

DOI: 10.5846/stxb201901030025

李婷,唐磊,王丽,安磊,王骏,莫康乐,陈求稳.水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例.生态学报, 2020,40(4):1473-1485.

Li T, Tang L, Wang L, An L, Wang J, Mo K L, Chen Q W. Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1473-1485.

水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响 ——以溪洛渡至向家坝河段为例

李 婷^{1,2}, 唐 磊¹, 王 丽¹, 安 磊¹, 王 骏¹, 莫康乐^{1,*}, 陈求稳¹

1 南京水利科学研究院, 南京 210029

2 四川大学水利与水电学院, 成都 610065

摘要:梯级水库修建后自然河流形成了河相段和湖相段,而河流生境的改变对鱼类种群空间分布和生态类型变化产生了重要影响。为探究金沙江梯级水电开发对鱼类资源的影响,结合 2018 年 5 月渔获物和文献记载水库修建前后的渔获物数据,分析了鱼类群落组成及变化,优势物种及群落多样性特点,以及鱼类在河相、湖相段生态类型的变化。结果表明,梯级水库建设后溪洛渡至向家坝鱼类的种类数减少,随着水库的运行该减少趋势放缓,而大型鱼种类占比呈增长趋势。受生境变化的影响,鱼类优势物种发生变化,水库河相段和湖相段生态类型差异较大。生态类型组成上以缓流型、生活于水流中下层、产卵初始水温高于 18℃ 等生态类型占优。研究表明,高坝大库的运行会造成鱼类种群以生态需求为目标,形成明显的空间分布和群落结构特征,而梯级水库建设导致的水动力条件差异是鱼类群落生态类型差异的内在驱动力。

关键词:梯级水库;鱼类种群;生态类型;河相;湖相;种群分布

Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach

LI Ting^{1,2}, TANG Lei¹, WANG Li¹, AN Lei¹, WANG Jun¹, MO Kangle^{1,*}, CHEN Qiuwen¹

1 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

2 College of Water Conservancy and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Natural rivers are divided into the riverine and lacustrine zones owing to the construction of cascade reservoirs. However, changes in habitat conditions have significant effects on the spatial distribution of fish and changes in ecological types. Changes in fish species composition, dominant species, community diversity and variation in fish ecological types between riverine and lacustrine zones were used to evaluate the effects of fish habitat. Data were obtained from the fishery survey in May 2018 and previous literature. The results showed that the number of fish species decreased and the rate of decrease slowed, whereas the proportion of big fish species increased after the construction of cascade reservoirs. The dominant species were constantly changing under the influence of habitat changes, and the ecological types of fish in the riverine and lacustrine zones were different. The species that inhabit the slow-flow zone, the middle and lower layers of water flow, and require initial spawning water temperature higher than 18℃ were the dominant ecological types. Finally, the study showed that because of fish autecology, there were distinct patterns in fish spatial distribution and community structure characteristics affected by the operation of high dam reservoirs. The riverine and lacustrine zones caused by the

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502205);国家自然科学基金项目(51809176);江苏省博士后基金(2018K098B);湖北省重点实验室 2015 年度开放课题(SXSN/4009)

收稿日期:2019-01-03; 网络出版日期:2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: klmo@nhri.cn

hydrodynamic variation of cascade reservoir construction were the internal driving force for the changes in fish community ecological types.

Key Words: cascade reservoirs; fish community; ecological types; riverine zone; lacustrine zone; distribution characteristics

电作为可再生清洁能源,在全球能源供应中占有重要地位。梯级水库可以充分利用河流落差,最大限度地开发河流的水能资源,获取巨大经济效益,成为当前水电开发利用的趋势^[1]。全球 397 个大型河流生态系统约有 27% 的处于梯级开发状态,而河流自由流动长度对水生生物尤其是鱼类具有重要的意义^[2]。梯级水库建设阻隔了河流的连通性,且库与库之间受下级水库的顶托作用改变了河流的自然形态,导致河相向湖相的转变。在巴西,85% 的水库中鱼的种类数小于 40,水位顶托下多数河道鱼类栖息地受到淹没而导致生境破坏,从而使浅滩的鱼类密度增高^[3];Liermann 等^[2]在全球尺度下,开展多个的淡水区间鱼类资源分析,表明大坝对广适性鱼类影响较小,对本地特有物种威胁较大;Sá-Oliveira 等^[4]在亚马逊等热带地区开展水库修建对鱼类的影响研究,指出大坝导致的河相、湖相栖息地变化与鱼类的群落组成和结构差异具有密切关系;王晓臣等^[5]在汉江梯级电站—喜河库区的鱼类群落调查结果显示产漂流性卵、喜流速产粘性卵的鱼类受筑坝影响较大;吴清江等^[6]认为大坝会阻隔鱼类的洄游通道,因此,河相段长度及其生境特征对产漂流性卵鱼类的自然繁殖具有重大影响。以上研究表明,不同地区水库运行对鱼类资源的影响既存在共性又具有差异性。鱼类作为水生态系统中的高级消费者^[7],高坝大库运行下鱼类资源的稳定性及可持续性备受关注。水库修建对鱼类种群分布特征的影响有待进一步探讨,同时,水生环境变化与鱼类种群生态类型组成息息相关。因此,有必要针对梯级水库运行影响下开展鱼类种群分布及生态类型变化的相应研究。

我国西南水能资源丰富,占我国水能资源的 75%。金沙江、雅砻江、澜沧江等 13 个西南水电基地正逐步形成,小湾、锦屏、溪洛渡等一批百万千瓦以上的骨干水电站已建成投产。金沙江作为我国 13 个水电开发基地之一,下游已规划建设 4 座梯级水电站,其中溪洛渡和向家坝已投入运行。20 世纪 80 年代金沙江下游鱼类多达 141 种^[8],自金沙江下游梯级水电开发后,鱼类资源受到严重影响,2008—2011 年下游仅调查到鱼类 78 种^[9]。

本文基于溪洛渡至向家坝鱼类资源调查数据,对金沙江梯级水库间河相段、湖相段鱼类群落分布特征及其变化进行分析,以探明金沙江水库建设河湖分区对鱼类种群的影响,为梯级水电开发下鱼类生态类型变化、鱼类多样性保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

金沙江下游属于山区型河流,多高山峡谷,急流浅滩交替^[10]。溪洛渡和向家坝梯级水库是金沙江下游梯级开发的最后两级,分别于 2013 年 5 月和 2012 年 10 月下闸蓄水。溪洛渡至向家坝总长度约 156 km,向家坝水库建成后,库区回水范围距溪洛渡坝下约 6 km^[11]。由于水库调度频繁多变,下游流速分布不稳定,本文在 2018 年 5 月份溪洛渡最大下泄流量 5490 m³/s 条件下,按平均流速大于 0.5 m/s,0.5—0.2 m/s,小于 0.2 m/s 的标准^[12]将溪洛渡至向家坝区间分别划分为河相段、过渡段、湖相段,各区间长度分别为 0—38 km、38—65 km、65—156 km,如图 1 所示。

