

场地污染地下水抽出处理系统井群加权优化方法研究

陈帆, 史浙明, 贾永锋, 臧永歌, 廉新颖, 姜永海, 冉泽宇, 尚长健

Polluted groundwater pump and treat system optimization based on weighted optimization method on the area

CHEN Fan, SHI Zheming, JIA Yongfeng, ZANG Yongge, LIAN Xinying, JIANG Yonghai, RAN Zeyu, and SHANG Changjian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

某氨氮污染地下水抽出—处理系统优化模拟研究

Simulation and optimization of a pumping and treating system for the remediation of ammonia polluted groundwater

王平, 韩占涛, 张海领, 孔贝贝, 张鑫馨 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 34–43

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189–195

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

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

基于地质建造探索承德市土地利用优化路径

Exploration of land use optimization path based on geological formation in Chengde City

卫晓锋, 王京彬, 孙厚云, 殷志强, 何泽新, 贾凤超, 李霞, 刘宏伟, 张竞 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 15–25

安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究

A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang

朱文举, 平建华, 侯俊山, 宁艺武, 耿文斌 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 200–208



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212029

陈帆, 史浙明, 贾永锋, 等. 场地污染地下水抽出处理系统井群加权优化方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 201-214.
CHEN Fan, SHI Zheming, JIA Yongfeng, et al. Polluted groundwater pump and treat system optimization based on weighted optimization method on the area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 201-214.

场地污染地下水抽出处理系统井群加权优化方法研究

陈帆^{1,2}, 史浙明², 贾永锋¹, 臧永歌¹, 廉新颖¹, 姜永海¹, 冉泽宇^{1,2}, 尚长健¹

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012;

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 井群布设是地下水修复抽出处理技术的关键环节之一。为提高抽出处理技术的修复效率, 以某污染场为研究对象, 建立非线性-动态-多目标的模拟-优化模型, 以污染物去除率最高、修复达标时间最短、资金成本最低为优化目标, 设定单井、双井、三井模式下不同的抽出流量, 采用加权优化方法对井群布设方案进行对比计算。结果表明: 整体而言单井模式修复效果较差, 侧重资金成本时双井模式抽出方案修复效果整体较优, 侧重达标时间成本时三井模式抽出方案修复效果整体较优; 单井模式恒定流量抽出修复效果较优, 多井模式下后期若适当降低抽出流量, 可减少总抽出量, 节省资金成本, 井群动态管理可提高修复效率。研究验证了加权优化方法在井群优化应用中的灵活性和实用性, 可为加权优化方法结合数值模拟方法在抽出处理技术的井群布设优化中应用提供参考。

关键词: 污染地下水; 抽出处理技术; 加权优化方法; 多目标优化; 动态修复

中图分类号: X523

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0201-14

Polluted groundwater pump and treat system optimization based on weighted optimization method on the area

CHEN Fan^{1,2}, SHI Zheming², JIA Yongfeng¹, ZANG Yongge¹, LIAN Xinying¹, JIANG Yonghai¹,
RAN Zeyu^{1,2}, SHANG Changjian¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Well group layout is one of the key steps of groundwater recovery with pump and treat technology. In order to improve the remediation efficiency of pump and treat technology, a pollution field was taken as the research area, and a nonlinear-dynamic-multi-objective simulation-optimization model was established. The minimum capital cost, maximum pollutant removal rate and shortest remediation time were taken as the optimization objectives, and different extraction flows under single, double and three-well modes were set. The weighted optimization method is used to compare the well group layout scheme. The results show that: Overall,

收稿日期: 2022-12-19; 修订日期: 2023-02-13

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1806202)

第一作者: 陈帆(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水修复与模拟方面的研究。E-mail: 1366163229@qq.com

通讯作者: 尚长健(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地下水污染修复技术与模拟方面的研究。E-mail: shangcj@yeah.net

the single-well mode has poor remediation efficiency, when focusing on capital cost, the double-well pumping scheme is better overall, when focusing on the standard time, the mitsui-well pumping scheme is better overall; the single-well mode with constant flow is better than the multi-well modes, if the pumping flow is reduced appropriately in the late stage of the multi-well modes, the total amount of water pumped can be reduced and the capital cost can be saved, the dynamic management of well groups can improve the remediation efficiency. This study provides a reference for the application of weighted optimization method combined with numerical simulation method in well group layout optimization of pump and treat technology, and verifies the flexibility and practicability of weighted optimization method in well group optimization application.

Keywords: contaminated groundwater; pump and treat technology; weighted optimization method; multi-objective optimization; dynamic remediation

随着工业化的发展,地下水污染问题日益凸显^[1-3]。抽出处理(pump and treat)技术具有处理成本低、修复效率高等显著优势,是应用范围最广的地下水污染修复技术^[4-5]。根据策略需求将抽出处理技术优化分为污染源削减、污染羽控制、污染羽修复 3 类^[6]。污染源削减是利用抽出处理技术快速、大幅削减含水层中污染物浓度,常用于风险管控和修复前期,适宜去除溶解态污染物、非水溶性有机物。风险管控模式时结合水力截获或其他技术,可高效削减含水层中的污染物;修复模式前期可降低高浓度区污染物含量;修复模式后期结合原位注入等技术达到修复目标^[7]。污染羽控制是利用抽出处理技术控制地下水流场,阻止污染羽迁移扩散,适宜用于控制渗透性、富水性较好地区的有机物、重金属等大多数污染物。在风险管控模式时通过单井或井群抽出,可有效阻止污染羽的迁移;修复模式时可结合其他治理技术达到修复目标。污染羽修复是采用抽出处理技术将含水层中污染物浓度降低至地下水修复目标,适宜修复均质含水层中迁移性较强的污染物。在修复模式时针对污染羽布井抽出,逐步减小污染羽体积,降低污染物浓度,使其达到修复目标^[8]。

井群布设是抽出处理技术的关键环节之一,抽注井的位置、数量、间距、抽注流量等参数均有可能影响污染地下水修复效率、修复时间和资金成本^[9-12]。井群优化问题的优化方法包括解析/半解析方法、数值模拟法、模拟-优化方法等^[13]。从 20 世纪 90 年代至今,更多学者倾向于采用模拟-优化法解决优化问题^[14-16]。首先通过水文地质和污染物特征数据建立地下水流程和溶质运移模型,根据场地修复目标确定目标函数和约束条件,设置初始井群布设方案,采用优化算法对井群布设方案进行优化计算^[17]。基于抽出处

理技术井群优化所考虑的多种因素,不同的优化策略采用不同的数学规划法建立井群优化模型^[18-19],非线性规划解决目标函数或约束条件为非线性的优化问题^[20],动态规划解决时变的抽注速率问题^[21-23],多目标规划解决多个优化目标的问题^[24-26]。近些年,地下水污染修复问题趋于复杂,组合规划模型成为研究热点^[27]。加权优化方法可根据场地多种修复目标进行方案优化,通过主观或客观权重赋值方法计算各方案得分,最终得到最优方案。相较于人工智能算法,加权优化方法不需要复杂的软件和公式,是一种简单、直观的数据处理方法^[28-30]。

本文以山东某化工厂污染地下水为研究对象,基于场地污染调查数据,利用 GMS 软件建立地下水流程和溶质运移模型,在动态修复的基础上,以污染物去除率最高、修复达标时间最短、资金成本最低为目标,以抽出井数量、抽出井间距、抽出流量为变量,建立非线性-动态-多目标优化模型,采用加权优化方法筛选最优抽出方案,借此验证加权优化方法在井群优化领域的灵活性和实用性。

