

考虑降解时双层介质中有机污染物的一维扩散解析解

谢海建^{1,2}, 蒋元生¹, 杨文参¹, 陈云敏²

(1. 浙江大学水文与水资源工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 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)

摘要: 有机污染物往往比无机物离子对环境有更大的危害。为了研究填埋场有机污染物在衬垫系统的运移规律, 建立了有机污染物在双层多孔介质中的一维扩散模型, 同时考虑有机污染物在介质中的降解作用。针对零浓度和零通量两种下边界条件, 推导出模型的解析解。与数值模型 POLLUTE v7 的比较说明了本文模型的合理性和有效性。基于得到的解析解, 分析了降解作用对有机污染物在成层介质中的运移影响与相关参数的敏感性。结果表明有机污染物的降解作用能有效地减少有机污染物在土壤衬垫系统中的浓度分布和底部通量。当土层降解半衰期为 5~10 a 时, 底部污染物通量可比不考虑降解时减少 4~8 倍。相对于下层土, 上层土降解作用对提高整体的防污性能更有效, 能更显著地降低污染物的浓度。

关键词: 有机污染物; 双层多孔介质; 解析解; 扩散; 降解; 填埋场

中图分类号: TU442; X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S1-0190-07

作者简介: 谢海建(1981-), 男, 浙江温岭人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事环境土力学和地下水多相流等方面的研究与教学工作。E-mail: xiehaijian@zju.edu.cn。

Analytical solutions for contaminant diffusion in two-layered porous media considering degradation

XIE Hai-jian^{1,2}, JIANG Yuan-sheng¹, YANG Wen-can¹, CHEN Yun-min^{1,2}

(1. Institute of Hydrology and Water Resources Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The organic contaminants are always more harmful to the environment than the inorganic ions. One-dimensional mathematical model for organic contaminant diffusion through two-layered porous media is developed to investigate the behavior of organic transport in the landfill liner system. Degradation of the organic contaminants in the porous media is considered. The bottom boundary conditions are assumed to be zero concentration or zero flux. The analytical solutions for the mathematical model are obtained by means of the method of separation of variables. The results obtained by the proposed analytical solution agree well with those obtained by the commercial software POLLUTE v7. The effect of degradation on organic contaminant diffusion through the layered media is investigated on the basis of the proposed solutions. The bottom concentration and flux of the soil liners can be greatly reduced when the degradation effect is considered. The bottom flux for the liner system with the half-lives of 5-10 years can be 4-8 times less than those assuming no degradation. Compared to that of the lower layer, the effect of the degradation of the upper layer is more important on reducing the organic concentration in the underlying environment.

Key words: organic contaminant; two-layered porous medium; analytical solution; diffusion; degradation; landfill

0 引言

城市固体废弃物(MSW)填埋场往往产生多种有机污染物, 这些污染物的迁移已对周围环境及地下水造成了污染^[1-3]。因此, 作为防止污染物扩散的衬垫系统就成为填埋场中最重要的部分之一。影响污染物在介质中迁移的主要机理有对流、扩散、吸附以及生物降解等。由于有机污染物往往比无机物离子对环境有更大的危害, 因此, 对有机污染物迁移机理的研究显

得尤为重要^[4-5]。在环境岩土工程中, 经常遇到污染物在运移参数有很大区别的双层土壤中运移的问题。比如, 填埋场中的渗滤液通过压实黏土(CCL)和下伏垫层运移^[7], 污染物在覆盖层和受污染的沉积层中的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278452, 51008274, 51010008); 973 计划项目(2012CB719806); 浙江省公益性技术研究项目(2011C21061); 浙江省自然科学基金项目(LYBD060003)

收稿日期: 2013-03-03

扩散运移问题^[8-9]。

研究有机污染物在复合衬垫中的扩散问题时,以往大多采用数值方法进行分析^[10-12]。但通过解析解能对问题的物理本质有更深入和根本的认识,并能揭示问题的内在规律及可以为数值模型提供一个有效的检验手段。另外,对于填埋场初步设计,大部分的模型参数很难获取。在这种情形下,简单的解析解比复杂的数值模型更合适^[13]。

目前,已经有学者通过拉普拉斯变换法^[14-15]、积分变换法^[16]、拉普拉斯变换和二项式定理相结合的方法^[17]求解了双层或多层多孔介质中的扩散或对流-弥散方程。但这些研究未考虑生物降解作用对污染物运移的影响。

