

梯级开发下金沙江下游鱼类群落结构特征及环境驱动因子

屈霄^{1,2,3}, 郭传波², 熊芳园^{2,3}, 辛未², 陈宇顺^{2,3}, 苏巍¹

(1. 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室 中国三峡集团中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100;

2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过分析处于不同水电开发程度江段的鱼类群落结构特征, 探究在梯级水电开发下影响鱼类群落的主要环境驱动因子, 为金沙江下游相关水电工程的生态环境效应评价和管理建议提供理论支撑。2017年春季和秋季在金沙江下游乌东德水电站至向家坝水电站坝下江段, 应用多网目复合刺网进行鱼类群落定量研究, 分析鱼类多样性特征以及鱼类群落与环境因子的关系。鱼类调查结果表明, 乌东德、白鹤滩江段与溪洛渡、向家坝江段鱼类群落有明显差异:保持峡谷激流型生境的乌东德和白鹤滩江段鱼类组成以土著特有鱼类为主,优势种为喜流水的圆口铜鱼(*C. guichenoti*)、泉水鱼(*P. procheilus*)、犁头鳅(*L. fimbriata*);已成库区生境的溪洛渡和向家坝江段鱼类组成多为长江中下游常见种类,优势种为喜静水缓流的鱥(*H. leucisculus*)、瓢鱼(*P. sinensis*)、似鱈(*T. wainho-nis*)。典范对应分析结果表明,影响金沙江下游鱼类群落结构的主要环境驱动因子包括水深、总固体悬浮物、电导率、pH 和水温等。溪洛渡、向家坝江段与乌东德、白鹤滩江段生境差异显著,表现为溪洛渡、向家坝江段平均流速显著低于乌东德、白鹤滩江段,而平均水深则相反。

关键词:金沙江; 梯级电站; 鱼类群落; 环境驱动因子

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)06-0046-11

金沙江下游是从攀枝花(雅砻江河口)到宜宾(岷江河口)的长江干流江段,流域面积21.4万km²,河段长768 km,自然落差712.6 m,河道平均比降0.093% (中国河湖大典, 2010)。金沙江北接四川盆地,南承云贵高原,地形复杂,属于典型的峡谷激流生境。特殊的自然条件孕育了特有丰富的淡水鱼类区系,属江河鱼类及高原鱼类分布的过渡地带。金沙江下游一直以来是我国淡水鱼类资源最为丰富的地区之一,且多数为长江上游特有鱼类(吴江和吴明森, 1990),种类多达58种,占特有鱼类总数的近一半(Guo et al, 2019; Liu et al, 2020)。

同时,金沙江又蕴藏储量巨大的水力势能,可开发量达3 790万kW,是我国规划最大的水电基地和“西电东送”的重要电源基地,共规划有19个梯级电站,其中金沙江下游规划有乌东德、白鹤滩、溪洛

渡、向家坝4个梯级水电站,均为高坝巨型深水库,溪洛渡与向家坝水电站已蓄水发电,乌东德和白鹤滩水电站工程将分别在2021年和2022年全部竣工(长江电力, <https://www.cypc.com.cn/>)。随着梯级电站的完工与投入使用,金沙江下游原本自然连续的激流河段将变成片段化的、缓流甚至静止的水库环境,水文情势如水位、流速、水温、浑浊度等都会随之发生巨大改变,极大影响流域内原有的鱼类群落结构和分布状况(陈大庆等, 2005; 骆辉煌等, 2012; Chen et al, 2017; 陈宇顺, 2018)。

国内外在对水电开发所引发的环境影响和生态效应进行了大量研究和评估后发现,梯级水电开发阻断了河流连通性,致使河流生境片段化,且水库间受下级水库顶托作用,原河流栖息地的形态、水文、水化学和水生生物学特征均会发生改变(Kummu & Varis, 2007; Li & He, 2008; Agostinho et al, 2016)。鱼类群落对梯级水电开发的响应已成为备受关注的研究热点之一(Lytte & Poff, 2004; Jel-lyman & Harding, 2012; Ziv et al, 2012)。水电站蓄水后,库区流速变缓、水位升高、流态稳定,喜流水性鱼类不仅栖息空间显著被压缩,作为其产卵和发育的流速刺激也将消失(蒋艳等, 2009);静水面积的增加使得定居型鱼类生境扩大,同时也增加了外来

收稿日期:2020-06-19

基金项目:三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室开放课题(Y641291201);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-3-2);中国科学院百人计划项目(Y62302)。

作者简介:屈霄,1993年生,男,博士研究生,主要从事水域生态学研究。E-mail:quxiaox@ihb.ac.cn

通信作者:苏巍。E-mail:su_weil@ctg.com.cn

陈宇顺。E-mail:yushunchen@ihb.ac.cn

种入侵风险(Moyle & Mount, 2007)。坝下江段因库区低温清水下泄,会直接影响鱼类新陈代谢(曹文宣等,2007),对鱼类的产卵、生长和觅食产生不利影响。而梯级电站大坝隔断引起生境片段化,阻隔了鱼类扩散和洄游通道,造成鱼类物种和资源量减少(Petesse & Petre, 2012)。近年来金沙江下游土著鱼类种类减少,渔获物小型化、低龄化现象明显,鱼类资源整体呈衰退趋势(高少波等,2013;唐会元等,2014;李婷等,2020)。王导群等(2019)和周湖海等(2019)于2016—2018年在金沙江下游攀枝花至巧家段(白鹤滩水电站坝址所在地)累计发现了8处漂流性鱼类产卵场,江段水位、流量和水温与鱼类产卵规模显著相关。

现阶段,金沙江下游乌东德与白鹤滩水电站所处的江段正处于大坝建设的施工进行阶段,而向家坝水电站和溪洛渡水电站之间的部分江段已变成缓流甚至静止的水库环境,亟需在梯级电站投产前探明各江段的鱼类群落结构及主要环境驱动因子。因此,本研究将比较分析不同江段的鱼类群落结构特征,探究在梯级水电开发下影响鱼类群落的主要环境驱动因子,以期为金沙江下游相关水电工程的生态环境效应评价和管理建议提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样断面设置

研究区域为金沙江下游乌东德水电站至向家坝水电站坝下江段,其中,溪洛渡和向家坝水电站分别于2007年和2008年完成截流,2014年蓄水发电;乌东德和白鹤滩水电站分别于2016年和2015截流进入导流洞施工阶段。现阶段从乌东德水电站库尾雅砻江河口至溪洛渡库尾490 km干流江段仍处于正常流水状态,溪洛渡库尾至向家坝水电站坝下的293 km干流江段已从“河流相”转变为“水库相”。因此,本研究以乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝4级水电站为中心,选择以每级电站的上游、下游共8个代表性区域为采样断面(图1),其中仍保持正常流水的乌东德和白鹤滩江段选择距离在建坝址5 km外江段进行样品采集,在已成库区的溪洛渡和向家坝江段选取电站上游静水江段以及电站下游尾水回水区江段采集样品。

