

禁渔初期鄱阳湖流域柘林水库鱼类资源时空分布格局及影响因子*

孟子豪, 杨德国, 胡飞飞, 陈康, 刘璐, 向邈, 李学梅**

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水鱼类种质资源与生物技术重点实验室, 武汉 430223)

摘要: 为了解长江十年禁渔初期鄱阳湖流域柘林水库鱼类资源时空分布格局及其影响因子, 于 2020 年 9 月 (秋季)、12 月 (冬季) 和 2021 年 4 月 (春季)、7 月 (夏季), 采用渔获物抽样和水声学探测相结合的方法对柘林水库鱼类群落和资源密度的时空动态进行调查, 并利用广义可加模型 (generalized additive model, GAM) 识别了影响鱼类资源变化的关键因子。调查期间共采集鱼类 5 目 12 科 36 属 54 种, 鲤形目鱼类占比最高为 70.38%, 鳊 (*Hypophthalmichthys nobilis*)、鲮 (*Hemiculter leucisculus*) 和黄尾鲮 (*Xenocypris davidi*) 为优势种。水声学探测结果表明, 鱼类密度 (ind./1000 m³) 具有明显的时空异质性, 春、夏季 (10.42±17.57 和 16.34±11.89) 显著高于秋、冬季 (2.74±3.33 和 2.02±5.07), 中游 (3.18±4.76) 则显著低于上、下游 (11.20±15.66 和 5.37±9.33)。GAM 模型对鱼类密度的总偏差解释率为 84.6%, 其中经纬度、季节、叶绿素 *a* 浓度和溶解氧对鱼类密度的影响效应显著, 水深和总氮的影响不显著。鱼类主要分布在 29.12°~29.30°N, 115.05°~115.15°E 区域, 显著影响鱼类分布的溶解氧和叶绿素 *a* 浓度范围分别为 9~12 mg/L 和 5~15 μg/L。柘林水库鱼类呈现小型化趋势, 为维护生态系统稳定性和鱼类多样性, 后续需加强对鱼类群落结构和时空分布格局影响的机制方面的相关研究。

关键词: 鱼类资源; 水声学; 广义可加模型; 鄱阳湖流域; 柘林水库; 时空分布

Fish resources spatio-temporal distribution patterns and controlling factors in Zhelin Reservoir, Lake Poyang Basin during early fishing ban period*

Meng Zihao, Yang Deguo, Hu Feifei, Chen Kang, Liu Lu, Xiang Miao & Li Xuemei**

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

Abstract: A combination of multi-mesh gillnet and hydroacoustic survey was undertaken in September (Autumn), December (Winter) 2020 and April (Spring), July (Summer) 2021 in Lake Poyang Basin, Jiangxi Province to understand the spatiotemporal distribution patterns of fish resources and its controlling factors in Zhelin Reservoir during early fishing ban period. Generalized additive model (GAM) was used to identify the key factors affecting the dynamics of fish resources. During the survey, a total of 5440 individuals were recorded, including 54 species representing 36 genera, 12 families and 5 orders with the dominant Cyprinidae including *Hypophthalmichthys nobilis*, *Hemiculter leucisculus* and *Xenocypris davidi* for 70.38%. The hydroacoustic survey indicated that fish density (ind./1000 m³) showed significant spatial-temporal heterogeneity, which was significantly higher in spring and summer (10.42±17.57 and 16.34±11.89) than those in autumn and winter (2.74±3.33 and 2.02±5.07). The fish density in the midstream (3.18±4.76) was significantly lower than those in the upstream and downstream (11.20±15.66 and 5.37±9.33). The total deviation explanation rate of GAM model for fish density was 84.6%, in which the latitude and longitude, season, chlorophyll-*a* concentration and dissolved oxygen had significant effects on fish density, while the effects of water depth and total nitrogen were not significant. Fish resources were mainly distributed in the regions of 29.12°–29.30°N and 115.05°–115.15°E, and the ranges of dissolved oxygen and chlorophyll-*a* were 9–12 mg/L and 5–15 μg/L, respectively. There was a trend of miniaturization of fish species in Zhelin Reservoir. In order to maintain the ecosystem stability and fish diversity, it is necessary to strengthen research on the mechanisms that affect the structure and spatiotemporal distribution pattern of fish communities in the future.

* 2022-12-13 收稿; 2023-02-09 收修改稿。

财政部和农业农村部现代农业产业技术体系专项资金项目 (CARS-46) 和中国水产科学研究院基本科研业务费院级湖库增殖渔业创新团队项目 (2020TD57) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: xmli@yfi.ac.cn。

Keywords: Fish resources; hydroacoustic; generalized additive model; Lake Poyang Basin; Zhelin Reservoir; spatio-temporal distribution

鱼类是水生态系统的重要组成部分,在维系自然界物质循环、能量流动、缓解温室效应以及维护生物多样性、保持生态平衡等方面都发挥着重要的作用,其群落结构和多样性变化对水生态系统的稳定性有重要影响^[1]。鱼类种群的分布格局并非随机的,已有的研究表明水温、溶解氧、叶绿素 *a* 等水环境因子是影响鱼类时空分布格局的关键因子。鱼类是变温动物,温度的变化对其生长活动有重要影响^[2],而充足溶解氧浓度保证鱼类正常呼吸作用的关键,决定鱼类的垂直分布格局^[3]。叶绿素 *a* 则表征了水体的营养水平,鲤科鱼类倾向于分布在营养盐含量高的水域^[4],因此了解鱼类的分布模式与影响因子,既是基本的鱼类生态问题,也是对合理管理渔业资源的必要条件^[5]。江西柘林水库是长江中游鄱阳湖流域的大型峡谷型水库,由人工拦截鄱阳湖五大支流之一的“修河”而成^[6]。作为江西省最大的人工湖,柘林水库不仅是江西省九江市重要的饮用水水源地,还是鳃国家级水产种质资源保护区的所在地,在水源涵养、洪水调蓄、旅游开发、渔业养殖以及生物多样性保护等方面均具有重要的生态作用^[7]。近年来随着社会进步和经济发展,库区周边的土地利用形式更加多样化,人类活动的干扰强度不断增大,对库区的水质和生态环境造成了一定的影响,局部水域的水生态有逐步退化的迹象^[8],陈康等^[9]发现柘林水库鱼类群落结构和生物多样性具有明显的时空变化特征,且部分库区的多样性水平较低,生态系统抗干扰能力较弱,为保护长江水系渔业资源、维护生物多样性、修复水域生态系统,为期十年的禁渔令自 2020 年 1 月 1 日正式实施^[10],在此背景下对柘林水库渔业资源的科学监测与准确评估不仅是后续评估禁渔效果的前提,也是相关部门制定渔业资源管理政策的基础,更是努力践行“向江河湖海要食物”大食物观的重要举措。

相比传统渔获物调查方法,水声学方法具有更广的调查范围、更高的准确度、更快速、高效、连续获取数据、更低的成本以及不损伤鱼类等优点,目前已被广泛应用于鱼类资源的定量评估中^[11-12]。此外,水声学结合 GIS、遥感等其他技术方法,在鱼类集群行为分析、濒危物种保护、栖息地修复与适宜性评价^[13-14]以及水生植物盖度评估^[15]等方面的研究也有广阔的应用前景^[16-19]。准确识别和评估环境因子对鱼类种群分布的影响是渔业资源学研究的必要组成部分^[20],广义可加模型(generalized additive model, GAM)能够有效地解释鱼类分布与环境因子间的响应关系,是研究鱼类时空分布格局及其与环境因子关系的重要方法之一^[21]。本研究利用 2020 年 9 月(秋季)、12 月(冬季)和 2021 年 4 月(春季)、7 月(夏季)4 个季度的水声学、渔获物及水环境调查数据,阐明了柘林水库鱼类资源的时空分布格局,并运用 GAM 模型分析了鱼类资源与环境因子的关系,旨在为基于水声学方法的湖库鱼类资源定量评估技术和智慧捕捞技术的建立提供数据基础,也为禁渔背景下柘林水库渔业资源的保护和可持续利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

