

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.004

考虑生物降解作用时 GCL+AL 衬垫中
有机污染物的扩散规律

吴 珣^{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. 河海大学岩土工程科学研究所,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: 为研究有机污染物在土工复合膨润土衬垫(GCL)+土体保护层(AL)衬垫中的运移规律,建立了考虑AL中生物降解作用的GCL+AL衬垫中有机污染物一维扩散模型,并得到该模型的解析解。通过与Pollute v7的计算结果进行比较,验证了模型的合理性。基于该模型,分析了生物降解作用对有机污染物在GCL+AL衬垫中运移的影响,探讨考虑生物降解时GCL+AL与压实黏土衬垫(CCL)之间的等效性。结果表明,减小有机污染物在AL中的降解半衰期可以减少GCL+AL衬垫底部有机污染物通量。在文中计算条件下,GCL+1m以上的AL复合衬垫可代替标准的0.75m CCL。

关键词: 填埋场防渗系统;生物降解作用;有机污染物;苯扩散规律;解析解;GCL+AL衬垫
中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)01-0016-06

Rule of diffusion of organic pollutants through
GCL+AL liners considering biodegradation

WU Xun^{1,2}, SHI Jianyong^{1,2}, HE Jun³

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

Abstract: A one-dimensional model describing diffusion of organic pollutants through composite liners of geosynthetic clay liner (GCL) and attenuation liner (AL) was developed to investigate the transport of organic pollutants in the composite liners. Degradation of the organic pollutants in AL is considered. The analytical solution to the model was obtained, and the results are in good agreement with those from Pollute v7 software, showing the reasonability of the proposed model. The effect of biodegradation on diffusion of organic pollutants was investigated on the basis of the proposed model. The equivalence between GCL+AL and the compacted clay liner (CCL) is discussed with consideration of biodegradation. The results show that the bottom flux of the GCL+AL composite liners is reduced when the degradation half-life of organic pollutants in AL decreases. The standard 0.75 m CCL can be replaced by a combination of a GCL and an AL with a thickness of more than one meter under the calculation conditions described in this paper.

Key words: seepage prevention system of landfill; biodegradation; organic pollutants; diffusion rule of benzene; analytical solution; GCL+AL liners

卫生填埋法广泛应用于城市固体废弃物的处理,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的重要组成部分之一^[1-3]。由于土工复合膨润土衬垫(GCL)价格经济、施工简便、工期短,因此已被广泛应用于填埋场的衬垫系统中^[4-5]。CJJ 113—2007《生活垃圾填埋场防渗系统工程技术规范》^[6]规定填埋场可采用下方具有一层土体保护层(AL)的 GCL 代替压实黏土衬垫(CCL),但是规范中未对 AL 的厚度进行规定。因此分析污染物在 GCL+AL 复合衬垫中的运移规律并探讨 GCL+AL 复合衬垫与传统 CCL 的等效性具有重要意义。

填埋场中的污染物种类繁多,其中有机污染物虽然浓度较低,但危害性大。渗滤液中的有机污染物和无机污染物在复合衬垫中的迁移方式不同,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]。目前研究有机物在复合衬垫中的扩散运移主要有数值方法和解析解 2 种方法。Foosse 等^[8]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^[9]建立了有机污染物在完好复合衬垫中迁移的一维模型,并得到了解析解。谢海建等^[10]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传统压实黏土衬垫之间的等效性。Cleall 等^[11]建立了一系列污染物在双层衬垫系统中的扩散方程,并给出不同边界条件下模型的解析解。但是,上述研究在建立运移模型时都未考虑污染物在衬垫中的生物降解作用。

生物降解是有机污染物在土体中运移的一个重要机理^[12-13]。Xie 等^[14]在假设污染物通过土工膜为稳态过程的基础上建立了考虑生物降解的有机污染物通过复合衬垫的一维扩散模型,并得到了模型的解析解,基于解析解分析得出生物降解作用对有机污染物复合衬垫中的迁移有较大影响的结论。因此为了准确分析填埋场中衬垫中的污染物运移,应充分考虑生物降解作用。目前关于考虑生物降解作用下污染物在复合衬垫中的运移解析解答还很少,考虑生物降解作用下针对污染物在不同类型的复合衬垫运移解析解还需进一步完善。

