

Hu F X, Li B, Jiang W, *et al.* Movement patterns of *Schizothorax wangchiachi* in the lower reaches of the Heishui River based on acoustic telemetry [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(1): 012610. [胡凡旭, 李博, 姜伟, 等. 基于声学标记追踪的黑水河下游短须裂腹鱼活动规律研究 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(1): 012610.]

基于声学标记追踪的黑水河下游短须裂腹鱼活动规律研究

胡凡旭^{1,2} 李博^{1,2} 姜伟^{1,2} 苏巍^{1,2} 郭文韬^{1,2} 朱佳志^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 宜昌 443100)

摘要: 以黑水河短须裂腹鱼为研究对象, 于2024年11月26日至2025年4月1日在白鹤滩库区葫芦口及黑水河回水区开展声学标记追踪实验。共设大同(DT)、汤家坪(TJP)、转堡(ZB)三个放流点, 标记放流短须裂腹鱼28尾, 布设声学接收器18台, 实验期间共接收到有效位置信号321397个, 每尾个体平均被4.8台接收器捕获, 信号接收时长为1—126d。不同放流点短须裂腹鱼的空间利用存在差异。ZB组活动范围最大, 50%KUD、95%KUD和MCP面积分别为4.37、26.96和14.62 km², 明显大于TJP和DT组; TJP组活动范围次之, 沿河道带状分布; DT组活动范围最小, 局限于黑水河河口附近。位移率比较结果表明, 不同放流点间存在显著差异(Kruskal-Wallis, $P < 0.05$), 其中DT组显著低于TJP和ZB组, TJP组显著高于ZB组。RI分析显示, DT和ZB组在放流初期RI较高并逐渐下降, TJP组则在2025年1月后逐渐升高并在3月达到0.95至1.0。总体上, 短须裂腹鱼在放流后主要在放流点上下游短期活动, 随后逐步迁移出接收器监测范围, 部分个体进入黑水河主河段或金沙江干流。本研究揭示了黑水河下游短须裂腹鱼的短期活动范围与运动规律, 为裂腹鱼类生活史研究及增殖放流策略优化提供参考。

关键词: 黑水河; 短须裂腹鱼; 声学标记追踪; 活动中心

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)01-012610-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0207 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0207



短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachi*)俗称细鳞鱼、鲃鱼、沙肚, 是长江上游特有的一种鲤科鱼类, 其主要分布于金沙江、乌江和雅砻江等干支流^[1,2], 长期以来因其独特的生态适应性和重要的生态价值而备受关注。受金沙江下游梯级电站开发及过度捕捞等因素的影响, 短须裂腹鱼的栖息地受到严重威胁, 种群数量呈现下降趋势^[3]。近年来, 为促进裂腹鱼等鱼类资源的恢复, 中国长江三峡集团有限公司在金沙江下游组织开展了增殖放流、栖息地修复、生态调度等一系列保护措施。然而, 当前针对短须裂腹鱼的研究多集中于其繁殖生物学及生长发育等方面的研究^[4-9], 虽有部分学者对其

行为生态开展了研究^[10,11], 然而针对其在自然水体中行为模式及生态需求方面仍尚不够深入。一些研究者指出, 裂腹鱼在进行繁殖或觅食活动时具有短距离洄游的特性^[7,12], 然而尚缺乏实质性的直接观测调查资料。在自然生境下短须裂腹鱼生态习性与行为模式相关资料的缺乏, 影响了金沙江下游栖息地保护、增殖放流等系列保护措施的实施。

近年来, 鱼类声学遥测(Acoustic telemetry)技术开始广泛应用于河流、湖泊鱼类行为追踪研究^[13-17]。鱼类声学遥测源于20世纪50年代, 其主要通过在水生动物体表或体内植入超声波标记, 再通过声学接收器接收标记发出的信号来获取标记的

收稿日期: 2025-06-17; **修订日期:** 2025-09-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3204200); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBZZ20220230和NBWL202200489-07); 中国三峡建工集团有限公司项目(JGEP0421005和JGEP0421006)资助 [Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFC3204200); China Three Gorges Corporation Research Projects (NBZZ20220230 and NBWL202200489-07); Three Gorges Construction Engineering Corporation Research Projects (JGEP0421005 and JGEP0421006)]

作者简介: 胡凡旭(1994—), 男, 工程师; 主要从事长江流域水生生物资源的保护研究。E-mail: hu_fanxu@ctg.com.cn

通信作者: 姜伟(1982—), 男, 正高级工程师; 主要从事水生生态修复及保护工作。E-mail: jiang_wei16@ctg.com.cn

水生动物个体信息^[18]。声学遥测是研究自然环境中鱼类等水生动物个体行为的有效手段,应用声学遥测技术可用于量化水生动物在湖泊或河流内的活动区域和活动模式,对于解析一些受环境条件变化影响(如建坝、航运等)的水生动物的生态需求具有重要意义,有助于指导管理者制定合理的保护策略^[19]。

黑水河作为金沙江下游白鹤滩水电站库区左岸一级支流,其距金沙江下游白鹤滩水电站约30 km^[20]。相关资料表明,黑水河是短须裂腹鱼等鱼类的重要栖息地,短须裂腹鱼在黑水河渔获物中占有较高的比重^[21]。随着金沙江下游白鹤滩水电站的蓄水,黑水河下游约20—30 km的河段已成为白鹤滩回水区域,原山区急流生境转变为急流-缓流交替生境。水电站修建导致的河流不连续性影响了鱼类的上下游的洄游活动,梯级电站导致的河流不连续性背景下,原适应流水生境的鱼类可能会向支流洄游。此外,有研究表明,水电站阻隔效应下部分鱼类种群可能会调整其生活史策略以增强定居性^[22]。对于短须裂腹鱼而言,其在白鹤滩库区形成后的行为模式和分布范围是否会发生改变直接影响后续保护策略的制定和实施。

基于上述背景,在目前短须裂腹鱼行为模式和分布范围不明的背景下,本研究以黑水河短须裂腹

鱼为研究对象,基于声学标记追踪技术,开展放流短须裂腹鱼活动规律研究,旨在解析黑水河短须裂腹鱼在库区回水江段的行为模式和分布范围,为后续增殖放流、裂腹鱼栖息地修复措施的制定与实施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究地点在白鹤滩库区黑水河回水段至库区金沙江干流葫芦口段之间,研究区域上接黑水河干流流水江段,下连白鹤滩库区金沙江干流,全长约35 km,河道中间无物理阻隔,研究区域涵盖了白鹤滩库区金沙江干流、黑水河回水区、黑水河流流水江段等不同水域类型。实验区域河段共设置18个监测站点(图1),每个监测站点布设全向超声波接收器一台。

