

## 2017—2022年雅砻江甘孜以下干流及部分支流鱼类种类组成及群落结构\*

熊美华<sup>1</sup>, 董微微<sup>1</sup>, 刘小帅<sup>2</sup>, 朱 滨<sup>1</sup>, 宋以兴<sup>2</sup>, 胡兴坤<sup>1</sup>, 曾 昌<sup>1</sup>, 余 丹<sup>1</sup>, 邵 科<sup>1\*\*</sup>

(1: 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心, 武汉 430079)

(2: 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610056)

**摘要:** 基于 2017—2022 年在雅砻江甘孜以下干流及部分支流的鱼类监测数据, 采用多样性指数和多元统计方法分析了该流域的鱼类群落结构。通过在雅砻江干流和 6 条支流 21 个采样点的监测及相关文献调研共获得鱼类 98 种, 包括 9 种国家二级重点保护鱼类和 28 种长江上游特有鱼类。除干流下游 Margalef 丰富度指数外, 其他区域多样性指数值相差不大; 干流上、中、下游和 6 条支流间鱼类生物多样性不存在显著差异。Cluster 分析和 NMDS 分析表明鱼类群落可以分成 6 组, ANOSIM 检验表明 6 组间存在显著性差异, 6 组在海拔和河流等级上存在极显著和显著性差异。分别计算 6 个聚类组的优势种和常见种, 并从栖息类型、食性和产卵类型上进行分析, 结果显示 6 组在栖息类型和产卵类型上差异显著。二滩库区和鲢鱼河静缓流河段优势种为翘嘴鲈 (*Culter alburnus*)、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 等, 建议加强对下游流域外来物种的监测, 避免发生大规模生物入侵现象。自 1980s 以来, 雅砻江下游流域鱼类种类组成发生了明显变化, 推测与梯级电站修建运行等造成生境改变有关。

**关键词:** 鱼类群落结构; 多元统计分析; 优势种; 生物入侵; 雅砻江流域

## Species composition and community structure of fish in the main stream and some tributaries of the Yalong River below Ganzi from 2017 to 2022\*

Xiong Meihua<sup>1</sup>, Dong Weiwei<sup>1</sup>, Liu Xiaoshuai<sup>2</sup>, Zhu Bin<sup>1</sup>, Song Yixing<sup>2</sup>, Hu Xingkun<sup>1</sup>, Zeng Chang<sup>1</sup>, Yu Dan<sup>1</sup> & Shao Ke<sup>1\*\*</sup>

(1: Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources, Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration, Wuhan 430079, P.R.China)

(2: Yalong River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610056, P.R.China)

**Abstract:** Based on fish monitoring data in the main stream and some tributaries of the Yalong River below Ganzi from 2017 to 2022, the fish species composition and community structure were analyzed by using diversity index and multivariate statistical methods. A total of 98 fish species were obtained based on literature research and fish monitoring at 21 sampling sites in the main stream and six tributaries, including nine national second-class protected fishes and 28 endemic species in the upper reaches of the Yangtze River. There was no significant variation in fish biodiversity index between the main stream and six tributaries. Cluster analysis and NMDS analysis showed that the fish community could be divided into six groups. ANOSIM test showed a significant difference among the six groups. Extremely significant differences in altitude and significant differences in river order were analyzed using ANOVA among the six groups. The dominant species and common species of the six cluster groups were calculated respectively. The habitat types, feeding habits, and spawning types were analyzed. The results suggested that the six groups had significant differ-

\* 2023-03-21 收稿; 2023-05-16 收修改稿。

雅砻江流域水电开发有限公司项目 (0023-19ZB0139) 和水利部三峡工程管理局三峡后续工作项目 (12620200600020J005) 联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: shaoke86@mail.ihe.ac.cn。

ences in habitat type and spawning type. Introduced species *Culter alburnus* and *Oreochromis niloticus* were the dominant species in the slow-flowing reaches of the Ertan and Ganyu River. It is suggested to strengthen the monitoring of introduced and alien species in the downstream area of the Yalong River to avoid large-scale biological invasion. Since the 1980s, the fish species composition in the lower reaches of the Yalong River has changed significantly, which is likely due to habitat change, the construction of power stations, and other anthropogenic activities.

**Keywords:** Fish community structure; multivariate statistical analysis; dominant species; biological invasion; Yalong River

雅砻江(26°32′~33°58′N, 96°52′~102°48′E)处于青藏高原东南缘,是金沙江最大的支流,也是长江的八大支流之一<sup>[1]</sup>。雅砻江河源至新龙县乐安乡尼托村为上游河段,尼托至理塘河口为中游河段,理塘河口至雅砻江金沙江汇口为下游河段<sup>[2]</sup>。雅砻江全流域地势总体表现为西北高、东南低,由源头海拔超过 5000 m 降至河口约 980 m,河流下切强烈,地形十分复杂<sup>[1]</sup>;地貌上跨越了高原区、盆地中山区等;气候上跨越南、中、北亚热带,暖温带,寒温带等气候区;上、中、下游水文特点差异较大,造就了雅砻江流域独特的鱼类组成、资源类型、区系分布的突出特征<sup>[3-9]</sup>。对雅砻江流域层面的鱼类资源调查主要有邓其祥<sup>[4]</sup>在 1968 年、1980—1984 年在雅砻江干支流开展的鱼类调查,吴江等<sup>[5]</sup>在 1983—1984 年间开展的雅砻江渔业自然资源调查,丁瑞华通过收集和检视有关单位的标本整理了包括雅砻江流域在内的四川鱼类<sup>[10]</sup>,张春光等在 2008—2017 年间开展了金沙江流域包括雅砻江的鱼类调查<sup>[11]</sup>,郭延蜀等通过近 20 余年的调查和收集整理出版了包括雅砻江鱼类的《四川鱼类原色图志》<sup>[12]</sup>。其他相关研究多集中在区域层面或局部水域,如雅砻江下游<sup>[6-7,9]</sup>、锦屏一级和二级电站<sup>[13-15]</sup>工程水域、二滩库区<sup>[16-19]</sup>及雅砻江支流如力丘河<sup>[20]</sup>、鲢鱼河<sup>[21]</sup>、安宁河<sup>[22-23]</sup>等的调查。

雅砻江流域水力资源丰富,干流共规划 21 座水电站,下游 5 座梯级水电站目前已全部建成运行;中游两河口、杨房沟水电站已于 2021 年蓄水发电<sup>[24-25]</sup>。梯级电站的建设运行会导致一系列水文、生境等因素的变化,如阻隔河流连通性,改变河流自然形态从而引起河相向湖相的转变,且电站不同运行时长等因素都会对鱼类群落组成和结构造成影响<sup>[26-29]</sup>。目前仅邓其祥等<sup>[16-17]</sup>、蒋红等<sup>[18]</sup>和何莎<sup>[19]</sup>基于二滩水库修建前后鱼类资源的变化,分析了二滩水库建成后鱼类种类组成的演变,但缺乏对现阶段流域层面鱼类资源分布状况等的研究报道。

本文基于 2017—2022 年对雅砻江流域鱼类资源进行的较系统的调查及该期间相关学者所发表的文献资料,分析在雅砻江这种特殊地形地貌背景下鱼类随流域纵向梯度变化的情况,为探讨鱼类群落构建机制及相关影响因素提供基础;结合该流域鱼类历史资料,分析雅砻江鱼类种类组成和结构的变化,为该流域鱼类种质资源保护提供科学依据;结合干流梯级电站建设完成情况,分析鱼类种群聚类情况及优势种,提出在下游梯级电站运行背景下土著鱼类的针对性保护措施建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集地点

2017—2022 年根据鱼类区系研究方法,对雅砻江流域进行鱼类资源调查,调查范围包括甘孜至雅砻江河口等干流区域及与干流水电工程相关的支流,其中,上游、中游、下游干流分别设置 2、3、8 个采样点,中游支流鲜水河、卧龙寺沟和霍曲河分别设置 2、1 和 1 个,下游支流理塘河、永兴河和鲢鱼河分别设置 2、1 和 1 个,具体采样点设置情况见图 1 和附表 I。河流等级的划分依据 Horton<sup>[30]</sup>提出的水系组成理论,把干流作为 1 级河流,汇入干流的支流作为 2 级河流,汇入 2 级河流的支流作为 3 级河流。

### 1.2 样品采集方法

采取科研特许捕捞方法,采用刺网、地笼、饵钓钩等(附表 I)网具在捕捞许可范围内采集鱼类标本、测量生物学信息、做好记录,对于存活鱼类将其放回捕捞水域,对于已死亡鱼类,将其用 10% 福尔马林溶液固定保存以制作成标本,对不确定种类采集分子样品,并用无水乙醇保存。鱼类种类依据形态特征参考相关文献和书籍<sup>[10-12,31-33]</sup>进行鉴定,鱼名拉丁名参照 Fishbase、郭延蜀等<sup>[12]</sup>的标准,逐尾测量鱼类体质量(精确至 0.1 g)等生物学指标,记录采集时间和采集地点等相关信息。通过对样本的分类鉴定,资料的分析整理,并综合 2017—2022 年所发表文献<sup>[13,20]</sup>,编制出雅砻江流域鱼类种类组成名录表。其中,本调查中福建纹胸鲃(*Glyptothorax fokiensis* (Rendahl))改为了中华纹胸鲃(*Glyptothorax sinensis* (Regan))<sup>[34]</sup>,裂腹鱼属(*Schizo-*