笔者在已有研究的基础上,建立了考虑生物降解作用的有机污染物在 GCL+AL 衬垫中的一维扩散模型,采用分离变量法对所建立模型进行求解。基于模型的解析解,分析了生物降解作用对有机污染物在 GCL+AL 衬垫中运移的影响,结合解析解探讨了考虑降解时 GCL+AL 与 CCL 之间的等效性。

1 模型建立

模型的主要假设为:(a)有机污染物主要通过扩散运移,不考虑对流作用;(b)污染物扩散是一维的;(c)污染物在土中的扩散系数为常数;(d)压实黏土和 GCL 是均质、饱和的;(e)介质对污染物的吸附作用均为平衡线性吸附。计算模型如图 1 所示。

因为 GCL 的厚度很薄(约为 10 mm),因此不考虑污染物在 GCL 中的生物降解作用,污染物在 GCL 中的运移控制方程为

$$\frac{\partial C_g(z,t)}{\partial t} = \frac{D_g}{R_{dg}} \frac{\partial^2 C_g(z,t)}{\partial z^2} \tag{1}$$

式中: $C_g(z,t)$ ——污染物在 GCL 中的质量浓度; D_g ——污染物在 GCL 中的扩散系数; t ——时间; R_{dg} ——GCL 对污染物吸附的阻滞因子。

污染物在 AL 中的运移控制方程为

$$\frac{\partial C_a(z,t)}{\partial t} = \frac{D_a}{R_{da}} \frac{\partial^2 C_a(z,t)}{\partial z^2} - \lambda C_a(z,t) \tag{2}$$

其中 $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$

式中: $C_a(z,t)$ ——污染物在 AL 中的质量浓度; D_a ——污染物在 AL 中的有效扩散系数; R_{da} ——AL 对污染物吸附的阻滞因子; λ ——考虑降解作用时污染物在 AL 中的衰变系数; $t_{1/2}$ ——污染物在土层中的降解半衰期。

假设污染物在衬垫系统中的初始质量浓度均为零,即

$$C_g(z,0) = 0 \quad C_a(z,0) = 0 \tag{3}$$

渗滤液中污染物质量浓度假设为恒定值 C_0 ,则 GCL 的上边界条件为

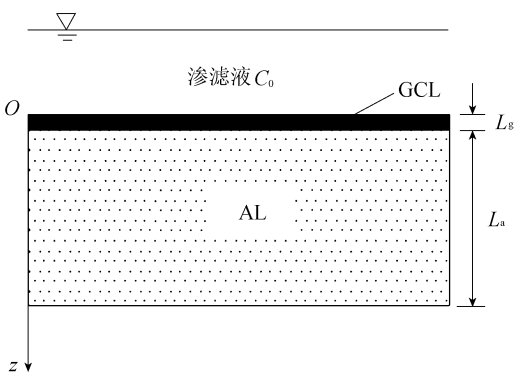


图 1 计算模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

$$C_g(0,t)=C_0 \tag{4}$$

式中: C_0 ——污染物初始质量浓度。

在 GCL 和 AL 的交界面,污染物质量浓度满足浓度连续和通量连续条件^[15]:

$$C_g(L_g,t)=C_a(L_g,t) \quad n_g D_g \frac{\partial C_g(L_g,t)}{\partial z} = n_a D_a \frac{\partial C_a(L_g,t)}{\partial z} \tag{5}$$

式中: n_g ——GCL 的孔隙率; n_a ——AL 的孔隙率; L_g ——GCL 的厚度。

衬垫系统下边界,即在复合衬里的底部,若其下伏含水层或渗滤液导流层的流速足够大,以致能及时带走进入该层的污染物时,可认为复合衬里底部的浓度为零,即

$$C_a(L,t)=0 \quad L=L_g+L_a \tag{6}$$

式中: L_a ——AL 的厚度。

2 模型求解

模型的边界条件为非齐次,为求解模型,设

$$C_g(z,t)=u_g(z)+v_g(z,t) \quad C_a(z,t)=u_a(z)+v_a(z,t) \tag{7}$$

$u_i(z)$ 的选取应保证 $v_i(z,t)$ 满足齐次边界条件, $u_i(z)$ 满足:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_g(z)}{dz^2} = 0 & \frac{D_a}{R_{da}} \frac{d^2 u_a(z)}{dz^2} - \lambda u_a(z) = 0 & u_g(0) = C_0 \\ u_a(L) = 0 & n_g D_g \frac{du_g(L_g)}{dz} = n_a D_a \frac{du_a(L_g)}{dz} & u_g(L_g) = u_a(L_g) \end{cases} \tag{8}$$

