

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究	张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董瑶 (2439)
北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究	姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)
浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征	方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)
南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征	段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)
西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM _{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较	程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)
沙尘天气对兰州市 PM ₁₀ 中主要水溶性离子的影响	王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)
上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究	梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)
重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量	彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)
宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析	李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)
包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选	王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)
氨水混合吸收剂脱除 CO ₂ 实验研究	夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)
焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究	孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)
2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源	邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)
千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异	王明珠, 张运林, 施坤, 高冀, 刘刚, 蒋浩 (2528)
千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析	殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)
太湖夏季水体中尿素的来源探析	韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)
鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例	刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)
不同营养湖泊沉积物中 ²¹⁰ Pb _{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析	王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)
地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究	姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)
预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究	陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)
类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附	王红宇, 刘艳 (2585)
粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学	孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)
SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd ²⁺ 的影响	王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)
老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响	唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)
TiO ₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究	李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)
荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用	朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)
改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究	马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)
催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨	王梦月, 马鲁铭 (2633)
聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 为反硝化固体碳源的脱氮特性研究	刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)
某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解	青宪, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)
嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究	卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)
提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法	李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)
滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价	郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)
舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征	江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)
青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析	谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)
福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价	黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)
不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析	张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)
桑沟湾溶解态无机磷的分布、季节变化及影响因素	李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)
引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例	王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)
三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征	李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)
广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价	何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)
青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价	张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)
焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究	伯鑫, 王刚, 温柔, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)
Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响	王辉, 谢鑫源 (2748)
3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应	李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)
施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究	陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)
保护性耕作对茬冬小麦土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)
渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系	贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)
蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究	王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)
铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究	牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)
连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征	赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)
冬季猪粪固体堆放过程中 NH ₃ 、N ₂ O 和 NO 排放特征研究	丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)
填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究	黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)
渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究	王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)
中国铅流变化的定量分析	马兰, 毛建素 (2829)
半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展	赵志瑞, 侯彦林 (2834)
《环境科学》征稿简则 (2679)	
《环境科学》征订启事 (2735)	
信息 (2476, 2556, 2713, 2770)	

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究

姜烈¹, 何江涛^{1*}, 姜永海², 刘菲¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 以北京某场地生活垃圾填埋场硝酸盐污染地下水为研究对象, 针对抽出处理技术, 利用遗传算法(GA)和模拟退火法(SA)对地下水硝酸盐污染羽治理区中布置 18 口备选井方案进行优化。优化目标函数最小化治理成本, 确定最佳井数及其井的位置和抽水速率, 同时达到在 100 d 内将研究区硝酸盐浓度降低至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的治理目标。GA 优化结果为 8 号井优化抽水速率为 $155 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 14 号井优化抽水速率为 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。SA 优化结果为 8 号井优化抽水速率为 $82 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 14 号井优化抽水速率为 $39 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。基于 GA 和 SA 优化抽水速率, 硝酸盐总量去除率分别为 76.89% 和 84.92%。优化结果说明, 最佳井的位置应位于硝酸盐污染羽中游及中下游的中轴线上, 且中游抽水速率比下游要大。两种优化算法对比表明 SA 优化系统治理成本比 GA 节省 6.8%, 且波动性小, 更收敛。

关键词: 地下水; 硝酸盐; 抽出处理; 模拟优化; 遗传算法; 模拟退火法

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2572-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.07.019

Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method

JIANG Lie¹, HE Jiang-tao¹, JIANG Yong-hai², LIU Fei¹

(1. Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environment Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: To study the groundwater polluted by nitrate in a landfill site in Beijing, with the pump-and-treat technology, genetic algorithms (GA) and simulated annealing (SA) were used to optimize the cases of 18 planned pumping wells in the groundwater nitrate plume. The optimization method was run to determine the minimum total costs, as a result of the optimal number of wells with the optimal locations and pumping rates. The results of optimization showed that, both GA and SA optimization conditions could reach the desired results, which means that the concentration of nitrate could be reduced to $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ after 100 days pumping. However, under the GA optimization conditions, the pumping rates of well 8 and well 14 were $155 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ and $10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. In contrast, under the SA optimization conditions, the pumping rate of well 8 was $82 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, and that of well 14 was $39 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Based on the GA and SA optimized pumping rate, the total mass removal rates of nitrate were 76.89% and 84.92%, respectively. The results showed that the best location of the well was in the central axis of either midstream or downstream of the nitrate contamination plume. The pumping rate of midstream was larger than downstream. Comparison of the two optimization algorithms showed that the optimized system management cost of SA was 6.8%, which was lower than that of GA. Meanwhile, SA was easily convergent with smaller volatility.

