

引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响

肖 洋,刘扬扬,王中敏,王 孟

(长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051)

摘要:为识别引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响,通过设置 3 种不同预测情景,采用一维水动力学模型,分析了引调水工程实施和汉江中下游 7 个梯级枢纽联合运行下的流量、流速演变特征和趋势。结果表明:南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北地区水资源配置、引江济汉等工程调水后,汉江中下游径流过程减水和坦化明显,流速减小,典型平水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均流量分别减少 38%、28%、18%,年均流速分别降低 9%、9%、3%,典型枯水年年均流量分别减少 27%、22%、1%,年均流速分别降低 13%、8%、1%。叠加引江补汉工程影响后,引调水工程的不利累积影响微弱,典型平水年黄家港、黄庄、仙桃断面年均流量和流速减幅基本不变,典型枯水年黄家港、皇庄断面年均流量降幅变为 16%、12%,年均流速降幅变为 4%、3%,仙桃断面年均流量和流速则由减少状态变为增加 4%和 2%;典型枯水年黄家港、皇庄、仙桃断面枯水期流量最大增幅分别由 139%、97%、160%增加至 201%、146%、173%,改善了枯水期水动力条件,使黄家港断面最小下泄流量满足程度由情景一的 75%逐步提升至情景二的 94%和情景三的 98%;汉江中下游仍面临水量减少带来的部分时段最小下泄流量和敏感期生态流量难以保障、水华现象仍可能发生等生态环境风险,建议统筹考虑引调水工程对水文情势的累积影响,研究提出汉江中下游生态流量调度方案。

关键词:引调水工程;引江补汉工程;水文情势;生态流量;水量调度;汉江中下游

中图分类号:TV67;TV68 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0161-10

Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River//XIAO Yang, LIU Yangyang, WANG Zhongmin, WANG Meng(*Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China*)

Abstract: To identify the cumulative influence of water diversion projects on the hydrological regime in the middle and lower reaches of the Hanjiang River, by setting up three different prediction scenarios and using a one-dimensional hydrodynamic model, the evolution characteristics and trends of flow and velocity under the joint operation of water diversion projects and seven cascade hubs in the middle and lower reaches of the Hanjiang River were analyzed. The results show that after the water diversion projects such as the first phase of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, the Hanjiang River-to-Weihe River Diversion Project, the Water Resources Allocation in Northern Hubei Province, and the Water Diversion Project from Yangtze River to Hanjiang River, the runoff process in the middle and lower reaches of the Hanjiang River has been significantly reduced and leveled. In typical normal years, the annual average flow at Huangjiagang, Huangzhuang and Xiantao sections decrease by 38%, 28% and 18% respectively, and the annual average velocity decrease by 9%, 9% and 3% respectively. In typical dry years, the annual average flow at Huangjiagang, Huangzhuang and Xiantao sections decrease by 27%, 22% and 1% respectively, and the annual average velocity decrease by 13%, 8% and 1% respectively. After superimposing the influence of the Water Diversion Project from the Three Gorges Reservoir to the Hanjiang River, the cumulative adverse effects of the water diversion project are weak. In typical normal years, the reduction rate of average annual flow and velocity at Huangjiagang, Huangzhuang and Xiantao sections remain basically unchanged. In typical dry years, the average annual flow at Huangjiagang and Huangzhuang sections decrease by 16% and 12% respectively, and the average annual velocity decrease by 4% and 3% respectively. The average annual flow and velocity at Xiantao section change from a decreasing state to an increasing state of 4% and 2%, respectively. The maximum increases in flow during the dry seasons in typical dry years at the Huangjiagang, Huangzhuang, and Xiantao sections increase from 139%, 91%, 160% to 201%, 146%, and 173%, respectively, improving the hydrodynamic conditions, and making probability of flow larger than the minimum discharge flow at Huangjiagang section increasing from 75% in Scenario One to 94% in Scenario Two and 98% in Scenario Three. The middle and lower reaches of the Hanjiang

基金项目:国家自然科学基金项目(52109005)
作者简介:肖洋(1989—),男,高级工程师,博士,主要从事水环境模拟研究。E-mail:xiaoyang198990@outlook.com

River still face ecological and environmental risks such as the difficulty in ensuring the minimum discharge flow in some periods and the ecological flow during the sensitive period due to the reduction in water volume, and the possible occurrence of algal blooms. It is suggested to study and propose an ecological flow dispatching plan for the middle and lower reaches of the Hanjiang River by comprehensively considering the cumulative influence of water diversion projects on hydrological conditions.

Key words: water diversion project; the Water Diversion Project from the Three Gorges Reservoir to the Hanjiang River; hydrological regime; ecological flow; water dispatch; middle and lower reaches of the Hanjiang River

我国水资源时空分布不均,水资源分布状况和经济社会发展布局不匹配等问题突出,通过实施引调水工程,转移部分丰水地区的水资源以满足缺水地区发展需求,是解决我国水资源矛盾、促进经济社会可持续发展的重要举措。然而,引调水工程的实施将会改变水源及水源下游区水文过程,使补水河湖水文情势发生变化^[1-2],并可能对河道水环境敏感目标造成影响^[3-6]。

汉江是长江最大的支流,以丹江口水库为界,水库坝址以上为汉江上游,水库坝址以下为汉江中下游。汉江中下游是汉江流域乃至湖北省经济发展的中心,分布有多处水产种质资源保护区、鱼类产卵场和湿地公园等涉水环境敏感区。2014 年以来,汉江上游相继建成南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北地区水资源配置(以下简称“鄂北工程”)等跨区域引调水工程,将丹江口水库及以上区域水量引入各工程受水区后,汉江中下游面临水资源减少的问题^[7-9]。为缓解减水对生态环境造成的不利影响,2014 年汉江中下游建成引江济汉工程,将长江干流荆江河段水量引入汉江中下游兴隆水利枢纽以下河段^[10];同时,为提高汉江流域的水资源调配能力,提升南水北调中线工程供水保障能力,目前正在建设引江补汉工程,拟将长江干流三峡库区水量引入丹江口水库坝下汉江干流^[11]。至 2035 年,汉江将形成“上游引水、中下游补水”的水网分布格局,汉江中下游水文情势将主要受控制枢纽、重大引调水工程调度运行的综合影响。为保障区域水生态环境安全,在发挥引调水工程供水效益的同时,兼顾汉江中下游涉水环境敏感目标用水需求,有必要开展引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响研究,为汉江引调水工程科学调度和运行管理提供技术支撑。

