

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律

邓一荣^{1,2,3}, 陆海建², 董敏刚², 程洲², 庄长伟², 肖荣波^{2,4*}, 钟音¹, 彭平安¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 广东省环境科学研究院, 广东省污染场地环境管理与修复重点实验室, 广州 510045; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 以粤港澳大湾区某典型化工污染场地为例, 共采集了247个土壤样品和20个地下水样品, 探讨了场地苯系物的污染分布特征, 利用GMS分别从水平和垂直方向模拟分析了该场地苯系物在土壤与地下水的污染迁移扩散规律。结果表明, 场地土壤样品中苯、乙苯、间、对-二甲苯、邻-二甲苯超标值, 其中苯系物超标值的土壤样品主要集中在0.5~4 m深度范围; 地下水样品中苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯超标较严重, 最大超标倍数分别为140.00、101.33、212.00和103.40倍, 主要分布在浅层地下水。地下水中的苯系物在水平方向主要以对流/弥散运移方式从西北往东南方向迁移, 而在垂向上浮苯主要集中在地下水水面处, 溶解态苯主要在水动力作用下迁移。模拟验证分析结果表明, MT3D模型能较准确地反映场地苯系物的空间分布和迁移特征, 可为粤港澳大湾区化工类污染场地的精准化管控与修复提供科学指导。

关键词: 污染场地; 苯系物; 空间分布; 地下水; 污染物迁移

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5615-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906235

Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area

DENG Yi-rong^{1,2,3}, LU Hai-jian², DONG Min-gang², CHENG Zhou², ZHUANG Chang-wei², XIAO Rong-bo^{2,4*}, ZHONG Yin¹, PENG Ping-an¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Contaminated Environmental Management and Remediation, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Environment Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In this study, we analyzed 247 soil and 20 groundwater samples from a typical chemical site in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area and simulated the solute transport of pollutant benzene with the GMS software, in order to reconstruct the distribution and migration mechanism of benzene series (BTEX) pollutants. The detected concentrations of benzene, ethylbenzene, *m,p*-xylene, and *o*-xylene exceeded the screening values in some soil and groundwater samples, indicating that the pollution of BTEX in shallow groundwater was serious. Our simulation indicated an elliptical flow of benzene in groundwater (from northwest to southeast), mainly through convection, dispersion, and molecular diffusion. Along the vertical direction, the BTEX was mainly distributed in the form of floating benzene, and some of the constituents were dissolved in the groundwater. Due to hydrodynamic mechanisms, the dissolved benzene tended to migrate faster and had hence a greater impact on the downstream groundwater. Through the model validation and analysis, we obtained a linear fitting correlation coefficient (R^2) of 0.995 between the simulated and actual monitoring values, which indicates a good agreement between these two sets of data. The model had a high prediction accuracy, and could hence accurately determine the migration and distribution characteristics of benzene. Therefore, it provides a scientific basis for the accurate control and remediation of chemical contaminated sites in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area.

Key words: contaminated site; benzene series; spatial distribution; underground water; pollutant migration

随着我国城市化进程的推进和土地流转的巨大需求, 因工业企业关停并转遗留了大量污染地块, 其存在的土壤与地下水污染问题对城市人居环境健康安全构成严重威胁^[1~8]。国家的相关法律、法规要求土地用途变更为住宅、公共管理与公共服务用地的, 变更前应当按照规定进行土壤污染状况调查, 对于超标的建设用地地块, 须进行土壤污染风险评估^[9, 10]。

化工污染场地具有污染物种类繁多、复杂、可持久性强等特点, 是土壤污染防治攻坚难点之

一^[11~14], 其中苯系物 (benzene toluene ethylbenzene and xylene, BTEX) 是最典型的化工场地特征污染物^[15~18], 而 BTEX 中苯的毒性最大。如何准确获取场地污染物的分布特征、迁移规律对污染地块的调

收稿日期: 2019-06-28; 修订日期: 2019-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1800806, 2018YFC1800205, 2018YFC1801403); 国家自然科学基金项目 (41601616); 有机地球化学国家重点实验室开放基金项目 (SKLOG-201618); 广东省重大科技专项 (2016B020240008)

作者简介: 邓一荣 (1985~), 男, 博士, 主要研究方向为场地调查、风险评估和土壤修复, E-mail: ecoyrdeng@163.com

* 通信作者, E-mail: ecxiaorb@163.com

查评估、风险管控和治理修复具有重要实践意义^[11, 19~21]. 目前已有国内外学者开展了相关的工作, 如通过室内实验探讨水位波动对土壤苯系物污染迁移的影响、空气注射修复污染场地污染物苯的优化设计数值模拟、苯污染的迁移和分布规律以及苯从泄漏的原油类污染物中释放溶解到地下水中的质量传输规律^[22~25]. 目前对苯系物在场地土壤和地下水中的迁移规律研究多集中在室内实验和数值模拟的探索, 而对实际化工场地的应用研究还相对缺乏.

