

# 基于GMS应用的化工区地下水污染模拟与分析

孙丽凤<sup>1</sup>, 王闯<sup>2</sup>

1. 青岛理工大学计算机工程学院, 青岛 266033

2. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100

**摘要** GMS是目前地下水数值计算的重要应用软件之一,运用GMS可以模拟地下水流分布和地下水污染物的迁移规律等。以化工厂区为例,经过地质模型概化、参数确定、调参等过程,预测污染物的浓度及污染范围。研究了该厂区渗滤液的扩散对下游抽水井的影响,建立了该厂区地下水流模型及溶质运移模型。结果表明,该区域地下水流向为自北向南,沿水流方向水位逐渐下降,水降幅度较为缓和,在下游抽水井附近形成地下水降落漏斗;污染物的浓度在持续增加,局部污染物浓度高达4.1mg/L,污染的范围也逐渐扩大,污染面积约为 $8.23 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,污染物向下游扩散长度约1084.64 m,在垂向上,厂区位置污染物已经扩散到第二层深水含水层。若不加以控制抽水量,会加剧污染物的扩散速度。

**关键词** GMS;地质模型概化;调参;渗滤液;水流模型;溶质运移

GMS是地下水模拟系统(groundwater modeling system)的英文缩写。GMS由Brigham Young University的环境模型实验室和美国军工水道实验站在综合MODFLOW、FEMWATER、MT3DMS、RT3D、SEAM3D、MODPATH、SEEP2D、NUFT、UTCHEM等已有地下水模型的基础上合作开发的一个综合性的、用于地下水模拟的图形界面软件<sup>[1-5]</sup>。随着科技的进步,经济的发展,GMS版本不断更新,不断增添新的程序模块,通过先进的观测手段和新的数值计算方法,含水层参数的精度不断提高,功能不断完善<sup>[6]</sup>。国内外已有一些关于局部区域地下水污染的研究<sup>[7-14]</sup>。本文将GMS应用于分析某化工厂渗滤液在地下水中的扩散情况,采用概念建模法模拟该区域污染扩散趋势,摸清污染羽范围,分析调查范围内特征污染物的浓度分布状况,明晰地下水污染的迁移途径,并预测地下水污染随时间的变化趋势,判断化工厂对下游水源的影响。

## 1 研究区域

### 1.1 区域水文地质概况

该化工厂所处区域为平原的过渡地带,受地质构造、岩性、气候、河流等内外力作用的控制和人类作用的影响,地势由北向南逐渐变缓。北部为连绵起伏的低山丘陵,南部系广

阔坦荡的平原。地势北高南低,并向东南倾斜。

该区域为暖温带半湿润季风区大陆性气候。多年平均气温 $14.1^\circ\text{C}$ 。区内历年平均降水量为750 mm,最小降水量为680 mm,最大降水量为820 mm。河流贯穿该区域的西部和南部,河流水位常年稳定。河全长约19.3 km,流域面积约为 $0.135 \text{ km}^2$ 。河流流经该区域内的长度约为12.8 km,流域面积约为 $0.09 \text{ km}^2$ 。在上游1-2处河宽约为8 m,河床厚度约为3 m;下游2-3处河宽约为5 m,河床厚度约为4 m。该研究区域的总面积约为 $30 \text{ km}^2$ ,研究区域如图1所示。

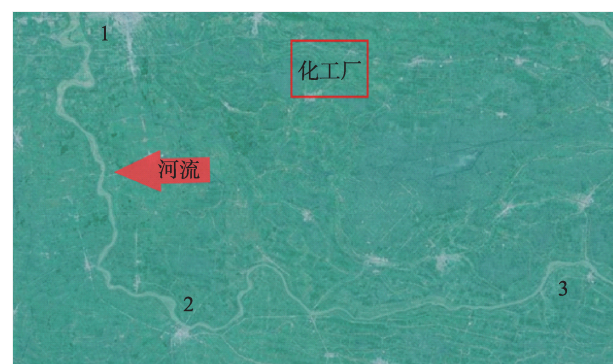


图1 研究区域

Fig. 1 The study area

收稿日期:2016-07-14;修回日期:2016-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51408349)

