

# 雅砻江梯级水库电站中长期联合优化调度研究

钟斯睿<sup>2</sup>, 何彦锋<sup>1,2</sup>, 郭生练<sup>2\*</sup>, 余春涛<sup>1</sup>, 谢雨祚<sup>2</sup>, 王 俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年2月17日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年4月29日

## 摘 要

以雅砻江中下游河段的两河口、杨房沟、锦屏I级、锦屏II级、官地、二滩和桐子林等7座梯级水库为研究对象, 建立雅砻江梯级水库联合优化调度模型, 并采用DPSA-POA算法求解。利用1956年6月~2013年5月的旬径流资料进行优化调度和对比分析。结果表明: 与单库运行相比较, 梯级水库联合优化调度运行的年均发电量可达936.96亿kW·h, 提高发电量75.06亿kW·h (+8.7%); 年均弃水量为373.67亿m<sup>3</sup>, 减少弃水135.74亿m<sup>3</sup> (-26.6%); 二滩和锦屏I级水库作为中、下游河段的龙头水库, 具有明显的梯级水库库容补偿效益。

## 关键词

梯级水库, 联合优化调度, DPSA-POA算法, 补偿效益

# Mid-Long Term Joint Optimal Operation of Cascade Reservoirs in the Yalong River

Sirui Zhong<sup>2</sup>, Yanfeng He<sup>1,2</sup>, Shenglian Guo<sup>2\*</sup>, Chuntao Yu<sup>1</sup>, Yuzuo Xie<sup>2</sup>, Jun Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Feb. 17<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Taking the Lianghekou, Yangfanggou, Jinping-I, Jinping-II, Guandi, Ertan and Tongzilin cascade reser-

作者简介: 钟斯睿(1999-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面研究工作, Email: zhongsr@whu.edu.cn

\*通讯作者 Email: slguo@whu.edu.cn

文章引用: 钟斯睿, 何彦锋, 郭生练, 余春涛, 谢雨祚, 王俊. 雅砻江梯级水库电站中长期联合优化调度研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(2): 128-137. DOI: 10.12677/jwrr.2022.112014

voirs in the middle and down Yalong River basin as the case study, a joint optimal operation model of cascade reservoirs was established and solved by DPSA-POA algorithm with ten-day runoff data from June 1956 to May 2013. Compared with single reservoir operation, the joint operation of cascade reservoirs can generate 93.696 billion kW·h hydropower annually, which is increased 7.506 billion kW·h (or +8.7%); the average annual abandoned water volume is 37.367 billion m<sup>3</sup>, which is reduced by 13.574 billion m<sup>3</sup> (or -26.6%). Ertan and Jinping-I reservoirs located in the middle and down river have obvious storage compensation benefit.

## Keywords

Cascade Reservoirs, Joint Optimal Operation, DPSA-POA Algorithm, Compensation Benefit

Copyright © 2022 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

随着经济社会快速发展,我国用电需求量逐年上升。为缓解电力供需矛盾,推进“双碳”目标的实现,合理调节我国能源结构,迫切需要开发利用清洁能源。截止至 2020 年底,我国已建成水库 98,112 座,总库容 8983 亿 m<sup>3</sup>,水电站装机容量超 3.7 亿 kW,年发电量约占全国总发电量的 17.8%,水电已成为我国最主要的清洁能源。与单库调度相比,联合调度可充分发挥梯级水库之间的库容补偿效益,提高流域梯级水库群的整体发电量。因此,开展梯级水库群联合优化调度研究,实现洪水资源高效利用,具有重大的应用价值。

动态规划及相关理论的发展与应用为水库优化调度问题的研究奠定了基础[1],在上世纪 60 年代末, Hall [2] 和 Keckler [3] 等首次应用动态规划法求解了梯级水库的规划调度问题。动态规划方法通过遍历所有可能情况,搜寻优化调度问题的全局最优解,但是梯级水库联合调度是一个多维多阶段问题,各级水库间也存在复杂的水力、电力耦合联系。随着库群规模扩大、计算时段增加,模型将不可避免的遇到“维数灾”问题,这将直接影响模型的求解效率。为此,如何在动态规划的理论基础上,通过合适的降维分解方法,是目前研究梯级水库联合优化调度的热点课题。

