

# 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式

詹良通<sup>1</sup>, 刘 伟<sup>1, 2</sup>, 曾 兴<sup>1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663)

**摘 要:** 为了解中国第一代垃圾填埋场中防渗帷幕的服役性能及其影响因素, 以苏州七子山填埋场地质条件为例, 以 COD 作为代表性污染物, 在前期现场勘查基础上建立了有限差分计算模型, 对防渗帷幕被污染物击穿时间的影响因素进行了计算分析, 并基于 Ogata 解析解给出了防渗帷幕击穿时间和设计厚度的简化计算公式。模拟和分析结果表明: 场地地质条件对嵌入式防渗帷幕击穿时间影响不十分显著; 帷幕上下游水头差、帷幕渗透系数、阻滞因子和厚度对嵌入式防渗帷幕的击穿时间有显著影响, 击穿时间与上下游水头差、帷幕渗透系数、阻滞因子、以及帷幕厚度的平方近似呈线性关系; 扩散系数对嵌入式防渗帷幕击穿时间的影响不可忽略。

**关键词:** 垃圾填埋场; 竖向防渗帷幕; 击穿时间; 设计厚度; 水头差

**中图分类号:** TU47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2013)11-1988-09

**作者简介:** 詹良通 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程等方面的教学与科研工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

## Parametric study on breakthrough time of vertical cutoff wall for MSW landfills and simplified design formula for wall thickness

ZHAN Liang-tong<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1, 2</sup>, ZENG Xing<sup>1</sup>, CHEN Yun-min<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Guang

Dong Electric Power Design Institute, China Enrgy Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** In order to investigate the performance of vertical cutoff wall for a simple dump landfill, a finite difference model is set up on the basis of the geological condition of the Qizishan landfill in Suzhou. The breakthrough time of vertical cutoff wall by the contaminant of COD is analyzed considering different materials and design parameters. The parametric study shows that cross hydraulic head, wall permeability, retarding factor and design thickness are the primary parameters to affect the breakthrough time of the cut off wall being keyed into an aquitard layer. The effect of geological condition on the keyed-in cut off wall is relatively insignificant. The influence of diffusion coefficient can not be neglected, especially for the condition of low cross hydraulic head.

**Key words:** landfill; vertical cutoff wall; breakthrough time; wall thickness; hydraulic head difference

## 0 引 言

中国约有 90%的生活垃圾采用填埋方式处理, 其中仅有 56%达到无害化标准<sup>[1]</sup>。第一代填埋场大多建成于 20 世纪 90 年代, 这些填埋场场底缺少完善的渗滤液导排和人工防渗衬垫系统, 主要依靠天然土层及在下游设置的竖向防渗帷幕作为污控措施。另外, 在一些老填埋场和污染场地污控治理项目中也大量采用竖向帷幕作为防污屏障和措施<sup>[2]</sup>。填埋场中常见的防渗帷幕形式有多种, 各国常用的帷幕形式也不尽相同, 如美国普遍采用黏土-膨润土材料的竖向帷幕<sup>[2]</sup>; 德国、英国等欧洲国家更多采用水泥-膨润土材料的竖

向帷幕<sup>[3-4]</sup>; 日本较多采用深层搅拌法获得土-膨润土掺合料竖向帷幕<sup>[5-6]</sup>及钢板桩竖向帷幕<sup>[7]</sup>; 而中国填埋场中采用较多的是塑性混凝土竖向帷幕。

防渗帷幕在填埋场中有广泛的应用, 但是对于防渗帷幕服役性能, 特别是服役寿命的研究仍较少。目前国内外关于防渗帷幕的研究主要集中于帷幕材料特性和对比对防渗性能影响的实验研究, 获得了不同材料类型 (如土-膨润土、水泥-膨润土、掺加矿渣材

**基金项目:** 国家高新技术发展计划 (863) 计划项目 (2012AA062601);

国家自然科学基金重大国际合作项目 (51010008)

**收稿日期:** 2012-12-04

料的水泥-膨润土、塑性混凝土等)帷幕的渗透性能、与污染物的长期相容性以及实际防渗效果<sup>[3-6, 8-11]</sup>。也有少数学者研究了防渗帷幕击穿时间的影响因素, Neville 等<sup>[12]</sup>研究结果表明污染物在墙内的运移与竖向帷幕外侧污染物浓度、达西渗流密切相关; Philip<sup>[13]</sup>研究发现即使在水头较低(水力梯度  $i=1$ )时, 对流仍然是污染物运移通过竖向帷幕的主导因素; 张文杰等<sup>[14]</sup>研究苏州七子山填埋场竖向防渗帷幕厚度、渗透系数、设计深度对污染物迁移扩散的影响时, 发现在高水头条件下, 对流是污染物运移的主导作用, 而帷幕渗透系数和深度对防止污染物向下游土体渗漏极为关键; 王艳明等<sup>[15]</sup>分析了苏州七子山填埋场防渗帷幕在加固前和加固后的阻隔性能, 论证了老场防渗帷幕加固所需要的最小厚度。上述研究尚没有深入系统地分析各因素(如水头、帷幕渗透系数和厚度、地层渗透性能、扩散作用等)对防渗帷幕击穿时间的影响规律。另外, 目前工程界缺少竖向帷幕服役寿命的评估方法。

本文针对苏州七子山填埋场一期工程的竖向防渗帷幕及地质条件, 基于前人调查研究和实测数据, 借助污染物地下运移数值分析软件 GMS, 分析了水头差、帷幕渗透系数和厚度对防渗帷幕击穿时间的影响, 在此基础上利用 Ogata 等<sup>[16]</sup>提出的污染物一维运移解析解, 获得了防渗帷幕击穿时间和设计厚度的简化计算公式, 为同类工程中竖向帷幕设计提供参考。

1 填埋场概况

苏州七子山填埋场一期工程 1993 年正式投入运行, 设计使用年限为 15 a, 容纳垃圾  $4.70\times10^6\text{ m}^3$ , 是一个典型的山谷型填埋场, 如图 1 所示。场地地质条件如图 2 所示, 其中未风化基岩可认为是相对隔水层。帷幕下游地下水位埋深为 1~2 m, 上游垃圾堆体内水头达到十多米<sup>[14, 17-18]</sup>, 超过规范中 0.3 m 的要求。一期工程没有水平衬垫系统, 其主要防渗措施为塑性混凝土竖向帷幕和帷幕灌浆。上覆土层中采用塑

