

洪梅,赵明明,魏涛,等.基于 SWAT 模型的滏阳河流域断流河道复流研究.吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1):253 - 263. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220051.

Hong Mei,Zhao Mingming, Wei Tao, et al. Study on Water Restoration in the Dried-up River of the Fuyang River Basin Based on the SWAT Model. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1):253 - 263. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220051.

基于 SWAT 模型的滏阳河流域断流河道复流研究

洪梅^{1,2},赵明明^{1,2},魏涛^{1,2},林豪栋³

1. 吉林大学新能源与环境学院, 长春 130021

2. 吉林大学石油化工污染场地控制与修复技术国家地方联合工程实验室, 长春 130021

3. 台州市污染防治工程技术中心, 浙江 台州 318000

摘要:针对滏阳河流域断流河道生态修复的问题,为了实现断流河道尽可能恢复有水时间并且恢复基本生态功能的目标,基于节水措施和调水工程现状,通过建立滏阳河流域 SWAT (soil and water assessment tool) 水文模型,在模型中设置不同补水水量、补水方式的生态补水情景,分析不同情景下断流河道断面的径流量变化和恢复有水天数,并结合生态流量评价标准评价不同情景的河流生态恢复效果。结果表明:滏阳河流域邯郸断面在节水情景和调水情景中恢复河流生态效果较好,在通过上游节水措施和补充年调水 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的情景下,可以达到 5—10 月恢复有水 184 d、恢复径流量 $3.4867 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 的目标;年内恢复径流峰值在 8 月中旬,并且河道年均径流量可以恢复到“好”等级的生态流量标准。滏阳河下游邢台断面在节水情景和调水情景下恢复径流量较少,河道有水天数不达标,需要在上游节水条件下补充外来调水水量 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 来达到恢复年有水天数 304 d、恢复径流量 $1.9065 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 的目标,年内恢复径流峰值分别在 3 月中旬和 8 月中旬;并且在达到恢复有水目标的情景下邢台断面仅达到“一般”等级的生态流量标准,需要考虑增加调水水量进行分时段单点补水的补水方案。

关键词:SWAT 模型;生态补水;恢复有水;情景分析;滏阳河流域

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220051

中图分类号:P641.1

文献标志码:A

Study on Water Restoration in the Dried-up River of the Fuyang River Basin Based on the SWAT Model

Hong Mei^{1,2}, Zhao Mingming^{1,2}, Wei Tao^{1,2}, Lin Haodong³

1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China

2. National Local Joint Engineering Laboratory of Petrochemical Pollution Site Control and Remediation Technology, Jilin University, Changchun 130021, China

3. Taizhou Engineering Technology Center of Pollution Control, Taizhou 318000, Zhejiang, China

收稿日期:2022-03-02

作者简介:洪梅(1972—),女,教授,博士生导师,主要从事污染场地控制与修复方面的研究, E-mail: hongmei@jlu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC370220);国家重大科技专项(2018ZX07111001)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFC370220) and the National Science and Technology Major Project (2018ZX07111001)

Abstract: In order to achieve the goal of restoring water to the river as long as possible and to restore the basic ecological functions, a SWAT (soil and water assessment tool) hydrological model for the Fuyang River basin was established based on the current status of water conservation measures and water transfer projects. The different ecological water replenishment scenarios were designed, the variation of runoff volume and the restoration of the annual number of days with water were analyzed for different scenarios. Ecological restoration effects were analyzed based on the ecological base flow standard. The results show that the river ecological restoration effect is better in the water conservation scenario and the water transfer scenario in the Handan section of Fuyang River basin, and 184 days of water restoration from May to October can be achieved through the upstream water conservation measures and the scenario of $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ of supplemental annual water transfer, and the restored runoff volume of $3\,486.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, the water replenishment can reach the ecological baseflow standard and guarantee the basic ecological function of the river. The Xingtai section in the lower reaches of Fuyang River has less restored runoff under water-saving and water transfer scenarios, so the number of days with water in the river does not meet the standard, and it needs to supplement the external water transfer volume of $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ under the upstream water conservation condition to achieve the restoration of the annual number of days with water is 304 days and the restored runoff volume of $1\,906.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, and Xingtai section under the scenario of achieving the target of restoring water. The ecological replenishment scheme of increasing water transfer for single point replenishment in different periods needs to be considered as it cannot reach the ecological base flow standard of the river.

Key words: SWAT model; ecological water replenishment; water restoration; scenario analysis; Fuyang River basin

0 引言

近年来,随着经济发展和人类活动强度、范围的扩大,我国水资源面临着资源量严重短缺、水资源时空分布不均等一系列问题。华北平原地区是我国水资源紧张地区之一,特别是沧州、邯郸、邢台等城市,区域水资源供需不平衡,流域内河流生态遭到破坏^[1-2]。子牙河上游滏阳河流域地处华北平原的中部,随着人类活动和气候变化,流域内干旱少雨,水资源日益匮乏,导致部分河流季节性或常年断流,水生态环境遭到了破坏^[3-4]。

生态流量是维持和保障河流系统健康的重要基础,为了修复流域生态环境,恢复流域生态水量,需要对流域内河流进行生态补水^[5-6]。生态补水是指在一些无法满足生态需水量而受损的流域,通过工程或者非工程措施向流域系统调水,补充其生态系统用水量,使被破坏的生态系统逐渐恢复其原有的、能自我调节的基本功能,达到恢复流域生态平衡的目标^[7-8]。2020 年水利部印发《2020 年度河湖生态补水方案以及补充方案》^[9],统筹利用南水北调工

