

王焰新. 我国北方岩溶泉域生态修复策略研究: 以晋祠泉为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 331-344.

DOI: 10.11932/karst20220301

我国北方岩溶泉域生态修复策略研究 ——以晋祠泉为例

王焰新

(中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:我国北方岩溶分布面积广, 岩溶泉水资源丰富, 是岩溶区工农业及居民生活的优质供水水源。但在全球气候变化和采煤等强烈人类活动的叠加作用下, 我国北方岩溶泉水流量衰减, 水质恶化, 岩溶泉域生态环境功能下降。通过合理、适度的人工干预, 强化岩溶大泉的自然恢复机能, 并最终实现泉域生态环境修复, 是当前我国生态文明建设的先行区和重点领域。论文在分析研究晋祠泉断流原因的基础上, 针对性地提出并科学地评估了汾河二库强化渗漏补给、泉域岩溶水关井压采、煤矿区保水限采、近源生态补水和远源河道渗漏补给等一系列措施及预期效果, 以期推进晋祠泉域岩溶地下水生态环境得到根本性改善。该研究工作有望对我国北方岩溶大泉的生态修复形成示范效应, 为遏制我国岩溶区生态恶化现象提供科学依据。

关键词:北方岩溶泉; 生态修复; 渗漏补给; 地下水资源; 水化学; 成效分析

中图分类号: P641; X171.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 03-0331-14 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

我国北方岩溶分布面积广, 岩溶地下水存储量大, 岩溶泉水资源丰富, 水质良好, 始终是岩溶区工农业及居民生活的优质供水水源^[1-6]。但北方岩溶区受天然地质条件限定, 第四系和煤系地层直接沉积在岩溶地层之上, 呈现出一种“煤在楼上, 水在楼下”的共生格局^[7-9]。煤炭开采和工农业生产等强烈人类活动, 势必对岩溶水系统和水环境产生强烈影响^[10-13]。自20世纪50年代以来, 在全球气候变化和采煤等强烈人类活动的叠加作用下, 我国北方岩溶泉水流量下降, 水质恶化, 岩溶泉域生态环境功能下降^[2-3, 14-15]。因此如何采取合理的措施, 通过适度的人工干预, 强化岩溶大泉的自然恢复机能, 并最终实现泉域生态环境修复, 是当前我国生态文明建设的先行区和重点领域。

我国岩溶面积较大, 对岩溶水系统的科学认识尚不完善, 对岩溶水的开发利用、保护与岩溶生态环境修复往往会面临科学依据缺乏的现状。本文以我国北方晋祠泉域为代表, 通过有针对性地开展构造地质、勘查地球物理、水文地质、环境水文地球化学、煤田水文地质、地质模型等调查研究工作, 把握泉域岩溶地下水形成-运移形成的宏观、微观地质条件, 查明晋祠泉流量衰减至断流的成因机制, 科学地评估多种生态修复措施对泉域岩溶水系统和泉域生态环境的修复效应, 总结经验, 形成有效的工作指导方案, 有望对我国北方岩溶大泉的生态修复形成示范效应, 为遏制我国岩溶区生态恶化现象提供科学依据。

1 研究区概况

晋祠泉是我国北方著名的岩溶大泉, 也是晋祠历

作者简介: 王焰新(1963—), 男, 教授, 中国科学院院士, 博士生导师, 长期从事水文地质、环境工程的教学与科研工作。E-mail: yx.wang@cug.edu.cn。

收稿日期: 2022-01-30

史文化名胜三绝之一,承担着太原市部分县区工农业生产和城市生活的供水保障任务。晋祠泉群出露于晋源区晋祠镇西山悬瓮山下,由难老泉、圣母泉、善利泉组成。晋祠泉域主体位于太原市西山地区,介于 $111^{\circ}54' \sim 112^{\circ}33'E$ 和 $37^{\circ}33' \sim 38^{\circ}19'N$ 之间。晋祠泉域东部边界上段自沙沟村经郑家梁到昔湖洋村,中段沿柳林河谷自昔湖洋村经红咀上、下槐村到石马村,下段自三给村到汾河二坝。南部与太原平原相接。西部以岭底向斜轴部、狐堰山构造隆起带、西社—申堂沟断裂带、支家庄到胡家庄为边界。北部以石岭关—康家会断裂带为边界。行政区划以太原市的古交

市、清徐县、晋源区、万柏林区所辖范围为主,局部涉及尖草坪区、娄烦县和交城、静乐等九县(区),总面积 $2\,732.0\text{ km}^2$,其中裸露和浅覆盖面积为 953.4 km^2 ,埋藏区面积 $1\,472.4\text{ km}^2$,第四系平原区面积 306.2 km^2 。

研究区属典型的温带半干旱大陆性季风气候,干旱多风,雨量集中,蒸发强烈,四季分明,昼夜温差大及无霜期短为其典型特征。区内多年平均降雨量(1959—2018年)为 465.1 mm 。(图1),降雨时空分布极不均匀,年内60%的雨量集中在汛期,6-9月份。降水量的地域分布特征为山区大于盆地,西部大于东部,中部大于北部和南部。

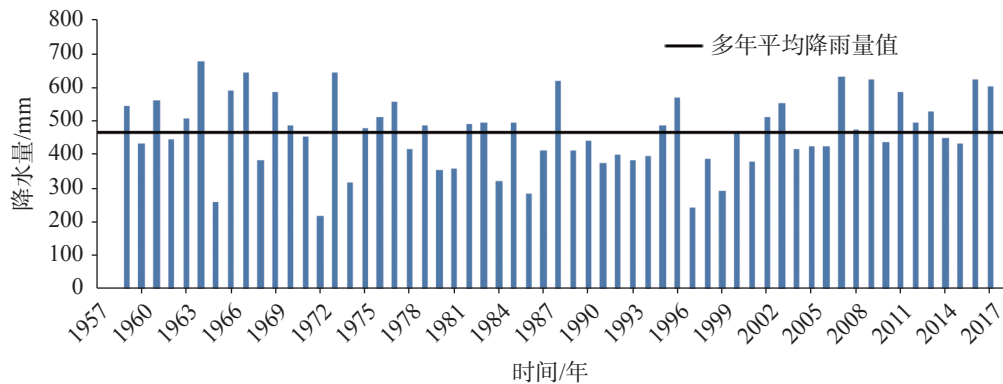


图1 太原市晋祠泉域多年降雨量柱状图

Fig. 1 Histogram of annual rainfall in Jinci spring area of Taiyuan City

区内多年平均蒸发量 $1\,871.8\text{ mm}$ (20 cm观测皿观测值)。多年平均气温 $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $39.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。平均相对湿度60%。

区内地表水系均属黄河流域汾河水系(图2)。汾河为区内主要河流,自汾河水库至上兰村注入太原盆地,流经长度 85.25 km ,多年平均来流量 $9.16\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。研究区内分布有天池河、屯兰川、狮子河、原平川、大川河、梵石沟、磨石沟、玉门沟、虎玉沟、冶峪沟、风峪沟、柳子沟、白石沟等多条季节性河流,均为汾河一级支流。

晋祠泉域区大部分范围属于吕梁山山区,东部和南部的平川区属于晋中盆地。山区一带地势一般较为陡峻,海拔高程在 $1\,300 \sim 2\,160\text{ m}$ 。盆地区地势较为平缓,海拔高程为 $752 \sim 850\text{ m}$ 。

晋祠泉域区范围内地层以寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系和三叠系地层为主,主要地层单位为凤山组、冶里组、亮甲山组、马家沟组、峰峰组、太原组、山西组、下石盒子组和上石盒子组。第四系主要分布在太原盆地分山接触带。

晋祠泉域主体变形阶段为燕山期和喜山期^[16],主要发育有NE-SW向和NNW-SSE向的正断层及褶皱组合,大型正断层多组合形成NE-SW向的地堑与地垒。在构造形迹上,西山地区表现为两翼不对称的复式向斜构造,包括数个呈“S”型展布的大型向斜以及一系列小型褶皱。褶皱构造主要由狮子河向斜、马兰向斜和东社向斜、水峪贯向斜等组成,其西翼多陡峭,东翼平缓开阔,多被NE-SW向断层所切割。断裂主要分布在泉域区的SE和SW两侧,构成西山地区天然边界。

晋祠泉域地下水类型丰富^[17],根据含水介质的岩性特征与地下水的赋存条件,研究区地下水类型可分为:碳酸盐岩类裂隙岩溶水、碎屑岩类碳酸盐岩类层间裂隙岩溶水、碎屑岩类裂隙水、松散岩类孔隙水和侵入岩类风化裂隙水。其中碳酸盐岩类裂隙岩溶水分布于整个研究区,为边山断裂带晋祠泉、平泉等泉水的补给来源;碎屑岩类碳酸盐岩类层间裂隙岩溶水和碎屑岩类裂隙水广泛分布于西山中部地区;松散岩类孔隙水广泛分布于太原断陷盆地区和山区