Key words: groundwater; nitrate; pump-and-treat; simulation and optimization; genetic algorithm; simulated annealing

地下水是重要的饮用水源。由于人类发展忽略了环境保护, 导致地下水污染严重, 其中硝酸盐污染问题突出^[1]。过量的硝酸盐会对人类健康造成严重危害, 例如蓝婴病^[2]。因此, 治理地下水硝酸盐刻不容缓^[3]。

目前, 国际上地下水硝酸盐污染治理技术分为原位处理技术和抽出处理技术。抽出处理技术仍然是最常用的一种。抽出处理技术的核心在于如何有效地把污染的地下水从含水层中抽出来, 通常考虑的因素包括抽水井的位置、抽水井数、抽水速率、安装井和抽水处理成本, 需要找到一个合适的方法得到最优解, 从而使治理成本最小化^[4]。因此, 其关

键是多目标优化问题。目前, 国外已有许多模拟优化技术运用到抽出处理技术设计^[5]。传统的优化方法包括线性规划、非线性规划、动态规划、二次规划和整数规划^[6]。较新的优化方法包括遗传算法(GA)^[7~11]和模拟退火法(SA)^[12~16]。这些优化方法可以耦合到地下水模拟模型中。

抽出处理在优化过程中容易陷入局部优化。GA 和 SA 采用了多种全局优化方法, 能够实现全局

收稿日期: 2013-12-24; 修订日期: 2014-02-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA062603)

作者简介: 姜烈(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水污染与控制, E-mail: jiangliel1976@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jithe@cugb.edu.cn

优化. Dougherty 等^[17]首次将模拟退火法(SA)运用到地下水修复最优设计,在其设计中包含井的安装费用和抽水费用. McKinney 等^[18]运用遗传算法解决了最大抽水量和最低抽水成本等地下水优化问题. Yoon 等^[19]运用实数编码遗传算法来确定最优抽水速率和最佳井的位置,最大限度减小了地下水修复系统成本. Erickson 等^[20]利用小生境技术遗传算法解决了抽出处理地下水修复问题,实现了修复成本和剩余污染物浓度最小化. 吴剑锋等^[21]开发改进了一种小生境 Pareto 遗传算法(INPGA),以美国麻省军事保护区为实例,通过建立研究区复杂地下水污染治理的多目标优化管理模型,并添加消息传递接口(MPI)的并行计算和个体适应度,提高了运行库计算速度.

本文以北京某场地生活垃圾填埋场硝酸盐污染地下水为研究对象,采用 Visual MODFLOW 4.6 中 Modular Groundwater Optimizer (MGO)^[22],将水流模拟软件 MODFLOW、溶质运移 MT3DMS 与遗传算法和模拟退火法相结合,尝试解决地下水硝酸盐污染抽出处理优化模拟,优化井的位置、井的抽水速率及最小化治理成本. 其执行程序通过 FORTRAN 自动编码器来汇编,属于内置模块,在优化过程中采用 DOS 界面运行.

1 地下水硝酸盐抽出处理优化系统设计

1.1 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm)是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,它最初由美国 Michigan 大学 Holland 教授于 1975 年首先提出. 采用概率化的寻优方法,能自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定的规则. 遗传算法的核心是选择、交叉、变异. 更多遗传算法的描述参见文献[23,24]. 从任一初始种群出发,通过选择、交叉、变异操作,产生一群更适应环境的个体,检查其结果是否符合优化的要求,如果不符合,重复其上述过程,直到优化出满意的结果.

1.2 模拟退火法

模拟退火法,源于统计热力物理学,它模拟熔融状态下物体逐渐冷却达到结晶状态的物理过程. 材料中的原子原来会停留在使内能有局部最小值的位置,加热使能量变大,原子会离开原来位置,而随机在其他位置中移动. 退火冷却时速度较慢,使得原

子有较多可能可以找到内能比原先更低的位置. 不依赖初始模型的选择,能寻找全局最小点而不陷入局部极小^[19]. 模拟退火算法的操作步骤如下.

