

## 黏土贯穿裂隙污染物迁移的实验和数值模拟研究

曾 颖<sup>1</sup>, 顾正聪<sup>2</sup>, 黄 勇<sup>1</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 云南湖柏环保科技有限公司, 云南 昆明 650034)

**摘要:** 为研究裂隙黏土中的溶质运移, 研制一套适用于裂隙黏土中溶质运移的实验装置, 通过测定实验装置内示踪剂溶液的电导率来监测溶质的运移规律。实验结果发现模型底部监测孔处的渗出液浓度在短时间内就趋于稳定达到最大, 表明黏土中裂隙的存在会使溶质顺着裂隙快速穿过黏土层, 形成优先流现象, 从而对黏土层下部的水体造成污染。采用数值方法对室内试验进行模拟分析, 讨论了提高水头和改变岩土体两种方法来进行预测, 结果显示黏土层上部水头变化对黏土中的溶质浓度影响不大, 且不同土体中如均出现贯穿型裂隙, 那么污染物进入含水层的时间基本一致, 防渗失效, 这时改变防渗材料没有意义。

**关键词:** 裂隙黏土; 饱和渗流实验; 溶质运移; 优先流; 数值模拟

**中图分类号:** P64

**文献标识码:** A

## Experimental and numerical simulation of movement of contaminants through cracks

ZENG Jie<sup>1</sup>, GU Zhengcong<sup>2</sup>, HUANG Yong<sup>1</sup>

(1.School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China; 2. Yunnan Hubai Environmental Protection Technology Co., Ltd. Yunnan Kunming, 650034)

**Abstract:** In order to study the solute transport in fissured clay, experimental apparatus for solute transport in fissured clay are developed based on previous saturated seepage experiments. The solute transport is monitored by measuring the conductivity of the tracer solution in the experimental setup law. The results show that the concentration of exudate in the bottom of the model tends to be stable in a short time, which indicates that the existence of cracks in the clay will cause the solute to pass through the clay layer rapidly and form preferential flow phenomena. The upper head of the clay layer has little effect on the solute concentration in the clay, and the effect of the water head is similar in the different soils.

**Key words:** fractured clay; saturated seepage flow; solute transport; preferential flow; numerical simulation

压实的黏土在完整、无损、无裂隙等情况下渗透性差, 防渗效果好, 可以有效地防止污染物渗入到地下水中<sup>[1]</sup>。但是由于施工或管理的原因使黏土中产生了裂隙<sup>[2]</sup>, 溶质会沿着裂隙, 以一种优先流<sup>[3]</sup>的形式, 快速到达相对于黏土层底部, 会造成污染物的集中渗漏现象。在这种情况下, 黏土防渗层被击穿的时间缩短, 防渗效果减弱甚至缺失。前人为了在室内实验测试黏性土中污染物迁移的有效弥散系数和吸附参数, Barone 和 Rowe 等<sup>[4]</sup>研究了挥

发性有机化合物在自然黏土中的迁移过程。Edil 等<sup>[5]</sup>获得了压实黏土中有机污染物运移的弥散系数、吸附分布系数和降解系数。在室内实验中污染物常采用示踪剂来代替, 模拟示踪剂在裂隙和黏土基质间的运移转化规律。黏土中污染物的运移问题主要采用数值模拟的方法进行研究。在研究土中污染物的运移规律时, Rowe 和 Booker<sup>[6-7]</sup>采用有限层法进行研究, Leo 和 Booker<sup>[8]</sup>采用边界元法进行研究, 余开彪和胡斌等<sup>[9]</sup>采用有限单元法进行静态和动态研

收稿日期: 2016-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572209)

作者简介: 曾颖(1992-), 男, 江西赣州人, 硕士, 研究方向为水文地质。

究。MattaX 和 Kvtel<sup>[6]</sup>把有蜡涂层的玻璃板用氢氟酸腐蚀成所需的微模型裂隙；后来 Davis 和 Jonas<sup>[7]</sup>用抗蚀剂取代了蜡涂层。本文采用室内实验的方法来研究水流和溶质在裂隙黏土中的运移规律，探讨优先流现象与黏土中裂隙的发育关系，并运用数值法模拟实验，预测并分析了提高水头和改变岩土体两种情况时的溶质运移规律。

