ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第10期
2013年10月15日

目 次

南京地区大气气溶胶 $PM_{2.1}$ 中稳定碳同位素组成研究 …… 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,孙德玲,卢霞,姜文娟(3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 …… 胡冬梅,彭林,白慧玲,牟玲,韩锋,刘效峰,冀豪栋,张鹏九(3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 …… 罗娜娜,赵文吉,晏星,宫兆宁,熊秋林(3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 …… 楼狄明,陈峰,胡志远,谭丕强,胡炜(3749)
兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}O$ 特征及其水汽来源 …… 陈粉丽,张明军,马潜,李小飞,王圣杰,李菲(3755)
天山乌鲁木齐河源1号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 …… 岳晓英,李忠勤,张明军,周平,樊晋(3764)
O_3/H_2O_2 氧化苯乙烯气体性能及机制 …… 何觉聪,黄倩茹,叶杞宏,罗雨薇,张再利,樊青娟,魏在山(3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 …… 关晖,肖化云,朱仁果,郑能建,瞿玲露(3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 …… 李男,肖化云,陈永忠,周丹,罗笠,吴代赦(3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 …… 王雪蕾,蔡明勇,钟部卿,姚延娟,殷守敬,吴迪(3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 …… 杨永刚,胡晋飞,肖洪浪,邹松兵,尹振良(3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 …… 游丽丽,宗海波,张淑芳,尹国宇,李涛,侯立军(3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 …… 韩建刚,曹雪(3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 …… 刘叶,邹立,刘陆,高冬梅(3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 …… 聂海峰,成杭新,赵传冬,刘应汉,杨柯,李括,彭敏,刘飞(3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 …… 孙闰霞,柯常亮,谷阳光,卢腾腾,杜飞雁,马胜伟,林钦(3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 …… 边璐,李田,侯娟(3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 …… 余杨,王雨春,周怀东,高博,赵高峰(3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 …… 李飞鹏,张海平,陈玲(3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 …… 韩涛,翟淑华,胡维平,张红举,李钦钦(3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 …… 陈超,钟继承,范成新,孔明,余居华(3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 …… 周慧华,宋晓光,吴革,谢鑫源(3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 …… 区凤莊,孙国萍,许玫英(3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 …… 易齐涛,孙鹏飞,谢凯,曲喜杰,王婷婷(3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性 …… 陈迪,郑祥,魏源送,杨勇(3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 …… 纪营雪,王风贺,张帆,张艳红,王国祥,顾中铸(3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 …… 王文东,周礼川,丁真真,王洪平,孙学军(3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 …… 朝木尔乐格,冯流,霍艳霞(3927)
$nTiO_2$ 在水中的分散沉降行为研究 …… 陈金媛,方金凤,魏秀珍(3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 …… 谢芸芸,陈天虎,周跃飞,谢巧勤(3940)
两性离子在聚偏氟乙烯(PVDF)膜表面接枝改性的研究 …… 周桂花,肖峰,肖萍,王东升,段晋明,石健,臧莉(3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 …… 周锋,王文林,王国祥,马久远,万寅婧,唐晓燕,梁斌,季斌(3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 …… 李文英,彭智平,于俊红,黄继川,徐培智,杨少海(3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 …… 金树权,周金波,陈若霞,林斌,王德耀(3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 …… 李振亮,张代钧,卢培利,曾善文,杨永浩(3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 …… 郭秀丽,高大文,卢健聪(3981)
生物陶粒反应器的氢自养反硝化研究 …… 陈丹,王弘宇,宋敏,杨开,刘晨(3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 …… 严俊霞,李君剑,李洪建,张义辉(3992)
SiB3 模式对作物区 CO_2 通量的模拟研究 …… 张庚军,卢立新,蒋玲梅,蒋磊,Ian Baker(4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 …… 徐鹏,江长胜,郝庆菊,祝滔(4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价:以许昌市为例 …… 闫慧,陈杰,肖军(4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 …… 史双昕,董亮,李玲玲,张辉,李斯明,张天野,黄业茹(4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 …… 吴彦瑜,胡小英,洪鸿加,彭晓春(4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 …… 王旌,罗启仕,张长波,谈亮,李旭(4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 …… 李曼,陈卫平,魏福祥,焦文涛(4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中运移行为研究 …… 方婧,余博阳(4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 …… 李慧颖,杜晓明,杨宾,伍斌,徐竹,史怡,房吉敦,李发生(4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 …… 白尚斌,周国模,王懿祥,梁倩倩,陈娟,程艳艳,沈蕊(4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 …… 梁惜梅,聂湘平,施震(4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 …… 刘洋,付强,高军,徐网谷,殷波,曹亚乔,秦卫华(4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 …… 张义贤,付亚萍,肖志华,张喜文,李萍(4090)
利用高通量测序对封存 CO_2 泄漏情景下土壤细菌的研究 …… 田地,马欣,李玉娥,查良松,伍洋,邹晓霞,刘爽(4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析 …… 李思远,郝春博,王丽华,吕铮,张丽娜,刘莹,冯传平(4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 …… 常晶晶,尹华,秦华明,叶锦韶,彭辉,宋小飞(4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 …… 胡莹,黄益宗,黄艳超,刘云霞,梁建宏(4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 …… 刘俊,周坤,徐卫红,陈惠,张明中,江玲,杨芸,王崇力,熊治庭(4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 …… 李力,吕永龙,王铁宇(4132)
《环境科学》征稿简则(3926) 《环境科学》征订启事(4057) 信息(3878,3953,3999,4041)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征

李慧颖[1,2],杜晓明[2],杨宾[2],伍斌[2],徐竹[2],史怡[2],房吉敦[2],李发生[1,2*]
(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)

摘要: 非水相流体(non-aqueous phase liquids, NAPLs)如石油烃类和有机溶剂类污染土壤和地下水引起了广泛关注. 不同粒径多孔介质中不同性质流体入渗形态的识别是确定污染范围、有效修复土壤和地下水的前提. 本研究选取不同性质的 4 种 NAPLs 流体,建立可视化砂箱模型,比较 4 种流体在不同粒径石英砂中指流形态差异,并引入分形理论对迁移形态进行定量描述. 结果表明,NAPLs 流体指进过程属于毛细管指进,主要驱动力为毛细力; 同种污染物或同一黏度数量级污染物之间指流宽度和渗流面积变化趋势与毛细管数和邦德数变化趋势呈负相关; 指流宽度和渗流面积随着介质粒径的减小和流体黏度的增大而增加; 指流宽度和渗流面积与渗流面的质量分形维数呈正相关,质量分形维数可以作为指流宽度和渗流面积的指示指标.

