

# 帷幕工程对重金属污染扩散阻滞作用数值模拟

邓红卫, 吴彦霖

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 地下水渗流是重金属扩散的主要作用之一。基于地下水渗流规律的对流、弥散、源汇作用,在不考虑生物降解和化学反应的情况下,以帷幕工程为对象,分析其对重金属污染物的阻滞效应。应用GMS软件建立了污染物运移过程的一维对流-弥散仿真模型和抽压水井扰动下的地下水修复模型。研究表明,帷幕工程对重金属污染物的扩散和运移起到了明显的阻碍作用,降低了污染物扩散半径。在污染源持续补给的状态下,365 d的扩散距离从900 m缩短为465 m;帷幕工程外部观测点的污染物质量浓度从2.8 mg/L减少到1.42 mg/L,降低了50%;在抽压水井的扰动下,帷幕工程内部凝固态污染物和溶解态污染物被吸附和被稀释的反应速度得到了提升。

**关键词** GMS;帷幕工程;重金属污染;阻滞效果

**中图分类号** TD167

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.009

## Numerical Simulation of Retardation Effect of Curtain Grouting Project on the Diffusion of Heavy Metal Pollution

DENG Hongwei, WU Yanlin

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Groundwater interstitial flow is one of the major ways for the diffusion of heavy metal pollution. Based on the law of the convection, diffusion, and source-sink effect of groundwater flow, this paper analyzes the retardation effect of the curtain grouting project on the diffusion of heavy metal pollution, without considering biological degradation and chemical reactions. A one-dimensional convection-diffusion simulation model of the transport process of contaminants and groundwater restoration model under disturbance of pumping wells were established using GMS software. The results showed that the curtain grouting project had apparent retardation effect on the diffusion and transport of heavy metal pollutants, reducing the diffusion radius. With continuous supply of pollutants in 365 d, the diffusion distance was shortened from 900 m to 465 m. The mass concentration of pollutants at the external observation site of the curtain project decreased from 2.8 mg/L to 1.42 mg/L, a reduction of about 50%. Under disturbance of pumping wells, the adsorption and dilution of pollutants in solidified and dissolved forms were accelerated in the project.

**Keywords** GMS; curtain grouting; heavy metal pollution; retardation effect

随着工业和矿业的发展,重金属以固态形式的堆积对土壤和空气的影响,以及以渗流形式对地下水和土壤的影响越来越严重。控制重金属污染物的扩散范围,吸附重金属以减少其在地下水中的分布已成为环境整治的主要内容。国外对地下水溶质运移规律的研究起步较早,如Miller等<sup>[1]</sup>针对镉在地下水中的运移特征,建立了相关的一维饱和多孔介质溶

质运移的数学模型;Yeh等<sup>[2]</sup>对溶质对流-弥散方程与化学平衡方程间耦合的数学特征进行了分析研究;Kookana等<sup>[3]</sup>和Gerritse<sup>[4]</sup>模拟研究了Cd在土壤中的运移情况,利用CDE模型描述了土壤中Cd的迁移情况。近年来,国内学者也开展了帷幕注浆对污染物阻滞作用的研究,如陈永贵等<sup>[5,6]</sup>通过土柱实验,结合一维对流-弥散控制方程对重金属污染物在黏土固

收稿日期:2014-04-01;修回日期:2014-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51074178);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC09B00);湖南省科技计划重大专项(2011FJ1003)

作者简介:邓红卫,副教授,研究方向为采矿安全技术、尾矿库安全技术、矿山水资源安全管理等,电子邮箱:denghw208@126.com

引用格式:邓红卫,吴彦霖.帷幕工程对重金属污染扩散阻滞作用数值模拟[J].科技导报,2014,32(20):59-63.