1.2 样品采集

野外样品采集时间为2017年春季(5月)和秋季(10月)。为了获取更多更全面的鱼类群落样品,本研究采用了多种捕捞方式对每个采样区1 km范

围内不同生境开展了采样。在沿岸缓流生境选取2~3处适宜位置,共设置复合网目刺网沉网和浮网各2条(12种网目随机拼接,长30 m,高1.5 m)和三层刺网沉网2条(长80 m,高5 m,内层网目2 cm,外层网目5 cm);多网目复合刺网采样方法参照Appeberg et al (1995)进行,该方法已在国内鱼类监测中广泛应用(汪振华等,2013;郭传波等,2018)。在河流中间急流生境采取流刺网(长100 m,高1.5 m,网目3 cm)进行喜流水性鱼类采集(但胜国等,1999;田辉伍等,2016)。对采集到的鱼类现场鉴定到种,不确定的种类则保存在75%酒精内带回实验室进行进一步的分析鉴定。在采样现场记录鱼类的种类数、每种鱼的数量、重量等。

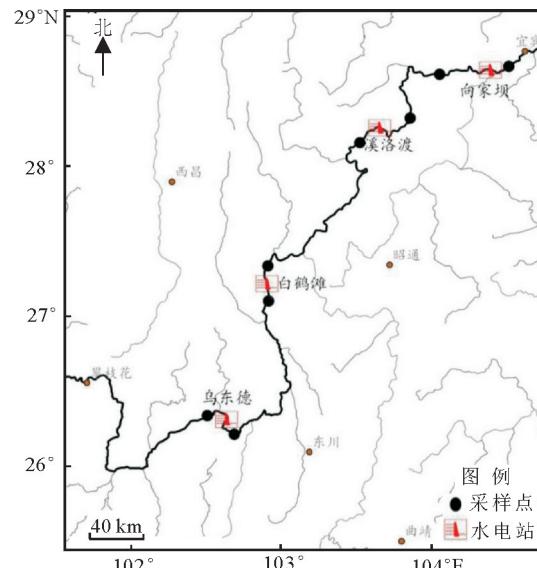


图1 2017年金沙江下游鱼类群落调查区域与样点分布

Fig.1 Map of the study area and location of sampling sites in the lower Jinsha River

与此同时,在每个采样区域采集水样,选取易受大坝和其他人类活动影响的水环境因子进行测定,包括现场测量水深(WD)、水温(WT)、透明度(SD)、pH、电导率(COND)、溶氧(DO)、浊度(NTU)、流速(FLOW)等。同时取2 L表层(即水面以下0.5 m处)水样带回实验室,测定叶绿素a(Chl-a)、COD_{Mn}、总氮(TN)和总磷(TP)、总硬度(TH)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)等指标,分析方法根据APHA (2005)进行。

1.3 数据分析

生物多样性的计算采用Shannon-Wiener多样性、Margalef丰富度、Pielou均匀度和Simpson优势度等指数。采用相对重要性指数(index of relative importance, IRI)确定优势种类(Pinkas et al,

1971)。参考《四川鱼类志》、《中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷)》和《中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(下卷)》获取金沙江下游鱼类生态类型,包括食性、栖息地要求、产卵类型等。为了比较不同江段鱼类群落相似性,在R软件“betapart”程序包中应用各江段鱼类种类有无数据计算群落Sørensen相异度指数(Baselga & Orme, 2012)。

对各江段环境因子进行单因素方差分析(One-way ANOVA),如果单因素方差差异显著,则进行多重比较;如果方差具有同质性,就进行LSD(the least significant difference)检验;如果方差不具同质性,就选用非参数Games-Howell检验。同时应用软件Canoco for Windows 4.5对金沙江下游鱼类群落和水环境因子进行分析。物种数据进行去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA),若最大梯度长度(Lengths of gradient)最大值超过4,适合选择单峰模型,即采用典型相关分析(Canonical correspondence analysis, CCA)(Braak & Smilauer, 2002)。环境变量的重要值按其单独解释物种数据的方差值的大小排序,其解释的显著性由Monte Carlo检验确定。物种数据和环境数据(除pH)经过 $\log(x+1)$ 转换。

2 结果与分析

2.1 种类组成及生物量分布

2017年在金沙江下游江段采集到鱼类1 309尾,共70种,隶属于5目12科48属(表1)。

表1 2017年金沙江下游梯级电站江段鱼类种类组成

Tab.1 Fish species composition in the cascaded dams section of the lower Jinsha River (2017)

种类	乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	物种缩写
鲑形目 Salmoniformes					
太湖新银鱼 <i>N. taihuensis</i> b			+	+	<i>N.ta</i>
鲤形目 Cypriniformes					
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	+	+	+		<i>A.riv</i>
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i> ^{a,b}	+D	+D	+		<i>C.gu</i>
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i> ^b				+	<i>C.he</i>
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	+	+		+	<i>P.pa</i>
云南盘鮈 <i>Discogobio yunnanensis</i> ^b	+				<i>D.yu</i>
墨头鱼 <i>Garra pingi</i>		+	+	+	<i>G.pi</i>
花鮰 <i>Hemibarbus maculatus</i>	+		+		<i>H.ma</i>
唇鮰 <i>H. Labeo</i>				+	<i>H.la</i>
丁鱥 <i>Tinca tinca</i>				+	<i>T.ti</i>
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>				+	<i>C.id</i>
鲫 <i>Carassius auratus auratus</i>	+	+	+	+	<i>C.au</i>
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	+		+	+	<i>C.ca</i>
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>			+	+	<i>C.er</i>
似鱎 <i>Toxabramis wwinhonis</i>		+		+D	<i>T.ww</i>
贝氏鮈 <i>Hemiculter bleekeri</i> ^b				+D	<i>H.bl</i>
翫 <i>H. leucisculus</i>	+D	+	+D	+D	<i>H.le</i>

