

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.012

径流变异对滹沱河流域水库生态调度的影响

冯 平, 白 粟, 张 婷, 李建柱

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要:分析了滹沱河中上游径流变异情况并计算了河道生态流量,通过构建岗南-黄壁庄梯级水库供水及生态多目标优化调度模型,并采用 NSGA-II 求解多种情景方案,探求入库径流变异对水库生态调度的影响。研究表明:小觉站和平山站径流分别在 1983 年和 1979 年发生变异,流域径流整体呈显著下降趋势;利用频率众值法、Tennant 法和年内展布法计算的河道理想、适宜及最小生态流量对应的年生态需水量分别为 9.85 亿、5.85 亿、3.23 亿 m^3 ;农业灌溉及生态需水缺水率随来水频率的增大而显著增大;入库径流下降趋势显著且发生变异,致使变异后不同水平年水库调度的供水保证率均有所降低;农业灌溉需水和生态需水矛盾显著,枯水年农业灌溉供水率降低 4% 可提高 12% 的生态供水率。

关键词:径流变异;生态流量;梯级水库;多目标优化调度;滹沱河流域

中图分类号:TV697.1⁺1;TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0099-10

Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin//FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, LI Jianzhu(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: The runoff change in the middle and upper reaches of the Hutuo River was analyzed, and ecological flow of the river was calculated. A multi-objective optimization model for water supply and ecological operation of Gangnan-Huangbizhuang cascade reservoirs was established, and NSGA-II was used to solve different schemes in various scenarios. The results showed that the runoff of Xiaojue and Pingshan stations had a significant decreasing trend, and changed abruptly in 1983 and 1979, respectively; annual ecological water demands corresponding to the optimal, suitable, and minimum ecological flows of the river, calculated with the optimal distribution function for each month, Tennant method, and dynamic calculation method, were 985 million, 585 million, and 323 million m^3 , respectively. Reservoir operation results also showed that the water shortage rate of agricultural irrigation and ecological water demands increased significantly with the increase of the inflow frequency, and the water supply guarantee rate under reservoir operation in different level years decreased due to the significant decrease and sudden change of water inflow. In addition, there is a significant contradiction between irrigation water demand and ecological guarantee, and reducing the rate of water supply for irrigation by 4% may increase the ecological water supply rate by 12% in dry years.

Key words: runoff change; ecological flow; cascade reservoirs; multi-objective optimization operation; Hutuo River Basin

水库的建设运行可以有效地解决水资源时空分布不均的问题,更好地实现水资源优化配置。但水库大坝的兴建不可避免地带来了生态问题,如改变下游河道地貌特征^[1]及径流分布^[2],降低库区污染物扩散能力且容易产生水体富营养化现象^[3],以及影响底栖动物沿程分布^[4]等。因此,考虑社会经济、水资源与生态环境协调发展^[5-6]的水库生态调

度逐渐成为研究热点。

生态调度的目标一般是保护河道生境及鱼类等水生生物资源,将生态目标嵌入水库的常规运行方式中。Gates 等^[7]提出增加水库季节性枯水流量以保证下游水生生物栖息地需求;King 等^[8]针对澳大利亚墨累河水库生态调度问题,提出增加下泄洪峰流量和持续时间以满足鱼类产卵和繁殖的流量。目

基金项目:国家自然科学基金项目(52079086)

作者简介:冯平(1964—),男,教授,博士,主要从事水环境水生态研究。E-mail:fengping@tju.edu.cn.

通信作者:张婷(1988—),女,副教授,博士,主要从事生态水文研究。E-mail:zhangting_hydro@tju.edu.cn

前水库的生态调度主要集中在大流域梯级水库群的多目标调度问题,Steinschneider 等^[9]在康涅狄格河流域实施水库群生态调度,在不降低水库防洪能力的前提下,实现了恢复河流生态系统持续性所需的自然水文流态的目标;Bian 等^[10]探讨了我国黄河流域梯级水库运行对水库自身及下游河道生态环境的影响,以及发电与供水、防洪和防冰的关系;董增川等^[11]围绕防洪、航运、发电和生态等目标,在金沙江流域开展了水库的生态调度研究,评估生态调度对下游河道生态及四大家鱼产卵繁殖的影响;白涛等^[12]针对融雪补给型河流,基于开源及节流的方法开展了水库生态调度研究。

水库生态调度首先需要采用一定的方法确定河道的生态流量,这些方法主要分为水文学法、水力学法、水文生物分析法、生境模拟法及整体分析法。Gippel 等^[13]采用水力学的湿周法计算河道生态需水量;张文鸽等^[14-16]在研究区域内选取指示物种,采用生境模拟法中的物理栖息地模型推求河段控制断面的适宜生态流量;Nikghalb 等^[17]在里海南部地区,对 Tennant 法、Q95 法以及物理栖息地模型进行了比较分析,并确定最低生态流量及适宜生态流量;Hughes 等^[18]运用整体分析法计算南非河流生态流量,指出该方法在南非水资源管理方面有良好的应用基础。

由于气候及人类活动的影响,水文序列易发生不同程度的变异。许多学者利用参数和非参数检验对水文序列进行变异诊断^[19-20],并采用水文模型法^[21]和水文统计法^[22]对影响因素进行评估。王亚超等^[23-24]对于产生变异的径流,根据划定的天然期运用水文学等方法求解河道的生态流量;白涛等^[25-26]计算了水文变异条件下的生态流量,通过构建多目标水库调度模型,探究水文变异对水库生态调度的影响;Lu 等^[27]耦合二维水动力模型及降雨-径流模型,评估在未来气候变化情况下水库生态运行方案的有效性。

现有关于生态流量的研究中对径流变异的影响考虑不足,在生态流量推求方法中,主要选取人类影响较小时段的径流序列进行数据分析。此外,在水库生态调度的求解过程中,较少考虑入库径流变异对水库调度的影响,由此制定的方案不适用于变异后径流序列的生态调度。

