



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

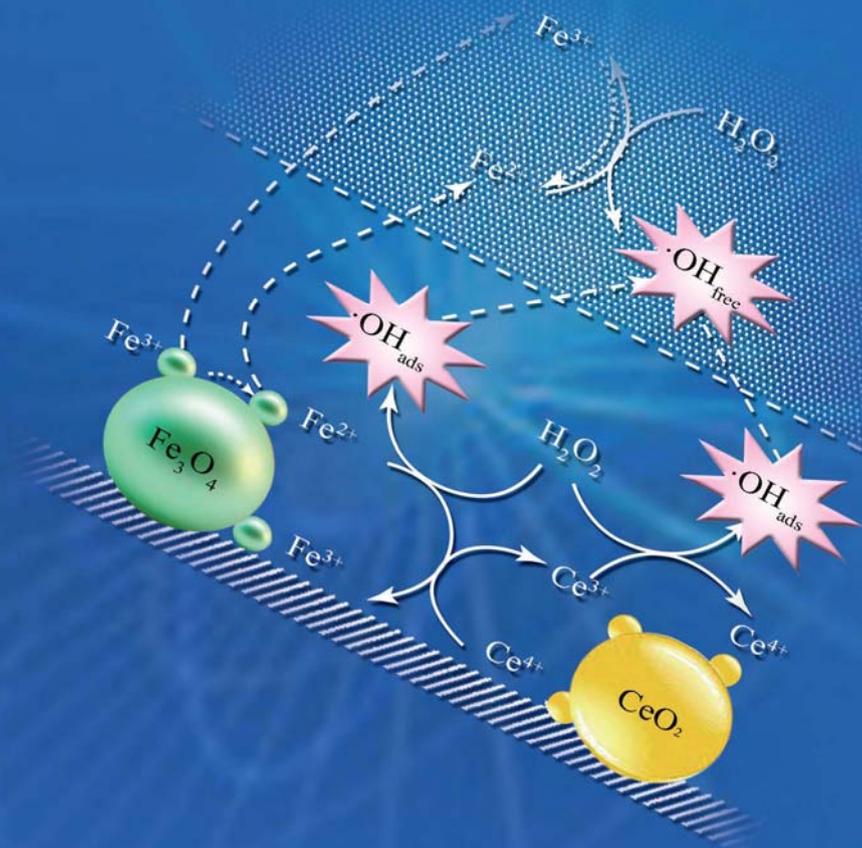
环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

封面文章

磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用

展思辉, 张宇, 朱丹丹, 等, 2016, 10(1): 1-11



中国科学院
生态环境研究中心

主办



科学出版社

出版

Vol. 10 No. 1

2016.1

目次

综 述

磁性 Fe₃O₄ 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用 展思辉 张宇 朱丹丹 邱明英 于雯超 史强 (1)

水 污 染 防 治

人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除 黄翔峰 王坤 陈国鑫 陆丽君 刘佳 (12)

选矿废水中黄药的生化处理 夏丽娟 胡学伟 张雅琳 靳松望 王亚冰 (21)

增强型中空纤维膜生物反应器处理污水 赵微 肖长发 权全 胡晓宇 环国兰 (27)

TEMPO 氧化微晶纤维素和马来酸酐接枝微晶纤维素的制备及对 Cu²⁺ 的吸附 杨阳 王一宁 潘远凤 肖惠宁 (33)

利用活性氧分子消除污水中的 COD 白敏蔚 毛首蕾 李超群 周建纲 (38)

污水颗粒尺寸分布对深度过滤中雌激素去除的影响 胡碧波 阳春 刘达 (43)

于桥水库溶解性有机碳分布特征及三卤甲烷的生成势 牛志广 魏晓婷 张颖 (48)

不同 pH 下纳米级天然黄铁矿对水中 ReO₄⁻ 的去除规律 丁峰 钱天伟 丁庆伟 赵东叶 崔晋艳 王莉霄 (55)

聚酰胺小球负载 *Comamonas* sp. (bdq06) 生物降解水中的喹啉 蔺烧 陈瑜 郭树君 邵德武 耿直 霍明昕 刘志强 朱遂一 (60)

草酸改性柚子皮对废水中镉离子的吸附性能 毛艳丽 康海彦 吴俊峰 (65)

合肥城郊典型排水沟渠沉积物磷形态及其释放风险 唐文坤 李如忠 钱靖 金菊良 常笑 (73)

新型缓释碳源的制备及其性能 王润众 郝瑞霞 赵文莉 (81)

乳液电纺纤维膜固定化漆酶及其对水中酚类污染物的降解 袁钰 代云容 宋永会 于彩虹 (88)

螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用 李雪娟 和树庄 常学秀 谭福广 申意 陆福田 侯文通 (95)

HRT 和 SRT 对 AO 工艺去除四环素及耐药菌的影响 郑宇 黄满红 陈亮 徐奇 (103)

对乙酰氨基磺酰氯生产废水的 UASB 处理及硫酸盐的影响 李伟成 张红 戚伟康 牛启桂 刘宇宇 李玉友 高迎新 (110)

炼化污水的厌氧生物预处理技术 王宇 许双双 阎光绪 王庆宏 李敏 马文峰 马静园 郭绍辉 (115)

多胺改性 PGMA-DAAM 树脂的合成及对 Pb²⁺ 的吸附性能 杨迎霞 宋明超 陶子元 刘春萍 (121)

光催化剂磷酸钾的制备及结构表征 刘天成 黄家卫 王天丽 唐光阳 贾丽娟 王博涛 王红斌 (127)

重庆市加油站周边浅层地下水中石油烃污染调查与特征分析 赵丽 张韵 郭劲松 张丹 邓春光 (131)

