

# 泗河流域水库闸坝群交互式优化调度模型与应用

公绪英, 彭 慧, 谭乐彦, 张雪晶, 李文良, 靳璐宇, 李福臻, 朱士辉

山东省水利勘测设计院, 山东 济南

Email: [hygongxuying@163.com](mailto:hygongxuying@163.com)

收稿日期: 2021年9月5日; 录用日期: 2021年10月13日; 发布日期: 2021年10月20日

## 摘 要

以协调流域上中下游地区间用水, 以及生产、生态用水部门之间用水, 合理配置流域水资源为研究目的, 建立水库闸坝群交互式优化调度模型; 以泗河流域作为算例, 利用全流域31座大中型水库闸坝的长系列联合兴利调算成果, 论证新建14座拦河闸坝数量、位置的可行性, 提出优化拦蓄工程布局的建议; 在优化后的拦蓄工程布局下, 提出基于县际控制断面下泄水量的控制指标法的干流水量分配办法, 对加强泗河干流水量统一调度, 促进流域经济社会发展和生态环境改善具有重要意义。

## 关键词

水库闸坝群, 交互式优化调度模型, 联合兴利调算, 优化工程布局, 水量分配, 统一调度

# Interactive Optimal Operation Model and Application of Sluice and Dam Group in Sihe River Basin

Xuying Gong, Hui Peng, Leyan Tan, Xuejing Zhang, Wenliang Li, Luyu Jin, Fuzhen Li, Shihui Zhu

Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan Shandong

Email: [hygongxuying@163.com](mailto:hygongxuying@163.com)

Received: Sep. 5<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 13<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 20<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to coordinate the water utilization between the upper, middle and lower reaches of the basin, as well as between the departments of production and ecological water, and rationally allocate the water

作者简介: 公绪英, 1981年1月, 山东蒙阴, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水文水资源、规划设计工作。

文章引用: 公绪英, 彭慧, 谭乐彦, 张雪晶, 李文良, 靳璐宇, 李福臻, 朱士辉. 泗河流域水库闸坝群交互式优化调度模型与应用[J]. 水资源研究, 2021, 10(5): 533-543. DOI: [10.12677/jwrr.2021.105058](https://doi.org/10.12677/jwrr.2021.105058)

resources in the basin, an interactive optimal operation model of dam and gate group of reservoirs is established. Taking Sihe River basin as an example, this paper demonstrates the feasibility of the number and location of 14 newly built sluice dams by using the results of long-term joint benefit adjustment of 31 large and medium reservoir dams in the whole basin, and puts forward some suggestions for optimizing the layout of the sluice projects. Under the optimized layout of the storage project, a method of water distribution in the main stream based on the control index method of the discharge under the inter-county control section is put forward, which is of great significance for strengthening the unified regulation of the water flow in the main stream, promoting the economic and social development, and improving the ecological environment.

## Keywords

Interactive Optimal Operation Model, Dam and Gate Group of Reservoir, Joint Interest Adjustment, Optimize Engineering Layout, Water Distribution, Unified Dispatching

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着经济的快速发展和人们生活水平的不断提高,水资源需求量日益增加[1],跨地区河流上下游、左右岸用水矛盾也日渐突出,研究流域水库群优化调度是十分必要的。

目前关于流域水库群优化调度的研究较多。陈立华等[2]根据梯级水电站优化调度特点,建立并行遗传算法求解多阶段最优化问题数学模型。马利亚等[3]以水库运行模拟模型为基础,建立了基于 DPSA 的梯级水库群中长期优化调度模型。冯仲恺等[4]将蛛群优化方法(SSO)这一新型群体智能寻优方法引入梯级水库群优化调度领域,并提出精英集聚蛛群优化方法(ESSO)。张培等[5]从风险管理的角度出发,构建了考虑径流预报误差,滞时的不确定性两类风险因子耦合作用的水库群短期优化调度风险分析模型。陈悦云等[6]建立面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度模型。万东辉等[7]提出了一种考虑水库调度影响的梯级水库群汛期分期方法。

维持河流健康,实现人水和谐是新时期的治水理念,不仅需要考虑人类社会发展对水资源的需求,同时也要考虑维持河流健康所需要的生态水量。本文以泗河流域作为算例,建立水库闸坝群交互式优化调度模型,以人水和谐理念为指导思想,以实现全流域水资源的统一管理和统一调度为基本准则,以全流域水库群闸坝群的科学合理调度为基本手段,以实现泗河流域水资源系统在灌溉、工业供水、生态补水等方面的综合利用效益最佳为优化目标,探索了实现人与河流和谐发展的有效途径。

## 2. 研究区概况

泗河发源于泰安新泰市太平顶,流经新泰、泗水、曲阜、兖州、邹城、微山、任城,于任城区辛闸村入南阳湖,是南四湖东区最大的入湖河流。干流全长 159 km,流域面积 2357 km<sup>2</sup>,其中济宁市内 2030 km<sup>2</sup>,泰安市 327 km<sup>2</sup>。泗河流域属鲁南泰沂低丘陵与山前冲洪积平原交接地带,东部山峦绵亘,丘陵起伏;西部为泰沂山前冲洪积平原,地形平坦开阔,山区 921 km<sup>2</sup>,丘陵区 566 km<sup>2</sup>,平原区 850 km<sup>2</sup>。泗河流域地理位置及水系如图 1 所示。