化注浆帷幕中的运移规律进行了研究,通过三维对流-弥散计算模型,采用数值分析方法对污染物阻滞效果进行了研究;邓飞跃等<sup>[7]</sup>通过渗流实验,分析了黏土固化注浆结石体对固体填埋场渗滤流中有害物质的阻滞效果;龙晓燕等<sup>[8]</sup>通过重金属在黏土固化注浆中的浓度随时间和距离的运移特性,得出了污染物在黏土固化注浆帷幕的迁移解析式;许增光<sup>[9]</sup>利用MT3DMS建立了以非水相重液体——四氯乙烯为污染物的迁移模型,描述了重金属在含水层的吸附、对流、弥散规律。

已有研究多是先对污染物迁移原理、方程、运移规律分析,然后针对某污染物进行模拟和实验,缺乏以污染场地特别以矿山为研究对象,在帷幕工程影响下,对重金属污染物迁移现象的探讨。主要原因是重金属污染物迁移需要的时间过长,只能通过实验和模拟手段对参数和模拟环境概化进行分析,导致贴近工程的研究很少,因此加强对污染场地环境的概化以及参数的简化,建立仿真模拟的分析研究显得尤为重要。本文以帷幕工程为物理屏蔽的模型,概化矿山水文地质资料,综合考虑渗流场下污染物的迁移情况,重点研究重金属污染物在帷幕工程阻挡下的运动规律,分析在抽压水井的扰动下,工程屏障研究区域中的凝固态和溶解态污染物被吸附或稀释的加强和加快现象。

## 1 模拟机制、模型简化及参数选取

### 1.1 污染物的迁移机制

污染物在地下水中运移的主要机制有对流、弥散、吸附与交换等<sup>[10]</sup>。1) 对流:污染物处于地下水运动中,沿着地下水流动方向产生对流;2) 弥散:污染物在地下水流速的变化中产生的分子扩散以及离散作用;3) 吸附与交换:注浆帷幕对污染物的机械过滤、物理吸附、化学吸附以及生物吸附作用。由于化学吸附及生物吸附对污染物的处理周期较长,而且污染物的吸附量较少,所以本文在不考虑化学吸附及生物吸附的条件下,探讨注浆帷幕对污染物的阻滞迁移作用,以及抽压水井扰动下帷幕工程内部液相和固相对污染物阻滞作用的加强和加快效果。

### 1.2 帷幕工程阻滞机制

地下水污染物主要是在水力梯度为主导驱动力的渗流作用下迁移,即渗流速度越大,污染物迁移速度越快,扩散范围越广<sup>[11-13]</sup>。注浆帷幕工程利用注浆使介质渗透性降低,阻止污染物随渗流场向周围水体扩散,在帷幕工程与污染渗流液接触带根据其材料的不同对重金属污染物表现出一定的吸附能力。此前已有很多学者证实,黏土固化注浆帷幕工程比表面积大,与污染物的接触面积大,所以吸附能力强<sup>[14]</sup>。但在实际工程中,帷幕工程传递介质渗透率较低,滞留的污染物较少且时间较短,穿透帷幕工程的污染物量较少,故污染物主要以越过帷幕工程的方式向周围水体迁移,形成外围的污染。

### 1.3 帷幕工程内外污染扩散模拟模型及参数选取

该模拟采用GMS8.0中MT3D和RT3D模块分别对帷幕工程内部和外部进行计算,模型长1600 m,宽2000 m;模型上部为水流上游,水头值为500 m,模型下部为水流下游,水头值为30 m,其计算模型如图1和图2所示。

