

## 金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响\*

郝好鑫<sup>1,2</sup>, 杨霞<sup>3</sup>, 杨梦斐<sup>1\*\*</sup>, 王俊洲<sup>1</sup>, 潘婷婷<sup>1</sup>, 李志军<sup>1</sup>

(1: 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

(2: 长江水利委员会湖库水源地面源污染生态调控重点实验室, 武汉 430051)

(3: 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

**摘要:** 水温是重要的水文指标。气候变化和人类活动加剧背景下, 水温变化已成为威胁全球水生态系统的重要因素。长江上游开发了世界上规模最大的梯级水库群, 然而目前关于梯级水库和气候变化对下游水温及水生态的耦合影响仍不清楚。本文基于长江宜宾-重庆段长序列水温和气象资料, 解析了气象因子和金沙江梯级水库对下游水温的影响, 评估了长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区重要鱼类适宜产卵时间对水温变化的响应, 结果表明: 研究河段近 30 年年平均水温显著增高, 增幅约为 0.5~1.1℃; 向家坝-溪洛渡水库蓄水后向家坝站、朱沱站和寸滩站年水温过程平均滞后约 36、13 和 7 d, 蓄水后下游河段春季“滞冷”效应明显, 秋冬季“滞热”效应明显, 各水文站旬平均水温最大增加和降低幅度分别为 1.8~3.7℃和 1.3~3.6℃, “滞热”程度大于“滞冷”程度; 年内不同月份水温变化主要由梯级水库蓄水引起, 年际间平均水温变化主要由气候变化引起; 蓄水后向家坝站附近水温达到重要鱼类适宜产卵水温时间延迟了 30~40 d, 蓄水对达到重要鱼类适宜产卵水温的时间延迟程度为: 黑尾近红鲂>长薄鳅、圆口铜鱼、岩原鲤>中华金沙鳅>长江鲟>胭脂鱼, 且不同鱼类间生态位的重叠程度增加。研究结果可为减缓水电开发对水生生态的影响提供基础支撑。

**关键词:** 长江上游; 梯级水库; 气候变化; 水温; 产卵时间

## Impacts of the cascade reservoirs of Jinshajiang River on water temperature and fish spawning time\*

Hao Haoxin<sup>1,2</sup>, Yang Xia<sup>3</sup>, Yang Mengfei<sup>1\*\*</sup>, Wang Junzhou<sup>1</sup>, Pan Tingting<sup>1</sup> & Li Zhijun<sup>1</sup>

(1: Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P.R. China)

(2: Key Laboratory of Ecological Regulation of Non-point Source Pollution in Lake and Reservoir Water Sources, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430051, P.R. China)

(3: China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R. China)

**Abstract:** Water temperature has been recognized as one of the important hydrological indicators. However, changes in water temperature are going to threaten the sustainability of aquatic ecosystems owing to the climate change and the increased anthropogenic activities. While some of the world's largest cascade reservoirs have been developed in the upper reaches of the Changjiang River, it remains unclear about the combined effects of these reservoirs and climate changes on the water temperature and aquatic ecosystems. In this study, long-term water temperature and meteorological data (1989–2019) from Yibin–Chongqing segment of the Changjiang River were used to investigate the impacts of meteorological factors and Jinshajiang River cascade reservoirs on downstream water temperature, as well as to reveal the responses of fish spawning time to the water temperature changes in the National Nature Reserve for the Rare and Endemic Fishes located in the upper reaches of the Changjiang River. The major results of this study are: The average annual water temperatures in the study areas increased significantly over the last 30 years, with an increase of 0.5–1.1℃; After the impoundment of Xiangjiaba–Xiluodu cascade reservoir, the annual water temperature processes were delayed about 36, 13 and 7 days at three stations along the reservoir, respectively. The “cooling effect” and “warming effect” in the lower reaches were significant in spring and autumn–winter due to the impoundment of the cascade reservoirs, with the maximum increased and decreased ten-day mean

\* 2022-03-18 收稿; 2022-05-22 收修改稿。

中国长江三峡集团有限公司科研项目(SXSN/4596)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: ymf@whu.edu.cn。

water temperature of 1.8–3.7°C and 1.3–3.6°C, respectively. Therefore, the “warming effect” was greater than the “cooling effect”; The annual variations of water temperatures were mainly caused by the cascade reservoirs and the inter-annual variations were mainly caused by climate changes, which clearly showed an increasing trend; The time to reach the optimum spawning water temperature for important fish nearby the Xiangjiaba Hydrometric Station was delayed by 30–40 days after the reservoir impoundment, in the order of *Ancherythroculter nigrocauda* > *Leptobotia elongate*, *Coreius guichenoti*, *Procypris rabaudi* > *Jinshaia sinensis* > *Acipenser dabryanus* > *Myxocyprinus asiaticus*. Notably, the overlaps of the ecological niches for fish populations were increased. The results of the study may provide guidance to mitigate the impacts of hydropower development on aquatic ecology.

**Keywords:** Upper reaches of the Changjiang River; cascade reservoirs; climate change; water temperature; spawning time

水温是重要的水文指标,直接或间接调节着广泛的水生生态过程<sup>[1-5]</sup>。水温变化直接影响藻类、水生植物和水生动物的繁殖和发育,并且通过影响水体的化学反应速率和溶解氧浓度等改变水体硝化、反硝化等一系列生物地球化学循环过程,进而对整个水生生态系统产生深刻影响<sup>[1,4-6]</sup>。近年来气候变化和人类活动加剧背景下,全球河流和湖泊的水温普遍升高或节律改变,水温变化已成为威胁全球淡水生态系统安全的重大因素,并且这种变化趋势仍在不断加剧<sup>[1-5]</sup>。因此,研究水温变化特征及其生态响应对维护淡水生态系统健康稳定具有重要意义。

