



禁捕前鄱阳湖鱼类群落多样性及环境影响因子研究

邓艳敏¹, 王银平², 胡敏琦², 程鑫³, 黄中家⁴, 刘凯^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;

3. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

4. 中国农业科学院研究生院, 北京 100086)

摘要: 为掌握鄱阳湖鱼类群落特征, 课题组于 2020 年春季 (5 月)、夏季 (8 月)、秋季 (11 月) 和 2021 年冬季 (1 月) 4 个季度, 在鄱阳湖 10 个区域 5 种生境开展鱼类资源调查研究, 同步采集水环境样品。研究共采集鉴定鱼类 67 种, 隶属于 8 目 14 科 47 属, 其中鲤科鱼类物种数最多 (41 种), 占比为 61.19%。基于不同分组, 鱼类生态类型分别以定居性鱼类 (67.16%)、杂食性鱼类 (44.78%)、中下层鱼类 (35.82%) 占据优势。该群落以小型鱼类为优势类群, 数量占比为 68.70%; 鱼类优势种共有 6 种, 第一优势种为似鳊。鱼类群落结构在季节上存在显著性差异, 春季鱼类物种多样性指数高于冬季。非度量多维尺度分析 (NMDS) 显示, 空间上鱼类可划分为 2 个类群, 分别为湖口区类群和草型湖区-湖汊区-湖心区-沿岸带类群。冗余分析 (RDA) 显示, 总磷、叶绿素 a 和透明度是影响鱼类物种时空分布的关键环境因子。丰度/生物量比较曲线 (ABC 曲线) 分析表明, 鱼类群落受到严重干扰 ($W=-0.091$)。本研究成果可为鄱阳湖禁渔效果评估和鱼类多样性保护提供科学依据。

关键词: 长江禁捕; 鱼类群落; 环境影响因子; 冗余分析; 鄱阳湖

中图分类号: S 931

文献标志码: A

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊, 也是长江中下游最大的通江湖泊, 通江口位于长江中下游分界处, 距长江口约 800 km^[1-2]。鄱阳湖以松门山为界分为南北两部分, 北面与长江连通, 为狭长的通江水道, 流速较大, 湖底高程较低, 沿岸多为岩壁, 底质多为沙质; 南面为宽广的主湖区, 湖盆自西向东、自北向南逐渐升高, 沿岸地势低平, 底质多为河流冲积物^[3]。鄱阳湖受长江和抚河、修河、赣江、信江、饶河等长江主要支流的双重影响, 丰、枯季节的水域面积相差极大, 形成水位制约水量吞吐平衡的过水性、吞吐型、季节性湖泊^[4], 是长江中下游典型的江湖复合生态系统

(river-lake complex ecosystem)^[5]。鄱阳湖具有明显的季节变化与洪泛平原变化节律, 孕育了丰富的水生生物资源, 是许多重要鱼类的产卵场、索饵场和育肥场, 也是全球水安全和生物多样性保护的关键区域之一^[6]。近年来, 受水域污染、航运发展、过度捕捞、涉水工程和挖砂采石等人类活动影响, 包含鄱阳湖在内的长江流域鱼类群落多样性锐减、群落结构变化显著^[7-8]。为遏制资源衰退趋势, 有效保护长江水生生物资源, 2019 年 12 月 27 日农业农村部印发《农业农村部关于长江流域重点水域禁捕范围和时间的通告》, 自 2021 年 1 月 1 日起, 实行全面禁止生产性捕捞。

收稿日期: 2022-08-24 修回日期: 2023-01-13

资助项目: 农业农村部财政专项“长江下游渔业资源与环境调查 (CJDC-2017-22)”; 国家重点研发计划 (2019YFD0901205); 农业农村部财政专项“长江禁捕后常态化监测专项 (2022)”

第一作者: 邓艳敏 (照片), 从事渔业生态学研究, E-mail: dengym530@163.com

通信作者: 刘凯, 从事鱼类生态学及物种保护研究, E-mail: Liuk@ffrc.cn



鱼类作为水生生物多样性的重要组成部分, 是水域生态系统功能最敏感和最可靠的指标^[9-10]。其生长、发育都与栖息水域环境因子密切相关, 对环境的变化有着重要的指示作用^[11]。水环境因子会通过“上行效应”影响鱼类, 进而影响鱼类的空间分布特征, 从而引起鱼类群落产生差异性变化^[12-13]。保持鱼类群落结构的合理性是生物多样性可持续发展的关键, 对于制定有效的保护策略非常重要。在鱼类生态学方面, 鱼类群落结构与环境影响因子之间的响应关系是研究重点, 国内研究多集中于海域和湖库^[14-16], 对鄱阳湖的研究较多在湖口^[17]、通江水道^[18]、附属湖泊及支流^[19]等局部水域, 而针对全湖的周年研究报道少有涉及。

本研究采用非度量多维尺度分析 (NMDS)、丰度/生物量比较曲线 (ABC 曲线) 和冗余分析 (RDA) 方法, 系统分析长江禁捕前鄱阳湖鱼类物种组成、群落多样性现状, 并探究鱼类群落的关键环境影响因子, 旨在系统揭示鄱阳湖全湖鱼类资源现状, 为鄱阳湖禁渔效果评估和鱼类多样性保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据生境类型, 在鄱阳湖设置 10 个调查样区 (图 1), 覆盖湖口区、湖汉区、湖心区、沿岸带、草型湖区 5 种生境类型, 每个样区设置 3 个监测

点。于 2020 年春季 (5 月)、夏季 (8 月)、秋季 (11 月) 和 2021 年冬季 (1 月) 4 个季度开展鱼类资源调查, 调查网具为三层复合刺网 (网长 50 m, 网高 2 m, 网目 2 cm、6 cm、10 cm 和 14 cm) 和定置 (串联) 倒须笼壶 (网长 20 m, 网宽、网高均为 40 cm, 网目 1.6 cm)。每个监测点放置 2 条三层复合刺网和 3 条定置 (串联) 倒须笼壶, 网具于当日下午放置, 次日上午收集。利用数显游标卡尺和电子天平测定每尾鱼类的生物学数据。全长、体长精确到 0.01 mm, 重量精确到 0.01 g。实验过程中操作人员严格遵守道德伦理规范, 并按照中国水产科学研究院淡水渔业研究中心实验动物伦理委员会制定的规章制度执行。

1.2 环境影响因子

水环境因子测定与鱼类采样同步进行。

物理水环境: 水温 (Tem)、水深 (Dep)、酸碱度 (pH)、溶解氧 (DO)、浊度 (Tur) 和透明度 (SD) 等指标通过便携式水质监测仪现场测定。水化学指标: 总氮 (TN)、总磷 (TP)、溶解态总氮 (TDN)、亚硝态氮 (NO_2^- -N)、溶解态总磷 (TDP)、磷酸盐 (PO_4^{3-} -P)、氨氮 (NH_4^+ -N)、叶绿素 a (Chl.a)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 等采集的水样带回实验室测定。

