

doi: 10.7541/2024.2023.0173

禁渔初期长江宜昌-城陵矶江段鱼类资源时空分布特征

史银魁^{1,2} 俞立雄¹ 周雪¹ 高雷¹ 朱峰跃¹ 杨锦毅^{1,2}
陈大庆¹ 王珂^{1*} 段辛斌^{1*}

(1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站/农业农村部长江中上游渔业资源环境科学观测实验站, 武汉 430223; 2. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 研究于2022年7月(丰水期)和2023年1月(枯水期)使用SIMARD EY60回声探测仪对长江中游宜昌-城陵矶江段的鱼类资源进行了调查, 并结合网捕调查结果, 评估了长江十年禁渔初期该江段鱼类资源的时空分布特征。结果显示, 禁渔初期宜昌-城陵矶江段丰水期和枯水期的鱼类密度分别为128.69和38.43 ind./1000 m³, 目标强度(TS)均值分别为-57.54 和-60.18 dB, 转换后鱼类体长均值为5.22和3.85 cm。丰水期和枯水期鱼类密度和TS值均存在显著性差异。在水平方向上, 鱼类分布不均匀, 蜿蜒曲折处鱼类密度高于平直江段。两次调查鱼类密度最大江段分别为公安-石首和枝江-荆江江段; 在垂直方向上, 不同水层间鱼类平均密度表现为底层>中层>表层, 两时期各水层之间鱼类密度均存在极显著性差异。结合网捕数据及历年历史调查数据, 宜昌至城陵矶江段鱼类资源以鲤科、鲢科鱼类为主。禁渔初期鱼类资源有所恢复, 但仍以小个体鱼类为主。长江中游鱼类资源的时空分布与生活习性、水域生态环境等因素相关。相关成果将为后续进一步开展禁渔效果评估提供数据支撑。

关键词: 长江中游; 水声学; 鱼类资源; 时空分布; 禁渔初期

中图分类号: S932.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2024)04-0546-12



长江是我国最重要的淡水渔业资源产区^[1-3], 长江中游从湖北省宜昌市至江西省湖口县, 河道曲折, 水流缓滞, 湖泊河网广布, 并连通有长江故道, 良好的水文和饵料条件为鱼类等水生生物提供了优良的繁育场所, 鱼类资源丰富^[4], 历史上宜昌-城陵矶江段内分布有11个漂流性卵产卵场, 是四大家鱼等经济鱼类的主要繁殖栖息场所^[5]。而近几十年来, 伴随着长江经济带的蓬勃发展, 人类高强度活动下暴露出的水生生物多样性指数持续下降, 珍稀鱼类濒危程度加剧, 捕捞量持续降低, 鱼类资源小型化等资源衰退问题日益突显^[1, 6-9]。为扭转这一

困境, 长江流域于2020年1月1日起实施为期十年的全面禁渔, 以期恢复长江水系水生生物资源, 遏止鱼类资源衰减, 提高水生生物多样性。

科学有效的渔业资源评估对渔业资源管理和政策措施的适应性调整具有指导意义^[10]。传统渔业资源评估方法中的网具捕捞存在鱼类种类、大小的选择差异, 采样覆盖面局限, 获取鱼类资源信息的效率低等问题; 而水声学方法具备实时高效、调查覆盖广、对鱼类资源无差别探测、无损伤等优势, 目前已被广泛应用于海洋、湖泊水库、内陆江河的渔业资源监测评估中^[11-16]。孙铭师等^[17]以

收稿日期: 2023-05-30; **修订日期:** 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金(U2240214); 国家重点研发计划(2022YFC3202001); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD09)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China-Ministry of Water Resources of the People's Republic of China - China Three Gorges Corporation limited Yangtze River Water Science Research Joint Fund Project (U2240214); National Key Research and Development Plan Project (2022YFC3202001); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD09)]

作者简介: 史银魁(1997—), 男, 硕士研究生; 研究方向为渔业资源。E-mail: ykshiaurora@163.com

通信作者: 王珂, 女, 副研究员; 主要从事鱼类资源研究。E-mail: wangke@yfi.ac.cn 段辛斌, 男, 研究员; 主要从事鱼类资源研究。E-mail: duan@yfi.ac.cn *共同通信作者

水声学方法研究了长江中游非底部鱼类的分布特征,指出产卵场分布、鱼类洄游、增殖放流都是造成不同江段鱼类水平密度差异的原因;季节性的泄洪、生态调度与自然界鱼类产卵时期一致,造成在季节时期尺度上鱼类密度存在显著性差异。为了解洪湖至宜昌江段鱼类时空分布变化,段辛斌等^[18]采用水声学方法调查结果显示不同季节鱼类TS存在极显著差异,鱼类资源水平分布不均,垂直方向上鱼类密度均表现为表层最大。禁渔以来关于长江中游鱼类资源分布特征的研究较少,为了解禁渔后长江中游渔业资源的空间分布特征和密度情况,于2022年7月(丰水期)和2023年1月(枯水期)依托水声学方法,同时对长江中游宜昌至城陵矶江段辅以鱼类资源调查,分析禁渔后不同时期鱼类资源的变化特征,旨在为禁渔效果评估和长江中游渔业资源管理保护提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 调查时间和区域

本研究选择宜昌(111°20'21"E, 30°38'15"N)至城陵矶(112°59'53"E, 29°30'47"N),总航程近390 km的江段作为研究区域(图 1),分别于丰水期(2022年7月)、枯水期(2023年1月)对该区域进行了2次水声学调查。

1.2 水声学调查

本研究使用的水声学探测设备为SIMRAD公司生产的EY60分裂波束回声探测器,携带分裂波束式换能器(ES700-7C),工作频率为200 kHz,半功率角(3 dB Beam width)为7°,调查时换能器发射功率为150 W,脉冲宽度(Pulse duration)为64μs。调查

船总长28.5 m,宽5.38 m,发动机功率44 kw,根据风浪情况航速在6—15 km/h内调整;鉴于航道管理要求,探测航线为平行于岸线的主航道,具体航行信息见表 1。探测时将换能器通过钢构件固定在船的左舷中部,并远离机舱,距船首约15 m,消减船舶自身噪声对回声探测效果的影响;换能器垂直置入距水面约0.5 m深的位置。GPS地理坐标信息通过Garmin60CSx型导航仪记载。参照Aglen^[19]覆盖率公式计算水声学调查的覆盖率:

$$D=L/\sqrt{S}$$

式中, L 为水声学调查航线航程(m), S 为探测水域水面面积(m^2), D 为水声学调查覆盖率。

计算得丰水期和枯水期的 D 值分别为14.22和13.82,均在6以上。为消除不同介质条件对换能器的影响,探测前已参照Duncan和Foote的操作方法使用直径13.7 mm的钨铜金属球对探测仪进行校准^[20,21]。为采集到更准确的水声学原始数据,选择风浪干扰较低的天气,于上午7时至下午6时期间进行连续探测。

1.3 鱼类资源调查

为了解调查江段的鱼类组成及群落结构,经湖北省农业农村厅批准后,在水声学调查的同期,于2022年7月和12月在宜昌-城陵矶江段设置3个采样断面(枝江、公安和监利)开展固定站点鱼类资源调查。使用三层流刺网(长200 m×宽2 m,内网网目规格分别为2a=1、3、5 cm各1张)与垂直于水流的方向置于河道中间,于下午放网,早上收网,单次放网时间约16h。鱼类资源调查按照淡水渔业资源调查

表 1 各江段水声学调查期间航行信息

Tab. 1 Navigation information during hydroacoustic survey in each river section

调查江段 Survey section	航程 Voyage (km)		平均水深 Average water depth (m)		平均航速 Mean speed (km/h)	
	丰水期 Wet season	枯水期 Dry season	丰水期 Wet season	枯水期 Dry season	丰水期 Wet season	枯水期 Dry season
A. 宜昌- 宜都	37.60	30.79	16.40	11.46	15.67	9.97
B. 宜都- 枝江	56.24	53.75	15.87	10.75	14.82	9.54
C. 枝江- 荆州	56.26	54.63	12.97	6.89	15.16	9.70
D. 荆州- 公安	35.11	36.25	14.54	9.79	9.00	10.03
E. 公安- 石首	52.40	50.78	15.29	9.06	9.95	10.19
F. 石首- 监利	68.92	72.58	19.72	11.45	15.39	9.97
G. 监利- 城陵矶	86.98	83.80	13.86	9.97	9.42	13.23
A—G. 宜 昌-城陵矶	393.52	382.57	15.54	9.90	12.00	10.46