作者简介:孙丽凤,副教授,研究方向为水环境模拟分析,电子信箱:sllf6603@126.com

引用格式:孙丽凤,王闯.基于GMS应用的化工区地下水污染模拟与分析[J].科技导报,2016,34(18):176-181;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.024

根据地面调查和钻井数据显示,地层自上而下可分为2层,第一层为第四系风化沉积物,主要由细砂和粉砂互层,该层的主要补给源为降水补给;第二层主要是渗透系数较小的黏土、亚黏土。

### 1.2 化工厂区污染状况

其主要污染物为四氯化碳,厂区南部有两口抽水井(西南为潜水井1#,抽水量为3000 m<sup>3</sup>/d;东南为深水井2#,抽水量为500 m<sup>3</sup>/d)。

## 2 模型的建立

根据该地区的水文地质特征,在垂向上将模型概化为两层。概念建模的方法在水平上按7500 m×4500 m进行位置校准。概念模型法采用GIS工具构建MODFLOW计算模型,模型的几何尺寸、源汇项、边界条件和水力学参数在概念模型中完成,然后剖分网格并把概念模型导入MODFLOW计算模型。经过调参校准建立水流模型,后经导入所需参数建立三维溶质运移模型。

## 3 模型参数确定

### 3.1 河流水位与河床高程

通过现有水文地质报告、调查报告,以及历年对河流各个时期水位、水量及河床高程的检测,得出各节点河流水位与河床高程值(表1)。

表1 河流水位与河床高程

Table 1 Water levels of the stream and elevations of the riverbed

节点编号	水位/m	高程/m
1	890.812	888.824
2	884.348	882.011
3	880.687	878.033

### 3.2 降水补给

根据该区域现有的钻孔记录及地球物理勘察资料,按照包气带岩性对该区域进行分区,将研究区划分为3个区域,如图2所示。

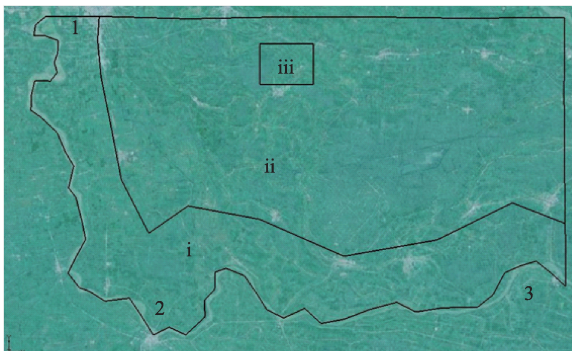


图2 研究区域分区

Fig. 2 Partition of the study area

根据该地区地貌单元及其沉积物类型、岩性特征及气象资料的收集,确定该区域的补给系数及补给量,补给系数及补给量如表2所示。

表2 补给系数及补给量

Table 2 Supply coefficient and recharge

区域	补给系数	降雨量/(m·y <sup>-1</sup> )	补给量/(m·d <sup>-1</sup> )
i	0.28	0.75	0.000575
ii	0.30	0.75	0.000616
iii	0.1	0.75	0.000205

### 3.3 渗透系数与垂直各向异性

在单元剖分及所选定有关资料的基础上,根据岩性、含水层性质、等水位头线、水头动态和抽水试验等资料初步确定参数初始估计值,经多次调参校正确定与实测数值较吻合的模拟数值。该区渗透系数与垂直各向异性如表3所示。

表3 各层渗透系数与垂直各向异性

Table 3 The layers of horizontal hydraulic conductivity and vertical anisotropy

	含水层1	含水层2
渗透系数(m/d)	8.1	1.0
垂直各向异性系数	4	4

## 4 水流模型

### 4.1 水流模型的建立

使用高级概念模型法创建多层MODFLOW,根据概念模型法在MAP模块中使用GIS工具创建模拟场地,并对源汇项、模型边界、层参数(如水力传导系数)以及所有用于模拟的数据进行定义、导入、运行,输出水流模型。该区域水流模型如图3所示。

图3反映了该区域地下水流向从北到南,沿水流方向水位逐渐下降,水降幅度较为缓和,在下游抽水井附近形成地下水降落漏斗<sup>[15]</sup>。

### 4.2 水流模型校准

模型校准就是通过调整模型的参数如渗透系数、补给量等使得模拟结果与观测数据可以基本相吻合的过程。调参过程是一个复杂而辛苦的工作,所调整的参数必须符合模拟区的具体情况,但由于测试误差、简化的假设和输入条件的不确定性,模型校准不可能完全吻合,因此校准结果只需达到与实测数据近似的一定范围即可<sup>[16]</sup>。校核目标及误差量级如图4所示。

