*J. Lake Sci.(湖泊科学)*, 2026, 38(1):000-000

DOI 10.18307/2026.0136



# 金沙江乌东德水电站集运鱼系统集鱼效果监测与初步评价

杨科[1,2**]，夏利名[1,2]，陈志伟[1,2]，范向军[1,2]，张地继[1,2]，高玉磊[1,2]，段正全[1,2]，格宇轩[1,2]

（1:中国长江三峡集团有限公司，武汉 430010）
（2:高坝大库运行安全湖北省重点实验室，宜昌 443133）

**摘 要：**集运鱼系统作为解决高坝过鱼难题的新兴型式，于二十一世纪初开始应用于我国部分高水头电站，但相关工程集鱼效果却鲜有报道。乌东德水电站首创尾水口集鱼方案，建设了集运鱼系统帮助鱼类洄游。本研究基于乌东德集运鱼系统 2021-2023 年集获鱼类数据，采用多样性指数、相对重要性指数、个体生态学矩阵和 Ward 聚类等方法分析集获鱼类特点，与环评及设计阶段相关要求相互印证，初步评价乌东德集运鱼系统集鱼效果。2021-2023 年，乌东德集运鱼系统集获鱼类 52 种 95281 尾。统计分析表明：（1）10 种主次要过鱼对象全部集获，金沙鲈鲤（*Percocypris pingi*）平均规格最大。（2）集获的圆口铜鱼（*Coreius guichenoti*）、长鳍吻鮈（*Rhinogobio ventralis*）、中华金沙鳅（*Jinshaia sinensis*）、长薄鳅（*Leptobotia elongata*）和裂腹鱼亚科（*Schizothoracinae*）鱼类以 4 龄、3 龄、6 龄、4 龄和 4 龄为主。（3）集获鱼类多样性指数总体处于一般水平，群落结构相对简单。（4）集获鱼类中优势种为鳘（*Hemiculter leucisculus*）、中华沙鳅（*Botia superciliaris*）和泉水鱼（*Pseudogyrinocheilus procheilus*），3 种优势种优势程度达 87.3%。（5）物种层面上，集获鱼类中粘沉性卵、定居型为主要生态类群，喜流特征以急流型鱼类为主，缓流型鱼类亦占一定比例。（6）Ward 聚类分析发现，集鱼数量最多的 7 月、8 月单独为两个聚类，其他月份为一个聚类，季节性差异明显。总体而言，乌东德集运鱼系统帮助了江段大部分鱼类物种洄游，未出现不同个体规格的选择性集诱鱼，初步判断集获的主次要过鱼对象大都为达到初次性成熟年龄的潜在繁殖群体，部分主次要过鱼对象集获月份与环评及设计阶段提出的繁殖时间相比存在滞后或提前，集获鱼类组成变化基本符合设计阶段预测。与同类型过鱼设施相比，乌东德集运鱼系统利用发电尾水诱鱼具有较好的效果，为消减电站的阻隔影响发挥了积极作用。后续需进一步优化集运鱼系统运行方式，加强相关监测，科学、合理的综合评价集运鱼系统有效性，促进金沙江下游连通性恢复。
**关键词：**过鱼设施；乌东德水电站；集运鱼系统；集鱼效果；鱼类多样性

## Monitoring and preliminary evaluation of fish collection effectiveness in the fish collection and transportation system at Wudongde Hydropower Station, Jinsha River

Yang Ke[1,2**], Xia Liming[1,2], Chen Zhiwei[1,2], Fan Xiangjun[1,2], Zhang Diji[1,2], Gao Yulei[1,2], Duan Zhengquan[1,2], Ge Yuxuan[1,2]
(1: *China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R.China*)
(2: *Hubei Key Laboratory of Operation Safety of High Dam and Large Reservoir, Yichang 443133, P.R.China*)

**Abstract:** The fish collection and transportation system were first implemented in China in the early 21st century at several high-head hydropower stations as an emerging solution to address fish passage challenges in high dams. Nevertheless, the extant literature on the effectiveness of this approach is inconclusive. The Wudongde Hydropower Station, Jinsha River, initiated a pioneering initiative in the form of a tailrace outlet fish collection scheme, meticulously constructing a comprehensive fish collection and transportation system to facilitate fish migration. This study utilised the Diversity Index, the Index of Relative Importance, the Fish Autecology Matrix, and Ward Clustering to analyse the characteristics of fish collected from the Wudongde fish collection and transportation system from 2021 to 2023. The results were cross-validated with environmental impact assessment and design requirements in order to provide a preliminary evaluation of the system's efficacy. During the period 2021–2023, the Wudongde fish collection and transportation system amassed a total of 95281 individuals from 52 distinct fish species. The statistical analyses yielded the following findings: (1) The collection of all 10 main and secondary fish passing objects was successful, with *Percocypris pingi* exhibiting the largest average size. (2) The collected specimens of *Coreius guichenoti*, *Rhinogobio ventralis*, *Jinshaia sinensis*, *Leptobotia elongata*, and *Schizothoracinae* fishes were primarily 4-year-old, 3-year-old, 6-year-old, 4-year-old, and 4-year-old, respectively. (3) the indices of fish diversity indicated moderate overall diversity and a relatively simple community structure. (4) The dominant species included *Hemiculter leucisculus*, *Botia superciliaris*, and *Pseudogyrinocheilus procheilus*, collectively accounting for 87.3% of the total catch. At the species level, sticky and demersal eggs were predominant. (5). The lotic type species dominated, but the lentic type also comprised a notable proportion. (6) Ward's clustering method

*2025-01-16 收稿；2025-05-30 收修改稿。
国家重点研发计划（2022YFC3204200）和中国长江三峡集团自主科研项目（NBYG202200462）联合资助。
** 通信作者；E-mail：ydyangke@163.com。

revealed significant seasonal variations, with July and August exhibiting distinct clusters due to the high collection volumes observed during these months. Conversely, other months were grouped into a separate cluster. The Wudongde fish collection and transportation system facilitated migration for the majority of fish species in the river section, with no size-selective bias observed. Preliminary assessment suggests that the majority of the main and secondary fish passing objects collected are potential breeding populations that have reached the age of first sexual maturity. In comparison with the stipulated breeding time that was outlined during the environmental impact assessment and design stage, the collection month of certain fish specimens has been postponed or advanced. The alteration in fish composition is largely consistent with the predictions made during the design stage. A comparison of the Wudongde fish collection and transportation system with analogous fish passage facilities reveals its superior efficacy. This is attributable to the utilisation of a turbine tailwater for fish attraction, which serves to effectively mitigate the barrier effects of the hydropower station. Subsequent endeavours must focus on optimising system operations, enhancing monitoring, and conducting scientific evaluations to ascertain the effectiveness of these measures. This will facilitate the restoration of connectivity in the lower Jinsha River.
**Keywords:** Fish passage facilities; Wudongde Hydropower Station; Fish collection and transportation system; Fish collection effectiveness; Fish diversity

水电作为清洁可再生能源，已被 150 个国家或地区使用，提供了全球 19%的电力供应[1]。目前，全球 63%的河流（大于 1000km）修建有拦河大坝用于水电开发，由此造成的河段破碎化和水文情势改变对鱼类产生了较大影响[2-3]。一是阻隔洄游通道，使鱼类无法完成全部生活史[4-5]。二是形成大小不同的异质种群，种群间基因难以交流，降低了水生生物多样性[6-7]。为了缓解水电工程的阻隔影响，鱼道、升鱼机和集运鱼系统等过鱼设施应运而生，其中鱼道适用水头较低的中低坝，升鱼机与集运鱼系统则适用高坝[8-11]。

