

基于 MODFLOW 的地下水 Cr(VI) 污染水动力场模拟预测研究

王小刚, 董则军, 刘天宇, 唐利平
(四川省冶金地质勘查局水文队, 四川 成都 610000)

摘要: 随着社会和经济的快速发展,我国地下水污染问题已日益突出,地下水中 Cr(VI) 的污染已成为危害环境和人类健康的危险物质。由于 Cr(VI) 的毒性高、易迁移等特点,给地下水环境带来严重的安全隐患。在对某市城区水文地质及工程地质条件进行分析的基础上,依据 2005 年的资料用 Visual Modflow 进行参数率定,确定水文地质参数,建立了第四系地下水系统三维非稳定流模型;再用 2005 – 2009 年的资料验证了模型的可靠性,利用此模型进行地下水水流场模拟预测,并将现状条件下(2010 年)Cr(VI) 污染晕与预测的地下水水流场形态进行叠加来预测 Cr(VI) 污染晕的发展趋势,为今后当地政府部门应对 Cr(VI) 污染地下水治理提供相关政策建议与决策参考,具有重要意义。

关键词: 第四系地下水系统; Cr(VI) 污染; 地下水水流场; MODFLOW 数值模拟

中图分类号: X523; TU478

文献标识码: A

文章编号: 1672- 643X(2013)01- 0192- 04

Simulation and prediction of hydrodynamic field of groundwater Cr(VI) pollution based on MODFLOW

WANG Xiaogang, DONG Zejun, LIU Tianyu, TANG Liping

(Institute of Hydrogeology in Sichuan Provincial Bureau of Metallurgical & Geological Prospecting, Chengdu 610000, China)

Abstract: With the rapid development of society and economy, the groundwater pollution problem has become increasingly prominent, the pollution of Cr(VI) of the groundwater has become dangerous substances that harm environment and human health. Because of Cr(VI)'s highly toxic, easy migration characteristics, it brings a serious security risk to the groundwater environment. A three dimensional unsteady groundwater flow model of quaternary groundwater system was built based on the analysis of hydrogeological conditions of a city. All the parameters were determined by Visual Modflow of the model using 2005's data; The reliability of the model was tested by 2005 – 2009's data. The paper used the model to carry on groundwater flow field simulation and prediction, use the status quo of Cr(VI) pollution halo(2010) and prediction of groundwater flow field morphology superimposed to predict the development trend of the Cr(VI) pollution, Has important significance for local government departments to respond to Cr(VI) contaminated groundwater governance to provide policy recommendations and decision-making reference.

Key words: quaternary groundwater system; Cr(VI) pollution; groundwater flow field; modflow numerical simulation

0 引言

地下水的开采,会使局部区域的地下水位发生较大变化。建立反映地下水动力场的数学模型,利用数值模拟软件对地下水流动等问题进行计算分析,是目前研究地下水流动、评价地下水环境状况的主要技术方法之一。近年来借助数值模拟技术,已经建立了不少地下水计算与水动力场预测模型^[1-4],它们多采用模块化结构组合成子程序包^[5],

允许用户直接接受 MODFLOW 输出的数据和图形文件^[6],降低模拟工作的繁复性,有些模型还考虑了污染物的弥散度和污染物与含水层的吸附作用的变化^[7],结合水文与地质机制,建立水流与溶质运移耦合模型,模拟出地下水开采过程中水位和污染物浓度的动态变化^[8]。