引调水工程对水文情势的累积影响识别一般采用对比分析法或模型预测法进行研究。对比分析法利用数理统计方法对引调水工程实施前后流量、水位或流速等水文情势指标的变化程度进行定量分析^[12-13],主要用于引调水工程水文情势影响回顾性评价和后评价研究。例如,黄朝君等^[14]根据实测水文、水质资料,分析了南水北调中线一期工程运行对

汉江丹江口大坝—襄阳区间流量、水位、水质和生态水量的影响,结果表明汉江丹江口大坝—襄阳区间干流河段非汛期流量和水位有所减小。模型预测法采用数学模型对不同引调水工程叠加影响下水文情势指标进行预测分析,主要用于引调水工程调水规模 and 过程等调水方案论证研究^[15-20]。例如,邓志民等^[21]运用 MIKE 模型模拟鄂北工程实施对汉江中下游干流水文情势的影响,结果表明鄂北工程对汉江中下游水文情势影响较小。以上研究重点关注汉江中下游历史水文情势变化分析、单一水利水电工程建设运行的水文情势影响等方面,本文系统考虑南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北、引江济汉、引江补汉和包括丹江口在内的汉江中下游 7 个梯级枢纽联合运行,采用模型预测法分阶段、分典型年、分要素厘清各引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响,深入揭示汉江中下游水文情势的演变趋势与特征。

1 研究区概况

汉江发源于秦岭南麓,干流全长 1 577 km,流域面积 15.9 万 km²,是长江最长的支流。汉江中下游位于 30°N~33°N、111°E~115°E,河长 652 km,集水面积 6.4 万 km²,控制水文站皇庄站多年平均径流量约 467 亿 m³。汉江中下游地区地势西北高,东南低,具有高山、丘陵、平原、湿地等多种地貌类型,河流密布、沟壑交织,主要支流有南河、北河、唐白河(唐河、北河汇流河段同称为唐白河)、小清河、蛮河、竹皮河、汉北河等。汉江中下游自上而下规划有丹江口、王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山、兴隆 7 个梯级枢纽,其中丹江口水库为多年调节水库,其他梯级枢纽为日调节或调节性能较弱;目前新集、碾盘山水利枢纽在建,其他梯级枢纽均已建成。研究区主要引调水工程分布如图 1 所示。

汉江水质优良,是南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北工程等跨区域引调水工程的水源地。南水北调中线一期工程的水源地为丹江口水库,工程建成通水以来,已累计向北京、天津、河南、河北等受水区调水超过 600 亿 m³,直接受益人口超过 1.08 亿人。引江济汉工程是南水北调中线一期工程的配套工程,从长江引水补给汉江兴隆水利枢纽至河口段

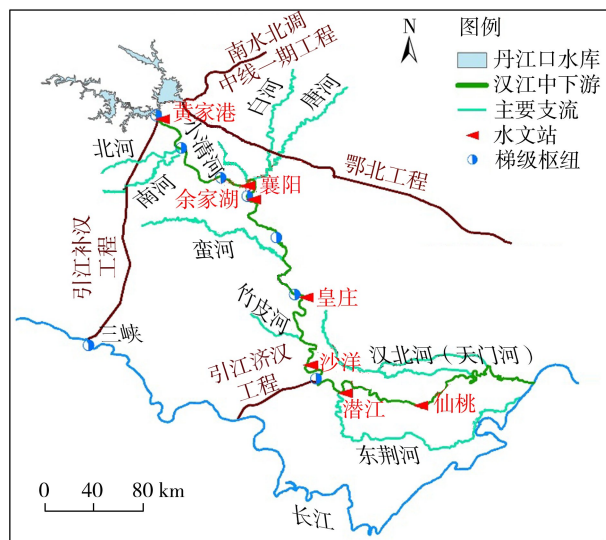


图1 研究区引调水工程分布

Fig.1 Distribution of water diversion projects in study area

和东荆河灌区,以满足该河段灌溉、航运和生态用水需求,并解决东荆河灌区的灌溉水源问题;工程设计流量为 $350 \text{ m}^3/\text{s}$,最大流量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$;工程已于2014年建成并运行。引江补汉工程是南水北调中线工程的后续工程,工程取水口位于三峡水库坝前北岸龙潭溪,采用 194.8 km 的输水隧洞引水至丹江口大坝下游约 5 km 的汉江右岸安乐河口,渠首设计流量 $170 \sim 212 \text{ m}^3/\text{s}$,向汉江中下游多年平均补水量 36.0 亿 m^3 ,工程预计2035年建成通水;引江补汉工程建设运行后,联合丹江口水库下泄过程,距丹江口水库坝址下游约 6 km 的黄家港水文站断面径流过程将有所变化。引汉济渭工程在汉江干流黄金峡和支流子午河三河口分别修建水利枢纽蓄水,通过秦岭输水隧洞输水至陕西省渭河流域关中地区;工程采用“一次立项,分期配水”的建设方案,多年平均条件下近期水平年2025年和远期水平年2030年取水规模分别为 10 亿 m^3 和 15 亿 m^3 ;2010年底工程开工建设,2023年7月实现先期通水,使丹江口水库入库径流有所减少。鄂北工程以丹江口水库为水源地,年引水量 13.98 亿 m^3 (含引丹灌区引水量),渠首设计流量 $38 \text{ m}^3/\text{s}$;2015年10月工程开工建设,2021年1月实现全线试通水。

2 模型构建与参数验证

2.1 模型构建

考虑丹江口、王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山、兴隆7个梯级枢纽以及汉江重大引调水工程全部运行,采用一维水动力学模型分析各引调水工程实施对汉江中下游水文情势(流量和流速)的叠加

累积影响,计算时间尺度为分。一维水动力学模型采用圣维南方程组:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/A}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2RA} = \frac{Q}{A} q_1 \quad (2)$$

式中: A 为过流断面面积; t 为时间; Q 为流量; x 为河长; q_1 为旁侧入流; g 为重力加速度; h 为水位; C 为谢才系数; R 为水力半径。