太湖地区典型降雨水稻田径流污染物输出特点及相关性分析 陈育超 李阳 于海明 乔斌 孙井梅 (137)

铁屑耦合生物麦饭石的 PRB 系统修复含铬酸根与硝酸根地下水 狄军贞 朱志涛 戴男男 江富 (145)

山核桃加工废水的成分测定与分析 张贝贝 刘文洪 李俊峰 叶志青 (150)

煤基活性炭的改性及其对含铜废水的吸附性能 吕游 刘树根 谢容生 宁平 谷俊杰 (157)

以养殖固体废弃物发酵产物为碳源的 SND 系统的脱氮除磷效果 成小婷 罗国芝 李丽 谭洪新 (163)

石墨烯/TiO₂ 复合物的制备及其光催化性能 张宏忠 秦小青 王明花 (169)

剩余污泥对活性黑和酸性大红混合染料的吸附 王春英 黄平清 黄晓霞 刘茹 (175)

狭叶香蒲活性炭对 Cd²⁺ 与 Pb²⁺ 的吸附及机理分析 舒艳 李科林 宋金凤 李冰 汤春芳 (181)

催化湿式氧化法处理垃圾渗滤液 蔡先明 秦侠 张丽 崔红蕊 (189)

印染废水中氮硫形态转化和去除效率 王学华 李蕾 刁新星 王浩 (194)

反硝化生物滤池用于再生水脱氮效能及动力学研究 高建锋 杨碧印 赵建树 张金松 (199)

TiO₂ 光催化耦合 SO₄²⁻ 体系对硝基苯酚的降解性能及动力学 唐海 沙俊鹏 颜酉斌 蔡昌凤 王军刚 (205)

铁碳微电解/H₂O₂ 耦合类 Fenton 法预处理高浓度焦化废水 殷旭东 李德豪 毛玉凤 朱越平 刘正辉 (212)

生化-Fenton 氧化联合工艺处理石化净化水的回用 王永超 李玉平 陈娟 (217)

模拟优化模型在地下水监测布井中的应用 熊锋 苏婧 翟秋敏 孙源媛 吴超 姜永海 席北斗 (223)

活性炭负载 CuO 催化过硫酸盐去除活性艳红 X-3B 染料 王宇轩 王应军 方明珠 (230)

生物接触氧化法应急处理原水突发性藻类污染 许骆 罗建中 邓俊强 刘敏强 (237)

次氯酸钠降解水中萘普生的效果 纪夏玲 吕文英 李富华 陈平 李若白 范斯娜 姚琨 张祥丹 刘国光 (243)

大 气 污 染 防 治

活性炭纤维负载功能化离子液体的脱硫性能 王建英 张丽喆 穆惠英 陈莹 胡永琪 (248)

滤袋式膜生物反应器净化二甲苯 徐孟孟 陈效 蒋轶锋 吴成强 (257)

电极配置对多针-板脉冲等离子体反应器放电特性的影响 董冰岩 周海金 施志勇 黄芸伟 丁奇岷 王晖 (262)

油茶果壳炭对油烟的吸附性能	刘超 廖雷 覃爱苗	周江喜 彭娟(267)
防止中小型锅炉脱硫除尘一体化系统中引风机积灰振动的研究		吕太 贺培叶(272)
程序升温脱附法测定活性炭上酯类有机物的脱附活化能	任爱玲 孟少左 田森	张丁超 韩梦非(277)
大流量低浓度 VOCs 气体二次吸附浓缩净化技术开发		
.....	苟志萌 李照海 何娇 羌宁 覃兰雪	徐素玮 曹熠(283)
挥发性有机物生物增溶性能及效果		王国惠 许亚楠 李慧敏(289)
制备条件对锰氧化物 SCR 脱硝性能的影响	刘育松 高凤雨 唐晓龙 易红宏	赵顺征 曹雨萌(295)

固体废物处置

水泥回转窑共处置含砷污泥	熊正为 朱雷 杨博豪 魏清伟 陆森(301)	
进出料频率对牛粪两相厌氧发酵特性的影响	王光远 李文哲 李骞 蔡康妮 王忠江(306)	
城市污泥过热蒸汽薄层干燥初始段凝结特性	张绪坤 孙瑞晨 王学成 温祥东 吴起 邢普(311)	
家电报废量预测模型与安徽省实例分析	刘志峰 张雅堃 黄海涛 薛亚琼 王玲(317)	
药渣与煤共热解动力学模型及逸出气红外特性分析	刘宝宣 蒋旭光 吕国钧 王飞 池涌 严建华(323)	
温度对热水解预处理高含固污泥特性的影响	程瑶 韩芸 卓杨 代璐 彭党聪(330)	
疏浚底泥固化改性资源化利用技术		武博然 柴晓利(335)
利用旋转炉热解城市污泥的产物特性	王学涛 张兴宇 徐斌 兰维娟(343)	
次氯酸钠氧化废轮胎胶粉对改性沥青性能的影响		
.....	于凯 张琛 王欢 张楠 陆宇鹏 李彤彤 李沁宇 刘双喜(350)	
聚乙烯醇/超细羽绒粒子共混膜的制备及其染料吸附动力学		
.....	陈凤翔 谢文雅 董兵海 王世敏 赵丽 许祖勋 万丽(355)	
以粉煤灰为原料制备高纯度 NaP 型分子筛	周慧云 徐婷婷 陈彦广 解聪浩 宋华(360)	
核桃壳骨架构建剂对污泥脱水性能的影响	董凌霄 丁绍兰 谢林花 蔡丽 杨慧佳(365)	
巢湖蓝藻酸提取液提高玉米秸秆的酶解效率	吴玉杰 王进 崔康平 洪天求 岳正波(370)	
稻壳基高比表面积介孔活性炭的制备与表征	薛广钊 侯贵华 乔仁静 董鹏玉 张勤芳(375)	
改性油菜秸秆对 Co(II) 的吸附		汪洋 吴纓(379)
化工污泥基轻质填料的制备及其应用	俞敏洁 胡俊 孙婧 李溪 徐炎华(385)	
不同碱剂对污泥与餐厨垃圾联合厌氧发酵产氢余物产甲烷的影响	郑育毅 林鸿 林志龙 罗鸿信 刘常青(393)	
废弃 LCD 面板金属钢的超声协同浸出	庄绪宁 李英顺 杨义晨 胡冰倩 赵颖璠(399)	
脉冲电场在污泥处理中的应用	姜俊杰 梁美生 李伟 裴旭倩(405)	

