



长江中游鱼类群落结构及多样性

方冬冬^{1,2}, 杨海乐², 张辉², 吴金明², 危起伟^{1,2,3*}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214000;

2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;

3. 武汉长江中华鲟保护中心, 湖北 武汉 430223)

摘要: 为了解长江中游鱼类群落结构、多样性及其与环境因子的关系, 2021年6月和11月在长江中游5个江段(宜昌、石首、嘉鱼、武汉、湖口)开展了鱼类和环境调查。定量分析了鱼类群落结构特征、时空分布格局及其与环境因子的关系。研究期间共采集到鱼类16335尾, 隶属6目13科50属76种, 其中鲤形目鱼类最多(52种), 占总种数的70%。在3种生活习性类型中, 定居性鱼类物种数最多(80%); 在3种摄食类型中, 肉食性鱼类物种数最多(46%); 在3种产卵类型中, 产黏性卵鱼类的物种数最多(50%)。相对重要性指数(IRI)显示, 瓦氏黄颡鱼、银鲴、三角鲂、铜鱼等中小型鱼类为优势种。平均Margalef丰富度指数为5.11、平均Pielou均匀度指数为0.63、平均Shannon-Wiener多样性指数为3.23、平均Simpson优势度指数为0.26。丰度/生物量比较曲线表明, 宜昌和湖口江段鱼类群落受人类活动干扰严重, 石首、嘉鱼和武汉江段鱼类群落相对稳定。Cluster和NMDS分析结果表明, 长江中游的鱼类群落可划分为3个类群, 宜昌为一类群; 石首、嘉鱼和武汉为一类群; 湖口为一类群。RDA分析结果显示, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和底质类型是影响长江中游鱼类群落结构差异的主要因子。研究表明, 与历史资料相比, 长江中游鱼类群落发生了显著变化, 经济鱼类占比减少, 鱼类个体呈现小型化和低龄化。引起这些变化的原因是由于长期的人类活动和自然环境变化共同作用的结果。

关键词: 鱼类群落结构; 多样性; 冗余分析; 环境因子; 长江中游

中图分类号: S 931

文献标志码: A

鱼类处在河流生态系统食物链的顶端, 鱼类群落结构及其多样性和稳定性对于评估河流生态系统的健康与否具有重要的科学意义^[1]。鱼类群落结构与其所处的水域生态环境联系密切^[2], 并表现出一定的响应关系。研究发现, 鱼类群落结构受多个环境因子的共同影响, 如土地利用类型、地形地貌、水文条件、河流水质、生境质量等^[3-6]。但由于自然地理位置、空间尺度等原因, 鱼类群

落结构对环境因子变化的敏感性各有不同。朱书礼等^[7]在对柳江鱼类群落结构研究中发现, 河宽、海拔和pH是柳江鱼类群落结构差异的主要影响因素。雷娟等^[8]在对长江上游支流老河沟鱼类群落结构的时空格局研究中发现, 河宽、海拔、底质类型、水深、流速是影响老河沟鱼类群落时空差异的主要栖息地因子, 溶解氧、电导率、pH、水温、总溶解固体是影响老河沟鱼类群落时空差

收稿日期: 2022-08-23 修回日期: 2023-01-09

资助项目: 农业农村部财政专项“长江渔业资源与环境调查(2017—2021)”; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(YF1202201)

第一作者: 方冬冬(照片), 从事渔业资源保护与利用研究, E-mail: fangdong19910111@126.com

通信作者: 危起伟, 从事水生生物多样性保护与利用研究, E-mail: weiqw@yfi.ac.cn



异的主要水环境因子。Wang 等^[9]对美国威斯康辛州流域的研究发现, 流域农业用地比例超过 50% 时, 鱼类完整性指数显著降低。而国内学者丁森等^[10]对太子河流域研究发现, 农业用地达到 25% 时, 会导致鱼类群落结构发生显著改变。目前关于长江中游鱼类群落结构的研究多集中于监利、武汉、宜昌、洞庭湖和鄱阳湖流域等江段, 这些研究多基于局域尺度下某一江段鱼类的组成、物种多样性变化、鱼类食物网结构等方面^[11-13], 研究空间尺度较小, 特别是针对禁捕之后全方位对长江中游的鱼类群落结构的组成、鱼类群落结构与环境因子关系的研究还没有报道。

长江中游河床比降和缓, 江面宽阔, 沙洲众多, 同时还拥有众多封闭或半封闭的长江故道, 良好的水文条件和充足的饵料生物为鱼类等水生生物提供了优良的索饵场、越冬场和产卵场^[14]。据文献记载, 长江中游有 215 种鱼类, 其中仅见于中游地区的鱼类有 42 种^[15]。近几十年来, 由于人类活动的干扰和破坏, 如涉水工程的建设、污水的大量排放、采砂船的滥采乱挖等, 使得长江中游的渔业资源量急剧下降^[16]。为了保护长江渔业资源和水生生物多样性, 我国于 2021 年 1 月 1 日启动了“十年禁渔”计划。本研究基于 2021 年的渔获物和环境因子的调查数据, 分析了长江中游

鱼类多样性的整体现状, 探讨了鱼类群落结构与环境因子的关系, 以期为长江中游渔业资源修复和鱼类多样性保护提供参考依据, 并为未来长江禁捕评估提供对照基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域

长江中游从湖北宜昌至江西湖口, 全长 950 km, 流域面积 $68 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。长江中游河道迂回, 江面宽展, 河床比降锐减, 水流迟缓, 河道类型复杂多样, 分布有顺直、弯曲及分汊等河型, 并有众多大小湖泊与河网, 是我国淡水湖泊最为集中的地区^[17]。本研究在长江中游设置了宜昌、石首、嘉鱼、武汉、湖口 5 个调查站位 (图 1)。宜昌江段处长江中上游分界处, 受三峡大坝和葛洲坝联合调度的影响, 改变了长江流态和季节变化规律, 流速减缓及下泄的洪水引起河道底质和水文条件的改变^[18]。石首江段位于下荆江首端, 该江段进口、出口较为顺直, 中间多急弯分汊, 为典型的蜿蜒型河道^[19]。嘉鱼江段为典型的微弯分汊型河段, 护县洲、白沙洲和复兴洲为顺列江心洲, 江心洲两侧水流较为湍急, 岸边、洲头和洲尾部分水流相对较缓^[20]。武汉江段地势平坦, 水

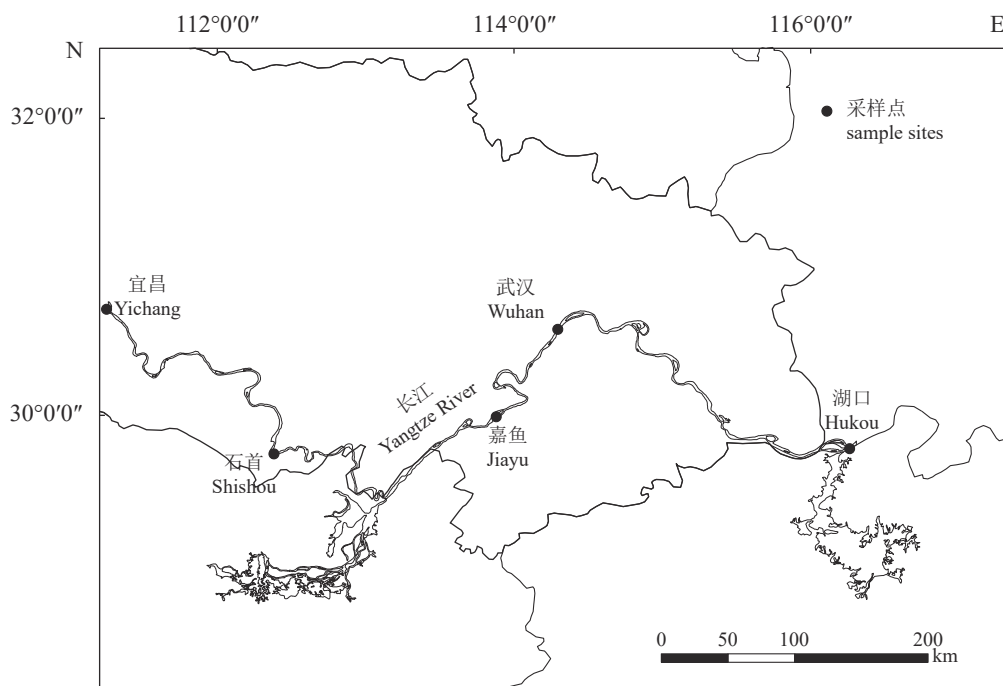


图 1 长江中游鱼类采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the middle reaches of the Yangtze River

流平缓, 河势基本稳定, 冲淤变幅小, 沿岸有发育良好的浅滩^[21]。湖口江段是长江与鄱阳湖进行生态联系的首要江段, 为典型的江湖复合生态系统。其水域生境复杂, 是一些洄游性、半洄游性鱼类在长江与鄱阳湖之间洄游的必经水域^[22]。

