

DOI: 10.12264/JFSC2021-0469

鄱阳湖通江水道越冬时期鱼类群落的栖息地适宜性分析

李慧峰¹, 曹坤^{2,3}, 汪登强⁴, 丁放^{2,3}, 毛智慧^{2,3}, 俞立雄⁴, 王珂⁴, 段辛斌⁴,
贾春艳⁴, 陈大庆^{1,4}, 王琳^{1,2,3}

1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;
2. 中国水产科学研究院资源与环境研究中心, 北京 100141;
3. 农业农村部渔业遥感科学观测实验站, 北京 100141;
4. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 武汉 434020

摘要: 鄱阳湖通江水道是多种洄游性鱼类完成生活史过程的重要通道, 具有重要的生态功能, 对于长江中下游鱼类资源的养护及其多样性维持至关重要。为了解越冬时期鄱阳湖通江水道中不同体长鱼类资源的空间分布规律及栖息生境状况, 本研究将鱼类声学探测、生境遥感定量制图分析和三维水动力模拟相结合, 分别绘制出3种不同体长鱼类群落的水深(SI_D)、流速(SI_V)、坡度(SI_S)等单因子生境适宜度指数曲线, 并利用乘法建立栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型, 对通江水道中不同水域的鱼类生境适宜度进行对比和评估。结果表明, 鄱阳湖通江水道越冬时期鱼类平均全长为(10.1±5.73) cm, 主要分布在屏峰山以北的湖口县、鞋山和屏峰附近3个水域; 小体长鱼类群组(1~20 cm)水深的生境适宜度曲线为双峰型, 最适宜水深包括3.06~4.59 m和9.18~12.24 m两个区间, 流速为0.05~0.13 m/s, 坡度为0~2.23°; 中等体长组(20~40 cm)及大体长组(>40 cm)鱼类适宜的水深、流速和坡度的生境适宜度曲线均为单峰型, 其中中等体长组最适宜栖息的生境因子范围为水深9.18~13.77 m、流速0.05~0.13 m/s和坡度0~2.23°, 大体长组为13.77~15.3 m、0.10~0.13 m/s和0~2.23°。

关键词: 鄱阳湖; 栖息地适宜性指数; 最适栖息地分布; 鱼类声学探测; 遥感; 水动力模型

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)03-0341-14

据估计, 热带和亚热带拥有洪泛平原的河流鱼产量是无洪泛平原河流的100倍^[1]。鄱阳湖作为长江干流最大的洪泛平原湖泊, 周围拥有数千平方公里未被开垦的天然湿地。每逢夏季台风季节, 各支流汇水和长江水位升高引起江水倒灌入湖, 湖水面积可达4000 km²以上, 整个鄱阳湖流域可达162200 km²。冬季由于缺乏支流水量补给和长江水位降低引起湖水外泄, 水域收缩为河流状湖泊, 面积仅数百平方千米, 露出巨大的湖底湿地和季节性草滩^[2]。鄱阳湖通江水道与长江之

间频繁的物质和能量交换, 加上静水和流水生境的相互作用, 鱼类资源相当丰富, 它既为江湖洄游性鱼类提供了重要的摄食和育肥场所, 也是某些过河口洄游性鱼类的繁殖通道或繁殖场, 对长江鱼类种质资源保护及种群的维持具有重大意义^[3-6]。

近年来由于水利工程兴建、外来物种入侵、过度捕捞、地下水开采、河漫滩阻隔、点源和面源污染等人类活动影响及气候变化^[7-8], 大量鱼类土著种及传统优势经济鱼类栖息环境发生极大的变化, 表现为生境丧失、破碎化和同质化等^[9-10],

收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2022-01-17.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900801); 中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(2018HY-ZD0101); 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资助项目(2020TD11).

作者简介: 李慧峰(1992-), 女, 博士研究生, 从事渔业资源及遥感应用研究. E-mail: 2018213001@njau.edu.cn

通信作者: 陈大庆, 研究员, 从事渔业资源研究, E-mail: chdq@yfi.ac.cn; 王琳, 副研究员, 从事鱼类生态学遥感应用研究, E-mail: angels121@cafs.ac.cn

进而造成种群的遗传隔离及物种丰度和多样性的下降^[11-14]。良好的生境是鱼类生存、繁衍的基本条件,了解鱼类对河流栖息地生境选择及其利用程度是研究河流鱼类栖息地评估、保护、恢复和应用研究的关键^[15-17]。近年来国内学者也越来越重视在自然生境状态下探讨鱼类分布和生境因子的定量关系^[18-21],如陈新军等^[22]利用不同方法探讨了印度洋大眼金枪鱼的最适宜栖息地分布情况,孙霄等^[23]对海州湾及邻近海域短吻红舌鲷产卵场的生境适宜性进行分析。王成友^[24]通过对超声波标志的放流中华鲟亲本进行实时定位跟踪,结合适宜中华鲟产卵的流速、水深、坡度等生境指标,确定了中华鲟的适宜产卵区域。Jones 等^[25]收集汇入苏必利尔湖的 Dog 河不同江段的湖鳟卵,确定了适宜湖鳟产卵的水深、流速和基质等生境。魏卓等^[26]通过流动观察法和目视搜索对长江中江豚的栖息地进行确定,得出了江豚活动最适宜的水深、流速和透明度等生境范围。前人在该水域已开展的鱼类资源研究目前主要集中在鱼类种群或群落本身,以及极少数包含通江水道在内的全湖区鱼类群落的时间或空间动态分布研究^[6]。

本研究结合鱼类声学探测、多时相雷达遥感、

三维水动力模拟等技术和方法获取空间上连续分布的鱼类资源、高程、坡度、水深和流速数据,着重分析了鄱阳湖通江水道在作为鱼类越冬场所时鱼类群落的自然分布情况,并采用生境利用法^[27]绘制通江水道冬季鱼类群落的单因子生境适宜度曲线,开展栖息地适宜度分析,旨在掌握鄱阳湖通江水道冬季河相时期的鱼类群落自然分布特征,提高对通江水道鱼类资源与生境之间关系的认识,并结合现代信息技术对该水域鱼类群落的生境需求进行量化的分析。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖通江水道(图 1)是位于鄱阳湖北部的狭长地带,其空间范围为湖口(29°44'52"N, 116°13'45"E)至通江水道末端的新池乡(29°19'48"N, 116°5'50"E),江段长约 40 km,东西河床宽度约 3~8 km,湖水由南向北最后经湖口注入长江,入长江口最窄处仅约 1 km。根据遥感图像所获取的通江水道河流弯曲度、凹凸岸等几何形态分布特征,将研究区从南到北进一步划分为 14 个河段单元。

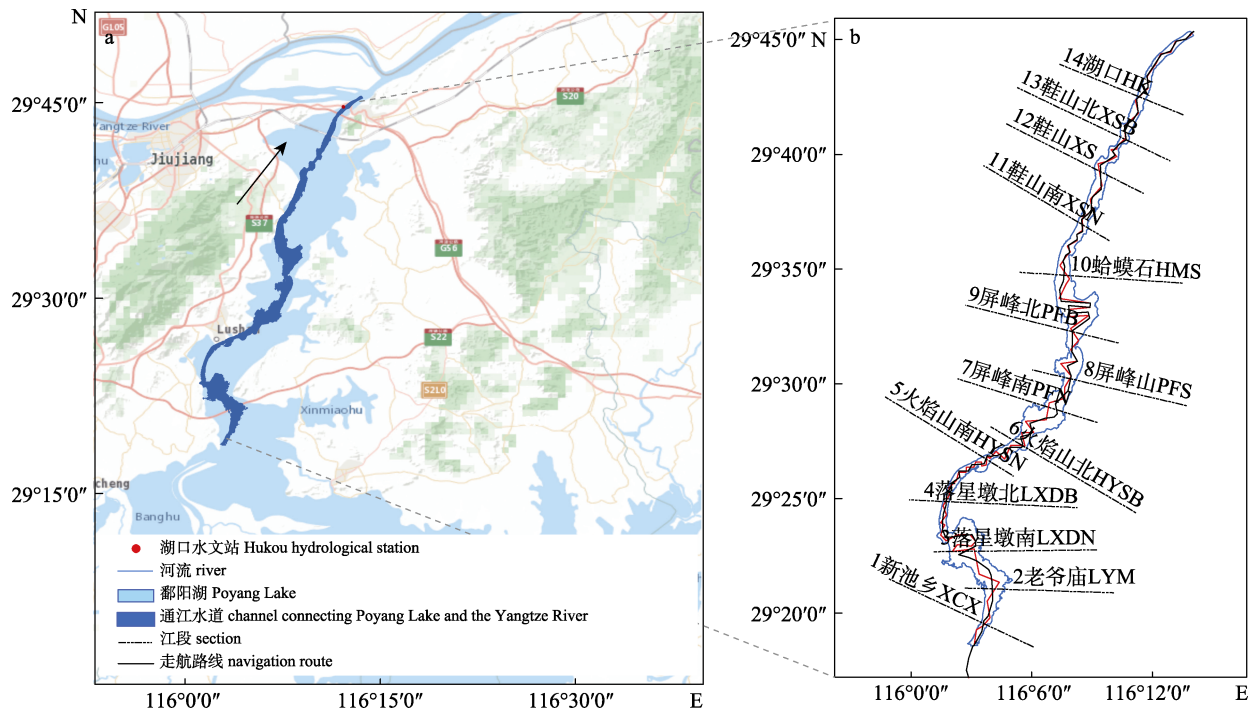


图 1 鄱阳湖通江水道水声学走航路线(a)及江段划分情况(b)

