

· 水利与土木工程 ·

DOI:10.15961/j.jsuese.2017.01.009

## 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响

蔡玉鹏<sup>1,2,3</sup>, 杨志<sup>1,3</sup>, 徐薇<sup>1,3</sup>

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079; 2. 湖北省水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072; 3. 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079)

**摘要:**三峡水库蓄水后, 坝下水温变化对四大家鱼关键生活史阶段造成一定影响。本文使用水温变化指标定量评价蓄水后水温的改变程度, 分析水温改变对四大家鱼自然繁殖的影响。基于宜昌水文站 1983—2013 年长系列逐日水温资料, 建立了 25 个具有生态意义的水温参数, 利用变动范围法计算了三峡水库蓄水后 25 个水温参数变化度, 对高度改变的水温参数采用线性回归方法评估其变化倾向, 基于 F 检验法检验回归效果。分析四大家鱼自然繁殖时间与水温参数变化的关系, 研究四大家鱼自然繁殖对水温过程变化的响应。结果表明: 整体水温改变度达 44.2%, 高度改变的水温参数有 7 个, 分别是 1、4、10、11、12 月平均水温、最低水温出现日期、水温达到 18 °C 日期, 水温改变度达 87.9%、75.8%、74%、100%、100%、74%、89.9%, 说明三峡水库蓄水后坝下水温发生显著变化; 下泄水温在消落期 4、5 月份偏低趋势明显, 较蓄水前平均降低 2.3、1.7 °C, 由于 4、5 月水温偏低导致水温达到 18 °C 的日期发生显著变化, 由蓄水前 4 月 19 日推迟至蓄水后 5 月 4 日, 平均推迟 15 d。四大家鱼自然繁殖时间与水温达到 18 °C 的日期密切相关, 下泄水温偏低造成其自然繁殖时间推迟, 首次产卵推迟至 5 月中旬, 整个繁殖季节由 4—7 月份压缩至 5—6 月份, 研究成果为三峡水库开展生态调度提供科学支撑。

**关键词:**三峡水库; 水温变化指标; 四大家鱼; 生态调度

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2017)01-0070-08

### Effect of Water Temperature Variation After Impoundment of the Three Gorges Reservoir on Natural Reproduction of the Four Major Chinese Carps

CAI Yupeng<sup>1,2,3</sup>, YANG Zhi<sup>1,3</sup>, XU Wei<sup>1,3</sup>

(1. Inst. of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sci., Wuhan 430079, China;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;

3. Key Lab. of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Water temperature (WT) variation at downstream of the dam after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR) influenced the critical life cycle stages of the Four Major Chinese Carps to a certain extent. The degrees of WT variation in the Middle Yangtze River after impoundment of the TGP were quantitatively assessed, then effects of WT variation on the Four Major Chinese Carps were analyzed. 25 WT parameters with ecological interpretations by Indicators of WT Alteration method were generated based on daily data of the Yichang hydrologic station from 1983 to 2013. The variation degree of 25 parameters after impoundment of the TGR was calculated by the range of variability approach, the linear regression method by F-test was used to evaluate trend of WT parameters with high alteration. Then relationship between spawning time of the Four Major Chinese Carps to variation of WT parameters was analyzed, to study the response of four carps spawning to WT change. The results showed: the total alteration of WT had reached to 44.2%, 7 parameters representing high alteration in WT were found out, which were mean monthly WT respectively in January, April, October, November and December, arising date in the lowest WT, and arising date that WT arriving in 18 °C, the corresponding WT alteration degree had reached to 87.9%, 75.8%, 74%, 100%, 100%, 74%, 89.9%, these all gave explanations of obvious change in WT alteration downstream

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 国家重点研发计划水资源高效利用专项资助(2016YFC0402204); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201501001); 湖北省水资源安全保障湖北省协同创新中心资助项目(HB-SZYAQ-01); 国家自然科学基金资助项目(51609156)

作者简介: 蔡玉鹏(1977—), 男, 高级工程师。研究方向: 生态水文; 梯级水库生态调度等。E-mail: cyp@mail.ihe.ac.cn

of the dam after impoundment of the TGR. Compared to the same period before impoundment of the TGR, the average released WT were 2.3 °C and 1.7 °C lower in April and May during drawdown period, thereby the significant change of arising date that WT arriving in 18 °C was occurred, from 19 June in pre-impoundment period to 4 May in post-impoundment period, averagely postponed by 15 days. The spawning season of the Four Major Chinese Carps was closely related to the arising date that WT arriving in 18 °C. Due to the lower released WT by the TGR, the first spawning time of the Four Major Chinese Carps had postponed from April to mid-May, and the whole spawning season had been shortened. The results might provide scientific reference for the experimental ecological operation of the TGR on natural reproduction of the Four Major Chinese Carps.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; indicators of water temperature alteration; the Four Major Chinese Carps; ecological operation

