

金沙江下游向家坝库区鱼类群落结构空间格局

熊飞^{1,2}, 郭祺¹, 张伟¹, 刘红艳^{1,2}, 翟东东^{1,2}, 段辛斌³, 田辉伍³, 陈大庆³

(1. 江汉大学生命科学学院, 湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心, 湖北 武汉 430056;

2. 江汉大学, 持久性有毒污染物环境与健康危害湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430056;

3. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 430223)

摘要:探究鱼类群落结构空间分布特征及其对梯级水电开发的响应, 为水电开发生态环境影响评价及鱼类保护提供依据, 为长江“十年禁渔”效果评估提供本底资料。2016–2018年采用复合刺网和地笼对向家坝库区库首邵女坪、库中绥江和库尾桧溪的鱼类群落进行了7次调查, 探究了建坝后的鱼类种类组成、个体大小、生态类群及其空间分布特征。调查共采集到鱼类59种, 隶属于6目16科49属, 其中长江上游特有鱼类5种, 外来鱼类12种。在邵女坪、绥江和桧溪江段分别采集到鱼类39、40和39种, Jaccard相似性指数分析表明, 3个江段鱼类群落物种组成中等相似。相对重要性指数(IRI)分析显示, 邵女坪江段鱼类群落的优势种为中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)和鳊(*Hemiculter leucisclus*), 绥江江段优势种为鳊、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、瓦氏黄颡鱼(*Pseudobagrus vachelli*)和鳙(*Aristichthys nobilis*), 桧溪江段优势种为瓦氏黄颡鱼、镜鲤(*Cyprinus carpio* var. *specularis*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、鳊、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和鲫(*Carassius auratus*)。NMDS分析显示, 库首邵女坪和库尾桧溪江段鱼类群落差异相对较大, Bray-Curtis相异指数为0.59; 库中绥江与库首邵女坪鱼类群落更为相似, Bray-Curtis相异指数为0.41; 库中绥江和库尾桧溪的Bray-Curtis相异指数为0.46。广适性鱼类是向家坝库区各江段的优势类群, 分别占鱼类种类、数量和重量的57.7%±5.9%、65.2%±20.7%和47.7%±16.1%; 从库首至库尾江段其数量比分别为43.3%、67.8%和84.5%, 呈现逐渐增加趋势。向家坝库区渔获群体体长为29–655 mm, 平均体长为(128±65) mm, 体重为0.1~5 408 g, 平均体重为(70±218)g, 主要种类(鲤和镜鲤除外)在不同江段间个体大小差异显著($P<0.05$)。与蓄水前(2011年)相比, 金沙江下游鱼类群落发生了显著变化, 流水性的特有鱼类减少, 外来鱼类增多。

关键词:优势种; 特有鱼类; 外来鱼类; 向家坝库区; 金沙江下游

中图分类号: S931.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)04-0082-10

生境破坏是造成生物多样性丧失的重要原因(Pogson, 2015)。大坝修建损害了河流的连续性, 使鱼类扩散和迁移受阻, 改变了原有鱼类的适宜生境, 从而引起鱼类群落的演替(Liermann et al, 2012; 魏念等, 2021)。长江上游(含金沙江中下游)是我国水生生物多样性研究和保护的热点地区(吴江和吴明森, 1985; Chen et al, 2009), 也是水梯级开发集中、河流生境破碎化严重的区域, 石鼓以下干流江段已建成三峡、向家坝、溪洛渡等10余座水电站, 导致长江

上游鱼类多样性保护面临严峻挑战(Xie, 2003; 曹文宣, 2017)。金沙江一期工程向家坝电站于2008年10月截流, 2012年10月开始蓄水运行, 其上游的溪洛渡电站于2007年10月截流, 2013年5月开始蓄水运行。大坝的阻隔、水文水动力条件的改变, 将直接影响鱼类的栖息和繁衍, 导致鱼类群落的改变, 水梯级开发后金沙江下游鱼类群落现状备受关注。王俊等(2017)依据2015年6月和10月的调查报道了金沙江一期工程建设后向家坝库区绥江江段的鱼类群落结构特征, 李婷等(2020)依据2018年5月的调查报道了溪洛渡坝下桧溪江段的鱼类生态类群特征。这些研究表明, 在梯级水电开发的影响下, 金沙江下游向家坝至溪洛渡江段鱼类群落结构正在发生显著变化。

为了进一步全面了解金沙江一期工程建设后向家坝库区鱼类群落结构及空间分布特征, 2016–2018年对向家坝库区库首邵女坪、库中绥江和库尾桧溪等不同江段的鱼类群落进行了系统调查, 分析了库区鱼类群落种类组成、个体大小、优势种和生态类群, 探讨了鱼

收稿日期: 2022-04-24 修回日期: 2023-11-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3205903); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD09); 国家自然科学基金(51779105, 51979123); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020034)。

作者简介:熊飞, 1977年生, 男, 教授, 主要从事水生态和鱼类保护研究。E-mail: xf9603@163.com

通信作者:段辛斌, 男, 研究员。E-mail: duan@yfi.ac.cn

类群落结构空间分布特征及其对梯级水电开发的响应,以期为水电开发生态环境影响评价及鱼类保护提供依据,为长江“十年禁渔”效果评估提供本底资料。

1 材料与方法

1.1 样点设置

2016年7月和10月,2017年4月、8月和11月,2018年8月和10月对金沙江下游向家坝库区鱼类群落进行了7次调查,调查站点包括邵女坪、绥江和桧溪等3个江段(图1)。邵女坪位于向家坝库区的库首,距向家坝坝址约11 km;绥江位于向家坝库区中部位置,距向家坝坝址约90 km;桧溪位于向家坝库区库尾,距向家坝坝址约123 km,距其上游的溪洛渡水电站坝址约33 km。

