

干旱半干旱区跨流域调水对供水格局的影响

邢姝颖¹, 刘德地¹, 程玉菲², 王军德²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 构建了跨流域水资源调配综合模拟模型 CWatM-IITA, 系统性考虑天然水循环过程与人类用水过程的动态互馈, 实现分布式跨流域水资源调配及其影响下的水循环转化过程模拟, 以甘肃省引洮供水工程为例开展应用研究, 分析不同典型年气候条件下跨流域调水对供水格局与水资源量时空分布的影响。结果表明: 跨流域调水有效提升了受水区生活与工业供水保障水平, 严重干旱年生活、工业和灌溉缺水率分别下降 15.9%、19.1% 和 34.3%; 在需水量较大的地区, 水资源禀赋越差、气候敏感性越高, 则缺水改善越受限; 跨流域调水显著增加了受水区的地表水资源量且主要集中在灌溉补水量较大的地区, 对地下水资源量及其时空分布的影响则十分有限; 严重干旱年地表水资源量增加了 0.84 亿 m³。

关键词: 干旱半干旱区; 跨流域调水工程; CWatM; 水资源配置; 供水格局; 引洮供水工程

中图分类号: TV213; P339

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)03-0232-12

Impacts of inter-basin water transfer on water supply structure in arid and semi-arid regions//XING Shuying¹, LIU Dedi¹, CHENG Yufei², WANG Junde² (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An integrated simulation model for inter-basin water transfer and allocation, WatM-IITA, is developed, to systematically consider the dynamic feedback between processes of natural water cycle and human water use, and to simulate the distributed inter-basin water transfer and allocation and transformation processes of the water cycle under their influence. Taking the Yintao Water Transfer Project in Gansu Province as an example, the effects of inter-basin water transfer on the water supply structure and the volume of water resources are assessed across spatiotemporal scales under different typical annual climatic conditions. The results indicate that inter-basin water transfer effectively enhances domestic and industrial water supply security in the water-receiving area. In severe drought years, the domestic, industrial, and irrigation water shortage rates decrease by 15.9%, 19.1%, and 34.3%, respectively. Regions with higher water demand but poorer natural water resource endowment and greater climate sensitivity show more constrained water shortage alleviation. Inter-basin water transfer significantly increases the volume of surface water resources in the water-receiving area, particularly in regions with substantial irrigation supplementation, while its impact on the volume of groundwater resources and its spatiotemporal distribution patterns remained marginal. In severe drought years, the volume of surface water resources increases by 84 million cubic meters.

Key words: arid and semi-arid region; inter-basin water transfer project; CWatM; water resources allocation; structure of water supply; the Yintao Water Transfer Project

全球变暖加速了水循环过程, 大气水汽通量的增加加剧了以干旱和洪涝为主的极端气象水文事件^[1], 其中干旱事件的强度、发生频次和持续时间均呈上升趋势^[2-3]。干旱半干旱区作为对气候变化和人类活动最敏感的区域之一^[4], 其水资源供需矛盾日益凸显。以引调水工程为核心的水网建设逐渐成为应对干旱灾害、缓解水资源供需失衡问题的重

要举措。

水资源系统分析是跨流域水资源调配研究的重要环节。国内外对于调水工程运行调度与水量配置的研究集中于优化配置模型的构建与求解^[5-6], 对于较复杂的跨流域调水系统, 大多基于概化的节点图构建集总式模拟模型^[7-8], 对水资源调配过程的空间异质性考虑不足, 也未能充分反映基于水循环的水

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0018); 国家自然科学基金项目(52379022)

作者简介: 邢姝颖(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: syxing@whu.edu.cn

通信作者: 刘德地(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: dediliu@whu.edu.cn

资源动态变化对调配过程的影响。随着分布式水文模型的发展,相关学者开展了水资源配置模型与水文模型的耦合研究^[9-11],但大多数仅将水文模拟信息单向传递给水资源配置模型,未能充分反映用水对来水变化、下一时段来水对用水变化的响应过程。因此,研究天然水循环过程与人类用水过程的动态互馈关系,以及跨流域水资源调配过程在分布式水文模型中的有效表达,系统性考虑水源区可引水量与受水区用水需求,成为辨析跨流域调水对供水格局影响及水循环响应的关键。

引洮供水工程受水区位于黄土丘陵区,水资源匮乏导致当地人畜饮水困难、经济发展受限,地下水的长期过度开采加剧了生态环境的恶化。作为甘肃省有史以来规模最大的跨流域调水工程,引洮供水工程对解决甘肃中部地区工业用水、人畜饮水和旱作农业补充灌溉问题,改善当地生态环境与人民群众生存条件,促进经济社会可持续发展具有深远意义^[12]。

本文耦合了水文模型 CWatM (community water model) 与跨流域水资源调配模块,构建了跨流域水资源调配综合模拟模型 CWatM-IITA (CWatM-based integrated simulation model for inter-basin water transfer and allocation)。该模型通过天然水循环过程与经济社会用水过程的动态互馈,以及水源区与受水区之间、受水区行政单元之间的跨尺度信息交互,实现水资源调配过程的分布式表达,并模拟跨流域调水参与水循环的转化过程。以 2020 年为现状水平年,根据工程建设布局与调配规则设置具体情景,分析了不同典型年气候条件下跨流域调水对供水格局和水资源量时空分布的影响,初步探讨了跨流域调水工程的供水保障能力及其水循环响应。

1 CWatM-IITA 模型开发

1.1 CWatM 基本原理

CWatM^[13] 是国际应用系统分析研究所 (International Institute for Applied System Analysis, IIASA) 开发的分布式水文模型,可应用于日尺度下 30''~30' 空间分辨率的全球和区域水文建模^[14-16]。CWatM 模块结构如图 1 所示。天然水循环模块(蓝色)模拟下垫面的产汇流过程,并为供用水模块(黄色)提供河道径流量、湖库水量、土壤墒情和地下水储量等水资源信息;供用水模块则结合网格单元用水需求和供用水规则,逐时段进行水资源供用耗排等计算,并通过耗水和退水影响下一时段水循环模块的初始水文通量和储量。两大水循环模块互相聚合、动态链接、实时互馈。

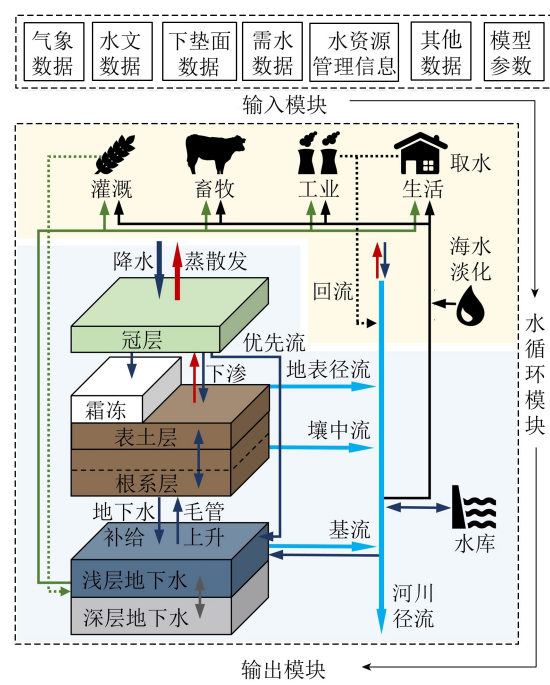


图 1 CWatM 模块结构及网格单元储量与通量关系

Fig. 1 CWatM module structure and the relationship between cell storage and flux

1.2 跨流域水资源调配模块

跨流域水资源调配等管理决策通常基于行政边界,在不同时间尺度上开展宏观调控。CWatM 采用统一的网格单元模拟产汇流和用水过程,水源区与受水区之间、调水涉及的行政单元之间以及不同时间段的系统之间缺乏信息交互,难以有效表达调水系统管理决策。因此,修改 CWatM 供用水模块并搭建一个与其动态链接的调水模块,构建跨流域水资源调配模块,从而实现调水系统的跨尺度信息交互。调水模块中的外调水水源识别模块计算水源区的调水工程可引水量;供用水模块将外调水水源在受水区范围内进行空间展布,并模拟多水源面向多用水户的联合供水过程;外调水配置完成后调水模块中的外调水输水模块统计受水区实际引水量并执行水量转移程序。

1.2.1 调水模块

外调水水源识别模块计算单位时段内水源区调水工程可引水量:

$$A_t = \min \{ \max [\max (Q_t - E_t, 0) \Delta t - L_t, 0], H \Delta t, M_t \} \tag{1}$$

其中

$$L_t = \sum_{s=1}^S f_{sw,s} L_{s,t}$$

$$M_t = \sum_{c=1}^C M_{c,t} = \sum_{c=1}^C \max (P_{c,m} - \sum_{i=t_m}^{t-1} Z_{c,i}, 0)$$

