

文章编号:1672-3031(2020)01-0012-09

# 横断山区水电开发对鱼类资源多维影响及其保护措施研究进展

张汶海<sup>1</sup>, 胡 鹏<sup>2</sup>, 侯佳明<sup>2</sup>, 贾仰文<sup>2</sup>, 徐 飞<sup>2</sup>

(1. 澜湄水资源合作中心, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:**横断山区水系发达, 河流众多, 岭谷高差悬殊, 复杂的地质环境造就了鱼类物种的多样性, 同时丰富的水能资源形成了目前我国最大的水电能源基地。近年来, 梯级电站密集建设改变了该区域水流、水温、水质、水域空间等多方面生态水文条件, 对当地鱼类种群资源造成深远影响。本文基于横断山区水电开发及鱼类资源的现状, 系统归纳了水电开发引起的生态水文要素变化和鱼类栖息过程受到胁迫的内在关系, 回顾了国内外研究者在鱼类资源保护各个角度上提出的研究方法和应对措施, 并提出了下一阶段研究的重点和具体方向。研究可为梯级水电开发下的鱼类资源保护提供理论支撑。

**关键词:**横断山区; 水电开发; 鱼类生境; 生态影响; 研究进展

**中图分类号:** X171.4; TV7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.01.002

## 1 研究背景

横断山区的水能资源极为丰富, 是我国目前水电能源开发的重点区域, 可产生防洪、供水、航运、灌溉等综合功能的效益, 因此具有明显的开发优势及国家能源战略意义。根据“十三五”规划, 国家西南地区常规水电站建设仍然会以金沙江、雅砻江、大渡河三大水电基地建设为水电开发中心, 横断山区成为重中之重。但是, 该区域有着“中国鱼类物种现实数据库”称号的生态本底条件决定了生态保护意义。然而, 受水电能源开发影响, 在横断山区各个流域鱼类产卵规模逐年下降, 体重减小, 鱼类向喜静水、非产漂浮型鱼卵的鱼类种群结构发展, 生存环境受到多方面威胁。为营造横断山区水电开发下鱼类资源保护可持续发展环境, 我们有必要了解时空变化条件下水电开发程度及未来规划, 以及鱼类在水电开发过程中物种资源量遭受胁迫的现状, 认知在水电开发过程中生态水文条件变化和鱼类资源变化之间的联系, 理解学者在目前影响对策和减缓措施研究中的目的、存在的问题、未来研究重点。这将有利于找到水电发展和鱼类资源发展的协同关系, 以实现水能资源利用经济效益和生态效益的协调发展。

## 2 横断山区水能资源开发现状

横断山区位于青藏高原东南部, 是我国第一、二阶梯的过渡地带, 地理位置介于东经 $97^{\circ}02'58''$ — $104^{\circ}27'16''$ , 北纬 $24^{\circ}41'05''$ — $33^{\circ}33'51''$ 之间, 区域总面积 $43.45$ 万 $\text{km}^2$ <sup>[1]</sup>, 涉及西藏、青海、甘肃、四川、云南五省地界。该区域降水较丰沛, 多年平均年降水量在 $600$  mm以上<sup>[2]</sup>。河川众多, 隶属沱江、怒江、红河、澜沧江、金沙江、雅砻江、岷江、黄河、嘉陵江等9个流域, 平均河道比降在 $12\%$ 以上<sup>[3]</sup>, 巨大的地势落差和较小的淹没损失为丰富的水能向电能资源转化提供了天然有利条件。经测算, 横断山区水能理论蕴藏量为 $1.54$ 亿 $\text{kW}$ , 约占全国水能蕴藏总量的 $1/4$ <sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2015CB452701); 国家重点研发计划课题(2016YFC0401302); 国家自然科学基金(51509265, 51625904)

作者简介: 张汶海(1989-), 博士生, 主要从事工程水力学和生态水力学方面研究。E-mail: zwh8915@hotmail.com

通讯作者: 胡鹏(1985-), 博士, 高级工程师, 主要从事生态水文和生态水力学方面研究。E-mail: hp5426@126.com

目前,横断山区已建及规划水电站建设主要分布在金沙江、雅砻江、大渡河、岷江等主要水系,其中干流已建41座,总装机8097.1万kW,另规划和正在建设的35座。预计到2020年,区域干流投产电站总装机容量达到10920万kW,2030年达到12631万kW<sup>[6]</sup>,干流已建和规划水电站名称及装机规模如表1所示。此外,各流域支流小水电开发星罗棋布,占横断山区装机总量近三成,几乎每条支流都已建设水电站,金沙江支流已建56座;雅砻江支流已建6座;大渡河及岷江流域一级支流更是不超过20 km就有一座<sup>[7]</sup>,但小水电发电量也仅为横断山区总发电量的5.5%<sup>[8-9]</sup>,因此,国家“十三五”水电规划中明确提出该区域原则上不再开发建设25万kW以下的中小水电站,已建成的中小水电站也不再扩容。