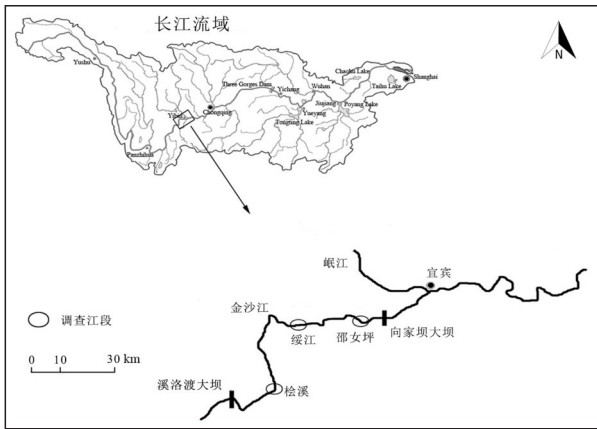


图1 向家坝库区调查江段

Fig.1 Location of the investigated section of Xiangjiaba Reservoir

1.2 样品采集

在当地渔政管理部门办理科研特许捕捞证后进行鱼类捕捞作业。主要作业网具为复合刺网和地笼,复合刺网由4个不同网目的网片(长50 m,高2 m)串联拼接而成,网目分别为2.0、6.0、10.0和14.0 cm;地笼长18 m,高0.33 m,宽0.45 m,网目为0.8 cm,每次使用3个地笼。每个站点每次连续调查7 d,每天作业时长为12 h(6:00 pm-6:00 am)。捕捞收网后,在新鲜状态下对鱼类进行种类鉴定,并计数、称重。鱼类种类鉴定主要参考《四川鱼类志》(丁瑞华,1994),对疑难物种用4%甲醛溶液保存,带回实验室进一步核实。《四川鱼类志》未记录的物种,如果原产地位于长江上游水系以外,定为外来鱼类。鱼类生物学测量时体长精确到1 mm,体重精确到0.1 g,有鳞鱼的体长从吻端测量到尾部前端的最后1枚鳞片,无鳞鱼的体长从吻端测量到最后一个脊椎骨。

1.3 数据分析

为便于比较鱼类群落的空间变化,将不同调查时段的渔获物混合在一起进行综合分析。采用Jaccard相似性指数(I_{JS})分析不同江段鱼类群落物种组成差异,计算公式为:

$$I_{JS}=c/(a+b-c) \quad (1)$$

式中: a 、 b 为不同江段鱼类群落的物种数, c 为不同江段鱼类群落中共有的物种数。当 $0 \leq I_{JS} < 0.25$ 时,为极不相似;当 $0.25 \leq I_{JS} < 0.50$ 时,为中等不相似;当 $0.50 \leq I_{JS} < 0.75$ 时,为中等相似;当 $0.75 \leq I_{JS} \leq 1.00$ 时,为极相似(Krebs,1999)。

采用相对重要性指数(IRI)判断物种的群落成员型,计算公式为:

$$IRI=(N+W) \times F \times 10^4 \quad (2)$$

$$F=C/Y \quad (3)$$

式中: N 为物种的数量比, W 为物种的重量比, F 为物种在调查中的出现率, C 为物种出现的次数, Y 为鱼类调查的总次数。当 $IRI \geq 1000$ 时,为优势种;当 $1000 > IRI \geq 100$ 时,为亚优势种;当 $100 > IRI \geq 10$ 时,为伴生种;当 $IRI < 10$ 时,为偶见种(熊飞等,2014)。

基于采样点和物种个体数计算鱼类群落Bray-Curtis相异度指数(I_{BC})(Bloom,1981),计算公式为:

$$I_{BC}=1-2C_{ij}/(S_i+S_j) \quad (4)$$

式中: S_i 为江段 i 的物种个体数之和, S_j 为江段 j 的物种个体数之和, C_{ij} 为江段 i 和江段 j 共有物种的个体数较小值之和。指数 I_{BC} 越高,表示两群落结构差异越大。

通过非度量多维尺度排序(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)分析各江段群落结构的差异性。用胁迫系数(Stress)衡量NMDS图的优劣,Stress<0.2时,表示排序结果合理。

根据鱼类对水流生境的偏好将鱼类分为流水性、静水性和广适性3种不同的生态类型(肖琼等,2015)。采用方差分析(ANOVA)比较各主要渔获种类(各江段的优势种)在不同江段的个体大小差异,先进行数据的方差齐性检验,若方差齐选用F检验对总体方差进行检验,若方差不齐选用Welch检验,检验后进行均值的多重比较,方差齐选用LSD法,若方差不齐选用Tamhane's T2法。

2 结果与分析

2.1 物种组成

2016–2018年在金沙江下游向家坝库区共采集

到鱼类 59 种(表 1),隶属于 6 目 16 科 49 属。其中,鲤形目鱼类种类最多,占鱼类物种总数的 61.0%,其次是鲇形目(22.0%)和鲈形目(11.9%),这 3 个目的鱼类物种数量占总体的 94.9%。鲤形目中以鲤科鱼类为主,约占鲤形目鱼类物种数的 88.9%;鲇形目中以鲿科鱼类为主,约占鲇形目鱼类物种数的 61.5%。采集到长江上游特有鱼类 5 种,占鱼类物种数的 8.5%。其中,岩原鲤和圆口铜鱼被列入国家重点野生动物保护名录(二级)。采集到外来鱼类 12 种,占鱼类物种数的 20.3%。

在库首邵女坪江段采集到鱼类 39 种,其中特有鱼类 2 种,外来鱼类 7 种;库中绥江江段采集到鱼类 40 种,其中特有鱼类 2 种,外来鱼类 5 种;库尾松溪江段采集到鱼类 39 种,其中特有鱼类 3 种,外来鱼类 3 种。从鱼类出现率看,鲮(*Hemiculter leucisclus*)和瓦氏黄颡鱼(*Pseudobagrus vachelli*)在 3 个江段采样过程中的出现率均为 100%(表 1)。邵女坪和绥江江段之间的鱼类群落物种组成 Jaccard 相似性指数为 0.55,邵女坪和松溪为 0.53,绥江和松溪为 0.52,3 个江段鱼类群落物种组成均为中等相似。

表 1 2016–2018 年向家坝库区鱼类组成及出现率 %

Tab.1 Composition and occurrence frequency (%) of fish species in Xiangjiaba Reservoir (2016–2018)