逐步优化算法(POA) [4]把多阶段问题分解为多个两阶段问题,进而加快模型求解效率;逐次逼近算法(DPSA) [5]把多维问题分解为多个一维问题,从而实现降维的目标。上述两种方法均在我国水库实践有较好的应用。李亮[6]等将 DPSA 算法应用于梯级水库短期优化调度,结果表明该算法的结果具有良好精度。周佳等[7]对 POA 算法进行改进,使模型在多水库中长期优化调度问题中一定程度避免收敛于局部最优解。许银山等[8]在比较 DPSA 和 DPSA-POA 两种算法的研究中指出 DPSA-POA 算法从时间和空间两种角度进行降维,在求解大规模混联梯级水库联合优化调度问题上具有明显优势。张剑亭等[9]利用 DPSA-POA 法求解乌江梯级联合优化调度问题,与单库优化调度结果对比,梯级水库群整体年均发电量提高 12.11 亿 kW·h。邓乐乐等[10]采用 DPSA-POA 算法求解了雅砻江流域两河口、锦屏 I 级、二滩三座水库的联合调度问题,与常规调度相比,每年增发电量 44.03 亿 kW·h,减少弃水量 65.91 亿 m<sup>3</sup>。

本文以雅砻江流域中下游河段为研究对象,针对“两河口-杨房沟-锦屏 I 级-锦屏 II 级-官地-二滩-桐子林”梯级水库群,建立雅砻江梯级水库中长期联合优化调度模型,采用 DPSA-POA 算法进行求解,分析探讨雅砻江中下游梯级水库联合优化调度的发电效益。

## 2. 研究区域及数据资料

### 2.1. 雅砻江流域概况

雅砻江是金沙江第一大支流，发源于青海省巴颜喀拉山南麓，其干流主要位于四川省境内，自西北流向东南，于攀枝花市注入金沙江，全长 1571 km，流域面积 13.6 万 km<sup>3</sup>。

雅砻江从河源至河口天然落差 3830 m，水能蕴藏量巨大，目前规划建设水电站 22 座，在全国规划的十三大水电基地中，梯级水库的装机规模位列第三。流域水系及梯级水库电站示意图如图 1 所示，其中下游梯级电站主要由两河口、杨房沟、锦屏 I 级、锦屏 II 级、官地、二滩和桐子林 7 座水库组成，其中两河口、锦屏 I 级、二滩为控制性水利枢纽工程，各水库电站的基本参数如表 1 所示。

### 2.2. 流域径流资料

采用 1956 年 6 月~2013 年 5 月旬径流资料作为输入雅砻江流域梯级水库中长期联合调度模型的径流资料。其中两河口、锦屏一级和二滩水库有详尽的旬入库流量资料；杨房沟、锦屏二级、官地和桐子林四座径流式水库的旬入库流量资料由上述三座水库流量资料修正移置而来，假设流域内相邻水库的多年平均降雨量的差异不显著，主要考虑流域面积因素带来的差别，即按相邻水库坝址以上流域面积之比换算各级水库的入库流量。



Figure 1. Schematic diagram of watershed system and planned cascade hydropower plants  
图 1. 流域水系及梯级水库电站规划示意图

**Table 1.** Basic parameters of Yalong River cascade reservoirs and hydropower plants  
**表 1.** 雅砻江梯级水库电站基本参数表

水库电站	两河口	杨房沟	锦屏 I 级	锦屏 II 级	官地	二滩	桐子林
正常蓄水位/m	2865	2094	1880	1646	1330	1200	1015
汛限水位/m	2845.9		1859.0			1190.0	
死水位/m	2785	2088	1800	1640	1321	1155	1012
总库容/亿 m <sup>3</sup>	107.67	5.13	79.90	0.19	7.60	58.00	0.91
正常蓄水位以下库容/亿 m <sup>3</sup>	101.54	4.56	77.65	0.14	7.29	57.93	0.72
调节库容/亿 m <sup>3</sup>	65.60	0.538	49.11	0.04	1.23	33.70	0.15
防洪库容/亿 m <sup>3</sup>	20.00		16.00			9.00	
装机容量/MW	3000	1500	3600	4800	2400	3300	600
保证出力/MW	1050	523	1086	1443	710	1028	227
调节能力	多年	日	年	日	日	季	日

### 2.3. 水库防洪任务

雅砻江流域梯级水库主要由两河口、锦屏 I 级、二滩三座水库承担防洪任务。两河口水库设计防洪库容为 20 亿 m<sup>3</sup>，占雅砻江梯级水库防洪总库容的 55.6%，可分担长江中下游、川渝河段以及雅砻江下游防洪任务。

