

DOI: 10.5846/stxb202106291724

焦丽君, 刘瑞民, 王林芳, 党晋华, 肖艳艳, 夏星辉. 基于 SWAT 模型的汾河流域生态补水研究. 生态学报, 2022, 42(14): 5778-5788.

Jiao L J, Liu R M, Wang L F, Dang J H, Xiao Y Y, Xia X H. Study on ecological water supplement in Fenhe River Basin based on SWAT Model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5778-5788.

基于 SWAT 模型的汾河流域生态补水研究

焦丽君¹, 刘瑞民^{1,*}, 王林芳², 党晋华^{3,4}, 肖艳艳⁴, 夏星辉¹

1 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

2 山西农业大学高粱研究所, 晋中 030600

3 山西省生态环境监测和应急保障中心, 太原 030027

4 山西农业大学资源环境学院, 晋中 030600

摘要:随着人类对于河流的开发利用日益增强, 显著改变了河流的天然径流过程, 生态供水不足成为流域生态系统健康的重要制约因素。以山西省汾河流域为研究区, 基于天然和实测径流数据, 利用 SWAT 模型分别模拟了流域近 30 年天然径流和近 10 年跨流域调水情况下现状径流过程, 并在此基础上对流域各河道生态流量及现状径流量进行时空量化, 探讨了不同生态流量标准下生态缺水量在时间和空间上的变化情况。研究结果表明: (1) 汾河流域各河道生态流量时空差异明显, 汛期(0.50—18.80 m³/s)河道生态流量需求显著高于非汛期(0.05—1.81 m³/s), 总体分布特征为中下游干流远高于上游支流; (2) 在 Tennant 法的不同生态流量标准下, 汾河流域非汛期生态流量保障情况整体优于汛期, 高频缺水区主要分布在支流, 呈上下游分散分布; (3) 在中等级生态流量标准下, 流域约 84% 的区域能保障基本生态流量需求, 关键缺水区为岚河、潇河、浮山县及浍河地区; (4) 建议流域生态补水在时间上侧重汛期补水, 空间上侧重高频缺水地区, 基于流域生态水量时空分布特征分配跨流域调水资源, 提高水资源利用效率。研究从时空上量化了跨流域调水工程实施后流域生态流量满足程度, 可以为未来流域水资源管理提供有效指导。

关键词:生态流量; SWAT 模型; 天然径流; 跨流域调水; 生态补水

Study on ecological water supplement in Fenhe River Basin based on SWAT Model

JIAO Lijun¹, LIU Ruimin^{1,*}, WANG Linfang², DANG Jinhua^{3,4}, XIAO Yanyan⁴, XIA Xinghui¹

1 State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Sorghum Research Institute, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, China

3 Shanxi ecological environment monitoring and emergency support center, Taiyuan 030027, China

4 School of resources and environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, China

Abstract: Facing the increasingly serious water shortage problem, with the increasing demand for water resources, the development and utilization of rivers by human beings have been enhanced, which significantly changed the natural hydrological process of basins. The basic ecological water demand of rivers cannot be guaranteed, and the shortage of ecological water supply has become an important factor restricting the health of watershed ecosystem. In order to effectively guarantee the river ecological flow, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to simulate the natural runoff and the current runoff process with inter basin water transfer in Fenhe River Basin of Shanxi Province based on the natural and measured hydrological data. First, based on the SWAT model, the monthly natural runoff for about 30 years and the monthly current runoff after the implementation of inter basin water transfer projects in recent 10 years were simulated in

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0605001)

收稿日期: 2021-06-29; 网络出版日期: 2022-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liurm@bnu.edu.cn

the Fenhe River Basin. Second, based on the improved Tennant method, the ecological flow values under different ecological flow criteria were quantified in each river channel in flood season and non-flood season. Last, the temporal and spatial distribution characteristics of ecological flow and ecological water shortage were analyzed in the whole basin. The results showed that: (1) the ecological flow of each channel showed significantly temporal and spatial differences, with the values were 0.05—1.81 m³/s for non-flood season and 0.50—18.8 m³/s for flood season. The overall distribution characteristics were that the ecological flow in the middle and lower reaches was much higher than that in the upstream tributaries. (2) Under different ecological flow criteria of Tennant method, the satisfaction of ecological flow in non-flood season was better than that in flood season, and the areas with high-frequency of water shortage were mainly distributed in the upstream and downstream tributaries. (3) Under the medium-level environmental flow standards, about 84% of the basin could guarantee the basic ecological flow demand, and the key water shortage areas were Lanhe, Xiaohe, Fushan County and Huihe River basin. (4) The ecological water supplement of the basin should focus on flood season in time and areas with high frequency of water shortage in space, and the water resources of inter-basin water transfer projects should be allocated based on the spatial and temporal distribution characteristics of ecological water deficiency to improve the utilization efficiency of water. In conclusion, this study quantified the satisfaction degree of ecological flow after the implementation of inter basin water transfer projects in time and space, which can provide effective guidance for watershed water resources management.

