

doi: 10.12029/gc20200610

王志恒, 梁永平, 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 郭芳芳, 谢浩, 赵一. 2020. 北方断流岩溶大泉复流的生态修复模式与复流措施效果的定量评价——以山西太原晋祠泉为例[J]. 中国地质, 47(6): 1726–1738.

Wang Zhiheng, Liang Yongping, Tang Chunlei, Shen Haoyong, Zhao Chunhong, Guo Fangfang, Xie Hao, Zhao Yi. 2020. Ecological restoration pattern and quantitative evaluation of recirculation measures for northern discontinuous karst spring: A case study of Jinci Spring in Taiyuan City, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 47(6):1726–1738(in Chinese with English abstract).

## 北方断流岩溶大泉复流的生态修复模式与复流措施效果的定量评价——以山西太原晋祠泉为例

王志恒<sup>1,2</sup>, 梁永平<sup>1,2</sup>, 唐春雷<sup>1,2</sup>, 申豪勇<sup>1,2</sup>, 赵春红<sup>1,2</sup>, 郭芳芳<sup>1,2</sup>, 谢浩<sup>1,2</sup>, 赵一<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所; 2. 自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力重点实验室, 广西桂林 541004)

**摘要:**岩溶大泉是中国北方岩溶地下水的主要天然排泄形式, 它们集供水、旅游、生态等功能于一体, 是重要的自然资源。自 20 世纪后期, 受自然、特别是人类大规模开发、采煤等活动的影响, 有近 30% 的岩溶大泉断流, 其中不乏中外闻名的大泉。十七大以来, 各地政府积极响应党中央国务院加强生态文明建设的号召, 启动了一些重要断流岩溶大泉复流的生态修复工程。本文根据北方断流岩溶大泉的结构模式与成因, 提出了包括利用上游水库蓄水、调节渗漏段河水流量、在河流渗漏段实施人工增补工程、在岩溶地下水强径流带和排泄区采取关井压采、封堵泉口下游自流井、对煤矿带压区进行监控、补给区分区植树造林措施的复流模式; 以山西太原晋祠泉为实例, 在对各项复流措施效果进行定量优化评价的基础上, 得出抬高汾河二库水位至设计标高、关闭岩溶地下水强径流带内白家庄煤矿降压排水井、封堵处置泉口下游自流井是近期经济可行的有效措施; 最后利用建立的泉域地下水渗流数值模型, 预测实施三项近期措施后, 晋祠泉水可望在 2 年左右的时间实现复流, 该结论以期对晋祠泉及北方岩溶区其他同类型岩溶泉水生态复流工作提供示范与参考。

**关键词:**生态修复模式; 复流措施; 定量评价; 水文地质调查工程; 晋祠泉; 山西省

中图分类号: P641.69 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1726-13

## Ecological restoration pattern and quantitative evaluation of recirculation measures for northern discontinuous karst spring: A case study of Jinci Spring in Taiyuan City, Shanxi Province

WANG Zhiheng<sup>1,2</sup>, LIANG Yongping<sup>1,2</sup>, TANG Chunlei<sup>1,2</sup>, SHEN Haoyong<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Chunhong<sup>1,2</sup>, GUO Fangfang<sup>1,2</sup>, XIE Hao<sup>1,2</sup>, ZHAO Yi<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China*; 2. *Karst Dynamics Laboratory, MLR&GZAR, Guilin 541004, Guangxi, China*)

收稿日期: 2019-04-24; 改回日期: 2020-06-10

基金项目: 自然资源部中国地质调查项目(DD20160242, DD20190334)、中国地质科学院基本科研项目(2020010, JYYWF20182004, 2017023) 及国家自然科学基金项目(41672253, 41902256) 共同资助。

作者简介: 王志恒, 男, 1990 年生, 硕士, 研究实习员, 从事地下水资源评价及开发利用方面的研究; E-mail: wangzh@karst.ac.cn。

通讯作者: 梁永平, 男, 1962 年生, 研究员, 长期从事北方岩溶地下水资源调查与评价工作; E-mail: lyp0261@karst.ac.cn。

**Abstract:** Karst spring is the main natural discharge form of karst groundwater in northern China and is an important natural resource with the functions of water supply, tourism and ecological environment. Nearly 30% of karst springs have been dried up, influenced by natural factors, coal mining, especially by human beings' large-scale development and utilization of karst groundwater since the last century. The dried-up springs also include some world-famous karst springs. Since the 17th National Congress of the Communist Party of China (CPC), local governments have actively responded to the call of the CPC Central Committee and the State Council to strengthen ecological civilization construction, and hence ecological restoration projects have been initiated for the reflow of some important karst springs. Based on the structural mode and genesis of the karst springs in northern China, this paper proposes the spring reflow pattern, which includes the following measures: regulating the water flow of the leakage section by using the water storage of the upstream reservoir, implementing artificial supplementary projects in the seepage section of the river, closing the wells in karst groundwater strong runoff zones and drainage areas, blocking artesian wells downstream of the spring water outlet, monitoring drainage in coal mines under pressure, and conducting afforestation measures in recharge zones. Taking Jinci spring in Taiyuan of Shanxi Province as an example and based on the quantitative optimization evaluation of the effects of these reflow measures, it is concluded that raising the storage level of the Fenhe Second Reservoir to the design elevation, closing the drainage well of Baijiashuang coal mine in the strong runoff zone of karst groundwater to reduce water pressure, and plugging and disposing of artesian well downstream of spring outlet seem to be economically feasible and effective measures in the near future. Finally, by using the numerical model of spring groundwater, it is predicted that, after the implementation of these measures, Jinci spring water is expected to reflow in about two years. The results can provide demonstration and reference for other karst springs of the same type in northern China.

**Keywords:** ecological restoration model; reflow measure; quantitative evaluation; hydrogeological survey engineering; Jinci spring; Shanxi Province

**About the first author:** WANG Zhiheng, male, born in 1990, assistant researcher, engages in the research on evaluation and development of groundwater resources; E-mail: wangzh@karst.ac.cn.

**About the corresponding author:** LIANG Yongping, male, born in 1962, professor, engages in the survey and evaluation of groundwater resources; E-mail: lyp0261@karst.ac.cn.

**Fund support:** Supported by the program of China Geological Survey (No. DD20160242, No. DD20190334), Basic Scientific Research Project of Chinese Academy of Geological Sciences (No. 2020010, No. JYYWF20182004, No. 2017023), National Natural Science Foundation of China (No. 41672253, 41902256).

## 1 引言

岩溶大泉是中国北方岩溶地下水主要排泄形式,据实际调查统计,北方岩溶区流量大于 $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的泉水有41处,大于 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的170余处(Liang et al., 2018)。近40年来,在国民经济高速发展对水资源需求量骤升的情况下,人类对岩溶地下水大规模、高强度的开采活动,使泉域水资源补排关系长期失衡,造成近30%(46处)泉水在短期内断流或接近断流(袁道先, 2010; 梁永平等, 2013),其中不乏集供水、人文、旅游、生态功能为一体的世界性著名大泉。在党中央国务院大力倡导生态文明建设的新形势和南水北调、各地引黄工程通水后有了替代水源的条件下,选择一些意义重大、具备复流条件的大泉开展生态修复工作,恢复其本来的面貌,是

生态文明建设成果的标志性指标,也是一件“功在当代、利在千秋”的大事。

晋祠泉是中国著名岩溶大泉,也是晋祠历史文化名胜三绝之一,20世纪50年代平均流量 $1.99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,于1994年4月30日断流。2015年7月,山西省委、省政府下发了“关于印发《汾河流域生态修复规划纲要(2015—2030年)》的通知”,全面启动了汾河流域生态修复工程,晋祠泉的复流是其中的重要内容之一。为配合这一工程,中国地质调查局于2016年启动“汾河流域晋中南大型岩溶泉域1:5万水文地质调查”项目,该项目在水文地质调查工作的基础上,结合前人工作成果资料对晋祠泉域岩溶水系统进行了深入研究。基于此,本文在分析中国北方“单斜顺置型”岩溶大泉结构模式与成因的基础上,提出适用于此类断流岩溶大泉的生态复流模式,并