鱼名	邵女坪	绥江	松溪
鲟形目 Acipenseriformes			
鲟科 Acipenseridae			
1 俄罗斯鲟 <i>Acipenser gueldenstaedti</i> Brandt ^{**} , ^R	0	14	0
鲤形目 Cypriniformes			
鲃科 Cobitidae			
2 短体荷马条鲃 <i>Homatula potanini</i> (Günther) [*] , ^R	0	0	20
3 横纹南鲃 <i>Schistura fasciolatus</i> (Nichols et Pope) ^R	14	0	0
4 贝氏高原鲃 <i>Trilophysa bleekeri</i> (Sauvage et Dabry) ^R	14	0	20
5 中华沙鲃 <i>Botia superciliaris</i> Günther ^R	0	14	60
鲤科 Cyprinidae			
6 宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i> (Temminck et Schlegel) ^R	71	86	40
7 马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i> (Temminck et Schlegel) ^R	100	71	40
8 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i> (Cuvier et Valenciennes) ^E	86	43	100
9 银鲃 <i>Squalidus argentatus</i> (Sauvage et Dabry) ^E	14	14	20
10 丁鲃 <i>Tinca tinca</i> (Linnaeus) ^{**} , ^E	14	0	20
11 鳊 <i>Aristichthys nobilis</i> (Richardson) ^E	43	43	20
12 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (Cuvier et Valenciennes) ^E	71	86	40
13 中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i> (Günther) ^E	71	57	40
14 高体鲮 <i>R. ocellatus</i> (Kner) ^E	14	14	0
15 彩石鲮 <i>R. lighti</i> (Wu) ^E	29	0	0
16 兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i> (Dybowsky) ^E	0	43	20
17 寡鳞鲮 <i>Pseudolaubuca engraulis</i> (Nichols) ^E	14	71	60
18 鲮 <i>Hemiculter leucisclus</i> (Basilewsky) ^L	100	100	100
19 红鳍原鲮 <i>Cultrichthys erythropterus</i> (Basilewsky) ^L	43	29	60
20 翘嘴鲮 <i>Culter alburnus</i> (Basilewsky) ^L	57	100	0
21 团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i> (Yih) ^{**} , ^L	29	0	0
22 唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i> (Pallas) ^R	0	14	0
23 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> (Temminck et Schlegel) ^E	71	71	40
24 嘉陵颌须鲃 <i>Gnathopogon herzensteini</i> (Günther) ^R	0	14	0
25 圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i> (Sauvage et Dabry) [*] , ^R	0	0	60
26 蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i> (Bleeker) ^E	71	100	100
27 光唇蛇鲃 <i>Saurogobio gymnocheilus</i> (Lo, Yao et Chen) ^R	0	0	20
28 裸腹片唇鲃 <i>Platysmacheilus nudiventris</i> (Lo, Yao et Chen) [*] , ^R	0	14	20
29 钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i> (Wu et Wang) [*] , ^R	57	86	60
30 中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i> (Bleeker) ^R	86	29	0

续表 1

鱼名	邵女坪	绥江	松溪
31 云南光唇鱼 <i>Acrossocheilus yunnanensis</i> (Regan) ^R	0	14	0
32 墨头鱼 <i>Garra pingi pingi</i> (Tchang) ^R	0	0	20
33 岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i> (Tchang) ^{*,R}	57	0	0
34 鲤 <i>Cyprinus carpio</i> (Linnaeus) ^E	57	57	80
35 镜鲤 <i>C. carpio</i> var. <i>specularis</i> ^{**,E}	29	57	80
36 鲫 <i>Carassius auratus</i> (Linnaeus) ^E	100	86	100
37 日本白鲫 <i>C. auratus cuvieri</i> (Temminck et Schlegel) ^{**,E}	0	0	40
鲇形目 Siluriformes			
鲇科 Siluridae			
38 大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i> (Chen) ^E	86	71	60
39 鲇 <i>S. asotus</i> (Linnaeus) ^E	86	71	60
胡子鲇科 Clariidae			
40 革胡子鲇 <i>Clarias bathupogon</i> Sauvage ^{**,E}	29	0	0
鲮科 Bagridae			
41 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> (Richardson) ^E	14	57	0
42 瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i> (Richardson) ^E	100	100	100
43 光泽黄颡鱼 <i>P. nitidus</i> (Sauvage et Dabry) ^E	43	100	60
44 粗唇鲮 <i>Leiocassis crassilabis</i> (Günther) ^R	29	71	60
45 长吻鲮 <i>L. longirostris</i> (Günther) ^R	0	14	20
46 乌苏拟鲮 <i>Pseudobagrus ussuriensis</i> (Dybowski) ^R	0	14	0
47 切尾拟鲮 <i>P. runcates</i> (Regan) ^R	14	29	0
48 细体拟鲮 <i>P. pratti</i> (Günther) ^R	0	14	0
钝头鲮科 Amblycipitidae			
49 白缘鲮 <i>Liobagrus marginatus</i> (Günther) ^R	0	0	20
鲴科 Ictaluridae			
50 斑点叉尾鲴 <i>Ictalurus Punetaus</i> (Rafinesque) ^{**,E}	0	14	0
鲑形目 Salmoniformes			
银鱼科 Salangidae			
51 太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i> (Chen) ^{**,L}	0	0	20
颌针鱼目 Beloniformes			
针鱼科 Hemirhamphidae			
52 间下鱻 <i>Hyporhamphus intermedius</i> (Cantor) ^E	14	0	20
鲈形目 Perciformes			
鲈科 Serranidae			
53 鳊 <i>Siniperca chuatsi</i> (Basilewsky) ^E	0	0	20
鲈科 Percoidea			
54 梭鲈 <i>Sander lucioperca</i> (Linnaeus) ^{**,E}	57	0	0
太阳鱼科 Centrarchidae			
55 加州鲈 <i>Micropterus salmoides</i> (Lacepede) ^{**,L}	14	14	40
丽鱼科 Cichlidae			
56 尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus) ^{**,E}	14	0	20
57 红腹罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i> (Gervais) ^{**,E}	0	43	0
鰕虎鱼科 Gobiidae			
58 子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i> (Rutter) ^E	43	57	80
鱧科 Channidae			
59 乌鱧 <i>Channa argus</i> (Cantor) ^E	14	0	0

注: *长江上游特有鱼类, **外来鱼类, ^R流水性鱼类, ^E广适性鱼类, ^L静水性鱼类, 0为未采集到。

Note: * denotes species endemic to the upper Yangtze River, ** denotes exotic species, R denotes rheophilic species, E denotes eurytopic species, L denotes limnophilic fish species, 0 means not collected.