本研究以粤港澳大湾区某典型化工污染场地为例, 对场地土壤和地下水进行实地钻探取样和检测, 分析了场地苯系物的污染特征, 并以苯系物中的苯为典型对象, 探讨其在土壤和地下水中的空间分布、迁移规律及其影响因素, 以为化工类污染场地的精准化管控与修复提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 场地概况

地块位于粤港澳大湾区核心城市, 始建于20世纪60年代, 地块关闭搬迁前为化工涂料厂, 主要生

产各类油漆, 年产1万t以上. 因城市更新改造“退二进三”政策而关停搬迁, 地块用地性质是由工业用地规划调整为商住用地. 地块位于山前堆积冲沟地带, 整体地势呈北高南低, 由西向东呈高-低的条带式垄状低丘地形. 山顶标高为200 m, 冲沟海拔标高为45 m, 冲沟表层为花岗岩碎屑堆积物, 较杂乱, 无一定层次规律. 地块按地层沉积年代、成因类型可分为人工填土层、第四系冲积层(砂土)、第四系坡积层(粉质黏土)和第四系残积层(砂质黏性土)四大层.

1.2 样品的采集

为掌握地块的土壤与地下水污染情况, 经对地块的原生产区、储存区、废水处理区等区域的历史生产使用情况进行污染识别和综合判断后, 采用判断布点和系统布点法, 分初步和详细两个阶段进行布点, 共布设111个土壤采样点和20个地下水监测井, 如图1所示. 对土壤点位进行原位分层采样, 根据土壤分层与污染情况, 结合PID/XRF快速测定, 每个点位采集2~4个土壤样品, 共采集土壤样品247个, 地下水样品20个.

1.3 样品分析与质控

土壤与地下水样品苯系物含量采用吹扫捕集-

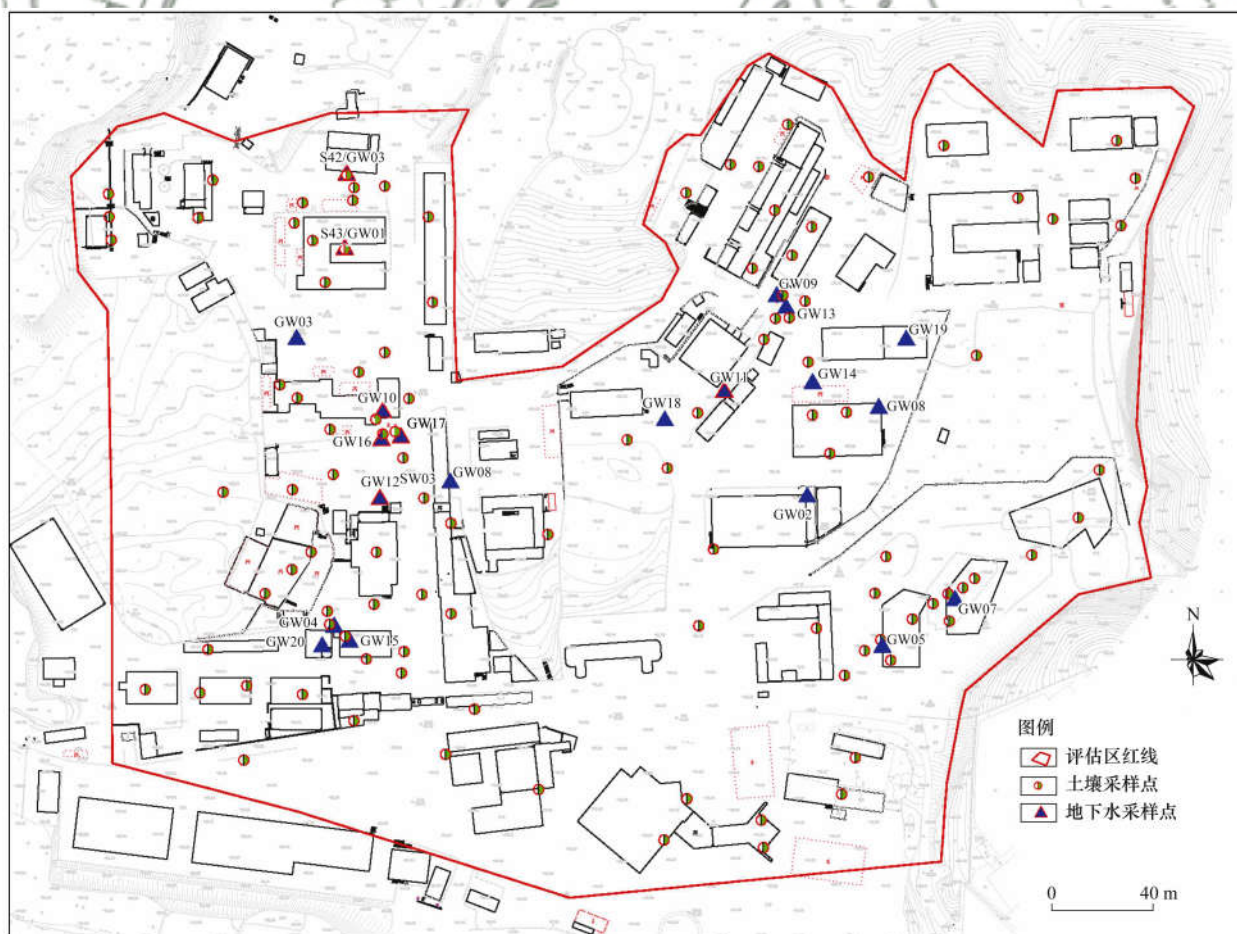


图1 场地采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling points within the site

气相色谱-质谱联用的方法测定,具体参照 USEPA8260C 的规定.同时,从样品采集到检测分析全过程严格质量保证/质量控制措施,采用现场平行、现场空白、运输空白、清洗空白、方法空白、基质加标等监控方法.土壤样品中苯系物的方法检出限为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,地下水样品为 $0.5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,回收率在 $80\% \sim 120\%$ 之间,方法空白中无待测物检出.

