

松花江佳木斯市区段江水对地下水补给程度分析

迟宝明¹, 丁元芳², 易树平¹, 周彦章¹, 赵孟芹³, 郑 河⁴

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026; 2. 水利部松辽水利委员会水文局, 吉林 长春 130021; 3. 佳木斯市水文局, 黑龙江 佳木斯 154002; 4. 内蒙古第九地质勘查开发院, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要 采用 MODFLOW 软件, 在佳木斯市区建立了地下水流模拟模型。在地下水开采井正常运行和全部关闭两种情况下, 分别对现状年和设计典型年, 运用所建模型求解松花江对研究区地下水的补给量, 分析补给程度, 从一个侧面探讨江水污染对地下水水质的影响程度。计算结果表明: 从求解的年内总量上, 通过关闭开采井的方式能够抑制近 1/4 的江水侧渗补给; 关闭开采井初期并不能迅速降低江水的侧渗补给量。

关键词 地下水; 水质; 补给程度; 数值仿真; 松花江; 佳木斯

中图分类号: P641.136 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)04-0026-04

Recharge of Jiamusi downtown section of Songhua River to the groundwater

CHI Bao-ming¹, DING Yuan-fang², YI Shu-ping¹, ZHOU Yan-zhang¹, ZHAO Meng-qin³, ZHENG He⁴

(1. College of Environment & Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Songliao Water Resources Commission, the Ministry of Water Resources, Changchun 130021, China; 3. Hydrology Bureau of Jiamusi, Jiamusi 154002, China; 4. No. 9 Geological Institute of Exploration and Development of Inner Mongolia, Xilinhaote 026000, China)

Abstract A numerical model was established for groundwater flow in Jiamusi City based on MODFLOW software. Two cases that all of the pumping wells were in operation or closed were simulated, and the recharge quantity of Songhua River to groundwater in present year and the design typical year was calculated. The recharge degree and the influence of river pollution on the groundwater quality were discussed. Results indicate that about 1/4 of river water to the groundwater can be controlled per year by closing of the wells, however, the recharge of river water to groundwater would not decreased rapidly during the early period after the closing of the wells.

Key words groundwater; water quality; recharge degree; numerical simulation; Songhua River; Jiamusi

佳木斯市位于松花江下游南岸, 一直开采地下水饮用。由于长期开采, 市区内已形成东西 2 个开采漏斗, 且以紧靠松花江的七水源为中心的西部漏斗水位降深最大, 为 13.32 m。七水源现状实际供水为 10.4 万 m³/d, 占市政水源地供水系统的 86%。造纸厂、发电厂、石油化工厂等企事业单位的自备水源井大多沿江布设, 傍河开采地下水, 致使激发的江水侧渗补给在地下水总补给中占有较大比重。由于化学事故、战争或者人为投毒等行为, 可能致使松花江遭受严重污染, 进而影响佳木斯市供水。本文试图以佳木斯市区段为例, 借助数值仿真技术, 通过松花

江水对沿岸地下水补给程度的分析, 以及关闭开采井对江水侧渗补给的控制程度, 从一个侧面分析和探讨江水污染对沿岸地下水水质的影响程度, 从而为水主管部门和各级政府进行科学决策提供依据^[1]。

1 水资源现状

1.1 概况

佳木斯市是黑龙江省东部地区的重要城市, 市区地形自西南向东北逐渐倾斜, 南部为完达山脉和张广才岭向北延伸的低山丘陵区, 中部为岗阜状台地, 北部为沿江平原^[2]。多年平均气温 3.0℃, 多年

平均降水量 540 mm,多年平均水面蒸发量为 1251 mm,无霜期多年平均为 133 d。

第四系孔隙潜水含水岩组分布于北部河谷平原及南部支谷中,含水层由全新统及上更新统、中更新统冲积冰水砂、砂砾石、砾卵石组成。三者之间无稳定的隔水层,故形成具有统一水力联系的含水层。含水层厚度自北向南变薄,沿江一带为 50~70 m,中部为 30~50 m,漫滩后缘及支谷厚度为 8~18 m;自西向东含水层厚度则由大变小,沿江一带为 105~110 m,向东延伸 6 km,逐渐变为 60 m,再向东延伸 25 km,逐渐变到 30 m 左右。碎屑岩类裂隙孔隙水含水岩组分布于江南岸的平原区,伏于第四系之砂砾石孔隙水之下。由于其上普遍覆盖着较厚的黏性土层,故隔绝了与上部潜水的的水力联系,其裂隙水大都具有承压性质,承压水位一般为 30~40 m。