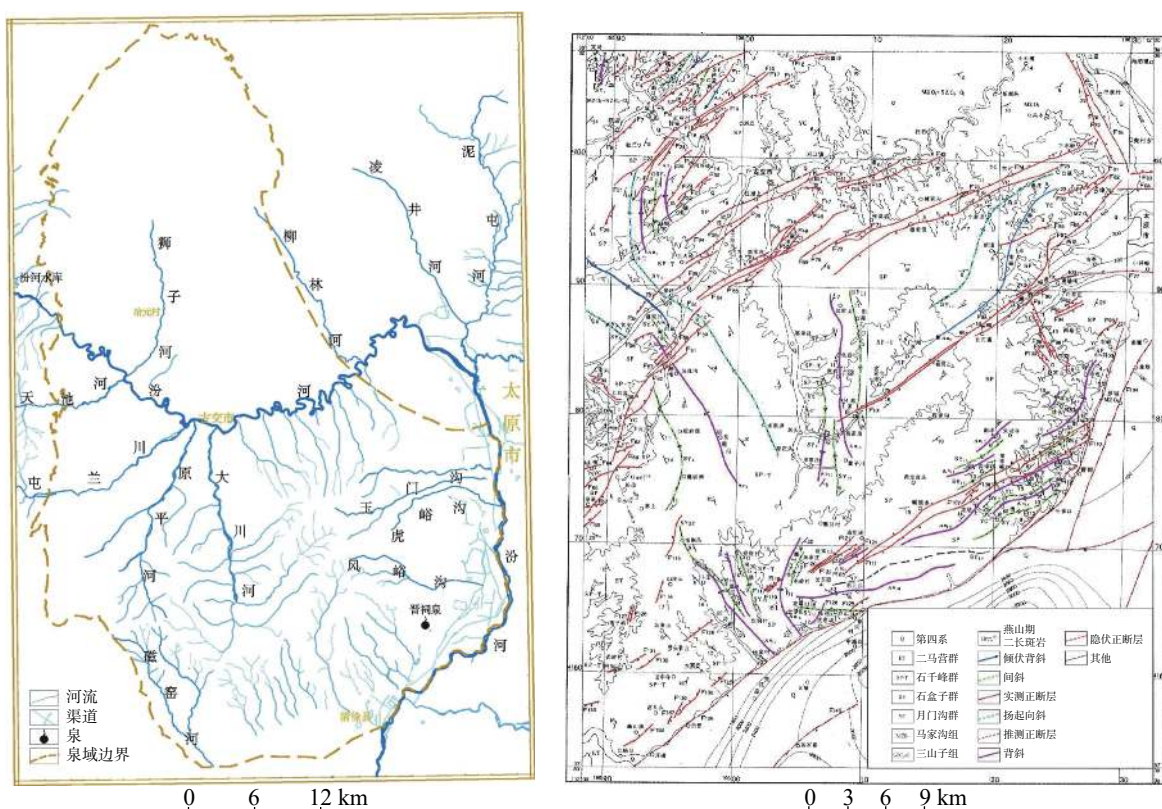


图 2 晋祠泉域水系分布及构造纲要图

Fig. 2 Water system distribution and structural outline map of Jinci spring area

的山间河谷地区;侵入岩类风化裂隙水主要分布于西部以及北部边界以外地区,区内仅有零星分布。

泉域北部为灰岩山区,南部为砂页岩山区。在构造方面,西山地区为一北端翘起,向南倾没的簸箕状向斜构造,形成了一个三面封闭条件较好,一面排泄相对集中的岩溶水系统。区内岩溶水地下水主要受汾河以北大气降雨补给以及汾河渗漏段渗漏补给。岩溶水流向总趋势由北西向南东径流。岩溶水的排泄方式主要为:泉与自流井、人工开采井、煤矿开采、向太原盆地的侧向排泄。泉域岩溶水从补给区到径流排泄区,水温、矿化度、水化学类型等呈现明显的增加趋势。水化学类型由重碳酸盐型逐渐过渡为重碳酸盐-硫酸盐型、硫酸盐-重碳酸盐型、硫酸盐型和硫酸盐-氯化物型。

2 泉水断流原因分析

为了查明晋祠泉域泉水断流的主要原因,我们分析计算了 1960s(1959-1963 年)、1980s(1984-1988 年)以及近年来(2013-2017 年)泉域岩溶水水均衡(表 1)。其中,1960s 研究区岩溶水开采主要以泉水

和浅井的形式加以利用,煤矿开采活动也仅限于上组煤浅层开采,基本处于未扰动的原始状态。通过计算 1960s 岩溶水水均衡能够帮助我们全面认识天然状态下该研究区岩溶水系统水均衡和收支情况。研究区岩溶水和煤炭资源的大量开采主要发生于 20 世纪 80 年代以后^[18-19]。通过计算 1980s 岩溶水系统水均衡,能够直观地展现出晋祠泉断流之前研究区水均衡和岩溶水收支变化情况,从而为分析泉水断流原因提供依据。近年来,在山西省各级政府部门的多项举措下,晋祠泉域岩溶水水位持续回升^[16,20-24]。因此,通过计算近几年的岩溶水水均衡,可以有助于分析适度人工干预下该研究区岩溶水的收支变化情况,为进一步开展泉域生态修复提供依据。

泉域岩溶水水均衡计算结果表明,20 世纪 60 年代时泉域岩溶水资源表现为正均衡,水均衡收入项大于支出项。其中降雨入渗量占了收入项的绝大部分,为 $3.299 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,泉(自流井)的流量与侧向排泄占了支出项的很大一部分,此时开采量在支出项中的占比比较小。20 世纪 80 年代泉域岩溶水资源表现为负均衡,支出项明显大于收入项。但与 60 年代相比,降雨入渗补给量显著减小,为 $2.823 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;人工

表 1 泉域岩溶地下水水均衡摘要表
Table 1 Summary of karst groundwater balance in spring area

	收入/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$				支出/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
	1959-1963	1984-1988	2013-2017		1959-1963	1984-1988	2013-2017
降雨入渗	3.299	2.823	3.418	泉(自流井)	1.798	0.959	0.261
河流渗漏量	0.955	0.742	1.022(2.254*)	开采	0.307	1.289	1.251
				侧向排泄	1.954	1.889	2.059
总计	4.254	3.565	4.44		4.059	4.137	3.572

注: (*)为考虑了汾河二库渗漏的情况。

开采量逐渐成为支出项中的主要影响因素, 泉(自流井)流量明显下降。近几年泉域岩溶水资源表现为正均衡, 泉域接受补给的水量在经过人工开采、煤矿开采、向太原盆地孔隙水的侧向排泄之后仍然有盈余。水量的连续盈余, 必然使得排泄区岩溶地下水水位持续上升。

综合影响晋祠泉流量与泉口水位动态的各种因素, 分析长时间序列泉域水资源要素变化特征, 可生成以下要素变化图(图 3)。由图 3 可知, 晋祠泉自 1950 年以来经历以下四个阶段:

(1)高水位大流量阶段(1970 年以前): 该阶段泉域内降雨量较大, 煤矿排水量少, 岩溶水开采量小并且主要以分散式开采为主, 泉水水位较高。

(2)水位下降断续出流阶段(1970-1985 年); 该阶段降雨量波动较大, 岩溶水分散式开采井不断增加, 城镇集中供水水源地相继建成, 岩溶水开采量大

大增加, 泉水水位较之前有所下降。

(3)较低水位断流阶段(1985-2008 年): 该阶段降雨量相对较少, 煤矿抽排岩溶水量大, 岩溶水开采量也增大, 泉水水位持续下降。

(4)人工调控阶段(2008-至今): 该阶段降水量较大且存在一定波动, 煤矿排水量与岩溶水人工开采量在人为调控之下减少, 泉水水位逐渐升高。

综上所述, 总结晋祠泉断流的原因如下:

(1)降水频率分析结果显示, 20 世纪 60 年代—90 年代期间, 晋祠泉域内经常出现枯水年或偏枯年, 特别是 1974-1994 这 20 年间, 只出现 1 次丰水年和 1 次偏丰年, 其余多为偏枯年份, 1990 年后更是连续偏枯年份。因此, 可认为, 降雨补给减少是晋祠泉断流的重要原因。

