

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.296>



# 一维流动条件下 PCE 链式降解中 PRB 厚度解析及影响

陈华丽<sup>1</sup>, 胡成<sup>2\*</sup>, 陈刚<sup>2</sup>, 王挺<sup>1</sup>, 吴礼光<sup>1</sup>

1. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 浙江杭州 310018

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

**摘要:** 可渗透反应墙(Permeable Reactive Barrier, PRB)技术是原位地下水或者土壤修复中最受瞩目的技术之一, 该技术和安装的首要关键问题就是反应墙的厚度计算。现有的反应墙设计方法大部分只考虑了单一污染物或者反应墙本身, 很少考虑多种污染物的存在以及含水层水力性质的实际情况。聚焦于可渗透反应墙中的 PCE(四氯乙烯)链式降解过程, 基于可渗透反应墙—含水层的多域多组分污染物的体系建立了一维条件下的对流弥散方程, 通过借鉴相关文献提出的转换算法得出方程解析解, 并由此推导出适合多组分污染物体系的反应墙厚度公式, 利用软件 COMSOL 建立了数值模型验证了其正确性。对比已有的 Rabideau 模型发现: 计算反应墙厚度时不能完全忽略含水层的自然衰减反应, 尤其当达标面远离反应墙出口处时; 对于多种组分皆来源于同一种母源反应物的污染物, 计算反应墙厚度时边界条件十分关键。本文模型的解析解可以为可渗透反应墙的设计和安装提供建设性的意见, 还可以快速分析多组分污染物的分布和预测, 为地下水的修复工程、风险评估、后期监测控制提供了计算的支撑。

**关键词:** 可渗透反应墙; 一维流动; 四氯乙烯; 解析解; 反应墙厚度; 环境科学。

中图分类号: X523

文章编号: 1000-2383(2021)08-3012-07

收稿日期: 2020-08-25

## PRB Thickness and Influence Based on 1D PCE Chain Degradation

Chen Huali<sup>1</sup>, Hu Cheng<sup>2\*</sup>, Chen Gang<sup>2</sup>, Wang Ting<sup>1</sup>, Wu Liguang<sup>1</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

**Abstract:** Permeable Reactive Barrier (PRB) technology is one of the most popular technologies for in-situ groundwater or soil remediation. A key task of design and installation is to calculate the thickness of the PRB. Most of the existing models of calculating the PRB thickness only consider the single species or the reaction barrier itself, with little consideration of a variety of contaminants and the combination of the aquifers. The response to PRB and aquifer multi-domain system, the convection dispersion equation of multi-species under one-dimensional condition was established. The analytical solution of the equation was obtained by using a conversion algorithm proposed by related literature, and the formula of the new PRB thickness was deduced at the same time, and then the numerical model was built based on the software COMSOL to validate this analytical solution. After comparing the required PRB thickness calculated from this study and previously developed Rabideau models, the aquifer reaction capability is found to be non-negligible for the determination of the required thickness of the PRB especially when the compliance plane becoming far from the PRB exit face. For the remediation multiple species sharing a single parental species, the correctness

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No. 41401539).

作者简介: 陈华丽(1978—), 女, 副教授, 博士, 主要从事地下水污染处理及数值模拟研究。ORCID: 0000-0002-8907-1715. E-mail: hualichen@zjgsu.edu.cn

\* 通讯作者: 胡成, E-mail: hu\_cheng@cug.edu.cn

引用格式: 陈华丽, 胡成, 陈刚, 等, 2021. 一维流动条件下 PCE 链式降解中 PRB 厚度解析及影响. 地球科学, 46(8):3012-3018.

in the boundary and the domain conditions are crucial to estimate the effective thickness of a PRB. The proposed analytical solution provides meaningful designing insights for the PRB design and installation.

**Key words:** Permeable Reactive Barrier (PRB); 1D flow; PCE; analytical solution; PRB thickness; environmental science.

