

龙羊峡水库鱼类多维多样性空间分布格局

卓玉 李钧乐 李英钦 李柯懋 简生龙 隋晓云 贾银涛 陈毅峰

SPATIAL DISTRIBUTION PATTERN OF FISH MULTIFACETED BIODIVERSITY IN THE LONGYANGXIA RESERVOIR

ZHUO Yu, LI Jun-Le, LI Ying-Qin, LI Ke-Mao, JIAN Sheng-Long, SUI Xiao-Yun, JIA Yin-Tao, CHEN Yi-Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

落叶生境蛭态轮虫物种多样性及四种中国新记录种

SPECIES DIVERSITY OF BDELLOID ROTIFERS IN LEAF LITTER AND FOUR NEW RECORDS IN CHINA

水生生物学报. 2021, 45(2): 436–445 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.275>

珠江水系广西江段鱼类多样性空间分布特征

FISH DIVERSITY AND DISTRIBUTION PATTERN OF THE PEARL RIVER SYSTEM IN GUANGXI

水生生物学报. 2020, 44(4): 819–828 <https://doi.org/10.7541/2020.098>

新疆伊犁河不同河段鱼类的物种多样性和优势种

SPECIES DIVERSITY AND DOMINANT FISH SPECIES IN DIFFERENT REACHES OF THE ILI RIVER, XINJIANG

水生生物学报. 2017, 41(4): 819–826 <https://doi.org/10.7541/2017.102>

广东沿海洛氏角毛藻复合群物种多样性的探究

PRELIMINARY STUDY ON THE SPECIES DIVERSITY OF *CHAETOCEROS LORENZIANUS* COMPLEX FROM GUANGDONG COASTAL WATERS

水生生物学报. 2017, 41(6): 1282–1290 <https://doi.org/10.7541/2017.159>

基于多位点序列分型方法的于桥水库微囊藻遗传多样性分析

GENETIC DIVERSITY OF *MICROCYSTIS* STRAINS IN YUQIAO RESERVOIR BASED ON MULTILOCUS SEQUENCE TYPING (MLST) APPROACH

水生生物学报. 2021, 45(4): 871–880 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.067>

武汉东湖夏冬两季浮游动物物种多样性及群落结构研究

SPECIES DIVERSITY AND COMMUNITY STRUCTURE OF ZOOPLANKTON IN SUMMER AND WINTER IN THE EAST LAKE, WUHAN

水生生物学报. 2020, 44(4): 877–894 <https://doi.org/10.7541/2020.105>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2023.0052

龙羊峡水库鱼类多维多样性空间分布格局

卓玉^{1,2,3} 李钧乐^{1,2,3} 李英钦^{4,5} 李柯懋^{4,5*} 简生龙^{4,5} 隋晓云²
贾银涛^{2*} 陈毅峰²

(1. 西藏大学生态环境学院, 拉萨 850000; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 青海省渔业技术推广中心, 西宁 810012; 5. 青海省高原水生生物及生态环境重点实验室, 西宁 810012)

摘要: 为了解龙羊峡水库鱼类多维多样性现状及空间分布格局, 于2022年6月对龙羊峡的鱼类进行了调查, 并结合鱼类物种出现与否、个体数和生物量3种数据类型对龙羊峡鱼类物种多样性、系统发育多样性和功能多样性现状及空间分布进行了研究。调查共采集鱼类2416尾, 94.24 kg, 经鉴定有鱼类19种, 隶属于4目7科17属, 其中土著鱼类8种, 外来鱼类11种。与历史调查相比, 龙羊峡的土著鱼类减少, 而外来种显著增加。基于3种数据类型计算的物种多样性、系统发育多样性和功能多样性分布结果存在差异, 所以在研究鱼类生物多样性时应该结合多种数据类型对其进行综合评估。具体来看, 龙羊峡物种丰富度分布呈现出库首>库尾>库中的特征, 但个体数和生物量从库尾至库首逐渐减少; 3种数据类型计算出的鱼类系统发育多样性均在库中最高; 基于物种出现与否和个体数两种数据类型计算的功能多样性均在库尾较高, 而基于生物量数据计算的功能多样性则在库首较高。回归分析表明, 龙羊峡鱼类系统发育多样性受外来物种显著影响, 而物种多样性和功能多样性的变化与距大坝距离和外来种数量之间均不相关。

关键词: 物种多样性; 系统发育多样性; 功能多样性; α 多样性; 龙羊峡水库

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)03-0504-09



鱼类是水生生态系统中最重要的一类脊椎动物, 被作为水生生态系统健康评价中重要的指示物种之一^[1,2], 研究其群落结构和生物多样性变化能够较好地指示水生生态系统健康状况, 并为保护鱼类生物多样性及水生生态系统提供科学依据。目前对于鱼类生物多样性的研究主要集中于物种多样性维度, 物种多样性能够直观地反映出生态系统中物种数及多度的变化规律, 是群落多样性的基本组成维度, 也是目前使用最广泛的生物多样性的度量^[3-5]。但单一维度的研究并不能够全面地反映生态系统的结构和功能, 不同维度的生物群落多样性表示的意义不同, 所提供的有关生态系统状况的信息也不同^[6]。因此, 近年来, 研究人员又提出了基于物种进化历史的系统发育多样性和物种功能性状

差异的功能多样性来反映群落多样性特征。系统发育多样性能够基于物种间亲缘关系的远近, 从物种进化历史的角度物种间的生态差异^[7,8]; 功能多样性即群落中物种之间功能差异的程度, 能够反映物种在群落中的功能作用, 也是联系生物多样性和生态系统功能的关键性因素^[6,9,10]。

水库是介于河流和湖泊之间的一种半人工半自然水体类型, 其内部存在明显的环境梯度, 水库入水口库尾区域偏向于河流性质, 为流水环境, 水深较浅; 而靠近大坝的库首区域更偏向于湖泊性质, 为静水环境, 中间还存在由流水环境向静水环境过渡的区域, 这种环境梯度也会对流域内的水生生物造成影响^[11,12]。龙羊峡水库位于青海省海南州共和县与贵南县交界处, 距离黄河源头1684 km。