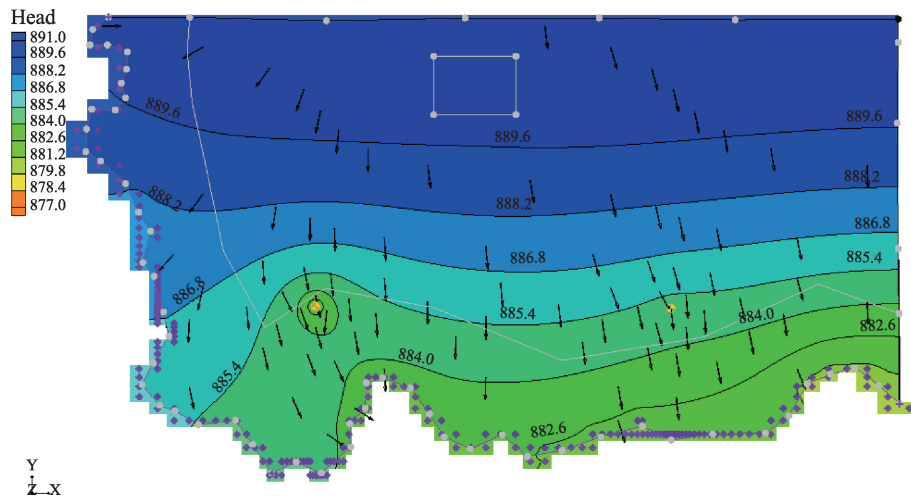


图3 研究区水流模型

Fig. 3 Water flow model of the study area

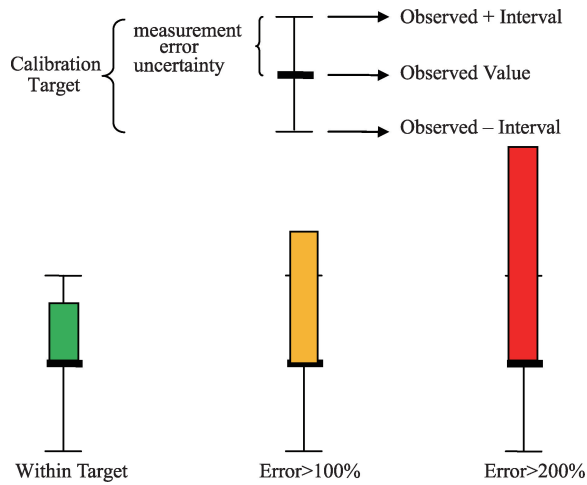


图4 校核目标及误差量级

Fig. 4 Checking target and error magnitude

通过该区域观测井的地下水位高程数据的收集,将收集到的观测井地下水位数据导入MODFLOW模型生成具有观测属性的图层,设置置信区间为 $\pm 0.5$ ,即计算结果与观测结果误差不超过 $\pm 0.5$ 可视为准确,结果如图5所示。

图5表明,在模拟区域的计算水位总体低于观测水位,西南部分区域观测水位与计算水位误差较大,局部误差高达200%。当执行试验校准时,需要不断重复计算新的结果,因此需要追踪误差走向,运用绘图导向工具将计算数据和观测数据进行对比(图6)。

每个观测点都对应一个图标,在对角线上或者接近对角线的点表示误差小,远离对角线的点表示误差大。如图5~图6所示,模拟水位与观测水位吻合相对较好,部分区域超出模拟的置信区间,在该区域中部地区部分误差为黄色并且是负值,说明观测值略大于当前计算值;在该区域西南部误差为

