

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190366

溪洛渡水库分层取水调度 对下游河段水温结构的影响分析

李雨, 邹珊, 张国学, 周新春

(长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要:梯级水库建设对下游水温影响的范围和程度,以及水库开展生态调度的措施和成效,一直是学术界关注和讨论的热点问题。利用长江干流9个水文站和12个观测断面的水温资料,系统分析了溪洛渡和向家坝梯级水库试验性生态调度的成效。结果表明:(1)梯级水库对坝下水温的影响主要表现为春季低温水下泄以及冬季的高温水下泄;(2)受向家坝水库建成蓄水的影响,其下游水温达到18℃的时间推迟约40d;(3)溪洛渡水库的分层取水调度使坝下泄水温提升约0.4℃,但对向家坝坝下河段的水温几无影响;(4)高温(较干流平均高1.8℃)、量大(占比达到45%)的岷江水汇入,以及沿程气温的升高,是保护区内向家坝-朱沱区间水温沿程升高的主要驱动力。提出的研究方法和结论可为深入认识水库运行对水温结构的影响机理提供参考,也可为后续优化生态调度方案提供科学依据。

关键词:溪洛渡水库;向家坝水库;生态调度;水温结构

中图分类号:TV697.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)03-0101-08

0 引言

金沙江下游干流分为向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德四级开发,正常蓄水位下水深达120~255m,均为高坝巨型水库。同时,金沙江下游也是我国生物多样性尤其是鱼类生物多样性非常高的地区之一,向家坝水电站坝址以下1.8km处为“长江上游珍稀、特有鱼类国家自然保护区”,分布栖息有66种特有鱼类,以及3种珍稀鱼类。鱼类的生长、繁殖均有特定的水温需求。溪洛渡、向家坝水电站建成运行后下泄水温变化,会对下游保护区的水生动物特别是鱼类带来不利影响^[1-3]。

针对梯级水库建设对下游水温影响的范围和程度,以及水库开展生态调度的措施和成效这两大生态调度核心问题,众多学者开展了大量研究。通过建立二维温度模型^[4-6]或对模型开展针对性改进^[7-9],模拟改变单一水库调度方式或梯级水库的开发顺序,研究水库水温结构及下泄水温的累积影响,是多数学者研究该类问题的切入点和着力点^[10-12]。但对于溪洛渡-向家坝

梯级水库所在的金沙江下游,河道水温的变化有其独有的时空变化特征,同时受河段水温特性、梯级水库带来的温度累积效应、支流入汇以及气温等多种因素的影响。由此可见,定量分析和评估水库建设对坝下水温结构的影响以及生态调度的成效,一直是学术界研究的热点和难点问题。为了更好的辨识水库分层取水后水温时程变化的影响因素,量化评估坝下河段水温提升的实际效果和沿程演变规律,开展溪洛渡-向家坝梯级水库试验性生态调度的成效分析显得尤为重要。

水库生态调度是指一种降低大坝的建设和运行对河流生态系统负面影响的措施。为减少溪洛渡和向家坝梯级水库建成后低温水下泄对下游河段生态环境的不利影响,溪洛渡水电站设计采用4层叠梁门取水方案,叠梁门单层门叶高度12m,最大挡水高度为48m。2017和2018年1~5月溪洛渡水库开展了分层取水调度试验,2018年1月15日开始逐步下放第一层叠梁门(落门),取水高程抬高12m,单层叠梁门稳

收稿日期:2019-10-19

基金项目:长江水利委员会长江科学院开放研究基金项目(CKWV2016368/KY);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402301)

作者简介:李雨(1986—),男,河南鹿邑人,博士,高级工程师,主要研究方向为水文及水资源。E-mail:liyuhw@163.com

定运行时间分别为 3d 和 68d,4 月 17 日逐步起吊该层叠梁门(提门),取水口恢复至原有底部高程 518m。

本文选择攀-宜江段 9 个控制性水文站 1956~2016 年月均水温资料,以及 2017~2018 年生态调度期 12 个水温监测断面表层和垂向水温观测数据,从沿程水温时空特征、垂向水温的二维时空分布特征以及叠梁门运用方式对水温的影响等方面开展了分析,系统回答了溪洛渡水库的分层取水生态调度对下游水温影响的范围和程度,从而为深入认识水库运行对水温结构的影响机理提供参考,也可为后续优化生态调度方案提供科学依据。

1 数据和方法

1.1 历史水文和气象数据

考虑到水文和气象数据时空分布的区域性和连续性^[12],还有干支流以及梯级水电站的综合影响,故分析水文和气象历史本底特性时,将研究区间扩展至攀枝花-朱沱江段(以下简称“攀-朱江段”)。选取该区间 5 个控制性水文站 1956~2016 年共 61a 的月均水温资料,统计各站及沿程多年水温变化过程。分别为金沙江下游干流的攀枝花、华弹和屏山站,川江干流的朱沱站,以及重要支流岷江出口控制站高场站,位置见图1。其中,从 2012 年开始向家坝水文站代替屏山站成为金沙江的出口控制站。

