

# 石家庄市地下水系统的数值模拟与预测

王 宏<sup>1</sup>, 娄华君<sup>2</sup>, 田廷山<sup>3</sup>, 陈 浩<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 中国地质科学院水文地质与环境地质研究所, 石家庄 050061)

**摘要:** 本文应用 GMS 软件, 建立石家庄市地下水流模型。应用该模型, 预测黄壁庄水库的渗漏补给减少后, 石家庄市地下水系统的变化情况, 根据模拟结果得出, 随着黄壁庄水库侧向渗漏量的减少, 石家庄市地下水位不断下降, 地下水降落漏斗面积不断扩大。因此提出从水库直接取水灌溉、加大污水回用力度、尽快实施南水北调等措施, 以保证石家庄市地下水资源可持续发展, 对于指导合理利用地下水、缓解地下水位下降具有现实意义。

**关键词:** GMS; 侧向渗漏; 地下水系统; 模拟与预测; 可持续发展

**中图分类号:** P641.8

**文献标识码:** A

**Abstract:** The GMS software is applied to set up the groundwater model of Shijiazhuang city. After applying the model, the variable condition of the groundwater system is predicted. According to the simulated result, it is known that the groundwater level decreases and the funnel's area increases with the decrease of lateral leakage from Huangbizhuang reservoir. Therefore, it is suggested that we should utilize water from reservoir to irrigate, increase the extent to recycle the seepage and carry out the project of supplying water from south to north, in order to guarantee the water resource's sustaining utilization of Shijiazhuang city. Such suggestions are useful to guide the groundwater utilization reasonably and alleviate the decrease the groundwater level.

**Key words:** GMS; lateral leakage; groundwater system; simulation and prediction; sustaining development

## 引言

石家庄市位于河北省中南部, 市内有滹沱河、绵河、冶河、人工渠、石津渠、黄壁庄和岗南水库等水域。其中滹沱河自西北向东南斜贯本区, 因上游黄壁庄和岗南水库拦水而使之常年断流。黄壁庄水库是市域内的大型水库之一, 位于石家庄地区西北部鹿泉县境内, 总库容量为  $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 与上游的岗南水库串连, 共同担负着石家庄市的防洪、灌溉和城市供水等任务<sup>[1]</sup>。从 60 年代开始, 市域内便开始大规模的开采地下水, 而其西部山区的侧向补给和黄壁庄水库的侧向渗漏是该区的主要补给源。随着黄壁庄水库副坝加固防渗工程的实施, 使得水库的侧向渗漏量减少, 从而对下游地区的地下水系统势必会产生一定的影响。本文应用 GMS 软件, 建立石家庄地下水流模型, 预测黄壁庄水库侧向渗漏减少后, 石家庄市地下水系统的变化。