1 研究区概况

研究区为山东省某化工厂,位于山前冲积平原,地形平坦,地表较完整,厂区面积 $9.045 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。属暖温带半湿润季风型大陆性气候,具有春旱多风,夏热多雨,秋季易于旱涝,冬季寒冷少雪等特征,一年四季交替分明。多年平均气温为 $12.6 \sim 13.1 \text{ }^\circ\text{C}$,全年降水量在 $500 \sim 700 \text{ mm}$,平均值为 619 mm 。降水一般集中在 6—10 月份,占全年降水量的 78.7%。研究区地下水类型为第四系潜水,主要接受大气降水及侧向流入补给,排泄方式主要为侧向径流排泄。地下水总体流向为东南至西北,平均水力梯度为 4‰。岩性(厚

度)由地表自上而下依次为填土(0~1.5 m)、粉质黏土(1.3~2.6 m)、砂土层(2.2~10.5 m)、粉质黏土(10~12 m)等4层,地下水主要赋存于砂土层中,含水层厚约8 m。

研究区为该厂区的重点污染区,根据相关规划,后续将规划为二类居住用地和教育科研用地。基于前期环境调查和风险评估结果,土壤超标污染物多为挥发性和半挥发性污染物,土壤修复采用原地异位常温解析技术和热解析技术多种修复技术混合方法;地下水主要污染物为苯,最高质量浓度达到1 320 μg/L,修复目标值为120 μg/L,污染范围约4×10⁴ m²,整个含水层均已污染。经过修复技术比选,最终选择抽出处理技术修复该研究区污染地下水。研究区平面图见图1,水文地质剖面图见图2,研究区布设4口监测井,为Mw1、Mw2、Mw3、Mw4,4处地下水采样点,为S1、S2、S3、S4。

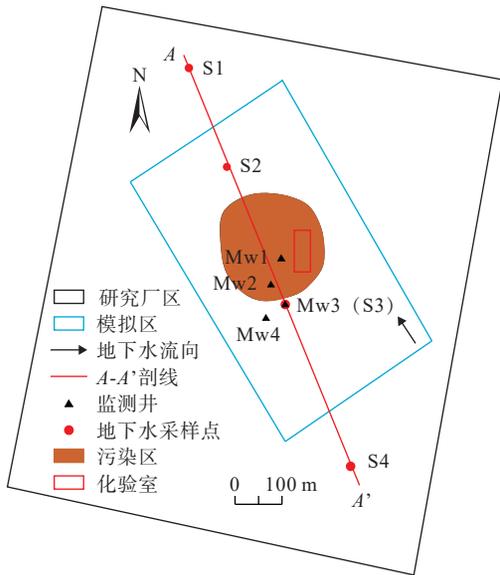


图1 研究区平面图
Fig. 1 Plan of the study area

2 地下水流和溶质运移模型

2.1 概念模型

基于前期钻孔资料及水文地质调查情况,根据场区所处区域地形地貌、水文地质条件和地下水运动特征,以场区为中心向四周扩大圈定长420 m,宽210 m(面积约8.82×10⁴ m²)的模拟区,其南北边界基本平行于等水位线,东西边界基本平行于地下水流向。模拟区含水层为第四系潜水,埋深为2.2~10.5 m,含水层厚约8 m,岩性较为均一,主要为砂土,渗透性较好,故概化

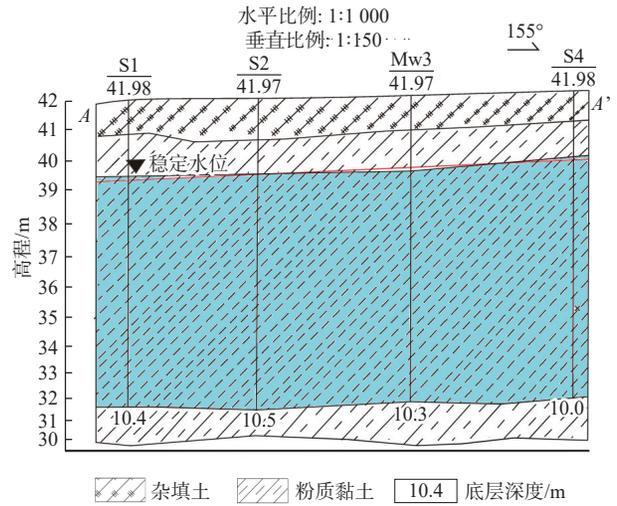


图2 研究区水文地质剖面图
Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

为单层均质含水层。研究区西北和东南边界与水位方向大致平行,概化为给定水头边界;西南和东北边界与水流方向垂直,概化为隔水边界;模型顶部接受大气降水补给,概化为降水入渗边界;模型底部为相对隔水的粉质黏土层,概化为垂向隔水边界。研究区补给来源主要为大气降水和侧向径流补给,排泄方式为侧向排泄。依据《水文地质手册(第二版)》^[31]给出经验值,确定降水入渗系数为0.28。通过场地内抽水试验确定研究区的渗透系数为2.4 m/d,给水度为0.15。研究区概念模型图见图3。

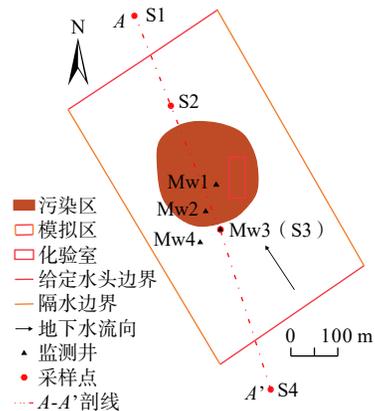


图3 研究区概念模型图
Fig. 3 Conceptual model diagram of the study area

2.2 数学模型

按照水文地质概念模型,将未增加抽出井进行修复的模拟区地下水概化为空间二维流,地下水流场的输入、输出随时间、空间变化,为非稳定流。

地下水流方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件:

$$h(x, y, t)|_{t=0} = h_0(x, y), (x, y) \in \Omega, t = 0 \quad (2)$$

第一类边界条件:

$$h(x, y, t)|_{\Gamma_1} = h(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0 \quad (3)$$

第二类边界条件:

$$K \frac{\partial h}{\partial \bar{n}}|_{\Gamma_2} = q(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \quad (4)$$

式中: $h_0(x, y)$ ——已知水头分布;

K_x 、 K_y ——分别为 x 、 y 方向上的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

h ——潜水含水层厚度/m;

W ——源汇项/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

μ ——潜水层给水度;

H ——水位/m;

t ——时间/d;

Ω ——模型模拟区域;

$h(x, y, t)$ ——一类边界上的已知水位函数;

Γ_1 ——一类边界;

$q(x, y, t)$ ——二类边界上的已知流量函数;

K ——二维空间上的渗透系数张量;

Γ_2 ——二类边界;

\bar{n} ——二类边界的外法线方向。

溶质数学模型是建立在水流模型的基础之上, 基于研究区的具体情况, 仅考虑污染物在含水层中的对流弥散作用, 不考虑化学和生物等反应。

溶质运移方程:

$$\frac{\partial(\theta \rho^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{i,j} \frac{\partial \rho^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i \rho^k) + q_s \rho_s^k + \sum R_n \quad (5)$$

初始条件:

$$C(x, y, t)|_{t=0} = \rho^0(x, y), (x, y) \in \Omega, t = 0 \quad (6)$$

式中: ρ^k ——溶解于水中 k 组分的质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$);

x_i 、 x_j ——沿坐标轴的距离/m;

θ ——多孔介质孔隙度;

