

湖泊阻隔对鱼类群落的影响——以保安湖为例

屈霄 高雯琪 陆颖 刘晗 熊芳园 陈宇顺

CONNECTIVITY LOSS IN LAKE ON FISH COMMUNITIES ——A CASE STUDY OF BAO'AN LAKE

QU Xiao, GAO Wen-Qi, LU Ying, LIU Han, XIONG Fang-Yuan, CHEN Yu-Shun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0117>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价

COMMUNITY STRUCTURE AND THE WATER QUALITY DURING DIFFERENT HYDROLOGICAL PERIODS IN POYANG LAKE

水生生物学报. 2021, 45(5): 1093–1103 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.148>

浅水湖泊鱼类群落结构评估: 复合网目刺网与网簖的比较

ASSESSING FISH ASSEMBLAGES IN A SHALLOW YANGTZE RIVER LAKE USING MULTI-MESH GILLNETS AND DENSE-MESH WEIRS

水生生物学报. 2018, 42(6): 1116–1123 <https://doi.org/10.7541/2018.137>

溪流鱼类群落对低水头坝的大小及功能的响应——以皖南山区河源溪流为例

RESPONSE OF STREAM FISH ASSEMBLAGES TO THE SIZE AND FUNCTION OF LOW-HEAD DAMS: A CASE STUDY IN THE HEADWATER STREAMS OF THE WANNAN MOUNTAINS

水生生物学报. 2018, 42(5): 965–974 <https://doi.org/10.7541/2018.119>

贵州草海水生植物多样性及群落演替

AQUATIC PLANT DIVERSITY AND COMMUNITY SUCCESSION IN CAOHAIR WETLAND, GUIZHOU PROVINCE

水生生物学报. 2020, 44(4): 869–876 <https://doi.org/10.7541/2020.104>

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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2022.0117

湖泊阻隔对鱼类群落的影响——以保安湖为例

屈霄¹ 高雯琪^{1,2} 陆颖¹ 刘晗^{1,2} 熊芳园^{1,2} 陈宇顺^{1,2}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探讨湖泊内部阻隔引发的生态问题, 阐释鱼类群落聚合对湖泊内部阻隔的响应, 研究选取长江中游典型阻隔湖泊保安湖为研究对象, 于2019—2020年夏季和秋季对其肖四海湖区(完全阻隔)、扁担塘湖区(半阻隔)、桥墩湖区(半阻隔)和主体湖区的鱼类群落结构进行了调查, 应用单因素方差分析、置换多元方差分析和非度量多维尺度等多重统计方法分析了湖区间鱼类群落组成和多样性的差异。结果表明, 完全阻隔湖区肖四海鱼类群落结构发生了明显变化, 其种类数[(15±3)种]显著低于半阻隔湖区[(22±3)种]和主体湖区[(23±3)种, $P<0.05$], 鱼类丰度高而生物量低, 物种丰富度指数、Shannon指数和Simpson指数显著低于主体湖区($P<0.05$), 功能丰富度指数、功能分散度指数和功能均匀度指数也显著较低($P<0.05$); 而半阻隔湖区鱼类群落结构与主体湖区无显著性差异。置换多元方差分析和非度量多维尺度分析也显示出完全阻隔湖区鱼类群落与半阻隔湖区和主体湖区鱼类群落具有显著性差异($P<0.05$), 半阻隔湖区与主体湖区无显著性差异。研究发现湖泊内部水文阻隔对鱼类群落组成也有着重要影响, 恢复湖泊内部水文自由连通对湖泊生态管理和生物多样性保护有着重要作用。

关键词: 水文阻隔; 鱼类群落; 多样性; 生态影响; 保安湖

中图分类号: Q145⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)09-1476-12



水文动态塑造了多元的景观类型, 在维持水生生物多样性和生态系统完整性方面起着至关重要的作用^[1-4]。水文动态过程在同一区域不同景观类型的连通作用, 即景观元素间以水为载体的物质、能量和生物交换, 称为水文连通性^[5]。水文连通在纵向空间上, 携带营养源自上游至下游迁移, 为河流水生生物完成其生活史提供了能量和物质; 在横向空间上, 维持河流与流域内湿地、湖泊等的自然联系, 为两者间有机质和生物的交流提供了机会, 并营造出高度异质的生境斑块。与此同时, 水文连通性在不同时间尺度上对物种适应性进化、扩散和群落形成也起着重要作用^[6, 7]。

然而, 随着流域内各式各样闸坝的建设, 水体间的自由连通逐步被阻隔, 营养物质与生物间的自然交流被阻断^[5]。已有的研究表明, 因闸坝引发的水文阻隔对水生生物群落造成了深远的影响^[8-11]。以长江中下游流域为例, 江湖阻隔湖泊浮游植物、

湿生植物、底栖动物和鱼类种类多样性均低于水文自由连通的湖泊, 食物网结构更趋于简化^[8, 12-14]。与此同时, 原与阻隔水体相连通的河流/湖泊, 其水生生物(特别是鱼类)结构也因阻隔引起的交流缺失而发生改变。

长江中下游流域在气候和地形等因素共同作用下, 形成了河湖星罗棋布、周期性淹没的独特而完整的生态系统——江湖复合生态系统。得天独厚的环境特征孕育了丰富的江湖平原生物类群, 是我国重要的物种资源库, 被世界自然基金会(WWF)列为全球238个生物多样性优先保护的生态区之一^[15]。也正因充沛的水资源, 长江中下游江湖复合生态系统遭受了较为严重的人类活动干扰^[16, 17]。20世纪50—70年代, 为防洪和渔业生产等目的, 长江中下游流域修建了大量堤坝, 不仅阻隔了河流与湖泊间的有机联系, 湖泊间甚至湖泊内部也形成了分隔^[18]。现阶段有关于河湖阻隔的水生态研究已较为丰富,

收稿日期: 2022-03-29; **修订日期:** 2022-08-02

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901203); 中国科学院水生生物研究所“生态文明”特色研究所服务性项目(Y85Z0511)资助
[Supported by the National Key R & D Program of China (2019YFD0901203); the Featured Institute Service Projects from the Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences (Y85Z0511)]

作者简介: 屈霄(1993—), 男, 博士研究生; 研究方向为群落生态学。E-mail: quxiao@ihb.ac.cn

通信作者: 陈宇顺, E-mail: yushunchen@ihb.ac.cn

而湖泊内部阻隔的研究仍十分匮乏。因此,本研究拟围绕湖泊内部阻隔引发的生态问题,探讨鱼类群落对湖泊内部阻隔的响应,以期丰富水文阻隔生态影响的研究内容,并为湖泊阻隔生物多样性保护提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样点布设

保安湖(114°39′—49′E, 30°12′—18′N), 位于湖北省大冶市, 长江中游南岸, 东邻三山湖, 西隔梁子湖, 南邻保安镇, 北濒长江。保安湖属梁子湖水系, 平均水深2.5 m, 湖泊面积达41.6 km², 蓄水量为1.63×10⁸ m³, 为河谷沉溺型湖泊, 湖盆平浅, 湖底淤泥深厚。湖水主要依赖地表径流和湖面降水补给, 集水面积243.3 km², 补给系数5.1。主要入湖河流有高桥港和金牛河等30余条, 经东沟闸注入保安湖, 出水由长港, 经樊口大坝泄入长江。2018年前保安湖主要生态服务功能为渔业、灌溉和调蓄; 湖泊水质相对较好, 达地表水Ⅲ类; 增殖放流以鲢鳙为主; 2018年12月30日后保安湖全面封湖禁渔。由于20世纪70年代围垦, 湖区被数个围堤分割为扁担塘、肖四海、桥墩湖和主体湖四个部分。各湖区除肖四海完全被土堤拦断与主体湖水不通外, 扁担塘、桥墩湖与主体湖虽有不同高度的石堤相隔, 但各有1—2个缺口与主体湖相通, 湖水也可通过石栏大堤孔隙与主体湖水交换。