2.2 群落结构

相对重要性指数(IRI)分析表明,向家坝库区邵女坪江段鱼类群落的优势种为中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)和鳡(表2),绥江江段的优势种为鳡、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、瓦氏黄颡鱼和鳊(*Aristichthys nobilis*)(表3),桧溪江段的优势种为瓦氏黄颡鱼、镜鲤(*Cyprinus carpio* var. *specularis*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、鳡、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和鲫(*Carassius auratus*)(表4)。鳡是向家坝库区各江段共同的优势种,数量比为16.6%~46.0%,重量比为4.9%~20.2%。瓦氏黄颡鱼是绥江和桧溪江段的优势种,数量比为12.4%~25.7%,重量比为6.9%~9.7%,是邵女坪江段的亚优势种,数量比为3.5%,重量比为1.2%。中华倒刺鲃在邵女坪江段为优势种,其数量比为12.5%,重量比为40.4%,而在绥江江段为偶见种,在桧溪江段未采集到。

NMDS分析显示(图2),库尾桧溪江段鱼类群落差异相对较大,Bray-Curtis相异指数为0.59,库中绥江与库首邵女坪鱼类群落更为相似,Bray-Curtis相异指数为0.41。绥江与桧溪鱼类群落Bray-Curtis相异性指数为0.46。

2.3 生态类群

向家坝库区各江段以广适性鱼类占优势,占鱼类种类的57.7%±5.9%(52.5%~64.1%),占鱼类数量的65.2%±20.7%(43.3%~84.5%),占鱼类重量的47.7%±16.1%(37.4%~66.2%)(图3);从库首至库尾江段其数量比分别为43.3%、67.8%和84.5%,呈现逐渐增加趋势。静水性鱼类在各江段的物种比例均较低(10.3%~12.8%),在数量和重量方面,均表现为绥江>邵女坪>桧溪。流水性鱼类在库首邵女坪江段的种类比例最低(23.1%),但其数量和重量比例在3个江段中均最高,分别为43.5%和30.1%,库中绥江和库尾桧溪江段流水性鱼类种类、数量和重量比例差别不大,分别为37.5%和33.3%、8.8%和9.3%、13.5%和14.9%。

2.4 个体大小

向家坝库区主要渔获种类体长和体重情况见表5,渔获群体体长范围29~655 mm,平均体长(128±65)mm,体重范围0.1~5 408 g,平均体重(70±218)g。最大个体为草鱼,体长655 mm,体重5 408 g。体长最小个体为高体鳊,体长29 mm,体重0.4 g。体重最小个体为太湖新银鱼,体长55 mm,体重0.1 g。方差分析(ANOVA)显示,向家坝库区鲤和镜鲤不同江段体长、体重差异不显著($P>0.05$),其他主要种类在不同江段个体大小(体长或体重)差异显著($P<0.05$)。

表2 向家坝库区邵女坪江段鱼类群落结构

Tab.2 Composition of the fish community in the Shaonping section of Xiangjiaba Reservoir

鱼名	N/%	W/%	F/%	IRI	群落成员型
中华倒刺鲃	12.5	40.4	85.7	4534	优势种
鳡	28.0	6.9	100.0	3481	优势种
鲢	1.2	10.2	71.4	815	亚优势种
马口鱼	6.8	1.3	100.0	806	亚优势种
鲫	2.3	5.0	100.0	728	亚优势种
草鱼	1.1	6.8	85.7	675	亚优势种
鳊	0.9	13.4	42.9	612	亚优势种
宽鳍鱮	5.9	1.3	71.4	515	亚优势种
瓦氏黄颡鱼	3.5	1.2	100.0	476	亚优势种
翘嘴鲌	1.5	4.1	57.1	320	亚优势种
高体鳊	16.2	0.5	14.3	238	亚优势种
钝吻棒花鱼	3.8	0.2	57.1	228	亚优势种
蛇鲡	2.2	0.5	71.4	192	亚优势种
子陵吻鰕虎鱼	4.3	0.1	42.9	187	亚优势种
麦穗鱼	1.7	0.2	71.4	138	亚优势种
梭鲈	1.0	1.3	57.1	133	亚优势种
鲈	0.8	1.2	85.7	168	亚优势种
中华鳊	1.4	0.1	71.4	103	亚优势种
红鳍原鲌	0.7	1.0	42.9	73	伴生种
大口鲈	0.3	0.5	85.7	72	伴生种
光泽黄颡鱼	0.3	0.6	42.9	36	伴生种
团头鲂	0.1	1.1	28.6	34	伴生种
鲤	0.3	0.3	57.1	32	伴生种
岩原鲤	0.3	0.2	57.1	29	伴生种
镜鲤	0.4	0.5	28.6	25	伴生种
革胡子鲈	0.1	0.4	28.6	16	伴生种
彩石鳊	0.5	0.03	28.6	15	伴生种
其他	1.7	1.08	-	44	偶见种

注: N-数量比, W-重量比, F-出现率, IRI-相对重要性指数。

Note: N-individual percentage, W-weight percentage, F-occurrence frequency, IRI-relative importance index.

