

小江回水区江段鱼类群落结构的时空变动及驱动因素分析

郑梦婷¹, 杨志², 胡莲², 金瑶², 朱其广², 邹曦², 乔晔², 刘小燕¹, 唐会元²

(1. 湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南长沙 410128;

2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北武汉 430079)

摘要:调查小江下游回水区鱼类资源,探讨三峡水库175 m正常蓄水后该江段鱼类群落结构的时空变动特征及其驱动因素,为小江鱼类资源保护提供参考依据。在小江下游渠口、养鹿、高阳和黄石设置4个采样江段,1个位于水库变动回水区,3个位于水库常年回水区。基于2013年和2019年5-7月及10-11月开展的鱼类资源调查数据,采用多元分析方法量化分析小江回水区江段非生物因子时空变动与鱼类群落结构时空变动的关系。结果显示:2013年和2019年共在小江回水区江段采集到鱼类74种,隶属于7目15科56属,其中优势种鱼类15种,长江上游特有鱼类7种,外来鱼类5种;小江常年回水区的鱼类群落结构在2019年发生了明显改变,而变动回水区江段的鱼类群落结构在2013年和2019年间无明显差异;小江常年回水区江段的鱼类群落结构在2013年显示出明显的季节变动特征,而在2019年季节性变动特征不明显;变动回水区江段的鱼类群落结构在2013年和2019年均存在明显的季节变动;总磷含量、磷酸盐含量、水温和流速显著影响小江回水区江段鱼类群落结构的时空分布格局,其中磷酸盐含量和水温是最关键的驱动因素。尽量维持小江变动回水区的自然生境特征、采取措施控制小江常年回水区外来物种的数量以及严格控制外源营养物的输入,对于保护小江土著鱼类资源具有重要意义。

关键词:鱼类群落结构;环境因子;冗余分析;时间效应;小江

中图分类号:S932.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)03-0042-12

河流筑坝形成了拦河水库,原有的自然流水生境转变为流水、缓流水以及静水区梯次排列的生境,并迅速改变河流鱼类群落结构的时空分布格局(Clavero et al, 2010; Pelicice et al, 2015; Poff, 2018)。探讨鱼类群落结构在库区不同生境江段以及短期和长期时间尺度上的变动特征,一直是水生态学研究的重要内容之一(Gao et al, 2010; 杨志等, 2015; Loures & Pompeu, 2019; Yang et al, 2021)。研究发现,水库蓄水后,鱼类群落的种类组成及其结构在空间纵向梯度上会沿着水库河流带到湖沼带进行重新分布,并或多或少呈现随库区水位和蓄水运行周期变动的特征(Ferrareze et al, 2014; Lin et al, 2019)。许多喜流水性的鱼类种类会根据库区水位的周期性变动在水库的河流带和过渡带之间进行迁徙,而适应静水生境的肉食性鱼类和浮游生物食

性鱼类则往往常年在库湖沼带鱼类群落中占据主导地位(Lin et al, 2019; Yang et al, 2021)。研究也发现,造成库区不同江段鱼类群落结构时空格局变动的因素,除鱼类的迁徙特征和上游梯级水库蓄水运行的综合影响效应以外,库区不同江段间的纵向梯度生境差异(如流速、营养盐差异等)也起着重要的作用(Terra et al, 2011; Loures & Pompeu, 2019; Yang et al, 2021)。尽管如此,由于库区不同支流在流域、局域和河段尺度上生境组成的差异以及在鱼类种类组成上的差异,不同支流鱼类群落结构在时空尺度上的变动特征及其驱动因素很可能也存在明显的差异(刘燕山等, 2021)。在此背景下,对特定支流鱼类群落结构的时空变动特征及其驱动因素进行研究,对于该支流鱼类资源的保护具有重要的意义。

小江(又名澎溪河)是三峡库区消落区面积最大、变动回水区较长以及常年流量较大的一条支流(史方等, 2017),孕育着丰富多样的鱼类资源(叶学瑶等, 2017),不仅是许多适应库区静缓流生境鱼类的栖息、觅食和产卵区域(阮瑞等, 2017),也是许多产漂流性卵鱼类的产卵区域(陈小娟等, 2020)。迄今,关于小江鱼类群落结构的研究主要涉及种类组成及生物多样性在蓄水前后的变动(叶学瑶等, 2017)以及部分区域(如汉丰湖等)鱼类群落结构的

收稿日期:2021-07-28 修回日期:2023-01-11

基金项目:国家重点研发计划课题(2019YFC0408904);国家自然科学基金(51779157);湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30336);中国长江三峡集团有限公司科研项目“三峡库区产黏沉性卵鱼类自然繁殖的生态调度需求及调度方式研究”。

作者简介:郑梦婷,1995年生,女,硕士研究生,主要研究方向为渔业资源与环境。E-mail:247115837@qq.com

通信作者:唐会元。E-mail: Tanghy@mail.ihe.ac.cn

季节性变动特征(丁庆秋等, 2015; 王敏等, 2017), 而对其回水区江段群落结构在三峡水库 175 m 正常蓄水后(2012年后)的时空变动特征及其驱动因素的定量分析研究缺乏。本文在小江下游回水区 4 个江段开展鱼类资源调查, 探讨三峡水库 175 m 正常蓄水后该江段鱼类群落结构的时空变动特征及其驱动因素, 以为小江鱼类资源保护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于三峡库区小江下游回水区河段(图 1)。小江全长 182.4 km, 流域面积 5 172.5 km², 回水区长度约 117.5 km, 包括开州区汉丰湖调节坝以下江段。在三峡水库低水位运行时, 汉丰湖调节坝至渠口镇下游白家溪江段为流水江段, 而白家溪以下江段为静缓流生境江段。采样江段有 4 个, 从上游到下游分别为渠口、养鹿、高阳和黄石江段, 其中渠口采样江段位于水库变动回水区, 该区域的底质基质主要由砾石和卵石组成, 其他 3 个采样江段位于水库的常年回水区, 底质基质主要由淤泥及大型岩石构成; 高阳、养鹿和渠口江段均具有大面积的港湾生境, 在春夏季时这些港湾覆盖有面积的水草植被, 为许多粘草产卵鱼类产卵场的主要分布区域(阮瑞等, 2017)。



图 1 研究区域及采样江段

Fig.1 Schematic diagram of the study area and sampling river sections

1.2 样本采集及环境因子测定

2013 年和 2019 年 5–7 月以及 10–11 月, 分别在 4 个采样江段(渠口、养鹿、高阳和黄石)开展鱼类资源调查(图 1)。2013 年为三峡水库达到 175 m 正常蓄水位后的第 1 年, 而 2019 年为三峡水库达到 175 m 正常蓄水位后的第 7 年。每次采样, 使用 2

