

长江上游宜宾至朱沱河段水文要素变化 及对河道和水生态影响

王渺林, 曹磊, 平妍容, 杜涛

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 重庆

收稿日期: 2023年11月6日; 录用日期: 2023年11月23日; 发布日期: 2023年12月26日

摘要

为研究长江上游宜宾至朱沱河段水文要素变化及其影响, 利用河段内朱沱水文站长系列实测流量、输沙量和水温资料, 主要采用Mann-Kendall法分析变化的趋势性和突变性, 结果表明: 1) 枯水期流量有显著增加趋势; 2) 输沙量显著减小; 3) 平均水温和最低水温有显著的升高趋势, 而最高水温则显著下降。2012年~2021年受采砂、航道整治等因素影响, 宜宾-朱沱河段冲刷7929万 m^3 , 初步分析了对水生态的可能影响。

关键词

水文特性变化, 趋势变化, 突变, 河段冲淤, 水生态, 长江上游

Changes in Hydrological Elements and Their Impacts on River Channel and Aquatic Ecology from Yibin to Zhutuo Section in the Upper Reaches of the Yangtze River

Miaolin Wang, Lei Cao, Yanrong Ping, Tao Du

Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Upper Changjiang River, Bureau of Hydrology, CWRC, Chongqing

Received: Nov. 6th, 2023; accepted: Nov. 23rd, 2023; published: Dec. 26th, 2023

Abstract

In order to study the changes and the impacts of hydrological elements from Yibin to Zhutuo section in

作者简介: 王渺林(1975年2月-), 男, 正高级工程师, 主要从事水文水资源分析研究工作, Email: 17831198@qq.com

文章引用: 王渺林, 曹磊, 平妍容, 杜涛. 长江上游宜宾至朱沱河段水文要素变化及对河道和水生态影响[J]. 水资源研究, 2023, 12(6): 575-581. DOI: 10.12677/jwrr.2023.126063

the upper reaches of the Yangtze River, the series of observed flow, sediment transport and water temperature data at Zhutuo hydrological station were analyzed. The Mann-Kendall method was used to analyze the trends and mutations of changes. The results show that: 1) There was a significant increase in flow during the dry season; 2) Significant reduction in sediment transport; 3) The average and minimum water temperatures showed a significant upward trend, but the highest water temperature significantly decreased. From 2012 to 2021, this river reach was eroded by factors such as sand mining and waterway regulation, with a total scouring amount of 79.29 million m³. The impacts of the changes in hydrological characteristics on aquatic ecology were analyzed preliminarily.

Keywords

Changes in Hydrological Characteristics, Trend Changes, Mutation, River Erosion and Sedimentation, Aquatic Ecology, The Upper Reaches of the Yangtze River

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江上游宜宾至朱沱河段长约 233 km, 河段为长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区(以下简称“保护区”), 主要保护对象有白鲟、长江鲟、胭脂鱼等珍稀濒危鱼类以及众多长江上游特有鱼类[1]。保护区在长江上游水域生态系统中具有代表性和典型性, 是保存长江上游水生生物多样性不可或缺的栖息繁殖地[1] [2] [3] [4]。

2012 年以来, 金沙江下段乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等水电站陆续投入运行发电[5]。受水库蓄水和下泄水量调控影响, 下游保护区河道水文情势发生一定程度改变, 可能对河道和水生态造成一定影响[2] [3] [4]。本文收集河段内朱沱水文站长系列实测流量、水温和输沙量资料, 分析河段水文要素变化特点。并利用 2012 年 10 月~2021 年 10 月宜宾 - 朱沱河段的实测河道地形资料分析河段冲淤情况, 初步分析对水生态的可能影响, 成果可为水库生态调度提供科学依据。

2. 资料与分析方法

2.1. 站点及资料

河段内有朱沱水文站, 本次收集了朱沱站 1954 年~2021 年逐月平均流量、1956 年~2020 年输沙量和含沙量、1960~2022 年历年平均水温、最高水温和最低水温资料。另外还利用了 2012 年 10 月~2021 年 10 月宜宾 - 朱沱河段的实测河道地形资料。水文、泥沙及河道观测资料均来源于长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局。