针对水库生态调度中存在的不足,选择受环境变化影响较大的滹沱河流域^[28]为研究对象,对滹沱河中上游径流序列的变化进行检验,基于径流变异序列采用水文学方法推求河道生态流量过程,并构建岗南-黄壁庄梯级水库供水及生态多目标优化调

度模型,探求入库径流变异对水库生态调度的影响,为子牙河流域水资源开发利用、水生态环境规划和管理提供理论依据。

1 研究区概况

滹沱河是子牙河上游的主要支流,处于 122°16'E ~ 116°6'E,37°27'N ~ 39°25'N,发源于五台山北麓,流经山西、河北两省,在河北正定县穿越京广铁路至献县,与滏阳河及滏阳新河汇流于子牙河。滹沱河全长 587 km,流域面积 31 417 km²,其中山区面积为 23 608 km²,平原面积为 7 809 km²。岗南水库位于滹沱河干流中游,控制面积 15 900 km²;黄壁庄水库位于滹沱河中下游,距离岗南水库 28 km,控制面积 23 400 km²。最大的支流冶河在岗南、黄壁庄水库区间汇入滹沱河,冶河汇入滹沱河处建有平山水文站,控制流域面积为 5 724.82 km²,占岗南-黄壁庄水库区间面积的 85.6%。小觉水文站为岗南水库的入库径流监测站,控制流域面积 15 834.58 km²。研究区域如图 1 所示。

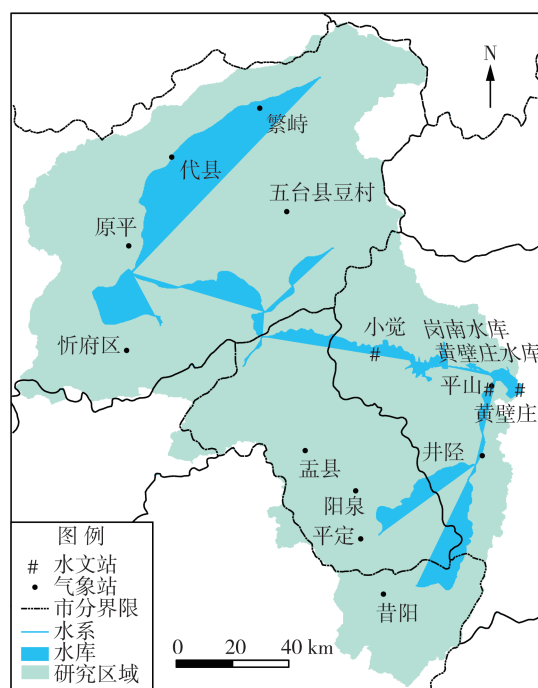


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

2 数据来源与分析

2.1 径流变化特征

小觉站和平山站的月径流数据来源于海河流域水文年鉴。小觉站和平山站的径流特征如表 1 所示,图 2 为小觉站和平山站的年径流序列趋势图。小觉站、平山站多年平均径流量分别为 4.4 亿和 3.4 亿 m³。整体上,小觉站径流量以每年 0.11 亿 m³

表 1 小觉站和平山站的径流特征

Table 1 Runoff characteristics of Xiaoju and Pingshan stations

站点	集水面积/km ²	M-K 检验 z 值	阶段	多年径流量 均值/亿 m ³	多年径流量 均值极值比	多年径流量 均值变差系数
小觉站	15 834. 58	-3. 62	变异前	6. 67	5. 61	0. 62
			变异后	3. 70	19. 66	0. 82
平山站	5 724. 82	-0. 82	变异前	5. 10	3. 29	0. 41
			变异后	3. 10	12. 48	0. 76

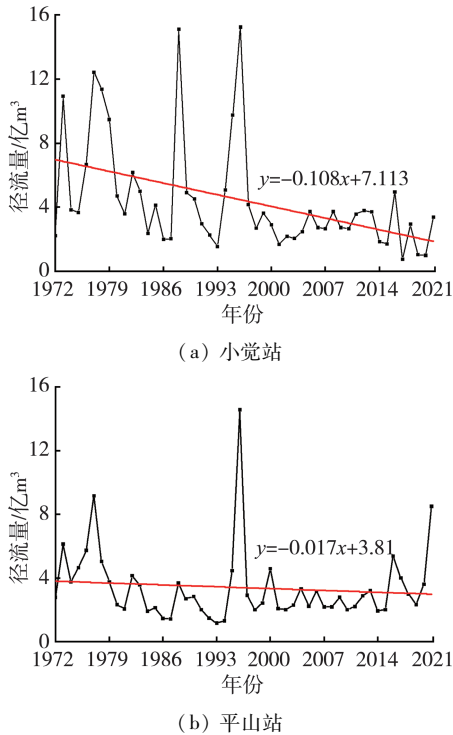


图 2 小觉站和平山站径流序列趋势

Fig. 2 Trends of runoff at Xiaoju and Pingshan stations

的速率递减;平山站径流序列呈现波动下降趋势,以每 10 a 0.16 亿 m³ 速率减少。Mann-Kendall (M-K) 趋势检验^[29] 结果表明,小觉站径流变化的 z 值绝对值超过了 0.05 显著性水平的临界值 1.96,下降趋势显著;平山站年径流序列的 M-K 趋势检验 z 值为 -0.82,绝对值低于 0.05 显著性水平的临界值 1.96,下降趋势未通过显著性检验。在 95% 置信区间内,小觉站和平山站的径流变异点分别为 1983 年和 1979 年。药芝星^[30] 通过 Pettitt 检验对小觉站径流序列进行变异点分析,同样得出径流变异点为 1983 年。进一步研究表明,滹沱河小觉站以上流域径流深呈显著下降趋势,且流域降雨呈下降趋势和流域干旱化趋势明显是流域径流减少的主要原因^[30-31]。此外,20 世纪 80 年代以来,流域水资源开发利用程度超过 40% 的国际公认警戒线^[32],水资源过度开发利用对径流变化的影响日益增强。