收集丹江口水库坝下汉江干流约 652 km 河道 $1:2000$ 河道大断面地形测量资料,输入 MIKE11 水动力模型。

2013年丹江口水库大坝加高前,汉江中下游水文情势受丹江口水库调蓄作用和引丹灌区引水(清泉沟引水)影响,可作为引调水工程影响预测的背景情景;2014—2023年,丹江口水库大坝加高、引江济汉、南水北调中线一期、鄂北(含清泉沟引水)、引汉济渭工程相继建成,可用于分析已建引调水工程对水文情势的累积影响;2035年南水北调中线一期、引汉济渭工程引水规模进一步扩大,引江补汉工程建成通水,可用于进一步分析引调水工程对水文情势的累积影响以及引江补汉工程对汉江中下游水文情势的影响。因此,考虑汉江流域主要引调水工程建设和规划情况,本文设置3种预测情景:①情景一,丹江口水库大坝加高前(正常蓄水位 157 m),不考虑南水北调中线一期、引汉济渭、引江济汉、引江补汉等工程调水,仅丹江口水库清泉沟引水 6.28 亿 m^3 ;②情景二,丹江口水库大坝加高(正常蓄水位 170 m),考虑引汉济渭工程调水 10 亿 m^3 、南水北调中线一期工程调水 93.4 亿 m^3 、鄂北工程调水 13.98 亿 m^3 (含清泉沟引水)、引江济汉工程调水 31 亿 m^3 ,不考虑引江补汉工程实施;③情景三,丹江口水库大坝加高(正常蓄水位 170 m),考虑引汉济渭工程调水 15 亿 m^3 、南水北调中线一期工程调水 115.1 亿 m^3 、鄂北工程调水 13.98 亿 m^3 (含清泉沟引水)、引江济汉工程调水 31 亿 m^3 、引江补汉工程汉江中下游补水 36 亿 m^3 。

基于丹江口水库坝下黄家港水文站1956—2018年天然流量过程,采用排频法确定50%、90%、95%频率对应的年份分别为典型平水年(1979年)、典型枯水年(1995年)和典型特枯水年(1999年)。各情景分别选择平水年和枯水年2个典型年,共设置6种计算工况。考虑不同情景下丹江口水库调度运行方案变化,调算1956—2018年丹江口水库逐旬下泄流量过程。不同计算工况下,以丹江口水库下泄流量为上边界,以宗关水位为下边界。其中,宗关

水位根据不同情景下上游来流、长江水位顶托和宗关断面水位流量关系曲线计算得到。考虑沿程区间北河、南河、小清河、唐白河、蛮河、竹皮河等主要支流的汇入、沿线主要引排水闸站取退水对汉江中下游径流的影响,以及王甫洲、新集、崔家营、雅口、碾盘山、兴隆 6 个梯级枢纽运行对河道断面地形和局部河段水文情势的影响。

2.2 参数验证

糙率系数是决定水动力模型模拟结果合理性的关键参数。汉江中下游地形复杂,不同河段糙率系数具有差异,其中丹江口坝下至襄阳段糙率系数取 0.05,襄阳至余家湖段糙率系数取 0.029,余家湖至宜城段糙率系数取 0.05,宜城至皇庄段糙率系数取 0.015,皇庄至沙洋段糙率系数取 0.033,沙洋至汉川段糙率系数取 0.015^[22]。为验证上述糙率系数的适用性,采用 2016 年丹江口水库逐日下泄流量以及襄阳水文站、皇庄水文站、沙洋水位站和潜江水文站逐日实测水位数据对一维水动力学模型的糙率系数进行验证。在计算过程中,上述糙率系数为初始值,根据水位模拟值与实测值的差异(绝对平均误差(MAD)、均方根误差(RMSE))对糙率系数进行调整,经反复试算,直至模拟值与实测值符合较好。

当汉江中下游不同河段糙率系数介于 0.020~0.038(表 1)时,襄阳、皇庄、沙洋和潜江水文站实测水位值与模拟值变化过程拟合程度较高,各水文站 MAD 均小于 6.9 cm, RMSE 均小于 10.2 cm(图 2)。

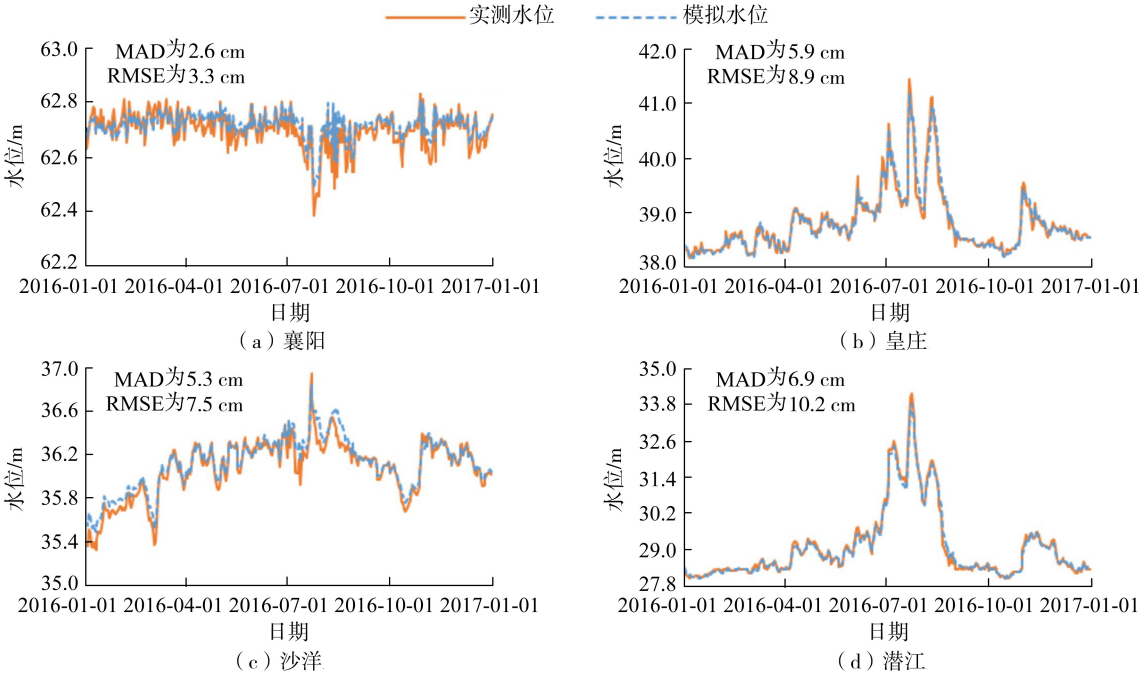


图 2 典型水文站模拟水位与实测水位对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured water levels of typical hydrology stations

表 1 一维水动力模型河床糙率系数
Table 1 Riverbed roughness coefficients of one-dimensional hydrodynamic model

河段	河段长/km	糙率系数
黄家港—王甫洲	23.81	0.032
王甫洲—新集	47.50	0.028
新集—崔家营	61.50	0.020
崔家营—皇庄	129.03	0.025
皇庄—兴隆	97.00	0.027
兴隆—仙桃	140.99	0.028
仙桃—宗关	152.17	0.028