$D_{i,j}$ ——水力弥散度/($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$);

v_i ——地下水流速/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

q_s ——单位体积含水层的源汇项流量/ d^{-1} ;

ρ_s^k ——第 k 种溶质的源汇项质量浓度;

$\sum R_n$ ——化学反应项;

$\rho^0(x, y)$ ——已知质量浓度分布。

2.3 模型的识别和验证

根据概念模型并考虑模拟精度, 利用 GMS 软件对模拟区进行网格离散化剖分, 水平方向网格大小为 $5\text{m} \times 5\text{m}$, 垂直方向剖分为 1 层。地下水运动以水平方向为主, 修复前期未设置抽注水井, 水位变幅不大, 因此模型概化为二维非稳定流。

水流模型模拟期为 2020 年 3 月至 2021 年 3 月。研究区源汇项主要为降水入渗和侧向补给/排泄。根据场区内抽水试验结果及经验值, 确定初始的水文地质参数并进行模拟。降水入渗系数初值取 0.28 (0.0004 m/d), 水平渗透系数初值取 2.4 m/d , 垂直渗透系数初值取 0.24 m/d , 给水度初值取 0.15。本文采用试估-校正法对模型进行验证, 即根据初始概念模型建立地下水流模型, 进而对降水入渗系数、渗透系数、给水度等不断调参, 直到观测井计算水位与实际观测水位的误差在允许范围内^[32](图 4)。经过反复调试, 模拟水位与观测水位具有一致性, 拟合相关系数 (R^2) >0.95 (图 5), 建立的地下水流动模型已达到精度要求, 反映了地下水的水力特征, 可预测地下水流场及污染物浓度。最终识别的水文地质参数为: 渗透系数 3 m/d , 给水度 0.20, 孔隙度 0.3, 降水入渗系数 0.06 (0.0001 m/d)。苯初始浓度根据 2021 年 3 月地下水水质监测结果, 采用克里格插值法确定浓度场, 得到潜水含水层中苯污染羽分布, 溶质模拟过程中仅考虑对流弥散作用, 纵向弥散度为 20 m , 模拟得到研究区地

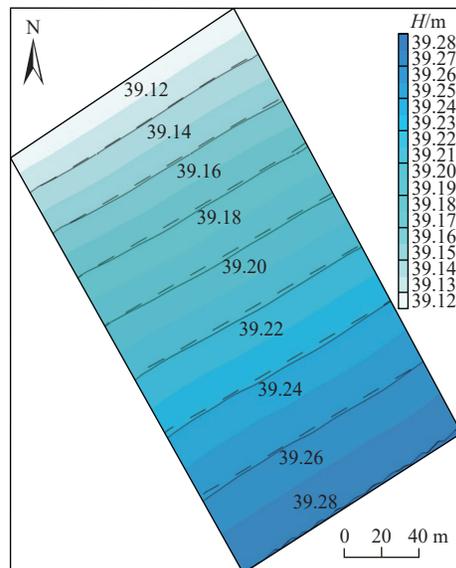


图 4 地下水流场拟合等水头图

Fig. 4 Contour map of groundwater flow field

下水中苯的污染羽分布, 并设计备选抽出井 W1—5, 见图 6。

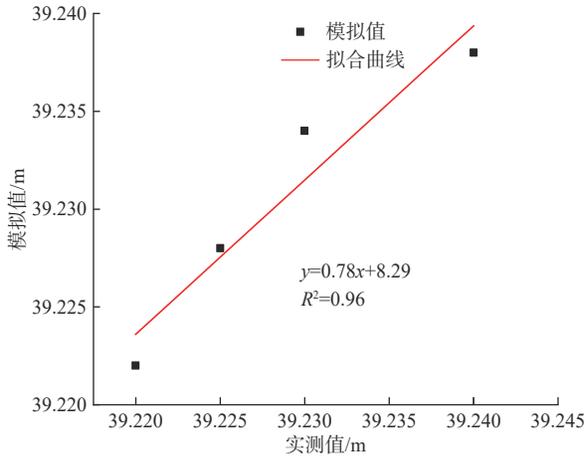


图 5 地下水位实测值与模拟值拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of the observed and calculated groundwater table values

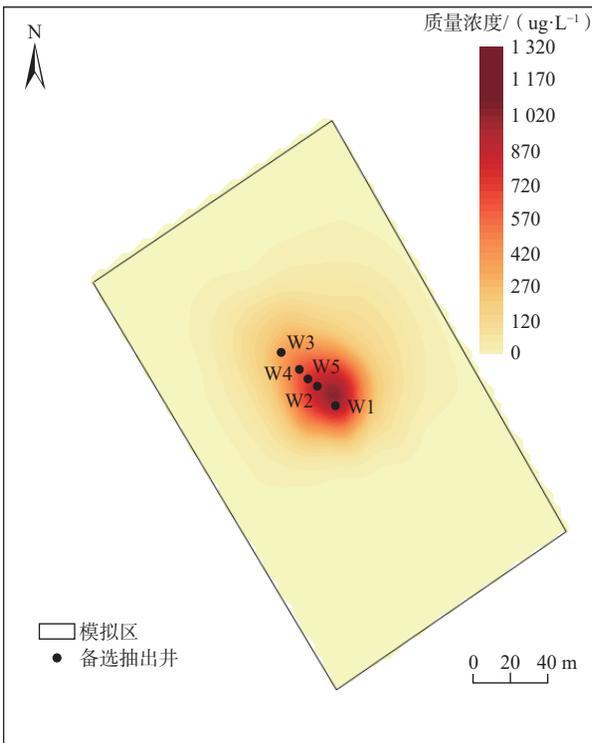


图 6 研究区地下水污染羽 (2021 年 3 月) 和井群布设分布图

Fig. 6 Distribution map of groundwater pollution plume (March 2021) and well groups in the study area

3 研究方法

3.1 加权优化方法

抽出处理技术井群优化的目标为污染物去除率最高、修复达标时间最短、资金成本最低, 优化参数

为井布局、井数量、井间距、抽出流量等; 约束条件为水头、地下水污染物浓度、污染羽的位置和范围等^[33-34]。研究区的修复原则为以最低的修复成本, 最少的达标时间去除最大量的污染物。评价指标为污染物去除率、修复达标时间、资金成本。采用加权优化方法对多种方案进行比选(抽出井均为完整井)。

加权优化算法公式为:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^3 W_i y_i \quad (7)$$

式中: \hat{y} ——总得分;

y_i ——第 i 种决策变量的基础得分;

W_i ——第 i 种决策变量相对应的权重。

总资金成本/总抽出时间的数值越低, 得分越高。

基础得分见下式:

$$y_i = 100 - \left[\frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right] \quad (8)$$

式中: Q_i ——第 i 个方案的总达标时间/d 或总资金成本/元;

Q_{\max} ——最大抽出时间/d 或总资金成本/元;

Q_{\min} ——最小抽出时间/d 或总资金成本/元。

总修复成本包括建井成本和运营成本。查找相关资料, 确定打井成本为 1 200 元/口, 抽出处理成本为 2 元/m³^[35]。

去除率的数值越高, 得分越高。基础得分公式:

$$y_i = 100 - \left[\frac{Q_{\max} - Q_j}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right] \quad (9)$$

式中: Q_j ——第 j 个方案的污染物去除率/%;

Q_{\max} 、 Q_{\min} ——去除率最大值、最小值。

达标时间内的污染物去除率(S)为:

$$S = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中: M_0 ——修复初期含水层中污染物总质量/ μg ;

