

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.007

水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究

王康,肖洋,毛劲乔,龚轶青,张培培,王刚

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:为分析金沙江向家坝建成前后坝下江段水温变化对典型鱼类繁殖期的影响,基于实测数据分析研究了金沙江下游年际水温变化趋势与近年水温变幅,进而将14种典型鱼类历史产卵期适宜水温范围投影至现阶段水温历时变化曲线,得出各典型鱼类的繁殖期变化情况,并通过提出时间重叠度指标定量评价了水温变化对鱼类的影响。结果表明,建坝前金沙江下游水体升温期为2—6月,水温年内变化范围为11.8~23.2℃;建坝后则推迟至4—7月,水温年内变化范围为14.0~23.1℃,水温变幅趋于减小;在建坝后的水温条件下,金沙江下游典型鱼类主要繁殖时段可能由3月上旬—7月下旬后移至3月下旬—8月上旬。

关键词:水温;鱼类繁殖期;时间重叠度;金沙江下游

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)02-0050-06

Study on the spawning period of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change

WANG Kang, XIAO Yang, MAO Jingqiao, GONG Yiqing, ZHANG Peipei, WANG Gang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the influence of the water temperature change in the lower reaches of Jinsha River on the spawning period of typical fishes before and after the completion of the Xiangjiaba Dam, the interannual water temperature trend and the variation range in recent years are analyzed and studied based on the measured data; and then the suitable water temperature range of 14 typical fish species in the historical spawning period is projected to the change curve of current water temperature, so as to obtain the variation of spawning period. The influence of water temperature change on the spawning activity is quantitatively evaluated by the proposed index of time overlap. The results show that the rise period of temperature in the lower reaches of Jinsha River before the dam construction is from February to June, and the annual variation range is 11.8 to 23.2℃. After the dam is built, it is postponed to April-July, with the variation range of 14.0 to 23.1℃, and the temperature fluctuations show a decreasing trend. Under the water temperature condition after the dam construction, the main spawning period of typical fishes in the lower reaches may move from early March-late July to late March-early August.

Key words: water temperature; fish spawning period; time overlap; the lower reaches of Jinsha River

作为河流生态系统中的顶级群落,鱼类繁殖过程受水文水动力条件、理化因子和地形等因素的影响^[1-5]。水温作为其中的代表性元素,对鱼类代谢反应速率起着控制性的作用。当环境水温下降,鱼类身体细胞生长率停止或降低,其卵母细胞进行增殖发育;水温升高时,鱼类生殖细胞的形成速度加快,但过高的水温会增加胚胎畸形率、缩短产卵时间^[6]。不同鱼类生长的适温范围不一,在这个范围内,鱼类的代谢活动(消化、摄食、耗氧等)往往与水温呈正相关关系,水温升高能刺激性腺发育成熟的鱼类排卵,促发鱼类的繁殖活动^[7-9]。

水利水电工程不仅造成流速、水位、流量的变化,还使得河道上下游的物质交换趋于单向性,生境连通性降低,对水生生物栖息和繁殖产生多方面的影响^[10-11]。如果水库出现水温分层现象和滞温效应,下泄水体水温会异于原天然河道水温,可能导致坝下部分鱼类繁殖时间推迟、产卵规模缩小、鱼卵成活率降低等问题^[12-13]。

基金项目:国家自然科学基金(52109013);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251)

作者简介:王康(1998—),男,硕士研究生,主要从事水生态研究。E-mail:wang_kang1998@163.com

通信作者:毛劲乔(1978—),男,教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail:maojq@hhu.edu.cn

引用本文:王康,肖洋,毛劲乔,等.水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):50-55.

WANG Kang, XIAO Yang, MAO Jingqiao, et al. Study on the spawning period of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 50-55.