收稿日期: 2023-02-17; 修订日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(32171659 和 U22A20454); 国家重点研发计划(2021YFC3200103)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32171659 and U22A20454); the National Key Research and Development Program (2021YFC3200103)]

作者简介: 卓玉(1999—), 女, 硕士研究生; 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: zhuoyu0608@163.com

通信作者: 李柯懋, E-mail: 776239004@qq.com 贾银涛, E-mail: jiayintao@ihb.ac.cn *共同通信作者

龙羊峡水库始建于1978年,坝高178 m,全长1227 m,其中主坝长度396 m,总库容为 $2.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$,水库回水长度108 km,水面面积 383 km^2 ,总装机容量 $1.28 \times 10^6 \text{ kw}$,是多年调节的大型水利枢纽,以发电为主,兼具防洪、灌溉、防凌、养殖和旅游等综合效益^[13]。龙羊峡水库是黄河流域面积最大的深水水库,控制着黄河上游将近65%的水量和主要洪水来源,龙羊峡水电站的建设为西北电网的调峰、调频发挥了重要作用,也为下游地区的防洪、灌溉和缓解下游断流做出了巨大贡献^[13]。龙羊峡水库为该地区的旅游业和养殖业创造了条件,其优越的地理位置和水文条件使得龙羊峡水库拥有黄河上游龙羊峡至积石峡河段最大的鲑鳟养殖容量^[14]。但近年来,随着黄河上游梯级水电站的修建和各水库水产养殖产业的发展,加之生态区域气候的特殊性,龙羊峡流域内鱼类群落结构发生了巨大改变^[15]。王基琳等^[16]于1982年(龙羊峡水库蓄水前)在龙羊峡采集到鱼类10种(含一高原鳅属未定种),均为土著鱼类;张建军等^[17]于2005—2007年在龙羊峡采集到鱼类17种,其中土著鱼类8种,外来鱼类9种。这两次调查显示,自龙羊峡水库自蓄水后,其鱼类组成已发生较大变化,主要特征为外来鱼类显著增加。但近年来,水电开发及水产养殖的持续发展是否导致鱼类群落发生了更大变化,目前还不得而知,且针对龙羊峡鱼类的多维多样性现状及空间分布格

局未见报道。本研究基于龙羊峡现有鱼类组成,结合物种出现与否、个体数和生物量3种数据类型,从物种多样性、系统发育多样性和功能多样性3个维度来评估龙羊峡鱼类多样性现状及分布特征,以期深入了解龙羊峡水库鱼类的群落结构变动趋势及龙羊峡水库鱼类重点保护区域划分等保护措施制定提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间及采样点设置

2022年6月,我们对龙羊峡鱼类展开调查。根据龙羊峡地形条件及调查的可操作性,沿河流方向共设置10个调查点位,根据流速和距大坝距离沿河流方向将研究区域分为库尾、库中和库首3个河段。1、2、3号样点为库尾,库尾接近龙羊峡水库入水口,距大坝距离大于30 km,为自然河道与库区交汇处,水流逐渐由流水过渡至静水;4、5、6、7号样点为库中,库中为静水区域,距大坝距离在10—30 km,受到的其他人为干扰较库首少;8、9、10号调查点为库首,库首也为静水区域,库首距大坝距离小于10 km,且靠近龙羊峡镇,是龙羊峡景区游乐设施集中区域,也是龙羊峡水库网箱养殖的主要区域(图1)。

1.2 鱼类采集及处理

于2022年6月14日至6月17日对龙羊峡水库鱼

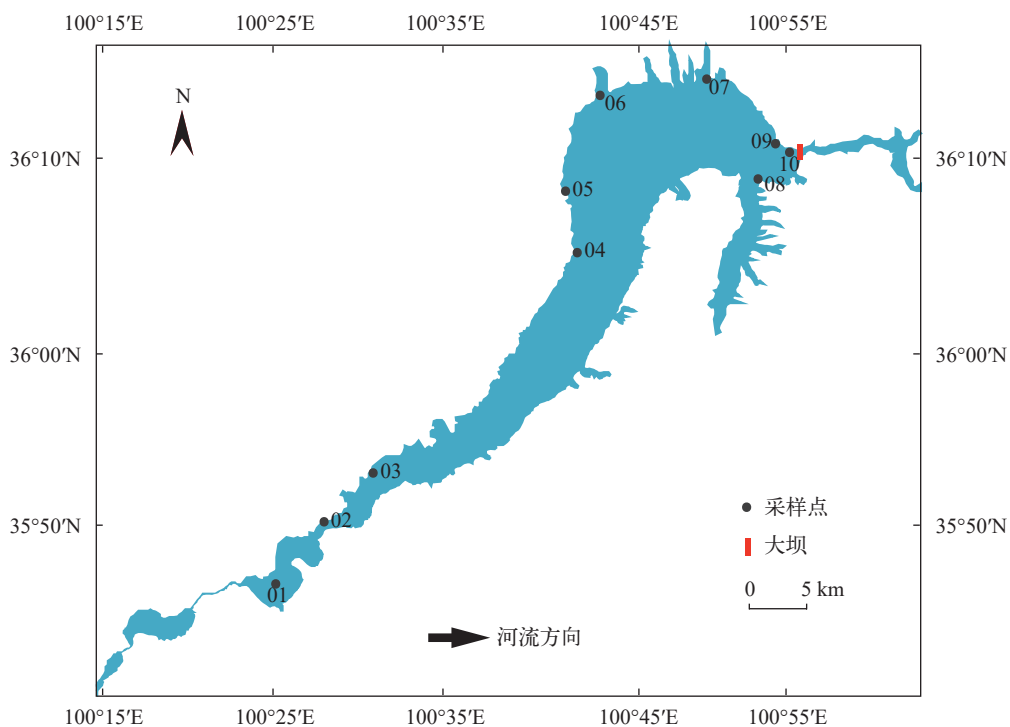


图1 龙羊峡调查点位示意图

Fig. 1 Location of the sampling sites of Longyangxia Reservoir

类进行调查, 鱼类采集采取网捕形式, 网具为三重刺网(网目为10—150 mm, 长80 m, 高1.5 m)和地笼(长30 m), 每个样点各放置一个刺网和一个地笼, 采样时间为24h。鱼类种类鉴定参考《中国淡水鱼类检索》^[18]《中国条鳅志》^[19]《黄河鱼类志》^[20]。对于基于形态学无法鉴定的种类则采集鳍条并加入酒精固定后带回实验室进行分子鉴定。现场测量全长(mm)、体长(mm)、体高(mm)和体重(g)等指标。

