

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.019



# 固化污泥对渗滤液中氟阻滞作用的数值分析

王月香<sup>1,2</sup>, 顾欢达<sup>1</sup>, 陈茂林<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学 土木学院, 江苏 苏州 215011; 2. 南京工业大学 土木工程博士  
流动站, 南京 211186; 3. 苏州淡林环境科技有限公司, 江苏 苏州 215129)

**摘要:** 固化污泥是一种新型填埋场底部防渗阻滞材料, 为论证其防渗阻滞作用的有效性, 需进行典型污染物的穿透试验, 但由于固化污泥渗透性很低, 采用常规土柱试验很难得到污染物通过其迁移时的相关参数。为解决该问题, 用柔性壁渗透试验代替传统土柱试验。渗滤液中污染成分较多, 取含量较高且较易穿透的污染物即氟离子作为典型污染物, 首先进行穿透试验获得迁移参数, 然后结合二维有限元法研究分析其在防渗阻滞层及周边岩土环境中 60 a 内的运动迁移范围、浓度分布情况, 并对比分析未设防渗阻滞层的情况。研究表明, 在填埋场底部设置固化污泥防渗层对于以氟为代表的阴性污染物有较好的延迟阻滞作用。由于阳性污染物的穿透能力较阴性污染物弱, 因而固化污泥防渗层对重金属等阳性污染物也应具有较强的阻滞作用, 从而能进一步延迟填埋场渗滤液对周边环境的污染。

**关键词:** 固化污泥; 填埋场防渗; 氟离子; 迁移阻滞; 数值分析

**中图分类号:** X705      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2017)01-0132-08

## Numerical analysis of the postponing effect of solidified sludge as a new type of landfill liner material

Wang Yuexiang<sup>1,2</sup>, Gu Huanda<sup>1</sup>, Chen Maolin<sup>3</sup>

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China;

2. Nanjing Technology University, Nanjing 211186, P. R. China;

3. Suzhou Danlin Environmental Engineering Limited Corporation, Suzhou 215129, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** The solidified sludge as a new type of liner material should be at the bottom of municipal solid waste landfill site to prevent the contamination of the pollutant leakage. The hydrodynamic dispersion test was conducted to investigate the postponing effect of solidified sludge. It was very difficult to obtain hydrodynamic dispersion parameters of sludge solidified layer with low permeability by the existing column tests and methods. The flexible wall parameter was proposed and improved to solve the problem. Because of the high concentration and strong penetrating power, fluorine ion was chosen as the typical representative. The hydrodynamic dispersion parameters could be calculated by the breakthrough curve of

**收稿日期:** 2016-03-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(51378327, 51378118, 51508369), 江苏省自然科学基金(BK20150289), 江苏省建设系统项目(2016ZD26), 苏州科技大学科研启动项目(331531102)

**作者简介:** 王月香(1977-), 女, 博士后, 主要从事环境岩土工程研究, (E-mail) wyxcjy@sina.cn.

**Received:** 2016-03-04

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378327, 51378118, 51508369), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (No. BK20150289), Jiangsu Architecture System Foundation (No. 2016ZD26), SUST Research Approval Foundation (No. 331531102)

**Author brief:** Wang Yuexiang (1977-), postdoctor, main research interest: geoenvironment, (E-mail) wyxcjy@sina.cn.

fluorine ion. And then, the two dimensional definite method was used to analyze the transference scope and concentration distribution of fluorine ion in solidified sludge layer and surrounding in 60 years. The situation without solidified sludge layer had a contrast with the above. The results showed that the solidified sludge layer had an important postponing effect on the transference of fluorine ion. Because positive pollutants had weaker penetrating ability than negative ones. The solidified sludge also had a strong blocking effect on the positive pollutant such as heavy metals or other positive pollutants, which could further delay the pollution of landfill leachate.

**Keywords:** solidified sludge; landfill seepage control; fluorine ion; transfer block; numerical analysis

在城市固体废弃物填埋过程中,会产生渗滤液,这些渗滤液中往往含有很多污染物。当填埋场防渗系统出现破损时,这些污染物将会渗入周边岩土环境中造成污染。对于污染物随渗滤液的迁移扩散,其一般历时很长,很难由室内淋滤试验在短期内完成,因此,多通过数值方法进行分析,冯民权等<sup>[1]</sup>对水环境污染采用有限差分、有限元等方式进行了模拟与预测,Freeze 等<sup>[2-5]</sup>对地下水的水动力特性、污染及模拟进行了研究,赵颖等<sup>[6-8]</sup>对土壤有机污染物的迁移建立数学模型进行了数值分析和预测,方晰等<sup>[9]</sup>研究了重金属的累积和迁移规律,宁丽等<sup>[10]</sup>对柴油在土壤中的迁移污染进行了数值模拟。这些研究成果均采用数值分析方法来模拟分析各种污染物迁移和分布,说明数值模型非常适合用于研究污染物随水迁移问题。