性混凝土竖向帷幕, 厚度 0.8 m, 材料由水泥、膨润土、砂、碎石等组成; 风化基岩中采用帷幕灌浆, 材料为水泥黏土浆液, 帷幕的设计防渗标准为渗透系数  $k<1\times10^{-6}\text{ cm/s}$ <sup>[14]</sup>。

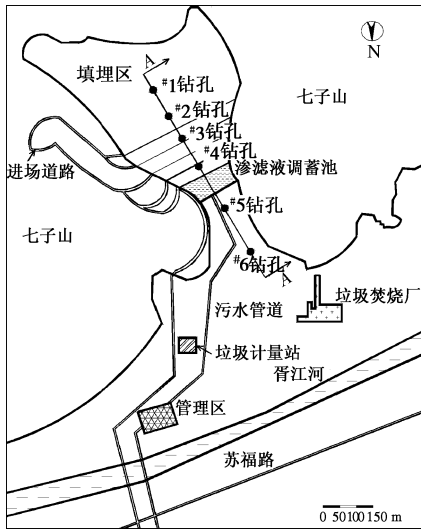


图 1 苏州七子山填埋场钻孔平面布置图

Fig. 1 Layout of boreholes at Qizhishan landfill in Suzhou

笔者及同事于 2006 年 3 月在现场钻孔取样测试, 调查污染物扩散情况及分布范围。钻孔取样平面布置和剖面如图 1, 2 所示, 其中帷幕下游 2 个钻孔主要为了分析下游土体的污染情况, #5 钻孔深度约 6 m, #6 钻孔深度约 20 m<sup>[18-20]</sup>。

#6 钻孔位于竖向帷幕下游, 距离帷幕约 200 m, 测试结果表明该钻孔孔隙水中 COD 浓度随深度变化不大, 考虑到浅层土可能受到人为因素的影响, 选择 5 m 以下土样孔隙水中 COD 浓度作为该场地背景值, 约为 1030 mg/L<sup>[18-20]</sup>。#5 钻孔距离截污坝约 18 m, 测试结果表明浅层 5 m 深度内土体孔隙水中 COD 浓度超过背景值, 说明浅层受到一定程度污染; 而深层土体孔隙水中 COD 浓度接近背景值<sup>[18-19]</sup>。造成这种现象可能有两种原因, 一是防渗帷幕被污染物击穿, 污染物已经迁移到下游土体中; 二是调蓄池中渗滤液偶

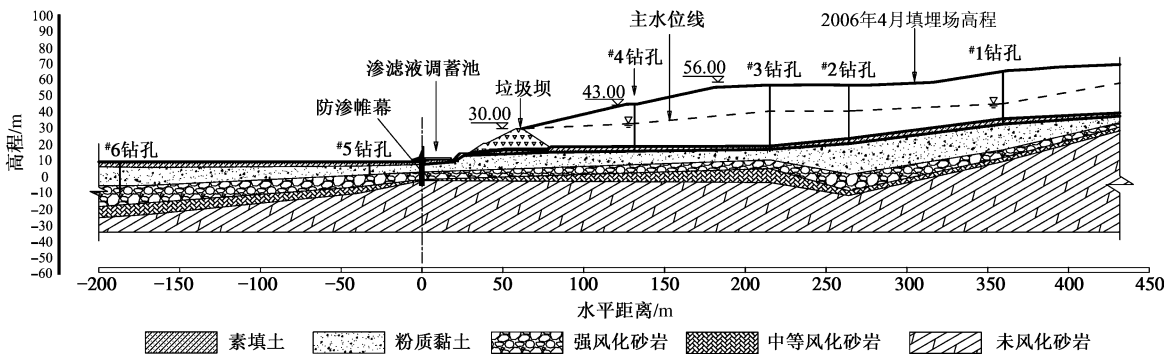


图 2 苏州七子山填埋场钻孔剖面图

Fig. 2 Cross section of boreholes at Qizhishan landfill in Suzhou

尔外溢引起下游表层土体污染。本文通过数值分析鉴别了造成此现象的原因,为防渗帷幕的防污效果评估提供了依据。

2 防渗帷幕击穿时间影响因素分析

2.1 污染物运移控制方程及数值分析软件

分析采用 GMS 软件的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块进行。MODFLOW 是一个地下水渗流的三维有限差分法分析模块,可以进行饱和土层中地下水渗流分析,获得渗流速度和渗流场分布;而 MT3DMS 是污染物运移的三维有限差分法分析模块,在 MODFLOW 计算得到渗流场的基础上,进行污染物运移分析。

McDonald 等<sup>[21]</sup>给出的地下水渗流的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t}。$$
(1)

式中  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$  分别为在  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向上的渗透系数,假定渗透系数的主轴与坐标轴平行; $h$  为测压管总水头; $W$  为单位体积流量,代表源/汇项; $S_s$  为多孔介质的储水系数; $t$  为时间。 $S_s$  和渗透系数  $k$  为  $x$ ,  $y$ ,  $z$  的函数,而  $W$  是空间和时间的函数。

Zheng 等<sup>[22]</sup>给出污染物运移的控制方程为

$$\frac{\partial(nC_k)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(nD_{ij}\frac{\partial C_k}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(nv_{si}C_k)+q_sC_{sk}+\sum R_n。$$
(2)

式中,  $n$  为孔隙率;  $C_k$  为溶解在地下水中污染物  $k$  的浓度;  $D_{ij}$  为水力弥散系数;  $q_s$  为单位体积土层的体积流量,流入为正,流出为负;  $C_{sk}$  为流入或流出的污染物浓度;  $\sum R_n$  为各类生化反应项;  $v_i$  为渗流速率;  $t$  为时间;  $x_{ij}$  为距离。

