



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.013

白洁,左锐,郭学茹,等.基于数值模拟的傍河水源地潜在污染水力调控优化技术[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):83-90. BAI Jie, ZUO Rui, GUO Xue ru, et al. Optimal control technology of hydraulic regulation in water resource area along rivers based on numerical simulation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 83-90. (in Chinese)

# 基于数值模拟的傍河水源地潜在污染水力调控优化技术

白洁<sup>1,2</sup>, 左锐<sup>1,2</sup>, 郭学茹<sup>1,2</sup>, 汪立娜<sup>1,2</sup>, 王金生<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

**摘要:** 傍河饮用水源地污染控制技术是我国环境保护与饮水安全领域的研究热点。选取松花江流域佳木斯七水源地大型水源地为研究区, 综合分析其水文地质条件, 应用数值模拟方法拟合研究区水动力学场及水化学场。在此基础上运用 MGO 模块的模型基础, 采用全局寻优算法——遗传算法, 分析不同抽水量及井位对七水源-废醪池污染羽进行水力调控的效果, 得出最优井位及抽水量。同时通过分析清除污染源和未清除污染源情况下, 不同观测井中污染物浓度的变化趋势, 探讨了水力调控优化控制技术对傍河水源地污染控制的有效性, 为傍河水源地的安全供水提供技术保障。

**关键词:** 地下水; 数值模拟; 傍河水源地; 水力调控; 优化控制

**中图分类号:** S311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0083-08

## Optimal control technology of hydraulic regulation in water resource area along rivers based on numerical simulation

BAI Jie<sup>1,2</sup>, ZUO Rui<sup>1,2</sup>, GUO Xue ru<sup>1,2</sup>, WANG Li na<sup>1,2</sup>, WANG Jin sheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Pollution control technology of water resource area along rivers is a research hot topic in the field of environment protection and drinking water security in China. In accordance with historical data and hydrogeological conditions in the study area, the numerical simulation method and MGO module model were applied to the study area based on the regional groundwater flow field and initial concentration of groundwater pollution. By means of global optimization algorithm genetic algorithm, the best exploitation quantity and location of pumping wells were optimized to control the contaminant plume in the research area. In the two basic conditions of eliminating pollution sources and controlling pollution sources, the variation trend of pollutants in different observation wells was analyzed and the effectiveness of the hydraulic control technology was explored in order to provide technical support for ensuring water safety in water resource area along rivers.

**Key words:** groundwater; numerical simulation; water resource area along rivers; hydraulic regulation; optimal control

在我国北方各大河流域周围如黄河流域、松花江流域等<sup>[1,2]</sup>, 傍河水源地是主要的供水方式。水源地的供水保障及水质安全<sup>[3,4]</sup>, 对保证区域社会经济的快速腾飞, 生态环境的可持续发展等具有重要意

义<sup>[5,6]</sup>。随着国家对松花江流域专项整治工程的全局启动和实施, 作为松花江沿岸重要城市之一的佳木斯市, 其地下水水源的保护将成为该地区当下的首要问题<sup>[7]</sup>。佳木斯市是松花江沿岸新兴的工业城

收稿日期: 2015-10-25 修回日期: 2016-05-14 网络出版时间: 2016-08-19  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.1514.016.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2014ZX07201-010)

Fund: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (2014ZX07201-010)

作者简介: 白洁(1987-), 女, 北京人, 主要从事地下水污染研究。E-mail: 13578793@qq.com

通讯作者: 左锐(1981-), 男, 安徽枞阳人, 副教授, 博士, 主要从事地下水污染控制与修复研究。E-mail: zr@bnu.edu.cn

市。城市供水以地下水为主<sup>[8]</sup>。近年来,由于长期不合理开采地下水,其潜水位不断下降,形成地下水降落漏斗,尤其是距松花江约 100 m 处的友谊糖厂废醪池严重污染七水源地下水,迫使七水源关闭<sup>[9-10]</sup>。

本文以佳木斯市第七水源废醪池为重点研究区,在初始水流和污染物浓度场的基础上,运用数值模拟的方法,着重进行水力调控优化控制研究,提出合理防治污染的调控方案,有效解决抽水井的优化问题,实现傍河水源地污染防控的目的。

## 1 研究区概况

佳木斯市位于完达山北麓,三江平原西侧,松花江下游。松花江流向北东向,把佳木斯市分为江南、江北两部分。区内地形呈南高北低之势。南部为浑圆状丘陵,最高点 275 m,一般坡度 20°。中南部为波状山前台地,台地前缘呈陡坎状与松花江冲积漫滩河谷平原相接,海拔标高 85~120 m。北部为松花江冲积漫滩河谷平原,海拔标高 75~83 m。

研究区为松散岩类孔隙潜水含水层,广泛分布于漫滩平原及支谷漫滩。含水层由中-上更新统、全新统砂、砂砾石、卵石组成,其中没有连续隔水层。该含水层颗粒一般较粗,结构松散、孔隙发育、透水性强,含水丰富,渗透系数  $K = 0.12 \sim 0.0442 \text{ cm/s}$ 。含水层厚度自北向南逐渐变薄,自西向东由厚变薄;北部沿江一带厚 20~70 m,平原中部厚 30~50 m;南部漫滩后缘及支沟厚 8~18 m;西部黑通一带厚度 45~53 m,中部区厚 40 m。地下水位埋深一般为 5~7 m。

