

沁河流域经济社会与生态用水平衡分析及预测

田锦涛¹, 左其亭^{1,2}, 巴音吉³, 全志淼¹, 纪义虎¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001; 3. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004)

摘要: 基于经济社会与生态用水平衡理论与量化方法并结合 SWAT 模型, 提出了沁河流域经济社会与生态用水平衡研究思路, 分析了沁河流域 2005—2020 年经济社会与生态用水平衡状态, 并预测了流域未来气候变化情景下规划水平年(2025 年、2030 年和 2035 年)经济社会与生态用水平衡点。结果表明: 2005—2020 年沁河流域经济社会与生态用水失衡指数均为负值, 经济社会与生态两端用水情况表现为生态端亏水; 现状年沁河流域经济社会与生态用水失衡指数总体上呈现波动增长趋势, 流域经济社会与生态用水平衡状态逐渐好转; 95%、75%、50% 降雨频率下沁河流域 2025 年经济社会与生态用水平衡点分别为 0.76、0.66、0.63, 2030 年分别为 0.67、0.63、0.52, 2035 年分别为 0.54、0.43、0.41。

关键词: 经济社会与生态用水平衡; 区域水平衡; 人水关系; SWAT 模型; 沁河流域

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)02-0009-08

Analysis and prediction of water use balance between economic society and ecology in the Qinhe River Basin// TIAN Jintao¹, ZUO Qiting^{1,2}, BA Yinji³, QUAN Zhimiao¹, JI Yihu¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China; 3. Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264004, China)

Abstract: Based on the theory and quantitative methods of socio-economic and ecological water use balance, combined with the SWAT model, a research approach for the balance between socio-economic and ecological water use in the Qinhe River Basin was proposed. The socio-economic and ecological water use balance status in the Qinhe River Basin from 2005 to 2020 was analyzed, and the equilibrium points of socio-economic and ecological water use for planning level years (2025, 2030, and 2035) under future climate change scenarios were predicted. The results show that the imbalance indices of socio-economic and ecological water use in the Qinhe River Basin from 2005 to 2020 were all negative, indicating a persistent ecological water deficit in the basin. The imbalance index for the current year exhibits a fluctuating upward trend, and the socio-economic and ecological water use balance status is gradually improved. Under the rainfall frequencies of 95%, 75% and 50%, the predicted balance points of socio-economic and ecological water use in 2025 are 0.76, 0.66 and 0.63, respectively, those in 2030 are 0.67, 0.63 and 0.52, respectively, and those in 2035 are 0.54, 0.43, and 0.41, respectively.

Key words: water use balance between economic society and ecology; regional water balance; human-water relationship; SWAT model; the Qinhe River Basin

水资源作为重要的基础性资源,是经济社会发展的基本支撑,也是生态文明建设的必要保障^[1]。目前我国水资源空间分布不均^[2],使有限的水资源在协调经济社会和生态环境用水关系中承受着巨大压力,导致经济社会与生态用水之间出现紧张的竞

争关系,进而引发水资源短缺和水环境污染问题。在此背景下,统筹水资源与经济社会发展和生态系统保护的关系、实现健康的经济社会与生态用水平衡,成为引领水利高质量发展的重要内容^[3]。因此,深入研究经济社会和生态系统用水平衡问题、协

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200201); 中国工程科技发展战略河南研究院战略咨询研究项目(2024HENYB01); 中国地质调查局项目(DD20220885)

作者简介: 田锦涛(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: tj928@163.com

通信作者: 巴音吉(1989—),男,工程师,硕士,主要从事自然资源综合调查研究。E-mail: Geobayinji@163.com

调两者用水关系,对于推动经济社会可持续发展、实现人与自然和谐共生具有重要意义。

现阶段,经济社会用水与生态用水之间的关系以竞争为主要特征,需要协调并合理配置水资源。针对水资源在经济社会与生态之间的协调关系,国内外较多学者开展了相关研究。例如:针对水资源的不合理分配问题建立优化计算模型,从不同角度研究经济社会与生态用水的竞争关系^[4-8];利用耦合协调度模型评价水资源、经济社会、生态系统之间的耦合协调关系^[9-12]。上述研究虽重点关注了经济社会与生态用水的竞争关系,但是尚未明确经济社会与生态水平衡的概念内涵及理论。左其亭等从人水关系的视角开展了经济社会与生态水平衡的相关研究,明确了其概念及基本原理^[13],构建了经济社会与生态水平衡的计算规则^[14],提出了经济社会与生态水平衡的度量方法^[15],而基于上述理论及方法,计算不同用水需求下经济社会与生态水平衡的研究还有待进一步拓展。SWAT模型是流域尺度的分布式水文模型,可以较好地模拟流域水文要素^[16-18]。基于前人研究成果^[19-21],发现SWAT模型在沁河流域具有较好的模拟效果。因此,本文结合SWAT模型开展沁河流域经济社会与生态水平衡计算及预测研究,以期为流域水平衡相关研究提供一种新的思路。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

沁河是黄河重要的一级支流(图1),干流全长485 km,发源于山西省沁源县,自北向南流经山西、河南2省17个县(市),流域面积13 535 km²。流域内矿产资源丰富,尤其是煤炭业发展迅速,在国家能源战略中的地位十分突出。同时,沁河流域也是中

