

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.06.015

贵州境内乌江水电梯级开发联合生态调度

吕巍^{1,2}, 王浩¹, 殷峻暹¹, 朱心悦³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 环境保护部环境工程评估中心, 北京 100012;
3. 南京国环科技股份有限公司, 江苏 南京 210042)

摘要: 为保护乌江干流水生生态系统, 实现水能资源开发和生态环境双赢, 进行乌江水电梯级开发联合生态调度。分析计算了乌江主要生态控制断面洪家渡、乌江渡和思林的最小、适宜及理想生态流量过程; 构建了乌江干流梯级水电站多目标联合优化调度模型, 采用智能优化算法对其进行求解。计算得到乌江干流9座水库多年平均发电量和典型年年发电量、3个主要控制断面的生态用水保证率及其典型年水库调度过程。结果表明, 通过乌江干流梯级水电站联合优化调度, 在保证水电站防洪安全和发电效益正常发挥的同时, 可提高乌江干流生态流量保证率; 对于偏枯年和枯水年, 即使通过梯级水电站优化调度, 其理想生态流量用水需求也难以满足。

关键词: 生态调度; 水电梯级开发; 乌江; 贵州

中图分类号: TV213.2; X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)06-0918-10

国内外现有梯级水利水电工程运行结果表明: 梯级水电建设一方面带来了巨大的经济效益和社会效益, 另一方面亦对河流生态系统产生了诸多不利影响, 如造成大坝下游河流地貌学特征的变化^[1]、自然水文周期的人工化等。为了降低建库筑坝对河流生态系统的影响, 人们尝试采取了各种工程和非工程措施。水库生态调度就是一种典型的非工程措施, 即通过调整水库的运行调度方式, 使得梯级水利水电工程在发挥经济效益的同时, 减少相关生态环境负面影响。

近年来, 中国专家学者在减轻水电水利工程对生态与环境的不良影响方面进行了一系列的探索与实践。傅春和冯尚友^[2]提出了生态水利的概念, 并建立了水资源持续利用的数学模型; 贾海峰等^[3]对水库调度和营养物削减关系进行了探讨, 从而做到了防洪调度兼顾库区富营养化的控制; 王好芳和董增川^[4]建立了基于量与质的面向经济发展和生态环境保护的多目标协调配置模型, 用以解决水资源短缺和用水竞争性的问题。高永胜^[5]提出了生态调度的基本原则, 构建了生态调度的基本框架。董哲仁等^[6]针对现行水库运行调度的不足, 提出了水库多目标生态调度基本思路。艾学山和范文涛^[7]针对现行水库调度过分强调经济利益而忽视生态环境需水状况, 建立了以经济效益、社会效益和生态效益组成的综合效益最大为目标函数, 以灌溉、发电、航运等为约束条件的水库生态调度多目标数学模型。胡和平等^[8]以水电站年发电量最大为优化目标, 以生态方案为约束, 提出了基于生态流量过程线的水库优化调度模型。卢有麟等^[9]针对传统优化模型难以同时处理多个优化目标的固有缺陷, 提出一种改进多目标差分进化算法对模型进行求解, 并以三峡水库多目标优化调度为例进行计算。Cai等^[10]建立了三峡-葛洲坝梯级水库生态调度模型, 利用遗传算法对模型进行求解, 并采用RVA方法对调度结果进行评价。王煜等^[11]在葛洲坝下游中华鲟产卵场水动力数学模型及产卵适合度评价模型的基础上, 利用BP人工神经网络构建了水库调度与产卵场产卵适合度关系模型, 并将其嵌入葛洲坝现行的水库调度模型, 建立了优化中华鲟产卵生境的水库生态调度模型。

总的来说, 现有的水库生态调度主要以生态流量为约束条件, 考虑的生态指标也相对简单, 且主要以单

收稿日期: 2016-06-07; **网络出版时间:** 2016-11-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20161117.0911.026.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAB07B03); “十二五”国家科技重大专项资助项目(2012ZX07205)

作者简介: 吕巍(1979—), 男, 吉林桦甸人, 博士研究生, 主要从事水资源管理、环境影响评价等方面研究。

E-mail: 108874605@qq.com

库研究为主。而梯级水电站生态调度与单库相比, 在调度对象、调度目标、调度时段等方面具有突出的复杂性。本文针对西南山区河流贵州境内乌江干流生态环境问题, 综合考虑梯级水电站的功能和调蓄能力, 构建梯级水电站多目标优化调度模型, 分析兼顾不同生态保护目标需求的调度方式对发电、航运、生态等用水的影响, 提出兼顾生态保护目标的梯级水电站调度方案, 为乌江干流水生生态系统的健康发展提供技术支撑, 以实现水能资源开发和生态环境保护双赢的目标。

1 研究区域概况

乌江是长江上游右岸的最大支流, 为贵州省第一大河, 流域面积 87 920 km², 其中, 贵州境内为 66 849 km², 占 76%。干流全长 1 037 km²。六冲河汇口以上为上游, 汇口至思南为中游, 思南以下为下游。水电开发共分为 12 级, 其中贵州境内包括普定、引子渡、洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林和沙沱 9 级, 下游重庆境内包括彭水、银盘和白马 3 级。乌江流域地理位置示意图 1, 贵州境内乌江的 9 座梯级水电站的蓄水控制水位、调蓄性能、保证出力、装机容量等基本特性见表 1。