升鱼机与集运鱼系统均为非自主上溯型过鱼设施[12]。升鱼机利用坝下固定式建筑集诱鱼，通过垂直或倾斜升降方式将鱼类运输至上游放流[13]。法国 Golfech-Malause 水电站建设了升鱼机帮助鲑鱼上行过坝，设施布置在坝下 20 米，诱鱼流速约 0.3m/s-0.6m/s，平均流量 4.5m$^3$/s。Croze 等人研究发现仅 47%的鲑鱼成功通过了该水电站的升鱼机，较小的诱鱼水流是通过效率较低的主要原因[14]。集运鱼系统包括移动式与固定式两种，二者主要区别在坝下收集设施[15]。移动式为坝下集鱼船或集鱼平台，通过补水装置营造水流集诱鱼[16]。固定式为坝下集鱼建筑，现多为组合方案。例如通过鱼道连接主河道，在鱼道内营造诱鱼水流，鱼道末端设置具有提升功能的集鱼斗。乌江彭水集运鱼船是国内第一座针对高坝的过鱼设施，工程 2011 年投入运行，为移动式集运鱼船[10]。运行以来，彭水集运鱼船系统具有不干扰大坝运行，操作灵活，转运次数和时间不受限制等优点[17]，同时也存在作业水域受限，船内设备噪声较大，诱鱼流量较小等不足[11,16]。目前，国内丰满水电站、黄登水电站[18]等建设了升鱼机，马马崖一级水电站、龙开口水电站等则建设了集运鱼船系统，苏洼龙水电站、杨房沟水电站等建设了鱼道+集鱼站的组合式集运鱼系统[12]。但是，由于吸引水流较小、机械设备完备率较低等缺点，严重制约部分高坝过鱼设施发挥应用效果[19]。

针对现有过鱼设施建设、运行成果，乌东德水电站首创大流量尾水口集鱼方案，旨在为高坝过鱼提供一种新的可行方式。工程从提出到建成耗时 7 年，2014 年 12 月《金沙江乌东德水电站环境影响报告书》首先提出电站建设将对鱼类产生较大阻隔影响，经多方比选，考虑集运鱼船系统过鱼，过鱼种类重点考虑圆口铜鱼（*Coreius guichenoti*）、长鳍吻鮈（*Rhinogobio ventralis*）等长江上游特有鱼类和重要经济鱼类，以及其它省级保护、红皮书珍稀濒危鱼类。2015 年 3 月，原国家环境保护部对乌东德水电站环境影响报告书进行了批复，要求“针对电站建设和运行对鱼类的影响，采取集运过鱼系统过鱼。”2019 年 7 月《金沙江乌东德水电站集运鱼系统方案设计专题报告》提出“移动式方案运行安全性存在较大风险，集鱼效果具有不确定性，尾水集鱼方案在集鱼有效性、工程可行性及维护便利性等方面优势显著，拟采用尾水集鱼方案。”2021 年 3 月乌东德集运鱼系统正式投入试运行，系统由集鱼、提升装载、运输过坝、码头转运、运输放流和监控监测等部分组成。集鱼设施布置在电站两岸尾水口，右岸固定集鱼站布置在尾水急流区和二道坝下缓流区的交接地带，兼顾尾水区流水性鱼类和二道坝下缓流性鱼类。左岸、右岸尾水集鱼箱则主要针对流水性鱼类设计，利用鱼类对大流量尾水的趋流性集鱼。

本研究利用乌东德集运鱼系统 2021-2023 年集获鱼类数据，分析物种组成、个体规格、年龄结构和群落结构，初步评价乌东德集运鱼系统集鱼效果，以期为后续系统运行提供理论依据，为科学、全面的评价集运鱼系统有效性奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 工程概况

乌东德水电站最大坝高 270m，总装机容量 10200MW，是中国第四、世界第七大水电站。电站于 2020 年 1 月下闸蓄水，是金沙江下游河段四座巨型水电站中最上游梯级[20]。

乌东德集运鱼系统通过移动式与固定式集鱼设施的组合，诱集不同生态类型鱼类（图 1）。为统一分析尺度，后续数据均基于运行相对稳定的右岸固定式集鱼站，移动式集鱼箱集获鱼类不纳入数据分析范畴。根据江段前期鱼类资源调查、生境质量调查和鱼类遗传多样性分析和文献调研结果，《金沙江乌东德水电站集运鱼系统方案设计专题报告》中明确系统主要过鱼对象为圆口铜鱼、长鳍吻鮈，次要过鱼对象 8 种，兼顾过鱼对象 38 种（表 1）。主次要过鱼对象繁殖季节为工程主要过鱼季节。其中，主要过鱼对象圆口铜鱼和长鳍吻鮈的繁殖期为 4-7 月，8 种次要过鱼种类的主要繁殖期在 3-7 月，少量裂腹鱼可能在 2 月有繁殖行为，而其它 38 种兼顾过鱼种类的主要繁殖季节在 2-9 月。

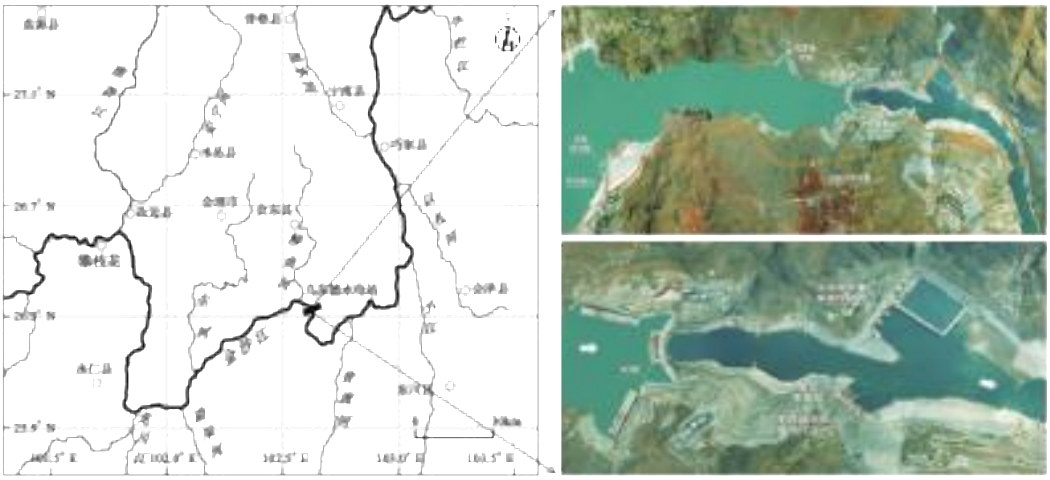

图 1　乌东德水电站及集运鱼系统[19]

**Fig.1　Wudongde hydropower Station and fish collection and transportation system**

### 1.2 过鱼流程与数据采集

乌东德集运鱼系统过鱼流程为诱集鱼→提升→分拣→暂养→运输→放流。其中诱集鱼是集运鱼系统的核心，鱼类具有顶水趋流的特性，当坝下鱼类上溯时，会被布置在尾水出口的集鱼站下泄水流吸引，进而通过防逃笼进入集鱼池。集鱼池内放置漏斗型集鱼箱，当集鱼一定时间后，集鱼箱通过启闭机提升至作业平台，集鱼箱中的鱼类再经过溜鱼槽进入分拣区，进行物种的鉴定与计数、体征数据采集。随后转入暂养箱中，暂养箱通过水泵抽取江水暂养，集鱼高峰期每天换水 4-6 次，非集鱼高峰期每天换水 2 次，避免鱼类由江水进入暂养箱中水质变化影响生存状态。最大暂养天数不超过两天，之后通过装有维生系统的运鱼车和运鱼船运输至坝上合适江段放流。

表 1　乌东德水电站集运鱼系统目标鱼类

**Tab.1　Target fish species in the fish collection and transport system of Wudongde Hydropower Station**

| 过鱼优先级 | 物种 |
|---|---|
| 主要过鱼对象 | 圆口铜鱼、长鳍吻鮈 |
| 次要过鱼对象 | 齐口裂腹鱼、细鳞裂腹鱼、短须裂腹鱼、昆明裂腹鱼、长丝裂腹鱼、长薄鳅、金沙鲈鲤、中华金沙鳅共 8 种 |
| 兼顾过鱼对象 | 华鲮、短身金沙鳅、白缘鮈、中华纹胸鮡、黄石爬鮡、裸体异鳔鳅鮀、鲢、圆筒吻鮈、鲤、鲫、异鳔鳅鮀、前鳍高原鳅、峨嵋后平鳅、重口裂腹鱼、中华沙鳅、铜鱼、岩原鲤、缺须墨头鱼、凹尾拟鲿、细体拟鲿、拟缘鮈、钝吻棒花鱼、西昌华吸鳅、四川华吸鳅、鲇、瓦氏黄颡鱼、泥鳅、蛇鮈、犁头鳅、短体副鳅、张氏鲚、宽鳍鱲、粗唇鮠、切尾拟鲿、泉水鱼、紫薄鳅、红尾副鳅、细尾高原鳅共 38 种 |

