

DOI: 10.12264/JFSC2024-0107

长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落结构及多样性年际变化

唐成^{1,2}, 邓华堂², 田辉伍², 蒲艳², 段聪³, 吴兴华⁴, 唐锡良⁴, 段辛斌^{1,2}, 陈大庆^{1,2}

1. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070;
2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站 湖北 武汉 430223;
3. 重庆市珍稀特有鱼类国家级自然保护区管理处, 重庆 402260;
4. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010

摘要: 为了全面评估金沙江下游梯级水电站运行和禁渔政策的实施对长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类的群落结构与多样性的影响, 本研究基于 2007—2021 年的鱼类资源调查数据, 分析了该江段珍稀特有鱼类群落结构的年际变化; 同时采用物种多样性、分类多样性和功能多样性 3 个维度的 8 个指数, 对该江段不同时期(金沙江一期工程蓄水前、蓄水后和禁渔初期)珍稀特有鱼类的多样性进行评价分析。结果显示, 在连续 15 年的监测中, 共记录珍稀特有鱼类 29 种, 隶属于 3 目 6 科 23 属。从生态类型上看, 该江段的珍稀特有鱼类以栖息于底层、产漂流性卵、偏好流水生境的杂食性或肉食性鱼类为主。等级聚类分析(cluster)和非度量多维尺度分析(NMDS)显示, 在相似性水平为 70%时, 不同年份的珍稀特有鱼类群落可以分为 4 组。One-way ANOSIM 检验结果表明, 蓄水前和蓄水后珍稀特有鱼类群落组成无明显差异, 禁渔初期与蓄水前、蓄水后的群落组成均有显著差异($P<0.05$)。物种多样性分析结果显示, Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数具有不同的年际变化趋势, 变化范围分别是 1.709~2.506、0.729~0.906、1.719~3.147、0.647~0.867。平均分类差异指数(Δ^+)和分类差异变异指数(Δ^+)均表现为禁渔初期>蓄水前>蓄水后。运动、繁殖和摄食等不同维度的功能多样性在不同时期的变化趋势具有一定的差异, 其中运动功能丰富度在禁渔初期较高, 摄食功能丰富度在蓄水后较高, 繁殖功能丰富度在蓄水前较高; 运动功能均匀度在禁渔初期显著高于蓄水前和蓄水后, 摄食、繁殖功能均匀度在不同时期无显著差异; 功能离散度在禁渔初期均显著高于蓄水前和蓄水后。研究结果表明, 长江上游珍稀特有鱼类的群落结构和多样性受水电开发和禁渔政策等环境因素影响明显, 且不同维度的多样性指数之间关系复杂, 反映出鱼类群落在生态环境变化下的适应与调整。

关键词: 长江上游; 珍稀特有鱼类; 群落结构; 物种多样性; 分类多样性; 功能多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)11-1273-18

长江干流宜昌以上江段为长江上游, 位于我国地势的第一阶梯和第二阶梯, 全长 4300 多 km^[1-2]。由于海拔落差大, 地形地貌复杂多变, 形成了独特的水文特征和水动力环境, 为众多水生生物提供了广阔且适宜的栖息生境, 是我国淡水鱼类资源的重点保护区域^[3-4]。据历史资料记载, 长江上

游分布有鱼类 286 种, 珍稀鱼类 4 种, 长江上游特有鱼类 124 种, 是我国特有鱼类比例最高的水系^[1]。

长江上游珍稀特有鱼类的核心种群主要分布在长江宜昌以上干流水域, 其生存和繁衍必须依赖于长江上游独特的生态环境和种群基础, 是我国独有的水生生物资源, 具有十分重要的科研

收稿日期: 2024-04-13; 修订日期: 2024-07-04.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202001); 国家自然科学基金项目(U2240214, 51909271, 32202942); 中国三峡集团建设管理有限公司项目(JG/18056B, JG/18057B); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD09).

作者简介: 唐成(1998-), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源研究. E-mail: 1119720793@qq.com

通信作者: 陈大庆, 研究员, 从事渔业资源研究. E-mail: chdq@yfi.ac.cn

价值和生态保护价值,同时也是评估生态系统健康状况和环境质量的重要指示物种^[2,5-6]。另外,这些鱼类在食物链中通常占据特定的位置,与其他生物形成复杂的相互作用关系,共同维持着生态系统的平衡和稳定。深入研究珍稀特有鱼类群落结构变化,可以更好地了解生态系统的运行机制和演化过程,为生态保护和环境治理提供科学依据和技术支持。然而,在水电开发、过度捕捞等因素的综合影响下,长江上游珍稀特有鱼类的生存受到了严重威胁^[7-8]。随着三峡水库全面蓄水,长江干流江津花红堡以下约 600 km 河道转变为库区,大幅缩减了喜流水性鱼类的栖息地^[2,9],这将对大约 40 种长江上游特有鱼类产生影响^[10]。金沙江下游梯级水电站相继运行之后,长江上游原有的自然河段遭到破坏,转变成为“河流-库区-河流”形式,严重阻隔了淡水洄游性鱼类的洄游路线^[11-12]。同时,河流的水文情势也发生显著改变,导致多种长江上游特有鱼类的关键栖息地破碎或消失,对鱼类群落结构的分布特征造成了明显影响^[12-13]。

长江宜宾至江津江段上游毗邻金沙江下游梯级水库,而下游则与三峡水库相接,在同时受到上下游水库的综合影响之下,仍然保留了足够长的自然流水江段,为珍稀濒危水生动物与其他长江上游特有鱼类提供了宝贵的栖息环境^[4]。当前关于宜宾至江津江段鱼类的研究多集中于鱼类早期资源^[14-17]、种群动态^[5,18-19]、群落结构与多样性^[20-23]等方面,对于该江段珍稀特有鱼类在三峡库区与金沙江梯级水电站相继运行期间的变化趋势的研究较少。

另外,在传统的鱼类群落研究中,物种多样性指数被广泛使用。这种多样性测度方法将所有物种视为等同,未考虑种间的分类关系及其生态功能上的差异^[24]。近年来分类多样性和功能多样性逐渐受到重视^[25-26]。已有研究表明,仅从一个维度研究多样性难以全面揭示生态系统的结构与功能特性^[27]。综合使用多个维度的研究方法能够相互补充,不仅有助于深入地理解生物群落的构建机制及生物多样性的成因,同时也为制定科学的生态保护策略和评估人类活动对生态系统的影响

提供了重要依据^[28]。因此,本研究基于长期鱼类资源监测数据,深入剖析了长江上游宜宾至江津江段内珍稀特有鱼类群落的构成及变迁,同时从物种多样性、分类多样性和功能多样性 3 个层面探讨了该江段珍稀特有鱼类多样性的动态变化趋势。为理解该江段珍稀特有鱼类群落在不同时期的变化状况提供了坚实的数据基础,以期为保护和恢复该江段珍稀特有鱼类的多样性提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 调查方法

本研究统计了在长江上游宜宾至江津江段长期监测调查的珍稀特有鱼类数据。调查站点包括宜宾、泸州和江津(图 1),调查时间为每年的 5—7 月(繁殖期)和 9—12 月(育肥期和越冬期)。为了综合比较该江段珍稀特有鱼类群落的年际变化,将数据分为金沙江一期工程蓄水前(2007—2012 年)、蓄水后(2013—2019 年)以及禁渔初期(2020—2021 年)3 个时期进行对比分析。其中 2007—2016 年主要通过统计监测江段的各类渔船在不同生境中所捕捞的渔获物数据,主要捕捞渔具有流刺网、定置刺网、排钩等,然后使用小型手抄网、撒网等采集网自行采集进行数据补充。2017—2021 年以聘请渔民采用流刺网、定置刺网等渔具主动捕捞的方式采集鱼类数据,禁渔初期仅使用定置刺网和地笼,其中 2019—2021 年是在有关部门允许的情况下进行作业。鱼类种类鉴定主要参照《中国动物志》^[29-30]和《四川鱼类志》^[31]。

1.2 数据分析

1.2.1 生态类型划分 参考历史资料^[31-33],对目标鱼类的生态类型进行系统的整理与分析。具体而言,依据鱼类栖息的水层深度,划分为中上层、中下层和底层 3 大生态类群;根据鱼类对栖息生境的偏好特性,分为流水型、静水型以及广适型鱼类;在鱼卵类型方面,分为黏性卵、漂流性卵、沉性卵以及产于贝类鳃瓣内的卵 4 种类型;依据鱼类成年阶段的主要食物组成,将其划分为植食性、肉食性和杂食性 3 个类型。

1.2.2 群落相似性 基于不同年份鱼类的数量百

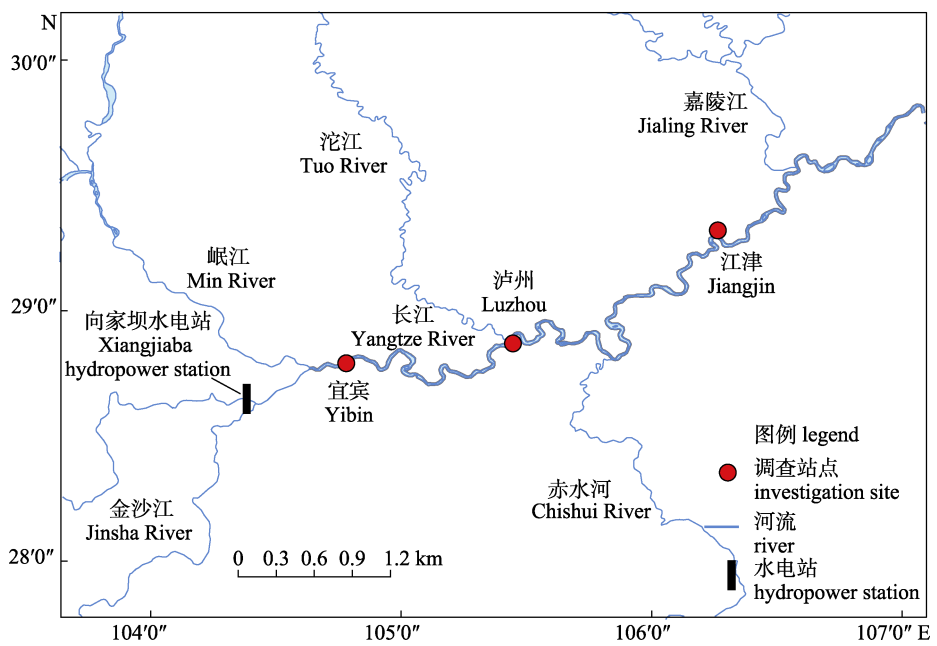


图 1 长江上游宜宾至江津江段调查站点设置

Fig. 1 Sampling sites set in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

