

金沙江下游干流(水富—宜宾段)鱼类群落结构

刀 微¹, 唐永忠², 李学华², 陈远超¹, 胡清娥², 韦建福¹, 赵祖权², 余廷松², 潘晓赋¹, 王晓爱¹

1. 中国科学院昆明动物研究所/云南省高原鱼类育种重点实验室/云南省高原湖泊水体生态系统健康评估与修复工程研究中心, 云南 昆明 650201
2. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区云南管护局, 云南 昭通 657000

摘要: 金沙江下游干流(水富—宜宾段)是多种长江珍稀特有鱼类的幼鱼庇护所,也是大型水利工程建设较为密集的地区之一,其鱼类生物多样性受到严重威胁。为评估其鱼类资源现状,于2021—2023年在宜宾市安边镇、三块石及柏溪镇3个江段开展了10次调查。结果显示,共采集鱼类7目20科50属69种,其中鲤形目最多(48种);长江上游特有鱼类17种,国家重点保护野生动物7种,外来物种8种。群落优势种以铜鱼(*Coreius heterodon*)、瓦氏黄颡鱼(*Tachysurus vachelli*)、粗唇鲃(*Leiocassis crassilabris*)为主。生物多样性指数中仅Margalef丰富度指数呈现出时间和空间的显著性差异($p<0.05$)。ABC曲线结果表明,鱼类群落整体处于中度干扰状态,但大个体优势种呈增加趋势。聚类分析结果显示,在56.71%的相似性水平上,2021和2022年的鱼类种类较为相似,归为一组;而2023年的种类与历史记录较为相似,归为另一组;与2021—2022年相比,2023年金沙江下游干流(水富—宜宾段)的鱼类种类有所增加。建议后续持续开展鱼类增殖放流、控制外来鱼类入侵以及加强科研监测等措施,进一步推动金沙江及长江鱼类种群数量的恢复。

关键词: 鱼类群落; 种类组成; 物种多样性; 丰度生物量曲线; 金沙江下游干流

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fish community structure in mainstream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section)

DAO Wei¹, TANG Yongzhong², LI Xuehua², CHEN Yuanchao¹, HU Qing'e², WEI Jianfu¹, ZHAO Zuquan², YU Tingsong², PAN Xiaofu¹, WANG Xiao'ai¹

1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Fish Breeding, Kunming Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences/Yunnan Ecosystem Health Assessment and Restoration Engineering Research Center of Plateau Lake Water, Kunming 650201, China
2. National Nature Reserve of Rare and Endemic Fishes in Upper Reaches of Yangtze River (Yunnan Section), Zhaotong 657000, China

Abstract: The lower reaches of the Jinsha River (Shuifu-Yibin section), a nursery habitat for various rare and endemic fish species of the Yangtze River, are one of the areas with dense construction of large hydrop projects. However, the fish biodiversity in this region is under severe threat. To assess the status of its fish resources, we had conducted ten surveys from 2021 to 2023 in three river sections: Anbian Town, Sankuashi and Baixi Town. The results show that a total of 69 fish species belonging to 7 orders,

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2025-01-08

基金项目: 第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK05010103); 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区(云南段)生态项目; 云南省科学技术厅重点研发计划(202303AC100011); 云南省科学技术厅-科技平台与人才计划(202105AD160026)

作者简介: 刀 微(1995—), 女, 博士研究生, 研究方向为水生态和鱼类保护。E-mail: daowei01@163.com

通信作者: 王晓爱(1986—), 女, 正高级工程师, 博士, 研究方向为水生态系统保护修复及云南土著鱼类种质资源保护和可持续利用。E-mail: wangxiaoi@mail.kiz.ac.cn

20 families and 50 genera were collected, with the Cyiformes being the most abundant (48 species). There were 17 endemic fish species from the upper Yangtze River, 7 species of nationally protected wildlife, and 8 invasive species. The dominant species in the community included *Coreius heterodon*, *Tachysurus vachelli*, and *Leiocassis crassilabris*. Among the biodiversity indexes, only the Margalef richness index showed significant temporal and spatial differences ($p < 0.05$). The ABC curve indicates that the fish community was in a state of moderate disturbance, but with a trend of increasing dominance of larger individuals. Cluster analysis shows that at a similarity level of 56.71%, the species from 2021 and 2022 were grouped together due to their similarities, while the ones in 2023 were more similar to historical records so they were grouped together. Compared with the results from 2021 to 2022, there had been an increase in fish species in the mainstream of the Jinsha River (Shuifu-Yibin section) in 2023. It is recommended that measures such as continuous fish stocking, controlling the invasion of non-native fish species, and strengthening scientific monitoring be implemented to further promote the recovery of fish populations in the Jinsha River and the Yangtze River.

Keywords: Fish community structure; Species composition; Species diversity; Abundance-biomass comparison curves; Mainstream of the Lower Reaches of Jinsha River

鱼类是地球上最大的脊椎动物类群,广泛分布于全球的淡水和海洋环境中,是淡水生态系统中必不可少的组成部分,对整个淡水生态系统的生物和环境具有重要影响^[1-2]。然而,随着全球化进程的加快和人类活动的加剧,鱼类多样性和资源量急剧下降,其中栖息地退化已成为鱼类种群数量减少的主要且持续的原因之一^[3]。特别是水利工程建设引起的栖息地退化,已成为威胁淡水鱼类生物多样性的最主要且长期的因素之一^[3]。因此,定期开展鱼类现状调查对于其保护研究以及维持淡水生态系统的稳定平衡至关重要。

金沙江发源于青海境内唐古拉山脉的格拉丹冬雪山北麓,是我国第一大河——长江的上游河段,干流石鼓以上河段为上游,石鼓至雅砻江口为中游,攀枝花(雅砻江河口)至宜宾江段为下游^[4]。金沙江全长 2 308 km,流经青海、西藏、四川、云南 4 省区,整个流域因其地理位置特殊、地形地势复杂、江水流态多样且气候多样,孕育了丰富多样的鱼类,是全球生物多样性研究热点之一,同时也是我国最大的水电基地^[5-6]。20 世纪初,金沙江流域的鱼类有 214 种^[7];1985 年,金沙江记录鱼类 161 种^[8]。近十几年来,由于人类活动的干扰和破坏,如水电开发、滥捕、环境污染等,尤其是梯级电站的建设,使得整个金沙江流域的鱼类资源严重衰退,截至 2017 年,共记述金沙江流域的鱼类 200 种,其中实际采集到的鱼类仅 108 种^[9]。