3 结果与分析

3.1 引调水工程对汉江中下游径流的影响

南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北、引江济汉工程以及丹江口水库大坝加高的建设运行,使汉江中下游水文情势呈现年均流量减少、水文过程明显坦化的特性(图 3)。从情景一到情景二,典型平水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均流量分别减少了 375 m³/s (38%)、383 m³/s (28%) 和 201 m³/s (18%),月均流量变幅范围为-79%~56%、-56%~51%和-51%~63%,其中丰水期(5—10 月)流量最大降幅分别为 79%、56%、51%,枯水期(12 月至翌年 3 月)流量最大增幅分别为 56%、51%、63%;典型枯水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均流量分别减少了 171 m³/s (27%)、180 m³/s (22%) 和 6 m³/s (1%),减幅较典型平水年要小,月均流量变幅范围分别达到-71%~139%、-56%~97%和-49%~166%,较典型平水年

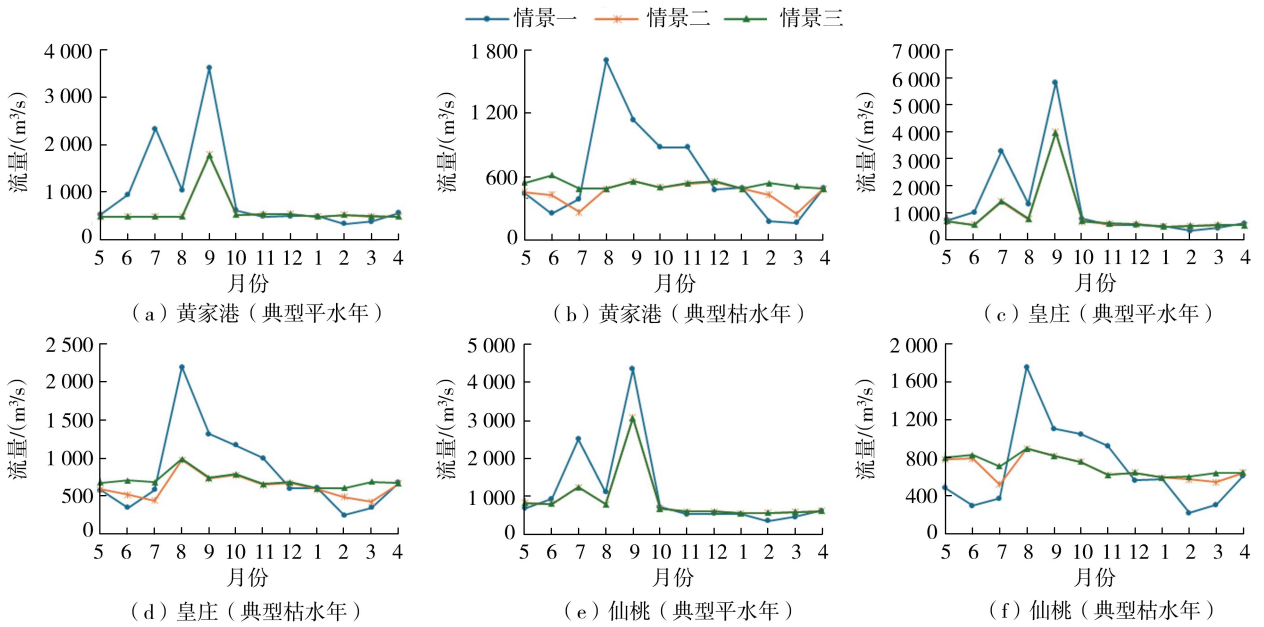


图3 引调水前后汉江中下游主要断面流量

Fig. 3 Flow of the main sections in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after water diversion

明显增加,其中丰水期流量最大降幅分别为 71%、56%、49%,枯水期流量最大增幅分别为 139%、97%、160%。以黄家港为例,对比情景一到情景二的变化,典型平水年月均流量峰值从 3617 m³/s 降低至 1798 m³/s,虽都出现在 9 月,但双峰型流量过程线变为单峰型;典型枯水年月均流量峰值从 1703 m³/s 降低至 558 m³/s,单峰型流量过程线变为坦化度高的无峰型。据统计,考虑南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北和引江济汉工程的影响,按各工程设计规模运行条件下丹江口水库坝址至仙桃河段、仙桃至汉江河口段多年平均年径流量分别减少约 117.4 亿 m³ 和 86.4 亿 m³,显著大于情景一条件下只考虑清泉沟引水的 6.28 亿 m³ 调水量,加之丹江口水库大坝加高按 170 m 蓄水位运行后,丹江口水利枢纽功能任务和调度方式发生较大变化,方才造成汉江中下游总体的减水影响和水文过程的剧烈变化。

进一步考虑南水北调中线一期、引汉济渭工程扩大调水规模以及引江补汉工程的实施,汉江中下游水资源调配能力有所增加,因不同典型年引江补汉工程补水过程和南水北调中线一期、引汉济渭增加调水过程的差异,总体上汉江中下游年均流量减幅不变或降低,水文过程不变或进一步坦化。从情景一到情景三,典型平水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均和月均流量的变化几乎与情景一到情景二的变化相似,主要是由于典型平水年引江补汉工程补水过程与南水北调中线一期、引汉济渭工程增加调水规模后丹江口水库减少下泄的过程基本一致且相互抵消。从情景一到情景三,典型枯水年的水文情势

变化则不同,黄家港和皇庄断面年均流量分别减少 98 m³/s (16%) 和 98 m³/s (12%),仙桃断面年均流量则增加 25 m³/s (4%);黄家港、皇庄、仙桃断面月均流量变幅范围为 -71% ~ 210%、-55% ~ 146% 和 -49% ~ 179%,与情景一到情景二的变化相比,各断面丰水期最大减幅基本不变,枯水期流量最大增幅变为 201%、146%、173%,水文过程由于枯水流量的增加而进一步坦化,这与引江补汉工程在汉江枯水时段发挥的补枯效益密切相关。

从最小下泄流量的保障程度看,以水利部发布的《第一批重点河湖生态流量保障目标(试行)》确定的黄家港断面不小于 490 m³/s 为最小下泄流量目标,采用黄家港断面 3 种情景下 1956—2018 年长系列逐旬流量进行满足程度评价。情景一条件下,黄家港断面最小下泄流量满足程度为 75%;情景二条件下,丹江口大坝加高后蓄丰补枯作用更强,黄家港断面最小下泄流量满足程度提高至 94%;进一步考虑引江补汉工程运行后(情景三),黄家港断面最小下泄流量满足程度提高至 98%。保障汉江中下游最小下泄流量是水利水电工程设计论证要满足的前提条件之一,因此尽管情景二、情景三汉江中下游多年平均径流量较情景一均有所减少,但最小下泄流量满足程度并未降低。