土壤污染防治

外源铅在不同类型土壤的形态转化		宋波 曾炜铨(410)
荧光假单胞菌产铁载体对油菜吸收砂基和水基中镉的影响	晋银佳 刘文 朱跃 王丰吉(415)	
再生水灌溉区土壤对头孢噻肟的吸附特征	虞敏达 张媛 张慧 檀文炳 高如泰 席北斗 杨津津(421)	
化学氧化法治理焦化厂 PAHs 污染土壤	杨勇 张蒋维 陈恺 李忠博 李洪旺 牛静 王瑜瑜(427)	
循环流化床燃煤固硫灰改良云南红粘土	李勇辉 王群英 邓庆德 景文斌 张石华(432)	

生态修复工程

不同沉水植物组配对北大港水库水体净化效果的影响	常素云 吴涛 赵静静(439)
生态修复工程对城市内河水体细菌多样性的影响	唐方园 张秋芳 周阳靖 陈力行 徐继荣 程军蕊(445)
组合型生态浮床处理农家乐污水	王郑 崔康平 许为义 孟蓉 孙鹏 陈鸿汉(455)
微宇宙法研究环境因子对南方典型梯级水库群藻类生长的影响	周利 朱嘉成 朱佳 高静思(461)

环境生物技术

水葫芦多环芳烃含量及其与脂肪含量的关系	杨海燕 郭金鹏 卢少勇 曲洁婷 贾九敏(467)
金鱼藻对不同扰动方式下悬浮物的生理响应	张翠英 王丽萍 万蕾 张后虎(473)
以不同底物和苯胺为燃料的微生物燃料电池的产电特性	佟海龙 黄力群 何燕 刘解答 刘承鸿 于荆(480)
含固率和电极间距对牛粪发酵产电性能的影响	王成显 张艺臻 吴淑娜 张小梅 沈建国 丁仕林 辛言君(485)

工程实例

城镇污水处理厂的综合绩效评价	魏亮 陈滢 刘敏 翟宇超(490)
膜工艺在电镀废水处理工程中的应用	夏仙兵 蔡邦肖 缪佳 林建平 倪政(495)

环境监测与评价

SPE-HPLC 法检测环境水样中的痕量三氯卡班	朱开杭 曾庆玲 沈春花 周真明 李飞(503)
--------------------------------	-------------------------

模拟优化模型在地下水监测布井中的应用

熊 锋^{1,2} 苏 婧^{1*} 翟秋敏² 孙源媛¹ 吴 超¹ 姜永海¹ 席北斗¹

(1. 中国环境科学研究院,北京 100012; 2. 河南大学环境与规划学院,开封 475001)

摘 要 以北京市某农田用地地下水监测井为研究对象,基于农田水文地质参数建立了地下水多目标模拟优化模型。结合 Monte Carlo 分析法分析了地下水水流模型和溶质运移模型参数的不确定性,并求解了单口监测井的影响半径,最后借助 NSGA-II 算法建立了两个目标函数之间的权衡关系。模型求解结果表明,监测系统可靠性目标最大为 76.8%,对应的监测井数量最小为 3 口;当扩大污染羽的控制边界时,可以建立 4 口监测井。研究结果表明,模拟优化模型可以用于地下水监测井布井优化当中,建立两个目标函数之间合理的权衡关系,确定监测井的数量和位置,保证监测系统的可靠性。

关键词 模拟优化模型 非支配排序遗传算法 多目标优化 监测网优化 地下水

中图分类号 P641.74;X523 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)01-0223-07

Application of simulation optimization model in groundwater monitoring well optimization

Xiong Feng^{1,2} Su Jing¹ Zhai Qiumin² Sun Yuanyuan¹ Wu Chao¹ Jiang Yonghai¹ Xi Beidou¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract A multi-objective simulation optimization model for groundwater monitoring network design was established based on the hydrogeological data of a farmland in Beijing. The groundwater flow and solute transport was simulated using MODFLOW and MT3DMS, with the parameter uncertainty analyzed by Monte Carlo method. Non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was used to optimize the two objective functions in the optimization model, where one was to maximize the monitoring reliability, and the other was to minimize the monitoring cost. The result showed that the maximal reliability of the monitoring system reached 76.8% when the number of the monitoring well was 3, with the presence of well 5, well 6, and well 8. A fourth well (well 10) could be adopted when the control boundary for the pollution plume extended. The case study indicated that the simulation optimization model can be used in groundwater monitoring well optimization to establish the trade-off relationship between the two objective functions, to obtain the number and location of the monitoring wells, and to guarantee the reliability of the monitoring system.