1.2 表层水温数据

选择 12 个表层水温监测断面(干流 10 个,支流 2 个)2017~2018 年表层水温自动和人工观测数据。断面包括:白鹤滩水文站(人工)、溪洛渡大坝坝前(自动)、溪洛渡水文站(自动)、绥江县城(自动)、向家坝大坝

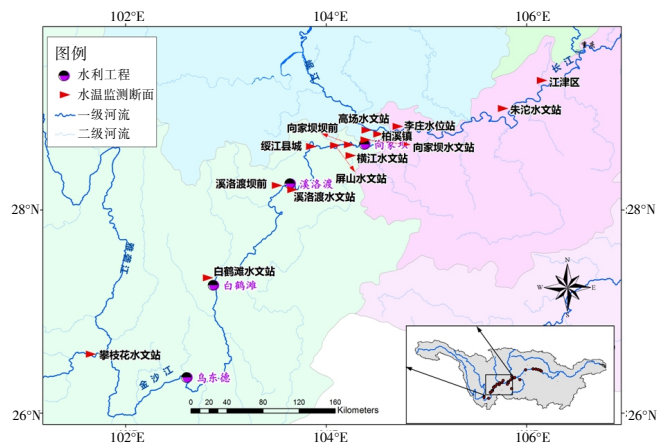


图1 攀-朱江段干支流及监测断面示意图
Fig.1 The location of the main streams and tributaries and monitoring sections along the Pan-Zhu River reach

坝前(自动)、向家坝水文站(自动)、柏溪镇(自动)、李庄水位站(自动)、朱沱水文站(人工)、江津区(自动)、横江水文站(人工、横江)和高场水文站(人工、岷江)。

1.3 垂向水温数据

2017~2018 年于溪洛渡和向家坝坝前配置了光纤测温设备(见图 2),每日 24 段次观测。为对比观测测温精度,2018 年于溪洛渡右岸叠梁门前新增温度链测温设备,每日 24 段次观测。单层叠梁门稳定运行时间分别为 3d 和 68d(见图 3)。此外,生态调度期间,每月中旬在溪洛渡大坝坝前,绥江县城和向家坝大坝坝前三个断面还开展了垂向水温人工比测。

1.4 分析方法

采用数理统计和对比分析等方法,从水温的年内分布、年际变化、干支流变化特性、水利工程影响等方面分析攀-朱江段沿程水温时空特征;以各水文控制



图2 溪洛渡坝前光纤、温度链位置
Fig.2 The location of optical fiber and temperature chain in front of Xiluodu dam



图3 溪洛渡 2017 和 2018 年生态调度试验各阶段进度
Fig.3 The process of different stages during Xiluodu ecological operation in 2017 and 2018

站的长序列水温数据为本底资料,采用对比分析的方法,分天然河段期、工程运行期以及生态调度期等多个分期节点,从表层水温的沿程分布与变化、垂向水温的二维时空分布特征以及叠梁门运用方式对水温的影响等方面,系统分析溪洛渡和向家坝梯级水库试验性生态调度的成效。

2 沿程水温时空分布规律

2.1 水温时空分布特性

攀-朱江段 20 世纪 60~80 年代水温均表现为偏低时期,自 20 世纪 90 年代以来,各站水温一致呈现出逐步上升趋势。至 2011~2016 年,攀枝花、屏山以及朱沱站的水温分别上升 0.9、0.4、0.4℃,其中攀枝花站的上升幅度最大,且 2010 年以后水温上升趋势尤为明显,2011~2016 年水温变幅达 0.8℃,相对变幅率为 5%,远超过 2010 年以前的 0.6%~1.24% 幅率。

随着沿程升温作用以及重要支流的汇入,攀-朱江段表层水温沿程呈现交替升降的规律(见图 4,其中箱型统计图数据源为相应水文站历史月均水温数据)。具体表现为:攀-屏区间水温沿程逐渐升高,攀枝花站到华弹站再到屏山站水温均上升 1℃左右;屏-朱区间随着低温(低 2℃左右)且量大(占比超过 50%)的岷江水入汇,呈现出沿程减小的趋势。由此可见,支流入汇对攀-朱区间干流水温的影响较大,其影响程度取决于支流入汇的水温和水量以及水库的调蓄作用。

2.2 梯级水库影响下的水温变化特性

攀-朱江段存在乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝组成的梯级水库,其中乌东德和白鹤滩水库目前仍处于建设阶段。溪洛渡水电站是长江防洪体系中的重要工程,上接白鹤滩电站尾水,下与向家坝水库相连。最大坝高 278m,总库容 $115.7 \times 10^8 \text{m}^3$,最大水深 240m,控制流域面积 $45.44 \times 10^4 \text{km}^2$,占金沙江流域面积的 96%。