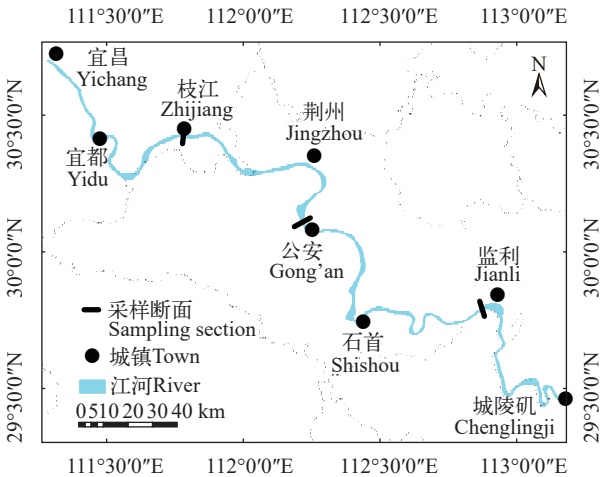


图 1 宜昌-城陵矶江段水声学调查示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydroacoustic survey in Yichang to Chenglingji reach

规范进行抽样统计^[22], 鱼类种类参照《中国淡水鱼类检索》^[23]《中国动物志-硬骨鱼纲鲤形目》^[24, 25]《湖北鱼类志》^[26]《四川鱼类志》^[27], 鉴定记录鱼类种类、尾数, 并测量体长、体重等数据。

1.4 数据处理及分析

水声学数据处理 使用 Sonar5_Pro分析软件 (Lindem Data Acquisition, Oslo, Norway) 对水声学数据进行转换和分析, 转换模式为时变增益 (Time-varied gain, TVG) $TVG = 40lgR$ 。对转换后的数据设置自动识别水底, 并人工校对, 对部分江段的河床进行手动画底以消除水底杂质造成的干扰。设置信号目标强度 (Target strength, TS, 单位: dB) 背景噪声阈值为 < -70 dB, 采用交叉过滤法 (Cross Filter Detector) 对图像进行处理, 消除噪声干扰以准确提取信噪比较低的信号, 手动去除明显的噪声信号。同时采用单回声检测与跟踪分析 (Single echo detection and tracking methods, STM) 和图像分析法分析回声映像。表层线设置为探头下 0.8 m, 消除 0.75 m 的探测盲区; 底层线设置为底部 0.2 m 以上, 消除河床底质的影响。将软件自动追踪判别的鱼类信号结果导出存储为 Excel 文件格式用于统计分析。软件参数设置如表 2 所示。

采用回声计数法^[28]计算鱼体密度, 计算公式参考淡水渔业资源调查规范^[22]。TS 和鱼体体长之间的换算采用 Foote^[21]提出的喉鳔鱼类 TS 值与鱼类体长的经验公式对鱼类体长进行估算:

$$TS = 20lgL - 71.9$$

式中, TS 为鱼类的目标强度 (dB); L 为目标鱼体的体长 (cm)。

鱼类群落结构分析 在分析鱼类空间分布特征时, 对不同江段、不同时期的鱼类目标强度进行非参数检验, 鱼类密度进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)。针对水平方向的鱼类密度分布特征, 将两次水声学调查数据划分为 2—3 km 的小单

元, 参照 Balk 和 Lindem^[29]的方法单独计算各单元的鱼类密度。再将各单元鱼类密度和坐标信息导入到 ArcGIS 10.8 (Environmental Systems Research Institute, USA) 软件, 采用反距离加权法 (Inverse Distance Weighting, IDW) 进行栅格插值运算, 绘制鱼类密度水平分布图。为探究鱼类在垂直方向上的分布规律, 在提取分析数据时先根据水深将水体 3 等分为表层、中层和底层, 分别计算各水层的鱼类密度和平均 TS, 计算各水层鱼类密度的变异系数, 依照孙儒泳等^[30]对种群的划分标准 ($s^2/m=0$, 均匀分布; $s^2/m=1$, 随机分布; $s^2/m>1$, 集群分布) 判别鱼类种群分布类型。通过 Pearson 相关性分析鱼类单体 TS 与水深的相关性。在分析渔获物重量百分比及其数量百分比的基础上, 采用相对重要性指数 (IRI) 计算鱼类优势度, 并将 $IRI \geq 500$ 的鱼类划分为优势种。

$$IRI = (P_N + P_W) \times F$$

式中, P_N 代表某种鱼类的数量百分比; P_W 代表某种鱼类的质量百分比; F 是某种鱼类在调查期间出现的频率。

运用 SPSS 26.0、Excel 2019、Origin 2022 软件对数据进行统计分析。2 次水声学数据的采集方法一致, 数据后处理分析方法相同。

2 结果

2.1 鱼类 TS 分布特征

水平分布 统计分析显示, 2 次水声学调查长江中游宜昌-城陵矶江段鱼类回声 TS 值均呈现非正态分布 (图 2), 丰水期和枯水期的 TS 值分别为 $-69.99 \sim -29.74$ dB (体长 L : 1.25—128.23 cm) 和 $-69.98 \sim -28.13$ dB (体长 L : 1.25—154.35 cm)。两次调查的 TS 值介于 $-70 \sim -46$ dB 的个体占比均超过 99%。TS 值介于 $-70 \sim -64$ dB (体长 L : 1.24—2.48 cm) 的个体占比为枯水期 (57.63%) 高于丰水期 (49.81%); 丰水期 $-64 \sim -43$ dB 的个体占比 (49.72%) 高于枯水期 (41.83%)。

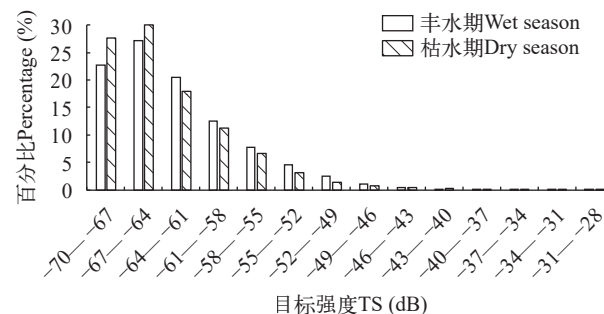


图 2 丰水期和枯水期鱼类 TS 分布

Fig. 2 Distribution of fish TS in wet season and dry season

表 2 Sonar5_Pro 主要参数设置

Tab. 2 Main parameters of Sonar5_Pro

Sonar5_Pro 参数 Parameter	参数设置 Parameter setting
前景滤波器Foreground filter	[1, 3]
背景滤波器Background filter	[1, 55]
目标平滑滤波Target smooth filter	[1, 3]
信号长度Signal length	[3, 50]
最大增益补偿Maximum Gain Compensation	6 dB
最小目标长度Minimum track length	2 ping
最大脉冲缺失Maximum ping gap	2 ping
门阀过滤范围Gating range	0.3 m

对整个调查江段两时期探测的鱼类目标强度进行单因素方差分析, 结果显示两时期调查到的鱼类目标强度之间差异极显著($F=1052.98$, $P<0.01$)。丰水期和枯水期的平均TS分别为 (-57.54 ± 6.4) 和 (-60.18 ± 5.49) dB, 相应体长分别为5.22 cm (2.49—10.94 cm)和3.85 cm (2.05—7.25 cm)。丰水期A江段的平均TS (-53.07 dB)最大, B江段平均TS (-58.63 dB)最小; 枯水期平均TS值D江段 (-57.65 dB)最大, C江段 (-64.39 dB)最小。利用非参数检验分析7个不同调查江段鱼类TS的差异性(表 3), 丰水期B与G、D与E、D与F、E与F江段之间不存在显著性差异($P>0.05$), 其余江段之间均存在极显著差异($P<0.01$); 枯水期A与C江段之间存在显著性差异($P<0.05$), D与G之间不存在显著性差异($P>0.05$), 其余江段之间均存在极显著差异($P<0.01$)。