Key words simulation optimization model; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II); multi-objective optimization; optimizing design of monitoring network; groundwater

地下水是水资源的重要组成部分^[1],近几十年来,随着人为活动对地下水污染的不断加剧,地下水水质监测和地下水污染物修复逐渐成为地下水管理的主要内容^[2]。在地下水污染场地建立长期有效的监测系统,将为地下水管理提供有效的依据^[3]。随着地下水监测系统的发展,一些研究者发现,世界各国都存在数据丰富但信息贫乏的问题^[4,5]。因此,近年来地下水监测井网优化设计的作用越发凸显。

地下水环境复杂,污染状况呈动态变化,加之大部分地下水污染场地调查不够充分,通过现有监测井网的刻画实际地下水污染物的污染羽状况十分困

难。目前,将地下水数值模拟模型和优化模型的耦合技术——模拟优化模型是比较科学的监测井网设计方法^[6,7]。模拟优化模型既可以反映地下水系统本身固有的规律,又可以在面临决策问题时考虑多重因素,提供最佳监测井布设方案。国内外均有利用模拟优化模型设计地下水监测井网的研究^[8,9]。

基金项目:全国地下水基础环境状况调查评估(2031002001)

收稿日期:2015-03-05; 修订日期:2015-04-23

作者简介:熊锋(1988—),男,硕士研究生,主要从事地下水数值模拟和地下水优化布井研究。E-mail: xiongfengde@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sujing169@163.com

随着 Meyer P. D. 等^[10]首次利用 Monte Carlo 分析法解决地下水监测井优化的不确定性参数, He L. 等^[11-13]、Datta B. 等^[14,15]、Gorelick S. M. 等^[16]、Khalil A. 等^[17]分别提出了解决模拟优化模型不确定性参数的随机模型,并进行了地下水源强识别和地下水污染物修复监测井优化设计; Reed P. 等^[18,19]基于迁移转化模型和遗传算法建立了一个长期的地下水监测系统,构建了 4 个目标函数,完成了地下水监测系统的多目标优化,并指出了地下水多目标优化的必要性。Yenigül N. B. 等^[20]耦合有限差分法和粒子示踪模型,结合 Monte Carlo 分析法模拟了垃圾填埋场的垃圾渗滤液的泄露情况,最后评价了优化后的监测网的可靠性;最近, Bashi-Azghadi S. N. 等^[21,22]在数值模拟的基础上,结合概率支持向量机和概率神经网络,利用非支配排序遗传算法对未知源强进行识别,并优化了监测井的位置。

这些模型大多只考虑监测效果或者监测成本,缺少可靠性评估,但是在实际建井的过程中,往往需要在监测效果和成本之间进行权衡,而且模型的参数不确定性问题也难以避免。本研究为解决地下水监测井优化多种复杂关系和不确定性参数的问题,构建了地下水水流模型和溶质运移模型,以地下水氨氮监测系统可靠性最大化和监测井数量最小化为目标,构建了地下水监测井多目标优化模型,并进行分析和对比。

1 研究方法

1.1 监测网多目标优化模型

优化模型中地下水监测井的设计需要考虑监测井数量、位置等因素,而监测系统的可靠性则需要考虑监测系统能否反映地下水实际情况。监测井数量越少,建井成本越低,更符合决策者要求;监测井数量越多,监测覆盖的面积就越大,监测系统能够反映的水文地质信息就越多,监测系统越可靠。因此,监测井的模拟优化模型需要在监测可靠性和监测井数量之间进行权衡。地下水监测井优化设计是以监测井数量最小和监测系统可靠性最高为目标,设立监测井网,数学公式如下:

监测井数量最小化目标:

$$\text{Min}Z1 = N \quad (1)$$

监测井系统可靠性最大化目标:

$$\text{Max}Z2 = \sum_{i=1}^{i=N} \pi R_i^2 \quad (2)$$

约束条件:

$$01 \leq N1 \leq 40 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{i=N} \pi R_i^2 \leq S \quad (4)$$

式中: N 是监测井的数量,正整数, $N = (0, 1, 2, \dots, 40)$,这使得优化模型成为多目标非线性混合整数规划模型; S 是研究区域的总面积; R_i 是 i 井对水流模型的影响半径,跟降雨入渗系数、池塘入渗补给系数和渗透系数有关。

1.2 影响半径的确定

1.2.1 地下水水流模拟和溶质运移模拟

地下水水流模拟和溶质运移模拟分别由两个常用软件 MODFLOW 和 MT3DMS 建立^[23,24]。水流模块 MODFLOW 可以提供模拟优化模型所需的水头,溶质运移模块 MT3DMS 则为优化模型提供氨氮的污染羽。MODFLOW 水流方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

式中: K_x 、 K_y 、 K_z 分别为渗透系数在 x 、 y 、 z 方向上的分量; h 为水头 (m); w 源汇项; S_s 表示贮水率 (m^{-1}); t 为时间 (d)。MT3DMS 地下水溶质运移方程如下:

$$\frac{\partial(\theta c^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \theta D_{ij} \frac{\partial c^k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i c^k) + q_s c_s^k + \sum R'_n \quad (6)$$

式中: θ 表示孔隙度 (无量纲); c^k 表示溶质组分 k 的浓度 (mg/L); D_{ij} 是弥散系数张量 (m^2/d); v_i 是孔隙中实际水流速度 (m/d); q_s 表示源汇项 (d^{-1}); c_s^k 是源汇项溶质组分 K 的浓度 (mg/L); \sum 表示化学反应项总和 (mg/(L·d))。本研究再根据收集到的水头数据和氨氮浓度反推得到降雨入渗系数、池塘入渗补给系数和渗透系数,这一过程需要借助 Monte Carlo 分析法来完成。

