

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 ..... 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 ..... 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 ..... 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 ..... 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 ..... 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 ..... 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 ..... 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 ..... 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 ..... 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 ..... 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 ..... 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 ..... 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 ..... 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 ..... 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 ..... 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 ..... 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 ..... 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 ..... 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 ..... 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 ..... 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 ..... 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 ..... 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 ..... 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 ..... 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 ..... 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 ..... 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 ..... 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 ..... 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 ..... 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ..... 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F<sub>rex</sub> 的特性检测水质环境中生物毒性物质 ..... 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 ..... 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 ..... 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 ..... 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 ..... 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 ..... 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 ..... 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 ..... 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 ..... 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 ..... 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 ..... 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 ..... 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 ..... 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 ..... 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 ..... 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 ..... 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 ..... 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 ..... 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 ..... 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

# 光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用

章艳红, 叶淑君\*, 吴吉春\*

(南京大学地球科学与工程学院, 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210093)

**摘要:** 基于光透法定量流体饱和度的原理及其在两相流中的应用, 设计了两组密封砂箱实验来研究气体或重非水相流体 (DNAPL) 在饱和孔隙介质中的迁移, 观察了气体或 DNAPL 在孔隙介质中的迁移规律, 应用并验证了 2 个水/气两相流中的光强-饱和度 (LIS) 模型, 特别是建立并应用了适用于 NAPL/水两相流系统的 2 个新 LIS 模型. 结果表明, 气体以不规则的“指状”通道向上迁移直到在砂箱顶部聚集, 最终形成连续的气体分布; TCE 由于自身重力的影响向下迁移直至砂箱底部, 最终在砂箱中形成不规则的污染羽并在砂箱底部形成污染池. 利用实验结果应用并验证 4 个光透法模型得到: 2 个水/气系统中 LIS 模型 (WG-A 和 WG-B) 整体适用于本实验数据; 2 个 NAPL/水系统的 LIS 模型 (NW-A 和 NW-B) 得到与实测资料较吻合的结果, 其中基于单个孔隙水驱替假设的模型 NW-A 与实验结果更加接近, 对量化多孔介质中的 NAPL/水系统各相饱和度具有一定的参考意义.

**关键词:** 孔隙介质; NAPL; 气体; 光透法; 模型

中图分类号: X131; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2120-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.012

## Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application

ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun

(Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Based on light transmission method in quantification of liquid saturation and its application in two-phase flow system, two groups of sandbox experiments were set up to study the migration of gas or Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs) in water saturated porous media. The migration of gas or DNAPL was monitored in the study. Two modified Light Intensity-Saturation (LIS) models for water/gas two-phase system were applied and verified by the experiment data. Moreover two new LIS models for NAPL/water system were developed and applied to simulate the DNAPL infiltration experiment data. The gas injection experiment showed that gas moved upward to the top of the sandbox in the form of ‘fingering’ and finally formed continuous distribution. The results of DNAPL infiltration experiment showed that TCE mainly moved downward as the result of its gravity, eventually formed irregular plume and accumulated at the bottom of the sandbox. The outcomes of two LIS models for water/gas system (WG-A and WG-B) were consistent to the measured data. The results of two LIS models for NAPL/water system (NW-A and NW-B) fit well with the observations, and Model NW-A based on assumption of individual drainage gave better results. It could be a useful reference for quantification of NAPL/water saturation in porous media system.

**Key words:** porous media; NAPL; gas; light transmission method; model

地下水有机污染对人类危害大且难以治理<sup>[1-3]</sup>. 非水相液体污染物 (non-aqueous phase liquids, NAPLs) 属于地下水有机污染物的一种特殊类型, 在水中溶解度很低, 国内外学者对 NAPLs 在地下水中的运移, 控制和修复等方面做了大量的工作<sup>[4-16]</sup>. NAPL 泄漏进入地下以后, 由于它是与水互不溶混的液体, 在地下水饱和区中表现为 NAPL/水两相流. 研究地下水中 NAPL 污染物的含量和分布以及二相流的运动规律, 饱和度是一个必不可少的物理量, 但是其测定仍然是一个技术难题. 水/气两相流在地下水系统中普遍存在, 如包气带就是典型水/气两相系统, 另外应用地下水曝气技术去除地下水中可挥发性有机物 (VOCs) 时也会产生水/气两

相系统. 因此研究地下水系统中水/气两相驱替的运动规律也很重要<sup>[17,18]</sup>. 为了掌握气体在地下水中运移规律, 则需要定量水/气两相流中流体的饱和度.

光透法作为一种无损的非侵入式的监测方法广泛应用于室内二维砂箱实验中流体迁移规律监测<sup>[19-24]</sup>. CCD (charge-coupled device) 相机的应用更是极大地提高了监测时间的即时性和监测空间的

收稿日期: 2013-09-30; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41030746, 40872155); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB428803)

作者简介: 章艳红 (1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为地下水污染及其修复技术, E-mail: yhzhang618@gmail.com

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

高密度性,其中时间分辨率可达到 1 s,空间分辨率可达到 1 mm 以下. 光透系统已经广泛应用于包含水和 NAPL 的多相系统中<sup>[25, 26]</sup>,研究多相流中的优势流等问题<sup>[27, 28]</sup>. 如何利用光透系统获得的实验数据(如光强信息)获得不可直接测量的物理量(如各相的饱和度)是极其关键的,但是这一方面的研究却很少. Niemet 等<sup>[20]</sup>建立了监测水/气两相的光透系统,并且基于 5 种不同物理模型得到求解二维实验系统中水/气两相流体饱和度的方法,最后利用水/气驱替实验结果验证了模型. 这 5 种模型对于孔隙几何性质、湿润性和驱替方式等进行了不同假设简化,具体可见原文. O'Carroll 等<sup>[21]</sup>将 Tidwell 等<sup>[19]</sup>和 Niemet 等<sup>[20]</sup>在非饱和流中关于标准化光强和水饱和度的关系扩展到水/NAPL 两相流中,但是对于模型及参数均未进行说明和论证,没有考虑染色后 NAPL 对光的吸收作用,即模型中忽略了染色后 NAPL 的吸收系数而只考虑染色剂本身的折射率. Bob 等<sup>[24]</sup>基于水/气模型<sup>[20]</sup>建立了适用于水/NAPL 两相的光透模型,但是模型中参数较多而且部分参数难以得到. 国内,光透法在水/NAPL 两相流中的研究工作仍属于起步阶段. 本研究分析了光透法定量两相流中流体饱和度的模型,并通过实验对所建模型进行了应用和验证. 本研究首先介绍了光透法定量流体饱和度的原理,然后提出在二相流(水/气和水/NAPL)中定量流体饱和度的新模型. 最后分别将模型应用于水/气和水/NAPL 两相流实验中,对模型的有效性进行了验证.