本文研究主要着眼于江水对第四系砂砾石孔隙水的补给关系。

1.2 开发利用现状

佳木斯市区供水工程分为蓄水工程、提水工程和地下水工程。位于佳木斯城南 6 km 的四丰山水库就是佳木斯城区的蓄水工程。提水工程全部沿松花江分布,以松花江水作为供水水源,年平均提水量 5.05 亿 m^3 。佳木斯市有提水工程 4 处,其中 2 处是工业提水工程,2 处是农业灌溉提水工程。在工业提水工程中,发电厂提水工程年提水能力为 6.7 亿 m^3 ,主要为发电厂和造纸厂供水;友谊糖厂提水工程年提水能力 600 万 m^3 。在农业灌区提水工程中,松江灌区设计灌溉面积 2 066.67 hm^2 ,长青灌区设计灌溉面积 800 hm^2 ,实灌面积较小。

佳木斯市区地下水供水系统分为市政水源供水系统、企事业自备水源供水系统和农业供水系统。佳木斯市政已建有 7 个水源地,其中松花江坝内建

设的二、三、五水源因水量和水质问题已分别停用。目前有 4 个水源地正常运行,设计日供水能力为 20 万 m^3 ,供水 55.8 万人。有开采井 44 眼,开采深度 30~40 m,实际日供水能力为 12 万 m^3 。市政水源地供水系统主要为城市生活和工业供水,4 个水源地开采的地下水全部为第四系砂砾石孔隙潜水。除居民饮用水外,城区企事业单位的饮用水采取自备井,自给自足。现有自备井 419 眼,其中浅水井 217 眼,深水井 202 眼。日开采能力为 11.7 万 m^3 ,其中浅层水 8.0 万 m^3/d ,深层水 3.7 万 m^3/d 。企事业供水系统主要为工业生产、城市生活和环境供水,农业供水系统主要为农村生活和菜田灌溉供水。

佳木斯市地下水资源超采,使得市区一度形成了近 60 km^2 的降落漏斗。到 2000 年,城区地下漏斗区面积为 57 km^2 。沿江部分地下水水源地因水量和水质的原因关闭后,2003 年城区地下漏斗区面积减少为 37 km^2 ,自此以后地下漏斗区变化不大。

1.3 研究区范围

研究区的范围为松花江南岸河漫滩地区,北部和西部以松花江为界,南部以与丘陵区的接触边界为界,东部到道德乡—松江乡鱼池一带,总面积为 193.16 km^2 ,如图 1 所示。

2 地下水流模型

2.1 水文地质概念模型

根据含水岩组分布、开采层位等特征,将研究区内具有统一水力联系的全新统及上更新统、中更新统冲积冰水砂、砂砾石、砾卵石组成的第四系孔隙潜水含水系统作为计算目的层。地下水运移符合达西定律,将含水系统概化为非均质各向同性的平面二维非稳定流地下水系统。