固废填埋场底部一般设置有防渗层,防渗层必须对废弃物渗滤液具有良好的阻滞作用。近年来国内外学者对填埋场底部防渗性能进行了较多研究,罗春泳<sup>[11]</sup>对粘土衬垫的环境土工特性进行了分析,刘福东<sup>[12]</sup>研究了填埋场固化污泥屏障材料的阻滞特性,陈云敏等<sup>[13]</sup>研究了填埋场水位雍高对衬垫的影响。为了保证良好的防污性,填埋场底部防渗材料必须要满足一定阻滞性能。参照 Mustafa 等<sup>[14]</sup>、Valls 等<sup>[15]</sup>、Cinquelpalmi 等<sup>[16]</sup>、Malviyar 等<sup>[17]</sup>、Lasheen 等<sup>[18]</sup>利用沸石、垃圾焚烧灰灰、水泥胶凝材料固化处理污泥等废弃物的研究思路。笔者将污泥固化<sup>[19]</sup>,并应用到填埋场底部作为防渗层,其防渗性能能够满足 $<10^{-7}$  cm/s<sup>[20]</sup>的要求,防渗性能较好,且由于是固废制成,因而较为经济。

为更深入地分析固化污泥作为新型填埋场防渗材料的阻滞作用,采用有限元法进行研究。由于在一般情况下氟、氯等阴离子比重金属等阳离子的穿透速度快,防渗层一般对其阻滞作用偏弱<sup>[5]</sup>,因而采用渗滤液测试中含量较高的氟离子<sup>[21]</sup>作为典型污

染物,先通过穿透试验获得其迁移参数,然后结合二维有限元法进行计算,从而分析固化污泥这种新型防渗材料对氟的阻滞作用的有效性。

## 1 迁移数学模型和参数

污染物迁移过程及机制非常复杂,其中可能包含解吸附、对流、弥散、衰变、降解等,由于氟在渗滤液中迁移以对流、弥散和吸附 3 种作用为主,因而分析时仅考虑这 3 种作用耦合。

### 1.1 迁移数学模型

污染物迁移数学模型包括 3 部分,即控制方程、初始条件和边界条件<sup>[2-5]</sup>。所采用的有限元数值分析模型以及模型参数确定公式的推导见文献<sup>[22]</sup>,以下仅列出模型参数确定公式,模型参数确定需通过室内弥散试验以及绘制相应弥散曲线获得。

#### 1) 水动力弥散系数<sup>[22]</sup>

$$D_L = \frac{1}{8} \left[ \frac{z - vt_{0.159}}{\sqrt{t_{0.159}}} - \frac{z - vt_{0.841}}{\sqrt{t_{0.841}}} \right]^2 \quad (1)$$

式中: $D_L$  为水动力弥散系数,  $m^2/s$ ;  $z$  为空间位置,  $m$ ;  $v$  为达西平均流速,  $m/s$ ;  $t_{0.159}$ 、 $t_{0.841}$  分别为溶质相对浓度达到 0.159、0.841 时所需要的时间,  $s$ 。

2) 有效孔隙度  $n_e$ <sup>[22]</sup> 有效孔隙度为一维渗流时,达西流速  $v$  与多孔介质中平均线性流速之比,对应多孔介质,有

$$n_e = \frac{vt_{0.5}}{L} \quad (2)$$

式中: $v$  为达西流速,  $cm/s$ ;  $t_{0.5}$  为相对浓度为 0.5 时所需时间,  $s$ ;  $L$  为渗流路径长度,  $cm$ 。

#### 3) 线性流速<sup>[22]</sup>

$$u = \frac{v}{n_e} = \frac{L}{t_{0.5}} \quad (3)$$

式中: $u$  为线性流速,  $m/s$ ,  $n_e$  为有效孔隙率,无量纲,  $t_{0.5}$  为相对浓度达到 0.5 所需的时间,  $s$ 。

#### 4) 纵横向弥散度<sup>[22]</sup>

$$\alpha_L = \frac{D_L}{u} \quad (4)$$

式中： $\alpha_L$  为纵向弥散度。

据 Gelhar 等<sup>[23]</sup> 所得高可靠度的数据表明横向弥散度一般比纵向弥散度要小 1~2 个数量级,因而文中横向弥散度取纵向弥散度的 1/10。