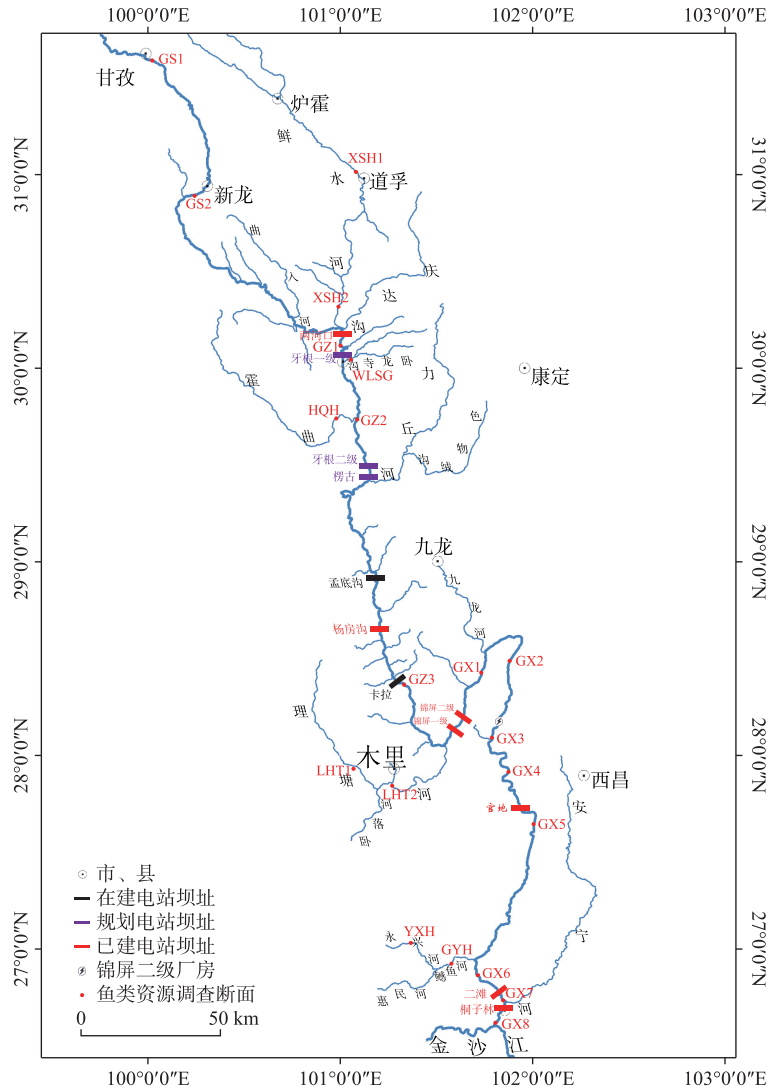


图1 雅砻江流域鱼类采样点分布

Fig.1 Distribution of fish sampling sites in the Yalong River

*thorax*) 鱼类采用形态鉴定和分子鉴定相结合的方式确定种类,分子鉴定所用的标记为线粒体 *Cytb* 基因。

### 1.3 数据处理与分析

采用 Shannon 多样性指数 ( $H'$ )<sup>[35]</sup>、Simpson 优势度指数 ( $C$ )<sup>[36]</sup>、Margalef 种类丰富度指数 ( $R$ )<sup>[37]</sup>、Pielou 均匀度指数 ( $J$ )<sup>[38]</sup> 分析不同河段鱼类群落结构特征,各指数值依据每种鱼类尾数,采用 Microsoft Excel 2019 进行统计和计算获得。

基于原始渔获物丰度矩阵,经平方根转换后以 Bray-Curtis 相似性系数为基础构建不同采样点的相似性矩阵,采用层次聚类 Cluster 方法和非度量多维尺度分析 (NMDS) 对各采样区域鱼类群落进行分组,了解各采样区域鱼类群落结构的变化。依据协强系数 (Stress) 来衡量 NMDS 分析结果的可信度:当 Stress<0.05 时,具有很好的代表性,可信度最高;当 Stress<0.1 时,可以认为是一个好的排列;当 Stress<0.2 时,认为该结果有一定的解释意义,但有部分细节不可靠,可用 NMDS 的二维点图表示<sup>[39-40]</sup>。采用单因素的相似性分析 (one-way ANOSIM) 对分组数据进行差异检验,判断该分组结果的正确性<sup>[41]</sup>。Cluster、NMDS 和 ANOSIM 检验通过

生态统计软件 Primer 6.0 进行。

以相对重要性指数(index of relative importance, IRI)判断鱼类群落优势种<sup>[42]</sup>。将 IRI 值 $\geq 1000$  的物种确定为优势种,将  $1000 > \text{IRI} \geq 500$  的物种确定为常见种。

按照鱼类栖息的环境、食性和产卵类型进行生态类型划分。依据鱼类栖息的环境可将鱼类划分为急流型、缓流型和静水型;按食性可划分为肉食性、杂食性和植食性;按产卵类型可划分为(黏)沉性卵、浮性卵、黏性卵、漂流性卵、蚌内产卵、筑巢产卵和体内受精等<sup>[43]</sup>,其中,将具有微黏性但沉在水底发育的黏沉性卵与沉性卵划分为同一类,即(黏)沉性卵。

所有分析数据均为本研究野外调查数据,不包含文献记载数据。

## 2 结果

### 2.1 种类组成

2017—2022 年间在雅砻江流域共收集到渔获物 8691 尾,体质量达 124.28 kg;隶属于 3 目 12 科 59 属 94 种(亚种),结合相关文献资料<sup>[13,20]</sup>整理得到 2017—2022 年间雅砻江流域鱼类 98 种(亚种)(附表 II),隶属于 4 目 13 科,其中鲤形目鱼类种类数最多,包含鲤科、平鳍鳅科和鳅科 3 科,共 72 种,占鱼类种类总数的 73.5%;其次为鲇形目鱼类,包括鲇科、鲰科、钝头鲩科、鮡科和鮠科 5 科,共 19 种鱼类,占鱼类种类总数的 19.4%;鲈形目鱼类包括 4 科,为丽鱼科、鮨科、太阳鱼科和虾虎鱼科,共 6 种,占比为 6.1%;鲑形目鱼类包括 1 科 1 种。其中,境外引入种有 6 种,为大鳞鲃(*Luciobarbus capito* (Güldenstädt))、散鳞镜鲤(*Cyprinus carpio specularis* Lacepède)、斑点叉尾鮰(*Ictalurus punctatus* (Rafinesque))、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum))、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus* (Linnaeus))、大口黑鲈(*Micropterus salmoides* (Lacepède));黄河特有种 1 种,为花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni* Herzenstein)<sup>[12]</sup>。

在雅砻江上游干流共监测到鱼类 9 种,均隶属于鲤形目鱼类,包含鲤科和鳅科,其中鳅科仅 1 种,为泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus* (Cantor)),其他 8 种均为鲤科鱼类,其中 5 种为裂腹鱼属鱼类。中游干流共监测到鱼类 26 种,除 4 种为鲇形目鱼类外,其他均为鲤形目鱼类,其中鲤科鱼类最多,有 15 种,平鳍鳅科鱼类次之,有 4 种,在属层面,裂腹鱼属鱼类最多,有 6 种。下游干流共监测到鱼类 82 种,其中鲤形目鱼类 56 种,鲇形目鱼类 19 种,鲈形目鱼类 6 种,鲑形目鱼类 1 种。从上游、中游到下游,鱼类种类数逐渐增多。雅砻江支流中,鲜水河共采集到 11 种鱼类,鱼类种类与上游干流类似,卧龙寺沟共采集到 5 种鱼类,霍曲河采集到 3 种鱼类,力丘河记载鱼类 13 种<sup>[20]</sup>;下游支流理塘河共采集到 17 种鱼类,鳊鱼河采集到 13 种鱼类,鳊鱼河支流永兴河采集到 7 种鱼类。

在上游、中游和下游河段均采集到 4 种裂腹鱼属鱼类,分别为短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii* (Fang))、长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema* Herzenstein)、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti* (Tchang))和四川裂腹鱼(*Schizothorax kozlovi* Nikolsky),其中,在支流鲜水河、力丘河和理塘河也采集到了这 4 种鱼类,另一种细鳞裂腹鱼(*Schizothorax chongi* (Fang))在卡拉以上河段未监测到;支流鳊鱼河未监测到裂腹鱼属鱼类,且鳊鱼河与其支流永兴河未监测到共有鱼类。

