

doi: 10.12029/gc20220407

申豪勇, 李佳, 王志恒, 谢浩, 梁永平, Yongxin Xu, 韩双宝, 任建会, 潘尧云, 赵春红, 赵一. 2022. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题[J]. 中国地质, 49(4): 1127-1138.

Shen Haoyong, Li Jia, Wang Zhiheng, Xie Hao, Liang Yongping, Yongxin Xu, Han Shuangbao, Ren Jianhui, Pan Yaoyun, Zhao Chunhong, Zhao Yi. 2022. Water resources utilization and eco-environment problem of Fenhe River, branch of Yellow river[J]. Geology in China, 49(4): 1127-1138(in Chinese with English abstract).

黄河支流汾河流域水资源开发利用现状 及生态环境问题

申豪勇^{1,2}, 李佳³, 王志恒¹, 谢浩¹, 梁永平¹, Yongxin Xu², 韩双宝⁴,
任建会⁵, 潘尧云⁶, 赵春红¹, 赵一¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 西开普大学, 南非 7535; 3. 水利部南水北调规划设计管理局, 北京 100038; 4. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 5. 山西省地质调查院, 山西 太原 030006; 6. 山西省第二地质工程勘察院, 山西 侯马 043000)

提要:【研究目的】汾河是黄河第二大支流,也是山西省的第一大河,流域内水资源供需矛盾突出,分析水资源开发利用现状及其生态环境问题是进行流域生态修复的前提。【研究方法】本文在分析汾河流域水资源特征及其开发利用现状的基础上,系统总结了汾河径流量衰减、岩溶大泉断流和水质恶化等生态环境问题,并对其成因进行了分析。【研究结果】研究表明:汾河流域多年平均水资源量为 33.59 亿 m³,其中地下水资源是水资源的主要组成部分,约占 72%;2005 年以后由于跨流域调水、地下水压采等汾河流域综合治理措施的实施,水资源的供水结构发生了较大的变化,地表水的供水比例由最初的 30%提高到 55%,地下水供水比例由原来的 62%降低到目前的 37%。整体上,汾河流域的水资源开发利用程度高达 80%以上,水资源的过度开发已导致汾河干流断流、入黄径流量大幅衰减、岩溶大泉断流等严重的生态环境问题。其中,汾河流入黄河径流量从 1955 至 2018 年衰减程度达 63.5%,衰减的原因主要是降水量的减少和岩溶大泉的流量衰减;汾河流域内 8 个岩溶大泉的总流量从 1956 至 2018 年的衰减程度达 69%,50%的岩溶大泉已在不同时期断流,岩溶大泉的水质恶化问题也非常严重,如晋祠泉和龙子祠泉的 TDS 和 SO₄²⁻呈逐年升高的趋势,煤矿开采是造成岩溶泉水 SO₄²⁻含量快速升高的主要原因。【结论】汾河流域的水资源供需矛盾十分突出,虽然通过跨流域调水等生态修复措施实现了汾河干流全年不断流、地下水位升降回升和地表水环境质量初步改善,但生态环境恶化的趋势依然严峻。

关键词:岩溶大泉;水资源;生态环境问题;水文地质调查工程;汾河;黄河流域;山西

创新点:分析了山西省汾河流域近 15 年的水资源特征及其供水结构的变化规律;系统总结了汾河流域的生态环境问题,并对其成因进行了探讨。

中图分类号:P641.69 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)04-1127-12

Water resources utilization and eco-environment problem of Fenhe River, branch of Yellow river

收稿日期:2021-11-20;改回日期:2022-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41902256)、中国地质调查项目(DD20190334、DD20221758)及中国地质科学院基本科研业务经费项目(2020010)共同资助。

作者简介:申豪勇,男,1988年生,助理研究员,主要从事岩溶水文地质方面的研究;E-mail:shenhaoyong@karst.ac.cn。

通讯作者:王志恒,男,1990年生,助理研究员,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。

SHEN Haoyong^{1,2}, LI Jia³, WANG Zhiheng¹, XIE Hao¹, LIANG Yongping¹, Yongxin XU²,
HAN Shuangbao⁴, REN Jianhui⁵, PAN Yaoyun⁶, ZHAO Chunhong¹, ZHAO Yi¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. University of the Western Cape, Cape Town 7535 South Africa; 3. Bureau of South to North Water Transfer of Planning, Designing and Management, Ministry of Water Resources Beijing 100038, China; 4. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China; 5. Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 6. The second Geological Engineering Survey Institute of Shanxi Province, Houma, 043000, Shanxi, China)

Abstract: This paper is the result of the hydrogeological survey engineering.

[Objective] As the second largest tributary of the Yellow River, Fenhe River is the largest river in Shanxi Province. However, there is contradiction between the supply and demand of water resources in the basin. The analysis of water resources utilization and eco-environment problem is precondition of ecological remediation. **[Methods]** Based on the analysis of water resources characteristics of the Fenhe River Basin and its utilization, this paper systematically summarizes the ecological and environmental problems of the Fenhe River watershed, such as attenuation of runoff, drying up of karst spring and deterioration in water quality. **[Results]** Our result shows that the average amount of water resources in the Fenhe River Basin for multi-year average is 3.359 billion m³, groundwater resources are the main component of the total water resources, which is accounting for 72%. The structure of water supply of water resources has changed greatly due to the impact of comprehensive treatment measures in the Fen River Basin since 2005, such as cross-basin water transfer and groundwater pressure extraction. The water supply ratio of surface water has increased from 30% to 55%, and the water supply ratio of groundwater has been reduced from 62% to 37%. Overall, the utilization of water resources in the Fenhe River Basin is as high as 80%. Excessive exploitation of water resources has caused serious eco-environmental problems such as the cut-off of Fen River, the significant decline in the runoff of the Fen River into the Yellow River and the decline of karst spring flow. The percentage of runoff for Fenhe River enter the Yellow River has attenuated by 63.5% from 1955 to 2018. The main reasons for the attenuation are the decrease in precipitation and the flow attenuation of the karst spring. The total flow of the 8 large karst springs in the Fenhe River Basin has decreased by 69% from 1956 to 2018, and 50% of the large karst springs had dried up in different periods; The water quality of karst springs has been deteriorating seriously, for example, the TSD and SO₄²⁻ of Jinci Spring and Longzici Spring have been increasing year by year. Coal mining is the main reason for the rapid increase of SO₄²⁻ in karst springs. **[Conclusions]** Although the inter-basin water transfer project construction has improve some of the eco-environment in the Fenhe River, such as the recovery of Fenhe River to perennial river, and the stopped falling of groundwater level in the basin, and the improvement of the quality of surface water environment, there is serious unbalance between supply and demand for water resources in Fenhe River Basin, finally the trend of deterioration of the ecological environment is still severe.

Key words: karst spring; water resources; ecological environment problems; geological survey engineering; Fenhe River; Yellow River Basin; Shanxi Province

Highlights: The characteristics of water resources and the change of water supply structure in Fen River basin in recent are analyzed in the past 15 years; The eco-environment problem of Fenhe River is summarized and their causes are discussed.