水温是河流生态系统中物理、化学、生物过程的关键因素和主要调控因子<sup>[1-3]</sup>,控制着水生生物的生命循环、生物群落的组成及鱼类的丰度及分布,对鱼类的自然繁殖、早期发育、幼鱼摄食和生长、栖息地选择行为、越冬等几乎整个生活史环节都有重要影响<sup>[4-5]</sup>。人类活动诸如土地利用、水库大坝建设、水资源利用等改变了河流水温,其中水库大坝被认为是显著改变河流水温最重要的原因,尤其是大型水库,下泄水温与自然水温相比有较大差异,水库深层水的下泄导致春季、夏季水温偏低,冬季则偏高<sup>[6-7]</sup>,水温的周年循环发生错位,水温时空分布发生相应改变,对坝下江段的水生态系统产生深远的影响。

长江是中国“四大家鱼”(青鱼、草鱼、鲢、鳙)的主要天然原产地和栖息地,其资源动态是水生态系统健康状况的重要表征,也是三峡水库调度运行中的高度关注对象。近年来,三峡水库坝下水温变化对四大家鱼的影响日益受到相关研究学者的关注。郭文献等<sup>[8-9]</sup>利用1956—2006年宜昌水文站实测水温资料,分析了葛洲坝水库和三峡水库蓄水前后水温特征参数变化,结果表明三峡水库蓄水对河流水温有一定的调节性,其下泄水温相对于天然状况有一定的滞后性,影响四大家鱼产卵繁殖。陈永柏等<sup>[10]</sup>总结了四大家鱼产卵与水温的关系,水温低于18 °C或高于30 °C会引起胚胎发育停止或产生畸形。彭期冬等<sup>[11]</sup>分析了三峡工程对四大家鱼自然繁殖水温条件的影响,结果表明蓄水后4~5月份水温降低明显,4月份水温降低3.0 °C,水温的“推迟”引起下游四大家鱼自然繁殖时间后移。邹振华等<sup>[12]</sup>对比分析了宜昌和寸滩两站同期旬水温变化过程、水温差值、水温相关性和温变率相关性,三峡水库的修建对宜昌站水温特性的影响较显著。邓云等<sup>[13]</sup>采用纵向1维水温模型分析了三峡工程对宜昌至监利河段水温情势的影响,模拟结果显示三峡水库蓄水后四大家鱼产卵场的特征水温出现时间明显滞后,监利水温达到18 °C的时间较蓄水前延迟

1~3旬,结果表明三峡蓄水使得坝下水温情势发生显著变化,并对下游生态环境产生重要影响。然而,受水温资料和鱼类监测资料的限制,目前这些研究大多在宏观上分析水温变化对鱼类尤其是四大家鱼的影响,缺乏水温过程定量化的描述方法,水温变化究竟如何影响四大家鱼生活史有待深入分析。

为此,本研究着眼于三峡水库蓄水前后水温参数的定量分析及水温参数变化,以宜昌水文站1983—2013年实测水温资料为基础,构建具有生态意义的25个水温参数,分析三峡水库蓄水后坝下水温的改变程度,探讨长江中游水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响,旨在为三峡水库针对四大家鱼自然繁殖的生态调度方案提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集与处理

水温数据来自1983—2013年宜昌水文站逐日水温实测资料。长江干流宜昌水文站位于葛洲坝下约6 km,上距三峡大坝约46 km,是三峡-葛洲坝梯级水库出库控制站,站点位置关系见图1。

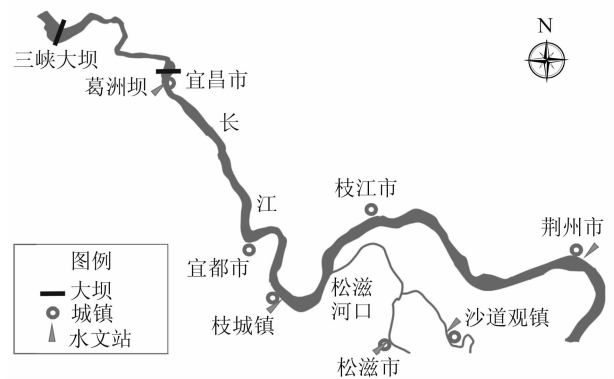


图1 研究站点位置示意图

Fig. 1 Location of Yichang Hydrological Station and the Three Gorges Reservoir

由于三峡水库2003年开始蓄水,因此将2003—2013年11年资料作为三峡水库蓄水后系列,1983—2002年20年资料作为蓄水前系列。三峡蓄水前的四大家鱼自然繁殖资料参考文献[14 -