## 1 研究区的自然地理及水文地质条件

研究区包括全部石家庄市 (含近郊区)、鹿泉市、栾城县、元氏县、赵县、藁城市和正定的部分

地区, 总面积为  $1700 \text{ km}^2$  (图 1)。

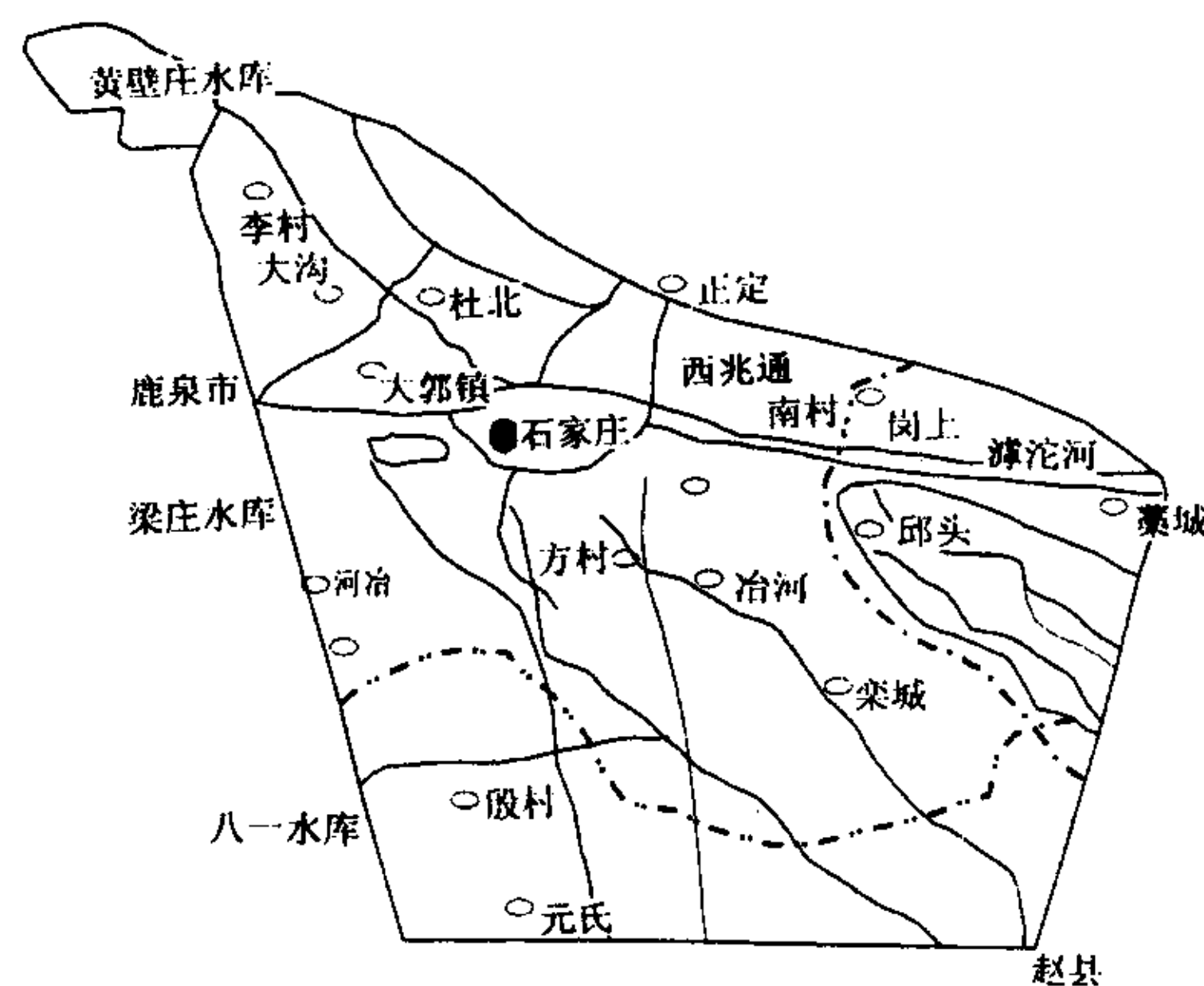


图 1 研究区范围

其中黄壁庄水库下游为滹沱河冲洪积平原, 滹沱河自西北向东南贯穿本区域。区内地下水主要赋存于第四系松散岩层孔隙中。由于区内含水层厚度由山前向平原区由小变大, 地下水流速亦由西向

收稿日期: 2005-11-03; 修订日期: 2006-02-06

作者简介: 王宏 (1973-), 女 (汉族), 辽宁朝阳人, 在读博士生。



东逐渐变缓,地下水补给条件逐渐变差。天然状态下,地下水水力坡度的变化规律与地形变化规律基本一致。但近30年来,由于地下水的连年超采,使得石家庄市形成了地下水降落漏斗,并不断扩展,地下水出现了反向补给。故区内现补给源为大气降水、黄壁庄水库的侧向渗漏补给和西部山区的侧向补给等,排泄方式主要是人工开采<sup>[2]</sup>。

## 2 研究区水文地质概念模型

### 2.1 地下水系统分析

本区地下水系统属于一个完整的潜水地下水系统,其主要补给源有:一是来自于西部山前的侧向补给和黄壁庄水库的渗漏补给;二是包括降雨入渗、河流入渗、灌溉回归入渗的垂向补给。地下水的排泄以人工开采为主,由于区内地下水埋深较

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) + \epsilon = S \frac{\partial h}{\partial t} & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ K_x \left(\frac{\partial h^2}{\partial x}\right) + K_y \left(\frac{\partial h^2}{\partial y}\right) + K_z \left(\frac{\partial h^2}{\partial z}\right) - \frac{\partial h}{\partial z}(K_z + p) + p = \mu \frac{\partial h}{\partial t} & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ h(x, y, z) |_{t=0} = h_0(x, y, z) & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t) & x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K_n \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases}$$

式中:  $\Omega$ ——潜水含水层的渗流区域;  $h$ ——含水层的水位标高 (m);  $K_x, K_y, K_z$  为  $x, y, z$  方向上的渗透系数 (m/d);  $S$ ——含水层的储水系数 (1/m);  $h_0(x, y, z)$ ——潜水含水层的初始水位分布 (m);  $h_1$ ——潜水含水层的水位边界值 (m);  $\Gamma_1$ ——潜水含水层水位边界;  $\Gamma_2$ ——潜水含水层流量边界;  $K_n$ ——边界面法向方向的渗透系数 (m/d);  $q(x, y, z, t)$ ——为含水层二类边界单位面积流量,流入为正,流出为负 ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ );  $\epsilon$ ——潜水含水层的垂向补排强度 ( $\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$ )<sup>[3]</sup>。  $P$ ——为潜水面的蒸发及降雨补给等 (1/d)。

### 3.1 地下水流模型的求解

本文采用规则网格有限差分法求解。具体应用的 GMS (地下水模型系统) 软件,是以 MODFLOW (模块化三维有限差分地下水流动模型) 等模块为核心的地下水模型系统,应用逐次超松弛叠代法 (SOR),对上述数学模型进行求解<sup>[4]</sup>。

求解过程中,首先根据研究区水文地质条件、结合以往做过的二维稳定流模型给定的参数值,给出各区的参数初值。然后,按照区内多年统测的平均地下水位数据,利用内插和外推法获得潜水含水层的初始水位,做出初始流场。最后经模型计算得

大,潜水蒸发量微乎其微,故忽略不计。故将本区概化为非均质、各向异性 ( $K_x = K_y \neq K_z$ )、三维非稳定地下水流系统<sup>[3]</sup>。

### 2.2 边界条件的处理

研究区北部以滹沱河为界,边界走向近似与地下水位等值线垂直,有水通过时处理为补给边界,无水通过时处理为零流量边界。南部边界无水通过处理为零流量边界。东部边界近似与地下水位等值线平行,处理为定水头边界。西边界属于山区与平原的过渡带,处理为定流量边界。含水层顶部为潜水面条件。

## 3 地下水流数值模拟模型

根据上述的水文地质概念模型,用于模拟该区地下水流的数学模型如下:

到研究区内水均衡量 (表 1)。

研究区 1996 年地下水资源量计算均衡表 (单位:  $10^8 \text{m}^3$ )  
表 1

补排项		补给量	占补给量的百分率
补给量	降雨入渗量	4.587	33.47%
	侧向补给量	2.1	15.323%
	地表水入渗	5.777	42.15%
	农田灌溉回归	0.848	6.18%
	污水入渗补给	0.393	2.86%
	合计	13.705	
排泄量	人工开采量	9.5978	90.52%
	侧向流出量	1.004	9.48%
	合计	10.6018	

由上表看出,研究区内 1996 年地下水总补给量是  $13.705 \times 10^8 \text{m}^3$ ,总排泄量是  $10.6018 \times 10^8 \text{m}^3$ 。模拟期内总补给量大于排泄量  $3.1032 \times 10^8 \text{m}^3$ 。据分析,导致补给量大于排泄量,主要是由于 1996 年大水造成地表水的渗入量增加的缘故。

