

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220485

金沙江下游梯级水库人造洪峰生态调度综合效益影响分析

朱文丽, 曹瑞, 邢龙, 龚文婷, 申赵勇, 李帅

(中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北 宜昌 443133)

摘要:5~6月的人造洪峰生态调度是促进金沙江下游产漂流性卵鱼类繁殖的重要手段。为探究人造洪峰生态调度对梯级水库综合效益的影响,拟定了梯级水库不同开展时段的生态调度方案,以发电量、弃水量、供水保障率为评价指标,选取丰(25%)、平(50%)、枯(75%)典型来水对各方案进行效益分析。结果表明:典型来水条件下,向家坝在不同时段开展生态调度对梯级水库效益无明显影响,白鹤滩、乌东德分别在6月上旬、6月中旬开展生态调度时梯级水库效益最大。

关键词:金沙江下游;梯级水库;人造洪峰;生态调度;综合效益

中图分类号:P33;TV697.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2024)01-0084-06

0 引言

长江上游鱼类资源丰富,是多种珍稀鱼类和经济型鱼类繁殖的重要区域^[1-2]。同时,长江上游蕴藏着丰富的水能资源^[3-4],随着高坝、大库容的水电站相继建成投产,天然河流的径流、水深、热量传递等水文因素逐步发生改变^[5-7],影响了鱼类的正常产卵繁殖^[8]。开展生态调度是减少大坝建设运行对河流生态系统不利影响,实现河流生态修复的重要措施,成为长江流域水资源管理的重要内容。如何在满足流域梯级水库防洪、发电、供水、航运等社会经济目标基础上,协调生态调度需求,充分发挥梯级水库综合效益成为当前流域水资源优化配置的关键问题之一。

根据不同的生态保护目标、生态调度开展方式,水库生态调度可分为水温调度、水文过程调度、泥沙调度等^[9],其中水文过程调度主要包括人造洪峰调度、基荷发电调度等。人造洪峰生态调度是指通过调节水库出库流量,模拟河流天然的涨水过程,促进下游产漂流性卵鱼类自然繁殖^[10]。长江上游水库群生态调度实践

结果表明人造洪峰生态调度对鱼类繁殖有明显的促进作用^[11-12],对于如何进一步优化梯级水库人造洪峰生态调度方式,一些学者也进行了有益探索。戴凌全等^[13]以溪洛渡、向家坝梯级水库为例,探求鱼类产卵所需的适宜生态流量;戴会超等^[14]提出一种兼顾发电需求的水库生态调度过程,形成人工涨水过程刺激鱼类产卵;王方方等^[15]论证了乌东德、白鹤滩梯级水库联合开展人造洪峰生态调度的优越性。然而,对于梯级水库在什么时段开展生态调度有利于综合效益高效发挥,目前仍缺乏相关研究。

鉴于此,本文以金沙江下游梯级水库为研究对象,根据人造洪峰生态调度开展时段的多种组合拟定了梯级水库调度方案,选取丰、平、枯典型来水进行日尺度调度计算,分析各方案的梯级水库综合效益,为实际生产调度提供一定借鉴和参考。

1 研究区域概况

1.1 金沙江下游梯级水库

金沙江干流以石鼓和攀枝花为界,分为上、中、下

收稿日期:2022-11-30

网络首发日期:2023-10-27

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20231027.1341.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(52109024);长江水科学研究联合基金项目(U2040218)

作者简介:朱文丽(1996—),女,河南许昌人,硕士,助理工程师,主要从事水库调度管理和研究工作。E-mail: zhu_wenli@ctg.com.cn

通信作者:李帅(1987—),男,湖北汉川人,博士,高级工程师,主要从事水库调度管理和研究工作。E-mail: li_shuai@ctg.com.cn

三段,攀枝花至宜宾为金沙江下游,区间流域面积21.4万 km²,河段长768 km^[16]。金沙江下游规划建设了四座大型水库,从上游至下游依次为乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝,总调节库容208.19亿 m³,总防洪库容154.93亿 m³,总装机容量4 480万 kW,承担发电、防洪、航运和生态调度等任务。

1.2 人造洪峰生态调度实践

金沙江下游开展人造洪峰生态调度的水库有:乌东德、白鹤滩、向家坝,由于向家坝调节库容有限,当水量条件不满足时与溪洛渡水库联合开展人造洪峰调度^[17]。金沙江下游梯级水库人造洪峰生态调度历年开展情况见表1,从2017至2022年的实践中可以看出,梯级水库人造洪峰调度时间主要集中在5月中旬至6月中旬。