## 1 光透法原理

当光照射于吸收介质表面时,在通过一定厚度的介质后,由于介质吸收了一部分光能,透射光的强度就要减弱. 根据比尔定律,又称朗伯-比尔定律或是布格-朗伯-比尔定律,当光源穿过均匀介质时,光能被介质吸收后以指数形式减弱<sup>[20]</sup>. 对于特定波长的光源,穿过厚度为  $d_i$  介质后光强  $I$ ,可以表达为:

$$I = CI_0 \exp(-\alpha_i d_i) \quad (1)$$

式中,  $C$  是纠正光在发射和观测点之间差异的光学几何参数. 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,  $C$  可以忽略不计.  $I_0$  是入射光源强度,  $\alpha_i$  是介质  $i$  的光吸收系数.

对于有着相同含水量的均质孔隙介质可以认为是一个单一相,统一作为均匀的介质. 将各相的吸收能量和界面损失在介质厚度  $d_i$  范围内累积起来,

则式(1)可以表达为:

$$I = CI_0 \left( \prod \tau_{p,q} \right) \exp\left(-\sum \alpha_j d_j\right) \quad (2)$$

式中,  $\tau_{p,q}$  是指光穿过介于相  $p, q$  间界面的透射率,利用菲涅耳方程进行计算[见式(3)];  $\alpha_j$  是介质  $j$  的光吸收系数;  $d_j$  是介质  $j$  的厚度.

$$\tau_{p,q} = \frac{4n_p n_q}{(n_p + n_q)^2} \quad (3)$$

式中,  $n_p, n_q$  分别物质  $p, q$  的折射率.

Niemet 等<sup>[20]</sup>根据孔隙介质的孔隙几何特征、物质湿润性和驱替方式对孔隙介质进行了相应地概化. 在自然条件下,通常认为含水层是湿润性的<sup>[29]</sup>. 石英砂是典型的水润性孔隙介质. 因此本研究对孔隙介质概化如图 1,假设孔隙介质具有均一的孔隙尺寸,固体颗粒是湿润性的,其表面有一层薄膜水,并且概化为两种不同的驱替模式:模式 A 为单个孔隙水随机独立驱替,如图 1(a)所示;模式 B 为所有孔隙水统一驱替,如图 1(b)所示. 图 1 中物质  $X$  代表气体或 NAPL 中的一种.

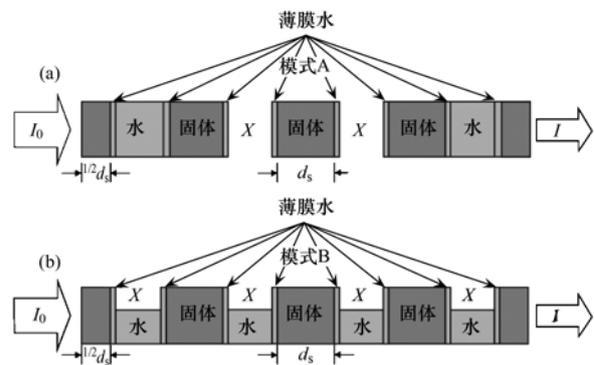


图 1 物理模型概化示意

Fig. 1 Graphs of physical model generalization

### 1.1 水/气两相系统

Niemet 等<sup>[20]</sup>基于光透法原理建立了关于如何利用光强值求解流体饱和度的 5 个水/气模型,根据本实验条件,选择并应用其中两个水/气模型(模型 C 和模型 D)具体表达式分别见文献[20]中的方程(11)和(13),此处不再赘述. 为了简化模型,此处引入了新的参数  $C_1$  ( $C_1 = I_{res}/I_w$ , 式中,  $I_{res}$  是指当砂箱只有残余水时穿过的光强值,  $I_w$  是指砂箱完全饱和水时穿过的光强值). 根据光透法原理可知,假定不考虑光源的稳定性,对于特定的介质每一像素点的  $C_1$  值是恒定的;若忽略介质的非均质性,则  $C_1$  在空间上也是不变的. 本实验中得到  $C_1$  的统计均值为 0.10,其对应的残余水饱和度为 0.046<sup>[20]</sup>. 此时,模型 C 和模型 D 分别可以表达为模型 WG-A 和模型

WG-B,具体表达式如下:

$$S_g = \ln(I/I_w)/\ln(C_1) \quad (4)$$

$$S_g = (1 - I/I_w)/(1 - C_1) \quad (5)$$

### 1.2 NAPL/水两相系统

将孔隙介质概化为由均一的粒径大小为  $d_s$  的立方体颗粒组成,三氯乙烯(TCE)经过染色后它的吸收系数不能忽略,忽略水相的吸收光能损失.根据孔隙水驱替方式的不同可以分为两种情况,即模型 NW-A 和模型 NW-B.

#### 1.2.1 模型 NW-A

假定孔隙介质中单个孔隙中的水随机驱替,并假定一旦驱替时则必须完全驱替,即单一孔隙内不是完全充满水就是完全充满 NAPL,如图 1(a) 所示驱替模式 A. 根据式(2),可建立以下表达式:

$$I = CI_0 \tau_{s,w}^{2k} \tau_{w,o}^{2k S_o} \exp(-\alpha_s L_s) \exp(-\alpha_{do} S_o L) \quad (6)$$

式中, $k$ 是整个介质厚度上颗粒(或孔隙)的数量; $S_o$ 是油的有效饱和度, $\tau_{s,w}$ 是固体颗粒/水界面的透射率, $\tau_{w,o}$ 是水/NAPL界面的透射率, $\alpha_s$ 、 $\alpha_{do}$ 分别是固体颗粒和染色后 NAPL 的吸收系数; $L_s$ 、 $L$ 分别在整个介质厚度上的固体颗粒和孔隙的厚度.