1.3 数据分析

生态类型 按照洄游类型划分为定居性、江湖洄游性和江海洄游性 3 类^[20]; 依据食性划分

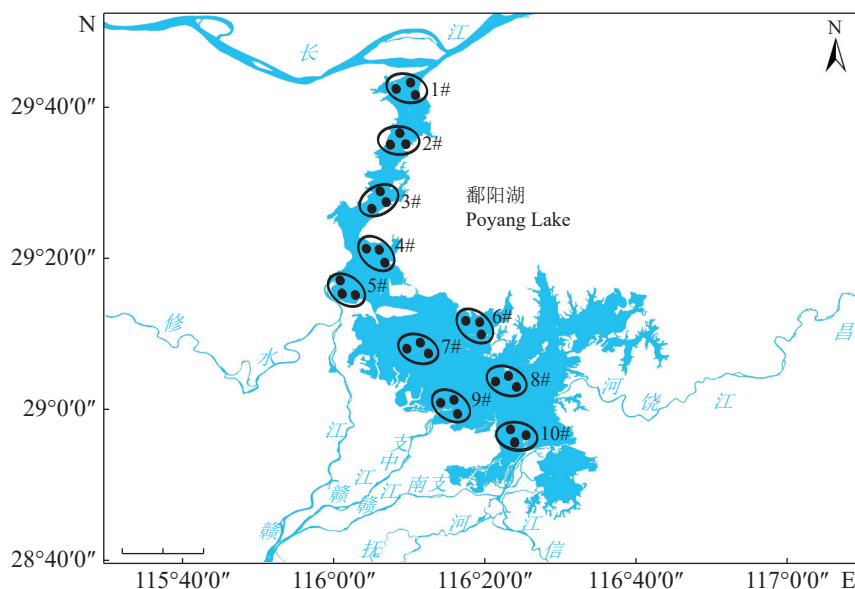


图 1 渔业资源调查点位示意图

Fig. 1 The sketch map points of survey of fishery resources

为肉食性、杂食性、植食性、碎屑食性和浮游生物食性 5 类^[20]; 根据栖息水层划分为中上层、中下层和底层 3 类^[21]。

世界自然保护联盟 (IUCN) 依据相关标准 IUCN 等级划分为灭绝 (extinct, EX)、野外灭绝 (extinct in the wild, EW)、区域灭绝 (regionally extinct, RE)、极危 (critically endangered, CR)、濒危 (endangered, EN)、易危 (vulnerable, VU)、近危 (near threatened, NT)、无危 (least concern, LC)、数据缺乏 (data deficient, DD)^[22]。

优势种 鱼类优势种利用 Pinkas 等^[23] 相对重要性指数 (index of relative importance, IRI) 来判断。计算公式:

$$IRI = (N + W) \times F \quad (1)$$

式中, IRI 为相对重要性指数, N 为某物种的数量占总鱼类数量的百分比 (%); W 为某物种的重量占总重量的百分比 (%); F 为某物种在调查中被捕获的点位与总调查点位百分比 (%). 将 $IRI \geq 1000$ 为优势种, $100 \leq IRI < 1000$ 为重要种, $10 \leq IRI < 100$ 为常见种, $1 \leq IRI < 10$ 为一般种, $IRI < 1$ 为少见种^[24]。根据已有文献^[25], 将初次性成熟小于 2 龄, 最大体长小于 24.00 cm 的鱼类划为小型鱼类。

物种多样性 采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')^[22]、Margalef 丰富度指数 (D)^[26]、Pielou 均匀度指数 (J')^[27] 和 Simpson 优势度指数 (C)^[25] 进行鱼类物种多样性分析。计算公式:

$$H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N) \quad (2)$$

$$D = (S-1)/\ln N \quad (3)$$

$$J' = H'/\ln S \quad (4)$$

$$C = \sum (n_i/N)^2 \quad (5)$$

式中, S 为鱼类群落中总物种数 (种); N 为鱼类群落中总数量 (尾); n_i 为第 i 种鱼类的数量 (尾)。

ABC 曲线 群落结构稳定性利用 ABC 曲线进行分析^[28]。通过观察在同一坐标系中丰度优势度曲线和生物量优势度曲线两条线的分布情况来分析群落不同干扰情况下的特征^[29]。ABC 曲线中丰度与生物量相对关系用 W 统计量表示, 计算公式:

$$W = \sum_{j=1}^S \left[\left(\sum_{j=1}^i B_j \right) - \left(\sum_{j=1}^i A_j \right) \right] / 50(S-1) \quad (6)$$

式中, S 为出现的物种数 (种), B_j 为物种的累计生物量, A_j 为物种的累计丰度。

在未受干扰的群落中, W 为正值, 生物量优势度曲线在数量优势度曲线之上; 当群落受到中度干扰时, W 值接近于 0, 两条曲线出现相交; 如果数量优势度曲线在生物量优势度曲线之上, W 为负值, 表明群落处于严重干扰状态。

鱼类群落结构 鱼类群落结构的时空变化采用 NMDS 方法, NMDS 二维点图的优劣用胁迫系数 (stress) 衡量, stress < 0.1 时, 表明排序较好; 0.1 < stress < 0.2 时, 表明排序有一定解释意义; stress > 0.2 时, 表明排序无解释意义。鱼类群落结构与环境因子梯度分析依据各排序轴 (gradient length) 的大小选择模型, gradient length < 2 standard units, 则为冗余分析 (redundancy analysis, RDA); gradient length > 4 standard units, 为典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA); 2 standard units < gradient length < 4 standard units, 选择冗余分析和典范对应分析均可经过蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 检验后, 确定与群落结构相关的环境影响因子。

利用 Excel 2010、IBM SPSS Statistics 26 软件进行数据统计分析。采用单因素方差法 (One-Way Analysis of Variance, ANOVA) 对鱼类数量、重量、物种数、季节及调查样区间的差异进行检验分析, 若差异显著 ($P < 0.05$), 再次进行 Tukey 多重比较。采用 Excel 2010、Primer 5.0、Canoco 5.0 软件作图。

2 结果

2.1 物种组成

2020—2021 年 4 个季度, 鄱阳湖全湖共采集鱼类 67 种, 隶属于 8 目 14 科 47 属 (表 1)。包括样本 18 400 尾, 重 406.51 kg, 其中, 鲤形目 47 种, 鲈形目 7 种, 鲇形目 7 种, 鲱形目 2 种, 鳊形目、鳊形目、颌针鱼目、胡瓜鱼目各 1 种, 鲤科鱼类物种数最多为 41 种, 占比 61.19%; 其次为鲮科, 共 7 种, 占比 10.45%。

本调查采集似鳊数量最多, 共 2 430 尾, 占总调查数量的 13.21%; 贝氏鲮次之, 2 317 尾, 占 12.59%。鲂重量最大, 33.15 kg, 占总重量的 8.16%; 鲫次之, 共 30.49 kg, 占 7.50%。调查到包含 IUCN 等级为濒危的鳊, 易危的长身鳊和