种渔具(刺网和虾笼)在每个采样江段进行鱼类样本采集。刺网网目尺寸为 20~250 mm(包括 20、40、80、100、120、200 和 250 mm), 不同网目规格的刺网网长为 100~200 m, 同一网目规格刺网的网长在不同断面及不同月份间略有差异。刺网放置时, 其一端被固定在沿岸带, 并沿着河流横截面从沿岸带放置到河道中间(Yang et al, 2021)。根据采样点的最大水深, 在黄石、高阳和养鹿江段放置网高为 3、5、8、10、20、30 和 50 m 的定置刺网, 在渠口江段则放置网高为 3、5、8 和 10 m 的定制刺网, 使得各个水层分布的鱼类均能够捕捞到。虾笼被放置在非常浅的河道或岩石密布的区域, 以捕捉小型营底栖生活的鱼类。定置刺网和虾笼开始放置时间通常为 17:00–19:00, 持续到第二天早上 6:00–7:00, 以覆盖鱼类活动最频繁的时间段(Blabolil et al, 2017)。每次采样时, 相同网目规格刺网以及虾笼在每个采样江段的捕捞努力量大致相等。对所有采集到的鱼类标本进行种类鉴定, 并测量每尾个体的全长、体长(精确到 1 mm)和体重(精确到 0.1 g)(丁庆秋等, 2015)。

在渔获物采样的同时, 使用 LGY II 型流速仪和多参数水质分析仪 YSI 6600 现场测量各个采样江段的断面平均流速(m/s)、水温(WT, °C), 溶解氧(DO, mg/L)和 pH。同时, 鱼类资源调查期间, 采集并测定各个采样点的总氮(TN, mg/L)、总磷(TP, mg/L)、氨氮(AN, mg/L)、硝氮(NN, mg/L)、磷酸盐(PP, mg/L)、高锰酸盐指数(COD_{Mn}, mg/L)和叶绿素 a(Chl-a, µg/L)含量。

1.3 数据统计与分析

对采集到的所有鱼类的拉丁名, 按照 Eschmeyer's Catalog of Fishes(Fricke et al, 2020)进行校对和更正, 并确定所有鱼类的流速偏好(曹文宣等, 2007; 梁秩棠等, 2019)。同时, 计算每个采样江段鱼类的相对丰度; 计算鱼类在渔获物中的数量和重量比例, 确定比例大于 2% 的主要种类组成。

基于 Bray–Curtis 相似性矩阵, 采用组平均连接的聚类分析(Cluster analysis, CA)方法来确定鱼类群落结构的潜在空间和时间分组(Clarke & Gorley, 2006)。在 CA 之前, 为了避免稀有物种的不确定性影响, 将每个采样点相对丰度小于 0.5% 的鱼类物种排除(Yang et al, 2018)。Bray–Curtis 相似矩阵数据进行 lg(x+1) 转换。采用 One-way ANOSIM 方法检验鱼类群落结构在各组之间的差异是否在统计学上显著, 并采用百分比相似性分析(Similarity Percent-

age, SIMPER) 获得引起不同组间鱼类群落结构差异的主要种类。同时, 使用以下公式计算这些主要种类在不同聚类组间的相对丰度的变化:

$$R_{av} = G_{1ra} - G_{2ra} \quad (1)$$

式中: R_{av} 为主要种类在不同聚类组之间的相对丰度的变化; G_{1ra} 和 G_{2ra} 分别为主要物种在聚类组 1 和聚类组 2 中的相对丰度(%)。

使用 11 个环境变量和鱼类的相对丰度数据来分析生物-非生物关系。11 个非生物变量, 包括总氮(TN)、硝氮(NN)、氨氮(AN)、总磷(TP)、磷酸盐(PP)、叶绿素 a(Chl-a)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、水温(WT)、pH、溶解氧含量(DO)和流速(V), 被用作解释变量, 而相对丰度数据为响应变量。所有数据在建模前都经过 $\lg(x+1)$ 转换。在生物-非生物关系分析前, 首先采用去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)确定使用线性还是非线性模型(Yang et al, 2021)。对本文的数据而言, DCA 前 4 个轴的最大轴长度小于 3(范围为 1.493~1.971), 表明选择线性模型是合适的。因此, 我们使用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)模型来分析生物-非生物关系(Borcard et al, 2011)。在 RDA 构建之前, 采用方差膨胀系数(Variance inflation factor, VIF)检验各变量间的共线性; VIF 值大于 10 的变量具有明显的共线性, 其将被排除在 RDA 分析中。RDA 分析时, 采用正向选择方法选择解释变量, 以获得最简洁的 RDA 模型(Borcard et al, 2011), 并通过置换检验(permutation test)确定 RDA 全局模型、每个 RDA 标准轴和每个解释变量的显著性。随后, 在此基础上, 采用层次分割方法(Hierarchical partitioning, HP)评估不同变量解释小江下游鱼类群落结构变动的相对比例。

使用软件 PRIMER-E (Version 6) 和 PERMANOVA+ (Anderson et al, 2008) 进行 CA、ANOSIM 和 SIMPER 分析。使用 R 软件包“vegan 2.5-4”、“ggplot2 3.3.2”、“ggrepel 0.8.2”和“rdacca.hp 0.1.0”进行 DCA、VIF、RDA、Permutation test 和 HP 分析。本文的显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 鱼类种类组成及主要种类

2013 年和 2019 年共调查到渔获物 2 497.53 kg, 47 305 尾, 鉴定出种类 74 种, 隶属于 7 目 15 科 56 属(表 1), 其中 2013 年采集到鱼类 69 种, 2019 年采集到鱼类 63 种。2 次调查中, 采集到的鲤科鱼类种类

数最多, 共有 35 属 46 种, 占总种类数的 62.16%; 其次为鲮科和鳊科, 分别有 4 属 8 种和 5 属 6 种, 各占 10.81% 和 8.11%; 最少为鳊科、银鱼科、胭脂鱼科、胡子鲇科、鲢科、鳙科、沙塘鳢科、丽鱼科和合鳃鱼科, 均仅有 1 属 1 种, 各占 1.35%(表 1)。2 次调查共采集到长江上游特有鱼类 7 种, 以及外来鱼类 5 种(表 1)。

2 次调查, 在渔获物中数量百分比或重量百分比大于 2% 的鱼类共有 15 种, 如图 2。其中数量百分比最高的种类为似鳊(*Pseudobrama simoni*), 占总采集尾数的 28.74%, 其次为蒙古鲌(*Chanodichthys mongolicus*)、鲃鱼(*Pseudolaubuca sinensis*)和光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*), 分别占 10.06%、8.98%、8.93% 和 6.91%, 最少为鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*), 占 0.47%; 重量百分比最高的种类为翘嘴鲌(*Culter alburnus*), 占总重量的 15.68%, 其次为鲤(*Cyprinus carpio*)、蒙古鲌、鲢和似鳊, 分别占 13.13%、11.69%、9.06% 和 8.05%, 最少为银鲌(*Squalidus argentatus*), 占 0.43%(图 2)。

