptibility Index)	地下水位埋深、净补给量、含水层介质、地形坡度、土地利用	M. Arfaoui 等 ^[56]
	EPIK	表层岩溶、保护层、入渗条件、岩溶网络发育程度	A. Nekkoub 等 ^[57]
	COP	汇流、覆盖岩性、降水量	M. Khazaa'lah 等 ^[58]
	PI	保护层、入渗条件	E. Şener 等 ^[59]
海岸带	GALDIT	地下水赋存状态、含水层渗透系数、海平面以上地下水埋深、距海岸距离、海水入侵的影响程度、含水层厚度	Lyu Pan 等 ^[60]

指数评价方法多为定性或半定量，因子评分和权重设置存在一定主观性。目前，包气带的评价主要采用耦合 GIS 的定性方法，侧重于描述和分类环境特征。然而，这种方法难以量化大尺度、复杂包气带-含水层中的污染物迁移过程^[50]。此外，目前指数方法大多用于评估水资源（含水层）的脆弱性，而对于水源（如供水井）的风险评估则需依据污染运移时间和路径来确定保护区范围^[51]。

3.2.2 过程模拟

相较指数法，过程模拟法可以考虑不同类型的污染源（点源和面源）和污染物特性，模拟污染物在地下水系统中的迁移、扩散和反应过程，从而定量评估地表污染源对地下水系统的影响。过程模拟方法不仅可评估水资源的脆弱性，在水源（供水井、泉等）风险评估和保护区划分方面同样具有较强应用价值（表4）。

基于过程模拟法的地下水脆弱性评估，最早应用于井口保护区的划分^[67]。该方法以水流模型为基础，通过正向或反向的离子示踪模型和溶质对流-弥散模型等，结合 GIS 技术，根据运移（滞留）时间划分供水井捕获区或水源地保护区^[73]。随后，S. Brouyere 等^[76]指出了基于污染过程的 3 个脆弱性评价参数，即

污染物从污染源到评价目标的最短运移时间、目标污染最大浓度，及持续污染时间。基于此，国内外学者构建了一系列量化模型，通过绘制目标处的污染物（溶质）浓度穿透曲线（breakthrough curve），提取关键指标，如目标处最大浓度与污染源施加浓度比值、达到污染阈值浓度的时间、高于阈值浓度的持续时间等，以定量方式评估地下水污染脆弱性^[72]。

过程模拟法可应用于不同地下水渗流条件。在研究松散沉积物孔隙含水层的地下水流问题时，常基于等效介质假说，构建一维到三维的地下水模型对地下水渗流和污染物迁移进行模拟^[61-64]。对于裂隙介质优势通道和土壤局部透镜体，升尺度非局域模型，如双区模型（dual-domain single-rate mass transfer, DDMT）、连续时间随机游走模型（continuous time random walk, CTRW）、多速率质量交换模型（multi-rate mass transfer, MRMT）等，可以刻画污染物在非均质介质中的反常迁移特征^[77-78]。然而，目前考虑介质非均质性的地下水污染风险过程模拟和评价，多以模拟包气带中的污染迁移为主^[65-68]，应用上述非局域模型进行地下水污染风险评估研究较少。此外，对岩溶水系统及污染过程的时空动态性方面定量表征相对不足^[79]。复合污染物的多介质界面过程、溶质运移反应相关参

数的升尺度率定和不确定性研究，是污染风险过程性评价的重难点^[80-81]。

表4 地下水源脆弱性评价的过程模拟方法
Table 4 Process simulation methods for groundwater vulnerability assessment

类型	标准	模型	应用
水资源 (Re-source)	溶质传输时间、稀释、穿透持续时间和穿透曲线的时间形状	一维非饱和带溶质运移模型 (HYDRUS-1D)	S. Saw 等 ^[61]
	污染物浓度、迁移速度和水流量	淋失估算及化学模型 (leaching estimation and chemistry model, LEACHM)	N. Nasri 等 ^[62]
	均匀流	地下水流模型 (Modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, MODFLOW)、溶质运移模型 (Modular three-dimensional transport model, MT3D)	S. Eslamian 等 ^[63]
	污染物的迁移路径和浓度变化	地下水流及溶质运移模型 (finite-element ground water flow and transport model, FEFLOW)	高月香等 ^[64]
	污染物的浓度、运移速度和扩散距离	根区水质模型 (root zone water quality model, RZWQM)	S. Esmacili 等 ^[65]
	非均匀流	一维双重渗透模型 (MACRO)	M. O. Schwartz 等 ^[66]
	孔隙水在包气带的滞留时间和净入渗率	二维非饱和带溶质运移模型 (HYDRUS-2D)	Zheng 等 ^[67]
	污染物的迁移速度和浓度变化	随机传递函数模型 (transfer function model, TFM)	M. Bancheri 等 ^[68]
水源 (Source)	污染物的浓度、迁移速度和运移时间	地下水流模型 (MODFLOW)、粒子示踪模型 (particle tracking post-processing model, MODPATH)	L. M. Bofill 等 ^[69]
	供水井	地下水流模型 (MODFLOW)	徐树媛 ^[70]
	距水源的固定距离、泵抽引起的降水区域、污染到达水源的滞留时间 (TOT)	正向、反向溶质对流-弥散模型 (forward and backward groundwater flow and transport model, WATFLOW-WTC)	E. O. Frind 等 ^[71] 、 J. W. Molson 等 ^[72]
	含水层水位降深、开采区距水源井的距离	地下水流模型 (MODFLOW)、粒子示踪模型 (MODPATH)	E. Steiakakis 等 ^[73]
	污染物滞留时间、污染浓度、井口捕获区等	岩溶泉动态模型 (recharge-conduit-diffuse, RCD)	C. Butscher 等 ^[74]
	溶质的运移时间和路径轨迹	土壤和水分评估模型 (soil and water assessment tool, SWAT)	S. J. Zeiger 等 ^[75]
泉	各流动系统对泉水排放的时间变化贡献和穿透曲线的时间形状		
	泉水流量和污染物的浓度		

3.3 污染危害

自 20 世纪 80 年代以来，“受体”风险的概念逐步融入地下水污染风险评估框架。早期的评估主要针对需保护的水源（井、泉等）和水资源（含水层）。2004 年，欧盟委员会在岩溶含水层风险评估报告（COST Action 620）中明确指出，评估地下水水源或水资源的污染危害是地下水污染风险评估的关键内容^[33]。随着生态风险理论的融入，污染受体的概念扩展到人群、

生物类群和生态系统，危害评价也涵盖了地下水污染对人体健康、生态环境和社会经济的多方面影响^[82]。目前，地下水污染危害评价主要从两方面展开：一是评估地下水的功能价值，包括供给、支持、调控和文化作用（图 3），以衡量污染可能造成的危害程度与规模^[83]。二是采用健康风险和生态风险评价模型，评估地下水污染对人体健康、生态环境（如农作物产值、生物多样性）等方面的潜在损害。

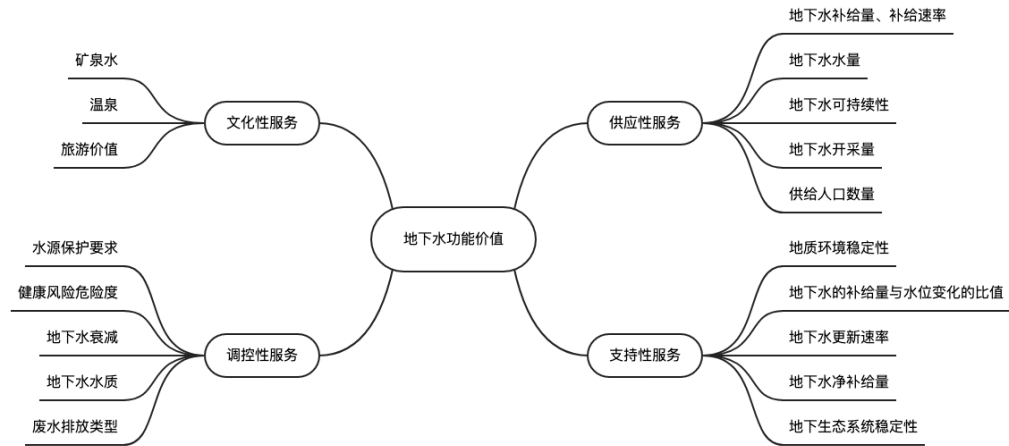


图 3 地下水功能价值 (据 J. Van Der Gun 等^[83]修改)