(2)对泉域不同历史时期的水均衡计算结果表明, 1960s 泉域岩溶地下水系统基本处于稳定平衡阶

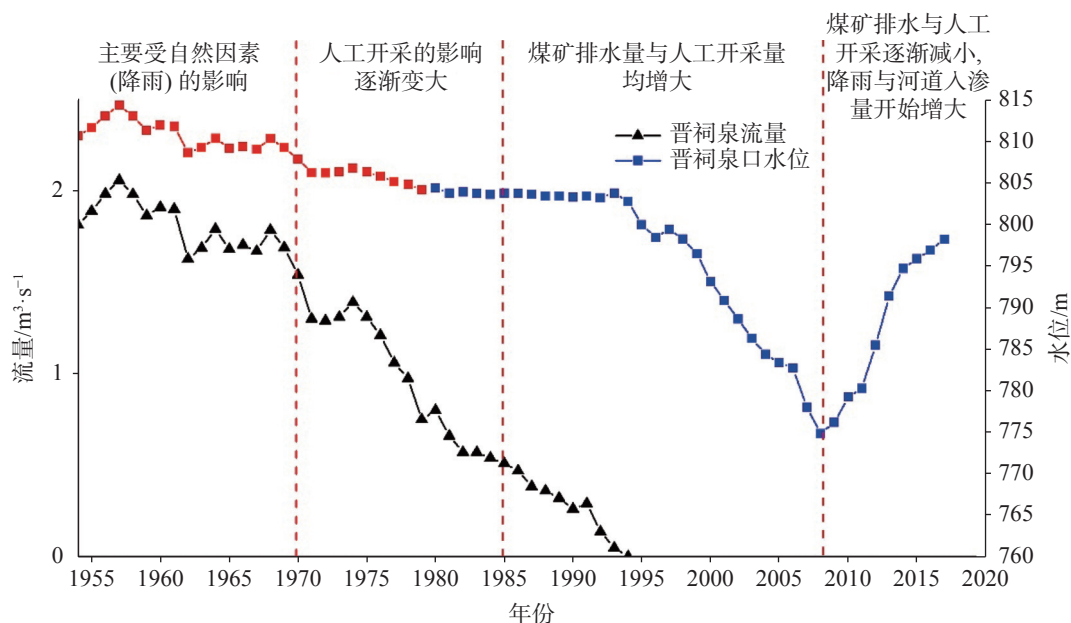


图 3 多年序列晋祠泉流量及水位变化曲线

Fig. 3 Flow and water level change curve of Jinci spring in multi-year sequence

段,而到20世纪80年代,随着岩溶水开采量和采煤排水的增加,泉流量减少,泉域岩溶地下水系统处于负均衡阶段。到20世纪90年代,岩溶水总开采量进一步增加,岩溶水系统负均衡加剧。由此可见,包括采煤排水在内的岩溶水开发利用是晋祠泉断流的直接原因。

3 泉域生态修复措施及成效分析

为了促进晋祠泉域生态环境快速健康恢复,论文提出了汾河二库强化渗漏补给、泉域岩溶水关井压采、煤矿区禁采限采、近源和远源河道生态补给(地表水源置换地下水)等一系列措施,并预测评估了预期效果,以期推进晋祠泉域岩溶地下水生态环境得到根本性改善。

3.1 汾河二库加强渗漏补给成效分析

3.1.1 二库渗漏影响的确认

汾河二库是一座以防洪、供水为主的大型水库^[25]。2010年9月汛限水位提高到895 m左右,2014年9月水库蓄水位达到900 m,此后保持在此高水位运行。

根据库区地质条件,当水库蓄水位达到正常蓄水位(905 m)时,库区地表水可以通过下马家沟组灰岩向太原西山一带渗漏^[26],且补给量随着水位的升高呈增加趋势。如图4所示,汾河二库区地表水渗漏量与蓄水位大致呈线性关系:2001-2008年,汾河二库蓄水位上升缓慢,泉域内库区地表水渗漏量稳定在 $0.46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;2008年之后库区蓄水

位开始快速增加,地表水渗漏补给量同步增加,至2017年12月,库区地表水水渗漏补给量达到了 $1.54 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。如下图所示,若无二库蓄水,汾河寨上一扫石段河道渗漏量在 $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 左右波动。可见汾河二库蓄水水位的逐步提高,极大增加了库区地表水渗漏量,是晋祠泉域岩溶水系统的重要补给项。

水化学和同位素证据也进一步证明了汾河二库对晋祠泉域岩溶水的显著补给效应(图5)。如图5a所示,在汾河二库周边岩溶水 $\delta\text{D}-\text{Na}$ 散点图中,吾儿崂和解家塔组成的区域代表了汾河二库北侧岩溶地下水特征,即 δD 值和 Na^+ 偏低,汾河二库1和汾河二库2水样点的区域代表了二库水的特征。由图可以发现,二库周边的岩溶水样点落在了二库北侧补给区端元和二库地表水端元之间的混合线附近,该特征进一步说明了二库周边的岩溶水受到了二库水的渗漏补给影响。其中冀家沟、银角村、扫石村等处更为靠近二库地表水端元,表明其受到二库水渗漏补给的影响较大。同时,银角村的岩溶水样点呈现较高 δD 值,表明其可能受到了更加强烈的蒸发作用的影响。而扫石村岩溶水中更高的 Na^+ 含量,表明其除了接受汾河二库的补给外,还可能受到了地表近源生活污水的渗漏影响。

针对放射性同位素 ^{14}C 和主量元素 Cl^- 的联合分析也进一步确认了汾河二库水对晋祠泉域岩溶水的渗漏补给效应(图5b)。研究区岩溶水 ^{14}C 年龄大部分均在4000年以上,表明其经历了较长的运移时间。而汾河二库库水的年龄则在60-100年之间,说明二库水体中有一大部分来自于岩溶地下水的补给。比较特别的是,冀家沟、银角村、扫石村处的岩溶水远

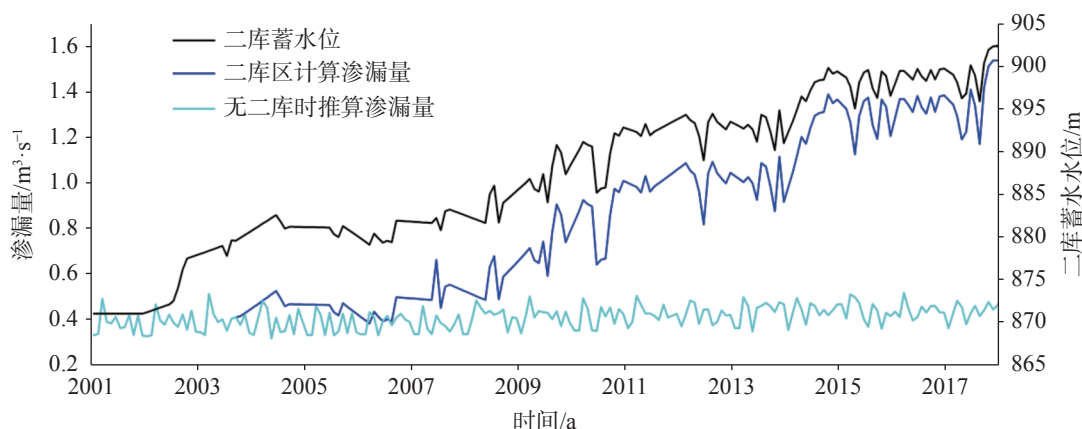
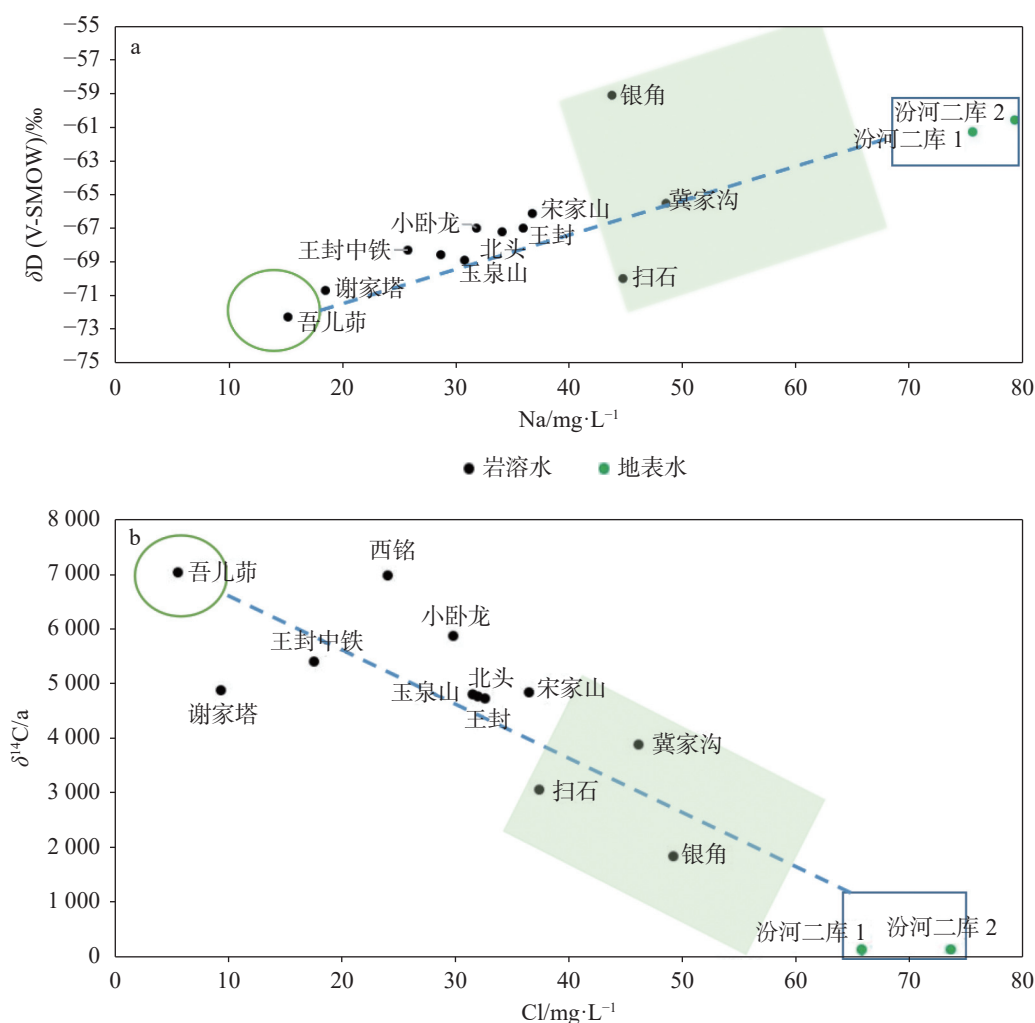


