

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200295

乌东德和白鹤滩梯级电站枯水年联合生态调度研究

王方方, 李 鹏, 鲍正风, 曹 辉, 张滔滔, 王二朋

(智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 615050)

摘 要:近年来极端来水频发, 枯水年水电站的人造洪峰生态调度实施难度较大。结合金沙江下游河段产漂流性卵鱼类产卵要求, 对该河段乌东德和白鹤滩电站的人造洪峰生态调度过程进行分析, 并在分析枯水年和特枯典型年人造洪峰生态调度中水量不足的情况下, 通过实施梯级电站联合优化生态调度, 以实现上下游水量补给, 来缓解水量不足的矛盾; 并通过与单库调度的水量保证率对比, 论证梯级联合生态调度的优越性。

关键词:生态调度; 人造洪峰; 联合调度; 枯水年

中图分类号:TV697.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)06-0048-05

0 引言

为减轻水库建设对河流生态系统和天然水环境的影响, 在水库调蓄中充分考虑下游生态需水要求, 通过实施生态调度, 以修复河流的生态系统结构和功能, 保障河流生态系统健康安全。

生态调度是指通过改善传统的水库调度方式, 合理安排水库调蓄, 改善下游水文、水力与水体环境条件, 使得受调蓄后的水库下游河道恢复自然水文情势, 以满足不同鱼类的生长繁殖条件。生态调度方式主要包括: 人造洪峰调度, 生态需水调度以及叠梁门水温调度等。人造洪峰调度是目前较为常见的生态调度方式, 尤见金沙江下游, 通过人为调蓄水库模拟天然的洪峰过程, 以满足产漂流性卵鱼类的繁殖。目前, 在三峡水库、金沙江下游的溪洛渡、向家坝水库均已开展实施生态调度, 并对水库下游鱼类产卵有显著促进作用。

20 世纪以来, 生态调度逐渐引起业内学者越来越多关注。王远坤^[1]针对不同的生态保护目标对生态调度进行了分类, 对人造洪峰调度、生态需水调度、水温调度等进行了解释分析。20 世纪初, 生态调度研究多集中于对水库生态需水调度的分析研究, 通过提出不同的计算方法, 如 Tennant 法^[2-3]、湿周法^[4]、IFIM 法^[5]来

定量水库调蓄的最小生态流量约束。2010 年以来, 随着国内大型水电站运行经验的积累, 专家结合水电站生态调度中的不足, 进一步在最小生态流量的基础上, 结合鱼类繁殖需求, 提出满足鱼类繁殖生态条件的生态调度过程, 通过在水库运行中人为调蓄来模拟天然洪峰过程。如李清清^[6]结合三峡水库的生态调度目标, 在常规调度的基础上提出基于人工造峰的生态调度方法, 通过“先蓄后泄”分析了不同来水条件下三峡水库生态调度对防洪和发电的影响; 戴会超^[7]围绕三峡水库的调控过程建立数学模型, 以发电量最大为目标函数, 提出了改善鱼类产卵环境的优化人造洪峰调度过程。但这些研究并未考虑枯水年来水不足的情况下如何通过梯级优化调度来满足人造洪峰过程。因此, 本次研究以乌东德和白鹤滩梯级电站作为研究对象, 分析枯水年情况下梯级电站的联合人造洪峰生态调度方式, 以期为梯级电站生态调度运行提供借鉴和指导。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区域概况

乌东德和白鹤滩电站为金沙江下游的龙头梯级电站, 位置分布见图 1。电站建成后, 由于大坝阻隔及调蓄影响, 一定程度上改变了河道原有天然特性。电

收稿日期: 2020-08-05

基金项目: 基于水位波动的水库支流库湾富营养化和藻类水华的生态调度研究(U2040210)

作者简介: 王方方(1989—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水库调度方面的工作。E-mail: 840623832@qq.com

通信作者: 李鹏(1984—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水库调度方面的工作。E-mail: li_peng4@ctg.com.cn