铬是地下水中常见的污染物,其中 Cr(VI) 是已被研究证实的“三致”污染物,被定为环境中危害最大的污染物之一,其毒性高出 Cr(III) 100 倍左

收稿日期:2012-09-05; 修回日期:2012-10-08

作者简介:王小刚(1986-),男,四川内江人,硕士,主要从事水文地质和工程地质方面的研究。

右^[9]。我国生活饮用中 Cr(VI) 的含量 0.05mg/L (GB5749-2006)^[10]。

某市城区为工业和生活聚集区,20 世纪 70-80 年代,因该城区内某自行车零件厂电镀车间废水下渗,造成土壤和地下水体 Cr(VI) 污染。据初期监测(1991),污染中心区土壤中的 Cr(VI) 含量高达 4405.248 mg/kg,高出其它地区几十倍。同时第四系地下水系统第Ⅱ和第Ⅲ含水组地下水也受到污染,污染范围达 3.33 km²,污染发生后,相关部门迅速关闭了污染源电镀车间,但以后数年地下水中仍有 Cr(VI) 检出^[11]。之后虽经采取一些技术处理措施,但目前地下水中的 Cr(VI) 仍未完全消除,据有关部门的监测数据,近 19 年来地下水中 Cr(VI) 最高浓度达 62.0 mg/L(2009);同时 Cr(VI) 污染有扩散趋势,已威胁到周边企事业单位地下饮用水源的安全。

1 数学模型

根据水文地质特征,结合含水层组的划分,通过一定的钻孔资料分析,将第四系地下水系统概化为自上向下的 3 层,第一层:含水层(第Ⅱ含水组)→第二层:弱透水(隔水层)→第三层:含水层(第Ⅲ含水组)结构系统。含水层岩性以砂性土为主,含有若干相对较薄的不连续的粘性土夹层或透镜体,但每个含水层仍然具有较强的统一的水力联系。弱透水层主要是由厚度较大的连续的粘性土组成,构成承压含水层的顶板和底板。相邻含水层在水头差作用下,通过其发生越流,含水层与弱透水层构成多层结构的含水系统^[12-13]。

根据获得资料的情况及本次工作的目的,以 2005 年 1 月作为模型模拟的初始条件,时段跨度为 2005 年 1 月-2009 年 12 月,为期 5 年,计算步长为 1 个月(30 d)。

整个模拟研究区面积为 25 km²,据水文地质概念模型范围、第四系地下水系统含水层结构特征及第四系地下水系统地下水流动特征,将研究区划分为 69 行 104 列,共剖分 7 176 个单元格(图 1)。

2 水文地质参数率定

根据试验资料初步确定渗透系数和给水度,确定边界条件和初始条件,导入补给蒸发量,利用观测井的水位反演渗透系数、给水度和补给系数。

降雨入渗和灌溉入渗等垂向入渗补给量用模型中的 recharge 处理。此次选用 2005 年的资料进行调参,然后用 2005-2009 年间的资料校正模型。根

据实验资料,初步确定参数值(表 1 和表 2)。用 PEST 子程序包率定各区域渗透系数、给水度、释水系数和补给系数。调整后的参数见表 3 和表 4。

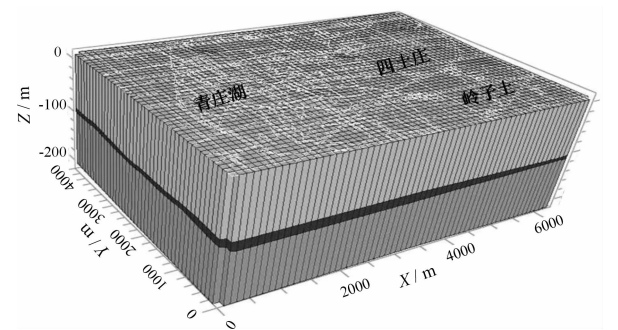


图 1 研究区第四系地下水系统网格剖分立体示意图

表 1 第Ⅱ含水层水文地质参数表						m/d
分 区	1	2	3	4	5	6
渗透系数	7.80	7.00	6.00	5.00	4.00	3.00
给水度	0.20	0.20	0.16	0.12	0.10	0.08

表 2 第Ⅲ含水层水文地质参数表								m/d
分 区	1	2	3	4	5	6	7	8
渗透系数	9.00	5.00	4.00	4.00	4.00	3.00	2.70	1.70
释水系数	0.0100	0.0080	0.0060	0.0040	0.0030	0.0100	0.0018	0.00018

表 3 调整后第Ⅱ含水层水文地质参数表						m/d
分 区	1	2	3	4	5	6
渗透系数	8.00	7.20	6.40	5.00	4.10	3.30
给水度	0.22	0.20	0.18	0.14	0.10	0.06

表 4 调整后第Ⅲ含水层水文地质参数表								m/d
分 区	1	2	3	4	5	6	7	8
渗透系数	8.92	4.57	4.00	3.89	3.69	3.05	2.69	1.69
释水系数	0.0098	0.0084	0.006	0.004	0.003	0.012	0.0018	0.00018