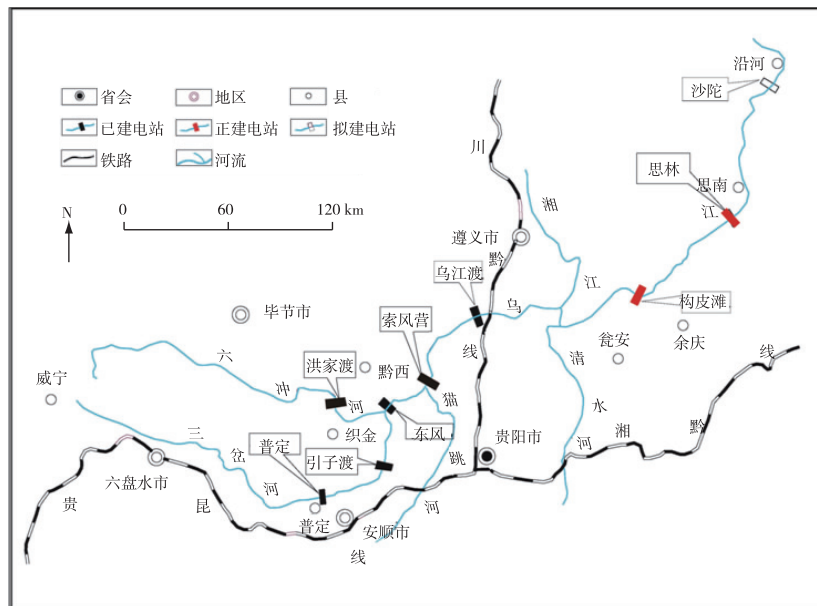


图 1 贵州乌江流域地理位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Wujiang River basin in Guizhou province

表 1 贵州乌江梯级水电站基本特性

Table 1 Basic characteristics of cascade hydropower stations along Wujiang River in Guizhou province

水库名称	汛限(正常)蓄水位/m	死水位/m	调蓄库容/亿m ³	调蓄性能	保证出力/MW	装机容量/MW
洪家渡	1 140	1 076	33. 61	多年	159. 1	600
普定	1 145	1 126	2. 480	季	13. 9	84
引子渡	1 086	1 052	3. 220	季	46. 5	360
东风	970	936. 0	4. 910	季	236. 0	695
索风营	837	822. 0	0. 674 0	日	166. 9	600
乌江渡	760	720. 0	13. 60	季	332. 0	1 250
构皮滩	630	590. 0	29. 02	年	746. 4	3 000
思林	440	431. 0	3. 170	日	303. 6	1 050
沙沱	365	353. 5	2. 870	日	322. 9	1 120

2 梯级水电站联合生态调度原则和边界条件

2.1 联合调度原则

乌江贵州段 9 座水库调蓄能力和调蓄性能不同。其中, 普定、引子渡、东风、索风营、思林和沙沱 6 座水库是日调节水库或季调节水库, 调节能力很小, 调节库容均不足 5 亿 m^3 。洪家渡、构皮滩和乌江渡分别为多年、年和季调蓄水库, 其调蓄库容分别为 33.61 亿 m^3 、29.02 亿 m^3 和 13.60 亿 m^3 , 总调蓄能力达到 76 亿 m^3 。因此, 在本研究中, 洪家渡、乌江渡和构皮滩 3 座水库的联合优化调度, 统筹考虑水库发电、生态和航运用水需求; 普定、引子渡、东风、索风营、思林和沙沱 6 座水库以发电为主, 根据其发电调度规则, 在满足防洪安全的前提下, 水库尽快蓄水至正常蓄水位运行。

2.2 调度边界条件

在进行梯级水库多目标联合优化调度时, 防洪调度按照各水库防洪要求设定调度规则; 航运则考虑乌江渡和思林两座水库下游的航运用水需求, 根据《贵州乌江梯级水电站水库调度手册》, 需乌江渡下泄流量不小于 $100 \text{ m}^3/\text{s}$, 需思林下泄流量不小于 $193 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

本次研究综合考虑生态健康程度及实测径流量, 确定河流最小、适宜和理想生态流量。采用需水等级系数来表征过水断面宽度、植被覆盖率、水质污染、生物多样性等因素对生态流量的影响。最小、适宜、理想生态流量的需水等级指数分别按照式(1)一式(3)计算。

$$\begin{cases} \phi_{\min} = \alpha_1 \xi_1 + \alpha_2 \xi_2 + \alpha_3 \xi_3 \\ \sum \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ_{\min} 为最小生态流量的蓄水等级指数; ξ 表示影响河道生态需水系数的特征要素; ξ_1 表示最枯年最枯月径流量比率; ξ_2 表示最小生态特征指数; ξ_3 表示稳定性指数; α_i 指特征要素与最小生态流量的需水等级指数的相对隶属程度, 采用熵值法计算获得^[12]。

$$\begin{cases} \phi_{\text{opt}} = \phi_{\min} + \alpha_1 v_{xz} + \alpha_2 \xi_{\text{opt}} \\ \sum \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϕ_{opt} 为河道适宜生态需水等级指数, 在最小生态需水等级指数基础上求出; α_i 指特征要素(主要指变异系数和适宜生态特征指数)与河道适宜生态需水等级指数的相对隶属程度; ξ_{opt} 为适宜生态特征指数; v_{xz} 为适宜生态修正系数。

$$\begin{cases} \phi_{\text{ide}} = \alpha_1 \xi_{\text{year}} + \alpha_2 \xi_{\text{ide}} \\ \sum \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ϕ_{ide} 指河道理想生态需水等级指数; ξ 指河道理想生态需水系数的特征要素, 包括理想生态特征指数 ξ_{ide} 以及年内变异系数 ξ_{year} ; α_i 指特征要素与河道理想生态需水等级指数的相对隶属度。

