

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.001

# 地下水环境修复工艺优化设计研究进展

何理, 李晶, 任丽霞, 杜鹏, 董焕焕, 黄国和

(华北电力大学资源与环境研究院, 北京 102206)

**摘要:**介绍了3种应用相对广泛的地下水修复技术,即抽出处理法、可渗透反应墙和自然降解法,重点回顾和评述了地下水修复系统优化设计的方法,探讨了结合健康风险评价体系和不确定性研究的地下水修复系统优化设计,旨在为地下水资源的修复和管理提供理论依据。

**关键词:**地下水污染;地下水修复技术;地下水修复系统;优化设计;不确定性;健康风险评价  
中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)03-0001-04

## Research progress in groundwater remediation technology and optimization design

HE Li, LI Jing, REN Lixia, DU Peng, DONG Huanhuan, HUANG Guohe

(Resources and Environmental Research Academy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Three kinds of widely used technologies for groundwater remediation, including pumping treatment, permeable reactive barriers, and natural degradation technologies, are introduced in this paper. An overview of the methods for optimization design of a groundwater remediation system is provided. In addition, the optimization design of the groundwater remediation system is discussed based on a combination of the health risk assessment system and uncertainty study. This study aims to provide a theoretical basis for groundwater resources remediation and management.

**Key words:** groundwater contamination; groundwater remediation technology; groundwater remediation system; optimization design; uncertainty; health risk assessment

随着人口的增长和社会经济的快速发展,我国地下水的开采量逐年加大。但过度开采地下水,使我国很多地区形成了严重的地下水漏斗。此外,地表环境污染加剧,农业灌溉以及农药化肥的过度施用,引发了地下水污染问题,严重威胁到我国居民的身体健康和财产安全<sup>[1]</sup>。日益严峻的地下水环境问题已经成为自然、社会、经济可持续发展的重要制约因素。国家环境保护部于2011年发布地下水环境影响评价技术导则,“十二五”规划中也明确提出推进地下水污染防控,控制城镇污染、农业面源污染对地下水的影响,严格监控受污染土壤和污水灌溉对地下水的影响等。这标志着我国已经开始高度关注地下水的污染问题。

## 1 地下水修复技术

进入地下水的污染物主要来源于人类的活动。生活污水和垃圾会引起地下水的总硬度、硝酸盐和氯化物含量的升高,有时还会造成病原体污染。工业废水和废物则造成地下水中有有机化合物和无机化合物污染。农业上过度施用的化肥和农药,将使地下水中硝酸盐含量增高。目前地下水中较为普遍的污染物主要是石油化工产品、硝酸盐和重金属。

关于地下水污染修复,国外尤其是欧美国家,从20世纪70年代以来对地下水污染治理的研究取得了较大的进展<sup>[2]</sup>。我国已在地下水污染调查及污染物迁移转化模式方面做了一些基础性的研究,近年来针对地下水治理技术及其应用的研究逐渐增

基金项目:国家自然科学基金委优秀青年基金(51222906);环保部公益性行业项目(201309063)

作者简介:何理(1976—),男,教授,博士,主要从事地下水修复研究。E-mail:li.he@ncepu.edu.cn

多。在众多的地下水修复技术中,应用最广泛的3个方法是抽出处理法、可渗透反应墙和自然降解法。

### 1.1 抽出处理法

抽出处理法是目前应用相对普遍的方法,它是通过建立一系列的井群,将受污染的地下水用抽水井抽送到地面加以处理的方法。井群系统能够控制受污染地下水的流动,故抽水井群的建立是抽出处理法的关键。在地面上建立同地表水处理相类似的地下水污水处理系统,可采用的方法有物理法、化学法和生物法。物理法指对抽出的含有污染物的地下水利用吸附、重力分离、反渗透和焚烧等方式将污染物去除。化学法包括混凝沉淀、氧化还原、离子交换和中和等方法。生物法有活性污泥法、生物膜法、厌氧消化法和土壤处理法等。具体采用哪种方法要依据污染物的理化特点及其他因素等来决定。处理后的地下水一般有两个去向,一是直接使用,二是用于灌溉,且多用于回灌,原因是回灌既可以稀释受污染的水体,冲洗含水层,又可以加速地下水的循环流动,从而缩短地下水修复的时间。