1.2 数据的获取

样品采集 分别在 2021 年的 6 月和 10 月进行 1 次调查, 调查方式为聘请渔民使用不同类型的网具进行捕捞, 捕捞网具包括定置刺网(网目 6 cm, 网高 2 m, 网长 100 m)、流刺网(网目 2.5 cm、网高 2 m, 网长 230 m)、地笼(长 7 m、网目 1 cm、高 0.4 m)。地笼主要放置在岸边的浅水区。每天作业时长 12 h [下午 (18:00) 至第二天清晨 (6:00)]。调查期间对渔获物鉴定到种, 鉴定方法参照《四川鱼类志》^[23] 和《中国动物志·鲤形目(中卷)》^[24], 对于不能现场鉴定的鱼类样本, 用 5%~10% 的福尔马林溶液固定, 标明捕捞时间和地点, 带回实验室后再进行种类的鉴定。在对所有渔获物进行生物学测量时, 体长测量精确到 1 mm, 体重测量精确到 0.1 g。

环境因子调查 水体理化指标包括 pH、水温、溶解氧、悬浮物固体、总氮、总磷、高锰酸钾指数、硝酸盐、磷酸盐、氨氮(平均值±标准差)。其中, pH、水温、溶解氧利用手持 YSI 参数水质分析仪 (YSI ProPlus) 现场测定。其他水质参

数通过将采集样品低温下送至实验室, 48 h 内参照《水和废水分析检测方法》测定^[25](表 1)。

栖息地因子包括底质、流速、水深、河宽(平均值±标准差)。其中底质类型参考 Gao 等^[26] 的研究, 底质类型在野外现场测定, 按其粒径的大小分为三类: ①卵石和巨砾(粒径>64 mm); ②圆石和砂砾(4 mm<粒径<64 mm); ③砂/黏土/淤泥(粒径<4 mm)。流速采用手持超声波多普勒流速仪 (LSH10-1A) 测定, 河宽采用激光测距仪 (Leupold RX-IV) 现场测量(表 1)。

1.3 数据分析

生物多样性 分别采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Margalef 种类丰富度指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (E)、Simpson 优势度指数 (C)^[27], 分析长江中游干流鱼类生物多样性:

$$H = - \sum_{i=1}^S (n_i/N) \ln(n_i/N) \quad (1)$$

$$D = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

$$C = 1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N}\right)^2 \quad (4)$$

式中, n_i 为第 i 个物种数量, N 为群落中所有物种数量, S 为群落中物种种类数。

群落优势种 采用 Pinkas 相对重要性指数

表 1 长江中游各点位环境因子

Tab. 1 Environmental factors for each site in the middle reaches of the Yangtze River

类别 items	宜昌 Yichang	石首 Shishou	嘉鱼 Jiayu	武汉 Wuhan	湖口 Hukou
pH	7.60±0.22	7.49±0.07	7.65±0.28	7.67±0.06	7.09±0.28
水温/°C water temperature	22.75±1.32	22.4±0.44	23.9±1.76	23.1±3.92	23.3±3.50
溶解氧/(mg/L) DO	7.32±0.52	7.87±0.45	8.13±0.71	7.8±0.91	7.71±1.08
高锰酸盐指数/(mg/L) COD _{Mn}	1.75±0.49	1.59±0.41	2.11±0.54	2.16±0.40	1.93±0.17
总氮/(mg/L) TN	1.6±0.24	1.6±0.34	1.6±0.40	1.6±0.24	1.5±0.26
总磷/(mg/L) TP	0.25±0.11	0.23±0.09	0.39±0.11	0.29±0.10	0.25±0.10
悬浮物/(mg/L) SS	14.1±11.02	18.4±3.11	89.6±65.3	54.9±29.77	48.9±35.74
氨氮/(mg/L) NH ₄ ⁺ -N	0.05±0.01	0.06±0.02	0.03±0.01	0.06±0.02	0.07±0.03
硝酸盐/(mg/L) NO ₃ ⁻ -N	6.79±0.67	6.70±0.80	6.02±0.54	5.46±0.60	4.47±1.59
磷酸盐/(mg/L) PO ₄ ³⁻ -P	0.07±0.01	0.09±0.01	0.05±0.02	0.05±0.02	0.08±0.01
底质 bottom	卵石	砂	砂	砂	砂砾
流速/(m/s) flow rate	0.28±0.05	0.038±0.02	0.28±0.20	0.04±0.01	0.31±0.17
水深/m depth	23.07±0.01	16.02±0.01	7.10±0.05	6.54±0.15	6.89±0.24
河宽/m width	820.03±56.30	733.49±117.71	3862.36±73.88	1899.10±193.06	1682.04±119.34

(IRI) 对两个采样位点的鱼类群落优势种进行计算^[28]:

$$IRI = (N + W') \cdot F \quad (5)$$

式中, N 为渔获物中某物种的数量占总数量的百分比(%), W' 为某物种的重量占总重量的百分比(%), F 为某种鱼类的出现频率。鱼类在群落中的重要性由 IRI 来判定: $IRI \geq 1000$ 为优势种, $1000 > IRI \geq 100$ 为重要种, $100 > IRI \geq 10$ 为常见种, $IRI < 10$ 为一般种, $IRI < 1$ 为稀有种。

生态类型划分 对采集到的鱼类进行生态类型划分, 按其迁移的习性不同, 可分为定居性、江海洄游性和江湖洄游性 3 种类型。按其食性不同, 可划分为杂食性、肉食性和植食性 3 种类型。按其产卵类型, 划分为黏性卵、喜贝性产卵、漂流性卵 3 种类型^[29]。

鱼类群落的稳定性使用 ABC 曲线及 W (W -statistic) 统计进行判定, ABC 曲线最初是由 Warwick^[30] 提出, 应用在海洋大型底栖动物群落以监测污染对底栖动物群落的影响, 目前已被广泛应用于判定水生生物群落的栖息环境质量。通过 ABC 曲线可以判断水生生物群落的栖息环境质量, W 的统计范围为 $-1 \sim 1$, 当 $W > 0$ (生物量曲线在丰度曲线上方), 群落的优势种是一种或几种大个体的种类, 群落受到的扰动较小, 当 $W < 0$ (生物量曲线在丰度曲线下方), 群落优势种是一种或几种小个体的种类, 群落受到较大的扰动, 当生物量曲线和丰度曲线相交, 该群落受到中度扰动^[31]。 W 统计公式:

$$W = \sum_{i=1}^s \frac{B_i - A_i}{50 \times (S - 1)} \quad (6)$$

式中, B_i 和 A_i 分别为 ABC 曲线中种类序号对应的生物量和数量的累积百分比, S 为出现的物种数。ABC 曲线采用 Primer 6.0 软件完成。

群落结构相似性分析 根据不同站点鱼类相对丰度数据建立矩阵, 其中横坐标为种类, 纵坐标为站点。以 Bray-Curtis 相似性系数为基础构建相似性矩阵, 采用等级聚类的分类方法和非度量多维标度 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) 的排序方法分别构建聚类分析图和 NMDS 图, 其分析结果的优劣由过胁强系数 (Stress) 值来衡量, 使用 Primer 6.0 软件进行分析。

鱼类群落结构与环境因子的关系 对各样点鱼类相对多度数据进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 发现排序轴

最大的梯度长度小于 3, 因此选择典范对应分析 (Redundancy analysis, RDA) 比较适宜^[32]。在进行 DCA 和 RDA 分析前, 需剔除出现频率低于 5% 的鱼类, 以避免稀有种的干扰。为了优化分析, 对环境数据进行 $\lg(x+1)$ 转化, 剔除波动因子 > 20 的环境因子, 并在分析中降低稀有种的权重^[33]。在 RDA 分析过程中, 运用蒙特卡罗检验分析评价环境因子对鱼类群落变化影响的显著程度。上述分析过程在 Canoco 5.0 软件中完成。

2 结果

2.1 鱼类种类组成、生态类型及优势种

调查期间, 共监测到长江中游鱼类 16 335 尾, 隶属于 6 目 13 科 50 属。其中鲤形目 (Cypriniformes) 52 种, 种类数最多, 占 70%; 其次为鲇形目 (Siluriformes) 12 种, 占 14%; 鲈形目 (Perciformes) 7 种, 占 9%; 鲟形目 (Acipenseriformes) 2 种, 占 3%; 鲱形目 (Clupeiformes) 2 种, 占 3%; 鳗鲡目 (Anguilliformes) 1 种, 占 1%。

鱼类的生态类型按食性划分: 植食性鱼类 10 种, 占 13%; 肉食性鱼类 35 种, 占 46%; 杂食性鱼类 31 种, 占 41%。按产卵类型划分: 产漂流性卵的鱼类 34 种, 占 45%; 产黏性卵的鱼类 38 种, 占 50%; 喜贝性产卵的鱼类 4 种, 占 5%。按生活习性划分: 定居性鱼类 61 种, 占 80%; 江湖洄游性鱼类 12 种, 占 16%; 江海洄游性鱼类 3 种, 占 4% (表 2)。

