

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.031

基于可变环境标准约束的地下水修复优化模型

徐宗达,何理,卢宏伟,樊星

(华北电力大学可再生能源学院,北京 102206)

摘要:提出了一个集成的模拟-优化方法用于设计不确定条件下受石油污染的地下水最优修复方法。该方法有以下4个优点:①通过建立的代理回归模型给修复策略(井的抽注速率)和修复性能(污染物浓度)之间提供了直接且响应迅速的桥梁;②减轻优化过程中产生的计算工作量;③提供一个能够揭示满足环境质量标准程度大小的满意度水平;④防止过于乐观或悲观的优化策略的制定。将该方法应用于位于安徽省某发电厂受石油污染的地下水含水层区域,用来识别最佳的修复策略。结果表明:在较宽松的、对修复效果影响不是很大的环境标准或者较长的修复周期条件下,大多数抽注修复井的抽注速率将会减小,伸缩指数的增加对修复优化结果并没有产生严重影响。

关键词:地下水修复;模拟;优化;代理模型;伸缩指数

中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)01-0176-08

Groundwater remediation optimization model based on telescopic environmental-standard constraints

XU Zongda, HE Li, LU Hongwei, FAN Xing

(College of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An integrated simulation-optimization approach for optimal design of petroleum-contaminated groundwater remediation under uncertainty is proposed. Compared to previous approaches, it has 4 advantages as follows: (1) providing a direct and response-rapid bridge between remediation strategies (pumping rates) and remediation performance (contaminant concentrations) through the created surrogates; (2) alleviating the computational cost in the optimization process; (3) providing a satisfaction level that indicates the degree to which the environmental quality standard is satisfied; (4) preventing the formulation of over optimistic and over pessimistic optimization strategies. The approach is applied to a petroleum-contaminated aquifer located in a power plant of Anhui Province for identifying the optimal remediation strategies. The results show that the pumping rates of most wells would decrease under a relaxed standard or longer remediation duration. The increased telescopic index has no serious effect on the optimal remediation strategy.

Key words: groundwater remediation; simulation; optimization; surrogate; telescopic index

在过去的一些年,由于地下储油管道石油污染物泄漏引起的地下水污染成为一个严重的环境问题^[1-3],这些石油污染物对当地的地下水和周边居民的生活健康可能构成严重的威胁^[4],这给努力开发合适的地下水管理系统修复受污含水层提供了一个充分的理由^[5]。为了保护地下水质量和提高公共

生活健康水平,已经有大量的修复技术用于去除地下水中的污染物。地下水污染修复是一项复杂、费时和价格高昂的工程。为了增加地下水污染修复的效率,同时减小修复成本,一个集成的仿真、优化模型时常被决策者采用。模拟的目的是为了预测污染羽随时间和空间的变化情况,而优化则是为了从大

量的修复策略中找到一个最合适的方案^[6-7]。决策者提供一个量化环境标准程度大小的满意度水平。

早期,大量基于地下水流动和污染物迁移模拟和优化模型的方法被用于设计最优地下水修复系统^[8-10]。例如,Huang^[11]建立了一个基于遗传算法的非线性、离散化方法用于优化地下水修复系统,这种方法可以根据预测的地下水情况通过实时的方式确定最佳修复策略。He等^[12]开发了一种耦合的模拟优化方法用于优化地下水修复系统,这种方法可以给修复策略(抽注速率)和修复性能(污染物浓度)提供直接且响应迅速的桥梁。Gaur等^[13]开发了一个基于抽注修复的地下水修复系统优化模型,这个模型综合元素分析法、人工神经网络法和粒子群优化算法3种算法设计一个抽注水网络系统。该优化模型可以保证抽注修复效率最大化同时最大限度地降低修复成本。然而,之前大多数研究在优化过程中很少考虑不确定性因素的影响。为了更好地应对优化地下水修复系统过程中的不确定性因素问题,大量的数学模型/方法已经被相关研究人员开发利用^[14-16]。例如,He等^[17]提出了一种基于参数不确定性的模糊机会约束规划仿真模型用于确定最佳的地下水修复策略,该模型可以帮助决策者应对模糊参数不确定性条件下的模拟优化问题,同时减轻优化过程中的计算负担。Qin等^[18]提出了一个基于随机多准则决策分析的模拟方法用于优化地下水修复系统,该方法综合了污染物迁移模型、两相真空抽吸模型、确定性多准则决策分析和蒙特卡罗模拟等多种模型算法。通过该方法,决策者不仅可以直接获取各不确定性因素的重要程度,同时可以深入了解各修复策略之间的优劣差异。Yang等^[19]提出了一种基于模拟的模糊优化方法应用于不确定性条件下区域地下水管理系统。与传统方法相比,这种方法将模拟和优化结合在一起,通过使用模糊机会约束规划处理优化过程中的不确定性。决策者可以通过权衡违背相关的环保标准的风险和经济效益之间的利弊确定最佳地下水修复策略。

然而,上述研究处理的不确定性因素很少考虑到环境质量标准这一点。当标准过于严格时,修复的费用会大大增加;相反,如果标准过于宽松,那么最低环境标准就有可能被打破。因此,有必要制定一个合适的环境标准来提高修复效率,同时降低修复的成本。事实上,环境质量标准通常随着国家、空间位置和特定使用范围的变化而变化^[20],因此,决策者在实际修复策略设计过程中并不会采用一个一成不变的环境标准。相比之下,在修复策略设计过程中选择一个灵活的环境标准不仅可以防止抽注修复过度或者过轻两种极端情况的发生,同时还能

为决策者提供一个量化环境标准程度大小的满意度水平。

综合上述考虑,基于模拟模糊优化方法被提出用于解决地下水修复过程中由环境质量标准引起的不确定性。本研究主要包括以下几个内容:①提供一个地下水抽注修复的数值仿真模型;②通过运行该数值仿真模型得到一系列相关结果;③通过逐步二次响应分析建立修复策略(抽注速率)和修复性能(污染物浓度)之间的回归代理模型;④通过使用一种数学方法找出最佳的修复策略;⑤将该方法应用到位于安徽省的某电厂一个受石油污染的地下水含水层,验证模型的可行性。