柘林水库位于修河流域(29°03'~29°27'N, 115°04'~115°40'E),水库坝址以上汇水区域 9340 km²,水域面积 308 km²,总容量 79.2 亿 m³,正常水位 65 m,平均水深 16.3 m,最大水深 45 m,流域内大小支流有 603 条,库区分布有 2000 km²以上的岛屿 1667 个。柘林水库属亚热带季风气候,四季分明,雨水充沛,流域年平均降水量为 1611.8 mm^[6-8]。

1.2 渔获物与水环境调查

水声学调查期间,于柘林水库的上、中、下游水域分季节同步开展渔获物和水环境调查,样点布设如图 1 所示。渔获物调查网具为复合三层流刺网和地笼,刺网的中层网目分别为 2.7、8、14 cm,规格(高×长)分别为 2 m×50 m、3 m×50 m 和 5 m×50 m,地笼截面为 30 cm×30 cm,网目 1.2 cm,长度 15 m,每个采样点布设 3 条刺网和 2 个地笼,放置过夜(12 h)后对采集到的渔获物进行种类鉴定和生物学测量,鉴定方法参照《中国动物志》^[22-23]。鱼类重要性指数(IRI)计算公式如下:

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

式中,*N%*为某一物种鱼类尾数占总尾数的比例,*W%*为某一物种鱼类生物量占总渔获物生物量的比例,*F%*

为某一物种出现样点数占总样点数的比例。 $IRI > 1000$ 为优势种, $1000 > IRI > 100$ 为重要种。

采用哈希 HQ40d 便携式多参数水质分析仪现场测定表层水温、pH、溶解氧,透明度用塞氏盘测定,水深用 SM-5 测深仪测定。取 1 L 水样于 PE 塑料瓶中,冷藏保存带回实验室分别测定总氮、总磷、总悬浮物和叶绿素 a 等,分析方法按照《水和废水监测分析方法》进行。

1.3 水声学数据获取与分析

于 2020 年 9、12 月和 2021 年 4、7 月采用“之”字形航线在柘林水库开展声学调查(图 1),探测设备为便携式分裂波束科学鱼探仪(Simrad EK80, Norway),换能器的型号为 ES200-7C,工作频率为 200 kHz,半功率角 7° ,发射功率为 60 W,脉冲宽度为 64 μ s。调查船为江西省山水武宁渔业公司提供的渔业用船(赣武渔 20171),将换能器固定于船舷右侧水下约 0.5 m,方向垂直向下,船速约为 10 km/h。2020—2021 年 4 次调查的覆盖率分别为 8.4%、12.2%、8.3% 和 7.4%,达到了获取可靠水声学评估结果的取样强度标准^[24-25]。使用 EK80 软件采集水声学及地理坐标数据,并存储于联想 T14 便携式计算机。为消除水环境差异对换能器的影响,探测前使用直径 13.7 mm 的钨铜金属球参照标准校正流程对 Simrad EK80 设备进行校正。

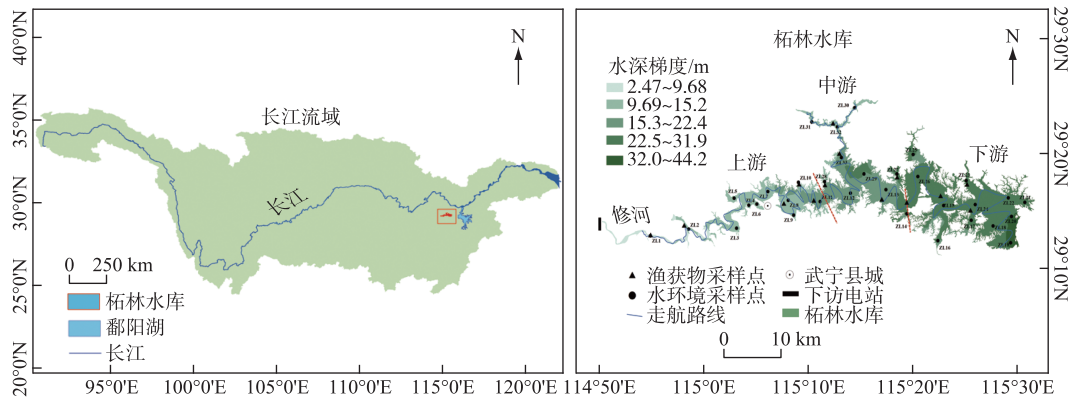


图 1 柘林水库渔获物与水环境调查采样点和水声学调查走航路线示意

Fig.1 Distribution of sampling sites and routes of hydroacoustic survey in Zhelin Reservoir

使用 Echoview 12.0 软件对 EK80 软件程序采集的水声学数据进行分析,并通过交叉过滤方法对图像进行处理,消除噪声干扰并准确提取信噪比较低的信号,设置信号目标强度(target strength, TS)背景噪声阈值为 < -70 dB,采用回波积分法统计鱼类资源密度,以每 3000 个 ping 为 1 个采样单元,并根据采样单元的密度计算整个走航区域的密度平均值。参照 Foote^[26]提出的鱼类 TS 值与鱼类全长的经验公式对鱼类长度进行估算,为:

$$TS = 20 \lg L - 67.5 \quad (2)$$

式中, TS 为鱼类的目标强度(dB); L 为目标鱼体的全长(cm);67.5 为常数。

1.4 广义可加模型(GAM)构建

基于鱼类密度栅格数据,运用 ArcGIS 10.2 的空间分析工具提取水环境采样点的鱼类密度数据,使环境数据与鱼类密度数据一一对应^[27]。使用广义可加模型分析柘林水库鱼类密度与时空和环境因子的关系,根据方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)判断因子的多重共线性^[28],剔除 $VIF > 4$ 的 WT (7.06) 和 pH (4.16),以 \ln 转化后的鱼类密度为响应变量构建 GAM 模型,其表达式为:

$$\ln(\text{Density}) = s(\text{lon}, \text{lat}) + s(\text{season}) + s(\text{DO}) + s(\text{TC}) + s(\text{WD}) + s(\text{TN}) + s(\text{TP}) + s(\text{TSS}) + s(\text{Chl.}a) \quad (3)$$

式中, $\ln(\text{Density})$ 表示鱼类密度的自然对数, s 为自然样条平滑函数, $s(\text{lon}, \text{lat})$ 表示鱼类密度分布是经度和纬度相互作用的结果;season 表示季节变量,即春、夏、秋、冬;DO、TC、WD、TN、TP、TSS 和 Chl. a 分别表示溶解氧(mg/L)、透明度(cm)、水深(m)、总氮(mg/L)、总磷(mg/L)、总悬浮物(mg/L)和叶绿素 a (μ g/L)。采用逐步回归方法依次将解释变量加入到模型中,结合赤池信息(Akaike information criterion, AIC)和决策系数 R_{adj}^2 对变量进行筛选,AIC 值越小、 R_{adj}^2 越大则模型的拟合效果越好,利用 F 检验评估变量的显著性^[29]。

1.5 数据分析与可视化工具

运用 ArcGIS 10.2 绘制水声学航线及采样点分布图,用反距离加权法 (IDW) 进行栅格插值分析鱼类密度 (Density, ind./1000 m³) 的时空分布格局。利用非参数 Kruskal-Wallis 检验对不同采样季节和区域的鱼类密度进行显著性检验,显著水平为 0.05^[30]。解释变量的 VIF 检验、GAM 模型的构建与检验在 R v4.1.2 中分别通过 R 包 ‘car’ 和 ‘mgcv’ 完成,用 R 软件 ‘ggplot2’ 包绘图。