分比构建原始矩阵,数据经过四次方根转换后,构建不同年份的 Bray-Crutis 相似性系数矩阵,采用等级聚类分析(cluster)和非度量多维尺度分析(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)来研究该江段珍稀特有鱼类群落结构的年际变化;用单因素相似性分析(one-way analysis of similarity statistics, one-way ANOSIM)对聚类结果和不同时期的群落结构进行差异检验;采用相似性百分比(Similarity Percentage, SIMPER)分析造成不同时期群落差异的种类及贡献率;用胁迫系数(stress)衡量 NMDS 图的优劣,0<stress<0.05 表示排序结果具有很好的代表性;0.05<stress<0.1 表示排序结果较好;0.1<stress<0.2 表示排序结果有一定解释意义^[34-35]。

1.2.3 物种多样性 采用 Shannon-Wiener 指数^[36]、Simpson 指数^[37]、Margalef 指数^[38]和 Pielou 指数^[39]对长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落进行物种多样性分析,计算公式如下:

Shannon-Wiener 指数:
$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

Simpson 指数:
$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

Margalef 指数:
$$d = \frac{S-1}{\ln N}$$

Pielou 指数:
$$J = \frac{H}{\ln S}$$

式中, $P_i=n_i/N$, n_i 为 i 种的个体数; N 为所有种类总个体; S 为物种数。

1.2.4 分类多样性 依据纳尔逊分类系统^[40]建立长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类名录,从目、科、属、种 4 个等级水平确定鱼类的分类地位,权重值分别为 $W_{\text{order}}=100$, $W_{\text{family}}=75$, $W_{\text{genus}}=50$, $W_{\text{species}}=25$ ^[41]。基于鱼类种类有无数据,采用平均分类差异指数(average taxonomic distinctness, Δ^+)和分类差异变异指数(variation in taxonomic distinctness, Λ^+)^[41-43]来表征该江段珍稀特有鱼类群落分类多样性的变动情况,计算公式如下:

$$\Delta^+ = \frac{\sum \sum_{i < j} w_{ij}}{S(S-1)/2}$$
$$\Lambda^+ = \frac{\sum \sum_{i < j} (w_{ij} - \Delta^+)^2}{S(S-1)/2}$$

式中, S 为鱼类种类数, w_{ij} 为第 i 和 j 个物种在分类系统树状图中的路径长度。

本研究采用随机检验(randomization test)对长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类名录进行 1000 次随机抽样,得到分类多样性的期望值,并利于分类多样性指数的 95%置信区间漏斗图(95%

probability funnels), 对观测值与期望值进行比较分析^[44]。

1.2.5 功能多样性 (1)功能性状选择 本研究选取了与运动、摄食、繁殖相关的 14 个性状^[45-46]来探究 2007—2021 年长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落的功能多样性。通过查阅历史资料^[31]和世界鱼类资料库(FishBase, <https://fishBase.mnhn.fr/search.php>)对功能性状进行赋值和分类(表 1)。

(2) 功能多样性指数 选取功能丰富度(functional richness, FR_{ic})、功能均匀度(functional evenness, FE_{ve}) 和 功 能 离 散 度 (functional divergence, FD_{iv}) 3 项指数来分析研究区域珍稀特有鱼类群落的功能多样性^[47]。这 3 项功能多样性指数分别反映了一个物种在群落中占据了多少功能空间、物种功能性状丰度在功能空间中分布的

均匀程度和离散程度^[48]。计算公式如下:

$$FR_{ic} = SF_{ic} / R_c$$

式中, SF_{ic} 指群落中物种所占据的生态位, R_c 指特征值的绝对值。

$$FE_{ve} = \frac{\sum_{L=1}^{S-1} \min\left(PEW_L, \frac{1}{S-1}\right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}}$$

$$PEW_L = \frac{EW_L}{\sum_{L=1}^{S-1} EW_L}$$

$$EW_L = \frac{dist(i, j)}{W_i + W_j}$$

式中, S 为群落总物种数, EW_L 为均匀度权重; $dist(i, j)$ 为物种 i 和 j 的欧式距离; W_i 为物种 i 的相对丰度; L 为分支长; PEW_L 为分支长权重。

表 1 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类的功能性状
Tab. 1 Functional characteristics of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

功能类别 functional category	功能性状 functional trait	变量类型 variable type	功能性状类型或范围 functional trait type or range
运动功能 locomotion function	体形 body shape	分类变量 categorical variable	梭形、侧扁形、纺锤形、圆筒形、平扁形 pike, lateral flat, fusiform, cylindrical, flat
	最大体长/mm maximum length	连续变量 continuous variable	72–1200
	体高/体长/% body height/body length	连续变量 continuous variable	13.5–47.2
	尾柄长/体长/% tail handle length/body length	连续变量 continuous variable	6.9–25.7
	背鳍长/体长/% dorsal fin length/body length	连续变量 continuous variable	12.4–47.7
	营养级 trophic level	连续变量 continuous variable	2–4.2
	摄食功能 feeding function	分类变量 categorical variable	杂食性、肉食性 omnivorous, carnivorous
摄食功能 feeding function	食性 feeding habit	分类变量 categorical variable	杂食性、肉食性 omnivorous, carnivorous
	口位 oral position	分类变量 categorical variable	端位、亚上位、亚下位、下位 end position, sub-upper position, sub-lower position, lower position
	吻长/头长/% snout length/head length	连续变量 continuous variable	26.9–62.5
	眼径/头长/% eye diameter/head length	连续变量 continuous variable	3.5–32.2
	眼间距/头长/% eye spacing/head length	连续变量 continuous variable	14.1–50.0
	繁殖功能 reproductive function	分类变量 categorical variable	黏性、漂流性、沉性、产于贝类鳃瓣内 sticky eggs, drifting eggs, sunken eggs, likes shellfish to lay eggs
	产卵类型 egg type	分类变量 categorical variable	黏性、漂流性、沉性、产于贝类鳃瓣内 sticky eggs, drifting eggs, sunken eggs, likes shellfish to lay eggs
繁殖功能 reproductive function	初次性成熟年龄 age at first sexual maturity	连续变量 continuous variable	1.4–9.1
	初次性成熟体长 mm length at first sexual maturity	连续变量 continuous variable	52–800

$$FD_{iv} = \frac{\Delta d + \overline{dG}}{\Delta |d| + \overline{dG}}$$

$$\Delta d = \sum_{i=1}^S W_i \times (dG_i - \overline{dG})$$

$$\Delta |d| = \sum_{i=1}^S W_i \times |(dG_i - \overline{dG})|$$

$$\overline{dG} = \frac{1}{S} \times \sum_{i=1}^S dG_i$$

$$dG_i = \sqrt{\sum_{k=1}^T (x_{ik} - g_k)^2}$$

$$g_k = \frac{1}{S} \times \sum_{i=1}^S x_{ik}$$

式中, x_{ik} 为物种 i 性状 k 的值, g_k 为性状 k 的重心, T 为性状数, $\Delta|d|$ 为物种 i 与重心的平均距离, Δd 为以相对丰度为权重的离散度, W_i 为物种 i 的相对丰度。

1.2.6 数据处理 使用 Excel 对原始数据进行收集整理; 利用 PRIMER 6.0 软件进行 Cluster、NMDS、One-way ANOSIM 分析, 并计算物种多样性指数和分类多样性指数, 随机检验通过 PRIMER 6.0 软件的 TAXDTEST 功能进行计算; 使用 R 4.1.0 软件中的 vegan、FD 程序包计算功能多样性指数; 使用微生信在线平台 (SRplot, <https://www.bioinformatics.com.cn>) 绘制相关系数矩阵图; 使用 SPSS 16.0 软件对数据进行非配对样本差异显著性检验分析 (One-Way ANOVA, Duncan 法); 使用 GraphPad Prism 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 群落结构

2.1.1 种类组成 2007—2021 年在长江上游宜宾至江津江段共记录珍稀特有鱼类 17026 尾, 隶属于 3 目 6 科 23 属 29 种 (图 2)。其中, 国家一级保护动物有长江鲟 (*Acipenser dabryanus*), 国家二级保护动物有胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*)、岩原鲤 (*Procypris rabaudi*)、圆口铜鱼 (*Coreius guichenoti*)、长鳍吻鮡 (*Rhinogobio ventralis*)、四川白甲鱼 (*Onychostoma angustistomata*)、红唇薄鳅 (*Leptobotia rubrilabris*) 和长薄鳅 (*Leptobotia elongata*)。种类组成以鲤科鱼类种类最多, 共有

17 种, 占总种类数的 58.62%; 其次是鳅科和平鳍鳅科, 分别有 6 种和 3 种; 鲟科、胭脂鱼科和钝头鮡科最少, 均只有 1 种。2015 年和 2017 年监测到的珍稀特有鱼类种类最多, 有 20 种, 占总种类数 68.97%; 2020 年最少, 仅 13 种。岩原鲤、圆口铜鱼、圆筒吻鮡 (*Rhinogobio cylindricus*)、长鳍吻鮡、异鳔鳅 (*Xenophysogobio boulengeri*) 和拟缘鳅 (*Liobagrus marginatoides*) 6 种鱼类在每年调查中均有出现, 属于常见种类; 半鳊 (*Hemiculterella sauvagei*)、高体近红鲌 (*Ancherythroculter kurematsui*)、短身鳅 (*Gobiobotia abbreviata*) 等 9 种鱼类仅在 5 年或者低于 5 年的调查中有记录, 属于偶见种类。

2.1.2 生态类型 从食性上看, 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落仅有肉食性和杂食性鱼类, 其中肉食性鱼类数量百分比在金沙江一期工程蓄水前呈现上升趋势; 在蓄水初期 (2013—2015 年间) 呈现逐年下降, 之后则是“上升—下降—上升”的波动趋势。从栖息水层上看, 珍稀特有鱼类群落中以底层鱼类为主; 在蓄水之后, 栖息于中上层和中下层的鱼类在群落中的占比有所上升。从产卵类型上看, 以产漂流性卵和黏性卵的鱼类为主, 且漂流性卵 > 黏性卵; 但是在蓄水后, 产漂流性卵鱼类的数量百分比呈现先上升后大幅度下降的趋势, 直到禁渔初期产黏性卵的鱼类的数量百分比超过产漂流性卵的鱼类。从生境偏好上看, 偏好流水生境的鱼类占有较大比例; 在蓄水后, 静水型鱼类的占比则有所上升; 在禁渔初期, 广适型鱼类呈现上升趋势 (图 3)。

