J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(3):000-000
DOI 10.18307/2027.0333
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

大渡河源区鱼类群落结构和多样性空间格局及其影响因子*

张东亚[1,2],杨　森[1],包春鹏[1],郝　盟[3],张志明[4],谭均军[1],柯森繁[1],石小涛[1**]
（1: 三峡大学水利与环境学院，宜昌 443002）
（2: 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司，北京 100024）
（3: 北京师范大学水科学研究院，北京 100875）
（4: 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，武汉 430079）

摘　要：为支撑大渡河源区生态保护与水电开发协同决策，厘清区域鱼类群落结构特征、多样性空间格局并明晰其保护价值，于 2024 年系统采集大渡河源区 11 条河流的鱼类样本，开展鱼类群落结构及多样性研究。研究结果表明，大渡河源区共采集鱼类 18 种，隶属 3 目 5 科 12 属，其中土著鱼类 14 种，外来种 4 种，珍稀保护及特有鱼类共 9 种，大渡裸裂尻鱼（*Schizopygopsis daduensis*）为河源区核心优势种。NMDS 分析显示，河源区两条主要干流的鱼类群落呈现明显分化特征。SIMPER 分析表明，斯氏高原鳅（*Triplophysa stoliczkai*）、鳙（*Aristichthys nobilis*）是驱动群落分化的主要贡献物种，贡献率分别为 29.96%和 10.99%。物种多样性方面，呈现干流显著高于支流的空间分布规律，其中足木足河的 Margalef 丰富度指数（2.02）与 Shannon 多样性指数（1.82）均为最高。随机森林模型表明，Shannon 多样性指数与 Margalef 丰富度指数主要受地形和水文因子驱动，其中海拔（5.29%）、河宽（4.14%）为关键因子，而 Pielou 均匀度指数受水质因子中溶解氧（3.10%）影响最显著。本研究明确了研究区鱼类群落组成与多样性格局，识别出以足木足河为代表的核心保护区域，为区域珍稀特有鱼类和多样性保护提供了科学支撑。

关键词：群落特征；多样性保护；珍稀濒危物种；水电开发；大渡河

Spatial Pattern of Fish Community Structure and Diversity in the Headwater Region of the Dadu River under Hydropower Development and Its Influencing Factors*

Zhang Dongya[1,2], Yang Sen[1], Bao Chunpeng[1], Hao Meng[3], Zhang Zhiming[4], Tan Junjun[1], Ke Fansen[1], Shi Xiaotao[1**]
(1: *College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *P. R. China*)
(2: *PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing* 100024, *P. R. China*)
(3: *College of water sciences ,Beijing normal university, Beijing* 100875, *P.R. China*)
(4: *Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Instiute of Hydroecology of MWR and CAS, Wuhan* 430079, *P. R. China*)

Abstract: This study investigated fish community structure, spatial patterns of fish diversity, and fish conservation value in the headwater region of the Dadu River, to support collaborative decision-making for ecological protection and hydropower development in this area. Fish samples were systematically collected from 11 rivers in the Dadu River headwaters in 2024 for the analysis of fish community structure and diversity. A total of 18 fish species were recorded, belonging to 12 genera, 5 families, and 3 orders, including 14 native species, 4 exotic species, and 9 rare, protected, or endemic species. Schizopygopsis daduensis was the dominant species

*　2026-03-09 收稿；2026-07-01 收修改稿；2026-07-07 录用。
国家自然科学基金专家推荐类原创探索计划项目（52553010）、国家自然科学基金项目（52279069）、湖北省自然科学基金创新群体项目（2023AFA005）和国际（地区）合作与交流项目（W2511058）联合资助。
**　通讯作者；E-mail: fishlab@163.com。

across the entire study area. Non-metric multidimensional scaling (NMDS) revealed a clear differentiation in fish community composition between the two main trunk streams of the headwater region. Fish communities among tributaries of the Chuosijia River basin showed high similarity, while those in the Zumuzu River basin exhibited distinct variations. Similarity percentage (SIMPER) analysis identified Triplophysa stoliczkai and Aristichthys nobilis as the main species contributing to community differentiation, with contribution rates of 29.96% and 10.99%, respectively. In terms of species diversity, fish diversity was significantly higher in the trunk streams than in the tributaries. Among all surveyed waters, the Zumuzu River had the highest Margalef richness index (2.02) and Shannon diversity index (1.82). Random forest model analysis indicated that spatial variations in the Shannon diversity index and Margalef richness index were primarily regulated by topographic and hydrological factors. Altitude (5.29%) and river width (4.14%) were the dominant influencing factors, while dissolved oxygen (3.10%) exerted the strongest effect on the Pielou evenness index. This study clarified the fish community composition and spatial diversity patterns in the Dadu River headwaters, and identified the Zumuzu River as a core conservation area. These findings provide a scientific reference for the conservation of rare and endemic fish species in this region.

Keywords: Dadu River; hydropower development; biodiversity conservation; rare and endangered species; community characteristics

河流鱼类群落的物种组成与多样性的空间分布格局，是鱼类生态学研究中的核心科学问题之一[1-3]。鱼类群落结构的形成与维持受多重环境因子的综合调控，地形地貌、水文条件和水质环境在不同空间尺度上共同塑造了鱼类的分布格局与多样性格局[4-5]。解析环境因子对鱼类群落结构和多样性的驱动机制，对于揭示河流生态系统的群落构建规律、评估河流健康及制定保护策略具有重要的理论意义和实践价值[6-8]。特别是在青藏高原，海拔梯度变化剧烈、生境异质性高且分布着大量适应急流环境的特有鱼类，其群落空间格局与环境驱动机制尤为值得深入探究[9-10]。

大渡河是岷江的最大支流，发源于青海省果洛藏族自治州，干流全长约 1062 公里，流域面积广阔，是长江上游水生生物多样性的一个关键热点区域[11-12]。其河源区地处青藏高原东缘，独特的地理环境和复杂的水文条件孕育了高度特化的鱼类区系，其中包含了大量长江上游特有种和国家级、省级重点保护物种，更是裂腹鱼亚科（Schizothoracinae）、条鳅科（Nemacheilidae）和鮡科（Sisoridae）等适应急流、低温环境鱼类的理想栖息地[13]。该区域丰富的特有和濒危鱼类资源，使其成为水生生物迁地保护和种质资源保存的战略要地[14-15]。

大渡河源区作为高海拔河流生态系统，其生境具有天然的脆弱性与敏感性[11,16]，鱼类资源的空间分布格局受地形、水文等多重环境因子的综合调控，同时水电开发、栖息地片段化以及外来物种入侵等因素，进一步加剧了威胁土著鱼类资源[17-19]。然而目前对大渡河现有研究多集中于大渡河中上游干流区域[20-21]，针对河源区系统性的研究相对匮乏，限制了对河源区核心区域生态状况的精准评估[22-23]。关于多重环境因子对鱼类群落结构和多样性空间格局的影响仍是热点话题[24]。

针对上述研究背景与大渡河源区鱼类研究的现有缺口，本研究对大渡河源区鱼类开展系统性调查，旨在明确河源区鱼类群落组成特征、优势种分布规律及空间格局差异，识别多样性热点区域并探究其关键驱动因素。研究结果可为河源区生态保护与水电开发协同决策提供精准科学支撑，也为长江上游乃至西南地区同类河源区的生态保护与资源开发提供参考范式。

