

## 考虑污染物扩散风险的场地地下水污染多层次风险评估方法

张行洲, 殷乐宜, 陈 坚, 周笑笑, 杨丽虎, 吴吉春, 谢月清

### A study of the multi-tiered risk assessment method of site groundwater contamination considering transport-induced risk

ZHANG Xingzhou, YIN Leyi, CHEN Jian, ZHOU Xiaoxiao, YANG Lihu, WU Jichun, and XIE Yueqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209006>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述

Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk

王嘉瑜, 蒲生彦, 胡, 李博文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 43-50

#### 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究

A study of the risk ranking method of landslides and collapses

解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 刘秀伟, 赵伟华, 张成强 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 184-192

#### 鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31-37

#### 考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160

#### 区域地下水污染调查取样点布设量化分配方法

Quantitative sample distribution in regional groundwater contamination investigation

李颖智, 蔡五田, 耿婷婷, 张涛, 张智印 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 24-30

#### 吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析

Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A case study in the Taoer River catchment

查恩爽, 肖霄 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 36-43



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209006

张行洲, 殷乐宜, 陈坚, 等. 考虑污染物扩散风险的场地地下水污染多层次风险评估方法 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 160-170.

ZHANG Xingzhou, YIN Leyi, CHEN Jian, *et al.* A study of the multi-tiered risk assessment method of site groundwater contamination considering transport-induced risk[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 160-170.

## 考虑污染物扩散风险的场地地下水污染多层次风险评估方法

张行洲<sup>1</sup>, 殷乐宜<sup>2</sup>, 陈坚<sup>2</sup>, 周笑笑<sup>1</sup>, 杨丽虎<sup>3</sup>, 吴吉春<sup>1</sup>, 谢月清<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 表生地球化学教育部重点实验室, 江苏南京 210023;

2. 生态环境部环境规划院长江经济带生态环境联合研究中心, 北京 100012;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 地下水中污染物具有迁移性和扩散性, 会对下游敏感受体造成威胁, 目前场地地下水风险评估主要关注人体健康风险, 还未能综合考虑地下水污染的整体风险, 尤其是忽视了污染物迁移引起的对下游敏感受体的风险。本研究基于“源-径-汇”模型构建了考虑污染物扩散风险的场地地下水污染风险评估的指标体系与风险评估模式。在指标体系构建方面, 重点考虑场地地下水的污染源、迁移路径和敏感受体 3 个方面。在风险评估模式方面, 根据场地不同地下水污染状态开展 3 个层次的风险评估。基于假想的铬污染场地开展了案例分析, 设置了地下水污染状态的 4 种情景, 利用 Wexler 溶质运移模型计算了地下水污染羽的时空变化, 并针对地下水污染的不同层次开展了风险评估。结果表明, 在场地地下水污染羽未到达场地边界的 2 种情形中, 场地地下水的风险评分分别为 4.0, 6.2, 分别属于低风险与中风险。在场地地下水污染羽到达或超出场地边界的 2 种情形中, 场地地下水的风险评分分别为 7.0, 8.8, 分别属于中风险与高风险。综合而言, 本研究构建的方法能够用来对场地地下水进行系统全面的评估和对比, 能够根据风险结果对污染场地进行有效的分级管控, 为污染场地的风险管控提供技术支撑。

**关键词:** 场地地下水污染; “源-径-汇”模型; 指标体系; 风险评估

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0160-11

## A study of the multi-tiered risk assessment method of site groundwater contamination considering transport-induced risk

ZHANG Xingzhou<sup>1</sup>, YIN Leyi<sup>2</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, ZHOU Xiaoxiao<sup>1</sup>, YANG Lihu<sup>3</sup>,

WU Jichun<sup>1</sup>, XIE Yueqing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Earth Surficial Geochemistry of Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Ecological Environment Joint Research Center for Yangtze River Economic Zone, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing, 100012, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** Contaminants in groundwater can spread downstream, causing risks to receptors along the path. The risk

收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2022-11-07

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家重点研发课题(2019YFC1804803)

第一作者: 张行洲(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事场地地下水风险评估研究。E-mail: [13132203635@163.com](mailto:13132203635@163.com)

通讯作者: 谢月清(1983-), 男, 教授, 主要从事地表水与地下水相互作用研究。E-mail: [yxie@nju.edu.cn](mailto:yxie@nju.edu.cn)

assessment of our current site groundwater contamination focuses mainly on human health risks. It rarely considers integrated risks of groundwater contamination, particularly neglecting risks to receptors at downstream locations. This study constructs a new index system and a tiered risk assessment approach for site groundwater contamination based on the “source-pathway-receptor” model considering risks to downstream receptors. For the construction of the index system, the source, pathway and receptor of site groundwater contamination are considered. For the risk assessment approach, a multi-tiered risk assessment are determined according to site groundwater contamination status. Based on the hypothetical case study of a chromium-contaminated site, four scenarios of groundwater contamination states are set. The spatio-temporal changes of groundwater contamination plumes are calculated by using the Wexler solute transport model, and risk assessment is carried out for different states of the groundwater contamination. The results show that in the two cases where the site groundwater contamination plumes have not reached the site boundary, the risk scores of the site groundwater are 4 and 6.2 points, respectively. The risk of the site groundwater at the two contamination states is low and medium, respectively. In the two cases where the site groundwater contamination plumes have arrived or exceeded the site boundary, the risk scores of the site groundwater are 7.0 and 8.8 points, respectively. The corresponding risk at the two contamination states is medium and high, respectively. It can be seen that this new method can comprehensively assess the potential level of harm of groundwater contamination to both human health and ecological environment, and therefore can provide technical support for the management of contaminated sites.

**Keywords:** site groundwater contamination; source-pathway-receptor model; index system; risk assessment

随着我国城市化和工业化的不断推进,场地的地下水污染问题逐渐凸显。城市的发展需要将原工业场地转为建设用地,工业场地存在的地下水污染将会影响未来人体与环境的安全<sup>[1]</sup>。目前我国污染场地的风险评估更多关注表层土壤和包气带,能够综合考虑土壤和地下水的污染风险评估工作还很少。对场地地下水污染有效管控的基础是地下水污染的风险评估,然而地下水具有隐蔽性和流动性<sup>[2]</sup>,目前评估体系对地下水的这些特征关注较少,需要采用合适的指标体系对包括扩散风险的地下水污染风险进行综合评估,为风险管控提供重要支撑。

