

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                      |                                                           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析 .....                      | 李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)                                        |
| 长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征 .....                                    | 王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)                    |
| 北京城区大气 PM <sub>2.5</sub> 主要化学组分构成研究 .....                            | 刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)                   |
| 2014年春季山东省 PM <sub>2.5</sub> 跨界输送研究 .....                            | 贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)                       |
| 燃煤电厂产生和排放的 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征 .....                          | 马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)                         |
| 南京夏季城市冠层大气 CO <sub>2</sub> 浓度时空分布规律的观测 .....                         | 高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)                |
| 北京市机动车尾气排放因子研究 .....                                                 | 樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)                                  |
| 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力 .....                                        | 张维康, 王兵, 牛香 (2381)                                        |
| 长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算 .....                                           | 丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)                                   |
| 基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N <sub>2</sub> O 排放量估算 .....                  | 韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)                                       |
| 不同源汇信息提取方法对区域 CO <sub>2</sub> 源汇估算及其季节变化的影响评估 .....                  | 张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)                                       |
| 实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估 .....                                        | 王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)                             |
| 博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价 .....                                 | 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)                                |
| 岩溶泉水化学性质及 δ <sup>13</sup> C <sub>DIC</sub> 影响因素 .....                | 赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)                                 |
| 柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析 .....                                         | 原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437) |
| 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价 .....                                    | 庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)                |
| 三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征 .....                                        | 王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)                              |
| 干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响 .....                                 | 林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)                         |
| 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究 .....                                       | 王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)                                   |
| 西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析 .....                                           | 段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)                                      |
| 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价 .....                                        | 杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)                                        |
| 宁波三江口水域原核生物群落结构分析 .....                                              | 胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)                            |
| 全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响 .....                                          | 孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)                                  |
| 菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响 .....                                      | 马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)                               |
| 生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究 .....                                        | 李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)                                 |
| 复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究 .....                                          | 王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)                        |
| 3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响 .....                                           | 吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)                              |
| 基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响 .....                                    | 高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)                        |
| BDD 和 PbO <sub>2</sub> 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究 .....                       | 伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)                                  |
| 开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附 .....                                              | 李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)                        |
| 碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究 .....                                             | 张金利, 李宇 (2554)                                            |
| 刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能 .....                                         | 常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)                        |
| 碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除 .....                      | 雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)                            |
| 固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用 .....                                      | 李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)                         |
| PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水 .....                                 | 袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)                                    |
| Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究 .....                                       | 王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)                          |
| 制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别 .....                                            | 黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)                          |
| 不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化 .....                                | 陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)                          |
| 利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数 .....                               | 王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)                        |
| 连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能 .....                                  | 姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)                               |
| 广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价 .....                                         | 张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)                             |
| 山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征 .....                                     | 喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)                   |
| 金华市萤石矿区土壤氟污染评价 .....                                                 | 叶群峰, 周小玲 (2648)                                           |
| 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制 .....                                        | 侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)                                  |
| 黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素 .....                                      | 李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)         |
| 缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响 .....                                      | 雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)                                      |
| 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析 .....                                       | 朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)                                       |
| 不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO <sub>2</sub> 排放和微生物量的影响 .....                     | 刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)        |
| 1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解 .....                                   | 贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)                       |
| 耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析 .....                                          | 杨阳, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)                             |
| 水介质中 C <sub>60</sub> 纳米晶体颗粒与 Cu <sup>2+</sup> 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究 ..... | 于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)                              |
| 地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立 .....                                       | 郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)                              |
| 《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)      |                                                           |

# 基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响

高燕维\*, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞\*, 吴吉春\*

(南京大学地球科学与工程学院水科学系, 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 重非水相污染物 (DNAPL) 在地下水中的运移分布受多种因素控制. 选择四氯乙烯 (PCE) 作为 DNAPL 的代表, 通过二维砂箱实验探究地下水流速对 DNAPL 运移分布的影响. 采用透射光法 (LTM) 监测 DNAPL 在砂箱内的运移行为并定量分析 DNAPL 的饱和度, 进而采用空间矩分析 DNAPL 污染羽的平均运移行为随时间的变化. 结果表明, 透射光法分析得到的 DNAPL 计算体积与实际注入体积有良好的相关性 ( $R^2 > 0.98$ ), LTM 的测量精度较高, 可准确反映 DNAPL 的入渗行为和再分布过程. DNAPL 饱和度和污染羽一阶矩 (质心) 的分析结果表明, 流速的增加能够促进 DNAPL 在水平和垂直方向的运移使得运移路径倾斜, 且其对 DNAPL 垂向入渗的促进作用更为明显; 污染羽二阶矩 (展布) 的分析结果显示流速的增加还提高了 DNAPL 在横向和垂向的扩散速度, 导致污染区域增大. 实验过程中, DNAPL 的饱和度直方图在较小地下水流速下始终呈单峰分布, 在较大地下水流速下则逐渐呈双峰分布, 且流速越大, 两个峰值的间距越大.

**关键词:** 重非水相; 饱和多孔介质; 透射光法 (LTM); DNAPL 饱和度; 空间矩; 地下水流速

中图分类号: X144; X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2532-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.028

## Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method

GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, SUN Yuan-yuan, XU Hong-xia\*, WU Ji-chun\*

(Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, Department of Hydrosiences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The migration and distribution of dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) in subsurface are affected by many factors. We selected PCE as the substitute contaminant, and performed several well-controlled two-dimensional sandbox experiments to investigate the effect of flow velocity on DNAPL infiltration and redistribution. Light transmission method (LTM) was used to monitor the transport process of DNAPL in the sandbox and quantitatively measure DNAPL saturation. The spatial moments based on measured DNAPL saturation were used to describe the average spatial behavior of DNAPL plume at various times. Experimental results showed a strong correlation between results obtained by LTM and the known amounts of DNAPL added into the sandbox ( $R^2 > 0.98$ ). The LTM accurately reflected the infiltration and redistribution processes. The results of DNAPL saturation and first moment (mass center) showed that the increased velocity promoted not only lateral but also vertical migration, leading to an inclined percolation path. Also vertical migration reacted more sensitive to flow velocity. The second moment (spread variance) showed that the increased velocity promoted lateral and vertical spread, increasing the pollution scope. The histogram of DNAPL saturation showed a unimodal distribution at low flow velocity, but showed a bimodal distribution at larger flow velocity, and the distance between two peaks became higher with the increasing flow velocity.

**Key words:** DNAPL; saturated porous media; light transmission method; DNAPL saturation; spatial moments; water flow velocity

随着石油工业及其相关有机化工产业的发展, 含氯烯烃、多氯联苯以及含酚杂油等重非水相液体 (dense non-aqueous phase liquid, DNAPL) 开始进入地下环境并污染土壤和地下水. 常见的 DNAPL 包括三氯乙烯 (trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯 (perchloroethylene, PCE) 等含氯有机溶剂<sup>[1,2]</sup>, 国内外许多地区已经受到 DNAPL 不同程度的污染<sup>[3~7]</sup>. 由于 DNAPL 具有密度大, 溶解度小, 低黏滞性, 弱迁移性, 以及强穿透性等特征, 容易在自身重力和地表水淋滤作用下穿透包气带进入到含水层中, 最终到达并聚积在底部基岩上形成污染池, 成为稳定的长期污染源, 给 DNAPL 污染的修复带来了较大的困

难<sup>[8]</sup>.