近年来可渗透反应墙(Permeable Reactive Barrier, PRB)技术,因其成本低廉、方便等原因成为最受关注且最具应用前景的地下水污染原位修复技术之一。其主要机理是将墙体(结合一定化学或者生物手段)放置于污染羽经过的区域,被污染的地下水流经墙体反应单元时在一定时段内与反应介质发生物理、化学或生物降解达到环境许可的程度(黄润竹等,2016;王泓泉,2020)。国内关于反应墙的研究很多,但大部分着重于反应墙填充材料选择等水文地球化学层面(李敬杰等,2019),对反应墙厚度的研究未引起足够重视。污染物在墙体内部的滞留时间与反应墙的厚度和地下水的流速密切相关。在PRB原位修复过程中,设计安装的首要任务就是计算反应墙的厚度(谭勇等,2016)。一般现行的办法是实施室内小试或者现场中试确定污染羽的滞留时间(Gavaskar *et al.*, 1998; Gavaskar, 1999);另外也可利用数学模型推算出反应墙的设计参数,相关常数可通过小尺度的室内试验或查阅相关文献获取。

目前已经有几种优化计算反应墙厚度的数学模型,但在边界条件的设定上不一样。基于 van Genuchten and Alves (1983) 的溶质运移理论公式, Tratnyek *et al.* (1997) 推导出反应墙的厚度是渗流速度的函数,但在模型中并未定义PRB出口界面的边界条件;同样地, Eykholt *et al.* (1999) 计算得出稳定流条件下PRB的设计方程,但是没有考虑墙体内部污染物的弥散效应。Rabideau *et al.* (2005) 在基于PRB出口零通量边界或者半无限边界的条件下计算得到了PRB最小厚度。但是因成本控制和反应墙自身结构的影响,现有的反应墙所设计的滞留时间并不合理,导致反应墙出口处的污染物浓度难以达到环境标准(特别是污染羽初始浓度较高的时候)。另外考虑到自然衰减对污染物在反应介质中降解过程的影响, Park and Zhan (2009) 在PRB-含水层多域法的基础上建立非稳定流条件下的半解析解来计算PRB厚度。由于对渗流介质中的PRB部分做了苛刻的简化假设,基于上述技术方法,往往也会导致反应墙所设计的滞留时间、反应墙污染物处理效率的计算偏差,难以达到设计目标。

此外,上述几种模型讨论的都是单组分污染物

的运移问题,应用到实际中容易显示出局限性。实际污染场地的地下水污染羽中一般存在两种及以上的污染组分,例如含氯溶剂(四氯乙烯PCE、三氯乙烯TCE等)作为PRB的目标污染物,其在PRB-地下水含水层体系内部的降解过程通常被描述为一级链式降解反应网络。Sun *et al.* (1999) 和 Clement (2001) 提出一种转换算法可用于解决多组分污染物的运移方程和连续一级反应网的问题,但是该算法在多域的情况下需要进一步验证。

本文基于 Sun *et al.* (1999) 和 Clement (2001) 的转换算法,在PRB-含水层体系多域的情况下建立了多组分污染物一维的对流弥散方程,结合最大允许污染度的约束条件得到了PRB厚度的计算公式,同时将该模型与 Rabideau 模型进行比较,探究反应墙厚度计算过程中的影响因素。最终得出的PRB设计方程可以为今后解决实际问题提供参考,包括PRB-含水层体系多组分污染物的修复。

## 1 建立模型

### 1.1 控制方程和边界条件

如图1所示,反应墙与含水层毗连但是二者的物理、化学性质不同,形成了PRB-含水层多域体系空间介质结构。污染羽穿过板状墙体与反应介质发生一系列复杂反应,浓度沿地下水流方向逐渐降低而达到修复效果。当污染羽流向大致垂直于反应墙体,考虑到最坏的情况可能是污染羽覆盖整个墙面时,可当作一维渗流的情况来建立数学模型解决问题(Rabideau *et al.*, 2005; Park and Zhan, 2009)。

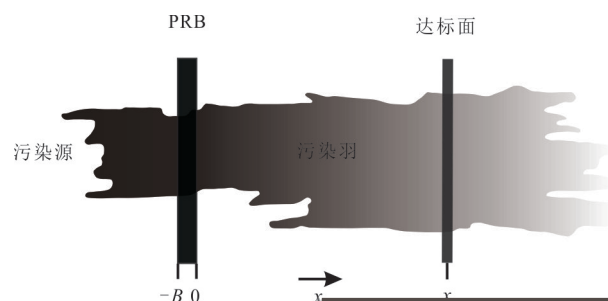


图1 一维流动条件下的PRB-含水层多域体系结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of PRB-aquifer multi-domain system in 1D flow

假设初始污染物为四氯乙烯(PCE),流经PRB时其发生链式脱氯依次形成多种中间产物:三氯乙烯(TCE)、二氯乙烯(DCE)和氯乙烯(VC).如图1所示,平行于地下水流动的方向作为 $x$ 轴(该方向与反应墙的入口和出口面垂直),以反应墙的出口处作为原点建立直角坐标系,其中反应墙厚度为 $B$ .