步骤 1:给定初始温度 T_0 解 X_0 算 $f_0 = f(x_0)$; 步骤 2:随机产生扰动 Δx , 计算 $f_1 = f(x_0 + \Delta x)$ 和 $\Delta f = f_1 - f_0$; 步骤 3:若 $\Delta f \leq 0$ 则转步骤 5, 否则产生随机数 $R \in [0, 1]$; 步骤 4:若 $p = \exp(-\Delta f/T) \geq R$, 则用 $x' = x_0 + \Delta x$ 代替 x_0 , f_1 代替 f_0 ; 步骤 5:检查 M 过程是否结束,若未结束则转步骤 2; 步骤 6:降低温度参数 T ; 步骤 7:判断终止准则是否满足,若满足,则算法终止,否则,转步骤 2.

1.3 地下水多目标优化模型

地下水优化模型通常包含两组变量:决策变量和状态变量. 在优化过程中的目的是识别这些决策变量的最佳组合. 状态变量依赖地下水流方程的水头和地下水溶质运移方程的浓度. MODFLOW 水流方程如下:

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

式中, K_x 、 K_y 、 K_z 分别为渗透系数在 x 、 x 、 y 方向的分量; h 表示水头(m); q_s 表示单位时间从单位体积含水层流入或流出的水量(d^{-1}); S_s 表示贮水率(m^{-1}); t 表示时间(d). MT3DMS 地下水溶质运移方程:

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

式中, θ 表示含水层的孔隙度(无量纲); c^K 表示溶质组分 K 的浓度($mg \cdot L^{-1}$); D_{ij} 是水动力弥散系数张量($m^2 \cdot d^{-1}$); v_i 是孔隙中实际水流速度($m \cdot d^{-1}$); q_s 表示单位时间从单位体积含水层流入或流出的水量(d^{-1}); c_s^K 是源汇项溶质组分 K 的浓度($mg \cdot L^{-1}$); $\sum R_n$ 表示化学反应项总和 [$mg \cdot (L \cdot d)^{-1}$].

优化设计过程中,目标函数包含井的安装费用、抽水费用、抽水地下水硝酸盐治理费用等. 其数学表达式如下.

最小化:

$$J = a_1 N \sum_{i=1}^N W_i + a_2 \sum_{i=1}^N |Q_i| \Delta t_i \quad (3)$$

约束条件:

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (4)$$

$$h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max} \tag{5}$$

$$c_i \leq c^* \tag{6}$$

式中, J 表示目标函数, a_1 表示安装一口井的总费用, W 表示研究区备选井的数量, N 是总的优选井数量, 即从备选井中优化出来井的数量, a_2 是抽出和处理单位体积的水的费用^[4], Q_i 单位时间抽水的体积($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), $Q_{\min}$ 和 $Q_{\max}$ 分别是最小抽水和最大抽水量, Δt_i 是井 i 持续抽水时间(d), h_i 是井 i 的水头(m), $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 分别是最小水头和最大水头(m); c_i 是井 i 的溶质的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), c^* 表示目标治理浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 上述定义多目标优化方案也可以通过试错法解决. 虽然试错法简单、易用, 但测试和检验烦琐, 且不能保证组合的最优方案, 容易产生局部优化, 往往很难找到最优的抽出处理方案. 所以在满足所有约束条件下, 应用遗传算法和模拟退火法比试错法更有效解决井的位置及组合问题^[22].

2 材料与方法

2.1 研究区水文地质条件

研究区位于北京某场地, 所处区域地势平坦. 场地东侧为养殖场, 西南侧为当地农民耕作农田, 农村垃圾和畜禽养殖废水均排放到池塘(图1).

依据场地调查资料, 利用 CTECH 对研究区构建三维地质剖面图, 第一层主要含水层为非承压含水层, 地下水标高 16~23 m, 厚度约 6.92 m, 以粉细砂为主, 局部夹有砂质粉土、黏质粉土和粉质黏土(图2). 研究区第一含水层下面主要为砂质粉土、黏质粉土, 渗透性很差, 能够起到较好的隔水作用.

