

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究

姜林^{1,2}, 钟茂生^{1,2}, 贾晓洋^{1,2}, 夏天翔^{1,2}, 姚珏君^{1,2}, 樊艳玲^{1,2}, 张丽娜^{1,2}, 唐振强³

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 北京市固体废物与化学品管理中心, 北京 100089)

摘要: 以北京某大型焦化厂苯污染地下水为例, 对该场地不同功能地块苯呼吸暴露途径的致癌风险进行了评价, 计算了苯的修复目标、修复范围并提出了相应的修复策略。结果表明, 室内呼吸含苯的蒸气为关键暴露途径。该途径下, 规划为商业用地的地块 A 苯的致癌风险为 6.37×10^{-8} , 未超过 1.0×10^{-6} , 风险可接受。但规划为工业遗址公园的地块 B 及规划为综合开发区的地块 C 苯的致癌风险分别为 2.20×10^{-4} 、 7.49×10^{-5} , 均超过可接受风险水平。为使风险可接受, 该场地地下水应修复至 $118 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 需修复的地下水面积约为 16.5 万 m^2 。综合考虑该场地地下水含水层的高渗透性及苯的强挥发性, 确定削减污染源强度的空气注射技术并辅以切断暴露途径的工程控制措施为该场地苯污染地下水的优先修复策略。

关键词: 地下水; 人体健康; 风险评价; 源强削减; 工程控制

中图分类号: X523; X820.4; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3329-07

Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway

JIANG Lin^{1,2}, ZHONG Mao-sheng^{1,2}, JIA Xiao-yang^{1,2}, XIA Tian-xiang^{1,2}, YAO Jue-jun^{1,2}, FAN Yan-ling^{1,2}, ZHANG Li-na^{1,2}, TANG Zhen-qiang³

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Centre for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Beijing Municipal Solid Waste and Chemical Management Center, Beijing 100089, China)

Abstract: The carcinogenic risk originated from benzene in contaminated groundwater of a large-scale coke plant in Beijing was analyzed and assessed for different land use zones according to the site redevelopment plan. The results revealed that indoor vapor inhalation was the key exposure pathway for all the three zones. The carcinogenic risk in zone A as commercial area was 6.37×10^{-8} , below the maximum allowable level (1.0×10^{-6}), but was 2.20×10^{-4} in zone B as industrial park and 7.49×10^{-5} in zone C as residential/commercial area, both beyond the acceptable level. Further, the remediation target for benzene was calculated at $118 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and the corresponding remediation area was contoured to be $165\,000 \text{ m}^2$. Given the high permeability of the aquifer and the excellent volatility of benzene, air-sparging with a combination of engineering control measure was recommended to mitigate the risk of the groundwater contamination.

Key words: groundwater; human health; risk assessment; source decontamination; engineering control

地下水是我国 70% 人口的饮用水源, 我国 661 个城市中有 400 多个城市开采地下水作为饮用水。地下水水环境质量对于国民经济发展和人民群众身体健康至关重要^[1]。但是, 在从事各项生产活动的过程中, 由于废水的大量排放、工业废渣淋滤、城市垃圾填埋场的渗漏、石油和化工原料的传输管线、储存罐的破损以及农业污水灌溉等活动, 我国许多地区地下水已受到不同程度的污染^[2]。据已有调查资料, 我国现有 300 多个城市由于地下水污染造成供水紧张。部分城市浅层地下水已不能直接饮用, 华北平原部分地区深层水中已有污染物检出^[1]。近年来, 随着一些突发地下水污染事件的发生, 地下水污染问题也越来越引起人们的关注, 国家有关部门也开始把地下水污染研究列为工作内容,

在不同层次的科研项目中也出现了地下水污染控制和治理方面的课题^[3]。

地下水污染健康风险评价是基于保护人体健康的考虑, 客观、科学的量化地下水污染对人体健康产生的潜在影响。截至目前, 美国、英国、荷兰等国家业已开展了基于保护人体健康的地下水污染风险评价研究并制定颁布了许多相关技术导则^[4~8]。随着我国地下水污染问题的不断暴露, 国内也有研究人员开展了地下水污染风险评价的相关研究^[9~13]。