1 集成模拟优化模型

1.1 集成模拟非线性优化流程

图1为集成模拟模糊非线性优化流程图。第一步,通过数值生成实验得到大量的模拟情景,每个模拟情景包含一组解释变量(修复井的抽注速率)和反应变量(监测井中污染物浓度),模拟模型运行一次得到各个模拟情景对应的统计结果;第二步,通过逐步二次响应分析得到修复策略(抽注速率)和修复性能(污染物浓度)之间的回归代理模型;第三步,进行统计检验,通过统计检验确认生成的代理模型误差足够小,从而将模拟和优化过程结合起来;最后,通过非线性优化技术得到最佳的地下水修复策略。

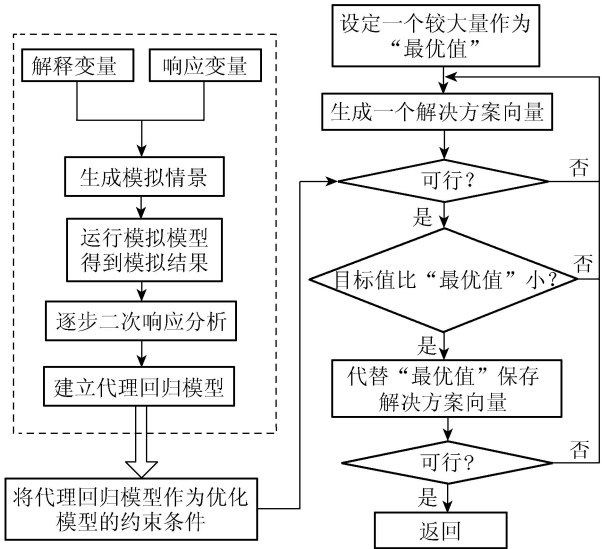


图1 集成模拟模糊非线性优化流程

1.2 数值模拟模型

使用 BIOPLUMEIII 数值模拟软件模拟地下水污染物的迁移过程。BIOPLUMEIII 是一个二维有限差分模型,用于模拟污染物在地下水含水层中对流、分散、吸附和生物降解作用下有机污染物的生物降解过程^[21]。该模型通过迭代迁移方程6次从而确

定石油烃有机污染物和电子受体/反应副产物的迁移过程。迁移方程用来预测污染物浓度随着空间位置的变化情况。对于本研究来说,氧气是唯一的电子受体,迁移方程^[22]如下:

$$\frac{\partial(bH)}{\partial t} = \frac{1}{R_h} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(bD_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(bHV_i)}{\partial x_i} \right] - \frac{H'W}{n} - \frac{Q}{n} \delta(x - x^{(r)})H \quad (1)$$

$$\frac{\partial(Pb)}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(bD_{ij} \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(bPV_i)}{\partial x_i} \right] - \frac{P'W}{n} \quad (2)$$

$$\Delta H_{so} = \frac{P}{F_o} \quad P = 0 \quad (H > \frac{P}{F_o}) \quad (3)$$

$$\Delta P_{os} = HF_o \quad H = 0 \quad (P > HF_o) \quad (4)$$

$$H(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y) \quad ((x, y) \in \Omega, t=0) \quad (5)$$

$$H(x, y, t) \Big|_{t=\Gamma_1} = H_1(x, y, t) \quad ((x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0) \quad (6)$$

式中: R_h 为迟滞系数; H 为石油烃的浓度; H' 为液相中石油烃的浓度; n 为有效孔隙度; b 为饱和度; W 为单位面积上的流量; V_i 为 x 方向上的渗流速率; D_{ij} 为水动力弥散系数; x_i 为水平方向笛卡尔坐标; x_j 为竖直方向笛卡尔坐标; t 为时间; P 为氧浓度; P' 为液相中氧浓度; Q 为抽吸率; $x^{(r)}$ 为井位坐标; ΔH_{so} 为好氧生物降解量; ΔP_{os} 为电子受体减小量; F_o 为氧气化学计量比; Ω 为研究区域; Γ_1 为初始边界条件。

1.3 逐步二次响应分析

逐步二次响应分析(SQRSA)用来定量描述响应变量和解释变量之间的关系^[23-24]。 C_k 为经过抽注修复后第 k 个监测井中污染物的浓度大小。 C_k 同时也可以表示成一组解释变量($Q_1, Q_2, \dots, Q_n$)的多项式函数,其中 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 为各抽注井的抽注速率。代理回归模型方程如下:

$$C_k = a_{0,k} + \sum_{i=1}^n a_{i,k} Q_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij,k} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^n a_{ii,k} Q_i^2 + e_k \quad (i \neq j) \quad (7)$$

式中: $a_{0,k}$ 为代理回归模型的常数项; $\sum_{i=1}^n a_{i,k} Q_i$ 为代理回归模型的一阶项; $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij,k} Q_i Q_j (i \neq j)$ 为代理回归模型的交叉项; $\sum_{i=1}^n a_{ii,k} Q_i^2$ 为代理回归模型的二阶项; e_k 为代理回归模型的误差项; n 为代理模型自变量的个数。

