

# 澜沧江—怒江中上游河段水温时空特性及差异分析

裘思谦<sup>1</sup> 许尤<sup>2</sup> 徐雅倩<sup>2</sup> 赵星星<sup>1</sup> 龙良红<sup>1,3</sup> 纪道斌<sup>1,3</sup> 杨正健<sup>1,3</sup>

- (1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002;
2. 湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430068;
3. 三峡大学三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 湖北宜昌 443002)

**【摘要】**:为探究自然河段与梯级水库段水温时空变化的差异,于2016~2020年选取了32个监测断面进行原位水温监测,并采用水温沿程变化率、库水替换次数、水体滞留时间、水温连续性评价指标,对比分析了干流无水电站建设的怒江和有梯级水库建设的澜沧江的水温时空分布特征。结果表明:怒江与澜沧江建库前的水温在纵向上呈现出较好的连续性特征,与气温沿程变化基本一致;水温非连续性强度均值仅为0.04,表明自然因素对水温空间连续性的影响有限。受气象条件的影响,怒江不同时期水温沿程变化率略有差异,1月最大为 $1.32^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{km}^{-1}$ ,10月最小为 $1.02^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{km}^{-1}$ 。怒江平均水温沿程变化率( $1.17\pm 0.12^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{km}^{-1}$ )高于自然状态下的澜沧江( $0.58\pm 0.11^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{km}^{-1}$ ),两河流的流量的差异可能是主要影响因素。流域梯级水电开发显著改变了澜沧江中上游河段的水温沿程自然变化特征,受水库下泄水温滞后效应的影响,水温沿程出现明显的落差且波动剧烈。黄登水库是对水温空间连续性破坏明显的水库,水温非连续性强度显著高于其他水库,而乌弄龙、里底、大华桥水温非连续性强度处于较低的水平,接近自然河流状态。梯级开发对水温空间连续性的影响具有复杂性,受梯级水库联合运行、单库规模、调节性能等因素的综合作用,不同类型水库的影响存在差异。

**【关键词】**:水温 时空变化 连续性 澜沧江 怒江

**【中图分类号】**:P332.6 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2022)010-2186-11

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202210008

水温作为水生态系统中重要因子,与水体物理化学特性以及水生生物的生存密切相关<sup>[1,2]</sup>。自然河流水温沿水流方向呈现出连续性变化,以此维系水生态系统及水生生物种群分布的连续性<sup>[3]</sup>。水库的建设阻断了河道水温原有的连续性,而梯级水库建设更是加剧了水温破坏在空间上的累积。认识梯级水库对河道

<sup>1</sup>收稿日期:2021-10-20;修回日期:2021-12-31

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U2040220);国家自然科学基金项目(52079069,51779128,51879099)

作者简介:裘思谦(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水文学。E-mail:15848154389@163.com

\*通讯作者 E-mail:893310859@qq.com

水温的影响是减缓水库对水生态环境影响的基础。

国内外学者针对水库建设对库区及下游河道水温的影响已开展了大量研究。姚维科等<sup>[4]</sup>为探究水电工程干扰下水温时空特征，在澜沧江梯级水库干扰典型段开展了野外水温现场监测，结合建库前水温实测数据，指出水库运行使水温升降过程出现明显的滞后性。刘兰芬等<sup>[5]</sup>采用野外现场监测与数学模型相结合的方法，定量分析了澜沧江下游梯级水库下泄水温的累积效应，认为减缓下泄低温水的关键在于控制流域梯级开发的程度。Olden等<sup>[6]</sup>对比分析 FlamingGorge 水库建设前后水温数据，发现水库的运行使水温升降过程滞后，且“均一化效应”显著。张士杰等<sup>[7]</sup>采用三维模型 Mike3 定量分析龙头水库对水温累积效应的影响，研究表明龙头水库的建设使下泄水温与天然水温的温差进一步扩大。Hanieh等<sup>[8]</sup>利用5种基于水温—气温关系的热力指标，分析了 Loire 河的水温变化，研究表明，与自然河流相比，梯级水库的累积效应使夏季水温降低了 2 的，且水温峰值推迟了 23d。然而已有研究多侧重于将建库后的水温数据与建库前的历史水温数据对比，以此反映建库前后水温差异，虽具有一定的指导意义，但未考虑水温在时间尺度上的变化。当梯级水库建设时间跨度较大时，气候变化、人类活动等因素，可能引起水温原有时空分布特征的改变<sup>[9]</sup>，故直接将建库前后水温数据对比分析水库建设对水温的影响存在一定的局限性。

本研究选取中国云南境内 2 条大型河流——澜沧江与怒江为研究对象，其中澜沧江为有梯级水库建设的河流，而怒江是中国境内唯一没有在干流修建水电站的自然河流。以水温沿程变化特征为主要关注点，分析了河道水温的沿程变化规律。以此为基础，在考虑河流连续性的情况下，通过对比不同类型水库水温沿程变化特征与自然河道水温变化规律的差异，得到梯级水库的水温影响特征，以期为河流健康评价及优化梯级水库生态调度方案提供参考。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究区域与样点设置

澜沧江和怒江是亚洲重要的国际河流，位于我国西南地区，发源于青藏高原，由云南省流出国境。澜沧江和怒江以梅里雪山山脉—碧罗雪山山脉—崇山山脉作为分水岭，在云南境内自北向南并行奔流，两江最短直线距离不到 19km，形成江水并流而不交汇的奇特地理景观<sup>[10]</sup>。澜沧江流域和怒江流域以干热河谷地形为主，以纵向岭谷横断山脉中段两江并流区(28° N~30° N)峡谷段最为典型<sup>[11]</sup>。两江都属于典型的亚热带湿润气候，受印度洋西南季风影响显著。由于特殊的地理环境，降水空间分布不均，从 400~3000mm 不等，且呈现从南向北减少的趋势<sup>[12]</sup>。