依据生态类型(图 2)进行分析,按栖息类型,急流型鱼类分别占总数量和总体质量的 47.91% 和 61.93%,静水型鱼类分别占总数量和总体质量的 29.89% 和 19.44%,缓流型鱼类分别占总数量和总体质量的 22.2% 和 18.63%;按食性分类,杂食性鱼类分别占总数量和总体质量的 78.09% 和 78.30%,肉食性鱼类分别占总数量和总体质量的 21.36% 和 18.73%,植食性鱼类分别占总数量和总体质量的 0.55% 和 2.97%;按产卵类型,产黏性卵鱼类分别占总数量和总体质量的 49.12% 和 24.75%,产(黏)沉性卵鱼类分别占总数量和总体质量的 39.33% 和 61.24%,产漂流性卵鱼类分别占总数量和总体质量的 7.18% 和 11.94%,产浮性卵鱼类分别占总数量和总体质量的 0.51% 和 0.91%,筑巢产卵鱼类分别占总数量和总体质量的 2.16% 和 0.97%,体内受精产沉性卵鱼类分别占总数量和总体质量的 1.19% 和 0.18%,蚌内产卵鱼类分别占总数量和总体质量的 0.52% 和 0.01%。

### 2.2 珍稀特有鱼类监测结果

2017—2022 年间通过监测和整理获得圆口铜鱼(*Coreius guichenoti* (Sauvage et Dabry))、长鳍吻鮡(*Rhinogobio ventralis* (Sauvage et Dabry))、金沙鲈鲤(*Percocypris pingi* (Tchang))、细鳞裂腹鱼、重口裂腹鱼

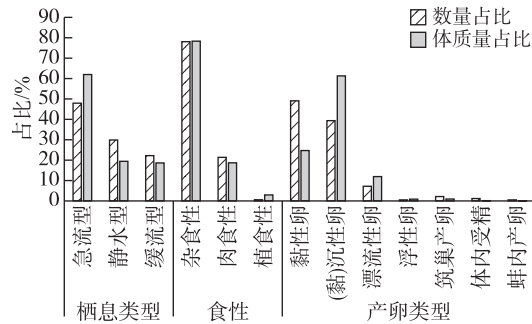


图2 雅砻江流域鱼类生态类型组成

Fig.2 Composition of fish ecological types in the Yalong River

(*Schizothorax davidi* (Sauvage))、厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus* Herzenstein)、岩原鲤(*Procypris rabaudi* (Tchang))、长薄鳅(*Leptobotia elongata* (Bleeker))和青石爬鮡(*Euchiloglanis davidi* (Sauvage)) 9种国家二级重点保护鱼类;监测到长江上游特有鱼类雅砻白鱼(*Anabarilius liui yalongensis* Li et Chen)、厚颌鲂(*Megalobrama pellegrini* (Tchang))、圆口铜鱼等28种(附表II),其中在干流上、中、下游监测到的特有鱼类种类数分别为5、13、22种,与各河段整体鱼类种类数变化趋势一致,在支流鲜水河、卧龙寺沟、霍曲河、力丘河、理塘河、鳧鱼河和永兴河分别监测和整理得到特有鱼类7、1、3、8、8、1和4种,变化趋势与各支流整体鱼类种类数不同。

### 2.3 生物多样性分析

从图3可以看出,干支流各区域 Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数没有明显差异;Margalef 丰富度指数和鱼类物种数变化趋势较一致,在雅砻江下游河段最高;支流中鲜水河和理塘河丰富度指数值较高,卧龙寺沟和霍曲河较低,均低于1;干支流各区域 Shannon 多样性指数值有一定波动,在上、中、下干流区域多样性相差不大,支流理塘河多样性指数值最高,霍曲河最低。

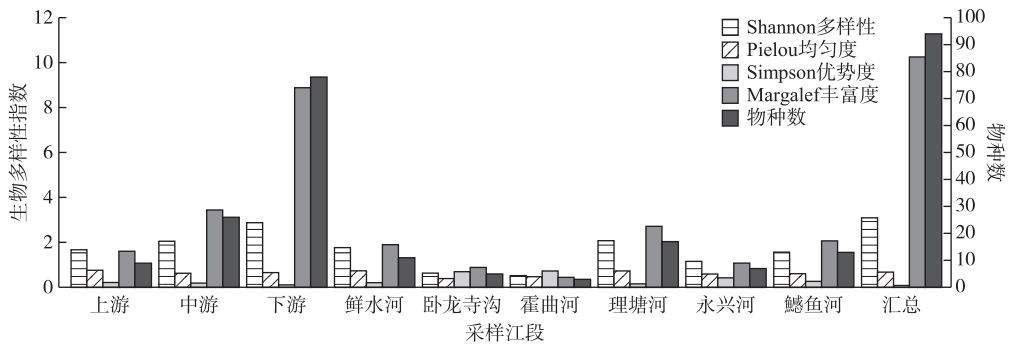


图3 干流上、中、下游及各支流鱼类生物多样性指数

Fig.3 Fish community biodiversity index in the Yalong River

将雅砻江鱼类按照干支流分成2组,干流上、中、下游为第1组,6条支流为第2组,对两组所有指数值进行单因素方差分析,结果表明:Shannon 指数( $F = 5.07, P = 0.059$ )、Simpson 优势度指数( $F = 2.80, P = 0.138$ )、Margalef 丰富度指数( $F = 4.48, P = 0.072$ )和 Pielou 均匀度指数( $F = 1.47, P = 0.265$ )等在0.05水平上差异均不显著,说明干支流鱼类生物多样性不存在显著差异。

### 2.4 鱼类群落结构及相似性分析

依据21个采样点的鱼类种类和相对丰度数据分析鱼类群落结构,Cluster 聚类分析表明:在44.36%的 Bray-Curtis 相似性水平上,可将雅砻江干支流21个采样河段分成6组(图4),组1为下游官地至中游卡拉

的干支流河段,具体包括干流 5 个采样点 (GZ3、GX1 至 GX4) 和支流理塘河 2 个采样点 (LTH1、LTH2);组 2 为卡拉往上中上游干流及支流鲜水河河段,具体包括上游干流 2 个采样点 (GS1、GS2)、中游干流 2 个采样点 (GZ1、GZ2) 和支流鲜水河 2 个采样点 (XSH1、XSH2),2021 年建成的杨房沟水电站位于该聚类组所有采样点以下,两河口水电站 2021 年运行,仅 GZ2 采样点样品是运行后采集的,因此该组鱼类所栖息的河段基本处于天然状态,几乎还未受电站蓄水运行影响;组 3 为鲢鱼河支流永兴河;组 4 包括 GX5(金河)、GX7(得石)、GX8(雅砻江河口)等二滩电站建设运行后依旧留存的 3 个流水河段;组 5 为 GX6(二滩)和 GYH(鲢鱼河)两个静缓流河段;组 6 为中游霍曲河(HQH)和卧龙寺沟(WLSG)两个支流河段。One-way ANOSIM 检验结果表明这 6 组间的群聚结构在统计学上的差异显著(全局  $R=0.951$ ,  $P=0.001$ , 置换检验 999 次)。NMDS 分析的胁强系数  $0.08 < 0.1$ ,表明该聚类结果基本可信,是一个好的排列(图 5)。