2 人造洪峰生态调度方案拟定

2.1 人造洪峰流量过程

参考1.2节生态调度实践与已有研究成果,根据同时段坝址2年一遇洪水过程设置水库出库流量过程^[13,15],乌东德与白鹤滩水库设置5天左右的涨水、退水过程,向家坝设置5天左右的涨水过程;乌东德、白鹤滩、向家坝起涨流量为3 000 m³/s左右,日均涨水幅度为400 m³/s左右,其中白鹤滩的洪峰流量不小于洪水过程平均流量的1.5倍。金沙江下游梯级水库人造洪峰调度出库流量过程见表2。

2.2 人造洪峰时段方案

金沙江下游梯级水库开展人造洪峰调度需要在坝下游江段水温达到18℃,且监测到产漂流性卵鱼类亲鱼性成熟度达到繁殖产卵要求后^[14-15],助力产卵场形成适宜的水文和水动力条件^[18]。根据生态调度实践,

乌东德、白鹤滩、向家坝水库最早于5月下旬、6月上旬、5月中旬实施生态调度。受气温、海拔等因素影响,位于上游的水库及河道水温更晚达到18℃,考虑到乌东德、白鹤滩开展生态调度年份较少且位于上游,为了更好的保障水温条件,设置乌东德、白鹤滩水库实施生态调度的时间不早于6月上旬,向家坝水库实施生态调度的时间不早于5月中旬。金沙江下游梯级水库需在6月底之前消落至汛限水位,为避免影响消落任务,梯级水库最晚在6月中旬实施生态调度。设置梯级水库开展人造洪峰调度的不同时段方案见表3。

3 综合效益评价指标

枯水期,金沙江下游梯级水库调度需满足发电、供水、航运、生态等综合调度需求,并致力于提升水量利用率,其中为下游河道供水,保障航运及最小生态流量需求可通过供水保障率来表征^[19-20],发电效益在长期调度中以发电量表征^[21],提高水量利用率以减少弃水为目标^[22]。综合多种调度需求,采用发电量、弃水量、供水保障率指标对梯级水库综合效益进行评价。

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T A_i \times q_{-e_{i,t}} \times h_{i,t} \times \Delta t \quad (1)$$

$$W_{-s} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T 3600 \times q_{-s_{i,t}} \times \Delta t \quad (2)$$

$$rel_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T rel_{i,t} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E 代表梯级水库的总发电量,kW·h; i 、 N 分别为梯级水库从上游至下游的编号和数量; t 为调度时段编号, T 表示调度时段长度; A_i 代表水电站 i 的出力系数; $h_{i,t}$ 代表水电站 i 在时段 t 的发电水头,m; $q_{-e_{i,t}}$ 、 $q_{-s_{i,t}}$ 分

表1 金沙江下游梯级水库人造洪峰生态调度统计

Table 1 Statistics on artificial flood peak operation of cascade reservoirs in the lower Jinsha River

水库	年份	起止时间	出库流量/(m ³ /s)	涨水时长	日涨幅/(m ³ /s)	退水时长	日降幅/(m ³ /s)	备注
乌东德	2022	5月22—31日	2 600~4 370	5	350	4	70	
		6月17—26日	5 040~8 180	6	520	3	860	
白鹤滩	2022	6月3—13日	3 100~6 040	5	550	5	590	
向家坝	2017	5月13—17日	1 830~3 760	4	480			
		5月20—25日	2 440~4 540	5	420			
	2018	5月15—18日	3 350~4 300	3	320			与溪洛渡联合
	2019	5月25—31日	3 870~5 920	4	510			与溪洛渡联合
	2020	5月23—28日	2 720~4 690	4	490			与溪洛渡联合
	2022	5月13—15日	3 350~4 120	2	390			
		6月2—8日	1 990~5 440	4	860			与溪洛渡联合
6月16—21日		5 880~11 100	5	1040				

表2 生态调度流量过程 (单位: m^3/s)
Table 2 Ecological flow processes of cascade reservoirs (unit: m^3/s)

时间	乌东德	白鹤滩	向家坝
第1天	3 200	2 800	3 500
第2天	3 350	2 900	3 800
第3天	3 650	3 110	4 100
第4天	4 150	3 440	4 400
第5天	4 625	3 900	4 700
第6天	4 875	4 750	
第7天	4 800	5 750	
第8天	4 650	4 750	
第9天	4 300	3 850	
第10天	3 650	3 050	