续表 1

种 类	乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	物种缩写
鱥 <i>Hopophthalmichthys molitrix</i>				+	<i>H.mo</i>
厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i> ^{a,b}				+	<i>M.pe</i>
中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>				+D	<i>S.si</i>
白甲鱼 <i>O. sima</i>	+				<i>O.si</i>
宽鳍鱲 <i>Zacco platypus</i>	+D	+	+D	+	<i>Z.pl</i>
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>				+	<i>O.bi</i>
麦瑞加拉鲮 <i>Cirrhinus mrigala</i>				+	<i>C.mr</i>
泉水鱼 <i>Pseudogyrincheilus procheilus</i> ^{a,b}	+D	+			<i>P.pr</i>
寡鳞飘鱼 <i>Pseudolaubuca engraulis</i> ^b			+	+	<i>P.en</i>
飘鱼 <i>P. sinensis</i>	+	+	+D	+	<i>P.si</i>
银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>		+		+	<i>S.ar</i>
吻鮈 <i>Rhinogobio typus</i> ^b				+	<i>R.ty</i>
长鳍吻鮈 <i>R. ventralis</i> ^{a,b}		+			<i>R ve</i>
中华鳑鲏 <i>Rhodeus sinensis</i>	+	+	+		<i>R.si</i>
高体鳑鲏 <i>R.ocellatus</i>		+		+	<i>R.oc</i>
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>		+	+	+	<i>S.da</i>
长蛇鮈 <i>S. dumerili</i> ^b	+			+	<i>S.du</i>
昆明裂腹鱼 <i>Schizothorax grahami</i> ^{a,b,d}	+	+	+		<i>S.gr</i>
细鳞裂腹鱼 <i>S. chongi</i> ^{a,b}		+			<i>S.ch</i>
短须裂腹鱼 <i>S. wangchiachii</i> ^{a,b}	+				<i>S.wa</i>
中华裂腹鱼 <i>S. sinensis</i>		+			<i>S.si</i>
齐口裂腹鱼 <i>S. prenanli</i>	+				<i>S.pr</i>
中华沙鳅 <i>Botia reevesae</i> ^b	+	+	+		<i>B.re</i>
长薄鳅 <i>Leptobotia elongata</i> ^{a,b,d}		+		+	<i>L.el</i>
薄鳅 <i>Leptobotia pellegrini</i>		+			<i>L.pe</i>
红唇薄鳅 <i>Leptobotia rubrilabris</i>				+	<i>L.ru</i>
短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i> ^{a,b}			+D		<i>P.po</i>
红尾副鳅 <i>P. variegatus</i> ^b		+			<i>P.va</i>
双斑副沙鳅 <i>Parabotia bimaculata</i> ^{a,b}	+				<i>P.bi</i>
东方高原鳅 <i>Triplophysa orientalis</i> ^b	+	+	+		<i>T.or</i>
西昌高原鳅 <i>Triplophysa xichangensis</i> ^{a,b}	+			+	<i>T.xi</i>
贝氏高原鳅 <i>Triplophysa bleekeri</i> ^{a,b}	+		+		<i>T.bl</i>
戴氏南鳅 <i>Schistura dabryi</i> ^b	+				<i>S.da</i>
中华间吸鳅 <i>Hemimyzon sinensis</i>	+		+		<i>H.si</i>
短身金沙鳅 <i>Jinshaia abbreviata</i> ^{a,b,c}	+				<i>J.ab</i>
犁头鳅 <i>Lepturichthys fimbriata</i> ^{a,b}	+D	+			<i>L.fi</i>
西昌华吸鳅 <i>Sinogastromyzon sichangensis</i> ^{a,b}		+			<i>S.si</i>
鮀形目 Siluriformes					
长吻鮀 <i>L. longirostris</i> ^b		+			<i>L.lo</i>
长须黄颡鱼 <i>Pelteobagrus eupogon</i> ^{a,b,d}	+	+D	+D	+D	<i>P.eu</i>
黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i>			+	+	<i>P.fu</i>
光泽黄颡鱼 <i>P. nitidus</i>	+	+D			<i>P.ni</i>
瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i>			+		<i>P.va</i>
乌苏拟鲿 <i>P. ussuriensis</i>		+D			<i>P.us</i>
白缘油鱼 <i>Liobagrus marginatus</i> ^{a,b,d}	+	+			<i>L.ma</i>
鮀 <i>Silurus asotus</i>	+	+		+	<i>S.as</i>
大口鮀 <i>S. meridionalis</i> ^b	+			+D	<i>S.me</i>
中华纹胸𬶐 <i>G. sinense sinense</i> ^{a,b}	+	+			<i>G.si</i>
锦形目 Cyprodontiformes					
间下鱥 <i>Hyporhamphus intermedius</i>			+		<i>H.in</i>
鲈形目 Perciformes					
波氏吻鰕虎鱼 <i>R. clifford popei</i> ^{b,f}				+	<i>R.cl</i>
子陵吻鰕虎鱼 <i>R. giurinus</i>	+D		+	+	<i>R.gi</i>
莫比桑克口孵非鲫 <i>Oreochromis mossambicus</i>		+	+		<i>O.mo</i>
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>		+	+	+	<i>M.sa</i>

注: “+”表示该物种出现, “+D”表示该物种为优势种, ^a 长江流域特有种, ^b 中国特有种, ^c 中国特有属, ^d 受威胁种, ^f 河口鱼。

Note: “+” denotes observed species, “+D” denotes the dominant species, ^a denotes the species endemic to the Yangtze river basin; ^b denotes the species endemic to China; ^c denotes the genera endemic to China; ^d denotes the threatened species; ^f denotes fish species in the estuaries.

2.2 优势种及生态类型

以相对重要性指数(*IRI*)衡量金沙江下游各江段鱼类重要性发现,2017年5月乌东德江段主要以圆口铜鱼(*IRI*=190.3)、泉水鱼(141.7)、子陵吻虾虎鱼(111.5)、犁头鳅(104.1)为主;白鹤滩江段鱼类优势种为圆口铜鱼(414.3)、短体副鳅(121.2)、乌苏拟鲿(121.0)、光泽黄颡鱼(105.2);溪洛渡江段翫(2077.4)、飘鱼(417.7)、宽鳍鱲(112.6)为优势类群;向家坝江段以翫(562.1)、似鱈(133.8)、长须黄颡鱼(123.0)、贝氏翫(120.3)为主。10月乌东德江段以宽鳍鱲(235.6)、圆口铜鱼(190.8)和翫(116.7)为优势种;白鹤滩江段以长须黄颡鱼(321.4)、短体副鳅(172.2)为优势种;溪洛渡江段优势种为翫(548.11)、长须黄颡鱼(307.8)和大口鮈(303.9);翫(307.9)和中华倒刺鲃(117.9)为向家坝江段优势种。整体而言各江段鱼类优势种类有着明显的区别,乌东德和白鹤滩江段以圆口铜鱼、泉水鱼、犁头鳅和短体副鳅为主,而在溪洛渡和向家坝江段则以翫、飘鱼、似鱈为优势种类。