反应墙和含水层皆为均质的透水介质.反应墙和含水层内部污染物运移控制方程以及线性反应链(PCE(1)→TCE(2)→DCE(3)→VC(4))由下列方程给出:

$$R_i \frac{\partial c_{ij}}{\partial t} - D_i \frac{\partial^2 c_{ij}}{\partial x^2} + u_i \frac{\partial c_{ij}}{\partial x} = y_{ij} \lambda_{i(j-1)} c_{i(j-1)} - \lambda_{ij} c_{ij} \quad (i=1,2;j=1,2,3,\dots,m), \quad (1)$$

式中:下标 $i$ 表示反应墙( $i=1, -B \leq x \leq 0$ )和含水层( $i=2, 0 \leq x \leq +\infty$ ); $j$ 表示第 $j$ 种污染物组分; $c$ 为污染物浓度,单位为 $M/L^3$ ;  $R$ 为阻滞系数(吸附作用); $D$ 为纵向弥散系数张量,单位为 $L^2/T$ ;  $u$ 为渗流速度,单位为 $L/T$ ;  $\lambda$ 为反应速率常数,单位为 $1/T$ ;  $y_j$ 为第 $j$ 种污染物组分的反应生成物的种类个数; $x$ 为 $x$ 轴方向上的空间变量,单位为 $L$ ;  $t$ 为时间变量,单位为 $T$ ;  $m$ 为污染物组分总数.

反应墙入口处污染物的浓度为时间函数:

$$n_1 D_1 \frac{\partial c_{1j}}{\partial x} - qc_{1j} \Big|_{x=-B} = -qc_{0j}(t) \quad (j=1,2,3,\dots,m), \quad (2)$$

式中: $n$ 为介质孔隙度; $q$ 为单位流量,在反应墙和含水层内皆为常数(反应墙和含水层的渗流速度可通过 $u_1 n_1 = u_2 n_2 = q$ 建立联系); $c_{0j}(t)$ 为反应墙入口处的污染物浓度(常数或为时间函数),单位为 $M/L^3$ .

假设反应墙介质和含水层介质此前并未受到污染,即浓度初始条件为 $c_{Bi}(t=0) = c_{Li}(t=0) = 0$ ,且反应墙出口处流量和浓度皆为连续函数:

$$c_{1j} \Big|_{x=0} = c_{2j} \Big|_{x=0}, n_1 D_1 \frac{\partial c_{1j}}{\partial x} - qc_{1j} \Big|_{x=0} = n_2 D_2 \frac{\partial c_{2j}}{\partial x} - qc_{2j} \Big|_{x=0} \quad (j=1,2,\dots,m). \quad (3)$$

零通量边界设在距反应墙出口面无穷远处:

$$\frac{\partial c_{2j}}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0 \quad (j=1,2,\dots,m). \quad (4)$$

## 1.2 Clement 转换算法

Clement在Sun *et al.* (1999)的基础上进一步展得一种转换算法,适用于更为复杂的反应网络.将方程(1)简化,得到的简单解进行逆运算便得出原方程中的解.假设污染物组分皆为相同的阻滞系数.

对反应墙和含水层中污染物的浓度进行简化转换(转换矩阵 $S_i^{-1}$ 详见附录方程式A1~A2):

$$b_i = S_i^{-1} c_i \quad (i=1,2), \quad (5)$$

那么运移方程可以简化为:

$$R b_{it} - D_i b_{ixx} + u_i b_{ix} = A_i b_i, \quad (6)$$

式中:加粗大写的字母代表 $n$ 阶方阵,加粗小写的字母代表 $n \times 1$ 的列矩阵(或者列向量); $b$ 为简化转换后的浓度矢量; $b_t$ 是转换后的浓度矢量关于时间的一阶导数; $b_x$ 为转换后的浓度矢量关于 $x$ 的一阶导数; $b_{xx}$ 为浓度矢量关于 $x$ 的二阶导数; $A_i$ 是反应速率常数 $\lambda_i$ 的 $n$ 阶对角矩阵(转换矩阵详见附录方程式A3~A4).

