

# 基于粒子群方法的地下水污染抽出 - 处理优化研究

刘世辉<sup>1</sup>, 江思珉<sup>1\*</sup>, 刘颖<sup>2</sup>, 吴超<sup>1</sup>, 陆帅帅<sup>1</sup>, 廖婷<sup>3</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院水利工程系, 上海

<sup>2</sup>上海同济工程咨询有限公司, 上海

<sup>3</sup>同济大学国际足球学院, 上海

收稿日期: 2023年6月19日; 录用日期: 2023年8月8日; 发布日期: 2023年8月18日

## 摘要

基于抽出 - 处理的污染地下水修复是一种有效的修复技术, 具有简单易行、可控性强、适用范围广等优点。该方法可以为决策者提供更直观的修复效果, 提高污染地下水修复的效率。同时, 该方法可以为工程实践提供技术支持和决策依据, 提高修复效率和成本效益。本研究采用数值模拟方法对污染地下水进行抽出处理, 通过模拟地下水流动和污染物运移过程, 预测了污染范围和程度。接下来建立修复方案优化模型, 考虑了不同目标函数对修复效果的影响, 并采用粒子群方法进行方案的优化。计算结果表明, 粒子群算法与地下水流模拟程序(MODFLOW)和污染物运移程序(MT3DMS)的耦合可以实现合理的抽出处理方案, 并设计出符合管理目标的修复系统, 为地下水污染现场的修复提供科学的工程指导。

## 关键词

地下水污染, 抽出 - 处理方法, 模拟优化, 粒子群方法, 地下水修复

# Study of Groundwater Pollution Pump and Treat Optimization Based on Particle Swarm Method

Shihui Liu<sup>1</sup>, Simin Jiang<sup>1\*</sup>, Ying Liu<sup>2</sup>, Chao Wu<sup>1</sup>, Shuaishuai Lu<sup>1</sup>, Ting Liao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Tongji Engineering Consulting Corporation Limited, Shanghai

<sup>3</sup>International Football Academy, Tongji University, Shanghai

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 18<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 刘世辉, 江思珉, 刘颖, 吴超, 陆帅帅, 廖婷. 基于粒子群方法的地下水污染抽出-处理优化研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(8): 812-820. DOI: 10.12677/ag.2023.138078

## Abstract

Pump and treat method of contaminated groundwater remediation is an effective remediation technique, which has the advantages of simplicity, controllability, and wide applicability. This method can provide decision-makers with a more intuitive remediation effect and improve the efficiency of contaminated groundwater remediation. This method can also provide technical support and decision basis for engineering practice and improve remediation efficiency and cost effectiveness. In this study, numerical simulation was used to simulate the pump and treat of the contaminated groundwater. By simulating the process of groundwater flow and pollutant migration, the distribution and degree of pollution plume were predicted by simulating the groundwater flow and contaminant transport processes. On the basis of the simulation model, a remediation scheme optimization model was established, considering the effects of different objective functions on the remediation effect, and the particle swarm optimization approach was used for the optimization of the scheme. The results show that the coupling of the particle swarm optimization with the groundwater flow simulation program (MODFLOW) and the contaminant transport program (MT3DMS) can achieve a reasonable pump and treat scheme and design a remediation system that meets the management objectives, providing scientific engineering guidance for the remediation of groundwater contamination sites.

## Keywords

Groundwater Pollution, Pump and Treat Method, Simulation Optimization, Particle Swarm Method, Groundwater Remediation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

地下水资源作为水资源的重要组成部分,被广泛应用于农业、工业和城市居民生活等方面。然而,各种人为和自然因素导致地下水中的污染物质在一些地区不断积累,给人类健康和环境安全带来了巨大威胁。近年来,全国范围内城市建成区重污染企业搬迁改造或关闭退出[1]。这些企业的搬迁或关闭,为改善城市环境、保护公众健康和提高产业结构提供了契机。然而,重污染企业在生产运营过程中会产生大量的有害化学物质和废弃物,导致较为严重的地下水污染[2] [3]。因此,如何有效修复遗留污染场地的地下水污染,成为了当前亟需解决的重要问题。

