

丹江口水库大坝加高对汉江干流水温影响评价

王远坤, 王一旭, 孟长青, 张验科

(华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206)

摘要:为探究丹江口水库大坝加高对汉江干流水温的影响,采用汉江干流白河站、黄家港站和襄阳站实测水温资料,基于改进的河流水温变化评价指标,分析了大坝加高前后汉江水温变化趋势,量化评估了水库下游河道水温的变化程度。结果表明:丹江口水库大坝加高显著改变了汉江中游水温情势,坝下河段水温极值变幅指标呈下降趋势,均化程度逐年加深,黄家港站最高、最低水温的出现日期均向后推迟,存在“滞冷”和“滞温”现象;水温情势的改变程度与距离密切相关,距离大坝较近的黄家港站水温情势变化明显,水温集中期相较于大坝加高前滞后约23 d;距大坝较远的襄阳站水温情势变化较小。

关键词:丹江口水库;汉江干流;水温;评价指标

中图分类号:X143

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)05-0066-07

Assessing impacts of Danjiangkou Dam heightening on water temperature in main stream of Hanjiang River// WANG Yuankun, WANG Yixu, MENG Changqing, ZHANG Yanke (*School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*)

Abstract: To assess the impacts of the Danjiangkou Dam heightening on water temperature in the main stream of the Hanjiang River, the measured water temperature data of the Baihe, Huangjiagang and Xiangyang stations in the mainstream of the Hanjiang River was analyzed and the variation degree of water temperature in the lower reaches of the reservoir was quantitatively evaluated based on the improved evaluation indicator values for river water temperature variation. The results show that the Danjiangkou Reservoir heightening has significantly changed the hydrological regime in the middle of the Hanjiang River. The extreme variation value of water temperature under the dam shows a downward trend, and the degree of homogenization increases year by year. The date of the maximum and minimum water temperature at the Huangjiagang station has been postponed, indicating the phenomenon of cold and warm stagnation. The change degree of water temperature regime is closely related to the distance. The Huangjiagang station is closer to the dam, and its water temperature regime changes obviously, and the water temperature concentration period lags about 23 days compared with that before the dam heightening. The Xiangyang station far away from the dam has little water temperature variation regime.

Key words: Danjiangkou Reservoir; main stream of Hanjiang River; water temperature; evaluation indicators

水温对维持水生态系统的稳定有重要作用,其变化将影响水生生物的生存繁衍^[1-2]。大型水利工程的修建运行将改变河流天然水文情势^[3],其表现之一为河流水温与天然水温的差异^[4-6],水温的改变会使鱼类产卵场出现迁移、破碎化甚至消失的现象^[7-8],严重威胁河流生态安全。因此,筑坝河流水温研究对流域生态安全具有重要意义。

近年来筑坝河流水温变化对水环境、水生态的影响研究受到广泛关注^[9-12]。众多专家学者从不同角度对水温进行了研究。水温模型研究方面,李提

来等^[13]构建了一维和三维水动力与水温模型,对典型平水年下游河道水温进行预测,发现梯级电站建设后库区表层与底层温差加大,下泄水流全年平均水温降低、年内水温变幅减小;邱如健等^[14]采用MIKE11模型模拟宜昌坝下江段水温,指出三峡水库蓄水后宜昌至城陵矶河段升温期降温、降温期升温效应明显,且越靠近大坝河段水温较蓄水前变化越大。水温评价指标研究方面,宋策等^[15]构建了具有一定普适性的水库下游河道水温影响评价指标,以量化识别水库对河流水温的季节性波动;陶雨薇

基金项目:国家自然科学基金项目(41901028;52279064);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021MS041)

作者简介:王远坤(1981—),男,教授,博士,主要从事水文学及生态水文学研究。E-mail:yuankunw@ncepu.edu.cn

通信作者:孟长青(1988—),女,讲师,博士,主要从事区域水文模拟研究。E-mail:els_meng@ncepu.edu.cn

等^[16]利用水温指标分析三峡水库对下泄水温的影响,三峡水库蓄水显著改变了坝下水温过程,坝下水温的变化使中华鲟的繁殖时间推迟 29 d。相较于水温模型,水温指标方法具有所需资料较少、计算简便等优点。已有水温指标研究主要关注年尺度水温变化分析,未考虑年内不同季节变化特征。

丹江口水库运行后汉江水文过程发生了显著改变,其对汉江流域生态环境的影响受到了广泛关注,相关研究主要集中在丹江口水库对汉江中下游水文情势变化的影响上^[3,17],而对水温的研究探索较少,特别是丹江口水库大坝加高后汉江中下游水温变化特征规律尚未见定量化研究。本文基于丹江口水库大坝加高前后实测水温资料,分析汉江水温变化趋势及水温周期性变化特征,并在年尺度水温指标基础上进一步提出季尺度水温指标,开展不同尺度汉江水温变化评价,以期对汉江丹江口水库生态调度提供科学支撑。

