

Ye H M, Li P C, Wu J M, *et al.* Habitat distribution characteristics and key influencing factors of *Acipenser dabryanus* juveniles in Luzhou River section of the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(12): 122502. [叶海明, 李鹏程, 吴金明, 等. 长江泸州江段人工增殖放流长江鲟幼鱼栖息分布特征及关键影响因素分析 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(12): 122502.]

长江泸州江段人工增殖放流长江鲟幼鱼栖息分布特征及关键影响因素分析

叶海明¹ 李鹏程² 吴金明² 沈丽² 李君轶² 杜浩²

(1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223)

摘要: 研究以人工增殖放流的长江鲟(*Acipenser dabryanus*)幼鱼为研究对象, 基于2023年在长江上游泸州江段的监测数据分析了长江鲟幼鱼资源密度的时空分布特征, 并通过广义加性模型(GAM)筛选影响其栖息分布的主要环境因子。结果显示, 长江上游泸州江段长江鲟幼鱼资源密度在时间和空间上均存在显著差异。时间上, 夏季长江鲟幼鱼资源密度显著高于秋季($P<0.05$); 空间上, 在8个调查江段中, 龙马潭江段长江鲟幼鱼资源密度最高, 为0.43 kg/(h·次), 九聚村位点长江鲟CPUE最低, 为0.011 kg/(h·次), 龙马潭江段长江鲟幼鱼资源密度显著高于其他位点($P<0.05$), 其他7个位点之间则无显著差异($P>0.05$); 影响长江鲟幼鱼资源密度分布的主要环境因子为流速、底栖动物密度和水温, 其中流速偏差解释率最高为69.1%。幼鱼资源密度值在流速(0.15—0.86) m/s随流速增加而迅速减小, 后趋于平稳; 底栖动物密度与幼鱼资源密度呈正相关性, 即随着底栖动物密度的增加, 长江鲟幼鱼资源密度呈现上升的趋势; 幼鱼资源密度在(18.9—20.7)℃随着水温的升高而减少。研究揭示了长江鲟幼鱼在长江干流泸州段的栖息分布特征及流速、底栖动物密度和水温对其分布的影响, 可为长江鲟栖息地保护与种群恢复提供科学依据。

关键词: 长江泸州江段; 长江鲟幼鱼; 增殖放流; 分布特征; 环境因子

中图分类号: S965.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)12-122502-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0034 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0034



长江上游指长江源头至干流宜昌江段, 全长4511 km, 流域面积105.4万km²^[1]。该区域具有复杂的地形地貌和发达的河网水系, 其河道曲折, 滩沱相间, 为鱼类提供了产卵、索饵和越冬等重要栖息地^[2]。同时, 长江上游也是我国重要的淡水鱼类种质资源基因库, 分布有长江鲟(*Acipenser dabryanus*)、圆口铜鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)等124种长江上游特有鱼类^[3]。此外, 丰富的鱼类资源和多样的地理生境使长江上游成为维系长江流域生态平衡的重要区域。然而, 自20世纪70年代以来, 随着社会的快速发展, 环境

污染、过度捕捞和水利设施建设等人类活动对长江上游的生态环境造成了一定程度的负面影响, 导致鱼类资源减少、生境破碎和生物多样性下降等一系列生态问题^[4-6]。

长江鲟, 隶属于鲟形目(*Acipenseriformes*), 鲟科(*Acipenseridae*), 鲟属(*Acipenser*), 是长江水域生物资源的重要代表物种, 主要分布在金沙江下游、长江上游及其各大支流^[7, 8]。20世纪70年代, 长江鲟的资源量丰富, 渔获量最高可达5000 kg^[9]。然而, 到了20世纪末, 由于过度捕捞和水利工程建设等人类活动的影响, 长江鲟的自然种群数量急剧下降^[10, 11]。

收稿日期: 2025-02-10; **修订日期:** 2025-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(32102799); 国家重点研发计划(2021YFD1200304); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2023TD08)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32102799); Key Research and Development Program of China (2021YFD1200304); Yangtze River Rare and Endangered Fish Conservation Innovation Team Project (2023TD08)]

作者简介: 叶海明(1999—), 男, 硕士研究生; 主要从事濒危鱼类保护研究。E-mail: 1992989052@qq.com

通信作者: 李君轶, 男, 研究员; 主要从事濒危鱼类保护研究。E-mail: Junyili@yfi.ac.cn

为了恢复长江鲟的自然种群,自2007年以来,我国开始进行长江鲟的人工增殖和放流,主要放流幼鱼,且放流规模逐年增加。监测数据显示,长江鲟幼鱼数量正逐年递增。放流个体在野外的生存和繁殖能力在很大程度上依赖于其栖息地的环境条件。然而,目前对长江鲟的研究主要集中在人工繁殖^[8,12]、遗传学^[6,13,14]和行为学^[15,16]等领域,而对长江鲟幼鱼的野外栖息地研究相对匮乏,尤其是其分布特征与环境因子之间的关系尚未得到充分探讨。

鱼类的分布与环境因素之间常存在复杂的非线性关系,传统的线性模型难以准确描述这些动态联系。广义加性模型(Generalized Additive Model, GAM)通过使用平滑函数来建模环境因素与鱼类分布之间的关系,从而更灵活地捕捉非线性模式,揭示环境变量对鱼类分布的非线性影响。这一特性使得GAM模型在研究渔业资源与环境因素之间的关系、资源的时空分布特征及未来鱼类资源状况的科学预测等方面得到了广泛应用^[17-19]。蒲艳等^[20]基于GAM模型揭示了流速、浮游生物密度、离坝距离和水温为影响长江上游鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼分布的主要环境因子;徐浩等^[21]使用GAM模型解析北部湾棕斑兔头鲂(*Lagocephalus spadiceus*)的时空分布及环境因子对其资源分布的影响;李文等^[22]借助GAM模型对黑水河红尾副鳅(*Paracobitis variegates*)的CPUE和环境因子之间的相关性进行了研究,证实了红尾副鳅的CPUE与海拔、月份、温度、流速和溶解氧有关。