式中: t 为日序列; A_t 为 t 时段调水工程可引水量; Q_t 为 t 时段水源工程取水口的来水流量; E_t 为河道内

生态流量; Δt 为时间常数, $\Delta t = 864\,000\text{ s}$; L_t 为 t 时段当地用水户的河道需水总量; H 为渠道输水能力; M_t 为 t 时段受水区引水定额; S 为用水户数量; $L_{s,t}$ 为 t 时段当地第 s 用水户的需水量; $f_{sw,s}$ 为第 s 用水户的地表水用水限制因子, 即调水规则设定的用水户需水量中河道用水占比的上限; c 为受水区行政单元编号; C 为受水区行政单元数量; m 为第 t 天对应的月序列; t_m 为第 m 月第 1 天对应的日序列; $M_{c,t}$ 为 t 时段受水区 c 单元引水定额; $P_{c,m}$ 为第 m 月受水区 c 单元设计引水量; $Z_{c,i}$ 为某日受水区 c 单元外调水实际用水量。

外调水输水模块按照式(2)统计单位时段内受水区实际利用的外调水总量:

$$Z_t = \sum_{c=1}^C Z_{c,t} = \sum_{c=1}^C \frac{V_{c,t} \min(A_t, \sum_{c=1}^C V_{c,t})}{\sum_{c=1}^C V_{c,t}} \quad (2)$$

其中 $V_{c,t} = \sum_{s=1}^S \max(f_{r,s} D_{s,c,t} - R_{s,c,t}, 0)$

式中: Z_t 、 $Z_{c,t}$ 分别为 t 时段受水区及其 c 单元的外调水实际利用量; $V_{c,t}$ 为 t 时段受水区 c 单元的外调水需水量; $f_{r,s}$ 为第 s 用水户的外调水用水限制因子; $D_{s,c,t}$ 为 t 时段受水区 c 单元第 s 用水户的需水量; $R_{s,c,t}$ 为 t 时段受水区 c 单元第 s 用水户的其余水源(用水优先级高于外调水)实际利用量。

1.2.2 供用水模块配置规则

a. 外调水供水均衡配置规则。以各个用水户的外调水实际引水量与需水量之比表征该用水户的受益程度, 行政单元内部的外调水分配以单位时段内总缺水量最小为目标, 以网格单元受益程度均等为原则引入外调水水源, 即:

$$\min G_t = \sum_{s=1}^S \sum_{x=1}^X (V_{x,s,t} - Z_{x,s,t}) \quad (3)$$

$$B_{s,t} = \frac{Z_{1,s,t}}{V_{1,s,t}} = \frac{Z_{2,s,t}}{V_{2,s,t}} = \dots = \frac{Z_{X,s,t}}{V_{X,s,t}} \quad (4)$$

式中: G_t 为 t 时段某行政单元的总缺水量; x 为该行政单元内部的网格编号; X 为该行政单元内部的网格数量; $V_{x,s,t}$ 、 $Z_{x,s,t}$ 分别为 t 时段第 x 网格第 s 用水户的外调水需水量和实际用水量; $B_{s,t}$ 为 t 时段该行政单元第 s 用水户的受益程度。

b. 供用水优先级规则。将供水优先级从高到低依次设置为: 居民生活用水、畜牧养殖用水、工业生产用水和农业灌溉用水。将外调水进一步分成 3 部分: 置换地表水的外调水、置换地下水的外调水以及作为备用水源的外调水。将用水优先级从高到低依次设置为: 置换地表水的外调水、河道水、再生水、

湖泊水、水库水、置换地下水的外调水、地下水和作为备用水源的外调水。程序按用水优先级从高到低的顺序识别水源, 并按供水优先级从高到低的顺序将各水源分配给用水户, 直至所有用水户的需水得到满足或所有水源耗尽为止。网格单元供用水情况的计算表达式为

$$K_{a,b,t} = \max(f_{a,b} D_{b,t} - \sum_{i=1}^{a-1} U_{i,b,t}, 0) \quad (5)$$

$$U_{a,t} = \min(F_{a,t}, \sum_{i=1}^{b-1} K_{a,i,t}) \quad (6)$$

$$U_{a,b,t} = \min(K_{a,b,t}, U_{a,t} - \sum_{i=1}^{b-1} U_{a,i,t}) \quad (7)$$

式中: a 为水源优先序; b 为用水户优先序; $K_{a,b,t}$ 为 t 时段第 b 用水户的第 a 水源需水量; $f_{a,b}$ 为第 b 用水户的第 a 水源用水限制因子; $D_{b,t}$ 为 t 时段第 b 用水户的需水量; $U_{a,t}$ 、 $U_{a,b,t}$ 分别为 t 时段第 a 水源的实际用水总量与第 b 用水户用水量; $F_{a,t}$ 为 t 时段第 a 水源可利用量; $U_{i,b,t}$ 、 $U_{a,i,t}$ 分别为 t 时段第 i 水源的第 b 用水户用水量和第 a 水源的第 i 用水户用水量; $K_{a,i,t}$ 为 t 时段第 i 用水户的第 a 水源需水量。

1.3 CWatM-IITA 模型耦合框架

CWatM-IITA 模型开发基于 CWatM 框架, 包含独立的配置文件、数据处理模块和水循环模块。配置文件包含输入数据路径、模型参数和输出选项等所有相关信息。数据处理模块主要承载构建模型运行所需的全局变量、存储数据读写和错误处理例程、推进水循环模块的时序更新以及输出模拟结果等功能。水循环模块由天然水循环和跨流域水资源调配两大模块构成, 主要子模块的组织架构与数据传递关系如图 2 所示(蓝色框线表示增设的调水模块及其链接关系)。CWatM-IITA 模型的整体运行机制如下: ①在模拟开始时, 数据处理模块从配置文件读取信息, 构建全局变量并设置初始状态; ②天然水循环模块模拟网格单元产流过程; ③跨流域水资源调配模块计算水资源数量及其组成, 并结合跨流域调水系统结构和调配规则进行水资源配置, 模拟取水、耗水和退水过程并将剩余水量和回流量反馈给相应的天然水循环模块, 进入产汇流转化过程; ④数据处理模块实时输出模拟结果, 推动时序递进与全局变量更新, 将其作为下一时段水循环的初始状态; ⑤重复步骤②~④。

天然水循环模块与跨流域水资源调配模块的动态互馈通过子模块之间的调用关系和信息交互实现。由于水循环模拟与水资源调配管理决策的时空尺度之间存在差异, 跨流域水资源调配模块通过全局变量的分解与聚合实现水源区与受水区之间、受

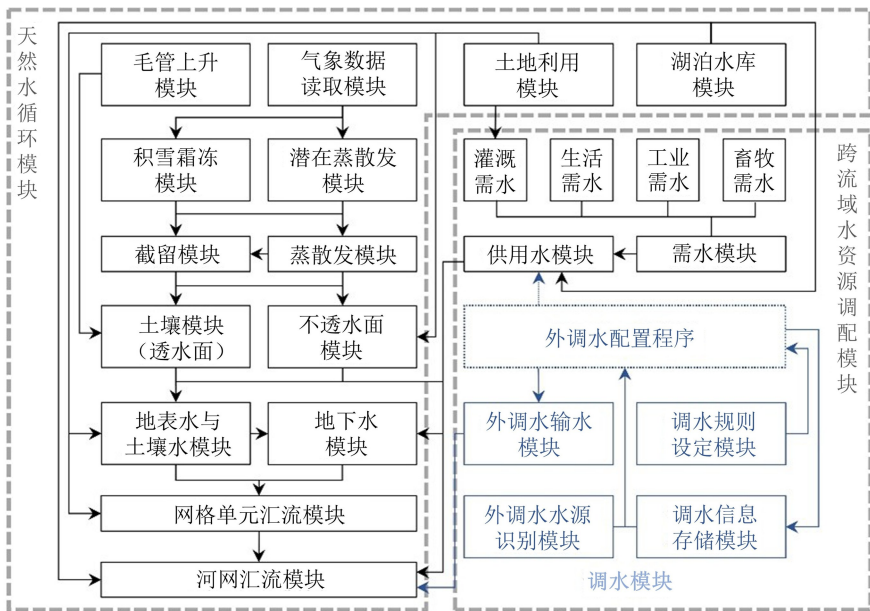


图2 CWatM-IITA 模型水循环模块架构与数据传递关系

Fig. 2 Architecture and data transmissions of the CWatM-IITA water cycle module

水区行政单元之间的信息交互。启用调水模块后,调水规则设定模块根据水源工程位置、受水区行政区划、工程设计引水量、渠道输水能力、受水区引水定额与外调水时空分配模式等跨流域调水选项与信息更新相关的全局变量;外调水水源识别模块读取河道径流和湖库水量等信息,根据调水规则计算水源工程可引水量并传递给供水模块中的外调水配置程序;供水模块聚合受水区行政单元缺水信息,将外调水水源分解到行政单元和网格单元,综合水资源供需两侧信息和供水规则进行水量分配;外调水输水模块统计供水模块的外调水配置结果,传递到河网汇流模块后扣除水源工程实际调水量;调水信息存储模块实时存储调水配置结果并更新受水区引水定额。