表1 横断山区主要流域干流水电站建设情况

流域名称	河段	电站名称(装机规模/万kW)
金沙江	上游	岗托(110)*、岩比(30)*、波罗(96)*、拉哇(168)*、叶巴滩(198)、巴塘(74)*、苏洼龙(116)*、昌波(106)*
	中游	虎跳峡(420)*、两家人(300)*、梨园(240)、阿海(200)、龙开口(180)、金安桥(240)、鲁地拉(216)、观音岩(360)
	下游	乌东德(370)*、白鹤滩(1200)*、溪洛渡(1386)、向家坝(640)
雅砻江	上游	温波寺(15)*、仁青岭(30)*、热巴(25)*、阿达(25)*、格尼(20)*、通哈(20)*、英达(50)*、新龙(50)*、共科(40)*、龚坝沟(50)*
	中游	两河口(300)*、牙根(150)*、楞古(230)*、卡拉(106)、孟底沟(170)*、杨房沟(220)*
	下游	锦屏一级(360)、锦屏二级(480)、官地(240)、二滩(330)、桐子林(60)
大渡河	上游	下尔呷(54)*、巴拉(70)*、达维(27)、卜寺沟(36)*、双江口(200)*、金川(86)、巴底(78)*、丹巴(200)*、猴子岩(170)、长河坝(260)、黄金坪(85)
	中游	泸定(92)、硬梁包(120)*、大岗山(260)、龙头石(70)、老鹰岩(64)*、瀑布沟(330)、深溪沟(66)*、枕头坝(95)、沙坪(62.5)、龚嘴(70)、铜街子(60)
岷江上游	上游	鸳鸯桥(0.36)、天龙湖(18)、十里铺(42)*、凤仪(2.4)*、金龙潭(18)、吉鱼(1.02)、铜钟(0.57)、姜射坝(1.28)、中坝(9.8)、福堂(36)、太平驿(26)、映秀湾(13.5)、紫坪铺(76)

表注: \* 表示规划或正在建设水电站

### 3 横断山区鱼类资源本底情况及变化趋势

横断山区经历过高原急剧隆起等地质活动,造成鱼类物种分布区隔离和物种分化,为不同鱼类创造了栖息条件,从而形成区域丰富多样的鱼类物种组成。据中国科学院青藏高原科考队统计分析<sup>[10]</sup>,横断山区共有鱼类237种和亚种,分属于8目18科97属。在骨鲮鱼类中鲤形目和鲶形目鱼类种类较多,共224种,占总数的94.5%。18个科中鲤科种类约占总数的54%,鳅科占18.1%,鲃科占10.1%,平鳍鳅科5.1%,鲢科占4.2%。在金沙江、雅砻江、大渡河、岷江水系等水电开发重点河流具有全区鱼类资源中的18科79属149种,种类数占全区总数的62.6%,且鱼类组成多样化及种群特征体现得更为明显。一方面,鲤科鱼种类占比相对较大,珍稀特有鱼类极多,其中雅罗鱼亚科、鮠亚科、鲴亚科、鲢亚科和鲂亚科的鱼类是本区其他水系所缺乏的,并且随着不断地监测采集,金沙江横断山区流域仍有新鱼种的出现<sup>[11-12]</sup>;另一方面,鱼类分布呈现出均衡性,金沙江流域鱼类构成本区长江水系鱼类的主体,共有鱼类16科63属96种,岷江共有鱼类26属35种,雅砻江共有鱼类16属30种,大渡河共有鱼类15属20种,这四条河流的物种重复出现率达到30%;在流域内部,随着海拔的增高,受气候条件影响,鱼类生长普遍较慢,性成熟晚,种类也相对变少<sup>[13-14]</sup>。

然而,近年来受水电建设影响,横断山区各流域鱼类物种从种群类别及群落丰度、年龄组成、

栖息范围及个体长度、重量特征等方面均发生了不同程度的变化。在种群类别及群落丰度方面,区域鱼类种群向喜静水、产沉性鱼卵的结构类型发展,金沙江干流攀枝花段适应流水生境的小型鱼类如凹尾拟鲮、前鳍高原鳅、中华金沙鳅和红尾副鳅呈逐年下降趋势,而丰度增加的种类为喜静、缓流生境的2种小型鱼类<sup>[15]</sup>。喜流水环境的白甲鱼、云南光唇鱼、蛇鮈、裸体鳅鲇、华鳊、犁头鳅和前臀鲃等在库区样本稀少,特别是江河洄游性鱼类胭脂鱼、鳡已多年未曾捕获,有可能已经灭绝<sup>[16-17]</sup>。从水电站建设前后的直接对比来看,鱼类物种多样性的减少也体现了群落组成变化,金沙江观音岩水电站大坝截流后鱼类群落物种减少严重,物种丰富度由建坝截流前的59种降低到建坝截流后的38种,物种数量减少了21种,减少比率35.6%<sup>[18]</sup>;雅砻江下游二滩水电站建设后,鱼类种群从98种下降到75种<sup>[19]</sup>。