2 结果与分析

2.1 渔获物组成

调查期间共采集鱼类 5440 尾,总重为 956691.7 g,隶属 5 目 12 科 36 属 54 种(附表 I)。其中,鳊 (*Hypophthalmichthys nobilis*)、鳙 (*Hemiculter leucisculus*) 和黄尾鲮 (*Xenocypris davidi*) 为优势种 (*IRI*>1000),其数量分别占总数量的 6.16%、56.05%、8.51%,其重量分别占总重量的 64.42%、8.12%、7.95%。鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、鲫 (*Carassius auratus*) 和翘嘴鲌 (*Culter alburnus*) 等 13 种鱼类为重要种 (*1000*>*IRI*>*100*),其中数量和重量占比超过 1% 的物种数分别为 9 种和 5 种,但仅有蒙古红鲌 (*Chanodichthys mongolicu*) 和鳊 (*Parabramis pekinensis*) 的数量和重量占比均超过 1%。除了贝氏鳊 (*Hemiculter bleekeri*)、拟尖头鲌 (*Culter oxycephaloides*)、斑条鲮 (*Acheilognathus taenianalis*) 和银鲌 (*Squalidus argentatus*) 外的其他重要种在 4 个季节均采到,拟尖头鲌在冬季未采到,贝氏鳊、斑条鲮和银鲌在秋季均未采到(表 1)。

表 1 水声学调查期间柘林水库渔获物种类组成*
Tab.1 Composition of fish during hydroacoustic survey in Zhelin Reservoir

鱼类种类	全长/cm		体重/g		数量 占比/%	重量 占比/%	优势度 <i>IRI</i>	出现季节
	范围	平均值	范围	平均值				
鳊	14.5~90.0	52.2	28.2~5500.0	1782.5	6.16	62.42	6857	春、夏、秋、冬
鳙	8.0~28.0	15.2	3.1~149.3	25.5	56.05	8.12	6417	春、夏、秋、冬
黄尾鲮	7.5~52.0	25.7	3.7~4007.1	164.3	8.51	7.95	1646	春、夏、秋、冬
鲢	20.0~77.0	45.1	71.9~5050.0	1336.8	0.70	5.31	601	春、夏、秋、冬
蒙古红鲌	11.0~66.0	25.9	8.1~2500.0	223.0	2.30	2.91	521	春、夏、秋、冬
草鱼	16.8~78.0	36.6	20.4~4800.0	848.9	0.64	3.11	375	春、夏、秋、冬
鲫	7.3~36.0	15.8	4.4~658.5	73.6	2.24	0.94	318	春、夏、秋、冬
鳊	4.4~56.0	16.8	0.4~2420.0	172.4	1.47	1.44	291	春、夏、秋、冬
翘嘴鲌	10.6~37.5	23.2	8.2~295.7	80.4	1.65	0.76	241	春、夏、秋、冬
贝氏鳊	11.0~24.0	16.1	10.5~106.6	34.1	2.50	0.48	224	春、夏、冬
鲤	10.9~70.0	40.9	13.9~4000.0	1237.8	0.28	1.94	222	春、夏、秋、冬
似鳊	5.1~18.2	12.5	1.5~62.2	19.9	1.71	0.19	190	春、夏、秋、冬
拟尖头鲌	10.4~36.0	16.9	7.1~285.9	42.8	1.80	0.44	168	春、夏、秋
斑条鲮	5.5~11.2	9.0	3.8~38.0	9.7	2.02	0.11	160	春、夏、冬
银鲌	7.1~13.8	9.4	1.6~47.3	13.5	1.54	0.12	125	春、夏、冬
蛇鲌	7.3~21.0	12.3	2.3~48.4	15.9	0.94	0.08	102	春、夏、秋、冬

* 仅列出了 *IRI*>100 的鱼类,加粗字体表示 *IRI*>1000,为优势种。

2.2 目标强度和推算全长的季节变化

4 个季节的单体目标强度和推算全长的变化特征如图 2 所示。鱼类单体频数随 *TS* 值增加呈下降的变化趋势(图 2a),夏季超过 80% 单体 *TS* 分布在 -65~-60 dB 之间;春、秋季均以 -70~-65 dB 占优,分别为 57.40% 和 47.29%;冬季 *TS* 值在 -70~-65 dB 区间的频率最高为 23.97%,但与 -65~-60 和 -60~-55 dB 区间的占比差异不大,-60~-55 dB 区间的占比为 92.38%。鱼类单体频数随全长减小呈先降低后增加的趋势(图 2b),且均 10 cm 以内的小型个体为主,依次为夏季 (98.67%)>春季 (94.61%)>秋季 (91.67%)>冬季

(87.78%)。秋、冬季全长超过 20 cm 的单体频率分别为 3.99% 和 3.33%, 均显著高于春、夏季 (1.75% 和 0.50%); 春、夏、秋、冬季全长在 35~40 cm 的占比均为最低, 分别为 0.17%、0.03%、0.33% 和 0.22%。

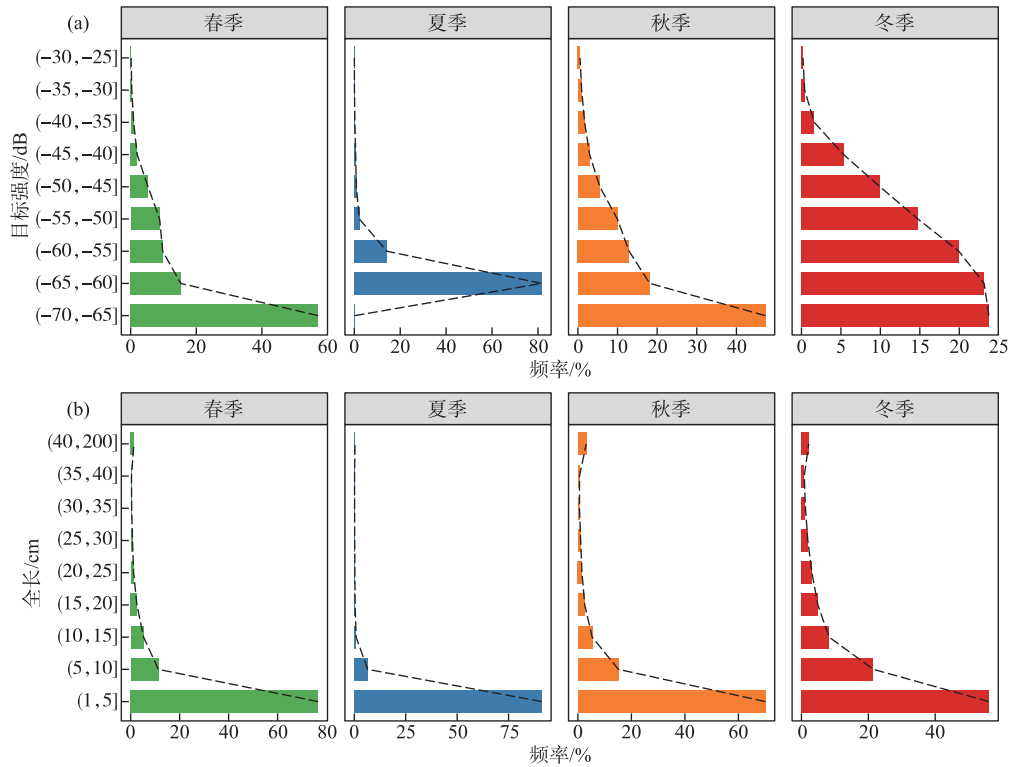


图 2 柘林水库鱼类目标强度和全长的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of fish target strength and length in Zhelin Reservoir