2.2 计算模型

本文主要进行污染物穿过防渗帷幕的运移分析,软件以三维有限差分为理论基础,故在  $z$  方向取单位宽度 1 m,建立计算模型如图 3 所示。根据场地实际

情况,在计算中将场地土层简化为 4 层,各土层相关计算参数见表 1。假定截污坝不透水,渗透系数设定为  $1\times10^{-8}\text{ cm/s}$ ;防渗帷幕穿过整个含水层,共 37 m 深,顶端与截污坝密封,底端嵌入到微风化基岩内,嵌入深度 2 m。

渗流计算的边界条件如图 3 所示,帷幕下游为水头边界,按多年平均地下水位控制,底部为不透水边界。该填埋场水位较高,可达到十几米<sup>[14, 17-18]</sup>,为了分析水头差对帷幕性能的影响,计算中考虑了 2 种水头条件:高水头差时,帷幕上下游水头差取 10 m;低水头差时,帷幕上下游水头差取 0.3 m。

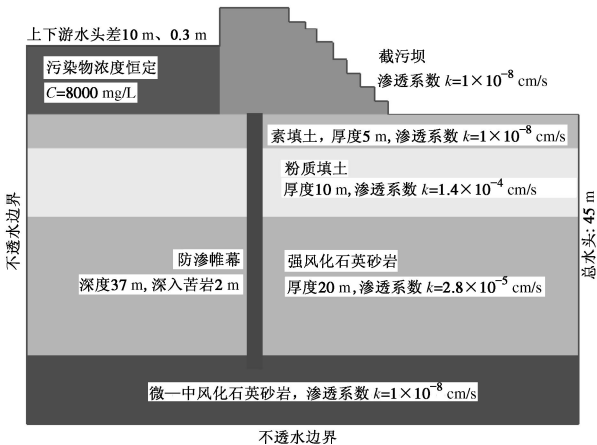


图 3 计算模型

Fig. 3 Computational model

由于该填埋场渗滤液中 COD 浓度较高,本文以 COD 作为代表性污染物进行分析。根据谢海建等<sup>[17-18]</sup>报道的该填埋场底土取样测试结果,防渗帷幕上游污染源设定为恒定浓度,8000 mg/L。参照中国行业标准《生活垃圾填埋场岩土工程技术规范》(CJJ176—2012)中对防渗帷幕厚度设计的有关规定,取帷幕下游边界污染物浓度达到上游边界的 10%作为击穿标准,污染物迁移距离和迁移深度也以 10%相对浓度等势线确定。

表 1 苏州七子山填埋场计算参数

Table 1 Input parameters for analyses of Qizishan landfill in Suzhou

土层	渗透系数 /(cm·s <sup>-1</sup> )	扩散系数 /(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	分布系数 /(mL·g <sup>-1</sup> )	弥散度 /m	孔隙率	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	厚度/m
素填土	8×10 <sup>-4</sup>	6×10 <sup>-10</sup>	1	0.1	0.44	1.5	5
粉质黏土	1.4×10 <sup>-4</sup>	3.5×10 <sup>-10</sup>	3	0.1	0.41	1.6	10
强风化—中风化基岩	2.8×10 <sup>-5</sup>	2.5×10 <sup>-10</sup>	3	0.1	0.35	2.0	20
微—未风化基岩	1×10 <sup>-8</sup>	1.5×10 <sup>-10</sup>	5	0.1	0.20	2.5	10
较差	1×10 <sup>-6</sup>	2.5×10 <sup>-10</sup>	5	0.1	0.35	2.2	0.6, 1.0, 1.6
标准	1×10 <sup>-7</sup>	2×10 <sup>-10</sup>	5	0.1	0.30	2.3	
较好	1×10 <sup>-8</sup>	1.5×10 <sup>-10</sup>	5	0.1	0.30	2.4	
截污坝	1×10 <sup>-8</sup>	2.5×10 <sup>-10</sup>	5	0.1	0.30	2.4	

2.3 计算参数

计算参数如表 1 所示, 包括各材料的渗透系数、孔隙率、干密度、厚度、扩散系数、分布系数、弥散度。其中土层渗透系数、孔隙率、干密度参考现场取样测试结果; 扩散系数、分布系数参考谢海建<sup>[18]</sup>的统计数据, 选择相同或相近土类的试验成果; 纵向弥散度取值参考王洪涛<sup>[23]</sup>的分析, 选择 0.1 m。

为了分析土层渗透系数对帷幕击穿时间的影响, 对上部三个土层渗透系数进行调整, 假定了 3 种不同透水条件的地层, 相关计算参数见表 2。透水条件 I 代表浅层土体透水性较强, 深层土体透水性较弱的情况; 透水条件 II 代表深部有透水性较强土层的情况; 透水条件 III 代表场地土层渗透系数均较小的情况。3 种透水条件的土层渗透系数分别参考上海老港填埋场、北京安定填埋场、安徽淮南填埋场的土层参数。

表 2 不同透水条件及各土层渗透系数

Table 2 Hydraulic permeabilities of soils under different hydrogeological conditions				
土层	厚度 /m	$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		
		透水条件 I	透水条件 II	透水条件 III
素填土	5	$3\times 10^{-5}$	$3\times 10^{-5}$	$3\times 10^{-5}$
粉质黏土	10	$3\times 10^{-4}$	$5\times 10^{-6}$	$5\times 10^{-6}$
强风化—中风化基岩	20	$1\times 10^{-7}$	$3\times 10^{-4}$	$3\times 10^{-7}$

2.4 计算工况

本文计算工况如表 3~5 所示, 分析了水头、帷幕渗透系数和厚度、土层渗透系数以及扩散系数变化对防渗帷幕击穿时间的影响。其中表 3 分析不同水头、帷幕渗透系数和厚度对防渗帷幕击穿时间的影响; 表 4 分析高低两种水头下 (10, 0.3 m), 3 种不同透水条件的地层对帷幕击穿时间的影响, 帷幕渗透系数设定为  $1\times 10^{-7}\text{ cm/s}$ , 厚度为 1 m; 表 5 分析高水头 (10