1 研究区概况

汉江发源于秦岭地区,是长江最大的一级支流,也是我国鱼类重要繁殖河流之一^[18]。丹江口水利枢纽建成于 1974 年,建设地点为湖北省丹江口市、河南省南阳市,集防洪、发电、灌溉、航运、养殖等综合效益于一身,是国家南水北调中线工程的水源地。丹江口水库以下至汉口为中下游河段,该河段有黄家港、襄阳等重要水文站^[19]。水库大坝及水文站分布如图 1 所示。

研究区概况图由中国科学院地理空间数据云平台(<http://www/gsccloud.cn/>)的 30 m 分辨率 GDEM V3 数据制作而成。气温数据来自中国气象数据网,水温数据来自长江水文年鉴。

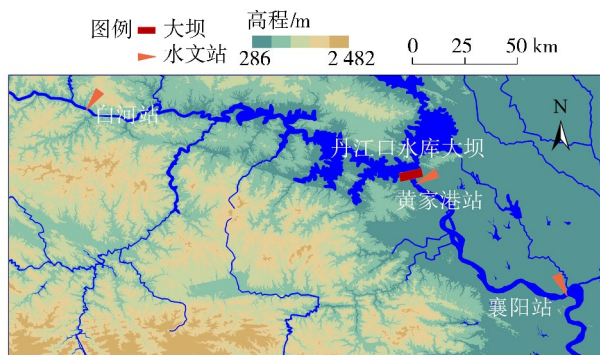


图 1 研究区概况及水文站分布

为满足调洪发电与航运需求,丹江口水库大坝于 2006—2012 年进行了加高建设,加高后正常蓄水位由 157 m 变为 170 m,相应蓄水量也由 174.5 亿 m^3 增至 290.5 亿 m^3 。现阶段丹江口水库水面面积

1 050 km^2 ,库区已具有明显的水温分层结构^[20]。近年来随着汉江流域梯级水利枢纽不断开发,其对河流生态环境的影响愈发显著,特别是水库加高后其下游河流生态系统受到严峻挑战。

2 研究方法

白河水文站位于陕西省白河县,是汉江上游控制站,也是丹江口水库的入库控制站。黄家港站位于丹江口水库下游 6 km,为水库的出库控制站。襄阳站距丹江口水库 111 km,是汉江中游干流控制站^[19]。以大坝加高为时间节点,将研究时段划分为丹江口水库大坝加高前(1975—2005 年)、加高期间(2006—2012 年)与加高后(2013—2019 年)3 个时段。丹江口水库初期工程于 1974 年全部完成^[21],1975—2005 年均为大坝加高前的时间段。为排除大坝加高期间的影 响,将白河站 1975—1986 年、黄家港站 1975—2005 年、襄阳站 1981—1986 年(襄阳站于 1981 年建站)作为未受大坝加高影响的基准期,由于时间较早、数据获取受到限制,均选取月水温数据进行分析。大坝加高期间与加高后时段为 2006—2019 年,采用日水温数据进行计算。

本文对丹江口水库大坝加高前后的水温变化趋势进行分析,在宋策等^[15]提出的年水温指标基础上,提出季尺度水温指标,基于水库干扰后的河流水温变化特征,量化分析大坝加高后水温变化程度。季尺度水温指标以季内数据进行计算与对比,可刻画年内不同季节水温变化特征。

2.1 基线偏离指标

基线偏离指标为大坝加高后河流水温与大坝加高前未经加高影响的河流基准水温的偏离相对值,是偏离量(建库后的河流水温与基准水温差值的平方和)与基线量(基准水温与其年均值的差值平方和)的比值,范围在 0~1 之间,其表达式为

$$I_{BD} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (T_{i,c} - T_{i,n})^2}{\sum_{i=1}^{12} (T_{i,n} - \bar{T})^2} \quad (1)$$

式中: I_{BD} 为年偏离指标; $T_{i,c}$ 为大坝加高后第 i 月河流水温; $T_{i,n}$ 为大坝加高前第 i 月河流水温; \bar{T} 为大坝加高前河流水温年均值; i 为月序($i=1,2,\dots,12$)。