天然条件下, 地下水流速一般在  $1.0 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1} \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ , 而在山麓、河谷地区以及一些抽水井附近地下水流速将增大, 出现大于  $1.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  的情况, 甚至可能达到  $10.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  以上<sup>[9,10]</sup>. 因此, 研究地下水流速对重非水相液体 (DNAPL) 运移行为的影响, 分析 DNAPL 在含水层中的运移机制及分布特

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41030746, 41102148)

作者简介: 高燕维 (1989 ~ ), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水污染物运移及污染修复等, E-mail: gordon\_wolf@foxmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: hxxu@nju.edu.cn; jcwu@nju.edu.cn

性,将有助于识别污染源的位置,从而为有效地进行 DNAPL 的污染修复提供依据.

目前对 DNAPL 污染的野外场地尺度的研究相对较少,国内外学者主要是通过室内砂箱研究 DNAPL 在含水层中的运移分布规律,一般采用非侵入式的监测方法并测算 DNAPL 的饱和度<sup>[11-23]</sup>. Fagerlund 等<sup>[12]</sup>应用 X 射线法,基于室内二维砂箱,研究异构烷烃(Soltrol 220)在具有倾斜界面的两个层状介质中的入渗过程和截留过程. Luciano 等<sup>[13]</sup>应用反射光分析方法,以玻璃珠为多孔介质填充在二维砂箱中,探究砂箱内多孔介质中水力梯度对氢氟醚(HFE-7100)饱和度分布及入渗运移速率的影响. 用于测量流体饱和度的非侵入方法包括伽马辐射法<sup>[14,15]</sup>、X 射线法<sup>[16,17]</sup>、反射光图像分析法<sup>[13]</sup>、透射光(light transmission method, LTM)图像分析法<sup>[18-23]</sup>等. 前两种方法只能对点测定,测量精度较低,耗时较长,其应用相对受到限制,而图像分析法具有较高的空间和时间分辨率,能够快速、准确、非侵入的一次性获取整个区域上的动态流体饱和度分布. 反射光法仅能表征砂箱表面的污染物分布特性,相对地,透射光法能更准确地表征污染物的运移特性和分布规律,被广泛地应用于室内二维实验<sup>[18-23]</sup>. 本研究选用地下水中普遍存在的四氯乙烯(PCE)作为目标污染物,采用透射光法来监测 PCE 在二维砂箱中的运移过程,探讨地下水流速对饱和和多孔介质中 PCE 运移及再分布过程的影响,同时采用矩分析法定量描述 PCE 污染羽的平均空间行为随运移时间的变化规律,以期对地下水中 DNAPL 污染的风险评价和修复防治提供依据.

1 材料与方法

1.1 砂箱装置

二维砂箱尺寸为 60.0 cm × 45.0 cm × 1.2 cm, 由 3 块铝框和两块钢化玻璃组成. 先将中心框与玻璃之间用橡胶条和玻璃胶密封,再将外框置于玻璃外侧进行固定. 中心框左右两侧各设置一条凹槽分别作为进水井和出水井,井壁周围包裹 200 目不锈钢滤网,防止石英砂进入凹槽,砂箱顶部中间位置设有注样孔(图 1).

砂箱填充的介质为半透明石英砂,背景介质为石英砂 C190 Accusand (20 ~ 30 目, Unimin, USA). 该石英砂平均粒径 ( $d_{50}$ ) 为 0.73 mm, 均一系数为 1.21. 为了防止 PCE 渗漏,在砂箱的顶部和底部各

装填约 2.0 cm 厚的细砂(70 ~ 80 目, Accusand, Unimin, USA), 细砂平均粒径 ( $d_{50}$ ) 为 0.21 mm, 均一系数为 1.15. 石英砂在使用前分别以 0.25 mol·L<sup>-1</sup> 的 HNO<sub>3</sub> 溶液和 0.25 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液先后浸泡 24 h,再用去离子水漂洗至 pH 为 7.0, 最后在 45℃ 条件下烘干<sup>[18]</sup>. 为了得到饱和和介质条件,采用湿法装填石英砂,装砂过程中进行充分的搅拌夯实,以保证砂子均匀填充.

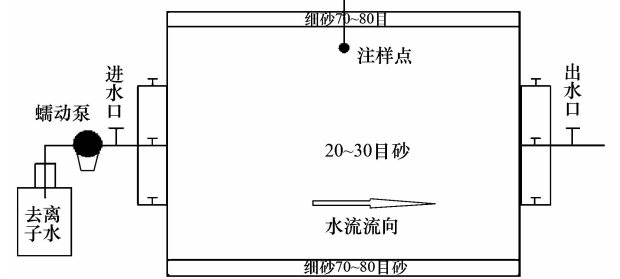


图 1 砂箱示意  
Fig. 1 Schematic of experimental setup

1.2 透射光监测系统

本研究采用透射光监测系统记录砂箱中流体的运移<sup>[19]</sup>. 该系统主要包括二维砂箱、光源和 CCD (charged coupled device) 相机这 3 个部分(图 2). 采用 LED 灯箱作为系统唯一的稳定光源,放置在砂箱一侧. CCD 相机 (AP2E, Apogee Instruments, Auburn, CA) 放置在砂箱另一侧,距离砂箱约 1.8 m,以遮光板封闭砂箱与相机之间的空间,保证 CCD 相机所接收的光线皆为来自灯箱发出后穿过砂箱的光线. CCD 相机的镜头为尼康镜头 (AF Nikkor 24 ~ 85 mm F/2.8 ~ 4, Japan). 相机通过软件 (MaxIm DL, Ottawa, ON) 与计算机连接,自动接收并记录透过砂箱的光强值.

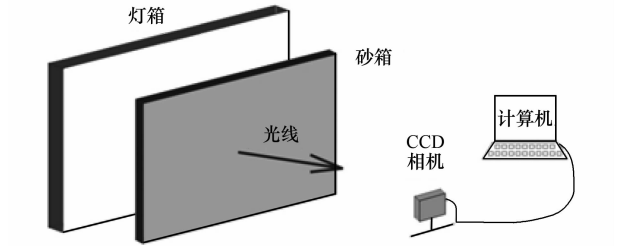


图 2 透射光系统  
Fig. 2 Light transmission system

1.3 实验过程

本研究采用 PCE 作为 DNAPL 污染物的代表. 为了便于观察 PCE 污染区域的变化,用 0.05 g·L<sup>-1</sup> 油红 O (苏丹红 5B) 将 PCE 染成红色. 油红 O 为有

机染色剂,溶于有机物而不溶于水,且该浓度下的油红 O 不会改变 PCE 的理化性质<sup>[24]</sup>.

