

DOI: 10.12264/JFSC2024-0009

十年禁渔初期金沙江干流鱼类群落结构及物种多样性

王忠原^{1,2}, 朱挺兵², 胡飞飞², 龚进玲², 郭祉宾², 李学梅², 杨德国²

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院长江水产研究所农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223

摘要: 基于金沙江干流 2022 年 5 月至 2023 年 11 月 6 个站位(岗托、奔子栏、石鼓、攀枝花、巧家、绥江)的渔获物调查数据, 分析鱼类群落组成现状、优势种特征、群落多样性的时空分布, 提出金沙江干流鱼类的保护措施。研究结果显示, 共采集到鱼类 68 种, 隶属于 4 目 15 科 48 属, 其中鲤形目鱼类最多(51 种), 占总种数的 75.0%, 国家级保护鱼类 5 种, 外来鱼类 7 种; 生态类型主要为杂食性、底栖性和定居性鱼类, 分别占 66.18%、44.12%和 72.06%; 群落优势种为鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*)和长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*); 鱼类群落的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 多样性指数(D')、Peilou 均匀度指数(J')和 Margalef 丰富度指数(R')的变化范围分别为 1.376~2.012、0.646~0.816、0.574~0.797 和 1.149~2.870, 经 ANOVA 分析检验, 4 个多样性指数的时间差异不显著($P>0.05$), 而空间差异明显($P<0.05$); ABC 曲线分析结果表明, 生物量曲线在丰度曲线上方, W 统计值为正值, 表明群落受到的扰动较小, 但与历史记录相比, 鱼类种类和生态类型均有一定变化; 2022—2023 年的属间-科间多样性指数(genus-family diversity index, $G-F$)由 0.29 降低为 0.19, 但物种数相对增多; 聚类分析和 NMDS 排序分析结果表明, 金沙江干流河段鱼类群落分成 2 组: 岗托、奔子栏、石鼓为一组; 巧家、攀枝花、绥江为一组; 相似性百分比(SIMPER)分析表明, 不同季度之间的鱼类群落物种组成差异显著, 主要分歧种为张氏鲮(*Hemiculter tchangii*)和中华鲮(*Rhodeus sinensis*)。作为禁渔后开展的系统调查, 本研究结果可为长江禁捕效果评估提供基准。建议在加强禁渔管理的同时, 监测外来种种群动态, 以及开展干支流生境修复等措施保护金沙江鱼类多样性。

关键词: 金沙江干流; 鱼类; 种类组成; 群落结构; 物种多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)03-0286-15

金沙江发源于青海境内唐古拉山脉的格拉丹冬雪山北麓, 是长江的上游。金沙江全长 2308 km^[1], 流经青海、西藏、四川、云南四省区。干流石鼓以上河段为上游, 石鼓至雅砻江口为中游, 雅砻江口至岷江口为下游。流域面积 36.2 万 km², 干流落差 3300 m, 水能资源蕴藏量与泥沙储备量极其丰富^[2], 是三峡水库入库泥沙的主要来源^[3], 同时也是国家规划的十三大水电基地之一。金沙

江独特的地形地貌和生态环境孕育出极其丰富的生物多样性^[4]。有关金沙江流域鱼类的研究最早可追溯到 20 世纪初, 资料显示金沙江流域的鱼类有 214 种^[5]; 吴江等^[1]记录了金沙江鱼类 161 种, 并对金沙江鱼类划分出六大区系。

数十年来, 金沙江鱼类资源受到水电开发、酷渔滥捕、环境污染、气候变化、外来物种入侵等因素的影响, 尤其是梯级电站的建设对生殖洄

收稿日期: 2024-01-14; 修订日期: 2024-02-15.

基金项目: 农业农村部财政专项“长江禁捕后常态化监测专项”(CJJC-2022-04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD61).

作者简介: 王忠原(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为鱼类生态学. E-mail: a15715650295@163.com.

通信作者: 杨德国, 男, 研究员, 研究方向为鱼类保护生物学, E-mail: yangdg@yfi.ac.cn; 朱挺兵, 男, 副研究员, 研究方向为鱼类生态学, E-mail: zhutb@yfi.ac.cn

游性鱼类的干扰作用尤为显著。王俊等^[6]对金沙江下游绥江段调查发现, 梯级电站蓄水后对鱼类群落干扰严重; 邵科等^[7]对金沙江中游攀枝花江段的鱼类资源监测发现, 观音岩水电站运行后, 产漂流性卵鱼类如圆口铜鱼丰度明显降低; 白洁^[8]基于金沙江上游鱼类数据进行河流威胁因子评估显示, 水电开发是上游鱼类主要威胁因子之一。此外外来鱼类入侵对本土鱼类的威胁也是改变金沙江流域生物多样性的关键因子^[9-10]。自长江十年禁渔计划实施后针对金沙江流域的资源调查变得零散, 亟需对金沙江流域鱼类多样性进行长期化监测。

本研究于2022年5月至2023年11月对金沙江干流6个站位的鱼类资源进行现场调查, 并运

用优势种分析、聚类 and 相似性分析、ABC 曲线、G-F 多样性指数等方法分析鱼类群落的时空变化特征, 旨在了解十年禁渔初期金沙江干流鱼类资源的变化特征, 为下一步金沙江鱼类资源的保护和利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点位设置

在金沙江干流设置6个采样站位(图1), 其中岗托(GT)、奔子栏(BZL)、石鼓(SG)3个站位位于金沙江上游, 攀枝花(PZH)站位位于中游, 巧家(QJ)站位、绥江(SJ)站位位于下游, 于2022年5—6月、10—11月和2023年5—6月、10—11月各采样1次。

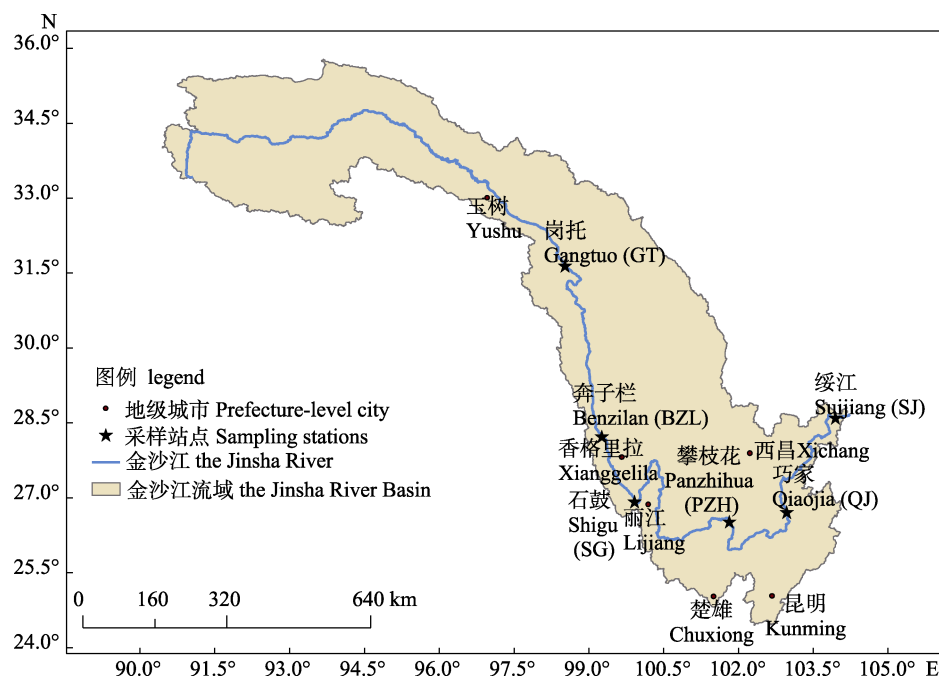


图1 金沙江干流水系及采样点图

Fig. 1 Drainage in the Jinsha River main stream and sampling sites in this study

1.2 物种分类鉴定

捕捞网具为三层刺网和地笼, 其中刺网长10~100 m, 高0.7~1.5 m, 内网网目1.8~6.5 cm, 外网网目8.5~25 cm; 地笼长10 m、宽45 cm、高33 cm、网径0.4 cm。每次调查在每个位点布设7~10张网, 地笼放置2~3个, 放置时间约为12 h。对于采集到的鱼类样本, 参考《四川鱼类志》^[11]