图4 汾河二库回水区渗漏量对比图(2001-2017年)

Fig. 4 Comparison of leakage in backwater area of Fenhe reservoir II (from 2001 to 2017)

图5 汾河二库及周边岩溶水水化学-同位素散点图 $^{87/86}\text{Sr}-\text{D}$ Fig. 5 Hydrochemistry isotope scatter diagram of Fenhe Reservoir II and surrounding karst water $^{87/86}\text{Sr}-\delta\text{D}$

高其它岩溶水样点,更为靠近汾河二库地表水。结合前述分析,判定上述处于地表水和岩溶水混合线中央的三处岩溶水受到了二库年轻、高氯离子浓度地表水的渗漏补给。

3.1.2 二库渗漏影响模拟与预测

通过构建晋祠泉岩溶水系统流场演化模型,改变模型中汾河二库回水区长时间序列入渗量,我们利用数值模拟的方法开展了汾河二库渗漏对晋祠泉域岩溶水流场演化的影响(图6)。

图6展示了二库蓄水影响下晋祠泉域岩溶水系统流场演化过程。在补给区,由于汾河二库蓄水抬升了地表水面高程,增大了对相邻岩溶地下水的渗漏补给,减小了该区与补给区地下水位的相对差值,补给区地下水流失量减小,加之其含水层本身储水系数较低,从而使补给区对下水位得到了明显抬

升。2014年之后二库蓄水高程持续抬升,并保持高水位运行,地表水渗漏补给量增加,对比2014年和2018年排泄区地下水位,发现地下水位进一步回升,同时二库作用下的地下水位相比自然渗漏时差值显著增大,说明二库渗漏对于岩溶水的补给起到了非常积极的强化作用。

图6模拟预测了汾河二库高位蓄水情况下晋祠泉域岩溶水系统流场演化过程图。模拟预测考虑了有汾河二库渗漏补给和没有二库渗漏补给两种情景:当汾河二库不发生渗漏补给时,晋祠泉域岩溶水水位在2023年整体呈降低态势。分析原因为,在不考虑二库渗漏补给时,库区地下水因下游消耗而水位降低,从而加大了与补给区地下水间的水力梯度,进而造成上游补给区地下水流动加快,水位相应降低。对于排泄区,不考虑上游二库渗漏补给会使补给量减少,在排泄量持续的情况下必然造成区域地下水

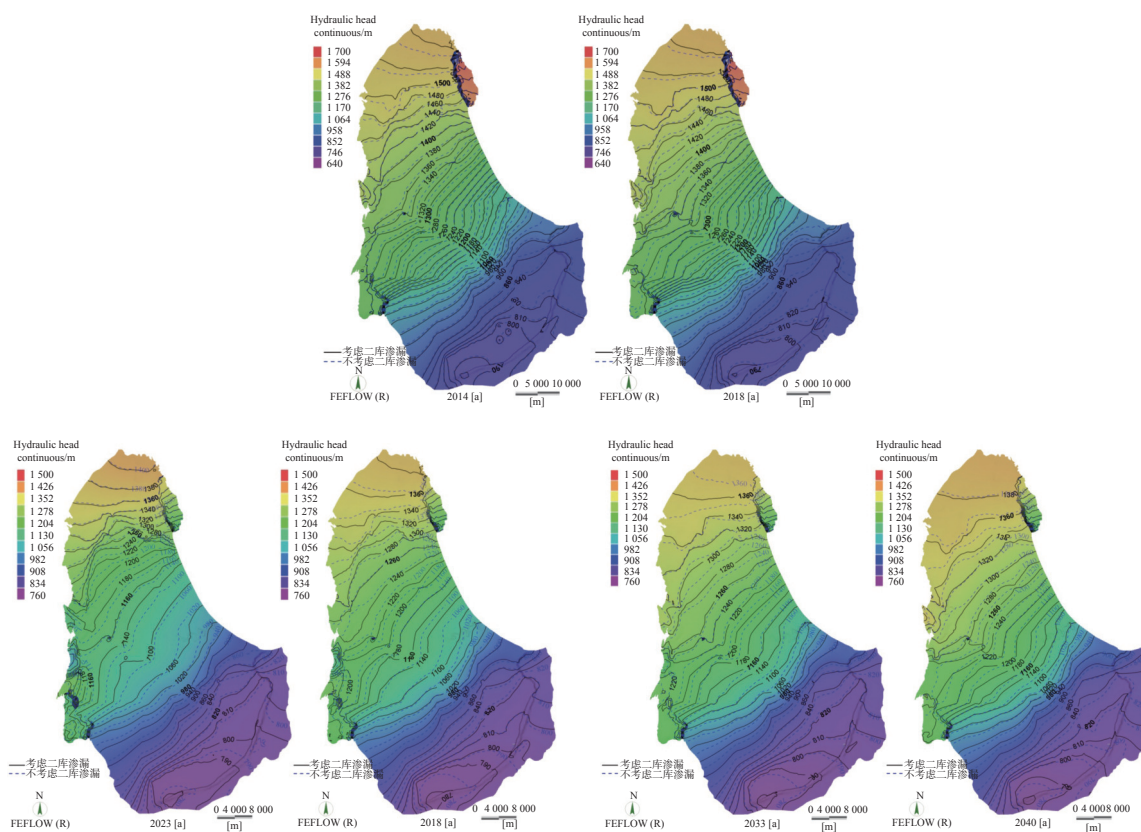


图 6 汾河二库蓄水影响下上马家沟组岩溶水流场演化模拟与预测(2014 年、2018 年)

Fig. 6 Simulation and prediction of karst water flow field evolution in Shangmajiagou formation under the influence of impoundment of Fenhe reservoir II (2014 and 2018)

水位下降。对比 2023、2028、2033、2040 年模拟预测结果发现,在考虑二库渗漏时地下水位则处于持续回升状态,地下水位开始持续回升,其中排泄区最为显著;排泄区水位降落漏斗在缓慢减小。所以,汾河二库渗漏在未来晋祠泉流场演化和泉域漏斗区生态恢复中起到了重要的补给作用。

3.2 河道渗漏(远源)补水成效分析

3.2.1 河道渗漏补水适宜段确认

根据野外调查和区域水文地质条件分析,罗家曲村至龙尾头村岩溶渗漏段,长约 13.0 km 的汾河碳酸盐岩裸露,部分地段构造强烈,段内及上游河段污染少,水质较好,汾河水库不放水时河内基本无水,河段内渗漏明显,为补水有利地段。通过修建拦河坝和渗水井进行蓄水,抬升地下水位,加大晋祠泉域入渗补给,促进晋祠泉域岩溶生态系统早日恢复。

为进一步查明典型渗漏段点及补水适宜性,我们采用特征离子组分和环境同位素示踪手段来加以研究^[9,27-28]。从图 7 可以看出,泉域岩溶地下水中 Na^+

含量均较低,一般低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在泉域北部岩溶裸露补给区,地下水直接接受降雨入渗补给,水岩作用主要以碳酸盐岩的风化溶蚀为主,硅酸盐矿物风化程度低,人类活动影响强度较弱,因此岩溶水中 Na^+ 含量较低。如位于补给区的娄子条村和冶元村等地,岩溶水中 Na^+ 含量只有 $9.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $14.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。沿地下水流径,岩溶水中 Na^+ 含量略有上升,在嘉乐泉、白家沟、李家沟以及汉道岩等地,达到了 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。说明在岩溶地下水向下径流过程中,受岩溶含水层中微量盐岩矿物溶解和地表径流入渗补给的影响,其钠离子含量也存在一定程度的缓慢的上升。比较而言,由于受表生带硅酸盐类矿物风化溶滤作用以及人类活动的共同影响,汾河水中 Na^+ 含量均较高,介于 $67.2 \sim 108.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。采自于泉域渗漏区段(强家庄、策马、扫石村)的岩溶水中 Na^+ 含量则表现出异常的高值,均大于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。据此,可以推断,渗漏段岩溶水中 Na^+ 含量值升高,可能是受地表河水入渗补给影响所致。而采自于汾河渗漏区段的岩溶水中 Na^+ 含量较大的波动范围表明,渗