研究区地下水补给、径流及排泄条件主要受地形地貌、气象、水文、地层岩性等因素的控制。大气降水为其主要补给来源,其次汛期江水、农田灌溉水及上游地下水也是第四系孔隙潜水的重要补给来源,而枯水期地下水补给江水,丰水期江水补给地下水。地下水位年变幅近江地带约 2 m 左右,随离江渐远地下水位年变幅减小。

## 2 研究区地下水流数值模拟

### 2.1 水文地质概念模型的建立

根据佳木斯地质及水文地质条件,明确在该研究区内进行地下水流数值模拟,查明研究区流场及污染现状,并开展地下水污染控制研究具有较强的代表性。加之距松花江约 100 m 处的糖厂废醪池严重污染地下水<sup>[11]</sup>,因此将七水源废醪池确定为重点研究区(图 1),在重点研究区开展水力调控优化控制研究,对于地下水污染控制具有重要意义。

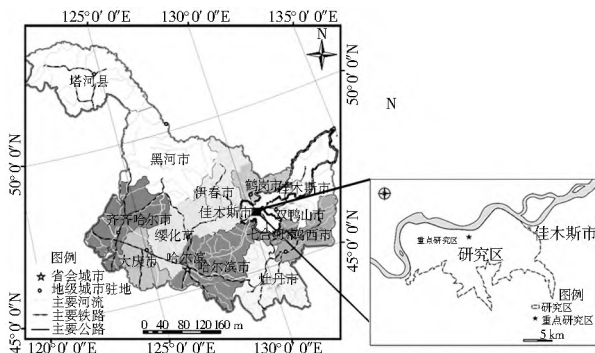


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

根据研究区地下水系统的特征,可以概化为一层非均质水平各向同性、稳定的地下水流系统;地下水流为平面二维流,并服从达西定律;上边界由大气降水入渗补给和蒸发排泄。

据研究区的水文地质条件可知,西边界和北边界为松花江,短期内松花江可作为第一类边界条件定水头边界;南边界为台地,可处理为第二类边界条件无渗流边界条件;东边界根据黑龙江省地质环境监测总站提供绘制的流场图,在竹板六队渔房-长青街一线有明显的地下水分水岭,因此选择竹板六队渔房-长青街一线作为第二类边界条件;模型底边界选择为潜水含水层底板,作为无渗流边界条件;模型顶界面选择地表为大气常压力边界。水文地质概念模型见图 2。

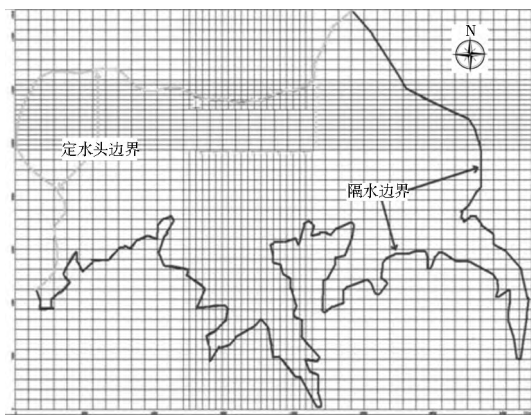


图 2 水文地质概念模型

Fig. 2 Conceptual model of hydrogeological condition

地下水系统数学模型:非均质、各向同性、平面二维结构、稳定地下水流系统,可建立如下微分方程的定解问题:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(H-B) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(H-B) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + W = 0 & (x, y) \in D; t \geq 0 & (1) \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) & (x, y) \in D; t = 0 & (2) \\ K(H-B) \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{2-1}} = q(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_{2-1}; t > 0 & (3) \\ \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{2-2}} = 0 & (x, y) \in \Gamma_{2-2}; t > 0 & (4) \end{cases}$$

式中:  $D$  为地下水渗流区域;  $H_0$  为初始地下水水位;  $H(x, y, t)$  为区内任一点水头标高;  $B$  为含水层底板标高;  $K$  为渗透系数;  $W$  为源汇向, 包括蒸发、降雨、灌溉入渗, 井的抽水量;  $\Gamma_{2-1}$  为二类边界, 表示侧向补给边界;  $q$  为侧向补给量;  $\Gamma_{2-2}$  为二类边界, 表示隔水边界。

### 2.2 数值模型的建立

网格剖分及参数分区: 模拟区范围东西长 22 060 m, 南北长 14 852 m, 面积 144. 1 km<sup>2</sup>。因其地势平坦, 地层连续且岩性简单, 所以在平面上网格均匀剖分。友谊糖厂废醪池作为重点研究区, 进行网格加密。全区共计 2 350 个单元, 分为 4 个参数区, 网格剖分及参数分区见图 3, 初始参数见表 1。