1.2 样本采集

经渔政部门批准,于 2018 年 5 月 22 日—5 月 24 日在溪洛渡坝下至桧溪段约 38 km 河相段范围内进行鱼类资源调查。鱼类样品采集参考《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[13],在专业人员带领下采用定点捕捞方式。采样工具为虾笼(总长度约 100 m,高 25 cm)、三层刺网(网眼大小为 1.5 cm—7 cm—12 cm,长度 200 m,

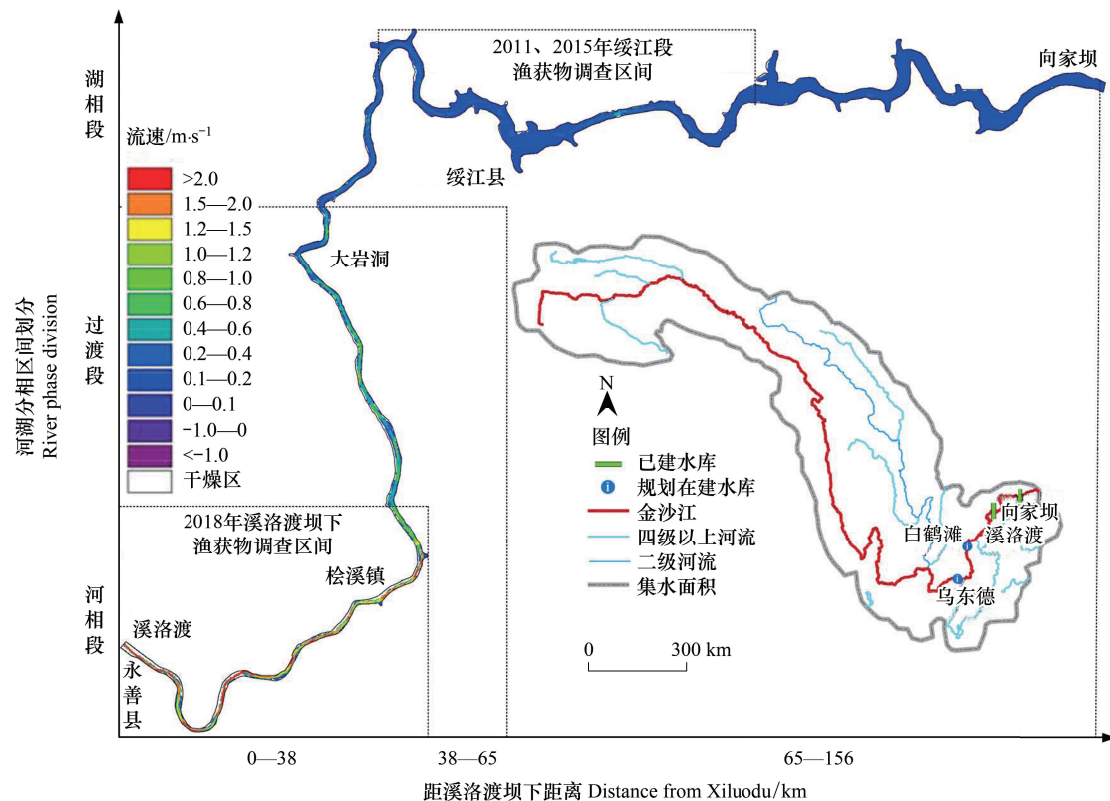


图1 研究区域河湖相分区及渔获物捕捞区间分布

Fig.1 Distribution map of rivers and lakes and sampling stations

高5 m)、小钩(总长度约300 m,高度为20—70 m)等。鱼类样品采集为全天候捕捞,每次放网10张、地笼10个,每天晚上和早上各收集1次,小钩仅在晚上进行,捕捞时长为72 h。采集到的鱼类进行现场拍照、称重、测量、取鳞片及耳石,解剖观察性腺发育等。鱼类鉴别参考《四川鱼类志》^[14]。

为研究梯级水库建设对鱼类种群的影响,通过文献调研获取了2011年6月及2015年6月绥江段(图1)^[15]渔获物调查结果与本研究调查结果进行对比分析。

1.3 数据分析

采用Shannon-Wiener多样性指数、Pielou's均匀度指数、Margalef丰富度指数及物种丰富度分析金沙江下游鱼类群落结构特征;采用相似性分析鱼类群落变化;鱼类生态类型变化采用鱼个体生态学指数进行分析。

具体计算方法如下:Shannon-Wiener多样性指数(H'): $H' = -\sum p_i \ln p_i$; Pielou's均匀度指数(J): $J = H' / \ln S$; Margalef丰富度指数(D): $D = (S - 1) / \ln N$; 鱼个体生态学指数^[16](R): $R = T \times A / n$;

式中, p_i 为群落中第*i*种个体数占物种总个体数的比例; S 为所有采集点的种类总数; N 为采集点的生物个体总数。 T 为群落矩阵, A 为鱼类个体生态类型矩阵, n 为种类数, R 为对环境需求程度矩阵。

鱼类个体生态类型包括每种鱼类已知生态学特征如生活史、产卵条件、食性偏好、栖息地要求,如表1。以此来评价鱼类群落变化对生态环境的需求程度。

相似性分析:基于原始数据标准化,计算原始渔获物生物量矩阵中不同采样点间的Bray-Curits相似性,并产生一个相似的三角形矩阵,再经平方根转换后用Bray Curits similarity进行相似性计算。以上统计分析均在PRIMER软件(版本V 3.3.1)中完成。