2.1.3 群落相似性 根据珍稀特有鱼类种类和数量百分比数据, 对长江上游宜宾至江津江段不同年份珍稀特有鱼类的群落结构进行 Cluster 聚类分析, 可将其划分为 4 个组群 (图 4): 组 I (2007—2008 年)、组 II (2009—2018 年)、组 III (2019 年)、组 IV (2020—2021 年), 4 个组群之间的平均相似率为 69.38%。NMDS 排序图 (图 4) 与 Cluster 聚类结果基本一致, 在相似性水平为 70% 时, 鱼类群落分为 4 组; stress=0.09 < 0.1, 表示排序结果较好, 具有解释意义。One-way ANOSIM 检验显示 4 个组群种类组成在统计学上差异显著 ($P < 0.05$)。

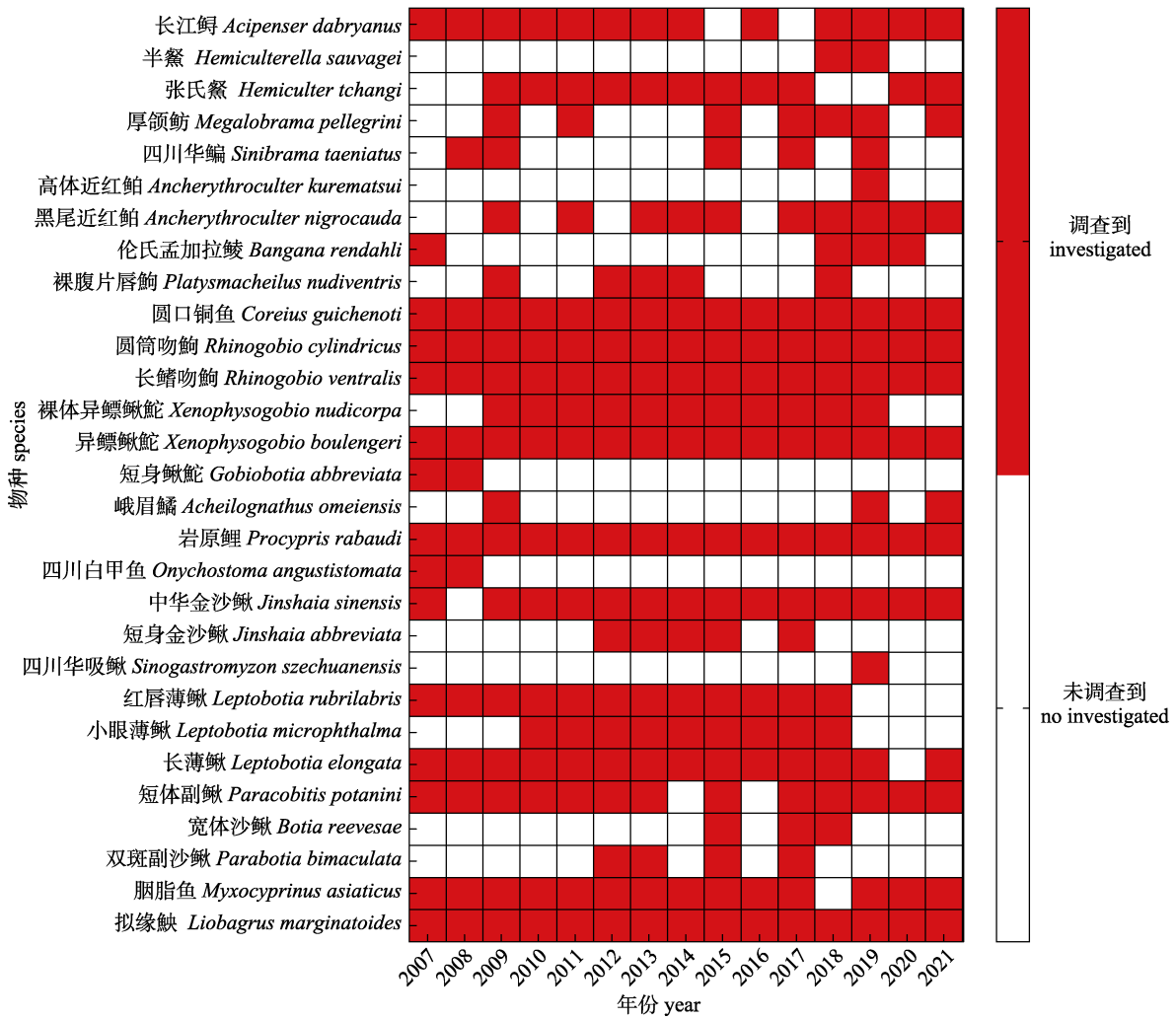


图 2 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类名录
Fig. 2 List of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

对不同时期的珍稀特有鱼类数据进行 One-way ANOSIM 检验(表 2), 结果表明, 长江上游宜宾至江津江段的珍稀特有鱼类群落结构在金沙江一期工程蓄水前和蓄水后无显著性差异($P>0.05$); 禁渔初期与蓄水前、蓄水后均有显著性差异($P<0.05$)。蓄水前和蓄水后群落结构的平均差异为 25.13, 黑尾近红鲂(*Ancherythroculter nigrocauda*)、张氏鲮(*Hemiculter tchangi*)、厚颌鲂(*Megalobrama pellegrini*)等 10 种鱼类贡献率较高, 累积贡献率为 49.21%; 蓄水前和禁渔初期群落结构的平均差异为 36.94, 红唇薄鲈、长薄鲈、长江鲟等 10 种鱼类贡献率较高, 累积贡献率为 67.80%; 蓄水后和禁渔初期群落结构的平均差异为 36.09, 长江鲟、长薄鲈、红唇薄鲈等 10 种鱼类贡献率较高, 累

积贡献率为 61.51%。

2.2 物种多样性

根据 2007—2021 年长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类的种类数和数量百分比进行物种多样性分析。结果显示, Shannon-Wiener 指数(H)变化范围是 1.709~2.506, 平均值是 2.149 ± 0.241 ; Simpson 指数(D)变化范围是 0.729~0.906, 平均值是 0.843 ± 0.054 ; Margalef 指数(d)变化范围是 1.719~3.147, 平均值是 2.331 ± 0.374 ; Pielou 指数(J)变化范围是 0.647~0.867, 平均值是 0.761 ± 0.070 (图 5)。分析多样性指数年际变化发现, 4 个指数呈现不同程度的波动。在蓄水之前, d 值呈波动变化, 其他 3 个指数则呈现出上升趋势; 在蓄水之后, H 值与 D 值均表现出先下降后逐渐趋于平稳的变化

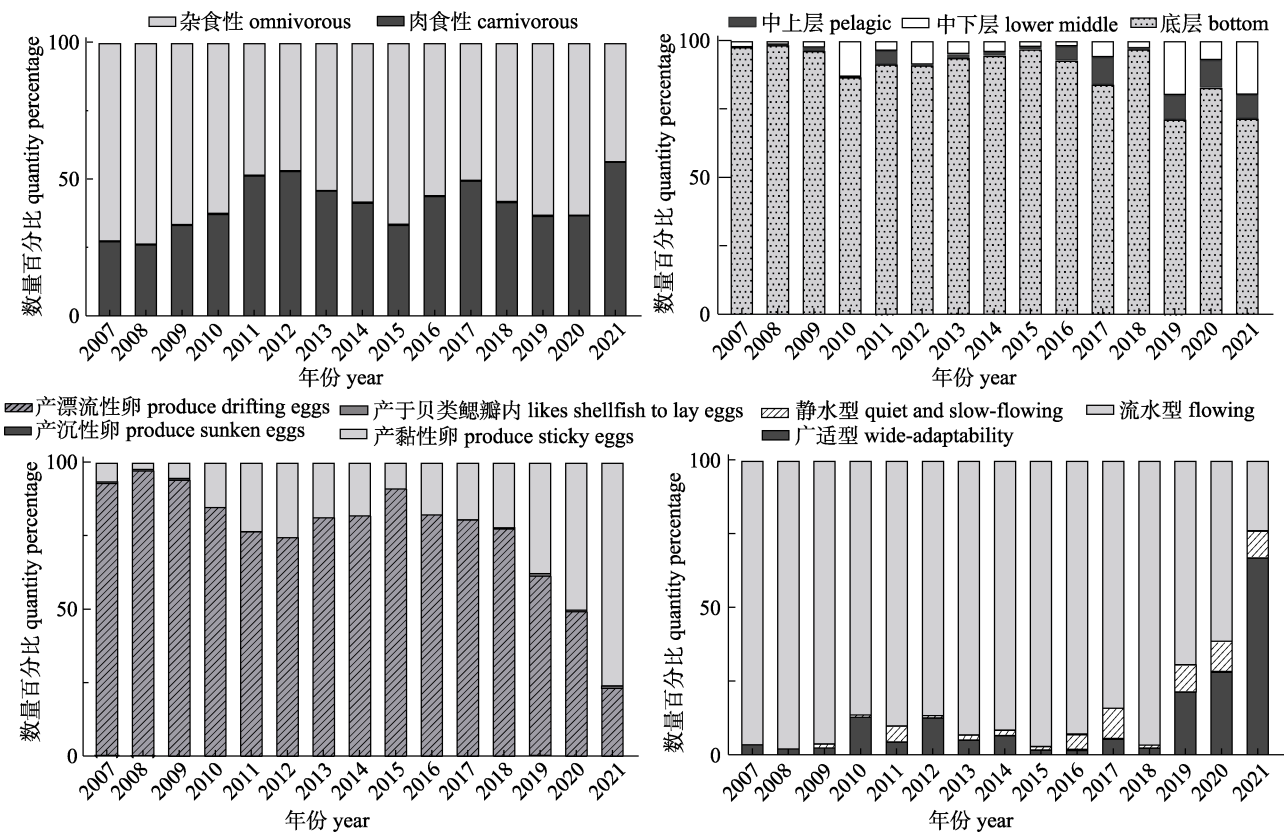


图 3 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类生态类型

Fig. 3 Ecological types of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

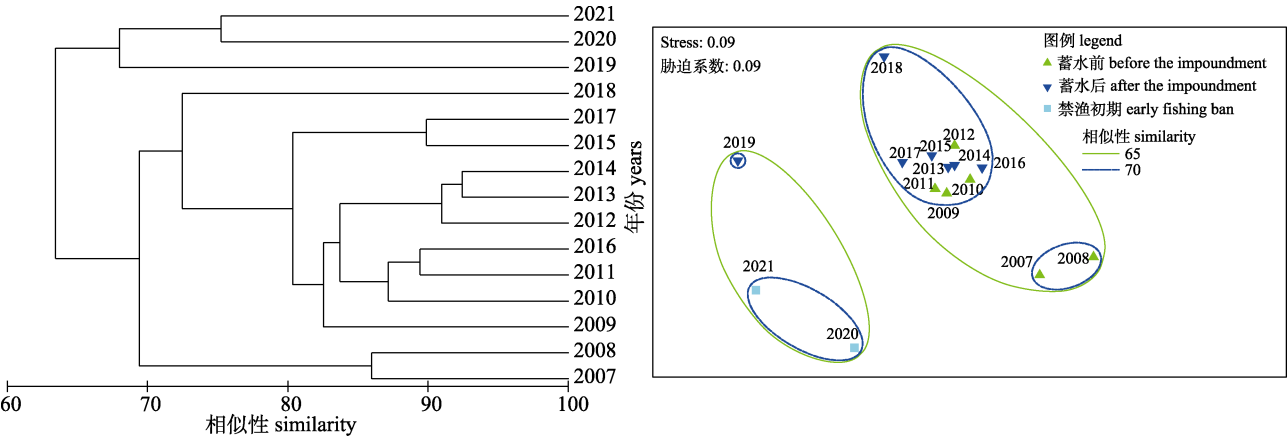


图 4 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼群落 Cluster 聚类和 NMDS 排序图

