

悬挂式 PRB 几何尺寸对水文地质参数的敏感性

周宏博¹, 孙树林^{1,2}, 柏仇勇^{3,4}, 黄勇博¹, 洪正义¹, 吴荣东¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 4. 江苏省环保厅, 南京 210098)

摘要: 从地质角度出发, 采用 Visual MODFLOW 软件, 针对不同水力梯度、弥散度和渗透系数等 4 种工况, 通过模拟污染物运移特征, 分析了悬挂式 PRB 几何尺寸对水文地质参数的敏感性。其分析结果表明: 水力梯度越大, 导水门越厚, 悬挂式 PRB 的埋深越浅; 弥散度越大, PRB 的深度和宽度越大; 渗透系数越大, 导水门越厚。

关键词: 悬挂式 PRB; 水力梯度; 弥散度; 渗透系数; Visual MODFLOW

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)05-0021-05

可渗透反应墙(permeable reactive barrier, PRB)是近年来迅速发展的一种原位被动的地下水修复技术, 是一种为达到一定环境污染治理目标而将特定反应介质安装在地面以下的污染处理系统, 它能够阻断污染带, 将其中的污染物转化为环境可接受的形式, 但不破坏地下水流动性^[1]。PRB 正在逐步取代成本高昂的抽出-处理技术, 成为地下水修复技术发展的新方向。

鉴于地下水污染的严重性, 国外学者广泛开展地下水污染控制及 PRB 原位修复技术研究。如 Cherry^[2]、Benson^[3]、Hudak^[4~5] 等对 PRB 的捕获区域、污水对 PRB 水力特性的影响等进行了数值模拟, Bowles^[6]、Wilson^[7] 等对 PRB 结构进行了研究。国内起步比较晚, 研究主要集中在 PRB 介质对地下水中污染物的反应特性方面, 如董军^[8]、张桂华^[9]、杜连柱^[10] 研究铁、活性炭等反应介质去除污染物的效果, 而场地地质条件等因素对 PRB 设计影响的研究较少, 容易造成污染物的去除效果不理想。PRB 按结构分为连续墙式和隔水漏斗——导水门式。通常, 这两种结构的 PRB 都被嵌入底部弱透水层, 防止污染物从 PRB 底部通过。但是, 当污染物位置在含水层上部且地下水以水平流动为主时, 可采用悬挂式 PRB 来节省材料。本

文采用了隔水漏斗——导水门悬挂式反应墙, 从地质角度出发, 利用 Visual MODFLOW 模拟了不同水力梯度、弥散度和渗透系数下污染物运移情况, 从而得出 PRB 几何尺寸对水力梯度、弥散度、渗透系数等水文地质条件的敏感性, 为设计 PRB 的几何尺寸等提供依据。

1 模型设计

1.1 地下水溶质运移模型

地下水中大多污染组分在运移过程中受对流、弥散、吸附/解吸附、氧化还原及生物降解等作用的影响^[11]。地下水中的物质在三维流场中的迁移转化可用偏微分方程描述:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

式中: θ ——有效孔隙度;

C^k ——物质 k 的溶解相质量浓度;

t ——时间;

$x_{i,j}$ ——沿直角坐标系轴向的距离;

D_{ij} ——水动力弥散系数张量;

v_i ——孔隙水平平均实际流速;

q_s ——单位体积含水层流量, 它代表源(正值)和汇(负值);

C_s^k ——源或汇水流中污染组分的浓度;

$\sum R_n$ ——反应相。

1.2 数值模型

假设地区面积为 $100\text{m} \times 100\text{m}$, 地层厚度为 20m , 含水层均质各向异性。区域内东西两侧水头为恒定值, 水流自西向东流, 南北两侧无水流通过。采用 Visual MODFLOW 模拟的 PRB 为悬挂式反应墙, 厚度为 1m , 嵌入深度为 10m , 与污染源距离为 40m 。其中