程、引黄工程等调水工程,并结合当地水库和其他水源向京津冀 22 条河湖实施生态补水 44.2 亿 m^3 。近年来,在子牙河上游流域已经实施了多种生态补水方案,例如 2018 年邢台市利用南水北调中线工程向境内七里河、白马河、午河、洺河、滏阳河等河流实施生态补水共 2.85 亿 m^3 ,恢复了境内多条河流的河道生态功能^[10]。生态补水已经成为解决断流河道恢复生态功能的一种有效途径,而制定科学的生态补水方案需要结合河道水文地理和地质条件,针对实际断流情况设置补水水量和方式^[11-12]。确定断流河道所需的生态补水总量和方式需要通过补水过程分析,减小补水过程中的损耗,以达到补水效益最优化及水生态修复目标^[13]。目前,农业灌溉节水、生活工业再生水、跨流域调水等非常规水源已经成为生态补水的水资源来源,多水源的补给方式为生态补水提供了效益优化的空间^[14]。

为优化生态补水方案,探究生态破坏河流生态需水量,已有学者在永定河流域基于永定河生态补水试验对永定河北京段生态补水调度进行研究^[15],还有研究者选取永定河断流河道构建河道水力学模

型,模拟分析研究区近两年生态补水过程^[16];然而,现有研究中河流生态补水方案优化多是基于现状补水工程试验效果,缺乏科学的情景预测模拟和径流恢复效果分析。SWAT(soil and water assessment tool)模型作为分布式水文模型,在世界范围内的流域尺度径流模拟中应用和研究广泛,其可以对流域径流进行不同时间、空间尺度的长期连续模拟^[17-19],可用来研究不同管理条件下大尺度复杂流域内预测水资源管理措施对径流的影响^[20]。例如,李建新等^[21]利用 SWAT 模型预测未来不同管理情景下的海河流域水资源变化趋势,为流域水资源管理提供了依据。

本研究基于 SWAT 模型,针对子牙河上游滏阳河流域断流情况进行生态补水情景模拟,并对于规划目标设置不同情景下的生态补水方案,结合生态流量评价方法,探究不同补水方案下河道恢复有水效果,以期为实际制定科学生态补水方案提供参考和建议。

1 研究区概况

滏阳河属于海河流域子牙河水系,发源于太行

山东麓邯郸市峰峰矿区滏山南麓,流经河北省多地,流域内有沙河、泚河等支流,多条支流与滏阳河干流至艾辛庄汇合(图 1),流域面积 2 747 km²。流域属温带大陆性季风气候,多年平均降雨量在 550 mm 左右,降雨多集中在 7—9 月。滏阳河流域兴建水利设施用于供水蓄水和调节下游河道流量,其中大型水库有:东武仕水库,位于滏阳河干流;朱庄水库,位于支流沙河;临城水库,位于支流泚河上游。

2 材料与方 法

2.1 SWAT 模型原理

本研究通过构建滏阳河 SWAT 分布式水文模型模拟生态补水情景下流域水文循环和径流响应。SWAT 模型是由美国农业部(USDA)农业研究中心 Jeff Arnold 博士开发的流域尺度分布式水文模型,模型开发的最初目的是在不同土壤类型、土地利用和管理条件特征的大尺度流域内,预测不同管理措施对流域产水、产沙及污染物负荷等影响^[22]。模型中的水文循环过程包括降水、入渗、蒸发、地表径流、壤中流等。SWAT 的水文循环基于水量平衡方程进行:



图 1 滏阳河流域地理位置及 SWAT 模型图
Fig.1 Location and SWAT model of Fuyang River basin

$$S_t = S_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})。(1)$$

式中: S_t 为最终土壤含水量,mm; S_0 为初始土壤含水量,mm; t 为时间,d; R_{day} 为第*i*天的降水量,mm; Q_{surf} 为第*i*天的地表径流量,mm; E_a 为第*i*天的蒸散发量,mm; W_{seep} 为第*i*天从土壤剖面进入包气带的水量,mm; Q_{gw} 为第*i*天回归流的水量,mm。

2.2 SWAT 模型构建

SWAT 模型数据包括数字高程模型、数字水系图、土地利用/覆被数据、土壤空间和属性数据、气象数据和水文数据等,收集的具体数据内容及来源见表 1。模型先根据研究区数字高程图设置子流域最小面积阈值,并利用研究区河网矢量图修正模型生成河网;然后根据河网特征和地形特征参数划分子流域,模型共划分为 25 个子流域;再根据土地利用图、土壤类型数据等数据文件生成水文响应单元(HRUs),设置土地利用面积、土壤面积和坡度的阈值分别为 10%、10%和 20%,共生成 246 个 HRUs。流域模型子流域、水库、水文站及断面分布如图 1 所示。由于本文构建的 SWAT 模型是对 2008—2016 年实测径流的模拟,考虑了人为用水和水库蓄放水,因此模型中计算了人工取水量和水库日出流量,以达到实际模拟效果。

2.3 生态流量评价方法

生态流量评价中包含了生态基流的考虑,生态基流一般是指维持河流基本形态和基本生态功能、保障水生生态系统基本功能正常运转和河道功能发挥、避免河道中的水生物可存活的最小流量,是评

价水生态环境是否遭到破坏的临界指标。目前生态基流的计算方法有很多种,包括水文学法、水力学法、生境模拟法和整体法等^[23-24]。其中:水文学法中的 Tennant 法不要求流量序列长期完整,适合在资料缺乏的流域使用,该计算方法主要基于河流天然状态下的多年平均流量,按照相应级别的百分比作为河流生态环境的流量推荐值。根据表 2,一般认为,河流多年平均流量的 10%是维持河道内生物短期生存的最小流量,平均流量的 30%可以维持生物生命活动的良好生存条件,平均流量的 60%可以为大多数生物在生长活动时期提供适宜的生存栖息环境^[25]。