表 1 鱼类个体生态学矩阵

Table 1 Fish autecology matrix

鱼种 Fish Species	急流型 Lotic type	缓流型 Lentic type	肉食 Carnivorous	杂食 Omnivorous	植食 Phytophagous	底层 Benthic	中下层 Lower level	中上层 Upper level	块石/岩石 Blockstone/Rock	砂砾石/卵石 Gravel/Peddle	底泥/水草 Sediment/Grass	半洞 游性 Sim-innigrate	定居性 Settlement	漂流型卵 Drafting eggs	微粘/沉型卵 Microviscous/Sunken eggs	黏型卵 Adhesive eggs	低于 18℃ 开始产卵 Strat spawn below 18℃	高于 18℃ 开始产卵 Strat spawn above 18℃
达氏鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
寡鳞鲟 <i>Pseudorasbora engraulis</i>	1	0	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	1	0	0	0	1
银鲟 <i>Pseudorasbora sinensis</i>	1	0	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	1	0	0	0	1
鳊 <i>Hemiculter leuciscus</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	0	0	1	0	1
圆口鲟 <i>Coreius guichenoti</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulidra</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
南方大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
鲇鱼 <i>Silurus asotus</i>	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
鲟鱼 <i>Coreius heterodon</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
长吻鲈 <i>Calter alburnus</i>	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
翘嘴鲈 <i>Ristichthys nobilis</i>	0	1	1	0	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	0	1	0	0	1
蒙古鲈 <i>Calter mongolicus</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	0	1	0	0	1
红鳍原鲈 <i>Caltrichthys erythropterus</i>	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	1	0	1	0	0	0	1
泉水鱼 <i>Semilabeo prochilus</i>	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
蛇鲈 <i>Saurogobio dabryi</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
光唇蛇鲈 <i>Saurogobio gymnocheilus</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
鲢 <i>Genopharyngodon idellus</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	1	0	1	0	0	0	1
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus varhelli</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
子陵吻鲈 <i>Rhinogobius giurinus</i>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
波氏吻鲈 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
草鱼 <i>Genopharyngodon idellus</i>	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1
鲫 <i>Carassius auratus</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
乐山小鲈 <i>Microphysogobio kiatingensis</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
异鳞鲈 <i>Xenophysogobio bodenegeri</i>	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
短身鲈 <i>Gobiolaia abbreiata</i>	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
间下鲈 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1

续表

鱼种 Fish Species	急流型 Lotic type	缓流型 Lentic type	肉食 Carnivorous	杂食 Omnivorous	植食 Phytophagous	底层 Benthic	中下层 Lower level	中上层 Upper level	块石/ 岩石 Blockstone/ Rock	砂砾石/ 卵石 Gravel/ Puddle	底泥/ 水草 Sediment/ Grass	半洄 游性 Semi- immi- grate	定居性 Settlement	漂流型卵 Drifting eggs	微粘/ 沉型卵 Microviscous/ Sunken eggs	黏型卵 Adhesive eggs	低于18℃ 开始产卵 Strat spawn below 18℃	高于18℃ 开始产卵 Start spawn above 18℃
半髯 <i>Hemiculterella sawagei</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	0	0	1	0	1
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
中华沙鳅 <i>Baia superciliosus</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
宽体沙鳅 <i>Baia reevesae</i>	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
长薄鳅 <i>Lepidobotia elongata</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
中华鲮 <i>Rhodens sinensis</i>	0	1	0	0	1	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	1/3	1/3	0	0	1
中华纹胸鮡 <i>Glyptothorax sinensis</i>	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
福建纹胸鮡 <i>Glyptothorax fukiensis</i>	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
张氏鮠 <i>Hemiculter tchangii</i>	0	1	0	1	0	0	0	1	1/3	1/3	1/3	0	1	0	1	0	0	1
白甲鱼 <i>Onychostoma sinu</i>	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
墨头鱼 <i>Garra pingi pingi</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
银鲌 <i>Squalidus argentatus</i>	0	1	0	1	0	0	1	0	1/3	1/3	1/3	0	1	1	0	0	1	0
长鳍吻鲈 <i>Rhinogobio ventralis</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1/2	1/2
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1/2	1/2	0	1	0	0	1
钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanthi</i>	1/2	1/2	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0
细鳞裂腹鱼 <i>Schizothorax dongii</i>	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
红尾副鲈 <i>Paracabotus variegatus</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1/3	1/3	1/3	0	1
前鲮高原鲮 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>	1/2	1/2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1/2	1/2	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
犁头鳅 <i>Lepurichthys fimbriata</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
粗唇鲃 <i>Leiocassis crassilabris</i>	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
切尾拟鲢 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	1/2	1/2	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
凹尾拟鲢 <i>Pseudobagrus emarginatus</i>	1/2	1/2	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
白缘鲢 <i>Liobagrus marginatus</i>	0	1	0	1	0	1	0	0	1/3	1/3	1/3	0	1	0	0	1	1	0
斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus punctatus</i>	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
丁鲷 <i>Tetraodon lineatus</i>	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1/2	1/2	1/3	1/3	1/3	0	1
棒鲈 <i>Lucioperca lucioperca</i>	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0

生态类型属性参考于书籍其他文献记载;少数鱼类由于缺乏资料记录或生态环境偏好不明显的取平均

1 结果与分析

2.1 鱼类种类组成及变化

2018年5月溪洛渡坝下共采集鱼类31种(表2),分别隶属于6目8科28属。其中鲤科(*Cyprinid*)占显著优势,其次是鲿科(*Bagridae*)、鲃亚科(*Cultrinae*)。鱼类群落多度大于1%的种类有15种,前4位依次是瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)、寡鳞鲃(*Pseudolaubuca engraulis*)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*);其中金沙江特有鱼类共4种,包括达氏鲃(*Acipenser dabryanus*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、异鳔鲃(*Gobiobotia Tchang*)、中华沙鳅(*Sinibotia superciliaris*)。2008—2011年永善县下断面^[12]调查到9种,包括双斑副沙鳅(*Parabotia bimaculata* Chen)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、长鳍吻鲃(*Rhinogobio ventralis*)、异鳔鲃(*Xenophysogobio boulengeri*)、短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)、长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*)、中华金沙鳅(*Jinshaia sinensis*)。

表2 溪洛渡坝下河相段渔获物

Table 2 Fishing composition of riverine zone of Xiluodu dam

序号 Order number	种类 Species	重量占比 Weight ratio/%	数量占比 Quantity ratio/%
1	达氏鲃 <i>Acipenser dabryanus</i>	2.79	0.43
2	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	4.49	38.20
3	寡鳞鲃 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	2.14	15.02
4	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	1.51	11.16
5	圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	18.93	6.87
6	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	1.17	3.00
7	南方鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	16.68	2.58
8	铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	9.84	2.15
9	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	0.56	2.15
10	长吻鲃 <i>Leiocassis longirostris</i>	8.99	1.29
11	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	18.05	1.29
12	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	0.23	1.29
13	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	0.14	1.29
14	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	0.86	1.29
15	鲇 <i>Silurus asotus linnaeus</i>	2.86	0.86
16	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	5.47	0.86
17	中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	3.33	0.86
18	短身鳅 <i>Gobiobotia abbreviata</i>	0.07	0.86
19	蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i>	0.11	0.86
20	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	0.07	0.86
21	宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	0.17	0.86
22	间下鱈 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	0.06	0.86
23	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	0.25	0.86
24	波氏吻鰕鲃 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	0.02	0.86
25	半鲮 <i>Hemiculterella sawagei</i>	0.18	0.86
26	马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	0.08	0.86
27	中华沙鳅 <i>Botia superciliaris</i>	0.04	0.43
28	异鳔鲃 <i>Xenophysogobio boulengeri</i>	0.03	0.43
29	泉水鱼 <i>Semilabeo prochilus</i>	0.86	0.43
30	福建纹胸鮡 <i>Glyptothorax fukiensis</i>	0.03	0.43
31	银鱼—	—	—