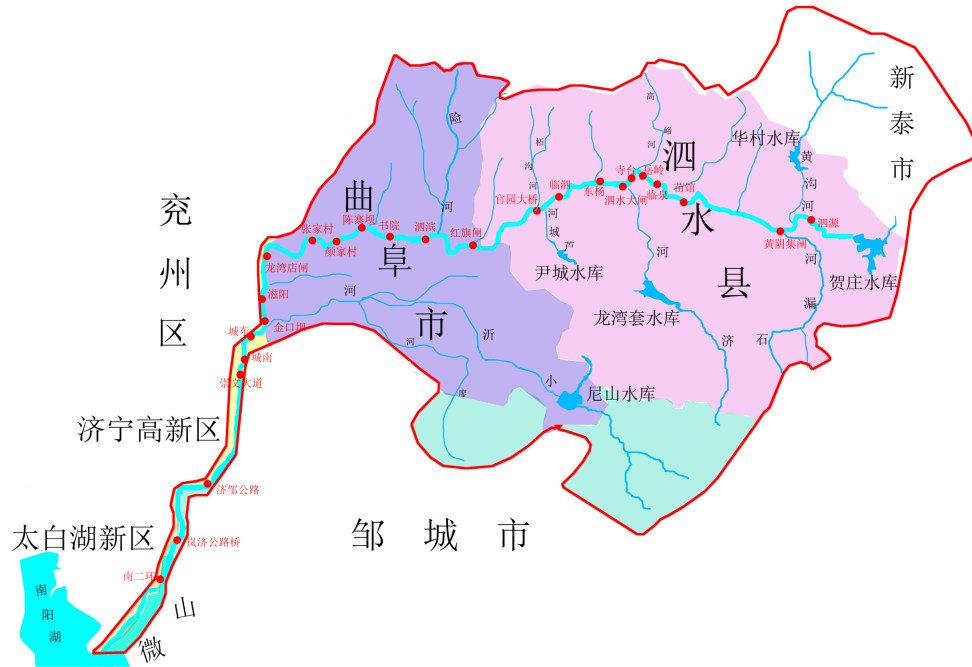


Figure 1. Geographical location and drainage map of the Sihe River basin  
图 1. 泗河流域地理位置及水系图