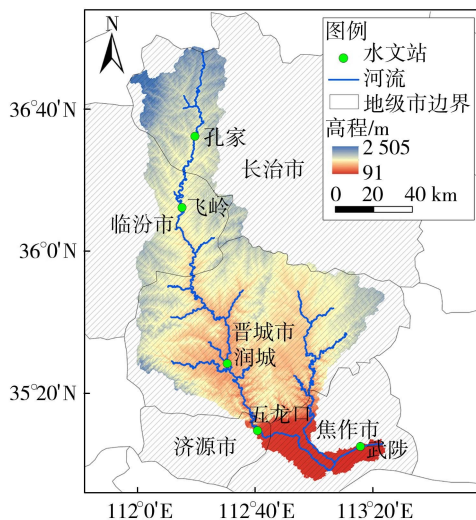


图1 研究区概况

国北方重要的粮食产区^[22],水资源在流域经济社会发展中发挥着重要作用。然而,由于流域经济社会发展对水资源需求的激增,导致生态用水被严重挤占,继而引起流域生态环境恶化,资源环境问题日益凸显^[20-23]。因此,综合分析沁河流域经济社会与生态水平衡状态,对于推动流域高质量发展和生态环境保护具有重要的意义。

1.2 数据来源及预处理

构建SWAT模型所需数据主要包括数字高程(DEM)、土地利用、土壤、气象以及水文等数据,其中DEM数据分辨率为90 m,来自地理空间数据云,通过已确定好的沁河经纬度范围下载覆盖沁河流域的DEM数据,经裁剪处理得到沁河流域掩膜图层和DEM数据;土地利用数据源自中国科学院资源研究所数据中心提供的1 km分辨率栅格数据,根据掩膜图层边界裁剪全国土地利用数据,以得到流域土地利用栅格数据;土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心提供的1:100万栅格数据,利用中国土壤数据集,通过裁剪、重分类和土壤参数计算,构建流域土壤数据库;气象数据来源于美国国家气候数据中心(NCDC)的逐日降水、风速、温度等数据;水文数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》,选取2005—2020年沁河流域润城、五龙口和武陟水文站的实测月径流数据,水文站具体位置见图1;CMIP6气象数据选用地球数据网格联盟提供的2023—2035年SSP2-4.5(中等排放强迫情景)的未来气候数据。

经济社会用水量、人口数量、工业产值、农作物种植面积等相关数据来源于山西省、河南省及各市水资源公报和统计年鉴;生活、工业、农作物用水定额的相关数据来源于《山西省用水定额》、河南省《农业与农村生活用水定额》及《工业与城镇生活用水定额》。

2 研究方法

2.1 沁河流域经济社会与生态水平衡计算框架

计算框架如图2所示,主要步骤如下:①利用经过处理的DEM、土地利用等数据,通过子流域划分、水文响应单元定义等操作构建沁河流域SWAT模型;②基于沁河流域实测径流数据,采用SWAT-CUP软件对模型进行率定与验证;③利用SWAT模型导出流域径流等相关数据,提取经济社会与生态水平衡要素并基于量化方法进行计算,得到流域经济社会与生态用水失衡指数,进而根据失衡指数计算结果对沁河流域经济社会与生态水平衡状态进行分析。

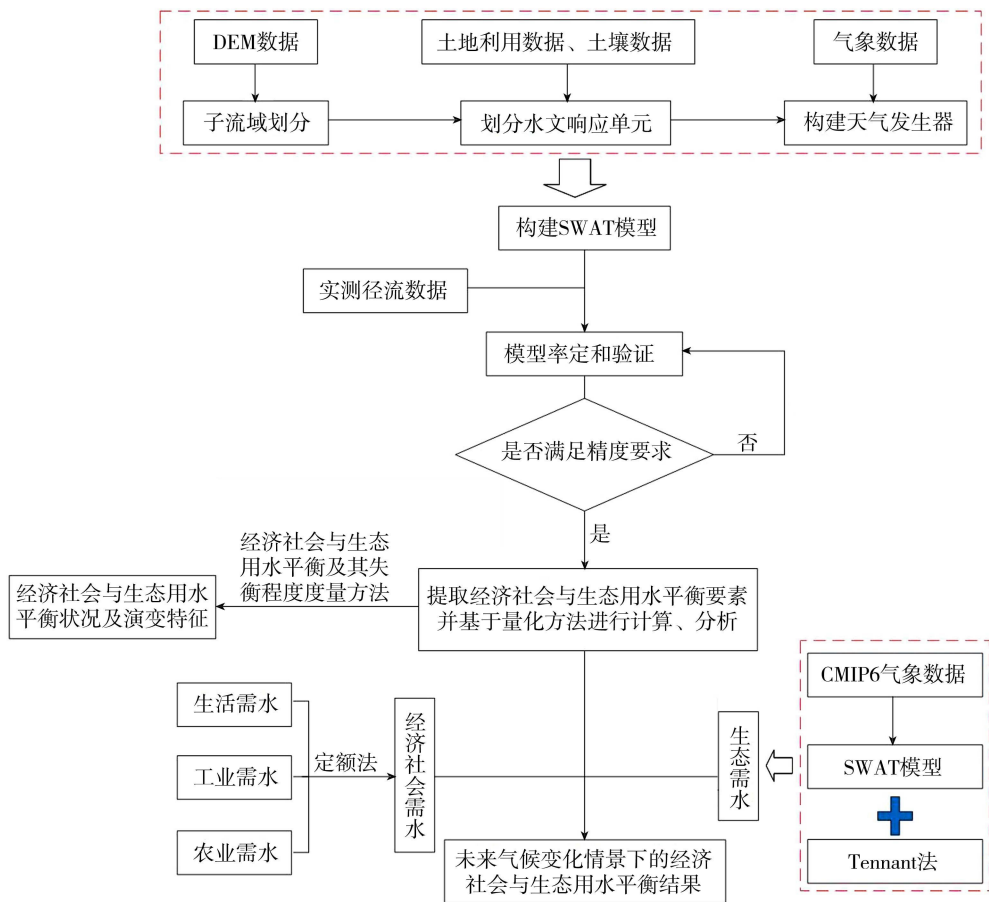


图2 计算框架

在对未来气候变化情景下的经济社会与生态用水平衡结果进行预测时,先采用定额法分别计算流域生活、工业和农业需水,进而计算流域经济社会需水量;然后将CMIP6气象数据导入SWAT模型运行并提取径流要素,并采用Tennant法计算流域生态需水量;最后根据优选思路比选出最终用水平衡方案。