2.2. 分析方法

目前常用的水文变化分析方法有线性回归、累积距平、滑动平均、二次平滑以及 Mann-Kendall 法和 Spearman 法等。由于 Mann-Kendall 法计算简便, 而且可以明确突变开始的时间, 指出突变区域, 因此得到了广泛的应用。本文研究应用 Mann-Kendall 方法分析水文要素变化的趋势性和突变性。其具体方法参见本文参考文献[6]。

3. 水文特性变化分析

3.1. 流量变化

采用 Mann-Kendall 法分析朱沱站逐月平均流量的趋势性和突变性, 结果见表 1。1 至 4 月、枯水期(11~4 月)

平均流量、年最小流量有显著增加趋势，突变年份在 2011 年~2014 年。而 6 月和 8 月的平均流量有显著减小趋势，突变年份为 2007 年、2008 年。朱沱站平均流量变化见图 1，由图可知年平均流量和汛期流量有下降趋势，枯水期平均流量则有显著增加趋势。枯水期平均流量突变分析见图 2，由图可知在 2014 年发生向上的突变。

溪洛渡、向家坝水电站分别于 2013 年 5 月、2012 年 10 月开始蓄水发电。根据朱沱站实测资料分阶段统计，2013~2021 年与 1954~2012 年流量平均值相比(见表 1)，在年平均流量变化很小情况下(增加 1.28%)，枯水期(11~4 月)流量有较大的增加，枯水期平均流量增加 28.65%；3 月平均流量增加 53.47%；年最小流量平均值增加 752 m³/s。而 6~9 月平均流量减少 4.46%~14.25%，汛期平均流量减少 6.2%。

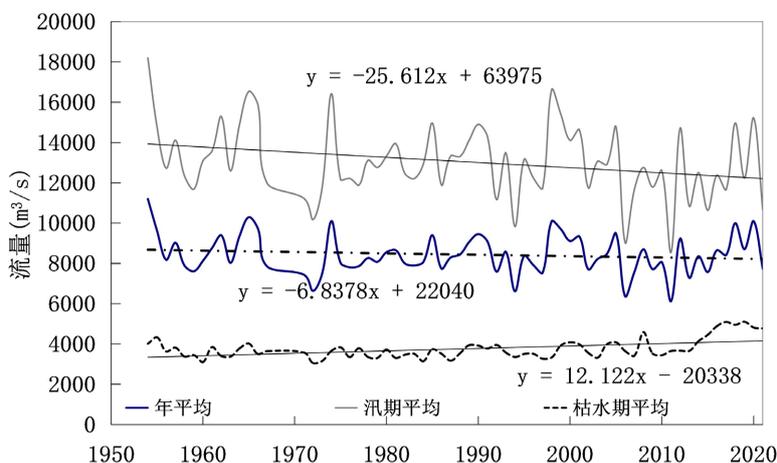


Figure 1. Average flow changes at Zhutuo Station

图 1. 朱沱站平均流量变化

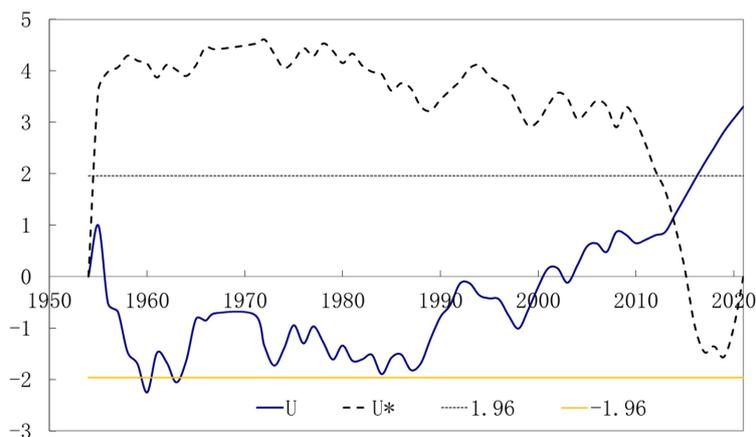


Figure 2. Analysis of sudden change in average flow in dry season at Zhutuo Station