3 讨论

3.1 大坝建设前后鱼类种类变化

历史上记载金沙江中下游(石鼓-宜宾)有鱼类115种,其中向家坝至溪洛渡江段103种,长江上游特有鱼类达60多种,这里曾是白鲟、中华鲟和长江鲟等多种长江上游珍稀、特有鱼类的重要产卵场和栖息地(吴江和吴明森,1985)。高少波等(2013)于2008-2011年在金沙江下游(攀枝花-水富)共采集鱼类78种,其中特有鱼类14种,鱼类多样性呈下降趋势。

表3 向家坝库区绥江江段鱼类群落结构

Tab.3 Composition of the fish community in the Suijiang section of Xiangjiaba Reservoir

鱼名	N/%	W/%	F/%	IRI	群落成员型
鲮	46.0	20.2	100.0	6611	优势种
鲢	4.1	22.9	85.7	2316	优势种
瓦氏黄颡鱼	12.4	6.9	100.0	1935	优势种
鳊	2.1	25.4	42.9	1179	优势种
翘嘴鲌	2.7	2.7	100.0	539	亚优势种
蛇鮈	3.4	1.2	100.0	453	亚优势种
宽鳍鱮	3.7	1.3	85.7	432	亚优势种
钝吻棒花鱼	4.3	0.6	85.7	425	亚优势种
鲤	2.4	4.5	57.1	398	亚优势种
马口鱼	3.2	1.9	71.4	362	亚优势种
寡鳞飘鱼	1.3	1.7	71.4	217	亚优势种
子陵吻鰕虎鱼	3.4	0.1	57.1	202	亚优势种
鲫	0.7	1.4	85.7	178	亚优势种
麦穗鱼	2.0	0.4	71.4	171	亚优势种
粗唇鲮	1.5	0.7	71.4	155	亚优势种
光泽黄颡鱼	1.2	0.3	100.0	146	亚优势种
中华鲮	1.5	0.1	57.1	87	伴生种
鲃	0.2	0.9	71.4	79	伴生种
镜鲤	0.4	1.0	57.1	79	伴生种
中华倒刺鲃	0.1	1.4	28.6	42	伴生种
长吻鲮	0.2	2.3	14.3	35	伴生种
大口鲃	0.1	0.4	71.4	34	伴生种
兴凯鲮	0.6	0.2	42.9	32	伴生种
草鱼	0.4	0.2	42.9	28	伴生种
红鳍原鲃	0.4	0.4	28.6	24	伴生种
黄颡鱼	0.2	0.1	57.1	19	伴生种
高体鲮	0.7	0.1	14.3	10	伴生种
其他	0.9	0.81	-	32	偶见种

注:N-数量比,W-重量比,F-出现率,IRI-相对重要性指数。

Note: N-individual percentage, W-weight percentage, F- occurrence frequency, IRI-relative importance index.

向家坝和溪洛渡等金沙江一期工程的下闸蓄水(2012-2013年),进一步加剧了金沙江下游鱼类多样性的丧失(屈霄等,2020)。本研究通过3年的调查,在金沙江下游向家坝库区累计调查到鱼类59种,其中长江上游特有鱼类仅5种,表明金沙江下游鱼类多样性特别是特有鱼类面临着严重威胁。本次调查与向家坝库区蓄水前相比(王俊等,2017),许多流水性鱼类(部分为长江上游特有鱼类)已在库中难以采集到,如长鳍吻鮈(*Rhinogobio ventralis*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)、细鳞裂腹鱼(*S. chongi*)、白甲鱼(*Onychostoma sima*)、红尾荷马条鳅(*H. variegatus*)、犁头鳅(*Lepturichthys fimbriata*)、中华金沙鳅(*Jinshaia sinensis*)等,一些物种已经在库首和库中江

表4 向家坝库区桧溪江段鱼类群落结构

Tab.4 Composition of the fish community in the Huixi section of Xiangjiaba Reservoir

鱼名	N/%	W/%	F/%	IRI	群落成员型
瓦氏黄颡鱼	25.7	9.7	100.0	3539	优势种
镜鲤	6.5	28.4	80.0	2793	优势种
鲤	7.6	21.9	80.0	2364	优势种
鲮	16.6	4.9	100.0	2147	优势种
草鱼	4.5	9.4	100.0	1389	优势种
鲫(含白鲫)	2.6	8.4	100.0	1109	优势种
蛇鮈	7.2	1.8	100.0	904	亚优势种
子陵吻鰕虎鱼	3.8	0.2	80.0	313	亚优势种
粗唇鲮	2.6	1.4	60.0	243	亚优势种
钝吻棒花鱼	2.9	0.6	60.0	209	亚优势种
中华沙鳅	3.2	0.2	60.0	205	亚优势种
寡鳞飘鱼	1.5	1.6	60.0	188	亚优势种
宽鳍鱮	3.8	0.9	40.0	187	亚优势种
光泽黄颡鱼	1.9	0.3	60.0	137	亚优势种
圆口铜鱼	0.6	1.7	60.0	133	亚优势种
鲃	0.5	1.0	60.0	90	伴生种
加州鲈	1.1	1.1	40.0	89	伴生种
长吻鲮	0.3	4.1	20.0	88	伴生种
红鳍原鲃	1.1	0.2	60.0	79	伴生种
鲢	0.6	0.6	40.0	45	伴生种
大口鲃	0.2	0.4	60.0	39	伴生种
马口鱼	0.7	0.1	40.0	32	伴生种
间下鱻	1.5	0.1	20.0	32	伴生种
麦穗鱼	0.6	0.1	40.0	26	伴生种
中华鲮	0.4	0.03	40.0	18	伴生种
其他	1.5	0.78	-	5.6	偶见种

注:N-数量比,W-重量比,F-出现率,IRI-相对重要性指数。

Note: N-individual percentage, W-weight percentage, F- occurrence frequency, IRI-relative importance index.

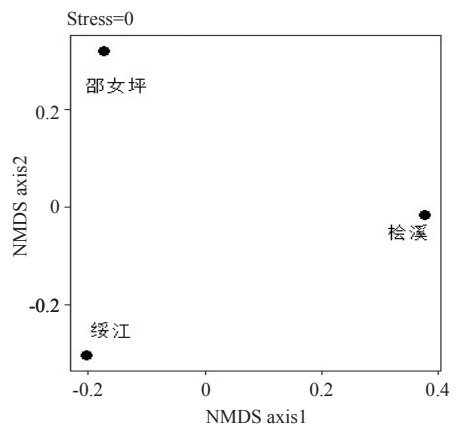


图2 向家坝库区3个江段鱼类群落NMDS分析
Fig.2 Nonmetric multidimensional scaling of the fish communities in the three sections of Xiangjiaba Reservoir