Fig. 1 The routes (a) and sections (b) of hydroacoustic survey in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River

1.2 鱼类声学数据采集与提取

于 2021 年 1 月 19 日至 1 月 20 日上午 8 时至下午 5 时每天进行水声学探测, 使用仪器为 SIMRAD 公司生产的 EY60 分裂波束回声探测仪, 换能器频率为 200 kHz, 束宽为 7°。探测时将探头通过钢管固定于调查船只右方, 垂直放置于水下 0.5 m, 采用“之”字形或近“之”字型进行走航探测, 船速约为 6~12 km/h, 平均水深为 8 m。调查前使用直径 13.7 mm 的钨铜金属球对仪器进行校准^[28]。根据 Aglen^[29]的定义, 本次水声学调查的覆盖率为 22.37, 达到 Godlewska 等^[30]研究的水声学评估结果的标准取样强度, 表明此次水声学探测能够代表研究区的资源分布情况。

通过 Sonar X (Lindem Data Acquisition, Oslo, Norway) 软件对鱼类回声信号数据进行转换和分析, 表层线设置为探头下 0.8 m, 消除 0.75 m 的探测盲区^[31]。采用回波计数法判别信号与目标强度 (TS), 仪器和数据处理参数设置参照文献^[28], 对提取的鱼类回声信号进行人工检视以保证数据的准确性, 最后采用 Foote^[32]提出的鱼体目标强度 (TS, dB) 和全长 (L , cm) 的经验公式来获取目标的体长信息:

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

结合渔获物资料将鱼类声学探测数据分为大 (40 cm 以上)、中 (20~40 cm)、小 (1~20 cm) 三个体长组^[3]。本次探测航线总航程约为 60 km, 每个单元航程约为 0.5 km, 将各单元的鱼类密度单独计算^[20], 再将获取的单元鱼类密度和坐标信息导入 ArcGIS 10.2 (Environmental Systems Research Institute, USA) 软件, 采用反距离加权法 (IDW) 进行插值运算, 最后得出鄱阳湖通江水道不同体长组鱼类密度的水平空间分布图。

1.3 地形数据获取及数字高程模拟

通江水道水下地形分布模拟主要采用 2012—2014 年通过编程定制拍摄的 30 m 空间分辨率的多时相 Radarsat-2 雷达数据, 结合 2012—2014 年通过船载双频回声探测仪 (型号为 Bathy-500) 所采集的湖底高程数据, 并参考地形测量期间水文站的水位数据 (<http://www.cjh.com.cn/>) 等。首先选取水位有代表性的遥感图像 (表 1), 提取每景图像中

的水陆边界线, 并根据遥感图像获取当日对应的湖口水文站水位数据, 对水陆边界线进行高程赋值, 在 ArcGIS 10.2 软件中对高程赋值后的水边线进行 5 m 距离间隔离散化, 转换为高程点数据。由于拍摄图像当日通江水道的湖口至都昌水位并无显著差异 (表 1), 因此不需进行离散高程点的纬度向校正^[33]; 其次, 对于遥感最小水陆边界线以内的区域, 采用声呐测深数据计算的高程数据进行克里金空间插值, 对插值结果生成等值线后同样按照 5 m 距离间隔进行线转点; 然后, 结合所有点数据共同进行克里金插值, 得到通江水道 5 m 空间分辨率的数字化 DEM 数据。最后, 对通江水道中的地形模拟结果进行横向精确性 (图 2a) 和纵向连续性 (图 2b) 分析, 得出只用实测数据模拟的结果 A 在横剖面上精确度最高, 但河流纵向地形刻画上却跳跃不断; 模拟结果 B 既能展现出连续光滑的河槽纵向变化, 又能同时兼顾数据在横剖面细节刻画的准确性, 因此本研究选择结合实测地形与多时相遥感提取水边线共同插值的方式来获取通江水道的高程数据。同时, 采用上述 DEM 数据, 使用 ArcGIS 10.2 计算获得坡度数据。

表 1 研究区 Radarsat-2 遥感数据成像时间及水文站水位
Tab. 1 30 m resolution remote sensing data and corresponding water levels in the study

成像日期 imaging date	都昌站 Duchang station	星子站 Xingzi station	湖口站 Hukou station	标准差 standard deviation
2013-12-06	8.44	8.19	8.14	0.13
2013-12-30	11.11	11.06	11.03	0.03
2013-11-17	8.84	8.42	8.23	0.25
2014-12-02	10.31	10.25	10.17	0.06
2014-12-07	10.92	10.87	10.82	0.04
2014-10-27	12.46	12.43	12.43	0.01
2012-10-24	9.09	8.82	8.71	0.16
2014-10-14	14.67	14.63	14.57	0.04

1.4 水文数据获取及水动力学参数模拟

采用湖口水文站的水文数据及 1.3 中模拟的地形数据, 使用 EFDC 20 (Environmental Fluid Dynamics Code) 正交化分析, 生成 50 m×30 m 的网格, 构建鄱阳湖通江水道三维水动力模型, 从

而得到通江水道水深和流速分布特征。为了检验三维水动力模型数据的准确性,本研究同时采用 LS45A 型流速仪对部分断面真实流速进行测量。用实测流速对模拟流速进行检验,如图 3 所示对比两者一致性($r=0.95, P<0.01$)。

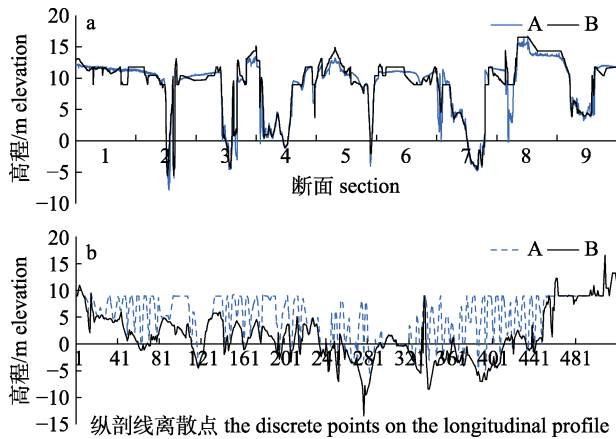


图 2 鄱阳湖通江水道实测与模拟高程数据的对比

a. 通江水道横剖面的精确性对比; b. 河流纵向的连续性对比。
Fig. 2 Comparison of simulated elevation and measured elevation in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River
a. Accuracy comparison of cross sections; b. Continuity comparison of river longitudinal sections.