About the first author: SHEN Haoyong, male, born in 1988, doctor, assistant researcher, engaged in karst water circulation and hydrogeology; E-mail: shenhaoyong@karst.ac.cn.

About the corresponding author: WANG Zhiheng, male, born in 1990, assistant researcher, engaged in the investigation, monitoring and evaluation of karst water resources; E-mail: wangzh@karst.ac.cn.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41902256) and the project of China Geological Survey (No. DD20190334, No. DD20221758), Basic scientific research project of Chinese Academy of Geological Sciences (No. 2020010).

1 引 言

汾河为黄河第二大支流,山西省第一大河,被

誉为山西省的“母亲河”,流域内自然资源丰富、生产条件得天独厚,是山西省的政治、经济和文化中心。但随着经济快速发展、煤炭等能源开发和人口

急剧增长,水资源供需矛盾越来越突出,汾河流域以全省27%的水资源和25%的土地承载着全省39%的人口和42%的GDP,水资源开发利用率高达80%以上(常建忠,2020),并引发了地表径流减少甚至断流、地下水位持续下降、岩溶大泉干涸、水质恶化和地面沉降等一系列生态环境问题(石建省等,2000;张建国等,2003;林兴贵,2020)。为解决汾河流域凸显的生态环境问题,落实国家生态文明建设思想和黄河流域生态保护和高质量发展国家战略,国家和地方政府在汾河流域先后实施了“千里汾河清水复流工程”、《汾河流域生态修复规划(2015—2030年)》、《以汾河为重点的“七河”生态保护与修复总体方案》和《汾河流域生态景观规划(2020—2035年)》等(郭东阳等,2020;韩双宝等,2021),通过跨流域调水、地下水压采、干流两侧排污企业综合整治、重点泉域生态修复等措施的实施,实现了汾河干流全年不断流、盆地区地下水位止降回升,但是流域生态环境仍未得到根本性好转,生态恶化的趋势依然严峻(常建忠,2020),一是水资源开发利用程度高,远超汾河流域的水资源承载能力,并大量挤占生态环境用水;二是岩溶地下水超采问题依然严重,洪山泉于2013年断流(吴伟伟等,2020)、古堆泉自1999年断流后泉口地下水位仍持续下降(杨士荣等,2020);三是煤矿开采造成的地表径流减少和含水层疏干问题依然严重,近年来又出现了闭坑煤矿“老窑水”对地表水和地下水的污染问题(梁永平等,2020)。

本文在系统梳理已有成果的基础上,以汾河流域为研究对象,分析了汾河流域的水资源特征及开发利用现状,系统总结了出现的生态环境问题,并对其成因进行了揭示,以期为汾河流域的水资源配置和生态修复提供科学依据,为黄河流域生态保护和高质量发展提供支撑。

2 研究区概况

汾河发源于山西省忻州市宁武县管涔山,干流自北向南纵贯太原、临汾两大盆地,于运城市万荣县庙前村附近汇入黄河,地理位置介于 $110^{\circ}30'E\sim 113^{\circ}30'E$ 、 $35^{\circ}20'N\sim 39^{\circ}00'N$,干流全长716 km,控制流域面积39471 km²,流经包括山西省会太原市在内的6个地市,流域范围全部位于山西省境内(图1),

约占山西省总面积的四分之一(侯新伟等,2008;杨永刚等,2016;马永来等,2017)。汾河流域地势北高南低,南北长、东西狭,按地形地貌和水沙条件可以分为上、中、下游三段(图2)。上游段:自河源至太原市兰村烈石口,河道长217 km,平均纵坡4.4‰,控制流域面积7705 km²,属山区性河流;中游段:自兰村至洪洞县石滩,河长267 km,平均纵坡1.7‰,控制流域面积20509 km²,属盆地平原性河流,此段城市生活、工业及农业灌溉用水量庞大,水资源供需矛盾最为突出;下游段:自洪洞石滩至入黄口,河长232 km,平均纵坡1.3‰,控制流域面积11257 km²,该河段为汾河干流中最为平缓的一段,河流泥沙淤积严重。

汾河的支流众多,流域面积大于1000 km²的有7条,分别为岚河、潇河、昌源河、文峪河、双池河、洪安涧河和浍河,其中,文峪河的径流量最大、岚河的泥沙含量最大(杨永刚等,2016)。汾河干流上目前建有2座大型水库,分别为:汾河水库,1961年投入使用,控制流域面积5268 km²,总库容7.33亿m³(李娟,2020);汾河二库,2007年投入使用,控制汾河水库到汾河二库区间的流域面积2348 km²,总库容1.33亿m³(郭芳芳等,2018);两座水库都位于纵坡比较大的上游地区,都是以防洪为主的综合性水库,两库的联合调度大大提高了太原市的防洪标准,但同时也对中下游汾河的天然径流量产生了影响。

汾河流域地处大陆性季风气候带,为半干旱、半湿润型气候过渡区,雨热同季,年降水量454~688 mm,全年降水量的70%集中在夏季的7—9月份,山区的降水量明显高于平原盆地区(杨萍果等,2008)。降水的时空分布不均对流域内的水资源及生态环境都产生直接的影响,流域内地表产水能力不足,地下水资源是主要的开发利用对象。流域内主要赋存的地下水类型为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水和碳酸盐岩类岩溶水,其中孔隙水主要分布于太原盆地、临汾盆地和山间河谷地区,因所处的水文地质单元不同,富水性差别较大;裂隙水主要分布于流域两侧的吕梁山东侧和太行山西侧,多为构造或风化裂隙水,富水性较差;岩溶水是流域内主要的地下水类型,岩溶区的面积为34391 km²,约占流域总面积的87%,在这些岩溶区内分布有丰富的岩溶水资源,其动态稳定、水量集中、水质良

