

基于渔业声学调查的珠江东塔产卵场鱼类栖息地适宜性研究

武智¹, 李跃飞¹, 朱书礼¹, 杨计平¹, 夏雨果¹, 李捷^{1,2}

1. 中国水产科学研究院珠江水产研究所/农业农村部珠江中下游渔业资源环境科学观测实验站/国家渔业资源环境广州观测实验站, 广东广州 510380
2. 农业农村部外来入侵水生生物防控重点实验室, 广东广州 510380

摘要: 东塔产卵场是珠江最大的鱼类产卵场, 同时也是多种珍稀特有鱼类的重要栖息地, 对维持珠江中下游鱼类早期资源的补充及其多样性至关重要。为评估东塔产卵场鱼类的栖息地适宜性, 基于 2016—2019 年的声学数据, 通过热点分析, 筛选出鱼类适宜分布的区域。以地形因子水深、坡度、坡向为栖息地指示因子, 建立各因子适宜度指数范围, 进而采用几何平均值法建立栖息地适宜性指数 (Habitat suitability index, HSI) 模型, 并计算研究江段的 HSI 值。结果显示, 东塔产卵场鱼类密度分布介于 $0.009\sim 0.057$ 尾· m^{-3} ; 在时间上, 鱼类密度呈逐年下降趋势, 在空间上, 鱼类分布整体自相关性不强, 部分区域局部自相关性强, 如产卵场沙洲邻近区域三年结果均为“热点区域”, 大藤峡水利枢纽下游及石咀段出现“冷点区域”。该江段鱼类的适宜水深范围为 5~8 m, 适宜坡度范围为 $1.0^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ (微斜坡), 适宜坡向范围为 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ (东南方向)。通过 HSI 模型计算, 得出研究江段 HSI 值介于 0.02~0.95, 平均值为 0.31 ± 0.22 , 高值区域集中出现在东塔产卵场的沙洲两侧, 河流两侧也有零星分布, 可能为鱼类潜在的适宜栖息区域; 主航道基本为 HSI 低值区。利用 2017 年声学调查数据对 HSI 模型进行了验证, 鱼类资源密度与 HSI 值呈线性正相关关系, 表明该模型可较好地预测东塔产卵场的鱼类栖息情况, 可用于江河鱼类栖息地适宜性分析与评价。

关键词: 东塔产卵场; 栖息地适宜性; 水声学技术; 热点分析

中图分类号: S 932.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Fish habitat suitability analysis of Dongta spawning ground of Pearl River based on fisheries acoustic survey

WU Zhi¹, LI Yuefei¹, ZHU Shuli¹, YANG Jiping¹, XIA Yuguo¹, LI Jie^{1,2}

1. Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Guangzhou Scientific Observing and Experimental Station of National Fisheries Resources and Environment/Experimental Station for Scientific Observation on Fishery Resources and Environment in the Middle and Lower Reaches of Pearl River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510380, China
2. Key Laboratory of Prevention and Control for Aquatic Invasive Alien Species, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510380, China

Abstract: As the largest spawning ground, the Dongta spawning ground is an important habitat for many rare and unique fish in the Pearl River, playing an important role in maintaining the supplement and diversity of early fish resources in the middle and lower reaches of the Pearl River. In order to evaluate the fish habitat suitability, we selected the suitable habitat of fish by a hot spot analysis based on the acoustic data from 2016 to 2019. Taking the terrain factors (Water depth, slope and aspect) as habitat indicators to calculate the fitness index range of each factor, we established the habitat suitability index (HSI) model by

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0900902); 珠江渔业资源调查与评估创新团队项目 (2020ZJTD-10, 2020ZJTD-04)

作者简介: 武智 (1988—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为渔业资源及渔业声学。E-mail: wz@prfri.ac.cn

通信作者: 李捷 (1979—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为渔业资源及生态学。E-mail: lijie1561@163.com

using the geometric mean method and calculated the HSI value. It is showed that the fish density ranged from 0.009 to 0.057 ind·m⁻³ in Dongta spawning ground. In terms of time, the fish density had been decreasing year by year, but in terms of space, the overall autocorrelation of fish distribution was not strong, while the local autocorrelation was strong in some areas. For example, the area adjacent to the spawning ground sandbar had been a hot spot in three years, and the "cold spot area" appeared in the downstream of the Datengxia Water Project and Shizui Section. The most suitable water depth range was 5–8 m, the suitable slope range was 1.0°–1.5° (Micro-slope), and the suitable aspect range was 90°–180° (Southeast direction). The average HSI value was 0.31±0.22, ranging from 0.02 to 0.95, and the high value was obtained mainly on both sides of the sandbar of the Dongta spawning ground but scattered on both sides of the river, where might be potentially suitable habitat areas. The main channel was basically the area with low HSI values. The HSI model was verified based on the acoustic data in 2017, and the fish density and HSI showed a linear positive correlation, which indicates that the established model in this paper can be used to analyze and evaluate the habitat suitability of river fish.