为探讨地下水流速对饱和和多孔介质中 PCE 运移和分布的影响,共设计进行 3 组不同水流流速下的砂箱实验,记为实验 1、实验 2 和实验 3. 通过蠕动泵 (LSP01-2A, Longer Pump) 控制 3 组实验的水流流速分别为 0.1、1.0 和 10.0 m·d<sup>-1</sup>, 对应小流速、中流速及大流速情形,流向从左向右 (图 1). 砂箱装填完毕后,先以去离子水冲洗砂箱,直至砂箱内无气泡残留,然后采用注射泵 (BT100-1F, Longer Pump) 将染色的 PCE 从气密性注射器中以 2.0 mL·min<sup>-1</sup> 的速率从砂箱顶部注样点处注入,共计注入 PCE 30.0 mL. 3 组砂箱实验的具体参数见表 1. PCE 注入砂箱之前先用 CCD 相机进行拍摄,记录背景光强值. 在 PCE 的注入和再分布过程中,设置 CCD 相机在封闭的遮光板中以一定的时间间隔进行拍摄,实时监测穿过砂箱光强的变化,记录不同时刻下的光强值.

表 1 实验条件

| Table 1 Experimental conditions |       |                            |                                   |                |
|---------------------------------|-------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 实验组                             | 孔隙度   | 水流流速<br>/m·d <sup>-1</sup> | PCE 注入速率<br>/mL·min <sup>-1</sup> | PCE 注入量<br>/mL |
| 1                               | 0.313 | 0.1                        | 2.0                               | 30.0           |
| 2                               | 0.300 | 1.0                        | 2.0                               | 30.0           |
| 3                               | 0.297 | 10.0                       | 2.0                               | 30.0           |

2 结果与讨论

2.1 PCE 饱和度

CCD 相机拍摄的图片实质上记录的是不同时刻透过砂箱的光强值,需要对获得的光强数据进行转换,得到相应时刻 PCE 在砂箱中的饱和度分布. 考虑水-NAPL 两相系统,假设水相为湿润相,介质单

个孔隙完全饱水或饱油,由光反射及折射定律建立以下表达式<sup>[20,25]</sup>:

$$I = CI_0\tau_{s,w}^{2k}\tau_{w,o}^{2kS_o}\exp(-\alpha_sL_s)\exp(-\alpha_{do}S_oL) \quad (1)$$

式中,  $I$  为出射光强;  $I_0$  为入射光强;  $C$  为校正参数,对于准直光源或是光源和介质到接收器的距离大致相同时,  $C$  可以忽略;  $k$  为整个介质厚度上颗粒 (或孔隙) 的数量;  $S_o$  为油相的有效饱和度,  $\tau_{s,w}$  为固体颗粒-水相界面的透射率,  $\tau_{w,o}$  为水相-NAPL 界面的透射率,  $\alpha_s$ 、 $\alpha_{do}$  分别为固体颗粒和染色 NAPL 的吸光系数;  $L_s$ 、 $L$  分别为整个介质厚度上固体颗粒和孔隙的厚度.

将完全饱油的光强表达式以及完全饱水的光强表达式代入上述公式可得到任一像素点位的油相饱和度公式<sup>[25]</sup>:

$$S_o = \frac{\ln I_s - \ln I}{\ln I_s - \ln I_{oil}} \quad (2)$$

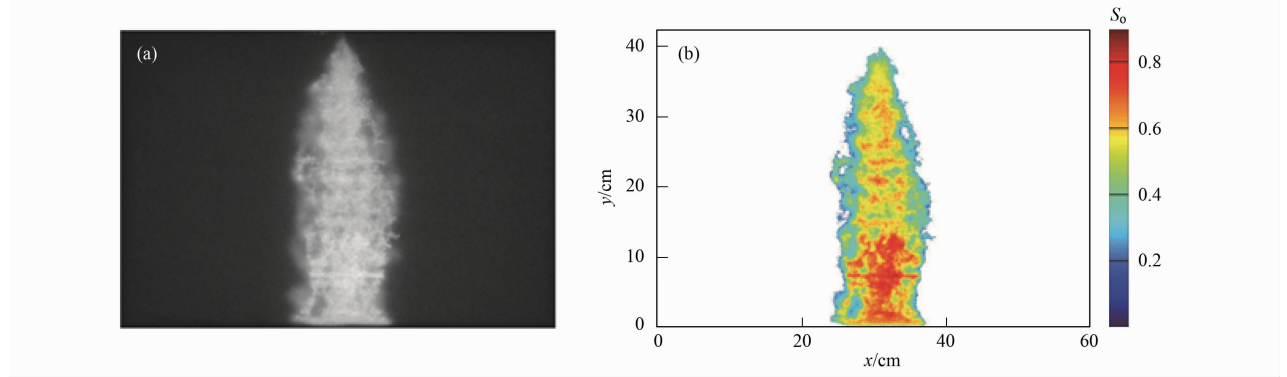
式中,  $S_o$  为油相饱和度,  $I_s$  为饱水条件下的光强值,  $I_{oil}$  为饱油条件下的光强值.

在水-NAPL 两相中引入参数  $M$  ( $M = I_o/I_s$ )<sup>[25]</sup>, 实验过程中认为光源处于稳定状态, 介质视为均匀介质, 根据实验过程中 NAPL 饱和和区域估算得到参数  $M$  的统计平均值为 0.43, 代入公式 (2) 得<sup>[25]</sup>:

$$S_o = \ln\left(\frac{I}{I_s}\right)/\ln(M) \quad (3)$$

以实验 1 中某时刻 CCD 相机拍摄得到的 PCE 分布 [图 3 (a)] 为例, 根据上述计算过程, 使用 Matlab 软件对图像进行处理, 所得 PCE 饱和度分布如图 3 (b) 所示.

为了验证上述计算方法的可靠性和准确性, 根据 PCE 的饱和度 ( $S_o$ ) 分布结果计算出相应的 PCE 体积, 然后与对应时刻的实际注入值进行比较. 本研究将 PCE 的运移过程分为入渗期和再分布期两



(a) CCD 图片; (b) PCE 饱和度 ( $S_o$ ) 分布

图 3 CCD 图片与 PCE 饱和度 ( $S_o$ ) 分布

Fig. 3 CCD image and PCE saturation distribution

个阶段,其中入渗期为 PCE 注入阶段,时长 15 min,停止注入 PCE 后,污染物进入再分布期. 考虑到大流速情形下再分布期有 PCE 流出研究区域,仅进行入渗期 PCE 体积的计算值和实际注入值的对比. 将 3 组实验中 PCE 的实际注入量和计算量进行回归拟合(图 4),得到其相关系数分别为 0.984、0.996 和

0.998,均方根误差(RMSE)分别为 1.22、0.75 和 0.72 mL. 当注入 30.0 mL PCE 时,相对误差分别为 4.06%、2.50% 和 2.40%,这些结果表明上述利用光强值计算饱和度的方法是可靠的,同时还说明 LTM 的测量精度较高,可以准确反映砂箱内 PCE 的运移与分布过程.