抽出-处理技术是一种针对地下水污染场地的修复技术,可以快速响应污染事件,将污染源头从地下水中抽出,并对抽出的污染水进行处理,从而快速降低地下水污染水平,被认为是隔离和去除高浓度污染羽最为有效的方法之一[3] [4]。研究表明,场地要素(水文地质条件、污染物种类、目标修复浓度等)和工程要素(抽水井数量、位置、流量等)影响着抽出-处理修复工程的有效性和经济性[5] [6] [7]。因此,开展抽水-处理优化设计提高修复效率和降低成本,成为抽出-处理技术需要解决的关键问题。

抽出-处理技术的优化方法包括人工试错法和模拟优化法,模拟优化法由模拟模型和优化方法组成。基于最优化原理,能搜索到全局最优解的启发式搜索算法(遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等)被应用于得到最优抽出-处理方案。Cardiff等[8]采用半解析模拟-优化模型来优化重质非水相液体(DNAPL)

污染治理的抽水方案,发现同时在污染源内部和周边布置抽水井时,抽水时费用最低。Abolfazl [9]等采用三种元启发式算法(GA、FA 和 PSO)优化抽水井的位置,结果表明三种算法都具有与有限元法相结合的能力。Ghaseminejad [10]等对 Sarakhs 市供水计划的案例通过 PSO-MODFLOW 模拟优化模型,研究了井位优化和抽水量优化问题。Tinesh [11]通过比较 BIOEFGM-PSO 模型与 FEM-PSO 模型的最佳原位生物修复成本,得出了基于 BIOEFGM-PSO 模型的优化成本比基于 FEM-PSO 模型的优化成本小的结论。宫志强等[12]对某铬污染场地抽出处理修复中的抽水方式进行优化模拟,认为在持续性抽出 30%污染物后改用间歇性抽水方式,可以有效降低修复成本。王平[13]等在某氨氮污染场地实施抽出处理修复发现,保证高浓度区一直有抽水井进行较大流量抽水,可以有效提高修复效率并缩短修复周期。耿国婷[14]基于不同情境分析比较了不同参数的变化对抽水井位置和抽水量优化布局的影响。

本研究针对某工业污染场地,旨在提高该场地下游污染水体的抽出处理修复效率并降低修复成本。通过利用应用广泛的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块进行地下水水流模拟和污染物溶质运移模拟,并将其与粒子群优化算法相结合,得出最优的抽水方案及相应的抽水费用,为抽出-处理技术方案设计提供依据。

## 2. 地下水模拟 - 优化模型

### 2.1. 地下水污染迁移模型

地下水模拟 - 优化模型通常涉及两组变量:决策变量和状态变量。决策变量是指影响地下水流的各种措施,如抽水量(或注水量)、抽水速率、井的位置、井运行与否等。状态变量是指地下水的状态参数(地下水位和污染物浓度等)。地下水模拟 - 优化模型由两个主要部分耦合而成:模拟模型和优化模型。模拟模型包括地下水流动模型和溶质运移模型,本文分别利用 MODFLOW 和 MT3DMS 进行求解;优化模型则是对决策变量进行优化,以达到最佳的技术效果和经济效益。

MODFLOW 的地下水流方程如下[15]:

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

式中:假定含水层的渗透系数的主轴方向与坐标轴方向一致, $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$ 分别为含水层渗透系数在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量[ $LT^{-1}$ ]; $h$ 为水头[L]; $W$ 为单位时间单位体积含水层流入或流出的水量[ $T^{-1}$ ]; $S_s$ 为贮水率[ $L^{-1}$ ]; $t$ 为时间[ $T$ ]。

MT3DMS 的地下水溶质运移方程如下[16]:

$$\frac{\partial(\partial c^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial c^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i c^k) + q_s c_s^k + \sum R_n \quad (2)$$