目前很多研究指出降解是有机污染物在土体中运移的一个重要因素^[18]。前人试验研究结果均指出许多类型的有机污染物能在土体中发生剧烈的降解^[18-23]。另外,土体中的生物降解也是减少土体污染的一个非常有效的办法^[24-25]。具有降解功能的生物屏障层被认为能最大程度地减少城市固体废弃物填埋场及危险填埋场对环境和公共健康的风险^[26]。因此,为了更有效地设计填埋场的衬垫系统,应着重考虑生物降解的作用。杨文参等^[27]曾获得了双层土中生物降解参数一致时的污染物运移解。本文考虑了双层土中生物降解参数的不同,给出了考虑降解作用时有机污染物在双层多孔介质中的一维扩散解析解,并在这个解析解的基础上,结合算例对成层衬垫系统对有机物的防污效果进行分析。

1 数学模型

在建立有机污染物在成层介质中的一维扩散模型时,主要基于以下假设:

- (1) 污染物在土中运移的主要方式是分子扩散和吸附作用,忽略水力传导的作用;
- (2) 污染物在土中的扩散是一维的,且遵循费克第二定律;
- (3) 污染物在土中的扩散系数为常数,即扩散系数不随时间、空间变化;
- (4) 土层各分层介质是均质、饱和的;
- (5) 介质对污染物的吸附作用均为平衡线性吸附;
- (6) 考虑生物降解对污染物在介质中迁移的影响。

基于以上假设,建立了有机污染物在层状土中的一维扩散模型,如图 1 所示。

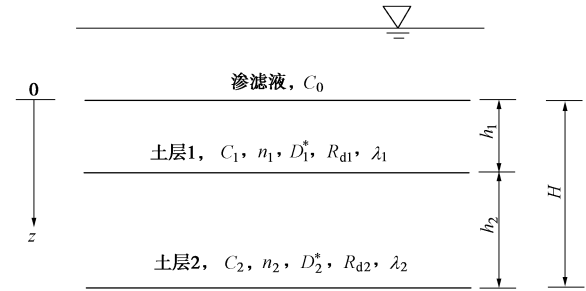


图 1 考虑降解时污染物在双层介质中的一维扩散模型

Fig. 1 Mathematical model for contaminant diffusion in two-layered media

在上述假设的基础上,建立了污染物在土中运移的控制方程。其中污染物在土层 1 中的运移控制方程为

$$\frac{\partial C_1(z,t)}{\partial t} = \frac{D_1^*}{R_{d1}} \frac{\partial^2 C_1(z,t)}{\partial z^2} - \lambda_1 C_1(z,t) \quad (1)$$

其中, $C_1(z,t)$ 为污染物在土层 1 中的浓度, D_1^* 为污染物在土层 1 中的有效扩散系数, R_{d1} 是介质 1 对污染物的吸附阻滞因子, z 为深度方向空间坐标, t 为时间。 λ_1 为土层 1 考虑生物降解作用的衰变系数,由下式确定:

$$\lambda_1 = \ln 2 / t_{1/2} \quad (2)$$

式中, $t_{1/2}$ 为污染物在土层 1 中的降解半衰期。

污染物在土层 2 中的运移控制方程为

$$\frac{\partial C_2(z,t)}{\partial t} = \frac{D_2^*}{R_{d2}} \frac{\partial^2 C_2(z,t)}{\partial z^2} - \lambda_2 C_2(z,t) \quad (3)$$

式中, $C_2(z,t)$ 为污染物在土层 2 中的浓度, D_2^* 为污染物在土层 2 介质中的有效扩散系数, R_{d2} 为介质 2 对污染物吸附的阻滞因子, λ_2 为土层 2 考虑生物降解作用的衰变系数。

假设在初始时刻,污染物在土层 1 中的含量为 0, 即

$$C_1(z,0) = 0 \quad (4)$$

在土层 2 中的含量为 0, 即

$$C_2(z,0) = 0 \quad (5)$$

在上边界,假设渗滤液中污染物的浓度为 C_0 , 则

$$C_1(0,t) = C_0 \quad (6)$$

在土层 1 和土层 2 的界面,必须保持污染物的浓度连续和通量连续,从而^[28]

$$C_1(h_1,t) = C_2(h_1,t) \quad (7)$$

$$n_1 D_1^* \frac{\partial C_1(h_1,t)}{\partial z} = n_2 D_2^* \frac{\partial C_2(h_1,t)}{\partial z} \quad (8)$$