Fig.3 Functional values of groundwater (modified after reference^[83])

针对地下水功能价值的评价，通常考虑水质和水量，评估其开采利用价值^[84-85]。此外，学者们根据不

同区域的自然地理和地质条件及不同的评价目标，从多角度构建地下水功能评价模型，并评估其社会经济

价值。Huan 等^[86]针对东北松花江流域的典型工业污染区域,建立了地下水资源(资源支持、再生、调节及可利用)、生态(植物生长)和地质功能(水位降落漏斗控制)的价值指标模型,并基于基准和补偿价值评估了地下水的总经济价值及污染损失价值。马尚钰等^[87]选择南水北调中线工程河南省受水城市,构建了地下水生态系统功能体系,包括供给服务(生活、农业、工业用水)、调节服务(净化水质、固碳、涵养水源)、支持服务(预防沉降、控制降落漏斗)和社会服务(科学教育),并基于替代市场方法核算了地下水生态系统服务价值。

地下水污染评估中,最受关注的是对人体健康的潜在危害。此类研究通常采用美国环保署(U.S.EPA)开发的饮用水污染风险评估“四步法”,包括问题识别、毒性评估、暴露评估和风险特征化^[88]。近年来,地下水污染的生态风险评估逐步展开,采用了多种模型,如潜在生态危害指数法^[89-90]、风险商值法^[91]、联用种间关系模型和地下水生态系统物种敏感度曲线的方法^[82]等,以评估不同类型地下水污染的潜在生态损伤。自2020年起,国家对地下水生态环境损伤的价值鉴定和评估方法做出明确规定,从水源供水功能、生物种群及多样性、农作物生产功能损伤等角度构建综合指标,圈定损伤范围、评估受损程度,并对损伤及其修复进行经济价值量化^[84,92]。将地下水污染损伤价值纳入风险评价模型,有助于评估地下水保护和修复的紧迫性,是地下水管理的重要环节。目前,地下水污染相关的损伤价值研究尚处于起步阶段^[93-94],针对不同环境(供水水源、农田养殖、湿地保护区等),应用多种环境价值评估方法(如直接市场价值评价法、校正生态价值当量法等)建立多维度的损伤价值评估体系,值得深入研究。

3.4 数据驱动的地下水污染风险模型优化

地下水污染风险评价模型常面临指标构建不合理、模型参数不确定性高、权重取值主观性较大以及处理大规模数据耗时等问题。在综合处理地下水水质、水量、水文地质和土地利用等数据信息时,统计方法可为地下水风险评价的变量提供赋值依据^[30]。统计方法和基于过程模拟的方法,无论单独使用或联立使用,都较叠置指数模型方法更为可靠^[95]。地下水风险评价模型优化方法的选择应考虑数据性质和问题特点,常用的统计方法包括回归方法^[96]、贝叶斯网络^[97]、人工神经网络^[98]、决策树和随机森林^[99-100]、模糊逻辑^[101]和层次分析^[102]等。

地下水风险评价模型的回归方法(Regression Method),基于历史数据建立自变量(各种影响地下

水质量或风险的因素)与因变量(地下水质量、污染程度等)的关系,通过分析评价指标与风险评价结果关联性确定各指标的影响权重^[103]。H. M. Rizzei 等^[104]利用逻辑回归算法预测了半干旱地区地下水硝酸盐浓度及污染风险。A. Madani 等^[105]通过分析遥感、地球物理数据和水质数据,应用逻辑回归开发了地下水污染概率预测模型。

贝叶斯网络(Bayesian Networks)将地下水水质指标、水文地质属性、气象数据和潜在污染源等相关变量表示为网络节点,并用概率分布描述这些节点间的依赖关系^[106]。相较于传统方法,它更注重模型结构和监测误差等方面的不确定性,从而提高模型精度,并通过建立评价因子间的逻辑关系,帮助决策者制定风险管理策略^[107]。Qiu 等^[108]利用贝叶斯同位素混合模型定量分析硝酸盐污染的多源贡献,显著提升了对地下水硝酸盐污染来源的识别精度和健康风险评估的准确性。A. Yongkal 等^[109]结合马尔科夫链蒙特卡洛技术,使用改进的贝叶斯网络方法,实现了对地下水污染源的准确识别和定位。

近年来,随着人工智能和计算机技术的迅速发展,人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)方法在评估地下水风险方面得到广泛应用。ANN方法通过处理非线性、高维度和复杂的地下水数据,实现对地下水受污染概率的识别和预测^[110]。潘紫东等^[111]使用BP(back propagation)神经网络建立替代模型,结合优化模型,通过梯度下降法更新权重,确定了地下水污染源强度和场地渗透系数。马春龙等^[112]利用自组织映射神经网络(self-organizing map, SOM)实现了对污染场地的多维监测数据的快速提取。卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)在预测不同地下水环境的污染特征时,表现出较强的泛化能力,因此在地下水风险评价中得到良好运用^[113-114]。

此外,运用模糊逻辑(fuzzy logic)方法基于突变理论可建立无需指标权重的多准则综合评价方法^[115];层次分析(analytic hierarchy process, AHP)通过矩阵运算和一致性检验确定各评价指标的权重^[116];局部灵敏度分析可验证评价因子对模型输出结果的影响^[117]。这些方法广泛应用于分析和降低评价模型的不确定性研究中。

4 地下水污染风险评价研究重点

4.1 现有评价方法的不足

概括而言,基于“源-路径-受体”的地下水污染风险评价体系在污染源荷载、地下水脆弱性和污染危害评价3个方面存在以下不足:

第一, 污染源荷载评价方法多依赖于有限的监测数据, 因此在基础资料覆盖度较差或数据精度不高的区域应用受限。同时, 对自然和人类活动影响下污染源荷载动态变化的全面评估也存在不足。

第二, 地下水脆弱性评价常采用指数方法和过程模拟方法。指数方法在大尺度或数据稀疏区域进行定性或半定量评价具有实际意义, 但其指标和权重设置存在主观性问题。对于不同水文地质条件, 需要调整指标评价体系, 但缺乏统一的脆弱性评价标准, 导致不同研究结果的比较不充分。对于提炼合适指标以反映地下水流系统的典型分布特征及其对污染风险的影响, 仍需进一步研究。基于过程模拟法的脆弱性评价能够定量描述污染物在含水层中的迁移反应过程, 并量化污染程度, 但模型结构和参数的不确定性较大。在场地尺度三维非均质介质场的刻画和渗流表征, 以及复合污染物在包气带-含水层中的多相微界面过程机理及其物理-化学-生物多过程耦合模拟方面, 需要深入研究。

第三, 在地下水污染危害评估方面, 现有研究多集中于根据水量和水质确定的地下水开发利用重要性评估, 而对地质环境和生态调节等功能的评估相对不足, 指标体系有待完善。关于地下水污染造成的人体和生态健康损伤评估, 多集中于污染物浓度和范围等单一指标, 主要关注公众健康风险; 对于水质以外的其他生态环境指标, 如农作物产量、生物多样性等, 关注较少。此外, 多种受体(如居民、动植物等)在地下水污染不同暴露途径上的综合风险考虑不足; 对于地下水污染引发的经济价值损伤评估研究也有待推进。

4.2 复杂地质环境下地下水污染物的迁移机制与过程

考虑地层岩性结构、地下水流场、水文生物地球化学条件等不同地质环境要素, 研究不同污染类型, 包括重金属、有机物、盐类、新污染物等的水-土-气-生多界面迁移机制及过程, 是准确评估地下水污染风险、制定地下水污染防治策略、进行污染修复的关键。

不同类型污染物在地下水中的迁移反应过程受控于不同的水文地质条件和局域生物地球化学环境。重金属在地下水系统中的吸附、沉淀、络合和氧化还原反应等过程, 显著受到矿物组成、水化学成分、微生物活动和有机质含量等因素的影响, 并在不同地质环境中表现出差异^[118-120]。例如, 沉积盆地地下水中的砷富集, 常由厌氧条件下含铁矿物(如铁氧化物)的微生物还原过程主导^[121]; 而在矿区环境, 含砷黄铁矿