根据 $IRI \geq 1000$ 为优势种, 2 次调查中各江段不同月份的优势种不同, 宜昌江段 6 月的优势种为 1 种, 10 月 2 种; 石首江段 6 月 6 种, 10 月 4 种, 相同种类为鳊 (*Siniperca chuatsi*) 和三角鲂 (*Megalobrama terminalis*); 嘉鱼江段 6 月 4 种, 10 月 3 种, 相同种类为鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和铜鱼 (*Coreius heterodon*); 武汉江段 6 月 3 种, 10 月 3 种; 湖口江段 6 月 4 种, 10 月 4 种, 相同种类为短颌鲚 (*Coilia brachygnathus*) 和三角鲂。长江中游的优势种主要以银鲴 (*Xenocypris argentea*)、鲢、三角鲂、铜鱼等经济鱼类为主 (表 3)。

2.2 鱼类多样性

从多样性指数水平来看 (图 2), 5 个采样点的鱼类 Margalef 丰富度指数变化范围, 6 月为 3.31~6.28, 平均为 4.96; 10 月为 4.16~5.99, 平均为

表 2 长江中游鱼类调查名录及生态类型

Tab. 2 Species composition and ecological guilds of fish community in the middle reaches of the Yangtze River

物种(缩写) species (abbreviation)	生态类型 ecological type	宜昌 Yichang	石首 Shishou	嘉鱼 Jiayu	武汉 Wuhan	湖口 Hukou
鲤形目 Cypriniformes						
鲤科 Cyprinidae						
鲃亚科 Cultrinae						
鳊(Pap) <i>Parabramis pekinensis</i>	H; Dr; R	+	+	+	+	+
鲮(Hel) <i>Hemiculter leucisculus</i>	O; V; R	+	+		+	+
达氏鲃(Cud) <i>Culter dabryi dabryi</i>	C; V; R	+		+	+	+
蒙古鲃(Cum) <i>Culter mongolicus</i>	C; V; R	+	+	+	+	+
拟尖头鲃(Cuo) <i>Culter oxycephaloides</i>	C; Dr; R	+	+	+	+	+
翘嘴鲃(Cua) <i>Culter alburnus</i>	C; Dr; R	+	+	+	+	+
银飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	O; V; R	+				+
三角鲂(Met) <i>Megalobrama terminalis</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
青梢红鲃 <i>Erythroculter dabryi</i>	C; V; R		+	+	+	
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	H; Dr; R		+	+		
黑尾近红鲃 <i>Ancherythroculter nigrocauda</i>	C; V; R				+	
尖头红鲃 <i>Erythroculter oxycephaloides</i>	C; V; R					+
红鳍原鲃(Cue) <i>Cultrichthys erythropterus</i>	C; V; R		+	+	+	+
贝氏鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	O; V; R			+	+	
鲴亚科 Xenocyprinae						
似鲴(Pss) <i>Pseudobrama simoni</i>	O; Dr; RL	+	+	+	+	+
银鲴(Xea) <i>Xenocypris argentea</i>	H; Dr; R	+	+	+	+	+
黄尾鲴(Xed) <i>Xenocypris davidi</i>	H; V; R	+	+		+	+
鲃亚科 Barbinae						
麦瑞加拉鲃 <i>Cirrhinus mrigala</i>	O; Dr; R					+
花鲈亚科 Cobitinae						
泥鳅(Mia) <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	C; V; R	+	+	+	+	+
鮡亚科 Gobioninae						
唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	O; V; R	+	+		+	+
华鲮(Sas) <i>Sarcocheilichthys sinensis</i>	O; Dr; R	+	+		+	+
蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	O; Dr; R	+	+		+	+
铜鱼(Coh) <i>Coreius heterodon</i>	O; Dr; RL	+	+	+	+	+
吻鮡(Rht) <i>Rhinogobio typus</i>	O; Dr; R	+	+	+	+	
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	O; Dr; RL	+				
圆筒吻鮡(Rhc) <i>Rhinogobio cylindricus</i>	O; Dr; R	+	+	+	+	
银鮡(Sqa) <i>Squalidus argentatus</i>	O; Dr; R	+	+	+	+	+
花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i>	O; V; R		+			+
长蛇鮡(Sad) <i>Saurogobio dumerili</i>	O; Dr; R		+	+	+	+
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	O; V; R		+	+		
似刺鲃 <i>Paracanthobrama guichenoti</i>	C; Dr; R		+			+
鲤亚科 Cyprininae						
鲫(Caa) <i>Carassius auratus</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
鲤(Cyc) <i>Cyprinus carpio</i>	O; V; R	+	+	+	+	+

· 续表 2 ·

物种(缩写) species (abbreviation)	生态类型 ecological type	宜昌 Yichang	石首 Shishou	嘉鱼 Jiayu	武汉 Wuhan	湖口 Hukou
镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	O; V; R		+			
鲢亚科 Hypophthalmichthyinae						
鲢(Hym) <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	H; Dr; RL	+	+	+	+	+
鳙(Hyn) <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	H; Dr; RL	+	+	+	+	+
鲂亚科 Acheilognathinae						
中华鲂 <i>Rhodeus sinensis</i>	O; Hi; R		+			
平鳍鲷科 Homalopterinae						
中华金沙鳅 <i>Jinshaia sinensis</i>	O; Dr; R	+				
鳅鲇亚科 Gobiobotinae						
宜昌鳅鲇 <i>Gobiobotia filifer</i>	C; V; R			+		
沙鳅亚科 Botiinae						
小眼薄鳅 <i>Leptobotia microphthalrna</i>	C; V; R			+		
长薄鳅 <i>Leptobotia elongata</i>	C; Dr; R	+	+			
花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>	O; Dr; R		+	+		+
雅罗鱼亚科 Leuciscinae						
草鱼(Cti) <i>Ctenopharyngodon idella</i>	H; Dr; RL	+	+	+	+	
赤眼鳟(Sqc) <i>Squaliobarbus curriculus</i>	O; Dr; RL	+	+	+	+	
鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	C; Dr; RL	+	+	+		
鳊 <i>Ochetobius elongatus</i>	O; Dr; RL	+				+
青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	C; Dr; RL		+	+		
胭脂鱼科 Catostomidae						
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	O; Dr; RL	+		+		+
野鲮亚科 Labeoninae						
华鲮 <i>Sinilabeo rendahli</i>	H; V; R	+	+			
鲮亚科 Acheilognathinae						
短须鲮 <i>Acheilognathus barbatus</i>	H; Hi; R		+		+	
大鳍鲮(Acm) <i>Acheilognathus macropterus</i>	O; Hi; R		+	+	+	+
无须鲮 <i>Acheilognathus gracilis</i>	H; Hi; R		+			
鲱形目 Clupeiformes						
鳊科 Engraulidae						
短颌鲢(Cob) <i>Coilia brachygnathus</i>	O; Dr; RL	+	+	+	+	+
长颌鲢 <i>Coilia macrognathos</i>	O; Dr; RS			+		+
鲈形目 Perciformes						
鲈科 Serranidae						
大眼鳊(Sik) <i>Siniperca kneri</i>	O; Dr; R	+		+	+	+
斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	O; Dr; R	+				
鳊(Sic) <i>Siniperca chuatsi</i>	O; Dr; R	+	+	+	+	+
长身鳊 <i>Coreosiniperca roulei</i>	O; Dr; R					+
鳊科 Channidae						
乌鳊 <i>Channa argus</i>	O; Dr; R		+			
虾虎鱼科 Gobiidae						
子陵吻虾虎鱼(Rhg) <i>Rhinogobius giurinus</i>	O; V; R	+	+	+		+

· 续表 2 ·

物种(缩写) species (abbreviation)	生态类型 ecological type	宜昌 Yichang	石首 Shishou	嘉鱼 Jiayu	武汉 Wuhan	湖口 Hukou
沙塘鳢科 Odontobutidae						
沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	O; V; R		+			
鲇形目 Siluriformes						
鲿科 Bagridae						
粗唇鲿(<i>Lec</i>) <i>Leiocassis crassilabris</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
大鳍鲿(<i>Hem</i>) <i>Hemibagrus macropterus</i>	C; V; R	+	+	+	+	+
光泽黄颡鱼(<i>Pen</i>) <i>Pelteobagrus nitidus</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
黄颡鱼(<i>Pef</i>) <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
瓦氏黄颡鱼(<i>Pev</i>) <i>Pelteobagrus vachelli</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
长须黄颡鱼(<i>Pee</i>) <i>Pelteobagrus eupogon</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
长吻鲿(<i>Lel</i>) <i>Leiocassis longirostris</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
圆尾拟鲿(<i>Pst</i>) <i>Pseudobagrus tenuis</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
细尾拟鲿 <i>Pseudobagrus pratti</i>	O; V; R		+	+		+
短尾拟鲿 <i>Pseudobagrus brevicaudatus</i>	O; V; R					+
鲇科 Siluridae						
大口鲇(<i>Sim</i>) <i>Silurus meridionalis</i>	O; V; R		+	+	+	+
鲇(<i>Sia</i>) <i>Silurus asotus</i>	O; V; R	+	+	+	+	+
鳗鲡目 Anguilliformes						
鳗鲡科 Anguillidae						
日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	O; Dr; RS					+
鲟形目 Acipenseriformes						
鲟科 Acipenseridae						
长江鲟 <i>Acipenser dabryanus</i>	C; V; R	+				
中华鲟 <i>Acipenser sinensis</i>	C; V; RS	+		+		