关键词:指流; 分形维数; 非水相流体; 毛细力; 黏滞力; 重力
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)10-4058-08

Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media

LI Hui-ying[1,2], DU Xiao-ming[2], YANG Bin[2], WU Bin[2], XU Zhu[2], SHI Yi[2], FANG Ji-dun[2], LI Fa-sheng[1,2]
(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)

Abstract: Non-aqueous phase liquids (NAPLs) like petroleum hydrocarbons and chlorinated solvents have resulted in contamination of soils and ground water, which aroused widespread concern. It's quite important to delineate pollution area for remediation according to different soil types with pollutants properties in consideration. In this paper, a two-dimension visual sand box apparatus was constructed, with four typical NAPLs selected for infiltration experiments conducted in initially dry porous media. The main driving force was identified and fingering patterns were compared. The fractal dimension was used to give quantitative description. The present work indicates that the main driving force was capillary forces and the mechanism was the capillary fingering. The fingers varied from skeletal patterns to fleshy patterns and the infiltration area increased when the capillary number and the bond number decreased for NAPLs with the same level of viscosity. The high viscous force resulted in larger finger width and infiltration area. The same change between fluids happened in finer media. Fractal dimensions were positively correlated with the finger width and infiltration area, which is helpful in the pollution area characterization.

Key words: finger flow; fractal dimension; non-aqueous phase liquids; capillary force; viscous force; gravity

非水相流体(non-aqueous phase liquids,NAPLs)为与水、气不相混溶的流体,按密度比水的大小可以分为轻非水相流体(light non-aqueous phase liquids, LNAPLs)和重非水相流体(dense non-aqueous phase liquids,DNAPLs). 近年来大量 NAPLs 污染物进入到地下环境中,在地下不同位置聚集形成轻油透镜体(LNAPL-lens)或重油聚集区(DNAPL pool). 因其难溶于水的性质成为土壤和地下水的长期污染源,给人类生存带来严重威胁[1]. 因此开展 NAPLs 迁移规律的实验模拟,进行 NAPLs 迁移驱动力和迁移形态的实验研究,对于有效识别 NAPLs 污染土壤范围和进行污染土壤治理具有重要的现实意义.

NAPLs 在地下土壤中迁移最重要的特性之一就是指流的存在[2,3]. Kueper 等[4]和 Gerhard 等[5]用数值模拟研究表明,除了污染源条件和地面下介质结构的异质性,流体的物理性质包括密度、黏度和界面张力等均会对 NAPLs 的渗流模式和重分布过程产生重要影响. 指流的宽度会随着流体黏度差别的增大和流速的增加而减小,也会随着界面张力的降低而减小[2]. Held 等[3]证实了 DNAPL 向下驱替水的过程中随着重力势的增加界面趋于不稳定,随着黏滞力的增大界面趋于稳定. 而对于 NAPLs 在地下环境中的指流迁移特性,已有的研究较多地关注

收稿日期: 2013-01-13; **修订日期**: 2013-03-04
基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109017)
作者简介: 李慧颖(1982 ~),女,博士研究生,主要研究方向为土壤污染模拟,E-mail:lihy@craes.org.cn
* 通讯联系人,E-mail:lifs@craes.org.cn

饱和区,对非饱和介质中 NAPLs 指流研究较少.

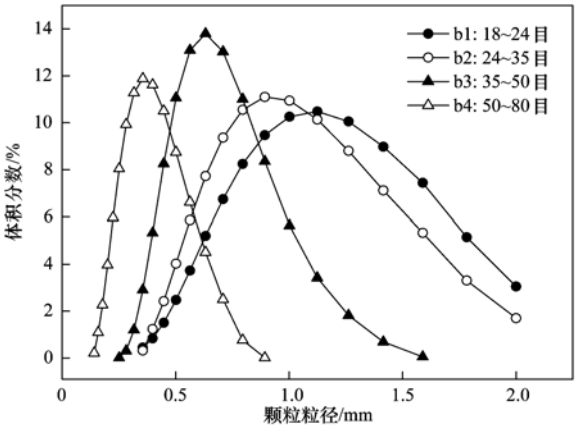
NAPLs 流体在饱和区中的指流研究均表明,流体在多孔介质中迁移的锋面形态具有分形特征. Tian 等[6]研究了 NAPLs 流体在二维多孔介质中的驱替过程,证明毛细管指进和黏滞指进的本质属性为分形特性. Ferer 等[7]研究了毛细管指进的分形性质和分形形态转变为紧凑形态的影响因素. Baveye 等[8]应用分形模型描述了溶质在土壤中的优先流形态,并指出可视化方法中图像分辨率和二值化阈值会影响分形维数的大小. Zhang 等[9]用修正的 DLA 模型研究了黏滞指进中分形维数和黏滞比的关系,研究表明随着黏滞比的增大,分形维数降低,分形指宽减小. Gharbi 等[10]记录了非混溶流体黏滞指进的动态过程,结果表明驱替过程中驱替面积遵循分形尺度法则,分形维数与重力数(gravity number)和黏滞比(viscosity ratio)相关,研究显示随着重力数的降低和黏滞比的增大,分形维数呈减小的趋势.

本研究选取 2 种典型 LNAPLs 污染物——柴油和甲苯,2 种 DNAPLs 污染物——1,2-二氯乙烷(1,2-DCA)和四氯乙烯(PCE),应用数码成像技术对 NAPLs 在不同粒径多孔介质中的指流迁移形态进行比较分析,引入分形理论对指流形态进行定量描述,深入分析指流形态与流体性质和介质粒径的相关关系,研究分形维数对指流形态的指示作用,以期为环境风险管理和污染土壤的修复提供技术支持.

