

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.04

邢台百泉泉域岩溶地下水模拟与方案调算

柴福鑫¹, 潘世兵¹, 石维新², 李琳¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 南水北调中线工程通水后会大大缓解邢台市供需水矛盾, 合理压采岩溶水和回灌补源, 可以使地下水位回升, 甚至泉水复涌。构建了邢台市百泉泉域岩溶地下水数值模型, 并通过对不同的调水方案、压采方案和回灌方案的模拟, 定量评估各种技术方案的实施效果, 论证了泉水复涌的可行性, 为科学制定百泉复涌工作的目标及措施提供科学依据。

关键词: 岩溶; 地下水; 邢台; 百泉; 回灌

中图分类号: P641.134

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0017-05

Simulation and scheme calculation of groundwater in the Baiquan karst groundwater system near Xingtai

CHAI Fuxin¹, PAN Shibing¹, SHI Weixin², LI Lin¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: The south-to-north water diversion middle route project will greatly ease the contradiction of water supply and demand in Xingtai. Reasonable reduction in exploitation and recharge of the karst groundwater can raise the groundwater levels and even lead to the re-upwelling of the Baiquan spring. In this paper, a numerical model of the karst groundwater was built for the catchment area of the Baiquan spring Near Xingtai. The model was used to quantitatively evaluate the implementation effect of various technical solutions by simulating different schemes of water transfer, including reduction in exploitation and recharge. The feasibility of re-issuing of the spring is proved, which provides a scientific basis for the scientific development objectives and measures for the Baiquan spring.

Keywords: karst; groundwater; Xingtai; Baiquan; artificial recharge

百泉是我国名泉之一, 位于河北省邢台市市区东南部。据百泉泉水流量历年监测资料, 1986 年以前长年喷涌。1979 年以前, 百泉泉水流量为 $4 \sim 7 \text{ m}^3/\text{s}$, 之后泉域地下水开采及矿山排水量持续增加, 导致泉水流量不断衰减, 特别是 1983 年以后, 泉水流量急骤衰减, 至 1986 年底干枯。百泉枯竭是邢台市水生态环境不断受到破坏的直接反映, 是地下水超采、河道补给减少等多种因素长期综合作用的结果。随着南水北调中线调水工程的通水以及邢台市调整

产业结构和建设节水型社会的实施, 邢台市水资源供需矛盾得到很大程度解决, 地下水的压采和置换会使得地下水位得到回升, 如何改善邢台市水生态环境和论证不同工程措施下泉水复涌的可行性, 成为政府和人民广泛关注的问题。本文在以往调查与研究基础上^[1-5], 利用地面调查、钻探、水文地质试验、地下水动态观测、开采量调查等资料, 建立了地下水数学模拟模型, 对百泉复涌的各种工程措施方案进行模拟和预测, 确定现实可行的泉水涌水量目

收稿日期: 2015-07-10; 修订日期: 2015-09-14

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201); 北京市科技计划课题(Z121100000312036)

第一作者: 柴福鑫(1979-), 男, 高工, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: chaifx@iwhr.com

标,评估岩溶地下水系统人工补给和岩溶地下水压采等措施的效果,提出包括压采、补源回灌、最严格管理、基础工作等方面的对策建议,为百泉复涌工作的顺利实施提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省太行山南段、邢台市西部,行政区包括邢台市的市区、沙河市、邢台县和邯郸市的武安和永年县部分地区,研究区示意图见图 1,泉域总面积 3 843 km²。多年平均气温 12.4 ~ 13.8℃,多年平均水面蒸发量 1 808 mm,多年平均降水量 550.3 mm,近 40 年降水量减少了 6%,年内降水量分配不均,多集中于 6—9 月份,占全年总降水量的 65% ~ 75%。区内水系发育,多具山区河流的特征,主要有沙河、七里河等,河水主要靠大气降水补给。20 世纪 80 年代以后,河流上游修建水库拦蓄地表水后,河流下游在大部分年份干涸,仅在个别丰水年份或水库放水时有水流通过。泉域内原主要岩溶大泉有百泉泉群和达活泉泉群,达活泉泉群自 1981 年干枯至今尚未复流,百泉泉群于 1982 年 6—8 月份出现了有记载以来的第一次断流,后时断时流至今,目前已干涸,虽然近几年(1996 年、2006 年)偶有溢出,但溢出时间短,流量小。