表 1 鄱阳湖鱼类物种组成

Tab. 1 Fish species composition of Poyang Lake

目 order	科 family	种 species	生态类型 ecological type	IUCN等级 IUCN status	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
鲤形目 Cypriniformes	鲤科 Cyprinidae	彩鲮 <i>Acheilognathus imberbis</i> *	R,C,L	—		+		
		无须鲮 <i>Acheilognathus gracilis</i> *	R,O,L	LC		++	+	
		兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i> *	R,O,L	LC	++++	+++++	++++	++++
		斑条鲮 <i>Acheilognathus taianalis</i> *	R,O,U	LC	++++	++++	+++++	++++
		花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i> *	R,C,L	LC	++	+++	++++	+++
		华鯪 <i>Sarcocheilichthys sinensis</i> *	R,O,L	LC	+++	+++	++++	++
		黑鳍鯪 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i> *	R,O,U	LC	+++	+++	+	++
		鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i> *	RL,O,U	LC	+++	+++	++	++
		贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i> *	RL,O,U	LC	+++++	++++	+++++	+++++
		黑尾鲮 <i>Hemiculter nigromarginis</i> *	R,O,U	—	+			
		银鲮 <i>Xenocypris argentea</i>	R,H,L	—	++	++++	++++	++++
		黄尾鲮 <i>Xenocypris davidi</i>	R,O,D	LC		+++		
		细鳞鲮 <i>Xenocypris microlepis</i>	R,O,L	LC			+	+
		圆吻鲮 <i>Distoechodon tumirostris</i>	RL,O,L	LC	++			
		蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	R,C,U	—	+++	++++	+++	+++
		翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i>	R,C,U	LC	++++	+++	++++	+++
		达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	R,C,L	—	++++	+++++	++++	+++
		尖头鲃 <i>Culter oxycephalus</i>	R,C,L	LC		+++	+++	++
		红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	R,C,U	—		+++++	++++	++
		鲮 <i>Parabramis pekinensis</i>	R,H,L	LC	+++	++++	+++	++++
		鲃 <i>Megalobrama skolkovii</i>	R,O,L	LC	++	+++++	+++++	++++
		鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	RL,C,U	LC				++
		鳊 <i>Ochetobius elongatus</i>	R,O,L	LC			+	
		鲫 <i>Carassius auratus</i>	R,O,D	LC	+++++	+++++	+++++	++++
		鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	R,C,D	LC	+++++	++++	++++	++++
		鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	RL,P,U	LC	++++	++++	++++	+++
		鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	RL,P,U	LC	+++	+++	+++	++++
		青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	RL,C,L	LC		+++	+++	++
		草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	RL,H,L	LC	+	++++	++++	++++

· 续表 1 ·

目 order	科 family	种 species	生态类型 ecological type	IUCN等级 IUCN status	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
		吻鮡 <i>Rhinogobio typus</i> *	RL,C,D	LC		+		
		银鮡 <i>Squalidus argentatus</i> *	RL,O,L	LC	+++	++++	++++	+++
		蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i> *	RL,O,L	LC	+++++	++++	++++	+++++
		长蛇鮡 <i>Saurogobio dumerili</i> *	R,C,U	LC		++		
		似刺鳊鮡 <i>Paracanthobrama guichenoti</i>	R,O,L	LC	+++	++	+++	
		飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i> *	R,O,U	LC	++	++	+++	++
		寡鳞飘鱼 <i>Pseudolaubuca engraulis</i> *	R,O,U	LC		+	+++	+++
		似鲚 <i>Toxabramis swinhonis</i> *	R,P,U	LC		+++	++	+
		似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i> *	R,P,L	LC	+++++	++++	+++++	+++++
		棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i> *	R,O,D	LC	+++	+	+++	+++
		赤眼鳟 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	RL,O,L	LC		+++	++++	++
		麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> *	R,O,U	LC	++++	++++	+++	+++
	鳅科 Cobitidae	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> *	R,O,D	LC	+++	++	+	
		中华花鳅 <i>Cobitis sinensis</i> *	R,O,D	LC	++++		+	++
		中华沙鳅* <i>Sinibotia supercilialis</i> *	R,O,L	VU			+	
		花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i> *	R,C,D	LC		+	+	
		武昌副沙鳅 <i>Parabotia banarescui</i> *	RL,O,L	LC	+	++		
	脂鲤科 Characin	短盖巨脂鲤 <i>Piaractus brachypomum</i>	R,C,U	—		+++		
鲈形目 Perciformes	鮨科 Serranidae	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	R,C,D	LC	+++	++++	++++	+++
		斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	R,C,D	LC			++	
		大眼鳊 <i>Siniperca kneri</i>	R,C,D	LC		++++	++++	
		长身鳊 <i>Coreosiniperca roulei</i> *	R,H,L	VU		+	+	
	月鳢科 Channidae	乌鳢 <i>Channa argus</i> *	R,C,D	LC	+	++++	++	
	刺鳅科 Mastacembelidae	中华刺鳅 <i>Mastacembelus sinensis</i> *	R,H,L	DD	+++		+	
	虾虎鱼科 Gobiidae	子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i> *	R,C,D	LC	+++	++		
鲇形目 Siluriformes	鲿科 Bagridae	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> *	R,O,D	LC	++++	++++	++++	++++
		光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i> *	R,O,D	LC	++++	++++	++++	+++
		长须黄颡鱼 <i>Pelteobagrus eupogon</i> *	R,O,D	—	++++	++	++++	++
		瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i> *	R,O,D	LC	++	++	++	+
		圆尾拟鲿 <i>Pseudobagrus tenuis</i> *	R,O,D	DD	++	+	++	

· 续表 1 ·

目 order	科 family	种 species	生态类型 ecological type	IUCN等级 IUCN status	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
		粗唇鲢 <i>Leiocassis crassilabris</i>	R,C,D	—	+++	++	+	
	鲚科 Siluridae	鲚 <i>Silurus asotus</i>	R,C,D	LC	++++	++++	+++	+++
鲱形目 Clupeiformes	鳊科 Engraulidae	刀鲚 <i>Coilia nasus</i> *	RS,C,U	LC	++++	++++		
		短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i> *	RL,C,U	—	++++	+++++	+++++	+++++
鲮形目 Mugiliformes	鲮科 Mugilidae	鲮 <i>Mugil cephalus</i>	RS,O,U	—	++++			
鳗鲡目 Anguilliformes	鳗鲡科 Anguillidae	鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	R,C,U	EN	++			
颌针鱼目 Beloniformes	鱻科 Hemirhamphidae	间下鱻 <i>Hyporhamphus intermedius</i> *	RS,C,D	LC			+++	
胡瓜鱼目 Osmeriformes	银鱼科 Salangidae	陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i> *	RS,C,D	DD				+

注: *. 小型鱼类, R. 定居性, RL. 江湖洄游性, RS. 江海洄游性, C. 肉食性, O. 杂食性, H. 植食性, De. 碎屑食性, P. 浮游生物食性, U. 中上层, L. 中下层, D. 底层, CR. 极危, EN. 濒危, VU. 易危, LC. 无危, DD. 数据缺乏, 图2同; “+++++”、“++++”、“+++”、“++”和“+”分别代表优势种、重要种、常见种、一般种和少见种

Notes: *. small fish, R. resident, RL. river-lake migratory, RS. river-sea migratory, C. carnivore, O. omnivore, H. herbivore, De. detritivore, P. planktivore, U. upper, L. lower, D. demersal, CR. critically endangered, EN. endangered, VU. vulnerable, LC. least concern, DD. data deficient, the same as in fig. 2; dominant, important, common, general and rare species are indicated by “+++++”, “++++”, “+++”, “++” and “+”, respectively