1 材料与方法

1.1 研究区域

大渡河作为我国规划的十三大水电基地之一，是长江上游岷江水系最大支流，流域地理范围介于 28°17′～33°48′N ，99°42′～103°48′E，发源于青海省久治县查七沟顶东侧，流经川西北多州市后在乐山市汇入岷江，干流全长 1062 km，天然落差 4175 m，流域面积 77400 km²（不含青衣江），年径流量 470 亿 m³，水能资源蕴藏量达 3132×10⁴ kW，是“西电东输”战略的重要组成部分。该流域地貌地形复杂、气候差异显著，水系呈树枝状分布，河源区（绰斯甲河口以上）江面高程介于 2500~5000 m。本研究空间尺度为大渡河源区足木足、绰斯甲、麻尔曲、梭磨河、茶堡河、阿柯河、玛柯河、杜柯河、色曲、则曲、

尼柯河等 11 条河流，各河流设置一个采样点（图 1）。

1.2 数据采集

1.2.1 鱼类调查　研究于 2024 年 5—6 月和 10—11 月对大渡河源区 11 条干支流鱼类资源进行调查，依据《生物多样性观测技术导则 内陆水域鱼类》（HJ710.7-2014）《内陆水域渔业自然资源调查手册》等标准和技术规范进行样本采集。电站库区和河道浅湾处主要采用地笼、定置刺网和手撒网采样，水深较深、流速相对较大的顺直河道段采用流刺网、钩钓、地笼等方式；其中，地笼及定制刺网放置 1 个晚上。

现场对采集的鱼类新鲜样本进行种类鉴定及体长（精确到 1 mm）、体重（精确到 0.1 g）等形态指标测量，并记录数量、采集地等相关数据。现场未能鉴定的种类，用 10%福尔马林溶液固定后带回实验室进一步鉴定，标本鉴定及分类参照四川鱼类志[25]和中国动物志[26]。

1.2.1 环境因子调查　在大渡河源区 11 条主要河流进行环境调查，包括水文、水质和地形三类环境因子监测，水文因子包括流速（FV）和水温（WT），水质因子包括透明度（SD）和溶解氧（DO），地形因子包括海拔（Elve）、河道总长（TL）和河宽（RW）（附表I）。

流速采用便携式流速仪，在每个监测点位的河道断面，按左、中、右 3 个垂线测定流速，每个垂线测定 3 个不同水深层面的流速，取平均值作为该点位的流速数据。水温、溶解氧浓度，采用便携式多参数水质监测仪，在每个点位水面下 50 cm 处。透明度（SD）采用塞氏盘（直径 20 cm）测定，将塞氏盘缓慢放入水中，直至肉眼无法看清盘面，记录此时的水深即为透明度，每个点位测定 3 次，取平均值，确保测定精度。海拔、河道总长、河宽，通过全球定位系统（GPS）和 Google Earth 软件获得。

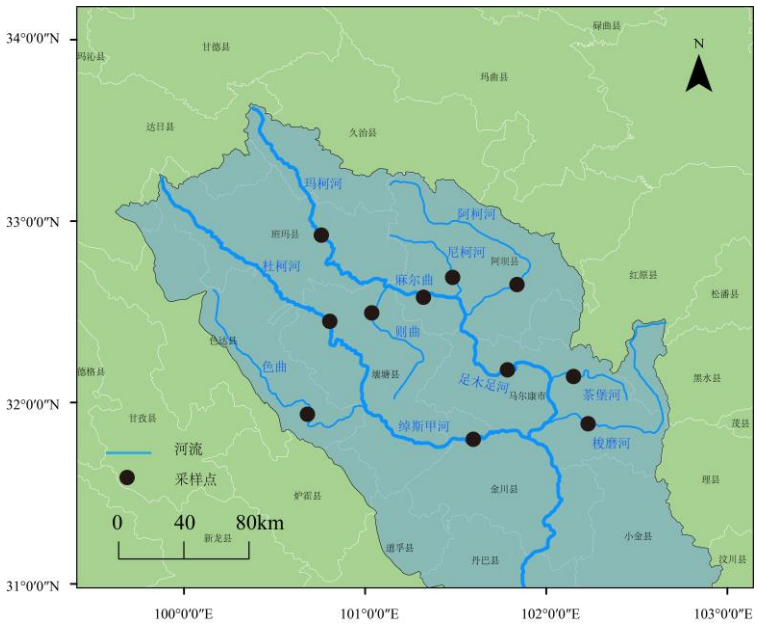

图 1 大渡河源区采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites in the headwater region of the Dadu River

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

1.3 数据处理

1.3.1 相对重要性指数　采用相对重要性指数（index of relative importance，*IRI*）对鱼类群落优势度进行划分。计算公式如下：

式中：N 为某种鱼在渔获物中的数量百分比，W 为某种鱼在渔获物中的重量百分比，F 代表某种鱼采集断面数占总断面数的百分比。$IRI\geq1000$ 为优势种；$1000>IRI\geq100$ 为常见种；$100>IRI\geq10$ 为一般种；$IRI<10$ 为偶见种[27]。

2.3.2 群落结构差异　采用非度量多维尺度分析（Non-metric multidimensional scaling, NMDS），基于 Bray-Curtis 相异系数构建群落相异矩阵，对鱼类群落数据进行降维排序。通过应力值（Stress）评估排序结果的可靠性，Stress<0.1 表明低维空间能够有效反映原始高维数据的相异关系。然后使用相似性百分比分析（similarity of percentage analysis, SIMPER）计算不同鱼类对组间相异性的平均贡献率[28]。

1.3.3 多样性指数　多样性采用 Shannon 多样性指数(H')[29]、Margalef 丰富度指数(D)[30]和 Pielou 均匀度指数(J')[31]来描述物种多样性。

Shannon-Wiener 多样性指数（H'）：

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} P_i \ln P_i \tag{1}$$

Margalef 丰富度指数（D）：

$$D = \frac{(S-1)}{InN} \tag{2}$$

Pielou's 均匀性指数（J）：

$$J = \frac{H'}{InS} \tag{3}$$

式中，P_i 为群落中第 i 种的个体数占所有物种总个体数的比例；S 为样品中的种类总数；N 为样品中的生物个体总数。

1.3.4 环境与群落结构和多样性的关系　采用方差分解分析（VPA）量化不同类型环境因子对鱼类群落变异的独立解释率与交互解释率，并经蒙特卡洛置换检验验证各因子组分的解释显著性。进一步量化环境因子对鱼类群落结构的独立与联合解释效应，采用冗余分析（redundancy analysis, RDA）。在进行 RDA 分析前，首先计算所有环境因子的方差膨胀因子（VIF）以检验多重共线性，保留 VIF 值均小于 5 的环境因子纳入后续分析。将数据进行标准化处理（丰度数据 Hellinger 标准化，环境因子数据 z-score 标准化），采用前向选择（forward selection）结合蒙特卡洛置换检验（999 次置换）筛选显著影响鱼类群落的环境因子（P<0.05）[32-33]。

采用随机森林模型（random forest，RF），分析多样性与环境因子的关系，采用指标% IncMSE（mean decrease accuracy）估测环境因子在预测多样性变动中的相对重要性，来量化影响多样性的环境因子[24]。

2 结果与分析

2.1 物种组成

21.1 种类组成　2024 年在大渡河源区共采集到鱼类 18 种，4897 尾，371.63 kg，隶属 3 目 5 科 12 属。其中，鲑形目 1 科 1 属 1 种，占总种数的 5.55%，鲤形目 2 科 7 属 14 种，占总种数的 77.78%，鲶形目 2 科 2 属 3 种，占总种数的，16.67%。其中，土著鱼类 14 种，占总种数的 77.78%；外来种 4 种，占总种数的 22.22%，分别为鳙（*Aristichthys nobilis*）、鲫（*Carassius auratus*）、鲤（*Cyprinus carpio*）、鲇（*Silurus asotus*）。大渡河源区分布的珍稀保护及特有鱼类共 9 种，占土著鱼类种数的 66.67%。其中国家一级重点保护野生动物 1 种，为川陕哲罗鲑（*Hucho bleekeri*）；国家二级重点保护野生动物 3 种，分别为重口裂腹鱼（*Schizothorax davidi*）、青石爬鮡（*Euchiloglanis davidi*）和厚唇裸重唇鱼（*Gymnodiptychus pachycheilus*）；省级保护野生动物 1 种，黄石爬鮡（*Euchiloglanis kishinouyei*）；长江上游特有鱼类 9 种，分别为川陕哲罗鲑、齐口裂腹鱼（*Schizothorax prenanti*）、重口裂腹鱼、大渡裸裂尻鱼（*Schizopygopsis daduensis*）、软刺裸裂尻鱼（*Schizopygopsis malacanthus*）、麻柯河高原鳅（*Triplophysa markehenensis*）、