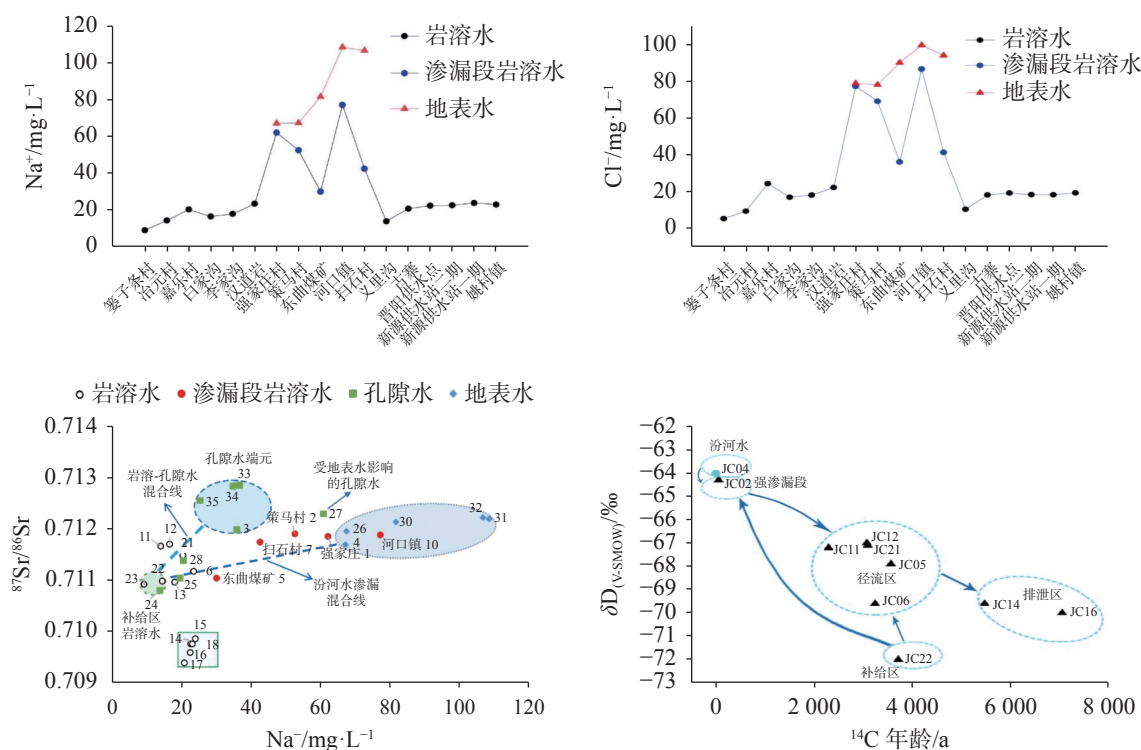


图7 地表水和岩溶水化学—同位素指示汾河主要渗漏段点

Fig. 7 Hydrochemistry isotope of surface water and karst water indicates the main leakage section points of Fenhe river

漏段各处岩溶水受汾河水入渗补给的程度不均一。鉴于 Na^+ 较为稳定的化学活性, 以其含量作为评估指标, 可以发现在各渗漏段点, 汾河水入渗对岩溶水的补给程度大小依次为: 河口镇 > 强家庄 > 策马村 > 扫石村。

由图7可见, 泉域北部补给区岩溶水(姜子条)中 Cl^- 含量较低, 仅为 $5.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 而沿岩溶地下水流径方向, 嘉乐泉、白家沟、李家沟、汉道岩等地岩溶水中 Cl^- 含量呈持续微弱上升趋势, 代表了天然水岩作用和入渗补给情况下的离子浓度富集效应。而在汾河典型渗漏区段岩溶水中 Cl^- 含量则发生显著上升, 强家庄、策马村和河口镇的岩溶水中 Cl^- 含量达到了 $70 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与地表水呈现高度的相似性。但在非渗漏区段, 无论是补给区、径流区还是排泄区, 岩溶地下水中 Cl^- 含量均呈现出较低的离子浓度水平 ($< 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。因此, 我们有理由相信, 汾河渗漏段岩溶地下水中较高的 Cl^- 含量主要来自于河水渗漏补给。以 Cl^- 为参考, 判断汾河渗漏段地表河水的渗漏影响强度顺序为河口镇 > 强家庄 > 策马村 > 扫石村 > 东曲煤矿。这一结果与前述认识基本一致。

环境稳定同位素锶与主量元素(Na)的联用, 有助于更深入地剖析地表水等与岩溶水的渗漏作用关

系^[9]。受硅酸盐岩风化、生活污水和工农业废水排放的影响, 汾河地表水的钠离子含量均较孔隙水和岩溶水有显著升高(图7)如汾河古交段河水中钠离子含量达到了 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。此外, 由于地表水主要经区域水系汇流成河, 其在与硅酸盐岩下垫面相互作用的过程中获得了较高的锶同位素值, 因此主要坐落在图中的右上端。相对地表水而言, 孔隙水受到的污水影响会小一些, 因此其钠离子含量也较低; 但孔隙水因赋存于松散介质中, 与硅酸盐岩风化水解作用强度大, 因而其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素值较高而位于左上角。大部分的岩溶水中钠离子含量较低, 而落在了图中左侧。北部补给区和一部分径流区岩溶水因接受地表降雨径流的快速入渗而呈现出中等的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。特别值得关注的是, 先前识别出的几处受汾河水渗漏严重影响的岩溶地下水, 由于受地表河水中较高的钠离子含量和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值影响, 其 Na 含量值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均有显著上升而落在地表水-岩溶水混合线上。

尽管在整个晋祠泉域, 从补给区到排泄区, 岩溶水的 ^{14}C 年龄是逐渐增大的, 但是在汾河两岸其变化趋势完全不同, 越靠近汾河主河道, 岩溶水的 ^{14}C 年龄就越年轻。从具体的岩溶水样点年龄来看, 在汾

河以北的广泛的碳酸盐裸露补给区,大多数岩溶地下水的 ^{14}C 年龄在 3000 年左右,例如冶元村为 3720 年,嘉乐泉为 3100 年,白家沟为 3080 年,岩溶地下水的平均运移时间较长。在靠近汾河的强家庄村一带,岩溶水 ^{14}C 年龄下降为 1200 年,是较为年轻的岩溶水;而在策马村附近, ^{14}C 年龄检测结果已经是现代碳,其地下水年龄小于 60 年,表明在该处岩溶地下水受到汾河河水的强烈渗漏而补给,成为了现代水。此外,该处较为年轻的岩溶地下水在往径流区流动的过程中,向汾河南岸岩溶含水层扩散流动,与汾河附近的岩溶地下水充分混合从而导致其 ^{14}C 年龄变年轻,如主河道以南、靠近汾河支流天池河的义里沟等处的岩溶地下水 ^{14}C 年龄低至 2300 年,反映出显著的地表河水渗漏混合效应。

3.2.2 河道渗漏补水成效分析

以现状开采模型为基础,分别模拟渗漏补水量为 $839.92\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (方案 1)、 $1128.90\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (方案 2)和 $2000\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (方案 3)时晋祠泉岩溶地下水系统流场演化过程(图)。如图 8 所示,在方案 3 补水条件下,远源补水对于古交地区岩溶地下水流场演

化影响最大,其原因一方面为远源补水--采用的是大流量补水,另一方面为汾河沿岸地下水径流区虽然裂隙发育但是储水系数较小,因此当采用大流量持续补水使地下水响应便会很显著。当补给、径流区地下水位抬升时,排泄区接收上游补给量增多,水位也随之上升,水位响应的时间及变化值主要受远源补水量及径流区渗透系数及排泄区储水系数影响。所以,当远源补水维持在 $2000\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 时泉域岩溶水水位可快速上升,预测晋祠泉域地下水生态环境将在数年内得到显著改善。

3.3 近源补水成效分析

3.3.1 近源补水通道识别

在晋祠泉域水文地质条件调查分析的基础上,进一步通过地下水 NaCl 示踪试验和地球物理勘查以探明晋祠附近明仙沟近源补水的可能性以及相关的水文地质参数。本次试验以明仙沟内钻孔(ZK17)为投源点投放 NaCl,在下游布置电导率监测井和物探测线的方法来识别岩溶水流向和连通性(图 9)。

