

江家口水库修建对下游河道水温情势影响分析

杨世伟 李克锋 张鹏 梁瑞峰 王远铭¹

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

【摘要】: 研究水库修建对于下泄河道水温的影响, 掌控水库、下泄水温以及河道水温的变化规律, 对于工程的生态环境修复以及河道生物多样性具有重要意义。采用宽度平均的立面二维水温模型对江家口水库库区水温分布及下泄水温规律进行模拟, 采用纵向一维水温模型对不同水平年坝下河道的水温进行数值模拟, 重点研究坝下 23.6km 处鱼类国家级水产种质资源保护区内水温情势的变化。结果表明, 库区水温出现明显的分层状况, 导致下泄水温在河道中表现为显著的“滞冷”“滞热”现象, 春夏降幅最高可达 3.6℃, 秋冬升幅最高可达 4.1℃。通过纵向一维水温模型考虑有无支流汇入的影响下, 计算了沿程水温的变化, 发现由于流水河段支流汇入和太阳辐射等影响下, 沿程河道水温得到有效缓解, 保护区处的水温已然接近天然水温, 并未显著改变保护区原有鱼类所需的水温环境, 不会对保护区鱼类的正常生长繁殖产生不利影响。

【关键词】: 江家口水库 水温 数值模拟 鱼类保护区

【中图分类号】: X524 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)04-0946-10

河流水温类似于人体的“体温”, 对河流生态系统起着至关重要的作用, 影响着水生生物的生长繁殖以及水质的生化过程, 进行灌溉用水的水温也会影响农作物的产量^[1,2]。河道水温的变化主要受到人类活动和气候变化的影响, 一方面表现在大坝等水利工程的修建对天然河道水温的影响^[3], 另一方面表现在全球气候变暖对河道水温的影响^[4]。其中水利工程对河道水温的影响尤甚, 并且下泄水温可能会对河道生态产生影响。龙羊峡水库建成, 蓄水前后相比, 河道水温出现了不同程度的平坦化现象, 年内水温变幅不足蓄水前的 1/3, 并且出现明显的水温延迟现象^[5]; 三峡水库建成蓄水, 导致坝下河道宜昌站断面处的河段水温在升温期出现水温“滞冷”和降温期水温“滞温”的现象, 进而使得中华鲟的繁殖时间有所滞后, 不利于中华鲟的繁殖和发育^[6]。

由于长江流域部分地区集中水电开发, 大量水利工程的修建以及无节制捕捞的影响, 导致长江流域鱼类多样性降低^[7]。为缓解这种影响, 长江上游流域建有 130 个水生生物保护区, 69 个水产种质资源保护区, 其中, 国家级水产种质资源保护区甚少^[8]。水产种质资源保护区主要为特有、稀有鱼类提供天然的生长繁殖环境, 但是大量水利工程的修建, 下泄水温的叠加效应和滞后效应, 都可能会对保护区内的鱼类产生影响。

针对库区水温、下泄水温以及河道水温的分析研究, 研究学者通常采用经验公式法和数值模型法进行模拟分析。经验公式法主要依据实测资料统计分析水温变化与水温影响因子之间的关系, 反映水温变化的统计规律^[9]。李勋贵等^[10]采用经验公式法对黄河上游河道水温进行模拟分析, 取得较好的精度; 颜剑波等^[11]采用指数函数法和余弦函数法两种经验公式法计算了多个水库的水温。数值模型法主要分为一维、二维和三维模型, 从河流水温的影响机制方面采用计算机模拟进行分析计算^[12,13]。张士杰等^[14]采用 MIKE3 三维水温模型对二滩水库的水温结构进行模拟, 较好地模拟了库区的垂向环流和温跃层的形成; 戴凌全等^[15]采用立面二维水温模型模拟分析了三峡水库库区水温结构及下泄水温分布规律, 并且模拟结果与实测值吻合良好; 陈黎明等^[16]分别

¹作者简介: 杨世伟(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境水力学. E-mail: 834881867@qq.com

梁瑞峰 E-mail: liangruifeng@scu.edu.cn

基金项目: 云南省重点研发科技项目(2019BC002); 大型水库分层的水质相应及影响缓解技术研究(2016YFC0401701)

采用三维和一维水动力、水温模型对梯级电站库区水温以及梯级电站间河道水温进行模拟分析。赵高磊等^[17]采用 Ce-qual-W2 模型模拟了梯级水库水温,发现梯级电站的联合运行产生的水温累积影响存在极限。甘衍军等^[18]采用 EFDC 模型较好地模拟了二滩水库水温分层结构。李林等^[19]采用三维水温模型模拟预测受支流影响的水库水温结构。为保证模拟精度,本文拟采用数学模型法对水温进行定量研究。