2.2 SWAT模型构建

a. 沁河流域水系划分: 主要内容包括加载DEM、添加Mask图层、DEM处理、设置流域面积临界阈值、编辑河网节点以及子流域参数计算,参考纪义虎等^[22]研究成果选取流域出口断面位置,最终将沁河流域划分为29个子流域。

b. 水文响应单元定义: 对沁河流域SWAT模型中土地利用、土壤数据、坡度三部分进行定义,先依次导入已构建的土地利用数据和土壤数据索引表,参考文献^[21],将土地利用、土壤数据、坡度阈值分别设置为5%、10%、10%。经模型计算,共将沁河流域划分为288个水文响应单元。

c. 气象数据处理: 基于文本文件索引表,将已构建的气象数据导入到SWAT模型中,包括降水量、气温、平均相对湿度、平均风速、太阳辐射等数据。

d. 将以上数据处理完成并输入模型后,设定模

型模拟尺度和模拟时段,进而运行SWAT模型对沁河流域水文要素进行模拟。本文设定预热期为2003—2004年,率定期为2005—2015年,验证期为2016—2020年。在模拟完成后,选用SWAT-CUP软件中SUFI-2反演算法对模型进行率定,并根据相关系数(R^2)和纳什效率系数(NSE)的计算结果评价模型适用性。

2.3 经济社会与生态用水平衡指数计算

经济社会与生态用水平衡是在特定条件下,保障生态系统健康、实现经济社会高质量发展的状态,其核心在于协调和平衡经济社会与生态用水需求,促进人水关系和谐演变。计算公式如下:

$$I = \begin{cases} \alpha(P_d - P_u) + \beta(P'_d - P'_u) & P_d > P_u \\ 0 & P_d = P_u \\ \alpha(P'_u - P'_d) + \beta(P_u - P_d) & P_d < P_u \end{cases} \quad (1)$$

其中 $P_d = W_s/W_e$ $P_u = U_s/U_e$
 $P'_d = 1 - P_d$ $P'_u = 1 - P_u$

式中: I 为经济社会与生态用水失衡指数, $-1 \leq I \leq 1$,其中 $I=0$ 表示经济社会与生态用水两端完全平衡, I 为正值表示经济社会端亏水, I 为负值则表示生态端亏水,绝对值越大越不平衡; P_d 、 P_u 分别为经济社会需水和用水占比; P'_d 、 P'_u 分别为生态需水和

用水占比; α 、 β 分别为破坏系数和弥补系数, $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$, 反映亏水端和盈水端对平衡的破坏和弥补程度, 数值越大对平衡的影响作用越强; W_s 、 W_e 分别为经济社会需水量和生态需水量, 两者之和为总需水量, m^3 , 其中假设现状年经济社会供需水平衡, 即经济社会需水量等于经济社会用水量, 生态需水量通过 SWAT 模型模拟的径流数据并采用 Tennant 法进行计算; U_s 、 U_e 分别为经济社会用水量和生态用水量, 两者之和为用水总量, m^3 。通过计算经济社会与生态用水失衡指数, 结合判别标准(表 1)来评判失衡状态。

表 1 经济社会与生态用水失衡状态判别标准

失衡状态	I	
	生态端亏水	经济社会端亏水
完全失衡	-1	1
极度失衡	>-1~-0.8	0.8~<1
重度失衡	>-0.8~-0.6	0.6~<0.8
高度失衡	>-0.6~-0.4	0.4~<0.6
中度失衡	>-0.4~-0.2	0.2~<0.4
轻度失衡	>-0.2~<0	>0~<0.2
完全平衡	0	0

生态需水主要采用水文学法、水力学法以及生态水力学法计算^[24-26], 其中 Tennant 法是一种常用的水文学法, 常用于评估流域生态健康水平和计算流域生态需水量^[27-28]。基于方法的适用性, 本文选取 Tennant 法作为生态需水计算方法, 基于 SWAT 模型模拟的径流数据, 按 Tennant 法“很好”标准(较枯期河水流量占比为 30%, 较丰期河水流量占比为 50%)计算现状年沁河流域生态需水量。

2.4 基于供、需水定量关系的经济社会与生态用水平衡预测

2.4.1 经济社会需水量

参考目前对供需水平衡的相关研究, 经济社会需水主要由生活、工业、农业需水 3 部分组成^[29-30]。本文采用定额法分别计算沁河流域长治、临汾、晋城、焦作、济源 5 个城市 3 种需水量, 进而得到沁河流域未来规划水平年经济社会需水量。

a. 生活需水量。经济社会需水量中生活需水量计算公式为

$$W_{C_{ti}} = 365O_{ti}D_{ti} \quad (2)$$

式中: $W_{C_{ti}}$ 为第 t 年 i 城市的生活需水量, m^3 ; O_{ti} 为第 t 年 i 城市人口数量; D_{ti} 为第 t 年 i 城市生活用水定额, $m^3/(人 \cdot d)$ 。其中时间为未来规划水平年 2025 年、2030 年、2035 年 3 个年份。在进行需水预测时, 经济社会发展指标的预测是首要任务之一, 其中在进行人口预测时, 本文基于 matlab2016a 平台建立 Logistic 模型, 并对模型内的函数进行多项式