### 1.2 可渗透反应墙

可渗透反应墙是在地下含水层中安置活性材料墙体,以便拦截污染羽状体,使污染羽状体通过反应介质后转化为环境可接受的另一种形式,实现污染物浓度达到环境标准的目标。可渗透反应墙主要由透水的反应介质组成,它通常置于地下水污染羽状体的下游,与地下水流相垂直。污染物去除机理有生物和非生物两种。受污染的地下水在自身水力梯度作用下通过可渗透反应墙时,产生沉淀、吸附、氧化还原和生物降解反应,使水中污染物得以去除,在可渗透反应墙下游流出处理后的净化水。此法可去除溶解在地下水中的有机物、金属、放射性物质以及其他污染物质<sup>[3]</sup>。

### 1.3 自然降解法

自然降解法在国外应用广泛。它是根据修复年限预测污染物的污染范围,将受污染的区域圈起来,建立一系列监测井,实时监测污染物浓度,凭借污染物在流动的地下水中的自然降解达到去除污染物的效果。由于该方法基本不进行任何人工修复,因此所需的修复时间比较长,适用于轻度污染区域及地广人稀且土地不亟须使用的区域。该技术通常与其他地下水处理技术相结合,以提高自然降解修复技术的处理效率,已在北美地区得到逐步推广<sup>[4]</sup>。

## 2 地下水修复系统优化设计

### 2.1 地下水修复系统优化设计的理论

20世纪70年代,地下水系统理论逐渐发展起

来。地下水系统是经过漫长的地质演化而形成的,内部结构的不均一性和外部环境因素的复杂性决定了地下水系统是一个开放且复杂的巨系统。受到污染的地下水所需要的修复周期较地表水的修复周期长,因此对地下水的污染治理需要制定更为谨慎的修复政策,以确保人类的健康和财产安全。但现实中,地下水这个复杂的巨系统受到许多不确定性因素的干扰,这种干扰加剧了地下水系统的不稳定性,因此,针对地下水系统修复政策的优化设计显得尤为重要。研究地下水修复系统主要涉及地下水中污染物的迁移转化以及结合修复技术的系统优化设计两个方面。许多学者积极致力于将地下水水流与溶质迁移模型和数值优化技术相结合,以解决地下水质量管理问题。

掌握地下水污染物的迁移转化规律是地下水修复系统优化设计的基础。只有在掌握了地下水污染物的迁移转化规律后,才能有针对性地提出有效的修复技术。由于地下水污染发生在地表以下,不能直接观测,因此,研究地下水污染物的迁移转化,主要通过现场监测并结合数学模型模拟法<sup>[5]</sup>。首先通过在污染带打井取样获取污染带中污染物的种类和质量浓度数据,然后根据实地调查确定污染地带的特征,选择相应的数学模型来模拟污染物在一定时间内的迁移转化规律。在比较理想的情况下,如满足达西定律,等温的均质含水层,这时可以选择稳定的对流-弥散溶质运移模型(这种模型属于确定性模型)。但是在天然多孔介质中,许多参数是不确定的,这些不确定性是由于含水层的非均质性以及非水相液体消解和迁移转化的物理、化学和生物特性所导致的。这种情况下一般选用不确定性模型。近些年来,越来越多的学者开始更多地关注可以处理过程和参数的不确定性模型。