Fig. 4 Cluster and NMDS ordination map of rare and endemic fish communities in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

趋势, d 值呈现波动性下降后再上升的趋势, 而 J 值则呈现波动性变化; 在禁渔初期 4 个指数均是下降趋势。

2.3 分类多样性

通过长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类名录计算出平均分类差异指数(Δ^+)和分类差异变

异指数(Λ^+), 结果显示二者变化范围分别为 68.68~73.90 和 282.5~438.4(图 6)。随机检验(randomization test)结果发现(图 6), Δ^+ 和 Λ^+ 均位于 95%置信区间内, 且大部分都超过了期望值, 表明整体上调查江段珍稀特有鱼类群落物种间的分类距离较远, 但分类地位关系的均匀程度较低。通过比较不同

表 2 不同时期长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落结构差异及贡献率
Tab. 2 Difference in the community structure and corresponding contribution rate of rare and endemic fishes between different periods in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

时期 period	平均差异 average difference	<i>P</i>	主要贡献物种 major contributing species	贡献率/% contribution rate	累积贡献率/% cumulative contribution rate
蓄水前 vs 蓄水后 before the impoundment vs after the impoundment	25.13	0.126	黑尾近红鲃 <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	6.09	6.09
			张氏鲮 <i>Hemiculter tchangi</i>	5.67	11.75
			厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>	4.90	16.65
			中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	4.77	21.42
			拟缘鲂 <i>Liobagrus marginatoides</i>	4.76	26.18
			长江鲴 <i>Acipenser dabryanus</i>	4.74	30.92
			裸腹片唇鲂 <i>Platysmacheilus nudiventris</i>	4.69	35.61
			红唇薄鲂 <i>Leptobotia rubrilabris</i>	4.63	40.24
			胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	4.56	44.80
			小眼薄鲂 <i>Leptobotia microphthalma</i>	4.41	49.21
			其他 others	—	50.79
蓄水前 vs 禁渔初期 before the impoundment vs the initial stage of fishing closed	36.94	0.036	红唇薄鲂 <i>Leptobotia rubrilabris</i>	11.47	11.47
			长薄鲂 <i>Leptobotia elongata</i>	9.18	20.65
			长江鲴 <i>Acipenser dabryanus</i>	9.16	29.81
			黑尾近红鲃 <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	7.62	37.43
			长鳍吻鲈 <i>Rhinogobio ventralis</i>	6.22	43.65
			厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>	5.75	49.40
			张氏鲮 <i>Hemiculter tchangi</i>	5.72	55.11
			异鳔鲂 <i>Xenophysogobio boulengeri</i>	4.44	59.55
			裸体异鳔鲂 <i>Xenophysogobio nudicorpa</i>	4.28	63.83
			圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	3.97	67.80
			其他 others	—	32.20
蓄水后 vs 禁渔初期 after the impoundment vs the initial stage of fishing closed	36.09	0.028	长江鲴 <i>Acipenser dabryanus</i>	11.31	11.31
			长薄鲂 <i>Leptobotia elongata</i>	9.09	20.40
			红唇薄鲂 <i>Leptobotia rubrilabris</i>	8.41	28.81
			厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>	5.68	34.49
			异鳔鲂 <i>Xenophysogobio boulengeri</i>	5.53	40.02
			张氏鲮 <i>Hemiculter tchangi</i>	4.66	44.69
			裸体异鳔鲂 <i>Xenophysogobio nudicorpa</i>	4.65	49.34
			小眼薄鲂 <i>Leptobotia microphthalma</i>	4.1	53.43
			黑尾近红鲃 <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	4.07	57.51
			长鳍吻鲈 <i>Rhinogobio ventralis</i>	4.00	61.51
			其他 others	—	38.49

时期的分类多样性指数发现(图 7), 蓄水前、蓄水后和禁渔初期的 Δ^+ 均值分别为 72.49±1.54、70.67±2.13 和 72.73±0.49, 呈现出先下降后上升的趋势, 表明蓄水之后群落中不同物种之间的平均分类距离缩短, 分类阶元的数量减少。 Δ^+ 均值分别为 392.10±20.92、362.18±59.61 和 410.50±26.16, 同样呈现出先下降后上升的趋势, 说明同蓄水后

比较, 蓄水前和禁渔初期群落中种间分类地位关系的均匀程度都相对较低。

2.4 功能多样性

2.4.1 运动功能多样性 2007—2021 年长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落运动功能丰富度(FR_{ic}-L)的变化范围是 5.059~20.671; 运动功能均匀度(FE_{ve}-L)的范围是 0.292~0.591; 运动功

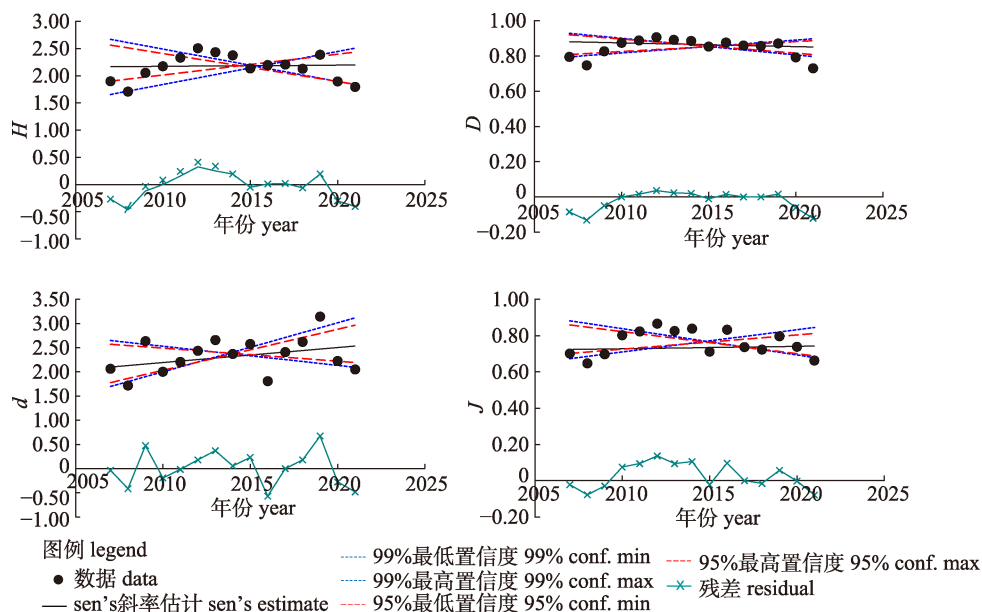


图 5 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼群落物种多样性年际变化

Fig. 5 Inter-annual changes in the species diversity indices of rare and endemic fish communities in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

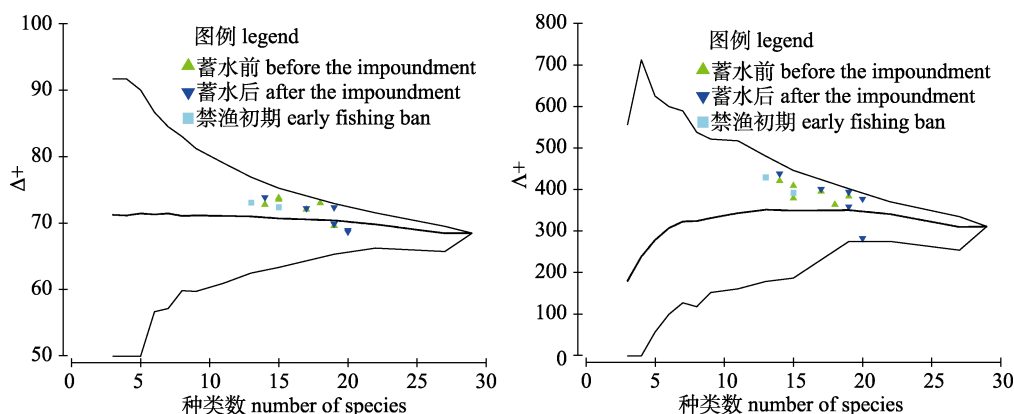


图 6 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落分类多样指数 95%置信漏斗图

Fig. 6 95% confidence funnel diagram of the two taxonomic diversity indices for rare and endemic fish community in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

能离散度(FD_{iv} -L)的变化范围是 0.564~0.884 (图 8)。分析运动功能多样性指数年际变化趋势发现 (图 8), FR_{ic} -L 在蓄水前呈现先上升后下降趋势, 在蓄水后呈现出多年持续下降趋势, 在禁捕初期有所上升; FE_{ve} -L 在蓄水前呈现波动变化, 蓄水后呈现先下降后上升的趋势至禁渔初期趋于平稳; 而 FD_{iv} -L 在蓄水前的变化趋势较为平稳, 在蓄水后呈现波动变化。对比不同时期的功能多样性指数发现, 蓄水后该江段珍稀特有鱼类 FR_{ic} -L 值最低, 而蓄水前和禁渔初期相近; FE_{ve} -L 和 FD_{iv} -L 在禁渔初期均显著高于其他两个时期($P<0.05$)。

2.4.2 摄食功能多样性 2007—2021 年长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类摄食功能丰富度(FR_{ic} -F)、均匀度(FE_{ve} -F)和离散度(FD_{iv} -F)的变化范围分别是 2.407~8.127、0.147~0.509、0.626~0.851 (图 9)。分析 3 个指数年际变化趋势发现, FR_{ic} -F 和 FE_{ve} -F 在蓄水之前呈现波动变化的趋势, 蓄水后呈现出先下降后上升的趋势; FD_{iv} -F 变化趋势较为平缓。对比不同时期摄食功能多样性指数发现, 蓄水后的 FR_{ic} -F 最高, 其次是蓄水前; 而 FE_{ve} -F 在蓄水后最低; FD_{iv} -F 在禁渔初期均显著高于其他两个时期($P<0.05$)。

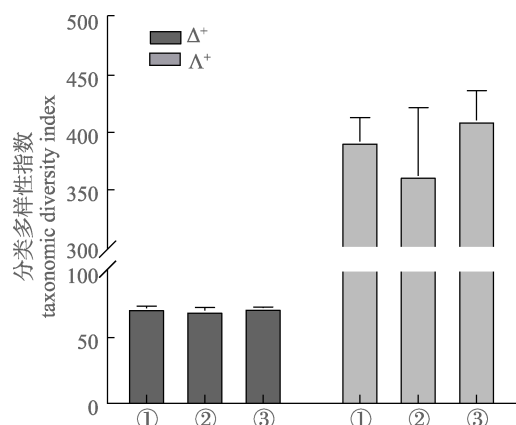


图 7 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落不同时期的分类多样性指数

①蓄水前; ②蓄水后; ③禁渔初期.

