

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器埋地渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

空气注射修复苯污染地下水模拟研究

樊艳玲, 姜林*, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋

(北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术中心, 污染场地风险模拟与修复北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要: 空气注射是原位修复地下水中挥发性污染物的有效方法之一, 但是因为缺乏现场数据, 目前系统设计主要依据经验. 为了获取合理设计参数, 以北京某焦化厂地下水苯污染区域为例, 结合现场试验, 采用 Petrasim 中的 TMVOC 模块对空气注射进行了设计参数优化与修复模拟研究. 现场试验得出最佳注气速率为 $23.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 影响半径为 5 m. 模型对现场试验过程中地下水压力变化进行了模拟, 模拟结果与实测结果吻合较好. 模型对注气位置进行优化, 最佳为底部注气; 以底部注气方式对注气速率进行优化, 得出最佳注气速率为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 与现场试验结果相近; 在最佳注气位置与注气速率下, 影响半径为 3 m, 现场测试结果比该值偏大, 这主要是因为现场测试参数主要指示地下水上部与非饱和带中气流变化, 而气流范围在接近地下水水面处开始迅速增大, 比地下水中实际气流范围要大. 依据场地地质参数, 利用优化参数, 对修复过程进行了模拟研究, 结果表明, 修复过程中逐渐将污染物浓度已经达标区域的注射井关停的修复方式比修复过程中所有注射井一直开启的修复效果要好. 采用注射井逐个关停的修复方式注气 90 d 后, 该场地污染物浓度从 $371\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

关键词: 地下水; 苯; 空气注射; 模型模拟; 修复周期

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3927-08

Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging

FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang

(Beijing Key Laboratory for Risk Modeling and Remediation of Contaminated Sites, China Urban Environmental Pollution Control Center, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Air sparging (AS) is one of the *in situ* remedial technologies which are used in groundwater remediation for pollutions with volatile organic compounds (VOCs). At present, the field design of air sparging system was mainly based on experience due to the lack of field data. In order to obtain rational design parameters, the TMVOC module in the Petrasim software package, combined with field test results on a coking plant in Beijing, is used to optimize the design parameters and simulate the remediation process. The pilot test showed that the optimal injection rate was $23.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, while the optimal radius of influence (ROI) was 5 m. The simulation results revealed that the pressure response simulated by the model matched well with the field test results, which indicated a good representation of the simulation. The optimization results indicated that the optimal injection location was at the bottom of the aquifer. Furthermore, simulated at the optimized injection location, the optimal injection rate was $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, which was in accordance with the field test result. Besides, 3 m was the optimal ROI, less than the field test results, and the main reason was that field test reflected the flow behavior at the upper space of groundwater and unsaturated area, in which the width of flow increased rapidly, and became bigger than the actual one. With the above optimized operation parameters, in addition to the hydro-geological parameters measured on site, the model simulation result revealed that 90 days were needed to remediate the benzene from $371\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ to $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ for the site, and that the operation model in which the injection wells were progressively turned off once the groundwater around them was "clean" was better than the one in which all the wells were kept operating throughout the remediation process.

Key words: groundwater; benzene; air sparging; simulation; repair time

苯系物(BTEX)是指苯、甲苯、乙苯、二甲苯等单环芳香烃类,主要来源于石油、化工和炼焦等工业的煤焦油提炼或液体石油产品高温裂解过程^[1,2],储油罐和采油管的泄露也会导致BTEX进入土壤和地下水中^[3].空气注射(air sparging, AS)是修复均质、渗透性好的土壤和地下水中挥发性有机污染物较有效的技术,其技术原理是将空气注入到饱和土壤和地下水中,通过吹脱作用将污染物从液相转移至气相中,并随空气上升进入非饱和区,继而

通过非饱和区生物降解去除,或其他尾气收集处理措施抽出处理,污染物浓度在可接受范围内时也可直接排入大气环境中^[4,5].

由于现场数据有限,目前空气注射的设计还主

收稿日期: 2012-01-10; 修订日期: 2012-05-10

基金项目: 北京市科委重大专项(Z09040600930902); 北京市环保局项目

作者简介: 樊艳玲(1984~),女,硕士,主要研究方向为污染场地风险评价与修复, E-mail: flylinger@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jianglin_JL@139.com

要依靠经验,很多学者致力于研究一种可靠的模型,分析空气注射的修复效果. Rahbeh 等^[6]用 SPARG 模拟研究了空气注射过程中的污染物去除机制, Benner 等^[7]用 BIOVENTING^{plus} 模拟研究了场地、污染物以及空气注射系统设计因素对修复效果的影响, Jang 等^[8]用 TechFlowMP 模拟研究了单井与多井对修复效果的影响.

TOUGH (transport of unsaturated groundwater and heat) 是美国劳伦斯伯克利国家实验室于 1981 年发布的,模拟一维、二维和三维孔隙或裂隙介质中,多相流 (multi-phase), 多组分 (multi-component), 及非等温 (non-isothermal) 的水流及热量运移的数值模拟程序, TMVOC 是其后续版本 TOUGH2 中侧重于环境污染问题的子模块^[9]. Petrasim 软件是以 TOUGH2 家族代码为模拟内核的商用的前、后处理软件,通过交互式环境,可进行网格剖分,参数定义和结构显示^[10].