计算区的上部边界为潜水面,是位置不断变化

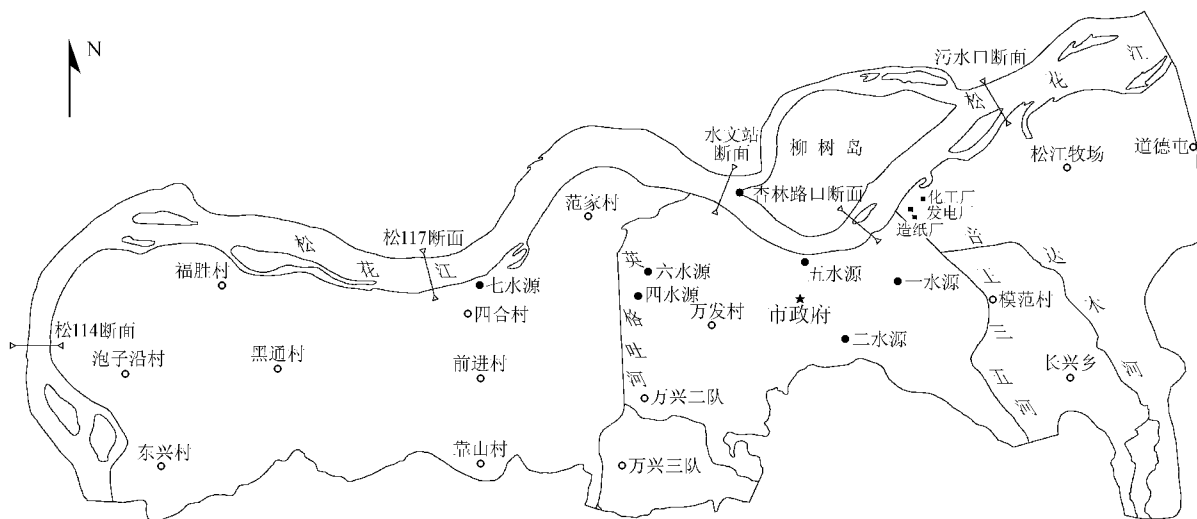


图 1 研究区范围

的水量交换边界,有降水入渗、潜水蒸发、河道渗漏、灌溉水回渗等;下部边界是以较厚的第三系亚黏土顶板为界,概化为隔水边界。西部和北部以松花边为界,概化为河流边界或一类水头边界,南部以平原和丘陵的分界线为界,基本概化为隔水边界,但局部平原支谷区概化为二类流量边界;东部下半段概化为隔水边界,上半段概化为二类流量边界。

地下水补给来源主要有江水侧渗补给、大气降水补给、灌溉回渗补给、部分外边界地下水径流补给和松花江支流高水位期的侧向渗透补给;地下水的排泄以人工开采为主。

2.2 数学模型

以连续性原理和达西定律为基础,结合地下含水系统的水文地质条件,建立与其水文地质概念模型相对应的平面二维非稳定流数学模型^[3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} [K(h-B)\frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K(h-B)\frac{\partial h}{\partial y}] + \varepsilon_1(x,y,t) - \varepsilon_2(x,y,t) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} & (x,y) \in D, t \geq 0 \\ h(x,y,0) = h_0(x,y) & (x,y) \in D \\ h(x,y,t)|_{\Gamma_1} = h_1(x,y,t) & (x,y) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K(h-B)\frac{\partial h}{\partial n}|_{\Gamma_2} = q(x,y,t) & (x,y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases}$$

式中: x, y 为坐标; h, B 分别为含水层水位和底板标高; $m, \varepsilon_1(x, y, t), \varepsilon_2(x, y, t)$ 分别为含水层的补给强度和排泄强度, m/d ; K 为渗透系数, m/d ; μ 为潜水含水层储水系数(给水度); $h_0(x, y)$ 为初始水位; m ; $h_1(x, y, t)$ 为第一类边界点水位, m ; $q(x, y, t)$ 为第二类边界单宽流量, m^2/d ; Γ_1, Γ_2 分别为一类边界和二类边界。

2.3 模型的识别和验证

上述模型采用有限差分法求解,并采用强隐式法(SIP)联立迭代求解代数方程组。计算区平面总面积为 193.157 km^2 ,采用VMOD进行自动矩形网格剖分,共剖分有效矩形网格单元6218个,每个单元面积为 $195.72 \text{ m} \times 158.70 \text{ m}$ 。根据水文地质条件,将潜水含水层渗透系数分为4个,给水度分为4个分区,降水入渗系数分为13个分区。各参数分区的渗透系数及给水度主要根据以往进行的抽水试验确定,降水入渗系数主要参考已有研究成果。模拟期为2002年1月16日到2002年9月16日。根据地下水动态观测及降水特征将模拟期逐月划分为8个应力期,每个应力期又分为6个时间步长。选取枯水期(2002-01-16~2002-05-15)进行数学模型的识别,丰水期(2002-05-16~2002-09-16)进行数学模型的验证。边界条件及源汇项分别利用VMOD中的River、Wall、GHB、Recharge、Well等模块进行处理,其

中江水对地下水的补给主要由河程序包River来计算,此计算程序既考虑了江水与地下水具有紧密水力联系的情况,又考虑了江水垂向补给地下水的情况^[4]。

采用“试错法”(trial-and-error)不断调整参数初值,并进行细致的拟合。通过对水量均衡分析、流场趋势拟合比较、长观孔计算水位与实测水位的拟合误差均小于 0.5 m ,说明所建模型比较真实地反映了研究区的地下水的实际情况,含水层结构、边界条件概化、水文地质参数的选取及源汇项的确定都是合理的,可以运用该模型进行江水对地下水补给程度分析。