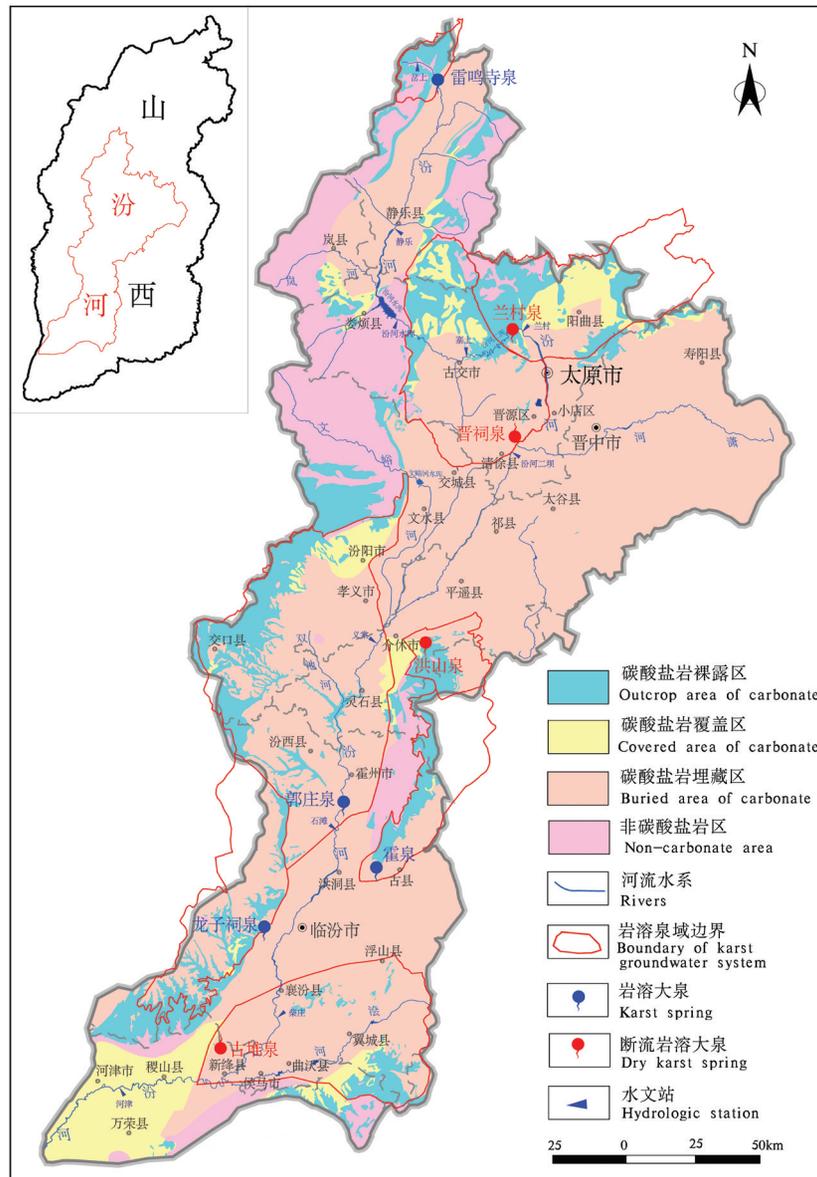


图1 汾河流域水系及岩溶大泉分布图

Fig.1 Map of water system and karst springs in Fenhe River Basin

好,是工农业生产和生活的重要水源,流域内共发育了8个规模不等、流量不等的岩溶大泉,从北到南依次为:雷鸣寺泉、晋祠泉、兰村泉、洪山泉、郭庄泉、霍泉、龙子祠泉和古堆泉(图1),其中,雷鸣寺泉是汾河的源头,兰村泉、龙子祠泉、洪山泉和霍泉分别是太原市、临汾市、介休市和洪洞县的主要供水源地,同时,岩溶大泉出流后都汇入到汾河中,是汾河清水径流的主要组成部分,20世纪60年代8个岩溶大泉年均总流量为8.6亿 m^3 ,占同期汾河径流量的49%(韩行瑞等,1993;Liang et al.,2018)。

3 研究方法 with 数据来源

2019—2021年中国地质科学院岩溶地质研究所联合水利部南水北调规划设计管理局、山西省地质调查院和山西省第二地质工程勘察院共同完成了汾河流域水资源开发利用现状及地下水动态调查分析。从中国气象网(<http://data.cma.cn>)收集了汾河流域内35个国家气象站点1980年以来的逐年降雨量数据,收集了2005—2019年的《山西省水资源公报》、2001—2020年的《山西省生态环境状况公

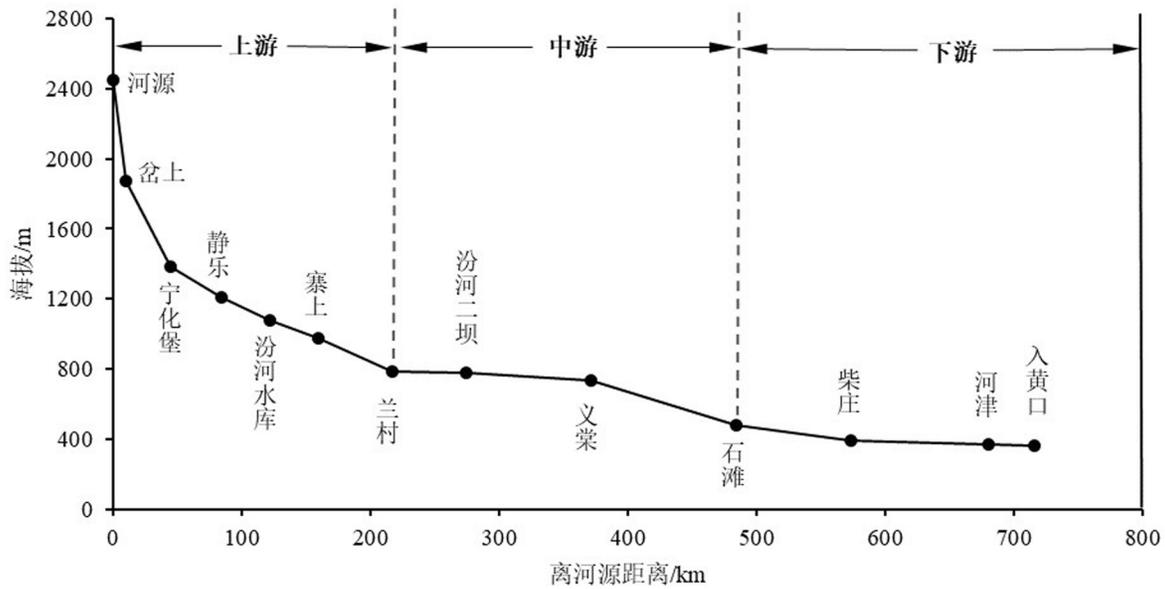


图2 汾河干流方向纵剖面图

Fig.2 Altitude distribution along the main stream of the Fenhe River

报》。系统整理了自然资源部、水利部和山西省政府等相关单位在汾河流域水文地质调查、生态环境调查、生态修复与保护治理方面的相关成果。

综合以上数据及资料,分析了汾河流域水资源特征、供水结构变化及开发利用现状,总结了汾河流域生态环境问题,对典型岩溶大泉的流量衰减、断流现状及成因和水质恶化形势进行了分析。

4 流域水资源特征及开发利用现状

4.1 流域水资源特征

汾河流域多年平均水资源总量为 33.59 亿 m³ (1956—2000 年),其中地表水资源量为 20.67 亿 m³、地下水资源量为 24.10 亿 m³、重复量为 11.18 亿 m³ (范堆相, 2005),这里的重复量是指由地下水补给而形成的河川基流量。由此可以看出,汾河流域地表产水能力不足,地下水资源量是水资源总量的主要组成部分,约占 72%。汾河流域水资源在空间分布方面,汾河中上游的水资源量为 21.11 亿 m³、下游的水资源量为 12.48 亿 m³,分别占总水资源量的 62.86%和 37.14%,与控制的流域面积基本一致。

根据《山西省水资源公报》的数据,汾河流域近 15 年(2005—2019 年)的水资源总量的变化情况如表 1 和图 3,整体上水资源总量的变化趋势与降水量基本一致,2017 年的水资源总量最多,约为 38.02 亿