TMVOC 在地下水中非水相液体 (NAPL)^[11]、苯^[12]以及 PCE/TCE^[13]的泄露模拟与处理预测已有应用. Luelseged^[14]用 TOUGH2 模型模拟一维和二维的 AS 试验系统,验证了 TOUGH2 模型可以很好地预测自由相和溶解相污染物的去除速率,陈华清^[15]通过二维试验结果与模拟结果的对比验证了 TMVOC 建立的 AS 模型具有较好的可靠性.但是由于室内试验尺度较小,且试验条件理想化,而场地实际情况具有大尺度、复杂性,所以利用场地资料与前期测试数据评估 TMVOC 模拟结果对其指导场地修复具有必要性.本研究将以北京市某焦化厂为例,结合现场测试结果,采用 Petrasim 中的 TMVOC 模块,优化注气位置、注气速率、影响半径,并对修复周期进行预测,以期 AS 的工程应用提供技术支持与理论依据.

1 研究区域概况

研究区域位于北京某焦化厂内,所在区域地势平坦,地势由西北向东南缓慢降低,平均坡降为 1.5‰. 该地区属半干旱、半湿润温带大陆性气候,地下水位埋深为 12 m,含水层厚度为 3.0 m,地下水的水位动态变化规律一般为:11 月~次年 3 月水位较高,其它月份相对较低,年内自然变化幅度约 1~2 m. 该焦化厂区域内含水层岩性主要为中砂和细砂,渗透系数为 $10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$; 水文地质和污染物分布调查表明,场地内饱和层土壤和地下水中的污染物主要为苯,其中污染最严重的区域集中分布于精苯分厂和原粗苯生产车

间厂区,最高浓度为 $371\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,为满足基于场地健康风险评价所确定的可接受的场地污染水平,苯的修复目标值定为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

AS 适用于去除赋存于渗透系数 $>0.1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的均质浅层含水层中,亨利常数 $>1.01 \times 10^7 \text{ Pa}$,蒸汽压 $>66.7 \text{ Pa}$ 的挥发性污染物^[16],通过以上场地条件与目标污染物性质^[17]的分析可以初步判断 AS 技术处理该区域地下水具有可行性.

2 现场试验

2.1 现场试验设计

试验系统包括 1 口空气注射井 (AIW)、3 口地下水监测井 (编号为 G3、G5、G8,离注射井距离分别为 3、5、8 m) 和 5 口土壤气监测井 (编号为 S2、S3、S4、S5、S6,离注射井距离分别为 2、3、4、5、5.8 m),如图 1 所示.

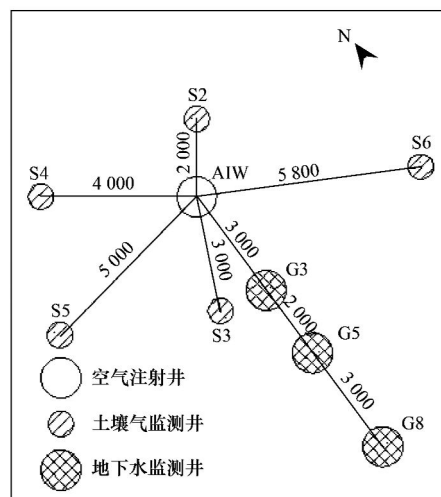


图 1 现场试验平面布置示意

Fig. 1 Pilot test plot setup

现场试验包括注气压力与流量测试、地下水压力响应测试、地下水溶解氧测试、氦气示踪测试和土壤气测试. 注气压力与流量测试是通过对比不同注气压力与流量下 G3 地下水位的隆起程度选择一个较佳注气工况;地下水压力响应测试与地下水溶解氧测试是通过注气过程中 G3、G5、G8 地下水位变化和 DO 浓度变化程度反映空气注射的影响半径;氦气示踪测试是在空气注射过程中掺入 6% 的氦气,通过 S2、S4、S5、S6 中的氦气浓度反映空气注射的影响半径;土壤气测试是通过注气一定时间后土壤气中 O_2 含量的变化反映空气注射的影响半径.

2.2 确定注气速率

受空气压缩机运行工况限制,现场仅对 (0.02

MPa, $14.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 和 (0.03 MPa , $23.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 进行了注气压力与流量测试, 结果如图 2 所示。

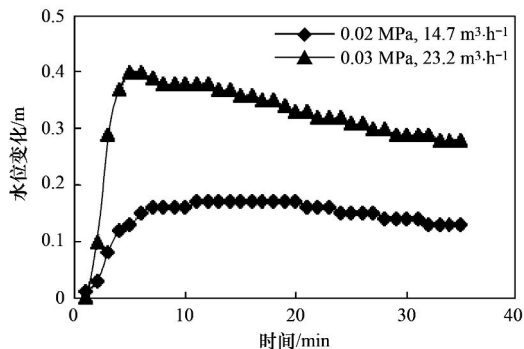


图 2 不同注气压力与流量条件下 G3 中水位变化

Fig. 2 Changes of water table level in G3 with different injection pressures and flow rates

