

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类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)对鲢鱼精 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)	

甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究

韩春媚^{1,2}, 冉娟⁴, 张慧², 李发生², 李雁³, 谷庆宝^{2*}

(1. 北京师范大学地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中山大学海洋科学学院, 广州 510275; 4. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广州 510300)

摘要: 针对我国日益严峻的土壤突发泄漏事故等环境问题, 采用二维土槽装置模拟非水相液体 (甲苯) 发生瞬时泄漏后, 其在北京褐潮土中的运移及分布规律, 并采用 STOMP 模型对其进行了模拟。结果表明, 泄漏 9 h 后, 含量 $> 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的甲苯污染羽横向与垂向距离比分别约为 2.3 和 3。这是由于北京褐潮土的渗透性能较差 (渗透系数为 $0.12 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$), 因此对甲苯的入渗过程有较强的阻滞作用, 导致甲苯运移方式主要以水平扩散为主, 垂向迁移能力较小。采用 STOMP 模型对非均质性土层结构 (北京褐潮土-砂土和砂土-北京褐潮土 2 种结构) 中的甲苯运移模拟结果表明, 由于砂土渗透系数 ($29.70 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 远大于北京褐潮土, 因此土层分界面的相对渗透率突变是影响甲苯重新分布的主要因素之一。本研究可为非水相液体污染物发生突发泄漏后, 及时获取其在土壤中的分布情况提供理论支持。

关键词: 北京褐潮土; 非水相液体; 运移; STOMP; 模拟

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3554-08

Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvo-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model

HAN Chun-mei^{1,2}, RAN Juan⁴, ZHANG Hui², LI Fa-sheng², LI Yan³, GU Qing-bao²

(1. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Frequently accidental spill of hazard materials into soil environment posed significant threats to human health and natural environment in China. In this paper, simulated nonaqueous phase liquid (NAPLs) toluene sudden spill in fluvo-aquic soil was performed in a two-dimensional tank to investigate the migration and distribution characteristics of toluene as well as its simulation through STOMP model. Visual observation showed that the horizontal expansion of toluene with concentration $> 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ were approximate 2.3 and 3 times the length of the corresponding vertical transportation, respectively. The result revealed that toluene exerted a preferential tendency to lateral spread compared to the vertical migration trends, which may contribute to the impeding effect as a result of the low permeable capacity of soil (permeability coefficient was $0.12 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$). The behavior and fate of toluene in heterogeneous soil layers (combined fluvo-aquic-sand and sand-fluvo-aquic soil layers, respectively) after spill were simulated using STOMP model and the results indicated that the significant difference in relative permeability of interface layer, due to the much higher value of permeability coefficient of sand ($29.70 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) than that of fluvo-aquic soil, played an important role on the redistribution of toluene after its spill into the heterogeneous soil layers. For practical purposes, the results of this study may be beneficial to identify the distribution property of NAPLs in time after its release into the soil environment.

Key words: fluvo-aquic soil; nonaqueous phase liquid (NAPLs); migration; STOMP; simulation

近年来, 由于化学品泄漏、爆炸或交通事故等引发的土壤污染事件在发生频率和危害程度上均有增加趋势。环境事故中, 石油类产品泄露较为常见^[1]。石油类产品大多不溶或微溶于水, 属于非水相液体 (nonaqueous phase liquid, NAPLs), 往往会在地下不同位置聚集形成若干个 NAPLs 油聚集区或透镜体, 成为土壤和地下水环境长期、连续的污染源^[2-4]。因此, 开展 NAPLs 泄漏对土壤环境的污染行为研究, 同时建立土壤环境事故的污染模拟预测

方法, 可为评估突发性环境泄漏事故造成的被污染区的污染程度提供技术指导和支持, 从而有利于土壤环境应急响应的决策制定与实施^[5,6]。

目前, 研究 NAPLs 污染物在土壤中运移规律所采用的方法主要有一维和二维物理模拟实验, 现场

收稿日期: 2011-12-15; 修订日期: 2012-02-21

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项经费项目 (200809095); 国家自然科学基金项目 (41271476)

作者简介: 韩春媚 (1982 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: ellenhancm@126.com

* 通讯联系人, E-mail: guqb@craes.org.cn

实验和数值分析方法等^[7]。室内实验一方面有助于了解 NAPLs 运移规律,另一方面可根据所得的实测数据,对采用的数值模型进行验证和评价。近年来,根据土壤中 NAPLs 运移特征以及研究目的,已经开发出多种用于模拟土壤中 NAPLs 运移规律的数学模型,其中以 NAPL Simulator、TOUGH2、UNCHEM 和 STOMP 等大型多相流集成模型的理论体系最为完整和科学,同时也被广泛用于研究土壤多相流规律^[8-11]。其中,由美国能源部西北太平洋国家实验室开发的 STOMP(subsurface transport over multiple phases)模型对地下环境中多相流的模拟所涉及的因素考虑周全,模拟结果也更准确,被国外诸多研究者采用^[12-14]。国内学者主要采用一维土柱和二维土槽装置,研究 NAPLs 污染物在土壤中的入渗运移特征^[15-17],而运用物理实验与数值模拟相结合的方法研究 NAPLs 在土壤中的运移与分布方面还处于起步阶段,尤其是基于 STOMP 模型来模拟 NAPLs 在实际土壤中的运移分布规律,目前国内研究较少。