2.2 河道生态流量

20 世纪 70 年代以来,黄壁庄水库以下的滹沱河河道常年干涸断流,黄壁庄水文站是滹沱河从山

区流向平原的出口控制站,将其作为生态流量的控制站对于保障滹沱河下游河道生态流量具有重要意义。黄壁庄水文站实测和径流还原后的天然月径流序列由海河流域委员会提供,图 3 为黄壁庄水文站 1956—2016 的年径流序列。天然径流序列和实测径流序列的年均径流量分别为 18.58 亿和 12.13 亿 m³。

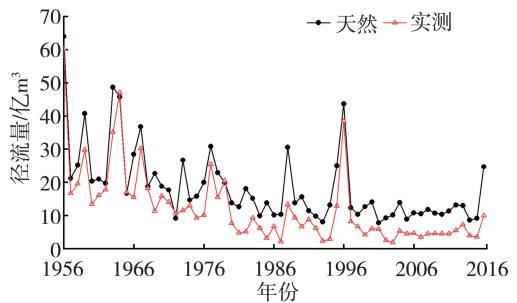


图 3 黄壁庄水文站天然及实测年径流序列

Fig. 3 Natural and measured annual runoff at Huangbizhuang station

河道生态流量分为最小生态流量、适宜生态流量、理想生态流量,采用 3 种方法计算:①频率众值法^[33] 采用四参数伯尔分布、有界约翰逊分布、三参数广义极值分布等分布函数拟合黄壁庄断面的 1—12 月径流序列,采用线性矩法计算各分布的参数,并将分布函数中概率密度最大处对应的河道流量作为该月的生态流量^[24]。②Tennant 法^[34] 以河道多年平均流量的百分数为基础,将河道流量划分为高限、最佳及底限共计 10 个范围,计算河道逐月生态流量,本文选取 30% 的多年平均流量进行计算。③年内展布法基于水文过程对径流的年内动态要求,根据天然历史径流序列,选取多年平均流量、各月最小流量组成的年均流量这两个典型的水文特征指标计算同期均值比,并以多年月均径流过程计算河道生态流量的年内过程^[35]。

根据黄壁庄水文站 1956—2020 年的天然径流序列资料进行生态流量的计算,结果如表 2 所示。根据表 2 的结果,计算各月的生态需水量总和,可得采用频率众值法计算的年生态需水量为 9.85 亿 m³;Tennant 法计算的 30% 年均流量的年生态需水量为 5.85 亿 m³;年内展布法得到的年生态需水量为 3.23 亿 m³。

表2 生态流量计算结果

Table 2 Calculation results of ecological flow

方法	生态流量/(m ³ /s)											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
频率众值法	20.8	26.1	54.3	30.9	16.5	12.3	31.3	58.5	37.7	35.6	35.6	19.8
Tennant法	8.6	9.4	16.4	11.1	8.1	8.8	29.7	53.2	26.4	18.9	13.7	8.8
年内展布法	4.8	5.2	9.1	6.1	4.4	4.8	16.4	32.3	14.5	10.4	7.5	4.8

根据 SL/T 712—2021《河湖生态需水计算规范》^[36],滹沱河为北方高开发利用河流,频率众值法得到的各月生态流量占年均流量的60%以上,可以很好地保障河流正常的生态功能,设定为目标理想生态需水。Tennant法建议的30%多年平均流量可为鱼类提供良好的活动区域,设定为适宜生态流量。年内展布法计算的生态流量约占年均流量的10%,为河流最低生态要求所需水量的下限目标,设定为最小生态流量。

3 岗南-黄壁庄梯级水库多目标优化模型构建

3.1 目标函数

岗南-黄壁庄梯级水库的调度涉及发电、防洪、供水、生态等多个目标。供水目标主要包括下游石家庄城市生活用水、西柏坡电厂发电工业用水和下游石津灌区的灌溉用水^[37]。岗南-黄壁庄梯级水库的调度规则是供水优先,可结合向下游供水下泄流量作为发电流量。因此在目标设定中不再考虑水库供水对发电的影响,水库生态调度的最终目的即为综合考虑流域年内供水缺水率 f_1 最小和年内生态需水缺水率 f_2 最小。

a. 年内供水缺水率最小:

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 w_j \frac{|W_{t,j} - D_{t,j}|}{D_{t,j}} \quad (1)$$

式中: $W_{t,j}$ 、 $D_{t,j}$ 分别为用水户 j 在 t 时段的供水量及需水量, $j=1, 2, 3$ 分别表示城市生活用水、工业用水和农业灌溉用水; w_j 为不同用水户的优先级权重; T 为计算总时段。

b. 年内生态需水缺水率最小:

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^T (Q_{2,t} - Q_{N,t})/Q_{N,t} \quad (2)$$

式中: $Q_{2,t}$ 为 t 时段黄壁庄水文站监测的水库下泄流量; $Q_{N,t}$ 为 t 时段黄壁庄水文站的生态流量。根据生态流量的计算结果,适宜生态流量可以较好地满足河流正常的生态功能,且生态用水的保证率较高,因此本文选取适宜生态流量标准下的年生态需水缺水率最小作为研究目标。

3.2 约束条件

a. 水位库容约束:

$$V_{\min,i,t} \leq V_{i,t} \leq V_{\max,i,t} \quad (3)$$

$$\text{其中 } V_{\max,i,t} = \begin{cases} V_{\text{正常},i,t} & \text{非汛期} \\ V_{\text{汛限},i,t} & \text{汛期} \end{cases}$$