1　材料与方法

1.1　实验材料

实验用多孔介质为 18 ~80 目石英砂,比重瓶法测得石英砂比重为 2.69 g·cm^{-3}. 以 24、35 和 50 目筛将石英砂分为 4 种不同粒径,每种石英砂粒径分布如图 1 所示. 其中,18 ~24 目石英砂粒径中值 d_{50} 为 0.95 mm,10% ~90% 粒径范围为 0.48 ~1.54 mm; 24 ~35 目石英砂粒径中值 d_{50} 为 0.87 mm,10% ~90% 粒径范围为 0.52 ~1.42 mm; 35 ~50 目石英砂粒径中值 d_{50} 为 0.60 mm,10% ~90% 粒径范围为 0.40 ~0.90 mm; 50 ~80 目石英砂粒径中值 d_{50} 为 0.34 mm,10% ~90% 粒径范围为 0.21 ~0.54 mm. 石英砂表面是否洁净对其润湿性能有较大的影响,通常洁净的石英砂表面由于其较高的表面能为强水湿表面,而介质的润湿性也是影响流体迁移形态的因素之一[11],因此实验进行前对石英砂进行了细致的清洗. 清洗过程包括:①用清水冲洗 3 次;②用 0.05 mol·L^{-1} NaOH 浸泡 3 h,用清水冲洗,重复 3 次; ③0.05 mol·L^{-1} HNO_3 浸泡 3 h,用清水冲洗,重复 3 次; ④用 5% 过氧化氢H_2O_2浸泡石英砂 3 h,去除有机杂质; ⑤用去离子水冲洗 3 次; ⑥自然风干,平均含水率为 1%.



粒径分析采用激光粒度分析仪
(型号为马尔文 Mastersizer 2000)测定

图 1　粒径分布示意

Fig. 1　Particle size distribution

染色示踪实验结合图像分析方法可以直接显示流体渗流路径,常被用于获得非饱和土壤中染色分布及覆盖面积[12, 13]. 为了便于观察污染物运移特征,NAPLs 污染物用浓度为 80 mg·L^{-1} 的苏丹红Ⅳ染色. 研究表明该浓度的染色剂对流体迁移速率等没有影响[14]. 染色后流体的性质如表 1 所示. 其中柴油和甲苯的密度小于水,为 LNAPL,PCE 和 1,2-DCA 密度大于水,为 DNAPL. 柴油动力黏度为 3.11 mPa·s,甲苯、1,2-DCA 和 PCE 的动力黏度介于 0.6 ~0.9 mPa·s 之间,远小于柴油的动力黏度. 4 种流体中,两种 LNAPL 表面张力分别为 23.9 mN·m^{-1}和 25.6 mN·m^{-1},两种 DNAPL 的表面张力分别为 32.7 mN·m^{-1}和 31.4 mN·m^{-1},大于 LNAPL 的表面张力.

表 1　流体的物理化学性质(20℃ ±2℃)

Table 1　Physical and chemical properties of fluids(20℃ ±2℃)

物理参数[1)]	NAPLs[2)]			
	柴油	甲苯	1,2-DCA	PCE
流体密度 ρ/g·cm^{-3}	0.82	0.87	1.22	1.62
动力黏度 μ_N/mPa·s	3.11	0.6	0.88	0.86
表面张力 σ/mN·m^{-1}	23.9	25.6	32.7	31.4

1)密度测试方法: ASTM D4052 ~11; 黏度测试方法: ASTM D445-11a; 表/界面张力测试方法: Dataphysics 仪器吊片法; 2)为苏丹红Ⅳ染色后流体性质

1.2　砂箱实验

研究指流的室内实验以二维砂箱实验为主,通常

在两块间距 1 ~ 2 cm 的透明有机或无机玻璃板组成的二维砂箱(土槽)中进行[15~18],通过透明玻璃板观测并记录指流迁移的形态. 本研究中实验装置采用二维砂箱,由无色硅酸盐玻璃制成,呈扁平立方体状,内壁为磨砂面以避免壁面效应. 砂箱长 60 cm,高 50 cm,厚 1 cm,三面密封,上界面敞开作为污染物加入口,两侧底部各留 1 cm × 1 cm 方口并贴有金属丝网以便于流体入渗时排气,实验装置如图 2 所示.

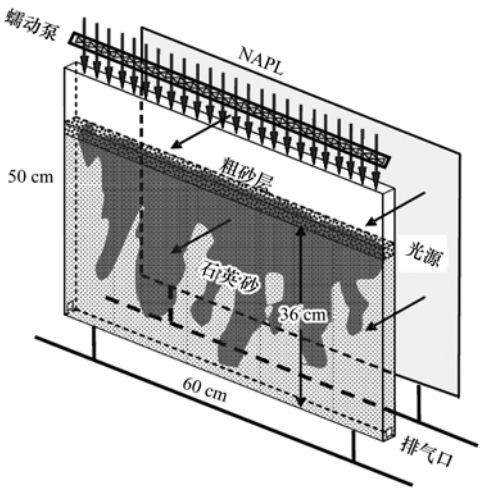


图 2 实验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

多孔介质孔隙大小和孔隙的分布形态等是影响流体迁移形态关键问题之一[19],为最大限度地保证介质的均质性和不同批次实验之间的可比性,石英砂装填采用标准化分层填装的方法:每次称取相同重量石英砂装填相同高度(2 cm). 装填完成后,在石英砂表层铺 1 cm 厚的粗砂,粗砂粒径大于 18 ~ 24 目石英砂,以防止污染物添加过程中接触石英砂时产生飞溅,同时使得污染物能均匀分布到石英砂层. 供试石英砂填充高度为 36 cm,装填后石英砂孔隙率为 0.49,容重为 1.38 g·cm^{-3}. 装填后石英砂水力性质如表 2 所示. 常水头渗透实验测得介质的饱和导水率,介质渗透系数依据渗透系数公式计算得出.

表 2 介质渗透系数

Table 2 Permeability of porous media

石英砂	18 ~ 24 目	24 ~ 35 目	35 ~ 50 目	50 ~ 80 目
饱和导水率[1)] K_s/cm·s^{-1}	0.45	0.26	0.14	0.05
渗透系数 k/cm^2	4.61E-06	2.63E-06	1.48E-06	5.40E-07

1)渗透实验采用 GB/T 50123-1999 常水头渗透实验进行测定,所测数值为实验砂箱中石英砂装填条件下的数值

污染物通过 24 通道蠕动泵(兰格,BT100-1L)添加模拟线源污染,实验中污染物添加速度为 4.85 mL·min^{-1}. 蠕动泵管采用耐有机溶剂腐蚀的氟橡胶软管. 污染物渗流前锋面到达砂箱底部即关停蠕动泵,结束污染物添加. 整个实验过程在 20℃ ±2℃环境温度中进行.