金沙江下游处于青藏高原向四川盆地的过渡带,复杂的地理环境孕育了丰富的鱼类资源以及数量较多的鱼类产卵场,是青藏高原鱼类与江河平原

鱼类的过渡分布水域,同时也是我国水生生物多样性研究和保护的热点地区^[10-12]。此外,金沙江下游紧邻长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区,为保护区的重要组成部分。该江段既是长江上游珍稀特有鱼类的幼鱼庇护所和补充群体的主要产卵江段,也是鱼类重要的洄游通道^[13]。历史上金沙江下游共记录鱼类 142 种^[14],宜宾境内鱼类产卵场 36 处^[15]。但受水利工程建设、环境污染等人为活动的影响,鱼类资源量急剧下降,产卵场生态功能也出现退化甚至丧失^[15]。目前,金沙江下游干流修建了乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个世界级巨型水电站^[6]及长江第一港——水富港。5 个大型水利工程的建设运行导致金沙江下游生境破碎化,阻断了长江上游珍稀特有鱼类和重要经济鱼类的生殖洄游通道,最终造成鱼类资源量下降,并引发鱼类群落结构的剧烈变化^[16-18]。金沙江下游干流(水富—宜宾段)紧邻向家坝水电站和水富港工程的下游江段,受水电工程蓄水运行的直接且显著影响,同时也受到中上游水电开发累积效应的影响^[13]。此外,为满足建设后的向家坝和溪洛渡两大电站大件运输的需求,实现水富港与长江主通道及其沿线公路、铁路的大容量联运^[19],水富港于 2021—2024 年开展了扩能工程二期项目建设。虽然目前已有一些关于金沙江下游宜宾江段鱼类早期资源的研究报道^[8,14,20-25],但工程建设过程中产生的污染势必会降低金沙江下游干流(水富—宜宾段)的鱼类生境质量,影响其生存与繁殖,进而导致其鱼类群落结构发生变化。因此,迫切需要了解水富—宜宾江段鱼类资源现状,评估工程扩建及水电工程运

行对鱼类资源的生态影响,并制定有效的保护措施,以减缓工程建设运行给水生生态造成的负面影响。2021—2023 年对金沙江下游干流(水富—宜宾段) 鱼类资源状况进行了系统调查和对比分析,并提出了保护该河段鱼类资源的建议,以期为长江上游珍稀、特有鱼类的保护提供科学依据,同时为长江“十年禁渔”政策的效果评估提供本底资料。

1 材料与方法

1.1 样点设置

本次调查样点依据金沙江下游干流(水富—宜宾段) 鱼类主要产卵场分布区域^[15],共设置安边镇、三块石及柏溪镇等 3 个采样江段(表 1)。并于 2021 年 6、9 和 11 月,2022 年 3、7、9 和 11 月,2023 年 6、9 和 11 月对其鱼类群落进行了 10 次调查。

表1 金沙江下游干流(水富—宜宾段) 渔获物调查采样点信息

Table 1 Information of fish sampling sites in mainstream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section)

序号 No.	调查样点 Sampling site	经度 Longitude/(°E)	纬度 Latitude/(°N)
1	安边镇上下游 1 km 范围内 1 km upstream and downstream of Anbian Town	104.430 8	28.625 9
2	三块石上下游 1 km 范围内 1 km upstream and downstream of Sankuaishi	104.489 7	28.660 9
3	柏溪镇上下游 1 km 范围内 1 km upstream and downstream of Baixi Town	104.539 3	28.687 9

1.2 样品采集及鉴定

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。监测方法参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》^[26] 的相关标准执行。为保证充分捕获不同栖息水层环境中的鱼类,调查中使用定置刺网(长 50 m、高 1.5 m、网目分别为 4 和 10 cm)、地笼(网径 3 cm、10 m×0.4 m×0.3 m)、钓钩(规格为 2 #)和手抄网(网深 18 cm、网眼 2 mm)开展渔获物调查。在水体较浅、水流湍急处,采用以刺网为主(4 cm 网目主要针对中上层的中小型鱼类,10 cm 网目主要针对中下层鱼类)、地笼和手抄网为辅的采样方法。在水体较深、水流缓慢处,采用以地笼为主、刺网和钓钩为辅的方式进行捕捞。为保证数据的可比性,各年及各采样江段所使用的渔具规格、数量、放置地点生境及作业时间尽量保持一致。放置刺网和地笼的时间为 18:00 至翌日 06:00。每个调查江段每次连续调查 3 d,每次作业时间为 12 h。现场对采集到的所有样本进行种类鉴定和计数,并逐尾测量体长(精确到 1 mm)和称体质量(精确到 0.1 g)^[27]。因禁渔护鱼的要求,对于能现场鉴定的物种,计数并测完体长和体质量后,放回金沙江中;对于无法现场鉴定到种的鱼类,相同样本选取 2~3 尾保存于 10% (φ) 的福尔马林溶液中,带回实验室做进一步鉴定。物种鉴定主要参考《四川鱼类志》^[28]、《云南鱼类志》^[29-30]

和《长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类图集》^[31] 等进行现场种类鉴定。鱼类物种拉丁学名和分类系统参考 Eschmeyer's Catalog of Fishes。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 优势种

采用相对重要性指数(Index of relative importance, IRI) 对采集到的鱼类群落优势种进行分析,计算公式为:

$$IRI = (N+W) \times F \quad (1)$$

式中: N 为某种类的个体数占总渔获个体数的百分比; W 为某种类的总质量占总渔获质量的百分比; F 为某种类出现的样点数占总调查样点数的比例。设定 $IRI \geq 500$ 的物种为优势种, $100 \leq IRI \leq 500$ 为重要种, $10 \leq IRI \leq 100$ 为常见种, $IRI < 10$ 为偶见种^[32]。

1.3.2 生物多样性指数

采用 Margalef 丰富度指数 (R')、Shannon 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J')、Simpson 多样性指数 (D') 和 $G-F$ 多样性指数 (D_{G-F}) 分析调查区域的鱼类物种多样性^[5,33]。计算公式分别为:

$$R' = (S-1) / \ln N \quad (2)$$

$$H' = -\sum N_i \ln N_i \quad (3)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (4)$$

$$D' = 1 - \sum_{i=1}^G N_i^2 \quad (5)$$

$$D_F = \sum_{k=1}^m D_{Fk} = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (6)$$

$$D_G = -\sum_{j=1}^p D_{Gj} = -\sum_{j=1}^p q_j \ln q_j \quad (7)$$

$$D_{G-F} = 1 - D_G / D_F \quad (8)$$

式中: $N_i = n_i / N$, S 、 N 和 n_i 分别为各样点的物种数、所有物种的个体数和第 i 种物种的个体数; D_F 为 F 指数; $P_i = S_{ki} / S_k$, S_k 为鱼类名录中 k 科中的物种数, S_{ki} 为鱼类名录中 k 科 i 属中的物种数; n 为 k 科中的属数; m 为鱼类名录中的科数; D_G 为 G 指数; $q_j = S_j / S$, S_j 为鱼类名录中 j 属中的物种数, S 为鱼类名录中的物种数; p 为名录中的属数; D_{G-F} 为 $G-F$ 指数, $G-F$ 指数值越高, 则代表非单科种越多。当 $D_F = 0$ 时, 说明该地区物种所有科均只有一个物种, 规定该地区的 $G-F$ 指数为 0。当 $G-F$ 指数接近 0 或为负值时, 则说明 F 指数较低或 G 指数较高, 对应科间多样性较低或属间多样性较高。

