

基于水声学和渔获物调查的洱海鱼类资源时空分布特征

张航 梁智策 匡晨亿 周婷 廖传松 苑晶 郭传波 刘家寿

SPATIAL-TEMPORAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FISH RESOURCES IN ERHAI LAKE BASED ON HYDROACOUSTICS AND CATCH SURVEY METHODS

ZHANG Hang, LIANG Zhi-Ce, KUANG Chen-Yi, ZHOU Ting, LIAO Chuan-Song, YUAN Jing, GUO Chuan-Bo, LIU Jia-Shou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0169>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF FISH RESOURCES IN ZHENJIANG YANGTZE RIVER DOLPHIN PROVINCIAL NATURE RESERVE WERE EVALUATED BASED ON HYDROACOUSTIC FREQUENCY DIFFERENCE TECHNIQUE

水生生物学报. 2023, 47(1): 121–132 <https://doi.org/10.7541/2022.2021.0314>

禁渔初期鄱阳湖鱼类时空分布特征

HYDROACOUSTIC SURVEYS ON SPATIAL-TEMPORAL DISTRIBUTION OF FISHES DURING EARLY FISHING BAN PERIOD IN POYANG LAKE

水生生物学报. 2023, 47(1): 147–155 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0163>

长江上游保护区干流江安-重庆段禁渔初期鱼类时空分布特点

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FISH IN THE MAIN STREAM OF THE UPPER YANGTZE RIVER RESERVE JIANG' AN-CHONGQING SECTION IN THE EARLY PERIOD OF FISHING BAN

水生生物学报. 2024, 48(4): 558–567 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0122>

禁渔初期长江宜昌-城陵矶江段鱼类资源时空分布特征

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

水生生物学报. 2024, 48(4): 546–557 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0173>

生态廊道建设对洱海不同类型湖湾鱼类群落分布及多样性的影响

ECOLOGICAL CORRIDOR CONSTRUCTION ON THE DISTRIBUTION AND DIVERSITY OF FISH COMMUNITIES IN DIFFERENT TYPES OF BAYS IN ERHAI LAKE

水生生物学报. 2023, 47(12): 1965–1975 <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0091>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2024.0169

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0169

基于水声学和渔获物调查的洱海鱼类资源时空分布特征

张航^{1,2} 梁智策^{1,2} 匡晨亿^{1,2} 周婷^{1,2} 廖传松¹ 苑晶¹
郭传波^{1,2} 刘家寿^{1,2}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北东湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为掌握洱海鱼类资源时空动态, 研究于2022—2023年采用水声学和渔获物调查方法评估洱海鱼类群落结构及其时空分布, 对鱼类群落结构、鱼类时空分布特征与环境因子之间的关系进行了研究和分析。研究共采集鉴定鱼类22种, 隶属于4目8科17属, 优势种为子陵吻虾虎鱼(*Rhinogobius giurinus*)。水声学调查结果显示: 4个季节鱼类TS值主要集中在-70—-58 dB (全长1.2—5.0 cm), 在夏、秋、冬和春季占比分别为88.40%、83.03%、84.53%和82.92%; 鱼类在夏、秋、冬和春季4个季度的平均目标强度分别为(-59.08±0.08)、(-54.99±0.15)、(-55.90±0.16)和(-58.07±0.18) dB, 鱼类密度分别为夏季(23851.61±889.30) ind./ha、秋季(14185.69±1106.54) ind./ha、冬季(2423.19±179.54) ind./ha和春季(3382.16±440.71) ind./ha。从各季节水平空间特征来看, 夏季和春季主要集中在北部区域。在垂直方向上, 夏、秋和春季均以2.5—6.5 m水层鱼类的占比较高, 占比分别为32.99%、30.65%和62.78%; 冬季以14.5—18.5 m水层鱼类占比较高, 占比为34.05%; 在冬季和春季鱼类在垂直方向上表现出明显的迁徙现象。冗余分析(RDA)结果显示, 水温(WT)、氨氮(NH₃-N)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等水体理化因子对洱海小型鱼类的分布具有明显影响。研究证明了水声学调查与渔获物调查相结合评估鱼类资源时空分布的可行性, 研究结果为洱海鱼类资源保护和恢复提供科学依据。

关键词: 水声学; 鱼类群落结构; 时空分布; 洱海

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)12-2029-13



洱海位于云南省大理白族自治州, 是云南省第二大淡水高原湖泊, 鱼类资源独特^[1, 2]。过去几十年来, 洱海一直是云南省重要的鱼类种质资源库和重要的渔业生产水域^[3-5]。前期关于洱海鱼类资源的研究共调查发现鱼类17—30种, 包括大眼鲤(*Cyprinus megalophthalmus*)、春鲤(*Cyprinus longipectoralis*)等特有鱼类^[6-11]。20世纪50年代以前, 洱海鱼类组成以土著种为主, 主要经济鱼类为大理裂腹鱼(*Schizothorax tallensis*)、洱海四须鲃(*Barbodes daliensis*)和洱海鲤(*Cyprinus barbatus*)等, 彼时渔业资源利用水平较低, 年均渔产量仅为450.3 t^[2]。20世纪60年代后, 为发展渔业洱海引入了“四大家鱼”开展增养殖, 渔产量得到迅速提高^[4]。20世纪

70年代后, 洱海土著鱼类种群逐渐衰退, 外来鱼类种群占据优势, 鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)等成为主要渔业对象^[12]。

前期研究综合表明洱海的鱼类资源发生快速变化, 特别是外来鱼类种类组成和结构快速变化^[6-11]。外来鱼类引入、过度捕捞和水位波动是造成洱海鱼类群落结构变化的主要原因^[12, 13]。在20世纪50年代, 洱海的鱼类群落结构以土著鱼类占绝对优势, 大理裂腹鱼、杞麓鲤(*Cyprinus carpio chilia*)、洱海四须鲃和云南裂腹鱼(*Schizothorax yunnanensis*)所占比例最高^[7]; 60—70年代, 外来鱼类开始增加, 青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)和鲢等外来种类首先在洱海定殖和

收稿日期: 2024-04-21; 修订日期: 2024-06-05

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2400900); 洱海生态调查项目(4532900HT202200026)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2023YFD2400900); Erhai Ecological Survey Project (4532900HT202200026)]

作者简介: 张航(1999—), 男, 硕士研究生; 主要从事渔业生态学研究。E-mail: zhanghang@ihb.ac.cn

通信作者: 刘家寿, 研究员; 主要从事渔业生态学研究。E-mail: jsliu@ihb.ac.cn

扩张; 80年代后, 陈氏新银鱼(*Neosalanx taihuensis*)和子陵吻鲈虎鱼等又逐步成为优势种^[13]。目前, 有关洱海鱼类资源的时空动态研究多数聚焦于鱼类群落的种类组成, 缺乏对鱼类资源及其分布格局的研究, 为更好地保护和恢复洱海鱼类资源, 有必要进一步开展这方面的研究。

以往有关洱海鱼类资源的调查研究主要以渔获物调查为主^[7-9]。近些年来, 水声学探测技术凭借高效快捷、调查区域广、不损坏生物资源、提供连续可持续的数据等优势, 被广泛应用于海洋和内陆水域的渔业资源评估和鱼类行为监测^[14, 15]。鉴于此, 为精确又高效地掌握洱海鱼类资源现状和时空分布特征, 本研究以水声学技术为主要手段, 结合传统渔获物调查的鱼类资源调查方法, 研究洱海鱼类资源时空分布和鱼类群落结构特征, 旨在为洱海鱼类资源的保护和恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域

洱海(100°05'E—100°17'E, 25°36'N—25°58'N, 图1)位于云南省大理白族自治州境内, 平均海拔

2056 m, 南北长约40 km, 东西宽约6.3 km, 面积约256.9 km², 蓄水量30 亿m³, 平均水深10.5 m, 最大水深为20.7 m, 调查水域最小水深约2 m。

1.2 水声学调查

采用水声学方法调查鱼类的密度、个体大小和空间分布, 调查时间分别为2022年6月(夏季)和9月(秋季)、2023年1月(冬季)和3月(春季)。探测过程选择在白天进行。科学探鱼仪采用挪威Simrad公司产EK80型, 换能器频率为120 kHz, 换能器固定在船只右舷距船首1/3处, 入水深度为0.5 m, 声波发射方向为垂直向下。调查时功率设定为100 w, 脉冲宽度选择128 μs, 脉冲发射模式选择interval, 发射频率为10 pings/s。探测前按标准方法进行实地校准^[16]。地理坐标数据由Garmin GPS map 60CSx型GPS导航仪实时记录, 与回声探测仪数据同步保存于笔记本电脑。