图 3 渗透系数分区

Fig. 3 Partition map of hydraulic conductivity

表 1 各分区初始水文地质参数

Tab. 1 Initial hydrogeological parameter in every part

分区	渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$
1	10
2	0.3
3	5
4	1

参数率定: 利用 Visual MODFLOW 软件, 将初始水位、补给量、排泄量、初始水文地质参数等代入模型, 计算地下水水位, 并利用观测孔水位进行拟合, 调节水文地质参数, 使计算值与观测水位趋于一致, 长期观测孔的水位与计算值的对比见表 2。

通过观测水位与计算水位的对比发现, 水位误差绝对值约为 0.5 m, 说明模型可以较真实的反应研究区地下水实际情况。最终参数率定结果见表 3。

### 2.3 模型检验

应用参数率定的结果建立模型, 预测 2009 年地下水水流场, 将其与 2009 年实际地下水水流场进行对比, 模拟流场与实测流场的吻合程度较好(图 4), 说明模型能够较真实的反应研究区的地下水实际情况, 含水层结构、边界条件概化、水文地质参数选取较合理。

表 2 观测孔水位对比

Tab. 2 Water level in observation wells

地名	水位	时间					
		2009年6月	2009年7月	2009年8月	2009年9月	2009年10月	2009年11月
福胜村	观测水位/m	76.466	76.016	75.426	75.446	75.026	76.396
	计算水位/m	76.81	76.23	75.97	75.73	75.66	76.12
	误差/m	-0.344	-0.214	-0.544	-0.284	-0.634	0.276
黑通村	观测水位/m	76.955	76.845	76.755	76.725	76.675	76.315
	计算水位/m	77.52	77.45	77.41	77.33	77.36	77.15
	误差/m	-0.565	-0.605	-0.655	-0.605	-0.685	-0.835

表 3 各分区拟合水文地质参数

Tab. 3 Fitted hydrogeological parameter in every part

分区	渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$
1	13.2
2	0.41
3	4.7
4	1.4

根据以上地下水数值模拟结果可知, 七水源附近的地下水漏斗已非常明显。佳木斯市地下水因过量开采形成的开采漏斗由来已久<sup>[12]</sup>。据多年监测资料显示, 1995 年间, 在松花江以南市区东部和中

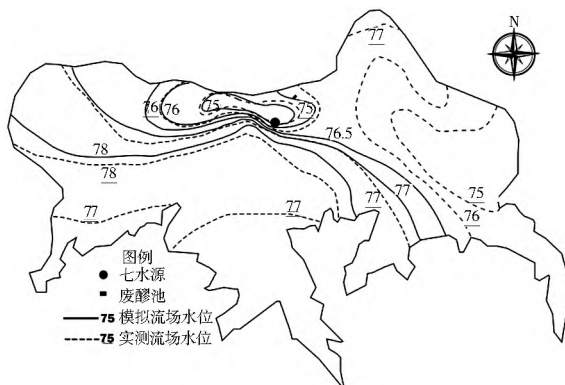


图 4 模拟地下水流场与实际流场对比(2009 年 9 月 10 日)

Fig. 4 Comparison between simulated and measured groundwater flow field

西部已形成两个范围较大的地下水开采漏斗。1996 年至 2000 年地下水开采漏斗进一步扩大, 已形成西起四合、东至红力村, 东西长达 19 km, 南北宽 3 km, 面积达 60 km<sup>2</sup> 的降落漏斗<sup>[9]</sup>。目前, 松花江四水源漏斗中心已转移至七水源。

### 3 水力调控优化控制技术研究

#### 3.1 重点研究区溶质运移模型的建立

水力调控优化控制技术的关键是在已有污染羽, 并且未对污染源进行清除的基础上, 主要通过流场下游抽水井的布设及抽水, 形成特定的捕获区, 改变原有流场, 从而达到控制污染的效果<sup>[11]</sup>。因此首先应该确定重点研究区的污染历史现状, 在此基础上开展水力调控优化控制。

为了更加准确的对水源地进行水力调控优化控制, 本文将水力调控范围定为七水源 废醪池周围 10 km<sup>2</sup> 的区域。在此重点研究区范围内, 将模型重新概化。

根据 1994 年- 2008 年七水源已有水质资料, 目前七水源地下水污染物主要有铁、锰<sup>[15]</sup> 和氨氮<sup>[16]</sup>。根据废醪池周边观测井 2009 年 9 月(丰水期)、2010 年 5 月(平水期) 以及 2011 年 3 月(枯水期) 三个时期水样的测试结果, 发现废醪池污水中氨氮的最大浓度为 1 076.98 mg/L(Ⅰ类水的氨氮标准为 ≤0.2 mg/L), 所以本次污染物运移模拟的典型污染物确定为氨氮。