注: +. 采集到样本; R. 定居性; RS. 江海洄游性; RL. 江湖洄游性; H. 植食性; O. 杂食性; C. 肉食性; V. 黏性卵; Hi. 喜贝性产卵; Dr. 漂流性卵
 Notes: +. fish species collected during the investigation; R. resident; RS. river-sea migration; RL. river-lake migration; H. herbivorous; O. omnivorous; C. carnivorous; V. viscid eggs; Hi. shellfish-like eggs; Dr. drifting eggs

表 3 长江中游鱼类优势种的时空分布

Tab. 3 Spatial and temporal distribution of dominant fish species in the middle reaches of the Yangtze River

站点 sites	月份 month	优势种 dominant species						
宜昌 Yichang	6月	银鲴						
	10月	鳊	铜鱼					
石首 Shishou	6月	鲢	鳊	三角鲂	瓦氏黄颡鱼	鳊	银鲴	
	10月	鳊	鳊	拟尖头鲂	三角鲂			
嘉鱼 Jiayu	6月	瓦氏黄颡	铜鱼	长吻鲿	鲢	团头鲂		
	10月	三角鲂	鲢	铜鱼				
武汉 Wuhan	6月	铜鱼	银鲴	鳊				
	10月	鲢	蒙古鲂	瓦氏黄颡鱼				
湖口 Hukou	6月	粗唇鲿	短颌鲚	三角鲂	长颌鲚			
	10月	达氏鲂	短颌鲚	蒙古鲂	三角鲂			

5.26。Pielou 均匀度指数变化范围, 6 月为 0.20~0.83, 平均为 0.65; 10 月为 0.28~0.73, 平均为 0.60。Shannon-Wiener 多样性指数变化范围, 6 月为 0.95~4.58, 平均为 3.33, 10 月为 1.42~4.01, 平

均为 3.13。Simpson 优势度指数变化范围, 6 月为 0.06~0.77, 平均为 0.24, 10 月为 0.11~0.65, 平均为 0.28。6 月鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数平均值大于 10 月。

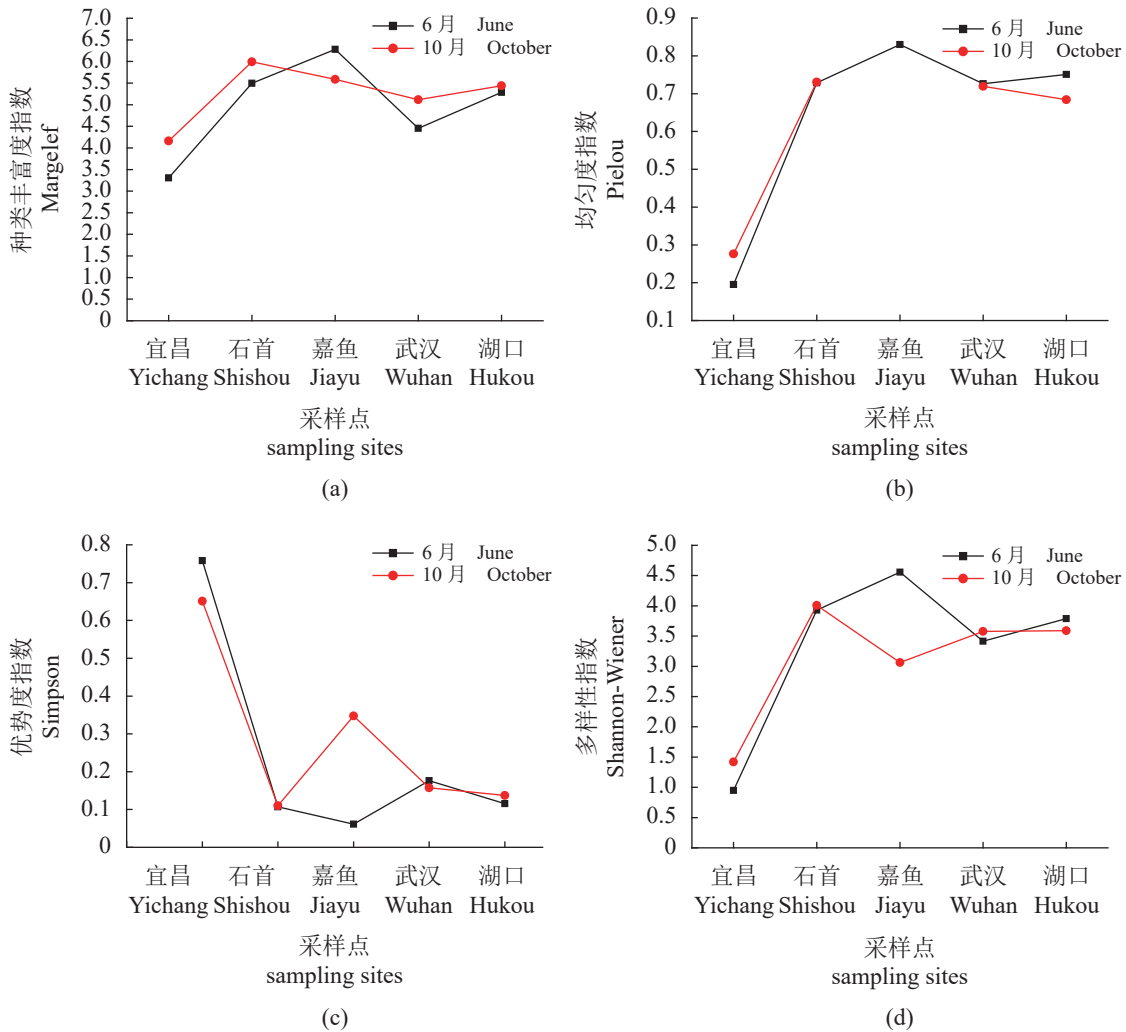


图 2 长江中游各江段鱼类多样性指数时空变化

Fig. 2 Temporal-spatial changes of fish diversity index in the middle reaches of Yangtze River

2.3 鱼类群落特征

丰度/生物量比较曲线显示, 宜昌和湖口江段的 W 值小于 0, 丰度优势度曲线和生物量优势度曲线相交, 表明两个江段的鱼类群落受到严重干扰。石首和武汉江段的 W 值大于 0, 生物量优势度曲线位于丰度优势度曲线之上, 且生物量优势度曲线的起点高于丰度优势度曲线的起点, 表明两个江段的鱼类群落结构相对稳定。嘉鱼江段的 W 值大于 0, 丰度优势度曲线和生物量优势度曲线相交, 且丰度优势度曲线的起点高于生物量优

势度曲线的起点, 表明该江段的鱼类群落受到中度干扰 (图 3)。

对鱼类群落进行 Cluster 和 NMDS 分析 (图 4)。Cluster 分析结果表明, 在 42.15% 的 Bray-Curtis 相似性水平上, 长江中游鱼类群落结构分为 3 个类群, 类群 I 为石首、嘉鱼和武汉; 类群 II 为湖口; 类群 III 为宜昌。One-Way ANOSIM 检验结果表明, 三组间的群聚结构在统计学上的差异不显著 ($R=1, P=0.1$)。NMDS 的分析结果与 Cluster 分析结果一致, Stress 的值为 0, 具有一定的解释意义。