2.2 群落结构及其时空变动特征

2013 年和 2019 年小江下游各江段鱼类群落的聚类分析如图 3。在 63.22% 的 Bray-Curtis 相似性水平上可将 2013 年和 2019 年小江下游各江段的鱼类群落结构分为 3 大组: 组 1 包括黄石、高阳、养鹿江段 2013 年春夏季和秋冬季鱼类, 以及渠口江段 2013 年和 2019 年春夏季鱼类; 组 2 包括黄石、高阳、养鹿江段 2019 年春夏季和秋冬季鱼类; 组 3 包括渠口江段 2013 年和 2019 年秋季鱼类。One-way ANOSIM 检验显示各大组间及任意两大组间的鱼类群落结构在统计学上差异显著(各组间, $r=0.711$, $P=0.1\%$, 迭代次数 999 次; 组 1 vs 组 2, $r=0.670$, $P=0.1\%$, 迭代次数 999 次; 组 1 vs 组 3, $r=0.703$, $P=2.2\%$, 迭代次数 45 次; 组 2 vs 组 3, $r=0.896$, $P=3.6\%$, 迭代次数 28 次)。同时, 组 1 又可以分为 2 小组, 其中组 1A 包括黄石、高阳、养鹿江段 2013 年春夏季鱼类, 以及渠口江段 2013 年和 2019 年春夏季鱼类, 组 1B 包括黄石、高阳、养鹿江段 2013 年秋冬季鱼类; 组 2 也可以分为 2 小组, 其中组 2A 包括黄石、高阳、养鹿江段 2019 年春夏季的鱼类群落结构, 而组 2B 包括黄石、高阳、养鹿江段 2019 年秋冬季的鱼类群落结构(图 3)。One-way ANOSIM 检验显示鱼类群落结构在组 1A 和组 1B 间差异显著, 而在组 2A 和组 2B 间差异不显著(组 1A vs 组 1B, $r=0.723$, $P=1.8\%$, 迭代次数 56 次; 组 2A vs 组 2B, $r=0.926$, $P=10.0\%$, 迭代次数 10 次)。

表 1 2013 和 2019 年小江下游的鱼类种类组成

Tab.1 Species composition of fish catches from the lower reaches of Xiaojiang River in 2013 and 2019					2013 年				2019 年			
序号	目	科(亚科)	种		黄石	高阳	养鹿	渠口	黄石	高阳	养鹿	渠口
1	鲱形目	鲢科	短颌鲚	<i>Coilia mystu</i>		+			+	+	+	+
2	鲱形目	银鱼科	太湖新银鱼	<i>Neosalanx taihuensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
3	鲱形目	胭脂鱼科	胭脂鱼	<i>Myxocyprinus asiaticus</i>	+				+		+	
4		鳅科	中华沙鳅	<i>Botia superciliaris</i>		+	+	+		+	+	+
5			花斑副沙鳅	<i>Parabotia fasciata</i>		+		+				
6			红尾副鳅	<i>Homatula variegata</i>				+				
7			*长薄鳅	<i>Leptobotia elongata</i>	+				+			
8			紫薄鳅	<i>Leptobotia taeniaps</i>	+							
9			泥鳅	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
10		鲤科	宽鳍鱮	<i>Zacco platypus</i>		+	+	+		+	+	+
11			马口鱼	<i>Opsariichthys bidens</i>	+	+						
12			青鱼	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	+	+		+	+	+	+	
13			草鱼	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
14			赤眼鲮	<i>Squaliobarbus curriculus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
15			鳊	<i>Elopichthys bambusa</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
16			银鲴	<i>Xenocypris argentea</i>				+				
17			黄尾鲴	<i>Xenocypris davidi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
18			似鲃	<i>Pseudobrama simoni</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
19			鲮	<i>Aristichthys nobilis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
20			鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
21			中华鲮	<i>Rhodeus sinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
22			高体鲮	<i>Rhodeus ocellatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
23			大鳍鲮	<i>Acheilognathus macropterus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
24		**麦瑞加拉鲮		<i>Cirrhinus mrigala</i>					+	+	+	
25			飘鱼	<i>Pseudolaubuca sinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
26			鲮	<i>Hemiculter leucisculus</i>			+	+			+	+
27			贝氏鲮	<i>Hemiculter bleekeri</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
28			翘嘴鲮	<i>Culter alburnus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
29			蒙古鲮	<i>Chanodichthys mongolicus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
30			达氏鲮	<i>Chanodichthys dabryi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
31			拟尖头鲮	<i>Culter oxycephaloides</i>	+		+			+	+	
32			红鳍原鲮	<i>Culter erythropterus</i>	+		+		+	+		
33			鲮	<i>Parabramis pekinensis</i>	+	+	+		+	+	+	
34			鲮	<i>Megalobrama mantschuricus</i>		+	+		+	+		
35			团头鲮	<i>Megalobrama amblycephala</i>	+	+	+		+	+	+	
36			*厚颌鲮	<i>Megalobrama pellegrini</i>			+			+		
37			花鲮	<i>Hemibarbus maculatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
38			麦穗鱼	<i>Pseudorasbora parva</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
39			华鲮	<i>Sarcocheilichthys sinensis</i>	+							
40			银鲮	<i>Squalidus argentatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
41			棒花鱼	<i>Abbottina rivularis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
42			铜鱼	<i>Coreius heterodon</i>	+	+	+		+	+		
43			*圆口铜鱼	<i>Coreius guichenoti</i>	+							
44			*圆筒吻鲮	<i>Rhinogobio cylindricus</i>	+	+	+					
45			*长鳍吻鲮	<i>Rhinogobio ventralis</i>	+							

续表2

序号	目	科(亚科)	种	2013年				2019年			
				黄石	高阳	养鹿	渠口	黄石	高阳	养鹿	渠口
46			蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
47			光唇蛇鮈 <i>Saurogobilo gymnocheilus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
48			宜昌鳅鮡 <i>Gobiobotia filifer</i>	+					+		
49			中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
50			*宽口光唇鱼 <i>Acrossocheilus monticola</i>	+							
51			**大鳞鲃 <i>Luciobarbus capito</i>		+				+	+	
52			*岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>	+				+	+		
53			鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
54			**散鳞镜鲤 <i>Cyprinus carpio var. specularis</i>					+	+		
55			鲫 <i>Carassius auratus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
56	鲇形目	鲇科	鲇 <i>Silurus asotus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
57			南方鲇 <i>Silurus meridionalis</i>			+					
58		胡子鲇科	**草胡子鲇 <i>Clarias fuscus</i>						+		
59		鲿科	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
60			瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
61			光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
62			长吻鮠 <i>Leiocassis longirostris</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
63			粗唇鮠 <i>Leiocassis crassilabris</i>		+	+				+	+
64			切尾拟鲿 <i>Pseudobagrus truncatus</i>			+	+			+	+
65			细体拟鲿 <i>Pseudobagrus pratti</i>			+	+			+	+
66			大鳍鲢 <i>Mystus macropterus</i>	+	+	+	+	+	+	+	
67	颌针鱼目	鲻科	间下鲻 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
68	鲈形目	鲈科	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
69		鳊科	乌鳊 <i>Channa argus</i>	+						+	
70		沙塘鳢科	沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>						+		
71		虾虎鱼科	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
72			波氏吻虾虎鱼 <i>Ctenogobius cliffordpopei</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
73		丽鱼科	**莫桑比克罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i>					+	+	+	+
74	合鳃鱼目	合鳃鱼科	黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	+		+			+	+	+

注:* 长江上游特有鱼类;** 外来鱼类。
Note: * Endemic fish species to the upper Yangtze River; ** Exotic fish species.