1.3 图像记录和处理

实验中利用数码相机对流体入渗迁移过程进行拍照记录. 为消除玻璃反光的影响,实验装置处于暗室之中,砂箱后方放置与之相同尺寸的灯箱作为光源. 灯箱内置 4 根荧光灯管,灯管前放置匀光板以保证光线均匀. 数码相机(型号 Nikon D90)放置于砂箱前 100 cm 处,并与电脑连接. 由于图片分辨率的差异会对分形计算结果产生影响[8],因此在照片拍摄过程中设置相同的曝光参数,并以软件控制相机自动拍照以减少人为按动快门产生的振动影响. 本研究中所用照片分辨率均为2 572 × 1 625像素,每个像素约为 0.2 mm × 0.2 mm. 利用 Photoshop CS5 和 Image-J 软件对图像进行分析处理. 为保证分形维数计算结果的可比性,同一污染物照片以相同的阈值进行污染范围提取和二值化处理[20,21]. 计算分形维数的过程中,每幅照片均从同一个位置开始进行盒子计数.

1.4 方法

1.4.1 流体迁移主要驱动力

研究显示多孔介质渗流体系中主要有 3 种力影响,包括重力、黏滞力和毛细压力[19]. 重力与驱替相和被驱替相两相之间的密度差直接相关,各相受到的黏滞力与该相的黏度相关,毛细压力为各驱替相之间以及驱替相与固相之间界面上固有的相互作用力[22]. 毛细压力、重力和黏滞力的相互作用决定了流体在多孔介质中的渗流、重分布的方式. 这些力的大小可以用无量纲的数值来表示,分别为毛细管数(capillary number,C_a)和邦德数(bond number,B_o).

毛细管数表达式为[23]:

$$C_a = \frac{v\mu}{\sigma\cos\theta}$$

式中,v 为流体的达西速率,由不同时间垂向迁移距离拟合得到;μ 为流体的动力黏度;σ 为驱替相和

被驱替相之间的界面张力,在非饱和介质中为流体和空气之间的界面张力,即流体的表面张力;θ 为液相-气相-固相系统中三相之间的接触角,石英砂粉末接触角由 Washburm 毛细管上升法测得,所用仪器为 dataphysics DCAT 动态接触角测量仪.

邦德数 B_o 公式为[23]:

$$B_o = \frac{\Delta\rho g(k/n)}{\sigma\cos\theta}$$

式中,$\Delta\rho$ 为驱替相和驱替相之间的密度差;g 为重力加速度;k 为介质固有渗透系数;n 为多孔介质孔隙度;σ 和 θ 含义与上一公式相同.

1.4.2　分形维数计算方法

分形维数是描述分形自相似基本特征的几何参数. 与拓扑维数相比,分形维数可以体现图形的不规则程度. 指流研究中以质量分形维数(mass fractal dimension, D_m)表征渗流面积,进而识别渗流形态[8]. 本研究中计算分形维数的方法为盒子计数法,用不同特征尺度(ε)的正方形(盒子)网格覆盖被测图形,得到不同 ε 下覆盖被测图形所需的盒子个数 N_ε. 在分形的假设下,对于符合分形的现象,不同特征尺度下 $\lg N_\varepsilon$ 与 $\lg\varepsilon$ 呈线性相关,且回归线斜率即为分形维数.

分形维数 D_f 表达式为:

$$D_f = \lim_{\varepsilon\to 0}[\lg N_\varepsilon/\lg\varepsilon]$$

本研究中分形维数采用 Image-J 软件的分形插件 FracLac 2.5 完成.

2　结果与讨论

2.1　NAPLs 流体迁移驱动力及其对指流形态的影响

对四氯乙烯、1,2-二氯乙烷和甲苯进行了 2 种粒径的实验,对柴油进行了 4 种粒径的实验,实验最终时刻迁移路径图见图 3. 从中可知,其它实验条件相同情况下,不同性质 NAPLs 流体在不同粒径多孔介质中迁移形态差别较大. 本研究以毛细管数和邦德数为参数识别流体迁移的主要驱动力,比较驱动力变化对流体迁移形态的影响.

毛细管数 C_a 表征黏滞力相对于毛细压力的重要性. C_a 是粘滞力和界面张力的比值,C_a 越大,说明粘滞力对流体迁移的影响越大,界面张力的影响越小. 当 $C_a \ll 1$ 时,毛细压力为主要驱动力,局部区域孔喉尺寸的变化决定了流体的路径. 邦德数 B_o 表示重力和毛细压力的相对重要性. B_o 越大说明重力对流体流动性的影响越大. $B_o \ll 1$ 时,毛细压力起主导作用为主要驱动力. 图 4(a)和 4(b)中所示为流体在不同粒径石英砂中渗流的毛细管数 C_a 和邦德数 B_o. 从中可以看出,C_a 值和 B_o 值数量级分别为 10^{-5} 和 10^{-6},均远小于 1,即在本研究实验条件下 NAPLs 流体入渗迁移过程中的主要驱动力为毛细压力,指进过程为毛细管指进[24~27]. 如图 4(a)所示,不同流体之间 C_a 值大小排序为柴油 > PCE > 1,2-DCA > 甲苯. 其中柴油 C_a 值分别为其它 3 种流体的 2.2 ~ 11.2 倍. 在多孔介质 b1 中柴油 C_a 值数量级达 10^{-4},远大于其它 3 种流体. C_a 值在同种流体不同粒径介质之间表现为数值大小随着介质粒径减小而降低. 柴油、PCE、1,2-DCA 和甲苯在石英砂 b3 中迁移的毛细管数为石英砂 b1 中 3.0 ~ 7.3 倍. 柴油 C_a 值在 4 种粒径石英砂中随着介质粒径的减小呈线性递减的趋势. 由图 4(b)可以看出,在 2 种粒径石英砂中 B_o 排序为 PCE > 1,2-DCA > 甲苯 > 柴油,与密度大小关系相同. 与 C_a 相似,随着介质粒径的减小,B_o 值逐渐减小. 柴油、PCE、1,2-DCA 和甲苯在石英砂 b3 中迁移的 B_o 值为石英砂 b1 中 5.0 ~ 6.4 倍. 柴油 B_o 值在 4 种粒径石英砂中随着介质粒径的减小呈线性递减的趋势.