《云南鱼类志》^[12-13]《长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区鱼类图集》^[14]等进行现场种类鉴定、拍照, 然后测量鱼的全长(精确到0.1 cm)、体长(精确到0.1 cm)和体重(精确到0.1 g)。每个样点针对每种鱼类取一大一小共2尾制作标本, 先进行编号、测量, 然后用10%甲醛溶液固定, 带回实验室做进一步鉴定。鱼类物种拉丁学名参考《拉

汉世界鱼类系统名典》^[15]。

1.3 数据分析

1.3.1 资源量估算 以单位捕获努力渔获量(CPUE)作为相对资源量的评价参数。具体以各个站位刺网的单位面积(1000 m²)每小时渔获量来表示, 计算公式如下:

$$CPUE = \frac{C}{s \times h \times 1000}$$

式中, C 为总渔获量; s 为刺网张网面积; h 为捕捞小时数。

1.3.2 优势种分析 采用相对重要性指数(IRI)对采集到的鱼类群落优势种进行分析, 计算公式如下:

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

式中, N 为某种类的个体数占总渔获个体数的百分比; W 为某种类重量占总渔获重量的百分比; F 为有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; $100 \leq IRI \leq 500$ 的物种为重要种; $10 \leq IRI \leq 100$ 的物种为常见种; $IRI < 10$ 的物种为偶见种^[16]。

1.3.3 鱼类多样性分析 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})^[17]分析金沙江干流水域的鱼类物种多样性。计算公式如下:

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

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

$$J' = H / \ln S$$

$$D' = 1 - \sum_{i=1}^G P_i^2$$

$$D_F = \sum_{k=1}^m D_{Fk} = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

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

$$D_{G-F} = 1 - D_G / D_F$$

式中, $P_i = n_i / N$, S 、 N 和 n_i 分别为各站点的物种数、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。

1.3.4 ABC 曲线 Warwick 最早提出 ABC 曲线概念用来反映外界环境干扰对生物群落的影响效应^[18]。本研究利用 PRIMER 5.0 绘制 ABC 曲线, 以采样站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, 计算公式如下:

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

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。

1.3.5 群落结构相似性分析 根据不同站点的鱼类相对丰度值建立矩阵, 其中横坐标为站点, 纵坐标为种类。以 Bray-Curtis 相似性系数为基础构建相似性矩阵, 采用等级聚类的分类方法和非度量多维标度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)的排序方法, 利用 PRIMER 5.0 软件分别构建聚类分析图和 NMDS 图, 其分析结果的优劣由过胁强系数(Stress)值衡量: $Stress < 0.05$ 拟合极好; $0.05 \leq Stress < 0.1$ 拟合较好; $0.1 \leq Stress < 0.2$ 拟合一般; $0.2 \leq Stress < 0.3$ 拟合较差。取种类出现频数 ≥ 3 的鱼类丰度数据, 利用相似性百分比(SIMPER)解释导致群落结构差异的重要物种。

2 结果与分析

2.1 种类组成

共采集到鱼类 68 种, 隶属于 4 目 15 科 48 属(表 1)。其中鲤形目鱼类种类数最多(51 种), 占比 75.0%; 其次是鲇形目和鲈形目, 分别有 9 种和 7 种, 占比 13.2% 和 10.3%; 最少的是鲑形目, 仅有一种陈氏新银鱼(*Neosalanx tangkahkeii*)。外来鱼类 7 种, 包括大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)、奥利亚罗非鱼(*Oreochromis aureus*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、齐氏罗非鱼

(*Coptodon zillii*)、散鳞镜鲤(*Cyprinus carpio specularis* Lacepède)、梭鲈(*Sander lucioperca*)、拉氏鲮(*Rhynchocypris lagowskii*)。列入《中国濒危动物红皮书-鱼类》的鱼类有 5 种, 其中包括国家二级保护动物胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)、岩原鲤(*Procypris rabaudi*)、白甲鱼(*Onychostom simus*)、重口裂腹鱼(*Schizothorax davidi*)和细鳞裂腹鱼(*Schizothorax chongi*)。中华金沙鳅(*Jinshaia sinensis*)为重庆市重点保护动物。黄石爬鮠(*Euchiloglanis kishinouyei*)在《中国脊椎动物红色名录》列为濒危级保护物种。按照生态类型划分, 干流河段主要以定居性、底栖性、杂食性鱼类为主, 分别占鱼类总种数的 72.06%、44.12%、66.18% (表 1)。

表 1 金沙江干流鱼类种类组成及生态类型
Tab. 1 Species composition and ecotypes of fishes in the main stream of the Jinsha River

目 order	科 family	属 genus	种名 species	生态类型 ecotype
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	棒花鱼属 <i>Abbottina</i>	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	S、B、O
		鲃属 <i>Culter</i>	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	S、U、C
		白甲鱼属 <i>Onychostoma</i>	白甲鱼 <i>Onychostoma simus</i>	M、B、O
		鲮属 <i>Hemiculter</i>	鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	S、U、C
			贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	S、U、H
			张氏鲮 <i>Hemiculter tchangi</i>	S、U、C
			草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i>	S、L、H
		草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		
		倒刺鲃属 <i>Spinibarbus</i>	中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	S、B、O
		华鲃属 <i>Sinibrama</i>	四川华鲃 <i>Sinibrama taeniatus</i>	S、U、O
		鲫属 <i>Carassius</i>	鲫 <i>Carassius auratus</i>	S、L、O
		近红鲃属 <i>Ancherythroculter</i>	黑尾近红鲃 <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	S、U、C
		鲤属 <i>Cyprinus</i>	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	S、L、O
			散鳞镜鲤 <i>Cyprinus carpio specularis</i>	S、L、O
			鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>	M、U、O
		裂腹鱼属 <i>Schizothorax</i>	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	
			短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>	M、L、H
			齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	M、B、H
			软刺裂腹鱼 <i>Schizothorax malacanthus</i>	M、U、O
			四川裂腹鱼 <i>Schizothorax kozlovi</i> Nikolsky	M、B、O
			细鳞裂腹鱼 <i>Schizothorax chongi</i>	M、B、O
			重口裂腹鱼 <i>Schizothorax davidi</i>	M、U、O
			长丝裂腹鱼 <i>Schizothorax dolichonema</i>	M、B、O
			长须裂腹鱼 <i>Schizothorax longibarbus</i>	M、B、O
			鳊属 <i>Zacco</i>	S、B、O
			宽鳍鳊 <i>Zacco platypus</i>	
		鲮属 <i>Phoxinus</i>	拉氏鲮 <i>Rhynchocypris lagowskii</i>	M、U、O
		鲈鲤属 <i>Percocypris</i>	金沙鲈鲤 <i>Percocypris pingi</i>	M、U、C
		裸裂尻鱼属 <i>Schizopygopsis</i>	软刺裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis malacanthus</i>	M、U、O
		马口鱼属 <i>Opsariichthys</i>	马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	S、B、C
		麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	S、U、O
		墨头鱼属 <i>Garra</i>	墨头鱼 <i>Garra pingi pingi</i>	M、B、O
		盘鮈属 <i>Discogobio</i>	云南盘鮈 <i>Discogobio yunnanensis</i>	M、B、O
		鲴属 <i>Rhodeus</i>	中华鲴 <i>Rhodeus sinensis</i>	S、L、O
			彩石鲴 <i>Rhodeus lighti</i>	S、B、O
			高体鲴 <i>Rhoeus ocellatu</i>	S、L、O
		泉水鱼属 <i>Pseudogyrinocheilus</i>	泉水鱼 <i>Pseudogyrinocheilus prochilus</i>	M、L、O
		蛇鮈属 <i>Saurogobio</i>	蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	S、B、O
		叶须鱼属 <i>Ptychobarbus</i>	裸腹叶须鱼 <i>Ptychobarbus kaznakovi</i>	M、B、C

