

DOI: 10.11779/CJGE2015S1020

有机污染物在完好三层复合衬垫中的扩散分析

吴 瑞^{1, 2}, 施建勇^{1, 2}, 何 俊³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;
3. 湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为了研究有机污染物在土工膜(GM)+土工复合膨润土衬垫(GCL)+土体保护层(AL)三层衬垫中运移规律, 建立了有机污染物在GM+GCL+AL三层衬垫中的一维扩散模型。有机污染物在土工膜上的扩散假设为稳态运移, 得到了模型的解析解。通过与已有解析解的比较计算, 验证了该模型的合理性。基于文中模型, 分析了AL的厚度对有机污染物在GM+GCL+AL三层衬垫中运移的影响并探讨了GM+GCL+AL衬垫与GM+CCL衬垫之间的等效性。结果表明增加AL的厚度可以有效减少GM+GCL+AL三层衬垫底部有机污染物通量。在文中的计算条件下, GM+GCL+2 m以上的AL衬垫可代替标准的GM+0.75 m CCL复合衬垫。

关键词: 扩散; 有机污染物; 解析解; 衬垫

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S1-0099-06

作者简介: 吴 瑞(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail: wuxun21@126.com。

Diffusion of organic contaminant through intact triple-layer liner

WU Xun^{1, 2}, SHI Jian-yong^{1, 2}, HE Jun³

(1. Key of ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 3. College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: One-dimensional mathematical model for diffusion of organic contaminant through GM+GCL+AL composite liner is developed to investigate the behavior of organic contaminant transport in GM+GCL+AL composite liner. The diffusion of organic contaminant through GM is assumed to be a steady-state process. The analytical solution for the model is obtained. The results obtained by the proposed analytical solution are in good agreement with the previous analytical solutions. The effect of degradation in AL the diffusion of on organic contaminant is investigated on the basis of the proposed model. The equivalence between GM+GCL+AL and GM+CCL is discussed. The bottom flux of the GM+GCL+AL composite liner is reduced when the thickness of AL increases. The standard GM+0.75 m CCL can be replaced by a combination of a GM, a GCL and a more than 2 m thick AL under the proposed conditions.

Key words: diffusion; organic contaminant; analytic solution; liner

0 引言

填埋场中的污染物已经成为地下水污染的一个主要的威胁, 作为防止污染物迁移的衬垫系统是填埋场中最重要的部分之一^[1-2]。由于价格经济、施工简便, 土工复合膨润土衬垫(GCL)已被广泛地应用于填埋场衬垫系统中^[3]。中国建设部规范规定填埋场可采用GCL代替压实黏土衬垫(CCL), 但需在GCL下方需增加一定厚度的土体保护层(AL)^[4]。因此分析污染物在GCL复合衬垫的运移并探讨GCL复合衬垫和传统压实黏土衬垫(CCL)复合衬垫的等效性具有重要意义。

目前分析污染物在衬垫中的运移规律主要有数值计算和解析解答两种方法。解析解相对于数值解能对

问题的物理本质有更深入的认识, 并能揭示问题的内在规律及可以为数值模型提供一种有效的检验手段。对于填埋场衬垫系统的初步设计, 解析解往往比复杂数值模型更具有优势^[5-6]。

填埋场中的有机污染物的浓度虽然较低, 但危害性大。有机污染物和无机污染物在复合衬垫中的迁移方式是有所不同, 无机污染物主要通过复合衬垫中的缺陷运移, 有机污染物主要通过扩散运移^[7-8]。目前有

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372268, 51008120); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014B33814); 江苏省2014年度普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_0439)

