低渗透污染土水动力弥散参数试验研究

李 磊[1]，朱 伟[2]，屈 阳[2]，包建平[2]

（1. 河海大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210098；2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心，江苏 南京 210098）

摘 要：污染土的治理中通常采用降低渗透性的措施来控制其二次污染。通过获得其水动力弥散参数可以对其二次污染进行评价和预测，但是现有的土柱试验以及求解方法不适用于低渗透污染土水动力弥散参数的测定和求解。针对低渗透污染土水动力弥散参数试验和求解的问题，提出采用改进的柔性壁渗透仪测定其污染物的穿透曲线，根据所获得的穿透曲线，采用数值反演的方法计算污染土的水动力弥散参数。结果表明，采用柔性壁渗透仪和数值反演的方法，能够满足低渗透污染土水动力弥散参数测定的需要。

关键词：低渗透；污染土；水动力弥散；重金属

中图分类号：TU411 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2011)08－1308－05

作者简介：李 磊(1976－)，男，河南信阳人，副教授，从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: dr.lilei@163.com。

Experiment study on hydrodynamic dispersion parameters for contaminated soil with low permeability

LI Lei[1], ZHU Wei[2], QU Yang[2], BAO Jian-ping[2]

(1. College of Earth Sciences and Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China; 2. State Engineering Research Center of Efficient Utilization of Water Resources and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: The secondary pollution of contaminated soil can be controlled by permeability reduced and evaluated by obtained hydrodynamic dispersion parameters. It is impossible to obtain hydrodynamic dispersion parameters of contaminated soil with low permeability by the existing column tests and methods. To solve the above problem, the breakthrough curve is obtained by the improved flexible wall permeameter. Based on the breakthrough curve, the hydrodynamic dispersion parameters of contaminated soil can be calculated by numerical inversion. The results show that the hydrodynamic dispersion parameters of contaminated soil with low permeability can be determined by means of the flexible wall permeameter and numerical inversion method.

Key words: low permeability; contaminated soil; hydrodynamic dispersion; heavy metal

0 引 言

随着经济的发展，环境污染已经从水、大气逐步向土壤转移，近年来关于污染土的研究正日益受到重视。关于受污染土体以及各种含有污染物固体废弃物物理力学性质的研究正成为环境岩土工程研究中的热点问题之一[1-3]。

另一方面，对污染土以及污染土治理后的二次污染评估问题也引起了人们的重视。美国是最早开展污染土环境污染评估的国家，EPA 通过建立 TCLP 试验程序来评价和鉴定其二次污染，现在各国也大多参考美国 EPA 标准来制定本国相应的标准。这种评价方法实际上是一种静态试验方法，仅仅能够在一定的土水比、一定的溶媒以及一定的振荡频率、时间条件下获得污染物的浸出量[4-5]。而实际条件下污染土中污染物的浸出一个长期动态变化的过程，污染物会随着水流状态、周围介质的理化性质等不断变化[6]。目前研究污染物的长期迁移扩散过程普遍采用对流－扩散模型进行模拟，采用该模型研究污染物迁移扩散的前提是获得介质的水动力弥散参数[7]。

目前关于水动力弥散参数的研究主要通过示踪剂模型，采用土柱试验来实现[8]。而该方法适用的前提条件有：①该试验将土柱视为半无限体（试样的长度至少大于 3 倍直径）；②土柱中一般不含所研究的污染物，添加示踪剂作为所对应的污染物研究其在土柱中

基金项目：国家自然科学基金项目（50808068）；教育部博士点基金项目（200802941001）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2010B25714）

收稿日期：2010－06－09

的迁移过程。但是对于污染土而言，上述两个前提条件均难以成立：首先为了保证污染土中污染物能够得到稳定，在污染土治理中通常采用各种技术手段降低其渗透性[9]，如果采用能视为半无限体的土柱试验，试验的时间势必大大增加并存在侧漏的可能性;其次，污染土自身已含有污染物，如果采用在渗透水流中再加入所研究的污染物,污染物的迁移过程将十分复杂，采用现有的理论解和数值解都会存在求解困难。因此，采用现有的示踪剂模型和土柱试验对于低渗透污染土水动力弥散参数的求解存在一定的难度，需要研究新的试验方法以满足污染土二次污染评价的需要。

