

DOI: 10.11779/CJGE20211462

考虑对流-扩散-吸附-降解时成层介质中有机污染物 一维运移的解析模型

江文豪^{1,2,3}, 李江山^{*1,3}, 黄 哉^{1,3}, 韩丽君^{1,2,3}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 污染泥土科学与工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对成层介质中有机污染物一维运移问题, 建立了考虑对流-扩散-吸附-降解时成层介质中有机污染物的一维运移模型, 并采用分离变量法获得了该模型解析解。通过将一维运移解析模型的计算结果分别与现有解析解的计算结果和数值方法的计算结果进行对比分析, 对所建模型正确性进行了验证。基于所建解析模型, 以4层土体为例, 对有机污染物一维运移过程展开了参数分析。结果表明, 渗滤液水头 h_w 引起的对流作用会加快运移过程, 增大底部通量。与 h_w 为0.0 m时相比, h_w 为2.0 m下的底部通量可增大一个数量级以上; 降解作用会降低质量浓度和底部通量。当运移过程达到稳态时, 与降解半衰期 $t_{1/2}$ 趋近于无穷大时相比, $t_{1/2}$ 为100a下的底部通量可降低约45%; Robin边界常数 α 的增大会使得底部范围内的质量浓度降低, 同时也会使得底部通量增大, 但不同 α 下的底部通量在同一数量级内变化。

关键词: 有机污染物; 成层介质; 对流-扩散-吸附-降解; 一维运移; 解析解

中图分类号: TU449; X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)02-0262-11

作者简介: 江文豪(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事土体固结与污染物运移耦合方面的理论和试验研究工作。E-mail: Geo_Jiang2020@163.com。

Analytical model for one-dimensional transport of organic contaminants in multi-layered media considering advection-diffusion-adsorption-degradation

JIANG Wenhao^{1, 2, 3}, LI Jiangshan^{1, 3}, HUANG Xiao^{1, 3}, HAN Lijun^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Province Key Laboratory of Contaminated Sludge and Soil Science and Engineering, Wuhan 430071, China)

Abstract: For the problem of one-dimensional transport of organic contaminants in multi-layered media, a one-dimensional organic contaminants transport model in multi-layered media considering advection-diffusion-adsorption-degradation is established, and the analytical solution for the model is obtained by using the separation variable method. The correctness of the established one-dimensional transport analytical model is verified by comparing the calculated results with those of the existing analytical solution and the numerical method. Based on the established analytical model, the one-dimensional transport process of organic contaminants in a four-layer soil is taken as an example to conduct the parameter analysis. The results show that the advection caused by the leachate head h_w will accelerate the transport process and increase the bottom flux. Compared with that at h_w of 0.0 m, the bottom flux at 2.0 m can be increased by more than one order of magnitude. The degradation will reduce the concentration and bottom flux. When the transport process reaches the steady state, the bottom flux at degradation half-life $t_{1/2}$ of 100 a can be reduced by about 45% compared with that at $t_{1/2}$ of infinity. The increase of the Robin boundary constant α will reduce the concentration in the bottom region, and also will increase the bottom flux, which varies in the same order of magnitude under different α .

Key words: organic contaminant; multi-layered medium; advection-diffusion-adsorption-degradation; one-dimensional transport; analytical solution

0 引言

为阻止和减缓垃圾填埋场、固体废物堆填场等污

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1804002); 国家自然科学基金项目(51827814, 42177163)

收稿日期: 2021-12-08

*通信作者(E-mail: jsli@whrsm.ac.cn)

染场地中污染物的扩散与迁移, 工程上常在污染场地底部预先设置防渗系统^[1-4]。对于底部防渗系统, 常用防渗材料包括土工膜、土工复合膨润土衬垫、压实黏土衬垫和土体保护层等^[4-8]。在实际工程中, 为提高底部防渗系统的防渗性能, 常将不同类型的防渗材料进行紧密贴合, 从而组成多层防渗系统^[4-11]。为评价和比较不同多层防渗系统的有效性, 许多学者开展了有机污染物一维运移的相关理论研究^[6-19]。

对于底部防渗系统中有机污染物的一维运移问题, 以往学者大多考虑了双层和三层防渗系统的情况, 并针对不同工程情况提出了一系列解析模型^[6-19]。如对于双层防渗系统, 陈云敏等^[8]考虑了分子扩散和吸附作用, 获得了有机污染物一维瞬态运移的解析解; 考虑到上部边界质量浓度会随时间变化, Cleall 等^[10-11]给出了不同底部边界条件下有机污染物一维运移的解析解。针对三层防渗系统, Wu 等^[14]通过采用分离变量法, 获得了考虑降解情况下有机污染物一维运移的解析解; Feng 等^[17]考虑了对流、扩散、吸附和降解对运移过程的影响, 推得了有机污染物在三层复合衬垫中一维完全瞬态运移的解析解; Pu 等^[18]采用扩散-吸附-降解运移模型研究了三层复合衬垫中有机污染物的一维运移问题, 并发展得到了相应解析解。

对于污染场地的底部防渗系统, 由于其底部有厚度很大的下卧土层^[20-23], 因而一些学者在研究多层防渗系统中有机污染物的一维运移问题时会假定底部边界为半无限下边界的情况, 并求解得到了相应的解析解^[9, 15, 20-22]。如针对双层防渗系统, Foose^[21]通过假定底部边界为半无限下边界的情况, 提出了有机污染物一维运移的解析解; 考虑到对流作用和机械弥散会加快运移过程, 谢海建等^[9]求得了半无限下边界情况下有机污染物的一维对流-弥散解析解; 针对三层防渗系统, Xie 等^[15]研究了考虑降解时有机污染物的一维运移问题, 并发展得到了底部边界为半无限下边界情况下的一维运移解析解。

实际上, 尽管污染场地底部的下卧土层一定程度会阻止和减缓污染物的扩散与迁移, 但其厚度是有限的^[23-25]。为研究考虑下卧土层情况下底部防渗系统中污染物的运移问题, 同时考虑到底部防渗系统具有多层次及下卧土层具有成层性^[24-28], 一些学者对成层介质中污染物运移问题展开了相关研究^[24-37]。如陈云敏等^[24]考虑了分子扩散和吸附作用, 求得了污染物在成层介质中一维运移的解析解; 考虑到衰变作用对运移过程的影响, 余闯等^[28]发展得到了成层介质中污染物一维运移解析解; Liu 等^[29]针对扩散系数随位置发生变化的情况, 提出了溶质在成层介质中一维运移的解

析解; Dardouri 等^[35]通过开展土柱试验, 研究了吸附特性对有机污染物在成层土体中运移过程的影响; Yan 等^[36]研究了考虑降解情况下有机污染物在成层介质中的运移行为, 并基于广义积分变换法获得了相应解析解; 王亮等^[37]基于分子扩散和对流作用, 提出了成层介质中污染物一维运移的等效分析模型。

对于有机污染物在成层介质中的一维运移过程, 其运移规律会受多种因素的影响, 包括对流、分子扩散、机械弥散、吸附和降解等^[24-37]。然而, 在以上研究中, 有关有机污染物在成层介质中一维运移解析解答所考虑的运移机理不够完整, 如 Yan 等^[36]忽略了对流及机械弥散的影响; 王亮等^[37]忽略了降解作用的影响。此外, 对于有机污染物的一维运移问题, 其底部边界条件会对运移过程产生较大影响^[36, 38-40], 但以往研究大多假定底部边界为零质量浓度边界或零质量浓度梯度边界两种特定的情况^[24-25, 27-28, 37], 未对更具普遍性的质量浓度梯度与质量浓度呈函数关系的 Robin 边界情况开展相关解析理论研究^[38-40]。

