

■ 灌溉水源与输配水系统 ■

文章编号: 1672-3317(2022)09-0131-10

山区中小河流防洪水库对水温影响的模拟

——以固军水库为例

李健威¹, 庄春义¹, 张鹏^{2*}, 梁瑞峰²

(1.四川省水利水电勘测设计研究院, 成都 610072;

2.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘 要:【目的】探究山区中小河流防洪水库的水温对鱼类产卵和洄游的影响。【方法】以固军水库为对象, 采用立面二维水动力水温模型对典型平水年、枯水年、丰水年(情景 1、情景 2、情景 3)的库区水温分布与下泄水温进行了模拟, 探讨了防洪水库对水温的改变及对国家水产种质资源保护区鱼类产卵、洄游等生命活动的影响。【结果】①固军水库在不同情景条件下, 均表现为季节性分层水库, 且不存在全年稳定的库底水温。②水库水温的重塑为国家种质资源保护区内的裂腹鱼洄游创造了更多适宜洄游的水温通道。③固军水库运行对下游水温存在明显影响, 当单层取水时, 情景 1、情景 2 和情景 3 下的鲤鱼、鲫鱼的产卵开始时间分别由现状的 4 月中旬延迟至 4 月末, 5 月初以及 4 月下旬, 影响程度从小到大: 情景 3<情景 1<情景 2。④固军水库采用前置挡墙取水后, 春季低温水现象得到了有效缓解, 平水年、丰水年条件下产卵期间的“低温水”现象几乎消失, 而枯水年的低温水影响程度极其有限。【结论】中小河流防洪水库的低水位运行有利于库区鱼类洄游产卵, 可采用前置挡墙缓解下泄低温水以保护鱼类产卵。

关键词: 防洪水库; 水温; 国家种质资源保护区; 分层取水

中图分类号: TV697.21

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022257

OSID:



李健威, 庄春义, 张鹏, 等. 山区中小河流防洪水库对水温影响的模拟: 以固军水库为例[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 131-139, 146.

LI Jianwei, ZHUANG Chunyi, ZHANG Peng, et al. Simulation Study on the Effects of Small and Medium-sized River Flood Control Reservoirs in Mountainous Areas on Water Temperature: A Case Study in Gujun Reservoir[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 131-139, 146.

0 引言

【研究意义】随着全球气候变化的加剧, 极端降雨事件频发, 导致洪水事件发生的频率和强度越来越大^[1]。据相关统计报道, 我国在 1978—2008 年, 平均每 2 年发生一次较严重的洪水灾害^[2], 每年洪水灾害造成数百亿元的直接经济损失^[3]。流域和区域的防洪问题已成为社会广泛关注问题。防洪水库工程具有蓄枯调丰, 削弱洪水过程的功能, 已成为保护人类生命安全和维持社会发展的重要手段^[4]。目前, 在洪水多发的长江上游流域, 已建成金沙江中游梯级、金沙江下游三梯级(乌东德、溪洛渡和向家坝)、雅砻江梯级、岷江大渡河梯级、嘉陵江梯级和乌江梯级水库

群^[4], 防洪水库群的联合运行调度, 可在一定程度上较好地应对流域性或区域性洪水^[5]。然而, 防洪水库的修建在带来巨大社会效益的同时也给水生生态系统带来了胁迫, 水库运行使得坝下出现诸如减脱水河段, 生境破碎化, 水温过程变异等生态不利现象, 均会对水生生物的栖息环境造成不可逆的影响。当前, 利用防洪工程管理河流, 水生生物栖息地的数量和质量已受到严重限制^[6]。水库建成后的水温预测及减缓措施的研究可为水库管理者实现生态调度提供一定的技术支撑, 越来越受到社会及政府的高度关注^[7]。

【研究进展】水温作为生态系统的基本要素, 影响着水生生物的生命周期^[7]。鱼类作为水生生态系统中促进物质循环和能量流动的重要组成部分, 由于其对各种环境压力的反应显著, 被认为是河流生态系统健康的有效指标^[8-10]。水温的高低决定了鱼类新陈代谢的快慢, 从而影响鱼类的生长、性成熟, 进而限制了鱼类产卵等活动, 最终将影响鱼类种群密度(强度)^[11-13]。水库蓄水重塑了库区的水温结构, 特别是

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401700); 国家自然科学基金项目(51379136)

作者简介: 李健威(1969-), 男, 高级工程师。主要从事环境保护研究。
E-mail: w133505@126.com

通信作者: 张鹏(1993-), 男, 博士, 主要从事生态环境水力学研究。
E-mail: 2016223065134@stu.scu.edu.cn

大型水库,其库区分层现象显著,常表现为春夏季下泄“低温水”,秋冬季下泄“高温水”^[14-15]。坝前取水方式的不同将直接影响下游河道的水温过程,而不利(过高或者过低)的下泄水温将极大地影响坝下鱼类的生活节律。例如,当水温在 18℃及以上时,才能触发四大家鱼开始产卵,现场监测资料表明,三峡水库的运行,使得四大家鱼的产卵时间最多推迟 1 个月以上^[16]。此外,以往的研究多集中在大型河流上的水库对水温的影响^[7, 14-15],对山区中小河流上的防洪水库研究较少。山区中小河流洪峰相对于其他河流提前(如 4 月),因此,其流域上的防洪水库相对于大型河流上的防洪水库具有提前降低水库水位(如 2 月或者 3 月开始降水位)为防洪预留充足库容的特征。然而,中小河流防洪水库的独特运行特征对水生生态系统的具体影响程度如何,目前还尚不清楚。

【切入点】在我国西南山区,陡峭的河道底坡、区域降水的极端差异及下垫面等因素,使得洪涝灾害频繁发生,嘉陵江流域尤为显著。渠江是嘉陵江下游左岸最大一级支流,洪水灾害严重,威胁着渠江流域近千万人口的生命财产安全。州河是渠江左岸最大的一级支流,固军水库为州河支流中河上近期实施工程,其建成后可极大地缓解渠江干流的防洪压力^[18]。然而,固军水库坝址和淹没区涉及龙潭河特有鱼类国家级水产种质资源保护区的实验区,其蓄水调度在一定程度上破坏了原有的水温过程,其是否对水产种质资源保护区的珍稀特有鱼类产生影响及缓解措施如何实施等需进一步研究分析。【拟解决的关键问题】本文以中小河流上的固军水库为例,采用立面二维水动力水温模型,模拟并定量分析了防洪水库库区的水温过程及坝前取水措施对下游水产种质资源保护区的影响,以期为水库的生态运行调度和低温水减缓措施提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