针对常规的土柱试验以及示踪剂模型存在的试验周期长和求解困难的问题，对柔性壁渗透仪的水头控制系统进行完善，研制了一套能测定低渗透性污染土水动力弥散参数的试验装置，通过使用蒸馏水作为淋滤液，避免了加入示踪剂导致的求解困难问题。

1　污染土的制备

城市污水厂产生的污泥含有大量的重金属、有机污染物以及病原菌，随意弃置已经引发的严重的环境问题，通过固化/稳定化技术改善其物理力学性质、降低其透水性以及稳定其中污染物将其转化为污泥固化土是污泥处理的途径之一。污泥固化土是一种典型的低渗透污染土，再生资源利用过程需要开展其二次污染的评价工作[10]。

试验所用的污泥取自某污水处理厂脱水污泥，对污泥进行固化/稳定化处理所用的添加剂为疏浚淤泥和普通硅酸盐水泥。未经处理的污泥和淤泥基本指标如表 1 所示。从表 1 中可以看出，污泥是一种高含水率、高液限、高有机质并含有较多重金属的废弃物。

选择的固化/稳定化方案为 5∶1∶1,5∶1∶2,5∶1∶3，5∶0.5∶2，5∶2∶2，5∶3∶2（污泥:水泥:淤泥的质量比),按照上述质量比首先将淤泥掺入污泥当中，充分搅拌均匀后，再加入水泥进行搅拌，制成直径 10 cm、高度 5 cm 的试样，置于恒温恒湿箱养护至试验龄期。

2　低渗透污染土水动力弥散数学模型

假定土柱中均匀分布有污染土，在连续注入淋滤液（蒸馏水）的条件下，测定同一时间沿土柱污染物浓度的分布或某一点污染物浓度随时间的变化关系，即可获得其水动力弥散参数。数学模型可以表示为

$$\left.\begin{aligned} &R_d\frac{\partial C}{\partial t}=D_L\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-v\frac{\partial C}{\partial x}\ , \\ &C(x,0)=C_0 \qquad (x\ge 0)\ , \\ &C(0,t)=0 \qquad (t\ge 0)\ , \\ &C(\infty,t)=C_0 \qquad (t\ge 0)\ , \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中，C 为污染物在介质中的浓度，v 为渗透速度，D_L 为弥散系数，$D_L=\alpha_L v$，α_L 为纵向弥散度，C_0 为污染物的初始浓度，R_d 为阻滞系数。

假定上述土柱为半无限体，则式（1）的解析解可表示为

$$\frac{C(x,t)}{C_0}=1-\left\{\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left[\frac{x-\frac{v}{R_d}t}{2\sqrt{D_L t/R_d}}\right]+\frac{1}{2}\exp\left(\frac{vx}{D_L}\right)\mathrm{erfc}\left[\frac{x+\frac{v}{R_d}t}{2\sqrt{D_L t/R_d}}\right]\right\}。 \tag{2}$$

在试验柱的底端定期测定流出的污染物的浓度，通过式（2）可以获得污染土中不同类型污染物的穿透曲线，计算得到污染物的阻滞系数和弥散系数。

但是从式（2）中可以看出，其存在解析解的前提条件是假定试验柱为半无限体，这势必需要在试验中增加试验柱的长度，对于低渗透污染土而言，试验的周期会很长，或可能产生侧壁渗漏的问题，不便于实际应用。因此需要缩短试验柱的长度，将其视为有限长的柱体。假定试验柱的长度为 L，其描述其污染物运移的对流扩散方程可以表示为