开展水声学探测时航速保持8—10 km/h。洱海水面宽广, 采用“之”字形探测路线(图1), 调查水域覆盖整个水域。每个季节走航总程保持基本一致, 约为104 km, 在每个季节开展鱼类探测时, 每天走航探测时间约4—8h, 总路程分3d探测。走航覆盖率为6.58, 满足Aglen关于水声学探测覆盖率大于6的建议^[17]。

1.3 渔获物调查

通过多网目复合渔获物调查洱海鱼类群落结构特征, 渔获物调查时间分别为2022年6月(夏季)和9月(秋季)、2022年12月(冬季)和2023年3月(春季), 每个季度渔获物调查时间持续两个星期左右。在全湖共设置30个采样点开展鱼类调查(图1), 采用的工具为多网目复合刺网和地笼。多网目刺网包括浮网和沉网, 浮网长30 m, 网高5 m; 沉网长30 m, 网高2 m, 两种网目均为12种网目规格组成, 网目=8.6、3.9、16.0、13.0、11.0、1.6、2.5、4.8、3.1、1.0、7.0、5.8 cm。地笼长15 m, 高0.4 m, 宽0.4 m, 网眼2a=10 mm。浮网和沉网分别采集洱海表层和底层鱼类, 每次采样浮、沉网和地笼配合使用, 网具覆盖水体表层和底层。每个点位网具放置时间为当日18:00左右至次日6:00左右, 网具放置时长约为12h。采集的所有鱼类进行种类鉴定、并测量全长(精确度为0.1 cm)和体重(精确度为1 g)^[18-21]。

为进行鱼类资源时空特征比较分析, 本研究根据采样点的分布, 将1#、2#、3#、24#、25#、26#、27#、28#、29#、30#共10个采样点划分为北部区域; 将4#、5#、6#、7#、18#、19#、20#、21#、22#、23#共10个采样点划分为中部区域; 将8#、9#、10#、11#、12#、13#、14#、15#、16#、

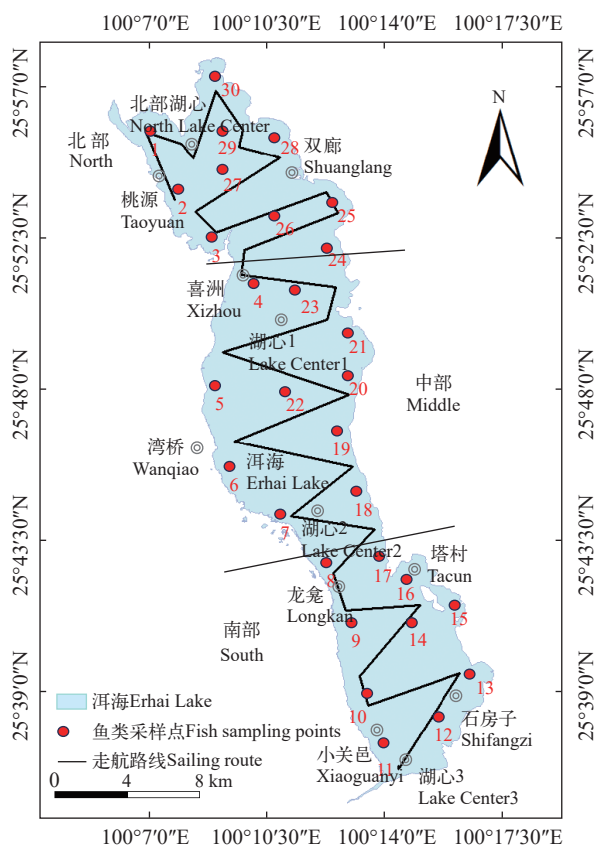


图1 洱海鱼类渔获物调查采样点分布及水声学调查走航路线图
Fig. 1 Distribution of sampling points of fish gillnet survey and hydroacoustic survey line in Erhai Lake

17#共10个采样点划分为南部区域(图 1), 所有采样点的平均水深为10.5 m, 水深为2.7—20.7 m。

1.4 数据处理

水声学数据通过Sonar5-pro软件(ver.=605.9)(Lindem Data Acquisition, 挪威)对EK80软件收集的水声学原始数据进行处理, 转换模式设定为可变增益(Time-varied gain, TVG) $TVG = 40\lg R$ 。为减小洱海表层风浪的干扰, 在表层设定一条深度为2 m的线, 使用软件自动识别水体底部, 并通过手动校对去除明显的噪音信号, 同时采用单回声检测和跟踪分析(Single echo detection and tracking methods, STM)对鱼类信号进行判别和计数。

鱼类密度估算采用SV/TS回声整合平均法(SV/TS scaling)^[22], 分析换能器下方2 m至水底0.5 m以上的数据。基于目标强度(Target strength, TS, 单位dB)的分布情况将单体目标检测阈值设置为-70 dB^[23]。本研究将洱海的鱼类目标强度分为14个TS值段进行展示, 范围在-70—-28 dB。软件参数设置如表 1 所示。通过TS推定鱼类个体的大小, 参照同类研究依据鱼体TS值(dB)换算鱼体全长(Total length, TL, 单位cm), 换算公式采用Foote于1987年建立的有鳔鱼类TS-TL经验公式^[24, 25]:

$$TS = 20\lg TL - 71.9 \quad (1)$$

采用ArcGIS 10.8软件开展鱼类资源空间分布建模。为评估洱海鱼类水平分布特征, 将水声学探测得到的声学映像以1000 m为单位划分单元, 并分别计算各单元的鱼类密度, 将鱼类密度、水深和GPS位点等信息导入ArcGIS软件, 数据栅格化之后, 使用克里金插值法绘制洱海鱼类水平分布图。为评估洱海鱼类的垂直分布特征, 将回声映像以4 m一个水层划分^[26], 分别计算每个水层的鱼类密度和平均目标强度, 然后计算每个水层的鱼类密度占

比。同时, 参照王崇瑞等^[27]在分析湖泊水声学垂直分布数据时, 根据最大水深来对水层进行划分。洱海的最大水深为20.7 m, 平均水深10.5 m, 为便于探讨鱼类在垂直方向上的分布规律, 本研究将6.5 m作为区分中上层水层和中下层水层的分界线。

水环境数据均由生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心提供, 采样站点共有11个, 根据鱼类采样点划分的北部、中部和南部区域, 水环境数据北部的采样站点分别为双廊、桃源和北部湖心; 中部的采样站点分别为喜洲、湖心1和湖心2; 南部的采样站点分别为龙龕、塔村、石房子、小关邑和湖心3(图 1)。水环境数据采用是2022年6月(夏季)、9月(秋季)和2022年12月(冬季)、3月(春季)四个月的采样数据。每次取水样体积为1 L进行测定数据, 水质数据包括水温(WT)、溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、叶绿素 a (Chl. a)、透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和pH值。

1.5 统计分析

运用相对性重要指数(Index of relative importance, IRI)确定不同季节渔获物中的优势种, 其计算公式:

$$IRI = (N\% + W\%) \times F \times 10000 \quad (2)$$

式中, IRI表示相对重要性指数, $N\%$ 表示不同鱼类的数量百分比, $W\%$ 表示重量百分比, F 表示鱼类出现频率。根据IRI的计算结果来划分为渔获物的优势度, 当 $IRI \geq 1000$ 时, 判断为优势种, $100 < IRI < 1000$ 判断为重要种, $10 < IRI < 100$ 判断为常见种, $IRI < 1$ 则判断为少见种^[28]。

采用置换多元方差分析(Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)比较各季节及洱海三个区域群落之间是否存在差异, 采用采用单因素方程分析(one-way ANOVA)检验鱼类密度的水平变化情况, 若不满足方差齐性条件则采用Kruskal-Wallis检验进行分析, 显著水平设为0.05。

利用Mantle检验, 分析鱼类群落结构与环境因子的相关关系。将鱼类丰度数据进行Hellinger 转换, 环境数据进行标准化处理。同时, 对鱼类丰度进行除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA), 并根据不同轴的梯度长度(Lengths of gradient, LGA)选择更加适合的排序方法。当 $LGA < 3$ 时, 采用RDA分析; 当 $LGA > 4$ 时, 采用典范对应分析(Canonical correlation analysis, CCA); 当 $3 \leq LGA \leq 4$ 时, RDA和CCA方法均可采用。根据DCA

表 1 Sonar5.Pro主要参数设置

Tab. 1 Main parameters of Sonar.5Pro

Sonar5.Pro参数项 Parameter of Sonar.5Pro	参数设置 Parameter setting
前景滤波器Foreground filter	[1, 3]
背景滤波器Background	[1, 55]
目标平滑滤波Target smooth filter	[1, 3]
信号强度Signal length	[3, 50]
最大增益补偿Maximum Gain Compensation	6 dB
目标强度阈值TS threshold	-70 dB
最小标准脉宽Minimum normalized pulse length	0.6 ping
最大标准脉宽Maximum normalized pulse length	1.8 ping
门阀过滤范围Gating range	0.3 m