本研究生物数据为 2021 年 3 月 1 日-2023 年 12 月 31 日右岸尾水固定式集鱼站集获鱼类。右岸固定式集鱼站于 2021 年 3 月投入运行，2021 年提升 1192 次，2022 年提升 1643 次，2023 年提升 1754 次。集鱼箱每日集鱼时间 8:00-17:30，每次集鱼时长 70-80 分钟，集鱼高峰期间择机开展夜间集鱼作业。

集获鱼类鉴定主要参考《云南鱼类志》(上册、下册)[21-22]、《中国动物志•硬骨鱼纲•鲤形目》(中卷)[23]、《中国动物志•硬骨鱼纲•鲤形目》(下卷)[24]和《金沙江流域鱼类》[25]，物种分类地位参考物种 2000 中国节点(http://www.sp2000.org.cn)。集获主要、次要、部分兼顾过鱼对象和其他珍稀特有鱼类时，通常数量相对较少，这部分鱼类体征数据逐尾采集；单次提升集获到中华沙鳅(*Botia superciliaris*)和鲚(*Hemiculter leucisculus*)等集群上溯鱼类时，通常数量较多，为避免长时间计数与测量影响鱼类存活，抽取大、中、小等不同体型个体测量体征数据，并利用“鱼类总重/测量鱼类平均体重=鱼类尾数”推算数量，具体采集比例根据鱼类存活情况、个体数量等因素决定。采集的体征数据包括全长（精确到 0.1cm）、体长（精确到 0.1cm）、体重（精确到 g）等。

### 1.3 数据分析

1.3.1 *鱼类年龄结构* 利用集获的主次要过鱼对象实测体长数据，基于鱼类生长方程已有研究成果，初步推算集获鱼类年龄结构，判断是否达到性成熟年龄。其中，昆明裂腹鱼（*Schizothorax grahami*）、长丝裂腹鱼（*Schizothorax dolichonema*）、短须裂腹鱼（*Schizothorax wangchiachii*）和金沙鲈鲤（*Percocypris pingi*）缺乏相关研究，3 种裂腹鱼亚科鱼类选择分布范围较广的齐口裂腹鱼（*Schizothorax prenanti*）生长方程进行同属替代，金沙鲈鲤暂不做分析。生长方程计算公式如下：

（1）圆口铜鱼[26]

$$Lt=730.15[1-e^{-0.12（t+1.01）}]$$

（2）长鳍吻鮈[27]

$$Lt=278.6966[1-e^{-0.32962（t+0.25886）}]$$

（3）长薄鳅[28]

$$Lt=-1.3189+5.2132t$$

（4）中华金沙鳅[29]

$$Lt=19.6[1-e^{-0.1156（t+1.3764）}]$$

（5）细鳞裂腹鱼[30]

$$Lt=774.74[1-e^{-0.13（t+0.13）}]$$

（6）齐口裂腹鱼[31]

$$Lt=624.1[1-e^{-0.151（t+0.8281）}]$$

式中，*Lt* 表示 *t* 龄时的理论体长，本研究利用实测体长代入 *Lt*，推算集获鱼类年龄。

1.3.2 *鱼类物种多样性指数* 为了反映集运鱼系统集获鱼类物种多样性变化趋势，采用 Shannon-Wiener 多样性指数（H'）[32]、Simpson 优势度指数（F）[33]、基于数量的 Pielou 均匀度指数（J'）[34]、Margalef 种类丰富度指数（D）[35]进行分析。以上指数计算公式如下：

（1）Shannon-Wiener 多样性指数

$$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\,log_2\,P_i$$

（2）Simpson 优势度指数

$$F=1-\sum（P_i）^2$$

（3）Pielou 均匀度指数

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

（4）Margalef 丰富度指数

$$D=（S-1）/\ln N$$

式中，S 为种类数；Pi 为第 i 种鱼类的个体数占鱼类总个体数的比重；N 为鱼类总个体数，即 Pi=Ni/N。

1.3.3 *鱼类优势程度* 优势种的计算依据 Pinkas 相对重要性指数（Index of relative importance, IRI）[36]，优势种优势程度的计算依据相对重要性百分比指数（IRI%）[37]。

$$IRI=（N+W）\times F\times 10^4$$

$$IRI\%=（IRI/\sum IRI）\times 100\%$$

式中，N 为某一种类的数量占总数量的百分比，W 为某一种类的重量占总重量的百分比，F 为 1 月-12 月的出现频率。定义 IRI≥1000 为优势种，1000>IRI≥100 为常见种，100>IRI≥10 一般种，IRI<10 为少见种[38]。

1.3.4 *鱼类个体生态学矩阵* 基于不同物种的生态学特征构建个体生态学矩阵[39-40]。计算公式如下：

$$R=\frac{S\times A}{n_s}$$

式中，*S* 为鱼类群落矩阵，*S=[S1S2S3…Sj…Sn]*，*A* 为鱼类生态矩阵，$n_s$ 为鱼类群落种类数。*R* 为对环境需求程度矩阵，$R_i$ 代表具有此生态特征的鱼类物种数占集运鱼系统集获鱼类物种总数的比例。$R_i$ 在 0-1 之间，某种生态特征的 *Ri* 值越高，说明具有此生态类型的鱼类在集运鱼系统集获鱼类中占比越大。生态习性偏好数据来自《金沙江流域鱼类》、《四川鱼类志》等相关文献资料[25,39,41]。

1.3.5 *群落相似度分析* 鱼类群落相似度分析采用 R 语言中 factoextra、magrittr 包进行 Ward 聚类分析。本研究基于时间多样性的概念，利用时间代替空间，计算结果反映同一地点不同时间段的群落相似度[42]。

## 2 结果

### 2.1 鱼类种类与数量

2021-2023 年，乌东德集运鱼系统集获鱼类 52 种 95281 尾，隶属于 4 目 11 科 39 属。从集获种类分类层级来看，目的组成上鲤形目鱼类最多，共 40 种，占集获鱼类总物种数的 76.9%；科的组成上鲤科鱼类最多，共 31 种，占 59.6%；属的组成上裂腹鱼属鱼类最多，共 5 种，占 9.6%。从集获鱼类数量变化来看，3 年集获鱼类最多的月份为 7 月，共集获 45287 尾，占总集获数量的 47.5%，其次为 8 月，共 23951 尾，占 25.1%，两月集获鱼类占总数量的 72.6%。从集获鱼类物种变化来看，集获物种数最多的为 5 月和 6 月，均集获 33 种，占总集获物种数的 63.5%。其次为 7 月，共 27 种，占 51.9%（图 2）。

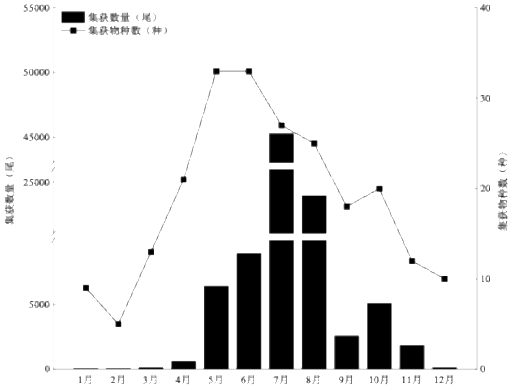


图 2　集获鱼类个体及物种数量月份差异

**Fig.2　Monthly difference in the number of individuals and species with collected fish**

从不同优先级集获数量来看，10 种主次要过鱼对象全部集获共 956 尾，占总集获数量的 1%；38 种兼顾过鱼对象集获 21 种 39865 尾，占总集获数量的 41.8%；其他鱼类集获 21 种 54460 尾，占总集获数量的 57.2%（表 2）。此外，乌东德江段生活有国家重点保护鱼类（二级）8 种，乌东德集运鱼系统全部集获共 717 尾，除圆口铜鱼、长鳍吻鮈、细鳞裂腹鱼（*Schizothorax chongi*）、长薄鳅（*Leptobotia elongata*）、金沙鲈鲤等五种目标鱼类外，还包括青石爬鳅（*Euchiloglanis davidi*）20 尾、岩原鲤（*Procypris rabaudi*）5 尾、红唇薄鳅（*Leptobotia rubrilabris*）4 尾。