M_i ——修复末期含水层中污染物总质量/ μg 。

3.2 抽出方案设计

井群布设方式需综合考虑污染羽形状及其所在场地的水文地质条件确定。通过分析研究区污染羽分布图, 污染羽呈对称分布, 其常见的布设方式为中心线轴法布设^[36]。根据场地修复需求, 需优先在高浓度污染区布井。通过数值模拟法确定单井最大抽出流量为 35 m³/d, 进而通过解析解公式求得单井在运行

初期捕获区宽度为 233 m, 超过污染羽的范围, 故最小抽出井数量定为 1 口。根据后续模拟结果, 在各模式最优井距、最优抽出流量确定的条件下, 得到抽出井数量和修复达标时间及修复达标所需资金成本的关系图(图 7)。从模拟数据可知, 抽出井数量增至 4 口时, 资金成本增加 51.11%, 增幅过大, 为节约成本将最大抽出井数量确定为 3 口。本研究设计 34 种抽水方案, 即单井优化方案 1—4, 双井优化方案 5—17, 三井优化方案 18—34, 模拟各抽水方案下达到修复需求的资金成本、时间和去除率, 见表 S1。

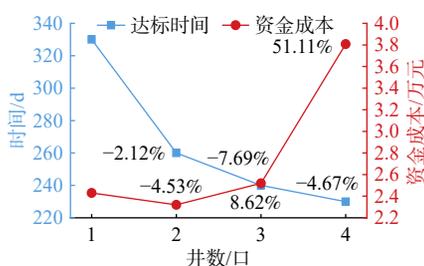


图 7 最优条件下抽出井数量与资金成本和达标时间的关系图
Fig. 7 Relationship between the number of pumping wells and capital cost, time of compliance under optimal conditions

4 结果

4.1 单井优化

在保证数值模型正常运行和污染物去除程度最大化的前提下, 抽出流量以 5 m³/d 的公差逐渐提高, 最终得到单井恒定抽出流量下的最优抽出流量为 35 m³/d。基于最优抽出流量, 分别在污染源(W1)、整个污染羽中心(W2)、污染羽下游中心(W3)3 个位置建立备选抽出井, 设计地下水修复方案(图 6), 模拟结果见表 1。

表 1 单井模式下不同井位的模拟结果

Table 1 Simulation results of different well locations in the single-well mode

井位	去除率/%	达标时间/d	总抽出量/m ³
W1	78.78	440	15 750
W2	76.34	320	11 550
W3	78.42	410	14 700

W1 位置抽出井虽位于污染物浓度最大处, 但受地下水流影响, 污染物向下游迁移, 污染物修复达标时间最长, 修复效率较低。W2 位置抽出井与 W3 位置抽出井修复结果相比, 修复达标时间减少 22%, 污染物去除率降低 2.7%。W2 位置抽出井达标时间内污染物去除率虽相对较低, 但是达标时间更短, 故将 W2 确定为单井最优抽出井位置。

对于一些地下水修复工程来讲, 将修复时间划分为若干阶段分别进行抽出方案的优化可达到更好的抽出效果^[37-39]。根据上述研究, 单井模式下确定最优井位 W2(方案 1), 而后针对 W2 分阶段改变抽出流量设计抽出方案。因恒定抽出流量模式下达到修复目标的抽出时间为 330 d(见表 S1), 考虑后期降低抽出流量, 达标时间将会延长, 将分阶段修复时间设定为 360 d。方案 2—4 进行分阶段修复, 初始抽出流量为 35 m³/d。方案 2 分为 2 个阶段, 在第 2 阶段(180 d)将抽出流量降至 30 m³/d; 方案 3—4 将分为 3 个阶段, 第 2—3 个阶段(120~360 d)将抽出流量降至 30 m³/d, 方案 4 在第 3 阶段(240 d)降低抽出流量至 25 m³/d。单井模式下抽出方案设计和优化结果见图 8 和表 S1 方案 1—4。结果表明, 在单井情况下, 分阶段降低抽出流量, 污染物去除率降低, 达标时间增加, 总资金成本并未显著降低, 最终得分表明单井恒定抽出流量为相对较优的抽出方案。

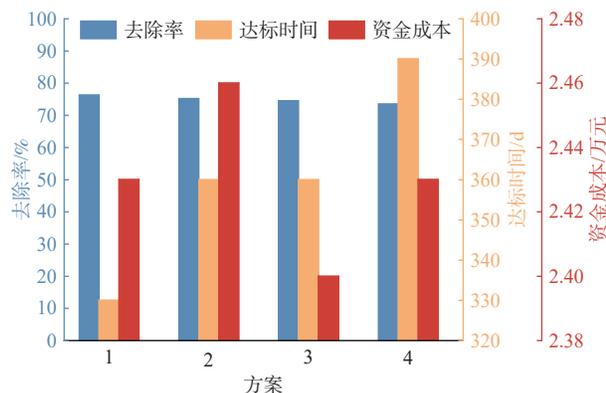


图 8 单井模式各方案模拟优化结果图
Fig. 8 Simulation optimization results of each scheme in the single-well mode

4.2 双井优化

抽出井形成的水流截获区受抽出量、井间距、抽出时间等因素制约。达到修复目标所需的总抽出量与抽出时间相互影响, 且与修复成本关系较大, 调节井间距为提高修复效率受限较小的一种方法, 与抽出井数量、抽出流量等因素有关^[40]。最优井间距可通过解析法或数值模拟法得到^[24]。在模型正常运行、总抽出量、抽出流量与单井相比变幅不大的前提下, 确定双井模式下的抽出流量为 20 m³/d。本节通过固定单井抽出流量为 20 m³/d、W2 井位、抽出井数量定为 2 口、各不同井间距的污染物去除率、达标时间, 确定初始最优井间距为 14.14 m(表 2), 即 W2 与 W4(图 6)。

与抽出井数量、抽出流量相比, 井间距的改变对抽出处理技术的修复效果影响并不显著, 因此模拟双井抽出时, 固定井间距和井位, 改变抽出流量, 设置了不同的抽出方案 5—17。

表 2 双井模式下不同井位的模拟结果
Table 2 Simulation results of different well locations in the double-well mode

井间距/m	去除率/%	达标时间/d	总抽出量/m ³
7.07	79.20	320	10 400
14.14	78.26	290	10 400
21.21	76.84	260	11 600
28.28	76.76	260	12 800

对照组为恒定抽出流量下的方案 5, 方案 6—9 改变抽出流量, 方案 10, 11 考虑分阶段关停上游(W2)抽出井及降低下游井(W4)抽出流量。双井模式下抽出方案设计和优化结果见图 9 和表 S1 方案 5—17。对比方案 6—7、方案 8—9、方案 10—13、方案 14—17, 得到抽出方案在划分阶段相同的情况下, 后期抽出流量降低, 可减少总抽出量, 节省总资金成本。但若后期抽出流量过低, 修复达标时间延长, 总抽出量过大, 会增加总资金成本。这可能是受地下水流影响, 随着抽出的不断持续, 污染物逐渐向下游迁移且整体浓度降低, 因此后期若适当降低抽出井的抽出流量或关停上游抽出井可降低抽出总量, 节省资金成本约 1.72%。