在研究区进行单孔抽水试验. 通过 Aquifer Test 软件分析, 结果见表1. 研究区含水层的平均渗透系

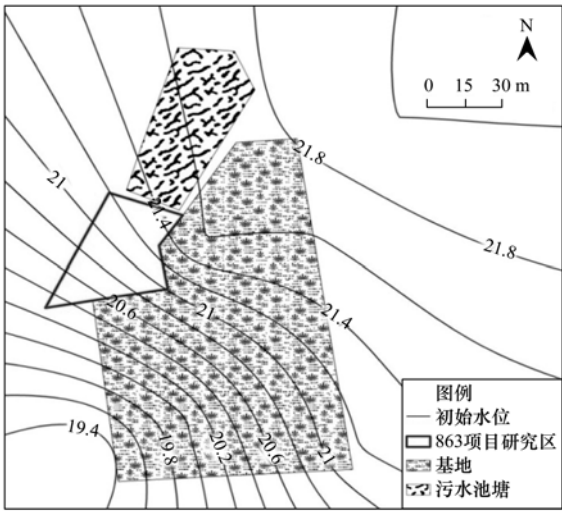


图1 研究区初始流场示意

Fig. 1 Initial head of the study area

数为 $3.37 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$.

表1 不同求参方法中渗透系数和导水系数结果表

Table 1 Getting hydraulic conductivity and transmissivity from different methods

分析方法	导水系数 T $/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	渗透系数 K $/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	储水系数 S
Theis	22.42	3.24	4.11E-02
Neuman	22.14	3.2	—
Cooper-Jacob Time-Drawdown	25.46	3.68	—
平均值	23.32	3.37	—

1) “—”表示文章中没有相关数据

2.2 研究区地下水污染状况

利用 Geoprobe 钻机对生活垃圾填埋场地下水及池塘污水进行取样调查. 现场测试数据: 池塘地表水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 高达 $46.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时地表 50 cm 渗坑 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 高达 $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 研究区地下水硝酸盐

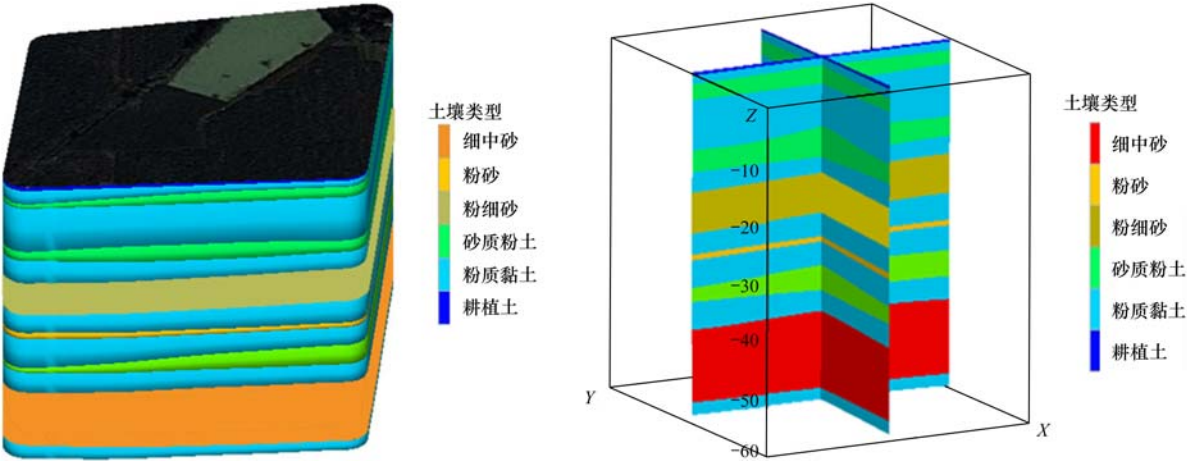


图2 研究区三维地质剖面

Fig. 2 Three-dimensional geological profile of the study area

仍处于不断变化的情况,同时场地调查尚不够充分,不足以刻画出实际地下水硝酸盐的污染羽状况. 因此,本研究以农村垃圾和畜禽养殖废水为污染源,硝酸盐入渗浓度为 $65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,模拟在天然地下水流动情况下释放 5 a 形成的硝酸盐污染羽作为抽出处理的初始污染羽. 研究区硝酸盐初始污染羽总量为 36.99 kg ,见图 3.