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

目 order	科(/subfamily) family	属 genus	种名 species	生态类型 ecotype
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	鲮属 <i>Aristichthys</i>	鲮 <i>Aristichthys nobilis</i>	M、U、C
		鲮属 <i>Acheilognathus</i>	大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	S、U、O
		原鲮属 <i>Cultrichthys</i>	红鳍原鲮 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	S、U、O
		原鲤属 <i>Procypris</i>	岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>	S、B、O
	平鳍鳅科 Homalopteridae	金沙鳅属 <i>Jinshaia</i>	中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	S、B、O
	鳅科 Cobitidae	泥鳅属 <i>Misgurnus</i>	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	S、B、O
		南鳅属 <i>Schistura</i>	戴氏山鳅 <i>Schistura dabryi dabryi</i>	S、B、O
		高原鳅属 <i>Triplophysa</i>	贝氏高原鳅 <i>Trilophysa bleekeri</i>	S、B、H
			斯氏高原鳅 <i>Triplophysa toliczkae</i>	S、B、O
			细尾高原鳅 <i>Triplophysa tenura</i>	S、B、O
			会东高原鳅 <i>Triplophysa huidongensis</i>	S、B、O
			前鳍高原鳅 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>	S、B、O
		副泥鳅属 <i>Paramisgurnus</i>	大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	S、B、O
	条鳅科 Nemacheilidae	副鳅属 <i>Paracobitis</i>	短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i>	S、B、O
	亚口鱼科 Catostomidae	胭脂鱼属 <i>Myxocyprinus</i>	胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	M、L、O
鲑形目 Salmoniformes	银鱼科 Salangidae	新银鱼属 <i>Neosalanx</i>	陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>	S、U、C
鲈形目 Perciformes	虾虎鱼科 Gobiidae	吻虾虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	S、B、C
	鲈科 Percidae	梭鲈属 <i>Sander</i>	梭鲈 <i>Sander lucioperca</i>	S、L、C
	丽鱼科 Cichlidae	慈鲷属 <i>Coptodon</i>	齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i>	S、U、O
		罗非鱼属 <i>Oreochromis</i>	尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	S、U、O
			奥利亚罗非鱼 <i>Oreochromis aureus</i>	S、U、O
	鳊科 Channidae	鳊属 <i>Channa</i>	宽额鳊 <i>Channa gachus</i>	S、U、C
	塘鳢科 Eleotridae	黄魮属	小黄魮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	S、B、O
	棘臀鱼科 Centrarchidae	黑鲈属 <i>Micropterus</i>	大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	S、L、O
	鲴科 Bagridae	黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	S、B、C
			瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	S、B、O
			光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	S、L、O
		鳊属 <i>Mystus</i>	大鳍鳊 <i>Mystus macropterus</i>	S、B、O
	鮡科 Sisoridae	鮡属 <i>Pareuchiloglanis</i>	前臀鮡 <i>Pareuchiloglanis anteanalis</i>	S、L、C
		石爬鮡属 <i>Euchiloglanis</i>	黄石爬鮡 <i>Euchiloglanis kishinouyei</i>	M、B、O
	鲇科 Siluridae	鲇属 <i>Silurus</i>	鲇 <i>Silurus asotus</i>	S、B、C
			大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	S、B、C

注: C, 肉食性; O, 杂食性; H, 植食性; M, 洄游性; S, 定居性; U, 中上层; L, 中下层; B, 底层。
Note: C, carnivorous; O, omnivorous; H, phytophagy; M, migration; S, settlement; U, upper and middle layers; L, middle and lower layers; B, bottom layer.

2.2 鱼类分布特征

从分布范围来看, 鲫(*Carassius auratus*)分布最为广泛, 在上中下游均出现; 裂腹鱼类主要出现在上游; 外来鱼类主要出现在中下游段。从各采样点来看, 巧家有 33 种鱼类分布, 攀枝花有 27 种鱼类分布, 绥江有 26 种鱼类分布, 石鼓有 20 种鱼类分布, 奔子栏有 19 种鱼类分布, 岗托有 10

种鱼类分布(表 2)。

2.3 单位努力捕捞量

金沙江干流的平均单位努力捕捞量(CPUE)为 1.4 kg/1000 m²/h。从空间上看, 各个站位之间的 CPUE 存在显著性差异($P<0.05$), GT 的 CPUE 最高, 为 3.5 kg/1000 m²/h; PZH 的 CPUE 最低, 为 0.3 kg/1000 m²/h。从时间上看,

4 次调查的 CPUE 无存在显著性差异($P>0.05$), 2023 年秋季的 CPUE 最低, 为 $0.8\text{ kg}/1000\text{ m}^2/\text{h}$ 但总体春季的平均 CPUE 比秋季的高, 其中 (图 2)。

表 2 金沙江干流的鱼类组成与分布
Tab. 2 Composition and distribution of fishes in the main stream of the Jinsha River

种名 species	采样站位 sampling site						种名 species	采样站位 sampling site					
	SJ	QJ	PZH	SG	BZL	GT		SJ	QJ	PZH	SG	BZL	GT
小黄鲮 <i>Micropercops swinhonis</i>				+			泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>				+		
白甲鱼 <i>Onychostoma sima</i>				+			鲇 <i>Silurus asotus</i>		+	+		+	
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	+		+	+			齐口裂腹鱼☆ <i>Schizothorax prenanti</i>				+	+	+
大鳍鲩 <i>Mystus macropterus</i>		+					齐氏罗非鱼△ <i>Coptodon zillii</i>		+	+	+		
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>				+			前鳍高原鳅☆ <i>Triplophysa anterodorsalis</i>				+		+
贝氏高原鳅☆ <i>Triplophysa bleekeri</i>					+		前臀鲃☆ <i>Pareuchiloglanis anteanalis</i>				+	+	
彩石鲮 <i>Rhodeus lighti</i>		+	+				翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>		+	+	+		
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+	+				泉水鱼☆ <i>Pseudogyrinocheilus procheilus</i>		+				
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>		+					软刺裂腹鱼 <i>Schizothorax malacanthus</i>					+	
陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>				+			软刺裸裂尻鱼☆ <i>Schizopygopsis malacanthus malacanthus</i>				+	+	+
大口黑鲈△ <i>Micropterus salmoides</i>	+						散鳞镜鲤△ <i>Cyprinus carpio specularis</i>			+			
大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	+	+					蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>		+	+	+		
大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	+		+		+		斯氏高原鳅 <i>Triplophysa toliczkae</i>				+	+	
大鳍鲩 <i>Acheilognathus macropterus</i>	+						四川华鲮☆ <i>Sinibrama taeniatus</i>		+				
戴氏山鳅☆ <i>Schistura dabryi dabryi</i>				+			四川裂腹鱼☆ <i>Schizothorax kozlovi</i>				+	+	+
短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i>		+					梭鲈△ <i>Sander lucioperca</i>		+				
短须裂腹鱼☆ <i>Schizothorax wangchiachii</i>	+			+	+	+	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>		+	+	+		
高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus ocellatus</i>				+			细鳞裂腹鱼☆ <i>Schizothorax chongi</i>				+	+	+
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	+	+					细尾高原鳅 <i>Triplophysa tenuta</i>				+	+	+
黑尾近红鲃☆ <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>		+					胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>		+				
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+	+	+				会东高原鳅 <i>Triplophysa huidongensis</i>				+		
黄石爬鲃☆ <i>Euchiloglanis kishinouyei</i>					+	+	拉氏鲃△ <i>Rhynchocypris lagowskii</i>					+	
鲫 <i>Carassius auratus</i>	+	+	+	+	+		重口裂腹鱼☆ <i>Schizothorax davidi</i>					+	
金沙鲈鲤☆ <i>Percocy prispingi</i>		+					岩原鲤☆ <i>Procypris rabaudi</i>				+		
宽额鲢 <i>Channa gachua</i>				+			鲮 <i>Aristichthys nobilis</i>		+	+			
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>		+	+				云南盘鮈 <i>Discogobio yunnanensis</i>		+	+			
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	+	+	+				张氏鲮☆ <i>Hemiculter tchangi</i>		+	+	+		
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		+					长丝裂腹鱼☆ <i>Schizothorax dolichonema</i>				+	+	+
裸腹叶须鱼 <i>Ptychobarbus kaznakovi</i>					+	+	长须裂腹鱼☆ <i>Schizothorax longibarbus</i>				+	+	+
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	+						中华倒刺鲃☆ <i>Spinibarbus sinensis</i>		+				
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	+	+	+	+			中华金沙鳅☆ <i>Jinshaia sinensis</i>				+	+	
墨头鱼 <i>Garra imberba</i>		+	+				中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>		+	+	+	+	
尼罗罗非鱼△ <i>Oreochromis niloticus</i>	+	+	+				子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>		+	+	+		
奥利亚罗非鱼△ <i>Oreochromis aureus</i>	+						红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>		+				

注: ☆表示长江特有种, △表示外来鱼类.
Note: ☆ indicates endemic species of the Yangtze River, △ indicates exotic fish.