$v_i(z,t)$ 满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_g(z,t)}{\partial t} = \frac{D_g}{R_{dg}} \frac{\partial^2 v_g(z,t)}{\partial z^2} & \frac{\partial v_a(z,t)}{\partial t} = \frac{D_a}{R_{da}} \frac{\partial^2 v_a(z,t)}{\partial z^2} - \lambda v_a(z,t) \\ v_g(z,0) = -u_g(z) & v_a(z,0) = -u_a(z) & v_g(0,t) = 0 \\ v_g(L_g,t) = v_a(L_g,t) & v_a(L,t) = 0 & n_g D_g \frac{\partial v_g(L_g,t)}{\partial z} = n_a D_a \frac{\partial v_a(L_g,t)}{\partial z} \end{cases} \tag{9}$$

分别求 $u_i(z)$ 、 $v_i(z,t)$ 后叠加得到 $C_i(z,t)$ 的解为

$$C_g(z,t) = \sum_{m=1}^\infty E_m \sin\left(\xi_m \frac{z}{L_g}\right) e^{-\beta_m t} + A_1 + A_2 z \tag{10}$$

$$C_a(z,t) = \sum_{m=1}^\infty E_m F_m \sin\left(\mu \xi_m \frac{L-z}{L_g}\right) e^{-\beta_m t} + B_1 e^{\varepsilon_1 z} + B_2 e^{\varepsilon_2 z} \tag{11}$$

其中

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\sqrt{\frac{R_{da}\lambda}{D_a}} & \varepsilon_2 &= \sqrt{\frac{R_{da}\lambda}{D_a}} \\ A_1 &= C_0 & B_2 &= -B_1 e^{2\varepsilon_1 L} & \beta_m &= \frac{D_g}{R_{dg}} \left(\frac{\xi_m}{L_g}\right)^2 \\ A_2 &= \frac{C_0 D_a n_a \varepsilon_1 (e^{\varepsilon_1 L_g} + e^{2\varepsilon_1 L - \varepsilon_1 L_g})}{n_g D_g (e^{\varepsilon_1 L_g} - e^{2\varepsilon_1 L - \varepsilon_1 L_g}) - n_a D_a \varepsilon_1 L_g (e^{\varepsilon_1 L_g} + e^{2\varepsilon_1 L - \varepsilon_1 L_g})} \\ B_1 &= \frac{C_0 n_g D_g}{n_g D_g (e^{\varepsilon_1 L_g} - e^{2\varepsilon_1 L - \varepsilon_1 L_g}) - n_a D_a \varepsilon_1 L_g (e^{\varepsilon_1 L_g} + e^{2\varepsilon_1 L - \varepsilon_1 L_g})} \\ E_m &= \frac{I_1 + I_2 + I_3}{L_g \left[n_g R_{dg} + n_a R_{da} \frac{L_a}{L_g} F_m^2 + \left(\frac{D_g R_{da}}{D_a R_{dg}} \mu^2 - n_g R_{dg} \right) \frac{\sin(2\xi_m)}{2\xi_m} \right]} \\ \mu &= \sqrt{\frac{D_g R_{da}}{D_a R_{dg}} - \frac{\lambda L_g^2}{\xi_m^2 D_a}} & F_m &= \frac{\sin \xi_m}{\sin\left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g}\right)} \end{aligned}$$

$$I_1 = \frac{2}{\xi_m^2} [A_1 \xi_m \cos \xi_m - A_1 \xi_m + A_2 \xi_m L_g \cos \xi_m - A_2 L_g \sin \xi_m]$$
$$I_2 = \frac{2n_a R_{da} F_m B_1}{\varepsilon_1^2 L_g^2 + \mu^2 \xi_m^2} \left[\varepsilon_1 \sin \left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g} \right) e^{\varepsilon_1 L_g} L_g + \mu \xi_m \cos \left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g} \right) e^{\varepsilon_1 L_g} - \mu \xi_m e^{\varepsilon_1 L_g} \right]$$
$$I_3 = \frac{2n_a R_{da} F_m B_2}{\varepsilon_1^2 L_g^2 + \mu^2 \xi_m^2} \left[\varepsilon_2 \sin \left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g} \right) e^{\varepsilon_2 L_g} L_g + \mu \xi_m \cos \left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g} \right) e^{\varepsilon_2 L_g} - \mu \xi_m e^{\varepsilon_2 L_g} \right]$$