锦屏 I 级和二滩水库防洪任务主要是确保枢纽防洪安全以及配合三峡水库承担长江中下游水库防洪任务，必要时两库联合运行调度缓解雅砻江下游、金沙江下游和川渝河段防洪压力。7 月份，锦屏 I 级和二滩水库以汛限水位指导防洪调度。两库为长江中下游预留总防洪库容不少于 25 亿 m<sup>3</sup>，其中二滩水库不少于 7 亿 m<sup>3</sup>。两库联合调度时，可通过拦蓄洪水等手段缓解长江中下游防洪压力，同时起到拦洪、削峰和错峰作用，缓解雅砻江、金沙江和川渝河段的防洪压力。

## 3. 雅砻江梯级水库联合优化调度模型

### 3.1. 梯级水库联合优化调度模型

#### 1) 目标函数

在满足各约束条件下，以梯级发电量最大为目标函数：

$$\max E_T = \sum_{t=1}^T P_t \Delta t \quad (1)$$

式中： $E_T$  为调度期内总发电量； $T$  为时段总数； $\Delta t$  为单个阶段时长，本文以旬为单位计算时段； $P_t$  为第  $t$  时段梯级电站的总出力，且按下式计算：

$$P_t = \sum_{i=1}^n N_{i,t} = \sum_{i=1}^n K_i Q_{i,t}^{fd} H_{i,t} \quad (2)$$

式中： $n$  为水电站数量； $N_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}^{fd}$  和  $H_{i,t}$  为第  $i$  个水电站第  $t$  时段的出力、发电流量和净水头； $K_i$  为第  $i$  个水电站的出力系数。

#### 2) 约束条件

##### ① 水量平衡约束：

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (I_{i,t} - Q_{i,t}) \Delta t \quad (3)$$

式中： $V_{i,t-1}$ 和 $V_{i,t}$ 分别表示第 $i$ 个水电站第 $t-1$ 时段和第 $t$ 时段初的蓄水量； $I_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别表示第 $i$ 个水电站第 $t$ 时段平均入库流量和平均出库流量。

② 水库的蓄水限制：

$$VL_{i,t} \leq V_{i,t} \leq VU_{i,t} \quad (4)$$

式中： $VL_{i,t}$ 表示第 $i$ 个水电站第 $t$ 时段允许的最小蓄水量，一般为死库容； $VU_{i,t}$ 表示第 $i$ 个水电站第 $t$ 时段允许的最大蓄水量，在汛期为汛限水位所对应的库容，在非汛期为正常蓄水位所对应的库容。

③ 水库出库流量限制：

$$QL_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq QU_{i,t} \quad (5)$$

式中： $QL_{i,t}$ 和 $QU_{i,t}$ 分别表示第 $i$ 个水电站 $t$ 时段水库放水量下限与上限。

④ 水库间的水量平衡方程：

$$I_{i+1,t} = QJ_{i,t} + Q_{i,t} \quad (6)$$

式中： $QJ_{i,t}$ 表示第 $i$ 个和第 $i+1$ 个水电站在第 $t$ 时刻的区间流量。

⑤ 电站出力限制：

$$PL_{i,t} \leq N_{i,t} \leq PU_{i,t} \quad (7)$$

式中： $PL_{i,t}$ 和 $PU_{i,t}$ 表示第 $i$ 个水电站第 $t$ 时段的最小出力和最大出力。

⑥ 水库初始边界条件：

$$\begin{cases} Z_{i,1} = Z_{i,b} \\ Z_{i,T+1} = Z_{i,e} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $Z_{i,b}$ 表示调度期初水库蓄水位； $Z_{i,e}$ 表示调度期末水库蓄水位。

⑦ 其他约束(防洪调度约束)：

根据防洪任务要求，7月份锦屏I级和二滩水库以汛限水位指导防洪调度，且两库为长江中下游预留总防洪库容不少于25亿 $m^3$ ，其中二滩水库单库防洪库容不少于7亿 $m^3$ 。两河口水库暂不参与流域梯级水库联合防洪调度，但仍需单独预留20亿 $m^3$ 防洪库容，由于其防洪高水位与正常蓄水位相同，且其防洪调度约束限制与汛期蓄水约束限制(约束条件②)一致，不需要额外设置约束条件。故针对锦屏I级和二滩水库，为满足其联合防洪调度需求，在出力计算式中引入惩罚项，惩罚的判别条件为：锦屏I级和二滩联合防洪库容小于25亿 $m^3$ 或二滩单库小于防洪库容7亿 $m^3$ ，对出力计算结果进行如下修正：

$$N'_{i,t} = (1 - \sigma\beta)N_{i,t} \quad (9)$$

式中： $N'_{i,t}$ 为第 $i$ 个水电站第 $t$ 时段考虑惩罚的出力( $I=3,6$ )； $\beta$ 为惩罚系数，视惩罚程度取不同值， $\beta > 0$ ； $\sigma$ 为惩罚判别因子，满足惩罚判别条件时取1，否则取0。