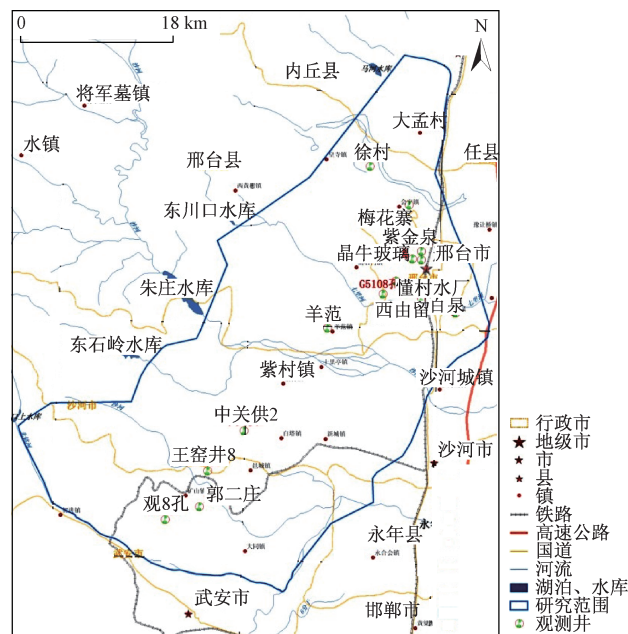


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

泉域主要位于河北省太行山南段的东麓低山丘陵陵区,海拔标高一般在 40 ~ 1 200 m,在河流及河谷洪

水作用下,沿山前地带形成有大小不一的冲洪积扇。区内地层自老至新有:太古界、元古界、古生界、中生界和新生界地层,水文地质剖面图见图 2。泉域划分出松散岩类孔隙含水岩系、碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩系和基岩裂隙含水岩系等三大含水岩系。泉域内岩溶水按埋藏条件划分为裸露型、覆盖型和埋藏型。区内主要岩溶形态有:溶孔、溶隙和溶洞等,其发育程度与分布受岩性、构造、地貌及水文与水动力条件控制,岩性和构造是关键因素。由内丘—邢台弧形大断裂和邢台—峰峰断层构成东部阻水边界;南部边界西段为北洺河地下水分水岭(西南为邯郸的峰峰黑龙洞泉泉域),东段为煤系地层和火成岩体构成阻水边界;西部以太行山地表分水岭为界;北界为内丘西北岭一带的地下分水岭(与邢台临城石鼓泉泉域毗邻)。以上边界构成基本独立、封闭的以岩溶水为主的水文地质单元。

2 地下水数值模型

考虑到岩溶水和上覆第四系孔隙水有水力联系,本次模拟建立双层的地下水模型,奥陶系岩溶水为主要模拟含水层,寒武系作为弱含水层。根据岩溶发育特点,奥陶系岩溶水模拟下界深度在 500 ~ 600 m。含水层为非均质各向异性,水流概化为非稳定达西流。

2.1 数学模型

地下水的三维水流运动描述为如下偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - Q$$

式中: K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} ——沿主轴方向渗透系数/(m · s⁻¹);

h ——侧压水头/m;

Q ——单位体积流量/(m³ · (s · m³)⁻¹);