垂直分布 在垂直水层分布上, 丰水期和枯水期的结果均显示TS值介于 -64 — -28 dB的个体占比底层>中层>表层(图 3)。对比分析整个宜昌-城陵矶江段不同水层的鱼类目标强度(表 4), 两个时期调查的结果均显示底层平均TS最大, 表层最小; 单体鱼的TS最大值同样都出现在水体底层。通过非参数检验分析, 结果显示, 除丰水期的水体表层与中层之间差异不显著($P>0.05$)之外, 其余各个水层之间的鱼类TS差异极显著($P<0.01$)。Pearson相关性分析表明, 丰水期鱼类TS大小与水深存在较强的正相关性($P<0.01$), 而枯水期TS与水深不存在相关性($P>0.05$)。

2.2 鱼类密度空间分布特征

水平分布及变化 两次调查中宜昌-城陵矶江段的鱼类密度均呈不均匀分布(图 4), 鱼类密度较高的区域多出现在河道蜿蜒曲折处, 且枯水期更加明显。丰水期和枯水期的鱼类平均密度分别为 (128.69 ± 171.93) 和 (38.43 ± 101.32) ind./1000 m³; 丰水期E江段的平均密度最大 $[(223.61\pm188.36)$ ind./1000 m³], B江段最小 $[(66.83\pm209.64)$ ind./1000 m³]; 枯水期C江段平均密度最大 $[(46.26\pm123.65)$ ind./1000 m³], B江段最小 $[(21.21\pm62.51)$ ind./1000 m³] (图 5)。丰水期和枯水期的分析单元中鱼类密度最大值分别出现在A江段(757.91 ind./1000 m³)和F江段(822.55 ind./1000 m³); 两时期的鱼类单元密度最小值均出现在B江段, 分别为0.154和0.031 ind./1000 m³。

单因素方差分析显示整个江段丰水期和枯水期的鱼类密度差异极显著($F=54.91$, $P<0.01$), 分析不同时期各江段鱼类平均密度之间的差异(图 6), 结果显示, 丰水期A与E、B与F、C与F、E与G江段

之间存在显著差异($P<0.05$), B与E、C与E江段枝江存在极显著性差异($P<0.01$), 其余江段之间差异不显著。枯水期各个江段之间均无显著差异($P>0.05$)。

垂直分布及变化 在垂直方向上, 丰水期C江段鱼类密度分布表现为底层>表层>中层, 其余各江段呈现为底层>中层>表层; 枯水期B江段鱼类密度分布特征为底层>表层>中层, 其余各江段同样呈现为底层>中层>表层(图 7)。丰水期和枯水期各水层之间鱼类密度均存在极显著性差异($F=64.51$, $df=680$, $P<0.01$; $F=8.17$, $df=746$, $P<0.01$)。各水层 t 检验分析结果显示, 丰水期3个水层两两之间均存在极其显著性差异($P<0.01$); 枯水期表层和中层之间差异不显著($P=0.10>0.05$), 表层和底层之间差异极显著($P<0.01$), 中层和底层之间差异显著($P=0.02<0.05$; 表 5)。在时间上, 丰水期和枯水期表层鱼类密度无显著的时期差异($F=0.27$, $P=0.60>0.05$), 而中层、底层鱼类密度存在极显著的时期差异($F=14.51$, $P<0.01$; $F=60.35$, $P<0.01$)。两时期各水层鱼类均呈明显的集群分布特征($s^2/m>1$)。

2.3 鱼类种类组成

丰水期(2022年7月)共采集到鱼类42种, 1647尾, 总重555.37 kg, 隶属于5目9科30属; 平均体长为31.40 cm, 体长分布在5.1—81.0 cm, 平均体重为337.40 g。栖息生态位在水体底层和中、下层的鱼类占大部分, 数量占比分别为45.14%和31.48%。鲤科鱼类多达28种, 数占比为52.13%, 平均体长为35.59 cm, 平均体重为480.59 g; 鲮科鱼类为7种, 数量占比为44.90%。优势鱼类为瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*) 37.73% (9.6—42.8 cm)、鳊(*Parabramis pekinensis*) 8.63% (14.6—56.2 cm)、银鲴(*Xenocypris argentea*) 11.85% (16.2—33.7 cm)、鲂(*Megalobrama skolkovii*) 7.41% (8.9—59.1 cm)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*) 2.79% (20.8—68.6 cm); 优势鱼类体长为8.9—68.6 cm, 平均为25.15 cm。

枯水期(2022年12月)共采集到鱼类40种, 1343尾; 总重441.14 kg; 隶属于5目7科29属; 平均体长为19.58 cm, 体长分布在6.8—80.0 cm, 平均体重为328.47 g。栖息在水体中、下层的鱼类占大部分, 数量占比为64.79%。枯水期同样为鲤科和鲮科鱼类最多, 分别为28种和6种, 数量占比分别为88.38%和8.34%, 其中鲤科鱼类平均体长为18.88 cm, 平均体重为340.47 g。优势鱼类主要为银鲴(*Xenocypris argentea*) 36.71% (10.5—12.7 cm)、鳊(*Parabramis pekinensis*) 14.15% (28.1—37.2 cm)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*) 1.34% (8.2—77.5 cm)、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*) 4.84% (12.3—38.8 cm)、

表 3 水平方向鱼类TS分布差异

Tab. 3 Difference distribution of fish TS in horizontal direction

江段区域 River section	丰水期Wet season			枯水期Dry season		
	均值Mean (dB)	范围Range (dB)	<i>P</i>	均值Mean (dB)	范围Range (dB)	<i>P</i>
A	-53.07±4.36	-69.93—-32.76	<0.01	-60.09±7.42	-69.92—-36.97	<0.01
B	-58.63±3.33	-69.94—-30.45		-61.31±5.61	-69.98—-28.13	
A	-53.07±4.36	-69.93—-32.76	<0.01	-60.09±7.42	-69.92—-36.97	<0.05
C	-58.33±4.59	-69.94—-30.6		-64.39±3.13	-69.92—-29.13	
A	-53.07±4.36	-69.93—-32.76	<0.01	-60.09±7.42	-69.92—-36.97	<0.01
D	-58.51±3.33	-69.99—-34.55		-57.65±8.04	-69.98—-28.24	
A	-53.07±4.36	-69.93—-32.76	<0.01	-60.09±7.42	-69.92—-36.97	<0.01
E	-57.97±1.86	-69.96—-29.74		-61.33±5.19	-69.94—-28.37	
A	-53.07±4.36	-69.93—-32.76	<0.01	-60.09±7.42	-69.92—-36.97	<0.01
F	-56.17±2.03	-69.99—-35.85		-59.93±3.15	-69.98—-28.57	
A	-53.07±4.36	-69.93—-32.76	<0.01	-60.09±7.42	-69.92—-36.97	<0.01
G	-57.58±3.26	-69.98—-30.02		-59.46±3.54	-69.97—-28.17	
B	-58.63±3.33	-69.94—-30.45	<0.01	-61.31±5.61	-69.98—-28.13	<0.01
C	-58.33±4.59	-69.94—-30.6		-64.39±3.13	-69.92—-29.13	
B	-58.63±3.33	-69.94—-30.45	<0.01	-61.31±5.61	-69.98—-28.13	<0.01
D	-58.51±3.33	-69.99—-34.55		-57.65±8.04	-69.98—-28.24	
B	-58.63±3.33	-69.94—-30.45	<0.01	-61.31±5.61	-69.98—-28.13	<0.01
E	-57.97±1.86	-69.96—-29.74		-61.33±5.19	-69.94—-28.37	
B	-58.63±3.33	-69.94—-30.45	<0.01	-61.31±5.61	-69.98—-28.13	<0.01
F	-56.17±2.03	-69.99—-35.85		-59.93±3.15	-69.98—-28.57	
B	-58.63±3.33	-69.94—-30.45	>0.05	-61.31±5.61	-69.98—-28.13	<0.01
G	-57.58±3.26	-69.98—-30.02		-59.46±3.54	-69.97—-28.17	
C	-58.33±4.59	-69.94—-30.6	<0.01	-64.39±3.13	-69.92—-29.13	<0.01
D	-58.51±3.33	-69.99—-34.55		-57.65±8.04	-69.98—-28.24	
C	-58.33±4.59	-69.94—-30.6	<0.01	-64.39±3.13	-69.92—-29.13	<0.01
E	-57.97±1.86	-69.96—-29.74		-61.33±5.19	-69.94—-28.37	
C	-58.33±4.59	-69.94—-30.6	<0.01	-64.39±3.13	-69.92—-29.13	<0.01
F	-56.17±2.03	-69.99—-35.85		-59.93±3.15	-69.98—-28.57	
C	-58.33±4.59	-69.94—-30.6	<0.01	-64.39±3.13	-69.92—-29.13	<0.01
G	-57.58±3.26	-69.98—-30.02		-59.46±3.54	-69.97—-28.17	
D	-58.51±3.33	-69.99—-34.55	>0.05	-57.65±8.04	-69.98—-28.24	<0.01
E	-57.97±1.86	-69.96—-29.74		-61.33±5.19	-69.94—-28.37	
D	-58.51±3.33	-69.99—-34.55	>0.05	-57.65±8.04	-69.98—-28.24	<0.01
F	-56.17±2.03	-69.99—-35.85		-59.93±3.15	-69.98—-28.57	
D	-58.51±3.33	-69.99—-34.55	<0.01	-57.65±8.04	-69.98—-28.24	>0.05
G	-57.58±3.26	-69.98—-30.02		-59.46±3.54	-69.97—-28.17	
E	-57.97±1.86	-69.96—-29.74	>0.05	-61.33±5.19	-69.94—-28.37	<0.01
F	-56.17±2.03	-69.99—-35.85		-59.93±3.15	-69.98—-28.57	
E	-57.97±1.86	-69.96—-29.74	<0.01	-61.33±5.19	-69.94—-28.37	<0.01
G	-57.58±3.26	-69.98—-30.02		-59.46±3.54	-69.97—-28.17	
F	-56.17±2.03	-69.99—-35.85	<0.01	-59.93±3.15	-69.98—-28.57	<0.01
G	-57.58±3.26	-69.98—-30.02		-59.46±3.54	-69.97—-28.17	