### 3.2. 模型求解方法

梯级水库的优化调度是一个多维多阶段问题，传统动态规划算法，所需储存空间大，计算时间长，效率低下，不可避免的面临“维数灾”问题。本文采用逐次逼近动态规划—逐次优化算法(DPSA-POA)对该问题进行简化降维，进而求解雅砻江流域梯级水库群的中长期联合优化调度模型。

逐次优化算法(POA)基本思想是将一个多阶段的决策问题依次分解为多个两阶段问题，固定其他时段变量，仅对所选的两阶段的决策变量进行寻优求解，并对后续两阶段问题按同样的方式依次求解，所得优化序列经过多次循环迭代后理论上可收敛于原问题的解[4]。

逐次逼近动态规划算法(DPSA)的基本思想是将一个多维的问题分解成多个一维的子问题,通过循环迭代求解所有一维子问题的优化序列并使之收敛于初始多维问题的解,进而实现降维,避免“维数灾”,大幅度缩短模型求解所需时间[5]。DPSA-POA 算法主要步骤如下:

- 1) 输入基本资料,如梯级水库群信息、流域水文资料等;
- 2) 拟定初始轨迹,可采用单库最优的方法所得的计算结果作为初始调度轨迹,也可在阶段变量的可行域内自行选取;
- 3) 先对水库 1 进行优化,期间保持其余  $n-1$  个水库的运行决策和状态变量保持不变。利用 POA 算法对水库 1 优化调度进行求解,依次调整阶段变量,使每次调整后对应两阶段的目标函数最优,更新得到的新轨迹。经多次循环迭代直至满足精度要求即可输出水库 1 的运行策略。
- 4) 按照水库顺序自上游至下游依次对后续水库进行优化,优化第  $n$  个水库时,上游第  $1\sim n-1$  个水库保持之前 POA 算法更新后的运行策略,下游水库仍保持初始策略,重复步骤(3)求解所有水库的优化运行轨迹。
- 5) 遍历所有水库得到新的优化调度线,并以此为初始调度线,重复步骤(2)~(4)直到目标函数收敛到满足精度要求为止。

#### 4. 联合优化调度结果分析

根据雅砻江流域 1956 年 6 月~2013 年 5 月的旬径流资料,以旬为计算时段,采用 DPSA-POA 算法求解梯级水库联合优化调度模型,得到雅砻江梯级水库的中长期优化调度成果,并与各级水库按简化运行策略调度的成果进行对比,如表 2 所示。研究结果表明:

- 1) 雅砻江梯级水库优化调度显著提高了流域水库群年发电量,并有效减少了水库弃水,提高流域水能资源利用效率。雅砻江各座水库年均发电量分别为 115.48、67.24、190.14、254.16、112.84、170.05 和 27.04 亿 kW·h,共计 936.96 亿 kW·h,与单库简化运行结果相比增发电量 75.06 亿 kW·h (8.7%)。雅砻江各座水库年均弃水量有所减少,各级水库弃水量减少 9.5%~30.8%,梯级水库群年均弃水 373.67 亿  $m^3$ ,与单库调度结果相比减少 135.74 亿  $m^3$  (26.6%),水能资源利用效率显著提升。

**Table 2.** Comparison of individual and joint optimal operation of Yalong River cascade reservoirs

**表 2.** 雅砻江梯级水库单库和联合优化调度结果比较

水库电站	单库弃水量 /亿 $m^3$	联调弃水量 /亿 $m^3$	减少弃水量 /亿 $m^3$ 及比例	单库发电量 /亿 kW·h	联调发电量 /亿 kW·h	增发电量及比例 /亿 kW·h(%)
两河口	12.03	10.89	1.14(9.5%)	111.59	115.48	3.89(3.5%)
杨房沟	42.31	29.30	13.01(30.8%)	62.17	67.24	5.07(8.2%)
锦屏 I 级	104.91	74.06	30.84 (29.4%)	172.61	190.14	17.53(10.2%)
锦屏 II 级	105.12	80.09	25.03(23.8%)	232.64	254.16	21.52(9.3%)
官地	78.48	56.19	22.29 (28.4%)	103.95	112.84	8.90(8.6%)
二滩	102.34	77.93	24.41(23.9%)	155.59	170.05	14.46(9.3%)
桐子林	64.22	45.21	19.01(29.6%)	23.35	27.04	3.70(15.8%)
<b>梯级</b>	<b>509.41</b>	<b>373.67</b>	<b>135.74(26.6%)</b>	<b>861.90</b>	<b>936.96</b>	<b>75.06(8.7%)</b>