为达到既定管理目标而建立的求解地下水最优管理决策的数学模型,通常是由地下水系统的数值模拟模型和最优化模型耦合而成。这种复合结构的优化模型可以在严格遵循地下水运动规律并结合地下水修复技术的前提下,寻求地下水系统修复的最优决策<sup>[6]</sup>。开发地下水系统优化设计模型的主要动因是降低地下水治理的巨额费用。若干实际应用已显示地下水系统优化设计能显著降低治理成本。国内外研究的地下水修复系统优化设计,往往都是在结合抽出处理技术的基础上。

### 2.2 地下水修复系统优化设计的方法

地下水修复的经济效益、环境效益和社会效益是地下水修复系统优化设计的主要内容。污染物的去除效果和修复成本通常被选为系统优化的目标,

污染物环境浓度标准、技术条件限制以及其他一些因素通常作为系统优化的限制条件。在系统优化设计中,采取的方法是基于运筹学的规划,包括传统的非线性规划、混合整数规划、多目标规划以及代理规划等。由于地下水开放的巨系统中存在大量的不确定因素,这些不确定因素都会对系统优化的结果产生影响,因此,研究系统中的不确定性也是系统优化设计中的一个重要方面。

### 2.2.1 传统的非线性规划

自1970年中期以来,在简化的运输模型或管理选项的基础上,非线性规划已被应用到地下水数量或质量的管理研究方面。大多数研究都关注利用水力梯度控制地下水的问题,即通过应用一系列的抽水井和注水井来创建一个控制羽迁移的水力梯度区域。相应的管理模型旨在减少泵的成本,同时保持向内的定向水头梯度走势沿着污染物的羽边界。

有限元方法、惩罚系数法、启发式算法、数据包络分析法等,都曾广泛用于非线性规划优化设计的求解中。Peralta等<sup>[7]</sup>提出了结合遗传-禁忌搜索算法(AGT)的两阶段优化模拟过程,对布莱恩海军弹药库附近的地下水修复系统和抽出-处理系统进行瞬态优化。AGT具有标准遗传算法和禁忌搜索功能,并能对优秀个体和新的子集/子空间进行分解优化。在筛选阶段中,通过减少需要评估变量的数量,以及解决方案空间维度(包括时间维度)问题,来简化和优化过程。通过对稳定流量进行子集/子空间的分解优化,来确定理想的候选集水井。瞬态优化是通过采用数学模型模拟随时间变化的抽水率,以此来确定集水井。由于优化过程中会引起紧约束,计算过程对模型参数的变化会非常敏感,因而能获得更好的目标值。

传统的非线性规划通常需要的计算量很大,尽管如此,由于它能够识别全局优化解,并能有效地处理离散决策变量,因此通常易与水流-迁移模型相结合,在地下水系统优化设计中的应用较广泛。

### 2.2.2 混合整数规划和多目标规划

为优化井位,一些早期的研究对混合整数的规划问题做了相关分析。McKinney等<sup>[8]</sup>提出了一个混合整数非线性规划模型来研究分析最优含水层的修复设计方案。在该模型中,通过使用多项式惩罚系数法,将目标函数的固定成本(包括系统施工安装成本,以及运行和维护成本)近似为连续函数中的一组决策变量。该模型在一个简单均匀且各向同性的含水层系统进行测试,以说明不同的成本函数组件对最佳修复政策的影响。

目前,关于地下水修复系统优化设计问题的研

究更多侧重于多目标修复。在地下水修复系统中经常会遇到多目标的问题,这些目标大致可分为:可以用货币体现的经济效益;促进社会发展的社会效益;保护环境、维持生态平衡的生态环境效益。解决地下水修复系统优化设计中多目标问题的方法有很多,国内外学者的相关研究也较多,这些方法已比较成熟,在很大程度上可为地下水管理者在经济效益、社会效益和环境效益之间的均衡决策提供理论依据。