1.2 短须裂腹鱼超声波追踪系统构建

声学接收机型号为加拿大VEMCO公司生产的69 kHz的VR2W和NextrackR1,在实验河段的实际测试结果显示两种型号的接收机的声信号有效接收距离600—800 m,声学接收机电池寿命大于6个月,实验开始时所有接收机均更换电池,确保所有接收机在实验期间均正常工作。通过在固定点位布置声学接收机形成接收机阵列,具体布设方式:

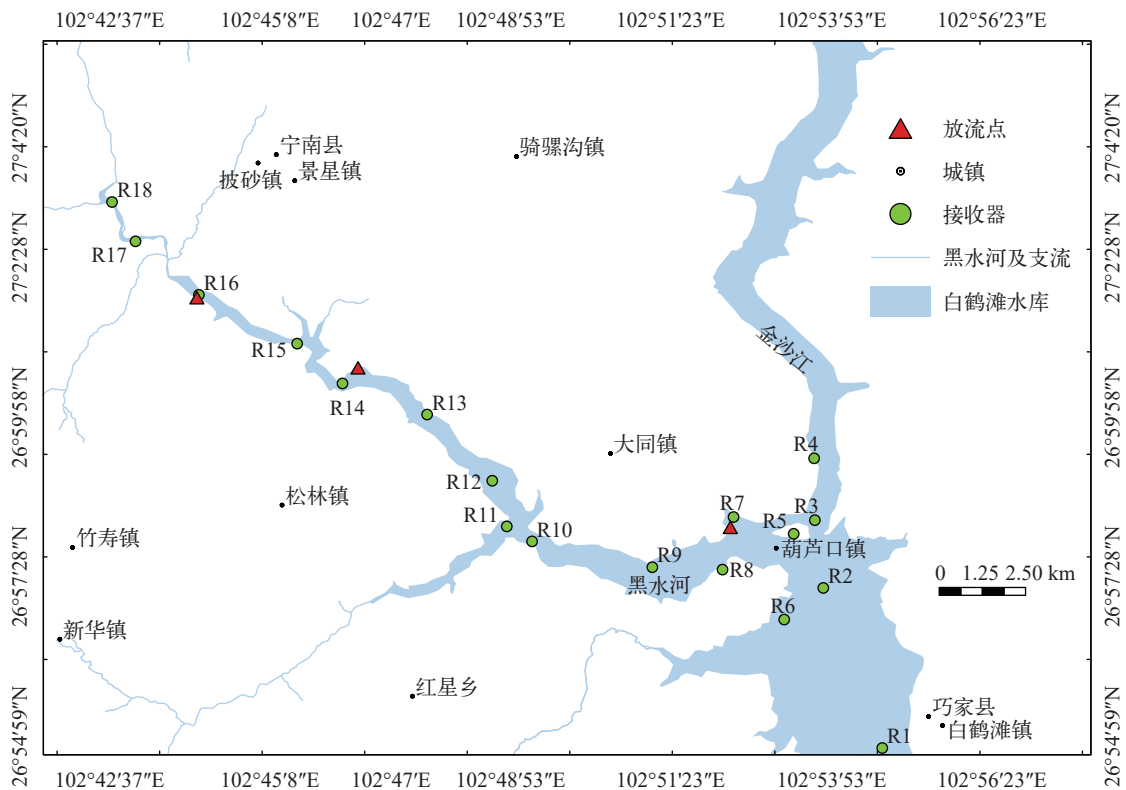


图1 研究区域及声学接收器布设点位

Fig. 1 Study area and acoustic receiver deployment locations

首先将带有锚石的浮球在固定点位抛入水中, 锚石沉降后, 浮球漂浮于水面, 浮球用绳索系在岸边以避免位置移动。之后使用绳索将声学接收机一端系在浮球之上, 声学接收机的另一端和浮球下的绳索之间用可上下移动的卡扣连接, 使声学听筒沉于水面以下4—5 m。声学听筒布设位置平均距离岸边35 m, 布设点位河道宽度278—1336 m。

1.3 实验鱼标记及放流

实验所用短须裂腹鱼均为来自黑水河干流流水河段的野生个体, 来源于非禁钓期合法垂钓。试验鱼钓获后暂养在黑水河适宜河段中, 挑选体表无明显损伤、个体活力较好的裂腹鱼个体作为实验用鱼, 实验所用短须裂腹鱼雄鱼均第二性征明显, 吻部均具珠星, 雌鱼腹部膨大, 故判定实验期间短须裂腹鱼应当处于繁殖期。使用加拿大VEMCO公司生产的V7型超声波标记(长20 mm, 直径7 mm, 空气中重1.5 g, 水中重0.7 g, 输出功率136 dB)对实验用鱼进行标记, 每个超声波标记均被设置为60s发射一次信号(该发射频率下标记寿命约120d), 共标记短须裂腹鱼28尾(雌性19尾, 雄性9尾)。实验鱼平均体长为23.7 cm, 平均体重为220.7 g。具体标记方法: 标记前将声呐标记通过尼龙线绑定, 标记过程中将裂腹鱼浸泡在MS222水溶液中, 直至其失去平衡, 然后通过背部手术方式将带有声学标记的尼龙线缝合在裂腹鱼的背鳍前方, 缝合后使用碘伏消毒处理, 并涂抹红霉素软膏, 标记完成后将鱼暂养在水池中观察其状态, 暂养7d无异常后, 于2024年11月26日在黑水河回水区35 km河段范围内的上游转堡(ZB)、中游汤家坪(TJP)、下游大同(DT)选择3个放流点投放实验鱼。

1.4 数据处理与分析

实验期间, 监测数据由布设于河道中的声学接收器自动记录, 每条标记鱼携带唯一的声学发射器, 通过接收器记录其不同时间和空间的监测信息。数据收集时间为2024年11月26日至2025年4月1日, 共计126d。将从各声学接收器读取的数据文件导入Fathom Central (<https://fathomcentral.com/>)平台进行初步整理和汇总, 获取包含鱼类个体编号、时间、接收机信息等字段关键信息, 剔除非本次标记个体的信号, 统计标记个体在各个监测点位的信号接收量, 按照放流地点的不同, 将所有标记放流个体划分为3组, 分别为大同(DT)、汤家坪(TJP)、转堡(ZB)。