戴氏山鳅（*Oreias dabryi*）、青石爬鮡和黄石爬鮡（*Euchiloglanis kishinouyei*）。

空间上，足木足河有 16 种，绰斯甲河有 10 种，阿柯河、麻尔曲均有 9 种；杜柯河、玛柯河、色曲、梭磨河、则曲均有 8 种，茶堡河有 5 种，尼柯河最少，仅 4 种，各条河流中，均以大渡裸裂尻鱼为主。外来物种中，鳙、鲫、鲤、鲇分布在足木足河、绰斯甲河和麻尔曲，属于大渡河源头干流河流（图 1，附表II）。

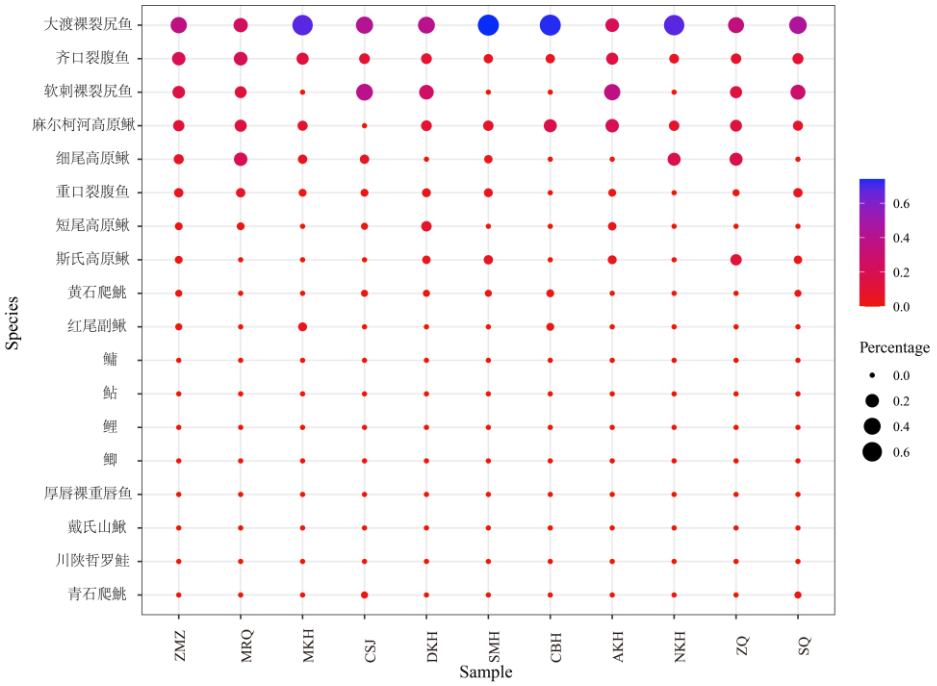

图 2 大渡河源区鱼类丰度气泡图。

ZMZ = 足木足河，MEQ = 麻尔曲，MKH = 玛柯河，CSJ = 绰斯甲河，DKH = 杜柯河，SMH = 梭磨河，CBH = 茶堡河，AKH = 阿柯河，NKH = 尼柯河，ZQ = 则曲，SQ = 色曲。

Fig. 2 Bubble plot of fish abundance in the headwater region of the Dadu River. Note: ZMZ=Zumuzu R., MEQ=Ma'erqu R., MKH=Make R., CSJ=Chuosijia R., DKH=Duke R., SMH=Suomo R., CBH=Chabao R., AKH=Ake R., NKH=Nike R., ZQH=Zequ R., SQH=Sequ R

2.1.2 优势种　基于相对重要性指数（*IRI*）分析，整体上大渡河源头区鱼类优势种有 5 种，分别为大渡裸裂尻鱼（*IRI*=8059.64），其 *IRI* 值远高于其他物种，为该区域的核心优势种；其次为齐口裂腹鱼（*IRI*=3691.03）；软刺裸裂尻鱼（*IRI*=2495.82）；重口裂腹鱼（*IRI*=1358.48）；麻尔柯河高原鳅（*IRI*=1010.41）（表 1）。可以看出，空间分布上大渡河源区干流和支流均以大渡裸裂尻鱼为核心优势种。干流中，足木足河和麻尔曲河的优势种较多，分别有 5 种和 6 种，优势种物种组成相似；麻尔曲和河梭磨河优势种物种数较少，只有 3 种。而支流中，茶堡河、尼柯河、玛柯河的大渡裸裂尻鱼 *IRI* 值分别达 15653、15026、14212，显著高于同支流其他鱼类类群，群落结构的物种组成相对单一，其优势物种分别有 3 种和 4 种。则曲河的优势物种数量最多，有 7 种，除大渡裸裂尻鱼等核心优势类群外，还包含细尾高原鳅、斯氏高原鳅等鱼类。

2.2 群落结构空间格局

NMDS 分析结果显示，排序的 Stress 值为 0.085，表明排序结果具有良好的可靠性与解释力，置换多元方差分析（PERMANOVA）表明，两组间的整体群落组成存在差异但未达到统计学显著水平（F=1.327，R^2=0.135，*P*=0.218）（图 3）。大渡河源区足木足流域（G1）和绰斯甲流域（G2）两大流域鱼类群落结

构在空间上呈现出明显的分异格局。其中，绰斯甲流域的绰斯甲河（A4）、杜柯河（A5）、色曲河（A11）三个样点在 NMDS 空间中紧密聚集，表明该流域内各支流的鱼类群落结构具有较高的内部相似度，群落组成一致性较强；而足木足流域的足木足干流（A1）、麻尔曲（A2）、玛柯河（A3）、梭磨河（A6）、茶堡河（A7）、阿柯河（A8）、尼柯河（A9）、则曲河（A10）等样点整体分布于另一区域，与绰斯甲流域样点形成明显空间隔离，且足木足流域内部样点分布相对分散，体现出该流域因生境异质性较高，支流与干流的鱼类群落结构存在一定内部分化。这一聚类结果直观体现了两大流域在鱼类群落组成层面的整体差异性，同时也反映出足木足流域内部生境异质性对鱼类群落结构的塑造作用更为显著。

表 1 大渡河源区各河流鱼类优势种

Tab. 1 Dominant fish species in each river of the headwater region of the Dadu River

物种	河源区	干流						支流				
		足木足	麻尔曲	玛柯河	绰斯甲	杜柯河	梭磨河	茶堡河	阿柯河	尼柯河	则曲	色曲
大渡裸裂尻鱼	8060	6585	5267	14212	7575	6232	8711	15653	4959	15026	8233	7186
软刺裸裂尻鱼	2496	3382	2572	-	6919	4084	-	-	8402	-	3466	4751
齐口裂腹鱼	3691	3974	5086	2995	2827	4374	-	1062	2397	1306	1645	3584
麻尔柯河高原鳅	1010	1458	1969	1024	-	-	1036	2726	2787	1183	2066	-
重口裂腹鱼	1358	1317	1474	-	1524	2751	3280	-	-	-	-	2869
细尾高原鳅	-	-	3101	-	-	-	-	-	-	2485	2734	-
斯氏高原鳅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1463	-