S_s ——单位储水系数/m⁻¹;

t ——时间/s。

2.2 模型构建

利用 GWMS 软件,采用有限单元法求解模型。通过对研究区进行三角形网格剖分得到空间离散单元,本研究区模拟范围 1 639 km²,综合考虑计算效率与可行数值解,平均网格大小取 0.25 km²,对于水源地集中开采区可以进行局部加密,以较高的精度模拟开采后地下水流场的变化趋势,共剖分 7 131 个三角形单元,见图 3。

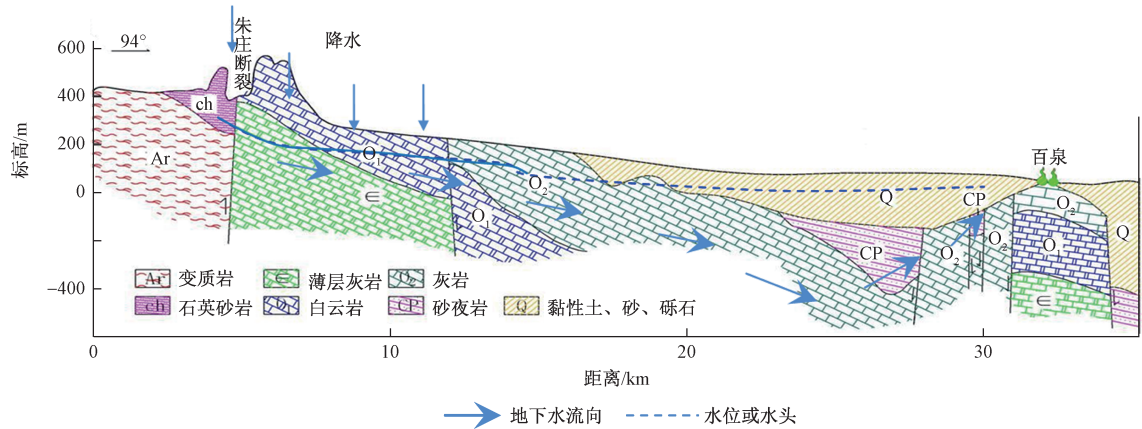


图 2 泉域水文地质剖面图(天然条件)

Fig. 2 Hydrogeological profile of the catchment area of the Baiquan spring

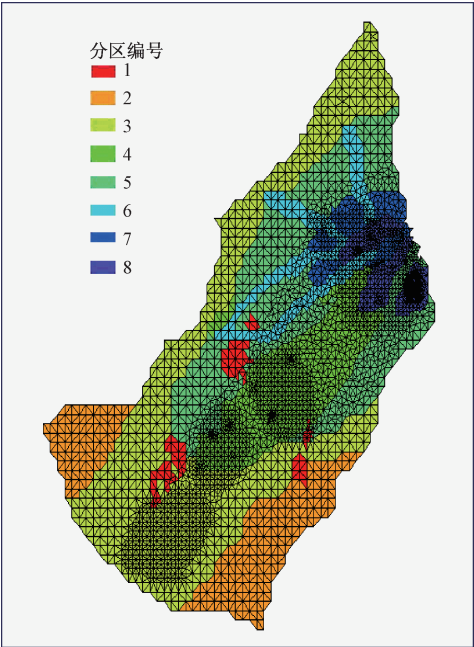


图 3 泉域模型剖分和水文地质参数分区图

Fig. 3 Mesh and hydrogeological parameter zones of the spring area model

2.3 流场模拟与参数调算

采用 1974—2006 年数据进行模型参数和边界条件识别;采用 2007—2011 年统测数据进行模型验证。运用 1974—2011 年降水系列和开采量统计数据模拟泉流量的变化,从溢流到逐渐干涸,以及 1996 年、2000 年和 2006 年的三次复流溢出,主要观测井地下水水位拟合见图 4。

模型识别得到岩溶含水层导水系数在 310 ~ 27 800m²/d 之间。岩溶含水层给水度 0.0021 ~ 0.011;隐伏区弹性释水系数 1.7 × 10⁻⁵ ~ 2.76 × 10⁻⁴(表 1)。