Key Words: ecological flow; SWAT model; natural runoff; inter basin water transfer; ecological water supplement

随着人口数量的显著增多和社会经济的迅速发展,人类在诸如工业、农业和生活等方面消耗的水资源越来越多,以人类用水需求为中心的水资源开发利用模式导致河流水系的生态环境显著恶化,河流生态问题凸显^[1]。生态流量作为维持和保障河流生态系统健康的重要基础,旨在维持河道内最基本的水量以尽可能满足天然状态的需要,近年来已成为许多科研与管理方面的研究热点^[2-4]。并且,随着人们生产生活及城市化建设发展,城市的水源供给呈现出多元化的趋势^[5]。多元水源供给条件为生态补水提供了基础,保障河道生态流量成为流域生态恢复工作重点内容^[6-7]。河流生态流量指维持河道及河口的自然生态系统和维持人类生存发展所依赖的生态系统所需要的水量、时间和水质^[8]。广义来说,河流生态流量既包括维持河道生态系统所需要的流量过程,也包括与河道相连的湖泊、河口、湿地等系统的需水量,又被称为“生态需水量”^[9]。其计算方法包括水文学法、水力学法、栖息地模拟法以及综合法等四类^[10]。其中水文学和水力学法计算相对简单,所需参数少,应用最为广泛^[11]。

然而,长期以来的研究主要关注主河道或流域出口的生态需水量计算,且河流生态补水计算多是基于固定值,缺乏科学的流域时空分配方法^[12]。已有学者从河流生态系统整体性出发,从时间上对生态流量进行细化,以反映自然水文过程的波动性和变化性^[13],但对流域整体生态流量的计算仍较为单一,特别是在河道复杂的大面积流域,如何考虑水资源的空间配置问题尚缺乏相关方法和案例研究^[14-15]。针对河流生态流量研究不足的现状,本文以山西省汾河流域为研究区,基于水文模型模拟和河流生态流量理论,对流域各河道生态流量和生态补水量进行时空量化研究,并据此提出河流生态补水政策和建议,以期对流域水资源配置管理提供决策支持。

1 研究区概况

汾河流域地处山西省的中部和西南部,是黄河的第二大支流,也是山西省最大的河流。其发源于宁武县管涔山雷鸣寺的上游,在运城市河津汇入黄河,流经忻州市、太原市、晋中市、吕梁市、临汾市、运城市 6 个地市、34 个县市,流域面积约为 39741 km²^[16]。汾河流域按河流特征可分为上、中、下游三段;太原兰村以上为上游,太原兰村至洪洞赵城为中游,中游断面以下,至万荣县庙前村入黄河口为下游。作为山西省严重缺水区域,汾河流域多年平均水资源量仅有 30.1 亿 m³,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,整体水资源开发利用率高达 80% 以上,区域地下水超采、地表径流减少问题严重^[17]。为了恢复“汾河流水哗啦啦”的景象,山西省于 2008 年启动了千里汾河清水复流工程,通过水量调度、污染治理等相关措施,改善汾河水环境和水生态。目前向流域供水的调入水工程包括:万家寨引黄南干线工程、引沁入汾和川取水输水工程、禹门口引黄工程,调水站点分布见图 1。

2 材料与方法

2.1 SWAT 模型

本研究采用 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)模拟汾河流域的天然及实际径流过程。该模型是由美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)和农业研究中心(Agricultural Research Service, ARS)开发的长时间分布式水文模型,具有很强的物理机制,在综合考虑自然因素和社会因素的基础上,能够较好地模拟大尺度流域的地表径流过程^[18]。模型自开发以来,已在许多不同的国家和地区得到了应用,对流域均能达到良好的模拟效果^[19–20]。

SWAT 模型建立所需的基础数据包括:流域数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、土地覆盖/土地利用类型、土壤类型与土壤属性库、气象水文观测数据(降水量、日最高/最低温度、日相对湿度、日平均风速和日太阳辐射)等,且所有数据需在同一投影和空间坐标系下^[21]。构建汾河流域 SWAT 模型使用的主要数据来源如表 1 所示。

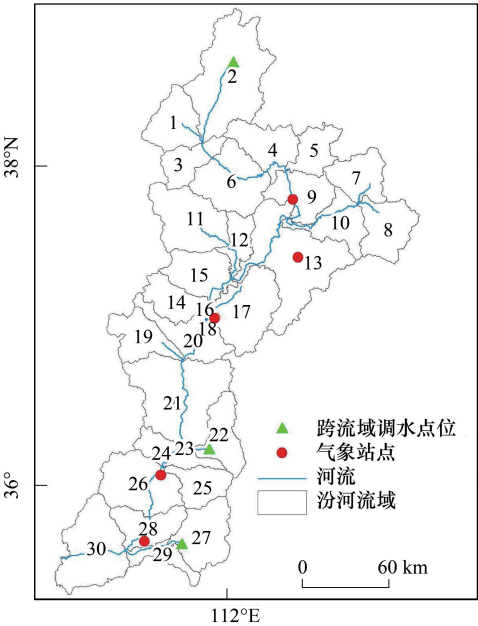


图 1 汾河流域子流域划分及编号
Fig.1 Division and numbering of sub-basin of Fenhe river basin

表 1 汾河流域 SWAT 模型基础数据及来源

Table 1 Datasets and their sources for building the SWAT model in Fenhe river basin		
数据类型 Data types	规格 Data description	来源 Data sources
数字高程模型 DEM	30 米分辨率	地理空间数据云
土地覆盖/土地利用 Land use	30 米分辨率(2015 年)	Landsat 卫星遥感解译,第二次全国土地调查
土壤类型和土壤属性 Soil attribute data	30 米分辨率	世界土壤数据库,山西省土种志
日气象数据 Daily meteorological data	5 个站点(1988—2018 年)	国家气象科学数据中心
月均流量 Monthly flow	1 个站点(2010—2016 年)	山西省环境科学研究院

DEM, 数字高程模型 Digital elevation model

首先,基于汾河流域 DEM 数据,使用 SWAT 模块中的自动水系提取功能(Automatic Watershed Delineation)生成河网,界定研究流域总出口。子流域的划分根据适度指数法,将由 DEM 数据提取的河网总长度与实际河网进行对比,选取模拟河网与实际河网的河道偏差最小时的集水面积作为集水面积阈值^[22]。在集水面积阈值 800 km² 的尺度上,将研究区划分为 30 个子流域,结果如图 1。最后,在子流域的基础上,进一步基于土地利用类型、土壤类型和坡度范围等划分水文响应单元(Hydrological Response Unit, HRU),使模型能够反映不同土地利用/覆盖、土壤和地形坡度的差异,提高预测的准确性。