针对以上研究情况, 为更为全面认识有机污染物在成层介质中的一维运移规律, 本文首先在已有研究基础上建立了考虑对流-扩散-吸附-降解时成层介质中有机污染物的一维运移模型, 并通过采用分离变量法求解得到了该模型的解析解。随后, 通过将一维运移解析模型的计算结果分别与陈云敏等^[24]所提解析解的计算结果以及数值方法的计算结果进行对比, 验证了所建模型的正确性。最后, 以 4 层土体中有机污染物的一维运移过程为例, 分析了相关参数变化对有机污染物在成层介质中运移过程的影响。

1 有机污染物的一维运移模型

1.1 计算简图

根据参考文献[24~28], 这里以成层土体为例给出了成层介质中有机污染物一维运移模型的计算简图(图 1)。在图 1 中, 从上至下依次为渗滤液、成层土体和水平导流层。竖向坐标系 z 由上部边界垂直向下, h_w 为渗滤液水头; C_0 为渗滤液中有机污染物质量浓度, 假定有机污染物质量浓度保持恒定^[14-19], 成层土体总共有 n 层, 第 i 层土体厚度记为 l_i , 土层的总厚度记为 L , $L = l_1 + l_2 + \dots + l_n$ 。为考虑更具普遍性的 Robin 边界条件对有机污染物运移过程的影响, 这里设定成层土体底部为具有一定透水性的水平导流层^[24-25, 38-40]。

1.2 基本假定

为获得考虑对流-扩散-吸附-降解时有机污染物在成层介质中一维运移的解析解, 参考已有的理论和相关试验研究^[14-19, 24-28], 作如下基本假定: ①每层土

体是均质、各向同性的，且处于饱和状态；②有机污染物的运移过程是一维的，且遵循 Fick 第二定律；③在渗滤液水头下，渗流过程已达到稳定渗流状态；④有机污染物的扩散系数为常数，每层土体的扩散系数不随时间和空间变化；⑤每层土体中土颗粒对污染物的吸附为等温线性吸附，且均已达到平衡状态；⑥采用一阶降解模型来考虑降解作用对运移过程的影响；⑦考虑单一有机污染物，运移方式考虑对流、分子扩散、机械弥散、吸附和降解。

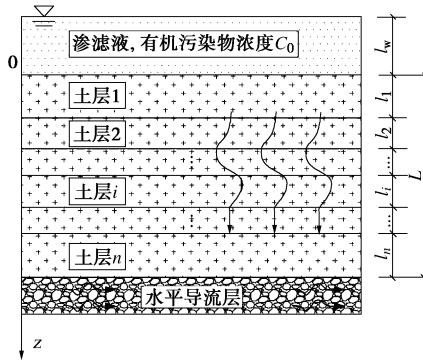


图 1 一维运移模型的计算简图

Fig. 1 Calculation diagram for one-dimensional transport model

需要说明的是，由于影响有机污染物运移过程的因素很多，上述假定条件可能与实际运移情况存在差异，如稳定渗流状态假定可能会高估有机污染物的运移速率。但上述假定条件与实际工况较为相符的，这些假定条件在理论研究中也已被广泛采用^[14-19, 24-28]。

1.3 一维运移控制方程及求解条件

在上述假定基础上，根据质量守恒定律，考虑对流、分子扩散、机械弥散、吸附和降解时有机污染物一维运移的控制方程可写为^[14-19, 24-28]

$$\frac{\partial C_i(z,t)}{\partial t} = \frac{D_i}{R_{d,i}} \frac{\partial^2 C_i(z,t)}{\partial z^2} - \frac{v_i}{R_{d,i}} \frac{\partial C_i(z,t)}{\partial z} - \lambda_i C_i(z,t) \quad (L_{i-1} \leq z \leq L_i) \quad (1)$$

式中： $C_i(z,t)$ 为第 i 层介质中有机污染物的质量浓度， $i=1, 2, \dots, n$ ； D_i 为水动力弥散系数， $D_i = D_{e,i} + D_{md,i}$ ， $D_{e,i}$ 为有效扩散系数， $D_{md,i} = \alpha_{L,i} v_i$ ， $D_{md,i}$ 为机械弥散系数， $\alpha_{L,i}$ 为纵向弥散度； v_i 为液相的流动速度； $R_{d,i}$ 为吸附阻滞因子； λ_i 为衰变系数， $\lambda_i = \ln 2/t_{1/2,i}$ ， $t_{1/2,i}$ 为降解半衰期； t 为时间； $L_i = l_1 + l_2 + \dots + l_i$ ， $L_0 = 0$ ， $L_n = L$ 。

在第 i 层介质任意位置处，通量 $J_i(z,t)$ 可写为

$$J_i(z,t) = -n_i D_i \frac{\partial C_i(z,t)}{\partial z} + n_i v_i C_i(z,t) \quad (2)$$

式中， n_i 为第 i 层介质的孔隙率。

在初始时刻，假定成层介质中有机污染物的质量浓度为 0。因此，初始条件可写为

$$C_i(z,0) = 0 \quad (3)$$

由于渗滤液中有机污染物的质量浓度为 C_0 ，因而上部边界条件可写为

$$C_1(0,t) = C_0 \quad (4)$$

考虑不同情况下水平导流层的渗透性会发生变化，这里可采用反映质量浓度梯度与质量浓度之间呈函数关系的 Robin 边界条件来描述底部边界条件^[36, 38-40]，其表达形式为

$$\left. \frac{\partial C_n(z,t)}{\partial z} \right|_{z=L} = -\alpha C_n(L,t) \quad , \quad (5)$$

式中， α 为大于 0 的 Robin 边界常数 (m^{-1})，其大小与水平导流层的透水性有关^[38-40]。当水平导流层的渗透性很大，以至于可将其近似为完全透水层时，则有 $\alpha = +\infty m^{-1}$ ，此时 Robin 边界条件退化为 Dirichlet 边界条件^[16-17]。当水平导流层渗透性很小，以至于水平导流层几乎无法起到导流作用时，这里可将其近似为完全不透水层，则有 $\alpha = 0 m^{-1}$ ，此时 Robin 边界条件退化为 Neumann 边界条件^[16-17]。

在任意两层介质的交界面处，需保持质量浓度连续和通量连续，从而有

$$C_i(L_i,t) = C_{i+1}(L_i,t) \quad , \quad (6)$$

$$J_i(L_i,t) = J_{i+1}(L_i,t) \quad . \quad (7)$$

需要补充的是，当所考虑介质类型为非土体介质时，如土工膜时，对应控制方程及求解条件的形式会发生变化，但这些变化可通过变量代换进行调整，从而获得与文中控制方程及求解条件一致的形式^[16]。

2 一维运移模型的解析解

为获得有机污染物一维运移模型的解析解，首先需将非齐次的上边界条件转化为齐次边界来处理。根据参考文献[19]中的求解方法，令

$$C_i(z,t) = w_i(z,t) + u_i(z) \quad , \quad (8)$$

式中， $w_i(z,t)$ 和 $u_i(z)$ 为待定求解的函数。

参考已有文献研究^[19]，首先对与时间 t 无关的函数 $u_i(z)$ 进行求解。

将 $u_i(z)$ 代入控制方程式 (1)，并进行整理可得

$$\frac{d^2 u_i(z)}{dz^2} - 2a_i \frac{du_i(z)}{dz} - b_i u_i(z) = 0 \quad , \quad (9)$$