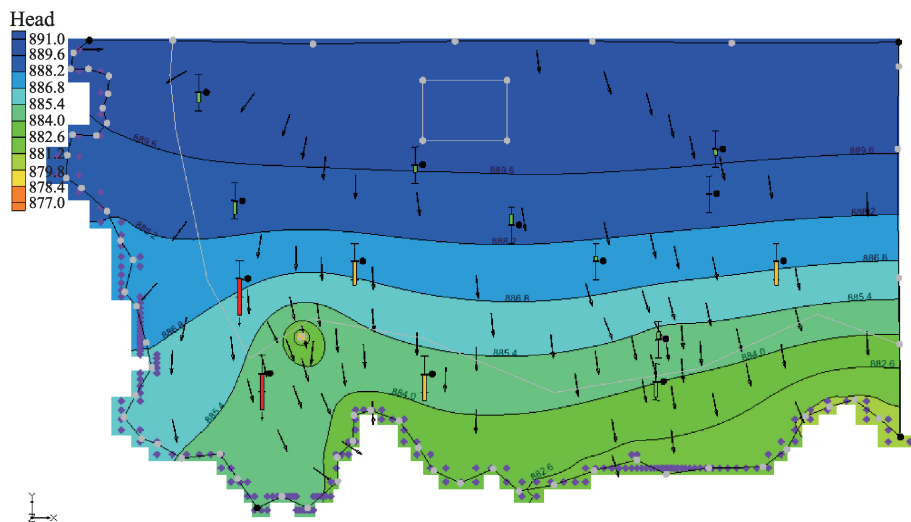


图5 观测井

Fig. 5 Observation wells

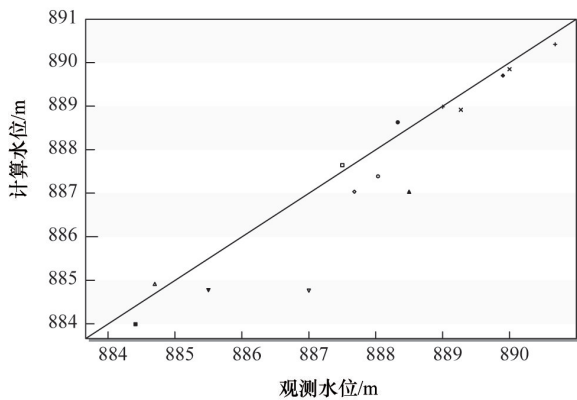


图6 模拟水位与观测水位对比

Fig. 6 Simulated water levels compared with observation water level

红色且为负值,说明该观测值远大于当前计算值。

模型调参就是使软件计算值尽可能与实际数值相吻合的过程,由于在研究区域的中部和西南部观测数值大于计算数值,可以通过更改区域中的渗透系数或补给系数的方法来改变模型输出的数值。适当降低中部和西南部区域含水层的渗透系数,促使含水层水的渗流速度下降,从而使得该区域模拟水位上升与观测水位相吻合,实现调参的目的;或者适当调高该区域的补给系数,使得该区域获得更多的外来有效补给,达到提高水位的效果。

调参是需要不断重复计算新结果的过程,需要不断追踪误差走向,在读取新的结果时误差图会被更新,若每次都对模型进行有效的更改,则误差会逐渐变小直到满足计算要求。最终调参结果如图7所示。