需水等级系数确定之后, 根据式(4)计算洪家渡、乌江渡和思林生态控制断面的最小、适宜和理想生态需水量, 结果见表 2。

$$Y_k = \phi_k Y' \quad (4)$$

式中: Y_k 表征河道特征断面生态需水量; ϕ_k 为河道生态需水等级系数, 表征不同级别河道的生态需水状况; Y' 为河道断面多年平均月平均流量。

$$Y' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (5)$$

式中: Q_i 表示第 i 年(月)平均流量, $i=1, 2, \dots, n$, n 为统计年数。

表 2 洪家渡、乌江渡和思林断面最小、适宜和理想生态需水流量

m³/s

Table 2 Minimum, optimal and ideal ecologically flow demands of the Hongjiadu, Wujiangdu and Silin stations

断面	等级	汛期						枯期					
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
洪家渡	最小	33.5	74.0	92.3	72.4	57.3	42.6	22.5	16.5	13.2	13.5	14.8	19.8
	适宜	55.1	124	153	118	96.5	68.6	36.5	26.7	21.7	21.2	24.2	32.1
	理想	87.2	196	240	187	153	109	57.3	42.3	34.2	36.8	38.4	50.3
乌江渡	最小	88.4	169	248	178	155	112	64.2	54.4	47.6	46.7	54.7	66.2
	适宜	162	303	448	324	283	201	115	99.3	84.7	82.9	98.4	119
	理想	255	483	717	519	451	321	183	159	135	132	157	191
思林	最小	254	493	585	368	309	245	150	119	105	104	118	169
	适宜	406	788	935	588	492	392	240	188	168	164	189	268
	理想	617	1 200	1 420	897	749	595	362	288	256	254	288	408

3 梯级水电站生态调度多目标优化模型

联合生态优化调度是综合协调梯级水库在防洪、发电、供水、航运、生态等各方面的效益, 提出梯级水库的联合优化调度方式。通过建立梯级水库多目标优化调度模型, 确定梯级水库优化调度目标与约束条件的数学描述方式。

3.1 目标函数

梯级水库多目标优化调度以发电、生态、航运综合效益最大为目标函数。其中, 发电以梯级枢纽发电量表示, 生态以生态流量贴进度表示, 航运以航运流量贴进度表示, 具体见式(6)。

$$Z = \max(Z_{\text{ELC}}\lambda_{\text{ELC}} + Z_{\text{ECO}}\lambda_{\text{ECO}} + Z_{\text{NAV}}\lambda_{\text{NAV}}) \tag{6}$$

$$Z_{\text{ELC}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T E(i,t) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T P_{i,t}\Delta t \tag{7}$$

$$Z_{\text{ECO}} = \sum_{j=1,6,8} \sum_{t=1}^T f_{j,t} \tag{8}$$

$$Z_{\text{NAV}} = \sum_{j=6,8} \sum_{t=1}^T g_{j,t} \tag{9}$$

$$f_{j,t} = \begin{cases} 1 & Q_{j,t} \geq Q_{j,t}^{\text{ECO}} \\ \frac{Q_{j,t}}{Q_{j,t}^{\text{ECO}}} & Q_{j,t} < Q_{j,t}^{\text{ECO}} \end{cases} \tag{10}$$

$$g_{j,t} = \begin{cases} 1 & Q_{j,t} \geq Q_{j,t}^{\text{NAV}} \\ Q_{j,t}/Q_{j,t}^{\text{NAV}} & f(Q_{j,t} < Q_{j,t}^{\text{NAV}}) \end{cases} \tag{11}$$

$$P_{i,t} = AQ_{i,t}H_{i,t} \tag{12}$$

$$H_{i,t} = Z_{i,t} - Z_{i,t}^{\text{wei}} \tag{13}$$

式中: Z_{ELC} 、 Z_{ECO} 、 Z_{NAV} 分别为发电量、生态目标贴进度和航运目标贴进度; λ_{ELC} 、 λ_{ECO} 、 λ_{NAV} 分别为发电量、生态流量贴进度和航运目标贴进度的权重; $f_{j,t}$ 为 j 断面在 t 时段生态流量贴进度, $j=1, 6, 8$ 分别表示洪家渡、乌江渡和思林断面; $g_{j,t}$ 为 j 断面在 t 时段航运流量贴进度, $j=6, 8$ 分别表示乌江渡和思林下游断面; i 为乌江干流梯级水库, $i=1, 2, \dots, 9$, 分别表示洪家渡、普定、引子渡、东风、索风营、洪家渡、构皮滩、思林、沙沱; $E(i,t)$ 为第 i 级水库 t 时段的发电量, kW·h; N 为水库的总梯级数; T 为计算时段总数; $P_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的发电出力, kW; Δt 为计算时段小时数; A 为综合出力系数; $Q_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段发

电流量; $H_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的平均水头; $Z_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的坝前水位, 通过水位—库容关系得到; $Z_{i,t}^{\text{wei}}$ 为 i 水库 t 时段的尾水位, 通过尾水位—泄流关系得到; $Q_{j,t}^{\text{ECO}}$ 为 j 断面 t 时段的生态需水流量; $Q_{j,t}^{\text{NAN}}$ 为 j 断面 t 时段的航运用水需求。