16]及年度监测报告,三峡蓄水后的四大家鱼自然繁殖资料来自于原位监测数据。

## 1.2 研究方法

Richter 等<sup>[17]</sup>1996年为全面评价河流生态系统状况,提出了水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA),是与生态紧密相关的32个水文参数指标,所选指标包括量(magnitude)、时间(timing)、频率(frequency)、持续时间(duration)和变化率(rate of change)5个方面。借鉴IHA构建理论,本文建立了具有生态意义的水温变化指标体系。该体系中的水温变化指标包括2组:第1组为表征水温状态值变化的参数,包括年平均水温、1至12月平均水温,共13个参数;第2组为表征蓄水前后水温过程改变的参数,主要是与生态过程有关的水温过程改变指标,包括年最低水温及出现日期、年最高水温及出现日期、极温差、极温升温速率、最低温升至最高温时间、最低温升至18℃时间、最低温升至18℃升温速率、水温达到18℃日期、从18℃达到最高温时间、从18℃达到最高温升温速率,共12个参数。所列水温变化参数均一定程度上与四大家鱼的自然繁殖有关,如中国南方地区鱼类开始产卵的时间虽然有先后差异,但一般都在18℃以上开始产卵,四大家鱼在水温低于18℃时则从未见到过产卵行为<sup>[10,14-15]</sup>,最低水温、最高水温等极温影响四大家鱼的生存和生长,升温过程则影响四大家鱼性腺发育等。

本文应用Richter等<sup>[18]</sup>提出的变动范围法(range of variability approach, RVA),以1983—2002年20年不受三峡工程影响的水温资料为基础,首先定义25个水温改变参数的自然状态目标范围,计算目标范围的上下限,然后以2003年蓄水以来水温资料为基础,计算25个参数落在目标范围内的年数,以此来衡量水温改变参数的改变程度,其计算公式如下<sup>[19]</sup>:

$$D = \frac{N_0 - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D$ 为水温改变度; $N_0$ 为计算年数,指蓄水后水温改变参数实际落在目标范围内的年数; $N_e$ 为期望年数,指蓄水后预期落在自然状态目标范围内年数。 $D$ 值为正值说明蓄水后落入目标范围计算年数大于期望年数, $D$ 为负值则计算年数小于期望年数。为判断水温改变程度, $D$ 值的绝对值处于0~33%属于无改变或低度改变(L),处于33%~67%为中度改变(M),处于67%~100%为高度改变(H)。以25

个参数的水温改变度绝对值的平均值来表示水温整体改变程度。对于高度改变的水温参数,RVA法无法获取长期的变化趋势,本文采用线性回归方法评估高度改变水温参数的变化倾向并利用F检验法检验回归效果是否显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水温改变程度

25个水温参数中,高度改变的参数有7个,分别为第1组的1、4、10、11、12月平均水温5个参数,第2组中的年最低水温出现日期、水温达到18℃日期2个参数,中度改变参数有6个,低度改变参数有12个。水温整体改变程度为44.2%,为中度改变,水温改变度的绝对值见图2。

