



三峡变动回水区胡家滩漩水结构运动特性分析^{*}

肖晴月¹, 段武睿¹, 胡钰坤¹, 付广鱼², 彭晨凯¹, 张 鹏³

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074;
3. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 三峡变动回水区存在复杂的碍航漩水结构, 然而当前对漩水结构动态演化机制认识不清, 难以为船舶航行进行有效指导。为此, 构建高精度无人机图像采集系统, 并于胡家滩河段开展漩水结构观测, 提出表面漩水结构识别与跟踪的图像处理技术, 定量解析变动回水区漩水结构的时空演化特征。通过灰度转换、二值化分割及形态学检测方法, 精准识别漩水核心区域, 并采用等效圆法量化其几何特征; 结合帧间位移法, 提取漩水结构帧间的动态演化参数。结果表明: 漩水结构在运动过程中呈现出显著的三阶段演化特征; 漩水结构半径与运动速度之间存在显著的正相关关系, 且关系存在阶段依赖性, 扩张阶段受外部因素影响相关性弱, 收缩阶段受内部流体动力学机制主导相关性强。此外, 漩水结构运动迁移过程中快速扩张期的增速跃升点可作为船舶航向预调整的关键节点, 为后续揭示三峡变动回水区漩水结构对船舶运动影响提供理论支撑。

关键词: 三峡库区; 变动回水区; 碍航流态; 漩水结构

中图分类号: U612; TV143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0128-09

Movement characteristics of vortex structure in Hujiatan Reach in fluctuating backwater area of Three Gorges

XIAO Qingyue¹, DUAN Wurui¹, HU Yukun¹, FU Guangyu², PENG Chenkai¹, ZHANG Peng³

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The complex vortex structure causes navigation-obstructing obstruction in the fluctuating backwater area of the Three Gorges. However, the dynamic evolution mechanism of the vortex structure is unclear, making it difficult to effectively guide ship navigation. To address this issue, a high-precision unmanned aerial vehicle (UAV) image acquisition system is built to carry out the observation of the vortex structure in the Hujiatan Reach. An image processing technology for surface vortex structure identification and tracking is proposed, and the spatiotemporal evolution characteristics of the vortex structure in the variable return water area are quantitatively analyzed. The core area of the vortex is identified through gray-scale conversion, binarization segmentation and morphological detection methods, and its geometric characteristics are quantified by the equivalent circle method. Combined with the inter-frame displacement method, the dynamic evolution parameters between frames of the vortex structure are extracted. The results show that the vortex structure exhibits a distinct three-stage evolution characteristic during its motion process. There is a significant positive correlation between the radius of the vortex structure and its movement velocity, and this correlation shows stage dependence: in the expansion stage, the correlation is weak due to the influence of external factors; in the contraction stage, the correlation is strong, dominated by internal hydrodynamic

收稿日期: 2025-04-21 录用日期: 2025-09-01

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52209080); 大学生创新创业训练计划项目(X202410618017)

作者简介: 肖晴月(2003—), 女, 研究方向为河流动力学。

通信作者: 张鹏(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail:421497269@qq.com

mechanisms. Furthermore, the growth rate jump point during the rapid expansion period of the vortex structure's movement and migration process can be regarded as a key node for the pre-adjustment of the ship's course, providing theoretical support for the subsequent discovery of the influence of the vortex structure in the fluctuating backwater area of the Three Gorges on ship movement.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; fluctuating backwater area; navigation-obstructing flow; vortex structure

随着三峡工程的全面运行和长江经济带战略的深入推进, 长江黄金水道作为连接东中西部综合运输体系的主干通道, 其战略地位愈发显著。三峡水库蓄水后, 库区航道的通航条件得到了显著提升, 有效推动了航运业的快速发展。在此背景下, 通行船舶数量急剧增加, 导致航道拥挤状况持续加剧, 船舶安全通行需求与航运规模扩张之间的矛盾也愈发突出。