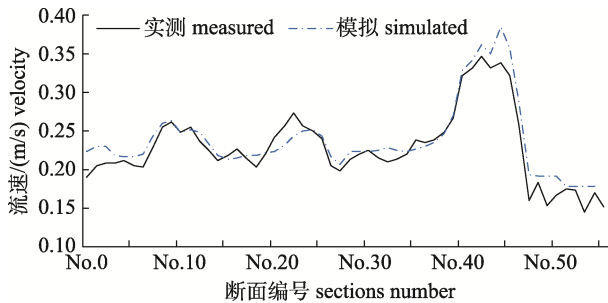


图 3 鄱阳湖通江水道平均流速模拟结果的验证

Fig. 3 Validation of simulated averaged velocity in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River

1.5 栖息地适宜度模型

栖息地适宜度指数是针对某个区域作为鱼类栖息地时的整体适宜程度,表达某一栖息地单元被某一物种占据的可能性。结合多个单因子的偏好曲线指数(SI)定义一个综合的栖息地适宜度指数(HSI),可在单因子偏好分析的基础上考虑多个环境变量的相互关系,评价鱼类栖息地的整体适宜性状况。使用 ENVI 5.3 (the environment for visualizing images)对各生境图层重采样至 $50 \text{ m} \times$

30 m 分辨率,并按同期水体范围对图层进行裁剪。将不同网格的水深、流速、坡度等参数与对应的鱼类分布特征,采用 EXCEL 建立单变量曲线,获得单因子的最佳值和适宜范围。按照不同体长组鱼类的单变量适宜度曲线(SI)分别定义综合的栖息地适宜度指数(HSI)^[34]。HSI 按如下公式计算:

$$HSI_i = SI_{V_i} SI_{D_i} SI_{S_i}$$

式中, i 是栅格的序号; HSI_i 是第 i 个栅格对应的栖息地适宜性指数值; SI_{V_i} 是第 i 个栅格的流速适宜度; SI_{D_i} 是第 i 个栅格的深度适宜度, SI_{S_i} 是第 i 个栅格的坡度适宜度。水深、流速、坡度设为同等权重。

2 结果与分析

2.1 鱼类空间分布的声学探测

本研究共探测到鱼类信号 884 个, TS 均值为 $(-48.2 \pm 3.93) \text{ dB}$, 范围为 $-69.87 \sim -28.07 \text{ dB}$ 。将转化后的鱼类体长分成 3 组,其中小体长组鱼类(TS 值为 $-70 \sim -46 \text{ dB}$)的个体最多,占比高达 90.48%;其次是中等体长组鱼类(TS 值为 $-46 \sim -40 \text{ dB}$),占比为 5.78%;大体长组鱼类体长(TS 值大于 -40 dB),占比最少,仅为 3.74%。

鄱阳湖通江水道冬季探测到的鱼类回声信号平均 TS 值为 -48.2 dB , 平均全长为 10.1 cm , 比陈文静等^[28]2014 年 9 月探测到的平均全长 7.6 cm 稍大。主要原因是长江中下游水域大多数鱼类的繁殖期是 5—7 月, 9 月鄱阳湖通江水道主要鱼类栖息地功能表现为多种幼鱼的索饵场^[3], 故彼时该水域内体长在 10 cm 左右及以下的幼鱼个体较多。而本次水声学调查航点主要位于冬季低水位时期的主河槽内, 通江水道栖息地功能主要表现为越冬场, 此时鱼类群落以鲤鲫和四大家鱼成鱼为主要优势种, 因此, 在鱼类个体大小方面, 声学调查结果与历史资料基本一致, 能较好地反映鱼类体长分布情况^[3-4]。

在空间分布上(图 4), 冬季鱼类主要在主河槽的深水区, 14[#]湖口、11[#]鞋山南和 8[#]屏峰山 3 个江段鱼类总数占全江段总数的 68.56%。其中小体长

组和中等体长组鱼类群落的空间分布重叠度较高, 主要在 9#屏峰北、7#屏峰南和 6#火焰山北水域, 分别占了全江段的 59.82%和 66.79%, 而大体长组

的鱼类群落则主要分布在北部 10#蛤蟆石至 14#湖口较靠近长江的江段, 其在全江段占比达 88.99%, 与中、小体长组的空间分布重叠度较小。

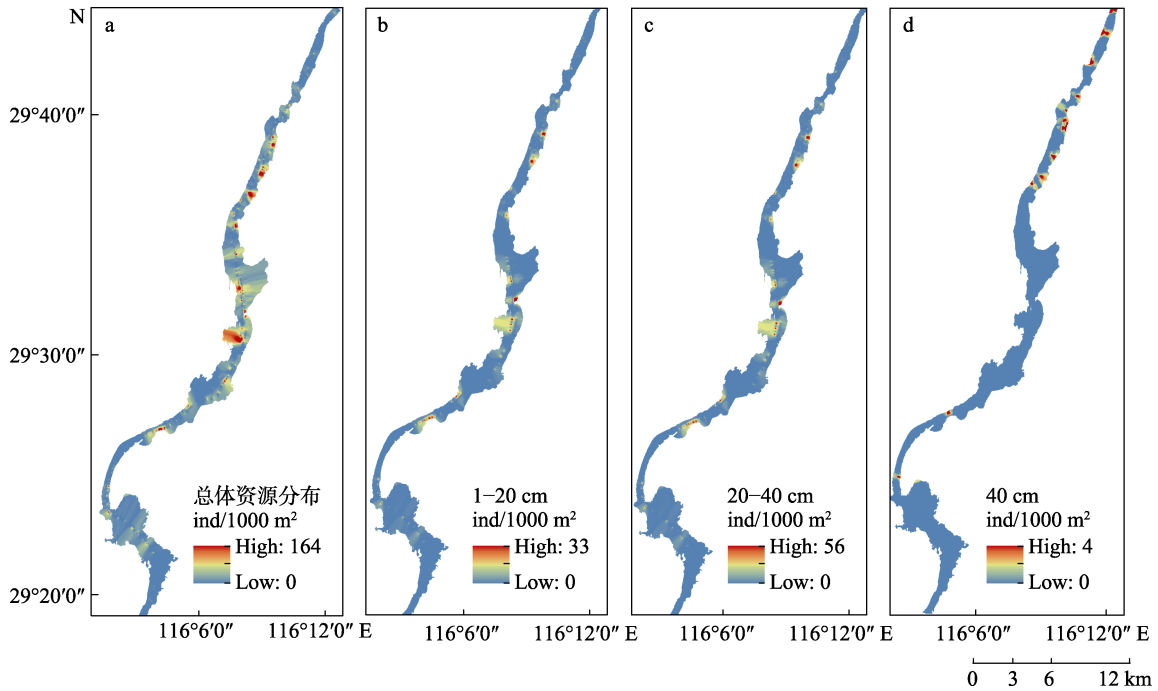


图 4 鄱阳湖通江水道冬季鱼类群落空间分布整体格局和不同体长组鱼类的分布
 a. 鱼类资源总体分布; b. 1-20 cm 小体长组鱼类分布情况; c. 20-40 cm 中等体长组鱼类分布情况;
 d. 40 cm 以上大体长组分鱼类布情况。

Fig. 4 Spatial distribution pattern of fish communities with different body lengths in the channel connecting Poyang Lake and the Yangtze River in winter

a. The distribution of total fish resources; b. The distribution of fish resources in 1-20 cm;
 c. The distribution of fish resources in 20-40 cm; d. The distribution of fish resources above 40 cm.

2.2 生境因子空间分布模拟

图 5a 为通江水道湖底高程分布图, 该区域内地势整体南高北低, 其中平均海拔最高的为 6#火焰山江段, 为 5.69 m, 平均海拔最低的为 12#鞋山江段, 为 0.13 m。图 5b 为鄱阳湖通江水道湖底坡度, 整体趋势主河道平均坡度低于两岸坡度, 其中平均坡度最高的为 12#鞋山江段, 为 2.59°, 平均坡度最低的为 2#老爷庙江段, 为 0.77°。图 5c 为通江水道的水深分布图, 由于湖底地势南高北低, 所以整体上北部江段水深大于南部江段, 沿岸带水深低于河槽中部。平均水深最高的为 12#鞋山江段, 为 8.85 m, 平均水深最低的为 6#火焰山北江段, 为 3.29 m。在流速分布上, 平均流速最高的为 4#落星墩北江段(0.28 m/s), 平均流速最低的为 9#屏峰北江段(0.07 m/s); 其中流速最大值点

位于 4#落星墩北江段 0.43 m/s, 最小值为 0.02 m/s 位于 8#屏峰山江段(图 5d)。

2.3 单因子生境偏好分析

分别绘制小、中、大 3 个体长组对水深、流速、坡度 3 个参数的单因子偏好曲线, 如图 6 所示。SI 值越接近 1.00, 适宜度越高, 0.80~1.00 认为是最适宜的生境因子区间。小体长组的鱼类最适宜栖息的水深范围为 9.18~12.24 m, 其中在 3.06~4.59 m 处有一个适宜度为 0.76 的小高峰, 最适宜的流速区间为 0.05~0.13 m/s, 最适宜的坡度为 0~2.23°。中等体长组最适宜的水深、流速和坡度分别为 9.18~13.77 m、0.05~0.13 m/s 和 0~2.23°。大体长组适宜的水深为 13.77~15.3 m, 适宜的流速和坡度分别为 0.10~0.13 m/s 和 0~2.23°。