### 3.2 模型校正、识别

本次建模应用统测的全区 19 个观测孔 1996 年 1 月~12 月的实际观测水位,对模型进行了调参、校核、验证。通过拟合同时期的地下水位,识别水文地质参数、边界值和其它均衡项,使建立的模型



更加符合研究区的水文地质条件。计算所得潜水含水层的流场与实际流场基本一致，地下水微动态变化趋势趋于一致。所建立的模拟模型基本达到模型的精度要求，符合研究区的水文地质条件，可以用来对该区地下水系统进行预测分析（图2、3）。

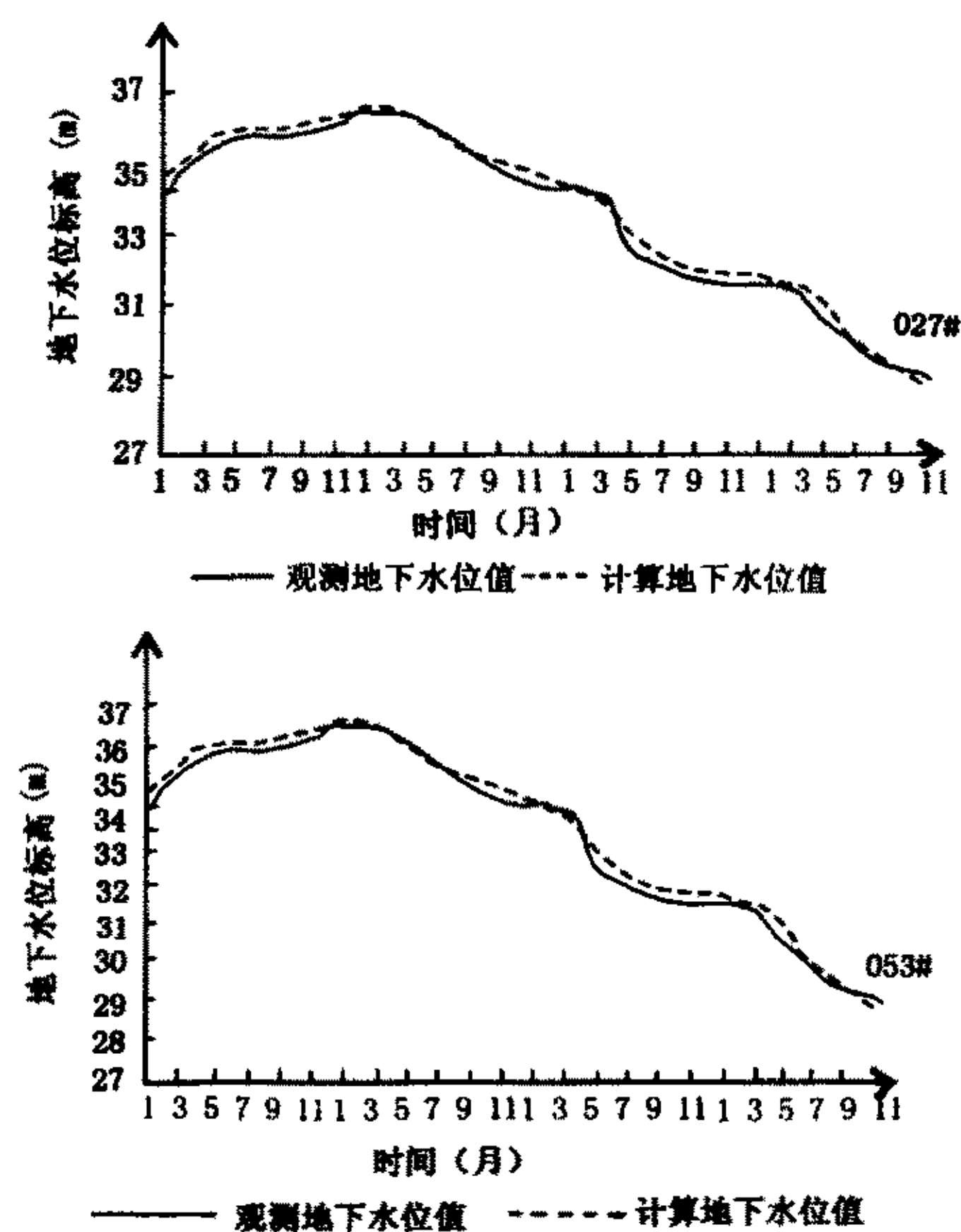


图2 模拟期观测孔拟合曲线

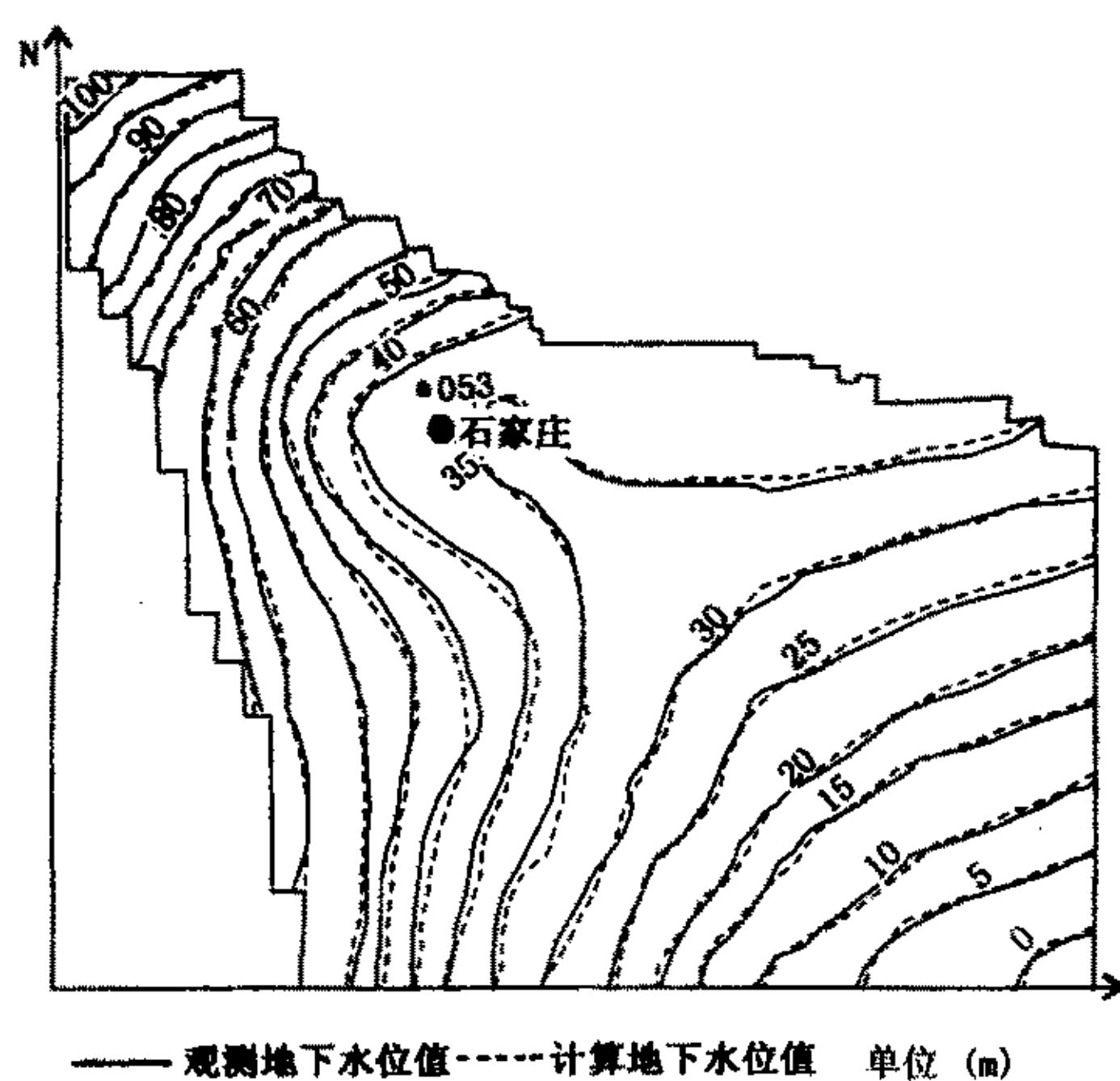


图3 1996年12月31日地下水流场拟合

#### 4 模型预测分析市区地下水资源的可持续发展

##### 4.1 地下水预测模型

在数学模型识别的基础上，给出预测模型的初始条件，边界条件及其源汇项后，即可以进行地下水位预测。分别预测2000~2005年及2000~2010年，黄壁庄水库侧渗量减少后，石家庄市地下水系统的响应情况。

采取两种方案对研究区水资源量进行预算：

方案Ⅰ：在水平年2000年的基础上，考虑一定节水措施，分别对2005、2010年的水资源量进行预算。

方案Ⅱ：在水平年2000年的基础上，考虑采取强制节水和污水回用措施，分别对2005、2010年的水资源量进行预算。

根据预算水量，利用等比内插的方法计算出从现状2000~2005年、2010年的需水量变化，从而对模型中的垂直补给量进行调整。

侧向补给量分别按黄壁庄水库侧渗量不变、减少 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的情况进行。