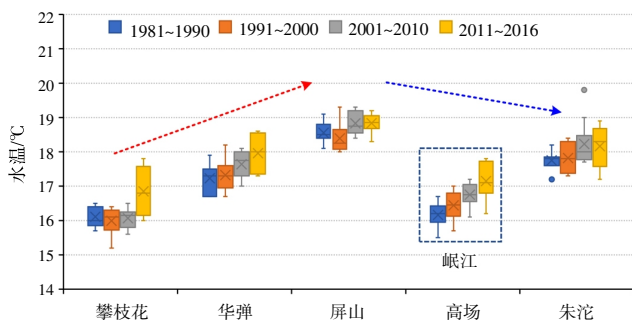


图 4 攀-朱江段各监测断面表层水温沿程分布

Fig.4 The distribution of water temperature along the Pan-Zhu river sections

向家坝水电站是金沙江干流梯级开发的最下游一级,上距溪洛渡电站 156.6km、下距宜宾市 33km。向家坝电站最大坝高 161m,总库容 $51.63 \times 10^8 \text{m}^3$,最大水深 130m,控制流域面积 $45.88 \times 10^4 \text{km}^2$,占金沙江流域面积的 97%。溪洛渡-向家坝联合调度方式为:当溪洛渡水库水位上升至 573.1m 后,溪洛渡水库维持入出库平衡,向家坝水库开始拦蓄洪水;当向家坝水库拦蓄至 380m,溪洛渡水库继续拦蓄洪水至 600m;当溪洛渡水库水位达到 600m 后,按保证枢纽安全方式进行调度;溪洛渡水库 9 月上旬开始蓄水,逐步蓄至正常蓄水位 600m;向家坝水库 9 月中旬开始蓄水,逐步蓄至正常蓄水位 380m,蓄水期间最小下泄流量为 $1200 \text{m}^3/\text{s}$;非汛期两个水库均根据兴利需求进行调度。

梯级水库对坝下水温的影响主要表现为春季(3~5 月)低温水下泄以及冬季(12 月~次年 2 月)的高温水下泄(见图 5)。受 2012 年向家坝水库建成蓄水的影响,屏山站春季水温下降 2.2℃,变化率达 -11.7%;冬季升温 2.3℃,变化率为 18.2%。由此可见,建坝后水库下泄水温变化过程较天然水温变化过程有较明显的延迟,即水库在升温期对水温产生“滞热”影响,在降温期产生“滞冷”影响,其影响程度主要取决于水库的水深和调蓄能力。

溪洛渡-向家坝水库运行期(2012 年后),由于受干支流梯级水库的影响,攀-朱江段沿程各水温监测断面均表现出春季水温降低而冬季水温增加的规律(见图 6),降幅最大的月份多出现在 4 月,增幅最大的月份则出现在 12 月。支流方面,岷江表现出升温幅度大而降温幅度小的特点,主要是由于其发源于高原雪山地带且建成的梯级水库相对较少,春季水温受自然高山融雪的影响程度大于梯级水库的调蓄作用,而冬季水温则主要取决于梯级水库的调蓄作用。

3 生态调度效果分析

3.1 生态调度对表层水温的影响

生态调度对沿程表层水温的影响主要表现为:溪洛渡水库的分层取水调度使坝下泄水温提升约 0.4℃,但坝下河段水温提升作用至绥江县城已显著弱化,对向家坝坝下河段水温几无影响(见图 7a~f),图中箱型统计图数据源为相应水文站 1956~2012 年旬水温数据。具体表现为:作为溪洛渡水库的入库控制站,白鹤滩水文站 2017~2018 年水温较历史时期无明显变化,但由于溪洛渡水库的分层取水调度,使得坝下溪洛渡

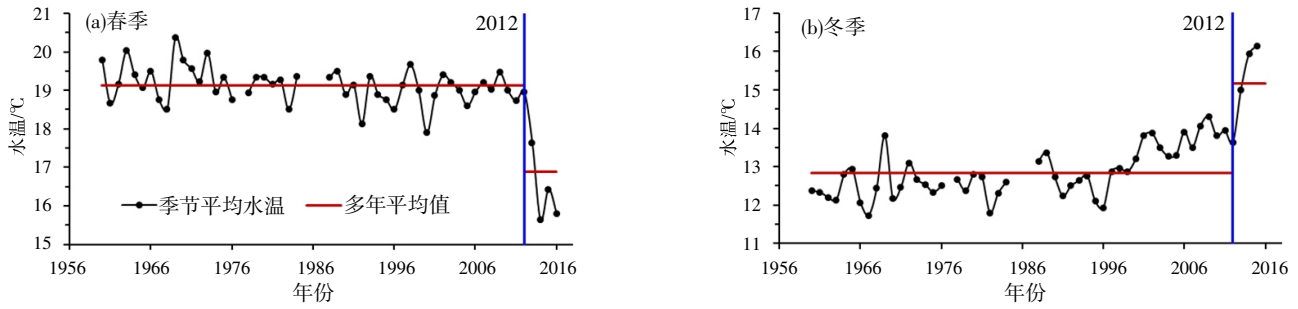


图5 屏山站春、冬季水温年际变化
Fig.5 The interannual variation of water temperature at Pingshan station in spring and winter