固军水库(图 1)位于渠江流域中河中游,坝址位于达州市万源市固军乡固军大桥顺直河段,控制流域 1 420 km²。工程任务以防洪为主,兼顾发电。水

库死水位,正常蓄水位,汛限制水位和校核洪水位分别为 473、494、474.0 m 和 495.55 m,总库容 1.31 亿 m³,防洪库容为 0.89 亿 m³。取水口底板高程 465.5 m,为 II 等大(2)型工程。最大发电引用流量 32.5 m³/s,装机 11.6 MW,多年平均发电量 3 587 万 kW/h,装机利用小时 3 093 h。

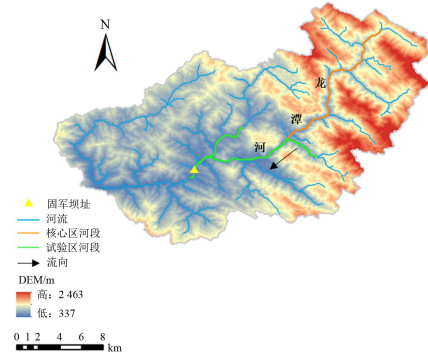


图 1 研究区域及水产种质资源保护区

Fig.1 Study area and national aquatic germplasm reserves

1.2 现场调查

现场调查结果显示,相对于整个龙潭河特有鱼类国家级水产种质资源保护区分布的 41 种鱼类,目前影响水域内分布有鱼类 21 种,隶属于 3 目 5 科 19 属。其中包括四川省重点保护水生野生动物重口裂腹鱼,被列入《中国濒危动物红皮书》和《中国物种红色名录》中的濒危物种(EN)白缘鲃,易危物种(VU)中华裂腹鱼,以及主要经济鱼类鲤、鲫和中华倒刺鲃等。其中,中华裂腹鱼、重口裂腹鱼等的产卵场主要分布在水产种质资源保护区核心区河段,而鲤、鲫的产卵场主要分布在固军坝下的凹岸湾沱。

2 数学模型及情景设置

固军水库库区长 12.74 km,坝前最大水深约 61 m,宽约 458 m,水动力和水温在纵向和垂向的变化远大于横向,属于典型的山区型河道水库。因此,采用立面二维的水动力水温模型可以较好地模拟固军水库的水动力水温过程^[14-15]。计算网格单元在主流方向上尺寸为 10~200 m,在水深方向上为 0.3~1 m,在正常蓄水位下,固军库区离散为 125×87 个矩形网格。

$$\frac{\partial BT}{\partial t} + u \frac{\partial BT}{\partial x} + w \frac{\partial BT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[B \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} + \frac{V_t}{\sigma} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[B \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} + \frac{V_t}{\sigma} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial B \phi_z}{\partial z}, \quad (1)$$

式中: u 、 w 分别为纵向和垂向的速度 (m/s); B 为河宽 (m); T 为水温 (°C); σ 为温度普朗特数,与密度梯度和流速梯度有关,通常取为 0.85; V_t 为紊动涡黏系数; C_p 为水的比热 (J/(kg·°C)); λ 为分子热扩散系数 (W/(m·°C)); ϕ_z 为穿过 z 平面的太阳辐射通量(水面热交换源项) (W/m²)。水面热交换包括净

太阳短波辐射、净长波辐射、蒸发和传导 4 个方面。

2.1 水温模型

开发的水温模型已在中国西南山区水库中得到广泛和成功的应用,并在溪洛渡水库和二滩水库^[19]中得到了很好的验证。曼宁粗糙度系数和消光系数是该模型中的重要参数,可能会显著影响模型输出。结

果表明,当水库运行确定时,模型输出对曼宁粗糙度系数不敏感,而模型中的消光系数是影响水库水温结果的最敏感参数,其受水体透明度影响。目前,州河尚无水库建成投产。为了进一步验证本文所建立的模型的普遍性和适用性,采用位于西南山区的四川省紫坪铺水库来验证水温模型的相关参数,验证水库与固

军水库具有相似的规模(大型水库),气候条件(亚热带季风性湿润气候)和水体透明度(夏季 0.25 m, 冬季 0.5 m)。引入均方根误差($RMSE$)来评估模型性能。结果表明,坝前断面和库中断面的 $RMSE$ 分别为 0.54 °C 和 0.63 °C。表明本研究建立水温模型预测精度较高,可用于固军水库的水温模拟预测。

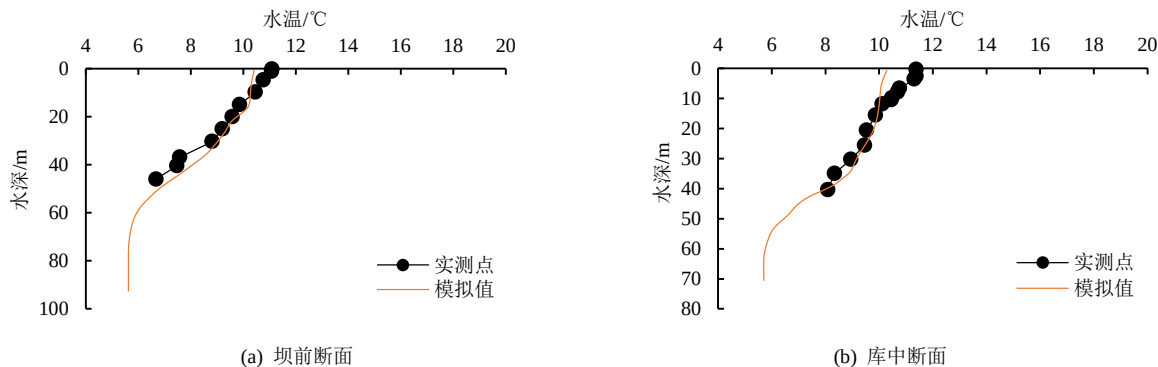


图 2 2010 年 3 月 31 日紫坪铺水库实测水温数据验证

Fig.2 Verification results of measured water temperature of the Zipingpu Reservoir on March 31, 2010