我国现行的污染场地健康风险评估技术规范是《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ25.3—2019)<sup>[3]</sup>,该标准适用于建设用地内部土壤、地下水污染健康风险评估和风险控制值的确定,但对于场地地下水污染向场地外迁移以及污染物对敏感受体的威胁缺乏考虑,未能建立起比较全面的风险评估体系<sup>[4]</sup>。目前,针对污染场地的健康风险评估,计算污染土壤和地下水的健康风险,未考虑综合风险。例如,董敏刚等<sup>[5]</sup>对我国南方某典型有机化工污染场地开展风险评估时,采用静态模型进行了2个层次的健康风险评估,确定场地各层土壤和地下水的修复范围和修复量。苏安琪等<sup>[6]</sup>对氯代烃类污染场地进行风险评估时,采用多米尼克(Domenico)饱和带溶质运移模型对

场地地下水的迁移进行刻画,计算不同污染物的致癌风险与危害商。雷廷<sup>[7]</sup>将溶质运移理论引入健康风险评估中,采用 BIOSCREEN 解析解模型模拟了浅层含水层中 1,2-二氯丙烷的迁移,并基于污染物浓度分布进行了人体健康风险评估。我国生态环境部于 2019 年发布了《地下水污染健康风险评估工作指南》(环办土壤函[2019]770 号)<sup>[8]</sup>,通过风险表征初步确定风险控制的目标污染物、关键暴露途径及风险水平,判断计算得到的风险值是否超过可接受风险水平。总体而言,我国地下水风险评估大部分都是延续了人体健康风险评估,还未能综合考虑地下水污染的整体风险,尤其是忽视了污染物迁移引起的对下游敏感受体的风险<sup>[9]</sup>。

一些国家已经尝试落实了考虑地下水迁移途径的污染场地综合风险管理。美国环保局采用“危害等级评估系统”(Hazard Ranking System, HRS)<sup>[10]</sup>对污染场地进行风险评估与分级,评估系统首先针对地下水迁移、地表水迁移、土壤暴露、空气迁移暴露途径分别计算风险评分,然后通过均方根方程计算污染场地的总评分。对每类暴露途径评分时,该方法主要考虑与场地污染风险有关的 3 类因子,包括污染物已经排放或者排放的可能性;污染物自身的特征,例如毒性、浓度等;周围居民或者其他环境敏感受体的受危害程度。加拿大通过“污染场地国家分类系统”(National

Classification System for Contaminated Sites, NCSCS)<sup>[11]</sup> 对污染场地进行风险评估和分级。该系统考虑污染物特征、迁移途径以及敏感受体,而迁移途径包括了地表与地下水迁移、土壤、蒸汽、沉积物迁移等路径,在计算得到风险结果之后分为 5 类不同优先程度的场地来管理。法国的“污染土地管理方法”<sup>[12]</sup> 首先根据初步调查所收集的信息,判定每个评估因子的分值,然后通过相加或相乘的计算方式综合每种迁移途径的分值。各迁移途径独立评估,每个迁移途径有其相对应的分值和场地分类。最终场地分类以迁移途径中分类级别最高的为准。

总体而言,国外已经有一些国家对不同污染场地进行综合风险评估,但对地下水污染的考虑并不统一。在我国,目前在产企业、关停企业地块、再开发地块管理存在差异化、碎片化、模式化,不同阶段之间存在管理空白区,对地下水下游敏感受体的风险管理尚不明确,亟需构建包含污染源特征、水文地质条件、水质安全、污染物迁移转化、风险水平等多要素,结合地下水污染风险、水质状况和水质趋势,涵盖不同污染扩散程度的多层次多维立体地下水污染风险预警指标体系,为系统化链条化开展地下水风险管理工作提供技术支撑。

目前的污染场地风险评估主要基于“源-径-汇”模型,即污染源、迁移路径和敏感受体<sup>[13]</sup>。该方法在评

估迁移路径和敏感受体的风险时,考虑的指标主要为路径及受体的固有特性,没有将污染扩散风险纳入考虑范围,导致开展场地管理时缺少理论依据。而本研究使用解析解模型能够描述污染物迁移扩散造成的风险,并由此引入污染羽到达场界或下游敏感受体的时间作为评估指标,将人体健康风险和场地污染扩散风险综合叠加。新方法能够综合评估场地地下水污染风险,结合敏感受体的管理要求,最终可以确定相对应的管理修复措施,如此能够更加全面、准确地评估场地地下水污染给人体健康和生态环境带来的影响。

## 1 指标体系及风险评估模式构建

### 1.1 指标体系构建

地下水污染对于人体健康和生态环境危害的全过程使用“源-径-汇”模型来考虑。通过该模型对地下水污染过程中的风险指标进行筛选和分类,污染源的污染风险主要为地表及土壤中污染物下渗对地下水造成污染风险,迁移路径中的污染风险以研究区地下水的污染情况表示,敏感受体的污染风险为污染对敏感受体造成的影响。场地地下水污染风险指标可以按此模型分为 3 类,因此指标体系以源、径、汇为基本指标类别,构成了比较完整的环境安全解决方案。整体评估框架如图 1 所示。

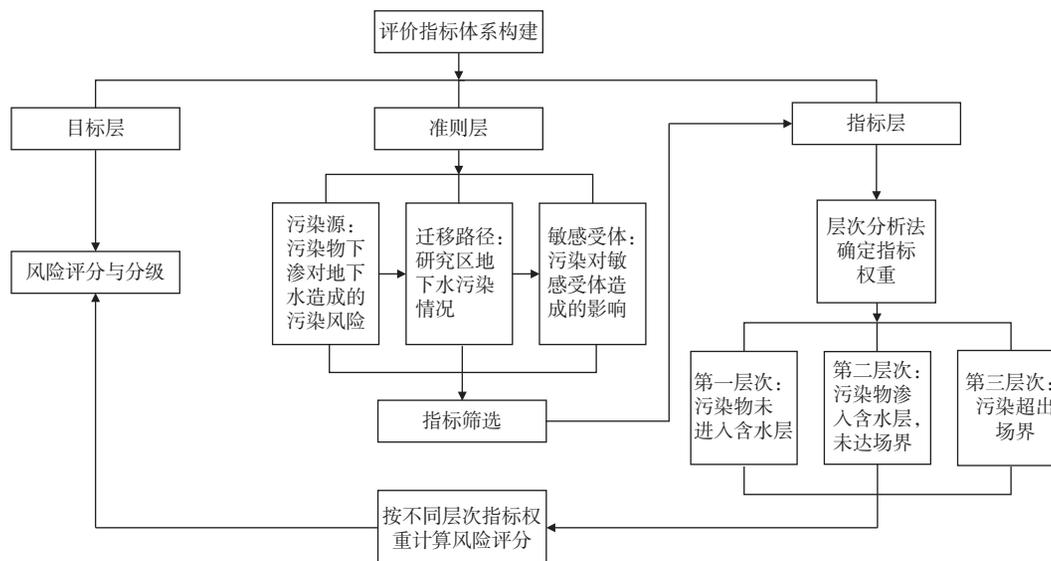


图 1 场地地下水污染多层次风险评估框架

Fig. 1 Multi-level risk assessment framework for groundwater contamination of the site