Keywords: Dongta spawning ground; Habitat suitability; Hydroacoustic technology; Hot spot analysis

河流栖息地是对水生生物有直接或间接影响的多种尺度下物理化学条件的组合^[1], 随着人类涉水活动的增加, 鱼类等水生生物的栖息地正遭受严重破坏。河流生物栖息地评估在河流生态修复中具有重要作用, 通过栖息地评估可为河流生态修复提供基础信息和依据^[2]。针对不同水动力条件下鱼类生境的变化, 国内外学者进行了大量研究^[3-5]。小尺度产卵场的地形特征是研究产卵场水动力特征的基础。河流的水动力特征与水下地形、地貌存在密切关系。特殊的河床形态决定了特殊的水力学特征, 如坡度与底部流速存在正相关关系^[6], 这些因素决定了鱼类的产卵条件^[7]。河流地形地貌在河流水量和水质不变的基础上, 与生物群落的多样性存在正相关性, 可影响其功能和结构^[8]。河流地形地貌方面的研究集中在河道和河段尺度上, 多为定性描述^[9]。定量的、微尺度的高程、高程变异系数、地形复杂度、坡度、坡向等地形因子, 多应用于海洋河口或中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 等珍稀濒危鱼类的产卵场研究, 而在“四大家鱼”产卵场方面的研究运用较少^[7,10-12], 珠江流域尚未见报道。

西江水系约有 70 多处经济鱼类产卵场, 尤其以郁、黔、浔三江最为集中。东塔产卵场是珠江流域最大的产卵场, 也是斑鳊 (*Mystus guttatus*)、卷口鱼 (*Ptychidio jordani*) 等珠江众多珍稀特有鱼类的重要栖息地, 具有重要的生态功能^[13-14]。近年来受水利水电开发、航道整治、挖沙等涉水活动影响, 鱼类栖息地遭到严重破坏, 表现为生境丧失、破碎化和同质化, 导致鱼类多样性降低、个体小型化, 鱼类群落组成发生巨大变化^[15-16]。主要渔业对象由 80 年代的鲮 (*Tenualosa reevesii*)、花鲮 (*Clupanodon thrissa*)、青鱼 (*Mylopharyngodon*

piceus)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、赤眼鲮 (*Squaliobarbus curriculus*) 等变为目前的广东鲮 (*Megalobrama terminalis*)、赤眼鲮、鲮 (*Cirrhinus molitorella*)、鳊 (*Hemiculter leucisculus*), “四大家鱼”仔鱼资源在总鱼苗量中所占比例从 46.6% 下降至 4.51%^[17-18]。

大藤峡水利枢纽位于东塔产卵场上游约 8 km, 于 2020 年建成。该电站的运行, 势必会改变下游江段的水下地形结构, 导致鱼类栖息地的生境发生变化, 从而影响其生存和繁衍^[19-20]。要正确认识工程对鱼类栖息地的影响, 必须对自然条件下栖息地状况, 鱼类与栖息地地形、地貌间的关系有清楚而充分的认识。因此, 有必要对该江段水下地形特征进行研究, 评估水坝建设及运行对下游鱼类栖息地的影响。

目前, 珠江流域关于鱼类微观栖息地地形、地貌的研究尚未见报道, 相关研究仅限于定性描述^[21], 栖息地功能现状缺少科学评估。本研究首次采用声学方法对东塔产卵场栖息地现状进行评估, 并构建了栖息地适宜性指数 (Habitat suitability index, HSI) 模型, 以期为江河鱼类栖息地功能评价、生态修复提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

东塔产卵场位于浔江上游, 自黔、郁两江汇合口起至东塔村止, 长约 7 km, 为珠江最大“四大家鱼”产卵场。该研究区域上起大藤峡水利枢纽下游, 下至石咀镇 (图 1), 具体地理位置为 110.057°E—110.16°E、23.432°N—23.467°N。研究区域长约 14 km, 水深介于 1.5~32.0 m。采用 ArcGIS 10.1 软