## 1 实验装置与方案

### 1.1 实验装置

实验装置由四部分组成,包括圆柱形模型装置、定/变压力系统、联通导管和电导率测量装置(探头已固定于模型内)组成。实验模拟一维条件下渗滤液渗漏穿过黏土层的情况,模型由高 700 mm、直径 180 mm 的圆柱体组成,装置侧面每隔 50 mm 设置一个直径为 5 mm 的监测孔。从圆柱形模型装置底部开始,依次装入厚 70 mm 的砾石,170 mm 的细砂,300 mm 的黏土土样,余下的 160 mm 作为临时贮存示踪剂溶液的区域(图 1)。

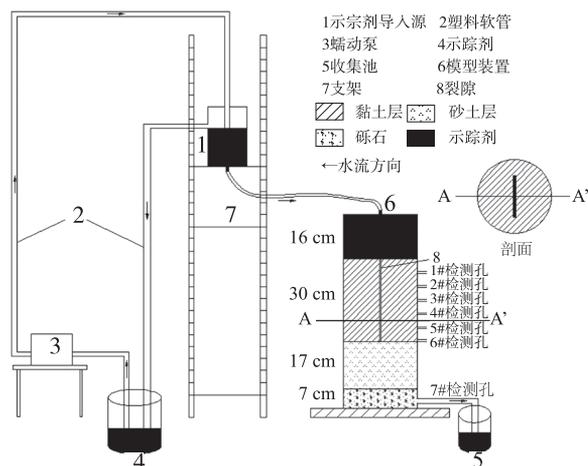


图 1 实验装置设计图

Fig.1 Design of experimental device

实验时,由蠕动泵从原液池中不断抽取示踪剂注入顶部柱状容器中,容器中示踪剂保持固定的高度,多余的示踪剂经过导流管回流到原液池中。为了研究黏土中裂隙对水流和溶质运移的影响,在圆柱形模型的黏砂土中设置 5 mm 宽的裂隙,裂隙和黏砂土层一样高,均为 300 mm,为贯穿型裂隙。

### 1.2 实验步骤

(1) 标准溶液的配制。在实验室配制了浓度分别为 0.1、0.5、1、5、10、20、30、40、50、60 g/L 的 NaCl 溶液,并测定了这些溶液的电导,通过一元

线性回归,获得溶液浓度和电导的关系式:

$$C=0.725\sigma_{25} \quad (1)$$

式中,  $C$  为 NaCl 溶液浓度 (mg/L);  $\sigma_{25}$  为 25℃ 时的电导率值 (ms/cm)。

(2) 土样装填。先把黏土土样放入盆中,加水充分饱和、沉淀。在圆柱形模型底部依次装入砾石和细砂,两层之间铺一层滤网,防止细砂进入砾石层。在砂层顶部铺一层滤网,然后把制作好的裂隙放在装置中间,与监测孔轴线垂直。在裂隙四周充填饱和含砂黏土,当裂隙与含砂黏土高度一样时停止。土样装填完毕后,让其静止 1~3 天左右。

(3) 加压沉降。模型顶部用盖子密封,往里加水,持续 1~2 周,待黏土沉降完全为止,然后把模型装置里的水放干,再往里加入黏土,使其和裂隙一样高,重复此步骤,直到黏土沉降不明显为止。

(4) 加入示踪剂溶液进行实验。

(5) 测量监测孔中示踪剂溶液的电导率。

### 1.3 稀释法测量示踪剂溶液的电导率

实验过程中,由于监测孔渗出液的体积比较小,一般在 0.5 ~ 1 ml 左右,因此须先收集监测孔中的渗出液,用蒸馏水将其稀释,测量稀释液的电导率,根据式 (2) 换算出渗出液的电导率,其经验计算公式为:

$$\sigma (v_1+v_2) = \sigma_1 v_1 + \sigma_2 v_2 \quad (2)$$

式中,  $\sigma_1$  为监测孔渗出液的电导率;  $v_1$  为监测孔渗出液的体积;  $\sigma_2$  为蒸馏水的电导率;  $v_2$  为蒸馏水的体积;  $\sigma$  为用蒸馏水稀释后的稀释液电导率。由于实验中用 100 mL 的容量瓶对渗出液进行稀释,因此监测孔渗出液体积与蒸馏水体积之和为 100 mL,即  $v_1+v_2=100$  mL。

