

典型污染场地含水层天然净化能力溶质模拟

曹红¹, 高宗军², 蔡五田¹, 王敏², 李伟¹, 王新峰¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051; 2. 山东科技大学, 山东青岛 266510)

摘要: 根据典型石油类污染场地岩性、水文地质等特征, 在长期观测、抽水试验及弥散试验等资料搜集与分析基础上, 通过水流模型验证, 构建了地下水水流运动及溶质迁移的数值模型。选取苯系物(BTEX)作为模拟因子, 运用GMS软件中MT3DMS模块模拟地下水对流-弥散溶质迁移过程, 运用RT3D模块模拟研究了地下水中移动、非移动的多种微生物共存的有机污染物生物降解过程。结果表明, 生物降解化学反应具有明显的降低污染物峰值的作用, 而研究区存在大量的好氧微生物作用和反硝化作用, 据此提出可以采用原位生物修复技术来治理石油污染。

关键词: 石油污染场地; 地下水水流运动; 地下水溶质迁移; 数值模拟; 地下水污染治理

中图分类号: X508 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2014)03-0065-04

Solute Transport Simulation of Natural Purification Ability in an Aquifer at a Typical Contaminated Site

CAO Hong¹, GAO Zongjun², CAI Wutian¹, WANG Min², LI Wei¹, WANG Xinfeng¹

(1. China Geological Survey Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, China;

2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Based on the lithological and hydrological characteristics at a typical petroleum contaminated site, and data collection and analysis of long-term observation and water pumping and dispersion experiments, a numerical model of groundwater flow and solute transport was developed and verified by a flow model. BTEX was used as the simulation factor, the convection/diffusion solute transport process in groundwater was simulated using MT3DMS module of GMS software, and the organic pollutant biodegradation process with the coexistence of a variety of mobile or immobile microorganisms in groundwater was simulated using RT3D module of GMS software. The results showed that chemical reactions of biodegradation can decrease the peak values of contamination, and a large amount of aerobic microbes and denitrification exist in the study area, which suggested that in situ bioremediation can be used to control petroleum pollution.

Key words: petroleum contaminated site; groundwater flow movement; solute transport; numerical simulation; groundwater pollution control

石油是经济发展不可或缺的重要资源, 但是石油开采、冶炼和运输过程的渗漏事故, 以及含油废水的排放、污水灌溉和各种石油制品的挥发等一系列现象, 都会造成有机污染物经包气带土层进入地下水中, 危害地下水资源。近年来, 国内外许多学者从水力学、物理学、数学等多学科综合应用的角度, 对石油类污染物在含水层中的运移^[1-3]、控制和修复^[4-6]进行了大量的调查和研究工作。随着电子计算机和数值方法的发展, 数值模拟逐渐取代传统的模拟技术, 为地下水运动研究提供了一种有效的手段^[7-8]。

本文选择典型石油类污染场地, 在验证的水流模型基础

上, 建立了溶质迁移模型, 并运用GMS^[9]中MT3DMS模块模拟地下水对流-弥散溶质迁移过程, 运用RT3D模块研究地下水中移动非移动的多种微生物共存的有机污染物生物降解过程。

1 研究区概况

研究区为一废弃的石油加工厂, 主要炼制(90号、70号)汽油、(0号、5号、-10号)柴油、(200号)溶剂油、(10号)建筑沥青、液化石油气及其它工业燃料等, 现已停产多年。根据表层土壤有机挥发性气体(VOC)监测结果, 将浓度较高的

收稿日期: 2013-08-22 修回日期: 2014-04-28 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.014.html>

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项基金项目(200911004); 中国地质调查项目(1212010913014)

作者简介: 曹红(1982-), 女, 山东泰安人, 助理工程师, 硕士, 主要从事水文地质、环境地质方面的调查研究。E-mail: caohong@chegs.cn

通讯作者: 高宗军(1964-), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质方面的调查研究。E-mail: zongjun_gao@163.com