为提高分析的准确性, 首先对原始检测数据进行标准化处理。去除经纬度缺失的数据, 并将原始UTC时间转换为北京时间(东八区时区), 以便更准

确地反映鱼类的活动规律。

短期活动中心计算 由于被动声学遥测技术的空间检测依赖于接收器阵列的布设, 其在空间分布上的不均匀性与检测概率的随机性可能导致原始检测数据在估算鱼类活动分布时产生偏差。为减少时空误差的影响, 本研究采用“活动中心”(Center of Activity, COA)方法对鱼类的位置数据进行平滑处理。活动中心(COA)是一种用来估计动物在短时间内活动位置的方法, 该方法通过在设定的时间间隔内, 计算每个个体被检测点的平均经纬度位置, 反映其在该时段内的核心活动区域, COA方法已广泛应用于鱼类声学标记追踪研究中, 已被证明在减少空间偏误、提升空间位置估计准确性方面具有良好表现^[23, 24]。在本研究中, 选取60min为时间分辨率(时间步长), 将数据按小时划分时间段, 每一时间段内, 分别对不同放流点的个体计算其COA, 从而生成小时尺度的活动轨迹。此方法在剔除检测噪声及减弱由接收器空间布局带来的偏差方面具有优势, 也便于后续开展个体间活动模式的比较分析^[25]。

栖息地范围估算 最小凸多边形(Minimum convex polygons, MCP)是动物空间生态研究中常用的估算动物活动范围的方法, 该方法通过获取的放流鱼类的位置信息数据计算鱼类活动边界范围^[26]。本研究中以计算的COA点为计算基准, 参照Udyawer等^[27]方法, 采用R语言中的sf包构建COA点的空间矢量对象, 筛选出位于研究区域河流范围内的COA点, 采用adehabitatHR包中的mcp函数计算各放流点的放流个体的最小凸多边形, 进而估算短须裂腹鱼的空间利用范围。基于获取的标记放流鱼类的位置信息, 在相同空间数据上进一步计算核密度利用分布(Kernel Utilization Distribution, KUD), KUD是基于标记放流鱼类位置信息拟合的二元概率密度函数, 其是反映鱼类关键空间活动范围的核心指标^[28]。KUD的计算主要需选择合适的平滑参数, 本研究中参考Kie^[29]的方法, 本文使用“参考带宽”作为平滑参数计算KUD, 提取50%与95%的等利用度边界线作为核心活动区与扩展活动区。

所有计算过程均基于R4.4版本完成, 并使用ggmap和ggplot2包进行数据可视化。

短须裂腹鱼的位移率及滞留指数 为定量评估不同放流点短须裂腹鱼的活动状况, 本研究参照Barry等^[19]提出的方法计算不同放流点标记放流的短须裂腹鱼的位移率(Displacement rates)。位移率由连续活动中心(COA)位置之间的直线距离除以观测间隔时间(以小时为单位)计算, 反映个体在

给定时间尺度上的空间移动强度。使用Kruskal-Wallis秩和检验来比较3个放流点中鱼类的每日平均位移率是否存在显著差异。为进一步评价鱼类在声学阵列区域内的停留状况, 计算了短须裂腹鱼在黑水河的滞留指数(Residency Index, RI), 滞留指数定义为在阵列内(18个接收器中的任何一个)探测到短须裂腹鱼的天数除以整个阵列部署的总天数(即截至2025年3月底), 为分析时间序列上的变化趋势, 本文还按月(2024年11月至2025年3月)统计了个体的月度滞留指数, 作为衡量其在阵列区域内空间稳定性的指标^[30]。

所有数据分析与图形绘制工作通过R4.4环境与Microsoft Excel 2010完成, 并借助ggplot2和ggpubr等可视化工具展示位移与滞留行为在空间与时间维度上的变化。

2 结果

2.1 标记放流鱼信号接收总体情况

2024年11月26日至2025年4月1日, 共放流短须裂腹鱼28尾, 布设18个固定声学接收机, 累计接收到有效信号321397个(表1)。在3处放流点中, DT组(9尾)接收48463次, TJP组(10尾)接收83368次, ZB组(9尾)接收189566次。单尾鱼平均被4.8台接收机捕获, 信号接收周期为1—126d。大部分个体在实验期内持续被监测, 仅个别个体游出监测范围, 其中编号A69-1604-37852个体放流后迅速进入金沙江干流, 在研究期间未再返回接收阵列。

2.2 短须裂腹鱼的空间分布及栖息地范围

根据声学遥测数据, 采用KUD和MCP方法估算了不同放流点短须裂腹鱼的活动范围(表2和图2)。结果显示, ZB组鱼体的活动范围最大, 其50%KUD、95%KUD及MCP面积分别为4.37、26.96和14.62 km², 均明显大于TJP组和DT组。ZB组个体的活动点分布最为广泛, 部分进入金沙江干流或在河口折返, 体现出明显的迁移行为。TJP组的50%KUD核心区呈椭圆形并沿河道延伸, 95%KUD范围明显大于DT组, 表现出一定的空间扩展性。相比之下, DT组的活动范围有限, 其50%和95%KUD范围最小, 仅集中于黑水河河口葫芦口附近, MCP与95%KUD边界接近, 未表现出明显的上下游迁移。

2.3 放流鱼位移率及滞留指数

为探究不同放流点对裂腹鱼迁移行为的影响, 本研究对3个放流点(ZB、TJP、DT)放流的携带声学标记的个体的移动情况进行了研究, 并基于短期活动中心(COA)计算平均位移率, 统计了平均位移率及其标准差、最大值与最小值。图3展示了3组

鱼在整个追踪期间的位移率随时间变化情况。

3个放流点的短须裂腹鱼位移率表现出显著差异(Kruskal-Wallis, $P < 0.05$)。两两比较结果(Dunn's test)表明: DT组的平均位移率显著低于TJP组和ZB组, 而TJP组显著高于ZB组(图4)。具体来看, DT组鱼体在2024年12月至2025年1月中旬平均位移率为300—1500 m/h, 个体差异较大, 表现为频繁的短程迁移; 但自1月中旬至3月中旬位移率降至接近零, 仅在3月末出现约500 m/h的短暂高峰。TJP组监测初期无数据, 1月初出现约1000 m/h的短暂高位移率后下降, 2—3月维持在500—1500 m/h, 表现为稳定活动。ZB组则呈“高—低”递减模式: 12月至1月初位移率为600—1200 m/h, 随后显著下降并趋于稳定, 至2月底后无数据记录, 可能因游出接收范围或标记失效。

2024年11月至2025年4月, 声学接收器监测结果显示: DT和ZB组标记鱼数量逐月下降; TJP组则自2025年1月起先增加后减少。相应的滞留指数(RI)结果表明, DT和ZB组在放流初期(2024年11月)普遍具有较高RI, 但随时间推移逐渐下降, 表明个体逐步游出接收范围。相比之下, TJP组初始RI较低, 但自2025年1月起显著上升, 并在2025年3月达到0.95—1.0 (如发射器 A69-1604-37827、A69-1604-37840、A69-1604-37853), 显示出明显的滞留增强(图5)。总体上, 同一放流点的个体表现出较高一致性, 提示存在集群游动特征。