的氧化有时是酸性矿山废水中砷污染的主要来源, 也是地下水砷污染的重要原因^[122-123]。

非水相有机污染物(NAPLs)在包气带和饱水带中的迁移涉及气相、吸附相、溶解相和非水相液体等多相态转化。这些污染物的分布特征受到多相流场、化学场、温度场和生物场等多场耦合作用的驱动^[124-125]。在实际场地研究中, 土地利用、雨水截留条件、径流强度、透镜体分布及黏土和岩石裂隙系统等因素, 对有机污染羽的扩散具有重要作用^[126-128]。

此外, 地下水中三氮(氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮)的转化、有机质的固氮作用及微生物的分解过程; 磷酸盐的吸附、沉淀和植物吸收等过程, 都与地下水的酸碱-氧化还原环境、有机质含量及微生物活性等生物化学因素密切相关^[129-131]。其迁移和归宿在地表水-地下水作用带中受水动力条件影响显著^[132]。

地层介质的非均质性对污染物的迁移过程有重要影响, 可能造成污染物的反常迁移(非费克扩散)^[133-134]。一方面污染物易经由高渗透性区域(如裂隙介质、古河道冲积扇的连通砂层等)的“优先水流通道”发生快速迁移, 造成超弥散型迁移^[135-136]; 另一方面, 由于低渗透性介质(如黏土)对污染物的物理、化学吸附及交换反应, 污染物穿透曲线在后期出现“拖尾”现象, 或由低渗透性介质吸附的污染物在特定条件下向高渗透性介质反向扩散, 导致污染的“反弹”, 造成次弥散型反常迁移^[137-139]。小尺度优先流通道和低渗透基质的存在改变了污染物在含水层中的迁移路径, 不仅限制了场地污染修复效果, 同时影响了地下水风险的长期动态评估^[140]。

综上所述, 开展详细的水文地质调查, 利用岩相地质统计和地球物理方法精准刻画非均质介质场和地下水流场特征, 深入研究不同污染物在各种地质环境中的赋存形态, 阐明污染物与环境介质的微界面及地层界面的作用机制和过程, 是准确模拟和评价实际场地或更大尺度流域污染风险、提高场地修复有效性和科学性的关键。目前, 围绕上述问题的研究主要集中在微观孔隙尺度、室内柱试验和场地试验尺度上, 对于千米及以上尺度的复杂地下水系统, 考虑超/次弥散型反常迁移效应和复合污染迁移规律的地下水污染风险量化评估尚未成熟。另一方面, 对于新污染物, 包括抗生素、内分泌干扰物、微塑料和持久性有机污染物, 其母体和产物在复杂含水层中的存在形式、迁移、降解和生物转化过程, 大多正处于研究初期, 其中的运移反应相关参数的率定, 仍需深入研究^[141]。

4.3 矿区地下水污染风险评价研究

金属、煤炭等矿产资源的开采引发了严重的地下

水污染问题。煤矿酸性矿井水 (Acid Mine Drainage, AMD) 的排放, 金属尾矿和煤矸石堆体的淋滤以及金属冶炼废气的排放, 均对土壤、地表水、地下水系统构成了污染风险, 威胁当地居民健康和生态安全^[142-144]。矿区地下水污染风险评估是矿山污染修复的重要基础。国内外针对煤炭、金属和稀土等矿区的地下水污染, 已开展了一系列风险评估工作^[145-147], 包括选取水质指标评估人体健康或潜在生态危险^[148-149]; 概化矿区水文地质条件构建含水层污染脆弱性指标模型^[47]; 选择特定污染源及污染荷载进行溶质运移模拟圈定污染范围^[150-151]; 综合污染现状、含水层脆弱性、地下水污染发生概率等绘制地下水风险分布图^[152]等。然而, 由于矿区特殊的地质、生态、社会和经济属性, 地下水污染风险评估仍面临以下挑战。

1) 复合污染源动态识别及分区量化

矿区污染源是典型的多源、复合污染源, 污染伴随着采矿、选矿和冶矿的各个环节, 污染物以废水、废渣和废气等多相形式, 通过连续渗漏、间歇性淋滤和废气沉降等复杂过程, 释放到地下水环境中^[153]。矿区污染呈现空间异质性, 面源污染的空间影响边界模糊且随时间延续。矿区的污染源及污染通量受采矿和排水活动的影响动态变化显著。此外, 许多矿区地质条件复杂, 地形变化大, 污染监测数据代表性、时域覆盖性往往不足。因此, 在多源污染的叠加情景下, 准确地分区量化不同污染荷载的贡献具有挑战性; 考虑矿区人类活动对污染荷载的重新分配来评估地下水污染风险, 这方面仍存在不足。

2) 人类活动下复杂地下水系统的复合污染过程

矿区作为人类活动强干扰区, 其地下水污染分布是人为改造下的非均质介质场、地下水流场和生物地球化学场多场耦合的结果, 并具有时空动态性。采矿活动在地表常造成不规则采坑、陡坡、渣山, 改变原有土壤和植被形态, 加剧地表污染物下渗和迁移^[154]; 在地下则破坏了原有地层结构及储水构造, 改变地下水径流路径^[155]。例如, 矿坑排水会导致地下水水位显著下降, 引起局部流场和地表水-地下水交互过程的变化, 进而改变局部酸碱环境和氧化还原条件, 影响微生物群落结构和代谢活动, 直接或间接影响重金属等污染物的释放和迁移^[156-158]。此外, 矿区常位于地形复杂、地下环境多变的区域; 岩溶和裂隙等多层含水系统发育, 并常伴有断层等地质构造^[159]。因此, 矿区大尺度非均质地层结构及地下水流场的三维表征, 是评价地下水污染风险的基础^[160]。基于大尺度非均质介质识别, 并考虑人类活动诱发的地下水流场动态演化,

研究酸性复合污染物的相互作用机制、迁移过程及污染趋势, 是当前评估矿区地下水污染风险的研究重点。

3) 矿区复合生态系统多维度损伤评估

矿区生态系统是以人类为主导的复合型生态系统, 矿区生态保护, 涵盖矿区居民生活、社会产值 (矿业、农业、第三产业经济)、生物及非生物系统稳定 (环境资源、人类、动植物、微生物等) 等多方面的需求^[161]。

矿区地下水具有重要的供给和生态支持意义。矿区常位于人口密集的半城市化关键地带, 地下水水质恶化不仅直接影响居民饮用水安全, 同时通过农业灌溉、牲畜和水产养殖等, 间接影响粮食安全^[162]。另一方面, 我国的煤矿区多分布于干旱、半干旱的生态脆弱区, 气候干燥、水资源匮乏, 采矿影响下地下水水质与水量的退化对生态威胁剧增^[163]。

近年来, 针对矿区整体生态风险评价的工作取得一定进展, 包括评估采矿、抽水、排污等活动造成的景观生态风险、生态服务功能损失、人体健康损伤和农田生态系统固碳损失等, 并考虑防护及修复成本进行损失价值量化^[164-168]。然而, 地下水污染作为构成矿区生态风险的重要因素, 当前的评估方法只关注地下水通过饮用水途径对人体健康的影响, 使用的指标过于单一, 而未能系统评估地下水的其他生态服务价值。缺乏多种受体 (如人类、动植物等) 在不同暴露途径下 (饮水、接触、食物链等) 的综合风险评估, 也缺乏对矿区地下水污染影响居民健康的长期损伤及地方病风险的研究。综合人体健康、生态和经济发展的多维度价值评价尚存不足。