常减压车间附近作为重点研究区域,如图 1 所示。研究区岩性结构见图 2。

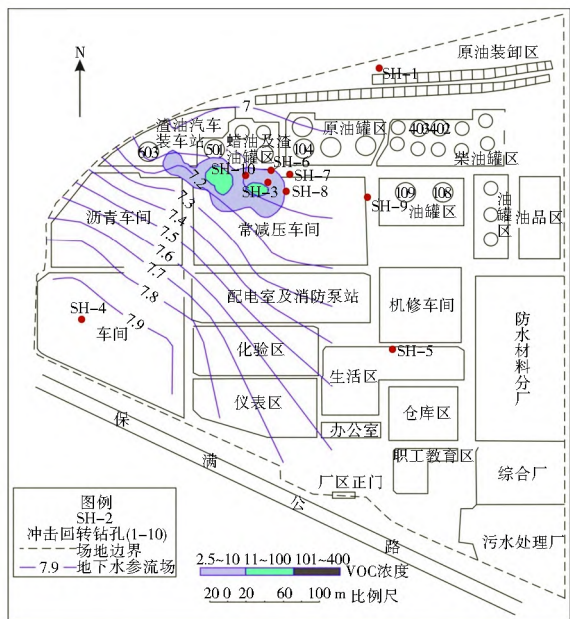


图 1 研究区土壤 VOC 浓度等值线及地下水流程图

Fig. 1 Soil volatile organic gases concentration contour and groundwater flow field in the study area

根据野外实际分层取样化验结果,选择了埋深 20~30 m 的非均质各向同性的微承压含水层作为主要研究对象。该含水层岩性主要为粉土、粉质黏土及砂层交互层,平均厚度约 10 m。含水层接受侧向径流、大气降水补给,地下水消耗项主要是抽水、边界流出和蒸发排泄。

研究区四周没有河流、山脉等自然边界,根据研究区初始流场边界来圈定模型边界,2008 年 11 月进行抽水试验前的初始流场如图 1 所示:东北、西南边界为指定水头边界,边界水位依据研究区内抽水前水位的数值插值得出;西北、东南边界沿流线方向为隔水边界。地下水流场剖面示于图 2。

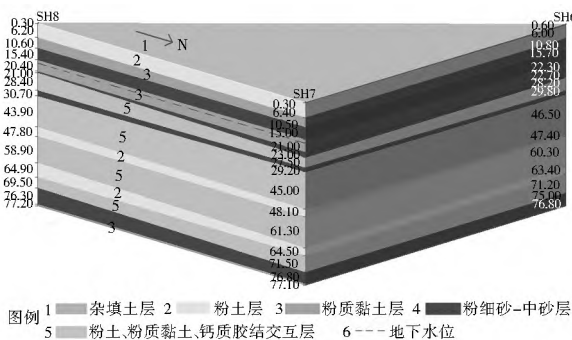


图 2 研究区岩性结构

Fig. 2 Lithological structure of the study area

2 水质模拟因子与模型构建

2.1 模拟因子的选取

苯系物(BTEX)是最常见的石油组成成分,由于其具有毒性和“致癌性、致突变性、致畸性”会使人们的健康受到直接损害^[10]。在研究区,苯系物(BTEX)的浓度监测出率达到了 100%,而且在含水层空间时间上的变化较为明显,所以选取 BTEX 作为有机污染评价的模拟因子。

2.2 水质概念模型构建

水质模型是建立在地下水流概念模型基础上的,研究区范围、含水层结构与水流模型是一致的,由于污染物的运移是靠地下水的流动所引起的,针对小尺度的研究区范围,污染物主要为有机单一污染,遂将水质边界类型划分、源汇项的概化与水流模型中的划分基本相似,概化为非均质、各向同性、空间三维结构、稳定的承压水含水层^[11]。流体概化为不可压缩的均质流体,密度为常数。监测资料表明,研究区内地下水有机污染物扩散范围有限,与模型边界无物质交换,故模型的边界均为二类边界,边界上溶质通量为 0。

2.3 数学模型构建

水质数学模型由地下水水流模型和溶质运移模型通过运动方程耦合而成。溶质运移偏微分方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} [\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j}] - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n & (1) \\ C(x_i, t) |_{t=0} = g(x) & \text{初始条件} & (2) \\ \frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 & \text{边界条件} & (3) \end{cases}$$