位于渠江流域的通江,其干流建有国家级水产种质自然保护区,具体位于渐潭河汇口至通江汇口河段,主要为长江上游特有鱼类提供良好的原始生境以供其发育繁殖。其上游支流渐潭河中游河段拟建江家口水库,是四川省防洪控制性水库,主要以防洪为主,兼顾发电。水库建成后,将会带来较大的经济效益,但同时也会改变河道天然的生态系统,有可能会改变保护区内鱼类原始生境,影响其生长发育繁殖。目前长江上游特有鱼类中华倒刺鲃、华鲮等,主要分布在长江上游的干支流流域的水体中,由于长期以来的无节制捕捞以及水环境恶化导致数量减少,目前位于渠江流域江家口水库坝址下游 28.5km 处的通河特有鱼类国家级水产种质资源保护区内生活有此类重点保护鱼类,其生长繁殖对水温十分敏感。本文首先采用宽度平均立面二维水温模型对江家口水库库区水温及下泄水温进行模拟分析,随后采用纵向一维水温模型对坝下河道水温进行模拟,重点分析坝下 28.5km 保护区断面处水温情况,对比不同水平年条件下水温较天然水温的变化情况,分析水库修建对河道内种质资源保护区的鱼类生境影响,为建立保护区鱼类保障措施提供依据,对于保护河流生态多样性具有重要意义。

1 研究区概况

1.1 流域概况

渐潭河为通江左岸支流,属于渠江流域。通江为巴河东支,巴河是渠江的主要支流,平昌县城至渠县三汇镇为巴河干流,平昌县城以上分为通江、南江两支。渐潭河河道全长 129km,总落差 1007m,平均比降 7.8%^[20]。江家口水库位于通江左岸支流渐潭河中游河段,开发任务以防洪为主,兼顾发电,其坝下 23.6km 处为鱼类国家级水产种质资源保护区,江家口水库总体布置图详见图 1。

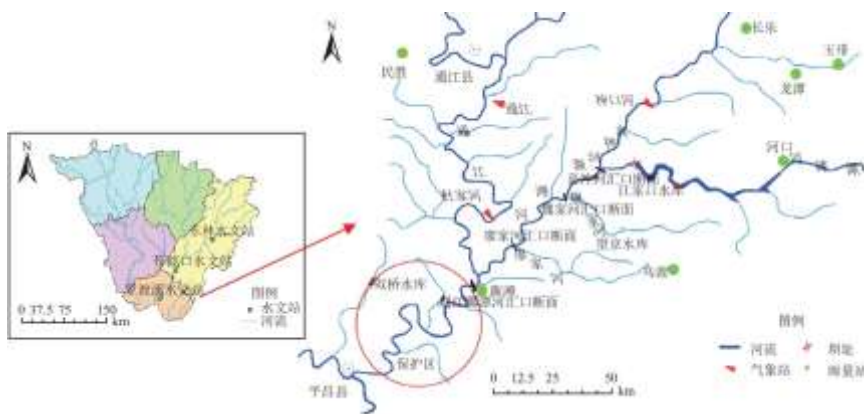


图 1 研究区域概况图

1.2 河段气候特征

巴河流域属亚热带湿润季风气候,具有冬暖、春旱、夏热、秋雨、日照少、雨量丰沛、无霜期长等特点。在地区分布上,降水量受高程的影响,具有随高程增加而降水量增大的特点。多年平均气温 16.6℃,极端最高气温 40.4℃,极端最低气温-6.2℃,多年平均降水量 1188.6mm,多年平均蒸发量 1157.3mm,多年平均风速 1.0~1.4m/s,历史最大风速 7.0~14.0m/s,多年平均最大风速 9.7m/s,多年平均相对湿度 76%^[21]。

1.3 水温现状

河道水温和气温存在很强的正相关关系，气温越高，水温越高^[22]。我国地表水水温数据的监测资料较少，本文采用经验公式法，根据实测资料建立水温与气温的回归方程求水温^[23]。

由于斯滩河上没有水温监测资料，采用邻近流域渠江主源州河上的东林水文站资料拟合江家口的入库和坝址水温。东林水文站多年平均流量 40m³/s, 距江家口坝址直线距离仅约 61.9km, 根据东林水文站 1957~1987 年水温实测月均值与气温月均值建立回归方程(图 2), 沿用该回归方程，以江家口入库断面处逐月实测气温数据计算该断面处的逐月天然水温(表 1)。江家口库区河段增温率采用渠江干流苟渡口与罗渡溪水文站之间的增温率并与流量比加权，坝址水温(表 1)由入库水温下推得到。并采用气温-水温相关法计算斯滩河干流天然河道水温的沿程变化。