“—”表示未统计但短期内大量出现

水库建设后鱼类种类数呈减少趋势,该减少趋势的增长随着水库运行时间逐步趋缓,但大型鱼类和小型鱼类的变化趋势存在差别。水库运行初期小型鱼类减少较快,由 34 种减少到 22 种减少了 12 种,其中鳅鮡属(*Gobiobotia*)、副鳅属(*Paracobitis*)、拟鲮属(*Pseudo genus*)变得十分稀少;大型鱼类的种类数占比由 2011 年的 0.358 增加到 2018 年的 0.387,增长幅度为 8.1%(图 2)。

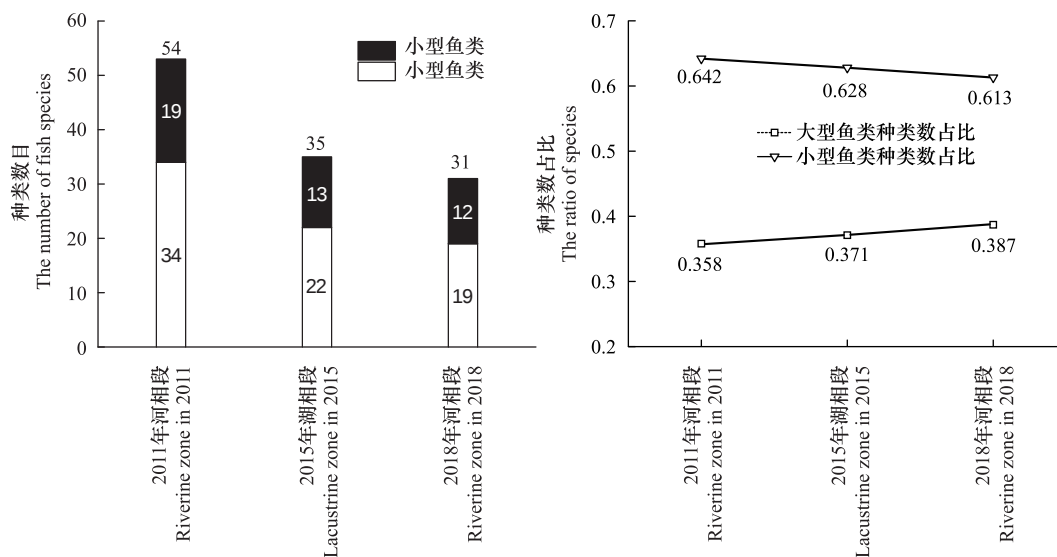


图 2 鱼类种类数变化

Fig.2 Variation of fish species number

2.2 鱼类群落特征分析

对比 2011 年、2015 年与 2018 年渔获物,选取各采样时间段生物量占比和个体数占比排名前 4 的鱼类,分析水库建设对优势物种的影响,结果如图 3 所示。4 种优势物种生物量和个体数占比均达到 60% 以上,优势度较为显著。3 次调查数据显示,生物量占比最高的为圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、鲮(*Aristichthys nobilis*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus Basilewsky*)等大型鱼类和黄颡鱼属(*Pelteobagrus*)等小型鱼类,个体数占比最高的为圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等大型鱼类及蛇鮈、棒花鱼等小型鱼类。其中,圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)是该区间的特有物种^[17-18],其个体数占比持续降低,而生物量占比先降低后升高。2018 年 5 月河相段捕获的圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)平均生物量在 0.4 kg 以上,多为 2—3 龄的鱼,低龄鱼相对较少,解剖后未发现性腺发育成熟的成鱼。

分别对建库前(2011 年)天然河相段、建库后(2015 年)湖相段与现存(2018 年)河相段的鱼类群落结构进行相似性分析,如表 3。结果显示,建库前天然河相段与现存河相段相似性最高为 57.18%,表明水库建设前后河相段鱼类群落结构仍能保持较高的相似性。建库前天然河相段与建库后形成的湖相段相似性为 48.13%,表明建库前后河相、湖相的变化对鱼类群落结构有较大的影响。建库后溪洛渡至向家坝区段内现存

表 3 不同年份各生境区间鱼类多样性比较

Table 3 Comparison of fish diversity in different spatiotemporal

渔获物捕捞时间及断面 Fishing in different spatiotemporal	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Margalef 丰富性指数 Margalef richness index	物种丰富度 Species richness	Pielou's 均匀度指数 Pielou's uniformity index
2011 年河相段 Riverine zone in 2011	2.44	6.13	54	0.61
2015 年湖相段 Lacustrine zone in 2015	2.45	—	35	0.69
2018 年河相段 Riverine zone in 2018	2.33	5.50	31	0.68