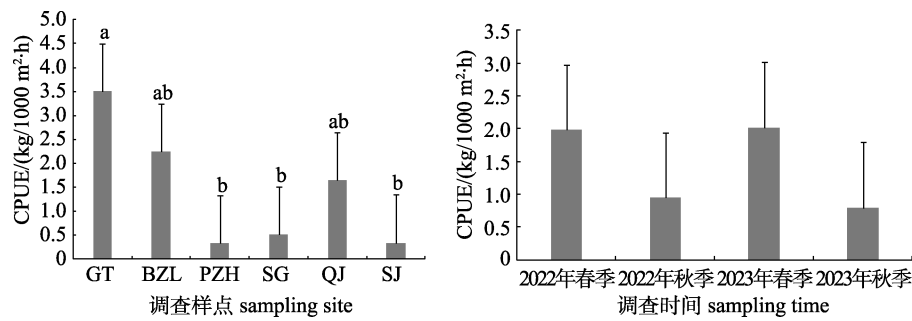


图 2 金沙江干流鱼类单位努力捕捞量(CPUE)的时空分布

相同小写字母表示无显著差异($P>0.05$), 不同小写字母表示有显著差异($P<0.05$).

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of CPUE of fishes in the main stream of the Jinsha River
The same lowercase letter indicates no significant difference ($P>0.05$), the different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

2.4 优势种分析

如表 3 所示, 相对重量以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)为主, 分别占渔获物总重的 31.8%、17.0%。金沙江干流优势种 3 种, 为鲢、齐氏罗非鱼和长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*), 分别占渔获物总数量的 2.6%、10.6%和 8.8%, 占渔获物总重量的 31.8%、4.3%

和 7.1%; 重要种 8 种, 分别为中华鲮(*Rhodeus sinensis*)、短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)、张氏鲮(*Hemiculter tchangii*)、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)、鳊、鲫、鲮(*Hemiculter leucisculus*)、鲤(*Cyprinus carpio*), 合计占渔获物总数量和总重量的 45.2%和 35.0%; 常见种、偶见种各有 17 种和 40 种, 合计占渔获物总数量和总重量的 32.8%和 21.8%。

表 3 金沙江干流渔获物组成情况

Tab. 3 Composition of fishery catches in the main stream of the Jinsha River

种类 species	尾数 number	重量/g weight	百分比/% percentage	相对重要性指数 IRI	群落地位 community status
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	179	214453.0	31.7501	658.12	I
齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i>	737	29231.6	4.3278	571.22	I
长丝裂腹鱼 <i>Schizothorax dolichonema</i>	622	47720.3	7.0651	569.20	I
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	972	2067.0	0.3060	351.11	II
短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>	228	27452.0	4.0643	220.98	II
张氏鲮 <i>Hemiculter tchangii</i>	1001	22241.9	3.2929	314.18	II
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	483	12242.7	1.8126	251.32	II
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	40	115005.1	17.0267	192.88	II
鲫 <i>Carassius auratus</i>	173	16449.6	2.4354	188.53	II
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	193	6591.0	0.9758	123.04	II
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	60	34030.3	5.0382	113.12	II
软刺裸裂尻鱼 <i>Schizothorax malacanthus</i>	144	5795.0	0.8580	96.07	III
四川裂腹鱼 <i>Schizothorax kozlovi</i>	138	8856.2	1.3112	94.63	III
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	105	20614.4	3.0520	87.40	III
蛇鲡 <i>Saurogobio dabryi</i>	332	6232.5	0.9227	77.83	III
大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	28	34840.2	5.1581	76.16	III
齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	145	9754.3	1.4441	67.56	III
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	127	698.6	0.1034	63.25	III
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	163	306.1	0.0453	52.21	III
细尾高原鳅 <i>Triplophysa tenura</i>	191	823.8	0.1220	47.01	III

(待续 to be continued)

(续表 3 Tab. 3 continued)

种类 species	尾数 number	重量/g weight	百分比/% percentage	相对重要性指数 IRI	群落地位 community status
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	98	745.6	0.1104	35.29	III
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	43	7785.0	1.1526	29.08	III
细鳞裂腹鱼 <i>Schizothorax chongi</i>	69	2478.2	0.3669	29.72	III
裸腹叶须鱼 <i>Ptychobarbus kaznakovi</i>	87	4621.7	0.6843	26.46	III
鲇 <i>Silurus asotus</i>	16	8212.5	1.2159	15.84	III
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	46	2886.9	0.4274	10.42	III
长须裂腹鱼 <i>Schizothorax longibarbus</i>	43	2081.1	0.3081	10.13	III
拉氏鲢 <i>Rhynchocypris lagowskii</i>	117	5155.5	0.7633	10.03	III
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	34	2633.5	0.3899	6.01	IV
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	36	1071.3	0.1586	5.55	IV
梭鲈 <i>Sander lucioperca</i>	9	4350.3	0.6441	5.30	IV
四川华鲮 <i>Sinibrama taeniatus</i>	42	1160.2	0.1718	4.24	IV
白甲鱼 <i>Onychostoma sima</i>	10	4175.5	0.6182	3.13	IV
泉水鱼 <i>Pseudogyrinocheilus procheilus</i>	18	1923.3	0.2847	1.72	IV
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	8	804.7	0.1191	1.67	IV
会东高原鳅 <i>Triplophysa huidongensis</i>	27	72.1	0.0107	1.63	IV
中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	4	1789.1	0.2649	1.32	IV
黄石爬鮠 <i>Euchiloglanis kishinouyei</i>	13	1309.2	0.1938	1.14	IV
前臀鮠 <i>Pareuchiloglanis anteanalis</i>	3	145.1	0.0215	1.15	IV
大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	22	353.2	0.0523	1.01	IV
大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	7	120.2	0.0178	0.97	IV
散鳞镜鲤 <i>Cyprinus carpio specularis</i>	2	1603.3	0.2374	0.73	IV
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	4	777.0	0.1150	0.71	IV
小黄魮 <i>Micropercops swinhonis</i>	1	1.4	0.0002	0.02	IV
中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	6	122.2	0.0181	0.29	IV
高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus ocellatus</i>	6	39.2	0.0058	0.50	IV
宽额鲢 <i>Channa gachua</i>	3	91.9	0.0136	0.23	IV
岩原鲤 <i>Procypris rabaudi</i>	2	133.6	0.0198	0.13	IV
大鳍鲮 <i>Mystus macropterus</i>	1	6.5	0.0010	0.02	IV
重口裂腹鱼 <i>Schizothorax davidi</i>	1	17.7	0.0026	0.02	IV
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	8	170.8	0.0253	0.58	IV
贝氏高原鳅 <i>Triplophysa bleekeri</i>	4	13.6	0.0020	0.08	IV
彩石鲮 <i>Rhodeus lighti</i>	5	24.7	0.0037	0.31	IV
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	2	445.2	0.0659	0.13	IV
陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>	12	1.8	0.0003	0.24	IV
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	1	508.6	0.0753	0.12	IV
戴氏山鳅 <i>Schistura dabryi dabryi</i>	1	3.2	0.0005	0.02	IV
短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i>	1	6.2	0.0009	0.75	IV
黑尾近红鲌 <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	38	401.7	0.0595	0.24	IV
金沙鲈鲤 <i>Percocypris pingi</i>	1	833.1	0.1233	0.48	IV
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	16	289.6	0.0429	0.59	IV
墨头鱼 <i>Garra imberba</i>	2	96.5	0.0143	0.63	IV
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	15	131.6	0.0195	0.61	IV

(待续 to be continued)

(续表 3 Tab. 3 continued)

种类 species	尾数 number	重量/g weight	百分比/% percentage	相对重要性指数 IRI	群落地位 community status
前鳍高原鳅 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>	9	38.6	0.0057	0.13	IV
软刺裂腹鱼 <i>Schizothorax malacanthus</i>	2	16.0	0.0024	0.34	IV
斯氏高原鳅 <i>Triplophysa toliczkae</i>	17	67.9	0.0101	0.16	IV
云南盘鮈 <i>Discogobio yunnanensis</i>	2	48.4	0.0072	0.06	IV
奥利亚罗非鱼 <i>Oreochromis aureus</i>	1	270.0	0.0400	0.07	IV
总计	6976	675440.14			

注: I 表示优势种; II 表示重要种; III 表示常见种; IV 表示偶见种。
Note: I represents dominant species; II represents important species; III represents common species; IV means occasional species.