2.3 抽出处理备选井方案

为了设计合理的抽出处理治理优化方案,根据模拟生成硝酸盐污染羽形成的范围及通过试错法确定的较为有效的抽水井位置,在研究区布置了 18 口备选井方案(图 3). 目的是在满足治理成本最小情况下,抽出处理后达到目标治理浓度,同时确定最佳井数及其井的位置和抽水速率.

研究区周围地下水硝酸盐背景浓度约为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 将研究区红色框作为浓度约束区,在 100 d 抽出处理修复时间内,其硝酸盐目标修复浓度低于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.4 模型概化及参数确定

研究区场地范围较小,可以将研究区假设为均质各向异性含水层. 地下水硝酸盐污染浓度主要分布在第一含水层,该层下部主要为砂质粉土、黏质粉土,渗透系数较差,能够起到较好的隔水作用,故而将含水层概化成一层. 研究场地为 $225\text{ m}\times 200$

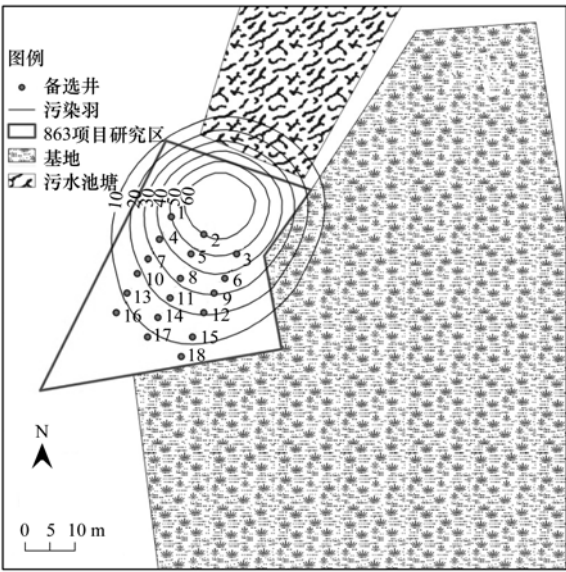


图3 地下水硝酸盐初始污染羽分布示意和备选井位置
Fig. 3 Initial groundwater nitrate contamination plumes and location of potential wells

m,将其剖分成 $2.25\text{ m}\times 2\text{ m}$. 地下水从北东方向向南西方向流(图 1). 研究区的初始水力坡度约为 0.01. 西北方向和东南方向为隔水边界. 地下水硝酸盐的阻滞因子设为 1. 地下水流模拟设置为稳定流模拟(两种优化方法只适合稳定流^[4]),模型输入参数见表 2.

表2 模型输入参数

Table 2 Input parameters of the simulation model

参数	数值	参数	数值
网格单元 $\Delta x/\text{m}$	2.25	横向弥散度/ m	10
网格单元 $\Delta y/\text{m}$	2	纵向弥散度/ m	1
水平渗透系数/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	3.37	应力期	1
垂向渗透系数/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	0.337	时间步长/ d	10
孔隙度	0.20	最大运移步长数目	50 000
有效空隙度	0.3	阻滞因子	1
含水层厚度/ m	6.92	修复时间/ d	100

表 3 列出了安装一口井的总费用、抽出和处理单位体积水的费用^[4]. 最小与最大水头值、最小与最大抽水量及硝酸盐目标治理浓度等约束条件.

表3 费用系数和约束变量
Table 3 Cost coefficients and constraint variables

系数	数值	系数	数值
$a_1/\text{元}$	20 000	$Q_{\min}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	0
$a_2/\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$	0.76	$Q_{\max}/\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	300
h_i/m	19	$c^*/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	10
$h_{\max}/\text{m}$	21	修复时间/ d	100

3 优化结果分析与讨论

3.1 抽出处理优化

本研究中 GA 设定的相关参数如下:种群数目为 100,最大遗传代数为 100,每口井的抽水速率离散化区间数为 32,交叉概率为 0.90,变异概率为 0.05. SA 设定的相关参数如下:初始温度为 1,抽样次数 10 000,降温率为 0.9,最大迭代次数为 100.