对比主次要过鱼对象集获月份（图 3），可以发现圆口铜鱼在 7-8 月集获，长鳍吻鮈主要在 7-9 月集获，长薄鳅集中在 6-8 月，金沙鲈鲤各月均有集获，但 6 月数量最多，裂腹鱼亚科五种鱼类亦集中在 5-6 月。

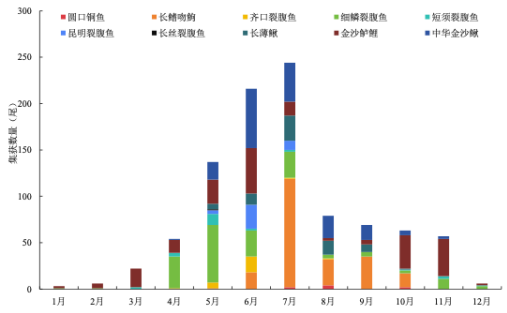


图 3　主次要过鱼对象集获数量月份差异

**Fig.3 Monthly difference in the number of main and secondary fish passing objects**

表 2　不同目标鱼类集获数量

**Tab.2　Collection numbers of different target fish species**

| 过鱼优先级 | 物种 |
|---|---|
| 主要过鱼对象 | 圆口铜鱼（8 尾）、长鳍吻鮈（214） |
| 次要过鱼对象 | 齐口裂腹鱼（26）、细鳞裂腹鱼（180）、短须裂腹鱼（27）、昆明裂腹鱼（40）、长丝裂腹鱼（1）、长薄鳅（69）、金沙鲈鲤（217）、中华金沙鳅（174） |
| 兼顾过鱼对象 | 华鲮（8）、短身金沙鳅、白缘鮡、中华纹胸鮡、黄石爬鮡（6）、裸体异鳔鳅鮀、鲢（6）、圆筒吻鮈（6）、鲤（9）、鲫（77）、异鳔鳅鮀（5）、前鳍高原鳅、峨嵋后平鳅、重口裂腹鱼、中华沙鳅（31143）、铜鱼、岩原鲤（5）、缺须墨头鱼（222）、凹尾拟鲿（8）、细体拟鲿、拟缘鮡（1）、钝吻棒花鱼、西昌华吸鳅（1）、四川华吸鳅（2）、鲇（21）、瓦氏黄颡鱼、泥鳅、蛇鮈（1）、犁头鳅（1977）、短体副鳅、张氏鲚（725）、宽鳍鱲（50）、粗唇鮠、切尾拟鲿、泉水鱼（5581）、紫薄鳅、红尾副鳅（11）、细尾高原鳅 |
| 其他鱼类 | 鲚、云南盘鮈、黄颡鱼、白甲鱼等 21 种共 54460 尾 |

## 2.2 鱼类体长体重与年龄结构

2021-2023 年，乌东德集运鱼系统集获最大个体为南方大口鲇（*Silurus meridionalis*），体长 88.7cm，体重 7392g；最小个体为西昌华吸鳅（*Sinogastromyzon sichangensis*），体长 3.5cm，体重 0.3g。

对比集获主次要过鱼对象个体规格（图 4），金沙鲈鲤平均规格最大，平均体长 40.9cm，平均体重 1268.6g；5 种裂腹鱼亚科鱼类其次，平均体长 28.5cm，平均体重 727g；圆口铜鱼第三，平均体长 30.6cm，平均体重 499.3g；往下分别为长薄鳅，平均体长 20.5cm，平均体重 116.2g；长鳍吻鮈，平均体长 18.9cm，平均体重 111.1g；个体规格最小的为中华金沙鳅（*Jinshaia sinensis*），平均体长 9.9cm，平均体重 18.4g。

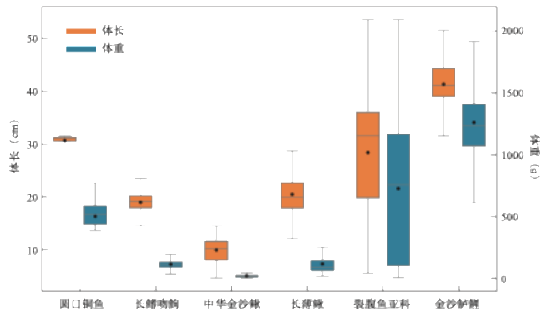


图 4　主次要过鱼对象个体规格

**Fig.4　Individual size difference of main and secondary fish passing objects**

根据体长数据推算主次要过鱼对象年龄结构（图 5），圆口铜鱼由 2-5 龄组成，以 4 龄为主，占总集获数量 62.5%；长鳍吻鮈由 1-8 龄组成，以 3 龄为主，占总集获数量 46.1%；中华金沙鳅由 1-10 龄组成，以 2-7 龄为主，6 龄最多，占总集获数量 20.2%；长薄鳅由 2-7 龄组成，以 4 龄为主，占总集获数量 59.1%；裂腹鱼亚科鱼类由 0-7 龄和 9 龄组成，以 4 龄为主，占总集获数量 25.8%。

## 2.3 鱼类多样性指数

根据乌东德集运鱼系统 2021-2023 年不同月份集获的鱼类物种与数量计算生物多样性指数（图 6）。结果表明 Shannon-Wiener 多样性指数为 0.61-1.98，Simpson 优势度指数为 0.28-0.82，两个指数最小值均出现在 2 月，最大值出现在 3 月；Pielou 均匀度指数为 0.25-0.77，最小值出现在 8 月，最大值出现在 3 月；Margalef 丰富度指数为 0.99-3.65，最小值出现在 2 月，最大值出现在 5 月。此外，还可以发现在集获鱼类数量较多的 5-8 月份多样性指数、优势度指数和均匀度指数都较低，而丰富度指数较高。

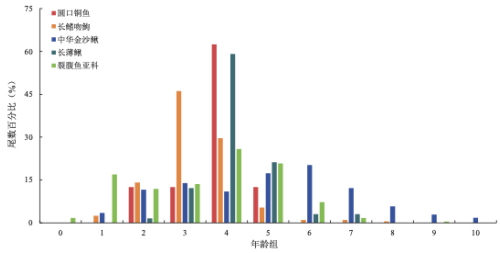


图 5　主次要过鱼对象年龄结构

**Fig.5　The age distribution of main and secondary fish passing objects**

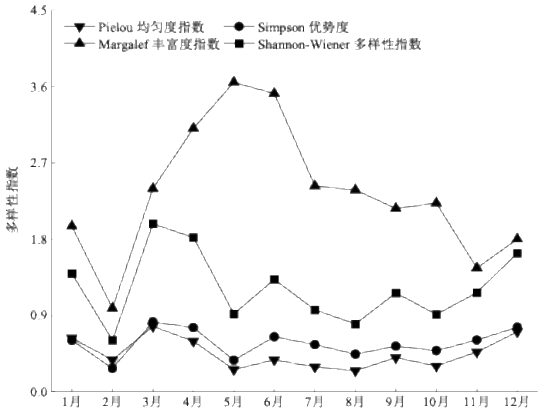


图 6　鱼类物种多样性指数月度变化

**Fig.6　Monthly changes of fish species diversity indices**

## 2.4 鱼类优势种

相对重要性指数（*IRI*）和相对重要性百分比指数（*IRI*%）计算结果表明（表 3）：2021-2023 年乌东德集运鱼系统集获鱼类中优势种 3 种，为鲿、中华沙鳅和泉水鱼（*Pseudogyrinocheilus procheilus*），3 种优势种优势程度达 87.3%，其中鲿优势种程度最高；常见种 4 种，为金沙鲈鲤、细鳞裂腹鱼、云南盘鮈（*Discogobio yunnanensis*）和犁头鳅(*Lepturichthys fimbriata*)，4 种常见种优势程度 9.7%；一般种为缺须墨头鱼(*Garra imberba*)和张氏鲿(*Hemiculter tchangi*)等 13 种，另 32 种为少见种，一般种和少见种优势程度仅占 3.1%。此外，从出现频率看，1 月-12 月均有集获的鱼类共 3 种，为鲿、金沙鲈鲤和云南盘鮈。

## 2.5 鱼类生态类型

选择喜流特征、洄游特性、产卵类型等 7 个生态学特征构建乌东德集运鱼系统集获鱼类个体生态学矩阵（附表 I）。*Ri* 值计算结果表明，集获鱼类中粘沉性卵（0.71）和定居型（0.71）为主要生态类群。喜流特征中急流型鱼类（0.52）为主，但缓流型（0.31）鱼类亦占一定比例。