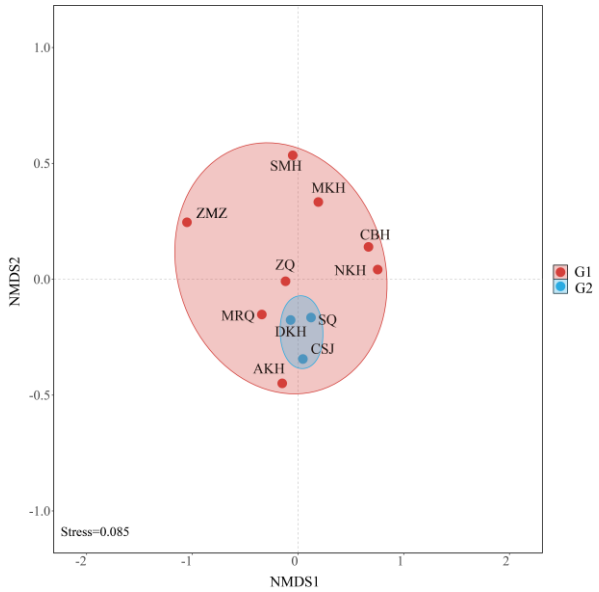

图 3 大渡河源区鱼类群落 NMDS 图

Fig. 3 NMDS plot of fish communities in the headwater region of the Dadu River

SIMPER 分析结果表明，足木足河流域（G1）与绰斯甲河流域（G2）鱼类群落结构的组间相异性为 37.94%，驱动两大流域群落结构分异且差异贡献率（Contribution%）超过 5%的物种共 5 种，分别为斯氏高原鳅、戴氏山鳅、鳙、鲇、青石爬鮡，其中斯氏高原鳅、戴氏山鳅、青石爬鮡为大渡河流域典型土著鱼类，鳙与鲇为外来入侵鱼类，两类物种的丰度分异共同构成了群落结构差异的核心要素（图 4）。

具体来看，斯氏高原鳅的差异贡献率最高（29.96%），其平均丰度在绰斯甲河流域（31.20%）显著

高于足木足河流域（9.94%），是驱动两流域群落分异的首要物种。戴氏山鳅的贡献率次之（27.57%），平均丰度在足木足河流域（49.70%）略高于绰斯甲河流域（42.40%）；外来入侵鱼类中，鳙的贡献率为10.99%，平均丰度在足木足河流域（9.02%）显著高于绰斯甲河流域（1.60%），鲇的贡献率为9.796%，平均丰度同样表现为足木足河流域（12.40%）高于绰斯甲河流域（5.15%）；青石爬鮡的贡献率为7.33%，平均丰度在足木足河流域（11.40%）与绰斯甲河流域（9.21%）间差异不大（图5）。

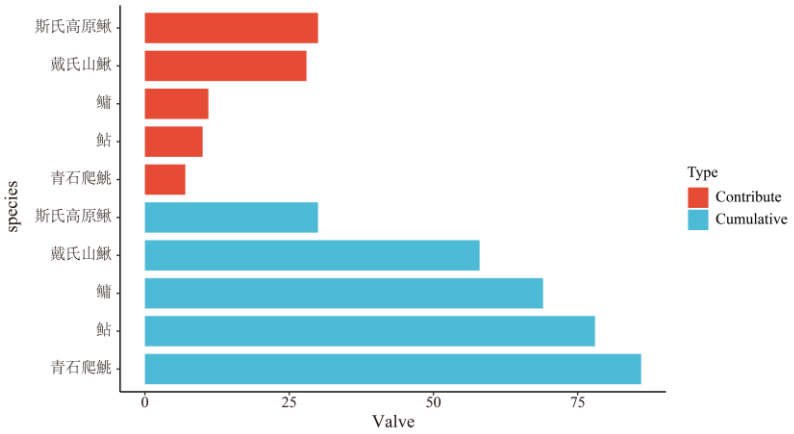

图4 鱼类群落差异物种累计贡献图

Fig. 4 Cumulative contribution plot of species contributing to fish community differences

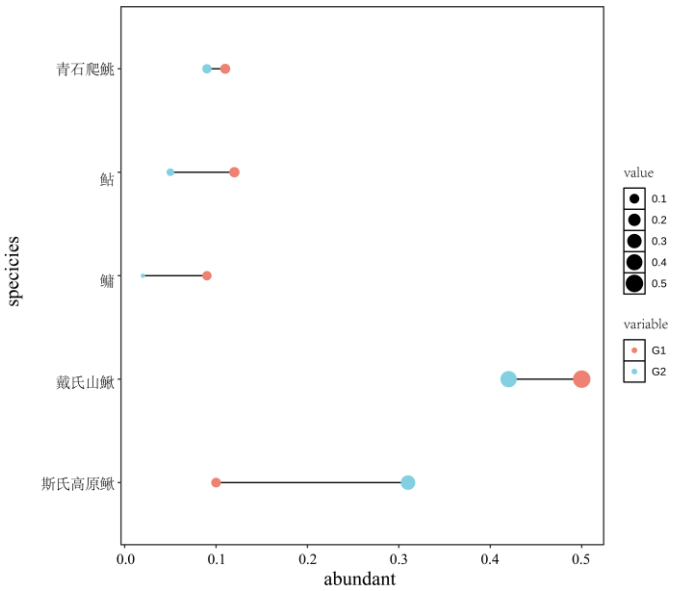

图5 鱼类群落差异贡献物种丰度图

Fig. 5 Abundance plot of species contributing to fish community differences

2.3 物种多样性　在物种多样性方面，大渡河源区鱼类群落呈现出干流整体多样性水平高于支流的空间格局，其中足木足、麻尔曲等干流江段及则曲支流的多样性表现较为突出。

各江段样点的Shannon指数范围为0.84~1.82（图6a）。干流江段（A1~A6）的Shannon指数范围为1.02~1.82，其中足木足（A1，1.82）的Shannon指数最高；支流江段（A7–A11）的Shannon指数范围为0.84~1.73，其中则曲（A10，1.73）的Shannon指数最高。

Margalef丰富度指数范围为0.61~2.02（图6b）。干流江段的Margalef指数范围为1.15~2.02，其中

足木足（A1，2.02）的物种丰富度最高；支流江段的 Margalef 指数范围为 0.61~1.33，其中阿柯河（A8，1.33）的物种丰富度最高。

Pielou 均匀度指数范围为 0.49~0.83（图 6c）。干流江段的 Pielou 指数范围为 0.49~0.82，其中麻尔曲（A2，0.82）的均匀度最高；支流江段的 Pielou 指数范围为 0.52~0.83，其中则曲（A10，0.83）的均匀度最高。

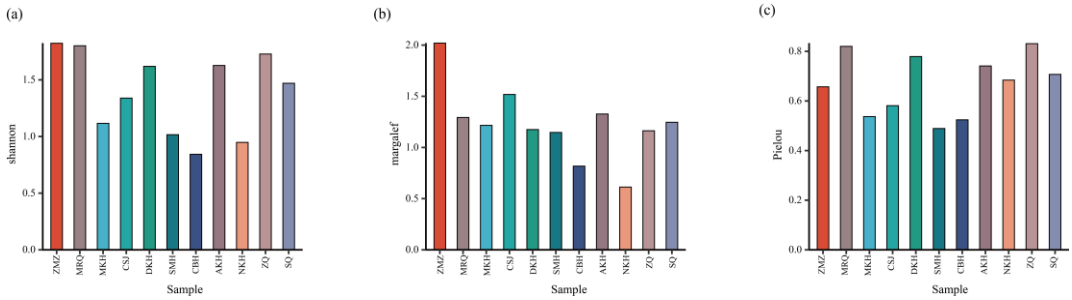

图 6 大渡河源区物种多样性(a) Shannon 多样性指数；(b) Margalef 丰富度指数；(c) Pielou 均匀度指数

Fig. 6 Species diversity plot of the headwater region of the Dadu River. (a) Shannon diversity index; (b) Margalef richness index; (c) Pielou evenness index