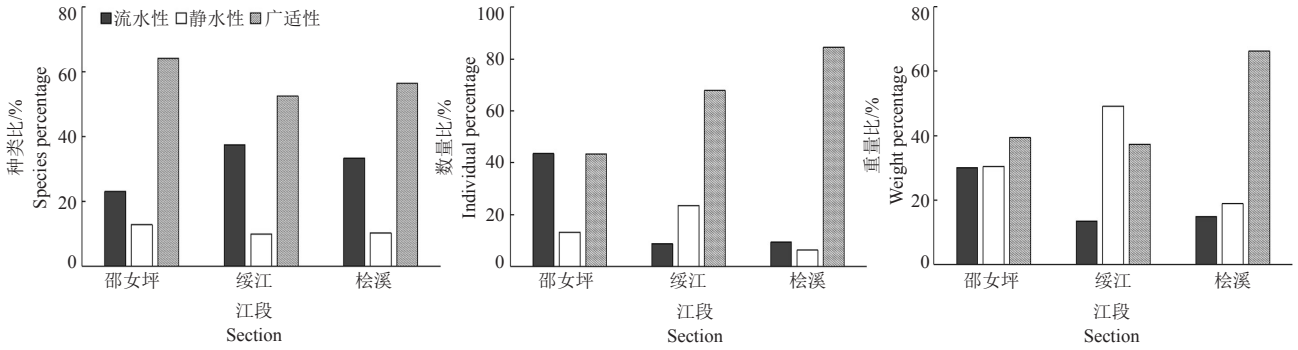


图 3 向家坝库区 3 个江段鱼类生态类群组成

Fig.3 Percentage composition of ecological types in the fish communities of the three sections of Xiangjiaba Reservoir

表 5 向家坝库区主要渔获种类个体大小

Tab.5 Body size of the primary species in the investigated sections of Xiangjiaba Reservoir

鱼名	邵女坪				绥江				松溪			
	体长/mm		体重/g		体长/mm		体重/g		体长/mm		体重/g	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
中华倒刺鲃	86~372	230±50 ^B	13~1112	302±183 ^a	217~380	315±57 ^A	481~1214	751±403 ^a	-	-	-	-
鳅	36~192	118±25 ^B	0.5~121	24±15 ^B	93~188	130±16 ^A	11~155	29±12 ^A	38~148	91±29 ^C	0.8~46	12±10 ^C
鲢	125~486	358±86 ^A	39~1806	848±45 ^A	71~536	211±114 ^B	6~3030	301±435 ^B	108~161	135±25 ^C	16~67	41±24 ^B
瓦氏黄颡鱼	71~225	128±39 ^A	5~144	33±35 ^A	46~145	128±31 ^A	2~164	31±25 ^A	43~217	94±38 ^B	1~130	16±22 ^B
鳙	208~545	394±111 ^A	181~3588	1474±1101 ^a	88~585	288±143 ^B	12~3500	667±708 ^b	166		71	
镜鲤	92~224	129±63 ^a	23~254	83±114 ^a	91~250	156±57 ^a	21~454	149±160 ^a	124~275	186±30 ^a	76~515	174±72 ^a
鲤	61~235	131±74 ^a	6~280	86±130 ^a	41~556	112±111 ^a	1~3900	209±687 ^a	62~249	151±33 ^a	6~417	115±73 ^a
草鱼	73~655	250±142 ^a	6~5408	605±1278 ^a	66~181	119±36 ^b	4~101	32±26 ^b	68~309	144±63 ^b	5~456	85±110 ^a
鲫	67~240	185±41 ^A	7~386	202±105 ^a	60~226	144±56 ^B	6~388	120±110 ^b	75~221	151±39 ^B	15~331	128±92 ^b

注: a、b、c 字母相同表示不同江段个体差异不显著 ($P>0.05$), 字母不同表示差异显著 ($P<0.05$); 显著水平 <0.01 时, 用相应的大写字母 (A、B、C) 表示。

Note: Values with different superscripts of a, b, and c denote significant difference in the body length of fishes between different sections ($P<0.05$), while no significant difference marked by the same letters ($P>0.05$); Values with different capital letters of A, B, and C denote a more significant difference at the level of 0.01.

段逐渐消失, 只能在库尾流水江段采到, 如泉水鱼 (*Pseudogyrincheilus prochilus*)、墨头鱼、圆口铜鱼、铜鱼 (*C. heterodon*)、异鳔鳅 (*Xenophysogobio bou-lengeri*)、中华沙鳅、中华纹胸鮡 (*Glyptothorax sinense*) 等 (表 6)。长江上游特有鱼类多适应激流环境, 栖息于底层或爬附于石上, 摄食着生藻类或底栖无脊椎动物 (刘建康和曹文宣, 1992), 向家坝水库的蓄水改变了这些鱼类长期以来的适宜生境。按 0.5~1 m/s 的平均流速估算, 四大家鱼等产漂流性卵鱼类的漂流孵化距离约 85~170 km (雷欢等, 2018)。目前溪洛渡大坝以下水体流速大于 0.2 m/s 的江段大约 65 km (李婷等, 2020), 不能很好地满足产漂流性卵鱼类繁殖的需求, 对长鳍吻鮡、长薄鳅和圆口铜鱼等产漂流性卵特有鱼类产生了较大影响。因此, 大坝的阻隔及流水生境的丧失会严重影响长鳍吻鮡、长薄鳅和圆口铜鱼等产漂流性卵等特有鱼类的繁殖, 导

致其不能顺利完成生活史, 在库区逐渐衰退或消失。

在库区采集到 12 种外来物种, 基本都是蓄水后引入的 (表 6, 序号 16~27)。其中, 太湖新银鱼在库区种群发展很快, 已经形成了一定规模的种群数量, 在“十年禁渔”前曾是库区拖网的主要捕捞对象。本研究由于网具的选择性, 在渔获物中仅偶见。丁鲶、镜鲤、梭鲈、加州鲈、尼罗罗非鱼等物种在库区不同江段采集到, 这些鱼类多为养殖品种, 可能来自养殖逃逸或弃养。研究表明, 建坝后坝上河流鱼类物种丰富度较低, 外来鱼类比例增加 (Jellyman & Harding, 2012), 水坝密度高的流域支持更高的外来鱼类多样性, 而水坝密度低的流域支持更高的土著鱼类多样性 (Pool et al, 2010)。

3.2 大坝建设前后鱼类群落结构的变化

水库蓄水不可避免带来鱼类群落结构的改变, 蓄水初期往往因为水温改变、生境多样性降低、产卵

表6 向家坝水库蓄水后鱼类组成变化

Tab.6 Newly appearing and disappearing fish species after Xiangjiaba Reservoir impoundment