其它条件保持和模拟模型条件相同，从而做模型的预测分析。

##### 4.2 两种预测方案的计算结果对比分析

###### 4.2.1 区内观测井地下水位变化

应用以上两种方案预算的数据计算，选择位于石家庄市区的常观孔053#孔对研究区域的地下水位进行分析（图4、5）。

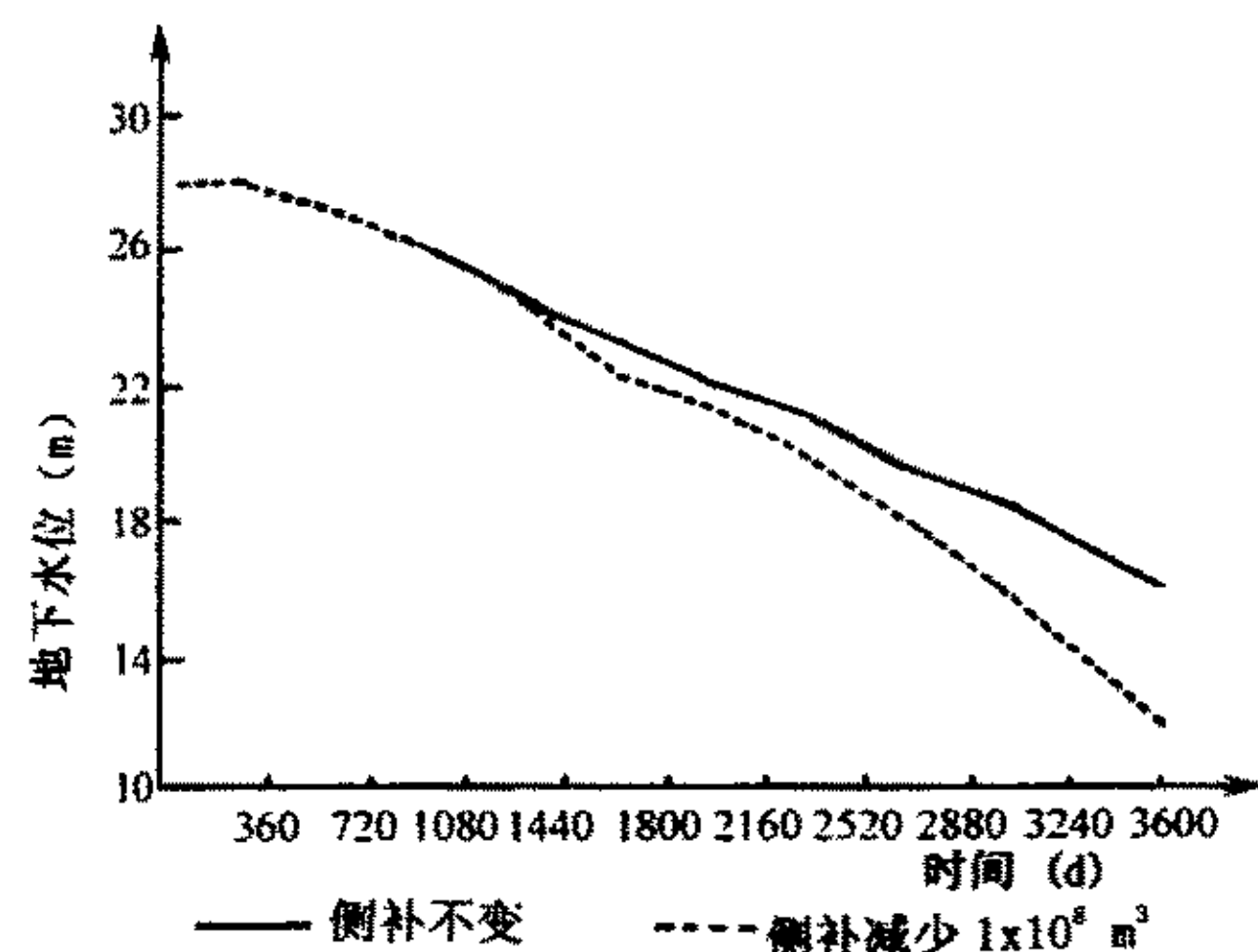


图4 053#观测井地下水位预测值（方案Ⅰ）

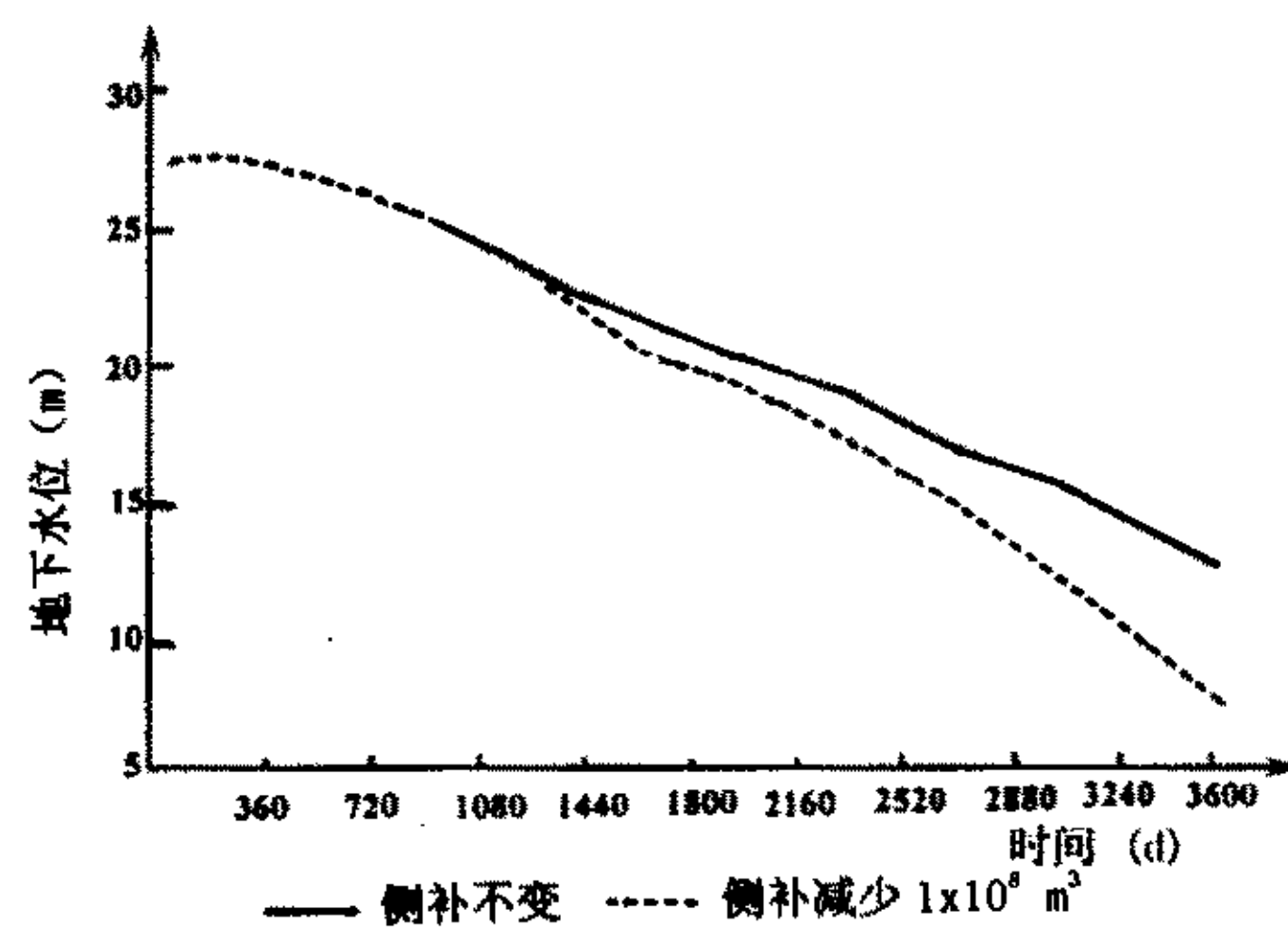


图5 053#观测井地下水位预测值（方案Ⅱ）

由图4可看出，黄壁庄水库的侧向补给量对053#孔地下水的影响比较明显。以2010年12月31日的地下水位为例，在黄壁庄水库侧向补给量不变时，053#孔的地下水位从2001年1月到2010年的12月下降了14.94m。在黄壁庄水库侧向补给量减少 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时，观测井地下水位从2001年12月31日到2010年的12月下降了19.03m，地下水位变