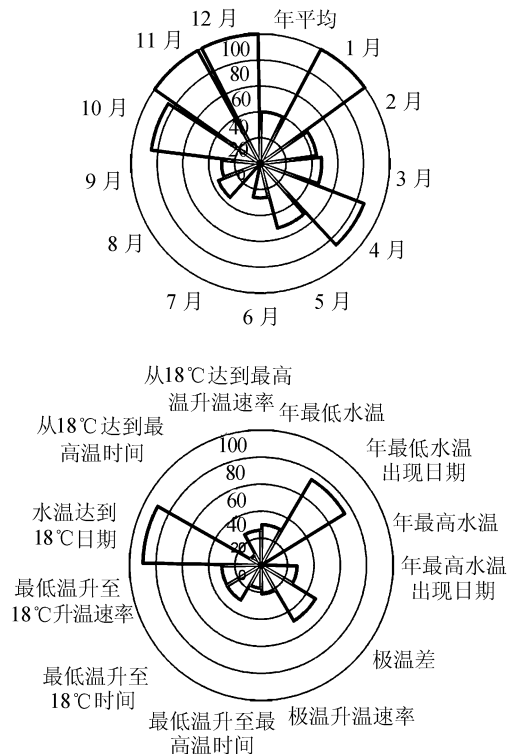


图2 宜昌站水温改变度

Fig.2 Water temperature alteration factor at Yichang station

三峡蓄水前后25个水温参数的均值、标准差、上下限目标范围及水温改变度计算结果见表1、2。在第1组参数中,蓄水前1月份平均水温由10.1℃升高到蓄水后12.9℃,水温升幅达2.8℃;2月份平均水温也有所升高,由10.3℃升高到11.4℃,较1月份平均水温变幅小;4月份平均水温与蓄水前17.2℃相比,急剧下降到14.9℃,水温相较于蓄水前偏低2.3℃;10、11、12月份平均水温较蓄水前相比均呈升高趋势,且随着时间的推移,升温幅度明显

加大,蓄水前分别为 20.0、16.7、12.7 °C,蓄水后分别为 22.0、19.2、16.2 °C,水温分别升高 2.0、2.5、3.5 °C。其它参数改变相对较低的月份中,5、6月平均水温延续了4月份水温偏低情势,但是水温下降

幅度逐渐减小,其中:5月份较蓄水前偏低 1.7 °C,6月份偏低 0.9 °C;7、8、9月平均水温则变化不大,较蓄水前水温偏高在 1 °C左右,蓄水前后月平均水温变化见图3。

表1 第1组水温变化指标分析结果

Tab.1 Results of the indicators in the first group of water temperature alteration analysis

计算结果	水温/°C												
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
蓄水前均值	10.1	10.3	12.8	17.2	21.4	23.9	24.7	25.7	23.3	20.0	16.7	12.7	18.2
标准差	0.9	0.9	1.1	0.7	0.8	1.3	0.9	1.1	0.9	0.8	0.6	0.7	0.5
上限	11.0	11.2	13.9	17.9	22.2	25.2	25.7	26.8	24.1	20.8	17.3	13.5	18.7
下限	9.3	9.3	11.7	16.4	20.6	22.6	23.8	24.6	22.4	19.1	16.1	12.0	17.8
蓄水后均值	12.9	11.4	11.8	14.9	19.7	23.0	25.1	25.9	24.4	22.0	19.2	16.2	18.9
水温改变度/%	-87.9	-51.5	-39.4	-75.8	-48.1	-23.4	11.9	39.9	-0.8	-74.0	-100.0	-100.0	-48.1
水温改变程度	H	M	M	H	M	L	L	M	L	H	H	H	M

表2 第2组水温变化指标分析结果

Tab.2 Results of the indicators in the second group of water temperature alteration analysis

计算结果	年最低水温/°C	年最低水温出现日期	年最高水温/°C	年最高水温出现日期	极温差/°C	极温升温速率/(°C·month <sup>-1</sup> )	最低温升至最高温时间/d	最低温升至18°C时间/d	最低温升至18°C升温速率/(°C·month <sup>-1</sup> )	水温达到18°C日期	从18°C达到最高温时间/d	从18°C达到最高温升温速率/(°C·month <sup>-1</sup> )
蓄水前均值	9.1	1/30	27.2	8/8	18.1	2.9	190.3	79.1	3.5	4/19	111.2	2.6
标准差	1	14*	1	17.9*	1.2	0.4	23.5	12.9	0.8	5*	16.6	0.5
上限	10.1	2/13	28.2	8/26	19.3	3.3	213.8	92.0	4.3	4/24	127.8	3
下限	8.1	1/16	26.2	7/21	16.9	2.6	166.8	66.2	2.8	4/14	94.6	2.1
蓄水后均值	10.3	2/21	27	8/20	16.7	2.8	179.6	71.7	3.3	5/4	107.9	2.6
水温改变度/%	-30.1	-74	2.3	-27.3	-48.1	21.2	16.9	-30.1	29.9	-89.9	-9.1	25.9
水温改变程度	L	H	L	L	M	L	L	L	L	H	L	L