三峡水库蓄水后, 库区水面显著拓宽和水深增大, 通航条件总体上得到明显改善。然而, 其变动回水区兼具库区航道和山区天然航道的双重特征。河道蜿蜒曲折, 浅滩和暗礁众多, 这种独特的水文地形条件形成泡水、漩水和回水等复杂流态; 这些流态呈现出瞬时性、空间不确定性和动态变化等特性, 对船舶航行安全构成严重威胁, 尤其是漩水结构的影响最为显著。例如, 船舶驶入大尺度泡漩区域时, 可能会受到侧向推力、偏心上举力或艏艉不平衡力偶的作用, 从而导致倾覆、偏转甚至触礁等事故^[1-5]; 这些因素限制了航道通过能力和航运效率的进一步提升^[6-7]。张丹^[8]通过三维水动力仿真建模, 对三峡水库回水变动区在消落期的水流流场进行数值模拟, 揭示漩水呈现消落期横流强化与汛期紊动加剧的特征; 梁锴等^[9]基于 MIKE21 软件模拟弯道二维水动力模型, 揭示漩水发生概率与流量呈正相关、漩核位置随流量增大向下游迁移的演化规律, 表明大流量条件下漩水空间不稳定性显著增强; 胡呈维等^[10]通过弯道水槽试验, 测量出典型断面三维流速数据, 利用高精度三维流场数据, 研究弯道环流结构的变化规律及其动力特性, 包括三维时均流场分布, 弯道环流的形状、尺度、强度及其演化过程。

综上所述, 现有研究成果主要集中于室内物理模型试验与小尺度数值模拟, 对复杂流态进行

探讨, 初步揭示了漩水结构的基础特性。然而, 对于大尺度野外环境下漩水结构的动态演变规律仍认识不足。本文通过无人机测量技术并结合图像处理算法, 深入分析漩水结构的运动特性, 为山区河流复杂环境下船舶航行提供参考。

1 漩水结构特征

漩水是一种三维旋转流场现象, 其核心区常呈现凹陷的漏斗状结构, 属于竖轴涡范畴。漩水与回流相比, 具有显著的非定常流态特性, 表现为很强的瞬时运动特征, 作用范围较小, 中心水面凹陷深度与漩涡强度正相关, 并伴随高速旋转和吸气等现象, 其平面位置呈动态变化特征。实测表明, 漩水平面位置随流量增大向下游偏移, 当流量超过 1.75 万 m^3/s 时其运动轨迹趋于稳定。

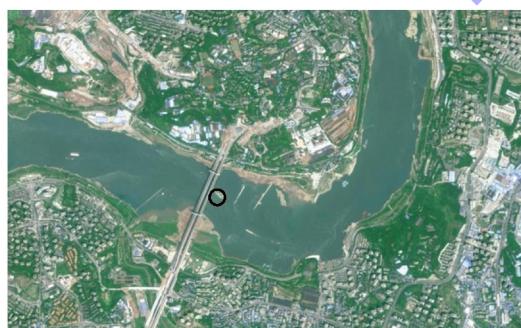
漩水的形成机制源于复杂的水动力条件, 一般由急流(流速大于 3 m/s)与缓流(流速小于 1.5 m/s)以不同流向交汇时, 界面处产生速度剪切层引发 Kelvin-Helmholtz 不稳定性, 其速度梯度产生的不稳定性形成压力变化从而诱发旋转力偶^[11], 使附近的水体旋转发展而成。这种速度差异导致涡量累积, 形成偏向低速侧的旋转流场, 其平移速度呈现空间异质性——漩涡运动速度约为主流流速的 40%, 漩涡中心向下游平移速度为均匀来流速度的 80%~90%, 但在岸壁边界层内受摩擦阻力影响可降低至 60%^[12]。漩水从产生时起, 其旋转速度逐渐增加, 中心水面凹陷程度随时间推移加深, 并随着水流逐渐向下游移动。其常常以集群形式出现, 时隐时现, 具有时空交替的间歇性特征。