本研究基于2023年泸州江段长江鲟科研监测数据和环境因子数据,分析长江鲟幼鱼的时空分布特征,并通过GAM模型解析了饵料生物资源密度和环境因子对幼鱼分布的影响。研究结果可为长江鲟幼鱼放流工作提供理论依据与科学指导,并进一步拓展用于长江上游其他特有珍稀鱼类的种群恢复与生境保护工作,以期为自然种群的养护与利用提供参考和支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文研究区域为长江干流泸州江段,该区域位于长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区内(N27°29'—29°4', E104°9'—106°30'),是长江上游生态环境较为典型的天然河段,具有复杂的水文地理特征和丰富的鱼类资源。根据以往的调查研究显示^[23],该江段长江鲟数量较多,是研究长江鲟幼鱼栖息地的重要区域。本文研究江段为野猪牙至合江江段,全长约100 km。研究区域设有8个监测位

点,从上游往下游依次为野猪牙、琥珀寺、何家坝、小市、龙马潭、罗湾、九聚村和合江(图1)。监测位点的生境特征见表1。

1.2 数据采集

长江鲟监测数据 分别于2023年7月(夏季)和11月(秋季)在长江干流泸州段开展长江鲟幼鱼监测工作,每个监测位点调查时间为3d;捕捞工具为定置刺网,网目大小分别为20、60和120 mm;捕捞时段为每日17:00至次日7:00。收网时,现场统计每个采样点监测的长江鲟尾数,并记录每尾鱼的体长(mm)和体重(g)。在数据记录完毕后,立即将监测的长江鲟幼鱼放生。本研究中的相关调查已获得渔业主管部门的科研捕捞许可。

根据长江鲟栖息地的相关研究,初步选择水深(Depth, D)、流速(Velocity, V)、pH、水温(Temperature, T)、底栖动物密度(Zoobenthos Density, ZD)、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)作为环境因子。各环境因子均在下网位置原位测量。水深由Speedtech便携式测深仪(SM-5手持式声纳)测量,流速由LSH10-1A手持式超声波多普勒流速仪测量,溶解氧和水温由便携式YSI溶氧仪测量,pH由雷磁PHB-4型pH计测量。

大型底栖动物采集 样品采集参照危起伟^[24]改良的江底定制网对底栖动物进行采集。在下网位置,将流速计固定于网口中间,网口朝上游方向,先将江底定制网前段悬挂的锚及锚链抛入江中,待锚固定好后,将剩余部分按照固定顺序依次抛入江中。每个监测位点放置江底定制网3d,每天放置3网,每网放置24h。现场裸眼分拣出漂流网内样品,使用75%乙醇固定,带回实验室后进行详细的计数、鉴定。记录流速计起始读数、放网时间。

1.3 数据分析

底栖动物漂流密度 漂流密度^[25](Zoobenthos densities, ZD)指平均每100 m³过网水量所采集到的底栖动物个数。计算公式:

$$ZD = N \times \frac{100}{V} \quad (1)$$

式中, N 表示每网底栖动物个数(ind.), V 表示过网水量(m³)。

长江鲟幼鱼判别 幼鱼指鱼类从孵化后到发育成熟并具有明显成年体特征之前的阶段。长江鲟初次性成熟年龄为雄性4龄、雌性6龄。由于长江鲟的年龄鉴定困难且雌雄个体无明显副性征,故雌雄不易区分。因此,本研究取雌雄初次性成熟的平均年龄(5龄)作为幼鱼判别界限。并根据四川