本研究以北京褐潮土为对象,考察甲苯发生瞬时泄漏后,其在土壤中的分布规律。其次,基于实验

室测定的部分土壤性质参数,通过 STOMP 模型对土壤中甲苯运移进行模拟,并根据实测结果对 STOMP 模型进行验证。在此基础上,应用 STOMP 模型对甲苯在非均质性土壤中的运移规律进行模拟,旨在研究不同类型土壤的渗透性能差异对甲苯运移及分布规律的影响,本研究可为及时获取 NAPLs 污染物在土壤中的分布特征,以及为环境应急事故响应提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与甲苯性质

选择具有代表我国北方土壤类型的北京褐潮土作为供试土壤。土壤样品采集于国家褐潮土土壤肥力和肥料效益监测基地(北京市:40°10'N,116°13'E)的表层土壤(0~20 cm)。进行实验前,首先进行土壤自然风干,去除植物残体,根须及砾石等杂质后,碾磨过 2 mm 筛后储藏备用。北京褐潮土基本理化性质如表 1 所示。可以看出,供试土壤有机质含量较低,属于砂质黏壤土,含有较高的砂粒组分,具有我国北方地区的地域代表性。

表 1 北京褐潮土基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of fluvo-aquic soil

土壤	pH	含水率/%	有机质/%	渗透系数 ¹⁾ / cm·h ⁻¹	土粒密度 / g·cm ⁻³	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	质地 ²⁾
北京褐潮土	8.5	1.2	1.4	0.12	2.61	57.8	25.9	16.3	砂质黏壤土

1) 根据“SL237-014-1999 渗透实验”标准方法,采用变水头渗透实验测定; 2) 根据美国土壤分类系统标准

选择甲苯作为 NAPLs 代表物质,主要理化性质如表 2 所示。可以看出,甲苯微溶于水,易挥发,易扩散,较易被土壤中的有机质吸附。表 2 中

的性质参数不仅是影响甲苯在土壤中运移的重要因素,同时也是 STOMP 模型模拟所需的必要参数。

表 2 甲苯主要理化性质¹⁾

Table 2 Primary physiochemical properties of toluene

参数名称	参数值	参数名称	参数值
相对分子质量	92.10	水中扩散系数/m ² ·s ⁻¹	5.88 × 10 ⁻¹⁰
密度/g·cm ⁻³	0.87	NAPL-水界面张力/N·cm ⁻¹	4.5 × 10 ⁻⁴
黏度/Pa·s	0.59 × 10 ⁻³	气-NAPL 界面张力/N·cm ⁻¹	2.8 × 10 ⁻⁴
理想气体常数/J·(kg·K) ⁻¹	90.28	等压摩尔比热常数 ²⁾ /J·(mol·K) ⁻¹	155.65
冰点温度/K	178.16	饱和蒸气压 ³⁾ /Pa	2.16 × 10 ⁴
标准沸点/K	383.75	Pitzner 偏心因子	0.12
临界温度/K	591.75	偶极矩/C·m	0.36
临界压力/Pa	4.07 × 10 ⁶	水溶性下亨利常数/mol·(kg·Pa) ⁻¹	1.60 × 10 ⁻⁶
临界摩尔体积/cm ³ ·mol ⁻¹	267.12	有机碳分配系数/cm ³ ·g ⁻¹	204.0
临界压缩系数	0.27	辛醇-水分配系数	537.0
空气中扩散系数/m ² ·s ⁻¹	7.78 × 10 ⁻⁶		

1) 条件:1.01 × 10⁵ Pa,20℃; 参数来源:美国国家标准技术研究院(NIST) <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C108883&Units=SI&Mask=8#Thermo-React>; 2) 采用 3 阶摩尔比热方程 $c_{pm} = a + bT + cT^2 + dT^3$ (式中, $a = 187.44$; $b = -0.73$; $c = 2.96 \times 10^{-3}$; $d = -2.87 \times 10^{-6}$) 计算得出; 3) 采用 Antoine 方程 $\ln p_0 = A - B/(T + C)$ (式中, $A = 4.24$; $B = 1.43 \times 10^{-3}$; $C = -45.96$) 计算得出