宋策等^[15]更改式(1)以得到冷季、暖季偏离指标值,使两者之和等于年偏离指标值。但实际研究在进行时间划分时,指标值的起始月序没有明确统一,无法四季相加得到年偏离指标值。本文基于式(1)提出季节性基线偏离指标,以对受大坝影响不同季节的水温变化特征进行分析,表达式为

$$I_{BDs} = \sum_{i=1}^3 (T_{i,cs} - T_{i,ns})^2 / \sum_{i=1}^3 (T_{i,ns} - \bar{T}_s)^2 \quad (2)$$

式中: I_{BDs} 为季偏离指标; $T_{i,cs}$ 为相应季节在大坝加高后第 i 月河流水温; $T_{i,ns}$ 为相应季节在大坝加高前第 i 月河流水温; \bar{T}_s 为相应季节在大坝加高前河流水温年均值。

2.2 相位偏移指标

相位偏移指标是大坝加高后河流水温与大坝加高前未经加高影响的河流基准水温的相位差绝对值。陶雨薇等^[16]对相位偏移指标进行了修改,将1年当作1个360°的圆形并平分为12个部分,依次代表1年的12个月,每部分的矢量大小为当月水温矢量模。各月水温矢量的合矢量方向即为水温集中期,受加高影响后的河流水温集中期与加高前水温集中期的差值即为峰值的相位偏移值。滞迟效应会使相位偏移指标值为正值,相位超前则会得到负值,表达式为

$$I_{PS} = \frac{D_c - D_n}{360} \times 365 \quad (3)$$

其中

$$D_c = \arctan(T_{x,c}/T_{y,c})$$

$$D_n = \arctan(T_{x,n}/T_{y,n})$$

$$T_{x,c} = \sum_{i=1}^{12} T_{i,c} \sin\theta_{i,c} \quad T_{y,c} = \sum_{i=1}^{12} T_{i,c} \cos\theta_{i,c}$$

$$T_{x,n} = \sum_{i=1}^{12} T_{i,n} \sin\theta_{i,n} \quad T_{y,n} = \sum_{i=1}^{12} T_{i,n} \cos\theta_{i,n}$$

式中: I_{PS} 为相位偏移指标; D_c 、 D_n 分别为将方位角换算为天数后的大坝加高后河流水温和大坝加高前河流水温的集中期; $T_{x,c}$ 、 $T_{y,c}$ 分别为大坝加高后水温、加高前水温在水平方向上的合成矢量值; $T_{x,n}$ 、 $T_{y,n}$ 分别为大坝加高后水温、加高前水温在垂直方向上的合成矢量值; $\theta_{i,c}$ 和 $\theta_{i,n}$ 分别为大坝加高后水温、加高前水温第 i 月的矢量角度值,均为 $\frac{\pi}{6}(i-1)$, $i \in (1,12)$ 。

基于式(3)提出季节性相位偏移指标表达式:

$$I_{PSs} = (D_{cs} - D_{ns})m/360 \quad (4)$$

其中

$$D_{cs} = \arctan(T_{x,cs}/T_{y,cs})$$

$$D_{ns} = \arctan(T_{x,ns}/T_{y,ns})$$

$$T_{x,cs} = \sum_{i=1}^m T_{i,cs} \sin\theta_{i,cs} \quad T_{y,cs} = \sum_{i=1}^m T_{i,cs} \cos\theta_{i,cs}$$

$$T_{x,ns} = \sum_{i=1}^m T_{i,ns} \sin\theta_{i,ns} \quad T_{y,ns} = \sum_{i=1}^m T_{i,ns} \cos\theta_{i,ns}$$

式中: I_{PSs} 为季节相位偏移指标; D_{cs} 、 D_{ns} 分别为将方位角换算为天数后的大坝加高后河流水温和大坝加高前河流水温的集中期; m 为当前季度的天数; $T_{x,cs}$ 、 $T_{y,cs}$ 分别为当前季度大坝加高后水温、加高前水温在水平向上的合成矢量值; $T_{x,ns}$ 、 $T_{y,ns}$ 分别为当前季度大坝加高后水温、加高前水温在垂直方向上的合成矢量值; $\theta_{i,cs}$ 、 $\theta_{i,ns}$ 分别为当前季度大坝加高

后水温、加高前水温第 i 月对应的矢量角度值,均为 $\frac{2\pi}{m}(i-1)$, $i \in (1,3)$ 。

2.3 极值变幅指标

极值变幅指标为大坝加高后河流水温变幅与大坝加高前未经加高影响的河流基准水温变幅的比值。一般情况下,水温过程受水库的影响会呈现均化现象,使得此指标值在0~1之间。若数值大于1,则代表当年水温变幅大于基准水温的变幅,其表达式为

$$I_{EC} = (T_{\max,c} - T_{\min,c}) / (T_{\max,n} - T_{\min,n}) \quad (5)$$

式中: I_{EC} 为极值变幅指标; $T_{\max,c}$ 、 $T_{\min,c}$ 分别为大坝加高后河流水温月极大值和月极小值; $T_{\max,n}$ 、 $T_{\min,n}$ 分别为大坝加高前河流基准水温的月极大值、月极小值。