1.3.3 ABC 曲线

Warwick 最早提出 ABC 曲线概念来反映外界环境干扰对生物群落的影响效应^[34]。当数量优势度曲线位于生物量优势度曲线之下时, 群落处于未受干扰状态; 当数量优势度曲线与生物量优势度曲线出现交叉时, 群落处于中度干扰状态; 当数量优势度曲线位于生物量优势度曲线之上时, 群落处于严重干扰状态^[35-36]。ABC 曲线以采样点的物种数据为样本, 计算 W 值表示丰度与生物量之间的相对关系^[5], 计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{(B_i - A_i)}{50(S-1)} \quad (9)$$

式中: A_i 和 B_i 分别为 ABC 曲线中种类序号 i 对应的丰度和生物量的累计百分比; S 为物种种类数。当生物量优势曲线在数量优势度曲线之上时 W 为正, 反之 W 为负。

1.3.4 鱼类种类组成的年际变化

基于各年鱼类种类组成数据, 构建种类组成 Jaccard 相似性矩阵, 并采用组平均连接的聚类分析 (Cluster analysis, CA) 方法, 分析鱼类种类组成在年际间的分组情况^[37-39]。1983 年的数据来源于吴江和吴明森^[8,10]、丁瑞华^[28]、褚新洛和陈银瑞^[29-30]; 1994、1997—1999、2000 和 2005 年的数据来源于刘清等^[20]和李雷等^[21]; 2007—2008 年的数据来源于危起伟和吴金明^[31]、危起伟^[40]; 2008—2011 年的数据来源于高少波等^[14]。

1.3.5 数据统计

鱼类数据使用 Excel 2016 软件记录并计算优势

种和生物多样性指数, 采用 Origin 2021 软件绘图。丰度生物量 (ABC) 曲线和聚类 (Cluster) 图通过 Primer 7.0 和 IBM SPSS Statistics 27.0 软件分析制作。

2 结果

2.1 鱼类物种组成

10 次调查统计渔获物约 483.07 kg、4 452 尾、69 种, 隶属于 7 目 20 科 50 属 (附录 A, 详见 <http://dx.doi.org/10.12131/20240218> 的资源附件)。鱼类种类组成以鲤形目为主, 共 48 种, 占总物种数的 69.57%; 鲇形目次之, 共 13 种, 占 18.84%; 太阳鱼目 3 种, 占 4.35%; 鲟形目 2 种, 占 2.90%; 其余目均为单科单种, 各占 1.45%。鲤形目中, 鲴科鱼类种类最多, 共 15 种, 占总物种数的 21.74%; 其次为鲃科, 共 13 种, 占总物种数的 18.84%; 鲤科鱼类共 8 种, 占总物种数的 11.59%。外来物种 8 种, 占总物种数的 11.59%, 包括斑点叉尾鲴 (*Ictalurus punctatus*)、杂交鲟 (*Acipenser* sp.)、大鳞副泥鳅 (*Paramisgurnus dabryanus*)、鲢 (*Cirrhinus molitorella*)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)、梭鲈 (*Sander lucioperca*)、齐氏罗非鱼 (*Coptodon zillii*)、蓝鳃太阳鱼 (*Lepomis macrochirus*)。

10 次调查中, 采集到长江上游特有鱼类 17 种, 占总物种数的 24.64%。且采集到国家一级重点保护野生动物 1 种, 即长江鲟 (*A. dabryanus*); 国家二级重点保护野生动物 6 种, 包括胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*)、长薄鳅 (*Leptobotia elongata*)、红唇薄鳅 (*L. rubrilabris*)、岩原鲤 (*Procypris rabaudi*)、长鳍吻鲈 (*Rhinogobio ventralis*)、圆口铜鱼 (*Coreius guichenoti*)。其中长江鲟、胭脂鱼、圆口铜鱼被列入《中国生物多样性红色名录》极危等级; 长薄鳅、长鳍吻鲈被列入《中国生物多样性红色名录》濒危等级。

2.2 优势种分析

IRI 分析结果表明, 从时间上来看 (表 2), 2021 年金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 鱼类群落的优势种为长江鲟、寡鳞鲈 (*Pseudolaubuca engraulis*)、圆口铜鱼、铜鱼 (*C. heterodon*)、蛇鲈 (*Saurogobio dabryi*)、瓦氏黄颡鱼 (*Tachysurus vachelli*) 和粗唇鲃 (*Leiocassis crassilabris*); 2022 年的优势种为鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲮 (*Hemiculter leucisculus*)、铜鱼、瓦氏黄颡鱼、粗唇鲃和梭鲈;

2023 年的优势种为长江鲟、无须高墨头鱼 (*Age-fer*)、铜鱼和瓦氏黄颡鱼。
neiogarra imberba)、鲮、宜昌鳅鲇 (*Gobiobotia fili-*

表2 金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 不同年份和样点鱼类优势种的相对重要性指数
Table 2 Index of relative importance of main fish species of different time and sample in mainstream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu–Yibin section)

物种 Species	年份 Year			样点 Sampling site		
	2021	2022	2023	安边镇 Anbian Town	三块石 Sankuaishi	柏溪镇 Baixi Town
长江鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	807.2	—	871.6	—	2 890.5	576.5
无须高墨头鱼 <i>Ageneiogarra imberba</i>	—	—	907.9	—	—	—
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	—	622.9	—	—	—	—
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	—	1 312.4	704.5	—	1 129.8	—
寡鳞鲃 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	612.2	—	—	—	156.4	—
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	—	—	—	—	542.2	—
宜昌鳅鲇 <i>Gobiobotia filifer</i>	—	—	1 042.6	1 238.9	—	—
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	546.1	—	—	—	—	—
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	1 508.1	2 693.3	6 658.5	5 627.7	1 709.1	4 938.0
蛇鲻 <i>Saurogobio dabryi</i>	946.6	—	—	—	564.8	—
瓦氏黄颡鱼 <i>Tachysurus vachelli</i>	8 160.3	9 632.8	3 725.6	5 042.5	4 520.4	8 086.0
粗唇鲃 <i>Leiocassis crassilabris</i>	2 078.8	1 534.6	—	693.5	—	1 572.4
梭鲈 <i>Sander lucioperca</i>	—	1 767.4	—	—	1 717.4	—

从空间上来看 (表 3), 安边镇江段鱼类群落的优势种为宜昌鳅鲇、铜鱼、瓦氏黄颡鱼和粗唇鲃; 三块石江段鱼类群落的优势种为长江鲟、鲮、寡鳞鲃、团头鲂、铜鱼、蛇鲻、瓦氏黄颡鱼和梭鲈; 柏溪镇江段鱼类群落的优势种为长江鲟、铜鱼、瓦氏黄颡鱼和粗唇鲃。