为对比量化天然径流和现状径流特征,本研究分别基于天然径流数据和实测径流数据构建汾河流域天然及实际水文模型。天然径流指的是未受人类活动影响下的流域天然流量,它与实测径流的差别在于天然径流包括实测径流和受人类活动影响部分的河川径流量两部分。其中受人类活动影响部分的河川径流量主要包括:灌溉用水、工业和生活用水、水库蒸发和渗漏水量和流域引调水资源^[23]。在模型构建过程中,相比于流域

天然模型,实际水文模型在基础模型建设上加入人为用水活动,包括跨流域调水工程、水库、取水工程和引水灌溉等。对于汾河流域天然径流的模拟,为了使年均径流数据具有一定的代表性,将汾河流域天然 SWAT 模型的模拟跨度设置为 30 a,时间为 1988—2018 年。对于汾河流域实测径流的模拟,模拟时段应包含各种水文年型,且为跨流域工程实施以来流域径流现状,因此模拟时间选择最近的 10 a,时间为 2008—2018 年。另外,在模型运行之前,为了消除初始状态对系统的影响,使系统进入相对稳定期,分别选择模拟时间的前两年作为模型预热期,在模型预热期内模型不输出模拟值。

天然径流量与实测径流量之间的计算公式如下^[23]:

$$W_{\text{天然}} = W_{\text{实测}} + W_{\text{灌溉}} + W_{\text{工业}} + W_{\text{生活}} + W_{\text{水库}} \pm W_{\text{引水}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{水库}}$ 指水库工程蓄水变量,包括水库蒸发和渗漏等。

对于模拟结果,本文采用决定系数(R^2)和效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)进行模型适用性评价。决定系数(R^2)表示模型模拟的结果和实测数据的相关性,取值为 0—1,值越大则模拟结果和实测数据的趋势性越相近^[24]。Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)表示模型模拟结果的可信度,主要用于衡量模拟结果与实测结果之间的拟合程度^[25]。效率系数(NSE)的取值为负无穷到 1,值接近 1,表示模型质量好,可信度高;值远远小于 0,则模型不可信^[26]。由于收集的数据有限,模型的率定验证期设置为 2010—2016 年。对于汾河流域天然模型,模拟结果指天然模型 2010—2016 年月径流模拟值,实测结果指 2010—2016 年还原后天然月径流量;对于汾河流域实测模型,模拟结果指实测模型 2010—2016 年月径流模拟值,实测结果指 2010—2016 年实测月径流量。

2.2 河道生态流量评估

本研究采用水文学的 Tennant 法计算汾河流域内各河道生态流量,并对计算结果利用生态流量标准等级加以评估。Tennant 法基于预先确定的天然径流百分比计算河流生态流量值,可将河道生态环境状况划分为最佳范围、非常好、好、中、差等不同等级,分别对应不同的生态流量标准^[27]。其中,中等级为维持河流生态系统健康的基本等级,其流量计算值为生态流量目标值。在时间上,Tennant 法综合考虑水生生物发育期和鱼类产卵育幼期划分为汛期(4—9 月)和非汛期(10 月—次年 3 月)两个时间段^[28]。而我国北方河流的径流与降水相关性很强,基于汾河流域年内降水分布特征,本研究将汛期时间修正到 5—10 月,非汛期时间修正到 11 月—次年 4 月,基于 1980—2018 年汾河各河道汛期和非汛期多年平均天然径流模拟值计算生态流量^[29]。不同生态环境状况的流量百分比,见表 2。

表 2 不同生态流量状况的流量占比/%

Table 2 Flow percentages of different eco-environmental standards

生态流量标准 Ecological flow criterion	最佳 Optimum	非常好 Excellent	好 Good	中 Fair	差 Minimum
非汛期 Non-flood season	60—100	30	20	10	10
汛期 Flood season	60—100	50	40	30	10

为了弥补 Tennant 法反映河流生态需水年内季节性变化方面的不足,本研究在计算中将多年月均流量区分为非汛期和汛期两个部分。分别以非汛期多年平均流量和汛期多年平均天然流量为基础计算非汛期和汛期的各河道天然流量,以更好地反映出季节变化较大的河流在不同时期的径流变化特征。

2.3 生态补水量化

生态补水的目标是使补水后河流径流能够满足一定的生态流量标准要求^[30]。基于此,本研究将不同生态状况等级下的河流流量值作为目标函数,具体如下:

$$W_i = W_a + W_s \quad (2)$$

式中, W_i 为生态环境状况 i 等级下的目标水量; W_a 为河道现状水量, W_s 为河道生态补水量。

不同生态环境状况下目标水量的计算基于 Tennant 标准系数和历史天然流量进行,由于各河道天然流量

难以实际观测,采用基于流域天然状态建立的 SWAT 模型对汾河流域天然径流量进行模拟,从而获得生态补水计算基本参数。对于流域内各河道现状径流量,采用基于流域现状建立的 SWAT 模型模拟获得流域内各河道现状径流量空间分布数据^[31]。

3 结果与分析

3.1 模型率定及验证

在径流模拟过程中,本文利用 SWAT-CUP(SWAT-Calibration and Uncertainty Programs)软件对流域天然及实测模型进行自动率定,并根据径流敏感度从参数库中选取 11 个径流敏感度较高的参数确定为率定参数(表 3、表 4)。根据获取的汾河流域出口河津水文站点 2010—2016 年径流天然及实测数据,将模型预热期设为 2008—2009 年,率定期设定为 2010—2013 年,验证期设定为 2014—2016 年。其中,径流天然数据指还原后天然流量,是在实测数据的基础上由实测径流量、地表水耗水量和蓄变量等还原计算得到^[23]。具体模拟结果见图 2—图 4。