式中: $\theta$ 为含水介质的孔隙度[无量纲]; $c^k$ 为溶质组分  $k$  的浓度[ $ML^{-3}$ ]; $D_{ij}$ 为水动力弥散系数张量[ $L^2T^{-1}$ ]; $v_i$ 为实际水流速度[ $LT^{-1}$ ],与 Darcy 流速  $q_i$  的关系为  $v_i = q_i / \theta$ ;  $q_s$  为单位体积含水层的源汇项流量[ $T^{-1}$ ]; $c_s^k$ 为源汇项中溶质组分  $k$  的浓度[ $ML^{-3}$ ]; $\sum R_n$ 为化学反应项总和[ $ML^{-3}T^{-1}$ ]。

### 2.2. 优化模型

在地下水污染的抽出 - 处理优化过程中,无论是从经济性还是从减小对周边环境的影响考虑,都要在保证污染修复目标的前提下降低工程费用。在抽出 - 处理优化模型中,决策变量包括抽水井数目、抽水井位置及抽水量等。在实际的抽出 - 处理优化设计中,备选抽水井的位置一般是根据场地条件预先给定的,因此对上述决策变量进行重新定义,一般包括两类决策变量:1) 流量决策变量,表示在抽水井位置上的抽水量;2) 0~1 决策变量,决定备选降水井是否开凿的决策变量(“开/关”)。

地下水污染抽出-处理优化设计的数学模型可表述为：在满足约束条件和控制条件的情况下，寻求一组决策变量值，使得抽出-处理工程造价最小。本文采用总造价最小为目标函数，由此建立优化数学模型如下：

目标函数：

$$\min J = a_1 \Delta t \sum_{i=1}^N |q_i| + a_2 \sum_{i=1}^N |I_i| \quad (3)$$

式中： $J$ 为修复费用； $q_i$ 为第 $i$ 个备选井的抽水量( $\text{m}^3/\text{d}$ )、 $I_i$ 为第 $i$ 个备选井是否安装(0~1变量)； $a_1$ 为单位体积水的抽水处理费用[万元/ $\text{m}^3$ ]； $a_2$ 为安装抽水井的单井费用[万元]； $\Delta t$ 为抽水时间[d]； $N$ 为备选井的数目。

约束条件：

单井抽水量约束：

$$q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max}, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

水头约束：

$$h_{\min} \leq h_j \leq h_{\max}, j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (5)$$

浓度约束：

$$C_j \leq C_0, j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (6)$$

式中： $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$ 分别为单井抽水量的上下限； $h_j$ 表示约束点 $j$ 修复结束时刻的水位[m]； $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ 分别为约束点水位的上下限； $C_j$ 表示约束点 $j$ 修复结束时刻的浓度[ $\text{mg}/\text{l}$ ]； $C_0$ 表示修复目标浓度[ $\text{mg}/\text{l}$ ]； $M$ 为约束点的数目。

### 2.3. 约束条件的处理

优化模型的约束条件除了显式约束条件(抽水量约束、水头约束、浓度约束等)外，还包括水位 $h$ 、浓度 $c$ 与抽水量 $q$ 之间关系的非线性约束 $h = f(q)$ 和 $c = g(q)$ 。其中， $f$ 和 $g$ 分别为水流模拟模型和污染物迁移模拟模型。

对于约束优化问题[17]，通常可以考虑转化为无约束优化问题进行处理，本文采用罚函数法。罚函数法是通过把约束条件变为罚函数，使有约束的目标函数变为无约束的目标函数。Mckinney等将各个约束变量的偏离与其惩罚因子的乘积作为对目标函数的惩罚[18]，则上述约束优化问题就转化成为无约束问题：

$$F = J + \sum_{k=1}^P \lambda_k \delta_k \quad (7)$$

式中： $F$ 为无约束目标函数值； $P$ 为约束条件数目的总和； $\lambda_k$ 、 $\delta_k$ 分别为第 $k$ 个约束条件的惩罚因子和偏离值。