中华沙鳅^[22]。此外, 调查中发现了外来物种短盖巨脂鲤。

物种数季节差异明显, 夏季(56种)极显著($P<0.01$)高于春季(39种)。数量和重量季节间差异明显, 秋季(186.35 kg, 7 246尾)显著高于春季(30.92 kg, 2 251尾)($P<0.05$)。空间上, 各个湖区的物种数差异不显著($P>0.05$), 湖口区 and 湖心区鱼类物种数均为 51 种, 草型湖区 50 种, 湖汉区 47 种, 沿岸带 46 种。鱼类数量和重量最多的是草型湖区, 最少的是沿岸带。

从洄游类型来看, 鄱阳湖以定居性鱼类为主, 物种数为 45 种, 占比为 67.16%, 数量占比为 58.08%, 重量占比为 59.18%; 从鱼类食性来看, 杂食性鱼类 30 种占优势, 占比为 44.78%, 数量百分比为 46.32%, 重量百分比为 32.49%, 肉食性鱼类次之 24 种; 从栖息水层来看, 中下层鱼类物种数最多, 为 24 种, 占比为 35.82%, 数量占比和重量占比分别为 39.50%、40.94%。中上层鱼类 21 种, 数量占比和重量占比为 27.21%、26.70%。底层鱼类 18 种, 数量占比和重量占比分别为 21.14%、26.57% (图 2)。综上所述, 鱼类生态类型组成主要以定居性、杂食性、中下层鱼类为主。

2.2 优势种及多样性指数

全年鄱阳湖优势种共有 6 种, 为似鳊、短颌鲚、鲫、贝氏鲮、蛇鮈和斑条鲮, 数量占比和重量占比分别为 62.68%、32.65%。其中, 似鳊为第

一优势种, 数量占 13.21%, 重量占 6.03%; 重要种有 14 种, 为鲢、黄颡鱼和达氏鲮等, 数量占 27.36%, 重量占 53.82% (表 2)。

春季优势种为似鳊、鲤、贝氏鲮、鲫和蛇鮈; 夏季优势种为短颌鲚、鲢、红鳍原鲮、兴凯鲮、鲫和达氏鲮; 秋季优势种为鲫、贝氏鲮、似鳊、短颌鲚、斑条鲮和鲢; 冬季优势种为似鳊、蛇鮈、短颌鲚和贝氏鲮。部分物种如鳗鲡、圆吻鲟、黑尾鲮和鲮仅出现在春季调查中。似刺鳊、圆尾拟鲮、粗唇鲢、乌鳢和泥鳅在冬季未采集到。

鄱阳湖鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 为 2.51 ± 0.25 , Margalef 丰富度指数 (D) 为 4.44 ± 0.84 , Pielou 均匀度指数 (J') 为 0.74 ± 0.06 , Simpson 优势度指数 (C) 为 0.12 ± 0.03 。季节间 H' 、 D 、 J' 、 C 均存在显著差异 ($P<0.05$)。春、夏、秋季多样性指数 (H') 差异较小, 但夏季均显著高于冬季 ($P<0.05$); 春、夏、秋、冬季节间丰富度指数 (D) 均存在显著性差异 ($P<0.05$), 夏季最高, 冬季最低; 春季均匀度指数 (J') 显著高于冬季 ($P<0.05$); 春季优势度指数 (C) 显著高于冬季 ($P<0.05$)。不同湖区鱼类多样性差异不明显 (表 3)。

2.3 ABC 曲线特征及 NMDS 分析

ABC 曲线分析显示, W 统计量值为 -0.091 , 小于 0, 表明鱼类群落处于严重干扰状态。同时, 丰度优势度曲线的起点高于生物量优势度曲线的起点, 丰度优势度曲线在生物量优势度曲线上方,

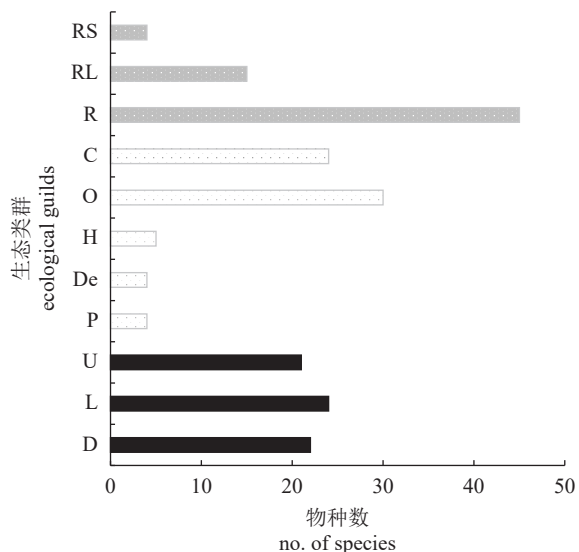


图 2 鄱阳湖鱼类生态类型

Fig. 2 Fish ecological guilds in Poyang Lake

表明该水域主要以生长快、性成熟早、个体小的鱼类为主 (图 3)。

NMDS 分析显示, 空间上鄱阳湖鱼类可划分为 2 个类群, 湖口区为类群 I, 草型湖区、湖汉

区、湖心区、沿岸带为类群 II (图 4), 类群 II 物种数、数量和重量极显著高于类群 I ($P < 0.01$), 表明类群 II 的物种更为丰富。类群 I 所在区域为通江水道, 主要以定居性、杂食性、底层鱼类为主; 类群 II 所在区域为主湖区, 主要以定居性、杂食性、中上层鱼类为主, 但主湖区植食性鱼类和浮游生物食性鱼类明显增加。鲤、鲫等定居性鱼类主要分布在草型湖区; 以四大家鱼为代表的江湖洄游性鱼类主要分布在湖汉区; 刀鲚、鳊等江海洄游性鱼类主要分布在湖心区。

2.4 群落与环境影响因子间的 RDA 分析

RDA 分析结果显示, 第一轴和第二轴特征值分别为 0.130 6 和 0.065 7, 解释了鄱阳湖鱼类群落总变异的 19.60%。第一轴和第二轴鱼类物种与环境影响因子的相关性分别为 0.504 7 和 0.624 9, 表明物种与环境影响因子具有较强的相关性。TP、SD 和 Chl.a 为影响鱼类群落结构变化的关键影响因子 ($P < 0.05$)。第一轴与 TP、DO 相关性高, 第二轴与 Chl.a 相关性高 (图 5)。TP 与银鲴、似鳊等物种的生存活动正相关; Chl.a 与鲫、斑条鲮等物