3 模型的识别与验证

本次模拟计算从 2005 年 1 月运行到 2009 年 12 月,运用初始确定的各含水层水文地质参数得出水位的输出和历史观测数据相比较,确定运用调整后的各种参数和其分区(表 3 和表 4),进行了模型的识别与校正,模型的总体拟合程度较好。为了提高模型的仿真程度,可视化输出了模拟区的第四系地下水系统地下水动态特征,对其进行分析判断。由输出的不同含水层组地下水位等值线拟合图(图 2)可以看出,各含水层组的水位动态总体拟合效果较好,能够反映出第四系地下水系统地下水实际的流场;所建立的数学模型对水文地质条件的概化、边界条件的选择以及参数的确定等都与研究区的实际情况符合较好。

4 第四系地下水系统地下水流场预测

研究区第四系地下水系统地下水流场预测时间为 2010–2020 年,其中 2011 年 6 月以后,贝钢水源地与国丰水源地水源井全部关闭。根据拟合模型进行预测,并分别给出两大水源地关停后 2011、2012、

2015 和 2020 年第Ⅱ、Ⅲ含水组地下水流场预测图(图 3 和图 4);另外,分别将现状年(2010 年)第四系地下水系统第Ⅱ、Ⅲ含水组的 Cr(VI)污染晕与预测的地下水流场形态进行叠加,以便分析 Cr(VI)污染晕的发展趋势。

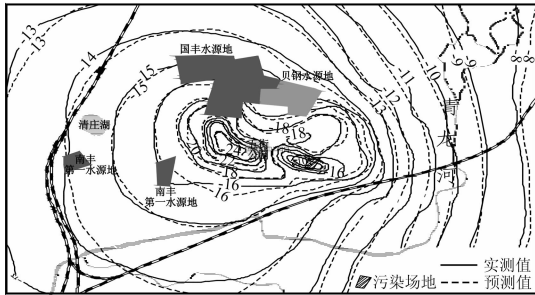


图 2 2009 年第四系地下水系统第Ⅱ、Ⅲ含水组地下水水位拟合曲线图

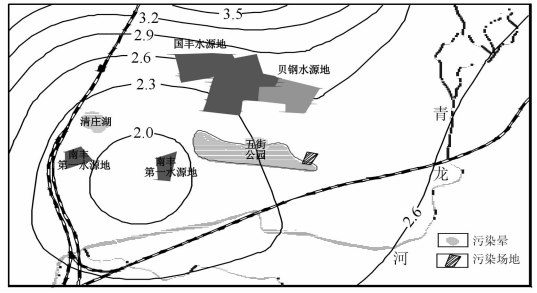
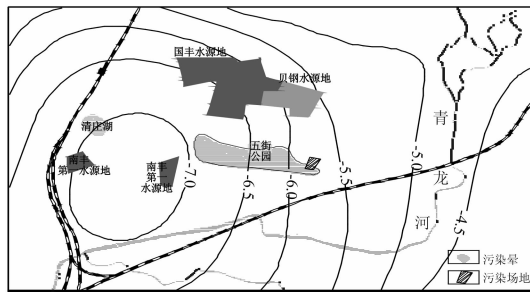
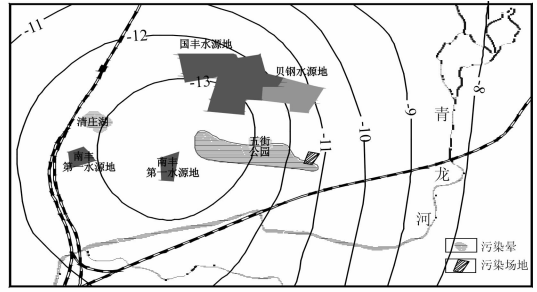
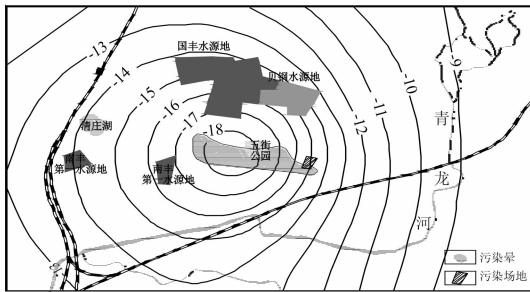
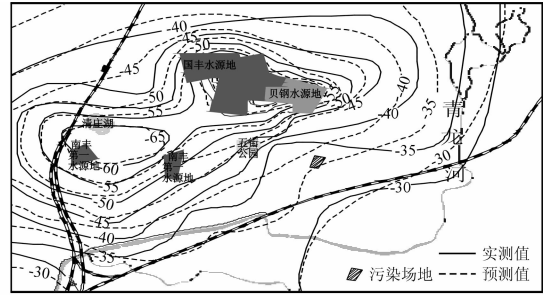