2.5 多样性分析

2.5.1 G-F 多样性指数 根据 4 次渔获物调查整理的鱼类数据计算金沙江干流科、属多样性指数。2022 年春季 *F* 指数为 4.60, *G* 指数为 3.25, *G-F* 指数为 0.29; 2022 年秋季 *F* 指数为 2.54, *G* 指数为 3.04, *G-F* 指数为负值(−0.20); 2023 年春季 *F* 指数为 4.04, *G* 指数为 3.33, *G-F* 指数为 0.18; 2023 年秋季 *F* 指数为 3.86, *G* 指数为 3.13, *G-F* 指数为 0.19。2022 年春季 *G-F* 指数最高, 2022 年秋季 *G-F* 指数最低, 且 2022 年秋季的属间多样性较高而科间多样性较低。

2.5.2 物种多样性 经 ANOVA 分析检验, 石鼓与岗托、石鼓与奔子栏、绥江与奔子栏的 Shannon 多样性指数存在显著性差异($P<0.05$), 攀枝花与岗托、攀枝花与石鼓、石鼓与奔子栏的 Peilou 均匀度指数存在显著性差异($P<0.05$), 绥江与奔子栏、石鼓与岗托的 Margalef 丰富度指数存在显著性差异($P<0.05$), 岗托与攀枝花、岗托与巧家、岗托与绥江的 Margalef 丰富度指数的空间变化存在极显著性差异($P<0.01$)(图 2)。不同采样时间的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Peilou 均匀度指数无显著性差异($P>0.05$)。鱼类物种多样性空间格局变化差异大于时间尺度差异。从总体来看, 金沙江干流鱼类的多样性指数偏低, Peilou 均匀度指数(*J'*)变化范围为 0.574~0.797, 其中石鼓、岗托的均匀度指数相对较高; Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*)和 Simpson 多样性指数(*D'*)的变化范围分别为 1.376~2.012 和 0.646~0.816, 其中石鼓、绥江的多样性均相对较高; Margalef 丰富度指数(*R'*)的变化

范围为 1.149~2.870, 其中绥江、石鼓、攀枝花、巧家的丰富度相对较高(表 4)。

2.6 ABC 分析

由图 4 可知, 生物量曲线位于丰度曲线之上, *W* 值为 0.081, 表明金沙江干流的鱼类群落处于较稳定状态。

2.7 等级聚类和 NMDS 排序分析

等级聚类分析结果(图 5)表明, 金沙江干流鱼类群落的整体相似度较低, 为 11.27%, 并将金沙江干流 6 个站点聚为两组, I 组 3 个站点, 依次是岗托、奔子栏、石鼓; II 组 3 个站点, 依次是绥江、攀枝花、巧家。相似性最高的两个站点为岗托和奔子栏, 相似度达到 65.82%。NMDS 分析结果(图 6)与聚类分析结果基本一致, 本次检验的 Stress=0.01, 表明排序结果代表很好, 具有较好的解释意义。

2.8 群落结构相似性分析

基于鱼类丰度数据的 SIMPER 分析结果表明, 2022 年春季、2023 年春季和 2022 年秋季、2023 年秋季的平均相异性(average dissimilarity)分别为 55.62%和 45.72%, 主要分歧种为张氏鲮、中华鲮、齐口裂腹鱼、齐氏罗非鱼、细尾高原鳅、瓦氏黄颡鱼、细鳞裂腹鱼, 累计贡献率分别为 47.53%和 51.87%。2022 年春季与秋季的平均相异性为 49.79%, 主要分歧种为中华鲮、短须裂腹鱼、长丝裂腹鱼、子陵吻虾虎鱼、鲫和蛇鮈, 累计贡献率为 50.34%。2023 年春季与秋季的平均相异性为 42.33%, 主要分歧种为张氏鲮、齐口裂腹鱼、中华鲮、细尾高原鳅、短须裂腹鱼, 累计贡献率为 40.81%。

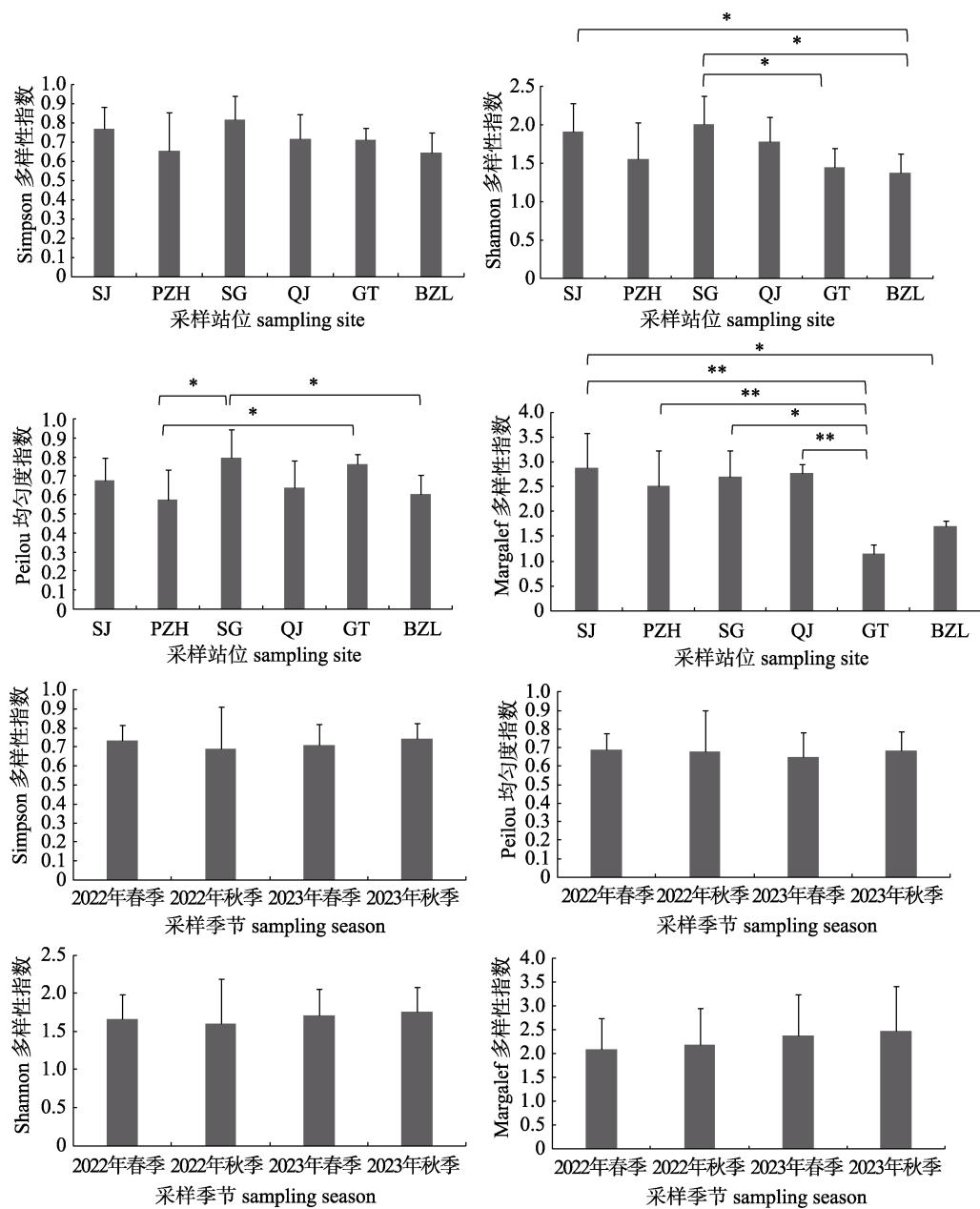


图 3 金沙江干流鱼类物种多样性时空变化

*表示有显著相关性($P<0.05$), **表示有极显著相关性($P<0.01$).