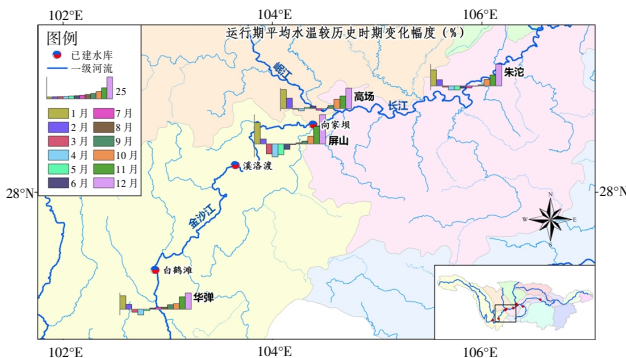


图6 溪洛渡-向家坝运行期平均水温较历史时期变化幅度

Fig.6 The variation of average water temperature between the operation period of Xiluodu-Xiangjiaba reservoirs and historical period

水文站3月12日~5月20日期间的水温明显提升(2017年其单层叠梁门稳定运行时间仅为3d,而2018年达到68d),但其影响至绥江县城已基本消失;受向家坝高坝深库的调蓄,其坝前的2017和2018年的水温波动,至坝下的向家坝水文站已基本趋于一致,可见水库的调蓄作用对水温的沿程变化起着至关重要的作用。由图7e和图7f可知,梯级电站运行后,1~2月水

温较历史同期偏高,而3~5月水温较历史同期偏低,特别是向家坝水文站,其表层水温达到18℃的时间由历史时期的4月上旬推迟至2017和2018年的5月中旬,推迟约40d。同时,对比向家坝水库建成后但上游的溪洛渡水库未开展生态调度的2013~2016年,以及开展生态调度的2017年和2018年,下游向家坝水文站的水温变化过程基本一致,说明溪洛渡水库的分层取水调度对向家坝下游河道水温的提升作用不明显。由图7f可知,位于保护区内的朱沱断面,其2017年和2018年水温1~2月受上游向家坝水库高温水下泄的影响,温度较历史时期显著上升,但3~5月水温较历史时期并无重大变化,可见保护区内的水温变化同时受到上游水库调度、支流岷江的入汇以及沿程气温的综合影响。

3.2 生态调度对垂向水温结构的影响

为了分析生态调度的综合影响,选择2018年1~5月作为分析时段(下同)。对比图8a和图8b可知,溪洛渡和向家坝水库水温的垂向变化基本一致,1~2月

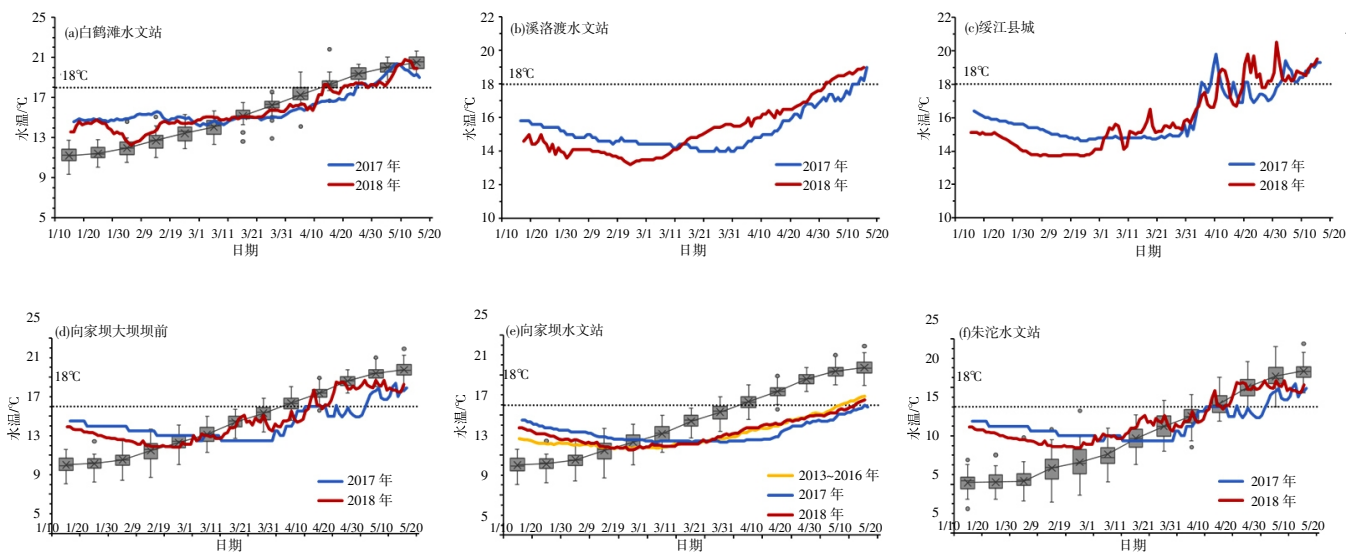


图7 各监测断面表层水温变化过程对比

Fig.7 The variation comparison of surface water temperature at various monitoring sections