以晋祠泉为例,采用响应矩阵法对复流模式中各项复流措施的效果进行定量评价,并对实行近期复流措施后晋祠泉水的复流时间进行了预测,以期为中国北方岩溶区其他同类型岩溶泉水生态复流工作提供参考。

## 2 北方断流岩溶大泉泉域地质结构

分析北方岩溶大泉断流的原因,除了自然要素如大气降水进入20世纪80年代后总体减少(与20世纪80年代前比较一般减少6%~10%),中国北方整体呈干旱化发展趋势外(胡子瑛等,2018),人类大规模开采以及环境条件改变是主要因素,包括了岩溶地下水的开采,煤矿突水以及降压排水,一些河流由于上游拦蓄使其流量减少,导致进入下游石灰岩区渗漏量减少等(马腾等,2001;高波,2002;梁永平等,2005;叶海东,2006;柴俊芳,2011;王军平,2015)。

从地质结构方面,根据对北方岩溶水系统(泉域)归纳的结构模式,大型断流泉水主要发生在地下水流向与地层倾向一致的“单斜顺置型”泉域(图1)(梁永平等,2010),如山东济南趵突泉、章丘明水泉、淄博泮水泉、莱芜郭娘泉;太行山前河南焦作九里山泉、安阳珍珠泉,河北邯郸黑龙洞泉、邢台百

泉、北京玉泉山泉;山西晋祠泉等等,这类泉域在北方分布最广,其主要特点包括:①岩溶地下水总体流向与地层倾向一致;②泉域岩溶地下水主要接受上游碳酸盐岩裸露区降水入渗补给以及河流渗漏补给,其中不少泉域上游存在过境外源水,如晋祠泉域汾河、北京玉泉山泉域上游永定河、济南趵突泉玉符河、河北邢台百泉的沙河等;③泉水主要由隔水顶板煤系地层阻水溢流,为上升泉,岩溶水排泄较为集中,排泄区沿石灰岩顶板往往发育有与泉水相连的岩溶地下水强径流带;④泉水下游存在大面积承压自流区和煤矿带压区;⑤泉域岩溶水动力分区为:补给区—径流、汇流区—排泄区—埋藏承压区。

由于上述特殊的结构模式,尤其泉口下游的承压区,往往也是岩溶地下水富集自流区,这一带打井、采煤极易造成泉水断流。根据统计,“单斜顺置型”岩溶大泉是我国各类断流岩溶大泉中最的一类,占到70%以上。

## 3 泉水复流模式

泉水作为岩溶水系统的天然排泄形式,是系统内各项水均衡要素均衡结果的外在表现。为达到泉水复流目的,从水均衡角度出发,需采取“开源”、

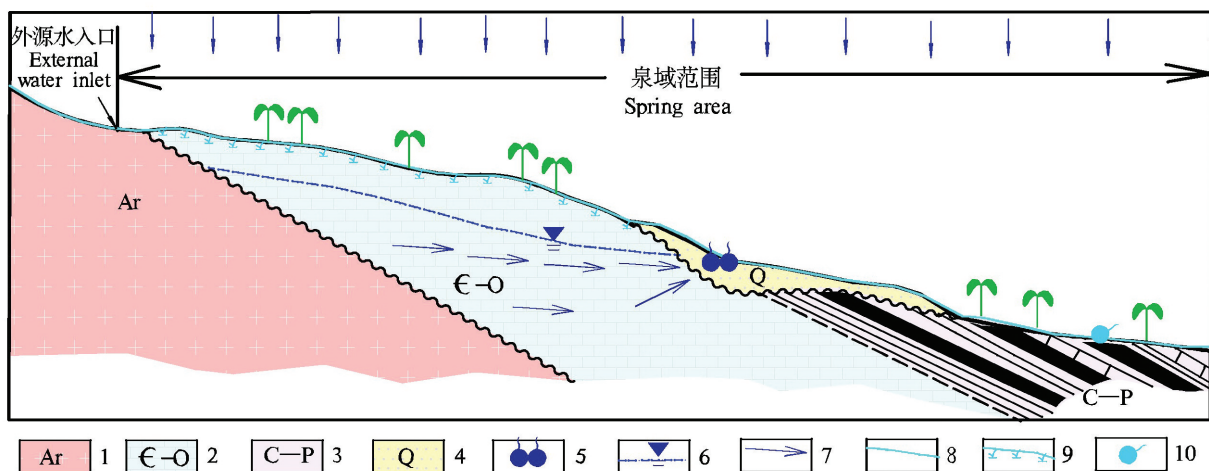


图1 “单斜顺置型”泉域结构剖面图

1—岩溶水隔水底板;2—碳酸盐岩含水层;3—岩溶水煤系地层隔水顶板;4—松散层;5—岩溶泉水;6—岩溶地下水水位;7—岩溶地下水流向;8—地表水;9—地表水渗漏段;10—碎屑岩裂隙泉水

Fig.1 Geological section of monoclinic concordant-type spring domain structure

1—Waterproof floor of karst groundwater; 2—Carbonate aquifer; 3—Waterproof roof of karst groundwater; 4—Unconsolidated formation; 5—Karst spring; 6—Contour of karst groundwater table; 7—Karst groundwater flow direction; 8—Surface water; 9—The location of surface water leakage; 10—Clastic rock spring

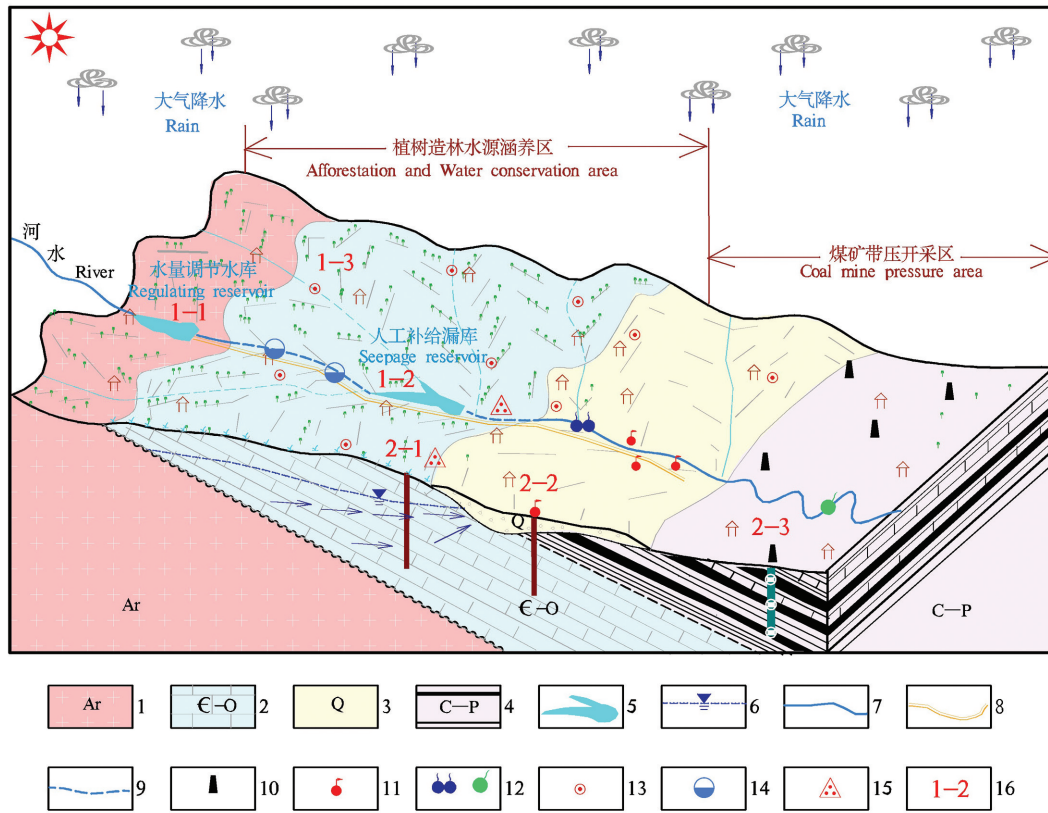


图2 大型断流泉水生态修复工程部署示意图

1—岩溶水隔水底板;2—碳酸盐岩含水层;3—松散层含水层;4—岩溶水煤系地层隔水顶板;5—水库;6—岩溶水等水位线;7—河流;8—引水工程线路;9—河流渗漏段;10—煤矿;11—自流井;12—岩溶泉水与碎屑岩泉水;13—开采井;14—渗坑、渗渠等;15—水源地;16—复流工程措施编号