收稿日期: 2015-03-26

机物在复合衬垫中的扩散运移主要有数值计算和解析解答两种方法。Foose 等^[9]建立了有机污染物在复合衬垫中的一维扩散模型并得到了半无限空间边界下的解。何俊等^[10]建立了有机污染物在完好复合衬垫中迁移的一维模型, 得到了解析解。谢海建等^[11]建立了污染物在 GCL+AL 防渗层的一维对流-弥散模型, 在模型解的基础上研究了 GCL+AL 防渗层的防污性能及其与 CCL 之间的等效性。Cleall 等^[12]建立了一系列污染物在双层衬垫系统中的扩散方程, 并且给出了不同边界条件下模型的解析解。目前现有的文献大都是关于有机污染物在两层衬垫中的运移分析, 有机污染物在三层介质中运移的解析研究还较少。

本文在已有研究的基础上, 建立了有机污染物在 GM+GCL+AL 衬垫中的一维扩散模型, 有机污染物在土工膜上的扩散假设为稳态运移, 采用分离变量法对所建立模型进行求解。基于得到的解析解, 分析有机污染物在 GM+GCL+AL 衬垫中的运移规律, 结合解析解探讨 GM+GCL+AL 衬垫与 GM+CCL 衬垫之间的等效性。本文的解析解是有机污染物在复合衬垫中运移解析解的进一步完善, 可为实验数据的拟合及分析、衬垫的设计等提供参考。

1 计算模型

模型的主要假设为: ①有机污染物主要通过扩散运移, 本模型不考虑对流作用; ②污染物扩散是一维的; ③污染物在土中的扩散系数为常数; ④GCL 和 AL 均质、饱和的; ⑤介质对污染物的吸附作用均为平衡线性吸附。计算模型示意图如图 1。

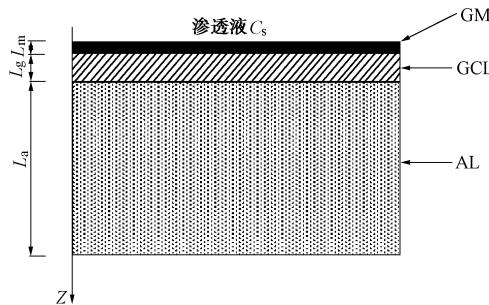


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational model

考虑到 GM 的厚度很薄(约 10 mm), 可考虑有机物在 GM 中的扩散为稳态过程^[13]。有机污染物在 GM 中的运移控制方程为

$$D_m \frac{\partial^2 C_m(z,t)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中 $C_m(z, t)$ 为有机污染物在 GCL 中的质量浓度; D_m 为有机污染物在 GM 中的扩散系数; t 为时间。

有机污染物在 GCL 中的运移控制方程为

$$\frac{\partial C_g(z,t)}{\partial t} = \frac{D_g^*}{R_{dg}} \frac{\partial^2 C_g(z,t)}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中 $C_g(z,t)$ 为有机污染物在 GCL 中的质量浓度; D_g^* 为有机污染物在 GCL 中的有效扩散系数; R_{dg} 为 GCL 对有机污染物吸附作用的阻滞因子,

$$R_{dg} = 1 + \frac{\rho_g K_{dg}}{n_g} \quad (3)$$

式中 ρ_g 为 GCL 的密度; K_{dg} 为 GCL 对有机污染物的吸附分布系数; n_g 为 GCL 的孔隙率。

有机污染物在 AL 中的运移控制方程为

$$\frac{\partial C_a(z,t)}{\partial t} = \frac{D_a^*}{R_{da}} \frac{\partial^2 C_a(z,t)}{\partial z^2} \quad (4)$$

式中 $C_a(z,t)$ 为有机污染物在 AL 中的质量浓度; D_a^* 为有机污染物在 AL 中的有效扩散系数; R_{da} 为 AL 对有机污染物吸附作用的阻滞因子,

$$R_{da} = 1 + \frac{\rho_a K_{da}}{n_a} \quad (5)$$

式中 ρ_a 为 AL 的密度; K_{da} 为 AL 对有机污染物的吸附分布系数; n_a 为 AL 的孔隙率。

假设有机污染物在衬垫系统中的初始浓度均为 0, 即

$$\left. \begin{array}{l} C_g(z,0) = 0 \\ C_a(z,0) = 0 \end{array} \right\} \quad (6)$$