确定 ξ_m 的特征方程为

$$n_g D_g \cos \xi_m \sin \left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g} \right) + n_a D_a \mu \sin \xi_m \cos \left(\mu \xi_m \frac{L_a}{L_g} \right) = 0$$

(12)

基于 μ, β_m, F_m , 得到 GCL+AL 衬垫底部的污染物通量 J :

$$J = -n_a D_a \frac{\partial C_a(L, t)}{\partial z} = \frac{n_a D_a}{L_g} \sum_{m=1}^{\infty} \mu \xi_m E_m F_m e^{-\beta_m t} - n_a D_a \varepsilon_1 B_1 e^{\varepsilon_1 L} - n_a D_a \varepsilon_2 B_2 e^{\varepsilon_2 L}$$

(13)

3 模型验证

为了验证模型的合理性,笔者将本文解析方法算得的 GCL+AL 衬垫中的污染物浓度分布与污染物运移分析软件 Pollute v7 的计算结果进行对比分析。苯是一种毒性很大的致癌物质,也是一种易溶的具有较强迁移能力的物质,很容易进入地下水系统,污染地下水环境。因此,笔者选取苯作为有机污染物的代表。GCL+AL 衬垫由 13.8 mm GCL 和下卧 0.6 m 压实黏土 AL 组成,GCL 和 AL 的参数参照文献[11,14,16],见表 1,苯的初始质量浓度 $C_0 = 1 \text{ mg/L}$ [17]。

表 1 GCL 和 AL 的计算参数

Table 1 Calculation parameters of GCL and AL

GCL 计算参数				AL 计算参数			
$D_g / (10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	L_g / mm	n_g	R_{dg}	$D_a / (10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	L_a / m	n_a	R_{da}
3.3	13.8	0.46	1	8.0	0.6	0.54	3.24

图 2 给出了 2 种方法得到的不同降解参数下考虑降解时复合衬垫中污染物浓度分布曲线。由图 2 可以看出,不同降解参数下基于本文解得到的污染物浓度分布情况与 Pollute v7 得到的分布曲线基本一致,验证了本文解析解的合理性和可靠性。

4 算例分析

4.1 考虑与不考虑生物降解作用对比

基于本文解析解,笔者分析了 AL 降解半衰期对 GCL+AL 衬垫底部污染物通量的影响。选取苯作为有机污染物的代表,GCL+AL 衬垫由 13.8 mm GCL 和下卧 0.6 m 压实黏土 AL 组成,GCL 和 AL 的参数见表 1,苯的初始质量浓度 $C_0 = 1 \text{ mg/L}$ 。参照文献[14],苯的降解半衰期一般为 10 ~ 50 a,本文选取降解半衰期分别为 10 a 和 20 a。计算结果如图 3 所示。

从图 3 可看出,考虑生物降解作用与不考虑生物降解得到的 GCL+AL 衬垫底部污染物通量差别较大。不考虑生物降解作用时 GCL+AL 衬垫底部稳定时的苯通量为 $0.0212 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,考虑降解作用且降解半衰期为 10 a 时苯通量为 $0.0124 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。同一时刻不考虑生物降解作用得到的 GCL+AL 衬垫底部污染物通量大于考虑生物降解作用得到的结果。由此可见生物降解作用对有机污染物迁移的影响不可忽略。

降解半衰期为 10 a 和 20 a 时 GCL+AL 衬垫底部稳定时的苯通量分别为 $0.0124 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和

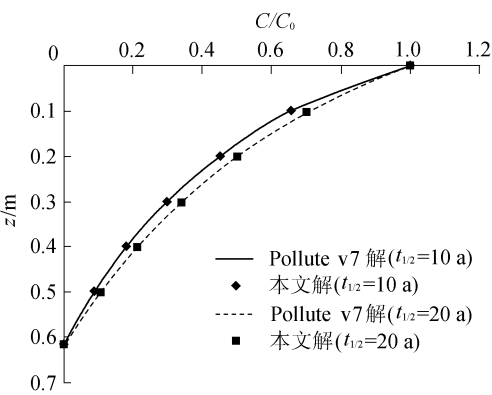


图 2 本文解和 Pollute v7 得到 GCL+AL 衬垫污染物浓度分布比较

Fig. 2 Comparison of concentration profiles of pollutants in GCL+AL liners from analytical solutions described in this paper with those from Pollute v7 software