将转换方程得出的结果进行逆转换(逆转换矩阵 $S_i$ 详见附录方程式A5~A6),可得出污染物的浓度:

$$c_i = S_i b_i. \quad (7)$$

## 1.3 运移方程的解

对方程(1)简化转换之后,为了便于计算引入无量纲变量,应用Laplace变换最终导出Laplace形式的半解析解(导出过程详见附录方程式A7~A31):

$$\bar{b}_{id} = \begin{cases} \bar{b}'_{1D} + \exp\left(\frac{\mu_{1D} x_D}{2}\right) \cdot \Delta \cdot V_B^T & (i=1) \\ A_2 S_{2D}^{-1} S_{1D} e & (i=2) \end{cases} \quad (8)$$

参数 $\Delta$ 和 $V_B^T$ 详见附录.方程(8)是非稳流状态下的半解析解,但在大多数实际情况中运移方程的解都为稳流条件.假设反应墙入口处的浓度是常数(即 $\bar{b}_{0iD}(p) = b_{0iD}/p$ ),通过将拉普拉斯变换变量 $p$ 趋近于0,即时间 $t$ 趋近于无穷大可导出稳流状态下的方程式:

$$b_i = \begin{cases} \bar{b}'_1 + \exp\left(\frac{\mu_{1x}}{2}\right) \cdot \Delta_0 \cdot V_{B0}^T & (i=1) \\ A_{20} S_2^{-1} S_1 e_0 & (i=2) \end{cases} \quad (9)$$

具体计算推理过程以及相关的参数详见附录(A32~A38).

## 1.4 反应墙厚度计算

稳流状态下的解析解如下:

$$\text{反应墙: } c_B = S_B b_B, \quad (10)$$

$$\text{含水层: } c_L = S_L A_{L0} S_L^{-1} S_B e_0. \quad (11)$$

稳定流状态下达标面处污染物的浓度  $c_L$  已知, 便可解方程得到反应墙厚度  $B$  的方程式. 因反应墙的厚度  $B$  在方程(11)中不好分离, 可简化方程(11), 简化过程如下.

反应墙中一级动力学反应为主导, 弥散反应占次要地位, 污染羽的弥散效应可忽略至最小, 考虑到反应墙介质主要用来延迟污染物的流动并与其反应达到修复地下水的目的, 因此  $Bv_{0i}$  的值远大于 1. 在这种情况下,  $\cosh(Bv_{0i}) \approx \sinh(Bv_{0i}) \approx \exp(Bv_{0i})/2$  (Park and Zhan, 2009). 在反应墙的实际运用中, 参数  $\Delta_{0i}$  远小于  $c'_{0i}$  的情况十分常见 (ETI, 2005). 因此, 方程 A36 (见附录) 中  $e_{0i}$  可近似简化为:

$$e_{0i} \approx \exp\left[\left(\frac{u_B}{2D_B} - v_{0i}\right)B\right] \cdot \frac{4b_{0i}v_{0i}u_B}{v_{0i}u_B + 2D_L\theta\omega_{0i}v_{0i} + \theta\delta\omega_{0i}u_B + 2D_Bv_{0i}^2}. \quad (12)$$

从而  $B$  可以很容易分离出来, 不需要解方程 (11). 每种污染物需要的反应墙厚度为:

$$B_i = \frac{2D_B}{u_B - 2D_Bv_{0i}} \left[ \ln\left(\frac{c_{im}}{b_{0i}}\right) + \alpha \right], \quad (13)$$

$$\alpha = \ln(v_{0i}u_B + 2D_L\theta\omega_{0i}v_{0i} + \theta\delta\omega_{0i}u_B + 2D_Bv_{0i}^2) - \ln(4u_Bv_{0i}), \quad (14)$$