表 3 水头、帷幕渗透系数和厚度对帷幕击穿时间影响计算  
工况及结果

Table 3 Cases and results of analyses for effect of hydraulic head, permeability and width of cutoff wall on breakthrough time				
工况	水头 /m	帷幕渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	厚度 /m	击穿时间/a
Case1	10.0	$1\times 10^{-6}$	0.6	0.97
Case2			1.0	2.38
Case3			1.6	6.16
Case4	0.3	$1\times 10^{-6}$	0.6	32.41
Case5			1.0	75.45
Case6			1.6	177.62
Case7	10.0	$1\times 10^{-7}$	0.6	8.10
Case8			1.0	21.64
Case9			1.6	60.0
Case10	0.3	$1\times 10^{-7}$	0.6	214.98
Case11			1.0	479.45
Case12			0.6	73.87
Case13	10.0	$1\times 10^{-8}$	1.0	187.88
Case14			1.6	465.74

表 4 地层透水条件对帷幕击穿时间影响计算工况及结果

Table 4 Cases and results of analyses for effect of hydrogeological condition on breakthrough time of cutoff wall

工况	地层透水条件	水位/m	击穿时间/a
Case15	苏州七子山填埋场实际情况	10.0	21.64
Case16		0.3	479.45
Case17	透水条件 I	10.0	23.05
Case18		0.3	423.63
Case19	透水条件 II	10.0	34.71
Case20		0.3	981.77
Case21	透水条件 III	10.0	38.15
Case22		0.3	983.55

表 5 扩散系数对帷幕击穿时间影响计算工况及结果

Table 5 Cases and results of analyses for effect of diffusion on breakthrough time of cutoff wall

工况	帷幕渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	扩散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	击穿时间/a	扩散作用的影响
Case23	$1\times 10^{-7}$	$10\times 10^{-10}$	21.64	扩散作用有一定程度影响
Case24		$10\times 10^{-9}$	18.50	
Case25	$1\times 10^{-8}$	$10\times 10^{-10}$	187.88	扩散作用影响较显著
Case26		$10\times 10^{-9}$	102.11	

m) 下, 扩散系数变化对帷幕击穿时间的影响, 帷幕渗透系数分别设定为  $1\times 10^{-7}$ ,  $1\times 10^{-8}\text{ cm/s}$  两种情况, 厚度设定为 1.0 m。

3 计算结果及讨论

3.1 高水头条件下帷幕渗透系数对渗流场分布的影响

图 4 显示了高水头下渗流场分布规律, 其中图 4(a)、4 (b)、4 (c) 分别对应于嵌入式防渗帷幕取不同渗透系数的分析结果。

根据达西定律, 流速与渗透系数及水力梯度有关:

$$v_x = ki_x \quad , \quad (3)$$

$$v_y = ki_y \quad 。 \quad (4)$$

式中  $v_x$ ,  $v_y$  分别表示土体中地下水水平方向和垂直方向的渗流速度;  $k$  表示土体的渗透系数, 水平和垂直方向的数值往往不同, 但本文在分析时为简化计算假定两者相同;  $i_x$ ,  $i_y$  分别表示水平和垂直方向的水力梯度。

图 4 (a)、4 (b)、4 (c) 水头等势线分布情况, 当帷幕渗透系数为  $1\times 10^{-6}\text{ cm/s}$  时,  $i_x$  与  $i_y$  相当, 故  $v_x$  与  $v_y$  相当, 帷幕上游地下水呈二维渗流状态; 而当帷幕渗透系数为  $1\times 10^{-8}\text{ cm/s}$  时, 水头等势线主要分布在帷幕内, 而帷幕上游在竖直方向上等势线分布非常稀少, 表明竖向水力梯度很小, 此时  $i_y \ll i_x$ , 故  $v_y \ll v_x$ , 竖向渗流非常微弱, 与水平方向相比可忽略不计。

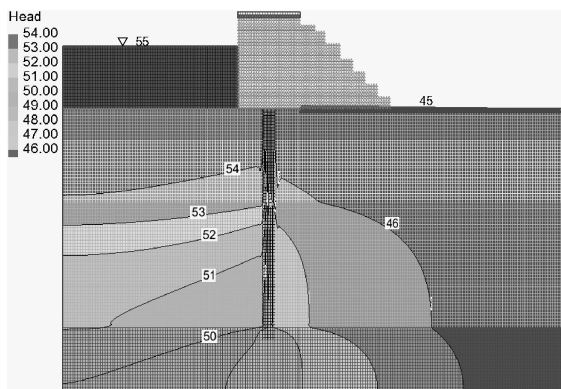
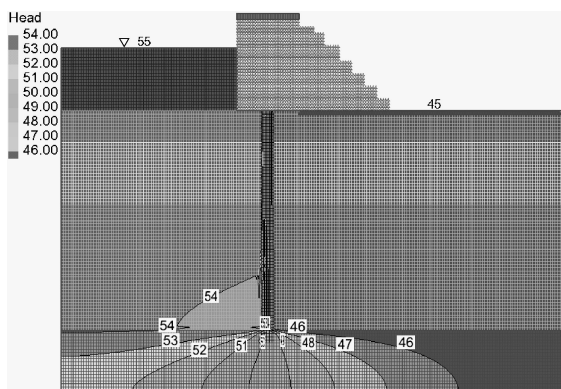
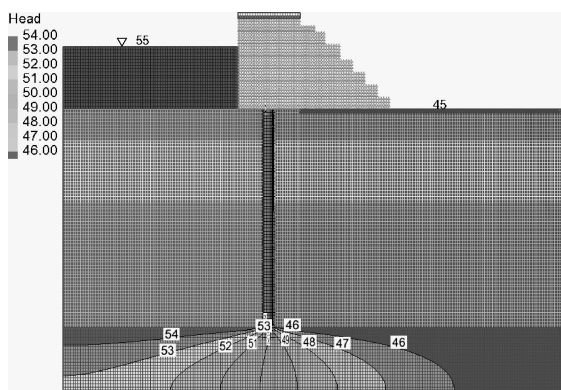
(a) 嵌入式帷幕渗透系数为 $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 厚度1.0 m(b) 嵌入式帷幕渗透系数为 $1 \times 10^{-7}$  cm/s, 厚度1.0 m(c) 嵌入式帷幕渗透系数为 $1 \times 10^{-8}$  cm/s, 厚度1.0 m