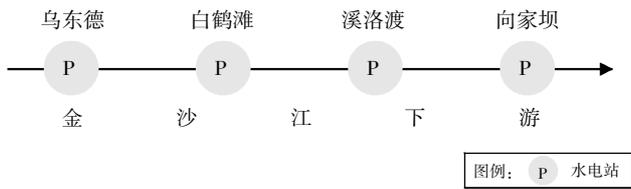


图1 金沙江下游干流梯级电站示意图

Fig.1 Schematic diagram of cascade hydropower stations in the lower reaches of Jinsha River

站的调蓄不可避免的会对鱼类繁殖造成影响。因此,在乌东德和白鹤滩电站常规调度中,将生态调度作为重要考虑因素,并在水库运行调度规程中对其人造洪峰生态调度作了明确规定:“为满足鱼类产卵刺激和孵化所需多样化水力条件,每年5~6月,水电站应实施一次参照同时段天然情况下2年一遇洪峰流量的人造洪水过程,过程持续时间10~15d”。即在适宜的鱼类种群繁殖季节,通过乌东德和白鹤滩电站实施人造洪峰,缓解径流调节对天然径流改变程度,为产漂流性卵鱼类产卵繁殖创造有利条件。

金沙江下游产漂流性卵鱼类一般产卵高峰期在5~6月,相应人造洪峰也在此时开展。乌东德和白鹤滩电站处于金沙江下游梯级的龙头,而5~6月正值流域枯丰转换和电站集中消落期,来水过程波动大,且两电站的调蓄过程也会对下游溪洛渡和向家坝电站运行产生影响,因此需要结合电站运行特性分析生态调度开展时机。同时,近几年极端天气事件频发,如2017年5月来水频率仅为80%,势必对人造洪峰过程造成影响,单库调度时电站来水量可能无法满足生态调度需求,因此有必要通过梯级联合优化调度来保障枯水年的梯级人造洪峰过程。

1.2 研究边界条件

长江勘测规划设计院樊皓等在《乌东德水电站水库运用与电站运行调度规程》(《调度规程》)研究中,通过数据监测发现,金沙江下游产漂流性卵鱼类繁殖适宜水温上下限为15.9℃~30℃,一般在5月下旬金沙江下游河段水温即可达到18℃,满足繁殖的水温条件。

在《调度规程》中,考虑乌东德电站分阶段运行规划,即初期运行兴利水位最高965m,离水库设计正常高水位对应库容还相差约 $12 \times 10^8 \text{m}^3$,初期运行阶段库容有限,因此推荐人造洪峰生态调度在来水量较大的5月下旬进行。

在白鹤滩水电站生态调度方案编制研究中,考虑受上游乌东德电站机组过流下泄低温水的累积影响,白鹤滩电站的实际下泄水温可能出现回暖略微滞后,推荐6月上旬制造1次人造洪水过程。结合乌东德电站运行过程发现,乌东德水库一般在3~5月开展叠梁门水温生态调度,以提高水库下泄水温,使其基本接近天然状态,因此乌东德运行调度基本不会对白鹤滩的水温造成滞后影响,白鹤滩在5月下旬即可满足产漂流性卵鱼类繁殖的水温条件;且6月金沙江下游天然来水开始大幅增加,叠加上游水库的集中消落影响,来水的不稳定加剧了人造洪峰调度过程的复杂性,极有可能造成弃水;同时参考白鹤滩下游梯级中的向家坝电站近几年的人造洪峰经验,其在上游溪洛渡电站调蓄下也均在5月进行人造洪峰试验。因此,对于白鹤滩电站,在5月下旬开展人造洪峰调度较为适宜。

2 乌东德-白鹤滩电站单库生态调度分析

2.1 乌东德人造洪峰过程

经过对乌东德现有人造洪峰方案进行论证,在电站运行中较为可行。方案中明确乌东德初期运行人造洪峰时间推荐为5月下旬;起涨流量按照环评批复要求,以不低于乌东德下游鱼类产卵期最小下泄流量 $1160 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 为原则;涨水时长根据产漂流性卵鱼类产卵高峰期时长分析出涨水持续时间约为4~6d;日均流量增幅参考照乌东德坝址两年一遇设计洪水过程(1990年6月),日均流量增幅控制在 $400 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;退水过程参考典型年流量变化过程,日均流量减幅控制在 $300 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,退水时长约维持5d左右。综合考虑上述原则,乌东德的人造洪峰方案见表1。