截止 2020 年，澜沧江中上游已建成乌弄龙、里底、黄登、大华桥 4 座梯级水库。黄登水库为具有季节能力的高坝大库，其余为日调节型水库，各梯级水电站特性见表 1。怒江是中国境内唯一没有在干流建设大型水库的河流<sup>[13]</sup>，具有很好的代表性和对照性。本文选取中国云南境内澜

表 1 澜沧江中上游梯级水电站特性

水电站名称	坝高 (m)	正常蓄水位 (m)	库容 (亿 m <sup>3</sup> )	调节性能	装机容量 (MW)	建成时间 (年份)
乌弄龙	137.5	1906	2.850	日	990	2019
里底	76.6	1820	0.745	日	420	2019
黄登	203.0	1622	15.000	季	1900	2019
大华桥	106.0	1479	2.930	日	920	2019

注：建成时间（年份）以全机组发电时间为节点。

沧江与怒江的并流区为研究区域。研究区域内并没有较大的支流汇入，因此，本研究未考虑支流来流对两江干流水温的影响。

澜沧江和怒江监测点位如图 1 所示。于 2018 年 1、10 月、2019 年 4 月和 2020 年 8 月，沿怒江中上游丙中洛断面至大兴地断面长约 235km 的河段开展了 6 个监测断面的水温监测。于 2016 年 10 月、2017 年 6 月、2018 年 1 月和 2020 年 8 月对澜沧江中上游长约 286km 的河段开展了 4 次水温监测。水库蓄水前，沿程布置了 7 个监测点位；2019 年澜沧江中上游 4 座梯级水库建成投产后，根据回水区长度的不同，每个水库增加了 3~5 个样点，涵盖了库区及坝下区域，共布置了 19 个监测点位，如表 2 所示。

表 2 监测点特征统计表

序号	名称	简称	距离 (km)	分类
1	云岭*	L1*	0	
2	乌弄龙*	L2	23.00	
3	乌弄龙*	L3	31.00	
4	乌弄龙* (库/)	L4	47.30	
5	乌弄龙坝下	L5	53.30	
6	里底*	L6	56.00	
7	里底* (库首)	L7	65.00	
8	巴迪*	L8*	69.00	澜沧江
9	里底坝下	L9	71.00	
10	叶枝乡	L10	86.00	
11	康普*	L11*	104.00	
12	三家桥	L12	108.00	
13	白济讯	L13	130.00	
14	中路*	L14*	150.00	
15	托巴	L15	154.00	
16	黄登*	L16	167.00	
17	维登*	L17*	191.00	
18	黄登*	L18	194.00	
19	中排*	L19*	222.00	
20	黄登*	L20	225.00	
21	黄登* (库/)	L21	243.00	
22	黄登坝下	L22	248.00	澜沧江
23	黄登*	L23*	255.00	
24	大华桥*	L24	257.00	
25	大华桥* (库首)	L25	280.00	
26	大华桥坝下	L26	286.00	
27	丙中洛	N1	0.00	
28	赤科	N2	27.70	
29	马吉乡	N3	70.10	怒江

30	鹿马登	N4	114.60
31	保登	N5	175.20
32	大兴地	N6	235.20

注:\*为澜沧江建库前监测点.

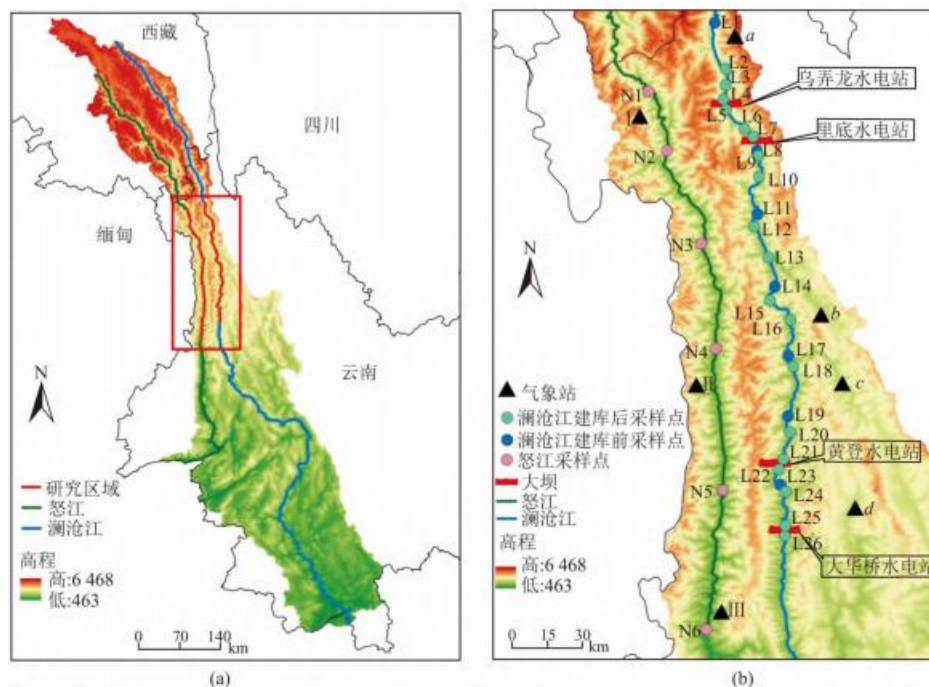


图 1 澜沧江、怒江监测点分布

## 1.2 监测指标与监测方法

2016 年 10 月至 2020 年 8 月对澜沧江和怒江沿程表层水温进行长期监测。在各监测点位水面以下 0.5m 处布置 RBRsol3T 水温传感器(RBR, 加拿大, 精度 $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$ ), 监测频率为 10min/次, 每次监测持续 1 个月, 对水温数据取月平均值进行分析。同时, 于 2020 年 8 月对澜沧江中上游已建成投产的 4 座梯级水库进行垂向水温监测。利用 EXO 多参数水质分析仪(YSI, 美国, 精度 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ )现场测定, 监测频率为 1Hz, 垂向每隔 0.2m 记录一次数据, 仪器沿水深方向下放至水底并保证每米内的水体参数都被监测。