2 研究区域及测量布置

2.1 胡家滩水道概况

胡家滩水道位于长江上游重庆市巴南区三峡

库区变动回水区上段(航道里程 675~681 km), 是长江上游著名的浅险滩之一。在该水道中段的李家沱大桥下方, 布置测量位置, 见图 1a)。该水道弯曲展宽河势特征尤为显著, 枯水期主河槽紧贴左岸, 河心分布由卵石夹沙构成的胡家滩浅礁、江心纵卧的砖灶子石梁与潜礁共同导致航槽流态紊乱, 水动力轴线与航槽中轴线偏角达 20° ^[13-14], 在水位衰退期随着库区水位从 175 m 逐步消落至 145 m, 原本被淹没的虎牙礁群和阶梯状河床大面积出露, 有效航道宽度骤减至 180 m 以下, 受复杂地形与水文条件耦合作用, 水道边滩常出现泡水、漩水、回水等复杂流态。其中, 漩水结构因其强烈的旋转流态和动态变化特性, 增加了船舶航行条件的复杂程度, 对船舶航行安全构成了严重威胁^[15]。其中李家沱大桥下漩水结构见图 1b)。因此, 针对漩水结构的研究具有重要的理论价值和实际意义, 可为改善船舶航行安全和水工整治工程设计提供科学依据。



a) 李家沱大桥下漩水测量位置



b) 李家沱大桥下漩水结构

图 1 李家沱大桥下漩水测量位置及效果
Fig. 1 Measuring position and effect of Lijiatuo Bridge

2.2 测量系统

针对三峡库区变动回水区河宽较大、传统测量手段无法布置地面控制点(GCPs)以及水面示踪粒子难以播撒追踪等特点, 本文基于无人机技术, 搭建一套多台无人机与高分辨率快速相机(帧率 ≥ 60 fps, 分辨率 ≥ 2000 万 px)相结合的图像采集系统^[16-17], 以“设备稳定性高、环境适应性强、图像质量高”原则, 核心设备选择采用大疆 M210 RTK V2 无人机, 搭载 Zenmuse X5S 云台相机。该系统以无人机的高空视角和快速响应能力为依托, 可高效覆盖研究区域的流态观测需求, 同时规避了人工布点与示踪粒子投放的物理限制, 为后续大范围流态观测提供数据基础。

2.3 测量布置

基于上述无人机技术对大尺度河道的覆盖能力并发挥其在大尺度河段观测中的优势, 本文提出基于 GCPs 的图像拼接与空间配准方案: 通过在河道两侧选取特征显著的地面控制点, 在后期图像数据的处理中利用这些地面控制点完成图像的高精度拼接, 最终实现还原大范围水域流态信息的完整重构。

在胡家滩水道的原型测量过程中, 选取岸边典型礁石、人工建筑物、船舶等实地场景物体完成多处观测图像的重构。具体实施中以胡家滩水道中李家沱大桥的桥墩处为例, 其空间分布见图 2。通过 Google Earth 软件进行坐标提取永久性固定标志物(如礁石群、航标建筑等)的空间坐标信息, 完成了后期像平面坐标和世界坐标的转换, 而半永久性地物(如特征水陆界面等), 采用多期影像交叉验证确保时空一致性。通过基于图像间同一标定物间的角点相关性计算, 求解图像旋转、缩放系数, 进一步将不同地点拍摄得到的图像进行重构, 最终实现多源异构影像的空间配准。