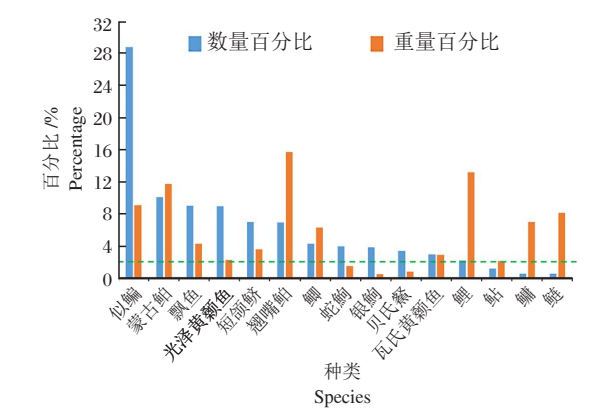


图2 小江下游两次调查主要鱼类的数量和重量百分比
Fig.2 Individual percentage and weight percentage of the main fish species in the lower reaches of Xiaojiang River

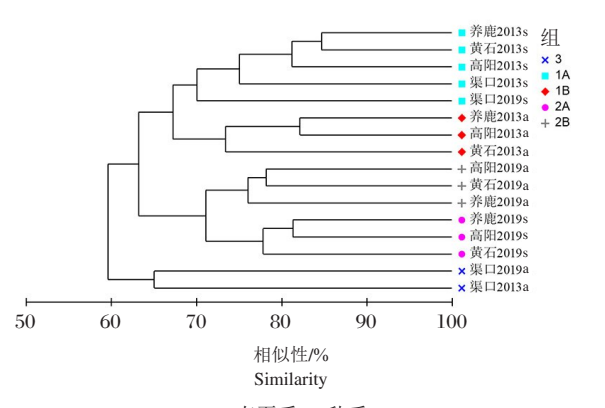


图3 小江下游各江段鱼类群落的聚类分析
Fig.3 Cluster analysis of fish community structures in the lower reaches of Xiaojiang River

用百分比相似性指数 (SIMPER) 分析组间群落结构差异 (表 2), 结果显示: 引起组 1 和组 2 间鱼类群落结构差异的主要物种共有 18 种, 其中短颌鲚 (*Coilia mystu*) 在两组间的丰度变动对组间鱼类群落结构的差异贡献率最高, 为 18.15%, 其次为蒙古鲌 (6.96%) 和蛇鮈 (6.84%); 引起组 2 和

组 3 间鱼类群落结构差异的有 17 种, 其中短颌鲚贡献率最高, 为 12.14%, 其次为似鳊 (11.30%) 和光泽黄颡鱼 (8.03%); 引起组 1 和组 3 间鱼类群落结构差异的共有 15 种, 其中光泽黄颡鱼贡献率最高, 为 11.56%, 其次为似鳊 (8.52%) 和短颌鲚 (7.14%)。

表 2 引起各组间群落结构差异的主要物种及其流水偏好

Tab.2 Main fish species that contributed to the dissimilarity in the community structure between the four major groups, and the information regarding their flow preference

种类	差异贡献率/%			相对丰度差异/%			流水偏好
	组 1 vs 组 2	组 2 vs 组 3	组 1 vs 组 3	组 1 vs 组 2	组 2 vs 组 3	组 1 vs 组 3	
短颌鲚	18.15	12.14	7.14	3.19	-2.21	0.98	L
蒙古鲌	6.96	3.22		-1.15	0.54		L
蛇鮈	6.84	6.40	6.01	0.30	-1.17	-0.87	EU
翘嘴鲌	6.26	3.94	7.48	-0.63	-0.20	-0.83	L
似鳊	4.99	11.30	8.52	-0.86	2.12	1.26	EU
光泽黄颡鱼	4.92	8.03	11.56	-0.16	-1.49	-1.65	EU
贝氏鲶	4.85	4.12	6.57	-0.61	-0.12	-0.73	EU
鲶	4.71	3.84	4.10	0.02	-0.61	-0.59	EU
银鮈	4.70	4.42	5.84	-0.69	0.65	-0.04	EU
鲚	4.11	3.87	4.63	0.06	-0.38	-0.32	EU
鲤	3.82	5.26	3.17	0.53	-0.99	-0.46	EU
鳊	3.61	3.46		0.65	-0.67		EU
瓦氏黄颡鱼	3.37	5.21	3.50	0.46	-0.97	-0.51	EU
达氏鲌	3.11	5.03	4.63	0.27	-0.90	-0.63	L
鲫	2.92	4.67	4.85	0.31	-0.86	-0.55	EU
鲢	2.75	3.22		0.33	-0.61		EU
鳙	2.39		2.29	0.11		-0.34	EU
莫桑比克罗非鱼	2.19			0.38			EU
赤眼鲮		2.53	3.09		0.43	0.22	EU

注: L-流水型物种; EU-广布种。
Note: L-Rheophilic species; EU-Eurytopic species.

2.3 群落结构与环境因子的关系

不同环境变量在小江各采样江段不同采样时间的平均值如表 3 所示。方差膨胀系数 (VIF) 检验显示环境因子变量 TN、NN 和 AN 的值大于 10 (TN, 64.516; NN, 30.077; AN, 119.450), 表明与其他变量具有明显的共线性, 因此这些变量被排除, 运用在后续的冗余分析中。通过变量的正向选择, 只有 5 个变量 (TP、PP、Chl-a、WT 和 V) 被最终选择为 RDA 模型的解释变量。这 5 个变量作为解释变量在 RDA 中获得的 Adjust R^2 (0.484), 几乎与全变量模型获得的 Adjust R^2 (0.516) 一样大。最终的 RDA 模型在统计学上是显著的 ($P < 0.01$), 没有明显的共线性 (各个变

量的 VIF 值均小于 10), 具有 2 个显著的规范轴 (RDA1: $F = 9.750, P = 0.001$; RDA2: $F = 5.801, P = 0.003$)。所选的 5 个解释变量中有 4 个解释变量与小江下游 4 个采样点鱼类群落结构的时空变动显著相关 (TP, $F = 3.310, P = 0.014$; PP, $F = 5.720, P = 0.001$; WT, $F = 4.046, P = 0.003$; V, $F = 4.017, P = 0.003$)。最终的 RDA 分析结果见图 4。所选的 5 个解释变量共同解释了群落结构 48.44% 的变异, 其中前 2 个规范轴共同解释了群落结构 39.46% 的变异, 第一个轴单独解释了群落结构 24.74% 的变异。

RDA1 轴能够将组 2 的鱼类群落结构 (2019 年春季和秋冬季黄石、高阳和养鹿江段样本) 与组 1

表 3 2013 年和 2019 年采样期间小江各采样江段环境因子的平均值
Tab.3 Average values of the environmental factors in the sampling sections of Xiaojiang River during the sampling period of 2013 and 2019