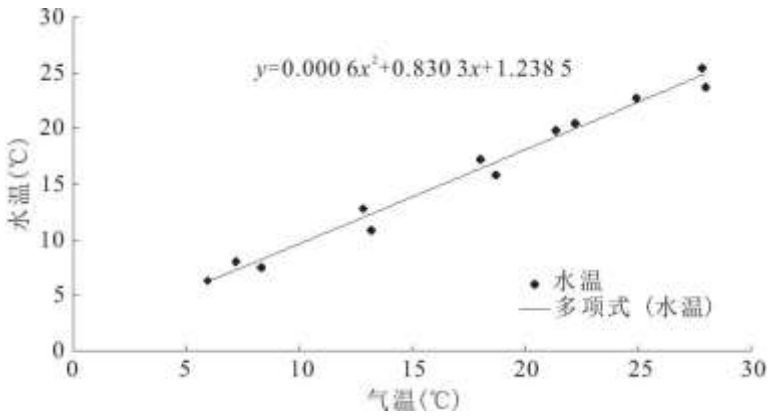


图 2 东林水文站水温-气温相关关系

表 1 江家口入库与坝址水温

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
入库水温	6.2	7.9	11.5	15.8	19.5	22.1	24.2	24.1	20.1	15.9	11.5	7.3
坝址水温	7.1	8.5	11.9	16.2	20.2	22.4	24.5	25.0	20.2	16.5	12.3	7.8
增温率(°C/100km)	3.60	2.49	1.86	1.61	3.00	1.32	1.25	3.47	0.08	2.62	3.17	2.01

2 水温模型

2.1 宽度平均的立面二维水温模型

2.1.1 控制方程

本文采用宽度平均的立面二维水温模型对库区水温进行模拟分析，该模型主要由水动力方程和水温方程组成，紊流模式采用标准的 $\kappa \sim \epsilon$ 模型，根据 Boussinesq 假定，在密度变化不大的浮力流问题中，只在重力项中考虑密度的变化，而控制方程的其它项中不考虑浮力作用^[24]。

模型的水动力方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(Bu) + \frac{\partial}{\partial z}(Bw) &= 0 \\ \frac{\partial Bu}{\partial t} + u \frac{\partial Bu}{\partial x} + w \frac{\partial Bu}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(B v_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B v_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(B v_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B v_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Bw}{\partial t} + u \frac{\partial Bw}{\partial x} + w \frac{\partial Bw}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(B v_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(B v_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial Bp}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(B v_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(v_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \beta B \Delta T g & \end{aligned}$$

模型的水温方程为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (BT) + u \frac{\partial}{\partial x} (BT) + w \frac{\partial}{\partial z} (BT) &= \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{B v_e \partial T}{\sigma_T \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{B v_e \partial T}{\sigma_T \partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial B \varphi_z}{\partial z} & \end{aligned} \quad (2)$$

式中：T 为水温，℃；u、w 分别为纵向和垂向的速度，m/s；B 为河宽，m； v_e 为综合扩散系数， m^2/s ，是分子粘性系数 ν 与紊动涡粘系数 ν_t 之和； σ_T 为无温度梯度环境下的紊动普朗特数，通常取 0.85； C_p 为水的比热容， $J/kg \cdot ^\circ C$ ； φ_z 为穿过 z 平面的水面热交换通量， W/m^2 ，由太阳短波辐射，大气长波辐射，潜热和显热 4 个水热交换过程组成，其中太阳短波辐射通过通江气象站的日照数据计算作为边界条件输入。

2.1.2 边界条件

进口边界水温采用库尾实测水温，速度假定为均匀流速， k 、 ε 分别由入流速度近似计算：

$$k = 0.00375 u^2, \quad \varepsilon = k^{1.5} / (0.4 H_0) \quad (3)$$

其中 $H_0[m]$ 为进口断面水深。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0, w = 0。 \quad (4)$$

假定出口断面为充分发展的湍流，有

水面表层单元计入水气热交换。库底和坝体表面采用无滑移边界条件，且为绝热边界。

模型参数得到了雅砻江二滩水库水温实测数据的验证^[26]。

2.1.3 求解方法

采用有限体积法和混合格式对微分方程进行离散。采用 SIMPLE 算法求解差分方程，并采用交错网格避免出现棋盘式不均匀压力场^[26]。

具体求解时，水动力方程与温度方程相耦合，计算中首先根据入、出库流量差计算该时刻运行水位，依次求解 u、w 动量方程和 k、ε 方程，再求解温度方程，然后用新的温度值修正 w 和 k 方程的源项，重新计算水动力学方程，直到各方程的误差余量小于容许值。对于水库年过程的模拟，模型可选择一年中的任意一个时刻作为起始计算时间，计算 365d 之后，与一年前的当前时刻水温、流场进行对比，如果水温、流场的误差值大于设定误差，继续进行迭代计算；如果小于设定误差，则认为迭代收敛，取最近一年的下泄水温、温度场与流场作为预测结果。