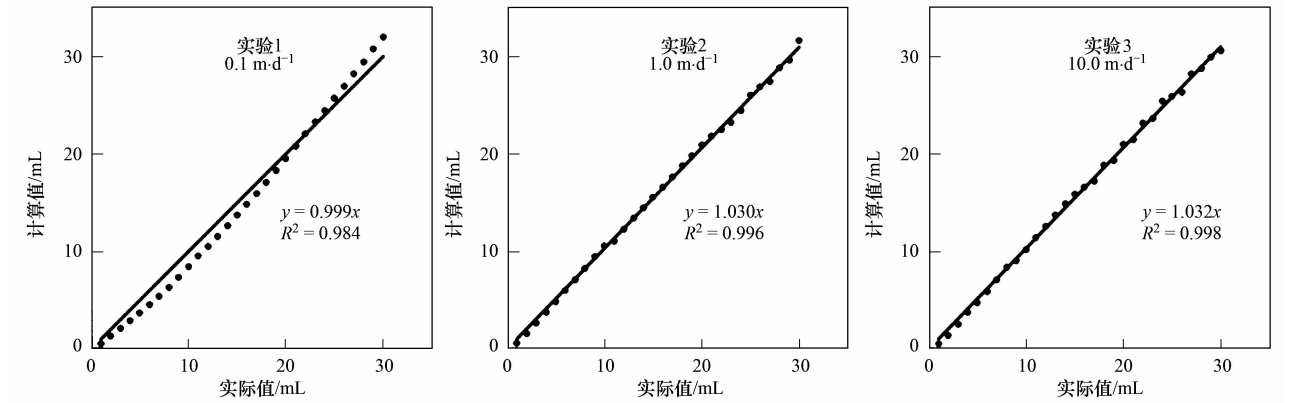


图 4 3 组实验 PCE 入渗期计算体积与实际注入体积的对比

Fig. 4 Comparison between calculated and actual PCE volumes of three experiments during PCE infiltration

图 5 为不同地下水流速条件下,砂箱中的 PCE 在不同时刻的饱和度分布情况,表 2 为不同地下水流速对 PCE 污染池空间分布的影响. 结合图 5 和表 2 可以看出,虽然 3 组实验中 PCE 的注入方式、注入速率和注入时间均相同,但是由于流速的影响,PCE 在实验期间内的运移行为表现出明显差异. 在入渗期,PCE 注入 2 min 后,流速为 0.1 m·d<sup>-1</sup>的情形下,与由重力作用引起的 PCE 垂向迁移相比,由毛细管力导致的 PCE 横向迁移不可忽视,相对于另外两组实验,PCE 在注入点附近相对较均匀地向四周扩散[图 5(a)]. 而随着流速增加至 1.0 m·d<sup>-1</sup>和 10.0 m·d<sup>-1</sup>,垂向入渗占据绝对的主导地位,PCE 沿注入方向快速向下运移,流速越大,PCE 的垂向运移速率越大,污染羽锋面深度越大,污染羽越狭长[图 5(b)和图 5(c)]. 这主要是由于增大的水流流速减小了 PCE 驱替水相的阻力. 注入停止时,小流速情形的实验 1 中,PCE 污染羽锋面的入渗深度约为 27.3 cm;而中-高流速情形下的实验 2 和实验 3 中,污染物已运移至底部并在细砂层上聚集形成 PCE 污染池,污染池的长度分别为 20.2 cm 和 28.6 cm,增大的地下水流速增加了 PCE 污染池在水流方向上的延伸. 从图 5 还可以明显看出,侧向水动力作用抑制了 PCE 沿上游方向的横向迁移,促进了其沿水流方向的迁移,使得 PCE 污染羽的入渗路径偏离注入中心,向下游倾斜. 随着流速从实验 1 的 0.1

m·d<sup>-1</sup>增大至实验 3 的 10.0 m·d<sup>-1</sup>,3 组实验中 PCE 污染羽渗流路径的倾斜角度分别为 1.3°、2.7°和 6.2°. 注入结束后进入再分布期,PCE 在水流驱动和自身重力的共同作用下继续向下运移,到达底部细砂层后由于无法克服细砂层的毛细管力而在其上方聚集,并形成污染池. 从图 5 可以明显看出,PCE 污染池的形状和位置等与地下水流速密切相关. 随着流速的增大,PCE 污染池的长度增加,厚度增大,污染池的中心位置向下游迁移(表 2). 实验进行 60 min 后,三组砂箱内 PCE 的空间分布范围和饱和度分布趋于稳定;实验进行 240 min 后,实验 1 和实验 2 中 PCE 的空间分布范围和饱和度分布与 60 min 时相比无明显变化,仅实验 3 中由于 PCE 随着水流不断流出砂箱而使得砂箱底部 PCE 的饱和度仍有降低. 因此,240 min 后结束本次实验,此时砂箱中的 PCE 主要以不连续的离散形态(ganglia)和连续的污染池(pool)<sup>[26]</sup>两种形式存在.

表 2 21 min 时不同地下水流速对 PCE 污染池空间分布的影响

| 项目         | PCE pool distribution at t = 21 min |      |      |
|------------|-------------------------------------|------|------|
|            | 地下水流速/(m·d <sup>-1</sup> )          |      |      |
|            | 0.1                                 | 1.0  | 10.0 |
| PCE 最大饱和度  | 0.81                                | 0.82 | 0.87 |
| 污染池的长度/cm  | 4.9                                 | 36.8 | 41.1 |
| 污染池的厚度/cm  | 0.8                                 | 2.2  | 3.1  |
| 污染池中心位置/cm | 31.6                                | 32.4 | 39.0 |