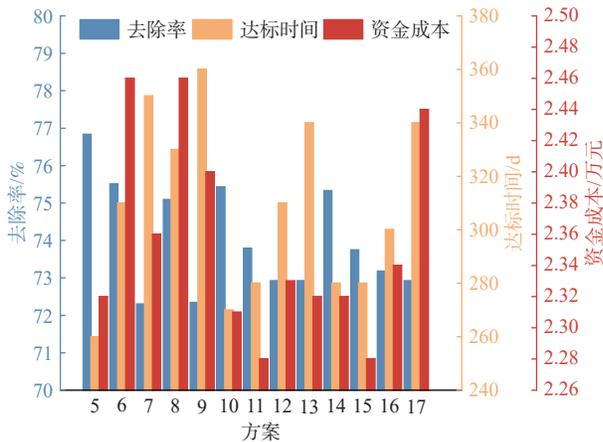


图 9 双井模式各方案模拟优化结果图

Fig. 9 Simulation optimization results of each scheme in the double-well mode

4.3 三井优化

在保证数值模型正常运行和总抽出量与单井、双井均变幅不大的前提下, 固定 W2 井位, 模拟三井恒定抽出流量为 15 m³/d 时, 各不同井间距的污染物去除率

和达标时间, 确定初始最优井间距, 结果显示井间距为 7.07 m 时, 修复效果最好(表 3), 进而固定三井模式下的井位, 即 W2、W4、W5(图 6), 划分 2 个和 3 个阶段, 改变抽出流量, 设计不同的抽出方案。

表 3 三井模式下不同井位的模拟结果
Table 3 Simulation results of different well locations in the mitsui-well mode

井间距/m	去除率/%	达标时间/d	总抽出量/m ³
7.07	79.46	240	10 800
14.14	80.99	270	12 150
21.21	81.15	310	13 950

三井模式方案设计同双井, 抽出方案和模拟结果见图 10 和表 S1 方案 18—34。对比方案 19—20、方案 21—22、方案 23—25、方案 27—29、方案 31—33, 可得到如双井相同的规律, 即抽出方案在划分阶段相同的情况下, 后期抽出流量降低, 可减少总抽出量, 节省总资金成本约 7.14%。但若后期抽出流量过低, 修复达标时间延长, 总抽出量过大, 会增加总资金成本。三井模式较双井模式因抽出井数量增加, 固定成本增加, 总资金成本整体较高, 但修复达标时间整体缩短。

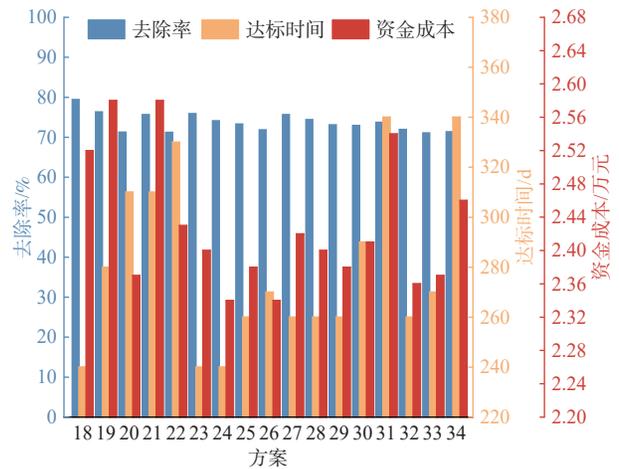


图 10 三井模式各方案模拟优化结果图

Fig. 10 Simulation optimization results of each scheme in the mitsui-well mode

5 分析

本文设计 34 种抽出方案, 采用加权优化方法, 将去除率、修复达标时间、总资金成本作为决策变量, 赋予不同的权重获得最优方案。34 种抽出方案评价指标的得分情况如图 11。整体而言单井模式 3 类指标得分均较低; 双井模式下侧重资金成本时得分较高, 较单井、三井节省约 3.07%、3.03%; 三井模式下达

标时间得分较高,较单井、双井节省约 22.22%、9.23%。从表 S1 数据可得,单井模式下固定抽出流量(方案 1)修复效果最好;双井和三井模式下后期适当降低抽出流量或关停上游抽出井可降低总抽出量,节省资金成本。

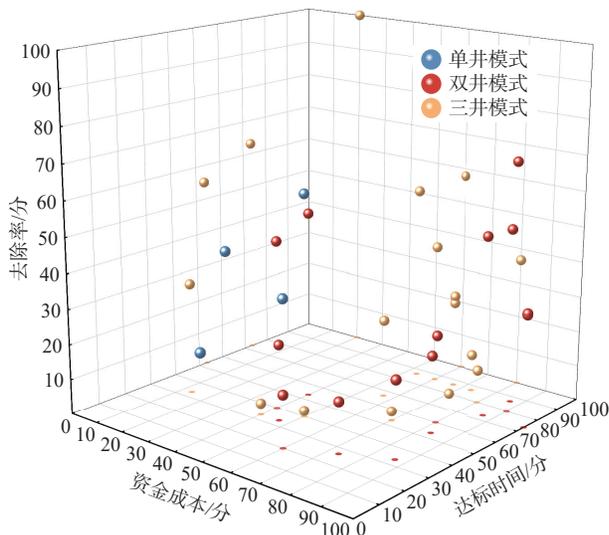


图 11 3 种模式下各方案模拟优化结果图

Fig. 11 Simulation optimization results of each scheme under the three modes

在加权优化方法中,权重的选取十分重要。权重确定方法包括主观赋值法(AHP 法、专家评定法、模糊分析单元法)和客观赋值法(因子分析法、转置法、交叉迭代法等)。运用主观赋值法确定各指标间的权重系数,反映了决策者的意向,但决策和评价结果具有较大的主观随意性。客观赋值法具有较强的数学理论依据,但权重受评价的样本限制,未考虑决策者

的意向^[41]。本文为简单场地的优化设计,采用主观赋值法,分为 4 种情景进行讨论,以降低优化结果的主观性。情景 1 和情景 2 考虑项目预算,将资金成本作为最大权重考量(资金成本权重大于另外 2 个因素权重之和);情景 3 和情景 4 侧重修复达标时间,表示项目为紧急响应事件(达标时间权重大于另外 2 个因素权重之和),因污染物去除率对修复方案影响较小,故权重赋值为 0.1。所赋权重见表 4^[36-40]。

表 4 权重赋值
Table 4 The weight assignment

决策变量	资金成本		时间成本	
	情景1	情景2	情景3	情景4
总资金成本	0.6	0.7	0.3	0.2
达标时间	0.3	0.2	0.6	0.7
污染物去除率	0.1	0.1	0.1	0.1

4 种情景下各抽出方案的得分情况见表 S1 和图 12 和图 13。因研究区井群的打井成本远大于单位立方米污水的抽出处理成本,同时,抽出井数量越多,捕获区范围越大,每天的抽出量越大,修复时间越短,因此抽出井的数量对模拟结果具有一定影响。根据模拟结果分析得到,侧重资金成本时(即情景 1 和情景 2),双井模式得分平均值较高,整体较优;侧重时间成本时(即情景 3 和情景 4),三井模式得分平均值较高,整体较优。从图中可知,侧重资金成本时(即情景 1 和情景 2),得分最高的均为方案 11,即抽出井数量为 2 口,井间距为 14.14 m,上游抽出井(W2)前 180 d 抽出流量为 20 m³/d,后降至 10 m³/d;下游抽出井(W4)抽出流量保持在 20 m³/d。该方案下污染羽苯浓度降至