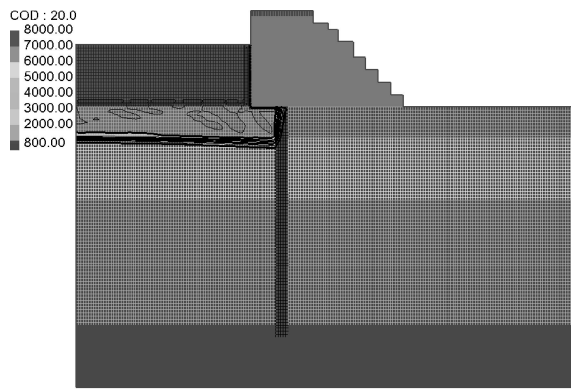
图4 高水头下稳态渗流场分布规律

Fig. 4 Distribution of hydraulic head of cutoff wall subjected to a high hydraulic head

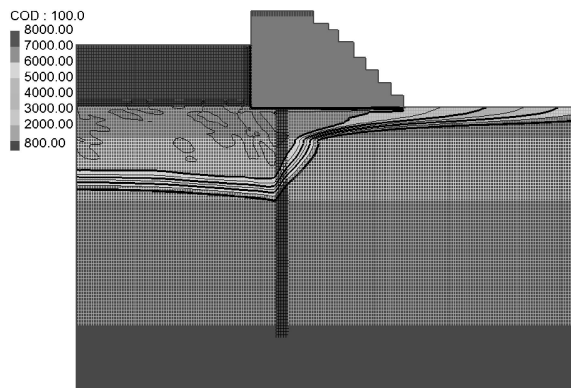
对于苏州七子山填埋场, 该场底以下 35 m 深度处存在未风化基岩隔水层, 当防渗帷幕嵌入该隔水层, 帷幕上游的竖向渗流作用被大大削弱。帷幕渗透系数越低, 对地下水渗流控制效果越好, 当帷幕渗透系数为  $1 \times 10^{-7}$  cm/s 时, 可以近似认为穿过帷幕的渗流是一维水平渗流。

### 3.2 水头对污染物浓度场分布及帷幕击穿时间的影响

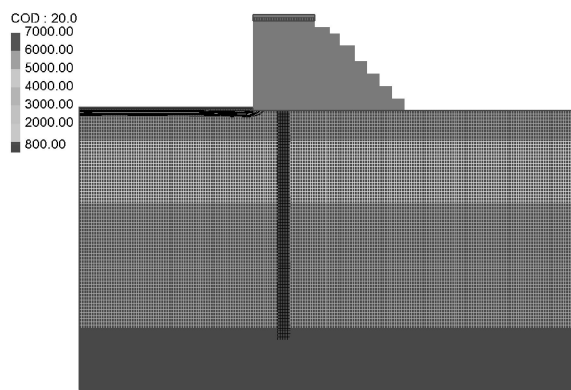
图5显示了水头对污染物运移的影响。其中图5(a)、5(b)显示了高水头差情况下运移 20, 100 a 后污染物浓度分布; 图 5 (c)、5 (d) 显示了低水头差情况下运移 20, 100 a 后污染物浓度分布。



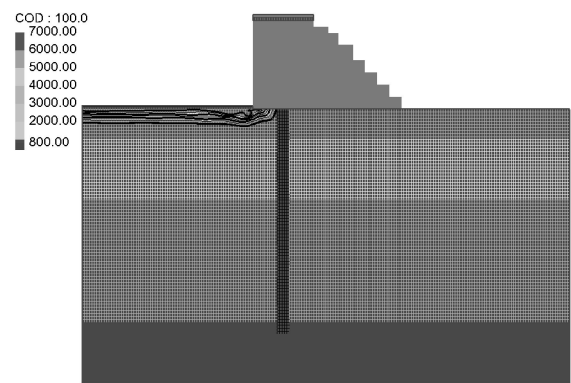
(a) 20 a时污染物浓度分布, 水头差10 m



(b) 100 a时污染物浓度分布, 水头差10 m



(c) 20 a时污染物浓度分布, 水头差0.3 m



(d) 100 a时污染物浓度分布, 水头差0.3 m

图5 水头对污染物运移的影响 (帷幕渗透系数为  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, 厚度为 1.0 m)Fig. 5 Effect of hydraulic head on pollutant transport (permeability of cutoff wall is  $1 \times 10^{-7}$  cm/s and width of cutoff wall 1.0 m)

图5 结果表明水头对污染物迁移有重要的影响。

如图 5 (a) 所示, 对于渗透系数为  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 厚度 1.0 m 的防渗帷幕, 在高水头条件下 (水头差为 10 m), 20 a 后污染物已经迁移至帷幕内, 21.6 a 左右防渗帷幕已被污染物击穿, 此时上游土体中污染物的迁移深度约为 6~7 m。如图 5 (b) 所示, 100 a 后下游土体中污染物迁移最大水平距离超过了 25 m。如图 5 (c)、5 (d) 所示, 在低水头条件下 (水头差为 0.3 m), 100 a 后污染物仍没有击穿防渗帷幕, 20 a 时帷幕上游土体中污染物的迁移深度约为 1 m, 100 a 时帷幕上游土体中污染物的迁移深度约为 3 m。由此可见水头差对污染物运移和帷幕寿命有重要影响, 实际工程中应严格控制帷幕上下游水头差, 降低污染风险。

### 3.3 水头、帷幕渗透系数和厚度对其击穿时间的影响

图 6 (a)、6 (b) 分别显示了高低水头差条件下帷幕渗透系数和厚度对其服役寿命的影响。图 6 结果表明, 帷幕击穿时间随上下游水头差、帷幕渗透系数和厚度几乎呈线性变化。帷幕厚度从 0.6 m 增加到 1.6 m, 击穿时间增加了 6~7 倍; 渗透系数减小一个量级, 击穿时间增加了约 8~9 倍; 上下游水头差从 10 m 减小到 0.3 m, 击穿时间增加了约 23~30 倍。水头、帷幕渗透系数和厚度 3 种因素主要反映了地下水渗流作用, 说明渗流作用对帷幕击穿时间有显著影响。