3 补给程度分析

佳木斯市区由于长年大量开采地下水,引起地下水位下降且低于江水位,致使江水常年补给地下水。松花江过境水量多年平均利用率仅为 0.7% ,且开发利用方式简便,水质问题成为决定其开发利用的关键性因素。松花江水一旦受到污染,污染物质会随水流以溶解、悬浮等不同方式运移,对地表水利用可通过关闭引水和提水工程来防止污染。对于接受河流侧渗补给的地下水,尤其是傍河型水源地(如七水源),定量分析江水对地下水的补给程度从而采取相应措施防止污染至关重要。

3.1 现状年计算

根据资料情况及地下水等水位线分析,选取2003年作为现状开采年,利用识别和验证后地下水模拟模型对地下水系统进行模拟,从而确定江水对地下水补给程度。本次模拟的源汇项选取,大气降水采用佳木斯站各月平均降水量值(表1);松花江水位采用各监测断面逐月平均水位(表1),并利用河道比降推求断面上下游相应的水位,边界侧向流量利用达西定律来计算,灌溉回渗量利用灌溉定额法来计算,其中利用降水量查询相应的灌溉定额;

表1 2003年降水量及江水水位

月份	降水量/ mm	断面平均水位/m				
		松114	松117	水文站	杏林路口	排污口
1	6.6	75.79	74.86	74.17	73.84	73.41
2	4.5	75.50	74.57	73.88	73.74	73.12
3	5.4	75.61	74.68	73.99	73.59	73.23
4	13.1	76.30	75.37	74.68	73.72	73.92
5	10.6	76.88	75.95	75.26	72.98	74.50
6	94.2	76.90	75.97	75.28	72.63	74.52
7	124.1	76.24	75.31	74.62	74.18	73.86
8	193.2	76.50	75.57	74.88	76.84	74.12
9	81.0	75.68	74.75	74.06	77.06	73.30
10	44.5	75.51	74.58	73.89	75.14	73.13
11	16.0	75.33	74.40	73.71	74.33	72.95
12	6.2	75.85	74.92	74.23	74.49	73.47

注:河道比降为 0.731×10^{-4} 。

人工开采量取用 2003 年研究区内的实际开采量(未计算企事业单位自备井中深水井的开采量)。运行模型统计研究区内松花江水对地下水的侧渗补给量(表 2)。

地下水开采激发了河流的侧渗补给。一旦江水受到污染,考虑停止地下水开采情况下河流对地下水的侧渗补给程度。因此,调整所建立的地下水模拟模型,关闭研究区内所有地下水开采井,运行模型,重新得到一组河流侧渗补给量(表 2)。

表 2 现状年的江水侧渗补给 万 m³/d

月份	侧渗量			百分比/%	月份	侧渗量			百分比/%
	运行	关闭	差值			运行	关闭	差值	
1	14.51	13.83	0.68	4.7	7	59.47	45.08	14.39	24.2
2	10.11	7.89	2.22	21.9	8	132.56	119.34	13.22	10.0
3	8.20	4.80	3.40	41.5	9	34.43	21.63	12.80	37.2
4	9.24	5.26	3.98	43.1	10	9.46	1.32	8.14	86.1
5	4.53	1.05	3.48	76.8	11	6.62	0.83	5.79	87.5
6	10.19	1.04	9.15	89.8	12	5.34	1.33	4.01	75.1

注:百分比为表中差值与运行值的比值,表 4 同。

3.2 设计典型年计算

在上述现状年模型的基础上,改变降雨量、灌溉定额、松花江水位以及其支流(音达木河、英格吐河)水位,其余边界条件和源汇项仍保持不变。运行模型,在开采井运行和关闭两种情况下分别计算江水对地下水的侧渗补给量,与现状年的结果进行对比分析。以 50 年一遇降水和江水为例,降水和江水位如表 3 所示,计算结果如表 4 所示。

表 3 50 年一遇降水量及江水位

月份	降水量/ mm	断面平均水位/m				
		松 114	松 117	水文站	杏林路口	排污口
1	4.50	78.96	78.01	77.32	75.64	74.86
2	0.50	78.85	77.90	77.21	75.53	74.75
3	23.70	78.94	77.99	77.30	75.62	74.84
4	16.30	78.99	78.04	77.35	75.67	74.89
5	72.50	78.57	77.64	76.95	75.28	74.50
6	113.10	79.23	78.30	77.61	75.93	75.15
7	189.30	81.37	80.44	79.75	78.03	77.24
8	227.70	81.31	82.92	82.23	80.46	79.66
9	153.70	83.79	83.23	82.54	80.77	79.97
10	46.00	84.10	80.90	80.21	78.48	77.69
11	8.00	81.77	79.91	79.22	77.50	76.72
12	12.50	81.26	80.33	79.64	77.92	77.14