从图 2 中可以看出, 注气压力与流量为 0.03 MPa , $23.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 地下水位最高隆起高度为 0.39 m , 高于注气压力与流量为 0.02 MPa , $14.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时的最高值 0.17 m 。据报道, 在砂质土壤中地下水位的隆起高度一般为几十 cm, 在 0.03 MPa , $23.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 注气条件下地下水位隆起高度已经超过了地下水层厚度, 因此选取 0.03 MPa , $23.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 为后续试验中所用工况条件。

2.3 确定影响半径

由图 3 和图 4 可见, G3、G5、G8 中的地下水位分别在 10、15、15 min 后上升到最大值 0.36 、 0.11 、 0.04 m , 溶解氧浓度分别在注气 60、65、75 min 后上升到 7.35 、 2.47 、 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由此可见, G3 和 G5 中地下水响应变化较明显, G8 中变化则相对不明显。由图 5 可见, S2、S4、S5 中最高氦气浓度分别达到 83% 、 13% 和 41% , S6 中氦气无检出; 由图 6 可见, S2、S3、S4、S5 中 O_2 浓度均不小于 19.0% , 与空气中 20.95% 的氧气浓度接近, 而 S6

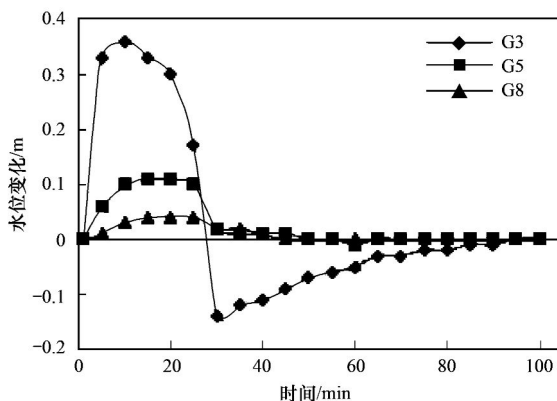


图 3 地下水位随时间的变化

Fig. 3 Variations of water table levels over time

中的氧气浓度仅为 16.6% , 由此可见, 空气注射对 S2 ~ S5 的影响较明显, 对 S6 影响不明显。综合上述分析, 该区域的影响半径为 5 m 。

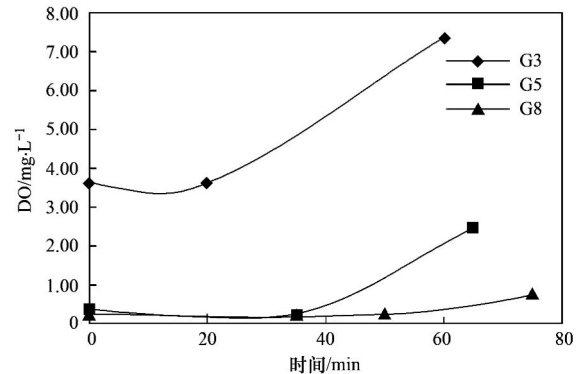


图 4 DO 随时间的变化

Fig. 4 Variations of DO concentration over time

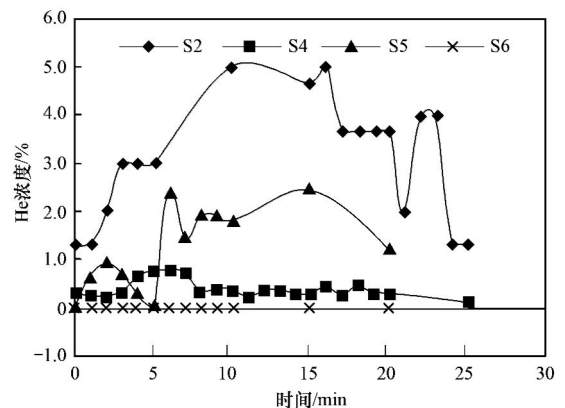


图 5 氦气浓度随时间的变化

Fig. 5 Variations of He concentration over time

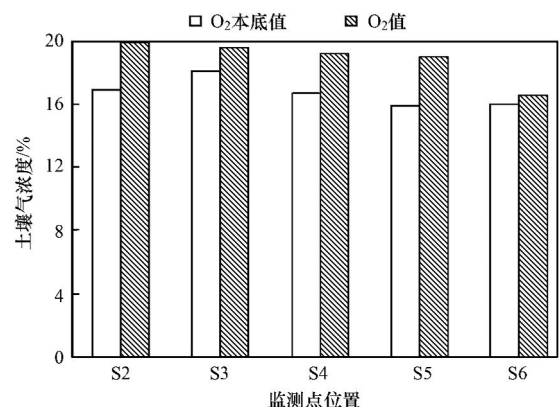


图 6 O_2 浓度变化

Fig. 6 Changes of O_2 concentration

3 建立模型

3.1 概念模型

建立一个长、宽、高分别为 24 m 、 24 m 、 15 m 的三维模块, 离散成 21 排 21 列 18 层, 共计 7 938 个有

效单元体. 在模型四周分别增加 0.001 m 的网格单元, 模拟过程中保持恒定状态, 但与外界保持热物理化学和物质交换, 保证地下水流和物料平衡. 顶层额外增加 1 层 0.001 m 的网格单元作为大气边界,

模拟过程中保持恒定状态, 与大气保持热物理化学与物质交换, 保证气相流动和物料平衡. 根据现场试验区域地质条件, 水位埋深为 14.7 m. 详细地层参数如表 1 所示.