式中, h_1 为土层 1 的厚度, h_2 为土层 2 的厚度。 n_1 、 n_2 分别为土层 1 和土层 2 的孔隙率。

在下边界,即在土层系统的底部采用零浓度的

边界条件, 即

$$C_2(H, t) = 0, \quad (9)$$

式中, H 为土层的总厚度, $H = h_1 + h_2$ 。

当土层系统下方含水层的水流流速较大以致能及时带走渗漏出的污染物时, 可以认为其下边界浓度为 0, 适宜采用零浓度下边界条件。

2 模型求解

为求解方便, 将非齐次的边界条件转化为齐次条件, 根据线性方程的叠加原理, 上述关于污染物的扩散问题可表示为下列问题的叠加:

$$\begin{cases} C_1(z, t) = \theta_1(z, t) + \phi_1(z)C_0, \\ C_2(z, t) = \theta_2(z, t) + \phi_2(z)C_0. \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\theta_1(z, t)$ 和 $\theta_2(z, t)$ 为满足齐次方程的变量, $\phi_1(z)$ 和 $\phi_2(z)$ 为满足非齐次边界的变量。

2.1 关于 $\phi_1(z)$, $\phi_2(z)$ 的求解

关于 $\phi_1(z)$, $\phi_2(z)$ 的问题描述如下:

满足的控制方程为

$$\begin{cases} \frac{D_1^*}{R_{d1}} \frac{d^2 \phi_1(z)}{dz^2} = \lambda_1 \phi_1(z), \\ \frac{D_2^*}{R_{d2}} \frac{d^2 \phi_2(z)}{dz^2} = \lambda_2 \phi_2(z); \end{cases} \quad (11)$$

具有的边界条件为

$$\phi_1(0) = 1, \quad (12)$$

$$\phi_1(h_1) = \phi_2(h_1). \quad (13)$$

$$n_1 D_1^* \frac{d\phi_1(h_1)}{dz} = n_2 D_2^* \frac{d\phi_2(h_1)}{dz}, \quad (14)$$

$$\phi_2(H) = 0. \quad (15)$$

显然, 上述方程的通解为

$$\begin{cases} \phi_1(z) = A_1 \exp\left(\sqrt{\frac{\lambda_1 R_1}{D_1^*}} z\right) + B_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda_1 R_1}{D_1^*}} z\right), \\ \phi_2(z) = A_2 \exp\left(\sqrt{\frac{\lambda_2 R_2}{D_2^*}} z\right) + B_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda_2 R_2}{D_2^*}} z\right). \end{cases} \quad (16)$$

定义参数:

$$a = \frac{n_2 D_2^*}{n_1 D_1^*}, \quad b = \frac{n_2 R_{d2}}{n_1 R_{d1}}, \quad c = \frac{h_2}{h_1}, \quad d = \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

$$\gamma_1 = h_1 \sqrt{\frac{\lambda_1 R_{d1}}{D_1^*}}, \quad \gamma_2 = h_2 \sqrt{\frac{\lambda_2 R_{d2}}{D_2^*}}.$$

由求解条件式 (12) ~ (15) 确定方程解的各系数如下:

$$B_1 = \frac{1}{1 + K_1 \exp(-2\gamma_1)}, \quad (17)$$

$$A_1 = 1 - B_1, \quad (18)$$

$$A_2 = -B_2 \exp[-2(1 + 1/c)\gamma_2], \quad (19)$$

$$B_2 = \frac{\exp(\gamma_1) + [\exp(-\gamma_1) - \exp(\gamma_1)]B_1}{\exp(-\gamma_2/c) - \exp[-(2 + 1/c)\gamma_2]}, \quad (20)$$

$$K_1 = \frac{1 - \sqrt{abd} \coth(\gamma_2)}{1 + \sqrt{abd} \coth(\gamma_2)}. \quad (21)$$

2.2 关于 $\theta_1(z, t)$, $\theta_2(z, t)$ 的求解

关于 $\theta_1(z, t)$, $\theta_2(z, t)$ 的控制方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t} = \frac{D_1^*}{R_1} \frac{\partial^2 \theta_1(z, t)}{\partial z^2} - \lambda_1 \theta_1(z, t), \\ \frac{\partial \theta_2(z, t)}{\partial t} = \frac{D_2^*}{R_2} \frac{\partial^2 \theta_2(z, t)}{\partial z^2} - \lambda_2 \theta_2(z, t); \end{cases} \quad (22)$$