1.3 功能特征的选择

选择与体型、营养、资源的获取及生境利用相关的6个特征来描述鱼类的功能特征: 最大体长、营养级、气候适应性(温带和亚热带)、流水亲和性(亲流性、广适性和嗜湖沼)、体高和口位(上位、端位、亚下位和下位)^[21, 22]。其中体高数据直接测量获得, 其他功能特征数据从Fishbase网站获得。

1.4 指数计算

采用物种丰富度来表征物种多样性。

采用种间平均距离(Mean pairwise distance, MPD)和最近种间系统发育距离(Mean nearest taxon distance, MNTD)来表征群落的系统发育多样性和功能多样性^[23, 24]。种间平均距离(MPD)表示在群落中随机选择的两个物种之间所有系统发育距离(或功能距离)的平均值; 最近种间平均进化距离(MNTD)表示每个物种与该群落中最接近的亲缘物种之间的最短系统发育距离(或功能距离)的平均值^[7, 24]。计算公式如下:

$$\text{MPD} = \frac{\sum_i^n \sum_j^n \sigma_{ij} f_i f_j}{\sum_i^n \sum_j^n f_i f_j}$$

$$\text{MNTD} = \frac{\sum_i^n \min \sigma_{ij} f_i}{n}$$

式中, n 为组成群落的物种数量, σ_{ij} 是物种*i*和物种*j*的谱系距离或功能性状距离, $\min \sigma_{ij}$ 为最短距离, f_i 和 f_j 分别为物种*i*和*j*的相对多度。

为了校正群落间由于物种数不同所造成的系统发育和功能多样性的差异, 我们分别计算了系统发育和功能多样性的标准化效应值(Standard effect size, SES)。标准化种间平均进化距离(sesMPD)表示在群落中随机选择的两个物种之间所有系统发育距离(或功能距离)的平均值与随机群落间的差异; 标准化最近种间平均进化距离(sesMNTD)表示每个物种与该群落中最接近的亲缘物种之间的最短系统发育距离(或功能距离)的平均值与随机群落间的差异^[7, 25]。

分别基于鱼类物种出现与否、鱼类个体数和生物量3种类型数据计算系统发育多样性和功能多

样性的标准化种间平均距离(sesMPD)和标准化最近种间谱系距离(sesMNTD)。同时, 为了反映当前龙羊峡库区土著鱼类多样性的分布格局, 我们进一步分析了不同河段土著鱼类的多样性。但由于多数样点土著物种数量小于3种, 不能对群落的系统发育和功能多样性进行评估, 因此, 我们对于土著鱼类的分析集中于物种多样性这一维度进行。

1.5 数据处理

物种间的分类距离使用“taxa2dist”函数进行计算^[26]; 使用“FD”包中的“gowdis”函数将功能性状转化为Gower相异距离矩阵后计算MPD值和MNTD值^[25, 27]。后分别使用R中“picante”包中的“pd”和“ntd”函数计算MPD值和MNTD值^[28]。

运用非参数检验对河段间鱼类生物多样性分布差异进行分析。非参数检验在R中完成。运用多元回归分析来评估水坝建设和外来鱼类数量是否影响龙羊峡水库物种多样性、系统发育多样性和功能多样性的分布格局。距大坝距离(m)代表了水坝建设对龙羊峡鱼类的影响; 而外来鱼类增加是目前龙羊峡水库鱼类面临的最大的威胁之一。以距大坝距离和外来种(物种数、个体数和生物量)所占百分比作为自变量, 生物多样性指标为因变量。回归分析在SPSS软件中完成。

2 结果

2.1 龙羊峡鱼类现状

本次调查共采集到鱼类19种, 隶属于4目7科17属(表1)。其中, 鲤形目(Cypriniformes)2科12属14种, 鲇形目(Siluriformes)1科1属1种, 鲈形目(Perciformes)2科2属2种, 鲑形目(Salmoniformes)2科2属2种。鲤形目鱼类为龙羊峡鱼类主要组成部分, 占鱼类总物种数的73.68%, 14种鲤形目鱼类隶属于鲤科(Cyprinidae)和鳅科(Cobitidae), 分别有5种和9种, 分别占鱼类物种总数的26.32%和47.37%。其次为鲈形目和鲑形目, 均占鱼类总物种数的10.53%, 鲈形目有鰕虎鱼科(Gobiidae)和沙塘鳢科(Odontobutidae)鱼类各1种, 鲑形目有胡瓜鱼科(Osmeridae)和鲑科(Salmonidae)鱼类各1种。鲇形目仅鲇科(Siluridae)鱼类1种。

土著鱼类仅有8种, 占龙羊峡鱼类物种总数的42.11%, 均为鲤形目鱼类; 外来鱼类11种, 占龙羊峡鱼类总物种数的57.89%, 其中鲤形目6种, 鲇形目、鲈形目和鲑形目鱼类全部为外来鱼类。

在渔获物数量及生物量上, 本次调查共渔获鱼类2416尾, 总重量为94.24 kg。其中土著鱼类1348尾, 占鱼类总个体数的55.79%, 土著鱼类总重

量为87.98 kg, 占鱼类总生物量的93.36%; 土著鱼类中个体数和生物量均以硬刺高原鳅(*Triplophysa scleroptera*)最多, 渔获1183尾, 83.92 kg, 占土著鱼类总个体数的87.61%, 占土著鱼类总生物量的89.05%, 外来鱼类1068尾, 占鱼类总个体数的44.21%, 外来鱼类总重量为6.26 kg, 占鱼类总生物量的6.64%。

本次调查采集的鱼类中刺鲃(*Acanthogobio guentheri*)被中国脊椎动物红色名录(2016)^[29]列为濒危物种, 拟鲃高原鳅(*Triplophysa siluroides*)、花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*)、黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)和厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus*)被列为易危物种。厚唇裸重唇鱼(仅限野生种群)和拟鲃高原鳅(仅限野生种群)被国家重点保护野生动物名录(2021)^[30]列为国家二级保护野生动物。