Fig.2 Schematic diagram showing the deployment of the ecological restoration project of large discontinuous spring  
1-Karst water resisting floor; 2-Carbonate aquifer; 3-Unconsolidated rock aquifer; 4-Karst water resisting roof; 5-Reservoir; 6-Karst water level; 7-River; 8-Water diversion project route; 9-River leakage section; 10-Coal mine; 11-Artesian well; 12-Karst spring and clastic rock spring; 13-Well; 14-Seepage pit and channel; 15-Water source; 16-Serial number of measure of reflow engineering

“节流”措施,使泉域岩溶水长期处于补给大于排泄的状态。结合上述岩溶水系统的结构特点,提出包扩增加补给量(补给来源)与减小排泄量(排泄途径)措施的泉水复流模式(图2)。

### 3.1 增加补给量措施

结合“单斜顺置型”泉域岩溶水系统的主要补给来源,增加泉域岩溶水补给量措施包括以下3个方面内容(图2):

(1)调节上游外源水水库放水量,使进入石灰岩渗漏段的渗漏率达到最大(图2中1-1)。很多泉域外上游外源水区都建有水库,如山东济南趵突泉玉符河上的卧虎庄水库,北京玉泉山泉泉域上游官厅水库、白浮泉上游的十三陵水库,河北邢台百泉上游的朱庄水库,太原晋祠、兰村泉域上游的汾河水库(汾河一

库)等等。由于进入石灰岩河段水流量与渗漏量间为非线性关系(梁永平等,2011),因此需要通过水库放水量的调节控制,使得渗漏率达到最大化,以发挥地表水资源最大的渗漏补给效能。

(2)增加河水渗漏对地下水的补给(图2中1-2)。包括在石灰岩渗漏河段修建水库(或抬高蓄水位)、修建梯级堤坝、开挖渗渠、渗坑来增加河水渗漏。岩溶区修建水库对岩溶地下水补给极为有利,如陕西铜川桃曲坡水库(张兴安,2004)、永寿县羊毛湾水库(陈晓晖,1989)、山西太原汾河二库等(郭芳芳等,2018;梁腾飞等,2020),年渗漏量均在数千万m<sup>3</sup>以上。

(3)开展泉域入渗补给区植树造林、涵养水源(图2中1-3)。从长远来讲,增加泉域岩溶水在区域上的降水入渗补给是一种增强抵御断流“免疫力”的有效

手段,选择泉域降水入渗补给区、上游外源水产流区开展植树造林、涵养水源是一举多得措施。

### 3.2 减小排泄量措施

根据水均衡原理,在补给量保持稳定的情况下,泉域岩溶水系统天然排泄量与人工排泄量之间为此消彼长的关系,结合“单斜顺置型”泉域特征,减小排泄量措施可包括以下3个方面(图2):

(1)关井压采措施(图2中2-1)。利用已有的引水工程(南水北调;山西、山东引黄工程等)覆盖区水源作为替代水源,对原有开采井、水源地关闭或压减开采量,减少泉域岩溶水的支出。由于不同地区开采井对泉水流量的响应在时间上存在差异,选择具体关井区域是非常重要的工作,选择与泉水相连的岩溶地下水强径流带进行关井压采,对泉水复流(增流)将起到事半功倍的作用。

(2)封堵泉口下游自流井(图2中2-2)。“单斜顺置型”泉域在泉水下游一般都存在自流区,这些部位打井一定程度上相当于直接抽取泉水,如太原晋祠泉下游清徐县平泉一带打成的自流井泉是导致晋祠泉水断流的重要原因(赵伟丽,2013),因此需要对这些自流井进行封堵处置。

(3)加强煤矿带压区疏干排水的监控,坚决关闭排水量极大的煤矿(图2中2-3)。煤矿矿坑突水和降压排水对泉水流量影响极大,太行山前多数泉水的断流均与此有关,河南焦作矿区2008年吨煤排水量达到 $30.58\text{ m}^3$ ,矿坑排水量一度达到当地地下水排泄总量的50%以上(牛磊等,2014);本世纪初山西霍州郭庄泉泉口附近4个矿,平均吨煤排水量 $10\text{ m}^3$ 以上(高波,2002)。这些煤矿不仅开采期间直接影响水量,未来闭坑后形成的采空区“老窑水”对地下水的污染将是致命的(李喜林等,2008)。因此,关闭一些大水煤矿是非常必要的措施。

## 4 晋祠泉水复流措施与效果定量评价

### 4.1 晋祠泉域岩溶水文地质概况

晋祠泉域位于山西省汾河流域的太原西山地区(图3),泉域面积 $2713\text{ km}^2$ 。泉域岩溶含水层为早古生界中上寒武统及奥陶系碳酸盐岩,上覆石炭一二叠煤系为区域隔水顶板,下伏下寒武统碎屑岩及前震旦系变质岩系为区域隔水底板。岩溶地下水主要接受碳酸盐岩裸露区、覆盖区降水入渗补给

及河流在碳酸盐岩裸露河段的渗漏补给(含水库渗漏),整体自北向南东渗流,在泉域南东太原盆地边山断裂带受松散层及南侧石炭系隔水顶板的阻水作用,主要水量于泉域碳酸盐岩出露的最低处——晋祠出流成泉,尚有少量水越过山前断裂带潜流进入盆地松散层含水层。泉域地层总体由北向南倾斜,结构模式呈现典型的“单斜顺置型”特征。

### 4.2 晋祠泉水复流措施

根据前述泉水复流模式和晋祠泉域岩溶水文地质条件(梁永平等,2019),结合山西省政府2014年的复流方案,确定晋祠泉水的复流措施如下(图3):

①利用汾河一库(水库库容 $7.21\text{ 亿 m}^3$ )进行放水量调节,维持汾河一库断面枯水期一定流量,使得下游汾河渗漏率达到最大;②在泉域内汾河渗漏段实施人工补给工程,其一提高汾河二库蓄水水位从目前 $902\text{ m}$ 至设计水位 $905.7\text{ m}$ ,其二在罗家曲到镇城底、古交至二库渗漏段修建一些低坝、渗渠、渗坑,增加河水的渗漏量;③在引黄工程水源覆盖区对岩溶地下水开采井进行关井、压采,重点关注太原西山山前的强富水区及岩溶地下水强径流带内的水井,包括压缩白家庄煤矿降压排水量,明仙沟及开化沟采取人工井灌措施(菅宇翔等,2016);④封堵晋祠泉下游清徐一带部分自流井,目前晋祠泉口下游自流井点14处;⑤对处于煤矿带压区且为岩溶地下水强富水区的白家庄矿、西峪煤矿、南峪煤业、东于煤业、梅园永兴煤业重新规划其开采煤层(禁采下组煤)布局 and 开采方式,必要时关闭,降低突水风险;⑥在泉域上游补给区实施人工造林涵养水源工程,以获得对泉域岩溶地下水的区域上的永久性补给。

### 4.3 晋祠泉复流措施效果的定量评价

总体而言,上述“开源节流”的措施均有利于晋祠泉水的复流,但各项措施的实施条件、晋祠泉水的响应时效以及强度、经济运行成本等都存在一定差别,为此需要对各措施的效果进行量化评价,以对其进行优劣评估,为最终方案的优化确定提供依据。

#### 4.3.1 汾河一库调节水量的渗漏补给效果评价

根据实测研究,在非顶托自由渗漏状态下,碳酸盐岩河段的河水流量与渗漏量之间为非线性关系(梁永平等,2011)。多年来,山西省水文水资源勘测局对汾河渗漏量做了大量实测分析,获得扫石以上渗漏段的渗漏率( $\alpha$ )与汾河一库断面水量( $Q$ )间