2.3 鱼类资源的时空分布

柘林水库鱼类密度具有明显时空异质性(图 3), 调查期间鱼类密度的变化范围和均值分别为 0~117.50 和 7.74 ind./1000 m³。季节间, 夏季平均密度最高, 为 (16.34±11.89) ind./1000 m³, 显著高于其他季节 ($P < 0.05$); 春季 ((10.42±17.57) ind./1000 m³) 显著高于秋、冬季, 但秋季和冬季间的差异不显著 ($P > 0.05$), 均值分别为 (2.74±3.33) 和 (2.02±5.07) ind./1000 m³ (图 3e)。空间上, 上游的密度范围为 0~117.50 ind./1000 m³, 均值为 (11.20±15.66) ind./1000 m³, 显著高于中、下游 ($P < 0.05$); 中游密度最低为 (3.18±4.76) ind./1000 m³, 显著低于下游 (5.37±9.33) ind./1000 m³, $P < 0.05$ (图 3f)。

2.4 GAM 模型构建

基于 AIC 和 R_{adj}^2 变化对逐步回归模型进行筛选(表 2), 当拟合 GAM 模型逐步加入 TP 和 TC 后, 模型 (Fit5 和 Fit8) 的 AIC 值变大, R_{adj}^2 变小, 故在模型中予以去除。因此, 最优 GAM 模型解释变量为 lon、lat、season、Chl.a、TN、DO、WD 和 TSS, 该模型的累计偏差解释率为 84.6%, AIC 值为 228.99, R_{adj}^2 值为 0.784。解释变量的 F 检验结果表明(表 3), lon、lat 和 season 与密度的关系极显著 ($P < 0.001$), Chl.a 和 DO 与密度的关系显著 ($P < 0.01$), 其他解释变量与密度的关系均不显著 ($P > 0.05$)。

不同解释变量对密度的影响效应如图 4 所示。所有解释变量对鱼类密度的影响效应都是非线性的。空间效应方面, 经纬度对鱼类密度具有极显著的影响效应 ($P < 0.001$), 图 4a 中黑色实线表明鱼类分布区域, 鱼类主要分布在 29.12°~29.30°N, 115.05°~115.15°E 区域附近, 红色和绿色虚线代表渔场分布的置信区间。时间效应方面, 季节变化对鱼类密度具有极显著的影响效应 ($P < 0.001$), 自春季至冬季呈先升高后降低

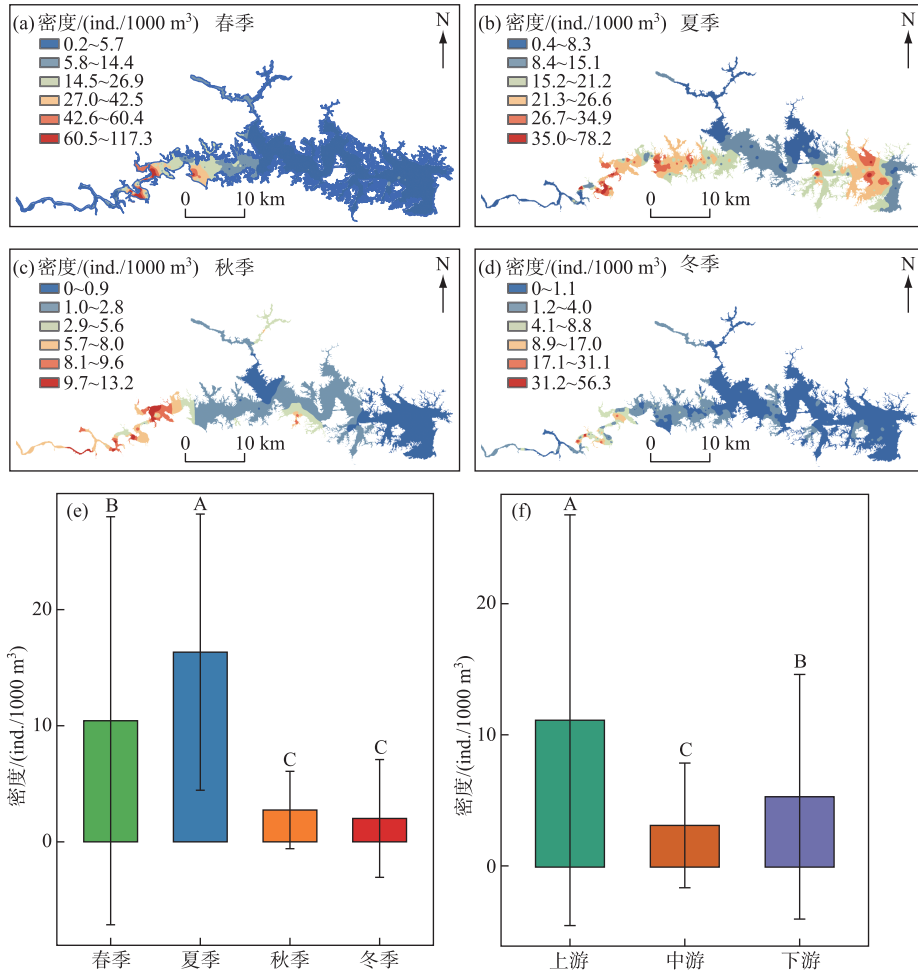


图3 柘林水库鱼类密度的时空分布

Fig.3 Spatial and temporal distribution of fish density in Zhelin Reservoir

表2 广义可加模型(GAM)逐步回归分析

Tab.2 GAMs stepwise regression analysis

	df	AIC	R^2_{adj}	Deviance explained	Response variables
Fit1	8.18	311.44	0.423	45.8%	Chl. <i>a</i>
Fit2	13.66	280.01	0.596	64.3%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat
Fit3	16.48	255.70	0.689	73.3%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season
Fit4	22.09	249.27	0.720	77.6%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season ,TN
Fit5	18.49	254.14	0.698	74.8%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season ,TN ,TP
Fit6	25.78	235.58	0.762	81.8%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season ,TN ,DO
Fit7	29.83	228.22	0.784	84.3%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season ,TN ,DO ,WD
Fit8	30.87	229.54	0.782	84.4%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season ,TN ,DO ,WD ,TC
Fit9	31.23	228.99	0.784	84.6%	Chl. <i>a</i> ,lon ,lat ,season ,TN ,DO ,WD ,TSS

的变化趋势,夏、秋季的影响效应高于春、冬季(图 4b)。环境效应方面,随叶绿素 *a* 浓度升高,鱼类密度呈递减的波动式变化,分别在 5 和 42 $\mu\text{g/L}$ 处达到最大值和最小值(图 4c);鱼类密度与 DO 呈先降低后升高再降低的变化趋势(图 4d),在 8.0~10.0 和 12.0~13.0 mg/L 的变化范围内,密度与 DO 呈显著正相关($P<0.01$),密度最大值和最小值分别出现在 8.0 和 10.0 mg/L 处;随 WD 和 TN 升高,鱼类密度的变化趋于平稳(图 4e、图 4f)。