序号	鱼名	绥江 2011年*	绥江 2015年*	桧溪 2018年**	本研究 (2016-2018年)		
					邵女坪	绥江	桧溪
1	白甲鱼	+	-	-	-	-	-
2	泉水鱼	+	-	+	-	-	-
3	墨头鱼	+	-	-	-	-	+
4	圆口铜鱼	+	+	+	-	-	+
5	铜鱼	+	+	+	-	-	-
6	长鳍吻鮡	+	-	-	-	-	-
7	齐口裂腹鱼	+	-	-	-	-	-
8	细鳞裂腹鱼	+	-	-	-	-	-
9	异鳔鮡	+	-	+	-	-	-
10	红尾荷马条 鲃	+	-	-	-	-	-
11	中华沙鳅	+	-	+	-	+	+
12	长薄鳅	+	-	-	-	-	-
13	犁头鳅	+	-	-	-	-	-
14	中华金沙鳅	+	-	-	-	-	-
15	中华纹胸鮡	+	-	+	-	-	-
16	俄罗斯鲟	-	-	-	-	+	-
17	丁鲶	-	+	-	+	-	+
18	团头鲂	-	-	-	+	-	-
19	镜鲤	-	-	-	+	+	+
20	日本白鲫	-	-	-	-	-	+
21	革胡子鲶	-	-	-	+	-	-
22	斑点叉尾鮰	+	-	-	-	+	-
23	太湖新银鱼	-	+	+	+	+	+
24	梭鲈	-	+	-	+	-	-
25	加州鲈	-	-	-	+	+	+
26	尼罗罗非鱼	-	-	-	+	-	+
27	红腹罗非鱼	-	-	-	-	+	-

注:*参考文献王俊等(2017),**参考文献李婷等(2020),+出现,-未出现。

Note: *referenced from Wang et al. (2017), **referenced from Li et al. (2020), + detected species, - undected species.

场不足或减少、饵料缺乏及种间竞争等因素导致鱼类物种多样性降低和群落变得简单化(Paller et al, 1992)。向家坝水库蓄水前(2011年),绥江江段的优势种为瓦氏黄颡鱼、圆口铜鱼、光泽黄颡鱼等,蓄水初期(2015年)草鱼、鳊、圆口铜鱼、鲢等占优势(王俊等,2017)。本研究显示,随着蓄水时间增加,库区绥江江段鱼类优势种逐步演替为以广适性和静水性鱼类,如鳊、鲢、瓦氏黄颡鱼和鳙等为主。蓄水前,圆口铜鱼的重量和数量比分别为13.0%和24.3%,蓄水初期(2015年)下降到4.2%和16.0%,本研究显示,目前

圆口铜鱼在绥江江段基本消失,在上游的流水江段(桧溪)还有一定数量,在渔获群体中的重量比约1.7%,数量比约0.6%。与蓄水前相比,静水性种类鳊发展为第一优势种,蓄水前重量、数量比分别为0.7%和1.6%,现在增加到20.2%和46%。总体上,向家坝水库蓄水后鱼类群落发生了显著变化,主要表现在:适应流水环境的物种,特别是长江上游特有鱼类正在库区逐渐消失或衰退,外来鱼类种类在增加,广适性和静水性物种的优势度在增加。

本研究显示,库首邵女坪和库尾桧溪江段鱼类群落差异相对较大,库中绥江与库首邵女坪鱼类群落更为相似,这与其所处的生境条件有关,库首邵女坪江段和库中绥江江段均处于湖相段,而库尾的桧溪处于河相段(李婷等,2020)。蓄水后,随着河流生境向库区生境的转变,对流水性鱼类的生存不利。在库首邵女坪江段,流水性鱼类的种类比例最低,但其数量和重量比例最高,主要是受优势种中华倒刺鲃的影响。在当地渔政管理部门了解到,向家坝库区蓄水后,库区网箱养殖活动发展很快,中华倒刺鲃是邵女坪江段主要的网箱养殖品种之一,2016-2018年当地政府对网箱养殖开展了专项清理行动。网箱养殖的逃逸或弃养,可能是导致流水性鱼类中华倒刺鲃为库首邵女坪江段优势种的主要原因。鲢、鳙等在渔获物中占有一定的优势,可能主要与库区的人工增殖放流活动有关。

3.3 鱼类资源保护与管理对策建议

向家坝库区蓄水后,增加了外来鱼类的入侵风险。应加强生物入侵知识的宣传普及,提高湖区居民生物安全意识,防止由放生、弃养等途径引入外来鱼类。规范和管控库区及周边水域的人工养殖活动,防止因养殖鱼类逃逸造成外来鱼类入侵。对库区外来鱼类进行监测和研究,掌握其种群动态和生态影响,建立外来种信息和预警系统。

本研究及李婷等(2020)的调查表明,溪洛渡坝下流水江段还存在圆口铜鱼等长江上游特有鱼类,但数量极少,应加强该江段鱼类资源的保护和管理。一方面,可通过梯级水库联合生态调度,提供满足产漂流性卵鱼类生活和繁殖的生态流量,另一方面,结合小水电清理整改行动,加强对可能为特有鱼类提供替代生境的库区支流的保护,如西宁河、中都河和大汶溪等(高少波,2014;张雄等,2014)。另外,针对产黏性卵鱼类,可以在合适水域通过设置人工鱼巢,模拟自然生态环境,为其提供适宜的产卵和孵化生境。2021年长江“十年禁渔”