基于式(5),提出季节性极值变幅指标表达式:

$$I_{ECs} = (T_{\max,cs} - T_{\min,cs}) / (T_{\max,ns} - T_{\min,ns}) \quad (6)$$

式中: I_{ECs} 为当前季度极值变幅指标; $T_{\max,cs}$ 、 $T_{\min,cs}$ 分别为当前季度在大坝加高后河流水温月极大值和月极小值; $T_{\max,ns}$ 、 $T_{\min,ns}$ 分别为当前季度在大坝加高前河流基准水温的月极大值、月极小值。

3 结果与分析

3.1 不同时间尺度水温变化

3.1.1 年水温变化

白河、黄家港和襄阳3站年均水温变化趋势见图2。总体来看,白河站水温先降低后升高,黄家港站水温变化过程为降低—升高—降低,襄阳站年际水温较大坝加高前略有升高。3站在2013—2019年大坝加高后的时段中有不同程度的水温降低现象,黄家港站尤为明显,其水温年平均降低率为2.86%,水温平均降低0.44℃/a。可见,大坝加高对其下游较近的黄家港站的年水温影响显著。

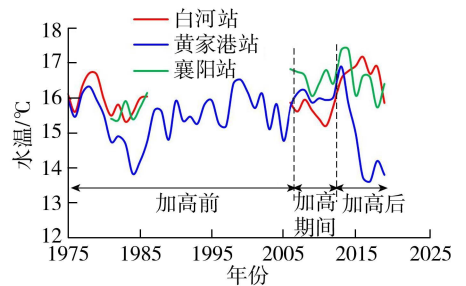


图2 3站年均水温变化趋势

3.1.2 月水温变化

白河、黄家港、襄阳3站月水温变化如图3所示。在图3(a)中,相较于大坝加高之前,加高后白河站月水温平均升高0.7℃,最高水温出现时间及回落时间延后,出现微弱的滞后现象。由图3(b)可

知,黄家港站水温在大坝加高前后差异明显,其最高月均水温降低 4℃;最低月均水温小幅增高 1.6℃;月均水温最大差值于 8 月出现,相差 4.1℃;加高后,水温波幅明显减小,水温年变幅减小了 5.62℃,呈现明显均化现象,且水温极值出现时间延后,出现“滞冷”和“滞温”现象。图 3(c)所示襄阳站水温在大坝加高前后无显著变化,表明丹江口水库对襄阳站年际水温影响微弱。

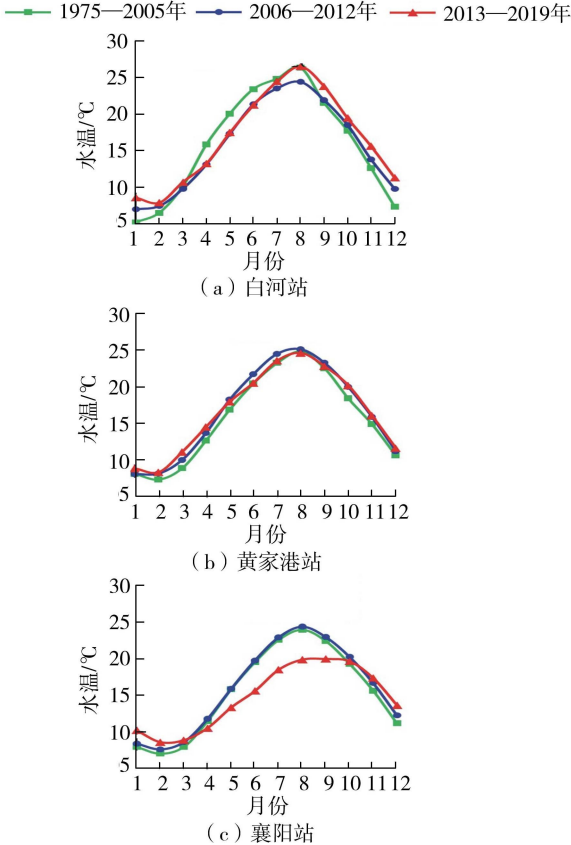


图 3 大坝加高前后 3 站多年月均水温对比

为进一步探究丹江口水库大坝加高对下游水温的影响,采用各站实测月水温、气温数据,分析水温气温两要素之间的相关性,计算得襄阳站加高前、加高期间、加高后的水温-气温相关系数 R^2 分别为 0.85、0.86、0.86。图 4 为黄家港站不同时段水温-气温关系线,可知在大坝加高前,黄家港、襄阳两站水温与气温均为显著相关;在加高工程期间,黄家港站相关系数由 0.75 下降到 0.70,加高工程完成后降到 0.43。因此表明坝下黄家港站水温与气温非同步变化,且相关性变差,气温对水温的影响由于大坝加高而减弱。Kedra 等^[22]对喀尔巴阡山脉水库建设前后河水温度的研究也印证了此结论。