表 1 地层参数

Table 1 Stratigraphic parameters

项目	表层粉土层	粉质砂土层	粉土层	砂土层
埋深/m	0~5	5~7	7~9	9~15
含水率/%	13	33	21	29(非饱和区)
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.70	2.68	2.71	2.66
孔隙度	0.37	0.35	0.39	0.3
水平渗透系/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	$7.0\text{E}-2$	3	$3.5\text{E}-2$	10
垂向渗透系/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	$4.0\text{E}-2$	3	$4.0\text{E}-3$	10
饱和热导/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	3.1	3.1	3.1	3.1
非饱和热导率/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	2.85	2.85	2.85	2.85

在给定参数条件下, 模型运行 3.1536×10^{10} s 后达到重力-毛细压力平衡, 为 AS 模拟研究提供了初始条件.

3.2 模型验证

利用 TMVOC 对地下水压力响应测试过程进行模拟, 将 G5 中的地下水响应测试值与模拟值进行对比. 对比结果如图 7 所示, 其中, 现场测试灵敏度为 0.01 m.

从图 7 中可以看出, 测试值与模拟值均呈缓慢上升逐渐趋于稳定的趋势, 在测试开始的前 5 min 内, 两者的差别较大, 10 min 后都接近稳定状态, 并且稳定后水位相差仅为 0.01 m, 由此可以看出, TMVOC 模拟结果与真值拟合程度较好, 模拟结果基本可以反映真实情况.

4 注气参数优化

由于现场测试在秋季进行, 所以地下水位相对较低, 为了使设计参数更合理, 根据污染场地所在区域地质资料, 在参数优化过程中, 模型中水位设置为地下 12 m.

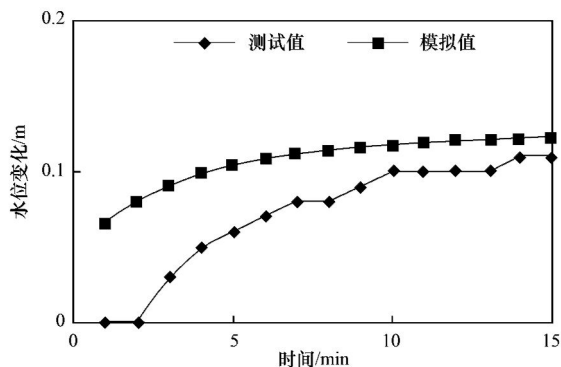


图 7 地下水位测试值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison of groundwater test level and simulated value

4.1 注气位置优化

以相同的注气速率 ($23.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 分别在含水层上部、中部和下部注气, 不同注气位置对含水层中气相饱和度的影响如图 8 所示, 其中, SG 表示气相饱和度.

从图 8 中可以看出, 随着注气位置的加深, 含水层中空气扩散范围也随之增大. 当注气位置位于含水层上部与中部时, 气流无法扩散到含水层底部, 不

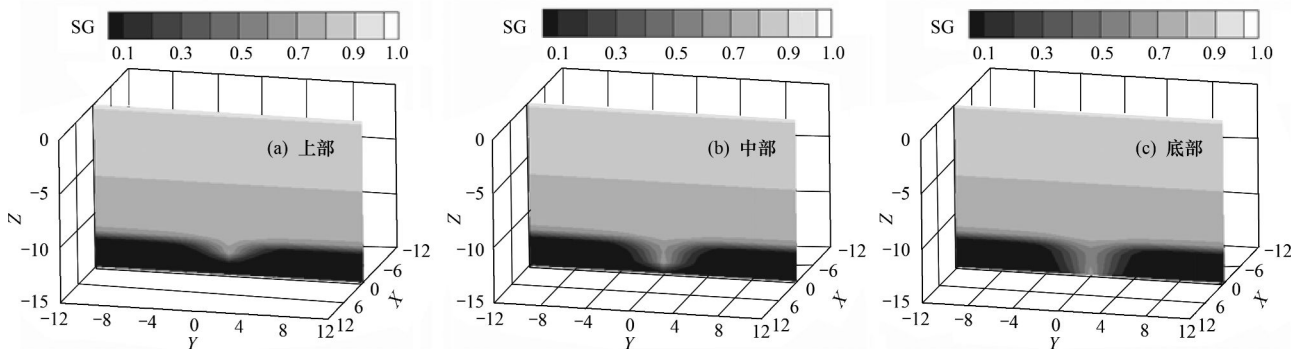


图 8 注气位置对含水层中气相饱和度的影响

Fig. 8 Effect of injection point on gas phase saturation in aquifer

利于底部污染物的去除;当注气位置位于含水层底部时,含水层中不存在修复死角.这一现象与陈华清等^[12]的研究结果相符.通过以上分析可以看出,在含水层厚度较薄,污染物充满整个含水层时,AS 易采用底部注气的方式.