3.2 引调水工程对汉江中下游流速的影响

河道流速与流量、水位和河道断面地形特征紧密相关,引调水工程通过改变汉江中下游径流过程对流速产生直接影响(图 4)。从情景一到情景二,

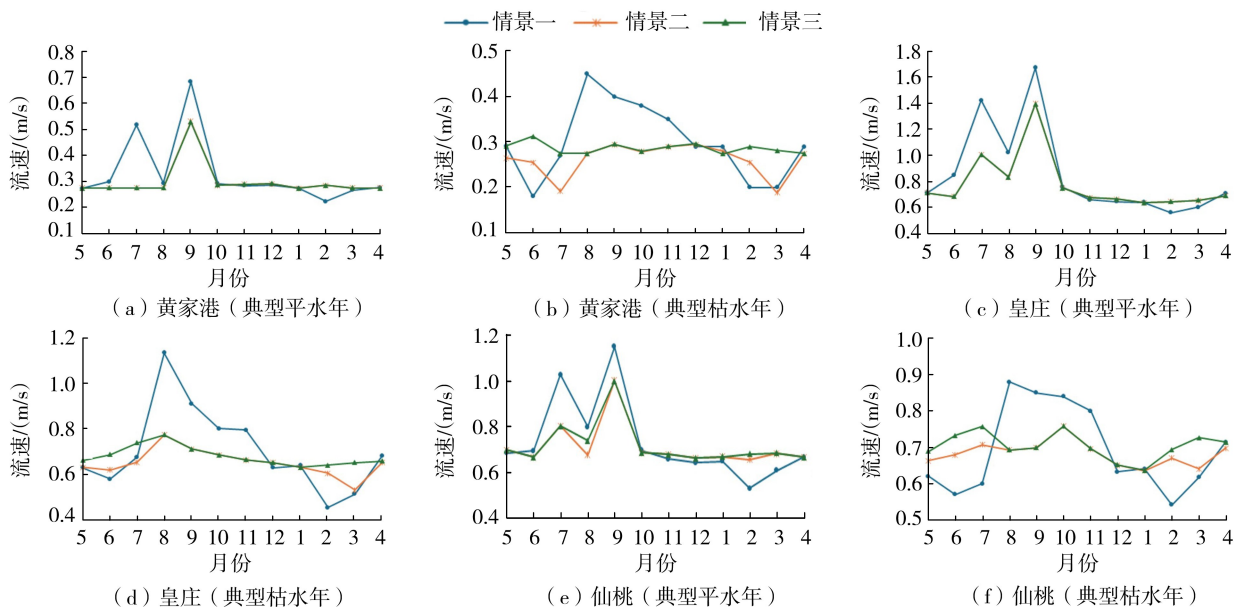


图4 引调水前后汉江中下游主要断面流速

Fig. 4 Velocity of main sections in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after water diversion

典型平水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均流速分别降低 0.03 m/s (9%)、0.07 m/s (9%) 和 0.02 m/s (3%), 月均流速变化幅度范围为 -47% ~ 28%、-29% ~ 15% 和 -22% ~ 25%; 典型枯水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均流速分别降低 0.04 m/s (13%)、0.05 m/s (8%) 和 0.01 m/s (1%), 月均流速变幅范围分别为 -39% ~ 42%、-32% ~ 33% 和 -21% ~ 24%。与径流变化类似, 典型平水年引汉济渭、南水北调中线一期和鄂北工程调水使皇庄以上河段年均流速最大减幅约 10%, 但受引汉济汉工程补水影响, 仙桃以下河段年均流速减幅不超过 3%。尽管典型枯水年径流变幅降低, 但受河道地形和流速背景值影响, 黄家港断面流速变化较典型平水年大。

从情景一到情景三, 典型平水年黄家港、皇庄、仙桃断面年均流速分别降低 0.03 m/s (9%)、0.07 m/s (9%) 和 0.01 m/s (2%), 月均流速变化幅度分别介于 -47% ~ 28%、-29% ~ 15% 和 -22% ~ 28% 之间; 典型枯水年黄家港、皇庄断面年均流速分别降低 0.01 m/s (4%)、0.02 m/s (3%), 仙桃断面年均流速增加 0.01 m/s (2%), 各断面月均流速变幅分别介于 -39% ~ 74%、-32% ~ 41% 和 -21% ~ 29% 之间。从情景二到情景三, 丹江口水库下泄水量进一步减少, 丹江口水库坝址处流速随着径流的减少而显著降低, 但引江补汉工程的实施则有效缓解了其他调水工程对汉江中下游的减水影响, 使得典型枯水年黄家港以下河段流速降幅变小, 尤其是仙桃以下河段流速出现大于各引调水工程实施前的情况。

4 讨论

4.1 汉江中下游水文情势变化特点与面临的问题

4.1.1 流量变化特征与面临的问题

汉江中下游最小下泄流量受降水、植被、流域引水、水利工程等多种因素的影响, 但丹江口水库蓄水运行对汉江中下游最小下泄流量的变化起主导作用^[23]。以丹江口水库坝下约 6 km 的黄家港断面为例, 分析汉江中下游最小下泄流量变化。将汉江中下游干流流量分为高水流量 ($Q \geq 1250 \text{ m}^3/\text{s}$)、中水流量 ($600 \leq Q < 1250 \text{ m}^3/\text{s}$)、低水流量 ($Q < 600 \text{ m}^3/\text{s}$) 3 个级别, 不同情景下 1956—2018 年逐旬流量过程统计表明, 受丹江口水库大坝加高和蓄丰补枯作用影响, 汉江中下游黄家港断面高水流量历时占比呈减少趋势, 其中情景一条件下, 高水流量历时占比约 25%; 情景二和情景三条件下, 高水流量历时占比降至约 10%。不同于高水流量历时占比变化特征, 黄家港断面低水流量历时占比呈增加趋势, 其中情景一条件下, 低水流量历时占比约 65%; 情景二和情景三条件下, 低水流量历时显著增加至约 80%。各情景下中水流量历时占比变化不显著 (图 5)。