具有的边界条件如下:

$$\theta_1(0, t) = 0, \quad (23)$$

$$\theta_1(h_1, t) = \theta_2(h_1, t), \quad (24)$$

$$n_1 D_1^* \frac{\partial \theta_1(h_1, t)}{\partial z} = n_2 D_2^* \frac{\partial \theta_2(h_1, t)}{\partial z}, \quad (25)$$

$$\theta_2(H, t) = 0; \quad (26)$$

具有的初始条件如下:

$$\begin{cases} \theta_1(z, 0) = -\phi_1(z)C_0, \\ \theta_2(z, 0) = -\phi_2(z)C_0. \end{cases} \quad (27)$$

为求解方便, 引入如下关系式对控制方程 (22)

进行简化:

$$\theta_i(z, t) = W_i(z, t) \exp(-\lambda_i t) \quad (i = 1, 2). \quad (28)$$

将方程 (23) 代入控制方程 (22) 得到

$$\frac{\partial W_i(z, t)}{\partial t} = \frac{D_i^*}{R_{di}} \frac{\partial^2 W_i(z, t)}{\partial z^2} \quad (i = 1, 2). \quad (29)$$

$W_i(z, t)$ 具有的边界条件如下:

$$W_1(0, t) = 0, \quad (30)$$

$$W_2(H, t) = 0, \quad (31)$$

$$W_1(h_1, t) \exp(-\lambda_1 t) = W_2(h_1, t) \exp(-\lambda_2 t). \quad (32)$$

$$\begin{aligned} n_1 D_1^* \exp(-\lambda_1 t) \frac{\partial W_1(h_1, t)}{\partial z} \\ = n_2 D_2^* \exp(-\lambda_2 t) \frac{\partial W_2(h_1, t)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (33)$$

初始条件为

$$W_1(z, 0) = -\phi_1(z)C_0, \quad W_2(z, 0) = -\phi_2(z)C_0. \quad (34)$$

考虑到上述关于 $W_1(z, t)$, $W_2(z, t)$ 问题的控制方程和求解条件与固结问题相类似, 在求解时参考文献 [28] 的解法, 得到满足上述求解条件的解如下:

$$W_1(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} g_{m1}(z) \exp(-\beta_m t) B_m, \quad (35)$$

$$W_2(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} g_{m2}(z) \exp[(\lambda_2 - \lambda_1 - \beta_m)t] B_m. \quad (36)$$

式中,

$$g_{m1}(z) = \sin\left(\xi_m \frac{z}{h_1}\right), \quad (37)$$

$$g_{m2}(z) = A_m \sin\left(\mu \xi_m \frac{H-z}{h_1}\right). \quad (38)$$

其中, 方程解的各系数如下:

$$A_m = \frac{\sin \xi_m}{\sin(\mu c \xi_m)}, \quad (39)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{b}{a} + (\lambda_1 - \lambda_2) \frac{R_{d2}}{D_2^*} \frac{h_1^2}{\xi_m^2}}, \quad (40)$$

$$\beta_m = \frac{D_1^*}{R_{d1}} \left(\frac{\xi_m}{h_1}\right)^2, \quad (41)$$

$$B_m = -2 \left[\int_0^{h_1} \phi_1(z) \sin\left(\xi_m \frac{z}{h_1}\right) dz + b \int_{h_1}^H \phi_2(z) \cdot A_m \sin\left(\mu \xi_m \frac{H-z}{h_1}\right) dz \right] / \left[h_1 \left[1 + bc A_m^2 + \left(\frac{b}{a \mu^2} - 1\right) \frac{\sin \xi_m \cos \xi_m}{\xi_m} \right] \right]. \quad (42)$$

ξ_m 为下列特征方程的正根:

$$a \mu \sin(\xi_m) \cos(\mu c \xi_m) + \cos(\xi_m) \sin(\mu c \xi_m) = 0. \quad (43)$$

至此, 可以写出满足一切求解条件的 $W_1(z, t)$ 和 $W_2(z, t)$ 一般解:

$$W_1(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\xi_m \frac{z}{h_1}\right) \exp(-\beta_m t) B_m, \quad (44)$$

$$W_2(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\mu \xi_m \frac{H-z}{h_1}\right) \exp[(\lambda_2 - \lambda_1 - \beta_m) t] B_m. \quad (45)$$