- 2) 联合优化调度可以充分发挥梯级水库的补偿效益。两河口水库作为雅砻江中游河段的龙头水库,具有多年调节能力,在梯级水库联合调度中对下游各级水库进行补偿,其年均发电量与单库调度结果相比,增发电量 3.89 亿 kW·h,增幅仅为 3.5%,但下游其他水库联合优化调度发电量均高于单库简化运行时的发电量,提升幅

度在 8.2%~15.8%不等。其中锦屏 I 级水库作为雅砻江下游河段的龙头水库，即受两河口水库的补偿效应影响，同时也对其下游四座水库起到一定补偿调节作用，其增发电量 17.53 亿 kW·h (10.2%)。锦屏二级、官地、二滩、桐子林等下游水库受到上游两座水库的补偿作用，年均发电量显著提高，分别提升了 21.52、8.90、14.46、3.70 亿 kW·h。

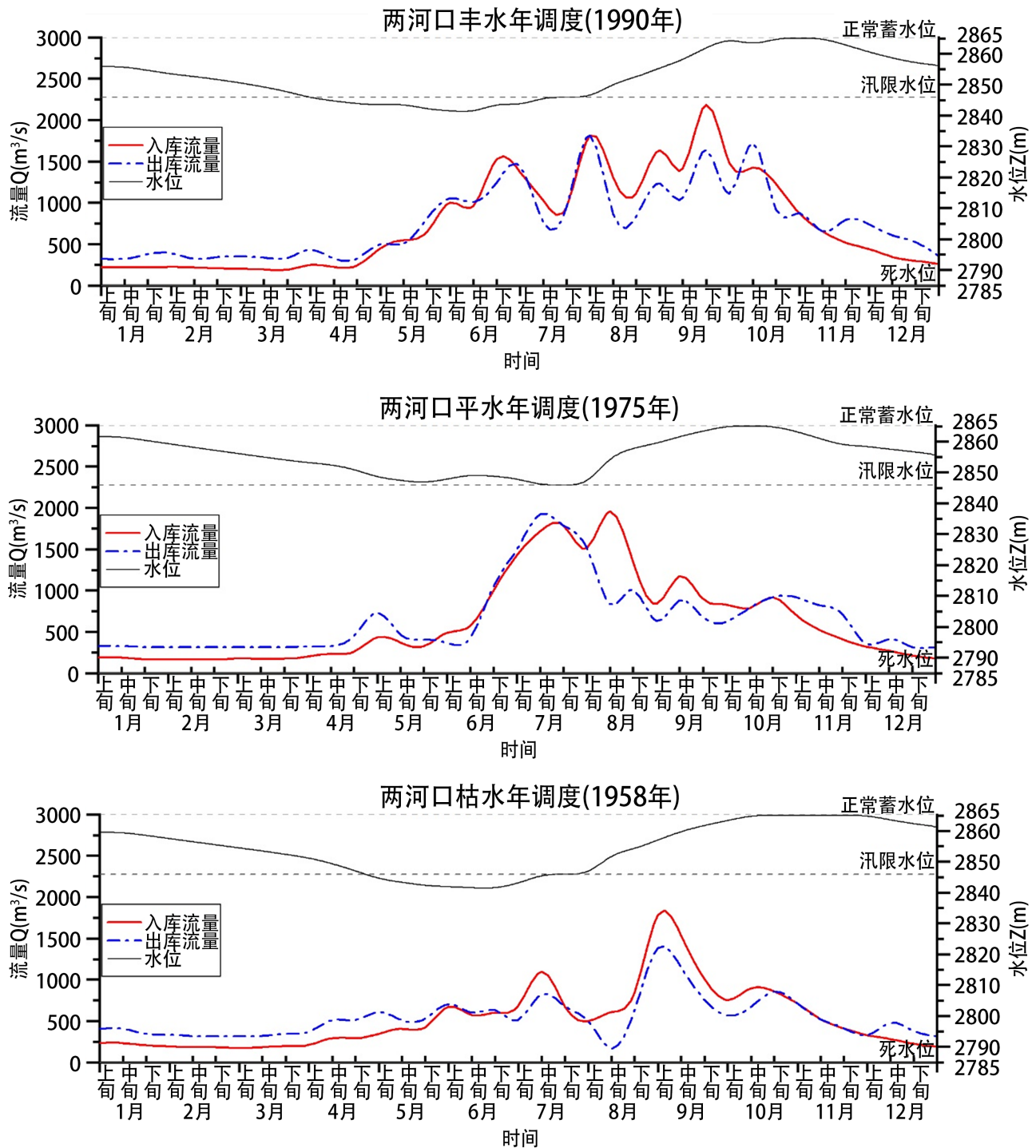


Figure 2. Dispatch process of Lianghekou reservoir in the wet, normal and dry typical years  
图 2. 两河口水库丰、平、枯典型年调度过程