丹江口大坝加高使水库储水量增大 116 亿 m^3 ,水位升高,表层水体与空气热交换加快,而深层水体传热困难,夏季升温与冬季降温均较大坝加高前更慢。汛期来水量大,库内水位较高,水温分层显著,

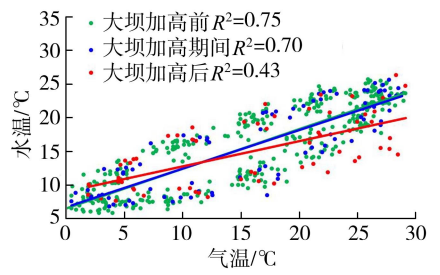


图 4 大坝加高前后黄家港站水温-气温相关关系

而下泄流量较大、温度低,导致黄家港站水温降温明显;非汛期来水量少,库内水位较低,水温虽有分层,但较汛期库内温差小,下泄流量少,故非汛期黄家港站水温较大坝加高前仅有较小升温。结合图 2 和图 3(b)可知,夏季水温降低量比冬季水温升高量更多,因此,从年尺度来看黄家港站在大坝加高后水温出现大幅降低现象。

总体来看,大坝加高后蓄水水位升高也加剧了水库水温分层,非季节性水流下泄,改变了坝下河道天然水温,导致水温与气温的相关性降低,加深了库内水温“高温不高、低温不低”的现象。

3.2 水温指标变化分析

3.2.1 年指标分析

以年为单位,通过基线偏离指标、相位偏移指标、极值变幅指标,计算丹江口水库大坝加高前后水温变化,结果如图 5 所示。

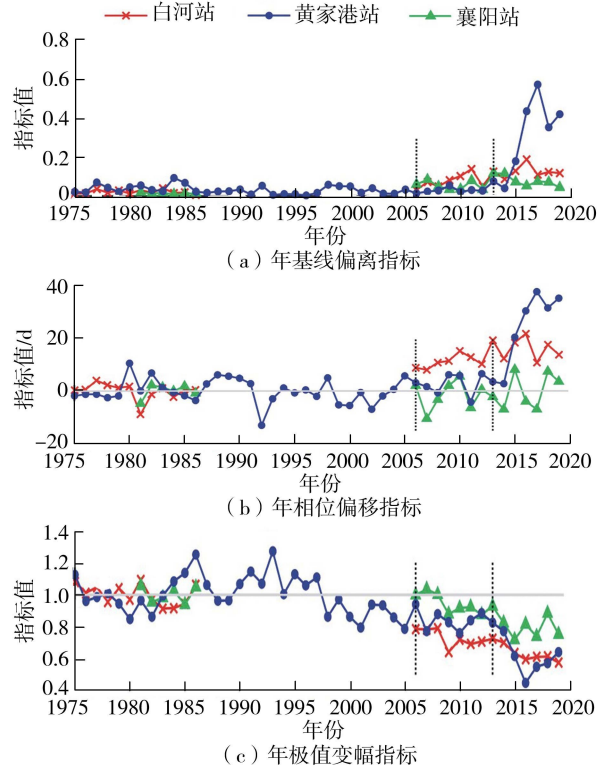


图 5 年水温评价指标

丹江口水库大坝加高前(1975—2005 年)3 站基线偏离指标值的范围为 0~0.10(图 5(a)),波动

幅度基本一致且显著低于建库后的指标值,说明水库对河流水温的影响大于天然状态下水温的调节。白河站位于丹江口水库上游,作为入库控制站,其水温不受丹江口水库调蓄影响,但由于汉江上游存在石泉、安康等水利枢纽,白河水温亦会发生不同于天然河道的水温波动,使基线偏离指标数值较天然状态下偏大;黄家港站年基线偏离指标值在大坝加高期间有小幅上升,而在大坝加高后(2013—2019年)上升显著并在2017年达到0.57,说明水库运行使黄家港站下泄水温与加高前基准条件下的水温差异明显且影响程度逐阶段加深;襄阳站距丹江口水库较远,基线偏离指标变幅较小,表现为水库对水温的调节作用随距离增大而逐渐减小,气温和支流河水汇入对其水温影响更明显,何力等^[23]的研究也印证了此结论。