表 2 鄱阳湖鱼类优势种和重要种组成

Tab. 2 The composition of dominant and important species of fish in Poyang Lake

类别 items	物种 species	数量百分比/% N	重量百分比/% W	出现频率/% F	相对重要性指数 IRI
优势种 dominant species	似鳊 <i>P. simoni</i>	13.21	6.03	92.50	1 778.93
	短颌鲚 <i>C. brachygnathus</i>	12.14	5.79	90.00	1 613.44
	鲫 <i>C. auratus</i>	8.03	7.50	95.00	1 475.11
	贝氏鲟 <i>H. bleekeri</i>	12.59	5.20	82.50	1 467.53
	蛇鲟 <i>S. dabryi</i>	8.58	5.25	87.50	1 209.38
	斑条鲮 <i>A. taenianalis</i>	8.14	2.90	95.00	1 047.98
重要种 important species	鲂 <i>M. skolkovii</i>	2.88	8.16	75.00	827.71
	黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i>	3.77	3.93	90.00	693.45
	达氏鲃 <i>C. dabryi</i>	2.21	4.56	65.00	440.26
	兴凯鲮 <i>A. taenianalis</i>	5.22	0.77	70.00	419.48
	鲤 <i>C. carpio</i>	1.87	2.66	80.00	361.97
	鳊 <i>S. chuatsi</i>	0.57	6.09	52.50	349.61
	草鱼 <i>C. idella</i>	0.42	6.89	42.50	310.56
	光泽黄颡鱼 <i>P. nitidus</i>	3.82	1.87	47.50	270.10
	银鲴 <i>X. argentea</i>	2.07	2.12	62.50	261.86
	鲢 <i>H. molitrix</i>	0.41	6.02	35.00	225.15
	鳊 <i>P. pekinensis</i>	1.38	2.21	57.50	206.16
	红鳍原鲃 <i>C. erythropterus</i>	2.18	2.16	42.50	184.50
	翘嘴鲃 <i>C. alburnus</i>	0.49	1.53	65.00	131.91
	鳊 <i>A. nobilis</i>	0.08	4.84	22.50	110.72

表 3 鄱阳湖鱼类群落多样性指数 (均值±标准差)

Tab. 3 Fish community diversity index of Poyang Lake (mean±SD)

类别 items		物种数 species	Shannon-Wiener多样性指数 H'	Margalef丰富度指数 D	Pielou均匀度指数 J'	Simpson优势度指数 C
季节 season	春季 spring	45 ^b	2.63±0.07 ^a	4.13±0.37 ^c	0.81±0.03 ^a	0.09±0.01 ^b
	夏季 summer	56 ^a	2.73±0.19 ^a	5.46±0.16 ^a	0.76±0.06 ^{ab}	0.10±0.02 ^{ab}
	秋季 autumn	53 ^a	2.52±0.32 ^a	4.68±0.29 ^b	0.72±0.10 ^{ab}	0.12±0.05 ^{ab}
	冬季 winter	39 ^{bc}	2.15±0.20 ^b	3.48±0.47 ^d	0.68±0.05 ^b	0.17±0.03 ^a
湖区 lake area	草型湖区 the grassy lake	50	2.38±0.04	4.40±0.61	0.68±0.06	0.14±0.01
	湖汊区 lake branch	47	2.60±0.37	5.20±0.72	0.70±0.08	0.12±0.06
	湖口区 estuary	51	2.85±0.07	5.93±0.27	0.75±0.03	0.09±0.01
	湖心区 lake center	51	2.76±0.05	5.70±0.23	0.73±0.03	0.09±0.01
	沿岸带 coastal zone	46	2.98±0.29	4.13±0.37	0.80±0.09	0.07±0.02

注: 数字上标注的不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)
Notes: Different letters marked on the numbers indicate significant differences ($P<0.05$)

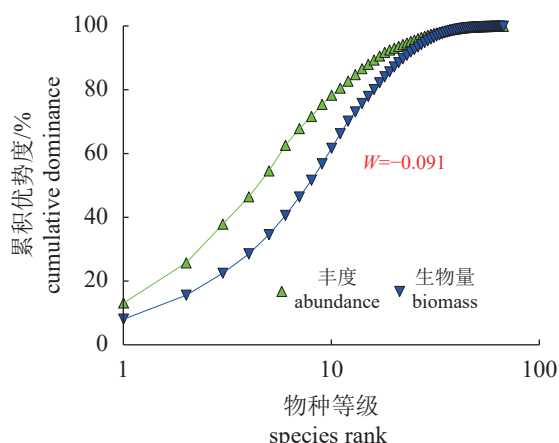


图 3 鱼类群落 ABC 曲线

Fig. 3 ABC curve of fish communities

种的生活动正相关; SD 与黄颡鱼、蛇鮈等物种的生活动负相关 (图 5)。

3 讨论

3.1 鄱阳湖鱼类物种组成

本次调查共采集鉴定鱼类 67 种, 与 1980 年调查的 117 种相比, 鱼类物种数出现明显下降^[30]。随着长江流域社会经济快速发展, 愈发频繁的人类活动使长江流域鱼类多样性受到严重威胁, 航运发展、污水排放和挖砂采石等破坏鱼类栖息地, 导致鱼类的洄游通道丧失, 生境异质性下降, 而过度捕捞则加速了鱼类资源衰退, 导致低龄化和小型化。近年来的研究报道包括杨少荣等^[31]2010 年记录鱼类 72 种、李敬鸿等^[21]2018 年记录鱼类 90 种, 本研究结果与之相比, 物种数同样有所减少。分析其原因, 除了在禁捕前长江流域渔业资

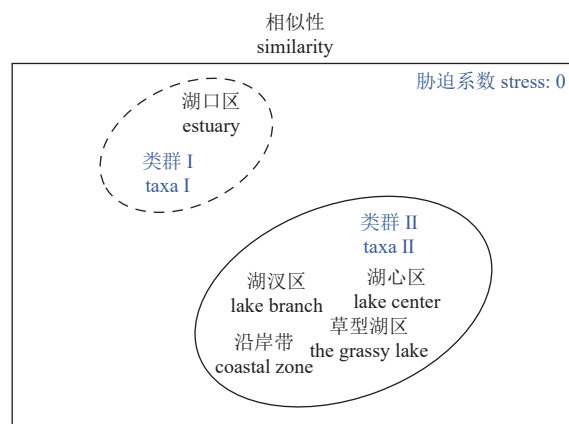


图 4 不同湖区鱼类 NMDS 分析

Fig. 4 NMDS analysis of fish in different lake areas

源普遍衰退这一共性因素, 以及相关研究在采样地点、方法及强度上有所差异外, 近年来极端气候频发, 2019 年江西省三季连旱, 鄱阳湖出现历史极枯水位, 湖泊面积大幅减少, 鱼类的栖息空间骤减, 鱼类产卵场遭到一定程度的破坏^[32], 可能导致鄱阳湖鱼类资源受到较大影响。随着长江大保护及长江禁捕政策深入推进, 长江流域自然生态环境在人为干扰强度逐渐下降的情况下得到改善, 鱼类资源有望逐步恢复。

鄱阳湖鱼类群落与长江下游流域其他湖泊的鱼类物种组成类似^[33-34]。本研究中, 鱼类物种组成以鲤科鱼为主, 生态类型以定居性、杂食性、中下层鱼类占优势。鱼类生态类型变化与河流的流速、营养盐以及水生生物分布密切相关^[35]。鄱阳湖鱼类主要为定居性鱼类, 而定居性鱼类主要以湖泊为栖息地, 其物种数季节间变化不大, 这与杨少荣等^[31]的研究结果类似。鄱阳湖鱼类食