表3 生态调度开展时段方案
Table 3 Time period schemes of ecological operation

方案	乌东德	白鹤滩	向家坝
方案1	6月上旬	6月上旬	5月中旬
方案2	6月上旬	6月上旬	5月下旬
方案3	6月上旬	6月上旬	6月上旬
方案4	6月上旬	6月上旬	6月中旬
方案5	6月上旬	6月中旬	5月中旬
方案6	6月上旬	6月中旬	5月下旬
方案7	6月上旬	6月中旬	6月上旬
方案8	6月上旬	6月中旬	6月中旬
方案9	6月中旬	6月上旬	5月中旬
方案10	6月中旬	6月上旬	5月下旬
方案11	6月中旬	6月上旬	6月上旬
方案12	6月中旬	6月上旬	6月中旬
方案13	6月中旬	6月中旬	5月中旬
方案14	6月中旬	6月中旬	5月下旬
方案15	6月中旬	6月中旬	6月上旬
方案16	6月中旬	6月中旬	6月中旬

别代表水电站 i 在时段 t 的发电流量、弃水流量, m^3/s ; W_s 代表总弃水量, m^3 ; Δt 代表时段小时数; rel_i 为水电站 i 的供水保障率, 若水电站 i 在时段 t 可以满足最小下泄流量约束, 则 $rel_{i,t}=1$, 否则 $rel_{i,t}=0$ 。

根据金沙江下游梯级水库的基本参数设置调度约束, 包括水量平衡约束、出库流量约束、水位约束、出力约束等。

4 结果分析

4.1 计算条件设置

根据乌东德、白鹤滩设计水文站(华弹站)与向家

坝设计水文站(屏山站)1942—2007年5—6月的天然流量数据, 选取频率分别为25%(1956年)、50%(1972年)、75%(1953年)的流量过程作为丰、平、枯典型来水情景, 对各生态调度方案的综合效益指标开展分析计算。调度时段选择5—6月, 开展生态调度时, 控制水库出库流量为生态调度流量过程, 不开展生态调度时, 金沙江下游梯级水库统一采用水位均匀消落策略, 在6月底消落至各水库汛限水位。

4.2 生态调度方案效益影响分析

经计算, 丰、平、枯来水条件下, 不同生态调度方案的梯级水库供水保障率均为100%, 表明人造洪峰调度不影响梯级水库供水及下游河道的航运、生态流量需求。为探究梯级水库开展生态调度对发电与弃水是否存在影响, 计算丰、平、枯来水条件下, 梯级水库按照方案1~16开展生态调度的发电量、弃水量, 并将其与采用水位均匀消落策略的常规调度结果进行比较, 得出每个生态调度方案发电量、弃水量的增量值, 增量结果见图1。

由图1可知, 相较常规调度, 开展生态调度会对梯级水库的发电量与弃水量造成影响, 且来水条件不同、水库生态调度时段不同, 影响程度也会有所不同。

4.2.1 不同来水条件的效益影响

基于16个生态调度方案相较常规调度的发电增量与弃水增量, 统计丰、平、枯来水条件下增量的最大值、最小值、平均值, 并采用平均增量相对常规调度结果的比值作为生态调度相对常规调度的变化。统计结果见表4。

由表4结果可知, 伴随来水由丰转枯, 发电量与弃水量的相对变化均在逐步减小, 即来水越少, 开展生态调度的梯级水库效益越接近常规调度, 生态调度对梯级水库效益发挥的影响越小。发电的最大增量、最小增量、平均增量伴随来水转枯均逐步减小, 与相对变化一致; 弃水最大增量伴随来水转枯逐步减小, 而最小增量的绝对值逐步增大, 这表明来水较枯时, 开展生态调度减少弃水的概率有所增大, 弃水平均增量仍为逐步减少, 与相对变化一致。

4.2.2 不同生态调度开展时段的效益影响

为分析不同生态调度时段对梯级水库综合效益的影响, 统计各库在不同时段开展生态调度时梯级水库的发电量与弃水量的期望值, 例如乌东德在6月上旬的效益期望值为方案1~8的结果均值。各库在各时段的效益期望值见表5。