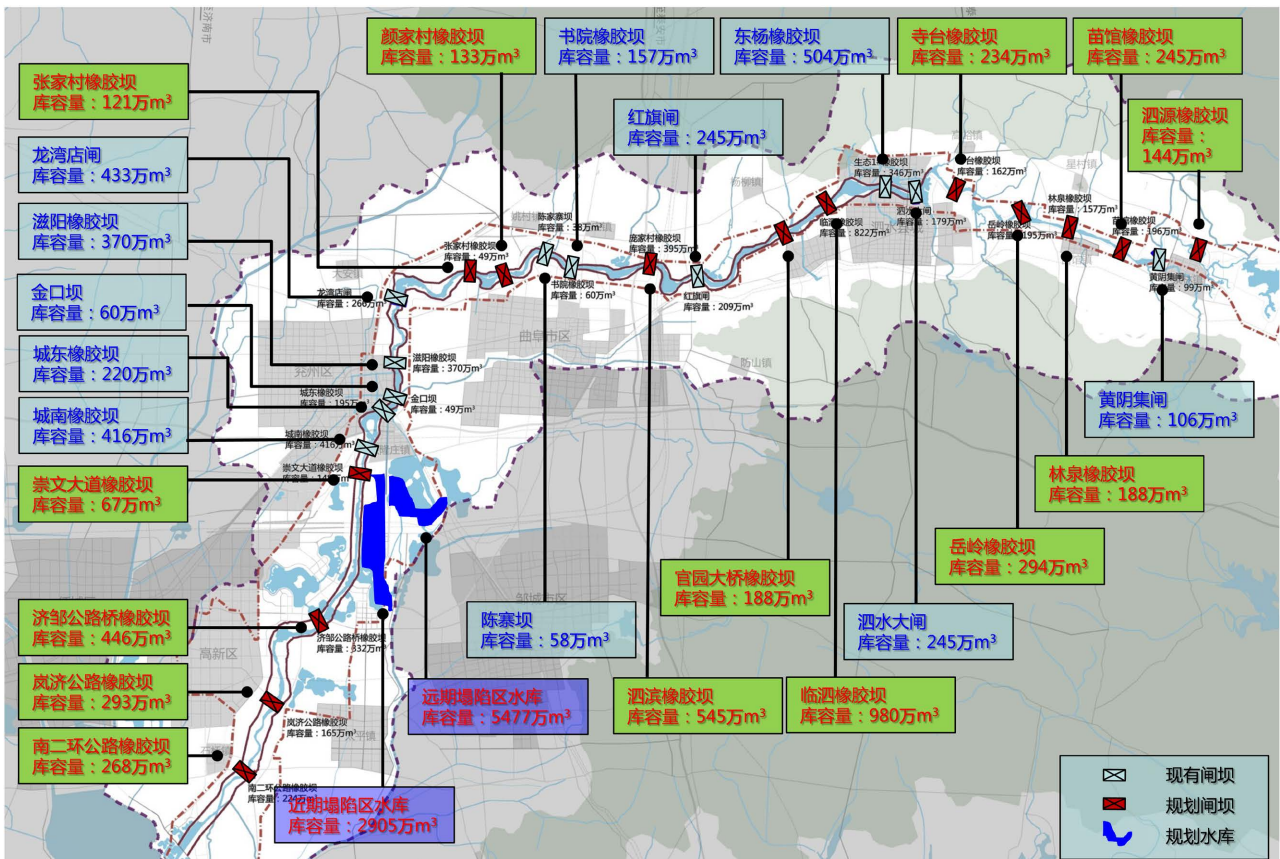


Figure 2. The present situation of Sihe River basin and the layout of planned water conservancy projects  
图 2. 泗河流域现状及规划水利工程布局示意图

泗河流域属于暖温带半湿润气候区，四季分明，气候变化显著，夏季炎热，冬季寒冷。流域内年平均气温为 13.7℃，多年平均降水量为 715 mm。降水分布的年际变化和季节变化都很大，最大降水量为 1192 mm (1964 年)，年最小降水量为 375 mm (2002 年)；年内雨季多集中在 7、8 月份，占年平均降水量的 51.7%。根据实测资料分析计算，泗河流域多年平均径流量 44,352 万 m<sup>3</sup>，其中济宁泗水、曲阜、邹城、兖州、济宁市区及以下分别为 21,935、8764、5736、125、107 万 m<sup>3</sup>，泰安 7684 万 m<sup>3</sup>。

### 3. 水库闸坝群交互式优化调度模型构建

针对泗河流域上中下游生产、生态用水矛盾尖锐的特点，以全流域河道外生产供水最大、河道内水面面积最大为优化目标，以县际控制断面下泄水量为约束条件，构建泗河流域水库闸坝群交互式优化调度模型；采用将遗传算法嵌套于长系列变动时历法中的算法进行联合兴利调算；建立评价模型论证方案的合理性。

#### 3.1. 泗河流域水库闸坝群概述

泗河流域现状共建有大型水库 1 座，中型水库 4 座，拦河闸坝 11 座。规划拟在泗河干流新建橡胶坝 14 座。另外，在泗河下游左岸新建煤矿塌陷区补源水库 1 座。流域内将形成 31 座闸坝水库群。泗河流域现状及规划水利工程布局如图 2 所示。

#### 3.2. 水库闸坝群交互式优化调度模型构建

##### 1) 优化目标

目标函数 1：全流域河道外生产供水最大：

$$\text{Max} \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^n g(i,t) \quad (1)$$

目标函数 2：河道内水面面积最大：

$$\text{Max} \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^n a(i,t) \quad (2)$$

式中： $g(i,t)$  为第  $i$  个水库(闸坝)第  $t$  时段的生产供水量； $a(i,t)$  为第  $i$  个水库(闸坝)第  $t$  时段的水面面积； $n$  为水库群及闸坝群数量； $T$  为联合调算中总时段数。

##### 2) 约束条件

本模型的约束条件主要有县际控制断面下泄水量约束、水量平衡约束、水量连续约束等。

##### 3) 决策变量

将各闸坝的灌溉面积作为决策变量。其中，决策变量最小值为各闸坝近 5 年来平均实灌面积，决策变量最大值为有效灌溉面积。

##### 4) 求解算法

首先利用线性加权和方法将基于流域协同用水的水库闸坝群交互式优化调度模型转化为单目标优化问题，如下式(3)所示：

$$F(X) = 0.55f_1(X) + 0.45f_2(X) \quad (3)$$

再采用将遗传算法嵌套于长系列变动时历法中的算法进行联合供水调算。优化调度模型结构以及泗河流域 31 座水库群闸坝群水量联合优化调度计算流程，如图 3 和图 4 所示。

##### 5) 合理性评价

为评价水库群闸坝群水量联合调度方案的合理性，基于耗散结构理论建立了流域内各地区间用水相对协同度的评价模型，通过流域内各地区间用水协同度的变化关系，进行水库群闸坝群水量联合调度方案的合理性评价，流程见图 5。