表 3 SWAT 模型参数
Table 3 SWAT model parameters

类别 Types	参数名称 Parameter name	含义 Parameter definition	类别 Types	参数名称 Parameter name	含义 Parameter definition
径流 Flow	CN	SCS 径流曲线系数	植物 Vegetation	EPCO	植物蒸腾补偿系数
地下水 Groundwater	ALPHA_BF	基流 α 因子	土壤 Soil	SOL_K	土壤层饱和导水率
	GWQMN	浅层地下水回流临界深度		SOL_AWC	土壤层有效含水量
	GW_DELAY	地下水延迟时间		SOL_BD	土壤湿密度
	GW_REVAP	地下水再蒸发系数		ESCO	土壤蒸发补偿系数
	REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数			

表 4 参数率定结果
Table 4 Calibration results of parameters

参数名称 Parameter name	天然模型率定值 Calibration value of natural model	实测模型率定值 Calibration value of actual model	P
CN2	58.07	39.31	0.00
ALPHA_BF	1.06	0.69	0.00
GWQMN	3573.14	3585.82	0.20
GW_DELAY	355.53	370.51	0.58
GW_REVAP	0.03	0.29	0.50
REVAPMN	22.67	447.10	0.11
EPCO	0.72	0.97	0.03
SOL_K	-665.58	-314.29	0.00
SOL_AWC	0.45	-0.14	0.00
SOL_BD	1.57	1.68	0.39
ESCO	1.02	1.18	0.18

由图 4 可知,对于汾河流域天然和实测模型,校准期和验证期的月均径流量决定系数(R^2)均大于 0.8,效率系数(NSE)值均大于 0.6。当决定系数(R^2)和效率系数(NSE)大于 0.5 时,表示校准和验证结果可以接受,模型模拟能较好的反映流域实际情况^[24,26,32]。因此 SAWT 模型在汾河流域的模拟结果是可靠的。

3.2 径流变化评估

基于汾河流域 SWAT 模型模拟 2010—2018 年的天然和现状年均径流量,其空间分布如图 5 所示。在人类活动影响下,汾河流域年均现状径流量较天然径流下降 38%,且空间分布格局有所改变。在跨流域调水工