分析结果, $DCA < 3$, 因此, 本研究采用RDA分析。利用RDA线性模型进行方差分解分析(Variance partitioning analysis)计算环境因子的相对解释率, 并结合双向选择筛选水温(WT)、氨氮(NH_3-N)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})4个环境影响因子进行RDA分析。

本研究的所有数据使用软件R 4.3.2、Excel 2019软件进行统计分析。

2 结果

2.1 鱼类群落结构与大小组成

共采集鉴定鱼类22种, 隶属于4目8科17属(表2)。

其中, 鲤科鱼类最多, 14种, 占物种总数的63.64%; 虾虎鱼科2种, 占物种总数的9.09%; 其他各科鱼类均为1种, 分别占物种数的4.55%。

本研究调查的鱼类中(表2)优势种为子陵吻虾虎鱼, 占渔获物总数量的68.00%, 总重量的4.51%, IRI为2595.91; 重要种有6种, 分别为鲫、黄颡鱼、鲢、西太公鱼、鳊和麦穗鱼, 共计占渔获物总数量和总重量的25.59%和83.71%, 其IRI分别为818.64、637.41、490.12、233.19、204.8和196.61。鱼类群落结构在北部与中部、北部与南部之间均存在显著性差异($P < 0.05$), 在四个季节间均存在显著差异($P < 0.05$; 表3)。

表2 洱海鱼类群落结构特征
Tab. 2 The fish assemblage structure in Erhai Lake

科/种 Family/Species	简称 Abbr.	IRI	出现频率 Occurrence frequency	相对丰度 Relative abundance (%)	相对生物量 Relative biomass (%)	平均全长 Average total length (cm)	平均体重 Average body weight (g)
鲤科Cyprinidae							
鳊 <i>Hemiculter leucisculus</i>	Hle	204.8	0.19	5.47	5.34	13.52	19.48
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Hmo	490.12	0.12	1.04	41.44	36.42	718.94
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	Ano	10.87	0.03	0.17	5.47	28.29	364.38
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	Cca	4.35	0.02	0.08	2.02	22	450.87
杞麓鲤 <i>Cyprinus carpio chilia</i>	Ccac	50.66	0.1	0.74	4.3	15.07	104.87
春鲤 <i>Cyprinus longipectoralis</i>	Clon	0.19	0.01	0.07	0.06	7.54	14.58
鲫 <i>Carassius auratus</i>	Cau	818.64	0.33	4.67	19.82	14.74	76.41
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	Ppa	196.61	0.34	4.78	1	7.23	3.7
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	Ari	0.54	0.03	0.13	0.08	10.41	10.98
兴凯鲌 <i>Acheilognathus chankaensis</i>	Acha	21.27	0.11	1.41	0.49	8.1	6.23
中华鲌 <i>Rhodeus sinensis</i>	Rsi	0.03	0.01	0.03	0	4.63	1.04
光唇裂腹鱼 <i>Schizothorax lissolabiatu</i>	Slis	0.18	0.01	0.03	0.16	21.57	85.55
云南裂腹鱼 <i>Schizothorax yunnanensis</i>	Syu	0.03	0	0.01	0.08	25.1	126.77
灰裂腹鱼 <i>Schizothorax griseus</i>	Sgr	1.18	0.02	0.07	0.59	27.47	154.37
银鱼科Salangidae							
陈氏新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	Nta	7.99	0.06	1.29	0.06	7.03	0.96
胡瓜鱼科Osmeridae							
西太公鱼 <i>Hypomesus nipponensis</i>	Hni	233.19	0.33	4.56	2.6	11.57	10.27
鲈科Cobitidae							
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	Man	3.45	0.07	0.29	0.24	13.01	15.1
鲇科Siluridae							
鲇 <i>Silurus asotus</i>	Sas	0.1	0.01	0.02	0.14	17.8	111.97
鲿科Bagridae							
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	Pfu	637.41	0.34	5.07	13.5	15.69	48.37
沙塘鳢科Odontobutidae							
小黄鲈鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	Msw	3.37	0.06	0.55	0.02	3.75	0.52
虾虎鱼科Gobiidae							
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	Rgi	2595.91	0.36	68	4.51	4.75	1.2
波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	Rcli	16.06	0.1	1.51	0.04	3.7	0.5

注: 加粗字体表示IRI > 100, 为重要种或优势种

Note: Bold font indicates IRI > 100, which is an important or dominant species

表 3 洱海鱼类群落在不同区域和不同季节间比较及多重比较

Tab. 3 Spatial and temporal comparison and pairwise comparison of fish community in Erhai Lake

项目Item	总方差Sum of square	均方(差)Mean square	F统计量F.Model	方差贡献Variation (R^2)	P值P value
北North vs. 南South	0.2775	0.2775	3.8675	0.1769	0.0240
北North vs. 中Middle	0.2576	0.2576	3.6129	0.1672	0.0170
南South vs. 中Middle	0.0425	0.0425	0.7171	0.0383	0.5684
春Spring vs. 冬Winter	2.2238	2.2238	14.1018	0.1956	0.0010
春Spring vs. 秋Autumn	1.2514	1.2514	7.3978	0.1131	0.0010
春Spring vs. 夏Summer	1.7772	1.7772	14.4169	0.1991	0.0010
冬Winter vs. 秋Autumn	2.7880	2.7880	15.7880	0.2140	0.0010
冬Winter vs. 夏Summer	0.7994	0.7994	6.1163	0.0954	0.0030
秋Autumn vs. 夏Summer	3.0759	3.0759	21.6365	0.2717	0.0010

注: 显著性的P值(<0.05)以粗体表示
Note: Significant P-values (<0.05) are indicated in bold

根据水声学探测结果, 夏、秋、冬和春季的TS值主要集中在-70 — -58 dB (全长1.2—5.0 cm;

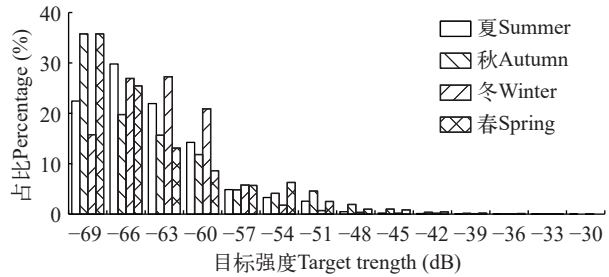


图 2 洱海鱼类目标强度分布季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of target intensity distribution of fish in Erhai Lake

图 2), 在四个季节分别占水声学探测的鱼类个体数的88.40%、83.03%、84.53%和82.92%。四个季节所对应的平均目标强度分别为(-59.08±0.08)、(-54.99±0.15)、(-55.90±0.16)和(-58.07±0.18) dB, 推算得到鱼类平均全长分别为(4.37±0.05)、(7.01±0.09)、(6.31±0.17)和(4.91±0.14) cm。

根据渔获物调查结果, 全长在1.2 — 9.9 cm的鱼类数量占比较高(图 3), 在夏、秋、冬和春季鱼类群落中所占的比例分别为71.80%、86.81%、85.28%和74.94%, 四个季节的鱼类平均全长分别为10.03、7.41、6.06和7.69 cm。四个季度的水声学探测和渔获物调查结果表明, 两种调查方法获得的鱼类全长分布结果较为一致(图 3)。