式中:  $B_i$  表示在达标面处每种污染物达标时需要的反应墙厚度;  $c_{im}$  为反应墙出口处第  $i$  种污染物的实际浓度, 单位为  $M/L^3$ ;  $b_{0i}$  为第  $i$  种污染物的参考浓度 (单位为  $M/L^3$ ), 可能为溶解度.

$$\alpha = \ln(v_{0i}u_B + 2D_L\theta\omega_{0i}v_{0i} + \theta\delta\omega_{0i}u_B + 2D_Bv_{0i}^2) - \ln(4u_Bv_{0i}), \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} c_{1m} \\ c_{2m} \\ \vdots \\ c_{(n-1)m} \\ c_{nm} \end{pmatrix} = S_B^{-1} S_L A_{L0M}^{-1} S_L^{-1} c_{MCL}, \quad (16)$$

$$A_{L0M} = \text{diag}\left[\exp\left(\frac{u_L - 2D_L\omega_{01}}{2D_L}x_{\text{comp}}\right), \exp\left(\frac{u_L - 2D_L\omega_{02}}{2D_L}x_{\text{comp}}\right), \dots, \exp\left(\frac{u_L - 2D_L\omega_{0n}}{2D_L}x_{\text{comp}}\right)\right], \quad (17)$$

为了使所有污染物的浓度都达标, 反应墙所需

厚度可以表示为:

$$B = \max(B_1, B_2, \dots, B_n). \quad (18)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 算法的验证

根据表 1 的参数来模拟实际 PRB 应用的实例——一级链式降解反应, 例如将四氯乙烯 (PCE) 的降解 ( $PCE \rightarrow TCE \rightarrow DCE \rightarrow VC$ ) 作为例子来验证本算法的正确性, 同时和原有算法进行对比分析. 设定两种区域分别代表反应墙 (厚度为 1 m) 和含水层 (距离反应墙 500 m), 达标面位于  $x=99$  m 处; 为避免模型边界效应, 将含水层的宽度扩展到 500 m; PRB 的入口面设为冯·诺依曼边界 (污染物浓度保持不变), PRB 的出口面设为连续边界 (污染物浓度与地下水流量皆连续), 含水层边缘看作层流边界; PRB 和距离 PRB 100 m 范围网格剖分为 0.05 m 为单位距离, 距离 PRB 100 m 以上以 0.1 m 为单位距离; 数值计算过程利用 COMSOL 软件实现; 模型参数取值参照 ETI (2005) 和 Alvarez and Illman (2006).

图 2 为双对数坐标下四种污染物在稳定状态下本算法和数值解的对比.  $x$  坐标右移 1 m 以保证坐标中数值为正值, 达标面相应移到  $x=100$  m 处. 从图 2 中可以清晰地看到本算法与数值解完全吻合, 证明了本算法的正确性.

表 1 模型所需参数

Table 1 Required model parameters

参数	值	参数	值
$n_B$	0.5	$n_L$	0.1
$u_B$ (m/d)	$q/n_B$	$u_L$ (m/d)	$q/n_L$
$D_B$ (m <sup>2</sup> /d)	$0.1u_B$	$C_{1b}$ (mg/L)	100
$D_L$ (m <sup>2</sup> /d)	$10u_L$	$C_{2b}$ (mg/L)	50
$B$ (m)	1	$C_{3b}$ (mg/L)	10
$q$ (m/d)	0.3	$C_{4b}$ (mg/L)	80
$\lambda_{B1}$ (1/d)	3.61 <sup>a</sup>	$y_{B1}$	1.0 <sup>a</sup>
$\lambda_{B2}$ (1/d)	5.73 <sup>a</sup>	$y_{B2}$	0.4 <sup>a</sup>
$\lambda_{B3}$ (1/d)	2.97 <sup>a</sup>	$y_{B3}$	0.02 <sup>a</sup>
$\lambda_{B4}$ (1/d)	3.61 <sup>a</sup>	$y_{B4}$	0.01 <sup>a</sup>
$\lambda_{L1}$ (1/d)	0.005 <sup>b</sup>	$y_{L1}$	1.0 <sup>b</sup>
$\lambda_{L2}$ (1/d)	0.003 <sup>b</sup>	$y_{L2}$	0.792 0 <sup>b</sup>
$\lambda_{L3}$ (1/d)	0.002 <sup>b</sup>	$y_{L3}$	0.737 7 <sup>b</sup>
$\lambda_{L4}$ (1/d)	0.001 <sup>b</sup>	$y_{L4}$	0.644 5 <sup>b</sup>

注: 上标 a 代表数据引自 ETI (2005); 上标 b 代表数据引自 Alvarez and Illman (2006).