注:河道比降为 0.731×10^{-4} 。

表 4 设计典型年的江水侧渗补给 万 m³/d

月份	侧渗量			百分比/%	月份	侧渗量			百分比/%
	运行	关闭	差值			运行	关闭	差值	
1	30.82	23.47	7.35	23.8	7	124.44	103.69	20.75	16.7
2	20.26	11.89	8.37	41.3	8	163.00	146.46	16.54	10.1
3	19.54	10.48	9.06	46.4	9	95.63	81.12	14.51	15.2
4	18.54	9.12	9.42	50.8	10	16.05	6.59	9.46	58.9
5	11.08	2.27	8.81	79.5	11	11.27	3.42	7.85	69.7
6	49.99	25.61	24.38	48.8	12	24.00	12.71	11.29	47.0

3.3 结果与分析

a. 现状年江水对地下水的日平均侧渗补给量在 7~8 月达到最大,此时并不是江水位最高时期,但是由现状年的地下水等水位图可以看出,此时研究区内东、西 2 个水位漏斗延伸范围最大,水力坡度变大,导致侧渗量也增大。

b. 现状年在开采井运行的条件下,江水对地下水的侧渗补给量为 9344.77 万 m³,在开采井关闭的条件下,江水对地下水的侧渗补给量为 6873.35 万 m³。设计典型年内,其上数据分别为 1.79 亿 m³, 1.34 亿 m³。通过关闭开采井,年内可减少侧渗补给量分别为 2471.42 万 m³ 和 0.45 亿 m³,分别占各自江水侧渗总补给量的 26.45% 和 25.14%。因此,从年内总量上来说,通过关闭开采井的方式能够抑制近 1/4 的江水侧渗补给。

c. 在 7~9 月汛期时,江水位上涨,与地下水水头差增大,关闭地下水开采井,减少的侧渗补给量所占百分比在现状年为 10.0%~37.2%,在设计典型年为 10.1%~16.7%,而在其他月份最高可达 79.5%~89.8%。因此,通过关闭开采井的方式,在丰水期抑制江水的侧渗补给效果不是很明显,而在其他季节则效果明显。

d. 在数值模拟时,是以一年时间且以年初的初始水位为基准来进行计算的。关闭开采井初期,由于长期形成的开采漏斗不可能迅速恢复,水头差仍然存在,江水的侧渗补给量并没有明显下降。在现状年第 1 个月的侧渗量仅减少 4.7%,在设计典型年的第 1 个月减少 23.8%。实际中为了维持正常的生产和生活,在没有长期应急水源地的情况下,研究区内所有的开采井是不可能长期关闭的。因此,短期的关闭并不能够明显减少江水的侧渗补给量。

e. 模拟计算过程中也存在众多不确定的因素,对于补给计算精度存在影响。例如,数据的不确定性:由于资料详细程度所限,模型采用数据(如降水、江水位等)均是月平均水位,实际上各月每日内的数据都不是完全相等的,地下水开采状况的不确定性:研究区存在 3 种供水系统,地下水开采并没有统一的管理,开采时间和开采量并不相同,尤其是沿江地下水开采井运行状况对江水侧渗补给影响较大。

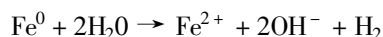
4 结论

通过对佳木斯市区段江水对地下水补给程度的分析可知,为了避免松花江遭受污染时对地下水水质产生影响,应做到未雨绸缪。一方面(下转第 87 页)

零价铁的氧化反应和硝基苯的还原反应。这是由于酸性条件下,Fe-C原电池电位差增加,促进了电极反应的进行,生成的氢离子是零价铁还原硝基苯转化成苯胺过程的反应物,故酸能促进反应的进行,而在碱性条件下,随pH值升高,零价铁腐蚀反应生成的铁离子转化为氢氧化铁沉淀,附着在零价铁表面,减少了零价铁的有效反应面积,阻碍了电子的传递作用,抑制了还原反应的进行,结果导致了硝基苯的还原率降低^[4]。因此,实验一般将pH值控制在偏酸性条件下,pH值=6.0~7.5为最佳。