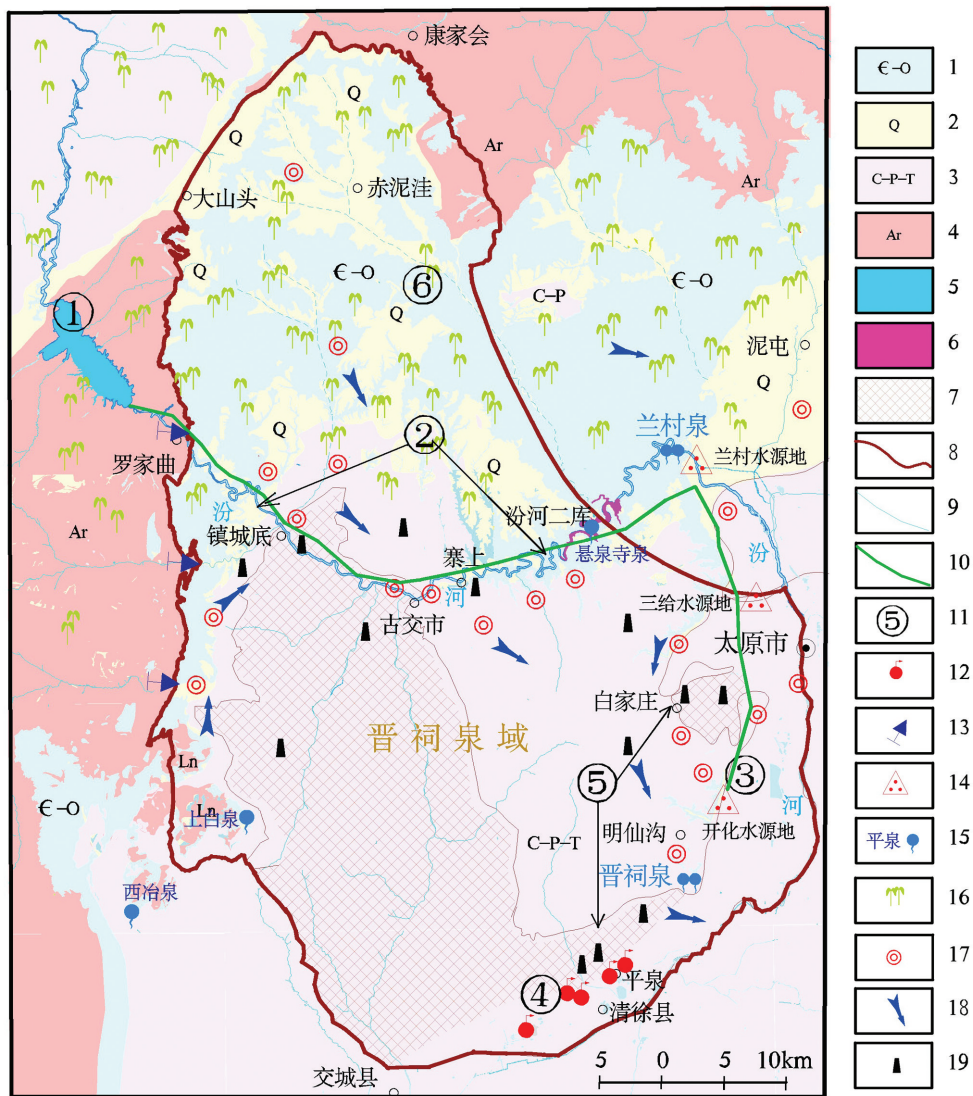


图3 晋祠泉水复流工程措施部署图

1—碳酸盐岩裸露区;2—碳酸盐岩覆盖区;3—碳酸盐岩埋藏区;4—非碳酸盐岩区;5—汾河水库;6—汾河二库;7—煤矿带压区;8—晋祠泉域边界;9—河流;10—引黄工程线路;11—复流工程措施编号;12—自流井;13—外源水入口;14—水源地;15—岩溶泉水及名称;16—植树造林水源涵养区;17—岩溶水开采井;18—岩溶水流动方向;19—煤矿

Fig.3 Schematic diagram showing the reflux project measures deployment of the Jinci Spring

1—Carbonate outcrop area; 2—Carbonate covered area; 3—Carbonate burial area; 4—Non-carbonate zone; 5—Fenhe Reservoir; 6—Fenhe Second Reservoir; 7—Coal mine pressure area; 8—Jinci Spring region boundaries; 9—River; 10—Yellow River Diversion Project line; 11—Serial number of measure of reflux engineering; 12—Artesian well; 13—External surface water inlet; 14—Water source; 15—Karst spring and its name; 16—Afforestation and water conservation area; 17—Karst groundwater well; 18—Karst groundwater flow direction; 19—Coal mine

为  $\alpha=48.06 \times Q^{-0.598}$  关系(未考虑区间来水)(党跃军, 2016)。汾河渗漏是晋祠泉域岩溶地下水重要补给源,但由于水资源高度开发,下游渗漏区在枯季经常出现河水断流状况(栾清华等,2015)。目前万家寨引黄水进入汾河一库,年供水能力达到3.2亿  $m^3$  (李悦等,2013),有了水源保障,同时汾河水库库容达7.21亿  $m^3$ ,有较强调节能力,因此维持水库下游

长期过水,无疑有利于对晋祠泉域岩溶地下水的补给,但为了提高入渗补给效率,根据建立的汾河一库断面过水量与渗漏率的关系,建议维持汾河一库断面枯季流量  $3 \sim 5 m^3 \cdot s^{-1}$ ,可使汾河河水的渗漏率达到18%以上。

#### 4.3.2 人工补给和关井压采措施的效果评价

结合上述措施,对晋祠泉水复流的人工补给和

关井压采措施效果评价计算位置选择:汾河罗家曲—龙尾头(也称远源补给)渗漏段补给选址在龙尾头一带;抬高汾河二库蓄水水位选址在二库蓄水范围内;在太原盆地山前断裂岩溶地下水富水带和岩溶地下水强径流带采取关井压采措施,计算位置选择在白家庄煤矿排水井;晋祠北西侧明仙沟修建小水库并配套钻孔进行人工回灌补给(又称近源补给)位置选择在距离明仙沟口约1 km处;处置晋祠泉口下游自流井及东于煤矿等计算位置选择在平泉一带。

(1)评价方法与指标:为单纯评价晋祠泉水对不同措施的响应效果,本次评价采用响应矩阵法进行计算。为此利用项目已建立的泉域地下水渗流数值模型(式1),将其拆分成一个仅由人工可控输入作用而产生的降深 $s$ 和人工流场,与一个仅由初始条件、边界条件和不可控输入影响下形成的自然水位 $h$ 和自然流场(王国利等,2007)。人工流场模型则可用于求解施加同等应力(抽或排水量)、同等时长的情况下晋祠泉水的响应矩阵。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K_x \frac{\partial H}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_y \frac{\partial H}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [K_z \frac{\partial H}{\partial z}] + \varepsilon \\ x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = K_x (\frac{\partial H}{\partial x})^2 + K_y (\frac{\partial H}{\partial y})^2 + K_z (\frac{\partial H}{\partial z})^2 + w \\ x, y, z \in \Gamma_0; t \geq 0 \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z) \quad x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \quad x, y, z \in \Gamma_2; t \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

其中: $\Omega$ 为渗流区域; $H$ 为含水层的水位标高(m); $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的渗透系数( $m \cdot d^{-1}$ ); $K_n$ 为边界法线方向的渗透系数( $m \cdot d^{-1}$ ); $S_s$ 为承压含水层储水系数( $m^{-1}$ ); $\mu$ 为潜水含水层的重力给水度; $\varepsilon$ 为含水层的源汇项( $d^{-1}$ ); $w$ 为含水层潜水面的垂向交换量( $m \cdot d^{-1}$ ); $h_0$ 为含水层的初始水位(m); $\Gamma_0$ 为渗流区域的上边界,即地下水的自由表面; $\Gamma_1$ 为渗流区域的一类边界; $\Gamma_2$ 为渗流区域的二类边界; $\bar{n}$ 为边界线的法线方向; $q$ 定义为流量边界的单宽流量( $m^2(d \cdot m)^{-1}$ ),流入为正,流出为负,隔水边界值为0。

本次设定输入项的单位脉冲量(输入)为各措施点加注 $5.0 \text{万} \text{m}^3 \cdot d^{-1}$ 水量,加注时长1年,以晋祠

泉口水位(输出)的响应曲线(注:加注水量时水位响应过程为上升—消退,抽水时水位响应过程为下降—恢复)为评价对象,由此可获得下列具体评价指标:①初始响应时间,某点加注水量后,晋祠泉口水位出现1 cm响应的起始时间;②最大响应值,晋祠泉口水位对某点加注水量的最大上升值;③最大值响应时间,晋祠泉口水位达到最大响应值时所需时间;④退水速率,达到最大响应值后水位消退的速率;⑤各措施实施的具体条件和经济成本框算。