注: A. 宜昌-宜都; B. 宜都-枝江; C. 枝江-荆州; D. 荆州-公安; E. 公安-石首; F. 石首-监利; G. 监利-城陵矶

Note: A. Yichang to Yidu; B. Yidu to Zhijiang; C. Zhijiang to Jingzhou; D. Jingzhou to Gongan; E. Gongan to Shishou; F. Shishou to Jianli; G. Jianli to Chenglingji

鲴(*Megalobrama skolkovii*) 6.55% (8.2—47.9 cm); 优势鱼类体长为8.2—77.5 cm, 平均为19.16 cm。

3 讨论

3.1 不同时期分布变化

本研究显示, 宜昌-城陵矶江段丰水期和枯水期的鱼类水声学平均密度分别为128.69和38.43 ind./1000 m³, 平均TS值分别为-57.54和-60.18 dB, 表明丰水期鱼类的平均密度和个体大小均大于枯水期, 与宋聘等^[31]、李祥艳等^[32]的研究结果一致。其原

因在于丰水期处于三峡枢纽调度泄水集中的6—9月^[33], 江水涨落等因素的刺激会影响亲鱼排卵受精^[34], 同时4—7月为鱼类普遍繁殖产卵期^[35], 在此期间鱼类因繁殖集群行为, 鱼类资源密度进而上升。以四大家鱼为例, 历史上长江中游宜昌-城陵矶江段分布有四大家鱼产卵场11处^[5]。在水温回升、流量增大刺激下, 繁殖亲鱼由支流、通江湖泊洄游至干流产卵场聚集, 导致水体鱼类密度增加, 大个体数量也随之增加。而枯水期水位下降, 温度降低, 鱼类前往支流、通江湖泊等深水区越冬, 活

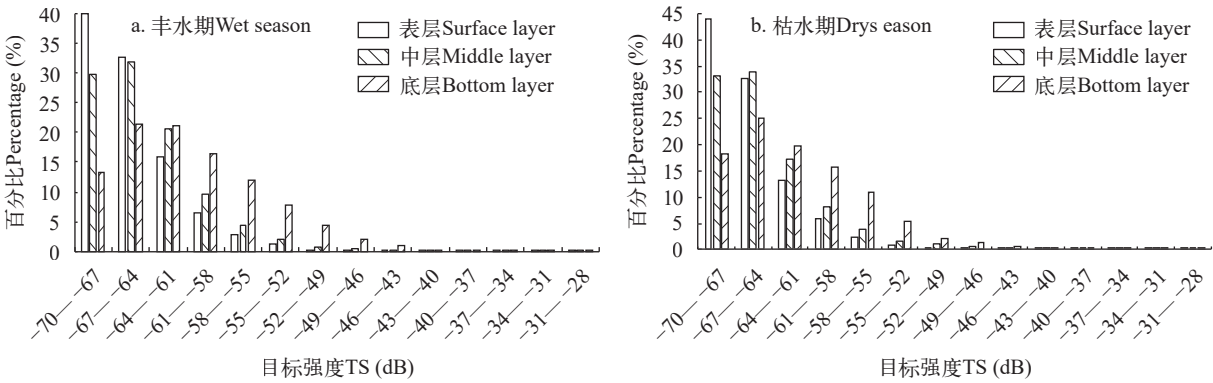


图3 垂直水层鱼类TS分布
Fig. 3 TS distribution of fish in vertical water layers

表4 宜昌-城陵矶江段垂直水层鱼类TS分布差异

Tab. 4 Difference in TS distribution of fish in vertical aquifers of the Yichang to Chenglingji River sections

水层 Water layer	丰水期 Wet season			枯水期 Dry season		
	均值 Mean (dB)	范围 Range (dB)	P	均值 Mean (dB)	范围 Range (dB)	P
表层Surface layer vs.	-62.51±2.94	-69.95—-43.57	>0.05	-63.42±4.17	-69.95—-28.73	<0.01
中层Middle layer	-60.66±3.37	-69.99—-35.15		-61.96±4.02	-69.98—-29.04	
表层Surface layer vs.	-62.51±2.94	-69.95—-43.57	<0.01	-63.42±4.17	-69.95—-28.73	<0.01
底层Bottom layer	-56.43±3.98	-69.99—-29.74		-59.18±5.59	-69.98—-28.13	
中层Middle layer vs.	-60.66±3.37	-69.99—-35.15	<0.01	-61.96±4.02	-69.98—-29.04	<0.01
底层Bottom layer	-56.43±3.98	-69.99—-29.74		-59.18±5.59	-69.98—-28.13	

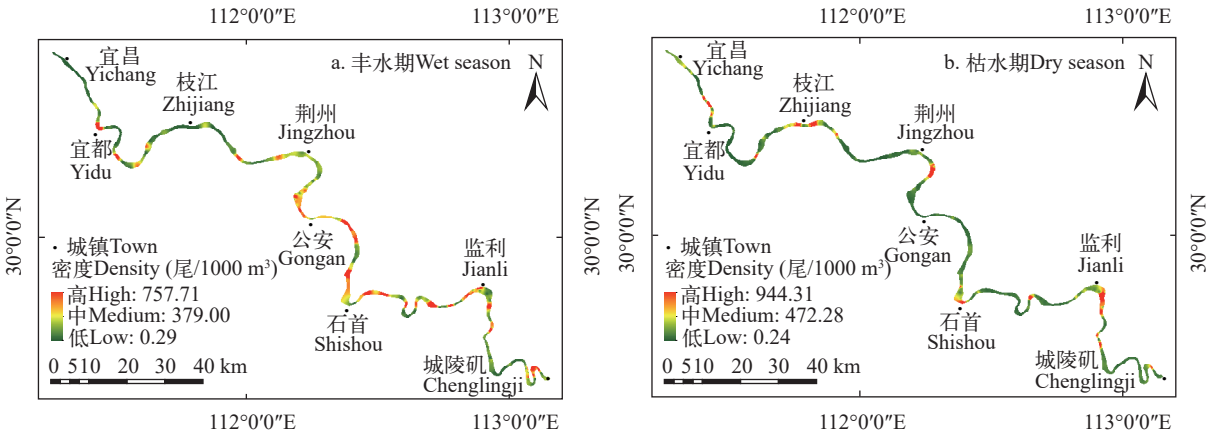


图4 鱼类密度水平分布
Fig. 4 Horizontal distribution of fish density

动减弱、密度降低, 鱼类被探测到的概率减小^[31]。其他研究也表明, 流域水文、水温、pH、溶氧、饵料生物量会随季节变化而增减, 从而影响鱼类栖息和迁移行为, 进而造成鱼类密度和TS在时间尺度上的差异^[16, 36–41]。