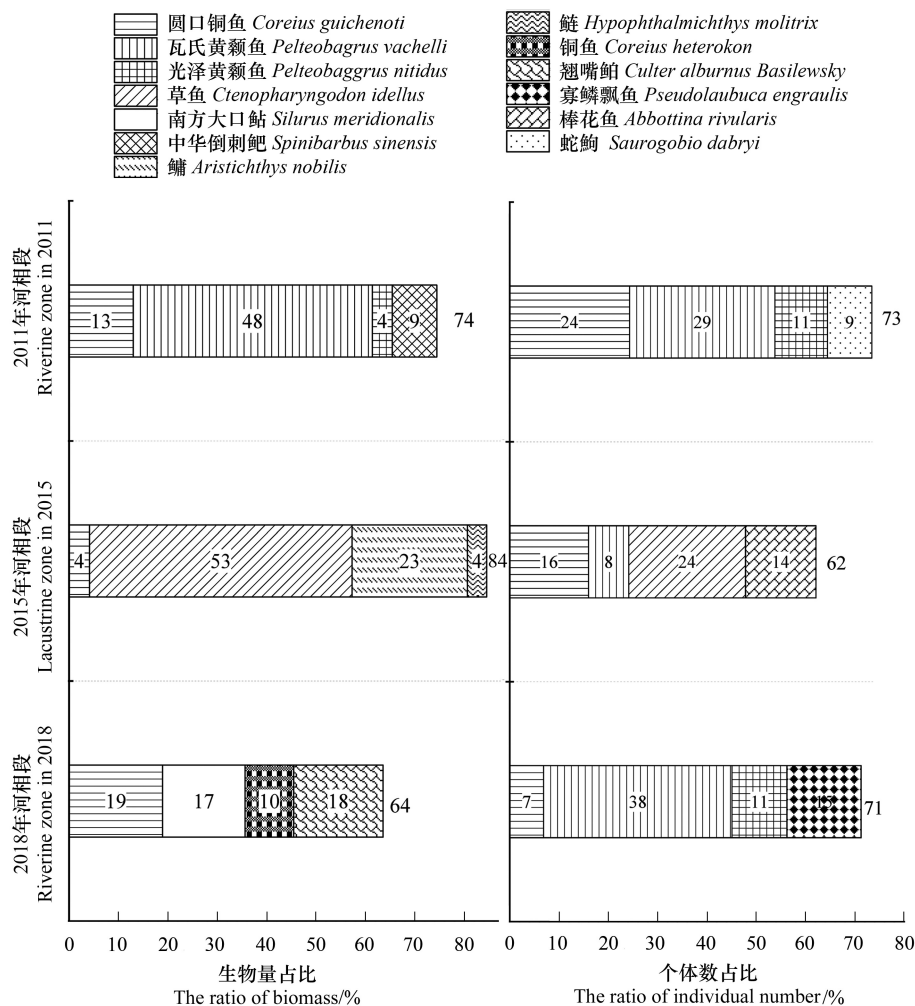


图3 不同年份相应调查点鱼类优势物种生物量和个体数占比

Fig.3 Ratio of biomass and individual number of dominant fish species in different spatiotemporal

河相段与湖相段相似性最低,仅为 44.15%,表明水库建成后鱼类经过调整适宜生境,群落结构方面形成河相与湖相的分区。然而,鱼类多样性差异不大,各区段渔获物均匀度指数也无显著差异,但 2018 年丰富度指数和多样性指数均略低。

2.3 鱼类群落生态类型及其变化

依据流速偏好、食性、水深偏好、底质偏好、洄游特性、产卵类型及产卵初始水温要求等 18 个生态指标建立了鱼类个体生态学矩阵(表 1),以分析鱼类生态类型组成。分析结果显示,具有显著优势的鱼类群落生态类型(个体数和生物量同时占优)为缓流型、喜砾石/砂卵石、定居性、产漂流型鱼卵、及产卵初始水温高于 18℃(图 4)。其中,产卵初始水温为 18℃ 以上的鱼类生物量占比和个体数占比均高达 96% 以上,即该区域以暖水性鱼类为主^[7,19]。食性上杂食性个体数占优,主要以黄颡鱼属(*Pelteobagrus*)及寡鳞鲃(*Pseudolaubuca engraulis*)等小型鱼类为主,数量多但生物量较小;肉食性生物量占优,肉食性以圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、铜鱼(*Coreius heterodon*)、长吻鲇(*Leiocassis longirostris*)、翘嘴鲇(*Culter alburnus Basilewsky*)等大型鱼类为优势种群,个体数较少但体重较大。

基于鱼类个体生态学矩阵,以鱼类生物量占比计算鱼群落对环境的需求度 R (表 4)。结果表明,不同年份生物量稳定占优的鱼类群落为缓流型、生活于水流中下层及产卵初始水温 18℃ 以上的生态类型,其他生态类型受水库运行影响均存在较大变化,尤其是绥江段由河相变为湖相后,其生态类型组成较其他江段有明显变化。

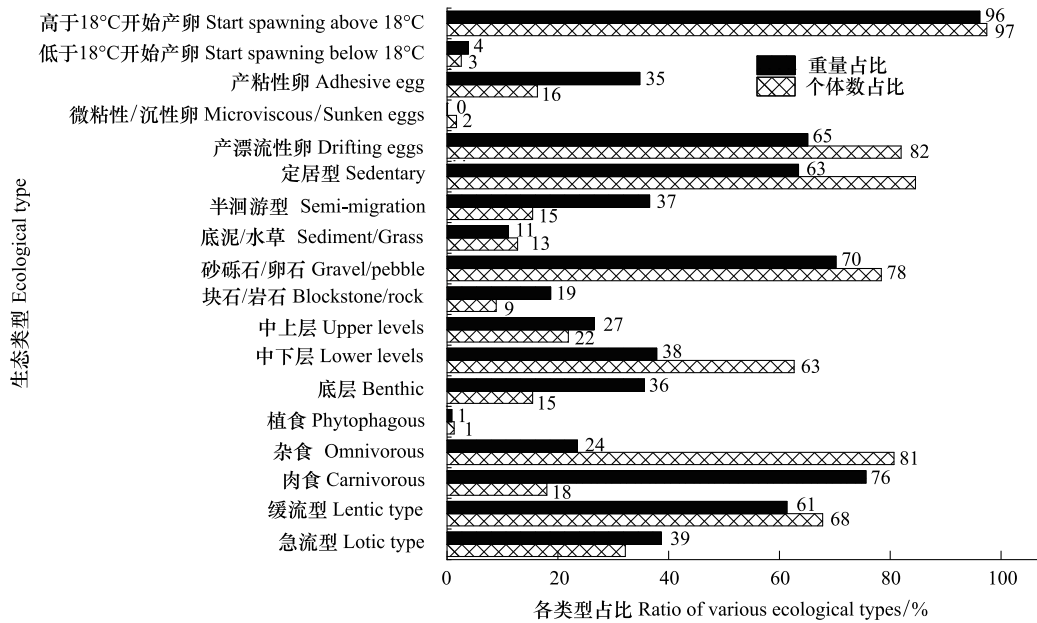


图 4 2018 年溪洛渡河相段鱼类生态类型

Fig.4 Fish ecological composition of the Xiluodu riverine zone in 2018

表 4 鱼类群落环境需求度

Table 4 Ecological or life history requirements of fish community

生态类型 Ecological types		生物量占比环境需求度 The ratio of biomass environmental demand		
		2011 年河相段/%	2015 年湖相段/%	2018 年河相段/%
流速偏好	急流型	30.9	6.5	38.7
Velocity preference	缓流型	69.1	93.5	61.3
食性偏好	肉食	4.7	7.7	46.9
Feedings preference	杂食	94.6	39.2	52.3
	植食	0.7	53.1	0.9
水深偏好	底层	31.9	11.4	35.6
Water depth preference	中下层	58.7	61.0	37.8
	中上层	9.5	27.6	26.5
底质偏好	块石/岩石	10.3	11.3	18.6
Bottom material preference	砂砾石/卵石	85.6	23.3	70.2
	底泥/水草	4.4	65.4	11.2
洄游特性	半洄游性	27.4	88.9	36.6
Migration characteristics	定居性	72.6	11.1	63.4
产卵类型	产漂流型卵	32.7	85.9	40.9
Spawning type	微粘/沉型卵	5.2	0.5	18.3
	产粘性卵	61.8	13.5	40.8
产卵初始水温	低于 18℃ Below 18℃	3.0	0.5	3.8
Initial water temperature for spawning	高于 18℃ Above 18℃	97.0	99.5	96.2