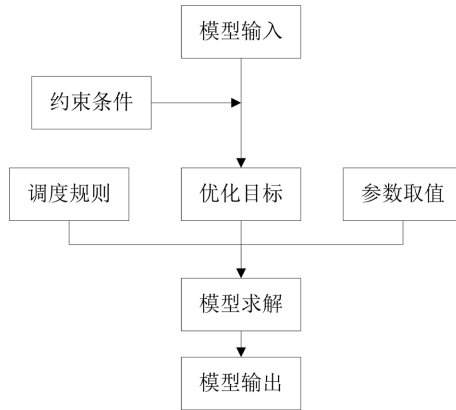


Figure 3. Optimization scheduling model structure diagram  
图 3. 优化调度模型结构图

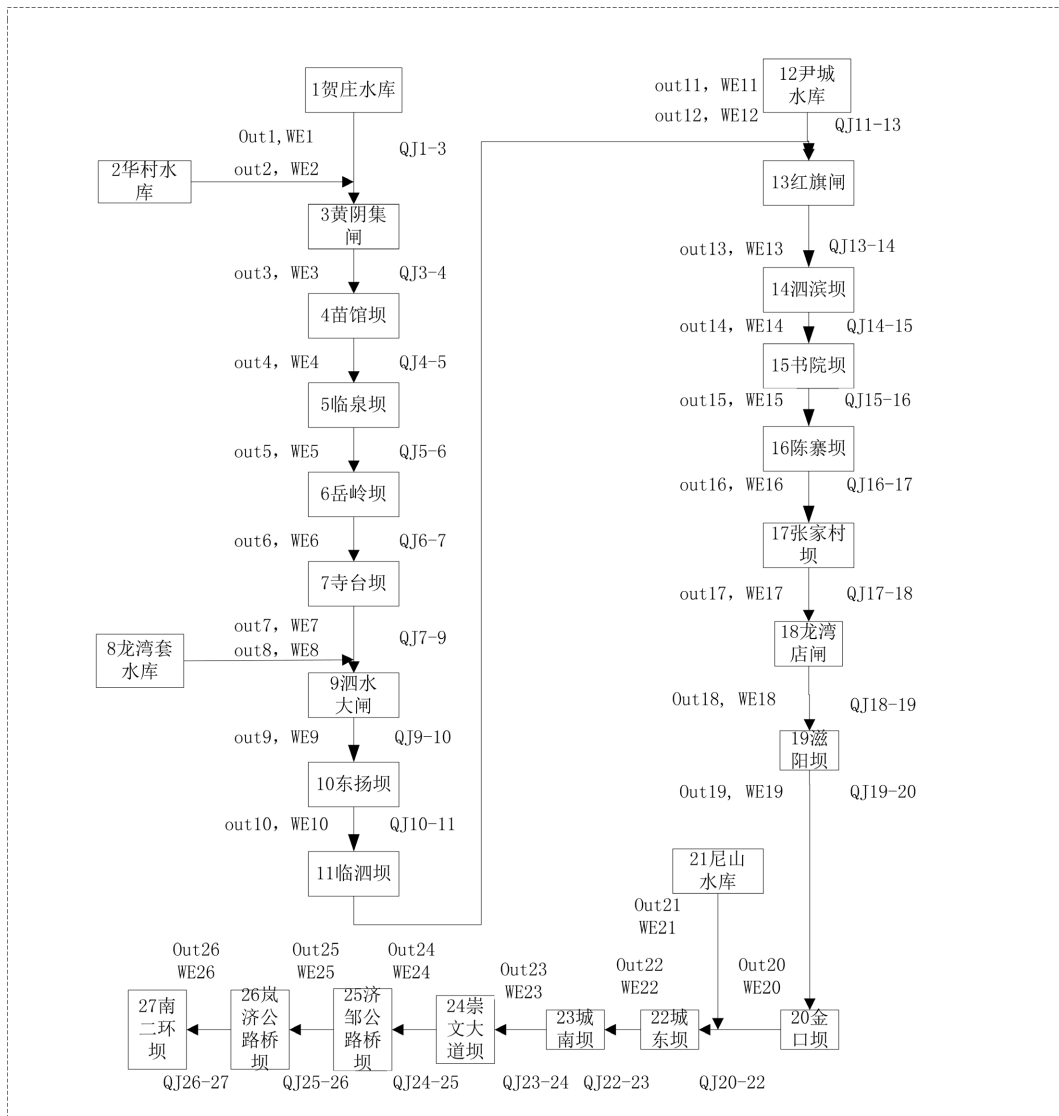


Figure 4. Flow chart of joint optimal operation of water volume of dam and sluice gate of 31 reservoirs in Sihe River basin  
图 4. 泗河流域 31 座水库闸坝群水量联合优化调度计算流程图

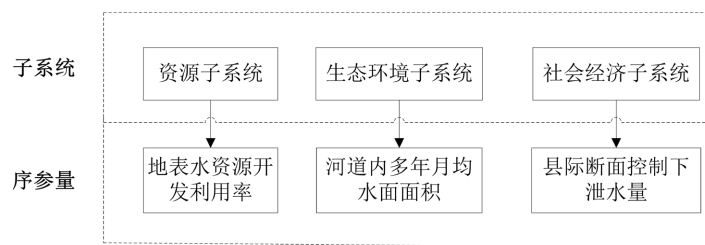


Figure 5. Flow chart of rationality evaluation model  
图 5. 合理性评价模型流程图

水资源系统的用水相对协调度  $u_i$ ，可由公式(4)计算得出：

$$u_i = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(1-r_{ij})]^2}{\sum_{j=1}^m (w_{ij}r_{ij})^2}} \quad (4)$$