对金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 不同采样江段 3 年的鱼类数据进行相对重要性指数 (IRI) 分析 (表 3), 结果显示, 金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 的优势种为长江鲟、无须高墨头鱼、岩原鲤、鲤、鲮、团头鲂、宜昌鳅鲇、圆口铜鱼、铜鱼、蛇鲻、瓦氏黄颡鱼、粗唇鲃、梭鲈等 13 种, 合计分别占总数量和总质量的 84.82% 和 86.57%; 其中相对数量和相对质量均以铜鱼和瓦氏黄颡鱼为主。重要种 8 种, 分别为中华沙鳅 (*Sinibotia superciliaris*)、宽体沙鳅 (*S. reevesae*)、鲫 (*Carassius auratus*)、寡鳞鲃、翘嘴鲃 (*Culter alburnus*)、唇鲮 (*Hemibarbus labeo*)、吻鲈 (*R. typus*) 和鲃 (*Silurus asotus*), 合计分别占总数量和总质量的 7.57% 和 4.59%; 常见种、偶见种各有 24 种, 各占总数量和总质量的 7.61% 和 8.84%。

2.3 多样性

2.3.1 G-F 多样性指数

根据 10 次调查的渔获物数据, 计算了金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 的科、属多样性指数。从时间上来看, *F*、*G* 和 *G-F* 指数均呈逐年升高的趋势 (表 4), 科级和属级分类阶元数量逐年增加, 说明该江段非单科种在逐年增加, 科间和属间多样性逐年丰富。从空间上来看, 安边镇的 *F*、*G* 和 *G-F* 指数高于三块石和柏溪镇, 柏溪镇的 *F*、*G* 和 *G-F* 指数高于三块石 (表 4), 说明安边镇的科间和属间多样性最高, 其次是柏溪镇, 三块石最低。

2.3.2 物种多样性

鱼类多样性指数的年际变化分析显示, 2021—2023 年的 3 年间, 金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 的 Margalef 丰富度指数和 Shannon 多样性指数波动较大, 其中 2023 年的 Margalef 丰富度指数和 Shannon 多样性指数均显著高于 2021 和 2022 年 ($p<0.05$), 2021 年和 2022 年间并无显著性差异。Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数相对稳定, 变化较小 (图 1)。总体来看, 2023 年的 Margalef 丰富度指数、Shannon 多样性指数、

表3 金沙江下游干流(水富—宜宾段)渔获物组成情况

Table 3 Composition of fishery catches in mainstream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section)

物种 Species	尾数 Number	质量 Mass/g	尾数百分比 Number percentage/%	质量百分比 Mass percentage/%	相对重要性 指数 IRI	群落地位 Community status
斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus punctatus</i> *	17	1 236.0	0.38	0.26	63.8	III
长江鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	39	47 760.3	0.88	9.89	2 152.6	I
杂交鲟 <i>Acipenser</i> sp.*	1	1 710.0	0.02	0.35	12.5	III
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	9	1 939.8	0.20	0.40	80.5	III
长薄鳅 <i>Leptobotia elongata</i>	15	825.7	0.34	0.17	50.8	III
红唇薄鳅 <i>Leptobotia rubrilabris</i>	1	41.7	0.02	0.01	1.0	IV
中华沙鳅 <i>Sinibotia supercilialis</i>	81	829.0	1.82	0.17	199.1	II
宽体沙鳅 <i>Sinibotia reevesae</i>	86	1 329.0	1.93	0.28	220.7	II
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	2	8.7	0.04	0.00	1.6	IV
大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i> *	2	32.4	0.04	0.01	1.7	IV
戴氏山鳅 <i>Claea dabryi</i>	1	7.2	0.02	0.00	0.8	IV
犁头鳅 <i>Lepturichthys fimbriatus</i>	30	306.2	0.67	0.06	73.7	III
短身金沙鳅 <i>Jinshaia abbreviata</i>	4	45.5	0.09	0.01	3.3	IV
中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	2	17.4	0.04	0.00	3.2	IV
中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	8	4 530.8	0.18	0.94	37.3	III
白甲鱼 <i>Onychostoma simum</i>	7	4 726.8	0.16	0.98	75.7	III
鲮 <i>Cirrhinus molitorella</i> *	1	1 014.0	0.02	0.21	7.7	IV
无须高墨头鱼 <i>Ageneiogarra imberba</i>	41	21 591.0	0.92	4.47	718.7	I
四川裂腹鱼 <i>Schizothorax kozlovi</i>	2	84.8	0.04	0.02	2.1	IV
岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>	25	8 373.1	0.56	1.73	535.5	I
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	14	8 994.6	0.31	1.86	507.8	I
鲫 <i>Carassius auratus</i>	16	2 085.59	0.36	0.43	184.6	II
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	19	208.3	0.43	0.04	47.0	III
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	3	94.3	0.07	0.02	5.8	IV
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	1	1 414.0	0.02	0.29	10.5	III
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	35	1 026.1	0.79	0.21	66.6	III
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	244	5 243.74	5.48	1.09	1 313.2	I
张氏鲮 <i>Hemiculter tchangii</i>	2	144.5	0.04	0.03	5.0	IV
似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	2	73.5	0.04	0.02	4.0	IV
四川华鳊 <i>Sinibrama taeniatus</i>	1	42.2	0.02	0.01	1.0	IV
寡鳞鲃 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	82	3 024.4	1.84	0.63	164.5	II
银鲃 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	4	226.8	0.09	0.05	4.6	IV
翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	6	3 284.3	0.13	0.68	162.9	II
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i> *	30	14 604.3	0.67	3.02	862.6	I
厚颌鲂 <i>Megalobrama pellegrini</i>	3	3 186.5	0.07	0.66	48.5	III
黄尾鲂 <i>Xenocypris davidi</i>	8	4 617.5	0.18	0.96	75.7	III
圆吻鲂 <i>Distoechodon tumirostris</i>	7	9 606.5	0.16	1.99	71.5	III
高体鲂 <i>Rhodeus ocellatus</i>	2	16.4	0.04	0.00	3.2	IV
宜昌鲃 <i>Gobiobotia filifer</i>	211	3 657.03	4.74	0.76	1 099.3	I