最终构建的场地地下水污染指标评估体系可分为目标层、准则层与指标层 3 个层次。其中目标层为

场地地下水污染最终风险评分,准则层为污染源、迁移路径和敏感受体 3 个因素,指标层按准则层分类

筛选。

由于各国的通用风险评估准则都是基于“源-径-汇”模型, 因此本研究中的指标筛选大部分参考各国的风险评估和预警指标体系。基于相关规范的文献调查<sup>[10-12]</sup>, 将各国规范中出现的高频指标筛选出来,

再结合研究尺度, 考虑指标体系的易用性, 对筛选出的指标进行优化, 并且着重考虑污染扩散风险, 加入了污染羽到达场界或下游敏感受体的时间这一指标, 进一步丰富和完善了风险评估体系。整合后的评估体系的具体指标见表 1。

表 1 指标分级评分  
Table 1 Index grading table

土壤污染物入渗浓度	土壤污染范围	地下水质量	健康风险	敏感受体或使用功能类型	迁移至敏感受体的天数/d	迁移速度/(m·d <sup>-1</sup> )	赋值
符合IV类水水质目标	0~5%调查范围	符合水质目标	$CR \leq 10^{-6}$ 且 $HQ \leq 1$	其他类型或没有敏感受体	$T > 1000$	$v \leq 0.3$	2
超IV类水水质目标 0~5倍	>5%~10%调查范围	超水质目标0~5倍	$10^{-6} < CR \leq 5 \times 10^{-6}$ 或 $1 < HQ \leq 5$	建设用地	$500 < T \leq 1000$	$0.3 < v \leq 1$	4
超IV类水水质目标 >5~20倍	>10%~25%调查范围	超水质目标>5~20倍	$5 \times 10^{-6} < CR \leq 10^{-5}$ 或 $5 < HQ \leq 10$	居住用地	$250 < T \leq 500$	$1 < v \leq 2$	6
超IV类水水质目标 >20~50倍	>25%~50%调查范围	超水质目标>20~50倍	$10^{-5} < CR \leq 10^{-4}$ 或 $10 < HQ \leq 100$	工农农业用水	$100 < T \leq 250$	$2 < v \leq 5$	8
超IV类水水质目标 >50倍	>50%调查范围	超水质目标>50倍	$CR > 10^{-4}$ 或 $HQ > 100$	水源地和敏感地表水体	$T \leq 100$	$v > 5$	10

## 1.2 指标含义及数据来源

### 1.2.1 污染源

污染源主要是工业场地中的污染物渗漏进入地下水, 这是造成场地地下水持续污染的重要原因。本部分包含土壤污染物入渗浓度和土壤污染范围 2 个子指标。

#### (1) 土壤污染物入渗浓度

地下水中的污染物来自场地地表生产活动和土壤中污染物, 工业废水泄漏可直接入渗进入地下水, 地表或者土壤污染物可在降雨淋滤作用下缓慢迁移至地下水中。由于地下水具有流动性, 存在对流和弥散作用, 因此潜水面上的土壤水溶液中污染物浓度与地下水中的污染物浓度会有所不同。例如, 土壤污染物在进入地下水后, 受到混合作用及地下水侧向流动过程影响, 污染物浓度会显著下降, 因此土壤入渗造成的地下水污染可能并不如土壤中严重。本指标将选取场地地下水中污染物的最高入渗浓度作为评估指标, 并对比污染物浓度和地下水水质功能目标, 如果入渗浓度超过水质功能目标, 则表明土壤污染物入渗正在持续污染地下水, 地下水存在继续污染的风险。指标的取值取决于地下水最高入渗浓度超过水质功能目标的倍数, 见表 1。该指标数据主要来自于场地勘察或者污染物迁移转化模型计算结果。

#### (2) 土壤污染范围

土壤污染范围也是造成地下水持续污染并造成风险的重要因素。土壤污染范围越小, 污染物入渗到地下水中会很容易被地下水扩散稀释; 相反, 若土壤

污染范围越大, 污染物很难在场地范围内混合稀释到相对低的浓度, 因此土壤污染范围越大对地下水的污染风险相对越高。指标的取值取决于土壤污染范围相对于场地的比例, 比例越大得分越大, 见表 1。该指标数据主要来自于场地调查结果。

### 1.2.2 迁移路径

污染物在迁移路径中的污染状态是引起地下水风险的直接原因。本部分考虑 2 个重要的子指标, 包括地下水质量和健康风险水平。

#### (1) 地下水质量

地下水质量一般通过《地下水质量标准》(GB/T14848—2017)<sup>[14]</sup>进行评估, 这一标准是依据我国地下水质量状况和人体健康风险, 并参照了地下水功能要求制定的水质分类, 标准的制定充分考虑了常规的和非常规污染物的毒理学指标例如砷、镉、四氯乙烯等。在质量分类中, I类和II类地下水中化学组分含量低或者较低, 适用于各种用途。III类地下水化学组分含量中等, 更多地适用于集中式生活饮用水和工农农业用水。与此相比, IV类地下水化学组分含量较高, 一般仅适用于农业和部分工业用水。本指标以IV类水的对应化学组分为参照目标, 赋值与超过IV类水化学组分的倍数成正相关关系。地下水质量的评分标准见表 1, 该指标使用场地监测数据或者经过模型解译的结果数据。

#### (2) 健康风险水平

为进一步体现地下水中有毒有害污染物, 通过呼吸、皮肤接触等途径对人体健康造成的风险, 需评估

污染因子的健康风险水平。健康风险参考《地下水污染健康风险评估工作指南》(环办土壤函〔2019〕770号)<sup>[8]</sup>计算,健康风险的计算包括评估准备、危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征和控制值计算6个部分,地下水健康风险的最终表达结果为单一污染物的致癌风险(Carcinogenic Risk, CR)和危害商(Hazard Quotient, HQ)。不同健康风险的得分见表1。该指标数据来源于人体健康风险评估结果。

### 1.2.3 敏感受体

敏感受体的污染风险来自地下水污染对其的影响。选择敏感受体类型和污染物迁移至敏感受体的时间作为影响指标。

#### (1) 敏感受体类型

污染物的迁移造成风险的程度与敏感受体有关系。如果迁移路径上存在敏感受体,例如下游存在用于饮用的水井或者居家生活用水,地下水污染造成的风险程度将会有所不同。用于饮用时,污染地下水造成的风险程度会比用于居家卫生用水的风险程度高。在该指标中,考虑多种可能的敏感受体,包括建设用地、居住用地、工农业用水及水源地和敏感地表水体4种情形,不同敏感受体的得分见表1。该指标数据来源于场地调查结果。