在年龄组成、长度与重量等个体特征方面,捕捞的个体偏小,重量较轻,幼龄化趋势化明显。根据2008—2011年间采样调查,金沙江下游整个库区间经济鱼类中仅圆口铜鱼等13种鱼类平均体重量达到50 g以上,多数种类平均体重低于50 g,起捕规格小于10 g,甚至不足1.0 g,种群结构未能达到合理水平<sup>[20]</sup>。金沙江中游一库八级水电加速建设的几年中,圆口铜鱼的产卵规模呈现出逐年下降的趋势,2010年的卵苗总量相比2006年下降了94.1%<sup>[21]</sup>。在栖息范围方面,鱼类栖息地随着水电建设发生了不同程度的迁移和缩减。大渡裸裂尻鱼最早分布在大渡河水系上游干流,而近几年鱼获数据证明主要分布在支流脚木河流域,其余支流捕捞数量极少<sup>[22]</sup>;中华金沙鳅最早的产卵场在金沙江中、下游地区也逐渐萎缩消失,而金沙江上游龙盘段、黎明乡段和巨甸镇河段新产卵场的发现也证明了中华金沙鳅已向上游地区迁移<sup>[23]</sup>。

#### 4 水电开发对鱼类资源的多维影响

开展梯级水电建设后,天然径流过程受到水库控制与调节,对鱼类生命史各阶段产生累积影响,造成鱼类种群数量与结构变化。近年来,围绕横断山区水电开发对鱼类生存繁殖的影响开展了大量研究,总结起来,可以分为水流流态、水域空间、水体温度、水质和悬移质4个方面。

**4.1 水流流态变化影响** 天然径流变化是维持河流生态系统健康的重要保障,也是生态水文因子变化与维持稳定的主要驱动力。由于梯级电站的密集建设,径流受到水库大坝层层拦截调蓄,天然径流河道演变成湖泊型水库,对河流天然的水文情势和鱼类生存繁殖造成重要影响。

一方面,削弱的脉冲流量过程会降低鱼类洄游产卵时水流刺激作用。在达到一定温度以后,天然的涨水过程使得流速有所增加,刺激了鱼类性腺排卵受精,产卵繁衍。山地河谷区涨水过程伴随着流量增加、水位升高、流速增大等水动力特征变化,是促进大多数鱼类繁殖生衍的重要信号和动力。如果自然水文情势的变动被削减,低峰和高峰脉冲减少,将导致繁殖期鱼类产卵的水流刺激作用弱化或消失。王波<sup>[24]</sup>对比了金沙江下游梯级电站建设前后的脉冲流量变化规律,发现天然河流较长时间的持续涨水过程转变为零散的多次小幅起涨过程,并且高流量脉冲“快起快落”,时间缩短、峰值降低,这与金沙江下游水电站建设后干流鱼类资源下降的趋势结果相对一致<sup>[25-28]</sup>。刘淑伟通过对金沙江中游梨园水电站附近鱼类资源监测,发现中华金沙鳅产卵场向上游迁移,认为与水电站建设后原有江段的激流环境消失有直接关系<sup>[23]</sup>。

另一方面,水体流速下降导致漂流性鱼卵下沉,不能顺利孵化。漂流性鱼卵吸水膨胀后比重略大于水,需要一定的水体流速维持鱼卵顺水漂流距离需求,直到受精卵发育成具有主动游泳能力的幼鱼。唐明英<sup>[29]</sup>以长江四大家鱼鱼卵为代表,在不同流速下开展了漂流性鱼卵悬浮成功率统计试验,结果表明当水流平均流速 $V \geq 0.25$  m/s的情况下,漂流性鱼卵才能保证理想状态下不下沉。目前在横断山区尚未有关于漂流性鱼卵安全孵化水动力特性的研究,随着梯级电站建设引起各库区间流速减缓累积效应加强,部分河段,如金沙江中游的一库八级,目前已建六级均是上库下库首尾相连,如何为野生及增殖站放流的产漂流性卵鱼类提供鱼卵孵化的适宜水流条件值得进一步深入研究。

**4.2 水域空间变化影响** 河流水系是淡水鱼类天然栖息地,通过纵向上下游、横向漫滩湿地、垂向

上下水层的连通交汇，为鱼类索饵、育肥、越冬、繁殖等生命史过程提供了不可或缺的栖息空间。梯级电站建设后，河流水域空间在各个维度均发生显著改变，严重影响了鱼类栖息繁殖。

一是河流纵向连通性降低，鱼类洄游通道遭受阻碍，限制了漂流性鱼卵孵化过程的漂流距离。由于横断山区的高山峡谷特征，干流电站大坝上下游水位落差极大，目前该区域电站大坝绝大部分均未建设鱼道，而是采取了增殖放流的鱼类保护方式。水电站建设切断了洄游性鱼类的上溯通道，即便是较短距离淡水洄游性鱼类，其栖息空间也被束缚在各个库区之间，鱼类种群难以生存繁衍。以0.25 m/s作为保证漂流性卵不下沉的最小流速，以圆口铜鱼鱼卵(漂流性卵)孵化至鳔出现，成为主动游泳的鱼苗，所需时间188.5 h<sup>[30]</sup>，仅仅考虑鱼卵漂流的理论最小纵向通道，那么至少需要169.7 km的流程阈值来保证鱼卵悬于水层中孵化。以金沙江为例，在规划的梯级电站全部建成后，除了上游日冕-龙盘库区及下游4库库区间距在170 km以上，其他干流库区间距均达不到漂流性鱼卵的最小流程要求。在此背景下，充分保护支流的连通性显得尤为重要。而横断山区支流河道比降大且河道狭窄，水深较浅，水资源量并不丰裕，各支流引水式水电开发后，基本无剩余流量或者剩余流量较少。岷江上游在建的引水式电站完成后，引水隧洞对应的河道全年出现217 d断流，长度达101.4 km，从而使河谷趋于荒漠化，鱼类的分布范围逐渐萎缩<sup>[31]</sup>。根据作者2017年5月份金沙江支流考察，金沙江中游支流弓江，水电站建设造成生境连通性差，在汛期沿程几乎没有超过有1 km的连续水域；下游的桑园河，仅45 km河段多达3座水电站，电站下游脱水现象严重。在长距离江河洄游性鱼类洄游通道被阻隔已不可避免的情况下，通过开展干支流的联合调控，为该区域其他土著鱼类提供更大的生存繁殖空间值得进一步深入研究。