影响水温变化的因素主要有气温、辐射、降水量、风速等气象因子以及水库建设、废水排放等人类活动<sup>[7-8]</sup>。长江上游开发了世界上规模最大的梯级水库群,在气候变化和水利水电工程综合作用下,近60年长江流域水温发生了显著变化,整体增温趋势明显(附图I):其中长江源沱沱河增高0.6~0.7°C,主要增温在5–9月<sup>[9]</sup>;上游金沙江干流显著增高约0.3~0.6°C<sup>[10-11]</sup>;上游攀枝花—宜昌段增高0.3~1.5°C,宜昌段年内水温呈现春季降温、冬季增温趋势<sup>[12]</sup>;长江中下游同样呈现水温总体增高趋势,其中鄱阳湖表层水温显著增高1.1°C,春季增温速度高于其他季节2~4倍<sup>[13-16]</sup>。已有研究表明,沱沱河水温变化主要受青藏高原夏季气温变化驱动,鄱阳湖水温变化受区域气温和辐射增加共同驱动<sup>[9,16]</sup>。值得关注的是,长江干支流梯级明显改变了坝下河段的年内水温变化,主要表现为年内水温变幅减小和水温过程相对天然水文滞后<sup>[17-18]</sup>。例如三峡175 m蓄水期宜昌和监利断面4–6月平均降温2.6和2.0°C,10–12月平均增温2.7和2.1°C,宜昌和监利断面旬均水温年内变幅分别降低1.5和2.5°C<sup>[19]</sup>;向家坝蓄水后屏山站春季降温2.2°C,冬季增温2.3°C,并且水温过程趋于平坦<sup>[12]</sup>;此外,支流雅砻江水电开发同样对长江干流水温过程产生影响,其中使华电站4月平均降温0.8°C,12月平均增温1.8°C<sup>[10]</sup>。综上所述,气温变化和干支流水电开发共同影响下游河段水温变化过程<sup>[9-16]</sup>。尽管刘邵伟等<sup>[10]</sup>和Tao等<sup>[14]</sup>采用线性回归、小波分析和广义回归神经网络(GRNN)等统计模型识别了气候变化和梯级开发对水温变化的影响,发现金沙江上游的气温变化影响了年均水温,三峡水库蓄水对宜昌下游水温的影响程度超过了气温变化。然而,在长江上游气候明显变化<sup>[20]</sup>和金沙江高强度梯级开发的背景下,两者如何共同影响下游水温变化仍有待进一步研究。

鱼类是河流生态系统的重要组成部分,也是河流生态环境变化重要的指示生物<sup>[1-2]</sup>。水温的自然节律对鱼类生活史的完成,尤其对繁殖期和早期发育阶段至关重要,扰乱水温变化节律将使鱼类卵子产量降低、性腺发育推迟、有效繁殖率和生存率下降<sup>[1-3,21-23]</sup>。产卵临界温度是衡量鱼类繁殖与水温两者关系的主要指标之一<sup>[7,21]</sup>,随着长江水温情势的改变,水温对区域鱼类的影响受到越来越多的关注。例如已有研究通过对比三峡蓄水前后鱼类适宜产卵临界水温对应时间变化,发现三峡蓄水后下游河道的水温变化使“四大家鱼”产卵平均推迟了10 d<sup>[17]</sup>,使中华鲟产卵平均推迟约20~29 d<sup>[18]</sup>,并且减少了产卵次数和产卵数量,降低了受精率,有效繁殖率大大降低<sup>[3]</sup>。

目前金沙江下游已建向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德4个梯级水库,库容52亿~205亿m<sup>3</sup>,均为高坝巨型水库。其中向家坝和溪洛渡分别于2012年10月和2013年5月下旬蓄水,最后一级向家坝下游紧邻我国最长的河流型自然保护区——长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区,梯级水库运行势必对下游保护区河道水温产生影响。自然保护区分布有长江鲟、白鲟、胭脂鱼等国家级重点保护鱼类和圆口铜鱼、长薄鳅、岩原鲤等65种长江上游特有鱼类<sup>[24-26]</sup>。为研究梯级水库和气候变化对该河段鱼类生长繁殖的影响,本文以向家坝坝下长江宜宾—重庆河段为研究区,以1989—2019年水温为研究对象,1)首先分析了向家坝—溪洛渡蓄水后下游水温变化特征,2)其次基于水温变化由气候变化和梯级开发共同驱动的假设,对比蓄水

前后水温对气象因素响应变化,并采用协方差分析检验了气候变化和梯级蓄水对年季和年内水温变化的影响,3)基于上述结果,探讨了向家坝—溪洛渡蓄水对研究河段重要鱼类适宜产卵水温时间的影响。研究旨在为减缓水电开发对水生生态的影响提供参考。

## 1 研究区域概况与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域为向家坝坝下长江干流宜宾—重庆河段,长度约 380 km,左岸主要支流有岷江、沱江、嘉陵江等,右岸主要支流有赤水河、乌江等。该段流经峡谷、丘陵和山地,河床多为卵石,滩多流急,流态紊乱,枯水期水流流速一般为 1.5~3.0 m/s,洪水期流速一般为 3.0~5.0 m/s,年径流量达 2060 亿 m<sup>3</sup>(李庄水文站)。

研究河段上游为金沙江梯级开发的最后两级,即溪洛渡和向家坝水电站(图 1)。溪洛渡水电站于 2013 年下闸蓄水,正常蓄水位 600 m,水库总库容 129.1 亿 m<sup>3</sup>;向家坝水电站于 2012 年下闸蓄水,正常蓄水位 380 m,总库容 51.86 亿 m<sup>3</sup>。



图 1 研究区域示意图

Fig.1 Diagram of the study area

### 1.2 鱼类资源

研究河段涉及长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区,分布的珍稀特有与经济鱼类主要包括长江鲟(*Acipenser dabryanus*)、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)、岩原鲤(*Procypris rabaudi*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、铜鱼(*Brass gudgeon*)、中华金沙鳅(*Jinshaia sinensis*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、黑尾近红鲂(*Ancherythroculter nigrocauda*)、“四大家鱼”、中华纹胸鲃(*Glyptothorax sinense*)等,历史上其产卵场广泛分布于金沙江和长江上游干支流,水温是影响其产卵的重要因素之一<sup>[24-25]</sup>。