Fig. 7 Taxonomic diversity index of rare and endemic fish communities in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

① Before the impoundment; ② After the impoundment; ③ Initial stage of fishing closed.

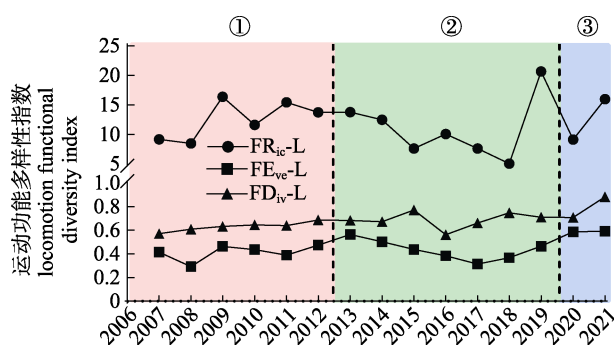


图 8 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落运动功能多样性指数年际变化

①蓄水前; ②蓄水后; ③禁渔初期.

Fig. 8 Inter-annual variation of diversity index of locomotion function of rare and endemic fish community in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

① Before the impoundment; ② After the impoundment; ③ Initial stage of fishing closed.

2.4.3 繁殖功能多样性 2007—2021 年长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类繁殖功能丰富度(FR_{ic-R})、均匀度(FE_{ve-R})和离散度(FD_{iv-R})的变化范围分别是 3.853~10.543、0.203~0.522、0.616~0.910。其年际变化结果显示(图 10), 该江段珍稀特有鱼类群落的 FR_{ic-R} 在蓄水前呈现下降的变化趋势, 蓄水后呈现出先下降后上升的趋势; FE_{ve-R} 和 FD_{iv-R} 呈现不同程度的波动变化。同蓄水之前相比, FR_{ic-R} 、 FE_{ve-R} 和 FD_{iv-R} 在蓄水后均下降,

并低于禁渔初期。

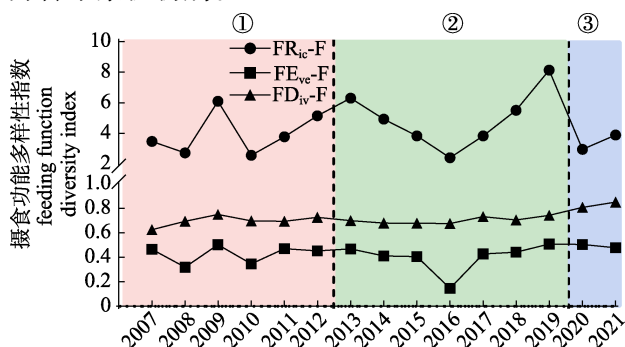


图 9 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落摄食功能多样性指数年际变化

①蓄水前; ②蓄水后; ③禁渔初期.

Fig. 9 Inter-annual variation in the diversity indices of feeding function for rare and endemic fish communities in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

① Before the impoundment; ② After the impoundment; ③ Initial stage of fishing closed.

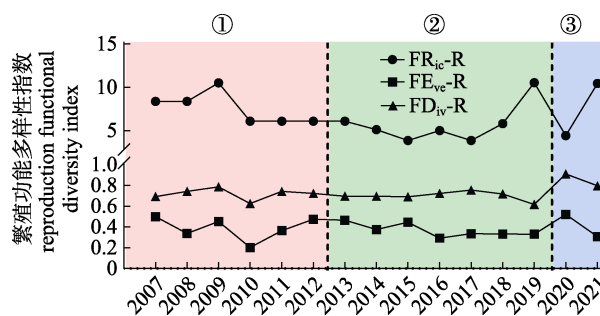


图 10 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落繁殖功能多样性指数年际变化

①蓄水前; ②蓄水后; ③禁渔初期.

Fig. 10 Inter-annual variation in the diversity index of reproductive function for rare and endemic fish community in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

① Before the impoundment; ② After the impoundment; ③ Initial stage of fishing closed.

2.5 多样性指数的相关性分析

对长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类不同年份的多样性指数进行 Spearman 相关性分析(图 11), 结果显示, 多样性指数两两之间相关系数数值差异较大, 显著程度也不同。其中 Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 指数(D)和 Pielou 指数(J)三者之间均存在显著正相关($r > 0.80$, $P < 0.05$); 而 Margalef 指数(d)与平均分类差异指数(Δ^+)、分类差异变异指数(Λ^+)之间存在显著负相关($r < -0.60$,

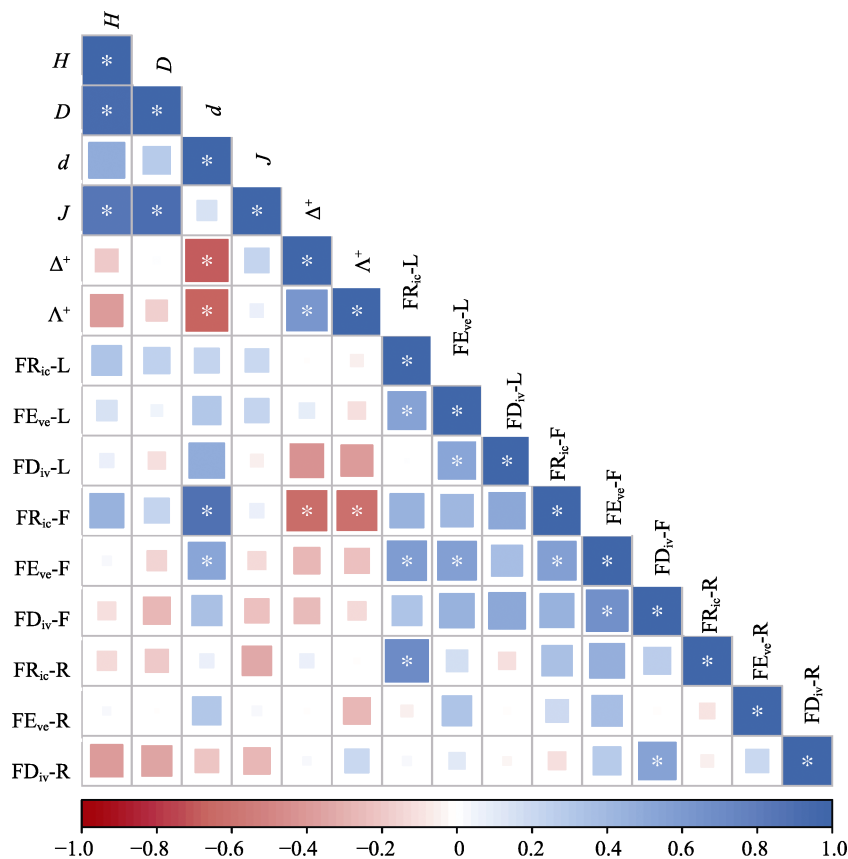


图 11 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类多样性指数的 Spearman 相关性分析
*表示显著相关($P<0.05$).

Fig. 11 Spearman correlation analysis of diversity index of rare and endemic fish communities in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin
*indicates significant correlation ($P<0.05$).

$P<0.05$), 与摄食功能丰富度($FR_{ic}-F$)呈显著正相关($r=0.89$, $P<0.05$), 与摄食功能均匀度($FE_{ve}-F$)存在中等程度的相关性($r=0.52$, $P<0.05$); $FR_{ic}-F$ 与 Δ^+ 、 Λ^+ 之间存在显著负相关($r<-0.60$, $P<0.05$); Δ^+ 与 Λ^+ 存在显著正相关关系($r=0.64$, $P<0.05$); 不同维度的功能多样性指数之间的相关关系大多不显著, 少数呈现中等程度的正相关。

3 讨论

3.1 珍稀特有鱼类群落结构变化

2007—2021 年长江上游宜宾至江津江段共记录珍稀特有鱼类 29 种, 其中国家一级保护鱼类 1 种, 国家二级保护鱼类 7 种。据周湖海等^[5]报道, 长江上游珍稀特有鱼类共有 127 种, 其中包括白鲟(*Psephurus gladius*)、中华鲟(*Acipenser sinensis*)、云南鲃(*Xenocypris yunnanensis*)等在内的 98 种珍稀特有鱼类在本次调查中未出现。自葛洲坝运行

以来, 白鲟于 2022 年 7 月 21 日被国际自然保护联盟(IUCN)将濒危等级由极危提级至灭绝, 中华鲟也被阻隔在葛洲坝下并建立了新的产卵场, 坝上江段多年未见其踪迹^[49]。另外, 西昌白鱼(*Anabarilius liui liui*)、云南鲃等特有鱼类仅分布于金沙江等流水系; 而四川爬岩鳅(*Beaufortia szechuanensis*)、黄石爬鮡(*Euchiloglanis kishinouyei*)等特有鱼类在三峡大坝建坝以后则是以支流栖息为主, 在干流有所分布但少有调查到^[5,31]。三峡大坝、向家坝、溪洛渡等大型水利工程的建设, 已经显著改变了长江上游干流的生态环境, 导致生境出现了破碎化现象^[22], 这使得珍稀特有鱼类栖息、摄食和繁殖的场所大范围萎缩, 资源量大幅度下降, 甚至有些物种因此面临灭绝的危机^[50]。

从生态类型上看, 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类以栖息于底层、产漂流性卵、偏好流水生境的杂食性或肉食性鱼类为主。在密集的