佳木斯市给水工程始建于 1936 年, 七水厂建于 20 世纪 80 年代<sup>[12]</sup>。因此溶质运移模型拟定以 1 076.98 mg/L 作为初始浓度, 污染时间拟定为 20 年。模拟的污染羽见图 5。可见在给定的参数和污染物浓度情况下, 20 年的时间已经有 7 号、8 号、9 号水源井中氨氮的浓度超过了Ⅰ类水的氨氮标准 0.2 mg/L。说明污染浓度场作为本次水力调控的初始浓度场较为合理。

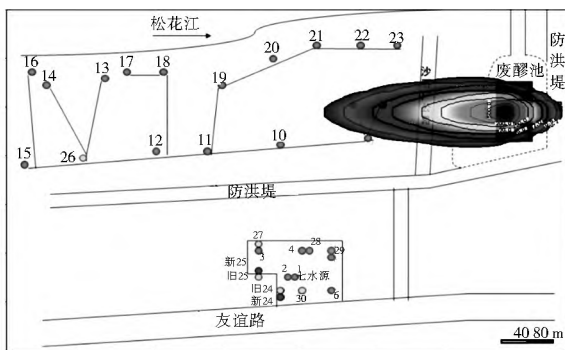


图 5 模拟出的污染羽分布

Fig. 5 Distribution of simulated contaminant plume

#### 3.2 调控目标选择及约束条件设置

Modular Groundwater Optimize(简称 MGO)

是郑春苗和 P. Patrick Wang 编写的地下水模拟软件。它是由一个主程序, 三个优化模块和完整的 MODFLOW 和 MT3DMS 程序组成。三个优化模块分别是遗传算法, 模拟退火法和禁忌搜索法<sup>[18]</sup>。本文主要应用遗传算法来解决抽水井的井群优化问题。在调控目标选定的基础上, 根据水力调控的概念, 将本次水力调控系统优化设计的目标定位能控制污染羽向下游发展的最佳抽水井位及最小抽水量。目标函数写成如下形式:

$$\min: J = \Delta t \sum_{i=1}^n y_i |Q_i| \quad (5)$$

式中:  $J$  为目标函数, 在此为抽水总量最小化;  $\Delta t$  为计算时长, 在水力控制系统中, 该时长为 1 d;  $Q_i$  表示第  $i$  眼井的抽水量 ( $L^3 \cdot T^{-1}$ );  $y_i$  为用于表示第  $i$  眼井是否被激活。  $y_i = 1$  时, 表示第  $i$  眼井为激活状态;  $y_i = 0$  时, 表示第  $i$  眼井未被激活。

约束条件设置如下:

$$\sum_{i=1}^n y_i \leq N_{\max} \quad (6)$$

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (7)$$

$$h_m^{\text{out}} - h_m^{\text{in}} \geq 0 \quad (8)$$

式(6)表示抽水井数量的约束, 本文将  $N_{\max}$  限定为 3, 即讨论抽水控制井为 1、2、3 口的情况; 式(7)表示每口井抽水量的约束, 确定抽水量的最大最小值有助于遗传算法的收敛, 如果最大值过大, 遗传算法不易收敛, 导致计算时间过长, 如果最大值设置过小, 则找不到最优解; 式(8)表示水头差约束, 它要求由图 6 箭头所连接的两个网格之间的水头差大于或等于 0, 防止污染水体进一步扩散。

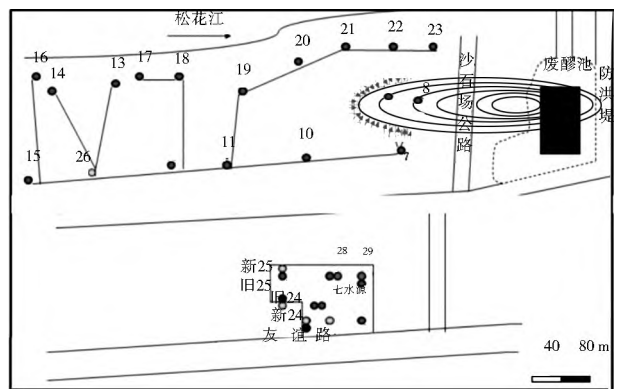


图 6 水头约束分布

Fig. 6 Distribution of head restraint

#### 3.3 备选抽水井及浓度观测井设置

遗传算法<sup>[18]</sup> (Genetic Algorithms, 简称为 GA), 最先是 John Holland 于 1975 年提出的。它作为一种发展较为成熟的全局优化算法, 能够针对非连续变量问题进行寻优, 能够避免陷入“局部最

优点”而找出全局最优点或接近全局最优点,因此在抽水治理系统的优化设计中,遗传算法具有自身的优势。本次研究依据遗传算法理论,共设置了 22 口备选抽水井供其选择最佳抽水井位置。为了检验水力调控的效果,分布的污染羽的周围设置了 5 口浓度观测井<sup>[19]</sup>。备选井及观测井位置见图 7。