4.2 注气速率优化

Bass 等^[18]总结了 49 个采用 AS 技术处理地下

水的场地案例,注气速率一般为 $5 \sim 30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,本研究中在含水层底部分别采用 5、10、15、20、25、 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率进行注气,不同注气速率对含水层中气相饱和度的影响如图 9 所示.

从图 9 中可以看出,气流围绕注射井成 U 型扩散,并且在靠近水面的时候,U 型开口迅速增大,出现弧形拐点,这与 Ji 等^[19]、张英等^[20]的试验结果相

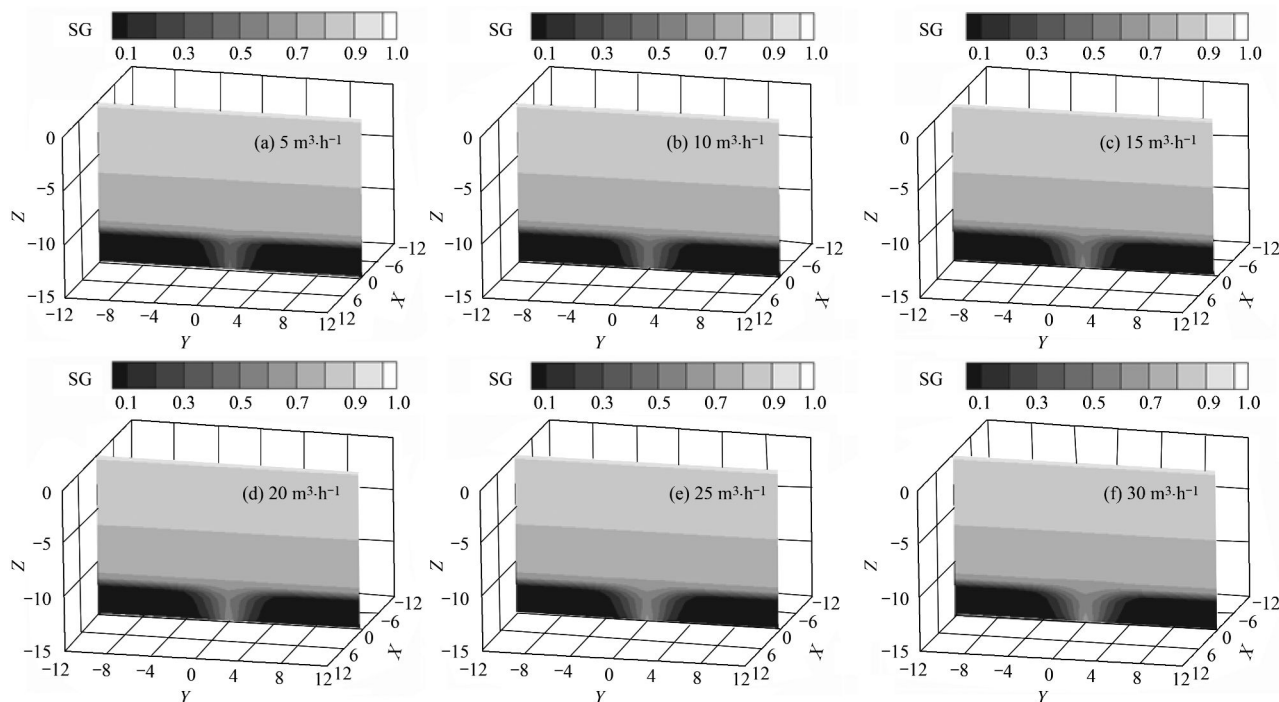


图 9 不同注气速率对含水层中气相饱和度的影响

Fig. 9 Effect of injection rate on gas phase saturation in aquifer

符,与郑艳梅等^[21]模拟得出的空气流场分布结论相一致.为防止相邻注射井之间存在修复死角,以 U 型开口增大处距离注射井之间的水平距离为影响半径,当注气速率为 5、10、15、20、25、 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,其影响半径分别为 1.5、1.5、2、3、3、3 m. 由此可以看出,随着注气速率的增加,影响半径逐渐增大,但当注气速率加大到一定程度后,影响半径不再继续增大,这与武强等^[22]的试验结果相符.在低曝气量时,地下水土环境中的空气孔道较少,增大曝气量可以增加孔道的数量,提高空气在介质中所占体积,同时孔道的覆盖面积也会随之增大,而随着曝气量的进一步增大,空气孔道的数量已接近饱和,额外增加的气流大部分都从原有的孔道流走,注气速率的继续增加只会使气流在介质中的停留时间变短,而气相饱和度和影响半径并没有相应幅度的增大^[23].

通过注气速率与影响半径之间的关系可以看出,在该场地条件下,最佳注气速率为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,

这一结果与现场试验结果较接近.