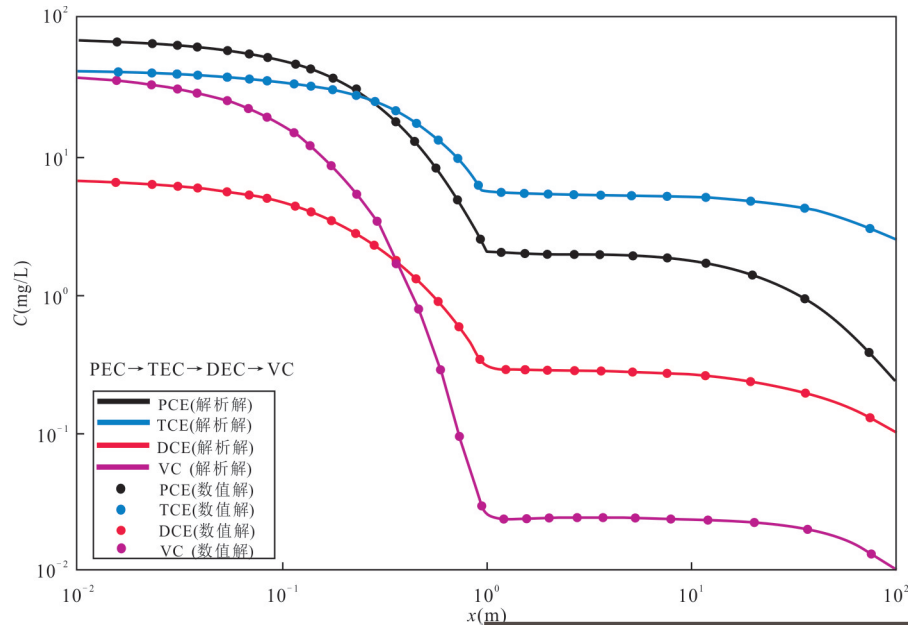


图2 本算法与数值解的对比

Fig. 2 Comparison of the results from the presented solution scheme against numerical solutions obtained