式中: $V_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的库容, $i=1, 2$ 分别为岗南水库和黄壁庄水库; $V_{\max,i,t}$ 、 $V_{\min,i,t}$ 、 $V_{\text{正常},i,t}$ 、 $V_{\text{汛限},i,t}$ 分别为水库 i 最高水位、死水位、正常蓄水位和汛限水位对应的库容。

b. 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t})\Delta t \quad (4)$$

式中: $I_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的平均入库流量; $Q_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的平均下泄流量,黄壁庄水库下泄流量包括河道生态用水、石津灌区灌溉水量及石家庄市的城市工业及生活供水。

c. 梯级水库水力联系:

$$I_{i,t} = Q_{i-1,t} + Q_{\text{in},i,t} \quad (5)$$

式中 $Q_{\text{in},i,t}$ 为 t 时段水库 i 的区间入流。

d. 下泄流量约束:

$$Q_{\min,i,t} \leq Q_{i,t} \leq Q_{\max,i,t} \quad (6)$$

式中 $Q_{\max,i,t}$ 、 $Q_{\min,i,t}$ 为水库 i 在 t 时段下泄流量允许的最大和最小值。

e. 变量非负约束:即梯级水库优化调度中各变量取值非负。

3.3 模型求解

多目标优化问题求解主要分为两种类型:一类是将多目标优化问题转化为单目标函数,通过传统优化算法求解;另一类是通过进化算法对多目标进行求解,决策者通过提供多种备选方案,根据需求选取最适合的趋于 Pareto 的最优解^[38],主要方法有线性规划、动态规划、遗传算法、人工神经网络和蚁群算法等。本文选用 NSGA-II 算法对模型求解,NSGA-II 算法是由 Deb 等提出的带精英策略的非支配排序遗传算法^[39],通过对种群分层排序,提高整体运行速度。NSGA-II 算法引入精英策略提高算法的鲁棒性,还引入拥挤度比较算子提高搜索范围,保

证种群多样性。NSGA-II 算法的主要求解步骤见文献[40]。

3.4 调度情景设置

岗南水库入库径流为小觉站监测径流,黄壁庄水库入库径流为岗南水库下泄及平山站区间入流水量。由于小觉站和平山站的径流序列发生变异,即水库的入库径流发生变异,本文选取岗南水库及黄壁庄水库设计频率下的丰水年、平水年及枯水年的逐月入库径流,依据变异前后径流序列的均值同倍比计算变异后设计水平年径流序列。小觉站和平山站径流序列变异前后不同水平年月径流过程如图4所示。

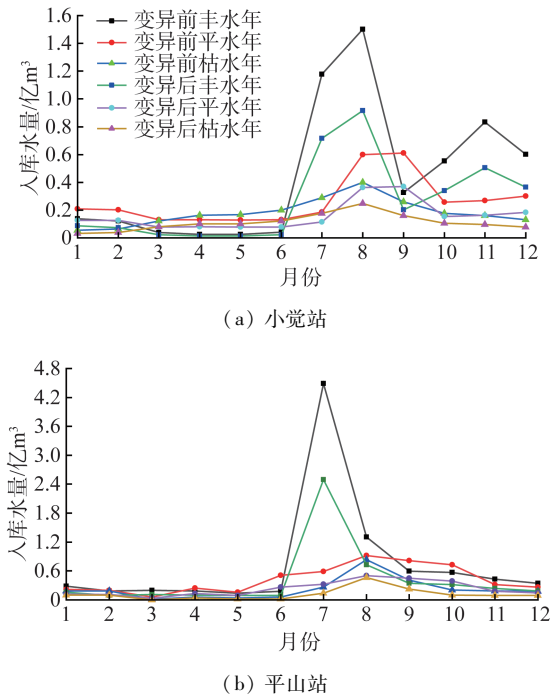


图4 径流变异前后不同水平年水文站月径流量

Fig.4 Monthly runoff of hydrological stations in different level years before and after runoff change

本文设计了6种生态调度情景,对应径流变异前丰、平、枯(情景1~3)和变异后丰、平、枯(情景4~6)不同水平年的调度情况。岗南水库和黄壁庄水库的灌溉供水主要是下游的石津灌区,灌区内主要种植作物为冬小麦、夏玉米及棉花,根据文献[41-42]制定的灌溉制度和灌溉定额,采用定额法计算石津灌区在不同水平年的月灌溉需水量,结果如表3所示。丰水年的灌溉需水量为1.38亿 m^3 ,平水年的灌溉需水量为3.83亿 m^3 ,枯水年的灌溉需水量为6.04亿 m^3 。

4 结果与分析

NSGA-II 算法中,种群规模设定为60,迭代次数为3000次,交叉概率设置为0.9,变异概率设定为

表3 不同水平年各月灌溉需水量

Table 3 Monthly irrigation water demand in different level years

月份	灌溉需水量/万 m^3			月份	灌溉需水量/万 m^3		
	丰水年	平水年	枯水年		丰水年	平水年	枯水年
1	0	0	0	7	0	6577	11159
2	0	5640	10046	8	0	0	392
3	0	5640	10046	9	0	0	0
4	4485	6118	10439	10	2115	4230	5023
5	383	717	588	11	2115	4230	5023
6	4698	5102	7635	12	0	0	0

0.08,图5为6种情景各方案的生态需水缺水率及农业灌溉缺水率 Pareto 散点图,其中径流变异前后丰水年调度结果和径流变异前平水年调度结果的种群规模最优解大多分布在坐标系原点,生态需水缺水率及农业灌溉缺水率均为0。由于工业及生活用水的优先级最高,调度过程中均优先保证工业及生活用水,优化调度不考虑工业及生活用水的缺水率。

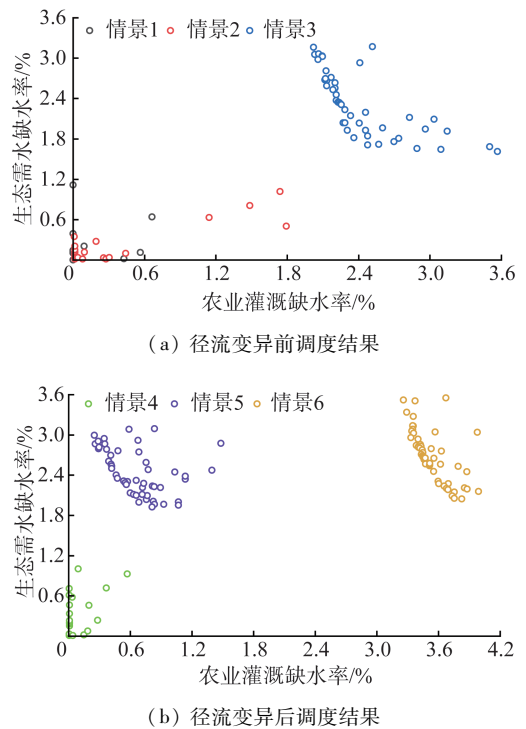


图5 各情景生态需水缺水率和农业灌溉缺水率 Pareto 散点图

Fig.5 Pareto scatter diagram of ecological water demand and agricultural irrigation water shortage rates in different scenarios