### 1.3 水温、气象和鱼类适宜产卵水温资料

选取向家坝、朱沱、寸滩 3 个水文站 1989—2019 年的逐旬水温数据分析研究河段水温变化特征,水文站位置如图 1 所示。向家坝水文站位于向家坝坝下 2 km,控制流域面积 45.88 万 km<sup>2</sup>,由于向家坝水电站建设,设该站于 2012 年后代替屏山水文站成为金沙江流域出口控制水文站;朱沱水文站位于研究河段中游,控制流域面积 69.47 万 km<sup>2</sup>,是观测长江上游金沙江来水与横江、岷江、沱江、赤水河等各主要支流汇合后水文特性的基本水文站;寸滩水文站位于研究河段下游,距离长江与嘉陵江汇口 7.5 km,控制流域面积 86.66 万 km<sup>2</sup>。

气象资料选择向家坝、朱沱和寸滩站附近的宜宾、合江和沙坪坝气象站 1989—2019 年逐月气象资料

(合江气象站缺少 1989—1990 年资料), 气象站位置如图 1 所示。基于已有水温与气象因子关系的相关研究<sup>[9,11]</sup>, 本研究选择与水温关系较为密切的气温、日照时数和降水量 3 个气象因子探索气候变化与水温的关系。

基于研究河段鱼类濒危程度、生态价值、产卵场分布和捕获记录等<sup>[24-27]</sup>, 选择长江鲟、胭脂鱼、圆口铜鱼、岩原鲤、中华金沙鳅、长薄鳅和黑尾近红鲃为区域典型重要鱼类, 通过文献调研方式搜集了重要鱼类的适宜产卵水温<sup>[24-29]</sup>。

#### 1.4 数据分析

采用 Mann-Kendall (M-K) 法检验 1989—2019 年长江干流宜宾—重庆河段水温(向家坝、朱沱和寸滩水文站数据)和气温、日照时数和降水量(宜宾、合江和沙坪坝站气象数据)变化趋势; 由于溪洛渡下闸蓄水时间晚于向家坝 1 年, 因此以向家坝蓄水时间 2012 年作为反映金沙江下游梯级(向家坝—溪洛渡)对水温影响的时间节点(蓄水前: 1989—2012 年, 蓄水后: 2013—2019 年), 采用单因素方差分析分析向家坝—溪洛渡蓄水对各水文站各月及全年平均水温的影响; 采用线性回归比较蓄水前后气象因子与水温的关系变化; 此外, 为检验月份和梯级蓄水对水温的影响是否由气象因子引起, 采用气温、降水量和日照时数为协变量, 月份为随机影响因子, 梯级蓄水为固定影响因子的协方差分析模型(ANCOVA)分析气象因子、月份和梯级蓄水对水温的影响。该协方差模型结构为一般线性模型(general linear model, GLM), 采用协变量和影响因子依次进入模型的 I 型平方和运行<sup>[30]</sup>, 协变量的共线性采用方差膨胀系数(VIF)检验( $VIF > 10$  表示存在严重共线性)。所有数据分析使用 R software V.4.1.2(R Development Core Team 2021)完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 向家坝—溪洛渡蓄水后下游水温变化特征

2.1.1 年际平均水温变化 从 M-K 检验结果可知, 研究河段 1989—2019 年间年平均水温呈现显著增高趋势( $P < 0.05$ ), 其中向家坝站水温呈现显著增高趋势( $P < 0.05$ ), 近 30 年平均水温增高约  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 增温速率为  $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 但向家坝—溪洛渡蓄水前后该站平均水温无明显变化; 朱沱站水温呈现极显著增高趋势( $P < 0.001$ ), 近 30 年平均水温增高约  $1.1^{\circ}\text{C}$ , 增温速率为  $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 向家坝—溪洛渡蓄水前后该站平均水温显著增高  $0.6^{\circ}\text{C}$  ( $P < 0.05$ ); 寸滩站水温呈现极显著增高趋势( $P < 0.001$ ), 近 30 年平均水温增高约  $0.9^{\circ}\text{C}$ , 增温速率为  $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 向家坝—溪洛渡蓄水前后该站平均水温显著增加  $0.5^{\circ}\text{C}$  ( $P < 0.05$ ) (图 2)。

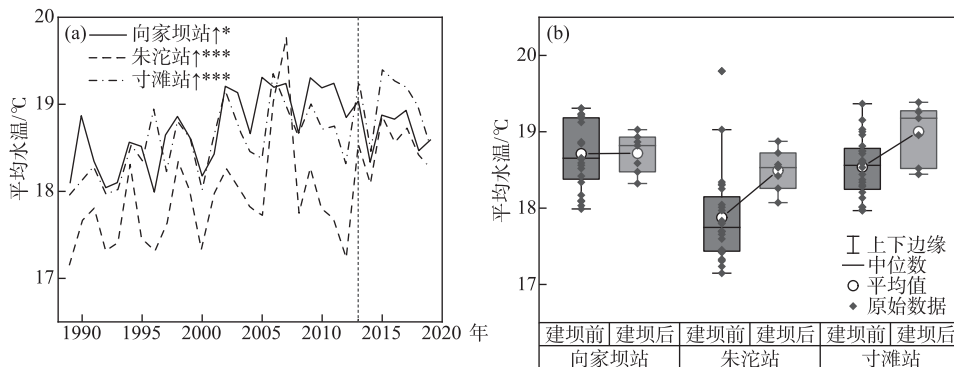


图 2 长江干流宜宾—重庆河段年平均水温变化: (a) 1989—2019 年水温变化; (b) 向家坝—溪洛渡蓄水前后水温变化(↑表示上升趋势, \*、\*\*、\*\*\* 分别表示 M-K 检验显著性为  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  和  $P < 0.001$ )

Fig.2 The annual average water temperature variation in Yibin-Chongqing segment of the Changjiang River: (a) Water temperature during 1989—2019; (b) Water temperature comparisons before and after the impoundment of Xiangjiaba-Xiluodu (↑ indicates increasing trend; \*, \*\*, \*\*\* indicate significant levels are  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.005$  according to M-K tests, respectively)