气象数据采用国家气象信息中心的中国地面气候资料日值数据集。研究区域内, 怒江沿程分布有贡山 I (56533)、福贡 II (56641)、六库 III (56643) 3 个气象站, 澜沧江沿程分布有德钦 a(56444)、维西 b(56548)、兰坪 c(56645)、云龙 d(56742) 4 个气象站点, 对各气象站点逐日气温数据取月平均值进行分析。气象站点具体位置见图 1。

## 1.3 数据分析

### 1.3.1 水温分层判别方法

水库的库容、出入库流量都是影响水库水体交换速率的重要因素, 本研究将采用  $\alpha$  法判别法<sup>[14]</sup> 和水体滞留时间<sup>[15]</sup> 作为判断水库水体水温类型, 计算公式见式(1)、(2), 判定阈值见表 3。

$$\alpha = \frac{W}{V} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为径流—库容比数;  $W$  为多年平均入库总流量 ( $m^3$ );  $V$  为水库库容, 一般为有效库容 ( $m^3$ )。

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

式中:  $T_r$  为水体滞留时间 ( $d$ );  $Q$  为多年平

均径流量 ( $m^3/d$ );  $V$  为水库库容, 一般为有效库容 ( $m^3$ )。

### 1.3.2 水温沿程变化率

水温沿程变化率是表征河道水温沿程变化的指标, 采用的计算公式如下:

$$K = \frac{(T_{\text{下}} - T_{\text{上}})}{\Delta L} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $K$  为水温沿程变化率 ( $^{\circ}C \cdot 100m^{-1}$ );  $T_{\text{上}}$ 、 $T_{\text{下}}$  分别为上下游水温 ( $^{\circ}C$ );  $\Delta L$  为上下游沿程距离差 ( $km$ )。

表 3 水库水温类型判定阈值

指标	分层型水库	过渡型水库	混合型水库
$\alpha$ 指标法	<10	10~20	>20
水体滞留时间 ( $d$ )	>100	10~100	<10
分层特征	稳定分层	不稳定分层	一般不分层

### 1.3.3 水温连续性评价指标

由河流连续体理论可知, 自然河流水温在空间上呈连续性变化<sup>[3]</sup>, 而水利工程建设打破了水温的连续性特征, 形成了水温的非连续性单元。本研究利用 Xu 等<sup>[16]</sup>提出的水温非连续性强度概念, 以固定间距内样点的水温作为一个分析单元, 对分析单元内的水温进行线性拟合, 用残差平方和代表水温不连续强度。在整个流域上, 当一个样点的水温发生突变时, 对应单元内的残差平方和(非连续性强度)也相应增大。基于上述方法, 本研究通过对比澜沧江和怒江的水温连续性特征, 评价梯级水库建设对河流水温连续性的影响, 计算公式见式(4)。

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4)$$

式中:  $RSS$  为非连续性强度;  $y_i$  为实测水温;  $x_i$  为第  $i$  个样点对应的距离;  $f(x_i)$  为根据实测水温数据拟合得到的预测水温。此公式采用一元线性模型预测水温, 对整组水温数据滑动进行计算, 其实质是计算一

组数据的残差平方和。计算水温非连续性强度时，需要确定分析单元的长度。由于澜沧江与怒江样点间距设置不同，澜沧江、怒江分别选取 50、100km 为一个分析单元计算，依次滑动计算两条河流的水温不连续性强度。不同分析单元水温非连续强度计算示意如图 2 所示。

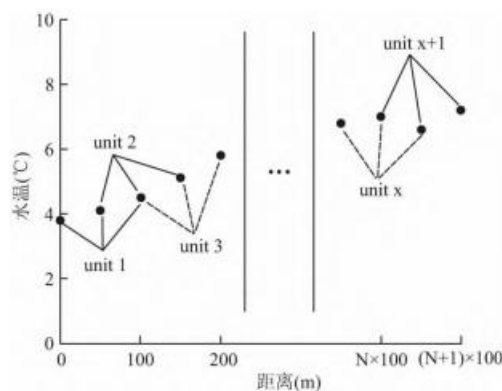


图 2 非连续性强度计算示意

### 1.3.4 研究区域水温与气温的关系

气温因素通常是影响河流水温最为直接的因素<sup>[17]</sup>。研究区域内气象站点较为稀疏，利用长期气温数据和距离的线性拟合函数，反推计算各监测点的气温值。各监测点水温和气温数据取月平均值后计算皮尔逊相关系数见表 4。

表 4 水温与气温的皮尔逊相关性分析

时期	2018 年 1 月	2018 年 10 月	2019 年 4 月	2020 年 8 月
怒江	0.990**	0.994**	0.964**	0.996**
时期	2016 年 10 月	2017 年 6 月	2018 年 1 月	2020 年 8 月
澜沧江	0.937**	-0.532	0.925**	0.672**

注：\*为  $P < 0.05$ ，\*\*为  $P < 0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 怒江水温沿程分布特征