式中， $a_i = v_i / (2D_i)$ ， $b_i = R_{d,i} \lambda_i / D_i$ 。

根据式 (9) 可以确定 $u_i(z)$ 的通解为

$$u_i(z) = R_{1,i} \exp(\delta_{1,i} z) + R_{2,i} \exp(\delta_{2,i} z) \quad , \quad (10)$$

式中， $\delta_{1,i} = a_i + \sqrt{b_i + a_i^2}$ ， $\delta_{2,i} = a_i - \sqrt{b_i + a_i^2}$ ， $R_{1,i}$ 和 $R_{2,i}$ 为待定系数。

由于成层介质中液相的渗流过程已达到稳定渗流状态，因此任意介质层中的达西流速 v_d 相同。根据

$v_d = n_i v_i$ 和式(2), 通量的连续性条件式(7)可改写为

$$n_i D_i \frac{\partial C_i(z, t)}{\partial z} = n_{i+1} D_{i+1} \frac{\partial C_{i+1}(z, t)}{\partial z} \quad . \quad (11)$$

根据质量浓度的连续条件式(6)和通量的连续条件式(11)可得

$$\begin{bmatrix} R_{1,i+1} \\ R_{2,i+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{(A_{2,i+1} - A_{1,i+1})} \begin{bmatrix} N_{11,i} & N_{12,i} \\ N_{21,i} & N_{22,i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{1,i} \\ R_{2,i} \end{bmatrix} \quad . \quad (12)$$

其中,

$$N_{11,i} = (A_{2,i+1} - A_{1,i}) \exp[(\delta_{1,i} - \delta_{1,i+1})L_i] \quad (13a)$$

$$N_{12,i} = (A_{2,i+1} - A_{2,i}) \exp[(\delta_{2,i} - \delta_{1,i+1})L_i] \quad , \quad (13b)$$

$$N_{21,i} = (A_{1,i} - A_{1,i+1}) \exp[(\delta_{1,i} - \delta_{2,i+1})L_i] \quad , \quad (13c)$$

$$N_{22,i} = (A_{2,i} - A_{1,i+1}) \exp[(\delta_{2,i} - \delta_{2,i+1})L_i] \quad . \quad (13d)$$

式中: $A_{1,i} = n_i D_i \delta_{1,i}$; $A_{2,i} = n_i D_i \delta_{2,i}$; $A_{1,i+1} = n_{i+1} D_{i+1} \delta_{1,i+1}$;

$A_{2,i+1} = n_{i+1} D_{i+1} \delta_{2,i+1}$ 。

为便于表达, 可设

$$\begin{bmatrix} R_{1,i+1} \\ R_{2,i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{N}_i \begin{bmatrix} R_{1,i} \\ R_{2,i} \end{bmatrix} \quad . \quad (14)$$

因此, 根据式(14)可得

$$\begin{bmatrix} R_{1,n} \\ R_{2,n} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{n-1} \begin{bmatrix} R_{1,1} \\ R_{2,1} \end{bmatrix} \quad , \quad (15)$$

式中, $\mathbf{M}_{n-1} = \mathbf{N}_{n-1} \mathbf{N}_{n-2} \cdots \mathbf{N}_1$ 。

令 $\mathbf{M}_{n-1} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$, 则根据上部边界条件式(4)和底部边界条件式(5)可得

$$\begin{aligned} R_{1,1} &= [M_{12}(\delta_{1,n} + \alpha) \exp(\delta_{1,n} L) + M_{22}(\delta_{2,n} + \alpha) \exp(\delta_{2,n} L)] \cdot \\ &\quad \{[M_{12}(\delta_{1,n} + \alpha) \exp(\delta_{1,n} L) + M_{22}(\delta_{2,n} + \alpha) \exp(\delta_{2,n} L)] - \\ &\quad [M_{11}(\delta_{1,n} + \alpha) \exp(\delta_{1,n} L) + M_{21}(\delta_{2,n} + \alpha) \exp(\delta_{2,n} L)]\}^{-1} C_0, \end{aligned} \quad (16a)$$

$$\begin{aligned} R_{2,1} &= [M_{11}(\delta_{1,n} + \alpha) \exp(\delta_{1,n} L) + M_{21}(\delta_{2,n} + \alpha) \exp(\delta_{2,n} L)] \cdot \\ &\quad \{[M_{11}(\delta_{1,n} + \alpha) \exp(\delta_{1,n} L) + M_{21}(\delta_{2,n} + \alpha) \exp(\delta_{2,n} L)] - \\ &\quad [M_{12}(\delta_{1,n} + \alpha) \exp(\delta_{1,n} L) + M_{22}(\delta_{2,n} + \alpha) \exp(\delta_{2,n} L)]\}^{-1} C_0. \end{aligned} \quad (16b)$$

利用式(16a), (16b), (14)可确定待定系数 $R_{1,i}$ 和 $R_{2,i}$, 从而确定函数 $w_i(z)$ 的表达式。

对于函数 $w_i(z, t)$, 将 $w_i(z, t)$ 代入控制方程式(1), 整理可得

$$\frac{\partial w_i(z, t)}{\partial t} = \frac{D_i}{R_{d,i}} \frac{\partial^2 w_i(z, t)}{\partial z^2} - \frac{v_i}{R_{d,i}} \frac{\partial w_i(z, t)}{\partial z} - \lambda_i w_i(z, t) \quad . \quad (17)$$

由于 $w_i(z, t)$ 的边界条件已化简为齐次边界条件, 因而可利用分离变量法对方程式(17)进行求解。根据参考文献[19]和式(17), 可假定 $w_i(z, t)$ 的表达式为

$$w_i(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} D_m f_{m,i}(z) \exp(a_m z - \beta_m t) \quad . \quad (18)$$

式中: D_m 和 β_m 为待定系数; $f_{m,i}(z)$ 为待定函数。

将式(18)代入式(17), 整理可得与 $f_{m,i}(z)$ 相关的关系式为

$$f''_{m,i}(z) + \theta_{m,i}^2 f_{m,i}(z) = 0 \quad , \quad (19)$$

式中, $\theta_{m,i} = \sqrt{|c_i \beta_m - a_i^2 - b_i|}$, $c_i = R_{d,i}/D_i$ 。

当 $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i < 0$ 时, $f_{m,i}(z)$ 的解答可写为

$$\begin{aligned} f_{m,i}(z) &= I_{m,i} \sinh(\theta_{m,i} z) + J_{m,i} \cosh(\theta_{m,i} z) \quad . \quad (20a) \\ \text{当 } c_i \beta_m - a_i^2 - b_i \geq 0 \text{ 时, } f_{m,i}(z) \text{ 的解答可写为} \\ f_{m,i}(z) &= I_{m,i} \sin(\theta_{m,i} z) + J_{m,i} \cos(\theta_{m,i} z) \quad . \quad (20b) \end{aligned}$$