表 1 汾河流域水资源总量与供水量统计

Table 1 Water resources and supplying water in Fenhe River Basin

年份	水资源总量/亿 m ³	供水量*/亿 m ³			供水总量	降水量 /mm
		地表水	地下水	其他水源		
2005	20.86	10.23	15.97	2.00	28.19	443.86
2006	23.23	8.15	16.97	1.98	27.11	485.46
2007	27.91	9.71	15.95	2.03	27.68	582.21
2008	24.03	10.07	15.79	1.61	27.47	441.32
2009	26.48	11.60	14.35	1.61	27.56	552.20
2010	23.88	12.77	14.38	1.46	28.61	460.25
2011	34.83	13.47	14.89	1.14	29.51	627.35
2012	30.95	12.84	14.48	1.66	28.97	519.53
2013	36.19	13.48	14.10	1.43	29.00	599.66
2014	33.04	13.08	13.51	1.36	27.94	569.13
2015	26.56	14.83	13.06	1.52	29.41	460.58
2016	35.80	16.29	12.24	2.14	30.67	608.57
2017	38.02	16.27	12.02	2.17	30.45	614.34
2018	34.06	16.98	11.45	2.17	30.60	493.08
2019	28.24	17.70	11.14	2.24	31.08	446.80

注: *供水量中包括了跨流域调水量。

m³;2005 年,水资源总量最少,约为 20.86 亿 m³。

4.2 流域供水现状

汾河流域 2005—2019 年年均供水量 28.95 亿 m³,其中地表水供水量占 45.47%、地下水供水量占 48.43%、其他水源(包括污水处理回用、矿坑水利用

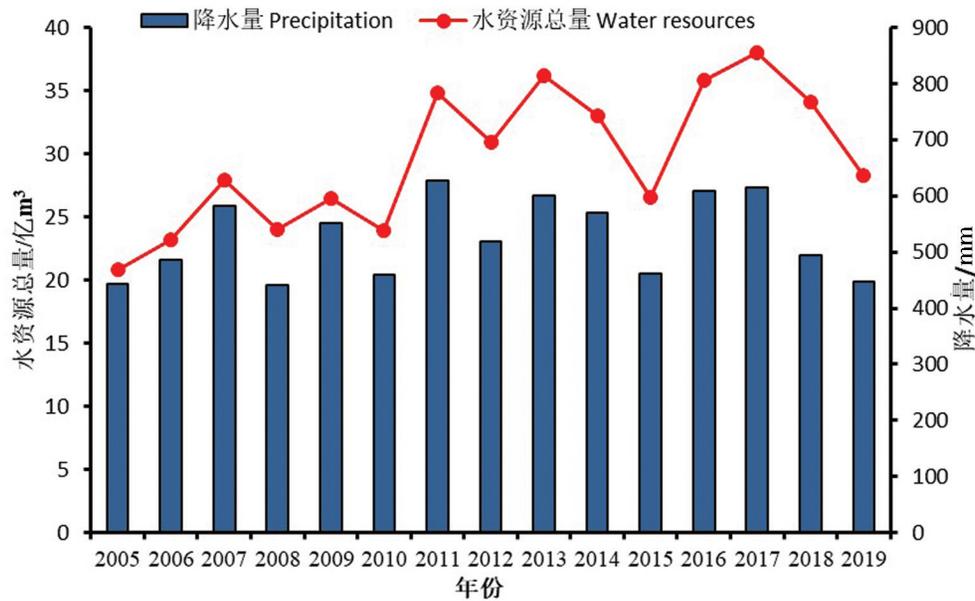


图3 汾河流域水资源总量和降水量多年动态变化曲线

Fig.3 Multi-year dynamic curve of total water resources and precipitation in Fenhe River Basin

等)占6.10%,见图4。在供水总量的时间变化方面,从2005年至2019年略呈增加趋势,但增加的幅度不大,但是供水的结构变化较大,从图5可以看出,地表水的供水比例越来越大,由最初的30%提高到目前的55%;而地下水的供水比例则相应的减少,由最初的62%降低到目前的37%。这与山西省实施的汾河流域综合治理、压采地下水、逐步优化供水结构的宏观调控政策相吻合。

汾河流域内不同行业用水量方面,从表2中可以看出,农田灌溉用水量最大,占比达55.41%;其次

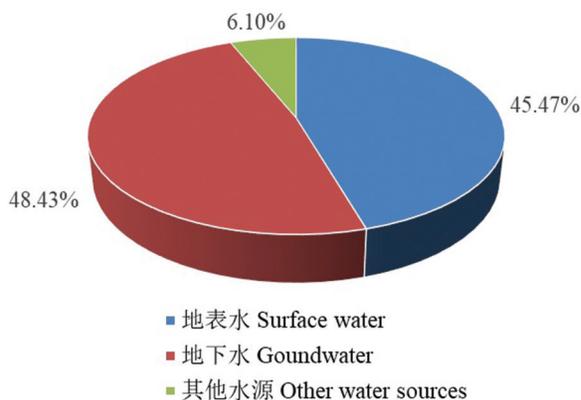


图4 汾河流域供水结构图

Fig.4 Water supply structure diagram of Fenhe River Basin

为城镇工业用水和居民生活用水,分别为19.37%和13.57%;林木渔畜用水(包括林果地和草场灌溉、鱼塘和牲畜用水)比例最小,占比3.10%。随着流域内人口的增长和国家大力推进生态文明建设战略决策的实施,流域内居民生活用水量 and 生态环境用水量的比例在逐渐提高。

5 生态环境问题及成因分析

5.1 岩溶大泉流量衰减和断流

汾河流域内岩溶大泉发育,泉水流量动态稳定、水质良好,是流域内城市生活和工农业生产的重要水源。20世纪60年代8个岩溶大泉的总流量达27.29 m³/s,其中郭庄泉的流量最大,为8.93 m³/s;雷鸣寺的泉水流量最小,约为0.2 m³/s。但经过近50年大规模的岩溶水开采和矿产开发,大部分岩溶大泉的开发方式也由原来的泉口提引水转为水井开采为主,导致8个岩溶大泉中已有4个分别在不同的时间断流,分别为兰村泉(1986年断流)、晋祠泉(1994年断流)、古堆泉(1999年断流)和洪山泉(2013年断流),目前仍然出流的岩溶大泉流量衰减也非常严重,2018年4个出流岩溶大泉的泉水总流量为8.33 m³/s,衰减程度达69%(梁永平等,2013;申豪勇等,2020;吴伟伟,2020)。从表3可以看出,泉