此次示踪试验在赤桥村监测井监测到显著的电

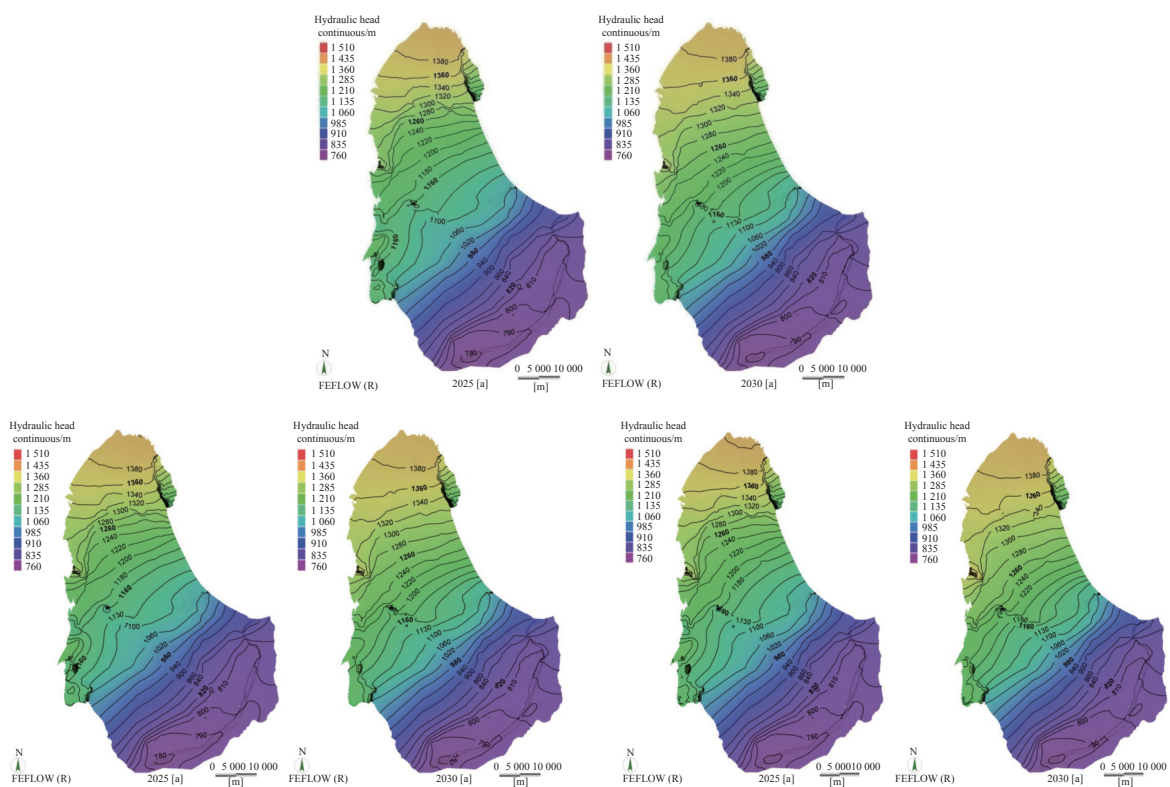


图 8 远源补水 $839.92\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1128.90\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $2000\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 时岩溶地下水流场演化图

Fig. 8 Evolution diagram of karst groundwater flow field at remote source water supplement of $8.3992\text{ million m}^3\cdot\text{a}^{-1}$, $11.289\text{ million m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ and $20\text{ million m}^3\cdot\text{a}^{-1}$

导率变化。从 5 月 29 日开始投盐,经过 10.3 d 之后,电导率开始上升,在 10.9 d 后达到峰值电导率,之后电导率值开始衰减,并于 13.5 d 后基本恢复至初始背景值。以电导率值开始上升时的地下水流速为最快流速,出现峰值电导率时的流速为峰值平均流速,电导率开始恢复为初始值的流速为最慢流速,此次试验投源井与赤桥村监测井的直线距离约为 1035 m,由此计算出该区间内地下水平均流速:最快流速为

$100.98 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$;最慢流速为 $76.89 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$;峰值平均流速为 $95.39 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

充电法勘探解译结果如图 10 所示,其中蓝色虚线区域为盐分随地下水流动路径。由解译结果来看,盐分从明仙沟投源井沿北西—南东向流向赤桥村井。相较该区构造情况而言,在明仙沟 SE 段的监测井-养殖场一带,由于受到邻近沟口的边山断裂(晋祠断裂)活动影响,该区间的次级断裂较为发育,主要形

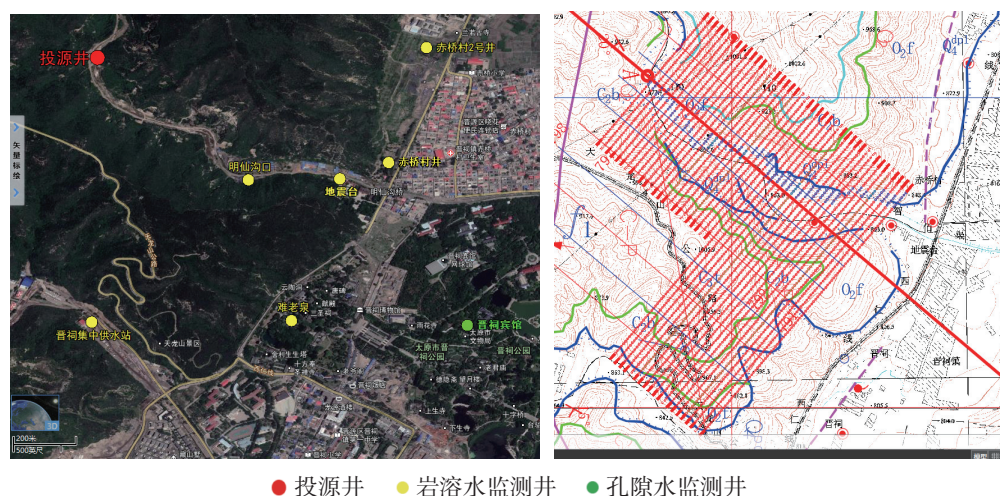


图 9 明仙沟—晋祠泉连通性示踪试验和充电法测线布置图

Fig. 9 Layout of mingxiangou-jinciquan connectivity tracing test and charging method survey line

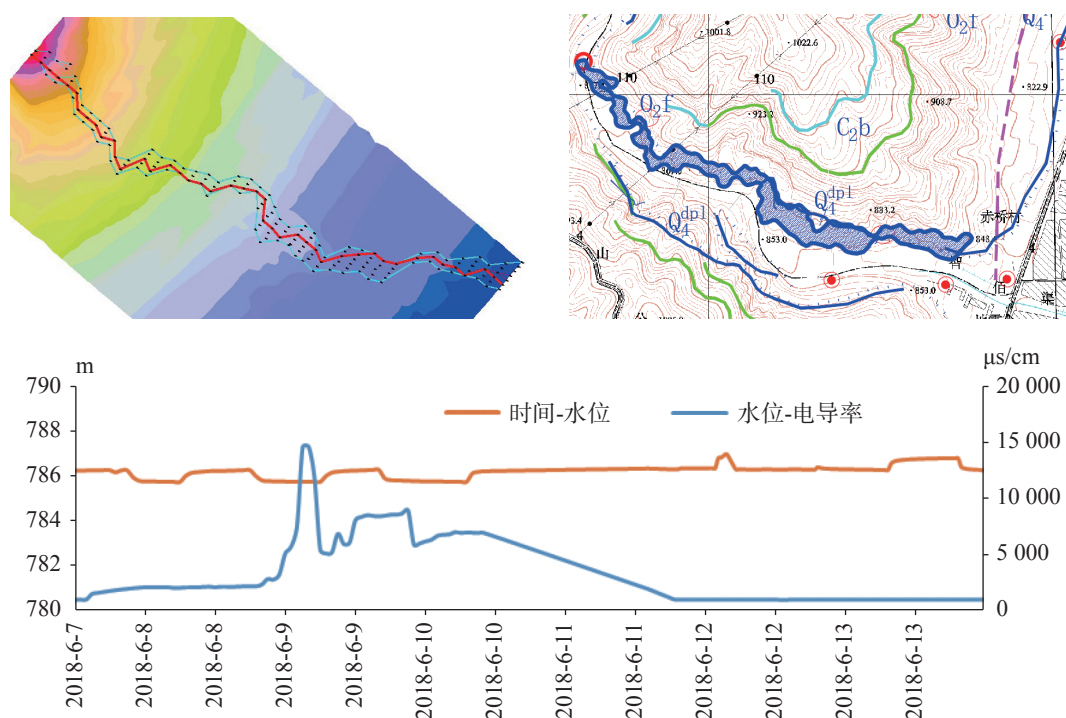


图 10 充电法数据成果及解译结果图(赤桥村监测井电导率及水位变化曲线)

Fig. 10 Charging method data results and interpretation results (conductivity and water level change curve of Chiqiao village monitoring well)

成以阶梯状断层组合为主的正断层组合以及一些小规模的地垒。该区域的南北向断裂及次级裂隙对于明仙沟沟口地下水运移具有明显控制作用,而东西向隐伏断裂导水性相对较弱,该区间地下水流动方向应当以向南或向 SE 为主。由此可以看出,充电法探测的结果与该区构造情况相符,该段地下水流向以南东向沿山谷地形流至明仙沟口。综合以上认识,认为明仙沟是晋祠泉附近比较适宜的近源补给区,且渗水池或渗井坝应该尽量修建在明仙沟后部,即 ZK17 孔西北部比较开阔的区域。

3.3.2 补水成效分析

近源补水工程为促进晋祠泉域生态修复的有力措施之一。为此我们模拟预测了明仙沟生态渗水、开化沟补水和两地同时补水三种方案下,晋祠泉域局部岩溶地下水流程的演变。各方案模拟结果输出的研究区岩溶地下水流程演化如图 11 所示:3 种近源补水方案均显示出良好的修复效果。其中,同时在明仙沟和开化沟补水时补水效果最佳,地下水水位整体回升明显,区域生态环境有望迅速改观。单独补水时,在明仙沟渗漏补水也极其有利于补给区的水资源补充,可以使晋祠泉域岩溶地下水大幅缩短维持现状开采条件下的恢复时间。