5 展望

综上所述, 地下水污染风险评价是地下水污染防治与修复的基础, 也是地下水环境研究的重点。过去 30 年间, 地下水污染风险评价理论和方法不断发展和完善, 从单一维度指标 (水质现状、含水层脆弱性等) 的定性或半定量评估, 逐步转向注重污染过程机理和后果的定量评价。同时, 跨生态、经济等多学科的多维度评价体系 and 生态经济价值评估方法已初步建立。现代新技术方法 (水文地球物理、地质随机方法、机器学习等) 的联合应用, 提高了模型的可靠性。然而, 当前地下水污染风险评价研究中仍存在不足, 具体包括: 污染源叠加效应解析不足, 复合污染物在复杂含水系统中的迁移转化机制和过程刻画不清, 受体风险评估不全面, 数据覆盖不全以及模型不确定性较大等。针对这些问题, 未来的研究应着力于以下几个方面:

(1) 多源数据融合的全周期污染水文地质监测。

构建智能地下水监测网络, 结合大数据分析和无人机搭载遥感技术, 实现对污染源的全面监测, 并动态传输地下水水位和水质数据, 以实现预警机制。现场监测与水文地质勘探、地球物理探测方法相结合, 获取更全面和精确的含水系统结构和地下水信息。采用地质随机方法, 建立多源数据融合的非均质地层模型, 更好地反映地下水系统的复杂性和变化特征。人工智能与污染物迁移预测模型的结合, 显著提高污染风险评估的精度和效率, 有助于快速识别和预测潜在的污染威胁。

(2) 复杂含水系统中污染物迁移的升尺度模拟和污染风险评价。深入研究不同污染物的物理、化学和生物转化机制, 加强场地及更大尺度的污染物迁移野外试验研究。综合考虑污染物的反常弥散过程及其尺度效应、复合污染物的界面作用机制、自然及人为扰动对污染荷载、地下水系统演化及污染迁移过程的动态调控机制, 完善反映边界条件时空变化的多场耦合污染物迁移转化动力学模型。合理率定地下水溶质运移反应相关参数, 如水动力弥散(包括非费克扩散)参数、地球化学反应速率、吸附系数、分配系数和阻滞系数等。在场地及流域尺度下, 量化模拟非稳态条件、不同地质环境中污染物的迁移转化规律, 以及地下水污染风险的动态响应规律。基于实验室和场地尺度的研究结果, 加强升尺度模拟方法的研究, 提高场地尺度和区域尺度地下水污染模拟和风险评价的效率和精度。

(3) 地下水功能价值损失的跨学科评估与决策。

综合地质学、生态学、毒理学、经济学和数据科学等多学科方法, 完善地下水污染功能价值损失评估体系。采用生态经济模型、健康风险评估方法及多标准决策分析工具, 精确量化和模拟污染物在不同介质和暴露途径中的迁移和毒性变化。通过情景分析和综合评估, 制定科学有效的治理决策方案。多学科交叉方法不仅能更精准识别和预测污染风险, 还能优化治理策略, 从而保障地下水资源的可持续利用。

6 结语

本文系统总结了近年来地下水污染风险评估领域的研究进展, 明确了基于“源-路径-受体”体系的污染源荷载风险评价、地下水脆弱性评价和污染危害评价的主要方法, 并强调了该框架在风险评价中的关键作用。研究表明, 现代技术的应用已使地下水污染风险评估从单一维度的定性评估, 逐步发展为多维度的

定量过程模型, 大幅提升了模型的可靠性。然而, 复合污染源的叠加效应解析以及复杂含水系统中污染物的动态迁移机制等方面, 仍然面临挑战。未来研究应重点关注多源数据融合的污染监测、复杂含水系统中污染物的迁移动态及跨学科的风险评价, 以提升地下水污染风险的识别与预测精度, 推动地下水资源的科学管理与可持续利用。

符号注释:

i 为污染源种类; L_i 为污染源 i 的释放可能性; P_i 为污染源 i 的污染源荷载风险指数; PI 为污染源荷载综合指数; Q_i 为可能释放污染物的量; R_i 为污染风险评价指数; S_i 为污染源荷载风险评价指数; T_i 为污染源 i 的污染物毒性; V_i 为地下水脆弱性指数; W_i 为第 i 类污染源的权重; W_i 为污染危害指数。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] JIA Xiyue, O'CONNOR D, HOU Deyi, et al. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 551–562.
- [2] KUMARI U, SWAMY K, GUPTA A, et al. Global water challenge and future perspective[M]//Green technologies for the defluoridation of water. Amsterdam: Elsevier, 2021: 197–212.
- [3] 生态环境部. 中国生态环境质量公报[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2022.
- [4] XIE Xianjun, SHI Jianbo, PI Kunfu, et al. Groundwater quality and public health[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2023, 48: 395–418.
- [5] MACHIWA D, JHA M K, SINGH V P, et al. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 901–927.
- [6] SIMPSON M W M, ALLEN D M, JOURNEAY M M. Assessing risk to groundwater quality using an integrated risk framework[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(11): 4939–4956.
- [7] RASHID A, AYUB M, ULLAH Z, et al. Groundwater quality, health risk assessment, and source distribution of heavy metals contamination around chromite mines: Application of GIS, sustainable groundwater management, geostatistics, PCAMLR, and PMF receptor model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 2113.
- [8] MASSONE H E, BARILARI A. Groundwater pollution: A discussion about vulnerability, hazard and risk assessment[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(2): 463–466.
- [9] ZHAO Di, WU Qiang, ZENG Yifan, et al. Contamination and human health risk assessment of heavy metal(loid)s in topsoil and groundwater around mining and dressing factories in Chifeng, North China[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10(1): 8.
- [10] 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 等. 巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6778–6789.
- [11] LIU Yu, ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, et al. Groundwater pollution risk assessment in plain area of barkol-Yiwu basin[J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6778–6789.
- [11] PETROVIĆ B. Intrinsic groundwater vulnerability assessment by multiparameter methods, a case study of Suva Planina