二是横向漫滩湿地的淹没和消落降低了黏性鱼卵的附着空间与孵化几率。天然河川径流具有水位丰枯季节波动、峰涨峰落特性，但其变化过程相对连续，是渐变过程。而水库发电由人工调控代替天然季节性水位变化，会形成大范围的消落带，且短时间内消落带水位频繁涨落，导致库区横向水域空间的脆弱性突出。对于出生不久的仔鱼和漂流性受精卵，在水位骤降的径流调节过程中容易搁浅死亡。产沉性卵或黏性卵的鱼类，如金沙江中游的达氏鲟、鲈鲤、岩原鲤、厚颌鲂、胭脂鱼等，在产卵季节3月份到来时，鱼卵会粘附在河滩中砾石表面或散布于砾石间的缝隙中，而梯级电站建设造成漫滩湿地的消失，降低产黏性卵鱼类的附着空间与孵化几率。

三是垂向水域深度增加造成底质环境变化，喜浅水鱼类的生境大幅消失。金沙江中游大坝高度多在100 m以上，下游坝高甚至超过了200 m。水库蓄水后，原本由高山峡谷形成的急流浅滩、砾石底质、洞穴岩盘等空间环境被垂向几十米至百米不等的深水淹没，并逐渐随泥沙输移和河床演变消失。而大部分喜浅水鱼类主要以砾石表面的生藻类和底栖动物为饵料，底质环境的变化将极大限制这部分鱼类的适宜生境，适应于缓流或静水环境生活的鱼类，种群数量将上升，出现新优势物种，库区种群结构将逐渐发生变化。

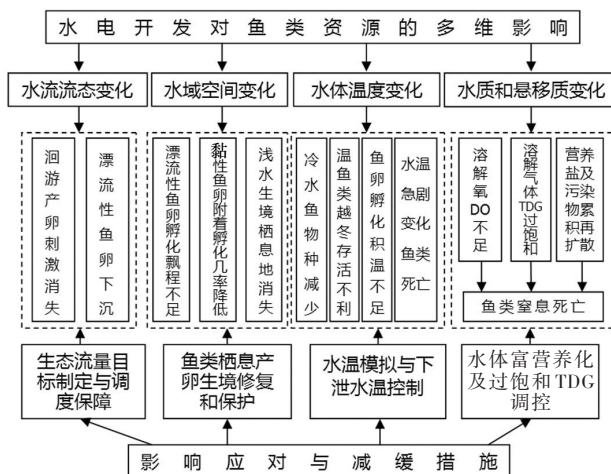


图1 水电开发对鱼类资源多维影响与减缓措施概化图

**4.3 水体温度变化影响** 水体温度变化通过影响鱼类生长代谢酶活性、蛋白质合成以及基因表达,从而影响了鱼类生存及物种繁殖。在水库修建后,库区停滞水体形成垂向水温分层结构,并随水电站发电泄流至下游河道,对鱼类生存繁殖产生不同程度的影响。其一,库区跃温层年内水温差缩小,水体温度趋于恒温,导致深水区冷水鱼类物种逐渐消失。美国葛伦峡大坝修建后,库区年内水温从原来的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右恒温,鱼种灭绝3种<sup>[32]</sup>。横断山区梯级大坝建设后流域水温年际变化与鱼类物种变化之间的关系还未有人研究。其二,由于水库泄水温度与天然河流水温存在显著差异<sup>[33]</sup>,秋、冬季下泄水温高于河流水温,春、夏季上游水库下泄水温低于河水温度,造成鱼类繁殖期孵化积温不足,繁殖成功率明显降低。金沙江下游溪洛渡和向家坝联合运行时,2—9月水温平均下降 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,10月至次年1月平均上升 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,四大家鱼繁殖出现延迟,冷水鱼繁殖提前;锦屏二级水电站调水泄流使冷水鱼(四川裂腹鱼)产卵推迟近一个月<sup>[34]</sup>,繁殖期滞后、缩短,导致繁殖成功率下降。其三,水力发电引发上游水库短时间内大量泄水现象显著增加,下游河道水温温差瞬时剧烈变化,影响鱼类新陈代谢水平及生命健康<sup>[35-37]</sup>。特别是冷水性鱼类都属于狭温鱼类,它们都生活在水温变化幅度很小的环境中,如果温度变化过大,将有导致鱼类死亡的危险。