4.1 不同频率的入库径流变异对生态调度影响分析

图6为各情景生态调度后黄壁庄站的流量过程。从图6可以看出,径流变异前,丰水年和平水年的河道流量均可以满足适宜生态流量要求,枯水年在8~9月流量较低,与生态适宜流量差距较大。径流变异后,只有丰水年可基本满足适宜生态流量需

求, 枯水年的下泄流量整体偏低, 生态流量的保证程度较差。整体上, 由于入库径流呈现递减趋势, 河道的生态流量随之减少。

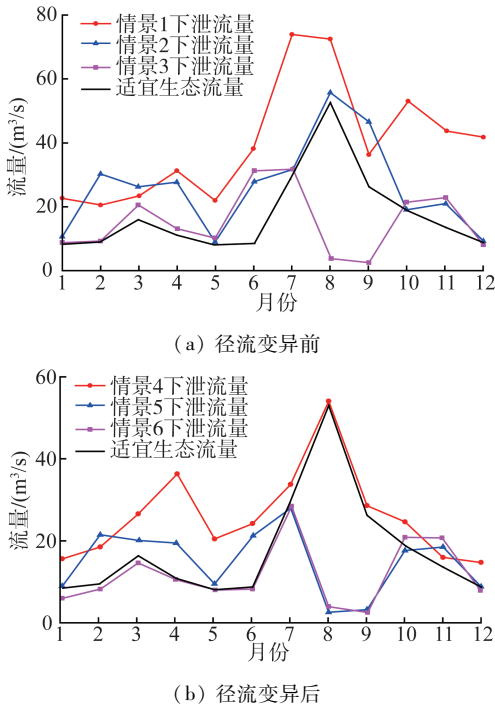


图 6 各情景生态调度后的流量过程
Fig. 6 Flow processes after ecological operation in different scenarios

进一步分析入库径流变异对农业灌溉及生态需水的影响, 结果如图 7 所示。对比分析情景 1、4 丰水年的调度结果, 径流变异前后丰水年的水库调度

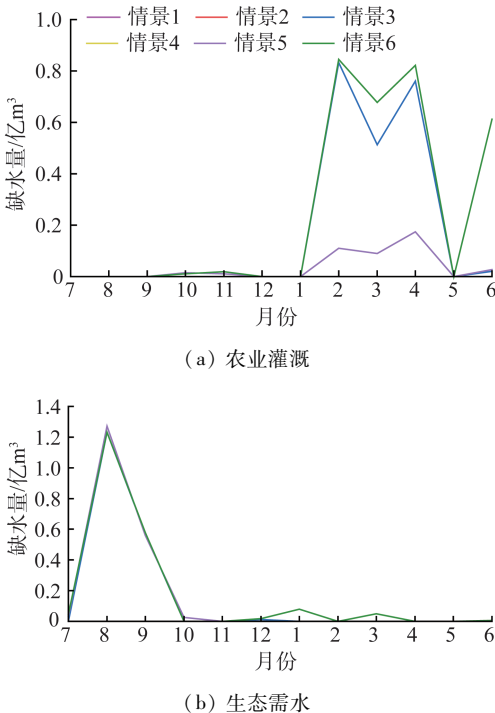


图 7 入库径流变异前后不同水平年生态调度后各月缺水
Fig. 7 Monthly water shortages after ecological operation in different level years before and after runoff change

均可以满足农业灌溉及生态需水, 因来水充沛, 水库的下泄水量基本可以满足农业灌溉及生态需水要求, 径流变异对丰水年水库调度的影响较小。对比分析情景 2、5 平水年的调度结果, 入库径流未发生变异时, 农业灌溉及生态需水保证率为 100%。入库径流发生变异后, 农业灌溉在 2—4 月有轻微缺水情况发生, 总缺水量为 4 183 万 m^3 , 月均缺水率为 6%; 生态需水在 8—9 月缺水较大, 其余月份均可满足生态需水, 生态需水的缺水量为 2.02 亿 m^3 ; 生态需水的月均缺水率增加了 15.5%。对比分析情景 3、6 枯水年的调度结果, 枯水年缺水情况均较为严重, 情景 3 的农业灌溉和生态需水的缺水量分别为 2.5 亿和 1.95 亿 m^3 , 情景 6 的缺水较情景 3 分别增加 0.9 亿及 0.19 亿 m^3 , 入库径流变异引起的农业灌溉月均缺水率增加了 8.5%, 河道生态需水月均缺水率增加了 2.8%。

综上所述, 径流变异前后, 不同水平年随着入库径流的减少, 农业灌溉及生态需水缺水均呈现增加趋势, 保证农业灌溉和河道生态需水的调度能力在减弱, 供水保证率降低, 河道生态引发负面效应。径流变异扩大了不同水平年间的缺水差异。缺水量的增加主要集中在枯水年, 枯水年农业灌溉缺水率较大是因为灌溉需水量在枯水年较大, 但来水量不足, 造成部分月份农业灌溉缺水严重; 生态需水缺水率较大是由于生态流量计算采用的是还原后的径流序列, 整体偏大, 且枯水年水库的来水量和生态需水量相近, 但由于兼顾农业灌溉要求, 使 8—9 月农业灌溉需水量较小月份水库下泄流量较少, 河道生态保证率较低。