注:标准差“\*”单位为d。

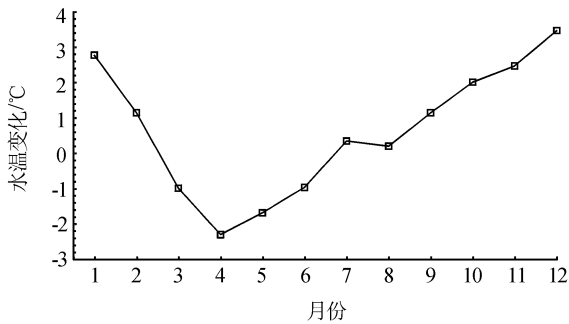


图3 三峡水库蓄水后水温的变化幅度

Fig.3 Range of water temperature after the impoundment of the TGR

在第2组参数中,年最低水温蓄水前 9.1 °C,蓄水后升高至 10.3 °C,出现日期由 1 月 31 日推迟至 2 月 21 日,推迟了 22 d。年最高水温变化不大,但日期推迟 12 d。年最低水温升高导致极温差(年最高水温与最低水温之差)变小,年内温度变化幅

度减小,年最低水温日期的推迟导致升至年最高水温时间减少 10.7 d,极温升温速率也随之下降 0.1 °C/月。水温达到 18 °C 日期为高度改变,改变度 -89.9%,由蓄水前 4 月 19 日推迟至蓄水后 5 月 4 日,平均推迟 15 d,由于水温达到 18 °C 日期和年最高水温日期均出现推迟现象,水温 18 °C 达到最高温时间变化不大,升温速率变化不大。

2.2 高度改变水温参数的变化趋势

采用线性回归方法绘制第1组5个高度改变水温参数的年际变化趋势,见图4。线性回归方程显著性检验 -F 检验结果表明,1月平均水温、4月平均水温、10月平均水温、11月平均水温、12月平均水温的 P 值均小于显著性水平 0.05,通过显著性检验,回归效果显著。图4结果显示,近30年1月平均水温总体呈上升趋势,升温速率 0.167 6 °C/a,

4月平均水温呈下降趋势,降温速率 $0.1043\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,三峡水库蓄水后降温尤为明显,降温速率达 $0.7046\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,其中2011年仅为 $12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而在降温季节,10月平均水温近30年总体呈上升趋势,升温速率 $0.1254\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,11月平均水温升温速率为 $0.1343\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,12月平均水温升温速率为 $0.1849\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,其中2013年12月份平均水温达 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,远高于蓄水前平均水温 $12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

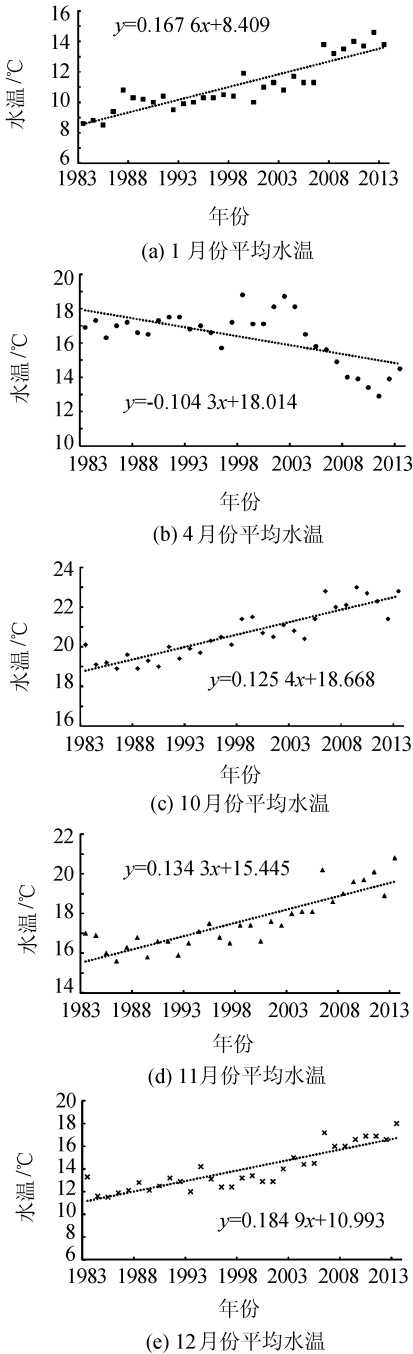


图4 第1组高度改变水温参数年际变化趋势

Fig.4 Interannual variation trend of high water temperature alteration in the first group