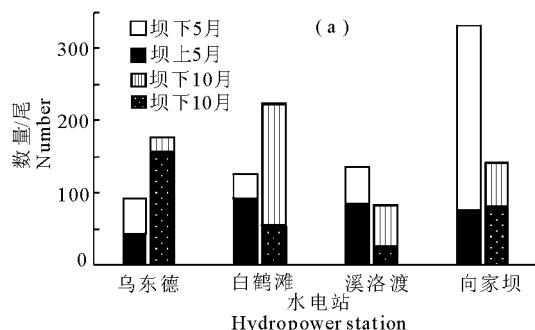


图2 2017年金沙江下游梯级电站江段鱼类数量(a)和重量(b)

Fig.2 Fish abundance (a) and biomass (b) for each survey section in the lower Jinsha River in 2017

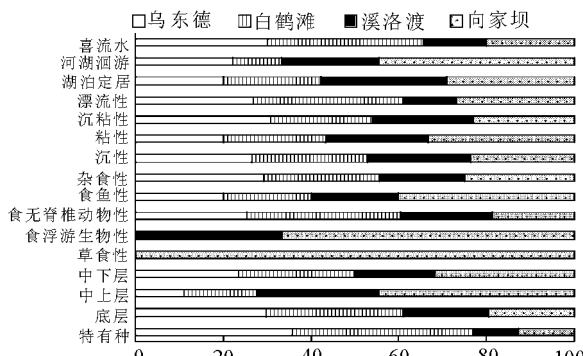


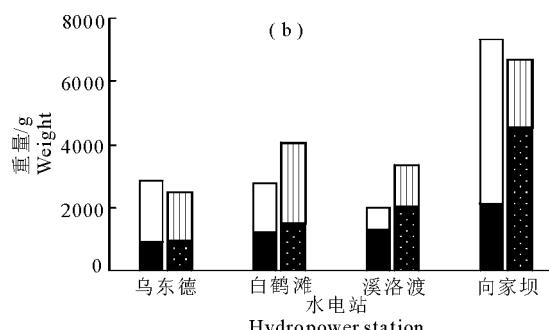
图3 2017年金沙江下游梯级电站江段鱼类各生态类型占比

Fig.3 Percentage composition of each ecotype in the lower Jinsha River (2017)

2.3 生物多样性及群落相似性

金沙江下游干流各采样断面鱼类多样性变动较大(图4),2017年全年各江段Shannon-weiner指数

依据鱼类的流速偏好、产卵类型、食性偏好、水深偏好及是否为长江上游特有种类等生态指标对金沙江下游梯级电站不同江段鱼类生态类型分析发现,不同江段具优势的鱼类生态类型不尽相同,总体表现出乌东德和白鹤滩江段长江上游特有鱼类丰富、喜流水生境、多产漂流性卵、杂食性偏好食无脊椎动物、多为底层鱼类;溪洛渡和向家坝江段则以河湖常见鱼类为主,定居型居多、产粘性/沉性卵、杂食性鱼类,中上层鱼类为主(图3)。全年在乌东德和白鹤滩江段共发现18种长江上游特有鱼类,而在溪洛渡和向家坝江段仅采集到7种上游特有鱼类,这7种中有5种特有鱼类为向家坝坝下江段采集到。喜流水生境鱼类在乌东德和白鹤滩江段占所有鱼类的60%~80%,而溪洛渡和向家坝江段占27%~40%;湖泊定居性鱼类在乌东德和白鹤滩江段占比约为19.6%,在溪洛渡和向家坝江段占45%左右。喜静水和缓流生境的鱼类在已成库区的江段正逐渐占据主导地位。



白鹤滩水江段最高为2.61,其次为乌东德江段2.47,向家坝江段2.44,溪洛渡江段最低为1.64。其中5月份以白鹤滩坝上游江段Shannon-weiner指数最高2.49,溪洛渡坝上游最低0.84;10月份以向家坝坝下江段多样性最高,其次为乌东德坝上和白鹤滩坝下江段,溪洛渡坝上江段最低。平均Pielou均匀度指数为白鹤滩(0.82)>乌东德(0.79)>向家坝(0.60)>溪洛渡(0.44);乌东德电站下游Pielou均匀度指数最高,为0.81,向家坝电站上游最低,为0.57。Margalef丰富度指数乌东德(4.85)>向家坝(4.60)>白鹤滩(4.34)>溪洛渡(2.86)。平均Simpson优势度指数白鹤滩>向家坝>溪洛渡>乌东德。

基于群落Sørensen相异度指数对金沙江下游各江段鱼类群落进行UPGMA层级聚类,结果发现

5月份在高度为0.75时,乌东德和白鹤滩江段鱼类群落与溪洛渡和向家坝江段有着中等不相似性;10月份在高度为0.70时,各江段鱼类群落可分为3支,分别为乌东德坝下和白鹤滩坝上江段、乌东德坝上和白鹤滩下江段、溪洛渡和向家坝江段(图5)。总体而言,乌东德、白鹤滩江段鱼类群落与溪洛渡、向家坝江段鱼类群落存在着较大差异,其主要原因

为乌东德和白鹤滩江段鱼类组成以喜流水生境鱼类种类居多,而溪洛渡和向家坝江段鱼类以喜缓流或静水鱼类种类较多。10月份乌东德坝址上游和白鹤滩下游江段在其浅滩地带采集到了部分喜缓流或静水鱼类如蟹、飘鱼、棒花鱼等,致使其鱼类群落与溪洛渡和向家坝江段鱼类具有一定相似性。