当砂箱完全饱水时,此时穿过砂箱的光强  $I_w$  可以用式(5)表达:

$$I_w = CI_0 \tau_{s,w}^{2k} \exp(-\alpha_s L_s) \quad (7)$$

当砂箱完全充满 NAPL 时,此时穿过砂箱的光强  $I_o$  则为:

$$I_o = CI_0 \tau_{s,w}^{2k} \tau_{w,o}^{2k} \exp(-\alpha_s L_s) \exp(-\alpha_{do} L) \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6),可得任一指定像素位置的 NAPL 的饱和度,即:

$$S_o = \frac{\ln(I_w) - \ln(I)}{\ln(I_w) - \ln(I_o)} \quad (9)$$

#### 1.2.2 模型 NW-B

假定孔隙介质中颗粒孔隙水都统一驱替,如图 1(b) 所示驱替模式 B,即每个孔隙内含有相同量的水(或 NAPL). 根据式(2),可建立以下表达式:

$$I = CI_0 [\tau_{s,w}^{2k} S_w \exp(-\alpha_s L_s) + \tau_{s,w}^{2k} \tau_{w,o}^{2k} S_o \exp(-\alpha_s L_s) \exp(-\alpha_{do} S_o L)] \quad (10)$$

将式(7)、(8)代入式(10),可得任一指定像素位置的 NAPL 的饱和度,即:

$$S_o = \frac{I_w - I}{I_w - I_o} \quad (11)$$

类似于水/气两相,在水/NAPL 两相中引入参数  $C_2$  ( $C_2 = I_o/I_w$ ),不考虑光源的稳定性和介质的不均质性, $C_2$  在时间和空间上也是恒定不变的.前人对于  $C_2$  值没有相关研究,利用本实验过程中的

NAPL 饱和和区域估算得到一个统计均值为 0.46. 此时,模型 NW-A 和模型 NW-B 以  $C_2$  的形式分别可以表达为:

$$S_o = \ln(I/I_w)/\ln(C_2) \quad (12)$$

$$S_o = (1 - I/I_w)/(1 - C_2) \quad (13)$$

以上各相饱和度均是指有效饱和度,其中水相的绝对饱和度  $S_{w-abs}$  计算则如下所示:

$$S_{w-abs} = S_w(1 - S_{w-res}) + S_{w-res} \quad (14)$$

其它相  $X$  (如 NAPL 或气相) 的饱和度,则表达为:

$$S_{X-abs} = S_X(1 - S_{w-res}) \quad (15)$$

整个砂箱中的指定某物质  $X$  的总体积,  $V_X$ , 可以下式进行计算:

$$V_X = \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} S_{X-abs} \times A \times T \times \theta \quad (16)$$

式中, $S_{X-abs}$ 是指特定物质  $X$  的绝对饱和度,其中下标  $X$  可以代表水、NAPL 或气体; $A$ 是指每个像素单位的面积; $T$ 是指砂箱的厚度; $\theta$ 是孔隙介质的孔隙度; $n_1$ 、 $n_2$ 分别是指整个砂箱横向、纵向上的像素数目.基于光透法原理建立的定量液体饱和度的模型都是基于光强值(light intensity)得到所需的目标物理量(饱和度,saturation),因此称这一类的模型为 LIS 模型.

## 2 材料与方法

### 2.1 实验装置和材料

在室内建立了用于监测人工气体的运移形态的光透法系统,主要包括 3 个部分:二维砂箱、灯箱和 CCD 相机.实验装置的具体细节和参数可以见文献 [23, 30, 31]. 简单介绍如下:二维砂箱是由两块厚度为 10 mm 的钢化玻璃内夹一个尺寸大小为 55 cm 宽 × 45 cm 高 × 1.28 cm 厚的中心铝框组成,并利用两个铝质边框在外部进行固定.砂箱及流动系统示意如图 2. 玻璃与中心框之间利用橡胶条和玻璃胶(GE Silicone II)进行密封.灯箱作为砂箱的唯一光源,位于砂箱的一侧 12.5 cm 处,由平行的六根长约 60 cm 的日光灯管(Panasonic, YZ18RR6500K)发光,经过扩散板后保证光源的均匀性. CCD 相机(AP2E, Apogee Instruments, Auburn, CA)放置于砂箱另一侧的一个与砂箱一体的木质暗箱内,距砂箱 1.8 m 并与一台计算机连接,用来接收透过砂箱的光线,并通过软件 Maxim DL(Ottawa, ON)自动记录光源强度.孔隙介质为半透明石英砂(C190 Accusand, 20/30 目, Unimin-Le Sueur, MN, USA),

平均粒径为 0.73 mm, 颗粒均匀性指数为 1.21. 采用分层填充的方式将石英砂填入砂箱内, 约 2 cm 左右为一层, 每层间充分搅拌均匀并压实. 实验过程

中利用注射泵 (LSP01-2A, 保定兰格恒流泵有限公司) 或蠕动泵 (Longer Pump, BT100-1F) 将气体或 NAPL 注入砂箱.