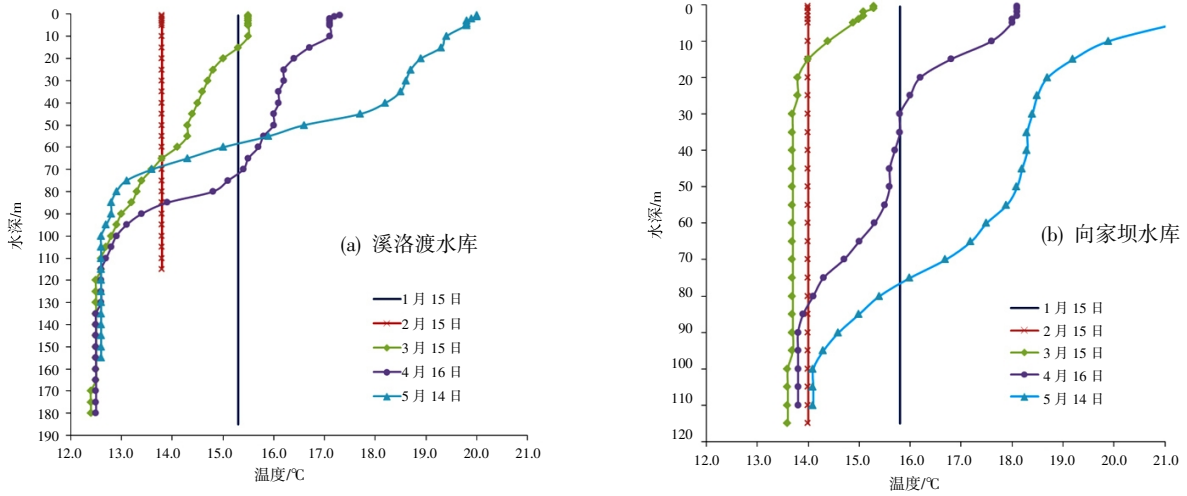


图8 溪洛渡、向家坝水库生态调度期水温垂向分布

Fig.8 The vertical distribution of water temperature in Xiluodu and Xiangjiaba reservoir during the ecological operation

水温垂向分层不明显,3月开始出现分层,随后温跃层逐月下移,且最终温度的垂向变化均止于水深110m附近。但二者的分层结构形式略有不同,溪洛渡水库温跃层出现的时间更早且跃变的幅度也更大,溪洛渡水库3月中旬温度的梯度变化已传至水深100m处,而此时向家坝水库温度梯度变化仅在水深20m范围内;至5月中旬,溪洛渡水库出现较为明显的温跃层,位于水深40~80m,跃变幅度达到6℃,而向家坝水库未观测到明显的温跃层,仅表现出非均匀的连续变化。由此可见,两水库垂向水温的分布和变化均遵循成库后水温分布的一般规律,溪洛渡水库的分层取水调度未能从整体上引起两个梯级水库垂向水温结构的突变。

3.3 生态调度对下游保护区的影响

2018年溪洛渡生态调度试验落门期间,受持续寒潮影响,电网用电需求增加,溪洛渡库水位消落较快。2月12日,溪洛渡库水位已消落至570m以下,仅具备单层叠梁门运行条件,库水位维持在570~576m之间(见图9)。至4月18日,叠梁门开始提门,水位由576m消落至572m。期间入库流量变幅不大,落门阶段入库流量介于2 200~2 800m³/s之间,稳定运行阶段入库流量介于1 600~3 000m³/s之间;提门阶段,入库流量小幅提升,介于1 800~2 700m³/s之间。

稳定运行阶段,门顶淹没水深在40~46m之间上下浮动。叠梁门顶(530m)处与取水口底板(518m)处水温变化趋势基本相同,530m处水温始终高于518m处水温0.2~0.3℃(见图10),3月中旬叠梁门顶部水温与取水口底板处水温温差达到最大值0.4℃。由此可见,

溪洛渡水库的分层取水对于增加发电机组进水口的水温,进而提升水库的下泄水温效果较为明显。

对比2017年和2018年溪洛渡水库坝前及坝下的水温变化过程可知(见图11a、图11b),通过2018年长达68d的单层叠梁门运行,坝前和坝后温差较2017年同期显著减小,最大温差由2017年的1.9℃减小到2018年的1.6℃,平均温差减小约0.4℃。但对比图11c和图11d可知,向家坝水库坝前和坝后温差2018年较2017年并未显著减小,反而略有增大,最大温差由2017年的3.2℃升至2018年的3.6℃。由此可见,溪洛渡水库的分层取水,虽能提高坝下河段的水温,但这种提升效果在绥江县城已显著弱化,再加上向家坝水库的调蓄作用,其对向家坝坝下河段水温几无影响。

上述分析可知,溪洛渡水库分层取水虽对向家坝坝下水温的提高无明显作用,但向家坝水库的低温水下泄并未降低保护区内朱沱断面的水温(较历史同期并无明显减小,见图7f),其主要原因是支流岷江的汇入以及沿程气温的升高(见图12)。具体表现为:2018年1~5月生态调度期内,溪洛渡水库的平均入库水量为0.192×10⁸m³,而出库流量为0.189×10⁸m³,出入库基本保持平衡,通过单层叠梁门的运用,其坝下水温提高约0.4℃。但同期向家坝水库的库容达到46×10⁸m³,故向家坝水库的下泄水温并未受到影响。