图 3 为不同时期怒江研究区域内的不同站点的表层水温和气温。整体上，各个时期怒江干流水温和气温均呈现从上游至下游逐渐升高的趋势，水温和气温具有显著的相关性 ( $P < 0.01$ )，相关系数分别高达 0.990、0.994、0.964、0.996。研究河段内，怒江干流水温沿程表现出较好的连续性特征，水温波动较小，无明显突变点。在丙中洛断面(N1)至大兴地断面(N6)235km 长的河段内，水温沿程增幅较为稳定，4 个时期依次为  $3.37^{\circ}\text{C}$ 、 $2.46^{\circ}\text{C}$ 、 $2.57^{\circ}\text{C}$  和  $2.87^{\circ}\text{C}$ ，水温增幅平均为  $2.82^{\circ}\text{C}$ ，没有显著的季节性差异。水温的沿程变化率也相对稳定，始终为正值。在四个时期中，冬季(1 月)的水温沿程增温最大，为  $1.32^{\circ}\text{C} \cdot 100\text{km}^{-1}$ ；秋季(10 月)最小为  $1.02^{\circ}\text{C} \cdot 100\text{km}^{-1}$ 。总体上，研究区域内怒江干流水温沿程增温率为  $1.17^{\circ}\text{C} \cdot 100\text{km}^{-1}$ 。

月均气温从上游至下游也逐渐升高，与表层水温的变化趋势同步。月均气温沿程增温在  $5.79^{\circ}\text{C} \sim 6.84^{\circ}\text{C}$  之间，平均增幅为  $6.25^{\circ}\text{C}$ 。2018 年 1 月气温增幅最大为  $6.84^{\circ}\text{C}$ ，2018 年 10 月最小为  $79^{\circ}\text{C}$ ，与水温增幅规律一致。

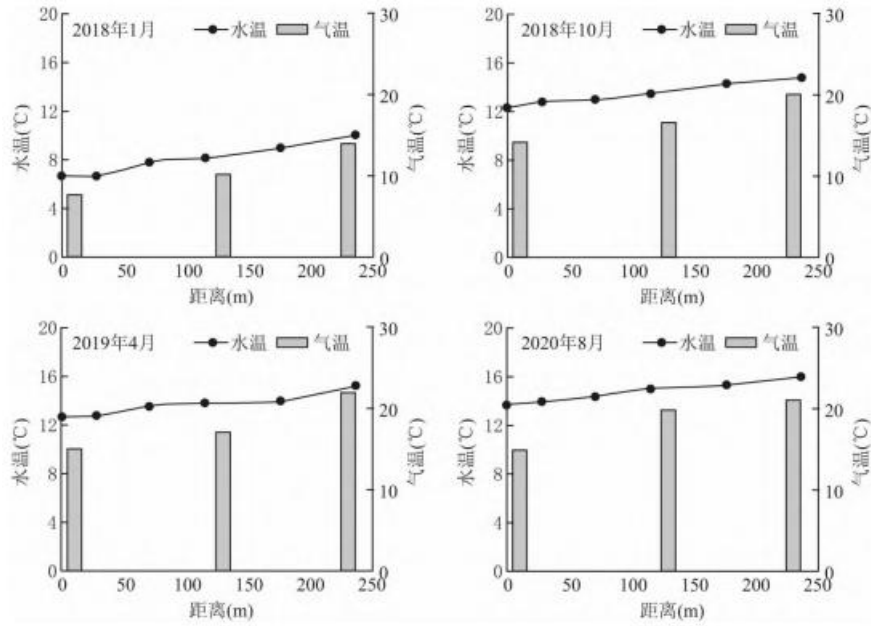


图3 怒江水温沿程分布特征

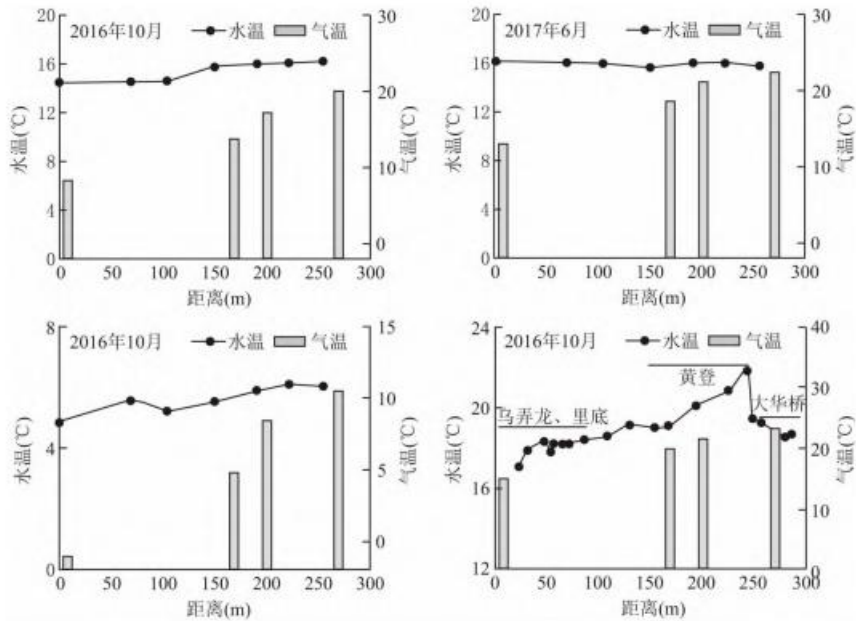


图4 澜沧江水温沿程分布特征

## 2.2 澜沧江水温沿程分布特征

根据研究区域内澜沧江梯级水库建成投产情况,可将研究时段分为2个特征时期:未受水库运行影响的自然河流(2020年之前)和受梯级水库运行影响的时期(2020年之后)。通过分析澜沧江中上游水温沿程时空变化(图4)可以看出,澜沧江建库前后中上游水温沿程分布特征存在较大差异。主要有如下特征:(1)自然河段时期,澜沧江水温表现出较好的连续性特征,水温波动较小,无明显突变点,河段内水温极值差不超过1.78℃;除2017年6月水温基本持平外,2016年10月和2018年1月总体上水温沿程缓慢升高,与气温沿程变化趋势基本一致( $P < 0.01$ ),相关系数分别为0.879和0.855,平均水温沿程变化率分别为0.70和