5) 吸附系数<sup>[22]</sup>, 由 Batch 试验法<sup>[14]</sup> 获得。

$$K_d = \frac{(C_0 - C)V_{sol}}{C_0 \cdot M_s} \quad (5)$$

式中： $K_d$  为吸附系数； $C_0$  为初始浓度, mg/L； $C$  为吸附平衡后的浓度, mg/L； $V_{sol}$  为溶液体积, L； $M_s$  为风干土样重量, mg。

6) 延迟因子<sup>[22]</sup>

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n_e} K_d \quad (6)$$

式中： $R_d$  为延迟因子； $\rho_d$  为干密度, g/cm<sup>3</sup>。

为得到氟在阻滞层中迁移的相对浓度  $C_t/C_0$  与时间  $t$  曲线, 即  $\bar{C}-t$  曲线, 其中相对浓度  $\bar{C}$  为某时间测得浓度  $C_t$  与初始浓度  $C_0$  之比。所用试验装置如图 1 所示, 为柔性壁渗透仪, 将 3 个相同高度固化污泥试样装在 1、2、3 号压力室中进行渗透试验, 氟污染液初始浓度采用实测值 10 mg/L, 渗透速度  $v$  为  $2.18 \times 10^{-6}$  cm/s, 对应于同一高度试样, 所采用渗透压相同。试样所采用渗透压和围压见表 1。渗滤液收集时间段为间隔 24 h。



图 1 弥散实验装置<sup>[22]</sup>

Fig. 1 hydrodynamic dispersion equipment

表 1 试验所用压力和流速

Table 1 The test pressure and velocity

压力/cm	渗透压/kPa	围压/kPa
$L_1=5 \quad D=5$	10	200
$L_2=8 \quad D=5$	16	200
$L_3=11 \quad D=5$	20	200

由弥散试验得到渗滤液中氟相对浓度  $C_t/C_0$  与时间  $t$  曲线, 如图 2 所示, 由此得表 2。

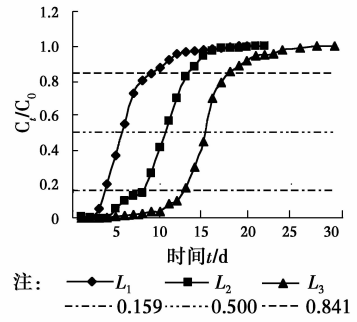


图 2 氟离子  $\bar{C}-t$  曲线

Fig. 2 The curve of Fluorine and time

表 2 达相对浓度运移时间

Table 2 Time for the relative concentration of Fluorine d

项目	$L_1=5$ cm	$L_2=8$ cm	$L_3=11$ cm
$t_{0.159}$	3.8	8.2	12.7
$t_{0.5}$	5.8	10.8	15.3
$t_{0.841}$	9.2	13.4	17.9

由(3)式  $u = \frac{v}{n_e} = \frac{L}{t_{0.5}}$  结合表 2 可得氟离子通过固化污泥的线性流速为： $u_1 = 9.98 \times 10^{-6}$  cm/s,  $u_2 = 8.57 \times 10^{-6}$  cm/s,  $u_3 = 8.32 \times 10^{-6}$  cm/s, 平均运移线性速度为  $\bar{u} = 8.96 \times 10^{-6}$  cm/s。

$$\text{由式(1)} \quad D_L = \frac{1}{8} \left[ \frac{z - vt_{0.159}}{\sqrt{t_{0.159}}} - \frac{z - vt_{0.841}}{\sqrt{t_{0.841}}} \right]^2,$$

并且有  $z = L$ , 得到水动力弥散参数为  $D_{L1} = 1.82 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s,  $D_{L2} = 3.28 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s,  $D_{L3} = 5.43 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s。则得平均水动力弥散参数为  $3.59 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s。

结合上述得到的水动力弥散参数, 由(4)式得纵向弥散度为  $\alpha_L = \frac{\bar{D}_L}{\bar{u}} = \frac{3.59 \times 10^{-6}}{8.96 \times 10^{-6}} = 0.40$  cm。

根据 Gelhar 等<sup>[23]</sup> 与 Neuman<sup>[24]</sup> 的研究成果, 所得弥散度与前人研究成果范围接近, 能够满足可靠度和精度要求。

结合表 2 和式(2), 有效孔隙度分别为  $n_{e1} = 0.218$ 、 $n_{e2} = 0.254$ 、 $n_{e3} = 0.262$ , 则平均孔隙度为 0.245。

而据自然界中各种岩土质的参数性质<sup>[5]</sup>, 取粘土层的有效孔隙度为 0.6。

由表 2 和式(5)可得吸附系数  $K_d$  为  $5.77 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/kg。