3 讨论

3.1 声学标记追踪技术的应用前景

传统鱼类行为生态学研究在自然水域中长期面临挑战, 因鱼类活动范围广、行为多样且隐蔽, 传统方法(如直接观察或渔获物调查)难以系统获取真实数据。随着声学标记追踪技术的发展, 研究者能够在自然环境中实现高精度、长时间的监测, 重建个体的移动路径、栖息偏好、迁徙路线及行为节律^[31], 对解析鱼类种群动态、繁殖及生态适应性具有重要意义^[32—34]。近年来, 该技术应用数量呈指数级增长^[15]。部分研究指出手术可能对鱼类产生短期影响, 但通常在数天内消失。例如, Jepsen等^[35]发现多数鱼体术后能迅速恢复, 生理应激轻微, 未显著影响长期存活率和行为。本研究采用背部手术方式将声学标记缝合于短须裂腹鱼背鳍前方, 暂养7d后放流。暂养期间未观察到死亡, 标记重量小于体重1%, 且无脱落, 显示出良好的稳定性和可行性。这一方法在类似研究中也已被证实具有较高的保留率和较低的行为干扰^[36]。尽管如此, 声学标记

表 1 实验鱼信息及声学信号追踪情况

Tab. 1 Summary of experimental fish and acoustic telemetry detections

序号 No.	声学标记编号 Tag ID	体长 Total length (cm)	体重 Body weight (g)	性别 Sex	放流地点 Release site	信号个数 Number of detections	追踪时长 Tracking duration (d)	接收到信号的 接收器数量 Number of receivers detected	标记鱼消失位置 Last detected location of the tagged fish
1	A69-1604-37855	22.0	160.0	雄	转堡	110409	78	4	R13
2	A69-1604-37850	22.5	172.0	雌	转堡	66395	79	8	R11
3	A69-1604-37840	20.0	153.0	雄	汤家坪	21886	82	2	R14
4	A69-1604-37853	23.0	206.3	雌	汤家坪	19446	83	4	R12
5	A69-1604-37831	22.0	216.0	雄	大同	19132	51	3	R17
6	A69-1604-37827	29.0	374.5	雌	汤家坪	18814	84	2	R14
7	A69-1604-37829	21.0	192.0	雄	汤家坪	14553	76	6	R1 5
8	A69-1604-37834	31.8	520.0	雌	大同	13787	126	3	R5
9	A69-1604-37844	23.0	246.0	雌	转堡	4612	15	15	R4
10	A69-1604-37832	23.5	206.0	雌	大同	4472	39	6	R1
11	A69-1604-37837	28.0	325.0	雄	大同	3853	118	5	R9
12	A69-1604-37846	27.5	287.0	雌	转堡	3121	6	4	R14
13	A69-1604-37845	16.0	100.0	雌	汤家坪	2899	61	4	R16
14	A69-1604-37851	25.0	204.9	雌	大同	2502	17	6	R5
15	A69-1604-37848	23.0	193.0	雌	汤家坪	2347	60	12	R6
16	A69-1604-37836	25.5	209.7	雄	转堡	2336	24	4	R18
17	A69-1604-37849	24.5	160.0	雌	汤家坪	2213	84	2	R14
18	A69-1604-37839	23.0	185.0	雌	大同	1927	33	4	R4
19	A69-1604-37841	21.0	162.0	雌	转堡	1663	19	8	R10
20	A69-1604-37835	26.0	228.9	雄	大同	1407	9	3	R4
21	A69-1604-37833	25.0	377.0	雄	大同	1370	31	4	R8
22	A69-1604-37854	21.5	163.0	雌	转堡	555	22	7	R10
23	A69-1604-37842	23.0	184.0	雌	汤家坪	554	4	3	R12
24	A69-1604-37843	21.0	146.8	雄	汤家坪	500	17	6	R15
25	A69-1604-37830	29.0	300.6	雌	转堡	433	5	2	R8
26	A69-1604-37828	22.5	181.0	雌	汤家坪	157	3	3	R16
27	A69-1604-37838	21.0	164.0	雌	转堡	42	4	2	R16
28	A69-1604-37852	22.5	162.5	雌	大同	12	1	3	R5

表 2 不同放流点间短须裂腹鱼的活动范围估算 (km²)

Tab. 2 Estimated activity ranges of *Schizothorax wangchiachii* among different release sites (km²)

活动范围Home range	ZB	TJP	DT
50%KUD	4.37	2.93	2.84
95%KUD	26.96	15.69	11.34
MCP	14.62	6.26	5.68

追踪技术仍存在局限: 一是成本较高, 国内缺乏成熟产品, 设备主要依赖进口^[13, 37–39]; 二是接收器阵列覆盖有限, 个体游出覆盖区或因电池寿命限制可能导致数据缺失, 本研究亦未能获得长周期数据; 三是发射间隔可能造成信号漏测, 当鱼体快速通过接收区时尤为明显。在本研究中, TJP放流个体初期未被接收器捕获, 可能因未进入覆盖范围或存在漏测。

尽管受到电池寿命和地理条件限制, 本研究仍实现了数月的连续监测, 获取了高时空分辨率的位置信息, 成功解析出短须裂腹鱼的短期活动范围和运动规律。通过增加标记个体数量, 最大程度降低了漏测带来的偏差, 保证了结果的可靠性。总体而言, 声学标记追踪技术在鱼类行为学研究中相较传统方法具有显著优势, 但其应用需结合研究对象、目的、预算和水域环境等因素综合设计, 合理设定发射间隔和接收器阵列, 并尽可能开展长期监测, 以获取完整的生活史信息。

3.2 黑水河下游放流短须裂腹鱼的活动规律特征

近年来, 已有诸多研究系统地揭示了裂腹鱼类亚科(Schizothoracinae)鱼种的繁殖生物学特征, 包括性成熟年龄、性腺发育、性比、卵径分布、繁殖力及胚胎和仔鱼的发育过程等方面^[5, 6, 8, 40]。例

如, 刘阳等^[4]对短须裂腹鱼的胚胎发育及早期仔鱼特征进行了研究; 颜文斌等^[41]通过定点原位水下视频观察, 明确了短须裂腹鱼繁殖期主要的产卵行为。尽管如此, 目前对于裂腹鱼类产卵洄游行为的研究仍主要集中于如青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)等国家重点保护鱼种^[42], 而对多数裂腹鱼类种群的洄游模式及活动规律调查则较为缺乏, 文献记录多为定性描述。这在很大程度上源于野外鱼类行为监测技术手段的限制, 缺乏直接观测证据支持该类鱼为短程洄游种类的判断^[43]。