与禁捕前后研究江段的数据对比显示, 本研究较2020年丰水期(177.32 ind./1000 m³)和2021年枯水期(105.88 ind./1000 m³)的鱼类密度^[42]有所降低; 但高于长江禁渔之前2014—2015年的调查结果

(秋季4.63 ind./1000 m³、春季12.54 ind./1000 m³、37.09 ind./1000 m³)^[18]。有研究模拟显示在全面禁捕情势下鱼类资源将快速上升, 但不同区域资源恢复时间会存在差异^[43, 44], 因此长江鱼类资源的恢复程度需要长久监测来研判。长江流域增殖放流规模自2016年《农业部关于做好“十三五”水生生物增殖放流工作的指导意见》发布后不断扩大, 并取得了良好的生态效果^[1]。而2022年恰逢复合高温干旱事件的发生, 长江流域夏季降雨量较常年同期减少了32.5%, 为1961年以来历史同期最少^[45], 调查期间探测区域的平均水深低于禁渔前后的近年水位, 这可能造成鱼类活动区域改变, 部分江段鱼类密度降低^[46]。本研究中水声学调查缺乏春、秋季节数据, 网具采样位点不足, 缺乏连年数据, 后续应加强流域全面系统的调查, 结合多角度连年数据综合分析鱼类资源变化的动因来全面解释禁渔以来长江中游渔业资源变化状况^[47]。

3.2 空间分布差异

2次调查结果显示丰水期和枯水期鱼类平均密

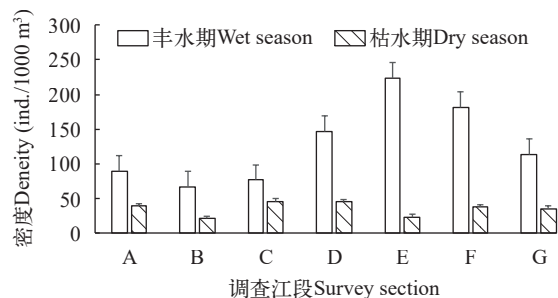


图5 水平方向鱼类平均密度对比

Fig. 5 Comparison of fish mean density in horizontal direction

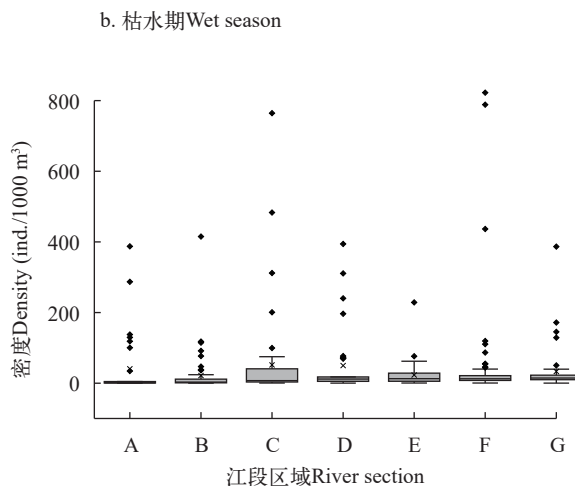
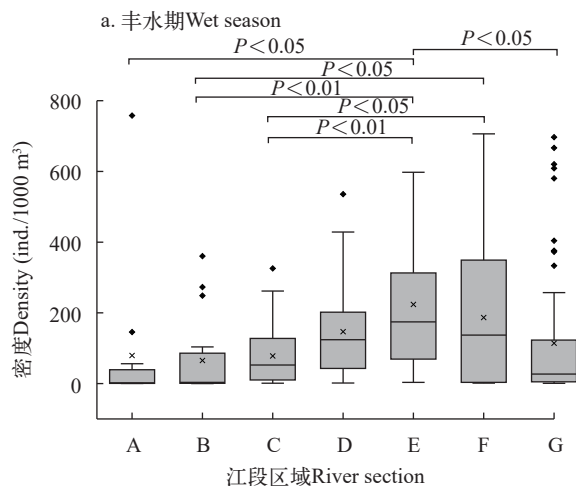


图6 各江段之间鱼类密度差异

Fig. 6 Difference of fish density among river sections in wet season

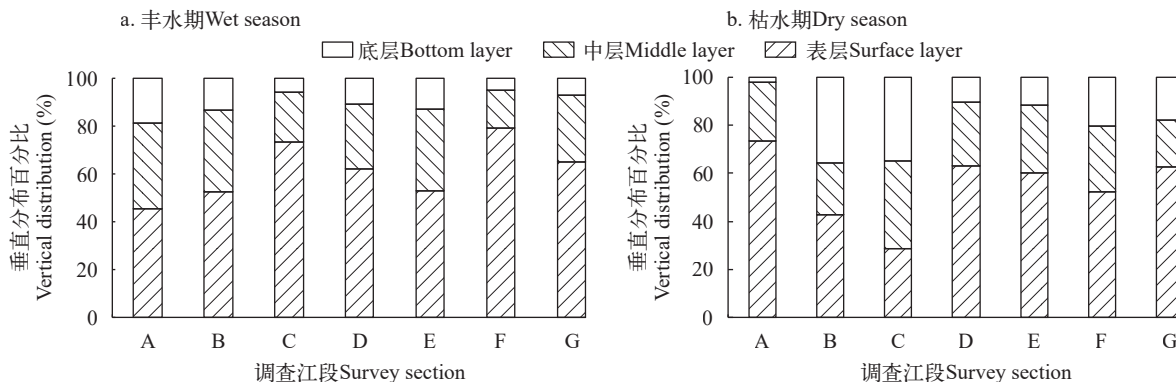


图7 鱼类垂直水层分布百分比

Fig. 7 Percentage of vertical water layer distribution of fish

度差异显著, 枯水期各江段鱼类密度差异不显著, 丰水期各江段之间鱼类密度普遍差异显著。丰水期公安-石首江段的鱼类平均密度值最高, 其次是石首-监利、荆州-公安、监利-城陵矶江段的平均密度较大; 且从密度分布图中可知河道蜿蜒曲折处的鱼类密度更高, 且枯水期现象更加明显, 这与三峡库区过渡带中的研究结果相似, 河道形态控制生境质量, 关联食物丰度, 蜿蜒的深水河道增加了生境异质性, 提高了鱼类的丰度^[48]。洞庭湖是长江中游的大型通江湖泊, 其接纳荆江三口分流及湘、资、沅、澧四方来水, 在城陵矶处汇流长江^[49], 以四大家鱼为代表的江湖洄游型鱼类有在湖泊中生长育肥, 在江河流水中繁殖的习性^[50]; 荆州-城陵矶江段位于通江湖泊洞庭湖的上游, 处于荆江首段的石首, 江段进、出口顺直, 中部分汉蜿蜒, 生境异质性强, 是水生生物良好的栖息地^[51], 适合鱼类洄游至此繁殖和仔稚鱼的索饵生长, 因此鱼类密度高于其他江段。

本研究中2次调查的鱼类密度均为底层>中层>表层, 这与胡飞等^[11]研究向家坝水库鱼类垂直密度分布格局一致, 并与任玉芹等^[37]在三峡库区澎溪河的不同季节鱼类垂直密度分布相似; 而区别于连玉喜等^[38]的研究中香溪河鱼类资源密度由表层至深层表现为降低的趋势; 本研究中网捕调查到中下层、底层鱼类占比最多, 与水声学结果一致。本研究中底层鱼类密度大于中上层的情况与2020年丰水期和2021年枯水期的调查结果不同^[42], 可能与本研究中两时期探测区域的水深均明显小于2020年7月和2021年12月有关。2022年水位远低于往年, 低水位时期的底层相对于高水位时期属于水体的中上层, 鱼类所适应的水层条件不变, 水位的降低可能导致鱼类趋向于向水体深层迁移。有研究表明在水体表层的仔鱼密度高于中层和底层^[52], 产卵高峰期后的7月, 大量仔稚鱼因索饵行为分布于水体中上层^[11], 与本研究结果的中上层小体长个体占