1.2 二维土槽实验方法

采用二维土槽作为模拟甲苯突发性土壤环境泄漏事故的实验装置,如图1所示.土槽材质为有机玻璃,呈扁平立方体状(长50 cm,高50 cm,厚5 cm).土槽顶部加盖密封,前视面板可以拆卸.土槽按照由下至上顺序分别填充:2 mm 石英砂层、40 cm 供试土壤和2 cm 石英砂层.采用分层填装方法装填土壤(密度 $\rho_b = 1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,孔隙度 $n = 46.4\%$).土槽顶部石英砂层中心设置4 cm × 5 cm 泄漏口,固定泄漏面积为 20 cm^2 .以土壤表层高度为 $z = 0 \text{ cm}$,土槽左面板处为 $x = 0 \text{ cm}$,在研究区域[长度方向(x)0 ~ 50 cm;高度方向(z)0 ~ -40 cm;面积为 $2 \times 10^3 \text{ cm}^2$]设置30个采样口(玻璃盖密封),具体分布为:①首先按网格布点法,以1号采样点($x = 5 \text{ cm}, z = -5 \text{ cm}$)为基准,分别在 x 和 z 方向上每隔10 cm设置采样口,则研究区域中有20个采样点;②在泄漏口下方(x)15 ~ 35 cm和(z) -5 ~ -15 cm区域范围内,以间隔为5 cm原则进行加密布点,即在第①步基础上新增7个采样点;③在 $z = -20 \text{ cm}$ 处,加密布设18号($x = 15 \text{ cm}$)、19号($x = 25 \text{ cm}$)和20号($x = 35 \text{ cm}$)3个采样点.

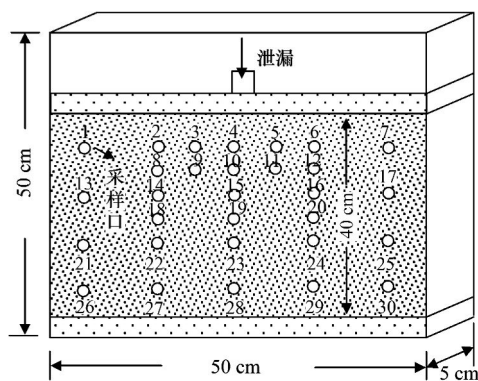


图1 二维土槽装置示意

Fig. 1 Sketch map of two-dimensional soil tank

泄漏模拟实验温度控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.采用瞬时泄漏方式(泄漏时间控制为2 s)向土槽顶部泄漏口中匀速通入甲苯(分析纯)40 mL (34.64 g).当泄漏发生9 h后,将取样口处玻璃盖拔下,迅速采集30个点点位的土壤样品(约2 g)于20 mL顶空瓶中(预先加入5 mL浓度为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液),并立即密封顶空瓶.采用静态顶空-气相色谱-火焰离子化检测(HS-GC-FID)标准方法^[18]对土样中的甲苯含量进行测定(HS型号:GERSTEL MPS Headspace; GC型号:Agilent 7890A).顶空加热条件:加热温度 85°C ;加热时间15 min;振荡频率400

$\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$;进样针温度 90°C ;进样体积1 mL;进样时间2.5 s.分离采用 $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$ HP-5MS 5% Phenyl Methyl Silox 毛细柱;升温程序为: 38°C (2 min) $\rightarrow 2^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1} \rightarrow 44^\circ\text{C}$ (2 min) $\rightarrow 20^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1} \rightarrow 170^\circ\text{C}$ (5 min);载气为He(纯度 $\geq 99.999\%$);进样口温度 260°C ;分流比40:1;柱流量 $2.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;传输线温度 280°C .标准曲线中的甲苯含量包括所有实验测定的含量,通过测定土壤中甲苯的峰面积并带入甲苯标准曲线方程,由此计算出土壤中的甲苯含量,每种样品取3个平行样的平均值.最后,在研究区域对30个土壤样品中的甲苯含量进行标准Kriging插值,插值密度为 $x = z = 0.5 \text{ cm}$,并采用Surfer软件将插值结果绘制成甲苯含量的等值面图形.

1.3 STOMP模型模拟方法

STOMP模型基本方程组由控制方程和本构方程组成.控制方程包括水、气、NAPLs三相的质量守恒和达西定律的偏微分方程组,如表3所示.控制方程和各分项方程中的下标 γ 分别代表水相(w)、气相(a)和NAPLs相(o)等物理状态,相由组分(用上标*i*表示)构成,*i*可分别为包含在 γ 相中的水(1)、气(g)和NAPLs(n)等组分.表3中控制(质量守恒)方程等号左边一项为 γ 相中物质质量随时间的变化率,即单位时间内进入和流出模拟单位网格内的组分*i*质量之差等于网格内组分*i*的质量,等号右边各项分别为通过界面的对流弥散与渗透通量之和及源汇项.本构方程主要由初级变量与二级变量方程组组成,STOMP模型采用积函数有限元差分法与全隐式退后欧拉法进行差分,采用Newton-Raphson迭代法求解初级变量,而次级变量如 s_γ 等则根据初级变量的数据通过求解本构方程得到^[19].

STOMP模型提供15个不同的运行模式,本研究根据实验目的和条件,选择其中的水-油-气(WOA)模式进行模拟计算.具体来说,根据选择的WOA模式,确定输入文件中的功能模块(input card)类型及所需参数和边界条件,编写输入参数文件;通过Fortran编译平台执行输入文件;根据输入文件所定义的输出节点、输出饱和度等变量组成形成输出文件1(output文件)和2(plot文件),即STOMP模型模拟结果和用于绘图的原始数据文件;利用Fortran程序将plot文件编译转换成Surfer软件所能读入的文件格式,从而实现污染物含量的等值面绘图^[20].

