

doi: 10.7541/2023.2022.0370

禁渔后西凉湖鱼类物种和功能多样性时空格局及其 与水环境因子的关系

邓文博^{1,2} 冯 凯² 林 刚³ 郭茜茜^{1,2} 苑 晶² 刘家寿²
李广宇¹ 李钟杰² 王齐东²

(1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 湖北省农业事业发展中心, 武汉 430064)

摘要: 为解析禁渔后西凉湖鱼类群落组成、结构与多样性格局, 探明影响鱼类多样性的关键环境因子, 于 2020 年 11 月和 2021 年 4 月在西凉湖开展了鱼类群落与环境因子调查, 共设置 15 个样点, 分布于西-西凉湖 (XLH1-8) 和东-西凉湖 (XLH9-15)。结果表明秋季与总氮、叶绿素 *a* 和高锰酸盐指数呈正相关, 西-西凉湖与总磷和浊度呈正相关。本次调查共采集鱼类 31 种, 隶属 6 目 8 科 26 属, 其中鲤形目最多 (24 种), 占 77.4%。优势种为似鲮、鲮、鲫和红鳍原鲃, 其中似鲮为主要优势种。非度量多维尺度排序分析 (NMDS) 结果表明, 西凉湖鱼类群落结构具有显著的季节和空间差异 ($P < 0.05$)。在秋季, 东-西凉湖的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数均显著高于西-西凉湖 ($P < 0.05$); Margalef 指数显著高于西-西凉湖 ($P < 0.05$); 在秋季, 东-西凉湖的功能丰富度指数显著高于西-西凉湖 ($P < 0.05$); 功能分散度指数显著高于西-西凉湖 ($P < 0.05$)。Pearson 相关性分析结果表明, Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数和 Margalef 指数与功能丰富度指数 ($r = 0.66$ 、 $r = 0.61$ 、 $r = 0.50$ 和 $r = 0.83$)、功能分散度指数 ($r = 0.93$ 、 $r = 0.89$ 、 $r = 0.89$ 和 $r = 0.70$) 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 即物种多样性增加, 占据的功能空间越大。冗余分析结果显示, 总磷是驱动西凉湖鱼类物种和功能多样性的关键环境因子。研究为禁渔后长江流域湖泊鱼类资源恢复和生态系统修复提供了科学依据, 为今后湖泊生态保护政策提供了参考。

关键词: 西凉湖; 禁渔; 富营养化; 功能多样性; 物种多样性; 群落结构; 环境因子

中图分类号: S932.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)10-1681-12



长江流域不仅是我国最重要的水生生物种质资源库之一, 也是我国最重要的淡水渔业基地之一。目前, 长江流域共有 54 个水生生物自然保护区和 278 个水产种质资源保护区^[1], 主要分布在长江中下游地区。近年来, 富营养化已成为长江流域湖泊面临的最重大的生态环境问题之一, 不仅导致生态环境退化, 多样性降低, 还严重制约当地经济社会发展^[2], 例如, 富营养化是影响湖泊鱼类群落结构的关键因素之一, 一方面导致鱼类总生物量增加和功能多样性降低, 但对物种丰富度影响不大; 另一方

面导致不同种类优势关系发生转变, 少数物种优势度显著增加^[3]。江河湖泊作为长江流域的载体, 在维持生物多样性和蛋白质供给等方面发挥了至关重要的作用, 为降低人类活动对长江流域重点水域生态环境的影响, 2020 年以来, 长江流域重点水域正式进入“十年禁渔期”, 重点水域进入休养生息的生态恢复阶段^[4]。

物种的功能性状反映了一个物种在特定生物与非生物环境条件下的生长、存活、摄食、繁殖及行为等特征, 反映了物种与非生物环境因子及生

收稿日期: 2022-09-01; **修订日期:** 2022-11-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0900605); 国家自然科学基金 (32002396); 中国科学院青年创新促进会 (2022344); 湖北省重点研发计划 (2020BBB077) 资助 [Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900605); National Natural Science Foundation of China (32002396); Youth Innovation Promotion Association CAS (2022344); Hubei Provincial Key Research and Development Program (2020BBB077)]

作者简介: 邓文博 (1997—), 男, 硕士研究生; 研究方向为渔业生态学。E-mail: wenbo9706@gmail.com

通信作者: 王齐东 (1987—), 男, 博士, 副研究员; 研究方向为渔业生态学。E-mail: wangqd@ihb.ac.cn

物间相互作用的关系,直接影响生态系统的结构与功能^[5,6]。功能多样性是生物多样性的重要组成部分,它通过耦合物种功能性状和多度来揭示群落的功能结构,更好地表征生态系统功能^[7]。相对于传统分类学多样性,功能多样性考虑了群落内不同物种间的性状差异及功能差异^[5,8]。因此,开展禁渔后不同营养水平湖区的功能多样性研究有助于掌握不同营养水平的湖泊鱼类群落结构差异及影响因素。

西凉湖属长江中游典型浅水草型湖泊^[9],丰富的水生植被为遏制水体富营养化提供了前提基础^[10-12],然而,为解决“吃鱼难”的问题,20世纪70年代西凉湖开始发展围网养殖,为保障水产品供给发挥了历史性贡献。随着超负荷围网养殖规模的不断扩大,围网面积一度超过湖泊面积的60%,不仅造成了严重的水体污染,还导致了渔业资源急剧衰退^[13]。2015年,国务院发布《水污染防治行动计划》简称“水十条”,随后一系列的湖泊生态保护恢复措施在西凉湖落地实施。2017年,西凉湖完成了9.3万亩的围网拆除任务;2020年,西凉湖正式实行全年禁渔^[4],此后湖泊进入生态恢复演替的新阶段。在此生态恢复背景下,西凉湖水生植被出现了不同程度的恢复,其中西-西凉湖水生植物未见恢复分布,而东-西凉湖局部有大量水生植物恢复,从而直接影响两个湖区的水体营养水平,形成了西-西凉湖呈现较高营养状态,东-西凉湖呈现较低营养状态的空间

格局。本文通过比较禁渔后不同营养水平湖区的鱼类群落时空格局及其与水环境因子的关系,结果将为长江流域禁渔湖泊鱼类资源恢复保护与生态系统修复提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

西凉湖位于长江中游南岸,地跨咸宁市咸安区、嘉鱼县和赤壁市(东经114°00'—114°10',北纬29°51'—30°02';图1),水系全流域面积827.0 km²,水域面积85.2 km²。西凉湖水系发育良好,水量丰富,入湖河流主要有汀泗河、泉水河,出湖河流由湖东北部余码河经金水闸排入长江^[14]。西凉湖自西向东可分为西-西凉湖和东-西凉湖,湖区之间的水系经水道连通,地势呈东南高、西北低,连通水道相对东、西湖区地势稍高。

1.2 调查点位与调查方法

2020年11月6—8日和2021年4月28—30日在西凉湖开展鱼类群落与水环境调查采样,共设置15个采样点(图1),其中西-西凉湖为XLH1-8,东-西凉湖为XLH9-15,2022年4月针对西凉湖鱼类种类数进行了补充调查。鱼类标本采样使用多网目复合刺网(高2.0 m,长30.0 m,网目2a分别为1.0、1.6、2.0、2.5、3.1、4.0、4.8、6.0、7.5、8.5、11.0和12.5 cm,a表示网眼边长)和定制地笼(长15 m,宽0.4 m,高0.3 m,网目2a为1.0 cm,a表示网眼边长),调查网