为探讨湖泊内不同阻隔程度对鱼类群落的影响, 本研究在保安湖不同程度阻隔湖区内共布设12个采样点(图1), 分别在半阻隔湖区扁担塘和桥墩湖各布设3个样点, 阻隔湖区肖四海布设3个采样点, 无阻隔湖区主体湖布设3个样点。

1.2 鱼类样品采集

于2019—2020年对保安湖鱼类群落共进行4次调查, 具体时间为2019年夏季(6月)、秋季(10月)与2020年夏季(6月)、秋季(10月), 每次调查时间约2周。为了获取更多更全面的鱼类群落样品, 本研究采用了多种捕捞方式进行鱼类样品收集。每样点使用多网目复合定置单片刺网1条(沉网, 网目a=5—60 mm, 长36 m, 高1.5 m)、多网目复合定置单片刺网1条(浮网, 网目a=5—60 mm, 长36 m, 高1.5 m)和拦截建网陷阱1组(又名网簖, 高2 m, 引网长25 m, 网袋2个, 网袋长10 m, 网目10 mm)进行鱼类样品采集。其中, 多网目复合定置单片刺网由12种规格网片(网目范围a=5—60 mm, a以5 mm递增, 每种网片长3 m)随机拼接而成^[19]。多网目复合定置单片刺网采样方法因其网目多样, 捕捞对象全面, 对湖泊

水生植被和底质无任何破坏作用, 已在淡水鱼类监测中广泛应用^[11, 20, 21]。拦截建网陷阱(网簖), 为保安湖区域使用的传统渔具, 一般在沿岸带布设, 渔获效率较高^[21]。网具放置时间为5:00 pm至次日6:00 am。鱼类取样时遵循够用即可, 尽量少捕的原则, 在获取渔获物总重后随机取一定重量样品进行测量, 其余鱼类均放归原水域。采集后的标本在新鲜状态下进行鉴定, 统计每种鱼类数量和重量。疑难种用甲醛进行固定后带回实验室进一步鉴定。

1.3 数据分析

计算各样点单位捕捞努力数量和单位捕捞努力重量, 用以表征各样点鱼类丰度和生物量。物种多样性的计算采用种类丰富度、Shannon-Wiener多样性、Margalef丰富度和Simpson优势度等指数^[22—24]。同时, 选取鱼类生长、摄食和繁殖等22项功能性状(表1), 功能性状数据来自文献资料和鱼类数据库Fishbase^[25—27], 计算功能丰富度(Functional richness, FRic)、功能趋异度(Functional divergence, FDiv)、功能均匀度(Functional evenness, FEve)及功能分散度(Functional dispersion, FDis)度量以表征鱼类群落功能多样性^[28—30]。采用相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)计算鱼类优势度, 选取IRI≥1000的前五位种类为各湖区优势种类^[31]。

对各湖区不同季节和年度鱼类种类数、丰度、生物量、物种多样性指数和功能多样性指数应用单因素方差分析(One-way ANOVA), 如果单因素方差差异显著, 则进行多重比较; 如果方差具有

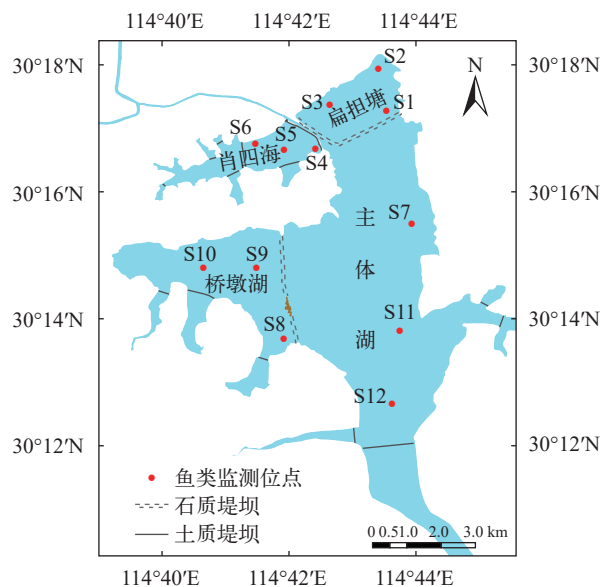


图1 2019—2020年保安湖调查区域与样点分布

Fig. 1 Study area and sampling sites in Bao'an Lake during 2019—2020

表 1 鱼类功能性状及性状分类
Tab. 1 Fish functional traits and categories

类型 Type	性状组成 Traits	性状分类 Trait categories	类型 Type	性状组成 Traits	性状分类 Trait categories		
生长	栖息地偏好	山溪河流	摄食	食性	无脊椎动物		
		湖泊定居			食性		
		江湖洄游			浮游生物食		
		河海洄游			性		
	栖息水层	表层	口型		杂食性		
		中上层			植食性		
		中下层			鱼食性		
		底层			上位口		
	体型	鳗型	其他		端位口		
		圆筒型			亚下位		
		纺锤型			下位口		
		侧扁型			营养级		
	平扁型	系统发育多样性指数	群落恢复力	稳定性			
				群落抵抗力			
				稳定性			
				土著/外来			
最大体长			易损率				
体宽							
性成熟体长							
尾柄长							
尾柄宽							
眼间距							
繁殖	产卵类型	沉性卵	护幼行为				
		黏性卵					
		浮性卵					
		漂流性卵					
	相对繁殖力						
	绝对繁殖力						
	卵径						

同质性, 就进行LSD(The least significant difference) 检验; 如果方差不具同质性, 就选用非参数Games-Howell检验。应用置换多元方差分析(Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA) 和非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析不同湖区鱼类群落组成的差异。采用相似性百分比分析方法(Similarity percentage procedure, SIMPER)分析各湖区鱼类群落结构的分歧种。以上统计分析使用“vegan”“FD”程序包在R 3.5.1软件中完成。

2 结果

2.1 不同湖区鱼类种类组成

2019年和2020年在保安湖水域累计捕获鱼类

18227尾, 重达148.8 kg, 隶属于7目12科37属44种(表 2)。其中, 以桥墩湖湖区种类数最高, 达35种; 其次为主体湖湖区33种, 扁担塘湖区32种; 以肖四海湖区鱼类种类最少为25种。在本研究中, 桥墩湖平均种类数(23±5)、主体湖(23±3)和扁担塘(21±3)均显著高于肖四海(15±3; $P<0.05$)。各湖区总体上呈现出夏季种类较秋季丰富的趋势, 但没有显著性差异。这一点也体现在保安湖整体夏季种类数高于秋季。

2.2 不同湖区鱼类丰度和生物量

以平均捕捞努力数量而言, 肖四海湖区所获数量[(585.7±617.9) ind./(net·d)]最多, 其次为桥墩湖湖区[(483.1±678.3) ind./(net·d)]、扁担塘湖区[(231.9±125.2) ind./(net·d)], 主体湖湖区[(218.3±136.5) ind./(net·d)]最低(图 2a)。在各湖区中, 扁担塘湖区和肖四海湖区夏季鱼类数量均高于秋季; 而在桥墩湖湖区和主体湖湖区中仅2020年夏季鱼类数量高于秋季, 2019年情况则相反, 但均不存在显著性差异($P>0.05$)。各湖区年度所获鱼类数量也不存在显著性差异($P>0.05$)。

在本研究四次调查中, 扁担塘湖区、桥墩湖湖区和主体湖湖区鱼类捕捞努力重量总体呈现为下降的趋势, 仅肖四海除2019年夏季鱼类重量, 呈现出上升的趋势。整体上, 主体湖[(3197.3±2735.1) g/(net·d)]和桥墩湖[(3223.6±1563.3) g/(net·d)]平均所获鱼类重量高于扁担塘[(3155.6±1550.5) g/(net·d)]和肖四海[(2830.6±1356.3) g/(net·d)], 仅在2019年秋季桥墩湖湖区鱼类捕捞努力重量显著高于肖四海湖区($P<0.05$)。年度间, 2019年各湖区平均所获鱼类重量高于2020年, 主体湖2019年鱼类重量[(5190.8±2189.2) g/(net·d)]显著高于2020年[(1203.6±526.2) g/(net·d)], 其他湖区年度间则没有显著性差异($P>0.05$)。