式中: C 为溶解于水中的污染物的溶度 (M/L^3); D_{ij} 为水动力弥散系数张量 (L^2/T); x_i 为空间坐标 (L); i 为地下水渗透流速 (L/T); q_s 为源(正值)或汇(负值)的单位流量 (L/T); θ 为孔隙度,无量纲; C_s^k 为源或汇的浓度 (M/L^3); C_k 为渗透系数为 k 的介质中的浓度 (M/L^3); $g(x_i)$ 为位置为 x_i 处的污染源浓度; R 为阻滞因子,无量纲; t 为时间 (T)。式中等号右端从左至右依次为弥散项、对流项、源汇项和化学反应项。

3 数值模拟与结果分析

本次模拟预测时段选取为 2009 年 10 月 - 2018 年 10 月共 10 年时间,主要从两个角度对有机污染物的迁移转化进行模拟预测,即:对流-弥散作用下的污染物的运移情况;叠加生物降解后^[12],污染物的运移情况。最终分析在这种含水层环境中,生物降解在污染物的扩散和运移转化上的延缓与抑制作用。

3.1 对流-弥散作用下污染物的迁移转化模拟

根据在污染源区地下水波动带测得的 VOC 浓度场,定位模拟过程的污染源。由于实际研究区污染源为废旧油池,其浓度经过长期观察为一定值,所以在模型的建立过程中,将污染源的浓度作为一定浓度 630 mg 输入。有机污染的净化是一个较为漫长的过程,将模拟的时间段确定为 10 年。根据弥散试验的模拟校参输入相应分区的弥散度,在此基础上模拟预测 10 年的污染羽变化(以 1 年、5 年、10 年为)如图 3 所示。

该模型是在仅考虑对流-弥散的原理的基础上进行的,反映了污染物在多孔介质中的水动力弥散情况。选取位于污染源较近的 SH6 和较远的 SH1 作为 BTEX 浓度观测井,分别做 BTEX 浓度散点曲线(图 4)。

由两观测井浓度变化曲线来看,总的来说远处的 SH-1 观测井浓度变化呈现“S”形,说明溶质运移存在一个不断加宽的过渡带,即水动力弥散,反应了这样一个不稳定的不可逆转的过程。离污染源较近的 SH-6 井到达污染峰值的时

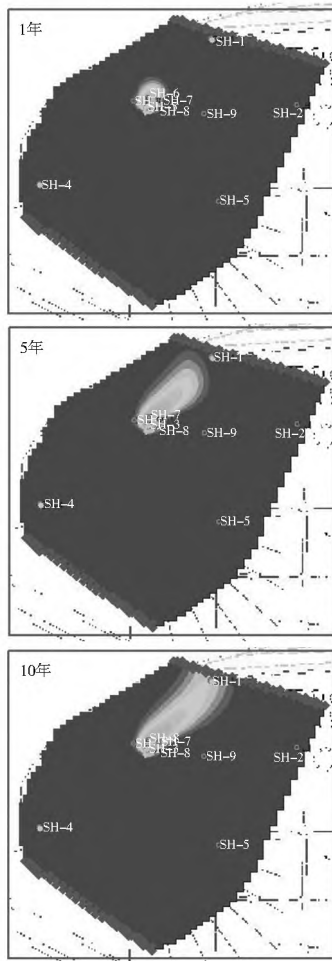


图3 对流-弥散作用下污染物的污染羽预测变化(1年、5年、10年)

Fig. 3 Solute transport prediction under the influence of groundwater convection/diffusion (1 a, 2 a, and 10 a)

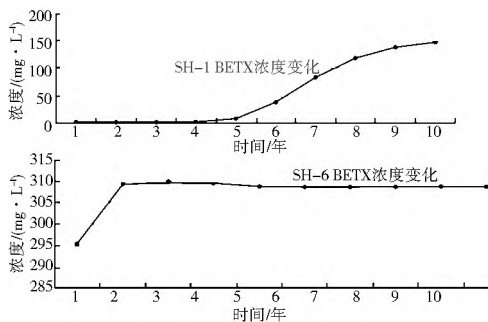


图4 对流-弥散作用下SH-1和SH-6观测井中BTEX浓度随时间变化曲线

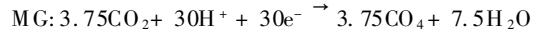
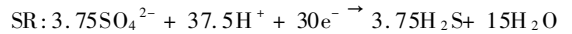
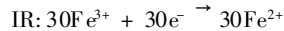
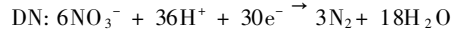
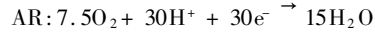
Fig. 4 Variation of BTEX concentration with time under the influence of convection/diffusion in the observation wells SH-1 and SH-6