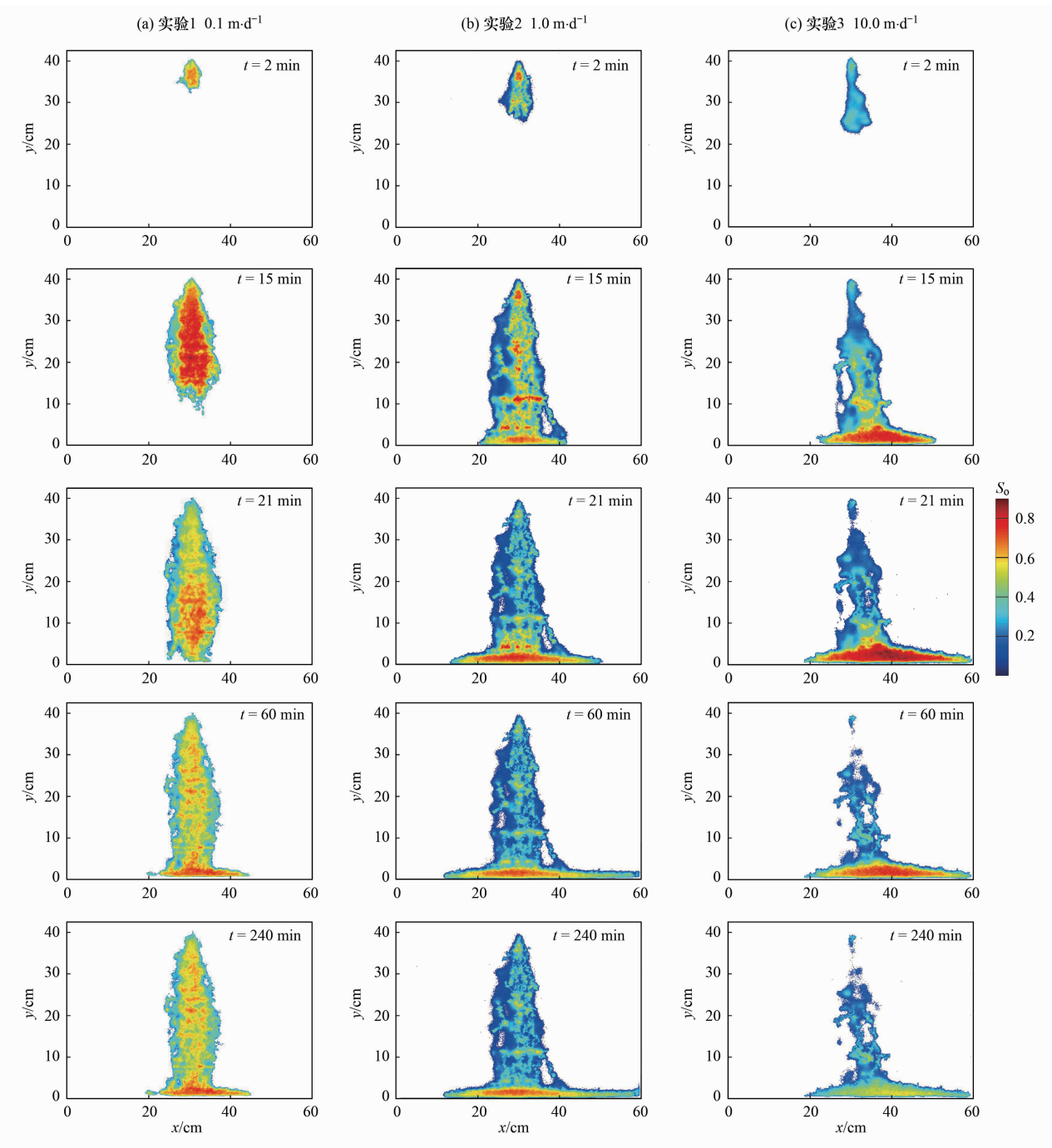


图5 不同流速情形下 PCE 迁移过程中的饱和度 ( $S_0$ ) 分布

Fig. 5 PCE saturation profiles during migration at varying flow velocity

绘制不同流速情形下 PCE 污染羽锋面移动随时间的变化曲线并进行回归拟合(图 6). 从图 6 中可以看出,相同时刻,PCE 污染羽锋面的深度随着流速增大而明显增加,实验 1、实验 2 和实验 3 中 PCE 到达底部细砂层界面的时间分别为 20、10 和 6.5 min,表明地下水流速的增加对 PCE 的垂向入渗具有明显的促进作用.

2.2 空间矩分析

基于 2.1 节中的 PCE 饱和度分析结果,采用空

间矩方法来定量描述流速对 PCE 污染羽在空间上的整体迁移行为及变化特征的影响<sup>[12,27]</sup>,空间矩 ( $M_{ij}$ ) 的定义为:

$$M_{ij}(t) = \int_{x_0}^{x_1} \int_{y_0}^{y_1} \varphi(x,y) S_0(x,y,t) x^i y^j dx dy \quad (4)$$

式中, $x_0$ 、 $x_1$ 、 $y_0$ 、 $y_1$  分别为  $x$  及  $y$  坐标的积分上/下限, $\varphi$  为孔隙度, $S_0$  为 PCE 饱和度, $i$ 、 $j$  分别为  $x$  及  $y$  方向的阶数,当  $i=0$ 、 $j=0$  时, $M_{00}$  为零阶矩,表示污染物的总量.

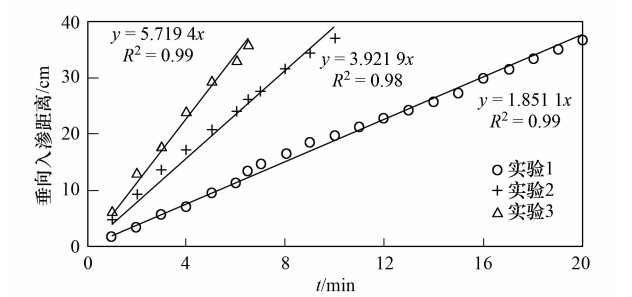


图 6 不同流速情形下 PCE 的垂向入渗距离随时间的变化

Fig. 6 Variation of vertical infiltration depth of PCE with time at varying flow velocity

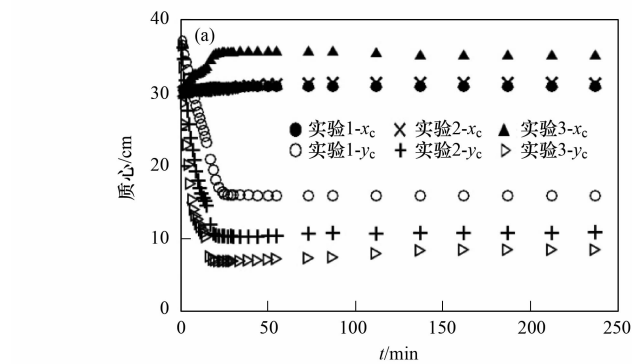
一阶矩 ( $x_c, y_c$ ) 表示污染羽质心的位置:

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (5)$$

二阶矩 ( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$ ) 表示污染羽围绕质心的展布:

$$\sigma_{xx} = \frac{M_{20}}{M_{00}} - x_c^2, \quad \sigma_{yy} = \frac{M_{02}}{M_{00}} - y_c^2 \quad (6)$$