在不同水深范围内对各体长组的 SI 进行对比,

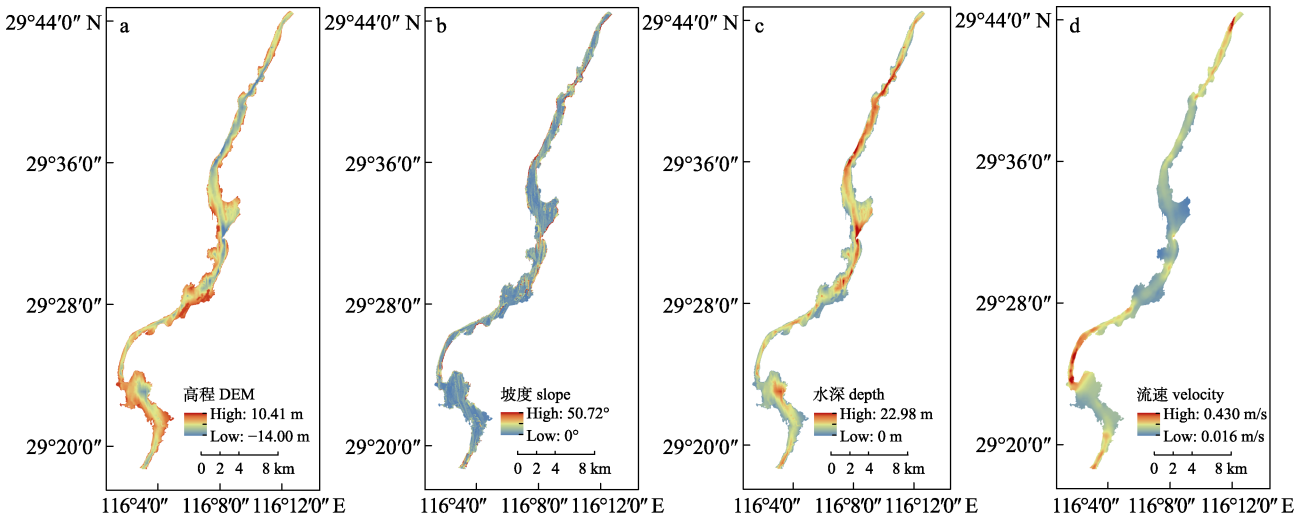


图 5 鄱阳湖通江水道生境因子分布图

a. 地形; b. 坡度; c. 水深; d. 流速.

Fig. 5 Distribution of habitat factors in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River
a. Terrain; b. Slope; c. Depth; d. Velocity.

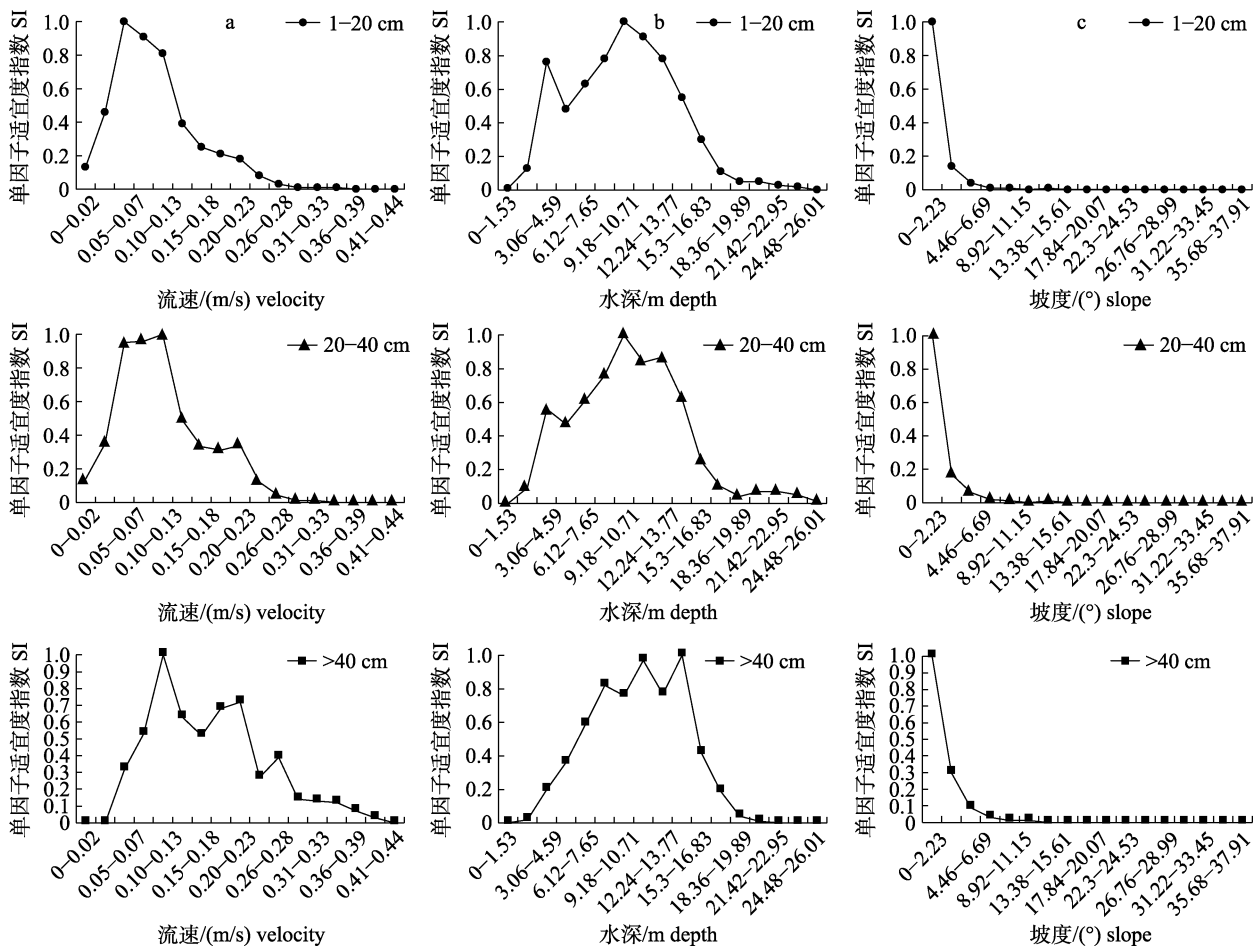


图 6 鄱阳湖通江水道不同体长鱼类群落的单因子适宜度曲线

a. 流速; b. 水深; c. 坡度.

Fig. 6 Single factor suitability curves for fish communities with different body lengths in the channel connecting Poyang Lake and the Yangtze River
a. Velocity; b. Depth; c. Slope.

体长组越大最适宜的水深越深。小体长组对浅水区(1.53~7.65 m)的适宜度明显高于其他两组鱼类。中等体长组对中等水深区域(12.24~13.77 m)的偏好程度更高。大体长组鱼类在较深的水域(13.77~18.36 m)适宜度最高。在更深的水域(18.36~26.01 m), 3个体长组的适宜度指数均小于0.1。

在不同流速范围内对各体长组的SI进行对比, 在低流速的区间(0~0.07 m/s), 小体长组鱼类适宜度指数最高。在中等流速区间(0.1~0.28 m/s), 大体长组的鱼类最高。在高流速区间(0.28~0.44 m/s), 3个体长组鱼类适宜度均很低。

坡度选择上, 3个体长组最适宜的坡度均为0~2.23°。但坡度区2.23~13.38°内大体长组鱼类适宜度明显高于其他两个体长组, 说明大体长组鱼类较适宜的坡度范围更大, 这从微地形生境变化的角度解释了大体长组鱼类对高流速的偏好。坡度变大会导致流速增加, 生境异质性程度提高, 为游泳能力较强的大体长组鱼类提供了更多水深、流速等生境条件的选择性^[28]。

综上, 冬季鄱阳湖通江水道小体长组鱼类偏好较浅的水深和较低的流速, 但适宜水深范围较广。大体长组鱼类偏好较大的水深和较高的流速, 同时偏好较窄的水深范围。

2.4 鱼类栖息地适宜度空间分布

以适宜度指数HSI表示不同体长组鱼类栖息地适宜性空间分布状况, HSI值越接近1.00适宜度越高, 0.80~1.00认为是最适宜的栖息地生境。图7所示为各江段不同适宜度占所在江段面积的百分比, 其中, 小体长组的鱼类最适宜面积占比较大的河段依次是6[#]~9[#]断面区间的屏峰山北部、屏峰山南部、火焰山北部和屏峰山江段, 小体长组鱼类适宜的栖息地主要分布在主河槽的岸边和江心洲的周边水域, 特别是屏峰山北部江段有大片缓流的浅水区。中等体长组鱼类最适宜栖息地占比较大的依次是9[#]屏峰山北部、7[#]屏峰山南部、6[#]火焰山北部和2[#]老爷庙江段, 而大体长组鱼类最适宜栖息地分布江段为10[#]蛤蟆石、2[#]老爷庙和11[#]鞋山南, 主要集中在水深较大且流速稳定的河槽深泓线附近。