收稿日期: 2011-12-20; 修订日期: 2012-01-29

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2005408911); 留学回国人员科研基金项目(20071108); 江苏省环境保护厅项目(201029)

作者简介: 周宏博(1987-), 男, 硕士, 主要从事环境地质与地质灾害方面研究。

E-mail: zhouhbo822@126.com

门宽 2m,两侧漏斗宽均为 19m,漏斗与门在一直线上。另外在 PRB 中心线上布置了 4 口浓度观测井。在模型中,网格划分为 10 行 $\times$ 10 列 $\times$ 20 层,大小为 10m $\times$ 10m $\times$ 1m,在恒定水头、污染源、PRB 处网格加密,网格大小为 1m $\times$ 1m $\times$ 1m。污染源浓度 2000mg/L,大小为 4m $\times$ 4m $\times$ 1m,距模拟区域西边界 5m(图 1)。

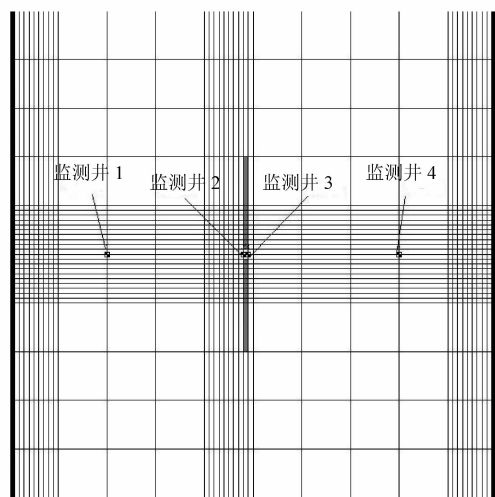


图 1 网格剖分图

Fig.1 Subdivision mesh

1.3 模拟工况

本文模拟了 4 种工况,考察不同情况下的污染物运移。其中,工况 2 的水力梯度为 0.006,是工况 1(0.002)的 3 倍,其他值不变;工况 3 的纵向、横向、垂向弥散度为 3m、0.3m、0.03m,是工况 1(1m、0.1m、0.01m)的 3 倍,其他值不变;工况 4 的渗透系数为

8m/d,是工况 1(5m/d)的 1.6 倍。数值模拟所需的各种参数见表 1。

表 1 四种工况下的模型参数

Table 1 Model parameter in four cases

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
K_h - 含水层 (m/d)	5	5	5	8
K_v - 含水层 (m/d)	0.5	0.5	0.5	0.8
K_h - 漏斗 (m/d)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
K_v - 漏斗 (m/d)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
K_h - 门 (m/d)	50	50	50	50
K_v - 门 (m/d)	50	50	50	50
θ - 含水层	0.15	0.15	0.15	0.15
θ - 漏斗	0.2	0.2	0.2	0.2
θ - 门	0.25	0.25	0.25	0.25
α_L (m)	1	1	3	1
α_{TH} (m)	0.1	0.1	0.3	0.1
α_{TV} (m)	0.01	0.01	0.03	0.01
D^* (m ² /d)	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
i	0.002	0.006	0.002	0.002

其中: K_h 和 K_v ——水平和垂向渗透系数; θ ——有效孔隙度; α_L , α_{TH} , α_{TV} ——纵向、横向、垂向弥散度; D^* ——水力弥散系数; i ——水力梯度。

2 结果与讨论

2.1 水力梯度对 PRB 设计的影响

工况 1 和 2 反应了不同的水力梯度对 PRB 设计的影响。图 2 和图 3 分别为两种工况下 1000d 的模拟效果。经过 1000d,污染羽状体在工况 1 和工况 2 下的最大浓度从 2000mg/L 分别降低到 120mg/L,6 mg/L。通过图 2(b)和图 3(b)可以看到,水力梯度越大,监测井出现峰值的时间越早。水力梯度越大,地下水