收稿日期: 2011-12-21; 修订日期: 2012-03-27

基金项目: 北京市科委重大项目 (D08040900360804); 环境保护公益性行业科研专项 (201009032)

作者简介: 姜林 (1964 ~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为污染场地调查、修复与固体废物污染控制, E-mail: jl-iej@vip.163.com

但是,已有研究在进行地下水健康风险评价时,将直接摄入途径(即直接饮用受污染地下水)及皮肤接触途径(即用受污染地下水淋浴等)作为受体主要的风险暴露途径进行相应的风险评估^[9~13]. 对于一些地下水已探明存在严重污染并已有明文规定禁止将该区域或场地地下水直接用作饮用水或生活用水地区的地下水污染健康风险评价,这种方法并不适用,其评价结果难以为该区域或场地受污染地下水的修复及管理决策提供科学指导. 本研究以北京某焦化厂苯污染地下水的健康风险评价为例,详细介绍如何根据工业污染场地中受体特定暴露特性进行地下水健康风险评价以及如何基于风险削减及控制理念进行地下水修复策略的制定,以期为国内类似地下水风险评价及管理项目提供借鉴.

1 研究区概况

本研究选取的焦化厂位于朝阳区东四环以外垡头地区,始建于1959年,主要以煤炭为原料,生产煤气和焦炭,并从粗焦油中提取各类化工产品. 厂区占地面积135万m²,地势平坦,地层结构主要分4

层,从上至下依次为0~1.5 m 回填土层、1.5~6.5 m 黏质粉土层、6.5~9.5 m 黏土层、9.5~18 m 砂质潜水含水层. 潜水水位埋深13~14 m,整体流向为自西北向东南方向,水力梯度1.4 m,地下水平均流速为1.4 cm·d⁻¹. 根据相关部门的规划,该厂区未来将大致规划为3个不同功能区,其中厂区北部(A区)将规划为商业开发区,中东部(B区)主要规划为工业遗址公园,西南部(C区)规划为涵盖商业开发及住宅的综合开发区,各功能区的相对位置如图1所示.

2 材料与方法

2.1 地下水采集

根据对厂区所属企业生产设施的具体布置、场地污染状况的现场踏勘、厂区现有地下水井水质监测结果、厂方长期工作人员的现场访谈以及厂区地下水水文地质情况,最终在该厂区内布置了48口潜水监测井,采集地下水样品48件. 地下水监测井的具体布置如图1所示,监测井的建设及地下水样品的采集遵循相关技术导则进行^[14].