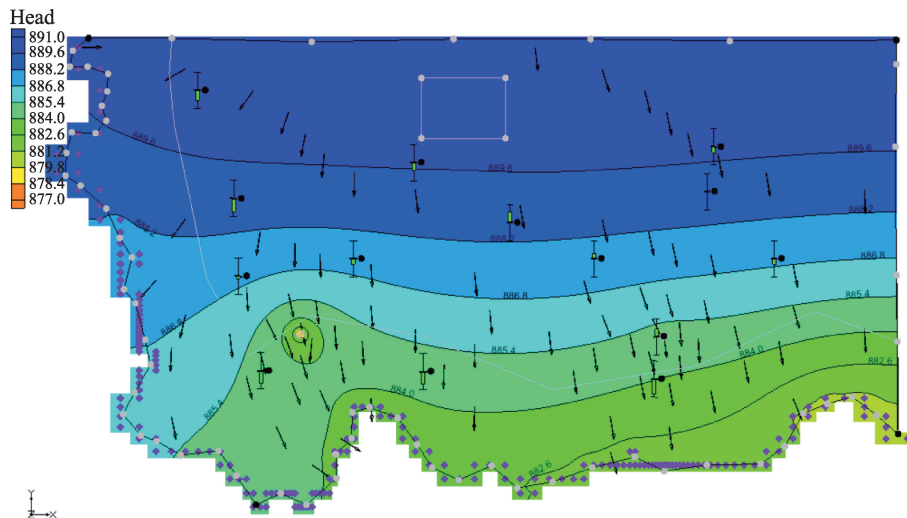


图7 调参结果

Fig. 7 Adjustable parameter results

## 5 溶质运移模型

### 5.1 污染传输模拟参数的确定

MT3DMS是基于MODFLOW模拟所得流场基础上进行的溶质运移模拟。在用数值法进行地下水溶质迁移模拟时,渗透系数、孔隙度、弥散度均为重要的参数<sup>[17-18]</sup>。根据相邻地区同一岩层的岩芯确定有效孔隙度,而弥散值与测试或观测范围有关<sup>[19-20]</sup>。参数选用中,通常参考一般经验公式:

$$\alpha_L = 0.1 \times L_d; \alpha_T = \frac{1}{5} \alpha_L \sim \frac{1}{10} \alpha_L \quad (1)$$

式中, $\alpha_L$ 为纵向弥散度, $L_d$ 为污染物浓度最高中心, $\alpha_T$ 为横向弥散度,通常横向弥散度比纵向弥散度小一个数量级,垂直方向的弥散度比纵向弥散度小2个数量级。

土壤颗粒的吸附作用是影响地下水污染物浓度的主要反应。本模型吸附方式选用Langmuir等温吸附,反应方式选用一节不可逆反应。其主要污染传输模拟参数如表4所示。

### 5.2 MT3DMS初始化

初始化MT3DMS模型,将污染传输模拟参数导入

表4 污染传输模拟参数

Table 4 Pollution transfer simulation parameters

参数名称	参数值	单位	备注
土壤单位体积容重	2.25	g/m <sup>3</sup>	土壤物性分析
纵向弥散度	2	m	经验公式
污染物浓度	20	mg/L	地下水检测
吸附常数	1.25	L/mg	等温吸附试验
有效孔隙度	0.2	-	同一岩层岩芯试验

MT3DMS模型,设定时间步长 $\Delta t=100$ 天,应力期7300天,即每100天输出一次结果,共模拟20年,保存并运行模型。运行结果如图8~图10所示。

从运行结果可以看出,污染物逐渐向下游扩散,运用构建多边形及构建弧度工具计算出污染面积约为 $8.23 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,向下游扩散长度约1084.64 m,在垂向上,厂区位置污染物已经扩散到第二层深层含水层;污染物浓度最高达到了约4.1 mg/L。