渗滤液中污染物浓度假设为恒定值 C_0 , 则 GM 的上边界条件为

$$C_m(-L_m, t) = S_{lm} C_0 \quad , \quad (7)$$

式中 S_{lm} 为有机污染物在渗滤液和 GM 上表面之间的分配系数。

在 GM 和 GCL 的交界面, 污染物浓度满足浓度连续和通量连续条件^[14], 即

$$C_m(0,t) = S_{mg} C_g(0,t) \quad , \quad (8)$$

$$D_m \frac{\partial C_m(0,t)}{\partial z} = n_g D_g^* \frac{\partial C_g(0,t)}{\partial z} \quad , \quad (9)$$

式中, S_{mg} 为有机污染物在 GM 下表面和 GCL 的分配系数。

在 GM 和 GCL 的交界面, 污染物浓度满足浓度连续和通量连续条件^[14], 即

$$C_g(L_g, t) = C_a(L_g, t) \quad , \quad (10)$$

$$n_g D_g^* \frac{\partial C_g(L_g, t)}{\partial z} = n_a D_a^* \frac{\partial C_a(L_a, t)}{\partial z} \quad . \quad (11)$$

衬垫系统下边界, 即在三层复合衬垫的底部, 若其下伏含水层或渗滤液导流层的流速足够大, 能及时带走进入该层的污染物时, 可认为复合衬垫底部的浓度为 0, 即

$$\left. \begin{array}{l} C_a(L,t)=0 \\ L=L_g+L_a \end{array} \right\} \quad (12)$$

2 模型求解

由模型中的式(1)可得

$$C_m(z,t)=A_1+A_2z \quad , \quad (13)$$

$$A_1=C_g(z,t)|_{z=0} S_{mg} \quad , \quad (14)$$

$$A_2=\frac{n_g D_g^*}{D_m} \frac{\partial C_g(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad . \quad (15)$$

$C_g(z,t)$ 的上边界可表示为

$$C_g(z,t)|_{z=0} S_{mg} - \frac{n_g D_g^*}{D_m} \frac{\partial C_g(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = S_{lm} C_0 \quad . \quad (16)$$

由于 $C_g(z,t)$ 和 $C_a(z,t)$ 模型的边界条件非齐次, 为了求解模型设

$$C_g(z,t)=u_g(z)+v_g(z,t) \quad , \quad (17)$$

$$C_a(z,t)=u_a(z)+v_a(z,t) \quad . \quad (18)$$

式中 $u_g(z)$ 和 $u_a(z)$ 的选取保证 $v_g(z,t)$ 和 $v_a(z,t)$ 满足其次边界条件, $u_g(z)$ 和 $u_a(z)$ 满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 u_g(z)}{dz^2}=0; \frac{d^2 u_a(z)}{dz^2}=0 \\ C_g(z,t)|_{z=0} S_{mg} - \frac{n_g D_g^*}{D_m} \frac{\partial C_g(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = S_{lm} C_0 \\ n_g D_g^* \frac{du_g(L_g)}{dz} = n_a D_a^* \frac{du_a(L_g)}{dz}; u_g(L_g)=u_a(L_g) \\ u_a(L)=0 \end{array} \right. \quad . \quad (19)$$

$v_g(z,t)$ 和 $v_a(z,t)$ 满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_g(z,t)}{\partial t} = \frac{D_g^*}{R_{dg}} \frac{\partial^2 v_g(z,t)}{\partial z^2}; \frac{\partial v_a(z,t)}{\partial t} = \frac{D_a^*}{R_{da}} \frac{\partial^2 v_a(z,t)}{\partial z^2} \\ C_g(z,t)|_{z=0} S_{mg} - \frac{n_g D_g^*}{D_m} \frac{\partial C_g(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \\ v_g(L_g,t)=v_a(L_g,t); n_g D_g^* \frac{\partial v_g(L_g,t)}{\partial z} = n_a D_a^* \frac{\partial v_a(L_g,t)}{\partial z} \\ v_a(L,t)=0 \\ v_g(z,0)=-u_g(z), v_a(z,0)=-u_a(z) \end{array} \right. \quad . \quad (20)$$