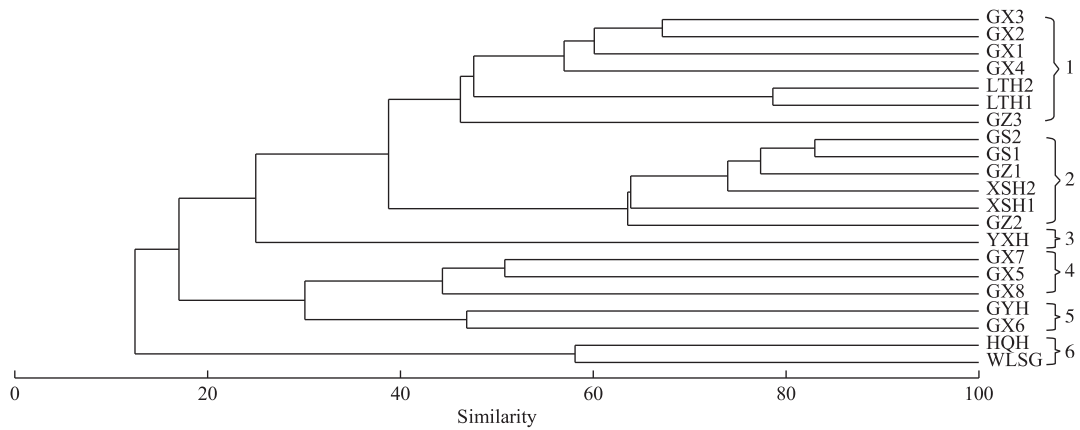


图 4 21 个采样河段鱼类 Cluster 聚类分析

Fig.4 The cluster analysis of fishes at 21 sampling sites

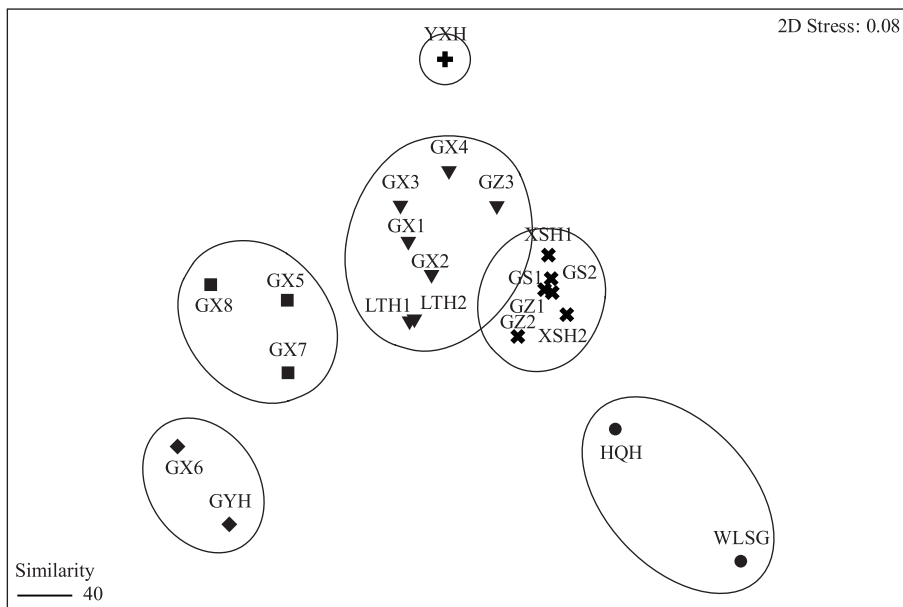


图 5 21 个采样河段鱼类非度量多维尺度分析(NMDS)

Fig.5 NMDS analysis of fishes at 21 sampling sites

对6个聚类组的海拔和河流等级进行单因素方差分析,结果显示,6个组在海拔上( $F=31.53, P<0.001$ )存在极显著差异,在河流等级上( $F=3.57, P<0.05$ )存在显著性差异。

### 2.5 优势种及生态类型

依据 Cluster 聚类分析结果,雅砻江鱼类被分成6组,在此基础上分析每组的优势种、常见种、平均体重及其生态类型情况,结果显示:组1(干流5个采样点(GZ3、GX1~GX4)和支流理塘河(LTH1、LTH2))优势种有:短须裂腹鱼、长丝裂腹鱼、鲤(*Cyprinus carpio* (Linnaeus))、金沙鲈鲤,常见种有鲇(*Silurus asotus* Linnaeus)、齐口裂腹鱼,鲤平均体重最大,3种裂腹鱼个体较小,平均体重均低于250 g;组2(卡拉往上中上游干流河段及支流鲜水河)优势种有:长丝裂腹鱼、短须裂腹鱼、四川裂腹鱼、齐口裂腹鱼,平均体重在200~310 g之间;组3(二级支流永兴河)优势种有:短须裂腹鱼、红尾荷马条鳅(*Homatula variegatus* (Sauvage et Dabry))、短体荷马条鳅(*Homatula potanini* (Günther)),常见种有云南盘鮡(*Discogobio yunnanensis* (Regan)),这4种鱼类个体均偏小,除短须裂腹鱼外,另3种鱼类平均体重在10 g以下;组4(金河、得石、雅砻江河口等流水河段)优势种有鲮(*Hemiculter leucisculus* (Basilewsky))、短须裂腹鱼、鲤、圆口铜鱼,常见种有鮡(*Aristichthys nobilis* (Richardson))、凹尾拟鲿(*Pseudobagrus emarginatus* (Regan))、齐口裂腹鱼、细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼,鮡个体最大,平均体重达1278.3 g,其次是鲤、细鳞裂腹鱼、短须裂腹鱼和圆口铜鱼,平均体重在400 g以上;组5(二滩和鳧鱼河等静缓流河段)优势种有翘嘴鲌(*Culter alburnus* Basilewsky)、尼罗罗非鱼、鲮、鳊(*Carassius auratus* (Linnaeus)),常见种有鲢(*Hypophthalmichthys molitrix* (Valenciennes))、鲂(*Megalobrama mantschuricus* Basilewsky)、鳊(*Siniperca chuatsi* (Basilewsky)),此聚类组鮡个体最大,其次为鲢;组6(霍曲河、卧龙寺沟中游2条支流河段)优势种有软刺裸裂尻鱼(*Schizopygopsis malacanthus malacanthus* Herzenstein)和短须裂腹鱼,个体均偏小(表1)。

对各组优势种的栖息类型、食性和产卵类型进行分析发现,各组优势种与鱼类生态类型有一定的关联性,如组2为卡拉往上中上游干流河段及支流鲜水河基本处于天然状态的河段,优势种和常见种均为急流型、杂食性鱼类,并产(黏)沉性卵;组5为二滩及鳧鱼河的静缓流河段,该组5种优势种均为静水型或缓流型鱼类,产卵类型多为黏性卵,与其他组流水性河段优势种生态类型差异较大。对6个聚类组优势种和常见种从栖息类型、食性、产卵类型上进行单因素方差分析,结果表明6组优势种在栖息类型( $F=3.09, P<0.05$ )和产卵类型( $F=2.846, P<0.05$ )上差异显著,仅在食性上差异不显著。

## 3 讨论

### 3.1 鱼类种类组成及其变化

2017—2022年调查期间通过监测和资料调研共获得雅砻江干支流鱼类98种,除去6种境外引入种和1种黄河特有种,还有91种鱼类,明显多于刘成汉<sup>[3]</sup>在1958—1959年期间调查和整理文献所获得的40种,可能原因与刘成汉仅对支流安宁河进行了实地调查有关,雅砻江干流的鱼类是通过查阅资料所得,因此整体种类数较少。吴江等<sup>[5]</sup>在1983—1984年开展了雅砻江渔业自然资源调查,共获得鱼类92种,与本调查种类数接近。邓其祥<sup>[4]</sup>在1968年、1980—1984年间对雅砻江干支流进行调查,并结合历史资料整理出鱼类种类89种,其中还包括泸沽湖和邛海等区域鱼类。张春光等经过实地调查和文献调研报道雅砻江流域分布土著鱼类72种<sup>[11]</sup>,少于本文监测和调研的种类数。不同文献报道雅砻江流域鱼类种类数的差异可能与调查网具、调查强度等有很大关系。

本研究在下游干支流(干流及支流理塘河、鳧鱼河和永兴河)所获得的鱼类共87种,其中贝氏高原鳅(*Triplophysa bleekeri* (Sauvage et Dabry))、青石爬鮡、黄石爬鮡(*Euchiloglanis kishinouyei* Kimura)和虹鳟来自刘猛等<sup>[13]</sup>2018—2019年在大河湾的调查,其余83种为笔者调查所得,比杨青瑞等<sup>[9]</sup>报道的2007—2008年雅砻江下游75种鱼类多,可能与调查时长有关,本调查历时6年,比杨青瑞等开展的调查时间长4年,可能会影响一些偶见种如雅砻白鱼、裸体异鰾鳅(*Xenophysogobio nudicorpa* (Huang et Zhang))、中华鳊(*Rhodeus sinensis* Günther)和白甲鱼(*Onychostoma sima* (Sauvage et Dabry))等的调查情况。邓其祥<sup>[7]</sup>报道1983—1984年间在雅砻江小金河口至雅砻江河口区域获得鱼类118种(亚种),剔除邛海、彝海和泸沽湖3个湖泊独有的7种鱼类和资料记载而未调查到的种类,还剩83种,为实际调查所获得的雅砻江下游干支流鱼类种

表 1 Cluster 聚类组优势种组成及生态类型\*  
Tab.1 Composition of the dominant species in 6 cluster groups