2.2 龙羊峡鱼类物种多样性格局

龙羊峡鱼类物种丰富度呈现出库首>库中>库尾的特征(表 2)。刺鲃、厚唇裸重唇鱼和拟鲃高原鳅3种土著鱼类仅在库尾河段出现; 而拟硬刺高原鳅(*Triplophysa pseudoscleroptera*)和黄河裸裂尻鱼仅在库首河段出现; 硬刺高原鳅和北方花鳅(*Cobitis sibirica*)2种土著鱼类在整个河段均有分布。鱼类个体数和生物量分布均呈现出库尾>库中>库首的特征(表 2)。但鱼类物种丰富度、个体数和生物量在不同河段间分布差异不显著($P>0.05$)。

龙羊峡水库土著鱼类物种丰富度呈现出库首>库尾>库中的特点, 土著鱼类个体数和生物量分布均呈现出库尾>库首>库中的特征(表 2)。龙羊峡水库库首和库中的土著鱼类物种丰富度差异显著($P=0.04$), 但其余河段的土著鱼类丰富度、个体数

表 1 龙羊峡鱼类物种名录

Tab. 1 Fish list of Longyangxia Reservoir

目Order	科Family	属Genus	种Species
鲤形目Cypriniformes	鳅科Cobitidae	高原鳅属 <i>Triplophysa</i>	拟硬刺高原鳅 <i>Triplophysa pseudoscleroptera</i> 硬刺高原鳅 <i>Triplophysa scleroptera</i> 拟鲃高原鳅 <i>Triplophysa siluroides</i>
		花鳅属 <i>Cobitis</i>	北方花鳅 <i>Cobitis sibirica</i>
		泥鳅属 <i>Misgurnus</i>	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>
	鲤科Cyprinidae	麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>
		裸鲤属 <i>Gymnocypris</i>	花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>
		鲤属 <i>Cyprinus</i>	鲤 <i>Cyprinus carpio</i>
		棒花鱼属 <i>Abbottina</i>	棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>
		鲫属 <i>Carassius</i>	鲫 <i>Carassius auratus</i>
		裸裂尻鱼属 <i>Schizopygopsis</i>	黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>
		鲫鲂属 <i>Rhodeus</i>	中华鲫鲂 <i>Rhodeus sinensis</i>
		刺鲃属 <i>Acanthogobio</i>	刺鲃 <i>Acanthogobio guentheri</i>
		裸重唇鱼属 <i>Gymnodiptychus</i>	厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnodiptychus pachycheilus</i>
		鲃形目Siluriformes	鲃科Siluridae
鲈形目Perciformes	鰕虎鱼科Gobiidae	栉鰕虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>	子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>
	沙塘鳢科Odontobutidae	黄魮鱼属 <i>Micropercops</i>	黄魮 <i>Micropercops swinhonis</i>
鲑形目Salmoniformes	胡瓜鱼科Osmeridae	公鱼属 <i>Hypomesus</i>	池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>
	鲑科Salmonidae	太平洋鲑属 <i>Oncorhynchus</i>	虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>

表 2 龙羊峡鱼类物种多样性(均值±标准差)

Tab. 2 The species diversity of fish in Longyangxia Reservoir (mean±SD)

多样性维度 Biodiversity dimension	河段 Reach	物种丰富度 Species richness	个体数(尾) Individual number (ind.)	生物量 Biomass (kg)
物种多样性(全部鱼类) Species diversity (all species)	库尾	6.33±0.58	429.33±585.51	29.47±47.35
	库中	7.50±2.38	244.50±322.98	0.89±1.13
	库首	8.33±1.53	51.33±15.95	0.75±0.43
物种多样性(土著鱼类) Species diversity (native species)	库尾	3.33±1.53	400.33±608.53	28.83±47.29
	库中	1.75±0.50	15.50±7.19	0.08±0.05
	库首	4.00±1.00	28.33±14.64	0.38±0.13

和生物量均无显著性差异($P>0.05$)。

2.3 龙羊峡鱼类系统发育多样性格局

基于鱼类物种出现与否、鱼类个体数两种数据计算的系统发育多样性的标准化种间平均距离(PD.sesMPD)和最近种间谱系距离(PD.sesMNTD)的分布特征一致,均为库中>库尾>库首;而基于生物量数据计算的系统发育多样性的标准化种间平均距离(PD.sesMPD)和最近种间谱系距离(PD.sesMNTD)则呈现出库中>库首>库尾的分布特征(图2)。龙羊峡水库鱼类系统发育多样性在不同河段间分布差异不显著($P>0.05$)。

2.4 龙羊峡鱼类功能多样性格局

基于鱼类物种出现与否数据计算的功能多样性的标准化种间平均距离(FD.sesMPD)和标准化最近种间谱系距离(FD.sesMNTD)呈现出库尾>库首>库中的分布特征;基于鱼类个体数数据计算的功能多样性的标准化种间平均距离(FD.sesMPD)和标准化最近种间谱系距离(FD.sesMNTD)呈现出库尾>

库中>库首的分布特征;而基于鱼类生物量数据计算的功能多样性的标准化种间平均距离(FD.sesMPD)和标准化最近种间谱系距离(FD.sesMNTD)则呈现出库首>库尾>库中的分布特征(图3)。龙羊峡鱼类功能多样性在不同河段间分布差异不显著($P>0.05$)。

2.5 多维多样性与环境因子的关系

多元回归分析结果发现:仅基于鱼类物种存在与否和鱼类个体数两种数据计算的系统发育多样性的标准化种间平均距离(P.PDsMPD)和标准化最近种间谱系距离(P.PDsMNTD)与外来物种数占比均呈显著正相关($P<0.05$;表3)。其余鱼类多样性指数与距大坝距离和外来物种之间均无显著相关关系($P>0.05$)。土著鱼类物种多样性与距大坝距离和外来物种之间也无显著相关关系($P>0.05$)。