金沙江是我国最大的水电基地,自上而下开发了乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个巨型水电站。向家坝水电站作为金沙江梯级电站的最后一级,其下游河道位于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区内,鱼类多样性高、物种丰富,具有重大保护和科研价值^[7]。随着近年来向家坝等水电站的建设与运行,坝下水温变化情况及其对鱼类繁殖期的影响情况已成为长江渔业资源保护中的焦点问题。基于历史水温观测资料,分析量化鱼类繁殖适宜水温区间^[7,13],是优化水利工程调度运行以促进鱼类自然繁殖的基础性问题。为探究受影响区域鱼类繁殖的水温需求,量化目标鱼类繁殖期的动态变化,本文基于屏山及向家坝水文站实测水温数据,提出基于适宜水温投影法的鱼类繁殖期推求方法,对水温变化条件下金沙江下游 14 种典型鱼类繁殖期的动态变化进行研究,以为向家坝水电站生态调度提供依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

向家坝水电站位于四川省宜宾市和云南省水富市交界的金沙江峡谷处,上距溪洛渡水电站坝址 157 km,下距宜宾市区 33 km(图 1)。坝址控制流域面积为 45.88 万 km²,占金沙江流域面积的 97%,多年平均径流量 3 810 m³/s,总库容 51.63 亿 m³,调节库容 9 亿 m³,回水区长度 156.6 km^[14]。2012 年 10 月向家坝水电站正式下闸放水,2014 年 7 月全面投产发电。坝下河道(即研究区域,28°38′N~28°46′N,104°26′E~104°39′E)位于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区,是重点保护对象白鲟(*Psephyrus gladius*)、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)及其他特有鱼类的产卵场和重要栖息地。

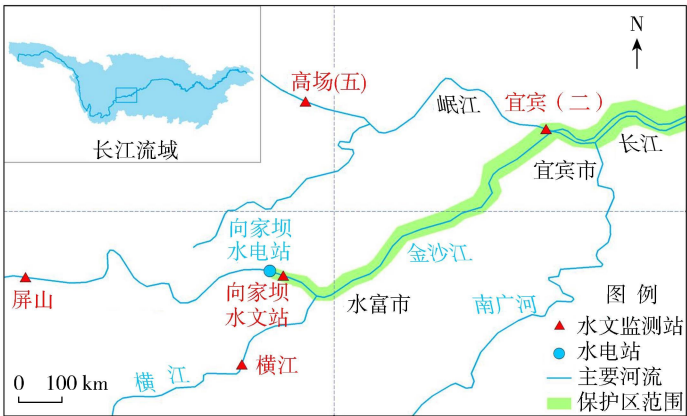


图 1 研究区域示意图
Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 水温数据

屏山水文站位于向家坝水电站上游 33 km 处,是距坝上最近的含水温观测记录的水文站,与向家坝水电站之间无支流汇入,海拔差 80 m,气象水温条件基本一致。因此,建坝前屏山水文站的监测水温可作为金沙江下游鱼类的生活历史水温。本文以 1961—2012 年屏山水文站的历史水温数据为依据开展研究,其中 1977 年因无实测数据不加入统计。

自 2012 年开始,位于向家坝坝下仅 2 km 的向家坝水文站正式投入使用,其监测水温可近似作为向家坝出库水温。考虑到向家坝水电站建设前后水文历史资料与现状有较大差异,故选择向家坝建成后 2015—2018 年的逐日实测水温数据作为建坝后的河道水温。

1.3 鱼类信息

通过文献调研筛选出 7 种有确切繁殖期及水温记录的金沙江下游流域国家级、省级保护鱼类^[15-17],包括白鲟、中华鲟(*Acipenser sinensis*)、胭脂鱼、达式鲟(*Acipenser dabryanus*)、岩原鲤(*Procypris rabaudi*)、细鳞裂腹鱼(*Schizothorax chongi*)和鲈鲤(*Percocypris pingi*)。其中白鲟自 2003 年以来再无捕捞记录,也无人工养殖个体存留,推测可能已灭绝;葛洲坝水利枢纽建成后,阻止了中华鲟亲鱼的生殖洄游,中华鲟已无法上溯到金沙江进行繁殖活动^[18],故不研究白鲟和中华鲟的繁殖期。同时以经济鱼类,如四大家鱼(青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙鱼(*Hypophthalmichthys nobilis*)),以及铜鱼(*Coreius heterodon*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、马口鱼(*Opsariichthys bidens*)、翘嘴鲇(*Erythroculter ilisaeformis*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫(*Carassius auratus*)、红鳍原鲇(*Cultrichthys erythropterus*)和鲇(*Silurus asotus*)为研究对象,根据文献^[19-23]分析历史繁殖期及产卵适宜水温。