表 3　集获鱼类相对重要性指数

**Table 3　The index of relative importance of the collected fish**

| 物种 | 数量百分比 | 重量百分比 | 出现频率 | 相对重要性指数 | IRI% | 优势类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 鱎 *Hemiculter leucisculus* | 56.03% | 41.10% | 100.00% | 9712.75 | 56.95% | 优势种 |
| 中华沙鳅 *Botia superciliaris* | 32.69% | 18.71% | 58.33% | 2997.98 | 17.58% | 优势种 |
| 泉水鱼 *Pseudogyrinocheilus procheilus* | 5.86% | 17.96% | 91.67% | 2182.86 | 12.80% | 优势种 |
| 金沙鲈鲤 *Percocypris pingi* | 0.23% | 9.01% | 100.00% | 924.21 | 5.42% | 常见种 |
| 细鳞裂腹鱼 *Schizothorax chongi* | 0.19% | 4.99% | 91.67% | 474.45 | 2.78% | 常见种 |
| 云南盘鮈 *Discogobio yunnanensis* | 0.89% | 0.41% | 100.00% | 129.44 | 0.76% | 常见种 |
| 犁头鳅 *Lepturichthys fimbriata* | 2.07% | 0.31% | 50.00% | 119.09 | 0.70% | 常见种 |
| 缺须墨头鱼 *Garra imberba* | 0.23% | 0.85% | 91.67% | 99.12 | 0.58% | 一般种 |
| 张氏鱎 *Hemiculter tchangi* | 0.76% | 0.30% | 75.00% | 79.84 | 0.47% | 一般种 |
| 白甲鱼 *Onychostoma sima* | 0.05% | 1.17% | 41.67% | 50.87 | 0.30% | 一般种 |
| 长鳍吻鮈 *Rhinogobio ventralis* | 0.22% | 0.78% | 50.00% | 50.13 | 0.29% | 一般种 |
| 短须裂腹鱼 *Schizothorax wangchiachii* | 0.03% | 0.64% | 66.67% | 44.80 | 0.26% | 一般种 |
| 鲫 *Carassius auratus* | 0.08% | 0.23% | 91.67% | 28.59 | 0.17% | 一般种 |
| 齐口裂腹鱼 *Schizothorax prenanti* | 0.03% | 0.64% | 41.67% | 27.62 | 0.16% | 一般种 |
| 鲇 *Silurus asotus* | 0.02% | 0.27% | 66.67% | 19.77 | 0.12% | 一般种 |
| 中华金沙鳅 *Jinshaia sinensis* | 0.18% | 0.10% | 66.67% | 19.15 | 0.11% | 一般种 |
| 南方大口鲇 *Silurus meridionalis* | 0.01% | 0.52% | 33.33% | 17.56 | 0.10% | 一般种 |
| 长薄鳅 *Leptobotia elongata* | 0.07% | 0.26% | 50.00% | 16.74 | 0.10% | 一般种 |
| 鲤 *Cyprinus carpio* | 0.01% | 0.39% | 41.67% | 16.64 | 0.10% | 一般种 |
| 黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco* | 0.12% | 0.14% | 50.00% | 12.93 | 0.08% | 一般种 |
| 其他 *Others(32 种）* | 0.23% | 1.22% | 21.10% | 30.64 | 0.18% | 少见种 |

### 2.6 群落相似性分析

利用 Ward 聚类计算乌东德集运鱼系统不同季节集获鱼类相似性，鱼类组成相似的季节聚为一类，组成差异较大的聚为另一类。结果表明（图 7）：12 个月份可以被分为 3 个聚类。聚类 I 为 8 月，聚类 II 为 7 月，7 月和 8 月为集运鱼系统集获鱼类数量最多的月份；聚类 III 包括 1 月-6 月和 9 月-12 月，其中 12 月、1 月、2 月、3 月、4 月集获鱼类群落组成相似程度较高，这几个月份集获鱼类数量较少。

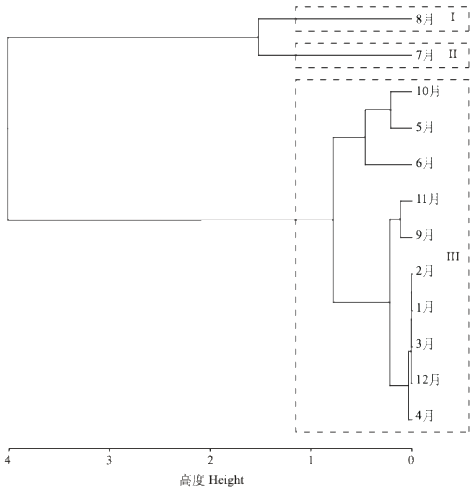


图 7　不同月份集获鱼类的 Ward 聚类

**Fig.7　The Ward clustering of collected fish in different months**

## 3 讨论

### 3.1 与国内部分集运鱼系统运行效果比较

目前，国内多数过鱼设施修建后运行效果不理想，缺乏相关监测数据，无成熟运行效果评价指标体系[8]。集运鱼系统于二十一世纪初引入我国，属新兴过鱼方式，国内缺少相关工程过鱼效果的研究报道[8,9,43]。2023 年 9 月，生态环境部环境工程评估中心发布的《2022 年水电行业绿色发展水平评估报告》选取部批已建成投运的 15 个水电项目的集运鱼系统（升鱼机）作为对象，开展了典型水电环保措施技术评估，评估报告评价乌东德集运鱼系统“针对深切峡谷、特高拱坝过鱼的世界级难题，建设了右岸固定式尾水集鱼站+左右岸尾水集鱼箱，通过多种集鱼设施的组合，实现了多点位、全深度、大流量集诱鱼，提高了集鱼效率，并对电站日内调峰发电不同时段的集诱鱼具有较好的适应性。”评估结果表明乌东德集运鱼系统 2022 年上行集鱼数量居全国首位（图 8）。

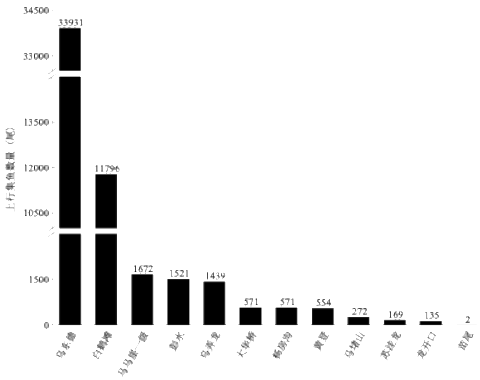


图 8　已建成集运鱼系统（升鱼机）2022 年上行集鱼数量

Fig.8　The fish collection and transportation system (Fish-lifting Machine) has been built to collect the number of upstream fish in 2022

### 3.2 乌东德集运鱼系统集获鱼类特点

2006-2012 年，唐会元等在乌东德下游的白鹤滩库区巧家段调查到鱼类 57 种[44]；2017 年，屈霄等在乌东德和白鹤滩江段调查到鱼类 49 种[45]；2016-2018 年，张镀光等在乌东德库区江段调查到鱼类 59 种[46]。2021-2023 年，乌东德集运鱼系统集获鱼类 52 种，对比蓄水前江段鱼类资源调查结果，可以判断集运鱼系统帮助了江段大部分鱼类物种洄游至坝上。

乌东德集运鱼系统建设的根本目的在于保持河流连通性，促进鱼类自然繁殖活动，以及坝上及坝下间的基因交流，因此在环评及设计阶段提出主次要过鱼对象繁殖季节为工程主要过鱼季节。2021-2023 年，乌东德集运鱼系统部分主次要过鱼对象集获月份与环评及设计阶段提出的繁殖时间相比存在滞后或提前。根据文献调研与现场调查，设计阶段提出圆口铜鱼、长鳍吻鮈繁殖时间为 4-7 月，但集运鱼系统集获圆口铜鱼主要在 8 月，长鳍吻鮈在 8-10 月均有集获，占总集获数量的 46.4%，中华金沙鳅、长薄鳅和金沙鲈鲤亦存在此现象，这可能与水库蓄水后夏秋季下泄低温水有关。相关研究表明，梯级水库存在热量格局的累计效应，低温水下泄或使夏秋季产卵的部分鱼类繁殖时间推后[47-48]。相反，对于秋冬季性腺发育，春季产卵的裂腹鱼亚科鱼类来说，可能使得这部分鱼类繁殖时间提前。设计阶段提出裂腹鱼亚科的五种鱼类繁殖季节为 2-6 月，但亦有 9.5%的裂腹鱼亚科鱼类在 10 月-次年 3 月之间被集获。