3 讨论

3.1 渔获物组成

渔获物调查记录柘林水库现有鱼类 54 种(附表 I),较我们 2020 年 9 月—2021 年 4 月的调查增加 1 种,为斑鳊(*Siniperca scherzeri*),鲤形目鱼类是柘林水库的主要物种,占物种总数的 70.38%,而柘林水库的历史调查数据记录鱼类 73 种,鲤形目鱼类占比 65.8%。鳊是 4 个季度的绝对优势种,其重量占比高达 62.24%,这与已有的研究结果一致^[9]。鳊作为一种江河洄游型鱼类,是柘林水库的优势种,这与柘林水库鳊苗种的增殖放流活动有关,据统计,江西省山水武宁渔业有限公司 2020—2021 年向柘林水库投放鳊苗种约 400 万尾。牟洪民等^[31]对红枫湖的研究也发现,连续多年的鳊增殖放流是目前湖中鳊占绝对优势的主要原因。调查还发现,柘林水库的中小型鱼类在渔获物中均具有相对较高的数量占比,尤其是绝对优势种鳊,其数量占比超过了 56%,在经过冬季捕捞作业活动后,柘林水库的鳊、银鲫等的小型鱼类优势度呈上升的趋势^[9],表明捕捞作业活动也会改变鱼类的群落结构特征,使鱼类向个体较小的种类转变^[32]。

表 3 基于 *F* 检验的响应变量的显著性分析
Tab.3 Significance analysis of response variables based on *F* test

	edf	Ref.df	<i>F</i>	<i>P</i>
s(Chl.a)	8.089	8.726	23.43	0.002**
s(lon,lat)	7.342	10.005	8.17	0.000***
s(season)	1.939	1.991	20.06	0.000***
s(TN)	1.017	1.033	0.03	0.924
s(DO)	6.327	7.468	3.59	0.002**
s(WD)	3.118	3.861	1.88	0.137

** 和 *** 分别表示显著水平为 0.01 和 0.001。

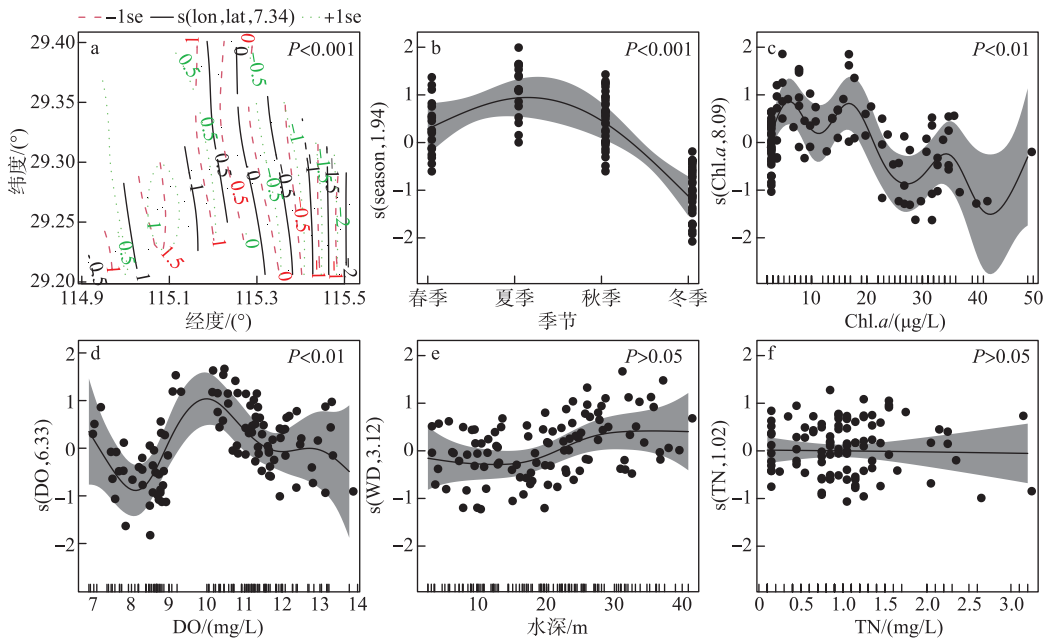


图 4 不同解释变量对柘林水库鱼类密度的影响效应

Fig.4 Effect of different response variables on fish density in Zhelin Reservoir

3.2 水声学探测的可靠性

水声学探测发现鱼类单体平均目标强度和推算全长分别为-58.5 dB 和 7.9 cm,说明柘林水库的鱼类个

体较小。该结果与陈文静等^[33]鄱阳湖鱼类单体目标强度(-56.4 dB)和推算全长(7.6 cm)相似。研究还发现,调查期间鱼类目标强度范围在-70~-35 dB的占比为99.77%,推算全长范围在0.7~20 cm的占比为98.96%,说明柘林水库的鱼类以中小型鱼类为主。此外,夏季全长低于10 cm鱼类占比高达98.67%,显著高于其他季节,这是因为多数鱼类的繁殖期一般为5~7月份,能够在库区自然繁殖的鲫、黄尾鲮等鱼类的幼鱼数量增加导致小型个体占比增加。在渔获物调查中,优势种鳊、黄尾鲮和重要种蒙古红鲌、鲫等鱼类的平均全长分布在3.5~39.0 cm之间,占比在92.2%以上,平均全长大于40 cm的鲢、鳙和鲤等鱼类的数量占比分别为0.70%、6.16%和0.28%,合计为7.13%,表明水声学探测目标全长推算与渔获物调查结果具有较好的一致性。尽管如此,本研究还发现水声学探测推算和渔获物调查鱼类全长范围分别为0.7~133.4和3.2~90.0 cm,两者并非完全一致,向伶俐等^[34]对嘉陵江中流蓬安段的研究发现,2018年7月-2019年4月的水声学探测和渔获物调查的鱼类全长范围分别为0.8~120.0和2.6~79.0 cm,这与本研究结果一致,分析认为这可能与捕捞使用的网具规格有关,本研究调查使用的刺网最小网目为2.7 cm,较小体型的幼鱼被捕获概率较低。此外,水声学探测推算全长为133.4 cm,渔获物调查的最大个体全长仅为90 cm,而柘林水库是鳢国家级水产种质资源保护区的所在地,鳢(*Elopichthys bambusa*)作为一种大型凶猛性鲤科鱼类,有报道记载其最大可达170 cm左右^[35],因此,推测水声学探测的大个体信号可能是鳢。

3.3 鱼类资源量的时空分布格局及其影响因子

柘林水库鱼类密度的时空分布格局差异显著,且GAM模型显示季节和空间对鱼类密度具有极显著影响效应(图4a、图4b)。自春季至冬季,鱼类密度呈现先升高后降低的变化趋势,春、夏季的密度显著高于秋、冬季。由春季至夏季(图3),水温逐渐升高,有利于鱼类的生长和繁殖活动,5~7月份后,鳊、鲫、黄尾鲮和鲌类进入繁殖期^[33],幼鱼数量大量增加,因此鱼类密度会显著增加。在秋、冬季,鱼类的越冬行为活动增强,鱼类开始向水下的石堆、洞穴等复杂的生境迁移和隐匿,不利于水声学探测,造成秋、冬季水声学探测的鱼类密度降低^[36]。此外,武宁渔业公司在柘林水库进行鲢、鳙等滤食性鱼类的生态渔业经营活动,春季的增殖放流和冬季的捕捞活动也可能是春季的鱼类密度显著高于冬季的原因之一^[37-38]。鱼类密度在上游最高,中游最低,且主要分布在29.12°~29.30°N, 115.05°~115.15°E区域附近(图3f、图4a)。鱼类的分布与水域的生境及周边环境条件等密切相关,柘林水库上游水域以修河河段为主,而水文联通性更高的河流生境更有利于产漂流性和粘性卵的鱼类产卵行为^[39],仔稚鱼的增加可能是该区域具有更高密度的主要原因。连玉喜等^[40]研究发现,云南高原的渔洞水库在接近河流生境的库尾和支流具有更高的鱼类密度。此外,上游水域周边土地利用形式也较为单一,主要以农田、林地为主,且水生植物更为丰富^[41],这些自然性更高的生境条件都为鱼类的栖息、生长等提供了更有利的条件^[42]。与上游相比,中、下游水域周边的土地利用形式更加多样化,而且中游水域靠近武宁县城,库区周边的人类活动干扰强度更大;下游水域则是庐山西海国家级风景名胜区的主体部分,大型节假日期间的旅游活动频繁,快艇、游船等对水体的扰动作用也会影响鱼类的分布,牟洪民等^[31]对红枫湖的研究结果也发现,赛艇、旅游观光船等人类活动密集的区域鱼类密度更低。此外,下游的岛屿众多,水下的底质条件更为复杂,更加有利于鳅鱼类的生存,增加了小型鱼类被捕食的压力^[43],导致鱼类密度较低,而复杂的水下环境也会对水声学探测的结果产生一定的影响。