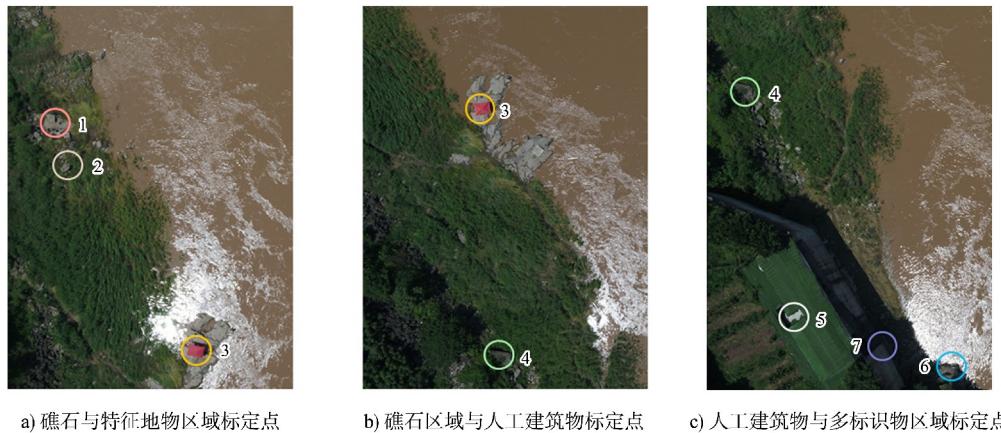


图 2 地面标定点选取

Fig. 2 Selection of ground calibration points

3 漩水识别与跟踪算法

3.1 图像预处理

为从水面图像中提取有效稳定的纹理信息, 基于图像预处理技术对无人机采集的高分辨率图像进行分析, 提取漩水结构的特征。整个过程首先通过加权平均法对原始 RGB 图片进行灰度转换, 其数学表达式为:

$$I_{\text{gray}} = 0.298 \cdot 9R + 0.587 \cdot 0G + 0.114 \cdot 0B \quad (1)$$

式中: I_{gray} 为像素点的期望值; R 、 G 、 B 分别为红、绿、蓝通道的像素值。该系数组合符合人眼对可见光谱的感知特性, 相较于简单均值法能更精确保留漩水结构的纹理细节特征。

再使用高斯滤波器(标准差 $\sigma=1.5$)对灰度图像进行平滑处理, 抑制高频噪声同时保留漩水结构边缘, 降噪效果见图 3a), 并将平滑结果应用 Sobel 算子检测强梯度纹理边缘提取漩水旋转边界的梯度特征, 最后使用自适应直方图将其均衡化, 增强泡沫与周围水体的灰度对比, 从而增强图像中的纹理信息, 增强效果见图 3b)。

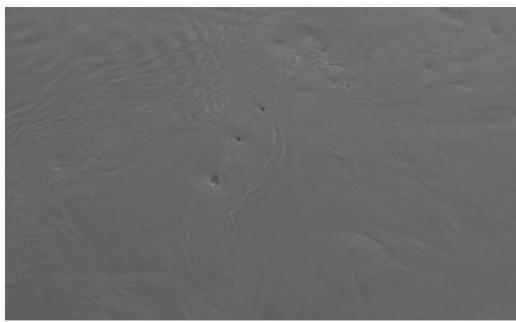


图 3 水面纹理增强及提取

Fig. 3 Surface texture enhancement and extraction

3.2 漩水识别算法

漩水结构识别算法基于模板匹配与形态分析相结合的检测原理, 其技术流程可分为特征匹配、区域筛选及位置校正三个阶段。

在特征匹配阶段, 首先滑动窗口遍历图像全域, 将预先训练加载好的的漩水模板与待测滤波图像进行归一化互相关计算, 计算各像素点邻域与漩水模板的相关系数矩阵 C , 其中元素 $C(x, y)$ 的计算公式为:

$$C(x, y) = \frac{\sum_{i,j} [T(i, j) - \bar{T}] [I(i + x, j + y) - \bar{I}]}{\sqrt{\sum_{i,j} [T(i, j) - \bar{T}]^2 \sum_{i,j} [I(i + x, j + y) - \bar{I}]^2}} \quad (2)$$

式中: $T(i, j)$ 为模板图像在坐标 (i, j) 处的像素值; $I(i+x, j+y)$ 为目标图像在平移 (x, y) 后对应模

板位置 (i, j) 的像素值; \bar{T} 为模板像素均值; \bar{I} 为图像局部区域像素均值。

该算法采用归一化互相关系数作为相似性度量准则, 通过消除模板与图像区域的全局亮度差异, 显著降低了光照强度波动对匹配结果的影响, 提升算法的环境适应性。

在区域筛选阶段, 基于预设匹配度阈值对响应图进行二值化分割, 基于最大类间方差法动态确定全局阈值, 将归一化相关系数矩阵通过相关性阈值 0.6 转换为二值图像, 该过程筛选出相关系数高于 0.6 的高置信度区域, 作为候选漩水中心, 提高识别图像中的相似特征。针对筛选出来的候选区域集合, 采用连通区域分析算法提取各独立区域的几何特征, 通过计算区域质心坐标建立初步定位集合, 并在过程中引入形态学滤波操作, 消除由噪声引发的伪响应区域, 以确保候选区域的空间连续性符合漩水结构的物理特性。