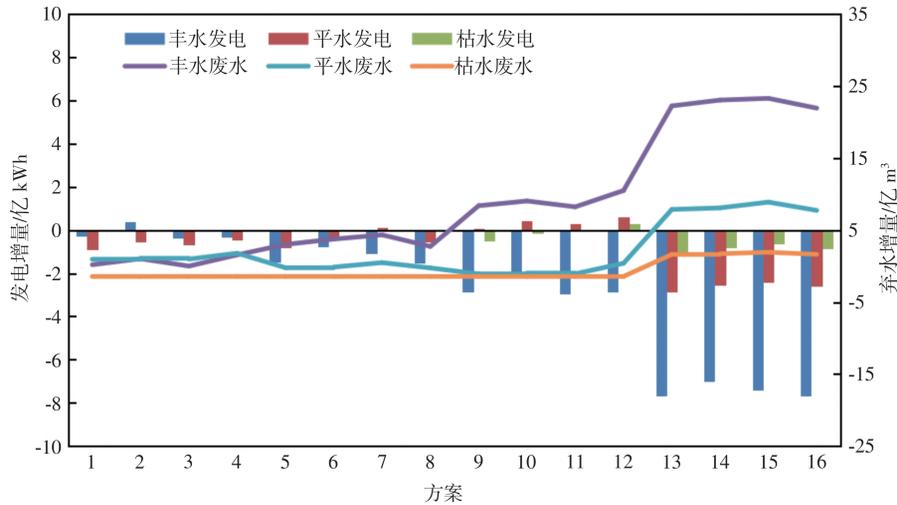


图1 生态调度方案与常规调度结果对比

Fig. 1 Comparison of results between ecological operation schemes and conventional scheduling

表4 生态调度方案发电量与弃水量增量

Table 4 The power generation and water spillage increments of ecological operation schemes

项目	发电量/亿 kW·h			弃水量/亿 m ³		
	丰	平	枯	丰	平	枯
常规调度	384.4	354.5	322.7	6.2	6.3	1.4
最大增量	0.4	0.6	0.3	23.3	8.9	1.9
最小增量	-7.7	-2.9	-1.1	0.0	-1.1	-1.4
平均增量	-2.9	-0.8	-0.5	9.0	2.2	0.1
相对变化/%	0.7	0.2	0.1	143.6	34.3	9.9

表5 各库不同时段开展生态调度的发电量与弃水量

Table 5 Power generation and water spillage of ecological operation of each reservoir in different time period

水库	项目	发电量/亿 kW·h			弃水量/亿 m ³		
		丰	平	枯	丰	平	枯
乌东德	6月上旬	383.7	353.9	-	8.3	6.9	-
	6月中旬	379.3	353.4	322.2	22.1	10.0	1.6
	方差	4.8	0.1	-	47.4	2.5	-
白鹤滩	6月上旬	383.0	354.3	322.6	11.1	6.5	0.0
	6月中旬	380.1	353.0	321.8	19.3	10.3	3.2
	方差	2.1	0.5	0.1	16.7	3.6	2.5
向家坝	5月中旬	381.4	353.4	321.9	14.7	8.2	1.5
	5月下旬	382.0	353.7	322.2	15.5	8.3	1.6
	6月上旬	381.5	353.8	322.3	15.2	8.6	1.7
	6月中旬	381.3	353.7	322.4	15.4	8.7	1.5
	方差	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0

注:枯水条件下,乌东德在6月上旬开展生态调度存在破坏水位约束条件的情况。

根据表5中各库不同生态调度时段发电量与弃水量的方差可知,乌东德在丰水条件下改变生态调度开

展时段对发电量与弃水量影响最大,在丰水与平水条件下6月上旬开展生态调度效益最好,但在枯水条件下6月上旬开展生态调度加大了约束破坏的风险;白鹤滩在平水条件下改变生态调度开展时段对发电量与弃水量影响最大,在各典型来水条件下6月上旬开展生态调度效益最好;各典型来水条件下,向家坝发电量、弃水量不同生态调度时段的方差最大仅为0.1,相较乌东德与白鹤滩,向家坝的生态调度无明显优势时段。综上分析,乌东德与白鹤滩水库生态调度的开展时段变化对梯级水库的发电量和弃水量影响较大,而向家坝生态调度开展时段的变化对于梯级水库效益无明显影响。

4.3 讨论

金沙江下游各级水库中,向家坝调整生态调度时段对于梯级水库效益无明显影响,因此在选择梯级水库生态调度时段方案时可仅关注乌东德、白鹤滩的4种生态调度开展时段组合,见表6。