3.2 约束条件

$$(1) \text{ 水库水量平衡约束: } V_{i,t+1} = V_{i,t} + Q_{i-1,t}^{\text{OUT}} D_t + SUR_{i-1,t} D_t + I_{i,t} D_t - Q_{i,t} D_t - SUR_{i,t} D_t \quad (14)$$

(2) 水位约束:

$$Z_{i,t}^{\text{MIN}} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\text{MAX}} \quad (15)$$

(3) 电站出力约束:

$$\alpha NF_{i,t} \leq P_{i,t} \leq NT_{i,t} \quad (16)$$

(4) 调度期初始运行水位约束

$$Z_{i,0} = Z_{i,0}^r \quad (17)$$

式中: $V_{i,t+1}$ 、 $V_{i,t}$ 为 i 水库在 $t+1$ 、 t 时段的库容; $I_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的区间入流; $Q_{i-1,t}^{\text{OUT}}$ 为 $i-1$ 水库的出库流量; $SUR_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的弃水流量, D_t 为 t 时段流量与水量的换算系数; $Z_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段末的水位; $Z_{i,t}^{\text{MIN}}$ 为 i 水库 t 时段允许的最底水位; $Z_{i,t}^{\text{MAX}}$ 为 i 水库 t 时段允许的最高水位; $NF_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的保证出力; α 为保证出力系数, 最大值为 1, 最小值为 0, 在模型计算过程中, 首先取值为 1, 如果模型无解, 调整系数 α , 允许部分时段低于保证出力发电; $NT_{i,t}$ 为 i 水库的装机容量; $Z_{i,0}^r$ 为 i 水库在调度运行初期的水位。

4 梯级水电站联合生态调度方案及结果分析

4.1 调度方案

贵州省乌江 9 座梯级水库均承担着重要的发电任务, 部分水库承担下游防洪和航运任务。本次研究根据水库发电、防洪和生态用水需求, 提出如下 3 种调度方案:

方案 1: 梯级水库以发电调度为主, 同时考虑洪家渡、乌江渡和思林最小生态流量需求以及乌江渡和思林下游航运用水需求。

方案 2: 梯级水库以发电调度为主, 同时考虑洪家渡、乌江渡和思林适宜生态流量需求以及乌江渡和思林下游航运用水需求。

方案 3: 梯级水库以发电调度为主, 同时考虑洪家渡、乌江渡和思林理想生态流量需求以及乌江渡和思林下游航运用水需求。

4.2 调度结果分析

4.2.1 多年平均调度结果分析

采用 LINGO 软件进行优化模型求解。采用 1952—2006 年径流资料, 进行长系列调节计算, 各种调度方案下, 贵州省乌江干流 9 座水库多年平均发电量见表 3, 乌江干流洪家渡、乌江渡和思林 3 个控制断面的生态用水保证率见表 4。

由表 4 可知, 通过乌江干流 9 座水库的联合优化调度, 能够满足洪家渡、乌江渡和思林 3 个控制断面的最小生态用水和适宜生态用水需求。同最小生态用水方案(方案 1)相比, 适宜生态用水方案(方案 2)下, 洪家渡、乌江渡、构皮滩、思林和沙沱的多年平均发电量有所降低。其中, 洪家渡和构皮滩的多年平均发电量分别降低了 1.61% 和 1.60% (见表 3)。

由表 3 可知, 与最小生态流量方案(方案 1)相比, 在考虑干流理想生态用水需求时(方案 3), 洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林和沙沱的多年平均发电量均减少。其中, 洪家渡降低了 1.61%, 东风降低了 5.04%, 索风营降低了 3.75%, 乌江渡降低了 2.92%, 构皮滩降低了 3.41%, 思林降低了 1.32%, 沙沱降低了 1.51%。在方案 3 下, 虽然干流水库多年平均发电量影响不大, 但乌江渡、洪家渡、构皮滩在部

分时段破坏了保证出力。其中,洪家渡、乌江渡、构皮滩保证出力破坏时段数占总调度时段数分别为23.5%、21%和14%。在方案3下,洪家渡、乌江渡和思林3个控制断面的理想生态流量时段保证率分别为76.5%、85%和85.83%。由此可见,从上游到下游,洪家渡、乌江渡和思林3个断面的理想生态流量保证率逐渐增加,洪家渡、乌江渡和构皮滩3座水库的保证出力时段破坏率逐渐降低。

表3 不同调度方案下水库多年平均年发电量

亿kW·h

Table 3 Average yearly generating capacity of every reservoir under different scheduling schemes

名称	方案1	方案2	方案3
普定	2.97	2.97	2.97
引子渡	9.76	9.76	9.76
洪家渡	14.08	13.85	13.85
东风	29.63	29.63	28.21
索风营	21.53	21.53	20.75
乌江渡	44.53	44.51	43.26
构皮滩	102.55	100.94	99.18
思林	41.94	41.84	41.39
沙沱	41.52	41.35	40.90
合计	308.50	306.38	300.27

表4 乌江干流各控制断面生态用水时段(月)保证率

%

Table 4 Guaranteed rate of ecological water use for each control section along Wujiang River