鱼类资源的动态变化还与水环境因子密切相关^[17,44-45]。研究发现,溶解氧、叶绿素 a 、水深和总氮浓度是影响柘林水库鱼类密度时空分布的关键因子,且溶解氧和叶绿素 a 的影响效应显著,当溶解氧和叶绿素 a 浓度分别为10 mg/L和5 μ g/L时,其影响效应达到最大(图4c、图4d)。溶解氧会通过影响鱼类的摄食、繁殖、生长等活动而影响其时空分布格局^[46],而叶绿素 a 浓度是水体浮游植物密度的表征,反映了水体初级生产力的大小,藻类组成和密度对以浮游生物为食的鲢、鳙等滤食性鱼类的影响尤为显著。本研究结果表明,水深在小于15 m的范围内,水深对鱼类密度具有负影响效应(图4e),这与周磊等^[47]对洪潮江水库的研究结果一致。分析认为,鱼类更喜栖息在饵料生物丰富、大型捕食性鱼类更少的浅水区^[48],因此在柘林水库较浅的上游区域的鱼类密度显著高于中、下游区域。营养盐含量是影响鱼类分布的另一个重要因素,小型鱼类的丰度会随湖区氮、磷等营养盐含量的增加而增加,宋聘等^[37]对镜泊湖的研究也发现,春季和秋季的鱼类密度呈现从南至北递减的变化趋势,这可能与湖区南部支流汇入的有机物增加有关,就柘林水库而言,上游修河和其他支流流入库区的营养盐促进了浮游生物的生长,这为鱼类提供了丰富的饵料生物。此外,本研

究还发现,夏季的鱼类主要集中分布在中游和下游的深水水域,而上游浅水区域密度则显著较低,这可能是因为夏季浅水区水温较高,超过了鱼类的适宜温度范围,因此鱼类倾向于向水温适宜的深水区迁移。

3.4 展望与不足

水声学探测和渔获物相结合的方法已被广泛应用于湖泊、水库的鱼类资源量的评估,本研究使用的是鱼类 *TS* 值与鱼类全长的经验公式进行水声学信号的转换,可能会影响数据的准确度,在提高水声学信号的识别准确度和适用性更广泛的目标强度-鱼类体长经验公式的建立等方面仍然有待优化改进。在长江十年禁渔措施正式实施后,对水声学评估渔业资源的要求更高,而如何在复杂的水文底形条件下提高水声学评估鱼类资源的准确性仍是水声学研究需要重点关注的方向。此外,影响鱼类资源的因素是复杂多样的,本研究仅讨论水环境因子对鱼类的影响,后续应加强有关气候变化和人类活动干扰等因素对生态系统的影响。尽管长江十年禁渔措施的实施降低了鱼类繁殖群体遭受的捕捞压力,保护了仔稚鱼的自然生长^[39],但资源的恢复是一个循序渐进的过程,为了准确评估禁渔效果需要开展长期持续的监测和调查,还需要深入影响鱼类资源变动的机制方面的研究,为禁渔背景下柘林水库鱼类群落结构优化调整和生态渔业可持续发展提供技术支持。

4 结论

1) 基于水声学探测和渔获物调查鱼类全长范围分别为 0.7~133.4 和 3.2~90.0 cm,两者之间具有较好的一致性,捕捞网具规格、鱼类行为特征和复杂的水下环境可能是造成两者差异的主要原因。

2) 柘林水库鱼类资源密度的时空分布格局差异显著,春、夏季显著高于秋、冬季,上游显著高于中、下游,且主要分布在 29.12°~29.30°N, 115.05°~115.15°E 的区域。

3) 溶解氧和叶绿素 *a* 是柘林水库鱼类密度时空变化的关键环境因子,且当其浓度分别为 9~12 mg/L 和 5~15 μg/L 时,对鱼类分布的影响更为显著。

5 附录

附表 I 见电子版(DOI: 10.18307/2023.0635)。

6 参考文献

- [1] Cheng XY, Tao J, Wu RD *et al.* Functional ecology of freshwater fish: Research progress and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 810-822. DOI: 10.5846/stxb201808141737. [程馨雨, 陶捐, 武瑞东等. 淡水鱼类功能生态学研究进展. 生态学报, 2019, **39**(3): 810-822.]
- [2] 殷名称. 鱼类生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [3] 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. *Ecology of Freshwater Fish*, 2009, **18**(2): 247-260. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2008.00342.x.
- [4] Jeppesen E, Jensen JP, Sondergaard M *et al.* Response of fish and plankton to nutrient loading reduction in eight shallow Danish Lakes with special emphasis on seasonal dynamics. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(10): 1616-1627. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2005.01413.x.
- [5] Planque B, Loots C, Petitgas P *et al.* Understanding what controls the spatial distribution of fish populations using a multi-model approach. *Fisheries Oceanography*, 2011, **20**(1): 1-17. DOI: 10.1111/j.1365-2419.2010.00546.x.
- [6] Meng ZH, Li XM, Wang XG *et al.* Influence of cage fish-farming on tempo-spatial distribution of nitrogen and phosphorus in Zhelin Reservoir: A case study of Taiyangshan Bay. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(9): 2832-2840. [孟子豪, 李学梅, 王旭歌等. 网箱养殖对柘林水库氮磷营养盐时空分布的影响——以太阳山库湾为例. 环境化学, 2021, **40**(9): 2832-2840.]
- [7] Liu HL, Liao B. The major eco-environmental problems and its protection countermeasures in Zhelin Lake. *Jiangxi Science*, 2013, **31**(1): 48-52, 128. [刘慧丽, 廖兵. 柘林湖湖泊生态环境问题及保护对策. 江西科学, 2013, **31**(1): 48-52, 128.]
- [8] Zhang YG, Wang YL, Yang P *et al.* Morphological diversity and molecular characteristics of bloom forming *Dolichospermum* species in Lake Zhelin, Jiangxi Province. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 1076-1087. DOI: 10.18307/2020.0416. [张毅鸽, 王一郎, 杨平等. 江西柘林湖水华蓝藻——长孢藻(*Dolichospermum*)的形态多样性及其分子特征. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1076-1087.]
- [9] Chen K, Meng ZH, Li XM *et al.* Community structure and functional diversity of fishes in Zhelin Reservoir, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(11): 4592-4602. DOI: 10.5846/stxb202106031466. [陈康, 孟子豪, 李学梅等. 江西柘林水库鱼类群落结构及功能多样性分析. 生态学报, 2022, **42**(11): 4592-4602.]
- [10] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于长江流域重点水域禁捕范围和时间的通告. [EB/OL]. 2019-12-27/2020-01-01.