逐步二次响应分析是一种有效的技术方法,在预先未知代理回归模型的基础结构的前提下它可以自动为代理模型从大量的潜在解释变量中筛选出必

要的解释变量,通过这个技术手段可以较好地描述各种不同修复情景和污染物浓度之间的关系。

1.4 优化模型

与地表水修复相比,现有技术很难充分认识地下水含水层的空间结构变异性,从而识别地下水污染监测网络系统,因此地下水修复是一个更加复杂的过程。在地下水修复系统中涉及许多因素,譬如抽吸井的整体抽注速率、总修复费用、健康风险、去污速率等。因此,在地下水修复系统中选择一个确定的目标至关重要。在实际修复过程中,抽吸井的安装成本远远小于运行成本,因此安装成本常常被忽略不计^[25]。修复井的抽注速率是影响修复成本最重要的因素,同时直接和修复性能相关联。因此,将修复井的总抽注速率作为优化模型的目标函数,在满足技术条件和环境约束条件下求其最小值从而保证地下水污染修复的成本最小化。对于技术条件约束,修复井的注入速率和抽出速率必须被限制在一个给定的上下边界范围。注入井的总注入速率数值上必须与抽出井的总抽出速率相等,从而创造一个稳定的地下水水力梯度,这样可以保证地下水朝着污染羽的迁移方向流动,与此同时必须保证在指定的时期注入清洁水。对于环境约束,所有监测井的污染物浓度必须小于或等于一个给定的环境标准限值。因此,优化模型方程如下:

$$\min V_{TR} = \sum_{i=1}^I Q_i^{\text{in}} + \sum_{j=1}^J Q_j^{\text{ex}} \quad (8a)$$

$$C_k(Q_i^{\text{in}}, Q_j^{\text{ex}}) \leq C_{\max} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (8b)$$

$$0 \leq Q_i^{\text{in}} \leq Q_{i,\max}^{\text{in}} \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (8c)$$

$$0 \leq Q_j^{\text{ex}} \leq Q_{j,\max}^{\text{ex}} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (8d)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^J Q_j^{\text{ex}} \quad (8e)$$

式中: V_{TR} 为抽注井的总抽注速率; Q_i^{in} 为第 i 个注入井的注入速率; Q_j^{ex} 为第 j 个抽出井的抽出速率; $Q_{i,\max}^{\text{in}}$ 为第 i 个注入井的最大注入速率; $Q_{j,\max}^{\text{ex}}$ 为第 j 个抽出井的最大抽出速率; I 为注入井的编号; J 为抽出井的编号; K 为监测井的编号; C_k 为经过修复后第 k 个监测井的预期污染物浓度; $C_{\max}$ 为最大可接受的污染物浓度。

事实上,由于在模拟过程中产生各种各样的误差,模拟的运行结果与实际的修复过程中存在着一定的差异,因此模拟的污染物浓度不可能完全满足环境标准。需要引入一个模糊集来描述污染物浓度和环境标准之间的一种不确定性关系。 C_k 在数值上允许超过 $C_{\max}$ 一定的范围,此时优化模型的环境约束条件可以在一定范围波动,从而使得到的修复

结果更加合理。在模型的转化过程中,在式(8)中引入一个伸缩指数 ξ_m ,其值由实际情形决定,譬如决策者的要求和技术方面的限值因素。这样,优化模型就转化为两个极端情形,其模型方程分别为

$$\begin{cases} \max(-V_{TR}) = -(\sum_{i=1}^I Q_i^{In} + \sum_{j=1}^J Q_j^{Ex}) \\ C_k(Q_i^{In}, Q_j^{Ex}) \leq C_{\max} \quad (k=1,2,\cdots,K) \\ 0 \leq Q_i^{In} \leq Q_{i,\max}^{In} \quad (i=1,2,\cdots,I) \\ 0 \leq Q_j^{Ex} \leq Q_{j,\max}^{Ex} \quad (j=1,2,\cdots,J) \\ \sum_{i=1}^I Q_i^{In} = \sum_{j=1}^J Q_j^{Ex} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \max(-V_{TR}) = -(\sum_{i=1}^I Q_i^{In} + \sum_{j=1}^J Q_j^{Ex}) \\ C_k(Q_i^{In}, Q_j^{Ex}) \leq C_{\max} + \xi_m \quad (k=1,2,\cdots,K) \\ 0 \leq Q_i^{In} \leq Q_{i,\max}^{In} \quad (i=1,2,\cdots,I) \\ 0 \leq Q_j^{Ex} \leq Q_{j,\max}^{Ex} \quad (j=1,2,\cdots,J) \\ \sum_{i=1}^I Q_i^{In} = \sum_{j=1}^J Q_j^{Ex} \end{cases} \quad (10)$$

通过分别求解模型方程(9)和(10),得到求解结果 f' 和 f'' 。这样将目标函数转化为模糊约束条件,同时确定其模糊关系的隶属度函数为

$$-V_{TR} = -(\sum_{i=1}^I Q_i^{In} + \sum_{j=1}^J Q_j^{Ex}) \geq f' \quad (11)$$

目标函数对应的模糊隶属度函数定义如下:

$$m_G = \begin{cases} 1 & -V_{TR} \geq f'' \\ \frac{-V_{TR} - f'}{f'' - f'} & f' \leq -V_{TR} < f'' \\ 0 & -V_{TR} < f' \end{cases} \quad (12)$$

约束条件对应的模糊隶属度函数定义如下:

$$m_{C_i} = \begin{cases} 1 & C_{k,i} < C_{\max,i} \\ 1 - \frac{C_{k,i} - C_{\max,i}}{\xi_i} & C_{\max,i} \leq C_{k,i} < C_{\max,i} + \xi_i, \forall i \\ 0 & C_{k,i} \geq C_{\max,i} + \xi_i \end{cases} \quad (13)$$

式中: $C_{k,i}$ 为第 i 次运行方案的监测井浓度。

式(13)是由初始约束条件导出的,其中 $C_{k,i} < C_{\max,i}$ 对应的隶属度为 1,而 $C_{k,i} \geq C_{\max,i} + \xi_i$ 对应的隶属度为 0,中间的就简化为线性处理。

为了兼顾模糊约束集和模糊目标集,引入满意度水平 λ ,定义:

$$\lambda = \min\{m_G, m_{C_1}, m_{C_2}, \cdots, m_{C_m}\} \quad (14)$$

满意度水平 λ 用来描述将模糊约束条件转化为确定约束条件偏差的接受程度。 λ 表示满足约束条件的可靠性水平。 $\lambda=1$ 表示约束条件完全满足; $\lambda=0$