拟合。

b. 工业需水量。工业需水量计算公式为

$$W_{I_{ti}} = \varphi_t A_{ti} \quad (3)$$

式中: $W_{I_{ti}}$ 为第 t 年 i 城市的工业需水量, m^3 ; φ_t 为第 t 年的万元工业增加值用水量, $m^3/万元$; A_{ti} 为第 t 年 i 城市的工业增加值, 万元。

c. 农业需水量。农业需水量计算公式为

$$W_{A_{ti}} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^H V_{jk} S_{ik} \quad (4)$$

式中: $W_{A_{ti}}$ 为第 t 年 i 城市的农业需水量, m^3 ; V_{jk} 为第 j 月第 k 种作物的灌溉定额, m^3/km^2 ; S_{ik} 为 i 城市第 k 种作物的有效灌溉面积, km^2 ; N 为一年中的灌溉月数; H 为作物种类数。

d. 经济社会需水量标准划分。本文以 2022 年各项参数值为初始值, 保持沁河流域现有的发展情况, 对 2023—2035 年沁河流域的典型年份进行预测模拟。为提高预测结果的准确性, 并强化不同方案之间的对比分析, 本文对所预测的生活、工业、农业 3 类需水量进行多层级划分, 具体来说: 在生活用水标准划分中, 为保证居民生活用水质量, 故采用单一标准; 工业用水标准划分综合考虑工业用水重复利用率变化趋势, 将工业需水标准依次划分为最小经济保障 S1(技术进步较快)、中等经济保障 S2(技术进步中等)和最大经济保障 S3(技术进步较慢)3 种; 农业需水量则根据《全国水资源综合规划技术大纲》, 分别计算降雨频率为 50%、75%和 95%的灌溉用水定额, 得出 3 种不同标准的农业需水量。

根据上述生活、工业、农业需水量计算时所划分的标准, 将工业需水和农业需水的不同标准组合, 得到不同用水平衡预测方案下经济社会需水量, 以便于流域未来经济社会与生态用水平衡预测方案优选, 具体方案划分标准见表 2。即根据不同的降雨频率, 先确定未来农业灌溉用水定额, 再根据式(4)计算农业需水量, 结合不同工业节水技术进步率下所给定的工业用水重复利用率计算工业需水量, 求和得到不同标准下的经济社会需水量。

表 2 沁河流域经济社会需水标准划分

规划水平年	工业用水重复利用率								
	降雨频率 50%			降雨频率 75%			降雨频率 95%		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
2025 年	0.85	0.80	0.75	0.85	0.80	0.75	0.85	0.80	0.75
2030 年	0.90	0.85	0.80	0.90	0.85	0.80	0.90	0.85	0.80
2035 年	0.95	0.90	0.85	0.95	0.90	0.85	0.95	0.90	0.85

2.4.2 生态需水量

邱曦等^[31]研究表明, CMIP6 典型气候数据 SSP2-4.5 情景较为符合沁河流域实际情况, 故本文采用 SSP2-4.5 气候情景下的 CMIP6 气象数据, 将

其导入沁河流域 SWAT 模型,模拟规划水平年 2025 年、2030 年和 2035 年相应子流域的河道径流量,再采用 Tennant 法,选取“很好”“较好”“一般”3 种标准(较枯期河水流量占比分别为 30%、20%、10%,较丰期河水流量占比分别为 50%、40%、30%)计算生态需水量,并将其分别定义为最低生态风险(E1)、中度生态风险(E2)和最高生态风险(E3)的生态需水量^[14]。

2.4.3 沁河流域水资源可利用量

水资源可利用量预测同样采用 SWAT 模型。在进行水资源可利用量计算时,假定流域汇流的主河道总水量为各个子流域的产水量,将各子流域产水量相加得到沁河流域规划水平年水资源可利用量。

2.4.4 沁河流域未来用水平衡方案优选

为给流域未来气候变化情境下规划水平年经济社会与生态用水分配提供参考,需对未来年份不同标准下用水平衡方案进行优选。对方案进行优选的关键为:确定经济社会与生态两端用水需求,计算一次平衡点,判断一次平衡点合理性,考虑多种因素对平衡点进行二次调整。优选步骤为:①根据经济社会需水与生态需水计算方法,得到规划水平年不同标准下的需水量;②将经济社会需水量和生态需水量分别除以总需水量,得到经济社会与生态两端需水量占比,此需水量占比数据即为一次平衡点;③计算得到沁河流域水资源可利用量,对比总需水量,判断一次平衡点合理性,若水资源可利用量能够满足两端需水,则认为平衡点适用,相反则不适用,需要进行调整;④根据经济社会用水、生态用水和综合效益约束,调整经济社会与生态两端用水需求,进行平衡点二次分析;⑤最后以经济社会用水占比表征经济社会与生态用水平衡点计算结果。

3 结果与分析

3.1 模型率定结果

SWAT 模型与实际径流的拟合情况见表 3,3 个典型水文站的 R^2 和 NSE 均符合精度检验标准,表明本文构建的 SWAT 模型对沁河流域的径流模拟效果较好,模拟径流与实测径流较为吻合,可用于后续的计算与分析。