两种优化方法都要求浓度约束区治理 100 d 后的地下水硝酸盐(以氮计)达到 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. GA 优化结果:8 号井优化抽水速率为 $155\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,14 号井优

化抽水速率为 $10\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; SA 优化结果:8 号井优化抽水速率为 $82\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,14 号井优化抽水速率为 $39\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. 其他井都为零(表 4). GA 在 8 号井优化的抽水速率比 SA 在 8 号井的要大,在 14 号井优化的抽

水速率比 SA 在 14 号优化的速率要小. 但 SA 总抽水速率($121\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)比 GA($165\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)小.

基于 GA 和 SA 优化的抽水速率,100 d 后硝酸盐总去除量分别为 28.45 kg 和 31.42 kg,其总量去除率分别 76.89% 和 84.92%,见图 4. 优化过程中发现,总抽水速率和硝酸盐总去除量存在近似线性增加的趋势.

GA、SA 同时优化了井的位置和抽水量. 图 4 可以看出研究区中 18 口备选井方案,两种优化方法最优的两口井都是 8 号井和 14 号井. 说明在该场地抽出处理中,只需要 2 口井就可以满足约束条件,到达治理目标,比初始方案减少 16 口井,节省了井的安装成本. 同时说明最优井的位置在污染羽的中轴线上中游和中下游抽水布置最为合理.

表 4 优化井位置与抽水速率

Table 4 Location and pumping rate of optimization wells

井编号(位置)	GA	SA
1,2,3,4	0	0
5,6,7	0	0
8	155	82
9,10,11,12,13	0	0
14	10	39
15,16,17,18	0	0
总抽水量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	165	121

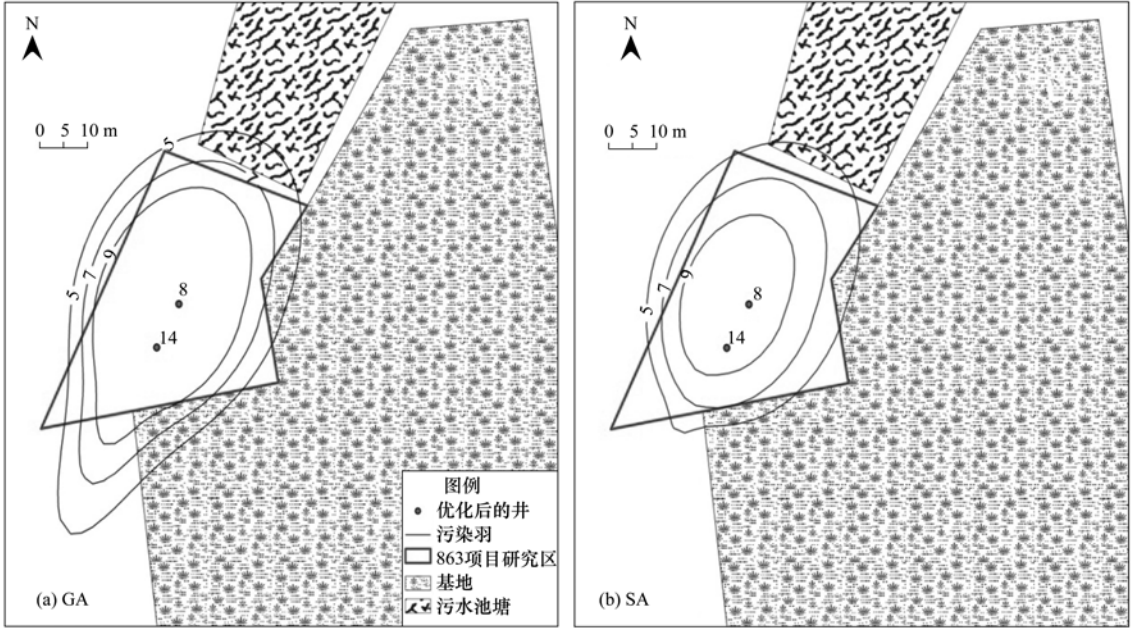


图 4 GA 和 SA 抽水治理 100 d 后地下水硝酸盐分布示意

Fig. 4 Distribution plume of nitrate in groundwater after 100 days using the GA and SA pump-and-treat method

3.2 GA 与 SA 对比分析

GA、SA 不仅可以优化井的位置、抽水速率及井数,而且还可以优化系统治理成本(井安装成本与抽出处理成本之和),见表 5. GA 和 SA 优化井数一样,其安装成本也就一样,但 SA 优化总的抽水量比 GA 要低,所以 SA 优化的系统成本要比 GA 要低,说明 SA 在多目标地下水硝酸盐修复优化管理要比 GA 体现出一定的优越性,体现在节省系统治理成本.