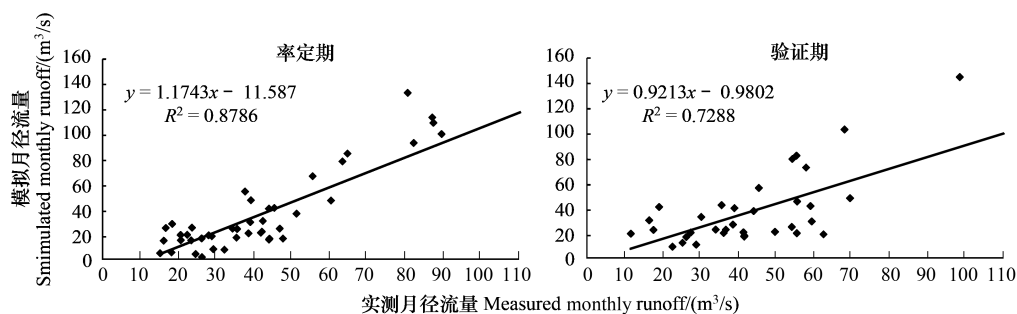


图 2 天然月径流实测值与模拟值散点分布

Fig.2 Scatter plots of measured and simulated natural monthly runoff

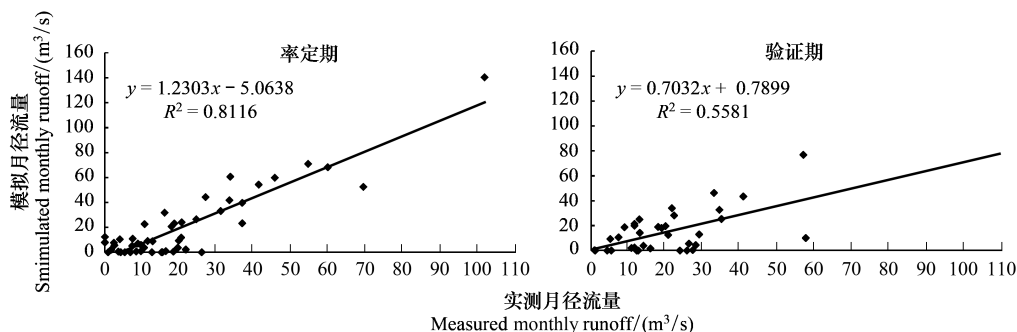


图 3 实际月径流实测值与模拟值散点分布

Fig.3 Scatter plots of measured and simulated actual monthly runoff

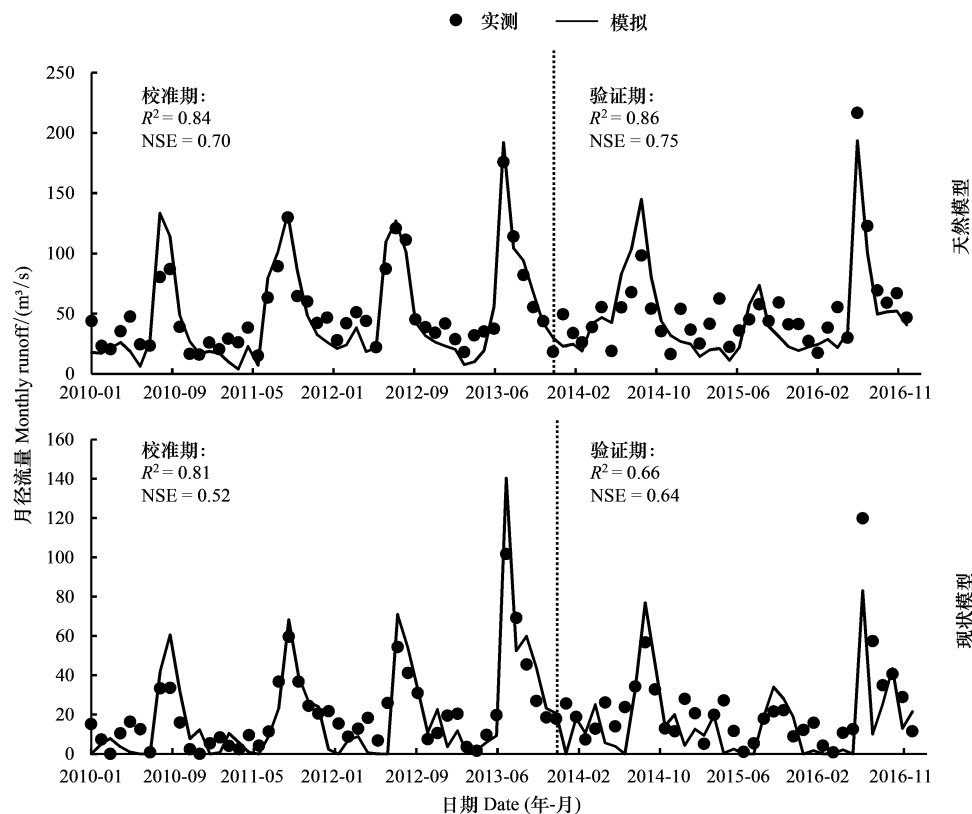


图 4 月径流实测值与模拟值比较

Fig.4 Comparison of measured and simulated monthly runoff

NSE: 纳什效率系数 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient

程的影响下,引水河道(子流域 2 和 3、子流域 22 和 23)现状径流较天然径流增加 73%,其他地区则受人为用水活动的影响,年均径流量显著下降^[33]。

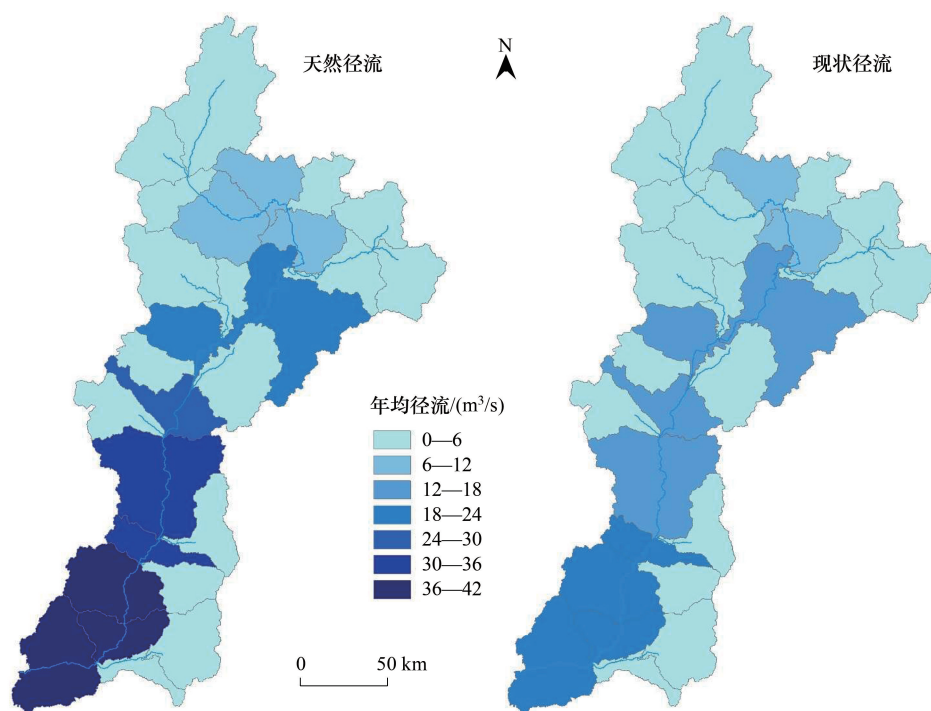


图 5 汾河流域 2010—2018 年年均径流量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of annual runoff in Fenhe River Basin from 2010 to 2018

为了进一步评估人类用水活动对流域天然水文状况的影响程度,根据《水文情报预报规范》(GB/T22482—2008)中的距平百分率划分径流丰平枯的标准,本研究选择了 3 个典型水文年型(距平百分比 $P > 10\%$, $10\% \geq P > -10\%$, $P \leq -10\%$),使用各水文年的天然和现状流量数据来对比评估其水文状况变化情况^[34]。基于模拟的 1980—2018 年的天然流量数据,计算各年流量的累计距平百分比,确定丰水年(2016、2017 和 2018)、平水年(2011、2012 和 2013)和枯水年(2010、2014 和 2015)。

由图 6 可知,流域实测流量多年月均值显著低于天然流量,整体约为天然月径流量的 50%,其中非汛期 3 月份的实测径流变化最大,径流削减幅度约为 86%。总体而言,受人为用水活动影响,非汛期月径流削减幅度高于汛期。不同水文年型的径流量差值主要出现在汛期,其中以 7 月份最为显著,并且即使在丰水年各月份实测流量仍远小于多年平均天然月径流量,水资源利用消耗率整体处于较高水平。