$$\left.\begin{aligned} &R_d\frac{\partial C}{\partial t}=D_L\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-v\frac{\partial C}{\partial x}\ , \\ &C(x,0)=C_0 \qquad (0\le x\le L)\ , \\ &C(0,t)=0 \qquad (t\ge 0)\ , \\ &C(L,t)=C_0 \qquad (t\ge 0)\ 。 \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式（3）不存在解析解，通过试验获得污染物的穿透曲线后，需要采用数值反演方法才能获得污染物迁移扩散的弥散参数和阻滞系数。反演方法常常采用单纯形法、变尺度法、脉冲谱法、可变容差法等等，为了避免多参数反演中陷入局部最优解的困难，本文采用遗传算法(GA)作为优化方法来反演系统参数，理论上遗传算法反演的参数个数是不受限制的，而且可以避免陷入局部最优。遗传算法是建立在种群遗传学和自然选择机理上的随机搜索和进化过程，遗传算法利用概率论的随机摄动直接实现目标函数的优化而不需要求导，其算法主要过程有编码、确定适应度函数、

表 1　污泥和疏浚淤泥的基本性质指标

Table 1 Basic properties of sludge and dredged silt

泥样	含水率 /%	重度 /(kN m^{-3})	比重	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	有机质 /%	Cu /(mg·kg^{-1})	Zn /(mg·kg^{-1})	Cr /(mg·kg^{-1})

污泥	664	10.1	1.61	11.6	380	160	56.29	45	788	257
淤泥	120	13.8	2.74	3.3	73	29	1.39	11	61	54

选择、交叉和变异。水动力弥散参数遗传反演的流程图如图 1 所示，iter 为叠代次数，ε 为收敛精度。

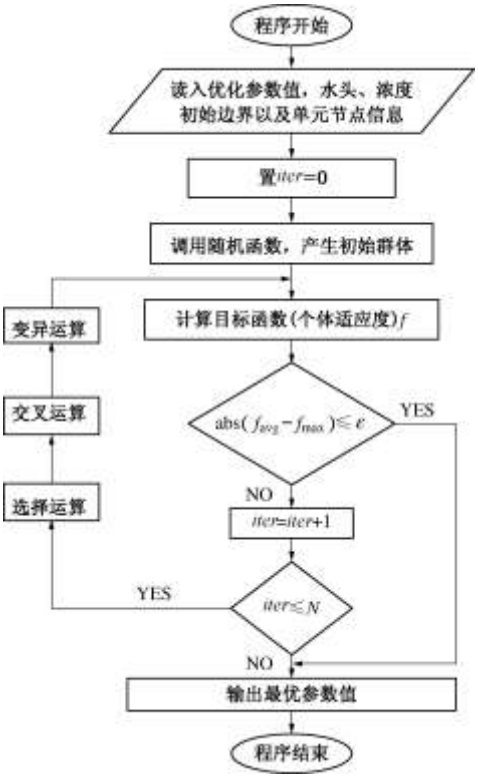

图 1 水动力弥散参数遗传反演流程

Fig. 1 Genetic inversion process of hydrodynamic dispersion parameters

其中，适应度函数形式为

$$f(\theta_j)=\sum_{k=1}^{N}(e_j(k))^2 \quad , \tag{4}$$

式中，$e_j(k)$ 为反演结果的计算误差，N 为计算样点的个数。

为验证上述数值方法的准确性，设计一个可以用式（2）表达的污染土污染物浸出的算例：假定高度为 50 cm，直径为 5 cm 的试验柱充满浓度为 2.0 mg/L 的某种溶质，水流速度为 8 cm/d，弥散度为 0.8 cm，阻滞系数为 3.0。采用式（2）获得 x=50 cm 处污染物浓度随时间变化过程，将该过程作为待拟合点，预先给定待反演参数的取值范围：$\alpha_L \in [0.0,1.0]$，$R_d \in [0.0,10.0]$。反演的参数 α_L=0.78 cm，R_d＝3.06，本文所提供的反演方法可以满足求解水动力弥散参数的需要。

3 试验装置及方案

根据所建立的低渗透污染土水动力弥散数学模型，设计了测定其水动力弥散参数的试验装置。试验装置参考了美国材料实验协会（ASTM）关于渗透试验的方法以及柔性壁渗透仪装置[11-12]。