最后进行坐标校正处理, 考虑模板半宽高参数对匹配定位精度的影响, 对检测坐标进行反向平移变换校正, 表达式为:

$$x_{\text{校正}} = x_{\text{质心}} - \frac{w_{\text{模板}}}{2} \quad (3)$$

$$y_{\text{校正}} = y_{\text{质心}} - \frac{h_{\text{模板}}}{2} \quad (4)$$

式中, $x_{\text{校正}}$ 、 $y_{\text{校正}}$ 分别为检测质心坐标校正后的横坐标、纵坐标; $x_{\text{质心}}$ 、 $y_{\text{质心}}$ 分别为检测质心横坐标、纵坐标; $w_{\text{模板}}$ 、 $h_{\text{模板}}$ 分别为模板的宽度、高度。

校正过程将质心坐标精准对应至漩水中心实际位置, 显著提升复杂流体场景中漩水特征检测的鲁棒性, 为后续漩水结构运动轨迹追踪提供了高置信度的时空基准数据。

3.3 漩水跟踪算法

漩水跟踪算法基于最近邻匹配与运动一致性校验原理, 旨在通过连续帧间的空间关联性, 提取单个漩水的运动轨迹及其动态特性。在计算中通过控制计算搜索窗口、迭代次数, 借助归一化互相关算法实现帧间漩水位置的快速匹配, 获取

帧间漩水在图像中的位移, 其原理见图 4。

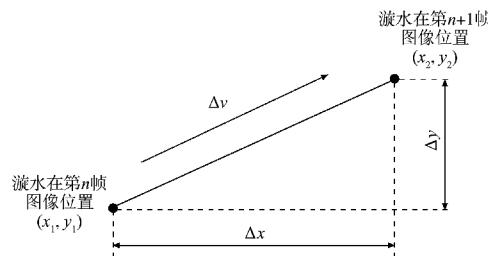


图 4 漩水结构跟踪算法原理
Fig. 4 Principle of vortex structure tracking algorithm

选择起始帧 t_0 中的某个漩水中心 (x_0, y_0) 作为跟踪起点, 对于后续帧 t_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 计算当前帧中所有漩水中心 (x_i, y_i) 与上一帧目标位置 (x_{i-1}, y_{i-1}) 的欧氏距离 d_j , 即:

$$d_j = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (5)$$

找到距离最小的点 (x_{i-1}, y_{i-1}) , 若 $d_j < 20 \text{ px}$, 则判定为同一漩水, 并更新轨迹点, 通过连接连续帧间的位置, 构建漩水结构的运动轨迹, 反映其时空演化特性。

漩水形态的量化描述通过局部区域图像分割实现, 根据相邻帧间的位移计算瞬时速度 v_i :

$$v_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{\Delta t} \quad (6)$$

式中: Δt 为帧间时间间隔。

并对每个轨迹点对应的漩水区域进行二值化处理, 计算连通区域面积 A_i :

$$A_i = \sum_{x,y} B(x,y) \quad (7)$$

式中: $B(x, y)$ 为二值化图像坐标 (x, y) 处的像素值。

再假设漩水区域近似为圆形, 简化漩水尺度的量化描述, 其等效半径由圆形面积公式反推得 r_t :