1.4 模型适用性评价方法

1.4.1 参数率定

选取部分天然水循环模块的参数进行率定。基于各流域出口站的月径流模拟值与实测值,参数率定以Kling等^[17]提出的修正后的Kling-Gupta效率系数(modified Kling-Gupta efficiency coefficient, KGE')为目标函数执行单目标优化,计算公式为

$$k = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s \mu_o}{\sigma_o \mu_s} - 1\right)^2} \quad (8)$$

式中: k 为KGE'; r 为相关系数; β 为偏离率; γ 为变异率; μ_s 、 μ_o 分别为模拟和观测系列的均值; σ_s 、 σ_o 分别为模拟和观测系列的标准差。

1.4.2 模拟效果评价

选取以下指标评价CWatM-IITA模型月径流模

拟精度:百分比偏差(P_{bias})、确定性系数(R^2)、均方根误差与观测值标准差之比(RSR)以及纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)。 P_{bias} 反映径流模拟值相对于实测值的平均偏差, R^2 、RSR和NSE分别衡量模拟值与实测值之间的线性相关性、相对偏差和拟合程度。表1为4种指标的评级等级标准与相应的取值范围^[18-19]。

表1 月径流模拟评价指标的分级标准

Table 1 Grading criteria for monthly runoff simulation evaluation indicators

性能等级	P_{bias} 绝对值/%	R^2	RSR	NSE
非常好	<10	>0.85	0~0.5	>0.75~1
良好	10~<15	>0.75~0.85	>0.5~0.6	>0.65~0.75
满意	15~25	>0.6~0.75	>0.6~0.7	>0.5~0.65
不满意	>25	≤0.6	>0.7	≤0.5

2 应用实例

2.1 研究区概况

甘肃省引洮供水工程由洮河九甸峡水利枢纽有坝自流引水,受益区包括兰州市榆中县,白银市会宁县,平凉市静宁县,天水市秦安县、甘谷县、武山县,以及定西市临洮县、安定区、渭源县、陇西县、通渭县,涵盖5个市辖区的11个设计供水县(区)。工程设计年引水量5.5亿 m^3 ,总干渠设计引水流量32 m^3/s ,加大流量36 m^3/s 。自2015年8月通水以来,工程供水量逐年增加,已成为受益区的主要水源之一。结合引洮供水工程的总体布置情况,在洮河、宛川河、祖厉河和渭河流域(北道以上)内进行水文建模。研究区内行政区划、河流水系和站点分布等情况如图3所示。水源区位于黄河上游一级支

流——洮河中上游,属高原山地气候,集水面积约 17 173 km²,年均气温 1.5~3.7℃,年降水 500~840 mm。受水区位于黄土高原丘陵沟壑区,地处温带大陆性气候与温带季风气候交界处,面积约 28 822 km²,年均气温 5.0~7.6℃,年降水 300~550 mm,气候干旱,产流少,水资源自然禀赋差。研究区汛期降水集中在 5—10 月,约占全年降水的 85%,同期径流占全年径流的 70%~90%,枯水期水量严重短缺,水资源时空分布不均。

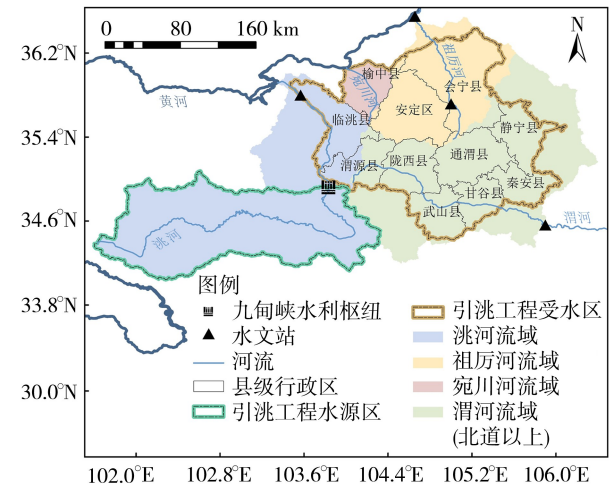


图 3 研究区概况
Fig. 3 Overview of study region

2.2 模型构建

2.2.1 数据输入

CWatM-IITA 模型构建需要输入的数据主要包括:GSWP3-W5E5 数据集^[20-21]提供 1971—2019 年空间分辨率为 0.5°的日气象数据;由全球水文数据集 MERIT Hydro IHU^[22]与高精度 MERIT Hydro 数据集^[23]提供 5'空间分辨率的高程数据以及河道参数、子网格地形等信息;1956—2022 年红旗、北道、靖远和会宁等站点的实测径流数据由甘肃省水利科学研究院提供;IIASA (<ftp://rcwadm: Water1090@ftp.iiasa.ac.at/>) 提供年尺度 5'×5'网格内土地利用情况与覆被信息;耕地灌溉面积来源于 1991—2022 年《甘肃省水资源公报》;5'空间分辨率的土壤及其水力特性数据来源于世界土壤数据库 HWSD (Harmonized World Soil Database) 和 Rosetta3 模型^[24];IIASA 提出的 WFaS (Water Futures and Solutions) 倡议^[25]提供 5'空间分辨率的月尺度需水数据;渠道输水能力、11 个核心受水县(区)的设计年引水量及其年内分配等信息来源于引洮供水工程设计运行规划和 2020—2023 年取水量统计成果。

2.2.2 模型校验与适用性评价

综合考虑模拟精度、数据获取难度与模型运行

时间,CWatM-IITA 模型以日为时间步长,空间分辨率设为 5'。结合引洮供水工程的建设运行情况,模型的模拟期设定为 1961—2014 年,其中自旋期为 1961—1975 年,率定期为 1990—2014 年,检验期为 1976—1989 年。

祖厉河属季节性河流,靖远站多年平均流量仅为 2.76 m³/s,枯水期流量常年低于 1 m³/s,且有断流现象,河道流量受外源生态补水的影响显著,因此根据实测流量对模拟得到的流域内来水量进行修正。宛川河流域暂无实测径流资料,参数取默认值。表 2 统计了洮河流域红旗站和渭河流域北道站月径流模拟结果的评价指标值及对应的评价等级。图 4 为率定期和检验期的站点模拟月径流与实测月径流过程线及拟合散点图。

表 2 CWatM-IITA 模型月径流模拟结果评价
Table 2 Evaluation of CWatM-IITA simulated

monthly discharge					
模拟时段	评价指标	红旗站		北道站	
		评价指标值	评价等级	评价指标值	评价等级
率定期	KGE'	0.89		0.72	
	P _{bias}	-0.09%	非常好	-9.82%	非常好
	R ²	0.89	非常好	0.73	满意
	RSR	0.46	非常好	0.68	满意
	NSE	0.80	非常好	0.52	满意
检验期	KGE'	0.80		0.56	
	P _{bias}	-18.50%	满意	-33.32%	不满意
	R ²	0.92	非常好	0.71	满意
	RSR	0.46	非常好	0.74	不满意
	NSE	0.78	非常好	0.39	不满意

CWatM-IITA 模型在洮河流域的模拟精度较高,模型适用性好。率定期和检验期内,红旗站月径流模拟的 NSE 分别为 0.80 和 0.78,所有指标性能等级基本达到非常好。率定期拟合散点均匀分布在 1:1 线两侧,P_{bias} 仅-0.09%。检验期径流模拟值与实测值的线性相关性略高于率定期,但洪峰流量的模拟值偏小。CWatM-IITA 模型在渭河流域具有一定的适用性,但流域产水不丰,从远期来看模拟精度因受下垫面条件和人类活动变化的扰动而降低。率定期内,渭河流域北道站的月径流模拟达到精度要求,评价指标的性能等级处于满意~非常好之间。检验期内径流模拟值与实测值的 R²>0.7,二者的线性相关性与率定期相当,但其平水期和丰水期流量的模拟值偏小。