为填补这一研究空白, 本研究基于声学标记追踪技术, 首次对黑水河下游放流短须裂腹鱼的短期活动规律进行了定量监测调查。实验结果显示, 黑水河短须裂腹鱼在进入回水区后短期内围绕放流位置上下游活动, 呈现出探索行为, 大多数个体其核心分布区域主要位于放流位置附近, 随着时间的推移其主要迁移趋势呈现出向接收器阵列范围外迁移的态势(前期大多数标记放流个体均先在放流

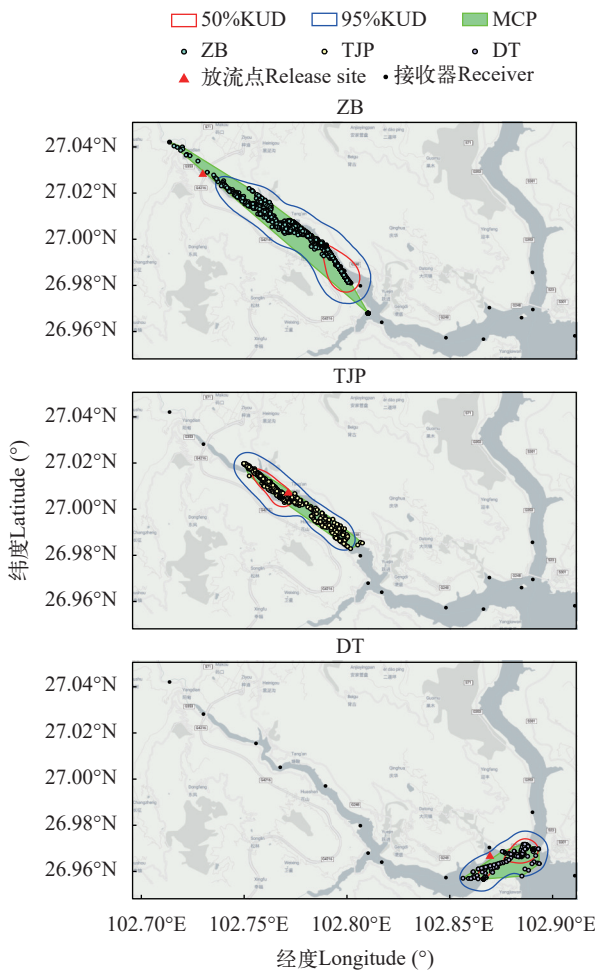


图2 标记放流短须裂腹鱼的活动范围及活动中心

Fig. 2 Activity range and center of tagged and released *Schizothorax wangchiachii*

点附近徘徊, 后向上下游大范围迁移), 最后大多数放流个体迁移出接收器阵列范围, 可能进入黑水河流水江段或金沙江干流。这可能与短须裂腹鱼的繁殖习性有关, 相关资料记载, 金沙江下游短须裂腹鱼的繁殖期在12月至次年3月^[41], 而本研究团队基于现场鱼类早期资源调查结果显示, 黑水河短须裂腹鱼的主要繁殖期处于1—2月(内部资料, 未发

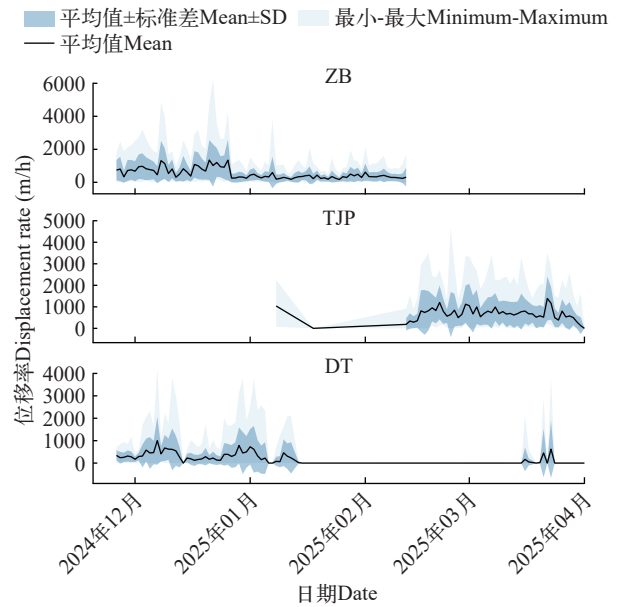


图3 不同放流点标记放流的短须裂腹鱼的位移率随时间变化

Fig. 3 Temporal variation in displacement rates of tagged and released *Schizothorax wangchiachii* among different locations

黑色实线代表平均位移率, 深色阴影代表平均值±标准差, 浅色阴影代表每日最小与最大位移范围

The solid black line represents the mean displacement rate, the dark shading indicates the mean±standard deviation, and the light shading shows the daily range between the minimum and maximum displacement

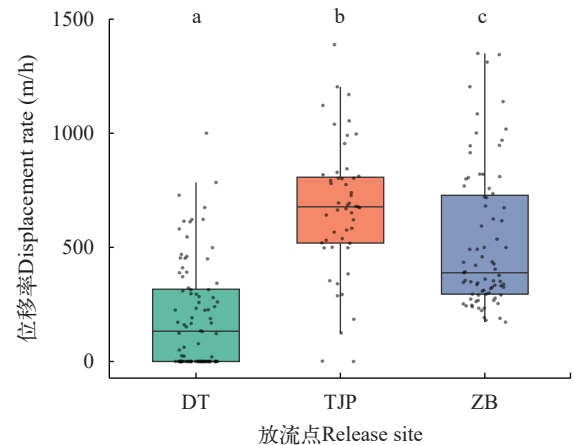


图4 不同放流组别短须裂腹鱼的平均位移率比较

Fig. 4 Comparison of the mean displacement rate of *Schizothorax wangchiachii* among different release groups

表), 因此实验期间正处于短须裂腹鱼的繁殖时间, 在回水区放流的短须裂腹鱼可能会向黑水河上游或金沙江干流洄游进行繁殖活动。从本研究中短须裂腹鱼的位移率和滞留指数结果来看, 本次各放流位置的裂腹鱼进入水体后, 同位置放流的个体总体活动趋势一致, 说明不同个体间可能会出现集群活动行为。

3.3 放流位置及时间变化对黑水河短须裂腹鱼的活动规律的影响

不同地理位置或生活史状况的鱼类, 在进入自然水体后可能会表现出差异化的行为模式, 本研究

以生活在黑水河自然水体的短须裂腹鱼为研究对象, 以排除生活史背景差异对行为数据分析的干扰, 通过在转堡(ZB)、汤家坪(TJP)、大同(DT)三个放流点布设声学接收阵列进行跟踪。结果表明, 短须裂腹鱼的活动范围与放流位置密切相关, 且活动性存在显著差异。这可能与短须裂腹鱼自身的生态习性(短距离洄游)以及不同放流点所处水文环境(如流速、水质、透明度等)差异密切相关^[44]。