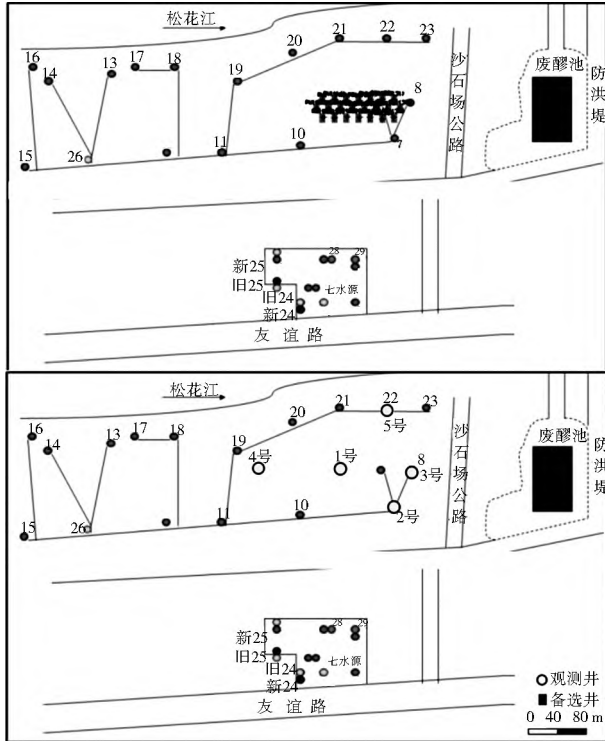


图 7 备选井与浓度观测井设置

Fig. 7 Location of candidate wells and observation wells

### 3.4 研究区水力调控系统优化控制结果

#### (1) 清除污染源情况。

在将最大允许井数分别设置为 1、2、3, 在已经

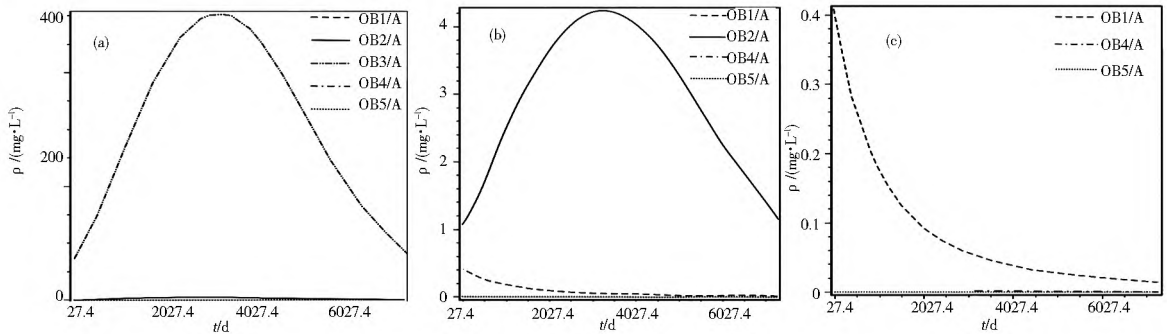


图 8 观测井中浓度变化曲线

Fig. 8 Concentration changing curve of observation wells

#### (2) 未清除污染源情况。

在未清除污染源的前提下,根据重点研究区范围,将最大允许井数分别设置为 1、2、3,在已经建好的模型中运行 MGO 模块,寻找出最佳抽水井位置及最小的抽水量。计算结果见表 5。

建好的模型中运行 MGO 模块,确定出了最佳抽水井位置及最小的抽水量,结果见表 4。

表 4 优化结果

Tab. 4 Optimization results

井数	最优代	井位(E, N)	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	147	(2828. 10, 2007. 33)	1 013. 75
2	129	(2868. 25, 2803. 16)	443. 23
		(2868. 25, 1931. 50)	443. 23
		(2828. 10, 2007. 33)	387. 51
3	114	(2957. 46, 2078. 70)	203. 25
		(2953. 00, 1944. 88)	203. 25

5 口观测井中的浓度变化见图 8。(a) 浓度-时间曲线图说明 3 号观测井中的浓度远远高于其他 4 口观测井中的浓度值,且其浓度变化呈先升后降的变化趋势;(b) 曲线图说明 2 号井中的浓度远高于 1 号、4 号和 5 号观测井,其浓度也呈现先升后降的趋势,由于 2 号、3 号观测井处于选择出的最佳抽水井位的上游,因此可以推断,最佳抽水井位上游的区域,均有污染物浓度先升后降的变化趋势。(c) 浓度-时间变化曲线图说明 1 号观测井中污染物的浓度,随时间呈下降趋势,说明由于抽水井的抽水已经控制了 1 号观测井所在位置的污染物。4 号观测井没有观察到污染物,说明污染羽没有继续向下游扩展;5 号观测井没有观测到污染物说明污染羽没有向其他方向扩展。

通过设置在污染羽周围的粒子,可以追踪到污染羽处溶质的运移方向,见图 9。同时通过粒子追踪可以发现,污染羽已经被抽水井控制。

5 口观测井中的浓度变化见图 10。(a) 浓度-时间曲线图说明 3 号观测井中的浓度远远高于其他观测井中的浓度值,且其浓度有持续升高趋势;(b) 曲线图说明 2 号井中的浓度远高于 1 号、4 号和 5 号观测井,其浓度也呈现先升后降的趋势;(c) 浓度-时间变