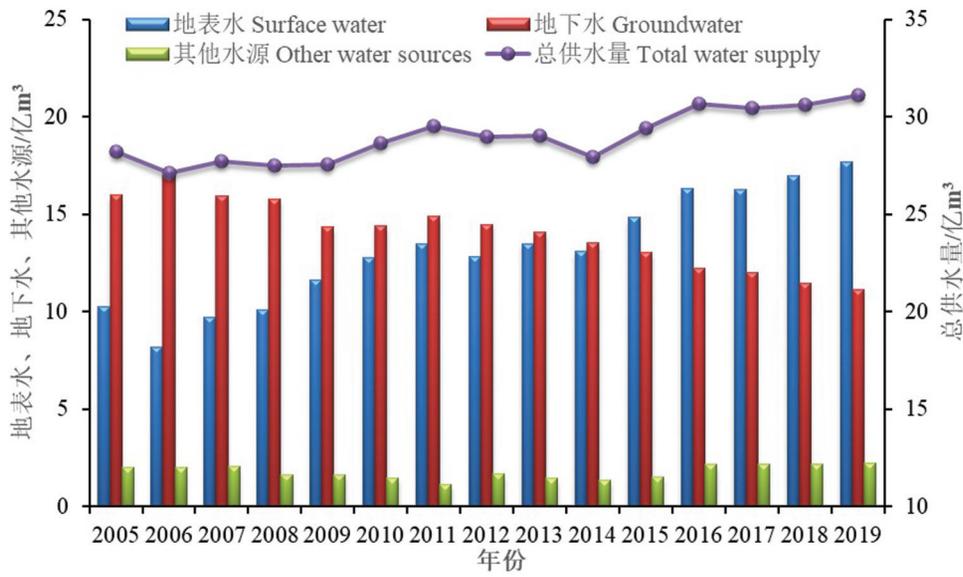


图5 汾河流域历年供水总量及供水结构变化图

Fig.5 Changes of total water supply and water supply structure in Fenhe River Basin over the years

水流量从20世纪70年代开始衰减,80年代以后衰减速率增加,2000—2009年衰减速率最大,最近10年由于岩溶大泉生态修复、地下水压采等使得泉水流量趋于稳定。以流域内泉水流量最大的郭庄泉为例,1980年以前,郭庄泉流量呈峰谷交替的自然波动状态,年均流量为8.36 m³/s;1980年之后,郭庄泉流量几乎呈直线下降趋势,1980—1999年的20年间,泉流量由7.65 m³/s锐减至2.30 m³/s,衰减程度达到69.9%,目前泉水流量稳定在2.0~2.5 m³/s。

岩溶大泉流量衰减或断流既受降水量减少、气温升高等气候变化的影响,也受岩溶水不合理开发、煤矿开采等人类活动的影响,而且大多数情况下两种因素叠加使得泉水流量衰减或者岩溶大泉断流的成因分析异常复杂(郭振中等,2004)。而且不同岩溶大泉流量衰减或断流的影响因素各不相

同,如晋祠泉水的断流主要受降水的减少、汾河渗漏量的降低、人工开采(含采煤排水)和平泉自流井及盆地孔隙水对泉水的袭夺等因素的影响,其中人工开采是造成晋祠泉断流的最主要原因(晋华等,2005;王志恒等,2021),2008年以来,在岩溶地下水压采、增大汾河碳酸盐岩渗漏段及汾河二库的渗漏量、关闭带压区的煤矿等复流措施的实施下,晋祠泉口的水位埋深已止降回升(表4,图6),由2008年最大埋深27.76 m回升到目前的2.2 m,在泉水复流措施的进一步优化前提下,晋祠泉的生态复流指日可待(梁永平等,2019;王志恒等,2020);兰村泉的断流主要原因是泉域内太原市兰村、枣沟、西张、三

表2 汾河流域不同行业用水量统计
Table 2 Water consumption statistics of different industries in Fenhe River Basin

时间	不同行业用水比例/%					
	农田灌溉	林牧渔蓄	城镇工业	城镇公共	居民生活	生态环境
2005-2009	57.89	2.96	21.60	4.43	11.37	1.75
2010-2014	54.18	3.14	18.20	4.43	14.03	5.79
2015-2019	54.15	3.12	18.51	3.82	15.51	4.88
2005-2019	55.41	3.10	19.37	4.24	13.57	4.31

表3 汾河流域岩溶大泉泉水流量变化一览
Table3 List of karst spring flow variation in Fenhe River Basin

岩溶大泉	泉水流量/m ³ ·s ⁻¹					
	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2018
晋祠泉	1.74	1.19	0.52	0.14	--	--
兰村泉	3.10	1.58	0.37	--	--	--
洪山泉	1.44	1.16	1.15	1.03	0.26	--
郭庄泉	8.93	7.53	7.10	4.97	2.42	2.14
霍泉	4.45	3.75	3.53	3.30	2.96	2.85
龙子祠泉	6.14	5.21	5.02	4.22	3.50	3.36
合计	25.80	20.42	17.69	13.66	9.14	8.35

表4 汾河流域断流岩溶大泉泉口岩溶地下水水位埋深(据杨士荣等,2020)

Table 4 Karst groundwater depth of dry karst spring in Fenhe River Basin (after Yang Shirong et al., 2020)

时间	地下水水位埋深/m		
	兰村泉	晋祠泉	古堆泉
1987	2.23		
1988	4.33		
1989	6.43		
1990	6.98		
1991	9.79		
1992	12.3		
1993	14.67		
1994	17.01		
1995	18.49	2.3	
1996	19.54	4.18	
1997	20.37	3.21	
1998	20.59	4.39	
1999	22.23	6.13	
2000	23.48	9.48	
2001	25.46	11.77	
2002	27.09	16.02	
2003	25.95	16.36	
2004	30.28	18.24	
2005	29.63	19.98	
2006	30.26	19.26	
2007	31.51	24.64	22.41
2008	30.13	27.76	25.56
2009	29.1	26.46	35.23
2010	28.43	23.89	42.33
2011	25.94	21.33	50.45
2012	24.5	14.38	57.05
2013	23.57	10.65	56.58
2014	24.42	6.75	59.21
2015	22.88	7.95	70.32
2016	22.6	5.67	71.96
2017	24.7	4.42	72.32
2018	26.91	2.22	74.84

给等水源地的开采造成(王宏,2011),泉口的水位从1986年泉水断流后呈直线下降趋势,2007年泉口水位埋深达到最大的31.51 m,而后由于太原市引黄水供水比例的增加、岩溶地下水压采、西张孔隙水水源地的关闭等原因,岩溶地下水水位开始回升,2008—2018年的回升速率为0.42 m/a(图6);农业灌溉开采岩溶地下水和矽卡岩铁矿降压排水是造成古堆泉断流的主要原因,而且目前古堆泉暂没有实

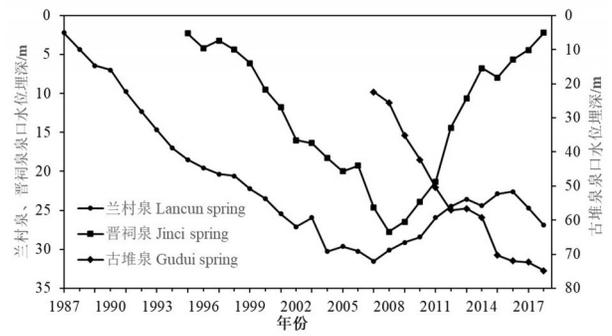


图6 汾河流域断流岩溶大泉泉口水位埋深动态曲线
Fig.6 Dynamic curve of water level buried depth at the cut-off karst spring in Fenhe River Basin