表 3 SWAT 模型拟合精度

水文站	率定期			验证期		
	NSE	R^2	精度	NSE	R^2	精度
润城	0.69	0.62	合格	0.68	0.66	较好
五龙口	0.76	0.64	合格	0.80	0.75	较好
武陟	0.82	0.81	好	0.67	0.66	较好

3.2 经济社会与生态用水平衡状况评价

根据经济社会与生态用、需水量计算方法,得到

沁河流域 2005—2020 年经济社会多年平均用、需水量均为 9.58 亿 m^3 ;多年平均生态用、需水量分别为 2.03 亿 m^3 和 6.42 亿 m^3 ,生态需水量计算结果与文献[23]结论较为相似;多年平均用、需水总量分别为 11.62 亿 m^3 和 16.01 亿 m^3 ,这主要是生态系统的用、需水不平衡导致的。总体来看,沁河流域生态系统用水需求无法得到满足。对比经济社会与生态需水量可以发现,沁河流域整体用水需求呈现为经济社会需水量大于生态需水量。

根据沁河流域经济社会与生态用、需水量,通过失衡指数计算方法和失衡状态判别标准(表 1)确定平衡点,将破坏系数 α 和弥补系数 β 分别设定为 0.9 和 0.2^[15],结合沁河流域水资源现状,量化沁河流域 2005—2020 年经济社会与生态用水失衡程度,结果见图 3。

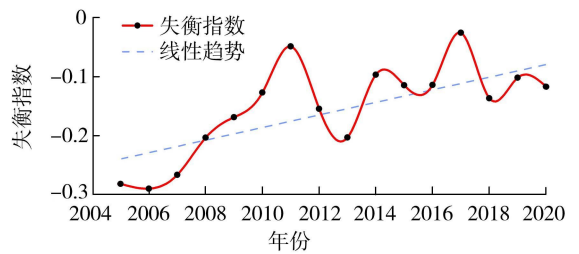


图 3 沁河流域经济社会与生态用水失衡指数演变

在研究期内,经济社会与生态用水失衡指数均为负值,总体呈现波动增长趋势。具体表现为,沁河流域在 2005—2008 年处于中度失衡状态,但随着时间推移逐步转变为轻度失衡状态。这表明沁河流域的经济社会与生态用水结构逐年改善,原因在于,一方面,随着流域产业结构的优化升级以及政府对生态环境保护重视程度的不断提高,针对以环境破坏为代价的经济社会用水实施了严格的约束措施,有效促进了水资源的合理配置与利用;另一方面,经济社会节水技术的快速发展也发挥了重要作用。工业用水重复利用率和灌溉水利用系数等关键指标的持续提升,显著改善了流域水资源利用效率,对实现流域经济社会用水与生态用水的动态平衡产生了积极影响。此外,2005—2020 年沁河流域的经济社会与生态用水一直呈现为生态端亏水的状态,这主要是流域的产业结构导致的。沁河流域的经济发展主要依赖于煤矿等传统重工业,对水资源的需求较高,导致生态用水被挤占。

3.3 未来气候变化情景下的经济社会与生态用水平衡分析

3.3.1 流域需水量及水资源量计算结果分析

图 4 为未来气候变化情景下规划水平年经济社会需水量计算结果,在流域各个年份的 9 种经济社

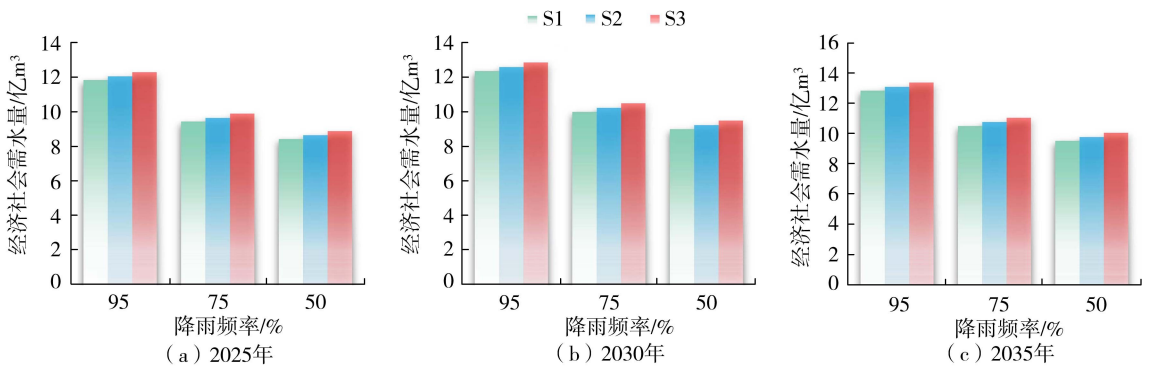


图4 规划水平年沁河流域经济社会需水量

会需水计算方案中,经济社会需水量计算结果最小的方案为降雨频率95%情况下的S1方案,需水量计算结果为8.42亿m³。对比年份差异可以发现,随着时间的推移,各个方案需水量均有所提升,这表明随着节水技术的提升,虽然水资源利用效率得到提高,但由于流域经济社会规模的扩大,所需供水量仍有所增大;在不同的降雨频率下,对比S1、S2、S3方案计算结果可以发现,在气候因素和技术升级之间,气候因素对需水量计算结果影响较大,这是由于沁河流域是重要的农业种植区,降雨频率的变化直接导致农业需水量的大幅变化,进而影响流域经济社会需水量计算结果。