分别求 $u_g(z)$ 和 $u_a(z)$, $v_g(z,t)$ 和 $v_a(z,t)$ 后叠加得到 $C_g(z,t)$ 和 $C_a(z,t)$ 的解为

$$C_g(z,t)=\sum_{i=1}^{\infty} g_{i1}(z) F_i e^{-\beta_m t} + B_1 + B_2 z \quad , \quad (21)$$

$$C_a(z,t)=\sum_{i=1}^{\infty} g_{i2}(z) F_i e^{-\beta_m t} + E_1 + E_2 z \quad , \quad (22)$$

式(21)、(22)中:

$$\beta_i=\frac{D_g^*}{R_{dg}} \left(\frac{\xi_i}{L_g} \right)^2 \quad , \quad (23)$$

$$g_{i1}(z)=\sin \left(\xi_i \frac{z}{L_g} \right) + G_i \cos \left(\xi_i \frac{z}{L_g} \right) \quad , \quad (24)$$

$$g_{i2}(z)=K_i \sin \left(\mu \xi_i \frac{L-z}{L_g} \right) \quad , \quad (25)$$

式(24)中

$$G_i=\frac{L_m n_g D_g^* \xi_i}{D_m L_g S_{mg}} \quad , \quad (26)$$

式(25)中

$$K_i=\frac{\sin(\xi_i)+G_i \cos(\xi_i)}{\sin \left(\mu \xi_i \frac{L_a}{L_g} \right)} \quad , \quad (27)$$

$$\mu=\sqrt{\frac{D_g^* R_{da}}{D_a^* R_{dg}}} \quad , \quad (28)$$

$$B_1=-E_2 L_a - B_2 L_g \quad , \quad (29)$$

$$B_2=\frac{n_a D_a^*}{n_g D_g^*} E_2 \quad , \quad (30)$$

$$E_1=-E_2 L \quad , \quad (31)$$

$$E_2=\frac{-S_{lm} C_0}{\left(L_a + \frac{n_a D_a^*}{n_g D_g^*} L_g \right) S_{mg} + \frac{n_a D_a^*}{D_m}} \quad . \quad (32)$$

特征方程为

$$\begin{aligned} & n_a D_a^* \mu \left[\sin(\xi_i) + \frac{L_m n_g D_g^* \xi_i}{D_m L_g S_{mg}} \cos(\xi_i) \right] \cos \left(\mu \xi_i \frac{L_a}{L_g} \right) + \\ & n_g D_g^* \left[\cos(\xi_i) - \frac{L_m n_g D_g^* \xi_i}{D_m L_g S_{mg}} \sin(\xi_i) \right] \sin \left(\mu \xi_i \frac{L_a}{L_g} \right) = 0 \quad . \quad (33) \end{aligned}$$

F_i 可通过 $g_{i1}(z)$ 和 $g_{i2}(z)$ 的正交性求得。

在式(22)浓度解的基础上, 可得到GCL三层衬垫底部的污染物通量 J 为

$$\begin{aligned} J(L,t) &= -n_a D_a^* \frac{\partial C_a(L,t)}{\partial z} \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\mu \xi_i K_i}{L_g} C_0 F_i e^{-\beta_m t} - (\eta_1 E_1 e^{\eta_1 z} + \eta_2 E_2 e^{\eta_2 z}) C_0 \quad . \quad (34) \end{aligned}$$