1.2.2 蒙特卡洛分析法求解不确定性参数

水文地质参数的不确定性会影响监测井的布井位置,可采用 Monte Carlo 分析法排除这些不确定性

带来的干扰。Monte Carlo 分析法的基本思想是,为了求解数学、物理、工程管理等方面的问题,建立一个概率模型,使它的参数等于问题的解;然后通过对模型的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征,最后给出所求解的近似值。Monte Carlo 分析不受水文地质参数随机波动的限制,对地下水数值模拟具有极强的适用性和可行性。

在数值模拟中, Monte Carlo 分析法 3 个主要步骤分别是: (1) 构建降雨入渗系数、池塘入渗补给系数和渗透系数的概率分布函数; (2) 分别对 3 个概率分布函数进行随机抽样, 并将抽样结果代入 MODFLOW 和 MT3DMS 中; (3) 分析 MODFLOW 和 MT3DMS 的运行结果, 并将降雨入渗系数、池塘入渗补给系数代入 MODFLOW 水流方程和 MT3DMS 溶质运移方程之中, 模拟得到地下水水头值和氨氮浓度值, 再与收集到的水头和氨氮浓度进行比较、校正。Monte Carlo 分析法通过以上 3 个主要步骤反复抽取随机参数, 直到得到降雨入渗系数、池塘入渗补给系数和渗透系数的近似值。最后将 Monte Carlo 分析得到的近似值代入影响半径的线性方程, 求解影响半径的变化规律。

1.2.3 影响半径求解

首先利用初始水文地质参数调试地下水水流模型, 筛选出改变影响半径的参数; 再根据地下水水流模型得到的监测井影响半径的大小, 建立影响半径与相应参数之间的数学关系。为求解二者之间的数学关系需要借助概率密度分布函数^[25,26], 根据 Deb K 等的求解经验, 本研究构建了一维线性关系。单个监测井监测到的氨氮浓度可以代表一定范围内氨氮的平均浓度, 而该范围内的影响半径取决于数值模拟中设定的降雨入渗系数 r_1 、池塘入渗补给系数 r_2 和水平渗透系数 k 的大小。假设监测井的影响半径与 r_1 、 r_2 和 k 之间符合线性关系 $R_i = a * r_1 + b * r_2 + c * k$, 为了得到这一线性关系, 本研究在 Monte Carlo 分析结果的基础上, 结合水流模型和溶质运移模型中抽水井的影响半径, 计算了不同水文地质参数对应的监测井影响半径。影响半径的求解借助 matlab 编程得到。

1.3 NSGA-II 算法求解多目标优化模型

本研究采用非支配排序遗传算法 NSGA-II

(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 解决地下水监测系统多目标优化问题^[25,26], 该算法采用快速非支配排序法和精英策略, 以拥挤度水平作为同级别判断标准, 保证了种群水平和种群多样性。NSGA-II 算法还避免了单独计算不同数量监测井系统的可靠性, 减少计算量。本研究的优化目标 Z1 为监测井的数量 N; 目标 Z2 为监测系统的可靠性, 主要取决于影响半径 R_i 。NSGA-II 主要流程如下:

(1) 首先初始化一个父代监测井群 P0 (监测井潜在位置), 种群大小 (即监测井数量) 为 N, 将所有监测井按非支配关系排序并给定一个适应度值;

(2) 然后通过交配、变异等遗传算子产生新的子代监测井群 Q0, 监测井数量仍为 N;

(3) 再将 P0 和 Q0 合并组成 R0, 此监测井数量为 2N。对 R0 进行非支配排序, 先将 R0 中的第一非支配解集 F1 放入新的父代监测井群 P1 中。如果 F1 的数量小于 N, 则向 P1 中添加下一非支配解集 F2, 直到添加 F_i 时, 监测井的数量大于 N, 再对 F_i 进行拥挤度排序, 取前 N-P1 个监测井加入到 P1 中, 使得 P1 的数量达到 N。再采用遗传算子产生新的子代监测井群 Q1;

(4) 以此类推, 直到达到最大进化代数或产生 Pareto 前沿, 终止 NSGA-II。

本研究中, NSGA-II 算法的目标函数是监测井的数量和监测系统的可靠性。通过 NSGA-II 算法建立两个目标函数的权衡关系, 首先得到监测井的数量 N, 并确定监测井的位置, 再根据 Pareto 前沿对照可靠性最大化目标 Z2, 得到最大监测面积, 计算监测系统的可靠性。关于 NSGA-II 更详细的说明可以参考 Deb K 等人的研究。

2 参数分析

2.1 区域概况

研究区域位于北京市某农田用地, 农田地处燕山南麓, 华北平原北端, 属潮白河冲积扇下段。农田占地面积约为 13 500 m², 东北侧有一养殖场, 西南侧均为当地居民耕作农田, 西北侧有一口池塘, 养殖场的废水均直接排入池塘, 北侧距离居民区 30 m。根据场地调查资料显示, 研究区可分为 14 个地质层, 其中包括 6 个含水层^[27]。本研究利用 GMS 软

件的 MODFLOW 和 MT3DMS 两个模块模拟了第 2 含水层,即第 5 地层,第 2 含水层为非承压含水层,含水层顶板埋深 12 ~ 14.6 m,含水层平均厚度 3.46 m,以砂质粉土、粉细砂为主,局部夹有粉质粘土。