柔性壁渗透仪的结构如图 2 所示。试样置于气密性良好的有机玻璃圆筒内，圆筒内充满氮气并维持一定的压力，压力的调节采用二级调压阀，根据 Moo-Young 等[13]的研究试验中气压取 30 kPa；试样外包裹一层橡皮膜，膜内排除空气后在圆筒内气压的作用下将紧紧的包裹住试样，以防止侧渗；采用马氏瓶维持淋滤液（蒸馏水）处于定水头状态（1.0 m），以保证渗透流速的恒定；淋滤液由下而上经过试样，收集淋滤液分析其成分，获得淋滤液的穿透曲线；每一个柔性壁渗透仪为一个单元，采用串联方式将若干个柔性壁渗透仪连接起来，采用一套加压装置施加相同的气压；每个单元单独收集渗滤液分析成分。

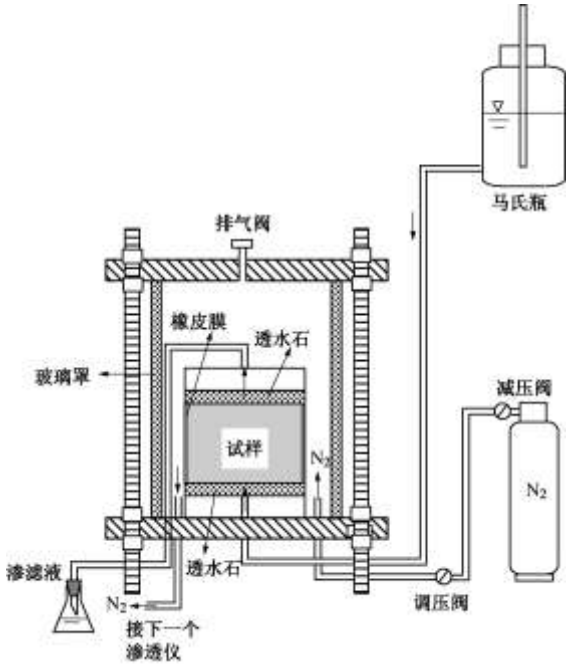

图 2 柔性壁渗透仪结构示意图

Fig. 2 Structure of flexible-wall permeameter

为了获得污染物的初始浓度，将试样抽真空饱和后置于离心机中采用 6000 rpm 的转速进行离心分离，采用 AAA320CRT 原子吸收分光光度计测定重金属浓度，将进行离心分离后的试样再次进行抽真空饱和，再次离心分离，孔隙水中的重金属浓度基本已经检测不到，因此可以将污泥固化土抽真空饱和后孔隙水中重金属的浓度作为污染物的初始浓度。