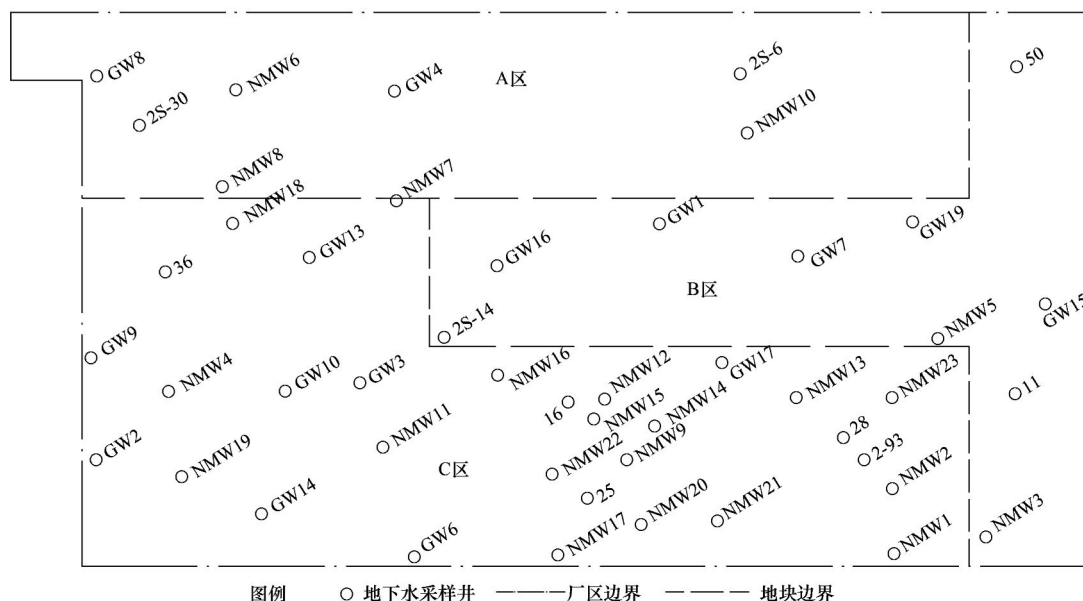


图1 地下水监测井平面布置

Fig. 1 Layout of groundwater monitoring well

2.2 样品分析

地下水样品分析方法参见文献[15],方法检出限0.5 μg·L⁻¹.

2.3 评价方法

地下水健康风险评价主要遵循数据收集-评估、毒性评估、暴露评估、风险表征4个步骤. 其中,数

据收集-评估主要是通过现场采样监测,确定场地地下水中目标污染物的种类、浓度及风险表征过程中需要用到的场地特征参数;毒性评估主要是确定目标污染物的毒性参数;暴露评估主要是根据场地未来的用地功能及污染介质特性,确定完整的暴露途径、暴露受体及暴露量计算模型;风险表征主要是

依据前 3 步的工作结果,采用剂量-效应模型计算完整暴露途径下特定暴露受体的健康风险. 其中,各种暴露途径下定量化风险计算模型的详细描述可参考文献[14,16]. 此处只详细描述地下水中挥发性有机物呼吸暴露途径的风险计算模型,具体如式(1)及式(2)所示:

$$IR1 = c_w \times \frac{H \times \frac{D_{ws}^{eff}}{L_B \times ER \times L_{gw}}}{1 + \frac{D_{ws}^{eff}}{ER \times L_B \times L_{gw}} + \frac{D_{ws}^{eff} \times L_{crack}}{D_{crack} \times L_{gw} \times \eta}} \times \frac{EF \times ED}{AT \times 365} \times URF \times 10^6 \quad (1)$$

$$IR2 = c_w \times \frac{H}{1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_{gw}}{D_{wss}^{eff} \times W}} \times \frac{EF \times ED}{AT \times 365} \times URF \times 10^6 \quad (2)$$

$$D_{ws}^{eff} = (h_{cap} + h_v) \left[\frac{h_{cap}}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$D_{cap}^{eff} = D_{air} \frac{\theta_{air}^{3.33}}{\theta_{tc}^2} + \frac{D_{water}}{H} \times \frac{\theta_{water}^{3.33}}{\theta_{tc}^2} \quad (4)$$

$$D_s^{eff} = D_{air} \times \frac{\theta_{air}^{3.33}}{\theta_t^2} + \frac{D_{water}}{H} \times \frac{\theta_{water}^{3.33}}{\theta_t^2} \quad (5)$$

$$D_{crack} = D_{air} \times \frac{\theta_{air}^{3.33}}{\theta_t^2} + \frac{D_{water}}{H} \times \frac{\theta_{water}^{3.33}}{\theta_t^2} \quad (6)$$

上述式中,IR1 为室内呼吸暴露途径的致癌风险,无量纲;IR2 为室外呼吸暴露途径的致癌风险,无量纲; c_w 为地下水中污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; H 为污染物亨利常数,无量纲; h_{cap} 为毛细带厚度,m; h_v 为土壤包气带厚度,m; L_{gw} 为地下水埋深,m; L_B 为建筑物层高,m; L_{crack} 为建筑物底板厚度,m; η 为建筑物底板裂隙率,无量纲;ER 为室内换气率, $\text{次} \cdot \text{s}^{-1}$;EF 为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$;ED 为暴露周期,a;AT 为平均暴露时间,a; U_{air} 为呼吸带风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; δ_{air} 为呼吸带高度,m; W 为平行于风向的距离,m;URF 为致癌斜率因子, $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$; θ_{waterc} 为毛细带土壤水分体积含量,无量纲; θ_{airc} 为毛细带土壤空气体积含量,无量纲; θ_{tc} 为毛细带土壤总孔隙度,无量纲; θ_{water} 为包气带土壤水分体积含量,无量纲; θ_{air} 为包气带土壤空气体积含量,无量纲; θ_t 为包气带土壤总孔隙度,无量纲; D_{air} 为污染物在空气中的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; D_{water} 为污染物在水中的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