1.4 研究方法

a. 投影包络法。将已有确切文献资料记载的适宜水温范围投影至现阶段水温历时变化曲线,曲线上对

应始末点的横坐标及其包络范围即为现状下的适宜繁殖期,依该法确定每一种典型鱼类现状下可能出现的繁殖期(图 2)。

b. 时间重叠度指标。对于某典型鱼类,其现状下繁殖期与历史繁殖期的时间重叠部分在历史繁殖期中所占比例即为时间重叠度,若现状与历史繁殖期完全重合,则时间重叠度为 100%。如胭脂鱼在天然状态下的适宜繁殖水温为 14.0~22.0℃,对应历史繁殖期为 3 月上旬—5 月上旬共 68 d;建坝后按其适宜繁殖水温推算,新的繁殖期移至 3 月下旬—6 月下旬,与历史繁殖期的时间重叠部分为 49 d,即胭脂鱼繁殖期的时间重叠度为 72.1%。

参考鱼类产卵适宜水温与 RVA 法推求生态水温匹配程度的方式^[7],将时间重叠度在 66.7% 以上的定义为高时间重叠度,>33.3%~66.7% 定义为中时间重叠度,0~33.3% 定义为低时间重叠度。时间重叠度的高低可用于判断水温变化对鱼类的影响程度,时间重叠度越高,表明当前水温变化对鱼类繁殖的影响程度越低。

2 结果与分析

2.1 年际水温变化

统计 1961—2012 年屏山水文站的历史月均水温观测值及向家坝水文站 2015—2018 年的月均水温观测值(图 3),天然状态下河道水温的变化范围为 11.8~23.2℃,极差为 11.4℃;建坝后河道水温的变化范围为 14.3~22.8℃,极差为 8.5℃。相较天然状态,向家坝建成后坝下水温变幅收窄,极值下降,水温过程趋于平坦;且建坝后水温的延迟现象较为明显,存在滞温效应。比较逐年月均水温与历史月均水温,近年水温升温过程相较历史时期存在明显滞后,但相邻年之间差异并不明显。2015—2018 年逐年的月均水温变化范围分别为 14.5~23.1℃、13.9~22.9℃、14.4~22.8℃、14.0~22.4℃,水温均值±标准差线均无显著波动。建坝

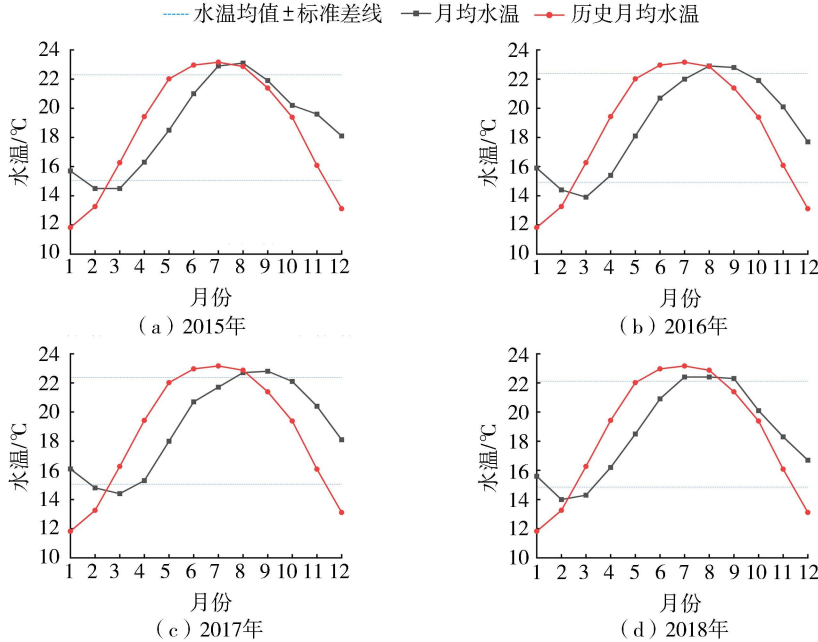


图 3 向家坝站 2015—2018 年月均水温与历史水温对比

Fig. 3 Comparison of monthly average water temperature and historical water temperature of Xiangjiaba Station from 2015 to 2018