2.2 边界条件

2.2.1 入库及坝址水温

州河流域先后设立有多个具有水温观测资料的水文站,分别为:州河干流的东林水文站、后河的毛坝水文站、中河的黄金口水文站、明月江的明月潭水文站和东柳河上的乌木水文站。

毛坝、黄金口水文站分别距离东林水文站 53.0、49.4 km。毛坝水文站所在河段地形的山区特征相对

于黄金口水文站更为突出,而后河接纳中河后的地形特征与黄金口河段更为接近,因此采用黄金口至东林之间的增温率作为中河沿程增温率,并以此增温率由黄金口水文站向上游推算固军坝址和库尾的天然水温见表 1。此外,将固军坝址处气温、水温建立相关关系(图 3),采用坝址处逐日气温可得到坝址处水温的逐日过程及现状变化范围(图 4)。

表 1 固军入库与坝址水温

Table 1 Water temperatures of inflow water and dam site of Gujun reservoir

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
入库水温	5.1	8.1	10.9	15.3	18.8	23.6	24.8	25.8	23.1	15.7	11.5	7.9
坝址水温	5.4	8.1	11.1	15.6	19.0	23.6	24.8	25.9	22.9	16.0	11.8	8.1
增温率/(°C 100 km ⁻¹)	2.024	0.607	1.619	2.024	1.822	0.202	0.607	1.012	-1.215	2.024	2.024	1.215

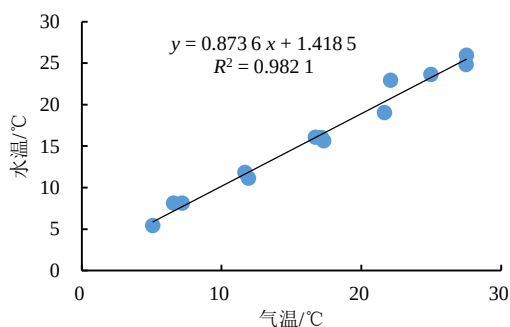


图 3 固军水库坝址的水温-气温相关关系

Fig.3 Correlation between water temperature and air temperature at the dam site of Gujun reservoir

2.2.2 气象数据

库区的气象条件采用宣汉县和万源市气象站数据按照距离加权使用。模型气象边界数据来源于国家气象科学数据中心。根据资料统计,研究区域的多年平均气温 18.5 °C,极端最高气温 39.5 °C,极端最低

气温-4.8 °C,多年平均降水量 1 254.6 mm,多年平均蒸发量 1 109.8 mm,多年平均风速 1.4 m/s,多年平均相对湿度 81%。

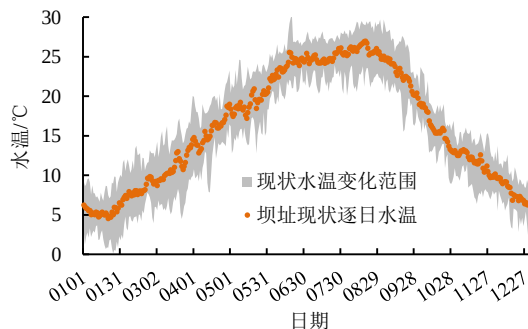


图 4 固军水库的坝址水温过程

Fig.4 Water temperature process at the dam site of Gujun Reservoir

2.3 模拟情景设置

除水面热交换影响水库水温的重塑过程外,不同

水文年的入库流量过程及相应的运行调度也决定了水库水温结构。本文对黄金口水文站 1959—2014 年系列月平均流量数据按照皮尔逊Ⅲ型曲线进行处理分析,其丰(10%)、平(50%)和枯水年(90%)的入库流量过程见图 5。按照防洪要求,相应的水库运行调度过程见图 5。值得注意的是,由图 5 可知,

防洪水库的主要特征在于 2、3 月水库水位开始急剧下降,主要为汛期保留足够的防洪库容。通过设置典型水文年的情景(情景 1:平水年;情景 2:枯水年;情景 3:丰水年),可以定量探讨水库建成不同水文频率下水温过程对水产种质资源保护区内鱼类的影响。

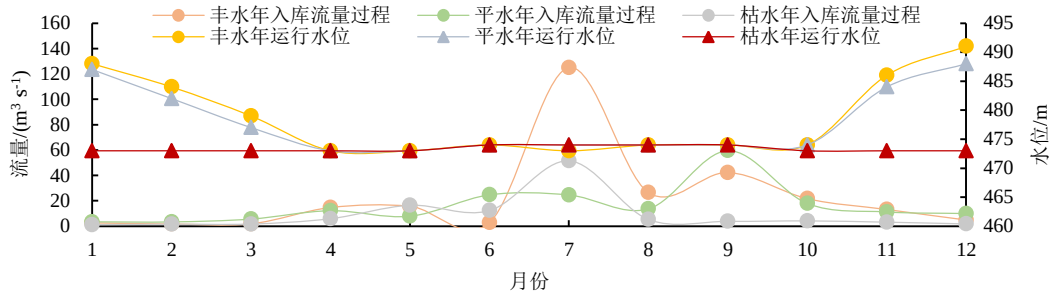


图 5 典型年(丰、平、枯)入库流量过程及运行调度过程(月末水位)

Fig.5 Inflow flow process and operation dispatching process (water level at the end of the month) in typical years (wet, normal and dry)

3 结果

3.1 不同情景下库区水温分布预测

图 6 显示了固军水库在情景 1 下各月月中的库区立面二维水温预测结果。各月月中坝前断面(水库拦漂索与大坝之间的位置,本文中该断面位于坝前 200 m 处)水温分布见图 7。

受到水库调节、流速变慢、水气界面热通量和库内对流与扩散的影响,库区水温在 2 月最低,坝前库底水温为 $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,表层水温为 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,库表与库底基本同温,表底温差仅为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。进入 3 月,入流水温、气温、太阳辐射开始回升,表层水温升高至 $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,库底水温不变,坝前垂向温差 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