未来气候变化情景下规划水平年生态需水量和流域水资源可利用量计算结果见图5,对比流域2005—2020年多年平均生态需水量,规划水平年生态需水量均有所提升,且随着时间的推移生态需水

量和水资源可利用量呈现逐年增长的趋势。

3.3.2 经济社会与生态用水平衡方案优选

根据表2,将经济社会需水量9种方案与生态需水量3种方案的不同标准相组合,得到各年份共27种用水平衡计算方案,预测并优选未来规划水平年经济社会与生态用水平衡方案,结果如图6所示,其中红点为不同降雨频率下的平衡方案优选结果。

本文初步拟定经济社会端用水符合最大经济保障准则,生态端用水符合最低生态风险准则,并计算既定准则下的经济社会需水量和生态需水量,将其除以总需水量,求得一次平衡点,然后判断一次平衡点总需水量与流域水资源可利用量关系并进行适应性调整,最后经过方案比选后,得到2025年、2030年、2035年不同降雨频率下的经济社会与生态用水平衡方案优选结果如表4所示。

基于用水方案优选思路,结合规划水平年的平衡结果来看,经济社会端较多能够达到“最大经济保障(S3)”,表明未来年份沁河流域经济社会端用水基本能够得到满足;生态端用水较少能够达到“最低生态风险(E1)”水平,表明未来沁河流域经济社会与生态用水中,仍然有较大可能出现生态端亏水现象。未来需进一步制定沁河流域综合水资源管理政策或设立专门的沁河流域管理机构,以加强对水资源分配的监测和评估。

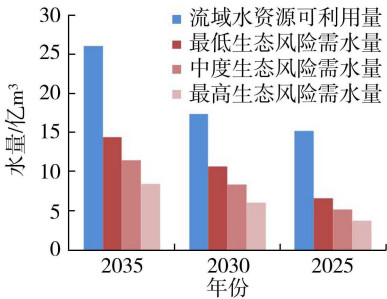


图5 规划水平年沁河流域生态需水量和水资源可利用量

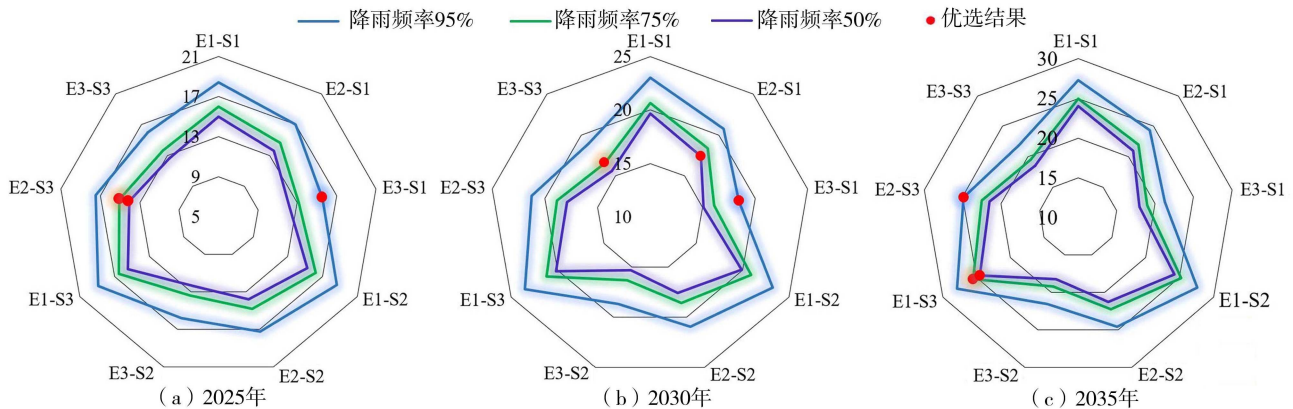


图6 规划水平年沁河流域各用水平衡计算方案下经济社会与生态总需水量(单位:亿m³)

表 4 规划水平年沁河流域经济社会与生态水平衡计算结果

规划水平年	降雨频率/%	平衡结果	平衡类型	需水量/亿 m ³		平衡点	用水量/亿 m ³	
				经济社会	生态		经济社会	生态
2025 年	95	S1-E3	最小经济保障与最高生态风险	11.84	3.73	0.76	11.56	3.64
	75	S3-E2	最大经济保障与中度生态风险	9.89	5.16	0.66	9.99	5.21
	50	S3-E2	最大经济保障与中度生态风险	8.88	5.16	0.63	9.62	5.59
2030 年	95	S1-E3	最小经济保障与最高生态风险	12.37	6.07	0.67	11.64	5.72
	75	S3-E3	最大经济保障与最高生态风险	10.50	6.07	0.63	11.00	6.36
	50	S1-E2	最小经济保障与中度生态风险	9.00	8.37	0.52	8.99	8.37
2035 年	95	S3-E2	最大经济保障与中度生态风险	13.38	11.47	0.54	14.06	12.05
	75	S3-E1	最大经济保障与最低生态风险	11.05	14.47	0.43	11.30	14.81
	50	S3-E1	最大经济保障与最低生态风险	10.06	14.47	0.41	10.71	15.41