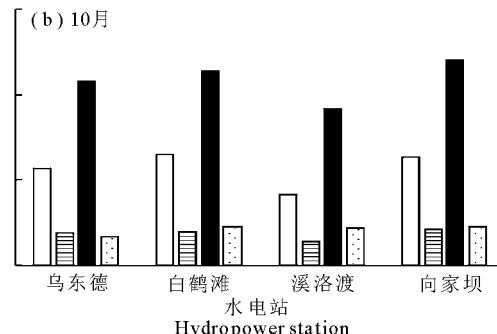
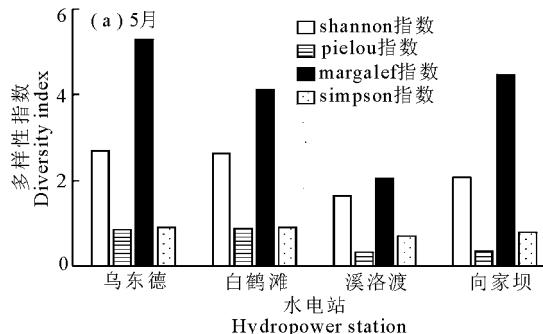
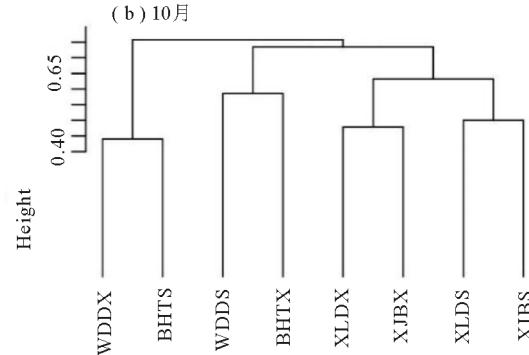
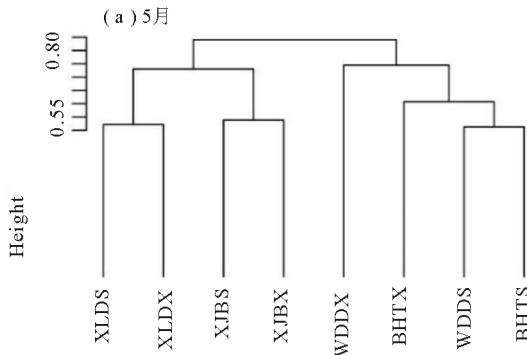


图4 2017年金沙江下游梯级电站江段鱼类多样性指数

Fig.4 Fish community diversity of each survey section in the lower Jinsha River in 2017



WDDX, WDDX 分别为乌东德坝上和坝下缩写; BHTX, BHTX 为白鹤滩坝上和坝下缩写; XLDS, XLDX 为溪洛渡坝上和坝下缩写; XJBS, XJBX 为向家坝上和坝下缩写。

图5 2017年金沙江下游梯级电站江段鱼类群落相似性

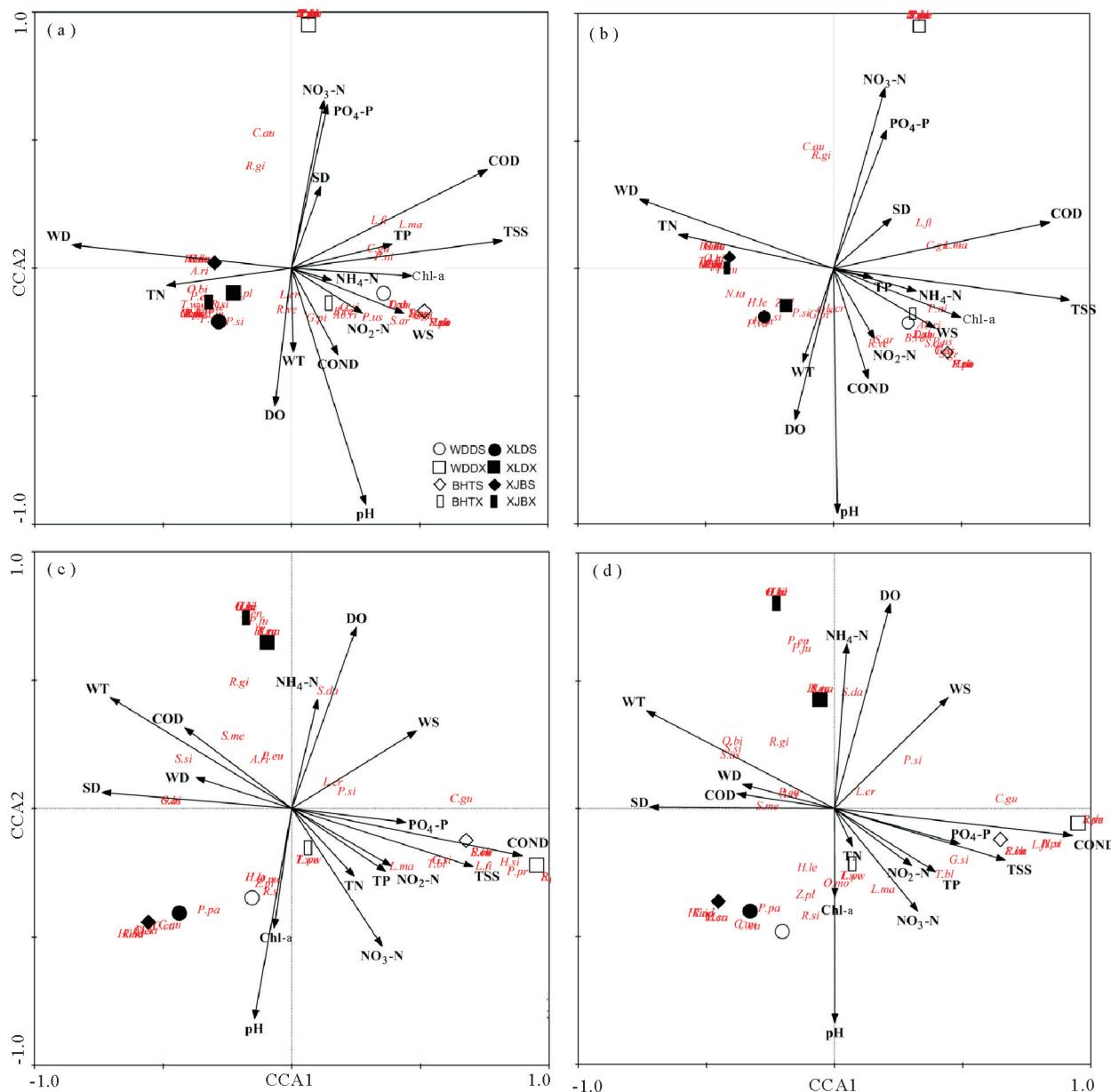
WDDX and WDDX are the abbreviations for the river sections above and below Wudongde Dam; BHTX and BHTX are the abbreviations for the river sections above and below Baihetan Dam; XLDS and XLDX are the abbreviations for the river sections above and below Xiluodu Dam; XJBS and XJBX are the abbreviations for the river sections above and below Xiangjiaba Dam.