2.2.3 情景设置

以 2020 年为现状水平年,围绕不同干旱频率对应的典型年气候条件和跨流域调水工程条件组合成 9 个情景(表 3)。

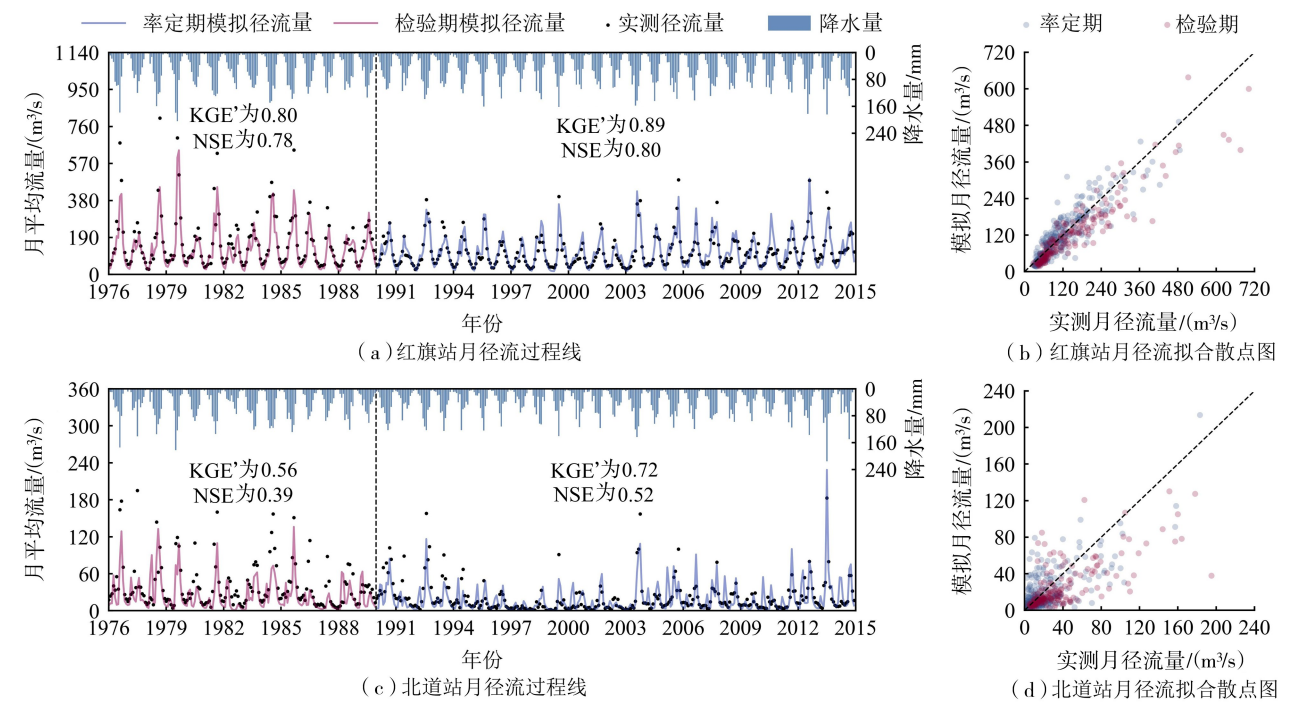


图 4 CWatM-IITA 模型模拟月径流校验结果

Fig. 4 Calibration and validation results of CWatM-IITA simulated monthly discharge

表 3 CWatM-IITA 模型情景设置

典型年气候条件	有无调水	外调水用水优先级	情景代码
N	ND		N-ND
	WD	B	N-WD-B
		R	N-WD-R
MD	ND		MD-ND
	WD	B	MD-WD-B
		R	MD-WD-R
SD	ND		SD-ND
	WD	B	SD-WD-B
		R	SD-WD-R

a. 典型年气候条件。基于站点实测径流数据进行排频,选取来水频率约为 50% 的年份作为平水年(N),根据《全国抗旱规划》,以年内来水对用水较为不利且能代表区域干旱特性的年份为标准,来水频率为 50%~75% 的年份对应轻度干旱年(MD),90%~95% 的年份对应严重干旱年(SD)。

b. 跨流域调水工程条件。考虑无调水(ND)和有调水(WD)两类情况。有调水情况下通过调整外调水水源面向多用水户的供用水约束条件,设置两种供用水优先级情形:外调水作为所有用水户的备用水源(B)、置换所有用水户的地下水取水(R)。

3 结果与分析

3.1 跨流域调水对供水格局的影响

选取 3 种典型年气候条件:2005 年代表平水年,2006 年代表轻度干旱年,1997 年代表严重干旱

年。为研究引洮供水工程对研究区供水格局的影响,设置 3 个情景对照组:N-ND 和 N-WD-B、MD-ND 和 MD-WD-B、SD-ND 和 SD-WD-B,分析不同典型年气候条件下跨流域调水对水资源供需关系及其时空变化的影响。

3.1.1 居民生活用水

3 组对照情景下居民生活需水量与缺水率的时空分布情况如图 5 所示。

引洮供水工程受水区 2020 年居民生活需水总量为 1.79 亿 m^3 ,其中安定、甘谷和渭源需水量较大,分别为 0.22 亿、0.20 亿、0.11 亿 m^3 。无调水情景下,受水区平水年生活缺水率为 9.3%,其中榆中、会宁和安定分别高达 43.6%、38.2% 和 22.2%,陇西和甘谷约为 2%,其余区县则不足 1%。随着干旱程度的加剧,受水区年缺水率升至 13.4%(MD-ND)和 20.3%(SD-ND)。轻度干旱年条件下,榆中、会宁和安定缺水率较平水年显著上升,达 60.4%、54.3% 和 33.3%。严重干旱年条件下,安定缺水率进一步升至 56.4%,陇西、甘谷和武山约 15%,缺水范围明显扩大。宛川河流域的榆中、祖厉河流域的会宁和安定生活用水缺水状况尤为严重,主要是由于当地地表水和地下水资源严重匮乏,除少部分沿河地区外亟须外调水水源保障基本生活用水。渭河流域的陇西、甘谷和武山严重干旱年生活缺水加剧,主要是干旱加剧导致当地水资源量显著减少,无法满足较大的用水需求。

有调水情景下,受水区年生活缺水率显著下降,

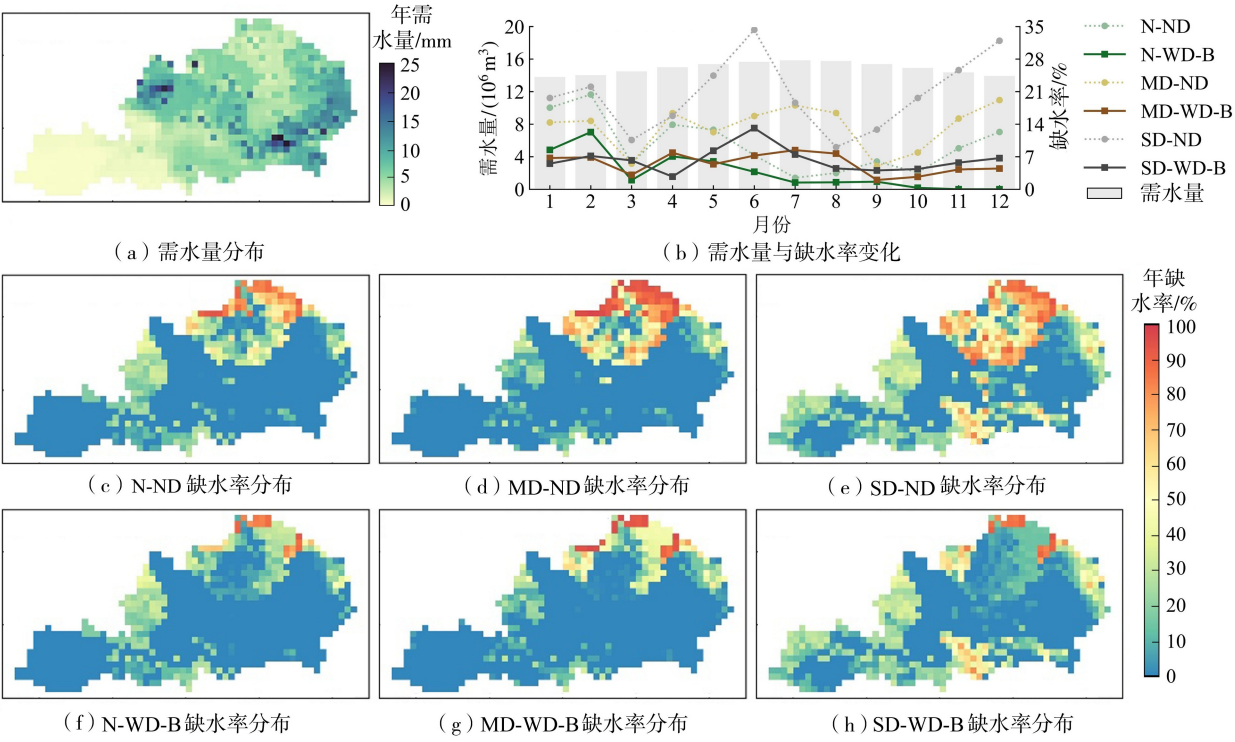


图 5 居民生活需水量与缺水率时空分布模拟结果

Fig. 5 Simulated spatiotemporal distributions of domestic water demand and shortage rate