### 2.4. 粒子群方法

粒子群方法[9] (Particle Swarm Optimization, PSO)源于对鸟群觅食行为的研究，具有算法简单、易于实现和计算效率高等特点。利用初始生成的 $N$ 个随机粒子，经反复迭代寻找 $D$ 维问题的最优解。粒子通过追随自身寻找到的最优解(个体极值 $p_{best}$ )和整个粒子群寻找到的最优解(全局极值 $g_{best}$ )更新自己的位置。

$$v_{id}^k = w_i v_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (p_{best} - x_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (g_{best} - x_{id}^{k-1}) \quad (8)$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (9)$$

式中： $k$ 为种群迭代次数； $v_{id}^k$ 为例子 $i$ 经 $k$ 次迭代后速度在 $d$ 维方向上的分量； $x_{id}^k$ 为粒子 $i$ 经过 $k$ 次迭

代后位置在  $d$  维方向上的分量;  $w_i$  为惯性因子;  $c_1$  为自我学习因子;  $c_2$  为社会学习因子;  $r_1, r_2$  为随机产生的约束因子, 服从  $U(0, 1)$  分布。为了防止粒子远离搜索空间, 粒子的速度  $v$  通常限定在一定范围内, 即  $v \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ 。最大速度  $v_{\max}$  和参数范围(搜索空间)有关, 通常设置为参数范围的  $k$  倍,  $0.1 \leq k \leq 1$ 。 $v_{\max}$  太大, 粒子飞离最优解, 太小则会陷入局部最优[19]。

### 3. 实例研究

#### 3.1. 问题概述

如图 1 所示, 污染场地概化为长度 1000 米、宽度 800 米、厚度 20 米的潜水含水层。北部和南部边界为 25 米和 20 米的定水头边界, 西部和东部边界为二类隔水边界。含水介质孔隙度为 0.30, 渗透系数为 20 m/d。考虑对流、弥散、吸附等过程: 纵向弥散度为 20.0 m, 水平横向弥散度为 3.0 m; 采用线性等温吸附模型, 分配系数为一阶吸附常数  $2 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{mg}$ , 一阶速率常数  $0.0003 \text{ d}^{-1}$ 。