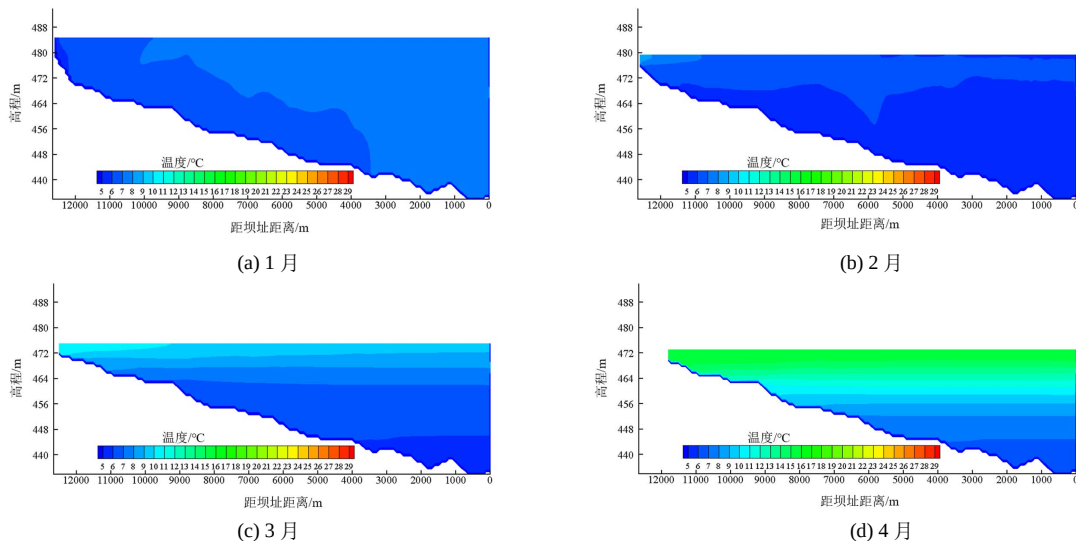
4—5 月太阳辐射、气温、入流水温持续上升,受气象条件和来流水温影响库区水温继续上升。到 4 月份,库区水位降至本年最低水位 473 m ,表层以下形成厚度 20.5 m 、梯度为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 的温跃层,库底水温略升为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,表层与底层温差升至 $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。5

月天然来流温度接近表层水温,来流在表层缓慢流动,库底水温由于热量的向下传递开始升高。

6—8 月,太阳辐射、来流水温、气温逐渐增大,库表水温持续上升,使表层水温仍维持在较高水平。6 月来流量大幅增加,月径流量为库容的 1.8 倍,大流量使库区水体掺混和紊动增强,库底低温水层被彻底破坏,库底水温升至 $12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。7、8 月气温达到全年最高值,8 月太阳辐射和来流水温达到全年最高值,库表水温持续升温到全年最高值 $28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

9 月气温、太阳辐射、来流均开始下降,但受 8 月的表层高温水的垂向热传导影响,库底水温升高至全年最高温 $23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

10 月—翌年 1 月,气温、太阳辐射、来流水温迅速降低,表层水温下降,由于来流水温低于库区水温,来流入库之后沿库底向坝前爬行。1 月气温达到全年最低,来流水温也降至全年最低 $5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,11 月—翌年 1 月,坝前垂向表底基本同温。呈季节性分层结构特征。



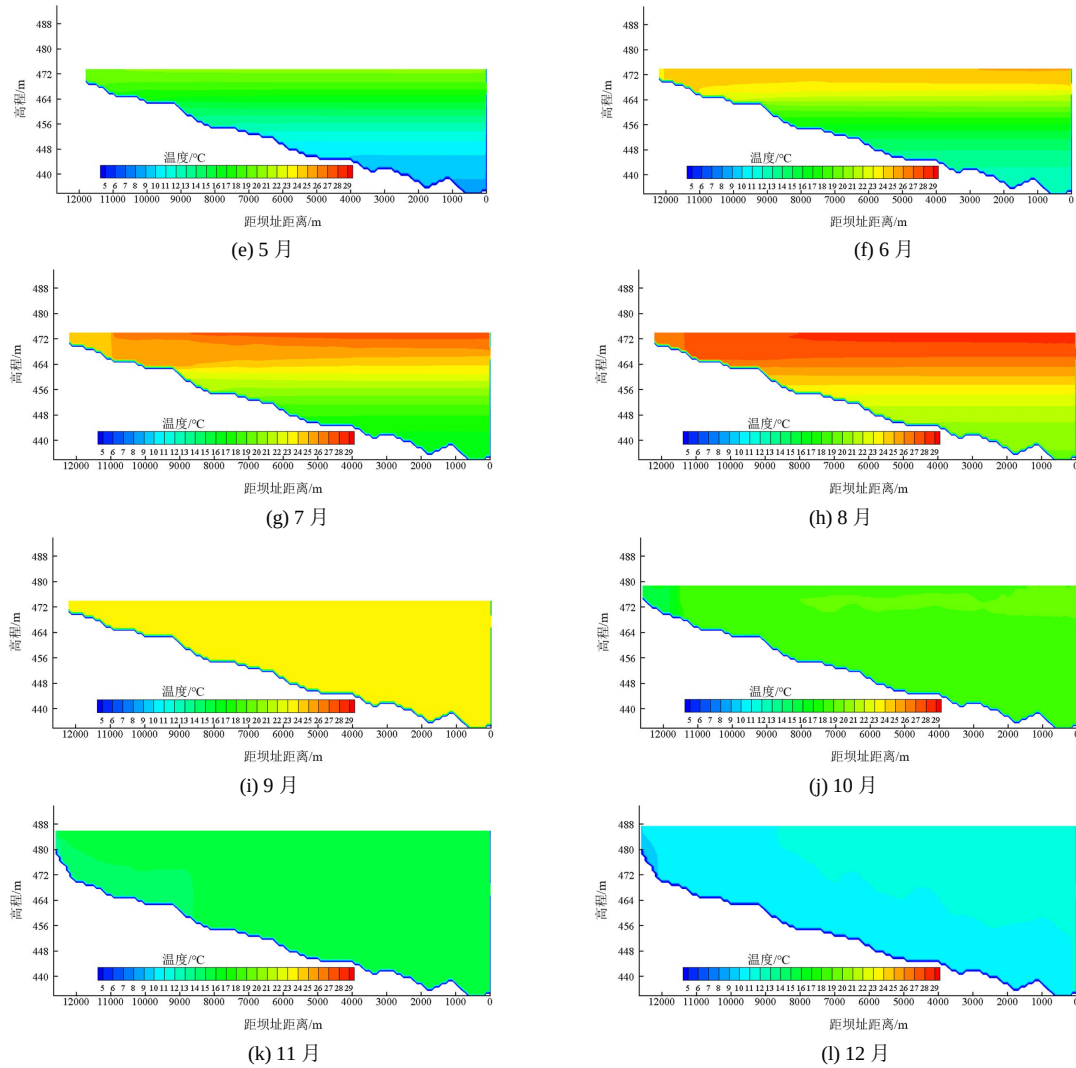


图6 固军水库库区逐月水温分布 (情景1)