- [11] Arunjith TS, Cheng F, Wang Z *et al.* Diurnal distribution of fish abundance and size composition in the Danjiangkou Reservoir, China. *Indian Journal of Fisheries*, 2022, **69**(1): 54-60. DOI: 10.21077/ijf.2022.69.1.108072-06.
- [12] Orduna C, Encina L, Rodríguez-Ruiz A *et al.* Hydroacoustics for density and biomass estimations in aquaculture ponds. *Aquaculture*, 2021, **545**: 737240. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737240.
- [13] Flores NY, Collas FL, Mehler K *et al.* Assessing habitat suitability for native and alien freshwater mussels in the River Waal (the Netherlands), using hydroacoustics and species sensitivity distributions. *Environmental Modeling & Assessment*, 2022, **27**(1): 187-204. DOI: 10.1007/s10666-021-09776-4.
- [14] Li HF, Cao K, Wang DQ *et al.* Habitat suitability analysis of fish community in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River in winter. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(3): 341-354. [李慧峰, 曹坤, 汪登强等. 鄱阳湖通江水道越冬时期鱼类群落的栖息地适宜性分析. 中国水产科学, 2022, **29**(3): 341-354.]
- [15] Xu ZA, Wu DH, Wang Y. Application of DT-X echosounder in submerged macrophyte investigation of Taihu Lake. *Yangtze River*, 2016, **47**(17): 15-18. [徐兆安, 吴东浩, 王玉. DT-X 回声探测仪在太湖沉水植物调查中的应用. 人民长江, 2016, **47**(17): 15-18.]
- [16] Dong CY, Li JY, Zhang H *et al.* Fish resource status in the white-flag dolphin national nature reserve of Tian-e-Zhou oxbow, Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(3): 86-92. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202001060002. [董春燕, 李君轶, 张辉等. 长江天鹅洲白鱔豚国家级自然保护区鱼类资源现状. 水生态学杂志, 2021, **42**(3): 86-92.]
- [17] Li PJ, Wang ZG, Lin DQ *et al.* Space-time characteristics of fishery resources of the Dolphin Provincial Nature Reserve of the Yangtze River in Zhenjiang based on acoustic survey. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(1): 141-148. [李佩杰, 王召根, 蔺丹清等. 基于水声学的长江豚类省级自然保护区水域(镇江)渔业资源时空特征. 中国水产科学, 2022, **29**(1): 141-148.]
- [18] Grippo M, Zydlewski G, Shen HX *et al.* Behavioral responses of fish to a current-based hydrokinetic turbine under multiple operational conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(10): 1-11. DOI: 10.1007/s10661-020-08596-5.
- [19] Wen D, Li HZ, Wang XG *et al.* Demonstration of layout of fishway entrance based on fish clusters distribution and fish upstream passage. *Hydro-Science and Engineering*, 2021, (6): 89-96. DOI: 10.12170/20210808001. [文典, 李洪泽, 王晓刚等. 基于鱼类集群及上溯通道分析的鱼道进口位置论证. 水利水运工程学报, 2021, (6): 89-96.]
- [20] Link JS. Ecological considerations in fisheries management; When does it matter? *Fisheries*, 2002, **27**(4): 10-17. DOI: 10.1577/1548-8446(2002)0270010: ecifm>2.0.co;2.
- [21] Peng YX, Fang DA, Xu DP *et al.* Correlation between the temporal and spatial characteristics of larval *Ctenopharyngodon idellus* resource and hydrological factors in the Anqing section of the Yangtze River. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(2): 314-324. [彭云鑫, 方弟安, 徐东坡等. 长江安庆段草鱼仔稚鱼资源时空动态特征与水文因子的相关性. 中国水产科学, 2022, **29**(2): 314-324.]
- [22] Chen YY. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes II. Beijing: Science Press, 1988.
- [23] Yue PQ. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes III. Beijing: Science Press, 2000.
- [24] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied. *FAO Fisheries Report*, 1983, (300): 293-298.
- [25] Godlewska M, Długoszewski B, Doroszczyk L *et al.* The relationship between sampling intensity and sampling error—Empirical results from acoustic surveys in Polish vendace lakes. *Fisheries Research*, 2009, **96**(1): 17-22. DOI: 10.1016/j.fishres.2008.09.014.
- [26] Foote KG. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, **82**(3): 981-987. DOI: 10.1121/1.395298.
- [27] Fang Z, Chen YY, Chen XJ *et al.* Influence of environmental factors on the abundance of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in west-central Pacific Ocean determined using different models. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, **25**(5): 1123-1130. DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17462. [方舟, 陈洋洋, 陈新军等. 基于不同模型研究环境因子对中西太平洋鲣资源丰度的影响. 中国水产科学, 2018, **25**(5): 1123-1130.]
- [28] Zhang YX, Bian XD, Shan XJ *et al.* Spatio-temporal distribution of chub mackerel (*Scomber japonicus*) spawning grounds and its relationship with environmental factors in the offshore waters of Yantai-Weihai. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(4): 618-632. DOI: 10.12264/JFSC2021-0342. [张雨轩, 卞晓东, 单秀娟等. 烟威近岸海域鲈产卵场时空分布及其与环境因子的关系. 中国水产科学, 2022, **29**(4): 618-632.]
- [29] Niu MX, Zuo T, Wang J *et al.* Egg and larval distribution of *Liza haematocheila* and their relationship with environmental factors in the coastal waters of the Yellow River Estuary. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(3): 377-387. DOI: 10.12264/JFSC2021-0532. [牛明香, 左涛, 王俊等. 黄河口近岸海域鲈鱼卵、仔稚鱼分布及其与环境因子的关系. 中国水产科学, 2022, **29**(3): 377-387.]
- [30] Yan L, Li J, Zhang P *et al.* Effects of spatiotemporal and environmental factors on the fishing ground of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the South China Sea based on the Generalized Additive Model. *Marine Science Bulletin*, 2021, **40**(2): 17-223. [晏磊, 李杰, 张鹏等. 基于 GAM 模型的南海鳶乌贼 CPUE 时空分布及其与环境因子的关系. 海洋通报, 2021, **40**(2): 17-223.]
- [31] Mou HM, Yao JJ, Ni ZH *et al.* Hydroacoustic investigation on fish resources and spatial distribution in Hongfeng Lake. *South China Fisheries Science*, 2012, **8**(4): 62-69. [牟洪民, 姚俊杰, 倪朝辉等. 红枫湖鱼类资源及空间分布的水声学调查研究. 南方水产科学, 2012, **8**(4): 62-69.]