3.3 生态流量空间分布

根据汾河流域天然状态下建立的 SWAT 模型模拟结果,将河道多年平均天然流量划分为非汛期(11—4 月)和汛期(5—10 月)两个阶段计算生态流量。

由图 7 可见,各河道生态流量与河道在流域中的位置有明显的关系。对于下游和干流河道,历史天然流量高,河道生态流量需求大。河道生态流量最小值出现在子流域 5,值为 $0.27\text{m}^3/\text{s}$;最大值出现在汾河流域总出口子流域 30,值为 $10.31\text{m}^3/\text{s}$ 。同时河流生态流量空间分布特征不随季节变化,不同水文时期空间分布特征一致。在非汛期 11—4 月份,流域各河道河流生态流量值为 $0.05—1.81\text{m}^3/\text{s}$,最大值出现在流域出口河津站点。在汛期 5—10 月份,流域各河道生态流量值为 $0.50—18.80\text{m}^3/\text{s}$ 。值得注意的是,河流生态流量大小受降水量影响显著,汛期降水量高,生态流量大,整体上汛期生态流量约为非汛期的 10 倍。

3.4 不同生态流量标准下河流缺水评估

基于 Tennant 标准系数表,在不同河道生态环境状况标准下,获得不同生态需求下河流缺水量时空分布

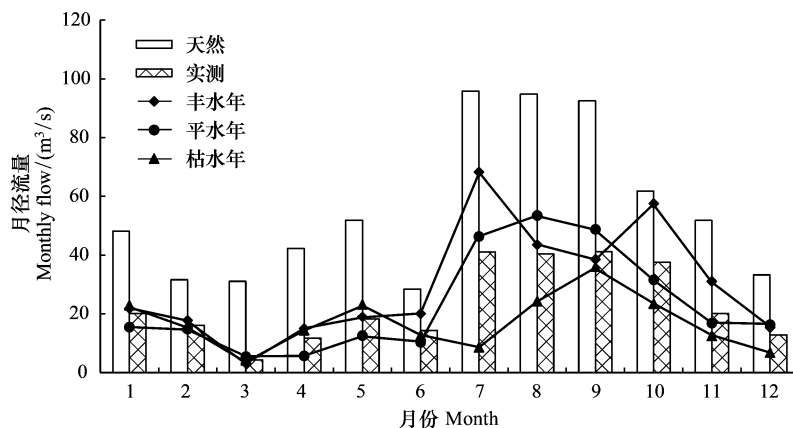


图 6 汾河不同水文年下现状与天然月均流量比较

Fig.6 Comparison of current and natural monthly discharge of Fenhe River in different hydrological years

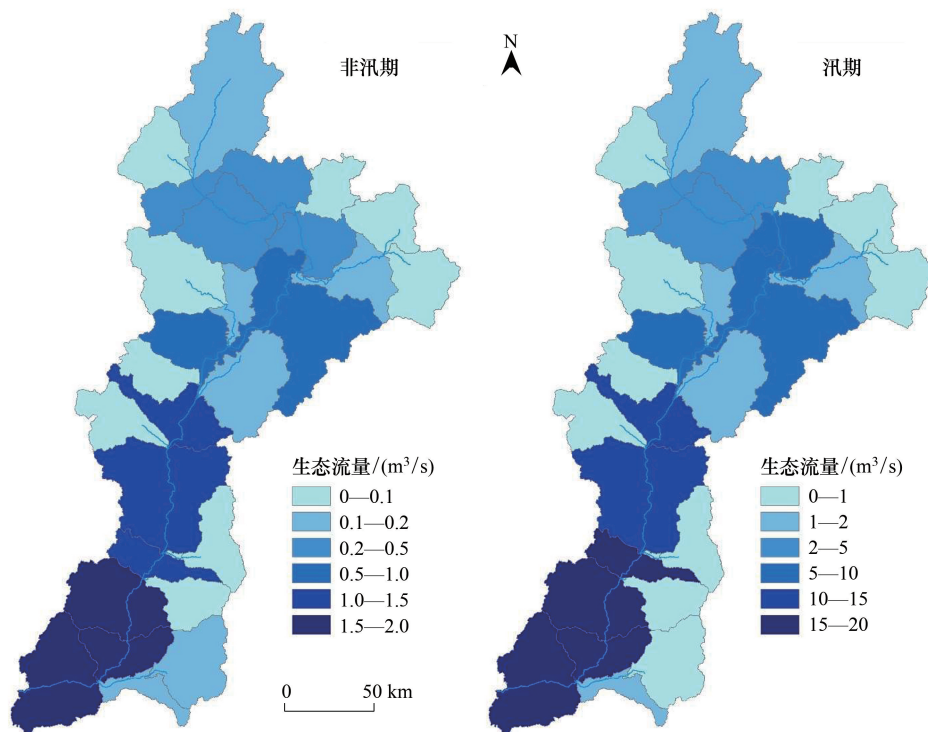


图 7 汾河流域河流生态流量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecological flow in Fenhe River Basin

图(图 8)。在差等级下,流域汛期和非汛期均无生态缺水现象,整体生态流量保障度较高,保证度最小值为 162%。在中等级下,非汛期部分支流出现生态缺水现象,缺水量为 $-0.26 \sim -0.05 \text{ m}^3/\text{s}$,严重缺水区分布在浍河(子流域 27)流域。在好等级下,汛期和非汛期均出现缺水区域,非汛期缺水量为 $-0.035 \sim -0.02 \text{ m}^3/\text{s}$,汛期为 $-0.55 \sim -0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在最佳等级下,非汛期和汛期的河流缺水呈多区域分布,非汛期缺水区域包括子流域 1、8、25 及 27;汛期缺水区域较之前不同,在流域上中下游普遍分布,其中流域出口缺水量最大,约为 $-10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