3 讨论

与历史调查资料相比,龙羊峡鱼类物种组成发生了较大变化,主要表现为土著鱼类减少,外来鱼

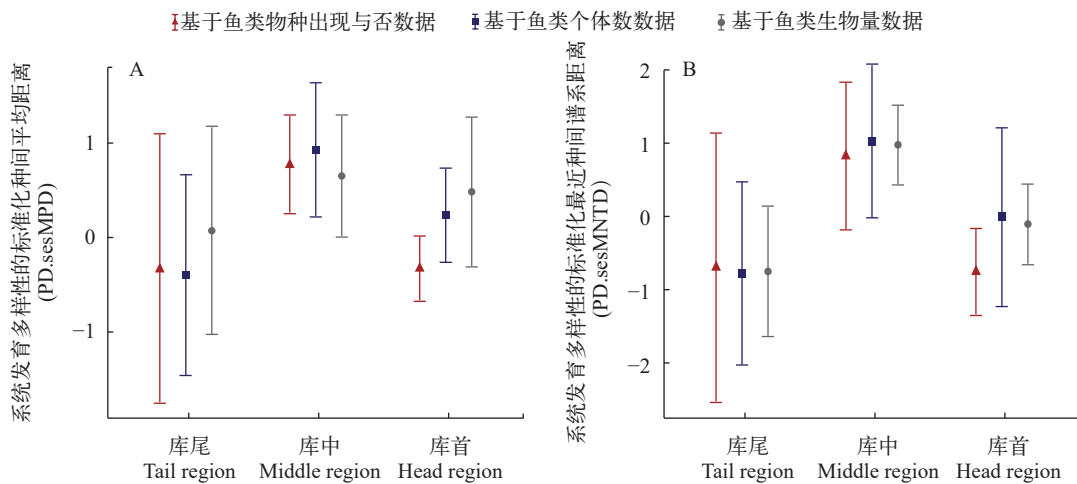


图2 龙羊峡鱼类系统发育多样性分布格局(均值±标准差)

Fig. 2 The distribution pattern of fish phylogenetic diversity in Longyangxia Reservoir (mean±SD)

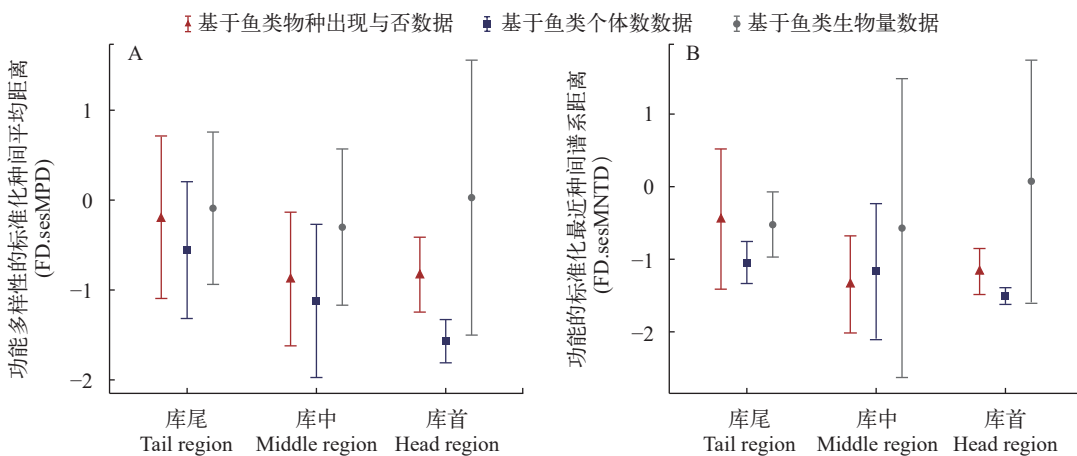


图3 龙羊峡鱼类功能多样性分布格局(均值±标准差)

Fig. 3 The distribution pattern of fish functional diversity in Longyangxia Reservoir (mean±SD)

类增加。1981年王基琳等^[16]在龙羊峡调查记录鱼类9种(不含一高原鳅属未定种),均为土著种。在龙羊峡水库蓄水后,冯慧等^[31]于2005—2008年对龙羊峡鱼类进行调查,记录鱼类共17种,其中土著鱼8种,外来鱼9种,与1981年调查记录相比,新增记录骨唇黄河鱼(*Chuanichia labiosa*)和极边扁咽齿鱼(*Platypharodon extremus*)两种土著鱼类,而东方高原鳅(*Triplophysa orientalis*)和斯氏高原鳅(*Triplophysa stoliczkai*)两种土著鱼在冯慧等^[31]在2005—2008年的调查未采集到,此时龙羊峡外来鱼类物种数已经超过土著鱼物种数。本次调查采集到鱼类19种,其中土著鱼8种,外来鱼11种。与之前的调查记录相比,骨唇黄河鱼、极边扁咽齿鱼、东方高原鳅和斯氏高原鳅4种土著鱼类均未采集到,而外来鱼种类新增6种,分别为泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、鲇(*Silurus asotus*)、棒花鱼(*Abbottina rivularis*)、中华鲟鱼(*Rhodeus sinensis*)、子陵吻鲈虎鱼(*Rhinogobius giurinus*)和黄魮(*Micropercops swinhonis*)。龙羊峡土著鱼类的减少与外来鱼类增加可能由以下3个原因造成:(1)水电站的修建导致河流形态发生巨大改变。龙羊峡水电站的建设导致流水生境减少,喜流水的鱼类生存空间缩减,而喜静水的鱼类增加。张建军等^[3]在2005—2007年间的调查就发现极边扁咽齿鱼和骨唇黄河鱼的分布区域严重缩减,由原来的刘家峡以上河段缩减至龙羊峡库尾野狐峡口到拉干河口。此外,水电站建设后静水区域增大,也极大地增加了外来鱼类的入侵风险^[32, 33]。我国长江流域的三峡水库^[33, 34]、雅砻江流域的二滩水电站水库^[35]、澜沧江流域^[36]等均报道过水电开发后流域内的土著鱼类减少而外来鱼类增加这一现象。(2)水产养殖。龙羊峡是黄河上游龙羊峡至积石峡河段鲢鳙养殖容量最大的水库^[14],在引进虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)、高白鲑(*Corgonus peled*)等经济鱼类的同