比更高相吻合。枯水期水温降低, 深水区环境可为鱼类越冬提供更多生存环境和容纳空间^[39]; 同时, 在枯水期水位降低的情况下, 调查船的扰动及航运对鱼类的影响更大, 鱼类躲避行为驱使下将更倾向于游向深水区^[53], 在扰动误差影响下探测到的鱼类多分布于底层。鱼类垂直分布情况与鱼类行为习性、水环境指标、饵料食物丰富度等均存在密切联系^[36, 40, 41], 需要进一步掌握生境、水文、饵料信息, 才能对不同水域鱼类垂直分布差异做出论证。

3.3 水声学探测效果及展望

丰水期和枯水期大于-46 dB的信号占比均不到目标总数的1%, 表明以小个体鱼类分布为主, 丰水期与枯水期TS值换算所得鱼类最大体长分别为128.23和154.35 cm, 远超网具方法捕获到的鱼类体长大小, 此类信号是否为大型鱼类信号需要严格的验证, 但少量的此类信号对鱼类整体TS和密度分析结果影响极小。丰水期和枯水期网具调查的鱼类体长为5.1—81.0和6.8—80.0 cm, 平均体长为31.4和19.6 cm; 丰水期和枯水期水声学换算的鱼类平均体长为5.22和3.85 cm, 低于网具调查结果。在鱼类资源调查中网具捕获鱼类具有被动性, 倾向于捕获大体长鱼类个体, 得到的数据无法全面代表鱼类资源真实现状。本研究中鱼类资源网具调查结果显示以鲤科和鲮科为主。水声学无差别探测到的鱼类更为丰富, 且小个体鱼类信息获取更多, 这是造成本研究中水声学换算平均体长小于网具调查的原因之一。在丰水期和枯水期鱼类资源网捕调查中, 主要科属鱼类栖息于中下层、底层的鱼类占比之和分别为76.62%和75.74%, 这与水声学调查的中层和底层鱼类占大部分的情况一致, 两种方法的结果互为补充印证。

在长江生态大保护的背景下, 因水声学方法具有便捷高效、对环境生物无损害等特点而优于传统鱼类资源网具调查方法, 近年来已作为主流技术方法被推广应用于江河湖泊的水生生物监测研究

表5 宜昌-城陵矶江段鱼类密度垂直分布t检验分析

Tab. 5 *t*-test analysis of vertical distribution of fish density in the section from Yichang to Chenglingji River

水层 Water layer	丰水期 Wet season			枯水期 Dry season		
	平均密度 Average density (ind./1000 m ³)	范围 Range (ind./1000 m ³)	<i>P</i>	平均密度 Average density (ind./1000 m ³)	范围 Range (ind./1000 m ³)	<i>P</i>
表层Surface layer vs. 中层Middle layer	26.23±54.84	0.09—401.227	<0.01	17.65±37.55	0.05—359.78	>0.05
表层Surface layer vs. 底层Bottom layer	26.23±54.84	0.09—401.227	<0.01	17.65±37.55	0.05—359.78	<0.01
中层Middle layer vs. 底层Bottom layer	74.21±134.16	0.06—768.47	<0.01	27.86±65.57	0.15—601.60	<0.05
表层Surface layer vs. 中层Middle layer	26.23±54.84	0.09—401.227	<0.01	17.65±37.55	0.05—359.78	<0.01
中层Middle layer vs. 底层Bottom layer	74.21±134.16	0.06—768.47	<0.01	27.86±65.57	0.15—601.60	<0.05
表层Surface layer vs. 底层Bottom layer	26.23±54.84	0.09—401.227	<0.01	17.65±37.55	0.05—359.78	<0.01

中^[54, 55]。但声学技术自身易受环境因子及噪声影响, 识别鱼类的准确性仍有待提高^[56], 且方法本身仅能识别鱼类目标信号大小, 无法鉴定鱼类种类, 所以无法评估鱼类资源多样性; 因此, 本研究中2次水声学调查的同期均开展了鱼类资源网具调查, 以补充鱼类生物信息, 从群落结构上评估鱼类资源状况及分布特征。因调查中探测航线区域的底质波动、洲滩深浅变化等都会影响数据质量, 今后常态化系统性的探测调查中应在掌握水文情势的前提下, 考虑实际水深垂直与倾斜探测相结合, 选择适当航线最大限度获取高质量数据。目前国内研究中尚未有针对长江中游统一适配的TS与体长换算公式, 故采用较为通用的喉鲈型鱼类的经验公式估算鱼类体长^[26], 而不同鱼类物种组成结构的水域中, TS与体长转换关系式存在差异, 难以统一适配^[57], 这也可能是造成本研究中水声学换算体长偏低的原因。未来针对长江流域加快建立系统的水声学识别特定水域中目标鱼类的TS与体长转换的模型公式, 是科学准确地利用水声学方法评估鱼类资源的基石。

参考文献:

- [1] Dong F, Fang D D, Zhang H, *et al.* Protection and development after the ten-year fishing ban in the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(2): 245-259. [董芳, 方冬冬, 张辉, 等. 长江十年禁渔后保护与发展 [J]. 水产学报, 2023, **47**(2): 245-259.]
- [2] Liu F, Lin P C, Li M Z, *et al.* Situations and conservation strategies of fish resources in the Yangtze River Basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 144-156. [刘飞, 林鹏程, 黎明政, 等. 长江流域鱼类资源现状与保护对策 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 144-156.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Fang D D, Yang H L, Zhang H, *et al.* Fish community structure and diversity in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(2): 154-170. [方冬冬, 杨海乐, 张辉, 等. 长江中游鱼类群落结构及多样性 [J]. 水产学报, 2023, **47**(2): 154-170.]
- [5] Yi B L, Liang Z S, Yu Z T, *et al.* Gezhouba Water Control Project and the Yangtze River the Four Major Chinese Carps [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988: 32-35. [易伯鲁, 梁秩桑, 余志堂, 等. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988: 32-35.]
- [6] 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. [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.]
- [7] Cao W X. Status and conservation of fish resources in the Yangtze River [J]. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2011(2): 1-4. [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.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Ba J W, Chen D Q. Invasive fishes in Three Gorges Reservoir area and preliminary study on effects of fish invasion owing to impoundment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(2): 185-189. [巴家文, 陈大庆. 三峡库区的入侵鱼类及库区蓄水对外来鱼类入侵的影响初探 [J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 185-189.]
- [10] Guan W J, Tian S Q, Zhu J F, *et al.* A review of fisheries stock assessment models [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, **20**(5): 1112-1120. [官文江, 田思泉, 朱江峰, 等. 渔业资源评估模型的研究现状与展望 [J]. 中国水产科学, 2013, **20**(5): 1112-1120.]
- [11] Hu F F, Zhu T B, Gong J L, *et al.* Acoustic study of fish resources in Xiangjiaba Reservoir in the lower reaches of Jinsha River during the early period of ten-year fishing ban [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(2): 233-244. [胡飞飞, 朱挺兵, 龚进玲, 等. 十年禁渔初期金沙江下游向家坝水库鱼类资源变化的水声学研究报告 [J]. 水产学报, 2023, **47**(2): 233-244.]
- [12] Huang S, Li L X, Dao W, *et al.* Spatial distribution characteristics analysis and resources assessment of fish in Lugu Lake [J]. *South China Fisheries Science*, 2020, **16**(1): 53-61. [黄朔, 李连翔, 刀微, 等. 泸沽湖鱼类空间分布特征分析与资源量评估 [J]. 南方水产科学, 2020, **16**(1): 53-61.]
- [13] Li D, Lin D Q, Wang Z G, *et al.* Spatial and temporal characteristics of fish resources in Zhenjiang Yangtze River Dolphin Provincial Nature Reserve were evaluated based on hydroacoustic frequency difference technique [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(1): 121-132. [李栋, 蔺丹清, 王召根, 等. 基于水声学频差技术的镇江长江豚类省级自然保护区鱼类资源时空特征 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(1): 121-132.]
- [14] Li H F, Wang K, Yu X J, *et al.* Hydroacoustic surveys on spatial-temporal distribution of fishes during early fishing ban period in Poyang Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(1): 147-157. [李慧峰, 王珂, 余绪俊, 等. 禁渔初期鄱阳湖鱼类时空分布特征 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(1): 147-157.]
- [15] Tao J P, Ai W M, Gong Y T, *et al.* Assessment of fish