生态类型组成生物量占比差异如图 5。2015 年生态类型差异显著大于其他年份。水库运行 3 年后(2015 年), 缓江湖相段与建库前(2011 年)的河相段相比, 喜砂砾石/卵石鱼类明显减少, 而喜底泥/水草鱼类增加; 定居型鱼类减少, 而半洄游性鱼类增加; 产漂流性鱼卵鱼类增加, 而产粘性卵鱼类减少; 水库运行 5 年后(2018 年), 溪洛渡坝下河相段与水库建设前(2011 年)原始河相段相比, 杂食性鱼类减少而肉食性鱼类增加, 中下层

鱼类减少而中上层鱼类增加。此外,产卵初始水温高于 18℃ 的环境需求度均高达 95% 以上,除少数生物量占比较低的鱼类,如达氏鲟 (*Acipenser dabryanus*)、裂腹鱼属 (*Schizothorax*)、白缘鳅 (*Liobagrus marginatus*) 等,能在低于 18℃ 水温下产卵外,其他鱼类均要求水温达到 18℃ 以上才开始产卵。

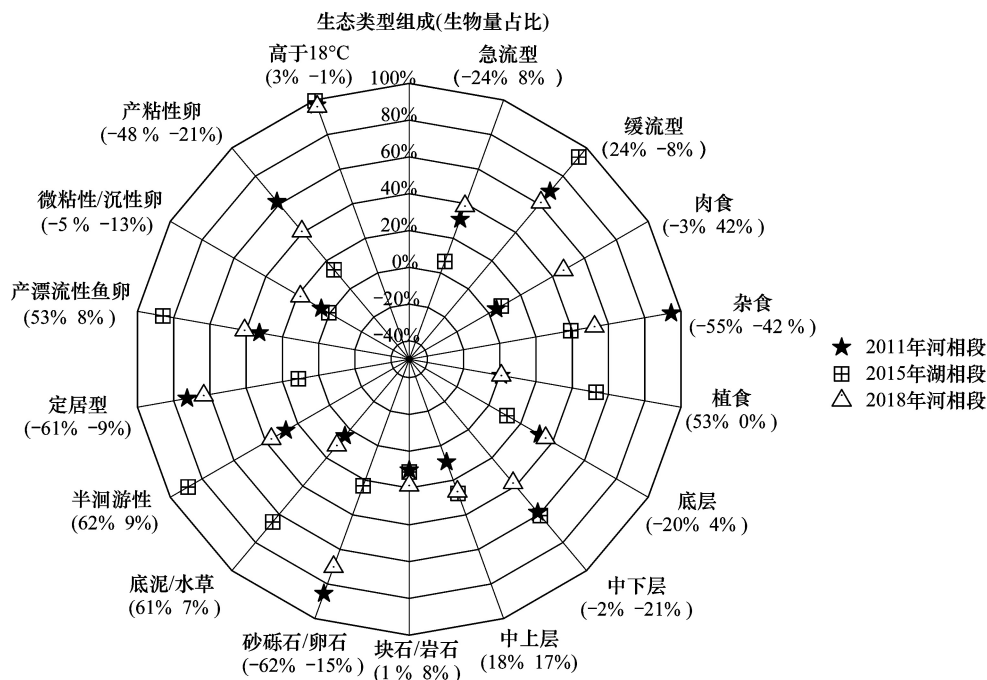


图 5 各生态类型组成比例变化

Fig.5 Variation of composition proportion of ecological types

以建库前 2011 年为参考,括号中的值分别为 2015 年、2018 年生物量生态类型占比与 2011 年的差值

3 讨论

3.1 水库建设影响下鱼类群落变化

梯级水库建设后鱼类种类数普遍出现减少趋势,例如三峡水库二期蓄水后监测到鱼类种类数减少了 21 种,其中喜急流浅滩或洄游型的土著鱼类减少较多,包括鳗鲡 (*Anguilla japonica*)、泉水鱼 (*Semilabeo prochilus*)、黄石爬鮡 (*Euchiloglanis kishinouyei* Kimura) 等^[20]。水库修建后溪洛渡至向家坝区间鱼类种类减少,主要有以下两方面原因:(1)河湖分区引起的生境条件变化,水库建设前土著鱼类多为喜河相生境的鱼类,河相段减少和湖相段增加导致急流浅滩型生境锐减,因此土著鱼类减少较为明显;(2)河相段长度对鱼类洄游、怀卵量、漂流性鱼卵的孵化等均有重要作用,河相段减少和水库的阻隔导致的鱼类洄游距离不足,半洄游性鱼类的怀卵量减少^[6];同时,漂流性鱼卵因漂流距离不够,降低了其存活概率,最终导致半洄游性和产漂流性卵鱼类的自然繁殖能力退减。由于水库的运行和人工干扰,外来鱼类种类数有所增加。例如,巴西 Capivara 水库^[21]运行前有土著鱼类 57 种,运行 20 年后土著鱼类减少 27 种,但是新增外来鱼类 11 种;汉江石泉水库至喜河水库区间水库运行 37 年后,新增外来鱼类 22 种^[5]。外来鱼类增加主要由人工养殖和增殖放流活动引起^[22]。溪洛渡至向家坝区间,大型鱼类与小型鱼类组成变化趋势存在差别,除二者对生境变化的适应能力不同外,草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢 (*Ctenopharyngodon idellus*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*) 等大型品种鱼类人工增殖放流的比例较高,也是导致大型鱼类占比升高的原因。此外,河相段、湖相段鱼类组成也存在差异,水坝修建前原始河相段鱼类向现存河相段聚集,因此河相段鱼类种类数相对较高,在三峡水库也存在类似的情况^[20]。