典型特枯水年是汉江中下游各行业用水和流域内外供水矛盾最突出的时段, 以丹江口水库坝下黄家港断面为典型, 分析不同情景下典型特枯水年汉江中下游最小下泄流量变化。以典型特枯水年 (1999 年) 黄家港断面逐旬流量过程为例, 情景一、二、三黄家港断面最小下泄流量满足程度分别为 28%、42% 和 72% (图 6, 图中旬数以当年 5 月至次年

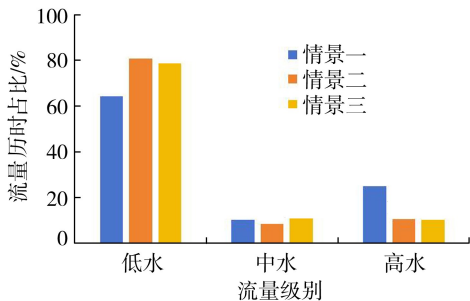


图 5 各情景下黄家港断面高、中、低水流量历时占比

Fig. 5 Proportions of duration with high, medium and low water flow at Huangjiagang section under different scenarios

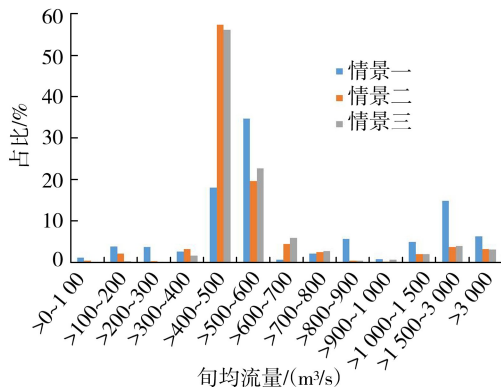


图 7 各情景下黄家港断面不同旬均流量占比

Fig. 7 Proportion of different ten-day average flow at Huangjiagang section under different scenarios

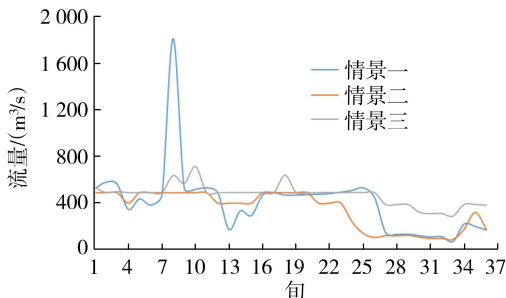


图 6 典型特枯水年黄家港断面旬均流量变化

Fig. 6 Variation of ten-day average flow at Huangjiagang section in typical extremely dry year

4 月为一个完成水文年进行统计)。典型特枯水年各情景黄家港断面最小下泄流量满足程度均不超过 80%, 其中情景二、三较情景一最小下泄流量满足程度显著提高, 尤其是情景三引江补汉工程实施后, 在特枯时段补水汉江中下游, 并结合丹江口水库囤蓄运用, 对提高最小下泄流量满足程度作用明显。

4.1.2 敏感期生态流量面临的问题

洪峰脉冲大小、日涨水率、涨水持续时间、出现次数是影响汉江产漂流性卵鱼类产卵行为的重要水文指标, 张辉等^[24]研究发现仙桃江段四大家鱼产卵适宜生态流量为 $1\,233 \sim 3\,950 \text{ m}^3/\text{s}$; 流量日涨幅在 $139.1 \sim 534.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 持续 5 d 的涨水过程可为四大家鱼产卵提供良好的条件。与情景一相比, 情景二和情景三条件下径流过程坦化明显, 如典型枯水年黄家港断面离势系数由情景一的 1.2 降低至情景二和情景三的 0.98 和 0.96, 主要是因为丹江口水库北调水量增加, 丹江口水库下泄和引江补汉工程补水大部分时段以满足汉江中下游最小下泄流量为目标进行调度, 使得 $>400 \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量占比增加, $>500 \sim 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $>1\,000 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量占比减少 (图 7)。然而, 该变化可能导致汉江中下游四大家鱼产卵适宜生态流量和刺激条件满足程度降低, 不利于鱼类资源的保护。

4.1.3 水华防控面临的问题

水华是汉江中下游主要的水环境问题之一。自 1992 年首次暴发水华以来, 水华暴发次数已累计达到 10 余次。汉江中下游水华的优势藻种为硅藻, 暴发时间主要集中在枯水时段春季 1—3 月, 暴发的河段基本在皇庄水文站以下至兴隆水利枢纽库区江段, 兴隆水利枢纽以下河段由于兴隆库区积累的藻类生物随水流下泄, 藻密度基本保持较高态势^[25]。为有效防患水华发生, 李建等^[26]研究发现兴隆库区河段和仙桃自然河段流速 (流量) 应分别达到 0.20 m/s ($1\,160 \text{ m}^3/\text{s}$) 和 0.67 m/s ($1\,040 \sim 1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$) 以上。田晶等^[27]亦提出, 仙桃断面 1—3 月 90% 不发生水华的概率下, 对应的最小 7 d 平均流量应高于 $780 \text{ m}^3/\text{s}$ 。引调水工程实施后, 典型枯水年枯水期流量虽有所增加, 但基本以 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右为主 (图 3), 距离李建等^[26-27]得出的防控水华的阈值流量仍有一定差距。同时, 与情景一、情景二相比, 尽管情景三条件下黄家港以下河段 1—3 月径流和流速有所增加, 但仙桃断面 1 月仍存在流速小于 0.67 m/s 的情况 (图 4), 仍面临水华风险, 需要高度关注。

4.2 汉江中下游水文情势不利影响减缓对策

南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北等引调水工程实施后, 在丹江口水库调蓄影响下, 汉江中下游径流坦化明显, 且年均径流均有所减少; 尽管引汉济汉工程和引江补汉工程补水作用对汉江中下游减水现象有所缓解, 但汉江中下游仍面临典型特枯水年最小下泄流量满足程度不高、敏感期生态流量难以保障以及水动力条件不足带来的水华风险。汉江中下游引调水工程调入水量和调出水量现象并存, 为保障引调水工程供水效益和汉江中下游水生态环境健康, 统筹考虑引调水工程对水文情势的累积影响, 研究提出汉江中下游最小下泄流量和敏感期生态流量