为量化丹江口水库大坝加高后水温集中期后移的时间,计算得图5(b)所示的年相位偏移指标。大坝加高后,白河站受其他水利工程影响,相位偏移指标值呈现小幅度增长,水温集中期后移16d;黄家港站水温的偏移量为0~38d,大坝加高前、加高期间、加高后其相位偏移指标的平均值分别为0.02d、2.7d、23d,水温集中期从大坝加高前的8月初,后移至8月下旬。襄阳站相位偏移指标值为0~8d,大坝加高后水温集中期平均前移0.1d,由于其受水库蓄水影响小,表现为自然因素对天然河道水温波动的影响较大。

丹江口水库大坝加高前3站水温极值变幅指标值均在1.0附近波动(图5(c));2006年后,极值变幅指标值有降低趋势并基本维持在1.0以下,水温初步呈现均化现象。而黄家港站极值变幅指标值逐年降低,2013—2019年水温极值变幅指标值降低了22.3%,均化程度加深,说明丹江口水库调节能力较强,对其下游河道水温影响明显。白河、襄阳两站指标值也有不同程度的降低,襄阳站降幅相对较小。

3.2.2 季指标分析

a. 季基线偏离指标。采用式(2)进行季基线偏离指标计算,得到不同季节的基线偏离指标值如图6所示。1975—2012年,各站四季指标值均低于0.36。2013年后,按不同季节进行分析,夏季、冬季的基线偏离程度有逐年增大趋势,水温在夏季受到较大影响。按水文站进行分类分析,白河站冬季水温升高,变化最大,襄阳站各季节变化最小,而黄家港站水温受大坝加高影响最为明显。黄家港站在2013年之前各季节的基线偏离指标值均稳定在0.04以下,而大坝加高后,春秋冬三季水库稳定蓄水放水,其基线偏离指标值变化比白河站小,但夏季为汉江流域丰水期,入库水量大,水位增加,水库下层

低温水下泄导致该站水温降低,基线偏离指标值达0.38,对比大坝加高前发生了较大波动。

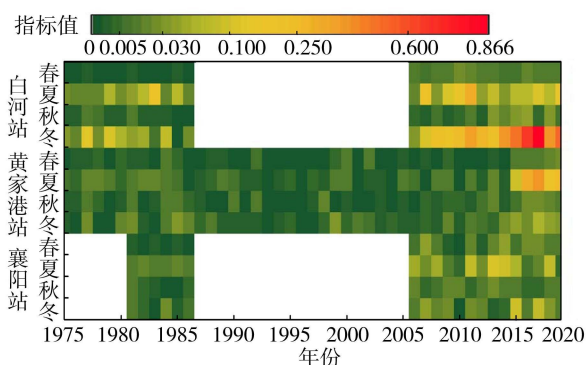


图6 3站季基线偏离指标对比

b. 季相位偏移指标。表1为大坝加高期间、大坝加高后3站各季节水温集中期平均偏移时间的对比结果。按季节来看,3站春季相位偏移时间最小,水温变化稳定,夏季相位偏移时间最大,冬季水温变化幅度较小且在大坝加高后均有不同程度的集中期后移,表现为滞迟现象;按水文站来看,白河站冬夏两季集中期后移较为明显、春秋两季变化不大,襄阳站水温呈现整体稳定的小幅波动,而黄家港站水温集中期变化在3站中最明显,其四季相较于大坝加高期间分别后移了1.6d、9.5d、8.5d、3.9d,夏季滞冷现象显著。

表1 3站各季节水温集中期平均偏移时间

水文站	季节	平均偏移时间/d	
		加高期间	加高后
白河站	春	0.09	1.53
	夏	-0.23	6.91
	秋	-0.72	-2.80
	冬	11.77	5.86
黄家港站	春	-0.19	1.43
	夏	0.86	10.38
	秋	-0.25	8.29
	冬	-0.45	3.50
襄阳站	春	-0.13	-0.84
	夏	3.00	1.45
	秋	0	1.23
	冬	-0.58	2.31

c. 季极值变幅指标。以大坝加高前为基准值,绘制图7所示极值变幅指标季节热力图。总体来看,大坝加高后相位偏移指标值均有所降低,表现为季水温最高值与最低值间的差值减小,均化作用明显。春夏两季变化幅度最明显,秋季次之。通过大坝加高前后对比,白河站水温温差减小;黄家港站极值变幅指标值在大坝加高前、加高期间、加高后呈阶段性变化,加高后其值的下降幅度最大且均维持在1以下,春夏两季尤为明显;襄阳站极值变幅指标值小幅降低,但由于受丹江口水库蓄水影响小,实际水温变化不大。