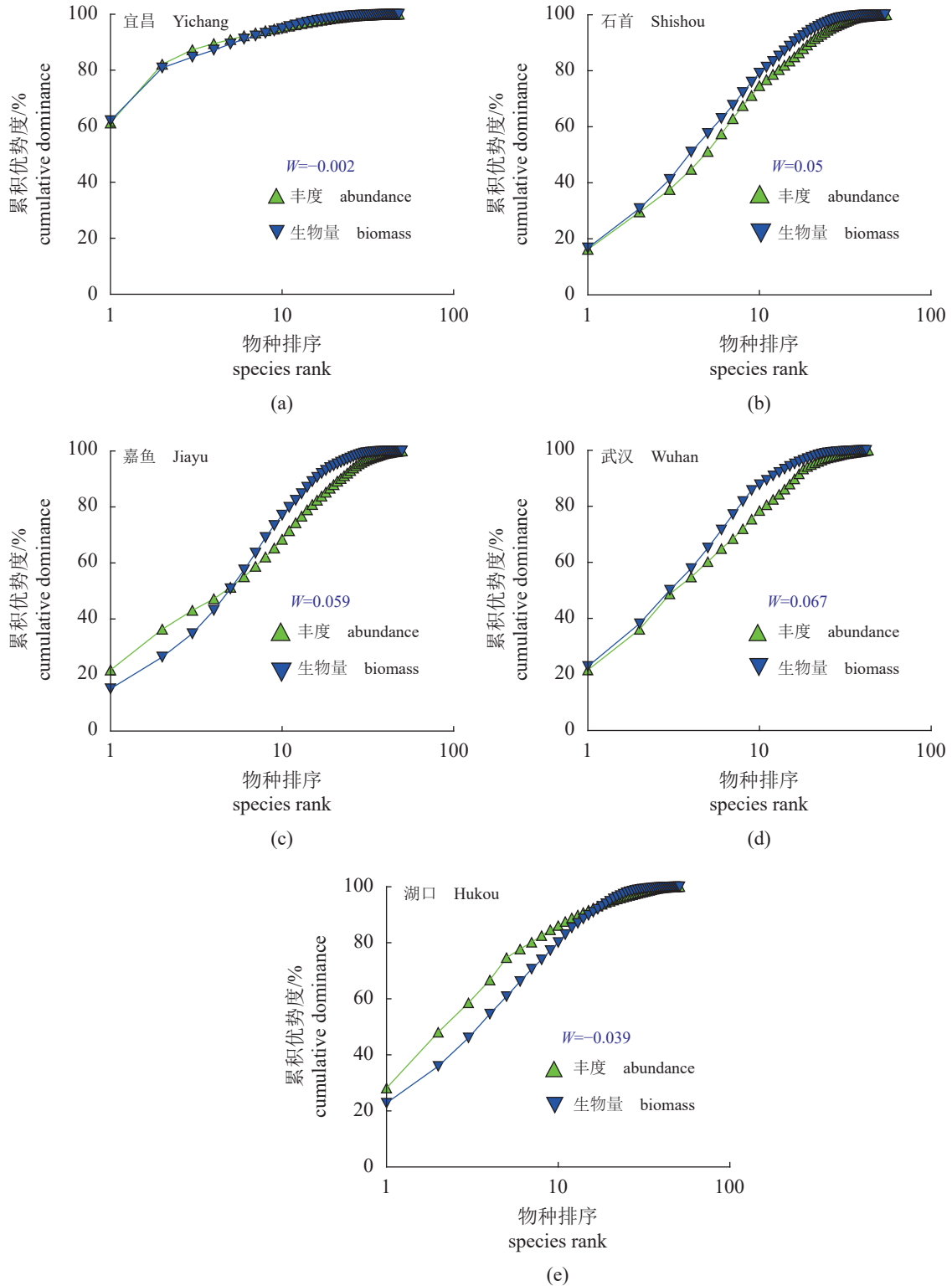


图 3 长江中游各江段鱼类群落的丰度/生物量曲线

Fig. 3 Abundance/biomass curve of fish communities at each reach in the middle reaches of the Yangtze River

2.4 鱼类群落结构与环境因子的关系

水环境因子与鱼类群落的关系 物种
DCA 结果显示, 4 个排序轴的梯度, 最长的为

1.09, 小于 3, 为线性模型, 故选择冗余对应分析。
RDA 结果显示, pH、NH₄⁺-N、COD_{Mn} 等环境因子主要贡献于轴 1, DO 环境因子主要贡献于轴 2, 轴 1 和轴 2 能共同解释所有变量的 96.88%(图 5-a)。

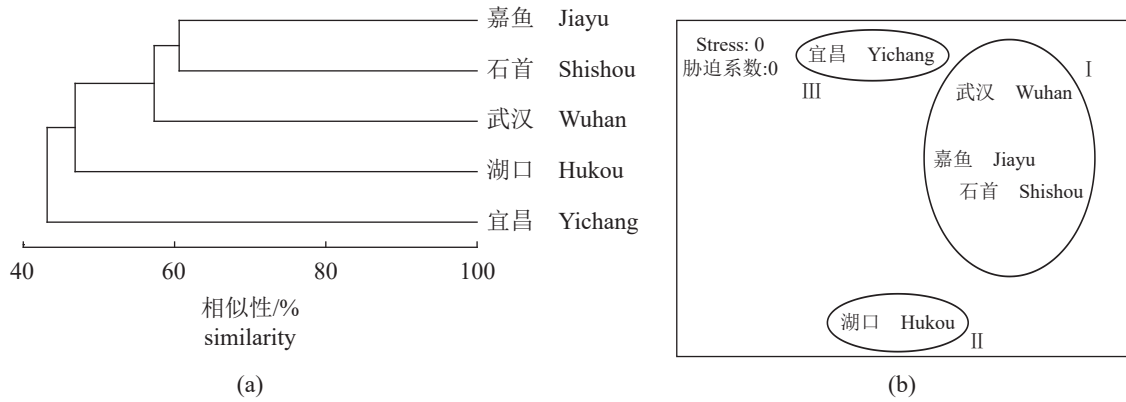


图 4 长江中游鱼类群落结构聚类 (a) 和非度量多维尺度分析 (b)

Fig. 4 Cluster analysis (a) and NMDS analysis (b) of fishes in the middle reaches of the Yangtze River

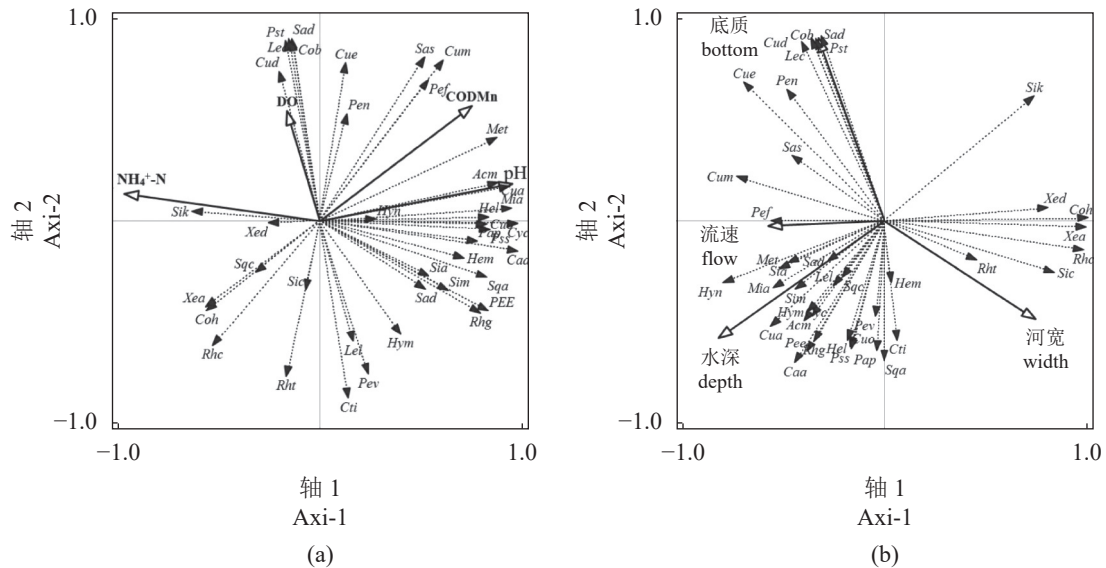


图 5 长江中游水环境因子 (a) 及栖息地因子 (b) 与鱼类物种组成的 RDA 分析图

物种缩写详见表 2

Fig. 5 RDA analysis water environmental factor(a) and habitat factor(b) and fish species composition in the middle reaches of the Yangtze River

Abbreviations of fish species are given in Tab. 2

随机置换检验发现, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是导致长江中游鱼类群落结构差异的主要水体理化因子 ($P < 0.05$) (表 4)。黄尾鲮、赤眼鲮、银鲮等与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关性较大。

栖息地因子与鱼类群落的关系 运用 RDA 检验河宽、底质类型、流速、水深对鱼类群落组成的影响, 结果显示, 河宽、底质类型和流速主要贡献于轴 2, 水深、流速主要贡献于轴 1, 轴 1 和轴 2 能共同解释所有变量的 96.88% (图 5-b)。随机置换检验发现, 底质类型是导致长江中游鱼类群落结构差异的主要栖息地因子 ($P < 0.05$) (表 5)。粗唇鲮、圆尾拟鲮、光泽黄颡鱼、红鳍原鲂等与

表 4 排序轴特征值及其与水环境因子的相关系数

Tab. 4 Eigenvalues of axes and their correlation coefficients with water environmental factors

指标 index	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2
特征值 eigenvalues	0.6406	0.3026
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-1.03484	-0.28524
DO	-0.33129	-1.07357
COD_{Mn}	-1.11502	0.73575
pH	1.12430	0.24003

表 5 排序轴特征值及其与栖息地因子的相关系数

Tab. 5 Eigenvalues of axes and their correlation coefficients with habitat factor

指标 index	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2
特征值 eigenvalues	0.3563	0.2752
底质 bottom	1.15840	-0.60365
河宽 width	0.72185	-0.83970
流速 flow rate	0.87850	-0.70729
水深 depth	-0.68928	0.87665

底质类型相关性较大。

3 讨论

3.1 鱼类种类组成及变化

本研究 2021 年在长江中游共调查到鱼类 76 种, 与杨婷越等^[34] 2018 年调查到的 79 种相差不多, 减少的物种有叉尾斗鱼 (*Macropodus opercularis*)、黑鳍鲈 (*Sarcocheilichthys nigripinnis*)、圆尾斗鱼 (*Macropodus ocellatus*)、圆吻鲂 (*Distoechodon tumirostris*) 和白甲鱼 (*Onychostoma sima*) 等, 一方面可能是由于网具的原因, 另一方面可能是这些鱼类数量下降。多年未见的鳊以及洄游性和半洄游性的长颌鲚、短颌鲚在多个江段被调查到, 表明禁捕之后, 部分生命周期短、栖息地尚存的受威胁鱼类种群有恢复的迹象。但与湖北省水生生物研究所 1974 年发表的专著《长江鱼类》^[35] 中统计的 153 种, 1990 年出版的《长江水系渔业资源》^[36] 记录的 215 种相比相差很大, 常见的广布种鱼类如鳊 (*Luciobrama macrocephalus*)、鲃 (*Tenualosa reevesii*)、中华细鲫 (*Aphyocypris chinensis*)、富氏拟鲮 (*Pseudobagrus fui*)、白鲟 (*Psephurus gladius*)、圆口铜鱼 (*Coreius guichenoti*) 等均未调查到, 鱼类组成已发生了较大的变化。过度捕捞、水质污染、外来物种入侵、江湖阻隔是导致长江中游鱼类多样性下降和物种组成变化的主要原因。