保障、水华防控调度等对策措施。

a. 最小下泄流量保障。引江补汉工程实施前,黄家港断面作为丹江口水库出库控制站,来水直接受丹江口水库调度影响;皇庄断面上游已、在建崔家营、王甫洲、雅口、碾盘山水库仅具有日调节能力,来水主要受丹江口水库调蓄以及丹江口至皇庄区间河道外用水影响。引江补汉工程实施后,丹江口水库调度方式发生一定变化,黄家港和皇庄断面最小下泄流量保障程度将受丹江口水库下泄、引江补汉工程补水以及区间河道外用水影响,建议考虑汉江中下游河道外合理用水需求以及区间来水过程,制定引江补汉工程补水和丹江口水库下泄联合运行方案,保障黄家港、皇庄断面最小下泄流量。

b. 敏感期生态流量保障。考虑丹江口水库下泄一定生态流量和唐白河发生规模洪水,联合王甫洲、崔家营和兴隆水利枢纽联合敞泄调度,汉江中下游 2018 年、2021 年开展了两次生态调度试验^[28-29]。然而,主要依靠唐白河洪水开展生态调度,存在洪水预见期短,调度水量难以保证等问题,且汉江多为 8—10 月的秋汛,与鱼类繁殖期时间难以协调。建议研究建立以丹江口水库为核心,王甫洲、崔家营、新集、雅口、碾盘山、兴隆等梯级枢纽工程以及引江补汉、引江济汉等引调水工程参与的联合生态调度机制,制定合理、可行的联合生态调度方案,为汉江中下游生态调度创造更有利条件。

c. 水华防控应急和相机调度。汉江仙桃断面叶绿素 a 质量浓度与水温、pH 值、溶解氧和总磷质量浓度均呈显著正相关关系,与氮磷比呈显著负相关关系,且上述指标均受流量直接影响^[30]。建议研究建立汉江中下游水华监测预警和应急调度机制,科学制定预警指标,通过实施丹江口水库和引江补汉、引江济汉等引调水工程应急调度,加大汉江中下游径流量,改善汉江中下游水动力条件,抑制或减少水华发生。同时,研究建立相机调度机制,利用引江补汉和引江济汉等引调水工程富余补水能力在 1—3 月相机向汉江中下游补水,通过增强水动力条件尽可能降低水华发生几率。

5 结 论

a. 南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北、引江济汉等引调水工程对汉江中下游径流过程不利影响明显,但影响沿程总体逐渐减弱,以典型枯水年为例,黄家港、皇庄、仙桃断面年均流量降幅分别为 27%、22%、1%,其中丰水期流量最大降幅分别为 71%、56%、49%,枯水期流量最大增幅分别为 139%、97%、160%;叠加引江补汉工程影响后,引调水工程

的不利叠加累积影响微弱,其中典型枯水年,黄家港、皇庄断面年均流量降幅分别为 16%、12%,仙桃断面年均流量增加 4%,黄家港、皇庄和仙桃断面丰水期流量最大降幅几乎无变化,枯水期流量最大增幅分别由 139%、97%、160% 增加至 201%、146%、173%,改善了枯水时段水动力条件,使黄家港断面最小下泄流量满足程度由 75%(情景一)逐步提升至 94%(情景二)和 98%(情景三)。

b. 南水北调中线一期、引汉济渭、鄂北工程调水使皇庄以上河段年均流速最大减幅约 10%,但受引江济汉工程补水影响,仙桃以下河段年均流速减幅不超过 3%;引江补汉工程实施后,丹江口水库下泄水量进一步减少,丹江口水库坝址处流速随着径流的减少而显著降低,但引江补汉工程的实施有效缓解了其他调水工程对汉江中下游的减水影响,使得黄家港以下河段流速降幅变小,尤其是典型枯水年仙桃以下河段流速出现大于各引调水工程实施前的情况。

c. 尽管随着引江济汉和引江补汉工程的实施,汉江中下游最小下泄流量满足程度得到提高,水华易发期水动力条件得到改善,但受其他引调水工程调出水量影响,汉江中下游仍面临水量减少带来的最小下泄流量和敏感期生态流量难以保障的风险,以及水动力条件不足带来的水华风险。建议统筹考虑引调水工程对水文情势的累积影响,研究提出汉江中下游最小下泄流量、敏感期生态流量和水华防控调度方案。

参考文献:

[1] 王中敏,刘金珍,刘扬扬,等. 引调水工程对汉江中下游生态环境的累积叠加影响研究[J]. 中国农村水利水电,2018(3): 29-32. (WANG Zhongmin, LIU Jinzhen, LIU Yangyang, et al. Research on the cumulative superposition effect of water diversion project on ecological environment in the middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. China Rural Water and Hydropower,2018(3): 29-32. (in Chinese))

[2] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 中线调水对汉江中下游区水文情势影响研究[J]. 水文,2022,42(3): 89-94. (ZHANG Yiya,YUAN Fei,ZHANG Limin,et al. Impacts of water diversion of middle-route project on hydrological regimes of middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Journal of China Hydrology,2022,42(3): 89-94. (in Chinese))

[3] ZHU Y P,ZHANG H P,CHEN L,et al. Influence of the south-north water diversion project and the mitigation projects on the water quality of Han River[J]. Science of the Total Environment,2008,406(1/2): 57-68.