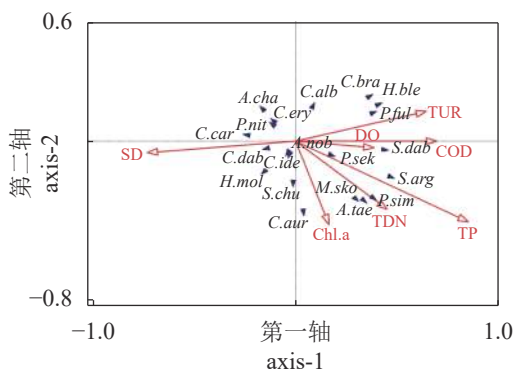


图5 鱼类群落与环境因子 RDA 分析

SD. 透明度, Tur. 浊度, DO. 溶解氧, TP. 总磷, TDN. 溶解态总氮, Chl.a. 叶绿素 a, COD_{Mn}. 高锰酸盐指数; *A. tae*. 斑条鲮, *H. ble*. 贝氏鲮, *P. pek*. 鳊, *C. ide*. 草鱼, *C. dab*. 达氏鲮, *C. bra*. 短颌鲚, *M. sko*. 鲂, *P. nit*. 光泽黄颡鱼, *S. chu*. 鳊, *C. ery*. 红鳍原鲮, *P. ful*. 黄颡鱼, *C. aur*. 鲫, *C. car*. 鲤, *H. mol*. 鲢, *C. alb*. 翘嘴鲮, *S. dab*. 蛇鲰, *P. sim*. 似鳊, *A. cha*. 兴凯鲮, *X. arg*. 银鲌, *A. nob*. 鳊

Fig. 5 RDA analysis of fish communities and environmental effect factors

SD. transparency, Tur. turbidity, DO. dissolved oxygen, TP. total phosphorus, TDN. total dissolved nitrogen, Chl.a. chlorophyll a, COD_{Mn}. permanganate index; *A. cha*. *A. chankaensis*, *H. ble*. *H. bleekeri*, *P. pek*. *P. pekinensis*, *C. ide*. *C. idella*, *C. dab*. *C. dabryi*, *C. bra*. *C. brachygnathus*, *M. sko*. *M. skolkovii*, *P. nit*. *P. nitidus*, *S. chu*. *S. chuatsi*, *C. ery*. *C. erythropterus*, *P. ful*. *P. fulvidraco*, *C. aur*. *C. auratus*, *C. car*. *C. carpio*, *H. mol*. *H. molitrix*, *C. alb*. *C. alburnus*, *S. dab*. *S. dabryi*, *P. sim*. *P. simoni*, *A. cha*. *A. chankaensis*, *X. arg*. *X. argentea*, *A. nob*. *A. nobilis*

性以杂食性为主, 其原因可能与杂食性鱼类饵料来源更广泛有关, 与单一食性的鱼类相比具有更大生存优势, 而处于营养级顶端的肉食性鱼类则容易受到生境变化的影响。调查发现了外来物种短盖巨脂鲤, 其为肉食性鱼类, 生长快且耐低氧, 可能会通过竞争和捕食作用威胁土著鱼类^[36], 进而影响鱼类群落多样性, 应持续关注外来物种的种群动态并评估其风险。

3.2 鄱阳湖鱼类群落多样性

优势种在群落中占据重要的生态位, 是影响鱼类群落特征的因素之一, 其种类变化对群落种类组成、能量流动和物质循环有一定的影响^[37]。本调查结果显示, 全湖优势种为似鳊、短颌鲚、鲫、贝氏鲮、蛇鲰和斑条鲮, 数量上达到了 62.68%, 小型鱼类成为优势类群, 杂食性鱼类资源量增加, 刀鲚等肉食性鱼类对群落结构的贡献明显减少, 这与鄱阳湖以往的研究结果相似^[38]。在长江禁捕全面实施后, 鄱阳湖鱼类优势种组成变化应持续关注。

有研究表明, 鱼类群落结构的时空特征与内源性因素(繁殖、摄食和洄游活动)和外源性因素(水环境因子)的季节性波动有关^[39]。本调查结果显示, 物种的多样性和丰富度受季节因素的影响。春、夏、秋季多样性指数(*H'*)显著高于冬季($P < 0.05$), 夏季丰富度指数(*D*)最高, 冬季最低。水温、水位变化可能是影响鄱阳湖鱼类群落多样性时空格局的主要原因。鱼类是变温动物, 季节性水温的变化引起洄游群体的聚集^[40]。水温增加会促进鱼类新陈代谢, 随着增强鱼类捕食需求, 其活动强度增加, 相同方法及强度捕捞到的鱼类种类及数量即增多; 随着水温降低, 鱼类通常向鄱阳湖深水区迁移, 摄食需求降低, 活动强度明显减弱, 被捕捞的概率也明显降低。水位的洪枯变化被认为是维持泛滥平原湖泊鱼类物种组成和分布的主要驱动力, 鱼类在进化过程中形成了与水位季节性变化相适应的生活史周期和节律^[35]。春季平水期, 在水温适宜时, 受水流的刺激长江干流大量河流性鱼类产卵繁殖, 随着夏季丰水期的到来, 大量仔鱼发育成稚鱼, 并随河流洪泛通过江湖过渡带向湖区迁移, 进入鄱阳湖育肥。随着秋季平水期和枯水期的到来, 大量河流性鱼类、江湖洄游性鱼类在湖中育肥后返回江河越冬, 定居型鱼类多集中在湖泊深水区越冬。因此, 鄱阳湖丰水期鱼类种类及数量均明显多于枯水期。

主湖区江海洄游性鱼类、江湖洄游性鱼类、定居性鱼类物种数及数量均高于通江水道, 表现出两区功能群组成有所不同, 主要体现在底层和中上层鱼类占比差异上。长江是“四大家鱼”等江湖洄游性鱼类繁殖场所, 鄱阳湖则是重要的育肥场所^[20]。通江水道水面窄、流速较大, 不利于浮游生物食性鱼类栖息和中上层鱼类活动, 而主湖区水面宽阔、流速较缓、饵料丰富, 这在一定程度上可以解释不同生境鱼类群落组成的差异^[30]。

3.3 鄱阳湖鱼类群落与环境因子的关系

RDA 排序图能够较好地解释物种与环境间的内在联系, 揭示鱼类对不同生态栖息环境适应性特征。有研究表明, 通江湖泊鱼类群落结构的变化与总氮、总磷、叶绿素 a、透明度、水深等环境影响因子密切相关。RDA 分析结果显示, 总磷、透明度和叶绿素 a 是表征鄱阳湖鱼类群落结构特征的关键影响因子。

随着湖区水文节律的变化, 伴随着水位升高, 营养物质流入湖区, 为鱼类提供丰富饵料基础,

鱼类摄食活动增强^[41]。总磷过高时会导致水体呈富营养化, 营养负荷及悬浮物升高将会限制敏感物种的栖息甚至生存, 随着富营养化程度的加剧, 耐性物种将逐渐取代敏感物种, 从而导致湖区鱼类群落的物种组成及丰度发生改变。同时, 有机物的积累为耐性物种提供食物来源, 有利于似鳊、银鲴等物种生存。对于底质泥沙含量比较高的区域, 水流速度较大导致水体的透明度降低, 影响了光合作用, 导致水体溶氧降低, 同时泥沙可能堵塞鱼类鳃丝, 对其呼吸造成影响^[42]。叶绿素 a 是反映浮游植物含量变化的重要指标, 在春季随着气温升高, 表层水温迅速上升, 水体中浮游植物开始大量繁殖, 反映为表层叶绿素 a 含量升高^[43-44]。而鲫、斑条鲮等小型杂食性鱼类, 多栖息于光照充足、水生指标较多的水域, 因此与水体叶绿素 a 的关联更为显著。