3 模型验证

为了说明本文模型的合理性和正确性, 作者将本文的解析解答与现有关于有机污染物在复合衬垫迁移解析解答进行比较验算。

Cleall等^[12]建立有机污染物在复合衬垫中迁移的一维扩散模型, 并得到模型的解析解。在文献中作者选择二氯甲烷作为有机污染物的代表, 假设 $C_0=1$

mg/L, 根据解析解求得GM+CCL两层复合衬垫底部通量随时间的变化规律, GM和CCL的参数见表1。将本文的解析解答式(34)中GCL的厚度退化为0的情形, GM和AL采用与文献中GM和CCL一样的计算参数, 运用本文的解析解答计算得到两层复合衬垫底部通量随时间变化与Cleall解答的对比结果见图2。由图2可见本文解析解得到的结果与文献的结果一致, 说明了本文解析解的合理性和可靠性。

表 1 GM 和 CCL 的计算参数

Table 1 Parameters of GM and CCL

计算参数	GM+CCL
$D_m/(m^2 \cdot s^{-1})$	5.8×10^{-13}
L_m/m	0.0015
$D_c^*/(m^2 \cdot s^{-1})$	6.5×10^{-11}
n_c	0.33
R_{dc}	1.7
L_c/m	0.9
S_{lm}	2.9
S_{mc}	2.9

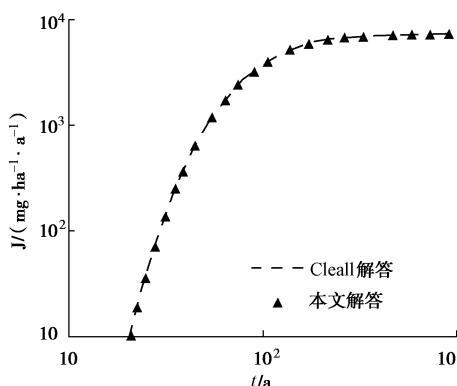


图 2 本文解与 Cleall 解答所得 CCL 衬垫底部有机污染物通量的对比

Fig. 2 Comparison of fluxes at base of CCL composite liner

between proposed model and model of Cleall

4 算例分析

4.1 AL 厚度的影响

基于本文解析解, 对比分析有机污染物在 GM+GCL+AL 三层复合衬垫中的运移规律。选取苯为有机污染物的代表, 苯的初始浓度 $C_0 = 1 \text{ mg/L}$ 。GM+GCL+AL 三层复合衬垫由 1.5 mm GM、10 mm GCL 和 AL 组成, AL 的厚度选取 0, 0.5, 1, 2 m 4 种不同的工况, GM、GCL 和 AL 的其他参数见表 2。计算结果如图 3 所示。

图 3 研究了 AL 厚度对 GM+GCL+AL 三层衬垫对于有机污染物防渗性能的影响。由图 3 可以看出

GM+GCL 衬垫底部不设 AL 时的防污性能较差, 1 a 时底部苯的通量已经达到稳定的 1613200 mg/ha/a 。随着 AL 厚度的增大, 同一时间的 GM+GCL+AL 三层衬垫底部苯通量逐渐减小且衬垫底部苯的通量达到稳定的时间越长。GM+GCL+1 m AL 的底部稳定通量是 GM+GCL+2 m AL 的 1.9 倍, GM+GCL+1 m AL 的底部稳定通量是 GM+GCL+0.5 m AL 的 1.9 倍。GM+GCL+2 m AL 衬垫底部稳定通量仅为 GM+GCL 衬垫底部不设 AL 时的 4%。由此可见增加 AL 厚度对 GM+GCL+AL 三层衬垫底部通量减小效果明显。

表 2 GM、GCL 和 AL 的计算参数

Table 2 Parameters of GM, GCL and AL

计算参数	GM+GCL+AL
$D_m/(m^2 \cdot s^{-1})$	5.8×10^{-13}
L_m/m	0.0015
$D_g^*/(m^2 \cdot s^{-1})$	6.5×10^{-11}
n_g	0.32
R_{dg}	4.92
L_g/m	0.75
S_{lm}	57
S_{mg}	57
n_a	0.54
R_{da}	3.24
L_a/m	0.5
$D_a^*/(m^2 \cdot s^{-1})$	8×10^{-10}