1.4 污染物在地下含水层中迁移规律的数值模拟

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right] + W = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t}, & (x, y, z \in \Omega) \\ h(x, y, z, t) = h_0(x, y, z), & (x, y, z \in \Omega), t = 0 \\ h \Big|_{B_1} = h_1(x, y, z, t), & (x, y, z) \in B_1, t \geq 0 \\ k \frac{\partial k}{\partial n} \Big|_{B_2} = q(x, y, z, t) = 0, & (x, y, z) \in B_2, t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, h 为地下水水头 (m); K_x 、 K_y 和 K_z 分别为 x 、 y 和 z 方向的渗透系数 ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$); B_1 为已知水头边界 (第一类边界); B_2 为隔水边界; h_1 为水位 (m); W 为源汇项强度 (d^{-1}); Ω 为渗流区域; μ_s 为储水率 (m^{-1}), 根据经验值取 0.000 9.

1.4.3 地下水水质运移模型

$$\begin{cases} R\theta \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i c) - Wc_s - Wc - \lambda_1 \theta c - \lambda_2 \rho_b \bar{c}, & (x, y) \in \Omega \\ c(x, y, t) = c_0(x, y, z), & (x, y) \in \Omega, t = 0 \\ c(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} = c_1(x, y, t), & (x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ \theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \Big|_{\Gamma_2} = f_1(x, y, t), & (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, c 为污染组分浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); D_{ij} 为水动力弥散系数张量 ($\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$); v_i 为地下水渗流速度张量 ($\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$); W 为水流的源 (正值) 或汇 (负值) (d^{-1}); θ 是介质的孔隙度, 无量纲; c_s 是源或汇中污染组分的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); λ_1 是溶解相一级反应速率 (d^{-1}); ρ_b 为多孔介质的密度 [$\text{mg}\cdot(\text{dm})^3$]; \bar{c} 介质骨架吸附的污染组分的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); t 为时间 (d); R 为阻滞因子; Γ_1 表示已知浓度边界, $c_1(x, y, t)$ 为已知浓度边界上的浓度值; Γ_2 表示通量边界, $f_1(x, y, t)$ 为边界 Γ_2 上已知的弥散通量函数.

1.4.4 初始浓度

根据地下水调查监测结果,通过有限差分法对场地污染区域进行浓度插值,得到模拟区域的初始浓度.

1.4.5 模拟中各参数值的确定

(1) 渗透系数 场地的潜水含水层分布有砂土层和粉质黏土层,模拟过程中按土层性质对其进行分区处理.通过现场抽水实验同时结合模拟调参拟合的结果确定各分区的渗透系数,其最终取值如表

方法

1.4.1 模拟方法

为掌握污染物在地下含水层中的迁移和变化规律,本文运用 GMS 中的 MODFLOW 和 MT3D 模块对苯系物的迁移进行模拟预测^[26].

1.4.2 地下水流模型

MODFLOW 是运用三维有限差分法分析地下水流模型,数学解析模型如下:

MT3D 模块以线性弥散和溶质质量守恒定律为基础,运用对流-弥散方程解析溶质在地下水中的迁移规律.基于 MODFLOW 模块的地下水水流模型,结合场地的污染物浓度等条件,运用溶质运移模型模拟预测污染物的迁移变化规律.溶质运移模型如下^[27]:

表 1 所示.

表 1 潜水含水层渗透系数各分区值/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$

Table 1 Permeability coefficients for the diving aquifer

in each subregion/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$		
分区号	1 区-砂土层	2 区-粉质黏土层
K_x	0.750	0.007
K_y	0.750	0.007
K_z	7.500	0.070

(2) 降水入渗系数 根据场地所在区域降雨量、地形地貌、土层性质结合当地经验赋予模拟的降雨入渗系数初值.模拟过程中经与场地实测水位的反演拟合确定最终的降雨入渗系数为 $0.0014 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$.

(3) 给水度 根据场地土层介质的均质性,对场地的给水度按照当地的经验值统一取 0.04.

2 结果与讨论

2.1 场地 BTEX 污染分布统计

为探究场地苯系物 (BTEX) 的空间分布情况,

在场地内采集了 247 个土壤样品和 20 个地下水样品,多个土壤样品中苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯的检出浓度超过了筛选值,最大超标倍数分别为 2.14、241.79、25.26 和 7.50。20 个地下水样品中苯系物(BTEX)检出统计结果如表 2 所示,地下水样品中苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯超标

较为严重,最大超标倍数分别为 140.00、101.33、212.00 和 103.40,超筛选值比例分别为 40.00%、35.00%、35.00% 和 35.00%。其地下水样品主要来自船漆工序车间、树脂工序车间及调色车间这 3 个生产区域,受污染地下水主要分布在松散岩类孔隙含水层中。