- abundance and distribution using fisheries acoustics and GIS modeling in the Nanxi River of Wenzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(11): 2992-3000. [陶江平, 艾为明, 龚昱田, 等. 采用渔业声学方法和GIS模型对楠溪江鱼类资源量及空间分布的评估 [J]. 生态学报, 2010, **30**(11): 2992-3000.]
- [16] Wang K, Duan X B, Liu S P, *et al.* Survey on temporal and spatial distribution of fish in the Daning River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(3): 516-521. [王珂, 段辛斌, 刘绍平, 等. 三峡库区大宁河鱼类的时空分布特征 [J]. 水生生物学报, 2009, **33**(3): 516-521.]
- [17] Sun M S, Wang K, Duan X B, *et al.* Distribution characteristics of non-bottom fishes in the middle reaches of the Yangtze River from Chenglingji to Yichang section [J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, **43**(4): 45-50. [孙铭帅, 王珂, 段辛斌, 等. 长江中游城陵矶至宜昌江段非底部鱼类分布特征研究 [J]. 淡水渔业, 2013, **43**(4): 45-50.]
- [18] Duan X B, Xie Y J, Guo J, *et al.* Hydroacoustic surveys on temporal and spatial distribution of fishes in the section from Honghu to Yichang of the Yangtze River middle reaches [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(12): 1842-1849. [段辛斌, 谢意军, 郭杰, 等. 长江中游洪湖至宜昌江段鱼类空间分布特征的水声学研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(12): 1842-1849.]
- [19] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied; FAO Fisheries Report; FAO Fisheries: Rome, Italy, 1983: 293-298.
- [20] Duncan A, Kubecka J. Hydroacoustic Methods of Fish Surveys [M]. Bristol: National Rivers Authority, 1994: 32-52.
- [21] Foote K G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, **82**(3): 981.
- [22] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. SC/T 9429-2019 Technical Specification for Freshwater Fishery Resources Survey in River [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. [中华人民共和国农业农村部. SC/T 9429-2019 淡水渔业资源调查规范 河流 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.]
- [23] Zhu S Q. The Synopsis of Freshwater Fishes of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1995. [朱松泉. 中国淡水鱼类检索 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995.]
- [24] Chen Y Y. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes II [M]. Beijing: Science Press, 1998. [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.]
- [25] Yue P Q. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes III [M]. Beijing: Science Press, 2000. [乐佩奇. 中国动物志-硬骨鱼纲. 鲤形目(下卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [26] Yang G R. The Fishes of Hubei [M]. Wuhan: Hubei Scientific & Technical Publishers, 1987. [杨干荣. 湖北鱼类志 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1987.]
- [27] Ding R H. The fishes of Sichuan, China [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1994. [丁瑞华. 四川鱼类志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]
- [28] Misund O A. Underwater acoustics in marine fisheries and fisheries research [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1997, **7**(1): 1-34.
- [29] Balk H, Lindem T. Sonar 4, Sonar 5 Post-processing Systems Operation Manual Version 5.9.8 [M]. Oslo: University of Oslo, 2008: 192-196.
- [30] Sun R Y, Wang D H, Niu C J, *et al.* Principles of Animal Ecology [M]. 4th ed. Beijing: Beijing Normal University Press, 2019. [孙儒泳, 王德华, 牛翠娟, 等. 动物生态学原理 [M]. 4版. 北京: 北京师范大学出版社, 2019.]
- [31] Song D, Du X, Jin X, *et al.* The characteristics of spatial-temporal distributions of fish resources in Lake Jingpo based on hydroacoustic assessment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(6): 2095-2104. [宋聃, 都雪, 金星, 等. 基于水声学探测的镜泊湖鱼类时空分布特征及资源量评估 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 2095-2104.]
- [32] Li X Y. Spatial and temporal distribution characteristics of fish in the main stream of the upper Yangtze River reserve Jiangnan-Chongqing section in the early period of closed fishing [D]. Chongqing: Southwest University, 2022: 23-44. [李祥艳. 禁渔初期长江上游保护区干流江安-重庆江段鱼类时空分布特征 [D]. 重庆: 西南大学, 2022: 23-44.]
- [33] Peng Q D, Liao W G, Li C, *et al.* Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Yangtze River by Three Gorges Project since the impoundment [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, **44**(S2): 228-232. [彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(S2): 228-232.]
- [34] Zhou X, Wang K, Chen D Q, *et al.* Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, **43**(8): 1781-1789. [周雪, 王珂, 陈大庆, 等. 三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响 [J]. 水产学报, 2019, **43**(8): 1781-1789.]
- [35] Duan X B, Chen D Q, Li Z H, *et al.* Current status of spawning grounds of fishes with pelagic eggs in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, **15**(4): 523-532. [段辛斌, 陈大庆, 李志华, 等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状 [J]. 中国水产科学, 2008, **15**(4): 523-532.]
- [36] Wang Y, Wang C F, Qin X H. The influence of the water environment changes on fish distribution in Dongqing Reservoir [J]. *Journal of China Three Gorges University*

- (Natural Sciences), 2018, **40**(1): 29-33. [王瑶, 王从锋, 秦孝辉. 董箐库区水环境变化对鱼类分布影响 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, **40**(1): 29-33.]
- [37] Ren Y Q, Chen D Q, Liu S P, *et al.* Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(6): 1734-1744. [任玉芹, 陈大庆, 刘绍平, 等. 三峡库区彭溪河鱼类时空分布特征的水声学研究所 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(6): 1734-1744.]
- [38] Lian Y X, Huang G, Godlewska M, *et al.* Hydroacoustic assessment of spatio-temporal distribution and abundance of fish resources in the Xiangxi River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 920-929. [连玉喜, 黄耿, Godlewska M, 等. 基于水声学探测的香溪河鱼类资源时空分布特征评估 [J]. *水生生物学报*, 2015, **39**(5): 920-929.]
- [39] Chen W J, He G, Wu B, *et al.* Spatial distribution and biomass assessment of fish in the channel connecting the Lake Poyang and the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(4): 923-931. [陈文静, 贺刚, 吴斌, 等. 鄱阳湖通江水道鱼类空间分布特征及资源量评估 [J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 923-931.]
- [40] Brandt S B, Gerken M, Hartman K J, *et al.* Effects of hypoxia on food consumption and growth of juvenile striped bass (*Morone saxatilis*) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009(381): S143-S149.
- [41] Brosse S, Lek S, Dauba F. Predicting fish distribution in a mesotrophic lake by hydroacoustic survey and artificial neural networks [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, **44**(5): 1293-1303.
- [42] Jia C Y. Hydroacoustic studies on fishes in the middle Yangtze from Yichang to the East Dongting Lake [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 13. [贾春艳. 长江中游宜昌至东洞庭湖鱼类的水声学研究所 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 13.]
- [43] Yang H L, Shen L, He Y F, *et al.* Status of aquatic organisms resources and their environments in the Yangtze River system (2017—2021) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(2): 3-30. [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]. *水产学报*, 2023, **47**(2): 3-30.]
- [44] 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**(3): 601-620.
- [45] Lin S, Li H Y, Huang P C, *et al.* Characteristics of high temperature, drought and circulation situation in summer 2022 in China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, **40**(5): 748-763. [林纾, 李红英, 黄鹏程, 等. 2022年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析 [J]. *干旱气象*, 2022, **40**(5): 748-763.]
- [46] Nguyen L V, Phan H K. Distribution and factors influencing on structure of reef fish communities in Nha Trang Bay Marine Protected Area, South-Central Vietnam [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2008, **82**(3): 309-324.
- [47] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The Yangtze River Office Organized a Symposium on the Implementation Plan for Yangtze River Monitoring System Construction [EB/OL]. (2020-09-04) [中华人民共和国农业农村部. 长江办组织召开《长江监测体系建设实施方案》专题研讨会 [EB/OL]. (2020-09-04). http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202009/t20200904_6351561.htm.]
- [48] Lin P, Chen L, Gao X, *et al.* Spatiotemporal distribution and species composition of fish assemblages in the transitional zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Water*, 2020(12): 3514.
- [49] Wan R R, Yang G S, Wang X L, *et al.* Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(1): 1-8. [万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(1): 1-8.]
- [50] 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 in the Yangtze Basin*, 1999, **8**(2): 153-157. [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.]
- [51] 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. [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.]
- [52] Hu X K, Gao L, Yang H, *et al.* Studies on spatial distribution of fish larvae in three channel patterns in the Huangshi section of middle Yangtze River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, **47**(6): 65-73. [胡兴坤, 高雷, 杨浩, 等. 长江中游黄石江段三种不同类型河道中仔鱼空间分布研究 [J]. *淡水渔业*, 2017, **47**(6): 65-73.]
- [53] Draštk V, Kubečka J. Fish avoidance of acoustic survey boat in shallow waters [J]. *Fisheries Research*, 2005, **72**(2-3): 219-228.
- [54] Wu Z, Tan X C, Li X H, *et al.* Acoustic monitoring on fish resources in Xijiang section of Pearl River during first closed fishing season [J]. *South China Fisheries Science*, 2014, **10**(3): 24-28. [武智, 谭细畅, 李新辉, 等. 珠江首次禁渔西江段鱼类资源声学跟踪监测分析 [J]. *南方水产科学*, 2014, **10**(3): 24-28.]
- [55] Xiang L L, Qin Q, Zhang Y, *et al.* Fish resource assessment in the Peng'an section of the middle Jialing River based on hydroacoustic surveys [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(4): 95-102. [向伶俐, 秦强, 曾燊, 等. 基于水声学方法的嘉陵江中游蓬安段鱼类资源研究 [J].