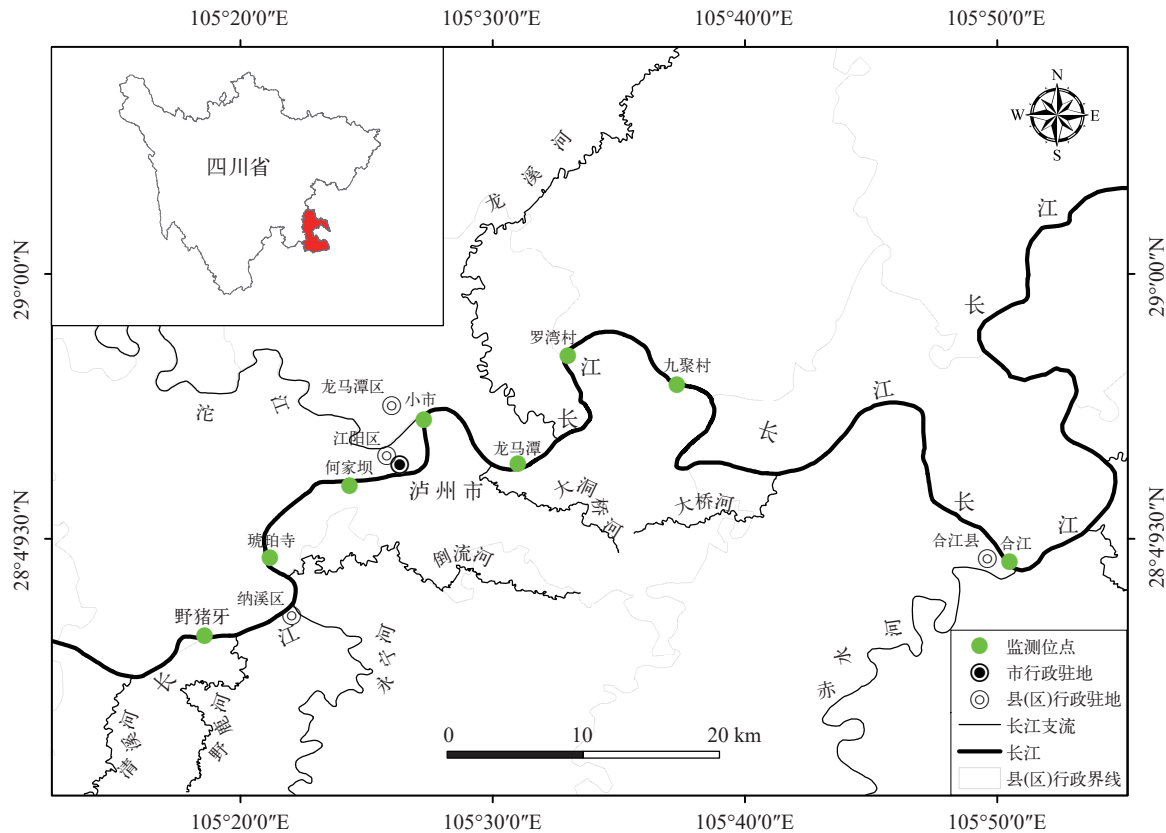


图1 研究区域及调查位点

Fig. 1 Study area and monitoring sites

表1 监测位点的生境特征

Tab. 1 Habitat characteristics of the monitored sites

调查点 Monitored site	经纬度 Longitude and latitude	生境特征 Habitat characteristic
野猪牙 Yezhuya	105°18'26.1000", 28°45'38.9412"	江面宽阔, 处于江心屿下方, 水流速度较快
琥珀寺 Huposhi	105°21'28.9152", 28°48'24.9516"	上有礁石乱滩, 水体流速快, 水流较为湍急
何家坝 Hejiaba	105°23'45.4956", 28°51'28.1052"	江面宽广且水流平缓, 左岸为主航道, 右岸为采砂后的沙坑, 水流较为稳定
小市 Xiaoshi	105°27'21.0888", 28°54'16.2252"	沱江与长江交汇处, 城镇中心, 受人类活动影响较大
龙马潭 Longmatan	105°30'41", 28°52'27"	城镇下游, 水体流速缓慢, 沿岸有水草覆盖且沱湾数量多
罗湾村 Luowancun	105°33'8", 28°56'59"	沱湾区域, 水体流速缓慢, 环境稳定
九聚村 Jiujucun	105°37'1", 28°55'43"	洄水湾, 水深, 局部水体形成明显的涡流结构, 水流复杂
合江 Hejiang	105°50'57", 28°48'15"	江段末端点, 赤水河汇入, 江面宽阔, 水流平稳

省水产资源调查组在长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究中得出的长江鲟年龄与体长(cm)直线方程^[12]判断临界体长, 方程:

$$L = 36 + 9.9t \quad (2)$$

式中, L 为体长(cm), t 为年龄。将平均年龄(5龄)代入方程, 确定幼鱼与成鱼的临界体长为85.5 cm。据

此判定体长小于85.5 cm的个体为幼鱼。

长江鲟幼鱼资源密度 统计8个监测点位监测长江鲟幼鱼的体长、体重、尾数及船次等数据, 单位捕捞努力渔获量(Catch Per Unit Effort, CPUE)以单位时间内单网捕捞渔获量[kg/(h·次)]表示, 使用Graphpad Prism10.1.2中的单因素方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)进行不同季节及不同监测点位CPUE的比较。CPUE的计算公式:

$$CPUE = \frac{C}{t \times n} \quad (3)$$

式中, CPUE为单位捕捞努力渔获量; C 为长江鲟监测量(kg); t 为作业时间(h); n 为作业网次。

GAM模型构建 在模型构建前, 采用Mantel分析筛选出对长江泸州江段长江鲟幼鱼分布有显著影响的环境因子, 然后通过方差膨胀因子(VIF)对筛选的环境因子进行多重共线性检验, 将VIF=10设为阈值。VIF值超过10的变量存在较高的线性相关性, 排除在最终模型构建之外; 通过共线性检测的环境因子被纳入模型分析^[21, 26]。

构建GAM模型时, 以长江鲟幼鱼CPUE为响应变量, 以通过多重共线性检验的环境因子作为解释变量, 通过GAM模型对长江鲟幼鱼资源丰度与相

关环境因子的关系进行拟合。GAM模型的一般形式:

$$Y = \alpha + \sum_{j=1}^{\infty} f_i(x_j) + \varepsilon \quad (4)$$

式中, Y 为长江鲟幼鱼的资源密度; α 是适合函数的截距; ε 是随机误差项; x_j 表示解释变量; $f_i(x_j)$ 是各环境变量 x_j 的任意单变量函数, 通过样条平滑函数来估计。

根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC), 从单个环境因子出发, 构建初始预测模型, 在单因子预测函数的AIC值最小的基础上, 每次向模型中添加一个新的环境因子, 进而得到AIC值最小的双因子预测模型, 不断反复执行上述步骤, 直到模型的AIC值最小, 此时模型即被视为最佳拟合模型。

数据处理 数据处理和绘图均在Excel 2019、Graphpad Prism和R 4.3.3软件中完成, 其中相关性分析以及GAM模型构建在R 4.3.3中完成, 使用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同监测位点长江鲟幼鱼CPUE进行显著性分析, 当 $P < 0.05$ 时表示显著性差异, 当 $P > 0.05$ 时表示无显著性差异。

2 结果

2.1 长江鲟体长、体重组成及分布频率

2023年, 在长江干流泸州段8个采样点共监测长江鲟239尾, 总重量为188.986 kg。体长为185—833 mm, 平均体长 (437.51 ± 137.79) mm, 优势体长组为250—350 mm, 体长频率分布占比30.54% (图2a); 体重为38—4365 g, 平均体重 (791 ± 725.26) g, 优势体重组为0—500 g, 体重频率分布占比43.93% (图2b)。

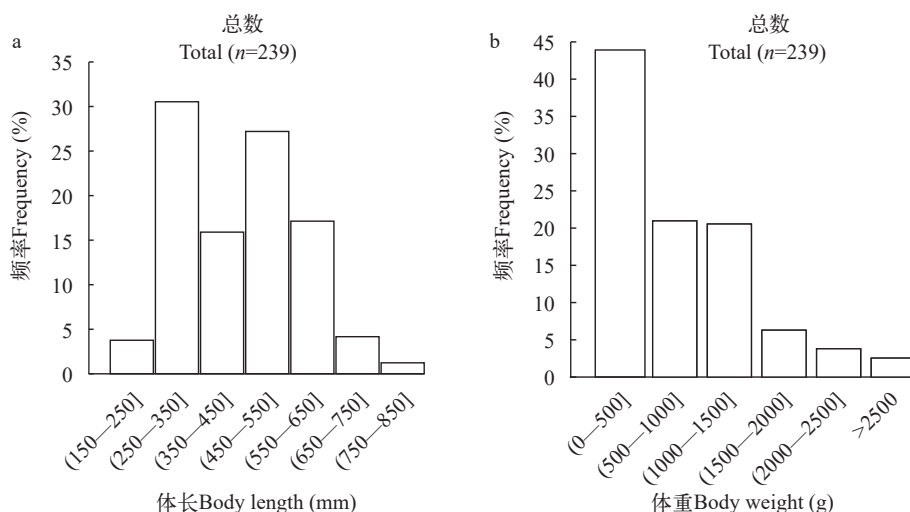


图2 长江鲟幼鱼体长、体重频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of body length and body weight of juvenile *Acipenser dabryanus*