研究结果表明,在不同季节,子流域 25 和 27,生态缺水频率最高,约为 63%;其次为子流域 1 和 8,缺水频

率为 50%。整体上,汾河流域非汛期生态流量保障情况优于汛期,高频缺水区主要分布在支流,呈上下游分散分布。因此,流域生态补水在时间上应侧重于汛期补水,在空间上应侧重于高频缺水河道。此外,在 Tennant 法所划分的 8 个生态流量标准中,中等级生态流量指维持生态系统健康所需要的最基本的水量,即在广义上的生态流量^[35—37]。在中等级生态流量标准下,流域约 84%的区域满足生态流量需求,为进一步改善流域流量生态现状,需要在 5—10 月对岚河(子流域 1)、潇河(子流域 8)、浮山县(子流域 25)及浍河(子流域 27)地区进行生态补水,补水量见表 5。

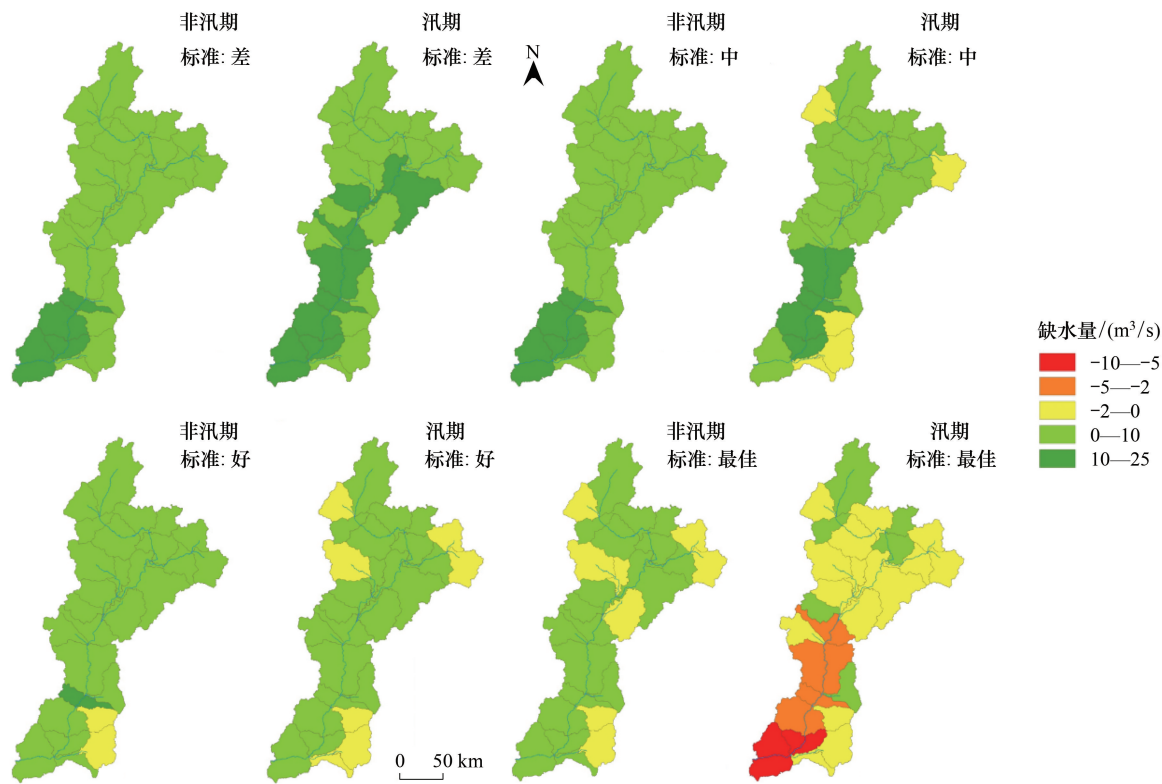


图 8 不同生态流量标准下河流缺水时空分布

Fig.8 Spatiotemporal distribution of water shortage under different ecological environment standards

表 5 中等级生态标准下汾河流域生态补水量

Table 5 Ecological water supplement demand of Fenhe River Basin under medium ecological standard				
生态补水 Ecological water supplement	汛期 Flood season			
	岚河	潇河	浮山县	浍河
月补水量 Monthly water replenishment/($\times 10^4 \text{ m}^3$)	19	15	15	68

4 结论和建议

本文以汾河流域为研究区,从保障流域各河道生态流量角度出发,首先基于流域天然径流数据模拟还原了 1988—2018 年汾河流域天然径流过程,在此基础上量化整个流域各河道生态流量,然后基于流域现状径流模拟结果,分析了跨流域调水后汾河流域生态缺水现状。结果表明:

- (1) 汾河流域各河道生态流量空间差异明显,干流生态流量远高于支流,中下游高于上游,且汛期和非汛期生态流量空间分布特征一致。
- (2) 汛期河道生态流量需求远高于非汛期,在不同的生态流量标准下,非汛期生态流量保障情况整体优于汛期。

(3) 当前的径流量和跨流域补水情况无法保障全流域生态流量需求,基于汛期和汛期综合分析,岚河、潇河、浮山县及浍河出现生态缺水频率最高。

(4) 现有的跨流域调水工程虽极大的增加了流域整体水资源量,但空间上分布不均,对流域整体生态流量保障状况改善较小。

(5) 由于关键生态缺水区呈流域内分散分布,后续应针对相应河道生态流量缺水现状,更合理的进行调水资源量的空间分配以使流域整体满足生态流量需求。

本研究在流域水文模型模拟基础上,揭示了汾河流域生态流量时空分布特征和各河道生态流量满足程度时空分布特征。但由于 Tennant 法中设定的分期百分数不一定能满足鱼类卵育期的具体要求,后续的生态需水研究中可以进一步结合汾河流域鱼类产卵场、栖息地的生态环境需求,对河道水力条件进行细化,以更好地满足汾河流域实际发展需要。