分别为 3.6% (N-WD-B)、5.6% (MD-WD-B) 和 6.3% (SD-WD-B)。榆中平水年缺水率为 27.9%，干旱年大于 40%，缺水改善效果不理想，主要是由于缺水总量大且当前引洮供水工程干渠及相应配套设施的供水能力相对有限；会宁的缺水改善效果较显著，但由于地下水资源禀赋差，农业补充灌溉需求大，占用了大量外调水资源，生活缺水率仍在 10% 左右；安定、武山和甘谷轻度干旱年缺水率不足 1%，但严重干旱年缺水率分别为 4.3%、7.7% 和 14.1%，其中安定缺水状况的改善最为显著，缺水范围和缺水程度大幅缩减，武山和甘谷严重干旱年生活与灌溉缺水大幅增长，而整体上工程供水保障能力则相对有限；其余区县平水年和轻度干旱年缺水率少于 1%，严重干旱年缺水率稳定在 2% 以下，生活供水得到了有效保障。从年内分布来看，跨流域调水显著降低了受水区生活用水缺水率的峰值，缺水率的波动幅度较无调水情景更小。整体而言，引洮供水工程有效缓解了受水区的生活供水压力，尤其是在轻度干旱条件下，对缺水情况的改善具有显著作用。

3.1.2 工业生产用水

3 组对照情景下工业生产需水量与缺水率的时空分布情况如图 6 所示。

引洮供水工程受水区 2020 年工业生产需水总量为 0.39 亿 m³，其中榆中需水量最大，为 0.16 亿 m³，其余区县均小于 0.05 亿 m³。无调水情景下，受水

区平水年工业缺水率为 28.0%，榆中、安定、会宁和甘谷分别为 60.4%、22.7%、15.3% 和 8.4%，其余区县基本无缺水。随着干旱程度的加剧，受水区年缺水率升至 38.2% (MD-ND) 和 46.6% (SD-ND)。轻度干旱条件下，榆中、会宁和安定缺水率较平水年增长了 15%~20%。严重干旱条件下，榆中、会宁和安定缺水率进一步升至 80.0%、35.4% 和 54.4%，甘谷升至 46.6%，武山、陇西和渭源约 20%，其余区县存在少量缺水但缺水范围明显扩大。受水区工业需水量不大，缺水率大于生活用水，但缺水量较小，缺水地区主要集中在榆中、安定、陇西和甘谷，前两者有限的当地水资源无法满足工业用水需求，后两者当地水资源对气候变化较敏感，干旱加剧时缺水状况更显著。

有调水情景下，受水区年工业缺水率显著下降，分别为 13.7% (N-WD-B)、24.3% (MD-WD-B) 和 27.5% (SD-WD-B)。榆中平水年缺水率为 32.7%，干旱年约 60%，缺水改善效果不理想；会宁干旱年缺水率约 10%，缺水改善相对有限但缺水量较小；甘谷、武山和渭源在平水年和轻度干旱年基本无工业缺水，严重干旱年缺水率分别为 22.7%、14.2% 和 12.7%；其余区县平水年和轻度干旱年缺水率稳定在 1% 以下，严重干旱年少于 2%，工业用水基本得到满足。从年内分布来看，跨流域调水有效缓解了受水区冬季工业缺水状况，减缓了缺水率的波动幅度。整体而言，引洮供水工程有效保障了受水区工

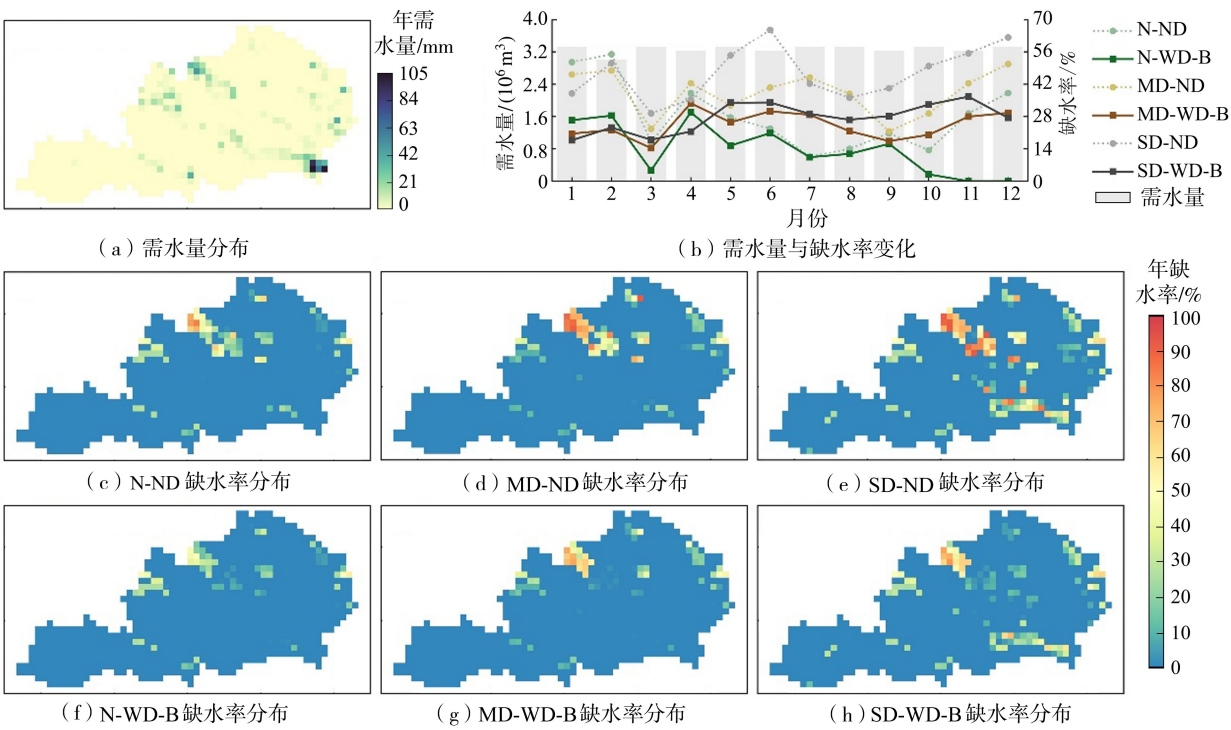


图 6 工业生产需水量与缺水率时空分布模拟结果

Fig. 6 Simulated spatiotemporal distributions of industrial water demand and shortage rate

业用水,除榆中外各区县的工业缺水量较小,且随着干旱程度的加剧,缺水量增幅有限。

3.1.3 农业灌溉用水

3 组对照情景下农业灌溉需水量与缺水率的时空分布情况如图 7 所示。

平水年条件下,受水区 2020 年农业补充灌溉需水总量为 5.61 亿 m^3 ,并随着干旱程度的加剧增至 6.50 亿 m^3 (MD-ND)和 9.45 亿 m^3 (SD-ND),其中榆中需水量最大,为 2.0 亿~2.6 亿 m^3 ,会宁次之,为 1.0 亿~1.4 亿 m^3 ;安定、陇西、甘谷和武山介于 0.4 亿~1.4 亿 m^3 之间;其余区县均小于 0.5 亿 m^3 。无调水情景下,受水区平水年灌溉缺水率为 63.3%,其中秦安无缺水;榆中缺水率高达 81.1%;安定、渭源、会宁和通渭在 50%~65%之间;其余区县介于 30%~45%之间。随着干旱程度的加剧,受水区年缺水率升至 72.5%(MD-ND)和 81.3%(SD-ND)。轻度干旱条件下,榆中、安定、会宁和陇西缺水率较平水年显著上升,分别达到 92.3%、82.7%、72.6%和 59.1%。严重干旱条件下,榆中、安定和会宁缺水率进一步升至 96.9%、89.6%和 86.4%;通渭、甘谷、渭源、武山和秦安的缺水范围有所扩大,缺水率也攀升至 91.6%、83.8%、83.4%、76.4%和 43.9%,且甘谷、武山和秦安较轻度干旱增幅超过 40%。灌溉需水占受水区需水总量的 70%~80%,需求量大且时空分布不均,其更强的气候敏感性、更高的供水技术成本、更低的供水优先级

与用水弹性加剧了缺水状况,缺水空间分布呈现出更显著的区域性差异。除地处洮河流域的临洮、地处渭河流域且灌溉需水较少的秦安与静宁外,灌溉缺水问题在农业区广泛分布,特别是在榆中、会宁、安定、甘谷和武山尤为突出。