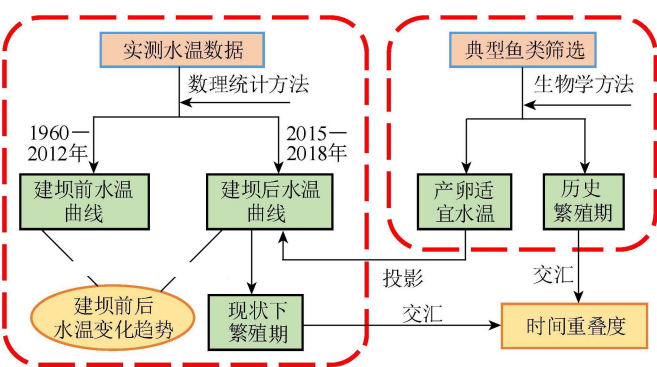


图 2 研究流程

Fig. 2 Flow chart of research method

后 2—3 月到达年内水温低点 14℃ 左右,在 8—9 月到达水温高点 23℃ 附近,均小于河道历史水温极值,水温变化趋于平缓。

2.2 年内水温变化

根据 2015—2018 年向家坝水文站的日均水温误差(图 4),年内水温变化主要分为两段,分别以 2 月下旬—3 月下旬、7 月中旬—9 月中旬为界,4—7 月为升温期,9 月—次年 2 月为降温期。站点的最低水温普遍出现在 2 月,最高水温出现在 8 月,年内水温极差平均值为 9.1℃。从误差范围分析,水温的波动映射到图中,上半年(鱼类主要产卵期)水温波动较小,标准差范围为 0.163~0.639℃,下半年波动略大,标准差范围为 0.221~1.401℃,表明向家坝下游河道在水电站建成投产后,不同年份间的年内水温变幅基本稳定。

2.3 建坝前后典型鱼类繁殖期变化

记录文献[19-23]中典型鱼类的繁殖时间与产卵水温,将繁殖时间在研究区域内对应的水温范围记为建坝后水温;将鱼类产卵适宜温度在水温曲线上覆盖的时长记作产卵适宜时段;引入时间重叠度指标并用于判断水温变化对鱼类的影响程度,结果见表 1。表 1 共包含 5 种珍稀特有鱼类和 9 种经济鱼类,其中达式鲴和岩原鲤为一年可两次产卵鱼类,14 种典型鱼类中具有高、中、低时间重叠度的鱼类分别有 7 种、3 种和 4 种。以达氏鲴为例,其繁殖期有两段,第 2 段产卵期的时间重叠度为 0,即其现状下第 2 段繁殖期与历史繁殖期不交叉,但对于第 1 段繁殖期,建坝后的产卵适宜时段完全包络历史产卵期,且第 1 段为产卵高峰期,因此虽然建坝后达氏鲴的第 2 段繁殖期受到极大影响,但整体而言建坝后的水温变化对达式鲴繁殖的影响仍然相对有限。

表 1 金沙江下游典型鱼类繁殖期变化分析结果

Table 1 Analysis results of spawning period changes of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River