水电开发之下,研究江段仍然保持着相对完整的流水生境,河流底质以泥沙和沙砾为主,拥有丰富的饵料资源,为偏好流水生境的底栖鱼类提供了优良的栖息生境^[4]。研究表明杂食性鱼类多见于生产力水平较低或受干扰程度较高的环境中,其数量增加会减弱营养级联强度^[51]。禁渔初期,长江宜宾至江津江段杂食性鱼类数量百分比下降,表明其河流环境与鱼类群落的健康状况可能有所改善。在蓄水之后,珍稀特有鱼类中产漂流性卵的鱼类数量百分比逐年下降,这可能与金沙江一期工程蓄水运行有关。随着向家坝和溪洛渡水电站相继运行,金沙江下游被分隔为多个不连续的环境单元,严重阻隔了产卵场仅分布于金沙江中下游或其他支流的鱼类的生殖洄游(如圆口铜鱼等),这使得坝下群体难以获得补充^[2,52];另外,坝下江段的水文形势也发生了巨大改变,难以满足长薄鳅、长鳍吻鮡等产漂流性卵的鱼类产卵所需的流量、流速等水文条件,使原有产卵场的功能退化甚至消失^[53],最终导致鱼类群落结构的改变。

同金沙江一期工程蓄水前、蓄水后两个时期相比,长江上游宜宾至江津江段的珍稀特有鱼类在禁渔初期的群落结构发生了改变,主要贡献物种有长江鲟、长薄鳅、红唇薄鳅等鱼类。其原因可能是:近年来相关科研和政府单位大力开展增殖放流活动,长江鲟等重点放流物种的放流规模逐渐增大^[54],导致其相对丰度大幅上升;另外,不同时期的调查方式也有差异,禁渔初期是通过聘请渔民主动捕捞进行调查,主要捕捞网具为定置刺网和地笼,这类网具通常放置于静水或缓流的环境下,对喜流水性鱼类的捕捞效果相对较差,这可能导致长薄鳅等鱼类在群落中的相对丰度下降。

3.2 不同维度多样性指数的变化趋势及关系

在当前众多的生物多样性测度方法中,物种多样性的使用最为广泛,能够最直观地表现出群落中物种数量和均匀度的变化规律^[55-56]。本研究发现在金沙江一期工程蓄水运行之前该江段珍稀特有鱼类的物种多样性呈现上升趋势,这可能与三峡库区蓄水后湖相段部分鱼类向河相段聚集,

导致河相段鱼类种类增加有关^[13,57]。蓄水后表现出先下降后逐渐趋于平稳的特征。蓄水初期河流原有的生态环境、水文情势等特征都发生改变,这会直接或间接地导致不适应的物种消失,从而降低鱼类群落的物种丰富度^[58];但是随着时间推移,鱼类群落也会逐渐趋于稳定。在禁渔初期物种多样性呈现下降趋势,但众多研究表明实施禁渔政策能有效减少对鱼类资源的过度捕捞,使鱼类群落结构有所改善,多样性逐步回升^[6,59-61]。例如,王银平等^[62]研究发现禁渔初期长江下游鱼类资源量呈现恢复态势,禁渔的效果初步显现;贾春艳等^[63]研究禁渔初期东洞庭湖鱼类资源密度分布情况时发现,该地区禁渔之后的鱼类平均密度显著上升,禁渔效果显著;另外,研究人员还在长江中下游的多个水域监测到了多年未曾出现的鳊^[64]。因此推测禁渔初期物种多样性下降的原因一方面可能是捕捞网具单一导致鱼类种类数下降,另一方面可能是由于部分鱼类的大规模增殖放流导致了群落中鱼类数量组成分布不均匀。

20 世纪 90 年代,Warwick 等^[41]和 Clarke 等^[42]基于群落中物种之间的亲缘关系,提出了平均分类差异指数(Δ^+)和分类差异变异指数(Λ^+)。其中 Δ^+ 反映了群落中种间亲缘关系的远近, Λ^+ 则表示群落中物种间分类地位关系的均匀程度^[65]。相较于物种多样性,二者不受采样规模和范围的影响,并且对环境的扰动更加敏感,因此被广泛应用于不同时期或地域的生物多样性比较^[55,65-68]。本研究利用 Δ^+ 和 Λ^+ 分析了不同时期珍稀特有鱼类群落的分类多样性,发现在金沙江一期工程蓄水之后,研究区域的 Δ^+ 和 Λ^+ 均低于蓄水前和禁渔初期,表明蓄水后群落种间分类差异减小,分类地位的均匀程度上升,亲缘关系近的种类在分类地位上占据优势,群落内部的竞争加剧,群落结构越不稳定。相较于蓄水之后,蓄水前长江上游宜宾至江津江段受水电开发的影响较小,生态环境更稳定,使更多具有分类差异的鱼类可以共存;而禁渔初期大幅度缩减了该江段鱼类的捕捞压力,使鱼类能够更好地生存和繁衍。

相较于蓄水后和禁渔初期,蓄水前宜宾至江津江段珍稀特有鱼类在运动、摄食和繁殖 3 个维

度均具有较高的功能丰富度,表明珍稀特有鱼类在蓄水前能够占据更多的生态位,这可能和蓄水前该江段相对完整且复杂的栖息生境有关^[45,57]。蓄水之后,运动、摄食和繁殖功能丰富度在一定的时期内均有下降的趋势,多年后才有所回升,表明大坝截流可能会使鱼类群落发生变化,导致功能多样性降低,这与 Oliveira 等^[69]以及 Zhang 等^[70]的研究结果基本一致。另外,该江段处于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区内,鱼类群落受到其他的人为干扰相对较小,随着保护区功能的发挥和生态系统的自我调节,鱼类群落可能会逐步适应现有的生态环境,从而使功能多样性得到一定的恢复。同时,本研究发现该江段珍稀特有鱼类在不同时期的功能均匀度相差不大,表明各时期珍稀特有鱼类群落功能分布均匀,对有效资源的利用效率基本一致^[65]。功能离散度反映群落中功能性状在性状空间中分布的最大离散程度,当优势物种远离重心时,功能离散度上升^[71]。本研究中蓄水前和蓄水后的功能离散度相近,均低于禁渔初期,这可能与长江鲟在禁渔初期大量出现有关。

对多样性指数进行相关性分析发现,单一维度的多样性指数间具有不同程度的相关性。其中物种多样性和分类多样性两个维度内的指数具有很强的相关性,而功能多样性指数间的相关性不显著。研究指出,物种的丰度与其功能性状的特征值共同决定了群落的功能多样性^[57,72]。本研究选择运动、摄食和繁殖 3 个不同层面的功能性状特征分别对群落功能多样性进行分析,可能是导致功能多样性指数间没有稳定相关关系的主要原因。不同维度多样性指数之间大多都不具有显著相关关系,这可能与各自关注的侧重点不同有关^[45,59]。另外, Cadotte 等^[73]和 Heino 等^[74]的研究还发现,生物多样性指数之间的关系还受环境因素的影响。由此可见,不同维度生物多样性指数之间的相关关系可能表现出高度的变异性。

3.3 珍稀特有鱼类资源保护

长江上游宜宾至江津江段是长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区不可或缺的一部分,在维护长江流域水生生物多样性方面扮演着举足轻

重的角色。该江段是长江上游珍稀特有鱼类的繁衍与生存的重要栖息地,对于维护生态系统的平衡与稳定具有深远的意义。本研究结果显示,在调查的不同时期,江段内珍稀特有鱼类的群落结构及其生态类型组成发生了明显变化。同时观察到,这些珍稀特有鱼类的物种多样性、分类多样性以及功能多样性均在金沙江一期工程蓄水之后呈现出不同程度的下降的趋势。因此,有必要积极推进该江段的生态修复工作,以确保珍稀特有鱼类能够实现健康繁衍,并维系生态系统的长期稳定。基于以上问题,提出以下 3 点建议:

(1) 积极开展梯级水库联合生态调度试验,持续优化并完善调度效果的评价体系。优化调节涨水率、涨水过程的持续时间、洪峰流量以及水温等水文节律指标,为圆口铜鱼、长鳍吻鲈等产漂流性卵鱼类的繁殖寻求最适生态调度,同时科学评估各种调度方案对河流生态系统与珍稀特有鱼类的具体影响,确保水利工程既增效益又护生态,实现双赢发展。

(2) 加强栖息地修复及保护,同时开展替代生境研究。全面调查该江段内珍稀鱼类的重要栖息地和产卵场的分布情况,并评估其退化程度。针对功能退化或丧失的栖息生境,要制定并实施科学的修复计划,例如建设人工鱼巢、生态护坡等生态修复工程。同时,对于长薄鳅、圆口铜鱼等主要在金沙江干支流产卵的珍稀特有鱼类,应在原栖息地保护的基础上,深入研究其在各支流的栖息特性,并探讨在长江上游干流段重建其产卵场的可能性,为迁地保护提供重要的技术和理论基础。

(3) 加强部分特有鱼类的人工繁育技术研究,并积极实施增殖放流活动。目前,长江鲟、岩原鲤、胭脂鱼等珍稀鱼类已经成功实现了规模化人工繁育,并且近年来也频繁进行野外增殖放流,使其野外种群规模初步形成。然而,对于短身金沙鳅(*Jinshaia abbreviata*)、高体近红鲌等部分珍稀特有鱼类,其人工繁殖技术仍有待突破,且在近年来的调查中很少发现它们的踪迹。因此,有必要增加对这些鱼类基础研究的投入,支持科研机构进行相关人工繁育技术的研发。尽快突破这些鱼

类的人工繁育技术瓶颈,以便能够开展增殖放流活动,以促进这些珍稀特有鱼类的种群恢复。

参考文献:

- [1] Cao W X. Water ecological restoration in the cascade development of hydropower in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, 3(2): 5-10. [曹文宣. 长江上游水电梯级开发的水域生态修复问题[J]. *长江技术经济*, 2019, 3(2): 5-10.]
- [2] Yang Z. Effects of cascade hydropower development in the main stream of the upper reaches of the yangtze river on fish communities[D]. Hubei: Huazhong Agricultural University, 2023. [杨志. 长江上游干流梯级水电开发对鱼类群落的影响研究[D]. 湖北: 华中农业大学, 2023.]
- [3] Pu Y, Yang H, Tian H W, et al. Spatial distribution characteristics and identification of key environmental factors for juvenile silver carp in upper reaches of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(6): 1220-1228. [蒲艳, 杨浩, 田辉伍, 等. 长江上游鲢幼鱼空间分布特征及其关键环境因子判别[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(6): 1220-1228.]
- [4] Wei Q W. Scientific Investigation Report on National Nature Reserve for the Rare and Endemic Fishes in the Upper Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2012. [危起伟. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区科学考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [5] Zhou H H, Li C, Deng H T, et al. Research on status and dynamic varietal trends of rare and unique fish stocks in the upper reaches of Yangtze River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2020, 50(6): 3-14. [周湖海, 李翀, 邓华堂, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类种群动态现状及变化趋势分析[J]. *淡水渔业*, 2020, 50(6): 3-14.]
- [6] Liu F, Lin P C, Li M Z, et al. Situations and conservation strategies of fish resources in the yangtze river basin[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(S1): 144-156. [刘飞, 林鹏程, 黎明政, 等. 长江流域鱼类资源现状与保护对策[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(S1): 144-156.]
- [7] Duan X B, Liu S P, Xiong F, et al. Analysis of fishing structure and biodiversity in the upper mainstream of the Yangtze River before and after three years' spring fishing off[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(6): 878-885. [段辛斌, 刘绍平, 熊飞, 等. 长江上游干流春季禁渔前后三年渔获物结构和生物多样性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(6): 878-885.]
- [8] Xu W, Qiao Y, Gong Y T. Changes of fish resources in Upper Yangtze River and its protection[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(1): 67-71. [徐薇, 乔晔, 龚昱田. 长江上游鱼类资源变迁及其保护评析[J]. *人民长江*, 2012, 43(1): 67-71.]
- [9] Zhou Q B, Cheng F, Wang Z, et al. Study on fish resources of the early life history stages and the effects of ecological regulation of the xiangjiaba reservoir at the Hejiang section in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(1): 95-103. [周岐兵, 程飞, 王震, 等. 长江上游合江江段鱼类早期资源与向家坝水库生态调度效果初步研究[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(1): 95-103.]
- [10] Liu J K, Cao W X. Fish resources of the Yangtze River basin and the tactics for their conservation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1992, 1(1): 17-23. [刘建康, 曹文宣. 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*, 1992, 1(1): 17-23.]
- [11] Li C. A preliminary analysis of the impacts of the cascade hydropower development on the fish biodiversity in the upper reach of the Yangtze River[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. [李陈. 长江上游梯级水电开发对鱼类生物多样性影响的初探[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.]
- [12] Cheng F, Li W, Castello L, et al. Potential effects of dam cascade on fish: Lessons from the Yangtze River[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2015, 25(3): 569-585.
- [13] Li T, Tang L, Wang L, et al. Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1473-1485. [李婷, 唐磊, 王丽, 等. 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*, 2020, 40(4): 1473-1485.]
- [14] Zhang X B, Yang S F, Yang W, et al. The distribution of the early-stage fish resources between Yibin-Jiangjin and Fuling-Fengdu in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2021, 51(5): 51-59. [张先炳, 杨胜发, 杨威, 等. 长江上游宜宾—江津与涪陵—丰都江段鱼类早期资源分布研究[J]. *淡水渔业*, 2021, 51(5): 51-59.]
- [15] 蒲艳, 邓华堂, 田辉伍, 等. 梯级水电站运行条件下长江上游鲢早期资源时空分布格局[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(8): 1015-1030. [Pu Y, Deng H T, Tian Huiwu, et al. Spatial and temporal distribution of *Hypophthalmichthys molitrix* early-stage resources in the upper reaches of the Yangtze River under the operation condition of cascade hydropower station[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(8): 1015-1030.]
- [16] Wang L F, Tian H W, Yan Z L, et al. Status of early-stage fish resources and hydrological condition response relationship in Luzhou section of Upper Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(4): 814-822. [王龙飞, 田辉伍, 严忠鑫, 等. 长江上游泸州江段鱼类早期资源现状及其与水文条件响应关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4): 814-822.]
- [17] Tang X L, Chen D Q, Wang K, et al. Spatial and temporal distribution of larval resources of fishes in the upper reaches of Yangtze River[J]. *Freshwater Fisheries*, 2010, 40(5): 27-31. [唐锡良, 陈大庆, 王珂, 等. 长江上游江津江段鱼类早期资源时空分布特征研究[J]. *淡水渔业*, 2010, 40(5): 27-31.]

- [18] Xiong F, Liu H Y, Duan X B, et al. Estimating population abundance and utilization of *Rhinogobio ventralis*, an endemic fish species in the Upper Yangtze River[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(3): 304-312. [熊飞, 刘红艳, 段辛斌, 等. 长江上游特有种长鳍吻鲃种群数量和资源利用评估[J]. 生物多样性, 2016, 24(3): 304-312.]
- [19] Xiong F, Liu H Y, Duan X B, et al. Population parameters of *Rhinogobio typus* in the Jiangjin section of the Upper Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2018, 48(6): 27-32. [熊飞, 刘红艳, 段辛斌, 等. 长江上游江津江段吻鲃的种群参数[J]. 淡水渔业, 2018, 48(6): 27-32.]
- [20] Li L, Wei Q W, Wu J M, et al. Current status of fish assemblages in Yibin reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11): 1449-1457. [李雷, 危起伟, 吴金明, 等. 长江宜宾江段渔业资源现状调查[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1449-1457.]
- [21] Gao T H, Tian H W, Ye C, et al. Diversity and composition of fish in the mainstream of national nature reserve of rare and endemic fish in the Upper Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(2): 36-42. [高天珩, 田辉伍, 叶超, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流段鱼类组成及其多样性[J]. 淡水渔业, 2013, 43(2): 36-42.]
- [22] Xiong F, Liu H Y, Duan X B, et al. Community structure of fish and resources utilization in Jiangjin section of the Upper Yangtze River[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2014, 38(3): 94-102. [熊飞, 刘红艳, 段辛斌, 等. 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), 2014, 38(3): 94-102.]
- [23] Tian H W, He C, Liu M D, et al. Study on structure of gillnet catches in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2016, 46(5): 37-42. [田辉伍, 何春, 刘明典, 等. 长江上游干流三层流刺网渔获物结构研究[J]. 淡水渔业, 2016, 46(5): 37-42.]
- [24] Magurran A E. Measuring biological diversity[J]. Current Biology, 2021, 31(19): R1174-R1177.
- [25] Qiao J L, Liu Y, Fu H X, et al. Urbanization affects the taxonomic and functional alpha and beta diversity of fish assemblages in streams of subtropical China[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109441.
- [26] Wang J, Chen L, Tang W J, et al. Effects of dam construction and fish invasion on the species, functional and phylogenetic diversity of fish assemblages in the Yellow River Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 293: 112863.
- [27] Gallardo B, Gascón S, Quintana X, et al. How to choose a biodiversity indicator—Redundancy and complementarity of biodiversity metrics in a freshwater ecosystem[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1177-1184.
- [28] Song W Y, Li X Y, Wang H J, et al. Multi-dimensional evaluation of small mammal diversity in tree line habitats across the three parallel rivers of Yunnan protected areas: Implications for conservation[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(9): 1215-1228. [宋文宇, 李学友, 王洪娇, 等. 三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示[J]. 生物多样性, 2021, 29(9): 1215-1228.]
- [29] Chen Y Y. Zoology of China, Osteichthyes, Cypriniformes (Middle)[M]. Beijing: Science Press, 1998. [陈宜瑜. 中国动物志, 硬骨鱼纲, 鲤形目(中)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [30] Le P Q. Zoology of China, Osteichthyes, Cypriniformes, Volume II[M]. Beijing: Science Press, 2000. [乐佩琦. 中国动物志, 硬骨鱼纲, 鲤形目, 下卷[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [31] Ding R H. The Fishes of Sichuan, China[M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1994. [丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [32] Wei N, Zhang Y, Wu F, et al. Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1858-1869. [魏念, 张燕, 吴凡, 等. 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, 2021, 30(8): 1858-1869.]
- [33] Tang C, Deng H T, Tian H W, et al. Analysis on the characteristics of fish community structure in the main stream section of the National Nature Reserve for Rare and Endemic Fish in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(2): 81-100. [唐成, 邓华堂, 田辉伍, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流段鱼类群落结构特征分析[J]. 水产学报, 2023, 47(2): 81-100.]
- [34] Lozupone C, Knight R. UniFrac: A new phylogenetic method for comparing microbial communities[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(12): 8228-8235.
- [35] Liu M, Zhang Y X, Liu Y, et al. Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River[J]. Freshwater Fisheries, 2022, 52(2): 22-33. [刘猛, 张逸譔, 刘园, 等. 雅砻江锦屏大河湾鱼类多样性及群落结构的年际变化[J]. 淡水渔业, 2022, 52(2): 22-33.]
- [36] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963
- [37] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, 163(4148): 688.
- [38] Margalef R. Information theory in ecology[J]. International Journal of General Systems, 1958, 3(1): 36-71.
- [39] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10(2): 370-383.
- [40] Nelson J S, Grande T C, Wilson M V H. Fishes of the World[M]. New York: Wiley, 2016.
- [41] Warwick R M, Clarke K R. New 'biodiversity' measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress[J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 129: 301-