### 2.2.3 代理规划

传统的非线性规划、混合整数规划、多目标规划大多基于直接搜索法。但直接搜索法的一个显著缺点是计算成本巨大,计算效率低下。因此,近来间接搜索算法日益受到研究人员的关注。间接搜索算法中,一些代理模拟取代了初始数值模拟。多元回归分析、人工神经网络、逐步聚类分析等方法被用于代理模拟中。人工神经网络是一种捕捉复杂非线性关系的算法,具有良好的自学习、自适应、自组织性和容错性等特点,因此已用于辅助管理非线性地下水的相关问题。Rogers等<sup>[9]</sup>提出了一个非线性地下水管理方法,并借助人工神经网络来优化含水层修复系统。这个方法允许溶质运移模拟同时进行。其获得最优解的步骤如下:①通过人工神经网络来预测污染物的流动和运移情况;②运用人工神经网络来研究最佳的解决方案。案例研究的结果表明,人工神经网络能够独立处理地下水污染物的流动和运移模拟,而且由于是同时进行模拟,所以计算负担小。人工神经网络可以反映输入和输出数据之间的非线性映射,可以用来建立一些地下水修复系统优化模型,可以直接根据有关的数据通过神经网络的自学习能力寻求输出变量与输入变量间的内在非线性规律,而不需要事先确定模型的具体形式。但是人工神经网络也有局限性,如模型参数较多,且一般没有具体的物理意义。人工神经网络对具有大量拟合样本的情况特别适用,如果只有有限的样本,回归分析则是一种有效的方法。早期的研究中,制定优化模型时一般使用一阶近似方程代替地下水流动方程。然而,线性逼近模拟几乎不能很好地模拟由耦合非线性微分方程得到的关系,因此,数值模拟越来越多地被非线性逼近模拟取代。

### 2.2.4 结合风险分析的地下水修复系统优化及不确定条件下的决策

地下水污染的风险就是污染物通过各种途径损坏人体健康的概率。评价和分级地下水污染的严重程度,优先处理污染最严重的点,节约成本,体现系统优化设计的经济效益<sup>[10-11]</sup>。风险分析还能充分体现系统优化设计的社会效益。以前经常使用数值

模拟输出用来评价环境和人体健康的风险等级。实际上,准确估计模型参数和最优模型经常缺少足够的信息,导致决策的不确定性,因此,许多研究都集中建立不确定条件下的最优模拟框架,其中研究最广泛的是污染物在地下水中的运移预测。模型不确定性和参数不确定性的新型随机优化模型也是研究的热点<sup>[12]</sup>。风险与不确定性有内在联系,有关不确定性风险评价的地下水修复系统优化设计中,石油化工产品,如三氯乙烯、多氯联苯和苯系物等,因其所具有的严重危害性和致癌性,为目前被研究较多的污染物质。处理这些不确定性问题常用的方法有模糊法和随机法。

随机系统的特点是,系统信息的描述是不确定的,不确定性以概率的形式表现出来。对于这类随机的地下水修复系统优化设计问题,可以通过随机规划来处理。一般思路是根据模型中随机性信息的特点,按照一定的途径将其转化为确定性模型来求解。最具代表性的方法为蒙特卡洛法,它通过随机抽样技术、统计检验方法等,利用一系列随机数据来模拟随机变量的概率分布,采用反复抽样的方法产生多组随机数,从而为优化问题提供依据,或对系统决策进行检验。

Zhang 等<sup>[13]</sup>在多元不确定条件下开发出一种整体模糊随机方法,来评价苯系物污染地下水的风险。这种方法将区间模糊地下建模系统和综合模糊二阶随机风险评估模型整合在一起。区间模糊地下建模系统是在因子设计、区间分析和模糊集的基础上提出的,用于混合不确定性下的污染物质量浓度预测。综合模糊二阶随机风险评估模型在健康风险评估中,通过模糊、随机、二阶段随机参数,系统地量化变量和不确定性。这种方法被应用到加拿大西部的一个汽油污染场地的管理中,结果表明,该方法能有效地处理不同数据质量水平下的信息组合,从而得到合适的修复工作方案。模糊理论以地下水系统中不确定参数为研究对象,引入满意度可以清晰地表达出模糊集合和约束条件的关系。