0.47℃·100km<sup>-1</sup>; (2) 梯级水库蓄水之后, 与同时期怒江的沿程水温截然不同, 澜沧江水温连续性被打破, 各水库之间波动较大, 水温极值高达 4.74℃; 不同水库水温的沿程变化特征存在一定差异, 黄登水库(167~243km)的水温显著高于其他水库, 水温沿程变化率高达 3.58℃·100km<sup>-1</sup>, 表明其水温沿程升温过程较其他水库更显著。虽然黄登坝下(L22)较库首(L21)水温下降了 2.26℃, 但大华桥水温沿程增温率仍为负值, 大华桥库区上游(L22-24)水温仍高于其库首(L25)。从气温来看, 澜沧江梯级水库运行前后, 月均气温始终表现为沿程逐渐升高的趋势, 平均增幅为 10.27℃, 但蓄水之后气温和水温的相关性显著降低, 相关系数仅为 0.672。

2.3 澜沧江梯级水库段水温空间分布特征 2020 年 8 月对乌弄龙、里底、黄登、大华桥水库开展水温监测, 各水库不同断面垂向水温如图 5 所示。结果表明: 乌弄龙、里底、大华桥水库各断面水温垂向变化较小, 表底温差最大不超过 0.36℃; 仅在乌弄龙 01(库首)断面水深 59~61m 处出现了弱分层, 垂向温度梯度仅 0.07℃·m<sup>-1</sup>。乌弄龙、里底、大华桥三座水库为典型的混合型水库, 但水库上下游的水温沿程变化趋势不同。乌弄龙和里底水库上游水温低于库首, 但大华桥库区上游水温高于库首, 表明大华桥水库水温受上游黄登水库影响显著。

黄登水库存在明显的水温分层现象, 表层斜温层明显, 温跃层水深在 0~20 和 90~100m, 最大表底温差达 4.6℃, 出现在黄登 01(库首)断面。黄登 01(库首)断面水温垂向结构较为特殊, 为“双混斜”结构, 水温在 0~11m 内变化较大(斜温层), 水温梯度达到 0.3℃·m<sup>-1</sup>; 11~92m 为混合层, 水温垂向差异较小, 仅在 1.5℃左右; 在 90~100m 出现第二个斜温层。黄登 02 断面和黄登 03 断面垂向水温变化趋势较为一致, 近表层斜温层(0~10m)和下层混合层。黄登水库水温纵向分布差异显著, 表层水温在黄登 03 断面最低, 至黄登 01(库首)断面增加了 1.61℃; 底层水温变化恰好与表层相反, 越靠近库首底层水温越低, 底层水温的纵向差异达 2.20℃。