Fig.5 Similarity of fish communities in the lower Jinsha River in 2017

2.4 鱼类群落与环境因子相关关系

对比分析金沙江下游干流各江段环境因子发现,乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝江段在水深、透明度、流速和总固体悬浮物有着显著差异($P < 0.05$)。溪洛渡和向家坝库区江段平均水深分别为(31.5±16.6)和(37.6±12.4)m,显著高于乌东德(19.5±0.3)m 和白鹤滩江段(20.4±0.5)m ($P < 0.05$)。水体透明度在各江段中变化类似于水深,溪洛渡(111.0±40.5)cm,向家坝(128.9±42.4)cm,显著高于乌东德(32.7±7.9)cm 和白鹤滩(17.5±4.1)cm,溪洛渡与向家坝、乌东德与白鹤滩均无显

著性差异。乌东德水体流速(1.59±0.4)m/s,白鹤滩(1.55±0.66)m/s,均显著高于溪洛渡江段(0.35±0.21)m/s,高于向家坝江段(0.88±0.10)m/s,溪洛渡江段与向家坝江段无显著性差异,可能的原因向家坝下游江段不受下游水库顶托作用,水流基本恢复正常。总固体悬浮物乌东德江段(37.4±9.8)mg/L,白鹤滩(125±16.0)mg/L,均显著高于溪洛渡江段(6.9±3.7)mg/L 和向家坝江段(2.79±1.45)mg/L($P < 0.05$)。其余水体理化参数在各江段间无显著性差异,但水体营养盐和叶绿素含量以白鹤滩江段最高。



(a) 5月数量,(b) 5月重量,(c) 10月数量,(d) 10月重量;物种缩写见表1。

图6 2017年金沙江下游鱼类群落与环境因子典范对应分析

(a) abundance in May; (b) biomass in May; (c) abundance in October; (d) biomass in October. Species abbreviations are shown in Table 1.

Fig.6 Canonical correspondence analysis between fish species composition and environmental factors in the lower Jinsha River in 2017

春季鱼类数量与环境因子CCA分析显示(图6a),第一、二轴的特征值分别为0.758和0.655,共解释了物种数据累计方差的43.9%。与第一轴相关性较高的变量分别是水深(-0.86)、总固体悬浮物(0.82)和化学需氧量(0.76);与第二轴相关性较高的变量有溶解氧(-0.54)、pH(0.92)、正磷酸盐(0.64)。Monte Carlo检验表明:水深是影响金沙江鱼类数量的主要因子($F=1.571, P=0.007$),其次为总固体悬浮物($F=1.543, P=0.011$)和pH($P=0.01$)。10月鱼类数量与环境因子CCA分析显

示,第一、二排序轴共解释了物种数据累计方差的45.3%,电导率(0.89)、透明度(-0.74)和总固悬浮物(0.70)与第一轴相关性较高;pH(-0.82)和溶解氧(0.71)与第二轴相关性高(图6c)。Monte Carlo检验发现电导率($F=1.691, P=0.04$)是影响10月金沙江鱼类数量分布的关键因子。

渔获物重量与环境因子典范对应分析结果表明,第一、二轴的特征值分别为0.74和0.652,共解释了物种数据累计方差的44.4%。第一轴相关性较高的变量分别是水深(-0.76)、总氮(-0.61)、总固体

悬浮物(0.92)和化学需氧量(0.84);与第二轴相关性较高的变量有溶解氧(-0.59)、pH(-0.96)、硝态氮(0.71)(图 6b)。Monte Carlo 检验表明:总固体悬浮物是影响金沙江鱼类数量的主要因子($F = 1.692, P = 0.001$),其次为化学需氧量($F = 1.514, P = 0.014$)、水深($F = 1.512, P = 0.025$)和 pH($P = 0.028$)。10月渔获物重量与环境因子 CCA 分析显示,第一、二排序轴共解释了物种数据累计方差的 45.9%,电导率(0.93)、透明度(-0.72)和水温(-0.73)与第一轴相关性较高;pH(-0.84)和溶解氧 DO(0.80)与第二轴相关性高(图 6d)。Monte Carlo 检验发现电导率($F = 1.922, P = 0.001$)、总固体悬浮物($F = 1.412, P = 0.041$)和水温($F = 1.571, P = 0.042$)是影响 10 月金沙江鱼类重量分布的关键因子。

3 讨论

3.1 金沙江下游鱼类群落结构变化

据历史资料记载,金沙江下游土著鱼类约 162 种,隶属于 5 目 15 科 79 属(吴江和吴明森,1990;张志英和袁野,2001;张春光,2019)。近年来,多位学者在该区域采集到的鱼类种类数与历史记载比较都要少。高少波等(2013)2008—2011 年在金沙江下游干流收集到 78 种鱼;唐会元等(2014)2006—2012 年在金沙江巧家段共采集到 57 种鱼;王俊等(2017)2015 年金沙江下游绥江段仅采集到 35 种鱼;李婷等(2020)2018 年在溪洛渡至向家坝江段共采集到 31 种鱼。本研究 2017 年在金沙江干流乌东德上游至向家坝下游江段累计收集到 70 种鱼,与历史资料相对比,同样发现了现阶段金沙江下游干流鱼类种类数减少,主要表现为洄游性与半洄游性鱼类、喜急流生境鱼类与产漂流性卵鱼类消失或减少。致使这一现象出现的原因可能是过度捕捞、环境污染以及水利工程等多重因素的共同作用。

在金沙江下游梯级电站各江段监测断面中,仍保持正常流水生境的乌东德、白鹤滩江段鱼类群落结构与已成库区的溪洛渡、向家坝江段有着明显的差异。乌东德和白鹤滩江段生物多样性较高,鱼类组成仍以土著喜流水鱼类为主,优势种类为圆口铜鱼、泉水鱼、犁头鳅和短体副鳅;而由河流相转为水库相的溪洛渡和向家坝库区江段生物多样性低,鱼类组成多为喜栖息静水或缓流的生境的鱼类,优势种类为蟹、飘鱼、似鱊。王俊等(2017)比较了金沙江一期工程蓄水前后绥江段鱼类群落结构变动,发

现蓄水后鱼类优势种由瓦氏黄颡鱼、圆口铜鱼、光泽黄颡鱼变为草鱼、鳙、鲢。李婷等(2020)对比了 2011、2015 和 2018 年溪洛渡和向家坝水库建成前后情况,同样发现鱼类种类数减少,缓流型鱼类占优势。同时我们在溪洛渡和向家坝江段发现了数种外来鱼类,如丁鱥、麦瑞加拉鲮、莫比桑克口孵非鲫、大口黑鲈等,这些鱼在金沙江下游的出现很可能与库区内及周边的水产养殖有关。