有调水情景下,受水区年灌溉缺水率降至 26.5%(N-WD-B)、33.0%(MD-WD-B)和 47.0%(SD-WD-B)。榆中的缺水状况改善不大,严重干旱缺水率仍超 80%,缺水量高达 2.30 亿 m^3 ;甘谷平水年和轻度干旱缺水率约 5%,武山和渭源在 20%~30%之间,且缺水量均不足 0.1 亿 m^3 ,但严重干旱缺水率均超过 55%,表明引洮供水工程虽然有效改善了当地灌溉条件,但其供水保障能力相对有限;安定、陇西和会宁的缺水状况得到显著改善,严重干旱缺水率分别降至 6.2%、5.7%和 2.6%;通渭、临洮、静宁和秦安缺水率稳定在 5%以下,且缺水量不超过 0.01 亿 m^3 ,灌溉供水得到了有效保障。从年内分布来看,受水区春灌需水量大,缺水高峰却通常出现在秋冬季,且干旱条件下 10—12 月缺水未得到有效缓解。整体而言,当前引洮供水工程对受水区灌溉缺水状况有所改善,但其改善效果相对有限,水资源禀赋不佳、灌溉需水量较大且对干旱程度敏感性较高的地区供水保障仍显不足,亟待加快相应旱作农业灌区建设,提升工程配套能力。

3.2 跨流域调水对水资源时空分布模式的影响

利用外调水置换地下水取水并退减部分地下水

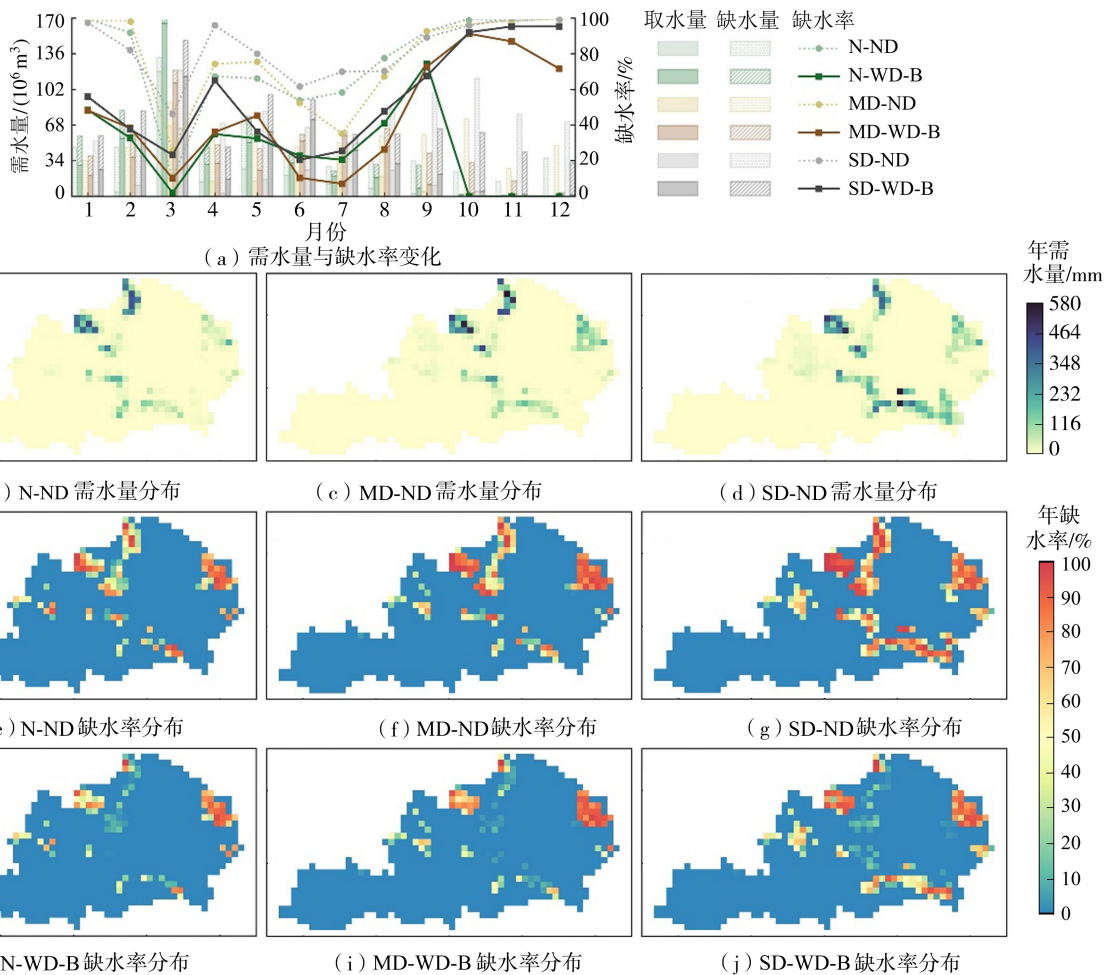


图 7 农业灌溉需水量与缺水率时空分布模拟结果

Fig. 7 Simulated spatiotemporal distributions of irrigation water demand and shortage rate

开采量,是促进受水区地下水回补和恢复、改善生态环境的有效途径。部分外调水通过输水渠道直接被用水户消耗,剩余部分则以退水形式进入河道和地下含水层,参与水循环过程并影响水循环要素的转化过程,从而改变水资源量的时空分布模式,具体表现为河川径流量和地下水补给量的变化。设置 N-ND 和 N-WD-R、MD-ND 和 MD-WD-R、SD-ND 和 SD-WD-R3 个情景对照组,分析不同典型年气候条件下跨流域调水对地表水资源量、地下水资源量及其时空分布的影响,旨在探讨引洮供水工程能否在改善受水区缺水状况的同时有效提升当地的水资源禀赋。

3.2.1 地表水资源量

3 组对照情景下 11 个受水县(区)的地表水资源量统计结果见表 4。图 8 为不同情景下的地表水资源量时空分布情况。

水源区逐年更新的河川径流量明显大于受水区。无调水情景下,受水区平水年地表水资源量约 9.11 亿 m^3 ,其中临洮为 1.57 亿 m^3 ,洮河从临洮西部自南向北汇入黄河,其沿河地区的地表水资源禀

表 4 受水区年地表水资源量模拟结果统计

Table 4 Statistics of simulated annual surface water quantity of water receiving area

行政区划	地表水资源量/ $10^6 m^3$					
	N-ND	N-WD-R	MD-ND	MD-WD-R	SD-ND	SD-WD-R
榆中县	43	52	21	28	8	16
会宁县	108	156	49	84	40	54
渭源县	77	78	44	45	27	29
临洮县	157	157	108	108	63	63
安定区	69	94	48	66	24	48
陇西县	77	88	37	47	30	48
通渭县	108	108	57	58	33	40
甘谷县	54	54	46	47	16	21
武山县	70	70	47	47	22	27
秦安县	81	81	65	65	28	28
静宁县	67	67	35	35	25	26
受水区	911	1006	556	630	317	401

赋最佳;祖厉河自南向北贯穿会宁全境,通渭则靠近渭河干流(北道站以上河段)下游,二者地表水资源也较为丰富,年水资源量均为 1.08 亿 m^3 ;地处宛川河流域的榆中地区地表水资源最少,仅为 0.43 亿 m^3 。随着干旱程度的加剧,受水区地表水资源量分别降至 5.56 亿 (MD-ND)、3.17 亿 m^3 (SD-

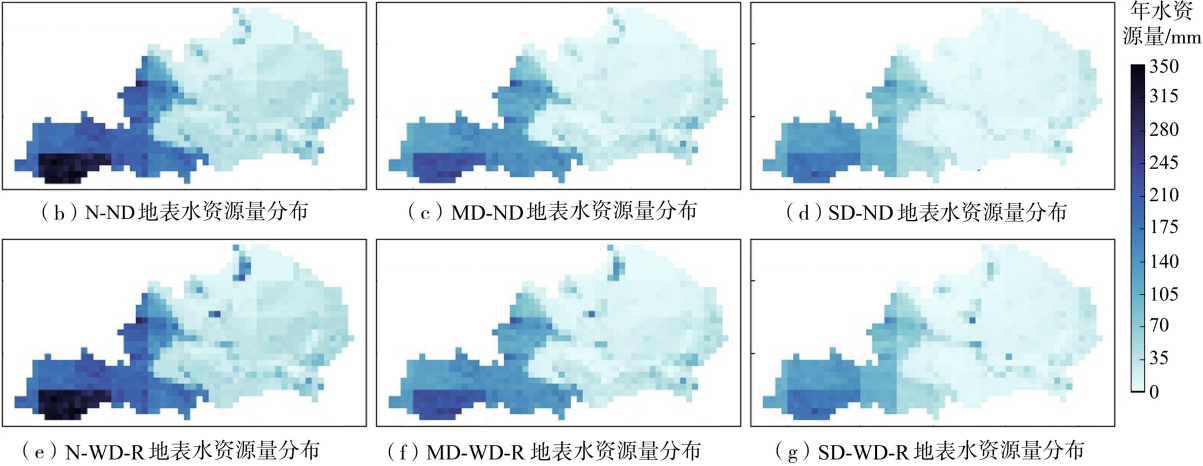
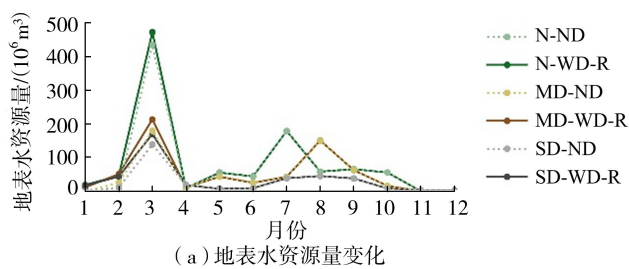