2.2 纵向一维水温模型

纵向一维水温模型组成部分主要为一维明渠恒定非均匀渐变流方程和一维温度对流方程^[27]：

$$\begin{aligned} -\frac{dz}{ds} &= (\alpha +) \frac{d}{dS} \left(\frac{Q^2}{2gA^2} \right) + \frac{Q^2}{K^2} \\ \frac{\partial(QT)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(A D_L \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{B \varphi_n}{\rho C_p} \end{aligned} \quad (5)$$

式中：z 为水位，m；Q 为流量，m³/s；A 为过水断面面积，m²；K 为断面平均流量系数，m³/s， $K = \frac{1}{n} A R^{2/3}$ ；n 为糙率；R 为水力半径，m；α 为动能修正系数；ξ 为局部水头损失系数；T 为水温，℃；ρ 为水的密度，kg/m³；φ_n 为水气界面热通量，W/m²；D_L 为纵向弥散系数，m²/s，D_L=0.011u²B²/Hu*；u 为断面平均流速，m/s；u* 为摩阻流速，m/s， $u^* = \sqrt{gRI}$ ；I 为水力坡降。

河段内有支流汇入的情况，区间支流水温会对河道水温产生影响，根据热量平衡原理可知：

$$T_b = (QT + q T_i) / (Q + q) \quad (6)$$

式中：Q(m³/s)、T(℃)分别为汇入干流前支流流量和水温；q(m³/s)、T_i(℃)分别为支流流量和水温；T_b(℃)为汇入支流干流水温。

以江家口水库下泄水温作为研究河段的上游边界条件，并计入支流入汇影响可以得到江家口坝下的沿程水温。

3 计算结果分析

3.1 库区水温分析

由于江家口水库的回水长度为 23.6km, 因此, 本研究中的计算区域为水库坝址至上游 23.6km(库尾)。, 计算网格单元在主流方向上尺寸为 5~400m, 在水深方向上为 0.5~1m, 在正常蓄水位 407m 下, 江家口库区离散为 93×52 个矩形网格。进口边界为入库流量和水温, 均为库尾实测流量和水温, 出口边界为坝前水位, 即采用正常蓄水位, 气象条件为多年月均值, 模拟江家口水库单独运行时库区的水温分布及下泄水温过程。

图 3~图 5 分别为各水平年江家口水库运行时表层水温、库底水温、月均下泄水温、坝址天然水温以及库区气温的年内变化过程, 各水平年表层水温均在 2 月最低, 为 8.1℃, 8 月最高, 为 26.2℃, 年内变幅较大, 为 18.1℃, 库底水温年内变化范围为 7.7℃~15.5℃, 变幅较表层水温小, 部分月份表层、底层水温相差较大。以 4 月为例(图 6), 由于受气象条件及来流水温的影响, 表层水体形成明显的温跃层。

江家口水库运行对下游水温存在明显影响, 不同水平年下泄水温范围为 8℃~24.8℃, 较坝址天然水温范围 7.1℃~25℃相比, 下泄水温的年较差减小, 较天然水温相比, 各月均水温变幅在 0.5℃~4.1℃之间。下泄水温在 2~8 月比建坝前坝址水温有所降低, 平均降低了 1.5℃, 4 月降低最多, 可达 3.6℃。9 月至翌年 1 月, 下泄水温平均上升 2.4℃, 12 月升温幅度最大, 可达 4.0℃。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, 建坝后滞后至 2 月。春夏季下泄低温水, 秋冬季下泄高温水现象显著。这是因为春夏季升温期, 气温和来流水温较高, 主要影响库区表层水体, 在取水口处水温受气温影响较小, 低于表层水温, 因此下泄水温低于天然水温; 而在秋冬季降温期, 来流水温低于库区水体水温, 因此下泄水温较天然水温偏高^[28]。