Tennant 法侧重河道流量的年际变化,用河道流量占多年平均径流量的比例将水生生物生存环境适宜程度、河道健康状况与河流流量联系起来,即按照河道恢复的流量占年均流量和生态流量的比例得到对生态补水后河道生态状况的评价。

基于 Tennant 法,最小生态流量应在平均流量的 10%~30%之间,并且在当年 10 月一次年 3 月的一般用水时期建议河道流量在多年平均流量的 20%以上,在 4—9 月的鱼虾类水生动物产卵期建议保障平均流量的 40%。计算流域河道最小生态需水量公式^[26]为

$$W_q = \sum_{i=1}^{12} 86400 T_i Q_i P_i。 (2)$$

式中: W_q 为河道生态环境基本需水量,m³; T_i 为第*i*月天数,d; Q_i 为多年平均流量,m³/s; P_i 为第*i*月推荐基流占比,%。

表 1 SWAT 模型基础数据内容及来源
Table 1 Contents and sources of basic datafor SWAT model

数据类型	数据描述	数据来源
数字高程模型	分辨率为 90 m×90 m	资源环境数据云平台
数字水系图	1、2、3、4、5 级河流矢量图	环境规划院
土地利用/覆被数据	2015 年中国土地利用现状遥感监测数据	
土壤空间和属性数据	中国土壤类型空间分布数据、	资源环境数据云平台
	中国土壤侵蚀空间分布数据、	
	中国土壤质地空间分布数据	
气象数据	中国气象站点空间分布数据、	
	中国气象同化驱动数据集 2008—2016 气象数据	
水文数据	艾辛庄水文站 2009—2016 年月平均径流量, 东武仕水库、朱庄水库 2008—2016 年日均出流量	水利部海河水利委员会官网

相关研究^[27]表明,海河流域河流生态流量目标应占多年平均流量的 26.27% 以上。

表 2 不同生态流量状况的流量占比
Table 2 Flow proportion of different eco-environment standards

生态流量标准	非汛期流量占多年平均流量比例/%	汛期流量占多年平均流量比例/%	年流量占多年平均流量比例/%
最佳范围	60~100	60~100	60~100
非常好	30	50	40
好	20	40	30
一般	10	30	20
差	<10	<10	<10

2.4 恢复有水情景

2.4.1 恢复有水目标

针对现有平水年实际断流情况,设置了以下断流河道的恢复目标,见表 3(有水条件设定为河道流量≥0 m³/s)。

表 3 断面恢复有水目标
Table 3 Target of restoring water for sections

断面	所属流域	河道长度/ km	恢复时间/ d	恢复月份
邯郸断面	滏阳河邯郸控制单元	8	180	5—10 月
邢台断面	滏阳河邢台控制单元	90	300	1—12 月

2.4.2 补水情景设置

实际子牙河流域上游滏阳河控制单元内断流河道恢复目标位于邯郸市和邢台市境内,参考实际流域节水工程和调水工程情况,在模型中通过 3 个水库(东武仕水库、朱庄水库、临城水库)和 4 个入水口(退水闸)进行水量分配,设置具体补水情景(表 4)如下。

1)不同节水措施下补水情景:模型中通过滏阳河流域临城水库、朱庄水库以及东武仕水库进行农业节水和城市生活工业节水水量的分配。根据河北平原节水灌溉工程节水效果研究及研究区农业节水潜力分析^[28],取平水年农业资源节水量及 2019 年各行政区实际农业用水比例,按照灌溉月份取用比

例的不同进行水量分配。根据《南水北调中线主要城市节水潜力分析与对策》^[29]提出的邯郸市、邢台市的工业生活节水量,参考当前和未来城市节水潜力,制定了 3 种不同梯度节水补水情景:情景 1(S₁)为在当前节水工程情况下的生态补水情景,补水水量共 3.10×10⁸ m³/a;情景 2(S₂)为取最大农业节水量情况下,结合当前工业生活节水量的节水补水情景,补水水量为 3.89×10⁸ m³/a;情景 3(S₃)为取最大农业节水量情况下,结合预测未来工业生活节水量的节水补水情景,补水水量为 4.14×10⁸ m³/a。

2)外来调水补水情景:设置情景 4(S₄)为补水水量与 S₃最大节水水量相同的对比情景,补水水量也为 4.14×10⁸ m³/a,即通过模型内退水闸模拟实际调水点位,将同等水量按照恢复有水目标时段进行调水补水情景模拟。

3)综合补水情景:情景 5(S₅)为在 S₃最大节水量补水情景基础上,分别增加邯郸断面上游调水量 1.00×10⁸ m³/a、邢台断面上游调水量 1.50×10⁸ m³/a,模拟节水措施下结合外来调水进行生态补水的情景,补水水量共 6.64×10⁸ m³/a。

表 4 不同情景下断面水量分配
Table 4 Water allocation under different scenarios

		10 ⁸ m³/a				
情景	断面	农业节水量	工业节水量	外来调水量	断面水量	总计补水水量
S ₁	邯郸	1.25	0.53	0	1.78	3.10
	邢台	1.11	0.21	0	1.32	
S ₂	邯郸	1.67	0.53	0	2.20	3.89
	邢台	1.48	0.21	0	1.69	
S ₃	邯郸	1.67	0.70	0	2.37	4.14
	邢台	1.48	0.29	0	1.77	
S ₄	邯郸	0	0	2.37	2.37	4.14
	邢台	0	0	1.77	1.77	
S ₅	邯郸	1.67	0.70	1.00	3.37	6.64
	邢台	1.48	0.29	1.50	3.27	