2.1.2 年内水温变化 由图 3 可知,向家坝—溪洛渡蓄水后长江干流宜宾—重庆河段年内水温过程和不同月份水温发生改变,蓄水后各站年内水温过程相比蓄水前产生明显“滞热”和“滞冷”效应,其中向家坝站水温过程滞后约 36 d,朱沱站滞后约 13 d,寸滩站滞后约 7 d。具体而言,蓄水后,向家坝站 3—8 月水温平均下降 1.8℃,其中 3—6 月降温显著( $P<0.001$ ),最大降幅 3.6℃(4 月下旬),9 月—次年 2 月平均增高 2.3℃,其中 10 月—次年 1 月增温显著( $P<0.001$ ),最大增幅 3.7℃(12 月中旬);朱沱站 4—7 月水温平均降低 1.8℃,其中仅 5 月降温显著( $P<0.05$ ),最大降幅为 1.6℃(5 月上旬),9 月—次年 3 月平均增温 1.4℃,其中 10 月—次年 2 月增温显著( $P<0.05$ ),最大增幅 3.2℃(12 月下旬);寸滩站 3—7 月水温平均降低 0.4℃,其中仅 5 月降温显著( $P<0.01$ ),最大降幅为 1.3℃(5 月上旬),8 月—次年 2 月平均增温 1.1℃,其中 10 月—次年 1 月增温显著( $P<0.05$ ),最大增幅 1.8℃(12 月中旬)(图 3,附表 I)。综上所述,向家坝—溪洛渡蓄水后下游河段春季“滞冷”效应明显,秋冬季“滞热”效应明显,“滞热”程度大于“滞冷”程度。

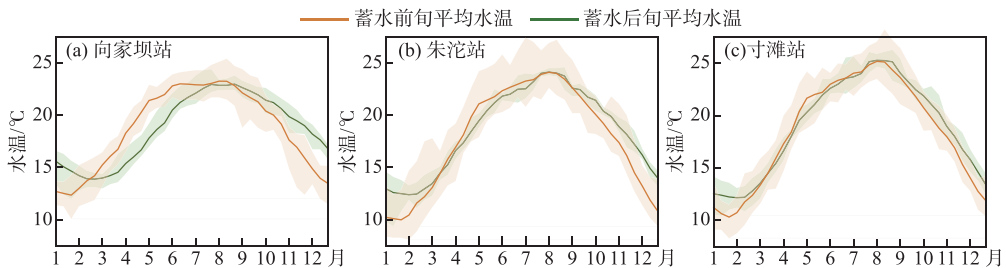


图 3 向家坝—溪洛渡蓄水前、后长江干流宜宾—重庆河段旬平均水温变化  
(阴影部分表示水温的最大和最小区间)

Fig.3 Comparison of ten-day water temperature changes before and after the impoundment of Xiangjiaba-Xiluodu (Shade area indicates the maximum and minimum intervals of water temperature)

## 2.2 水温变化主导因素

由图 4 和 M-K 检验结果可知,近 30 年研究区域平均气温呈现显著上升趋势( $P<0.05$ ),其中宜宾站、合江站和沙坪坝站近 30 年年平均气温分别上升约 0.9、0.4 和 1.3℃,气温上升速率分别为 0.3、0.2 和 0.4℃/10 a(图 4a);研究区域内年降水量和年日照时数近 30 年无显著变化趋势(图 4b,c)。

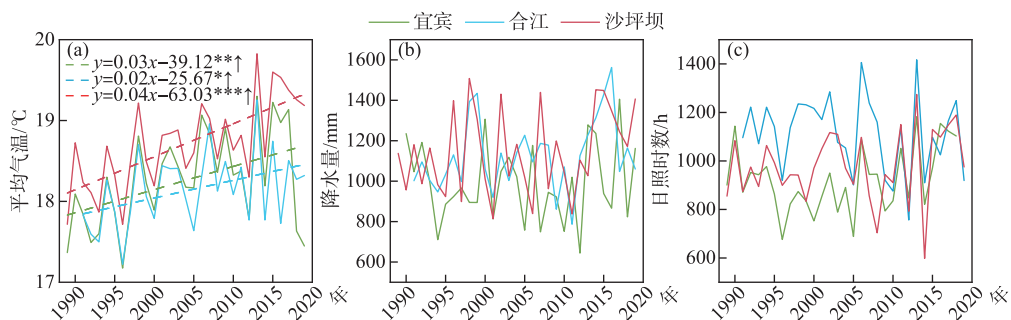


图 4 研究区域年平均气温、年降水量和年日照时数变化  
(↑表示上升趋势,\*、\*\*、\*\*\*分别表示 M-K 检验显著性为  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  和  $P<0.001$ )

Fig.4 The variation of annual average air temperature, annual precipitation and annual insolation  
(↑ indicates increasing trend; \*, \*\*, \*\*\* indicate significant levels are  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$  according to M-K tests, respectively)

由向家坝—溪洛渡蓄水前后气象因子与水温关系分析可知,气温是与水温关系最为密切的气象因子,其次是降水量和日照时数(图 5)。蓄水后各气象因子与水温的回归直线斜率均小于蓄水前,但斜率的降幅从