施有效的生态修复措施,泉口地下水位呈持续下降的趋势,2018年泉口的地下水位埋深已达74.84 m(杨士荣等,2020);人工开采和泉口附近煤矿降压排水是造成郭庄泉流量衰减的主要原因(高波,2002);煤矿开采排水是洪山泉断流最直接的原因(吴伟伟,2020)。

5.2 汾河径流量衰减

汾河入黄口河津水文站1956—2018年的实测径流量如图7所示,最大年径流量为33.55亿m³,出现于1964年,而当年的降雨量也为最大,达到了696.76 mm;最小年径流量为1.51亿m³,发生于2001年,而对应的降雨量并非最枯年份。整体上,汾河入黄的径流量呈衰减趋势,从1956—2018年衰减程度达63.5%。

从河津站径流量的年际变化曲线可以看出,汾河入黄的径流量呈先下降后上升的趋势,从1956—2000年径流量呈下降趋势,下降的幅度为0.48亿m³/a;从2000—2018年径流量呈升高趋势,升高的幅度为0.38亿m³/a。一般情况下,地表水的径流量随着降水量的丰枯而变化,两者呈正相关趋势,但从图7可以看出,在1970年之前,两者具有较好的正相关关系,径流量的变化基本上受降水量的影响,从1971年以后,人类活动的加剧,如汾河灌区地表水用水量的增大、煤矿开采对下垫面的破坏、岩溶大泉的流量衰减或断流等,造成汾河径流量的持续衰减,特别是叠加1997—2002年的持续枯水年,导致汾河入黄径流量在1999—2002年持续低于2亿m³/a,并造成了汾河干流的断流,断流的河段主要发生在兰村水文站—义棠水文站之间(刘宇峰等,

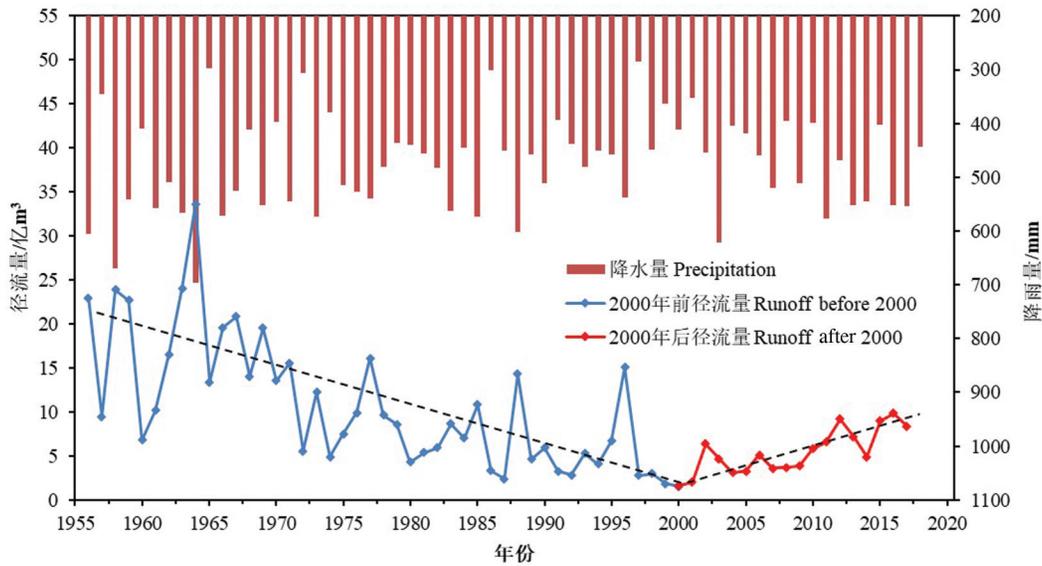


图7 汾河入黄口河津水文站径流量年际变化曲线

Fig.7 Interannual variation curve of runoff at Hejin hydrological station

2010;王登等,2018);在2003年以后,随着降水量的增加、汾河复流工程的实施以及万家寨引黄调水工程的生态补水,汾河的径流量逐渐增加。

5.3 地表水和地下水水质恶化

随着汾河流域经济社会的发展,汾河两岸城市生活和工矿企业向汾河排放的污水量已远超汾河的纳污能力,而且由于汾河径流量的衰减,进一步降低了汾河的自净能力。汾河流域地表水的水质恶化主要出现于上兰村断面以下的中下游地区,主要是进入太原盆地和临汾盆地内人类生产生活污水排放及农业活动的面源污染造成(孟志龙等,2017)。根据《山西省生态环境状况公报》,汾河干流2001—2019年上兰村断面以下干流的水质长期处于《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中的劣V类水质,主要的超标污染物为氨氮和COD,虽然在山西省下发了《关于印发山西省黄河(汾河)流域水污染治理攻坚方案的通知》后,开展了汾河流域污染治理攻坚战,实施了汾河生态补水、城镇生活污水系统治理、工业企业废水深度治理和汾河流域入河排污口排查整治等措施,使得汾河流域内13个国考断面全部退出了劣V类水质标准,有力促进了汾河流域地表水环境质量的改善,但是汾河流域中下游部分河段的地表水水质污染问题仍然非常严峻。

流域内岩溶大泉的水质恶化问题也非常严重,位于汾河中游的晋祠泉,泉水的总硬度和 SO_4^{2-} 都超

过了《地下水质量标准》(GB14848—2017)中Ⅲ类水的标准,同时,在泉水断流后这两个超标指标的含量一直呈上升的趋势,2018年泉水化学测试分析结果显示,泉水岩溶地下水的总硬度和 SO_4^{2-} 分别达到了657 mg/L和506 mg/L,水质的恶化问题非常严重。位于汾河下游的龙子祠泉,泉域面积2250 km²,泉水多年平均流量4.81 m³/s,是临汾市城市生活和工农业生产的主要供水水源,但是泉水的总硬度和 SO_4^{2-} 超标一直是困扰临汾市城市饮水安全的问题之一(申豪勇等,2017;谢浩等,2021);而且近年来这两个指标也呈升高的趋势,运用硫同位素的示踪技术对龙子祠泉水 SO_4^{2-} 超标及快速升高的原因进行了分析,结果显示龙子祠泉水中的 SO_4^{2-} 有71%来自于石膏溶解、22%来自于煤系地层、7%为其他原因,但是煤矿的开采是造成近年来 SO_4^{2-} 含量升高的主要原因(唐春雷等,2017)。

6 讨论

(1)汾河流域作为山西省的政治、经济和文化中心,水资源十分短缺,流域内的人均水资源量仅为全国人均水平的1/10。同时,流域以全省27%的水资源和25%的土地资源承载着全省39%的人口和42%的GDP(常建忠,2020),为了保障经济社会的发展,在2003年前流域的水资源开发利用率高达147%,在2003年万家寨引黄工程南干线通水后,流