随着长江十年禁捕全面实施, 捕捞压力彻底消除, 让江湖水生生物得以休养生息。未来应持续关注鄱阳湖鱼类资源特征及变动趋势, 摸清鱼类资源及其栖息地生境本底状况, 探究鄱阳湖水生生物响应长江禁捕的生态学效应及资源恢复机理, 为禁渔效果评估和鱼类多样性保护提供科学依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 杨潇, 马吉顺, 张欢, 等. 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[J]. *水生生物学学报*, 2021, 45(5): 1093-1103.
Yang X, Ma J S, Zhang H, *et al.* Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(5): 1093-1103 (in Chinese).
- [2] 姜涛, 周昕期, 刘洪波, 等. 鄱阳湖刀鲚耳石的两种微化学特征[J]. *水产学报*, 2013, 37(2): 239-244.
Jiang T, Zhou X Q, Liu H B, *et al.* Two microchemistry patterns in otoliths of *Coilia nasus* from Poyang Lake, China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(2): 239-244 (in Chinese).
- [3] 陈旻坤, 徐昔保. 近30年来鄱阳湖生态系统服务变化[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(1): 309-318.
Chen M K, Xu X B. Lake Poyang ecosystem services changes in the last 30 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(1): 309-318 (in Chinese).
- [4] 王欢, 陈文波, 何蕾, 等. 鄱阳湖不同水文连通性子湖水生植被覆盖度对年际水位变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 191-200.
Wang H, Chen W B, He L, *et al.* Responses of aquatic vegetation coverage to interannual variations of water level in different hydrologically connected sub-lakes of Poyang Lake, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 191-200 (in Chinese).
- [5] 常剑波, 曹文宣. 通江湖泊的渔业意义及其资源管理对策[J]. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(2): 153-157.
Chang J B, Cao W X. Fishery significance of the river-communicating lakes and strategies for the management of fish resources[J]. *Resources and Environment of the Yangtze Basin*, 1999, 8(2): 153-157 (in Chinese).
- [6] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555-561.
- [7] 金斌松, 聂明, 李琴, 等. 鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(3): 268-275.
Jin B S, Nie M, Li Q, *et al.* Basic characteristics, challenges and key scientific questions of the Poyang Lake basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(3): 268-275 (in Chinese).
- [8] 邓月萍, 邢久生, 熊丽黎, 等. 人类活动对鄱阳湖撮箕湖水环境影响的研究[J]. *江西水利科技*, 2022, 48(1): 40-45.
Deng Y P, Xing J S, Xiong L L, *et al.* Research on the influence of human activities on the water environment of Cuoji lake of Poyang Lake[J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2022, 48(1): 40-45 (in Chinese).
- [9] Guo C B, Lek S, Ye S W, *et al.* Predicting fish species richness and assemblages with climatic, geographic and morphometric factors: a broad-scale study in Chinese lakes[J]. *Limnologia*, 2015, 54: 66-74.
- [10] Park Y S, Grenouillet G, Esperance B, *et al.* Stream fish assemblages and basin land cover in a river network[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 365(1-3): 140-153.
- [11] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [12] Rahel F J. Factors structuring fish assemblages along a Bog Lake successional gradient[J]. *Ecology*, 1984, 65(4): 1276-1289.
- [13] Jackson D A, Peres-Neto P R, Olden J D. What controls who is where in freshwater fish communities - the roles of biotic, abiotic, and spatial factors[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(1): 157-170.
- [14] Zhang H, Kang M, Shen L, *et al.* Rapid change in Yangtze fisheries and its implications for global freshwater ecosystem management[J]. *Fish and Fisheries*, 2020, 21(1): 1-12.

- 21(3): 601-620.
- [15] 李思忠. 浅议《中国动物志: 硬骨鱼纲 鲤形目》(中卷)[J]. *动物分类学报*, 2001, 26(1): 115-118.
Li S Z. Review on 《Fauna Sinica: Osteichthyer Cyp-
riniformes》(Medium volume)[J]. *Acta Zootaxonomica
Sinica*, 2001, 26(1): 115-118 (in Chinese).
- [16] 周兴安, 乔永民, 王赛, 等. 洱海鱼类群落结构特征及其与环境因子关系[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1569-1577.
Zhou X A, Qiao Y M, Wang S, *et al.* Characteristics of fish assemblages associated with environmental factors in the Lake Erhai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(6): 1569-1577 (in Chinese).
- [17] 胡茂林, 吴志强, 刘引兰. 鄱阳湖湖口水域鱼类群落结构及种类多样性[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(2): 246-250.
Hu M L, Wu Z Q, Liu Y L. Fish diversity and community structure in Hukou area of Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(2): 246-250 (in Chinese).
- [18] 贺刚, 方春林, 陈文静, 等. 鄱阳湖通江水道屏峰段鱼类群落结构及多样性[J]. *江西水产科技*, 2016, 148(4): 3-6,9.
He G, Fang C L, Chen W J, *et al.* Fish community structure and diversity in the Pingfeng section of the Tongjiang waterway in Poyang Lake[J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2016, 148(4): 3-6,9 (in Chinese).
- [19] 吴申浩. 鄱阳湖洪泛平原鱼类群落与功能多样性的联系 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021, (1): 12-32.
Wu S H. Functional traits relationships of fish assemblages in sub-lakes of Poyang Lake floodplain[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021, (1): 12-32.
- [20] 胡敏琦, 王银平, 刘思磊, 等. 安庆七里湖湿地鱼类群落多样性特征及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2485-2495.
Hu M Q, Wang Y P, Liu S L, *et al.* Fish community diversity and its relationship with environmental variables in Qili Lake wetland in Anqing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2485-2495 (in Chinese).
- [21] 李敬鸿, 林鹏程, 黎明政, 等. 鄱阳湖物理生境特征及其对鱼类群落结构的影响[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(5): 95-102.
Li J H, Lin P C, Li M Z, *et al.* Physical habitat characteristics of Poyang Lake and their influence on fish community structure[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(5): 95-102 (in Chinese).
- [22] 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): 501-551,615.
Jiang Z G, Jiang J P, Wang Y Z, *et al.* Red list of China's vertebrates[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(5): 501-551,615 (in Chinese).
- [23] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. *Fish Bulletin*, 1971, 152: 1-105.
- [24] 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(9): 2403-2410.
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(9): 2403-2410 (in Chinese).
- [25] 陈国宝, 李永振, 陈新军. 南海主要珊瑚礁水域的鱼类物种多样性研究[J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 373-381.
Chen G B, Li Y Z, Chen X J. Species diversity of fishes in the coral reefs of South China Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 373-381 (in Chinese).
- [26] Margalef R. Information theory in ecology[J]. *General System*, 1958, 3: 36-71.
- [27] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2): 370-383.
- [28] 曲方圆, 于子山, 隋吉星, 等. 丰度生物量比较法应用局限性[J]. *海洋科学*, 2009, 33(6): 118-121.
Qu F Y, Yu Z S, Sui J X, *et al.* The limitations of abundance biomass comparison method[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(6): 118-121 (in Chinese).
- [29] 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.
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 (in Chinese).
- [30] 张堂林, 李钟杰. 鄱阳湖鱼类资源及渔业利用[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(4): 434-444.
Zhang T L, Li Z J. Fish resources and fishery utilization of Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 434-444 (in Chinese).
- [31] 杨少荣, 黎明政, 朱其广, 等. 鄱阳湖鱼类群落结构及其时空动态[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(1): 54-64.
Yang S R, Li M Z, Zhu Q G, *et al.* Spatial and temporal variations of fish assemblages in Poyanghu Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1): 54-64 (in Chinese).
- [32] Pandolfi J M, Lovelock C E. Novelty trumps loss in global biodiversity[J]. *Science*, 2014, 344(6181): 266-267.
- [33] 王朝, 周立志, 戴秉国, 等. 水位洪枯变化对菜子湖江湖过渡带鱼类物种和功能多样性的影响[J]. *湖泊科学*,