图 8 地表水资源量的时空分布模拟结果

Fig. 8 Simulated spatiotemporal distributions of surface water quantity

ND),表明受水区地表水资源对于干旱的高度敏感性。在严重干旱年条件下,受水区地表水资源量的空间分布差异有所减小,全区域在极端干旱情况下面临的水资源压力或将进一步趋同。

有调水情景下,受水区地表水资源量显著增加,分别达 10.06 亿(N-WD-R)、11.97 亿(MD-WD-R)、8.81 亿 m^3 (SD-WD-R)。其中渭源、临洮、秦安和静宁地表水资源量受调水影响很小;甘谷、武山和通渭在平水年及轻度干旱年地表水资源量基本不受调水影响,严重干旱年条件下的增幅介于 0.05 亿~0.07 亿 m^3 之间;榆中的地表水资源量年增幅约 0.08 亿 m^3 ;会宁、安定和陇西地表水资源量显著增加,平水年增幅分别为 0.48 亿、0.25 亿、0.11 亿 m^3 ,轻度干旱年为 0.35 亿、0.18 亿、0.10 亿 m^3 ,严重干旱年为 0.14 亿、0.24 亿、0.18 亿 m^3 。从空间分布来看,跨流域调水对地表水资源量的增幅主要集中在外调水对农业灌溉供水最大的会宁、安定和陇西。从年内分布来看,地表水资源量的增幅主要集中在 2—3 月,跨流域调水有效缓解了受水区冬春季供水,尤其是春灌补水的压力。

3.2.2 地下水资源量

3 组对照情景下 11 个受水县(区)地下水资源的统计结果见表 5。图 9 为不同情景下的地表水资源量时空分布情况。

表 5 受水区年地下水资源量的模拟结果统计

Table 5 Statistics of simulated annual groundwater quantity of water receiving area

行政 区划	地下水资源量/ 10^6 m^3					
	N-ND	N-WD-R	MD-ND	MD-WD-R	SD-ND	SD-WD-R
榆中县	7	7	2	2	1	1
会宁县	9	10	3	4	4	5
渭源县	129	129	111	112	48	49
临洮县	219	219	151	151	95	95
安定区	14	14	6	7	3	3
陇西县	36	36	27	28	8	9
通渭县	36	36	20	20	10	11
甘谷县	29	30	21	22	5	5
武山县	24	25	21	22	4	4
秦安县	56	56	39	39	17	17
静宁县	33	34	22	22	13	13
受水区	592	594	424	428	207	213

洮河流域东部与渭河(北道站以上河段)下游地区的地下水资源量显著大于其他区域,这主要得益于丰富的地下水补给来源,如直接降水和河床渗漏等。此外,较厚的土壤含水层渗透能力较强,可有效蓄存水分并促进地下水补给。受水区平水年地下水资源量约 5.92 亿 m^3 ,其中临洮最大,为 2.19 亿 m^3 ;渭源次之,为 1.29 亿 m^3 ;而榆中和会宁最小,均不足 0.1 亿 m^3 。在轻度干旱年和严重干旱年条件下,受水区地下水资源量降至 4.24 亿(MD-ND)、2.07 亿 m^3 (SD-ND)。

有调水情景下,受水区地下水资源量略有增加,

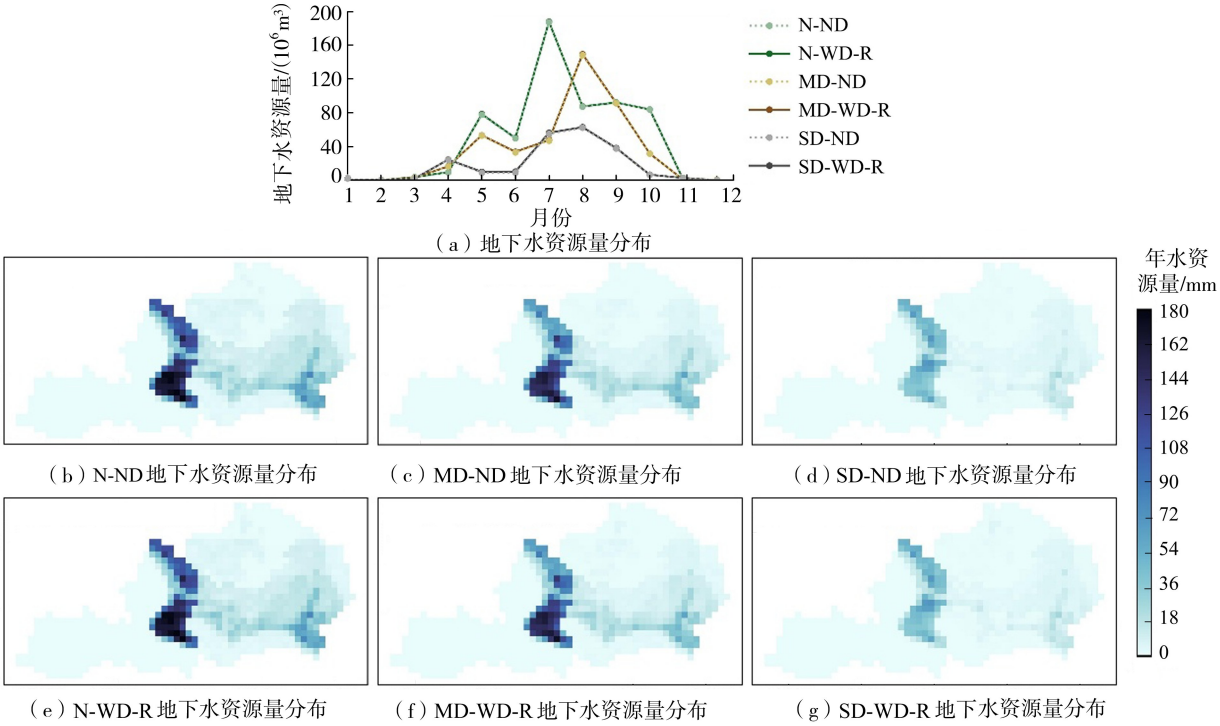


图 9 地下水资源量的时空分布模拟结果

Fig. 9 Simulated spatiotemporal distributions of groundwater quantity

分别达到 5.94 亿 (N-WD-R)、4.28 亿 (MD-WD-R) 和 2.13 亿 m^3 (SD-WD-R)。地下水资源量的增幅主要集中在会宁、渭源、陇西和武山,但不足 0.01 亿 m^3 。整体而言,跨流域调水对地下水资源量时空分布模式的影响十分有限,原因在于当前引洮供水工程供水能力相较于受水区缺水总量仍有不足,从而未能对地下水开采量起到显著的退减作用。

4 结 论

a. 本文耦合了分布式水文模型 CWatM 与跨流域水资源调配模块,构建了分布式跨流域水资源调配综合模拟模型 CWatM-IITA。CWatM-IITA 模型通过天然水循环过程与水资源调配过程之间的动态互馈,以及水源区与受水区之间、水资源配置单元之间以及不同时序断面之间的跨尺度信息交互,实现了水资源调配过程及其水循环路径的模拟。

b. 以甘肃省引洮供水工程为例开展应用研究,结果表明,受水区生活供水优先级高,工业需水相对较少,工程在保障生活和工业供水方面成效显著,有效缓解了秋冬缺水状况。受水区灌溉需水占总需求的 70%~80%,用水需求量大且时空分布不均,其更强的气候敏感性、更高的供水技术成本、更低的供水优先级与用水弹性加剧了缺水状况,且改善效果相对有限。严重干旱条件下,受水区生活缺水率由 22.2% 降至 6.3%,工业缺水率由 46.6% 降至 27.5%,