实验过程发现,将原溶液稀释到 100 mL,测其电导率,在利用式 (2) 计算出的原溶液电导率与原溶液的实际电导率有一定的偏差,一般偏大。本次实验中采用配制标准溶液测定溶液稀释前后的电导率来进行偏差校正。由此得出原溶液电导率与利用其稀释液电导率换算出的原溶液电导率的关系式为:

$$\sigma_1 = -0.0015\sigma^2 + 0.7911\sigma + 0.6308 \quad (3)$$

式中,  $\sigma_1$  为 25℃ 时原溶液的电导率;  $\sigma$  为利用稀释液电导率换算出的原溶液电导率。

## 2 裂隙黏土中溶质运移数值模拟分析

### 2.1 模型离散

按照室内实验圆柱形模型装置的实际尺寸,采

表1 模型参数反演值

Tab.1 Inversion values of model parameters

黏砂土渗透系数	$1 \times 10^{-5}$ m/s	裂隙等效渗透系数	1 m/s
黏砂土纵向弥散度	0.1 m	砾石层纵向弥散度	1 m
黏砂土横向弥散度	0.05 m	砾石层横向弥散度	0.7 m

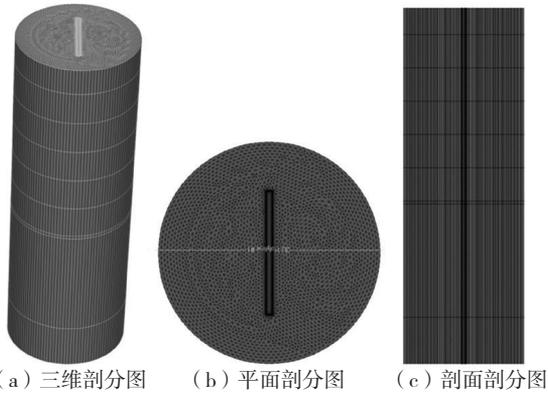


图2 模型网格剖分图

Fig.2 Meshing of the model

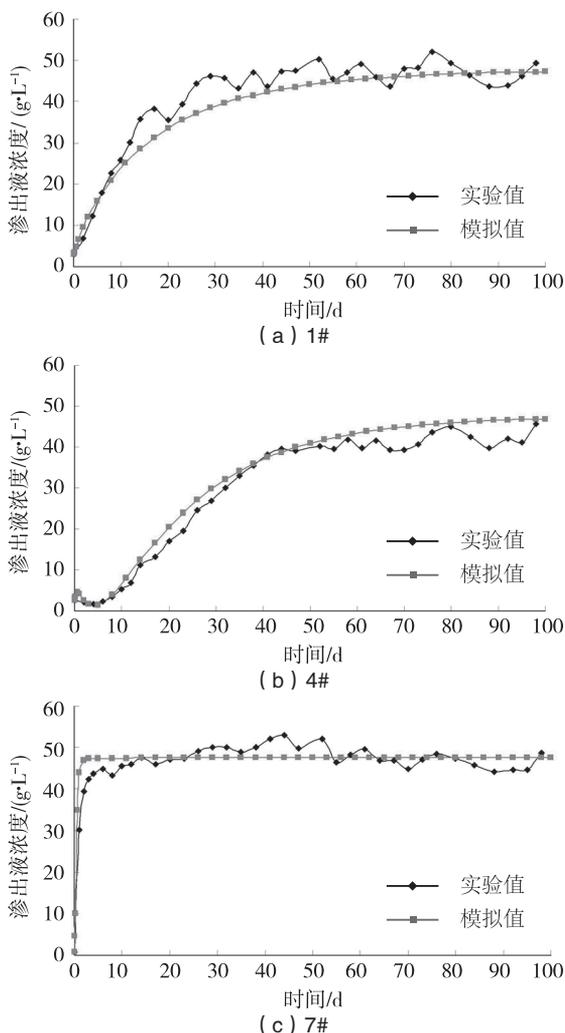


图3 各监测孔处渗出液浓度实验值与计算值对比

Fig.3 Comparison of experimental and calculated values of exudate concentration at each monitoring hole