2.3 不同湖区优势种

以相对重要性指数衡量鱼类优势种类发现, 扁担塘湖区以红鳍原鲃*Cultrichthys erythropterus*、似鲮*Toxabramis swinhonis*和短颌鲚*Coilia brachynathus*为优势种类; 肖四海湖区以鲫*Carassius auratus*、鲮*Hemiculter leucisculus*、鳊*Hypophthalmichthys nobilis*和达氏鲃*Culter dabryi* 为鱼类优势种。不同湖区间, 桥墩湖湖区优势种与扁担塘较为相似, 多以红鳍原鲃、短颌鲚和似鲮为优势种; 主体湖湖区中红鳍原鲃、短颌鲚、似鲮、鲮和鳊为鱼类优势种。总体上而言, 保安湖湖区鱼类优势种以似鲮、鲮和短颌鲚等小型鱼类为主, 肖四海湖区鱼类优势种区别于其他湖区。同时, 值得一提的是, 在本研究中短颌鲚在扁担塘湖区、桥墩湖湖区和主体湖

表 2 保安湖历史记录和现状各湖区鱼类种类名录

Tab. 2 List of fish species in historical and current records in different sub-lakes in Bao'an Lake

种类 Species	扁担塘 Biandantang	肖四海 Xiaosihai	桥墩湖 Qiaodunhu	主体湖 Main Lake	现状 Current	全湖历史 History
鳊科Engraulidae						
1.短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>	+	+	+	+	+	
银鱼科Salangidae						
2.寡齿新银鱼 <i>Neosalanx oligodontis</i>		+	+	+	+	+
鲤科Cyprinidae						
3.鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		+	+	+	+	+
4.鲫 <i>Carassius auratus auratus</i>	+	+	+	+	+	+
5.棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	+	+	+	+	+	+
6.麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	+	+	+	+	+	+
7.黑鳍鳉 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	+		+	+	+	+
8.华鳊 <i>S. sinensis</i>	+		+		+	
9.唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>						+
10.花鲮 <i>H. maculatus</i>			+	+	+	+
11.蛇鲰 <i>Saurogobio dabryi</i>	+				+	
12.亮银鲰 <i>Squalidus nitens</i>			+	+	+	+
13.西湖银鲰 <i>S. sihuensis</i>						+
14.似刺鲃 <i>Paracanthobrama guichenoti</i>	+		+	+	+	+
15.草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	+	+	+	+	+	+
16.青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	+		+	+	+	+
17.鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>						+
18.鳊 <i>Ochetobius elongatus</i>						+
19.赤眼鳊 <i>Squaliobarbus curriculus</i>			+	+	+	+
20.短须鳊 <i>Acheilognathus barbatulus</i>						+
21.兴凯鳊 <i>A. chankaensis</i>	+	+	+	+	+	+
22.大鳊 <i>A. macropterus</i>	+	+	+	+	+	+
23.越南鳊 <i>A. tonkinensis</i>						+
24.彩副鳊 <i>Paracheilognathus imberbis</i>						+
25.方氏鳊 <i>Rhodeus fangi</i>						+
26.彩石鳊 <i>R. lighti</i>						+
27.高体鳊 <i>R. ocellatus</i>	+	+		+	+	+
28.中华鳊 <i>R. sinensis</i>						+
29.似鳊 <i>Toxabramis swinhonis</i>	+	+	+	+	+	+
30.贝氏鲃 <i>Hemiculter bleekeri</i>						+
31.鲃 <i>H. leucisculus</i>	+	+	+	+	+	+
32.飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>						+
33.翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	+	+	+	+	+	+
34.达氏鲃 <i>C. dabryi</i>	+	+	+	+	+	+
35.蒙古鲃 <i>C. mongolicus</i>	+		+	+	+	+
36.尖头鲃 <i>C. oxycephalus</i>			+	+	+	+
37.红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	+	+	+	+	+	+
38.团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>						+
39.鲂 <i>M. skolkovii</i>						+
40.三角鲂 <i>M. terminalis</i>						+
41.鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	+				+	+
42.似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	+	+	+	+	+	+

续表 2

种类 Species	扁担塘 Biandantang	肖四海 Xiaosihai	桥墩湖 Qiaodunhu	主体湖 Main Lake	现状 Current	全湖历史 History
43. 银鲴 <i>Xenocypris argentea</i>	+		+	+	+	+
44. 黄尾鲴 <i>X. davidi</i>	+	+	+	+	+	+
45. 细鳞鲴 <i>X. microlepis</i>						+
46. 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	+	+	+	+	+	+
47. 鳙 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	+	+	+	+	+	+
鳅科 Cobitidae						
48. 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>		+		+	+	+
49. 大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>				+	+	+
50. 中华沙鳅 <i>Botia supercilialis</i>						+
51. 花鳅 <i>Cobitis sinensis</i>						+
鲮科 Bagridae						
52. 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+	+	+	+	+	+
53. 瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i>	+				+	+
54. 长须黄颡鱼 <i>P. eupogon</i>			+		+	
鲇科 Siluridae						
55. 鲇 <i>Silurus asotus</i>		+			+	+
青鳉科 Oryziatidae						
56. 青鳉 <i>Oryzias latipes</i>						+
57. 中华青鳉 <i>O. latipes sinensis</i>						+
鱖科 Hemirhamphidae						
58. 间下鱖 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	+		+	+	+	+
合鳃鱼科 Synbranchidae						
59. 黄鳝 <i>Monopterus albus</i>						+
斗鱼科 Belontiidae						
60. 圆尾斗鱼 <i>Macropodus chinensis</i>		+			+	+
鲢科 Channidae						
61. 乌鲢 <i>Channa argus</i>	+	+	+		+	+
鲈科 Serranidae						
62. 鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	+		+	+	+	+
63. 大眼鳊 <i>S. kneri</i>						+
塘鳢科 Eleotridae						
64. 黄魮鱼 <i>Hypseleotris swinhonis</i>						+
65. 沙塘鳢 <i>Odontobutis potamophila</i>	+				+	+
66. 小黄魮鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>		+	+		+	+
鰕虎鱼科 Gobiidae						
67. 波氏吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>						+
68. 子陵吻鰕虎鱼 <i>R. giurinus</i>	+		+	+	+	+
69. 粘皮鰕虎鱼 <i>Mugilogobius myxodermus</i>						+
鳗鲡科 Anguillidae						
70. 鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>						+
刺鲀科 Mastacembelidae						
71. 刺鲀 <i>Mastacembelus aculeatus</i>						+
72. 中华刺鲀 <i>Sinobdella sinensis</i>						+
总计 Total	32	25	35	33	44	68

注: 全湖鱼类历史记录参考胡传林和黄祥飞^[32]、梁彦龄和刘伙泉^[33]、张堂林^[34]、Xie 等^[35]、李为^[36]、Li 等^[37, 38]
 Note: Historical records of fish in Bao'an Lake are from Hu and Huang^[32], Liang and Liu^[33], Zhang^[34], Xie, et al.^[35], Li^[36], Li, et al.^[37, 38]