表 3 STOMP 模型中各相控制方程

Table 3 Governing equations of three phases in STOMP model

相	主控(质量守恒)方程	各分项方程 ¹⁾
水相	$\frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{\gamma=1,g,i} (n_D \omega_\gamma^w \rho_\gamma s_\gamma) \right] = - \sum_{\gamma=1,g} (\nabla F_\gamma^w + \nabla J_\gamma^w) - \nabla F_1^s + m^w$	$F_\gamma^w = - \frac{\omega_\gamma^w \rho_\gamma k_{r\gamma} k}{\mu_\gamma} (\nabla P_\gamma + \rho_\gamma g z_g)$ $J_\gamma^w = - \tau_\gamma n_D \rho_\gamma s_\gamma \frac{M_\gamma^w}{M_\gamma} D_\gamma^w \nabla \chi_\gamma^w$ $F_1^s = D_1^s \nabla s_1$
气相	$\frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{\gamma=1,g} (n_D \omega_\gamma^a \rho_\gamma s_\gamma) \right] = - \sum_{\gamma=1,g} (\nabla F_\gamma^a + \nabla J_\gamma^a) + m^a$	$F_\gamma^a = - \frac{\omega_\gamma^a \rho_\gamma k_{r\gamma} k}{\mu_\gamma} (\nabla P_\gamma + \rho_\gamma g z_g)$ $J_\gamma^a = - \tau_\gamma n_D \rho_\gamma s_\gamma \frac{M_\gamma^a}{M_\gamma} D_\gamma^a \nabla \chi_\gamma^a$
NAPL 相	$\frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{\gamma=1,g,n} (n_D \omega_\gamma^o \rho_\gamma s_\gamma) + (1 - n_T) \omega_s^o \rho_s \right] = - \sum_{\gamma=1,g,n} (\nabla F_\gamma^o + \nabla J_\gamma^o) + m^o$	$F_\gamma^o = - \frac{\omega_\gamma^o \rho_\gamma k_{r\gamma} k}{\mu_\gamma} (\nabla P_\gamma + \rho_\gamma g z_g)$ $J_\gamma^o = - \tau_\gamma n_D \rho_\gamma s_\gamma \frac{M_\gamma^o}{M_\gamma} D_\gamma^o \nabla \chi_\gamma^o$

1) F_j^i 为组分 i 在 j 相中的对流通量, $[kg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}]$; J_j^i 为组分 i 在 j 相中的扩散通量, $[kg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}]$; t 为时间, $[s]$; n_D 为有效孔隙度; ω_γ^i 为组分 i 在 γ 相中的质量分数; ρ_γ 为流体密度, $[kg \cdot m^{-3}]$; s_γ 为流体饱和度; m^i 为组分 i 的源汇项, $[kg \cdot s^{-1}]$; n_T 为总孔隙度; ω_s^o 为 NAPLs 组分被土壤等介质吸附的质量分数; ρ_s 为多孔介质的颗粒密度, $[kg \cdot m^{-3}]$; $k_{r\gamma}$ 为 γ 相的相对渗透系数; k 为固有渗透系数, $[m^2 \cdot s^{-1}]$; μ_γ 为 γ 相的动力学黏度, $[kg \cdot (m \cdot s)^{-1}]$; P 为压强, $[Pa]$; g 为重力加速度, $[m \cdot s^{-2}]$; z_g 为单位重力矢量; τ_γ 为流体的弯曲系数; M^i 和 M_j 分别为组分 i 质量和 j 相总质量, $[kg]$; D_j^i 为组分 i 在 j 相中的扩散系数, $[m^2 \cdot s^{-1}]$; χ_j^i 为组分 i 在 j 相中的摩尔分数; 下标 γ 是对流体相的总称, l、g、i、n 分别表示水、气、冰以及 NAPL 相; 上标 w、a、o 和 s 分别表示 γ 相中的水、气、NAPLs 和溶解于水相中的 NAPLs 组分

根据实验条件对 STOMP 模型模拟的参数进行设置. 主要参数分为 5 类: ①北京褐潮土性质参数; 除表 1 所示参数外, 模型还需输入土壤 Van Genuchten 方程[式(1)]中残余水饱和度 s_{rw} 及 m 、 α 和 n 参数. 获取方法是首先采用压力膜仪(型号: 1500F1 15bar, SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.)测试土壤水分特征曲线(土壤水饱和度 s_w 与气-水毛管压力水头 h_c 的关系), 再利用最小二乘法线性回归得到式(1)中参数^[21]. ②甲苯性质参数: 如表 2 所示. ③边界条件: 将 NAPLs 边界条件设为 Dirichlet 边界, 其他均设为 Neumann 边界. 仅泄露口(5 cm × 4 cm)设为开边界, 其他均为闭边界, 无任何流体进出. ④初始条件: 初始甲苯饱和度为 0, 初始水饱和度为实验测定的水饱和度. ⑤模拟区域边界概化和环境条件: 模拟维数为二维平面区域(x 0 ~ 50 cm, z 0 ~ -40 cm). 在笛卡尔直角坐标系内对模拟区域设置网格数(2 000)和节点数(2 193)、模拟温度(20℃)和时间(240 h)等.

$$h_c > 0 \text{ 时: } s_w = s_{rw} + (1 - s_{rw}) [1 + (\alpha h_c)^n]^{-m}$$

$$h_c < 0 \text{ 时: } s_w = 1 \quad (1)$$

式中, s_w 为土壤水饱和度; s_{rw} 为残余水饱和度; h_c 为气-水两相间的毛管压力的水头值, $[m]$; α $[m^{-1}]$ 、 n 和 m 为拟合参数, 其中 $m = 1 - 1/n$.