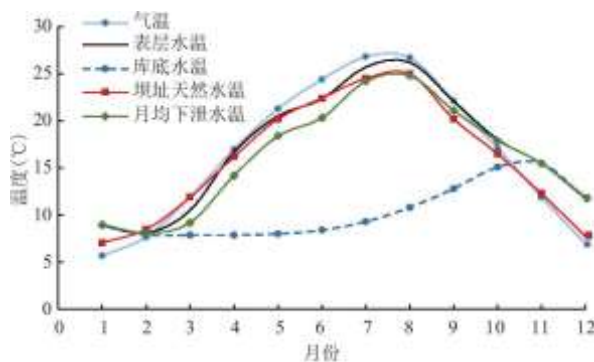


图 3 丰水年江家口水库运行下泄水温过程

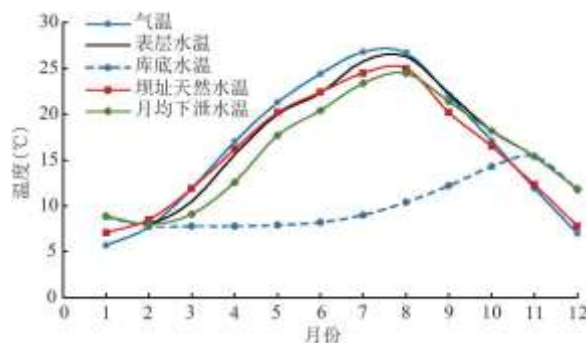


图 4 平水年江家口水库运行下泄水温过程

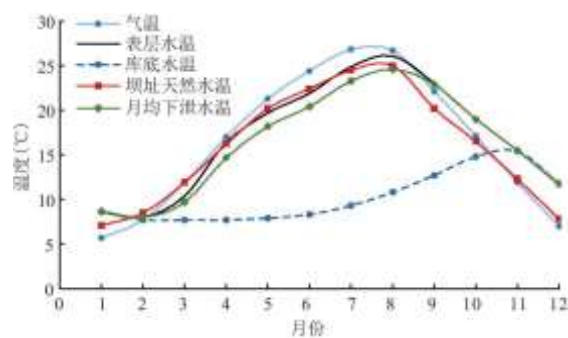


图 5 枯水年江家口水库运行下泄水温过程

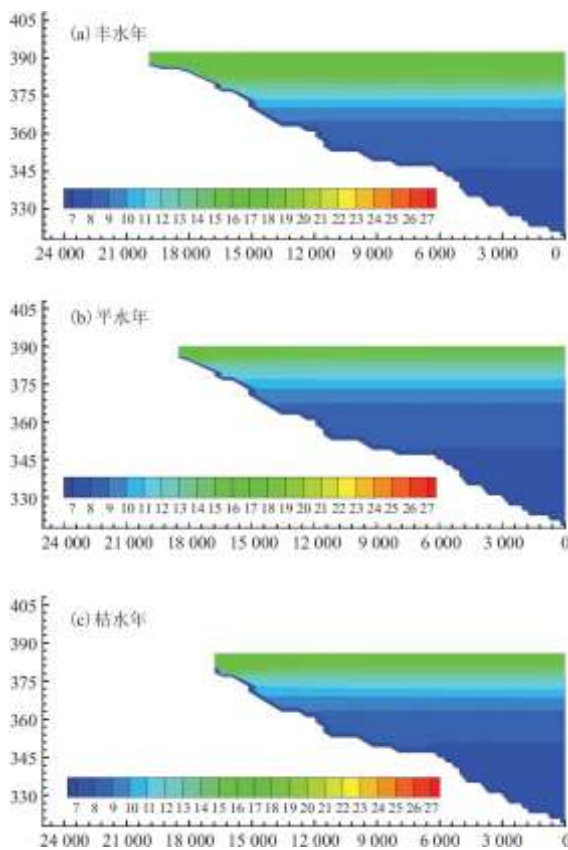


图 6 各水平年 4 月份库区水温分布

3.2 坝下河段水温情势影响分析

3.2.1 河段水温时间分布特征

为研究江家口水库的修建对下游河道水温的影响，尤其是对下游通河特有鱼类国家级水产种质资源保护区内水温的影响，采用纵向一维水温模型对平水年坝下河道水温进行模拟，并与河道天然水温进行对比分析。由于澌潭河干流沿程有喜神河、魏

家河、廖家河等支流汇入，且保护区位于通江渐潭河汇口下游，因此图 7 分别对比了坝下 6km 处喜神河汇口断面、12km 处魏家河汇口断面、23km 处廖家河汇口断面以及通江渐潭河汇口下游断面等 4 个断面在不同水平年下的多年月平均水温变化过程。不同水平年各断面蓄水后均表现为升温期(2~8 月)水温有所降低，降温期(8~12 月)水温有所升高，出现“滞冷”“滞热”现象，不同水平年在升温期平均最大降幅为 1.8℃,降温期平均最大升幅为 3.1℃,而且靠近坝址处断面这种现象最为显著，改变了河道的天然水温环境。