名称	方案1	方案2	方案3
洪家渡	100	100	76.5
乌江渡	100	100	85.0
思林	100	100	85.8

综上所述,通过乌江干流9座水库联合优化调度,在基本不降低水库多年平均发电量的同时,可满足洪家渡、乌江渡和思林3个控制断面的适宜生态流量需求。同时,乌江干流从上游到下游,随着梯级水库总调蓄能力的增加,梯级水库对径流调节能力逐渐增强,生态用水保证率逐渐增加。

4.2.2 典型年调度结果分析

从上述贵州乌江干流水库联合优化调度的多年平均调度结果可知,通过联合优化调度,可满足干流最小和适宜生态用水需求,且对多年平均发电量影响较小。因此,典型年调度方案主要针对乌江干流理想生态流量需求,分析干流9座水库在丰、平、枯不同典型年的优化调度结果。

采用沙沱坝址1952—2006年(水文年)实测流量组成样本系列,依据《水利水电工程设计洪水计算规范:SL44—2006》和《水利水电工程水文计算规范:SL278—2002》的规定,频率曲线采用P-Ⅲ型分布,由适线法确定统计参数和各频率设计值。最终确定沙沱坝址典型水平年及其流量见表5。

在考虑乌江干流理想生态流量时,典型年的9座水库的年发电量结果见表6,各典型年洪家渡、乌江渡、构皮滩和思林4座水库调度过程见图2—图6。由表6可知,在保证水库防洪安全和发电效益正常发挥的同时,丰水年、偏丰年和平水年可满足干流各控制断面理想生态流量用水需求;但遇上偏枯年和枯水年,即使通过联合调度,也不能满足干流理想生态流量用水需求;尤其是枯水年,由于水库上游来水量较少,水库很难蓄水到正常蓄水位,水库发电效益很难正常发挥,水库在部分时段需低于保证出力线发电。

表5 沙沱坝址典型水平年及其流量

Table 5 Typical years and flow of Shatuo dam

水平年	年份	相应流量/(m ³ ·s ⁻¹)
丰水年	1999	15 000
偏丰水年	1974	12 700
平水年	1968	10 600
偏枯水年	1961	9 670
枯水年	2006	7 530

表 6 各典型年水库年发电量

亿kW·h

Table 6 Yearly generating capacity of each reservoir in different typical years

名称	普定	引子渡	洪家渡	东风	索风营	乌江渡	构皮滩	思林	沙沱	合计
丰水年	3.24	10.66	17.47	31.01	23.07	50.56	135.37	51.75	50.62	373.75
偏丰水年	2.17	6.35	16.81	30.58	22.80	46.04	105.33	43.17	43.08	316.32
平水年	2.90	8.12	18.99	30.20	21.90	41.66	92.72	40.07	40.18	296.74
偏枯年	2.97	9.87	14.32	28.06	20.28	38.94	88.73	39.94	39.60	282.72
枯水年	2.17	6.35	8.01	20.65	14.37	25.20	48.19	27.25	29.37	181.56
多年平均	3.16	9.78	15.59	26.61	18.37	39.90	96.67	40.50	38.77	289.35

注:多年平均发电量来自文献[9]。

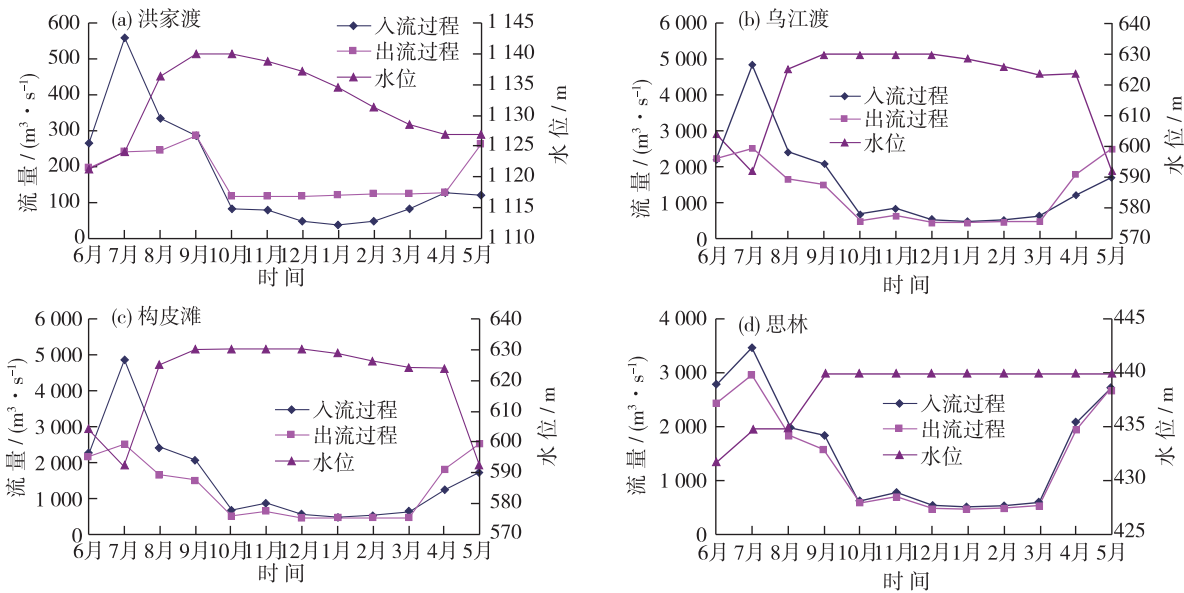


图 2 丰水年洪家渡、乌江渡、构皮滩和思林 4 座水库调度过程

Fig. 2 Scheduling process of Hongjiadu, Wujiangdu, Goupitan and Silin four reservoirs in wet year