3.2 Eh值

由于Fe⁰具有很强的还原性,所以反应器内的低氧化还原电位在缺氧条件下会引起厌氧腐蚀,即水被分解生成OH⁻和H⁺,Fe⁰被氧化生成Fe²⁺。反应方程如下:



氧化还原反应中产生的H₂是非湿润相,占据了反应器中相当一部分孔隙,使零价铁的渗透性降低,加快了腐蚀速度。另外,pH值不断升高,容易形成碳酸盐或氢氧化物沉淀覆盖在零价铁表面,降低了其活性,同时也减小了反应器的渗透性^[5]。

图3表明,在室温条件下,控制溶液的pH值在6.0~7.5,实验用水的Eh值为-300~-360mV,进入反应器后,出水口的监测值降低到-170mV,说明化学反应器对还原性物质已有不同程度的去除作用。整个实验中Eh值的变化在-172~-266mV之间,还原条件很稳定,适合实验条件的要求。

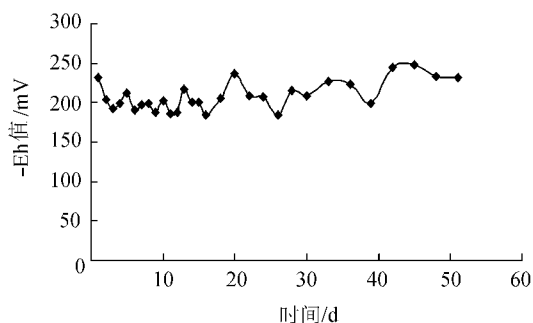


图3 Eh值随时间变化曲线

4 结论

实验分别对pH值、Eh值因素对零价铁法处理硝基苯废水的影响进行了研究,结果表明,零价铁对难生物降解的硝基苯类有机物的去除效果较好,适应性强。在室温和酸性条件下,选择粒径为0.1~2mm的铁屑,控制铁炭比为由5:1,控制反应体系的pH值为6.0~7.5,Eh值在-172~-266mV之间,可使硝基苯的还原率达到97.4%。

参考文献:

- [1] 胡黎明. 地下水污染修复的活性渗滤墙技术[J]. 水利水电技术, 2003, 7(34): 11-13.
- [2] 胡丽娟, 董晓丹, 周琪. 零价铁修复土壤及地下水的PRB技术[J]. 环境保护科学, 2005, 8(31): 48-50.
- [3] 吴双桃, 陈少瑾, 胡劲召, 等. 零价铁对土壤中硝基苯类化合物的还原作用[J]. 中国环境科学, 2005, 25(2): 188-191.
- [4] POLAT K, AKSU M L, PEKEL A T. Electroreduction of nitrobenzene to p-aminophenol using voltammetric and semipilot scale preparative electrolysis techniques[J]. J Appl Electrochem, 2002, 32: 217-223.
- [5] 董军, 赵勇胜, 赵晓波, 等. PRB技术处理污染地下水的因素分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(2): 226-230.

(收稿日期: 2006-12-09 编辑: 傅伟群)

(上接第29页)

最大限度开发利用地表过境水量,在水质符合所需要求时,尽量直接从河道中引水和提水,减少地下水的开采;另一方面,优化沿江地区地下水开采井的布局,将江水水位与地下水水位的水头差控制在一定范围内,使得关闭开采井后地下水位能在较短时间内升高,从而在特殊时期保护地下水水质。

本文的计算在某种程度上能够为松花江水污染事件中污染物质在地下水动力学方面的研究提供基础。此外,还要进一步开展污染物质运移变化的研究以及污染河道对沿岸地下水环境影响的研究,保证沿江城市工农业生产和人民生活的水源安全^[5]。

参考文献:

- [1] 王凯军, 曹剑锋, 徐蕾, 等. 地下水资源管理预警系统的建立及应用研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 238-243.
- [2] 水利部松辽水利委员会. 松花江志[M]. 长春: 吉林人民出版社, 2004: 455-457.
- [3] 房佩贤, 卫中鼎, 廖资生. 专门水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 104-112.
- [4] 郭卫星, 卢国平. MODFLOW 模块化三维有限差分地下水流动模型[R]. 美国地质调查局, 1999.
- [5] 王超, 李勇, 包振琪. 污染河道对沿岸地下水环境影响规律研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 535-541.

(收稿日期: 2006-01-21 编辑: 傅伟群)