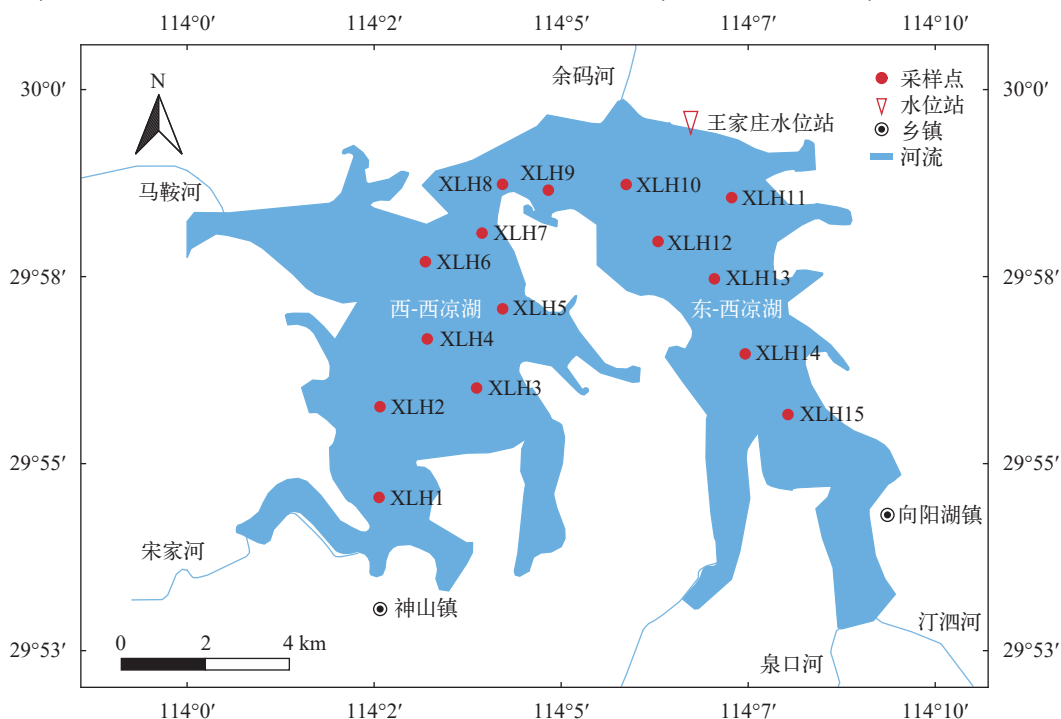


图1 西凉湖渔获物样点示意图

Fig. 1 Diagram of fish catch sites in Xiliang Lake

具的网目顺序是随机拼接, 且所有调查网具的网目顺序保持一致。每个调查站点分别布置一条浮网、一条沉网和一个地笼, 定置时间为12h(6:00 pm至翌日6:00 am)。鱼类种类鉴定到种, 并统计渔获物样本数量、全长(精确到0.1 cm)和体重(精确到0.01 g)等种群生物学信息, 种类鉴定参考《中国淡水鱼类检索》^[15]和《湖北鱼类志》^[16]。

采集鱼类样本时, 同步使用多参数水质分析仪(YSI Pro DSS, 美国)现场测定溶解氧(DO)、pH、水温(WT)、电导率(Cond)和浊度(Tur); 透明度(SD)使用塞氏盘现场测定, 水深(WD)使用SM-5便携式测深仪现场测定; 使用有机玻璃采水器采集水样, 用-4℃冰箱保存运回实验室, 并在24h内进行测定; 总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等指标参照《水和废水监测分析方法》测定^[17], 叶绿素 a (Chl. a)参照HJ 897-2017《水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法》测定^[18]。

1.3 数据处理

主成分分析 水质数据除溶解氧、pH和水深外均进行ln转换后, 基于欧几里得距离(Euclidean distance), 使用主成分分析法(Principal component analysis, PCA)比较西凉湖水环境时空差异。

优势种 采用Pinkas等^[19]的相对重要性指数(IRI)分析鱼类群落优势种, 计算公式如下:

$$IRI = (N\% + W\%) \times F\% \times 10^4$$

式中, $N\%$ 为某种鱼类的尾数占总渔获物数量的百分比, $W\%$ 为该种类鱼类的重量占总渔获物重量的百分比, $F\%$ 为该种鱼类出现的次数占总样点数比例。IRI ≤ 1 为少见种, 1 < IRI ≤ 10 为一般种, 10 < IRI ≤ 100 为常见种, 100 < IRI ≤ 1000 为重要种, IRI > 1000 为优势种^[20]。

群落结构分析 鱼类物种矩阵数据经过log₂($x+1$)转化后, 基于Bray-Curtis相似性度量^[21], 使用非度量多维尺度(Nonmetric Multidimensional Scaling, NMDS)排序进行分析。采用Two-way ANOSIM方法比较不同季节和空间尺度下的群落结构差异, 并计算 P 值^[22]。

物种多样性 本研究采用的物种多样性指数^[23, 24]计算公式如下:

(1)Shannon-Wiener指数(H')

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i$$

(2)Simpson指数(D_S)

$$D_S = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

(3)Pielou指数(J')

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

(4)Margalef指数(D_m)

$$D_m = (S - 1) / \ln N$$

式中, P_i 为第 i 种鱼类所占的比例, S 为物种数, N 为总物种数量。

功能多样性 鱼类物种功能性状参考《湖北鱼类志》^[16]《中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目(中卷)》^[25]和Fishbase网站^[26], 选取最大体长、恢复力、鱼卵生态类型、亲本抚育行为、生活史策略、食性、营养级、口位、生态习性、鱼体形态和栖息水层等11种功能性状。基于Gower距离公式, 通过Cornwell等^[27]和Villegger等^[28]提出的方法计算功能多样性(Functional diversity, FD), 本研究选择了以下5个方面的功能多样性测度。

(1)功能丰富度Functional richness(FRic)

$$FRic = \frac{SF_{ci}}{R_c}$$

式中, SF_{ci} 为物种所占据的生态位空间, R_c 为整个群落中性状 c 所占据的生态位空间。

(2)功能均匀度Functional evenness(FEve)

$$EW_b = \frac{d_{ij}}{w_i + w_j}$$

$$PEW_b = \frac{EW_b}{\sum_{b=1}^{S-1} EW_b}$$

$$FEve = \frac{\sum_{b=1}^{S-1} \min(PEW_b \times \frac{1}{S-1}) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}}$$

式中, S 为物种数, EW_b 为均匀度权重, w_i 为物种 i 的相对丰富度, w_j 为物种 j 的相对丰富度, PEW_b 为分支长权重, d_{ij} 为物种 j 和物种 i 之间的欧式距离。

(3)功能趋异度Functional divergence(FDiv)

$$g_k = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S x_{ik}$$

$$dG = \sqrt{\sum_{k=1}^T (x_{ik} - g_k)^2}$$

$$\overline{dG} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S dG_i$$

$$\Delta d = \sum_{i=1}^S w_i \times (dG_i - \overline{dG})$$

$$\Delta |d| = \sum_{i=1}^S w_i \times |dG_i - \overline{dG}|$$

$$FDiv = \frac{\Delta d + \overline{dG}}{\Delta |d| + \overline{dG}}$$

式中, x_{ik} 为物种 i 性状 k 的值, g_k 为性状 k 的中心, $\overline{dG}$ 为物种 i 与重心的平均距离, d 是以多度为权重的离散度, T 为功能性状数量。

(4) 功能分散度 Functional dispersion (FDis)

$$c = \frac{\sum w_j x_{jk}}{\sum w_j}$$

$$FDis = \frac{\sum w_j z_j}{\sum w_j}$$

式中, c 为加权重心, z_j 物种 j 到重心 c 的加权距离, w_j 为物种 j 的相对多度, x_{ik} 为物种 i 性状 k 的值。

(5) 功能冗余度 Functional redundancy (FRed)

$$Rao's = \sum_{i=1}^S \sum_{j=(i-1)}^{S-1} d_{ij} p_i p_j$$

$$FRed = 1 - \frac{Rao's}{Ds}$$

式中, p_i 、 p_j 为物种相对多度, $Rao's$ 为二次熵指数^[29]。

Pearson 相关性分析 采用 Pearson 相关性分析法解析物种多样性与功能多样性的关系, 并计算相关系数 r 和 P 值。

冗余分析 鱼类物种矩阵数据经过 $\log_2(x+1)$ 转化后进行去趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA), 根据 DCA 分析结果 ($DCA_{max} < 3$), 选择冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA); 再通过方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 和约束轴置换检验结果 ($VIF < 10$; $P < 0.05$), 选取总磷、透明度和 pH, 以逐步迭代的方式筛选出有显著解释性的环境因子 ($P < 0.05$), 并采用蒙特卡罗检验分析环境因子对鱼类多样性影响的显著程度。