- [32] Mao ZG, Gu XH, Zeng QF *et al.* Community structure and diversity of fish in Lake Taihu. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(12): 2836-2842. DOI: 10.3321/j.issn: 1003-5427.2009.01.012. [毛志刚, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 太湖鱼类群落结构及多样性. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2836-2842.]
- [33] Chen WJ, 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 Lake Sci*, 2017, **29**(4): 923-931. DOI: 10.18307/2017.0416. [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. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 923-931.]
- [34] Xiang LL, Qin Q, Zeng Y *et al.* Fish resource assessment in the Peng'an section of the middle Jialing River based on hydroacoustic surveys. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(4): 95-102. [向伶俐, 秦强, 曾焯等. 基于水声学方法的嘉陵江中游蓬安段鱼类资源研究. 水生生态学杂志, 2022, **43**(4): 95-102.]
- [35] Li CC. Study on population ecology and natural multiplication rate control of Yellowcheek carp (*Elopichthys bambusa*) in reservoirs. *Freshwater Fisheries*, 1976, (11): 15-22. [李长春. 水库鳊鱼的种群生态学及其自然增殖率控制的初步研究. 淡水渔业, 1976, (11): 15-22.]
- [36] Lian YX, Huang G, Godlewska M *et al.* Hydroacoustic assessment of spatio-temporal distribution and abundance of fish resources in the Xiangxi River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 920-929. DOI: 10.7541/2015.121. [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. 水生生物学报, 2015, **39**(5): 920-929.]
- [37] Song D, Du X, Jin X *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics and resource assessment of fish in Jingbo Lake based on hydroacoustic detection. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 2095-2104. DOI: 10.18307/2022.0630. [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. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 2095-2104.]
- [38] Sun MB, Gu XH, Zeng QF *et al.* Seasonal and daily spatial distribution of fish in Lake Tianmu based on the hydroacoustic method. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(17): 597-5605. DOI: 10.5846/stxb201401010001. [孙明波, 谷孝鸿, 曾庆飞等. 基于水声学方法的天目湖鱼类季节和昼夜空间分布研究. 生态学报, 2015, **35**(17): 597-5605.]
- [39] Fernando CH, Holčák J. Fish in reservoirs. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 1991, **76**(2): 149-167. DOI: 10.1002/iroh.19910760202.
- [40] Lian YX, Li C, Ye SW *et al.* Spatial distribution pattern and main influencing factors of fish in Yudong Reservoir of Yunnan Plateau. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1755-1765. DOI: 10.18307/2018.0626. [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素. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1755-1765.]
- [41] Meng ZH, Yang DG, Chen K *et al.* Temporal and spatial distribution and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Zhelin Reservoir. *Environmental Chemistry*, 2023, **42**(1): 138-149. [孟子豪, 杨德国, 陈康等. 柘林水库表层沉积物氮、磷、有机质的时空分布及污染评价. 环境化学, 2023, **42**(1): 138-149.]
- [42] Jia CY, Wang K, Li HF *et al.* Spatial distribution and density changes of fish resources in East Dongting Lake during early fishing ban period. *South China Fisheries Science*, 2022, **18**(3): 48-56. DOI: 10.12131/20210148. [贾春艳, 王珂, 李慧峰等. 禁渔初期东洞庭湖鱼类资源的空间分布与密度变化. 南方水产科学, 2022, **18**(3): 48-56.]
- [43] Rypel AL, Layman CA, Arrington DA *et al.* Water depth modifies relative predation risk for a motile fish taxon in Bahamian tidal creeks. *Estuaries and Coasts*, 2007, **30**(3): 518-525. DOI: 10.1007/BF03036517.
- [44] Rodriguez MA, Lewis WM. Structure of fish assemblages along environmental gradients in floodplain lakes of the Orinoco River. *Ecological Monographs*, 1997, **67**(1): 109. DOI: 10.2307/2963507.
- [45] Xu GB, Wang L, Yang SF *et al.* Spatial distribution and habitat characteristics of fish swarm in fluctuating backwater zone of Three Gorges Reservoir in impoundment period. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(12): 6-52. DOI: 10.11988/ckyyb.20201212. [徐观兵, 王丽, 杨胜发等. 三峡水库变动回水区蓄水期鱼群空间分布及生境特征. 长江科学院院报, 2021, **38**(12): 6-52.]
- [46] Flood B, Wells M, Midwood JD *et al.* Intense variability of dissolved oxygen and temperature in the internal swash zone of Hamilton Harbour, Lake Ontario. *Inland Waters*, 2021, **11**(2): 162-179. DOI: 10.1080/20442041.2020.1843930.
- [47] Zhou L, Li YS, Shi J *et al.* Spatial distribution of fish resources and its correlation with environmental factors in the Hongchaojiang Reservoir based on hydroacoustic detection. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, **42**(1): 1-10. DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20191114005. [周磊, 李育森, 施军等. 基于水声学探测的洪潮江水库鱼类资源空间分布及其与环境因子的相关性. 渔业科学进展, 2021, **42**(1): 1-10.]
- [48] Wang K, Duan XB, Liu SP *et al.* Acoustic assessment of the fish spatio-temporal distribution during the initial filling of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River (China), from 2006 to 2010. *Journal of Applied Ichthyology*, 2013, **29**(6): 1395-1401. DOI: 10.1111/jai.12370.

附表 I 柘林水库鱼类种类名录
Attached Tab.I List of fish species in Zhelin Reservoir

目	科	亚科	属	种	拉丁名			
鳗鲡目	鳗鲡科		鳗鲡属	鳗鲡	<i>Anguilla japonica</i>			
			草鱼属	草鱼	<i>Ctenopharyngodon idella</i>			
			雅罗鱼亚科	赤眼鲮属	赤眼鲮	<i>Squaliobarbus curriculus</i>		
				青鱼属	青鱼	<i>Mylopharyngodon piceus</i>		
				棒花鱼属	棒花鱼	<i>Abbottina rivularis</i>		
				颌须鲃属	短须颌须鲃	<i>Gnathopogon imberbis</i>		
				蛇鲃属	光唇蛇鲃	<i>Saurogobio gymnocheilus</i>		
				鲃亚科	鲃属	华鲃	<i>Sarcocheilichthys sinensis</i>	
						黑鳍鲃	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	
					鲮属	花鲮	<i>Hemibarbus maculatus</i>	
					麦穗鱼属	麦穗鱼	<i>Pseudorasbora parva</i>	
					银鲃属	银鲃	<i>Squalidus argentatus</i>	
			蛇鲃属		蛇鲃	<i>Saurogobio dabryi</i>		
			鲤形目	鲤科	鲃亚科	鲃属	红鳍原鲃	<i>Cultrichthys erythropterus</i>
						华鲃属	华鲃	<i>Sinibrama wui</i>
							达氏鲃	<i>Culter dabryi</i>
							尖头红鲃	<i>Culter oxycephaloides</i>
							蒙古红鲃	<i>Culter mongolicus</i>
							拟尖头鲃	<i>Culter oxycephaloides</i>
							翘嘴鲃	<i>Culter alburnus</i>
						鲂属	团头鲂	<i>Megalobrama amblycephala</i>
						鲮属	油鲮	<i>Hemiculter bleekeri</i>
鲃属	鲃	<i>Parabramis pekinensis</i>						
	长春鲃	<i>Parabramis pekinensis</i>						
鲃亚科	似鲃属	似鲃	<i>Pseudobrama simoni</i>					
	鲃属	银鲃	<i>Xenocypris macrolepis</i>					
		黄尾鲃	<i>Xenocypris davidi</i>					
		大鳍鲃	<i>Acheilognathus macropterus</i>					
		斑条鲃	<i>Acheilognathus taenianalis</i>					
		短须鲃	<i>Acheilognathus barbatulus</i>					
鲃亚科		无须鲃	<i>Acheilognathus gracilis</i>					
		兴凯鲃	<i>Acanthorhodeus chankaensis</i>					
	鲃属	中华鲃	<i>Rhodeus sinensis</i>					
	鲤属	鲤	<i>Cyprinus carpio</i>					
鲤亚科	鲫属	鲫	<i>Carassius auratus</i>					
	鲤属	岩原鲤	<i>Procypris rabaudi</i>					

		鲢亚科	鲢属	鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>
			鳙属	鳙	<i>Aristichthys nobilis</i>
	鳊科	条鳊亚科	条鳊属	短体条鳊	<i>Homatula potanini</i>
颌针鱼目		鳊科	下鳊属	间下鳊	<i>Hyporhamphus intermedius</i>
		鲇科	鲇属	大口鲶	<i>Silurus meridionalis</i>
鲇形目		鲿科	黄颡鱼属	黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>
				瓦氏黄颡鱼	<i>Pelteobagrus vachelli</i>
		沙塘鳢科	黄黝鱼属	黄黝鱼	<i>Hypseleotris swinhonis</i>
				鳊	<i>Siniperca chuatsi</i>
	鲴科	鳊亚科	鳊属	大眼鳊	<i>Siniperca kneri</i>
鲴形目				长体鳊	<i>Siniperca roulei</i>
				斑鳊	<i>Siniperca scherzeri</i>
		鳊科	鳊属	乌鳊	<i>Channa argus</i>
		刺鳊科	刺鳊属	中华刺鳊	<i>Sinobdella sinensis</i>
	虾虎鱼科	虾虎鱼亚科	吻虾虎鱼属	子陵吻虾虎鱼	<i>Rhinogobius giurinus</i>