组别	鱼名	N/%	W/%	F/%	IRI 值	平均体重/g	生态类型
组 1	短须裂腹鱼	38.683	41.518	100.000	8020.085	205.3	RAP、OMN、DEM
	长丝裂腹鱼	13.902	14.494	100.000	2839.641	241.0	RAP、OMN、DEM
	鲤	2.780	11.931	85.714	1261.013	820.9	STI、OMN、ADH
	金沙鲈鲤	4.927	6.936	85.714	1016.855	269.3	SLO、CAR、DEM
	鲇	3.220	7.841	85.714	948.065	465.8	SLO/STI、CAR、ADH
	齐口裂腹鱼	4.390	3.429	71.429	558.532	149.4	RAP、OMN、DEM
组 2	长丝裂腹鱼	40.341	42.390	100.000	8273.116	241.0	RAP、OMN、DEM
	短须裂腹鱼	19.805	19.270	100.000	3907.487	223.2	RAP、OMN、DEM
	四川裂腹鱼	14.042	16.796	100.000	3083.815	274.4	RAP、OMN、DEM
	齐口裂腹鱼	10.471	13.995	100.000	2446.570	306.6	RAP、OMN、DEM
组 3	短须裂腹鱼	61.089	95.305	100.000	15639.402	136.0	RAP、OMN、DEM
	红尾荷马条鳅	20.623	1.902	100.000	2252.477	8.0	RAP、OMN、ADH
	短体荷马条鳅	9.728	0.557	100.000	1028.432	5	RAP、OMN、ADH
	云南盘鮡	4.669	0.498	100.000	516.747	9.3	SLO、OMN、PEL
组 4	鲶	33.520	3.008	100.000	3652.801	8.0	STI、OMN、ADH
	短须裂腹鱼	4.581	21.723	100.000	2630.389	420.2	RAP、OMN、DEM
	鲤	1.028	10.107	100.000	1113.539	871.2	STI、OMN、ADH
	圆口铜鱼	2.838	12.852	66.667	1046.023	401.3	RAP、OMN、PEL
	鳊	0.603	8.704	100.000	930.775	1278.3	SLO、CAR、PEL
	凹尾拟鲢	10.771	1.346	66.667	807.814	11.1	SLO、CAR、ADH
	齐口裂腹鱼	1.698	5.222	100.000	692.049	272.4	RAP、OMN、DEM
	细鳞裂腹鱼	1.006	5.888	100.000	689.378	518.8	RAP、OMN、DEM
	长丝裂腹鱼	2.145	3.888	100.000	603.356	160.6	RAP、OMN、DEM
组 5	翘嘴鲌	33.533	31.314	100.000	6484.694	265.3	STI、CAR、ADH
	尼罗罗非鱼	11.776	6.741	100.000	1851.774	162.6	STI、OMN、ADH
	鳊	1.198	16.690	100.000	1788.787	3959	SLO、CAR、PEL
	鳙	12.575	0.986	100.000	1356.044	22.3	STI、OMN、ADH
	鲫	13.972	12.471	50.000	1322.132	253.5	STI、OMN、ADH
	鲢	1.796	6.690	100.000	848.613	1057.9	SLO、HER、PEL
	鲂	4.192	3.124	100.000	731.532	211.7	SLO、OMN、DEM
	鳊	6.587	6.225	50.000	640.581	268.5	SLO、CAR、EPI
	软刺裸裂尻鱼	84.091	75.517	100.000	15960.814	35.3	SLO/RAP、OMN、DEM
组 6	短须裂腹鱼	3.977	18.444	50.000	1121.055	182.1	RAP、OMN、DEM

\* RAP 急流、SLO 缓流、STI 静水；CAR 肉食性、OMN 杂食性、HER 植食性；PEL 漂流性卵、ADH 黏性卵、DEM(黏) 沉性卵、EPI 浮性卵。N=某种鱼类的数量/鱼类总数量，W=某种鱼类体质量/鱼类总体质量，F=调查中某种鱼类出现的次数/调查次数。

类,比 2017—2022 年在下游干支流所获得的种类数稍少。2017—2022 年新增的种类主要是瓢鱼(*Pseudolabrus sinensis* Bleeker)、雅砻白鱼、贝氏鲶(*Hemiculter bleekeri* Warpachowski)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus* (Richardson))、团头鲂(*Megalobrama amblycephala* Yih)、鳊等适应静缓流生境的鱼类,可能与下游梯级电站建设形成水库导致生境改变、流速减小有关,且新出现种中外来物种很多,如大鳞鲃、散鳞镜鲤、斑点叉尾鲷、虹鳟、大口黑鲈、尼罗罗非鱼等。本次相对于邓其祥<sup>[7]</sup>未调查到的种类主要为圆筒吻鲷(*Rhinogobio cylindricus* Günther)、四川白甲鱼(*Onychostoma angustistomata* (Fang))、短尾高原鳅(*Triplophysa brevicauda* (Herzenstein))、红唇薄鳅(*Leptobotia rubrilabris* (Dabry))、峨眉后平鳅(*Metahomaloptera omeiensis* Chang)等适应急流生境的种类。



### 3.2 下游梯级电站建设对鱼类的影响

梯级电站建设和运行对鱼类资源的不利影响主要表现在阻隔和生境破碎化,及径流分配时空格局的改变引起自然水文情势改变,梯级开发使原有连续的河流生态系统被分隔成片断化的环境单元,造成生态景观的破碎及河流生态系统向水库—河流生态系统的转变<sup>[26]</sup>。大坝建设对洄游性鱼类产生阻隔,使其不能有效完成生殖和索饵等生活史过程,往往造成资源的严重下降,同时也影响鱼类的分布和不同水域群体间的交流。水库淹没导致流水性鱼类关键生境消失,一些原有的江河流水性鱼类种类数量减少甚至消失,而一些适应静水或缓流的鱼类及广适性鱼类逐步在群落中占据优势地位;同时,水库环境还可能提高外来物种入侵的可能性,加剧对土著种类生存竞争的压力<sup>[43]</sup>。

雅砻江下游已建成并运行锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩和桐子林5级水电站,其中锦屏一级为年调节电站、二滩电站为季调节电站、官地和桐子林为日调节电站、锦屏二级为引水式电站。

对比分析锦屏一级、二级电站工程水域(锦屏一级库尾至锦屏二级厂房)鱼类种类变化,在水电站建设前(1990—1994年、1997年)共采集到31种鱼类<sup>[14]</sup>,本调查该影响区鱼类(组1)共32种,种类数接近。在电站建设前主要鱼类有金沙鲈鲤、短须裂腹鱼、长丝裂腹鱼、四川裂腹鱼、长鳍吻鲈和长薄鳅等,本调查金沙鲈鲤和裂腹鱼属鱼类依旧为优势种类,新增优势种和常见种有鲤和鲇等静缓流适宜库区生境的鱼类,而长鳍吻鲈极少,长薄鳅在该河段未调查到。这种变化应与锦屏一级库区的形成给静缓流鱼类提供了适宜生境有关,因此鲤和鲇成为优势种、常见种,这与廖敏于2021年对锦屏一级库区进行的鱼类调查结果部分吻合,其优势种为鳙、短须裂腹鱼、鲤和麦穗鱼(*Pseudorasbora parva* (Temminck et Schlegel))等静水型鱼类<sup>[15]</sup>,本文聚类组1中鳙的尾数比也高达6%。另锦屏二级减水河段的存在也给建设前的主要鱼类如金沙鲈鲤、裂腹鱼属鱼类等保留了适宜生境,因此这些鱼类依旧是该江段优势种,这与刘猛等的报道一致<sup>[13]</sup>。

二滩电站修建前1992—1994年、1996—1998年野外调查采集到鱼类61种<sup>[16]</sup>,建库后2002年、2004年采集到57种<sup>[17-18]</sup>,2007年采集到鱼类36种<sup>[19]</sup>,本次在二滩库区及鳅鱼河采集到24种,鱼类种类数呈显著下降趋势,减少的种类有圆口铜鱼、长鳍吻鲈、圆筒吻鲈、泉水鱼(*Pseudogyrinocheilus procheilus* (Sauvage et Dabry))、墨头鱼(*Garra imberba* Garman)及高原鳅属、荷马条鳅属等适应急流生境的鱼类;新增的种类主要为翘嘴鲈、鳊、大眼鳊(*Siniperca kneri* Garman)、长吻拟鲢(*Pseudobagrus longirostris* (Günther))等栖息静缓流生境的肉食性鱼类;其中,鳙、团头鲂和尼罗罗非鱼为自2007年以来新增种类<sup>[19]</sup>,且尼罗罗非鱼在本调查中数量激增,已成为本江段优势种类。

雅砻江下游梯级电站建设后,仅桐子林坝下至雅砻江江口长约15 km江段处于未开发状态,此江段鱼类与金河、得石采样点鱼类共同聚为组4(图4),金河处于二滩库尾流水江段,其上为官地电站,得石为桐子林坝上江段,官地和桐子林均为日调节电站,库容较小、库区存在一定流速,因此相对于锦屏一级和二滩等年调节、季调节等调节性强的电站,对流水性鱼类的影响相对较小<sup>[29,43]</sup>,如本调查中圆口铜鱼亦是该聚类组优势种。

从以上分析结果可看出下游鱼类聚类结果与梯级电站建设有很大关系,电站的调节性能、减水河段、库尾流水河段长度等均影响着鱼类组成及其结构,因此在进行鱼类保护时要考虑电站的开发方式等。调节性能强的电站需适当控制静缓流生境鱼类的种群数量;对库尾流水江段,需采取措施保护此生境,特别对有洄游特性鱼类的江段,需建设相应过鱼设施使其顺利通过大坝,完成生殖和索饵洄游。

### 3.3 生物入侵及其影响

雅砻江下游大河湾以下流域属中亚热带湿润气候区,年平均气温18~21℃,河口一带近亚热带气候,具有罗非鱼(*Oreochromis* spp.)生长繁殖的自然环境<sup>[44,45]</sup>。下游梯级电站的修建运行造成整体流速减缓,江面变宽,库区水域加深,有机物和营养盐增加,库区浮游动植物等大幅增加,为罗非鱼和翘嘴鲈等静水型外来鱼类或水库常见种的大幅爆发提供适宜生境和饵料基础<sup>[26,46]</sup>。本调查显示,翘嘴鲈、尼罗罗非鱼等不仅在二滩库区、鳅鱼河等区域形成了自然种群,且成为Cluster聚类组5(二滩及鳅鱼河)中的优势种,IRI值高达6000和1800以上。二滩电站为雅砻江建成的第一座水电站,因此翘嘴鲈和罗非鱼等在二滩电站的种群规模和扩张状态需引起重视,应加强对下游流域外来物种的监测和控制,并采取措施降低外来鱼类的种群数量,避免发生大规模生物入侵现象。特别是Cluster聚类组4(二滩电站和桐子林电站建成后还存在的部分