根据主次要过鱼对象体长数据推算年龄结构，可初步判断繁殖群体状况。研究表明，金沙江朵美段圆口铜鱼初次性成熟年龄多为 2 龄，屏山段为 2-3 龄[25]。泸州段长鳍吻鮈初次性成熟年龄为 2 龄，乌江下游 3 龄达到初次性成熟[49]。长江上游保护区江段长薄鳅初次性成熟年龄为 2.3 龄[50]。长江上游宜宾段中华金沙鳅初次性成熟或在 2 龄以后[29]；金沙江下游齐口裂腹鱼初次性成熟平均年龄 2.87 龄[31]；裂腹鱼亚科鱼类通常在 3-4 龄达到初次性成熟[51]。综上所述，乌东德集运鱼系统主次要过鱼对象在长江和金沙江不同江段初次性成熟年龄大都在 2-3 龄，裂腹鱼亚科鱼类在 3-4 龄。结合主次要过鱼对象年龄结构分析结果，可初步判断乌东德集运鱼系统集获主次要过鱼对象大都为达到初次性成熟年龄的潜在繁殖群体。2022 年以来，乌东德水电站在每年的 5-6 月开展促进产漂流性卵鱼类繁殖的“人造洪峰”生态调度。目前，乌东德坝下 30km 的黄草坪断面已在 2022-2024 年连续 3 年采集到圆口铜鱼、长鳍吻鮈和中华金沙鳅鱼卵，2023-2024 年连续 2 年采集到长薄鳅鱼卵，这亦证明在相应季节乌东德坝下存在这部分鱼类的繁殖群体。

集获过鱼对象规格特点可验证集运鱼系统有效性。部分过鱼设施监测结果发现大个体鱼类难以被集获，主要是诱鱼水流较小、下游鱼类入口尺寸偏小等原因，若诱鱼水流较大则可能导致中小个体鱼类难以上溯，过鱼设施效果不佳[52-53]。乌东德集运鱼系统紧临尾水布置，利用尾水作为诱鱼水流，建设阶段对不同发电工况下尾水流速分布进行了模型研究，电站满发工况下，尾水洞出口流速可达 3.5m/s。下游鱼类通过带有喇叭口的防逃笼进入集鱼池，防逃笼喇叭口高 1.5m，宽 0.5m，系统设有 8 行 2 列共 16 节防逃笼。2021-2023 年，乌东德集运鱼系统集获最大鱼类体长达 88.7cm，体重 7392g；最小鱼类体长仅 3.5cm，体重仅 0.3g。此外，集获主次要对象个体规格最大的平均体长可达 40.9cm，平均体长最小的仅 9.9cm，这表明乌东德集运鱼系统能够集诱游泳能力较强的大个体鱼类，也能够集诱游泳能力相对较弱的小个体鱼类，未出现流速和鱼类入口尺寸缺陷造成的选择性集诱鱼。

水库蓄水后，自然的河相生境将转变为受控的河道型水库生境，带来的流速变化将影响河流泥沙输移、水生生物群落组成、营养盐状态等，从而影响食物链中相对高端的鱼类，这个影响在群落层面上具体表现为鱼类群落结构发生变化[54-55]。在集运鱼系统设计阶段对乌东德及白鹤滩水电建成蓄水后的坝下鱼类资源演变趋势进行了预测，认为白鹤滩蓄水后，乌东德坝下圆口铜鱼、长鳍吻鮈等喜流型产漂流性卵鱼类及裂

腹鱼类等喜流型产粘沉性卵鱼类资源量将下降，广适型、喜静缓流生境鱼类将成为优势种群。本研究表明，集运鱼系统集获鱼类优势种中鲿为缓流型鱼类，优势程度 57%。另外 2 种优势种中华沙鳅和泉水鱼，4 种常见种金沙鲈鲤、细鳞裂腹鱼、云南盘鮈和犁头鳅，均为急流型鱼类，累计优势程度达 40%。主要过鱼对象圆口铜鱼、长鳍吻鮈累计优势程度仅 0.3%。此外，鱼类个体生态学矩阵分析表明，集获鱼类中急流型鱼类物种数较多，但缓流型鱼类亦占一定比例。对比集运鱼系统集获鱼类与蓄水前江段鱼类组成，从鱼类尾数来看，乌东德坝下江段优势类群已由蓄水前的急流型鱼类逐渐转变为缓流型鱼类，但物种层面上，急流型鱼类物种仍占较大比例。因此判断 2021–2023 年集获鱼类特点基本符合设计阶段预测，广适型、喜静缓流生境鱼类已成为坝下优势种群，但目前急流型鱼类仍占一定比例。此外，这也符合右岸固定集鱼站布置在尾水急流区和二道坝下缓流区的交接地带，兼顾尾水区流水性鱼类和二道坝下缓流性鱼类的集鱼目标。

此外，集运鱼系统可作为江段鱼类资源调查点，判断坝下鱼类群落结构，分析鱼类物种在梯级水库中的生存及分布状况。多样性指数分析结果表明不同月份多样性指数处于一般水平[56]，表明目前集获鱼类群落结构相对简单。这可能与优势种优势程度较高有关，相关研究表明渔获物中一种或几种鱼类占主导地位，导致多样性指数降低[57]。2021-2023 年，乌东德集运鱼系统集获金沙鲈鲤 217 尾，其中 2021 年集获 20 尾，平均体重 901.1g，2022 年 118 尾，平均体重 1236g，2023 年为 79 尾，平均体重 1406.5g。个体规格呈逐年上升趋势，这可能蓄水后食物资源变化有关。金沙鲈鲤成鱼喜栖息于开阔水面，喜猎食鲿等小型鱼类[41]。运行过程中亦发现金沙鲈鲤通常与鲿同时出现，而鲿是水库蓄水后增殖的物种，因此判断水库蓄水后为其提供了更优质的食物资源。次要过鱼对象中长丝裂腹鱼（*Schizothorax dolichonema*）仅集获 1 尾，兼顾过鱼对象中的细尾高原鳅（*Triplophysa stenura*）、前鳍高原鳅（*Triplophysa anterodorsalis*）和峨眉后平鳅（*Metahomaloptera omeiensis*）等未集获，这可能与此物种分布范围有关，相关资料表明长丝裂腹鱼、高原鳅属鱼类主要分布于金沙江及雅砻江中上游，峨眉后平鳅等小型鱼类主要分布在流速较快、含氧量较高的支流，金沙江下游干流较为罕见[25,58]。

### 3.3 集运鱼系统后续运行提升方向

截至 2024 年 6 月底，乌东德集运鱼系统已累计集鱼突破 10 万尾，为消减大坝的阻隔影响，帮助鱼类洄游和沟通上下游鱼类种群基因交流发挥了积极作用。但在运行过程中，发现存在过鱼目标对象减少、电站调度要求与集运鱼系统运行条件难以匹配、设备自动化智能化程度不高、过鱼效果监测评估体系不健全等问题，后续运行中相应的提升方向有以下几点：（1）加强坝下鱼类资源监测。运用水声学探测和标记追踪等技术，了解集运鱼系统下游鱼类多样性及时空分布规律，探究群落结构演变趋势及上溯规律；（2）加强环境因素监测与分析。水温、流速和流量等是影响过鱼设施运行的主要环境因素[59]，后续需加强相关环境监测，探究高流速大流量尾水场景下的监测设备应用，综合分析环境因素对集运鱼系统运行效果影响规律与内在机制；（3）应用辅助诱鱼手段。诱鱼是过鱼设施运行成功的关键，相关研究表明，灯光、饵料等辅助诱鱼手段可增加鱼类进入过鱼设施的几率[60]。（4）开发鱼类智能识别算法，研究智能识别技术应用。当前乌东德集运鱼系统多利用人工进行物种鉴定、数量计算和体征测量，后续应利用人工智能技术提升自动化水平，避免长时间测量影响鱼类生存状态，提升系统运行效率。（5）建立集运鱼系统运行效果综合评价指标体系。目前，过鱼设施效果评估主要依靠有效性和效率两个指标，但受到技术条件等客观因素影响难以量化特定时期坝下具有过坝需求的种类及数量[9]。后续乌东德集运鱼系统将持续做好运行数据纪录和相关监测，科学、合理的评价集运鱼系统有效性，促进金沙江下游连通性恢复。

## 4 附件

附表 I 见电子版（DOI:10.18307/2026.0136）。

## 5 参考文献


[1] Lehner B, Liermann CR, Revenga C et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502. DOI: 10.1890/100125.