Fig.6 Monthly water temperature distribution in Gujun reservoir area (scenario 1)

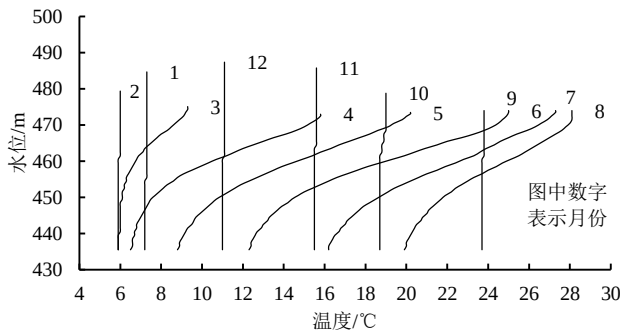


图7 固军水库坝前逐月水温分布 (情景1)

Fig.7 Monthly water temperature distribution in front of the dam of Gujun reservoir (scenario 1)

在情景2中,各月月中坝前水温分布见图7。除入出库流量和坝前水位外,固军水库枯水年的计算条件与平水年基本相同,来流水温仍采用多年平均的逐月入库水温。固军枯水年来流为平水年的57%,10月—翌年2月的运行水位平均比平水年低12 m,3—4月的运行水位与平水年相同。但枯水年3—4月来流仅为平水年的42%,因而3—4月水库调节性能相对平水年更高,水库下泄低温水现象更为突出。库区

在典型枯水年的水温结构和平水年相近,仍呈季节性分层结构特征。

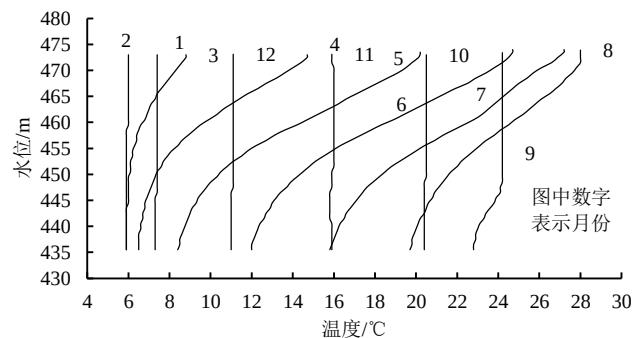


图8 固军水库坝前逐月水温分布 (情景2)

Fig.8 Monthly water temperature distribution in front of the dam of Gujun reservoir (scenario 2)

在情景3中(库区分布图未显示),各月月中坝前水温分布见图8。除入出库流量和坝前水位外,固军水库丰水年的计算条件与平水年基本相同,来流水温仍采用多年平均的逐月入库水温。固军丰水年来流为平水年的1.42倍,10月—翌年2月的运行水位平均比平水年高2.0 m,3—4月的运行水位与平水年相

同。但丰水年来流主要集中在7—9月,3—4月来流仅为平水年的92%,因而3—4月水库调节性能相对平水年有所提高,水库下泄低温水现象更为突出。库区在典型丰水年(图9)的水温结构和平水年相近,仍呈季节性分层结构特征。

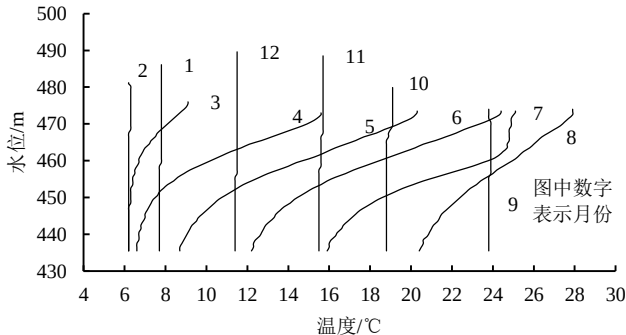


图9 固军水库坝前逐月水温分布 (情景3)

Fig.9 Monthly water temperature distribution in front of the dam of Gujun reservoir (scenario 3)

3.2 不同情景下泄水温预测

根据取水口取水高程,图10—图12显示了固军水库在不同情景下的下泄水温过程。

在情景1下,与坝址现状水温相比,水库对下游水温存在明显影响。水库年均下泄水温比建坝前升高0.6℃。下泄水温在2—6月比建坝前坝址水温有所降低,平均降低了1.6℃,3月降低最多,达2.8℃。7月—翌年1月,下泄水温平均上升2.0℃,11月温升幅度最大,为3.8℃。全年出现月均最高温度的月份建坝前后均为8月;全年出现月均最低温度的月份建坝前为1月,建坝后为2月;月均最高温度从建坝前的25.9℃升为建坝后的26.9℃,月均最低温度从建坝前的5.4℃升为建坝后的6.1℃,温差扩大了0.3℃。

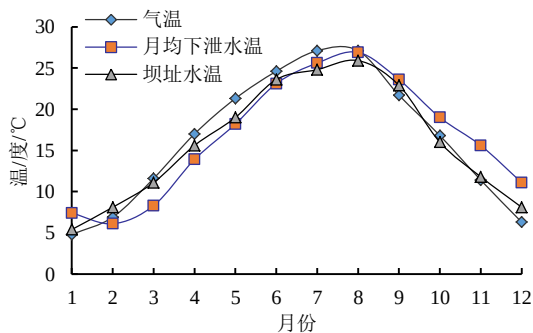


图10 固军水库月均下泄水温与坝址天然水温的比较 (情景1)

Fig.10 Comparison between monthly average discharge water temperature of Gujun reservoir and natural water temperature of dam site (scenario 1)

在情景2下,与坝址水温相比,水库对下游水温存在明显影响。水库年均下泄水温比建坝前升高0.7℃。下泄水温在2—6月比建坝前坝址水温有所降低,平均降低了1.8℃,3月降低最多,达3.1℃。7月—翌年1月,下泄水温平均上升2.5℃,10月温升