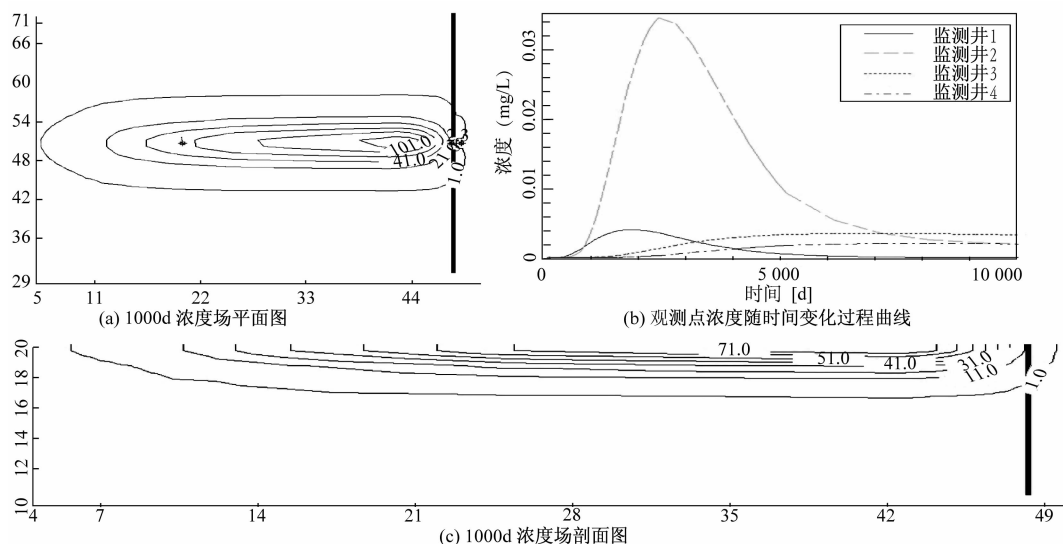


图 2 工况 1 模拟效果

Fig.2 Simulation results of Case 1

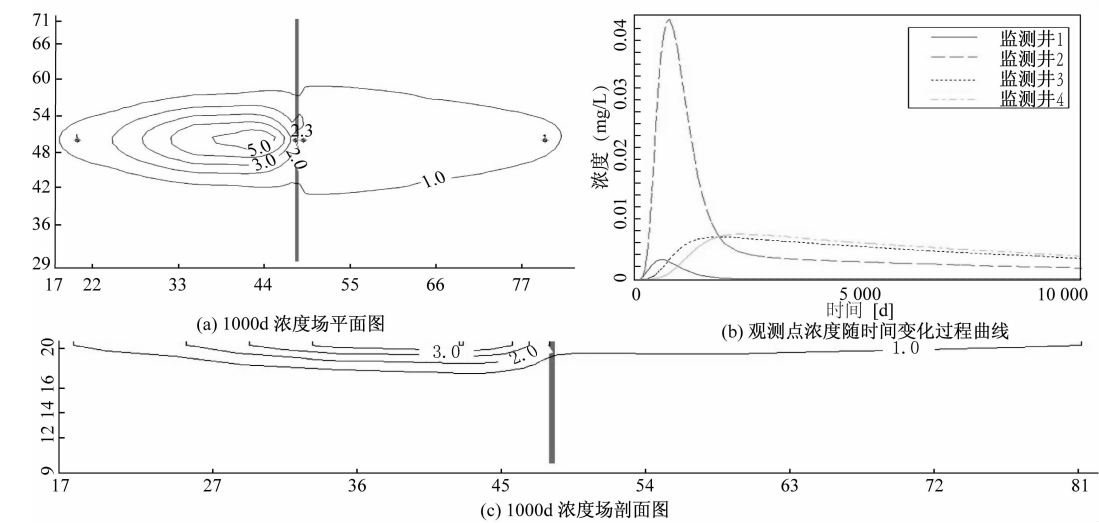


图 3 工况 2 模拟效果

Fig.3 Simulation results of Case 2

流速越快,相同时间从门中通过的污染物量越多,浓度减小越快。但由于流速越快,经过门的时间越短,被导水门吸收得越少,导致 PRB 下游一侧的污染晕越大。因此,设计门的厚度时需考虑水体流速和污染物滞留时间,水力梯度越大时需要门的厚度越大。