3 结果与讨论

3.1 模型率定及验证

本文采用 SWAT-CUP 工具中的 SUFI-2 方法对模型进行参数的不确定性分析、敏感性分析,及

参数率定和结果验证。对模型全部的水量模拟相关参数用 t 值(t 检验)和 P 值(P -value)来衡量参数敏感性,其中: t 代表参数敏感程度,绝对值越大越敏感; P 代表参数敏感性的显著性,值越接近于 0 越显著^[30-31]。选择滏阳河流域出口艾辛庄水文站水文观测数据为模型率定及验证的实测数据,根据所选择的水量参数敏感性($P \leq 0.4$)筛选了流域敏感性参数 10 个,按照敏感性从大到小排序,参数分别为径流曲线数、河岸调蓄基流 α 因子、平均坡长、基流 α 因子、土壤饱和和渗透系数、土壤湿容重、地下水时间延迟、侧向水流坡长、浅层含水层水位和支流曼宁系数。模型具体参数取值见表 5。

表 5 SWAT 模型主要参数				
Table 5 Main parameters of the SWAT model				
参数名称	符号	$ t $	P	最优取值
径流曲线数	CN2	29.861	0.000	-0.308
河岸调蓄基流 α 因子	ALPHA_BNK	2.728	0.007	0.742
平均坡长	SLSUBBSN	2.117	0.035	0.208
基流 α 因子	ALPHA_BF	1.880	0.061	0.292
土壤饱和和渗透系数	SOL_K	1.789	0.074	0.387
土壤湿容重	SOL_BD	1.615	0.107	-0.125
地下水时间延迟	GW_DELAY	1.069	0.286	159.500
侧向水流坡长	SLSOIL	1.043	0.297	0.700
浅层含水层水位	REVAPMN	0.938	0.349	357.643
支流曼宁系数	CH_N1	0.894	0.372	0.042

采用确定性系数 R^2 和 Nash-Suttcliffe 效率系数(NSE)来综合评价 SWAT 模型的模拟效果。 R^2 表示模拟值与观测值变化趋势的一致性, R^2 值越接近于 1,说明模拟值与实测值趋势越吻合;NSE 表示实测值与模拟值的偏离程度,NSE 值越接近于 1,表明模拟值越接近于实测值。一般情况下当 $R^2 \geq 0.65$, $NSE \geq 0.5$ 时,表示模型模拟的结果较符合实际^[32-33]。

对艾辛庄水文站 2008—2016 年月平均流量观测数据进行收集,由于资料缺乏连贯性,选择 2008 年为预热期,2009—2011 年为模型率定期,2015—

2016 年为模型验证期。水量拟合结果如图 2 所示,通过实测值和模拟值点线图可以看出,流域月均流量模拟结果较吻合。根据模型结果可知,艾辛庄水文站在率定期 $R^2 = 0.83$, $NSE = 0.60$,验证期 $R^2 = 0.80$, $NSE = 0.72$,满足模型模拟精度要求,模型模拟效果较符合实际。

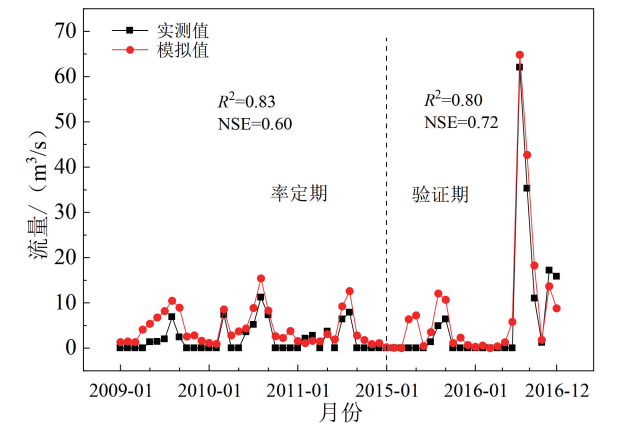


图 2 艾辛庄水文站月均流量模拟

Fig.2 Simulation of monthly average flow at Aixinzhuang hydrological station

3.2 河道生态流量

根据生态流量评价方法(本文 2.3 小节),认为“一般”等级下的生态流量占比为维持河流生态的基本等级,“好”等级以上的生态流量占比可以认为河流系统开始恢复,在“最佳范围”内可以保证河流的完整性(表 2)。根据 Tennant 法计算河道基本生态需水量^[26]。由历史数据可得 2006—2017 年年均流量和径流量数据(图 3),由此计算得知滏阳河流域的 2006—2017 年的年均流量为 $3.050 \text{ m}^3/\text{s}$,年均径流量为 $0.960 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

根据 SWAT 模型模拟出的断面月均流量,各子流域年均流量差距不大,因此邯郸断面和邢台断面分别使用流域出口(子流域 14 和子流域 4,图 1)的模拟流量计算生态流量。根据 Tennant 法计算标准^[25]可知:生态流量低于多年平均流量的 10%,即低于 $0.305 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,可评价为“差”等级;生态流量在平均流量的 10%~20%之间,即 $0.305 \sim 0.610 \text{ m}^3/\text{s}$,可评价为“一般”等级;生态流量在多年平均流量的 20%~30%之间,即达到 $0.610 \sim 0.915 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,可评价为“好”等级,考虑为保证一定河流的生态功能;在生态流量大于多年平均流量的 30%,即达到

0.915 m³/s 以上时,可评价为“非常好”,即生态流量占比最佳状态。因此,滏阳河流域断面最小生态流量应在 0.305 m³/s,基本生态水量为 0.096 × 10⁸ m³/a。