(2)评价结果:结合具体情况,对目前正在实施或具备实施条件的措施进行评价,包括:罗家曲—龙尾头汾河渗漏河段修低坝漏库、汾河二库抬高蓄水水位、关闭白家庄煤矿排水井、明仙沟人工补给、平泉自流井区封堵措施,采用响应矩阵计算获得的晋祠泉口水位响应曲线及指标如图4、表1。

各复流措施的效果评价如下:

①罗家曲—龙尾头渗漏补给。山西省相关部门计划在罗家曲—龙尾头汾河渗漏段增设8座小型滚水低坝漏库,增加汾河对晋祠泉域岩溶水的补给,目前已进入勘查选址阶段,受地形等条件限制,坝址高度均在2.5 m以下,一般回水距离100 m左右。从总体水资源平衡角度,修建漏库无疑能够增加晋祠泉域岩溶水补给量,对泉水复流及水资源量是有益的,但单纯从晋祠泉水复流的角度,水位起始响应时间需要840 d(2.3年),达到最大水位响应需要约12年,以每座水库每天增加渗流量 $5000 \text{m}^3$ 计算,晋祠泉口水位仅能升高0.09 m,效果不佳,而且还存在建坝的工程投入问题。

②汾河二库增加渗漏的效果。汾河二库处于晋祠泉域东侧中游,设计最大蓄水标高905.7 m,目前蓄水量标高902 m,根据笔者利用上游寨水文站和下游上兰村水文站的对二库渗漏量的计算结果,当二库水位提高到设计蓄水高度时,每日可增加约 $5.84 \text{万} \text{m}^3$ 的渗流量(郭芳芳等,2018),根据前述计算结果,加注1年水量后,其起效时间仅需120 d(4月),实施约2年后效果达到最大,并可使晋祠泉口水位抬升约0.467 m,而且该措施不需要增加更多的工程投入,但需要考虑的环境问题是可能对下游军库产生影响。汾河二库坝址坐落于区域岩溶发育相对较弱的上寒武统一奥陶统亮甲山组白云岩之上,施工中对坝址均进行了防渗处理,建库后

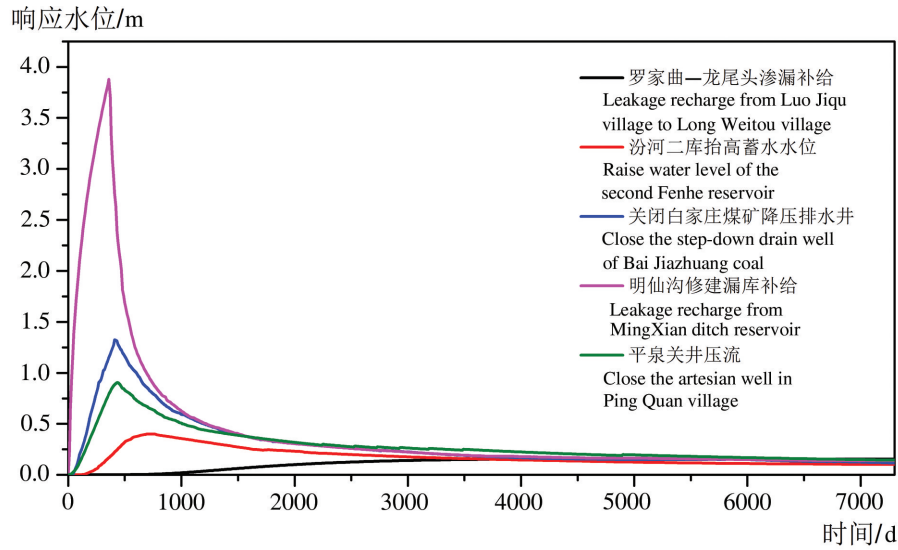


图4 晋祠泉口水位对不同措施单位脉冲加注水量的响应曲线

Fig. 4 The groundwater level response curve of Jinci spring to different measures unit impulse filling water quantity

坝下约2 km的地下水位并无大的变化,2017年9月(水库蓄水水位标高已达到902 m,坝址处蓄水深度46 m)实测坝下水位标高832.79 m,与汾河水位基本一致,军库位于二库坝址下约4 km的汾河北岸,水库蓄水至设计标高时不会导致下游地下水位大幅度提高从而造成军库淹没。

③关闭白家庄矿降压排水井。位于通向晋祠泉强径流带的集中开采主要是白家庄煤矿的710降压排水井,日排水量8000 m<sup>3</sup>,其余为村民分散开采。白家庄煤矿已于2016年闭坑,但降压排水仍然继续,主要向矿区内居民生活供水,现万家寨引黄工程水源已到达这一带,具备了替代水源。根据计算其起效时间40 d,达到最大响应时间1.12年,可使晋祠泉口水位抬升0.212 m。

④明仙沟修漏库的人工补给。2014年山西省水利厅制定的晋祠泉水复流措施中,设计在明仙沟修建漏库并辅以渗孔进行人工补给。从计算结果

看对晋祠泉水水位提升最大,起始时间仅需10 d,达到最大值需1年左右,如回灌水量达到2万 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,1年后晋祠泉口水位可回升1.55 m(注:这里仅作为效果比较,实际晋祠泉水出流后,水位回升将大大减缓),但因明仙沟据晋祠泉口距离仅1 km,且处于岩溶地下水强径流带,停止回灌一年后,退水过程迅速,水位下降至最大回升值的三分之一,可持续性较差。根据明仙沟内3个岩溶水勘探孔资料,单位涌水量均在3000 m<sup>3</sup>(d·m)<sup>-1</sup>以上,具有很好的回灌条件。但目前回灌的水源和蓄水设施尚未解决,根据原有设计,回灌水源为将引黄水引进晋阳湖,再提水到明仙沟蓄水水库,初步估算工程投入约4千万元,水源成本在2元/m<sup>3</sup>以上,存在明显的设施建设和运行成本较高的问题,因此,认为该措施仅可作为应急使用。

⑤平泉关井压流(含关闭东于排水煤矿)。晋祠泉口下游为岩溶地下水承压区,从上固驿到平泉

表1 晋祠泉口对主要补给方案的水位响应

Table 1 The groundwater level response of Jinci spring to the main supply scheme

响应	罗家曲—龙尾头	汾河二库	白家庄矿	明仙沟	平泉自流井
起始响应时间/d	840	120	40	10	40
最大响应时间/d	4380	710	410	370	420
最大响应水位/m	0.117	0.400	1.325	3.871	0.905
平均退水速度/(cm/a)	0.156	1.703	6.425	19.780	4.008
目前水源	一库放水	一库放水、区间来水	关闭降压排水井	无水源(晋阳湖调水)	关闭自流井及排水煤矿
工程	需建低坝	抬高到设计水位	关井	需建提水、蓄水可回灌井	处置井、关矿