灌溉缺水率由 81.3% 降至 47.0%。

c. 跨流域调水工程提升受水区供水保障的程度与受水区本地水资源禀赋及气候敏感性有关。对于需水量较大的地区,水资源禀赋越差、气候敏感性越高,引调水工程对缺水的改善效果越有限。地处宛川河流域的榆中水资源禀赋差,工业和灌溉需水量极大,平水年总缺水率由 77.9% 降至 57.6%,严重干旱年由 94.0% 降至 80.8%。

d. 跨流域调水显著增加了受水区地表水资源量且主要集中在外调水对灌溉供水量较大的地区,对地下水资源量时空分布模式的影响则十分有限。受水区严重干旱年地表水资源量增加 0.84 亿 m^3 ,主要集中在灌溉供水量最大的会宁、安定和陇西。

e. 引洮供水工程建设有效缓解了受水区水资源供需矛盾。在相应配套工程发挥效益的区域,水资源支撑经济社会发展的能力有所提升,供水保障能力及其对干旱的适应性进一步增强。但在区域经济社会发展水平和配套工程建设不均衡的限制下,部分区域的水资源支撑能力特别是在旱作农业补充灌溉方面发挥欠佳,亟待加快配套工程建设,综合发挥工程效益。

参考文献:

[1] ALLAN R P, BARLOW M, BYRNE M P, et al. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle

- to climate change[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2020, 1472(1): 49-75.
- [2] CHIANG F, MAZDIYASNI O, AGHA KOUGHAK A. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2754.
- [3] 谢灵枫, 杨肖丽, 吴凡, 等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 10-17. (XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese)).
- [4] HUANG Jianping, YU Haipeng, GUAN Xiaodan, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [5] GUO Xuning, HU Tiesong, ZHANG Tao, et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 424-425: 252-263.
- [6] 闻昕, 黄抒艺, 谭乔凤, 等. 江苏省南水北调多工程多目标联合优化调度方法[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 118-124. (WEN Xin, HUANG Shuyi, TAN Qiaofeng, et al. A multi-objective joint optimal operation method for the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 118-124. (in Chinese)).
- [7] MURGATROYD A, HALL J W. The resilience of inter-basin transfers to severe droughts with changing spatial characteristics[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 571647.
- [8] 贾丹妮, 武连洲, 栗晓玲, 等. 跨流域调水工程“用户枢纽”群联合优化调配[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 188-197. (JIA Danni, WU Lianzhou, SU Xiaoling, et al. Joint optimization and allocation model of “user-hub” group in inter-basin water transfer project [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 188-197. (in Chinese)).
- [9] 裴源生, 赵勇, 张金萍. 广义水资源合理配置研究(I): 理论[J]. *水利学报*, 2007(1): 1-7. (PEI Yuansheng, ZHAO Yong, ZHANG Jinping. Study on rational deployment of generalized water resources: I-theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007(1): 1-7. (in Chinese)).
- [10] 陈强, 秦大庸, 苟思, 等. SWAT模型与水资源配置模型的耦合研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 19-22. (CHEN Qiang, QIN Dayong, GOU Si, et al. Research of the coupling of SWAT model and water allocation model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 19-22. (in Chinese)).
- [11] 曾思栋, 夏军, 黄会勇, 等. 分布式水资源配置模型DTVGM-WEAR的开发及应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 1-6. (ZENG Sidong, XIA Jun, HUANG Huiyong, et al. Development and application of distributed water resources allocation model: DTVGM-WEAR [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(3): 1-6. (in Chinese)).
- [12] 甘肃省引洮供水一期工程初步设计报告(GSY-2006CS-020-1)[R]. 甘肃: 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 2020.
- [13] BUREK P, SATOH Y, KAHIL T, et al. Development of the community water model (CWatM v1. 04): a high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(7): 3267-3298.
- [14] POKHREL Y, FELFELANI F, SATOH Y, et al. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 226-233.
- [15] CHENG Wenju, FENG Qi, XI Haiyang, et al. Modeling and assessing the impacts of climate change on groundwater recharge in endorheic basins of northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: 170829.
- [16] LONG Di, YANG Wenting, SCANLON B R, et al. South-to-North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater levels[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3665.
- [17] KLING H, FUCHS M, PAULIN M. Runoff conditions in the upper Danube Basin under an ensemble of climate change scenarios[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 424-425: 264-277.
- [18] MORIASI D N, GITAU M W, PAI N, et al. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria[J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58: 1763-1785.
- [19] MORIASI D N, ARNOLD J G, LIEW M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50: 885-900.
- [20] KIM H. Global soil wetness project phase 3 atmospheric boundary conditions (experiment 1) [Data set]. *Data Integration and Analysis System (DIAS)* [EB/OL]. [2024-09-24]. <https://doi.org/10.20783/DIAS.501>.
- [21] CUCCHI M, WEEDON G P, AMICI A, et al. WFDE5: bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 2097-2120.

(3): 9-13. (XIA Jihong, QIN Ruzhao, DOU Chuanbin. et al. Habitat suitability assessment model and suitability grading classification for fishes in small and medium rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 9-13. (in Chinese))

[26] 闫肖瑶, 杨泽凡, 曾庆慧, 等. 流速-水温对草鱼生殖洄游的交互作用实验研究[J/OL]. 水生态学杂志, 2023: 1-10 [2024-09-20]. DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 202306190163. (YAN Xiaoyao, YANG Zefan, ZENG Qinghui, et al. Experimental study on the interaction of flow velocity and water temperature on the grass carp reproductive migration [J/OL]. Journal of Hydroecology, 2023: 1-10 [2024-09-20]. DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 202306190163. (in Chinese))

[27] 谭燕平, 王玉蓉, 李嘉, 等. 雅砻江锦屏大河湾减水河段中鱼类栖息地模拟研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(3): 40-43. (TAN Yanping, WANG Yurong, LI Jia, et al. [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(3): 40-43. (in Chinese))

[28] 邓月曦, 唐锡良, 严忠奎, 等. 齐口裂腹鱼上溯洄游过程中的感官圈解译研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3882-3889. (DENG Yuexi, TANG Xiliang, YAN Zhongluan, et al. Interpretation of sensory query distance during upstream migration of Schizothorax prenanti [J]. China Environmental Science, 2022, 42(8): 3882-3889. (in Chinese))

[29] 朱天然, 孙林, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼集群行为对流态的响应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 144-150. (ZHU Tianran, SUN Lin, Li Jia, et al. Response of the behavior of the Schizothorax prenati to the flow pattern [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 144-150. (in Chinese))

[30] 刘小帆. 高坝过鱼设施集诱鱼流态营造与生境适宜性评价[D]. 成都: 四川大学, 2021.

[31] LIU Shikang, JIAN Yuxang, LI Pengcheng, et al. Optimization schemes to significantly improve the upstream migration of fish: a case study in the lower Yangtze River Basin [J]. Ecological Engineering, 2023, 186: 106838.

[32] 张辉, 莫康乐, 李婷, 等. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对草鱼江湖洄游潜在的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 600-610. (ZHANG Hui, MO Kangle, LI Ting, et al. The potential influence of the Poyang Lake Hydraulic Project construction on river-lake migration of grass carp [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 600-610. (in Chinese))

[33] 廖磊, 安瑞冬, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼趋流行为的水力学特性研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 69-72. (LIAO Lei, AN Ruidong, LI Jia, et al. Study on hydraulic characteristics of Schizothorax prenantis rheotaxis behavior [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 69-72. (in Chinese))

[34] 谢春航, 安瑞冬, 李嘉, 等. 鱼道进口布置方式对集诱鱼水流水力学特性的影响研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(增刊2): 25-32. (XIE Chunhang, AN Ruidong, LI Jia, et al. Study on the influence of fishway entrance layout mode on hydraulic characteristics of fish luring flow [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(Sup2): 25-32. (in Chinese))

[35] 甄婉月, 王晓松, 穆祥鹏, 等. 基于坝下流场模拟的集鱼系统进口位置选择研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 204-211. (ZHEN Wanyue, WANG Xiaosong, MU Xiangpeng, et al. Study on the optimal positioning of fish collection system based on numerical simulation of reservoir downstream [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(3): 204-211. (in Chinese))

[36] 肖洋, 刘扬扬, 王中敏, 等. 引调水工程对汉江中下游水文情势累积影响研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 169-178. (XIAO Yang, LIU Yangyang, WANG Zhongmin, et al. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 169-178. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 21 编辑: 胡新宇)

(上接第 243 页)

[22] EILANDER D, VAN VERSEVELD W, YAMAZAKI D, et al. A hydrography upscaling method for scale-invariant parametrization of distributed hydrological models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(9): 5287-5313.

[23] YAMAZAKI D, IKESHIMA D, SOSA J, et al. MERIT Hydro: a high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset [J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 5053-5073.

[24] ZHANG Y, SCHAAP M G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3) [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 39-53.

[25] WADA Y, FLÖRKE M, HANASAKI N, et al. Modeling global water use for the 21st century: the water futures and solutions (WFaS) initiative and its approaches [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(1): 175-222.

(收稿日期: 2024 - 12 - 18 编辑: 胡新宇)