表 2 地下水样品中苯系物因子检出结果分析¹⁾

Table 2 BTEX contents in the groundwater samples

检测因子	筛选 /mg·L ⁻¹	筛选值 来源	最大值 /mg·L ⁻¹	最小值 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	标准偏差	检出率 /%	超筛选 值率/%	最大超标 倍数/倍
苯	0.010 0	A	1.400 0	nd	0.160 5	0.393 0	59.09	40.00	140.00
甲苯	0.700 0	A	2.930 0	nd	0.279 3	0.673 8	54.54	10.00	4.19
乙苯	0.300 0	A	30.400 0	nd	3.391 0	7.806 3	68.18	35.00	101.33
间,对-二甲苯	0.500 0	A	106.000 0	nd	8.304 7	23.837 2	77.27	35.00	212.00
邻-二甲苯	0.500 0	A	51.700 0	nd	3.432 8	11.552 5	68.18	35.00	103.40
苯乙烯	0.020 0	A	0.051 0	nd	0.006 8	0.015 5	40.91	10.00	2.55
氯苯	0.300 0	A	1.570 0	nd	0.100 6	0.353 6	40.91	10.00	5.23
1,4-二氯苯	0.300 0	A	0.001 3	nd	0.000 3	0.000 2	4.54	0.00	0.00

1)“A”表示《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017);nd 表示未检出

2.2 场地 BTEX 污染垂向分布特征

由于苯系物污染情况相同且苯为该场地土壤与地下水样品中检出比例及超标比例皆较高的污染物,其它苯系物在土壤和地下水中的迁移规律与苯相似,故以苯为例分析苯系物垂向污染分布特征。图 2 为场地采样点位土壤苯污染的垂直分布图,苯有检出的土壤样品大部分分布在 0.5~4 m 深度范围,苯超筛选值土壤样品也主要集中在 0.5~4 m 深度范围,土壤样品中苯检出含量最高为 8.55 mg·kg⁻¹,其对应深度为 4.0 m。可能是由于粤港澳大湾区地区地下水水位埋深较浅,枯水期与丰水期期间地下水存在水位波动带,波动带在 0.5~4 m 范围内。

2.3 场地 BTEX 污染在地下水中迁移及影响因素分析

2.3.1 BTEX 在水平方向迁移规律及因素分析

选取场地地下水中苯系物污染典型区域进行数值模拟,模拟区域共布设了 7 个地下水监测井,各监测井苯系物的检测结果如表 3 所示,GW09、GW11、GW13 和 GW14 监测井苯系物检测结果均出现了不同程度超筛选值情况,其中 GW13 监测井中苯系物超标最为严重。为预测苯系物的运移规律和结果,采

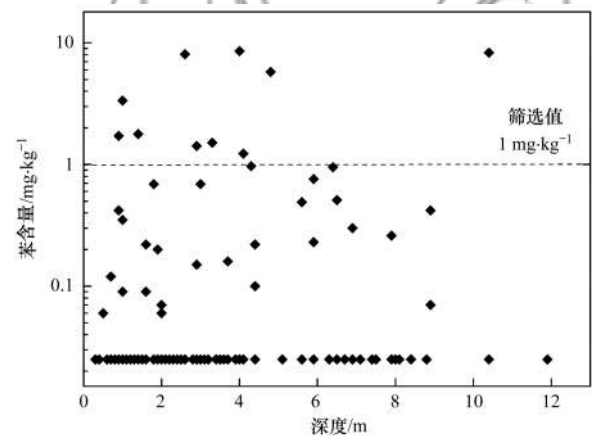


图 2 场地采样点位土壤苯污染的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of benzene in typical soil samples

用 GMS 软件对苯污染物进行模拟,模拟时通过有限差分法对场地污染区域进行浓度插值,得到模拟区域的初始浓度^[28]。图 3 为苯在场地内第 0、100、200 和 300 d 的浓度模拟预测结果。

根据地下水流场的模拟结果,场地地下水水位高低基本与地形吻合,西北高东南低,地下水流向是从西北往东南方向流动,场地地下水水位和地形如图 4 所示。根据溶质模拟预测结果可知,污染物主要

表 3 场地苯系物调查结果统计¹⁾/mg·L⁻¹

Table 3 Statistical chart of BTEX at the site/mg·L⁻¹

监测井污染物	筛选值	GW02	GW09	GW11	GW13	GW14	GW18	GW19
苯	0.010 0	nd	0.780 5	0.023 5	1.110 0	0.398 6	nd	0.002 1
甲苯	0.700 0	nd	0.595 0	0.049 0	0.792 0	0.470 0	nd	nd
乙苯	0.300 0	nd	0.900 0	0.080 0	0.732 0	0.450 0	nd	0.000 6
间,对-二甲苯	0.500 0	nd	1.800 0	0.180 0	2.560 0	0.750 0	0.001 4	0.001 1
苯乙烯	0.020 0	nd	0.002 7	0.001 6	0.051 0	0.050 6	nd	nd
邻-二甲苯	0.500 0	nd	0.788 0	0.580 0	1.440 0	0.900 0	0.700 0	nd