式中, $I_{m,i}$ 和 $J_{m,i}$ 均为待定系数。

根据质量浓度和通量的连续性条件, 可以得到待定系数 $I_{m,i}$ 和 $J_{m,i}$ 满足以下关系式:

$$\begin{bmatrix} I_{m,i+1} \\ I_{m,i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} I_{m,i} \\ I_{m,i} \end{bmatrix} \quad , \quad (21)$$

$$\mathbf{T}_i = \frac{\exp[(a_i - a_{i+1})L_i]}{n_{i+1} D_{i+1} \theta_{m,i+1}} \begin{bmatrix} \bar{C}_i \bar{F}_i - \bar{B}_i \bar{G}_i & \bar{C}_i \bar{H}_i - \bar{D}_i \bar{G}_i \\ \bar{B}_i \bar{E}_i - \bar{A}_i \bar{F}_i & \bar{D}_i \bar{E}_i - \bar{A}_i \bar{H}_i \end{bmatrix}. \quad (22)$$

式中, \bar{A}_i , \bar{B}_i , \bar{C}_i , \bar{D}_i , \bar{E}_i , \bar{F}_i , \bar{G}_i 和 \bar{H}_i 为待定的相关参数。

由于当 $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i < 0$ 时和当 $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i \geq 0$ 时, $f_{m,i}(z)$ 的表达式不相同, 因而不同情况下 \bar{A}_i 等相关参数的表达式不相同。在连续性边界 $z = L_i$ 处, 其通量和质量浓度连续涉及到的函数仅有 $w_i(z, t)$ 和 $w_{i+1}(z, t)$ 。因此, \bar{A}_i 等相关参数的表达式共有四种情况, 即情况 1: $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i < 0$ 和 $c_{i+1} \beta_m - a_{i+1}^2 - b_{i+1} < 0$; 情况 2: $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i < 0$ 和 $c_{i+1} \beta_m - a_{i+1}^2 - b_{i+1} \geq 0$; 情况 3: $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i \geq 0$ 和 $c_{i+1} \beta_m - a_{i+1}^2 - b_{i+1} < 0$; 情况 4: $c_i \beta_m - a_i^2 - b_i \geq 0$ 和 $c_{i+1} \beta_m - a_{i+1}^2 - b_{i+1} \geq 0$ 。需要说明的是, \bar{A}_i 等相关参数表达式对应的不同情况主要与对流作用和降解作用对有机污染物运移过程的影响相关, 如当第 i 层介质中对流作用和降解作用对运移过程的影响较大时, 在 β_m 较小时会出现 $(c_i \beta_m - a_i^2 - b_i)$ 小于 0 的情况。

由于不同情况下 \bar{A}_i 等相关参数的表达式是基本相同的, 限于篇幅, 这里以情况 2 和情况 4 为例, 给出这两种情况下 \bar{A}_i 等相关参数的表达式。

当属于情况 2 时, \bar{A}_i 等相关参数的表达式为

$$\bar{A}_i = \sin(\theta_{m,i+1} L_i) \quad , \quad (23a)$$

$$\bar{B}_i = \sinh(\theta_{m,i} L_i) \quad , \quad (23b)$$

$$\bar{C}_i = \cos(\theta_{m,i+1} L_i) \quad , \quad (23c)$$

$$\bar{D}_i = \cosh(\theta_{m,i} L_i) \quad , \quad (23d)$$

$$\bar{E}_i = a_{i+1} n_{i+1} D_{i+1} \sin(\theta_{m,i+1} L_i) + \theta_{m,i+1} n_{i+1} D_{i+1} \cos(\theta_{m,i+1} L_i), \quad (23e)$$

$$\bar{F}_i = a_i n_i D_i \sinh(\theta_{m,i} L_i) + \theta_{m,i} n_i D_i \cosh(\theta_{m,i} L_i) \quad , \quad (23f)$$

$$\bar{G}_i = a_{i+1} n_{i+1} D_{i+1} \cos(\theta_{m,i+1} L_i) - \theta_{m,i+1} n_{i+1} D_{i+1} \sin(\theta_{m,i+1} L_i), \quad (23g)$$

$$\bar{H}_i = a_i n_i D_i \cosh(\theta_{m,i} L_i) + \theta_{m,i} n_i D_i \sinh(\theta_{m,i} L_i) \quad . \quad (23h)$$

当属于情况 4 时, \bar{A}_i 等相关参数的表达式为

$$\bar{A}_i = \sin(\theta_{m,i+1} L_i) \quad , \quad (24a)$$

$$\bar{B}_i = \sin(\theta_{m,i} L_i) \quad , \quad (24b)$$

$$\bar{C}_i = \cos(\theta_{m,i+1} L_i) \quad , \quad (24c)$$

$$\bar{D}_i = \cos(\theta_{m,i} L_i) \quad , \quad (24d)$$

$$\bar{E}_i = a_{i+1} n_{i+1} D_{i+1} \sin(\theta_{m,i+1} L_i) + \theta_{m,i+1} n_{i+1} D_{i+1} \cos(\theta_{m,i+1} L_i), \quad (24e)$$

$$\bar{F}_i = a_i n_i D_i \sin(\theta_{m,i} L_i) + \theta_{m,i} n_i D_i \cos(\theta_{m,i} L_i) \quad , \quad (24f)$$

$$\bar{G}_i = a_{i+1} n_{i+1} D_{i+1} \cos(\theta_{m,i+1} L_i) - \theta_{m,i+1} n_{i+1} D_{i+1} \sin(\theta_{m,i+1} L_i), \quad (24g)$$

$$\bar{H}_i = a_i n_i D_i \cos(\theta_{m,i} L_i) - \theta_{m,i} n_i D_i \sin(\theta_{m,i} L_i) \quad . \quad (24h)$$

基于底部边界条件式 (5), 则有

$$I_{m,n} T_{11,n} + J_{m,n} T_{12,n} = 0 \quad . \quad (25)$$

在式 (25) 中, 当 $c_n \beta_m - a_n^2 - b_n < 0$ 时, 有

$$T_{11,n} = \theta_{m,n} \cosh(\theta_{m,n} L) + (\alpha + a_n) \sinh(\theta_{m,n} L) \quad , \quad (26a)$$

$$T_{12,n} = (\alpha + a_n) \cosh(\theta_{m,n} L) + \theta_{m,n} \sinh(\theta_{m,n} L) \quad . \quad (26b)$$

当 $c_n \beta_m - a_n^2 - b_n \geq 0$ 时, 则有

$$T_{11,n} = \theta_{m,n} \cos(\theta_{m,n} L) + (\alpha + a_n) \sin(\theta_{m,n} L) \quad , \quad (27a)$$

$$T_{12,n} = (\alpha + a_n) \cos(\theta_{m,n} L) - \theta_{m,n} \sin(\theta_{m,n} L) \quad . \quad (27b)$$

由于 $u_1(0) = C_0$, 因而有 $w_1(0, t) = 0$ 。根据 $w_1(0, t) = 0$ 和式 (20) 的表达式可知, 系数 $J_{m,1}$ 始终为 0, 因而有 $J_{m,1} = 0$ 。

为获得相关系数的表达式, 这里令 $I_{m,1} = 1$, 则根据式 (21) 和式 (25) 可得有关 β_m 的超越方程为

$$\mathbf{T}_n \cdots \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_0 = 0 \quad , \quad (28)$$

式中, $\mathbf{T}_0 = [1 \ 0]^T$, $\mathbf{T}_n = [T_{11,n} \ T_{12,n}]$ 。

利用式 (28) 确定 β_m 以后, 根据式 (21) 至式 (27b) 即可确定如 $I_{m,i}$ 和 $J_{m,i}$ 等相关系数。

根据初始条件式 (3)、式 (8) 和式 (18) 中的关系式可得 D_m 的表达式:

$$D_m = -\frac{\sum_{i=1}^n \int_{L_{i-1}}^{L_i} u_i(z) n_i R_{d,i} f_{m,i}(z) S_{i-1} e^{-a_i z} dz}{\sum_{i=1}^n \int_{L_{i-1}}^{L_i} n_i R_{d,i} f_{m,i}(z) f_{m,i}(z) S_i dz} \quad , \quad (29)$$