综上, 在栖息地适宜度的空间分布上, 小体

长组和中等体长组的高度适宜栖息水域较为一致, 共同的高度适宜水域分布在9[#]屏峰山北部、7[#]屏峰山南部和6[#]火焰山北部江段。小体长组和中等体长组不适宜栖息水域完全一致, 主要分布在12[#]鞋山、13[#]鞋山北、14[#]湖口、3[#]落星墩南部和4[#]落星墩北部江段。三个体长组最不适宜江段都为4[#]落星墩北部江段, 此江段平均水深、流速和坡度分别为5.37 m、0.28 m/s、1.61°, 其平均流速高于其他所有江段。

如图8所示, 8[#]屏峰山及9[#]屏峰山北江段皆为大体长鱼类群落的不适宜江段, 但却是小体长鱼类群落的适宜江段; 11[#]鞋山南是大体长鱼类群落的适宜江段, 但却是小体长鱼类群落的不适宜江段。在鱼类的分布上, 小体长鱼类群落在8~9[#]屏峰山及其北部江段多分布在西南部水深较浅(0.35~13.3 m, 均值7.06 m)且流速较低(0.01~0.11 m/s, 均值0.07 m/s)区域, 大体长鱼类多分布在11[#]鞋山南江段的流速适中(0.09~0.12 m/s, 均值0.11 m/s)和水深适中(7.90~10.93 m, 均值9.43 m)的区域。对8~9[#]屏峰山及北部江段和11[#]鞋山南江段的生境因子图层进行叠加对比后发现, 8~9[#]屏峰山及北部江段流速在0.05~0.1 m/s(小体长组, SI_v=1)的面积占比(76.20%)远高于11[#]鞋山南江段的65.08%, 但在0.1~0.13 m/s(大体长组, SI_v=1)的面积占比(25.05%)低于11[#]鞋山南江段的59.22%。8~9[#]屏峰山及北部江段水深在3.06~4.59 m和9.18~12.24 m(小体长组, SI_D=1)的面积占比(50.30%)远高于11[#]鞋山南江段的19.13%, 但在13.77~15.3 m(大体长组, SI_D=1)的面积占比(4.55%)低于11[#]鞋山南江段的28.16%, 说明在流速和水深分布上, 8~9[#]屏峰山及北部江段更适宜小体长组, 11[#]鞋山南江段更适宜大体长组, 证明了流速和水深是造成不同体长组鱼类在两个江段分布出现差异的主要原因。

3 讨论

3.1 水声学探测误差分析

利用水声学研究鱼类资源是在不扰动水生生物和自然环境的情况下对鱼类分布及集群进行原位观测, 除了能够快速地对整个水体进行探测,

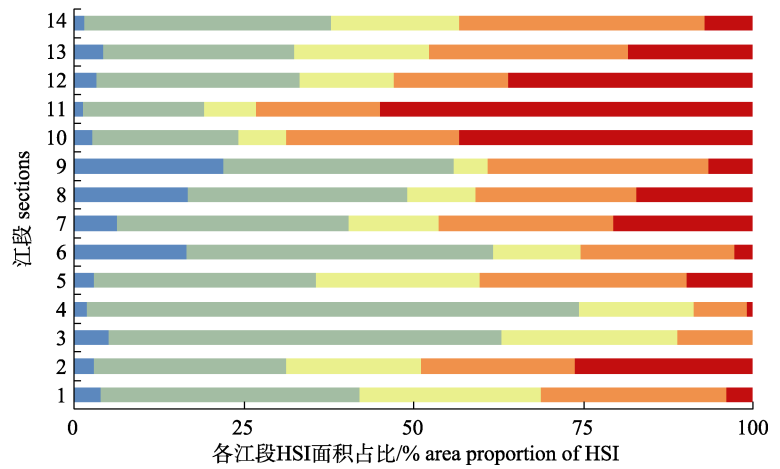
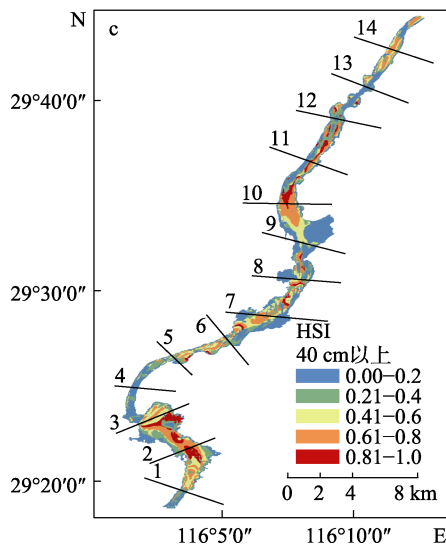
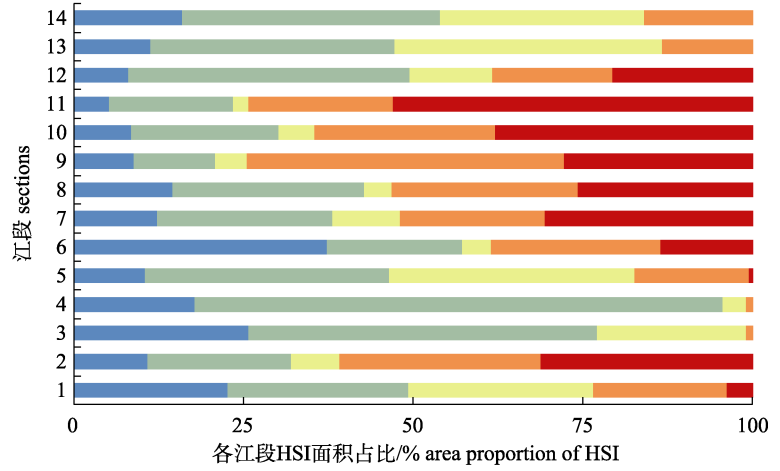
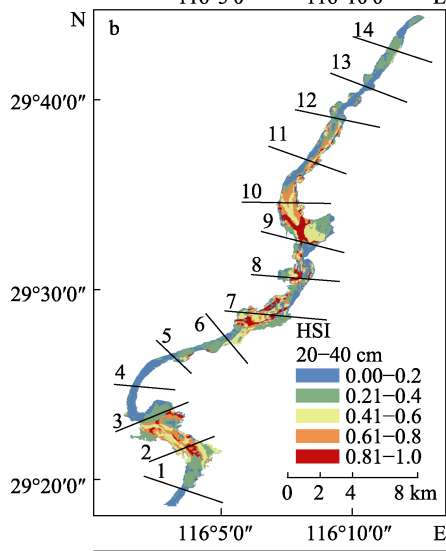
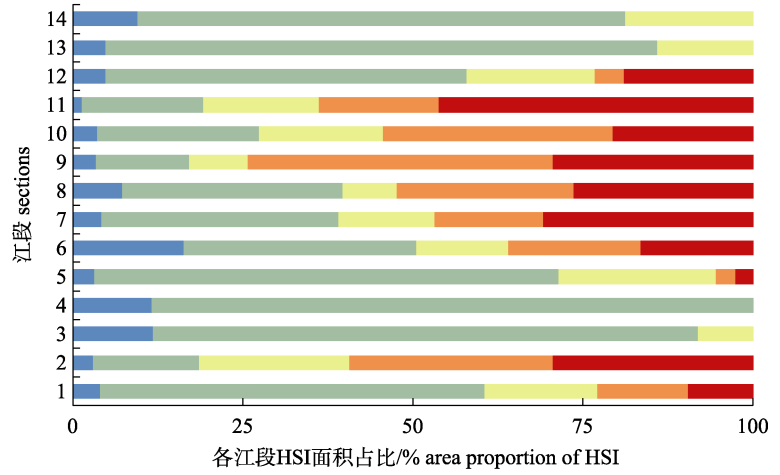
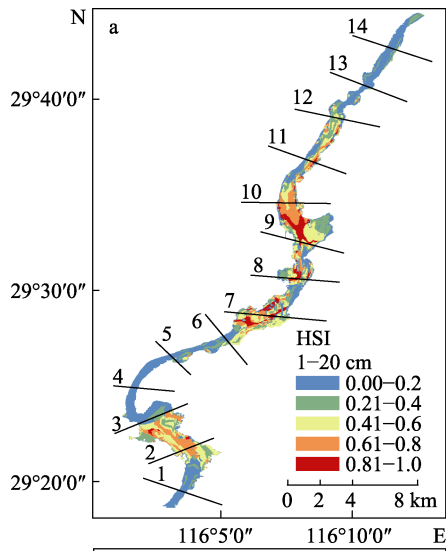


图 7 鄱阳湖冬季通江水道不同体长组鱼类栖息地适宜度分布图及各江段所占百分比

a. 1-20 cm 小体长组; b. 20-40 cm 中等体长组; c. 40 cm 以上大体长组.