3) 雅砻江梯级水库汛期按照汛限水位控制, 非汛期则尽可能处于高水位运行, 提高电站发电水头。根据雅砻江流域的旬径流资料, 选取 1990 年、1975 年和 1958 年分别作为丰水年、中水年和枯水年的典型年, 分别绘出两河口、锦屏 I 级和二滩水库丰、平、枯典型年的运行调度过程, 如图 2~4 所示。

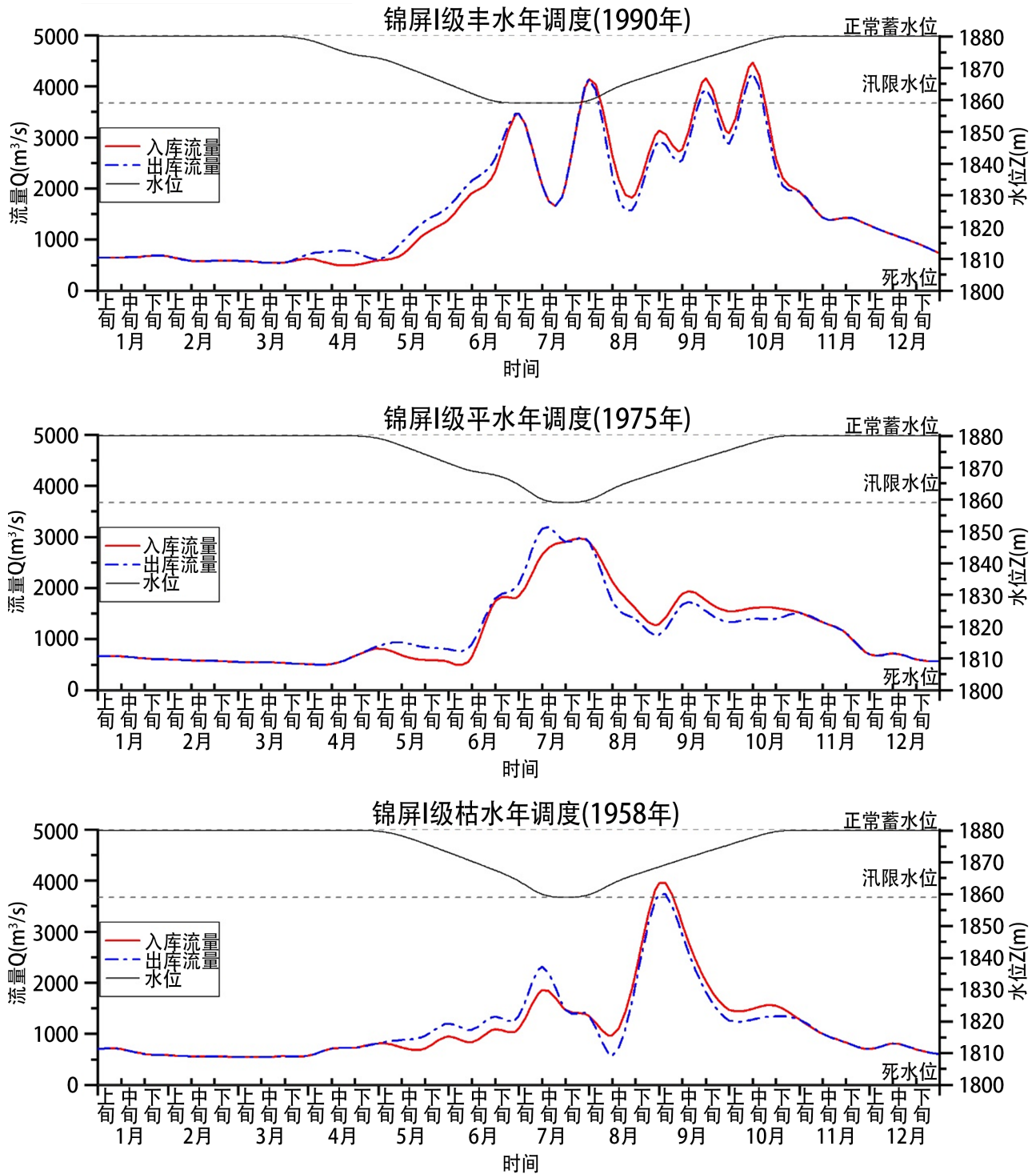


Figure 3. Dispatch process of Jinping-I reservoir in the wet, normal and dry typical years