间越早,浓度都在305 mg/L以上,并且随着污染物有污染源向外扩散的同时,各监测井浓度峰值存在变小趋势。

3.2 生物降解作用下污染物的迁移转化模拟

生物降解作用下污染物迁移转化的在RT3D模型中模拟运行,主要是在好氧厌氧条件下使用相关不同的电子受体模拟来进行的,这是一个逐级降解的过程。模拟过程分五级序列逐步进行:有氧呼吸(AR);反硝化作用(DN);铁(Ⅱ)还

原(IR);硫酸盐反应(SR)以及甲烷的生成(MG)^[12-13]。所有这些生化反应假定发生在地下微生物作用的水相中,预计将按照以下顺序发生:



通过不同的电子受体路径,整个反应运动体系用来模拟烃的降解速率^[14]。

$$r_{HC, O_2} = -k_{HC, O_2} [HC] \frac{O_2}{K_{O_2} + [O_2]} \quad (4)$$

$$r_{HC, NO_3} = -k_{HC, NO_3} [HC] \frac{NO_3}{K_{NO_3} + [NO_3]} \cdot \frac{K_{i, O_2}}{K_{i, O_2} + [O_2]} \quad (5)$$

$$r_{HC, Fe^{3+}} = -k_{HC, Fe^{3+}} [HC] \frac{[Fe^{3+}]}{K_{Fe^{3+}} + [Fe^{3+}]} \cdot$$

$$\frac{K_{i, O_2}}{K_{i, O_2} + [O_2]} \cdot \frac{K_{i, NO_3}}{K_{i, NO_3} + [NO_3]} \quad (6)$$

$$r_{HC, SO_4} = -k_{HC, SO_4} [HC] \frac{[SO_4]}{K_{SO_4} + [SO_4]} \cdot$$

$$\frac{Fe^{3+}}{K_{Fe^{3+}} + [Fe^{3+}]} \cdot \frac{K_{i, O_2}}{K_{i, O_2} + [O_2]} \cdot \frac{K_{i, NO_3}}{K_{i, NO_3} + [NO_3]} \quad (7)$$

$$r_{HC, CH_4} = -k_{HC, CH_4} [HC] \frac{[CO_2]}{K_{CO_2} + [CO_2]} \cdot$$

$$\frac{[SO_4]}{K_{SO_4} + [SO_4]} \cdot \frac{[Fe^{3+}]}{K_{Fe^{3+}} + [Fe^{3+}]} \cdot \frac{K_{i, O_2}}{K_{i, O_2} + [O_2]} \cdot$$

$$\frac{K_{i, NO_3}}{K_{i, NO_3} + [NO_3]} \quad (8)$$

式中: r_{HC, O_2} 、 r_{HC, NO_3} 、 $r_{HC, Fe^{3+}}$ 、 r_{HC, SO_4} 、 r_{HC, CH_4} 分别表示烃类通过利用 O_2 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 以及生成 CH_4 而降解的速率; $[O_2]$ 表示氧气的浓度 $[ML^{-3}]$; k_{HC, O_2} 为一阶速率常数 $[T^{-1}]$; K_{O_2} 为半饱和常数 $[ML^{-3}]$; K_{i, O_2} 是抑氧指数 $[ML^{-3}]$ 。

根据长期观测资料,污染源 BTEX 浓度按 630 mg/L 的稳定浓度输入,而初始水平的氧、硝酸盐、亚铁离子、硫酸根和含水层中的甲烷浓度分别为: 5.51、13.47、0.0、0.0 和 0.0 mg/L。10年内的污染羽变化情况预测结果(以1年、5年、10年为例)如图5所示。