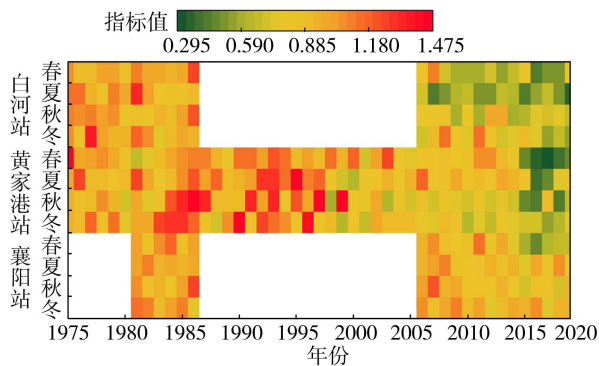


图7 3站季极值变幅指标对比

3.3 生态影响分析

汉江是产漂流性卵鱼类的重要分布水域,为探究丹江口水库大坝加高前后水温的变化对银鮡生长繁殖的影响,对5月中旬至8月上旬的银鮡繁殖期内^[24]水温相位偏移时间进行计算,结果如图8所示(相位推迟为正值,相位超前为负值),大坝加高后,2013—2019年白河站、黄家港站、襄阳站水温集中期平均向后推迟了5.1 d、1.9 d、3.9 d,总体来看,水库下游银鮡产卵占鱼类产卵总量的比例受影响不大,而其在上游的产卵量将可能发生改变。

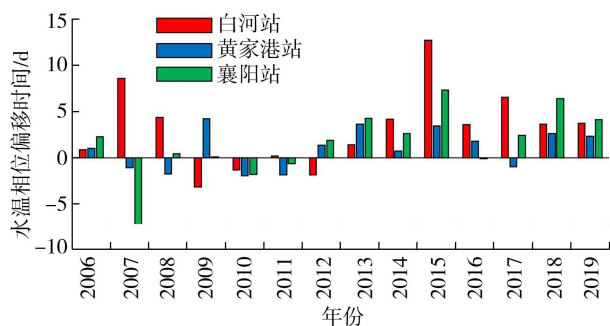


图8 3站5月中旬至8月上旬相位偏移指标

经上文分析,黄家港站受丹江口水库大坝加高影响最明显,对比黄家港站年(1月1日—12月31日)、夏季(6月1日—8月31日)、银鮡繁殖期(5月11日—8月10日)3种时间尺度3个时间段的水温集中期,发现与大坝加高完成前相比,2013年及以后时段的水温集中期均有后移。年尺度水温集中期受影响最大,从8月上旬后移至8月下旬;夏季、银鮡繁殖期2个时段内水温分布情况及持续升温的变化趋势年际相差小,以致大坝加高后的水温集中期虽然有后移情况,但变化较小。

4 结论

a. 丹江口水库对下游生态影响具有长期性和复杂性,大坝加高后坝下水温已发生显著变化。丹江口水库大坝加高后,水温极值变幅指标呈下降趋势,均化效应显著。水温极值出现时间延后,存在

“滞冷”和“滞温”现象。

b. 年水温评价指标的计算结果显示了水温的滞迟与均化作用,但相较于年指标分析,季指标分析更能清晰地地区分出年内水温受影响最大的时段,表示出季节性波动与季节间对比。

c. 大坝加高对汉江中游水温的影响与距离密切相关,显著改变了黄家港站水温情势,使其水温集中期滞后约23 d,而对襄阳站水温的改变程度较小。

参考文献:

- [1] WANG Y K, ZHANG N, WANG D, et al. Impacts of cascade reservoirs on Yangtze River water temperature: assessment and ecological implications [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125240.
- [2] 张先炳, 胡亚萍, 杨威, 等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 117-122. (ZHANG Xianbing, HU Yaping, YANG Wei, et al. Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4): 117-122. (in Chinese))
- [3] 班璇, 师崇文, 郭辉, 等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [4] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 34-42. (JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 34-42. (in Chinese))
- [5] LONG L H, XU H, JI D B, et al. Characteristic of the water temperature lag in Three Gorges Reservoir and its effect on the water temperature structure of tributaries [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(22): 1459.
- [6] 刘军英, 贾更华, 韩龙喜, 等. 水库下游河道水温沿程分布的解析解及与其他方法的比较[J]. *水资源保护*, 2012, 28(4): 28-32. (LIU Junying, JIA Genghua, Han Longxi, et al. Analytical solution of water temperature distribution in river downstream of reservoir and comparison with another method [J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(4): 28-32. (in Chinese))
- [7] LI T, MO K, WANG J, et al. Mismatch between critical and accumulated temperature following river damming impacts fish spawning [J]. *Science of the Total*