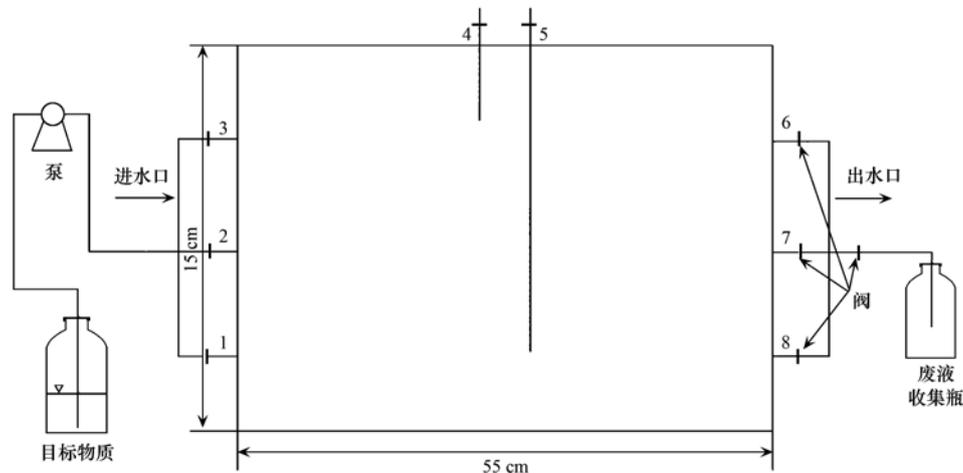


图2 砂箱及流动系统示意

Fig. 2 Schematic of the sandbox and flow system

## 2.2 两相流实验

为了研究在饱和多孔介质中的二相流问题共进行了二组砂箱实验: 第一个砂箱 (S1) 实验是为了模拟地下水曝气技术中单点注气时气体的运移形态及地下水驱替过程, 研究水/气两相特别是气相的迁移规律; 第二个砂箱 (S2) 实验则是为了研究饱和介质中 DNAPL 的运移形态. 第一个砂箱 (S1) 最终测量得到砂箱的厚度为 2.256 cm, 介质孔隙度为 0.342. 考虑实验人员的自身安全, 选择了空气作为目标气体. 如图 2 所示, 通过 5 号孔的取样针向砂箱内注入空气, 注入点位置距离砂箱顶部约 31 cm. 气体注入前, 将经过空气曝气 24 h 的 5 L 蒸馏水, 利用蠕动泵以  $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  速度泵入饱水砂箱中充分替换原有蒸馏水. 实验选择以  $0.1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度利用蠕动泵匀速注入气体, 实验过程历时约 7 d. 注入气体前, 利用 CCD 相机记录饱和砂箱 (S1) 饱水时光强值 ( $I_{01}$ ). CCD 相机的拍照间隔在根据气体注入的过程分别为 10 min、30 min 和 1 h, 在砂箱放置过程中则设为 1 h. 第二个砂箱 (S2) 的实际厚度为 2 cm, 介质孔隙度是 0.332. 目标污染物 DNAPL 为 TCE, 并利用油红 O 进行染色后使用. 在完全饱水砂箱中, 通过孔 4 中的取样针注入目标污染物 TCE, 注入点位置在砂箱顶部往下约 7 cm 处. 通过蠕动泵往砂箱中注入 TCE, 整个 TCE 注入过程持续 34 min, 0 ~ 5 min 的注入速度设为  $15 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 6 ~ 34 min 的注入速度设为  $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ . TCE 注入完成后, 关

闭注入孔和出水口, 砂箱放置 7 d. 实验注入 TCE 前, 利用 CCD 相机记录饱和砂箱 (S2) 饱水时光强值 ( $I_{02}$ ). CCD 相机的拍照间隔在 TCE 注入过程中为 1 min, 在注入实验结束后的砂箱放置过程中则设为 1 h.

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验结果及分析

#### 3.1.1 水/气两相系统

利用 CCD 相机可以动态监测整个气体入渗过程的光强值, 图 3 给出了其中两个时刻的光强变化图. 图 3(a) 是气体入渗实验前期由于气体的注入引起的光强值变化图, 如图 3(a) 所示, 气体在注入孔隙介质中后以“指状”通道向上运移, 直至砂箱顶部. 这种气体“指状”迁移通道是不规则的, 说明了孔隙介质在微观尺度上存在一定的非均质性和气体迁移路径的无规律性. 图 3(b) 则是气体入渗实验完成后最终时刻由于气体引起的砂箱内光强值变化图, 说明了在整个砂箱内部形成了大范围的气体分布, 此时一共排出了 1 453.85 mL 的水 (砂箱 S1 孔隙体积为: 1 909.59 mL). 从图 3(b) 中可以看出, 连续的气体分布内部光强变化值有所差别, 这可能与孔隙介质的压实程度和充填情况有关.

#### 3.1.2 NAPL/水两相系统

染色后 TCE 入渗过程引起了光强值的变化, 其中两个时刻的光强值变化情况如图 4 所示. 其中图

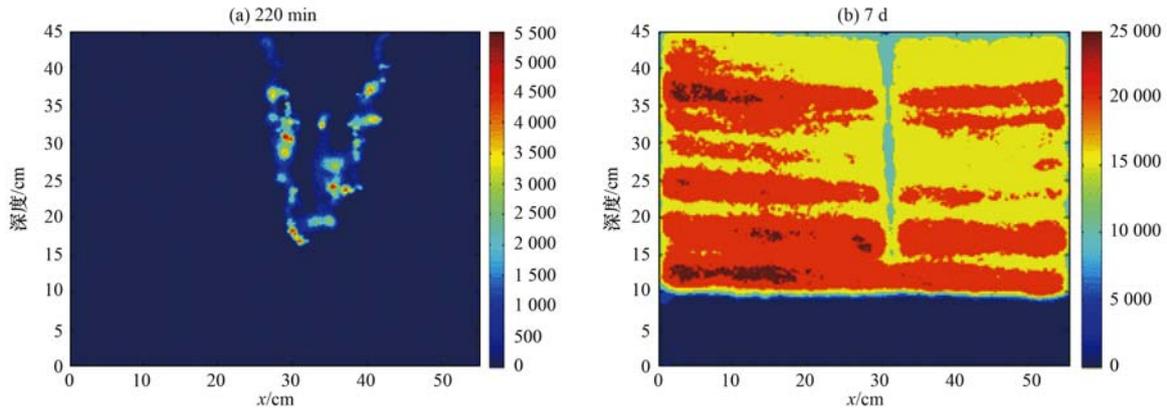


图3 饱和砂箱 (S1) 中气体入渗过程中光强变化

Fig. 3 Changes of light intensity during air infiltration process in saturated sandbox (S1)

4(a)是注入 TCE 5 min 后的光强变化图,从图 4(a)中可以看出,TCE 作为重非水相液体(DNAPL),在进入孔隙介质后主要在自身重力的影响下克服毛细管压力,并驱逐孔隙中水,向下迁移;同时也存在一定程度的横向迁移,而且左右并不是完全对称,在 TCE 污染羽前缘左右迁移速度存在明显差异;在 TCE 向下迁移的过程其纵向迁移方向也会发生改变,说明了虽然 20/30 目的石英砂均匀程度很高但是砂箱内

的介质由于人为填充仍存在一定程度的非均匀性.图 4(b)则是在 TCE 注入完成后引起的光强值变化情况,反映了 TCE 最终在砂箱内部的污染羽分布情况,部分 TCE 截留在上部成为残留态,其它则由于重力作用最终迁移至砂箱底部,并在砂箱底部形成了污染池.从图 4(b)可以明显地看出局部地区横向扩散的不均匀性和纵向迁移方向上的改变(污染羽对称轴为一条曲线).