#### (2) 污染物迁移至敏感受体的时间

污染场地下游可能存在敏感受体,利用污染物迁移至敏感受体的时间作为评估指标,指标的分级如表1所示。当污染尚未迁移出场界时,将场界作为敏感受体,模拟预测评估污染物迁移至场界的时间;或当污染已经迁移出场界,场地下游存在敏感受体时,模拟预测评估污染物迁移至敏感受体的时间。参考《饮用

水水源保护区划分技术规范》(HJ338—2018)<sup>[15]</sup>计算一级保护区半径时取污染物迁移时间100 d,二级保护区污染物迁移时间1 000 d,将1 000 d和100 d作为评分范围的上下限。迁移时间的指标分级见表1。

#### (3) 污染物迁移速度

若场地下游无敏感受体,利用污染物迁移速度作为评估指标,迁移速度较快则风险较大。参考《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ338—2018)<sup>[15]</sup>不同介质保护区范围经验值,得到评分范围的上限5 m/d,下限0.3 m/d。该指标数据通过溶质运移模型模拟计算得到,迁移速度的指标分级如表1所示。

### 1.2.4 解析解溶质运移模型

敏感受体指标类别中涉及的污染物迁移模拟,可以使用解析解模拟与数值解模拟,刘玲等<sup>[16]</sup>使用FEFLOW建立土壤-地下水耦合数值模型模拟六价铬的运移,结果较为精确。然而数值模型的构建比较复杂,需要的场地参数较多,因而在初步的研究中使用解析解对污染物浓度分布进行快速估算。对于地下水污染物的三维溶质运移,在不同的边界条件与污染源条件下有许多解析解与半解析解,其中主要的是Domenico解<sup>[17]</sup>。Domenico解为近似解,其计算中存在一定的近似误差,后来的Wexler为受狄利克雷边界条件约束的点,线和面积源的三维污染物传输问题推导出了半解析解,相比于Domenico解更为精确<sup>[18]</sup>。

因此本研究在分析污染物迁移转化过程时,采用Wexler地下水污染物迁移解析模型<sup>[19]</sup>。Wexler模型假定地下水为稳定流,污染源为点源,考虑污染物运移中的自然衰减过程,污染物浓度分布为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{C_0 Q \exp\left[\frac{v(x - X_c)}{2D_x}\right]}{8\pi\gamma\sqrt{D_y D_z}} \cdot \left\{ \exp\left[\frac{\gamma\beta}{2D_x}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{(\gamma + \beta t)}{2\sqrt{D_x t}}\right] + \exp\left[\frac{-\gamma\beta}{2D_x}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{(\gamma - \beta t)}{2\sqrt{D_x t}}\right] \right\} \quad (1)$$

$$\gamma = \left[ (x - X_c)^2 + \frac{D_x(y - Y_c)^2}{D_y} + \frac{D_x(z - Z_c)^2}{D_z} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\beta = [v^2 + 4D_x k]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $C$ ——污染物质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );

$t$ ——污染物迁移时间/d;

$C_0$ ——污染源入渗质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );

$Q$ ——渗漏流量/( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ );

$X_c, Y_c, Z_c$ ——点源的坐标/m;

$D_x, D_y, D_z$ —— $x, y, z$ 方向上的水动力弥散系数/( $\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$ );

$v$ —— $x$ 方向的水流流速/( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ),假定 $y$ 与 $z$ 方向流速均为0;

$k$ ——一阶衰减系数/ $\text{d}^{-1}$ ;

$\gamma$ ——计算过程中表征点到污染源之间距离的算符/m;

$\beta$ ——计算过程中表征流速的算符/( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )。

### 1.3 风险评估模式

由于场地污染在时间和空间尺度上存在多个阶段,不同阶段风险评估中起主要作用的风险因素不同,因此本文采用多层次风险评估。使用污染物运移

模型模拟场地污染物的迁移过程, 根据污染物迁移范围和地下水、场界之间的关系划分风险评估的层次, 选择不同的指标组合进行风险评估(表 2)。第三层次相比于第二层次增加考虑了污染物迁移到场外后, 可能威胁到的场外敏感受体的地下水使用功能类型。

表 2 多层次风险评估模式  
Table 2 Multi-level risk assessment model

指标层次	地下水含水层污染特征	指标组合
第一层次	未污染(场地土壤已污染)	源
第二层次	已污染, 范围未超场界	源、径、汇
第三层次	已污染, 范围已超场界	源、径、汇

#### 1.4 指标权重确定

指标权重体现了指标对整体风险评估的重要程度, 本文采用层次分析法结合专家咨询法对各个层次风险评估的指标进行打分赋权, 最终结果如下:

第一层次: 已发现场地土壤污染但地下水尚未污染, 此时土壤污染物作为地下水污染源, 存在土壤污染物持续下渗污染地下水风险, 需要对污染源开展风险评估。评估权重: 土壤污染物入渗浓度为 50%、土壤污染范围为 50%。

第二层次: 已发现场地地下水污染但污染尚未迁移至场界, 未对场地用地红线外的敏感受体产生风险, 需要对污染源和污染状况开展风险评估。评估权重: 土壤污染物入渗浓度为 10%、土壤污染范围为 10%、地下水质量为 30%、健康风险水平为 25%、污染物迁移至场界的时间为 25%。

第三层次: 已发现场地地下水污染且污染已迁出场界, 对场地用地红线外的敏感受体产生风险, 需要对污染源、污染状况以及对敏感受体的影响开展风险评估, 必要时进行风险预警。评估权重: 土壤污染物入渗浓度为 5%、土壤污染范围为 5%、地下水质量为 15%、健康风险水平为 15%、污染物迁移至敏感受体的时间为 30%、敏感受体地下水使用功能类型为 30%。

#### 1.5 风险等级与应对措施

在污染物运移模拟计算的基础上根据各指标权重和得分, 开展风险评估并进行风险分级。不同评估层次中各个评估指标的权重采用专家打分法得到, 因此具有一定的主观性, 但能够在一定程度上区分各指标在不同层次的风险严重程度<sup>[20]</sup>。最终的风险评分公式为:

$$I = \sum_{i=1}^n \omega_i X_i \quad (4)$$

式中:  $I$ ——最终风险总得分;

$n$ ——某一评估层次中涉及的指标个数;

$\omega_i$ ——某一评估层次中各个具体指标的权重;

$X_i$ ——各个具体指标的得分。

评估得分, 8 分以上为高风险, 4~8 分为中风险, 4 分及以下为低风险。

根据《中华人民共和国土壤污染防治法》要求, 建设用地土壤污染修复和风险管控名录中需要实施修复的场地, 土壤污染责任人应当结合土地利用总体规划和城乡规划编制修复方案, 报地方人民政府生态环境主管部门备案并实施, 修复方案应当包括地下水污染防治的内容。《污染地块土壤环境管理办法(试行)》<sup>[21]</sup>指出对暂不开发利用的污染地块, 实施以防止污染扩散为目的的风险管控。“十四五”规划重点任务指出存在地下水污染的地块, 要统筹推进地下水风险管控和修复。因此, 对于不同的风险等级, 可参照相关法律法规, 分级制定管理修复措施。