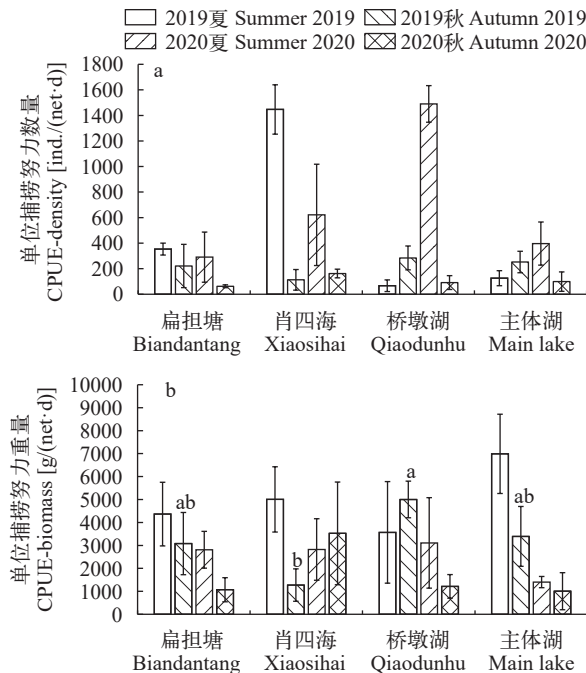


图2 保安湖不同湖区鱼类单位捕捞努力量

Fig. 2 Catch per unit effort of fish

a. 数量, b. 重量

a. density and b. biomass in sub-lakes of Bao'an Lake

湖区均为主要优势种,而在肖四海湖区均不为优势种。在不同季节中,保安湖夏季鱼类优势种组成与秋季也有着相对明显的差别,夏季鲮亚科种类、鲫多为优势种类,而秋季则以短颌鲂和达氏鲃为优势种类,其中短颌鲂有着非常明显的季节差异(表3)。

2.4 不同湖区多样性指数

在本研究中,扁担塘湖区平均种类丰富度最高(16.83±5.14),其次为主体湖湖区(15.33±4.52)和桥墩湖湖区(15.25±4.19),肖四海湖区平均种类丰富度最低,仅为11.0±2.54;扁担塘湖区和主体湖湖区种类丰富度均显著高于肖四海湖区(图3a, $P<0.05$);而各湖区在不同季节和年度间种类丰富度差异不显著($P>0.05$)。整体上各湖区Shannon指数呈现出

与种类丰富度相似的趋势,即扁担塘湖区(1.76±0.44)和主体湖湖区(1.75±0.23)显著高于肖四海湖区(1.29±0.35; $P<0.05$),桥墩湖湖区(1.64±0.14)则与其他湖区无显著性差异。这一点也体现在不同季节中,特别是2019年秋季和2020年夏季肖四海湖区Shannon指数显著低于扁担塘湖区和主体湖湖区(图3b; $P<0.05$)。不同季节和年度各湖区Shannon指数变化差异不显著($P>0.05$)。Margalef指数也同样显示出,肖四海湖区(1.83±0.44)显著低于其他湖区(图3c; $P<0.05$),而季节和年度对各湖区Margalef指数的影响不显著($P>0.05$)。Simpson指数在各湖区间波动幅度相对较小,以主体湖湖区平均Simpson指数(0.75±0.04)最高,其次为扁担塘湖区(0.72±0.15)和桥墩湖湖区(0.70±0.04),仍以肖四海湖区(0.60±0.17)最低(图3d)。其中在2020年夏季,肖四海湖区Simpson指数显著低于主体湖湖区和扁担塘湖区($P<0.05$)。

在功能多样性层面,功能丰富度指数(FRic)整体以扁担塘湖区(178.78±75.22)最高,其次为桥墩湖湖区(166.50±62.76)和主体湖湖区(164.29±56.23),肖四海湖区(151.13±82.69)最低(图4a)。其中2019年秋季扁担塘湖区和主体湖湖区FRic指数显著高于肖四海湖区($P<0.05$),2020年秋季桥墩湖湖区也显著高于肖四海湖区($P=0.01$)。而同一湖区内不同季节和年度间FRic指数变化差异不显著($P>0.05$)。功能均匀度(FEve)方面,主体湖湖区(0.60±0.06)>桥墩湖湖区(0.54±0.09)>扁担塘湖区(0.47±0.07)>肖四海湖区(0.41±0.04),主体湖湖区显著高于扁担塘湖区和肖四海湖区(图4b, $P<0.05$);不同季节和年度间对湖区FEve指数影响也不显著($P>0.05$)。功能趋异度指数(FDiv)方面也表现出桥墩湖湖区(0.82±0.10)和主体湖湖区(0.79±0.09)高于肖四海湖区(0.74±0.04)和扁担塘湖区(0.69±0.13),但均没有显著性差异(图4c)。而与其他多样性指数不同的是,扁担塘FDiv指数低于其他湖区。各湖区鱼类功能分散度

表3 保安湖不同湖区前五位鱼类优势种

Tab. 3 Top five dominant species of fish in sub-lakes of Bao'an Lake

湖区 Sub-lake	2019夏 Summer 2019	2019秋 Autumn 2019	2020夏 Summer 2020	2020秋 Autumn 2020
扁担塘 Biantangtang	高体鲮、鳊、红鳍原鲃、 麦穗鱼、草鱼	短颌鲂、银鲃、鳊、 红鳍原鲃、似鲮	似鲮、鲫、似刺鲃、 大鳍鲃、红鳍原鲃	短颌鲂、达氏鲃、 似鲮、红鳍原鲃
肖四海 Xiaosihai	鲫、红鳍原鲃、鳊、鲤	达氏鲃、麦穗鱼、鳊、 鲫、鳊	鲫、鳊、鳊、大鳍鲃	似鲮、鳊、草鱼、 达氏鲃、鲫
桥墩湖 Qiaodunhu	红鳍原鲃、短颌鲂、鳊、鳊	短颌鲂、蒙古鲃、鲢、 似鳊、鳊	似鲮、红鳍原鲃、鲫、 大鳍鲃、鳊	短颌鲂、似鲮、达氏鲃、 红鳍原鲃
主体湖 Main lake	草鱼、鳊、短颌鲂、 高体鲮、鳊	短颌鲂、似鲮、鳊、 红鳍原鲃、鳊	似鲮、红鳍原鲃、似刺鲃、 鲫、大鳍鲃	短颌鲂、达氏鲃、 似鲮、红鳍原鲃

注:以相对重要性指数大小进行鱼类优势种排列顺序

Note: The order of the dominant fish species is based on the index of relative importance