4.3 影响半径优化

从 3.2 节的结论可以看出,当注气速率为 $20 \sim 30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,影响半径为 3 m,而现场试验得出影响半径为 5 m. 从图 9 中可以看出,气流在地下水中呈 U 型,但是在接近水面处 U 型开口迅速增大,因此,从地下水上部与非饱和带中所测的参数变化反映出的结果比地下水中实际气流半径要大. Lundegard 等^[24]研究也指出,传统测试方法只能通过间接方式测量空气注射引起的地下水和土壤气中压力和组成的改变,所以测试结果往往会比实际影响半径要大.

5 修复模拟

5.1 注射井布置

一般在实际应用中,采用“等三角法”进行布井^[4,15],该方法可以合理利用 AS 系统资源,保证注

气井之间的有效修复范围有一定重叠,避免修复盲区的产生和污染物向未污染区域的迁移. 图 10 以三口相邻注射井为例,示例等三角布井方法.

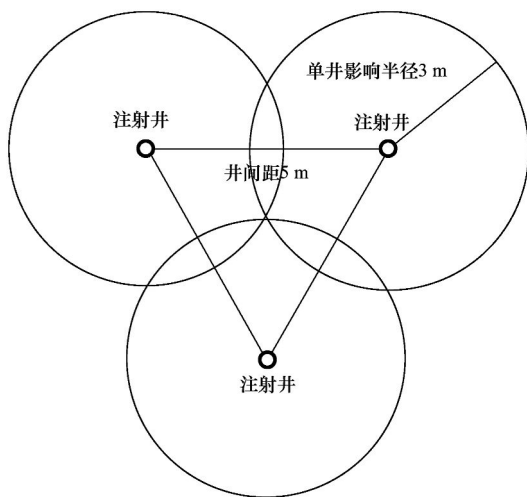


图 10 AS 井间距设置

Fig. 10 AS well spacing

通过等三角方法计算得出影响半径 3 m 时井间距为 5 m.

5.2 修复区域污染物分布

实际污染场地面积较大,本研究中仅假设 1 个长度 100 m,埋深 15 m 的二维网格作为模拟区域. 修复区域污染物最高浓度为 $371\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,模型中污染物浓度采用质量分数表示,即 8.56×10^{-5} . 模型中左边界水位埋深 12.85 m,右边界水位埋深 13.05 m,不透水层埋深 15 m,在 X 轴方向上每隔 5 m 设置一个注射井,共有注射井 19 个,横坐标依次为 $X=5、10、15\cdots\cdots 90、95$,注射井井屏位于地面以下 14.5 ~ 15.0 m. 污染物分布如图 11 所示,其中, $X(\text{aq})\text{ben}$ 表示溶解态苯的质量分数.

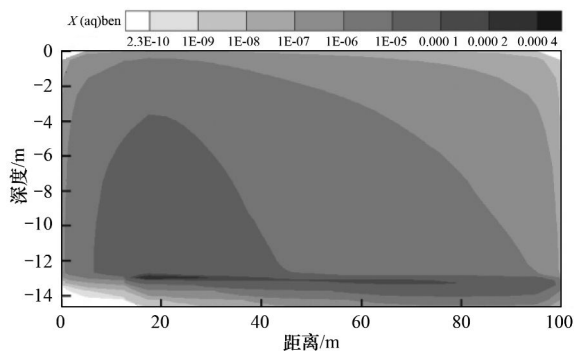


图 11 溶解态苯质量分数分布

Fig. 11 Mass fraction distribution of dissolved benzene

从图 11 中可以看出,含水层上部污染物含量最高. 污染物的泄露扩散过程中受到对流、弥散、吸

附、挥发等作用,在地下水流的作用下,污染物沿水流方向向下游迁移,由于苯密度比水小,所以垂向迁移较小,污染物主要集中在含水层上部. 随着迁移时间的增加,污染物逐渐向含水层深处扩散,同时,在挥发作用下,部分污染物也向非饱和带扩散.

5.3 修复方式研究

为满足基于场地健康风险评价所确定的可接受的场地污染水平,苯的修复目标值定为 $1\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,转化为苯在水中的质量分数为 2.31×10^{-10} .

图 12 所示为注射井一直处于开启状态下,修复活动进行 100 d 后苯的分布情况.

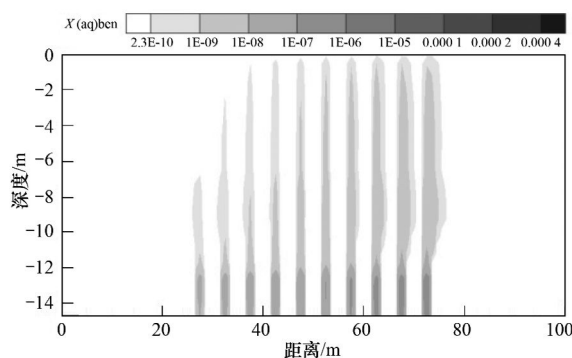


图 12 注气 100 d 后溶解态苯质量分数分布

Fig. 12 Mass fraction distribution of dissolved Benzene 100 days after injection

在修复过程中,对于污染物浓度已经达标的区域,关闭其范围内的注射井,以下称该修复方式为注射井逐个关停方式. 表 2 所示为修复过程中注射井的开启情况,图 13 所示为 10、20、40、70、80、90 d 后苯在水中的质量分数分布.