3 风险评价

3.1 数据采集与分析

(1) 地下水苯浓度采集

本研究区域 3 个不同功能地块 48 个地下水样品苯的监测结果如表 1 所示.

表 1 样品监测浓度¹⁾

Table 1 Analysis results of the samples

监测井编号	11	16	25	28	36	50	2-93	2s-6
苯浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<0.5	801	<0.5	371 000	<0.5	<0.5	215	<0.5
监测井编号	2s-14	2s-30	GW1	GW2	GW3	GW4	GW6	GW7
苯浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.8	<0.5	<0.5	<0.5	10.6	<0.5	13.7	<0.5
监测井编号	GW8	GW9	GW10	GW13	GW14	GW15	GW16	GW17
苯浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	141	8.7	23.3	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
监测井编号	GW19	NMW1	NMW2	NMW3	NMW4	NMW5	NMW6	NMW7
苯浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<0.5	2.4	1000	<0.5	<0.5	<0.5	17.6	<0.5
监测井编号	NMW8	NMW9	NMW10	NMW11	NMW12	NMW13	NMW14	NMW15
苯浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<0.5	756	<0.5	0.7	208	<0.5	76400	39.1
监测井编号	NMW16	NMW17	NMW18	NMW19	NMW20	NMW21	NMW22	NMW23
苯浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	<0.5	<0.5	<0.5	0.7	2	<0.5	<0.5	<0.5

1) <0.5 表示该地下水样品中苯浓度低于方法检测下限 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

由表 1 可以看出,此次采集的 48 个地下水样品中 19 个检出苯,浓度介于 $0.7 \sim 371\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均浓度为 $23\,717.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于目前场地风险评价过程中一般以样品的 95% 置信上限浓度作为风险计算的浓度^[17],因此本研究采用 Pro-UCL 软件计算研究区域不同地块地下水苯的 95% 置信上限浓度为分别为 A 区 $48 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, B 区 $130\,450$

$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, C 区 $8\,860 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) 其他相关参数采集

地下水污染健康风险评价模型用到的其它相关参数见 2.3 节所述. 其中,考虑非饱和带不同深度土壤质地的不同,最终代入模型中的土壤参数为该区域不同深度对应土壤参数的加权平均值. 取值如表 2 所示.

表 2 参数取值
Table 2 Values of parameters

参数	θ_t	θ_{water}	h_v	L_{gw}	θ_{waterc}	θ_{tc}	W	L_B	η	U_{air}	δ_{air}	D_{water}	D_{air}	L_{crack}	ER	H
A 区	0.43	0.22	10	11	0.34	0.38	1 300	3	0.01	2.2	2	9.8×10^{-12}	8.8×10^{-6}	0.15	2.3×10^{-4}	0.227
B 区	0.42	0.19	11	11	0.34	0.38	1 000									
C 区	0.41	0.19	11	11	0.34	0.38	1 000									

1) θ_{waterc} 、 θ_{airrc} 、 θ_{tc} 、 η 、 U_{air} 、 δ_{air} 、ER 这 7 个参数因无法实测,采用的是 ASTM 推荐值,参见文献[18]; 2) $\theta_t = \theta_{\text{water}} + \theta_{\text{air}}$, $\theta_{\text{tc}} = \theta_{\text{waterc}} + \theta_{\text{airc}}$

3.2 毒性评估

污染物毒性指以剂量-反应关系表示污染物对人体产生的不良效应. 苯的毒性主要表现在致癌性,其呼吸途径的单位致癌斜率因子 $\text{URF}^{[19]}$ 为 $2.2 \times 10^{-6} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$.