图 2. 朱沱站枯水期平均流量突变分析

Table 1. Analysis results of flow changes at Zhutuo Station

表 1. 朱沱站流量变化分析结果

| 阶段平均流量 | 趋势和突变分析 | | | 分阶段对比(平均流量 m ³ /s) | | |
|--------|---------|------|------|-------------------------------|-------------|--------|
| | MK 统计值 | 趋势 | 突变年份 | 1954~2012 年 | 2013~2021 年 | 变化率 |
| 一月 | 5.198 | 显著增加 | 2011 | 2985 | 4260 | 42.72% |
| 二月 | 4.767 | 显著增加 | 2012 | 2690 | 3851 | 43.16% |

Continued

| | | | | | | |
|------------|--------|------|------|--------|--------|---------|
| 三月 | 4.949 | 显著增加 | 2012 | 2756 | 4230 | 53.47% |
| 四月 | 3.737 | 显著增加 | 2008 | 3388 | 4702 | 38.80% |
| 五月 | 0.374 | / | | 5281 | 5679 | 7.54% |
| 六月 | -2.162 | 显著减少 | 2007 | 10,397 | 8916 | -14.25% |
| 七月 | -1.539 | / | | 17,991 | 16,233 | -9.77% |
| 八月 | -2.321 | 显著减少 | 2008 | 18,113 | 16,522 | -8.78% |
| 九月 | -0.532 | / | | 16,259 | 15,533 | -4.46% |
| 十月 | -0.985 | / | | 10,935 | 11,191 | 2.35% |
| 十一月 | -1.086 | / | | 6060 | 6383 | 5.34% |
| 十二月 | 1.608 | / | | 3849 | 4526 | 17.56% |
| 年平均流量 | -0.509 | / | | 8429 | 8537 | 1.28% |
| 汛期(5~10月) | -1.811 | / | | 13,162 | 12,346 | -6.20% |
| 枯水期(11~4月) | 3.307 | 显著增加 | 2014 | 3621 | 4659 | 28.65% |
| 年最小流量 | 3.273 | 显著增加 | 2014 | 2334 | 3086 | 32.17% |

3.2. 输沙量变化

根据朱沱站 1956~2020 年实测输沙量系列统计分析, 最大年输沙量为 48,400 万 t, 年平均含沙量最大值为 1.53 kg/m³, 发生于 1998 年; 最小年输沙量为 2120 万 t, 发生于 2015 年, 年输沙量极值比为 22.8。2013~2020 年输沙量平均值为 5070 万 t, 仅为 1956~2012 年输沙量平均值 28,207 万 t 的 17.8%, 减少 82.2%。从朱沱站历年输沙量和平均含沙量变化(图 3)可见, 年输沙量、平均含沙量系列存在显著的下降趋势。Mann-Kendall 法分析年输沙量系列的突变年份为 2009 年。

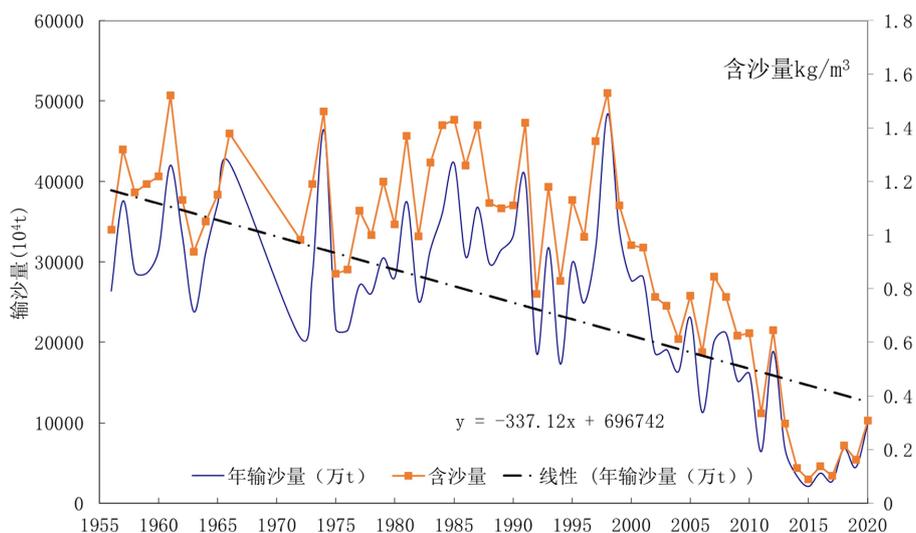


Figure 3. Changes of annual sediment transport and average sediment concentration at Zhutuo Station
图 3. 朱沱站历年输沙量和平均含沙量变化