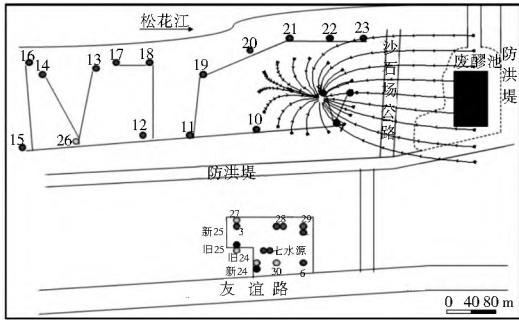


图 9 粒子追踪结果

Fig. 9 Particle Tracking results

化曲线图说明 1 号观测井中污染物的浓度, 随时间呈下降趋势, 说明由于抽水井的抽水已经控制了 1 号观测井所在位置的污染物。4 号观测井没有观察

到污染物, 说明污染羽没有继续向下游扩展; 5 号观测井没有观测到污染物说明污染羽没有向其他方向扩展。

表 5 优化结果

Tab. 5 Optimization results

井数	最优代	井位(E, N)	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	147	(2828. 10, 2007. 33)	1 021. 36
		(2868. 25, 2803. 16)	462. 47
2	129	(2868. 25, 1931. 50)	462. 47
		(2828. 10, 2007. 33)	381. 63
3	114	(2957. 46, 2078. 70)	212. 23
		(2953. 00, 1944. 88)	212. 23

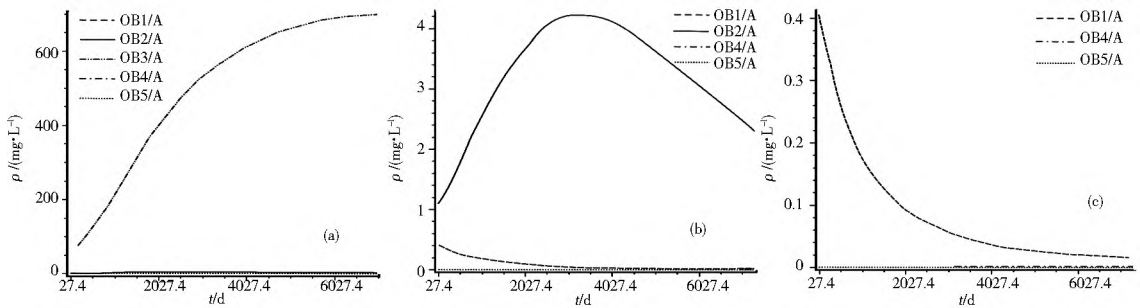


图 10 观测井中浓度变化曲线

Fig. 10 Concentration changing curves of observation wells

(3) 优化结果分析。

对比清除污染源与未清除污染源的情况下, 同一观测井中的浓度(图 11), 可以发现, 对于 1 号观测井, 两种情况下的浓度没有变化; 对于 2 号观测井, 污染物浓度都呈现出先升高后降低的趋势, 且在升高段, 二者是重合的, 在减小段, 未

清除污染源情况下, 2 号观测井中的浓度比清除污染源情况下 2 号观测井中的浓度降低的要慢; 对于 3 号观测井, 清除污染源情况下, 呈现出先升高后降低的趋势, 而未清除污染源情况下, 污染物浓度呈现出持续升高的趋势; 4 号、5 号观测井中未发现污染物。

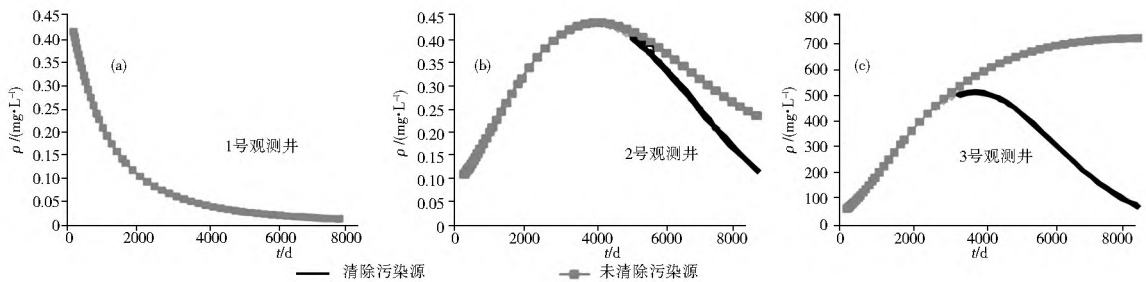


图 11 观测井中浓度变化对比

Fig. 11 Contrast of concentration variations in observation wells

4 结论

本文根据研究区已有水质资料及水文地质条件, 通过数值模拟的方法, 运用 MODFLOW 软件建立了七水源-废醪池的地下水污染运移模型, 并验证了目前七水源附近降落漏斗不断扩大的趋势。在此基础上, 运用 MGO 模块与集成的全