长江鲟的体长主要分布在250—650 mm, 体重则主要分布在1500 g以下。鉴于本研究中监测到的长江鲟的最大个体体长为833 mm, 低于长江鲟幼鱼与成鱼判别标准(855 mm), 故可判定本研究中所有长江鲟个体均为幼鱼。

2.2 长江鲟幼鱼资源密度时空分布特征

2023年, 长江上游泸州段泸州江段在不同季节和监测位点长江鲟的CPUE如图3所示。夏季长江鲟的CPUE显著大于秋季($P < 0.05$; 图3a)。空间上, 从上游到下游, 泸州江段长江鲟幼鱼的CPUE呈波动变化趋势, 总体呈先上升后下降。龙马潭位点长江鲟幼鱼CPUE最高, 为0.43 kg/(h·次), 九聚村位点长江鲟CPUE最低, 为0.011 kg/(h·次)。非参数检验结果显示, 龙马潭监测位点的长江鲟幼鱼CPUE显著高于其他监测位点($P < 0.05$), 而其他监测位点间则无显著差异($P > 0.05$; 图3b)。

2.3 长江鲟幼鱼资源密度与环境因子的相关性

Mantel分析结果显示, 夏季, 底栖动物密度与资源密度呈显著正相关, 水温与资源密度呈较强负相关。秋季, 底栖动物密度与长江鲟幼鱼资源密度呈显著正相关, 流速与资源密度呈显著负相关(表2和图4)。因此, 本研究选取对长江鲟幼鱼资源密度影响较大的流速、底栖生物密度和温度作为解释变量, 长江鲟幼鱼资源密度作为响应变量进行GAM建模。

2.4 GAM模型结果

通过方差膨胀因子VIF对所选3个变量进行共线性检测, 结果显示筛选的环境因子的VIF值均小于10, 表明筛选因子均可作为解释变量(表3)。

在模型构建过程中, 首先分别将3个环境因子单独纳入模型, 结果显示流速对应的AIC值最低; 继

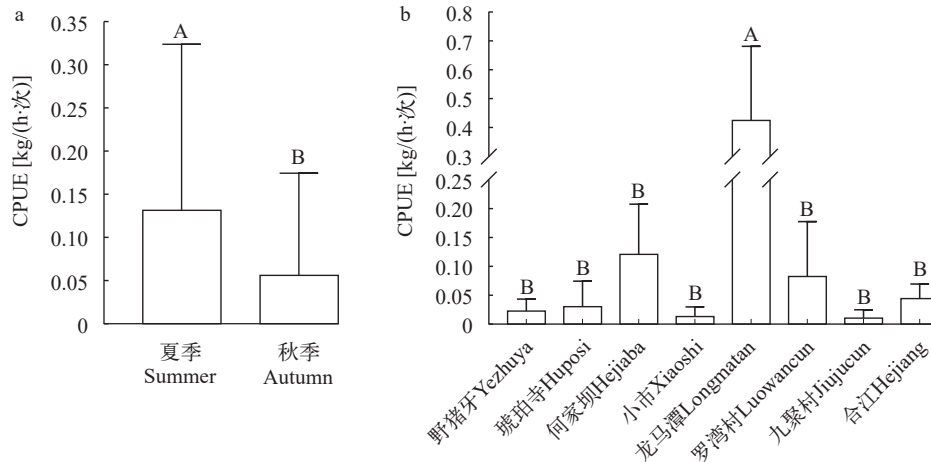


图3 泸州江段不同季节和监测位点长江鲟的CPUE

Fig. 3 CPUE of *Acipenser dabryanus* in different seasons and monitoring sites in the Luzhou River section

表2 研究区域环境因子季节变化量

Tab. 2 Seasonal variation of environmental factors in the Luzhou section of upper reaches of the Yangtze River (mean±SD)

环境因子Environmental factor	夏季Summer	秋季Autumn
$T(^{\circ}\text{C})$	20.56±0.12	19.27±0.14
pH	8.15±0.16	7.97±0.13
DO (mg/L)	7.66±0.42	7.92±0.64
Depth (m)	10.57±3.59	9.44±2.82
V (m/s)	0.35±0.14	0.48±0.21
ZD (ind./100 m ³)	1.55±0.35	0.86±0.34

而以流速作为GAM模型的固定变量, 再接着将底栖动物密度、水温加入模型, 流速+底栖动物密度对应的AIC值最低; 最后在(流速+底栖动物密度)的模型基础上加入温度后, AIC值最小(表4)。因此, 最终选择流速、底栖动物密度和温度为最优的模型, 最优GAM模型表达式:

$$Y = \alpha + s(V) + s(ZD) + s(T) + \varepsilon \quad (5)$$

2.5 长江鲟资源密度的关键影响因子

GAM模型残偏差分析显示, 模型的累计残偏差解释率为85.8%, 其中流速的偏差解释率最高(69.1%; 表5)。GAM模型显示, 流速、底栖生物密度与长江鲟幼鱼资源密度具有显著的非线性关系($P < 0.05$)、温度与长江鲟幼鱼资源密度具有显著的线性关系。流速、底栖生物密度和水温对长江鲟幼鱼资源密度分布的影响如图5。在流速0.15—0.86 m/s, 流速较低时长江鲟幼鱼资源密度的值较高, 流速增加后资源密度迅速减小并趋于平稳, 其长江鲟幼鱼多分布在0.21 m/s的流速范围下(图5a)。底栖动物密度对长江鲟幼鱼资源密度的分布有非线性正相关影响, 意味着随着栖息地底栖动物密度的增加, 长江鲟幼鱼对该生境的偏好性也随之增强