3.3. 水温变化

利用朱沱站 1960~2022 年实测水温资料, 分析年水温统计值变化的趋势性和突变性, 结果见表 2, 年平均

水温和最低水温有显著的升高趋势，突变年份分别为 2015 年、2014 年；而年最高水温则出现显著下降趋势，突变年份为 1995 年。从朱沱站水温变化过程线(图 4)可见，年平均水温和最低水温有显著的升高趋势，而年最高水温则出现显著下降趋势。2013~2022 年与 1960~2012 年水温统计平均值相比(见表 2)，年平均水温增加 0.72℃、年最低水温平均增加 2.95℃，而年最高水温平均降低 0.87℃。

Table 2. Analysis results of water temperature changes at Zhutuo Station

表 2. 朱沱站水温变化分析结果

| 项目 | 趋势和突变分析 | | | 分阶段对比(水温℃) | | |
|------|---------|------|--------|-------------|-------------|-------|
| | MK 统计值 | 趋势 | 突变年份 | 1960~2012 年 | 2013~2022 年 | 变化 |
| 平均水温 | 2.29 | 显著升高 | 2015 年 | 17.86 | 18.58 | 0.72 |
| 最高水温 | -4.16 | 显著降低 | 1995 年 | 25.90 | 25.03 | -0.87 |
| 最低水温 | 4.20 | 显著升高 | 2014 年 | 8.48 | 11.43 | 2.95 |

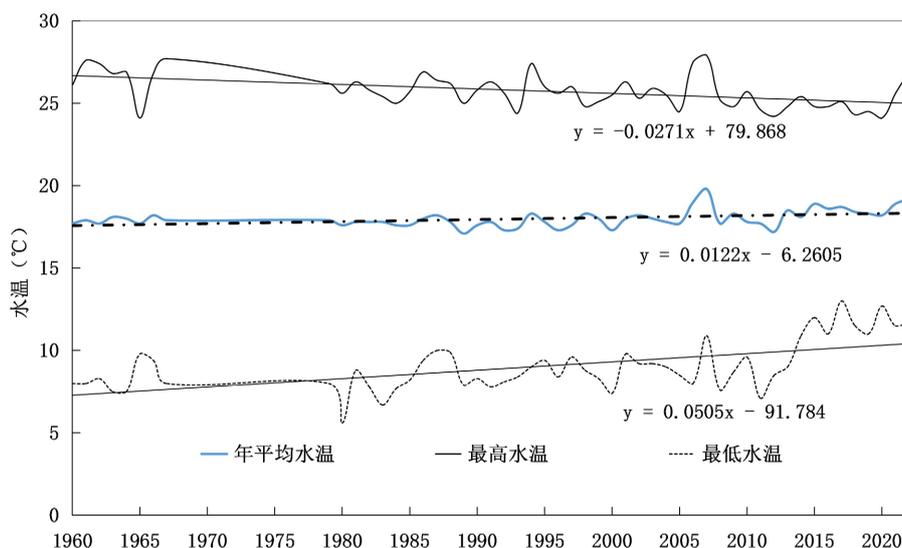


Figure 4. Changes of water temperature at Zhutuo Station

图 4. 朱沱站水温变化

4. 对河道与水生态的影响

4.1. 河段冲淤情况

2013~2020 年朱沱站输沙量比 1956~2012 年输沙量平均值减少 82.2%。来沙减少使该段的淤积速度减缓和冲刷强度增强。由于本河段为山区河流，河床可冲刷的沙质覆盖层极薄。根据 2012 年 10 月~2021 年 10 月宜宾至朱沱河段的实测地形资料分析了河段冲淤情况，该河段 2012~2021 年间共冲刷 7929 万 m³，其中冲刷主要发生在 2016 年以前，2012 年 10 月至 2016 年 11 月河段累计冲刷 8929 万 m³；2016 年 11 月至 2021 年 11 月河床累积呈小幅度淤积的状态，淤积量 1000 万 m³。一方面该段河道 2016 年以前采砂活动频繁，采砂量较大，分析表明 2016 年前冲刷主要受河道采砂影响。2016 年开始河道全面禁止采砂。岷江和沱江仍然是长江上游重要的泥沙来源，特别是 2020 年遭遇强降雨过程，为宜宾至朱沱河段提供一定的泥沙来源，从而缓解该段河床冲刷[5]。