根据  $\bar{n}_e = 0.245$  和所测干密度  $\rho_d = 1.442$  g/cm<sup>3</sup>, 结合式(6)得延迟因子  $R_d$  为 4.39。

固化污泥下卧粘土的水动力弥散参数取用文献<sup>[5, 23-24]</sup> 的研究数据。所得模型各参数见表 3。

表 3 有限元模型参数  
Table 3 FEM model parameters

参数	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	纵向弥散度	横向弥散度	延迟因子	吸附系数 $K_d/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	初始浓度 $C_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	有效孔隙度 $n_e$
固化污泥	$1.09 \times 10^{-7}$	0.40	0.04	4.39	$5.77 \times 10^{-5}$	10	0.245
下卧粘土	$1.00 \times 10^{-7}$	100.00	10.00	1.00	$9.00 \times 10^{-3}$	0	0.600

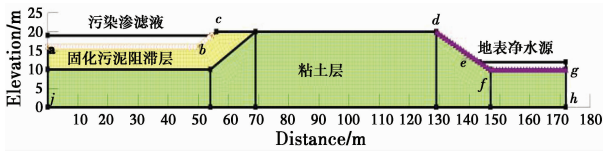


图 3 有限元模型<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Analysis model

### 1.2 模型初始浓度和边界条件

1) 边界条件  $L_{abc}$  ( $h_{ab} = 16.0 \text{ m}$ , bc 坡面的坡度为 1:1.5): 初始浓度  $C_{F^-} = 10 \text{ mg/L}$ , 污染渗滤液总水头高  $H = 19 \text{ m}$ ,  $t \geq 0$ 。

2) 边界条件  $L_{cd}$ 、 $L_{def}$  (def 坡面的坡度为 1:1.5)、 $L_{fg}$ 、 $L_{gh}$ 、 $L_{hj}$ 、 $L_{ja}$  上流量  $Q: Q = 0, t \geq 0$ 。

3) 边界条件  $L_{efg}$ : 地表净水源水头高  $H = 12 \text{ m}$ ,  $t \geq 0$ 。

通过对比分析填埋场底部设固化污泥阻滞层和未设阻滞层时氟在整个场地、污染坑和地表净水源处的污染分布,从而评价阻滞作用的有效性。考虑到污泥阻滞层在短期内不会被击穿,将考察时间取至 60 a 以内。在分析过程中,根据中国环保总局的相关规定<sup>[25]</sup>,如果地表净水源中氟离子浓度大于 1.0 mg/L 即认为污染。

## 2 结果与分析

1) 水头变化 图 4 显示渗滤液在压强作用下缓慢地透过地层向地表净水源处转移。图 4 表明,在地层中设有污泥阻滞材料时,水头下降较快,尤其在污染坑底部位置。

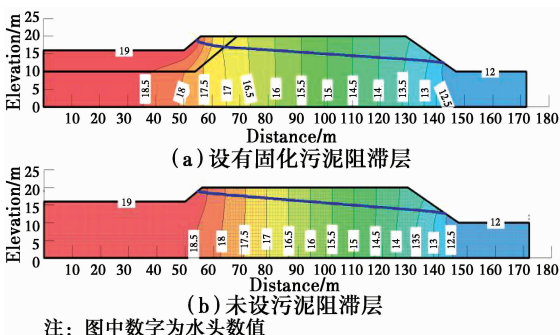


图 4 场地水头  
Fig. 4 Distribution of Water head

由图 5 可知,在污染坑底部设有固化污泥阻滞层时,在地层同一深度的水头比没有阻滞层的要低,表明污染渗滤液受到固化污泥的阻滞作用,其在地层中的渗透速度减缓。

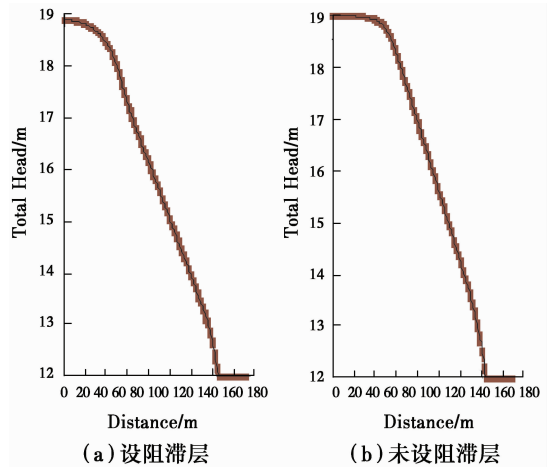


图 5 污染坑底部水头  
Fig. 5 Distribution of Water head at the bottom of pollution pit location