第2组2个高度改变水温参数的年际变化趋势如图5所示。年最低水温出现日期、水温达到 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日期通过显著性检验,变化趋势明显。年最低水温出现日期在三峡水库蓄水前差异较大,2012年最早,1月5日即出现最低水温,1988年最晚,2月25日才出现最低水温,3月份则从未出现最低水温,三峡水库蓄水后,年最低水温出现日期基本稳定在3月份,少数年份在1、2月份,近30年来年最低水温出现日期呈推迟趋势,推迟速率为 $1.0431\text{ d}/\text{a}$ 。同样,水温达到 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日期呈推迟趋势,三峡水库蓄水前稳定在4月中下旬,从未超过5月份,而在2006年三峡水库初期蓄水后,水温达到 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日期推迟至5月份,最晚推迟至5月23日,近30年来推迟速率为 $0.7226\text{ d}/\text{a}$ 。

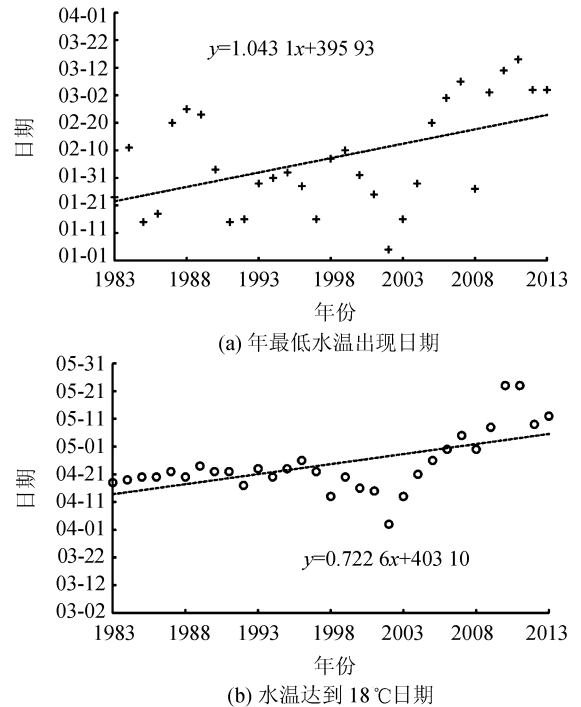


图5 第2组高度改变水温参数年际变化趋势

Fig.5 Interannual variation trend of high water temperature alteration in the second group

### 2.3 水温改变对四大家鱼自然繁殖的影响

三峡水库蓄水前后不同年份四大家鱼首次产卵时间、首次产卵水温、繁殖期分析结果见表3。

20世纪60年代4月下旬四大家鱼即开始产卵,三峡水库蓄水前首次产卵时间一般4月底至5月上旬,与之相比开始产卵的时间基本相同,变化不大,三峡蓄水后,4月份已无家鱼产卵,仅在少数年份如2006、2008、2009年水温达到 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日期在5月上旬以前情况下,5月上旬仍能发现家鱼产卵,逐渐推迟到5月中旬或更后的日期。

表3 长江中游四大家鱼自然繁殖情况

Tab. 3 Natural reproduction conditions of the FMCC in the middle Yangtze River

年份	首次产卵时间	首次产卵水温/℃	自然繁殖期	监测地点
1981	5月10日	20.7	5月中旬~7月上旬	宜昌
1986	4月29日	18.5	4月下旬~6月下旬	宜都
1998	5月6日	21.6	5月上旬~6月下旬	监利
1999	5月1日	20.4	5月上旬~7月上旬	纱帽
2005	5月28日	22.6	5月下旬~7月上旬	宜都
2006	5月8日	19.7	5月上旬~6月下旬	宜都
2007	5月19日	20.2	5月中旬~6月下旬	宜都
2008	5月9日	19.2	5月上旬~7月下旬	宜都
2009	5月9日	18.0	5月上旬~7月中旬	宜都
2011	6月18日	23.8	6月中旬~6月下旬	涪市
2012	5月19日	22.0	5月中旬~6月下旬	沙市
2013	5月13日	19.4	5月中旬~6月上旬	沙市

四大家鱼自然繁殖时间、繁殖期与水温变化相关关系如图6所示,由于宜昌至沙市江段区间来水较小,对沙市江段水温影响较小,宜昌站水温变化过程可以代表该江段水温情势变化趋势。分析各年四大家鱼首次产卵时间,均出现在水温首次达到18℃时间之后,表明四大家鱼在繁殖季节只有当产卵水温大于18℃才产卵的事实;蓄水后仅有2005、2006年4月底达到18℃,但四大家鱼产卵日期仍在5月份,其他年份由于水温首次达到18℃时间推迟至5月份,相应的4月份则从未监测到四大家鱼产卵行为;首次产卵水温在蓄水前后的大小差异没有规律性,可能与年最低水温升至18℃的积温时间及性腺发育状况有关。