2.4 环境对群落结构和多样性的影响

2.4.1 环境对鱼类群落的影响　方差分解分析（variance partitioning analysis, VPA）结果显示，水文、水质与地形三类环境因子共同调控了大渡河源区鱼类群落的空间变异，其贡献模式呈现显著的层级差异（图 7）。其中，地形因子的独立变异解释比例最高，为 0.42，表明海拔梯度、河宽、河道总长等地形地貌特征是塑造鱼类群落结构的核心驱动要素。其次为水文因子的独立效应，变异解释比例为 0.18，反映出流水、水温等对鱼类群落组成的调控作用，是塑造群落结构差异的关键环境要素。水质因子并不单独贡献，其与地形、水文三者共同交互作用的变异解释比例为 0.13，揭示了水质、水文与地形因子间存在显著的协同调控效应，鱼类群落结构是多维度环境条件耦合作用的综合产物。

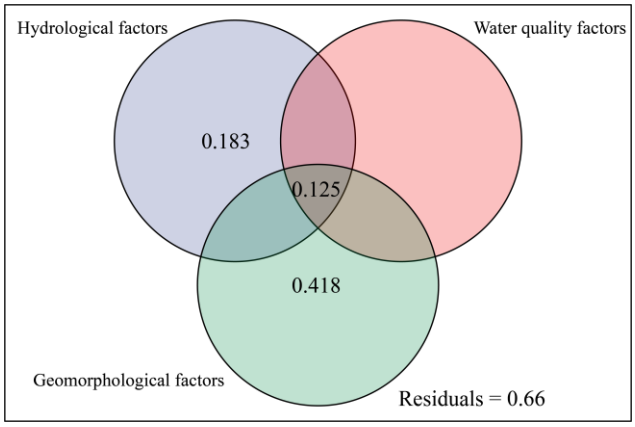

图 7 环境因子对大渡河源区鱼类群落组成变异的方差分解（VPA）Venn 图

Fig. 7 Venn plot of variance partitioning (VPA) for environmental factors affecting variation in fish community composition in the headwater region of the Dadu River

冗余分析（RDA）结果显示，RDA1 的解释率为 56.93%，RDA2 的解释率为 20.43%（图 8）。空间上呈现明显的组间分异足木足流域（G1）与绰斯甲流域（G2），其中溶解氧（DO）、透明度（SD）等水质因子对足木足流域（G1）鱼类群落结构的驱动作用较突出，而水温（WT）、河道总长（TL）等水

文及地形因子则与绰斯甲流域（G2）的鱼类群落关联更为紧密。这一结果表明，水质条件（如溶解氧、透明度）显著塑造了足木足流域鱼类群落的结构特征，而水文与地形因子（如水温、河道长度）则主导了绰斯甲流域鱼类群落的空间分异格局。

2.4.2 环境对多样性的影响　随机森林模型显示，大渡河源区鱼类物种多样性的驱动因子存在显著的指数特异性（图 9）。对于 Shannon 多样性指数，仅河宽（RW）表现为正的 MSE 增加率（2.38%），是影响群落多样性的关键水文因子，而流速、溶解氧等水文、水质因子对其预测贡献较低。Margalef 丰富度指数则主要受地形与水文因子主导，海拔（Elve，5.29%）和河宽（RW，4.14%）的 MSE 增加率均超过 4.00%，同时水温（WT，2.11%）、水深（TL，1.59%）、溶解氧（DO，1.06%）等也表现出一定正向贡献，而水深（SD，-2.03%）、流速（FV，-1.34%）的影响较弱。Pielou 均匀度指数的核心驱动因子为水质因子，溶解氧（DO，3.10%）是唯一表现为正 MSE 增加率的关键变量，水温（WT，-3.93%）、海拔（Elve，-3.22%）、河宽（RW，-3.05%）等因子对其预测贡献较低。综合来看，物种多样性的维持呈现明显的维度分化，物种丰富度多样性受地形和水文因子影响，而群落均匀度则对水质环境（溶解氧）高度敏感，反映了多元环境因子对鱼类多样性的协同调控作用。

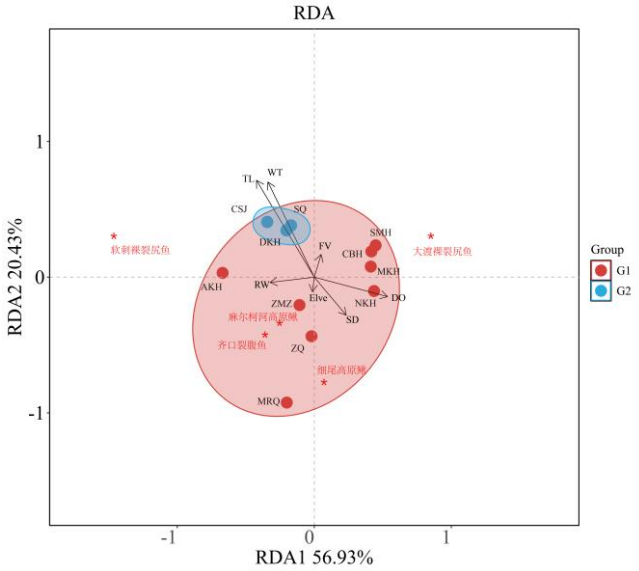

图 8 大渡河源区鱼类群落与环境因子的冗余分析（RDA）图

Fig. 8 Redundancy analysis (RDA) plot of fish communities and environmental factors in the headwater region of the Dadu River

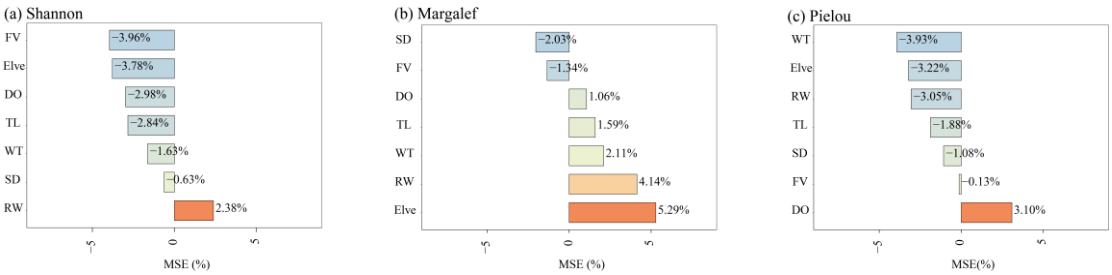

图 9 随机森林模型的环境因子对物种多样性影响。(a) Shannon 多样性指数；(b) Margalef 丰富度指数；(c) Pielou 均匀度指数。

Fig. 9 Effects of environmental factors in random forest model on species diversity. (a) Shannon diversity index; (b) Margalef richness index; (c) Pielou evenness index

3 讨论

3.1 大渡河源区鱼类资源和多样性空间特征

本研究系统解析了大渡河源区鱼类群落的空间分布特征，核心发现为该区域鱼类物种与多样性空间分布存在显著差异，整体呈现干流物种丰富度与多样性显著高于支流的宏观格局。物种方面，研究发现不同支流的物种数差异明显，干流足木足河、绰斯甲河物种数量分别为 16 种和 10 种，是流域物种最富集的区域；而茶堡河、尼柯河等小型支流物种数仅为 3~5 种。本研究发现主要保护鱼类已从历史广泛分布区域退缩，仅在足木足河干流维持种群，这与大渡河上游已建电站导致的栖息地破碎化、洄游通道阻断的规律一致[14-15]。其原因在于干流足木足河因承接多条支流生态廊道，支流的鱼类会聚集到干流作为补充，使其包含鲶形目和鲑形目物种，鱼类物种数更高[34-35]。此外，外来种也主要分布于干流区域，这与干流库区形成的静水缓流生境为鳙、鲫、鲤、鲇等外来鱼类提供了适宜的生存条件有关[36-37]。滤食性的鳙通过改变库区生境浮游生物群落结构间接影响土著鱼类的食物资源，杂食性的鲫和鲤通过直接竞争食物资源、扰动底质改变生境，其扩散可能进一步挤压土著急流特有种的生存空间，加剧原生群落的结构分异[38-39]。支流物种数显著低于干流，可能与部分支流因引水式电站导致的减水断流、生境萎缩有关[19]。鱼类组成方面，所有支流均以鲤形目为绝对优势，这与青藏高原东缘河流的典型区系特征一致[21]。