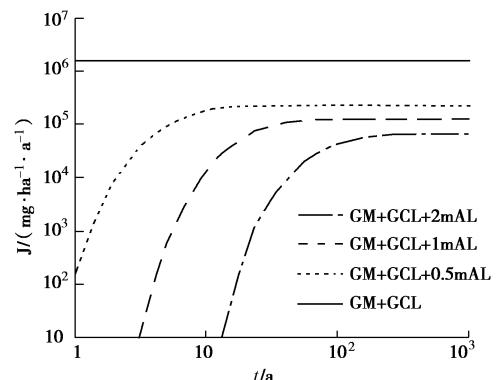


图 3 AL 厚度对于 GM+GCL+AL 衬垫底部通量的影响

Fig. 3 The influence of thickness of Al on the flux at base of GM+GCL+AL liner

4.2 GM+GCL+AL 衬垫与 GM+CCL 衬垫的比较

本节针对苯分析 GM+CCL 复合衬垫和 GM+GCL+AL 三层衬垫之间的等效厚度问题。苯的初始浓度 $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, GM+GCL+AL 三层复合衬垫由 1.5 mm GM、10 mm GCL 和 2 m AL 组成, GM、GCL 和 AL 的其他参数见表 2。GM+CCL 复合衬垫由 1.5 mm GM、0.75 m CCL 组成, GM 和 CCL 的计算参

数见表 3。对为达到与标准的 GM+0.75 m CCL 具有相似底部通量需要在 GCL 下方铺设的 AL 的厚度进行了分析。从图 4 可以看出 GM+GCL+2 m AL 三层衬垫相对于 GM+0.75 m CCL 衬垫阻止作用在短期内效果明显。随着时间的增长, GM+GCL+2 m AL 三层底部通量逐渐与 GM+0.75 m CCL 衬垫底部通量接近。GM+GCL+2 m AL 与 GM+0.75 m CCL 的底部稳定通量都大致相同。因此, 在 GM+GCL 下方铺设 2 m 以上 AL 可以使 GM+GCL+AL 衬垫达到比 GM+0.75 cm CCL 更好的有机污染物防渗效果。

表 3 GM 和 CCL 的计算参数

Table 3 Parameters of GM and CCL

计算参数	GM+CCL
$D_m/(m^2 \cdot s^{-1})$	5.8×10^{-13}
L_m/m	0.0015
$D_c^*/(m^2 \cdot s^{-1})$	6.5×10^{-11}
n_c	0.32
R_{dc}	4.92
L_c/m	0.75
S_{lm}	57
S_{mc}	57

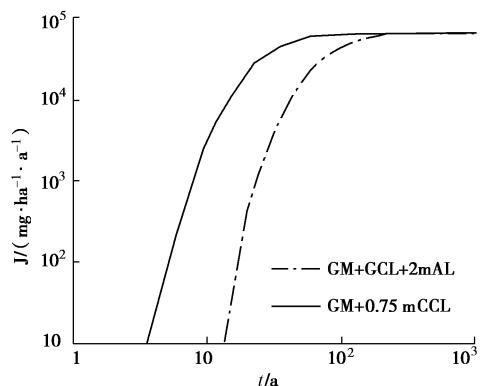


图 4 GM+GCL+AL 衬垫和 GM+CCL 衬垫底部通量对比

Fig. 4 Comparison between fluxes at base of GM+GCL+AL liner and those at base of GM+CCL liner

5 结 论

本文建立了有机污染物在 GM+GCL+AL 衬垫中的一维扩散模型, 有机污染物在土工膜上的扩散假设为稳态运移, 得到了模型的解析解。基于解析解得到的结论如下:

(1) GM+GCL+1 m AL 的底部稳定通量是 GM+GCL+2 m AL 的 1.9 倍, GM+GCL+1 m AL 的底部稳定通量是 GM+GCL+0.5 m AL 的 1.9, 增加 AL 厚度对 GM+GCL+AL 三层衬垫底部通量减小效果明显。

(2) GM+GCL+2 m AL 三层衬垫相对于 GM+0.75

m CCL 衬垫阻止作用在短期内效果明显。GM+GCL+2 m AL 三层底部稳定通量与 GM+0.75 m CCL 衬垫底部稳定通量接近。

(3) 在本文的计算条件下, 在 GM+GCL 下方铺设 2 m 以上 AL 可以使 GM+GCL+AL 衬垫可达到比 GM+0.75 m CCL 更好的有机污染物防渗效果。

参考文献:

- [1] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 18 - 20. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Modern sanitary landfill design and construction[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 吴 瑞, 施建勇, 何 俊. 等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的扩散分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 120 - 124. (WU Xun, SHI Jian-yong, HE Jun. An analysis of organic contaminant diffusion through clay liner under the condition of transient temperature[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 120 - 124. (in Chinese))
- [3] 钱学德, 施建勇, 郭志平, 等. 黏土衬垫系统污染物迁移规律研究[J]. 河海大学学报, 2004, 32(4): 415 - 420. (QIAN XUE-de, SHI Jian-yong, GUO Zhi-ping, et al. Regularity of contaminant transport through geosynthetic clay liners[J]. Journal of Hohai University, 2004, 32(4): 415 - 420. (in Chinese))
- [4] CJJ 113—2007 生活垃圾填埋场防渗系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (CJJ 113—2007 Technical code for liner system of municipal solid waste landfill[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 陈云敏, 谢海建, 柯 瀚, 等. 挥发性有机化合物在复合衬里中的一维扩散解[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1076 - 1080. (CHEN Yun-min, XIE Hai-jian, KE Han, et al. Analytical solution of one-dimensional diffusion of volatile organic compounds (VOCs) through composite liners[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1076 - 1080. (in Chinese))
- [6] PEREZ GURRERO J S, SKAGGA T H, VAN GENUCHTE M T. Analytical solution for multi-species contaminant transport subject to sequential first-order decay reactions in finite media[J]. Transp Porous Med, 2009, 80: 373 - 387.
- [7] FOOSE G J. Leakage rates and chemical transport through composite landfill liners[D]. Madison: University of Wisconsin, 1997.

- [8] EDIL T B. A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners[J]. *Waste Management*, 2003, **23**: 561 – 571.
- [9] FOOSE G J, BENSON C H, EDIL T B. Analytical equations for predicting concentration and mass flux from composite liners[J]. *Geosynthetics International*, 2001, **8**(6): 551 – 575.
- [10] 何俊, 何世秀, 胡其志. 有机污染物在完好复合衬垫中的迁移分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1653 – 1657. (HE jun, HE shi-xiu, HU qi-zhi. Analysis of organic contaminant transfer through intact composite liner[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(6): 1653 – 1657. (in Chinese))
- [11] 谢海建, 楼章华, 陈云敏, 等. 污染物通过 GCL/AL 防渗层对流-弥散解析解[J]. 科学通报, 2010, **55**(21): 2148 – 2155. (XIE hai-jian, LOU zhang-hua, CHEN yu-ming, et al. An analytic solution to contaminant advection and dispersion through GCL/AL liner system[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, **55**(21): 2148 – 2155. (in Chinese))
- [12] CLEALL P J, LI Y C. Analytical solution for diffusion of VOCs through composite landfill liners[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(9): 850 – 854.
- [13] KIM J Y, EDIL T B, PARK J K. Volatile organic compound (VOC) transport through compacted clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, **127**(2): 126 – 134.
- [14] FOOSE G J, BENSON C H, EDIL T B. Comparison of solute transport in three composite liners[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(5): 1 – 13.

(本文责编 黄贤沙)