- 水生生态学杂志, 2022, 43(4): 95-102.]
- [56] Gerlotto F, Fréon P. Some elements on vertical avoidance of fish schools to a vessel during acoustic surveys [J]. *Fisheries Research*, 1992, 14(4): 251-259.
- [57] Pollom R A, Rose G A. A global review of the spatial, taxonomic, and temporal scope of freshwater fisheries hydroacoustics research [J]. *Environmental Reviews*, 2016, 24(3): 333-347.

SPATIAL-TEMPORAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FISH RESOURCES IN YICHANG-CHENGLINGJI RIVER SECTION OF THE YANGTZE RIVER IN THE EARLY PERIOD OF FISHING BAN

SHI Yin-Kui^{1,2}, YU Li-Xiong¹, ZHOU Xue¹, GAO Lei¹, ZHU Feng-Yue¹, YANG Jin-Yi^{1,2},
CHEN Da-Qing¹, WANG Ke¹ and DUAN Xin-Bin¹

(1. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing/Fishery Resources and Environmental Science Experimental Station of the Upper-Middle Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 2. Shanghai Ocean University, National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: In this study, we investigated fish resources in the Yichang to Chenglingji reach of the middle Yangtze River using the SIMARD EY60 echo detector in July 2022 (during the high-water season) and January 2023 (during the low-water season). Additionally, we integrated the results of net fishing surveys to assess the spatial and temporal distribution characteristics of fish resources in this reach during the initial ten-year fishing ban period. The results revealed that during the wet season and dry season of the fishing ban period, fish densities were 128.69 ind./1000 m³ and 38.43 ind./1000 m³, with mean target strengths (TS) of -57.54 and -60.18 dB, and mean fish lengths of 5.22 and 3.85 cm, respectively. Significant differences in fish density and TS values were observed between the two seasons. Horizontally, fish distribution was uneven, with higher fish densities observed in meandering and winding sections compared to straight river segments. The sections with the highest fish densities during both surveys were found in the Gongan to Shishou and Zhijiang to Jingzhou reaches. Vertically, fish densities showed a pattern of bottom layer > middle layer > surface layer, and significant differences were observed in fish densities among these layers during both seasons. Combining net fishing data and historical survey data from previous years, fish resources in the Yichang to Chenglingji reach were dominated by Cyprinidae and Bagridae, while there was some recovery of fish resources during the initial fishing ban period, small individual fish still dominated. The spatial and temporal distribution of fish resources in the middle Yangtze River was correlated with factors such as habitat preferences and aquatic ecological conditions. These findings provide valuable data support for future evaluations of the effectiveness of the fishing ban.

Key words: The middle reaches of the Yangtze River; Hydroacoustics; Fish resources; Spatial and temporal distribution; Early fishing ban period

附表 1 宜昌-城陵矶江段鱼类种类组成

Appendix 1 Composition of fish species in Yichang to Chenglingji River section

时期 Period	种类 Species	空间 生态位 Spatial niche	平均体重 Average weight (g)	体重比 Weight ratio (%)	数量比 Quantity ratio (%)	体长Body length (cm)	
						范围 Range	均值 Mean
丰水期 Wet season	鲤科 Cyprinidae						
	银鲴 <i>Xenocypris argentea</i>	中、下层	186.04	6.53	11.85	16.2—33.7	22.27
	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	中、下层	599.65	15.33	8.63	14.6—56.2	32.87
	鲂 <i>Megalobrama skolkovii</i>	中、上层	570.49	12.53	7.41	8.9—59.1	26.00
	似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	中、下层	22.95	0.36	5.35	10.5—20.0	11.55
	鲫 <i>Carassius auratus</i>	中、下层	179.69	1.97	3.71	10.0—68.5	28.59
	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	中、上层	1836.95	15.21	2.79	20.8—68.6	46.41
	蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	中、下层	23.88	0.14	1.94	13.1—14.8	13.96
	蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	上层	380.16	2.12	1.88	21.3—45.4	30.35
	达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	上层	169.53	0.70	1.40	16.7—32.5	23.60
	拟尖头鲃 <i>Culter oxycephaloides</i>	中、上层	205.56	0.81	1.34	21.0—45.3	25.23
	鲮科 Bagridae						
	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	底层	145.64	16.29	37.73	9.6—42.8	22.55
	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	底层	127.87	1.31	3.46	13.0—39.9	22.64
	光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	底层	40.88	0.18	1.52	10.0—27.4	15.36
	长须黄颡鱼 <i>Pelteobagrus eupogon</i>	底层	90.82	0.28	1.03	11.6—27.2	21.87
	鲴科 Serranidae						
	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	底层	380.83	1.58	1.40	17.4—40.2	25.55
	其他鱼类 Other fish	—	—	24.64	8.57	5.1—81.0	—
枯水期 Dry season	鲤科 Cyprinidae						
	银鲴 <i>Xenocypris argentea</i>	中、下层	133.55	14.92	36.71	10.5—12.7	11.54
	鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	中、下层	470.39	20.26	14.15	28.1—37.2	32.58
	鲂 <i>Megalobrama skolkovii</i>	中、上层	363.21	7.25	6.55	8.2—47.9	22.71
	蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	中、下层	25.26	0.41	5.29	6.8—18.6	13.96
	蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i>	上层	223.24	2.83	4.17	10.0—56.2	19.22
	似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	中、下层	17.55	0.19	3.50	9.1—12.9	10.60
	拟尖头鲃 <i>Culter oxycephaloides</i>	中、上层	362.74	3.29	2.98	8.0—59.5	25.80
	银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	中、下层	17.41	0.15	2.83	7.1—12.8	10.44
	吻鮈 <i>Rhinogobio typus</i>	底层	16.17	0.11	2.31	10.6—13.7	12.50
	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	中、上层	3586.32	14.63	1.34	8.2—77.5	52.15
	黄尾鲴 <i>Xenocypris davidi</i>	中、下层	599.48	2.31	1.27	18.2—45.0	30.89
	鲫 <i>Carassius auratus</i>	中、下层	123.99	0.39	1.04	8.2—25.3	16.65
	鲮科 Bagridae						
	瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	底层	176.55	2.60	4.84	12.3—38.8	23.84
	大鳍鲮 <i>Mystus macropterus</i>	底层	189.11	1.46	2.53	6.8—39.4	28.16
	鲴科 Serranidae						
	鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	底层	233.72	0.85	1.27	16.2—35.8	21.43
	鲴科 Engraulidae						
	短颌鲚 <i>Coilia brachygnathus</i>	中、上层	41.14	0.16	1.19	16.0—31.7	20.16
	其他鱼类 Other fish	—	—	24.87	8.04	8.6—80.0	—