图 5 为 GA 与 SA 遗传代数与目标函数优化收敛对比. GA 在 40 代后优化目标函数趋于收敛,而 SA 在 20 代后趋于稳定. GA 在前 20 代目标函数

优化波动性比 SA 要大. 两者最终都趋于稳定. 两种优化方法识别决策变量的最佳组合. 在最小化治理成本下,全局优化井数、井的抽水量、安装成本、抽水处理成本,使得优化结果可信. SA 的系统治理成本要比 GA 少 3 338.45 元,节省成本约 6.8%,见表 5.

表 5 GA、SA 优化系统治理成本/元

Table 5 GA,SA optimization of the cost management

of the system/yuan			
优化算法	井安装成本	抽出处理成本	系统治理成本
GA	40 000	12 500.25	52 500.25
SA	40 000	9 161.80	49 161.80

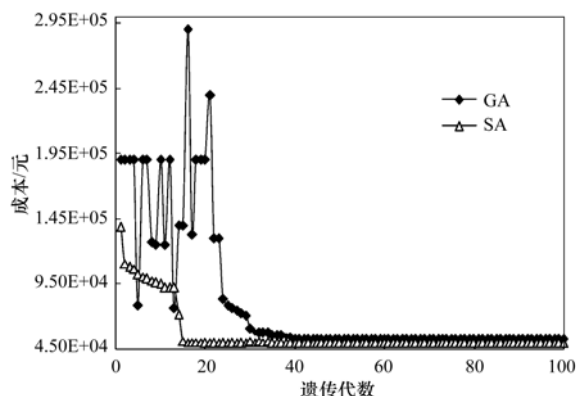


图5 GA、SA 目标函数优化收敛对比

Fig. 5 Comparison of the convergence of GA and SA for optimal objective function value

4 结论

(1) 本研究依据北京某场地调查资料, 利用遗传算法 (GA) 和模拟退火法 (SA) 对地下水硝酸盐污染羽治理区中布置 18 口备选井方案进行优化。为达到 100 d 将研究区硝酸盐浓度降低到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的目标, GA 和 SA 优化的井都为 8 号井和 14 号井, 优化总抽水速率分别为 $165 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $121 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 同时其硝酸盐总量去除率分别为 76.89% 和 84.92%。

(2) 优化结果说明, 最佳井的位置应位于硝酸盐污染羽中游及中下游的中轴线上, 且中游抽水速率比下游要大。两种优化算法对比表明模拟退火法 (SA) 优化系统治理成本比遗传算法 (GA) 节省 6.8%, 且波动性小, 更收敛。

(3) 模拟退火法 (SA) 和遗传算法 (GA) 耦合到地下水模拟程序 MODFLOW 和溶质运移程序 MT3DMS 中, 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指导。