将式 (44)、(45) 代入式 (32)、(33) 得

$$\theta_1(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\xi_m \frac{z}{h_1}\right) \exp[-(\beta_m + \lambda_1) t] B_m, \quad (46)$$

$$\theta_2(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\mu \xi_m \frac{H-z}{h_1}\right) \exp[-(\beta_m + \lambda_1) t] B_m. \quad (47)$$

将式 (46) ~ (47) 和式 (16) 代入式 (10) 得到

$$C_1(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\xi_m \frac{z}{h_1}\right) \exp[-(\beta_m + \lambda_1) t] B_m + A_1 \exp\left(\sqrt{\frac{\lambda_1 R_1}{D_1^*}} z\right) + B_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda_1 R_1}{D_1^*}} z\right), \quad (48)$$

$$C_2(z, t) = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\mu \xi_m \frac{H-z}{h_1}\right) \exp[-(\beta_m + \lambda_1) t] B_m + A_2 \exp\left(\sqrt{\frac{\lambda_2 R_2}{D_2^*}} z\right) + B_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda_2 R_2}{D_2^*}} z\right). \quad (49)$$

在求得上述浓度解的基础上, 通过下式可得到 t

时刻, 在土层中任一点 z 处的污染物通量 $J(z, t)$:

$$J(z, t) = -n_i D_i^* \frac{\partial C_i(z, t)}{\partial z}. \quad (50)$$

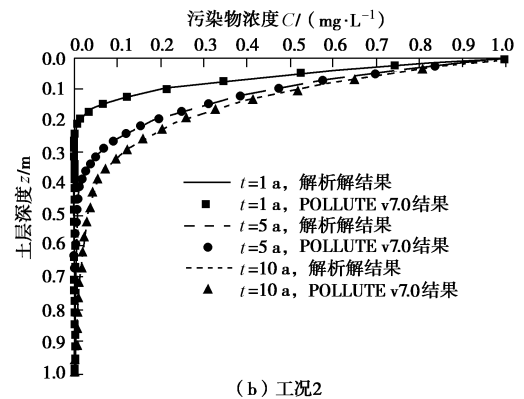
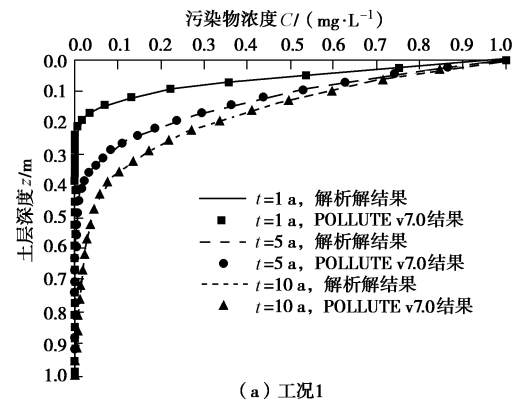
3 与数值方法的比较

基于上述解析解, 笔者编制了相应的计算程序。并将本文计算结果与著名污染物运移分析软件 POLLUTE v7.0 的结果进行了对比。土层 1 和土层 2 的参数取值参考了文献[29], 见表 1。渗滤液中的污染物初始浓度 $C_0=1.0$ mg/L, 土层 1、2 中污染物初始浓度为 0, 有机污染物在土层中的半衰期分别为工况 1(土层 1 的 $t_{1/2}=10$ a, 土层 2 的 $t_{1/2}=5$ a)、工况 2(土层 1 的 $t_{1/2}=5$ a, 土层 2 的 $t_{1/2}=10$ a) 和对比工况(土层 1 的 $t_{1/2}=0.1$ a, 土层 2 的 $t_{1/2}=0.5$ a)。笔者对本文推导的解析解与分析软件 POLLUTE v7.0 得出的结果进行了对比, 结果如图 2 所示。

表 1 土层的运移性质参数

Table 1 Transport parameters for two porous media

土层类别	孔隙率 n	D^* / (m ² ·s ⁻¹)	ρ / (g·cm ⁻³)	层厚 h/m	K_d / (mL·g ⁻¹)
土层 1	0.32	5.0×10^{-10}	1.79	0.4	0.70
土层 2	0.40	8.9×10^{-10}	1.62	0.6	0.28