域的水资源开发利用程度才逐渐低于80%。虽然跨流域调水暂时缓解了流域的水资源供需矛盾,但是大规模的跨流域调水(包括已建成的万家寨引黄南干线工程、引沁入汾工程、禹门口引黄工程和正在实施的中部引黄工程、东山供水工程)必然对汾河流域的水循环、地表水和地下水转化关系以及水化学场产生重大的影响,建议下一步开展相关的研究,进一步评估跨流域调水对流域水资源总量、供水结构改变和水循环规律的影响。

(2)岩溶地下水系统发育、以岩溶大泉进行集中排泄是汾河流域岩溶地下水循环的主要特点,在近40年的岩溶地下水大规模开发利用后,已经出现了岩溶大泉流量持续衰减、4个岩溶大泉断流和岩溶地下水水质恶化等一系列生态环境问题,造成这些生态环境问题的影响因素包括气候变化(降水量变化、气温变化)和人类活动(地下水开采、煤矿开采、地表水和岩溶地下水转化关系改变、泉水下渗自流井袭夺、盆山边界岩溶地下水和孔隙地下水转化关系改变等),每个岩溶大泉的主要生态环境问题及发展演化趋势不同,相应的影响因素也不一样;目前针对这些生态环境问题成因分析大都是定性的进行分析,针对不同影响因素及其贡献程度的定量化分析还需要进一步开展研究。

7 结 论

(1)汾河流域水资源供需矛盾突出,水资源开发利用率高达80%以上,其中农田灌溉用水量最大,约占55.41%,林木渔畜用水量最小,约占3.10%。受地形地貌及水循环规律的影响,流域内地表产水能力不足,地下水资源是水资源总量的主要组成部分,约占72%。但近年来在跨流域调水、地下水压采等汾河流域综合治理措施的实施下,水资源的供水结构发生了较大的变化,从2005—2019年地表水的供水比例逐渐加大,由最初的30%提高到55%,相应的地下水供水比例逐渐减少,由最初的62%降低到目前的37%。

(2)汾河流域水资源的过度开发,导致汾河流域干流兰村—义棠段出现断流、汾河汇入黄河的径流量大幅衰减,衰减程度达63.5%。汾河入黄口河津水文站的年际变化过程显示,汾河入黄的径流量呈先下降(1956—2000年)后升高(2001—2018年)

的趋势,下降的原因主要是降水量的减少、汾河灌区地表水用水量的增大、岩溶大泉的流量衰减或断流等,上升的原因主要是降水量增加、汾河复流工程的实施以及万家寨引黄调水工程的生态补水。

(3)汾河流域内岩溶大泉发育,岩溶地下水是城市生活和工农业生产的重要水源,也是汾河径流量的重要组成部分。但目前岩溶大泉的流量衰减问题非常严重,从1956—2018年,流域内8个岩溶大泉的流量衰减程度达69%,其中4个岩溶大泉已断流。同时,岩溶地下水的水质恶化问题也非常严重,晋祠泉和龙子祠泉的TDS和 SO_4^{2-} 呈逐年升高的趋势,通过硫同位素示踪发现煤矿开采是造成龙子祠泉水 SO_4^{2-} 含量快速升高的主要原因。

References

- Chang Jianzhong. 2020. Implement "five ideas enriching water" and build happy river in Shanxi Province[J]. China Water Resources, (19): 5-6(in Chinese).
- Fan Duixiang. 2005. Evaluation of Water Resources in Shanxi Province[M]. Beijing: China water resources and Hydropower Press, 119-131(in Chinese).
- Gao Bo. 2002. Cause analysis and countermeasures of flow attenuation in Guozhuang spring[J]. Water Resources Protection, (1): 64-65(in Chinese with English abstract).
- Guo Dongyang, Wang Jing, Lin Dong. 2020. Investigation and consideration on water ecological protection and restoration of seven rivers basin in Shanxi Province[J]. Water Resources Planning and Design, (12): 17-18(in Chinese).
- 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).
- Guo Zhenzhong, Zhang Hongda, Yu Kaining. 2002. Multiple causes of attenuation of karst spring discharge in Shanxi Province[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, (2): 22-25(in Chinese with English abstract).
- Hou Xinwei, Li Xiangquan, Chen Hao. 2008. Study on transforming relationship among surface water, precipitation and groundwater along Fenhe River in Taiyuan Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (6): 38-39(in Chinese with English abstract).
- Han Shuangbao, Li Fucheng, Wang Sai, Li Haixue, Yuan Lei, Liu Jingtao, Shen Haoyong, Zhang Xueqing, Li Changqing, Wu Xi, Ma Tao, Wei Shibo, Zhao Minmin. 2021. Groundwater resource and eco-environmental problem of the Yellow River Basin[J]. Geology in China, 48(4):1014-1015(in Chinese with English abstract).