图 7 为不同流速情形下 PCE 污染羽的质心 ( $x_c, y_c$ ) 和展布 ( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$ ) 随时间的变化情况. 以砂箱左下角为坐标原点, 注入点坐标为 (30.0, 37.0). 从图 7(a) 中可以看出,  $x_c$  随着流速的增大而增大, 实验 1 和实验 2 中  $x_c$  的变化规律相似, 质心向右迁移. 实验 2 中地下水流速 ( $1.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 是实验 1 的 10 倍, 但两组实验的  $x_c$  并无显著差异, 实验结束时的  $x_c$  值相同, 约为 31.0 cm; 而在实验 3 的大流速 ( $10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 情形下, 实验结束时  $x_c$  增大至 35.0 cm, 与实验 2 相比有了大幅增加, 表明地下水流速较大时对 PCE 横向运移的促进作用更为显著. 对比 3 组实验的  $y_c$ , 发现其随着地下水流速的增大而迅速减小, 进一步表明流速的增大能够显著促进 PCE 的垂向运移, 导致 PCE 污染羽锋面深度增大. 值得



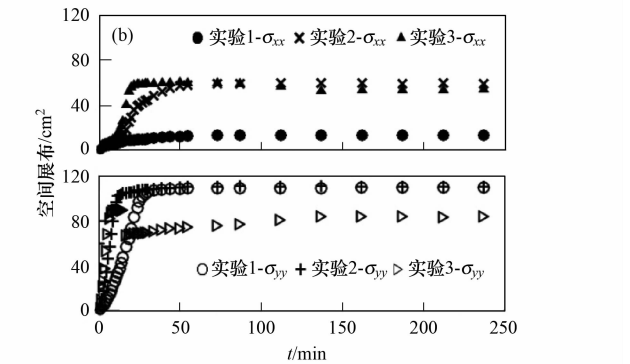
(a) 质心随时间的变化; (b) 空间展布随时间的变化

注意的是, 不同流速条件下, 污染羽垂向质心的变化幅度明显大于其水平质心的变化, 说明 PCE 的垂向运移对流速的响应更敏感. 实验进行 60 min 后, 3 组实验里 PCE 在砂箱中的运移趋于稳定, 对应的  $x_c$  和  $y_c$  也趋于稳定, 其中实验 2 和 3 的  $y_c$  在实验结束时 (240 min) 与 60 min 时相比略有增大, 这是由于实验过程中有 PCE 随着水流流出砂箱使得 PCE 污染池体积量减小, 进而导致垂向质心向上迁移所致. 从图 7(b) 可以看出, 3 组实验 PCE 污染羽的  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{yy}$  均呈现出先迅速增加然后趋于稳定的变化过程. 在上升过程中, 相同时刻, 流速越大,  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{yy}$  的值越大, 且趋于稳定所需的时间越短. 这表明流速增大促进了 PCE 在横向 ( $x$ ) 和垂向 ( $y$ ) 的扩散速度, 增大了 PCE 的污染范围, 同时还加速了 PCE 的污染进程. 需要指出的是, 实验 3 中  $\sigma_{yy}$  在 PCE 注入停止后 ( $t = 15 \text{ min}$ ) 迅速下降, 这是由于较大的水动力 ( $10.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 促使 PCE 快速向下运移到达底部界面处, 砂箱上部的运移路径上只存在少量连续的 PCE [图 5(c)], 大量 PCE 快速运移至底部界面处并聚积, 使得 PCE 在垂向 ( $y$ ) 上的扩散范围显著下降. 3 组实验中, PCE 在砂箱内的展布 ( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$ ) 在 60 min 后趋于稳定, 直至实验结束时均无明显变化, 这与 2.1 节中的饱和度变化趋势相同.

### 2.3 饱和度直方图

PCE 的饱和度直方图可以描述不同饱和度区间 PCE 的体积分数, 可以更好地了解 PCE 饱和度的空间分布规律.

图 8 为 3 组砂箱实验中的 PCE 在不同时刻的饱和度直方图, 横坐标表示饱和度, 饱和度间隔 0.01, 纵坐标表示该饱和度区间 PCE 的体积分数. 从中可以看出, 在 PCE 注入 2 min 后, 3 组流速情形下 PCE 的饱和度直方图均表现为单峰, 随着流速从



(a) 质心随时间的变化; (b) 空间展布随时间的变化

图 7 PCE 污染羽的质心与展布随时间的变化情况

Fig. 7 Center of mass of PCE plume ( $x_c, y_c$ ), and variances ( $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$ ) at different time