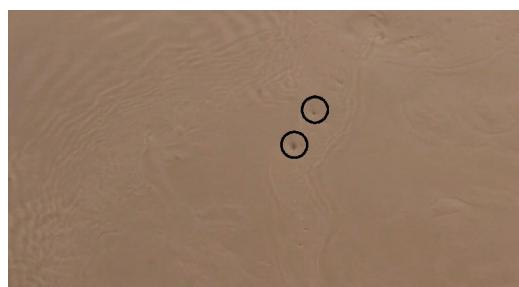
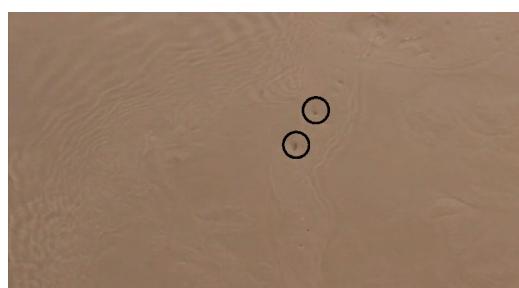
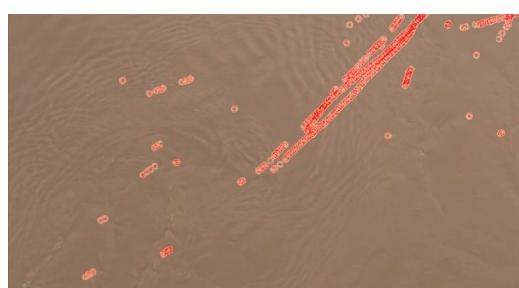
$$r_t = \sqrt{A_i / \pi} \quad (8)$$

最后漩水运动轨迹采用时间序列图像拼接技术展示漩水形态的历时变化。

3.4 漩水识别精度

基于上述漩水结构识别算法检测得到的漩水结构见图 5。图 5a)、b)、c) 呈现了连续三帧图像中检测到的漩水结构动态演化过程(如圆圈所示, 漩水核心区边界清晰且位置连贯), 其中核心区通

过形态学方法被精准标注(圆圈区域)。图 5d) 为通过时域叠加法在一个观测时段内所有漩水结构的空间位置(标记)与首帧背景图像融合叠加的效果, 直观揭示漩水结构的空间分布特征及迁移轨迹。可以看出, 漩水中心定位与目视判读结果吻合, 验证了漩水识别算法的有效性; 时域跟踪可完整捕捉漩涡移动路径, 证明了漩水跟踪算法可靠。

a) $t_1=1$ sb) $t_2=2$ sc) $t_3=3$ s

d) 时段内漩水结构空间位置叠加图

图 5 漩水结构识别

Fig. 5 Identification of vortex structure

4 漩水结构运动特性分析

4.1 漩水面积变化特征

基于上述漩水结构跟踪算法可以检测得到单个漩水结构的运动轨迹跟踪结果。计算方法是基于每帧图像得到的漩水结构位置, 对每个漩水对象在下帧图像中的漩水结构位置进行相邻图像中漩水结构质心的欧氏距离, 以距离最小且小于某个设定阈值时, 作为该漩水对象的下一帧运动位置, 以此类推实现跨帧目标关联, 直到没有满足这个条件。阈值大小的设定, 要根据漩水结构在前后两帧运动位移进行估算。本文根据拍摄结果设置阈值为 0.6。识别漩水结构运动轨迹的第 1 帧图像见图 6, 点线表示下一帧图像中该漩水结构的位置。该漩水结构每两帧的图像见图 7。