0.0161 g/(m²·a)。随着降解半衰期增大,GCL+AL 衬垫底部污染物通量增大。由此可见,减小有机污染物在 AL 中的降解半衰期,增强污染物在 AL 中的降解作用可以提高 GCL+AL 衬垫的防渗效果。

4.2 GCL+AL 衬垫与 CCL 的比较

对于单层 CCL,考虑有机污染物的降解作用时污染物在 CCL 衬垫中的运移方程定解问题为

$$\begin{cases} \frac{\partial C(z,t)}{\partial t} = \frac{D^*}{R_d} \frac{\partial^2 C(z,t)}{\partial z^2} - \lambda_1 C(z,t) \\ C(0,t) = C_0 \quad C(L_c,t) = 0 \quad C(z,0) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

求解得到 CCL 底部的污染物通量 J :

$$J = \frac{nD^*}{L_c} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2m^2\pi^2 D^*}{m^2\pi^2 D^* + \lambda R_d L_c^2} (-1)^m e^{-\left(\frac{m^2\pi^2 D^*}{R_d L_c^2} + \lambda\right)t} - nD^* \frac{\sqrt{\frac{\lambda R_d}{D^*}} e^{L_c \sqrt{\frac{\lambda R_d}{D^*}}}}{1 - e^{2L_c \sqrt{\frac{\lambda R_d}{D^*}}}} + nD^* \frac{\sqrt{\frac{\lambda R_d}{D^*}} e^{-L_c \sqrt{\frac{\lambda R_d}{D^*}}}}{1 - e^{-2L_c \sqrt{\frac{\lambda R_d}{D^*}}}} \quad (15)$$

式中: D^* ——污染物在 CCL 中的有效扩散系数; L_c ——CCL 的厚度; n ——CCL 的孔隙率; R_d ——CCL 对污染物的阻滞因子; λ_1 ——考虑降解作用时污染物在 CCL 中的衰减系数。

用衬垫底部污染物通量来反映复合衬垫防渗性能,结合式(13)和式(15)对比分析 GCL+AL 衬垫与 CCL 底部污染物通量。选取苯作为有机污染物的代表,GCL+AL 衬垫由 13.8 mm GCL 和下卧 0.6~1 m 压实黏土 AL 组成,GCL 和 AL 的参数见表 1。CCL 为 0.75 m 压实黏土, $D^*=5\times 10^{-10}$ m²/s, $L_c=0.75$ m, $n=0.5$, $R_d=3.5$ 。苯的初始质量浓度 $C_0=1$ mg/L。苯在 CCL 和 AL 中的降解半衰期相同,分别取为 10 a 和 20 a。计算结果如图 4 所示。

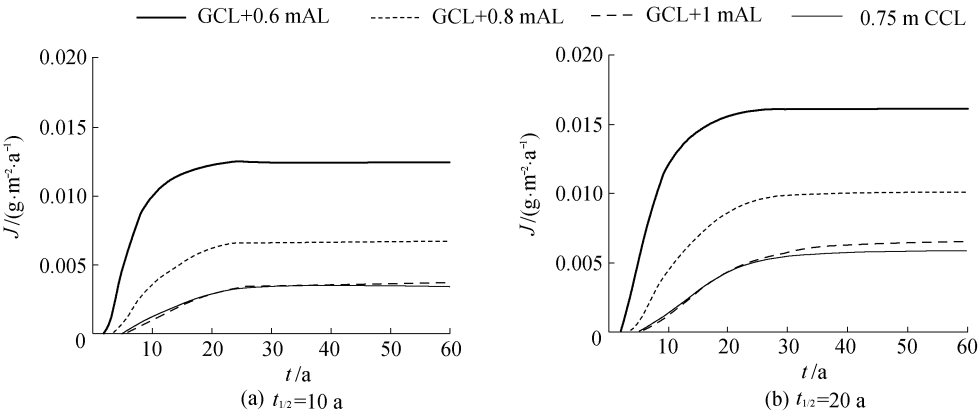


图 4 GCL+AL 衬垫和 CCL 底部污染物通量对比
Fig. 4 Comparison of bottom flux between GCL+AL liners and CCL liner

图 4 描述了 AL 厚度对 GCL+AL 衬垫防渗性能的影响。同一降解半衰期下,随着 AL 厚度的增大,同一时间的 GCL+AL 衬垫底部污染物通量逐渐减小。降解半衰期为 10 a,GCL+0.6 mAL 的底部污染物稳定通量是 GCL+0.8 mAL 的 1.85 倍。降解半衰期为 20 a,GCL+0.6 mAL 的底部污染物稳定通量是 GCL+0.8 mAL 的 1.59 倍。由此可见增加 AL 厚度对复合衬垫底部污染物通量减小效果明显。