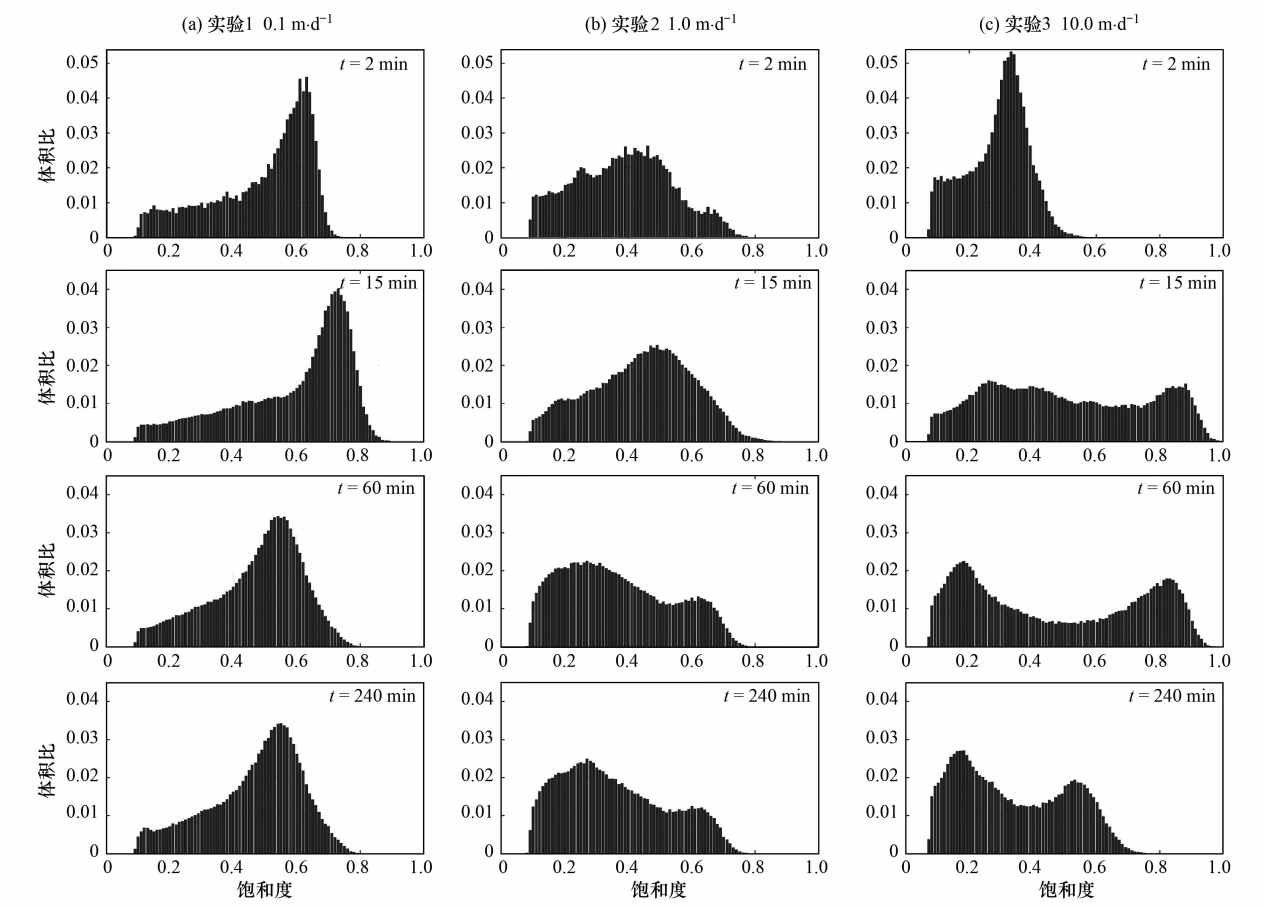


图 8 3 组实验中 PCE 在不同时刻的饱和度直方图

Fig. 8 Histogram of PCE saturation of the three experiments at different time

0.1 m·d<sup>-1</sup>增加至 10.0 m·d<sup>-1</sup>, 峰值对应的饱和度区间随之减小, 分别为 0.55 ~ 0.65、0.35 ~ 0.52、0.25 ~ 0.36. 这是因为在小水流速条件下, PCE 缓慢向四周扩散[图 5(a)], 而大水流速条件下, PCE 在向四周扩散的同时迅速下渗, 使得饱和度峰值减小, 间接说明了水流速度增大促进了 PCE 的迁移和展布. 15 min 后, 实验 1 和实验 2 的饱和度直方图的峰值与 2 min 时的相比向大饱和度方向移动, 而此时实验 3 的饱和度分布则较为均匀, 无明显峰值. 实验进行 60 min 后, 实验 1 的饱和度直方图峰值对应的饱和度区间减小(0.5 ~ 0.6), 而实验 2 和实验 3 的饱和度直方图表现出明显的双峰分布, 实验 2 的两个峰值分别在 0.1 ~ 0.4 和 0.6 ~ 0.7 之间; 实验 3 的两个峰值分别在 0.1 ~ 0.3 和 0.7 ~ 0.9 之间. 可以看出, 流速越大, 两个峰值的间距越大. 这是由于水动力驱替作用随着流速的增加而增大, PCE 更易被水相驱替导致运移路径上孔隙中 PCE 的残留量减小, 对应的饱和度减小, 更多的 PCE 在界面处聚积形成较高饱和度的污染池, 从而使 PCE

的饱和度分布分别向低值和高值两个方向集中.

3 结论

- (1) 利用非侵入的透射光法(LTM)能够快速而准确地获取任意时刻 DNAPL(PCE)在二维砂箱中的饱和度分布. 根据透射光法的 CCD 图像计算得到的 DNAPL 体积与实际注入值具有良好的相关性( $R^2 > 0.98$ ).
- (2) 地下水流速的增大不仅提高了 DNPAL 的垂向入渗速度, 还促进了 DNPAL 在水流方向上的横向运移使得 DNAPL 入渗路径倾斜, 并且地下水流速较大时(10.0 m·d<sup>-1</sup>)对 DNAPL 横向运移的促进作用更为显著. 随着流速的增大, 砂箱底部细砂层上聚集的 DNAPL 污染池的长度和厚度随之增加, 污染池的中心位置向下游迁移. 不同流速条件下, DNAPL 污染羽垂向质心的变化幅度明显大于其水平质心的变化.
- (3) 地下水流速为 0.1 m·d<sup>-1</sup>时, DNAPL 的饱和度直方图在注入期和再分布期始终呈单峰分布;

地下水流速为  $1.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $10.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  时, DNAPL 的饱和度直方图在 DNAPL 分布稳定后呈明显的双峰分布, 且流速越大, 两个峰值的间距越大。