向家坝站—朱沱站—寸滩站逐渐降低,说明蓄水后各气象因子对水温的控制作用降低,且距离向家坝越近,气候对水温控制力越弱(图5)。

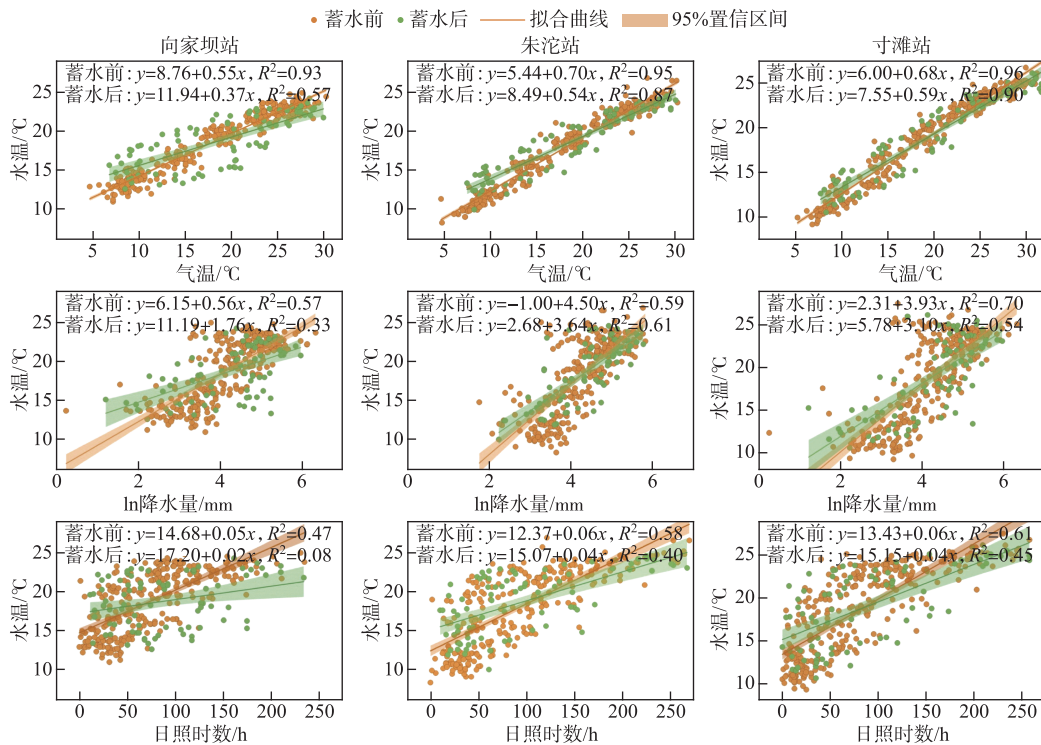


图5 向家坝—溪洛渡蓄水前、后水温与气温、降水量和日照时数的关系

Fig.5 The relationships between water temperature and air temperature, precipitation and insolation duration before and after the impoundment of Xiangjiaba-Xiluodu

上述分析表明,研究区域水温受月份、气象和梯级蓄水共同影响,且近30年一些气象因子发生了显著变化。本研究假设3个水文站近30年的月平均水温变化由气候变化和梯级蓄水引起,采用气象因子为协变量和梯级蓄水、月份为影响因子的协方差模型(ANCOVA)检验上述假设。结果表明,当协变量(气温、降水量和日照时数)进入模型后,梯级蓄水和月份均不再单独对水温有显著影响,说明年际变化周期化上,梯级蓄水和月份对水温的影响完全由气象因子变化引起(表1)。但梯级蓄水和月份对水温的影响存在极显著的交互作用( $P < 0.001$ )(表1),即不同月份水温对梯级蓄水的响应存在极显著差异,且该效应无法被协变量(气象因子)完全解释,说明存在单独影响年内不同月份水温变化的因子,即梯级蓄水。综上所述,年内水温变化主要由梯级蓄水引起,年际变化主要由气候变化引起。

### 2.3 对重要鱼类适宜产卵水温的时间影响

向家坝为金沙江梯级电站的最后一级,其下游紧邻长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区,下游河道春季水温“滞冷”效应势必影响鱼类的生长和繁殖<sup>[21,28,31]</sup>。根据已有的自然保护区鱼类相关研究和宜宾江段鱼类资源调查结果<sup>[24-27]</sup>,选择与研究重要鱼类传统产卵场和捕获地距离较近的向家坝站和朱沱站水温为代表,在旬精度上对比向家坝—溪洛渡蓄水前后达到重要鱼类适宜产卵水温的时间变化,结果表明(表2):距离向家坝水电站越近,蓄水对重要鱼类适宜产卵水温的时间影响越大,其中向家坝站附近达到重要鱼类适宜产卵水温的时间延迟30~40 d,朱沱站延迟10~20 d(对长江鲟和胭脂鱼已无明显影响)。整体而言,金沙江下游梯级蓄水对重要鱼类适宜产卵水温时间延迟的影响大小为:黑尾近红鲃>长薄鳅、圆口铜鱼、岩原鲤>中华金沙鲈>长江鲟>胭脂鱼(表2)。

表 1 气温、降水量、日照时数和向家坝—溪洛渡蓄水及月份对水温影响的协方差分析

Tab.1 Results of ANCOVA (GLM) analysis of the effects of air temperature, precipitation, insolation duration, the impoundment of Xiangjiaba-Xiluodu and season on water temperature

		向家坝站		朱沱站		寸滩站	
		VIF	F	VIF	F	VIF	F
协变量	气温	4.29	246.37 ***	5.6	388.19 ***	5.55	414.10 ***
	降水量 <sup>†</sup>	2.36	2.5	3.3	12.95 **	3.53	9.82 **
	日照时数	2.41	18.48 **	2.42	5.66 *	2.25	12.14 **
影响因子	梯级蓄水		0.01		1.02		0.01
	月份		0.3		0.91		2.21
	蓄水×月份		51.50 ***		12.78 ***		14.52 ***

$n=372$ ; VIF 为方差膨胀系数; † 表示数据经对数转化; \*, \*\*, \*\*\* 分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  和  $P<0.001$  水平上显著。

表 2 向家坝—溪洛渡蓄水前、后重要鱼类适宜产卵水温的时间对比

Tab.2 Comparison of water temperature periods for important fish spawning in different segments of Changjiang River before and after the impoundment of Xiangjiaba-Xiluodu

鱼类	产卵适宜水温/°C	向家坝站			朱沱站		
		蓄水前	蓄水后	延迟/d	蓄水前	蓄水后	延迟/d
长江鲟	16~19 <sup>[25]</sup>	3月上旬	4月上旬	30	3月下旬	3月下旬	—
胭脂鱼	15~23 <sup>[28-29]</sup>	2月下旬	3月下旬	30	3月中旬	3月中旬	—
圆口铜鱼	≥18 <sup>[26]</sup>	3月下旬	5月上旬	40	4月上旬	4月中旬	10
岩原鲤	18~26 <sup>[25]</sup>	3月下旬	5月上旬	40	4月上旬	4月中旬	10
中华金沙鳅	17.8~23.2 <sup>[26]</sup>	3月下旬	4月下旬	30	4月上旬	4月中旬	10
长薄鳅	22~25 <sup>[26]</sup>	5月中旬	6月下旬	40	5月下旬	6月上旬	10
黑尾近红鲌	≥21 <sup>[26]</sup>	4月上旬	6月上旬	40	5月上旬	5月下旬	20