采样点	总氮 / mg·L ⁻¹	硝氮 / mg·L ⁻¹	氨氮 / mg·L ⁻¹	总磷 / mg·L ⁻¹	磷酸盐 / mg·L ⁻¹	Chl-a / μg·L ⁻¹	COD _{Mn} / mg·L ⁻¹	水温 /℃	pH	DO / mg·L ⁻¹	流速 / m·s ⁻¹
黄石 2013s	0.96	0.40	0.38	0.03	0.01	22.01	2.48	24.12	7.47	5.22	0.18
高阳 2013s	0.73	0.20	0.28	0.03	0.00	37.73	3.03	23.88	7.61	5.61	0.12
养鹿 2013s	1.39	0.76	0.25	0.08	0.03	31.34	2.09	24.56	8.01	6.45	0.45
渠口 2013s	1.50	0.85	0.25	0.15	0.06	7.06	1.83	23.28	7.56	6.02	1.21
黄石 2013a	1.58	0.93	0.30	0.10	0.04	15.20	1.81	19.24	7.88	7.52	0.12
高阳 2013a	1.37	0.86	0.35	0.05	0.02	28.97	1.94	19.20	7.66	5.48	0.08
养鹿 2013a	1.35	0.96	0.26	0.10	0.04	9.06	1.81	19.22	7.49	5.91	0.18
渠口 2013a	1.41	0.91	0.26	0.18	0.06	6.64	2.23	18.42	7.79	5.34	0.32
黄石 2019s	0.16	1.09	1.58	0.04	0.06	13.09	4.00	24.33	8.70	5.37	0.24
高阳 2019s	0.23	0.90	1.49	0.04	0.13	28.16	4.03	24.16	8.55	6.30	0.19
养鹿 2019s	0.15	0.94	1.46	0.03	0.07	22.71	3.71	24.20	8.46	5.95	0.42
渠口 2019s	0.07	0.82	1.30	0.04	0.07	18.93	3.19	23.99	8.56	6.05	1.48
黄石 2019a	0.11	1.34	1.50	0.05	0.06	2.71	2.43	19.77	8.81	5.69	0.11
高阳 2019a	0.17	1.25	1.52	0.04	0.06	6.76	2.69	20.10	8.28	5.29	0.10
养鹿 2019a	0.22	1.27	1.51	0.05	0.06	6.72	2.82	19.13	8.14	5.48	0.15
渠口 2019a	0.15	1.13	1.34	0.04	0.06	16.56	3.17	19.05	8.00	5.65	0.28

注:s-春夏季;a-秋季。
Note:s-Spring and summer, a-Autumn.

(2013 年春夏季和秋冬季黄石、高阳和养鹿江段样本)和组 3(渠口江段 2013 年和 2019 年秋季的鱼类群落结构)的鱼类群落结构分离开来,其中组 2 分布在 RDA1>0 的一侧,而组 1 和组 3 则分布在 RDA1<0 的一侧;组 3 以及组 1B 样本分布在 RDA2<0 的一侧,而组 1B 样本分布在 RDA2>0 的一侧,表明沿着 RDA2 轴 2013 年 4 个采样江段的鱼类群落结构呈现明显的季节性变动特征;尽管如此,组 2A 和组 2B 样本在 RDA2=0 的上下两侧均有分布,表明黄石、高阳和养鹿江段的鱼类群落结构在 2019 年时的季节性变动特征不明显。似鳊(PS)、银鮡(SAR)、赤眼鲮(*Squalio-barbus curriculus*)(SCU)和蒙古鲌(CM)等位于三序图的左下角,其的相对丰度变动紧密联系着更高的 Chl-a 和 TP 含量。岩原鲤(*Procypris rabaudi*)(PR)、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)(CG)、宽鳍鱮(*Zacco platypus*)(ZP)和华鲮(*Sarcocheilichthys sinensis*)(SSI)等位于靠近中心的左上角,其相对丰度在聚类组 1 春夏季样本中最高,与较高的流速(V)和较高的水温(WT)密切相关。同时,贝氏鲃(*Hemiculter bleekeri*)(HB)、光泽黄颡鱼(PN)、蛇鮈(SD)等与变量 WT 正相关,表明这些鱼类在水温较高的时候大量出现;短颌鲚(CMY)、罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)(OM)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)(PF)

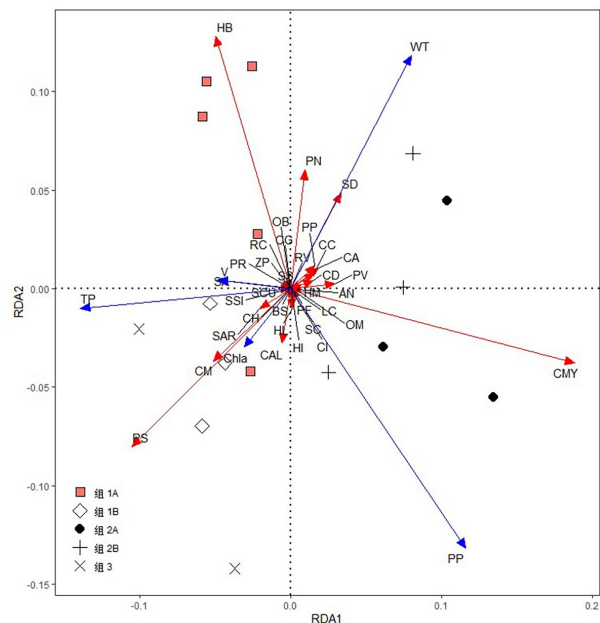
等的相对丰度变动易受磷酸盐(PP)含量变动的影响。其他种类如鲤(*Cyprinus carpio*)(CC),鲇(*Silurus asotus*)(SA)和瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)(PV)等聚集在三序图的中央,表明它们能够存在于水库的大部分区域,并能够适应不同采样点的生境条件。总之,RDA 分析的结果显示第一个轴主要代表生物-非生物之间的年际变动关系(鱼类群落结构在 2 次采样间发生了明显变动),而第二个轴主要描述生物-非生物之间的季节变动关系(图 4)。

RDA 的层次分割(HP)结果显示:磷酸盐解释的鱼类群落结构时空变异比例最高,为 34.58%,其次为和水温和总磷,分别为 25.31% 和 15.17%,最低为 Chl-a,仅为 10.76%(图 5)。

3 讨论

3.1 鱼类群落结构的时空变动特征

聚类分析以及 One-way ANOSIM 检验结果显示在相同采样季节,黄石、高阳和养鹿江段的鱼类群落结构在不同年份间差异明显,而渠口江段的鱼类群落结构在不同年份间差异不明显(图 3),表明小江常年回水区的鱼类群落结构在三峡水库 175 m 正常蓄水运行多年后发生了明显的改变,而小江变动回水区江段(渠口江段)的鱼类群落结构在 2 次调查间无



环境变量以蓝色箭头显示;不同鱼类物种的缩写用红色箭头表示:PP-鳊、CI-草鱼、SCU-赤眼鲮、CMY-短颌鲚、PN-光泽黄颡鱼、SC-鳊、PF-黄颡鱼、CA-鲫、HI-间下鲃、ZP-宽鳍鱮、CC-鲤、HM-鲢、OB-马口鱼、CM-蒙古鲌、SA-鲃、CAL-翘嘴鲌、CD-达氏鲌、SD-蛇鲈、PS-似鳊、CH-铜鱼、PV-瓦氏黄颡鱼、PR-岩原鲤、SAR-银鲌、HB-贝氏鲃、AN-鳊、RC-圆筒吻鲌、RV-长鳍吻鲌、BS-中华沙鳢、SS-中华倒刺鲃、SSI-华鲈、CG-圆口铜鱼、HL-鳟、OM-莫桑比克罗非鱼和LC-大鳞鲃