1.4 统计分析

采用 R 4.1.0 软件“FactorMineR”^[30] 和“Factoextra”包^[31] 进行 PCA 分析、“car”包^[32] 和“emmeans”包^[33] 进行物种多样性和功能多样性双因素方差分析、“mFD”包^[34] 计算功能多样性指数、“vegan”包^[35] 进行 NMDS 和 RDA 分析^[36, 37], 并使用“rdacca.hp”包^[38] 计算 RDA 分析中环境变量的解释率; 使用 PRIMER 6 软件进行 Two-way ANOSIM 分析; 使用 QGIS 3.16.10 软件制作采样点图。

2 结果

2.1 水环境时空特征

主成分分析结果表明, 第一轴方差贡献率为

39.73%, 第二轴方差贡献率为 20.85% (表 1), PCA 显示西凉湖水环境在时空分布上具有差异 (图 2), 秋季与总氮、叶绿素 a 和高锰酸盐指数相关变量显著正相关, 西-西凉湖与总磷和浊度相关变量显著正相关。

2.2 鱼类物种组成

本研究共调查到鱼类 31 种, 隶属 6 目 8 科 26 属 (表 2), 其中鲤形目最多 (24 种), 占总调查种类 77.4%; 其次为鲈形目 (3 种), 其余种类均较少。2020—2021 年共采集到鱼类样本 12315 尾, 其中在春季和秋季, 东-西凉湖分别采集到 15 种和 19 种, 西-西凉湖分别采集到 19 种和 17 种。

2.3 鱼类优势种组成

优势种分析结果表明 (表 3), 似鲮、鲫、鲮和红鳍原鲈为西凉湖主要优势种, 其中似鲮在不同季节、不同湖区中均为绝对优势种; 在春季, 东-西凉湖主要优势种为似鲮、鲫、鲮和红鳍原鲈, 重要种为鲢、似鳊和黄颡鱼; 西-西凉湖主要优势种为似鲮、鲫、鲮和鲢, 重要种为红鳍原鲈、黄颡鱼和达氏鲈。在秋季, 东-西凉湖主要优势种为似鲮、鲫、鲮和红鳍原鲈, 重要种为鲢、黄颡鱼、达氏鲈、草鱼和大鳍鲮; 西-西凉湖优势种为似鲮和红鳍原鲈, 重要种为鲮、鲫、黄颡鱼和达氏鲈。

表 1 西凉湖水环境主成分分析负荷矩阵

Tab. 1 Principal component analysis load matrix for the water environment in Xiliang Lake

	特征值 Eigenvalue	解释方差比例 Proportion of explained variance (%)	累计解释方差比例 Proportion of cumulative explained variance (%)
PC1	5.17	39.73	39.73
PC2	2.71	20.84	60.57
PC3	1.68	12.92	73.49

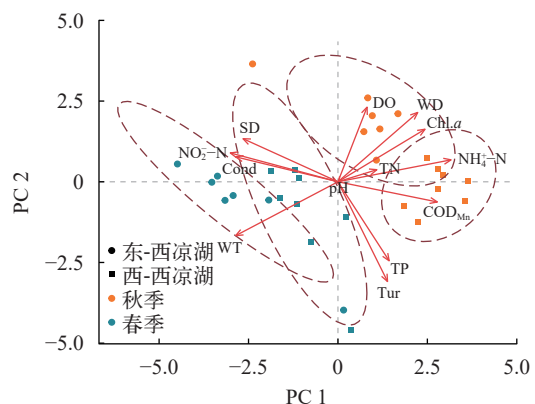


图 2 西凉湖水环境主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of the water environment in Xiliang Lake

表 2 西凉湖鱼类种类名录
Tab. 2 Fish species in the Xiliang Lake

物种Species	春Spring		秋Autumn	
	东-西凉湖East-Xiliang Lake	西-西凉湖West-Xiliang Lake	东-西凉湖East-Xiliang Lake	西-西凉湖West-Xiliang Lake
鲱形目Clupeiformes				
鲱科Engraulidae				
湖鲱 <i>Coilia ectenes taihuensis</i>	○	+		+
鲤形目Cypriniformes				
鲤科Cyprinidae				
雅罗鱼亚科Leuciscinae				
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		+	+	
鲃亚科Cultrinae				
贝氏鲃 <i>Hemiculter bleekeri</i>	+	+	+	+
红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	+	+	+	+
蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	○			
鲃 <i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+	+	+
达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	+	+	+	+
翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	○	+	+	+
似鲃 <i>Toxabramis swinhonis</i>	+	+	+	+
银飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	○	○		
长春鲃 <i>Parabramis pekinensis</i>	○			
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	+	+	+	
鲴亚科Xenocyprininae				
似鲴 <i>Acanthobrama simoni</i>	+	+	+	+
湖北圆吻鲴 <i>Distoechodon hupeinensis</i>			+	+
鲢亚科Hypophthalmichthyinae				
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	+	+	+	+
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	○	+		
鲃亚科Gobioninae				
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	+	+	+	+
花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	○	○		
似刺鲃 <i>Paracanthobrama guichenoti</i>		○		
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	○		+	
银鲃 <i>Squalidus argentatus</i>		+		
鲤亚科Cyprininae				
鲫 <i>Carassius auratus</i>	+	+	+	+
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	+	○	+	+
鲮亚科Acheilognathinae				
大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	+	○	+	+
兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	+	+	+	+
鲇形目Siluriformes				
鲇科Bagridae				
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+	+	+	+
鲈形目Perciformes				
鰕虎鱼科Gobiidae				
子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	+	+		
鳢科Channidae				
乌鳢 <i>Channa argus</i>	○	○		

续表 2

物种Species	春Spring		秋Autumn	
	东-西凉湖East-Xiliang Lake	西-西凉湖West-Xiliang Lake	东-西凉湖East-Xiliang Lake	西-西凉湖West-Xiliang Lake
鲴科Serranidae				
鲴亚科Epinephelinae				
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>		○		
颌针鱼目Beloniformes				
鱮科Hemirhamphidae				
间下鱮 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	○	○	+	+
合鳃目Symbranchiformes				
合鳃科Symbranchidae				
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>		+		
总计Total	25	27	19	17

注：“+”表示在2020—2021年所获种类，“○”表示2022年补充种类
Note: “+” indicates species acquired in 2020—2021, “○” indicates supplemental species in 2022

表 3 西凉湖鱼类优势种时空分布
Tab. 3 Spatial-temporal distribution of dominant fish species in Xiliang Lake

物种Species	春Spring		秋Autumn		均值Average
	东-西凉湖East-Xiliang Lake	西-西凉湖East-Xiliang Lake	东-西凉湖East-Xiliang Lake	西-西凉湖West-Xiliang Lake	
似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	11172	10446	9517	13568	11176
鲫 <i>Carassius auratus</i>	2892	2300	2659	975	2206
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	2377	2565	2492	708	2035
红鳍原鲮 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	1633	984	1763	1017	1349
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	426	2257	142	41	716
似鳊 <i>Acanthobrama simoni</i>	387	37	1	1	106
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	203	385	331	108	257
达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	19	502	192	424	284
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	0	6	123	0	32
大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	0	0	145	14	40

注: 表中数字为每种鱼类相对重要性指数(IRI), 且仅列出不同湖区在不同时期下任何一次优势指数大于100的物种
Note: The number in the table is index of relative importance of each fish species (IRI), in addition, only species with a dominance index larger than 100 are listed in the table in different lakes and different times

2.4 鱼类群落结构时空特征

双因素方差分析结果显示(图 3), 西凉湖鱼类群落结构具有显著的季节和空间差异($P<0.05$), 春季和秋季鱼类群落组成存在显著性差异($R=0.474$; $P<0.05$), 西-西凉湖和东-西凉湖鱼类群落组成存在显著性差异($R=0.285$; $P<0.05$)。

2.5 物种多样性与功能多样性

物种多样性分析结果表明(图 4), 在秋季, 东-西凉湖Shannon-Wiener指数($P<0.001$)、Simpson指数($P<0.001$)、Pielou指数($P<0.001$)均显著高于西-西凉湖; 东-西凉湖Margalef指数显著高于西-西凉湖($P<0.05$), 而物种多样性在不同季节间的差异不显著($P>0.05$)。功能多样性分析结果表明(图 5), 在秋季, 东-西凉湖功能丰富度指数显著高于西-西凉湖($P<0.05$); 东-西凉湖功能分散度指数显著高于西-