“—”表示无明显变化。

### 3 讨论

气候变化和人类活动导致全球河流和湖泊水温普遍增高,水温节律发生改变<sup>[1-2]</sup>。本研究进一步发现,长江干流宜宾—重庆河段近 30 年年平均水温同样发生了显著增高( $P<0.05$ ),增幅约为 0.5~1.1°C(增温速率约为 0.2~0.3°C/10 a)。与长江其他河段相比,该河段水温增加幅度明显小于长江源沱沱河(2011—2015 年较 1977—1980 年增高 0.6~1.7°C)<sup>[9]</sup>,总体高于长江中下游<sup>[13-15]</sup>;增温速率高于金沙江中上游(1960—2013 年增温速率为 0.063~0.170°C/10 a)和攀枝花—宜昌河段(1956—2016 年增温速率为 0.051—0.247°C/10 a)<sup>[10-11]</sup>,总体与鄱阳湖表层水温接近(1917—2017 年增温速率为 0.28°C/10 a)<sup>[16]</sup>(附图 I)。说明长江干流年均水温增温趋势从上游至下游总体呈现降低趋势,且 30 年增温速率略有增加。近 50 年长江流域的实测气象资料表明,金沙江干流直门达以上和四川盆地是气候变暖的敏感区域<sup>[20,32]</sup>,而研究河段及左岸主要支流岷江及沱江流经四川盆地,因此宜宾—重庆河段水温增高速率高于上下游河段可能与四川盆地气温增高速率相对较高有关。

附表 I 和图 5 验证了前文关于研究河段水温由气候变化和梯级开发共同驱动的假设,协方差分析进一步表明年内不同月份水温变化主要由梯级蓄水引起,年际平均水温变化主要由气候变化引起(表 1)。事实上,水库对下游河段水温节律的影响一直是水电开发关注的主要生态环境影响之一<sup>[6]</sup>,长江干流及主要支流已建水利水电工程多开展了相关研究,例如邹珊等研究指出向家坝和三峡蓄水对宜昌水文站 4 和 12 月水温变化影响最大,分别较蓄水前降温 2.6°C 和增温 4°C 左右<sup>[12]</sup>;刘邵伟等研究指出雅砻江水电开发导致其下游至金沙江干流华弹水文站四月水温平均降低约 0.8°C,12 月增温 1.8°C<sup>[10]</sup>;本文通过对比向家坝—溪洛渡

蓄水前后下游水文站实测水温资料,进一步发现蓄水后向家坝站、朱沱站和寸滩站年内水温过程滞后约 36、13 和 7 d,“滞冷”和“滞热”效应最大分别出现在 4—5 和 12 月,该效应使向家坝站 4 月水温降低 3.3℃,12 月水温增高 3.4℃。该结果与周珊和刘邵伟等的研究结论较为一致,并且已有研究表明该效应与溪洛渡和向家坝水库垂向水温分层有关,其中溪洛渡水库的低水温和高温水下泄对下游水温的影响高于向家坝<sup>[33]</sup>。

长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类产卵期主要集中在 2—5 月<sup>[24-26]</sup>,向家坝—溪洛渡蓄水后春季低温水下泄引起的“滞冷”效应推迟了鱼类适宜产卵水温的时间,不同种类和个体对温度的敏感性导致延迟程度不尽相同<sup>[31]</sup>。尽管鱼类产卵受水温、溶解氧、流速和食物等多种因素影响<sup>[1,24-26]</sup>,但水温作为重要影响因素<sup>[2-4]</sup>,已被广泛验证成为评估水利水电工程对鱼类影响的关键指标<sup>[7]</sup>。本文基于适宜产卵水温与对应时间的研究表明,向家坝—溪洛渡蓄水后向家坝站附近重要鱼类适宜产卵水温时间延迟 30~40 d,总体而言蓄水对重要鱼类适宜产卵水温时间的延迟程度为:黑尾近红鲃>长薄鳅、圆口铜鱼、岩原鲤>中华金沙鳅>长江鲟>胭脂鱼(表 2)。事实上,适宜产卵水温时间推迟不仅直接影响鱼类的产卵时间,由于“滞冷”效应降低了鱼类性腺发育期的积温,更造成了产卵期和性腺成熟期的时间不匹配。已有研究表明上述影响已使长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区中铜鱼产卵率降低 66%<sup>[21]</sup>,使葛洲坝下中华鲟有效产卵繁殖率降低为原来的四分之一<sup>[3]</sup>。此外,由于向家坝—溪洛渡蓄水后下游河道年内水温变化幅度降低(附表 I),蓄水后不同鱼类适宜产卵水温和对适宜产卵时间的重叠面积加强(图 6),不同物种间的生态位重叠程度增加。生态位重叠不仅说明物种间对资源利用的相似性增加,也将使得保护区不同鱼类物种间的潜在竞争关系加强<sup>[34-35]</sup>,对鱼类多样性可能产生更深远的影响。

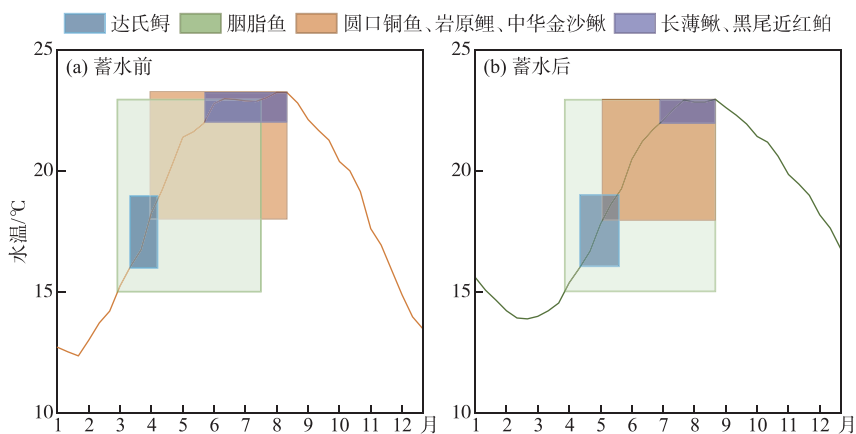


图 6 向家坝—溪洛渡蓄水前、后重要鱼类适宜产卵水温及对应时间(以向家坝水文站为例)