指数(FDis)变动趋势与FRic指数和FEve指数相似, 肖四海湖区(4.74 ± 1.3)显著低于其他湖区($P < 0.05$)。

2.5 不同湖区鱼类群落聚合

置换多元方差分析发现, 2019年和2020年四次

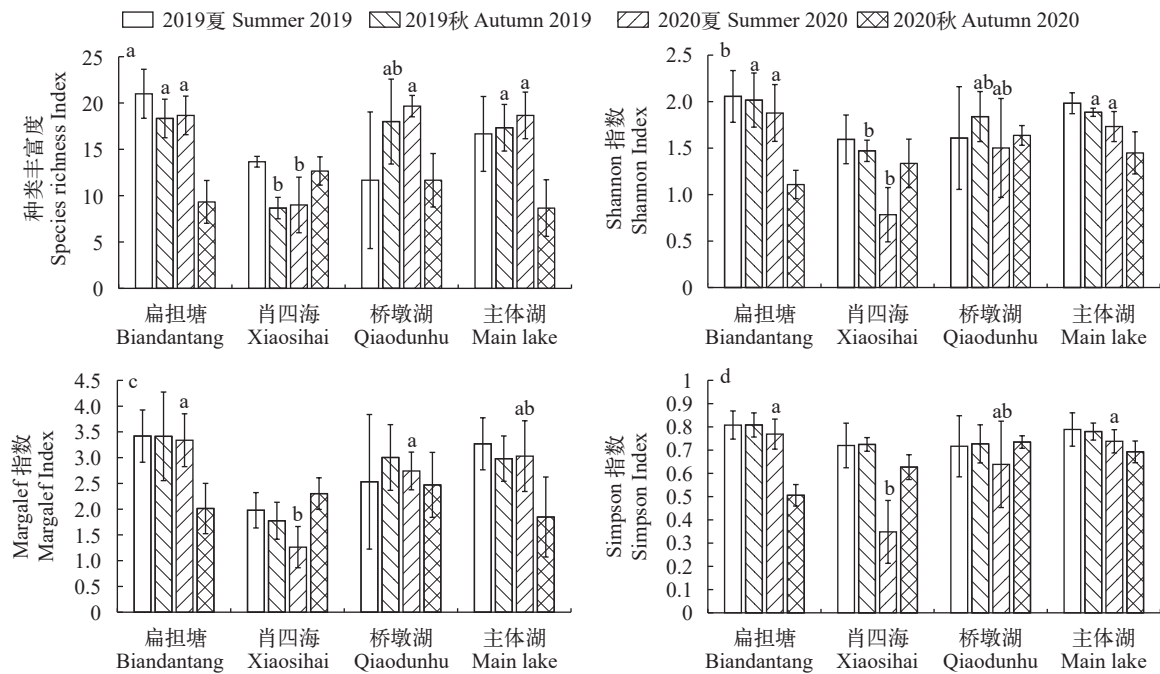


图3 保安湖不同湖区鱼类物种多样性指数

Fig. 3 Fish species diversity in sub-lakes of Bao'an Lake

a. 种类丰富度指数; b. Shannon多样性指数; c. Margalef丰富度指数; d. Simpson优势度指数。柱状图上边缘不同小写字母表示湖区间有显著性差异; 下同

a. index of species richness; b. Shannon index; c. Margalef index; d. Simpson index. Different lowercase letters on the upper of histograms indicate statistically significant differences between sub-lakes. The same applies below

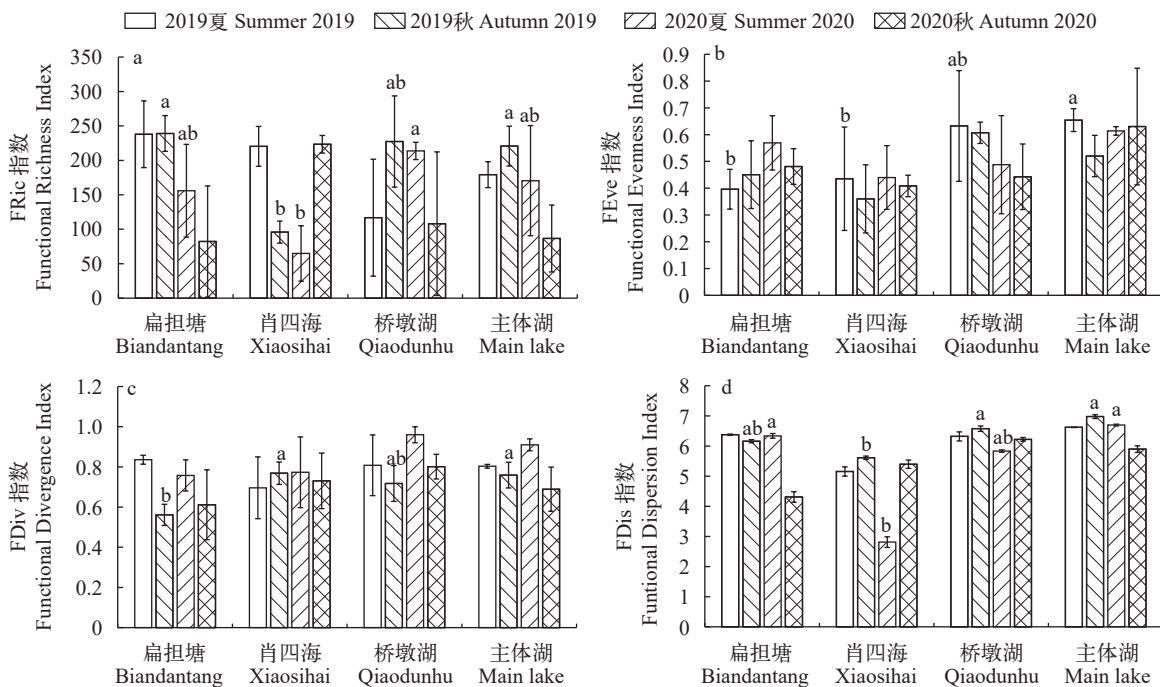


图4 保安湖不同湖区鱼类功能多样性指数

Fig. 4 Fish functional diversity in sub-lakes of Bao'an Lake

a. 功能丰富度指数; b. 功能均匀度指数; c. 功能趋异度指数; d. 功能均匀度指数

a. functional richness index; b. functional evenness index; c. functional divergence index; d. functional dispersion index

调查中各湖区鱼类群落组成均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 肖四海湖区鱼类群落组成与其他湖区差异显著, 而其他湖区间差异不显著。非度量多维尺度分析(NMDS)结果也发现, 应力函数值在0.07—0.13, NMDS中Bray-Curtis 距离矩阵与原始距离矩阵非线性拟合 R^2 在0.98—0.99, 模型拟合效果较好; 肖四海湖区鱼类群落组成与其他湖区区分较为明显, 桥墩湖湖区和主体湖区鱼类群落组成区分不明显, 扁担塘湖区鱼类群落组成更偏向于主体湖湖区(图5)。SIMPER相似性百分比分析结果发现, 短颌鲚、鲫和似鲮为肖四海鱼类群落与其他湖区群落差异的主要物种(表4)。特别是秋季短颌鲚对肖四海与其他湖区鱼类群落差异的贡献性高于春季。

3 讨论

3.1 保安湖及不同湖区鱼类群落变动

保安湖的渔业发展大致历经以下过程: 1960s前全湖以天然捕捞为主, 鱼种主要来自灌江纳苗和自然增殖; 1970s修堤建闸后, “围网、拦网、网箱”

三网养殖和资源增殖养殖开始兴起, 鱼种以人工投放为主; 2010年起三网养殖退出湖泊, 2018年起湖泊全面封湖禁渔(<http://dayeyun.cjyun.org/>)^[32, 33, 39]。随着渔业发展阶段和湖泊利用方式的不同, 鱼类区系组成也逐渐演变为由洄游性、流水性和湖泊定居性鱼类组成的复合体转变为以湖泊定居性鱼类为主的相对单一结构^[13, 33]。在本研究中, 现阶段保安湖鱼类区系组成与历史组成相比, 仍表现出洄游性和流水性鱼类消失或减少的趋势, 而洄游性鱼类的补充仍以人工投放为主, 如鲢和鳙等。

在保安湖鱼类区系组成受江湖阻隔影响发生变化的同时, 各湖区间鱼类群落也受到了湖泊内部阻隔的影响。完全阻隔湖区肖四海其鱼类群落结构与其他湖区有着相对明显的区别, 主要体现在鱼类组成、单位捕捞努力量、优势种和多样性等方面。在鱼类组成方面, 肖四海江湖洄游和流水性种类进一步减少, 如蒙古鲃 *Culter mongolicus*、赤眼鲮 *Squaliobarbus curriculus*、银鲴 *Xenocypris argentea*、黑鳍鲈 *Sarcocheilichthys nigripinnis* 和鳊 *Siniper-*