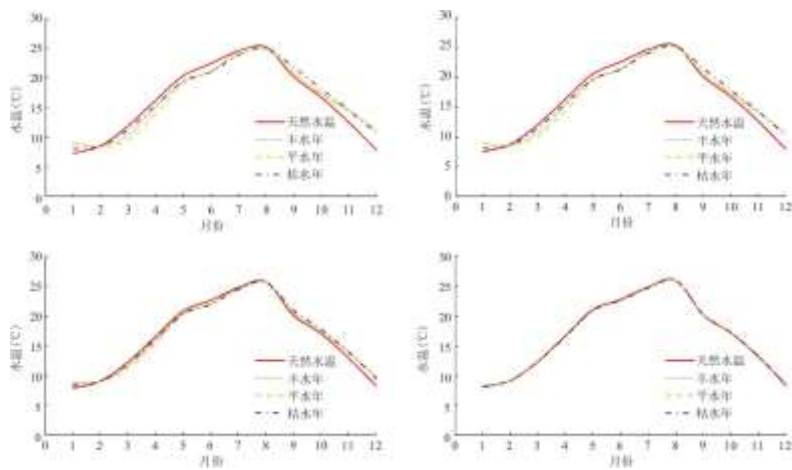


图 7 各断面水温年内变化过程

由于坝下河道渐潭河干流的鱼类产卵期一般为 4~6 月，若水温低于 20℃左右，其受精卵孵化效果降低^[29]。表 2 细化对比分析了不同水平年各断面 4~6 月的水温以及达到 20℃所对应的月份，可知由于水库的修建蓄水，产卵期各断面各月平均水温均较同月天然水温低，变幅在 0.1℃~2.4℃之间。靠近坝址附近的喜神河汇口断面，水温降幅最大可达 2.4℃,各水平年产卵期水温平均降低 1.3℃,且水温达到 20℃以上的月份为 6 月，明显滞后于天然情况 1 个月左右，导致坝下河道内鱼类产卵繁殖时间有所滞后。但随着沿程不断有支流的汇入，通江渐潭河汇口下游断面的达到 20℃水温出现月份为 5 月，与天然情况的月份相差不大，可见这种产卵繁殖推迟现象有所缓解，且水温降幅仅有 0.1℃,保护区范围内 4~6 月的各月水温已与天然河道水温无异，故不会改变保护区鱼类的原始生境，不会对保护区内鱼类的正常生长繁殖产生负面影响。

表 2 坝下各断面 4~6 月河道水温对比

断面	水平年	4 月	5 月	6 月
喜神河汇口断面	蓄水前	16.3	20.4	22.5
	蓄水后丰水年	15.1	19.4	21.0
	蓄水后平水年	13.9	19.0	21.3
	蓄水后枯水年	15.4	19.4	21.0
魏家河汇口断面	蓄水前	16.4	20.6	22.6
	蓄水后丰水年	15.4	19.8	21.3
	蓄水后平水年	14.4	19.5	21.6

	蓄水后枯水年	15.7	19.7	21.4
廖家河汇口断面	蓄水前	16.6	20.9	22.7
	蓄水后丰水年	16.0	20.5	22.0
	蓄水后平水年	15.4	20.3	22.1
	蓄水后枯水年	16.1	20.4	22.0
通江渐潭河汇口下游断面	蓄水前	16.7	21.1	22.8
	蓄水后丰水年	16.6	21.0	22.7
	蓄水后平水年	16.6	21.0	22.7
	蓄水后枯水年	16.6	21.0	22.7

3.2.2 河段水温空间分布特征

河段蓄水后，“滞冷”“滞热”现象显著，春夏季的下泄低温水对河道生态影响尤甚。而且产卵期内各断面水温变化最明显的月份为4月，因此针对该月份进行水库修建蓄水后坝下河道水温空间分布特征进行对比，深入分析此类现象沿程的缓解情况。图8反映了4月蓄水前后水温的沿程变化规律，水库修建蓄水后的各水平年的水温在4月份均低于天然水温，喜神河汇口、魏家河汇口、廖家河汇口以及通江渐潭河汇口下游断面升温期水温较天然水温分别降低了2.4℃、2.0℃、1.1℃、0.1℃,降温幅度沿程明显减小。可知保护区范围内的水温已然接近天然水温，水库下泄低温水对下游河道水温的影响沿程得到有效的缓解，通河特有鱼类国家级水产种质资源保护区内水温与天然水温无明显差异，保护区内鱼类原有水温环境未发生改变，故该保护区内的鱼类受精卵的孵化、幼鱼的生长发育过程等不会受到不利影响。