刘绍平等^[37] 研究发现, 长江中游主要优势种为铜鱼、南方鲇、长吻鲃、黄颡鱼、草鱼、鳊、鲤、青鱼、鲢 9 种, 其中四大家鱼占渔获物生物量的 10%。本研究中长江中游的主要优势种为铜鱼、银鲟、鳊、鲃、鲢、三角鲂、瓦氏黄颡鱼、短颌鲚等小型鱼类, 相比较刘绍平等^[37] 的研究中, 四大家鱼等经济鱼类优势种的数量明显降低。过度捕捞和江湖阻隔是导致四大家鱼资源量下降的

主要原因, 研究表明江湖阻隔会造成鱼类多样性下降, 如洪湖在被江湖阻隔后, 四大家鱼等鱼类资源明显下降^[38]。曹文宣^[39] 研究表明, 长江流域渔业资源衰退严重, 全江段过度捕捞现象普遍。从外来种组成来看, 麦瑞加拉鲮, 散鳞镜鲤、杂交鲟、纵带鲃 (*L. argentivittatus*)、北方花鲈 (*Cobitinae granoci*) 等在中游多个江段被调查到, 外来物种入侵是导致长江中游鱼类群落结构变化的重要因素。研究表明, 外来种与本地种相比有着较强的生存优势, 在争夺食物饵料和生存空间方面优于本地种, 种群密度大大提高, 并成为优势种群, 土著鱼类明显处于劣势, 甚至濒临灭绝^[40]。

本研究表明, 长江中游的鱼类优势种主要由瓦氏黄颡鱼、三角鲂、短颌鲚等小型鱼类组成, 四大家鱼等重要的经济鱼类资源量明显下降。鱼类物种组成发生了较大的变化, 禁捕之后, 部分生长周期短、栖息地尚存的受威胁鱼类群落有逐渐恢复的迹象。

3.2 鱼类群落结构特征

鱼类多样性 Shannon-Wiener 指数显示, 6 月的鱼类多样性 Shannon-Wiener 指数高于 10 月, 分析可能与水温有关, 研究发现水温增加会促进鱼类的活动性增强, 进而导致被动性网具的鱼类捕获率增加^[41], 本研究使用的地笼和刺网均为被动性网具。从空间分析来看, 长江中游平均鱼类多样性指数最高的为石首江段 (3.97), 其次为湖口江段 (3.67), 最低的为宜昌江段 (1.18)。石首江段河道形态较为复杂, 生境异质性较高, 加之沿岸有发育良好的浅滩, 为众多水生生物提供了良好的栖息地, 鱼类多样性较高^[19]。湖口江段位于鄱阳湖与长江交汇处, 横向水文的连通有利于河流与湖泊之间生物、有机物和能量的交换, 鱼类多样性较高^[42], 保持江湖连通性对维护生物多样性至关重要。大坝会改变原有河流生境、阻断河流纵向连通性、淹没重要鱼类产卵场等, 对鱼类多样性和群落组成产生不利影响^[43], 故宜昌江段是 5 个江段中鱼类多样性最低的。

ABC 曲线结果显示, 宜昌和湖口江段鱼类群落处于严重干扰状态 ($W < 0$), 渔获物多以小型鱼类为主。宜昌江段是长江中上游的分界点, 上游河床比降大、水流湍急, 宜昌江段的环境条件相对于其他 4 个江段更为特殊, 该江段鱼类群落构建机制环境过滤作用较大^[44], 多以产漂流性卵的

小型鱼类为主。彭春兰等^[45]的研究表明, 大坝蓄水后宜昌江段水的流速和水体状况及生态环境的变化不利于喜激流性鱼类的生存, 更有利于一些喜静水的杂食性底层鱼类的生存, 如铜鱼、银鲴等小型鱼类。湖口江段连通长江与鄱阳湖, 是鄱阳湖与长江下游进行生态联系的首要江段, 其水域生境复杂, 为多种江湖洄游性和江海洄游性鱼类提供了关键洄游通道^[46]。洄游性和半洄游性长颌鲚、短颌鲚为优势种。受三峡大坝和葛洲坝联合调度, 以及水环境污染、过度捕捞等人为因素的影响, 导致湖口江段大型经济鱼类减少, 耐污性鱼类的数量有所增加。研究表明三峡工程建设使长江四大家鱼产卵期水文条件发生改变, 四大家鱼鱼苗量大大减少, 导致进入鄱阳湖育肥的四大家鱼数量减少^[47]。王生等^[48]研究表明, 湖口江段渔业水环境污染严重, 对水质敏感的大型经济鱼类往往会迁离受污染的水体, 而耐污性的湖泊定居性鱼类种群数量有所增加。石首、嘉鱼和武汉江段的鱼类群落相对稳定 ($W>0$), 表明鱼类群落中的优势种以大个体的种类为主。石首和嘉鱼江段分别为长江天鹅洲白鱓豚国家级自然保护区和长江新螺段白鱓豚国家级自然保护区, 率先在2018年实行了全江段禁捕, 受人类活动影响小, 鱼类群落结构相对稳定。郑亦婷等^[49]对长江武汉段鱼类群落结构的研究表明, 武汉江段鱼类群落中的优势种以大个体的种类为主, 鱼类群落维持在相对稳定的水平, 鱼类规格有增大的趋势, 与本研究结果类似。

Cluster分析和NMDS分析结果表明, 在42.15%的相似性水平上, 长江中游鱼类群落可划分为3组, 其中石首、嘉鱼和武汉江段的鱼类群落高度相似(最小的相似性水平高达58.93%)。有研究表明, 鱼类群落结构与生境的异质性密切相关, 在相似的生境中鱼类群落组成也非常相似^[50]。石首、嘉鱼和武汉江段地势平坦, 水流平缓, 河势基本稳定, 冲淤变幅小, 沿岸有发育良好的浅滩, 瓦氏黄颡鱼、银鲴、鳊等小型鱼类的数量占比较高。宜昌江段和湖口江段由于受特殊的水文条件和人为因素的影响, 鱼类群落构成与其他江段差异较大, 各自为一组。

本研究表明, 长江中游鱼类多样性呈现出越远离大坝多样性越高的趋势, 由于不同江段生境异质性的差异, 导致各江段鱼类群落在结构组成上存在一定的差异。总体上长江中游鱼类群落的优势种群主要以小型鱼类为主。

3.3 鱼类群落结构与环境因子的关系

鱼类群落结构的时空变化主要是由于环境因子在空间和时间尺度上的异质性引起的, 影响群落结构的主要因子包括自然环境因子、土地利用因子和水环境质量因子等^[51]。本研究表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响长江中游鱼类分布的主要的水环境因子之一, 底质类型是影响鱼类分布的主要栖息地因子。水体中TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 过高是导致水体富营养化的重要因素, 当水体中富营养化程度较高时, 大型鱼类逐渐减少, 低值小型鱼类比例不断增加^[52]。本研究结果显示, 长江中游鱼类组成以鲤形目为主, 鱼类群落的优势种为小型鱼类, 在某种程度上可能与水体中的总氮和总磷超标有关, 杨海乐等^[53]研究发现, 总氮和总磷为长江流域水体主要的超标污染物。RDA分析结果显示, 黄尾鲴、赤眼鳟、银鲴等鱼类的丰度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度呈正相关, 这些物种多为植食性或杂食性鱼类, TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是水生植物生长必须的营养元素, 鱼类食谱与水生植物的分布存在一定的关系。例如在宜昌、石首和武汉江段沿岸有发育良好的浅滩, 水流较缓, 水生植物丰富, 饵料充足, 是鱼类优越的栖息地与索饵场。银鲴、鳊等植食性鱼类的数量占比较大。Maes等^[54]研究发现, 鱼类倾向于沿岸带水生植物丰富的水域, 主要因为沿岸带水生植物光合作用导致溶解氧含量高于敞水区, 较高的溶解氧和复杂的沿岸带生境不仅能为鱼类提供躲避场所, 还能增加鱼类饵料生物的丰度。底质类型对于鱼类产卵和繁殖具有重要作用, 是影响鱼类群落结构的重要环境因子^[55], RDA分析结果显示, 粗唇鲃、圆尾拟鲮、光泽黄颡鱼与底质类型呈正相关, 这些物种多为底栖产黏性卵的鱼类, 产卵场要求水位浅、底质硬、水流较缓、透明度高, 受精卵黏附于砾石或岩石上受精发育。湖口江段河岸带多为砾石底质, 水流较缓, 为鲮科鱼类提供了优良的产卵场。宜昌江段葛洲坝下约80 km的近坝江段河床底质的主要组成类型为卵石, 而近坝江段则以大型卵石为主。卵石底质为中华鲟受精卵提供了优良的散布和孵化场所, 可以有效地减少食卵鱼的吞噬、推移质运动所带来的机械伤害^[56]。研究发现, 葛洲坝近坝约4 km的江段是中华鲟唯一已知的稳定产卵场^[57]。