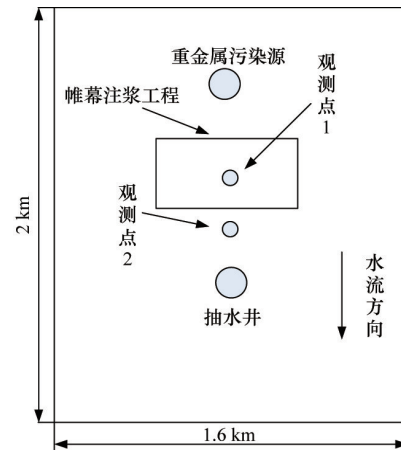


图1 帷幕工程外部污染物迁移的MT3D计算模型

Fig. 1 MT3D model of contaminant transport outside the curtain project

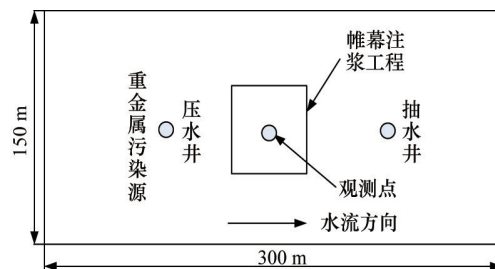


图2 帷幕工程内部污染物迁移的RT3D计算模型

Fig. 2 RT3D model of contaminant transport in the curtain project

计算参数的选取依据:1) 假定在一定的温度和矿山酸性条件下;2) 在不考虑生物降解和化学反应条件下;3) 参数的获取以经验参数和文献[15]所得为主,部分参数如堆积密度、横向各向异性值、弥散参数等是根据矿山环境经验所得。

MT3D计算模型中采用有限差分网格划分,初始通过压水井压入重金属量为100 mg/L,模型面积为 $XY=1600\text{ m}\times 2000\text{ m}$ ,底部和侧面为隔水边界,网格细分平面单元 $40\times 32$ ,共计1280个网格。其中帷幕工程外部的主要参数值为:垂直横向弥散比纵向弥散为0.5,水平横向弥散比纵向弥散为0.2,有效分子扩散比例系数为0.3,孔隙度为0.3,初始重金属污染物在液相中的质量浓度为100 mg/L,帷幕工程的渗透系数为0.015 m/d,纵向弥散度为20,横向各向异性值为1.0。

RT3D计算模型中采用有限差分网格划分,模型面积为 $XY=300\text{ m}\times 150\text{ m}$ ,底部和侧面为隔水边界,网格细分平面单

元25×50,共计1250个网格。其中垂直横向弥散比纵向弥散为0.5,水平横向弥散比纵向弥散为0.1,有效分子扩散比例系数为0.3,孔隙度为0.3,初始重金属污染物在液相中的质量浓度为300 mg/L,帷幕工程的渗透系数为0.015 m/d,纵向弥散度为20,横向各向异性值为1.0,堆积密度为 $1.5 \times 10^6$  g/cm<sup>3</sup>,初始重金属污染物在固相中的质量浓度为 $3 \times 10^{-5}$  mg/L,压入水量为30 m<sup>3</sup>/d,抽出水量为30 m<sup>3</sup>/d。

## 2 数值模型建立与结果分析

### 2.1 帷幕工程外部对重金属污染物的阻滞作用

模型建立了重金属污染物在设置和未设置帷幕工程的365 d的运移计算。重金属污染物在地下水中迁移的质量浓度等值线见图3和图4。

图3和图4对比可看出:1) 重金属在地下水渗流环境下发生了明显的运移现象;2) 30 d时重金属污染物沿水流方向扩散到帷幕工程边缘,75 d时沿帷幕工程,水平方向开始扩散;3) 帷幕工程有效地阻滞了污染物垂直方向的扩散,将大

部分污染物抵挡在前端,从而减少了污染物的扩散半径。

由图5可看出,观测点1在有帷幕工程时污染物质量浓度在0.333~0.413 mg/L,无帷幕工程时污染物质量浓度达在3.249~9.293 mg/L。观测点2在无帷幕工程作用下,污染物成线性快速增长,达到峰值7 mg/L后缓慢下降,125 d后维持在2.8 mg/L;在设置帷幕工程作用下,观测点1的污染物质量浓度变化趋势较平稳,观测点2污染物质量浓度在50~150 d存在陡增现象,在达到最高浓度1.8 mg/L后缓慢下降,250 d后维持在1.42 mg/L。