[2] Liermann CR, Nilsson C, Robertson J et al. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. *BioScience*, 2012, 62(6): 539-548. DOI: 10.1525/bio.2012.62.6.5.

[3] Grill G, Lehner B, Thieme M et al. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221. DOI: 10.1038/s41586-019-1111-9.

[4] Chapin III FS, Zavaleta ES, Eviner VT et al. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 234-242. DOI: 10.1038/35012241.

[5] Ding, CZ, Sun J, Huang MR et al. Flow and thermal regimes altered by a dam caused failure of fish recruitment in the upper Mekong River. *Freshwater Biology*, 2023, 68(8): 1319-1329. DOI: 10.1111/fwb.14105.

[6] Hudman SP, Gido KB. Multi-scale effects of impoundments on genetic structure of creek chub (Semotilus atromaculatus) in the Kansas River basin. *Freshwater Biology*, 2013, 58(2): 441-453. DOI: 10.1111/fwb.12079.

[7] Silva AT, Lucas MC, Castro-Santos T et al. The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries*, 2018, 19(2): 340-362. DOI: 10.1111/faf.12258.

[8] Wen JY, Chen A, Cao N et al. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(5): 49-55. DOI: 10.3880/j.issn. [温静雅, 陈昂, 曹娜等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述. 水利水电科技进展, 2019, 39(05): 49-55.]

[9] Noonan MJ, Grant JWA, Jackson CD. A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, 2012, 13(4): 450-464. DOI: 10.1111/j.1467-2979.2011.00445.x.

[10] Tao JP, Wen JY, He Da et al. Review on monitoring and evaluating of fish passage facilities for upper migration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(10): 2770-2782. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201810013. [陶江平, 温静雅, 贺达等. 上行过鱼设施过鱼效果监测研究进展. 长江流域资源与环境, 2019, 39(05): 49-55.]

[11] Cai L, Zhang P, Hou YQ et al. Demand, achievement and issues of fish passage facilities in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(01): 292-299. DOI: 10.13292/j.1000-202001.029. [蔡露, 张鹏, 侯轶群等. 我国过鱼设施建设需求、成果及存在的问题. 生态学杂志, 2020, 39(01): 292-299.]

[12] Jin ZJ, Shan CK, Cui L et al. Design of entrance and attraction flow of fish passage facility. *Water Resources Protection*, 2019, 35(06): 145-154. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933. [金志军, 单承康, 崔磊等. 过鱼设施进口及吸引流设计. 水资源保护, 2019 ,35(06): 145-154.]

[13] Shen CY, Yang RG, Qin X et al. Application of fish passage facilities in Lancang River Basin. *Water Power*, 2023, 49(02): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342. [沈春颖, 杨锐国, 秦鑫等. 澜沧江流域过鱼设施的应用探讨. 水力发电, 2023, 49(02): 1-5.]

[14] Croze O, Bau F, Delmouly L. Efficiency of a fish lift for returning Atlantic salmon at a large-scale hydroelectric complex in France. *Fisheries Management and Ecology*, 2008, 15(5-6): 467-476. DOI: 10.1111/j.1365-2400.

[15] Zhang Q, Tang Y, Shi J et al. Numerical Study on Fish Collection and Transportation Facility with Water Temperature Compensation. *Water*, 2023, 15(18): 3185. DOI: 10.3390/w15183185.

[16] Liang YY, Liu DF, Shi XT et al. Overview of Fish Barging. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2014, 31(2): 25-29, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.02.006. [梁园园, 刘德富, 石小涛等. 集运鱼船研究综述. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 25-29, 34.]

[17] Zheng JX, Han DJ. Review on the Development of Oversea High Dam Fishpass Facilities and Its Enlightenment to China. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(04): 76-79. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2013.04.016. [郑金秀, 韩德举. 国外高坝过鱼设施概况及启示. 水生态学杂志, 2013, 34(04): 76-79.]

[18] Cai L, Katopodis C, Johnson D et al. Case study: Targeting species and applying swimming performance data to fish lift design for the Huangdeng Dam on the upper Mekong River. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 32-38. DOI: 10.1016/j.ecoleng.

[19] Wu JD, Wang X, Weng YH et al. Scheme design of fish collection and transportation system of Wudongde Hydropower Station. *Yangtze River*, 2022, 53(2): 88-94. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.02.015. [吴俊东, 王翔, 翁永红等. 乌东德水电站集运鱼系统方案设计. 人民长江, 2022, 53(02): 88-94.]

[20] Fan QX, Zhang CR, Chen WB et al. Key technologies of intelligent construction of Wudongde and Baihetan super high arch dams. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(02): 22-35. DOI: 10.11660/slfdxb.20190203. [樊启祥, 张超然, 陈文斌等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术. 水力发电学报, 2019, 38(02): 22-35.]

[21] 褚新洛, 陈银瑞. 云南鱼类志(上册). 北京: 科学出版社, 1989.

[22] 褚新洛, 陈银瑞. 云南鱼类志(下册). 北京: 科学出版社, 1990.

[23] 陈宜瑜. 中国动物志•硬骨鱼纲•鲤形目(中卷). 北京: 科学出版社, 1998.

[24] 乐佩琦. 中国动物志•硬骨鱼纲•鲤形目(下卷). 北京: 科学出版社, 2000.

[25] 张春光, 杨君兴, 赵亚辉等. 金沙江流域鱼类. 北京: 科学出版社, 2019.

[26] Yang Z, Wan L, Tao JP et al. Age and Growth of *Coreius guichenoti* in the Mainstream of the Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(04): 46-52. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2011.04.017. [杨志, 万力, 陶江平等. 长江干流圆口铜鱼的年龄与生长研究. 水生态学杂志, 2011, 32(04): 46-52.]

[27] Bao XG, Xie WX, Huang DM et al. Study on the Age and Growth of *Rhinogobio ventralis* in Jinsha River. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(21): 10017-10019. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2009.21.134. [鲍新国, 谢文星, 黄道明等. 金沙江长鳍吻鮈年龄与生长的研究. 安徽农业科学, 2009, 37(21): 10017-10019.]

[28] Liang YQ, Hu XJ, Huang DM et al. Studies on the age and growth of *Leptobotia elongate. Journal of Hydroecology*, 2007, 27(3): 29-31. DOI:10.3969/j.issn.1003-1278.2007.03.012. [梁银铨, 胡小健, 黄道明等. 长薄鳅年龄与生长的研究. 水生态学杂志, 2007, 27(3): 29-31.]

[29] 贾砾. 长江宜宾段中华金沙鳅食性与生长研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2013.

[30] Zhu QG, Tang HY, Lin H et al. Age Structure, Growth Characteristics and Population Dynamic of *Schizothorax chongi* in Middle and Lower Jinsha River. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(02): 56-63. DOI: 10.15928/j.1674-3075.201904210099. [朱其广, 唐会元, 林晖等. 金沙江中下游细鳞裂腹鱼的年龄生长及种群动态. 水生态学杂志, 2021, 42(02): 56-63.]

[31] 段鹏翔. 金沙江下游齐口裂腹鱼种群动态研究[学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.

[32] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illionois Press, 1949.

[33] Simpson EH. Measurement of diversity. *Nature*,1949, 163(4148): 688. DOI: 10.1038/163688a0.

[34] Pielou EC. Ecological Diversity. New York: John Wiley and Sons, 1975.

[35] Margalef R. Information theory in ecology. International Journal of General System, 1958.

[36] Pinkas L, Oliphant MS, Iverson LK. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. *Fish Bulletin*, 1971, 152: 1-10.

[37] Cortes E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes. Canadian *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(3): 726-738. DOI: 10.1139/f96-316.

[38] Dai MM, Yang K, Li S et al. Fish diversity and resource status in the Nanguang River, a tributary of upper Yangtze River. *Biodiversity Science*, 2019, 27(10): 1081-1089. DOI: 10.17520/biods.2019264. [代梦梦, 杨坤, 黎树等. 长江上游支流南广河的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 2019, 27(10): 1081-1098.]