图 4(c)所示为流体指进迁移过程中指流宽度的比较. 从中可以看出,不同粒径介质之间指流宽度变化情况表现为,随着介质粒径的减小,指流宽度增加,与 C_a 值和 B_o 值在不同粒径介质之间的变化呈负相关. 介质粒径从 18 ~ 24 目到 35 ~ 50 目,指流宽度增加 10% 到 3 倍不等,如图 3 中所示. 柴油在 4 种粒径石英砂中指流宽度随介质粒径的减小而增加,其变化趋势与柴油在 4 种粒径中 C_a 值和 B_o 值变化趋势呈负相关. 不同流体之间比较得出,在粗粒径石英砂 b1 中,4 种流体指流宽度相差不大,介于 25 ~ 32 mm 之间,略有差异. 在细粒径石英砂 b3 中,指流宽度差异较大,介于 30 ~ 110 mm 之间. 从变化趋势上看,PCE、1,2-DCA 和甲苯 3 种流体指流宽度逐渐增大(图 3),与这 3 种流体 C_a 值和 B_o 值的变化趋势呈负相关. 与 PCE、1,2-DCA 和甲苯比较,柴油指流宽度表现出独特特性,与其显著高的 C_a 值和较低 B_o 值一致. 图 4(d)所示为流体渗流迁移过程中渗流面积的比较. 与指流宽度变化趋势相同,渗流面积随着介质粒径的减小而增加. 不同流体之间比较,在较细粒径介质(介质 b3)中,渗流面积甲苯 > 1,2-DCA > PCE,与指流宽度的大小关系一致,与 B_o 值呈负相关. 柴油同样表现出独特的性质,研究认为主要原因为与其它 3 种流体相比柴油具有显著高的黏度.

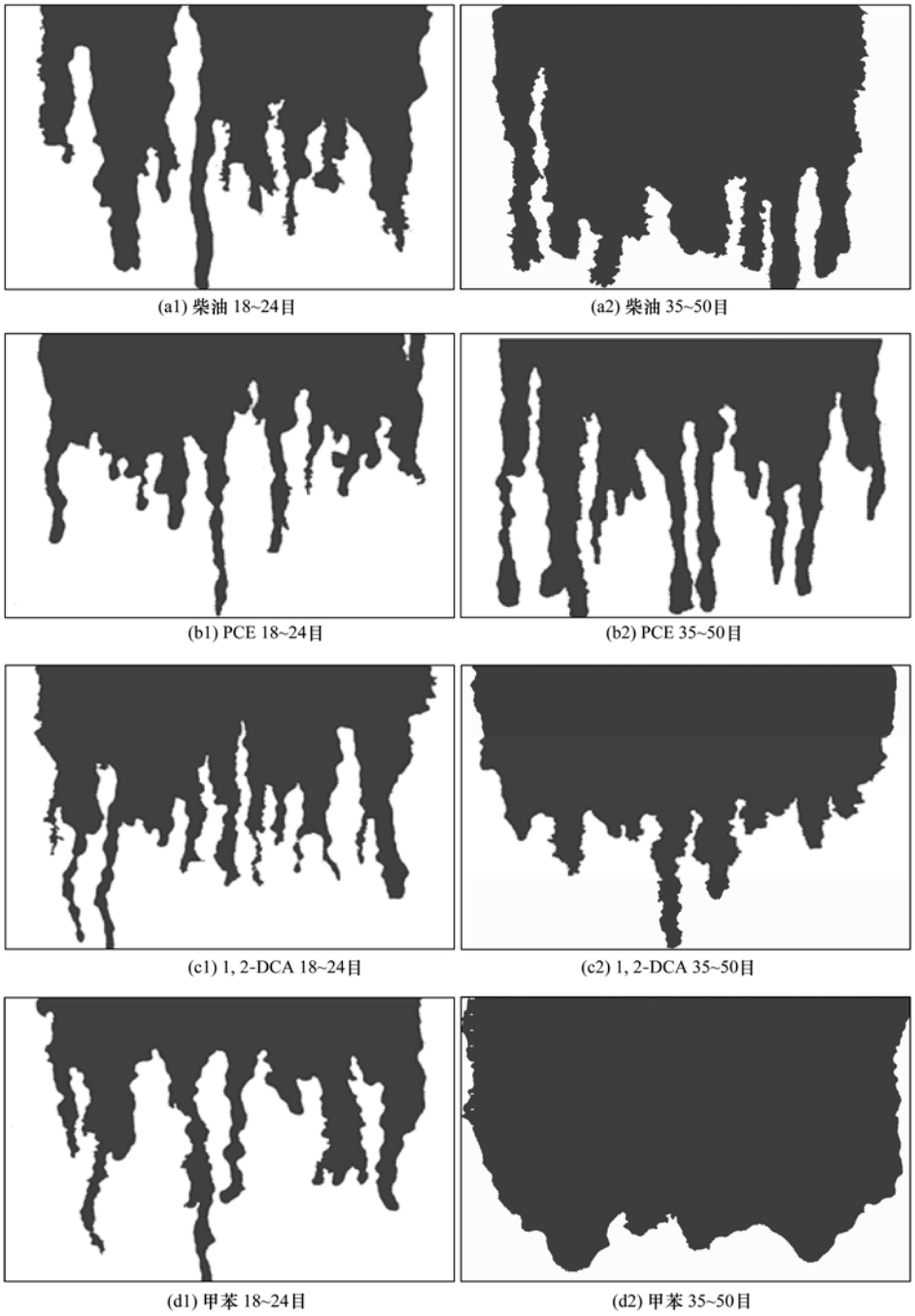


图 3 实验停止时 NAPLs 迁移锋面形态

Fig. 3 Front morphology of NAPLs at the end of the experiments

Held 等[3]实验证实了 DNAPL 向下驱替水的过程中随着重力势的增加界面趋于不稳定,即指流宽度减小,而随着黏滞力的增大界面趋于稳定,即指流宽度和渗流面积增加[2, 3]. 本研究中柴油的 C_a 值分别为其他 3 种介质的 2.2 ~ 5.5 倍(石英砂 b1)和 2.2 ~ 11.2 倍(石英砂 b3),表明黏滞力在柴油渗流过程中的作用力更强. 从流体本身的性质来说,PCE、1,2-DCA 和甲苯的黏度差别不大,介于 0.6 ~ 0.9 mPa·s之间,而柴油黏度为 3.11 mPa·s,为其他 3 种流体的 3.5 ~ 5 倍. 因此黏度数量级同为 10^{-1}(小于 1 mPa·s)的 PCE、1,2-DCA 和甲苯在渗流过程中指流宽度与 C_a 值和 B_o 值呈负相关,而黏度数量级为 10^0(大于 1 mPa·s)的柴油在黏滞力的作用下指流宽度有所增加,表现出独特的性质.