致谢: 本研究场地基础信息调查由中国环境科学研究院、北京建工环境修复有限责任公司、轻工环保研究所等共同完成。此外, 南京大学吴剑锋老师对遗传算法优化方法工作给予指导! 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Organization W H. Guidelines for drinking-water quality. Vol. 1; Recommendations[M]. Geneva; World Health Organization, 2004.
- [2] Law G, Parslow R, McKinney P, *et al.* Non-Hodgkin's lymphoma and nitrate in drinking water: a study in Yorkshire, United Kingdom[J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 1999, **53**(6): 383-384.
- [3] 浮海梅, 金云霄. 浅谈地下水硝酸盐污染[J]. 地下水, 2009, **31**(3): 85-87.
- [4] 彭伟, 吴剑锋, 吴吉春. NPGA-GW 在地下水系统多目标优化管理中的应用[J]. 高校地质学报, 2008, **14**(4): 631-636.
- [5] Peralta R C, Kalwij I, Wu S. Practical simulation/optimization modeling for groundwater quality and quantity management[C]. CEE Faculty Publications, 2003. 784-788.
- [6] Shieh H J, Peralta R C. Optimal in situ bioremediation design by hybrid genetic algorithm-simulated annealing[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, **131**(1): 67-78.
- [7] Smalley J B, Minsker B S, Goldberg D E. Risk-based in situ bioremediation design using a noisy genetic algorithm[J]. Water Resources Research, 2000, **36**(10): 3043-3052.
- [8] Mategaonkar M, Eldho T I. Groundwater remediation optimization using a point collocation method and particle swarm optimization[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, **32**: 37-48.
- [9] Babbar M, Minsker B S. Groundwater remediation design using multiscale genetic algorithms[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, **132**(5): 341-350.
- [10] Kazemzadeh-Parsi M J, Daneshmand F, Ahmadfarid M A, *et al.* Optimal groundwater remediation design of pump and treat systems via a simulation-optimization approach and firefly algorithm[J]. Engineering Optimization, 2014, doi: 10.1080/0305215X.2013.858138.
- [11] Sharief S, Eldho T, Rastogi A, *et al.* Optimal groundwater remediation by pump and treat using FEM-and EGA-based simulation-optimization model[J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2012, **16**(2): 106-117.
- [12] Sidiropoulos E, Fotakis D. Cell-based genetic algorithm and simulated annealing for spatial groundwater allocation[J]. WSEAS Transactions on Environment and Development, 2009, **4**(5): 1-10.
- [13] Baveye P. Discussion of "optimal in situ bioremediation design by hybrid genetic algorithm-simulated annealing" by Horng-Jer Shieh and Richard C. Peralta[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, **132**(2): 127-127.
- [14] Karasulu B, Korukoglu S. A simulated annealing-based optimal threshold determining method in edge-based segmentation of grayscale images[J]. Applied Soft Computing, 2011, **11**(2): 2246-2259.
- [15] Zain A M, Haron H, Sharif S. Genetic algorithm and simulated annealing to estimate optimal process parameters of the abrasive waterjet machining[J]. Engineering with Computers, 2011, **27**(3): 251-259.
- [16] Singh T S, Chakrabarty D. Multi-objective optimization for optimal groundwater remediation design and management systems[J]. Geosciences Journal, 2010, **14**(1): 87-97.
- [17] Dougherty D E, Marryott R A. Optimal groundwater

- management; 1. Simulated annealing [J]. Water Resources Research, 1991, **27**(10): 2493-2508.
- [18] McKinney D C, Lin M D. Genetic algorithm solution of groundwater management models [J]. Water Resources Research, 1994, **30**(6): 1897-1906.
- [19] Yoon J H, Shoemaker C A. Improved real-coded GA for groundwater bioremediation[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2001, **15**(3): 224-231.
- [20] Erickson M, Mayer A, Horn J. Multi-objective optimal design of groundwater remediation systems; application of the niched Pareto genetic algorithm (NPGA) [J]. Advances in Water Resources, 2002, **25**(1): 51-65.
- [21] 吴剑锋, 彭伟, 钱家忠, 等. 基于 INPGA 的地下水污染治理多目标优化管理模型: I——理论方法与算例验证[J]. 地质论评, 2011, **57**(2): 277-284.
- [22] Zheng C M, Wang P P. MGO-A Modular Groundwater Optimizer Incorporating MODFLOW/MT3DMS, Documentation and User's Guide [M]. Tuscaloosa, AL: University of Alabama and Groundwater Systems Research Ltd., 2003.
- [23] Ritzel B J, Eheart J W, Ranjithan S. Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem[J]. Water Resources Research, 1994, **30**(5): 1589-1603.
- [24] Wang M, Zheng C. Optimal remediation policy selection under general conditions [J]. Ground Water, 1997, **35**(5): 757-764.
- [25] 师学明, 王家映. 地球物理资料非线性反演方法讲座(三)模拟退火法[J]. 工程地球物理学报, 2007, **4**(3): 165-174.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i> (2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i> (2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i> (2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i> (2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i> (2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i> (2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i> (2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i> (2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i> (2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen (2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i> (2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i> (2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i> (2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i> (2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan (2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i> (2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i> (2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i> (2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i> (2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming (2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaxing	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i> (2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i> (2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i> (2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i> (2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-hui, <i>et al.</i> (2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i> (2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i> (2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i> (2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan (2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i> (2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i> (2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke (2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun (2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i> (2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i> (2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i> (2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i> (2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-rui, HOU Yan-lin (2834)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行