用 Feflow 软件建立数值分析模型<sup>[10]</sup>, 对模型采用三角形网格单元, 将三维圆柱形模型剖分为 59 360 个节点, 105 678 个单元, 网格剖分图见图 2。

## 2.2 弥散参数计算

根据实测和计算的示踪剂浓度, 对模型进行多次调试计算得到黏土、裂隙和砾石层的相关参数(表 1)。为了验证模型的计算参数反演值的正确性, 分别选取 1#、4# 和 7# 监测孔处示踪剂浓度实验值与计算浓度值进行比较(图 3)。

从图 3 中可看出, 模型计算值先增大, 最后均趋于稳定, 与实验值吻合较好, 表明可以用验证的模型来预测示踪剂在裂隙黏土中的迁移规律。

## 2.3 预测结果分析

### (1) 水头变化对污染物迁移的影响

改变黏土层上部的水头, 分别为 0.3、0.5、1、2 m 四种工况, 1#、3# 和 7# 监测孔处的溶质浓度模拟计算结果见图 4。从图中可以看出, 随着黏土层上部水头的增大, 各监测孔处的溶质浓度逐渐增加, 但达到稳定的时间差别较大。1# 和 3# 监测孔处的溶质浓度随着黏土层上部水头的增大而增大, 7# 监测孔处的溶质浓度变化趋势基本一致, 相差不大, 在短时间内就趋近于原示踪剂溶液浓度达到稳定。说明在贯穿型裂隙黏土中, 黏土层上部水头的变化对黏土中的溶质浓度分布有影响, 对溶液顺着裂隙穿过黏土层造成其地下水的影响不大。

### (2) 土体渗透性对污染物迁移的影响

渗透系数分别取  $1 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-5}$ 、 $1 \times 10^{-7}$ 、 $1 \times 10^{-10}$  m/s 四种工况, 1#、3# 和 7# 监测孔处的溶质浓度模拟计算结果见图 5。从图中可看出, 随着岩土体渗透系数的增大, 相同时刻各监测孔处溶质的浓度也增大, 但不同深度处的溶质浓度增加速度不一样。随着土层渗透系数的增大, 土层中的溶质浓度趋近于原示踪剂溶液浓度达到稳定的时间缩短。黏土渗透系数为  $1 \times 10^{-4}$  m/s 时 1# 和 3# 监测孔处的溶质浓度变化最大, 说明随着黏土渗透系数的增大, 相同时刻监测孔处的溶质浓度会增大; 黏土渗透系数为  $1 \times 10^{-7}$  m/s 和  $1 \times 10^{-10}$  m/s 时 1# 和 3# 监测孔处