由此可见,重金属污染物在沿地下水迁移的运动过程中,直接穿越帷幕工程,在工程内部吸附和稀释的污染量较少,主要沿地下水渗流规律在帷幕工程外部进行扩散。帷幕工程材料大部分由水泥和黏土构成,其硬度和强度的特殊性使其渗透系数较小,吸附能力较差。因此帷幕工程主要依靠其物理性阻止重金属污染物穿透工程进行扩散,表明工程的阻滞和吸附作用一定程度地保护了地下水体免受污染,阻止了重金属污染物的扩散。

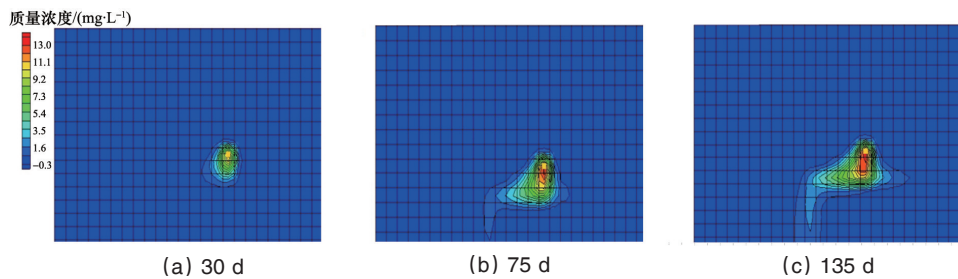


图3 设置注浆帷幕工程后不同天数的污染物迁移

Fig. 3 Contaminant transport after different days of the curtain grouting project

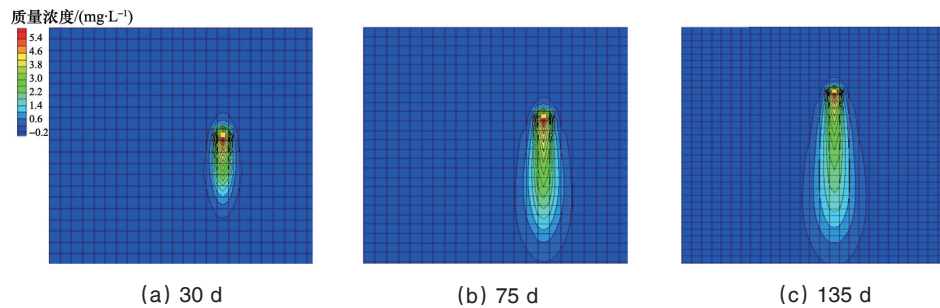


图4 未设置注浆帷幕工程时不同天数的污染物迁移

Fig. 4 Contaminant transport after different days without the curtain grouting project

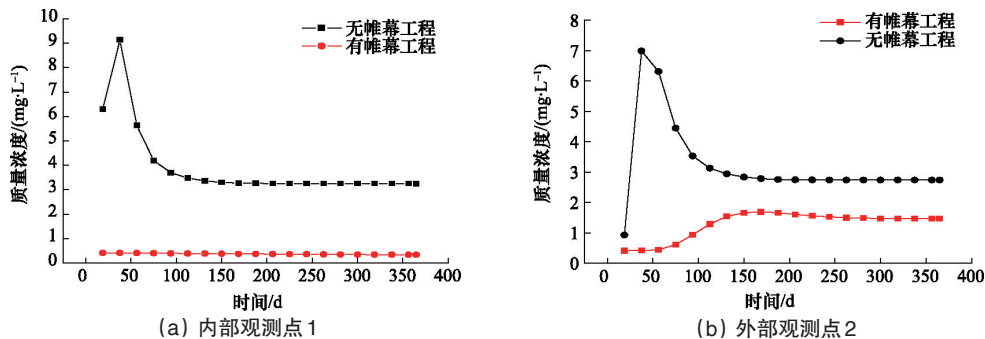


图5 帷幕工程对污染物质量浓度的影响

Fig. 5 Mass concentration of contaminants of the curtain project

## 2.2 抽压水井对注浆帷幕工程内部重金属污染物的扰动作用

从图6~图9可以看出:在抽压水井的扰动下,帷幕工程内部的重金属污染物被吸附和被稀释的反应速度得到了提升。

对图6~图9分析可知,帷幕工程内部的重金属污染物无论是溶解态还是凝固态都主要以分子扩散、固液态相互交换以及弥散的形式由内向外运移,稀释效果较差,时间较长。但在抽压水井的扰动下,加快了地下水的流动性,重金属污染物的稀释效果也得到明显提升。