图 3. 锦屏 I 级水库丰、平、枯典型年调度过程



非汛期，两河口、锦屏 I 级和二滩水库运行水位均维持在汛限水位附近到正常蓄水位范围内，处于较高的水位运行发电。其中锦屏 I 级和二滩水库汛末蓄满之后长期维持在正常蓄水位，直至来年汛前为响应防洪任务，缓慢降低水位。

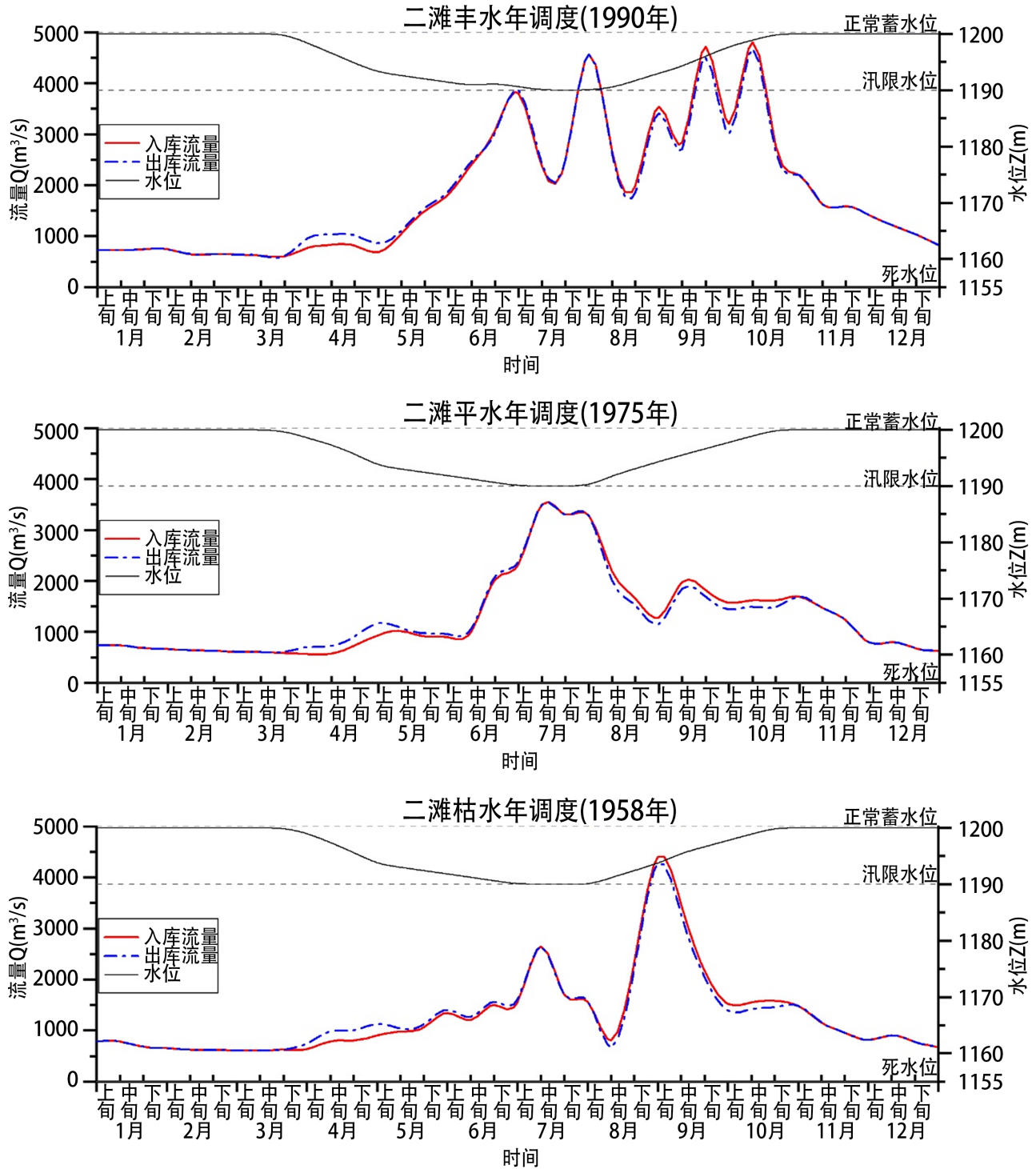


Figure 4. Dispatch process of Ertan reservoir in the wet, normal and dry typical years