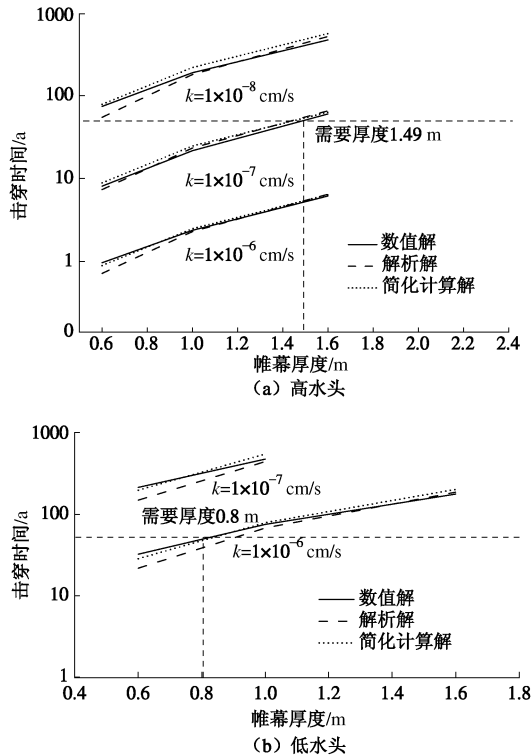


图 6 防渗帷幕击穿时间影响因素数值计算与解析解对比

Fig. 6 Comparison between numerical and analytical results

在图 6 中, 如果以 10% 相对浓度作为击穿标准, 在高水头下, 确保防渗帷幕击穿时间达到 50 a, 则防渗帷幕渗透系数不应大于  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 且厚度不应小

于 1.49 m; 而在低水头条件下, 确保防渗帷幕击穿时间为 50 a, 则防渗帷幕渗透系数不应大于  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ , 且厚度不应小于 0.8 m。

分析结果还表明, 污染物主要击穿帷幕顶部进入下游土体, 主要有两方面原因: 一是浅部渗流路径最短, 水力梯度最大, 渗流作用最显著; 二是浅层土体中污染物浓度梯度最大, 使得污染物的扩散更明显, 故在工程中可通过提高浅层帷幕的厚度和防污性能来延长帷幕的击穿时间。

### 3.4 地层透水条件对帷幕击穿时间的影响

表 4 显示了地层透水条件对嵌入式帷幕击穿时间的影响。表 4 结果表明, 对于嵌入式帷幕, 如由苏州七子山填埋场地层透水条件变为地层透水条件 III 时, 在高水头条件下, 帷幕击穿时间从 21 a 增加到 38 a; 在低水头条件下, 帷幕击穿时间也增加了约 2.32 倍, 说明地层透水条件对帷幕击穿时间有一定程度的影响。但是, 与水头、帷幕渗透系数和厚度相比, 地层透水条件对帷幕击穿时间的影响没有那么显著, 这是因为嵌入式帷幕显著削弱了渗流作用 (图 4 (b)), 以致土层渗透系数对渗流的影响不明显。

表 3 分析结果表明, 对于苏州七子山填埋场的水头高度、地层透水条件以及帷幕设计参数, 不到 5 a 防渗帷幕已经被污染物击穿。根据分析结果, 运行 13 a 后下游土体中污染物最大迁移距离达到了 10 m 以上, 最大深度达到了 5 m。谢海建等<sup>[18-20]</sup>对该填埋场防渗帷幕上下游取样测试结果表明, 运行 13 年后, 在防渗帷幕下游 18 m 处<sup>#5</sup> 钻孔取得的 5 m 深度范围内土样孔隙水中 COD 浓度测试结果接近于国家标准允许值, 表明该范围内土层已受到渗滤液污染, 该实测数据与本文分析结果基本吻合。故可推断填埋场下游<sup>#5</sup> 钻孔测得的浅层土体污染是由防渗帷幕被击穿引起, 因此原有防渗帷幕应进行加固补强。

### 3.5 扩散系数对帷幕击穿时间的影响

表 5 和图 7 显示了扩散系数对帷幕击穿时间的影响。表 5 和图 7 结果表明, 高水头条件下帷幕击穿时间随扩散系数变大而减小; 帷幕渗透系数越低, 变化越明显。这是因为帷幕渗透系数越低, 对地下水渗流控制效果越好, 渗流速度越慢, 扩散作用逐渐突出。分析结果表明: 扩散系数对帷幕击穿时间的影响不可忽略。

## 4 帷幕击穿时间和设计厚度简化计算公式

根据前述渗流和污染物运移分析, 当帷幕渗透系数小于  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 并深入到不透水层中, 污染物穿

过帷幕的运移可近似为是一维水平运移。本文采用 Ogata<sup>[16]</sup>推导的均质半无限空间内污染物一维运移解析解来近似计算污染物在防渗帷幕内一维水平运移, 解析解为

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{xR_d - v_s t}{2\sqrt{D_h R_d t}} \right) + \exp \left( \frac{v_s x}{D_h} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{xR_d + v_s t}{2\sqrt{D_h R_d t}} \right) \right] \quad (5)$$

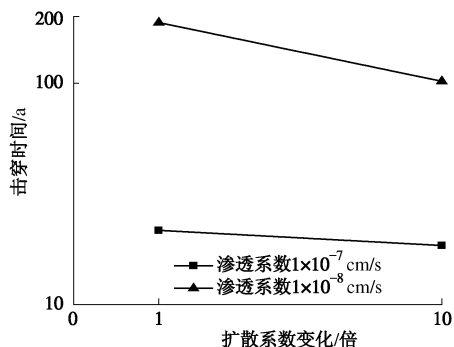


图7 扩散系数对帷幕击穿时间的影响

Fig. 7 Effect of diffusion on breakthrough time of cutoff wall

利用 Ogata 解析解计算得到各种设计参数组合下帷幕击穿时间如图 6 所示, 图 6 还显示了利用前面数值分析的计算结果。对比表明, 数值方法计算和解析计算结果吻合较好, 略有差别。两者的差别主要是因为解析解是基于均质半无限空间内污染物一维运移分析, 而数值分析中帷幕是有限厚度。因此, 采用 Ogata 等<sup>[16]</sup>解析解用来近似计算污染物在有限厚度的防渗帷幕内水平一维运移是可行的。为了便于工程应用, 本文对 Ogata 等<sup>[16]</sup>解析解进行简化, 以 10% 相对浓度为击穿标准条件, 得到本文研究填埋场中嵌入式防渗帷幕击穿时间的简化公式:

$$T = \frac{5.569 \times 10^{-7} \times R_d \times L^2}{k \times H \times D_h^{0.0175} + 80 \times D_h^{0.9895}} \quad (6)$$