- Mountain (SE Serbia)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(4): 85.
- [12] 生态环境部, 水利部, 自然资源部. 地下水污染防治重点区划定技术指南[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2023.
- [13] 王丽娜. 循环经济中污染控制的相关机制研究[M]. Scientific Research Publishing, Inc. USA, 2020.
- [14] 刘凡, 孙继朝, 张英, 等. 地下水污染风险评价研究综述[J]. 南北水调与水利科技, 2014, 12(3): 127–132.
LIU Fan, SUN Jichao, ZHANG Ying, et al. Review of groundwater pollution risk assessment[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(3): 127–132.
- [15] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1140–1147.
TENG Yanguo, SU Jie, ZHAI Yuanzheng, et al. A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(10): 1140–1147.
- [16] 孙才志, 陈相涛, 陈雪姣, 等. 地下水污染风险评价研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 152–161.
SUN Caizhi, CHEN Xiangtao, CHEN Xuejiao, et al. Recent advances in groundwater contamination risk assessment[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 152–161.
- [17] FOSTER SSD. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy[C]//VAN DUJJEVEN-BODEN W, VAN WAEGENINGH HG. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Committee on Hydrogeological Research. The Hague, 1987: 69–86.
- [18] 左锐, 陈敏华, 李仙波, 等. 基于“生态水位-水质-水源地”协同作用的地下水环境风险评价方法研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(8): 1275–1283.
ZUO Rui, CHEN Minhua, LI Xianbo, et al. Environmental risk assessment of groundwater based on comprehensive effects of ‘ecological groundwater level-quality-source area’[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(8): 1275–1283.
- [19] BONOMI T, CAVALLIN A, CERUTTI P, et al. Groundwater contamination risk assessment: Initial methodology for highly developed areas. Case study in the Province of Milan (Italy)[J]. *Terra Nova*, 1994, 6(2): 195–201.
- [20] CIVITA M, DE MAIO M. Assessing groundwater contamination risk using ARCIINFO via GRID function[M]. Titolo Volume Non Avvalorato. 1997.
- [21] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [22] GOLDSCHIEDER N. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(4): 555–564.
- [23] MORRIS B, FOSTER S. Assessment of groundwater pollution risk[M]. World Bank Policy Research Working Paper, 2006.
- [24] 周仰效, 李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 1–11.
ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater quality monitoring and assessment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(1): 1–11.
- [25] SOMARATNE N, ZULFIC H, ASHMAN G, et al. Groundwater risk assessment model (GRAM): Groundwater risk assessment model for wellfield protection[J]. *Water*, 2013, 5(3): 1419–1439.
- [26] GIRI S, KUMAR TIWARI A, KUMAR MAHATO M, et al. Spatio-temporal variations of metals in groundwater from an iron mining impacted area: Assessing sources and human health risk[J]. *Total Environment Research Themes*, 2023, 8: 100070.
- [27] RAVINDRA B, SUBBA RAO N, DHANAMJAYA RAO E N. Groundwater quality monitoring for assessment of pollution levels and potability using WPI and WQI methods from a part of Guntur district, Andhra Pradesh, India[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(12): 14785–14815.
- [28] 李全生, 刘举庆, 李军, 等. 矿山生态环境数字孪生: 内涵、架构与关键技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3859–3873.
LI Quansheng, LIU Juqing, LI Jun, et al. Digital twin of mine ecological environment: Connotation, framework and key technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3859–3873.
- [29] BANERJEE A, CREEDON L, JONES N, et al. Dynamic groundwater contamination vulnerability assessment techniques: A systematic review[J]. *Hydrology*, 2023, 10(9): 182.
- [30] TIAN Lei, HU Litang, WANG Dong, et al. Site-scale groundwater pollution risk assessment using surrogate models and statistical analysis[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2024, 261: 104288.
- [31] JERMILOVA U. Bayesian Network Model of Mercury Exposure to Aquatic Ecosystems of the Mackenzie Watershed[D]. Trent University (Canada), 2023.
- [32] 滕彦国, 左锐, 苏小四, 等. 区域地下水环境风险评价技术方法[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1532–1539.
TENG Yanguo, ZUO Rui, SU Xiaosi, et al. Technique for assessing environmental risk of regional groundwater[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1532–1539.
- [33] ZWAHLEN F. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620)[R]. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels, 2003: 297.
- [34] LI Xinyan, WU Hao, QIAN Hui. Groundwater contamination risk assessment using intrinsic vulnerability, pollution loading and groundwater value: A case study in Yinchuan Plain, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(36): 45591–45604.
- [35] JENIFER M A, JHA M K. Comprehensive risk assessment of groundwater contamination in a weathered hard-rock aquifer system of India[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201: 853–868.
- [36] ZHANG Qixiao, LI Peiyue, LYU Qiaofen, et al. Groundwater contamination risk assessment using a modified DRATICL model and pollution loading: A case study in the Guanzhong Basin of China[J]. *Chemosphere*, 2022, 291: 132695.
- [37] MGBENU C N, EGBUERI J C. The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria[J]. *Applied Water Science*, 2019, 9(1): 22.
- [38] WALDSCHLÄGER K, LECHTHALER S, STAUCH G, et al. The way of microplastic through the environment—Application of the source-pathway-receptor model (review)[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136584.
- [39] XU Haoli, YANG Xing, WANG Daqing, et al. Multivariate and spatio-temporal groundwater pollution risk assessment: A new long-time serial groundwater environmental impact assessment system[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 317: 120621.
- [40] TLEUOVA Z, SNOW D D, MUKHAMEDZHANOV M, et al. Relation of hydrogeology and contaminant sources to drinking water quality in southern Kazakhstan[J]. *Water*, 2023, 15(24): 4240.
- [41] TOSIC M, RESTREPO J D, IZQUIERDO A, et al. An integrated approach for the assessment of land-based pollution loads in the coastal zone[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 211: 217–226.
- [42] 环境保护部. 环境影响评价技术导则 地下水环境: HJ 610—2016[S]. 2016.
- [43] REBELO A, FERRA I, GONÇALVES I, et al. A risk assessment model for water resources: Releases of dangerous and hazardous substances[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 140: 51–59.
- [44] ZHANG Junjun, ZHAI Yuanzheng, XUE Pengwei, et al. A GIS-based LVF model for semiquantitative assessment of groundwater pollution risk: A case study in Shenyang, NE China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2017, 23(2): 276–298.
- [45] TAGHAVI N, NIVEN R K, PAULL D J, et al. Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153486.
- [46] GENG Cheng, LU Debao, QIAN Jinglin, et al. A review on process-based groundwater vulnerability assessment methods[J]. *Processes*, 2023, 11(6): 1610.

- [47] 王淼淼, 陈宜金, 邢朕国, 等. 基于DRTIC-SL的草原区露天煤矿地下水脆弱性评价[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 165–169. WANG Miaomiao, CHEN Yijin, XING Zhenguo, et al. Groundwater vulnerability assessment of open-pit coal mine in steppe area based on DRTIC-SL[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(10): 165–169.
- [48] WANG Yanxin, MERKEL B J, LI Yilian, et al. Vulnerability of groundwater in quaternary aquifers to organic contaminants: A case study in Wuhan City, China[J]. Environmental Geology, 2007, 53(3): 479–484.
- [49] YIN Leihao, XU Beiyi, CAI Wutian, et al. Intrinsic vulnerability assessment of the qingduo Karst system, Henan province[J]. Water, 2023, 15(19): 3425.
- [50] CHENINI I, ZGHIBI A, KOUZANA L. Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: State of the art and a case study[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 109: 11–26.
- [51] VU T D, NI C F, LI Weici, et al. Predictions of groundwater vulnerability and sustainability by an integrated index-overlay method and physical-based numerical model[J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126082.
- [52] 徐颖, 李梦雪, 董心月, 等. 氟化工园区及周边地下水健康风险及脆弱性评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 2300–2310. XU Ying, LI Mengxue, DONG Xinyue, et al. Health risk and vulnerability assessment of groundwater in fluorine chemical industrial and surrounding areas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 2300–2310.
- [53] 原若溪, 孔祥波, 费宇红, 等. DRASTIC和GOD两种方法评价地下水防污性的实例研究[J]. 吉林水利, 2018(3): 1–8. YUAN Ruoxi, KONG Xiangbo, FEI Yuhong, et al. Assessing groundwater vulnerability using DRASTIC and GOD methods[J]. Jilin Water Resources, 2018(3): 1–8.
- [54] RAZAVI DIZAJI A, HOSSEINI S A, REZAVERDINEJAD V, et al. Assessing pollution risk in ardabil aquifer groundwater of iran with arsenic and nitrate using the SINTACS model[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(4): 2609–2616.
- [55] ISWAHYUDI S, BOY Yoseph Cahya Sunan Sakti Syah Alam, HUTABARAT J, et al. Groundwater aquifer vulnerability index (AVI) of purwokerto area, Indonesia[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2023, 33(1): 197–209.
- [56] ARFAOUI M, AOUITI S, AZAZA F H, et al. Assessment of groundwater vulnerability in coastal zone using SI method and GIS: Case study of bouficha aquifer (northeast Tunisia)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(50): 75699–75715.
- [57] NEKKOUB A, BAALI F, HADJI R, et al. The EPIK multi-attribute method for intrinsic vulnerability assessment of karstic aquifer under semi-arid climatic conditions, case of Cheria Plateau, NE Algeria[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(15): 709.
- [58] KHAZAA'LAH M, TALOZI S, HAMDAN I. Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2023, 9(1): 19–40.
- [59] ŞENER E. Intrinsic groundwater vulnerability assessment, comparison of different methodologies and validation[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(19): 1963.
- [60] LYU Panpan, SONG Jian, YIN Ziyue, et al. Integrated SEAWAT model and GALDIT method for dynamic vulnerability assessment of coastal aquifer to seawater intrusion[J]. Science of the Total Environment, 2024, 925: 171740.
- [61] SAW S, SINGH P K, MAHATO J K, et al. Application of GIS-based DRASTIC model and its validation with solute transport model in the assessment of groundwater vulnerability index: A case study from coal mining region of India[J]. Environmental Quality Management, 2023, 33(2): 265–276.
- [62] NASRI N, CHEBIL M, GUELLOUZ L, et al. Modelling nonpoint source pollution by nitrate of soil in the Mateur plain, northeast of Tunisia[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(2): 1057–1075.
- [63] ESLAMIAN S, HAROONI Y, SABZEVARI Y. Simulation of nitrate pollution and vulnerability of groundwater resources using MODFLOW and DRASTIC models[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 8211.
- [64] 高月香, 沈欢, 张毅敏, 等. 基于FEFLOW的高尔夫球场地下水污染风险预测研究与效果评估[J]. 水利水电技术, 2018, 49(11): 144–150. GAO Yuexiang, SHEN Huan, ZHANG Yimin, et al. Groundwater pollution risk prediction research and effect evaluation of golf course based on FEFLOW[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(11): 144–150.
- [65] ESMAEILI S. Comprehensive simulation assessment of nitrate mass loading to groundwater from agricultural landscapes[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2013.
- [66] SCHWARTZ M O. Numerical modelling of groundwater vulnerability: The example Namibia[J]. Environmental Geology, 2006, 50(2): 237–249.
- [67] ZHENG Fuxin, ZHAI Yuanzheng, XIA Xuelian, et al. Simulation of trinitrogen migration and transformation in the unsaturated zone at a desert contaminant site (NW China) using HYDRUS-2D[J]. Water, 2018, 10(10): 1363.
- [68] BANCHERI M, COPPOLA A, BASILE A. A new transfer function model for the estimation of non-point-source solute travel times[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126157.
- [69] BOFILL L M, SUHOGUSOFF A V, FERRARI L, et al. Analysis and comparison of wellhead protection areas delimitation methods applying a stochastic MODFLOW model as a reference[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(6): 704.
- [70] 徐树媛. 基于地下水数值模型的保护矿区水源井禁采区界定[J]. 中国煤炭, 2016, 42(12): 45–49. XU Shuyuan. The definition of ban area to protect water source in mining area based on the groundwater numerical model[J]. China Coal, 2016, 42(12): 45–49.
- [71] FRIND E O, MOLSON J W, RUDOLPH D L. Well vulnerability: A quantitative approach for source water protection[J]. Ground Water, 2006, 44(5): 732–742.
- [72] MOLSON J W, FRIND E O. On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-of-travel zones for source water protection[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012, 127(1/2/3/4): 76–87.
- [73] STEIAKAKIS E, VAVADAKIS D, MOURKAKOU O. Groundwater vulnerability and delineation of protection zones in the discharge area of a karstic aquifer: Application in agyia's Karst system (Crete, Greece)[J]. Water, 2023, 15(2): 231.
- [74] BUTSCHER C, HUGGENBERGER P. Intrinsic vulnerability assessment in Karst areas: A numerical modeling approach[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 135088848.
- [75] ZEIGER S J, OWEN M R, PAVLOWSKY R T. Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: A SWAT modeling application[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147295.
- [76] BROUYÈRE S, BALZANI L, ORBAN P. The CASPER project: An integrated approach for pollution risk assessment in peri-urban groundwater catchment areas[J]. Advances in Geosciences, 2022, 59: 45–51.
- [77] LU Bingqing, ZHANG Yong, ZHENG Chunmiao, et al. Comparison of time nonlocal transport models for characterizing non-fickian transport: From mathematical interpretation to laboratory application[J]. Water, 2018, 10(6): 778.
- [78] ZHANG Yong, ZHOU Dongbao, YIN Maosheng, et al. Nonlocal transport models for capturing solute transport in one-dimensional sand columns: Model review, applicability, limitations and improvement[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(25): 5104–5122.
- [79] DING Hanghang, ZHANG Xuemei, CHU Xuwei, et al. Simulation of groundwater dynamic response to hydrological factors in karst aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 2020, 587: 124995.
- [80] 滕应, 骆永明, 沈仁芳, 等. 场地土壤-地下水污染物多介质界面过程与调控研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1333–1340.