本研究结果表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和底质类型是影响长江中游鱼类分布的主要环境因子, 黄尾鲴、赤眼鳟、银鲴等植食性鱼类的分布与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈

正相关, 分析可能与鱼类的食谱和水生植物的分布存在一定的关系。粗唇鲢、圆尾拟鲮、光泽黄颡鱼与底质类型呈正相关, 这些多为产黏性卵的鱼类, 受精卵需要黏附于砾石或岩石上受精发育, 产卵场多位于底质硬, 水流较缓的水域。

感谢中国水产科学研究院长江水产研究所濒危鱼类保护课题组许兰馨、杨俊林、方康、周芷芸、盖帅帅、周向峰、朱传亚、董芳、万朝阳等在采样过程中提供的帮助。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 何勇凤, 李昊成, 王旭歌, 等. 长湖鱼类群落结构的时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 265-273. He Y F, Li H C, Wang X G, *et al.* Spatial-temporal variation of fish community structure in lake Changhu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 265-273 (in Chinese).
- [2] Heino J, Soininen J, Alahuhta J, *et al.* A comparative analysis of metacommunity types in the freshwater realm[J]. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(7): 1525-1537.
- [3] 李丽娟. 太子河河岸带土地利用类型对水生生物群落结构的影响 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2017. Li L J. Relationship between land use types within riparian zones and community structure of aquatic organism in Taizi River, China[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [4] 殷旭旺, 金文, 王博涵, 等. 太子河流域鱼类组成及其与环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 2017, 30(2): 42-45. Yin X W, Jin W, Wang B H, *et al.* The species composition of fishes and relationship with environmental factors in Taizi River Basin[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2017, 30(2): 42-45 (in Chinese).
- [5] 王银平, 匡箴, 蔺丹清, 等. 长江安庆新洲水域鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2417-2426. Wang Y P, Kuang Z, Lin D Q, *et al.* Community structure and species diversity of fish around the Xinzhou shoal in the Anqing section of the Yangtze River, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2417-2426 (in Chinese).
- [6] Suárez Y R, Petrere Jr M, Catella A C. Factors determining the structure of fish communities in Pantanal lagoons (MS, Brazil)[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2001, 8(2): 173-186.
- [7] 朱书礼, 陈蔚涛, 李新辉, 等. 柳江鱼类群落结构及多样性研究[J]. 水生生物学报, 2022, 46(3): 375-384. Zhu S L, Chen W T, Li X H, *et al.* Pattern of fish assemblage structure and diversity in Liujiang River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(3): 375-384 (in Chinese).
- [8] 雷娟, 梁阳阳, 隋晓云, 等. 长江上游支流老河沟鱼类群落结构的时空格局[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1126-1132. Lei J, Liang Y Y, Sui X Y, *et al.* Structure and spatial-temporal pattern of fish assemblage in the Laohegou stream, Sichuan Province, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1126-1132 (in Chinese).
- [9] Wang L Z, Lyons J, Kanehl P. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales[J]. *Environmental Management*, 2001, 28(2): 255-266.
- [10] 丁森, 张远, 渠晓东, 等. 影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2272-2280. Ding S, Zhang Y, Qu X D, *et al.* Influence on the spatial distribution of fish in Taizi River Basin by environmental factors at multiple scales[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2272-2280 (in Chinese).
- [11] 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. 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 (in Chinese).
- [12] 刘明典, 高雷, 田辉伍, 等. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状[J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 147-158. Liu M D, Gao L, Tian H W, *et al.* Status of fishes at the early life history stage in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(1): 147-158 (in Chinese).
- [13] 巴家文, 邓华堂, 段辛斌, 等. 应用稳定性同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)技术研究长江中游干流主要鱼类的营养级[J]. 动物学杂志, 2015, 50(4): 537-546. Ba J W, Deng H T, Duan X B, *et al.* Trophic level ana-

- lysis on main fish species in the middle reaches of Yangtze River by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis[J]. Chinese Journal of Zoology, 2015, 50(4): 537-546 (in Chinese).
- [14] 孙铭帅. 长江中游城陵矶至宜昌江段鱼群密度分布特征研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- Sun M S. Studies on the density distribution of fishes in the section from Chenglingji to Yichang of the Yangtze River middle reaches[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese).
- [15] 于晓东, 罗天宏, 周红章. 长江流域鱼类物种多样性大尺度格局研究[J]. 生物多样性, 2005, 13(6): 473-495.
- Yu X D, Luo T H, Zhou H Z. Large-scale patterns in species diversity of fishes in the Yangtze River Basin[J]. Biodiversity Science, 2005, 13(6): 473-495 (in Chinese).
- [16] 陈大庆, 段辛斌, 刘绍平, 等. 长江渔业资源变动和管理对策[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 685-690.
- Chen D Q, Duan X B, Liu S P, *et al.* On the dynamics of fishery resources of the Yangtze River and its management[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(6): 685-690 (in Chinese).
- [17] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策 [J]. 长江流域资源与环境, 1992, 1(1): 17-23.
- Liu J K, Cao W X. Fish resources of the Yangtze River Basin and the tactics for their conservation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1992, 1(1): 17-23 (in Chinese).
- [18] 常涛, 段中华, 黎明政. 三峡水库蓄水后长江中游宜昌江段鱼类早期资源群聚动态[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(1): 137-146.
- Chang T, Duan Z H, Li M Z. Dynamic of fish eggs assemblage in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(1): 137-146 (in Chinese).
- [19] 刘心愿, 渠庚, 姚仕明, 等. 三峡工程运用后石首弯道段整治工程累积影响和演变趋势研究[J]. 水利水电快报, 2020, 41(1): 22-27.
- Liu X Y, Qu G, Yao S M, *et al.* Study on cumulative influence of regulation projects on Shishou reach since impoundment of Three Gorges Reservoir and its evolution trend[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2020, 41(1): 22-27 (in Chinese).
- [20] 张新华, 邓晴, 文萌, 等. 弯曲分汉浅滩潜坝对洄游鱼类栖息地的影响研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 18-28.
- Zhang X H, Deng Q, Wen M, *et al.* Impact of submerged spur Dike on migrating fish habitat in bending branched shoal[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 18-28 (in Chinese).
- [21] Li M Z, Duan Z H, Gao X, *et al.* Impact of the Three Gorges Dam on reproduction of four major Chinese carps species in the middle reaches of the Changjiang River[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(5): 885-893.
- [22] 崔奕波, 李钟杰. 长江流域湖泊的渔业资源与环境保护 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Cui Y B, Li Z J. Fishery resources and conservation of environment in lakes of the Changjiang River basin[M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese).
- [23] 丁瑞华. 四川鱼类志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- Ding R H. The fishes of Sichuan, China[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology Press, 1994 (in Chinese).
- [24] 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.
- Chen Y Y. Fauna Sinica (Osteichthyes): Cypriniformes II [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).
- [25] 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 [M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).
- [26] Gao X, Zhang Y, Ding S, *et al.* Response of fish communities to environmental changes in an agriculturally dominated watershed (Liao River Basin) in northeastern China[J]. Ecological Engineering, 2015, 76: 130-141.
- [27] 高少波, 池仕运, 李嗣新, 等. 楠溪江鱼类资源调查及物种多样性分析[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(6): 72-81.
- Gao S B, Chi S Y, Li S X, *et al.* Fish resource investigation and species diversity analysis of Nanxi River in Zhejiang Province[J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(6): 72-81 (in Chinese).
- [28] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[R]. Sacramento: State of California the Resources