Fig. 3 Spatial and temporal changes in fish species diversity in the main stream of the Jinsha River
* indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates very significant correlation ($P<0.01$).

表 4 金沙江干流鱼类群落的多样性指数

Tab. 4 Diversity indices of fish communities in the main stream of the Jinsha River

采样点 sampling site	Simpson 多样性指数	Shannon 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数
绥江 SJ	0.767±0.115	1.916±0.366	0.677±0.117	2.870±0.716
攀枝花 PZH	0.653±0.199	1.557±0.471	0.574±0.158	2.516±0.712
石鼓 SG	0.816±0.125	2.012±0.361	0.797±0.147	2.694±0.531
巧家 QJ	0.717±0.126	1.780±0.327	0.636±0.145	2.765±0.189
岗托 GT	0.712±0.059	1.446±0.248	0.761±0.055	1.149±0.183
奔子栏 BZL	0.646±0.104	1.376±0.254	0.603±0.101	1.698±0.114

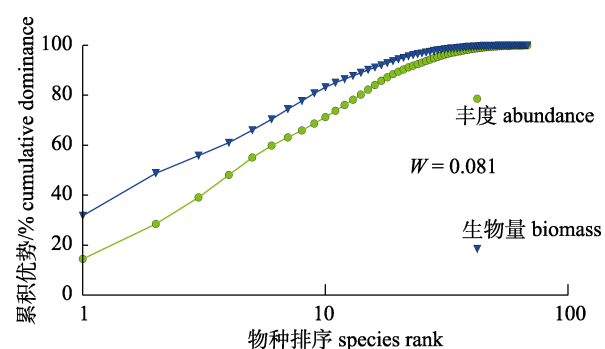


图 4 金沙江干流鱼类群落 ABC 曲线及 W 值统计
Fig. 4 ABC curve and W statistics of fish communities in the main stream of the Jinsha River

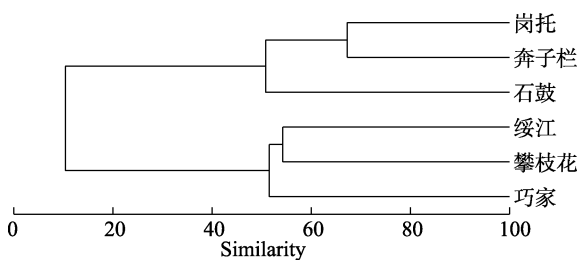


图 5 金沙江干流鱼类群落结构聚类
Fig. 5 Structural clustering of fish communities in the main stream of the Jinsha River

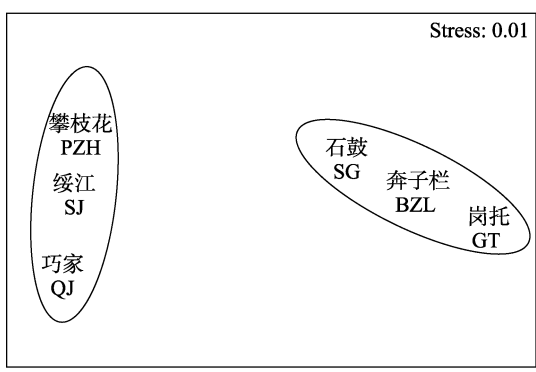


图 6 金沙江干流鱼类群落 NMDS 排序
Fig. 6 NMDS sorting of fish communities in the main stream of the Jinsha River

3 讨论

3.1 金沙江干流鱼类群落结构

金沙江干流鱼类的群落结构正在发生剧烈变化。根据历史调查数据(表 5), 金沙江流域最多拥有鱼类种类 214 种^[5](外来种 2 种), 而本研究的调查结果显示, 金沙江历史鱼类种类数减少, 外来种类数增多, 物种多样性处于减少趋势。从鱼类分布来看, 各站点的种类数均低于历史记录, 如

表 5 金沙江鱼类物种历史调查结果
Tab. 5 Historical investigation results of fish species in the Jinsha River

调查年份 survey year	调查区域 investigation area	鱼类种类数 number of fish species	参考文献 reference
1960	金沙江四川阿坝、甘孜河段	37	曹文宣等 ^[19]
1990	金沙江全流域	161	吴江等 ^[1]
2008–2011	金沙江下游干流	78	高少波等 ^[20]
2009–2012	金沙江攀枝花雅砻江口至格里坪江段	60	杨志等 ^[21]
2013–2017	金沙江干流攀枝花江段	65	邵科等 ^[7]
2019	金沙江全流域	214	孙赫英等 ^[5]
2017–2021	金沙江干流	98	杨海乐等 ^[22]
2022–2023	金沙江干流	68	本研究 this study

巧家段及其周围江段历史鱼类种类数 164 种^[11,23], 本研究在该站点发现的种类数为 33 种, 仅占 20.1%, 表明分布在该区域的绝大多数鱼类已经十分少见。从生态类型来看, 本次采集到的种类多为定居性、杂食性和底栖性鱼类, 分析可能受大坝阻隔和周围人类活动影响, 一些河道洄游性鱼类如白甲鱼、墨头鱼、泉水鱼、云南盘鮈等有所下降, 杂食性鱼类居多代表其具有较强的适应能力和较宽的生态位宽度^[24]。金沙江流域鱼类中鲤形目占比最高, 符合我国鱼类区系的共同特点^[5,25]。限于条件和长江禁渔管理, 本研究未能开展高强度多频次的渔获调查, 但本研究调查时间集中在鱼类繁殖期和索饵期等活动强度较高的时期, 已是现有条件下采集鱼类的较理想时段。

从渔获物组成来看, 本次渔获物调查采集鱼类 68 种, 其中物种组成以鲤形目最多, 占比 75.0%。曹文宣等^[19]记录了四川甘孜和阿坝等地区的金沙江鱼类 37 种。吴江等^[1]首次整理出金沙江流域共有 7 目 19 科 89 属, 共 161 种及亚种。本研究采集到了前述中报道的 57 种历史土著鱼类, 同时采集到的 7 种入侵鱼类在金沙江中下游河段较为多见, 尤其是巧家段采集到的齐氏罗非鱼和尼罗罗非鱼数量每网网次比例极高。从优势种来看, 鲢鳙的个体偏大, 在中下游河段生物量占比较大, 而齐氏罗非鱼的丰度占比较大, 进一

步表明外来鱼类对本土鱼类的生存胁迫加重。在金沙江中游渔获物种类中,变化最明显的是泉水鱼、墨头鱼、中华倒刺鲃等优良经济鱼类,在调查中丰度比例明显降低。调查发现,2022年春季、秋季的种类数差异很小,而2023年春季的种类数明显高于其他3个季度,但从 one-way ANOSIM 检验结果来看,4个季度发现的种类数在统计学上差异不显著($P>0.05$)。金沙江干流鱼类单位努力捕捞渔获量具有显著的空间分布特征,岗托与攀枝花、巧家、石鼓均存在显著差异($P<0.05$),且岗托的 CPUE 高于其他几个站点。分析其原因可能在于受当地藏民宗教习俗的影响对鱼类的保护优于其他地区^[26],且岗托的海拔高、生境受人为干扰程度较弱,其鱼类物种资源量较高,这也表明禁渔后金沙江流域渔业资源下降趋势略为缓和^[27-28]。