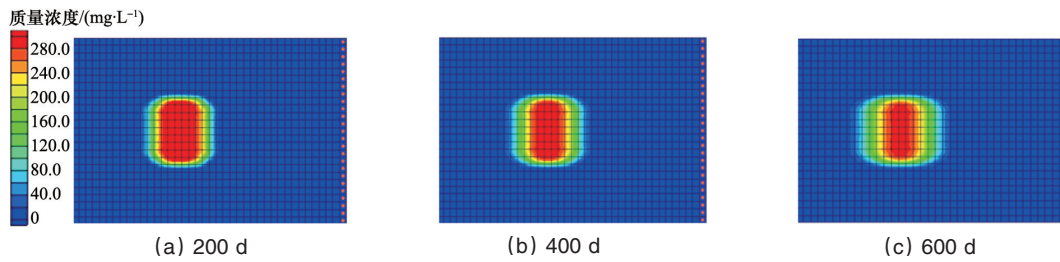


图6 未受抽压水井扰动,帷幕工程内部不同天数溶解态污染物迁移

Fig. 6 Contaminant transport in dissolved state after different days in the curtain project without disturbance of pumping wells

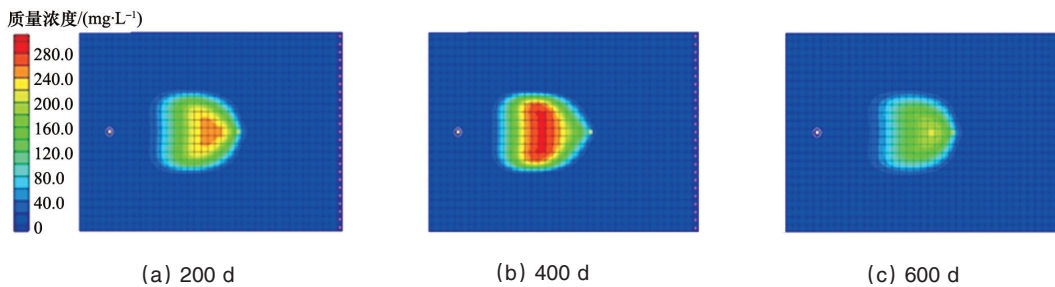


图7 受抽压水井扰动,帷幕工程内部不同天数溶解态污染物迁移

Fig. 7 Contaminant transport in dissolved state after different days in the curtain project under disturbance of pumping wells

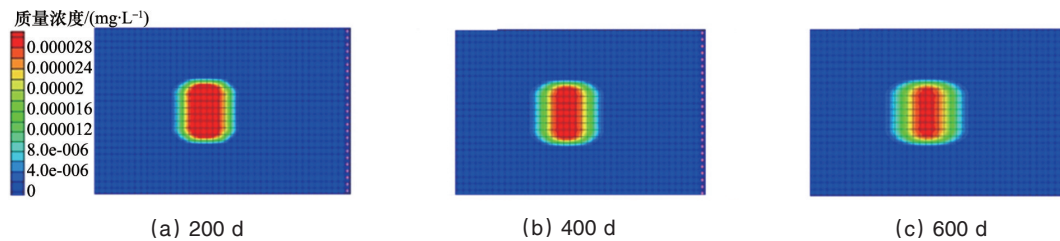


图8 未受抽压水井扰动,帷幕工程内部不同天数凝固态污染物迁移

Fig. 8 Contaminant transport in solidified state after different days in the curtain project without disturbance of pumping wells