3.2 河相及湖相鱼类生态类型差异

流速驱动的泥沙输移、营养盐状态、水生生物等在河相、湖相空间分布差异^[22-25]和鱼类群落生态类型的变化关系密切。绥江段由河相变为湖相后,底质偏好和洄游特性等生态类型变化最为显著。溪洛渡水库修建后向家坝入库泥沙明显减少^[25],且泥沙颗粒细化以悬移质的粉细砂为主,悬移质泥沙在湖相区域沉积,而溪洛渡坝下河相段则多表现为冲刷^[26]。现场调查情况显示,河相段以块石及砾石为主,湖相段以粉细砂及淤泥为主。绥江段由河相变为湖相后鱼类生态类型发生转变,一方面由底质类型变化造成,另一方面和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)喜聚集于湖相有关,表现为绥江湖相段草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)生物量占比明显高于建库前后的河相段。建库后绥江段生境湖泊化使得急流型鱼类减少而缓流性鱼类增加。此外,有研究表明过渡段是泥沙沉积和生源物质沉积的热点区域^[4],同时,过渡段水流条件相对较缓,为底栖型、喜流速的铜鱼(*Coreius heterodon*)幼鱼、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)幼鱼及杂食性的黄颡鱼属(*Pelteobagrus*)提供了育肥场所。过渡段处于河相段和湖相段之间,生源物质丰富十分适合幼鱼的育肥,该区间鱼类的单位数量可能高于河相段和湖相段^[3]。

现存河相段与建库前河相段相比鱼类食性变化最为明显,杂食性减少而肉食性增加,这是因为河相段缩短后,急流浅滩型栖息地减少,而肉食性鱼类多聚集于河相段,导致现存河相段肉食性鱼类密度增高。此外,流水环境下块石和砾石底质更适应于底栖动物的生殖^[27],静水环境下底栖动物多样性会随底质粒径的减小而减少^[28-29],故而肉食性鱼类和以肉食为主的杂食性鱼类在河相段的密度相对较高,植食性和以滤食为主的杂食性鱼类在湖相段较多。中下层、产粘性卵、喜砂砾石/卵石底质的鱼类小幅度减少,主要原因是现存河相段栖息空间不足,生活于水流中下层及喜砂卵石底质的短身鮡(*Gobiobotia abbreviate*)、宽体沙鳅(*Botia reevesae*)、长薄鳅(*Leptobotia elongate*)、等小型土著鱼类竞争能力低于南方大口鲶(*Silurus meridionalis*)、长吻鮠(*Leiocassis longirostris*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus Basilewsky*)等大型肉食鱼类。

本文主要揭示水库运行前后,河相段和湖相段鱼类群落组成和生态类型的差异。据 2018 年湖相段现场观测及当地渔民反映,湖相段草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Ctenopharyngodon idellus*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、倒刺鲃(*Spinibarbus denticulatus denticulatus*)、黄颡鱼属(*Pelteobagrus*)等鱼类数量相对较多,而铜鱼(*Coreius heterodon*)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus Basilewsky*)等鱼类的捕捞量相对较少,表明 2018 年河相、湖相段鱼类组成及变化趋势与已有数据显示的河相、湖相鱼类组成及变化趋势相一致。总体而言,在河相段中,喜急流、生活于中下层、底栖型土著鱼类居多^[28,30];而湖相段以喜缓流静水鱼类为主。人工增殖放流的鲢(*Ctenopharyngodon idellus*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等在湖相段较为丰富^[5,31]。河相、湖相生境分区、鱼类饵料分布不均以及人工增殖放流是导致各区段鱼类生态类型差异的重要原因。

3.3 水库建设后鱼类群落变化影响因素及保护建议

鱼类多样性变化与水库运行时间^[21]、水库河相、湖相分区^[3]、支流生境^[2]等多种因素有关。水库运行初期由于生境变化剧烈,鱼类种群多样性呈快速降低趋势,但随着鱼类对生境的适应及外来鱼类增加,多样性有所升高。如苏里南 Brkopordo 大坝^[32],水库初期运行 4 年间鱼类多样性和均匀度出现大幅度降低;运行 40 年后,鱼类种类数、多样性和均匀度数虽仍低于自然河段时期,但均高于大坝运行初期。鱼类多样性持续降低的时间跨度^[1,33]与生源要素、水库库容以及敏感鱼类消失等因素有关。溪洛渡至向家坝区间鱼类的多样性出现小幅度降低,但多样性差异不明显,主要原因是水库建设前鱼类资源已经受人为过度捕捞影响,一直处于比较匮乏的状态^[12],故水库运行对鱼类多样性的影响不显著。目前,溪洛渡至向家坝区间鱼类多样性变化仍未达到稳定状态,优势物种不断改变,对鱼类群落多样性也存在一定影响。此外,部分敏感性鱼类种类和数量仍处于持续减少的阶段,根据 2018 年调查的渔获物情况,圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)仍然是该区域的优势物种,但其鱼龄组成不平衡、性腺发育不成熟等情况比较明显;同时,溪洛渡至向家坝之间河相区长度小于 40 km,圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)和铜鱼(*Coreius heterodon*)等漂流性鱼卵的孵化概率降低。但河相段减少对黄颡

鱼属(*Pelteobagrus*)、鲇属(*Silurus Linnaeus*)、长吻鮠(*Leiocassis longirostris*)等产粘性卵的鱼类产卵影响较小,后者仍可依赖自然繁殖来维持其种群稳定性。

水库河湖分相形成后,急流浅滩型栖息地减少,大量的历史产卵场水动力条件发生改变,干流鱼类繁殖能力降低。在亚马逊河的 Porto primavera 水库进行多样性研究发现,水库运行的 14 年内,虽淹没了大量的历史产卵场导致物种丰富度有所降低,然而该区域拥有多条植被丰富的支流,多数鱼类能找到适合的替代生境,因此鱼类的多样性并未出现下降情况^[33],说明支流替代生境及人工生态保护修复可以成为干流鱼类多样性恢复的重要手段^[34]。溪洛渡至向家坝区间具有大汶溪和中都河两条地理条件良好的支流,但 2018 年现场调研显示,两条支流均存在引水发电导致的河道生态流量不足以及溢流堰建设导致的支流生境阻隔的问题,加强对支流的生境恢复应作为维持金沙江干流鱼类多样性的重要手段。

4 结论

通过对溪洛渡至向家坝区间鱼类的调查,并结合历史数据进行比较,分析了金沙江下游梯级水库影响下鱼类群落的变化,揭示了水库河相段与湖相段鱼类群落生态类型差异的形成原因,并受此启发提出了金沙江鱼类保护的支流替代生境建议。研究主要结论如下:

梯级水库建设后,金沙江溪洛渡至向家坝区间鱼类种类减少,随着水库运行时间推移,该减少趋势放缓,但尚未达到新的稳定状态。溪洛渡至向家坝区间,自由流动水体长度小于 65 km,其中流速大于 0.5 m/s 的河相长度不足 40 km。河相段减少,导致该区间特有的优势物种圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)繁殖力降低,其种群优势地位和种群稳定面临威胁。