根据聚类和 NMDS 排序分析得知,鱼类群落组成可以划分成2组,其中上游3个点位岗托、奔子栏、石鼓为第Ⅰ组,河面较宽且水流湍急,适合高原鳅类和裂腹鱼类的生长;中下游3个点位巧家、攀枝花、绥江为第Ⅱ组,水流速度较慢,利于有机物沉积,营养物质丰富从而适合棒花鱼等小型鱼类生长发育。NMDS 排序中应力函数值 $\text{Stress}=0.01$,可以较好地解释聚类结果。由 SIMPER 分析可知,2022年春季和2023年春季鱼类组成差异显著,主要分歧种为张氏鲮、中华鲮、齐口裂腹鱼等,贡献值超过50%,印证了聚类分析结果。本研究调查结果中,张氏鲮、中华鲮、子陵吻虾虎鱼等均为短生命周期小型鱼类。禁渔后鱼类资源恢复过程中,因不同生活史和生态位差异,短生命周期鱼类有望快速恢复^[22]。

3.2 金沙江干流鱼类多样性特征

丰富度指数和均匀度指数反映了水域中鱼类种类数和物种分布情况,指数越高表明群落结构复杂度和稳定性越高^[29]。从 Shannon 多样性指数和 Margalef 丰富度指数来看,金沙江中下游的鱼类物种丰富度明显高于上游,分析其原因可能是上游海拔过高,常年气温普遍偏低,冷水性鱼类如裂腹鱼类和高原鳅类占主导,而中下游鱼类物种丰富度高与其气候偏暖、水文环境条件较为复

杂、栖息地环境丰富多样有关。但与屈霄等^[30]研究结果比较发现,本研究下游各站点的 Margalef 丰富度指数均低于历史数据,可能是因为采集的鱼类种数减少导致丰富度指数较低,这表明禁渔前期鱼类资源已然处于衰退状态。而本研究2022—2023年的 Margalef 丰富度指数逐渐增加(图3),这表明禁渔后期资源衰退有恢复趋势。从 Simpson 指数和 Peilou 均匀度指数来看,各采样点的鱼类群落结构复杂度较低,但稳定性处于正常水平。

$G-F$ 指数是一种将属间的多样性(G 指数)和科间的多样性(F 指数)进行分析处理后的标准化指数,可以对不同地区科级和属级层面的生物多样性进行比较^[17,31]。2022年春季 $G-F$ 指数高于2023年春季,表明2022年春季的鱼类在科、属水平上多样性相对较高。2022年秋季的 G 指数较高, $G-F$ 指数为负值,表明了其属间多样性较高。 $G-F$ 指数的大小与物种数的多少有关^[31],2023年的物种数相对高于2022年,但该季度捕获的鱼类名录中有7个单独种,因单独种对 F 指数贡献为0,所以其 $G-F$ 指数较低。

ABC 曲线显示丰度曲线在生物量曲线下方, W 值为正值,表明干流段的群落优势种是一种或几种大个体种类,群落优势种在一定程度上决定了生物量优势曲线和丰度优势曲线的位置^[32],此结果与本研究 IRI 分析结果一致,大型鱼类如鲢占主导。本研究表明,禁渔后鱼类群落受到的干扰较小。调查发现2022—2023年间,静水缓流性鱼类丰度和生物量占比有所增加,分析原因可能是梯级电站导致河流阻断水势变缓对喜缓流和静水环境的鱼类生存起到积极作用^[6,30]。李婷等^[33]研究表明金沙江下游梯级水库的拦阻使得鱼类群落生态类型差异显著,湖相段鱼类高于河相段鱼类。

3.3 金沙江鱼类资源威胁因素及保护建议

本研究表明,金沙江干流的土著鱼类资源仍处于衰退状态,其结果可能是多方面原因造成的。除了历史上的过度捕捞和正在进行的水电开发之外,外来物种入侵也成为了当地土著鱼类资

源衰退的重要原因^[34-35]。本研究发现,金沙江干流的外来鱼类已经多达 7 种。特别是在金沙江中下游的梯级水库中,以罗非鱼为代表的外来鱼类已经在当地建立了种群,并成为当地的主要渔获对象,需要引起足够警惕。

建议从以下几个方面改善金沙江流域种群资源和生物多样性: (1) 针对金沙江上游河段: 对开发及保护进行统筹规划,避免造成水域生态的不利影响,可通过收集珍稀土著鱼类种质资源、自然水文环境修复、科学开展濒危鱼类的增殖放流、加强禁渔政策执行力度等; (2) 针对中下游河段: 提升人工养殖繁育技术,监控外来鱼类种群动态,梯级电站联合生态调度,重视干支流生境修复和增加部分支流如牛栏江、黑水河等作为鱼类繁殖保护区。

参考文献:

- [1] Wu J, Wu M S. Fish fauna in Jinsha River[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 1990, 9(3): 23-26. [吴江, 吴明森. 金沙江的鱼类区系[J]. *四川动物*, 1990, 9(3): 23-26.]
- [2] Liu X W, Xu J J, Han Z M. Analysis on spatial-temporal distribution of precipitation in Jinsha River Basin and variation trend[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(15): 36-44. [刘晓婉, 许继军, 韩志明. 金沙江流域降水空间分布特征及变化趋势分析[J]. *人民长江*, 2016, 47(15): 36-44.]
- [3] Pan J G. Study on sediment transport characteristics in Jinsha River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(5): 35-39. [潘久根. 金沙江流域输沙特性分析[J]. *水土保持通报*, 1997, 17(5): 35-39.]
- [4] Lang N J, Guo L Q, Meng G T, et al. Analysis and research on diversity law of plateau mountainous region system of the Jinshajiang River valley[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(2): 33-40. [郎南军, 郭立群, 孟广涛, 等. 金沙江流域高原山地系统分异规律的分析研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(2): 33-40.]
- [5] Sun H Y, Sui X Y, He D K, et al. Fish systematic conservation planning in the Jinsha River Basin[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(S1): 110-118. [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.]
- [6] Wang J, Su W, Yang S R, et al. Variation characteristics of fish biodiversity in Suijiang section before and after impoundment of first phase of Jinsha River hydropower project[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(3): 394-401. [王俊, 苏巍, 杨少荣, 等. 金沙江一期工程蓄水前后绥江段鱼类群落多样性特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3): 394-401.]
- [7] Shao K, Yang Z, Tang H Y, et al. Changes of fish community structures in Panzhihua section of the Jinsha River before and after impoundment of the Guanyinyan hydropower station[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(11): 2417-2426. [邵科, 杨志, 唐会元, 等. 观音岩水电站蓄水前后金沙江攀枝花江段鱼类群落结构及变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(11): 2417-2426.]
- [8] Bai J. Species diversity and conservation of fish and benthic fauna in upper reaches of the Jinsha River[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021. [白洁. 金沙江上游鱼类及底栖动物多样性和保护[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.]
- [9] Li D Y, Li R H, Wu Z Q, et al. Species composition and diversity of fish in Dawangtan Reservoir in Nanning, Guangxi[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 110-117. [李德越, 李荣辉, 吴志强, 等. 广西南宁大王滩水库鱼类物种组成及多样性分析[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 110-117.]
- [10] Zhang Y S, Wang T, Hu Y B, et al. Relationship between fish community structure and environmental factors in the Yellow River from Yanguoxia to Heishanxia[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2023, 59(3): 303-313, 321. [张永胜, 王太, 虎永彪, 等. 黄河干流盐锅峡—黑山峡段鱼类群落结构与环境因子的关系[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(3): 303-313, 321.]
- [11] Ding R H. The Fishes of Sichuan, China[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994. [丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [12] Chu X L, Chen Y R. The fishes of Yunnan, China: Part I Cyprinidae[M]. Beijing: Science Press, 1989. [褚新洛, 陈银瑞. 云南鱼类志上册[M]. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [13] Chu X L, Chen Y R. The fishes of Yunnan, China: Part II Cyprinidae[M]. Beijing: Science Press, 1990. [褚新洛, 陈银瑞. 云南鱼类志下册[M]. 北京: 科学出版社, 1990.]
- [14] Wei Q W, Wu J M. Atlas of fishes in the national nature reserve for the rare and endemic fishes in the upper reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2015. [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.]
- [15] Wu H L, Shao G Z, Lai C F. Latin-Chinese dictionary of fishes names[M]. Jilong: The Sueichan Press, 1999. [伍汉霖, 邵广昭, 赖春福. 拉汉世界鱼类名典[M]. 基隆: 水产出版社, 1999.]