图4 小江下游鱼类群落结构与环境变量关系的冗余分析结果

Environmental parameters, are shown by blue arrows, whereas the abbreviations of species representing the different fish species are shown by red arrows: PP-*Parabramis pекinensis*, CI-*Ctenopharyngodon idellus*, SCU-*Squaliobarbus curriculus*, CMY-*Coilia mystus*, PN-*Pelteobagrus nitidus*, SC-*Siniperca chuatsi*, PF-*Pelteobagrus fulvidraco*, CA-*Carassius auratus*, HI-*Hyporhamphus intermedius*, ZP-*Zacco platypus*, CC-*Cyprinus carpio*, HM-*Hypophthalmichthys molitrix*, OB-*Opsariichthys bidens*, CM-*Chanodichthys mongolicus*, SA-*Silurus asotus*, CAL-*Culter alburnus*, CD-*Chanodichthys dabryi*, SD-*Saurogobio dabryi*, PS-*Pseudobrama simoni*, CH-*Coreius heterodon*, PV-*Pelteobagrus vachelli*, PR-*Procypris rabaudi*, SAR-*Squalidus argentatus*, HB-*Hemiculter bleekeri*, AN-*Aristichthys nobilis*, RC-*Rhinogobio cylindricus*, RV-*Rhinogobio ventralis*, BS-*Botia superciliosa*, SS-*Spinibarbus sinensis*, SSI-*Sarcocheilichthys sinensis*, CG-*Coreius guichenoti*, HL-*Hemiculter leucisculus*, OM-*Oreochromis mossambicus* and LC-*Luciobarbus capito*

Fig.4 Redundancy analysis triplot of fish community structure and environmental parameters in the lower reaches of the Xiaojiang River

明显的差异。该结果与在三峡库区干流常年回水区 (Yang et al, 2021) 以及变动回水区 (Yang et al, 2012) 获得的结果相一致。鱼类群落结构的年际变动在不同水文功能区域间的差异,很可能归因于这2方面原因:(1)变动回水区在三峡水库高、低水位时均具有一定的流速,该区域既分布有适应静缓流生境的鱼类种类,也分布有喜流水性的鱼类种类,区域内的鱼类群落结构易受上游江段流水性鱼类下行补充的影

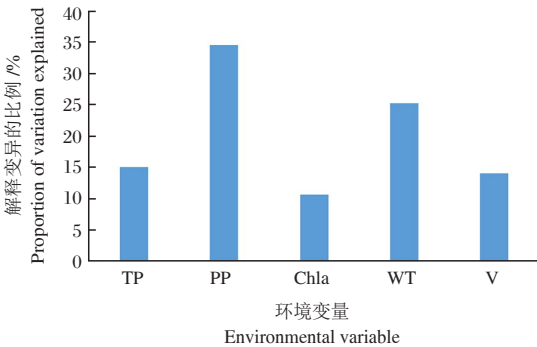


图5 环境变量解释小江下游鱼类群落结构变动的相对比例
Fig.5 Relative explanation proportions of different environmental variables in explaining the variations in fish community structure changes in the lower reaches of Xiaojiang River

响。尤其当变动回水区的优势类群主要为喜流水性鱼类时,只要这些鱼类在上游自然连通的流水江段内有充足的群体,该变动回水区的鱼类群落结构就会保持相对稳定 (Yang et al, 2012; 2021); (2)常年回水区通常分布有大量适应静缓流生境的鱼类种类,虽然在一定程度上可以维持该区域鱼类群落结构的稳定,但是当上游鱼类群落结构发生变化时,由于生物间的相互作用,该区域的鱼类群落结构也会受到影响而发生变动 (董哲仁, 2010; Yang et al, 2021)。除此之外,常年回水区通常是库区非土著物种数量急剧增加的区域,其鱼类群落结构更易受非土著物种增殖的影响 (Lin et al, 2019)。正如本文表2所述,通过葛洲坝及三峡船闸引入的短颌鲚以及由于外来引种或放生进入的莫桑比克罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) (杨志等, 2012) 等非三峡库区土著物种数量的剧烈变动主要发生在常年回水区江段。

同时,聚类分析以及 One-way ANOSIM 检验的结果也显示常年回水区江段 (黄石、高阳和养鹿) 的鱼类群落结构在 2013 年时有明显的季节性变动特征,然而在 2019 年时季节性变动特征并不明显 (图3),表明随着三峡水库正常蓄水运行的进行,常年回水区江段的鱼类群落结构在不同季节间逐渐趋同。尽管如此,本文的结果也显示变动回水区江段 (渠口江段) 的鱼类群落结构在 2013 年和 2019 年均呈现明显的季节性变动特征,表明变动回水区江段的鱼类群落结构有其独特的抗扰动和稳定机制,即静水性和喜流水性鱼类共存于不稳定的生境中,共同利用这个生境,从而使得该生境具有更多的稀有物种并最终达到群落的中度可持续性 (Oliveira et al, 2003); 生物与非生物因子共同构建鱼类群落结构,在不稳定

生境中,外界因子包括流速及水质的梯度等在鱼类群落结构构建中的作用更显著,其能够避免常年回水区江段(更为稳定的生境)所面临的生物间的显著效应(如表2显示外来物种、短颌鲚等非土著物种在渠口江段难以形成大规模的种群,并进而影响其种群的稳定)(Beesley & Prince, 2010)。这种机制在三峡库区干流回水变动区江段也曾被观测到(Yang et al, 2012)。

3.2 鱼类群落结构与环境因子的关系

RDA结果显示小江回水区江段鱼类群落结构的时空变动与营养盐含量(总磷、磷酸盐)、叶绿素a、水温及流速的时空变动密切相关,表明水质、水温以及水文情势特征在影响小江回水区江段鱼类群落结构时空变化中起着重要的作用。许多研究已发现,水质特征包括总磷、磷酸盐、溶解氧、pH、叶绿素a等显著影响着河库鱼类群落结构的时空分布格局,且其关键水质影响要素随着不同研究区域间的生境特征差异而有所不同(程琳, 2011; 孟睿等, 2013; 刘燕山等, 2021; Lin et al, 2012; Gao et al, 2015; Yang et al, 2021)。在外源营养物质输入较高的湖库中,总磷和/或叶绿素a浓度通常是影响其鱼类群落结构时空变动的关键因子之一(程琳, 2011; 孟睿等, 2013; Miranda et al, 2015; 周兴安等, 2016; Yang et al, 2021)。有调查发现,小江回水区江段是三峡库区营养盐含量较高、浮游植物生物量较高的区域,因此小江回水区江段的鱼类群落结构一定程度上会受到该区域营养盐含量和浮游植物生物量变动的影响(陈薛伟杰, 2018)。本文中表2的结果也证实了这一点:调查区域的鱼类主要为适应静缓流生境或广适性的鱼类种类,而这些鱼类种类的食物来源与其栖息区域营养盐含量和浮游植物生物量存在密切的关系。