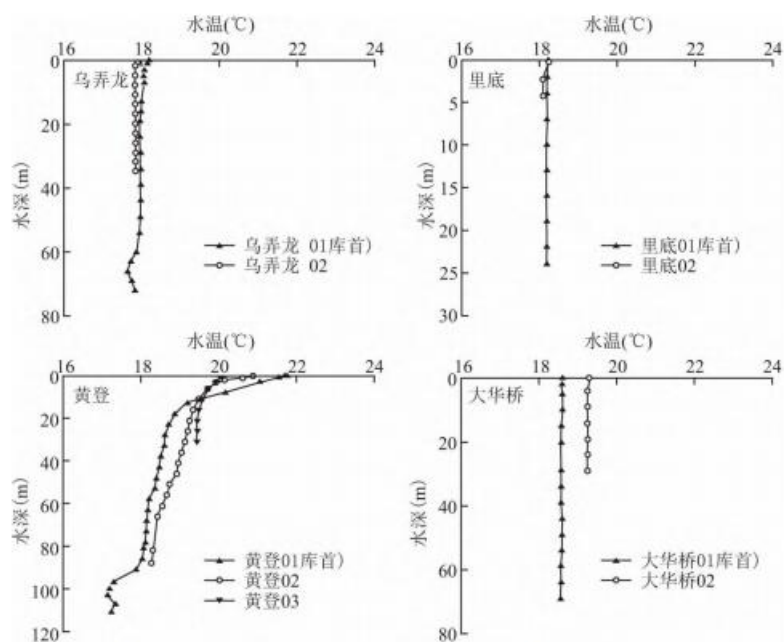


图 5 2020 年 8 月澜沧江各库区垂向水温分布特征

### 3 讨论

#### 3.1 水温沿程分布差异的主要原因

自然河流水温由水体与外界的水热交换过程所决定, 受气象条件、海拔、支流入汇、河床、流量等环

境因素的综合影响<sup>[18]</sup>。已有研究表明,气象条件(太阳辐射、气温、相对湿度、风速)等是影响河流水温变化的重要因素,其中气温和水温的关系密切<sup>[19]</sup>。Segura等<sup>[20]</sup>通过建立气温—水温之间的经验模型对河流水温进行模拟,取得了较好的效果,一定程度上说明气温的重要性。其次,海拔也是影响水温的重要因素,海拔通过影响气象条件间接对水温产生影响,故海拔与气温存在协同作用关系<sup>[21]</sup>。当干流水温存在差异时,干流水温会受到支流入汇水温的影响<sup>[22]</sup>。然而,本研究区域内并无大型支流汇入,且云岭断面至黄登断面和丙中洛断面至大兴地断面的集水面积相对较小,区段内支流汇入增加的径流量对于干流可忽略不计,因而本研究中支流入汇并不是影响水温的主要原因。河床作为边界条件影响水温的方式包括地下水补给、热量交换等,其对水温的影响较小<sup>[23, 24]</sup>。因此,本研究着重对比气象条件(气温差异)和人为干扰(水库建设)对河道沿程水温的影响。自然河流水温一般遵循着特定的沿程变化规律,即水温随河流等级以及距离的增加呈现出逐渐升高的趋势。这种在纵向上表现出较为规则的沿程变化特征<sup>[25]</sup>,即水温的连续性特征。当支流入汇及地下水补给较小时,河道水温沿程变化率相对稳定,且与气温沿程变化趋势一致<sup>[25, 26]</sup>。Caissie等<sup>[18]</sup>在高山峡谷区河流的研究中也观察到类似现象,结果表明纵向上水温逐渐升温,且水温与气温的变化规律保持一致。怒江作为无人干扰处于自然状态的河流,观测期内怒江水温也始终处于稳定的状态,沿程逐渐升高,且与气温保持一致。澜沧江作为受人为干扰(水库建设)严重的河流。与怒江类似,澜沧江建库前水温也呈现出相似的规律,但建库后(2020年8月)水温的连续性被破坏,且水温沿程变化趋势与气温不一致。结果表明:澜沧江受到了非自然因素(筑坝蓄水)的影响,打破了其原有的水温沿程分布特征。值得一提的是,本研究中2017年6月澜沧江水温沿程基本持平,推测可能是受更频繁的降雨天气影响,澜沧江流域降雨量年内分配不均匀,全年约66%的降雨量集中在夏季,且受东南季风的控制和影响,降雨峰值出现在6~7月<sup>[27]</sup>,强降雨过程使得水热交换频繁,造成该时期沿程增温过程不明显。虽然2017年6月澜沧江水温并未与气温表现出显著的一致性(表4),但水温空间连续性特征并未改变,不影响总体分析。

水温沿程变化率是反映河段水温沿程分布特征的重要指标。监测结果表明,怒江的平均水温沿程变化率显著高于自然状态下的澜沧江,两者分别为 $1.17 \pm 0.12$ 和 $0.58 \pm 0.11 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 100\text{km}^{-1}$ ,说明怒江水温沿程变化更为明显。从已有的相关报道来看,怒江和澜沧江多年平均流量分别为 $1435$ 和 $2070\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,差值达 $635\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[28]</sup>。

流量可能是造成两者水温差异的影响因素之一<sup>[18]</sup>。流量大小决定了水体的热容,与高流量的澜沧江相比,低流量的怒江水体热容较小,水流相对较慢,水温更易受外界条件(气象条件)的影响,其水温沿程变化率相对较高<sup>[29]</sup>。Zwieniecki等<sup>[30]</sup>在对美国俄勒冈州低海拔地区14条河流的沿程水温观测研究中,也发现了相似的结论:以Brush为代表的低流量河水温沿程变化率显著高于其他高流量河流,研究表明流量与水温沿程变化率之间有显著相关性。

相比于怒江,澜沧江梯级水库蓄水之后的河道水温沿程变化更为显著。已有研究表明,不同类型水库在入流、出流、气象、自身运行特性等多重因素的影响下水温空间分布特征存在差异<sup>[31]</sup>。本研究也发现,不同水库水温沿程分布差异较大。在乌弄龙、黄登水库,表层水温呈递增趋势,里底水库基本持平,而大华桥水库呈递减趋势。水温沿程变化率由大到小依次为,黄登、乌弄龙、里底、大华桥。根据 $\alpha$ 法判别法、水体滞留时间等判别指标,澜沧江中上游已开发的黄登水库为过渡型水库,而乌弄龙、里底、大华桥为混合型水库(表5)。同一时期黄登库区增温效应显著高于其他水库,主要是由于黄登为季调节水库,相比于其他水库,库容更大、水更深,水体滞留时间也长达21.46d,因此水体受气温和太阳辐射影响的增温效应更为显著。对于乌弄龙、里底、大华桥三座混合型水库,库容小且水深较浅,各水库并未出现明显的水温分层(图5)。库湾水体垂向交换频繁,水体滞留时间短,因而水温沿程变化不显著。但大华桥水库沿程水温呈降低趋势,有异于其他水库。其主要原因是大华桥水库受到黄登水库下泄水(L22)的显著影响。尽管黄登下泄水温显著低于其库区(L16~21),但相比于自然状态下,黄登水库蓄水使得该河段的水温高于自然状态下的河道水温。可见,准确认识不同类型水库水温分层状态对于评估梯级水电开发背景下河道水温变化

趋势至关重要。

表 5 水库水温垂向结构类型

	乌弄龙	里底	黄登	大华桥
$\alpha$ 指标	82.46	322.15	17.01	110.91
水体滞留时间 (d)	4.43	1.13	21.46	3.67
类型	混合型	混合型	过渡型	混合型