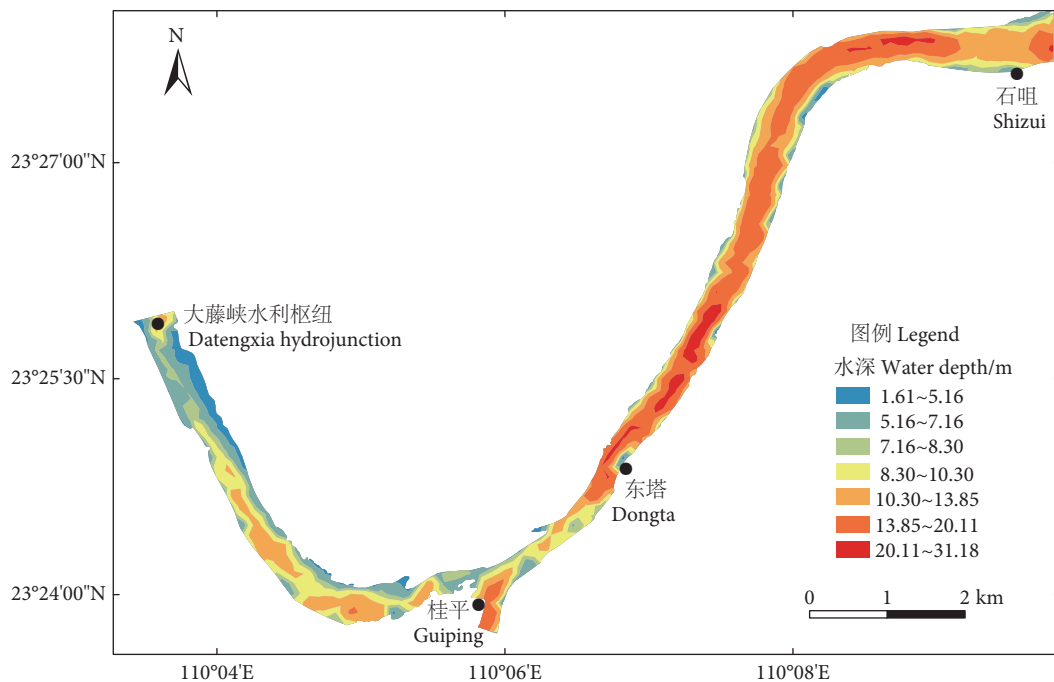


图1 调查区域水深分布图

Fig. 1 Distribution of water depth in survey area

件绘制地图, 数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>, 1 : 25 万全国基础地理数据库, 2019 公众版)。

1.2 数据采集

分别于 2016 年 4 月、2017 年 6 月、2018 年 4 月和 2019 年 4 月对该江段进行了声学走航探测。使用仪器为分裂波束渔探仪 EY60 (Simrad, 挪威), 换能器中心频率 120 kHz, 发射功率 200 W, -3 dB 波束宽 7.0°, 脉冲宽度 256 μ s。在每次调查前, 参照校准流程, 使用碳化钨校准球 (Φ 23 mm) 对系统收发增益进行校准^[22]。调查船只使用当地渔船, 长约 8 m, 换能器垂直向下固定于船舷, 吃水约 0.5 m。船速约 4.4~5.5 kn, 走航方向为顺流而下, 设计航线为“之”字形, 在实际航程中根据调查江段情况进行实时调整。

2019 年 4 月使用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP, WHR600, 美国) 对产卵场进行流场、地形同步监测。在测量前, 记录待测量区域内上下游断面中心点的坐标, 以及弯道处断面中心点坐标, 通过配置引导物, 画出测量区域的计划线。在实际测量时, 根据导航测量软件, 记录、校正测船航迹, 使测船沿着计划线依次测量。该次测量断面间距为 150 m, 共 94 个断面, 通过 ADCP 实测, 监测期间浔江流量约 5 000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.3 数据分析

1.3.1 地形因子提取

测量的原始数据在 ADCP 辅助测量软件 Win-River 以 ASCII 码文件导出, 读取每个测量断面、流速矢量、水深、经纬度等数据, 使用 ArcGIS 10.1 软件构建河床不规则三角网和数字高程模型, 提取产卵场高程、坡度、坡向、地形起伏度、高程变异系数、地表粗糙度共 6 个地形因子^[11]。

地形因子之间可能存在共线性关系, 分析数据时, 采用 Pearson 相关系数判定两者之间的相关性, 当两者存在共线性关系时, 仅选取其中一个变量为解释变量。

1.3.2 热点分析

热点分析用于识别具有统计显著性的高值 (热点) 和低值 (冷点) 的空间聚类, 是根据在一定分析规模内的所有要素, 计算每个要素 Getis-Ord G_i^* 统计值, 得到每个要素的 z 得分和 P 值。统计学上的显著性正值 z 得分表示热点, z 得分越高, 表示热点聚集越紧密; 负值表示冷点, z 得分越低, 冷点聚集就越紧密。通过 z 得分和 P 值, 可以得到产卵场鱼类资源密度高值或低值在空间上发生聚类的位置^[23]。

与传统的鱼类空间分布相关研究不同, 本研究侧重从地理空间视角去解释鱼类的空间聚类。首先

使用声学数据后处理软件 Echoview 5.4 (Myriax Pty Ltd. 澳大利亚) 对原始数据进行处理, 获得不同调查时间的鱼类密度信息。其次利用 ArcGIS 10.1 软件中的不等边三角形 TIN 方法建立密度数据范围, 通过建立 TIN 能够剔除无数据的水域; 然后利用空间统计分析模块中的空间自相关和热点分析对鱼类密度数据进行分析 and 结果可视化输出。

1.3.3 栖息地模型建立

2016、2018 和 2019 年采样时间均为 4 月, 2017 年为 6 月。为降低在热点分析和模型建立中季节变化造成的影响, 本文利用 2016、2018 和 2019 年数据构建模型, 以 2017 年数据验证模型。