由运行结果来看,考虑生物降解与只考虑对流-弥散预测的污染羽的范围相近(表1),但浓度峰值有明显的不同:以SH-1为例,对流-弥散的预测浓度为147.10 mg/L,而考虑生物降解的预测浓度为84.4 mg/L。

综上所述,污染范围的大小主要是由于水流的对流扩散造成的,而生物降解只是在污染范围内起到降解污染物的作用,反应在浓度上峰值上有明显变化。

4 结语

在水流模型和水质模型构建基础上,在仅考虑对流-弥散条件和同时考虑生物降解化学反应两种条件下,对有机污染物BTEX的污染羽和峰值的变化数值进行了模拟预测,发现生物降解化学反应在场内具有明显的降低污染物峰值

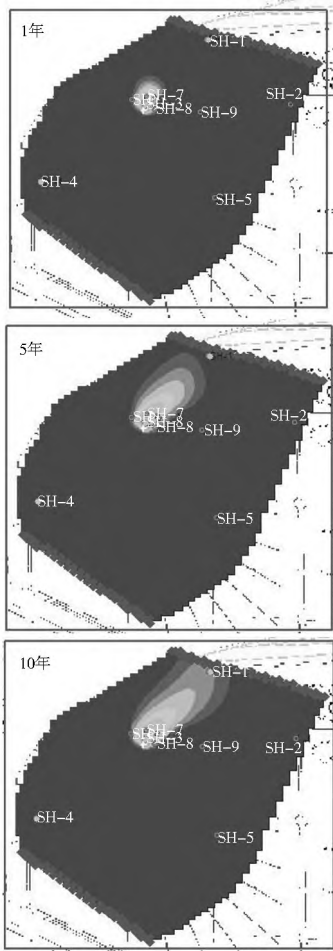


图 5 考虑生物降解作用原理下污染物的污染羽预测变化图(1 年、5 年、10 年)

Fig. 5 Solute transport prediction in consideration of the principle of biodegradation (1 a, 2 a, and 10 a)

表 1 两种原理下的模拟污染羽范围比较

Table 1 Comparison of solute transport results under two different principles

预测年月	对流-弥散原理下的模拟		生物降解原理下的模拟	
	最大横向距离/m	最大纵向距离/m	最大横向距离/m	最大纵向距离/m
2009 年 10 月	46.43	52.03	46.25	52.21
2010 年 10 月	63.20	64.79	63.38	68.14
2011 年 10 月	74.84	77.93	75.53	79.41
2012 年 10 月	87.25	84.39	87.10	91.97
2013 年 10 月	97.18	106.24	96.64	104.31
2014 年 10 月	105.71	118.53	104.10	117.19
2015 年 10 月	111.56	118.43	111.65	120.72
2016 年 10 月	119.79	120.72	118.17	120.67
2017 年 10 月	124.48	120.72	122.74	122.24
2018 年 10 月	127.93	120.08	126.36	122.33

的作用。水质模拟预测结果表明,研究区存在大量的好氧微生物作用和反硝化作用,因此可以采用原位生物修复技术来治理石油污染,例如采用充气和曝气技术来增加土壤和地下水中的 DO;通过注射 NO₃⁻ 提高反硝化细菌的反硝化作用,使 BT EX 发生了厌氧降解,或进一步培养石油烃降解细菌,

增强研究区的净化能力。

本次选取的有机污染物研究对象为非轻质的苯系物 (BT EX),能够在含水层中随水流运动,所以模拟效果较好;但是大多数有机污染物属于轻质,可能只存在于地下水的波动带上,而现有模拟软件针对的是整个含水层,因此对流-弥散作用对污染物扩散迁移的模拟效果,还有待于进一步的研究。

参考文献(References):

[1] 刘明柱,陈鸿汉,胡丽琴.北方某城市浅层地下水中有有机污染物迁移转化的数值模拟研究[J].中国地质,2005,32(3):507-511. (LIU Ming zhu, CHEN Hong han, HU Li qin. Numerical Modeling of Transport of Organic Pollutants in Shallow Groundwater in a Certain City of Northern China[J]. Geology in China, 2005, 32(3): 507-511. (in Chinese))