2.2 地下水水流模型和溶质运移模型参数分析

2.2.1 地下水水流模型及模型参数

农田用地含水层的水平渗透系数由抽水试验通过 Aquifer Test 得到,平均值为 3.51 m/d;同样得到农田池塘入渗补给系数和降雨入渗系数分别为 0.025 和 0.009。因农田占地面积较小,可将第 2 含水层模拟成均质含水层。研究区域剖分成 5 m × 5 m,水流方向为由北向南,初始流场如图 1,初始水力坡度为 0.01,南北边界为定水头边界,含水层厚 3.46 m,有效孔隙度为 0.3。研究区域内有一口抽水量为 880 m³/d 的抽水井。模型运行 365 d,时间步长为 13 d。

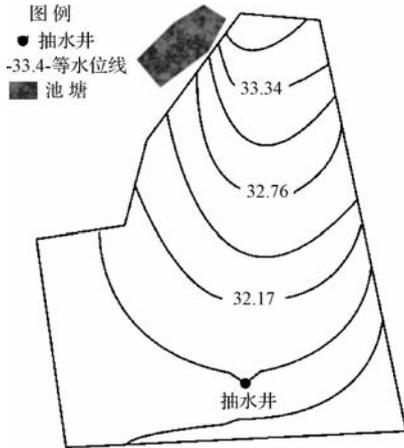


图 1 农田等水位线现状

Fig. 1 Initial head of farmland

2.2.2 地下水溶质运移模型参数

在保存 MODFLOW 模型解的基础上,使用 MT3DMS 模型。MT3DMS 是一个多组分模型,需要提前定义氨氮的对流、扩散项和源汇混合相。本研究以池塘为污染源,池塘氨氮浓度为 6.8 mg/L,模拟氨氮随地下水迁移的情况,模拟时长为 365 d。农田用地氨氮污染羽如图 2 所示。

2.3 监测井影响半径分析

监测井影响半径需要通过 Monte Carlo 分析,根据降雨入渗系数 r_1 、池塘入渗补给系数 r_2 和渗透系

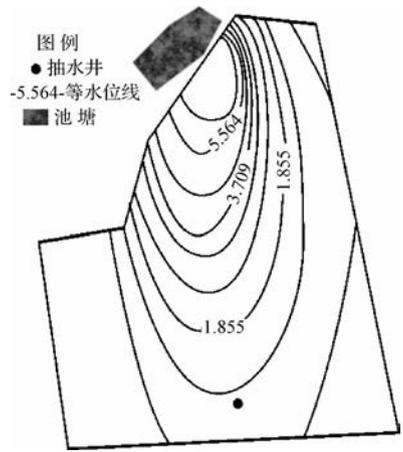


图 2 农田地下水氨氮污染羽

Fig. 2 Initial groundwater ammonia nitrogen contamination plumes

数 3 个参数确定, Monte Carlo 分析计算次数为 600 次, r_1 和 r_2 分别在 [0.004, 0.015] 和 [0.005, 0.025] 区间内随机分布,渗透系数 k 在 [1, 20] 上平均分布。 r_1 、 r_2 和 k 为不同的量纲,构建数学关系之前需要分别将 r_1 、 r_2 和 k 进行归一化处理,处理公式如下:

$$k' = (k - k_{\min}) / (k_{\max} - k_{\min})$$

式中: r_1' 和 r_2' 计算方法同 k' 。再利用地下水水流模型得到的不同的影响半径建立 R 与 r_1' 、 r_2' 和 k' 之间的数学关系。本研究得到 R 与 3 个系数之间的线性关系为 $R_i = 46.5r_1' - 39.2r_2' - 14.3k'$ 。为了验证 R 分布函数的可靠性,选取校准完成的 3 个水流模型和溶质运移模型的参数和抽水井的影响半径进行了验证。结果见表 1, 9 组验证数据的计算值均与模拟值的相对误差处于一个较小的范围内,表明 R 的分布函数具有一定的可靠性。

3 结果与讨论

3.1 NSGA-II 算法优化目标函数的 Pareto 前沿

设定的相关参数:种群大小为 40,迭代次数为 100,交叉概率为 0.5,变异系数为 0.5。NSGA-II 算法建立了 NSGA-II 算法多目标模拟优化模型中目标函数的 Pareto 前沿,见图 3,其中 Z1 为监测井数量, Z2 为监测系统可靠性。目标函数的 Pareto 前沿开始随着监测井数量的增加而迅速增加,后期变化趋

于缓慢,最后逐渐收敛。根据 MATLAB 返回值 $[x, fval, exitflag, output]$ 中的 $exitflag$ 和 $fval$ 来衡量了多组解的好坏,最后确定图 3 中 Pareto 前沿的 $fval$ 最小,此时的收敛性最好。当监测井的数量为 25 时, Pareto 前沿开始收敛,再增加监测井的数量对可靠性目有贡献较小。

表 1 影响半径可靠性分析

Table 1 Reliability analysis of radius of influence of monitoring wells

序号	r_1	r_2	k	R 模拟	R 计算	相对误差 (%)
1	0.014	0.021	3.5	9.1	9.03	-0.77
2	0.013	0.019	3.2	8.9	8.95	0.56
3	0.012	0.017	3.0	8.9	8.79	-1.24
4	0.012	0.014	3.3	9.3	10.21	9.78
5	0.011	0.015	2.8	9.1	8.64	-5.05
6	0.010	0.013	2.5	9.0	8.56	-4.89
7	0.010	0.012	3.1	9.2	10.06	9.35
8	0.009	0.011	2.2	8.8	8.47	-3.75
9	0.008	0.009	2.0	9.0	8.32	-7.56
10	0.006	0.005	1.5	9.1	8.86	-2.64