续表 3 to be continued

物种 Species	尾数 Number	质量 Mass/g	尾数百分比 Number percentage/%	质量百分比 Mass percentage/%	相对重要性 指数 IRI	群落地位 Community status
鳅鮀 <i>Gobiobotia pappenheimi</i>	1	9.0	0.02	0.00	0.8	IV
异鳔鳅 <i>Xenophysogobio boulengeri</i>	13	153.7	0.29	0.03	32.4	III
银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>	19	233.7	0.43	0.05	31.7	III
唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	36	3 257.5	0.81	0.67	247.2	II
圆筒吻鲃 <i>Rhinogobio cylindricus</i>	5	333.6	0.11	0.07	6.0	IV
长鳍吻鲃 <i>Rhinogobio ventralis</i>	1	140.0	0.02	0.03	1.7	IV
吻鲃 <i>Rhinogobio typus</i>	26	4 598.5	0.58	0.95	409.6	II
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	35	10 147.6	0.79	2.10	673.6	I
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	451	176 264.7	10.13	36.49	12 431.6	I
蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i>	97	3 125.3	2.18	0.65	565.2	I
斑点蛇鲃 <i>Saurogobio punctatus</i>	9	570.2	0.20	0.12	21.3	III
裸腹片唇鲃 <i>Platysmacheilus nudiventris</i>	5	40.4	0.11	0.01	4.0	IV
长须黄颡鱼 <i>Tachysurus eupogon</i>	1	40.0	0.02	0.01	1.0	IV
光泽黄颡鱼 <i>Tachysurus nitidus</i>	5	225.1	0.11	0.05	10.6	III
黄颡鱼 <i>Tachysurus fulvidraco</i>	28	884.46	0.63	0.18	54.1	III
瓦氏黄颡鱼 <i>Tachysurus vachelli</i>	2 199	7 5 316.7	49.39	15.59	19 495.4	I
粗唇鲃 <i>Leiocassis crassilabris</i>	365	16 843.7	8.20	3.49	3 505.6	I
长吻鲃 <i>Leiocassis longirostris</i>	11	796.5	0.25	0.16	68.7	III
切尾拟鲃 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	3	86.6	0.07	0.02	5.7	IV
大鳍鲃 <i>Hemibagrus macropterus</i>	2	240.7	0.04	0.05	6.3	IV
白缘鲃 <i>Liobagrus marginatus</i>	10	110.83	0.22	0.02	24.8	III
中华纹胸鲃 <i>Glyptothorax sinensis</i>	8	26.7	0.18	0.01	12.3	III
鲃 <i>Silurus asotus</i>	4	3 745.8	0.09	0.78	115.4	II
大口鲃 <i>Silurus meridionalis</i>	6	349.41	0.13	0.07	13.8	III
子陵吻虾虎 <i>Rhinogobius giurinus</i>	9	34.8	0.20	0.01	27.9	III
梭鲈 <i>Sander lucioperca</i> *	25	26 282	0.56	5.44	1 200.4	I
齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i> *	1	63.2	0.02	0.01	1.2	IV
蓝鳃太阳鱼 <i>Lepomis macrochirus</i> *	2	159.2	0.04	0.03	2.6	IV
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	7	726.6	0.16	0.15	20.5	III
斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	4	305.8	0.09	0.06	5.1	IV

注: *. 外来种; I. 优势种; II. 重要种; III. 常见种; IV. 偶见种。
Note: *. Exotic specie; I. Dominant species; II. Important species; III. Common species; IV. Occasional species.

Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数均为最高, 其次是 2021 年, 最低为 2022 年。

从空间变化上来说, 3 个采样江段的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数波动较大, Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数相对稳定, 变化较小 (图 2)。其中安边镇江段的 Margalef 丰富度指数显著高于三块石和柏溪镇 ($p<0.05$), 三块石江段的 Shannon 多样性指数、

Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数均高于安边镇和柏溪镇, 但无显著性差异。总体而言, 安边镇的物种最为丰富, 其次是柏溪镇最低为三块石。Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数最高的为三块石, 其次是安边镇, 最低的是柏溪镇。

2.4 群落稳定性

2021—2023 年度 ABC 曲线见图 3, 2021 和

表4 金沙江下游干流(水富—宜宾段)不同时间和样点鱼类物种多样性 F 、 G 和 $G-F$ 指数
Table 4 F -index, G -index, $G-F$ -index of different time and samples in mainstream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section)

指标 Index	年份 Year			样点 Sampling site		
	2021	2022	2023	安边镇 Anbian Town	三块石 Sankuaishi	柏溪镇 Baixi Town
科 Family	12	13	19	17	14	16
属 Genus	24	27	48	43	30	35
种 Species	32	32	60	51	37	48
F 指数 F -index	5.262	6.232	9.256	8.509	5.686	6.226
G 指数 G -index	3.103	3.249	3.808	3.696	3.669	3.644
$G-F$ 指数 $G-F$ index	0.410	0.479	0.589	0.566	0.355	0.415

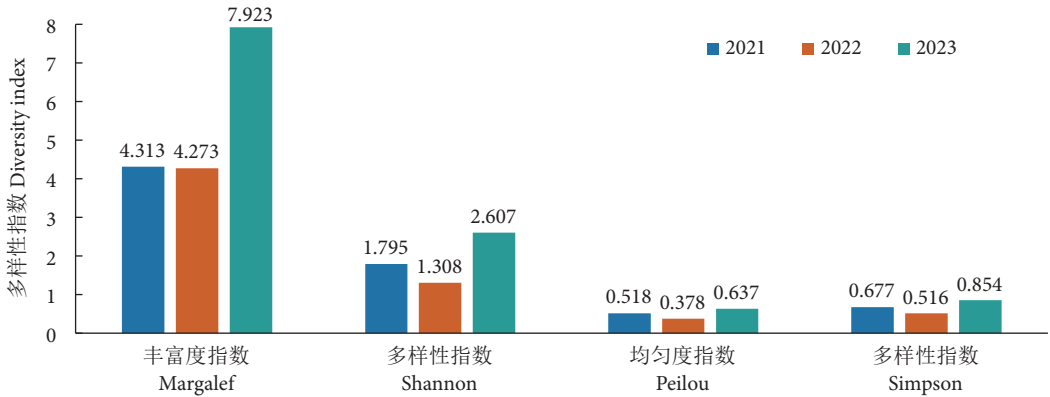


图1 2021—2023 年金沙江下游干流(水富—宜宾段)鱼类物种多样性时间变化

Fig. 1 Temporal changes in fish species diversity in main stream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section) during 2021–2023

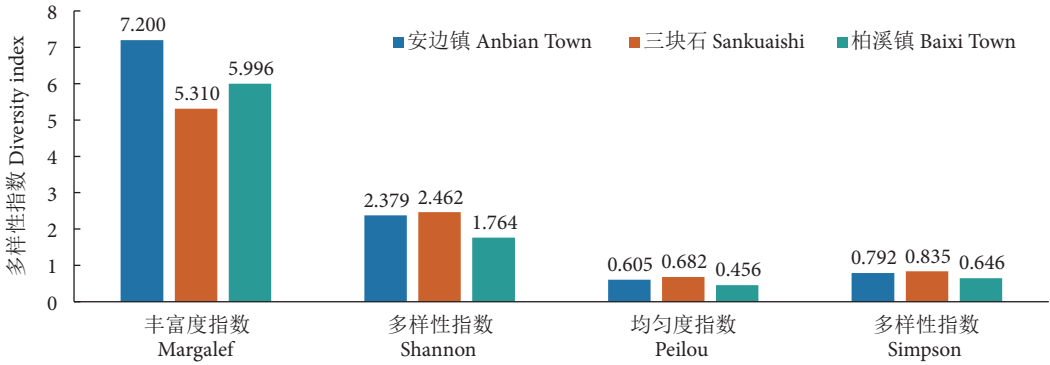


图2 金沙江下游干流(水富—宜宾段)鱼类物种多样性空间变化

Fig. 2 Spatial changes in fish species diversity in main stream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section)