3.4 煤矿区保水限排及岩溶水压采成效分析

煤矿开采排放岩溶水和矿区岩溶水超采是晋祠

泉域岩溶生态环境的主要影响因素之一^[29-31]。经调查,2017 年泉域煤矿排放岩溶水量约 $1\,003.68\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 。泉域范围内取用岩溶水较大的煤矿有 5 个,年开采岩溶水量约 $756.09\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 。若采用替代水源,压采煤矿区岩溶水,有望持续恢复矿区及周边岩溶水位。根据煤矿岩溶水开采量及控制开采的难易程度,提出方案 1:官地矿、白家庄矿关井压采,西峪矿保水限排;方案 2:官地矿、白家庄矿、西铭矿、杜儿坪矿关井压采,西峪矿和东于矿保水限排;方案 3:官地矿、白家庄矿、西铭矿、杜儿坪矿、炉峪口矿关井压采,西峪矿、东于煤矿、镇城底矿、屯兰矿、马兰矿、东曲矿、西曲矿、原相矿和福昌矿保水限排。

依据方案 1-3,模拟晋祠泉域岩溶地下水流程演化(图 12),相比维持现状开采条件,对实施煤矿区保水限排和关井压采可以有效地消除采矿活动造成的矿区周边岩溶地下水降落漏斗。当降落漏斗逐渐被填平后,排泄区上游来水中途消耗量减少,有利于排泄区岩溶地下水资源的补充和地下水水位持续回升。方案 3 中对多个煤矿进行关井压采、保水限排,使岩溶水资源的减排数量最大,水位回升效果也最佳。方案 2 相比方案 3 保水量减少了 $830.66\text{ 万 m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,但模拟得到的晋祠泉水位回升时间仅相差 2 个月,说明在短期内方案 2 具有成本低、效益好的优势。方案 1 对岩溶水资源的恢复效果有限,对区域水资源保护和生态环境修复的效果不显著,明显劣于方案 2 和 3。

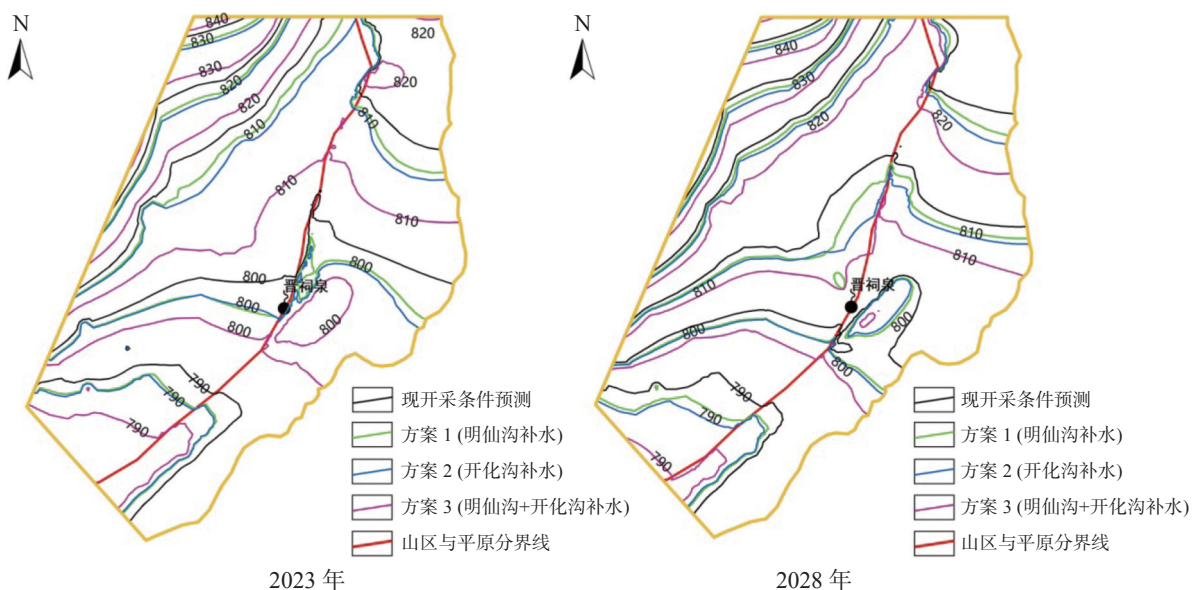


图 11 晋祠泉域马家沟组岩溶地下水流程模拟结果图(2023 年、2028 年)

Fig. 11 Simulation results of karst groundwater flow field of Majiagou Formation in Jinci spring area (2023 and 2028)

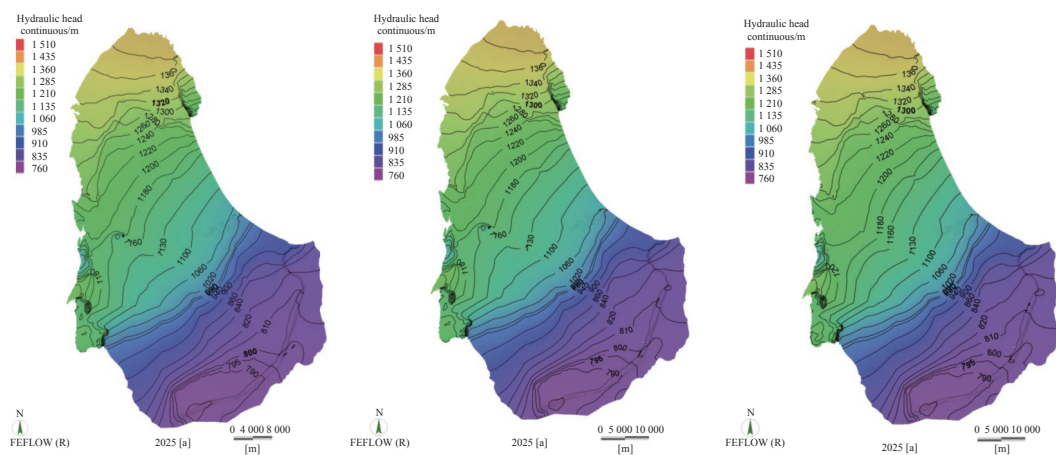


图 12 煤矿区保水限排和关井压采工况下泉域岩溶水流场演化图

Fig. 12 Evolution diagram of karst water flow field in spring area under the conditions of water conservation and drainage restriction and shut in and pressure mining in coal mine area

4 结 论

本文以收集的大量资料和野外地质、水文地质调查、监测、试验、测试等方法获得的丰富数据为基础,综合运用构造水文地质分析、水文地球物理勘查、水文地质钻探、水文地质试验、水文地球化学研究、水文地质模拟等多种手段,查明了晋祠泉重点补给区段水文地质条件,系统地研究了在人类强烈活动影响下,晋祠泉岩溶水系统地下水补给、赋存与运动规律,探讨了晋祠泉域岩溶水系统生态修复补水方案,开展了不同补水工况下泉岩溶水系统补水效果的模拟与预测研究,为科学规划、可持续开发利用岩溶水资源和尽快实现晋祠泉复流,提供了重要的科学依据和关键技术支撑。

本文还系统地研究了多年时间序列泉域岩溶水系统流场的演化特征及形成原因,从多年序列泉域水资源要素变化出发,总结出晋祠泉动态变化的四个阶段特征,并识别了影响泉动态的关键因子,认为造成晋祠泉断流的原因依次为:过量岩溶水开采(含采煤排出岩溶水)>降雨减少>汾河渗漏减少。因此,控制泉域内岩溶水开采(含采煤排岩溶水)是能否实现岩溶泉域生态修复的关键。近年来,在降雨持续偏丰的有利形势下,加上稳定运行汾河二库,以及在主要河流渗漏段筑坝远源补水和在晋祠泉邻近合适地段人工近源补水等“组合拳”措施的实施,进一步改善泉域生态环境,有效地加大了泉域入渗补给量,将会加快实现晋祠泉域岩溶水系统和生态环境恢复。因此,建议在加强二库渗漏补给的

前提下,同时实施岩溶水压采,辅以煤矿区保水限采等多种措施,以实现晋祠泉域岩溶水和生态环境的快速健康恢复。

参考文献

- [1] 梁永平, 赵春红. 中国北方岩溶水功能[J]. 中国矿业, 2018, 27(s2): 297-299,305.
LIANG Yongping ZHAO Chunhong. Karst water function in northern China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(s2): 297-299,305.
- [2] 张晓博. 采煤活动影响下娘子关岩溶水系统演化研究[D]. 中国地质大学(北京), 2017.
ZHANG Xiaobo. Study on the evolution of Niangziguan karst water system under the influence of coal mining activities[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [3] 吴潇. 柳林泉岩溶水系统水文地球化学演化及污染溯源研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
WU Xiao. Study on hydrogeochemical evolution and Pollution Tracing of liulinquan karst water system[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [4] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 363-380.
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in northern China[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 363-380.
- [5] 廖资生. 论北方岩溶水资源的开发与管理问题[J]. 中国岩溶, 1985, 4(Z1): 107-114.
LIAO Zisheng. On development and management of karst water resource in north China[J]. Carsologica Sinica, 1985, 4(Z1): 107-114.
- [6] 刘启仁, 张凤岐, 秦毅苏, 周俊业, 董玉良, 马潭, 何斌, 白世英, 贾秀梅. 中国北方岩溶水资源的形成、分布与合理开发利用