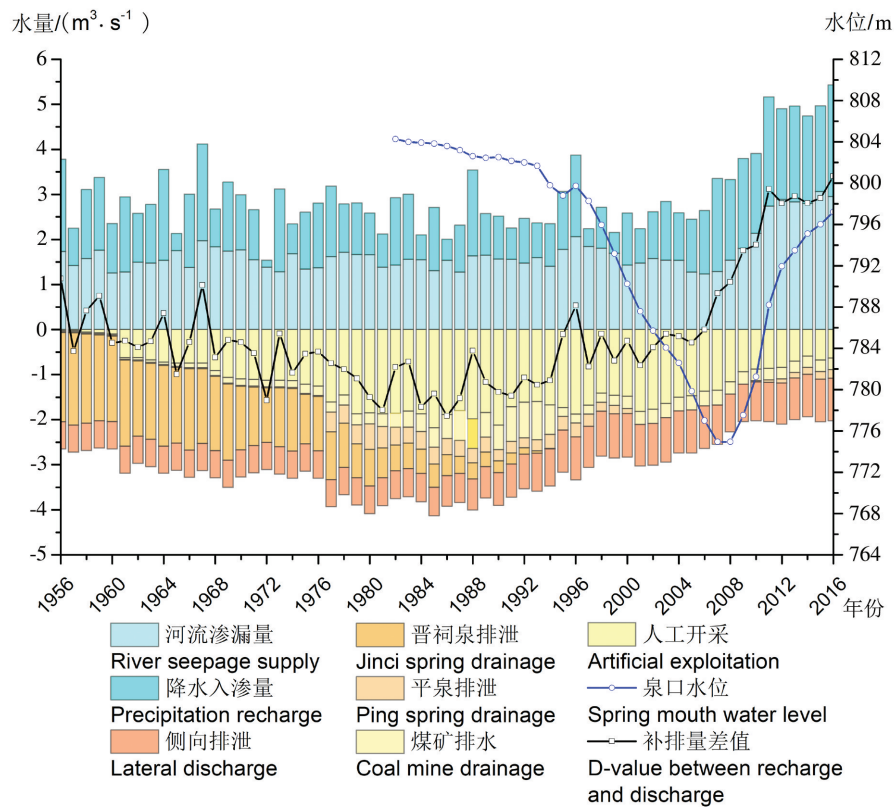


图5 岩溶水均衡计算结果图

Fig. 5 Calculation results of karst water balance

再到东于,调查结果共有14处自流水点(含平泉不老池泉水),2017年12月实测总流量 $16300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,2018年9月实测自流量为 $17185 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,此外还有东于煤矿日排水量 $6672 \text{ m}^3$ (含少量煤系地层水量),总计排水量约 $23000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。如实施自流井封堵并关闭东于煤矿,使压缩排泄量 $1.15 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,持续时间为1年,则根据计算,约40 d后晋祠泉口水位开始抬升,420 d后水位抬升达到最大值 $0.21 \text{ m}$ 。其主要问题是钻孔封堵存在一定难度,目前清徐水利局已对部分自流井加装阀门,可减少非灌溉季节的排水量。

#### 4.3.3 植树造林、涵养水源措施的效果评价

大气降水降落地表后分为地表产流、入渗地下、陆面蒸散三部分,不同的地面植被覆盖状况对它们的分配比例有一定影响。植被可以拦蓄地表径流、消洪补枯、涵养水源,特别是对表层地下水的补给非常有利,但植被叶面截留的雨水蒸发及其本身生长所发生的蒸腾作用又会消耗大量的水分,孰是孰非学界还存在一定争议(陈军锋等,2001;周晓峰等,2001;李玉山,2001;高洋洋等,2009;李慧赟

等,2012;金晓媚等,2013),需要开展定量方面的评价。根据申豪勇等(2017)运用地表能量平衡系统(SEBS)模型由NOAA/AVHRR的遥感数据对碳酸盐岩裸露区和碎屑岩区不同覆盖率下陆面蒸散量的初步研究结果(表2),认为碎屑岩地区的日均蒸散量和月均蒸散量均高于碳酸盐岩地区;碳酸盐岩地区的蒸散量与植被覆盖率之间呈正相关的关系,即蒸散量随着植被覆盖率的增大而增加;在碎屑岩地区中等植被覆盖率地区(40%~80%)的陆面蒸散量最低。这一结论有悖于我们的一般认知,还有待与地表产流相结合做进一步的深入研究,但根据晋祠泉域补给区情况,大气降水除了入渗补给地下水外,汾河以北的碳酸盐岩裸露区和以南的碎屑岩地表水进入汾河干流后还形成河流汇入汾河二库对岩溶地下水的二次渗漏补给,因此,目前建议在泉域南部碎屑岩区实施中等覆盖率的造林工程,而在碳酸盐岩区不宜于开展大规模的植树造林工程。

#### 4.3.4 晋祠泉水复流措施的优化与建议

根据上述对晋祠泉水复流措施效果的定量评

表2 不同岩性地区日蒸散量和月蒸散量  
Table 2 Daily and monthly evapotranspiration in different lithology areas

地面岩性	碳酸盐岩裸露区			碎屑岩区		
	<40	40~80	>80	<40	40~80	>80
植被覆盖率/%	<40	40~80	>80	<40	40~80	>80
日均蒸散量/mm	3.57	3.66	4.04	4.15	4.08	4.23
月均蒸散量/mm	90.67	92.92	100.52	103.94	102.17	105.64

价结果,提出如下晋祠泉水复流的优化方案:

(1)近期措施包括:①抬高二库蓄水水位从目前902 m左右至设计水位905.7 m,可增加渗漏量5.84万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;②关闭处于岩溶地下水强径流带内的白家庄煤矿(已闭坑)降压排水井,减排0.8万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;③处置晋祠泉口下游部分自流井及东于排水煤矿,使排泄量从现状2.3万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 减少到1.15万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(2)远期措施包括:①通过上游汾河一库调节,维持汾河一库断面枯季河水流量3~5 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,可使河水在扫石以上渗漏段的渗漏率达到18%以上;②在泉域上游碎屑岩区实施中等植被率的植树造林、涵养水源措施,有利于晋祠泉域岩溶地下水的补给。

#### 4.4 晋祠泉域岩溶水均衡分析与复流预测

##### 4.4.1 泉域岩溶水均衡分析

岩溶水系统的整体性决定了在定量化评价晋祠泉水各项复流措施的效果及预测泉水出流时间同时,有必要对系统内各均衡要素进行计算分析,掌握泉域岩溶水“补给—排泄”的平衡关系。基于水文地质调查项目,笔者对晋祠泉域岩溶水系统1956—2016年各项水均衡要素进行了分析计算(图5),均衡方程为:

$$Q_{\text{降水}} + Q_{\text{河流}} = Q_{\text{泉}} + Q_{\text{开采}} + Q_{\text{煤矿}} + Q_{\text{侧排}} + Q_{\text{储}} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{降水}}$ —降水入渗补给量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{河流}}$ —河流渗漏量,包括汾河及其他支流在碳酸盐岩裸露段的渗漏量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{泉}}$ —泉水排泄量(包括平泉自流井排泄量), $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{开采}}$ —人工开采量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{煤矿}}$ —煤矿排泄岩溶水量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{侧排}}$ —侧向排泄第四系及深层岩溶水量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{储}}$ —地下水储存量的变化量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

均衡计算结果表明,20世纪70年代以前,泉域岩溶水基本处于补排平衡状态,补排量差仅 $-0.028 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。自1972—2006年,泉域岩溶水一直处于超采状态,多年平均超采系数达0.713,为严重超采区;虽然20世纪80年代以来,针对泉水流量大幅度衰减的现状,山西省有关部门便开始实施了中水回用、综合管理等提高水资源利用率的措施,但终不能挽回泉水枯竭断流的局面,此阶段多年平均补排量差值达到 $-0.816 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。直到2003年10月,山西引黄一期工程通水,逐渐置换了泉域内部分岩溶井的开采量(李辉, 2011); 2005年前后太原市又进行了煤矿整合,关闭了部分大水煤矿,加强煤矿管理,减少了矿坑排水量;加之2006年以后汾河二库蓄水抬高,超过下奥陶统(880 m左右)进入中奥陶统强岩溶发育层,并逐渐越过王封地垒对东南部排泄区形成补给,2007—2016年多年平均补给排泄量差值转负为正,为 $+2.35 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,晋祠泉口水位也在经历一定的滞后期后于2008年止跌回升,至2018年底泉口水位距地表仅1.61 m。

根据均衡计算结果,不难发现以下两点:①2008年以来,晋祠泉域内岩溶水总体呈现正均衡,泉口水位逐年回升,人工排泄量较20世纪80—

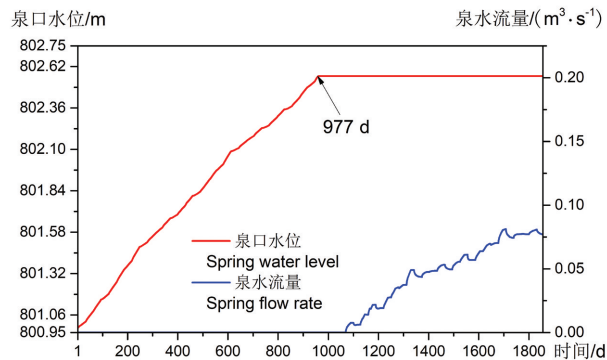


图6 现状条件下晋祠泉水位及流量预测曲线  
Fig. 6 The prediction curve of water level and discharge in Jinci spring under current conditions