与TP相比,变量PP具有更高的解释能力(图5),表明小江回水区江段的鱼类群落结构更易受磷酸盐含量变动的影响。已有研究表明,磷酸盐易被浮游植物吸收利用,是影响不同类型水域浮游植物数量消长的主要影响因子之一(李钦钦等, 2010; 王丽卿等, 2011; 李佳俊等, 2015),因此磷酸盐可以作为关键要素通过浮游植物-鱼类这一上行效应影响鱼类群落的结构特征。由于三峡水库的磷酸盐主要来源于随降雨、径流作用输入的生活和生产性排污,包括农业面源输入、城镇污水输入以及工业生产排污输入等(曹承进等, 2008),因此通过控制污水输入,很可能可以调控小江回水区江段的鱼类群落结构,从而使得小江回水区江段鱼类生物多样性得以增加

(例如环境耐受性高的部分外来物种数量的减少,以及水质要求高的部分土著物种数量的增加等)。

RDA结果显示水温主要影响调查区域鱼类群落结构的季节分布特征,且这种影响主要与鲤、蛇鮈、鳊、光泽黄颡鱼等在春夏季产卵的鱼类种类的数量变动有关。已有研究表明,水温是促使鱼类产卵行为发生的驱动因素之一(Kayaba et al, 2010; King et al, 2016),而鱼类产卵行为的发生又会使得鱼类发生聚集行为,从而在特定时间特定江段内出现大量集群群体(Tao et al, 2017)。在本文中,许多鱼类在春夏季节到小江回水区沿岸带水草基质或流水浅滩上产卵繁殖,然而其在秋冬季时又会回到三峡水库干支流深水湾沱处越冬,从而使得这些鱼类在小江回水区江段的种群数量在不同季节间呈现明显的变动特征。研究已发现,三峡水库干支流回水区江段的鱼类群落结构的季节性变动明显,且该种变动与部分鱼类受水位和水温变动显著影响的季节性迁徙有关(杨少荣等, 2010)。尽管如此,本文的结果还显示在2019年时,常年回水区的3个采样江段的鱼类群落结构的季节性变动变得不明显,这很可能与这些区域生境趋于相对稳定、定居性鱼类比例较高,而迁徙性鱼类比例较低有关。

RDA结果显示流速显著影响小江回水区江段鱼类群落结构的时空变动,该结果与Yang等(2021)在三峡水库干流回水区江段获得的结果相一致。尽管如此,与三峡库区干流相比,流速对小江回水区江段鱼类群落结构时空变动的解释能力较弱(图5),这很可能与小江回水区各调查江段流速梯度不明显有关:三峡水库低水位运行时,下游3个调查江段位于常年回水区,其上游及区间来水量通常较小,难以在此3个江段间产生明显的流速梯度;三峡水库高水位运行时,4个调查江段均位于小江回水倒灌区内,该回水区末端直达汉丰湖调节坝坝址,只有当调节坝放水时才会产生一定的流速梯度。该结果突显了在辨识影响不同采样江段鱼类群落结构时空变动的关键生境因子时,需要充分考虑采样江段间所存在的生境特征差异。

3.3 研究结果在小江下游鱼类资源保护中的运用

本文的研究结果显示处于变动回水区内的渠口江段的鱼类群落结构在三峡水库正常蓄水多年后仍保持稳定,而其他3个处于常年回水区内的江段的鱼类群落结构则显示相反的结果,表明小江变动回水区江段在保持原有鱼类物种多样性方面具有更大的作用。尤其是相较于渠口江段,下游3个江段的非土

著物种(如短颌鲚、莫桑比克罗非鱼等)在渔获物中的相对丰度更大,其群落结构更易受到非土著物种特别是外来物种数量变动的影响。在上述背景下,尽量维持小江变动回水区的自然生境特征(如在三峡水库低水位运行时,尽量维持其流水生境长度;在高水位运行时,尽量维持一定长度的流水缓冲区),以及采取措施控制小江常年回水区外来物种的数量对于保护小江回水区江段土著鱼类资源具有重要的意义。

同时,RDA分析结果显示营养盐含量的时空变动对小江回水区江段鱼类群落结构的时空变化有显著的影响。因此,通过外源营养物的输入控制,很可能会改变小江回水区江段营养物质的时空分布格局,从而促进小江回水区江段鱼类群落结构的完善(如物种生物多样性的上升、重要种质鱼类数量的增加等)。此外,本文结果还显示小江回水区江段的鱼类群落结构在三峡水库正常蓄水多年后仍在发生变动,表明在研究区域开展长期的鱼类资源监测是非常有必要的。

参考文献

- 曹承进,秦延文,郑丙辉,等,2008. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 29(2): 310-315.
- 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.
- 程琳,2011. 长江流域湖泊鱼类群落与主要环境因子关系及其预测模型[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 陈薛伟杰,2018. 三峡库区万州江段和小江鱼类食物网结构与功能研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- 陈小娟,唐会元,杨志,等,2020. 三峡水库支流小江鱼类早期资源现状[J]. 三峡生态环境监测, 5(1): 42-47.
- 代亮亮,李莉杰,何梅,等,2020. 贵州草海秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系[J]. 水生态学杂志, 41(2): 64-69.
- 丁庆秋,彭建华,杨志,等,2015. 三峡水库高、低水位下汉丰湖鱼类资源变化特征[J]. 水生态学杂志, 36(3): 1-9.
- 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等,2010. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展, 21(4): 550-559.
- 李佳俊,沈萍萍,谭辉辉,等,2015. 南海东北部浮游植物对氮、磷加富的响应及与不同水团的关系[J]. 海洋学报, 37(10): 90-101.
- 李钦钦,邓建才,胡维平,等,2010. 太湖金墅湾水源地浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 21(7): 1844-1850.
- 刘燕山,谷先坤,唐晟凯,等,2021. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 41(2): 769-780.
- 梁秩荣,易伯鲁,余志堂,2019. 江湖鱼类早期发育图志[M].

广州: 广东科技出版社.