图 3 2011 年、2012 年、2015 年和 2020 年第Ⅱ含水组地下水流场预测图

从图 3 和图 4 可以看出:

(1) 关闭国丰和贝钢两大水源地的抽水井以后,第Ⅱ、Ⅲ含水组地下水位逐年上升。2011 年,第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水位分别为 $-19.1 \sim -7.8$ m 和 $-55.6 \sim -27.3$ m;2012 年,第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水位分别为 $-13.8 \sim -6.9$ m 和 $-50.1 \sim -24.5$ m;2015 年,第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水位分别为 $-7.9 \sim -3.7$ m 和 $-45.1 \sim -21.7$ m;2020 年,第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水位分别达到 $1.4 \sim 3.5$ m 和 $-43.2 \sim 20.3$ m。

(2) 第Ⅱ含水组地下水位降落漏斗中心从五街公园向西转移至丰南第一水源地,第Ⅲ含水组地下水水位降落漏斗中心从国丰钢铁北厂院内逐渐转移

至丰南第一水源地,说明在关停国丰和贝钢水源地的井以后,第Ⅲ含水组地下水向丰南第一水源地流向汇集;2011 年,第Ⅱ和Ⅲ地下水水位降落漏斗中心水力梯度分别为 46% 和 62.5% ;2012 年,第Ⅱ和Ⅲ地下水水位降落漏斗中心水力梯度分别为 1.5% 和 32.7% ;2015 年,第Ⅱ和Ⅲ地下水水位降落漏斗中心水力梯度分别为 0.5% 和 12.7% ;2020 年,第Ⅱ和Ⅲ地下水水位降落漏斗中心水力梯度分别仅为 0.08% 和 6.0% 。说明第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水位降落漏斗中心水力坡度(地下水流动交换速度)逐年减小。至 2020 年,第Ⅱ含水组地下水位降落漏斗将基本消失,而第Ⅲ含水组地下水位降落漏斗不会消失。