**4.4 水质和悬移质变化影响** 伴随水电开发建设对河流水文过程、水域空间、水体温度等物理性质的改变,水体中溶解氧、污染物的迁移转化过程,以及泥沙对金属盐吸附解析等水化学性质发生变化,影响鱼类栖息环境。

一是水库泄水引起溶解氧浓度和总溶解气体饱和度变化明显,鱼类生命健康受到威胁。在坝前库区,由于水深增大引起水温分层现象,上层温水层水面与大气氧气交换,能够保持较高溶解氧水平,在库底水层,由于水流扩散性低,氧补充不足,浮游生物死亡于库底,产生大量硫化氢,会形成不适合鱼类生存的缺氧区。在坝下河道,山区高坝水库泄流消能造成的水流气体过饱和现象突出,鱼类吸入过饱和气体后,随着水流环境恢复常压状态,血管中仍保持过饱和状态的溶氧,迅即形成气泡,也就是俗称的“气泡病”,危及鱼类生命。

二是营养盐、有毒化合物沉降形成内源污染。库区水体流动缓慢,水流悬沙动力作用发生改变,泥沙大量沉降,附着在泥沙颗粒上的营养盐、有毒化合物库底淤积,存在二次污染隐患;同时表层透明度提高,但营养物质和鱼类饵料也相应减少。当达到一定温度及水流条件时,营养盐及河底有毒物质随泥沙颗粒再悬浮,短时间内扩散会形成“内源”污染和有毒物质扩散现象。此外,高浓度的泥沙集中下泄会淤堵鱼鳃器官,造成鱼类窒息死亡<sup>[38]</sup>。总体而言,梯级水库层层阻拦引起水流滞留,水环境容量降低<sup>[39]</sup>,容易造成水质环境恶化从而影响鱼类生长。

## 5 影响应对与减缓措施相关研究

针对水电开发对于鱼类生存繁殖的多维影响,也相应开展了大量应对与减缓措施研究,集中体现在生态流量目标制定与调度保障、鱼类栖息产卵生境修复和保护、水温模拟与下泄水温控制、水体富营养化及过饱和TDG调控4个方面,如图2所示。

**5.1 生态流量目标制定与调度保障** 目前国内生态流量评价方法主要以水文学法(包括Tennant法、流量历时曲线法、RVA法和7Q10法)<sup>[40]</sup>、水力学法(湿周法、R2-Cross法)、栖息地法(IFIM法、CA-SIMIR法)<sup>[41]</sup>、综合法(整体法、BBM法)<sup>[42]</sup>为主。针对横断山区鱼类产卵流量需求,吉小盼<sup>[43]</sup>通过Tennant法、R2-Cross法和PHABSIM法3种不同方法评价出岷江姜射坝水电站建设后产卵期生态需水过程,得到最小生态流量 $40.6\text{ m}^3/\text{s}$ 的结果。傅菁菁<sup>[44]</sup>根据年内不同季节鱼类繁殖习性,利用上述常用的生态需水评价方法结合河段水文情势变化,制造产卵期洪峰流量,为鱼类产卵繁殖创造适宜的条件。陈端<sup>[45]</sup>通过栖息地法在汛期制造拟天然洪峰,对锦屏二级月均泄水量进行生态约束,提出生态系统健康与工程效益损失的折中调度方案。张志广<sup>[46]</sup>通过产卵期逐日流量过程与日涨水率和日落水率两个生态水文因子之间的定量分析,构建了金沙江上游干流裂腹鱼产卵期、非产卵期生态水

文学特征指标,并分别采用 Tennant 法、R2-cross 法、生态水力学法及生境法计算了研究河段生态需水量,以最符合多年水文情势特征的生态流量过程线作为鱼类水流环境保护调度策略。从发展趋势看,细化时间尺度并保证鱼类生长繁殖全过程水动力需求的研究会逐步深入,并应用到水利水电工程的生态调度中。

**5.2 鱼类栖息产卵生境修复和保护** 一方面,在横向近岸区建设人工浮岛,通过半沉式浮床结构提供鱼卵孵化、幼鱼栖息的适宜水流环境,从而增加种群数量。宋超<sup>[47]</sup>在长江口利用“漂浮人工湿地”对鱼类产卵场进行修复,有效的诱导周边水域亲鱼聚集,并为早期仔鱼提供了丰富的饵料资源,而横断山区梯级水电建设后人工浮岛工程的研究工作正在开展。另一方面,水电站建设后干流纵向连续性破碎几乎无法挽回,喜流水性、产漂浮性卵的鱼类适宜生存空间逐步被压缩到支流,优先选择与干流环境、鱼类群落结构相似的支流进行保护成为可行方案。胡睿<sup>[48]</sup>针对干支流鱼类种群组成和多样性相似度分析,发现金沙江上游支流欧曲、赠曲、色曲的鱼类种群结构与干流藏曲极度相似,建议规划保留;张雄<sup>[49]</sup>通过河段分类、河段样方调查、河流整体评估的技术路线评估了金沙江下游支流栖息地质量,结合栖息地评估结果、各支流的特有鱼类种数、年径流量和水电开发强度,运用分层排序法,得出了各支流水域空间的保护优先级。针对鱼类栖息地保护,逐步呈现从干流向支流迁移的趋势,适当拆除发电效益低下的支流小水电,创造更多鱼类生境将成为该地区未来生境保护的研究重点。