梯级水库河相段与湖相段鱼类群落生态类型结构差异较大。溪洛渡至向家坝河相段缩短,使得河相段喜急流、肉食性、中下层和底栖型的土著鱼类密度高于建库前自然河相段;湖相段的增加为喜缓流静水、杂食、中上层的鱼类提供了充足的生存空间和丰富的饵料。此外,增殖放流等人工干预的影响也不容忽视。

加强对大汶溪、中都河以及白鹤滩上游的黑水河等支流的生境恢复,可作为金沙江梯级水库影响下干流鱼类保护的重要手段之一。

致谢:华中农业大学马徐发老师和四川省农业科学院水产研究所周波帮助样品采集及处理,特此致谢

参考文献(References):

- [1] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, Revenga C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [2] Liermann C R, Nilsson C, Robertson J, Ng R Y. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. *Bioscience*, 2012, 62(6): 539-548.
- [3] Agostinho A A, Gomes L C, Santos N C L, Ortega J C G, Pelicice F M. Fish assemblages in Neotropical reservoirs: colonization patterns, impacts and management. *Fisheries Research*, 2016, 173: 26-36.
- [4] Sá-Oliveira J C, Hawes J E, Isaac-Nahum V J, Peres C A. Upstream and downstream responses of fish assemblages to an eastern Amazonian hydroelectric dam. *Freshwater Biology*, 2015, 60(10): 2037-2050.
- [5] 王晓臣, 杨兴中, 邢娟娟, 吕彬彬, 张军燕, 张建军. 汉江喜水库区形成对鱼类群落结构的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 932-937.
- [6] 吴清江, 程飞. 金沙江下游梯级电站运行对产漂浮性卵鱼类的影响及保护策略//三峡工程与长江水资源开发利用及保护国际研讨会论文集, 2013.
- [7] 李捷, 李新辉, 贾晓平, 李跃飞, 何美峰, 谭细畅, 王超, 蒋万祥. 西江鱼类群落多样性及其演变. *中国水产科学*, 2010, 17(2): 298-311.
- [8] 吴江. 金沙江鱼类及发展渔业议. *淡水渔业*, 1989, (5): 3-9.
- [9] 高少波, 唐会元, 乔晔, 杨志, 陈金生. 金沙江下游干流鱼类资源现状研究. *水生态学杂志*, 2013, 34(1): 44-49.
- [10] 刘芬良. 晚新生代金沙江下游段地貌演化与河谷发育研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [11] 李盛青, 刘道明, 丁晓文. 金沙江下游梯级水库调度对其航道的影响研究. *人民长江*, 2014, 45(12): 62-64+88.
- [12] 杨志, 唐会元, 朱迪, 高少波, 徐薇, 万力, 龚昱田, 乔晔. 金沙江干流攀枝花江段鱼类种类组成和群落结构研究. *水生态学杂志*, 2014,

35(5): 43-51.

- [13] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京: 农业出版社, 1991.
- [14] 丁瑞华. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- [15] 王俊, 苏巍, 杨少荣, 姜伟. 金沙江一期工程蓄水前后缓江段鱼类群落多样性特征. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 394-401.
- [16] Suen J P, Herricks E E. Investigating the causes of fish community change in the Dahan River (Taiwan) using an autecology matrix. *Hydrobiologia*, 2006, 568(1): 317-330.
- [17] 杨志, 张鹏, 唐会元, 龚云, 董纯, 陈小娟, 赵娜. 金沙江下游圆口铜鱼生境适宜度曲线的构建. 生态科学, 2017, 36(5): 129-137.
- [18] 杨志, 龚云, 朱迪, 潘磊, 董纯, 刘宏高, 陈小娟, 唐会元. 金沙江中下游圆口铜鱼的繁殖生物学. 水生生物学报, 2018, 42(5): 1010-1018.
- [19] 高少波, 唐会元, 陈胜, 杨志, 董方勇. 金沙江一期工程对保护区圆口铜鱼早期资源补充的影响. 水生态学杂志, 2015, 36(2): 6-10.
- [20] 杨志, 唐会元, 朱迪, 刘宏高, 万力, 陶江平, 乔晔, 常剑波. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局. 生态学报, 2015, 35(15): 5064-5075.
- [21] Orsi M L, Britton J R. Long-term changes in the fish assemblage of a neotropical hydroelectric reservoir. *Journal of Fish Biology*, 2014, 84(6): 1964-1970.
- [22] Power M E, Dietrich W E, Finlay J C. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. *Environmental Management*, 1996, 20(6): 887-895.
- [23] Dudgeon D. The ecology of tropical Asian rivers and streams in relation to biodiversity conservation. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31: 239-263.
- [24] Greathouse E A, Pringle C M, McDowell W H, Holmquist J G. Indirect upstream effects of dams: consequences of migratory consumer extirpation in Puerto Rico. *Ecological Applications*, 2006, 16(1): 339-352.
- [25] 朱玲玲, 陈翠华, 张继顺. 金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究. 泥沙研究, 2016, (5): 20-27.
- [26] 胡艳芬, 吴卫民, 陈振红. 向家坝水电站泥沙淤积计算. 人民长江, 2003, 34(4): 36-38.
- [27] 段学花, 王兆印, 田世民. 河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(9): 1553-1556.
- [28] 简东, 黄道明, 常秀岭, 张庆, 谢山, 谢文星, 杨汉运. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替. 水生态学杂志, 2010, 3(6): 12-18.
- [29] 张志英, 袁野. 溪落渡水利工程对长江上游珍稀特有鱼类的影响探讨. 淡水渔业, 2001, 31(2): 62-63.
- [30] 蒋艳, 冯顺新, 马巍, 李翀. 金沙江下游梯级水电开发对鱼类影响的分析//水力学与水利信息学进展, 2009: 63-69.
- [31] 林鹏程, 高欣, 刘春池, 刘焕章. 葛洲坝上下游江段鱼类时空分布特征研究. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1047-1053.
- [32] Mol J H, de Mérona B, Ouboter P E, Sahdew S. The fish fauna of Brokopondo Reservoir, Suriname, during 40 years of impoundment. *Neotropical Ichthyology*, 2007, 5(3): 351-368.
- [33] Granzotti R V, Miranda L E, Agostinho A A, Gomes L C. Downstream impacts of dams: shifts in benthic invertivorous fish assemblages. *Aquatic Sciences*, 2018, 80(3): 28-41.
- [34] Marques H, Dias J H P, Perbiche-Neves G, Kashiwaqui E A L, Ramos I P. Importance of dam-free tributaries for conserving fish biodiversity in Neotropical reservoirs. *Biological Conservation*, 2018, 224: 347-354.