图 4. 二滩水库丰、平、枯典型年调度过程

据此,可以总结出雅砻江流域梯级水库联合优化调度的一般性原则:非汛期基本维持高水位运行,汛前降至汛限水位及以下;汛期来水充沛时可以实现满发,汛末提前蓄水使水位恢复至较高水平。

## 5. 结论

本文以雅砻江流域梯级水库电站为研究对象,针对“两河口-杨房沟-锦屏 I 级-锦屏 II 级-官地-二滩-桐子林”梯级水库进行中长期优化调度研究,建立了梯级水库联合优化调度模型,并采用 DPSA-POA 算法进行求解。研究结果表明:

- 1) 联合优化调度能显著提高梯级水库的发电效益。雅砻江流域梯级水库群整体发电量共计 936.96 亿 kW·h, 年均弃水量 373.67 亿 m<sup>3</sup>, 与单库简化运行结果相比增发电量 75.06 亿 kW·h (8.7%), 减少弃水 135.74 亿 m<sup>3</sup> (26.6%)。
- 2) 龙头水库的梯级补偿效益明显。二滩和锦屏 I 级水库作为中下游河段控制性水库工程, 有较好的调节能力, 在施行梯级水库联合优化调度方案时, 对下游水库有良好的补偿效益, 有效提高了下游水库的发电量。
- 3) 若采用更精确的日或 6 h 计算时段进行研究, 充分利用水文气象预报信息, 实现梯级水库汛期运行水位动态控制和提前蓄水联合优化调度, 雅砻江梯级水库年发电量与原设计单库规则相比, 预计可以提高 10% 以上。

## 基金项目

国家自然科学基金(51879192)项目资助。

## 参考文献

- [1] LITTLE, J. D. C. The use of storage water in a hydroelectric system. *Journal of the Operations Research Society of America*, 1955, 3(2): 187-197. <https://doi.org/10.1287/opre.3.2.187>
- [2] HALL, W. A., BUTCHER, W. S. and ESOGBUE, A. Optimization of the operation of a multi-purpose reservoir. *Water Resources Research*, 1969, 8(2): 471-485. <https://doi.org/10.1029/WR004i003p00471>
- [3] LARSON, R. E., KECKLERV, W. G. Applications of dynamic programming to control of water resource systems. *International Federation of Automatic Control*, 1969, 5(1): 15-26. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(69\)90050-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(69)90050-8)
- [4] DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- [5] TAN, Q. F., WEN, X., FANG, G. H., et al. Long-term optimal operation of cascade hydropower stations based on the utility function of the carryover potential energy. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 124359.
- [6] 李亮, 黄强, 肖燕, 肖志娟. DPSA 和大系统分解协调在梯级水电站短期优化调度中的应用研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005(10): 125-128+133.  
LI Liang, HUANG Qiang, XIAO Yan and XIAO Zhijuan. The application research of DPSA and large-scale system decomposition-coordination for cascaded hydroelectric short-term optimal scheduling. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005(10): 125-128+133. (in Chinese)
- [7] 周佳, 马光文, 张志刚. 基于改进 POA 算法的雅砻江梯级水电站群中长期优化调度研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(3): 18-22.  
ZHOU Jia, MA Guangwen and ZHANG Zhigang. Study on the mid-long term optimal dispatching of cascaded hydropower stations on Yalong river based on POA modified adaptive algorithm. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(3): 18-22. (in Chinese)
- [8] 许银山, 梅亚东, 杨娜, 雍婷. 大规模混联水库群长期优化调度[J]. *水电自动化与大坝监测*, 2010, 34(4): 58-63.  
XU Yinshan, MEI Yadong, YANG Na and YONG Ting. Optimal operation method of large-scale multi-reservoir group. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2010, 34(4): 58-63. (in Chinese)
- [9] 张剑亭, 郭生练, 陈柯兵, 何绍坤. 基于信息熵的梯级水库联合优化调度增益分配法[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(2): 94-102.  
ZHANG Jianting, GUO Shenglian, CHEN Kebing and HE Shaokun. Benefit distribution method based on information entropy for optimal joint operation of cascade reservoirs. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(2): 94-102. (in Chinese)
- [10] 邓乐乐, 郭生练, 何绍坤, 张剑亭, 陈柯兵, 巴欢欢. 雅砻江梯级电站发电优化调度研究[J]. *水资源研究*, 2019, 8(2): 109-116.  
DENG Lele, GUO Shenglian, HE Shaokun, ZHANG Jianting, CHEN Kebing and BA Huanhuan. Optimal operation of Yalong River's cascade reservoirs. *Journal of Water Resources Research*, 2019, 8(2): 109-116. (in Chinese)