2 结果与讨论

2.1 甲苯含量在土壤中分布的实测与模拟值比较

40 mL 甲苯瞬间泄漏发生 9 h 时, 北京褐潮土中甲苯含量的实测结果表明[图 2(a)], 含量 $> 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的甲苯污染羽横向与垂向距离比分别约为 2.3 和 3. Van Genuchten 方程[式(1)]拟合土壤水分特征曲线结果表明, 土壤中的残余水饱和度 $s_{rw} = 0.02$, $\alpha = 31.2 \text{ m}^{-1}$, $n = 1.10$, $m = -0.091$, 拟合残差为 4.67×10^{-3} . 将参数输入 STOMP 模型的 input card 并运行程序, 图 2(b)为相同实验条件下甲苯含量分布的模拟预测结果. 可以看出, 模拟与实测结果反映出的甲苯分布范围和程度基本一致. 从甲苯横向分布规律来看, 含量 $> 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的污染羽横向距离的实测值与模拟值均分别约为 25 cm 和 15 cm. 从甲苯垂向迁移特征看, 含量 $> 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 污染羽的实测和模拟的下渗距离均约 11 cm; 含量 $> 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的甲苯污染羽垂向距离实测值(约 5 cm)小于模拟值(约 7 cm), 原因可能是甲苯极易挥发, 在取样和分析过程中可能造成质量损失^[22], 另一方面, 可能是模拟低估了土壤的渗透系数, 导致垂向迁移的模拟结果偏大.

总体上, 甲苯含量分布的实测与模拟结果均说

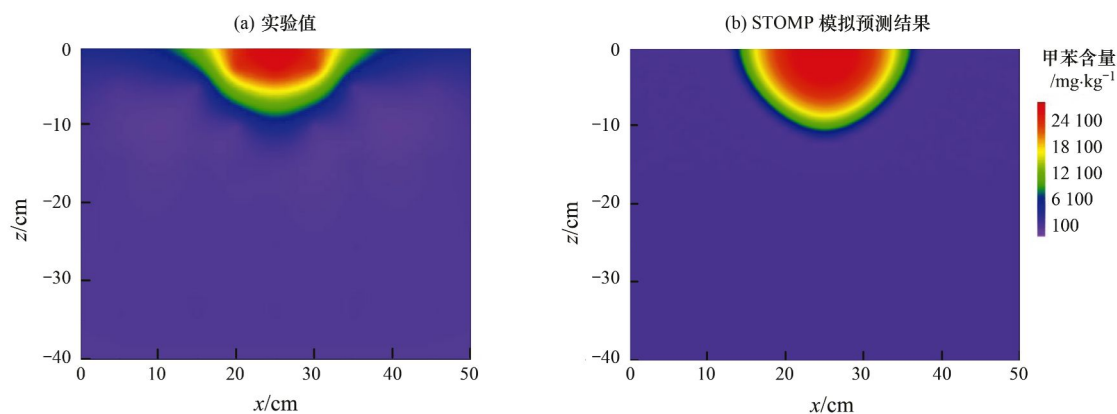


图2 北京褐潮土中甲苯含量分布

Fig. 2 Contour profile of toluene concentration in fluvo-aquic soil

明,与垂向迁移趋势相比,甲苯在北京褐潮土中更易发生横向扩散,这是因为 NAPLs 类物质由于具有高黏滞性而不易在土壤中入渗,而是主要被截留在表层土壤中^[23,24]. 另外,土壤渗透性能也是影响 NAPLs 运移的重要因素之一,即在低渗透地层中 NAPLs 易发生横向扩散,而在渗透率较高的地层中, NAPLs 则较易在重力作用下垂直向下渗透^[25,26]. 研究表明,渗透系数 K 与土壤质地的关系可大致认为:壤质砂土 ($K = 14.59 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 和砂土 ($K = 29.70 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 渗透系数最大;黏质壤土 ($K = 0.26 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$)、粉质壤土 ($K = 0.45 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$)、壤土 ($K = 1.04 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 和砂质壤土 ($K = 4.42 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 次之;粉质黏土 ($K = 0.02 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 和砂质黏土 ($K = 0.12 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 最小^[27]. 北京褐潮土属于砂质黏壤土,渗透系数较小(表1, $K = 0.12 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$),因此可以推测,北京褐潮土对甲苯的渗透过程有较强的阻滞作用,而较易发生横向扩散.