本文假设 2 年及以上鱼类热点分布重叠区域(网格)为鱼类适宜分布区域, 提取热点区域中的地形因子。根据频率分布法, 统计各因子分布范围, 然后对结果进行归一化处理, 估算适宜度指数值 (Suitability index, SI), 出现频次最高的值赋予 $SI=1$, $SI \in [0, 1]$ 。

由于几何平均值考虑了各因子之间的补偿影响, 对生境适宜性的估计更为保守, 因此 HSI 模型采用几何平均法建立, 计算公式为^[4]:

$$S_{HSI,i} = (SI_{1i} \times SI_{2i} \times \dots \times SI_{ni})^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中: $S_{HSI,i}$ 为第 i 个网格的栖息地适宜性指数值; i 为研究区域网格序号; SI_{ni} 为第 n 个地形因子第 i 个网格的 SI 值。

1.4 HIS 模型验证

利用 2017 年 6 月的声学调查数据及水深数据, 分析该江段鱼类资源密度分布情况, 验证是否 HIS 值越高的网格鱼类密度越高。

2 结果

2.1 鱼类密度及空间热冷点分布格局

2016—2019 年鱼类平均密度见表 1, 鱼类密度呈逐年下降趋势, 使用非参数检验进行分析, Kur-skal-Wallis 结果显示, 不同调查时间鱼类密度存在显著性差异 ($P < 0.05$)。从偏度值可以看出数据左偏, 表明低密度单元格较多。

表 1 东塔产卵场不同调查时间鱼类密度分布信息

Table 1 Fish density distribution in Dongta spawning ground in different periods

调查时间 Survey year	鱼类密度 Fish density/(尾·m ⁻³)	范围 Range	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of variance
2016年	0.057 4±0.128 7	(0.000 3, 1.018 4)	6.146	41.269	2.24
2017年	0.043 4±0.056 5	(0.007 2, 0.405 3)	3.744	17.185	1.30
2018年	0.031 6±0.037 7	(0.000 4, 0.196 7)	2.004	4.265	1.19
2019年	0.009 4±0.007 1	(0.000 4, 0.035 6)	1.492	2.536	0.75

将鱼类密度导入 GIS 中进行空间自相关和热点分析, 得到鱼类在东塔产卵场的热点分布图(图 2)。空间上, 研究区域鱼类资源的空间分布具有一定的聚集特征, 即不同年份均出现“热点区域”(红色区域), 标志为 $z > +1.65$ ($P < 0.1$), 如东塔产卵场部分区域 3 年结果均为“热点区域”; 而大藤峡下游及石咀段出现“冷点区域”(蓝色区域); 其他江段绝大部分 z 值介于 $-1.65 \sim +1.65$, 这些区域内渔业资源密度高值和低值之间的空间自相关性弱, 为随机性分布。总体来看, 东塔产卵场部分区域局部自相关性强, 整体自相关性表现并不强烈, 鱼类资源密度呈现“热”“冷”不均的局部性分布特征。

2.2 适宜度曲线构建

根据上述方法, 从鱼类“热点分布”区域中选

取 2 年及以上重合区域网格, 共 80 个, 提取各网格地形因子, 利用频度分布, 拟合建立地形因子的单因子适宜度曲线。

本文共获取了 6 个解释变量, 包括高程、坡度、坡向、地形起伏度、高程变异系数、地表粗糙度。高程变异系数、地形起伏度和坡度的相关系数大于 0.85, 因高程变异系数和地形起伏度是基于高程(水深)计算得出的, 因此只保留坡度进行分析; 地表粗糙度数据主要集中在 1 左右, 无法拟合。因此选择水深、坡度、坡向 3 个地形因子作为预测变量参与分析。由图 3 可见, 热点区域水深介于 1.5~25.0 m, 鱼类适宜水深为 5.0~8.0 m; 坡度介于 $0^\circ \sim 27^\circ$, 鱼类适宜范围介于 $1^\circ \sim 1.5^\circ$, 依据坡度等级, 鱼类适宜区域为微斜坡; 鱼类适宜的坡向介于 $90^\circ \sim 180^\circ$, 即东南方向。