西凉湖($P<0.05$), 而功能多样性在不同季节间的差异不显著($P>0.05$)。

Pearson相关性分析结果表明(图 6), 功能丰富度指数、功能分散度指数与物种多样性指数均显著正相关($P<0.01$), 其中功能丰富度指数与物种数相关系数最高为0.84, 功能分散度指数与Shannon-Wiener指数相关系数最高为0.93; 功能均匀度指数、功能趋异度指数和功能冗余度指数与物种多样性之间均不显著($P>0.05$)。

2.6 鱼类多样性与环境因子的关系

鱼类多样性与环境因子冗余分析结果表明(图 7), 在物种多样性方面, 总磷与物种数、Margalef指数呈正相关, 与Simpson指数、Shannon-Wiener指数和Pielou指数呈负相关; 在功能多样性方面, 总磷与功能均匀度指数呈正相关, 与功能丰富度指数、功

能趋异度指数、功能分散度指数和功能冗余度指数呈负相关。蒙特卡罗检验结果(表 4)表明总磷在物种多样性和功能多样性上均具有显著性($P<0.05$)。

3 讨论

根据《湖北省湖泊志》记载, 1983—1986年在

西凉湖调查到鱼类87种^[13], 而2002—2003年在西凉湖仅调查到鱼类40种^[39], 在本研究中, 共调查到西凉湖鱼类31种。在全面禁渔前, 过度捕捞和“三网”养殖等人类活动导致较高营养级的消费者数量下降, 鱼类群落以低营养级种类为主^[40]。在全面禁渔后, 似鲮等低营养级的鱼类占主要优势种^[41], 原因

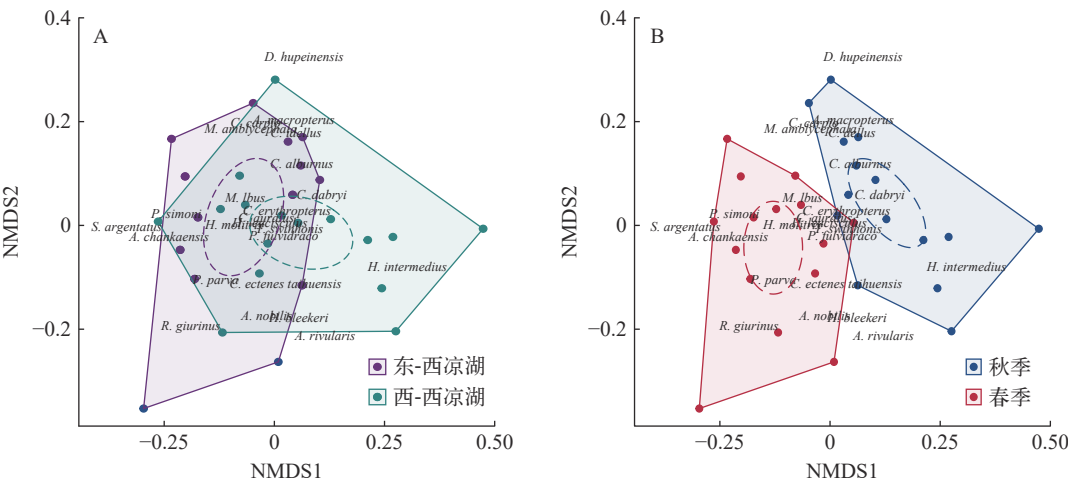


图 3 西凉湖鱼类物种组成非度量多维排序分析(NMDS)

Fig. 3 Non-metric Multidimensional Scaling analysis of fish species composition in Xiliang Lake (NMDS)

多边形面积表示样点分布范围; 椭圆表示95%置信区间; 圆点表示采样点; A表示空间变化; B表示季节变化

Polygon area indicates the distribution range of sample points; ellipse indicates 95% confidence interval; Dots indicate sample points; A indicates temporal variation; B indicates spatial variation

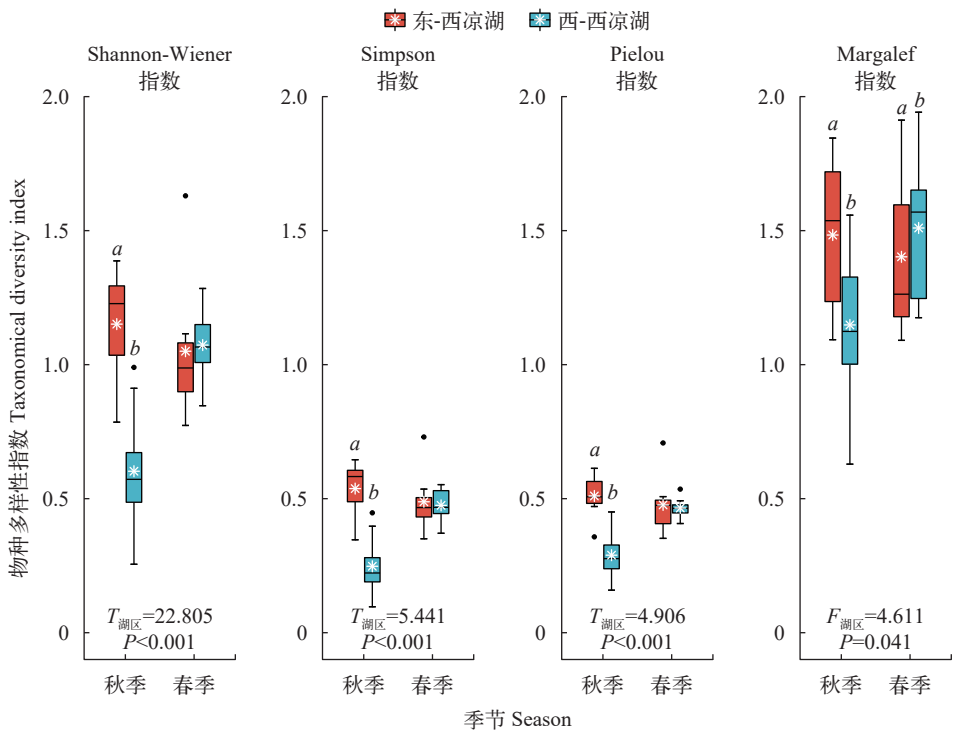


图 4 西凉湖鱼类物种多样性时空变化

Fig. 4 Spatial-temporal variation of fish species diversity in Xiliang Lake

白色“*”表示平均数; 黑色粗线条表示中位数

The white “*” indicates the average; The thick black line indicates the median

可能包括三个方面: (1)与其个体小、寿命短、繁殖率高及扩散能力强等特性相关; (2)富营养化提高了湖泊初级生产力, 促进了浮游动物种群扩张, 为浮游动物食性鱼类提供了丰富的饵料资源; (3)鲌亚科、鳊*Siniperca chuatsi*和乌鳢*Channa argus*等鱼食性鱼类资源恢复较慢, 且现阶段鲌亚科鱼类体型较小[如翘嘴鲌平均体重为(39.67±7.13) g], 超过70%的鲌亚科的鱼食性鱼类处于幼鱼阶段, 对似鲮等小型鱼类的捕食压力较小。

鱼类群落结构与环境因子密切相关, 已有研究表明环境因子对物种分布的影响大于生物因素^[42, 43]。在本研究中, 鱼类群落结构在时间和空间上均具有显著性差异, 秋季西凉湖与多种环境因子呈正相关(如叶绿素 a), 叶绿素 a 代表湖泊初级生产力, 研究发现初级生产力越高, 鱼类生产力越高^[44]; 栖息生境的差异也会影响鱼类群落结构^[45], 东-西凉湖水生植物分布较广, 不仅能为鱼类提供良好的栖息生境, 还能为鲤、鲫等产黏性卵鱼类提供有利的繁殖生境。