[39] 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(04): 1473-1485.]

[40] Teng H, Tian HW, Liu HW et al. Fish resources status in Heishui River, a tributary of the lower reaches of Jinsha River. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1499-1511. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202105.016. [滕航, 田辉伍, 刘寒文等. 金沙江下游支流黑水河鱼类资源现状. 生态学杂志, 2021, 40(05): 1499-1511.]

[41] 丁瑞华. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.

[42] Magurran AE, Dornelas M, Moyes F et al. Temporal β diversity—A macroecological perspective. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, 28(12): 1949-1960. DOI: 10.1111/geb.13026.

[43] Wang M, Ma WZ, Zhao Y et al. Discussion on the development of fish collection and transportation system and relevant technical problems. *Water Power*, 2017, 43(02): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2017.02.002. [王猛, 马卫忠, 赵谊等. 集运鱼系统发展及相关技术问题探讨. 水力发电, 2017, 43(02): 6-9.]

[44] Tang HY, Yang Z, Gao SB 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. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(06): 7-15. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2014.06.002. [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. 水生态学杂志, 35(06): 7-15.]

[45] Qu X, Guo CB, Xiong FY et al. Characterization of the fish community and environmental driving factors during development of cascaded dams in the Lower Jinsha River. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(06): 46-56. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.06.006. [屈胥, 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. 水生态学杂志, 2020, 41(06): 46-56.]

[46] Zhang DG, Wang DQ, Li GJ et al. Fish resources in reservoir section before impoundment of Wudongde Hydropower Station. *Yangtze River*, 2022, 53(10): 45-51. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.10.007. [张镀光, 王导群, 利广杰等. 乌东德水电站蓄水前库区江段鱼类资源研究, 人民长江, 2022, 53(10):45-51.]

[47] Huang ZL, Li ZL. Dams trigger exponential population declines of migratory fish. *Science Advances*, 2024, 10(19): 1-22. DOI: 10.1126/sciadv.adi65.

[48] He FZ, Zarfl C, Tockner K et al. Hydropower impacts on riverine biodiversity. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(11): 755-772. DOI: 10.1038/s43017-024-00596-0.

[49] 姚建伟. 长江上游长鳍吻鮈繁殖生物学研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2015.

[50] 田辉伍. 长江上游保护区长薄鳅和红唇薄鳅种群生态及遗传结构比较研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2013.

[51] 陈礼强. 细鳞裂腹鱼生殖生物学研究[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2007.

[52] Li J, Li XH, Pan F et al. Preliminary study on the operating effect of Xiniu fishway in Lianjiang River. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(4): 53-57. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2013.04.013. [李捷, 李新辉, 潘峰等. 连江西牛鱼道运行效果的初步研究. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 53-57.]

[53] Wang X, Gao L, Wang K et al. Effects of fish passing through the fishway of the Xiajiang Water Control Project. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(01): 130-140. DOI: 10.12264/JFSC2021-0181. [王晓, 高雷, 王珂等. 峡江水利枢纽鱼道过鱼效果的初步研究. 中国水产科学, 2022, 29(01): 130-140.]

[54] Greathouse EA, Pringle CM, McDowell WH et al. Indirect upstream effects of dams: consequences of migratory consumer extirpation in Puerto Rico. *Ecological Applications*, 2006, 16(1): 339-352. DOI: 10.1890/05-0243.

[55] Sá-Oliveira JC, Hawes JE, Isaac-Nahum VJ et al. Upstream and downstream responses of fish assemblages to an eastern Amazonian hydroelectric dam. *Freshwater biology*, 2015, 60(10): 2037-2050. DOI: 10.1111/fwb.12628.

[56] Magurran AE. Ecological diversity and its measurement. Princeton: Princeton universitypress, 1988.

[57] Li S, Jiang W, Li B et al. Fish community structure and diversity below Gezhouba Dam in Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(03): 121-130. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202205260193. [李莎, 姜伟, 李博等. 长江葛洲坝坝下江段鱼类群落结构及多样性. 水生态学杂志, 2024, 45(03): 121-130.]

[58] 朱松泉. 中国条鳅志. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.

[59] Shi XT, Bai TX, Xu JW et al. Monitoring and evaluation of effectiveness through fishway in Songxin Hydropower Station of Heishui River, lower reaches of Jinsha River. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 972-984. DOI: 10.18307/2023.0317. [石小涛, 白天翔, 许家炜等. 金沙江下游支流黑水河松新电站鱼道过鱼效果监测与评估. 湖泊科学, 2023, 35(3): 972-984.]

[60] Mueller RP, Simmons MA. Characterization of gatewell orifice lighting at the Bonneville Dam second powerhouse and compendium of research on light guidance with juvenile salmonids. Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2007.

附表 Ⅰ 鱼类个体生态学矩阵

**Appended Tab.I Fish autecology matrix**

| 种 species | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 圆口铜鱼 *Coreius guichenoti* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 长鳍吻鮈 *Rhinogobio ventralis* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 齐口裂腹鱼 *Schizothorax prenanti* | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 细鳞裂腹鱼 *Schizothorax chongi* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 短须裂腹鱼 *Schizothorax wangchiachii* | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 昆明裂腹鱼 *Schizothorax grahami* | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 长丝裂腹鱼 *Schizothorax dolichonema* | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 长薄鳅 *Leptobotia elongata* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 金沙鲈鲤 *Percocypris pingi* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 中华金沙鳅 *Jinsha*ia sinensis | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 华鲮 *Bangana rendahli* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 黄石爬鮡 *Euchiloglanis kishinouyei* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 鲢 *Hypophthalmichthys molitrix* | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 圆筒吻鮈 *Rhinogobio cylindricus* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 鲤 *Cyprinus carpio* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 鲫 *Carassius auratus* | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 异鳔鳅鮀 *Xenophysogobio boulengeri* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 中华沙鳅 *Botia superciliaris* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 岩原鲤 *Procypris rabaudi* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 缺须墨头鱼 *Garra imberba* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 凹尾拟鲿 *Pseudobagrus emarginatus* | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 拟缘鮡 *Liobagrus marginatoides* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 西昌华吸鳅 *Sinogastromyzon sichangensis* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 四川华吸鳅 *Sinogastromyzon szechuanensis* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 鲇 *Silurus asotus* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 蛇鮈 *Saurogobio dabryi* | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 犁头鳅 *Lepturichthys fimbriata* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 张氏鲨 *Hemiculter tchangi* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 宽鳍鱲 *Zacco platypus* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 泉水鱼 *Pseudogyrinocheilus procheilus* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 红尾副鳅 *Homatula variegatus* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 鲨 *Hemiculter leucisculus* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 云南盘鮈 *Discogobio yunnanensis* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 白甲鱼 *Onychostoma sima* | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 子陵吻鰕虎鱼 *Rhinogobius giurinus* | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 鱘 *Aristichthys nobilis* | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 银鱼 *Neosalanx tangkahkeii* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 乌苏拟鲿 *Pseudobagrus ussuriensis* | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 青石爬鮡 *Euchiloglanis davidi* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 翘嘴鲌 *Culter alburnus* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 南方大口鮠 *Silurus meridionalis* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 麦穗鱼 *Pseudorasbora parva* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 马口鱼 *Opsariichthys bidens* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 高体鳑鲏 *Rhodeus ocellatus* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 短须颌须鮈 *Gnathopogon imberbis* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 大口黑鲈 *Micropterus salmoides* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 草鱼 *Ctenopharyngodon idella* | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 棒花鱼 *Abbottina rivularis* | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 斑纹薄鳅 *Leptobotia zebra* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 短尾拟鲿 *Pseudobagrus brevicaudatus* | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 红唇薄鳅 *Leptobotia rubrilabris* | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| *Ri* | 0.52 | 0.31 | 0.17 | 0.71 | 0.29 | 0.29 | 0.71 |

注：E1.急流型，E2.缓流型，E3.广适型，E4.定居型，E5.短距离洄游型，E6.漂流性卵，E7.粘沉卵。

Note: E1.Lotic type, E2.Lentic type, E3.Eurytopic type, E4.Settlement, E5.Simimmigrate, E6.Drafting eggs, E7.Sticky and demersal eggs.