- Environment, 2021, 756:144052.
- [8] ZHANG P, YANG Z, CAI L, et al. Effects of upstream and downstream dam operation on the spawning habitat suitability of coreius guichenoti in the middle reach of the Jinsha River[J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 198-208.
- [9] JIANG X, MA R, MA T, et al. Modeling the effects of water diversion projects on surface water and groundwater interactions in the central Yangtze River basin [J]. Science of the Total Environment, 2022, 830:154606.
- [10] CHEN H, YAO L, FITRI A. The influence mechanism research of inflow temperature in different time scale on the water temperature structure [J]. Earth and Environmental Science, 2019, 365(1) :012058.
- [11] 惠二青, 毛劲乔, 戴会超. 上游水库水温情势变化对中华鲟产卵江段水温的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2) :44-48. (HUI Erqing, MAO Jingqiao, DAI Huichao. Effects of temperature variation at upstream of the Three Gorges Reservoir on Chinese sturgeon spawning reach[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2) :44-48. (in Chinese))
- [12] 李想, 刘睿, 甘露, 等. 筑坝河流生态系统变化与响应研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8) :63-70. (LI Xiang, LIU Rui, GAN Lu, et al. Change and response of dammed river ecosystem[J], Yangtze River, 2021, 52(8) :63-70. (in Chinese))
- [13] 李褪来, 陈黎明, 王向明. 梯级水电站对库区和河道水温的影响预测[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3) :23-28. (LI Tilai, CHEN Liming, WANG Xiangming. Influence forecast of the cascade power stations on water temperature of reservoirs and rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3) :23-28. (in Chinese))
- [14] 邱如健, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库蓄水对宜昌—城陵矶河段水温情势影响研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3) :108-115. (QIU Rujian, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Impact from impoundment of Three Gorges Reservoir on water temperature regime of Yichang-Chenglingji reach [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(3) :108-115. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 陶雨薇, 王远坤, 王栋, 等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10) :48-55. (TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges Dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10) :48-55. (in Chinese))
- [17] 王学雷, 宋辛辛. 梯级水库叠加影响下汉江中下游流域水文情势变化研究 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2019, 53(5) :685-691. (WANG Xuelei, SONG Xinxin. Study on the change of hydrological regime in the middle and lower reaches of Hanjiang River under the influence of cascade water conservancy projects [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2019, 53(5) :685-691. (in Chinese))
- [18] 李修峰, 黄道明, 谢文星, 等. 汉江中游鱼类资源现状 [J]. 湖泊科学, 2005(4) :366-372. (LI Xiufeng, HUANG Daoming, XIE Wenxing, et al. Status of fisher resources in the middle reaches of the Hanjiang River [J]. Journal of Lake Sciences, 2005(4) :366-372. (in Chinese))
- [19] 刘洪蕊, 刘玉芳, 王结良, 等. 水库运行对汉江流域草鱼洄游影响评价研究 [J]. 水生态学杂志, 2021, 42(5) :69-77. (LIU Hongrui, LIU Yufang, WANG Jieliang, et al. Impact of reservoir operation on Grass Carp (Ctenopharyngodon idella) migration in the Hanjiang River basin [J], Journal of Hydroecology, 2021, 42(5) :69-77. (in Chinese))
- [20] 白敬沛, 黄耿, 蒋长军, 等. 丹江口水库鱼类群落特征及其历史变化 [J]. 生物多样性, 2020, 28(10) :1202-1212. (BAI Jingpei, HUANG Geng, JIANG Changjun, et al. Characteristics and historical changes of the fish assemblage in the Danjiangkou Reservoir [J]. Biodiversity Science, 2020, 28(10) :1202-1212. (in Chinese))
- [21] 张飒, 班璇, 黄强, 等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(7) :34-43. (ZHANG Sa, BAN Xuan, HUANG Qiang, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7) :34-43.
- [22] KĘDRA M, WIEJACZKA Ł. Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: assessment and management implications [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626:1474-1483.
- [23] 何力, 张斌, 刘绍平, 等. 汉江中下游水文特点与渔业资源状况 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(11) :1788-1792. (HE Li, ZHANG Bin, LIU Shaoping, et al. Hydrological characteristics and fishery resources status of mid-lower Hanjiang River [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(11) :1788-1792. (in Chinese))
- [24] 李修峰. 汉江中游银鮡的繁殖生物学和早期发育研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2008.

(收稿日期:2022-09-27 编辑:骆超)