Fig. 7 Habitat suitability indexes and percentage of the fish with different length in the channel connecting Poyang Lake and the Yangtze River in winter

a. Fish with the body length from 1 cm to 20 cm; b. Fish with the body length from 20 cm to 40 cm; c. Fish with the body length above 40 cm.

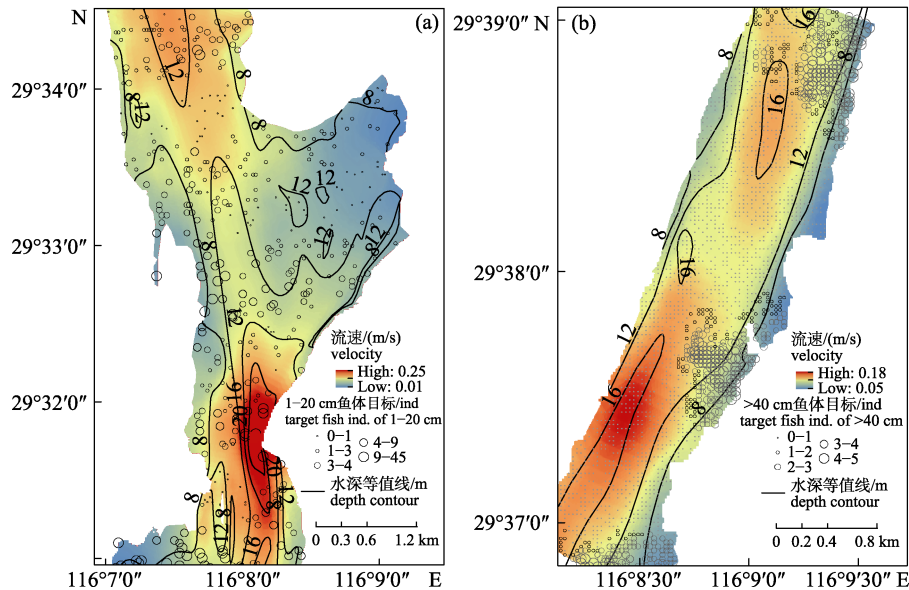


图 8 鄱阳湖冬季通江水道典型江段鱼类资源及生境数据分布

a. 小体长组(1-20 cm)鱼类高度偏好江段; b. 大体长组(>40 cm)鱼类高度偏好江段。

Fig. 8 The distribution of fish resources and habitat data in typical sections in the channel connecting Poyang Lake and the Yangtze River in winter

a. Favorite sections for fish with the body length of 1-20 cm; b. Favorite section for fish with the body length above 40 cm.

还可实现对水体连续的声学覆盖, 探测结果具有较高的空间分辨率。但同时, 风浪、船体运行、植被等外部环境的影响可能会对探测精度造成一定的影响^[35]。首先, 为尽量减小水声学数据的误差, 本研究在水声学调查时首先选择晴朗无风和水体透明度较高的天气条件进行探测, 以降低由于风浪雨水等造成的气泡以及悬浮泥沙等^[36-38]对探测结果所造成的影响。其次, 航线集中在鄱阳湖通江水道的主河槽范围, 该水域范围冬季水生植被覆盖度低^[39-40], 水声学探测时走航路线的水深范围为 5~21 m, 平均水深为 8 m, 因此植被和底质对探测信号的干扰较小。但仍可能存在由于调查频次较少所产生的随机性误差问题, 今后将进一步增加调查频次来对本研究结果进行验证。

3.2 栖息地适宜度曲线

水深和流速对于鱼类栖息地选择起到重要影响作用, 通过温度、溶解氧等环境因子间接影响鱼类分布, 研究表明水深对不同体长组鱼类分布起到显著影响^[15]。在水深和流速偏好上, 体长越大, 适宜的水深和流速也越大, 但大体长组适宜的流速范围小于小体长组, 推测其可能原因是鱼类体长增加的同时, 游泳能力不断增强, 能够减

小水流的控制, 偏好性地选择更适宜的水深和流速范围^[41-42], 而小体长组鱼类游泳能力较弱, 最优生态位容易被大体长组鱼类群落所占据。

本研究采用生境利用法绘制适宜度曲线, 物种分布及生境因子分布基础数据均来自实测, 因此对适宜度的定量描述具备较高的可靠性^[34]。但是, 生境利用法获取的频率分布是直接由声学观测时鱼类群落所利用的生境条件得到, 因此适宜度高在某些情况下可能仅代表该群落当前所选择的栖息地条件, 不一定是最佳栖息地。例如, 小体长组适宜的水深范围宽于大体长组适宜的水深范围, 其可能的原因是进入冬季前, 河流水位迅速下降时, 个体较小的鱼类由于受限于较低的游泳能力, 未能及时游向最适宜深度的水域而滞留在本身适宜度较低的区域。本研究结果可为进一步采用生境偏好法绘制栖息地适宜度曲线, 即同时考虑不同体长或种群的积极选择性提供经验和知识。但本研究所采用的全局性生境适宜度指数法并未考虑各生境因子在鱼类群落对生境需求的耦合作用关系, 在以后研究中可采用基于地理加权回归的地空间统计方法建立局地生境适宜度指数, 对多生境因子耦合作用下的鱼类群落生境需求进

行定量分析。

3.3 栖息地适宜性空间分布特征

冬季不同体长组鱼类群落最适栖息地空间分布不一,小体长鱼类最适栖息地主要分布在图 7a 屏峰山及其以南区域,大体长鱼类最适栖息地主要分布在图 7b 靠近北部湖口入长江口处,其一可能与冬季通江水道中鱼类群落的结构组成相关,通江水道中北部江段水深较深,可吸引南部通江水道中和北部长江中的部分江湖洄游型鱼类和定居型鱼类来此越冬,相关研究也证明,湖口区域鱼类主要包括鲢、草鱼和鳙等江湖洄游型鱼类和少部分定居型鲤等大体长组鱼类^[43-45]。其二与地理位置有关,湖口处于通江水道与长江的汇流处,相关研究认为河流交汇口对增加鱼类的多样性有很重要的意义,各种有机物在此处汇流,有利于提高河流初级生产力,为通江水道中的越冬鱼类提供充足的饵料资源^[17,46]。

冬季不同体长组鱼类最适栖息地空间分布都呈现出较为明显的纵向条带状分布,从河槽中部至两岸,栖息地适宜度 HSI 呈现递减的趋势,该结果和多数内陆鱼类分布结果较为一致^[47-48]。如陈文静等^[28]通过对鄱阳湖通江水道鱼类分布情况进行分析后得出,大多数的鱼类主要集中分布在主河槽,且大个体更倾向于深水区。杜浩等^[49]通过对长江中鱼类分布进行研究后得出深水区的鱼类集聚程度也更高。分析主要原因可能是河槽多位于深水区,其地形复杂度高,使水温、水深、流速和微地形起伏变化的范围更宽,极大地丰富了河道的生境多样性^[50],有利于满足不同需求鱼类种群的栖息地偏好,对于维持水生生物多样性具有十分积极的意义。

在鱼类栖息地适宜性分析上,不同学者由于所采用方法的异同,及研究水域的差别可能会给出不同的结果^[51-55],特别是与地统计及空间统计方法相结合时,目前还没有普遍推荐的方法基于空间上连续的生境分布数据和生物资源调查数据生成栖息地使用函数或偏好函数,加上本次调查并未进行资源的实地取样调查,因此本研究所给出的栖息地适宜性曲线仅代表研究时段不同体长的鱼类群落的整体分布特征,不同种类鱼类的适