2.2 NAPLs 流体指流迁移的分形特征及分形维数比较

由分形理论可知,如果迁移锋面符合分形假设,则盒子计数法中包含染色面积的盒子个数与特征尺

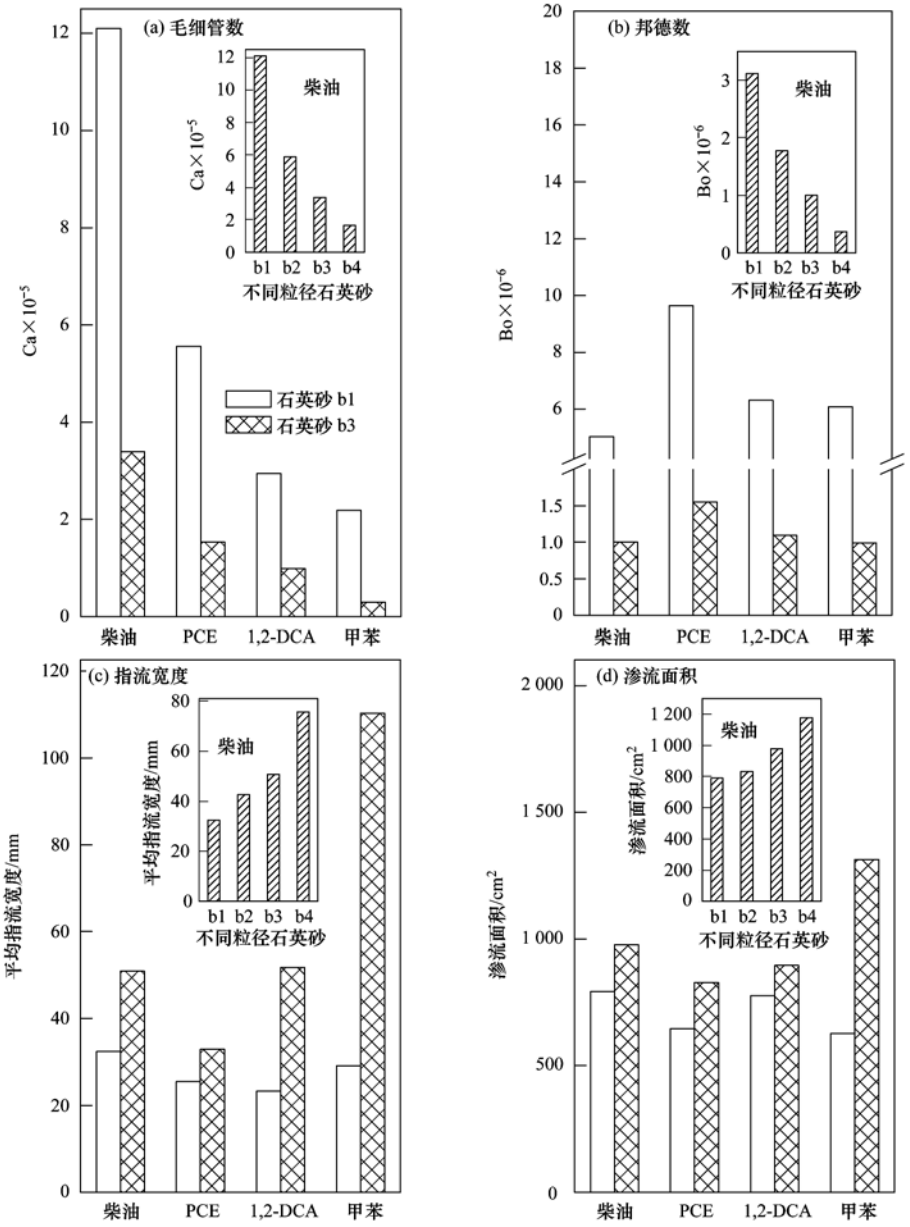


图 4　NAPLs 流体在两种粒径石英砂中迁移的毛细管数、邦德数、指流宽度和渗流面积

Fig. 4　Indicators of NAPLs infiltration in two kinds of porous media: capillary number, Bond number, the average width of fingers and the infiltration area of the final time

度的对数值呈线性相关. 以盒子计数法计算指流驱替面每 min 的分形维数,流体迁移到砂箱底部即实验最后 1 min 的分形维数拟合公式及相关系数如表 3 所示. 每 min 分形维数线性拟合的相关系数 R^2 均大于 0.99,说明流体渗流面形态符合分形假设,指流形态具有分形性质[16].

图 5 所示为 4 种流体迁移过程中每 min 分形维数箱图. 由图 5(a)可以看出,柴油、PCE、1,2-DCA 和甲苯这 4 种流体在较粗粒径介质 b1 中分形维数 D50 分别为 1.78、1.72、1.78 和 1.71,在较细粒径介质 b3 中分形维数 D50 分别为 1.84、1.80、1.85 和 1.87. 由图 5(b)可以看出柴油在 b1、b2、b3 和 b4 这 4 种粒径介质中分形维数 D50 分别为 1.78、1.82、1.84 和 1.87. 研究结果表明分形维数随着介质粒径的减小而增加. Smith 等[16]的实验中分别计算了 PCE 在 3 种不同粒径饱和介质中迁移的分形维数,研究结果显示分形维数随着介质粒径的减小而逐渐增加的趋势.

不同流体之间比较得出,在较细粒径介质 b3 中分形维数大小关系为甲苯 > 1,2-DCA > 柴油 > PCE,与指流宽度和渗流面积在不同流体间的大小关系相同. 在较粗粒径介质 b1 中分形维数大小关系为柴