3.3 暴露评估

(1) 暴露途径

由于本研究区域潜层地下水已不作为饮用水及生活用水,因此直接摄入苯污染地下水及通过皮肤接触该场地苯污染地下水这 2 种暴露途径不存在. 但是,由于苯具有强烈的挥发性,未来居住在该场地的人群可能因呼吸自地下水挥发至室内或室外空气中的苯而对使自身健康受到危害. 因此,地下水中的苯通过挥发进入室内空或室外空气并随呼吸进入人体进而对人体健康造成危害是该场地地下水健康风险的主要来源,如图 2 所示.

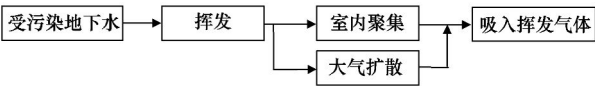


图 2 暴露途径分析
Fig. 2 Exposure pathway analysis

(2) 暴露参数

由于本研究区域已初步规划为不同功能区,各功能区的主要暴露受体及其暴露参数也不同. 其中 A 区为商业区,主要受体为成人. B 区为工业遗址公园,主要暴露人群为公园管理工作人员,其暴露性质可参考商业区工作人员. C 区为商业与居住混合的综合开发区,暴露人群既有小孩,也包括成人,其中小孩作为敏感受体. 在本次风险评价中相关参数主要依据相关统计数据确定,具体取值如表 3 所示^[14].

表 3 暴露参数

暴露参数	Table 3 Exposure parameter			工商业 成人
	儿童	居住	成人	
EF		350		300
ED	6		30	25
AT		70		

(3) 风险表征

3 个不同用地功能地块中地下水健康风险计算结果如表 4 所示.

表 4 风险计算结果

区域	Table 4 Risk calculation results		
	A 区	B 区	C 区
室内风险 (IR1)	6.37×10^{-8}	2.20×10^{-4}	7.49×10^{-5}
室外风险 (IR2)	2.26×10^{-8}	5.58×10^{-5}	1.02×10^{-5}
IR1/IR2	2.81	3.94	7.43

由表 4 可知,A 区地下水中苯污染对未来人群造成的致癌风险并未超过目前国内外普遍可接受的致癌风险水平 1.0×10^{-6} ^[19, 20~22],但 B 区及 C 区计算的风险值均超过这一水平. 而且,各区受体在室内所受风险大于室外所受风险 (IR1/IR2 比值均大于 1),这主要是因为室内换气率低、空气流动比弱,相对于室外,对空气中挥发性有机污染物的稀释作用小. 因此,依据该场地目前的用地规划,需要采取相应的措施对 B、C 区苯污染地下水进行修复,以确保其对未来人群的健康不造成不可接受的风险.

4 修复对策

4.1 修复目标及范围

由于同一受体不可能在室内外同时出现,因此修复目标的制定主要考虑主要风险途径,即室内呼吸蒸气暴露途径. 通过设定未来人群因该场地地下水苯污染而导致的可接受致癌风险增加概率为 1.0×10^{-6} ,可以通过式(1)反推该场地 B、C 区域地下水中苯允许的浓度 (即这 2 个区域地下水的修复目标). 其结果分别为 $593 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $118 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 考虑到厂区地下水的流动性以及地下水中苯的扩散迁移,最终该厂区地下水的应修复至 $118 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

通过将此前 48 个地下水样品苯的分析结果与修复目标比较发现,共有 7 个点超过修复目标,需要进行修复. 其具体位置如图 3 中实心黑点所示.