水资源系统用水相对协调度  $E(p)$ ，可由公式(5)计算得出：

$$E(p) = -k \sum_{i=1}^3 u_i \log u_i \quad (5)$$

## 4. 拦河闸坝优化效果评价及建设方案

### 4.1. 泗河流域水库闸坝群优化效果评价

利用水库闸坝群长系列联合兴利调算成果，以流域内各地区间用水相对协调度、拦河闸坝的蓄水状态及建设位置为评价指标，优化干流闸坝群建设方案。总体上看，流域上游产流量大，拦河闸坝的蓄水状况最佳，中游、下游略逊，特别是兖州以下，区间几乎无产水面积，闸坝来水仅为上游弃水，但部分闸坝因有中水汇入及塌陷区水库相机补源，蓄水状况有所改善，如图 6 所示。

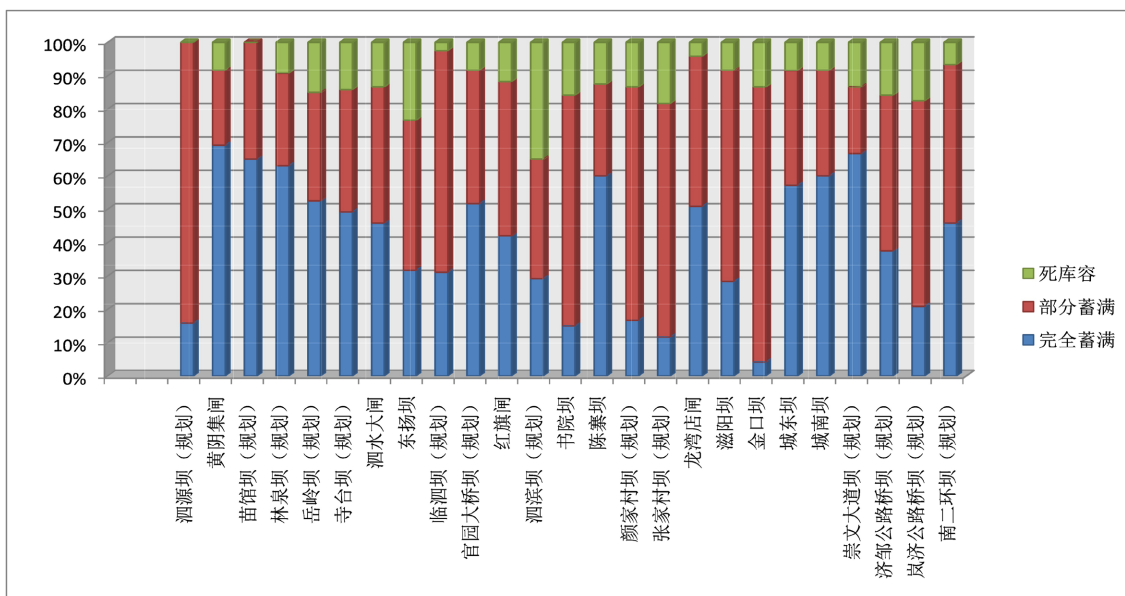


Figure 6. Annual average water storage before the optimization of river dam and sluice gate  
图 6. 拦河闸坝优化前多年平均蓄水情况

## 4.2. 拦河闸坝优化建设方案

在规划工况下, 计算得出泗河流域各地区间用水相对协同度为 0.62。同时结合闸坝的控制流域面积、上级蓄水工程状况等因素, 初步提出规划拦河闸坝优化方案(如图 7 所示)。