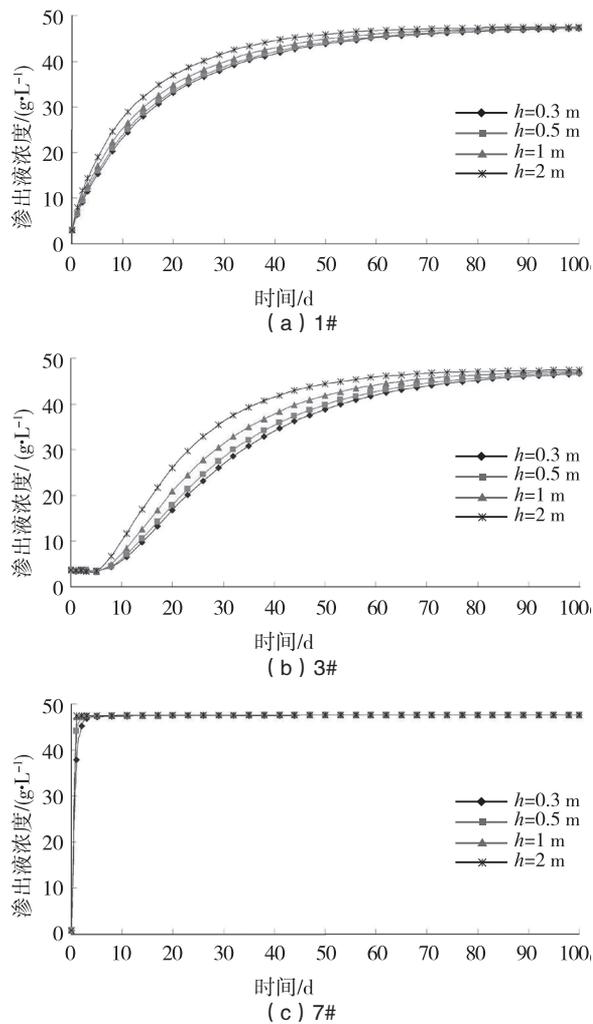


图 4 黏土层上部水头变化时的模拟结果对比曲线图

Fig.4 Curve of the simulation results for different upper heads of clay layer

的溶质浓度变化趋势基本一致，说明渗透系数较小时对黏土中溶质的运移规律影响较小，裂隙导致的优先流对溶质的运移起着主导作用，黏土中的基质流不明显；7# 监测孔处的溶质浓度变化趋势基本一致，说明黏土渗透系数变化对溶质运移规律的影响不大。

综上所述，在贯穿型裂隙土层中，渗透系数的变化对黏土中的溶质浓度分布有影响，但对溶液顺着裂隙穿过黏土层造成其地下水的的影响不大。

### 3 结论

1) 黏土中有裂隙存在时，溶质会顺着裂隙快速穿过黏土层，形成优先流现象。

2) 预测结果显示黏土层上部水头变化对黏土中的溶质浓度有影响，但对裂隙和黏土层下部地下水体中的溶质浓度影响不大。由于贯穿裂隙的出现，

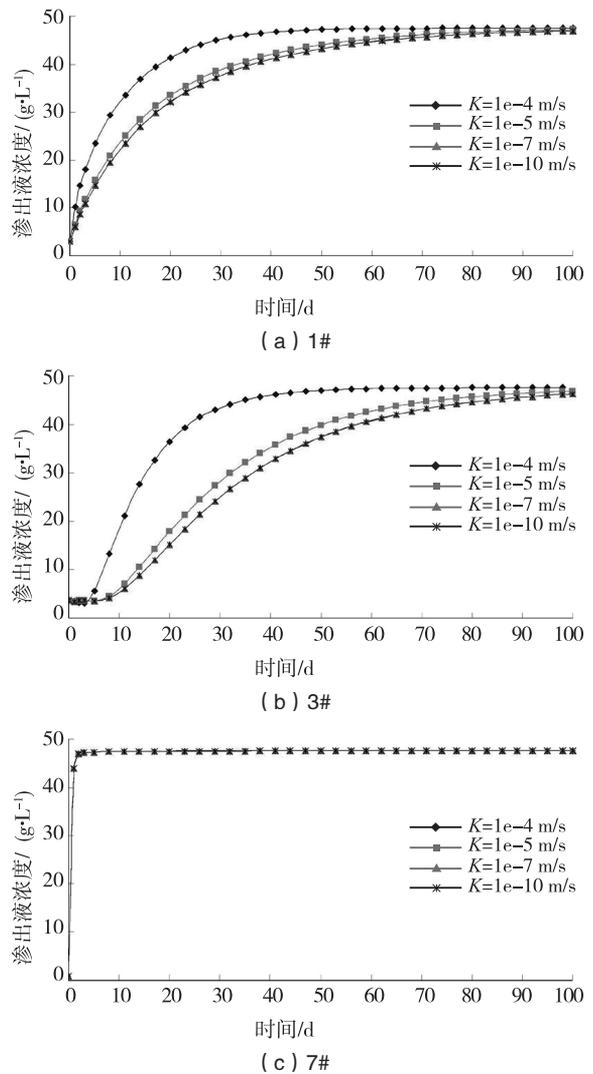


图 5 黏土渗透系数变化时的模拟结果对比曲线图

Fig.5 Curve of the simulation results for different clay permeability coefficients