表示模糊约束条件超出了最低限制。

从决策者的角度来考虑,目标函数对应的隶属度 m_G 越大,得到的优化结果越理想。又因为 λ 是 $\{m_G, m_{C_1}, m_{C_2}, \cdots, m_{C_m}\}$ 其中的最小值,因此,目标函数转化为求解 λ 的最大值。最后的优化模型方程为

$$\begin{cases} \max \lambda \\ -V_{TR} \geq \lambda f'' + (1 - \lambda) f' \\ C_k \leq C_{\max} + (1 - \lambda) \xi_m \quad (k=1,2,\cdots,K) \\ 0 \leq Q_i^{In} \leq Q_{i,\max}^{In} \quad (i=1,2,\cdots,I) \\ 0 \leq Q_j^{Ex} \leq Q_{j,\max}^{Ex} \quad (j=1,2,\cdots,J) \\ \sum_{i=1}^I Q_i^{In} = \sum_{j=1}^J Q_j^{Ex} \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

该模型方程结果可以通过一些常用的优化软件诸如 Lingo 或 Matlab 求解。通过求解该模型方程,可以得到各抽注修复井的抽注速率以及最优的满意度水平 λ_{opt} 。当然,修复井的总抽注速率也可以通过计算得到。

2 案例分析

2.1 场地概况

将该集成模拟优化模型应用于安徽省某发电厂受石油污染的地下水含水层,污染羽是由于该区域某地下储油池的泄漏产生,并且已经严重威胁到周围的环境质量和居民的生活健康。当中,主要考虑有机污染物萘,萘是一种有毒的化学物质,长时间接触将会严重损伤人体的神经系统、呼吸系统、肝脏和肾脏等生理机能,而且可能会威胁到人体的生殖功能。在模拟模型中,规定模拟区域的上下边界为非流动区域,从而形成一个稳定的地下水水力梯度,同时地下水流向为从东北到西南。根据该区域的水文地质条件可知,研究区域的含水层厚度为 2 133.6 ~ 6 705.6 mm,横向和纵向渗透系数均为 350.5×10^{-5} mm/s,同时该区域的储存系数约为 0.30。模拟区域的面积为 (762.0×609.6) m²,将其离散为 25×20 网格区域范围,每个网格的尺寸 x 和 y 方向均为 30.48 m。

模拟区域内(图 2),在污染羽周围设定了 2 口注入井和 4 口抽出井,同时设定了 8 口监测井分别观察石油有机污染物萘的浓度变化情况。这样,在该模拟区域就建立了一套完整的抽注井修复系统,该修复系统主要用于控制污染的地下水迁移,防止污染区域的不断扩张,同时降低污染物浓度水平。

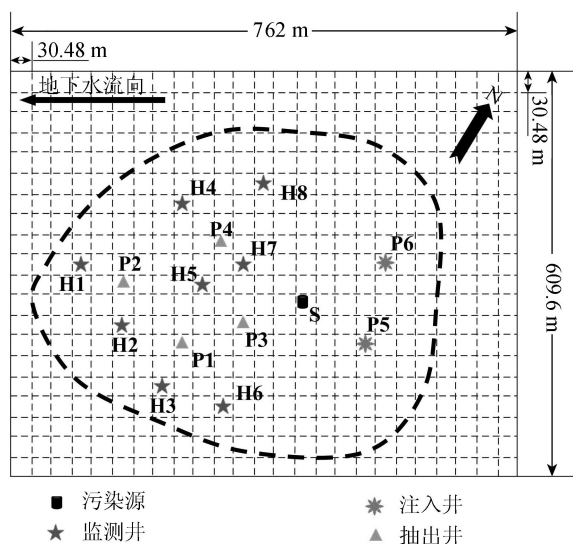
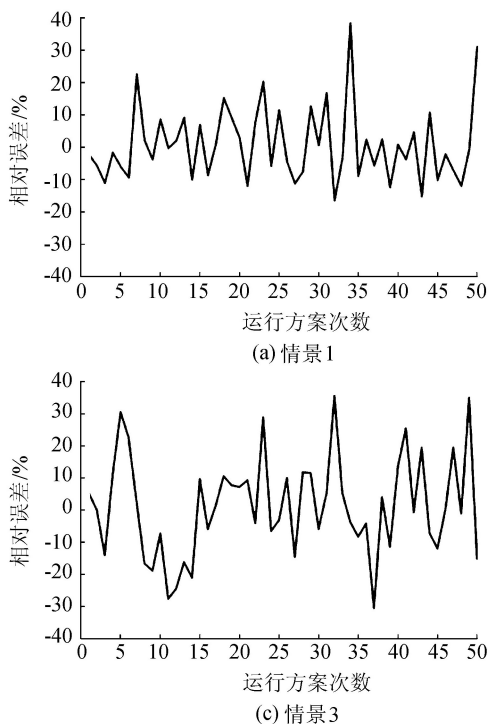


图2 模拟区域与井位布置

2.2 结果分析

2.2.1 代理回归模型结果分析

将模拟模型运行 m 次,得到 m 个样本结果,为进一步生成代理回归模型作准备。将响应变量(监测井所监测得到的石油有机污染物萘的浓度)数值取自然对数。当所有的输出结果经过数字化处理后,通过最小二乘法得到了代理回归模型的相关系数和相对误差。此外,为了检验不同修复时长对石油有机污染物萘的去除效率的影响,考虑3个不同修复周期(3 a、5 a 和 10 a) 污染物萘的浓度变化情况。在每一个修复周期内,8 口监测井分别得到8 个相应的代理模型,总共得到了24 个代理模型。