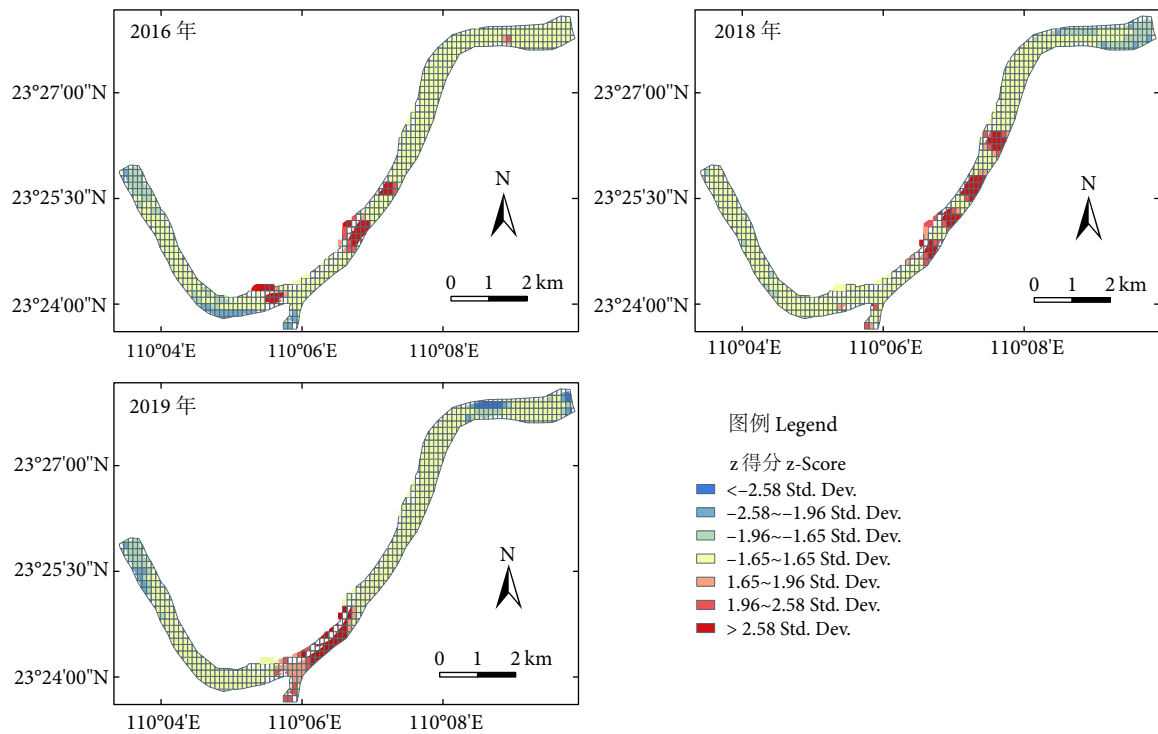


图2 不同年份东塔产卵场鱼类资源空间热点分布图

Fig. 2 Hotspots of fsh resources in Dongta spawning ground in different years

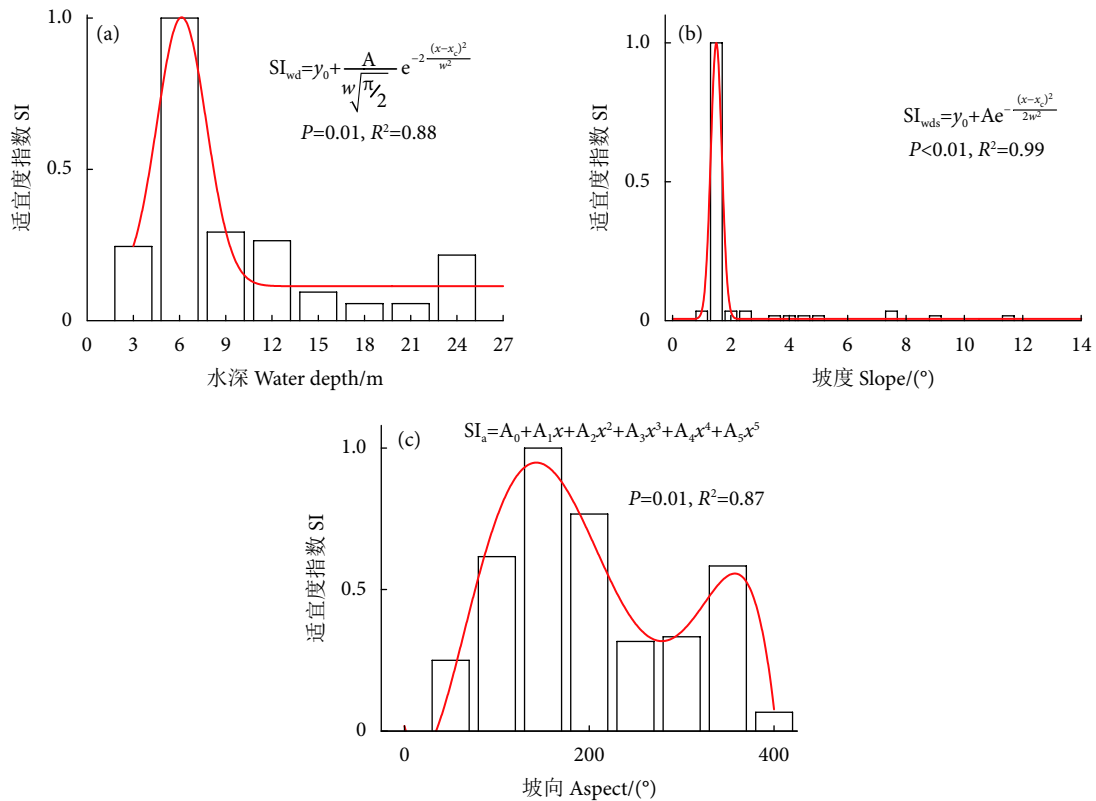


图3 不同地形因子的适宜曲线

Fig. 3 Suitability index curve of different terrain factors

2.3 HSI 值计算

根据公式 (1) 计算得出鱼类密度的 HSI 值。5 000 m³·s⁻¹ 流量下 HSI 值分布介于 0.02~0.95, 平

均值为 0.31±0.22。其中, HSI 值大于 0.5 的区域占总数的 26.67%。由图 4 可知, 研究江段 HSI 最大值出现在产卵场沙洲两侧, 河流两侧也有零星分