- TENG Ying, LUO Yongming, SHEN Renfang, et al. Research progress and perspective of the multi-medium interface process and regulation principle of pollutants in site soil-groundwater[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1333–1340.
- [81] CHEN Ge, SUN Yajun, LIU Jiayu, et al. The effects of aquifer heterogeneity on the 3D numerical simulation of soil and groundwater contamination at a chlor-alkali site in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(24): 797.
- [82] 于畅, 王荣芳, 刘贺丹, 等. 基于ICE-SSD联用的地下水中苯并[a]芘生态风险评价: 以下辽河平原地下水为例[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(6): 2525–2533.
- YU Chang, WANG Rongfang, LIU Hedan, et al. ICE-SSD-based ecological risk assessment of benzo[a]pyrene in groundwater: A case study of Liao River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2525–2533.
- [83] VAN DER GUN J. Groundwater resources sustainability[M]//Global groundwater. Amsterdam: Elsevier, 2021: 331–345.
- [84] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 生态环境损害鉴定评估技术指南 环境要素 第1部分: 土壤和地下水: GB/T 39792.1—2020[S]. 2021.
- [85] 徐迎春, 杨丽虎, 宋献方, 等. 基于保护敏感目标的场地地下水污染风险评估[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(3): 262–271.
- XU Yingchun, YANG Lihu, SONG Xianfang, et al. Site groundwater pollution risk assessment based on the protection of sensitive receptors[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(3): 262–271.
- [86] HUAN Huan, XU Jianwei, WANG Jinsheng, et al. Groundwater pollution risk control from an industrial economics perspective[M]. Singapore: Springer Singapore, 2018.
- [87] 马尚钰, 王富强, 王雪彦, 等. 南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务价值评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1204–1212.
- MA Shangyu, WANG Fuqiang, WANG Xueyan, et al. Evaluation of groundwater ecosystem service value in Henan Province under the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(6): 1204–1212.
- [88] HAGARTY A. United States analysis of the regulatory inception of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in drinking water policy among states and review of regulatory efforts made by the Federal Environmental Protection Agency[D]. Southern Illinois University at Edwardsville, 2023.
- [89] 李小牛, 周长松, 周孝德, 等. 污灌区浅层地下水污染风险评估研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(3): 326–334.
- LI Xiaoniu, ZHOU Changsong, ZHOU Xiaode, et al. Study on risk assessment of groundwater pollution in sewage irrigation area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 326–334.
- [90] 郑翔, 管祎亭, 吴卫华. 黑龙江流域水体和沉积物重金属的生态风险研究[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(6): 814–824.
- ZHENG Xu, GUAN Yiting, WU Weihua. Study on ecological risk of heavy metals in water and sediments in the Heilong River Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(6): 814–824.
- [91] 张千千, 邢锦兵, 王慧玮, 等. 河北省某大型焦化厂地下水中多环芳烃的污染特点、源解析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 807–815.
- ZHANG Qianqian, XING Jinbing, WANG Huiwei, et al. Analysis on contamination characteristics, pollution source identification and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons of groundwater in a large coking plant site of province[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 807–815.
- [92] LI Xinyan, WU Hao, QIAN Hui. Groundwater contamination risk assessment using intrinsic vulnerability, pollution loading and groundwater value: A case study in Yinchuan Plain, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(36): 45591–45604.
- [93] LI Congxin, LI Guozhu. Impact of China's water pollution on agricultural economic growth: An empirical analysis based on a dynamic spatial panel lag model[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(6): 6956–6965.
- [94] ZHAI Yuanzheng, JIANG Ya, CAO Xinyi, et al. Valuation of ecosystem damage induced by soil-groundwater pollution in an arid climate area: Framework, method and case study[J]. *Environmental Research*, 2022, 211: 113013.
- [95] ZOU Yanhong, YOUSAF M S, YANG Fuqiang, et al. Surrogate-based uncertainty analysis for groundwater contaminant transport in a chromium residue site located in Southern China[J]. *Water*, 2024, 16(5): 638.
- [96] ELZAIN H E, CHUNG S Y, VENKATRAMANAN S, et al. Novel machine learning algorithms to predict the groundwater vulnerability index to nitrate pollution at two levels of modeling[J]. *Chemosphere*, 2023, 314: 137671.
- [97] SAJEDI-HOSSEINI F, MALEKIAN A, CHOUBIN B, et al. A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 954–962.
- [98] 张涛, 王夏晖, 毕二平, 等. 基于BP神经网络的粤北某地区地下水脆弱性评价及其风险管控[J]. *环境工程*, 2023, 41(12): 270–277.
- ZHANG Tao, WANG Xiahui, BI Erping, et al. Groundwater vulnerability evaluation and risk control in a certain area in northern Guangdong province based on bp neural network[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(12): 270–277.
- [99] NAFOUANTI M B, LI Junxia, MUSTAPHA N A, et al. Prediction on the fluoride contamination in groundwater at the Datong Basin, Northern China: Comparison of random forest, logistic regression and artificial neural network[J]. *Applied Geochemistry*, 2021, 132: 105054.
- [100] HE Song, WU Jianhua, WANG Dan, et al. Predictive modeling of groundwater nitrate pollution and evaluating its main impact factors using random forest[J]. *Chemosphere*, 2022, 290: 133388.
- [101] NOURANI V, MALEKI S, NAJAFI H, et al. A fuzzy logic-based approach for groundwater vulnerability assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(12): 18010–18029.
- [102] 李霄, 柴璐, 王晓光, 等. 基于层次分析法的丹东地区地下水污染防治区划[J]. *地质与资源*, 2018, 27(4): 396–405.
- LI Xiao, CHAI Lu, WANG Xiaoguang, et al. Regionalization of groundwater pollution prevention in Dandong area based on analytic hierarchy process[J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(4): 396–405.
- [103] AKAKURU O C, ADAKWA C B, IKORO D O, et al. Application of artificial neural network and multi-linear regression techniques in groundwater quality and health risk assessment around Egbema, Southeastern Nigeria[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(3): 77.
- [104] RIZEE H M, AZEEZ O S, PRADHAN B, et al. Assessment of groundwater nitrate contamination hazard in a semi-arid region by using integrated parametric IPNOA and data-driven logistic regression models[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(11): 633.
- [105] MADANI A, HAGAGE M, ELBEIH S F. Random Forest and Logistic Regression algorithms for prediction of groundwater contamination using ammonia concentration[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(20): 1619.
- [106] MOGHADDAM H K, RAJAEI A, RAHIMZADEH KIVI Z, et al. Prediction of qualitative parameters concentration in the groundwater resources using the Bayesian approach[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, 17: 100758.
- [107] 张双圣, 强静, 刘汉湖, 等. 基于贝叶斯公式的地下水污染源识别[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1568–1578.
- ZHANG Shuangsheng, QIANG Jing, LIU Hanhu, et al. Identification of groundwater pollution sources based on Bayes' theorem[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1568–1578.
- [108] QIU Huili, GUI Herong, XU Haifeng, et al. Quantifying nitrate pollution sources of shallow groundwater and related health risks based on deterministic and Monte Carlo models: A study in Huaibei mining area, Huaibei coalfield, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 249: 114434.
- [109] AN Yongkai, YAN Xueman, LU Wenxi, et al. An improved Bayesian approach linked to a surrogate model for identifying