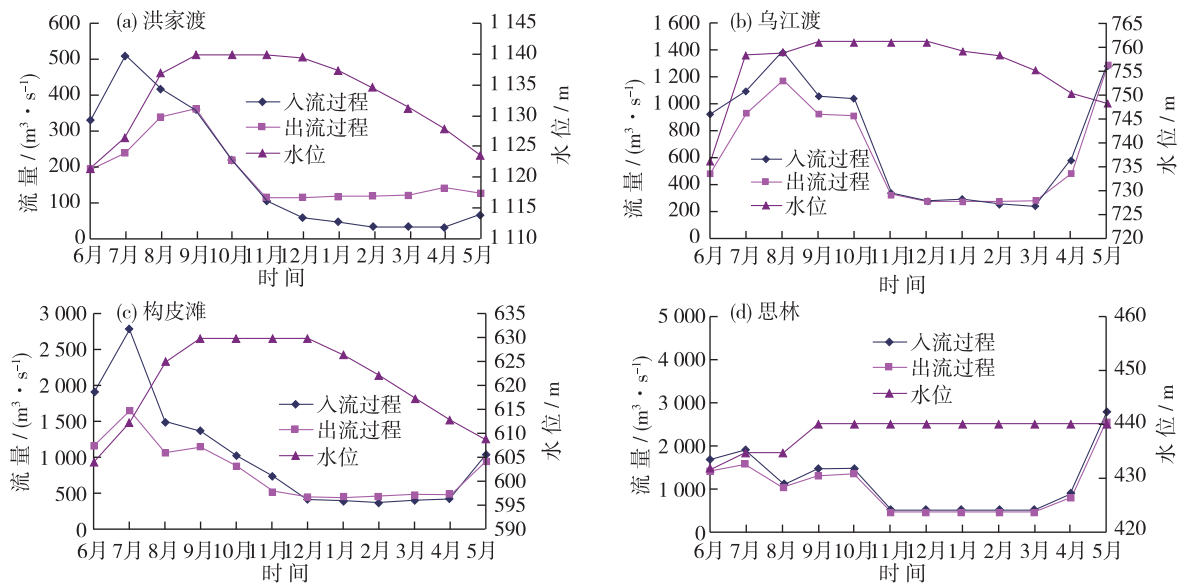


图 3 偏丰水年洪家渡、乌江渡、构皮滩和思林 4 座水库调度过程

Fig. 3 Scheduling process of Hongjiadu, Wujiangdu, Goupitan and Silin four reservoirs during partial wet years

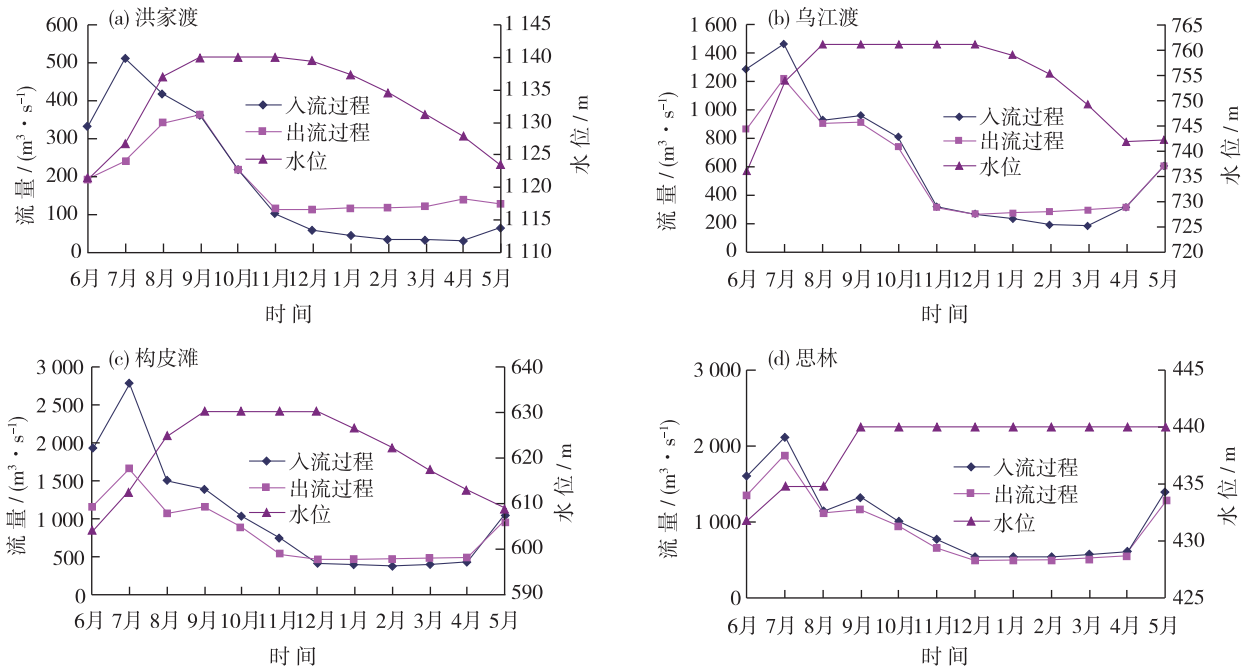


图 4 平水年洪家渡、乌江渡、构皮滩和思林 4 座水库调度过程

Fig. 4 Scheduling process of Hongjiadu, Wujiangdu, Goupitan and Silin four reservoirs during normal years