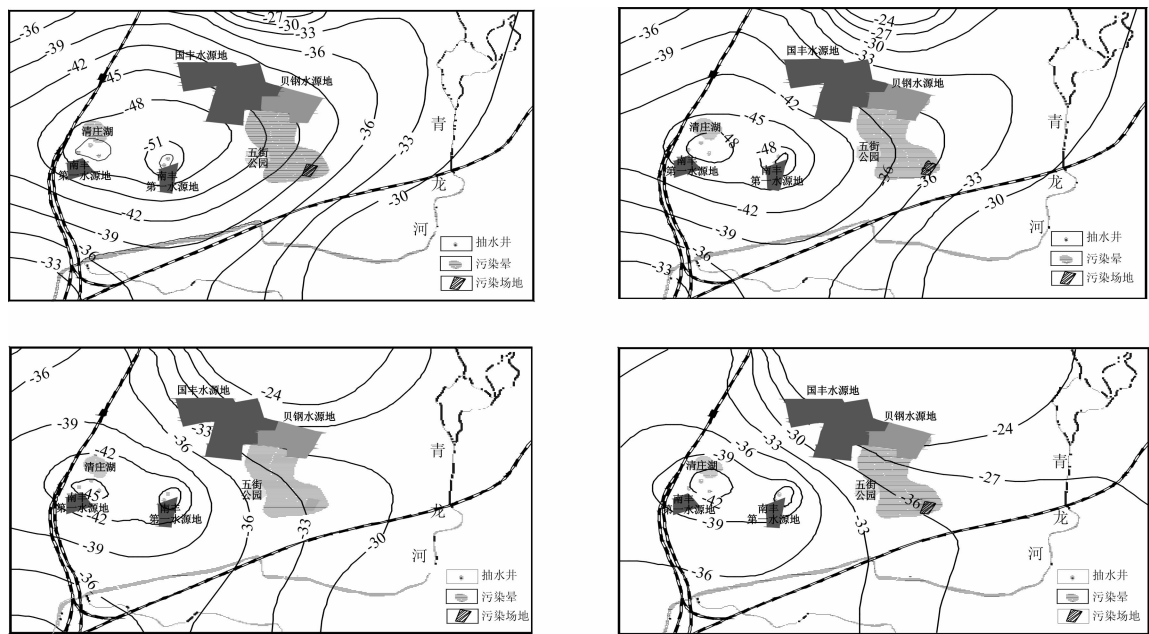


图 4 2011 年、2012 年、2015 年和 2020 年第Ⅲ含水组地下水水流预测图

(3)国丰和贝钢两大水源地关闭以后,第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水流场的变化主要表现在地下水水位上升和流速减缓;结合现状年(2010)Cr(VI)污染晕形态和地下水流方向的变化可知,2011 年以后,第Ⅱ和Ⅲ含水组 Cr(VI)污染晕会继续向西扩散,即向丰南第一水源地方向扩展,但第Ⅲ含水组污染晕扩散速度比第Ⅱ含水组污染晕扩散速度要快。

5 结 语

采用 MODFLOW 模型进行参数率定后,再用已有的资料验证了模型,模型有相当的精度和可靠性。通过对关闭国丰和贝钢两大水源地的抽水井以后进行第四系地下水系统第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水流场模拟预测,并将 Cr(VI)污染晕与预测的地下水水流场形态进行叠加分析,第Ⅱ和Ⅲ含水组地下水水位逐渐上升;地下水水位降落漏斗第Ⅱ含水组将基本消失,而第Ⅲ含水组地下水水位降落漏斗将不会消失;第Ⅱ和Ⅲ含水组 Cr(VI)污染晕继续向西扩散,威胁到丰南第一水源地饮用水安全。所得结论可为今后当地政府部门应对 Cr(VI)污染地下水治理提供政策建议与决策参考。

参考文献:

[1] 孙纳正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京:地质出版社,1981.
[2] 吴吉春,薛禹群,黄海,等. 山西柳林局部区域溶质运移

二维数值模拟[J]. 水利学报,2001,32(8):38-43.
[3] 陶月赞,姚梅. 地下水渗流力学的发展进程与动向[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):221-230.
[4] Chiang Wenhsing, Wolfgang Kinzelbach. 3D Ground water modeling with PMWIN: A simulation system for modeling groundwater flow and pollution [M]. Springer, 2001.
[5] 周念清,朱蓉,朱学愚. MODFLOW 在宿迁市地下水资源评价中的应用[J]. 水文地质工程地质,2000,27(6):9-13.
[6] 李文跃,张博. Visual MODFLOW 在大庆龙西地区地下水数值模拟中的应用[J]. 世界地质,2003(2):161-165.
[7] Gorelick S M, Voss C I, Gill P E, et al. Aquifer reclamation design:the use of contaminant transportsimulation combined with nonlinear programming[J]. Water Resour. Res, 1983,19(4):945-951.
[8] 王智,高瑾,董新光. MODFLOW 在三工河流域地下水资源评价中的应用[J]. 新疆农业大学学报,2002,25(4):29-34.
[9] 李强. 运城市高铬地下水的分布及成因分析[J]. 地下水,2006,28(4):31-33.
[10] 国家环境保护总局. GB3838-2002,地表水环境质量标准[S].
[11] 河北省地质环境监测总站. 河北省唐山市地质环境监测报告(1986-1990年)[R]. 石家庄:河北省地质环境监测总站,1991:24-27.
[12] 陈南祥. 工程地质及水文地质[M]. (第三版). 北京:中国地质大学出版社,2007.
[13] 张元禧,施鑫源. 地下水水文学[M]. 北京:中国地质大学出版社,1998.