通过计算机随机生成50 组不同的修复运行方案,得到不同修复情景下的污染物浓度。从图3 可见,两者之间的相对误差范围在30%~35% 之间,表明得到的代理回归模型具有较好的模拟精度。其他监测井也呈现出类似的结果,表明在可接受的误差水平下,所建立的代理回归模型可以较好地代替传统的数值仿真模型,可节省大量的计算工作量。

2.2.2 优化结果

对环境标准来说,本研究案例选用萘的饮用水标准质量浓度限值(1.0 mg/L)^[26]。通过计算标准质量浓度从 0.2 mg/L 到 1.0 mg/L 各自的最优抽注速率来检验不同环境标准对修复系统最优运行条件的影响。根据决策者的需要和技术条件的限值引入一个伸缩指数 ξ_m 。 ξ_m 在数值上等于 $C_{\max} \xi$,其中 ξ 为最大可接受的污染物浓度 $C_{\max}$ 所占的百分比,在本研究案例中设定10%、20%、30% 和 50% 4 个数值。

图4 为 $\xi=10\%$ 时不同修复周期下各抽注修复井的最优抽注速率。不同的修复周期和环境标准导致不同的修复系统运行条件,以修复周期3 a 为例,在环境标准为 0.2 mg/L 条件下,各抽注井的最优抽注速率分别为 $17.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $10.37 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4.52 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $2.86 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $24.89 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $10.00 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在这种情景下,抽注井 P1 和 P5 拥有较高的抽注速率,表明大部分被污染的地下水通过抽出井 P1 而抽出,相对应地大部分清洁水则通过注入井 P5 注入该抽注修复系统,其他剩余的抽注井在修复过程中对污染物的消减也有重要的贡献。当环境标准增长到 0.6 mg/L

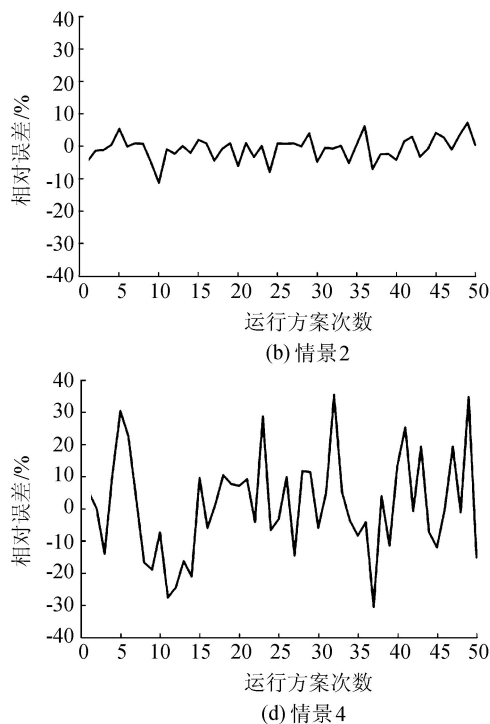


图3 代理回归模型的表现水平

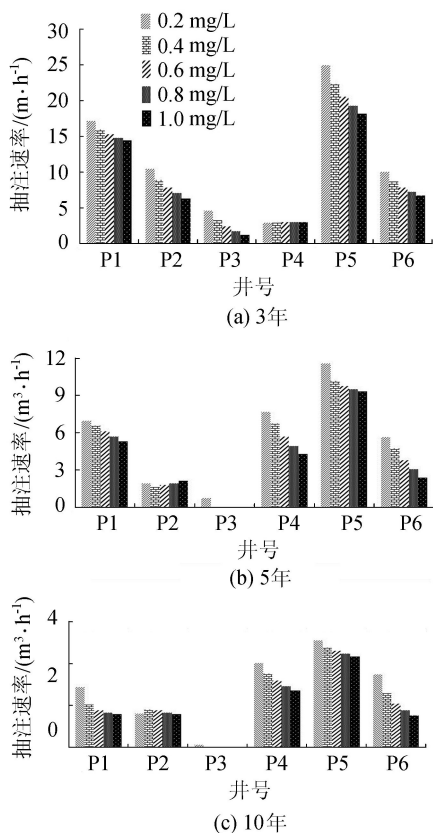
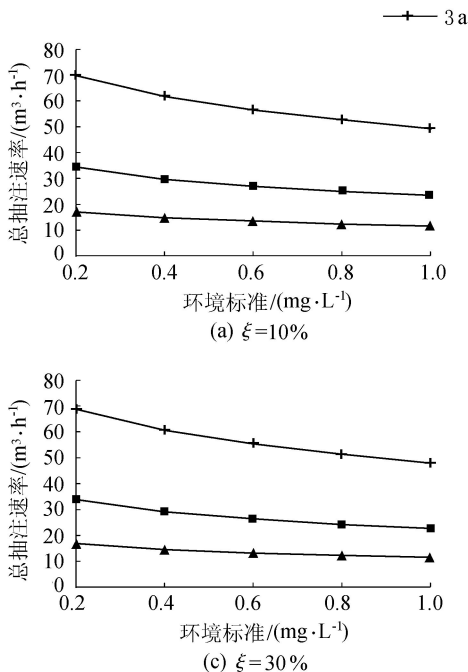


图4 各抽注井的最优抽注速率($\xi=10\%$)

时,抽出井 P3 的抽出速率降幅最大,约为 48.6%,抽注井 P2 和 P6 的抽注速率分别减小约 24.6% 和 21.7%,抽注井 P1 和 P4 的抽注速率相对而言略有下降,然而抽出井 P4 的抽出速率还有一定幅度上升。上述结果表明,在较宽松的环境标准下修复系统所需要移除的污染物减少,从而大部分抽注井的抽注速率将会减小。