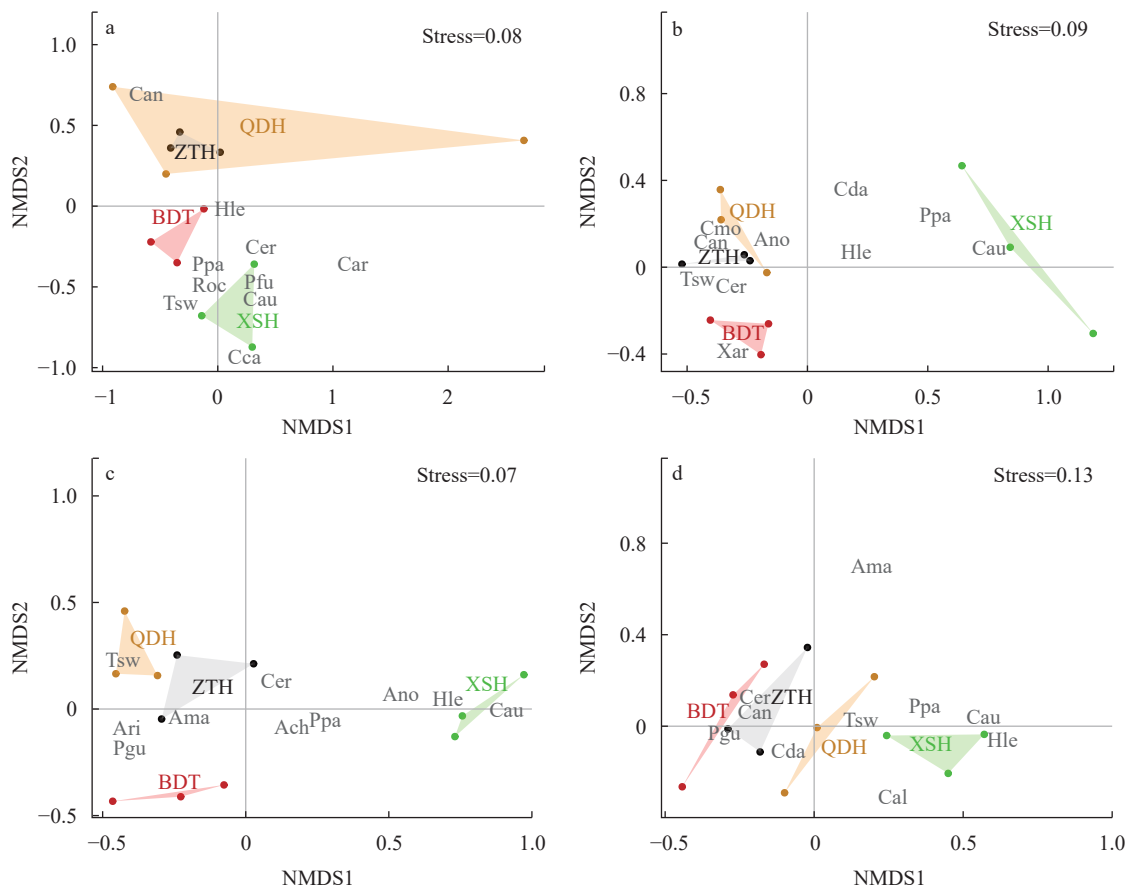


图5 保安湖不同湖区鱼类群落NMDS分析

Fig. 5 Non-metric multidimensional scaling analysis of fish communities among sub-lakes of Bao'an Lake

a. 2019夏季; b. 2019秋季; c. 2020夏季; d. 2020秋季

a. summer 2019; b. autumn 2019; c. summer 2020; d. autumn 2020

ca chuatsi等; 由于连通性的缺失, 短颌鲚也在肖四海较少出现。而半阻隔湖区扁担塘和桥墩湖与保安湖主体湖区鱼类组成差异相对较小(图 5)。肖四海鱼类单位捕捞努力数量虽高于其他湖区, 但其单位捕捞努力重量却在各湖区中最低。张春兰^[40]发现长江中游湖泊自江湖联系丧失后, 天然渔业资源产量持续下降。

在物种和功能多样性层面, 完全阻隔湖区肖四海物种多样性指数和功能多样性指数也低于其他湖区。以往关于水文阻隔的研究中, 多关注于鱼类物种丰富度的减少, 而对物种均匀度的相关报道较少^[13, 40, 41]。在我们的观测中, 完全阻隔湖区物种均匀度也明显低于未阻隔湖区。郑鹏等^[42]发现我国东部平原湖泊江湖阻隔后鱼类群落在功能性状趋于同质化, 生态位分化程度低, 竞争作用变强。生态位分化理论认为, 物种间生态位越相似, 竞争排斥越强烈, 物种共存难度越大, 某一或某些物种成为绝对优势种的概率增大^[43, 44]。在本研究中, 肖四海鱼类群落功能丰富度和功能分散度显著低于其他湖区, 表明被阻隔湖区鱼类群落功能性状特异性降低, 生态位分化程度和资源互补度低, 生态位重叠加剧, 物种间竞争可能变得更为激烈。

3.2 湖泊阻隔对湖区鱼类群落的影响过程

自然的水文连通为不同水体间有机质和生物的交流提供了途径, 营造出多样的生境斑块, 驱动物种多样化与结构复杂化^[3, 5, 7]。而水文阻隔阻断了这一自由连通, 减少了生物间的自由交流, 增大了阻隔水体间生物群落的差异^[8-10, 12, 13]。本研究置换多元方差分析发现, 保安湖各湖区间鱼类群落存

在显著性差异($P < 0.05$), 而完全阻隔湖区肖四海鱼类群落正是这一结果出现的主要原因。非度量多维尺度分析(NMDS)能够反映沿环境梯度不同生境群落之间物种组成的相异性, 即 β 多样性。NMDS分析较为直观地展现出肖四海湖区鱼类群聚组成与扁担塘湖区、桥墩湖湖区和主体湖湖区鱼类群聚组成距离较远, 而扁担塘湖区、桥墩湖湖区和主体湖湖区鱼类群聚组成距离较近, 这意味着不同湖区鱼类群聚组成因阻隔而发生了明显改变。Liu和Wang^[45]和Jiang等^[46]均发现长江中下游流域湖泊江湖连通丧失后, 鱼类群落 β 多样性有明显的升高。在水文阻隔发生后, 往往在区域尺度会带来高的生境异质性, β 多样性也随之升高, 而水文连通自然且频繁的水体间 β 多样性通常较低^[47-50]。

在局部尺度上, 水文阻隔使得同一水体内的异质生境斑块逐步同质化, 进而导致食物网链节率和食性重叠度增大, 食物网结构趋于简化^[5]。陈俊伊等^[51]利用碳、氮稳定同位素对保安湖食物网结构进行了研究, 发现浮游植物已成为最主要基础食物源, 高营养级凶猛鱼类的缺乏使得杂食性小型鱼类占主要优势, 种间相互作用程度相对较高。而这一点在完全阻隔湖区肖四海较为明显, 肖四海凶猛性鱼类种类和资源量均低于其他湖区, 小型杂食性鱼类为主要优势类群^[51]。Liu和Wang^[14]以底栖动物食物网为例, 分析了水文阻隔对湖泊食物网的影响, 发现阻隔湖泊底栖动物对有机碎屑的依赖程度远高于通江湖泊, 总链节数明显下降, 种间相关作用增强。

综上所述, 本研究发现湖泊内部完全阻隔湖区鱼类群落发生了明显变化, 主要体现在鱼类种类减

表 4 保安湖不同湖区鱼类群落差异的主要种类组成(贡献率>5%)

Tab. 4 Main species composition of fish community differences in sub-lakes of Bao'an Lake (contribution rate>5%)