幅是 4.09m。

由图 5 看出, 在黄壁庄水库侧向补给量不变时, 053 # 孔的地下水位从 2001 年 1 月到 2010 年的 12 月下降了 11.34m。在黄壁庄水库侧向补给量减少  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  时, 053 # 观测井地下水位从 2001 年 12 月 31 日到 2010 年的 12 月下降了 15.2m, 地下水位变幅是 3.86m。由此可知, 随着黄壁庄水库侧向补给量的减少, 地下水位在持续下降。方案 II 由于采取了污水回用措施, 从而减少了地下水开采量, 因此图上反映方案 II 预测的地下水位下降幅度比方案 I 预测的水位下降幅度有减弱的趋势<sup>[5~7]</sup>。

#### 4.2.2 石家庄市地下水降落漏斗变化

通过模型的预测分析可知, 当黄壁庄水库侧向补给量减少后, 石家庄市地下水降落漏斗中心水位开始下降, 漏斗面积也逐渐扩大, 在向市区北部迅速扩展的同时, 也向东南方向有所扩展。同时图中还可看出, 由于根据方案 II 输入模型中的开采量小于方案 I 的值, 因此方案 II 模拟的地下水降落漏斗的发展要比方案 I 模拟的结果要缓慢, 地下水位降落漏斗中心水位和漏斗面积对比第一次模拟时都有了很大的改善。同时漏斗区下游地下水分水岭也更靠近漏斗中心, 表明漏斗规模在缩小, 袭夺下游的地下水量也在减少 (图 6、7、8、9)。

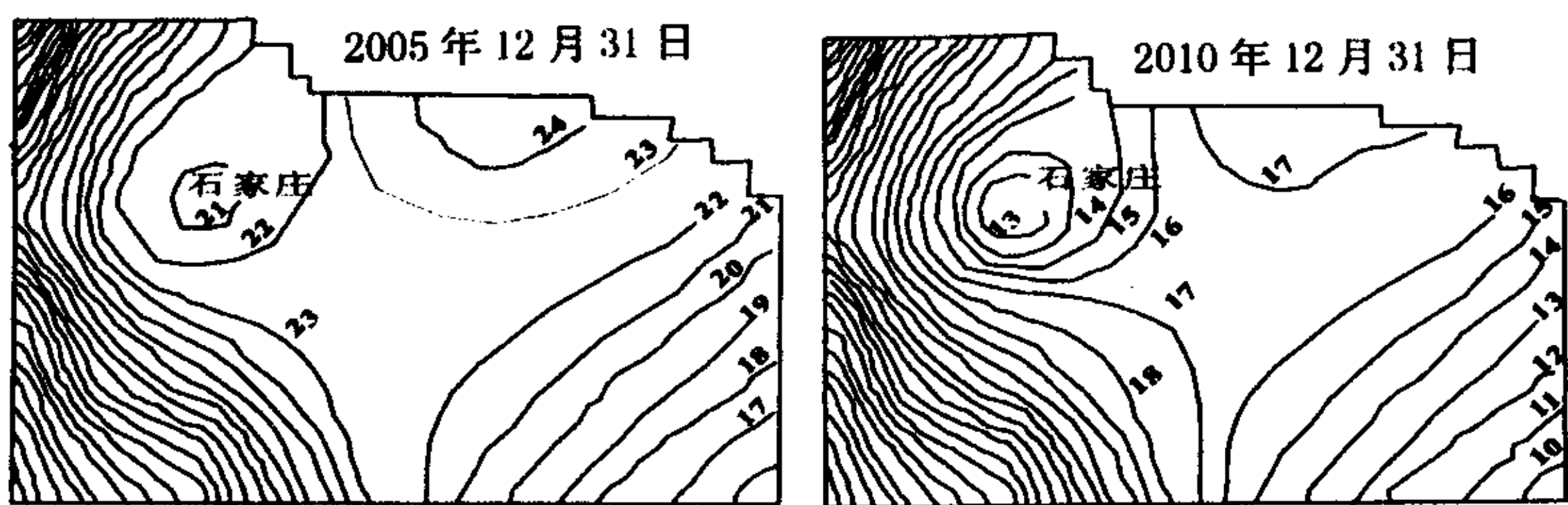


图 6 侧补不变时地下水流场 单位 (m) (方案 I)