4 试验结果

根据不同时间收集的渗滤液中重金属浓度的变

化，采用数值反演方法计算出的水动力弥散参数如表 2 所示。采用反演出的水动力弥散参数计算出的重金属浓度随时间变化关系与实测值对比如图 3 所示。从图表可以看出：

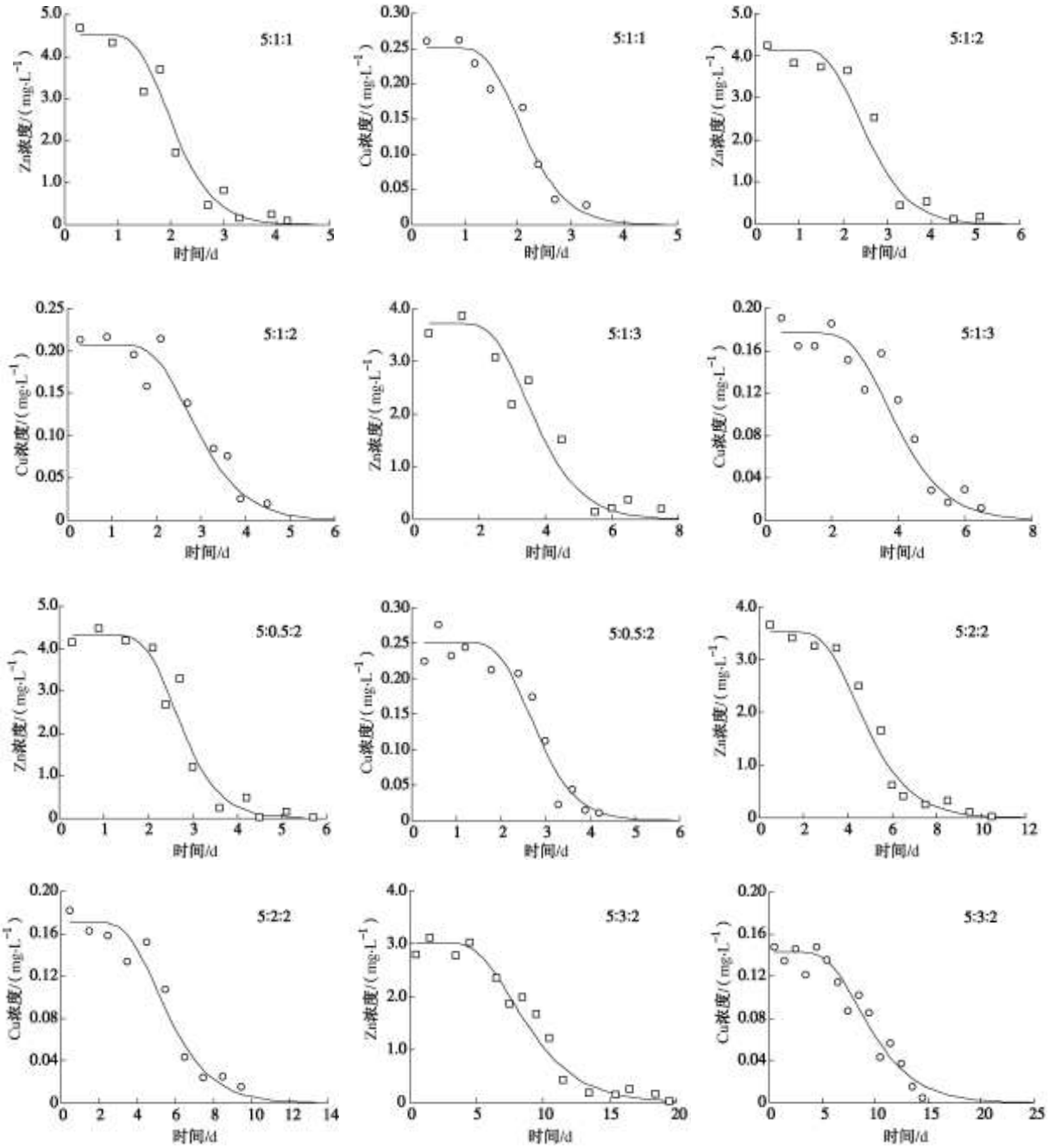

图 3 污泥固化土重金属穿透曲线计算值与实测值比较

Fig. 3 Comparison of heavy metal breakthrough curves between calculated and measured values for solidification sludge

（1）采用柔性壁渗透仪获得污染土中污染物的浸出浓度，根据实测的污染物浓度值采用数值反演的方法能够获得污染土的水动力弥散参数。

（2）水动力弥散参数中的弥散度与介质性质有关，阻滞系数与污染物的种类以及介质性质相关，表中计算所获得的水动力弥散与这一规律相吻合。

（3）弥散度明显受水泥掺入量影响，受淤泥掺入量的影响小，而阻滞系数则相反。这主要是污泥固化土的水动力性质受水泥控制更为显著；淤泥中的黏土矿物对重金属有显著吸附效应，因此阻滞系数变化大。

（4）采用采用数值方法计算获得的污染物穿透曲线与污染物浸出浓度实测值变化趋势一致。

表 2 污泥固化土水动力弥散参数

Table 2 Hydrodynamic dispersion parameters of solidification sludge

试 样	弥散度/cm		阻滞系数	
	Cu	Zn	Cu	Zn
5∶1∶1	0.081	0.082	11.2	10.8
5∶1∶2	0.082	0.084	14.2	12.3