本节针对苯分析了考虑降解作用下 GCL 和 CCL 之间的等效厚度问题,即在 GCL 下方铺设多厚的 AL 能达到与标准的 75 cm CCL 具有同样底部污染物通量。从图 4 可以看出降解半衰期分别为 10 a 和 20 a 时,GCL+1 mAL 与 75 cm CCL 的底部污染物通量都大致相同。因此,在 GCL 下方铺设 1 mAL 可以使 GCL+AL 衬垫达到与 75 cm CCL 相同的有机污染物防渗效果。

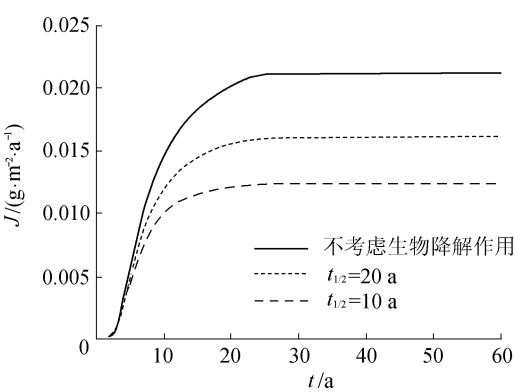


图 3 AL 降解参数对 GCL+AL 衬垫底部污染物通量的影响
Fig. 3 Effect of degradation parameter of AL on bottom flux of GCL+AL liners

5 结 论

- a. 降解参数对有机污染物在 GCL+AL 衬垫中的迁移有较大影响。与不考虑 AL 中生物降解作用相比,考虑生物降解作用得到的 GCL+AL 垫底部污染物通量较小。
- b. 增强有机污染物在 AL 中的降解作用可以提高 GCL+AL 衬垫的防渗效果。
- c. 增加 AL 厚度对减小 GCL+AL 衬垫底部污染物通量效果明显。在本文的计算条件下,为达到与标准 CCL 同样的苯的防渗效果,需在 GCL 下方铺设 1 m 以上 AL。

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.

[2] 吴珣,施建勇,何俊. 非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 Jianyong,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] QIAN Xuede. Limit equilibrium analysis of translational failure of landfills under different leachate buildup conditions [J]. Water Science and Engineering, 2008, 1 (1) : 44-62.

[4] 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:自然科学版,2004, 32 (4) : 415-420. (QIAN Xuede, SHI Jianyong, GUO Zhiping, et al. Regularity of contaminant transport through geosynthetic clay liners [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32 (4) : 415-420. (in Chinese))

[5] EDIL T B. A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners [J]. Waste Management, 2003, 23 (7) : 561-571.

[6] CJJ 113—2007 生活垃圾填埋场防渗系统工程技术规范 [S].

[7] FOOSE G J. Leakage rates and chemical transport through composite landfill liners [D]. Madison: University of Wisconsin, 1997.

[8] FOOSE G J, BENSON C H, EDILI T B. Analytical equations for predicting concentration and mass flux from composite liners [J]. Geosynthetics International, 2001, 8 (6) : 551-575.

[9] 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 Shixiu, HU Qizhi. Analysis of organic contaminant transfer through intact composite liner [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (6) : 1653-1657. (in Chinese))

[10] 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 Haijian, LOU Zhanghua, CHEN Yunmin, 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))

[11] CLEALL P J, LI Yuchao. Analytical solution for diffusion of VOCs through composite landfill liners [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137 (9) : 850-854.

[12] 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.

[13] XU Jian, WU Laosheng, CHEN Weiping, et al. Adsorption and degradation of ketoprofen in soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38 (3) : 1177-1182.

[14] XIE Haijian, LOU Zhanghua, CHEN Yunmin. An analytical solution to organic contaminant diffusion through composite liners considering the effect of degradation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 36 : 10-18.

[15] FOOSE G J, BENSOM C H, EDIL T B. Analytical equations or predicting concentration and mass flux from composite liners [J]. Geosynthetics International, 2001, 8 (6) : 551-575.

[16] FOOSE G J, BENSOM 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.

[17] ÖMAN C B, JUNESTEDT C. Chemical characterization of landfill leachates-400 parameters and compounds [J]. Waste Management, 2008, 28 (10) : 1876-1891.