地下水污染风险研究也有不少案例。为了设计成本较低的可持续污染场地管理系统,决策者需要恰当的工具(即环境决策系统)帮助他们规划、评估、选择、优化可能的方案。德国<sup>[14]</sup>、荷兰<sup>[15]</sup>等都已经开展了地下水风险的案例研究。根据荷兰土壤保护法,土壤被分为3个等级,即清洁、轻度污染、重度污染。对于轻度污染的土壤,采用可持续的方法管理,即在风险和土壤使用特定的最大值和背景值的基础上对土壤进行再利用。对于重度污染的土壤,原则上要进行土壤修复,修复的紧迫性取决于特

定场地的健康风险、生态系统、地下水的评估结果。荷兰主要的风险评估工具是土壤中关键污染物浓度模型(健康风险和食品安全)、物种敏感度分布图等。风险分析在地下水污染案例研究中已经逐渐成为为一个很重要的方法。

### 3 结 语

我国针对以经济、环境和社会效益为目标的地下水修复系统优化设计已经开发了多种方法,但在研究中还有几个突出的问题:对复合污染物处理的研究不多;理论方法不具有普遍的优越性;对不确定性问题的处理大多基于参数是独立不相关的假设,而这样的假设可能会导致模拟结果的不准确。

未来的地下水研究应着重考虑能同时去除地下水中的多种污染物。为了降低地下水修复系统优化设计框架中不确定性因素的干扰,以获得更精确的地下水修复政策,模拟优化方法必须对多种方法进行融合,并归纳这些方法的优点,以大大降低误差对决策结果的影响。未来的研究应侧重于寻求解决优化设计总框架下的混合不确定性问题。另外,地下水修复系统的优化设计应结合健康风险分析评价和不确定性问题的处理,使研究成果能为地下水修复政策的制定提供可靠的理论依据。

### 参考文献:

- [1] 赵勇胜. 地下水污染场地污染的控制与修复[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(2): 301-310. (ZHAO Yongsheng. Groundwater pollution control and remediation [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(2): 301-310. (in Chinese))
- [2] 杜东, 马震, 方成. 国内外地下水污染研究的现状及发展趋势[J]. 山西建筑, 2007, 33(2): 194-195. (DU Dong, MA Zhen, FANG Chen. The existing circumstance and developing tendency of the research on groundwater pollution at home and abroad [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(2): 194-195. (in Chinese))
- [3] 柏耀辉, 张淑娟. 地下水污染修复技术: 可渗透反应墙[J]. 云南环境科学, 2005, 24(4): 51-54. (BAI Yaohui, ZHANG Shujuan. Permeable reactive barrier as a remedy technology of contaminated groundwater [J]. Yunnan Environmental Science, 2005, 24(4): 51-54. (in Chinese))
- [4] 柳富田, 秦雨. 地下水石油污染的原位修复技术[J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2011, 12(3): 56-59. (LIU Futian, QIN Yu. In-situ remediation technologies for groundwater petroleum contamination [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2011, 12(3): 56-59. (in Chinese))

(下转第 18 页)