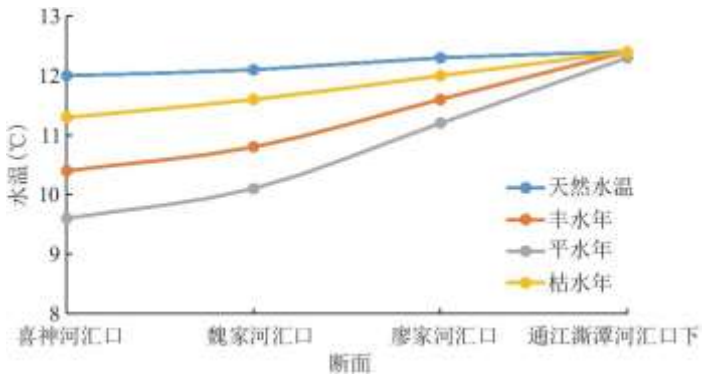


图8 坝下河道4月沿程水温变化

3.3 支流影响分析

由于渐滩河干流有多条支流汇入，以平水年为例分析支流汇入对建库后干流水温的影响，坝址年均下泄流量与支流年均流量的占比情况如图9所示。考虑所有支流汇入后，坝址下泄流量占渐滩河河口处干流总流量的41%，喜神河占干流总流量的22%，魏家河、朱家河和廖家河分别占干流总流量的11%、12%和14%。



图9 支流、干流流量占比

不考虑支流汇入的情况，计算分析建库后渐滩河河口处的水温，并与考虑支流影响以及天然情况下的水温对比分析(图10)，可见在河口处水温的年内变化表现为，建库后水温在升温期(2~8月)较天然水温相比有所下降，平均降低0.5℃，降温期(8至次年2月)水温有所升高，平均升高0.6℃；若不考虑支流汇入影响，升温期水温平均降低1.4℃，降温期水温平均升高1.9℃，“滞冷”“滞热”现象更为严重。考虑到支流与干流流量的占比，各支流流量共占河口处干流流量的59%，可见支流汇入对于该现象有所缓解^[30]。河口下游即为保护区范围，由于渐滩河汇入通江，其流量仅占通江干流流量的10%，汇入后的水温主要受通江干流水温的影响。建库后在保护区范围内的水温已与天然水温无异(图11)，因此江家口水库修建并未对鱼类保护区的原始生境产生较大的影响。

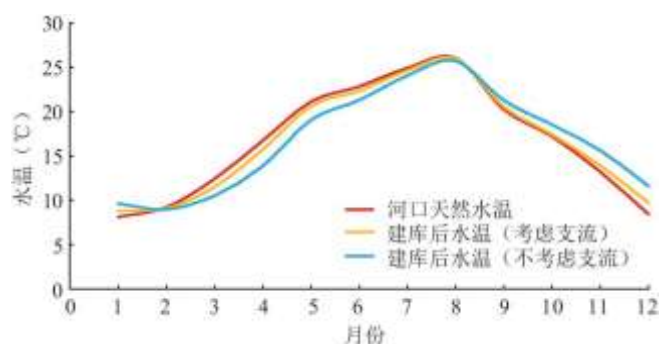


图10 河口水温年内变化过程

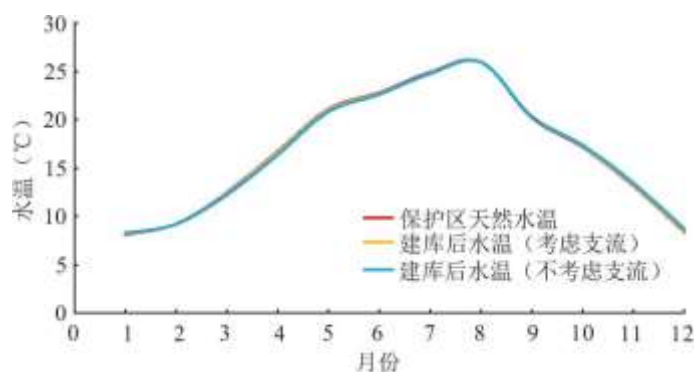


图11 保护区水温年内变化过程

4 结论

通过采用宽度平均的立面二维水温模型对库区水温分布以下泄水温进行模拟,采用纵向一维水温模型对江家口坝下河道进行沿程水温模拟,并对河段水温进行时空分布特征分析,得到以下结论:

(1)库区水温出现明显分层状况,表底温差最大可达 16.8℃,下泄水温较天然水温相差较大,春夏升温期水温出现“滞冷”现象,最大降幅可达 3.6℃,秋冬降温期水温出现“滞热”现象,最大升幅可达 4.1℃,澧潭河干流鱼类的最适产卵时间有所滞后,这种影响在靠近坝址附近尤为显著。