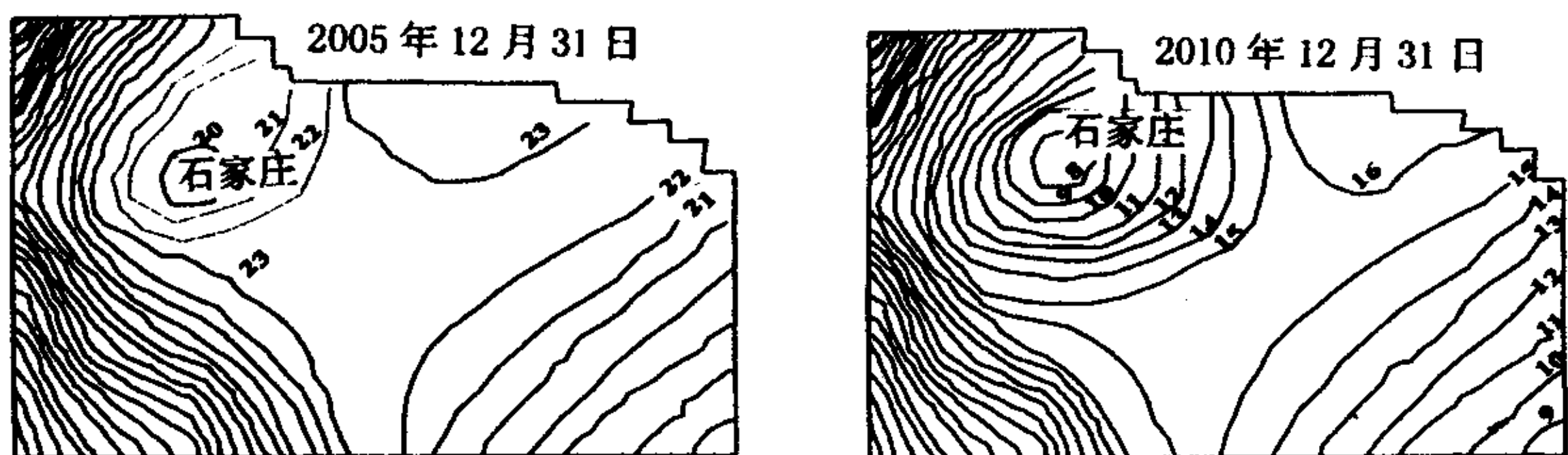


图 7 侧补减少  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  时地下水流场 单位 (m) (方案 I)

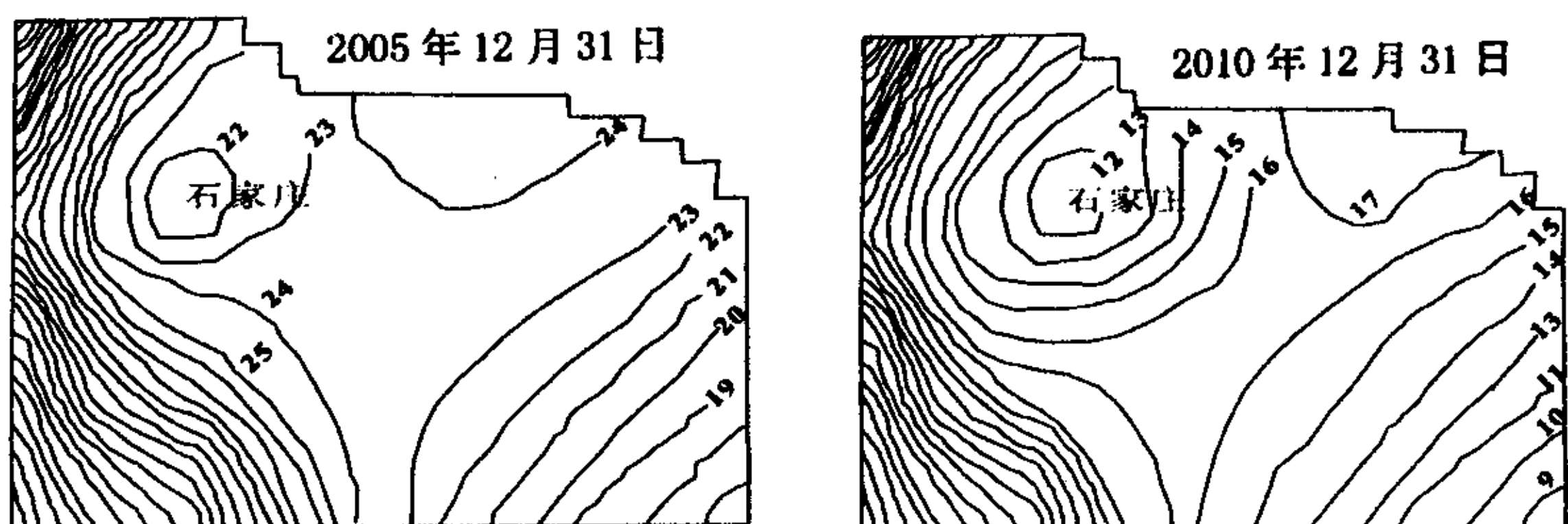


图 8 侧补不变时地下水流场 单位 (m) (方案 II)

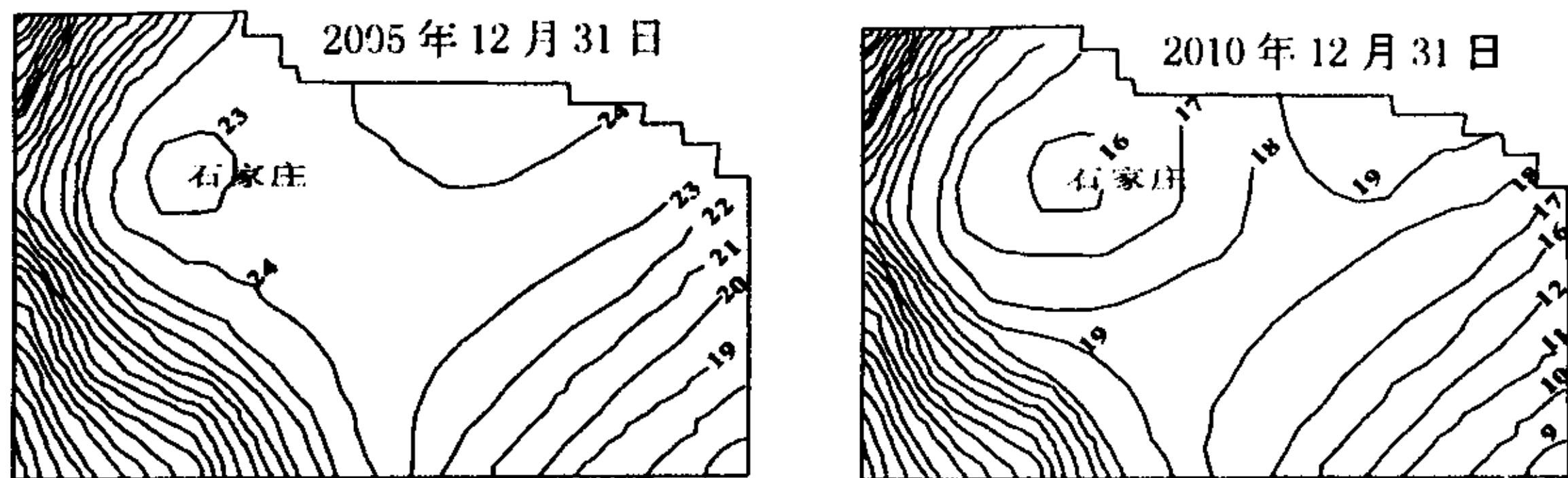


图 9 侧补减少  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$  时地下水流场 单位 (m) (方案 II)