- Han Xingrui, Lu Rongan, Li Qingsong. 1993. Karst Water System: Study on Karst Spring in Shanxi[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 125–266(in Chinese).
- Jin Hua, Yangsuolin, Zheng Xiuqing, Li Cijun. 2005. Analysis of the reduction in flow from Jinci Springs[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 36(4): 488–490(in Chinese with English abstract).
- Li Juan. 2020. Analysis on scheduling for beneficial use of Fenhe Reservoir[J]. Shanxi Water Resources, (11):12–13(in Chinese).
- Liang Yongping, Gao Xubo, Zhao Chunhong, Tang Chunlei, Shen Haoyong, Wang Zhiheng, Wang Yanxin. 2018. Review characterization, evolution, and environmental issues of karst water systems in Northern China[J]. Hydrogeology Journal, 26:1371–1385.
- Liang Yongping, Wang Weitai, Zhao Chunhong, Wang Wei, Tang Chunlei. 2013. Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. Carsologica Sinica, 32(1): 34–41(in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Zhao Chunhong, Wang Zhiheng, Tang Chunlei, Zhao Yi, Xie Hao, Shi Weizhi. 2020. Thinking and practice on the reserch direction of karst water in north China[J]. Carsologica Sinica, 40(3): 363–368(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): 11–17(in Chinese with English abstract).
- Lin Xinggui. 2020. Analysis of existing problems of ecological environment of Fenhe basin and general idea of its restoration[J]. Water Resources Planning and Design, (6): 32–34(in Chinese).
- Liu Yufeng, Sun Hu, Yuan Zhihua. 2010. Characteristics and driving factors of runoff and sediment changes fluxes into the Yellow River from Fenhe River in recent 60 years[J]. Journal of Mountain Science 28(6): 668–671(in Chinese with English abstract).
- Ma Yonglai, Jiang Xiuhua, Liu Dongxu. 2017. Rivers and Lakes in the Yellow River Basin[M]. Zheng Zhou: Yellow River Water Conservancy Press, 40–42(in Chinese).
- Meng Zhilong, Yang Yonggang, Qin Zuodong, Jiao Wentao. 2017. Isotopic tracing for nitrate pollution process of water body in the lower reaches of Fenhe River[J]. China Environmental Science, 37(3): 1066–1072(in Chinese with English abstract).
- Shen Haoyong, Liang Yongping, Cheng Yang, Huang Chunling. 2017. Study on the regional evapotranspiration over different surface conditions of the Longzici spring drainage[J]. Carsologica Sinica, 36(2): 234–241(in Chinese with English abstract).
- Shen Haoyong, Liang Yongping, Zhao Chunhong, Tang Chunlei, Wang Zhiheng. 2020. Hydro–Geological characteristics and demarcation of gudui spring karst groundwater system[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50(1): 218–219(in Chinese with English abstract).
- Shi Jiansheng, Zhang Fawang, Qin Yisu, Li Ruimin, Ye Hao, Liu Zuzhi, An Lizhong, Pei Hanhua, Guo Zhenzhong, Zhao Yunzhang, Wang Yanjun. 2000. Groundwater resources and main environment–geological problems in the Huanghe River Valley as well as some countermeasures[J]. Acta Geoscientia Sinica, (2): 114–120(in Chinese with English abstract).
- Tang Chunlei, Liang Yongping, Wang Weitai, Zhao Chunhong, Shen Haoyong. 2017. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of the karst groundwater systems in Longzici spring basin[J]. Journal of Guilin University of Technology, 37(1): 52–58(in Chinese with English abstract).
- Wang Deng, Jian Shenqi, Hu Caihong. 2018. Impacts of climate change and human activities on runoff in Fenhe River Basin[J]. Arid Land Geography, 41(1): 25–29(in Chinese with English abstract).
- 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 on Jinci Spring in Taiyuan City [J]. Geology in China, 47(6): 1726–1738(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhiheng, Liang Yongping, Shen Haoyong, Zhao Chunhong, Tang Chunlei, Xie Hao, Zhao Yi. 2021. Dynamic characteristics of karst groundwater in Jinci spring under superimposed influence of natural and human activities [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(6): 1823–1837(in Chinese with English abstract).
- Xie Hao, Liang Yongping, Li Jun, Zou Shengzhang, Shen Haoyong, Zhao Chunhong, Wang Zhiheng. 2021. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements in groundwater in Longzici Spring area[J]. Environmental Science, 42(9): 4257–4258 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hong. 2011. Feasibility of spring reflow at Lancun village of Shanxi Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 22(6): 177–179(in Chinese with English abstract).
- Yang Pingguo, Zheng Fengyan. 2008. Spatial and temporal variation of precipitation in Fenhe Valley for 50 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 22(12): 108–109(in Chinese with English abstract).
- Yang Shirong, Di Fan. 2020. Study on evaluation, protection and control countermeasures of karst springs in Fenhe River Basin[J]. Water Resources Development Research, (5): 20–25(in Chinese).
- Yang Yonggang, Qin Zuodong, Xue Zhanjin. 2016. Study on Hydrology and Water Resources in Fenhe River Basin[M]. Beijing: Science Press, 28–30(in Chinese).
- Zhang Jianguo, Zhao Huijun, Zhang Ruoqiong. 2003. Environment problems of water in the Yellow River Basin of Shanxi Province[J]. Journal of Changjiang Institute of Technology, 20(4): 1–4(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常建忠. 2020. 实施“五策丰水”, 打造三晋幸福河[J]. 中国水利, (19): 5-6.
- 范堆相. 2005. 山西省水资源评价 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 119-131.
- 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.
- 郭东阳, 王晶, 蔺冬. 2020. 山西“七河”流域水生态保护及修复调研与思考[J]. 水利规划与设计, (12): 17-18.
- 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(4): 493-494.
- 郭振中, 张宏达, 于开宁. 2002. 山西岩溶大泉衰减的多因复成性[J]. 工程勘察, (2): 22-25.
- 侯新伟, 李向全, 陈浩. 2008. 汾河中游干流河水与大气降水和浅层地下水的转化关系[J]. 水文地质工程地质, (6): 38-39.
- 韩双宝, 李甫成, 王赛, 李海学, 袁磊, 刘景涛, 申豪勇, 张学庆, 李长青, 吴玺, 马涛, 魏世博, 赵敏敏. 2021. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 48(4): 1014-1015.
- 韩行瑞, 鲁荣安, 李庆松. 1993. 岩溶水系统: 山西岩溶大泉研究[M]. 北京: 地质出版社, 125-266.
- 晋华, 杨锁林, 郑秀清, 李慈君. 2005. 晋祠岩溶泉流量衰竭分析[J]. 太原理工大学学报, 36(4): 488-490.
- 李娟. 2020. 汾河水库兴利调度研究[J]. 山西水利, (11): 12-13.
- 梁永平, 王维泰, 赵春红, 王玮, 唐春雷. 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): 34-41.
- 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 2021. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 40(3): 363-368.
- 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文地质条件新认识[J]. 水文地质工程地质, 46(1): 11-17.
- 林兴贵. 2020. 汾河流域生态环境存在问题及生态修复总体思路探析[J]. 水利规划与设计, (6): 32-34.
- 刘宇峰, 孙虎, 原志华. 2010. 近60年来汾河入黄河水沙演变特征及驱动因素[J]. 山地学报, 28(6): 668-671.
- 马永来, 蒋秀华, 刘东旭. 2017. 黄河流域河流与湖泊 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 40-42.
- 孟志龙, 杨永刚, 秦作栋, 焦文涛. 2017. 汾河下游流域水体硝酸盐污染过程同位素示踪[J]. 中国环境科学, 37(3): 1066-1072.
- 申豪勇, 梁永平, 程洋, 黄春玲. 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.
- 申豪勇, 梁永平, 赵春红, 唐春雷, 王志恒. 2020. 古堆泉岩溶地下水系统特征及系统圈划[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(1): 218-219.
- 石建省, 张发旺, 秦毅苏, 李瑞敏, 叶浩, 刘祖植, 安立忠, 裴捍华, 郭振中, 赵云章, 王彦俊. 2000. 黄河流域地下水资源、主要环境地质问题及对策建议[J]. 地球学报, (2): 114-120.
- 唐春雷, 梁永平, 王维泰, 赵春红, 申豪勇. 2017. 龙子祠泉域岩溶水水化学同位素特征[J]. 桂林理工大学学报, 37(1): 52-58.
- 王登, 荐圣洪, 胡彩虹. 2018. 气候变化和人类活动对汾河流域径流情势影响分析[J]. 干旱区地理, 41(1): 25-29.
- 王宏. 2011. 西西兰村泉水复流的可行性分析[J]. 水资源与水工程学报, 22(6): 177-179.
- 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——以太原晋祠泉为例[J]. 中国地质, 47(6): 1726-1738.
- 王志恒, 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 唐春雷, 谢浩, 赵一. 2021. 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), 51(6): 1823-1837.
- 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒. 2021. 龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 42(9): 4257-4258.
- 杨萍果, 郑峰燕. 2008. 汾河流域50年降水量时空变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 22(12): 108-109.
- 杨士荣, 狄帆. 2020. 汾河流域岩溶大泉评价和保护治理对策研究[J]. 水利发展研究, (5): 20-25.
- 杨永刚, 秦作栋, 薛占金. 2016. 汾河流域水文水资源研究 [M]. 北京: 科学出版社, 28-30.
- 张建国, 赵惠君, 张若琼. 2003. 山西省黄河流域的水环境问题[J]. 长江理工大学学报, 20(4): 1-4.