- electric network planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 24-29. (in Chinese))
- [ 5 ] 李如忠,汪家权,王超,等. 不确定性信息下的河流纳污能力计算初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 459-463. (LI Ruzhong, WANG Jiaquan, WANG Chao, et al. Calculation of river water environmental capacity under unascertained information [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 459-463. (in Chinese))
- [ 6 ] 王光远. 未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 1-9. (WANG Guangyuan. Unascertained information and its mathematical treatment [J]. J Harbin Archit & Civ Eng Inst, 1990, 23(4): 1-9. (in Chinese))
- [ 7 ] 刘开第. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [ 8 ] KARR J R. Defining and measuring river health [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 221-234.
- [ 9 ] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005(4): 15-18. (DONG Zheren. River health connotation [J]. China Water Resources, 2005(4): 15-18. (in Chinese))
- [10] 刘昌明, 刘晓燕. 河流健康理论初探 [J]. 地理学报, 2008, 63(7): 683-692. (LIU Changming, LIU Xiaoyan. Healthy river: essence and indicators [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 683-692. (in Chinese))
- [11] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 等. 健康河流的评价指标和评价标准 [J]. 水利学报, 2006, 37(3): 253-258. (GENG Leihua, LIU Heng, ZHONG Huaping, et al. Indicators and criteria for evaluation of healthy rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 253-258. (in Chinese))
- [12] 唐晓娇, 黄瑾辉, 李飞, 等. 基于盲数理论的水体沉积物重金属污染评价模型 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1104-1112. (TANG Xiaojiao, HUANG Jinhui, LI Fei, et al. Assessment model for heavy metal pollution in sediment based on the blind theory [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(5): 1104-1112. (in Chinese))
- [13] 闫峰, 刘凌, 徐丽娜, 等. 隶属度向量分析法在河流健康评价中的应用 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 30-32. (YAN Feng, LIU Ling, XU Lina, et al. Application of membership vector analysis in river health assessment [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(10): 30-32. (in Chinese))
- [14] 黄兴国. 河流健康评价理论研究及其应用[D]. 南京: 河海大学, 2012.
- [15] 赵焕臣. 层次分析法: 一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

(收稿日期: 2013-11-26 编辑: 徐娟)

(上接第4页)

- [ 5 ] 弓永峰. 地下水石油污染模拟及防治措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [ 6 ] 于福荣, 卢文喜, 李平, 等. 地下水管理模型求解方法综述[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 27-31. (YU Furong, LU Wenxi, LI Ping, et al. Review on optimization methods for groundwater management models [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 27-31. (in Chinese))
- [ 7 ] PERALTA R, KALWIJ I, WU S. Practical remedial design optimization for large complex plumes [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(5): 422-431.
- [ 8 ] MCKINNEY D C, LIN M D. Approximate mixed-integer nonlinear programming methods for optimal aquifer remediation design [J]. Water Resources Research, 1995, 31(3): 731-740.
- [ 9 ] ROGERS L L, DOWLA F U, JOHNSON V M. Optimal field-scale groundwater remediation using neural networks and the genetic algorithm [J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(5): 1145-1155.
- [10] 杜朝阳, 钟华平. 地下水系统风险分析研究进展 [J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 437-444. (DU Zhaoyang, ZHONG Huaping. Advances in risk analysis of groundwater system [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 437-444. (in Chinese))
- [11] 于勇, 翟远征, 郭永莉, 等. 基于不确定性的地下水污染风险评价研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 115-124. (YU Yong, ZHAI Yuanzheng, GUO Yongli, et al. Risk assessment of groundwater pollution based on uncertainty [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 115-124. (in Chinese))
- [12] HE L, HUANG G H, LU H W. A stochastic optimization model under modeling uncertainty and parameter certainty for groundwater remediation design: Part I. model development [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176: 521-526.
- [13] ZHANG X D, HUANG G H. Assessment of BTEX-induced health risk under multiple uncertainties at a petroleum-contaminated site: an integrated fuzzy stochastic approach [J]. Water Resources Research, 2011, 47(12): 30-32.
- [14] MCKNIGHT U S, FINKER M. A system dynamics model for the screening-levellong-term assessment of humanhealth risks at contaminated sites [J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 40: 35-50.
- [15] SWARTJES FA, RUTGERS M, LIJZEN J P A, et al. State of the art of contaminated site management in the Netherlands: policy framework and risk assessment tools [J]. Science of the Total Environment, 2012, 427: 1-10.

(收稿日期: 2013-12-04 编辑: 彭桃英)