表6 乌东德和白鹤滩生态调度时段组合

Table 6 Ecological operation period combinations for Wudongde and Baihetan

水库	方案1-4	方案5-8	方案9-12	方案13-16
乌东德	6月上旬	6月上旬	6月中旬	6月中旬
白鹤滩	6月上旬	6月中旬	6月上旬	6月中旬

为综合评价乌东德与白鹤滩不同生态调度时段组合方案的效益,计算典型来水条件下梯级水库按照各方案组合开展生态调度的发电量与弃水量期望值,结果见图2。

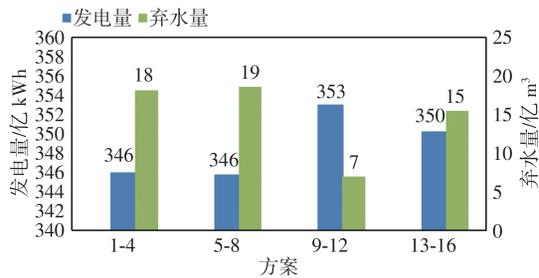


图2 各组合的发电量与弃水量期望值

Fig. 2 The expected value of power generation and water spillage of each period combination

枯水条件下,乌东德在6月上旬开展生态调度时,因水量不足而破坏水位下限约束,因此不再考虑乌东德在6月上旬开展生态调度。乌东德在6月中旬开展生态调度的方案9~16中,方案9~12发电量略大,同时弃水量明显偏小,约为方案13~16的50%,可知典型来水条件下,乌东德、白鹤滩分别在6月中旬、6月上旬开展生态调度时,梯级水库整体效益最大。

5 结论与展望

本文拟定金沙江下游梯级水库人造洪峰生态调度时段方案,以发电量、弃水量及供水保障率为评价指标,进行日尺度调度计算,分析了典型来水条件下金沙江下游梯级水库生态调度开展时段对综合效益的影响。得出以下结论:

(1)金沙江下游梯级水库开展生态调度不影响供水,对发电量影响较小,对弃水量影响较大,且来水越丰,生态调度对梯级水库发电量与弃水量的影响越显著。

(2)不同来水条件下,向家坝水库生态调度开展时段变化对梯级水库综合效益无明显影响,而乌东德与白鹤滩水库生态调度开展时段变化对梯级水库综合效益影响较大。

(3)白鹤滩、乌东德分别在6月上旬、中旬开展生态调度试验,梯级水库整体效益最佳。

实际调度过程中,生态调度的出库流量需随入库流量动态调整,以便满足多方调度需求,本文在设置生态调度方案及计算分析中,仅针对典型来水考虑了具有代表性的生态调度流量过程,对于极端来水情况及生态调度流量过程的优化仍有所不足,因此将在后期研究中综合考虑生态调度的流量过程与开展时段,进一步完善梯级水库生态调度方案。

参考文献:

- [1] 王龙飞,田辉伍,严忠奎,等.长江上游泸州江段鱼类早期资源现状及其与水文条件响应关系[J].长江流域资源与环境,2022,31(4):814-822.
- [2] 唐会元,杨志,高少波,等.金沙江下游巧家江段的鱼类生物多样性及其群落结构的年际动态[J].水生态学杂志,2014,35(6):7-15.
- [3] 樊启祥,林鹏,蒋树,等.金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(7):537-556.
- [4] 屈霄,郭传波,熊芳园,等.梯级开发下金沙江下游鱼类群落结构特征及环境驱动因子[J].水生态学杂志,2020,41(6):46-56.
- [5] 脱友才,周晨阳,梁瑞峰,等.水电开发对大渡河瀑布沟以下河段的水温影响[J].水科学进展,2016,27(2):299-306.
- [6] 陈求稳,张建云,莫康乐,等.水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J].水科学进展,2020,31(5):793-810.
- [7] 张士杰,闫俊平,李国强.流域梯级开发方案调整的水温累积影响研究[J].水利学报,2014,45(11):1336-1343.
- [8] 李博,郝星辰,黄涛,等.三峡水库生态调度对长江中游宜昌江段四大家鱼自然繁殖影响分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(12):2873-2882.
- [9] 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.
- [10] 刘焕章,黎明政,常涛.水生所与三峡和葛洲坝水利工程中的鱼类保护[J].水生生物学报,2020,44(5):1040-1044.
- [11] 周岐兵,程飞,王震,等.长江上游合江江段鱼类早期资源与向家坝水库生态调度效果初步研究[J].中国环境监测,2022,38(1):95-103.
- [12] 孟秋,高雷,汪登强,等.长江中游监利江段鱼类早期资源及生态调度对鱼类繁殖的影响[J].中国水产科学,2020,27(7):824-833.
- [13] 戴凌全,戴会超,李玮,等.兼顾四大家鱼产卵需求的梯级水电站生态调度[J].水力发电学报,2022,41(5):21-30.
- [14] 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.
- [15] 王方方,李鹏,鲍正风,等.乌东德和白鹤滩梯级电站枯水年联合生态调度研究[J].水文,2021,41(6):48-52.
- [16] 张文娟.金沙江下游鱼类繁殖最优生态流量计算及其水库调度效益评价[D].宜昌:三峡大学,2022.
- [17] 祝华,徐承旭.长江中上游水库群启动生态调度试验“人造洪峰”助四大家鱼产卵[J].水产科技情报,2020,47(4):205.
- [18] 林俊强,李游坤,刘毅,等.刺激鱼类自然繁殖的生态调度和适应性管理研究进展[J].水利学报,2022,53(4):483-495.
- [19] 罗成鑫,丁伟,张弛,等.水库分级分期旱限水位设计与控制研究[J].水利学报,2022,53(3):348-357.
- [20] 齐悦,熊泗军,杨微.河道生态基流研究综述[J].吉林水利,2019(12):10-15.
- [21] 兰回归,李英海,李清清,等.基于改进萤火虫算法的水库多目标调度决策研究[J].人民长江,2022,53(9):195-201.
- [22] 彭方旭,汪妮,魏霞.基于改进粒子群算法的多水库复杂联合供水优化调度研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):143-148,155.