珍稀濒危物种中，本研究发现，国家一级保护动物川陕哲罗鲑仅在足木足河有分布；国家二级保护鱼类重口裂腹鱼、青石爬鮡及省级重点保护鱼类黄石爬鮡等，主要分布在足木足、麻尔曲和绰斯甲等大型干流支流中，反映出干流区域作为珍稀保护鱼类栖息地的重要性[40]。而支流主要保护鱼类为主要为重口裂腹鱼，物种较为单一，其中重口裂腹鱼在梭磨河的 *IRI* 值达 3280，是该支流的核心优势种之一。与历史研究相比，本研究发现主要保护鱼类已从广泛分布的区域退缩，仅在主要干流足木足河中维持种群，体现了水电开发背景下大渡河源区干流保护对珍稀濒危鱼类群落功能维系的重要性和不可替代性[14-15,19]。这一规律并非区域个例，金沙江流域的研究同样证实，水电开发导致的原生流水生境萎缩，是驱动高原河流特有鱼类种群衰退、分布范围收缩的核心驱动因素[41]。

鱼类多样性层面，大渡河源区鱼类多样性的空间分布整体呈现干流多样性水平高于支流的空间规律，其中足木足河在 Margalef 丰富度指数与 Shannon 多样性指数最高，分别为 2.00 和 1.82；则曲河在 Pielou 均匀度 Pielou 指数上表现优异，反映出其群落结构更均衡；而尼柯河等小型支流的多样性指数显著偏低。这一梯度格局与河流的流域面积、栖息生境类型直接相关，干流及大型支流因河道规模大、生境异质性高、连通性强，支撑了更高的多样性；小型支流则因生境单一、连通性有限，多样性水平受限[20]。这一现象与长江流域[42-43]、澜沧江[36]等高原及大型河流的研究结果高度一致，普遍印证了河流水文连通性与生境异质性越高、多样性水平越突出的生态规律。研究发现，干流仍为多样性核心区，河源区整体多样性格局未发生根本性变化，但部分支流的 Shannon 指数下降了，Pielou 均匀度降低更为明显，表明水电开发干扰已对多样性产生负面影响[34]。

3.2 大渡河源区鱼类群落和多样性的影响因素

区别于以往单一类型环境因子的研究，本研究在系统揭示大渡河源区鱼类群落结构与多样性的空间格局的同时，研究了地形、水文和水质三类环境因子对其的影响。结果表明，三类环境因子共同驱动了河源区鱼类群落的空间变异。其中，地形因子是塑造鱼类群落结构分异的关键影响因子，水文和水质因子则发挥着重要的协同调控作用[44-46]。

群落结构层面，地形因子（海拔、河宽、河道总长）对鱼类群落空间差异的贡献最为突出，这与全球山区河流的研究结论具有一致性，山区河流的鱼类群落结构往往受到河流地貌特征的强烈控制[41]。此外，研究发现，足木足流域与绰斯甲流域的鱼类群落分异与地形、水文梯度密切相关，其中绰斯甲流域的鱼类群落与河道总长、水温等因子的关联更为紧密，而足木足流域则受溶解氧、透明度等水质因子的显著影响，反映了河源区内部因地形和水文条件差异导致的群落分化格局[9,20]。

多样性层面，Shannon 多样性指数与 Margalef 丰富度指数受海拔、河宽等地形水文因子主导，地形地貌是决定物种分布的基础框架，水库蓄水会改变河道形态、淹没河岸带，导致原有栖息地丧失，从而

可能显著降低特有种的丰富度[6,10,41]。Pielou 均匀度指数受溶解氧水质因子调控，水质因子，尤其是溶解氧，直接关系到鱼类的生理耐受和竞争平衡，溶解氧不足会首先淘汰高耗氧的敏感物种，导致群落均匀度下降[23]。

上述环境因子对鱼类群落和多样性的驱动机制，为理解水电开发引发栖息生境改变进而影响鱼类群落分异提供了重要线索[47-48]。大渡河源区作为我国西南重要的水电基地，梯级水电开发已成为该区域鱼类地形变化变化最主要的潜在干扰因素之一[14,22]。结合本研究结果推测，在大渡河源区，水电开发对群落结构的影响呈现多路径协同效应：一方面，大坝建设阻断了川陕哲罗鲑等珍稀洄游性鱼类的迁移通道，同时引发支流减水断流，削弱了梭磨河等支流的生态廊道功能，可能直接导致原生特有物种的分布退缩[49-51]；另一方面，干流库区形成的静水缓流生境，为鳙等外来物种沿水系网络扩散创造了适宜条件，进一步加剧了原生群落的结构分异[7,37]。这也印证了本研究观察到干流多样性高于支流、外来种主要分布于干流的格局特征[52,53]。

需要指出的是，本研究虽无法直接量化水电开发的独立效应，但所识别的关键环境驱动因子为后续开展水电开发累积生态效应的长期监测与评估建立了基线参照，也为后续大渡河源区珍稀特有鱼类保护、水电开发与生态保护的协同管理提供基础科学依据。

3.3 保护建议

本研究明确，大渡河源区是川陕哲罗鲑等极危物种的最后天然庇护所，也是青藏高原东缘原生层级化鱼类群落的天然保存库，具有不可替代的生态保护价值。基于本研究揭示的上述规律与保护价值，结合流域梯级水电开发引发的栖息地破碎化、水文连通性断裂、水文情势改变等核心生态挑战，提出以下建议性措施：

1）构建分级保护体系。建立大渡河源区鱼类资源分级保护体系，结合物种分布特征实施精准分区管控。设定足木足河为核心保护区域，优先划定生态红线，保障水文连通性与急流生境完整，严控各类导致生态碎片化的人类活动；将玛柯河、梭磨河等设为重点保护区域，聚焦川陕哲罗鲑关键生境修复，通过河道整治、植被恢复等措施，稳固其产卵场与栖息环境[15,54,55]。

2）优化水文调度。以水电开发与生态保护协同发展为原则，在保障电站枢纽正常运行的前提下，通过科学水文调度维系鱼类关键栖息生境；依托实时监测数据动态优化调度方案，严格管控生态扰动范围与强度，保障鱼类栖息生境的完整性与稳定性[22,56]。

3）恢复河流连通性。对支流已建小型水电站开展生态后评估，拆除产能落后、规划不合理的电站；在建巴拉、绰斯甲等大型水电站配套建设鱼类洄游通道，保障鱼类产卵场等核心栖息生境的连通性[57]。

4 附件

附表 I~II 见电子版（DOI: 10.18307/2027.0333）。

5 参考文献

[1] Moore JW, Olden JD. Response diversity, nonnative species, and disassembly rules buffer freshwater ecosystem processes from anthropogenic change. *Global Change Biology*, 2017, **23**(5): 1871-1880. DOI: 10.1111/gcb.13536.

[2] Xiong FY, Li ZY, Brosse S *et al*. Fishing ban halts seven decades of biodiversity decline in the Yangtze River. *Science*, 2026, **391**(6786): 719-723. DOI: 10.1126/science.adu5160.