正式开始实施,这将有效促进向家坝库区鱼类资源恢复和鱼类多样性保护。

志谢:江汉大学生命科学学院 2015 级本科生蔡金和 2016 级硕士研究生文函宇参与部分野外调查工作,谨表谢意。

参考文献

- 曹文宣, 2017. 长江上游水电梯级开发的水域生态保护问题[J]. 长江技术经济, (1):25-30.
- 丁瑞华, 1994. 四川鱼类志[M]. 成都:四川科学技术出版社.
- 高少波, 2014. 金沙江下游支流大汶溪鱼类资源现状与保护对策[J]. 水生态学杂志, 35(6):16-23.
- 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.
- 雷欢, 谢文星, 黄道明, 等, 2018. 丹江口水库上游梯级开发后产漂流性卵鱼类早期资源及其演变[J]. 湖泊科学, 30(5):1319-1331.
- 李婷, 唐磊, 王丽, 等, 2020. 溪洛渡至向家坝河段水电开发下鱼类种群分布及生态类型变化[J]. 生态学报, 40(4):1473-1485.
- 刘建康, 曹文宣, 1992. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. 长江流域资源与环境, 1(1):17-23.
- 屈霄, 郭传波, 熊芳园, 等, 2020. 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[J]. 水生态学杂志, 41(6):46-56.
- 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, 26(3):394-401.
- 魏念, 张燕, 吴凡, 等, 2021. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化[J]. 长江流域资源与环境, 30(8):1858-1869.
- 吴江, 吴明森, 1985. 关于金沙江石鼓到宜宾段鱼类资源的概况及其利用问题[J]. 西南师范学院学报(自然科学版), (1):80-87.
- 肖琼, 杨志, 唐会元, 等, 2015. 乌江下游干流鱼类物种多样性及其资源保护[J]. 生物多样性, 23(4):499-506.
- 熊飞, 刘红艳, 段辛斌, 等, 2014. 长江上游江津江段鱼类群落结构及资源利用[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 38(3):94-102.
- 张雄, 刘飞, 林鹏程, 等, 2014. 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, 23(4):496-503.
- Bloom S A, 1981. Similarity indices in community studies: potential pitfalls[J]. Marine Ecology Progress Series, 5(2):125-128.
- Chen D Q, Xiong F, Wang K, et al, 2009. Status of research on Yangtze fish biology and fisheries[J]. Environmental Biology of Fishes, 85:337-357.
- 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 and Freshwater Research, 46(4):475-489.
- Krebs C J, 1999. Ecological Methodology[M]. New York: Harper Collins.
- Liermann C R, Nilsson C, Robertson J, et al, 2012. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity[J]. BioScience, 62(6):539-548.
- Paller H M, Gladden J B, Heuer J H, 1992. Development of the fish community in a new south Carolina reservoir[J]. American Midland Naturalist, 128:95-114.
- Pogson B, 2015. Habitat fragmentation reduces biodiversity[J]. Science, 347(6228):1325.
- Pool T K, Olden J D, Whittier J B, et al, 2010. Environmental drivers of fish functional diversity and composition in the Lower Colorado River Basin[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 67(11):1791-1807.
- Xie P, 2003. Three-Gorges Dam: risk to ancient fish[J]. Science, 302:1149-1151.

(责任编辑 熊美华)

Spatial Pattern of Fish Community Structure in Xiangjiaba Reservoir on the Lower Jinsha River

XIONG Fei^{1,2}, GUO Qi¹, ZHANG Wei¹, LIU Hong-yan^{1,2}, ZHAI Dong-dong^{1,2},
DUAN Xin-bin³, TIAN Hui-wu³, CHEN Da-qing³

(1. School of Life Sciences, Hubei Engineering Research Center for Protection and Utilization of Special Biological Resources in the Hanjiang River Basin, Jiangnan University, Wuhan 430056, P. R. China;

2. Hubei Key Laboratory of Environmental and Health Effects of Persistent Toxic Substances, Jiangnan University, Wuhan 430056, P. R. China;

3. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Wuhan 430223, P. R. China)

Abstract: In this study, we explored the impacts of cascaded hydropower development on the fish community in the lower Jinsha River. The study was based on an investigation of fish community structure conducted from 2016 to 2018, focusing on species composition, body size, dominant species, ecological groups, and spatial distribution. The investigation, that included seven fish surveys, was conducted using multiple gill nets and cages in the Shaonvping, Suijiang and Huixi sections of the lower, middle and upper streams of Xiangjiaba Reservoir. A total of 59 fish species belonging to 49 genera, 16 families and 6 orders were collected, among which there were 5 species endemic to the upper Yangtze River and 12 exotic species. There were 39, 40 and 30 fish species collected in the Shaonvping, Suijiang and Huixi sections, respectively. The Jaccard index of similarity showed that fish species composition in the three sections were at a medium level. The relative importance index (IRI) showed that *Spinibarbus sinensis* and *Hemiculter leucisclus* were the dominant species in the Shaonvping section, *H. leucisclus*, *Hypophthalmichthys molitrix*, *Pseudobagrus vachelli* and *Aristichthys nobilis* were dominant in the Suijiang section, and *P. vachelli*, *Cyprinus carpio* var. *specularis*, *Cyprinus carpio*, *H. leucisclus*, *Ctenopharyngodon idellus* and *Carassius auratus* were dominant in the Huixi section. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) showed that fish community structure between the Shaonvping and Huixi sections was more dissimilar with a Bray-Curtis dissimilarity index of 0.59, while the fish community structure between the Suijiang and Shaonvping sections were more similar with a Bray-Curtis dissimilarity index of 0.41. The Bray-Curtis dissimilarity index between the Suijiang and Huixi sections was 0.46. Eurytopic species dominated the Xiangjiaba Reservoir, accounting for 57.7%±5.9% of the total species number, 65.2%±20.7% in abundance and 47.7%±16.1% in total catch weight. The abundance percentages of the eurytopic species were 43.3% in Shaonvping, 67.8% in Suijiang and 84.5% in Huixi sections, displaying an increasing trend from the lower to upper streams of the reservoir. Body length and weight ranges were 29-655 mm and 0.1-5 408 g, with mean values (±SD) of (128±65) mm and (70±218) g. Body size of the primary species was significantly different among the three sections of the reservoir, except for *C. carpio* var. *specularis* and *C. carpio* ($P<0.05$). In conclusion, fish community structure in the lower Jinsha River has changed dramatically since reservoir impoundment in 2011, and diversity among endemic species has decreased and increased among exotic species. Our results provide a basis for ecological impact assessment of cascaded hydropower projects and fish protection in the lower Jinsha River and information for assessing the effectiveness of the "ten-year fishing ban" in the Yangtze River.

Key words: dominant species; endemic fish species; exotic fish species; Xiangjiaba Reservoir; the lower Jinsha River