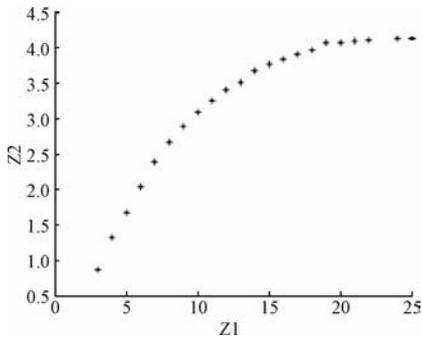
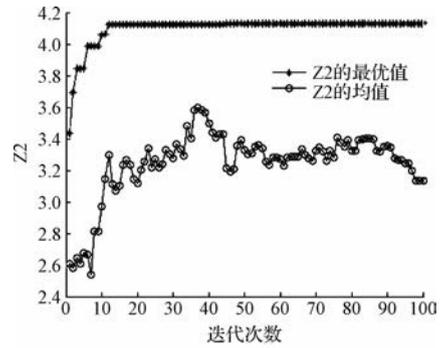


图 3 NSGA-II 算法优化目标函数的 Pareto 前沿

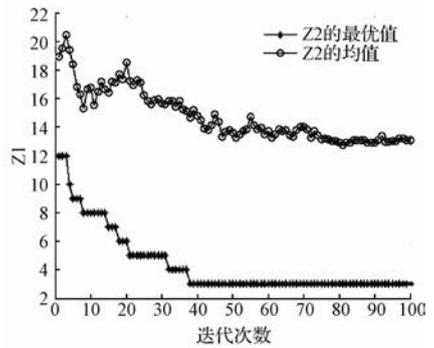
Fig. 3 Pareto optimality of objective functions of NSGA II

图 4 显示了 NSGA-II 算法遗传代数与目标函数优化的收敛趋势。图 4(a)显示监测系统可靠性最大化目标在计算 10 代后趋于收敛;图 4(b)监测井数量最小化目标在前 20 代计算波动性较大,在计算 40 代后目标函数趋于收敛。NSGA-II 算法能进一步识别监测井的最佳组合,在监测系统可靠性最大

的情况下,全局优化监测井的数量,使得优化结果可信。



(a) NSGAII 算法的 Z2 的迭代曲线



(b) NSGAII 算法的 Z1 的迭代曲线

图 4 目标函数优化收敛性

Fig. 4 Convergence of objective optimization model

3.2 监测井数量和位置的确定

根据目标函数的 Pareto 前沿可知,在农田总面积 $13\ 500\ m^2$ 的前提下,为确保最大化监测系统可靠性目标,监测井的数量最小为 3,此时最大监测面积为 $10\ 370\ m^2$;当监测井数量为 4 时,最大监测面积为 $13\ 770\ m^2$,大于农田面积 $13\ 500\ m^2$ 。由此可知,3 口监测井是多目标模拟优化模型的非劣最优解,建立 4 口监测井会给监测系统带来冗余。优化方案的误差需根据农田的实际面积来判断,因监测井的数量为整数规划,所以两种优化方案均存在一定的误差,根据实际监测网布设的经济效益推荐建立 3 口监测井的优化方案,两种方案的对比见下表 2。根据 MT3DMS 模拟到的氨氮污染羽的扩散情况来看,当氨氮的控制浓度较高时,建立 3 口监测井就可以满足模型的解;当氨氮控制浓度较低时,污染羽边界扩散范围较大时,可以考虑采用 4 口监测井。监测井的位置见图 5。

NSGA-II 算法根据精英策略直接确定了 3 口或

者 4 口监测井的位置,相比于普通 NSGA 算法计算效率更高,普通 NSGA 在得到 3 口井之前还会分别计算建立 1 口和 2 口监测井时的最优解。

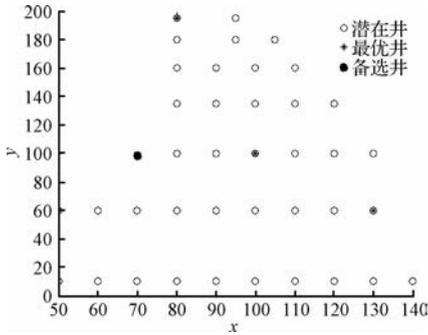


图 5 最优监测井的位置

Fig. 5 Best location of monitoring wells

表 2 监测井位置和监测系统的可靠性

Table 2 Location and reliability of monitoring wells

监测井数量	监测井编号	监测面积(m ²)	监测概率(%)
3	19,23,39	10 370	76.80
4	19,20,23,39	13 770	102

从图 5 可知,3 口监测井分别位于氨氮污染羽的源强、中位线和污染羽边缘上,并成三角形分布,保证了最大的监测区域,同时也符合研究区域的地下水水流场的分布状况。研究区域地下水水流方向为由北向南,氨氮的浓度也由北向南逐渐降低,3 口监测井可以满足不同浓度梯度的监测。备选井的位置首选污染源的正下游,并以靠近中位线为最佳。

4 结论

本研究以北京市某农田用地水文地质资料为基础,利用 GMS 相关模块建立农田地下水水流模型和氨氮溶质运移模型,并用 Monte Carlo 分析法分析了水文地质参数的不确定性,在上述工作的基础上建立了地下水监测井布设的多目标模拟优化模型,模型通过 NSGA-II 算法进行了优化计算。为使得监测系统的可靠性目标最大化,NSGA-II 优化的监测井数量为 3 口,监测井位置分别为 19 号、23 号和 39 号监测井。

模拟优化模型结果表明,最佳监测井的位置应分别位于氨氮污染羽的上中下游,并呈三角形分布,

3 口监测井的监测系统可靠性目标最大,最大为 76.8%。如果降低环境控制标准,污染羽的边界将会扩散到农田用地以外的区域,此时需要考虑 4 口监测井的布设方案。

地下水数值模拟软件 GMS 结合 NSGA-II 可以解决地下水监测网多目标非线性混合整数规划的问题,设计出合理的监测井布设方案和符合地下水管理的可靠性目标,为地下水污染场地监测提供科学的指导。