如果修复周期增加到 5 a,大部分抽注井的抽注速率将会减小。当环境标准为 0.2 mg/L 时,抽注井各抽注井的最优抽注速率分别为 6.94 m³/h、1.91 m³/h、0.69 m³/h、7.66 m³/h、11.56 m³/h 和 5.65 m³/h。在这种情形下,大部分被污染的地下水通过抽出井 P4 抽出,相应地大部分清洁水则通过注入井 P5 注入,而抽出井 P1 对系统的修复贡献相对减小。当环境标准增长到 0.6 mg/L 的时候,所有抽注井对污染物的削减贡献将会减小,各抽注井的最优抽注速率将会变为 6.08 m³/h、1.75 m³/h、0 m³/h、5.69 m³/h、9.75 m³/h 和 3.77 m³/h。当设定更加宽松的环境标准时,抽注井 P1、P4、P5 和 P6 的抽注速率将会更大程度地降低,同时抽注井 P3 的抽注速率持续保持为零。

当修复周期增长到 10 a 时,各抽注井的抽注速率将会显著减小。例如,当环境标准设定为 0.2 mg/L 的时候,注入井 P5 和 P6 的注入速率将会减小到 5.10 m³/h 和 3.48 m³/h,与此同时,抽出井 P1、P2、P3、P4 的抽出速率将会变得更小。当设定的环境标准高于 0.2 mg/L 时,抽出井 P3 的抽出速率将会减小到零,表明随着修复周期时间的不断增加,自然衰减将会对修复性能的作用影响越来越大。

图 5 为不同的修复方案下所有抽注井的总抽注速率大小。以 $\xi=10\%$ 为例,当环境标准设定为 0.2 mg/L 时,经过 3 a、5 a 和 10 a 抽注修复的系统总抽注速率分别为 69.77 m³/h、34.41 m³/h 和 17.15 m³/h。当环境标准变为 0.6 mg/L 时,此时修复系统总抽注速率分别变为 56.69 m³/h、27.05 m³/h 和 13.39 m³/h,

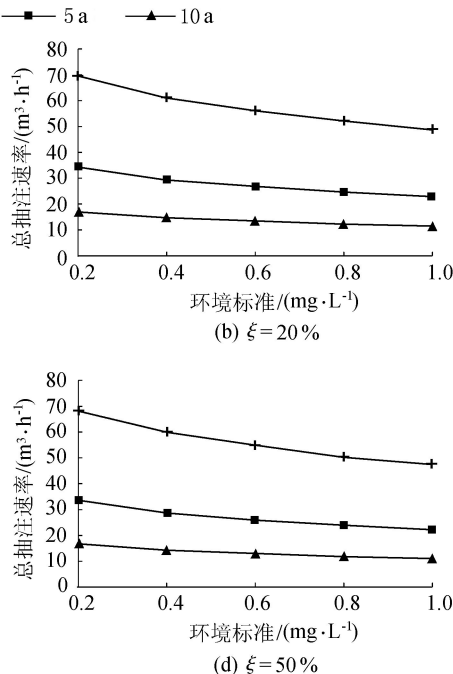


图5 不同伸缩指数 ξ 条件下系统最优总抽注速率

随着环境标准的不断变松,相对应地系统总抽注速率不断减小,当环境标准增加到 1 mg/L 时,此时经过修复周期分别为 3 a,5 a 和 10 a 的系统总抽注速率将会分别减小到 49.50 m³/h、23.38 m³/h 和 11.68 m³/h。与此类似,当给定一个特定的环境标准时,系统的总抽注速率将会随着修复周期时间的增加而减小,当修复周期从 3 a 增长到 10 a 后,系统的总抽注速率将会由 69.77 m³/h 减小到 17.15 m³/h,系统的修复周期越长,从地下水中抽取污染物的总量相对应地越少。修复系统抽出速率的减小将会导致注入井注入速率的减小从而保证系统维持一个稳定的地下水水力梯度,使得地下水可以直接向污染羽的内部方向流动。在一个较长的修复周期内,当修复系统的抽出速率和注入速率都减小会导致系统的总抽注速率相应减小。从图 5 还可以看出,系统的总抽注速率随着伸缩指数 ξ 的增加变化并不明显。例如,当 $\xi=10\%$,经过 3 a 抽注修复,环境标准设定为 0.2 mg/L、0.4 mg/L、0.6 mg/L、0.8 mg/L 和 1.0 mg/L 的系统的总抽注速率分别为 69.77 m³/h、61.82 m³/h、56.69 m³/h、52.76 和 49.50 m³/h;当 ξ 加大到 30% 时,相对应地经过 3 a 抽注修复系统的总抽注速率分别为 68.81 m³/h、60.74 m³/h、55.51 m³/h、51.49 m³/h、48.15 m³/h。可见系统的总抽注速率变化幅度非常小,同时在不同 ξ 条件下,系统的总抽注速率变化趋势非常类似。

图 6 为在不同修复时间、环境标准和伸缩指数条件下,满意度水平的变化情况。从图 6 可见,满意度水平随着伸缩指数变化幅度并不是很明显,具体来说,当伸缩指数相对较低时($\xi=10\%$)、环境标准设定为 0.8 mg/L 时,满意度水平出现显著变化,此时在修复周期为 5 a 时满意度水平达到最大值 0.58;当 ξ 变为 20% 或 30% 时,在所有不同修复方案和环境标准限制条件下,满意度水平变化非常微

弱,其数值大小维持在平均水平 0.51;当伸缩指数相对较高($\xi=50\%$)时,满意度水平的平均值大小有一定幅度的增加,同时在修复周期为 3 a 时的满意度水平出现显著变化,此时在环境标准为 0.6 mg/L 时达到最大值 0.65,当环境标准改变为 1 mg/L 时,满意度水平减小到 0.61,仍然远远超出其平均值。较高的满意度水平意味着该修复方案被决策者接受的可能性更大,因此,对于本研究在实际修复过程中选取伸缩指数 $\xi=50\%$ 条件下,3 a 抽注修复是最可靠的修复方案。