2.2 STOMP 模型垂向和横向模拟结果的验证

将垂向(图1中的4、10、15、19、23和28号共6个样点)和水平方向(图1中的1~7共7个样点)上实测甲苯含量及其 STOMP 模拟值进行比较,结果如图3所示.

可以看出,STOMP 模型模拟结果和实测结果比较吻合(模拟值略大于实测值). 垂直方向上[图3(a)],甲苯含量随土层深度增加而迅速下降. 水平方向上[图3(b)],甲苯含量以距离泄漏源最近的4号点位最高,并呈现与4号点距离增加而降低的对称分布状态. 因此,在验证 STOMP 模型准确基础上,可通过实测或收集资料等方式得到模型所需的参数,采用数值模拟的方法便可以在较大时空范围内以及复杂条件下对目标问题进行预测模拟. 尤其在应急条件下,打破实验室和田间实验的长期性和局部性的局限,为有机化合物泄漏事故应急处理提供一套数值模拟方法,为快速准确模拟有机化学品

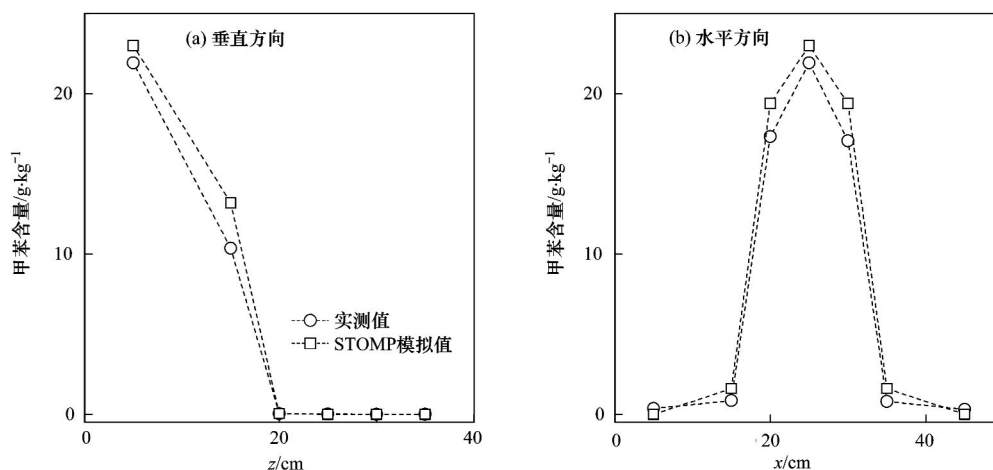


图3 STOMP 模拟结果验证

Fig. 3 Verification of simulated results through STOMP model

泄漏的运移分布提供支撑。

2.3 甲苯在非均质性土壤中的运移规律模拟

土壤非均质性在自然界中普遍存在, 实际土壤层序中可能掺杂若干数量和性质不确定的夹层, 导致实验室测定结果无法反映出实际土壤中的 NAPLs 分布规律^[28]。因此采用模型对非均质性土层结构中的 NAPLs 运移规律进行模拟具有重要的环境意义。模拟土槽中含有两种不同质地的土壤, 一种为北京褐潮土, 另一种为性质与其差异较大的砂土 ($K = 29.70 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$, 孔隙度 $n = 43\%$)。采用 STOMP 模型对甲苯在两种土层结

构中的运移及分布规律进行模拟。第一种结构(壤-砂结构): 上层 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 为北京褐潮土, 下层 $2 \sim 40 \text{ cm}$ 为砂土; 第二种结构(砂-壤结构): 上层 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 为砂土, 下层 $2 \sim 40 \text{ cm}$ 为北京褐潮土。2 种土壤结构分布情况下 40 mL 甲苯泄漏 9 h 和 240 h 的运移分布状况分别如图 4 和图 5 所示。可以看出, 甲苯在非均质性土层中的运移规律与均质介质(图 2)截然不同, 并且在不同结构土层中的运移规律差异明显。这是由于两种质地土壤的分层界面处的相对渗透率不连续性是影响 NAPLs 重新分布的最敏感因子^[5]。