[3] Cheng DD, Zhao XT, Song JX *et al*. Quantifying the distribution and diversity of fish species along elevational gradients in the Weihe River Basin, northwest China. *Sustainability*, 2019, **11**(21): 6117. DOI: 10.3390/su11216177.

[4] Dodds WK, Perkin JS, Gerken JE. Human impact on freshwater ecosystem services: A global perspective. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9061-9068. DOI: 10.1021/es4021052.

[5] Zhu YS, He JY, Xiong FY *et al*. Cumulative ecological impact of cascade hydropower development on fish community structure in the main stream of the Xijiang River, China. *Animals*, 2025, **15**(4): 495. DOI: 10.3390/ani15040495.

[6] Liu XJ, Olden JD, Wu RW *et al*. Dam construction impacts fish biodiversity in a subtropical river network, China. *Diversity*, 2022, **14**(6): 476. DOI:

10.3390/d14060476.

[7] Su GH, Logez M, Xu J *et al*. Human impacts on global freshwater fish biodiversity. *Science*, 2021, **371**(6531): 835-838. DOI: 10.1126/science.abd3369.

[8] Chen QW, Li QY, Lin YQ *et al*. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures. *Reviews of Geophysics*, 2023, **61**(4): e2023RG000819. DOI: 10.1029/2023RG000819.

[9] Lin PC, Fujiwara M, Ma BS *et al*. Ecological drivers shaping mainstem and tributary fish communities in the upper Jinsha River, southeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Processes*, 2025, **14**(1): 8. DOI: 10.1186/s13717-024-00572-y.

[10] He DK, Chen JN, Ding LY *et al*. The status and distribution pattern of fish diversity in the Yarlung Tsangpo River. *Biodiversity Science*, 2024, **32**(11): 24143. DOI: 10.17520/biods.2024143.

[11] Bao JH, Li WW, Zhang CS *et al*. Quantitative assessment of fish passage efficiency at a vertical-slot fishway on the Daduhe River in Southwest China. *Ecological Engineering*, 2019, **141**: 105597. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105597.

[12] Huang YZ, Wang XG, Li HZ *et al*. Research on a multi-species combined habitat suitability assessment method for various fish species. *Sustainability*, 2023, **15**(20): 14801. DOI: 10.3390/su152014801.

[13] Yang HY, Huang DM. A preliminary investigation on fish fauna and resources of the upper and middle Yalu Tsangpo River. *Journal of Central China Normal University*: *Natural Sciences*, 2011, **45**(4): 629-633. DOI: 10.19603/j.cnki.1000-1190.2011.04.025. [杨汉运，黄道明．雅鲁藏布江中上游鱼类区系和资源状况初步调查．华中师范大学学报：自然科学版, 2011, **45**(4): 629-633.]

[14] Cao N, Mao ZP. Countermeasures and suggestions on fish protection during hydropower development of mainstream of Daduhe River. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, **48**(1): 116-121. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.01.021. [曹娜，毛战坡．大渡河干流水电开发中鱼类保护对策及建议．水利水电技术, 2017, **48**(1): 116-121.]

[15] Zhang DY, Zhang ZM, Hou YQ *et al*. Current status of fish resources and conservation suggestions in upper reaches of Dadu River. *Yangtze River*, 2025, **56**(9): 158-165. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2025.09.019. [张东亚，张志明，侯轶群等．大渡河上游鱼类资源现状与保护建议．人民长江, 2025, **56**(9): 158-165.]

[16] Xue XW, Miao W, Ou YJ *et al*. Study on Ecological flow of Dadu River Based on combined hydrology-hydraulics-water ecology method. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(15): 6487-6498. DOI: 10.20103/j.stxb.202401020014. [薛笑薇，苗蔚，欧延静等．基于水文水力学水生态结合法的大渡河生态流量研究．生态学报, 2024, **44**(15): 6487-6498.]

[17] Agostinho AA, Pelicice FM, Gomes LC. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: Impacts and management related to diversity and fisheries. *Revista Brasleira de Biologia*, 2008, **68**(4 Suppl): 1119-1132. DOI: 10.1590/s1519-69842008000500019.

[18] Cao L, Zhang (E/E), Zang CX *et al*. Evaluating the status of China's continental fish and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 2016, **24**(5): 598-610.. DOI: 10.17520/biods.2015331 [曹亮，张鹗，臧春鑫等．通过红色名录评估研究中国内陆鱼类受威胁现状及其成因．生物多样性, 2016, **24**(5): 598-610.]

[19] Zhang RY, Huang FJ, Yang HW *et al*. Investigating the impact of the construction of the Duliu River dam in China on the spatiotemporal changes of fish communities. *Scientific Reports*, 2025, **15**: 14836. DOI: 10.1038/s41598-025-98750-1.

[20] Li J, Xiong CL, Zhao N *et al*. Fish community structure in the mainstem of upper Dadu River based on environmental DNA metabarcoding. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(6): 162-169. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202508190001. [李佳，熊灿林，赵娜等．基于 eDNA 宏条形码技术的大渡河上游鱼类群落结构分析．水生态学杂志, 2025, **46**(6): 162-169.]

[21] Wang WJ, Fang YH, Yang Z *et al*. Fish community structure and diversity in the Leshan section of Dadu River. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(3): 62-69. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202108230289. [王文君，方艳红，杨钟等．大渡河乐山段鱼类群落结构及其多样性分布特征．水生态学杂志, 2023, **44**(3): 62-69.]

[22] Chen BF, Wang DS, Zhang D *et al*. Conservation of aquatic ecosystems and fish species during hydropower development in the river basin: Case study for the Dadu River Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(S1): 347-357. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.S1.057. [陈帮富，王东胜，张迪等．流域水电开发水生态及鱼类保护实践：以大渡河流域为例．水利水电技术：中英文, 2022, **53**(S1): 347-357.]

[23] Zhang DY, Jin Y, Hou YQ *et al*. Impact of hydropower development on fish resources in the upper Dadu River and countermeasures for conservation. *Journal of Hydroecology*, 2024, **45**(6): 76-85. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202210110406. [张东亚，金弈，侯轶群等．水电开发对大渡河上游鱼类资源的影响与保护对策．水生态学杂志, 2024, **45**(6): 76-85.]

[24] Qi ZY, Xiong F, Hu XK *et al*. Effects of multiple stressors on the spatial pattern of fish diversity in the middle and lower reaches of the Han River,

China. *Animals*, 2025, **15**(21): 3109. DOI: 10.3390/ani15213109.

[25]丁瑞华. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.

[26]中国科学院动物研究所. 中国动物志. 北京：人民教育出版社, 1960.

[27]Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in california waters. *Fish bulletin*, 1971, **152**: 1-140.

[28] Qi ZY, Zhai DD, Liu HY *et al*. Fish community structure and nested distribution pattern of the three tributaries at the head of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2025, **37**(3): 952-964. DOI: 10.18307/2025.0332. [戚智远, 翟东东, 刘红艳等. 三峡水库库首 3 条支流鱼类群落结构和嵌套性分布格局. 湖泊科学, 2025, **37**(3):9 52-964.]

[29] 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.

[30]Margalef R. Information Theory in Ecology. *General Systems*, 1958, (3): 36-71.

[31] Pielou EC. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, **13**: 131-144. DOI: 10.1016/0022-5193(66)90013-0.

[32] dos Santos NCL, García-Berthou E, Dias JD *et al*. Cumulative ecological effects of a Neotropical reservoir cascade across multiple assemblages. *Hydrobiologia*, 2018, **819**(1): 77-91. DOI: 10.1007/s10750-018-3630-z.

[33] Shen YJ, Zhang YF, Cheng RL *et al*. Diversity and spatiotemporal dynamics of fish communities in the Chongqing section of the Upper Yangtze River based on eDNA metabarcoding. *Ecology and Evolution*, 2023, **13**(11): e10681. DOI: 10.1002/ece3.10681.