### 3.2 梯级水库对水温空间连续性的破坏

依据河流连续体理论,自然状态下河流沿地势自上游向下游流动过程中相邻河段首尾相连,生境因子沿水流方向连续分布,进而完成物质能量的传递与交换<sup>[3]</sup>。水温作为水生态系统的重要驱动因子,其空间连续性对维系水生生物的多样性和生态系统的稳定性具有重要意义。但流域梯级水电开发极大程度地破坏了水温的空间连续性和连通性<sup>[32]</sup>,主要体现在将河流阻隔成相对独立的河段,改变其连通状态,从而导致水温沿程出现明显的落差<sup>[33, 34]</sup>,河段物质、能量和水流输送受阻。因此,识别水温空间连续性的突变是缓解梯级开发对河流生态系统影响的重要前提。为量化澜沧江梯级水库开发对河道水温空间连续性的影响,本研究计算了不同时期澜沧江和怒江干流水温的非连续性强度,结果如图 6 所示。通过对比不同时期河道水温连续性强度,发现怒江和澜沧江建库前水温非连续性强度变化范围介于 0~0.17,平均值仅为 0.04,表明该区域内自然因素对水温空间连续性的影响很小。在澜沧江梯级水库蓄水后,乌弄龙、里底、大华桥水温非连续性强度处于较低的水平,变化范围介于 0.01~0.4;黄登水库非连续性强度变化剧烈,其平均值超过 0.4,最大能达到 2.79。黄登水库对水温空间连续性的破坏显著,其对澜沧江中上游河段水温连续性起决定性作用。

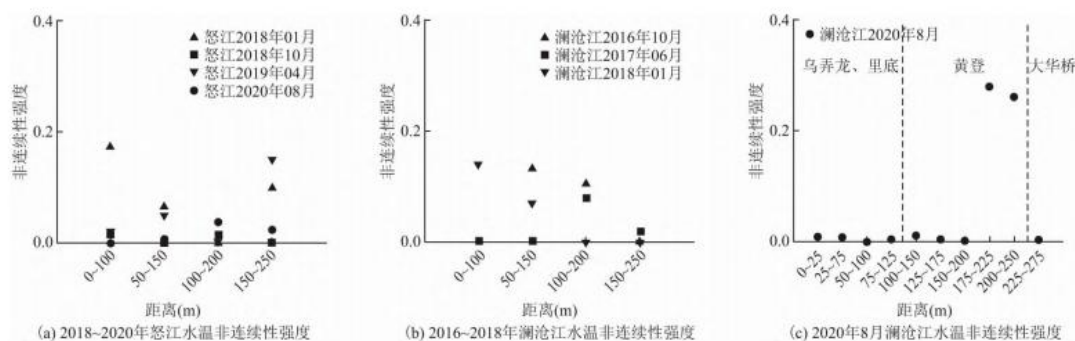


图 6 水温连续性分析

已有研究表明:随着梯级电站修建数量的增加,水库对河道水温的影响会被逐级累积,在梯级末端彻底改变天然水温的季节性正弦分布<sup>[35]</sup>,水温空间连续性受破坏程度愈严重。张士杰等<sup>[7]</sup>分析了开都河中上游“一库三级”和“一库四级”开发方案对水温空间分布的影响,结果表明梯级电站的数目对水温空间累积影响起决定性作用。但梯级电站对水温连续性的影响也存在极限,当电站达到一定数量时,空间连续性被多次干扰后已呈现破碎化、片段化的格局,电站数目的持续增多对连续性的影响逐渐减弱<sup>[36]</sup>。赵高磊等<sup>[37]</sup>构建了虚拟水库并使其首尾相连无限叠加,分析了梯级极限开发下的水温空间特征,结果表明流域梯级开发对水温的影响同样存在极限,经历 22 个梯级电站调节后,下泄水温相对于入流水温不再变化。在本研究中,乌弄龙一里底梯级水电开发并没有明显破坏该河段的水温连续性,这也表明梯级水库对河道水温连续性的影响程度还与水库类型密切相关。乌弄龙、里底同属日调节型水库,库容小且水体滞留时间短(4.43

和 1.13d), 入流水温与出流水温相差较小( $<0.74^{\circ}\text{C}$ ), 水库建设对河段水温的影响基本可以忽略。然而, 水库调节性能愈强, 对水温的连续性影响越大, 以年际调节和年调节水库最为显著<sup>[35]</sup>。本研究中属于季调节型的黄登水库对水温连续性的破坏也十分显著。可见, 流域梯级水电开发对水温空间连续性的影响十分复杂, 受梯级电站数量、各级水库调节性能、不同梯级开发方式、取水口高程等多重因素影响。综上所述, 水温的空间连续性评价为分析水库建设背景下的水温累积效应提供了新指标、新思路, 能有效避免直接对比建库前后水温数据时引入的偏差。然而, 水温非连续性评价指标依然存在一定的缺陷, 对水温监测样点的间距要求苛刻, 限制了此方法的实际应用, 在方法的理论改进上仍有待进一步研究。

## 4 结论

(1) 怒江与澜沧江建库前的河道水温沿程分布特征类似, 与气温沿程变化趋势基本一致, 水温非连续性强度平均值仅为 0.04, 研究表明自然因素对水温空间连续性的影响很小, 其水温沿程分布基本上处于连续变化状态。

(2) 梯级水库的运行改变了澜沧江中上游河段的水温自然变化特征, 水温沿程出现明显的落差且波动剧烈。黄登水库对水温空间连续性破坏显著, 水温非连续性强度平均值超过 0.4, 而乌弄龙、里底、大华桥水温非连续性强度处于较低的水平, 接近自然河流状态。

(3) 梯级水库蓄水是导致水温空间连续性破

坏的主要因素, 但梯级开发对水温空间连续性的影响复杂, 不同类型水库的影响存在差异。准确认识梯级各水库的水温分层特性是评估流域梯级水电开发对水温空间连续性影响的关键。

### 参考文献:

[1] MYRVOLD K M, KENNEDY B P. Interactions between bodymass and water temperature cause energetic bottlenecks in juvenile steelhead [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2015, 24(3): 373-383.