- 2019, 31(5): 1403-1414.
- Wang C, Zhou L Z, Dai B G, *et al.* The impacts of water level fluctuations between wet and dry seasons on taxonomic and functional diversity of fish communities in the ecotone floodplain of Lake Caizi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1403-1414 (in Chinese).
- [34] 蒋祥龙, 黎明政, 杨少荣, 等. 鄱阳湖鱼类集合群落结构特征及其时间变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(3): 588-601.
- Jiang X L, Li M Z, Yang S R, *et al.* Temporal variation of fish metacommunity structure in Poyang Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(3): 588-601 (in Chinese).
- [35] 刘燕山, 谷先坤, 唐晟凯, 等. 东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 769-780.
- Liu Y S, Gu X K, Tang S K, *et al.* Fish community structure and its relationship with main environmental variables in the East Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 769-780 (in Chinese).
- [36] 徐海根, 强胜, 韩正敏, 等. 中国外来入侵物种的分布与传入路径分析[J]. *生物多样性*, 2004, 12(6): 626-638.
- Xu H G, Qiang S, Han Z M, *et al.* The distribution and introduction pathway of alien invasive species in China[J]. *Chinese Biodiversity*, 2004, 12(6): 626-638 (in Chinese).
- [37] 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.
- [38] 郭治之, 刘瑞兰. 江西鱼类研究[J]. 南昌大学学报(理科版), 1995, 19(3): 222-232.
- Guo Z Z, Liu R L. The fishes of Jiangxi province[J]. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 1995, 19(3): 222-232 (in Chinese).
- [39] 袁晨, 裴瑞华, 郑梓瑶, 等. 广东东莞松木山水库鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(4): 940-949.
- Yuan C, Pei R H, Zheng Z Y, *et al.* Structural characteristics of fish assemblage and its relationship with environmental factors in Songmushan Reservoir, Dongguan City of Guangdong Province[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(4): 940-949 (in Chinese).
- [40] 钱新娥, 黄春根, 王亚民, 等. 鄱阳湖渔业资源现状及其环境监测[J]. *水生生物学报*, 2002, 26(6): 612-617.
- Qian X E, Huang C G, Wang Y M, *et al.* The status quo of fishery resources of Poyang Lake and its environmental monitoring[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(6): 612-617 (in Chinese).
- [41] 聂振林, 王咏雪, 胡成业, 等. 三门湾春秋季节鱼类群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(9): 1390-1398.
- Nie Z L, Wang Y X, Hu C Y, *et al.* Fish community structure and its relationships with environmental factors in Sanmen bay during spring and autumn[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1390-1398 (in Chinese).
- [42] 孟子豪, 李学梅, 王旭歌, 等. 汉江支流堵河鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2022, 41(2): 300-306.
- Meng Z H, Li X M, Wang X G, *et al.* Fish community structure and diversity in Duhe River, a tributary of Hanjiang River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(2): 300-306 (in Chinese).
- [43] 马景雪, 张培玉, 王宗兴, 等. 黄岛近海岸贝类养殖区细菌群落结构多样性及与环境因子响应[J]. 水产学报, 2022, 46(6): 984-994.
- Ma J X, Zhang P Y, Wang Z X, *et al.* Bacterial community structure diversity and environmental factors in the coastal shellfish culture area of Huangdao[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 984-994 (in Chinese).
- [44] Li Y L, Liu Q G, Chen L P, *et al.* A comparison between benthic gillnet and bottom trawl for assessing fish assemblages in a shallow eutrophic lake near the Changjiang River estuary[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(2): 572-586.

Fish community diversity and environmental influencing factors in Poyang Lake before the fishing ban

DENG Yanmin¹, WANG Yinping², HU Minqi², CHENG Xin³, HUANG Zhongjia⁴, LIU Kai^{1,2,3,4*}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;

3. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;

4. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: As an important component of aquatic biodiversity, fish are the most sensitive and reliable indicator of ecosystem function in aquatic areas. Its growth and development are closely related to the environmental factors of the inhabiting waters, and have an important indicator of environmental changes. In order to grasp the characteristics of the fish community in Poyang Lake, we conducted fish resource surveys in ten regions of Poyang Lake involving five habitats and collected water environment samples simultaneously in spring (May), summer (August), autumn (November) of 2020 and winter (January) of 2021 before the comprehensive fishing ban. We identified a total of 67 fish species, belonging to 8 orders 14 families 47 genera, of which Cyprinidae had the the maximum no. of species, accounting for 61.19%. According to different groups, the dominant ecological types of fish were mainly lake sedentary (61.19%), omnivore (44.78%), and lower fish (35.82%). Small fish was the dominant group in this community, accounting for 68.70%, and the index of relative importance (IRI) showed that there were six dominant species, the first one was *Pseudobrama simoni*. Significant seasonal differences were observed in fish community structure ($P < 0.05$), and the fish species diversity index in spring was higher than that in winter ($P < 0.05$), because the diversity and richness of species were affected by seasonal factors. Changes in water temperature and water level may be the main reasons for affecting the spatial and temporal pattern of fish community diversity in Poyang Lake. Non-metric multidimensional scaling analysis (NMDS) showed that fish could be spatially divided into two taxa, namely the estuary taxon and the grassy-lake branch-lake center-coastal zone taxon. In redundancy analysis (RDA), we observed that total phosphorus, chlorophyll a and transparency were key environmental factors affecting the spatial and temporal distribution of fish species. With the change of hydrological rhythm in the lake area, with the increase of water level, nutrients flow into the lake area, providing a rich food source for fish, and fish feeding activities are enhanced. When the total phosphorus is too high, it will lead to eutrophication of the water body, and the nutrient load and suspended solids will limit the habitat and even survival of sensitive species. Chlorophyll a is an important indicator reflecting the change of phytoplankton content, and in spring, with the increase of temperature, the surface water temperature rises rapidly, and phytoplankton in the water body begins to multiply in large quantities, which is reflected in the increase of surface chlorophyll a content. Abundance-biomass comparison curve (ABC curve) analysis showed that the fish community was severely disturbed ($W = -0.091$). This study can provide a scientific basis for the evaluation of the effect of fishing ban and the conservation of fish diversity in Poyang Lake.

Key words: fishing ban in the Yangtze River; fish community; environmental influencing factors; redundancy analysis (RDA); Poyang Lake

Corresponding author: LIU Kai. E-mail: Liuk@ffrc.cn

Funding projects: Project of Yangtze Fisheries Resources and Environment Investigation (2017-2021) from the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China (CJDC-2017-22); National Key R&D Program of China(2019YFD0901205); Normalized Monitoring Program after 10-year Ban on Yangtze fishing (2022) from the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China