表 3 流体迁移至砂箱底部时渗流面的分形维数拟合结果

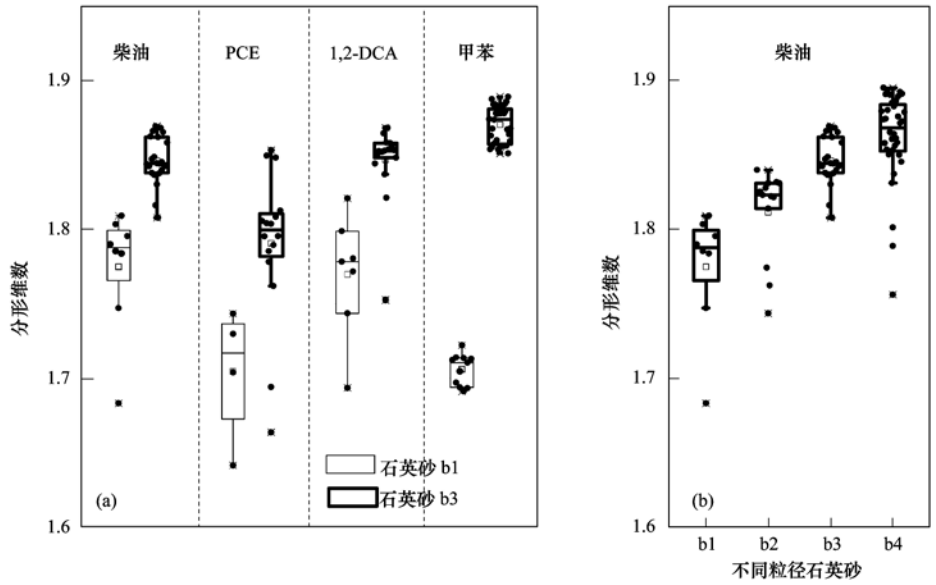
Table 3 Fitting results of fractal dimensions of sweep area of the fluids at the end

NAPLs	介质/目	拟合公式[1)]	R^2	分形维数
柴油	18 ~ 24	$y = -1.789x - 0.003$	0.998	1.79
	24 ~ 35	$y = -1.830\ x - 0.055$	0.999	1.83
	35 ~ 50	$y = -1.876\ x + 0.026$	0.999	1.88
	50 ~ 80	$y = -1.894x - 0.114$	0.999	1.89
甲苯	18 ~ 24	$y = -1.706x + 0.137$	0.998	1.71
	35 ~ 50	$y = -1.858x - 0.052$	0.998	1.86
1,2-DCA	18 ~ 24	$y = -1.816\ x - 0.055$	0.999	1.82
	35 ~ 50	$y = -1.843\ x - 0.244$	0.998	1.84
PCE	18 ~ 24	$y = -1.734\ x - 0.016$	0.997	1.73
	35 ~ 50	$y = -1.786\ x + 0.107$	0.998	1.79

1) y: $\lg N_\varepsilon$; x: $\lg\varepsilon$

油 > 1,2-DCA > PCE > 甲苯,与渗流面积在不同流体间的大小关系相同,与指流宽度排序不同. 与文献相比,本研究中 PCE 在干砂介质中迁移的分形维数介于 1.7 ~ 1.8 之间,文献中 PCE 在饱和玻璃粉中迁移的分形维数介于 1.4 ~ 1.5 之间. 本研究中 PCE 指流宽度约 3 cm,文献中指流宽度小于 1 cm. 与文献相比也符合分形维数越大指流越宽的规律. 柴油渗流面积分形维数在 4 种粒径介质中随着介质粒径减小而增加的趋势与指流宽度和渗流面积变化趋势一致.

质量分形维数表征流体渗流面的复杂程度,分形维数越小表明渗流面越复杂,表现为指流细瘦杂乱,渗流面积越小,如图 3(a1)、3(b1)、3(c1)和 3(d1)所示; 分形维数越大表明渗流面越紧凑,表现为指流宽度越宽,渗流面积越大,如图 3(a2)、3(b2)、3(c2)和 3(d2)所示,即分形维数可以指示指流宽度和渗流面积的大小. 相对而言,对于不同性质的流体指流宽度和渗流面积的大小关系,在较细粒径介质中分形维数对指流宽度和渗流面积均有较好的指示作用,而在较粗粒径介质中,分形维数对渗流面积的指示作用更好. 对于同一种流体在不同粒径介质间指流宽度和渗流面积的大小关系分形维数均具有很好的指示作用.



箱图中数据包括指流稳定后每分钟的分形维数

图 5 流体迁移锋面分形维数比较

Fig. 5 Comparison of fractal dimensions of the fluids

3 结论

(1)流体渗流过程中 C_a 值和 B_o 值均远小于 1,渗流属于毛细管指进,渗流过程中主要驱动力为毛细压力. C_a 值和 B_o 值随着介质粒径的减小而降低,在较细粒径介质中毛细压力的作用更大. 对于同种流体,指流宽度和渗流面积随着介质粒径的减小而逐渐增加,分形维数逐渐增大,与 C_a 值和 B_o 值变化趋势相反.

(2)不同流体之间比较,黏度大小为同一数量级的 PCE、1,2-DCA 和甲苯渗流过程中的指流宽度、渗流面积和质量分形维数的大小关系分别与这 3 种流体 C_a 值和 B_o 值的大小关系相反. 柴油由于其显著高的黏度表现出独特的性质.

(3)4 种流体在干砂介质中迁移的渗流面具有分形性质,质量分形维数可以较好地指示同种流体

在不同粒径介质间和不同流体在相同粒径介质中迁移的指流宽度和渗流面积的大小关系,可以为环境管理和修复范围的确定提供技术支持.

参考文献:

[1] 韩春媚, 冉娟, 张慧, 等. 甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3554-3561.

[2] Kueper B H, Frind E O. An overview of immiscible fingering in porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1988, **2**(2): 95-110.

[3] Held R J, Illangasekare T H. Fingering of dense nonaqueous phase liquids in porous media: 2. Analysis and Classification [J]. Water Resources Research, 1995, **31**(5): 1223-1231.

[4] Kueper B H, Frind E O. Two-phase flow in heterogeneous porous media: 2. Model application[J]. Water Resources Research, 1991, **27**(6): 1059-1070.

[5] Gerhard J I, Kueper B H, Hecox G R. The influence of waterflood design on the recovery of mobile DNAPLs. (dense nonaqueous phase liquids)[M]. Blackwell Publishing Ltd, 1998.

[6] Tian J P, Yu B M, Yao K L. Fractal nature of capillary and viscous fingering in two-dimensional porous media[J]. Chinese Physics Letters, 1995, **12**(12): 739-742.

[7] Ferer M, Bromhal G S, Smith D H. Crossover from fractal capillary fingering to compact flow: The effect of stable viscosity ratios[J]. Physical Review E, 2007, **76**(Part 2): 0463044.

[8] Baveye P, Boast C W, Ogawa S, *et al*. Influence of image resolution and thresholding on the apparent mass fractal characteristics of preferential flow patterns in field soils[J]. Water Resources Research, 1998, **34**(11): 2783-2796.

[9] Zhang J H, Liu Z H. Study of the relationship between fractal dimension and viscosity ratio for viscous fingering with a modified DLA model[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, **21**(1-2): 123-128.