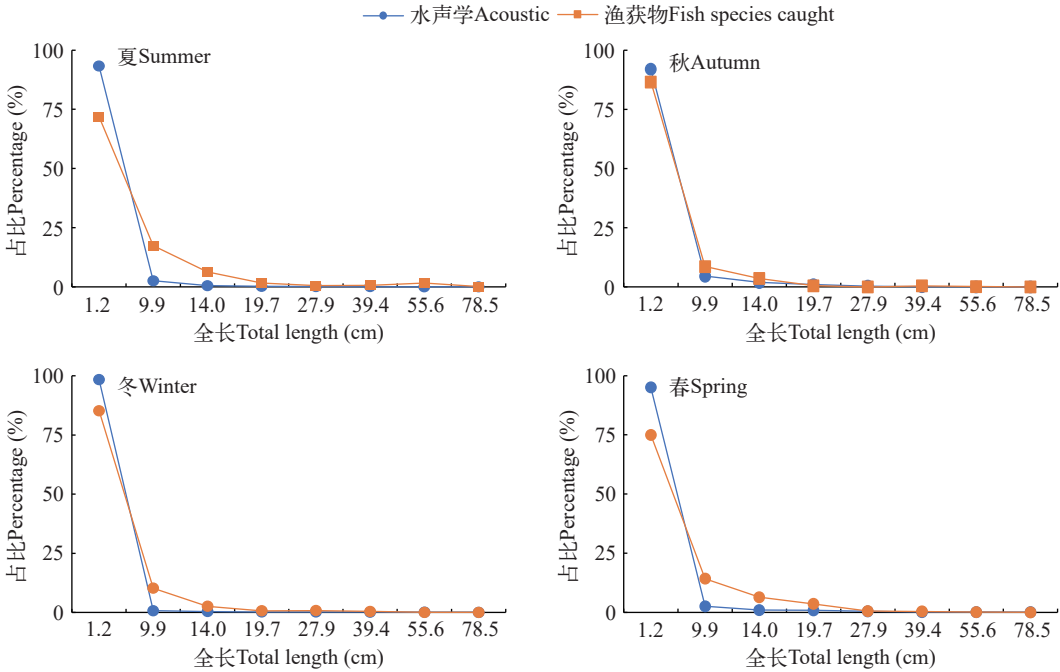


图 3 基于水声学和渔获物采样四个季度洱海鱼类全长分布

Fig. 3 Total length distribution of fish in Erhai lake in four quarters based on hydroacoustics and catch sampling

2.2 鱼类水平分布

洱海鱼类密度在不同季节间均存在显著性差异(Kruskal-Wallis test, $P<0.01$), 夏季和秋季鱼类密度显著高于冬季和春季(Kruskal-Wallis test, $P<0.01$)。从全年来看(表 4), 夏季鱼类密度最高, 平均值为(23851.61±889.30) ind./ha, 分布范围为42.90—632975.72 ind./ha; 秋季次之, 平均值为(14185.69±1106.54) ind./ha, 分布范围为126.37—476144.70 ind./ha; 冬季和春季的鱼类密度平均值分别为(2423.19±179.54) 和(3382.16±440.71) ind./ha, 分布范围分别为(19.01—128195.57)和(22.43—258473.69) ind./ha。

根据水声学探测得到的洱海鱼类密度(−70 dB≤

TS≤−28 dB)水平分布及季节变化特征(图 4), 从水平方向看, 夏季北部区域鱼类密度显著高于中部和南部区域(Kruskal-Wallis test, $P<0.05$), 鱼类平均密度为(27861.52±1586.10) ind./ha; 秋季和冬季在北部、中部和南部区域的鱼类密度分布较为均匀, 秋季3个区域鱼类平均密度分别为(12085.29±1115.98)、(16833.34±2126.29)和(12669.03±2221.77) ind./ha; 冬季3个区域鱼类平均密度分别为(2292.67±371.56)、(2599.14±220.82)和(5469.19±2277.60) ind./ha; 春季北部区域和南部区域存在显著差异性(Kruskal-Wallis test, $P<0.05$), 鱼类平均密度分别为(4258.89±634.92)和(2584.75±1695.83) ind./ha (表 5)。利用非参数检验分析3个区域在4个季节间鱼类TS, 夏季北部区域鱼类TS显著大于中部和南部区域($P<0.05$), 鱼类平均TS值分别为北部(−52.65±0.20) dB [(9.16±0.22) cm]、中部(−60.87±0.13) dB [(3.56±0.20) cm]、南部(−61.40±0.11) dB [(3.35±0.19) cm]; 秋季中部与北部和南部均有显著差异($P<0.05$), 鱼类平均TS值分别为北部(−60.96±0.25) dB [(3.52±0.17) cm]、中部(−57.55±0.21) dB [(5.22±0.14) cm]、南部(−60.56±0.24) dB [(3.69±0.13) cm]; 冬季鱼类TS在3个区域不存在显著差异($P>0.05$); 春季洱海北部的鱼类

表 4 水声学方法估算洱海鱼类密度的季节变化

Tab. 4 Estimation of seasonal variation of fish density in Erhai Lake by hydroacoustic method

季节 Season	鱼类密度Fish density (ind./ha)		
	最小值Min	最大值Max	平均值Mean±SE
夏季Summer (2022年6月)	42.90	632975.72	23851.61±889.30
秋季Autumn (2022年9月)	126.37	476144.70	14185.69±1106.54
冬季Winter (2023年1月)	19.01	128195.57	2423.19±179.54
春季Spring (2023年3月)	22.43	258473.69	3382.16±440.71

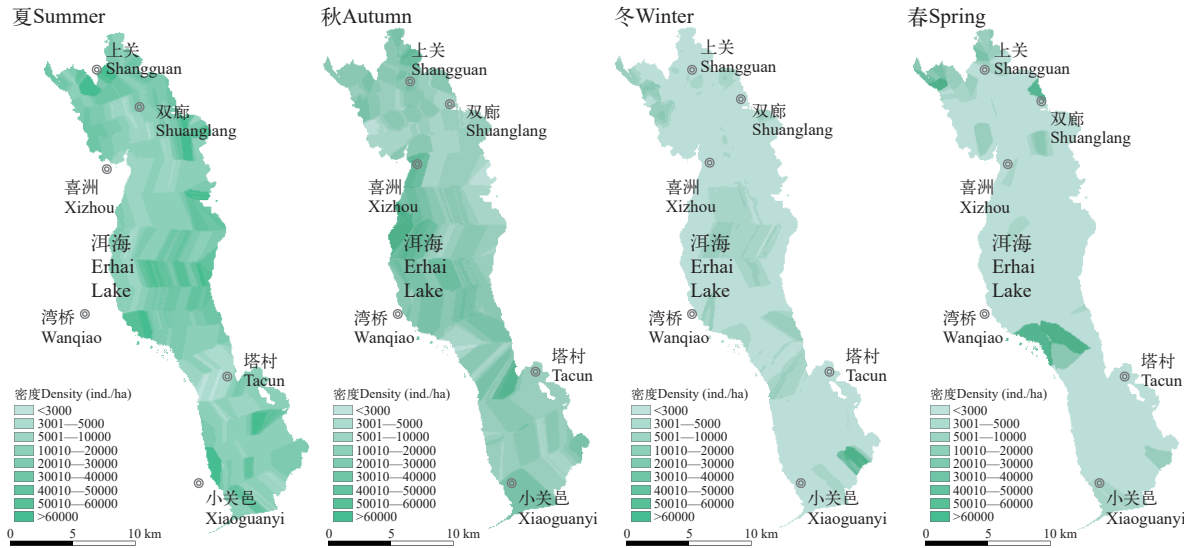


图 4 四个季度洱海鱼类密度水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of fish density during four seasons in Erhai Lake

表 5 水声学方法估算洱海鱼类密度的空间和季节变化

Tab. 5 Spatial and seasonal variation of fish density estimated by hydroacoustic method in Erhai Lake

区域 Distribution	平均水深 Average water depth (m)	鱼类密度Fish density (ind./ha, mean±SE)			
		夏Summer	秋Autumn	冬Winter	春Spring
北部 North	7.91	27861.52±1586.10	12085.29±1115.98	2292.67±371.56	4258.89±634.92
中部 Middle	13.2	23985.47±1383.46	16833.34±2126.29	2599.14±220.82	3162.82±2096.42
南部 South	7.98	22345.71±3413.35	12669.03±2221.77	5469.19±2277.60	2584.75±1695.83

TS显著大于中部和南部区域($P<0.05$)鱼类平均TS值分别为北部(-58.92 ± 0.24) dB [(4.46 $\pm$ 0.21) cm]、中部(-62.60 ± 0.39) dB [(2.92 $\pm$ 0.24) cm]、南部(-64.21 ± 0.36) dB [(2.42 $\pm$ 0.27) cm; 表 6]。

2.3 鱼类垂直分布

鱼类的垂直分布结果表明,夏、秋和春季均以2.5—6.5 m水层的鱼类占比较高(图 5), 分别为32.99%、30.65%和62.78%, 鱼类在这一水层的平均密度分别为(11358.76 $\pm$ 613.35)、(7871.08 $\pm$ 712.42)和(5115.10 $\pm$ 675.38) ind./ha。冬季以14.5—18.5 m水层的鱼类占比较高, 为34.05%, 鱼类平均密度为(2259.99 $\pm$ 218.37) ind./ha (表 7)。

总体上, 综合洱海的平均水深(平均水深为10.5 m左右), 将水体以6.5 m作为洱海中上层水层与中下

表 6 水声学方法估算洱海鱼类平均TS的空间和季节变化

Tab. 6 Spatial and seasonal variation of fish mean TS by hydroacoustic method in Erhai Lake