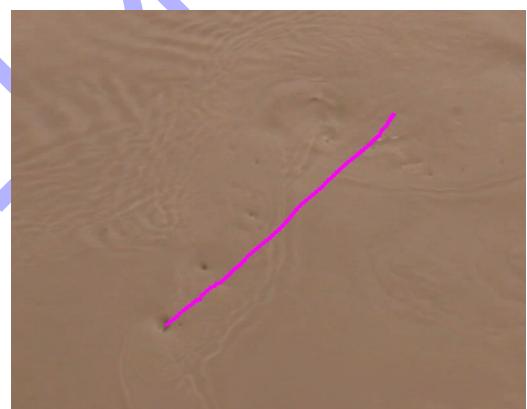


图 6 单个漩水结构轨迹跟踪

Fig. 6 Single vortex structure trajectory tracking

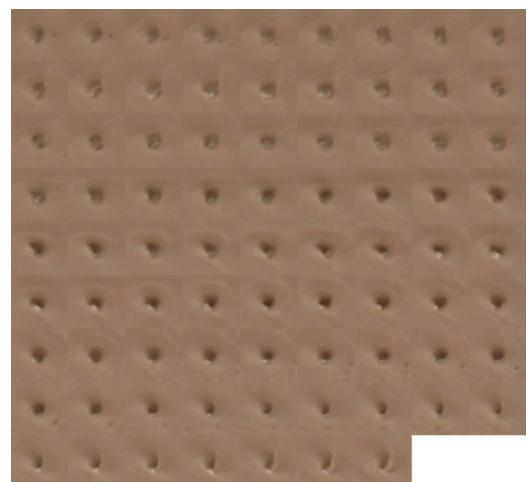


图 7 单个漩水结构演变过程

Fig. 7 Evolution process of vortex water structure

单个漩水生命周期的典型演化特征见图 8。单个漩水结构的动态演化过程呈现显著的三阶段特征：初期漩水面积较大、深度较浅，在主流剪切作用下沿流向拉伸为椭圆形，伴随面积快速扩张 56% (图 8 峰值区)；中期漩水面积缩窄、深度变大，反映旋转动能强于黏性耗散的作用；末期漩水结构形态发生扭曲，黏性耗散作用大于旋转动能，漩水面积迅速衰减。漩水结构的生命周期反映了旋转强度与黏性耗散的动态演变过程。

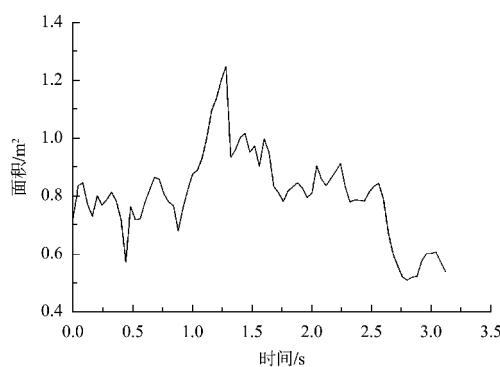


图 8 单个漩水面积变化过程

Fig. 8 Process of changing area of a single vortex

4.2 漩水半径变化特征

半径-时间演化曲线见图 9。由半径-时间演化曲线可识别漩水结构的非线性生命周期特征，并将漩水的运动迁移过程生命周期阶段进一步细化划分为三个阶段：缓慢扩张期、快速扩张期和收缩阶段。在缓慢扩张期 (0~0.8 s)，半径以 0.03 m/s 的低速增长，表明初始阶段能量输入受限，可能受流场稳定性或边界条件抑制；在快速扩张期 (0.80~1.56 s)，增速提升至 0.07 m/s，反映外部能量输入显著增强 (如剪切流失稳或局部压力梯度突变)；在收缩阶段 (1.56~3.12 s)，半径从峰值 0.63 m 非线性衰减至 0.18 m，前期 (1.56~2.40 s) 以 0.07 m/s 缓衰，后期 (2.40~3.12 s) 受湍流掺混扰动影响，衰减速率增至 0.10 m/s。快速扩张期 (0.80~1.56 s) 的增速跃升点 (0.8 s) 可作为流场动态监测的关键节点，建议船舶在此阶段前实施航向预调整，以应对后续收缩阶段可能突发的流场扰动风险，其演化规律为船舶航行风险动态预警提供了关键依据。

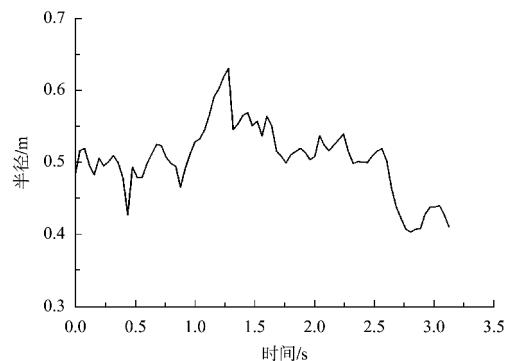


图 9 单个漩水变化过程中半径随时间的变化关系

Fig. 9 Relationship between radius and time of a single vortex

4.3 漩水半径与运动速度变化特征

单个漩水结构的半径与其运动速度的关系见图 10。进一步分析得到漩水结构半径与运动速度之间存在显著正相关关系，相关系数为 0.60，且这种相关性在扩张阶段 (0~1.56 s) 呈弱化趋势 ($R^2=0.35$)，表明该阶段的能量输入可能受初始扰动 (如气泡夹带)、地形约束等外部因素影响，而在收缩阶段 (1.56~3.12 s) 两者关联性显著 ($R^2=0.67$)，表明此时漩水运动主要受内部流体动力学机制主导，验证了黏性耗散主导机制下尺度缩减与动能损失的同步性，揭示了漩水结构尺度-速度关系的阶段依赖性。