流水河段,如金河、得石江段),该组优势种有短须裂腹鱼、鲤和圆口铜鱼,其中短须裂腹鱼 IRI 值高达 2600 以上,因此特别要关注该组优势种组成及其变化,采取相应措施如定期捕捞限定种类等来避免罗非鱼等外来种的扩张,避免对下游流域裂腹鱼等土著鱼类和原有的生态系统造成巨大危害<sup>[45-46]</sup>。

### 3.4 鱼类群落结构及其变化

关于群落构建机制,目前存在着中性构建理论和生态位理论(包括竞争排斥学说和环境过滤学说)等,影响鱼类群落结构变化的因素较多,如可利用资源的数量、环境异质性和外界干扰作用等都会直接影响群落动态<sup>[47]</sup>。对 2017—2022 年雅砻江流域鱼类群落结构分析显示,在 44.36% 的相似性水平上鱼类群落可分成 6 组,这 6 组生境、水文条件相差较大,因此相似性水平较低,被分成不同的组别,这显示了环境过滤机制在雅砻江流域鱼类群落结构形成过程中的主导作用。Ward 和 Stanford 在河流连续统概念的基础上,基于河流生态系统中普遍存在的人为干扰(如水利建设)进一步提出了河流“序列不连续体概念(serial discontinuity concept)”,该概念较为详尽地描述了人类活动对河流中的环境因素与生物成分及其生态过程的影响<sup>[48]</sup>。此外,水利建设也引起了栖息地同质化现象,即降低了环境异质性,正如牛红玉等<sup>[49]</sup>提出的外界干扰(本研究中的大坝修建)等也作为一种环境过滤器,对群落结构产生着影响,由此造成河流区域鱼类区系的同质化<sup>[50-51]</sup>,这也部分解释了中上游干、支流基本处于天然状态的区域中鱼类群落结构与二滩电站影响区至河口段差异较大的现象。

另有研究表明,河道治理<sup>[52]</sup>和水利建设<sup>[53-54]</sup>等人类活动<sup>[55]</sup>改变了局域栖息地条件和水流流态,从而改变了河流中鱼类等水生生物类群的纵向梯度格局。大量研究显示水利工程通过阻隔鱼类的洄游路线<sup>[52]</sup>、坝上形成水库降低上游流速<sup>[56]</sup>、降低下游水温<sup>[57]</sup>和改变水流流态<sup>[58]</sup>等途径对鱼类的分布和数量产生深远影响。Petts<sup>[59]</sup>总结了水利工程的三重生态学效应:首先,改变水质、沉积作用的速率和水流流态;其次,改变河床的横截面特征、河床沉积物的移动性能和初级生产力;最后,导致大型底栖无脊椎动物和鱼类等生物群落的改变。本调查所形成的鱼类群落结构聚类结果表明,库区及库区支流聚成一支(组 5),各库尾段和河口段流水段聚成一支(组 4),主要原因是电站的运行对流速、水温和水流流态等上述因素的改变所导致的库区静水和坝下流水生境差异较大,且库区沉积物等的变化导致初级生产力的改变从而影响库区、库尾和坝下等不同区段浮游和底栖生物类群,进而影响鱼类的饵料供应,因此,库区和坝下鱼类群落相似性低。

一条河流从源头至河口的纵向梯度变化过程可以分成侵蚀、转化和沉积 3 个过程。由于存在一定的坡度,众多支流逐级合并汇入干流,溪流大小、流量和流域面积均逐级增大,且一系列生态环境因子往往呈现出显著的空间梯度变化。如上中下游的坡度、流速、河床基质、深度、河宽、水温和海拔高度等生态环境因子和水文环境特征均体现出极高的空间异质性与显著的周期性<sup>[60-61]</sup>。2017—2022 年雅砻江鱼类形成的 6 个聚类组海拔高度和河流等级存在的显著性差异也说明空间异质性造成了鱼类群落结构差异。对组 1 内部各河段更细致的分类,发现更小的分支也是沿着海拔高度与河流等级进行排列的,如海拔上接近的锦屏大河湾段(GX1~GX4)先聚在一起,再分别与支流理塘河(LTH1 和 LTH2)的两个采样点鱼类以及海拔稍高的卡拉段(GZ3)相聚。对雅砻江流域从源头至河口鱼类群落随纵向梯度变化的探讨,还需结合更多生态环境因子进行长时间监测数据来进行,并对下游梯级电站建成后与中上游情况进行对比,可以更深入探讨人类活动的影响情况,建议开展雅砻江流域鱼类资源的连续监测,为整个流域鱼类群落结构的时空异质性、周期性变化及梯级电站影响等分析提供基础,并为生物多样性保护提供参考数据。

## 4 附录

附表 I、II 见电子版(DOI: 10.18307/2024.0134)。

## 5 参考文献

- [1] 姜胜凡. 雅砻江堰塞事件的地貌响应[学位论文]. 西宁: 青海师范大学, 2021.
- [2] 龚芝瑞. 雅砻江下游梯级水电站多尺度联合优化调度[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [3] Liu CH. Notes on the fishes fauna of Szechwan. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 1964, 1(2): 95-138. [刘成汉. 四川鱼类区系的研究. 四川大学学报: 自然科学版, 1964, 1(2): 95-138.]
- [4] Deng QX. An ichthyological survey in the Yalong River. *Journal of Nanchong Normal University: Natural Science Edition*, 1985, (1): 33-