**5.3 水温模拟与下泄水温控制** 针对横断山区梯级水库水温垂直分层后下泄水温变化造成的影响,专家学者主要通过水温模拟与预测、调度管理、工程技术措施3方面开展减缓措施研究。邓云<sup>[50]</sup>利用立面二维  $k-\varepsilon$  水温模型模拟溪洛渡电站库区水温及下泄水温,在升温期采取加大泄流措施降低库水位,升高表层水温,同时增加引水口纳入表层温水,从而提高下泄河道水温,到达温水性鱼类产卵的适宜水温比原泄流方案提前了 7 d,但与天然径流过程相比仍有差距。骆辉煌<sup>[51]</sup>采用 CE-QUAL-W2 立面二维模型模拟了金沙江下游梯级水库(乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝)不同运行方式的下泄水温变化趋势,发现两库(溪洛渡和向家坝)运行时达到温水鱼类产卵水温 18℃ 的时间比天然河流延迟 34 d,4 库联合运行时更是延迟 43 d。随着电站进水口分层取水方式的改进,一定程度上缓解了水温变化对鱼类生长发育的不利影响。分层取水工程措施主要包括高低进水口、双层进水口和叠梁门取水,其中叠梁门取水方式虽然使发电量略有减小,但具有取水高程灵活、水工结构简单、施工影响较小等优势,多为工程实际所采用<sup>[52]</sup>。李璐<sup>[53]</sup>模拟了锦屏一级水库采用叠梁门分层取水方案对下泄低温水的改善效果,发现二层或三层叠梁门取水方案比单层叠梁门取水方案年均水温高达 1℃,更接近下泄水温和河道天然水温,多层叠梁门取水方式对减缓锦屏一级水库低温下泄水的效果更明显。利用叠梁门分层取水方式的改进,并结合鱼类生命史过程水温需求开展针对性调控,将成为梯级电站建设后鱼类栖息水温环境恢复的有效手段。

**5.4 水体富营养化和过饱和总溶解氧(Total Dissolved Gas, TDG)调控** 和晓荣<sup>[54]</sup>结合区域污染源及产业规划排污量,分析了金沙江中游段已建六级库区水质演变趋势,预计 2020 年 COD<sub>Cr</sub>、TP 总量会超过库区水环境容量,存在潜在的水体富营养化风险。梁俐<sup>[55]</sup>以金沙江支流上龙川水库蓄水调度和入流营养盐状况进行分析,发现在水位较高的 4 月和汛末蓄水期 8—9 月,干流对支流的倒灌是支流富营养化的主要成因,而通过降低水库运行水位和“双重营养盐削减”手段相配合,能够有效制约支流富营养化发生。在过饱和和 TDG 调控方面,通过水利枢纽的有效调度来减少总溶解气体对鱼类的危害是方便经济的生态调度新方法。沈忱<sup>[56]</sup>分析了金沙江下游向家坝水库泄流过程中溶解氧浓度与饱和度的时空变化数据,证明溶解氧浓度与河道水温及发电流量呈负相关关系;冯镜洁<sup>[57]</sup>通过观测横断山区高坝泄流引起的过饱和和 TDG 沿程释放规律,发现 TDG 的释放过程与水体紊动强度、水深、压强等有直接关系,利用观测结果对已有释放模型进行了验证和参数率定,并采用此模型预测得到了金沙江下游河段恒定流下 TDG 沿程释放规律。而在梯级水库群联合调度下,非恒定流泄流过程的 TDG 释放对鱼类生存的累积影响还有待深入研究。