由表1可知,向家坝建成运用后,其坝下向家坝水文站3~5月水温较建库前(1956~2011年)同期分别降低了1.6℃、2.6℃、2.4℃,但与之对应的岷江水温几

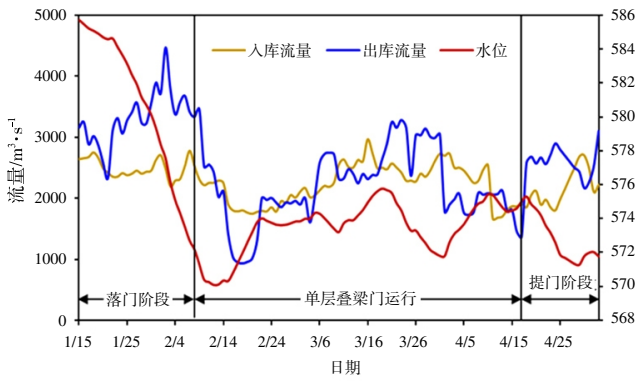


图9 2018年生态调度期间溪洛渡水库运行
Fig.9 The variation of water level and discharge in Xiluodu reservoir during the ecological operation in 2018

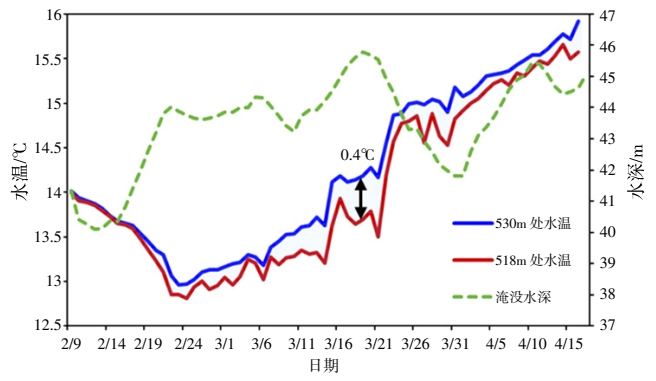


图10 溪洛渡水库分层取水水温垂向变化过程
Fig.10 The vertical variation of stratified water temperature in Xiluodu reservoir

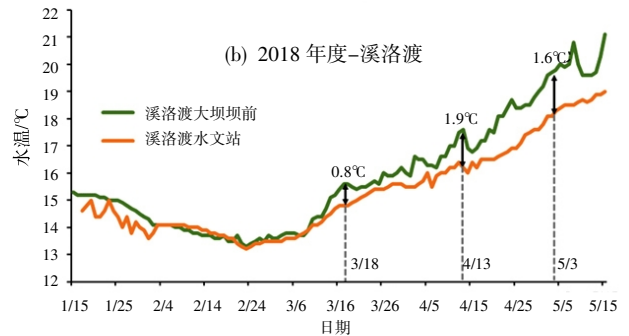
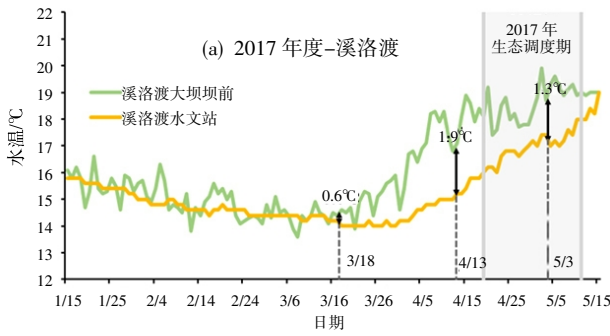


图11 2017、2018年溪洛渡、向家坝坝前及坝下水温变化过程对比
Fig.11 The variation comparison of water temperature in front of and below Xiluodu and Xiangjiaba dam in 2017 and 2018

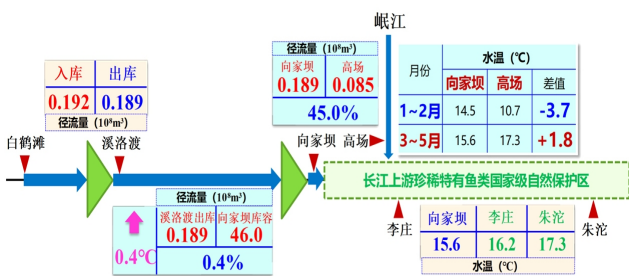


图12 2018年溪洛渡-向家坝生态调度对下游保护区水温影响概化图
Fig.12 The generalized diagram of the impacts of the Xiluodu-Xiangjiaba ecological operation on the water temperature in the downstream reserve in 2018