RDA分析表明, 总磷是影响西凉湖物种多样性和功能多样性的关键因子, 总磷含量升高会导致物种多样性、功能丰富度指数和功能分散度指数下降。磷是湖泊富营养化的关键影响因子之一^[46], 随着富营养化水平的提高, 湖泊中的食物资源可利用性发生根本改变。本研究发现, 在秋季, 西-西凉湖物种多样性均低于东-西凉湖, 西-西凉湖总磷含量较高(西-西凉湖: 0.04 mg/L; 东-西凉湖: 0.02 mg/L), 初级生产力更高, 水体中积累的有机物分解和夜间浮游植物的呼吸作用造成水体溶解氧含量降低, 尤其是水体底层, 导致底栖生境质量下降^[47], 直接影响底层鱼类生存和生长等; 其次, 东-西凉湖丰富的水生植物不仅能为小型鱼类提供良好的庇护场所^[48], 还能提高草食性鱼类和杂食性鱼类的觅食效率^[49], 降低物种间食物资源竞争作用。在富营养化的压力下, 鱼类群落表现出综合响应^[50], 种间作用加剧, “藻华”暴发和缺氧事件等环境变化都会导致物种丰富度下降^[51], 部分鱼类功能性状的缺失, 功能性状空间减小, 功能丰富度降低; 其次, 低营养状态下

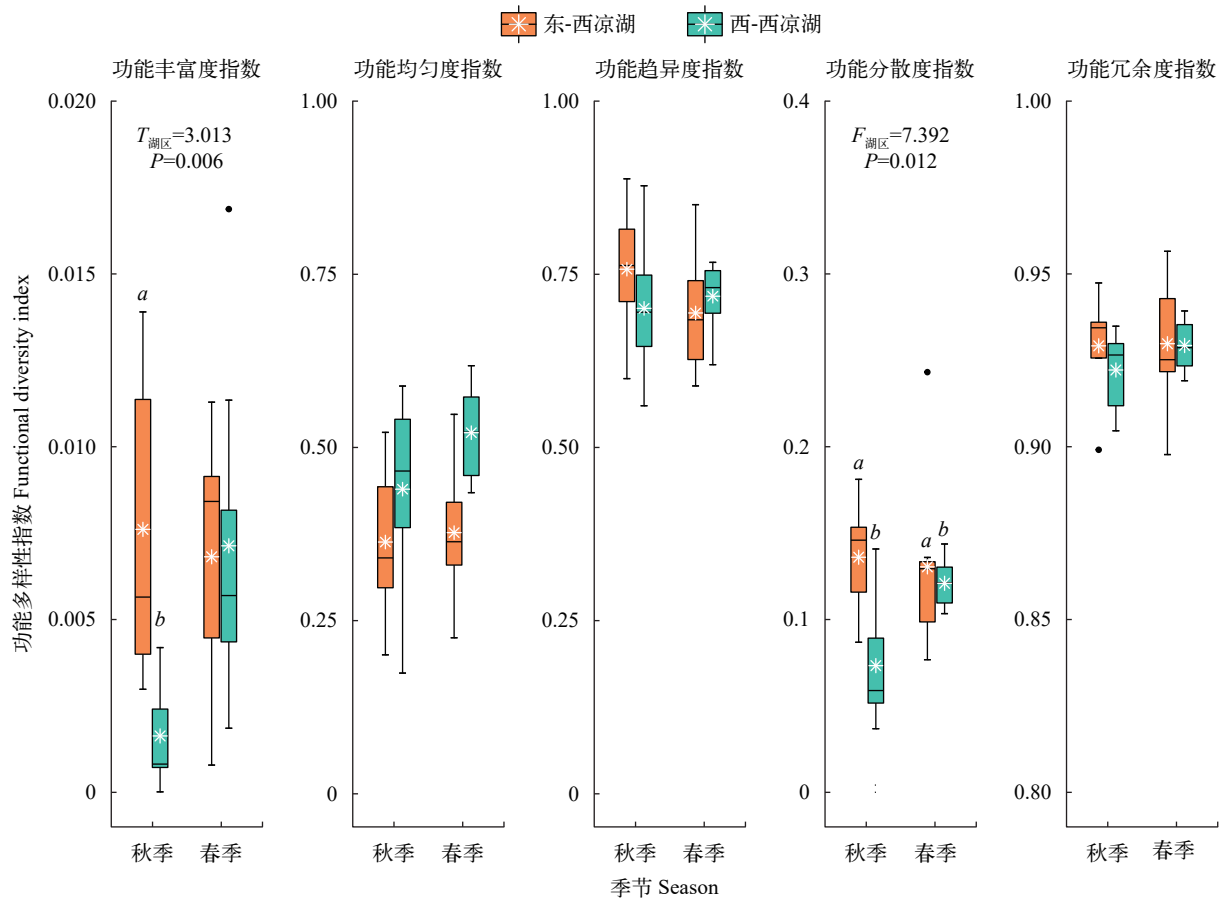


图5 西凉湖鱼类功能多样性时空变化

Fig. 5 Spatial-temporal variation in the functional diversity of fish in Xiliang Lake

白色“*”表示平均数; 黑色粗线条表示中位数

The white “*” indicates the average; the thick black line indicates the median

的东-西凉湖优势种似鲮丰度较低(东-西凉湖: 65%; 西-西凉湖: 86%), 功能分散度指数相对较小, 物种生态位重叠较低, 群落内竞争较小, 生态系统相对稳定。

4 结论

本研究证明了总磷是影响西凉湖物种多样性和功能多样性的关键因子, 富营养化促进了浮游藻

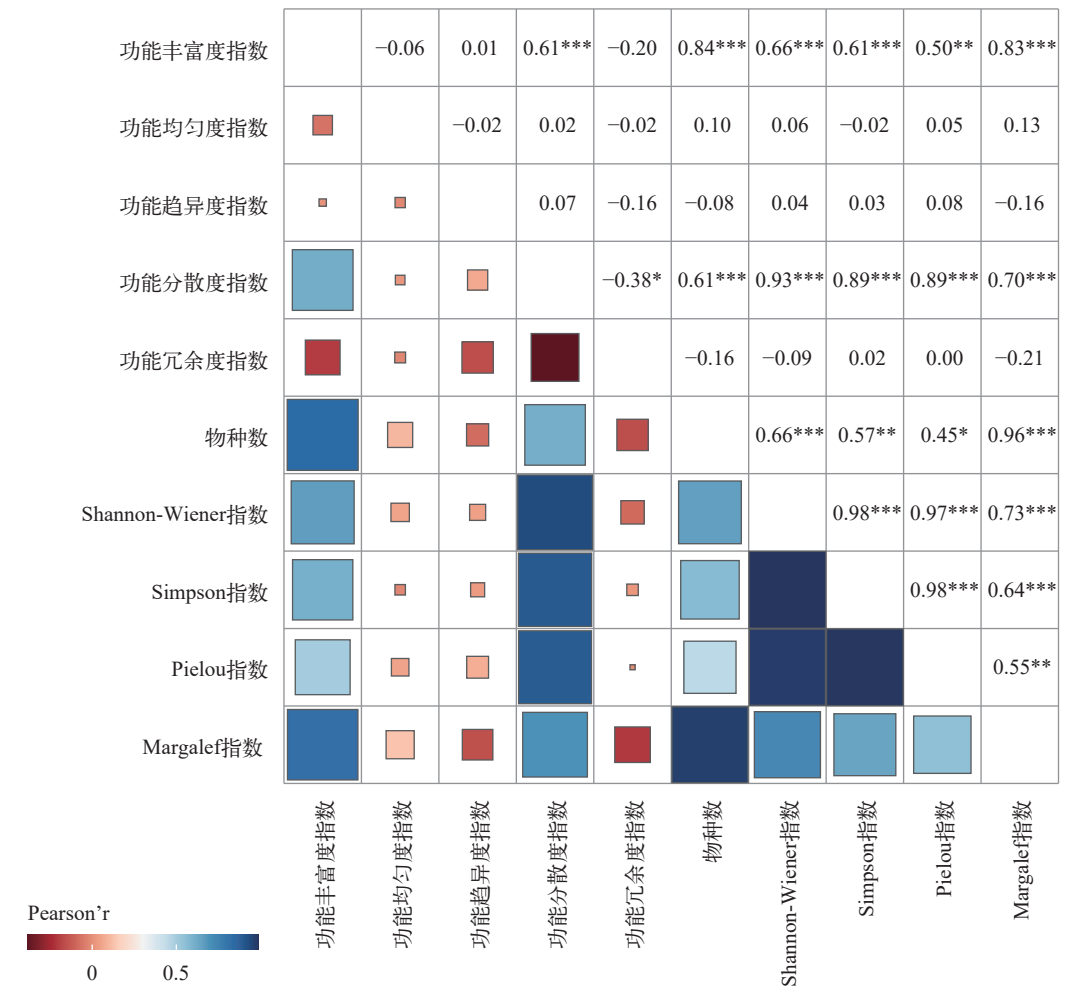


图 6 物种多样性与功能多样性Pearson相关性分析

Fig. 6 Pearson correlation analysis of species diversity and functional diversity