3个放流点位置转堡(ZB)位于黑水河干流流水河段与库区回水区交汇处, 具有较大的水动力与环境异质性, 该区域放流的短须裂腹鱼表现出最大的活动范围, 而随着回水区中、下游水生环境的稳定, TJP及DT位置放流的裂腹鱼的活动范围相继减小。进一步分析表明, 三个放流点的短须裂腹鱼在放流后均表现出不同程度的位移模式变化, TJP放流组的鱼类在放流初期没有位移率数据, 接收器阵列未接收到该位点放流鱼的信号, 由于该放流点放流标记鱼的数量较多, 且在后期均被监测到, 故可以排除设备故障或初期信号漏测的可能, TJP放流的短须裂腹鱼在放流初期可能表现出一定的水域环境适应过程, 栖息在放流点附近的回水湾内影响了接收器对信号的接收; 而后在2—3月份呈现出相对稳定的位移率水平, 表明该区域可能存在相对适宜的栖息环境, 标记放流个体在一定范围内频繁活动。反之, ZB与DT组个体在放流初期表现出较高的位移率, 随后位移率趋于较低水平甚至游离监测范围, 这可能反映了短须裂腹鱼可能存在放流点依赖的行为分化: DT与ZB组呈现高初始位移率, 随后趋于平稳或消失, 可能表明存在逃逸型或快速扩散型迁移策略^[45]。结合放流位置及标记短须裂腹鱼声学信号消失的位置推断各放流点放流的短须裂腹鱼的最终去向, 发现放流的28尾短须裂腹鱼中共有8尾可能进入金沙江干流(DT放流的短须裂腹鱼6尾, TJP、ZB各1尾), 共有6尾可能进入黑水河流水河段(TJP4尾, ZB2尾), 其中DT放流的短须裂腹鱼更多地游向金沙江干流, 而TJP和ZB放流的短须裂腹鱼更多地游向黑水河流水江段, 该监测结果对于后续短须裂腹鱼增殖放流策略制定和白鹤滩水库过鱼设施优化运行具有重要参考价值。

在本研究中, 声学接收器阵列自2024年11月下旬开始布设, 并持续运行至2025年4月初, 总追踪周期达到126d。追踪数据显示, 汤家坪(TJP)放流点的短须裂腹鱼在2—4月期间维持高水平的活动性, 与其已知的繁殖季节高度吻合^[7, 41], 这表明TJP放流点可能是连接栖息场所和繁殖场所的重要通道, 其在放流初期可作为裂腹鱼主要栖息场所, 裂腹鱼进入

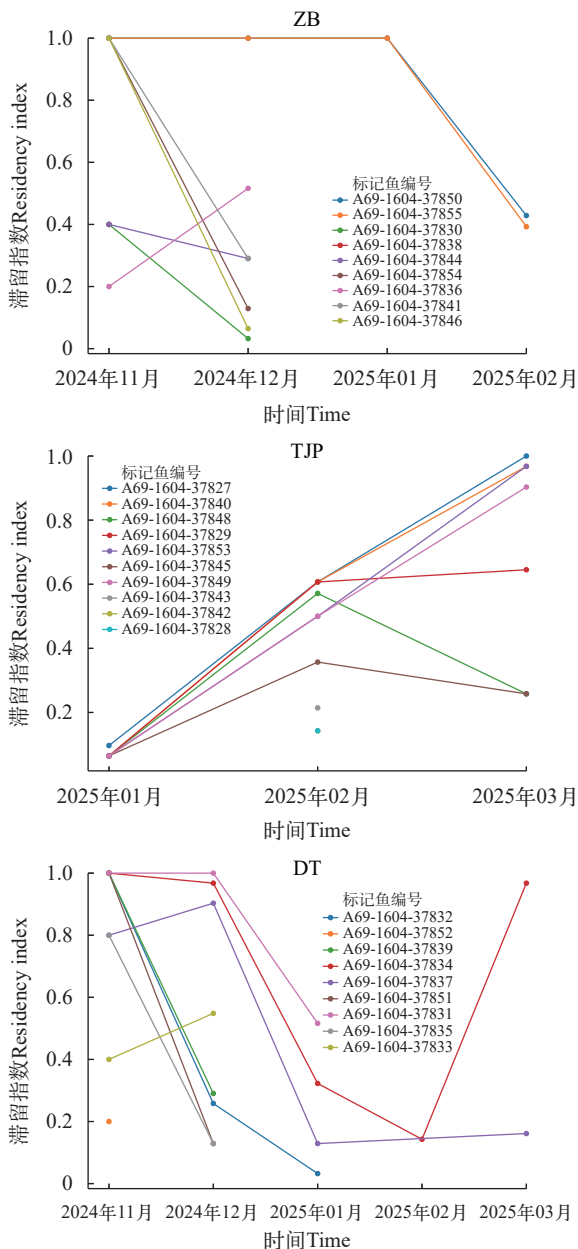


图5 不同放流位置的短须裂腹鱼滞留指数的月变化

Fig. 5 Monthly variation of the retention index of *Schizothorax wangchiachii* at different release locations