金沙江下游河流生境由乌东德和白鹤滩江段典型的峡谷激流生境逐渐变成了溪洛渡和向家坝江段缓流水库型生境,鱼类生态类型也相应地发生了转变。产漂流性卵鱼类因在缓流水体中无法满足其顺利产卵和漂流孵化过程中对流态的需要,种群数量无法得到持续补充(周湖海等,2019),在溪洛渡和向家坝已成库区的江段中产漂流性卵鱼类种类明显下降。在高速水流对河床底质的冲刷下,河床底质一般以块石和砾石为主,不仅可以为底层鱼类提供多样的栖息环境和躲避场所,还能够促进无脊椎动物的增殖,从而为鱼类提供更为丰富的饵料生物(段学花等,2013)。而相应的建坝蓄水后,水深增大使得水体底部溶解氧下降,不利于底层鱼类的生存;同时由于细粒径颗粒物的沉积,无脊椎动物多样性会随之下降(Kedzierski & Smock,2001);因此水库生境中鱼类多栖息在水体中上层,以植食性和杂食性偏滤食鱼类为主。随着乌东德和白鹤滩水电站的逐步完工,水库蓄水,土著鱼类的栖息地日益减小,金沙江下游生境的连续性和完整性再次受到切割,其鱼类群落结构非常可能演变成类似于溪洛渡和向家坝库区江段鱼类群落。多数研究都表明由自然河流改造而成的水库,其鱼类群落结构较蓄水前均发生了明显的变化(吴强等,2007;王晓臣等,2013;Orsi & Britton,2014)。

3.2 鱼类群落结构变动的环境驱动因子

已有研究表明梯级水电站的修建阻断了河流生态系统的自然连通性,原有水文节律也将随之改变(Kummu & Varis, 2007; Jellyman & Harding, 2012)。栖息生境的破坏,明显地缩减了土著鱼类的生存空间,将对鱼类多样性产生深远的影响(Ziv et al,2012)。随着金沙江下游溪洛渡与向家坝水电站的下闸蓄水,其库区内平均流速为 0.61 m/s,显著低于仍保持正常流量的乌东德与白鹤滩江段的 1.57 m/s;库区内平均水深 34.5 m,显著深于乌东德与白鹤滩江段水深。通过金沙江下游鱼类群落与环境因子的典范对应分析发现,乌东德与白鹤滩江

段的水环境明显区别于已成库区的溪洛渡与向家坝江段，尤其表现在乌东德和白鹤滩江段的高流速、高总固体悬浮物；同时不同生活型的鱼类在两者生境中也有较为明显的区分。统计分析发现影响金沙江下游鱼类分布的主要环境因子是水深与总固体悬浮物。水深作为制约鱼类垂直分布的重要环境因子，往往通过影响不同水层的溶解氧和水温实现（Prchalova et al., 2009; Mimnda & Killgore, 2014）。连玉喜等（2018）在金沙江下游流域支流拦坝蓄水的大型水库中发现，水温随着水深的增加呈现出稳定热分层现象，并且97.6%的鱼类分布在0~10 m的水层内。溶解氧同样也会随着水深的增大而降低，多数鱼会避开溶解氧较低区域，以免影响到正常的呼吸作用（何大任和蔡厚才，1998）。由于金沙江两岸地势陡峭，水库蓄水后沿岸带水深陡然增大，不再适宜原有栖息生境内底层鱼类生存，这一点在本研究中不同江段鱼类生态类型变化中也有所体现。已下闸蓄水的溪洛渡和向家坝江段底层鱼类种类和数量明显低于乌东德和白鹤滩江段。同时，总固体悬浮物含量较高的水体其悬浮颗粒影响了水下光照的分布，在一定程度上会降低浮游植物初级生产力（张运林等，2004），不利于以浮游生物为食的鱼类生存，这可能是乌东德和白鹤滩江段浮游生物食性鱼类较少的主要原因；但同时高悬浮物也为非肉食性鱼类躲避捕食提供了可能，提高种群存活率和多样性。由于金沙江下游梯级电站均为高坝巨型深水库，水库的建设会致使原河道水位急剧升高，水深增加，流速减缓，原本浑浊的水体经沉淀效应后变清，喜流水性鱼类的栖息环境明显被压缩，而库区静水区面积的增加，更适宜于喜静水性和缓流鱼类生存（Moyle & Mount, 2007）。与此同时，水位波动、流速等水文节律作为刺激流水性鱼类产卵和生长的外界必备要素，流水生境的丧失使得这些信号消失，不利于流水性鱼类生长和繁殖（蒋艳等，2009；李婷等，2020）。

参考文献

- 曹文宣,常剑波,乔晔,等,2007.长江鱼类早期资源[M].北京:中国水利水电出版社.
- 陈大庆,常剑波,顾洪宾,2005.金沙江一期工程对保护区生态环境的影响与对策[J].长江科学院院报,22(2): 21-24.
- 陈宇顺,2018.长江流域的主要人类活动干扰,水生态系统健康与水生态保护[J].三峡生态环境监测,3(3): 66-73.
- 但胜国,张国华,苗志国,等,1999.长江上游三层流刺网渔业现状的调查[J].水生生物学报,23(6): 655-661.
- 段学花,王兆印,田世民,2007.河床底质对大型底栖动物多样性影响的野外试验[J].清华大学学报(自然科学版),47(9): 1553-1556.
- 高少波,唐会元,乔晔,等,2013.金沙江下游干流鱼类资源现状研究[J].水生态学杂志,34(1): 44-49.
- 郭传波,王瑞,屈霄,等,2018.浅水湖泊鱼类群落结构评估:复合网目刺网与网簖的比较[J].水生生物学报,42(6): 44-51.
- 蒋艳,冯顺新,马巍,等,2009.金沙江下游梯级水电开发对鱼类影响的分析[C]//周孝德,李桂芬,王连祥,等.水力学与水利信息学进展.西安:西安交通大学出版社,63-69.
- 何大仁,蔡厚才,1998.鱼类行为学[M].厦门:厦门大学出版社.
- 李婷,唐磊,王丽,等,2020.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[J].生态学报,40(4): 1473-1485.
- 连玉喜,李昌,叶少文,等,2018.云南高原渔洞水库鱼类空间分布格局及主要影响因子[J].湖泊科学,30(6): 287-297.
- 骆辉煌,李倩,李翀,2012.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,10(4): 256-259.
- 唐会元,杨志,高少波,等,2014.金沙江下游巧家江段鱼类生物多样性及群落结构的年际动态[J].水生态学杂志,35(6): 7-15.
- 田辉伍,何春,刘明典,等,2016.长江上游干流三层流刺网渔获物结构研究[J].淡水渔业,46(5): 37-42.
- 王导群,田辉伍,唐锡良,等,2019.金沙江攀枝花江段产漂流性卵鱼类早期资源现状[J].淡水渔业,49(6): 41-47.
- 王俊,苏巍,杨少荣,等,2017.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,3(3): 394-401.
- 王晓臣,杨兴中,邢娟娟,等,2013.汉江喜河库区形成对鱼类群落结构的影响[J].生态学杂志,32(4): 932-937.
- 汪振华,龚甫贤,吴祖立,等,2013.多网目单层和三重组合刺网在岩礁和沙地生境中的鱼类采集效果比较[J].生态学杂志,32(2): 507-514.
- 吴江,吴明森,1990.金沙江的鱼类区系[J].四川动物,3(3): 23-26.
- 吴强,段辛斌,徐树英,等,2007.长江三峡库区蓄水后鱼类资源现状[J].淡水渔业,37(2): 70-75.
- 张春光,2019.金沙江流域鱼类[M].北京:科学出版社.
- 张运林,秦伯强,陈伟民,等,2004.悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响[J].水科学进展, (5): 615-620.
- 张志英,袁野,2001.溪落渡水利工程对长江上游珍稀特有鱼类的影响探讨[J].淡水渔业,31(2): 62-63.
- 中国河湖大典纂委员会,2010.中国河湖大典长江卷(上、下卷)[M].北京:中国水利水电出版社.