“*”表示 $P<0.05$, “**”表示 $P<0.01$, “***”表示 $P<0.001$

“*” indicates $P<0.05$, “**” indicates $P<0.01$, “***” indicates $P<0.001$

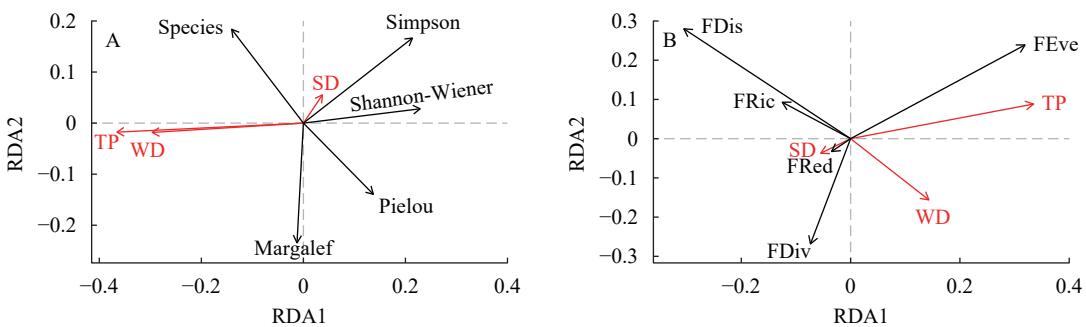


图 7 物种多样性与环境因子的冗余分析(A)和功能多样性与环境因子的冗余分析(B)

Fig. 7 The redundancy analysis(RDA) of taxonomical diversity and environmental factors(A) and the redundancy analysis(RDA) of functional diversity and environmental factors(B)

TP. 总磷; SD. 透明度; WD. 水深; Species. 物种数

TP. total phosphorus; SD. secchi depth; WD. water depth; Species. species number

表 4 鱼类多样性与主要环境因子RDA分析结果

Tab. 4 Results of RDA analysis of fish diversity and major environmental factors

物种多样性Taxonomical diversity			功能多样性Functional diversity		
环境因子 Environmental factors	解释量Interpretation percentage (%)	显著性检验P significant test	环境因子 Environmental factors	解释量Interpretation percentage (%)	显著性检验P significant test
总磷TP	65.59	0.026*	总磷TP	98.45	0.012*
水深WD	36.57	0.071	水深WD	18.54	0.207
透明度SD	-2.30	0.369	透明度SD	-17.18	0.662

注：“*”表示显著影响因子， $P < 0.05$

Note: “*” indicates significant impact factors, $P < 0.05$

类大量生长，甚至局部暴发了“蓝藻水华”，直接损害了鱼类栖息环境，降低了鱼类物种多样性、功能丰富度和功能分散度。同时，富营养化促进了小型浮游动物食性鱼类更占绝对优势。此外，研究发现水生植被也是影响湖泊鱼类群落时空差异的重要因素之一，水生植被的衰退导致了鱼类栖息和繁殖生境受损。本研究为禁渔湖泊的渔业管理提供了科学依据，建议：(1)提高鲢、鳙等产漂流性卵的滤食性鱼类的人工增殖放流，增强滤食性鱼类对浮游藻类的抑制作用，遏制“藻华”局部暴发势头，从而改善水环境；(2)增加鱼食性鱼类的增殖放流(如鳊和鮠类等)，通过营养级联效应控制小型浮游动物食性鱼类的种群规模；(3)加大关键栖息生境的生态修复力度，特别是沉水植物，优化鱼类栖息生境质量，提高鱼类多样性。

参考文献:

- [1] Yu W J, Xu C X. The 332 aquatic life reserves in the Yangtze River Basin took the lead in achieving a total ban on fishing [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2020, **47**(3): 173. [于文静, 徐承旭. 长江流域332个水生生物保护区率先实现全面禁捕 [J]. 水产科技情报, 2020, **47**(3): 173.]
- [2] Carpenter S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, **105**(32): 11039-11040.
- [3] Feng K, Deng W, Zhang Y, et al. Eutrophication induces functional homogenization and traits filtering in Chinese lacustrine fish communities [J]. *Science of The Total Environment*, 2023(857): 159651.
- [4] Wang R, Han Y, Fan F, et al. Need to shift in river-lake connection scheme under the “ten-year fishing ban” in the Yangtze River, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022(143): 109434.
- [5] Comte L, Cucherousset J, Boulêtreau S, et al. Resource partitioning and functional diversity of worldwide freshwater fish communities [J]. *Ecosphere*, 2016, **7**(6): e01356.
- [6] Özkundakci D, Gsell A S, Hintze T, et al. Winter severity determines functional trait composition of phytoplankton in seasonally ice-covered lakes [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(1): 284-298.
- [7] Stuart-Smith R D, Bates A E, Lefcheck J S, et al. Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity [J]. *Nature*, 2013, **501**(7468): 539-542.
- [8] Shaffer J A, Munsch S, Juanes F. Functional diversity responses of a nearshore fish community to restoration driven by large-scale dam removal [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018(213): 245-252.
- [9] Peng Y H, Jian Y X, Ni L Y, et al. Studies on the diversity of aquatic plants in Lake Xiliang [J]. *Guihaia*, 2003, **23**(3): 211-216. [彭映辉, 简永兴, 倪乐意, 等. 西凉湖水生植物多样性研究 [J]. 广西植物, 2003, **23**(3): 211-216.]
- [10] Lu B, Xu Z, Li J, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: An alternative way to remediate polluted rural rivers [J]. *Ecological Engineering*, 2018(110): 18-26.
- [11] Dai Y R, Jia C R, Liang W, et al. Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage [J]. *Ecological Engineering*, 2012(40): 113-116.
- [12] Odoh C K, Zabbey N, Sam K, et al. Status, progress and challenges of phytoremediation-An African scenario [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019(237): 365-378.
- [13] Hubei Provincial Lake Journal Compilation Committee. Hubei Provincial Lakes Journal [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2014: 451-469. [湖北省湖泊志编纂委员会. 湖北省湖泊志 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2014: 451-469.]
- [14] Wang S M, Dou H S. China Lakes Journal [M]. Beijing: Science Press, 1998: 196-197. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 196-197.]
- [15] Zhu S Q. Search for Freshwater Fish in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1995: 5-191. [朱松泉. 中国淡水鱼类检索 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 5-191.]
- [16] Yang G R. Hubei Fish Journal [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1987: 30-202. [杨干荣. 湖北鱼类志 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1987: 30-202.]
- [17] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods: 4th edition [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 88-430. [国家环境保护总局