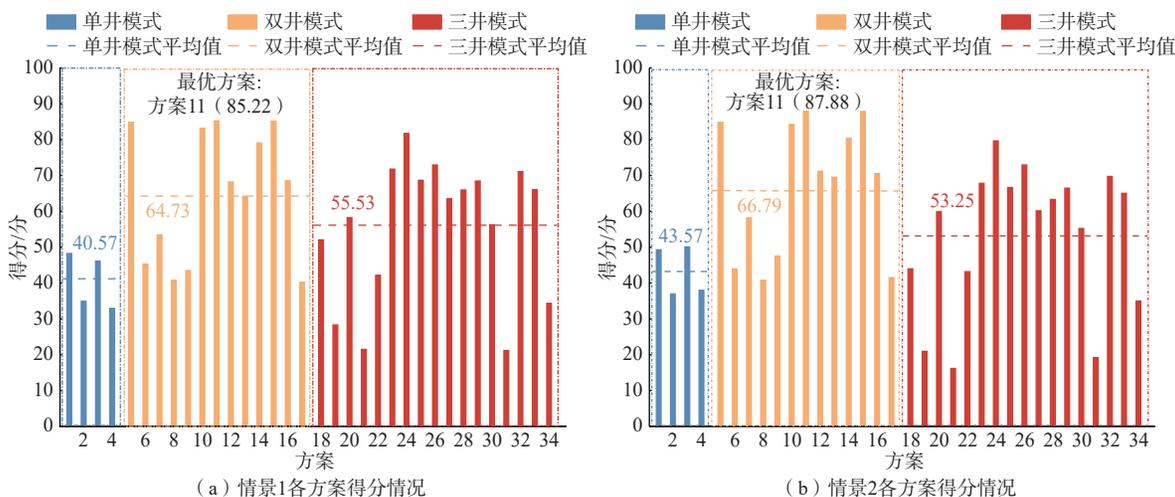


图 12 侧重资金成本时各方案得分情况(情景 1 和情景 2)

Fig. 12 Scores of different schemes under focusing on capital cost (Scenario 1 and Scenario 2)

修复目标下的达标时间为 280 d, 总资金成本为 2.28 万元, 污染物去除率为 73.39%。侧重达标时间时(即情景 3 和情景 4), 得分最高的均为方案 24, 即抽出井数量为 3 口, 井间距为 7.07 m, 前 180 d 上、中、下游(W2、W5、W4)抽出井的抽出流量均为 15 m³/d, 后上、

中游(W2、W5)抽出井抽出流量降至 10 m³/d, 下游(W4)抽出流量保持不变。该方案下修复达标时间为 240 d, 总资金成本为 2.34 万元, 污染物去除率为 74.17%。整体而言, 同一侧重目标, 权重赋值虽有差异, 但优化结果差别不大, 且最优方案为同一种。

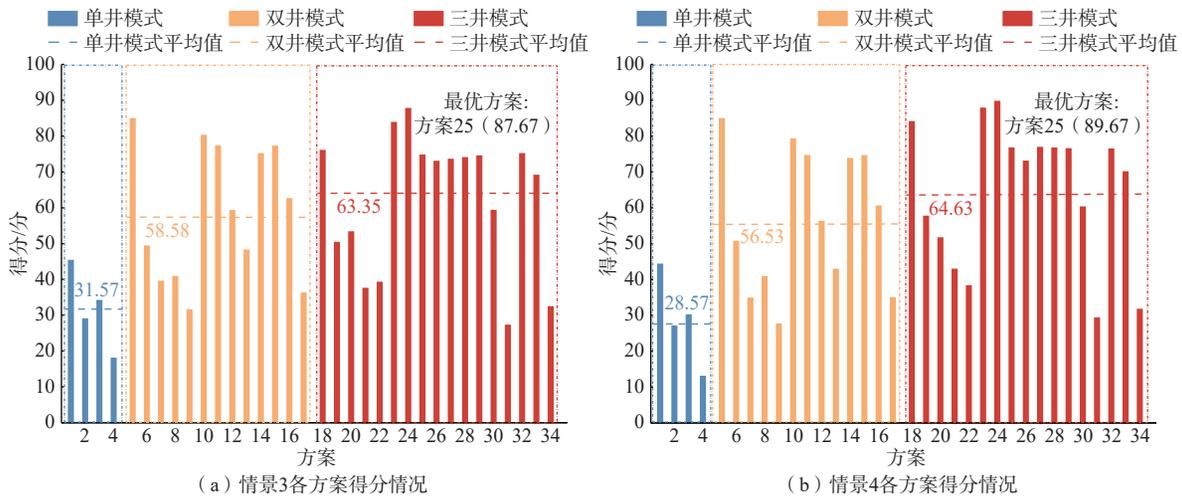


图 13 侧重时间成本时各方案得分情况(情景 3 和情景 4)

Fig. 13 Scores of different schemes under focusing on time cost (Scenario 3 and Scenario 4)

6 结论与展望

(1) 本文设定 4 种情景, 计算 34 种抽出方案的加权优化得分, 结果显示侧重资金成本时, 最优方案为抽出井数量为 2 口, 井间距为 14.14 m, 上游抽出井(W2)前 180 d 抽出流量为 20 m³/d, 后降至 10 m³/d; 侧重达标时间时, 最优方案为抽出井数量为 3 口, 井间距 7.07 m, 第 1 阶段前 180 d 上、中、下游抽出井(W2、W5、W4)抽出流量为 15 m³/d, 后 W2、W5、W4 抽出流量依次为 5, 10, 15 m³/d。

(2) 通过各抽出模式下各方案模拟数据对比分析得到, 多井模式下, 适当降低抽出流量或关停上游抽出井可有效降低总抽出量, 减少资金成本 1.72% ~ 7.14%。进行抽出处理修复时, 考虑动态修复, 可进一步提高抽出处理技术的修复效率。

(3) 本文通过加权优化方法进行研究区抽出处理修复井群方案设计, 权重考虑主观赋值法, 分为 4 种情景进行讨论, 最终得到的修复方案提高了修复效率。加权优化方法操作简单, 可进行多目标优化, 灵活性高, 可用于简单场地的井群布设优选, 但本文权重采用主观赋值法, 存在一定主观性, 后期应考虑主客观融合的方式确定权重, 以提高最优方案的合理性与准确性。

参考文献 (References) :

- [1] FAN Yue, LU Wenxi, MIAO Tiansheng, et al. Optimal design of groundwater pollution monitoring network based on the SVR surrogate model under uncertainty[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(19): 24090 - 24102.
- [2] 侯德义. 我国工业场地地下水污染防治十大科技难题 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(9): 2015 - 2025. [HOU Deyi. Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(9): 2015 - 2025. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 席北斗, 李娟, 汪洋, 等. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32(1): 1 - 9. [XI Beidou, LI Juan, WANG Yang, et al. Strengthening the innovation capability of groundwater science and technology to support the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei region: status quo, problems and goals[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(1): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 荣志昊, 史学峰, 李昌武, 等. 地下水抽提井的优化布