污染物对不同岩土体内部的渗入速度有差异，但对不同岩土层下方的含水层污染速度基本一致，此时如通过改变防渗材料来减少污染物入渗没有作用。

### 参考文献：

[1] 田素川. 裂隙岩体注浆浆液扩散规律研究 [D]. 北京：中国矿业大学，2014.  
 [2] 何俊，万娟，王宇. 压实黏土干燥裂隙及渗透性能研究 [J]. 工程地质学报，2012(3)：397-402.  
 [3] 徐宗恒，徐则民，曹军尉，等. 土壤优先流研究现状与发展趋势 [J]. 土壤，2012 ( 6 ) : 905-916.  
 [4] BARONE F S, ROWE R K, QUIGLEY R M.A laboratory estimation of diffusion and adsorption coefficients for several volatile organics in a natural clay soil[J].Journal of (下转第 81 页)

的去除作用要优越许多,且改性沸石粉去除  $\text{Cu}^{2+}$  的最佳掺量为 2 g: 100 mg/L。

3) 溶液 pH 值在小于 5 的条件下对沸石粉吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的影响较大, pH 值越小, 沸石粉对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附量就越小; pH 值在 5 ~ 8 之间对沸石粉吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的效果较好。

#### 参考文献:

- [1] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34 (6): 130-135.
- [2] LIU Wengang, WEI Dezhou, MI Jinyue, et al. Immobilization of Cu(II) and Zn(II) in simulated polluted soil using sulfurizing agent [J]. Chemical Engineering Journal, 2015 (277): 312-317.
- [3] 林爱军, 王凤花, 谢文娟, 等. 土壤铜污染对植物的毒性研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (35): 21740-21742.
- [4] 潘科, 朱艾嘉, 徐志斌, 等. 中国近海和河口环境铜污染的现状 [J]. 生态毒理学报, 2014, 9 (4): 618-631.
- [5] 唐启祥, 杨留方, 吴兴惠, 等. 天然沸石及沸石类分子筛 [J]. 材料导报, 2004 (18): 256-261.
- [6] 李长洪, 李华兴, 张新明. 天然沸石对土壤养分有效性的影响 [J]. 土壤与环境, 2000, 9 (2): 163-165.
- [7] 李见云, 郑宾国, 化全县, 等. 沸石粉对溶液中铜的吸附性能研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (14): 240-243.
- [8] 金兰淑, 高湘骥, 刘洋, 等. 4A 沸石对复合污染水体  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的去除 [J]. 环境工程学报, 2012, 27 (6): 1-4.
- [9] 许秀云, 蔡玉曼. 改性沸石对重金属离子竞争吸附特性研究 [J]. 地质学刊, 2010, 34 (1): 92-97.
- [10] PANAYOTOVAM. Kinetics and thermodynamics of removal of nickel ions from wastewater by use of natural and modified zeolite [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2001, 10(3): 267-272.
- [11] 赵亚娟, 赵西成, 江元汝. 粉煤灰合成沸石的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28 (5): 1008-1012.
- [12] 李爱阳, 褚宏伟. 改性斜发沸石处理电镀废水中的重金属离子 [J]. 材料保护, 2004, 37 (6): 37-45.
- [13] 罗道成, 易平贵, 陈安国. 改性沸石对电镀废水中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  的吸附 [J]. 材料保护, 2002, 35 (7): 138-141.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 75 页)
- contaminant hydrology, 1992, 10(3): 225-250.
- [5] Edil T B, Wambold W S, Park J K. Partitioning of VOCs in Clay Liner Materials [C]// Geoenvironment 2000@ sCharacterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics. ASCE, 2014:775-790.
- [6] ROWE R K, BOOKER J R. The analysis of pollutant migration in a non-homogenous soil [J]. Géotechnique, 1984, 34(4):601-612.
- [7] BOOKER J R, ROWE R K. A finite layer technique for calculating three-dimensional pollutant migration in soil [J]. Géotechnique, 1986, 36(2):205-214.
- [8] LEO C J, BOOKER J R. A boundary element method for analysis of contaminant transport in porous media I: homogeneous porous media [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(14):1701-1715.
- [9] 余开彪, 胡斌, 张挺. 垃圾渗滤液在土体中扩散规律的模拟计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11):1944-1948.
- [10] 贺国平, 邵景力, 崔亚莉, 等. FEFLOW 在地下水流模拟方面的应用 [J]. 成都理工大学学报, 2003 (4): 356-361.
- (责任编辑 王利君)