表 2 不同修复时间注射井的开启状况

Table 2 Open injection wells at different time

修复时间/d	开启注射井的坐标 X/m
0 ~ 40	5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、85、90、95
40 ~ 70	25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、90、95
70 ~ 80	50、55、60、65、70、75
80 ~ 90	60、65、70、75

从图 12 ~ 13 中可以看出,苯去除速率最快的区域位于注气点的周围. 污染物从水相向空气孔道中的挥发是主要的传质机制^[25],注气点附近气流密度较大(如图 3),气-液传质面积大,并且气液之间浓度梯度较大,所以苯能较快的从水中进入气相中,随着气相的上升而去除.

从图 12 ~ 13 中可以看出,注射井逐个关停的修

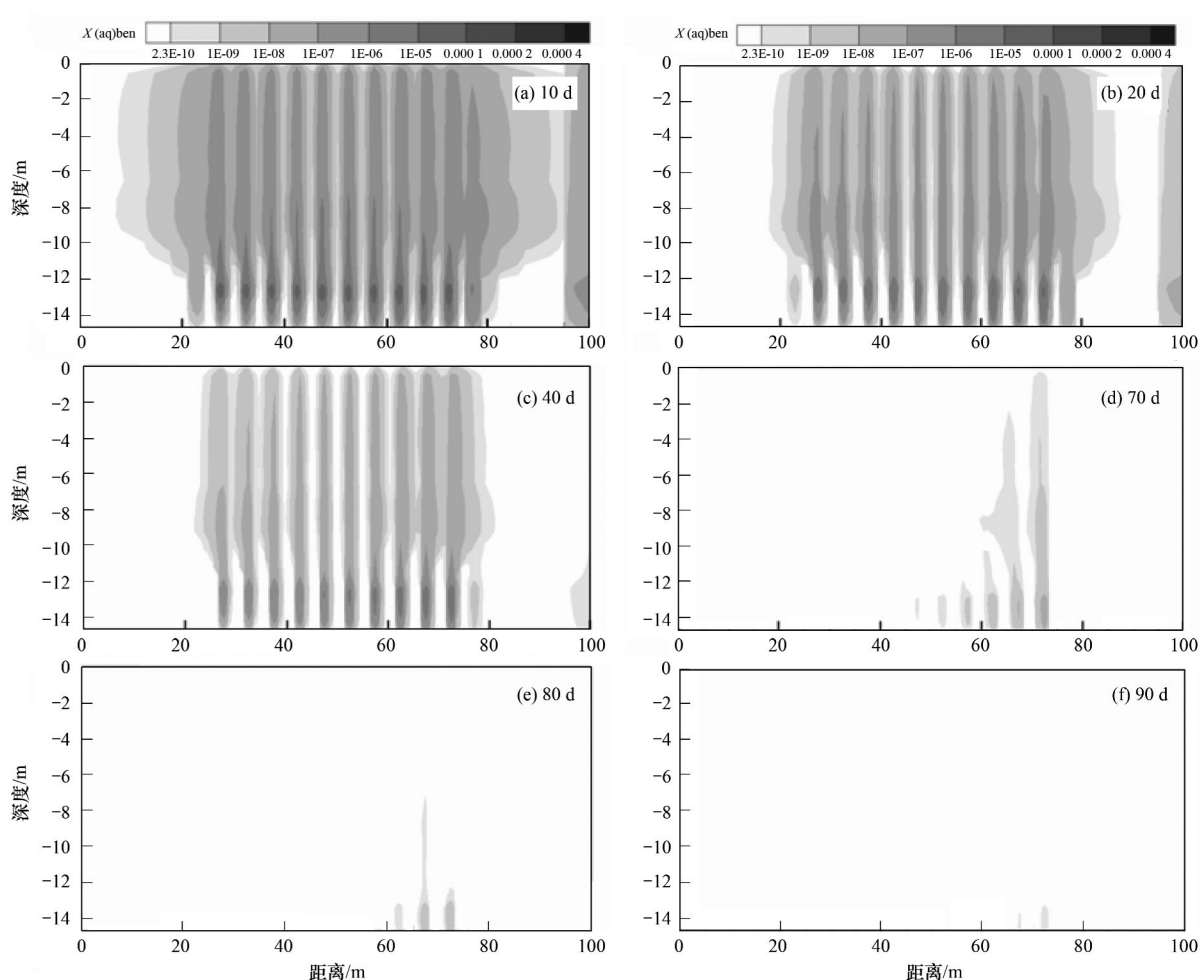


图 13 不同注气时间后溶解态苯质量分数分布

Fig. 13 Mass fraction distribution of dissolved Benzene during the injection

复效果比一直开启的修复效果要好. 注射井一直开启的状态下,携带苯的气流在周围气体压强下从含水层中垂直向上运移到地面,而当达标区域停止空气注射后,携带苯的气流从含水层中进入非饱和带后在气体压差作用下向压强小的区域进行一定程度的扩散,增大了苯的传质面积,加快了修复的过程.