繁殖高峰期后位移率及滞留指数增加, 活动性增强, 反映其向周边区域搜索适宜产卵环境的行为模式。ZB与DT两个位置放流的鱼类在放流后的较短时间内表现出短暂的探索行为, 随后信号接收量呈现随时间的推迟而减少的趋势, 表明这些区域更可能为“过渡型”栖息地, 而非繁殖或长期停留区域。这一现象与先前研究中基于声学追踪技术发现的洄游鱼类行为模式一致, 即繁殖活动驱动下的周期性栖息地变更及不同区域的功能分化^[44]; 此外, Tracey等^[45]指出, 鱼类在不同生态位点的栖息忠诚度(Site fidelity)及其行为模式在空间结构异质性环境中高度依赖放流点位置与水文条件。本研究期间正处于白鹤滩水库水位消落期, 黑水河回水区水文条件变动剧烈, 这可能导致了不同放流位置的短须裂腹鱼行为模式的差异。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Wu X W. Fishes of Cyprinidae in China Volume I [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1982: 144–145. [伍献文. 中国鲤科鱼类志 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 144–145.]
- [2] Ding R H. The Fishes of Sichuan, China [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1994: 364–366. [丁瑞华. 四川鱼类志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 364–366.]
- [3] Gao S B, Tang H Y, Qiao Y, *et al.* Status of fishery resources in the mainstream of the lower reaches of Jinsha River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(1): 44–49. [高少波, 唐会元, 乔晔, 等. 金沙江下游干流鱼类资源现状研究 [J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(1): 44–49.]
- [4] Liu Y, Zhu T B, Wu X B, *et al.* Observation of embryonic and early larval development of *Schizothorax wangchiachii* [J]. *Fisheries Science*, 2015, **34**(11): 683–689. [刘阳, 朱挺兵, 吴兴兵, 等. 短须裂腹鱼胚胎及早期仔鱼发育观察 [J]. 水产科学, 2015, **34**(11): 683–689.]
- [5] Zuo P X, Li G H, Leng Y, *et al.* Study on embryonic and early larval development characteristics of *Schizothorax wangchiachii* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(3): 77–82. [左鹏翔, 李光华, 冷云, 等. 短须裂腹鱼胚胎与仔鱼早期发育特性研究 [J]. 水生态学杂志, 2015, **36**(3): 77–82.]
- [6] Li T C, Deng L J, Xie J W, *et al.* Preliminary study on the reproductive biology of *Schizothorax wangchiachii* in the Jinping Bend of the Yalong River [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2025, **53**(6): 80–84. [李天才, 邓龙君, 谢继维, 等. 雅砻江锦屏大河湾短须裂腹鱼繁殖生物学初步研究 [J]. 安徽农业科学, 2025, **53**(6): 80–84.]
- [7] Yang M J, Hu J C. Study on artificial domestication and breeding of *Schizothorax breviscapus* in Jinsha River [J]. *Yunnan Agriculture*, 2021(10): 56–60. [杨慕静, 胡江春. 金沙江短须裂腹鱼人工驯养繁育研究 [J]. 云南农业, 2021(10): 56–60.]
- [8] Yang H, Li T C, Song Y X, *et al.* Influence of water temperature on gonadal maturation and spawning period of *Schizothorax wangchiachii* [J/OL]. *Journal of Hydroecology*, 2024: 1–12. (2024-04-02). <https://link.cnki.net/doi/10.15928/j.1674-3075.202401060008>. [杨浩, 李天才, 宋以兴, 等. 水温对短须裂腹鱼性腺成熟与繁殖的影响 [J/OL]. 水生态学杂志, 2024: 1–12. (2024-04-02). <https://link.cnki.net/doi/10.15928/j.1674-3075.202401060008>.]
- [9] Chu Y C, Wang W F, Hu J J, *et al.* Effect of environmental light on growth performance and physiology of *Schizothorax wangchiachii* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, **42**(6): 77–83. [褚云冲, 王伟夫, 胡江军, 等. 光照对短须裂腹鱼生长及生理影响研究 [J]. 渔业科学进展, 2021, **42**(6): 77–83.]
- [10] Chai Y, Huang J, Zhu T B, *et al.* Preliminary study on substrate preference of *Schizothorax wangchiachii* larvae fish [J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, **49**(1): 42–45. [柴毅, 黄俊, 朱挺兵, 等. 短须裂腹鱼仔稚鱼底质选择性初步研究 [J]. 淡水渔业, 2019, **49**(1): 42–45.]
- [11] Liang X. Behavioral study on wild juvenile *Schizothorax wangchiachii* [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(5): 321–326. [梁祥. 野生短须裂腹鱼幼鱼行为学研究 [J]. 现代农业科技, 2011(5): 321–326.]
- [12] Yang Z, Tang H Y, Gong Y, *et al.* Effects of spawning migration on the variations of fish assemblage structures in the lower reaches of Heishui River, Jinsha River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(3): 753–762. [杨志, 唐会元, 龚云, 等. 产卵迁徙对金沙江黑水河下游鱼类群聚结构变动的影响 [J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 753–762.]
- [13] Shi L, Ye S W, Zhu H, *et al.* The Spatial-temporal distribution of fish in lake using acoustic tagging and tracking method [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(5): 611–620. [石磊, 叶少文, 朱浩, 等. 基于声学标记追踪法的湖泊鱼类时空分布研究 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(5): 611–620.]
- [14] Hellström G, Lennox R J, Bertram M G, *et al.* Acoustic telemetry [J]. *Current Biology*, 2022, **32**(16): 863–865.
- [15] Hussey N E, Kessel S T, Aarestrup K, *et al.* Aquatic animal telemetry: a panoramic window into the underwater world [J]. *Science*, 2015, **348**(6240): 1255642.
- [16] Jacoby D M P, Piper A T. What acoustic telemetry can and cannot tell us about fish biology [J]. *Journal of Fish Biology*, 2025, **106**(5): 1260–1284.
- [17] Hou Y Q, Zou X, Jiang W, *et al.* Accurate determination algorithm of swimming trajectory for ultrasonically tagged fish in natural water [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(3): 182–188. [侯轶群, 邹璇, 姜伟, 等. 自然水体中超声波标记鱼游动轨迹精密确定算法 [J]. 农业工程学报, 2019, **35**(3): 182–188.]