[10] Gharbi R B C, Qasem F, Peters E J. A relationship between the fractal dimension and scaling groups of unstable miscible displacements[J]. Experiments in Fluids, 2001, **31**(4): 357-366.

[11] Powers S E, Anckner W H, Seacord T F. Wettability of NAPL-contaminated sands[J]. Journal of Environmental Engineering, 1996, **122**(10): 889-896.

[12] Öhrström P, Persson M, Albergel J, *et al*. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage[J]. Journal of Hydrology, 2002, **257**(1-4): 164-173.

[13] Sheng F, Wang K, Zhang R D, *et al*. Modeling preferential water flow and solute transport in unsaturated soil using the active region model[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(7): 1491-1501.

[14] Pennell K D, Pope G A, Abriola L M. Influence of viscous and buoyancy forces on the mobilization of residual tetrachloroethylene during surfactant flushing[J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(4): 1328-1335.

[15] 武晓峰, 唐杰, 藤间幸久. 地下水中轻质有机污染物(LNAPL)透镜体研究[J]. 环境污染与防治, 2000, **22**(3): 17-20.

[16] Smith J E, Zhang Z F. Determining effective interfacial tension and predicting finger spacing for DNAPL penetration into water-saturated porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, **48**(1-2): 167-183.

[17] Oostrom M, Dane J H, Wietsma T W. A review of multidimensional, multifluid intermediate-scale experiments: Nonaqueous phase liquid dissolution and enhanced remediation [J]. Vadose Zone Journal, 2006, **5**(2): 570-598.

[18] Heiss V I, Neuweiler I, Ochs S, *et al*. Experimental investigation on front morphology for two-phase flow in heterogeneous porous media[J]. Water Resources Research, 2011, **47**(10): W10528.

[19] Rose W, Channapragada R. Microscopic aspects of capillary imbibition[R]. Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE 1549-G, 1960.

[20] Baveye P C, Laba M, Otten W, *et al*. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data[J]. Geoderma, 2010, **157**(1-2): 51-63.

[21] Ogawa S, Baveye P, Boast C W, *et al*. Surface fractal characteristics of preferential flow patterns in field soils: evaluation and effect of image processing[J]. Geoderma, 1999, **88**(3-4): 109-136.

[22] Wilson J L, Conrad S H, Mason W R, *et al*. Laboratory investigation of residual liquid organics from spills, leaks, and the disposal of hazardous wastes in ground water. Final report, April 1986-August 1989[Z]. 1990.

[23] Dawson H E, Roberts P V. Influence of Viscous, Gravitational, and Capillary Forces on DNAPL Saturation[J]. Groundwater, 1997, **35**(2): 261-269.

[24] Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 165-187.

[25] Zhang C Y, Oostrom M, Wietsma T W, *et al*. Influence of viscous and capillary forces on immiscible fluid displacement: pore-scale experimental study in a water-wet micromodel demonstrating viscous and capillary fingering[J]. Energy & Fuels, 2011, **25**(8): 3493-3505.

[26] Ferer M, Ji C, Bromhal G S, *et al*. Crossover from capillary fingering to viscous fingering for immiscible unstable flow: Experiment and modeling[J]. Physical Review E, 2004, **70**(1Part 2): 016303.

[27] Ferer M, Bromhal G S, Smith D H. Two-phase flow in porous media: Crossover from capillary fingering to compact invasion for drainage[J]. Physical Review E, 2005, **71**(2Part 2): 026303.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 10

Oct. 15, 2013

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in $PM_{2.1}$ in Nanjing Region ····· WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, *et al.* (3727)

Distribution and Source Apportionment of *n*-Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China ····· HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, *et al.* (3733)

Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size ····· LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, *et al.* (3741)

Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel ····· LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, *et al.* (3749)

Characteristics of $\delta^{18}O$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area ····· CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, *et al.* (3755)

Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China ····· YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, *et al.* (3764)

Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O_3/H_2O_2 ····· HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, *et al.* (3772)

Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of *Pinus massoniana* Lamb. and Source Apportionment ····· GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, *et al.* (3777)

Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province ····· LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, *et al.* (3782)

Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin ····· WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, *et al.* (3788)

Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region ····· YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, *et al.* (3797)

Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay ····· YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, *et al.* (3804)

Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat: Results of a Simulation Study ····· HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)

Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis ····· LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, *et al.* (3818)

Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin ····· NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, *et al.* (3825)

Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen ····· SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, *et al.* (3832)

Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China ····· BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)

Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment ····· YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, *et al.* (3847)

Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake ····· LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)

Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu ····· HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, *et al.* (3862)

Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake ····· CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, *et al.* (3872)

Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases ····· ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, *et al.* (3879)

Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments ····· OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)

Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas ····· YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, *et al.* (3894)

Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland ····· CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, *et al.* (3904)

Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash ····· JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, *et al.* (3912)

Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light ····· WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, *et al.* (3921)

Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material ····· Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)

Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO_2 in Aquatic System ····· CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)

Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess ····· XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, *et al.* (3940)

Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance ····· ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, *et al.* (3945)

Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage ····· ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, *et al.* (3954)

Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment ····· LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, *et al.* (3963)

Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment ····· JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, *et al.* (3969)

Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge ····· LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, *et al.* (3975)

Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge ····· GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)

Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor ····· CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, *et al.* (3986)

Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow ····· YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, *et al.* (3992)

Modeling of CO_2 Fluxes at Cropland by Using SiB3 Model ····· ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, *et al.* (4000)

Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain ····· XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, *et al.* (4009)

Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City ····· YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)

Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong ····· SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, *et al.* (4024)

Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil ····· WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, *et al.* (4031)

Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil ····· WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, *et al.* (4036)

Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column ····· LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, *et al.* (4042)

Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils ····· FANG Jing, YU Bo-yang (4050)

Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media ····· LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, *et al.* (4058)

Allelopathic Potential of *Phyllostachys edulis* on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process ····· BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, *et al.* (4066)

Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary ····· LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)

Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province ····· LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, *et al.* (4081)

Effects of Cu^{2+} Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes ····· ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, *et al.* (4090)

Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO_2 Leakage by High-throughput Sequencing Technology ····· TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, *et al.* (4096)

Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake ····· LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, *et al.* (4105)

Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain ····· CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, *et al.* (4112)

Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (*Oryza sativa* L.) ····· HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, *et al.* (4119)

Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato ····· LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, *et al.* (4126)

Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China ····· LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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）

2013 年 10 月 15 日　34 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 10　Oct. 15，2013

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