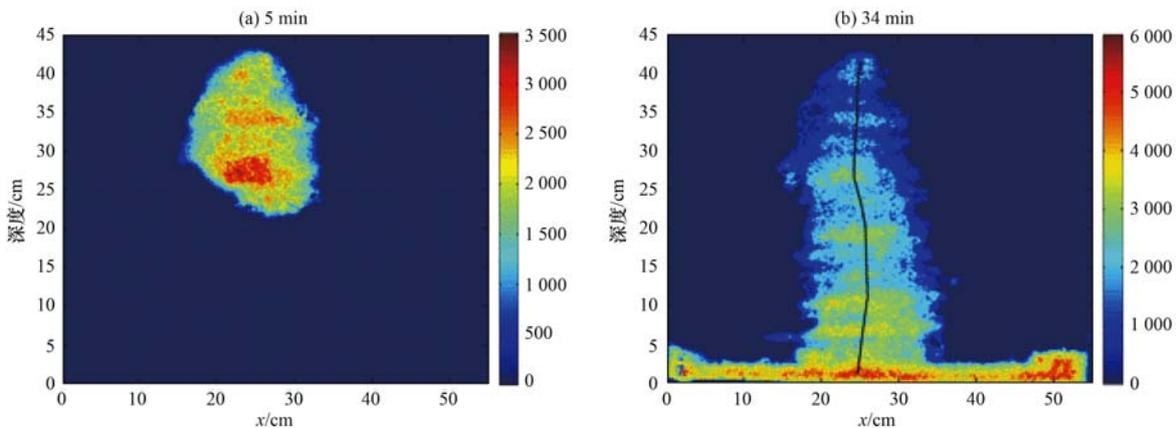


图4 饱和砂箱 (S2) 中染色后 TCE 入渗过程中光强变化

Fig. 4 Changes of light intensity during dyed TCE infiltration in saturated sandbox (S2)

### 3.2 模型计算结果

#### 3.2.1 水/气两相系统

利用 2.1 节中的模型 WG-A 和模型 WG-B 对实验观测的光强值数据进行了计算.两个水/气两相模型在参数  $C_1$  等于实测值 ( $C_1 = 0.1$ ) 的条件下计算得到的砂箱内饱和度分布,在气体注入时两个不同时刻砂箱内气体饱和度分布如图 5 所示.从中可以看出两个水/气模型的计算结果在图形上只有微小差异,尤其是气体注入结束后(7 d)的饱和度分布图[图 5(c),5(d)].然后根据式(16)得到模型

计算的结果,即预测的气体注入量,具体计算结果与实测值分别见图 6.从中可以直观地看出不同模型的计算结果除前期存在一定程度的偏差外,整体上均接近实测值,其中模型 WG-B 的计算结果更加接近实测值.对比两个不同的水/气模型的计算结果,在数值上没有表现出明显在差异性,在整个时间序列上模型 WG-A 的计算结果略小于模型 WG-B,如模型 WG-A 的计算结果为 1 418.79 mL,而模型 WG-B 的计算则为 1 450.08 mL.这是因为模型在气体入渗过程中整个砂箱区域可以分为饱气带、部分饱气

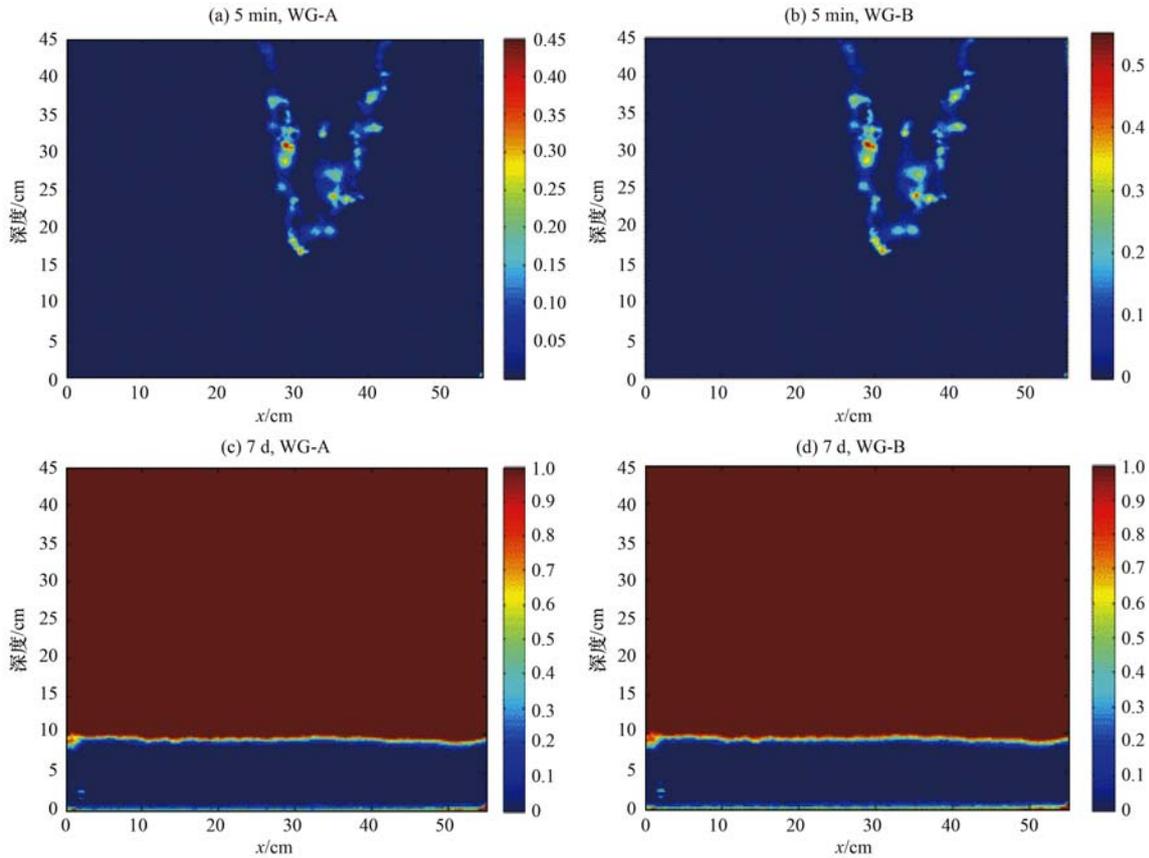


图 5 水/气两相不同时刻气体饱和度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of gas saturation in water/gas system at different times

带和饱水带 3 种情况. 对于饱和和饱气的情况, 不同模型的计算结果是相同的. 不同模型间的差异只表现在气体部分饱和的区域, 然而由于单点的注气方式产生的部分饱和的区域有限, 所以计算结果总体上差异不大.