4.2. 对水生态的可能影响

分析表明朱沱站年平均水温增加 0.72℃，年最低水温平均增加 2.95℃，而年最高水温平均下降 0.87℃。进

一步分析朱沱站旬平均水温变化情况，溪洛渡、向家坝水库蓄水后，朱沱站 4~7 月水温平均降低 1.8℃，9 月至次年 3 月平均增温 1.4℃，其中 10 月至次年 2 月增温显著，最大增幅 3.2℃(12 月下旬)。参考郝好鑫等对向家坝下游河段气温变化的影响因素分析[7]，本河段年内水温变化主要由上游梯级蓄水引起，年际变化主要由气候变化引起。

针对本河段鱼类繁殖期所需水温，高天珩等调查了长江干游宜宾、合江及江津段鱼类组成及其多样性[8]；任杰等对重要鱼类的水温、水质和水文水动力等生态需求进行了分析研究[9]；王康等研究了金沙江下游典型鱼类繁殖期[10]，郝好鑫等研究了长江干流宜宾重庆河段鱼类适宜产卵时间[7]，参考上述研究，本河段典型鱼类和繁殖时间见表 3。表 3 中将繁殖时间对应的朱沱站 2013 年~2020 年平均水温范围记为水温条件变化。河段内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 14℃~22℃；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 10 d~20 d。四大家鱼等部分鱼类在水温低于 18℃时繁殖会受到影响。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% [11]。该“滞冷”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温水和高温水下泄对下游水温的影响高于向家坝[12]。

Table 3. Water temperature during spawning period of typical fishes

表 3. 典型鱼类繁殖期水温条件

| 鱼类 | 繁殖时间 | 适宜产卵水温(℃) | 水温条件变化(℃) |
|------|-------|-----------|-----------|
| 达式鲟 | 3~4 月 | 14.0~18.3 | 13.9~17.3 |
| 胭脂鱼 | 3~4 月 | 14.0~22.0 | 13.9~17.3 |
| 四大家鱼 | 5~6 月 | 18.0~24.0 | 16.8~21.6 |
| 铜鱼 | 4~7 月 | 20.0~24.0 | 14.8~22.9 |

分层取水是国内目前改善水库下泄低温水不利影响的重要工程措施，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 12 m，最大挡水高度为 48 m [13]。而采取叠梁门取水方案，将会使得延迟效应和低温水程度减缓，在珍稀特有鱼类产卵生态修复上起到了一定的作用[14]。因此建议进一步优化溪洛渡水库的叠梁门运行调度方式，提升 3~6 月下泄水温[13]。

5. 结语

为研究长江上游宜宾 - 朱沱河段干流水文要素变化及其影响，利用河段内朱沱水文站长系列实测流量、水温和输沙量资料，采用 Mann-Kendall 法分析变化的趋势性和突变性：1) 流量方面，1 至 4 月和枯水期(11~4 月)平均流量有显著增加趋势，突变年份在 2011 年~2014 年，而 6 月和 8 月的平均流量有显著减小趋势。2) 输沙量显著减小，突变年份为 2009 年。3) 水温方面，平均水温和最低水温有显著的升高趋势，突变年份分别为 2015 年、2014 年；而最高水温则出现显著下降趋势。进一步分析朱沱站旬平均水温变化情况，朱沱站 4~7 月水温平均降低 1.8℃，9 月至次年 3 月平均增温 1.4℃。

利用 2012 年 10 月~2021 年 10 月宜宾 - 朱沱河段的实测地形资料分析了河段总体冲淤情况，受采砂、航道整治等人类活动因素影响，2012~2021 年间宜宾 - 朱沱河段共冲刷 7929 万 m³。

初步分析了对水生态的可能影响。水温变化对典型鱼类产卵繁殖产生一定的影响。建议进一步优化溪洛渡的叠梁门运行调度方式，提升下泄水温，建议进一步重视长江上游梯级电站开发运行引发的相关水生态问题。