2) 氟离子的迁移 图 6~8 表示,氟离子在 10 a 后在地层中的迁移情况及浓度分布。

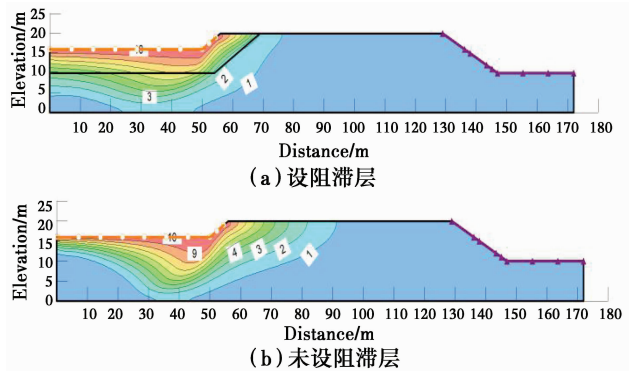


图 6 场地历经 10 a 氟离子的污染  
Fig. 6 Concentration distribution of Fluorine in 10 years

比较图 6 可知,当地层中设有污泥阻滞层时,在同一深度和水平位置,氟浓度均比未设的要低。而就广度方面即迁移扩散范围相比较,没有阻滞层的地层中氟扩散的更快,范围更广。

图 7 表示 10 a 后污染坑底部氟浓度的分布情况。由图 7 可知,当设有污泥阻滞层时,在污染渗滤液面下 10 m 深度处,同一水平位置的氟浓度比未设的低很多。如在距污染源 40 m 处氟浓度达到最大值,约为 6.9 mg/L( $\text{g}/\text{m}^3$ ),而相比之下,没有阻滞层的则约为 8.3 mg/L。固化污泥作为防渗层的阻滞作用十分显著。

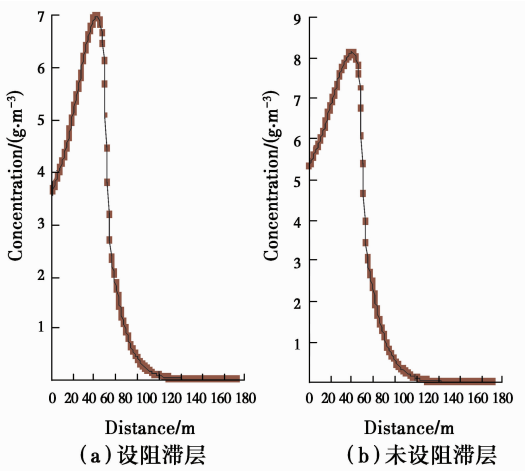


图 7 10 a 后污染坑底部氟离子的浓度分布  
Fig. 7 Concentration distribution at the bottom of pollution pit location in 10 years

图 8 表示距离污染坑为 147 m 处即地表净水源处氟浓度分布规律。由图 8 可知,氟浓度沿深度逐渐增大。在污染坑底部设置固化污泥防渗层时,在同一深度处,氟浓度比未设阻滞层的低一个 10 的数量级。由此可见,固化污泥防渗层的阻滞作用非常有效。

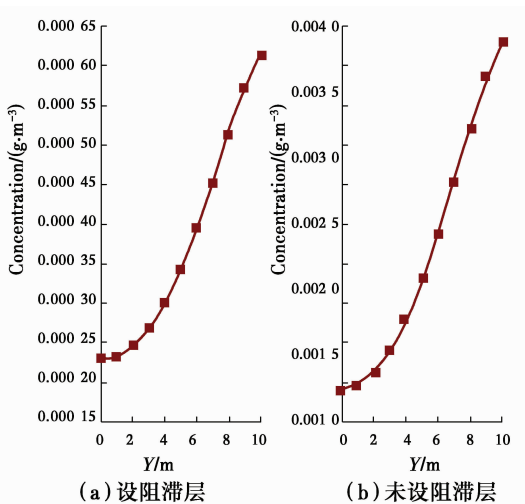


图 8 10 a 后净水源处氟离子浓度分布  
Fig. 8 Concentration distribution at the source of water location in 10 years

由图 9 可看出,随着时间的不断增长和渗流的逐步深入,氟离子的污染晕不断扩大,渐渐向地表净水源地推进。经 50 a 后,氟离子在设有污泥阻滞层的地层中最大扩散范围为 115.0~132.0 m,水源地未受到污染。而在未设污泥阻滞层中最大扩散范围约 140.0~150.0 m,已经使水源受到污染。