式中, $S_{i-1} = \exp[\sum_{k=1}^{i-1} 2(a_{k+1} - a_k)L_k]$ ($S_0 = 1$)。

根据式 (8), (10), (18), 任意位置处有机污染

物的质量浓度 $C_i(z, t)$ 可写为

$$C_i(z, t) = R_{1,i} \exp(\delta_{1,i} z) + R_{2,i} \exp(\delta_{2,i} z) + \sum_{m=1}^{\infty} D_m f_{m,i}(z) \exp(a_i z - \beta_m t) \quad . \quad (30)$$

根据式 (2), (30), 任意位置处有机污染物的通量 $J_i(z, t)$ 可写为

$$J_i(z, t) = (v_d - n_i D_i \delta_{1,i}) R_{1,i} \exp(\delta_{1,i} z) + (v_d - n_i D_i \delta_{2,i}) R_{2,i} \exp(\delta_{2,i} z) + \sum_{i=1}^{\infty} D_m [(v_d - a_i n_i D_i) f_{m,i}(z) - n_i D_i f'_{m,i}(z)] \exp(a_i z - \beta_m t) \quad , \quad (31)$$

式中, $f_{m,i}(z)$ 的表达式见式 (20), 相关参数的物理含义在一维迁移控制方程的推导和求解过程中已述。

式 (30), (31) 即为有机污染物在成层介质中一维迁移模型的解析解, 利用该解析解答可运算考虑对流、分子扩散、机械弥散、降解和吸附等因素下有机污染物在成层介质中的一维迁移过程。

3 一维迁移解析模型的验证

对于成层介质中有机污染物的一维迁移问题, 已有学者[24-25, 27-28, 36-37]通过某些简化假定获得了相应的解析解。为验证本文所建一维迁移解析模型的正确性, 以下将所建解析模型的计算结果分别与陈云敏等[24]所求解析解的计算结果和数值方法的计算结果展开对比研究。

3.1 与陈云敏等^[24]解析解的对比

陈云敏等^[24]忽略了对流和降解作用, 并设定底部边界为零质量浓度边界, 求解得到了有机污染物在成层介质中一维迁移的解析解。为验证本文所建一维迁移解析模型的正确性, 可设定渗滤液水头 $h_w = 0$ m, 第 i 层介质中的衰变系数 $\lambda_i = 0$, Robin 边界常数 $\alpha = +\infty \text{ m}^{-1}$ (实际取 $\alpha = 10^{13} \text{ m}^{-1}$), 将本文所建解析模型与陈云敏等^[24]所求的解析解进行对比。需说明的是, 由于当 $h_w = 0$ m 且 $\lambda_i = 0$ 时本文解答的形式会发生显著变化 (本文所建解析模型与陈云敏等^[24]所求解析解的形式存在明显区别)。因此, 为比较两种不同形式下解析解的计算结果, 这里采用本文所建解析模型进行运算时实际取 $h_w = 1.0 \times 10^{-6}$ m。参考《生活垃圾卫生填埋处理技术规范: GB50869—2013》^[41]中所要求设定的压实黏土材料性能和文献[24, 25, 27, 28, 36, 37]中所考虑工况的相关参数, 这里以 4 层介质中有机污染物的一维迁移过程为例。表 1 给出了 4 层土体的物理力学参数以及相关的环境参数。在后续将本文所建解析模型与陈云敏等^[24]所求解析解进行分析对比时, 除指定参数值外, 其余相关参数值均取表 1 中的

表 1 4 层土体的物理力学参数及相关的环境参数

Table 1 Physical-mechanics parameters of four-layer soils and environment-related parameters

土层 编号	渗透系数 $k_v/(10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	有效扩散系数 $D_e/(10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	纵向弥散度 a_f/m	降解半衰期 $t_{1/2}/\text{a}$	吸附阻滞因子 R_d	孔隙率 n	厚度 l/m	渗透液水头 h_w/m	质量浓度 $C_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	Robin 边界常数 $\alpha/(\text{m}^{-1})$
土层 1	1.0	4.0	0.02	150	6.6	0.35	0.50	1.0	1.0	1.0
土层 2	0.2	2.0	0.01	100	9.8	0.30	0.50	1.0	1.0	1.0
土层 3	20.0	6.0	0.04	200	4.2	0.40	0.25	1.0	1.0	1.0
土层 4	100.0	8.0	0.05	250	2.8	0.45	0.75	1.0	1.0	1.0

计算参数。

图 2 所示为所建解析模型计算结果和陈云敏等^[24]解析解计算结果的对比情况。从图 2 可以看出, 在不同时间下, 本文所建解析模型所求的有机污染物质量浓度分布曲线与陈云敏等^[24]解析解所求的质量浓度分布曲线十分一致, 这一定程度验证了所建解析模型的正确性。对比结果表明, 本文所建一维运移解析模型可用于成层介质中有机污染物一维扩散过程的计算。

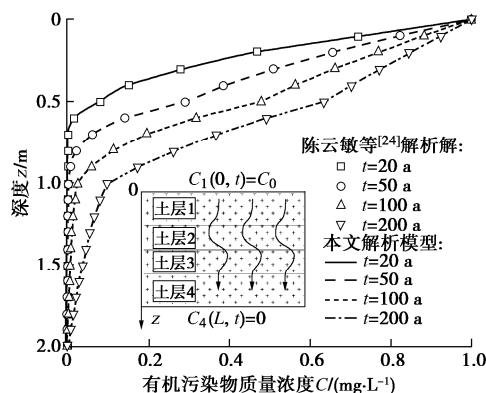
图 2 本文所建解析模型与陈云敏等^[24]解析解的对比

Fig. 2 Comparison between proposed analytical model and analytical solution proposed by Chen et al.

3.2 与数值方法的对比

对于有机污染物的一维运移问题, 数值方法也是工程上常用的计算方法^[24, 27, 42-43]。为进一步验证本文所建一维运移解析模型的正确性, 以表 1 中所示的计算参数为例, 将所建解析模型的计算结果与数值方法的计算结果进行对比。根据参考文献^[24, 27, 42, 43], 这里采用有限差分法对有机污染物在成层介质中的一维运移过程进行计算。

图 3 所示为所建解析模型的计算结果和数值方法的计算结果的对比情况。从图 3 可以看出, 不同时间下本文所建解析模型所求的有机污染物质量浓度分布曲线与数值方法所求的质量浓度分布曲线完全重合, 这进一步验证了所建解析模型的正确性。通过对比可以看出, 本文所建一维运移解析模型可用于成层介质中有机污染物一维运移过程的模拟研究。

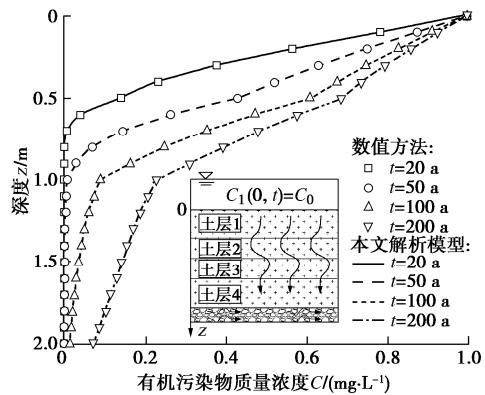


图 3 本文所建解析模型与数值方法计算结果的对比

Fig. 3 Comparison between proposed analytical model and numerical method

4 参数分析

对于成层介质中有机污染物的一维运移问题, 以往学者大多忽略了对流或降解等因素对运移过程的影响^[24-25, 27-28]。基于此, 为进一步认识和研究成层介质中有机污染物的一维运移特性, 以表 1 中所示的计算参数为例, 对渗透液水头、降解半衰期、Robin 边界常数等因素展开参数分析。