(图5b)。温度对长江鲟幼鱼资源密度分布的影响表现为线性负相关关系, 长江鲟幼鱼资源密度在水温18.9—20.7℃随着水温的升高而减少(图2c)。

3 讨论

3.1 长江鲟幼鱼的时空分布特征

本研究结果显示, 长江上游泸州江段长江鲟幼鱼具有明显的时空分布特征。从季节来看, 夏季长江鲟幼鱼资源密度显著高于秋季, 与长江上游圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)^[27]、红尾副鳅(*Paracoptobrycon variegatus*)^[28]、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)^[29]等鱼类的季节变化趋势一致。夏季长江鲟幼鱼的资源密度高于秋季, 可能与增殖放流的时间及其放流后的行为有关。长江鲟的增殖放流主要集中在上半年, 放流地点多位于泸州上游的宜宾江段^[30]。根据Wu等^[31]的研究显示, 放流的长江鲟幼鱼主要进行降河迁移, 这可能是导致泸州江段夏季长江鲟幼鱼资源密度高于秋季的主要原因。随着季节更替, 水文节律和饵料资源等生境条件发生明显改变, 这些因素可能促使部分长江鲟幼鱼进入赤水河等饵料资源更为丰富的通江支流, 导致长江鲟幼鱼资源密度在夏秋两季发生明显改变。从空间来看, 长江鲟幼鱼主要集中在龙马潭江段, 而其他江段的资源密度相对较低。龙马潭江段位于沱江汇入长江干流下游约10 km的拐弯位置且处于市区的下游, 营养物质汇入丰富。该江段左岸沱湾数量多, 水流缓慢。此外, 沱湾适宜底栖生物的生长和繁殖^[12], 为长江鲟幼鱼提供了丰富的饵料资源。龙马潭区域特殊的水文地貌条件可能通过影响底栖动物结构及水动力适宜性, 间接影响长江鲟的栖息密度。

3.2 环境因子对长江鲟幼鱼资源密度分布的影响

河流环境是水生生物生存与繁衍的基础, 鱼类

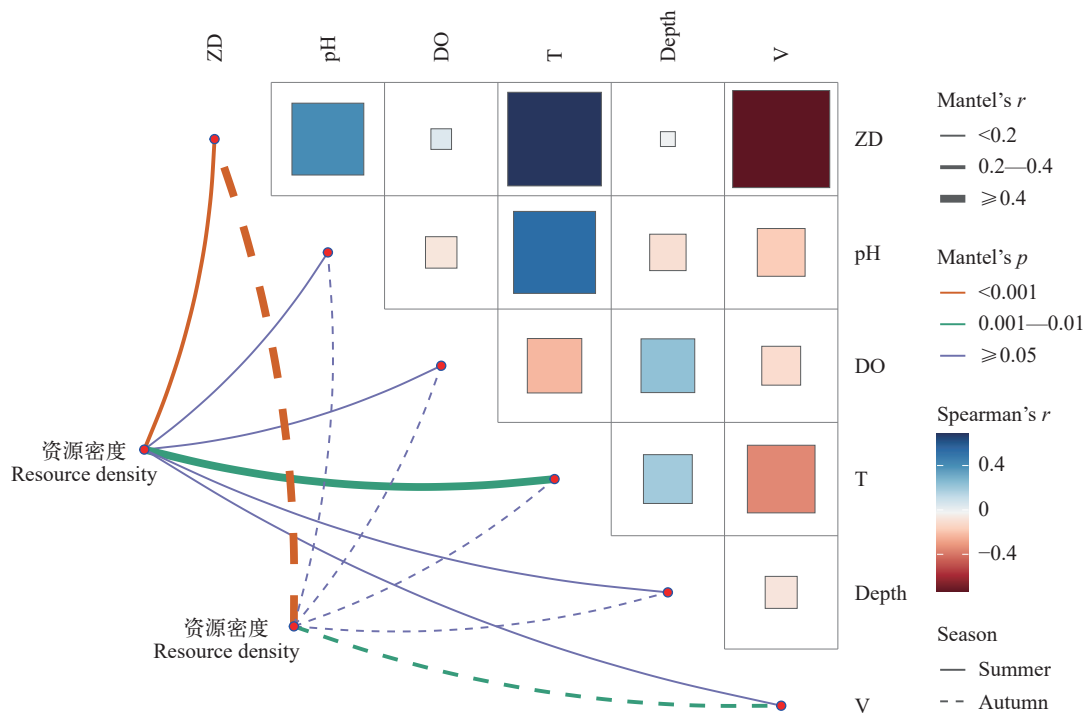


图4 长江鲟幼鱼资源密度与不同环境因子之间的相关性

Fig. 4 Correlation of relative abundance of juvenile *Acipenser dabryanus* and environmental factors

ZD. 底栖动物密度; DO. 溶解氧; T. 温度; Depth 水深; V 流速; Mantel's r 表示长江鲟幼鱼资源密度与各环境因子间的相关系数; Mantel's p 值用来衡量这种相关性在统计意义上是否显著; Spearman's r 系数展示了各环境因子之间的关联强度, 色块面积大对应相关性强, 色块颜色反映相关系数的大小

ZD. benthic density; DO. dissolved oxygen; T. temperature; Depth. water depth; V. velocity of flow; Mantel's r represents the correlation coefficient between juvenile sturgeon resource density and environmental factors. Mantel's p -value is used to measure whether this correlation is statistically significant; Spearman's r coefficient shows the strength of the correlation between environmental factors, and the correlation is strong with a large area of the color patch, and the color of the color patch reflects the size of the correlation coefficient

表3 基于方差膨胀因子的多重共线性检验

Tab. 3 Multicollinearity test of factors based on variance inflation factors

解释变量Factor	方差膨胀因子VIF
流速Velocity	3.870
底栖动物密度Zoobenthos densities	2.368
温度Temperature	2.045

表4 GAM变量筛选及参数分析

Tab. 4 Variable screening process and parameters analysis for GAM

因子Factor	偏差解释率Deviance explanation (%)	赤池信息准则AIC
T	61.6	-66.61
V	69.1	-76.93
ZD	47.9	-62.02
V+T	81.1	-94.39
V+ZD	84.7	-104.66
V+ZD+T	85.8	-106.68

的地理分布、栖息地选择及繁殖习性与均与河流环境密切相关。水流速度、底质类型、水温、溶

解氧等因素直接影响鱼类的生存条件, 进而决定了它们在不同河段的分布模式和繁殖时机^[32-35]。本研究结果显示流速、底栖动物密度和水温对长江鲟幼鱼的资源密度和分布有显著影响。GAM建模结果显示, 长江鲟幼鱼资源密度随着流速的升高而减少, 多集中在流速0.2 m/s以下, 说明长江鲟幼鱼偏好低流速环境, 这与四川水产研究调查组的调查

表5 长江鲟幼鱼GAM模型最佳拟合结果

Tab. 5 The optimal fitting result of GAM model for juvenile *Acipenser dabryanus*