另外, 在水库渗漏量相同, 分别采取两种方案进行计算的情况下, 方案 II 的模拟结果不但地下水



位降落漏斗的变化趋势比方案 I 模拟结果平缓,而且地下水位标高也明显高于方案 I 的模拟结果。在此以石家庄市地下水位降落漏斗中心水位(12月份)为例进行对比分析,两次模拟的结果见表 2。

石家庄市地下水位降落漏斗中心水位(12月份)  
方案 I 与方案 II 模拟结果对比(单位: m) 表 2

	方案 I			方案 II			结果对比	
	2000	2005	2010	2000	2005	2010	2005	2010
侧补不变	26.91	20.94	12.52	26.91	23.19	16.21	2.25	3.69
侧补减少 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$	26.91	20	8.43	26.91	22.27	12.35	2.27	3.92

从上表看出,在侧向补给量一致的前提下,2005 年时,方案 II 模拟的地下水位比方案 I 模拟的水位要高 2.27m,到 2010 年时则为 3.92m 由此可知,随着开采量的减少,石家庄市地下水位降落漏斗的中心水位具有很大的回升潜力。但并不说明市区内水资源是可持续发展的。即使在采取方案 II 进行计算分析的情况下,市区内的地下水位仍在继续下降,地下水降落漏斗仍在进一步发展,因此必须采取更加强有力的措施,以确保石家庄市水资源的可持续利用,从而为社会经济的可持续发展提供更加有力的支撑条件。

5 结论和建议

由以上分析得出,黄壁庄水库的渗漏补给对石家庄市地下水系统的影响十分明显。随着黄壁庄水库侧渗量的减少,石家庄市地下水位降落漏斗水位逐年下降,漏斗面积不断扩展。结合本区的水文地质

状况,以地下水资源可持续发展为目标,提出如下建议:

- (1) 由于区内滹沱河冲洪积扇含水层颗粒较粗,垂向渗透系数较大,同时本区已形成的降落漏斗也是很好的地下库容,建议应充分利用这一地质条件,实施从水库直接取水灌溉,这样既能满足农业的需要,又实现了水资源对地下含水层的渗漏补给,一举两得。
- (2) 在没有外来调水的情况下,全面提高用水效率,加大污水回用力度,对缓解区内水资源的短缺,改善水环境具有不可替代的作用。
- (3) 由于近年来黄壁庄水库上游地区降雨量偏少和水资源利用程度提高,下游的来水量呈下降趋势,因此应尽快实施南水北调,从而减少地下水的开采量也是解决石家庄市水资源短缺的主要措施。

参 考 文 献

[1] 费宇红. 黄壁庄水库坝基截渗对下游可持续发展的影响及对策 [J]. 勘察科学技术, 1999, (6): 13 ~ 15.

[2] 王宏, 姜华君等. MODFLOW 在华北平原地下水库模拟中的应用 [J]. 世界地质, 2003, (1): 69 ~ 72.

[3] McDonald, M. G. & A. W. Harbaugh, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U. S. Geological Survey, 1984.

[4] 王宏. 子牙河流域地下水系统的仿真模拟—以滏阳河水系为例 [D]. 2003, 吉林大学硕士论文, 13 ~ 38.

[5] 贾金生. 地下水系统演化模拟与可持续利用的研究—以石家庄市、栾城县为例 [D]. 2002, 中国科学院博士论文, 58 ~ 105.

[6] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及对不同开采量响应的计算—以河北省栾城县为例 [J]. 地理学报, 2002, (3): 202 ~ 209.

[7] 河北省平原区水资源评价模型研究报告 [R]. 石家庄, 河北省水文水资源勘测院资料室. 2003, 26 ~ 38.

(上接第 33 页)

施工引入了水下注浆技术,与普通大口井相比有其独特之处,其特点归纳如下:

- (1) 克服了井壁进水的无砂混凝土不完整井易于堵塞的严重缺陷。
- (2) 与井底进水的混凝土井壁大口径不完整井相比,辐射管的作用,增大了含水层与井的接触面积,扩大了井的影响范围,从而提高了大口井的出水量。
- (3) 由于是完整井,而且井壁及井底完全不进水,同时,辐射管口安置了止水的管盖装置,可以将进水口轻易封住,易于排干井内的水,从而使沉砂及井壁清扫变得非常容易,可以做到象清扫蓄水池一样去清扫大口井。
- (4) 克服了不完整井底部涌水及设置反滤层的麻烦。因为反滤层做法不易操作,易被井内沉砂填

埋,减小其透水性,久而久之,影响不完整井的出水量。

- (5) 由于完整辐射井的进水部位在地表以下 5.6 ~ 6.0m,对河水的过滤路径长,水质有保障,经几年的使用证实,洪水季节河水浑浊度 15 度时,井内水的浑浊度仍然 < 1。

4 结论

完整井壁辐射井兼有普通辐射井出水量大的特点,同时,易于清洗,是新型卫生的取水井。值得在乡镇及中、小城市中推广应用。

参 考 文 献

[1] 地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队. 水文地质手册 [M]. 北京:地质出版社, 1978, (630 ~ 638).