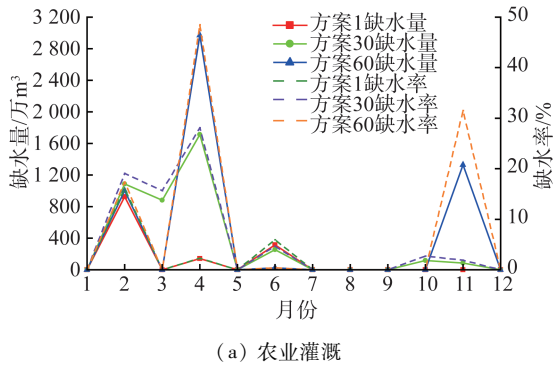
4.2 典型方案调度过程分析

模型求解的 6 种情景中, 每个非劣解集都包含 60 个调度方案, 根据农业灌溉缺水率的侧重程度由小到大分别为方案 1~60。为分析水库的调度特性, 在 6 种调度情景下选择非劣解集中的农业灌溉缺水率最小方案(方案 1)、生态需水缺水率最小方案(方案 60)以及二者综合考虑的方案(方案 30)进行比较。入库径流变异后的调度情景贴近实际情况, 可以反映不同方案间水库的调度能力, 因此选择情景 4、5、6 进行 3 种方案的对比分析。

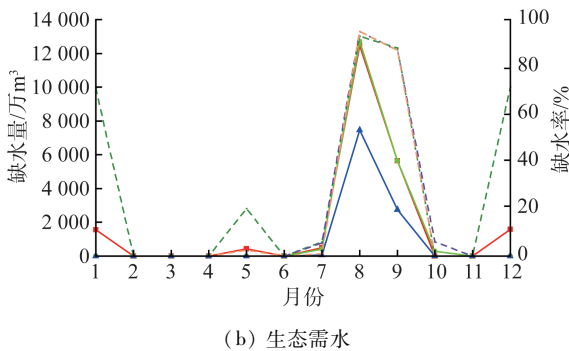
情景 4 为径流变异后丰水年的调度情况, 3 种方案的调度结果为生态需水及农业灌溉缺水率均为 0 的最优情况。

情景 5 为径流变异后平水年的调度结果, 各月缺水情况如图 8 所示。方案 1 的全年农业灌溉缺水量为 1408 万 m^3 , 全年生态需水缺水量为 2.36 亿 m^3 , 8 月生态需水缺水较为严重, 月均生态需水缺水率为

29%。方案60的农业灌溉缺水量在11月和4月较为明显,全年农业灌溉缺水总量为5335万 m^3 ;除8、9月外,其他月份的生态需水缺水率下降显著。方案30的农业灌溉缺水总量为4183万 m^3 ,生态需水缺水总量为2.03亿 m^3 ,月均生态需水缺水率较方案1下降14%。



(a) 农业灌溉



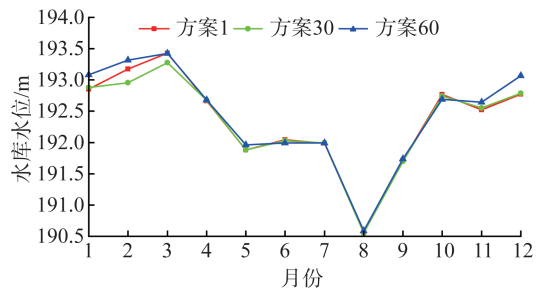
(b) 生态需水

图8 情景5的3种方案调度后的各月缺水量

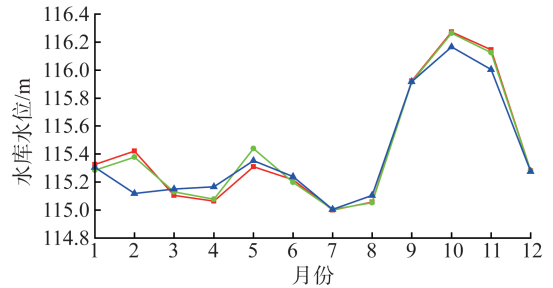
Fig. 8 Monthly water shortages after ecological operation in three schemes in scenario five

情景6为径流变异后枯水年调度结果,缺水情况较为严重,3种方案的库水位变化如图9所示。岗南水库、黄壁庄水库水位的变化过程差别较大,增长和消落趋势基本保持同步。3种方案下,岗南水库水位在11月至次年3月差异较为明显,方案1的水位偏低,方案60的水位最高;黄壁庄水库的水位差异主要体现在1—5月,方案1的水位变化最剧烈。这主要由于方案1要保证水库下游灌区的春灌需水量,加大供水,两水库需共同调节尽可能满足农业灌溉及生态用水。

进一步分析情景6下3种调度方案各月农业灌溉和生态需水缺水量,结果如图10所示。方案1、30、60的农业灌溉月均缺水率分别为27%、31%、32%;3种方案的生态需水月均缺水率分别为30%、18%、17%,整体上,农业灌溉及生态需水缺水的情况较为明显。方案1农业灌溉整体缺水量最少,不同方案间缺水量差异主要集中在9—11月和2—4月,枯水年生态需水缺水量在汛期较大。



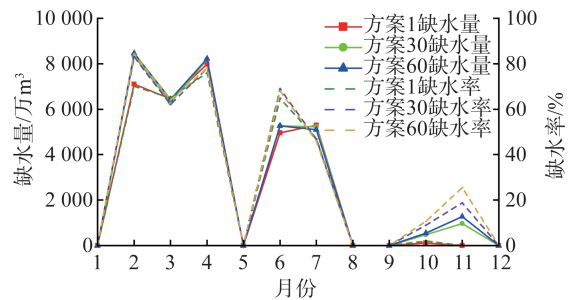
(a) 岗南水库



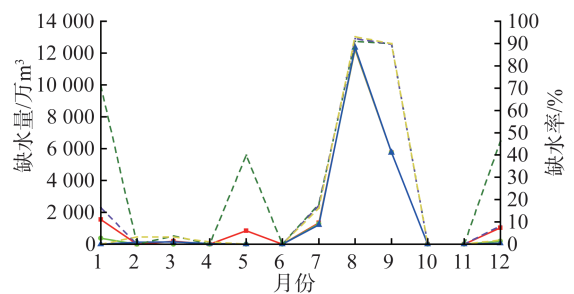
(b) 黄壁庄水库

图9 情景6的3种方案调度后水库水位变化过程

Fig. 9 Reservoir water level change processes after ecological operation in three schemes in scenario six