- Agency Department of Fish and Game Fish, 1971: 1-105.
- [29] 沈红保, 李瑞娇, 吕彬彬, 等. 渭河陕西段鱼类群落结构组成及变化研究[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1311-1320.
- Shen B H, Li R J, Lv B B, *et al.* Characteristics of fish community structure in the Weihe River of Shaanxi section[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(6): 1311-1320 (in Chinese).
- [30] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [31] Stojković Piperac M, Milošević D, Simić V. The application of the abundance/biomass comparison method on riverine fish assemblages: limits of use in lotic systems[J]. *Biologica Nyssana*, 2015, 6(1): 25-32.
- [32] 樊紫薇, 蒋日进, 张洪亮, 等. 岱衢洋产卵场鱼卵、仔稚鱼群落结构及其与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2020, 44(4): 606-620.
- Fan Z W, Jiang R J, Zhang H L, *et al.* Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in Daiquyang spawning ground[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(4): 606-620 (in Chinese).
- [33] 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).
- [34] 杨婷越, 俞丹, 高欣, 等. 长江中游干流鱼类群落构建机制分析[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(5): 1045-1054.
- Yang T Y, Yu D, Gao X, *et al.* Mechanism of fish community assembly in middle reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 1045-1054 (in Chinese).
- [35] 湖北省水生生物研究所鱼类研究室. 长江鱼类[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- IHB. Fishes of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 1976 (in Chinese).
- [36] 长江水系渔业资源调查协作组. 长江水系渔业资源[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- Cooperation group on fishery resources investigation of the Yangtze River water system. Fishery resources of the Yangtze River system[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990 (in Chinese).
- [37] 刘绍平, 段辛斌, 陈大庆, 等. 长江中游渔业资源现状研究[J]. *水生生物学报*, 2005, 29(6): 708-711.
- Liu S P, Duan X B, Chen D Q, *et al.* Studies on status of fishery resources in the middle reach of the Yangtze River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(6): 708-711 (in Chinese).
- [38] 茹辉军, 刘学勤, 黄向荣, 等. 大型通江湖泊洞庭湖的鱼类物种多样性及其时空变化[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 93-99.
- Ru H J, Liu X Q, Huang X R, *et al.* Diversity of fish species and its spatio-temporal variations in Lake Dongting, a large Yangtze-connected lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1): 93-99 (in Chinese).
- [39] 曹文宣. 长江鱼类资源的现状与保护对策[J]. *江西水产科技*, 2011(2): 1-4.
- Cao W X. Status and conservation of fish resources in the Yangtze River[J]. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2011(2): 1-4 (in Chinese).
- [40] 巴家文, 陈大庆. 三峡库区的入侵鱼类及库区蓄水对外来鱼类入侵的影响初探[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 185-189.
- Ba J W, Chen D Q. Invasive fishes in Three Gorges Reservoir area and preliminary study on effects of fish invasion owing to impoundment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 185-189 (in Chinese).
- [41] 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.
- [42] Amoros C, Bornette G. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4): 761-776.
- [43] 赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 等. 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状[J]. *生物多样性*, 2021, 29(3): 361-372.
- Zhao Y, Niu C W, Li X J, *et al.* Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(3): 361-372 (in Chinese).
- [44] 张晨. 长江流域典型生境鱼类群落结构变化特征及构建机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- Zhang C. Characteristics and assembly mechanisms of fish community in typical habitat types in the Yangtze

- River Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 (in Chinese).
- [45] 彭春兰, 陈文重, 叶德旭, 等. 长江宜昌段鱼类资源现状及群落结构分析 [J]. 水利水电快报, 2019, 40(2): 79-83.
- Peng C L, Chen W Z, Ye D X, *et al.* Status and community structure of fish resources in Yichang section of Yangtze River[J]. Express Water Resources & Hydro-power Information[J]. 2019, 40(2): 79-83 (in Chinese).
- [46] 刘熠, 杨习文, 任鹏, 等. 长江湖口段春夏季仔稚鱼群落结构研究[J]. 水生生物学报, 2019, 43(1): 142-154.
- Liu Y, Yang X W, Ren P, *et al.* Community characteristics of larvae and juvenile fish in Hukou Section of the Yangtze River in spring and summer[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(1): 142-154 (in Chinese).
- [47] 陈文静, 张燕萍, 赵春来, 等. 近年长江湖口江段鱼类群落组成及多样性[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 684-691.
- Chen W J, Zhang Y P, Zhao C L, *et al.* Species composition and biodiversity of fish community in Hukou section of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(6): 684-691 (in Chinese).
- [48] 王生, 段辛斌, 陈文静, 等. 鄱阳湖湖口鱼类资源现状调查[J]. 淡水渔业, 2016, 46(6): 50-55.
- Wang S, Duan X B, Chen W J, *et al.* Status and changes of fish resources in the Hukou area of Poyang Lake[J]. Freshwater Fisheries, 2016, 46(6): 50-55 (in Chinese).
- [49] 郑亦婷, 韩鹏, 倪晋仁, 等. 长江武汉江段鱼类群落结构及其多样性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(1): 24-35.
- Zheng Y T, Han P, Ni J R, *et al.* Studies on structure of fish community and species diversity in Wuhan Section of the Yangtze River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(1): 24-35 (in Chinese).
- [50] 李捷, 李新辉, 贾晓平, 等. 连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5795-5805.
- Li J, Li X H, Jia X P, *et al.* Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5795-5805 (in Chinese).
- [51] 刘伟, 张远, 高欣, 等. 浑河流域鱼类群落特征及其与环境因子的关系[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(3): 266-274.
- Liu W, Zhang Y, Gao X, *et al.* Fish community structure and its relationship with environmental variables in Hun River Basin of Liaoning Province[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(3): 266-274 (in Chinese).
- [52] Tammi J, Lappalainen A, Mannio J, *et al.* Effects of eutrophication on fish and fisheries in Finnish lakes: a survey based on random sampling[J]. Fisheries Management and Ecology, 1999, 6(3): 173-186.
- [53] 杨海乐, 沈丽, 何勇凤, 等. 长江水生生物资源与环境本底状况调查 (2017—2021)[J/OL]. 水产学报, 2022: 1-28. (2022-10-10). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhT-DCdPD67GiICSQCPb615o3KkYI5iMwtYmDuxNCR-SuOEQKtp8L6ajnSHarUk_g&uniplatform=NZKPT.
- Yang H L, Shen L, He Y F, *et al.* Status of aquatic organisms resources and their environments in Yangtze river system (2017—2021)[J]. Journal of Fisheries of China, 2022: 1-28. (2022-10-10). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD67GiICSQCPb615o3KkYI5iMwtYmDuxNCR-SuOEQKtp8L6ajnSHarUk_g&uniplatform=NZKPT (in Chinese).
- [54] Maes J, Stevens M, Breine J. Modelling the migration opportunities of diadromous fish species along a gradient of dissolved oxygen concentration in a European tidal watershed[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 75(1-2): 151-162.
- [55] Bhat A. Patterns in the distribution of freshwater fishes in rivers of Central Western Ghats, India and their associations with environmental gradients[J]. Hydrobiologia, 2004, 529(1): 83-97.
- [56] 危起伟. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估 [D]. 北京: 中国科学院大学水生生物研究所, 2003.
- Wei Q W. Reproductive behavioral ecology of Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*) with its stock assessment[D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese).
- [57] 危起伟. 从中华鲟(*Acipenser sinensis*)生活史剖析其物种保护: 困境与突围[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1297-1319.
- Wei Q W. Conservation of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) based on its life history: dilemma and breakthrough[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1297-1319 (in Chinese).

Fish community structure and diversity in the middle reaches of the Yangtze River

FANG Dongdong^{1,2}, YANG Haile², ZHANG Hui², WU Jinming², WEI Qiwei^{1,2,3*}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214000, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

3. Wuhan Yangtze River *Acipenser sinensis* Protection Center, Wuhan 430223, China)

Abstract: To understand the relationship between fish community structure and diversity and environmental factors in the middle reaches of the Yangtze River, fish and environmental surveys were conducted in five sections of the middle reaches of the Yangtze River (Yichang, Shishou, Jiayu, Wuhan and Hukou) in June and November 2021. Using these data, fish community structural characteristics, the spatial and temporal distribution pattern and its relationship with environmental factors were analyzed. A total of 16 335 individuals belonging to 76 species, 50 genera, 13 families, and 6 orders were collected, among which, Cyprinidae was the most abundant with 52 species, accounting for 70%. Among the three living habits, the number of resident fish species was the largest (80%). Among the three feeding types, the number of carnivorous fish species was the largest (46%). Among the three spawning types, sticky-egg fish had the largest number of species (50%). According to index of relative importance (IRI), the dominant fish species were small fishes, such as *Pelteobagrus vachelli*, *Xenocypris argentea*, *Megalobrama terminalis*, *Coreius heterodon*. The average Margalef richness index was 5.11, the average Pielou evenness index was 0.63, the average Shannon-Wiener diversity index was 3.23, and the average Simpson dominance index was 0.26. The abundance/biomass comparison curve showed that the fish communities in Yichang and Hukou were seriously disturbed, and those in Shishou, Jiayu, and Wuhan were relatively stable. The results of Cluster analysis and non-metric multidimensional scale ranking (NMDS) analysis showed that the fish communities in the middle reaches of the Yangtze River could be divided into three groups, and Yichang belonged to one group. Shishou, Jiayu and Wuhan belonged to one group, and Hukou belonged to one group. Redundancy analysis (RDA) was used to analyze the relationship between fish community and environmental factors. It was found that ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and bottom type were the main factors affecting the differences in fish community structure in the middle reaches of the Yangtze River. The results showed that compared with the historical data, the fish community structure in the middle reaches of the Yangtze River has changed significantly, the proportion of economic fish has decreased, and the fish individuals have become smaller and younger. These changes were caused by the joint effect of long-term human activities and natural environmental changes.

Key words: fish community structure; diversity; redundancy analysis; environmental factors; the middle reaches of the Yangtze River

Corresponding author: WEI Qiwei. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

Funding projects: Specific Financial Fund of Ministry of Agriculture, “Investigation of Fishery Resources and Environment in the Yangtze River (2017–2021)”；Central Public Interest Scientific Institution Basal Research Fund, Chinese Academy of Fishery Sciences (YFI202201)