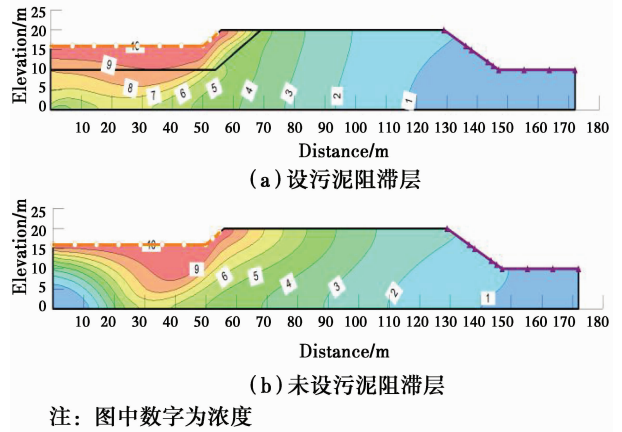


图 9 场地历经 50 a 氟离子的污染  
Fig. 9 Concentration distribution of Fluorine in 50 years

由图 10 显示,50 a 后,在同一深度地层即 (Elevation)  $Y=10$  m,污染坑底部的氟离子浓度仍然较其他部位高,设有污泥阻滞层的污染坑底部范围内,氟离子浓度在 8.0~9.0 mg/L 范围,而未设有污泥阻滞层的地层在同一位置氟离子浓度较高,为 9.0~9.5 mg/L。

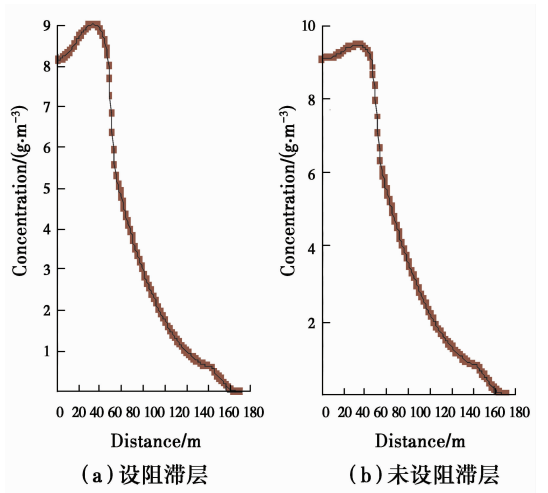


图 10 50 a 后污染坑底部氟离子浓度分布  
Fig. 10 Concentration distribution of Fluorine at the bottom of pollution pit location in 50 years

图 11 表示经 50 a 后,氟离子在纵深的浓度变化。由图 11 可知,在同一水平位置,同一深度,设有污泥阻滞层的地层中氟离子浓度仍然比未设地层中的低。在地表净水源处,经 50 a 后,设有污泥阻滞层的氟离子浓度为 0.54 mg/L,达到 III 水标准,而未设的地层在该处氟离子浓度为 1.14 mg/L,已经被污染。

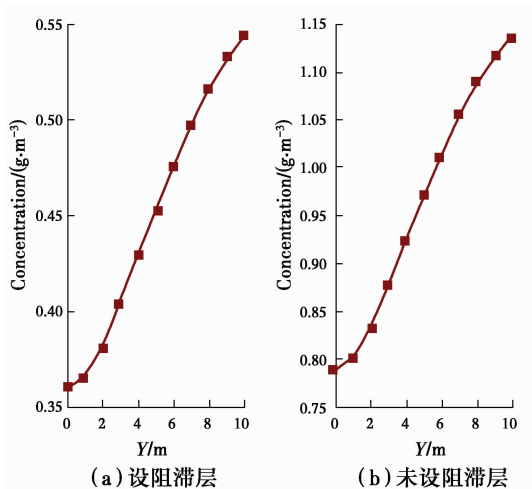
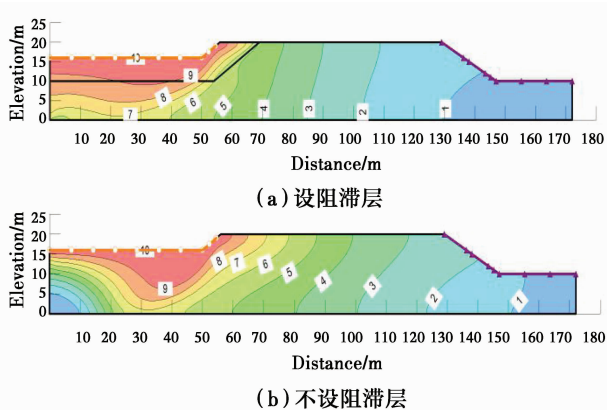


图 11 50 a 后净水源处氟离子的浓度分布  
Fig. 11 Concentration distribution at the source of water location in 50 years