无变化。干支流对比,向家坝建库前,岷江水温较干流为低温水,而建库后则变为高温水。随着大量岷江水的入汇(水量占比超过30%),朱沱断面水温较上游向家坝断面则呈现出,建库前降低而建库后升高的现象,由此可见岷江水汇入对干流水温具有较大影响。2018年更为显著,由于高温(3~5月较干流水温平均高1.8°C)、量大(水量占比平均为30.5%)的岷江水汇入,以及沿程气温的升高(李庄气温由3月初的11°C升至5月底的25°C),对向家坝~朱沱区间水温的沿程增高影响巨大,水温由向家坝坝下的15.6°C逐步

表1 向-朱区间各监测断面3~5月分时段水温和流量统计
Table1 The statistics of water temperature and discharge in each monitoring section of Xiang-Zhu River reach during March-May in different time periods

年份	月份	向家坝(长江)			高场(岷江)			朱沱(长江)	
		水温/°C	流量/m ³ ·s ⁻¹	占比/%	水温/°C	流量/m ³ ·s ⁻¹	占比/%	水温/°C	流量/m ³ ·s ⁻¹
1956~2011	3月	16.2	1400	50.9	13.7	860	31.3	14.6	2750
	4月	19.4	1550	45.9	17.6	1250	37.0	18.4	3380
	5月	21.8	2270	43.0	20.0	2110	40.0	21.6	5280
2012~2017	3月	14.6	1900	50.9	13.6	1330	35.7	14.3	3730
	4月	16.8	2290	50.2	17.3	1480	32.5	17.6	4560
	5月	19.4	2220	42.5	20.3	1850	35.4	20.6	5220
2018	3月	14.3	2440	62.6	15.5	950	24.4	15.5	3900
	4月	16.2	2030	47.9	18.4	1340	31.6	18.3	4240
	5月	17.6	3180	48.5	19.6	2330	35.6	19.8	6550

注:占比为该断面流量占朱沱站断面流量的比值。

升高到朱沱水文站的 17.3°C。

4 结论与讨论

本文选择攀-宜江段 9 个控制性水文站 1956~2016 年月均水温资料,以及 2017~2018 年生态调度期 12 个水温监测断面表层和垂向水温观测数据,采用统计分析和对比分析等方法,从沿程水温时空特征、垂向水温的二维时空分布特征以及叠梁门运用方式对水温的影响等方面,系统分析了溪洛渡和向家坝梯级水库试验性生态调度的效果。主要结论如下:

(1)攀-朱江段水温年内分布整体变化一致,1~6 月为升温期,8~12 月为降温期。沿程各水文站水温一致呈逐步上升趋势,攀枝花站最为突出,2011~2016 年水温变幅达 0.8°C,相对变幅率达 5%。支流入汇对攀-宜区间干流水温的影响较大,其影响程度取决于支流入汇的水温和水量以及水库的调蓄作用。

(2)梯级水库对坝下水温的影响主要表现为春季(3~5 月)低温水下泄以及冬季(12~次年 2 月)的高温水下泄。屏山站春季水温下降 2.2°C,变化率达-11.7%;冬季升温 2.3°C,变化率为 18.2%。宜昌站春季水温下降 1.8°C,变化率为-10.5%;冬季升温 3.1°C,变化率高达 29.4%。

(3)溪洛渡水库的分层取水调度使坝下水温提升约 0.4°C,但坝下河段水温提升作用至绥江县城已显著弱化,对向家坝坝下河段水温几无影响。受向家坝水库建成蓄水的影响,其下游向家坝水文站表层水温达到 18°C 的时间,由历史时期的 4 月上旬推迟至的 5 月中旬,推迟约 40d。

(4)溪洛渡和向家坝水库水温的垂向变化基本一致,1~2 月水温垂向分层不明显,3 月开始出现分层,随后温跃层逐月下移,且最终温度的垂向变化均止于水深 110m 附近。溪洛渡水库的分层取水调度,未能从整体上引起两个梯级水库垂向水温结构的突变。

(5)溪洛渡水库分层取水虽对向家坝坝下水温的提高无明显作用(库容交换系数仅为 0.4%),但高温(3~5 月较干流水温平均高 1.8°C)、量大(水量占干流的比重达到 45%)的岷江水汇入,以及沿程气温的抬升(由 11°C 升至 25°C),是保护区内向家坝-朱沱区间水温沿程升高的主要驱动力。

本文分析出向家坝建库前岷江水温较干流为低温水,而建库后则变为高温水,岷江入汇对干流水温影响较大的结论,建议后续的生态调度优化方案的制定应重点关注。由于溪洛渡水库实施分层取水的生态调度刚起步,仍处于试验阶段,且受水情和综合调度需求限制,设计中的四层叠梁门仅运用了一层,故其改善下泄水温的程度有限,建议后续增加叠梁门运用层数,最大程度发挥工程措施的效用。

参考文献:

- [1] Cheng F, Li W, Castellol L, et al. Potential effects of dam cascade on fish: lessons from the Yangtze Riever [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2015,25(3):569-585.
- [2] Brown L E, Hannah D M, Milner A M. Hydroclimatological influences on water column and streambed thermal dynamics in an alpine river system [J]. *Journal of Hydrology*, 2006,325(1):1-20.
- [3] 陈敏.长江流域水库生态调度成效与建议[J]. *长江技术经济*, 2018,2(2):36-40. (CHEN Min. Effectiveness and suggestions of reservoir ecological regulation in the Yangtze River basin [J]. *Technology and*

- Economy of Changjiang, 2018,2(2):36–40. (in Chinese))
- [4] 宋策, 周孝德, 唐旺. 水库对河流水温影响的评价指标[J]. 水科学进展, 2012,23(3):419–426. (SONG Ce, ZHOU Xiaode, TANG Wang. Evaluation indicators for assessing the influence of reservoirs on downstream water temperature [J]. Advances in Water Science, 2012,23(3):419–426. (in Chinese))
- [5] 邓云, 李嘉, 李然, 等. 水库调度对溪洛渡电站下游水温的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006,38(5):65–69. (DENG Yun, LI Jia, LI Ran, et al. Impact of reservoir operation on the water temperature downstream of Xiluodu power station [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2006,38(5):65–69. (in Chinese))
- [6] 宋策, 周孝德, 辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J]. 水科学进展, 2011,22(3):421–428. (SONG Ce, ZHOU Xiaode, XIN Xiangwen. Water temperature dynamics of Longyangxia reservoir and its influence on downstream water temperature [J]. Advances in Water Science, 2011,22(3):421–428. (in Chinese))
- [7] 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. (TUO Youcai, ZHOU Chenyang, LIANG Ruifeng, et al. Influence of hydroelectric development on water temperature downstream the Pubugou hydropower station of the Dadu River [J]. Advances in Water Science, 2016,27(2):299–306. (in Chinese))
- [8] 姬雨雨, 陈求稳, 施文卿, 等. 水库运行对漫湾库区洲滩水热交换影响[J]. 水科学进展, 2018,29(1):73–79. (JI Yuyu, CHEN Qiuwen, SHI Wenqing, et al. Influence of reservoir operation on water and heat exchange in the Manwan's island [J]. Advances in Water Science, 2018,29(1):73–79. (in Chinese))
- [9] 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. (ZHANG Shijie, YAN Junping, LI Guoqiang. Cumulative effects of cascade development project adjustment on water temperature [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(11):1336–1343. (in Chinese))
- [10] 邹振华, 陆国宾, 李琼芳, 等. 长江干流大型水利工程对下游水温变化影响研究[J]. 水力发电学报, 2011,30(5):139–144. (ZOU Zhenhua, LU Guobin, LI Qiongfang, et al. Water temperature change caused by large-scale water projects on the Yangtze River mainstream [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,30(5):139–144. (in Chinese))
- [11] 魏希, 邓云, 张陵蕾, 等. 雅鲁藏布江干流中游河段水温特性分析[J]. 工程科学与技术, 2015(s2):17–23. (WEI Xi, DENG Yun, ZHANG Linglei, et al. Analysis of water temperature characteristics in middle reach of the Yarlung Zabo River [J]. Advanced Engineering Sciences, 2015(s2):17–23. (in Chinese))
- [12] 蔡玉鹏, 杨志, 徐薇. 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响[J]. 工程科学与技术, 2017,49(1):70–77. (CAI Yupeng, YANG Zhi, XU Wei. Effect of water temperature variation after impoundment of the Three Gorges reservoir on natural reproduction of the four major Chinese carps [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017,49(1):70–77. (in Chinese))

Analysis on the Influence of Layered Water Intake Operation on the Water Temperature Structure in the Lower Reaches of Xiluodu Reservoir

LI Yu, ZOU Shan, ZHANG Guoxue, ZHOU Xinchun

(Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The scope and degree of the influence of the cascade reservoir construction on the downstream water temperature, as well as the measures and effects of the reservoir ecological operation, have been the hot issues. Based on the water temperature data of 9 hydrological stations and 12 observation sections in the main stream of the Yangtze River, this paper systematically analyzed the effects of experimental ecological operation of Xiluodu and Xiangjiaba cascade reservoirs. The results show that: (1) the impacts of cascade reservoirs on the water temperature under the dam are mainly manifested in the low-temperature water discharge in spring and the high-temperature water discharge in winter; (2) the time of the downstream water temperature reaching 18°C is delayed about 40 days due to the influence of Xiangjiaba reservoir; (3) the layered water intake operation of Xiluodu Reservoir makes the water temperature under the dam increase about 0.4°C, but has little influence on the water temperature of Xiangjiaba lower reach; (4) high temperature (1.8°C higher than the average of the main stream), large amount (accounting for 45%) of Minjiang River water inflow, and the rise of temperature along the route are the main driving forces for the rise of water temperature along the route in the inner Xiangjiaba–Zhutuo section of the reserve. The research methods and conclusions can provide a reference for further understanding of the mechanism of reservoir operation on water temperature structure, and also provide a scientific basis for the subsequent optimization of ecological operation scheme.

Key words: Xiluodu reservoir; Xiangjiaba reservoir; ecological regulation; water temperature structure