参考文献(References):

- [1] Wang Y Z, Liu L, Guo S S, Yue Q, Guo P. A bi-level multi-objective linear fractional programming for water consumption structure optimization based on water shortage risk. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117829.
- [2] 李斐, 邓志民, 邓瑞, 彭才喜. 汉江干流生态流量保障措施研究. *人民长江*, 2021, 52(2): 50-53.
- [3] 江善虎, 周乐, 任立良, 王孟浩, 卫林勇, 袁飞. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因. *水科学进展*, 2021, 32(3): 356-365.
- [4] 赵芬, 庞爱萍, 李春晖, 郑小康, 王烜, 易雨君. 黄河干流与河口湿地生态需水研究进展. *生态学报*, 2021, 41(15): 6289-6301.
- [5] 贺建文. 内陆干旱区城市多目标水资源优化配置研究. *人民黄河*, 2020, 42(S1): 26-29.
- [6] Cheng B, Li H E. Improving water saving measures is the necessary way to protect the ecological base flow of rivers in water shortage areas of Northwest China. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107347.
- [7] Yan Z Q, Zhou Z H, Sang X F, Wang H. Water replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 1152-1165.
- [8] Guan X J, Zhang Y M, Meng Y, Liu Y, Yan D H. Study on the theories and methods of ecological flow guarantee rate index under different time scales. *Science of the Total Environment*, 2021, 771: 145378.
- [9] Poff N L, Matthews J H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 667-675.
- [10] Cheng B, Li H E. Agricultural economic losses caused by protection of the ecological basic flow of rivers. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 68-75.
- [11] 王鸿翔, 桑明崎, 查胡飞, 郭文献. 基于生态水文学法的湘江生态流量研究. *人民长江*, 2019, 50(8): 70-73.
- [12] 曾庆慧, 胡鹏, 赵翠平, 龚家国, 刘欢, 杨泽凡. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响. *生态学报*, 2020, 40(20): 7153-7164.
- [13] Parasiewicz P, Ryan K, Vezza P, Comoglio C, Ballesterio T, Rogers J N. Use of quantitative habitat models for establishing performance metrics in river restoration planning. *Ecohydrology*, 2013, 6(4): 668-678.
- [14] 王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 冯慧娟, 李若男, 沈红保. 基于黄河鲤鱼栖息地水文——生态响应关系的黄河下游生态流量研究. *水利学报*, 2020, 51(9): 1175-1187.
- [15] 庞爱萍, 易雨君, 李春晖. 基于生态需水保障的农业用水安全评价——以山东省引黄灌区为例. *生态学报*, 2021, 41(5): 1907-1920.
- [16] 王丹丹. 汾河下游生态基流调控及水质改善研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [17] 范肖予. 基于汾河干流基本生态需水的汾河水库生态补水研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [18] Bhumika U, Jha M K, Verma A K, Anebagilu P K. Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140737.
- [19] Zhang H, Wang B, Liu D L, Zhang M X, Leslie L M, Yu Q. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: a case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124822.
- [20] Neupane P, Bailey R T, Tavakoli-Kivi S. Assessing controls on selenium fate and transport in watersheds using the SWAT model. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140318.
- [21] Teshager A D, Gassman P W, Secchi S, Schoof J T. Simulation of targeted pollutant-mitigation-strategies to reduce nitrate and sediment hotspots in agricultural watershed. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1188-1200.
- [22] 吴泰兵, 夏达忠, 张行南. 基于改进适度指数法的流域流水网阈值确定研究. *水电能源科学*, 2011, 29(4): 18-20.
- [23] 于海超, 张扬, 马金珠, 郭嘉兵, 陈沛源. 1969-2018 年黄河实测径流与天然径流的变化. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 1-7.
- [24] 张建永. 基于 SWAT 模型的官厅水库流域非点源污染模拟与评价[D]. 北京: 北京师范大学, 2002.

- [25] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [27] 杨蕊, 冯民权, 孙小平, 杨志. 基于改进 Tennant 法的汾河中游环境流量计算方法. *水电能源科学*, 2018, 36(12): 13-15.
- [28] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.
- [29] 李俊, 宋松柏, 王贺佳. 基于指标筛选的汛期时间域划分及合理性分析. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 123-134.
- [30] Liu F, Qin T L, Yan D H, Wang Y, Dong B Q, Wang J W, Nie H J, He S, Liu S S. Classification of instream ecological water demand and crucial values in a semi-arid river basin. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136409.
- [31] Golmohammadi G, Rudra R, Dickinson T, Goel P, Veliz M. Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 375-386.
- [32] Chen L, Dai Y, Zhi X S, Xie H, Shen Z Y. Quantifying nonpoint source emissions and their water quality responses in a complex catchment: a case study of a typical urban-rural mixed catchment. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 110-121.
- [33] Wang Y G, Zhang W S, Zhao Y X, Peng H, Shi Y Y. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 1348-1362.
- [34] 刘赛艳, 解阳阳, 黄强, 蒋晓辉, 李向阳. 流域水文年及丰枯水期划分方法. *水文*, 2017, 37(5): 49-53.
- [35] 李昌文. 基于改进 Tennant 法和敏感生态需求的河流生态需水关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [36] 杨裕恒, 曹升乐, 刘阳, 李晶莹, 刘春彤. 基于改进 Tennant 法的小清河生态基流计算. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(5): 97-101.
- [37] 张沛雷. 汾河入河口基本生态流量分析计算. *陕西水利*, 2020, (10): 34-35, 38-38.