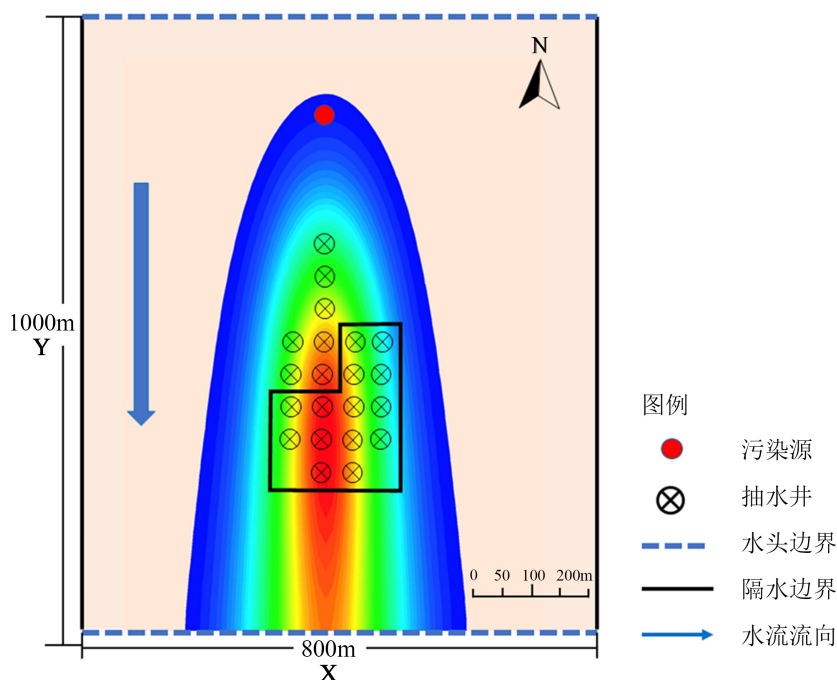


Figure 1. Study area

图 1. 研究区示意图

研究区北部有一家重污染工业企业, 在生产过程中(20 年)产生持续性污染物泄漏。泄漏方式通过注水井方式( $20 \text{ m}^3/\text{d}$ )向含水层持续恒定地排放污染物(质量浓度为  $400 \text{ mg/L}$ )。城市重污染企业搬迁改造工程关停了该企业, 废弃工业场地处于闲置状态(闲置 3 年), 此时场地的污染状况作为地下水抽水 - 处理的初始条件。下游拟修建养老院, 为此要求采取抽出 - 处理措施进行地下水污染治理(修复时间设置为 100 天), 确保养老院范围内污染物浓度低于限值( $15 \text{ mg/L}$ )。

依据上述条件地下水污染物运移模型, 模型离散为  $80 \times 100$  的均匀网格(网格尺寸为  $800 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ )。地下水污染物运移模型分为 2 个阶段: ① 第 1 阶段模型包括 2 个应力期: 第 1 个应力期为溶质运移模拟 20 年, 第 2 个应力期为 3 年(污染物泄漏被控制后的自然衰减阶段); ② 第 2 阶段模型为地下水抽出 - 处理模型, 对应于修复时间, 模拟时长为 100 天。

### 3.2. 抽出 - 处理优化设计

为了最大化抽出 - 处理的污染修复效果, 需要根据地下水污染状况和场地水文地质条件, 对抽水井进行模拟优化设计。主要原则是: ① 重点修复目标地块(养老院)上游的污染羽; ② 优先在高浓度区布井抽水, 高效消减含水层中的污染物; ③ 沿污染羽轴线布设抽水井, 可以最大限度捕获污染羽。如图 1 所示, 在养老院范围和上游方向布设 21 个备选抽水井, 单井最大抽水速率为  $600 \text{ m}^3/\text{d}$ , 修复时间 100 天。

通过建立抽出 - 处理的优化模型, 在满足约束条件(目标治理浓度  $C_0 = 15 \text{ mg/L}$ ,  $h_{\min} = 10 \text{ m}$ )的情况下, 求解最优井位和抽水量, 使得修复费用最小。表 1 为抽水 - 处理费用系数和约束变量。采用 matlab 2022b 中提供的 PSO 工具箱进行优化计算,  $nvars = 21$ ,  $lb = 0$ ,  $ub = 600$ 。

**Table 1.** Cost factors and constraint variables

**表 1.** 费用系数和约束变量

系数	数值	系数	数值
$q_{\min}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	0	$a_1/\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$	0.53
$q_{\max}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	600	$a_2/\text{元}$	15,000
$h_{\min}/\text{m}$	10.0	$c/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	15
$h_{\max}/\text{m}$	无		