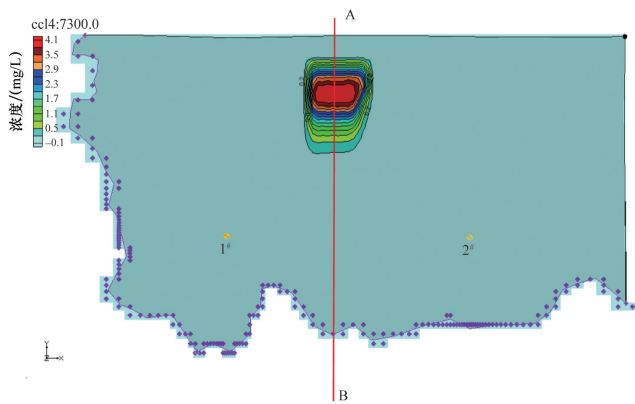


图8 第一层含水层污染范围及浓度

Fig. 8 The first layer aquifer pollution area and concentration

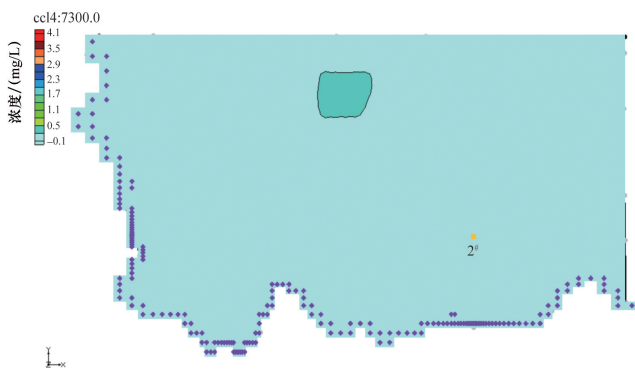


图9 第二层含水层污染范围及浓度

Fig. 9 The second layer aquifer pollution area and concentration

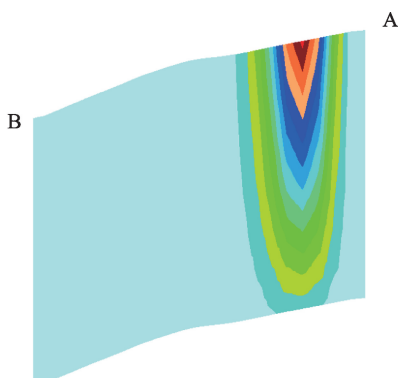


图10 图8的A-B剖面图

Fig. 10 A-B sectional drawing of Fig. 8

## 6 结论

运用GMS软件模拟该区域的地下水溶质运移情况,经过调参校准,模拟效果较好,反映了该区域关于地下水的一些基本情况。结果表明,污染物的浓度在持续增加,污染的范围也逐渐的扩大,污染物逐渐渗入到深层含水层,对地下水影响较大。虽暂时未影响到下游抽水井,但是若不加以控制

继续加大抽水量,则在抽水井附近形成的地下水降落漏斗面积进一步扩大,进而改变地下水位的分布,加剧污染物的扩散速度。所以应该加大对污染源的治理,适当控制下游的抽水量,防止污染范围进一步的扩大。

## 参考文献(References)

- [1] 窦艳兵, 郑佳. 地下水模拟系统(GMS)软件及其应用[C].//北京市水文科学技术研讨会论文集. 中国水利水电出版社, 2008, 285-289.  
Dou Yanbing, Zheng Jia. Groundwater modeling system (GMS) software and applications [C]. Hydrological science and Technology Symposium, Beijing, 2008, 285-289.
- [2] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质, 2003(5): 53-55.  
Zhu Xiaobin. Groundwater modeling system (GMS) software[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003(5): 53-55.
- [3] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
Xue Yuqun, Xie Chunhong. Numerical simulation of groundwater [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] 戴永旺, 常云龙. 基于 GMS 软件的地下水数值模拟应用研究[J]. 商品与质量: 学术观察, 2012(11): 75-75.  
Dai Yongwang, Chang Yunlong. Numerical simulation of groundwater based on GMS software application [J]. Product and Quality, Academic Watch, 2012(11): 75-75
- [5] 薛红琴. 地下水溶质运移模型应用研究现状与发展[J]. 勘察科学技术, 2008(6): 17-22.  
Xue Hongqin. Present situation and development of research on groundwater solute transport model [J]. Survey of Science and Technology, 2008(6): 17-22.
- [6] 魏林宏, 束龙仓, 郝振纯. 地下水流数值模拟的研究现状和发展趋势 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000(3): 50-52.  
Wei Linhong, Shu Longcang, Hao Zhenchun. Research status and development trend of numerical simulation of groundwater flow [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2000(3): 50-52.
- [7] 王喆, 卢丽, 夏日元. 基于GMS的北京西郊垃圾场地下水溶质运移模拟[J]. 人民黄河, 2012(11): 85-87.  
Wang Zhe, Lu Li, Xia Riyuan. West of Beijing based on GMS landfill groundwater solute transport simulation [J]. People of the Yellow River, 2012(11): 85-87.
- [8] 朱锦程. 某化工厂厂区地下水污染现状与评价[J]. 科学中国人, 2015 (3): 19.  
Zhu Jincheng. Present situation and evaluation of groundwater pollution in a chemical factory [J]. Science in China, 2015(3): 19.
- [9] 薛蕊, 常远. 利用GMS模拟技术分析矿坑涌水对周围村庄的影响[J]. 环境保护科学, 2015(2): 77-79.  
Xue Rui, Chang Yuan. GMS simulation analysis of gushing water on surrounding villages [J]. Environmental Science, 2015(2): 77-79.
- [10] 翁帮华, 刘国东, 杨洁, 等. 气田开发地下水污染预测模型参数的测定[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(4): 257-260.  
Weng Banghua, Liu Guodong, Yang Jie, et al. Determination of parameters of groundwater pollution prediction model of gas field development [J]. Oil and Gas Chemicals, 2003, 32 (4): 257-260.
- [11] 张新成, 秦延军, 郑敏红, 等. 基于GMS平台的MODFLOW在海拉尔油田数值模拟计算中的应用[C]. 石油天然气勘查技术中心站第二十次技术交流会(2012)论文集. 石油天然气勘查技术中心站, 2012: 18-22.  
Zhang Xincheng, Qin Yanjun, Zheng Minhong, et al. GMS platform-