4 结 论

a. 基于水文、气象、土地利用等基础数据构建了沁河流域 SWAT 模型,对模型的率定和验证结果均符合精度检验标准(R^2 最低为 0.62, NSE 最低为 0.67),表明模型拟合程度较好,可用于沁河流域经济社会与生态水平衡分析。

b. 2005—2020 年沁河流域经济社会与生态水平衡指数均为负值,即经济社会与生态用水一直呈现为生态端亏水的状态,生态用水被严重挤占,指数总体呈现波动增长趋势,由中度失衡状态逐渐转变为中度、轻度失衡状态,沁河流域经济社会与生态用水结构逐年转好。

c. 根据不同未来用水平衡方案的划分标准,未来气候变化情景下沁河流域经济社会与生态水平衡共有 27 种计算方案,根据优选思路挑选出规划水平年不同降雨频率下的最优方案,最终确定沁河流域 95%、75%、50% 降雨频率下 2025 年经济社会与生态水平衡点为 0.76、0.66、0.63,2030 年为 0.67、0.63、0.52,2035 年为 0.54、0.43、0.41。

参考文献:

[1] 左其亭,张志卓,马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(10):29-38. (ZUO Qiting,ZHANG Zhizhuo,MA Junxia. Relationship between water resource utilization level and socio-economic development in the Yellow River Basin[J]. China Population Resources & Environment, 2021,31(10):29-38. (in Chinese))

[2] 黄梓鑫,李晶,楚晶晶,等. 中国农业水土资源时空匹配特征及影响因素研究[J]. 人民长江,2024,55(2):116-124. (HUANG Zixin,LI Jing,CHU Jingjing, et al. Spatiotemporal matching characteristics and influencing factors of agricultural water and soil resources in China [J]. Yangtze River, 2024, 55 (2): 116-124. (in Chinese))

[3] 王浩,游进军. 锚定国家需求 以水资源优化配置助力

高质量发展[J]. 中国水利,2022(19):20-23. (WANG Hao, YOU Jinjun. Anchor national needs and promote high-quality development with the optimal allocation of water resources[J]. China Water Resources, 2022(19): 20-23. (in Chinese))

[4] 倪红珍,王浩,汪党献. 经济社会与生态环境竞争用水的供求均衡水价研究[J]. 水利发展研究,2007(7):15-18. (NI Hongzhen, WANG Hao, WANG Dangxian. Research on the supply-demand balance water price of economic, social, and ecological competition for water[J]. Water Resources Development Research, 2007(7): 15-18. (in Chinese))

[5] 杨丽,刘海军,王红瑞,等. 长江经济带“四水”与社会经济 SD 模型构建及应用 I:模型构建与验证[J]. 人民长江,2022,53(3):1-7. (YANG Li, LIU Haijun, WANG Hongrui, et al. Construction and application of system dynamic model for “four water” and socio-economic in the Yangtze River Economic Belt I: model construction and verification[J]. Yangtze River, 2022, 53(3): 1-7. (in Chinese))

[6] ZHU Cong, FANG Chuanglin, ZHANG Lifang, et al. Simulating the interrelationships among population, water, ecology, and economy in urban agglomerations based on a system dynamics approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 439: 140813.

[7] LIU Peiheng, LYU Subing, HAN Yuping, et al. Comprehensive evaluation on water resources carrying capacity based on water-economy-ecology concept framework and EFAST-cloud model: a case study of Henan Province, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109392.

[8] AI Yadi, MA Zhenzhen, XIE Xinmin, et al. Optimization of ecological reservoir operation rules for a northern river in China: balancing ecological and socio-economic water use [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108822.

[9] HE Liying, DU Xinqiang, ZHAO Jiahui, et al. Exploring the coupling coordination relationship of water resources, socio-economy and eco-environment in China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: 170705.

- [10] 杜新强,何立滢,姚泓钰,等. 近 15 年来中国北方水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展评价[J]. 中国农村水利水电, 2022 (6): 66-75. (DU Xinqiang, HE Liying, YAO Hongyu, et al. Evaluation of the coupling coordination development of water resources, socio-economy and eco-environment in Northern China in recent 15 years [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (6): 66-75. (in Chinese))
- [11] CUI Dan, CHEN Xin, XUE Yinglan, et al. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale: a case study of Kunming[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 234: 189-199.
- [12] 王富强,应卓晖,吕素冰,等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. 水资源保护, 2022, 38 (5): 80-86. (WANG Fuqiang, YING Zhuohui, LYU Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 80-86. (in Chinese))
- [13] 左其亭,吴青松,金君良,等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 165-173. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JIN Junliang, et al. The basic principle and theoretical system of regional water balance [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 165-173. (in Chinese))
- [14] 左其亭,全志森,吴青松,等. 经济社会与生态用水平衡计算规则与方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 1-10. (ZUO Qiting, QUAN Zhimiao, WU Qingsong, et al. Calculation rules and methods for water use balance between economic society and ecology [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 1-10. (in Chinese))
- [15] 左其亭,吴青松,纪义虎,等. 区域水平衡及失衡程度度量方法[J]. 水利学报, 2024, 55(1): 1-12. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JI Yihu, et al. Methods for measuring regional water balance and imbalance degree [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (1): 1-12. (in Chinese))
- [16] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al. SWAT: model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [17] ARNOLD J G, FOHRER N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling[J]. Hydrological Processes, 2005, 19 (3): 563-572.
- [18] JEONG H, LEE B, KIM D, et al. Improving estimation capacity of a hybrid model of LSTM and SWAT by reducing parameter uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2024, 633: 130942.
- [19] 全志森,左其亭,王鹏抗,等. 基于 SWAT 的沁河流域水压力指数计算及生态脆弱性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 15-24. (QUAN Zhimiao, ZUO Qiting, WANG Pengkang, et al. Ecological vulnerability analysis of the Qinhe River Basin based on SWAT and water stress index [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 15-24. (in Chinese))
- [20] 秦西,张羽,马军霞,等. 基于 SWAT 的沁河流域水资源生态足迹计算及承载程度分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(6): 1-9. (QIN Xi, ZHANG Yu, MA Junxia, et al. Water resources ecological footprint and carrying levels in the Qinhe River Basin based on SWAT [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(6): 1-9. (in Chinese))
- [21] 张乐开,左其亭,钟涛,等. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析 & 预测[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 862-872. (ZHANG Lekai, ZUO Qiting, ZHONG Tao, et al. Analysis and prediction of water conservation capacity in Qinhe River Basin based on SWAT [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 862-872. (in Chinese))
- [22] 纪义虎,左其亭,马军霞. 基于 Tapio 和 LMDI 模型的沁河流域碳排放与水资源利用脱钩关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 94-101. (JI Yihu, ZUO Qiting, MA Junxia. Analysis of decoupling relationship between carbon emissions and water resources utilization in the Qinhe River Basin based on Tapio and LMDI models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 94-101. (in Chinese))
- [23] 刘义,史佩东,刘森,等. 基于生态需水的黄河中游水平衡分析:以沁河流域为例[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 30-40. (LIU Yi, SHI Peidong, LIU Miao, et al. Analysis of water balance in the middle reaches of the Yellow River based on ecological water demand: a case study on Qinhe River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 30-40. (in Chinese))
- [24] ZHANG Jian, FU Yicheng, PENG Wenqi, et al. Calculation and evaluation of suitable ecological flows for eco-environmental recovery of cascade-developed rivers [J]. Science of The Total Environment, 2023, 878: 162918.
- [25] 高勋,陈星,卢娟娟,等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 55-61. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 55-61. (in Chinese))