表 1 岩溶含水层水文地质参数分区一览表

分区编号	1	2	3	4	5	6	7	8
导水系数 T/ (m ² · d ⁻¹)	0	310	1350	3560	6028	15200	21670	27800
给水度 μ	0	0.0021	0.0023	0.0036	0.0052	0.0065	0.009	0.011
弹性释水系数 S/(× 10 ⁻⁴)	0	0.17	0.47	0.83	1.02	1.2	2.01	2.76

注:模型根据潜水或承压自动判断(水位是否高于隔水顶板)弹性释水系数或给水度取值;1 区为岩浆岩分布区,即基岩出露区。

3 不同规划方案模拟

3.1 措施分析

随着南水北调中线工程的通水以及引朱济邢等引调水工程以及产业结构调整 and 地下水压采等政策的实施,邢台地下水位回升甚至泉水复涌成为了可能。本文拟采取工程方案组合进行模拟和论证,为工程的实施提供技术支持,近期实施的主要措施,见表 2。

表 2 邢台市地下水生态修复主要措施

Table 2 Main measures for groundwater ecological restoration of Xingtai	
类型	措施
补源	朱庄、东石岭、东川口等水库放水,通过河道补水
	矿区疏干水引入河道补水
	引江水通过深井回灌补水
	引朱济邢水通过深井回灌补水
工程措施	人工增雨
	节约用水,减小开采
	引江调水置换地下水
	引朱济邢供水置换地下水
压采	通过工程改造或关矿等减小疏干水开采
	中水或其他非常规水源置换地下水
非工程措施	制定法规条文进行法律约束、
	节水保泉宣传、政策扶持等

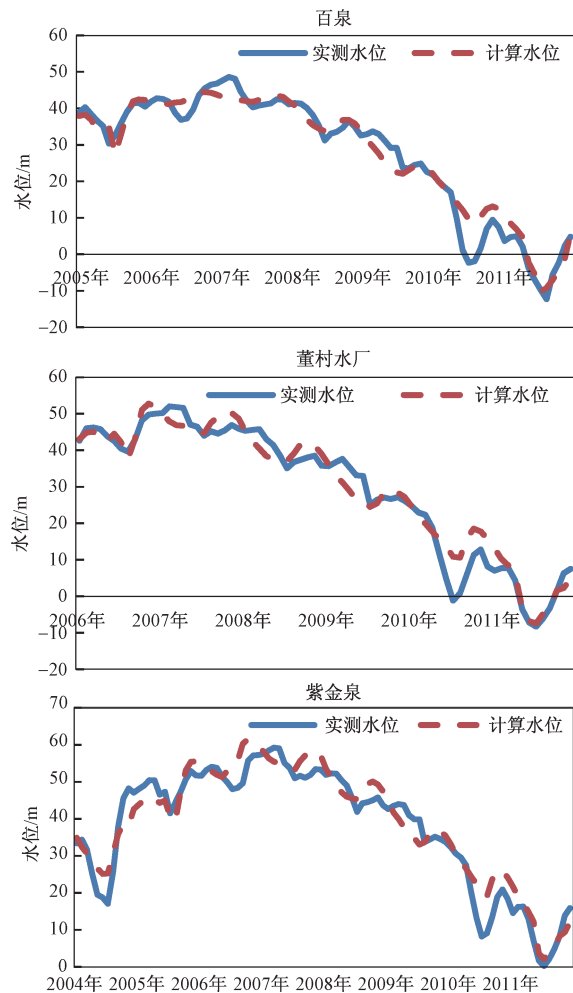


图 4 岩溶水水位拟合结果

Fig. 4 Simulation results of the karst water levels

通过大量资料分析,邢台市百泉泉域地下水位受到降水丰枯影响比较明显,为了保证方案模拟的真实性,分别选取了多年平均降水量(550mm)、偏枯 10%和偏丰 10%,并选取典型年份 2011 年、2005 年和 2009 年的年降水过程作为模型预测的降水量。