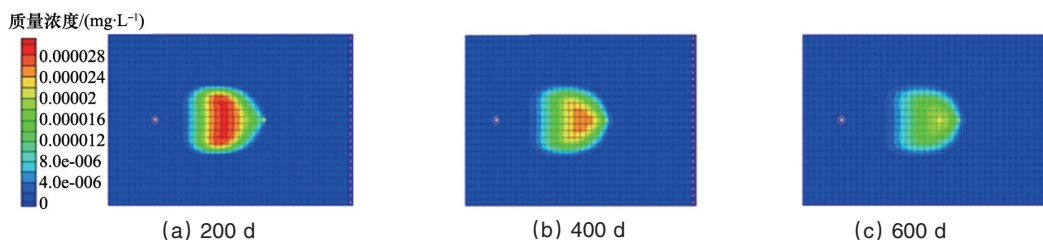


图9 受抽压水井扰动,帷幕工程内部不同天数凝固态污染物迁移

Fig. 9 Contaminant transport in solidified state after different days in the curtain project under disturbance of pumping wells

图10为帷幕工程内部观测点1污染物质量浓度,由图可知,抽压水井对研究区中的溶解态和凝固态重金属污染物的吸附范围和稀释强度起到了一定的扰动效果。无抽压水井扰动时,观测点1的污染物质量浓度线性缓慢下降,而抽压水井的扰动使污染物质量浓度呈指数快速下降,200 d时溶解态污

染物质量浓度由300 mg/L降为255 mg/L,凝固态污染物质量浓度由 $30 \times 10^{-6}$  mg/L降为 $25.5 \times 10^{-6}$  mg/L。通过对观测点1污染物质量浓度变化值的横向和纵向对比,发现抽压水井的扰动增强了地下水的流动性,加快和加强了注浆工程中重金属污染物被稀释和被吸附的速度。

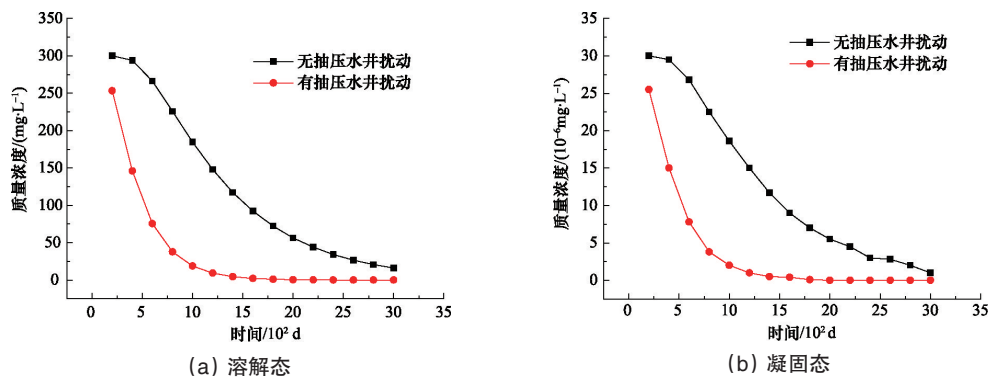


图10 帷幕工程内部观测点1 污染物质量浓度

Fig. 10 Mass concentration of contaminants at observation site 1 in the curtain project

### 3 结论

1) 在地下水渗流规律作用下,帷幕工程能有效地阻滞污染物的扩散,降低污染物扩散半径。污染物沿地下水渗流方向的运移距离由900 m减少到465 m,外部观测点污染物质量浓度由2.800 mg/L降低到1.420 mg/L,内部观测点质量浓度范围由3.249~6.293 mg/L降为0.333~0.413 mg/L。

2) 从长期效应看,抽压水井加大了该区域的地下水量,增强了地下水流动性,提升了渗流速度,使污染物被稀释效果得到了显著增强。

3) 帷幕工程对重金属的吸附和阻止作用受很多因素的影响,在不考虑生物降解、吸附性、材料强度和硬度等物化特性的情况下,结合外部抽压水井的扰动和地下水渗流规律对重金属污染物的扩散进行模拟分析,对合理设计帷幕工程,防止污染物的扩散起到一定作用。

#### 参考文献(References)

[1] Miller C W, Benson L V. Simulation of solute transport in a chemically reactive heterogeneous system: Model development and application[J]. *Water Resource*, 1993, 19(2): 381-391.