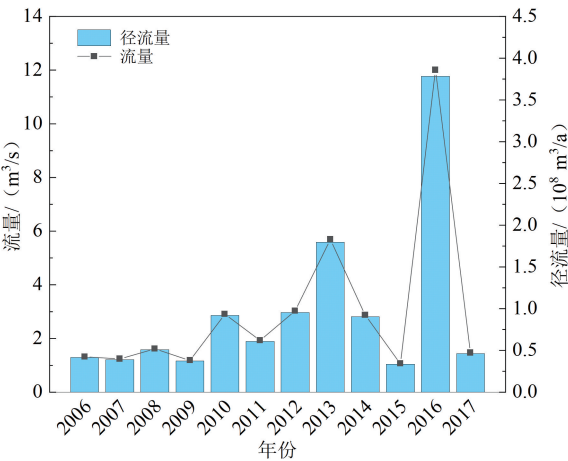


图 3 滏阳河流域 2006—2017 年年均流量和径流量
Fig.3 Average annual flow and runoff in 2006 - 2017 of Fuyang River basin

3.3 恢复有水情景结果

3.3.1 恢复径流量及有水天数

不同情景下滏阳河年内断面补水效果如图 4、

图 5 所示,图 4 表示了不同情景下断流河道的恢复流量曲线,图 5 表示了不同情景下断流河道年内恢复的径流量及天数。在 S₁—S₃ 情景下,邯郸断面和邢台断面恢复径流量随着补水水量增加而上升(表 4、图 5); S₃ 情景下可恢复邯郸断面水量 1 412.3 × 10⁴ m³/a,年内恢复河道有水的天数共 172 d,其中恢复目标下的 5—10 月中占 104 d(图 4);可恢复邢台断面水量 541.6 × 10⁴ m³/a,年内恢复河道有水的天数共 147 d(图 5)。

在 S₄ 情景下,在邯郸断面上游集中 5—10 月调水补水情况下,对比 S₃ 情景达到了更好的补水效果,恢复了邯郸断面径流量 2 770.9 × 10⁴ m³/a(图 5),5—10 月的断流天数显著减少;可以看出在相同补水水量的情况下,补水时间集中,补水频率更高,能达到更好的恢复河道有水的效果。S₄ 情景在邢台断面上游每月增加外来调水量,对比相同水量按月节水比例分配的情景,全年河道有水天数由 147 d 增加至 225 d,断面径流量恢复到 783.1 × 10⁴ m³/a(图 5);说明在相同补水水量情况下,根据缺水时段需求通过调水工程进行针对性补水对比节水补水情景更有利于达成断流恢复有水的目标。

S₄ 情景下 2 个断面补水情况分别为上游邯郸断面的单线路补水和下游邢台断面的多通道补水,对比可知,邢台断面在补水水量增加的情况下,恢复径

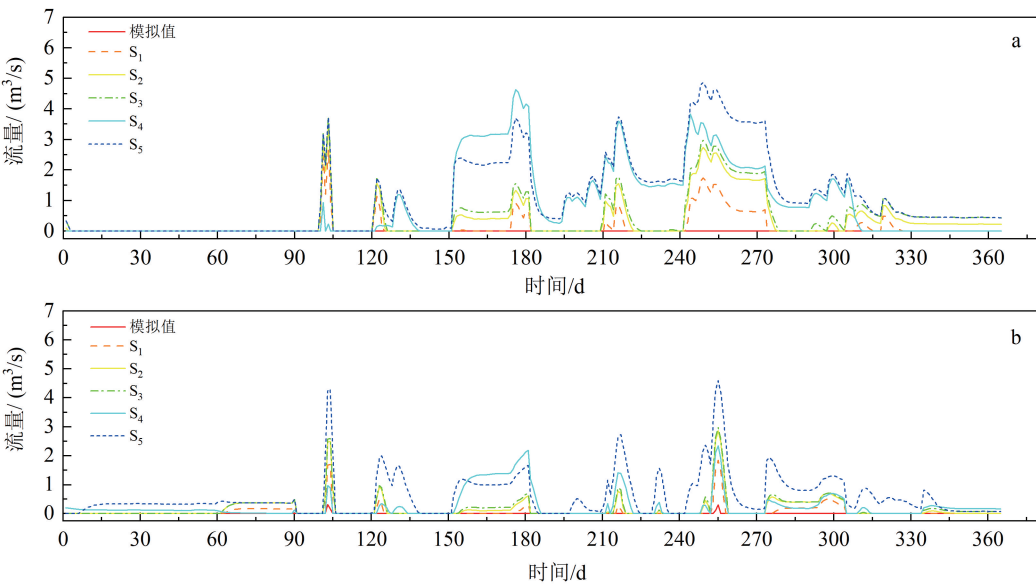


图 4 不同情景下年内邯郸断面(a)和邢台断面(b)流量曲线
Fig.4 Annual flow curves for Handan section (a) and Xingtai section (b) under different scenarios