幅度最大,为4.6℃。全年出现月均最高温度的月份建坝前后均为8月;全年出现月均最低温度的月份建坝前为1月,建坝后为2月;月均最高温度从建坝前的25.9℃升为建坝后的26.9℃,月均最低温度从建坝前的5.4℃升为建坝后的6.1℃,温差扩大了0.3℃。

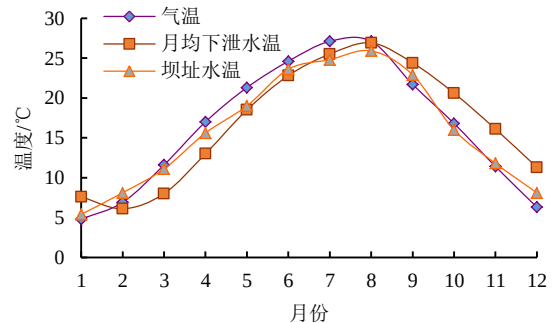


图11 固军水库月均下泄水温与坝址天然水温的比较 (情景2)

Fig.11 Comparison between monthly average Discharge water temperature of Gujun reservoir and natural water temperature of dam site (scenario 2)

在情景3下,与坝址水温相比,水库对下游水温有明显影响。水库年均下泄水温比建坝前升高0.6℃。下泄水温在2—6月比建坝前坝址水温有所降低,平均降低了1.6℃,3月降低最多,达3.1℃。7月—翌年1月,下泄水温平均上升2.1℃,11月温升幅度最大,为3.8℃。全年出现月均最高温度的月份建坝前后均为8月;全年出现月均最低温度的月份建坝前为1月,建坝后为2月;月均最高温度从建坝前的25.9℃升为建坝后的26.6℃,月均最低温度从建坝前的5.4℃升为建坝后的6.4℃,温差减小了0.3℃。

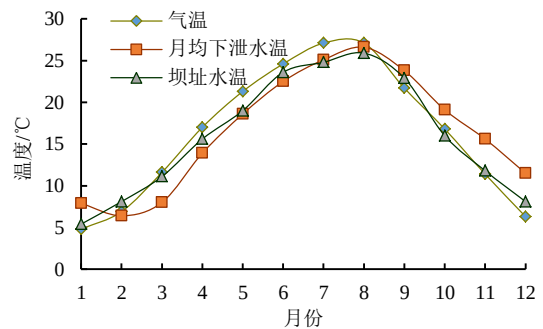


图12 固军水库月均下泄水温与坝址天然水温的比较 (情景3)

Fig.12 Comparison between monthly average discharge water temperature of Gujun reservoir and natural water temperature of dam site (scenario 3)

3.3 防洪水库变异水温过程对种质资源保护区鱼类的影响

3.3.1 固军水库对坝下保护区实验区及产卵场的影响

固军坝下分布有鲤、鲫鱼的产卵场,在长江上游其产卵时间为3—5月^[12],喜好在流水生境中产卵。鲤、鲫鱼的产卵时间依赖于水温条件,当水温达到16℃时才开始产卵^[11-12]。将3—5月坝址天然水温和

不用情景下的下泄水温与产卵阈值水温进行了对比分析以确定防洪水库修建对坝下鱼类产卵场的影响。

图 13 显示了坝下鲫鱼产卵期间固军水库下泄水温对产卵场的影响程度。从图 13 可以看出,天然情况下,鲫鱼在 4 月中旬开始产卵。然而由于防洪水库的修建,在情景 1 中,鲤鱼、鲫鱼产卵时间延迟超过一句,在 4 月末开始产卵;在情景 2 中,鲤鱼、鲫鱼的产卵时间相较于情景 1 延迟时间更久,在 5 月初开始产卵;而在情景 3 中,鲤鱼、鲫鱼的产卵时间延迟一句,在 4 月下旬将开始产卵。总的来说,建库均会延迟鲤、鲫鱼的产卵时间,但影响程度随运行情景的不同而不同,影响程度(延迟时间的长短)从小到大:情景 3<情景 1<情景 2。

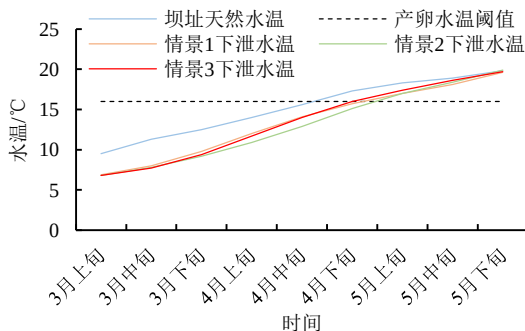


图 13 下泄水温对坝下产卵场的影响

Fig.13 The impact of discharge water temperature on spawning ground downstream of the dam

3.3.2 库区水温结构对上游保护区的影响

裂腹鱼在产卵期需要进行短距离生殖洄游。中华裂腹鱼和重口裂腹鱼的产卵场位于保护区的核心区,固军水库的运行不会影响到产卵场的水温过程。但在产卵前的洄游期,需要在一定的水温范围内才能触发洄游行为^[20]。本文对产卵洄游期(7月)坝址处的天然水温进行分析发现,7月的多年平均水温为 24.8℃,在长江支流洄游鱼类洄游期间喜好水温范围(22~28℃)之内^[21]。在情景 1,情景 2 和情景 3 中,库区 7 月均出现水温分层现象。当水位高程在 468 m 及以上时,水温满足 24.8~28℃范围,因此,库区的水温结构重塑为种质资源保护区内的裂腹鱼洄游提供了更广阔的,适宜洄游的水温通道。

3.4 不同坝前取水方式的对比

根据 3.2 节下泄水温预测结果,进一步分析得出了水库在不同情景下(不采取任何措施下(单层取水))下泄水温与坝址天然水温之间的差异(图 14)。各情景下均存在明显的春季“低温水”和冬季“高温水”现象。其中丰、枯水年 3 月下泄水温低于建坝前天然水温 3.1℃,为降幅最大月份,枯水年 10 月下泄水温高于建坝前天然水温 4.6℃,为升幅最大月份。