时不可避免地带来了许多经济价值不高的小型鱼类,如麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、中华鲟鱼、子陵吻鲈虎鱼等;养殖过程中管理不善导致引进的外来鱼类逃逸进入库区,如虹鳟养殖过程中,网箱破损鱼类逃逸进入库区并建立自然种群^[37]。(3)不规范的放生活动。民间私自放生将许多外来鱼类引入该流域内,盲目随意放生导致外来鱼类的分布区域扩大^[37]。

基于物种出现与否、个体数和生物量3种数据计算的龙羊峡鱼类物种多样性、系统发育多样性和功能多样性的分布情况存在差异,这是由于3种类型的数据具有不同的生物学和生态学意义。因此,仅基于单一的数据类型无法对研究区域内的鱼类生物多样性进行准确评估。在研究中除了考虑生物多样性三种维度的差异外,还应将鱼类的物种、个体数和生物量对结果的影响考虑在内,结合多种数据类型对生物多样性进行综合评估。

龙羊峡库尾的物种丰富度较低,这主要是由于库尾外来种较少,而库首和库尾的外来种大幅增加,并伴随土著种的减少。库尾更为靠近库区和自然河道交界处,水流速度相对来说较快,更适合喜缓流的土著鱼类生存,刺鲃、拟鲇高原鳅和厚唇裸重唇鱼仅在库尾河段中采集到;库中和库首为静水区,水流速度缓慢,适合一些喜静水的小型外来鱼类生存,而喜流水的鱼类逐渐向库尾迁移^[38],所以库首和库中土著鱼类较库尾少,外来鱼类较多,库中的土著鱼类仅硬刺高原鳅和北方花鳅两种,库中的外来鱼类有9种,分别为麦穗鱼、鲫、池沼公鱼、泥鳅、棒花鱼、子陵吻鲈虎鱼、鲇、中华鲟鱼和黄魮。龙羊峡水库鱼类个体数和生物量从库尾至库首依次递减。王珂^[39]在2013年关于三峡库区鱼类的研究中也发现三峡库区从上游到下游鱼类密度减小的现象。龙羊峡水库库尾土著种硬刺高原鳅资源量较大,库首靠近龙羊峡镇,旅游业发

表 3 距大坝距离和外来种对鱼类 α 多样性的影响

Tab. 3 Effect of the distance from dam and exotic species on the α -diversity of fish assemblages

多样性维度 Biodiversity dimension	多样性指标 Diversity index	解释变量 Explanatory variable	调整后 R^2 Adjusted R-square	P值 P value	非标准化系数 Unstandardized coefficients
系统发育多样性 Phylogenetic diversity	P.PDsMPD	外来种物种数占比	0.55	0.01	3.76
	P.PDsMNTD	外来种物种数占比	0.40	0.03	4.70
	I.PDsMPD	外来种个体数占比	0.49	0.01	2.12
	I.PDsMNTD	外来种个体数占比	0.43	0.02	2.89

注: PD.sesMPD为系统发育多样性的标准化种间平均距离; PD.sesMNTD为系统发育多样性的标准化最近种间谱系距离; P、I分别表示基于鱼类物种存在与否、鱼类个体数数据计算

Note: PD.sesMPD is the standardized mean pairwise distance of phylogenetic diversity; PD.sesMNTD is the mean nearest taxon distance of phylogenetic diversity. P and I represent the calculation based on the presence or absence of fish species, and the number of individuals respectively

达,也是网箱养殖主要区域,人为干扰影响程度更大,也可能造成龙羊峡水库库首的鱼类个体数和生物量较库中更小。

龙羊峡鱼类系统发育多样性呈现出库中较高的特点,这表明龙羊峡水库库中的鱼类亲缘关系更远,而回归分析结果也显示龙羊峡水库鱼类系统发育多样与外来鱼类占比之间存在正相关关系,所以我们认为与土著鱼类亲缘关系较远的外来鱼类的增加导致龙羊峡水库库中的鱼类系统发育多样性较高。龙羊峡库尾的鱼类均为鲤科和胡瓜鱼科鱼类,物种间的遗传距离小,近亲缘关系物种较多。库中外来鱼类较多,且9种外来鱼类分别来自鲤科、鳅科、鰕虎鱼科、鲇科、沙塘鳢科、胡瓜鱼科和鲑科,外来鱼类物种间遗传距离较大导致了库中的系统发育多样性高于库首和库尾区域。

基于鱼类物种出现与否和鱼类个体数计算的鱼类功能多样性均为库尾较高,表明龙羊峡库尾的鱼类功能特征非常不同,且相似生态位的鱼类较少。库尾的鱼类体型差异较大,土著鱼类的口位均为亚下位或下位,外来鱼类的加入使得库尾鱼类的口位和营养级等功能特征更加多样化。库尾的土著鱼类之间或土著鱼类与外来鱼类间功能特征存在较大差异导致库尾鱼类功能多样性较高。库首和库尾河段外来鱼类与土著鱼类在空间和食物等资源利用上存在大量重叠,如虹鳟与裂腹鱼类、高原鳅等均为冷水性鱼类,泥鳅和棒花鱼的口位与黄河裸裂尻鱼和拟硬刺高原鳅相同;此外,外来鱼类之间也存在较大的功能特征的重叠,如外来鱼类大多以小型鱼类为主,体型均较小。这些功能特征的重叠导致库首和库中河段鱼类功能多样性偏低。而基于鱼类生物量计算的鱼类功能多样性则呈现出库首>库尾>库中的分布特征,这主要是由于库首鱼类生物量分布更加均衡,而库尾和库中河段出现的某种(些)鱼类生物量极大,进而影响功能多样性的结果。如库尾的1号样点处采集到的硬刺高原鳅生物量在样点鱼类总生物量中占比高达95.74%,库中4号样点的麦穗鱼和鲇生物量之和在样点鱼类总生物量中占比也高达93.6%。