湖区Sub-lake	2019夏Summer 2019	2019秋Autumn 2019	2020夏Summer 2020	2020秋Autumn 2020
扁担塘&肖四海	鲤*、鲫、高体鳊、黄颡鱼、似鲮、鳊、兴凯鳊	银鲴*、红鳍原鲌*、短颌鲚、似鲮*、鲫*、麦穗鱼*、青鱼、达氏鲌	似鲮、鲫、大鳍鲮、棒花鱼*、似刺鲃*、鳊、鳊*、麦穗鱼	鳊*、似鲮*、短颌鲚、鲫*、麦穗鱼、翘嘴鲌、红鳍原鲌
扁担塘&桥墩湖	高体鳊*、麦穗鱼*、似鲮*、红鳍原鲌、鲫、兴凯鳊	似鲮*、银鲴、短颌鲚、蒙古鲌、鳊	红鳍原鲌*、似鲮、鲫、大鳍鲮、间下鲃、兴凯鳊	红鳍原鲌、似鲮、短颌鲚、达氏鲌、鳊、翘嘴鲌、麦穗鱼、大鳍鲮
扁担塘&主体湖	高体鳊*、似鲮*、麦穗鱼、鳊、鲫、兴凯鳊	鳊、短颌鲚、银鲴、似鲮、大鳍鲮	红鳍原鲌、似鲮、短颌鲚*、大鳍鲮、鲫、麦穗鱼	短颌鲚、达氏鲌、似鲮、麦穗鱼、翘嘴鲌、红鳍原鲌、鳊、似刺鲃*
肖四海&桥墩湖	鲤*、鲫*、红鳍原鲌*、麦穗鱼*、鳊、高体鳊、黄颡鱼*、短颌鲚	短颌鲚*、蒙古鲌*、似鲮*、红鳍原鲌、鲫*、似鲮、达氏鲌、麦穗鱼	似鲮*、鲫、大鳍鲮、棒花鱼*、鳊、红鳍原鲌	鳊、红鳍原鲌、似鲮、短颌鲚、鲫、麦穗鱼、达氏鲌
肖四海&主体湖	鲤*、鲫*、短颌鲚、高体鳊、鳊、黄颡鱼*、银鲴*、乌鳢*、麦穗鱼	短颌鲚*、似鲮*、红鳍原鲌*、鳊*、青鱼*、鲫、达氏鲌、麦穗鱼	似鲮*、鲫*、大鳍鲮*、似刺鲃*、短颌鲚*、棒花鱼	鳊*、短颌鲚、似鲮、麦穗鱼、达氏鲌、红鳍原鲌、鲫*
桥墩湖&主体湖	鳊、银鲴*、红鳍原鲌、草鱼*、短颌鲚、兴凯鳊、鲫	似鲮*、蒙古鲌、鳊、似鲮、达氏鲌、翘嘴鲌、鳊、银鲴	大鳍鲮、麦穗鱼、鲫、鳊、兴凯鳊、间下鲃、似刺鲃、鲤	红鳍原鲌、达氏鲌、短颌鲚、翘嘴鲌、大鳍鲮、似鲮、鳊、麦穗鱼

注: 种类排序以对群落差异的贡献性大小、*代表为显著性物种

Note: Species are sorted by the contribution to community differences、*represents significant species

少,生物多样性下降,特异性功能性状(如洄游性状、高营养级和多样化体型等)趋于消失,而处于半阻隔的湖区鱼类群落变化幅度相对较小。诚然,本研究仅考虑了湖泊内部阻隔因素对不同湖区鱼类群落的影响,未能联系各湖区内水环境变化、各生物类群间相互作用、人工增殖等因素及其叠加效应的影响,仍存在一些不足之处。但基于两年的连续调查均发现完全阻隔湖区鱼类群落结构与主体湖区有着较为明显的区别,这也意味着湖泊内部水文自由连通对维持湖泊鱼类多样性有着重要作用。王洪铸等^[5]认为长江河流-泛滥平原作为一个不可分割的复合巨系统,江湖复合生态系统的保护与修复应注重整体性和系统性。因此,特别在江湖阻隔湖群恢复通江的同时,也应注重同一水系的内部连通,以达到复合生态系统保护的最好效果。

致谢:

感谢中国科学院水生生物研究所刘焕章和张堂林研究员给予的指导。感谢中国科学院水生生物研究所李为老师和王海军老师、保安湖管理处委员会李学军主任在鱼类样品采集时给予的帮助。感谢中国科学院水生生物所辛未女士在野外调查和样品分析工作给予的保障。

参考文献:

- [1] Poff N L, Allan J D, Bain M B, *et al.* The natural flow regime [J]. *BioScience*, 1997, **47**(11): 769-784.
- [2] Bunn S E, Arthington A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. *Environmental Management*, 2002, **30**(4): 492-507.
- [3] Lytle D A, Poff N L. Adaptation to natural flow regimes [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, **19**(2): 94-100.
- [4] Olden J D, Konrad C P, Melis T S, *et al.* Are large-scale flow experiments informing the science and management of freshwater ecosystems [J]? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, **12**(3): 176-185.
- [5] Wang H Z, Liu X Q, Wang H J. The Yangtze River-floodplain ecosystem: multiple threats and holistic conservation [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 157-182. [王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(S1): 157-182.]
- [6] Ward J V, Tockner K, Arscott D B, *et al.* Riverine landscape diversity [J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(4): 517-539.
- [7] Amoros C, Bornette G. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains [J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(4): 761-776.
- [8] Pan B Z, Wang H J, Liang X M, *et al.* Macrozoobenthos in Yangtze floodplain lakes: patterns of density, biomass, and production in relation to river connectivity [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, **30**(2): 589-602.
- [9] Zhang X K, Liu X Q, Wang H Z. Developing water level regulation strategies for macrophytes restoration of a large river-disconnected lake, China [J]. *Ecological Engineering*, 2014(68): 25-31.
- [10] Wang L M, Hu H J, Wang D. Ecological impacts of disconnection from the Yangtze on fish resources in Zhangdu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(3): 287-292. [王利民, 胡慧建, 王丁. 江湖阻隔对洪渡湖区鱼类资源的生态影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(3): 287-292.]
- [11] Qu X, Guo C B, Xiong F Y, *et al.* Characterization of the fish community and environmental driving factors during development of cascading dams in the lower Jinsha River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(6): 46-56. [屈霄, 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 [J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(6): 46-56.]
- [12] Wang H Z, Wang H J. Ecological Effects of River-lake Disconnection and Restoration Strategies in the Mid-lower Yangtze Basin [A]//Wang Z Y, Shao D G, Shao X J, *et al.* (Eds.), Comprehensive ecological management of water and sediment in the Yangtze River Basin. Beijing: Science Press, 2009: 379-396. [王洪铸, 王海军. 长江中下游江湖阻隔的生态学效应及修复方略 [A]//王兆印, 邵东国, 邵学军, 等. 长江流域水沙生态综合管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 379-396.]
- [13] Liu X Q, Wang H Z. Estimation of minimum area requirement of river-connected lakes for fish diversity conservation in the Yangtze River floodplain [J]. *Diversity and Distributions*, 2010, **16**(6): 932-940.
- [14] Liu X Q, Wang H Z. Food web of benthic macroinvertebrates in a large Yangtze River-connected lake: the role of flood disturbance [J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2008, **171**(4): 297-309.
- [15] Olson D M, Dinerstein E. The global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions [J]. *Conservation Biology*, 1998, **12**(3): 502-515.
- [16] Chen Y S, Zhang S H, Huang D, *et al.* The development of China's Yangtze River Economic Belt: how to make it in a green way [J]? *Science Bulletin*, 2017, **62**(9): 648-651.
- [17] Chen Y S, Qu X, Xiong F Y, *et al.* Challenges to saving China's freshwater biodiversity: fishery exploitation and landscape pressures [J]. *Ambio*, 2020, **49**(4): 926-938.
- [18] Chen Y S. Restoring aquatic ecosystem health of Yangtze River Basin under multiple human disturbances [J]. *Yangtze River*, 2019, **50**(2): 19-23. [陈宇顺. 多重人类干