(下转第 45 页)

- 2018, 171: 528-540.
- [22] 朱燕梅, 陈仕军, 马光文, 等. 计及发电量和出力波动的水光互补短期调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2769-2779. (ZHU Yanmei, CHEN Shijun, MA Guangwen, et al. Short-term complementary operation of hydro-photovoltaic integrated system considering power generation and output fluctuation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (13): 2769-2779. (in Chinese))
- [23] ZHANG Yusheng, MA Chao, YANG Yang, et al. Study on short-term optimal operation of cascade hydro-photovoltaic hybrid systems[J]. Applied Energy, 2021, 291: 116828.
- [24] 张歆蒨, 陈仕军, 曾宏, 等. 基于源荷匹配的异质能源互补发电调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3314-3320. (ZHANG Xinshuo, CHEN Shijun, ZENG Hong, et al. Heterogeneous energy complementary power generation dispatching based on output-load matching [J]. Power System Technology, 2020, 44 (9): 3314-3320. (in Chinese))
- [25] 崔杨, 程广岩, 仲悟之, 等. 计及受端电网调峰趋势的风-光-火特高压直流外送调度方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 32-40. (CUI Yang, CHENG Guangyan, ZHONG Wuzhi, et al. Wind-photovoltaic-fire UHVDC external dispatching method considering peaking trend of power grid [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42 (8): 32-40. (in Chinese))
- [26] 赵亮, 黎嘉明, 艾小猛, 等. 光伏出力随机性分量的提取和统计特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 48-56. (ZHAO Liang, LI Jiaming, AI Xiaomeng, et al. Analysis on random component extraction and statistical characteristics of photovoltaic power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (1): 48-56. (in Chinese))
- [27] 朱燕梅, 黄炜斌, 陈仕军, 等. 水光互补日内优化运行策略[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 142-149. (ZHU Yanmei, HUANG Weibin, CHEN Shijun, et al. Intra-day optimal operation strategy of hydro-pv hybrid system [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53 (3): 142-149. (in Chinese))
- [28] 吉铎格, 李慧, 叶林, 等. 基于波动特性挖掘的短期光伏功率预测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 146-155. (JI Xinge, LI Hui, YE Lin, et al. Short-term photovoltaic power forecasting based on fluctuation characteristics mining [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 146-155. (in Chinese))
- [29] 么艳香, 叶林, 屈晓旭, 等. 风-光-水多能互补发电系统功率云耦合模型分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1750-1756. (YAO Yanxiang, YE Lin, QU Xiaoxu, et al. Power cloud coupled model for wind-photovoltaic-hydro hybrid power generation system [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1750-1756. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-04-03 编辑: 熊水斌)

(上接第 16 页)

- [26] 金纯, 姜翠玲, 吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 8-14. (in Chinese))
- [27] 徐志侠, 董增川, 周健康, 等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(11): 15-17. (XU Zhixia, DONG Zengchuan, ZHOU Jiankang, et al. Montana method for ecological water requirement calculation and its application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34 (11): 15-17. (in Chinese))
- [28] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [29] 王煜, 武见, 王婷, 等. 黄河流域经济社会用水公平性评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(10): 54-60. (WANG Yu, WU Jian, WANG Ting, et al. Research on the evaluation of the fairness of economic and social water use in the Yellow River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(10): 54-60. (in Chinese))
- [30] 赵维岭, 纪义虎, 左其亭, 等. 区域水资源供需平衡指数分析方法: 以引沁灌区为例[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 128-135. (ZHAO Weiling, JI Yihu, ZUO Qiting, et al. Variation in balance between water supply and water demand in Yinqin irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42 (3): 128-135. (in Chinese))
- [31] 邱曦, 马军霞, 左其亭, 等. 基于区域水平衡理论和 SWAT 模型的沁河流域水收支平衡演变分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 9-15. (QIU Xi, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Evolution analysis of water budget balance in Qinhe River Basin based on regional water balance theory and SWAT model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1): 9-15. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-03-28 编辑: 熊水斌)