参考文献

- [1] 姚治华,王红旗,李仙波,等.北京顺义区地下水饮用水源地安全评价.水资源保护,2009,25(4):91-94
Yao Zhihua, Wang Hongqi, Li Xianbo, et al. Safety assessment of underground drinking water sources in Shunyi District of Beijing. Water Resources Protection, 2009, 25(4): 91-94 (in Chinese)
- [2] McKinney D. C., Lin M. D. Genetic algorithm solution of groundwater management models. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1897-1906
- [3] Zhou Yangxiao, Dong Dianwei, Liu Jiurong, et al. Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. Geoscience Frontiers, 2013, 4(1): 127-138
- [4] Ward R. C., Loftis J. C., McBride G. B. The "data-rich but information-poor" syndrome in water quality monitoring. Environmental Management, 1986, 10(3): 291-297
- [5] 陈植华.地下水观测网的若干问题与基于信息熵的研究方法.地学前缘,2001,8(1):135-142
Chen Zhihua. Some confusions in groundwater monitoring network and the entropy method. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 135-142 (in Chinese)
- [6] Mahar P. S., Datta B. Optimal monitoring network and ground-water-pollution source identification. Journal of Water Resources Planning and Management, 1997, 123(4): 199-207
- [7] Asefa T., Kemblowski M. W., Urroz G., et al. Support vectors-based groundwater head observation networks design. Water Resources Research, 2004, 40(11): W11509
- [8] Asefa T., Kemblowski M., Urroz G., et al. Support vector machines (SVMs) for monitoring network design. Groundwater, 2005, 43(3): 413-422
- [9] Wu Jianfeng, Zheng Chunmiao, Chien C. C., et al. A com-

- parative study of Monte Carlo simple genetic algorithm and noisy genetic algorithm for cost-effective sampling network design under uncertainty. *Advances in Water Resources*, **2006**, 29(6):899-911
- [10] Meyer P. D. , Brill JrE. D. A method for locating wells in a groundwater monitoring network under conditions of uncertainty. *Water Resources Research*, **1988**, 24(8):1277-1282
- [11] 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. *Journal of Hazardous Materials*, **2010**, 176(1-3):521-526
- [12] He L. ,Huang G. H. , Lu H. W. A stochastic optimization model under modeling uncertainty and parameter certainty for groundwater remediation design;Part II. Model application. *Journal of Hazardous Materials*, **2010**, 176(1-3):527-534
- [13] 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. *Environmental Pollution*, **2009**, 157(8-9):2485-2492
- [14] Datta B. ,Chakrabarty D. ,DharA. Optimal dynamic monitoring network design and identification of unknown groundwater pollution sources. *Water Resources Management*,**2009**,23(10):2031-2049
- [15] Singh R. M. ,Datta B. Identification of groundwater pollution sources using GA-based linked simulation optimization model. *Journal of Hydrologic Engineering*, **2006**, 11(2):101-109
- [16] Gorelick S. M. ,Evans B. ,Remson I. Identifying sources of groundwater pollution; An optimization approach. *Water Resources Research*,**1983**,19(3):779-790
- [17] Khalil A. ,Almasri M. N. ,McKee M. ,et al. Applicability of statistical learning algorithms in groundwater quality modeling. *Water Resources Research*, **2005**, 41(5):W05010
- [18] Reed P. ,Minsker B. , Valocchi A. J. Cost-effective long-term groundwater monitoring design using a genetic algorithm and global mass interpolation. *Water Resources Research*,**2000**,36(12):3731-3741
- [19] Reed P. M. ,Minsker B. S. Striking the balance; Long-term groundwater monitoring design for conflicting objectives. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **2004**,130(2):140-149
- [20] Yenigül N. B. ,Elfeki A. M. M. ,Gehrels J. C. ,et al. Reliability assessment of groundwater monitoring networks at landfill sites. *Journal of Hydrology*,**2005**,308(1-4):1-17
- [21] Bashi-AzghadiS. N. ,Kerachian R. ,Bazargan-Lari M. R. , et al. Characterizing an unknown pollution source in groundwater resources systems using PSVM and PNN. *Expert Systems with Applications*,**2010**,37(10):7154-7161
- [22] Bashi-Azghadi S. N. , Kerachian R. Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models. *Science of the total Environment*, **2010**,408(10):2189-2198
- [23] Prommer H. , Barry D. A. , Zheng C. MODFLOW/MT3DMS-based reactive multi-component transport modeling. *Groundwater*,**2003**,41(2):247-257
- [24] ZhengChunmiao, Wang P. P. MT3DMS: A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Army Engineer Research and Development Center Contract Report SERDP-99-1, Vicksburg, MS, **1999**
- [25] Deb K. ,Agrawal S. ,Pratap A. ,et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II//SchoenauerM. , DebK. , Rudolph G. ,et al. eds. *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, **2000**, 1917:849-858
- [26] Deb K. ,Pratap A. , Agarwal S. ,et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm;NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*,**2002**,6(2):182-197
- [27] 姜烈,何江涛,许真,等.硝酸盐污染地下水原位碳源注入生物修复优化方案研究. *农业环境科学学报*,**2014**,33(10):2014-2021
- Jiang Lie, HeJiangtao, Xu Zhen, et al. Optimization of in-situ carbon injection bioremediation of nitrate contaminated groundwater. *Journal of Agro-Environment Science*, **2014**,33(10):2014-2021(in Chinese)