[34] Zhang ZM, Liang WH, Zhang DY *et al*. Fish resources and diversity in the mainstem and tributaries of Dadu River from Jinchuan to Danba. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(3): 54-61. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202206060215. [张志明, 梁炆汉, 张东亚等. 大渡河金川至丹巴河段干、支流鱼类资源及其多样性分布. 水生态学杂志, 2023, **44**(3): 54-61.]

[35] Zhou XS, Li YQ, He JW *et al*. The native fish diversity with environmental influencing factors in the Daqing River basin, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, **12**: 1450903. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1450903.

[36] Zhang C, Ding LY, Ding CZ *et al*. Responses of species and phylogenetic diversity of fish communities in the Lancang River to hydropower development and exotic invasions. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 261-279. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.03.004.

[37] Ding CZ, Jiang XM, Xie ZC *et al*. Seventy-five years of biodiversity decline of fish assemblages in Chinese isolated plateau lakes: Widespread introductions and extirpations of narrow endemics lead to regional loss of dissimilarity. *Diversity and Distributions*, 2017, **23**(2): 171-184. DOI: 10.1111/ddi.12507.

[38] Qiu XC, Mei XY, Razlutskij V *et al*. Effects of common carp (*Cyprinus carpio*) on water quality in aquatic ecosystems dominated by submerged plants: A mesocosm study. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 2019(420): 28. DOI: 10.1051/kmae/2019017.

[39] Zhang X, Xie P, Hao L *et al*. Effects of the phytoplanktivorous silver carp (*Hypophthalmichthys* molitrixon) on plankton and the hepatotoxic microcystins in an enclosure experiment in a eutrophic lake, Lake Shichahai in Beijing. *Aquaculture*, 2006, **257**(1/2/3/4): 173-186. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2006.03.018.

[40] He B, Yan T, Huang YY *et al*. Analysis of fish resources status in the upper reaches of the Dadu River. *Freshwater Fisheries*, 2021, **51**(1): 38-45. DOI: 10.13721/j.cnki.dsyy.2021.01.005. [何斌, 颜涛, 黄颖颖等. 大渡河上游鱼类资源现状. 淡水渔业, 2021,**5 1**(1): 38-45.]

[41] Wang YD, Cui L, Li Q *et al*. The current status of fishery resources in the middle reaches of Jinsha river and the impact of cascade development. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(8): 1425-1435. DOI: 10.7541/2024.2023.0191. [王渝栋, 崔磊, 李茜等. 金沙江中游干流鱼类资源现状及梯级开发对其产生的影响分析. 水生生物学报, 2024, **48**(8): 1425-1435.]

[42] Lin PC, Chen L, Gao XC *et al*. Spatiotemporal distribution and species composition of fish assemblages in the transitional zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Water*, 2020, **12**(12): 3514. DOI: 10.3390/w12123514.

[43] Liu H, Guo CB, Qu X *et al*. Fish diversity, endemism, threats, and conservation in the Jinsha River Basin (Upper Yangtze River), China. *North American Journal of Fisheries Management*, 2021, **41**(4): 967-984. DOI: 10.1002/nafm.10441.

[44] Xiong CL, Li J, Zhu YJ *et al*. Hydrological regime alteration of Dadu River from 1960 to 2023. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(6): 105-113. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202508190002. [熊灿林, 李佳, 朱艳军等. 1960—2023 年大渡河水文情势变化研究. 水生态学杂志, 2025, **46**(6): 105-113.]

[45] Magoulick DD, Dekar MP, Hodges SW *et al*. Hydrologic variation influences stream fish assemblage dynamics through flow regime and drought. *Scientific Reports*, 2021, **11**: 10704. DOI: 10.1038/s41598-021-89632-3.

[46] Dong ZY, Chen LL, Zhang NP *et al*. Response of fish diversity to hydrological connectivity of typical tidal creek system in the Yellow River Delta based on environmental DNA metabarcoding. *Biodiversity Science*, 2023, **31**(7): 100-114. [董志远, 陈琳琳, 张乃鹏等. 基于环境 DNA 宏条形码技术研究黄河三角洲典型潮沟系统鱼类多样性及其对水文连通性的响应.生物多样性, 2023, **31**(7): 100-114.]

[47] Díaz G, Górski K, Heino J *et al*. The longest fragment drives fish beta diversity in fragmented river networks: Implications for river management and conservation. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**: 144323. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144323.

[48] Hu GY, Yang ZH, Bai FP *et al*. Water temperature's cumulative effect induced by the construction of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River. *J Lake Sci*, 2025, **37**(1): 293-303. DOI: 10.18307/2025.0151. [胡光洋, 杨中华, 白凤朋等. 金沙江下游梯级水电开发引起的水温累积效应分析. 湖泊科学, 2025, **37**(1): 293-303.]

[49] Cheng RL, Zhou XX, Zhang YF *et al*. eDNA reveals spatial homogenization of fish diversity in a mountain river affected by a reservoir cascade. *Journal of Environmental Management*, 2024, **361**: 121248. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121248.

[50] Fei SJ, Zhang TT, Zhao F *et al*. Impact of hydrological connectivity of tidal creek system in the Chongming Dongtan of the Yangtze River Estuary on distribution of fish communities. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2025, **32**(5): 675-688. DOI: 10.12264/JFSC2025-0021. [费姝洁, 张婷婷, 赵峰等. 长江口崇明东滩潮沟系统水文连通性对鱼类群落分布的影响. 中国水产科学, 2025, **32**(5): 675-688.]

[51] Shi XT, Gao SH, Ke SF *et al*. Upstream behavioral patterns of three typical fish species in the Heishui River of the Jinsha River after passing through the fishway and crossing the dam. *J Lake Sci*, 2025, **37**(5): 1709-1723. DOI: 10.18307/2025.0533. [石小涛, 高生辉, 柯森繁等. 金沙江黑水河 3 种典型鱼类通过鱼道过坝后上溯行为规律. 湖泊科学, 2025, **37**(5): 1709-1723.]

[52] Cheng RL, Luo Y, Zhang YF *et al*. eDNA metabarcoding reveals differences in fish diversity and community structure in heterogeneous habitat areas shaped by cascade hydropower. *Ecology and Evolution*, 2023, **13**(7): e10275. DOI: 10.1002/ece3.10275.

[53] Huang ZL, Li HY. Dams trigger exponential population declines of migratory fish. *Science Advances*, 2024, **10**(19): eadi6580. DOI: 10.1126/sciadv.adi6580.

[54] Xiong FY, Olden JD, Lu Y *et al*. Riparian land use and in-channel stressors drive fish community structure in the Yangtze River. *Landscape Ecology*, 2021, **36**(10): 3079-3095. DOI: 10.1007/s10980-021-01278-8.

[55] Zhao WT, He W, Zhao XF *et al*. Assessing the impact of small hydropower stations on the connectivity of the Chishui River and restoration strategies. *J Lake Sci*, 2025, **37**(1): 253-265. DOI: 10.18307/2025.0141. [赵文通, 贺蔚, 赵先富等. 小水电站对赤水河连通性影响评估及恢复对策. 湖泊科学, 2025, **37**(1): 253-265.]

[56] Ding LY, Chen LQ, Ding CZ *et al*. Global trends in dam removal and related research: A systematic review based on associated datasets and bibliometric analysis. *Chinese Geographical Science*, 2019, **29**(1): 1-12. DOI: 10.1007/s11769-018-1009-8.

[57] Zheng QZ, Wang QM, Liu F *et al*. Analysis of factors influencing the ecologically suitable areas for Glyptosternum maculatum in the Yarlung Zangbo River. *Ecological Indicators*, 2024, **159**: 111713. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111713.