## 6 结论与展望

随着十三五规划和“长江经济带”对水生物保护不断诠释，今后的水电开发加强大型水电环保力度，优化小水电改造思路，并逐渐健全流域鱼类资源保护措施。因此，横断山区水电能源开发与鱼类资源保护协同发展成为科研工作者新的使命。根据前人研究，横断山区水电能源开发对水环境产生了深远的累积影响，特别是水流脉冲和流速的改变，生命史各个阶段栖息空间的改变，以及水体温度、水质、悬移质的变化，均造成了鱼类生存繁殖环境受到胁迫，鱼类个体特征改变，物种多样性下降，种群数量减少。而横断山区鱼类资源发展趋势仍需要更多的监测调查数据进行说明。从目前针对鱼类保护开展研究来看，提出了生态流量目标制定与调度保障措施、鱼类栖息产卵生境修复和保护措施、水温模拟与下泄水温控制措施、水体富营养化及过饱和总溶解氧调控等有效措施。笔者认为，在今后的水电开发与生态保护研究工作中应重点考虑以下方面：(1)基于鱼类全生命周期水文水动力需求制定生态流量目标。开展鱼类生命史不同阶段水流微观需求特征的研究，考虑鱼类产卵、洄游越冬水动力特性，建立不同阶段的生态流量标准；(2)开展干、支流水域空间生态建设与优化研究。通过支流水电站消减及干支流联合调度创造鱼类产卵、洄游、越冬的水流环境、觅食环境等不同生命阶段空间环境，以鱼类资源多样性体现水域生态空间优劣程度；(3)开展梯级电站联合调度下水温累积效应对鱼类生存繁殖研究。建立鱼类种群数量和水温改变之间的关系，优化流域水温减缓措施的调控策略；(4)开展溶解氧过饱和对鱼类生存繁殖影响的定量研究；(5)开展系统研究并逐步建立健全鱼类监测体系、保护体系和评价体系，这将成为今后实现横断山区鱼类资源可持续发展的必经之路。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 张荣祖. 横断山区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [ 2 ] 陈吉琴, 王艳, 徐成汉. 金沙江流域降水径流趋势分析[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2016, 15(4): 15-18.
- [ 3 ] 马国君. 历史时期金沙江流域的经济开发与环境变迁[M]. 贵阳: 贵州大学出版社, 2015.
- [ 4 ] 陈进, 黄薇, 张卉. 长江上游水电开发对流域生态环境影响初探[J]. 水利发展研究, 2006, 6(8): 10-13.
- [ 5 ] 王儒述. 西部水电开发与可持续发展[J]. 三峡论坛(三峡文学·理论版), 2010(2): 23-27.
- [ 6 ] 张博庭. “十三五”规划与我国水电的发展[J]. 中国电力企业管理, 2017(1): 20-24.
- [ 7 ] 姚磊, 陈盼盼, 胡利利, 等. 长江上游流域水电开发现状与存在的问题[J]. 绵阳师范学院学报, 2016(2): 91-97.
- [ 8 ] 任浩宁, 宋智晨, 周修杰, 等. 2017-2022年中国小水电市场专项调研及投资方向研究报告[R]. ZERO POWER INTELLIGENCE GROUP. 2017.
- [ 9 ] 全国人大财政经济委员会. 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》(2017-2021)解释材料[M]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [ 10 ] 陈宜瑜. 横断山区鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [ 11 ] 李浩林. 金沙江流域鱼类物种多样性及其分布格局[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [ 12 ] 安莉, 刘柏松, 李维贤. 云南牛栏江云南鳅属鱼类二新种记述(鲤形目, 爬鳅科, 条鳅亚科)[J]. Zoological Systematics(动物分类学报(英文)), 2009, 34(3): 630-638.
- [ 13 ] 隋晓云. 中国淡水鱼类的分布格局研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- [ 14 ] 吴江, 吴明森. 金沙江的鱼类区系[J]. 四川动物, 1990(3): 23-26.
- [ 15 ] 杨志, 唐会元, 朱迪, 等. 金沙江干流攀枝花江段鱼类种类组成和群落结构研究[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 43-51.
- [ 16 ] 吴江, 吴明森. 雅砻江的渔业自然资源[J]. 四川动物, 1986(1): 5-9, 14.
- [ 17 ] 高欣. 长江珍稀鱼类研究与保护现状[J]. 大自然, 2014(2): 24-27.
- [ 18 ] 苏国欢, 沙永翠, 熊鹰, 等. 大坝截流前后金沙江观音岩水电站鱼类群落功能多样性的变化[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6): 965-970.