37. [邓其祥. 雅砻江鱼类调查报告. 南充师院学报:自然科学版, 1985, (1): 33-37.]
- [5] Wu J, Wu MS. Fishery natural resources of Yalong River. *Sichuan Journal of Zoology*, 1986, **5**(1): 1-5. [吴江, 吴明森. 雅砻江的渔业自然资源. 四川动物, 1986, **5**(1): 1-5.]
- [6] Duan B, Deng QX, Ye L. The study of fish in the lower reaches of the Yalong River. *Journal of Sichuan Teachers College: Natural Science*, 1995, **16**(4): 347-351. [段彪, 邓其祥, 叶林. 雅砻江下游渔获物研究. 四川师范学院学报:自然科学版, 1995, **16**(4): 347-351.]
- [7] Deng QX. Fish fauna and distribution in the lower reaches of Yalong River. *Chinese Journal of Zoology*, 1996, **31**(5): 5-12. DOI: 10.13859/j.c.jz.1996.05.002. [邓其祥. 雅砻江下游地区的鱼类区系和分布. 动物学杂志, 1996, **31**(5): 5-12.]
- [8] Chang XJ, Wei LW, Wang DW. Distribution characteristics and influencing factors of geological hazards in Yalong River Basin. *Journal of Catastrophology*, 2009, **24**(3): 83-88. [常晓军, 魏伦武, 王德伟. 雅砻江流域地质灾害分布特征及其影响因素分析. 灾害学, 2009, **24**(3): 83-88.]
- [9] Yang QR, Chen QW, Ma XF. Status of fish resources and protection measures in the lower reaches of Yalong River. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(3): 94-98. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2011.03.012. [杨青瑞, 陈求稳, 马徐发. 雅砻江下游鱼类资源调查及保护措施. 水生态学杂志, 2011, **32**(3): 94-98.]
- [10] 丁瑞华. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- [11] 张春光, 杨君兴, 赵亚辉. 金沙江流域鱼类. 北京: 科学出版社, 2019.
- [12] 郭延蜀, 孙治宇, 何兴恒等. 四川鱼类原色图志(上下册). 北京: 科学出版社, 2021.
- [13] Liu M, Zhang YX, Liu Y *et al.* Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River. *Freshwater Fisheries*, 2022, **52**(2): 22-33. [刘猛, 张逸谔, 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. 淡水渔业, 2022, **52**(2): 22-33.]
- [14] Deng QX, Yu ZW. The fish species resources of the affected area of the second-level and first-level hydroelectric power stations in Jinping Yalongjiang River. *Journal of Sichuan Teachers College: Natural Science*, 1999, **20**(1): 1-5. [邓其祥, 余志伟. 锦屏一二级水电站影响区的鱼类资源. 四川师范学院学报:自然科学版, 1999, **20**(1): 1-5.]
- [15] 廖敏. 雅砻江锦屏一级库区鱼类夏秋季分布格局与环境因子关系初步研究[学位论文]. 成都: 四川农业大学, 2022.
- [16] Deng QX, Yu ZW. Observation of fishes before the Yalong River is cut off by Ertan hydropower station. *Journal of Sichuan Teachers College: Natural Science*, 1996, **17**(3): 14-19. [邓其祥, 余志伟. 二滩水电站围堰截流前的鱼类监测. 四川师范学院学报:自然科学版, 1996, **17**(3): 14-19.]
- [17] Deng QX, Yu ZW, Li C. Fish fauna in Ertan Reservoir and nearby river area. *Journal of Sichuan Teachers College: Natural Science*, 2000, **21**(2): 128-131. [邓其祥, 余志伟, 李操. 二滩库区及相邻江段的鱼类区系. 四川师范学院学报:自然科学版, 2000, **21**(2): 128-131.]
- [18] Jiang H, Xie SG, Zhao WQ *et al.* Changes of fish assemblages after construction of Ertan Reservoir in Yalong River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(4): 532-539. [蒋红, 谢嗣光, 赵文谦等. 二滩水电站水库形成后鱼类种类组成的演变. 水生生物学报, 2007, **31**(4): 532-539.]
- [19] 何莎. 二滩水库水质、水生生物及鱼类资源现状调查[学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [20] Deng JJ, Wang XD, Tong LT *et al.* Fish diversity and spatial pattern in the Liqiu River, a tributary of the middle Yalong River. *Sichuan Journal of Zoology*, 2022, **41**(4): 444-453. [邓嘉俊, 王小东, 同琳铤等. 雅砻江中游支流力丘河鱼类资源现状. 四川动物, 2022, **41**(4): 444-453.]
- [21] Liu DQ. The fish resources in Ganyuhe River and its utilization. *Resources Development and Conservation*, 1992, **8**(1): 32-34, 39. [刘达清. 鲢鱼河的鱼类资源及渔业利用. 资源开发与保护, 1992, **8**(1): 32-34, 39.]
- [22] Ding RH, Huang YQ. Study on fish fauna and resource protection in Anning River. *Sichuan Journal of Zoology*, 1992, **11**(2): 23-26. [丁瑞华, 黄艳群. 安宁河鱼类区系及资源保护的研究. 四川动物, 1992, **11**(2): 23-26.]
- [23] Ru HJ, Zhang Y, Li YF *et al.* Community composition and status of fish resources in Anning River. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(5): 68-74. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2016.05.010. [茹辉军, 张燕, 李云峰等. 雅砻江支流安宁河鱼类群落组成及资源现状. 水生态学杂志, 2016, **37**(5): 68-74.]
- [24] 康宇. 四川省雅砻江中下游河段水电开发社会环境影响后评价[学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [25] Xu Y. Fish protection practices under condition of entire river hydropower development by a single company. *Yangtze River*, 2018, **49**(20): 24-28. [许勇. “一条江”水电开发模式下的鱼类保护实践. 人民长江, 2018, **49**(20): 24-28.]
- [26] 国家环境保护总局环境影响评价管理司. 水利水电开发项目生态环境保护研究与实践. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [27] Han JC, Liu GY, Zhuge YS *et al.* Ecological protection of fishery resources based on development of hydropower in Yalong River. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2009, **31**(5): 15-19. [韩京成, 刘国勇, 诸葛亦斯等. 水电开发背景下雅砻江鱼类资源的生态保护. 三峡大学学报:自然科学版, 2009, **31**(5): 15-19.]
- [28] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1473-1485. DOI: 10.5846/STXB201901030025. [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. *生态学报*, 2020, **40**(4): 1473-1485.]
- [29] Xiong MH, Shao K, Shi F *et al.* Impact of impoundment and operation duration of Yinpan hydropower station on fish community structure and ecological type in Wujiang River. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(6): 25-34. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202106220196. [熊美华, 邵科, 史方等. 蓄水运行时长对鱼类群落结构及生态类型的影响——以乌江下游银盘电站为例. *水生态学杂志*, 2022, **43**(6): 25-34.]
- [30] Horton RE. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 1945, **56**(3): 275. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275: edosat]2.0.co;2.
- [31] 陈宜瑜等. 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷). 北京: 科学出版社, 1998.
- [32] 乐佩琪等. 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(下卷). 北京: 科学出版社, 2000.
- [33] 张鸞, 曹文宣. 中国生物多样性红色名录. 脊椎动物. 第五卷, 淡水鱼类. 北京: 科学出版社 2021.
- [34] Xie ZG, Zhang E, He SP. Study on species validation for *Glyptothorax sinense* (Regan) and *G. fukiensis* (Rendahl) with the method of morphometrics. *Journal of Huazhong Agricultural*, 2001, **20**(2): 169-172. [谢仲桂, 张鸞, 何舜平. 应用形态度量学方法对中华纹胸鮡和福建纹胸鮡物种有效性的研究. *华中农业大学学报*, 2001, **20**(2): 169-172.]
- [35] Shannon CE. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, **27**(3): 379-423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [36] Ludwig JA, Reynolds JF. Statistical ecology, a primer on methods and computing. *Journal of Wildlife Management*, 1988, **54**(1): 197. DOI: 10.2307/2403729.
- [37] Margalef R. Information theory in ecology. *International Journal of General System*, 1958.
- [38] Pielou EC. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, **10**(2): 370-383. DOI: 10.1016/0022-5193(66)90133-0.
- [39] Clarke KR. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Austral Ecology*, 1993, **18**(1): 117-143. DOI: 10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x.
- [40] Lozupone C, Knight R. UniFrac: A new phylogenetic method for comparing microbial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(12): 8228-8235. DOI: 10.1128/AEM.71.12.8228-8235.2005.
- [41] Clarke KR, Gorley RN, Somerfield PJ *et al.* Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation, 3rd Edition. Plymouth: Primer-E Ltd, 2014.
- [42] Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. *Fish Bulletin*, 1971, **152**: 1-10.
- [43] Chen F, Lei H, Zheng HT *et al.* Impacts of cascade reservoirs on fishes in the mainstream of Pearl River and mitigation measures. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 1097-1108. DOI: 10.18307/2018.0422. [陈锋, 雷欢, 郑海涛等. 珠江干流梯级开发对鱼类的影响与减缓对策. *湖泊科学*, 2018, **30**(4): 1097-1108.]
- [44] Guo J. Analysis on the local climate of the Jinping-II Hydroelectric Project. *Water Power*, 2008, **34**(8): 1-3,7. [郭坚. 雅砻江锦屏二级水电站局地气候影响分析. *水力发电*, 2008, **34**(8): 1-3,7.]
- [45] Mei PS, Wang L, Han JC *et al.* Eco-environmental impact analysis of hydropower development on the Yalong River. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2009, **31**(2): 8-12. [梅朋森, 王力, 韩京成等. 水电开发对雅砻江流域生态环境的影响. *三峡大学学报: 自然科学版*, 2009, **31**(2): 8-12.]
- [46] Zhang DC, Zheng JL. Preliminary study on invasion of alien fish species after construction of hydropower projects. *Yangtze River*, 2019, **50**(2): 83-89. [张登成, 郑娇莉. 水电工程建设前后外来鱼类入侵问题初步研究. *人民长江*, 2019, **50**(2): 83-89.]
- [47] Shi YR, Chao M, Shen XQ. Environmental filtering mechanism controlling the species temporal coexistence pattern for fish communities in Changjiang Estuary. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, **37**(4): 525-533. [史赟荣, 晁敏, 沈新强. 主导长江口鱼类群落物种时间共存格局的环境过滤机制研究. *应用海洋学学报*, 2018, **37**(4): 525-533.]
- [48] Ward J, Stanford J. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems. *Environmental Science*, 1983.
- [49] Niu HY, Wang ZF, Lian JY *et al.* New progress in community assembly: Community phylogenetic structure combining evolution and ecology. *Biodiversity Science*, 2011, **19**(3): 275-283. DOI: 10.3724/SP.J.1003.2011.09275. [牛红玉, 王峥峰, 练琚瑜等. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. *生物多样性*, 2011, **19**(3): 275-283.]
- [50] Scott MC, Helfman GS. Native invasions, homogenization, and the mismeasure of integrity of fish assemblages. *Fisheries*, 2001, **26**(11): 6-15. DOI: 10.1577/1548-8446(2001)0260006: niham>2.0.co;2.
- [51] Rahel FJ. Homogenization of freshwater faunas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**: 291-315. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150429.
- [52] Gehrke PC, Brown P, Schiller CB *et al.* River regulation and fish communities in the Murray-Darling River system, Australia. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, **11**(3/4): 363-375. DOI: 10.1002/rrr.3450110310.
- [53] Rosenberg A, Bigford TE, Leathery S *et al.* Ecosystem approaches to fishery management through essential fish habitat. *Bulletin of Marine*