基金项目

长江水利委员会水文局科技创新基金项目(SWJ-CJX23Z10); 长江水科学研究联合基金(U2240201)。

参考文献

- [1] 孙志禹, 张敏, 陈永柏. 水电开发背景下长江上游保护区珍稀特有鱼类保护实践[J]. 淡水渔业, 2014, 44(6): 3-8.
SUN Zhiyu, ZHANG Min and CHEN Yongbo. Protection of the rare and endemic fish in the conservation area located in the upstream of the Yangtze River in the context of hydropower development. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(6): 3-8. (in Chinese)
- [2] 罗慧萍, 靖争, 赵伟华, 等. 溪洛渡、向家坝水库建设运行对下游鱼类栖息地的影响研究[J]. 四川环境, 2023, 42(1): 40-46.
LUO Huiping, JING Zheng, ZHAO Weihua, et al. Study on the influence of construction and operation of the Xiluodu and Xiangjiaba reservoirs on downstream fish habitat. *Sichuan Environment*, 2023, 42(1): 40-46. (in Chinese)
- [3] 吴华莉, 金中武, 周银军, 等. 变化环境下长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流水沙过程演变分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(7): 7-13.
WU Huali, JIN Zhongwu, ZHOU Yinjun, et al. Evolution analysis on water and sediment processes in the mainstream of national nature reserve for rare and endemic fishes in the upper reaches of the Yangtze River under changing environment. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(7): 7-13. (in Chinese)
- [4] 胡兴坤, 邵科, 阙延福, 等. 金沙江下游宜宾段产漂流性卵鱼类早期资源动态变化[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(2): 73-80.
HU Xingkun, SHAO Ke, QUE Yanfu, et al. Dynamic changes of early stage fish resources with drifting eggs in Yibin section of the lower Jinsha River. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(2): 73-80. (in Chinese)
- [5] 朱玲玲, 熊明. 金沙江梯级水库群下游河道河床冲刷分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(1): 10-15.
ZHU Lingling, XIONG Ming. Analysis of river bed scour downstream from dams of cascade reservoirs in the lower Jinsha River. *Journal of Water Resources Research*, 2023, 12(1): 10-15. (in Chinese)
- [6] Kendall, M. G. Rank correlation methods. London: Charles Griffin and Company Ltd., 1975.
- [7] 郝好鑫, 杨霞, 杨梦斐, 等. 金沙江下游梯级水库对水温及鱼类适宜产卵时间的影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 247-256.
HAO Haoxin, YANG Xia, YANG Mengfei, et al. Impacts of the cascade reservoirs of Jinshajiang River on water temperature and fish spawning time. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(1): 247-256. (in Chinese)
- [8] 高天珩, 田辉伍, 叶超, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流段鱼类组成及其多样性[J]. 淡水渔业, 2013, 43(2): 36-42.
GAO Tianheng, TIAN Huiwu, YE Chao, et al. Diversity and composition of fish in the mainstream of national nature reserve of rare and endemic fish in the upper Yangtze River. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(2): 36-42. (in Chinese)
- [9] 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. *Freshwater Fisheries*, 2014(6): 18-23. (in Chinese)
- [10] 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. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(2): 50-55. (in Chinese)
- [11] LI, T, MO, K. L., WANG, J., et al. Mismatch between critical and accumulated temperature following river damming impacts fish spawning. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 144052. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144052>
- [12] LONG, L. H., JI, D. B., LIU, D. F., 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. <https://doi.org/10.3390/w11051008>
- [13] 李雨, 邹珊, 张国学, 等. 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[J]. 水文, 2021, 41(3): 101-108.
LI Yu, ZOU Shan, ZHANG Guoxue, et al. Analysis on the influence of layered water intake operation on the water temperature structure in the lower reaches of Xiluodu reservoir. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(3): 101-108. (in Chinese)
- [14] 匡亮, 张鹏, 杨洪雨, 等. 梯级水库叠梁门分层取水水温改善效果的衰减[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1244-1251.
KUANG Liang, ZHANG Peng, YANG Hongyu, et al. Study on the reducing effect that stoplog gate has played in cascade reservoirs for water temperature stratification. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1244-1251. (in Chinese)