#### 参考文献:

- [1] 李海明, 陈鸿汉, 钟佐桑, 等. 垃圾堆放场氯代脂肪烃对浅层地下水的污染特征初步分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, **27**(2): 227-230.
- [2] 李红莉, 高虹. 水体中有机污染物的分析[J]. 化学分析计量, 2003, **12**(3): 16-18.
- [3] 韩宝平, 王小英, 朱雪强, 等. 某市岩溶地下水四氯化碳污染特征研究[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(6): 982-988.
- [4] Kao C M, Huang W Y, Chang L J, *et al.* Application of monitored natural attenuation to remediate a petroleum-hydrocarbon spill site [J]. Water Science and Technology, 2006, **53**(2): 321-328.
- [5] 王晓红, 魏加华, 成志能, 等. 地下水有机污染源识别技术体系研究与示范[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 662-667.
- [6] 刘菲, 王苏明, 陈鸿汉. 欧美地下水有机污染调查评价进展[J]. 地质通报, 2010, **29**(6): 907-917.
- [7] 高存荣, 王俊桃. 我国 69 个城市地下水有机污染特征研究[J]. 地球学报, 2011, **32**(5): 581-591.
- [8] 高霏, 刘菲, 陈鸿汉. 三氯乙烯污染土壤和地下水污染源区的修复研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(8): 821-829.
- [9] 吴吉春, 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 14-17.
- [10] Erning K, Grandel S, Dahmke A, *et al.* Simulation of DNAPL infiltration and spreading behaviour in the saturated zone at varying flow velocities and alternating subsurface geometries [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **65**(4): 1119-1131.
- [11] Tidwell V C, Glass R J. X-ray and visible light transmission for laboratory measurement of two-dimensional saturation fields in thin-slab systems [J]. Water Resources Research, 1994, **30**(11): 2873-2882.
- [12] Fagerlund F, Illangasekare T H, Niemi A. Nonaqueous-phase liquid infiltration and immobilization in heterogeneous media: 1. experimental methods and two-layered reference case [J]. Vadose Zone Journal, 2007, **6**(3): 471-482.
- [13] Luciano A, Viotti P, Papini M P. Laboratory investigation of DNAPL migration in porous media [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 1006-1017.
- [14] Kaluvarachchi J J, Parker J C. An efficient finite element method for modeling multiphase flow [J]. Water Resources Research, 1989, **25**(1): 43-54.
- [15] O'Carroll D M, Bradford S A, Abriola L M. Infiltration of PCE in a system containing spatial wettability variations [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, **73**(1-4): 39-63.
- [16] Kechavarzi C, Soga K, Wiart P. Multispectral image analysis method to determine dynamic fluid saturation distribution in two-dimensional three-fluid phase flow laboratory experiments [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, **46**(3-4): 265-293.
- [17] Darnault C J G, DiCarlo D A, Bauters T W J, *et al.* Measurements of fluid contents by light transmission in transient three-phase oil-water-air systems in sand [J]. Water Resources Research, 2001, **37**(7): 1859-1868.
- [18] Niemet M R, Selker J S. A new method for quantification of liquid saturation in 2D translucent porous media systems using light transmission [J]. Advances in Water Resources, 2001, **24**(6): 651-666.
- [19] O'Carroll D M, Sleep B E. Hot water flushing for immiscible displacement of a viscous NAPL [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, **91**(3-4): 247-266.
- [20] Bob M M, Brooks M C, Mravik S C, *et al.* A modified light transmission visualization method for DNAPL saturation measurements in 2-D models [J]. Advances in Water Resources, 2008, **31**(5): 727-742.
- [21] Ye S J, Sleep B E, Chien C. The impact of methanogenesis on flow and transport in coarse sand [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, **103**(1-2): 48-57.
- [22] 杨靖, 叶淑君, 吴吉春. 生物膜对饱和多孔介质渗透性影响的实验和模型研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1364-1371.
- [23] 章艳红, 叶淑君, 吴吉春, 等. 孔隙介质中生物膜空间分布及其对渗透性影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1072-1080.
- [24] Taylor T P, Pennell K D, Abriola L M, *et al.* Surfactant enhanced recovery of tetrachloroethylene from a porous medium containing low permeability lenses: 1. Experimental studies [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, **48**(3-4): 325-350.
- [25] 章艳红, 叶淑君, 吴吉春. 光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2120-2128.
- [26] Suchomel E J, Pennell K D. Reductions in contaminant mass discharge following partial mass removal from DNAPL source-zones [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(19): 6110-6116.
- [27] Kunstmann H, Kinzelbach W. Computation of stochastic wellhead protection zones by combining the first-order second-moment method and Kolmogorov backward equation analysis [J]. Journal of Hydrology, 2000, **237**(3-4): 127-146.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                             |                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013 .....                                             | LI Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min ( 2327 )                                |
| Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period .....                                                 | WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> ( 2337 )        |
| Chemical Species of PM <sub>2.5</sub> in the Urban Area of Beijing .....                                                                                                                                    | LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 2346 )    |
| Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM <sub>2.5</sub> in Shandong Province During Spring in 2014 .....                                                                          | JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> ( 2353 ) |
| Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> Emitted from Coal-Fired Power Plants .....                                                                                             | MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> ( 2361 )          |
| Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO <sub>2</sub> Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer .....                                                     | GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> ( 2367 )          |
| Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing .....                                                                                                                                                        | FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 2374 )    |
| Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing .....                                                                                  | ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang ( 2381 )                        |
| Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta .....                                                                                                                        | DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> ( 2389 )            |
| Estimation of N <sub>2</sub> O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N .....                                                                                         | HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping ( 2395 )                       |
| Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO <sub>2</sub> Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations .....                                                       | ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao ( 2405 )                      |
| Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium ( VI ) in Liaohe River .....                                                                                                   | WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> ( 2414 ) |
| Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China .....                                          | ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaile, JIANG Feng-qing ( 2422 )         |
| Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs .....                                                                                                        | ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> ( 2430 )           |
| Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin .....                                                                                            | YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> ( 2437 )             |
| Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing .....                                                                  | QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> ( 2446 )        |
| Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir .....                                                                                                   | WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> ( 2453 )             |
| Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas ..... | LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> ( 2459 )       |
| Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer .....                                                                                                | WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> ( 2465 )               |
| Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake .....                                                                                                                      | DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying ( 2472 )                  |
| Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir .....                                                                             | YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru ( 2480 )                          |
| Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth .....                                                                                                              | HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> ( 2487 )       |
| Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China .....                                                                                | SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> ( 2496 )        |
| Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth .....                                                                 | MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> ( 2504 )              |
| Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater .....                                                                                                                        | LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> ( 2511 )        |
| Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System .....                                                                                                                             | WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> ( 2518 )          |
| Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance .....                                                                                                                    | LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> ( 2525 )         |
| Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method .....                                                                   | GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> ( 2532 )        |
| Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO <sub>2</sub> Anodes .....                                                                                       | WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> ( 2540 )         |
| Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System .....                                                                                                                                           | LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> ( 2547 )   |
| Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites .....                                                                                                                | ZHANG Jin-li, LI Yu ( 2554 )                                         |
| Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres .....                                                                                                     | CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 2564 )        |
| Simultaneous Removal of Cd( II ) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method .....                                       | LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> ( 2573 )               |
| Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 $\beta$ -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung .....                                                             | LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> ( 2581 )         |
| Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor .....                                                                                                          | YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> ( 2591 )               |
| Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation .....                                                                                                                     | WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 2597 )          |
| Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters .....                                                                                                 | HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> ( 2604 )          |
| Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions .....                                                        | CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> ( 2610 )             |
| ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow .....                                                          | WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> ( 2617 )  |
| Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow .....                                                 | YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> ( 2626 )                     |
| Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China .....                                                                                      | ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> ( 2633 ) |
| Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province .....                                                                          | YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> ( 2641 )        |
| Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas .....                                                                                                                                    | YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling ( 2648 )                                 |
| Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism .....                                                                                                                 | HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> ( 2655 )           |
| Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China .....                                                         | LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> ( 2662 )               |
| Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain .....                                                                                     | LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju ( 2669 )                  |
| Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River .....                                                                    | ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long ( 2678 )                      |
| Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO <sub>2</sub> Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils .....                                                       | LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> ( 2686 )      |
| Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology .....                                           | HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> ( 2695 )       |
| Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent .....                                                 | YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> ( 2707 )        |
| Coupled Cytotoxicity of C <sub>60</sub> Nano-Crystal Particle with Cu <sup>2+</sup> to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7 .....                                                                     | YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> ( 2713 )           |
| Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water .....                                                                                                                                          | GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> ( 2719 )         |

《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 刘 毅 汤鸿霄 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 )

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

( Monthly Started in 1976 )

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                                             |                  |    |                                                                                                                                                                                                                                |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 )<br>北京市环境保护科学研究院<br>清 华 大 学 环 境 学 院                                                                                                                                              | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱 ( 海淀区双清路<br>18 号 , 邮政编码 : 100085 )<br>电话 : 010-62941102, 010-62849343<br>传真 : 010-62849343<br>E-mail : hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China<br>Tel: 010-62941102, 010-62849343 ; Fax : 010-62849343<br>E-mail : hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码 : 100717                                                                                                                                                 | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street ,<br>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<br>电话 : 010-64017032<br>E-mail : journal@ mail. sciencecp. com                                                                                                                    | Distributed      | by | Science Press<br>Tel: 010-64017032<br>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<br>( 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 国内邮发代号 : 2-821  
CN 11-1895/X

国 内 定 价 : 120.00 元 国外发行代号 : M 205

国 内 外 公 开 发 行