- [18] Wang C Y, Wei Q W, Du H, *et al.* Applications of ultrasonic telemetry in aquatic animal ecology [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(11): 2286-2292. [王成友, 危起伟, 杜浩, 等. 超声波遥测在水生动物生态学研究中的应用 [J]. 生态学报, 2010, **29**(11): 2286-2292.]
- [19] Barry J, Mcloone P, Fitzgerald C J, *et al.* The spatial ecology of brown trout (*Salmo trutta*) and dace (*Leuciscus leuciscus*) in an artificially impounded riverine habitat: results from an acoustic telemetry study [J]. *Aquatic Sciences*, 2020, **82**(3): 63.
- [20] Xie W, Deng H T, Tian H W, *et al.* Habitat suitability of *Schizothorax wangchiachii* in the Heishui River of the lower Jinsha River tributary [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, **35**(11): 3183-3189. [谢伟, 邓华堂, 田辉伍, 等. 金沙江下游支流黑水河短须裂腹鱼栖息地的适宜性 [J]. 应用生态学报, 2024, **35**(11): 3183-3189.]
- [21] Yang Z, Gong Y, Dong C, *et al.* Fish resource status of the lower reaches of the Heishui River and the measures for their conservation [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(6): 847-855. [杨志, 龚云, 董纯, 等. 黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(6): 847-855.]
- [22] Branco P, Amaral S D, Ferreira M T, *et al.* Do small barriers affect the movement of freshwater fish by increasing residency [J]? *Science of the Total Environment*, 2017(581): 486-494.
- [23] Grothues T M, Davis W C. Sound pressure level weighting of the center of activity method to approximate sequential fish positions from acoustic telemetry [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, **70**(9): 1359-1371.
- [24] Winton M V, Kneebone J, Zemeckis D R, *et al.* A spatial point process model to estimate individual centres of activity from passive acoustic telemetry data [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, **9**(11): 2262-2272.
- [25] Kraft S, Gandra M, Lennox R, *et al.* Residency and space use estimation methods based on passive acoustic telemetry data [J]. *Movement Ecology*, 2023, **11**(1): 12.
- [26] Abecasis D, Afonso P, Erzini K. Can small MPAs protect local populations of a coastal flatfish, *Solea senegalensis* [J]? *Fisheries Management and Ecology*, 2014, **21**(3): 175-185.
- [27] Udyawer V, Dwyer R G, Hoenner X, *et al.* A standardised framework for analysing animal detections from automated tracking arrays [J]. *Animal Biotelemetry*, 2018, **6**(1): 17.
- [28] Lichiti N I, Swihart R K. Estimating utilization distributions with kernel versus local convex hull methods [J]. *The Journal of Wildlife Management*, 2011, **75**(2): 413-422.
- [29] Kie J G. A rule-based ad hoc method for selecting a bandwidth in kernel home-range analyses [J]. *Animal Biotelemetry*, 2013, **1**(1): 13.
- [30] Appert C, Udyawer V, Simpfendorfer C A, *et al.* Use, misuse, and ambiguity of indices of residence in acoustic telemetry studies [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2023(714): 27-44.
- [31] Cooke S J, Bergman J N, Twardek W M, *et al.* The movement ecology of fishes [J]. *Journal of Fish Biology*, 2022, **101**(4): 756-779.
- [32] Lucas M C, Baras E. Methods for studying spatial behaviour of freshwater fishes in the natural environment [J]. *Fish and Fisheries*, 2000, **1**(4): 283-316.
- [33] Rutz C, Hays G C. New frontiers in biologging science [J]. *Biology Letters*, 2009, **5**(3): 289-292.
- [34] Crossin G T, Cooke S J, Goldbogen J A, *et al.* Tracking fitness in marine vertebrates: current knowledge and opportunities for future research [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2014(496): 1-17.
- [35] Jepsen N, Koed A, Thorstad E B, *et al.* Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned [J]? *Hydrobiologia*, 2002, **483**(1): 239-248.
- [36] Jepsen N, Richter L, Pedersen M I, *et al.* Survival, growth and tag retention of juvenile European eel (*Anguilla anguilla* L.) with implanted 12 mm passive integrated transponder tags and acoustic tags [J]. *Journal of Fish Biology*, 2022, **101**(5): 1375-1380.
- [37] Boyd K, Wei Q W, Ke F E. Application of ultrasonic telemetry technology to locate spawning grounds of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(2): 172-174. [Boyd K, 危起伟, 柯福恩. 应用超声波遥测技术定位中华鲟产卵区 [J]. 科学通报, 1995, **40**(2): 172-174.]
- [38] Wei Q W, Yang D G, Ke F E. Technology of Ultrasonic telemetry for Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* in the Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, **22**(3): 20-26. [危起伟, 杨德国, 柯福恩. 长江中华鲟超声波遥测技术 [J]. 水产学报, 1998, **22**(3): 20-26.]
- [39] Song W, Yin L M, Chen X Z, *et al.* Behavioral characteristics of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in tank by ultrasound pinger system [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, **44**(1): 79-84. [宋炜, 殷雷明, 陈雪忠, 等. 运用超声波标志法分析水槽养殖条件下大黄鱼行为特性 [J]. 水产学报, 2020, **44**(1): 79-84.]
- [40] Huang J, Zhu T B, Yang D G, *et al.* Development and growth characteristics of larval and juvenile *Schizothorax wangchiachii* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(6): 99-105. [黄俊, 朱挺兵, 杨德国, 等. 短须裂腹鱼仔稚鱼发育及生长特性的初步研究 [J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(6): 99-105.]
- [41] Yan W B, Zhu T B, Wu X B, *et al.* An observation on the spawning behavior of *Schizothorax wangchiachii* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2017, **47**(3): 9-15. [颜文斌, 朱挺兵, 吴兴兵, 等. 短须裂腹鱼产卵行为观察 [J]. 淡水渔业, 2017, **47**(3): 9-15.]

- [42] Shi X T, Lu J Y, Ke S F, *et al.* Differences in habitat substrate preferences between male and female individuals and groups of *Gymnocypris przewalskii* during their breeding and migration period [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(10): 1780-1788. [石小涛, 卢建雨, 柯森繁, 等. 繁殖洄游期青海湖裸鲤雌雄个体及群体对栖息地底质偏好选择的差异 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(10): 1780-1788.]
- [43] Yan T M, Gao K, Liu X S, *et al.* Reproduction time and main influencing factors of *Schizothorax prenanti* in the middle reaches of the Dadu River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(3): 49-56. [严太明, 高阔, 刘小帅, 等. 大渡河中游齐口裂腹鱼繁殖时间及其主要影响因素分析 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(3): 49-56.]
- [44] Li M, Chen M, Wu W, *et al.* Differences in the natural swimming behavior of *Schizothorax prenanti* Individual and schooling in spatially heterogeneous turbulent flows [J]. *Animals*, 2023, **13**(6): 1025.
- [45] Tracey S R, Hartmann K, Mcallister J, *et al.* Home range, site fidelity and synchronous migrations of three co-occurring, morphologically distinct estuarine fish species [J]. *Science of the Total Environment*, 2020(713): 136629.

MOVEMENT PATTERNS OF *SCHIZOTHORAX WANGCHIACHI* IN THE LOWER REACHES OF THE HEISHUI RIVER BASED ON ACOUSTIC TELEMTRY

HU Fan-Xu^{1,2}, LI Bo^{1,2}, JIANG Wei^{1,2}, SU Wei^{1,2}, GUO Wen-Tao^{1,2} and ZHU Jia-Zhi^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Fish Resource Conservation, Chinese Sturgeon Research Institute of China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, China)

Abstract: This study investigated the movement patterns of *Schizothorax wangchiachii* in the Heishui River using acoustic telemetry from November 26, 2024 to April 1, 2025. A total of 28 individuals were tagged and released at three sites—Datong (DT), Tangjiaping (TJP), and Zhuanbao (ZB)—with 18 acoustic receivers deployed. During the study, 321397 valid signals were recorded, each fish detected by an average of 4.8 receivers for 1—126 days. Spatial utilization differed significantly among release sites. The ZB group exhibited the largest activity range (50% KUD: 4.37 km²; 95% KUD: 26.96 km²; MCP: 14.62 km²), significantly greater than those of TJP and DT. The TJP group showed intermediate, river-aligned activity, while DT group remained most localized near the river mouth. Displacement rates also differed significantly (Kruskal-Wallis, $P < 0.05$), with DT lower than TJP and ZB, and TJP higher than ZB. Retention index (RI) declined over time in DT and ZB but increased in TJP, reaching 0.95—1.0 in March. Overall, released fish initially exhibited short-term exploratory movements around release sites, then gradually migrated beyond the array, with some entering the Heishui or Jinsha rivers. These results provide key insights for life-history studies and stock enhancement strategies for *S. wangchiachii* in the Heishui River.

Key words: Heishui River; *Schizothorax wangchiachii*; Acoustic telemetry; Center of activity