- [16] Ma S Q. Research on fish classification and functional diversity—Take the fish of Jinan as an example[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2020. [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.]
- [17] Jiang Z G, Ji L Q. Avian-mammalian species diversity in nine representative in China[J]. Biodiversity Science, 1999, 7(3): 220-225. [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.]
- [18] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. Marine Biology, 1986, 92(4): 557-562.
- [19] Cao W X, Wu X W. Fish biology and fishery problems in Ganzi Aba area of western Sichuan[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1962(2): 79-111. [曹文宣, 伍献文. 四川西部甘孜阿坝地区鱼类生物学及渔业问题[J]. 水生生物学集刊, 1962(2): 79-111.]
- [20] Gao S B, Tang H Y, Qiao Y, et al. Status of fishery resources in the mainstream of the lower reaches of Jinsha River[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(1): 44-49. [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.]
- [21] Yang Z, Tang H Y, Zhu D, et al. Temporal distribution patterns of fish community structure and species composition in the Panzhihua section of the Jinsha River[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(5): 43-51. [杨志, 唐会元, 朱迪, 等. 金沙江干流攀枝花江段鱼类种类组成和群落结构研究[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 43-51.]
- [22] 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.]
- [23] Yu X D, Luo T H, Zhou H Z. Large-scale patterns in species diversity of fishes in the Yangtze River Basin[J]. Biodiversity Science, 2005, 13(6): 473-495. [于晓东, 罗天宏, 周红章. 长江流域鱼类物种多样性大尺度格局研究[J]. 生物多样性, 2005, 13(6): 473-495.]
- [24] Meng Z H, Li X M, Wang X G, et al. Fish community structure and diversity in Duhe River, a tributary of Hanjiang River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(2): 300-306. [孟子豪, 李学梅, 王旭歌, 等. 汉江支流堵河鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2022, 41(2): 300-306.]
- [25] Li H L, Zhao Y H, Zhang J, et al. Comparison on fish species diversity between the lower reaches of the Jinsha River and National Nature Reserve for the rare and endemic fishes in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(6): 104-108. [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较[J]. 淡水渔业, 2014, 44(6): 104-108.]
- [26] Zhu T B, Chen L, Yang D G, et al. Distribution and habitat character of Schizothoracinae fishes in the middle Yarlung Zangbo River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(10): 2817-2823. [朱挺兵, 陈亮, 杨德国, 等. 雅鲁藏布江中游裂腹鱼类的分布及栖息地特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2817-2823.]
- [27] Tang H Y, Yang Z, Gao S B, et al. Annual dynamics of fish biodiversity and community structure in the non-impounded reaches of the lower Jinsha River: Case study of the Qiaojia section[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(6): 7-15. [唐会元, 杨志, 高少波, 等. 金沙江下游巧家江段鱼类生物多样性及群落结构的年际动态[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(6): 7-15.]
- [28] Fan Z H, Ba J W, Duan X B. Studies on fish resources and species diversity in the middle reaches of the Yangtze River from Yichang to Chenglingji section[J]. Freshwater Fisheries, 2012, 42(4): 20-25. [范振华, 巴家文, 段辛斌. 长江宜昌至城陵矶江段鱼类资源现状及物种多样性研究[J]. 淡水渔业, 2012, 42(4): 20-25.]
- [29] Wang Y P, Kuang Z, Lin D Q, et al. Community structure and species diversity of fish around the Xinzhou shoal in the Anqing section of the Yangtze River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2417-2426. [王银平, 匡箴, 蔺丹清, 等. 长江安庆新洲水域鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2417-2426.]
- [30] Qu X, Guo C B, Xiong F Y, et al. Characterization of the fish community and environmental driving factors during development of cascaded dams in the lower Jinsha River[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(6): 46-56. [屈霄, 郭传波, 熊芳园, 等. 梯级开发下金沙江下游鱼类群落结构特征及环境驱动因子[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(6): 46-56.]
- [31] Sun P, Wang Y X, Tian K, et al. Taxonomic diversity of fish species in five bays in Zhejiang Province[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(6): 1325-1333. [孙鹏, 王咏雪, 田阔, 等. 浙江 5 个海湾鱼类分类多样性研究[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(6): 1325-1333.]
- [32] Li Z Y, Wu Q, Shan X J, et al. Interannual variations in fish community structure in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(2): 403-413. [李忠义, 吴强, 单秀娟, 等. 渤海鱼类群落结构的年际变化[J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 403-413.]
- [33] 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.]
- [34] Daga V S, Skóra F, Padial A A, et al. Homogenization dynamics of the fish assemblages in Neotropical reservoirs: Comparing the roles of introduced species and their vectors[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 746(1): 327-347.
- [35] de Andrade Frehse F, Braga R R, Nocera G A, et al. Non-native species and invasion biology in a megadiverse country: Scientometric analysis and ecological interactions in Brazil[J]. *Biological Invasions*, 2016, 18(12): 3713-3725.

Fish community structure and species diversity in the main stream of the Jinsha River in the early ten-year fishing ban

WANG Zhongyuan^{1,2}, ZHU Tingbing², HU Feifei², GONG Jinling², GUO Zhibin², LI Xuemei², YANG Deguo²

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Wuhan 430223, China

Abstract: Based on catch survey data from six stations (Gangtuo, Benzilan, Shigu, Panzhihua, Qiaojia, and Suijiang) in the Jinsha River main stream from May 2022 to November 2023, we analyzed the current status of the composition of the fish community, characteristics of the dominant species, spatial and temporal distribution of the diversity of the community, and proposed conservation measures for fish in the Jinsha River main stream. The study collected a total of 68 fish species, distributed across 4 orders, 15 families, and 48 genera. Cypriniformes were the most abundant (51 species), accounting for 75.0% of the total species count. Among these, 5 species were nationally protected fishes, while 7 were exotic. The ecological types of the collected fish mainly included omnivorous, benthic, and sedentary fishes, representing 66.18%, 44.12%, and 72.06%, respectively. The dominant species within the community were *Hypophthalmichthys molitrix*, *Coptodon zillii*, and *Schizothorax dolichonema*. Various diversity indices were calculated: the Shannon-Wiener diversity index (H'), Simpson diversity index (D'), Peilou evenness index (J'), and Margalef richness index (R'). These indices ranged from 1.376 to 2.012, 0.646 to 0.816, 0.574 to 0.797, and 1.149 to 2.870, respectively. ANOVA analysis revealed the temporal variations in the four diversity indices were not significant ($P>0.05$). However, spatial differences were observed to be significant ($P<0.05$). ABC curve analysis showed that the biomass curve was above the abundance curve, and the W statistic value was positive, indicating that the community was less perturbed, but there were some changes in fish species and ecotypes compared with the historical records. The genera and family diversity indices ($G-F$) in 2022–2023 decreased from 0.29 to 0.19, but the number of species relatively increased; the results of cluster analysis and NMDS ordination analysis showed that the fish communities in the mainstem Jinsha River section were divided into 2 groups: Gangtuo, Benzilan, and Shigu in one group; and Qiaojia, Panzhihua, and Suijiang as the other. The similarity percentage (SIMPER) analysis showed that the species composition of the fish communities varied significantly among different seasons, and the main divergent species were *Hemiculter tchangii* and *Rhodeus sinensis*. As a systematic survey conducted after the fishing ban, the present results served as a benchmark for evaluating the ban's effectiveness on the Yangtze River. Based on these results, it is recommended to enhance the management of the fishing ban, monitor the population dynamics of exotic species, and implement habitat restoration efforts in both the main stream and tributary streams to safeguard the fish diversity of the Jinsha River.

Key words: main stream of the Jinsha River; fish; species composition; community structure; species diversity

Corresponding author: YANG Deguo, E-mail: yangdg@yfi.ac.cn; ZHU Tingbing, E-mail: zhutb@yfi.ac.cn