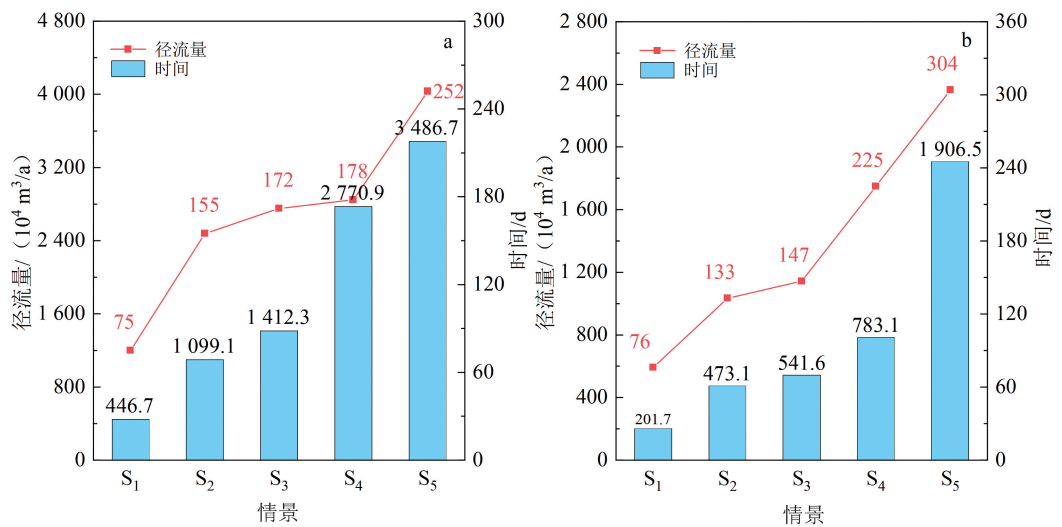


图 5 不同情景下年内邯郸断面(a)和邢台断面(b)恢复径流量及天数

Fig.5 Annual total amount and time of restored runoff for Handan section (a) and Xingtai section (b) under different scenarios

流量仍较小;说明上游补充的水量由于经过蒸发、入渗等过程难以补充至下游断面,通过多点位补水的损耗率要大于单点位补水的损耗率,因此邢台断面的补水难度要高于邯郸断面。

4 种单一模式补水情景(S₁—S₄)下都未能达到 2 个断面的恢复有水目标,因此达到目标需要依靠两种方式结合的综合补水情景。S₅情景是在 S₃ 的最大节水量情景下,增加邯郸断面上游调水量 1.00×10⁸ m³/a 和邢台断面上游调水量 1.50×10⁸ m³/a,S₅ 补水水量共 6.64×10⁸ m³/a(表 4),以达到断面恢复目标。其中:邯郸断面可恢复径流量 3 486.7×10⁴ m³/a,5—10 月恢复天数共 184 d;邢台断面可恢复径流量 1 906.5×10⁴ m³/a,全年恢复有水天数共 304 d,达到恢复有水目标(图 5)。并且可以看出,在 5 种模拟情景下 2 个断面恢复径流量时期集中在 3—10 月:邯郸断面年内最高断面径流量时期在 8—9 月,径流量峰值在 8 月中旬;邢台断面年内恢复径流量峰值分别在 3 月中旬和 8 月中旬,与年内降雨变化有关。

3.3.2 恢复河道生态效果

根据 3.2 小节得到的最小生态流量和基本生态水量,对 5 种模拟情景(S₁—S₅)下的断面流量进行数据分析,结果见表 6。

由表 6 可知:邯郸断面恢复效果在前 3 种节水补水情景(S₁—S₃)下均不能达到“好”的评价等级,说明仅靠这一区域的节水措施补充河道水量对于断流河道而言不能完全恢复河流基本生态;在调水情

景 S₄ 中,邯郸断面恢复流量占年均流量比例达到 28.8%,可以达到生态流量“好”等级评价,认为可以恢复到河流基本生态水平;综合补水方案 S₅ 为最佳补水方案,即在以节水措施为补水来源的基础上,引调少量外来水量 1.00×10⁸ m³/a,上游共补水 3.37×10⁸ m³/a 时,断面流量(1.110 m³/s)可达到生态流量占比 36.4%,为生态流量“非常好”等级评价,认为可以恢复河道完整性。并且综合补水情景减小了仅靠外来调水方式的供水压力,以本地节水水量回补为基础,更有利于节约水资源。

相较于邯郸断面,下游的邢台断面在 5 种补水情景下都无法恢复到“好”等级的生态流量标准(表 6),其中:在前 4 种情景(S₁—S₄)下,径流量占年均流量的比例均小于 10.0%,属于“差”等级的生态流量评价标准;在综合补水情景(S₅)下,上游补水共 3.27×10⁸ m³/a 时,断面流量(0.605 m³/s)可达到生态流量占比 19.8%,恢复效果可以达到“一般”等级,说明可以维持一定的流动性和生态功能,并且在上游支流较多并且有断流河道条件下,想要通过上游的生态补水措施恢复下游断流河道更好的生态效果,需要引调更多的补水水量,调水水量需大于 1.50×10⁸ m³/a。另由前文结果可知,针对缺水月份补水和通过单点位补水可以在相同水量条件下达到更好的补水效果,在邢台断面考虑选取河道上游补水点位分时段调水补水,对于恢复河道生态可取得更佳效果。

表 6 不同情景下流量和径流量恢复效果

Table 6 Flow and runoff restoration effect under different scenarios

断面	情景	流量/(m ³ /s)	径流量/(10 ⁴ m ³ /a)	恢复径流量占比/%	生态流量评价
邯郸断面	S ₁	0.142	446.7	<10.0	差
	S ₂	0.349	1 099.1	11.4	一般
	S ₃	0.448	1 412.3	14.7	一般
	S ₄	0.878	2 770.9	28.8	好
	S ₅	1.110	3 486.7	36.4	非常好
邢台断面	S ₁	0.064	201.7	<10.0	差
	S ₂	0.150	473.1	<10.0	差
	S ₃	0.172	541.6	<10.0	差
	S ₄	0.248	783.1	<10.0	差
	S ₅	0.605	1 906.5	19.8	一般

4 结论与建议

1)通过建立滏阳河上游的 SWAT 模型,并率定了 SWAT 模型参数,利用 SWAT 模型模拟了滏阳河流域 2009—2016 年月径流变化。根据滏阳河上游出口流域水文站艾辛庄实测流量数据,验证了流域径流模拟结果在验证期 $R^2=0.80$,NSE=0.72,模型模拟效果较符合实际。