3.2 方案调算与推荐方案

根据不同的补水、压采、回灌等工程措施,并考虑不同水文条件,设置了 6 种方案共 18 种情景。其中:方案 A - 现状开采规模,方案 B - 压采工农业生活岩溶水,方案 C - 补水 + 压采工农业生活岩溶水,方案 D - 补水 + 压采非生活用水,方案 E - 补水 + 压采非生活用水 + 深井回灌,方案 F - 补水 + 压采工农业生活岩溶水 + 深井回灌,方案序号 1、2、3 分别表示降水量偏丰(614mm)、平水年(552mm)和偏枯(493mm)。初始流场采用模拟得到的 2011 年 12 月 30 日百泉泉域流场。

通过对各种方案和情景的模拟计算,可以得到未来水位变化以及泉复涌时间等,综合结果见表 3。其中百泉泉坑采用 2006 年实测高程,为 46.65m。

由表 3 可以看出,不同方案和水文条件下,泉水复涌的时间和流量都有显著不同,如果仅依靠南水北调供水减少开采量,泉水大概在 2020 年左右才能复涌。因此,为了保证生态修复,并充分利用当地水源,需要进行补水、回灌等措施,在这些措施的综合作用下可以使得泉水在 2015 年达到复涌条件,经过综合比对,本研究认为方案 C 比较合理,可以作为推荐方案。其中 C2

表 3 未来不同年份泉水复涌流量与百泉水位

Table 3 Time, discharge and water levels of the spring of different schemes

方案	泉水复涌 时间	复涌时泉流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	复涌时百泉 水位/m	2015 年泉流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	2015 年百泉 水位/m	2020 年泉流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	2020 年百泉 水位/m	2030 年泉流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	2030 年百泉 水位/m
A1	无	无	无	无	-2.7	无	-3.2	无	-3.3
A2	无	无	无	无	-13.0	无	-31.5	无	-33.2
A3	无	无	无	无	-22.0	无	-61.9	无	-105.2
B1	2017-11-01	0.39	43.7	无	4.9	1.15	46.1	1.64	48.1
B2	2019-11-10	0.21	42.0	无	-5.4	0.18	42.0	1.18	46.2
B3	2023-11-01	0.14	41.7	无	-14.7	无	18.5	0.69	44.2
C1	2015-08-01	0.77	43.1	无	38.1	1.08	45.8	0.787	44.6
C2	2015-10-01	0.98	45.6	无	28.7	0.86	44.9	0.589	43.8
C3	2015-12-01	0.46	43.4	无	20.0	0.39	42.9	0.005	41.3
D1	2015-02-01	0.28	42.5	无	39.3	1.68	48.3	1.40	47.2
D2	2015-09-01	1.30	46.8	无	29.8	1.46	47.4	1.21	46.3
D3	2015-10-01	0.75	43.3	无	21.1	0.99	45.4	0.74	44.4
E1	2014-11-01	1.96	49.1	1.34	47.4	1.10	45.9	0.79	44.6
E2	2014-12-01	0.89	51.5	0.89	45.5	0.89	45.1	0.59	43.8
E3	2015-02-01	0.13	42.1	无	41.7	0.43	43.1	0.01	41.3
F1	2014-10-25	2.21	45.8	1.62	48.5	1.70	48.4	1.40	47.2
F2	2014-11-27	1.24	49.5	1.24	47.0	1.49	47.5	1.21	46.3
F3	2015-01-01	0.34	43.2	0.34	43.2	1.03	45.6	0.74	44.4