- 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 88-430.]
- [18] Water quality-Determination of chlorophyll *a*-Spectrophotometric method: HJ 897-2017 [S]. 2017: 1-5. [水质 叶绿素 a 的测定 分光光度法: HJ 897-2017 [S]. 2017: 1-5.]
- [19] Pinkas L. Food habits of albacore, bluefin tuna and bonito in California waters [J]. *California Department of Fish and Game Fish Bulletin*, 1971(152): 1-105.
- [20] Wang X H, Du F Y, Qiu Y S, *et al.* Variations of fish species diversity, faunal assemblage, and abundances in Daya Bay in 1980-2007 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(09): 2403-2410. [王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 等. 1980—2007年大亚湾鱼类物种多样性、区系特征和数量变化 [J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(09): 2403-2410.]
- [21] Bray J R, Curtis J T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin [J]. *Ecological monographs*, 1957, **27**(4): 326-349.
- [22] Somerfield P J, Clarke K R, Gorley R N. Analysis of similarities (ANOSIM) for 2-way layouts using a generalised ANOSIM statistic, with comparative notes on Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA) [J]. *Austral Ecology*, 2021, **46**(6): 911-926.
- [23] Lin P C, Li S Z, Qin X C, *et al.* Pattern of fish diversity and assemblage structure in the middle and lower reaches of the Yiluo River, Yellow River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 482-492. [林鹏程, 李淑贞, 秦祥朝, 等. 黄河伊洛河中下游鱼类多样性及群落结构 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 482-492.]
- [24] Xiong M H, Yang Z, Hu X K, *et al.* Studies on fish community structure in Jianli section of the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(9): 2109-2118. [熊美华, 杨志, 胡兴坤, 等. 长江中游监利江段鱼类群落结构研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(9): 2109-2118.]
- [25] Chen Y Y. Zoology of China Osteichthyes Cypriniformes (Medium Volume) [M], Beijing: Science Press, 1998: 112-200. [陈宜瑜. 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目 (中卷) [M], 北京: 科学出版社, 1998: 112-200.]
- [26] Froese R, Pauly D. FishBase. World Wide Web Electronic Publication, 2016. <http://www.FishBase.Org>.
- [27] Cornwell W K, Schilck D W, Ackerly D D. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume [J]. *Ecology*, 2006, **87**(6): 1465-1471.
- [28] Villéger S, Mason N W H, Mouillot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology [J]. *Ecology*, 2008, **89**(8): 2290-2301.
- [29] Ricotta C, Bello F, Moretti M, *et al.* Cerabolini, sandrine pavoine. measuring the functional redundancy of biological communities: a quantitative guide [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, **7**(11): 1386-1395.
- [30] Lê S, Josse J, Husson F. FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis [J]. *Journal of Statistical Software*, 2008, **25**(1): 1-18.
- [31] Alboukadel K, Fabian M. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses, 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.
- [32] Fox J, Weisberg S. An R Companion to Applied Regression, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA, 2019. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>.
- [33] Ben B, Julia P, Emi T, *et al.* CRAN Task View: Mixed, Multilevel, and Hierarchical Models in R, 2022. <https://CRAN.R-project.org/view=MixedModels>.
- [34] Magneville C, Loiseau N, Albouy C, *et al.* mFD: an R package to compute and illustrate the multiple facets of functional diversity [J]. *Ecography*, 2022, **2022**(1): e05904.
- [35] Jari O, Gavin L. S, F. Guillaume B, *et al.* vegan: Community Ecology Package, 2022. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- [36] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits [J]. *Ecology*, 2010, **91**(1): 299-305.
- [37] Cailliez F. The analytical solution of the additive constant problem [J]. *Psychometrika*, 1983, **48**(2): 305-308.
- [38] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, *et al.* Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, **13**(4): 782-788.
- [39] Hu J H, Zhang C L, Hu H J. Structure and variation of fish diversity of lakes in the central Yangtze River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2008, **29**(5): 47-51. [胡军华, 张春兰, 胡慧建. 长江中游湖泊鱼类物种多样性结构及动态 [J]. *水生生态学杂志*, 2008, **29**(5): 47-51.]
- [40] Liu Y S, Li D M, Zhu M S, *et al.* Current status of fish community and its diversity in lake Taihu, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(9): 1906-1917. [刘燕山, 李大命, 朱明胜, 等. 太湖鱼类群落现状及其多样性 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, **31**(9): 1906-1917.]
- [41] Yang M, Sheng P, Zhang Y P, *et al.* Characteristics of fish assemblages of poyang lake at the initial stage of the fishing ban [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(10): 1569-1579. [阳敏, 盛漂, 张燕萍, 等. 禁捕初期鄱阳湖鱼类群落的结构特征 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(10): 1569-1579.]
- [42] Hoeinghaus D J, Winemiller K O, Birnbaum J S. Local and regional determinants of stream fish assemblage structure: inferences based on taxonomic vs. functional groups [J]. *Journal of Biogeography*, 2007, **34**(2): 324-338.
- [43] de Azevedo M C C, Araújo F G, Pessanha A L M, *et al.* Co-occurrence of demersal fishes in a tropical bay in southeastern Brazil: A null model analysis [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **66**(1-2): 315-322.
- [44] Whitfield A K. Ichthyofaunal assemblages in estuaries: a South African case study [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1999, **9**(2): 151-186.
- [45] Yang, G. Fish community structure and correlation to major environmental factors in Yangtze Estuary [D]. Shang-

- hai: Shanghai Ocean University, 2012. [杨刚. 长江口鱼类群落结构及其与重要环境因子的相关性 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [46] Rönspieß L, Dellwig O, Lange X, *et al.* Spatial and seasonal phosphorus dynamics in a eutrophic estuary of the southern Baltic Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020(233): 106532.
- [47] Jacobson P C, Hansen G J A, Bethke B J, *et al.* Disentangling the effects of a century of eutrophication and climate warming on freshwater lake fish assemblages [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(8): e0182667.
- [48] Priyadarshana T, Asaeda T, Manatunge J. Foraging behaviour of planktivorous fish in artificial vegetation: the effects on swimming and feeding [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **442**(1): 231-239.
- [49] Quirino B A, Thomaz S M, Jeppesen E, *et al.* Aquatic macrophytes shape the foraging efficiency, trophic niche breadth, and overlap among small fish in a neotropical river [J]. *Water*, 2022, **14**(21): 3543.
- [50] Ritterbusch D, Blabolil P, Breine J, *et al.* European fish-based assessment reveals high diversity of systems for determining ecological status of lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(802): 149620.
- [51] Thomas G, Eckmann R. The influence of eutrophication and population biomass on common whitefish (*Coregonus lavaretus*) growth-the Lake Constance example revisited [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, **64**(3): 402-410.

SPATIAL-TEMPORAL PATTERNS OF FISH TAXONOMICAL AND FUNCTIONAL DIVERSITY IN XILIANG LAKE AND THEIR RELATIONSHIP WITH WATER ENVIRONMENTAL FACTORS AFTER FISHING BAN

DENG Wen-Bo^{1,2}, FENG Kai², LIN Gang³, GUO Qian-Qian^{1,2}, YUAN Jing², LIU Jia-Shou², LI Guang-Yu¹, LI Zhong-Jie² and WANG Qi-Dong²

(1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Provincial Agricultural Development Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to examine the composition, structure and diversity of fish assemblages in Xiliang Lake after fishing ban and identify key environmental factors affecting fish diversity, the investigation of fish assemblages and environmental factors was conducted in Xiliang Lake in November 2020 and April 2021, with 15 sample sites distributed in West-Xiliang Lake (XLH1-8) and East-Xiliang Lake (XLH9-15). The results showed that autumn was positively correlated with total nitrogen, chlorophyll *a* and chemical oxygen demand index, and West-Xiliang Lake was positively correlated with total phosphorus and turbidity. The results showed that a total of 31 fish species were collected belonging to 6 orders, 8 families, and 26 genera, among which the Cypriniformes (24 species) accounted for 77.4%. *Toxabramis swinhonis*, *Hemiculter leucisculus*, *Carassius auratus*, and *Cultrichthys erythropterus* were the dominant species, and *Toxabramis swinhonis* was the most dominant species. The results of Nonmetric Multidimensional Scaling indicated the significant seasonal and spatial differences in fish community structure in Xiliang Lake ($P < 0.05$). Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou index of East-Xiliang Lake were significantly higher than that in West-Xiliang Lake in autumn ($P < 0.05$), and Margalef index was significantly higher than that in West-Xiliang Lake ($P < 0.05$); Functional richness index of East-Xiliang Lake was significantly higher than that in West-Xiliang Lake in autumn ($P < 0.05$), and functional dispersion index was significantly higher than that in West-Xiliang Lake ($P < 0.05$). Pearson correlation analysis exhibited that Shannon-Wiener index, Simpson index, Pielou index and Margalef index were significantly and positively correlated with functional richness index ($r = 0.66$, $r = 0.61$, $r = 0.50$ and $r = 0.83$) and functional dispersion index ($r = 0.93$, $r = 0.89$, $r = 0.89$ and $r = 0.70$; $P < 0.05$). This result indicated that higher taxonomical diversity may contribute more functional space in fish assemblages. The results of the Redundancy Analysis indicated that total phosphorus were the key environmental factors driving fish species and functional diversity. This study provides a scientific basis for the recovery of fish resources and ecosystem restoration of lakes in the Yangtze River basin after the fishing ban, and provides a reference for future lake ecological protection policies.