由图 3 中可以看出,超标点主要位于厂区的中部偏南方向以及东南部. 经过现场实地踏勘发现,

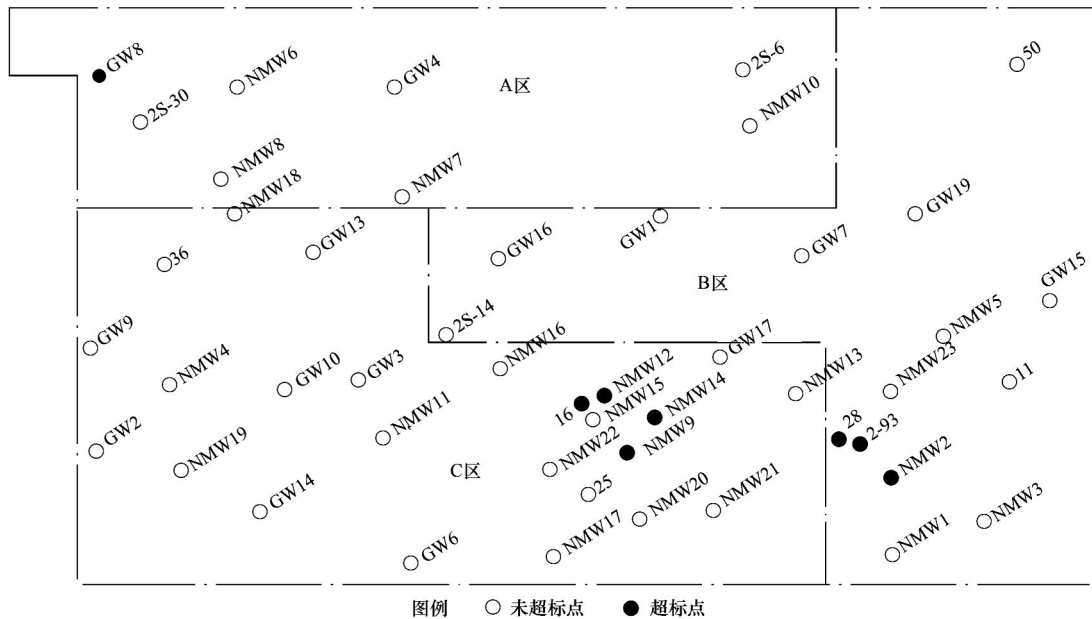


图3 超标点位置示意

Fig. 3 Locations of the monitoring wells exceeding the remediation target

这些超标点所在的区域正是粗苯回收车间以及精苯分厂车间所在地。现场可以明显看到正在渗漏的废水存储池及残留品储罐, NMW14 号井所在的粗苯车间现象尤为突出。因此, 可以推测, 该场地地下水中苯污染主要是该局部区域废水池及储罐泄露导致。而且, 由于随地下水的迁移, 污染区域沿着地下水流向已逐渐扩散至该局部区域的下游。

通过图 3 超标点位置, 虽然可以大致确定污染

区域所在位置及相应面积。但是, 据此确定的修复面积过大, 修复成本较高。因此, 为进一步详细探明该场地地下水中苯的污染状况, 本研究在已确定存在污染区域的外围进行补充监测采样, 另增设了 8 口地下水监测井做进一步监测, 具体布置位置如图 4 中的三角型图标所示, 其中实心三角形图标所代表的监测点 NMW30、NMW31、NMW33 的苯浓度依次为 509、2 170、105 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过修复目标值