因子Factor	残偏差Deviance (%)	累计残偏差解释率Deviance explained (%)	赤池信息准则AIC	P
流速Velocity	69.1	69.1	-76.93	<0.05*
+底栖动物密度Zoobenthos densities	15.27	84.37	-104.66	<0.05*
+温度Temperature	1.43	85.8	-106.68	<0.05*

注: *表示0.05水平上显著相关($P<0.05$)
Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level ($P<0.05$)

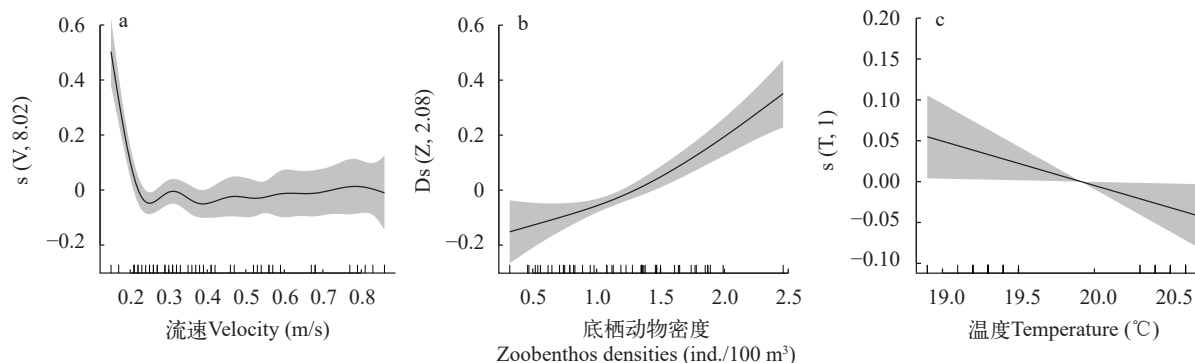


图5 不同环境因子对长江上游泸州江段长江鲟幼鱼资源密度分布的影响

Fig. 5 Effects of different environmental factors on the distribution of juvenile sturgeon resources in the upper reaches of the Yangtze River in the Luzhou River

结果相符^[12]。鱼类对流速的选择与其游泳能力有密切关联,游泳能力强的鱼类往往会选择流速较高生境^[36]。Du等^[37]对长江鲟幼鱼的游泳能力测验的结果表明,与其他鲟一样游泳能力较弱,更倾向于选择低流速生境作为栖息地。长江鲟为底栖、杂食性鱼类,幼鱼以动物性食物为主,包括虾类、瓣鳃纲类、蜉蝣目幼虫、襀翅目幼虫、蜻蜓目幼虫、摇蚊科幼虫及水生寡毛类等大型底栖动物^[8,23]。根据 GAM 模型分析结果,长江鲟幼鱼资源密度与底栖生物密度呈现正相关的非线性关系,即随着底栖生物的增加,长江鲟幼鱼资源密度也呈现增加的趋势,这与Harris等^[38]对墨西哥湾鲟鱼的研究结果一致。水温对鱼类的繁殖、摄食、生长、代谢速率、洄游行为、免疫功能和抗病能力等方面有着显著的影响^[39-41]。作为变温动物,鱼类的循环系统简单,无法保持体温,会随着外界环境的变化而变化。根据杜军等^[42]研究,长江鲟在20℃左右的水温下生长最为适宜。本研究显示,在水温18.9—20.7℃,长江鲟幼鱼资源密度随着水温的升高而减少,说明在适宜的水温范围内长江鲟幼鱼资源密度会随着水温的上升而降低。长江鲟幼鱼资源密度受水温影响的可能是在适宜的温度范围内,温度升高使鱼类的代谢速率加快,导致能量消耗增加,从而影响其生长效率。

3.3 展望

本研究利用泸州江段的监测数据,揭示了长江鲟幼鱼在该江段的分布情况,并分析了影响其栖息分布的关键因素。基于本研究结果,建议:(1)进一步优化长江鲟增殖放流工作,提高人工增殖放流长江鲟的标记比例,从更大尺度精确探明长江鲟放流后的迁移规律,系统评估其放流成效。(2)探索性开展长江鲟关键栖息地修复,在人工增殖放流补充野外种群的同时,进一步改善关键栖息地生境质量,

营造适宜生境和丰富饵料资源。

本研究仅在夏季和秋季对长江泸州江段的长江鲟进行了研究,未探讨春季和冬季的资源分布情况,这可能影响对其全年栖息动态的全面理解。后续研究应在实验条件允许的情况下,扩大监测时间范围,加强对各个季节的研究,以提高对长江鲟幼鱼分布的准确性。GAM模型分析结果显示,流速、底栖动物密度和水温是影响其分布的关键环境因子。但由于研究条件所限,尚未能纳入底质类型、人类活动干扰等其他潜在影响因素,限制了对其栖息环境需求的全面理解。未来的研究应引入更多生态变量,构建更系统和细致的分析框架,以深入揭示长江鲟幼鱼对多种环境因素的响应机制,为其野外种群恢复和栖息地保护提供科学依据。(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Hong B T, Ren P, Yuan Q Z, *et al.* Ecological function regionalization in the upper Yangtze River [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(8): 1009-1019. [洪步庭, 任平, 苑全治, 等. 长江上游生态功能区划研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(8): 1009-1019.]
- [2] Shen Y C. The landform of the Upper Reaches of the Yangtze River [M]. Beijing: Science Press, 1965: 3-7. [沈玉昌. 长江上游河谷地貌 [M]. 北京: 科学出版社, 1965: 3-7.]
- [3] Tang C, Deng H T, Tian H W, *et al.* Interannual variation of the community structure and diversity of rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze River section from Yibin to Jiangjin [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2024, **31**(11): 1273-1290. [唐成, 邓华堂, 田辉伍, 等. 长江上游宜宾至江津江段珍稀特有鱼类群落结构及多样性年际变化 [J]. *中国水产科学*, 2024, **31**(11): 1273-1290.]
- [4] Xiong F, Liu H Y, Duan X B, *et al.* Present status of fishery resources in Yinbin section of the upper Yangtze River