- 用[J]. 水文地质工程地质, 1992(4): 41-44.
- LIU Qiren, ZHANG Fengqi, QIN Yisu, ZHOU Junye, DONG Yuliang, MA Tan, HE Bin, BAI Shiyang, JIA Xiumei. Formation, distribution and rational development and utilization of karst water resources in northern China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992(4): 41-44.
- [7] Zhang Xiaobo, Guo Jing, Hu Qianhong, et al. Effects of Fe-rich Acid Mine Drainage on Percolation Features and Porestructure in Carbonate Rocks[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125571.
- [8] 薛凤海. 采煤保水: 实现水资源的可持续利用[J]. *山西水利*, 2011, 27(8): 5-8.
- XUE Fengmei. Coal mining to protect water resources: Realizing the sustainable utilization of water resources[J]. *Shanxi Water resources*, 2011, 27(8): 5-8.
- [9] Li Chengcheng, Gao Xubo, Wang Wanzhou, et al. Hydro-bio-geochemical processes of surface water leakage into groundwater in large scale karst water system: A case study at Jinci, northern China[J]. *Journal of Hydrology*: 125691.
- [10] Jiang Chunfang, Gao Xubo, Hou Baojun, et al. Occurrence and environmental impact of coal mine goaf water in karst areas in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 275: 123813.
- [11] 李向全, 张春潮, 侯新伟. 采煤驱动下晋东大型煤炭基地地下水循环演变特征: 以辛安泉域为例[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 3015-3026.
- LI Xiangquan, ZHANG Chunchao, HOU Xinwei. Characteristics of groundwater circulation and evolution in Jindong large coal base driven by coal mining: An example of Xin'an spring area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 3015-3026.
- [12] 刘振明, 张仁豪, 杨萌, 候乐, 托蓝河. 中国主要聚煤区含水层水文地球化学特性[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2016(7): 154-158.
- LIU Zhenming, ZHANG Renhao, YANG Men, HOU Le, TUO Lanhen. Hydrogeochemical characteristics of aquifers in major coal rich areas in China[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2016(7): 154-158.
- [13] 许伟. 采煤影响下长治盆地含水层空间分区变化研究[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2013.
- [14] 王志恒, 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 唐春雷, 谢浩, 赵一. 自然与人类活动叠加影响下晋祠泉域岩溶地下水动态特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1823-1837.
- WANG Zhiheng, LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, TANG Chunlei, XIE Hao, ZHAO Yi. Dynamic Characteristics of Karst Groundwater in Jinci Spring Under Superimposed Influence of Natural and Human Activities[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1823-1837.
- [15] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 高列波, 张建友, 张松涛, 李成城, 姜春芳. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 287-298.
- GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.
- [16] 刘盼, 李鹏翔, 陈斌, 胡祥云, 陈玲玉, 廖卫阳. 山西晋祠泉复流: 地球物理应用研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(25): 58-67.
- Liu Pan, Li Pengxiang, Chen Bin, HU Xiangyun, CHEN Lingyu, LIAO Weiyang. Reflow project of jinci spring in shanxi province: Application research of comprehensive geophysical prospecting methods[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(25): 58-67.
- [17] 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. 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*, 2019, 46(1): 11-18,34.
- LIANG Yongping, ZHANG Fawang, SHEN Haoyong, TANG Chunlei, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, HOU Hongbin, REN Jianhui, GUO Fangfang. Recognition of the critical hydro-geological conditions of the Jinci Spring and Lancun Spring in Shanxi[J]. *Hydrogeology&Engineering Geology*, 2019, 46(1): 11-18,34.
- [18] 冉曦, 顾盼, 连雷雷, 左建, 邱瑞明. 采煤和岩溶水开采对晋祠泉出流影响的随机模型分析[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(6): 154-158.
- RAN Xi, GU Pan, LIAN Leilei, ZUO Jian, QIU Ruiming. Impact of Coal Mining and Karst Water Exploitation on Outflow of Jinci Spring: Stochastic Model Analysis[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(6): 154-158.
- [19] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 973-984.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 973-984.
- [20] 唐春雷, 郑秀清, 梁永平, 张发旺, 景泽. 山西太原晋祠—平泉水力联系及对晋祠泉复流的贡献[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1755-1764.
- TANG Chunlei, ZHENG Xiuqing, LIANG Yongping, ZHANG Fawang, JING Ze. The hydraulic connection between Jinci and Pingquan in Taiyuan and its contribution to the reflow of Jinci spring[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1755-1764.
- [21] 石桂萍. 晋祠泉泉域变化分析与保护措施设计[J]. *水利技术监督*, 2014, 22(1): 43-46.
- SHI Guiping. Analysis on the change of water resources in Jinci spring area and design of protection measures[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2014, 22(1): 43-46.
- [22] 李悦, 刘家宏, 桑学锋, 袁飞. 汾河清水复流生态调水量研究[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(9): 21-24, 30.
- LI Yue, LIU Jiahong, SANG Xuefeng, YUAN Fei. Study on eco-water diversion quantity for clean water restoration of Fenhe River[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(9): 21-24, 30.
- [23] 菅宇翔, 范永平, 孙瑞, 魏路峰. 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*, 2016, 35(3): 20-22.
- JIAN Yuxiang, FAN Yongping, SUN Rui, WEI Lufeng. Analysis of groundwater environmental impact and protection measures of Jinci spring water replenishment project[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(3): 20-22.
- [24] 李昕生. 明仙沟引蓄水工程设计方案比选[J]. *山西水利*, 2017(3): 39-40.

- LI Xinsheng. Comparison and selection of design schemes of mingxiangou water diversion and storage project [J]. Shanxi Water Resources, 2017(3): 39-40.
- [25] 辛雁清. 汾河二库与太原市城市防洪[J]. 山西科技, 2013, 28(5): 22-23.
- XIN Yanqing . Fenhe Second Reservoir and Taiyuan City 's Urban Flood Control[J]. Shanxi Science and Technology, 2013, 28(5): 22-23.
- [26] 郭芳芳, 梁永平, 王志恒, 申豪勇, 赵春红. 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, 2018, 37(4): 493-500.
- GUO Fangfang, LIANG Yongping, WANG Zhiheng, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong. Attribution of spring fields and seepage calculation of Fenhe second reservoir in Xishan, Taiyuan, Shanxi Province[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 493-500.
- [27] 李劭宁, 贾晓鹏. 格尔木河 ^{222}Rn 同位素变化及其对地表水-地下水交互关系的指示意义[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1190-1199.
- LI Shaoning, JIA Xiaopeng. Variability of ^{222}Rn in Golmud River and its implication for surface-groundwater interaction[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1190-1199.
- [28] Bicalho C, Batiot-guilhe C, Taupin J, et al. A Conceptual Model for Groundwater Circulation Using Isotopes and Geochemical Tracers Coupled with Hydrodynamics: a Case Study of the Lez Karst System, France[J]. *Chemical Geology*, 2019, 528: 118442.
- [29] 常建忠. 山西省岩溶大泉地下水超采治理保护措施与经验[J]. *中国水利*, 2021(7): 43-45.
- CHANG Jianzhong. Control of overdraft of karst spring groundwater in Shanxi Province: measures and experiences[J]. *China Water Resources*, 2021(7): 43-45.
- [30] 王志恒, 梁永平, 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 郭芳芳, 谢浩, 赵一. 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*, 2020, 47(6): 1726-1738.
- WANG Zhiheng, LIANG Yongping, TANG Chunlei, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, GUO Fangfang, XIE Hao, ZHAO Yi. 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*, 2020, 47(6): 1726-1738.
- [31] 陆帅帅, 郑秀清, 李旭强, 陈军锋, 张永波, 臧红飞. 晋祠泉域岩溶水生态系统健康评价[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 34-41.
- LU Shuaishuai, ZHENG Xiuqing, LI Xuqiang, CHEN Junfeng, ZHANG Yongbo, ZANG Hongfei. Health assessment of karst groundwater ecosystem of Jinci spring area[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 34-41.

Study on ecological restoration strategy of karst spring region in north China: Taking Jinci spring as an example

WANG Yanxin

(China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract In northern China, karst is widely distributed and rich in karst spring water resources. It is a high-quality water supply source for industry, agriculture and residents' life in karst areas. However, under the superposition of global climate change, coal mining and other strong human activities, the flow of karst springs in northern China has declined, the water quality has deteriorated, and the ecological environment function of karst springs has declined. Therefore, how to take reasonable measures, strengthen the natural recovery function of karst springs through appropriate manual intervention, and finally realize the ecological environment restoration of spring area is the leading area and key field of ecological civilization construction in China. On the basis of analyzing and studying the causes of Jinci spring cutoff, the paper puts forward and scientifically evaluates a series of measures and expected results, such as strengthening leakage recharge of Fenhe Reservoir II, closing and pressure mining of karst water in spring area, water conservation and limited mining in coal mine area, near source ecological water replenishment and far source river leakage recharge, in order to promote the fundamental improvement of karst groundwater ecological environment in Jinci spring area. The research work of this paper is expected to form a demonstration effect on the ecological restoration of karst springs in northern China, and provide a scientific basis for curbing the ecological deterioration in karst areas in China.

Key words north karst spring, ecological restoration, leakage recharge, groundwater resources, hydrochemistry, effectiveness analysis

(编辑 张玲)