- groundwater pollution sources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2022, 30(2): 601–616.
- [110] OSTAD ALI ASKARI K, SHAYANNEJAD M, GHORBANIZ DEH KHARAZI H. Artificial neural network for modeling nitrate pollution of groundwater in marginal area of Zayandeh-rood River, Isfahan, Iran[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(1): 134–140.
- [111] 潘紫东, 卢文喜, 范越, 等. 基于模拟-优化方法的地下水污染源溯源辨识[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1698–1705. PAN Zidong, LU Wenxi, FAN Yue, et al. Inverse Identification of groundwater pollution source based on simulation-optimization approach[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(4): 1698–1705.
- [112] 马春龙, 施小清, 许伟伟, 等. 基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3): 191–202. MA Chunlong, SHI Xiaoqing, XU Weiwei, et al. Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 191–202.
- [113] ZHAO Yifu, YANG Liangping, PAN Hongjie, et al. Spatio-temporal prediction of groundwater vulnerability based on CNN-LSTM model with self-attention mechanism: A case study in Hetao Plain, northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024: 269160356[2024-04-15]. <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S100107422400175X>.
- [114] NADIRI A A, MOAZAMNIA M, SADEGHFAM S, et al. Formulating convolutional neural network for mapping total aquifer vulnerability to pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 304: 119208.
- [115] CHUKWUMA E C, OKONKWO C C, AFOLABI O O D, et al. Groundwater vulnerability to pollution assessment: An application of geospatial techniques and integrated IRN-DEMATEL-ANP decision model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(17): 49856–49874.
- [116] CHOROL L, GUPTA S K. Evaluation of groundwater heavy metal pollution index through analytical hierarchy process and its health risk assessment via Monte Carlo simulation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 170: 855–864.
- [117] 袁乾, 卢文喜, 范越, 等. 基于替代模型的煤矸石堆地下水污染随机模拟[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(6): 2444–2451. YUAN Qian, LU Wenxi, FAN Yue, et al. Stochastic simulation of groundwater pollution in coal gangue reactor based on alternative model[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2444–2451.
- [118] HUANG Dandan, WANG Guangcai, LI Zhihong, et al. Investigation of the removal mechanism of Cr(VI) in groundwater using activated carbon and cast iron combined system[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(22): 18341–18354.
- [119] 刘玲, 陈坚, 牛浩博, 等. 基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 164–174. LIU Ling, CHEN Jian, NIU Haobo, et al. Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 164–174.
- [120] 李婷, 吴明辉, 王越, 等. 人类扰动对重金属元素的生物地球化学过程的影响与修复研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4679–4688. LI Ting, WU Minghui, WANG Yue, et al. Advances in research on the effects of human disturbance on biogeochemical processes of heavy metals and remediation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4679–4688.
- [121] 张亚男. 江汉平原含水层铁还原砷释放过程中有机质转化机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021. ZHANG Yanan. Mechanisms of organic matter transformation during dissimilated iron reduction and arsenic mobilization in the aquifer of Jiangnan Plain[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [122] WANG Xingxing, SHU Zhipeng, HE Haohua, et al. Arsenopyrite dissolution in circumneutral oxic environments: The effect of pyrophosphate and dissolved Mn(III)[J]. *Water Research*, 2023, 230: 119595.
- [123] ZHANG Yinfeng, LI Shehong, SUN Jing, et al. Persistent arsenate-iron(III) oxyhydroxide-organic matter nanoaggregates observed in coal[J]. *Environmental Science. Nano*, 2021, 8(10): 2964–2975.
- [124] SUN Yuqin, SUN Jing, NGHIEM A A, et al. Reduction of iron (hydr)oxide-bound arsenate: Evidence from high depth resolution sampling of a reducing aquifer in Yinchuan Plain, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 406: 124615.
- [125] QIAO Fei, WANG Jinguo, CHEN Zhou, et al. Experimental research on the transport-transformation of organic contaminants under the influence of multi-field coupling at a site scale[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134222.
- [126] YANG Lurong, WANG Xinyu, MENDOZA-SANCHEZ I, et al. Modeling the influence of coupled mass transfer processes on mass flux downgradient of heterogeneous DNAPL source zones[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 211: 1–14.
- [127] HUANG Junqi, GOLTZ M N. Semianalytical solutions for transport in aquifer and fractured clay matrix system[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7218–7237.
- [128] DAFNY E. TCE longevity in the vadose zone and loading to the groundwater—The case of episodic NAPL releases from near-surface source[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2017, 7: 128–140.
- [129] XIAO Yong, LIU Kui, HAO Qichen, et al. Hydrogeochemical insights into the signatures, genesis and sustainable perspective of nitrate enriched groundwater in the piedmont of Hutuo watershed, China[J]. *CATENA*, 2022, 212: 106020.
- [130] 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 等. 高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素[J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3532–3542. YANG Heng, LI Guifang, YE Yuanxing, et al. Shallow groundwater around plateau lakes: spatiotemporal distribution of phosphorus and its driving factors[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3532–3542.
- [131] MAO Hairu, WANG Guangcai, RAO Zhi, et al. Deciphering spatial pattern of groundwater chemistry and nitrogen pollution in Poyang Lake Basin (eastern China) using self-organizing map and multivariate statistics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 329: 129697.
- [132] 王佳琪, 马瑞, 孙自永. 地表水与地下水相互作用带中氮素污染物的反应迁移机理及模型研究进展[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 270–280. WANG Jiaqi, MA Rui, SUN Ziyong. Reactive transport and model of nitrogen pollutants in the surface water-ground water interaction zones: A review[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 270–280.
- [133] NEUMAN S P, TARTAKOVSKY D M. Perspective on theories of non-Fickian transport in heterogeneous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(5): 670–680.
- [134] ZHENG Chunmiao, GORELICK S M. Analysis of solute transport in flow fields influenced by preferential flowpaths at the decimeter scale[J]. *Ground Water*, 2003, 41(2): 142–155.
- [135] ZHOU Renjie, ZHAN Hongbin. Reactive solute transport in an asymmetrical fracture-rock matrix system[J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 112: 224–234.
- [136] BIANCHI M, ZHENG Chunmiao. A lithofacies approach for modeling non-Fickian solute transport in a heterogeneous alluvial aquifer[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(1): 552–565.
- [137] HASAN S, JOEKAR-NIASAR V, KARADIMITRIOU N K, et al. Saturation dependence of non-fickian transport in porous media[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(2): 1153–1166.
- [138] 费宇红, 刘雅慈, 李亚松, 等. 中国地下水污染修复方法和技术应用展望[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 420–434. FEI Yuhong, LIU Yaci, LI Yasong, et al. Prospect of groundwater pollution remediation methods and technologies in China[J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 420–434.
- [139] 钱家忠, 王永媛, 刘雅静, 等. 分段非均质多孔介质中双分子反应性溶质运移实验与模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(10): 123–132. QIAN Jiazhong, WANG Yongyuan, LIU Yajing, et al. Experimental and simulation study on bimolecular reactive solute