### 3.3. 优化结果及分析

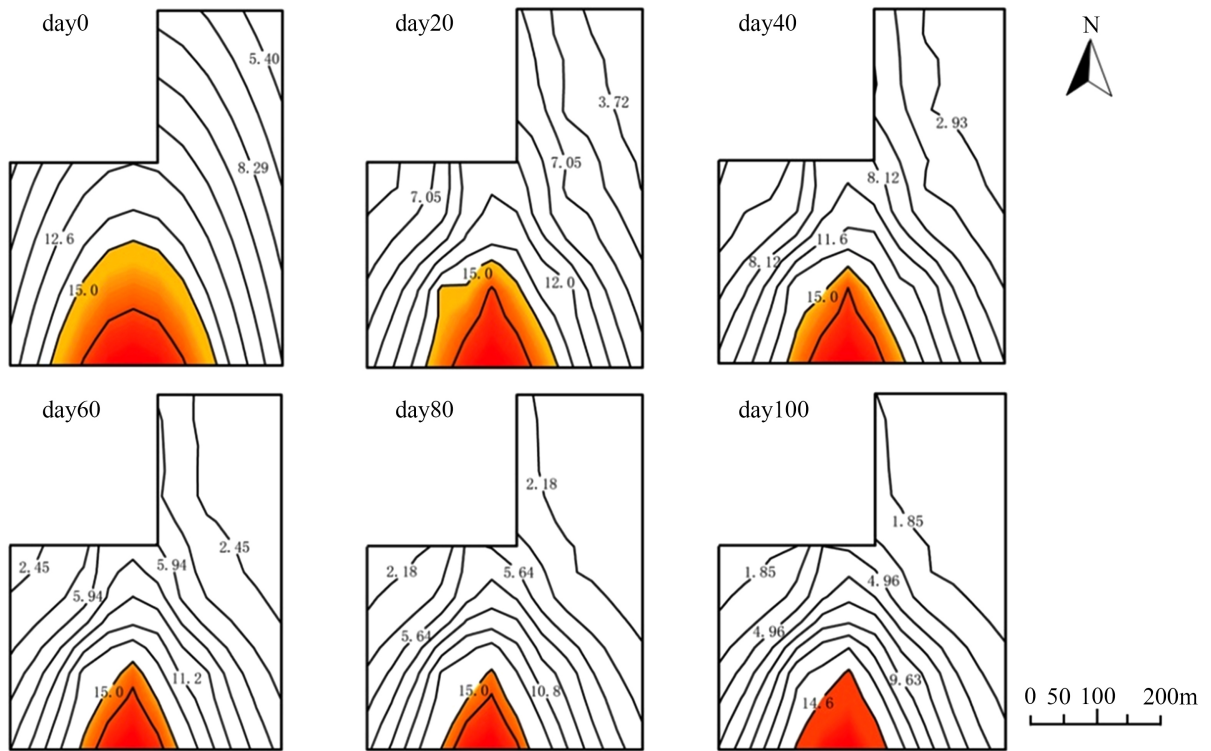
结合实际工程场地是否有现成的抽水井, 考虑不同目标函数的优化结果。① 优化场景 1: 对于新增抽水井的情形, 需要考虑抽水井的打井安装费用; ② 优化场景 2: 对于存在现成抽水井的情形, 不需要考虑抽水井的打井安装费用。两种情形下均为通过抽水 - 处理将场地污染物浓度降至  $15 \text{ mg/L}$ , 利用 PSO 方法优化得到抽水井位置和抽水量, 计算结果见表 2 所示。