从图 2(c)和图 3(c)可以看出,污染羽状体的最大浓度和竖向影响范围随着水力梯度的增大而减小。这是因为在渗透系数和垂向弥散度一定的情况下,水力梯度越大,地下水流速越快,垂向扩散的范围就越小。因此,在平流为主的地区,水力梯度越大,悬挂式

可渗透反应墙的埋深越浅。

2.2 弥散度对 PRB 设计的影响

工况 1 和 3 反应了不同的弥散度对 PRB 设计的影响。通过图 2 和图 4 的比较可以看出,弥散度越大,观测井浓度峰值越大,但出现峰值的时间相差不大。经过 1000d 以后,两种工况下污染物浓度分别降低到 120mg/L,40mg/L,但工况 3 的污染晕范围明显比工况 1 大。由此得出,弥散度越大,污染物浓度减小得越快,但污染晕的范围增加,PRB 设计的深度和宽度越大。

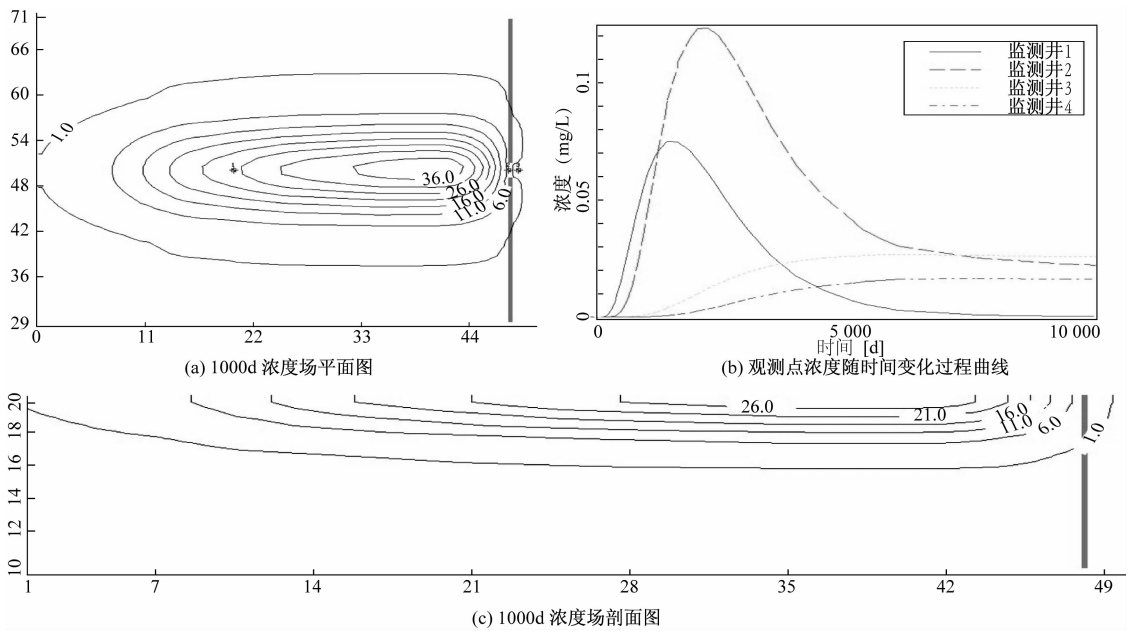


图 4 工况 3 模拟效果

Fig.4 Simulation results of Case 3

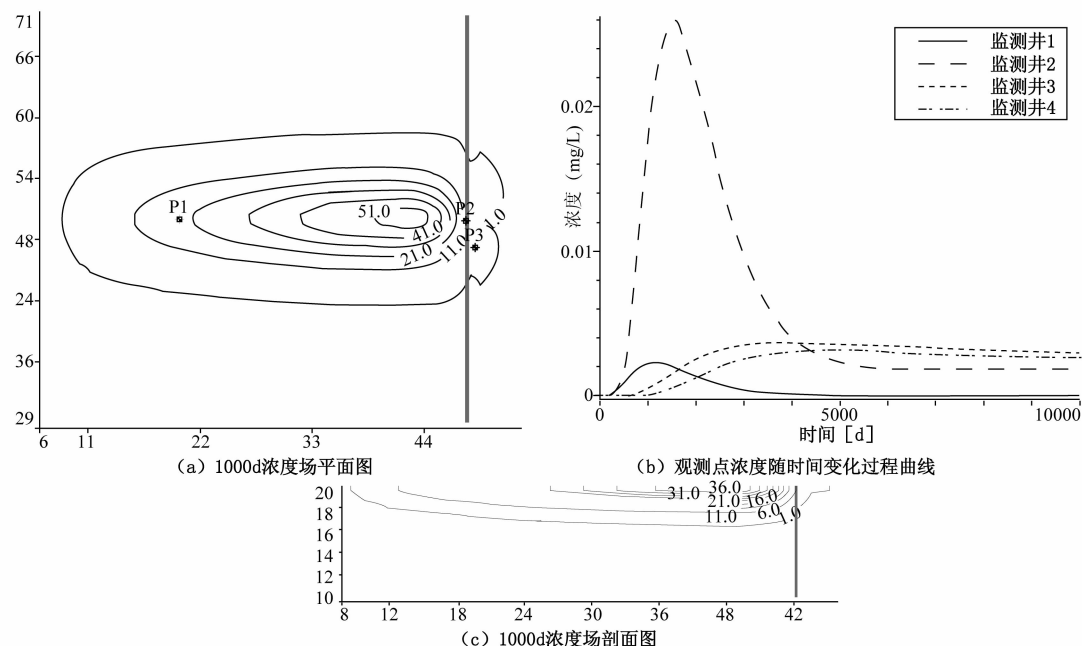


图5 工况4模拟效果

Fig.5 Simulation results of Case 4

2.3 渗透系数对 PRB 设计的影响

工况1和4反应了不同的渗透系数对PRB设计的影响。通过图2和图5的比较,可以看出,经过1000d,污染晕的形状相似,工况4的最大浓度降低的比较快,但污染物通过PRB后仍有少量残余。工况4的监测井出现峰值的时间比工况1早,但峰值相差不大。两种工况下竖向影响深度也接近。因此,渗透系数越大,导水门的厚度越大才能保证污染物浓度降低到设计值。

3 结论

采用 Visual MODFLOW 模拟了不同水力梯度、弥散度和渗透系数下污染物运移情况,从模拟结果分析了水文地质条件对PRB几何尺寸设计的影响。

(1)水力梯度越大,设计的导水门应越厚,这样才能保证污染物浓度降低到设计值。而悬挂式PRB的埋深却随水力梯度的增大而变浅;

(2)弥散度越大,污染晕扩散范围越大,PRB的深度和宽度应设计的越大;

(3)渗透系数越大,水流流速越快,所需的导水门越厚。

参考文献:

[1] 王伟宁,许光泉,史红伟,等. PRB修复地下水污染的研究综述[J]. 能源环境保护,2009,23(3):9-

13. [WANG W N, XU G Q, SHI H W, *et al.* Status review of groundwater pollution restoration by permeable reactive barrier[J]. Energy Environmental Protection, 2009,23(3):9-13. (in Chinese)]

[2] Robert C star, John A Cherry. In Situ Remediation of Contaminated Ground Water—The Funnel-and-Gate System[J]. Ground water,1994,32(3):465-476.

[3] Li L, Benson CH, Lawson EM. Impact of mineral fouling on hydraulic behavior of permeable reactive barriers[J]. Ground water,2005,43(4):582-596.