鱼类	文献记录		研究区内情况		时间重叠度/%	影响程度
	繁殖时间	产卵水温/℃	建坝后水温/℃	产卵适宜时段		
达式鲴 ¹	3—4 月	14.0~18.3	13.9~17.3	3 月上旬—5 月中旬	100.0	低
	11—12 月	12.6~15.6	16.4~20.1	1 月中旬—2 月下旬	0	高
胭脂鱼 ²	3—4 月	14.0~22.0	13.9~17.3	3 月下旬—6 月下旬	72.1	低
岩原鲤 ³	2—4 月	8.8~14.8	14.1~17.3	2 月上旬—3 月下旬	66.3	中
	8—9 月	20.0~24.0	22.1~23.0	7 月上旬—10 月下旬	100.0	低
细鳞裂腹鱼 ³	4—5 月	13.0~18.0	14.8~19.6	4 月上旬—5 月中旬	70.5	低
鲈鲤 ³	5—6 月	15.0~17.0	16.8~21.6	4 月上旬—5 月上旬	8.3	高
四大家鱼 ⁴	5—6 月	18.0~24.0	16.8~21.6	5 月中旬—7 月上旬	78.7	低
铜鱼 ⁴	4—7 月	20.0~24.0	14.8~22.9	6 月上旬—7 月下旬	62.0	中
圆口铜鱼 ⁴	4—7 月	20.0~22.0	14.8~22.9	6 月上旬—7 月中旬	51.1	中
鲤 ⁴	4—5 月	18.0~25.0	14.8~19.6	5 月中旬—8 月上旬	21.3	高
翘嘴鲌 ⁴	6—7 月	18.0~26.0	19.7~22.9	5 月中旬—8 月上旬	100.0	低
中华倒刺鲃 ⁴	3—6 月	20.0~30.0	13.9~21.6	6 月上旬—8 月上旬	5.5	高
马口鱼 ⁴	3—8 月	21.0~23.0	13.9~23.0	6 月中旬—8 月上旬	29.4	高
鲫 ⁴	4—6 月	16.0~23.0	13.9~17.3	4 月中旬—7 月下旬	80.2	低
鲇 ⁴	3—7 月	18.0~21.0	13.9~22.9	5 月中旬—6 月中旬	24.6	高

注:鱼类名称上标 1 为国家Ⅰ级保护鱼类,2 为国家Ⅱ级保护鱼类,3 为省级保护鱼类,4 为主要经济鱼。

根据表 1 计算结果,绘制典型鱼类建坝前后繁殖期分布图,如图 5 所示,图中每种鱼类繁殖期均由两根线条表示,上侧的虚线覆盖区域为历史繁殖期区间,下侧的实线覆盖区域为现状下繁殖期区间,图中百分数表示时间重叠度。第 1 段繁殖期细鳞裂腹鱼、铜鱼、圆口铜鱼、马口鱼、鲇和岩原鲤均有不同程度的缩短,胭脂鱼、四大家鱼、鲤、鲫和中华倒刺鲃有所推迟,以上鱼类的时间重叠度均不太高,说明水温变化对其繁殖行为产生了较大影响。仅有翘嘴鲌和岩原鲤第 2 段繁殖期有延长,即水温变化对其影响程度较低。

整体而言,14 种典型鱼类的历史繁殖期集中在 3 月上旬—7 月下旬,持续时间约 140 d;现有(建坝后)水温条件下,鱼类主要繁殖时段集中在 3 月下旬—8 月上旬,持续时间约 130 d。原因可能是该河段从 4 月才开始显著升温,升温过程持续至 7 月底,相较天然状态升温时间推迟较长,而水体的升温过程是刺激鱼类

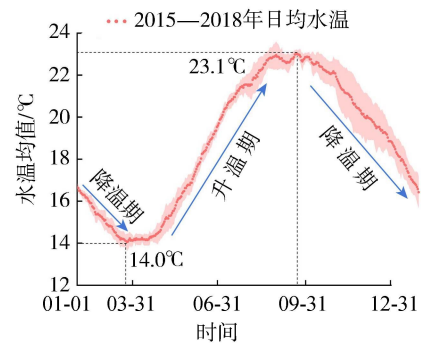


图 4 研究时段内日均水温及浮动误差
Fig.4 Daily average water temperature and floating error

产卵的重要因子。查阅铜鱼和四大家鱼繁殖活动的实际监测数据^[24-25],铜鱼的产卵高峰期由原来的4—6月集中到6月中旬—7月上旬,四大家鱼在2016—2017年的首次产卵活动都发生在6月10日以后,2016年监测到的最后一次产卵活动发生在7月8日,均与本文所得的金沙江下游典型鱼类繁殖期变化规律分析结果相符。然而,由本文方法推求的鱼类繁殖期可能与实地调研鱼类产卵时段存在一定的差异,原因在于从生物学角度分析,鱼类产卵时间和水温需求具备繁殖可塑性,即在不同的江段存在稳定性差异。