1)nd 表示未检出

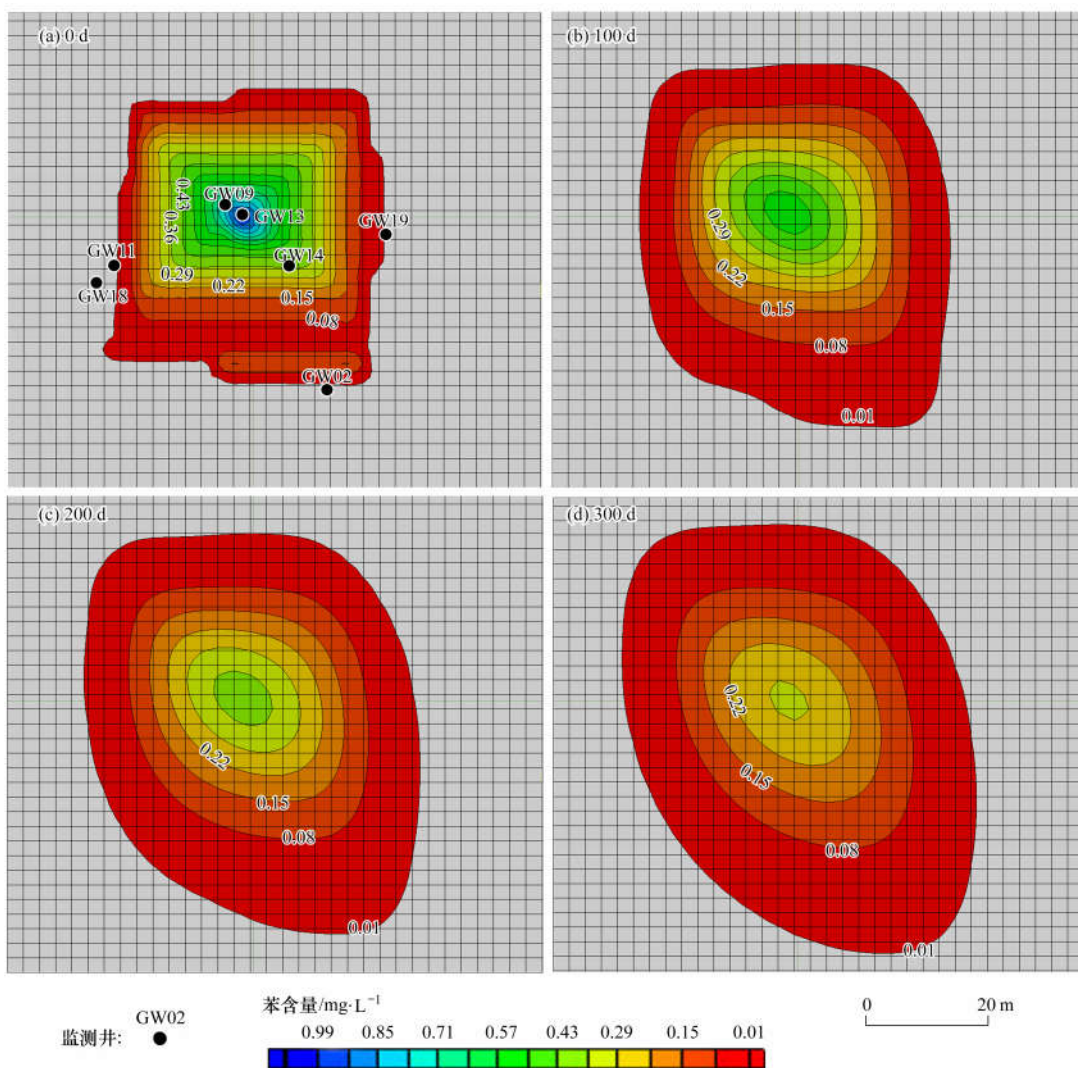
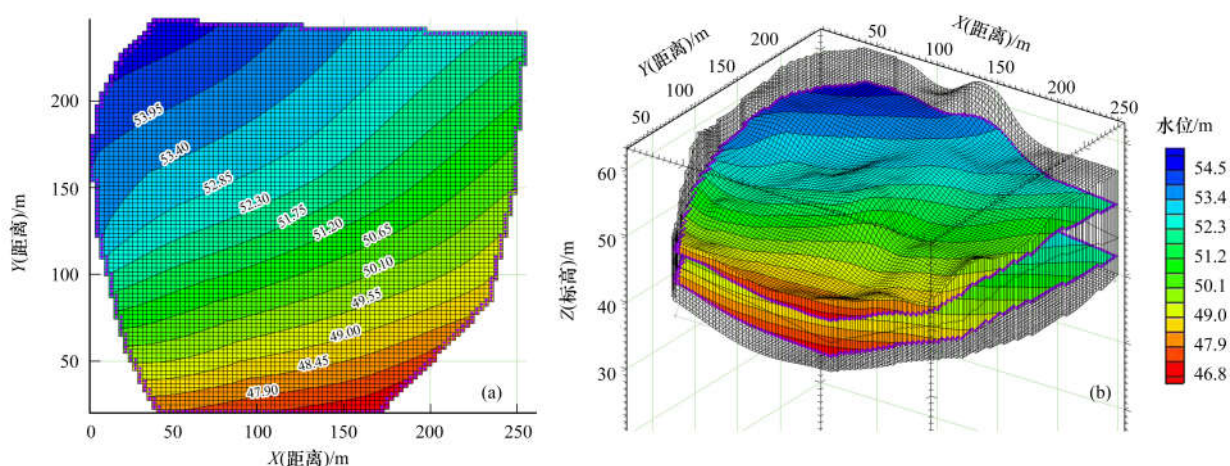


图3 场地污染物苯的模拟预测结果

Fig. 3 Simulated prediction results of benzene at the site



(a) 等水位线及监测点 GMS 模拟; (b) 场地地形及含水层三维分布

图4 场地地下水流场及地形模拟结果

Fig. 4 Simulation diagram of the groundwater flow field and topography at the site

运移方向与地下水流向基本一致即从西北往东南方向呈椭圆形状流动,也存在向其它方向的小范围的扩散,苯污染物在场地内主要以对流-弥散的运移方

式为主,同时存在分子扩散的形式^[29, 30].为更好地获取苯在空间上的迁移规律,统计分析模拟期内污染物苯在 GW9、GW13 和 GW14 在不同时期水平方

向上苯浓度的变化规律,其统计分析图如图 5 所示.