注:无特殊说明,年是指当年的 1 月 1 日,月是指当月 1 日。

方案(补水+压采+平水年)中,通过大沙河补水,长期分析约有50%的补水量可以进入市区,另外约50%的水量被南部矿区袭夺。

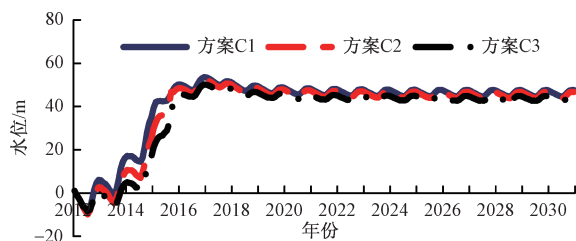


图5 方案C水位变化情况(百泉)

Fig. 5 Water level changes with time of plan C

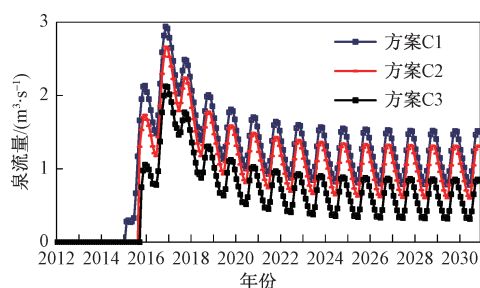


图6 方案C泉流量变化情况预测结果

Fig. 6 Discharge changes with time of plan C

4 结论

本文在以往调查与研究基础上,利用地面调查、钻探、水文地质试验、地下水动态观测、开采量调查等资料,建立了地下水数学模拟模型。

(1)利用数值模型对百泉复涌的各种工程措施方案进行模拟和预测,确定了现实可行的泉水涌水量目标,即近期实施地下水人工回灌工程,中远期实现当地地表水和地下水与引江水的联合调度。

(2)评估了岩溶地下水系统人工补给和岩溶地下水压采等措施的效果提出包括压采、补源回灌以及非工程措施等方面的对策建议,为百泉复涌工作的顺利实施提供科学依据。

建议对岩溶地下水有显著影响的矿山排水,要实施严格管理和控制。

参考文献:

[1] 刘英学,梁韵,乔梁. 邢台百泉岩溶地下水系统水-岩反应特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009,

7(4):63-66. [LIU Y X, LIANG Y, QIAO L. Analysis on Water-Rock Reaction Characteristics of Groundwater System in Xingtai-Baiquan Springs [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(4): 63-66. (in Chinese)]

[2] 李秀丽,韩廷印. 邢台百泉水源地地下水回补可行性分析[J]. 地下水, 2010, 32(4): 34-37. [LI X L, HAN T Y. Analysis on Feasibility of Groundwater Recharge in Baiquan Water source of Xingtai [J]. Underground Water, 2010, 32(4): 34-37. (in Chinese)]

[3] 崔秋苹,徐丹梅,牟永忠. 邢台百泉岩溶地下水水库蓄水构造分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(6): 18-21. [CUI Q P, XU D M, MU Y Z. Analysis on impoundment conformation of Baiquan Karst Groundwater Reservoir in Xingtai [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(6): 18-21. (in Chinese)]

[4] 李志明,杨旭东,兰剑梅,等. 河北邢台柏乡地裂缝成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 35-38. [LI Z M, YANG X D, LAN J M, et al. An analysis of earth fissure at Baixiang County, Xingtai City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 35-38. (in Chinese)]

[5] 徐亚,胡立堂,仪彪奇. 井孔-含水层系统数值模拟方法研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 26-31. [XU Y, HU L T, YI B Q. Advances in numerical simulation methods of a "well-aquifer" system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 26-31. (in Chinese)]

[6] 魏加华,郭亚娇,王荣,等. 复杂岩溶介质地下水模拟研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 27-34. [WEI J H, GUO Y J, WANG R, et al. Recent advances in simulation approaches of the complex karst medium [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 27-34. (in Chinese)]

[7] 王景瑞,胡立堂,尹文杰. iTOUGH2 反演模型在地下水模拟中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 35-41. [WANG J R, HU L T, YIN W J. Application of iTOUGH2 to groundwater modeling [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 35-41. (in Chinese)]

责任编辑:张若琳