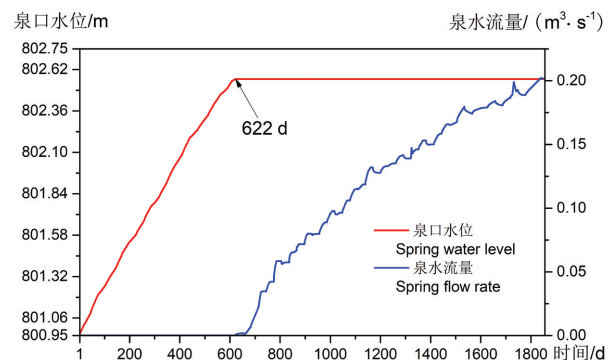


图7 采取近期复流措施后晋祠泉水位及流量预测曲线  
Fig. 7 The prediction curve of water level and discharge in Jinci spring under the condition of adopting the recent reflow measures

90年代明显减少,泉水复流终将实现;②1956—2016年,泉域多年平均补给量与排泄量的差值仍为负值,说明泉域岩溶水的“生态欠账”还未补齐,这也是泉水至今仍未出流的内在原因。

#### 4.4.2 晋祠泉水的复流预测

在水文地质调查工作对晋祠—兰村泉域水文地质条件取得新认识的基础上,笔者将晋祠—兰村泉域岩溶水系统概化为三维、各向异性、二层、非稳定地下水流动系统,采用基于有限元法的数值模拟软件FEFLOW建立了泉域地下水数值模型,以2016年6月—2017年5月为模型识别期,2017年6月—2017年12月为验证期,并对模拟区内26个长观孔进行了水位的识别与验证。

以数值模型为基础,多年平均降水量、现状年开采量为共同输入项,分别对现状条件下与采取近期复流措施条件下2019年1月1日起5年内(1856 d)泉口水位及泉水流量的变化情况进行预测,计算结果如图6、图7所示。

经模型模拟计算可知,现状条件下,晋祠泉水复流所需时间为977 d(约2.7年),5年后泉水流量达到 $0.077 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;通过实施上述3项近期措施后,多年平均降水条件下,泉水复流所需时间为622 d(约1.7年),5年后泉水流量可达到 $0.202 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此从保守的角度出发,可以认为采取近期复流措施后,在不大量增加泉域岩溶水开发和发生极端干旱气候条件下,晋祠泉水有望在2年左右实现复流。

## 5 结 论

(1)针对北方断流岩溶大泉最多的“单斜顺置型”泉域结构特点,构建的泉水复流模式中主要复流措施包括:利用上游水库调节石灰岩渗漏段河水流使渗漏率达到最大;通过蓄水工程增加河水渗漏对地下水的补给;在岩溶地下水强径流带以及与泉水密切的富水区实施关井压采与人工回灌补给;加强煤矿带压区疏干排水的监控;封堵泉口下游自流井;开展泉域入渗补给区分区植树造林、涵养水源等措施。

(2)通过河流渗漏段流量与渗漏量关系实测法和泉域岩溶地下水渗流数值模型基础上的响应矩阵法定量评价泉水复流效果,提出的评价指标包括:使河流渗漏率达到最大、对脉冲输入量的起始

响应时间、最大响应值、最大响应时间、水位响应退水速率以及具体措施实施条件和经济成本匡算。

(3)对晋祠泉水复流措施效果的定量评价结果表明,汾河罗家曲—龙尾头碳酸盐岩渗漏段筑坝增补远源补给措施所需起效时间长,效果不显著;明仙沟人工回灌措施虽然起效快,但退水速率迅速,持续性差,且在目前尚无补给水源前提下实施成本较高,宜于用作应急措施。比较而言,抬高汾河二库水位至设计高程、在岩溶水强径流带内实施关井压采措施、封堵泉口下游自流井及关闭部分带压区煤矿措施从经济、晋祠泉的响应效果以及可持续性方面更为有利。

(4)根据建立的岩溶地下水渗流数值模型预测,通过采取抬高二库蓄水位905.7 m;关闭处于岩溶地下水强径流带内的白家庄煤矿降压排水井;处置晋祠泉口下游14处自流井及东于排水煤矿,使排泄量从现状 $2.3 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 减少50%措施后,在不大量增加泉域岩溶水开发和发生极端干旱气候条件下,可望在2年左右实现晋祠泉水复流。

**致谢:**论文编写中得到了山西水利厅梁文彪教授级高级工程师、骈元高级工程师的帮助和中国地质研究监测院李文鹏教授级高级工程师的指导,谨此表示衷心感谢!

## Reference

- Chai Junfang. 2011. Discussion on the development and protection of Huo Spring karst groundwater[J]. Shanxi Water Resources, 27(08): 15-16(in Chinese).
- Chen Junfeng, Li Xiubin. 2001. The impact of forest change on watershed hydrology—Discussing some controversies on forest hydrology[J]. Journal of Natural Resources 15(5): 475-478 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohui. 1989. The leakage of Yang Maowan reservoir and the re-flow of Long Yansi spring [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, (1): 48-52 (in Chinese).
- Dang Yuejun. 2016. Analysis of Leakage in Gujiao Reach of Fenhe River in Jinci Spring Basin[J]. Journal of China Hydrology, 36(2): 62-66 (in Chinese with English abstract).
- Gao Bo. 2002. Causes of flow rate decrease of Guozhuang Spring and countermeasures[J]. Water Resources Protection, (1): 64-65 (in Chinese).
- Gao Yangyang, Zuo Qiting. 2009. Impact research of vegetation cover change on the total evapo-transpiration in a watershed[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 20(2):26-31 (in Chinese)