表1 乌东德人造洪峰过程

Table1 Artificial flood peak process of Wudongde reservoir

日均变幅	涨水						
	起始流量	第2天	第3天	第4天	第5天	第6天	日均涨幅
	1200	300	600	300	450	300	390
退水	日均降幅						
	第7天	第8天	第9天	第10天	日均降幅		
	150	300	600	750	450		

乌东德人造洪峰过程涨水6d,退水4d,整个过程需水量为 $19.3 \times 10^8 \text{m}^3$,平均流量为 $2240 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,接近两年一遇水平。

2.2 白鹤滩人造洪峰过程

白鹤滩人造洪峰方案在调度规程编制研究中尚

未考虑梯级联合生态调度,以乌东德下泄水温延迟为条件,将人造洪峰调度时间初定为6月上旬。分析发现,6月上旬由于来水变幅较大,人造洪峰难以满足电站实际运行中的稳控要求,同时枯水年单库调度可能难以满足人造洪峰过程水量需求,需要利用上游乌东德电站5月下旬人造洪峰中的下泄进行联合调度以缓解水量供需矛盾,且乌东德在5月的年度叠梁门水温调度可缓解水温的延迟回升。因此,综合考虑上述因素,本文中白鹤滩电站的人造洪峰过程设计在5月下旬。

白鹤滩电站人造洪峰设计原则依据环评批复方案,即:在5~6月参照两年一遇洪水制造10~15d的人造洪峰过程。因此通过对1953~2017年白鹤滩坝址长系列过程进行分析,参照坝址处5~6月两年一遇设计洪水过程,对人造洪峰过程进行设计。

起涨流量原则为:以不低于白鹤滩下游鱼类产卵期最小下泄流量 $1\ 260\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 为原则;涨水时长根据产漂流性卵鱼类产卵高峰期时长分析出涨水持续时间约为4~6d;涨水时长拟定方式为:根据历史过程拟合出的金沙江下游产漂流性卵鱼类的鱼苗日径流量与日均流量关系曲线,建议白鹤滩人造洪峰过程涨水持续时间为4~6d;涨水幅度拟定以遵循天然规律为原则,参照白鹤滩坝址处5月下旬的两年一遇设计洪水过程(1985年),涨水 $300\sim 560\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,日均流量增幅在 $500\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,峰值流量不小于洪水过程平均流量的1.5倍;退水过程由于天然洪水过不同年份差异较大,根据环境影响报告书分析结论,退水过程持续5~9d,日均流量减幅宜控制在 $300\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,使起涨流量与洪水过程结束流量基本一致。综合考虑上述原则,设计白鹤滩的人造洪峰方案见表2。

表2 白鹤滩人造洪峰过程

Table2 Artificial flood peak process of Baihetan reservoir

日均 变幅	涨 水	起始流量	第2天	第3天	第4天	第5天	日均涨幅
		1600	300	500	600	600	500
退 水	退水	第6天	第7天	第8天	第9天	第10天	第11天
		600	400	300	300	200	100

白鹤滩电站人造洪峰过程涨水时间5d,退水时间6d,整个过程需水量为 $22.55\times 10^8\text{m}^3$,平均流量为 $2\ 380\text{m}^3$ 。

通过对白鹤滩坝址控制代表站长系列逐旬均流量进行排频统计发现,白鹤滩坝址5月下旬平水年(50%)和枯水年(75%)来水量分别为 $22.55\times 10^8\text{m}^3$ 和 $19.48\times 10^8\text{m}^3$,即天然情况下,在来水低于平水年的时候

就无法满足生态调度需求。考虑上游电站枯水期消落影响,一定程度可缓解生态调度中的水量供需矛盾,但分析发现,金沙江下游以上较大调蓄电站主要分布在雅砻江,而雅砻江电站由于消纳及检修安排影响,一般在4月底基本消落至死水位附近,因此在5月对下游电站的补偿作用较小。同时由于全球气候变化影响,20世纪以来极端天气事件频发,枯水年出现的概率也有所增加,如2017年5月下旬乌东德坝址来水频率仅为80%,白鹤滩坝址来水频率仅为70%,无法满足人造洪峰需求,因此有必要优化梯级电站的生态调度方式,通过联合调度来缓解枯水年的水量供需矛盾,保障白鹤滩人造洪峰生态调度的圆满完成。