**Table 2.** Optimization results for various objective functions ( $\text{m}^3/\text{d}$ )

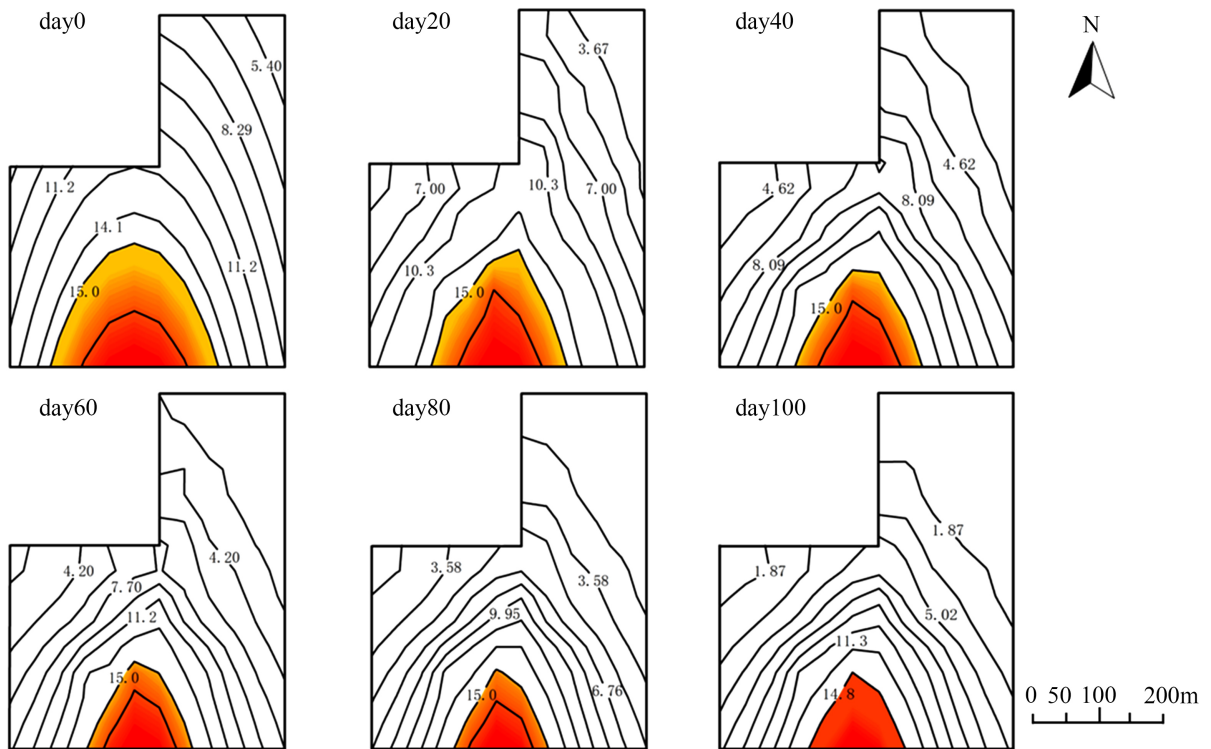
**表 2.** 不同目标函数的优化结果( $\text{m}^3/\text{d}$ )

备选井号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
优化场景 1	-277.4	-505.1	-353.6	-457.6	-239.6	-626	-419.9	-154.2	0	-52.9	0
优化场景 2	-291	-340.6	-173.4	-515.9	-432.2	-544.6	-440.7	0	0	-511.6	0
备选井号	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19	Q20	Q21	
优化场景 1	-510.5	-225.4	-210.1	-410.1	-529.8	-157.4	-257.7	-88.4	-561.4	-428.1	
优化场景 2	-292.2	0	-327.7	-420.9	-203.6	-568.8	-163.7	-297.3	-512.1	-191.1	

针对未考虑抽水井费用的目标函数, 在研究区中 21 口备选井方案中, 经过优化方法计算, 只需要 19 口井就可以满足约束条件, 实现修复目标, 比初始布井方案少 2 口井(Q9 和 Q10); 而对于考虑抽水井费用的目标函数, 在研究区中的 21 口备选井方案中, 最优井方案只需要 17 口井, 比初始布井方案少 4 口井(Q8, Q9, Q10, Q13)。



**Figure 2.** Changes of contaminant plume during remediation process (unconsidered for pumping well costs scenario)  
**图 2.** 修复过程中污染羽的变化(未考虑抽水井费用情形)



**Figure 3.** Changes of contaminant plume during remediation process (considered for pumping well costs scenario)  
**图 3.** 修复过程中污染羽的变化(考虑抽水井费用情形)

图 2 和图 3 分别为两种不同优化场景下污染羽随修复时间的变化情况。由图可知, 在修复期的前 20 天内, 2 种场景下修复区域污染物浓度去除速率大致相等; 经过 20 天后, 场景 1 中污染物去除速率相对缓慢, 场景 2 的污染物去除速率稍快于场景 1; 但是, 不同场景的污染物去除率大致相等。计算表明: 场景 1 中养老院范围残留污染物为 203.8 kg, 超标面积为 15,100 m<sup>2</sup>, 场景 2 中残留污染物 193.7 kg, 超标面积为 14,500 m<sup>2</sup>。