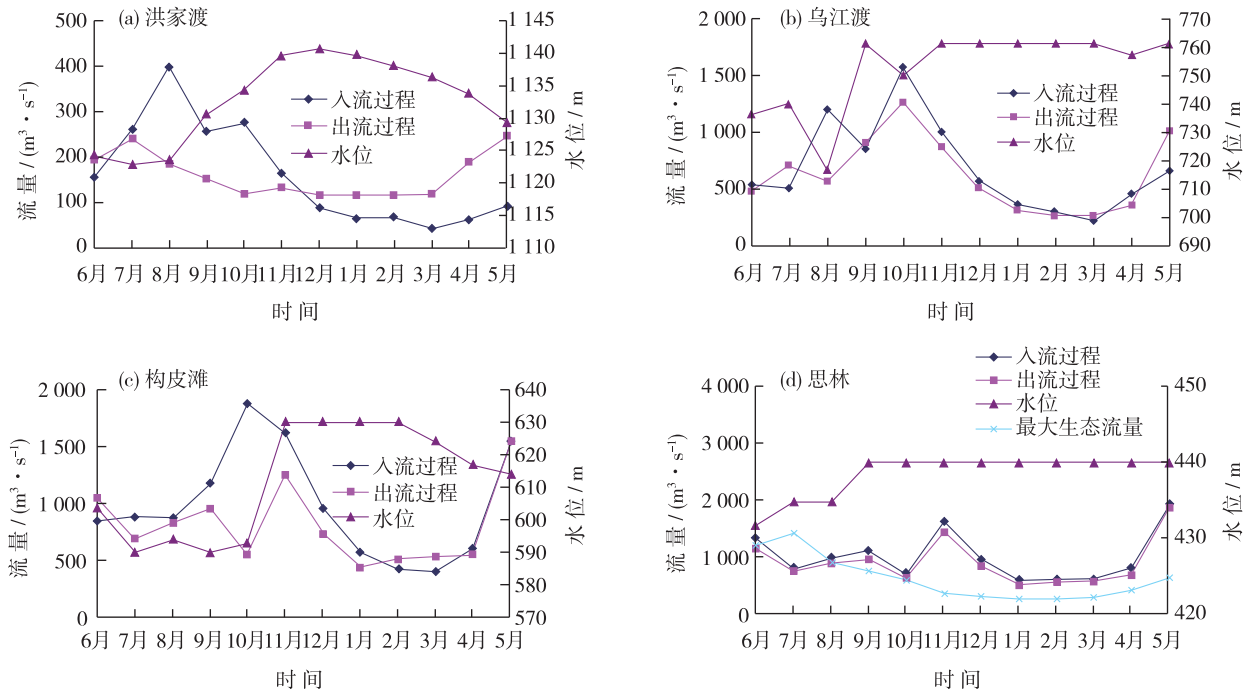


图 5 偏枯年洪家渡、乌江渡、构皮滩和思林 4 座水库调度过程

Fig. 5 Scheduling process of Hongjiadu, Wujiangdu, Goupitan and Silin four reservoirs during partial dried years

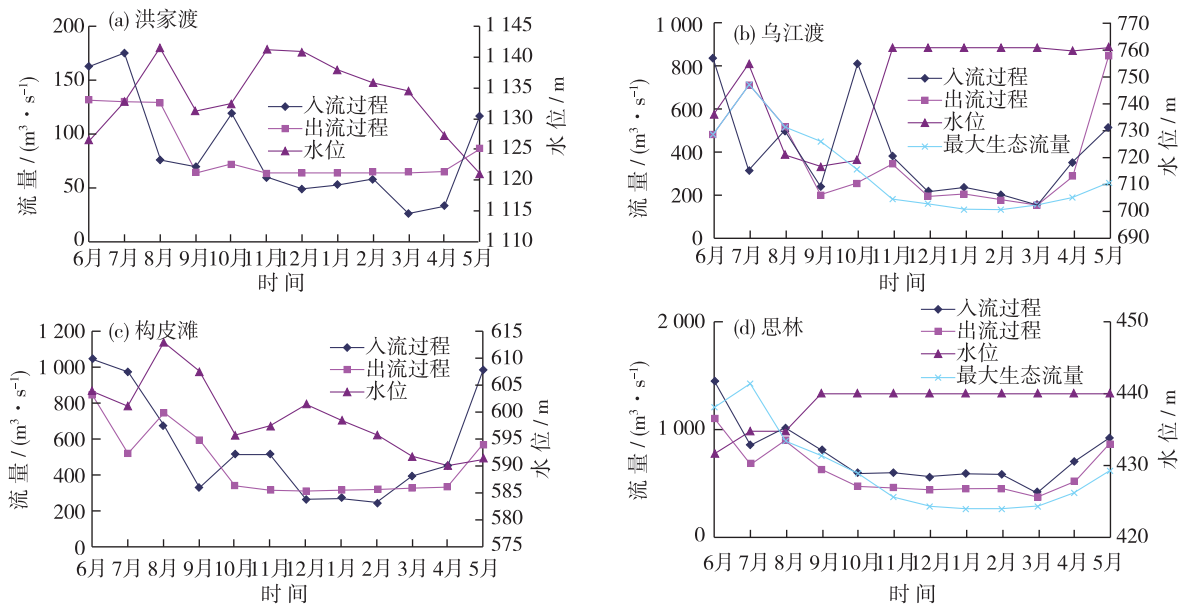


图6 枯水年洪家渡、乌江渡、构皮滩和思林4座水库调度过程

Fig. 6 Scheduling process of Hongjiadu, Wujiangdu, Goupitan and Silin four reservoirs during dry years