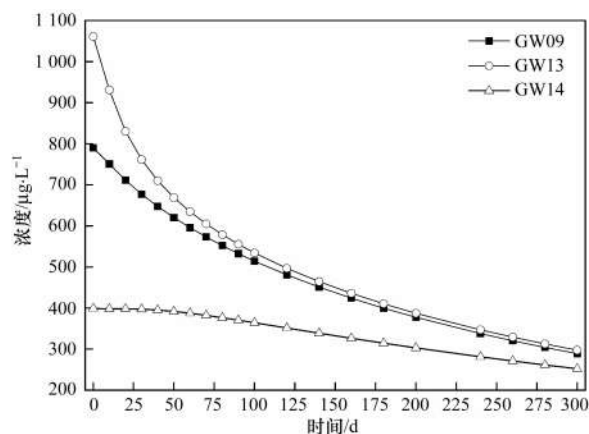


图 5 场地污染物苯模拟浓度随时间的变化趋势

Fig. 5 Variation of benzene concentrations over time at the site

如图 5 所示, GW13 处于污染晕中心且初始浓度最大,与其它 2 个监测井中苯浓度相比其曲线变化的斜率最大即浓度随时间变化最大,特别是 0 ~ 40 d 时间段 GW13 监测井中污染物苯浓度随时间的变化率最大. 在地下水中苯的浓度越大其在地下中的降解反应越强,浓度随时间变化越大. GW14 井与其它 2 个井相比曲线的斜率最为平缓即浓度随时间变化率最小,在 0 ~ 40 d 内曲线几乎处于平行状态,原因主要是 GW14 井处于污染晕下游,随着时间的变化上游的污染物会迁移补给. 如补给量与该处的污染物降解及反应的速率一致时则浓度变化处于一个平衡状态,当补给量小于降解及反应量时该处的苯浓度则会相应地减小,浓度-时间曲线呈现出下降的趋势^[31].

2.3.2 BTEX 在垂直方向迁移规律及因素分析

如图 6 所示,模拟结果显示,地下水面附近苯污染分布较多,其污染晕中心苯浓度最大,随着埋深的加大苯浓度随之降低. 在 0 d 时,苯垂向分布的最大

污染深度为 6 m; 100 d 时,苯在垂向上最大污染深度为 9 m; 200 d 和 300 d 时,最大污染深度均大于 10 m. 模拟分析发现,在垂向上苯整体向下迁移,越接近地下水面的苯其往下迁移的速度越小,地下水下部的苯向下迁移速度相对地下水面要更大. 在地下水多孔介质中,苯比水轻,且在水中的溶解度较小,在地下水以浮苯和溶解态苯 2 种状态存在,由于重力分异的结果使得越靠近地下水面苯的浓度越高. 地下水流速十分缓慢,地下水面附近的浮苯水力梯度较小,仅靠水流的带动其往下游迁移;而溶解态苯随水流向下迁移,其迁移的速度比上部浮苯迁移速度要大,导致了垂向上地下水面附近的浮苯往下游迁移的速度小于下部溶解态苯的迁移速度^[32].

2.4 污染物模拟验证分析

本研究小组于 2015 年对场地污染物开展了初始的调查和模拟,为了进一步详细了解地下水中污染物的分布范围,2016 年对前期调查区域进行了一次补充调查,其监测井布点原则为:在污染源的中心区域、前期调查的污染物分布的边界区域以及污染区域的地下水下游布设监测井,观测 1 a 后污染物的迁移分布情况. 本次补充调查共布设监测井 12 个,检测指标依据上一年的检测结果确定污染物种类.

运用 GMS 对场地苯系物的运移进行了模拟预测,其预测结果与实际监测结果对比如图 7 所示. 其中实线为各计算值 V_{cal} 的线性拟合直线,虚线为理论上计算值和实际值的 1:1 关系线,将模拟计算值和实际监测值做线性拟合,得到其相关系数 R^2 值为 0.995 0,显示模拟预测值具有较强的相关性. 模拟计算值与实际观测值相比,平均误差为 -2.888 9,得到均方根误差 (RMSE) 为 7.066 47,通过对比拟合图可知,模拟预测模型得到的浓度值与实际的观测