- 置 [J]. 广东化工, 2022, 49(7): 145 - 146. [RONG Zhihao, SHI Xuefeng, LI Changwu, et al. The optimization of groundwater pumping well layout[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(7): 145 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张丽娜, 姜林, 贾晓洋, 等. 地下水修复的技术不可达性及美国管理对策对我国的启示 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(5): 1120 - 1130. [ZHANG Lina, JIANG Lin, JIA Xiaoyang, et al. Technical impracticability of groundwater remediation and management countermeasures in the USA and lessons learned for China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(5): 1120 - 1130. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZHA Yuanyuan, YEH T C J, ILLMAN W A, et al. Exploitation of pump-and-treat remediation systems for characterization of hydraulic heterogeneity[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 324 - 340.
- [7] BORTONE I, ERTO A, DI NARDO A, et al. pump-and-treat configurations with vertical and horizontal wells to remediate an aquifer contaminated by hexavalent chromium[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2020, 235: 103725.
- [8] 赵乐, 苏春利, 谢先军, 等. 基于数值模拟的某纳污坑塘地下水砷污染修复技术设计 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27(6): 74 - 80. [ZHAO Le, SU Chunli, XIE Xianjun, et al. Design of remediation technology for arsenic pollution of groundwater in a pollutant pond based on numerical simulation[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(6): 74 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [9] COHEN R M, MERCER J W, GREENWALD R M, et al. Ground water issue: Design guidelines for conventional pump-and-treat systems[Z]. 1997:1-39.
- [10] 王平, 韩占涛, 张海领, 等. 某氨氮污染地下水抽出-处理系统优化模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 34 - 43. [WANG Ping, HAN Zhantao, ZHANG Hailing, et al. Simulation and optimization of a pumping and treating system for the remediation of ammonia polluted groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 34 - 43. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 姜烈, 何江涛, 姜永海, 等. 地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2572 - 2578. [JIANG Lie, HE Jiangtao, JIANG Yonghai, et al. Simulation of nitrate pollution in groundwater using pump-and-treat optimization method[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2572 - 2578. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杜川, 李厚恩, 陈素云. 数值模拟技术在污染地下水抽出-处理运行中的应用 [J]. 环境工程, 2023, 41(7): 102 - 108. [DU Chuan, LI Houen, CHEN Suyun. Application of numerical simulation technology in extraction and treatment of polluted groundwater[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(7): 102 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [13] MANTOGLIOU A, KOURAKOS G. Optimal groundwater remediation under uncertainty using multi-objective optimization[J]. Water Resources Management, 2007, 21(5): 835 - 847.
- [14] HOU Zeyu, LU Wenxi, XUE Haibo, et al. A comparative research of different ensemble surrogate models based on set pair analysis for the DNAPL-contaminated aquifer remediation strategy optimization[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2017, 203: 28 - 37.
- [15] BECKER D, MINSKER B, GREENWALD R, et al. Reducing long-term remedial costs by transport modeling optimization[J]. Groundwater, 2006, 44(6): 864 - 875.
- [16] 李娟, 尉鹏, 戴学之, 等. 基于机器学习方法的西安市数值模拟优化研究 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 872 - 881. [LI Juan, YU Peng, DAI Xuezhi, et al. Optimization of numerical simulation in Xi'an based on machine learning methods[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(4): 872 - 881. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 闫佰忠, 徐文杰, 李玉涵, 等. 地下水源热泵抽灌井优化布置及参数灵敏度 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 218 - 229. [YAN Baizhong, XU Wenjie, LI Yuhan, et al. Optimal layout of pumping and recharging wells for groundwater source heat pump and parameter sensitivity[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 218 - 229. (in Chinese with English abstract)]
- [18] AHLFELD D P, MULVEY J M, PINDER G F, et al. Contaminated groundwater remediation design using simulation, optimization, and sensitivity theory: 1. Model development[J]. Water Resources Research, 1988, 24(3): 431 - 441.
- [19] AHLFELD D P, MULVEY J M, PINDER G F. Contaminated groundwater remediation design using simulation, optimization, and sensitivity theory: 2. Analysis of a field site[J]. Water Resources Research, 1988, 24(3): 443 - 452.

- [20] MCKINNEY D C, LIN M D. Genetic algorithm solution of groundwater management models[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1897 – 1906.
- [21] CULVER T B, SHOEMAKER C A. Optimal control for groundwater remediation by differential dynamic programming with Quasi-Newton Approximations[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(4): 823 – 831.
- [22] 王浩然. 地下水开采条件下的微分动态规划模型[D]. 南京: 南京大学, 2000. [WANG Haoran. Differential dynamic programming model under the condition of groundwater exploitation[D]. Nanjing: Nanjing University, 2000. (in Chinese with English abstract)]
- [23] CULVER T B, SHENK G W. Dynamic optimal ground water remediation by granular activated carbon[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1998, 124(1): 59 – 64.
- [24] 宫志强, 刘明柱, 刘伟江, 等. 单井捕获地下水污染羽的优化方法 [J]. *环境工程学报*, 2019, 13(10): 2468 – 2474. [GONG Zhiqiang, LIU Mingzhu, LIU Weijiang, et al. Optimal method of groundwater pollution plume capture by single well[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(10): 2468 – 2474. (in Chinese with English abstract)]
- [25] REZAEI H, BOZORG-HADDAD O, LOÁICIGA H A. Reliability-based multi-objective optimization of groundwater remediation[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(10): 3079 – 3097.
- [26] YANG Yun, WU Jichun, LUO Qiankun, et al. An effective multi-objective optimization approach for groundwater remediation considering the coexisting uncertainties of aquifer parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127677.
- [27] 林茂, 苏婧, 孙源媛, 等. 基于脆弱性的地下水污染监测网多目标优化方法 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(1): 79 – 86. [LIN Mao, SU Jing, SUN Yuanyuan, et al. Multi-objective optimization method for groundwater contamination monitoring network based on vulnerability assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(1): 79 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张艳. 污染场地抽出一处理技术影响因素及优化方案研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010. [ZHANG Yan. Factors and optimization research of pump-and-treat technology in contaminated site[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 鞠晓明. 地下水污染场地水力控制优化方案研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011. [JU Xiaoming. Optimization of hydraulic control programs for groundwater contaminated sites[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 牛浩博, 魏亚强, 李璐, 等. 基于数值模拟的某地下水污染场地抽水方案设计 [J]. *环境保护科学*, 2021, 47(5): 69 – 75. [NIU Haobo, WEI Yaqiang, LI Lu, et al. Design of pumping project for a groundwater contaminated site based on numerical simulation[J]. *Environmental Protection Science*, 2021, 47(5): 69 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 中国地质调查局. 水文地质手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2012. [China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 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)]
- [33] 万鹏, 张旭, 李广贺, 等. 基于模拟-优化模型的某场地污染地下水抽水方案设计 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(11): 1608 – 1616. [WAN Peng, ZHANG Xu, LI Guanghe, et al. Design of contaminant groundwater pumping scheme based on a simulation optimization model[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11): 1608 – 1616. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 卞荣伟, 宋健, 孙晓敏, 等. MGO 软件在地下水污染抽出-处理方案优化中的应用 [J]. *地下水*, 2018, 40(3): 12 – 15. [BIAN Rongwei, SONG Jian, SUN Xiaomin, et al. Application of MGO to optimal design of pump and treat system in groundwater contamination remediation[J]. *Ground Water*, 2018, 40(3): 12 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 张然. 污水处理成本结构及变化趋势研究——基于污水处理上市公司数据的分析 [J]. *价格理论与实践*, 2020(10): 27 – 30. [ZHANG Ran. Research on structure and change trend of sewage treatment cost—analysis based on the date of sewage treatment listed companies[J]. *Price: Theory & Practice*, 2020(10): 27 –

30. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 宫志强, 陈坚, 杨鑫鑫, 等. 某铬污染场地地下水抽水方案优化 [J]. 环境工程, 2019, 37(5): 1 – 3. [GONG Zhiqiang, CHEN Jian, YANG Xinxin, et al. Optimization of groundwater pumping scheme in a chromium-contaminated site[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5): 1 – 3. (in Chinese with English abstract)]
- [37] KO N Y, LEE Kangkun, HYUN Y. Optimal groundwater remediation design of a pump and treat system considering clean-up time[J]. *Geosciences Journal*, 2005, 9(1): 23 – 31.
- [38] 孙军亮, 宫志强, 李璐, 等. 某氯代烃污染场地地下水抽出方案优化 [J]. 环境工程, 2021, 39(11): 172 – 178. [SUN Junliang, GONG Zhiqiang, LI Lu, et al. Optimization of groundwater pumping scheme for a chlorinated hydrocarbon-contaminated site[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(11): 172 – 178. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 耿国婷, 武晓峰, 游进军. 基于遗传算法的 TCE 污染地下水修复抽水处理优化方案研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(7): 69 – 81. [GENG Guoting, WU Xiaofeng, YOU Jinjun. Genetic algorithm-based study on optimization scheme for remediation of TCE-contaminated groundwater with pump-and-treat system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(7): 69 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 白相东, 张艳, 刘智荣, 等. 某冶炼厂污染场地抽出-处理技术优化方案研究 [J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(4): 23 – 26. [BAI Xiangdong, ZHANG Yan, LIU Zhirong, et al. pump and retreat—processing optimization plan of a smelter contaminated site[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2012, 14(4): 23 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 周新民, 郭瑜. 多指标决策的主客观权重模糊优选法 [C]// 第 28 届中国控制与决策会议论文集. 银川, 2016: 380–384. [ZHOU Xinmin, GUO Yu. Multi objective decision for the fuzzy optimization method of subjective and objective weight[C]//Proceedings of 2016 28th Chinese Control and Decision Conference(CCDC). Yinchuan, 2016: 380–384. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽

表 S1 各抽水方案模拟结果
Table S1 Simulation results of each pumping scheme

模式	方案	井位	不同阶段下的抽水流量 /(m ³ ·d ⁻¹)			去除率 /%	达标时间 /d	总成本 /万元	去除率得分 /分	时间得分 /分	成本得分 /分	情景1 /分	情景2 /分	情景3 /分	情景4 /分
单井	1	W2	35			76.34	330	2.43	62.64	40.00	50.00	48.26	49.26	45.26	44.26
	2		35 30			75.23	360	2.46	49.44	20.00	40.00	34.94	36.94	28.94	26.94
	3		35 30 30			74.52	360	2.40	40.97	20.00	60.00	46.10	50.10	34.10	30.10
	4		35 30 25			73.57	390	2.43	29.62	0.00	50.00	32.96	37.96	17.96	12.96
双井	5	W2、 W4	20			76.84	260	2.32	68.61	86.67	86.67	84.86	84.86	84.86	84.86
	6		20 15			75.51	310	2.46	52.78	53.33	40.00	45.28	43.94	49.28	50.61
	7		20 10			72.31	350	2.36	14.49	26.67	73.33	53.45	58.12	39.45	34.78
	8		20 15 15			75.09	330	2.46	47.78	40.00	40.00	40.78	40.78	40.78	40.78
	9	20 15 10			72.34	360	2.40	14.92	20.00	60.00	43.49	47.49	31.49	27.49	
	10	W2	20	15	75.43	270	2.31	51.78	80.00	90.00	83.18	84.18	80.18	79.18	
	W4	20	20												
	11	W2	20	10	73.79	280	2.28	32.16	73.33	100.0	85.22	87.88	77.22	74.55	
	W4	20	20												
	12	W2	20	5	72.93	310	2.33	21.89	53.33	83.33	68.19	71.19	59.19	56.19	
	W4	20	20												
	13	W2	20	0	72.93	340	2.32	21.86	33.33	86.67	64.19	69.52	48.19	42.85	
	W4	20	20												
	14	W2	20	15	15	75.33	280	2.32	50.64	73.33	86.67	79.06	80.40	75.06	73.73
	W4	20	20	20											
	15	W2	20	15	10	73.75	280	2.28	31.75	73.33	100.0	85.18	87.84	77.18	74.51
	W4	20	20	20											
	16	W2	20	15	5	73.18	300	2.34	24.93	60.00	80.00	68.49	70.49	62.49	60.49
	W4	20	20	20											
	17	W2	20	15	0	72.93	340	2.44	21.86	33.33	46.67	40.19	41.52	36.19	34.85
W4	20	20	20												
18			15			79.46	240	2.52	100.00	100.00	20.00	52.00	44.00	76.00	84.00
19	W2、		15	10	76.36	280	2.58	62.97	73.33	0.00	28.30	20.96	50.30	57.63	
20	W5、		15	5	71.32	310	2.37	2.69	53.33	70.00	58.27	59.94	53.27	51.60	
21	W4		15	10	75.70	310	2.58	54.98	53.33	0.00	21.50	16.16	37.50	42.83	
22			15	10	71.24	330	2.43	1.70	40.00	50.00	42.17	43.17	39.17	38.17	
三井	23	W2	15	10	75.93	240	2.40	57.83	100.0	60.00	71.78	67.78	83.78	87.78	
	W5	15	10												
	W4	15	15												
	24	W2	15	5	74.17	240	2.34	36.68	100.0	80.00	81.67	79.67	87.67	89.67	
	W5	15	10												
	W4	15	15												
	25	W2	15	0	73.31	260	2.38	26.51	86.67	66.67	68.65	66.65	74.65	76.65	
	W5	15	10												
	W4	15	15												
	26	W2	15	0	71.89	270	2.34	9.43	80.00	80.00	72.94	72.94	72.94	72.94	
	W5	15	5												
	W4	15	15												
	27	W2	15	10	10	75.68	260	2.42	54.83	86.67	53.33	63.48	60.15	73.48	76.82
	W5	15	10	10											
	W4	15	15	15											
	28	W2	15	10	5	74.41	260	2.40	39.61	86.67	60.00	65.96	63.29	73.96	76.63
	W5	15	10	10											
	W4	15	15	15											
	29	W2	15	10	0	73.15	260	2.38	24.57	86.67	66.67	68.46	66.46	74.46	76.46
	W5	15	10	10											
W4	15	15	15												

(续表)

模式	方案	井位	不同阶段下的抽水流量 /(m ³ ·d ⁻¹)			去除率 /%	达标时间 /d	总成本 /万元	去除率得分 /分	时间得分 /分	成本得分 /分	情景1 /分	情景2 /分	情景3 /分	情景4 /分
30		W2	15	5	0	72.96	290	2.41	22.27	66.67	56.67	56.23	55.23	59.23	60.23
		W5	15	10	10										
		W4	15	15	15										
31		W2	15	0	0	73.77	340	2.54	31.94	33.33	13.33	21.19	19.19	27.19	29.19
		W5	15	10	10										
		W4	15	15	15										
三井 32		W2	15	10	0	71.98	260	2.36	10.56	86.67	73.33	71.06	69.72	75.06	76.39
		W5	15	10	5										
		W4	15	15	15										
33		W2	15	10	0	71.10	270	2.37	0.00	80.00	70.00	66.00	65.00	69.00	70.00
		W5	15	10	0										
		W4	15	15	15										
34		W2	15	10	0	71.37	340	2.46	3.32	33.33	40.00	34.33	35.00	32.33	31.67
		W5	15	5	0										
		W4	15	15	15										

注: 抽水流量按所划分阶段依次设置, 方案1为单井模式恒定抽水流量的抽水方案; 方案2为单井模式抽水时间(按360 d)划分2个阶段的抽水方案(即前180 d抽水流量为35 m³/d, 后降至30 m³/d); 方案3—4为单井模式抽水时间(按360 d)划分单个阶段的抽水方案; 方案5为双井模式恒定抽水流量的抽水方案; 方案6—9为双井模式划分不同阶段抽水流量相同的抽水方案; 方案10—11为双井模式抽水流量不同时的抽水方案(如方案10, 抽水时间划分2个阶段, 前180 d W2、W4抽水流量为20 m³/d, 后W2降至15 m³/d, W4不变); 方案18—34为三井模式下的抽水方案, 设计思路同双井。