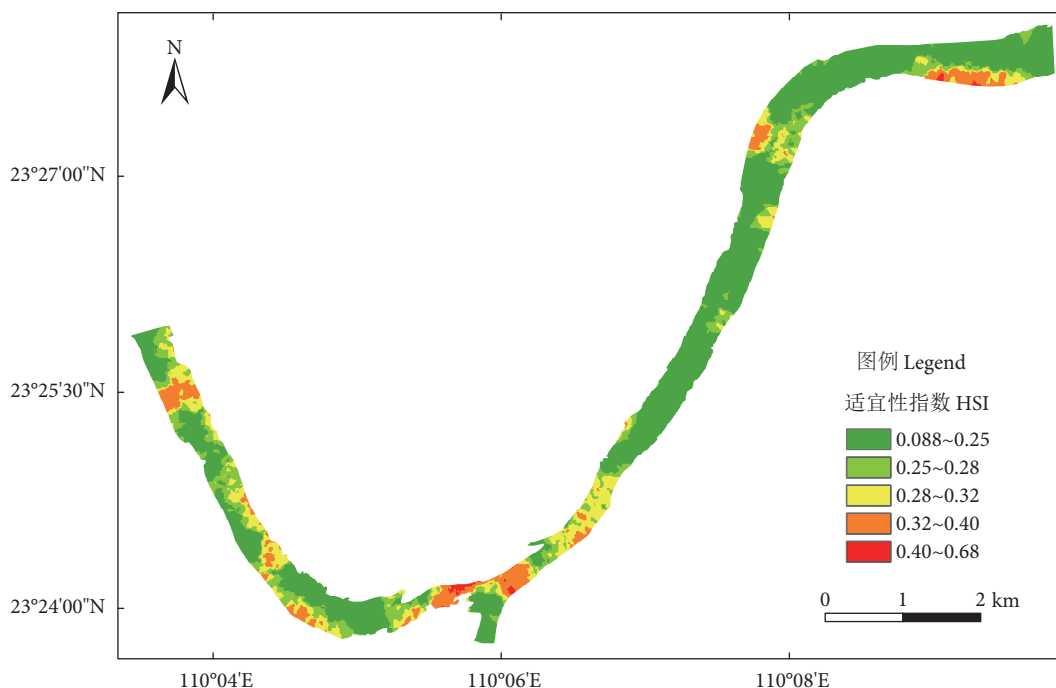


图4 东塔产卵场鱼类栖息地适宜性指数分布图

Fig. 4 Habitat suitability index distribution of Dongta spawning ground

布；另外，主航道基本上为 HSI 低值区域。

2.4 栖息地模型验证

使用 2017 年 6 月声学数据对 HSI 模型进行验证。通过 Pearson 相关性分析可知，鱼类密度与 HSI 值呈正相关关系 ($R=0.794, P=0.011$)。拟合结果显示，HSI 与鱼类密度的关系为： $y = 0.02x + 0.04$ ($R^2=0.63, RMSE=0.005$)，符合本文假设。

3 讨论

3.1 地形因子的选择性特征

东塔产卵场位于郁江、黔江和浔江三江交汇口，鱼类种类丰富，物种多样性高。文献资料显示，该江段鱼类优势种为鲮、鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲮、赤眼鲮、广东鲮、卷口鱼等^[15-16]。河流物种多样性和河床特征存在着一定程度的响应关系，同时生物群落的结构和功能受之影响。然而，目前尚不清楚地形因子如何影响鱼类^[24]。本研究提取了水深、坡度、坡向、地形粗糙度、高程变异系数、曲率等地形因子进行分析，通过判定各因子之间的相关性及各因子取值的分布情况，筛选出了水深、坡度、坡向作为构建适宜性模型的因子。

水深是鱼类生活空间的反映，鱼的体型大小、生活习性等决定了鱼类对水深的需求^[25]。Miranda 和 Killgore^[26] 研究表明，鱼类分布与水深呈非随机关系，约 75% 的物种分布在 12 m 以浅。Sheldon^[27]

认为鱼类分布与水深有着紧密联系，随季节和种类的不同而变化。本研究区域最大水深为 31.0 m，鱼类适宜水深介于 5.0~8.0 m。从图 1 可以看出，深水区主要为航道，航道在扩能升级过程中改变了河床结构，破坏了鱼类栖息地；另外，鱼类会对航道中的行船噪声产生回避行为^[28-29]，因此深水区基本为 HSI 低值区。