- based application of MODFLOW to numerical simulation in hailaer oil-field [C]. Oil and Gas Exploration Technology Center 20th Seminar (2012) Proceedings. Oil and Gas Exploration Fechnology Center, 2012: 18-22.
- [12] Qadir A, Ahmad Z, Khan T, et al. A spatio-temporal three-dimensional conceptualization and simulation of dera ismail khan alluvial aquifer in visual MODFLOW: A case study from Pakistan[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(2): 1-9.
- [13] Fernández-Álvarez J P, Álvarez-Álvarez L, Díaz-Noriega R. Groundwater numerical simulation in an open pit mine in a limestone formation using MODFLOW[J]. Mine Water and the Environment, 2015: 1-11.
- [14] Chitrakar P, Sana A. Groundwater flow and solute transport simulation in eastern al batinah coastal plain, oman: Case study[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 21(2): 05015020.
- [15] 高宗军. 抽水井附近地下水流运动特征[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2014, 33(3): 11-19.  
Gao Zongjun. Movement characteristics of groundwater flow near pumping wells[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 33 (3): 11-19
- [16] 吴吉春, 陆乐. 地下水模拟不确定性分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(3): 227-234.  
Wu Jichun, Lu Le. Groundwater simulation uncertainty analysis [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science Edition, 2011, 47 (3): 227-234.
- [17] 李木子, 翟远征, 左锐, 等. 地下水溶质迁移数值模型中的参数敏感性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 133-137.  
Li Muzi, Zhai Yuanzheng, Zuo Rui, et al. Sensitivity analysis of parameters in groundwater solute transport numerical model [J]. Route with the Water Science and Technology, 2014, 12 (3): 133-137.
- [18] 翟远征, 王金生, 苏小四, 等. 地下水数值模拟中的参数敏感性分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 99-101.  
Zhai Yuanzheng, Wang Jinsheng, Su Xiaosi, et al. Parameter sensitivity of groundwater numerical simulation analysis [J]. People of the Yellow River, 2010, 32(12): 99-101.
- [19] 刘岩磊, 王庆来. 不同流场情况下地下水弥散试验方法分析[J]. 地下水, 2014 (2): 10-13.  
Liu Yanlei, Wang Qinglai. Test method for dispersion of different groundwater flow field analysis[J]. Groundwater, 2014 (2): 10-13.
- [20] 郑西来, 杨喜成. 地下水含水介质的弥散度测定[J]. 西安工程学院学报, 1998, 20(4): 33-36.  
Zheng Xilai, Yang Xicheng. Determination of water dispersion of groundwater aquifer medium [J]. Journal of Xian Institute, 1998, 20 (4): 33-36.

## Groundwater pollution simulation analysis in chemical industry zone by means of GMS

SUN Lifeng<sup>1</sup>, WANG Chuang<sup>2</sup>

1. Computer Engineering Institute, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China
2. College of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China

**Abstract** GMS is the important groundwater numerical software to simulate groundwater flow distribution, migration of groundwater contaminants, etc. This paper takes the chemical plant zone as an example and uses GMS to predict the concentration of pollutants and the polluted area after generalizing the geological model, parameter identification, and adjusting-parameter processes. The effect of spread of the plant leachate on downstream pumping wells is studied, and a factory model of groundwater flow and solute transport model are set up. Results show that the regional groundwater flows from north to south, and along the flow direction the water level decreases relatively moderately. Groundwater descent funnel is formed in the downstream pumping well. Pollutant concentration continues to increase, with local pollutant concentration as high as 4.1mg/L, which has gradually exceeded the scope of pollution. The pollution area is about 823509.67m<sup>2</sup> and the downstream diffusion length is about 1084.64m. In the vertical direction, plant pollutants have spread to the second-level deep aquifer. If not controlled, the water output will intensify the pollutant diffusion velocity.

**Keywords** GMS; geological model of generalized; adjusting-parameter; leachate; flow model ; solute transport

(编辑 祝叶华)