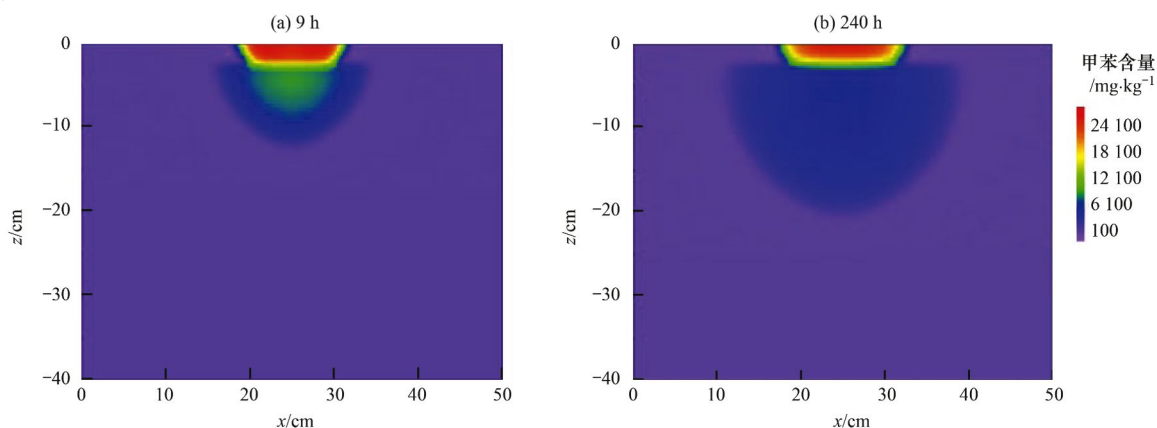


图 4 北京褐潮土-砂土结构中甲苯运移模拟

Fig. 4 Simulated migration of toluene in fluvo-aquic-sand soil texture

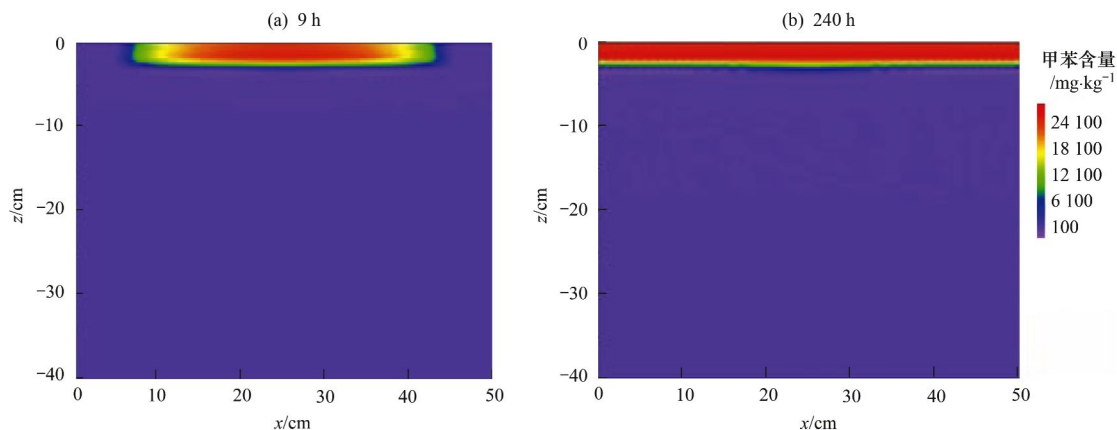


图 5 砂土-北京褐潮土结构中甲苯运移模拟

Fig. 5 Simulated migration of toluene in sand-fluvo-aquic soil texture

如图 4 所示, 在壤-砂结构中, 由于下层的砂土渗透系数远大于上层的北京褐潮土, 致使甲苯在分界面处的相对渗透率较高, 所以甲苯较易从北京褐潮土中入渗至砂土层中。因此, 对于壤-砂结构, 在甲苯锋面未进入砂土层前, 其锋面特征保持类似于均匀北京褐潮土的运移规律, 到达砂土层后, 甲苯入渗能力增强, 污染羽范围增加。相反, 在砂-壤结构

中(图 5), 甲苯主要以在砂土层中的横向扩散为主, 垂向迁移距离并未随泄漏时间延长而明显变化(9 h 和 240 h 均约为 2.5 cm)。这是由于当甲苯到达分界面时, 由于下层的北京褐潮土渗透系数很小, 因此导致甲苯入渗能力锐减, 甲苯大部分汇集于分界层上, 主要以横向扩散为主, 在横向扩散的同时, 甲苯含量在不断降低, 更加剧了甲苯向北京褐潮土中运

移的缓慢性. 该结果与前人研究结论类似^[5,15,29], 例如, Alfredo^[10]在研究海水入侵对非均质性含水层(砂土-黏土层序)中 NAPLs 分布的影响时发现, NAPLs 污染物主要残留于砂土层中, 黏土层由于渗透系数远小于砂土, 基本不含有 NAPLs 污染物. 因此, 北京褐潮土和砂土分界面的相对渗透率变化是影响甲苯重新分布的主要因素之一.

3 结论

(1) 采用二维土槽装置分析了当甲苯发生瞬时泄漏后, 其在北京褐潮土中的含量分布规律. 实验结果表明, 与垂向迁移趋势相比, 甲苯更易在北京褐潮土中发生横向扩散. 另外, 采用实测结果对 STOMP 模型的模拟结果进行验证, 结果表明, 模型模拟结果基本与实测结果吻合.

(2) STOMP 模型对北京褐潮土-砂土和砂土-北京褐潮土两种非均质性土层结构中的甲苯运移模拟结果表明, 由于土层分界面的相对渗透率突变, 甲苯运移与分布特征与均质北京褐潮土中的实测结果存在明显差异. 在北京褐潮土-砂土结构中, 由于下层的砂土渗透系数远大于上层的北京褐潮土, 致使甲苯较易从北京褐潮土中入渗至砂土层中. 砂土-北京褐潮土结构中, 甲苯主要以在上层砂土层中的横向扩散为主, 而垂向迁移受到阻滞.