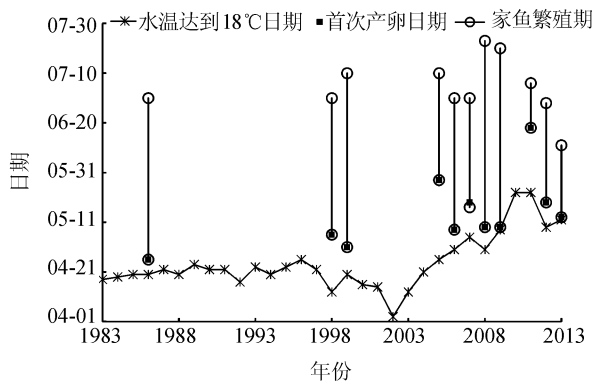


图6 四大家鱼自然繁殖与水温变化的关系

Fig. 6 Relationship between natural reproduction of the Four Major Chinese Carps and water temperature variation

长江中游四大家鱼整个自然繁殖期也发生相应变化。逐渐从三峡蓄水前的4~7月压缩至蓄水后的5~6月,特别是当部分年份水温首次达到18℃时间(如2011年为5月23日)过度推迟时,其整个繁殖季节将会大大缩短,蓄水后长江中游四大家鱼繁殖持续时间从蓄水前的约60~80 d,逐渐缩短至2011—2013年的约20~50 d,变化规律与水温达到18℃日期的推迟紧密相关。水温能够对鱼类的性腺发育造成明显影响,其典型特征是性腺成熟期的推迟<sup>[20-21]</sup>,而低温导致的性腺成熟期推迟必然会增加鱼类适合度代价,从而导致鱼类用于繁殖的能量减少,在持续较长的低温过程中,鱼类个体的性腺因投入更多的能量维持自身生存而逐渐退化。因此,当水温合适时,许多四大家鱼个体很可能无法在短时间内获得充足的能量使得性腺发育到成熟。根据2011—2013年的长江中游四大家鱼自然繁殖的监测结果,尽管水温达到18℃的时间延后,周年水温过程向后平移,并未完全阻断四大家鱼各生活史环节,仍然有部分四大家鱼能够在现有产卵场进行产卵活动,但产卵规模已较蓄水前有明显减少。对三峡水库生态调度而言,受水温延迟效应的影响,4月底至5月上旬为三峡水库消落期,开展生态调度满足四大家鱼繁殖具备较好的水流条件,但水温不能满足其需求,生态调度效果大打折扣,6月10日进入防洪期,需平衡防洪、发电与生态调度的关系,7月份四大家鱼自然繁殖已接近尾声,这些因素使得可生态调度的时段缩短。

### 3 结论

1) 三峡水库蓄水后坝下水温发生明显变化,水温整体改变程度为44.2%。下泄水温在升温季节4月、5月份较蓄水前明显偏低,平均比蓄水前偏低2.3℃、1.7℃,由于4月、5月水温偏低导致水温达到18℃的日期推迟。汛期7、8、9月水温变化不大,年内最低水温至最高水温的升温过程、升温速率变化不大。

2) 在与四大家鱼自然繁殖有关的高度改变水温参数中,4月平均水温呈下降趋势,年最低水温出现日期、水温达到18℃日期呈推迟趋势,其中年最低水温出现日期由蓄水前1月30日推迟至2月21日,推迟22 d,水温达到18℃日期由4月19日推迟至5月4日,平均推迟15 d。

3) 三峡蓄水后四大家鱼首次产卵推迟至5月中旬,家鱼繁殖时间显著推迟,整个繁殖季节由蓄水

前4-7月压缩至蓄水后5~6月,水温变化对四大家鱼自然繁殖造成一定影响,但未完全阻断四大家鱼关键生活史-自然繁殖阶段。未来在气候变化背景下,长江流域夏季平均流量下水温将偏低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[22]</sup>,随着长江上游干支流大规模的控制性梯级水库群的建设及调度运行,势必在长江中游产生水温的累积、叠加影响,建立四大家鱼周年生理变化的适温效应,解释四大家鱼适应水温过程的生理机制,是研究水温变化对四大家鱼自然繁殖影响的重要课题。