4.1 渗滤液水头

渗滤液水头 h_w 决定了对流速度的大小。为研究对流作用对有机污染物一维运移过程的影响, 图 4, 5 分别给出了不同 h_w 下有机污染物质量浓度随深度的分布曲线和底部通量随时间的变化曲线。从图 4 可知, h_w 越大, 相同时间内同一深度处的质量浓度越高, 且 h_w 越大, 相同深度处的最终质量浓度越高 (运移过程达到稳态时)。从图 5 可以看出, h_w 的增大显著增大了底部通量, 如当 $h_w=2.0 \text{ m}$ 时, 在相同时间下, 底部通量可达不考虑对流作用 ($h_w=0.0 \text{ m}$) 时底部通量的 10 倍以上。此外, 根据底部通量随时间的变化规律可知, 对流作用缩短了有机污染物运移过程达到稳态所需的时间。

上述变化规律表明, 对流作用不仅会加快有机污染物的一维运移过程, 显著增大底部通量, 还会使得有机污染物最终的质量浓度增大。相比于不考虑对流

作用时, 考虑对流作用时底部通量显著增大的主要原因在于底部质量浓度的显著增大。考虑到实际工程中污染场地内易出现高渗滤液水头的情况^[44-45], 且通常情况下土体介质中的有效扩散系数也较小^[14-19]。因此, 应考虑渗滤液水头引起的对流作用对有机污染物在成层介质一维运移过程的影响。

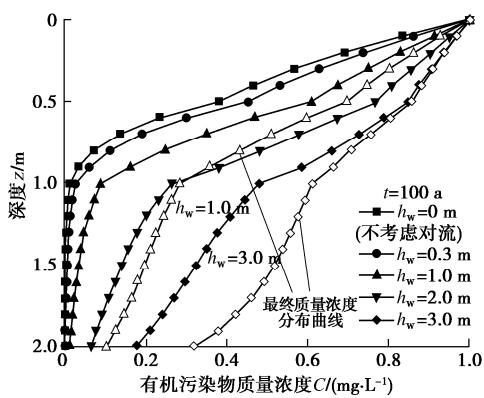


图 4 不同渗滤液水头下有机污染物质量浓度的分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of concentration of organic contaminants under different leachate heads

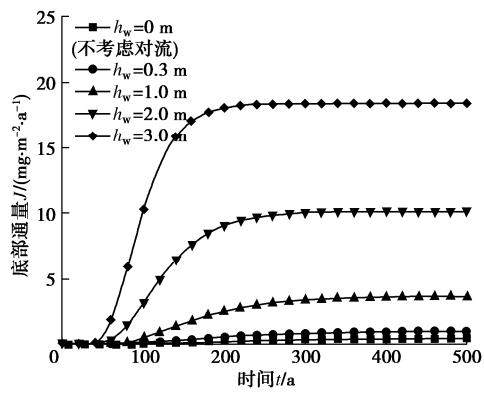


图 5 不同渗滤液水头下底部通量随时间的变化曲线

Fig. 5 Distribution curves of bottom flux with time under different leachate heads

4.2 降解半衰期

降解半衰期 $t_{1/2}$ 是反映有机污染物在成层介质中降解快慢的重要参数。为认识降解作用对运移过程的影响, 这里以土层 2 中有机污染物的降解过程为例。图 6, 7 分别给出了土层 2 中不同降解半衰期 $t_{1/2}$ 下有机污染物质量浓度随深度的分布曲线和底部通量随时间的变化曲线。从图 6 可知, $t_{1/2}$ 越大, 降解速率越慢, 相同时间内同一深度处的质量浓度越高。同时, 对比不同 $t_{1/2}$ 下的最终质量浓度分布曲线可知, $t_{1/2}$ 的增大使得最终质量浓度增高。从图 7 可以看出, $t_{1/2}$ 的增大使得底部通量增大, 与不考虑降解作用 ($t_{1/2}$ 为正无穷, 计算时取 $\lambda_2=0$) 时相比, $t_{1/2}=100$ a 时的底部通量可降低约 45%。此外, 底部通量随时间的变化规律还表明,

$t_{1/2}$ 的增大延长了有机污染物运移过程达到稳态时所需的时间。

从上述分析可知, 降解作用不仅会减小有机污染物的质量浓度和底部通量, 还会使得运移过程达到稳态时所需的时间缩短。出现这一现象的主要原因在于: 降解作用会减低成层介质中有机污染物的含量。分析表明, 降解作用会对有机污染物的运移过程产生较大影响, 因而考虑降解作用有利于准确预测有机污染物的一维运移过程。

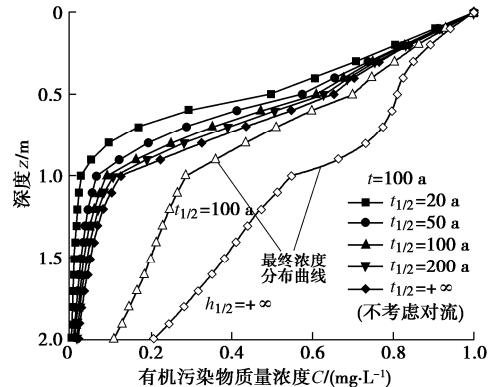


图 6 不同降解半衰期下有机污染物质量浓度的分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of concentration of organic contaminants under different degradation half-lives

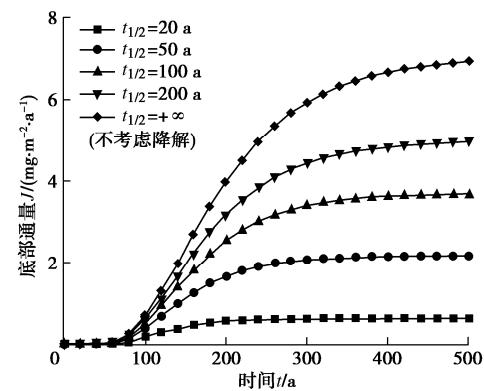


图 7 不同降解半衰期下底部通量随时间的变化曲线

Fig. 7 Distribution curves of bottom flux with time under different degradation half-lives

4.3 Robin 边界常数

Robin 边界常数 α 反映了成层介质底部水平导流层透水性的大小。为探究底部边界条件对有机污染物一维运移过程的影响, 图 8, 9 分别给出了不同 α 下有机污染物质量浓度随深度的分布曲线和底部通量随时间的变化曲线。从图 8 可知, α 主要对底部范围内质量浓度的影响较大, α 越大, 底部范围内的质量浓度越小。从不同 α 下的最终质量浓度分布曲线可以看出, α 的增大会使得底部范围内的最终质量浓度降低。从图 9 可以看出, α 越大, 底部通量也越大, 但 α 对