宜度曲线及栖息地适宜度的空间分布则需要资源调查数据基础上进一步研究^[56]。

4 结论

本研究在鱼类声学探测的基础上,创造性综合使用三维水动力学和遥感技术的生境量化测量方法,能够在较大尺度空间范围内快速获取鱼类栖息地适宜度的分布情况,了解鱼类栖息地生境选择及其利用程度,为河流鱼类栖息地评估和保护提供关键技术支持^[57]。目前,鱼类水声学方法只能推测个体大小,未来高精度声呐探测仪的开发和应用将有助于目标物种种类或功能群组的确定,或可利用本方法实现对不同种类的鱼类进行生境偏好分析。同时,鱼类生境因子涉及底质、覆盖物、水质、饵料等^[58],可结合现场调查、无人机遥感以及地理信息等技术补充更多的生境参数^[59],进一步提高鱼类栖息地研究方法的可靠性。此外,将继续开展通江水道不同季节鱼类群落的时空动态分布特征及其生境偏好研究。

参考文献:

- [1] Dronova I, Beissinger S, Burnham J, et al. Landscape-level associations of wintering waterbird diversity and abundance from remotely sensed wetland characteristics of Poyang Lake[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 462.
- [2] Wang L, Dronova I, Gong P, et al. A new time series vegetation-water index of phenological-hydrological trait across species and functional types for Poyang Lake wetland ecosystem[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 49-63.
- [3] Guo Z Z, Zou D L, Liu R L, et al. Investigation report on fish in Poyang Lake (one of the investigation reports on wildlife resources in Jiangxi)[J]. *Journal of Nanchang University*, 1964, 121-130. [郭治之, 鄒多祿, 刘瑞蘭, 等. 鄱阳湖鱼类调查报告(江西野生动物资源调查报告之一)[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 1964, 121-130.]
- [4] Zhang T L, Li Z J. Fish resources and fishery utilization of lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 434-444. [张堂林, 李钟杰. 鄱阳湖鱼类资源及渔业利用[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(4): 434-444.]
- [5] Jiang T. Study on migratory ecology of *Coilia* fish in Chinese waters inferred from otolith morphometric and microchemical characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014: 55-69. [姜涛. 基于耳石形态和微化学特征

- 的我国鲟属鱼类洄游生态学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 55-69.]
- [6] Wang S, Fang C L, Zhou H M, et al. Occurrence time and catch of young *Coilia nasus* at the mouth of Poyang Lake[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2017, 45(10): 122-124. [王生, 方春林, 周辉明, 等. 鄱阳湖湖口刀鲚幼鱼出现的时间及渔获量[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 122-124.]
- [7] He F Z, Thieme M, Zarfl C, et al. Impacts of loss of free-flowing rivers on global freshwater megafauna[J]. Biological Conservation, 2021, 263: 109335.
- [8] Avaria L J, Venditti C, Rivadeneira M, et al. Historical warming consistently decreased size, dispersal and speciation rate of fish[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(1): 787-793.
- [9] Ruesch A S, Torgersen C E, Lawler J J, et al. Projected climate-induced habitat loss for salmonids in the John Day river network, Oregon, USA[J]. Conservation Biology, 2012, 26(5): 873-882.
- [10] Yang S R, Li M Z, Zhu Q G, et al. Spatial and temporal variations of fish assemblages in Poyanghu Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(1): 54-64. [杨少荣, 黎明政, 朱其广, 等. 鄱阳湖鱼类群落结构及其时空动态[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 54-64.]
- [11] Chen W J, Zhang Y P, Zhao C L, et al. Species composition and biodiversity of fish community in Hukou section of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(6): 684-691. [陈文静, 张燕萍, 赵春来, 等. 近年长江湖口江段鱼类群落组成及多样性[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 684-691.]
- [12] Gao X, Ding S, Zhang Y, et al. Exploring the relationship among land-use, riparian habitat quality, and biological integrity of a fish community[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7198-7206. [高欣, 丁森, 张远, 等. 鱼类生物群落对太子河流域土地利用、河岸带栖息地质量的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7198-7206.]
- [13] Qian X E, Huang C G, Wang Y M, et al. The status quo of fishery resources of Poyang Lake and its environmental monitoring[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(6): 612-617. [钱新娥, 黄春根, 王亚民, 等. 鄱阳湖渔业资源现状及其环境监测[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 612-617.]
- [14] Huang L L, Wu Z Q, Li J H. Fish fauna, biogeography and conservation of freshwater fish in Poyang Lake Basin, China[J]. Environmental Biology of Fishes, 2013, 96(10-11): 1229-1243.
- [15] Zhang S Y, Wang Z H. Progress and current status of studies on essential fish habitat[J]. Fishery Modernization, 2011, 38(5): 58-65. [章守宇, 汪振华. 鱼类关键生境研究进展[J]. 渔业现代化, 2011, 38(5): 58-65.]
- [16] Medinas D, Marques J T, Costa P, et al. Spatiotemporal persistence of bat roadkill hotspots in response to dynamics of habitat suitability and activity patterns[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111412.
- [17] Rubec P J, Santi C, Chen X J, et al. Habitat suitability modeling and mapping to assess the influence of freshwater withdrawals on spatial distributions and population numbers of estuarine species in the lower peace river and charlotte harbor, Florida[J]. Marine and Coastal Fisheries, 2021, 13(1): 13-40.
- [18] Jacobus J, Ivan L N. Evaluating the effects of habitat patchiness on small fish assemblages in a great lakes coastal marsh[J]. Journal of Great Lakes Research, 2005, 31(4): 466-481.
- [19] Kapuscinski K L, Sloss B L, Farrell J M. Genetic population structure of muskellunge in the great lakes[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2013, 142(4): 1075-1089.
- [20] Rubec P J, Santi C, Ghile Y, et al. Modeling and mapping to assess spatial distributions and population numbers of fish and invertebrate species in the lower peace river and charlotte harbor, Florida[J]. Marine and Coastal Fisheries, 2019, 11(4): 328-350.
- [21] Li J, Li X H, Jia X P, et al. Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5795-5805. [李捷, 李新辉, 贾晓平, 等. 连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5795-5805.]
- [22] Chen X J, Feng B, Xu L X. A comparative study on habitat suitability index of bigeye tuna, *Thunnus obesus* in the Indian Ocean[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(2): 269-278. [陈新军, 冯波, 许柳雄. 印度洋大眼金枪鱼栖息地指数研究及其比较[J]. 中国水产科学, 2008, 15(2): 269-278.]
- [23] Sun X, Zhang Y L, Xu B D, et al. Habitat suitability of *Cynoglossus joyneri* spawning grounds in Haizhou Bay and adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1505-1514. [孙霄, 张云雷, 徐宾铎, 等. 海州湾及邻近海域短吻红舌鲷产卵场的生境适宜性[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1505-1514.]
- [24] Wang C Y. Migrations for reproduction of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and its habitat selections in the Yangtze River[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 56-63. [王成友. 长江中华鲟生殖洄游和栖息地选择[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 56-63.]
- [25] Jones N E, Parna M, Parna S, et al. Evidence of lake trout (*Salvelinus namaycush*) spawning and spawning habitat use in the Dog River, Lake Superior[J]. Journal of Great Lakes