- [4] ZHANG Mengmeng, WANG Shuai, FU Bojie, et al. Ecological effects and potential risks of the water diversion project in the Heihe River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619-620: 794-803.
- [5] 孙玲玲, 王菊, 罗欢, 等. 新增取水工程对水源保护区水流条件的数值模拟研究[J]. 环境生态学, 2023, 5(4): 93-101. (SUN Lingling, WANG Ju, LUO Huan, et al. Numerical simulation of new water intake project on flow condition of water source protection area [J]. Environmental Ecology, 2023, 5 (4): 93-101. (in Chinese))
- [6] 张怡雅, 袁飞, 张利敏, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 14-19. (in Chinese))
- [7] 班璇, 朱碧莹, 舒鹏, 等. 汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2817-2829. (BAN Xuan, ZHU Biying, SHU Peng, et al. Trend and driving force of climate and hydrological process in Hanjiang Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2817-2829. (in Chinese))
- [8] 朱烨, 李杰, 潘红忠. 南水北调中线调水对汉江中下游水文情势的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 79-83. (ZHU Ye, LI Jie, PAN Hongzhong. Influence of middle route project of south-to-north water diversion on hydrological regime in middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 79-83. (in Chinese))
- [9] 曾凌, 陈金凤, 刘秀林. 南水北调中线工程运行以来汉江中下游水文情势演变分析[J]. 水文, 2022, 42(6): 13-18. (ZENG Ling, CHEN Jinfeng, LIU Xiulin. Analysis on the evolution of hydrological situation in the Hanjiang mid-lower reaches river since the application of the Middle-Route South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42 (6): 13-18. (in Chinese))
- [10] 由星莹, 王祖卿, 彭翔鹏, 等. 汉江兴隆枢纽坝下枯水位下降成因浅析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(11): 9-15. (YOU Xingying, WANG Zuqing, PENG Xiangpeng, et al. Cause analysis of decline of low water level downstream the dam of Xinglong hydro-junction on Hanjiang River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(11): 9-15. (in Chinese))
- [11] 肖昌虎, 李波, 廖小永, 等. 引江补汉工程建设的必要性及重大意义[J]. 中国水利, 2022(18): 32-35. (XIAO Changhu, LI Bo, LIAO Xiaoyong, et al. Necessity and significance of project construction of the river diversion project from the Yangtze River to the Han River [J]. China Water Resources, 2022(18): 32-35. (in Chinese))
- [12] LI Yan, ZHAO Long, ZHANG Zhe, et al. Research on the hydrological variation law of the Dawen River, a tributary of the lower Yellow River[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1719.
- [13] 陶佳辉, 卞锦宇, 敖天其, 等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 133-141. (TAO Jiahui, BIAN Jinyu, AO Tianqi, et al. Variation characteristics of precipitation and runoff in water diversion area and water receiving area of East Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 133-141. (in Chinese))
- [14] 黄朝君, 王栋, 秦赫. 南水北调中线工程运行对汉江丹襄区间水文情势变化的影响研究[J]. 水利水电快报, 2021, 42(12): 31-37. (HUANG Chaojun, WANG Dong, QIN He. Research on operation impact of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion on hydrological regime in Danjiangkou-Xiangyang reach of Hanjiang River [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(12): 31-37. (in Chinese))
- [15] 谢兴勇, 钱新, 钱瑜, 等. “引江济巢”工程中水动力及水质数值模拟[J]. 中国环境科学, 2008, 28(12): 1133-1137. (XIE Xingyong, QIAN Xin, QIAN Yu, et al. Numerical simulation of hydrodynamics and water quality for water transfer from Yangtze River to Chaohu Lake [J]. China Environmental Science, 2008, 28(12): 1133-1137. (in Chinese))
- [16] 于珊, 李一平, 程一鑫, 等. 调水引流工程对平原河网水动力调控的效果[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 462-473. (YU Shan, LI Yiping, CHENG Yixin, et al. The impacts of water diversion on hydrodynamic regulation of plain river network [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 462-473. (in Chinese))
- [17] 张丹, 鲍军, 李想, 等. 考虑河流生态需水约束的调水规模研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 917-929. (ZHANG Dan, BAO Jun, LI Xiang, et al. Study on the water transfer scale considering the constraint of river ecological water demand [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 917-929. (in Chinese))
- [18] 杨少康, 刘冀, 张特, 等. 汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 143-151. (YANG Shaokang, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 143-151. (in Chinese))

- [19] 饶贵康,王玲玲,徐津,等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 31-37. (RAO Guikang, WANG Lingling, XU Jin, et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 31-37. (in Chinese))
- [20] 陈晓静,李昆朋,李萍,等. 秦淮区北部水系引补水方案模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 6-10. (CHEN Xiaojing, LI kunpeng, LI Ping, et al. Simulation study on water diversion scheme in northern river network of Qinhuai District [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 6-10. (in Chinese))
- [21] 邓志民,刘扬扬,樊皓. 鄂北调水工程对汉江中下游水文情势的影响[J]. 中国农村水利水电, 2017(4): 125-128. (DENG Zhimin, LIU Yangyang, FAN Hao. The effect of North Hubei Water Transfer Project on the hydrologic regimes in the middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(4): 125-128. (in Chinese))
- [22] 赵晓磊. 基于 MIKE21 模型的汉江中下游水环境影响风险研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(10): 54-61. (ZHAO Xiaolei. Study on water environment impact risk in the middle and lower reaches of Han River by MIKE21 model [J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(10): 54-61. (in Chinese))
- [23] 张欧阳,熊明. 汉江中下游近 60 年最小流量变化及影响因素分析[J]. 人民长江, 2017, 48(增刊 2): 89-92. (ZHANG Ouyang, XIONG Ming. Analysis of minimum discharge changes and influencing factors in the middle and lower reaches of Hanjiang River in recent 60 years [J]. Yangtze River, 2017, 48 (Sup2): 89-92. (in Chinese))
- [24] 张辉,曾晨军,李婷,等. 基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 1-8. (ZHANG Hui, ZENG Chenjun, LI Ting, et al. Ecological flow in the mid-lower Hanjiang River based on spawning demands of the four major Chinese carps [J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43 (3): 1-8. (in Chinese))
- [25] 李建,尹炜,贾海燕,等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(5): 136-144. (LI Jian, YIN Wei, JIA Haiyan, et al. Research progress on diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River; review and advances [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(5): 136-144. (in Chinese))
- [26] 李建,尹炜,贾海燕,等. 汉江中下游水华防控生态调度研究[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 740-751. (LI Jian, YIN Wei, JIA Haiyan, et al. Study on the ecological regulation of algal bloom control in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 740-751. (in Chinese))
- [27] 田晶,郭生练,王俊,等. 汉江中下游干流水华关键环境因子识别及阈值分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 196-203. (TIAN Jing, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Identification and threshold analysis of key factors of algal bloom in middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 196-203. (in Chinese))
- [28] 雷欢,陈锋,谢文星,等. 汉江中下游梯级枢纽联合生态调度对产漂流性卵鱼类自然繁殖的效应研究[J]. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1219-1233. (LEI Huan, CHEN Feng, XIE Wenxing, et al. Effects of the first ecological operation of cascade reservoirs in the middle and lower reaches of Hanjiang River on the natural reproduction of pelagic fish [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(4): 1219-1233. (in Chinese))
- [29] 金兴平. 2021 年长江流域水工程联合调度实践与成效[J]. 中国水利, 2022(5): 16-19. (JIN Xingping. Integrated regulation of water structures in the Yangtze River Basin in 2021 [J]. China Water Resources, 2022(5): 16-19. (in Chinese))
- [30] 查悉尼,辛小康,付婷,等. 2022 年夏季汉江中下游水华生消驱动因子及其贡献率量化研究[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 143-151. (ZHA Xini, XIN Xiaokang, FU Ting, et al. Summer driving factors and their quantitative contribution to algae bloom occurrence and demise in the middle and lower Hanjiang River in 2022 [J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(1): 143-151. (in Chinese))

(收稿日期:2024-04-06 编辑:王芳)