- 孟睿,何连生,过龙根,等,2013. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 34(7): 2588-2596.
- 阮瑞,张燕,沈子伟,等,2017. 三峡消落区鱼卵、仔稚鱼种类的鉴定及分布[J]. 中国水产科学, 24(6): 1307-1314.
- 史方,陈小娟,杨志,等,2016. 三峡水库小江流域鱼类营养层次研究[J]. 水生态学杂志, 37(4): 70-77.
- 王丽卿,许莉,卢子园,等,2011. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 32(10): 2868-2874.
- 王敏,朱峰跃,刘绍平,等,2017. 三峡库区汉丰湖鱼类群落结构的季节变化[J]. 湖泊科学, 29(2): 439-447.
- 杨少荣,高欣,马宝珊,等,2010. 三峡库区木洞江段鱼类群落结构的季节变化[J]. 应用与环境生物学报, 16(4): 555-560.
- 杨志,陶江平,唐会元,等,2012. 三峡水库运行后库区鱼类资源变化及保护研究[J]. 人民长江, 43(10): 62-67.
- 杨志,唐会元,朱迪,等,2015. 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[J]. 生态学报, 35(15): 5064-5075.
- 叶学瑶,陶敏,朱光平,等,2017. 三峡库区小江鱼类群落特征及其历史变化[J]. 长江流域资源与环境, 26(6): 841-846.
- 周兴安,乔永民,王赛,等,2016. 洱海鱼类群落结构特征及其与环境因子关系[J]. 生态学杂志, 35(6): 1569-1577.
- Beesley L S, Prince J, 2010. Fish community structure in an intermittent river: the importance of environmental stability, landscape factors and within-pool habitat descriptors[J]. Marine & Freshwater Research, 61(5): 605-614.
- Blabolil P, Říha M, Ricard D, et al, 2017. A simple fish-based approach to assess the ecological quality of freshwater reservoirs in Central Europe[J]. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, 418:53.
- Borcard D, Gillet F, Legendre P, 2011. Numerical Ecology with R[M]. New York: Springer.
- Clarke K R, Gorley R N, 2006. PRIMER V6: User manual/tutorial PRIMER-E[M]. Plymouth,UK: PRIMER-E.
- Clavero M, Blanco-Garrido F, Prenda J, 2010. Fish fauna in Iberian Mediterranean river basins: Biodiversity, introduced species, and damming impacts[J]. Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems, 14(6): 575-585.
- Ferrareze M, Casatti L, Nogueira M G, 2014. Spatial heterogeneity affecting fish fauna in cascade reservoirs of the Upper Paraná Basin, Brazil[J]. Hydrobiologia, 738(1): 97-109.
- Fricke R, Eschmeyer W N, Van der Laan R, 2020. Eschmeyer's catalog of fishes: Genera, species, references[P]. <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>.

- Gao X, Zeng Y, Wang J W, et al, 2010. Immediate impacts of the second impoundment on fish communities in the Three Gorges[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 87(2): 163–173.
- Gao X, Zhang Y, Ding S, et al, 2015. Response of fish communities to environmental changes in an agriculturally dominated watershed (Liao River Basin) in northeastern China [J]. *Ecological Engineering*, 76: 130–141.
- Kayaba T, Sugimoto T, Mori T, et al, 2010. Induced spontaneous spawning using an increased temperature stimulus in the cultured barfin flounder *Verasper moseri*[J]. *Fisheries Science*, 69(4): 663–669.
- King A J, Gwinn D C, Tonkin Z, et al, 2016. Using abiotic drivers of fish spawning to inform environmental flow management[J]. *Journal of Applied Ecology*, 53: 34–43.
- Lin C, Lek S, Lek-Ang S, et al, 2012. Predicting fish assemblages and diversity in shallow lakes in the Yangtze River Basin[J]. *Limnologia*, 42(2): 127–136.
- Lin P C, Gao X, Liu F, et al, 2019. Long-term monitoring revealed fish assemblage zonation in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37: 1258–1267.
- Loures R C, Pompeu P S, 2019. Temporal changes in fish diversity in lotic and lentic environments along a reservoir cascade[J]. *Freshwater Biology*, 64(10): 1806–1820.
- Miranda L E, Bies J M, Hann D A, 2015. Land use structures fish assemblages in reservoirs of the Tennessee River[J]. *Marine & Freshwater Research*, 66(6): 526–534.
- Pellicice F M, Pompeu P S, Agostinho A A, 2015. Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of neotropical migratory fish[J]. *Fish and Fisheries*, 16(4): 697–715.
- Oliveira E F, Goulart E, Minte-Vera C V, 2003. Patterns of dominance and rarity of fish assemblage along spatial gradients in the Itaipu Reservoir, Paraná, Brazil [J]. *Acta scientiarum: Biological sciences*, 25(1):71–78.
- Poff N L, 2018. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flow challenges in a non-stationary world[J]. *Freshwater Biology*, 63(8): 1011–1021.
- Tao J P, Yang Z, Cai Y P, et al, 2017. Spatiotemporal response of pelagic fish aggregations in their spawning grounds of middle Yangtze to the flood process optimized by the Three Gorges Reservoir operation[J]. *Ecological Engineering*, 103: 86–94.
- Terra B, Santos A, Araújo F G, 2011. Fish assemblage in a dammed tropical river: an analysis along the longitudinal and temporal gradients from river to reservoir[J]. *Neotropical Ichthyology*, 8(3): 599–606.
- Yang S R, Gao X, Li M Z, et al, 2012. Interannual variations of the fish assemblage in the transitional zones of the Three Gorges Reservoir: Persistence and stability[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 93(2): 295–304.
- Yang Z, Tao J P, Qiao Y, et al, 2018. Multivariate analysis performed to identify the temporal responses of fish assemblages to abiotic changes downstream of the Gezhouba Dam on the Yangtze River[J]. *River Research and Applications*, 34(9): 1142–1150.
- Yang Z, Pan X J, Hu L, et al, 2021. Effects of upstream cascade dams and longitudinal environmental gradients on variations in fish assemblages of the Three Gorges Reservoir[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 30(4): 503–518.

(责任编辑 郑金秀)

Spatiotemporal Variation of Fish Community Structure and Its Driving Factors in the Backwater Area of Xiaojiang River

ZHENG Meng-ting¹, YANG Zhi², HU Lian², JIN Yao², ZHU Qi-guang², ZOU Xi², QIAO Ye², LIU Xiao-yan¹, TANG Hui-yuan²

(1. College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, P.R. China;
2. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China)

Abstract: In this study, we explored the temporal and spatial variation characteristics of fish community structure and their driving factors in the backwater area of Xiaojiang River after the normal storage (175m after 2012) and operation of the Three Gorges Reservoir. It aimed to provide reference for the fish resource protection in the backwater area of Xiaojiang River. The study was based on the fish resource survey and habitat data collection conducted in four sections (Qukou in the variable backwater area , Yanglu, Gaoyang and Huangshi sections in the perennial backwater area) of the Xiaojiang River from May to July in 2013 and from October to November in 2019, and the relationship between the abiotic factors and the changes of fish community structure was quantitatively analyzed using multivariate analysis method. Results show that a total of 74 fish species belonging to 56 genera, 15 families and 7 orders were collected from the backwater area of Xiaojiang River in 2013 and 2019, including 15 dominant species, 7 endemic species and 5 exotic species. There were 69 fish species collected in 2013, while there were 62 fish species collected in 2019. The fish community structure in the perennial backwater area of Xiaojiang River has changed significantly in 2019, while no significant difference in the fish community structures in the river section of the variable backwater area was observed between 2013 and 2019. The fish community structure in the perennial backwater area of Xiaojiang River showed obvious seasonal variation in 2013, while the seasonal variation became less obvious in 2019. The fish community structure in the variable backwater area of Xiaojiang River showed obvious seasonal variation in 2013 and 2019. The total phosphorus content, phosphate content, water temperature and flow velocity significantly affected the temporal and spatial change pattern of fish community structure in the backwater area of Xiaojiang River, and the phosphate content and water temperature were two key factors driving the change of fish community structure. Our results indicate that maintaining the natural habitat characteristics of the variable backwater area of Xiaojiang River, taking measures to control the population size of alien species in the perennial backwater area of the Xiaojiang River as well as strictly controlling the input of exogenous nutrients are of great significance to protect the indigenous fish resources in the backwater area of Xiaojiang River.

Key words: fish community structure; environmental factor; redundancy analysis; temporal effect; Xiaojiang River