Key words: Xiliang Lake; Fishing ban; Eutrophication; Functional diversity; Taxonomical diversity; Community structure; Environmental factors

附表 1 西凉湖鱼类功能性状
Appendix 1 Fishes functional character

物种 Species	最大体长 Maximum body length (cm)	恢复力 Resilience	鱼卵生态 类型 Ecological type of fish roe	亲本抚育 行为 Parental nurturing behavior	生活史 策略 Life history type	食性 Feeding habits	营养级 Trophic level	口位 Mouth position	生态习性 Ecological habits	鱼体形状 Fish body shape	栖息水层 Habitat
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	15.4	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	沉性	筑巢、雄 鱼护卵	均衡主义	杂食性	3.3	下位	静水型	圆筒形	底层
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	17.0	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	浮性	无	机会主义	浮游动物 食性	2.1	端位	流水型	侧扁形	中上层
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	23.0	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	无	机会主义	浮游动物 食性	2.8	端位	静水型	侧扁形	中上层
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	134.3	低的, 最小族 群倍增时间 4.5—14 年	漂流性	无	周期主义	草食性	2	端位	江湖洄游 型	圆筒形	中下层
达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	44.4	低的, 最小族 群倍增时间 4.5—14 年	黏性	无	周期主义	鱼食性	3.3	亚上位	静水型	侧扁形	中上层
大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	13.0	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	沉性	筑巢、无 护卵	均衡主义	藻类食性	2	端位	静水型	卵圆形	中下层
湖鲚 <i>Coilia ectenes taihuensis</i>	35.4	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	浮性	无	机会主义	浮游动物 食性	3.5	亚下位	静水型	侧扁形	中上层
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	83.5	低的, 最小族 群倍增时间 4.5—14 年	黏性	无	周期主义	鱼食性	4.4	上位	静水型	侧扁形	中上层
湖北圆吻鲴 <i>Distoechodon hupeinensis</i>	21.5	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	无	机会主义	碎屑食性	2.6	亚下位	流水型	圆筒形	中下层
黄颡鱼 <i>Tachysu fulvidraco</i>	28.6	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	筑巢、雄 鱼护卵	均衡主义	底栖动物 食性	3.5	亚下位	静水型	平扁形	底层
鲫 <i>Carassius auratus</i>	39.3	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	无	机会主义	杂食性	2	端位	静水型	侧扁形	中下层
间下鱊 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	17.9	高度, 族群倍 增时间少于 15个月	黏性	无	机会主义	浮游动物 食性	3.4	上位	静水型	圆筒形	中上层
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	99.1	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	无	周期主义	杂食性	3.1	下位	静水型	圆筒形	中下层
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	102.4	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	漂流性	无	周期主义	藻类食性	2	端位	江湖洄游 型	侧扁形	中上层
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	10.5	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	筑巢、雄 鱼护卵	均衡主义	杂食性	3.1	上位	静水型	圆筒形	中下层
翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i>	92.8	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	黏性	无	周期主义	鱼食性	3.4	上位	静水型	侧扁形	中上层
似鳊 <i>Acanthobrama simoni</i>	16.1	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	漂流性	无	机会主义	碎屑食性	2.7	亚下位	流水型	侧扁形	中下层
似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	18.9	高度, 族群倍 增时间少于 15个月	黏性	无	机会主义	浮游动物 食性	3.2	端位	静水型	侧扁形	中上层
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	45.6	非常低的, 最 小族群倍增时 间超过14 年	黏性	无	周期主义	草食性	3.4	端位	静水型	纺锤形	中下层
兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	9.7	高度, 族群倍 增时间少于 15个月	沉性	筑巢、无 护卵	均衡主义	藻类食性	2.1	端位	静水型	平扁形	中下层
银鲌 <i>Squalidus argentatus</i>	15.2	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	漂流性	无	机会主义	杂食性	3.3	下位	流水型	圆筒形	底层

续表 1

物种 Species	最大体长 Maximum body length (cm)	恢复力 Resilience	鱼卵生态 类型 Ecological type of fish roe	亲本抚育 行为 Parental nurturing behavior	生活史 策略 Life history type	食性 Feeding habits	营养级 Trophic level	口位 Mouth position	生态习性 Ecological habits	鱼体形状 Fish body shape	栖息水层 Habitat
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	146.0	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	漂流性	无	周期主义	浮游动物 食性	2.8	端位	江湖洄游 型	侧扁形	中上层
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	9.8	高度, 族群倍 增时间少于 15个月	黏性	筑巢、雄 鱼护卵	均衡主义	底栖动物 食性	3.2	端位	静水型	平扁形	底层
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	100.0	中等的, 族群 倍增时间最少 1.4—4.4年	沉性	筑巢、雄 鱼护卵	机会主义	底栖动物 食性	2.9	端位	静水型	圆筒形	底层

附表 2 西凉湖物种多样性指数时空差异显著性

Appendix 2 Significance of spatial and temporal differences in taxonomical diversity indices in Xiliang Lake

多样性指数 Diversity index		湖区 Lake	季节 Season	交互作用 Interaction effect
Shannon-Wiener指数	<i>F</i>	22.805	0.725	12.376
	<i>P</i>	<0.001	0.402	0.002
Simpson指数	<i>F</i>	29.602	0.801	13.467
	<i>P</i>	<0.001	0.379	0.001
Pielou指数	<i>F</i>	24.068	0.516	10.812
	<i>P</i>	<0.001	0.479	0.003
Margalef指数	<i>F</i>	4.611	0.254	4.022
	<i>P</i>	0.041	0.618	0.055
湖区 vs. 季节 Lake vs. Season	条件 Condition	平均值 Mean	<i>T</i>	<i>P</i>
Shannon-Wiener指数	秋季东-西凉湖 vs. 秋季西-西凉湖	1.115 vs. 0.602	4.775	<0.001
	春季东-西凉湖 vs. 春季西-西凉湖	1.050 vs. 1.073	−0.200	0.843
Simpson指数	秋季东-西凉湖 vs. 秋季西-西凉湖	0.538 vs. 0.248	5.441	<0.001
	春季东-西凉湖 vs. 春季西-西凉湖	0.488 vs. 0.475	0.251	0.804
Pielou指数	秋季东-西凉湖 vs. 秋季西-西凉湖	0.510 vs. 0.289	4.906	<0.001
	春季东-西凉湖 vs. 春季西-西凉湖	0.477 vs. 0.465	0.256	0.800

附表 3 西凉湖功能多样性指数时空差异显著性

Appendix 3 Significance of spatial and temporal differences in functional diversity indices in Xiliang Lake

多样性指数 Diversity index		湖区 Lake	季节 Season	交互作用 Interaction effect
功能丰富度指数	<i>F</i>	9.081	0.150	5.035
	<i>P</i>	0.006	0.702	0.034
功能均匀度指数	<i>F</i>	1.821	0.054	0.724
	<i>P</i>	0.189	0.819	0.403
功能趋异度指数	<i>F</i>	1.651	1.931	1.682
	<i>P</i>	0.210	0.176	0.206
功能分散度指数	<i>F</i>	7.392	2.961	4.006
	<i>P</i>	0.012	0.097	0.056
功能冗余度指数	<i>F</i>	0.340	0.070	1.090
	<i>P</i>	0.561	0.787	0.297
湖区 vs. 季节 Lake vs. Season	条件 Condition	平均值 Mean	<i>T</i>	<i>P</i>
功能丰富度指数	秋季东-西凉湖 vs. 秋季西-西凉湖	0.008 vs. 0.001	3.013	0.006
	春季东-西凉湖 vs. 春季西-西凉湖	0.007 vs. 0.007	−0.160	0.874

附表 4 西凉湖鱼食性鱼类和小型杂食性鱼类

Appendix 4 Piscivorous fish and small omnivorous fish in Xiliang Lake

	种类Species	食性Feeding habits
鱼食性鱼类Piscivorous fish	翘嘴鲌	鱼食性
	达氏鲌	鱼食性
	红鳍原鲌	鱼食性
	似鲮	浮游动物食性
	鲈	浮游动物食性
小型杂食性鱼类Small omnivorous fish	贝氏鲻	浮游动物食性
	银鲷	杂食性
	麦穗鱼	杂食性
	棒花鱼	杂食性