[2] SAHOO G B, SCHLADOW S G, REUTER J E. Forecasting stream water temperature using regression analysis, artificial neural network, and chaotic non-linear dynamic models [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(3): 325-342.

[3] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130-137.

[4] 姚维科, 崔保山, 董世魁, 等. 水电工程干扰下澜沧江典型段的水温时空特征 [J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6): 1031-1037.

[5] 刘兰芬, 陈凯麒, 张士杰, 等. 河流水电梯级开发水温累积影响研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2007, 5(3): 173-180.

[6] OLDEN J D, NAIMAN R J. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: Modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity [J]. *Freshwater Biology*,

2010, 55( 1) : 86—107.

[7] 张士杰, 闫俊平, 李国强. 流域梯级开发方案调整的水温累积影响研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(11):1336—1343.

[8] SEYEDHASHEMI H, MOATAR F, VIDAL J P, et al. Thermalsignatures identify the influence of dams and ponds on streamtemperature at the regional scale[J]. Science of the Total Environment, 2020, 766: 142667.

[9] PRATS J, VAL R, ARMENGOL J, et al. Temporal variabilityin the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors [J]. Journal of Hydrology, 2010, 387( 1) : 105—118.

[10] 王义昭. 神奇美丽的横断山:地壳演化塑造的奇迹——“三江并流”世界自然遗产地形成地质背景浅析 [J]. 地质通报, 2006, 25(1-2):282—294.

[11] 明庆忠, 史正涛. 三江并流区干热河谷成因新探析 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(1):99—104.

[12] 徐娟. 近 50 年云南省怒江、澜沧江流域气象干旱研究 [J]. 北京大学学报:自然科学版, 2017, 53(5):964—972.

[13] KIBLER K M, TULLOS D D. Cumulative biophysical impact ofsmall and large hydropower development in Nu River, China [J]. Water Resources Research, 2013, 49( 6) : 3104—3118.

[14] 唐旺. 水库及下游河道水温预测研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2007.

[15] FRANCISCO R, ENRIQUE M, Joan A. The residence time ofriver water in reservoirs [J]. Ecological Modelling, 2006, 191( 2) : 260—274.

[16] XU Y, GUO X, DAN Y, et al. Impact of cascade reservoirs oncontinuity of river water temperature: A temperature trend hypothesis in river [J]. Hydrological Processes, 2020, 35( 1) : 1—13.

[17] 袁博, 周孝德, 宋策, 等. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12):59—65.

[18] CAISSIE D. The thermal regime of rivers: A review [J]. Freshwater Biology, 2006, 51: 1389—1406.

[19] 车用太, 何案华, 鱼金子. 水温微动态形成的水热动力学与地热动力学机制 [J]. 地震学报, 2014, 36(1):106—117.

[20] SeGURA C, CALDWELL P, SUN G, et al. A model to predictstream water temperature across the conterminous USA [J]. Hydrological Processes, 2015, 29( 9) : 2178—2195.

- [21] 夏依木拉提. 近 50 年天山西部内流河天然河道水温变化特征 [J]. 水文, 2009, 29(2):84—86.
- [22] JU P F, CHEN Q S, CHEN W. Numerical Simulation of Influence of Water Temperature of Tributary on Hanjiang Main River [J]. Water Resources and Power, 2013, 31( 5) : 84—87.
- [23] PAUFLER S, GRISCHEK T, BENSOM, et al. The Impact of River Discharge and Water Temperature on Manganese Release from the Riverbed during Riverbank Filtration: A Case Study from Dresden, Germany [J]. Water, 2018, 10( 10) : 1476—1482.
- [24] STEELMAN C, KENNEDY C S, CAPES D, et al. Electrical Resistivity Dynamics beneath a Fractured Sedimentary Bedrock Riverbed in Response to Temperature and Groundwater/Surface Water Exchange [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2017, 21( 2) : 1—36.
- [25] WEBB B W. Trends in stream and river temperature [J]. Hydrological Processes, 1996, 10( 2) : 205—226.
- [26] DICKSON N E, CARRIVICK J L, BROWN L E. Flow regulation alters alpine river thermal regimes [J]. Journal of Hydrology, 2012, 464 - 465 ( 2012) : 505—516.
- [27] 李海川, 王国庆, 郝振纯, 等. 澜沧江流域水文气象要素变化特征分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4):21—28.
- [28] 李志雄. 怒江流域开发与环境保护的关系 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2004.
- [29] 许允. 基于流域水温线的梯级水库水温累积效应分析与调控 [D]. 武汉:湖北工业大学, 2020.
- [30] ZWIENIECKI M A, MICHAEL N. Influence of streamside cover and stream features on temperature trends in forested streams of Western Oregon [J]. Western Journal of Applied Forestry, 1999( 2) : 106—113.
- [31] 龙良红, 徐慧, 纪道斌, 等. 向家坝水库水温时空特征及其成因分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(5):738—746.
- [32] WINEMILLER K O, MCINTYRE P B, CASTELLO L, et al. Balancing Hydropower and Biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong [J]. Science, 2016, 351( 6269) : 128—129.
- [33] GRUMBINE R E, DORE J, XU J. Mekong hydropower: Drivers of change and governance challenges [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10( 2) : 91—98.
- [34] XU X, TAN Y, YANG G. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions [J]. Earth-science Reviews, 2013, 124( 2) : 115—125.
- [35] 唐旺, 周孝德, 袁博. 不同类型水库对库区及河道水温的影响 [J]. 水土保持通报, 2014, 34(6):184

[36] 黄勇, 张然, 万丹, 等. 大渡河流域水系连通性与水电梯级开发的耦合分析研究 [J]. 南方建筑, 2020, 2(2):19-27.

[37] 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):121-128.