水下地形结构影响着鱼类的分布和多样性^[24]。相关研究表明，疏浚通过改变水下地形，显著影响鱼类群落及空间分布。鱼类丰度和多样性从与自然河口陡峭的坡度相关，转变为与疏浚河口平缓的坡度相关^[12]。西江航道经过二次扩能升级，河流水下地形地貌已发生了变化^[30]，因此鱼类偏好栖息于坡度较缓的区域^[31]。

坡向是坡度所面对的方向，用于识别表面上某一位置处的最陡下坡方向。相关研究表明，中华鲟产卵场平均坡向分别为 219.92°和 207.63°，长江四大家鱼产卵场平均坡向介于 150.16°~200.6°^[10-11]，本研究中栖息地坡向适宜范围介于 90°~180°。上述产卵场坡向分布范围不同，但根据河流地形走势来看，坡向均为水流方向；因此推测鱼类偏好栖息于河流中向着水流方向的微斜坡。

3.2 栖息地适宜度

HSI 模型是通过适宜度方程评价各个生态因子对某一特定物种的适宜度值和综合值，以此来评价

环境对这个特定物种生存和繁殖的适合程度。以往研究使用的生物因子来源于专家经验或者室内实验^[3]。近年来, 相关研究越来越重视探讨在自然状态下鱼类分布与生境因子之间的关系, 以此来确定鱼类适宜栖息地范围^[31]。本研究根据鱼类对生境的利用情况来绘制适宜度曲线, 鱼类时空分布及水下地形数据均为实测, 地形因子的频率分布是基于3年声学调查结果, 利用局部空间自相关方法对鱼类空间分布进行分析, 定位到鱼类分布的高密度区域, 能较为准确地反映野外实际情况。因此栖息地适宜性指数具有较高的可靠度。另外, 模型验证结果显示, HSI 值较高的区域, 鱼类密度较大, 表明该模型适用于东塔江段鱼类栖息地适宜性评价。

在数据分析中, 经常会遇到少量的鱼类高密度值, 这些值是研究者关注的热点; 但从经典统计学角度讲, 这些值却是造成评估不确定性的原因^[32]。鱼类以个体、种群、群落的形式分布在特定空间上, 具有高度的空间自相关性。经典统计学受基本假设的限制, 在研究个体、种群和群落空间自相关方面具有较多缺陷^[23]。热点分析可划分鱼类资源高低属性值的空间聚集, 能够直观清晰地表现渔业资源分布情况, 结果具有统计学意义。在渔业生态学中, 热点分析已应用于栖息地变动趋势、物种丰富度等方面^[33-35]。本研究尝试应用该法来识别鱼类适宜栖息地, 取得了较好的效果。由于能够较为直接清晰地表现渔业资源分布情况, 热点分析的应用前景将会被不断拓展。

3.3 研究不足及未来展望

本研究以河流地形特征作为变量研究鱼类栖息地适宜情况。坡度、坡向为常量, 不会随流量的变化而改变。水深作为表征高程的因子, 会随径流量的变化而增减。随着流量增大, 水深加深, 河流两岸漫滩及中心沙洲会被淹没, 适宜鱼类栖息的区域也会发生改变。但是本研究区域边界是基于 $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 流量建立的, 河流边界无法随流量的增加而变化。因此本文所建模型无法模拟高流量下的河流栖息地状况。

未来在开展此类工作时, 野外采样应选择在水位较高时, 尽可能将河流两岸漫滩及中心沙洲淹没。漫滩作为河流生态系统的重要组成部分, 为鱼类提供了多样化的栖息生境, 具有高生产力和微生物异质性, 对维持区域鱼类生物多样性具有重要作

用^[36-37]。本研究探明了大藤峡水利枢纽蓄水前东塔产卵场水下地形特征及鱼类时空分布, 今后仍需持续监测, 以评估该电站运行对坝下江段鱼类栖息地的影响。

参考文献:

- [1] 郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究 [J]. 环境科学学报, 2007(6): 928-936.
- [2] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展 [J]. 科技导报, 2008, 26(17): 82-88.
- [3] 易雨君, 侯传莹, 唐彩红, 等. 澜沧江中游河段中国结鱼栖息地模拟 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 82-89.
- [4] YU L X, LIN J, CHEN D, et al. Ecological flow assessment to improve the spawning habitat for the four major species of carp of the Yangtze river: a study on habitat suitability based on ultrasonic telemetry[J]. Water, 2018, 10(5): 600.
- [5] 谢雨芳, 吴鹏, 刘永, 等. 珠江河口凤鲚的栖息地适宜性评价 [J]. 南方水产科学, 2023, 19(1): 22-29.
- [6] WANG C Y, WEI Q W, KYNARD B, et al. Migrations and movements of adult Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* in the Yangtze River, China[J]. J Fish Biol, 2012, 81(2): 696-713.
- [7] 张辉. 葛洲坝下游中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 产卵场地形分析 [J]. 生态学报, 2007, 27(10): 3945-3955.
- [8] 朱瑶. 大坝对鱼类栖息地的影响及评价方法述评 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 100-103.
- [9] 柏海霞, 彭期冬, 李翀, 等. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3): 249-257.
- [10] YI Y J, ZHANG S, WANG Z Y. The bedform morphology of Chinese sturgeon spawning sites in the Yangtze River[J]. Int J Sediment Res, 2013, 28(3): 421-429.
- [11] 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]. 成都: 西南大学, 2018: 51-64.
- [12] BORLAND H, GILBY B, HENDERSON C, et al. Dredging fundamentally reshapes the ecological significance of 3D terrain features for fish in estuarine seascapes[J]. Landscape Ecol, 2022, 37(5): 1-16.
- [13] 帅方敏, 李新辉, 李跃飞, 等. 珠江东塔产卵场鳊繁殖的生态水文需求 [J]. 生态学报, 2016, 36(19): 1-8.
- [14] 黎小正. 模糊综合评价广西桂平东塔鱼类产卵场水质状况 [J]. 广西科学院学报, 2010, 26(3): 363-366.
- [15] 帅方敏, 李新辉, 何安尤, 等. 珠江水系广西江段鱼类多样性空间分布特征 [J]. 水生生物学报, 2020, 44(4): 819-828.
- [16] 张迎秋, 黄稻田, 李新辉, 等. 西江鱼类群落结构和环境影响分析 [J]. 南方水产科学, 2020, 16(1): 42-52.
- [17] TAN X C, LL X H, LEL S, et al. Annual dynamics of the abundance of fish larvae and its relationship with hydrological variation in the Pearl River[J]. Environ Biol Fish, 2010, 88(3): 217-225.
- [18] SHUAI F M, LI X H, LI Y F, et al. Temporal patterns of larval fish

- occurrence in a large subtropical river[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0146441.
- [19] 庞雪松, 杜敬民, 假冬冬, 等. 西江长洲枢纽下游近坝段水位下降特征及调控措施 [J]. *水利水运工程学报*, 2014(3): 42-48.
- [20] 李建. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响 [J]. *水利学报*, 2013, 44(8): 892-900.
- [21] 谭细畅, 李新辉, 林建志, 等. 基于水声学探测的两个广东鲂产卵群体繁殖生态的差异性 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1756-1762.
- [22] FOOTE K, KNUDSEN H, VESTNES G, et al. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide[J]. *ICES Coop Res Rep*, 1987, 144: 1-69.
- [23] 杨晓明, 戴小杰, 田思泉, 等. 中西太平洋鲣鱼围网渔业资源的热点分析和空间异质性 [J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3771-3778.
- [24] BORLAND H P, GILBY B L, HENDERSON C J, et al. The influence of seafloor terrain on fish and fisheries: a global synthesis[J]. *Fish Fish*, 2021, 22(4): 707-734.
- [25] 李翀. 长江上游保护区干流鱼类栖息地地貌及水文特征研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013: 46-51.
- [26] MIRANDA L E, KILLGORE K J. Fish Depth distributions in the lower Mississippi River[J]. *River Res Appl*, 2014, 30(3): 347-359.
- [27] SHELDON A L. Species diversity and longitudinal succession in stream fishes[J]. *Ecology*, 1968, 49(2): 193-198.
- [28] ROBERTIS D A, HANDEGARD N O. Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review[J]. *ICES J Mar Sci*, 2013, 70(1): 34-45.
- [29] WHEELAND L J, ROSE G A. Quantifying fish avoidance of small acoustic survey vessels in boreal lakes and reservoirs[J]. *Ecol Freshw Fish*, 2014, 24(1): 67-76.
- [30] 童朝锋, 周云, 孟艳秋. 航道清礁对西江鱼类保护区紊流体的影响 [J]. *水运工程*, 2018(11): 138-144.
- [31] 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 [J]. *中国水产科学*, 2022, 29(3): 341-354.
- [32] PETITGAS P, WOILLED M, DORAY M, et al. A geostatistical definition of hotspots for fish spatial distributions[J]. *Math Geosci*, 2016, 48(1): 65-77.
- [33] NELSON T A, BOOTS B. Detecting spatial hot spots in landscape ecology[J]. *Ecography*, 2008, 31(5): 556-566.
- [34] 李佳佳, 汪金涛, 陈新军, 等. 不同气候模态下西北太平洋柔鱼冬春生群资源时空分布变化研究 [J]. *南方水产科学*, 2020, 16(2): 62-69.
- [35] 史慧敏, 樊伟, 张涵, 等. 基于渔船轨迹的阿根廷滑柔鱼捕捞强度空间分析 [J]. *南方水产科学*, 2021, 17(6): 1-11.
- [36] 李斌, 郑宇辰, 徐丹丹, 等. 长江上游弥陀漫滩水体鱼类食物网动态的季节性变化 [J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1664-1675.
- [37] AMOROS C, BORNETTE G. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains[J]. *Freshw Biol*, 2002, 47(4): 761-776.