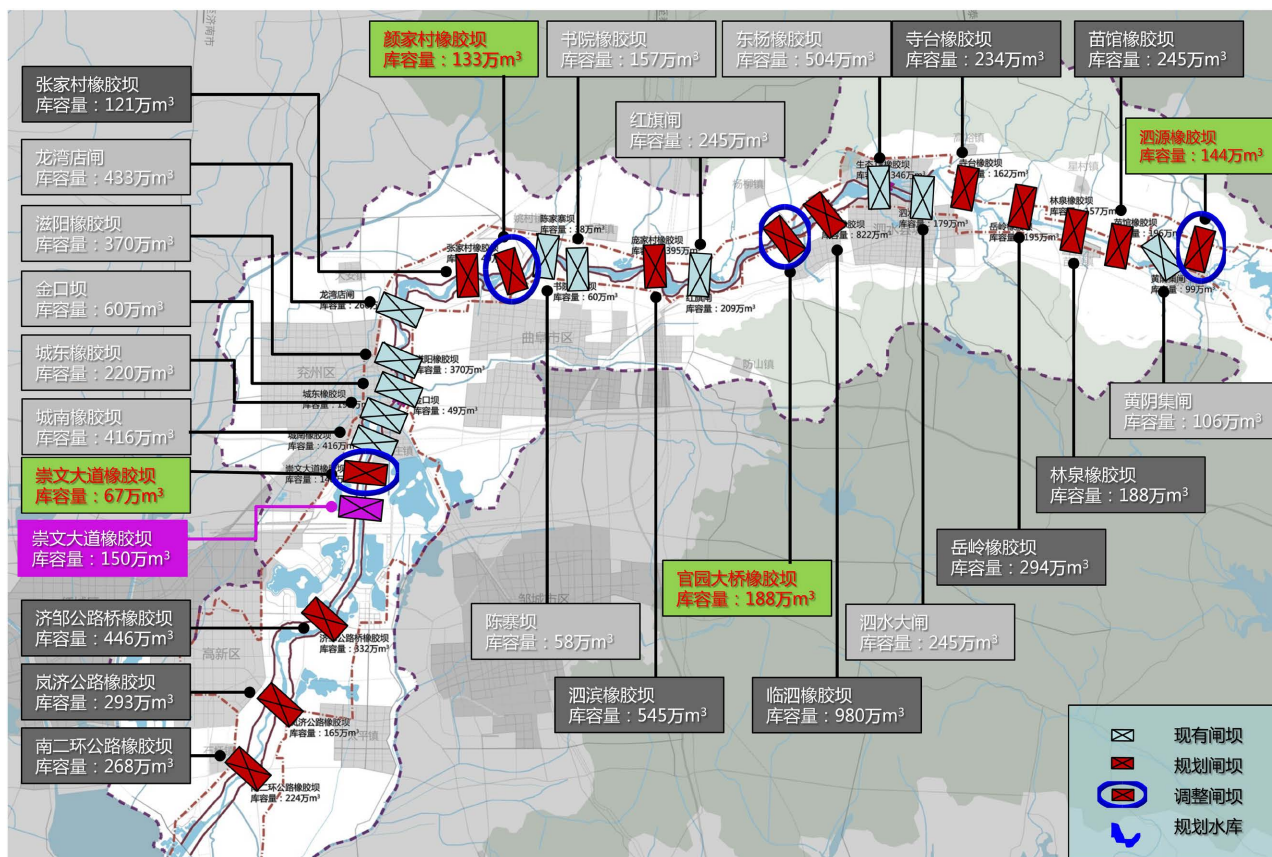


Figure 7. Schematic diagram of optimized construction scheme for river sluice and dam  
图 7. 拦河闸坝优化建设方案示意图

1) 泗源橡胶坝来水量仅为贺庄水库弃水量, 来水条件不佳, 距离上游中型水库贺庄水库较近, 建成后供水功能不强, 且距离泗水城区较远生态景观功能弱, 综上各因素本次建议将泗源坝去掉。

2) 官园大桥橡胶坝因临泗坝及红旗闸, 所以均属泗河干流上调蓄能力较强的水利枢纽, 来水条件较为优越, 但其建成后供水功能不强, 建议去掉。

3) 颜家村橡胶坝来水量仅为陈寨坝弃水量, 来水条件不佳, 且距离上级已建成的陈寨坝及规划建设张家村坝距离近, 建议去掉。

4) 崇文大道橡胶坝下移 1 km 后, 距离塌陷区相机补源水库更近, 具有节省工程投资、蓄水量更大的优势, 更有利于为塌陷区相机补源水库补水; 并且, 下游 1 km 处河底高程相差不大, 回水长度仍能至崇文大道处, 景观效果更好。

## 4.3. 拦河闸坝优化后模型成果

### 4.3.1. 拦河闸坝优化后蓄水情况

结合拦河闸坝优化后多年平均蓄水情况(图 8 所示)以及梯级闸坝蓄水状况(表 1 所示), 对拦河闸坝优化后多

年平均总体蓄水状况分析如下：年内完全蓄满的月份有 5.3 个月，占 44.5%；部分蓄满的有 5.3 个月，占 44.5%；完全蓄不满的有 1.4 个月，占 11%。各闸坝的蓄水状况分析如下：黄阴集闸蓄水状态最佳，完全蓄满的月份有 8.3 个月；书院坝由于非汛期向外调出水，造成完全蓄满的月份有 1.8 个月；金口坝因有城市供水任务，虽然年内完全蓄满的月份仅有 0.4 个月，但是部分蓄满的月份有 9.9 个，蓄水状态尚可。