- 305.
- [42] Clarke K R, Warwick R M. A taxonomic distinctness index and its statistical properties[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35(4): 523-531.
- [43] Clarke K R, Warwick R M. The taxonomic distinctness measure of biodiversity: Weighting of step lengths between hierarchical levels[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 184: 21-29.
- [44] Shang K Y, Jiang M, Lin P C, et al. River-lake disconnection on fish taxonomic distinctness in lakes from middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(1): 133-150. [尚坤钰, 姜明, 林鹏程, 等. 江湖阻隔对长江中下游湖泊鱼类群落分类多样性的影响[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(1): 133-150.]
- [45] Xiong F, Zhang W, Zhai D D, et al. Changes of species, taxonomic and functional diversity of fish assemblages in the Xiangjiaba Reservoir of the lower Jinsha River after impoundment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(1): 200-212. [熊飞, 张伟, 翟东东, 等. 蓄水后向家坝库区鱼类物种、分类和功能多样性变化[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(1): 200-212.]
- [46] Xia Z J, Liu F, Yu F D, et al. Species, functional and taxonomic diversity of fish in the Chishui River Basin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(5): 89-98. [夏治俊, 刘飞, 余梵冬, 等. 赤水河流域鱼类物种、功能和分类多样性研究[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(5): 89-98.]
- [47] Villéger S, Brosse S, Mouchet M, et al. Functional ecology of fish: Current approaches and future challenges[J]. *Aquatic Sciences*, 2017, 79(4): 783-801.
- [48] Shuai F M, Li X H, Chen F C, et al. Functional diversity of freshwater fishes and methods of measurement[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5228-5237. [帅方敏, 李新辉, 陈方灿, 等. 淡水鱼类功能多样性及其研究方法[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5228-5237.]
- [49] Xu L X, Zhou L, Wei Q W. Stock status and conservation dilemma of species of Acipenseriformes in the Yangtze River and relevant suggestions[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(2): 62-72. [许兰馨, 周亮, 危起伟. 长江鲟类资源现状及保护[J]. *水产学报*, 2023, 47(2): 62-72.]
- [50] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124: 115-125.
- [51] Wootton K L. Omnivory and stability in freshwater habitats: Does theory match reality?[J]. *Freshwater Biology*, 2017, 62(5): 821-832.
- [52] Gao S B, Tang H Y, Chen S, et al. Effects of the first phase of Jinsha River hydropower project on fish recruitment: Early life history stages of *Coreius guichenoti* in the Upper Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(2): 6-10. [高少波, 唐会元, 陈胜, 等. 金沙江一期工程对保护区圆口铜鱼早期资源补充的影响[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(2): 6-10.]
- [53] Hu X K, Shao K, Que Y F, et al. Dynamic changes of early stage fish resources with drifting eggs in Yibin section of the lower Jinsha River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(2): 73-80. [胡兴坤, 邵科, 阙延福, 等. 金沙江下游宜宾段产漂流性卵鱼类早期资源动态变化[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(2): 73-80.]
- [54] Yu X D, Liu L M, Luo G. Harmony between fish and water by ecological way—a summary of aquatic organisms' proliferation and release in China[J]. *China Fisheries*, 2022(3): 56-64. [余向东, 刘立明, 罗刚. 循生态之道 得鱼水和谐——我国开展水生生物增殖放流行动综述[J]. *中国水产*, 2022(3): 56-64.]
- [55] Jiang X L, Li M Z, Yang S R, et al. Temporal variation of fish biodiversity in Poyang lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(3): 376-388. [蒋祥龙, 黎明政, 杨少荣, 等. 鄱阳湖鱼类多样性的时空变化特征研究[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(3): 376-388.]
- [56] Zhuo Y, Li J L, Li Y Q, et al. Spatial distribution pattern of fish multifaceted biodiversity in the longyangxia reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(3): 504-512. [卓玉, 李钧乐, 李英钦, 等. 龙羊峡水库鱼类多维多样性空间分布格局[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(3): 504-512.]
- [57] Zhang W. Temporal and spatial changes of fish community structure and diversity in the Three Gorges Reservoir area [D]. Wuhan: Jiangnan University, 2023. [张伟. 三峡库区鱼类群落结构与多样性时空变化研究[D]. 武汉: 江汉大学, 2023.]
- [58] Li J Y. Studies on the characteristics of physical environment and fish spatiotemporal distribution in downstream reaches near to the Gezhouba Dam, Yangtze River [D]. Chongqing: Southwest University, 2017. [李君轶. 葛洲坝下近坝江段物理环境与鱼类时空分布特征的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.]
- [59] Shi X H. Temporal changes to fish community structure and diversity and environmental impact factors in Yichang reach, Yangtze River[D]. Hubei: Hubei University, 2023. [石小浩. 长江中游宜昌江段鱼类群落结构和多样性的时间变化及环境影响因素研究[D]. 湖北: 湖北大学, 2023.]
- [60] Yang H L, Shen L, He Y F, et al. Status of aquatic organisms resources and their environments in the Yangtze River system (2017—2021)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(2): 3-30. [杨海乐, 沈丽, 何勇凤, 等. 长江水生生物资源与环境本底状况调查(2017—2021)[J]. *水产学报*, 2023, 47(2): 3-30.]
- [61] Fang D D, Yang H L, Zhang H, et al. Interannual variation of fish community structure in Shishou section of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(11): 2338-2347. [方冬冬, 杨海乐, 张辉, 等. 长江石首江段鱼类群落结构年际变化及禁渔效果[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(11): 2338-2347.]
- [62] Wang Y P, Deng Y M, Liu S L, et al. Status analysis of fish community in the lower reaches of the Yangtze River at the

- beginning of 10-year fishing ban and assessment of fishing ban effect[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(2): 206-218. [王银平, 邓艳敏, 刘思磊, 等. 禁捕初期长江下游鱼类群落现状分析及禁渔效果初步评估[J]. *水产学报*, 2023, 47(2): 206-218.]
- [63] Jia C Y, Wang K, Li H F, et al. Spatial distribution and density changes of fish resources in East Dongting Lake during early fishing ban period[J]. *South China Fisheries Science*, 2022, 18(3): 48-56. [贾春艳, 王珂, 李慧峰, 等. 禁渔初期东洞庭湖鱼类资源的空间分布与密度变化[J]. *南方水产科学*, 2022, 18(3): 48-56.]
- [64] Zhao Y X, Zhang F, Zhou W Q, et al. The cogitation of cooperative protection between the 10-year fishing ban in the Yangtze River and water ecology[J]. *Environmental Ecology*, 2024, 6(4): 84-88. [赵宇轩, 张凤, 周文强, 等. 长江十年禁渔与水生态协同保护的思考[J]. *环境生态学*, 2024, 6(4): 84-88.]
- [65] Liu H. Taxonomic diversity and functional diversity of fishes in mangrove areas of Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021. [刘昊. 广西红树林区鱼类分类多样性及功能多样性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.]
- [66] Stojković Piperac M, Milošević D, Petrović A, et al. The best data design for applying the taxonomic distinctness index in lotic systems: A case study of the southern Morava River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 1281-1287.
- [67] Stamou G, Polyzou C, Karagianni A, et al. Taxonomic distinctness indices for discriminating patterns in freshwater rotifer assemblages[J]. *Hydrobiologia*, 2017, 796(1): 319-331.
- [68] Jiang X M, Ding C Z, Brosse S, et al. Local rise of phylogenetic diversity due to invasions and extirpations leads to a regional phylogenetic homogenization of fish fauna from Chinese isolated plateau lakes[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 388-398.
- [69] Oliveira A G, Baumgartner M T, Gomes L C, et al. Long-term effects of flow regulation by dams simplify fish functional diversity[J]. *Freshwater Biology*, 2018, 63(3): 293-305.
- [70] Zhang C, Fujiwara M, Pawluk M, et al. Changes in taxonomic and functional diversity of fish communities after catastrophic habitat alteration caused by construction of Three Gorges Dam[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(12): 5829-5839.
- [71] Jiang X L, Zhang W G. Functional diversity and its research method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2766-2773. [江小雷, 张卫国. 功能多样性及其研究方法[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2766-2773.]
- [72] He Q, Liu S D, Tang Y L, et al. Species and functional diversity of fish communities in an artificial reef area of the Pipa Island sea, Shandong[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(12): 1479-1495. [何倩, 刘淑德, 唐衍力, 等. 山东琵琶岛海域人工鱼礁区鱼类群落物种及功能多样性[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(12): 1479-1495.]
- [73] Cadotte M W, Carscadden K, Mirotchnick N. Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1079-1087.
- [74] Heino J, Soininen J, Lappalainen J, et al. The relationship between species richness and taxonomic distinctness in freshwater organisms[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50(3): 978-986.

Interannual variation of the community structure and diversity of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin

TANG Cheng^{1,2}, DENG Huatang², TIAN Huiwu², PU Yan², DUAN Cong³, WU Xinghua⁴, TANG Xiliang⁴, DUAN Xinbin^{1,2}, CHEN Daqin^{1,2}

1. College of Fisheries of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

3. Chongqing National Nature Reserve Management Office of Rare and Endemic Fish, Chongqing 402260, China;

4. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China

Abstract: The upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin are located in the upper reaches of the Yangtze River Rare and Endemic Fish National Nature Reserve (hereinafter referred to as “the Reserve”),

which is a key protection area for rare and endemic fishes in China. With the successive development of hydropower stations at the lower reaches of the Jinsha River and the implementation of the “10-year fishing ban” policy, the structure and diversity of rare and endemic fish communities in this section of the river are expected to change. Therefore, conducting a comprehensive survey and assessment of rare and endemic fishes in this section of the river is necessary. In this study, we analyzed the inter-annual changes in the community structure of rare and endemic fishes in this section of the river based on the fish resources survey data from 2007 to 2021. We evaluated the diversity of rare and endemic fishes in this section of the river at different periods (before impoundment in Jinsha River Phase I, after impoundment, and early after the fishing ban) using eight indices in three dimensions: species diversity, taxonomic diversity, and functional diversity. The results showed that 29 species of rare and endemic fish belonging to three orders, six families, and 23 genera were identified during the 15 consecutive years of monitoring. Regarding ecological types, the rare and endemic fishes in this section of the river were mainly omnivorous or carnivorous fishes inhabiting the bottom, laying drifting eggs, and preferring flowing water habitats. Cluster analysis and non-metric multidimensional scale analysis (NMDS) showed that the rare and endemic fish communities for the different years could be divided into four groups with $\text{stress}=0.09<0.1$ when the similarity level was 70%, and the ranking result was good.

The One-way ANOSIM test showed no significant difference in the community composition of rare and endemic fishes between the before- and after-impoundment periods, whereas significant differences were observed in community composition between the early fishing ban period and the before- and the after-impoundment periods ($P<0.05$). The results of species diversity analysis showed that the Shannon-Wiener, Simpson, Margalef, and Pielou indices had different interannual trends, with ranges of 1.709–2.506, 0.729–0.906, 1.719–3.147, and 0.647–0.867, respectively. The mean taxonomic difference index ($\Delta+$) and categorical difference variance index ($\Lambda+$) both showed that the early fishing ban > before the impoundment > after the impoundment. Functional diversity in different dimensions, such as motor, reproduction and feeding, showed some differences in different periods, with locomotion functional richness being higher at the early fishing ban, feeding function richness being higher after impoundment, and reproduction function richness being higher before impoundment. The uniformity of locomotion functional richness was significantly higher during the early fishing ban than that before and after impoundment. No significant difference was observed in the uniformity of feeding and reproduction functions in different periods. The dispersion of the functions was significantly higher at the beginning of the fishing ban than that before and after impoundment. Dispersion was significantly higher during the early fishing ban than before and after the impoundment. The results showed that the community structure and diversity of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River are evidently affected by environmental factors such as hydropower development and fishing ban policy, and the relationship between diversity indices in different dimensions is complex, reflecting the adaptation and adjustment of fish communities under the changes of ecological environment. This study reveals the dynamic evolution law of the diversity of rare and endemic fish, which provides a powerful scientific basis for protecting and restoring the diversity of rare and endemic fish in this section and promotes the healthy and sustainable development of the Yangtze River ecosystem.

Key words: upper reach of the Yangtze River; rare and endemic fish; community structure; species diversity; taxonomic diversity; functional diversity

Corresponding author: CHEN Daqin. E-mail: chdq@yfi.ac.cn