3 结 语

本研究提出了一个基于模拟和统计建模的方法,从而识别地下水修复的最佳策略,该方法将数值模拟、非线性优化和模糊推理结合在一起。在模拟过程中,通过使用一系列的代理回归模型建立起修复策略(修复井的抽注速率)和修复性能(污染物浓度)之间的关系,代理回归模型能够有效减少优化过程中产生的大量计算工作量。在优化过程中,通过引入满意度水平为决策者提供一个环境修复质量的参考标准。将上述模型应用于安徽省某电厂受石油污染的地下水含水层区域,结果表明,较长的修复周期对应于一个较低的总抽注速率,严格的环境标准意味着需要一个更高的总抽注速率,此外,尽管随着总抽注速率的增大、修复成本的提高,决策者也会更加愿意采纳这个方案,因为它能够更好地改善环境质量。满意度水平随着不同的伸缩指数变化幅度并不是很明显,说明其对修复优化的结果影响不是很大,较高的满意度水平意味着该修复方案被决策者接受的可能性更大,因此,对于本研究在实际修复过程中选取伸缩指数 $\xi=50\%$ 条件下,3 a 抽注修复是最可靠的修复方案。

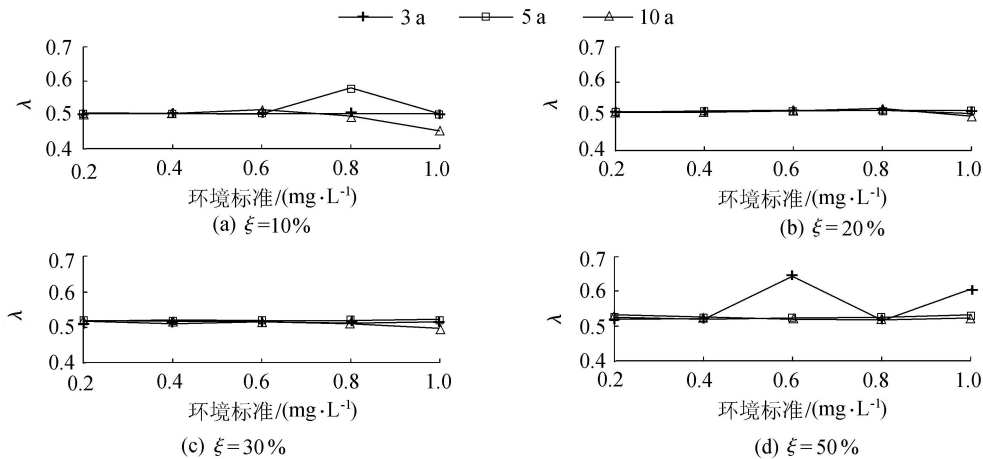


图 6 不同伸缩指数 ξ 条件下的满意度水平 λ

参考文献:

[1] 叶永红, 宁立波. 石油类污染物在包气带中的迁移预测: 以兰州西固商业石油储备库为例[J]. 环境科学与技术, 2012, 32 (11): 186-189. (YE Yonghong, NING Libo. Prediction of the migration of oil pollutants in vadose zone: a case study of commercial oil reserve base in Xigu, Lanzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 32(11): 186-189. (in Chinese))

[2] 吴鸣, 吴剑锋, 林锦, 等. 地下油罐泄漏区污染源的自动识别[J]. 环境科学学报, 2013, 33 (12): 3251-3259. (WU Ming, WU Jianfeng, LIN Jin, et al. Automated identification of the unknown contaminant source in groundwater at a leaking underground storage tank site [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33 (12): 3251-3259. (in Chinese))

[3] 王丽华, 吕铮, 郝春博, 等. 某石油污染场地地下水中降解菌群落结构研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (7): 1-8. (WANG Lihua, LYU Zheng, HAO Chunbo, et al. Degrading bacteria community structure in groundwater of a petroleum-contaminated site [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(7): 1-8. (in Chinese))

[4] CHEN Z. Integrated environmental modeling and risk assessment under uncertainty[D]. Regina, Saskatchewan: University of Regina, 2000.

[5] THANGJAM S S, DIBAKAR C. Multi-objective optimization for optimal groundwater remediation design and management systems[J]. Geoscience, 2010, 14 (1): 87-97.

[6] LU H W, HUANG G H, ZENG G M, et al. An inexact two-stage fuzzy-stochastic programming model for water resources management[J]. Water Resources Management, 2008, 22: 991-1016.

[7] LIU S J, LI X G, WANG H X. Hydraulics analysis for groundwater flow through permeable reactive barriers[J]. Environ Model Assess, 2011, 16: 591-598.

[8] MAYER A S, KELLEY C T, MILLER C T. Optimal design for problems involving flow and transport phenomena in subsurface systems [J]. Advance in Water Resources, 2002, 25(8-12): 1233-1256.

[9] AHMAD A L, ISMAIL S, BHATIA S. Optimization of coagulation flocculation process for palm oil mill effluent using response surface methodology [J]. Environment Science & Technology, 2005, 39: 2828-2834.

[10] HE L, HUANG G H, LU H W, et al. Optimization of surfactant-enhanced aquifer remediation for a laboratory BTEX system under parameter uncertainty [J]. Environment Science & Technology, 2008, 42: 2009-2014.

[11] HUANG Y F. Development of environmental modeling methodologies for supporting system simulation, optimization and process control in petroleum waste management [D]. Regina Saskatchewan: University of Regina, 2004.

[12] HE L, HUANG G H, LU H W. A coupled simulation-optimization approach for groundwater remediation design under uncertainty: an application to a petroleum-contaminated site [J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 2485-2492.

[13] GAUR S, CH S, GRAILLOT D, et al. Application of artificial neural networks and particle swarm optimization for the management of groundwater resource [J]. Water Resources Management, 2013, 3(27): 927-941.

[14] SINGH A, MINSKER B S. Uncertainty-based multi objective optimization of groundwater remediation design [J]. Water Resources Research, 2008, 44: W02404.