对于低风险场地, 无需采取特定防范措施; 对于中风险场地, 可采取以制度控制为主的风险管控措施, 必要时需持续开展定期地下水监测; 对于高风险地块, 实施以防止污染扩散为目的的风险管控; 对环境风险大、严重影响公众健康的地下水污染场地, 列入地下水污染场地清单, 统筹推进地下水风险管控和修复。

## 2 模拟结果

### 2.1 案例情景设置

由于污染场地一般处在地下水污染过程某阶段, 为了较详尽地展示本方法的应用性, 本次案例构建了假想污染场地, 并设置了污染的 3 个层次。假想场地长 160 m, 历史上主要生产铬盐, 场地周围皆为农业用地, 场地内由于铬渣堆长期堆放, 导致土壤与地下水发生铬污染, Cr 进入含水层的通量为 0.6 m<sup>3</sup>/d, 其中 Cr 质量浓度为 1 mg/L。场地潜水含水层厚 7 m, 地下水流主要为南北向, 流速为 0.06 m/d。场界下游存在敏感受体, 距离场地边界 30 m, 敏感受体类型为水源地。

对研究区南北方向污染物运移风险以及污染物运移对含水层所造成的风险进行评估, 根据《地下水质量标准》(GB/T14848—2017)<sup>[14]</sup>选择Ⅳ类水水质标准作为风险评估的目标水质, Cr 超标浓度为 0.1 mg/L。考虑了以下 4 种情形进行风险评估:

(1) 污染源发生渗漏, 渗漏通量为 0.6 m<sup>3</sup>/d, 其中 Cr 质量浓度为 1 mg/L, 但由于渗漏时间较短, 此时地

下水还没有受到污染。

(2) 污染源渗漏持续时间为 3 a, 随后进入到停产期, 铬渣堆被移除, 但土壤中的污染物继续向下渗漏, 渗漏浓度不变, 时间为 1 a, 此时污染羽仍然在场地内部。

(3) 污染物持续渗漏 3 a, 随后场地进入到停产期, 铬渣堆被移除, 但土壤中的污染物继续向下渗漏, 渗漏通量及浓度不变, 直到污染羽到达场地边界。

(4) 污染物持续渗漏 3 a, 随后场地进入到停产期, 铬渣堆被移除, 但土壤中的污染物继续向下渗漏, 渗漏通量及浓度不变, 时间为 5 a, 此时污染羽已经超过场地边界。

为了计算污染羽的迁移时间, 利用 Wexler 解析模型开展分析。纵向弥散系数设为  $0.1 \text{ m}^2/\text{d}$ , 横向弥散系数设为  $0.002 \text{ m}^2/\text{d}$ , 垂向弥散系数设为  $0.004 \text{ m}^2/\text{d}$ , 将场地的污染渗漏概化为污染物点源泄露, 泄露点坐标为  $(40 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, -0.18 \text{ m})$ , 污染物渗漏通量为  $0.6 \text{ m}^3/\text{d}$ , 地下水流速为  $0.06 \text{ m}/\text{d}$ 。健康风险评估的相关参数参考《地下水污染健康风险评估工作指南》<sup>[8]</sup> 的参考值。

## 2.2 模型模拟结果

在情形 1 中, Cr 尚未迁移出场地边界。情形 1 中设定污染物尚未迁移到潜水含水层中, 因此不需要进行解析解模拟。因此, 情形 1 采用第一层次风险评估。情形 2 中解析解模拟得到的含水层中污染物浓度分布如图 2, Cr 渗入潜水含水层但未到达场地边界。因此, 情形 2 采用第二层次风险评估。

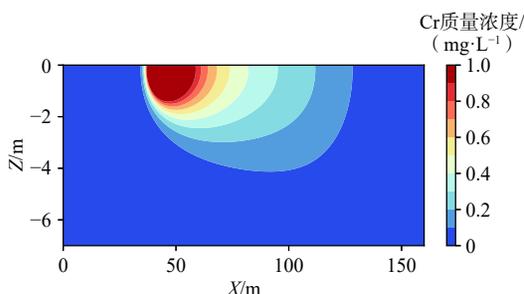


图 2 情形 2 解析解污染物分布结果

Fig. 2 Analytical solution result of contamination distribution of case 2

情形 3 与情形 4 考察当污染羽到达或超出场界时, 该场地地下水风险评估体系的评估结果。Wexler 模型计算的含水层中 Cr 浓度分布如图 3 所示。在情形 3 中, 停产后污染物继续渗漏 1 069 d, 污染羽前端刚好到达场地边界; 在情形 4 中, 污染范围已超过场地边界。因此, 情形 3 与情形 4 都采用第三层次风险评估。

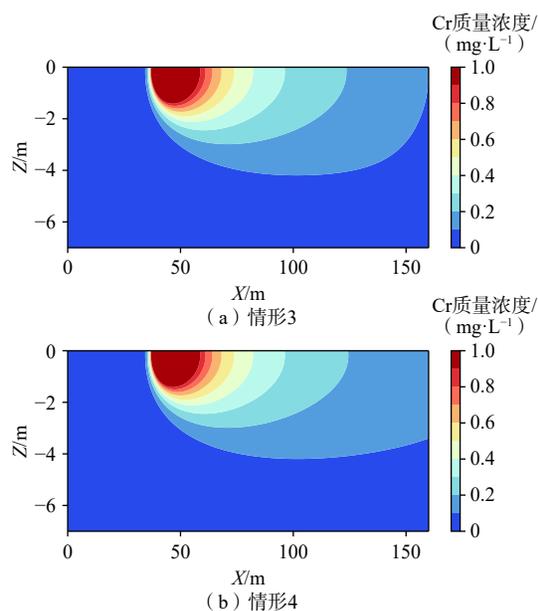


图 3 情形 3 和情形 4 解析解污染物分布结果

Fig. 3 Analytical solution result of contamination distribution of case 3 and case 4

## 3 模拟结果分析

### 3.1 污染物未超出场界的情形

情形 1 中土壤污染最高入渗浓度为  $1.0 \text{ mg}/\text{L}$ , 超过目标 10 倍, 单项评分为 6 分; 由于渗漏刚刚发生, 认为土壤污染范围小于 5% 调查范围, 单项评分为 2 分。按照第一层次指标权重: 土壤污染物入渗浓度为 50%、土壤污染范围为 50%。最终计算得到情形 1 的地下水风险评分为 4 分, 属于中风险。