2022 年鱼类群落数量优势度曲线位于生物量优势度曲线之上, W 分别为 -0.043 和 -0.100 , 表明 2021 和 2022 年金沙江下游干流(水富—宜宾段)的鱼类群落处于严重干扰状态, 群落失去大个体优势种, 以中小型鱼类为主。2023 年数量优势度曲线位于生物量优势度曲线之下, W 为 0.045 , 表明 2023 年金沙江下游干流(水富—宜宾段)的鱼类群落处于较稳定状态, 群落中大个体优势种增加趋势。

从不同江段看, 安边镇、三块石和柏溪镇鱼类群落数量优势度曲线与生物量优势度曲线相交, 表明这 3 个江段的鱼类群落均处于中度干扰状态。

2.5 物种种类组成年际变化

不同年份鱼类群落 Bray-Curtis 聚类如图 4 所示。群落结构相似度随着相聚距离的减小而升高, 在 56.71% 相似性水平上金沙江下游干流(水富—宜宾段)的鱼类群落可分为 3 组: 组 1 为 1983、

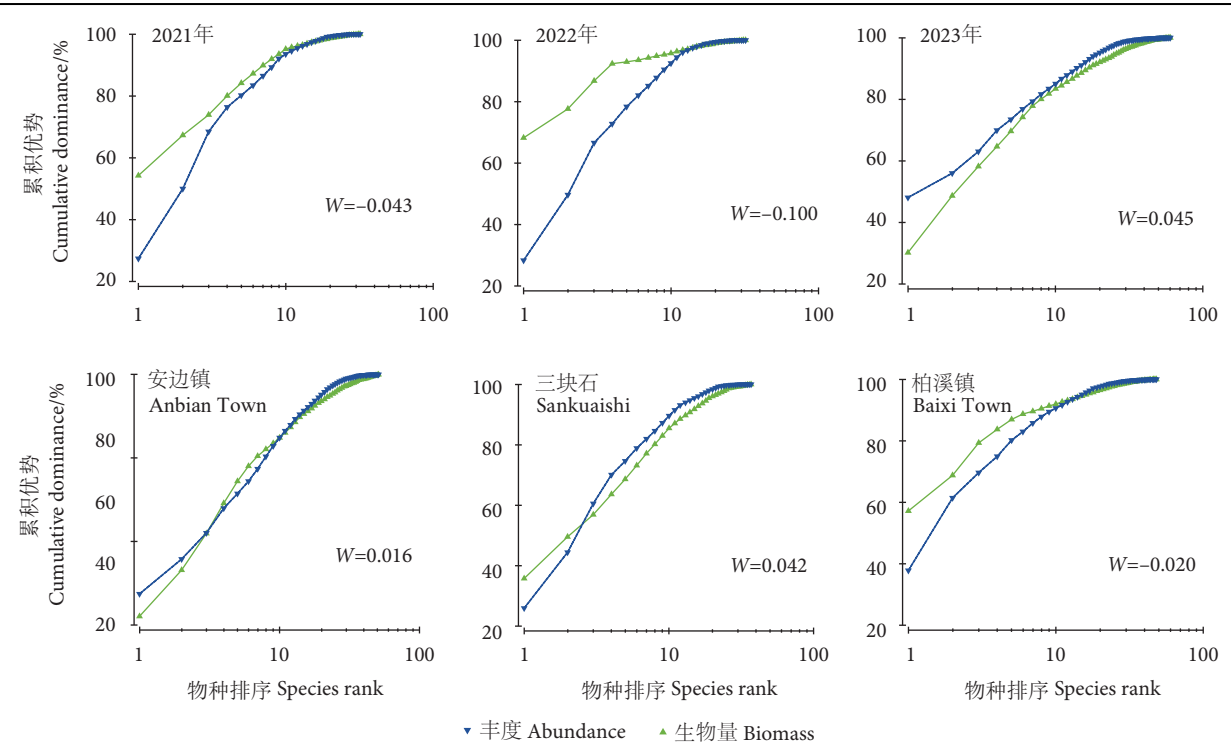


图3 金沙江下游干流(水富—宜宾段) 渔获物的丰度生物量曲线

Fig. 3 Abundance-biomass comparison (ABC) curves of fish catches below main stream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section)

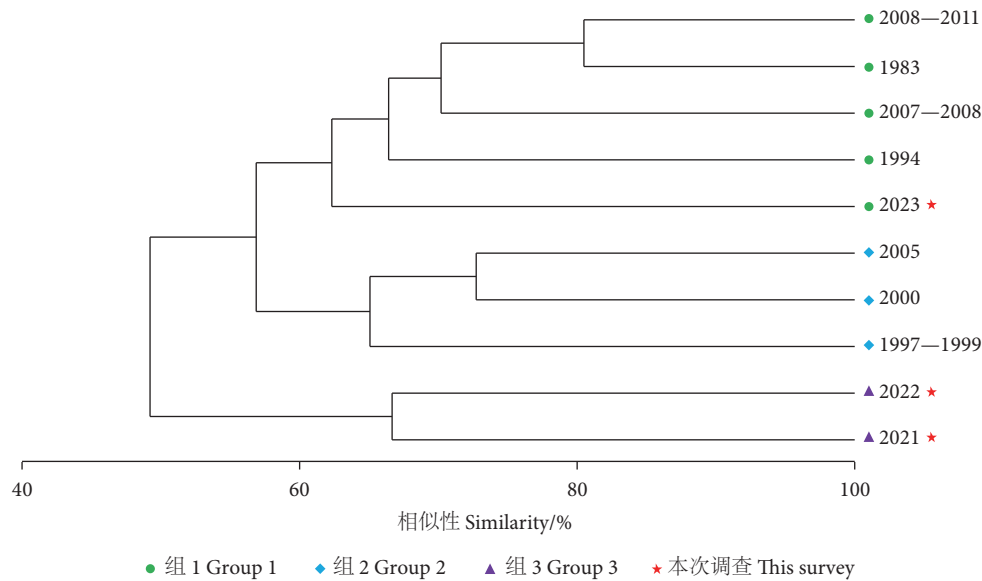


图4 金沙江下游干流(水富—宜宾段) 不同年份鱼类群落的相似性聚类

Fig. 4 Bray-Curtis clustering of fish community in main stream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section) in different years

1994、2007—2008、2008—2011 和 2023 年；组 2 为 1997—1999、2000 和 2005 年；组 3 为 2021 和 2022 年。