[2] 刘雪松,蔡五田,李胜涛.石油类污染场地土壤与地下水污染调查实例分析[J].水文地质工程地质,2010,37(4):121-125. (LIU Xue song, CAI Wu tian, LI Sheng tao. Survey of Soil and Groundwater Contamination in Oil Pollution Site[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 121-125. (in Chinese))

[3] 张敏,蔡五田,王丹,等.石油类污染场地地下水抽水过程水质变化成因[J].环境化学,2011,30(9):1627-1635. (ZHANG Min, CAI Wu tian, WANG Dan, et al. Analysis of Groundwater Quality Changing in Petroleum contaminated Site during Pumping[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(9): 1627-1635. (in Chinese))

[4] 赵勇胜.地下水污染场地污染的控制与修复[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):303-310. (ZHAO Yong sheng. Groundwater Pollution Control and Remediation[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007, 37(2): 303-310. (in Chinese))

[5] 张莹,张玉玲,张晟琦,等.修复石油类污染地下水的PRB反应介质研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2):399-404. (ZHANG Ying, ZHANG Yu ling, ZHANG Sheng yu, et al. Study on PRB Reactive Media in Remediation of Petroleum Contaminated Groundwater [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 399-404. (in Chinese))

[6] 杨宾,李慧颖,伍斌,等.污染场地中挥发性有机污染工程修复技术及应用[J].环境工程技术学报,2013,3(1):78-84. (YANG Bin, LI Hui ying, WU Bin, et al. Engineering Remediation Techniques and Its Application for Volatile Organic Compounds contaminated Sites[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(1): 78-84. (in Chinese))

[7] 徐乐昌.地下水模拟常用软件介绍[J].铀矿冶,2002,21(1):33-38. (XU Le chang. Introduction on Commonly Used Groundwater Simulation Software [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2002, 21(1): 33-38. (in Chinese))

[8] 孙纳正.地下水污染-数学模型和数值方法[M].北京:地质出版社,1989. (SU Na zheng. Groundwater Pollution The Mathematical Model and Numerical Method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. (in Chinese))

[9] 祝晓彬.地下水模拟系统(GMS)软件[J].水文地质工程地质,2003,30(5):53-55. (ZHU Xiao bin. Groundwater Modeling System(GMS) Software[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(5): 53-55. (in Chinese))

(下转第 103 页)

控制与变形控制基本相当。

(2) 闸门设计时应根据不同挡水水位情况对闸门的截面和主梁筋板位置进行优化,使得各主梁的应力与变形基本相等;有反向挡水要求的闸门应考虑顶底主梁上楔形块的支承作用,合理调整其截面尺寸,侧向楔形块的布置应尽量设计在横向主梁筋板位置,防止两侧边梁自身变形而加大主梁的应力和变形。考虑边梁自身变形与受剪力作用,应采取加强措施防止边梁与主梁破坏。

本文以 $2.0\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ (宽 \times 高)平板加筋型铸铁闸门进行计算对比,仅提供了一种计算对比的方法,而对于更多、更大孔口的闸门的应变情况和设计计算的简化方法,还有待进一步研究分析,以便为铸铁闸门设计规范的修订提供更多的依据。

参考文献(References):