#### 4. 结论

1) 抽出-处理技术是一种针对地下水污染场地的有效修复技术。模拟优化方法是基于最优化原理, 得到最优抽出-处理方案, 从而提高修复效率和降低成本。

2) 本研究依据某污染场地调查资料, 结合实际工程场地是否有现成的抽水井, 考虑两种不同的目标函数, 利用粒子群算法对地下水污染羽修复区域布置了备选抽水井方案进行优化。

3) 粒子群算法与地下水流模拟程序(MODFLOW)和污染物运移程序 MT3DMS 相耦合, 可以设计合理的抽出处理方案和符合管理目标修复系统, 为地下水污染现场修复提供科学的工程方面的指导。但是该算法与水流模型相耦合计算最优解所花费的时间成本太高, 后续可考虑相应的算法降低时间成本。

#### 参考文献

- [1] 唐秋萍, 张毅, 王伟. 化工企业拆迁场地健康风险评价[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(4): 7-11.
- [2] 彭晶倩, 李琳, 郑川, 等. 化工企业搬迁场地环境调查实践与思考[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(6): 71-73.
- [3] 蒲敏. 污染场地地下水抽出处理技术研究[J]. 环境工程, 2017, 35(4): 6-10.
- [4] 宋汉周, Allan D. Woodbury. 抽出处理措施的有效性评价——某碳酸盐岩含水层中地下水有机污染及其去除研究之三[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 67-71.
- [5] 吴玉成. 治理地下水有机污染抽出处理技术影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 1998(1): 30-32.
- [6] 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.
- [7] 顾翔, 杜鹏, 单慧媚, 等. 水力截获技术在地下水污染修复中的应用——以某危险废物填埋场为例[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(4): 52-58.
- [8] Cardiff, M., Liu, X., Kitanidis, P.K., Parker, J. and Kim, U. (2010) Cost Optimization of DNAPL Source and Plume Remediation under Uncertainty Using a Semi-Analytic Model. *Journal of Contaminant Hydrology*, **113**, 25-43. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.11.004>
- [9] Akbarpour, A., Zeynali, M.J. and Nazeri Tahroudi, M. (2020) Locating Optimal Position of Pumping Wells in Aquifer Using Meta-Heuristic Algorithms and Finite Element Method. *Water Resources Management*, **34**, 21-34. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02386-6>
- [10] Ghaseminejad, A. and Shourian, M. (2019) A Simulation-Optimization Approach for Optimal Design of Groundwater Withdrawal Wells' Location and Pumping Rate Considering Desalination Constraints. *Environmental Earth Sciences*, **78**, Article No. 270. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8273-5>
- [11] Pathania, T. and Eldho, T.I. (2020) Optimal *in Situ* Bioremediation System Design for Contaminated Groundwater Using Meshless EFGM Simulation and PSO. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2020*, American Society of Civil Engineers, Reston, 115-124. <https://doi.org/10.1061/9780784482964.012>
- [12] Ko, N. and Lee, K.-K. (2010) Information Effect on Remediation Design of Contaminated Aquifers Using the Pump and Treat Method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **24**, 649-660. <https://doi.org/10.1007/s00477-009-0352-9>
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] McDonald, M. and Harbaugh, A.W. (1988) A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model. In: *Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6*, U.S. Geological Survey, Washington DC.



- [16] Zheng, C. and Wang, P.P. (1999) MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. US Army Engineer Research and Development Center, Washington DC.
- [17] Mezura-Montes, E. and Coello Coello, C.A. (2011) Constraint-Handling in Nature-Inspired Numerical Optimization: Past, Present and Future. *Swarm and Evolutionary Computation*, **1**, 173-194.  
<https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.10.001>
- [18] 江思珉, 朱国荣, 孙振波, 徐强. Pareto 强度指标遗传算法求解地下水模拟-优化模型[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1):11-15.
- [19] Pedersen, M.E. (2010) Good Parameters for Particle Swarm Optimization. Hvass Laboratories, Luxembourg, 1551-3203.