局寻优算法——遗传算法(GA)的数学优化方法, 最终确定了在抽水井数为 3 的情况下通过水力调控来控制污染羽的最佳井位及最小抽水量, 而且通过不同情景下的水力调控方案, 发现是否有污染源对于水力调控系统在不同限制井数的情况下的总抽水量差距不大。

本研究为废醪池的治理及七水源的保护提供了

技术支持,同时也为地下水污染控制提供了实例。但是研究过程中未考虑废醪池中氨氮进入地下水的机理,及其氮元素本身和“三氮”转化在包气带及地下水中的迁移转化规律,因此还需要进一步考虑更多的影响因素,完善地下水污染物运移模型,从而取得更加准确的水力调控结果。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈梦熊. 中国水文地质环境地质问题研究[M]. 北京:地震出版社,1998:108. (CHEN Meng-xiong. Hydrogeological and Environmental Geological Problems in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1998: 108. (in Chinese))
- [2] 马新双,卢胜勇,李明良,等. 北方浅层地下水超采区地下水预测模型[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(4):134-136. (MA Xin shuang, LU Sheng-yong, LI Ming liang, et al. Research of groundwater prediction model in shallow groundwater over exploitation zone in the Northern Area[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 134-136. (in Chinese))
- [3] 唐克旺,朱党生,唐蕴,等. 中国城市地下水饮用水源地水质状况评价[J]. 水资源保护,2009,25(1):1-4. (TANG Ke wang, ZHU Dang sheng, TANG Yun. Groundwater quality assessment of urban drinking water sources in China[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1): 1-4. (in Chinese))
- [4] 朱党生,张建永,史晓新,等. 城市饮用水水源地安全评价(0): 全国评价[J]. 水利学报,2010,41(8):914-920. (ZHU Dang sheng, ZHANG Jian yong, SHI Xiao-xin, et al. Security assessment of urban drinking water sources 0. Security assessment for cities in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 914-920. (in Chinese))
- [5] 王红旗,秦成,陈美阳. 地下水水源地污染防治优先性研究[J]. 中国环境科学,2011,31(5):875-880. (WANG Hong qi, QIN Cheng, CHEN Mei yang. Study on priorities of prevention and control of groundwater source pollution[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 31(5): 875-880. (in Chinese))
- [6] 程彦培,倪增石,唐宏才. 供水安全与地下水污染防控[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(5):57-83. (CHENG Yan pei, NI Zeng shi, TANG Hong cai, et al. Water supply and groundwater pollution control[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2007, 5(5): 57-83. (in Chinese))
- [7] 黄应哲,孙永贺,李连南. 佳木斯市区浅层地下水水质评价[J]. 黑龙江水专学报,2001,28(1):31-32. (HUANG Ying zhe, SUN Yong he, LI Lian nan. Quality assessment of shallow underground water in Jiamusi City[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2001, 28(1): 31-32. (in Chinese))
- [8] 李龙辉,杨春生,张玉国. 佳木斯市地下水开发利用存在的问题及解决对策[J]. 地下水,2011,33(4):36-37. (LI Long hui, YANG Chun sheng, ZHANG Yu guo. Environmental geological problems and protection strategy of groundwater exploitation in Jiamusi City[J]. Ground water, 2011, 33(4): 36-37. (in Chinese))
- [9] 郇环,王金生,胡立堂. 松花江佳木斯段潜水脆弱性评价[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(S1):303-309. (HUAN Huan, WANG Jin sheng, HU Li tang. Phreatic vulnerability assessment in Jiamusi Section of Songhua River[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(S1): 303-309. (in Chinese))
- [10] 赵红梅,徐宏恩,王士君. 松花江佳木斯江段水环境容量分析[J]. 东北师大学报:自然科学版,2008,40(2):109-114. (ZHAO Hong mei, XU Hong en, WANG Shi jun. Analysis and research of environmental capacity of water in the Songhua River Jiamusi[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 109-114. (in Chinese))
- [11] 王小刚,郭纯青,王文君,等. 蔗渣浆厂废水对地下水影响的研究[J]. 地下水,2011,33(3):8-10. (WANG Xiaogang, GUO Chunqing, WANG Wenjun, et al. Affection of wastewater from bagasse pulp mill on groundwater[J]. Ground Water, 2011, 33(3): 8-10. (in Chinese))
- [12] 尹喜霖,曹继亮,孙晨奇,等. 佳木斯市四、六水源地及其附近地下水酚污染的研究[J]. 工程勘察,2000(3):16-19. (YIN Xi lin, CAO Jiliang, SUN Chengqi, et al. Analysis and research of environmental capacity of water in the Songhua River Jiamusi[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000(03): 16-19. (in Chinese))
- [13] 朱亮,段祥宝. 地下水污染运移数值模拟及最优估计[J]. 水动力学研究与进展(A辑),1996,11(5):513-519. (ZHU Liang, DUAN Xiangbao. Numerical modeling and optimal estimation of the transport of groundwater pollution[J]. Journal of Hydrodynamics, 1996, 11(05): 513-519.
- [14] 李勤,郑永胜,刘连成. 佳木斯市江北地下水水源地数值模拟研究[J]. 黑龙江水专学报,2008,35(4):8-11. (LI Qin, ZHENG Yongsheng, LIU Liancheng. Numerical simulation study of groundwater in North River of Jiamusi City[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2008, 35(4): 8-11.
- [15] 王岚,孟宪突,徐洪恩. 佳木斯市水源地源水铁、锰含量超标的原因分析[J]. 环境科学与管理. 2006,31(1):152-153. (WANG Lan, MENG Xiantu, XU Hongen. Analysis of causes of superstandard Fe and Mn content in source water of catchment areas in Jiamusi City[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(1): 152-153. (in Chinese))
- [16] 袁亚杰,孔庆辉. 佳木斯市地下水化学特征及水质变化[J]. 东北水利水电,2006,24(265):105-108. (YUAN Yajie, KONG Qinghui. Groundwater chemical characteristic and quality change in Jiamusi City[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2006, 24(265): 105-108. (in Chinese))
- [17] 陈尚龙,达丽红,乔光建. 氮污染物在非饱和土壤中迁移过程对地下水水质影响分析[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(4):57-83. (CHEN Shanglong, DA Lihong, QIAO Guangjian. Analysis to the effect of the nitrogen contaminant transporting in unsaturated soil on groundwater quality[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Tech