底部通量的影响较小, 不同 α 下底部通量在同一数量级内变化。

从上述分析可知, Robin 边界常数 α 主要对底部范围内的质量浓度产生较大影响, α 的增大会使得底部范围内的质量浓度降低, 同时也会使得底部通量出现一定程度的增大。对于这一规律, 这主要是由于 α 越大, 水平导流层的透水性越好, 运移至底部附近的有机污染物可更快被水流所稀释, 从而使得底部及其附近处的质量浓度降低, 但 α 的增大也使得底部有机污染物的质量浓度梯度增大, 因而底部通量出现一定程度的增大。

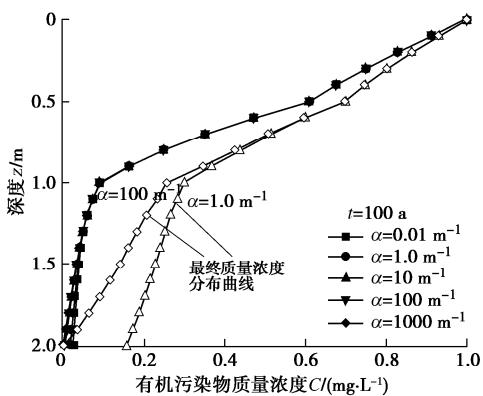


图 8 不同 Robin 边界常数下有机污染物质量浓度的分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of concentration of organic contaminants under different Robin boundary constants

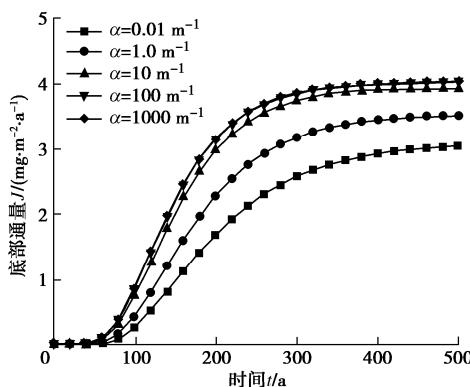


图 9 不同 Robin 边界常数下底部通量随时间的变化曲线

Fig. 9 Distribution curves of bottom flux with time under different Robin boundary constants

4.4 分析和讨论

根据上述分析可知, 以往有机污染物在成层介质中一维运移时所忽略的对流或降解或底部边界条件等因素会对运移过程产生较大影响, 因而采用本文所建一维运移解析模型可更为全面认识有机污染物在成层介质中的运移规律。

对于垃圾填埋场底部多层防渗系统、污染场地多层竖向防渗系统和污染底泥多层覆盖层系统等工程情

况^[14-19, 36, 46-48], 其均涉及与有机污染物运移过程相关的理论问题, 因而可应用本文所建解析模型开展运移规律分析, 从而指导多层防渗系统的设计。

需说明的是, 对于污染场地的防渗系统, 由于常用防渗材料土工膜的性质与压实黏土衬垫的性质存在较大差异, 因而有机污染物在土工膜中的运移规律与在土体介质中的运移规律存在一定差异, 对应控制方程的形式也会发生变化。对于该种差异, 可通过变量代换获得与本文控制方程及求解条件一致的形式^[16], 进而利用本文所建解析模型对包含土工膜的成层介质中有机污染物的运移过程展开研究。

5 结 论

(1) 建立了成层介质中有机污染物一维运移的解析模型, 该模型可更为全面考虑对流、分子扩散、机械弥散、降解和吸附等因素下的运移规律。

(2) 通过将所建解析模型与已有理论模型对比, 对所建模型的正确性进行了验证。利用所建模型, 分析了四层土体介质中有机污染物一维运移过程。

(3) 对流作用会加快运移过程, 增大底部通量。与不考虑对流作用 (渗透液水头 $h_w=0.0$ m) 时相比, $h_w=2.0$ m 下的底部通量可增大一个数量级以上。

(4) 降解作用会使得质量浓度和底部通量降低。当运移过程达到稳态时, 与不考虑降解作用 (降解半衰期 $t_{1/2}=+\infty$, $\lambda_2=0$) 时相比, 降解半衰期 $t_{1/2}=100$ a 下的底部通量可降低约 45%。

(5) Robin 边界常数 α 反映了成层介质底部水平导流层透水性的大小, 其主要会对底部范围内有机污染物质量浓度产生较大影响, 对底部通量影响较小。

参 考 文 献:

- [1] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46. (CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 1-46. (in Chinese))
- [2] SHACKELFORD C D. The ISSMGE Kerry Rowe Lecture: the role of diffusion in environmental geotechnics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(11): 1219-1242.
- [3] PU H F, QIU J W, ZHANG R J, et al. Assessment of consolidation-induced VOC transport for a GML/GCL/CCL composite liner system[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 455-469.
- [4] TOUZE-FOLTZ N, XIE H J, STOLTZ G. Performance issues of barrier systems for landfills: a review[J]. Geotextiles and

- Geomembranes, 2021, **49**(2): 475-488.
- [5] 谢海建, 詹良通, 陈云敏, 等. 我国四类衬垫系统防污性能的比较分析[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(7): 133-141. (XIE Haijian, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, et al. Comparison of the performance of four types of liner systems in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(7): 133-141. (in Chinese))
- [6] PENG M Q, FENG S J, CHEN H X, et al. Analytical model for organic contaminant transport through GMB/CCL composite liner with finite thickness considering adsorption, diffusion and thermodiffusion[J]. Waste Manag, 2021, **120**: 448-458.
- [7] 吴珣, 施建勇, 何俊. 有机污染物在完好三层复合衬垫中的扩散分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 99-104. (WU Xun, SHI Jianyong, HE Jun. Diffusion of organic contaminant through intact triple-layer liner[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 99-104. (in Chinese))
- [8] 陈云敏, 谢海建, 柯瀚, 等. 挥发性有机化合物在复合衬垫中的一维扩散解[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1076-1080. (CHEN Yunmin, XIE Haijian, 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))
- [9] 谢海建, 楼章华, 陈云敏, 等. 污染物通过 GCL/AL 防渗层的对流-弥散解析解[J]. 科学通报, 2010, **55**(21): 2153-2163. (XIE Haijian, LOU Zhanghua, CHEN Yunmin, et al. Analytical solution of convection-dispersion of pollutants passing through GCL/AL impermeable layer[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(21): 2153-2163. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] LI Y C, CLEALL P J. Analytical solutions for advective-dispersive solute transport in double-layered finite porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, **35**(4): 438-460.
- [12] 谢海建, 蒋元生, 杨文参, 等. 考虑降解时双层介质中有机污染物的一维扩散解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 190-196. (XIE Haijian, JIANG Yuansheng, YANG Wencan, et al. Analytical solutions for contaminant diffusion in two-layered porous media considering degradation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 190-196. (in Chinese))
- [13] XIE H J, LOU Z H, CHEN Y M, et al. An analytical solution to organic contaminant diffusion through composite liners considering the effect of degradation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, **36**: 10-18.
- [14] WU X, SHI J Y, HE J. Analytical solutions for diffusion of organic contaminant through GCL triple-layer composite liner considering degradation in liner[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(20): 1371.
- [15] XIE H J, ZHANG C H, FENG S J, et al. Analytical model for degradable organic contaminant transport through a GMB/GCL/AL system[J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, **144**(3): 04018006.
- [16] FENG S J, PENG M Q, CHEN Z L, et al. Transient analytical solution for one-dimensional transport of organic contaminants through GM/GCL/SL composite liner[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 479-492.
- [17] FENG S J, PENG M Q, CHEN H X, et al. Fully transient analytical solution for degradable organic contaminant transport through GMB/GCL/AL composite liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, **47**(3): 282-294.
- [18] PU H F, QIU J W, ZHANG R J, et al. Analytical solutions for organic contaminant diffusion in triple-layer composite liner system considering the effect of degradation[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(4): 907-921.
- [19] PENG M Q, FENG S J, CHEN H X, et al. An analytical solution for organic pollutant diffusion in a triple-layer composite liner considering the coupling influence of thermal diffusion[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **137**: 104283.
- [20] 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.
- [21] FOOSE G J. Transit-time design for diffusion through composite liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(7): 590-601.
- [22] 谢海建, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 考虑非线性吸附时污染物在半无限黏土中的一维扩散解[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9): 1404-1408. (XIE Haijian, CHEN Rempeng, CHEN Yunmin, et al. Analytical solution of contaminant diffusion through semi-infinite clay under non-linear adsorption condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(9): 1404-1408. (in Chinese))
- [23] 谢海建, 唐晓武, 陈云敏, 等. 原始土层影响下成层介质