(a) 农业灌溉



(b) 生态需水

图10 情景6的3种方案调度后的各月缺水量

Fig. 10 Monthly water shortages after ecological operation in ni three schemes in scenario six

综上所述,水库调度如果过于追求经济效益而忽略生态需水,对于河道会产生较为不利的生态影响;如果过于追求生态效益而放弃经济效益,灌区农业会受到较大的影响。因此,需要在二者之间做合理决策。以枯水年采用方案30为例,农业灌溉供水率降低4%会提高12%的生态需水供水率。

5 结 论

a. 小觉站径流量以每年 0.11 亿 m^3 的速率递减,下降趋势通过 0.05 的显著性水平检验;平山站径流序列呈波动下降,以每 10 a 0.16 亿 m^3 的速率减少,下降趋势不明显。小觉站和平山站的径流序列变异分别发生在 1983 年及 1979 年。

b. 根据黄壁庄断面 1956—2020 年的天然径流序列,频率众值法得到的生态流量接近生物生存的最佳流量,为理想生态流量,年生态需水量为 9.85 亿 m^3 ;Tennant 法计算的 30% 多年平均流量为河道适宜生态流量,年生态需水量为 5.85 亿 m^3 ;年内展布法得到的生态流量约占多年平均流量的 10% 以上,为河道最小生态流量,年生态需水量为 3.23 亿 m^3 。

c. 以水库供水缺水率最小和河道生态需水的缺水率最小为目标,构建的岗南-黄壁庄梯级水库多目标优化模型,采用 NSGA-II 算法求解最优解集。入库径流变异后不同水平年水库调度的供水保证率下降,与综合考虑经济效益和生态效益的水库调度方案相比,以枯水年为例,农业灌溉优先的调度方案会增大 13% 的生态缺水率,生态需水优先的调度方案会增大 5% 的农业灌溉缺水率,因此,应合理选择调度方式。

d. 基于调度结果的最优解,在丰水年和平水年黄壁庄水库保持适宜生态流量为下泄流量即可满足河道生态需水及农业灌溉需水量;在枯水年需适当减少春灌用水,增加水库蓄水以满足 8—9 月的生态流量。

参考文献:

- [1] NGOR P B, LEGENDRE P, OBERDORFF T, et al. Flow alterations by dams shaped fish assemblage dynamics in the complex Mekong-3S river system [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 103-114.
- [2] GILLESPIE B R, DESMET S, KAY P, et al. A critical analysis of regulated river ecosystem responses to managed environmental flows from reservoirs [J]. *Freshwater Biology*, 2015, 60(2): 410-425.
- [3] LAI Xijun, LIANG Qihua, JIANG Jiahu, et al. Impoundment effects of the Three-Gorges-Dam on flow regimes in two China's largest freshwater lakes [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(14): 5111-5124.
- [4] 许栋, 张博曦, 及春宁, 等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2): 60-66. (XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunling, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nandujang River in wet and dry seasons

under influence of cascade reservoirs[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2): 60-66. (in Chinese))

- [5] 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. *水利学报*, 2020, 51(7): 757-773. (DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7): 757-773. (in Chinese))
- [6] 吉小盼, 谭平, 刘园, 等. 长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5): 8-14. (JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(5): 8-14. (in Chinese))
- [7] GATES K K, KERANS B L. Habitat use of an endemic mollusc assemblage in a hydrologically altered reach of the Snake River, Idaho, USA [J]. *River Research and Applications*, 2014, 30(8): 976-986.
- [8] KING A J, WARD K A, CONNOR P O, et al. Adaptive management of an environmental watering event to enhance native fish spawning and recruitment [J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 17-31.
- [9] STEINSCHNEIDER S, BERNSTEIN A, PALMER R, et al. Reservoir management optimization for basin-wide ecological restoration in the Connecticut River [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140(9): 04014023.
- [10] BIAN Jiaqi, DONG Zengchuan, JIA Yifei, et al. Research on the multi-objective optimal operation of cascade reservoirs in the upper and middle Yellow River Basin [J]. *Water Supply*, 2019, 19(7): 1918-1928.
- [11] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [12] 白涛, 洪良鹏, 喻佳, 等. 基于开源和节流的乌伦古河流域水库群生态调度[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 132-140. (BAI Tao, HONG Liangpeng, YU Jia, et al. Ecological operation of reservoir group in the Ulungur River Basin through increasing water sources and reducing water consumption [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 132-140. (in Chinese))
- [13] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(1): 53-67.
- [14] 张文鹤, 黄强, 蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(2): 192-197.