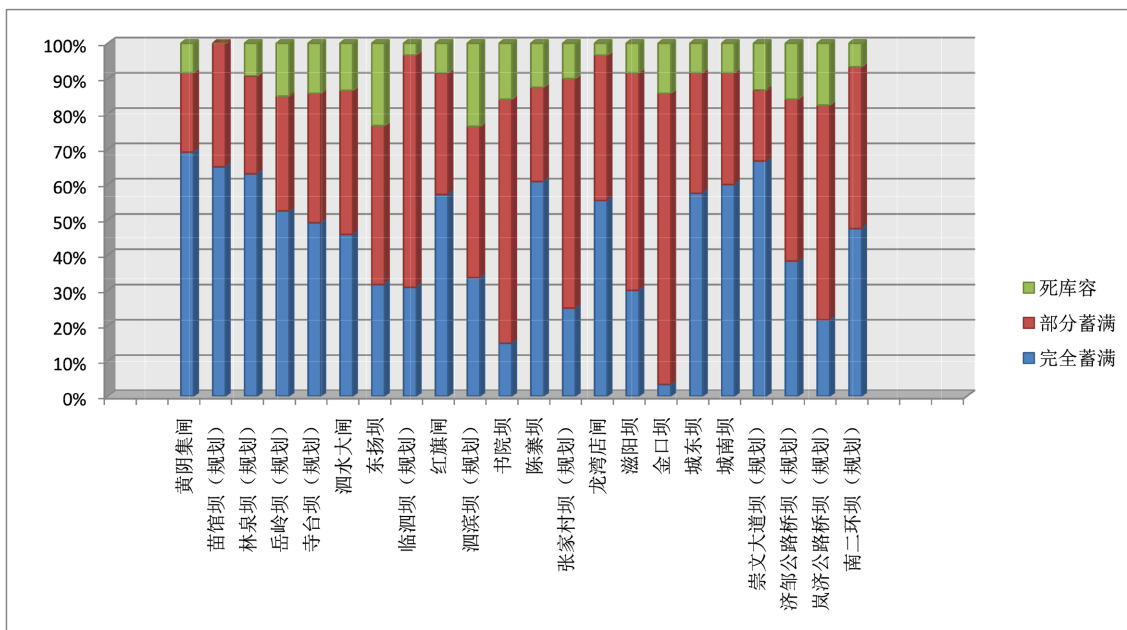


Figure 8. Annual average water storage after the optimization of river dam and sluice gate  
图 8. 拦河闸坝优化后多年平均蓄水情况

Table 1. Water storage status of cascade dam  
表 1. 梯级闸坝蓄水状况

方案	闸坝名称	完全蓄满		部分蓄满		死库容	
		月份数	库容(万 m <sup>3</sup> )	月份数	库容(万 m <sup>3</sup> )	月份数	库容(万 m <sup>3</sup> )
优化调整后	黄阴集闸	8.3	106	2.7	60	1	9
	苗馆坝(规划)	7.8	245	4.2	153	0	35
	林泉坝(规划)	7.5	188	3.3	108	1.1	4
	岳岭坝(规划)	6.3	294	3.9	158	1.8	42
	寺台坝(规划)	5.9	234	4.4	117	1.7	39
	泗水大闸	5.5	245	4.9	152	1.6	75
	东扬坝	3.8	504	5.4	239	2.8	50
	临泗坝(规划)	3.7	980	7.9	461	0.4	14
	红旗闸	6.8	245	4.1	164	1	23
	泗滨坝(规划)	4	545	5.1	385	2.8	286
	书院坝	1.8	157	8.3	68	1.9	2
	陈寨坝	7.3	58	3.2	34	1.5	6
	张家村坝(规划)	3	121	7.8	79	1.2	4



Continued

优化调整后	龙湾店闸	6.6	433	4.9	221	0.4	68
	滋阳坝	3.6	370	7.4	158	1	17
	金口坝	0.4	60	9.9	30	1.7	12
	城东坝	6.9	220	4.1	159	1	5
	城南坝	7.2	416	3.8	268	1	3
	崇文大道坝(规划)	8	67	2.4	48	1.6	6
	济邹公路桥坝(规划)	4.6	446	5.5	286	1.9	65
	岚济公路桥坝(规划)	2.6	293	7.3	108	2.1	22
	南二环坝(规划)	5.7	268	5.5	71	0.8	2
	平均	5.3	295.2	5.3	160.3	1.4	35.9

#### 4.3.2. 河道内生态景观效果评价

泗河干流闸坝群优化结果如表 2 所示,河道内多年月均水面面积达 2364 万  $m^2$ 。泗水县境内、曲阜市境内、兖州市及济宁市区境内干流河道内多年月均水面面积分别为 753、463、1148 万  $m^2$ ,较现状工况新增水面面积分别为 365、233、790 万  $m^2$ ,全河道新增水面面积 1388 万  $m^2$ 。

Table 2. Evaluation of ecological landscape effect in river channel ( $10^4 m^2$ )

表 2. 河道内生态景观效果评价(万  $m^2$ )

工况	泗水县	曲阜市	兖州市及济宁市区	全河道
现状	388	230	358	976
规划	753	463	1148	2364
新增	365	233	790	1388