3 乌东德-白鹤滩电站联合生态调度方法

考虑来水较枯时生态调度水量不足问题较为突出,本节从梯级联合调度考虑,优化生态调度方式,即在白鹤滩的人造洪峰生态调度中,充分利用上游乌东德电站人造洪峰过程中的下泄水量,考虑和乌东德电站的径流传播时间,择机适时开展人造洪峰调度过程,以缓解自身人造洪峰调度中的水量不足。

分别以设计枯水年(5月下旬频率为75%)和特枯典型年(2017年)为代表来对联合生态调度过程进行计算,并与乌东德和白鹤滩单库人造洪峰生态调度中的水量保证率进行比较,分析两种调度方式的优劣性,提出枯水情况下满足梯级电站生态调度需求的人造洪峰方式。

3.1 单库生态调度

在《乌东德水电站水库运用与电站运行调度规程》和《白鹤滩水电站水库运用与电站运行调度规程》中,结合乌东德-白鹤滩梯级电站的环境评价批复要求,对水库人造洪峰调度作出规定,即:“为满足鱼类产卵刺激和孵化所需多样化水力条件,每年5~6月,水电站应实施一次参照同时段天然情况下2年一遇洪峰流量的人造洪水过程,过程持续时间10~15d”。因此在生态调度过程分析中,模拟梯级电站相应坝址天然情况2年一遇洪水过程,来实施水库调蓄。

(1)乌东德单库生态调度。选取乌东德坝址5月下旬75%频率来水以及历史特枯典型年来水作为来水边界,分析水量供需情况。由于来水量可能出现不满足生态调度过程水量需求的情况,此时就需要在5月中旬进行回蓄,分别计算两种情况下5月中旬可回蓄的水量,可回蓄水量为扣除乌东德电站最小下泄流量

1 160m³·s⁻¹ 后所剩水量, 据此来计算水量不满足时需要提前回蓄天数, 结果见表 3。

表3 乌东德枯水年和特枯典型年人造洪峰水量分析

Table3 Analysis of artificial flood peak process at Wudongde station in dry year and extreme dry year

时间	枯水年(75%)	特枯典型年
天然流量(75%)(m ³ /s)	1895	1650
坝址天然来水量(10 ⁸ m ³)	18.01	15.68
上一旬可回蓄水量(10 ⁸ m ³)	7.74	4.34
生态调度需水量(10 ⁸ m ³)	19.31	19.31
缺水量(10 ⁸ m ³)	1.3	3.63
1d回蓄流量(m ³ /s)	735	620
1d回蓄水量(10 ⁸ m ³)	0.64	0.54
提前回蓄天数(d)	2	7

分析发现, 在枯水年和特枯典型年中, 5月下旬来水量均无法满足人造洪峰需求。枯水年缺水量为1.3×10⁸m³, 特枯典型年缺水量为3.63×10⁸m³, 分别需要在5月中旬回蓄2d和7d。

(2)白鹤滩单库生态调度。选取白鹤滩坝址5月下旬75%频率和历史特枯典型年来水作为来水边界进行分析。由于来水量可能出现不满足生态调度需水的情况, 此时就需要在5月中旬进行回蓄, 分别计算两种情况下5月中旬可回蓄的水量, 可回蓄水量为扣除生态流量1 260m³·s⁻¹后所剩水量, 据此来计算水量不满足时需要提前回蓄天数, 结果见表4。

表4 白鹤滩枯水年和特枯水年人造洪峰水量分析

Table4 Analysis of artificial flood peak process at Baihetan station in dry year and extreme dry year