- Science*, 2000, **66**(3): 535-542. DOI: 10.1590/S0100-879X2000000500015.
- [54] March JG, Benstead JP, Pringle CM *et al.* Damming tropical island streams: Problems, solutions, and alternatives. *BioScience*, 2003, **53**(11): 1069-1078. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[1069: DTISPS]2.0.CO;2.
- [55] Chu L, Wang WJ, Yan LL *et al.* Fish assemblages and longitudinal patterns in the headwater streams of the Chencun Reservoir in the Huangshan Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(3): 900-910. DOI: 10.5846/stxb201304140706. [储玲, 王文剑, 闫莉莉等. 黄山陈村水库上游河源溪流的鱼类群落及其纵向梯度格局. *生态学报*, 2015, **35**(3): 900-910.]
- [56] Bennett SJ, Cooper CM, Ritchie JC *et al.* Assessing sedimentation issues within aging flood control reservoirs in Oklahoma. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, **38**: 1307-1322. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2002.tb04349.x.
- [57] Clarkson RW, Childs MR. Temperature effects of hypolimnial-release dams on early life stages of Colorado River Basin big-river fishes. *Copeia*, 2000, (2): 402-412. DOI: 10.1643/0045-8511(2000)000[0402: teohrd]2.0.co;2.
- [58] Bonner TH, Wilde GR. Changes in the Canadian River fish assemblage associated with reservoir construction. *Journal of Freshwater Ecology*, 2000, **15**(2): 189-198. DOI: 10.1080/02705060.2000.9663736.
- [59] Petts GE. *Impounded rivers: Perspectives for ecological management*. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [60] 项秀颖. 青弋江流域鱼类群落结构时空格局的研究[学位论文]. 芜湖: 安徽师范大学, 2011.
- [61] Ostrand KG, Wilde GR. Seasonal and spatial variation in a prairie stream-fish assemblage. *Ecology of Freshwater Fish*, 2002, **11**(3): 137-149. DOI: 10.1034/j.1600-0633.2002.00005.x.

附表 I 雅砻江流域鱼类采样点信息

Attached tab. I The coordinates of fish sampling sites in Yalong River

点位	名称	经度	纬度	海拔/m	所属江段	河流等级	采样时间	网具	持续时长
GS1	甘孜县	99°59'15.36"E	31°18'48.96"N	3345.233	上游	1	2018-08	定置刺网、地笼	8 天
GS2	新龙县	100°18'41.76"E	30°56'24.36"N	3062.305	上游	1	2018-08、2018-11、 2019-09	定置刺网	12 天
GZ1	雅江县	101°0'52.92"E	30°2'13.56"N	2572.117	中游	1	2017-06、2017-11、 2018-06、2019-06、 2019-11、2020-07	地笼、饵钓钩、定置 刺网	24 天
GZ2	麻郎措	101°5'30.912"E	29°45'51.408"N	2483.13	中游	1	2022-07、2022-10	地笼、饵钓钩、定置 刺网	18 天
GZ3	卡拉	101°21'40.68"E	28°20'22.92"N	1907.897	中游	1	2017-11、2018-06、 2020-07、2020-11、 2021-03	定置刺网、地笼	15 天
GX1	文家坪	101°45'02.88"E	28°31'55.92"N	1572.451	下游	1	2018-06、2020-07	定置刺网	10 天
GX2	南河棉沙	101°52'14.52"E	28°27'34.56"N	1428.726	下游	1	2018-06、2018-11、 2019-11	定置刺网、地笼	12 天
GX3	里庄	101°51'35.64"E	28°14'56.40"N	1367.758	下游	1	2019-06、2019-11、 2020-07、2020-11、 2021-03	定置刺网、饵钓钩	15 天
GX4	官地	101°46'29.28"E	28°2'38.40"N	1330.242	下游	1	2020-11、2021-11	定置刺网	8 天
GX5	金河	101°56'39.84"E	27°42'36.36"N	1197.83	下游	1	2017-06、2017-11、 2018-10、2018-11、 2019-09、2019-11、 2020-07、2020-11、 2021-11	定置刺网、流刺网、 地笼	36 天

点位	名称	经度	纬度	海拔/m	所属江段	河流等级	采样时间	网具	持续时长
GX6	二滩	101°46'14.52"E	26°49'41.52"N	1200.95	下游	1	2017-11、2018-06、 2019-08、2020-07、 2020-11、2021-11	定置刺网	24 天
GX7	得石	101°50'07.80"E	26°45'19.44"N	1007.841	下游	1	2018-08、2020-07、 2020-11、2021-11	定置刺网、地笼	30 天
GX8	雅砻江河口	101°47'56.04"E	26°36'50.04"N	988.033	下游	1	2017-08、2017-12、 2018-08、2019-07、 2019-12、2020-11、 2020-12、2021-11	流刺网、定置刺网、 饵钓钩、百袋网、地 笼	41 天
XSH1	道孚	101°7'00.48"E	30°58'35.76"N	2960.824	鲜水河	2	2018-08、2018-11、 2019-09	定置刺网、地笼	12 天
XSH2	鲜水河口	101°0'09.72"E	30°12'42.12"N	2632.608	鲜水河	2	2018-11、2019-09	定置刺网、地笼	10 天
WLSG	卧龙寺沟	101°4'35.904"E	30°3'35.64"N	2706.48	卧龙寺沟	2	2022-07、2022-10	定置刺网、撒网、地 笼	10 天
HQH	霍曲河	101°4'50.23"E	29°44'23.68"N	2480.43	霍曲河	2	2022-10、2022-11	定置刺网、地笼	8 天
LTH1	呷姑	101°1'14.88"E	27°57'28.80"N	1884.43	理塘河	2	2018-09、2018-11、 2019-11、2020-07	定置刺网	16 天
LTH2	列瓦	101°15'12.24"E	27°51'40.68"N	1798.2	理塘河	2	2018-09、2019-06、 2019-09、2019-11、 2020-07	定置刺网	20 天
YXH	永兴	101°25'01.92"E	26°58'27.84"N	1246.368	永兴河	3	2020-07、2020-11、 2021-03、2021-11	定置刺网、撒网	16 天
GYH	渔门镇	101°30'42.12"E	26°54'03.96"N	1209.722	鲢鱼河	2	2020-07、2020-11、 2021-11		





鱼名	干流					支流					生态类型
	上游	中游	下游 <sup>[29]</sup>	鲜水河	卧龙寺沟	霍曲河	力丘河 <sup>[30]</sup>	理塘河	永兴河	鲢鱼河	
(18) 唇鲮			√								SLO、CAR、ADH
(19) 麦穗鱼							R				STI、OMN、ADH
(20) 圆口铜鱼※*			√								RAP、OMN、PEL
(21) 长鳍吻鮡※*											RAP/SLO、OMN、PEL
(22) 棒花鱼			√								SLO、OMN、DEM
(23) 裸体异鳔鳅鮀*											RAP、CAR、PEL
(24) 中华鲮			√								STI、OMN、MUS
(25) 彩石鲮			√								STI、OMN、MUS
(26) 大鳞鲃△			√R								SLO、OMN、PEL
(27) 中华倒刺鲃			√								SLO、OMN、DEM
(28) 金沙鲈鲤※*		√	√R						√		SLO、CAR、DEM
(29) 白甲鱼			√								RAP、OMN、DEM
(30) 伦氏孟加拉鲮*			√								SLO、OMN、ADH
(31) 泉水鱼			√R								RAP、OMN、ADH
(32) 墨头鱼			√R								RAP、OMN、DEM
(33) 云南盘鮡			√						√		SLO、OMN、PEL
(34) 短须裂腹鱼*	√	√	√R	√		√	R	√	√		RAP、OMN、DEM
(35) 长丝裂腹鱼*	√	√	√R	√			R	√			RAP、OMN、DEM
(36) 齐口裂腹鱼*	√	√	√R	√		√	R	√			RAP、OMN、DEM







鱼名	干流					支流					生态类型
	上游	中游	下游 <sup>[29]</sup>	鲜水河	卧龙寺沟	霍曲河	力丘河 <sup>[30]</sup>	理塘河	永兴河	鲢鱼河	
<b>3 鲑形目</b>	<b>Salmoniformes</b>										
<b>3.1 鲑科</b>	<b>Salmonidae</b>										
(92) 虹鳟△			R								STI、OMN、DEM
<b>4 鲈形目</b>	<b>Perciformes</b>										
<b>4.1 鲈科</b>	<b>Serranidae</b>										
(93) 鳊			√								SLO、CAR、EPI
(94) 大眼鳊			√								SLO、CAR、EPI
<b>4.2 虾虎鱼科</b>	<b>Gobiidae</b>										
(95) 子陵吻虾虎鱼			√R								STI、CAR、ADH
(96) 波氏吻虾虎鱼			√								STI、CAR、ADH
<b>4.3 丽鱼科</b>	<b>Cichlidae</b>										
(97) 尼罗罗非鱼△			√							√	STI、OMN、ADH
<b>4.4 太阳鱼科</b>	<b>Centrarchidae</b>										
(98) 大口黑鲈△			√								SLO、CAR、DEM

“√”为笔者于2017—2022年进行的野外调查种类；“R”为文献记录种类；※为国重点保护种类（二级）；\*为长江上游特有鱼类；△为境外引入种；RAP 急流、SLO 缓流、STI 静水；CAR 肉食性、OMN 杂食性、HER 植食性；PEL 漂流性卵、ADH 黏性卵、DEM（黏）沉性卵、EPI 浮性卵、MUS 蚌内产卵、NES 筑巢产卵、VIV 体内受精产沉性卵。