- [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2015, **37**(11): 43-50. [熊飞, 刘红艳, 段辛斌, 等. 长江上游宜宾江段渔业资源现状研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, **37**(11): 43-50.]
- [5] Zhou H H, Li C, Deng H T, *et al.* Research on status and dynamic varietal trends of rare and unique fish stocks in the upper reaches of Yangtze River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2020, **50**(6): 3-14. [周湖海, 李翀, 邓华堂, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类种群动态现状及变化趋势分析 [J]. *淡水渔业*, 2020, **50**(6): 3-14.]
- [6] Zou Y, Zhang J, Wen Z, *et al.* The complete mitochondrial genome of the hybrid of *Acipenser dabryanus* (♀) × *A. schrenckii* (♂) and its phylogeny [J]. *Conservation Genetics Resources*, 2018, **10**(4): 881-884.
- [7] Cao W X. China's Red List of Biodiversity: Vertebrates, Volume V, Freshwater Fishes (I) [M]. Beijing: Science Press, 2021: 50-51. [曹文轩. 中国生物多样性红色名录脊椎动物-第五卷淡水鱼类(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 50-51.]
- [8] Du H. Conservation aquaculture of dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*): fitness for survival of the fingerlings and juveniles from rearing environment [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. [杜浩. 达氏鲟的保护养殖: 丰容环境中仔幼鱼的生存适应性 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.]
- [9] Zhuang P, Ke F E, Wei Q W, *et al.* Biology and life history of Dabry's sturgeon, *Acipenser dabryanus*, in the Yangtze River [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1997, **48**(1): 257-264.
- [10] Yang J X, Pan X F, Chen X Y, *et al.* Overview of the artificial enhancement and release of endemic freshwater fish in China [J]. *Zoological Research*, 2013, **34**(4): 267-280. [杨君兴, 潘晓斌, 陈小勇, 等. 中国淡水鱼类人工增殖放流现状 [J]. *动物学研究*, 2013, **34**(4): 267-280.]
- [11] Zhang H, Wei Q W, Du H, *et al.* Present status and risk for extinction of the Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*) in the Yangtze River watershed: a concern for intensified rehabilitation needs [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, **27**(2): 181-185.
- [12] The Changjiang Aquatic Resources Survey Group S P. The Biology of the Sturgeons in Changjiang and Their Artificial Propagation [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1988. [四川省长江水产资源调查组. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1988.]
- [13] Liu J, Wang B, Hu Y, *et al.* Germplasm rescue of post-mortem critically endangered Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*) by cell preservation [J]. *Aquaculture Research*, 2023(2023): 2472375.
- [14] Liu Y, Chen Y, Gong Q, *et al.* Paternity assignment in the polyploid *Acipenser dabryanus* based on a novel microsatellite marker system [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(9): e0185280.
- [15] Zhang P M, Du H, Luo J, *et al.* Bottom substrate preference of captive Dabry's sturgeon broodstock in a simulated spawning environment [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(1): 103-109. [张平梅, 杜浩, 罗江, 等. 长江鲟亲体对人工模拟产卵底质的偏好性 [J]. *水生生态学杂志*, 2022, **43**(1): 103-109.]
- [16] Wu J P, Du H, Chu Z P, *et al.* The effects of different substrate environment on the growth of juvenile *Acipenser dabryanus* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2018, **48**(6): 23-26. [吴金平, 杜浩, 褚志鹏, 等. 不同底质环境对达氏鲟幼鱼生长效果影响的研究 [J]. *淡水渔业*, 2018, **48**(6): 23-26.]
- [17] Chatfield B S, Van Niel K P, Kendrick G A, *et al.* Combining environmental gradients to explain and predict the structure of demersal fish distributions [J]. *Journal of Biogeography*, 2010, **37**(4): 593-605.
- [18] Kindong R, Sarr O, Wang J, *et al.* Size distribution patterns of silky shark *Carcharhinus falciformis* shaped by environmental factors in the Pacific Ocean [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(850): 157927.
- [19] Rutterford L A, Simpson S D, Bogstad B, *et al.* Sea temperature is the primary driver of recent and predicted fish community structure across Northeast Atlantic shelf seas [J]. *Global Change Biology*, 2023, **29**(9): 2510-2521.
- [20] Pu Y, Yang H, Tian H W, *et al.* Spatial distribution characteristics and identification of key environmental factors for juvenile silver carp in upper reaches of Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(6): 1220-1228. [蒲艳, 杨浩, 田辉伍, 等. 长江上游鲢幼鱼空间分布特征及其关键环境因子判别 [J]. *长江流域资源与环境*, 2023, **32**(6): 1220-1228.]
- [21] Xu H, Huang L L, Wang C G, *et al.* Spatiotemporal distribution of *Lagocephalus spadiceus* and the relationship with environmental factors in the Beibu Gulf [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(3): 903-910. [徐浩, 黄亮亮, 王才广, 等. 北部湾棕斑兔头鲂时空分布及其与环境因子的关系 [J]. *应用生态学报*, 2025, **36**(3): 903-910.]
- [22] Li W, Pu Y, Tian H W, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and optimum habitat conditions of *Paracoptis variegatus* in Heishui River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, **30**(4): 515-524. [李文, 蒲艳, 田辉伍, 等. 黑水河红尾副鳅时空分布特征及其最适生境条件 [J]. *中国水产科学*, 2023, **30**(4): 515-524.]
- [23] Ye Z X. Study on the bait basis and spatial distribution and growth of *Acipenser* Changjiang after artificial release [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022. [叶志祥. 人工放流长江鲟水域的饵料基础及其放流后空间分布和生长研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2022.]
- [24] Liu X W, Du H, Zhang H, *et al.* Macroinvertebrates drift in upper reaches of the Yangtze River between Xinshi and