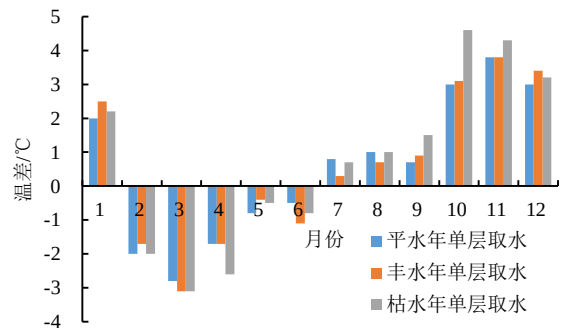


图 14 固军水库单层取水时下泄水温与天然水温的差异

Fig.14 The difference between discharge water temperature and natural water temperature of Gujun reservoir using single-layer water intake

上述的“低温水”效应,会推迟坝下鲤、鲫鱼的产卵开始时间。目前应用较多的低温水缓解措施有前置挡墙、叠梁门取水^[22]等。本文就“低温水”时期(2—6月)采取前置挡墙/叠梁门取水措施(挡墙顶高程 470.5 m,图 15),再次模拟了固军水库的情景 1、情景 2 和情景 3 的水温过程。减缓效果见图 16—图 17。结果表明,在采取缓解措施下,情景 1 的产卵期间“低温水”现象消失,情景 3 的下泄水温较天然水温仅降低了 0.1℃,而情景 2 较天然水温降低了 0.9℃,较单层取水时提高了 1.7℃。情景 1 和情景 3 下,固军水库的下泄水温几乎不会对坝下产卵场产生影响,而情景 2 中,下泄水温使得产卵开始时间从单层取水的 5 月上旬提前到 4 月下旬。综上所述,减缓措施具有显著的生态正效应。

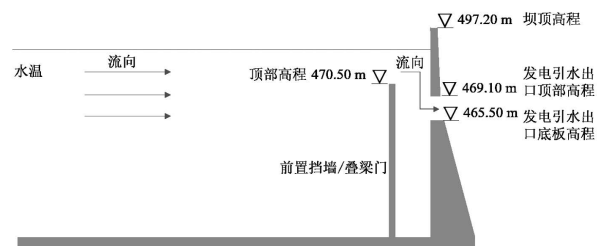


图 15 固军水库前置挡墙取水/叠梁门取水措施示意

Fig.15 Schematic diagram of water intake measures for front retaining wall/stoplog gate of Gujun reservoir

就对前置挡墙和叠梁门的对比选取,水库长时段低水位运行使水库水温结构呈季节性分层分布,下泄低温水现象并不非常显著,但不排除运行期部分高水位运行年份的全年分层和严重的低温水现象。水库开发任务主要为防洪,多数年份不能蓄满,且水库在 3 月或 4 月即需降至死水位运行,使泄流孔口靠近表层温水层而提高了下泄水温。若采用叠梁门,为应对部分年份的高水位,需设置 5.0 m×5 (共 5 层)叠梁门叶,而实际上在有鱼类产卵水温需求的 4—5 月只能启用 1 层叠梁门,使用效率低下。综合考虑技术经济可行性,推荐前置挡墙措施作为低温水应对措施,低

温水改善幅度范围为 1.8~2.1 °C。

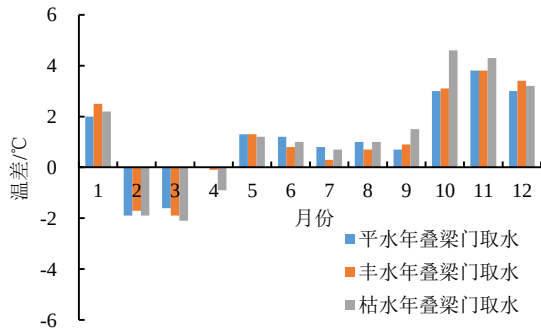


图 16 固军水库前置挡墙取水/

叠梁门取水措施与天然水温的差异

Fig.16 The difference between discharge water temperature and natural water temperature of Gujun reservoir using water intake measures of front retaining wall/stoplog gate

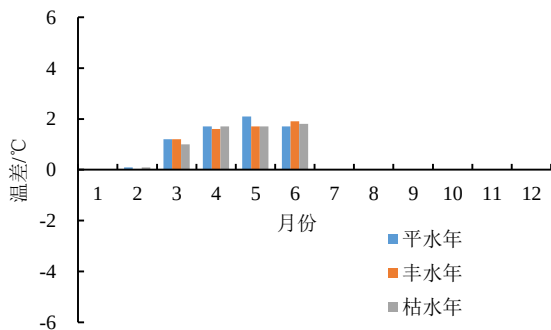


图 17 固军水库前置挡墙/叠梁门取水比

单层取水的下泄水温改善效果

Fig.17 The improvement effect of discharge water temperature using front retaining wall/stoplog intake in Gujun reservoir compared with single-layer intake

4 讨论

4.1 降水运行对下泄水温的影响和改善

由于降雨补给的时空影响,西南山区中小型流域洪峰过程较其他区域有所提前。为满足防洪要求,该流域防洪水库通常具有提前降水位的运行特征。由于提前降水位运行,该类型水库水体置换速度相比于其他水库更快^[22],其坝下河道更容易获得表层高温水。因此,其运行方式对坝下鱼类的洄游和产卵繁殖的影响相比于其他类型的水库具有一定的促进作用。

已有研究表明,前置挡墙/叠梁门分层取水措施有助于水库改善下泄低温水现象^[23]。相比之下,以往分层取水研究主要集中在大江大河的大型水库中,且重点关注措施的改善效果^[22]。本研究结合中小流域防洪水库提前低水位的运行特征,强调了提前降水位运行将进一步改善前置挡墙的水温。研究成果可为水库的生态调度提供技术支撑。

4.2 鱼类洄游的保护建议

鱼类洄游不仅受到坝体阻隔的影响,还受到水温

屏障的影响^[11]。以往研究重点关注的是坝体的阻隔影响,大量学者集中在鱼道(位置布置,下泄流量和机组工况等)如何满足鱼类上溯的问题^[21]。然而只考虑单一的鱼道,鱼类可能在库区失去洄游方向,从而导致鱼类洄游失败^[21]。本研究阐释了中小流域防洪水库运行对其库区洄游水温通道的影响,强调鱼道的运行应与库区水温通道的塑造相结合,尤其是保护区的修复和维护。