2)基于节水措施和调水情况设置的 5 种不同生态补水情景中,由单一路径补水的上游邯郸断面恢复径流效果均优于多支流补水的下游邢台断面,并且集中目标月份调水补水方案的补水效果更佳。综合补水情景(S₅)中,在最大节水量基础上,邯郸断面通过上游补充水量 $1.00\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 可以达到恢复 5—10 月有水天数 184 d,恢复径流量 $3\,486.7\times10^4\text{ m}^3/\text{a}$,恢复径流最高峰时期在 8 月中旬;邢台断面通过上游补充水量 $1.50\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$,可恢复年有水天数为 304 d,恢复径流量 $1\,906.5\times10^4\text{ m}^3/\text{a}$,年内恢复径流峰值时期在 3 月中旬和 8 月中旬。

3)根据 SWAT 模型模拟出的多年平均径流量,基于 Tennant 法计算出滏阳河流域最小生态流量应为 $0.305\text{ m}^3/\text{s}$ 。结合 5 种恢复有水情景模拟结果可以得出,邯郸断面在上游补水量 $3.37\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 时,断面流量可达到 $1.110\text{ m}^3/\text{s}$,达到“好”等级的生态流量标准;邢台断面在上游补水 $3.27\times10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 时,断面流量可达 $0.605\text{ m}^3/\text{s}$,达到“一般”等级生态流量标准,为优化补水效果可考虑在断流河道上游增加补水水量进行分时段单点位补水的生态补水方

案。

4)由于河流径流量变化影响因素复杂,影响生态补水过程的参数和条件众多,对于实际选择生态补水方案进行恢复河流生态的情况,有必要进行补水试验和构建更详细的流域水文模型。

参考文献(References):

[1] 段一明,张戈,于大涛. 河北省水资源脆弱性及其调控分析[J].国土与自然资源研究,2021,43(1):84-85.
Duan Yiming, Zhang Ge, Yu Datao. The Vulnerability of Water Resources in Hebei Province and Its Regulation and Analysis[J]. Territory & Natural Resources Study, 2021,43(1):84-85.

[2] 张光辉,连英立,刘春华,等.华北平原水资源紧缺情势因源[J].地球科学与环境学报,2011,33(2):172-176.
Zhang Guanghui, Lian Yingli, Liu Chunhua, et al. Situation and Origin of Water Resources in Short Supply in North China Plain[J]. Journal of Earth Science and Environment,2011,33(2):172-176.

[3] 马若燕,马海铭. 子牙河平原区供水结构变化情况分 析[J].海河水利,2018,37(5):9-10.
Ma Ruoyan, Ma Haiming. Analysis on Changes of Water Supply Structure in Ziya River Plain Area[J]. Haihe Water Resources, 2018,37(5):9-10.

[4] 金翠翠. 滏阳河灌区水资源优化配置研究[D]. 邯郸: 河北工程大学,2017.
Jin Cuicui. Study on the Optimal Allocation of Water Resources in Fuyang River Irrigation Aera [D]. Handan:Hebei University of Engineering, 2017.

- [5] Gómez-Balandra M A, Saldaña-Fabela M P, Martínez-Jiménez M. The Mexican Environmental Flow Standard: Scope, Application and Implementation[J]. Journal of Environmental Protection, 2014, 5(1):71 - 79.
- [6] 魏健, 潘兴瑶, 孔刚, 等. 基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1):64 - 69, 76.
- Wei Jian, Pan Xingyao, Kong Gang, et al. Study on Ecological Restoration of Water-Deficient Rivers Based on Ecological Water Supplement Method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(1):64 - 69, 76.
- [7] 张树军, 赵峰, 罗陶露, 等. 生态补水综合效益评价指标体系建立[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(5):813 - 819.
- Zhang Shujun, Zhao Feng, Luo Taolu, et al. Establishment of Comprehensive Benefit Assessment Indicator System on Artificial Recharge for Ecological Restoration[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(5):813 - 819.
- [8] 邢梦雅, 陈星, 周镔, 等. 基于生态补水的水环境改善效果评价体系[J]. 水资源保护, 2016, 32(1):64 - 66, 85.
- Xing Mengya, Chen Xing, Zhou E, et al. Study on Evaluation System of Improvement of Water Environment Based on Ecological Water Supplement[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1):64 - 66, 85.
- [9] 陈飞, 丁跃元, 唐世南, 等. 华北地区河湖生态补水与地下水回补的实践及效果分析[J]. 中国水利, 2021, 72(7):36 - 39.
- Chen Fei, Ding Yueyuan, Tang Shinan, et al. Practice and Effect Analysis of River-Lake Ecological Water Supplement and Groundwater Recharge in the North China Region[J]. China Water Resources, 2021, 72(7):36 - 39.
- [10] 贾瑞敏, 赵宇涵. 邢台市河流生态补水效果探析[J]. 河北水利, 2019, 31(10):33 - 34.
- Jia Ruimin, Zhao Yuhan. Analysis on the Ecological Water Replenishment Effect of Rivers in Xingtai City[J]. Hebei Water Resources, 2019, 31(10):33 - 34.
- [11] 李艳平. 浅谈桂林防洪及漓江补水工程的生态调度[J]. 广西水利水电, 2011, 40(4):26 - 29.
- Li Yanping. Ecological Operation of Guilin Flood Protection and Lijiang River Water Replenishment Project[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2011, 40(4):26 - 29.
- [12] Sun K, Hu L, Guo J, et al. Enhancing the Understanding of Hydrological Responses Induced by Ecological Water Replenishment Using Improved Machine Learning Models: A Case Study in Yongding River[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768(7):145489.
- [13] 杨卫, 许明祥, 李瑞清, 等. 面向生态环境的河湖连通引水调控方案研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(10):861 - 868.
- Yang Wei, Xu Mingxiang, Li Ruiqing, et al. Study on the Water Diversion Regulation Scheme of Interconnected River System Network Oriented to Ecological Environment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(10):861 - 868.
- [14] 高伟, 李金城, 严长安. 多水源河流生态补水优化配置模型与应用[J]. 人民长江, 2020, 51(7):75 - 81.
- Gao Wei, Li Jincheng, Yan Chang'an. Optimal Allocation Model of River Ecological Water Supplement Based on Multiple Water Sources[J]. Yangtze River, 2020, 51(7):75 - 81.
- [15] 邵惠芳, 刘军梅, 刘培斌, 等. 永定河北京段生态补水调配方案研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(7):62 - 72.
- Shao Huifang, Liu Junmei, Liu Peibin, et al. Study on Allocation Scheme of Ecological Water Supply in Beijing Section of Yongding River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(7):62 - 72.
- [16] 孙冉, 潘兴瑶, 王俊文, 等. 永定河(北京段)河道生态补水效益分析与方案评估[J]. 中国农村水利水电, 2021, 63(6):19 - 24.
- Sun Ran, Pan Xingyao, Wang Junwen, et al. An Analysis and Evaluation of Ecological Water Replenishment Benefit of Yongding River (Beijing Section)[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, 63(6):19 - 24.
- [17] 于磊, 邱殿明. 基于 SWAT 模型的漳卫南流域水量模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5):949 - 954.
- Yu Lei, Qiu Dianming. Water Quantity Simulation of the Zhangweinan Basin Based on SWAT Model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(5):949 - 954.
- [18] Mohsen T N, Kendall G, Hadi B M, et al. SWAT Modeling of Non-Point Source Pollution in