情形 2 中土壤污染最高入渗浓度为给定值  $1.0 \text{ mg}/\text{L}$ , 超过目标 10 倍, 单项评分为 6 分; 土壤污染范围通过模拟得到, 为  $317.96 \text{ m}^2$ , 大于 25% 调查范围小于 50% 调查范围, 单项评分为 8 分; 地下水质量根据模拟得到的污染物浓度分布评分, 地下水质量评分分布如图 4(a) 所示, 最高为 6 分; 健康风险根据模拟得到的污染物浓度分布评分, 致癌风险分布图如图 4(b) 所示, 最高为 0.003 7, 健康风险评分分布如图 4(c) 所示, 最高为 8 分; 由于污染物未超出场界, 迁移时间项为污染物到达场界的时间, 模拟得到污染物自情形 2 情况下尚需 704 d 到达场界, 评分为 4 分。按照第二层次评估权重: 土壤污染物入渗浓度为 10%、土壤污染范围为 10%、地下水质量为 30%、健康风险水平为 25%、污染物迁移至场界或敏感受体的时间为 25%。最终计算得到情景 2 的地下水风险评分分布如图 4(d), 最高为 6.2 分, 属于中风险。

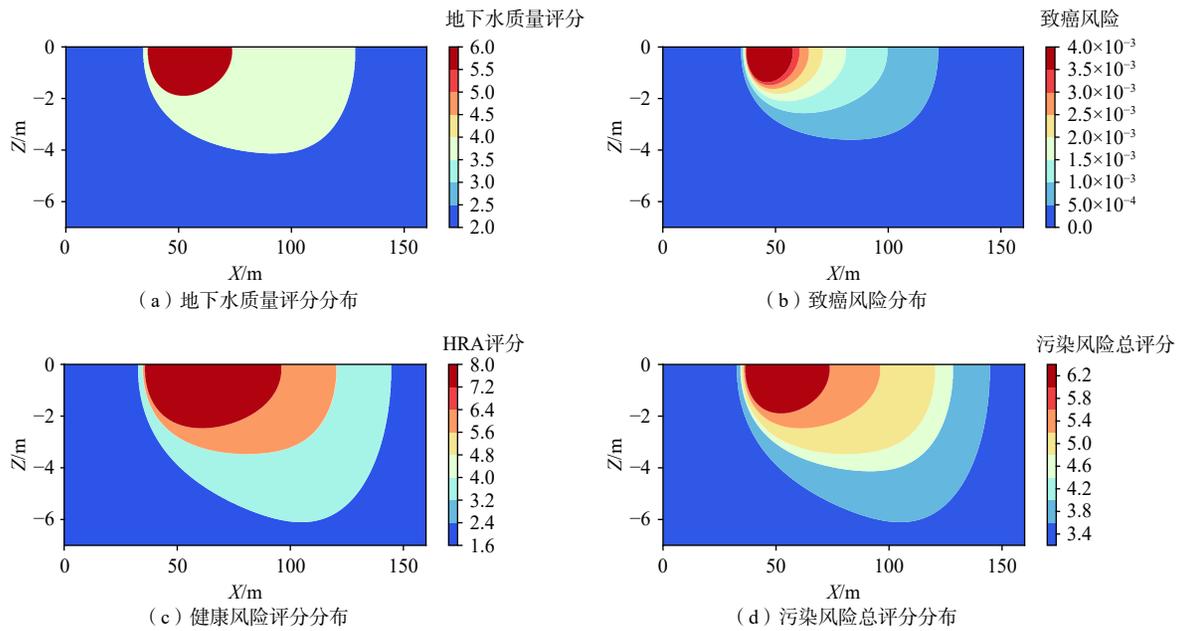


图 4 情形 2 解析解风险评估结果

Fig. 4 Analytical solution results of risk assessment of case 2

3.2 污染物到达或超出场界的情形

在情形 3 中, 污染物刚好到达场界。土壤污染最高入渗浓度为给定值 1.0 mg/L, 超过目标 10 倍, 评分为 6 分; 土壤污染范围通过模拟得到, 为 444.52 m<sup>2</sup>, 大于 25% 调查范围而小于 50% 调查范围, 单项评分为 8 分; 地下水质量根据模拟得到的污染物浓度分布评分, 地下水质量评分分布如图 5(a)所示, 最高为 6 分; 健康风险根据模拟得到的污染物浓度分布计算, 致癌

风险分布图如图 5(b)所示, 最高为 0.003 7, 健康风险评分分布如图 5(c)所示, 最高为 8 分; 由于污染物刚好到达场界, 迁移时间项为污染物到达敏感受体的时间, 模拟得到情形 3 情况下污染物尚需 800 d 到达敏感受体, 评分为 4 分; 敏感受体设置为水源地, 评分为 10 分。按照第三层次评估权重: 土壤污染物入渗浓度为 5%、土壤污染范围为 5%、地下水质量为 15%、健康风险水平为 15%、污染物迁移至场界或敏感受体的