### 参考文献:

- [1] Petts G E. Water quality characteristics of regulated rivers [J]. *Progress in Physical Geography*, 1986, 10(4): 492 - 516.
- [2] Webb B W, Walling D E. Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation [J]. *Applied Geography*, 1996, 16(3): 211 - 223.
- [3] Caissie D. The thermal regime of rivers: A review [J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(8): 389 - 1406.
- [4] Saltveit S J, Bremnes T, Brittain J E, et al. Effect of a changed temperature regime on the benthos of a norwegian regulated river [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1994, 9(2): 93 - 102.
- [5] Steel E A, Lange I A. Using wavelet analysis to detect changes in water temperature regimes at multiple scales: Effects of multi-purpose dams in the Willamette River basin [J]. *River Research and Applications*, 2007, 23(4): 351 - 359.
- [6] Preec R M, Jonies H A. The effect of keepit dam on the temperature regime of the NAMOI River, Australia [J]. *River Research and Applications*, 2002, 18(4): 397 - 414.
- [7] Prats J, Val R, Armengol J, et al. Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(1/2): 105 - 118.
- [8] Guo Wenxian, Wang Hongxiang, Xia Ziqiang, et al. Effects of Three Gorges and Gezhouba reservoirs on river water temperature regimes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(6): 182 - 187. [郭文献, 王鸿翔, 夏自强, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究 [J]. *水力发电学报*, 2009, 28(6): 182 - 187.]
- [9] Guo Wenxian, Wang Hongxiang, Xu Jianxin, et al. Effects of Three Gorges Reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(3): 22 - 26. [郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(3): 22 - 26.]
- [10] Chen Yongbai, Liao Wengen, Peng Qidong, et al. A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese Carps' spawning [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2): 130 - 133. [陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述 [J]. *水生态学杂志*, 2009, 2(2): 130 - 133.]
- [11] Peng Qidong, Liao Wengen, Li Chong, et al. Impacts of four major Chinese Carps' natural reproduction the in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since impoundment [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(2): 228 - 232. [彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(2): 228 - 232.]
- [12] 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. [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.]
- [13] Deng Yun, Xiao Yao, Tuo Youcai, et al. Influence of Three-Gorge Reservoir on water temperature between Yichang and Jianli [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 551 - 560. [邓云, 肖尧, 脱友才, 等. 三峡工程对宜昌-监利河段水温情势的影响分析 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 551 - 560.]
- [14] Yi Bolu, Liang Zhishen. Natural conditions of the spawning grounds of the "domestic fishes" in Yangze River and essential external factor for spawning [J]. *Acta Hydrobiologica, Sinica*, 1964, 5(1): 1 - 15. [易伯鲁, 梁秩燊. 长江家鱼产

- 卵场的自然条件和促使产卵的主要外界因素[J]. 水生生物学集刊,1964,5(1):1-15.]
- [15] 易伯鲁,余志堂,梁秩桑,等. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1988:1-46.
- [16] Survey Team of Spawning Grounds of Domestic Fishes in Changjiang River. A survey on the spawning grounds of the "four famous Chinese carps" in the Changjiang river after dammed by the key water control project at Gezhouba [J]. Journal of Fisheries of China,1982,6(4):287-305. [长江四大家鱼产卵场调查队. 葛洲坝水利枢纽工程截流后长江四大家鱼产卵场调查[J]. 水产学报,1982,6(4):287-305.]
- [17] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.
- [18] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. Protecting instream flows: How much water does a river need [J]. Freshwater Biology,1997,37:231-249.
- [19] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research & Management,1998,14(4):329-340.
- [20] Wen Haishen, Lin Haoran. Effect of environmental factors on gonadal maturation as well as its ovulation and spawning in teleosts [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2001,12(1):151-155. [温海深,林浩然. 环境因子对硬骨鱼类性腺发育成熟及其排卵和产卵的调控[J]. 应用生态学报,2001,12(1):151-155.]
- [21] Guan Zhongzhi, Liu Jiming, Li Dongzhan. Effect of photoperiod regulation and temperature on gonad progress of (plecoglossus altivelis) parent fish [J]. Chinese Journal Fisheries,2009,22(4):27-30. [关忠志,刘吉明,李东占. 光照和水温对香鱼性腺发育的影响[J]. 水产学杂志,2009,22(4):27-30.]
- [22] Vliet M T H V, Franssen W H P, Yearsley J R, et al. Global river discharge and water temperature under climate change [J]. Global Environmental Change,2013,23(2):450-464.

(编辑 张琼)

引用格式: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. [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.]