参考文献:

- [1] 韩春媚, 鲁炳闻, 于冀芳, 等. 土壤中挥发性有机污染物现场快速监测技术应用进展[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(5): 8-13.
- [2] Al-Raosh R I. Impact of wettability on pore-scale characteristics of residual nonaqueous phase liquids[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(13): 4796-4801.
- [3] Russo A E, Mahal M K, Brusseau M L. Nonideal behavior during complete dissolution of organic immiscible liquid 1. Natural porous media[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(1): 208-213.
- [4] Qin X S, Huang G H, He L. Simulation and optimization technologies for petroleum waste management and remediation process control[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(1): 54-76.
- [5] Wipfler E L, Nessb M, Breedveld G D, et al. Infiltration and redistribution of LNAPL into unsaturated layered porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 71(1-4): 47-66.
- [6] 张江华, 赵来军, 吴勤旻. 危险化学品泄漏扩散研究探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(1): 8-11.
- [7] 胡黎明, 劳敏慈, 濮家骝, 等. LNAPLs 在非饱和土中迁移的离心试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 690-694.
- [8] Guarnaccia J, Pinder G, Fishman M. NAPL: simulator documentation [EB/OL]. http://www.epa.gov/ada/download/models/napl_sim/napl_sim.pdf, 1997-10.
- [9] Pruess K, Battistelli A. TMVOC, a numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in saturated-unsaturated heterogeneous media [EB/OL]. http://esd.lbl.gov/TOUGHPLUS/manuals/TMVOC_Users_Guide.pdf, 2002-04.
- [10] Battistelli A. Modeling multiphase organic spills in coastal sites with TMVOC V. 2.0[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 316-324.
- [11] University of Texas. Volume II: technical documentation for UTCHEM- 9.0, a three-dimensional chemical flood simulator [EB/OL]. http://www.cpge.utexas.edu/utchem/UTCHEM_Tech_Doc.pdf, 2000-07.
- [12] Nellis S R, Yoon H, Werth C J, et al. Surface and interfacial properties of nonaqueous-phase liquid mixtures released to the subsurface at the Hanford site[J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(2): 343-351.
- [13] Oostrom M, Hofstee C, Lenhard R J, et al. Flow behavior and residual saturation formation of liquid carbon tetrachloride in unsaturated heterogeneous porous media [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 64(1-2): 93-112.
- [14] Oostrom M, Wietsma T W, Dane J H, et al. Desiccation of unsaturated porous media: intermediate-scale experiments and numerical simulation[J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(3): 643-650.
- [15] 李梅, 郑西来, 童玲, 等. 石油污染对土壤渗透性的影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(2): 119-123.
- [16] 邵明安, 张博闻. 原油在扰动土壤中入渗的实验研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 781-787.
- [17] 张博闻, 邵明安. 初始含水率对土壤中原油入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 9-13.
- [18] US EPA. Method 5021: volatile organic compounds in soils and other solid matrices using equilibrium headspace analysis [EB/OL]. <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/5021.pdf>, 1996-12.
- [19] White M D, Oostrom M. STOMP, subsurface transport over multiple phases, version 2.0, theory guide [EB/OL]. <http://stomp.pnnl.gov/documentation/guides/theory.pdf>, 2000-03.
- [20] White M D, Oostrom M. STOMP, subsurface transport over multiple phases, version 4.0, user's guide [EB/OL]. <http://stomp.pnnl.gov/documentation/guides/userguide.pdf>, 2006-06.
- [21] 肖建英, 李永涛, 王丽. 利用 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线[J]. 地下水, 2007, 29(5): 46-47.
- [22] 胡黎明, 郝荣福, 殷昆亭, 等. BTEX 在非饱和土和地下水系统中迁移的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(11): 1546-1549.
- [23] 纪学雁, 刘晓艳, 李兴伟, 等. 分层土柱法研究石油类污染

- 物在土壤中的迁移[J]. 能源环境保护, 2005, **19**(1): 43-45.
- [24] 刘晓艳, 史鹏飞, 孙德智, 等. 大庆土壤中石油类污染物迁移模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, **30**(2): 120-124.
- [25] Brouyère S. Modelling the migration of contaminants through variably saturated dual-porosity, dual-permeability chalk [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, **82**(3-4): 195-219.
- [26] Yoon H, Werth C J, Valocchi A J, *et al.* Impact of nonaqueous phase liquid (NAPL) source zone architecture on mass removal mechanisms in strongly layered heterogeneous porous media during soil vapor extraction [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2008, **100**(1-2): 58-71.
- [27] Carsel R F, Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources Research, 1988, **24**(5): 755-769.
- [28] 束善治, 梁宏伟, 袁勇. 轻非水相液体在非均质地层包气带中运移和分布特征数值分析[J]. 水利学报, 2002, (11): 31-37.
- [29] Schroth M H, Istok J D, Selker J S. Three phase immiscible fluid movement in the vicinity of textural interface [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1998, **32**(1-2): 1-23.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

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 Polycrylate	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

国内外公开发刊