3 结 论

- a. 向家坝水电站存在水库滞温效应,坝下水温相较于建坝前水温上升期滞后约1月,水温变幅收窄,极值下降,水温过程趋于平坦化;建坝前下游河道2—6月为升温期,8—12月为降温期,水温波动范围在11.8~23.2℃之间,极差为11.4℃;建坝后下游河道4—7月为升温期,9月—次年1月为降温期,水温在14.0~23.1℃之间浮动,平均极差为9.1℃。
- b. 依据时间重叠度指标,14种典型鱼类中,受水温影响程度低的有7种,高的有5种,说明该研究区域鱼类繁殖期的时间变化是普遍存在的,该指标具有实际意义。
- c. 金沙江下游典型鱼类繁殖期自然状态下集中在3月上旬—7月下旬,繁殖水温主要分布在13.9~22.0℃;水温条件变化后其繁殖期集中在3月下旬—8月上旬,与原繁殖期相比始末时间推迟约20d和10d。
- d. 影响鱼类繁殖期的因素较多,情况也较为复杂,本文仅考虑了水温对其产生的影响,事实上鱼类繁殖期还受到水位、流速、含沙量、河流底质等多方面的综合作用,有待于今后进一步探讨。

参考文献:

[1] WANG Yuankun,ZHANG Nan,WANG Dong,et al. Impacts of cascade reservoirs on Yangtze River water temperature:assessment and ecological implications[J]. Journal of Hydrology,2020,590:125-240.

[2] 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[J]. 淡水渔业,2014(6):18-23. (REN Jie,PENG Qidong,LIN Junqiang,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[J]. Freshwater Fisheries,2014(6):18-23. (in Chinese))

[3] 严太亮,徐兆礼,陈佳杰,等. 苏北浅滩沙脊潮沟地形对鱼类分布格局的影响[J]. 水产学报,2016,40(8):1218-1228. (YAN Tailiang,XU ZhaoLi,CHEN Jiajie,et al. Distribution pattern of fish community in Northern Jiangsu shoal in relation to bathymetry and tidal creek of sand ridge[J]. Journal of Fisheries of China,2016,40(8):1218-1228. (in Chinese))

[4] 侯俊,黄喻威,苗令占,等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. 水资源保护,2020,36(4):8-12. (HOU Jun,HUANG Yuwei,MIAO Lingzhan,et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):8-12. (in Chinese))

[5] 夏继红,秦如照,窦传彬,等. 中小河流鱼类生境适宜性评估模型与等级分区[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):9-13. (XIA Jihong,QIN Ruzhao,DOU Chuanbin,et al. Habitat suitability assessment model and suitability grading classification for fishes in small and medium rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):9-13. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 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[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2012,10(2):86-91. (LI Qian,LI Chong,LUO Huihuang. Ecological target watertemperature of rare and endemic fish in Yangtze River upstream[J].

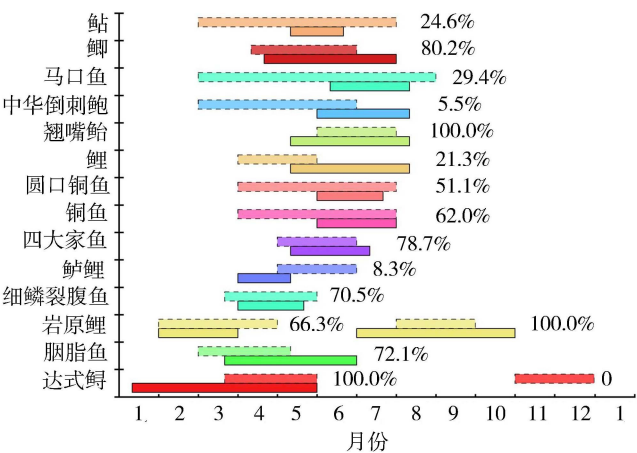


图5 建坝前后典型鱼类繁殖期分布
Fig.5 Distribution map of spawning period of typical fishes before and after the dam construction

- Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2012,10(2):86-91. (in Chinese))
- [8] 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[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(4):256-259. (LUO Huihuang,LI Qian,LI Chong. The impact of water temperature during the fish reproduction in the upper Yangtze River due to the cascade development in the lower Jinsha River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2012,10(4):256-259. (in Chinese))
- [9] 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. Variation of water temperature under the dam of the Three Gorges Reservoir and its impact on fish spawning[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(10):48-55. (in Chinese))
- [10] 毛劲乔,戴会超.重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):240-245. (MAO Jingqiao,DAI Huichao. Impact and regulation of major water conservancy and hydropower projects on important aquatic organisms[J]. Journal of Hohai University(Natural Science),2016,44(3):240-245. (in Chinese))
- [11] 郑从奇,武玮,魏杰,等.黄河下游支流大汶河鱼类多样性及影响因子分析[J].水资源保护,2020,36(6):31-38. (ZHENG Congqi,WU Wei,WEI Jie,et al. Fish diversity and its influencing factors in the Dawen River,a tributary of the lower Yellow River[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):31-38. (in Chinese))
- [12] 石希,孙健,史立地.基于 Landsat 卫星遥感资料的河流水温反演研究[J].水力发电学报,2021,40(2):121-130. (SHI Xi,SUN Jian,SHI Lidi. Research on river water temperature inversion based on Landsat satellite remote sensing data[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(2):121-130. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 毛劲乔,惠二青.四大家鱼产卵期水库滞冷效应对下游水温影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(7):691-696. (MAO Jinqiao,HUI Erqing. Effect of reservoir cooling retardation on downstream water temperature during spawning period of sidaiyu[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering,2020,38(7):691-696. (in Chinese))
- [15] 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].水生生态学杂志,2020,41(6):46-56. (QU Xiao,GUO Chuanbo,XIONG Fangyuan,et al. Characterization of the fish community and environmental driving factors during development of cascaded dams in the lower Jinsha River[J]. Journal of Hydroecology,2020,41(6):46-56. (in Chinese))
- [16] 张春光,杨君兴,赵亚辉,等.金沙江流域鱼类[M].北京:科学出版社,2019.
- [17] 危起伟.长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区考察报告[M].北京:科学出版社,2012.
- [18] 危起伟.从中华鲟(*Acipenser sinensis*)生活史剖析其物种保护:困境与突围[J].湖泊科学,2020,32(5):1297-1319. (WEI Qiwei. Conservation of Chinese sturgeon(*Acipenser sinensis*) based on its life history:dilemma and breakthrough[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(5):1297-1319. (in Chinese))
- [19] 丁瑞华.四川鱼类志[M].成都:四川科学技术出版社,1994.
- [20] 四川省长江水产资源调查所.长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究[M].成都:四川科学技术出版社,1988.
- [21] 张春光,赵亚辉.胭脂鱼的早期发育[J].动物学报,2000,46(4):438-447. (ZHANG Chunguang,ZHAO Yahui. Early development of Chinese sucker(*Myxocyprinus asiaticus*) [J]. Acta Zoologica Sinica,2000,46(4):438-447. (in Chinese))
- [22] 贺骥,张闻笛.生态环境、自然资源等领域监督管理体制现状及经验借鉴[J].水利发展研究,2020,20(4):7-10. (HE Ji,ZHANG Wendi. Current situation and experience of supervision and management system in the fields of ecological environment and natural resources[J]. Research on Water Conservancy Development,2020,20(4):7-10. (in Chinese))
- [23] YANG Zhi,ZHU Di,ZHU Qiguang,et al. Development of new fish-based indices of biotic integrity for estimating the effects of cascade reservoirs on fish assemblages in the upper Yangtze River,China[J]. Ecological Indicators,2020,119:106860.
- [24] 王海秀,尹正杰.长江上游水文情势变化对保护区铜鱼产卵的影响[J].人民长江,2019,50(12):46-50. (WANG haixiu,YIN Zhengjie. Effects of hydrological regime changes in the upper reaches of the Yangtze River on the spawning of copper fish in the reserve[J]. Yangtze River,2019,50(12):46-50. (in Chinese))
- [25] 黎明政,马琴,陈林,等.三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究[J].水生生物学报,2019,43(增刊1):84-96. (LI Mingzheng,MA Qin,CHEN Lin,et al. Study on reproductive status and hydrological demand of drifting egg fish in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Aquatic Biology,2019,43(Sup1):84-96. (in Chinese))