[2] Yeh G T, Tripathi V S. A critical evaluation of recent development in hydro geochemical transport model of reactive multichemical components[J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(1): 93-108.

[3] Kookana R S, Naidu R, Tiller K G. Sorption non-equilibrium during cadmium transport through soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(4): 635-651.

[4] Gerritse R G. Dispersion of cadmium in columns of saturated sandy soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 1344-1349.

[5] 陈永贵, 邹银生, 张可能, 等. 重金属污染物在黏土固化注浆帷幕中的运移规律[J]. *岩土力学*, 2007, 8(5): 2583-2588.

Chen Yonggui, Zou Yinsheng, Zhang Keneng, et al. Heavy metals transport process through clay-solidified grouting curtain in waste landfills[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 2583-2588.

[6] 陈永贵, 贺勇, 周星志, 等. 压实膨润土工程屏障对重金属污染物的阻滞[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(10): 4038-4042.

Chen Yonggui, He Yong, Zhou Xingzhi, et al. Retention of heavy metal ion on engineering barriers of compacted bentonites[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(10): 4038-4042.

[7] 邓飞跃, 张可能, 杨明. 黏土固化注浆帷幕对有害物质的阻滞作用[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2000, 31(12): 524-527.

Deng Feiyue, Zhang Keneng, Yang Ming. Harmful substances capability of clay-solidified grouting curtain by columnites[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2000, 31(12): 524-527.

- [8] 龙晓燕, 胡中雄. 垂直隔离工程控制污染物运移的应用研究[J]. *工程勘察*, 2000(1): 8-12.
- Long Xiaoyan, Hu Zhongxiong. Application of vertical barriers to prevent the transport of pollutants in soil[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2000(1): 8-12.
- [9] 许增光. 地下水有机物和重金属迁移与污染修复的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- Xu Zengguang. Organics and remediation simulation study of heavy metal migration and numerical groundwater[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [10] 陈永贵, 邹银生, 张可能. 黏土固化注浆帷幕控制重金属污染物运移的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2006, 27(10): 31-34.
- Chen Yonggui, Zou Yinsheng, Zhang Keneng. Numerical simulation of heavy metal cautions transport controlled by clay-solidified grouting curtain in landfills[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 31-34.
- [11] 陈云敏, 叶肖伟, 张民强, 等. 多场耦合作用下重金属离子在黏土中的迁移性状试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(12): 6-10.
- Chen Yunmin, Ye Xiaowei, Zhang Minqiang, et al. Experimental study on heavy metal ion transport in clay under coupled flows[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(12): 6-10.
- [12] 张可能, 田庆余, 邓飞跃, 等. 土柱实验研究黏土固化注浆帷幕的阻滞性能[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2004, 35(3): 473-477.
- Zhang Keneng, Tian Qingyu, Deng Feiyue, et al. Retardation capability of clay-solidified grouting curtain by columnites[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2004, 35(3): 473-477.
- [13] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论与模型[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- Chen Chongxi, Li Guomin. Groundwater and solute transport model theory[M]. Wuhan: Geosciences Press University of China, 1996.
- [14] 陈 Y G, 张 K N, 邹 Y S, et al. Removal of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  by adsorption on clay-solidified grouting curtain for waste landfills[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2006, 13(2): 166-170.
- [15] 郑春苗, Bennett G D. 地下水污染物迁移模拟[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- Zheng Chunmiao, Bennett G D. Applied contaminant transport modeling[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

(责任编辑 王媛媛)