时间	枯水年(75%)	特枯典型年
天然流量(75%)(m ³ /s)	2133	2050
坝址天然来水量(10 ⁸ m ³)	20.27	19.48
上一旬可回蓄水量(10 ⁸ m ³)	9.31	5.89
生态调度需水量(10 ⁸ m ³)	22.55	22.55
缺水量(10 ⁸ m ³)	2.28	3.07
1d回蓄流量(m ³ /s)	980	790
1d回蓄水量(10 ⁸ m ³)	0.85	0.68
提前回蓄天数(d)	3	5

分析发现, 在枯水年和特枯典型年中, 5月下旬来水量均无法满足人造洪峰需求。枯水年缺水量为2.28×10⁸m³, 特枯典型年缺水量为3.07×10⁸m³, 由于本节针对单库进行调度分析, 因此5月中旬回蓄暂不考虑乌东德同时段的回蓄, 此种情况下白鹤滩电站枯水年和特枯典型年分别需要在5月中旬回蓄3d和5d。

3.2 联合生态调度

由上述分析发现, 在来水较枯情况下, 乌东德和白

鹤滩电站均需要靠提前回蓄才能满足人造洪峰水量需求。然而, 乌东德与下游白鹤滩坝址的距离不到200km, 两者5月下旬多年平均区间流量仅140m³·s⁻¹, 白鹤滩电站的来水基本上取决于乌东德电站的下泄, 且两电站回蓄发生时间均在5月中旬, 乌东德在回蓄中下泄流量仅为1 160m³·s⁻¹, 白鹤滩在回蓄中最小下泄要满足生态流量1 260m³·s⁻¹, 势必造成白鹤滩回蓄的困难。因此, 本节从梯级联合调度考虑, 优化生态调度方式, 在下游白鹤滩人造洪峰中, 充分利用乌东德人造洪峰中的来水, 缓解自身的水量矛盾(见表5)。

表5 梯级电站联合生态调度水量分析

Table5 Analysis of joint ecological water dispatching at cascade hydropower stations

时间	乌东德人造洪峰	乌白区间	白鹤滩来水
第1天	1200	140	1340
第2天	1500	140	1640
第3天	2100	140	2240
第4天	2400	140	2540
第5天	2850	140	2990
第6天	3150	140	3290
第7天	3000	140	3140
第8天	2700	140	2840
第9天	2100	140	2240
第10天	1350	140	1490
第11天	2220	140	2360

在梯级电站联合调度方案中, 乌东德电站调度方案根据2.1节中人造洪峰过程控制, 考虑两电站间5月下旬多年平均区间流量140m³/s, 由于乌东德到白鹤滩电站传播时间仅为2h, 本次计算以天为时段, 因此直接以乌东德下泄以及区间流量之和作为白鹤滩电站的来水。由于乌东德人造洪峰过程为10d, 白鹤滩人造洪峰过程为11d, 且此时值集中消落期, 因此考虑乌东德第11d下泄逐渐恢复正常来水状态, 两库均满足批复中10~15d的人造洪峰过程要求。

根据上述梯级电站联合调度方式, 进一步分析白鹤滩充分利用乌东德人造洪峰来水后, 在枯水年和特枯典型年人造洪峰过程中的水量供需矛盾。结果如表6所示。

通过计算发现, 采用联合调度方式后, 白鹤滩在枯水年75%和2017年典型年中, 人造洪峰调度中缺水分别分别为0.27×10⁸m³和0.48×10⁸m³, 基本满足生态调度水量需求, 缺水量相比单库调度分别减少2.01×10⁸和2.59×10⁸m³。其中, 所缺水量可通过前期回蓄或者较乌东德延迟半天开展生态调度, 即可完全满足生态调度需水, 相比单库调度减少回蓄日至少为4d和2d。

表6 白鹤滩单库调度和联合调度水量差对比

Table6 Comparison of water quantity between single operation and joint operation in Baihetan reservoir

来水	项目	乌东德下泄	区间	白鹤滩来水	白鹤滩需求	水量差	回蓄天数	相比单库少回蓄量	相比单库少回蓄天数
75%	平均流量	2204	140	2344	2373	0.27	0.4	2.01	4
	水量	20.95	1.33	22.28	22.55				
特枯典型年	平均流量	2182	140	2322	2373	0.48	0.6	2.59	2
	水量	20.74	1.33	22.07	22.55				