- 污染物一维扩散模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2191-2195. (XIE Haijian, TANG Xiaowu, CHEN Yunmin, et al. One-dimensional model for contaminant diffusion through layered media[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(12): 2191-2195. (in Chinese))
- [24] 陈云敏, 谢海建, 柯瀚, 等. 层状土中污染物的一维扩散解析解[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 521-524. (CHEN Yunmin, XIE Haijian, KE Han, et al. Analytical solution of contaminant diffusion through multi-layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 521-524. (in Chinese))
- [25] ROWE R K, BOOKER J R. The analysis of pollutant migration in a non-homogeneous soil[J]. Géotechnique, 1984, 34(4): 601-612.
- [26] LEO C J, BOOKER J R. A boundary element method for analysis of contaminant transport in porous media—II: non-homogeneous porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(14): 1701-1715.
- [27] CHEN Y M, XIE H J, KE H, et al. An analytical solution for one-dimensional contaminant diffusion through multi-layered system and its applications[J]. Environmental Geology, 2009, 58(5): 1083-1094.
- [28] 余闯, 徐江伟, 陈樟龙, 等. 成层土中考虑衰变作用的污染物迁移规律分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 45-51. (YU Chuang, XU Jiangwei, CHEN Zhanglong, et al. Pollutant migration in layered soil with consideration of decay[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 45-51. (in Chinese))
- [29] LIU C X, BALL W P, ELLIS J H. An analytical solution to the one-dimensional solute advection-dispersion equation in multi-layer porous media[J]. Transport in Porous Media, 1998, 30(1): 25-43.
- [30] LIU G, SI B C. Analytical modeling of one-dimensional diffusion in layered systems with position-dependent diffusion coefficients[J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(2): 251-268.
- [31] PÉREZ GUERRERO J S, PIMENTEL L C G, SKAGGS T H. Analytical solution for the advection-dispersion transport equation in layered media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56(1/2): 274-282.
- [32] SWAMI D, SHARMA P K, OJHA C S P. Experimental investigation of solute transport in stratified porous media[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 19(3): 145-153.
- [33] SHARMA P K, SAWANT V A, SHUKLA S K, et al. Experimental and numerical simulation of contaminant transport through layered soil[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 8(4): 345-351.
- [34] DENG B Q, LI J J, ZHANG B, et al. Integral transform solution for solute transport in multi-layered porous media with the implicit treatment of the interface conditions and arbitrary boundary conditions[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 566-573.
- [35] DARDOURI S, SGHAIER J. Adsorption characteristics of layered soil as delay barrier of some organic contaminants: experimental and numerical modeling[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 110: 95-106.
- [36] YAN H X, WU J W, XIE H J, et al. An analytical model for chemical diffusion in layered contaminated sediment systems with bioreactive caps[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43: 2471-2490.
- [37] 王亮, 谢海建, 吴家蔚, 等. 填埋场成层衬垫污染物运移参数等效模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(3): 519-529, 554. (WANG Liang, XIE Haijian, WU Jiawei, et al. Equivalent model for pollutant transport parameters of layered landfill liners[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(3): 519-529, 554. (in Chinese))
- [38] 席永慧, 刘建航. 饱和多孔介质中污染物迁移模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 644-648. (XI Yonghui, LIU Jianhang. Modeling of contaminant migration in saturated porous media[J]. Journal of Tongji University, 2005, 33(5): 644-648. (in Chinese))
- [39] 张文杰, 黄依艺, 张改革. 填埋场污染物在有限厚度土层中一维对流-扩散-吸附解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1197-1201. (ZHANG Wenjie, HUANG Yiyi, ZHANG Gaige. Analytical solution for 1D advection-diffusion-adsorption transport of landfill contaminants through a soil layer with finite thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1197-1201. (in Chinese))
- [40] LIN Y C, YEH H D. A simple analytical solution for organic contaminant diffusion through a geomembrane to unsaturated soil liner: considering the sorption effect and Robin-type boundary[J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124873.
- [41] 生活垃圾卫生填埋处理技术规范: GB 50869—2013[S]. 北

- 京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Code for Municipal Solid Waste Sanitary Landfill: GB 50869—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))
- [42] ALSHAWABKEH A N, RAHBAR N. Parametric study of one-dimensional solute transport in deformable porous media[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(8): 1001-1010.
- [43] SAVOVIĆ S, DJORDJEVICH A. Numerical solution for temporally and spatially dependent solute dispersion of pulse type input concentration in semi-infinite media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, **60**: 291-295.
- [44] ZHANG W J, ZHANG G G, CHEN Y M. Analyses on a high leachate mound in a landfill of municipal solid waste in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(4): 1747-1752.
- [45] 陈云敏, 兰吉武, 李育超, 等. 垃圾填埋场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 Yunmin, LAN Jiwu, LI Yuchao, et al. Development and control of leachate mound in msw landfills[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 154-163. (in Chinese))
- [46] ZHAN L T, ZENG X, LI Y C, et al. Analytical solution for one-dimensional diffusion of organic pollutants in a geomembrane-bentonite composite barrier and parametric analyses[J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, **140**(1): 57-68.
- [47] QIU J W, PU H F, CHEN X L, et al. Analytical solutions for contaminant diffusion in four-layer sediment-cap system for subaqueous in situ capping[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(2): 376-387.
- [48] PENG C H, FENG S J, CHEN H X, et al. An analytical model for one-dimensional diffusion of degradable contaminant through a composite geomembrane cut-off wall[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2021, **242**: 103845.

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会通知

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会 (IS-Macau 2024) 将于 2024 年 6 月 14~17 日 (周五至周一) 在中国澳门特别行政区举行。本次会议由澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 (IoTSC)、土木与环境工程系与国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC204 共同举办。大会主席为澳门大学周万欢教授、东南大学徐涛副教授; 副主席为剑桥大学 Giulia Viggiani 教授; 秘书为澳门大学管铮博士。研讨会的主题为“智慧城市隧道与地下空间建设”, 具体包括: 软土基

本性质; 本构与数值模型; 软土地基处理新技术; 大数据、人工智能和机器学习在隧道和地下工程中的应用; 地下基础设施韧性与可持续发展; 隧道与地下施工智能监测与可视化技术; 观测法在地下工程中的应用; 现场案例研究。

大会组委会诚邀业界专家学者、工程技术人员、管理人员和企业代表等拨冗莅临, 共襄盛会!

会议网站: <https://is-macau2024.skliotsc.um.edu.mo>

咨询邮箱: ismacau2024@um.edu.mo。

(会议组委会)