从图 13 中还可以看出,受注入空气的影响,最远注射井(横坐标为 $X = 95$ m)下游污染物向下游进行迁移扩散,由此可知,在实际修复过程中需在污染羽边缘设置一排或数排空气注射井,以防止污染物向未污染区域的扩散.

采用注射井逐个关停的方式,修复活动进行 90 d 后,污染区域内的苯含量下降到修复目标值以下.

6 结论

(1)模型对现场试验过程中地下水压力变化进行了模拟,模拟结果与实测结果吻合较好,该软件的

模拟结果可以较好地代表实际结果.

(2)传统测试方法通过测量空气注射引起的地下水 and 土壤气中压力和组成的变化来推断影响半径,因此结果往往比实际影响半径偏大. 研究区域现场试验推断影响半径为 5 m,模型结果显示实际影响半径为 3 m.

(3)修复过程中,采用注射井逐个关停的方式较注射井一直开启方式的修复周期短. 研究区域采用注射井逐个关停的修复方式,90 d 后即可达到修复目标.

(4)现场试验条件有限,只能得出初步的设计参数,利用试验结果与模拟结果相结合的方式,能够得出较合理的设计参数,优化修复方式,预测修复周期,为实际工程实施提供技术参考与理论依据.

参考文献:

- [1] 何秋生, 王新明, 赵利容, 等. 炼焦过程中挥发性有机物成分谱特征初步研究[J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 61-65.
- [2] 何洁, 赵春香, 赵彩莲, 等. 某焦化厂苯污染危害调查[J].

- 中国煤炭工业医学杂志, 2006, **9**(10): 1095-1096.
- [3] 张应华, 刘志全, 李广贺, 等. 土壤苯污染引起的饮用地下水健康风险评价[J]. 土壤学报, 2008, **19**(2): 93-95.
- [4] Battell Memorial Institute. Final air sparging guidance document [R]. Washington: Naval Facilities Engineering Command, 2001.
- [5] Andrea L, Johson P C, Johson R L, *et al.* Air sparging design paradigm[R]. https://www.clu-in.org/download/contaminant-focus/dnapl/Treatment_Technologies/Air_Sparg_paradigm.pdf. 2002.
- [6] Rahbeh M E, Mohtar R H. Application of multiphase transport models to field remediation by air sparging and soil vapor extraction[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **143**(1-2): 156-170.
- [7] Benner M L, Mohtar R H, Lee L S. Factors affecting air sparging remediation systems using field data and numerical simulations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, **95**(3): 305-329.
- [8] Jang W, Aral M M. Multiphase flow fields in in-situ air sparging and its effect on remediation [J]. Transport in Porous Media, 2009, **76**(1): 99-119.
- [9] 施小清, 张可霓, 吴吉春. TOUGH2 软件的发展及应用[J]. 工程勘察, 2009, (10): 29-39.
- [10] Thunderhead Engineering Consultants, Inc. PetraSim User Manual [R]. <http://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2011/04/PetraSimManual.pdf>. 2008.
- [11] Rasmusson K, Rasmusson M. NAPL spill modeling and simulation of pumping remediation [R]. Uppsala Sweden: Uppsala University, 2009.
- [12] 陈华清, 李义连. 地下水苯系物污染原位曝气修复模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 46-51.
- [13] 陈华清, 李义连. 浅层地下水 PCE/TCE 污染原位曝气修复模拟研究 [J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(11): 53-57.
- [14] Luelseged T. Remediation of napls in groundwater using in situ air sparging [D]. Illinois: Chicago University, 2002.
- [15] 陈华清. 原位曝气修复地下水 NAPLs 污染实验研究及模拟 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [16] Chapter VII-Air Sparging [EB/OL], http://www.epa.gov/OUST/pubs/tum_ch7.pdf, 2002. 9-11.
- [17] 环境保护部. 国家污染物环境健康风险名录 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009. 1-9.
- [18] Bass H D, Hasting N A, Brown R A. Performance of air sparging systems: a review of case studies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, **72**(2-3): 101-119.
- [19] Ji W, Dahmain A, Ahlfied D P, *et al.* Laboratory study of air sparging: air flow visualization [J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 1993, **13**(4): 115-126.
- [20] 张英, 姜斌, 黄国强, 等. 地下水曝气过程中气体流型的实验研究 [J]. 化工进展, 2003, **22**(增刊): 246-251.
- [21] 郑艳梅, 李鑫钢, 黄国强. 地下水曝气过程中空气流场的数学模拟 [J]. 化工学报, 2007, **58**(5): 1277-1282.
- [22] 武强, 王志强, 杨淑君, 等. 地下水曝气工程技术研究——以德州胜利油田地下水石油污染治理为例 [J]. 地学前缘, 2007, **14**(6): 214-221.
- [23] 李雨松. 空气扰动法 (AS) 处理氯苯污染地下水的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [24] Lundegard P D, LaBrecque D. Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, U. S. A.): actual and apparent radius of influence [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1995, **19**(1): 1-27.
- [25] 郑艳梅, 李鑫钢, 王战强, 等. AS 技术修复 MTBE 污染地下水的传质研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(3): 503-505.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行