- 扰下长江流域的水生态系统健康修复 [J]. *人民长江*, 2019, **50**(2): 19-23.]
- [19] Appelberg M, Berger H M, Hesthagen T, *et al.* Development and intercalibration of methods in Nordic freshwater fish monitoring [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **85**(2): 401-406.
- [20] Wang Z H, Gong F X, Wu Z L, *et al.* Efficiency of multi-mesh gillnets and multi-mesh trammel nets in collecting fish from rocky reef and sandy beach habitats [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(2): 507-514. [汪振华, 龚甫贤, 吴祖立, 等. 多网目单层和三重组合刺网在岩礁和沙地生境中的鱼类采集效果比较 [J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(2): 507-514.]
- [21] Guo C, Wang R, Qu X, *et al.* Assessing fish assemblages in a shallow Yangtze River lake using multi-mesh gillnets and weirs [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(6): 44-51.
- [22] Shannon, C E. A mathematical theory of communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, **27**(3): 379-423.
- [23] Margalef R. Perspectives in Ecological Theory [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [24] Simpson E H. Measurement of diversity [J]. *Nature*, 1949, **163**(4148): 688.
- [25] Villéger S, Brosse S, Mouchet M, *et al.* Functional ecology of fish: current approaches and future challenges [J]. *Aquatic Sciences*, 2017, **79**(4): 783-801.
- [26] Winemiller K O, Fitzgerald D B, Bower L M, *et al.* Functional traits, convergent evolution, and periodic tables of niches [J]. *Ecology Letters*, 2015, **18**(8): 737-751.
- [27] Froese R. FishBase. world wide web electronic publication, 2009.
- [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] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, *et al.* Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity [J]. *Oikos*, 2005, **111**(1): 112-118.
- [30] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits [J]. *Ecology*, 2010, **91**(1): 299-305.
- [31] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food Habits of Albacore, Bluefin Tuna and Bonito in California Waters [C]. California Department of Fish and Game Fish Bulletin, 1971.
- [32] Hu C L, Huang X F. Collection of Research Papers on Fishery Ecology and Fishery Development Technology of Bao'an Lake [M]. Beijing: Science Press, 1991. [胡传林, 黄祥飞. 保安湖渔业生态和渔业开发技术研究文集 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [33] Liang Y L, Liu H Q. Resources, Environment and Fishery Ecological Management of Macrophytic Lakes [M]. Beijing: Science Press, 1995. [梁彦龄, 刘伙泉. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一) [M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [34] Zhang T L. Life-history strategies, trophic patterns and community structure in the fishes of Lake Biandantang [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005: 1-5. [张堂林. 扁担塘鱼类生活史策略、营养特征及群落结构研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005: 1-5.]
- [35] Xie S, Cui Y, Zhang T, *et al.* The spatial pattern of the small fish community in the Biandantang Lake—A small shallow lake along the middle reach of the Yangtze River, China [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2000, **57**(2): 179-190.
- [36] Li W. Ecological studies on the stocking fishery of mandarin fish *Siniperca chuatsi* (Basilewsky) in shallow lakes along the middle reach of the Yangtze River [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2011, 32-35. [李为. 长江中游浅水湖泊鳊放养渔业的生态学研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2011, 32-35.]
- [37] Li W, Zhang T, Li Z. Spatial distribution and abundance of small fishes in Xiaosihai Lake, a shallow lake along the Changjiang (Yangtze) River, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, **28**(3): 470-477.
- [38] Li W, Hicks B J, Lin M, *et al.* Impacts of hatchery-reared mandarin fish *Siniperca chuatsi* stocking on wild fish community and water quality in a shallow Yangtze Lake [J]. *Scientific Reports*, 2018(8): 11481.
- [39] Li W, Zhu T B, Guo C B, *et al.* Analysis of water environmental characteristics at different fisheries stages in Lake Xiaosihai [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(8): 1090-1096. [李为, 朱挺兵, 郭传波, 等. 肖四海不同渔业发展阶段的水环境特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(8): 1090-1096.]
- [40] Zhang C L. Changes of fish resources after isolation of rivers and lakes in middle reaches of the Yangtze River [D]. Beijing: Peking University, 2004. [张春兰. 长江中游江湖阻隔后鱼类资源的变动 [D]. 北京: 北京大学, 2004.]
- [41] 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**(1): 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]. *水生态学杂志*, 2008, **29**(1): 47-51.]
- [42] Zheng P, Jiang X M, Cao L, *et al.* Long-term changes in the functional trait composition and diversity of fish assemblages in eastern plain lakes under the regime of river-lake connectivity loss [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(1): 151-168. [郑鹏, 蒋小明, 曹亮, 等. 江湖阻隔背景下东部平原湖泊鱼类功能特征及多样性变化 [J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(1): 151-168.]
- [43] Vandermeer J H. Niche theory [J]. *Annual Review of Eco-*

- logy *Evolution and Systematics*, 1972(3): 107-132.
- [44] Zuppinger-Dingley D, Schmid B, Petermann J S, *et al.* Selection for niche differentiation in plant communities increases biodiversity effects [J]. *Nature*, 2014, **515**(7525): 108-111.
- [45] Liu X, Wang H. Effects of loss of lateral hydrological connectivity on fish functional diversity [J]. *Conservation Biology*, 2018, **32**(6): 1336-1345.
- [46] Jiang X, Zheng P, Cao L, *et al.* Effects of long-term floodplain disconnection on multiple facets of lake fish biodiversity: decline of alpha diversity leads to a regional differentiation through time [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(763): 144177.
- [47] Sullivan S M P, Watzin M C. Stream-floodplain connectivity and fish assemblage diversity in the Champlain Valley, Vermont, USA [J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, **74**(7): 1394-1418.
- [48] Bolland J D, Nunn A D, Lucas M C, *et al.* The importance of variable lateral connectivity between artificial floodplain waterbodies and river channels [J]. *River Research and Applications*, 2012, **28**(8): 1189-1199.
- [49] Hawkins C P, Mykrä H, Oksanen J, *et al.* Environmental disturbance can increase beta diversity of stream macroinvertebrate assemblages [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, **24**(4): 483-494.
- [50] Penha J, Landeiro V L, Ortega J C, *et al.* Interchange between flooding and drying, and spatial connectivity control the fish metacommunity structure in lakes of the Pantanal wetland [J]. *Hydrobiologia*, 2017, **797**(1): 115-126.
- [51] Chen J Y, Wang K, Guo Y L, *et al.* Food web structure of the Bao'an Lake by analysis of stable carbon and nitrogen isotopes analysis [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(5): 699-706. [陈俊伊, 王康, 郭钰伦, 等. 基于稳定同位素技术的保安湖食物网结构特征研究 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(5): 699-706.]

CONNECTIVITY LOSS IN LAKE ON FISH COMMUNITIES ——A CASE STUDY OF BAO'AN LAKE

QU Xiao¹, GAO Wen-Qi^{1,2}, LU Ying¹, LIU Han^{1,2}, XIONG Fang-Yuan^{1,2} and CHEN Yu-Shun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hydrological connection plays an important role in maintaining biodiversity and ecosystem function. In order to explain the effect of internal hydrological disconnection and response of fish communities, we selected a typical hydrological disconnection lake in middle reaches of Yangtze River-Bao'an Lake as the study object. Field sampling was conducted in Xiaosihai Lake (part of Bao'an Lake, complete disconnection), Biandantang Lake (part of Bao'an Lake, semi-disconnection), Qiaodun Lake (part of Bao'an Lake, semi-disconnection) and the main lake in both summer and autumn from 2019 to 2020. We compared and analyzed the differences of fish communities and functional diversity among those lakes using the multiple statistical methods. Result showed that the fish community structure in the complete disconnection lake had been changed significantly, which species number (15 ± 3) was significantly lower than that in the semi-disconnection lake (22 ± 3) and the main lake (23 ± 3 ; $P < 0.05$); abundance increased while the biomass decreased; the species richness index, the Shannon index and the Simpson index were significantly lower; and functional richness index, functional dispersion index and functional evenness index were also significantly lower the other lakes ($P < 0.05$). However, the fish community structure in the semi-disconnection lake had no significant difference with that in the main lake. The Permutational multivariate analysis of variance and non-metric multidimensional scaling analysis also showed that the fish community in the complete disconnection lake significantly distinguished from the semi-disconnection lakes and the main lake ($P < 0.05$), while there was no significant difference between the fish communities of semi-disconnection lakes and main lake was closer. Our study found that the internal hydrological disconnection in lake also has an important impact on the composition of fish communities, and restoring the free hydrological connectivity within lake was crucial to ecological management and biodiversity conservation.

Key words: Hydrological disconnection; Fish community; Diversity; Ecological impact; Bao'an Lake