- 周湖海,田辉伍,何春,等,2019.金沙江下游巧家江段产漂流性卵鱼类早期资源研究[J].长江流域资源与环境,28(12): 2910-2920.
- Agostinho A A, Gomes L C, Santos N C L, et al, 2016. Fish assemblages in Neotropical reservoirs: Colonization patterns, impacts and management[J]. Fisheries Research, 173: 26-36.
- APHA, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition [M]. Washington: American Public Health Association.
- Appelberg M, Berger H M, Hesthagen T, et al, 1995. Development and intercalibration of methods in Nordic freshwater fish monitoring[J]. Water Air & Soil Pollution, 85(2): 401-406.
- Baselga A, Orme C D L, 2012. Betapart: an R package for the study of beta diversity[J]. Methods in Ecology and Evolution, 3(5): 808-812.
- Braak C J F ter., Smilauer P, 2002. Canoco reference manual and CanoDraw for windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5) [M]. Section on Permutation Methods. Microcomputer Power, Ithaca, New York.
- Chen Y, Zhang S H, Huang D S, et al, 2017. The development of China's Yangtze River Economic Belt: How to make it in a green way[J]. Science Bulletin, 62(9): 648-651.
- Guo C B, Chen Y, Gozlan R E, et al, 2019. Biogeographic freshwater fish pattern legacy revealed despite rapid socio-economic changes in China[J]. Fish and Fisheries, 20(5): 857-869.
- Jellyman P G, Harding J S, 2012. The role of dams in altering freshwater fish communities in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Marine & Freshwater Research, 46(4): 475-489.
- Kedzierski W M, Smock L A, 2001. Effects of logging on macroinvertebrate production in a sand-bottomed, low-gradient stream[J]. Freshwater Biology, 46(6): 821-833.
- Kummu M, Varis O, 2007. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River [J]. Geomorphology, 85(3/4): 275-293.
- Li S, He D, 2008. Water level response to hydropower development in the upper Mekong River [J]. AMBIO, 37(3): 170-176.
- Liu H, Guo C, Qu X, et al, 2020. Fish diversity, endemism, threats, and conservation in the Jinsha River Basin (Upper Yangtze River), China [J]. North American Journal of Fisheries Management, DOI: 10.1002/nafm.10441.
- Lytle D A, Poff N L, 2004. Adaptation to natural flow regimes[J]. Trends in Ecology & Evolution, 19(2): 94-100.
- Mimnda L E, Killgore K J, 2014. Fish depth distribution in the lower Mississippi River[J]. River Research & Applications, 30(3): 347-359.
- Moyle P B, Mount J F, 2007. Homogenous rivers, homogeneous faunas[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(14): 5711-5712.
- Orsi M L, Britton J R, 2014. Long-term changes in the fish assemblage of a neotropical hydroelectric reservoir[J]. Journal of Fish Biology, 84(6): 1964-1970.
- Petesse M L, Petrere Jr M, 2012. Tendency towards homogenization in fish assemblages in the cascade reservoir system of the Tietê river basin, Brazil[J]. Ecological Engineering, 48: 109-116.
- Pinkas L, Oliphant M S, Iverson L K, 1971. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters [J]. Fish Bulletin, 152: 1-105.
- Prchalova M, Kubecka J, Cezh M, et al, 2009. The effect of depth, distance from dam and habitat on spatial distribution of fish in all artificial reservoir[J]. Ecology of Freshwater Fish, 18(2): 247-260.
- Ziv G, Baran E, Nam S, et al, 2012. Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(15): 5609-5614.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Characterization of the Fish Community and Environmental Driving Factors during Development of Cascaded Dams in the Lower Jinsha River

QU Xiao^{1,2,3}, GUO Chuan-bo², XIONG Fang-yuan^{2,3}, XIN Wei², CHEN Yu-shun^{2,3}, SU Wei¹

(1.Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, Chinese Sturgeon Research Institute, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100,P.R.China;

2.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072,P.R.China;

3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,P.R.China)

Abstract: The fish community and associated environmental driving factors were investigated as cascaded hydropower stations were developed in the lower Jinsha River. The objectives were to assess the environmental effects of hydropower station development and provide data to support effective management of the ecological environment. Field investigations were conducted during the spring (May) and fall (October) of 2017. Water quality parameters were measured and fish were sampled using gillnets with different mesh sizes. Transects were set in reaches above and below each of the four cascaded dams on the lower Jinsha River: the Wudongde and Baihetan hydropower dams under construction, and the Xiluodu and Xiangjiaba hydropower stations in operation. Multiple statistical analysis methods were used to detect fish biodiversity patterns and the relationships among fish community composition and environmental factors. The fish community in the Wudongde and Baihetan reaches, where the river flows freely (lotic system), were significantly different from those in the Xiluodu and Xiangjiaba reaches, where impoundment has created reservoirs (lentic system). In the canyon lotic reaches, the collected specimens were primarily indigenous and endemic fish species that prefer flowing water and the dominant species were *C. guichenoti*, *P. procheilus* and *L. fimbriata*. In the lentic reservoirs most of the fish were species common in the middle and lower Yangtze River that prefer quiescent or slow flowing water and the dominant species were *H. leucisculus*, *P. sinensis*, and *T. wwinhonis*. Canonical correspondence analysis (CCA) between fish community composition and the environment factors indicated that water depth, total suspended solids (TSS), conductivity, pH and water temperature were the key environmental driving factors affecting the fish communities of the lower Jinsha River. These results will support development of management strategies for conserving fishery resources and biodiversity in the lower Jinsha River.

Keywords: Jinsha River; cascaded dams; fish communities; environmental driving factors