图 7 给出了模型计算结果 (Pre.) 与观测值 (Obs.) 的误差率 [  $Relative\ Error\ (\%) = (Pre. - Obs.) \div Obs. \times 100$  ], 从图 6 中可以直观地看出, 前期两个模型的计算结果与观测值相比相对误差均较大, 主要是第 1、2、3 这 3 个时刻, 中后期则表现出较高的一致性. 实验前期的计算值和观测值间偏差

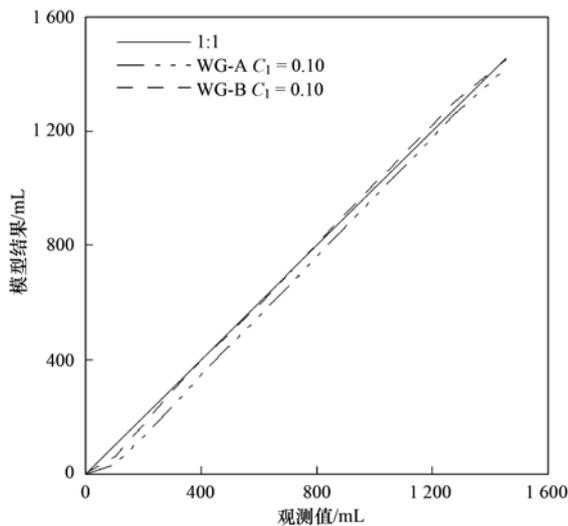


图 6 水/气两相 LIS 模型结果与实验数据对比

Fig. 6 Results of LIS models in water/gas system versus the measured data

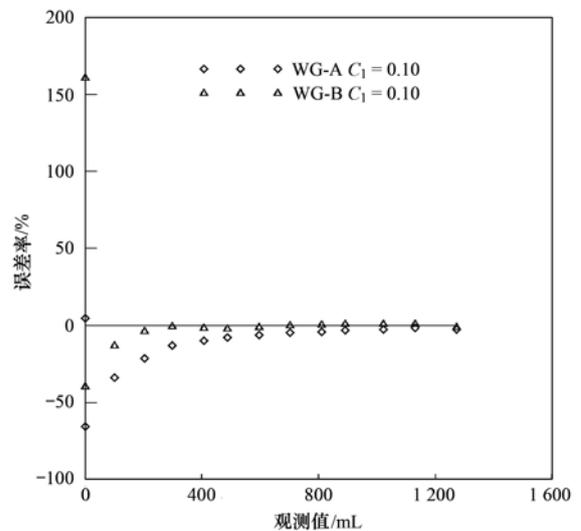


图 7 水/气两相 LIS 模型结果误差分析

Fig. 7 Relative errors of LIS models in water/gas system

较大,可能与光源的稳定性,仪器本身的噪声,以及模型本身假设和参数概化有关.误差率的大小与测量物理量的大小也密切相关,在前期测量物理量数值较小,可能其它系统误差和外界随机误差起到了主导作用,随着测量物理量数值的增大,这种作用逐渐减弱.为了评价整个序列模型的计算结果和观测值间的误差,引入了均方根误差 RMSE (root mean square error),其计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Pre.} - \text{Obs.})^2 / n}$$

式中, $n$ 为计算的各个时刻.计算得到两个水/气模型的 RMSE 分别为:43.44 mL(WG-A,  $C_1 = 0.10$ )和 15.95 mL(WG-B,  $C_1 = 0.10$ ).对应于砂箱总的 1453.85 mL 的气体注入量, RMSE% 分别为 2.99% (WG-A,  $C_1 = 0.10$ )和 1.10% (WG-B,  $C_1 = 0.10$ ).

### 3.2.2 NAPL/水两相系统

利用模型 NW-A 以及模型 NW-B 对整个 TCE 入渗过程中的监测数据进行了应用,其中 TCE 注入时两个不同时刻两个模型计算的饱和度分布见图 8. 以及将两个模型的计算结果和实测数据(即实验过程中由于 TCE 入渗从砂箱中排出水的体积)进行

对比,具体结果见图 9. 从中可以看出,模型 NW-A 的计算结果与实测数据在整个 TCE 入渗过程前、后期均较吻合,而在中期(TCE 入渗体积在 100 ~ 150 mL)与实测数据发生了一定的偏离,数值上均大于实测数据;模型 NW-B 的计算结果则表现为在整个 TCE 入渗过程中在数值上都略大于实测数据,在中期也表现出了和模型 NW-A 计算结果类似的规律,与前、后期计算结果相比在数值上更大程度地偏离实测数据.本实验中模型 NW-A 的计算结果更优,说明了单个颗粒孔隙水随机驱替的假设更加适用于本研究的实验结果. TCE 入渗过程中期两个模型的计算结果都更大程度地偏离实测数据,可能与光源的稳定性以及模型本身假设和参数概化有关.图 10 给出了整个入渗过程中两个模型计算结果和实测数据之间的误差率(%),在整个入渗过程中误差率正值明显多于负值,模型 NW-A 的误差率在 -5% ~ 20% 之间,模型 NW-B 则处于 15% ~ 40% 之间.两个模型的误差率在入渗过程中随时间(入渗量)表现出相同的变化规律,在数值上略有不同,说明了不同的物理假设(单独驱替模式 A 或是统一驱替模式 B)影响了模型的计算结果的数值大小,模型的本质