[15] YAN S, MINSKER B. Applying dynamic surrogate models in noisy genetic algorithms to optimize groundwater remediation designs [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 137(3): 284-292.

[16] LU H W, CAO M F, WANG X, et al. Numerical solutions comparison for interval linear programming problems based on coverage and validity rates [J]. Applied Mathematical Modeling, 2014, 38: 1092-1100.

[17] HE L, HUANG G H, LU H W. A simulation-based fuzzy chance-constrained programming model for optimal groundwater remediation under uncertainty [J]. Advance in Water Resources, 2008, 31: 1622-1635.

[18] QIN X S, HUANG G H, SUN W, et al. A Optimization of remediation operations at petroleum contaminated sites through a simulation-based stochastic-MCDA approach [J]. Energy Sources, 2008, 30: 1300-1326.

[19] YANG A L, HUANG G H, QIN X S, et al. Seeking optimal groundwater pumping strategies at Pinggu District in Beijing, China [J]. Journal of Hydroinformatics, 2013, 15: 607-619.

[20] HE L, HUANG G H, ZENG G M, et al. An integrated simulation, inference, and optimization method for identifying groundwater remediation strategies at petroleum-contaminated aquifers in western Canada [J]. Water Research, 2008, 42: 2629-2639.

[21] RIFAI H S, NEWELL C J, GONZALES J R, et al. Bioplume III natural attenuation decision support system user's manual version 1.0 [M]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1998.

[22] BORDEN R C, BEDIENT P B. Transport of dissolved hydrocarbons influenced by oxygen-limited biodegradation: 1. Theoretical development [J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1973-1982.

(下转第 194 页)

状况来讲,但是污染物释不释放还是一个问题。而且,刚才讲到的二次污染,我们也是从原理上知道会发生这件事情。但是,二次污染的情况是什么样的,我们没有很详细地去探讨。我认为过程很重要。污染物的释放过程是技术一定要解决的一个核心问题。污染物的释放过程和机理,实际上是很复杂的。这不光是弄清底泥里面有什么东西就完了的事情,这里面有很多很复杂的流体力学的问题。但是,这些很复杂的问题跟工程相结合的话,是可以做得到的。我们可以研究污染物释放的过程及机理,根据反应过程制定一些规范和标准来确定疏浚怎样做。后续处理中泥怎么办?说到底还是脱水的问题。我们讲了好多技术,但是这个脱水的过程不光是流体力学的问题,跟固体力学也是结合在一起的。我个人觉得,这里面还是有很多很深奥的问题。如果我们不知道底线在哪里的话,技术的推进是很难进行的。

主持人:李教授这个问题非常难回答,我试着回答。其实,我们讲的这个疏浚与泥处理利用,必须放到一个背景里面去。也就是今天会议的题目,这个题

目出得是很好的,“河湖水环境治理与生态修复中泥处理技术创新”。我们不是用泥处理这一招治天下。实际上,我们的定位是在水环境治理、水生态修复等系统工程中考虑底泥疏浚这一个措施怎么做。我是这样理解的。如果说这一个方法就能解决所有问题的话,那么这个认识就会变得片面,没有解决问题的可能性。当然,李教授讲的我们要关注过程,考虑释放的机理,我非常同意。但是,我觉得我们中国的事就要“两步抓”“同时走”,即过程要关注,现在的问题也要解决。现在,《河湖(库)环保疏浚前期调查工作导则》的事我们也要做。因为,我们今天在这里讨论的时候,不知道哪个地方已经清出来几十万方还是一百万方的泥了,不能等到我们把所有的事情都搞清楚的时候再去做,“一万年太久,只争朝夕”。所以,我们叫“两步走”,基础理论的要去做,眼下的事也要干。这是我个人的认识。今天的讨论很好,很热烈。时间关系,今天就讨论到这里。谢谢各位嘉宾,谢谢积极参与讨论的专家和各位参会人员。

(朱伟 整理供稿)

(上接第 183 页)

[23] TIR M, MOULAI-MOSTEFA N. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method [J]. Journal of Hazardous Materials,2008,158:107-115.

[24] HAMEED B H, TAN I A W, AHMAD A L. Preparation of oil palm empty fruit bunch-based activated carbon for removal of 2, 4, 6-trichlorophenol: optimization using response surface methodology [J]. Journal of Hazardous Materials,2009,164:1316-1324.

[25] MINSKER B S, SHOEMAKER C A. Dynamic optimal control of in-situ bioremediation of ground water [J]. Water Research,1998,124:149-161.

[26] HJ 25. 3-2014 污染场地风险评估技术导则[S].

(收稿日期:2015-03-30 编辑:徐 娟)

欢迎订阅《水资源保护》杂志

中国科学引文数据库来源期刊 中国科技核心期刊
RCCSE 中国核心学术期刊 中国高校特色科技期刊
ISSN 1004-6933 CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会联合主办的科技期刊。本刊针对我国水资源短缺、用水效率不高、水污染严重等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、防治技术、宏观管理及水环境治理问题,重点关注水环境、水资源和水生态问题,主要栏目有“水生态”“水环境”“水资源”,并根据需要开设“专家对话”“政策大家谈”“热点看过来”等栏目。

《水资源保护》是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国高校特色科技期刊,已被美国化学文摘(CA)数据库、美国《剑桥科学文摘》(CSA)数据库、波兰哥白尼索引(IC)数据库等收录和引用,长期以来一直都是水利界和环保部门备受关注的重点期刊,2012 年、2014 年连续被教育部科技司授予“中国高校特色科技期刊”称号。

《水资源保护》主要读者对象为全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生,邮发代号:28-298,双月刊,96 页,12 元/期,全年共计 72 元,每逢单月 20 日出版。可向当地邮局订阅,若无法从邮局订阅,亦可在本刊网站下载征订单。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 邮政编码:210098 电话/传真:(025)83786642 E-mail:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn http://www.hehaiqikan.cn/szybh/ch/index.aspx