式中,  $k$  帷幕渗透系数,  $R_d$  帷幕材料的阻滞因子,  $D_h$  帷幕材料的扩散系数,  $H$  帷幕上下游水头差,  $L$  帷幕厚度。

采用简化公式 (6) 计算结果与上述解析解对比如图 6 所示, 可见, 该简化公式能满足工程应用的精度要求。简化公式 (6) 表明: 防渗帷幕击穿时间与其厚度平方及阻滞因子成正比, 与帷幕渗透系数、扩散系数及上下游水头差成反比关系。

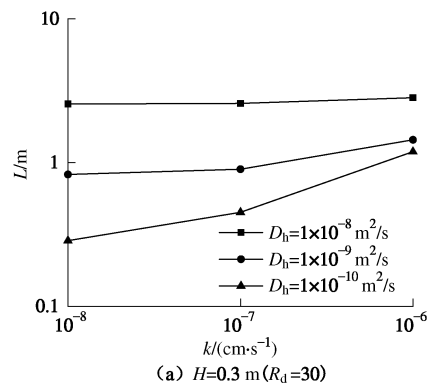
由帷幕击穿时间简化计算公式 (6) 可得到帷幕设计厚度的简化计算公式:

$$L = F_r \times \sqrt{\frac{T \times (k \times H \times D_h^{0.0175} + 80 \times D_h^{0.9895})}{5.569 \times 10^{-7} \times R_d}} \quad (7)$$

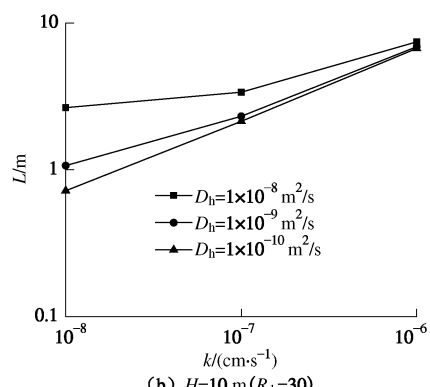
式中,  $F_r$  是安全系数, 考虑渗透稳定、机械侵蚀、化学溶蚀、施工因素等, 建议取 1.5。

当防渗帷幕击穿时间控制标准给定时 (如  $T = 50$

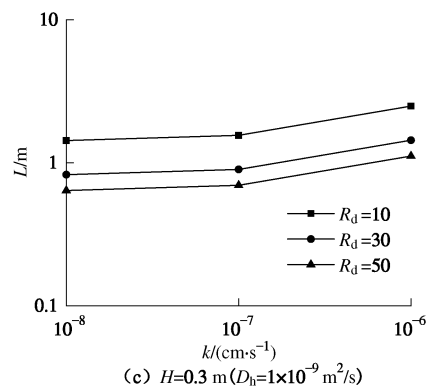
a), 则可由式 (5) 获得帷幕的设计厚度与其材料参数 (帷幕渗透系数、阻滞因子和扩散系数) 的关系, 如图 8 所示。可见, 在高水头差条件下 (如 10 m), 帷



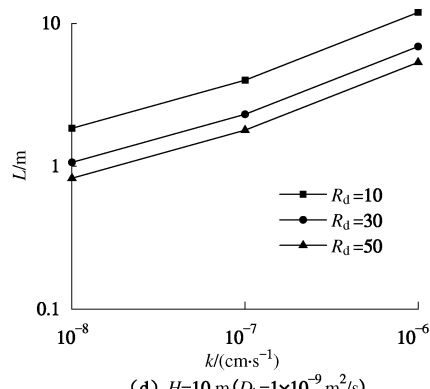
(a)  $H=0.3 \text{ m}$  ( $R_d=30$ )



(b)  $H=10 \text{ m}$  ( $R_d=30$ )



(c)  $H=0.3 \text{ m}$  ( $D_h=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )



(d)  $H=10 \text{ m}$  ( $D_h=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )

图8 帷幕设计厚度与各参数的关系

Fig. 8 Relationship between wall thickness and relevant parameters



幕的渗透系数须控制在  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  以下, 否则帷幕设计厚度可能达 1 m 以上, 工程中一般难以接受。但在低水头差 (如 0.3 m) 条件下, 帷幕的渗透系数控制要求可放宽至  $10^{-6} \text{ cm/s}$  数量级, 这时通过对材料改性控制其扩散系数和阻滞因子于较优值, 帷幕设计厚度可控制在 1 m 以下。

上述的帷幕击穿时间及设计厚度简化计算公式考虑了影响污染物通过嵌入式帷幕运移的主要因素, 即帷幕上下游水头差、帷幕渗透系数、扩散系数和阻滞因子, 能够满足工程设计精度要求, 可用于污染场地的防渗帷幕工程设计。

## 5 结论及建议

本文分析了各种因素对防渗帷幕击穿时间的影响, 并提出了帷幕击穿时间和设计厚度简化计算公式, 获得以下 6 点结论。

(1) 帷幕上下游水头差、帷幕渗透系数、阻滞因子和厚度对嵌入式防渗帷幕的击穿时间有显著影响, 击穿时间与上下游水头差、帷幕渗透系数、阻滞因子以及帷幕厚度的平方近似呈线性关系。

(2) 与帷幕上下游水头差、渗透系数和厚度相比, 场底土层透水条件对嵌入式帷幕击穿时间的影响不显著。

(3) 对于苏州七子山填埋场场地条件, 如采用嵌入式防渗帷幕作为污控措施, 以 10% 相对浓度作为击穿标准, 在 10 m 高水头条件下, 确保防渗帷幕击穿时间达到 50 a, 则防渗帷幕渗透系数应小于  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 且厚度不应小于 1.49 m; 在 0.3 m 低水头条件下, 确保防渗帷幕击穿时间达到 50 a, 则防渗帷幕渗透系数不应大于  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ , 且厚度不应小于 0.8 m。