(2)沿程支流汇入,河道水温“滞冷”“滞热”等现象得到了有效缓解;各断面水温变幅降温期由 2.4℃沿程降至 0.1℃,升温期由 3.4℃沿程降至 0.1℃,在保护区断面处的水温已然接近天然水温,因此江家口水库修建不会对保护区内鱼类的正常生长繁殖产生不利影响。

(3)预测结果表明,虽然保护区内的河流生态状况接近天然河道状况,但是靠近坝址附近的河段生态系统仍受下泄水温的影响,改变了河道内的鱼类原始生境,因有必要采取分层取水等有效措施减小下泄水温与天然水温的差异,保护河流的生态多样性。

参考文献:

- [1]雷欢,陈锋,黄道明.水温对鱼类的生态效应及水库温变对鱼类的影响[J].环境影响评价,2017,39(4):36-39,44.
- [2]刘向楠.水库水温分层时空特征及对农业灌溉影响[J].水科学与工程技术,2019(2):53-56.
- [3]纪道斌,龙良红,徐慧,等.梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J].水利水电科技进展,2017,37(3):7-14.
- [4]熊明,邹珊,姜彤,等.长江源区河流水温对气候变化的响应[J].人民长江,2018,49(14):48-54.
- [5]宋策,周孝德,辛向文.龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J].水科学进展,2011,22(3):421-428.
- [6]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.
- [7]李陈.长江上游梯级水电开发对鱼类生物多样性影响的初探[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [8]林鹏程,王春伶,刘飞,等.水电开发背景下长江上游流域鱼类保护现状与规划[J].水生生物学报,2019,43(S1):130-143.
- [9]许丹,陆宝宏,程昕野,等.应用 Logistic 曲线预测水库垂向水温[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):235-240.
- [10]李勋贵,王晓磊,苏贤保.黄河上游河道一维河道水温模型和经验公式法对比[J].水资源保护,2019,35(4):24-29,48.
- [11]颜剑波,楚凯锋,张德见,等.两种常用经验公式法计算水库水温效果比较研究[J].四川环境,2015,34(6):117-122.
- [12]保文秀.河流水温预测方法研究进展[C].中国环境科学学会.2014 中国环境科学学会学术年会(第四章).中国环境科学学会:中国环境科学学会,2014:99-103.

-
- [13]毕晓静,陆颖,袁旭,等.水库水温模型研究综述[J].环境科学与技术,2018,41(6):120-126.
- [14]张士杰,彭文启.二滩水库水温结构及其影响因素研究[J].水利学报,2009,40(10):1254-1258.
- [15]戴凌全,戴会超,毛劲乔,等.河道型水库立面二维水温结构数值模拟[J].排灌机械工程学报,2015,33(10):859-865.
- [16]李昶来,陈黎明,王向明.梯级水电站对库区和河道水温的影响预测[J].水利水电科技进展,2013,33(3):23-28.
- [17]赵高磊,林玲,蒲迅赤,等.梯级水库水温影响的极限[J].水科学进展,2020,31(1):120-128.
- [18]甘衍军,李兰,武见,等.基于 EFDC 的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(4):476-485.
- [19]李林,周孝德,宋策.基于三维水温模型预测有支流影响下的水库水温[J].水土保持通报,2012,32(2):159-161.
- [20]李萍,蔡炳云.巴河流域设计洪水地区组成研究[J].四川水利,2016,37(1):53-57.
- [21]李朝霞,范毅,尼玛次仁,等.巴河水电梯级开发对生态环境的影响[J].人民黄河,2011,33(5):63-65,68.
- [22]董林垚,陈建耀,付丛生,等.珠海小规模溪流水温与气温关系研究[J].水文,2011,31(1):81-87.
- [23]周洋洋,朱伟强.无资料地区水温估算方法研究[J].电力勘测设计,2016(S2):258-261.
- [24]梁瑞峰,李嘉,李克峰,等.立面二维水库水温模型的并行研究[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(1):30-33.
- [25]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.
- [26]王冠,韩龙喜,常文婷.基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布[J].水资源保护,2009,25(2):59-63.
- [27]郝红升,李克峰,庄春义.关于河道一维非恒定流水温预测模型的研究[J].四川大学学报(自然科学版),2005,42(6):1189-1193.
- [28]谢奇珂,刘昭伟,陈永灿,等.溪洛渡水库水温日变化的测量与分析[J].水科学进展,2018,29(4):523-536.
- [29]任泷.中华倒刺鲃保护生物学研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [30]马中良.基于 Mike11 的双支流河道中支流流量变化对下游水温的影响[J].水电能源科学,2014,32(2):27-30.