- nology, 2010, 8(4): 57-83. (in Chinese))
- [18] ZHENG Chur miao, WANG Patrick. MGO-A Modular Groundwater Optimizer Incorporating MODFLOW/MT3DMS Documentation and User's Guide[P]. The University of Alabama, May 2003.
- [19] 郭倩, 牟海斌, 徐嘉璐, 等. 水平井开采地下水方案优选的实例研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 105-108. (GUO Qian, MOU Hai bin, XU Jia lu, et al. A case study on the scheme optimization of horizontal wells to exploit groundwater[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 105-108. (in Chinese))
- [20] 郭守鋈, 李威, 张树恒, 等. 青海省盐湖集团供水二期水源地数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 52-54. (GUO Shou yun, LI Wei, ZHANG Shu heng, et al. Numerical simulation of the second period water source area of water supply for Salt Lake Group in Qinghai Province[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 52-54. (in Chinese))
- (上接第54页)
- [10] 张美华, 王晓燕, 秦福来. SCS模型在密云石匣试验小区降雨径流量估算中的应用[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2004(25): 155-158. (ZHANG Mei hua, WANG Xiao yan, QIN Fu lai, Application of SCS modal to estimate the quantity of rainfall runoff of small watershed in Shixia, Miyun County [J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2004(25): 155-158. (in Chinese))
- [11] Lucas I F J, Frans J M. Accuracy assessment of satellite derived land cover data: a review. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1994, 60(4): 410-432.
- [12] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (YUAN Zu oxin, Watershed hydrological model[M], Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990. (in Chinese))
- [13] 高蕴钰, 许有鹏. SCS遥感水文模型在曹娥江流域应用研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1992, 28(1): 150-159. (GAO Yun yu, XU You peng. An application research of SCS model based on remote sensing information in Cao E river basin[J]. Journal of Nan Jing university( Natural sciences edition) 1992, 28(1): 150-159. (in Chinese))
- [14] U. S Soil Conservation Service. National Engineering Handbook Section 4. Hydrology [M]. USA: U. S Government Printing Office 1972.
- [15] 权瑞松, 刘敏, 候立军, 等. 土地利用动态变化对地表径流的影响—以上海浦东新区为例[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 44-48. (QUAN Rui song, LIU Min, HOU Li jun, et al. Impact of land use dynamic change on surface runoff: a case study on Shanghai Pudong New District[J]. Journal of catastrophology, 2009, 24(1): 44-48. (in Chinese))
- [16] 周崔宁, 任树梅, 闫美俊. 曲线数值法(SCS模型)在北京温榆河流域降雨径流关系中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 87-90. (ZHOU Cui ning, REN Shu mei, YAN Mei jun. Application of SCS model to simulate rainfall runoff relationship in Wenyu river basin in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 87-90. (in Chinese))
- [17] 许彦, 潘文斌. 基于ArcView的SCS模型在流域径流计算中的应用[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 176-179. (XU Yan, PAN Wen bin. SCS model for watershed runoff calculation in arcview[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 176-179. (in Chinese))
- [18] 薛丽芳, 于红学, 郑青青, 等. 徐州市土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 27-32. (XUE Li fang, YU Hong xue, ZHENG Qing qing, et al. Effects of Land use change on runoff in Xuzhou city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 27-32. (in Chinese))
- [19] Wong Siu wai, Tang Bosin, Basil van Horen. Strategic urban management in China: A case study of Guangzhou development district[J]. Habitat International, 2006, 30(3): 645-667.
- [20] 孟春红, 路振广, 马细霞, 等. 基于二元水循环的灌区分布式水文模型的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 24(2): 92-97. (MENG Chun hong, LU Zhen gung, MA Xi xia, et al. Research on distributed hydrological model for irrigation area based on the theory of dual cycling water resources[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 24(2): 92-97. (in Chinese))