- Depression-Dominated Basins Under Varying Hydroclimatic Conditions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (11):2492.
- [19] Rouholahnejad E, Abbaspour K C, Vejdani M, et al. A Parallelization Framework for Calibration of Hydrological Models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 31: 28–36.
- [20] Uniyal B, Jha M K, Verma A K, et al. Identification of Critical Areas and Evaluation of Best Management Practices Using SWAT for Sustainable Watershed Management[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744:140737.
- [21] 李建新,朱新军,于磊. SWAT模型在海河流域水资源管理中的应用[J]. *海河水利*, 2010, 29(5):46–49, 54. Li Jianxin, Zhu Xinjun, Yu Lei. Application of SWAT Model in Water Resource Management of Haihe River Basin[J]. *Haihe Water Resources*, 2010, 29(5):46–49, 54.
- [22] Winchell M. ArcSWAT 2009 用户指南[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2012. Winchell M. ArcSWAT 2009 User's Guide [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012.
- [23] 王中根,赵玲玲,陈庆伟,等. 关于生态流量的概念解析[J]. *中国水利*, 2020, 71(15):29–32. Wang Zhonggen, Zhao Lingling, Chen Qingwei, et al. Analysis of the Ecological Flow Concept[J]. *China Water Resources*, 2020, 71(15):29–32.
- [24] 徐宗学,李鹏,侯昕玥. 河道生态基流理论基础与计算方法研究[J]. *人民黄河*, 2019, 41(10):119–127. Xu Zongxue, Li Peng, Hou Xinyue. Theoretical Basis and Estimation Method for Ecological Base-Flow[J]. *Yellow River*, 2019, 41(10):119–127.
- [25] 徐宗学,武玮,于松延. 生态基流研究:进展与挑战[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(4):1–11. Xu Zongxue, Wu Wei, Yu Songyan. Ecological Baseflow: Progress and Challenge [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4):1–11.
- [26] 郭利丹,夏自强,林虹,等. 生态径流评价中的 Tennant法应用[J]. *生态学报*, 2009, 29(4):6. Guo Lidan, Xia Ziqiang, Lin Hong, et al. Researches on Application of the Tennant Method in Ecological Flow Evaluation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):6.
- [27] 杨志峰,刘静玲,肖芳,等. 海河流域河流生态基流量整合计算[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4):442–448. Yang Zhifeng, Liu Jingling, Xiao Fang, et al. Conformity Calculation of River Ecological Basic Flows in the Haihe River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4):442–448.
- [28] 牛彦辉. 河北平原区节水灌溉工程节水效果研究[D]. 保定:河北农业大学, 2011. Niu Yanhui. Study on the Water-Saving Effect of Water-Saving Irrigation Projects in Hebei Plain[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011.
- [29] 刘昌明,左建兵. 南水北调中线主要城市节水潜力分析与对策[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(1):1–7. Liu Changming, Zuo Jianbing. Water Saving Potential Analysis and Countermeasures for Major Cities for the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project (SNWTP) [J]. *South to North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2009, 7(1):1–7.
- [30] 李小兰,曾献奎,王栋,等. 基于优化-自适应稀疏网格替代模型的地下水模拟参数不确定性分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4):1234–1243. Li Xiaolan, Zeng Xiankui, Wang Dong, et al. Uncertainty Analysis of Groundwater Simulation Parameters Based on Optimized-Adaptive Sparse Grid Surrogate Model [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4):1234–1243.
- [31] 付晨东,汪爱云. 新三水模型的改进与参数确定方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2):654–661. Fu Chendong, Wang Aiyun. Improvement of New Three-Water Model and Determination of Its Parameters[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52 (2): 654–661.
- [32] 张爽,曾献奎,吴吉春. 提孜那甫河流域融雪径流模拟及不确定性分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(5):1415–1424. Zhang Shuang, Zeng Xiankui, Wu Jichun. Snowmelt Runoff Simulation and Uncertainty Analysis in Tizinafu River Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(5):1415–1424.
- [33] 邱淑伟,吴亚敏,柯昱琪,等. 基于遍历搜索算法的水文地质参数优化求解[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(6):1854–1861. Qiu Shuwei, Wu Yamin, Ke Yuqi, et al. Optimization of Hydrogeological Parameters Based on Ergodic Search Algorithm [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(6):1854–1861.