4 结论与展望

本次研究结合电站实际运行要求,分析了乌东德电站和白鹤滩电站现有人造洪峰生态调度方案的适用性,考虑6月份来水的波动性以及弃水的风险性,推荐梯级电站人造洪峰调度在5月下旬开展。并以此为边界条件,对白鹤滩生态调度方案进行改善。在此基础上,进一步分析来水较枯情况下单库生态调度的可行性,并针对单库在枯水年人造洪峰的水量不足来设计联合生态调度方案,通过对比联合调度和单库调度中缺水量以及回蓄天数,论证了梯级电站联合调度能有效缓解来水较枯情况下生态调度的水量供需矛盾。

乌东德和白鹤滩电站投产后,金沙江下游将形成四座巨型电站连接的梯级规模,作为西电东送的重要电源点,电站的安全稳定运行至关重要。由于乌东德—白鹤滩梯级电站下游的溪洛渡—向家坝梯级电站也需要开展年度人造洪峰调度,且两梯级之间距离较短,传播时间仅2小时左右,因此可在本次研究基础上进一步考虑四座电站联合优化调度的生态调度方式,充分利用上下游电站之间的水量补给,保障年度生态调度工作的圆满完成。

参考文献:

[1] 王远坤,夏自强,王桂华. 水库调度的新阶段——生态调度[J]. 水文, 2008,28(1):7-9. (WANG Yuankun, XIA Ziqiang, WANG Gui-

hua. A new phase of reservoir regulation: ecological operation [J]. Journal of China Hydrology, 2008,28(1):7-9. (in Chinese))

- [2] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resource [J]. Fisheries, 1976,1(4):6-10.
- [3] 魏天锋,刘志辉. 基于改进的Tennant法的博尔塔拉河生态需水量计算[J]. 干旱区研究, 2016(3):643-648. (WEI Tianfeng, LIU Zhihui. Calculation of ecological water demand of the Bortala River based on the improved Tennant method [J]. Arid Zone Research, 2016(3):643-648. (in Chinese))
- [4] Gippel G J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. Regulated Rivers: Research and Management, 1998,14(1): 53-67.
- [5] Bovee K D, Lamb B L, Bartholow J M, et al. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology [R]. U. S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology, 1998.
- [6] 李清清,覃晖,陈广才,等. 基于人造洪峰的三峡梯级生态调度仿真分析[J]. 长江科学院院报, 2011,28(12):112-117. (LI Qingqing, QIN Hui, CHEN Guangcai, et al. Simulation of eco-operation of Three Gorges cascade hydropower plants based on man-made flood [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011,28(12): 112-117. (in Chinese))
- [7] 戴会超,张培培,董坤,等. 面向四大家鱼繁殖需求的水库生态调控模拟研究[J]. 水利水电技术, 2014,45(8):130-133. (DAI Huichao, ZHANG Peipei, DONG Kun, et al. Study on simulation of reservoir eco-regulation for reproduction demand of four major Chinese carps [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2014,45(8):130-133. (in Chinese))

Research on Joint Ecological Dispatching of Cascade Hydropower Stations in Low-Flow Year

WANG Fangfang, LI Peng, BAO Zhengfeng, CAO Hui, ZHANG Taotao, WANG Erpeng

(Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, Yichang 615050, China)

Abstract: With the frequent occurrence of extreme weather in recent years, it is difficult to carry out the ecological dispatching of artificial flood by hydropower station operation in extreme dry year. Based on the breeding water temperature requirements of fish with drifting eggs in the lower reaches of Jinsha River, this paper analyzed the time of ecological dispatching of artificial flood peak at Wudongde and Baihetan hydropower stations, and designed the corresponding artificial flood peak process. On this basis, considering the lack of water quantity in artificial flood peak regulation in dry years, the contradiction of water shortage is alleviated by implementing cascade hydropower stations joint optimization ecological operation to realize water supply from upstream to downstream. It demonstrates the superiority of cascade joint ecological operation by comparing with the water quantity satisfying rate of the single reservoir regulation.

Key words: ecological dispatching; artificial flood; joint dispatching; low-flow year