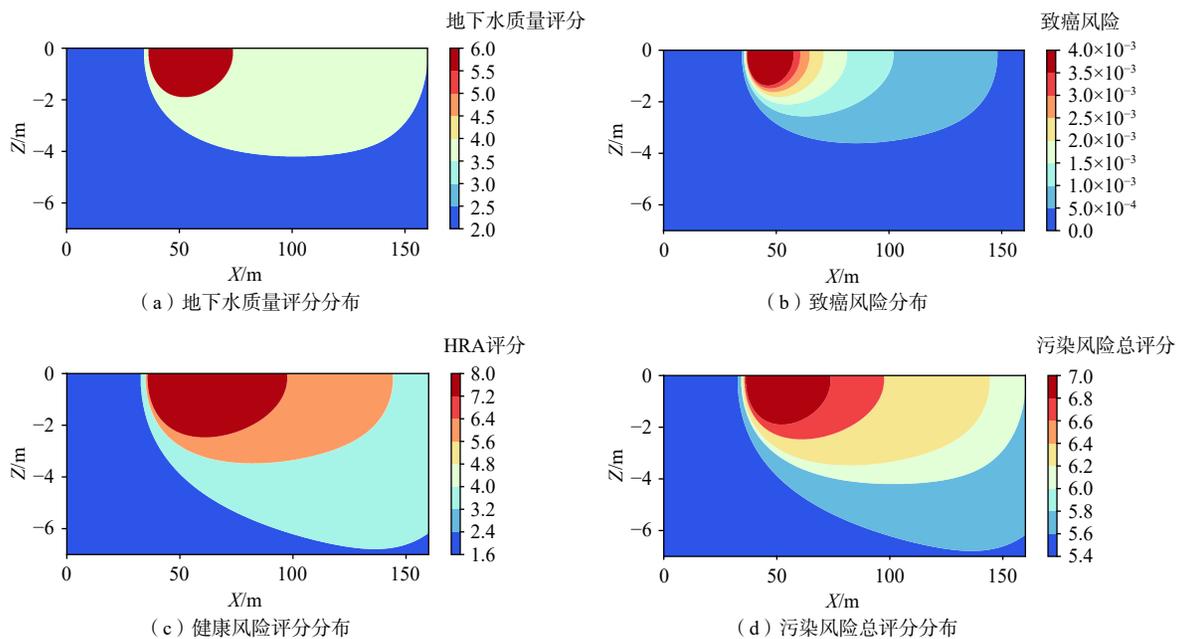


图 5 情形 3 解析解风险评估结果

Fig. 5 Analytical solution results of risk assessment of case 3

时间为 30%、敏感受体地下水使用功能类型为 30%。最终计算得到情景 3 的地下水风险评分分布如图 5(d), 最高为 7.0 分, 属于中风险。

情形 4 中, 污染物超出场界。土壤污染最高入渗浓度为给定值 1.0 mg/L, 超过目标 10 倍, 评分为 6 分; 土壤污染范围通过模拟得到, 为 464.84 m<sup>2</sup>, 大于 25% 调查范围小于 50% 调查范围, 单项评分为 8 分; 地下水质量根据模拟得到的污染物浓度分布评分, 地下水质量评分分布如图 6(a) 所示, 最高为 6 分; 健康风险根据模拟得到的污染物浓度分布计算, 致癌风险分布如图 6(b) 所示, 最高为 0.003 7, 健康风险评分分布如

图 6(c) 所示, 最高为 8 分; 由于污染物超出场界, 迁移时间项为污染物到达敏感受体的时间, 模拟得到情形 4 情况下污染物尚需 44 d 到达敏感受体, 评分为 10 分; 敏感受体设置为水源地, 评分为 10 分。按照第三层次评估权重: 土壤污染物入渗浓度为 5%、土壤污染范围为 5%、地下水质量为 15%、健康风险水平为 15%、污染物迁移至场界或敏感受体的时间为 30%、敏感受体地下水使用功能类型为 30%。最终计算得到情景 4 的地下水风险评分分布如图 6(d), 最高为 8.8 分, 属于高风险。

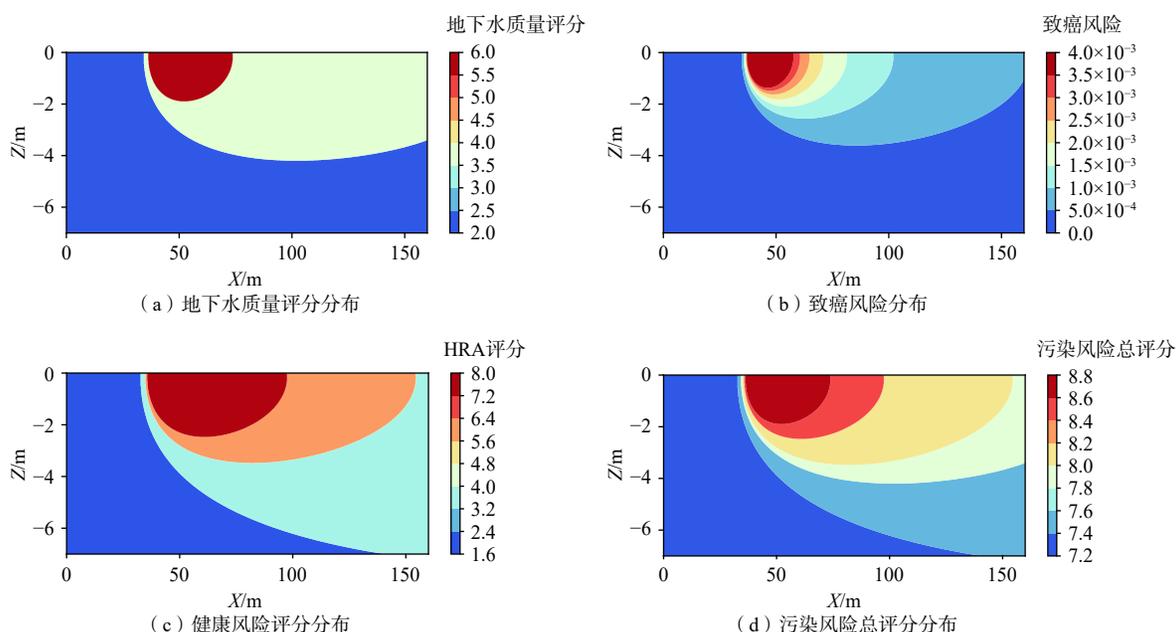


图 6 情形 4 解析解风险评估结果

Fig. 6 Analytical solution results of risk assessment of case 4

## 4 讨论

本研究基于“源-径-汇”模型构建了考虑污染物扩散风险的场地地下水污染多层次风险评估方法。本文运用该模型, 融合污染场地风险评估、地下水动态迁移风险评估以及当前地下水环境管理要求, 构建了为地下水环境管理决策服务的场地地下水污染风险评估体系。该体系基于地下水污染的过程, 根据污染源特征、水文地质条件、污染物特征、场地健康风险、污染物迁移情况等, 依据我国生态环境部门地下水环境管理要求, 综合判断场地当前存在的风险及环境问题<sup>[8,14-15]</sup>。

对比传统污染场地的风险评估(忽略污染羽扩散风险), 本方法特点为:

(1) 本方法已纳入传统风险评估方法, 传统方法评估结果是本方法的重要指标参数。

(2) 本方法同时考虑了地下水污染扩散风险, 基于地下水模拟预测模型的构建, 评估了污染物在地下水中的动态迁移过程对下游敏感受体的影响。

(3) 本方法紧密衔接我国当前环境管理需求, 结果最终可快速为管理决策服务。

本研究考虑国家地下水环境管理对于污染羽扩散的控制要求, 将评估分为 3 个层次, 其中, 第二层次和第三层次通过预测污染物迁移至场界或者敏感受体的时间, 评估污染扩散风险。传统场地风险评估更多关注对地表人群的健康风险, 忽略了地下水的扩散风险, 通过模拟预测评估地下水污染物迁移趋势, 识

别地下水污染扩散风险。当评估结果为中高风险时,依据当前环境管理要求,管理者应考虑及时采取相应措施,防止污染进一步扩散,避免产生人体健康和环境风险。

研究利用 Wexler 解析解评估了地下水污染三维扩散过程。解析解是对实际复杂问题的简化,目的是能够快速认识地下水污染物的扩散范围。早前也有污染风险评估研究利用了解析解评估地下水污染物传输过程,例如苏安琪等<sup>[6]</sup>利用了 Domenico 解析解模型,雷廷<sup>[7]</sup>利用了 BIOSCREEN 解析解模型,进行污染物迁移转化的计算。本研究采用了 Wexler 解析解,与地下水数值模型相比,虽然该方法评估精度不高,但是能够对潜在的地下水污染风险开展快速评估。