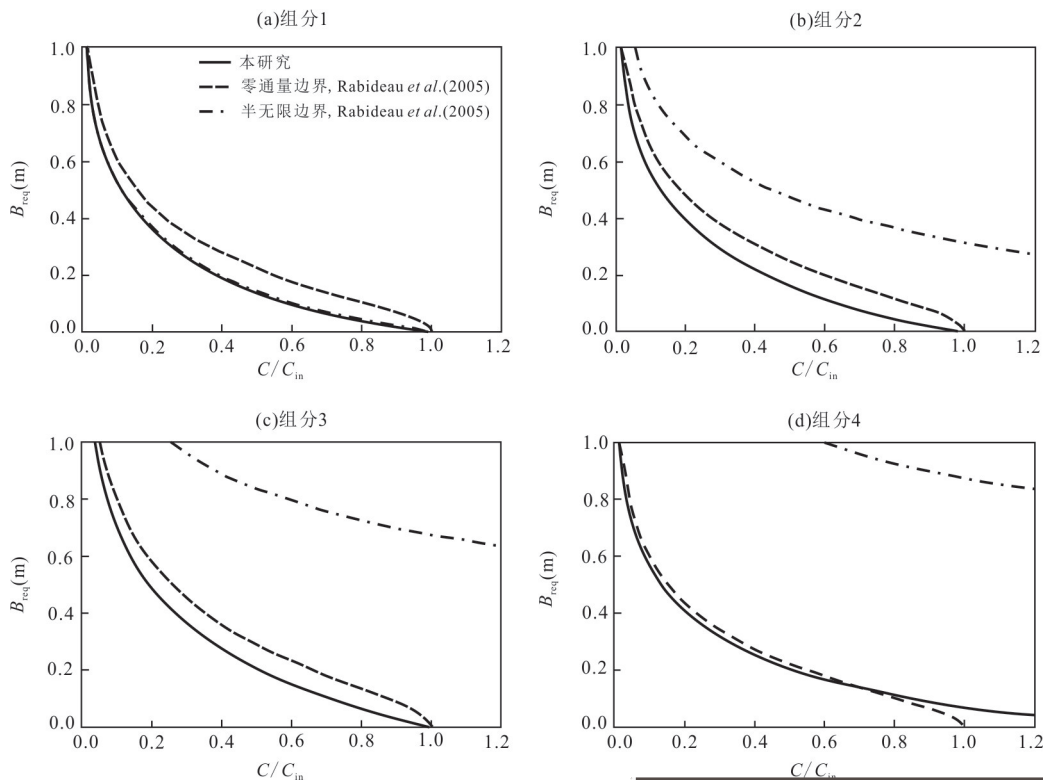


图3 标准浓度—反应墙厚度关系曲线(与Rabideau模型比较)

Fig. 3 The normalized concentrations of multiple species at the PRB exit face with varying PRB thickness (compared to previously developed model of Rabideau)

### 2.2 边界条件对反应墙厚度的影响

通过比较本文提出的反应墙厚度模型(方程13)与Rabideau模型关于反应墙出口处的标准浓度

与反应墙厚度的关系曲线(图3),探讨边界条件对反应墙厚度的影响. 本文与Rabideau模型最大的差别在于:Rabideau模型中,反应墙—含水层边界面看

作零通量边界或半无限边界;本文模型中反应墙和含水层之间的边界被视为内部边界。

**2.2.1 与第一类 Rabideau 模型(半无限出口边界)比较** 由图3可知,与Rabideau模型相比,本文模型中反应墙所需厚度最小。比较本研究模型与Rabideau模型(半无限出口边界)的浓度—反应墙厚度关系曲线,发现污染物组分1的两种曲线基本相同(图3a),但组分2~4的两种曲线的差异十分明显并且呈逐渐增大的趋势(图3b~3d)。这种差异可归因为两种模型条件设置的差异性:就反应速率来说,Rabideau半无限边界模型中距离入口边界1 m内区域的反应速率与反应墙的速率相等;但本文模型中,上述区域的反应速率与含水层反应速率相等(含水层的反应速率远小于反应墙)。因此相较于本研究模型,Rabideau模型中反应墙出口处污染物组分2~4的生成速率要大得多。

**2.2.2 与第二类 Rabideau 模型(恒定浓度入口边界—零通量出口边界)比较** 由图1可知,除了组分1,第二类Rabideau模型相比第一类Rabideau模型与本文模型的关系曲线更加接近。第二类Rabideau模型的出口边界设定为零通量边界,当浓度比(反应过程中浓度与初始浓度的比值)为1时反应墙厚度趋近于0。Rabideau模型的收敛性和两条曲线的差异性在组分4(图3d)中表现得最为显著:浓度比为1时本研究模型的反应墙厚度无法趋近于0。含水层的反应速率一般都很小,因此组分1~3的两条关系曲线的差值都比较小(组分4除外)。假设含水层的反应速率增加,推测本研究模型与Rabideau模型关系曲线间的差异会随之增加。

上述结果说明在估计反应墙有效厚度时(特别是将反应墙用于同源多组分污染的修复),边界条件的影响十分重要。

### 3 结论与建议

(1)本文基于反应墙—含水层体系多域法建立了多组分污染物一维流条件下的对流弥散方程,借鉴Clement等人提出的转换算法得出方程的解析解,由此得出关于反应墙厚度的数学模型(方程13)。通过与基于COMSOL软件的数值解进行对比证明了本算法的正确性。

(2)基于方程(13)利用相关数值模拟软件建立模型,并与已有的Rabideau模型进行对比,探究了反应墙厚度计算过程的影响因素。对比结果显示,

对于多种组分皆来源于同一种反应物的污染羽,计算反应墙厚度时边界条件十分关键;当达标面的位置较远时,含水层的降解效果对反应墙厚度计算具有显著影响。

(3)本模型的建立不但对于PRB的设计和施工计算PRB厚度有建设性的作用,而且快速方便。同时本模型可以计算PRB和含水层多域情况下多种污染物的分布和迁移,对于地下水修复过程中的方案设计、风险评估、施工管理、后期监测控制均有重要的借鉴意义。