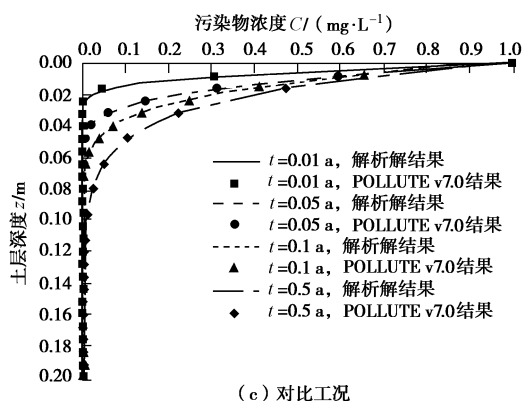


图2 本文计算结果和 POLLUTE v7.0 计算结果的比较

Fig. 2 Comprison of computed results by proposed model in this paper and those by POLLUTE v7.0

图2给出了两种方法得到的土层中污染物浓度分布曲线,由图2可知,曲线部分表示本文解析解的计算结果,数据点则表示数值计算软件 POLLUTE v7.0 的计算结果。显然,基于本文解得到的污染物浓度分布曲线与分析软件 POLLUTE v7.0 得到的分布曲线较为一致,吻合得很好。这说明了本文解析解的合理性和可靠性。

4 参数敏感性分析

首先考虑有机污染物在土层中的纯扩散问题,即此时有机污染物的半衰期趋于无穷大,也就是土壤中不存在有机污染物的降解(工况5)。为了研究降解对有机污染物扩散的影响,笔者选取了表2中不同工况的降解半衰期参数,分析了这些参数的不同组合。

表2 不同工况下降解半衰期参数 $t_{1/2}$ 取值

Table 2 Degradation half-lives for different cases						
土层类别	参考 工况	工 况 1	工 况 2	工 况 3	工 况 4	工 况 5
土层 1	10	10	5	10	∞	∞
土层 2	10	5	10	∞	10	∞

图3比较了不同半衰期时在 $z=0.4$ m 处有机污染物浓度的随时间变化曲线。从图3可知,有机污染物的降解对其浓度变化曲线影响很大。在 $z=0.4$ m 处,有机污染物浓度随污染物半衰期的减少而减少,随生物降解的强度增强而减少。对比参考工况、工况5可以得出,在10 a前,生物降解的影响并不显著,但10 a之后其影响逐渐增大。在10 a时,工况5的有机污染物浓度为0.11 mg/L,而参考工况的污染物浓度此时为0.07 mg/L,差距并不明显;在50年时,工况5的有机污染物浓度则达到了0.38 mg/L,此时参考工况的有机污染物浓度仅为0.14 mg/L。两者相差近三倍。工况1、2分别有部分土壤的生物降解强度要大于参考工

况的强度,而在 $z=0.4$ m 处,50 a 时工况1、2的有机污染物分布浓度(分别为0.12 mg/L, 0.08 mg/L)均小于参考工况的分布浓度(0.14 mg/L)。对比工况1和工况3,工况2和工况4都能看出这种变化。这些结果表明,生物降解对有机污染物的浓度分布可以产生显著的影响,随着生物降解作用的增强,土中的有机污染物分布浓度会随之下降。

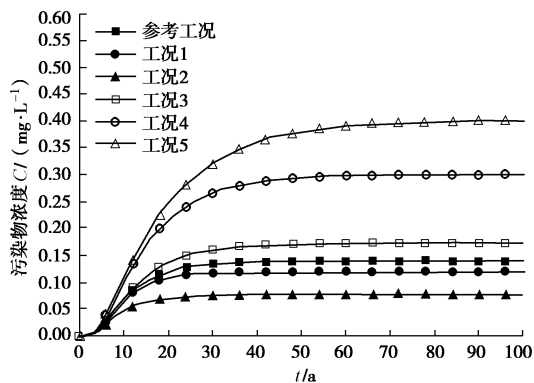


图3 不同工况下 $z=0.4$ m 处污染物浓度随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of concentration at $z=0.4$ m with time for different cases

图4则给出了生物降解对土壤衬垫底部有机污染物通量的影响曲线。类似浓度分布曲线的情形,有机污染物的生物降解对通量变化曲线的影响也非常大。从图4可知,在同一时刻,不同强度的生物降解条件下,有机污染物的通量有很大差异。并且随着生物降解活动的增强,通量呈急剧下降趋势。在100 a时,参考工况下的土壤衬垫底部通量值约为 2×10^4 ($\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$),工况5的底部通量值为 7.5×10^4 ($\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$),考虑降解与不考虑降解情形两者的结果相差近4倍。生物降解作用最强烈的工况2,土壤衬垫底部通量值仅约为 1.0×10^4 ($\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)。