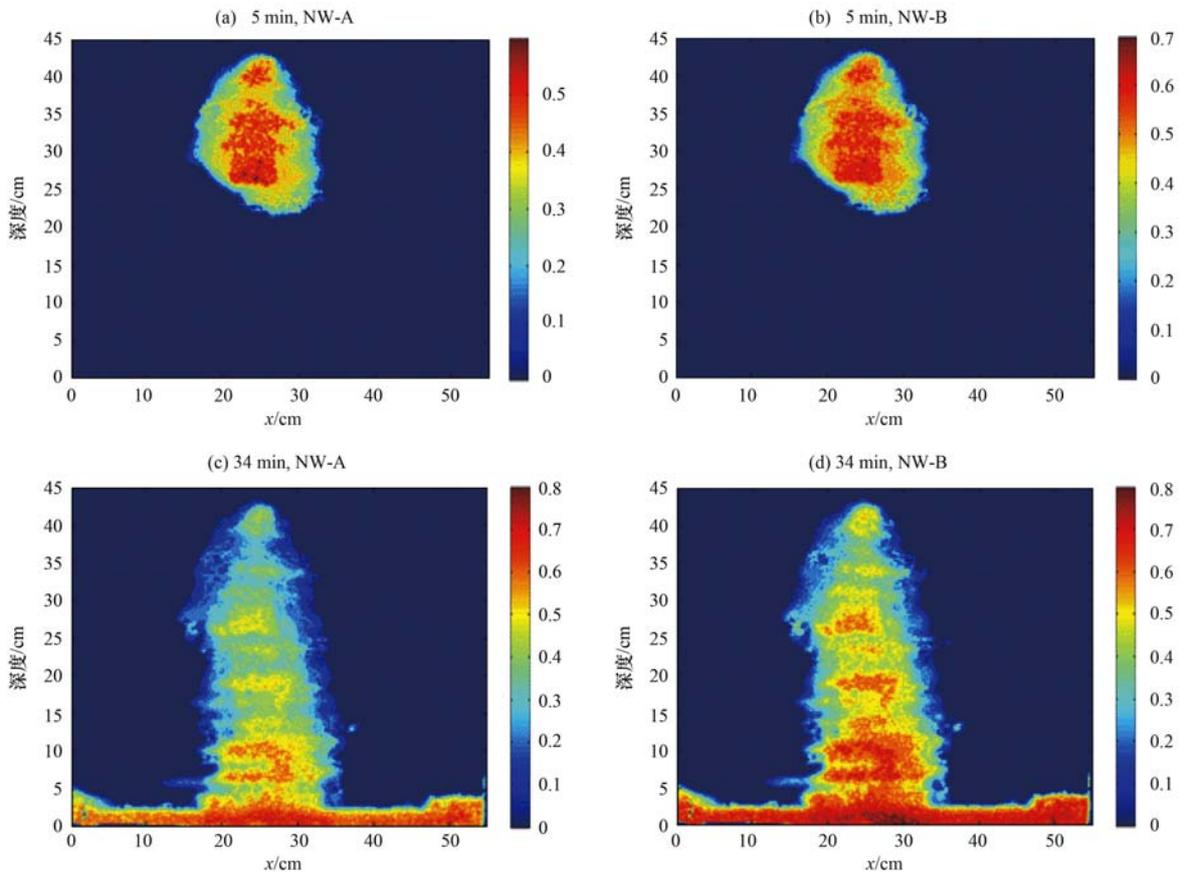


图 8 NAPL/水两相不同时刻 TCE 饱和度空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of TCE saturation in NAPL/water system at different times

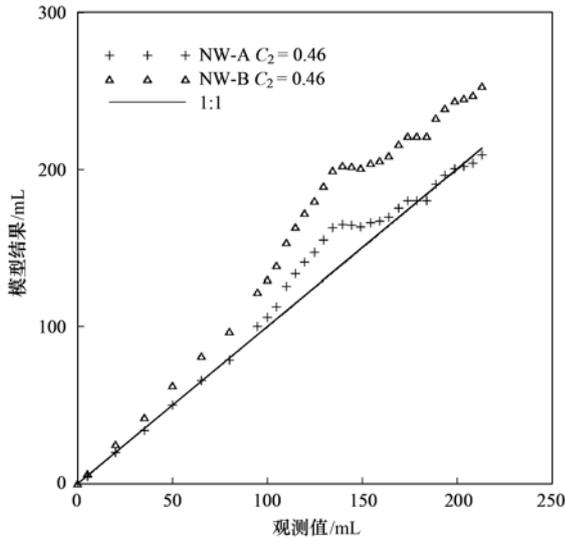


图9 NAPL/水两相 LIS 模型结果与实验数据对比

Fig. 9 Results of two LIS models in NAPL/water system versus the measured data

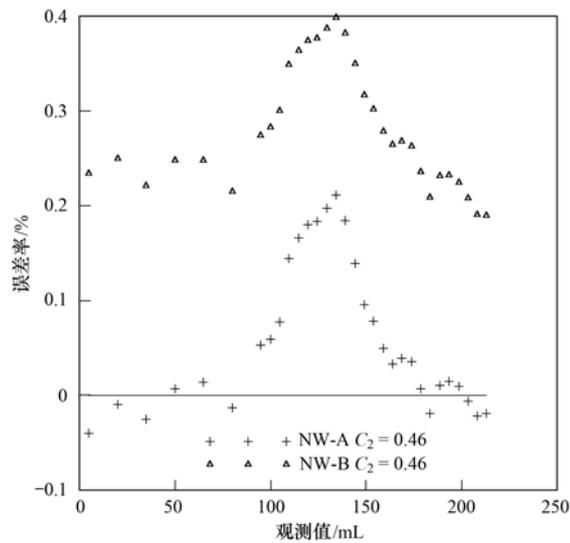


图10 NAPL/水两相 LIS 模型结果误差分析

Fig. 10 Relative errors of LIS models in NAPL/water system

(光透法原理) 没有改变. 两个 NAPL/水模型的 RMSE 值分别为: 12.30 mL (NW-A,  $C_2 = 0.46$ ) 和 42.08 mL (NW-B,  $C_2 = 0.46$ ); 对应于 213.14mL 的 TCE 注入量, RMSE% 分别为: 5.77% (NW-A,  $C_2 = 0.46$ ) 和 19.74% (NW-B,  $C_2 = 0.46$ ).

两相中不同 LIS 模型计算误差与模型的概化、光透系统的噪声、光源的稳定性或是外界光源的干扰及参数 ( $C_1$  或  $C_2$ ) 的误差有关, 本研究不能量化各种误差的大小. 其中参数的误差主要表现为忽略了参数 ( $C_1$  或  $C_2$ ) 的空间异性, 从实测的光强值资料 (图 3 和图 4) 可以看出虽然所使用的 20/30 目

的石英砂具有很高的均匀性, 但是在空间上由于充填方式或是介质本身仍表现出了非均匀性. 此时将砂箱作为均匀介质在整个空间上使用一个参数值 ( $C_1$  或  $C_2$ ) 对 LIS 模型的计算结果引入了一定的误差. 在以后的工作中可以将介质作为非均匀介质, 引入粒径均匀性指数到 LIS 模型中; 使用较之于白炽灯更加稳定的 LED 灯作为光源也不能保证入射光源长期使用的稳定性; 此外, 应该定量监测系统噪声和引入定量分析系统噪声的方法.