区域 Distribution	水声学 TS均值mean $\pm$ SE (dB)			
	夏Summer	秋Autumn	冬Winter	春Spring
北North	-57.56 $\pm$ 0.20	-60.96 $\pm$ 0.25	-55.30 $\pm$ 0.31	-58.92 $\pm$ 0.24
中Middle	-60.87 $\pm$ 0.13	-57.55 $\pm$ 0.21	-57.01 $\pm$ 0.21	-62.60 $\pm$ 0.39
南South	-61.40 $\pm$ 0.11	-60.56 $\pm$ 0.24	61.97 $\pm$ 0.30	-64.21 $\pm$ 0.36

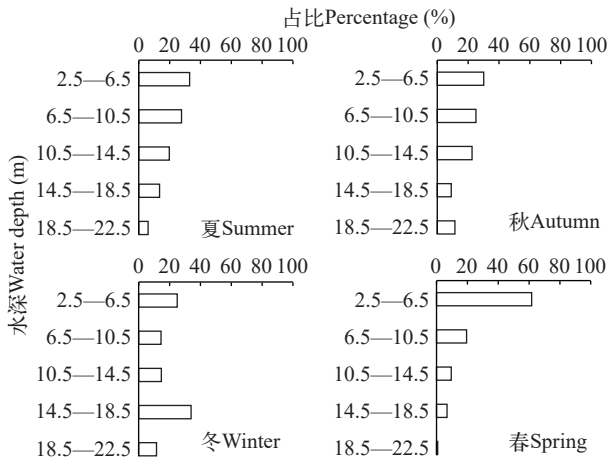


图 5 洱海各季节不同水层鱼类密度垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distribution characteristics of fish density in different layers of Erhai Lake in different seasons

表 7 水声学方法估算洱海不同水层间鱼类密度的季节变化

Tab. 7 Seasonal variation of fish density between different water layers estimated by hydroacoustic method in Erhai Lake (mean $\pm$ SE)

水深 Water depth (m)	鱼类密度Fish density (ind./ha)			
	夏Summer	秋Autumn	冬Winter	春Spring
2.5—6.5	11358.76 $\pm$ 613.35	7871.08 $\pm$ 712.42	2068.64 $\pm$ 174.19	5115.10 $\pm$ 675.38
6.5—10.5	9088.55 $\pm$ 459.34	7022.65 $\pm$ 609.18	1115.07 $\pm$ 129.38	1338.33 $\pm$ 283.05
10.5—14.5	6162.42 $\pm$ 690.32	5421.32 $\pm$ 545.03	1465.15 $\pm$ 263.13	730.78 $\pm$ 270.20
14.5—18.5	3747.19 $\pm$ 322.90	2532.82 $\pm$ 915.72	2259.99 $\pm$ 218.37	462.72 $\pm$ 236.50
18.5—22.5	2066.50 $\pm$ 482.06	2763.42 $\pm$ 518.12	907.61 $\pm$ 136.69	46.94 $\pm$ 0.00

层水层为分界线, 在夏、秋和冬季, 鱼类主要分布于中下层水层, 占比均超过60%, 特别是在冬季, 鱼类表现出向下迁徙的行为(图 6); 而在春季又表现出向上迁徙的趋势。

2.4 鱼类群落结构与环境因子之间的关系

本研究通过VPA变差分解和双向选择筛选出水温(WT)、氨氮(NH₃-N)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})4个显著影响因子进行RDA分析(Monte Carlo, $P<0.05$)。RDA结果表明, 水温和高锰酸盐指数与第一轴均呈负相关, 相关性分别为-0.87和-0.46; 氨氮和透明度与第二排序轴相关性最大, 均呈负相关关系, 相关性分别为-0.95和-0.57。鲢(Hle)和麦穗鱼(Ppa)与水温和高锰酸盐指数呈正相关关系; 鲫(Cau)和波氏吻虾虎鱼(Rcli)与氨氮、透明度呈正相关关系(图 7)。

3 讨论

3.1 鱼类群落结构主要特征

本研究发现洱海的鱼类群落结构以外来小型鱼类为主, 优势鱼类种群为子陵吻虾虎鱼, 重要鱼类种群为鲫、鲢等。这与前期研究结果较为一致, 如费骥慧把洱海鱼类把群落划分为湖滨带群落、湖心区群落和小型湖泊群落3种类型, 发现湖滨带和湖心区这两种群落类型在种类和数量组成上均以外来小型鱼类占优势^[8]。周兴安等^[5]也发现, 在洱海除泥鳅外的小型鱼类均为外来种^[9]。洱海小型鱼类占优势的原因, 一方面可能是因为高原湖泊中的凶猛性鱼类较少, 未被利用的空余生态位较多, 使得鱼类种群的种间竞争较小, 土著鱼类也呈现生存能力较脆弱的特点^[29, 30]。王乐等^[31]在乌伦古湖的研究也发现, 具有较强生态竞争力的西太公鱼会对土著鱼类种群构成较大影响, 而外来鱼类西太公鱼种群数量的增加与凶猛性鱼类种群衰退有关。外来小型鱼类成为洱海优势类群的另一原因在于, 子陵吻虾虎鱼、麦穗鱼、鲫和鲢等鱼类均具有食性杂、性成熟早、繁殖力高等生物学特征, 塑造了这些鱼类较强的环境适应能力^[32-34], 在适宜的气

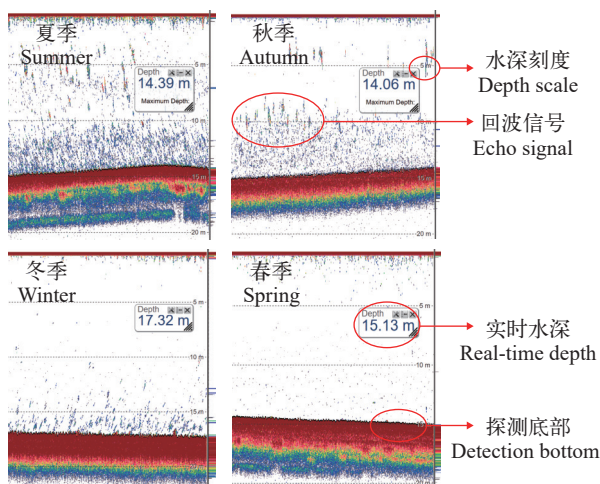


图6 洱海鱼类的回波映像示例图

Fig. 6 The echo image example of fishes in Erhai Lake

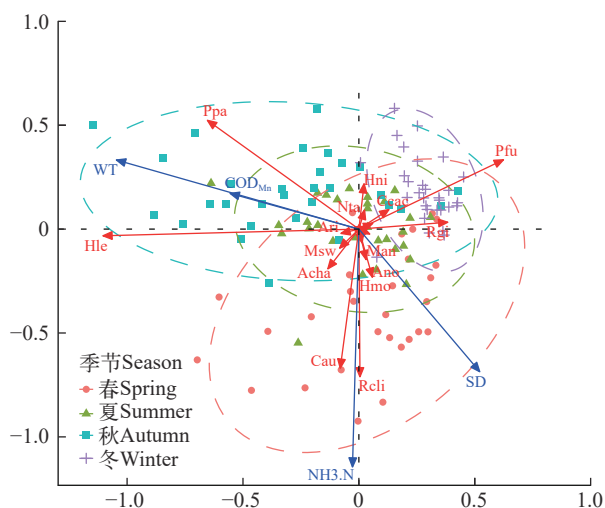


图7 洱海鱼类群落结构与环境因子之间的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis between fish community and environmental variables in Erhai Lake

鱼类物种缩写参见表1

Abbreviations for fish species can be found in Tab. 1

候、丰富的饵料和缺乏凶猛性鱼类的条件下,种群易快速定殖和扩张成为优势类群^[35]。与此同时,洱海的优势外来小型鱼类结构也表现出快速变化的特征,除子陵吻虾虎鱼仍然保持优势地位外,鲫、鲮和黄颡鱼等外来小型鱼类种群数量呈现较快增长趋势^[8, 11, 29],其内在原因需进一步研究。

3.2 鱼类资源时空分布特征

本研究发现洱海的鱼类密度呈现显著的季节性变化,主要表现为夏季最高,冬季最低。国内外许多同类研究也表明,鱼类密度和生物量通常在夏季最高^[25],而在冬季最低^[15]。鱼类属于变温动物,体温会随着水环境的温度变化而变化,温度过高或