图 12~14 表示经过 60 a 后地层中氟离子浓度的变化,其变化规律同前。时间越长,扩散范围越大,地表净水源逐渐被污染。在 60 a 时,设有污泥阻滞层地层中下游地表水源中氟离子浓度达到 0.85 mg/L,仍然达到 III 水标准,而未设有污泥阻滞层的该处,氟离子浓度为 1.64 mg/L,水源被污染。



注: 图中数字为浓度

图 12 场地历经 60 a 氟离子的污染  
Fig. 12 Concentration distribution in 60 years

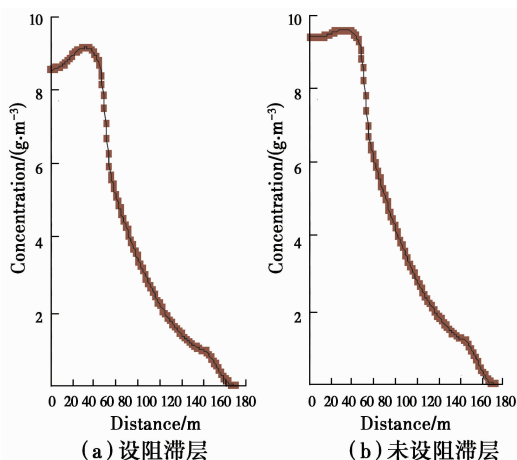


图 13 60 a 后污染坑底部氟离子的浓度分布  
Fig. 13 Concentration distribution at the bottom of pollution pit location in 60 years

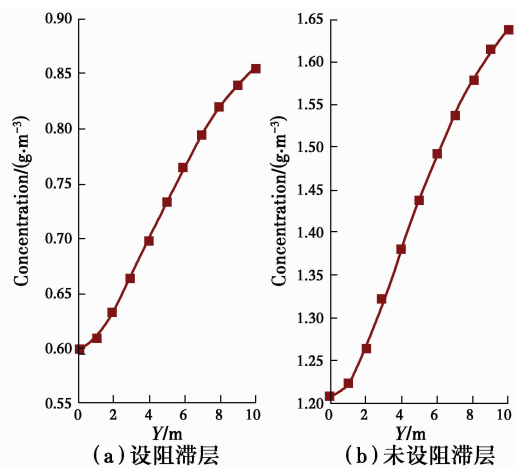


图 14 60 a 后净水源氟离子的浓度分布  
Fig. 14 Concentration distribution at the source of water location in 60 years

由图 15 氟浓度与时间的关系曲线可知,在填埋场底部设置污泥阻滞层可以长期有效的阻滞氟对于地表净水源的污染。

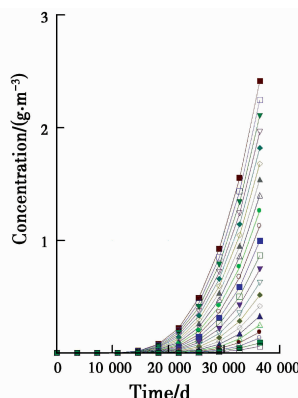


图 15 设阻滞层时净水源氟浓度与时间关系  
Fig. 15 Relationship of Fluorine concentration and time

### 3 结论

利用柔性壁渗透试验得出氟随渗滤液迁移参数,并采用二维有限元法建立数学模型,研究了氟在固化污泥防渗阻滞层及周边环境中 60 a 内的迁移情况,得出如下结论:

1)在填埋场底部设置固化污泥防渗阻滞层,与未设阻滞层相比,减缓了渗滤液对周边环境的污染。

2)经 50 a 后,氟离子在设有污泥阻滞材料的地层中最大扩散范围为 115.0~132.0 m,水源地未受到污染。而在未设污泥阻滞层中最大扩散范围约 140.0~150.0 m,水源已经受到污染。

3)时间越长、扩散范围越大。经 50~60 a 后,设有污泥阻滞层的氟离子浓度为 0.54、0.85 mg/L,达到 III 水标准,而未设的地层在地表净水源处氟离子浓度为 1.14、1.64 mg/L,已经被污染。

由上述分析可知,对于迁移速度较快的阴性污染物如氟,固化污泥作为填埋场新型防渗层,其阻滞作用十分显著,并且长期持续。由于在一般情况下阳性污染物的穿透能力弱于阴性污染物,固化污泥防渗阻滞层对于重金属等阳性污染物应具有较强的阻滞作用,文献[22]也证实这一点,因而在填埋场底部设置固化污泥防渗阻滞层能进一步延缓填埋场渗滤液对周边岩土环境的污染。