图5给出了20 a后在几种不同工况下土层中有机污染物的浓度分布曲线,同样类似在某点处得浓度分布变化得到的结论。不考虑降解参数的工况5的有机污染物在土层中的浓度分布是最高的,而生物降解强度最高的工况2有机污染物的浓度分布值是最低的,降解作用强度适中的参考工况,有机污染物的浓度分布值在诸多情况下也是居中的。这都说明,随着生物降解作用的增强,土壤中的有机污染物的浓度分布是逐渐减少的。生物降解作用越弱,有机污染物的浓度分布就越高。反之,生物降解强度越强有机污染物的浓度越低。

通过对比工况1、2和参考工况,发现土层1的降解参数对整个土层的浓度分布影响更明显,即增强土

层 1 中的生物降解作用强度, 可以更有效地降低土壤中的有机污染物的浓度分布。增强土层 2 中的生物降解作用强度, 有机污染物的浓度分布曲线变化相对不显著。同样, 对比工况 3、4、5, 也能得出相同的结论。所以, 有机污染物的浓度分布对土层 1 中的降解参数更敏感。

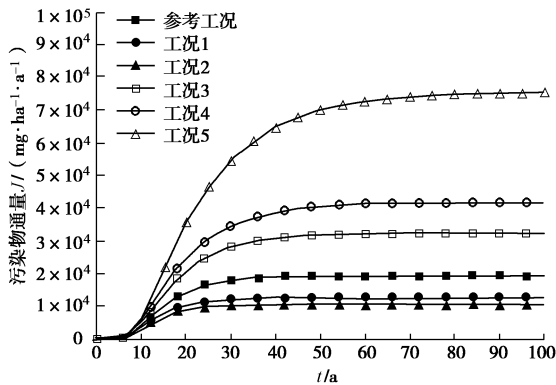


图 4 不同工况下土层底部污染物通量变化曲线的比较

Fig. 4 Variation of bottom flux with time for different cases

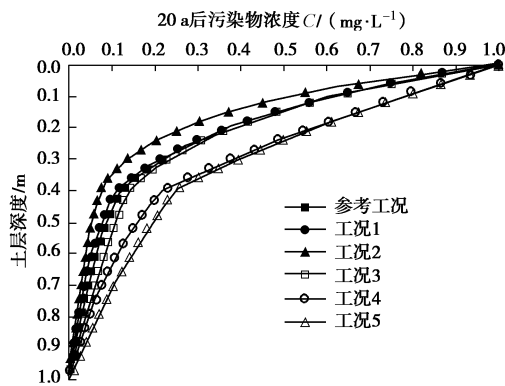


图 5 20 a 后在不同工况下土层中有机污染物的浓度分布曲线

Fig. 5 Soil concentration profiles of 20 years for different cases

5 结 论

本文建立了有机污染物在双层介质中的一维扩散模型, 同时考虑了有机污染物在土壤衬垫中的降解作用, 针对零浓度的下边界条件, 推导了模型的解析解。与数值模型比较说明了本文模型的合理性和有效性。

基于得到的解析解, 分析了降解作用对有机污染物在成层介质中的运移影响与相关参数的敏感性。结果表明有机污染物的降解作用能对污染物的运移产生显著影响, 并能有效地减少有机污染物在土壤衬垫系统中的浓度和底部通量。上层土壤中的降解作用对提高整体的防污性能更有效, 能更显著地减少有机污染物的浓度。

参考文献:

- [1] RUGGE K, BJERG P L, CHRISTIENSEN T H. Distribution of organic compounds from municipal solid waste in the groundwater down gradient of a landfill (Grindsted, Denmark)[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(5): 1395 - 1400.
- [2] 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.
- [3] EDIL T B. A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners[J]. Waste Management, 2003, 23: 561 - 571.
- [4] FOOSE G J. Leakage rates and chemical transport through composite liners[D]. Madison: University of Wisconsin Madison, 1997.
- [5] ROWE R K. Geosynthetics and minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics. Atlanta: Industrial Fabrics Association International, St Paul, MN, 1998: 27 - 102.
- [6] PARK J K, SAKTI J P, HOOPES J A. Transport of organic compounds in thermoplastic geomembranes I: mathematical model[J]. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(9): 800 - 806.
- [7] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W I, et al. Barrier systems for waste disposal facilities[M]. Oxford, U K: Taylor & Francis, 2004.
- [8] PALALERMO M R, MAYNORD S, MILLER J, et al. Guidance for in-situ subaqueous capping of contaminated sediments[M]. Chicago: Great Lakes National Program Office, 1998.
- [9] LAMPERT D J, REIBLE D. An analytical modeling approach for evaluation of capping of contaminated sediments[J]. Soil Sediment and Contamination, 2009, 18(4): 471 - 488.
- [10] KABLE U, MULLER W, BERGER W, et al. Transport of organic contaminants within composite liner systems[J]. Applied Clay Science, 2002, 21(1): 67 - 76.
- [11] EI-ZEIN A, ROWE R K. Impact on groundwater of concurrent leakage and diffusion of dichloromethane through geomembranes in landfill liners[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(1): 55 - 71.
- [12] DU Y J, SHEN S L, LIU S Y, et al. Contaminant mitigation performance of Chinese standard municipal solid waste

- landfill liner system[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, **27**(3): 232 – 239.
- [13] SHACKELFORD C D. Transit-time Design of earthen barriers[J]. *Engineering geology*, 1990, **29**(1): 79 – 94.
- [14] LEI F J, DANE J H, VAN GENUCHTEN M T. Mathematical analysis of one-dimensional solute transport in a layered soil profile[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1991, **55**(4): 944 – 953.
- [15] LEI F J, VAN GENUCHTEN M T. Approximate analytical solutions for solute transport in two-layer porous-media[J]. *Transport in Porous Media*, 1995, **18**(1): 65 – 85.
- [16] LIU C, BALL W P. Analytical modeling of diffusion-limited contamination and decontamination in a two-layer porous medium[J]. *Advances in Water Resources*, 1998, **21**(4): 297 – 313.
- [17] LIU C, 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.
- [18] XU J, WU L S, CHEN W P, et al. Adsorption and degradation of ketoprofen in soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(3): 1177 – 1182.
- [19] ROWE R K, HRAPOVIC L, KOSARIC N, et al. Anaerobic degradation of DCM diffusion through clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(12): 1085 – 1095.
- [20] BRIGHT M I, THORNTON S F, LERNER D N, et al. Attenuation of landfills leachate by clay liner material in laboratory columns: 1 Experimental procedures and behavior of organic contaminants[J]. *Waste Management & Research*, 2000, **18**(3): 198 – 214.
- [21] 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.
- [22] HEAD I M, JONES D M, LARTER S R. Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil[J]. *Nature*, 2003, **426**(6963): 344 – 352.
- [23] SINGH N, HENNECKE D, HOERNER J, et al. Mobility and degradation of trinitrotoluene/metabolites in soil columns: Effect of soil organic carbon content[J]. *Journal of Environmental Science and Health A*, 2008, **43**(7): 682 – 693.
- [24] HRAPOVIC L, ROWE R K. Intrinsic degradation of volatile fatty acids in laboratory compacted clayey soil[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2002, **58**(3/4): 221 – 242.
- [25] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological consideration in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(10): 1222 – 1233.
- [26] ALVAREZ P J J, ILLMAN W A. Bioremediation and natural attenuation-process fundamentals and mathematical models[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [27] 杨文参, 谢海建, 陈培雄, 等. 考虑降解时污染物在底泥及覆盖层中的运移解[J]. *土木工程学报*, 2011, **44**(增刊 2): 181 – 185. (YANG Wen-can, XIE Hai-jian, CHEN Pei-xiong, et al. Analytical solution for contaminant transport in underwater soil and cap layer[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, **44**(S2): 181 – 185. (in Chinese))
- [28] CHEN Y M, XIE H J, KE H, et al. An analytical solution of contaminant diffusion through multi-layered media and its applications[J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(9): 1083 – 1094.
- [29] ROWE R K, BOOKER J R. POLLUTEv7: Pollutant migration through nonhomogeneous soil, 1983-2005[R]. Ontario, Canada: GAEA Environmental Engineering Ltd, 2005.
- [30] ÖZISIK M N. Heat conduction[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [31] 谢海建. 成层介质污染物的运移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (XIE Hai-jian. A study on the mechanism of contaminant transport in layered media and the performance of landfill liner system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))

(本文责编 明经平)