- [1] 江宁,王煦. 水利工程铸铁闸门应用研究[J]. 水利技术监督, 2011, (1): 52-54. (JIANG Ning, WANG Xu. Study on Application of Cast iron Gates in Water Resources Projects [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2011, (1): 52-54. (in Chinese))
- [2] CJ/T 3006 1992, 供水排水用铸铁闸门[S]. (CJ/T 3006 1992, Cast iron Gate Valve for Water Supply and Drainage[S]. (in Chinese))
- [3] DB32/T 1712-2011, 水利工程铸铁闸门设计制造安装验收规范[S]. (DB32/T 1712-2011, Cast iron Gate Hydraulic Engineering Design and Manufacture Installation Acceptance Specification[S]. (in Chinese))
- [4] 刘天政,于秀香,王晶,等. 铸铁闸门的设计与使用[A]. 山东水利科技论坛 2006[C]. 2006: 540-543. (LIU Tianzheng, YU Xiuxiang, WANG Jing, et al. Design and Application of Cast iron Gate[A]. Shandong Province Water Conservancy Science and Technology BBS 2006[C]. 2006: 540-543. (in Chinese))
- [5] 任丰兰,方跃飞. 铸铁镶铜闸门门体三维有限元分析[J]. 农机使用与维修, 2011, (5): 47-49. (REN Fenglan, FANG Yuefei. Three Dimensional Finite Element Analysis of Cast iron Bronze Inlaid Gate Body[J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2011, (5): 47-49. (in Chinese))
- [6] 黄相才,赵广田,张启明. 铸铁闸门破坏试验的初步总结[J]. 郑州工学院学报, 1984, (1): 118-120. (HUANG Xiangcai, ZHAO Guangtian, ZHANG Qiming. Cast-iron Gate Failure Test of the Preliminary Summary [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology, 1984, (1): 118-120. (in Chinese))
- [7] 张友谦. 关于供水、排水铸铁闸门标准的探讨[A]. 中国水污染防治技术装备论文集[C]. 2004: 228-230. (ZHANG Youqian. Discussion of the Standard of Cast iron Gate for Water Supply and Sewage System[A]. Collections of Papers for Chinese Water Pollution Control Technology and Equipment[C]. 2004: 228-230. (in Chinese))
- [8] 许春. 铸铁闸门在山区水库中的引用与推广[J]. 安徽农学通报, 2007, (19): 113, 74. (XU Chun. Cast iron Gate in a Mountainous Area in a Reservoir Reference and Promotion [J]. Journal of Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, (19): 113, 74. (in Chinese))
- [9] 张喜和,邹天利,于福俊. PGE型平面铸铁闸门与平板滑动钢闸门的应用比较[J]. 吉林水利, 2001, (4): 38-39. ZHANG Xihe, ZHOU Tianli, YU Fujun. Application Comparison of PGE Flat Slab Cast steel Gate and Flat Slab Slide Steel Gate[J]. Jilin Water Resources, 2001, (4): 38-39. (in Chinese))
- [10] 陈方亮,赵英杰,姜成启,等. 钢铁复合闸门、平面钢闸门及铸铁闸门的应用比较[J]. 河南水利与南水北调, 2012, (16): 187-188. (CHEN Fangliang, ZHAO Yingjie, JIANG Chengqi, et al. Composite Steel Gate, The Application of Plane steel Gate and Cast iron Gate Comparison [J]. Journal of Henan Water Conservancy and South North Water Diversion Project, 2012, (16): 187-188. (in Chinese))
- [10] 张达政,陈鸿汉,李海明,等. 浅层地下水卤代烃污染初步研究[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 326-329. (ZHANG Dazheng, CHEN Honghan, LI Haiming, et al. Halogenated Hydrocarbon Contaminants in Shallow Groundwater [J]. Geology in China, 2002, 29(3): 326-329. (in Chinese))
- [11] 刘晓丽,梁冰,薛强. 地下水环境中有机污染物迁移转化动力学模型的研究[J]. 工程勘察, 2003, (1): 24-28. (LIU Xiaoli, LIANG Bing, XUE Qiang. On the Dynamics Model of Organic Chemical Transport in Groundwater Environment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003, (1): 24-28. (in Chinese))
- [12] 何江涛,史敬华,崔卫华,等. 浅层地下水氯代烃污染天然生物降解的判别依据[J]. 地球科学中国地质大学学报, 2004, 29(3): 357-362. (HE Jiangtao, SHI Jinghua, CUI Weihua, et al. Determining Criteria for Natural Biodegradation of Chlorinated Hydrocarbons in Shallow Wwater [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(3): 357-362. (in Chinese))
- [13] 邓韬. 石油类污染物在包气带中迁移转化研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. (DENG Tao. Study on the Migration and Transformation of Oil-contaminants in Vadose Zone [M]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [14] 何江涛,程东会,韩冰,等. 浅层地下水氯代烃污染天然衰减速率的估算[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 140-144. (HE Jiangtao, CHENG Donghui, HAN Bing, et al. Estimation of Natural Attenuation Rate of Chlorinate Solvents Contamination in Shallow Groundwater [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 140-144. (in Chinese))

(上接第 68 页)