固军水库坝下设置了鱼道以满足保护鱼类的洄游要求。对于本研究中的保护鱼类,水库管理者应重点关注 7 月前后鱼道和水库的运行模式,采用如加密库区水温监测,快速预测库区水温分布等方法以充分了解库区现在及未来的水温分布,可增加鱼类成功洄游到上游关键栖息地的成功概率。

5 结论

1) 在不同情景设置下,固军水库均表现为季节性分层水库,不存在全年稳定的库底水温。水库水温结构的重塑为保护区内的裂腹鱼洄游创造了更多适宜洄游的水温通道。

2) 固军水库运行对下游水温存在明显影响。在情景 1,情景 2 和情景 3 下,鲤、鲫鱼分别延迟至 4 月末,5 月初以及 4 月下旬开始产卵。其影响程度从小到大:情景 3<情景 1<情景 2。

3) 防洪型水库相对于非防洪型水库来说,其低水位运行更有利于坝下鱼类的产卵繁殖活动。

4) 固军水库采用前置挡墙取水后,平、丰水年下产卵期间的“低温水”现象几乎消失,而枯水年的低温水影响程度极其有限。

参考文献:

- [1] HOSSAIN A A, COHEN S, PRASKIEVICZ S. Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration[J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125-138.
- [2] 赵翌初. 潘家口水库防洪问题研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [3] ZHAO Yichu. Study on flood control problem of Panjiakou reservoir[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [4] 毕京佳. 基于遥感和 GIS 的洪水淹没范围估测与模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
- [5] BI Jingjia. Estimation and simulation of flood inundation using remote sensing and GIS[D]. Beijing: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [6] 侯时雨, 田富强, 陆颖, 等. 澜沧江-湄公河流域水库联合调度防洪作用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 68-78.
- [7] HOU Shiyu, TIAN Fuqiang, LU Ying, et al. Potential role of coordinated operation of transboundary multi-reservoir system to reduce flood risk in the Lancang-Mekong River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 68-78.

- [5] 王俊, 郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 473-480.
WANG Jun, GUO Shenglian. On Three Gorges Reservoir control water level and operating conditions in flood season[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 473-480.
- [6] LEE J H, KIL J T, JEONG S. Evaluation of physical fish habitat quality enhancement designs in urban streams using a 2D hydrodynamic model[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1 251-1 259.
- [7] 吴宇雷, 梁瑞峰, 李嘉, 等. 紫坪铺水库水温变化规律[J]. 环境影响评价, 2016, 38(3): 24-28.
WU Yulei, LIANG Ruifeng, LI Jia, et al. Study on water temperature change of zipingpu reservoir[J]. Environmental Impact Assessment, 2016, 38(3): 24-28.
- [8] ZHAO C S, YANG S T, LIU J G, et al. Linking fish tolerance to water quality criteria for the assessment of environmental flows: A practical method for streamflow regulation and pollution control[J]. Water Research, 2018, 141: 96-108.
- [9] JIA Y T, SUI X Y, CHEN Y F, et al. Climate change and spatial distribution shaped the life-history traits of schizothoracine fishes on the Tibetan Plateau and its adjacent areas[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e01 041.
- [10] SCHINEGGER R, PALT M, SEGURADO P, et al. Untangling the effects of multiple human stressors and their impacts on fish assemblages in European running waters[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 1 079-1 088.
- [11] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
DING Ruihua. Ichthyology of Sichuan[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994.
- [12] 曹文宣, 常剑波, 乔晔, 等. 长江鱼类早期资源[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
CAO Wenxuan, CHANG Jianbo, QIAO Ye, et al., Early fish resources in the Yangtze River[M]. Beijing: China water resources and Hydropower Press, 2007.
- [13] 危起伟. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区科学考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WEI Qiwei. Scientific investigation report on the National Nature Reserve of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [14] 张鹏, 梁瑞峰, 李永, 等. 巴塘河段梯级电站联合调度对水温的影响[J]. 四川环境, 2018, 37(2): 50-58.
ZHANG Peng, LIANG Ruifeng, LI Yong, et al. Influence of joint operation of cascade hydropower stations on water temperature in Batang River reach[J]. Sichuan Environment, 2018, 37(2): 50-58.
- [15] 梁瑞峰, 邓云, 脱友才, 等. 流域水电梯级开发水温累积影响特征分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2): 221-227.
LIANG Ruifeng, DENG Yun, TUO Youcai, et al. Analysis on characteristics of water temperature's cumulative effects of river cascade hydropower stations[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 221-227.
- [16] 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(S2): 228-232.
PENG Qidong, LIAO Wen'gen, LI Chong, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges project since the impoundment[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 228-232.
- [17] ZHANG P, LI K F, WU Y L, et al. Analysis and restoration of an ecological flow regime during the Coreius guichenoti spawning period[J]. Ecological Engineering, 2018, 123: 74-85.
- [18] 刘长升, 冯应和, 黄玫. 州河水库群防洪库容分配研究[J]. 四川水利, 2016, 37(1): 31-35.
LIU Changsheng, FENG Yinghe, HUANG Mei. Study on flood control capacity distribution of Zhouhe reservoir group[J]. Sichuan Water Resources, 2016, 37(1): 31-35.
- [19] 邓云, 李嘉, 罗麟. 河道型深水库的温度分层模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2004, 19(5): 604-609.
DENG Yun, LI Jia, LUO Lin. Simulation on thermal stratification of the river-like deep reservoir[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(5): 604-609.
- [20] CHEN Y B, LIAO W G, PENG Q D, et al. A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese carp's spawning[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 130-133.
- [21] XU Z H, YIN X N, SUN T, et al. Labyrinths in large reservoirs: An invisible barrier to fish migration and the solution through reservoir operation[J]. Water Resources Research, 2017, 53(1): 817-831.
- [22] 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): 1 244-1 251.
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[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1 244-1 251.
- [23] REN L, SONG C, WU W, et al. Reservoir effects on the variations of the water temperature in the upper Yellow River, China, using principal component analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110 339.

(下转第 146 页)

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动, 每年评选优秀论文 10 篇, 每篇奖励 800 元, 并颁发获奖证书, 届时将在期刊网站首页展示, 同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部