[4] Hudak P F. Performance Assessment of Hanging Funnel-and-Gate Structures Designed by Reverse Particle Tracking for Capturing Polluted Groundwater[J]. Wiley Periodicals,2007.

[5] Hudak, PF. Numerical modeling assessment of three-gate structures for capturing contaminated groundwater[J]. Environmental geology,2008,55(6):1311-1317.

[6] Marc W. Bowles. the trench and gate groundwater remediation system [D]. Calgary, Alberta: the university of Calgary,1997.

[7] Ryan D Wilson, Douglas M Mackay. A method for passive release of solutes from an unpumped well[J]. Ground water,1995,33(6):936-945.

[8] 董军,赵勇胜,赵晓波,等. 垃圾渗滤液对地下水污染的PRB原位处理技术[J]. 环境科学,2003,24(5):151-156. [DONG J, ZHAO Y S, ZHAO X B, *et al.* PRB Technology in Situ Remediation of Groundwater

- Polluted by Landfill Leachate [J]. Environmental Science, 2003, 24(5): 151–156. (in Chinese)]
- [9] 张桂华, 潘伟斌, 秦玉洁, 等. 受污染地下水可渗透反应墙修复技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增): 153–157. [ZHANG G H, PAN W B, QIN Y J, *et al.* Study on the Reaction Media of PRB Technology in the Remediation of Polluted Groundwater [J]. Journal of Agro-environmental Science, 2005, 24(S): 153–157. (in Chinese)]
- [10] 杜连柱, 张兰英, 刘娜, 等. 可渗透反应墙对地下水中多氯联苯的处理[J]. 环境化学, 2007, 26(4): 499–503. [DU L Z, ZHANG L Y, LIU N, *et al.* Treating polychlorinated biphenyl in groundwater with permeable reactive barrier [J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(4): 499–503. (in Chinese)]
- [11] 陈功新, 王广才, 刘金辉, 等. 地下水中的 TCE 污染去除模拟研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 361–364, 386. [CHEN G X, WANG G C, LIU J H, *et al.* Study of Simulating the Remediation of TCE-contaminated Groundwater [J]. Journal of East China Institute of Technology: Natural Science, 2008, 31(4): 361–364, 386. (in Chinese)]

Sensitivity of hanging PRB geometry dimension on hydrogeological parameters

ZHOU Hong-bo¹, SUN Shu-lin^{1,2}, BAI Qiu-yong^{3,4}, HUANG Yong-bo¹, HONG Zheng-yi¹, WU Rong-dong¹

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Environmental Protection Department of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the groundwater pollution being more and more serious, PRB gradually replaces the Pump-and-Treat and becomes a new development direction of groundwater remediation technologies in China. From the viewpoint of geology, this article uses the Visual MODFLOW to simulate 4 conditions of different hydraulic gradients, dispersities and hydraulic conductivities and analyzes the sensitivity of hanging PRB geometry dimension on hydrogeological conditions. The conclusions are as follows: (1) The greater the hydraulic gradient, the thicker the gate and the lighter the buried deep of PRB; (2) The depth and width of PRB increase with the augment of dispersity; (3) the larger the hydraulic conductivity, the thicker the gate.

Key words: hanging PRB; hydraulic gradient; dispersity; hydraulic conductivity; Visual MODFLOW

责任编辑: 张若琳

(上接第 20 页)

coal mining subsidence and outside influence boundary area. Data of seepage test, hydrogeological investigation and observation of water table are used. Comparison of the water table and surface water infiltration in 1955 and 2011, respectively, indicate that (1) The surface rock above the mined-out area is broken, causing the surface impermeable layers to lose confining effect; (2) In the coal mining subsidence area, water table decreases up to 86.3 m, and surface infiltration capacity is 31.61 times the value of experience; (3) Outside the mining influence boundary area, surface infiltration capacity and water table do not have not change significantly.

Key words: Nantong coal mine; karst mountains; coal mining subsidence; seepage test

责任编辑: 张若琳