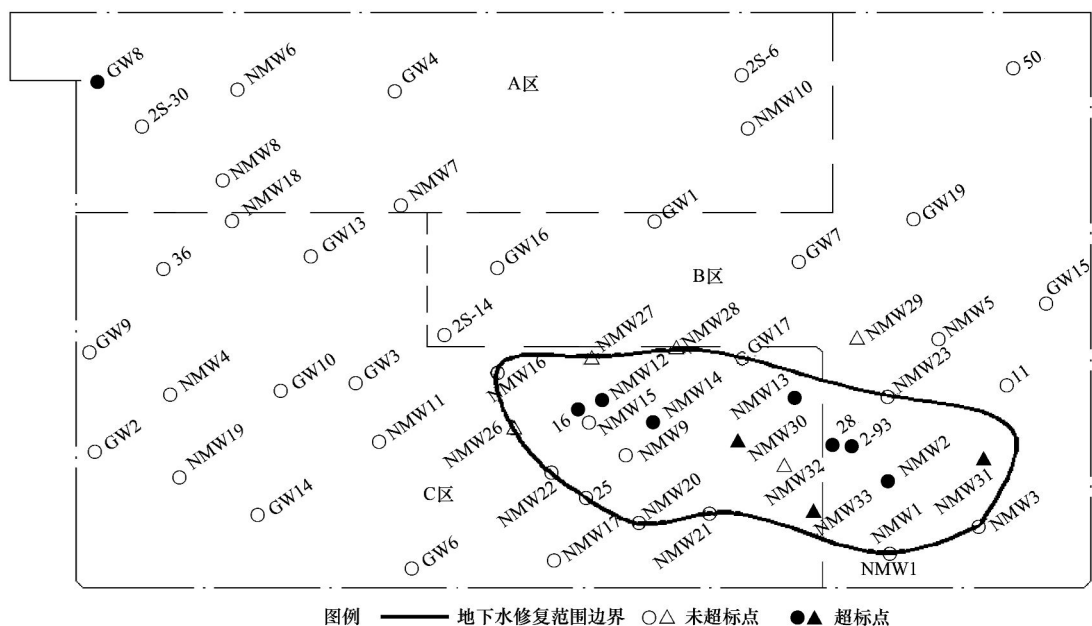


图4 地下水污染范围

Fig. 4 Groundwater contamination area

118 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 空心三角形图标所代表的监测点 NMW32、NMW26 浓度分别为 0.7、11.9 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, NMW27、NMW28、NMW29 苯浓度低于方法检出限。

因此,可综合前后两次的采样分析结果,更客观地确定本场地地下水的污染范围。具体如图 4 中黑实线所圈定的范围所示,面积大约为 16.5 万 m^2 。

由图 4 所确定的污染羽范围及变化趋势可知,该场地地下水中的污染源主要来自 NMW14 及 NMW12 所在的粗苯车间废水池及储罐的泄露。并且,污染羽随着场地地下的流动逐步向地下水下游方向扩散,其沿着地下水流向的扩散距离大于横向扩散距离,基本不向地下水上游地区扩散。

4.2 修复策略

目前,地下水修复技术包括抽出-处理(Pump-Treat)等异位修复技术以及空气注射(air-sparging)、生物曝气(bio-sparging)等原位修复技术。其中抽出-处理技术由于处理成本高、处理周期长、对场地扰动较大、地下水中苯浓度易反弹等缺点,其使用频率逐渐降低^[23, 24]。相反,诸如空气注射等原位修复技术由于其修复成本低、对地下水扰动小等优点逐步被采用^[23, 24]。考虑到研究区域地下水含水层土壤渗透性较好,达到 $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,高于该技术对土壤渗透性的最低要求 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[25~27]。而且,苯的挥发性极高,其亨利常数为 $230 \times 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$,也远高于空气注射技术对污染物亨利常数最低值 $100 \times 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的要求^[25~27]。

因此,综合考虑研究区域地下水污染状况及目前地下水修复技术的发展,最终确定空气注射作为该场地地下水的优先修复技术,该技术的具体原理及工艺流程可参考相关技术文件^[25~27]。

同时,由于该场地地下水主要是通过挥发进入室内后随呼吸进入人体,进而对人体健康不利。所以,为解决因场地污染状况及水文地质参数空间变异较大导致修复效果的不确定性,进而可能导致残留风险依然高于可接受风险水平这一问题,从构成风险的三要素出发,建议采用工程控制措施,切断苯进入室内的途径以控制其对人体健康产生不利影响的风险。例如,可在该场地未来建筑物底部铺设抽气管网及高密度乙烯防渗膜,将含有苯的蒸气隔离在建筑物底板之下并通过抽气管网将其定期抽出地面进行集中处理。

5 结论

(1)对北京某大型搬迁焦化厂地下水呼吸暴露

途径健康风险进行评价,结果显示该场地未来开发为商业用地的 A 区地下水苯污染的健康风险低于目前可接受致癌风险水平 1.1×10^{-6} 。但拟分别规划为工业遗址公园及综合开发区的 B、C 区苯污染地下水的健康风险均不可接受,且室内呼吸暴露为关键途径,风险分别为 2.20×10^{-4} 、 7.49×10^{-5} 。