者过低都影响着鱼类的基本活动,同时鱼类的繁殖和摄食等行为也会根据水温的变化而改变^[36]。王普泽等^[25]在博斯腾湖的研究发现夏季是鱼类生长和繁殖的高峰期,此时湖泊生态系统中的水生生物资源数量大量增加,为鱼类提供了丰富的饵料资源,同时水温升高也加快了鱼类生长速度,并且有利于卵的孵化和幼鱼的生长,这与夏季洱海的鱼类密度高于其他季节的原因应一致。洱海的平均水温从4月开始快速升高,夏季的平均水温为22.5℃,有利于浮游动物和浮游植物的生长和繁殖,促进了鱼类的摄食活动^[36]。同时,夏季黄颡鱼、子陵吻虾虎鱼、麦穗鱼、鲮等鱼类逐步进入产卵期,也有利于水体中鱼类密度的快速增加^[32-34]。此外,结合本研究发现的鱼类密度垂直分布的季节性变化,在冬季鱼类多数栖息于中下层水层^[37],而栖息于水底的石堆或水下洞穴等隐蔽生境中会出现水声学无法获取鱼类个体信号的情况,从而降低水声学获取的鱼类密度,这可能也是导致冬季探测得到的鱼类密度较低的原因之一。

本研究发现洱海的鱼类密度表现出明显的水平空间分布格局。一方面,夏、春两季鱼类主要集中在北部区域,这可能与北部区域水温较高有关^[38],洱海的北部区域全年平均水温为18.44℃,高于中部区域的17.40℃和南部水域的17.16℃。另一方面,鱼类密度水平分布图显示,夏、春两季鱼类多数聚集在沿岸带水域(图4),这主要由于洱海沿岸带水域水深的梯度较为平缓,具有茂盛的水草和广布的浅滩,是鱼类优越的天然产卵场^[39, 40]。在夏、春两季大部分鱼类如子陵吻虾虎鱼、鲫、黄颡鱼和麦穗鱼等正好进入产卵期^[32-34],性成熟的鱼类个体趋于聚集在天然的产卵场和索饵区域^[41, 42]。在秋季,洱海的鱼类密度水平分布较为均匀,主要原因可能是秋季洱海的不同水域平均水温较适宜,北部区域、中部区域和南部区域的平均水温分别为21.12、20.40和20.09℃,同时秋季洱海的浮游植物和浮游动物资源仍然较丰富^[43, 44],为分布于不同水域的鱼类均能提供充足的饵料,有利于鱼类趋于均匀分布^[45, 46]。综合而言,水温、水深和水草分布等因素是驱动洱海鱼类密度水平空间分布格局的主要环境因子^[8, 11, 38-40]。

洱海的鱼类密度也呈现明显的垂直空间变化,且这种变化在不同季节间表现不同。一方面,我们以6.5 m作为中上层水层与中下层水层的分界线,发现除春季以外,洱海的鱼类主要分布于中下层水层,鱼类密度占比均超过了60%,这与洱海的鱼类群落结构以中下层鱼类,如子陵吻虾虎鱼、黄颡

鱼、鲫和麦穗鱼等鱼类所占比例较高相吻合^[47]。在此基础上,本研究进一步将洱海的垂直水体空间分为5个水层,分析鱼类密度垂直分布的季节变化,发现夏、秋和春季均以2.5—6.5 m水层的鱼类密度较高,而冬季则以14.5—18.5 m水层的鱼类较高,表明洱海的鱼类具有季节性垂直迁徙现象,总体表现出冬季向下和春季向上迁徙的趋势。影响鱼类垂直分布的环境因素有很多,包括水温、溶氧、饵料和种间竞争等^[48—50]。夏、秋和春季洱海的平均水温高于冬季,在中上层的浮游生物饵料资源也更丰富^[43],以浮游生物为食的鱼类会向中上层水层聚集。冬季时洱海表层水体水温开始下降,鱼类的摄食等活动逐渐减弱^[51],在5个垂直水层间表现为向下迁徙趋势,这与任玉芹等^[52]和李慧峰等^[53]分别在三峡库区和鄱阳湖的研究发现冬季鱼类主要聚集在中下水层的现象相符。春季时洱海中上层水层水温较冬季快速回升,同时入湖河流和地表径流也带来了大量的溶解氧和有机质^[54],导致到春季洱海的鱼类活动空间逐步转移至中上层水体,提升春季在2.5—6.5 m水层的鱼类密度。另外,调查船的扰动和声学设备存在的近声场效应对鱼类分布可能产生影响^[55],一是鱼类因躲避行为会潜入更深水层^[56],二是水声学设备无法分析近声场的水声学数据,这些因素可能导致水声学探测获得的分布特征与实际情况有所差别,本研究在表层设定深度为2 m的分割线,可一定程度减少这方面的影响。

3.3 鱼类群落时空分布与环境因子关系

本研究分析了洱海鱼类群落时空分布与水环境因子关系。结果表明,总体而言,水温(WT)、氨氮(NH₃-N)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等水体理化因子是影响洱海鱼类群落时空动态的关键影响因子。具体而言,鲮和麦穗鱼与水温和高锰酸盐指数呈正相关关系,有研究表明,高锰酸盐指数是影响浮游植物密度变化的主要因素^[57],这些鱼类均属于浮游生物食性鱼类,在夏季水温升高后,洱海的浮游植物和浮游动物密度较高,丰富的浮游生物饵料资源和适宜的水温导致浮游生物食性鱼类丰度增加^[58, 59]。与此同时,鲫和波氏吻虾虎鱼的时空分布则主要受到氨氮和透明度的影响,这些鱼类属于中下层的杂食性或底栖动物食性鱼类,在水生植物丰富、透明度较高的生境可能有助于这类鱼类的摄食并提高鱼类密度^[60, 61]。亦有研究表明,水生植物丰富的湖岸水域其氨氮浓度也较高^[62],因此本研究中发现的氨氮影响鲫和波氏吻虾虎鱼的根本原因可能来自于水生植物的影响,一定程度上也说明修复洱海的水生植物群落对于鱼类资源的

保护和恢复也十分重要^[63]。

近些年来,水声学方法逐步广泛应用于鱼类资源时空动态研究^[23—27]。鱼类TS值既取决于鱼类自身的形态和行为^[64],也受到环境因子的干扰^[65],所以本研究除了采用水声学探测手段外,还结合渔获物调查手段,避免单一调查手段局限性,并对两种结果进行综合性分析。本研究中的水声学调查结果表明,除冬季外,洱海鱼类的TS值在各区域也表现出显著的差异性,4个季节洱海鱼类的目标强度主要集中在-70 — -58 dB (全长1.2—5.0 cm),该TS值区间的信号占比均超过80%。渔获物调查发现,整个湖区以子陵吻虾虎鱼、鲫、麦穗鱼和黄颡鱼等小型鱼类为主要优势种,且鱼类全长分布在1.2—9.9 cm的个体占比在各季节也均达到了70%以上,这与水声学探测获得结果相吻合,表明水声学与刺网捕捞相结合更能精确又高效地对鱼类群落开展研究调查,这与在镜泊湖、清江梯级水库和三峡水库等研究结论一致^[26, 66, 67]。正因如此,采用水声学和传统渔获物调查方法相结合用于鱼类资源时空分布的研究越来越多。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Li S S. Fish fauna and its differentiation in the upland lakes of Yunnan [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 1982, **28**(2): 169-176. [李树深. 云南湖泊鱼类的区系及其类型分化 [J]. 动物学报, 1982, **28**(2): 169-176.]
- [2] Chu X L, Chen Y R. Biological characteristics of fish fauna in lake of Yunnan Plateau and ways of fishery utilization [J]. *Resource Development and Market*, 1989, **5**(1): 3-8. [褚新洛, 陈银瑞. 云南高原湖泊鱼类区系的生物学特点及渔业利用的途径 [J]. 资源开发与保护, 1989, **5**(1): 3-8.]
- [3] Yan H, Zhou Z W, Zhao F, et al. The Investigation of the Indigenous of Fishes in Erhai Lake [C]. *Proceedings of the Third National Workshop on Sustainable Development of Modern Ecological Fisheries*, 2011: 84-91. [严晖, 周正文, 赵芬, 等. 洱海土著鱼类调查研究 [C]. 第三届全国现代生态渔业可持续发展交流研讨会论文集, 2011: 84-91.]
- [4] Fei J H, Tang T, Shao X Y. Fishery resources and developmental patterns of fishery in Erhai Lake [J]. *Wetland Science*, 2011, **9**(3): 277-283. [费骥慧, 唐涛, 邵晓阳. 洱海渔业资源与渔业发展模式 [J]. 湿地科学, 2011, **9**(3): 277-283.]
- [5] Chen Y R. Fish resources in Yunnan and their utilization and protection [J]. *Natural Resources*, 1991, **13**(1): 25-33. [陈银瑞. 云南的鱼类资源及其利用和保护 [J]. 自然资源, 1991, **13**(1): 25-33.]