- Jiangjin [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, **16**(2): 266-73. [刘向伟, 杜浩, 张辉, 等. 长江上游新市至江津段大型底栖动物漂流调查, 中国水产科学 [J]. *中国水产科学*, 2009, **16**(2): 266-73.]
- [25] Britton L J, Greens P E. Methods for collection and analysis of aquatic biological and microbiological samples [J]. *Techniques of Water Resources Investigations*, 1988, **5**(A4).
- [26] Liu X Z, Ji G, Wang X L, *et al.* Biological characteristics and spatio-temporal distribution of relative biomass of *Hexagrammos otakii* and relationships with the impact factors in Liaoning offshore [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, **29**(12): 1704-1713. [刘修泽, 吉光, 王小林, 等. 辽宁海域大泷六线鱼的生物学特征、资源丰度时空分布及与环境因子的关系 [J]. *中国水产科学*, 2022, **29**(12): 1704-1713.]
- [27] Liu F, Dan S G, Wang J W, *et al.* Feeding habits of *Coreius guichenoti* (Sauvage et Dabry) in the upper Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(6): 1081-1086. [刘飞, 但胜国, 王剑伟, 等. 长江上游圆口铜鱼的食性分析 [J]. *水生生物学报*, 2012, **36**(6): 1081-1086.]
- [28] Teng H, Tian H W, Liu H W, *et al.* Fish resources status in Heishui River a tributary of the lower reaches of Jinsha River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(5): 1499-1511. [滕航, 田辉伍, 刘寒文, 等. 金沙江下游支流黑水河鱼类资源现状 [J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(5): 1499-1511.]
- [29] Luo J. Fish community structure and growth characteristics and genetic structure analysis of *Schizothorax prenanti* in middle reaches of Yalong River [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019. [罗杰. 雅砻江中游鱼类群落结构及齐口裂腹鱼生长特性和遗传结构分析 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.]
- [30] Liu W C, Li J Y, Wu J M, *et al.* Breeding and releasing of Yangtze sturgeon in the upper reaches of the Yangtze River during the early stage of fishing ban [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(2): 26-33. [刘文成, 李君轶, 吴金明, 等. 禁捕初期长江上游长江鲟增殖放流效果 [J]. *水生生物学报*, 2025, **49**(2): 26-33.]
- [31] Wu J M, Wei Q W, Du H, *et al.* Initial evaluation of the release programme for Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus* Duméril, 1868) in the upper Yangtze River [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1423-1427.
- [32] 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.]
- [33] Li X L, Ni Z H, Peng L, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Yili River of Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(6): 59-68. [李晓莉, 倪朝辉, 彭亮, 等. 新疆伊犁河浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *水生态学杂志*, 2022, **43**(6): 59-68.]
- [34] Liu M, Yuan J L, Lian Q P, *et al.* Different water flow rates on the growth performance, antioxidant capacity, energy metabolism and tissue structure of *Micropterus salmoides* under an in-pond recirculating aquaculture system [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(1): 25-36. [刘梅, 原居林, 练青平, 等. 不同流速对流水槽大口黑鲈生长性能、抗氧化能力、能量代谢及组织结构的影响 [J]. *水生生物学报*, 2023, **47**(1): 25-36.]
- [35] Yang Y. Study on hydraulic characteristics of Chinese sturgeon habitat in Yangtze river [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. [杨宇. 中华鲟葛洲坝栖息地水力特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [36] Fulton C, Bellwood D, Wainwright P J M B. The relationship between swimming ability and habitat use in wrasses (Labridae) [J]. *Marine Biology*, 2001, **139**(1): 25-33.
- [37] Du H, Wei Q W, Xie X, *et al.* Improving swimming capacity of juvenile Dabry's sturgeon, (*Acipenser dabryanus* Duméril, 1869) in current-enriched culture tanks [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2014, **30**(6): 1445-1450.
- [38] Harris J E, Parkyn D C, Murie D J. Distribution of gulf of mexico sturgeon in relation to benthic invertebrate prey resources and environmental parameters in the suwannee river estuary, Florida [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, **134**(4): 975-990.
- [39] García-Gómez G, Hirst A G, Spencer M, *et al.* Responses of intraspecific metabolic scaling to temperature and activity differ between water-and air-breathing ectothermic vertebrates [J]. *Ecology Letters*, 2024, **27**(2): e14389.
- [40] Yang X, Weng Q, Li X, *et al.* High water temperature raised the requirements of methionine for spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2024, **50**(1): 23-40.
- [41] Zhang X B, Hu Y P, Yang W, *et al.* Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(4): 117-122. [张先炳, 胡亚萍, 杨威, 等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2021, **42**(4): 117-122.]
- [42] Du J, Zhao G, Gong Q, *et al.* Study on *Acipenser dabryanus* Dumeril farmed in pool [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, **22**(3): 824-827. [杜军, 赵刚, 龚全, 等. 达氏鲟亲鱼池塘人工培育试验 [J]. *西南农业学报*, 2009, **22**(3): 824-827.]

HABITAT DISTRIBUTION CHARACTERISTICS AND KEY INFLUENCING FACTORS OF *ACIPENSER DABRYANUS* JUVENILES IN LUZHOU RIVER SECTION OF THE YANGTZE RIVER

YE Hai-Ming¹, LI Peng-Cheng², WU Jin-Ming², SHEN Li², LI Jun-Yi² and DU Hao²

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

Abstract: The Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*), an endemic rare fish of the Yangtze River Basin, relies on specific juvenile habitat distributions and key environmental factors for population restoration. Using 2023 monitoring data from the Luzhou section of the upper Yangtze River, we analyzed the spatial and temporal patterns in *A. dabryanus* juvenile resource density and employed a generalized additivity model (GAM) to identify critical environmental factors influencing their habitat distribution, focusing on areas with artificially stocked juveniles. The results showed that there were significant temporal and spatial variations in *A. dabryanus* juvenile density within the Luzhou section. Temporally, summer densities were significantly higher than autumn values ($P < 0.05$). Spatially, among the eight investigated river sections, Longmatan recorded the highest density at 0.43 kg/(h-times), while Jiujiacun had the lowest CPUE at 0.011 kg/(h-times), and the *A. dabryanus* juvenile resource density in the Longmatan section was significantly higher than that of the other sites ($P < 0.05$), with no differences among the other seven sites ($P > 0.05$). Flow velocity, benthic fauna density, and water temperature emerged as primary drivers, with flow velocity bias explaining the highest rate of 69.1%. Juvenile density declined sharply as flow velocity increased from 0.15 to 0.86 m/s before stabilizing; benthic fauna density correlated positively with juvenile density, meaning higher benthic biomass was associated with greater juvenile abundance. Within the 18.9 to 20.7°C temperature range, juvenile density decreased with the increase of water temperature. This study reveals the habitat distribution characteristics of *A. dabryanus* juvenile in the Luzhou section and the effects of flow velocity, benthic animal density, and water temperature, providing a scientific basis for the habitat protection and population recovery initiatives.

Key words: Luzhou River section of the Yangtze River; Juvenile *Acipenser dabryanus*; Stock enhancement; Distribution characteristics; Environmental factors