Fig.6 Comparison of water temperature and corresponding periods for important fish spawning in Xiangjiaba section before and after the impoundment of Xiangjiaba-Xiluodu

#### 4 结论

本文基于长江宜宾—重庆段长序列水温和气象数据,研究了气候变化和向家坝—溪洛渡蓄水对下游水温变化的影响,并进一步分析了对区域重要鱼类适宜产卵水温时间的影响,结果表明:

1) 长江干流宜宾—重庆段近 30 年年平均水温显著增高 ( $P < 0.05$ ),增幅约为 0.5~1.1℃;向家坝—溪洛渡蓄水后向家坝站、朱沱站和寸滩站水温过程平均滞后约 36、13 和 7 d,蓄水后下游河段春季“滞冷”效应明显,秋冬季“滞热”效应明显,“滞热”程度大于“滞冷”程度。

2) 向家坝—溪洛渡蓄水后气象因子对水温的控制作用降低,蓄水对下游水温的影响从向家坝站至下游逐渐减弱,至寸滩站影响已基本消除。研究河段年内不同水温变化主要由梯级蓄水引起,年平均水温变化主要由区域气候变化(气温升高)引起。

3) 蓄水后向家坝站附近重要鱼类适宜产卵水温时间延迟 30~40 d,总体而言蓄水对重要鱼类适宜产卵



水温时间延迟程度为:黑尾近红鲌>长薄鳅、圆口铜鱼、岩原鲤>中华金沙鳅>长江鲟>胭脂鱼,蓄水后不同鱼类物种的生态位重叠程度增加。

基于上述研究结论和向家坝—溪洛渡的实际运行方式,为减缓水电开发对水生生态的影响,建议进一步优化溪洛渡的叠梁门运行调度方式,提升3—6月下泄水温;此外,鉴于乌东德、白鹤滩水电站已相继投产,应进一步关注金沙江下游四座梯级联合运行条件对下游水温的累积影响。

## 5 附录

附图 I 和附表 I 见电子版(DOI: 10.18307/2023.0118)。

## 6 参考文献

- [ 1 ] Ouellet V, St-Hilaire A, Dugdale SJ *et al.* River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2020, **736**: 139679. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139679.
- [ 2 ] Wang JQ, Song YZ, Huang J. Effects of increasing water temperature on water properties and aquatic organisms: A critical review. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(1): 100-109. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.01.014. [王锦旗, 宋玉芝, 黄进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展. *水生态学杂志*, 2020, **41**(1): 100-109.]
- [ 3 ] Huang ZL, Wang LH. Yangtze dams increasingly threaten the survival of the Chinese sturgeon. *Current Biology*, 2018, **28**(22): 3640-3647.e18. DOI: 10.1016/j.cub.2018.09.032.
- [ 4 ] Woodward G, Perkins DM, Brown LE. Climate change and freshwater ecosystems: Impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2010, **365**(1549): 2093-2106. DOI: 10.1098/rstb.2010.0055.
- [ 5 ] Dadras H, Dzyuba B, Cosson J *et al.* Effect of water temperature on the physiology of fish spermatozoon function: A brief review. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(3): 729-740. DOI: 10.1111/are.13049.
- [ 6 ] Hette-Tronquart N, Roussel JM, Dumont B *et al.* Variability of water temperature may influence food-chain length in temperate streams. *Hydrobiologia*, 2013, **718**(1): 159-172. DOI: 10.1007/s10750-013-1613-7.
- [ 7 ] Chen QW, Zhang JY, Mo KL *et al.* Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 793-810. [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. *水科学进展*, 2020, **31**(5): 793-810.]
- [ 8 ] Shi X, Xia JQ, Sun J. Comparison of methods to derive river water temperature using thermal infrared imagery: A case study of the upper Yangtze River catchment. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 307-319. DOI: 10.18307/2022.0125. [石希, 夏军强, 孙健. 基于热红外遥感影像的河流水温反演方法比较——以长江上游流域为例. *湖泊科学*, 2022, **34**(1): 307-319.]
- [ 9 ] Xiong M, Zou S, Jiang T *et al.* Response of river water temperature to climate change in source regions of Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, **49**(14): 48-54. [熊明, 邹珊, 姜彤等. 长江源区河流水温对气候变化的响应. *人民长江*, 2018, **49**(14): 48-54.]
- [ 10 ] Liu ZW, Lv PY, Yu Y *et al.* Variation in water temperature of the mainstream of the Jinsha River over last 50 years. *Freshwater Fisheries*, 2014, **44**(6): 49-54. [刘昭伟, 吕平毓, 于阳等. 50年来金沙江干流水温变化特征分析. *淡水渔业*, 2014, **44**(6): 49-54.]
- [ 11 ] Shao J, Du T, Guo W *et al.* Water temperature variation and its influencing factors in the upper Jinsha River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(8): 17-22, 28. DOI: 10.11988/ckyyb.20210380. [邵骏, 杜涛, 郭卫等. 金沙江上游河段水温变化规律及其影响因素探讨. *长江科学院院报*, 2022, **39**(8): 17-22, 28.]
- [ 12 ] Zou S, Li Y, Chen JF *et al.* Temporal and spatial variation of water temperature in Panzhihua-Yichang segment of Changjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(8): 35-41, 48. DOI: 10.11988/ckyyb.20190524. [邹珊, 李雨, 陈金凤等. 长江攀枝花—宜昌江段水温时空变化规律. *长江科学院院报*, 2020, **37**(8): 35-41, 48.]
- [ 13 ] Guo WX, He N, Dou GF *et al.* Hydrothermal regime variation and ecological effects on fish reproduction in the Yangtze River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(22): 12039. DOI: 10.3390/ijerph182212039.
- [ 14 ] Tao YW, Wang YK, Rhoads B *et al.* Quantifying the impacts of the Three Gorges Reservoir on water temperature in the middle reach of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2020, **582**: 124476. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124476.
- [ 15 ] Xiong YJ, Yin J, Paw UKT *et al.* How the three Gorges Dam affects the hydrological cycle in the mid-lower Yangtze River: A perspective based on decadal water temperature changes. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(1): 014002. DOI: 10.1088/1748-9326/ab5d9a.
- [ 16 ] Li XY, Peng SS, Deng XW *et al.* Attribution of lake warming in four shallow lakes in the middle and lower Yangtze River Basin. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(21): 12548-12555. DOI: 10.1021/acs.est.9b03098.
- [ 17 ] Guo WX, Wang HX, Xia ZQ *et al.* Effects of Three Gorges and Gezhouba Reservoirs on river water temperature regimes. *Journal of Hydroe-*