- [6] Tang J, Ye S, Li W, *et al.* Status and historical changes in the fish community in Erhai Lake [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, **31**(4): 712-723.
- [7] He Y M, Yang T L, Liu J, *et al.* The investigation of the fish current resources in Erhai Lake [J]. *Journal of Chuxiong Normal University*, 2010, **25**(3): 53-58. [何彦敏, 杨堂亮, 刘杰, 等. 洱海鱼类资源现状调查研究 [J]. *楚雄师范学院学报*, 2010, **25**(3): 53-58.]
- [8] Fei J H, Wang X Z, Shao X Y. Spatial pattern of fish community in the Erhai Lake [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, **36**(8): 1225-1233. [费骥慧, 汪兴中, 邵晓阳. 洱海鱼类群落的空间分布格局 [J]. *水产学报*, 2012, **36**(8): 1225-1233.]
- [9] 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. [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.]
- [10] Shu L, Lin J Y, Xu Y, *et al.* Investigating the fish diversity in Erhai Lake based on environmental DNA metabarcoding [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(5): 1080-1086. [舒璐, 林佳艳, 徐源, 等. 基于环境DNA宏条形码的洱海鱼类多样性研究 [J]. *水生生物学报*, 2020, **44**(5): 1080-1086.]
- [11] He W C, Yin C J, Yuan J, *et al.* Ecological corridor construction on the distribution and diversity of fish communities in different types of bays in Erhai Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(12): 1965-1975. [何万朝, 尹成杰, 袁静, 等. 生态廊道建设对洱海不同类型湖湾鱼类群落分布及多样性的影响 [J]. *水生生物学报*, 2023, **47**(12): 1965-1975.]
- [12] Du B H, Li Y A. Danger risk to fish diversity in Erhai Lake and proposals to dispel it [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, **14**(3): 42-44. [杜宝汉, 李永安. 洱海鱼类多样性危机及解危对策 [J]. *环境科学研究*, 2001, **14**(3): 42-44.]
- [13] Wu Q L, Wang Y F. On the succession of aquatic communities in Erhai lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, **11**(3): 267-273. [吴庆龙, 王云飞. 洱海生物群落的历史演变分析 [J]. *湖泊科学*, 1999, **11**(3): 267-273.]
- [14] Godlewska M, Zalewski M. Hydroacoustics as a tool for studying the impact of habitat modification (degradation) upon fish: a review [J]. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2001, **1**(3): 393-399.
- [15] Lian Y, Ye S, Godlewska M, *et al.* Diurnal, seasonal and inter-annual variability of fish density and distribution in the Three Gorges Reservoir (China) assessed with hydroacoustics [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2017, **63**: 97-106.
- [16] Foote K. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide [J]. *International Council for the Exploration of the Sea.*, 1987, **82**(3): 981-987.
- [17] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied [J]. *FAO Fisheries Report*, 1983(300): 293-298.
- [18] Chen Y Y. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes II [M]. Beijing: Science Press, 1998: 61-444. [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: 61-444.]
- [19] Yue P Q. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes III [M]. Beijing: Science Press, 2000: 273-425. [乐佩琦. 中国动物志-硬骨鱼纲鲤形目, 下卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 273-425.]
- [20] Chen Y R, Chu X L. Fish Fauna of Yunnan-Volume I [M]. Beijing: Science Press, 1989: 37-350. [陈银瑞, 褚新洛. 云南鱼类志, 上册 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 37-350.]
- [21] Chen Y R, Chu X L. Fish Fauna of Yunnan-Volume II [M]. Beijing: Science Press, 1990: 5-264. [陈银瑞, 褚新洛. 云南鱼类志, 下册 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 5-264.]
- [22] Mason D M, Johnson T B, Harvey C J, *et al.* Hydroacoustic estimates of abundance and spatial distribution of pelagic prey fishes in western lake superior [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2005, **31**(4): 426-438.
- [23] Tian P P, Li X Y, Deng H T, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of fish in the main stream of the Upper Yangtze River reserve Jiang'an-chongqing section in the early period of fishing ban [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(4): 558-567. [田盼盼, 李祥艳, 邓华堂, 等. 长江上游保护区干流江安-重庆段禁渔初期鱼类时空分布特点 [J]. *水生生物学报*, 2024, **48**(4): 558-567.]
- [24] Foote K G. Fish target strengths for use in echo integrator surveys [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, **82**(3): 981-987.
- [25] Wang P Z, Song D, Zhang Y Z, *et al.* Hydroacoustic assessment of spatio-temporal distribution and resource status of fish in Lake Bosten [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, **30**(5): 525-532. [王普泽, 宋聃, 张尹哲, 等. 基于水声学评估的博斯腾湖鱼类时空分布研究 [J]. *中国水产科学*, 2023, **30**(5): 525-532.]
- [26] 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.]
- [27] Wang C R, Zhang H, Du H, *et al.* Hydroacoustic assessment of abundance and spatial distribution of *Gymnocypris przewalskii* in Qinghai Lake with BioSonics DT-X echosounder [J]. *Freshwater Fisheries*, 2011, **41**(3): 15-21. [王崇瑞, 张辉, 杜浩, 等. 采用BioSonics DT-X超声

- 波回声仪评估青海湖裸鲤资源量及其空间分布 [J]. 淡水渔业, 2011, 41(3): 15-21.]
- [28] Cai X W, Xiong Y, Guo C, *et al.* Studies on the characteristics of fish community structure and the control strategies of drinking water source Yanlong Lake [J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, 49(2): 39-45. [蔡杏伟, 熊鹰, 郭超, 等. 饮用水水源地盐龙湖鱼类群落结构特征及调控策略研究 [J]. 淡水渔业, 2019, 49(2): 39-45.]
- [29] Gao L C, Zhuang D D, Zhang K X, *et al.* Preliminary investigation on the change of economic fish quantity in main lakes of Yunnan Plateau [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1981, 16(1): 31-34. [高礼存, 庄大栋, 张开翔, 等. 云南高原主要湖泊经济鱼类数量变动的初步调查 [J]. 动物学杂志, 1981, 16(1): 31-34.]
- [30] Yuan G, Ru H J, Liu X Q. Fish diversity and fishery resources in lakes of Yunnan Plateau during 2007—2008 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 837-841. [袁刚, 茹辉军, 刘学勤. 2007—2008年云南高原湖泊鱼类多样性与资源现状 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 837-841.]
- [31] Wang L, Yu X F, Dou Q M, *et al.* Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Ulungur Lake [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(5): 533-547. [王乐, 于雪峰, 窦乾明, 等. 乌伦古湖鱼类群落特征及其与环境因子的关系 [J]. 中国水产科学, 2023, 30(5): 533-547.]
- [32] Xiang T, Dong X H, Guo C, *et al.* The impacts of climate change on the distribution of *Pelteobagrus fulvidraco* by random forest model [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(6): 1262-1270. [项涛, 董响红, 郭超, 等. 基于随机森林模型预测气候变化对黄颡鱼适生区的影响 [J]. 水生生物学报, 2019, 43(6): 1262-1270.]
- [33] Guo Z Q. Study on niche differentiation of two species of invasive goby [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. [郭志强. 两种同属入侵鰕虎鱼生态位分化的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.]
- [34] Beatty S J, Allen M G, Whitty J M, *et al.* First evidence of spawning migration by goldfish (*Carassius auratus*); implications for control of a globally invasive species [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2017, 26(3): 444-455.
- [35] Cucherousset J, Olden J D. Ecological impacts of nonnative freshwater fishes [J]. *Fisheries*, 2011, 36(5): 215-230.
- [36] Brandt S B. The effect of thermal fronts on fish growth: a bioenergetics evaluation of food and temperature [J]. *Estuaries*, 1993, 16(1): 142-159.
- [37] Wu Z, Li J, Zhu S L, *et al.* Seasonal variation of fish density and behavior in Shijiao Reservoir, Beijiag River by using hydroacoustic methods [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(3): 674-681. [武智, 李捷, 朱书礼, 等. 基于水声学的北江石角水库鱼类资源季节变动及行为特征研究 [J]. 中国水产科学, 2018, 25(3): 674-681.]
- [38] Zhu F, Rypel A L, Murphy B R, *et al.* Rapid life-history diversification of an introduced fish species across a localized thermal gradient [J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88033.
- [39] Yang T, Yuan C B, Cao T, *et al.* Preliminary study on recovery and optimization of submerged macrophyte community in Lake Erhai, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1777-1787. [杨桐, 袁昌波, 曹特, 等. 洱海沉水植物群落恢复与优化初探 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1777-1787.]
- [40] Tian Y Q, Chen X, Lv C C, *et al.* Diversity and distribution status of aquatic plants in the lakeshore zone of Lake Erhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 941-949. [田玉清, 陈欣, 吕超超, 等. 洱海湖滨带水生植物多样性及分布现状 [J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 941-949.]
- [41] Wang Y F, Pan H X, Wu Q L, *et al.* Impacts of human activity on Erhai Lake and countermeasures [J]. *Journal of Lake Science*, 1999, 11(2): 123-128. [王云飞, 潘红玺, 吴庆龙, 等. 人类活动对洱海的影响及对策分析 [J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 123-128.]
- [42] 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.]
- [43] Gao D C, Lv X J, Yang S K, *et al.* Study on the seasonal variation and current status of zooplankton in Erhai Lake [J]. *Environmental Science Survey*, 2021, 40(2): 1-6. [高登成, 吕兴菊, 杨四坤, 等. 洱海浮游动物季节变化及现状研究 [J]. 环境科学导刊, 2021, 40(2): 1-6.]
- [44] Yang J J, Guo L G, Yin C J, *et al.* Preliminary evaluation of ecological effects of silver and bighead carps to control cyanobacterial blooms in the early eutrophication lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 386-396. [杨姣姣, 过龙根, 尹成杰, 等. 富营养化初期湖泊放养鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*) 控藻生态效果的初步评估 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 386-396.]
- [45] Schaus M H, Vanni M J. Effects of gizzard shad on phytoplankton and nutrient dynamics: role of sediment feeding and fish size [J]. *Ecology*, 2000, 81(6): 1701-1719.
- [46] Wen H X, Peng S, Huang B, *et al.* Species composition and diversity of phytoplankton in Erhai Lake [J]. *Pearl River*, 2017, 38(8): 84-87. [文红星, 彭松, 黄斌, 等. 洱海浮游植物种类组成及多样性分析 [J]. 人民珠江, 2017, 38(8): 84-87.]
- [47] Yang M, Sheng P, Zhang Y P, *et al.* Characteristics of fish assemblages of Poyang Lake at the initial stage of the fishing ban [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(10): 1569-1579. [阳敏, 盛漂, 张燕萍, 等. 禁捕初期鄱阳湖鱼类群落的结构特征 [J]. 水生生物学报, 2022,