5 结 论

综合考虑乌江干流梯级水电站在防洪、发电、航运、生态、环境等各方面的用水需求,全面权衡梯级水电站经济社会效益和生态环境效益的发挥,构建了乌江干流梯级水电站多目标优化调度模型,并采用优化算法对其进行求解,计算了乌江干流梯级水电站在不同水文情势、不同用水需求下的调度方案,并对调度方案进行评价。结果表明:

(1) 通过乌江干流梯级水电站联合优化调度,在保证水电站防洪安全和发电效益正常发挥的同时,可提高乌江干流生态流量保证率。

(2) 对于偏枯年和枯水年,即使通过梯级水电站优化调度,其理想生态流量用水需求也难以满足;尤其是枯水年,由于水库上游来水量较少,水库很难蓄水到正常蓄水位,水库发电效益很难正常发挥,水库在部分时段需低于保证出力线发电。

参考文献:

- [1] 孙东亚,董哲仁,赵进勇. 河流生态修复的适应性管理方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 57-59. (SUN D Y, DONG Z R, ZHAO J Y. Adaptivemanagementmethodologies in river restoration [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(2): 57-59. (in Chinese))
- [2] 傅春,冯尚友. 水资源持续利用(生态水利)原理的探讨[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 436-440. (FU C, FENG S Y. Study on the principle of the sustainable utilization of water resources(ecological hydraulic engineering) [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 436-440. (in Chinese))
- [3] 贾海峰,程声通,丁建华,等. 水库调度和营养物消减关系的探讨[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 104-107. (JIA H F, CHENG S T, DING J H, et al. Relationship between eutrophication control and reservoir operation [J]. Environmental Science, 2001, 22(4): 104-107. (in Chinese))
- [4] 王好芳,董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. 人民黄河, 2004, 26(6): 14-15. (WANG H F, DONG Z C. Multiple water resources allocation model based on the quantity and quality [J]. Yellow River, 2004, 26(6): 14-15. (in Chinese))
- [5] 高永胜. 河流健康生命评价与修复技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2006: 124-146. (GAO Y S. The river sys-

- tem health assessment and restoration technology[D]. Beijing: The China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006: 124-146. (in Chinese))
- [6] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32. (DONG Z R, SUN D Y, ZHAO J Y. The multi-objective and ecological reservoir operation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))
- [7] 艾学山, 范文涛. 水库生态调度模型及算法研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 451-455. (AI X S, FAN W T. The research on reservoir ecological operation model and algorithm[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 451-455. (in Chinese))
- [8] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325-332. (HU H P, LIU D F, TIAN F Q, et al. Research on reservoir scheduling method based on ecological flow process line[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))
- [9] 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 780-787. (LU Y L, ZHOU J Z, WANG H, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms Gorges cascade hydropower stations and its algorithms[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 780-787. (in Chinese))
- [10] CAI W J, ZHANG L L, ZHU X P, et al. Optimized reservoir operation to balance human and environmental requirements: a case study for the Three Gorges and Gezhouba Dams, Yangtze River basin, China[J]. Ecological Informatics, 2013, (18): 40-48.
- [11] 王煜, 戴会超, 王冰伟, 等. 优化中华鲟产卵生境的水库生态调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 319-326. (WANG Y, DAI H C, WANG B W, et al. Study of the eco-scheduling for optimization Chinese sturgeon spawning habitats[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(3): 319-326. (in Chinese))
- [12] 陆添超, 康凯. 熵值法和层次分析法在权重确定中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2009(22): 19-21. (LU T C, KANG K. The application of entropy method and AHP in weight determining[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2009(22): 19-21. (in Chinese))

On ecological operation of cascade hydropower stations along Wujiang River in Guizhou province *

LYU Wei^{1,2}, WANG Hao¹, YIN Junxian¹, ZHU Xinyue³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Appraisal Center For Environment & Engineering Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China;

3. Nanjing Guo Huan Technology Co., LTD, Nanjing 210042, China)

Abstract: In order to protect aquatic system health of Wujiang River and achieve the win-win goal of the water energy resources development and ecological environment, the ecological operation of cascade hydropower stations along Wujiang River in Guizhou province is studied. The minimum, suitable and ideal ecologically flow demands of the Hongjiadu, Wujiangdu and Silin stations were analyzed. And the multi-objective combination optimization scheduling model of Cascade Hydropower Stations there was built and solved. Mean annual and typical year generating capacity of 9 reservoirs are calculated. Ecological water period guaranteed rate and the scheduling process of 3 main control sections are showed. The results show that this study can increase the ecological water period guaranteed rate of Wujiang River, as well as guarantee benefits of flood control and power generation. As for low flow year, it is hard to reach the ideal ecological flow demand.

Key words: ecological operation; cascade hydropower stations; Wujiang River; Guizhou

* The study is financially supported by the National Key Technologies R & D Program of China during the 12th Five-year Plan Period (No. 2015BAB07B03).