5∶1∶3	0.084	0.084	16.4	15.3
5∶0.5∶2	0.062	0.061	13.8	11.8
5∶2∶2	0.107	0.109	15.3	13.2
5∶3∶2	0.131	0.130	15.7	14.4

5 结 论

（1）对于低渗透污染土，难以采用常规的土柱试验和计算方法获得其水动力弥散参数，需要对试验仪器和求解方法进行改进。

（2）采用改进的柔性壁渗透仪测定低渗透污染土水动力弥散参数，避免了侧壁渗漏问题，能够在较短的试验周期内获得污染土中污染物的穿透曲线。

（3）由于低渗透污染土试样尺寸的限制，因此其水动力弥散参数的求解不存在解析解，需要根据试验所获得的穿透曲线，采用数值反演方法求解其水动力弥散参数。

（4）本研究中污泥固化土抽真空饱和后的浓度能够代表污染物的初始浓度，但是对于其它存在污染物解析等现象的污染土，其初始浓度难以确定因此需要对本论文的计算模型进行改进才能计算其水动力弥散参数。

参考文献：

[1] 刘汉龙，朱春鹏，张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报，2008，**30**(8)：1213－1217. (LIU Han-long, ZHU Chun-peng, ZHANG Xiao-lu. Fundamental physical properties of soil polluted by acid and alkali in laboratory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 1213－1217. (in Chinese))

[2] 刘汉龙，朱春鹏，张晓璐. 酸碱污染土压缩特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1477－1483. (LIU Han-long, ZHU Chun-peng, ZHANG Xiao-lu. Laboratory tests on compression characteristics of soil polluted by acid and alkali[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1477－1483. (in Chinese))

[3] 李 磊，朱 伟，吉顺健，等. 微生物对固化/稳定化污泥长期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报，2008，**30**(12): 1778－1782. (LI Lei, ZHU Wei, JI Shun-jian, et al. Influence of micro-organism on long-term strength of solidified/stabilized sludge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1778－1782. (in Chinese))

[4] CHANG E E, CHIANG P C. Comparisons of metal leachability for Various wastes by extraction and leaching methods[J]. Chemosphere, 2001, **45**: 91－99.

[5] BILGE A, MEHMET A Y. Remediation of lead contaminated soils by stabilization/solidification[J]. Water Air Soil Pollut, 2002, **133**: 253－263.

[6] 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): 1371－1375. (CHEN Yun-min, YE Xiao-wei, ZHANG Min-qiang, et al. Experimental study on heavy metal ion transport in clay under coupled flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1371－1375. (in Chinese))

[7] 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，**28**(12): 2583－2588. (CHEN Yong-gui, ZOU Yin-sheng, Zhang Ke-neng, et al. Heavy metals transport process through clay-solidified grouting curtain in waste landfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(12): 2583－2588. (in Chinese))

[8] 陈崇希，李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 武汉：中国地质大学出版社, 1996. (CHEN Chong-xi, LI Guo-min. Theory and model of groundwater solute transport[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996. (in Chinese))

[9] GOUGAR MLD, SCHEETZ BE, ROY DM. Ettringite and c-s-h Portland cement phases for waste ion immobilization: A review[J]. Waste Management, 1996, **16**(4): 295－303.

[10] 李 磊. 污泥固化处理技术及重金属污染控制研究[D]. 南京：河海大学，2006. (LI Lei. Study on sludge solidification technology and heavy metal pollution control[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))

[11] ASTM D-5084, Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter[S]. 1996.

[12] 朱 伟，李 磊，林 城. 生物与化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(6): 933－938. (ZHU Wei, LI Lei, LIN Cheng. Biochemical effects on permeability of solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(6): 933－938. (in Chinese))

[13] MOO-YOUNG H K, ZIMMIE T F. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(9): 768－774.