## 5 结论

(1)本研究建立了基于“源-径-汇”模型的地下水风险评估指标体系,指标主要包括了污染源、迁移路径和敏感受体 3 大部分,引入了污染物扩散对下游敏感受体的影响,全面地考虑了地下水污染风险从产生到消除的全过程。基于地下水污染可能存在的状态,本研究构建了多层次风险评估模式,包括了土壤已污染但地下水未污染、地下水已污染但污染羽仍在场界内、地下水已污染但污染羽已超场界 3 个层次,能够对污染场地的地下水污染进行系统的风险评估,有助于风险管理者识别场地地下水污染对周围生态环境和人体健康整体的危害,制定更科学、全面的场地应对措施。

(2)案例分析包括了场地地下水中 Cr 污染物未到达场界的情形 1 与情形 2,地下水污染风险评分分别为 4 分与 6.2 分,分别为低风险与中风险。此外,案例分析还包括了场地地下水中污染物到达或超过边界的情形 3 与情形 4,地下水污染风险评分分别为 7.0 分与 8.8 分,分别为中风险与高风险。由于本研究构建的指标体系中考虑到地下水污染对下游敏感受体的威胁,在地下水污染物到达或超出边界时能明显看到污染风险会显著上升。因此,地下水污染防治要更多面向下游敏感受体,选择相应措施控制污染羽的迁移。

(3)研究采用 Wexler 解析解对污染物运移进行模拟,结合已建立的风险评估体系,能够实现对场地地下水污染风险的动态评估。但是解析解难以反映场地的实际的水文地质信息,以及土壤污染物下渗进入地下水的过程。未来在研究具体的场地时,可以采用

数值模型的方法对场地的地下水污染过程进行更加精细的刻画,使评估结果更加精准。

(4)研究采用的指标体系中,权重的分配使用了专家打分法,存在一定的主观性,后续的评估中,采取层次分析法与专家打分法结合的方式赋予各项指标权重,减少权重分配的主观性,更贴合实际。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 张保会,王林芳,郭宏,等.我国污染场地修复决策系统研究进展[J].环境与可持续发展,2021,46(2):138-143. [ZHANG Baohui, WANG Linfang, GUO Hong, et al. Progress of the research on the decision system of contaminated site restoration in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 138-143. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 车均,张蕾.地下水污染控制与修复的研究[J].资源节约与环保,2014(3):136. [CHE Jun, ZHANG Lei. Study on groundwater pollution control and remediation[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2014(3): 136. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 中华人民共和国生态环境部.建设用地土壤污染风险评估技术导则:HJ 25.3—2019[S].北京:中国环境科学出版社,2019. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for risk assessment of soil contamination of land for construction: HJ 25.3—2019[S]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2019. (in Chinese) ]
- [ 4 ] 王超,李辉林,胡清,等.我国土壤环境的风险评估技术分析展望[J].生态毒理学报,2021,16(1):28-42. [WANG Chao, LI Huilin, HU Qing, et al. Analysis and prospects on soil environmental risk assessment technology in China[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(1): 28-42. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 董敏刚,张建荣,罗飞,等.我国南方某典型有机化工污染场地土壤与地下水健康风险评估[J].土壤,2015,47(1):100-106. [DONG Mingang, ZHANG Jianrong, LUO Fei, et al. Health risk assessment of soil and groundwater for A typical organic chemical contaminated site in Southern China[J]. Soils, 2015, 47(1): 100-106. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 苏安琪,韩璐,晏井春,等.基于保护健康和水环境的氯代烃类污染场地地下水风险评估[J].环境工程,2018,36(7):138-143. [SU Anqi, HAN Lu, YAN Jingchun, et al. Risk assessment of chlorinated solvents in

- groundwater based on health and water environment[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(7): 138 - 143. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 雷廷. 基于溶质运移的地下水有机污染健康风险评估方法研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2014. [ LEI Ting. Research on health risk assessment method of organic pollution in groundwater based on solute transport[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2014. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 中华人民共和国生态环境部. 地下水污染健康风险评估工作指南: 环办土壤函[2019]770号[S]. 2019. [ Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Guidelines for health risk assessment of groundwater pollution: [2019]770[S]. 2019. (in Chinese) ]
- [ 9 ] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137 - 1142. [ LUO Yongming, TENG Ying. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1137 - 1142. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] USEPA. addition of a subsurface intrusion component to the hazard ranking system: 40 CFR 300[S]. Washington: Federal Register, 2017.
- [ 11 ] CCME. National classification system for contaminated sites[R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2008.
- [ 12 ] DARMENDRAIL D. The French approach to contaminated-land management. Revision 1[EB/OL]. France: BRGM, 2003(2007-12-31)[2022-10-30]. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52276-FR.pdf>.
- [ 13 ] 徐亚, 刘景财, 刘玉强, 等. 基于Monte Carlo方法的污染场地风险评价及不确定性研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1579 - 1584. [ XU Ya, LIU Jingcai, LIU Yuqiang, et al. Quantification of uncertainty in evaluating the health risk of a contaminated site based on Monte Carlo method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1579 - 1584. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [ General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese) ]
- [ 15 ] 中华人民共和国生态环境部. 饮用水水源保护区划分技术规范: HJ 338—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018. [ Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for delineating source water protection areas: HJ 338—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018. (in Chinese) ]
- [ 16 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] SANGANI J, SRIVASTAVA A, SRINIVASAN V. Analytical solutions to three-dimensional reactive contaminant transport problems involving point, line, and area sources[J]. *Transport in Porous Media*, 2022, 144(3): 641 - 667.
- [ 18 ] SUÁREZ-SOTO, ANDERSON, MASLIA, et al. A comparison between BIOCHLOR and the analytical contaminant transport analysis system (ACTS) for a case study in coastal Georgia[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2008. Reston: American Society of Civil Engineers, 2008: 1 - 10.
- [ 19 ] WEXLER E J. Analytical solutions for one-, two-, and three-dimensional solute transport in ground-water systems with uniform flow[M]. Denver, CO: Dept. of the Interior, U. S. Geological Survey, 1989.
- [ 20 ] 王嘉瑜, 蒲生彦, 胡玥, 等. 地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 43 - 50. [ WANG Jiayu, PU Shengyan, HU Yue, et al. Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 43 - 50. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块土壤环境管理办法(试行)[EB/OL].(2016-12-31). [2022-09-02]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118\\_394953.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118_394953.htm). [ Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Measures for soil environment management of contaminated land plots (Trial)[EB/OL]. (2016-12-31). [2022-09-02]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118\\_394953.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118_394953.htm). (in Chinese) ]