(4) 当防渗帷幕嵌入隔水层且其渗透系数小于  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  时, 帷幕上游竖向渗流作用可以忽略。在此工况下, Ogata 一维解析解计算结果与数值分析结果吻合较好, 运用该解析解近似计算污染物穿过防渗帷幕水平运移是可行的; 基于本文相关结论, 在 Ogata 解析解基础上提出了帷幕击穿时间和设计厚度简化计算公式, 可作为工程设计时的参考方法, 并在工程实践中进行验证和优化。

(5) 对于嵌入式防渗帷幕, 污染物从帷幕近顶部段击穿进入下游土体, 设计中应加强帷幕近顶部段的厚度和防污性能。

(6) 污染物在不同帷幕材料中的运移机理不同, 其参数取值也不同, 后续工作中有必要进一步研究不同帷幕材料的性能及计算参数。

## 参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部. 第一次全国污染源普查公报

[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部. 2010. 3-15. (PRC Environmental Protection Department. The first national Pollution source census bulletin.[R]. Beijing: PRC Environmental Protection Department. 2010. 3-15 (in Chinese))

[2] EPA. Slurry trench construction for pollution migration control. [R]. Superfund, EPA-540/2-84-001. 1984.

[3] 田余庆. 黏土固化注浆帷幕在固体废物填埋场中的阻滞性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003: 1-9, 52-59. (TIAN Yu-qing. Retention effect of clay-solidified grouting curtain in landfill[D]. Changsha: Central South University, 2003: 1-9, 52-59. (in Chinese))

[4] 陈永贵. 黏土固化注浆帷幕对渗滤液的阻渗机理及环境效应[D]. 长沙: 中南大学, 2004: 1-10, 14-36, 101-112. (CHEN Yong-gui. Retention mechanism and environmental effects of clay-solidified grouting curtain to leachate in landfill[D]. Changsha: Central South University, 2004: 1-10, 14-36, 101-112. (in Chinese))

[5] KAMON Masashi, KATSUMI Takeshi, INUI Toru, et al. Hydraulic performance of soil-bentonite mixture barrier[C]// Proceedings of 5th International Congress on Environmental Geotechnics, 2006: 733 - 740.

[6] KATSUMI Takeshi, INUI Toru, KAMON Masashi. In-situ containment for waste landfill and contaminated sites[C]// Proceedings of International Symposium Geoenvironmental Engineering. Hangzhou, 2009: 248 - 258.

[7] INAZUMI Shinya, KIMURA Makoto, NISHIYAMA Yoshikazu, et al. New type of hydraulic cutoff walls in coastal landfill sites from H-jointed steel pipe sheet piles with H-H joints[C]// Proceedings of 5th International Congress on Environmental Geotechnics, 2006: 725 - 732.

[8] OPDYKE S M, EVANS J C. Slag-cement-bentonite slurry walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(6): 673 - 681.

[9] EVANS J C, OPDYKE S M. Strength, permeability and compatibility of slag-cement-bentonite slurry wall mixtures for constructing vertical barriers[C]// Proceedings of 5th International Congress on Environmental Geotechnics, 2006: 118 - 125.

[10] FRATALOCCHI E, PASQUALINI E, BALBONI P. Performance of a cement-bentonite cut-off wall in an acidic sulphate environment[C]// Proceedings of 5th International Congress on Environmental Geotechnics, 2006: 133 - 139.

[11] 徐超, 黄亮, 邢皓枫. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗



- 墙渗透性能的影响[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 422 - 426. (XU Chao, HUANG Liang, XING Hao-feng. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 422 - 426. (in Chinese))
- [12] NEVILLE C J, ANDREWS C B. Containment criterion for contaminant isolation by cutoff walls[J]. Ground Water, 2006, **44**(5): 682 - 686.
- [13] PHILIP L K. An investigation into contaminant transport processes through single- phase cement-bentonite slurry walls[J]. Engineering Geology, 2001, **60**: 209 - 221.
- [14] 张文杰, 陈云敏, 詹良通. 垃圾填埋场渗滤液床垂直防渗帷幕的渗漏分析[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(5): 925 - 929. (ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, ZHAN Liang-tong. Transport of leachate through vertical curtain grouting in landfills[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(5): 925 - 929. (in Chinese))
- [15] 王艳明, 张乾飞. 填埋场防渗帷幕污染防治数值模拟及性能评价研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, **24A**(5): 662 - 670. (WANG Yan-ming, ZHANG Qian-fei. Study on numerical simulation and property evaluation of pollution prevention from vertical barrier curtains in sanitary landfills[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, **24A**(5): 662 - 670. (in Chinese))
- [16] OGATA A, BANKS R B. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media[M]. Washington DC: U S Government Printing Office, 1961.
- [17] ZHAN Tony L T, CHEN Y M, LING W A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China[J]. Engineering Geology, 2008, **97**: 97 - 111.
- [18] 谢海建. 成层介质污染物的迁移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 21-46, 63-95, 145-162, 189-213. (XIE Hai-jian. A study on contaminant transport in layered media and the performance of landfill liner systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 21-46, 63-95, 145-162, 189-213. (in Chinese))
- [19] XIE Hai-jian, CHEN Yun-min, ZHAN Liang-tong, et al. Investigation of migration of pollutant at the base of Suzhou Qizishan landfill without a liner system[J]. Journal of Zhejiang University (Science a), 2009, **10**(3): 439 - 449.
- [20] 谢 焰, 谢海建, 陈云敏, 等. 填埋场底土污染物浓度实测值和理论解的比较[J]. 自然灾害学报, 2009, **18**(5): 62 - 69. (XIE Yan, XIE Hai-jian, CHEN Yun-min, et al. Comparisons of measurements of contaminant concentration in landfill bottom soils with theoretical solutions[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, **18**(5): 62 - 69. (in Chinese))
- [21] MCDONALD M G, HARBAUGH A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model[R]// Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey: Chapter A1. Washington DC: United States Government Printing Office, 1988: 83 - 875.
- [22] ZHENG Chun-miao, WANG P Patrick. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide[CP]. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center. 1999.
- [23] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 1 - 62. (WANG Hong-tao. Dynamics of fluid and contaminant transport in porous media[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 1 - 62. (in Chinese))