3 讨论

3.1 鱼类种类组成及其变化

水富港建设前(1983 年),金沙江下游干流(水

富—宜宾段)记录鱼类 91 种^[10]；水富港建设后至电站建设前(1986—2005 年),共记录鱼类 78 种^[21]；水电站建设期间(2005—2011 年),共记录鱼类 74 种^[12,14]。本次采集鉴定鱼类 69 种,相对于以往调查种类减少,且鱼类种类组成明显改变。首先,一些河道洄游性鱼类如泉水鱼(*Pseudogyrinchilus prochilus*)、云南盘鮈(*Discogobio yunnanensis*)、

sis) 等和喜急流型鱼类如荷马条鳅属 (*Homatula*)、石爬鮡属 (*Chimarrichthys*) 等在本次调查中并未采集到。这可能是由于上、下游大坝的修建阻隔了洄游通道, 严重影响了洄游鱼类的生长繁殖; 同时, 水流变缓导致水文情势改变, 破坏了急流型鱼类的栖息环境^[5]。其次, 主要经济鱼类的种群数量如铜鱼等因鱼类资源的长期过度开发^[41] 而急剧下降, 甚至有些鱼类几乎消失, 如大部分裂腹鱼类在本次调查中并未发现。

本次调查采集到长江鲟 37 尾、胭脂鱼 9 尾、红唇薄鳅 1 尾、长薄鳅 15 尾、岩原鲤 25 尾及圆口铜鱼 35 尾, 尤其是长江鲟和长薄鳅, 时隔多年再次被记录到。这可能与增殖放流和禁渔政策的实施有关。据不完全统计, 自 2008 年以来, 在该江段已累计增殖放流长江鲟、胭脂鱼、岩原鲤、长薄鳅、圆口铜鱼、中华倒刺鲃 (*Spinibarbus sinensis*) 等多种鱼类, 共计 200 万余尾。但通过与历史数据比较, 这些物种在金沙江下游仍处于濒危状态。本次调查还采集到斑点叉尾鲷、杂交鲟、鲮、团头鲂、梭鲈等 8 种外来鱼类, 其中团头鲂和梭鲈的种群数量在逐年增加, 并成为了优势种, 表明外来鱼

类对本土鱼类的生存胁迫加剧, 其入侵可能已成为影响调查江段鱼类组成结构变化的重要原因之一, 应予以重视。从群落组成来看, 本次调查结果以鲤形目为主, 符合我国鱼类区系的典型特点^[7,23]; 但物种种数仍较历史记录减少, 且土著物种的占比呈下降趋势但值得注意的是, 本次调查中外来物种的占比已上升至 11.59%。

3.2 鱼类群落结构及多样性变化特征

水电站工程建设前 (2000—2008 年), 调查江段优势种以瓦氏黄颡鱼、圆口铜鱼和寡鳞鲃为主, 且以瓦氏黄颡鱼和圆口铜鱼为绝对优势种^[20,40]; 但随着水电站运行时间的增加和人为活动如捕捞的累积效应, 该江段的圆口铜鱼种群数量急剧下降, 优势种逐步演替为以广适性和静水性鱼类为主, 如鲮、鲃、瓦氏黄颡鱼和鲤等^[14]。本次调查中, 该江段的优势种主要为瓦氏黄颡鱼、铜鱼、鲮等, 2021 和 2022 年瓦氏黄颡鱼占绝对优势, 2023 年则铜鱼占绝对优势 (表 5)。这与 ABC 曲线结果相一致。2021 和 2022 年的 W 值分别为 -0.043、-0.100, 表明鱼类群落组成以生命周期短、个体小的种类为主, 生物量均集中于小个体体

表5 2000—2023 年金沙江下游干流 (水富—宜宾段) 优势种组成变化
Table 5 Changes of dominant species composition in mainstream of lower reaches of Jinsha River (Shuifu-Yibin section) during 2000–2003

物种 Species	年份 Year							
	2000 ^a	2007 ^b	2008 ^b	2008—2011 ^c	2011 ^d	2021 ^e	2022 ^e	2023 ^e
长江鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	—	—	—	—	—	+	—	+
长薄鳅 <i>Leptobotia elongata</i>	—	—	—	—	+	—	—	—
中华沙鳅 <i>Sinibotia superciliaris</i>	—	—	—	—	+	—	—	—
无须高墨头鱼 <i>Ageneiogarra imberba</i>	—	—	—	—	—	—	—	+
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	—	—	—	+	—	—	+	—
鲫 <i>Carassius auratus</i>	—	—	—	—	+	—	—	—
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	—	—	—	—	+	—	—	—
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	—	—	—	+	—	—	+	+
寡鳞鲃 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	+	—	—	—	—	+	—	—
宜昌鳅鲈 <i>Gobiobotia filifer</i>	—	+	+	—	—	—	—	+
异鳔鳅 <i>Xenophysogobio boulengeri</i>	—	+	+	—	—	—	—	—
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	+	+	+	+	+	+	-	—
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	—	—	—	—	+	+	+	+
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	—	+	+	+	—	+	—	—
瓦氏黄颡鱼 <i>Tachysurus vachelli</i>	+	+	+	+	+	+	+	+

续表 5 to be continued

物种 Species	年份 Year							
	2000 ^a	2007 ^b	2008 ^b	2008—2011 ^c	2011 ^d	2021 ^e	2022 ^e	2023 ^e
粗唇鲮 <i>Leiocassis crassilabris</i>	—	—	—	—	—	+	+	—
鲢 <i>Silurus asotus</i>	—	—	—	+	+	—	—	—
大口鲢 <i>Silurus meridionalis</i>	—	—	—	+	+	—	—	—
梭鲈 <i>Sander lucioperca</i>	—	—	—	—	—	—	+	—

注: a. 参考文献刘清等^[20] (2005); b. 参考文献危起伟^[40] (2012); c. 参考文献高少波等^[17] (2013); d. 参考文献李雷等^[21] (2013); e. 本次调查; +. 出现; —. 未出现; *. 绝对优势物种。

Note: a. Referenced from Liu, et al^[20] (2005); b. Referenced from Wei^[40] (2012); c. Referenced from Gao, et al^[17] (2013); d. Referenced from Li, et al^[21] (2013); e. This survey; +. Detected species, —. Undected species; *. Absolute advantage species.

质量区间, 鱼类群落均处于严重干扰状态。2023 年 W 值为 0.045, 表明大个体鱼类种群数量增加, 并成为优势种。聚类分析结果表明, 金沙江(水富—宜宾江段) 的鱼类群落结构在 2023 年发生明显变化。 R' 、 H' 、 J' 和 D' 在 2023 年均为最高; 这可能是因为金沙江干流水电站的建设运行以及水富港扩建工程的实施使其鱼类群落受到扰动, 加之人类活动导致的水污染亦可能影响调查江段的水生态环境, 这不仅会导致敏感鱼类迁离或死亡, 还可能危害了水生生物, 进而破坏鱼类食物链结构^[42-43]。自 2021 年长江“十年禁渔”政策全面实施以来, 结合持续开展的人工增殖放流工作, 金沙江下游江段的鱼类多样性保护和恢复已取得显著成效。