- Research, 2018, 44(5): 1117-1122.
- [26] Wei Z, Zhang X F, Wang K X, et al. Habitat use and preliminary evaluation of the habitat status of the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides asiaorientalis*) in the Balijiang section of the Yangtze River, China[J]. Acta Zoologica Sinica, 2003, 49(2): 163-170. [魏卓, 张先锋, 王克雄, 等. 长江江豚对八里江江段的利用及其栖息地现状的初步评价[J]. 动物学报, 2003, 49(2): 163-170.]
- [27] Yi Y J, Cheng X, Zhou J. Research progress in habitat suitability assessment methods[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(5): 887-893. [易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 887-893.]
- [28] 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.]
- [29] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied[J]. FAO Fisheries Report, 1983, 300(1): 293-298.
- [30] 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[J]. Fisheries Research, 2009, 96(1): 17-22.
- [31] Wanzenböck J, Mehner T, Schulz M, et al. Quality assurance of hydroacoustic surveys: The repeatability of fish-abundance and biomass estimates in lakes within and between hydroacoustic systems[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(3): 486-492.
- [32] 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.
- [33] Feng L, Hu C M, Chen X L, et al. MODIS observations of the bottom topography and its inter-annual variability of Poyang Lake[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2729-2741.
- [34] Yi Y J, Zhang S H. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(4): 363-377. [易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(4): 363-377.]
- [35] Tao J P, Gong Y T, Tan X C, et al. Spatiotemporal patterns of the fish assemblages downstream of the Gezhouba Dam on the Yangtze River[J]. Scientia Sinica(Vitae), 2012, 42(8): 677-688. [陶江平, 龚昱田, 谭细畅, 等. 长江葛洲坝坝下江段鱼类群落变化的时空特征[J]. 中国科学: 生命科学, 2012, 42(8): 677-688.]
- [36] Godlewska M, Frouzová J, Kubecka J, et al. Comparison of hydroacoustic estimates with fish census in shallow Malta Reservoir- which TS/L regression to use in horizontal beam applications?[J]. Fisheries Research, 2012, 21(2): 90-97.
- [37] Wu G F, Cui L J, Duan H T, et al. An approach for developing Landsat-5 TM-based retrieval models of suspended particulate matter concentration with the assistance of MODIS[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 85: 84-92.
- [38] Luo W. Poyang Lake water-sediment change of time and space remote sensing monitoring research[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015: 60-64. [罗卫. 鄱阳湖水沙时空变化遥感监测研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015: 60-64.]
- [39] Feng L, Hu C M, Chen X L, et al. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 80-92.
- [40] Cai X B. The change analysis of water stage and beach wetland in Poyang Lake with the aid of multi-temporal active and passive remote sensing data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010: 90-114. [蔡晓斌. 主被动遥感辅助下的鄱阳湖水位时空动态及洲滩变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 90-114.]
- [41] Cao P. Fish hydraulics study based on fish swimming behavior[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research. 2018: 44-57. [曹平. 基于鱼类游泳行为特性的鱼道水力学研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018: 44-57.]
- [42] Yu L X. Study on the topography and hydrodynamic characteristics of the four major Chinese carps' typical spawning grounds in the middle reaches of the Yangtze River[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 37-65. [俞立雄. 长江中游四大家鱼典型产卵场地形及水动力特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 37-65.]
- [43] Hu M L, Wu Z Q, Liu Y L. Fish diversity and community structure in Hukou area of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(2): 246-250. [胡茂林, 吴志强, 刘引兰. 鄱阳湖湖口水域鱼类群落结构及种类多样性[J]. 湖泊科学, 2011, 23(2): 246-250.]
- [44] Wang S, Duan X B, Chen W J, et al. Status and changes of fish resources in the Hukou area of Poyang Lake[J]. Freshwater Fisheries, 2016, 46(6): 50-55. [王生, 段辛斌, 陈文静, 等. 鄱阳湖湖口水域鱼类资源现状调查[J]. 淡水渔业, 2016, 46(6): 50-55.]

- [45] Keppeler F W, de Souza A C, Hallwass G, et al. Ecological influences of human population size and distance to urban centres on fish communities in tropical lakes[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2018, 28(5): 1030-1043.
- [46] Siqueira-Souza F K, Freitas C E C. Fish diversity of floodplain lakes on the lower stretch of the Solimões River[J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2004, 64(3a): 501-510.
- [47] Hu M L. Characteristics of water level, water environment and effects on fish communication and migration in the Hukou area of Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2009: 56-89. [胡茂林. 鄱阳湖湖口水位、水环境特征分析及其对鱼类群落与洄游的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2009: 56-89.]
- [48] Shi N. Temporal and spatial distribution characteristics of fish in the national aquatic germplasm resources conservation area of the four major fishes in the Chongqing section of the Yangtze River[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2019: 96-103. [石妮. 长江重庆段四大家鱼国家级水产种质资源保护区鱼类时空分布特征的研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2019: 96-103.]
- [49] Du H, Ban X, Zhang H, et al. Preliminary observation on preference of fish in natural channel to water velocity and depth: Case study in reach of Yangtze River from Jiangkou town to Yuanshi town[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(10): 70-74. [杜浩, 班璇, 张辉, 等. 天然河道中鱼类对水深、流速选择特性的初步观测——以长江江口至涪市段为例[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(10): 70-74.]
- [50] Li Q, Lu P Y, Peng Q D, et al. Analysis of the topography of the *Coreius heterodon* spawning ground in national nature reserve of rare and endemic fish in Yangtze River upstream area based on the distribution of pool-riffles[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(S2): 273-278. [李倩, 吕平毓, 彭期冬, 等. 基于深潭浅滩分布的长江上游保护区铜鱼产卵场地形分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(S2): 273-278.]
- [51] Ying X M, Cui S B, Liu J Y, et al. Comprehensive fuzzy judgement of aquatic living things habitat adaptability[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2007, 25(7): 60-63, 72. [英晓明, 崔树彬, 刘俊勇, 等. 水生生物栖息地适宜性指标的模糊综合评判[J]. *东北水利水电*, 2007, 25(7): 60-63, 72.]
- [52] Feng Y J, Fang X Y, Chen X J, et al. Fish HIS (habitat suitability index) modeling method based on SVM (support vector machine): CN104809479B[P]. 2017-12-15. [冯永坎, 方学燕, 陈新军. 基于支持向量机的鱼类栖息地适宜性指数建模方法: CN104809479B[P]. 2017-12-15.]
- [53] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(2): 260-269. [龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(2): 260-269.]
- [54] Zhou J, Wang Q X, Zhao W X, et al. Habitat suitability analysis of eelgrass *Zostera marina* L. in the subtidal zone of Xiaoheishan Island[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(1): 69-78.
- [55] He X F, Deng Q X. Investigation and protection on wintering ground, spawning ground and nursery ground of main economic fish in Jialing River[J]. *Journal of Southwestern Normal University*, 1979, 4(2): 27-41. [何学福, 邓其祥. 嘉陵江主要经济鱼类越冬场、产卵场、幼鱼索饵场调查及保护利用[J]. *西南师范学院学报*, 1979, 4(2): 27-41.]
- [56] Chen X J. Fish and Fishery Resources[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2004: 56-62. [陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 56-62.]
- [57] Wang K. Temporal and spatial distribution characteristics of fish in the Three Gorges Reservoir area and its relationship with related factors[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013: 83-101. [王珂. 三峡库区鱼类时空分布特征及与相关因子关系分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013: 83-101.]
- [58] Li Y, Zhao X Y, Zhang T, et al. Wintering migration and distribution of anchovy in the Yellow Sea and its relation to physical environment[J]. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(2): 104-112. [李骁, 赵宪勇, 张涛, 等. 黄海鲱鱼越冬洄游分布及其与物理环境的关系[J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(2): 104-112.]
- [59] Niu M X. Spatiotemporal dynamics of anchovy population and its response to environmental factors in the Yellow Sea based on ocean RS and GIS[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012: 108-109. [牛明香. 基于海洋遥感和GIS的黄海鲱鱼种群时空动态及对海洋环境因子的响应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012: 108-109.]

Habitat suitability analysis of fish community in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River in winter

LI Huifeng¹, CAO Kun^{2,3}, WANG Dengqiang⁴, DING Fang^{2,3}, MAO Zhihui^{2,3}, YU Lixiong⁴, WANG Ke⁴, DUAN Xinbin⁴, JIA Chunyan⁴, CHEN Daqing^{1,4}, WANG Lin^{1,2,3}

1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;
2. Fishery Resource and Environment Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China;
3. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100141, China;
4. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 434020, China

Abstract: The channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River is an important channel for most migratory fish to complete their life cycle process, and so has an important ecological function for the conservation and diversity of fish resources in the middle and lower reaches of the Yangtze River. In this study, acoustic detection, remote sensing, and three-dimensional hydrodynamic simulation were combined to understand the spatial distribution and habitat status of fish with different body length in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River through the winter period. Firstly, the single factor habitat suitability index (HSI) curves of water depth, flow velocity, and slope of three fish groups with different body length were drawn, and then the product method was used to establish the habitat suitability model. Finally, the habitat suitability of fish in different sections of the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River was compared and evaluated. The results showed that the average length of fish in the channel was 10.1 cm, and the fish were mainly distributed in Hukou, Mountain Xie, and Pingfeng area. The most suitable water depth range for fish groups with body length of 1–20 cm was 3.06–4.59 m and 9.18–12.24 m, with a flow velocity range of 0.05–0.13 m/s and slope range of 0–2.23°. The habitat suitability curves of water depth, flow velocity, and slope of fish that were sized 20–40 cm and over 40 cm were unimodal, and the most suitable range of water depth, flow velocity, and slope of the 20–40 cm fish group were 9.18–13.77 m, 0.05–0.13 m/s, and 0–2.23°, respectively. For fish with body length over 40 cm the most suitable ranges of water depth, velocity, and slope were 13.77–15.3 m, 0.10–0.13 m/s, and 0–2.23°, respectively.

Key words: the Poyang Lake; habitat suitability index; optimal habitat distribution; fish acoustic detection; remote sensing; hydrodynamic model

Corresponding author: CHEN Daqing, E-mail: chdq@yfi.ac.cn; WANG Lin, E-mail: angels121@cafs.ac.cn