- transport in segmented heterogeneous porous media[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(10): 123–132.
- [140] 郭芷琳, 马瑞, 张勇, 等. 地下水污染物在高度非均质介质中的迁移过程: 机理与数值模拟综述[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1817–1836.
- GUO Zhilin, MA Rui, ZHANG Yong, et al. Contaminant transport in heterogeneous aquifers: A critical review of mechanisms and numerical methods of non-fickian dispersion[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2021, 51(11): 1817–1836.
- [141] 刘菲. 地下水系统中的新污染物[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 1–2.
- LIU Fei. Emerging contaminants in groundwater systems[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(2): 1–2.
- [142] JIAO Yanan, ZHANG Chunhui, SU Peidong, et al. A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 170: 1240–1260.
- [143] GUO Yanwen, LI Xiangdong, LI Quanzhi, et al. Environmental impact assessment of acidic coal gangue leaching solution on groundwater: A coal gangue pile in Shanxi, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2024, 46(4): 120.
- [144] VITHANAGE M, BANDARA P C, NOVO L A B, et al. Deposition of trace metals associated with atmospheric particulate matter: Environmental fate and health risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 135051.
- [145] 颜睿. 铜陵典型金属矿区地下水污染风险性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- YAN Rui. Risk assessment of groundwater pollution in a typical metal mining area of Tongling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [146] 陈仁祥, 高杨, 宋勇, 等. 龙南足洞稀土矿区地下水水质特征及健康风险评价[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2021, 73(3): 111–118.
- CHEN Renxiang, GAO Yang, SONG Yong, et al. Groundwater quality characteristics and health risk assessment in Longnan Zudong rare earth mine[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2021, 73(3): 111–118.
- [147] ZHANG Qiuying, SHU Wang, LI Fadong, et al. Nitrate source apportionment and risk assessment: A study in the largest ion-adsorption rare earth mine in China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 302: 119052.
- [148] FEI Jiangchi, MIN Xiaobo, WANG Zhenxing, et al. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: A case study from South China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(35): 27573–27586.
- [149] KAZEMI A, ESMAELBEIGI M, SAHEBI Z, et al. Hydrochemical evaluation of groundwater quality and human health risk assessment of trace elements in the largest mining district of South Khorasan, Eastern Iran[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(54): 81804–81829.
- [150] SELHABAA, XU Guangquan, HUI Bao, et al. Simulation for migration and treatment of groundwater contamination in coal mining subsidence area: A case study of Datong dump, Huainan, China[J]. *Journal of Chemistry and Environment*, 2024, 3(1): 46–63.
- [151] MUNIRUZZAMAN M, KARLSSON T, AHMADI N, et al. Multiphase and multicomponent simulation of acid mine drainage in unsaturated mine waste: Modeling approach, benchmarks and application examples[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 120: 104677.
- [152] QIU Huili, GUI Herong, FANG Pei, et al. Groundwater pollution and human health risk based on Monte Carlo simulation in a typical mining area in Northern Anhui Province, China[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(5): 1118–1129.
- [153] WU Yating, ZHOU Lingfeng, MENG Yaobin, et al. Influential topographic factor identification of soil heavy metals using GeoDetector: The effects of DEM resolution and pollution sources[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 4067.
- [154] 赵欣, 王佟, 李聪聪, 等. 露天矿区生态地质层修复中地形重塑层的构建技术及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(7): 113–122.
- ZHAO Xin, WANG Tong, LI Congcong, et al. Construction and restoration technology of terrain remodeling layer in the restoration of ecological geological layer in open-pit mining areas[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 113–122.
- [155] 齐跃明, 周沛, 周来, 等. 考虑采动效应的闭坑矿井水硫酸盐污染规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(4): 89–100.
- QI Yueming, ZHOU Pei, ZHOU Lai, et al. Sulphate contamination in an abandoned coal mine in light of mining effects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(4): 89–100.
- [156] ZENG Bin, ZHANG Zhengxin, YANG Mui. Risk assessment of groundwater with multi-source pollution by a long-term monitoring programme for a large mining area[J]. *International Biodegradation & Biodegradation*, 2018, 128: 100–108.
- [157] FENG Haibo, ZHOU Jianwei, CHAI Bo, et al. Groundwater environmental risk assessment of abandoned coal mine in each phase of the mine life cycle: A case study of Hongshan coal mine, North China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(33): 42001–42021.
- [158] XIA Shiyang, SONG Ziling, ZHAO Xiaoliang, et al. Review of the recent advances in the prevention, treatment, and resource recovery of acid mine wastewater discharged in coal mines[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 52: 103555.
- [159] DONG Shuning, WANG Hao, GUO Xiaoming, et al. Characteristics of water hazards in China's coal mines: A review[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40(2): 325–333.
- [160] TAFTI M D, ARDEJANI F D, MARJI M F, et al. Simulation of groundwater contamination by leakage from waste-filled mine[J]. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 2021, 36(5): 49–55.
- [161] 李云鹏, 孔胃, 楚储, 等. 矿区生态系统演变与修复模式研究[J]. *中国矿业*, 2023, 32(1): 60–66.
- LI Yunpeng, KONG Wei, CHU Chu, et al. Study on the evolution and restoration model of mining area ecosystem[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(1): 60–66.
- [162] ZHU Yongguan, REID B J, MEHARG A A, et al. Optimizing Peri-URban Ecosystems (PURE) to re-couple urban-rural symbiosis[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1085–1090.
- [163] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 矿区生态风险评价研究述评[J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6566–6574.
- PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Research progress in ecological risk assessment of mining area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6566–6574.
- [164] 田惠文, 张欣欣, 毕如田, 等. 煤炭开采导致的农田生态系统固碳损失评估[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1499–1509.
- TIAN Huiwen, ZHANG Xinxin, BI Rutian, et al. An assessment of the carbon sequestration loss of farmland ecosystems caused by coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1499–1509.
- [165] BOLDY R, ANNANDALE M, ERSKINE P D, et al. Assessing impacts of mining on provisioning ecosystem services in a culturally diverse landscape of Western Cape York, Australia[J]. *Landscape Ecology*, 2023, 38(12): 4467–4481.
- [166] SHI Jieqing, LI Dengao, SHEN Chaoyong, et al. A new pattern to quantitatively evaluate the value of ecosystem services in the large-scale open-pit coal mining area[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1127028.
- [167] 季翔林, 阎跃观, 郭伟, 等. 耦合遥感生态指数模型的山西省及规划矿区生态环境评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(3): 103–112.
- Ji Xianglin, YAN Yueguan, GUO Wei, et al. Ecological environment assessment of Shanxi Province and planned mining area based on coupling Remote Sensing Ecological Index(RSEI) model[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(3): 103–112.
- [168] LIU Wanyu, LEE Dairong, WANG S Y S, et al. Assessing the ecological loss of mining areas in Taiwan[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(2): 288.