总体来说, 目前金沙江下游干流(水富—宜宾段) 鱼类群落结构维持在相对稳定的水平, 鱼类规格有增大的趋势, 但与历史数据比较, 鱼类生物多样性仍维持在较低水平, 主要表现在: 1) 一些洄游性和半洄游性的大型鱼类如白鲟 (*Psephurus gladius*)、中华鲟 (*A. sinensis*) 和长江鲟等种类, 资源量锐减, 甚至灭绝; 2) 喜急流生活的鱼类种类如鳅类、裂腹鱼亚科的种类减少; 3) 丰度主要由短生命周期的小型鱼类如鲮、瓦氏黄颡鱼和粗唇鲮等组成。

3.3 金沙江下游干流鱼类资源保护措施

本研究表明, 金沙江下游干流(水富—宜宾段) 的土著鱼类资源仍处于衰退状态。虽人为捕捞压力已得到有效控制, 但水利工程的开发运行以及外来物种的入侵仍然是导致土著鱼类资源衰退的重要原因。因此, 建议从以下几个方面改善金沙江下游江段鱼类种群资源和生物多样性: 1) 未来仍需持续开展土著鱼类的增殖放流工作。在“长江十年禁

捕”政策的基础上, 通过在水富港作业中心、横江河口、安边镇等江段建设鱼类增殖放流站, 放流如胭脂鱼、长薄鳅、岩原鲤和长江鲟等珍稀、特有鱼类及重要经济鱼类。同时, 开展鳅类如高原鳅属 (*Triplophysa*) 以及鲃类如石爬鲃属等鱼类的人工繁殖研究, 逐步增加珍稀濒危水生物种的放流种类和比重, 早日实现增殖放流的生态补偿效应。2) 规范和管控江段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。同时, 对已形成优势种群的外来物种如团头鲂和梭鲈进行监测和研究, 必要时应采取定向捕捞或修建隔离措施的方式对其种群规模进行控制。3) 加强鱼类资源和水质方面的全面监测, 研究金沙江下游梯级水电开发叠加影响效应, 评估增殖放流以及“长江十年禁捕”措施实施后的生态效果, 如未来应增加水声学的监测, 增强资源评估的水平。

参考文献:

[1] NORTHCOTE T G. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: a "top-down" view[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1988, 45: 361-379.

[2] 周向峰. 长江上游江安段鱼类资源调查研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023: 2.

[3] 夏雨果, 陈蔚涛, 李新辉, 等. 广东省内陆江河鱼类多样性[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(4): 34-45.

[4] 陆孝平, 富曾慈. 中国主要江河水系要览[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 63-96.

[5] 王忠原, 朱挺兵, 胡飞飞, 等. 十年禁渔初期金沙江干流鱼类群落结构及物种多样性[J]. *中国水产科学*, 2024, 31(3): 286-300.

[6] 周扬, 王宁, 温潇雄, 等. 长江上游梯级水电开发对区段水温累积影响及生态效应研究[J]. *水力发电学报*, 2024, 43(11): 1-16.

[7] 孙赫英, 隋晓云, 何德奎, 等. 金沙江流域鱼类的系统保护规划研究[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(S1): 110-118.

- [8] 吴江, 吴明森. 金沙江的鱼类区系[J]. 四川动物, 1990, 9(3): 23-26.
- [9] 张春光, 杨君兴, 赵亚辉, 等. 金沙江流域鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 20-23.
- [10] 吴江, 吴明森. 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), 1985(1): 80-87.
- [11] CHEN D Q, XIONG F, WANG K, et al. Status of research on Yangtze fish biology and fisheries[J]. *Environ Biol Fish*, 2009, 85: 337-357.
- [12] 熊飞, 郭祺, 张伟, 等. 金沙江下游向家坝库区鱼类群落结构空间格局[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(4): 82-91.
- [13] 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.
- [14] 高少波, 唐会元, 乔晔, 等. 金沙江下游干流鱼类资源现状研究[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(1): 44-49.
- [15] 孟宝, 张继飞, 叶华, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类产卵场功能现状分析及保护启示[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2772-2785.
- [16] 陈大庆, 常剑波, 顾洪宾. 金沙江一期工程对保护区生态环境的影响与对策[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(2): 21-24.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 龚廷登, 杨伟阶, 何滔, 等. 金沙江水富段水生生物的群落结构及水质监测[J]. 淡水渔业, 2014, 44(4): 25-34.
- [20] 刘清, 苗志国, 谢从新, 等. 长江宜宾江段渔业资源调查[J]. 水产科学, 2005, 24(7): 47-49.
- [21] 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.
- [22] 林俊强, 彭期冬, 任杰, 等. 赤水河与金沙江下游河段鱼类生境条件的相似性分析[J]. 淡水渔业, 2014, 44(6): 93-99.
- [23] 李浩林, 赵亚辉, 张洁, 等. 金沙江下游与长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区鱼类物种多样性比[J]. 淡水渔业, 2014, 44(6): 104-108.
- [24] 孙立元, 危起伟, 张辉, 等. 基于水声学的长江上游向家坝至宜宾江段鱼类空间分布特征[J]. 淡水渔业, 2014, 44(1): 53-58.
- [25] 李祥艳, 田辉伍, 蒲艳, 等. 长江上游宜宾江段鱼类早期资源现状研究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(4): 93-104.
- [26] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 242-289.
- [27] 杨志, 乔晔, 张轶超, 等. 长江中上游圆口铜鱼的种群死亡特征及其物种保护[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 50-55.
- [28] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 1-641.
- [29] 褚新洛, 陈银瑞. 云南鱼类志上册[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-377.
- [30] 褚新洛, 陈银瑞. 云南鱼类志下册[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-313.
- [31] 危起伟, 吴金明. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类图集[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-156.
- [32] 马思琦. 鱼类分类和功能多样性研究: 以济南地区鱼类为例[D]. 大连: 大连海洋大学, 2020: 12.
- [33] 蒋志刚, 纪力强. 鸟兽物种多样性测度的 $G-F$ 指数方法[J]. 生物多样性, 1999, 7(3): 220-225.
- [34] WARWICK R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. *Mar Biol*, 1986, 92(4): 557-562.
- [35] YEMANE D, FIELD J G, LESLIE R W. Exploring the effects of fishing on fish assemblages using Abundance Biomass Comparison (ABC) curves[J]. *ICES J Mar Sci*, 2005, 62(3): 374-379.
- [36] 李圣法. 以数量生物量比较曲线评价东海鱼类群落的状况[J]. 中国水产科学, 2008, 15(1): 136-144.
- [37] CLARKE K R, GORLEY R N. PRIMER V6: user manual/tutorial PRIMER-E[M]. Plymouth: PRIMER-E, 2006: 57-68.
- [38] 郭朋军, 江新琴, 俞存根, 等. 舟山沿岸渔场春秋季节鱼类群落结构特征分析[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 1-11.
- [39] 唐会元, 朱其广, 金瑶, 等. 长江支流大宁河巫溪段鱼类群落结构的年际变化及保护对策[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(6): 63-71.
- [40] 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: 81-227.
- [41] 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.
- [42] 高明慧, 何力劲, 翁士创, 等. 武江乐昌段鱼类组成及物种多样性的年际变化[J/OL]. 水生态学杂志, 2024[2024-08-06].
- [43] 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.