(2)可接受风险水平下,厂区地下水苯浓度需修复至 118 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,需修复的面积达 16.5 万 m^2 。

(3)综合考虑研究场地的水文地质参数及苯的物理化学特性,将地下水空气注射修复技术列为本场地苯污染地下水修复的优先技术。同时,从构成风险的三要素出发,建议该场地未来开发时采取一定的工程控制措施,通过有效切断苯的暴露途径以达到有效解决因场地污染空间变异及水文地质参数空间变异较大导致修复效果不确定,进而导致残留风险依然高于可接受风险的问题。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国地下水污染防治规划[R]. 2008.
- [2] 陈梦熊. 中国水文地质工程地质事业的发展与成就——从事地质工作 60 年的回顾与思考[M]. 北京:地震出版社, 2003.
- [3] 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): 303-310.
- [4] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: human health evaluation manual[C]. EPA/540/1-89/002, 1989.
- [5] US EPA. Guidelines for exposure assessment[C]. EPA/600/Z-92/001, 1992.
- [6] USEPA. Dermal exposure assessment: principles and application [C]. EPA/600/8-91/011B, 1992.
- [7] USEPA. Guidelines for carcinogen risk assessment[C]. EPA/630/P-03/001F, 2005.
- [8] Peter G, Dietrich H, Alberto B, et al. Guideline for groundwater risk assessment at contaminated sites [EB/OL]. <http://www.uni-tuebingen.de/gracos>, 2003.
- [9] 李政红,张胜,毕二平,等. 某储油库地下水有机污染健康风险评价[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 258-262.
- [10] 韩冰,何江涛,陈鸿汉,等. 地下水有机污染人体健康风险评价初探[J]. 地学前沿, 2006, 13(1): 224-229.
- [11] 张加双,杨悦锁,杜新强,等. 石油污染场地地下水污染健康风险评估[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36): 20887-20890.
- [12] 李燕,孙亚军,刘勇,等. 基于 RAIS 地下水源地健康风险评估[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 48-50.
- [13] Chai L H, Wang Z X, Wang Y N, et al. Ingestion risks of metals in groundwater based on TIN model and dose-response assessment-a case study in the Xiangjiang watershed, central-

- south China[J]. *Science of The Total Environmental*, 2010, **408** (16): 3118-24.
- [14] DB11/T 656-2009, 场地环境评价导则[S]. 北京市质量技术监督局.
- [15] USEPA. Volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)[S]. EPA method 8260C, 2006.
- [16] ASTM. Standard guide for risk-based corrective action [S]. E2081-00, 2004.
- [17] USEPA. Calculation of upper confidence limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites[S]. OSWER 9285.6-10, 2002.
- [18] ASTM E1739-95. Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites[S]. 2002.
- [19] USEPA. Integrated risk information system (IRIS) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/>, 2007.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则(征求意见稿)[S]. 2011.
- [21] Friebel E, Nadebaum P. Health screening levels for petroleum hydrocarbons in soil and groundwater part1: technical development document[S]. 2011.
- [22] DEFRA. Assessing risk from contaminated land-a proportionate approach[S]. 2006.
- [23] 张文静, 董维红, 苏小四, 等. 地下水污染修复技术综合评价[J]. 水资源保护, 2006, **22**(5): 1-4.
- [24] USEPA. Pump and treatment-groundwater remediation-a guide for decision makers and practitioners [S]. EPA/625/R-95/005, 1996.
- [25] Battelle. Air sparging guidance document[R]. Washington DC: Naval Facility Engineering Command, 2001. 8-10.
- [26] USEPA. How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: a guide for corrective action plan reviewers, chapter VII, air sparging[S]. EPA 510-R-04-002, 2004.
- [27] Yvonne J P B. Engineering and design in-suit air sparging[M]. Washington DC: United States Army Corps of Engineers, 2008. 39-45.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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