- [ 19 ] 杨青瑞,陈求稳,马徐发.雅砻江下游鱼类资源调查及保护措施[J].水生生态学杂志,2011,32(3):94-98.
- [ 20 ] 高少波,唐会元,乔晔,等.金沙江下游干流鱼类资源现状研究[J].水生生态学杂志,2013,34(1):44-49.
- [ 21 ] 唐会元,杨志,高少波,等.金沙江中游圆口铜鱼早期资源现状[J].四川动物,2012,31(3):416-421.
- [ 22 ] 李华,李强,李联满.大渡裸裂尻鱼资源现状与保护措施[J].西昌学院学报:自然科学版,2012(4):17-19.
- [ 23 ] 刘淑伟,杨君兴,陈小勇.金沙江中上游中华金沙鳅(*Jinshaiasinensis*)产卵场的发现及意义[J].动物学研究,2013,34(6):626-630.
- [ 24 ] 王波,黄薇,尹正杰.金沙江下游梯级对河流生态流量的影响研究[C]//全国环境与生态水力学学术研讨会,2008.
- [ 25 ] 高少波,唐会元,乔晔,等.金沙江下游干流鱼类资源现状研究[J].水生生态学杂志,2013,34(1):44-49.
- [ 26 ] 肖琼.金沙江下游水利工程对鳅科鱼类的变动影响[D].长沙:湖南农业大学,2015.
- [ 27 ] 段鹏翔.金沙江下游齐口裂腹鱼种群动态研究[D].长沙:湖南农业大学,2015.
- [ 28 ] 王俊,苏巍,杨少荣,等.金沙江一期工程蓄水前后绥江段鱼类群落多样性特征[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):394-401.
- [ 29 ] 唐明英,黄德林.草,青,鲢,鳙鱼卵水力学特性试验及其在三峡库区孵化条件初步预测[J].水利渔业,1989(4):26-30.
- [ 30 ] 余志堂,梁秩桑,易伯鲁.铜鱼和圆口铜鱼的早期发育[J].水生生物学报,1984(4):371-388.
- [ 31 ] 杨丽虎,陈进,黄薇,等.长江上游梯级水电开发情况及对生态环境的影响初探[J].中国农村水利水电,2007(3):79-81.
- [ 32 ] WEBB R H, WEGNER D L, ANDREWS E D, et al. Downstream Effects of Glen Canyon Dam on the Colorado River in Grand Canyon: A Review[C]//The Controlled Flood in Grand Canyon. American Geophysical Union, 2013.
- [ 33 ] 吴云鹏,周磊.浅谈水库水温分层及下泄低温水对鱼类活动影响[J].卷宗,2014(4):347-347.
- [ 34 ] 张楚汉.水利水电工程科学前沿[M].北京:清华大学出版社,2016.
- [ 35 ] 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.
- [ 36 ] 邓云.大型深水库的水温预测研究[D].成都:四川大学,2003.
- [ 37 ] 陈弘,高学平.水库水温分层取水下泄水温研究进展[J].中国科技论文在线,2012.02-08.<http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201202-161>.
- [ 38 ] 白音包力皋,陈兴茹.水库排沙对下游河流鱼类影响研究进展[J].泥沙研究,2012(1):74-80.
- [ 39 ] 陈建发,颜斐进,方胜强,等.梯级电站建设运营对下游水质的影响[J].长江大学学报(自科版),2012,9(1):47-49.
- [ 40 ] 沈忱.长江上游鱼类保护区生态环境需水研究[D].北京:清华大学,2015.
- [ 41 ] YI Y, CHENG X, YANG Z, et al. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 748-762.
- [ 42 ] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水动力学研究与进展,2003,18(3):294-301.
- [ 43 ] 吉小盼,杨玖贤,蒋红.珍稀保护鱼类产卵期生境需水量计算方法探讨[J].水力发电,2013,39(4):20-22.
- [ 44 ] 傅菁菁,芮建良,吴世东,等.基于环境的水库调度运行[C]//水电·2006国际研讨会会议论文集.昆明,2006.
- [ 45 ] 陈端,陈求稳,陈进.基于改进遗传算法的生态友好型水库调度[J].长江科学院院报,2012,29(3):1-6.
- [ 46 ] 张志广,谭奇林,钟治国,等.基于鱼类生境需求的生态流量过程研究[J].水力发电,2016,42(4):13-17.
- [ 47 ] 宋超,章龙珍,赵峰,等.“漂浮人工湿地”的构建及其对鱼类栖息地修复功能研究[C]//中国水产学会渔业资源与环境分会·2013年学术交流会会议论文集.舟山,2013.
- [ 48 ] 胡睿.金沙江上游鱼类资源现状与保护[D].北京:中国科学院大学,2012.
- [ 49 ] 张雄,刘飞,林鹏程,等.金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):496-503.
- [ 50 ] 邓云,李嘉,李然,等.水库调度对溪洛渡电站下游水温的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2006,38(5):65-69.
- [ 51 ] 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.
- [ 52 ] 蒋红, 卢红伟, 游湘, 等. 雅砻江锦屏一级水电站水温特性及分层取水方案研究[C]//现代坝工技术国际研讨会暨中日韩瑞大坝委员会第四次学术交流会, 2006.
- [ 53 ] 李璐, 陈秀铜. 水库分层取水方式减缓下泄低温水效果研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 215-218.
- [ 54 ] 和晓荣, 王秀英, 和武. 金沙江中游库区水污染综合防治措施研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(12): 71-76.
- [ 55 ] 梁俐, 邓云, 郑美芳, 等. 基于CE-QUAL-W2模型的龙川江支库富营养化预测简[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(s1):103-111.
- [ 56 ] 沈忱, 吕平毓, 冯顺新, 等. 向家坝水库蓄水对下游江段溶解氧饱和度影响研究[J]. 淡水渔业, 2014(6): 31-36.
- [ 57 ] 冯镜洁, 李然, 李克锋, 等. 高坝下游过饱和TDG释放过程研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 7-12.

## A research of the impacts of hydropower development on the survival and reproduction of fish and related conservation in the Hengduan Mountains

ZHANG Wenhai<sup>1</sup>, HU Peng<sup>2</sup>, HOU Jiaming<sup>2</sup>, JIA Yangwen<sup>2</sup>, XU Fei<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The water systems of Hengduan Mountains are well-developed. There are many rivers, and the height difference between the valleys is wide. Based on the complex geological environment, this area has created the diversity of fish species. At the same time, the abundant hydropower resources have formed the largest hydropower energy base in China. In recent years, the intensive construction of cascade hydropower stations has changed the ecological and hydrological conditions in this area, such as water flow, water temperature, water quality and water space, which has far-reaching impact on the resources of local fish stocks. Based on the development of hydropower and fish resources in Hengduan Mountains. firstly, this paper systematically summarizes the internal relationship between the changes of ecological hydrological factors and the stress of fish habitats caused by hydropower development. Secondly, this paper reviews the research methods proposed by scholars in various aspects of fish resource protection and response measures. Finally, this paper put forward the key points and specific directions of conservation research in the next stage. The study can provide theoretical support for the protection of fish resources under the development of cascade hydropower.

**Keywords:** the Hengduan Mountains; hydropower development; fish habitat; ecological impact; research progress

(责任编辑: 杨虹)