- 46(10): 1569-1579.]
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Prchalová M, Kubečka J, Čech M, *et al.* The effect of depth, distance from dam and habitat on spatial distribution of fish in an artificial reservoir [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2009, **18**(2): 247-260.
- [51] Jaenson T G. Overwintering of *Culex* mosquitoes in Sweden and their potential as reservoirs of human pathogens [J]. *Medical and Veterinary Entomology*, 1987, **1**(2): 151-156.
- [52] 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. 三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学研究 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(6): 1734-1744.]
- [53] 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): 147-155. [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): 147-155.]
- [54] Weng Y, Su Y P, Zhang Y Z, *et al.* Internal phosphorus loadings and fluxes of surface sediments in four seasons in Shanzi Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(6): 871-878. [翁圆, 苏玉萍, 张玉珍, 等. 福建山仔水库不同季节表层沉积物内源磷负荷分析 [J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 871-878.]
- [55] Tao J P, Wang X, Tan X C, *et al.* Diel pattern of fish presence at the Changzhou fishway (Pearl River, China) during the flood season [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, **31**(3): 451-458.
- [56] Draštik V, Kubečka J. Fish avoidance of acoustic survey boat in shallow waters [J]. *Fisheries Research*, 2005, **72**(2/3): 219-228.
- [57] Tao F, Liu K, Lin D Q, *et al.* Spatial pattern of phytoplankton community diversity in Xijiang River at Anqing, Anhui Province [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, **34**(2): 239-246. [陶峰, 刘凯, 蔺丹清, 等. 安庆市西江浮游植物群落多样性时空格局 [J]. *大连海洋大学学报*, 2019, **34**(2): 239-246.]
- [58] Tian Y, Kidokoro H, Watanabe T, *et al.* The late 1980s regime shift in the ecosystem of Tsushima warm current in the Japan/East Sea: evidence from historical data and possible mechanisms [J]. *Progress in Oceanography*, 2008, **77**(2): 127-145.
- [59] Luan Q S, Wu Q. Phytoplankton community succession and its relationship with the density distribution of major pelagic fishes in Laizhou Bay [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, **27**(5): 547-558. [栾青杉, 吴强. 2011年春、夏、秋三季莱州湾浮游植物群落演替及其与主要中上层鱼类资源密度的关系 [J]. *中国水产科学*, 2020, **27**(5): 547-558.]
- [60] 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.]
- [61] Wang J X, Zhang Y J, Liu C Q, *et al.* Function of aquatic plants in bioremediation of eutrophic Lakes [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(10): 6055-6057. [王军霞, 张亚娟, 刘存歧, 等. 水生植物在富营养化湖泊生物修复中的作用 [J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(10): 6055-6057.]
- [62] Wang S R, He Z J, Zhao H C, *et al.* Studying on total nitrogen content and release characteristics of ammonium in the surface sediment of Erhai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 256-261. [王圣瑞, 何宗健, 赵海超, 等. 洱海表层沉积物中总氮含量及氮的释放特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 256-261.]
- [63] Konan K J, Eyi A J, N'Da K, *et al.* Spatial and temporal variation of fish assemblage associated with aquatic macrophytes in three small lagoons of the South-eastern, Côte d'Ivoire [J]. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 2023, **26**(6): 9-19.
- [64] Kubečka J, Duncan A. Acoustic size vs. real size relationships for common species of riverine fish [J]. *Fisheries Research*, 1998, **35**(1/2): 115-125.
- [65] Lian Y X, Li C, Ye S W, *et al.* Fish spatial distribution patterns and controlling factors in Yudong Reservoir, Yunnan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1755-1765. [连玉喜, 李昌, 叶少文, 等. 云南高原渔洞水库鱼类空间分布格局及主要影响因子 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1755-1765.]
- [66] 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.]
- [67] Huang G. Study on temporal and spatial pattern and response process of fish community in Qingjiang Cascade Reservoirs [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. [黄耿. 清江梯级水库鱼类群落时空格局及响应过程研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.]

SPATIAL-TEMPORAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FISH RESOURCES IN ERHAI LAKE BASED ON HYDROACOUSTICS AND CATCH SURVEY METHODS

ZHANG Hang^{1,2}, LIANG Zhi-Ce^{1,2}, KUANG Chen-Yi^{1,2}, ZHOU Ting^{1,2}, LIAO Chuan-Song¹,
YUAN Jing¹, GUO Chuan-Bo^{1,2} and LIU Jia-Shou^{1,2}

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

Abstract: Erhai Lake, the second largest plateau freshwater lake in Yunnan Province, is known for its unique fish resources. In order to understand the temporal and spatial dynamics of fish resources, we evaluated the community structure and spatial-temporal distribution of fish in Erhai Lake by using hydroacoustics and catch survey methods from 2022 to 2023 this study. Additionally, the relationship among fish community structure, fish distribution characteristics, and environmental factors was analyzed. A total of 22 fish species were identified in the fishery survey, belonging to 17 genera, 8 families, and 4 orders, with *Rhinogobius giurinus* being the dominant species. The hydroacoustic survey results showed that the TS value of fish mainly ranged from -70 to -58 dB (total length 1.2—5.0 cm) in four seasons, accounting for 88.40%, 83.03%, 84.53%, and 82.92% in summer, autumn, winter, and spring, respectively. The average target intensity of fish in summer, autumn, winter, and spring were (-59.08 ± 0.08) dB, (-54.99 ± 0.15) dB, (-55.90 ± 0.16) dB, and (-58.07 ± 0.18) dB, respectively. Fish densities were as follows: (23851.61 ± 889.30) ind./ha in summer, (14185.69 ± 1106.54) ind./ha in autumn, (2423.19 ± 179.54) ind./ha in winter, and (3382.16 ± 440.71) ind./ha in spring. Spatially, fish in summer and spring were primarily concentrated in the northern region. Vertically, a higher proportion of fish were found in the 2.5—6.5 m water layer during summer, autumn, and spring, accounting for 32.99%, 30.65%, and 62.78%, respectively, whereas in winter, 34.05% of the fish were found in the 14.5—18.5 m water layer. Significant vertical migration was observed in winter and spring. Redundancy analysis (RDA) showed that water temperature (WT), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), transparency (SD), and high salinity index (COD_{Mn}) significantly affected the distribution of small fish in Erhai Lake. This study demonstrates the feasibility of combining acoustic surveys with catch surveys to investigate the spatial and temporal distribution of fish resources. The results provide a scientific basis for the protection and restoration of fish resources in Erhai Lake.

Key words: Hydroacoustics; Community structure; Spatial and temporal distribution; Erhai Lake