#### 参考文献:

- [1] 冯民权,郑邦民,周孝德. 水环境模拟与预测[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] FREEZE R A, CHERRY J A. Groundwater [M]. Prentice Hall; Englewood Cliffs, NJ, 1979.
- [3] FETTER C W. Applied hydrogeology [M]. 3rd edition. New York: Macmillan, 1994.
- [4] DOMENICO P A, SCHWARTZ F W. Physical and chemical hydrogeology [M]. 2nd edition. New York: Wiley, 1998.
- [5] ZHEN C M, GORDON D B. 地下水污染物迁移模拟 [M]. 2 版. 北京:高等建筑教育出版社,2009.
- [6] 赵颖,梁冰,薛强,等. 土壤有机污染物运移模型的对比分析[J]. 环境污染与防治,2008,30(6):23-26.
- ZHAO Y, QIANG B, XUE Q, et al. Contrast analysis on models of organic contaminant transport in soil[J]. Environmental Pollution and Protection, 2008, 30(6): 23-26. (in Chinese)
- [7] 梁冰,赵颖,薛强,等. 土壤中污染物迁移转化规律的数值模拟研究[J]. 岩土力学,2010,29(9):2373-2377.
- LIANG B, ZHAO Y, XUE Q, et al. Research on

numerical simulation of contaminant transportation and transformation in soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,29(9):2373-2377. (in Chinese)

- [8] 薛强,梁冰,刘晓丽,等. 土壤水环境中有机污染物运移环境预测模型的研究[J]. 水利学报,2003(6):48-55.
- XUE Q, LIANG B, LIU X L, et al. Study on environmental prediction model of organic contaminants transport in soil water environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(6):48-55. (in Chinese)
- [9] 方晰,田大伦,陈骏超,等. 重金属元素在樟树人工林中的累积与迁移[J]. 安全与环境学,2006,6(1):64-68.
- FANG X, TIAN D L, CHEN J C, et al. Accumulation and transportation of heavy metal elements in cinnamomum camphora plantation [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(1):64-68. (in Chinese)
- [10] 宁丽,曾溅辉,陈广. 柴油在土壤中迁移模拟的试验研究[J]. 安全与环境学报,2008,8(3):1-6.
- NING L, ZENG J H, CHEN G. Simulated study on the migration process and effects of diesel oil on the soil properties [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(3):1-6. (in Chinese)
- [11] 罗春泳. 粘土的环境土工特性及垃圾填埋场衬垫性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [12] 刘福东. 填埋场固化污泥屏障材料的阻滞特性研究 [D]. 长沙:中南大学,2008.
- [13] 陈云敏,兰吉武,李育超. 垃圾填埋渗沥液水位壅高及工程控制[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):154-163.
- CHEN Y M, LAN J W, LI Y C. The water level and control of percolation liquid in landfill site [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):154-163. (in Chinese)
- [14] MUSTAFA B, GÜNAY K. Industrial sludge solidification by using clinoptilolite [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2007, 39(4):951-960.
- [15] VALLS S, VAZQUEZ E. Stabilization and solidification of sewage sludges with Portland cement [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(10):1671-1678.
- [16] CINQUEPALMI M A, MANGIALARDI T, PANEI L, et al. Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars: physicochemical and leaching characteristics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(2/3):585-593.
- [17] MALVIYAR R, CHAUDHRY R. Leaching behavior

- and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized products [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1):207-217.
- [18] LASHEEN M R, AMMAR N S. Assessment of metals speciation in sewage sludge and stabilized sludge from different wastewater treatment plants, greater Cairo Egypt [J]. *Journal of Hazardous Materials*. 2009,164: 740-749.
- [19] 王月香,洪振舜,顾欢达,等.一种城市污泥的固化稳定化方法:201010221489.7[P]. 2012:05-23.
- [20] 中华人民共和国建设部.城市生活垃圾卫生填埋技术规范:CJJ17—2004[S].北京:中国建筑工业出版社,2004
- [21] 王月香.市政污泥和含氟污泥固化稳定化填埋处理研究. [D].南京:东南大学,2014.
- [22] 王月香,陈茂林,顾欢达,等.重金属  $\text{Cr}^{6+}$  在填埋场固化污泥阻滞层-土-水系统中迁移分析[J]. *环境工程学报*,2014,8(8):3471-3479.
- WANG Y X, CHEN M L, GU H D, et al. Analysis of migration character of heavy metal  $\text{Cr}^{6+}$  in solidified sludge-soil-water layers [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014,8(8):3471-3479. (in Chinese)
- [23] GELHAR L W, WELTY C, REHFELDT K R. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers [J]. *Water Resources Research*, 1992,28(7): 1955-1974.
- [24] NEUMAN S P. On advective transport in fratural permeability and velocity fields[J]. *Water Resources Research*, 1995,31(6):1455-1460.
- [25] 中国国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.

(编辑 郭飞)