### 4 结论

(1) 在饱和孔隙介质中气体向上迁移的过程是随机的, 气体注入饱和孔隙介质后在注入点附近以“指状”通道向上迁移, 最终在砂箱顶部聚集, 形成大范围的连续气体分布.

(2) DNAPL (TCE) 在饱和孔隙介质中主要在自身重力的作用下向下迁移, 部分 TCE 以残留态的形式截留在上部, 其它则以自由态的形式在重力影响下最终迁移至砂箱底部, 并在砂箱底部形成了污染池, 整个入渗过程中垂向迁移方向发生了改变, 同时局部也存在一定程度的横向迁移, 反映孔隙介质存在一定的非均匀性.

(3) 水/气两相 LIS 模型 (WG-A, WG-B) 的计算结果在整个气体注入过程中与实测数据相比, 虽然在实验前期计算结果表现出一定的误差, 但是整体吻合性较好. 两个不同模型的计算结果没有明显差别, 说明这两个模型均可用于水/气两相条件下流体饱和度的定量计算.

(4) NAPL/水两相 LIS 模型 (NW-A 和 NW-B) 的计算结果与实测数据在整个时间序列上均表现出较强的一致性, 两个不同模型的计算结果在数值上表现出一定的差异性, 其中模型 NW-A 的计算结果与实测数据更加吻合, 说明基于单个孔隙水驱替假设建立的模型 NW-A 更加适用于多孔介质中 NAPL/水两相条件下流体饱和度的计算.

(5) 单一介质填充时产生的介质非均匀性, 光源的稳定性, 系统误差的监测和量化以及参数 ( $C_1, C_2$ ) 的空间变化将成为新 LIS 模型的考虑因素.

### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] 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.  
 [3] 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.
- [4] 贺亮, 王乐力, 李亚军, 等. 地下水有机污染及微生物修复技术应用[J]. 地下水, 2012, **34**(3): 89-91.
- [5] 孟庆玲, 张力文, 吕聪, 等. 生物曝气技术对石油类污染地下水的修复效果及去除机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(增刊1): 402-407.
- [6] 曹玉彬. 高锰酸钾氧化处理三氯乙烯污染地下水实验研究[J]. 环境科技, 2010, **23**(6): 11-13.
- [7] 程莉蓉, 刘奕慧, 丁爱中, 等. 地下水三氯乙烯原位生物修复及其影响因素综述[J]. 安全与环境学报, 2012, **12**(4): 88-95.
- [8] 黄伟英, 刘菲, 鲁安怀, 等. 过氧化氢与过硫酸钠去除有机污染物的进展[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(9): 88-95.
- [9] Catalan L J J, Dullien F A L. Application of gravity drainage to the recovery of residual LNAPL in homogeneous and lensed sand packs [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1995, **18**(4): 279-306.
- [10] Zhang Y Y, Shariati M, Yortsos Y C. The spreading of immiscible fluids in porous media under the influence of gravity [J]. Transport in Porous Media, 2000, **38**(1-2): 117-140.
- [11] Zhang Z F, Smith J E. The velocity of DNAPL fingering in water-saturated porous media: laboratory experiments and a mobile-immobile-zone model [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, **49**(3-4): 335-353.
- [12] Zhang Z F, Smith J E. Visualization of DNAPL fingering processes and mechanisms in water-saturated porous media [J]. Transport in Porous Media, 2002, **48**(1): 41-59.
- [13] Ramsburg C A, Pennell K D. Density-modified displacement for DNAPL source zone remediation; Density conversion and recovery in heterogeneous aquifer cells [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(14): 3176-3187.
- [14] Jawitz J W, Sillan R K, Annable M D, *et al.* In-situ alcohol flushing of a DNAPL source zone at a dry cleaner site [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(17): 3722-3729.
- [15] Illangasekare T H, Edward J A III, Yates D N. Non-Aqueous-Phase Fluids in Heterogeneous Aquifers-Experimental Study [J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, **121**(8): 571-579.
- [16] Cui Y J, Delage P, Alzoghbi P. Retention and transport of a hydrocarbon in a silt [J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 83-91.
- [17] Lesson H, Headington R E. Air channel distribution during air sparging: a field experiment [M]. Columbus: Battelle Press, 2005. 215-222.
- [18] Reddy K R, Adams J A. Effect of groundwater flow on remediation of dissolved-phase VOC contamination using air sparging [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, **72**(2-3): 147-165.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Mumford K G, Dickson S E, Smith J E. Slow gas expansion in saturated natural porous media by gas injection and partitioning with non-aqueous phase liquids [J]. Advances in Water Resources, 2009, **32**(1): 29-40.
- [23] Ye S, 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.
- [24] 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.
- [25] Nicholl M J, Glass R J, Wheatcraft S W. Gravity-driven infiltration instability in initially dry nonhorizontal fractures [J]. Water Resources Research, 1994, **30**(9): 2533-2546.
- [26] Kneafsey T J, Pruess K. Laboratory experiments on heat-driven two-phase flows in natural and artificial rock fractures [J]. Water Resources Research, 1998, **34**(12): 3349-3367.
- [27] Selker J, Leclercq P, Parlange J Y, *et al.* Fingering flow in 2 dimensions 1. Measurement of matric potential [J]. Water Resources Research, 1992, **28**(9): 2513-2521.
- [28] Selker J, Parlange J Y, Steenhuis T. Fingering flow in 2 dimensions 2. Predicting finger moisture profile [J]. Water Resources Research, 1992, **28**(9): 2523-2528.
- [29] Fetter C W. Contaminant Hydrogeology [M]. Illinois: Waveland Press, 2008. 208-210.
- [30] 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.
- [31] 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.

## CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i>	(2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i>	(2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i>	(2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region .....	MA Juan-juan, LI Zhen	(2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	(2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i>	(2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i>	(2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian	(2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i>	(2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i>	(2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun	(2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i>	(2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i>	(2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian	(2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng	(2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....	WANG Shang, LI Da-peng	(2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i>	(2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao	(2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i>	(2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i>	(2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i>	(2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i>	(2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i>	(2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i>	(2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i>	(2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i>	(2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i>	(2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i>	(2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i>	(2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex .....	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i>	(2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i>	(2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i>	(2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i>	(2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i>	(2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i>	(2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i>	(2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i>	(2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i>	(2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato .....	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i>	(2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China .....	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i>	(2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i>	(2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i>	(2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i>	(2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i>	(2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i>	(2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i>	(2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i>	(2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng	(2433)

# 《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行