Impact Analysis of Artificial Flood Peak Operation on the Comprehensive Benefits of Cascade Reservoirs in the Lower Jinsha River

ZHU Wenli, CAO Rui, XING Long, GONG Wenting, SHEN Zhaoyong, LI Shuai

(River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

Abstract: From May to June, the ecological operation of artificial flood peak is an important solution to promote the natural reproduction of drift spawning fish in the lower Jinsha River. The purpose of this paper is to explore the impact of ecological operation on the benefits of cascade reservoirs. The dispatching schemes were proposed based on the time periods of ecological operation. Take power generation, water spillage and water supply guarantee rate as indexes, ecological operation schemes were evaluated under typical high, normal and low flow year conditions with frequencies of 25%, 50%, and 75%. The results revealed the following. Considering various inflow conditions, the ecological operation period of Xiangjiaba have no significant impact on the benefits of cascade reservoirs. To maximize the benefits of cascade reservoirs, It is recommended that Baihetan and Wudongde implement ecological regulation in early June and mid June respectively.

Keywords: the lower Jinsha River; cascade reservoirs; artificial flood peak; ecological operation; comprehensive benefits

(上接第83页)

The Changing Characteristics and Future Prediction of Extreme Precipitation in the Upper Lancang River Basin

CHEN Hao^{1,2}, YU Zhongbo^{1,2}, JIANG Peng^{1,2}, ZHANG Hongbo^{1,3}, ZHANG Mengdan⁴

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Joint International Research Laboratory of Global Change and Water Cycle, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

4. Changzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Changzhou 213002, China)

Abstract: In order to explore the changing characteristics of extreme precipitation in the upper Lancang River Basin (ULRB), based on the reanalysis data of China Meteorological Forcing Dataset (CMFD), this study evaluated extreme precipitation simulation by 10 GCMs' data of the Coupled Model Intercomparison Project Phase Six (CMIP6), correcting the deviation of CMIP6 multimodal precipitation data based on the total annual precipitation, and on this basis, the changing trend of extreme precipitation in the future periods (recently 2020—2049, forward 2060—2089) was estimated, discussing the reason of its changing trend. The results indicate that: (1) the uncertainty of CMIP6 multimodal extreme precipitation indices decreases after the deviation correction, and the R95p simulation effect of the multi-model ensemble mean is better than that of most single model. (2) In the future, the total precipitation of the research area will increase, with an increase in precipitation days within the year and an increase in precipitation frequency. In 2020—2049, the changing trend of extreme precipitation indices is not significant, and extreme precipitation events are showing a decreasing trend; in 2060—2089, especially under high radiation forcing, the intensity and frequency of extreme precipitation will show a significant increasing trend. (3) Climate warming leading to regional humidification could be the reason for the increase of extreme precipitation.

Keywords: CMIP6; extreme precipitation index; climate change; the upper basin of Lancang River (ULRB)