- with English abstract).
- Guo Fangfang, Liang Yongping, Wang Zhiheng, Shen Haoyong, Zhao Chunhong. 2018. Attribution of spring fields and calculation of seepage of the second reservoir of Fenhe River in Xishan mountain, Taiyuan, Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 37(3): 228–238 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ziyang, Zhou Junju, Zhang Lili, Wei wei, Cao Jianjun. 2018. Climate dry–wet change and drought evolution characteristics of different dry–wet areas in northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(6):1908–1919 (in Chinese with English abstract).
- Jian Yuxiang, Fan Yongping, Sun Rui, Wei Lufeng. 2018. Analysis of groundwater environmental impact and protection measures of Jinci spring water replenishment project[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 35(4): 20–22 (in Chinese).
- Jin Xiaomei, Guo Renhong, Xia Wei. 2013. Variation of regional evapotranspiration of Qaidam Basin using MODIS data[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(6): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- Li hui. 2011. Discussion on water resources management in taiyuan water–supply area of Shanxi Wangjiazhai Yellow River Diversion Project (YRDP) [J]. *Sci–Tech Information Development & Economy*, 21(16): 166–169(in Chinese with English abstract).
- Li Huiyun, Zhang Yongqiang, Wang Bende. 2012. Separating impacts of vegetation change and climate variability on streamflow using hydrological models together with vegetation data[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 42(8): 963–971 (in Chinese).
- Li Xilin, Wang Laigui, Han Liang. 2008. Study on of the mechanism water–rock interaction of mine water from abandoned mines during infiltration through coal rock[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 19(5): 11–14 (in Chinese with English abstract).
- Li Yue, Liu Jiahong, Sang Xuefeng, Yuan Fei. 2013. Study on eco–water diversion quantity for clean water restoration of Fenhe River[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 44(9): 21–25(in Chinese with English abstract).
- Li Yushan. 2001. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 16(5):420–426 (in Chinese with English abstract).
- Liang Tengfei, Cheng Jianmei, Zhang Naiyan. 2020. Numerical study on surface water leakage replenishment of the Fenhe 2<sup>nd</sup> reservoir into the Jinci spring system[J]. *Carsologica Sinica*, 39 (2): 147–153 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Gao Hongbo, Zhang Jianghua, Huo Jianguang, Wang Taoliang. 2005. Preliminary quantitative analysis on the causes of discharge attenuation in Niangziguan spring[J]. *Carsologica Sinica*, (3):227–231(in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Gao Xubo, Zhao Chunhong. 2018. Review characterization, evolution, and environmental issues of karst water systems in Northern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 26:1371–1385.
- Liang Yongping, Han Xingrui, Wang Weitai, Zhao Chunhong. 2013. Variations of karst water environmental problems in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 32(1):34–42 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Shi Donghai, Li Chunji, Wang Weitai, Zhao Chunhong, Li Xiaofeng, Wei Yanhua, Xu Fengwei. 2011. Test and research on the relationship between runoff and leakage on a karst percolation zone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 38(2): 19–26 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Wang Weitai. 2010. The division and characteristics of karst water systems in Northern China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(6): 860–868 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Zhang Fawang, Shen Haoyong, Tang Chunlei, Zhao Chunhong, Wang Zhiheng, Hou Hongbin, Ren Jianhui, Guo Fangfang. 2019. Recognition of the critical hydrogeological condition of Jinci Spring and Lancun Spring[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 46(1): 11–18 (in Chinese with English abstract).
- Luan Qinghua, Li Wei, Liu Jiahong, Chu Junying. 2015. Ecological influence and value evaluation of Fenhe River water diversion in order to reflow[J]. *Yellow River*, 37(5): 62–65(in Chinese with English abstract).
- Ma Teng, Wang Yanxin, Hao Zhenchun. 2001. The cause analysis for the declining discharge of Shen Tou spring and the forecast of its evolution trend[J]. *Carsologica Sinica*, 20(4): 261–267(in Chinese with English abstract).
- Niu Lei, Chen Li, Jiang Shengguo, Jia Chao. 2014. Study on influence of coal mining on aquifer—A case study on diggings in Jiaozuo[J]. *Groundwater*, 36(1): 45–47 (in Chinese with English abstract).
- Shen Haoyong, Liang Yongping, Cheng Yanng. 2017. Study on the regional evapotranspiration over different surface conditions of the Longzici spring drainag [J]. *Carsologica Sinica*, 36(2): 234–241 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoli, Liang Guohua, Nie Xiangtian. 2007. Research on groundwater management model and its application based on unit pulse saline intrusion response matrix[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 47(4): 589–592(in Chinese with English abstract).
- Wang Junping. 2015. Analysis and suggestion on flow attenuation of Chengtoughui Spring[J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, (3):30–31.
- Ye Haidong. 2006. Study on the Reasons of the Flow Reduction of the Longzici Karst water and protecting measures[J]. *Sci–Tech Information Development & Economy*, (15):148–149(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian. 2010. The situation and tasks for northern karst

- research of our country[J]. *Carsologica Sinica*,29(3):219-221 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingan. 2004. Study on the leakage of Taoqupo reservoir in Shaanxi Province[J]. *Groundwater*, 26(2): 150-152 (in Chinese).
- Zhao Weili. 2013. The relationship between Pingquan Spring and Jinci Spring and the possibility analysis on Jinci Spring's Reflow[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, (4): 83-89 (in Chinese).
- Zhou Xiaofeng, Zhao Huixun, Sun Huizhen. 2001. Proper assessment for forest hydrology effect [J]. *Journal of Natural Resources* 16(5): 420-426 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柴俊芳. 2011. 霍泉岩溶地下水开发及保护对策探讨[J]. *山西水利*, 27(08):15-16.
- 陈军锋, 李秀彬. 2001. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. *自然资源学报*, 15(5): 475-478.
- 陈晓晖. 1989. 羊毛湾水库渗漏与龙岩寺泉水复现[J]. *水文地质工程地质*, (1): 48-52.
- 党跃军. 2016. 晋祠泉域汾河干流古交段河道渗漏分析研究[J]. *水文*, 36(2): 62-66.
- 高波. 2002. 郭庄泉流量衰减原因分析及对策[J]. *水资源保护*, (1): 64-65.
- 郭芳芳, 梁永平, 王志恒, 申豪勇, 赵春红. 2018. 山西太原西山汾河二库的泉域归属及其渗漏量计算[J]. *中国岩溶*, 37(3): 228-238.
- 高洋洋, 左其亭. 2009. 植被覆盖变化对流域总蒸散量的影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 20(2): 26-31.
- 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 魏伟, 曹建军. 2018. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. *生态学报*, 38(6):1908-1919.
- 菅宇翔, 范永平, 孙瑞, 魏路峰. 2018. 晋祠泉补水工程的地下水环境影响及保护措施分析[J]. *水利水电工程设计*, 35(4): 20-22.
- 金晓媚, 郭任宏, 夏薇. 2013. 基于MODIS数据的柴达木盆地区域蒸散量的变化特征[J]. *水文地质工程地质*, 40(6): 8-12.
- 李辉. 2011. 试论万家寨引黄工程太原供水区水资源管理[J]. *科技情报开发与经济*, 21(16): 166-169.
- 李慧赟, 张永强, 王本德. 2012. 基于遥感叶面积指数的水文模型定量评价植被和气候变化对径流的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 42(8): 963-971.
- 李喜林, 王来贵, 韩亮. 2008. 废弃煤矿矿井水在煤岩体入渗过程中的水岩作用机理研究[J]. *水资源与水工程学报*, 19(5): 11-14.
- 李玉山. 2001. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. *自然资源学报*, 16(5): 462-430.
- 李悦, 刘家宏, 桑学峰, 袁飞. 2013. 汾河清水复流生态水量研究[J]. *水利水电技术*, 44(9): 21-25.
- 梁腾飞, 成建梅, 张乃俨. 2020. 基于数值模拟的汾河二库对晋祠泉岩溶水系统渗漏补给作用研究[J]. *中国岩溶*, 39(2):147-153.
- 梁永平, 高洪波, 张江华, 霍建光, 王桃良. 2005. 娘子关泉流量衰减原因的初步定量化分析[J]. *中国岩溶*, (3):227-231.
- 梁永平, 韩行瑞, 王维泰, 赵春红. 2013. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. *中国岩溶*, 32(1):34-42.
- 梁永平, 石东海, 李纯纪, 王维泰, 赵春红, 李晓峰, 魏燕花, 徐峰伟. 2011. 岩溶渗漏河段来水量与渗漏量间关系测试研究[J]. *水文地质工程地质*, 38(2): 19-26.
- 梁永平, 王维泰. 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. *地球学报*, 21(6): 860-868.
- 梁永平, 张发旺, 申豪勇, 唐春雷, 赵春红, 王志恒, 侯宏冰, 任建会, 郭芳芳. 2019. 山西太原晋祠—兰村泉水复流的岩溶水地质条件新认识[J]. *水文地质工程地质*, 46(1): 11-18.
- 栾清华, 李玮, 刘家宏, 褚俊英. 2015. 汾河清水复流工程生态影响及价值评价[J]. *人民黄河*, 37(5): 62-65.
- 马腾, 王焰新, 郝振纯. 2001. 神头泉流量衰减原因分析及趋势预测[J]. *中国岩溶*, 20(4): 261-267.
- 牛磊, 陈立, 江胜国, 贾超. 2014. 采煤对地下含水层的影响研究—以河南焦作矿区为例[J]. *地下水*, 36(1): 45-47.
- 申豪勇, 梁永平, 程洋. 2017. 龙子祠泉域不同下垫面蒸散量的对比研究[J]. *中国岩溶*, 36(2): 234-241.
- 王国利, 梁国华, 聂相田. 2007. 基于单位脉冲—海水入渗响应矩阵的地下水管理模型及应用[J]. *大连理工大学学报*, 47(4): 589-592.
- 王军平. 2015. 城头会泉流量衰减分析与建议[J]. *山西水土保持科技*, (3):30-31.
- 叶海东. 2006. 龙子祠泉岩溶水流量衰减原因及防治对策[J]. *科技情报开发与经济*, (15):148-149.
- 袁道先. 2010. 我国北方岩溶研究的形势和任务[J]. *中国岩溶*,29(3): 219-221.
- 赵伟丽. 2013. 平泉与晋祠泉的关系以及晋祠泉复流的可能性分析[J]. *山西水利科技*, (4): 83-89.
- 张兴安. 2004. 陕西省桃曲坡水库库区渗漏问题探析[J]. *地下水*, 26(2): 150-152.
- 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 2001. 正确评价森林水文效应[J]. *自然资源学报*, 16(5): 420-426.