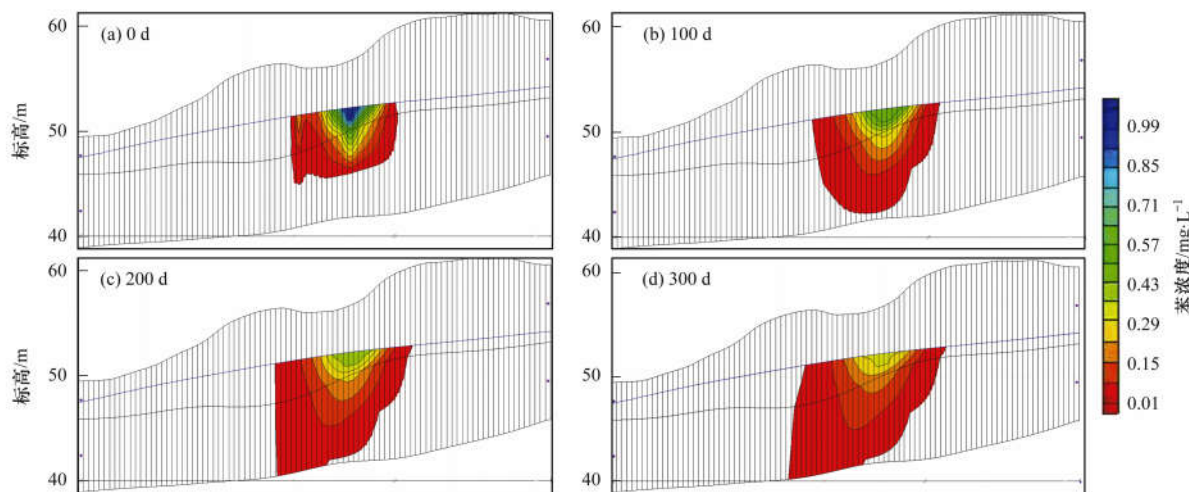


图 6 场地污染物苯垂向含量模拟结果

Fig. 6 Simulation results of benzene vertical concentrations at the site

值吻合较好,说明预测模型预测该场地中的苯污染物的迁移是有效的,且预测的精度较高,较准确反映了该化工场地苯的迁移规律和分布特征。

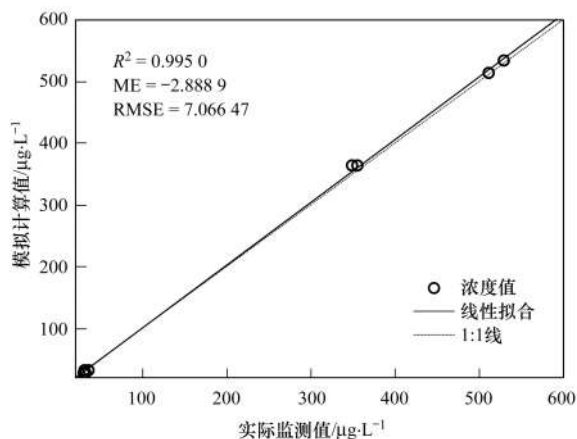


图7 模拟与实际监测结果拟合

Fig. 7 Fitting of the results obtained from the simulation and monitoring

3 结论

(1) 场地土壤与地下水苯系物污染较为严重。其中土壤样品苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯的最大超标倍数分别为 2.14、241.79、25.26 和 7.50, 地下水样品中苯、乙苯、间、对-二甲苯和邻-二甲苯超标较高, 最大超标倍数分别为 140.00、101.33、212.00 和 103.40。

(2) 场地模拟区域中苯污染物在水平方向上迁移与地下水流场一致, 呈椭圆形从西北往东南方向迁移; 在垂向上因重力分异浮苯迁移速度较小, 溶解态苯靠地下水驱动力作用其迁移速度较大。

(3) 苯污染物的模拟预测结果与实际监测值线性拟合相关系数 R^2 值为 0.9950, 苯污染物浓度的模拟预测值与其实际监测结果基本一致, 较准确地反映区域苯污染物的迁移规律和分布特征。

参考文献:

- [1] Li X N, Jiao W T, Xiao R B, *et al.* Contaminated sites in China: countermeasures of provincial governments[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **147**: 485-496.
- [2] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. *中国科学院院刊*, 2014, **29**(3): 327-335.
Chen M F. Review on heavy metal remediation technology of soil and groundwater at industrially contaminated site in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **29**(3): 327-335.
- [3] 邓一荣, 林挺, 肖荣波, 等. EKR-PRB 耦合技术在污染场地修复中的应用研究进展[J]. *环境工程*, 2015, **33**(10): 152-157.
Deng Y R, Lin T, Xiao R B, *et al.* Recent advances in the application of EKR-PRB in contaminated site remediation[J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(10): 152-157.
- [4] 吴俭, 邓一荣, 肖荣波, 等. 当前我国污染地块环境管理存在的问题与对策探析[J]. *环境监测管理与技术*, 2018, **30**(3): 1-3.
- [5] Wu J, Deng Y R, Xiao R B, *et al.* Analysis on problems and countermeasures to environmental management for contaminated sites in China at present[J]. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018, **30**(3): 1-3.
- [6] Qiao W J, Luo F, Lomheim L, *et al.* Natural attenuation and anaerobic benzene detoxification processes at a chlorobenzene-contaminated industrial site inferred from field investigations and microcosm studies[J]. *Environmental science & technology*, 2017, **52**(1): 22-31.
- [7] Chen S J, Tian M, Zheng J, *et al.* Elevated levels of polychlorinated biphenyls in plants, air, and soils at an e-waste site in Southern China and enantioselective biotransformation of chiral PCBs in plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(7): 3847-3855.
- [8] Qiao L, Zheng X B, Zheng J, *et al.* Legacy and currently used organic contaminants in human hair and hand wipes of female E-waste dismantling workers and workplace dust in South China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2820-2829.
- [9] O'Connor D, Müller-Grabherr D, Hou D Y. Strengthening social-environmental management at contaminated sites to bolster Green and Sustainable Remediation via a survey[J]. *Chemosphere*, 2019, **225**: 295-303.
- [10] 常春英, 吴俭, 邓一荣, 等. 中国土壤污染防治地方立法思路与探索——以广东省为例[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(11): 2170-2178.
Chang C Y, Wu J, Deng Y R, *et al.* Local legislation thinking and exploration for soil pollution prevention and control in China: taking Guangdong Province as example[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(11): 2170-2178.
- [11] Li X N, Cundy A B, Chen W P. Fuzzy synthetic evaluation of contaminated site management policy from the perspective of stakeholders: a case study from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **198**: 1593-1601.
- [12] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 934-944.
Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [13] Liu L, Bai L P, Man C G, *et al.* DDT vertical migration and formation of accumulation layer in pesticide-producing sites[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(15): 9084-9091.
- [14] Fang Y Y, Nie Z Q, Die Q Q, *et al.* Organochlorine pesticides in soil, air, and vegetation at and around a contaminated site in southwestern China: Concentration, transmission, and risk evaluation[J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 340-349.
- [15] Zhang R H, Jiang L, Zhong M S, *et al.* Applicability of soil concentration for VOC-contaminated site assessments explored using field data from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(2): 789-797.
- [16] 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 等. 农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2272-2280.
Tan B, Wang T Y, Li Q F, *et al.* Risk assessment and countermeasures of BTEX contamination in soils of typical pesticide factory[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2272-2280.
- [17] Verginelli I, Pecoraro R, Baciocchi R. Using dynamic flux