- (ZHANG Wenge, HUANG Qiang, JIANG Xiaohui. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 192-197. (in Chinese))
- [15] 蒋红霞, 黄晓荣, 李文华. 基于物理栖息地模拟的减水河段鱼类生态需水量研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 141-147. (JIANG Hongxia, HUANG Xiaorong, LI Wenhua. Ecological water demand of fish in flow reducing reach based on physical habitat simulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 141-147. (in Chinese))
- [16] 戴凌全, 王煜, 戴会超, 等. 金沙江下游向家坝水库不同出库流量对四大家鱼生境面积影响的定量分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1710-1718. (DAI Lingquan, WANG Yu, DAI Huichao, et al. Effect of different release from Xiangjiaba Reservoir in the lower reaches of Jinsha River on habitat area of four major Chinese carps[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1710-1718. (in Chinese))
- [17] NIKGHALB S, SHOKOOHI A, SINGH V P, et al. Ecological regime versus minimum environmental flow: comparison of results for a river in a semi Mediterranean region[J]. Water Resources Management, 2016, 30(13): 4969-4984.
- [18] HUGHES D A, HANNART P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa [J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(3/4): 167-181.
- [19] NALLEY D, ADAMOWSKI J, KHALIL B. Using discrete wavelet transforms to analyze trends in streamflow and precipitation in Quebec and Ontario (1954-2008) [J]. Journal of Hydrology, 2012, 475: 204-228.
- [20] 魏潇娜, 龙爱华, 尹振良, 等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 137-144. (WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 137-144. (in Chinese))
- [21] 何玉芬, 杨汉波, 唐莉华, 等. 北大沙河流域径流变化归因分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 95-101. (HE Yufen, YANG Hanbo, TANG Lihua, et al. Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 95-101. (in Chinese))
- [22] 杨林, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别 [J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8421-8429. (YANG Lin, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko hypothesis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8421-8429. (in Chinese))
- [23] 王亚超. 尼尔基水库生态流量与调度研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [24] 任杰宇. 水文变异条件下河道内生态需水研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [25] 白涛, 徐燕, 孙宪阁, 等. 官厅水库多目标调度规律与方案研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 101-108. (BAI Tao, XU Yan, SUN Xian'ge, et al. Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 101-108. (in Chinese))
- [26] 苏鑫. 水文变异条件下的水库生态调度模型 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [27] LU Xiaorong, WANG Xuelei, BAN Xuan, et al. Considering ecological flow in multi-objective operation of cascade reservoir systems under climate variability with different hydrological periods [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 309: 114690.
- [28] 傅长锋, 李发文, 于京要. 基于生态水文理念的流域水资源规划研究以子牙河为例 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1722-1731. (FU Changfeng, LI Fawen, YU Jingyao. Water resource planning driven by eco-hydrology theorem: a case study of Ziya River Basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(12): 1722-1731. (in Chinese))
- [29] 师忱, 袁士保, 史常青, 等. 滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 264-269. (SHI Chen, YUAN Shibao, SHI Changqing, et al. Effects of climate change and human activities on runoff in Luanhe River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 264-269. (in Chinese))
- [30] 药芝星. 子牙河流域上游径流变化及其影响因素研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [31] 苗正伟, 李娜, 路梅, 等. 滹沱河上游流域径流变化归因分析 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 756-767. (MIAO Zhengwei, LI Na, LU Mei, et al. Attribution analysis of runoff variations in the upper reaches of Hutuo River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 756-767. (in Chinese))
- [32] 程双虎, 王海宁, 刘佳. 滹沱河径流变化分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 96-99. (CHENG Shuanghu, WANG Haining, LIU Jia. Variation of runoff in Hutuo River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 96-99. (in Chinese))
- [33] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水 [J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Estimation of instream flow based on hydrological indexes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1336-1341. (in Chinese))

- [34] 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))
- [35] 潘扎荣,阮晓红,徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报,2013,44(1):119-126. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1):119-126. (in Chinese))
- [36] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范: SL/T 712—2021 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [37] 刘宝库. 岗南-黄壁庄水库群防洪预报调度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
- [38] 杨冬. 水库调度中的多目标优化问题的研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
- [39] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [40] ALAHDIN S, GHAFOURI H R, HAGHIGHI A. Multi-reservoir system operation in drought periods with balancing multiple groups of objectives [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 914-922.
- [41] 龚元石, 陆锦文, HUWE B, 等. 华北平原主要农作物灌溉需水量的估算[J]. 北京农业大学学报, 1993, 19(增刊1): 82-91. (GONG Yuanshi, LU Jinwen, HUWE B, et al. Estimation of Irrigation water requirements for main crops in North China Plain [J]. Journal of China Agricultural University, 1993, 19(Sup1): 82-91. (in Chinese))
- [42] 韦婉. 海河流域典型灌区节水水平评估及节水潜力估算[D]. 天津:天津大学, 2017.

(收稿日期:2022-12-27 编辑:施业)

(上接第24页)

- [13] 蔡旭东. 飞来峡水利枢纽初期发电运行调度分析[J]. 人民珠江, 2002(5): 40-42. (CAI Xudong. Analysis of the prime power generation and regulation of Feilaixia Water Control Project [J]. Pearl River, 2002(5): 40-42. (in Chinese))
- [14] 黄焕坤. 飞来峡水库的运行特点[J]. 广东水利水电, 2001(增刊3): 44-45. (HUANG Huankun. Operaiton characteristics of Feilaixia Reservoir [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002(Sup3): 40-42. (in Chinese))
- [15] 黄本胜, 李深林, 邱静, 等. 脏盆理论: 一种基于河湖水质影响的地表水资源评价新方法[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 150-157. (HUANG Bensheng, LI Shenlin, QIU Jing, et al. Dirty basin theory: a new method of water resources evaluation considering influence of river and lake water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 150-157. (in Chinese))
- [16] 廖一帆, 林炳章, 丁辉. 广东省暴雨高风险区划[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 7-16. (LIAO Yifan, LIN Bingzhang, DING Hui. High-risk rainstorm zonation of Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 7-16. (in Chinese))
- [17] 黄锋华, 黄本胜, 洪昌红, 等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 65-71. (HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, HONG Changhong, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 65-71. (in Chinese))
- [18] 芦云峰. 河道型水库洪水演进研究进展及存在的问题[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 122-126. (LU Yunfeng. Flood routing in river-reservoir system: research advances and existing problems [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 122-126. (in Chinese))
- [19] 许扬生. 飞来峡水利枢纽水库调洪演算方法探讨[J]. 广东水利水电, 2006(5): 7-9. (XU Yangsheng. Discussion on flood routing method of Feilaixia Reservoir [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2006(5): 7-9. (in Chinese))
- [20] 许海军, 陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值: 解析解法[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 69-73. (XU Haijun, CHEN Shouyu. Numerical analytic method for reservoir backwater storage flood routing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3): 69-73. (in Chinese))
- [21] 纪昌明, 张验科. 基于随机模拟的水库泄洪风险分析[J]. 人民黄河, 2009(5): 36-37. (JI Changming, ZHANG Yanke. Risk analysis of reservoir flood discharge based on stochastic simulation [J]. Yellow River, 2009(5): 36-37. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-07 编辑:王芳)