#### 4.3.3. 地表水资源开发利用率

地表水资源开发利用率结果,如表 3 所示。对结果分析可知,规划工程布局下泗河干流水库群及闸坝群多年平均向河道外生产用户供水 12,454 万  $m^3$ ,向外流域调出水量 313 万  $m^3$ ,计算干流地表水资源开发利用率为 35%。其中,泗水县境内、曲阜市境内、兖州市及济宁市区境内地表水资源开发利用率分别为 23%、44%、28%。与现状相比,泗水县境内水资源开发利用率略有下降,为中下游地区提供了更多的水资源量,有利于地区间协调发展;兖州市及济宁市区水资源开发利用率增加,增加利用的水资源量主要为煤矿塌陷区水库存蓄的雨水资源,以及上中游地区的生态泄水量。

Table 3. Utilization rate of surface water resources development

表 3. 地表水资源开发利用率

工况	泗水县	曲阜市	兖州市及济宁市区	全流域
现状	26%	43%	12%	31%
规划	23%	44%	28%	35%
新增	-3%	1%	16%	4%

#### 4.3.4. 县际控制断面下泄水量

规划工程布局下,经优化调度后,得出不同县际控制断面下泄流量如表4所示。泗水曲阜边界、曲阜兖州边界、兖州济宁市区边界多年平均下泄水量分别为9398、6515、5570万 $m^3$ ,较现状分别新增下泄水量938、1212、1121万 $m^3$ 。

Table 4. Intercounty control section drainage

表4. 县际控制断面下泄水量

工况	泗水曲阜边界(万 $m^3$ )	曲阜兖州边界(万 $m^3$ )	兖州济宁边界(万 $m^3$ )
现状	8460	5303	4449
规划	9398	6515	5570
新增	938	1212	1121

### 5. 基于县际控制断面下泄水量的干流水量分配方案研究

水量分配问题涉及到地区与部门多个决策主体,近期与远期多个决策时段,社会、经济、生态多个决策目标,是一个多维、复杂问题。水量分配应遵循以流域为基础,满足生态、公平性、尊重现状、效率、丰增枯减、市场、产水量优先的基本原则。课题组创新性提出基于水库闸坝群交互式优化调度模型,研究制定了流域内县际控制断面下泄水量分配的控制指标,如表5所示。在不同行政地区水量分配方案合理可行的基础上,秉承人水和谐的治水理念,实现区域间雨洪资源的充分协调可持续利用。

Table 5. Control index of water discharge at intercounty section of main stream

表5. 河干流县际断面下泄水量控制指标

频率	泗水、曲阜边界(万 $m^3$ )	曲阜、兖州边界(万 $m^3$ )	兖州、济宁市区及以下(高新区)边界(万 $m^3$ )
丰水年(20%)	22,896	12,899	10,224
平水年(50%)	10,891	5156	4690
枯水年(75%)	4469	1705	656
特枯水年(95%)	1394	890	357

### 6. 结语

本文以流域协同用水为目标,研究构建水库闸坝群交互式优化调度模型,以流域内各地区间用水相对协同度、拦河闸坝蓄水状态、河道生态用水满足程度等为评价指标,研究河道拦河闸坝建设优化方案;研究制定流域内不同行政地区的水量分配方案,对水权水市场建设和最严格水资源管理制度的顺利实施具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 刘德地,陈晓宏,楼章华. 水资源需求的驱动力分析及其预测[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 1-5. LIU Dedi, CHEN Xiaohong and LOU Zhanghua. Analysis on driving forces of water resources demand and its forecast. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 陈立华,梅亚东,麻荣永. 并行遗传算法在雅砻江梯级水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 66-70. CHEN Lihua, MEI Yadong and MA Rongyong. Parallel genetic algorithm and its application to optimal operation of the Yalong River cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 66-70. (in Chinese)
- [3] 马利亚,雷晓辉,蒋云钟,等. 基于DPSA的梯级水库群优化调度[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(2): 62-67. MA Liya, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Optimal operation of cascade reservoirs based on DPSA. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(2): 62-67. (in Chinese)

- 
- [4] 冯仲恺, 牛文静, 程春田, 等. 梯级水库群优化调度精英集聚蛛群优化方法[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 826-833.  
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, CHENG Chuntian, *et al.* Multi-reservoir operation using elite-gather social spider optimization. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(6): 826-833. (in Chinese)
- [5] 张培, 纪昌明, 张彦科, 等. 考虑多风险因子的水库群短期优化调度风险分析模型[J]. 中国农村水利水电, 2017, 419(9): 181-185.  
ZHANG Pei, JI Changming, ZHANG Yanke, *et al.* Short-term optimal operation risk analysis model considering multiple risk factors. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, 419(9): 181-185. (in Chinese)
- [6] 陈悦云, 梅亚东, 蔡昊, 等. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638.  
CHEN Yueyin, MEI Yadong, CAI Hao, *et al.* Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power generation, water supply and ecology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(5): 628-638. (in Chinese)
- [7] 万东辉, 李赫, 尼仓娜, 等. 考虑水库调度影响的梯级水库群汛期分期研究[J]. 中国农村水利水电, 2020, 452(6): 22-26.  
WAN Donghui, LI He, NI Cangna, *et al.* Research on the flood season segmentation of cascade reservoirs considering the influence of reservoir operations. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, 452(6): 22-26. (in Chinese).