- lectric Engineering*, 2009, **28**(6): 182-187. DOI: 10.11660/slfdbx.20181006. [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. 水力发电学报, 2009, **28**(6): 182-187.]
- [18] Zhang H. River temperature variations and potential effects on fish in a typical Yangtze River reach: Implications for management. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2016, **14**(4): 553-567. DOI: 10.15666/aer/1404\_553567.
- [19] Deng Y, Xiao Y, Tuo YC *et al.* Influence of Three Gorges Reservoir on water temperature between Yichang and Jianli. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 551-560. [邓云, 肖尧, 脱有才等. 三峡工程对宜昌—监利河段水温情势的影响分析. 水科学进展, 2016, **27**(4): 551-560.]
- [20] Ahmed N, Wang GX, Oluwafemi A *et al.* Temperature trends and elevation dependent warming during 1965–2014 in headwaters of Yangtze River, Qinghai Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2020, **17**(3): 556-571. DOI: 10.1007/s11629-019-5438-3.
- [21] Li T, Mo KL, Wang J *et al.* Mismatch between critical and accumulated temperature following river damming impacts fish spawning. *Science of the Total Environment*, 2021, **756**: 144052. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144052.
- [22] Tao YW, Wang YK, Wang D *et al.* Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges Dam. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, **37**(10): 48-55. DOI: 10.11660/slfdbx.20181006. [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. 水力发电学报, 2018, **37**(10): 48-55.]
- [23] Lugg A, Copeland C. Review of cold water pollution in the Murray-Darling Basin and the impacts on fish communities. *Ecological Management & Restoration*, 2014, **15**(1): 71-79. DOI: 10.1111/emr.12074.
- [24] Meng B, Zhang JF, Ye H *et al.* Current situation and protection enlightenment of the function of fishing spawning grounds in the National Nature Reserve for the rare and endemic fishes, upper reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(11): 2772-2785. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201911024. [孟宝, 张继飞, 叶华等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类产卵场功能现状分析及保护启示. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(11): 2772-2785.]
- [25] Ren J, Peng QD, Lin JQ *et al.* The fish reproduction ecological requirements of the National Nature Reserve for the rare and endemic fishes in the upper reaches of the Yangtze River. *Freshwater Fisheries*, 2014, **44**(6): 18-23. [任杰, 彭期冬, 林俊强等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区重要鱼类繁殖生态需求. 淡水渔业, 2014, **44**(6): 18-23.]
- [26] Li Q, Li C, Luo HH. Ecological target water temperature of rare and endemic fish in Yangtze River upstream. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, **10**(2): 86-91. [李倩, 李翀, 骆辉煌. 长江上游珍稀、特有鱼类生态水温目标研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, **10**(2): 86-91.]
- [27] Tian HW, He C, Liu MD *et al.* Study on structure of gillnet catches in the upper reaches of the Yangtze River. *Freshwater Fisheries*, 2016, **46**(5): 37-42. [田辉伍, 何春, 刘明典等. 长江上游干流三层流刺网渔获物结构研究. 淡水渔业, 2016, **46**(5): 37-42.]
- [28] Liu YH. Studies on biological characteristics of *Myxocyprinus asiaticus* (Bleeker). *Journal of Hydroecology*, 1996, (3): 3-6, 15. [刘乐和. 胭脂鱼生物学特征的研究. 水利渔业, 1996, (3): 3-6, 15.]
- [29] Zhang CG, Zhao YH. Early development of Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*). *Acta Zoologica Sinica*, 2000, **46**(4): 438-447. [张春光, 赵亚辉. 胭脂鱼的早期发育. 动物学报, 2000, **46**(4): 438-447.]
- [30] Hao HX, Di HY, Jiao X *et al.* Fine roots benefit soil physical properties key to mitigate soil detachment capacity following the restoration of eroded land. *Plant and Soil*, 2020, **446**(1/2): 487-501. DOI: 10.1007/s11104-019-04353-x.
- [31] Luo HH, Li Q, Li C. The impact of water temperature during the fish reproduction in the upper Yangtze River due to the cascade development in the lower Jinsha River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, **10**(4): 256-259, 266. [骆辉煌, 李倩, 李翀. 金沙江下游梯级开发对长江上游保护区鱼类繁殖的水温影响. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, **10**(4): 256-259, 266.]
- [32] Sang YF, Wang ZG, Liu CM. Spatial and temporal variability of daily temperature during 1961-2010 in the Yangtze River Basin, China. *Quaternary International*, 2013, **304**: 33-42. DOI: 10.1016/j.quaint.2012.05.026.
- [33] Long LH, Ji DB, Liu DF *et al.* Effect of cascading reservoirs on the flow variation and thermal regime in the lower reaches of the Jinsha River. *Water*, 2019, **11**(5): 1008. DOI: 10.3390/w11051008.
- [34] Korsu K, Heino J, Huusko A *et al.* Specific niche characteristics facilitate the invasion of an alien fish invader in boreal streams. *International Journal of Ecology*, 2012, **2012**: 813016. DOI: 10.1155/2012/813016.
- [35] He XB, Li J, Shen C *et al.* The breadth and overlap of ecological niche of major fish species in the Minjiang River Estuary, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(9): 3085-3092. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201809.037. [何雄波, 李军, 沈忱等. 闽江口主要渔获鱼类的生态位宽度与重叠. 应用生态学报, 2018, **29**(9): 3085-3092.]