龙羊峡水库物种多样性、系统发育多样性和功能多样性3种生物多样性在水库的空间分布趋势存在差异,所以我们仅从单一维度无法获得较为全面的生物多样性信息,在研究生物多样性时应该结合3个维度生物多样性进行综合评估。龙羊峡水库鱼类3个维度生物多样性在各河段间的分布均无显著性差异,其原因可能有:(1)水库内部无较大的物理阻隔,各河段的鱼类之间存在交流;(2)水库内鱼

类广布种较多,少数物种的广泛分布导致不同河段间的多维性格局变化不显著。

参考文献:

- [1] Ma K M, Kong H M, Guan W B, *et al.* Ecosystem health assessment: methods and directions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2106-2116. [马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向 [J]. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2106-2116.]
- [2] Munkittrick K R, Dixon D G. A holistic approach to ecosystem health assessment using fish population characteristics [J]. *Hydrobiologia*, 1989, **188**(1): 123-135.
- [3] Zhang J T, Fan L H. Development of species functional diversity and its measurement methods [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, **29**(5): 513-519. [张金屯, 范丽宏. 物种功能多样性及其研究方法 [J]. *山地学报*, 2011, **29**(5): 513-519.]
- [4] Ma K P. Methods for measuring biome diversity I : methods for measuring alpha diversity (Part I) [J]. *Biodiversity Science*, 1994, **2**(3): 162-168. [马克平. 生物群落多样性的测度方法 I : α 多样性的测度方法(上) [J]. *生物多样性*, 1994, **2**(3): 162-168.]
- [5] Lyashevskaya O, Farnsworth K D. How many dimensions of biodiversity do we need [J]? *Ecological Indicators*, 2012(18): 485-492.
- [6] Gallardo B, Gascón S, Quintana X, *et al.* How to choose a biodiversity indicator-Redundancy and complementarity of biodiversity metrics in a freshwater ecosystem [J]. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(5): 1177-1184.
- [7] Webb C O, Ackerly D D, McPeck M A, *et al.* Phylogenies and community ecology [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002(33): 475-505.
- [8] Faith D P. Conservation evaluation and phylogenetic diversity [J]. *Biological Conservation*, 1992, **61**(1): 1-10.
- [9] Tilman D. Functional diversity [J]. *Encyclopedia of Biodiversity*, 2001, **3**(1): 109-120.
- [10] Jiang X L, Zhang W G. Functional diversity and its research method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(10): 2766-2773. [江小雷, 张卫国. 功能多样性及其研究方法 [J]. *生态学报*, 2010, **30**(10): 2766-2773.]
- [11] Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(2): 151-160. [韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望 [J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(2): 151-160.]
- [12] Lin Q Q, Han B P. Reservoir limnology and its application in water quality management: An overview [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 1034-1040. [林秋奇, 韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用 [J]. *生态学报*, 2001, **21**(6): 1034-1040.]
- [13] Qinghai Provincial Water Resources Department. The Rough Guide to Rivers and lakes of Qinghai [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2018: 34-40. [青海省水利厅. 青海河

- 湖概览 [M]. 武汉: 长江出版社, 2018: 34-40.]
- [14] Jian S L, Guan H T, Li K M, *et al.* The aquaculture capacity to cage culture of trout in reservoirs from Gorge Longyangxia to Gorge Jishixia in Qinghai Reach [J]. *Hebei Fisheries*, 2019(6): 22-27, 57. [简生龙, 关弘弢, 李柯懋, 等. 青海黄河龙羊峡-积石峡段水库鲑鳟鱼网箱养殖容量估算 [J]. *河北渔业*, 2019(6): 22-27, 57.]
- [15] Tang W J, Shen Z X, Jian S L, *et al.* Investigation and conservation measures of rare and endangered fish species of the Yellow River in Qinghai Province [J]. *Reservoir Fisheries*, 2006, 26(1): 57-60. [唐文家, 申志新, 简生龙, 等. 青海省黄河珍稀濒危鱼类及保护对策 [J]. *水利渔业*, 2006, 26(1): 57-60.]
- [16] Wang J L, Cai M Y, Qin J G, *et al.* Investigation on the basic biology of fishery before impoundment of Longyangxia Reservoir [J]. *Reservoir Fisheries*, 1982(3): 2-11. [王基琳, 蔡明玉, 秦建光, 等. 龙羊峡水库蓄水前的渔业基础生物学调查 [J]. *水库渔业*, 1982(3): 2-11.]
- [17] Zhang J J, Feng H, Li K S, *et al.* Changes of fishery resources after the construction of cascade hydropower stations from Longyang Gorge to Liujia Gorge in upper stream of Yellow River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2009, 39(3): 40-45. [张建军, 冯慧, 李科社, 等. 黄河上游龙羊峡至刘家峡河段梯级水电站建设后鱼类资源变化 [J]. *淡水渔业*, 2009, 39(3): 40-45.]
- [18] Zhu S Q. Synopsis of Freshwater Fishes of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1995: 8-187. [朱松泉. 中国淡水鱼类检索 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 8-187.]
- [19] Zhu S Q. The Loaches of the Subfamily Nemacheilinae in China (Cypriniformes: Cobitidae) [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1989: 1-134. [朱松泉. 中国条鳅志 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989: 1-135.]
- [20] Li S Z. Fishes of the Yellow River & Beyond [M]. Taiwan: Aquatic Production Press, 2015: 71-402. [李思忠. 黄河鱼类志 [M]. 中国台湾: 水产出版社, 2015: 71-402.]
- [21] Cheng X Y, Tao J, Wu R D, *et al.* Functional ecology of freshwater fish: research progress and prospects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 810-822. [程馨雨, 陶捐, 武瑞东, 等. 淡水鱼类功能生态学研究进展 [J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 810-822.]
- [22] Shuai F M, Li X H, Chen F C, *et al.* Functional diversity of freshwater fishes and methods of measurement [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5228-5237. [帅方敏, 李新辉, 陈方灿, 等. 淡水鱼类功能多样性及其研究方法 [J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5228-5237.]
- [23] Yuan S J, Miao K E, Sun W, *et al.* Phylogenetic and functional structure of bird communities in Yancheng Jiulongkou Wetland Park [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 44(3): 112-122. [袁思佳, 苗可儿, 孙婉, 等. 盐城九龙口湿地公园鸟类群落谱系和功能结构 [J]. *南京师大学报 (自然科学版)*, 2021, 44(3): 112-122.]
- [24] Jia Y T, Jiang Y H, Liu Y H, *et al.* Unravelling fish community assembly in shallow lakes: Insights from functional and phylogenetic diversity [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2022(32): 623-644.
- [25] Zhao Y H, Zeng D, Si X F. The application of phylogenetic methods in community ecology [J]. *Bio-protocol*, 2021: e1010670-e1010670 [赵郁豪, 曾頔, 斯幸峰. 谱系分析在群落生态学中的应用 [J]. *Bio-protocol*, 2021: e1010670-e1010670.]
- [26] Oksanen J, Blanchet F G, Kindt R, *et al.* Community ecology package [J]. *R Package Version*, 2013(2): 321-326.
- [27] Laliberté E, Legendre P, Shipley B, *et al.* Measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology [J]. *R-Package FD*, 2014.
- [28] Kembel S W, Cowan P D, Helmus M R, *et al.* Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology [J]. *Bioinformatics*, 2010, 26(11): 1463-1464.
- [29] Jiang Z G, Jiang J P, Wang Y Z, *et al.* Red list of China's vertebrates [J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(5): 500-551. [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录 [J]. *生物多样性*, 2016, 24(5): 500-551.]
- [30] The Revised Lists of Wild Animals Under Special State Protection in China Was Officially Announced [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2021, 42(2): 605-640. [国家重点保护野生动物名录(2021年2月1日修订) [J]. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 605-640.]
- [31] Feng H. The study of aquatic biodiversity and the evaluation of ecosystem health in Huanghe River upper reach from Longyangxia to Liujiaxia [D]. Xi'an: Northwest University, 2009: 25-32. [冯慧. 黄河上游龙羊峡-刘家峡河段水生生物多样性研究及生态系统健康评价 [D]. 西安: 西北大学, 2009: 25-32.]
- [32] Moyle P B, Mount J F. Homogenous rivers, homogenous faunas [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(14): 5711-5712.
- [33] Ba J W, Chen D Q. Invasive fishes in Three Gorges Reservoir area and preliminary study on effects of fish invasion owing to impoundment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 185-189. [巴家文, 陈大庆. 三峡库区的入侵鱼类及库区蓄水对外来鱼类入侵的影响初探 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 185-189.]
- [34] Lin P C, Liu F, Li M Z, *et al.* Spatial pattern of fish assemblages along the river-reservoir gradient caused by the Three Gorge Reservoir (TGR) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(6): 1124-1134. [林鹏程, 刘飞, 黎明政等. 三峡水库蓄水后长江上游鱼类群聚沿河流-水库梯度的空间格局 [J]. *水生生物学报*, 2018, 42(6): 1124-1134.]
- [35] Jiang H, Xie S G, Zhao W Q, *et al.* Changes of fish assemblages after construction of Ertan Reservoir in