- chambers to estimate the natural attenuation rates in the subsurface at petroleum contaminated sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 470-479.
- [17] Teramoto E H, Chang H K. Field data and numerical simulation of btex concentration trends under water table fluctuations; example of a jet fuel-contaminated site in Brazil[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2017, **198**: 37-47.
- [18] Lhotsky O, Krákorová E, Linhartová L, *et al.* Assessment of biodegradation potential at a site contaminated by a mixture of BTEX, chlorinated pollutants and pharmaceuticals using passive sampling methods - Case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 1451-1465.
- [19] 容跃. 美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1726-1732.
Rong Y. Brief introduction of pollution sites remediation and risk assessment and its policy making in United States [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1726-1732.
- [20] 杜青青, 尹芝华, 左锐, 等. 某污染场地氨氮迁移过程模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4585-4595.
Du Q Q, Yin Z H, Zuo R, *et al.* Migration process simulation of ammonia nitrogen in contaminated site[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4585-4595.
- [21] 姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 等. 基于地下水暴露途径的健康风险评估及修复案例研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3329-3335.
Jiang L, Zhong M S, Jia X Y, *et al.* Case study on groundwater health risk assessment and remediation strategy based on exposure pathway[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3329-3335.
- [22] 李盼盼, 杨悦锁, 路莹, 等. 水位波动对土壤苯系物的污染运移和水化学影响[J]. *环境化学*, 2017, **36**(8): 1842-1848.
Li P P, Yang Y S, Lu Y, *et al.* Impact of water level fluctuation on BTEX migration and hydrochemistry in soils [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(8): 1842-1848.
- [23] 樊艳玲, 姜林, 张丹, 等. 空气注射修复苯污染地下水模拟研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3927-3934.
Fan Y L, Jiang L, Zhang D, *et al.* Simulation on remediation of benzene contaminated groundwater by air sparging [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3927-3934.
- [24] Yang Q S, Li Y, Zhou J F, *et al.* Modelling of benzene distribution in the subsurface of an abandoned gas plant site after a long term of groundwater table fluctuation [J]. *Hydrological Processes*, 2013, **27**(22): 3217-3226.
- [25] Ghoshal S, Pasion C, Alshafie M. Reduction of benzene and naphthalene mass transfer from crude oils by aging-induced interfacial films [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(7): 2102-2110.
- [26] Zhang C M, Guo X N, Henry R, *et al.* Groundwater modelling to help diagnose contamination problems [J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2015, **3**(4): 285-294.
- [27] 郑春苗, Bennett G D. 地下水污染物迁移模拟[M]. 孙晋玉, 卢国平, 译. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [28] 姜凤成, 李义连, 杨国栋, 等. 某化工场地地下水中污染物运移模拟研究[J]. *安全与环境工程*, 2017, **24**(2): 8-15.
Jiang F C, Li Y L, Yang G D, *et al.* Simulation study on groundwater pollutant transport of a chemical plant site [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, **24**(2): 8-15.
- [29] 李珊珊, 陆海建, 蓝俊康, 等. 基于GMS的广西平果铝赤泥堆场岩溶含水层溶质运移模拟[J]. *地下水*, 2017, **39**(1): 54-58.
Li S S, Lu H J, Lan J K, *et al.* Prediction of karst groundwater pollution by red mud stack field in Pingguo county Guangxi based on GMS simulation[J]. *Ground Water*, 2017, **39**(1): 54-58.
- [30] 陆海建, 蓝俊康, 黎容伶. 广西平果铝赤泥堆场对岩溶含水层污染风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(3): 295-300.
Lu H J, Lan J K, Li R L. Evaluation of the effect of the red mud stack field on the karst groundwater pollution in Pingguo County, Guangxi[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(3): 295-300.
- [31] 张宏凯, 左锐, 王金生, 等. 加油站泄漏污染物的迁移分布规律[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1532-1539.
Zhang H K, Zuo R, Wang J S, *et al.* The underground migration and distribution of petroleum contamination at a gas station[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1532-1539.
- [32] 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 等. 某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4251-4255.
Pei F, Luo Z J, Peng J J, *et al.* Phenols pollutants in soil and shallow groundwater of a retired refinery site[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4251-4255.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)