附录见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

### References

- Alvarez, P. J. J., Illman, W. A., 2006. Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models. John Wiley & Sons, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/047173862x>
- Clement, T. P., 2001. Generalized Solution to Multispecies Transport Equations Coupled with a First-Order Reaction Network. *Water Resources Research*, 37(1): 157–163. <https://doi.org/10.1029/2000wr900239>
- ETI, 2005. First-Order Kinetic Degradation Models. Technical Note 2.06. Environmental Technologies Inc., Waterloo.
- Eykholt, G. R., Elder, C. R., Benson, C. H., 1999. Effects of Aquifer Heterogeneity and Reaction Mechanism Uncertainty on a Reactive Barrier. *Journal of Hazardous Materials*, 68(1–2): 73–96. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00032-1)
- Gavaskar, A. R., 1999. Design and Construction Techniques for Permeable Reactive Barriers. *Journal of Hazardous Materials*, 68(1–2): 41–71. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00031-X)
- Gavaskar, A.R., Gupta, N., Sass, B.M., et al., 1998. Permeable Barriers for Groundwater Remediation: Design Construction and Monitoring. Battelle Press, Columbus. <https://doi.org/10.21236/ada379980>
- Huang, R.Z., Gao, Y.J., Liu, R., et al., 2016. Review of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 36(4): 240–244 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.J., Cai, W.T., Zhang, T., et al., 2019. Study on the Remediation of High Concentration Cr(VI) Contaminated Groundwater by Mixed Medium of Cast Iron and Coconut Shell Activated Carbon. *Environmental Pollution & Control*, 41(5): 551–555, 578 (in Chinese with English

- abstract).
- Park, E., Zhan, H. B., 2009. One-Dimensional Solute Transport in a Permeable Reactive Barrier-Aquifer System. *Water Resources Research*, 45(7): W07502. <https://doi.org/10.1029/2008wr007155>
- Rabideau, A. J., Suribhatla, R., Craig, J. R., 2005. Analytical Models for the Design of Iron-Based Permeable Reactive Barriers. *Journal of Environmental Engineering*, 131(11): 1589–1597. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2005\)131:11\(1589\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2005)131:11(1589))
- Sun, Y., Petersen, J. N., Clement, T. P., et al., 1999. Development of Analytical Solutions for Multispecies Transport with Serial and Parallel Reactions. *Water Resources Research*, 35(1): 185–190. <https://doi.org/10.1029/1998wr900003>
- Tan, Y., Liang, J., Zeng, G. M., et al., 2016. Effects of PRB Design Based on Numerical Simulation and Response Surface Methodology. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 10(2): 655–661 (in Chinese with English abstract).
- Tratnyek, P. G., Johnson, T. L., Scherer, M. M., et al., 1997. Remediating Ground Water with Zero-Valent Metals: Chemical Considerations in Barrier Design. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 17(4): 108–114. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1997.tb01270.x>
- van Genuchten, M. T., Alves, W. J., 1983. Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation. *Technical Bulletin U.S. Department of Agriculture*, 1661: 149. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(84\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(84)90020-9)
- Wang, H. Q., 2020. Study on Permeable Reactive Barrier Technology for the Remediation of Polluted Groundwater. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 10(2): 251–259 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 黄润竹, 高艳娇, 刘瑞, 等, 2016. 应用可渗透反应墙进行地下水修复的综述. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 36(4): 240–244.
- 李敬杰, 蔡五田, 张涛, 等, 2019. 铸铁和椰壳活性炭混合介质修复高浓度 Cr(VI) 污染地下水研究. *环境污染与防治*, 41(5): 551–555, 578.
- 谭勇, 梁婕, 曾光明, 等, 2016. 基于数值模拟和响应面法的 PRB 设计影响研究. *环境工程学报*, 10(2): 655–661.
- 王泓泉, 2020. 污染地下水可渗透反应墙 (PRB) 技术研究进展. *环境工程技术学报*, 10(2): 251–259.