- Yalongjiang River [J]. *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 [J]. 水生生物学报, 2007, **31**(4): 532-539.]
- [36] Zhang C. Responses of species and phylogenetic diversity of fish communities in the Lancang River to cascade hydropower development [D]. Kunming: Yunnan University, 2018: 17-18. [张超. 梯级水电开发背景下澜沧江鱼类物种多样性和系统发育多样性的变化 [D]. 昆明: 云南大学, 2018: 17-18.]
- [37] Tang W J, He D K. Investigation on alien fishes in Qinghai Province, China (2001-2014) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **24**(3): 502-510. [唐文家, 何德奎. 青海省外来鱼类调查(2001-2014年) [J]. 湖泊科学, 2015, **24**(3): 502-510.]
- [38] Tang W J, He D K. Fish resource survey on Cihaxia to Jishixia stretches in the upper reaches of Yellow River (2005—2010) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(4): 600-608. [唐文家, 何德奎. 黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查(2005—2010年) [J]. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 600-608.]
- [39] Wang K. The spatial-temporal distribution characteristics of fish and the analysis of relationship with correlation factors in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013: 25-30. [王珂. 三峡库区鱼类时空分布特征及与相关因子关系分析 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013: 25-30.]

SPATIAL DISTRIBUTION PATTERN OF FISH MULTIFACETED BIODIVERSITY IN THE LONGYANGXIA RESERVOIR

ZHUO Yu^{1,2,3}, LI Jun-Le^{1,2,3}, LI Ying-Qin^{4,5}, LI Ke-Mao^{4,5}, JIAN Sheng-Long^{4,5}, SUI Xiao-Yun², JIA Yin-Tao² and CHEN Yi-Feng²

(1. School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Qinghai Provincial Fishery Technology Extension Center, Xining 810012, China; 5. Key Laboratory of Plateau Aquatic and Environmental in Qinghai Province, Xining 810012, China)

Abstract: To understand the status and the spatial distribution pattern of fish multidimensional biodiversity, we conducted a survey on fish resources in Longyangxia Reservoir in June 2022. Three types of data, including the presence or absence of fish species, the number and biomass of individuals, were used to analyze the status and spatial distribution of species diversity, phylogenetic and functional diversity of fish in Longyangxia Reservoir. A total of 2416 specimens weighing 94.24 kg belonging to 4 orders, 7 families, 17 genera and 19 species were collected. Among these, 8 species were native, while 11 species were exotic. Compared to historical research, the native species in Longyangxia Reservoir decreased, while the number of exotic species increased significantly. There are differences in the distribution of species diversity, phylogenetic diversity, and functional diversity calculated based on the three data types. Specifically, the species richness was the highest in the head region of the reservoir, followed by the tail region and the middle region, while the number of individuals and biomass gradually decreased from the tail region to the head region. The phylogenetic diversity based on the three data types was the highest in the middle region. The functional diversity calculated based on the presence or absence of species and the number of individuals was the highest in the tail region, while the functional diversity calculated based on biomass data was the highest in the head region. The regression analysis showed that the phylogenetic diversity of fish in Longyangxia Reservoir was significantly affected by exotic species, while the changes in species diversity and functional diversity were not correlated with the distance from the dam and the number of exotic species.

Key words: Species diversity; Phylogenetic diversity; Functional diversity; Alpha diversity; Longyangxia Reservoir