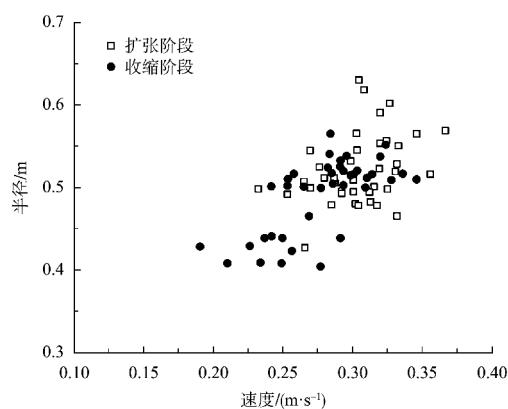


图 10 单个漩水变化过程中半径与速度的关系

Fig. 10 Relationship between radius and velocity of a single vortex

5 结论

1) 漩水结构在运动迁移过程中展现出显著的三阶段演化特征：初期，漩水结构受主流剪切作用影响，沿流向拉伸成椭圆形并逐渐扩张；中期，

旋转动能显著强于黏性耗散, 致使漩水面积缩窄、深度加大; 末期, 漩水结构形态扭曲变形, 并伴随面积迅速衰减, 揭示了旋转强度与黏性耗散之间的动态演变过程。

2) 漩水结构运动迁移生命周期依据半径-时间演化可细化为“缓慢扩张—快速扩张—收缩”三阶段: 缓慢扩张期, 漩水结构因能量输入受限, 半径低速增长; 快速扩张期, 漩水结构因外部能量输入增强, 半径增速跃升; 收缩阶段, 受湍流掺混扰动, 半径加速衰减。快速扩张期的增速跃升点可作为船舶航向预调整的关键节点, 船舶宜在该阶段前预调航向, 以此规避突发的流场扰动风险, 提升三峡水库变动回水区的航道通航效益与安全性。

3) 漩水结构半径与运动速度之间存在显著的正相关关系, 且这种相关性在不同阶段表现出明显的差异, 收缩阶段较扩张阶段更为突出: 扩张阶段, 因能量输入受初始扰动、地形约束等外部因素影响, 相关性弱; 收缩阶段, 漩水结构受内部流体动力学机制主导, 相关性强。

参考文献:

[1] LEE S. Hydrodynamic interaction forces on different ship types under various operating conditions in restricted waters[J]. Ocean engineering, 2023, 267: 113325.

[2] SHI W C, LI M X, YUAN Z M. Investigation of the ship-seabed interaction with a high-fidelity CFD approach[J]. Journal of marine science and technology, 2021, 26: 931-946.

[3] BECHTHOLD J, KASTENS M. Robustness and quality of squat predictions in extreme shallow water conditions based on RANS-calculations [J]. Ocean engineering, 2020, 197: 106780.

[4] HADI E S, TUSWAN T, AZIZAH G, et al. Influence of the canal width and depth on the resistance of 750 DWT Perintis ship using CFD simulation [J]. Brodogradnja, 2023, 74(1): 117-14.

[5] SAMUEL S, SIMANJUNTAK F, ANIK P M, et al. Analyzing the influence of water depth on total resistance in Ulstein X-bow configuration: a numerical study[J]. E3s web of conferences, 2023, 465: 01020.

[6] 曾杨, 盛进路, 范晓飚. 基于事故树的三峡库区船舶碰撞事故致因分析[J]. 人类工效学, 2021, 27(4): 57-60.

ZENG Y, SHENG J L, FAN X B. Causes analysis of ship collision accident in the Three Gorges Reservoir area of Yangtze River based on accident tree[J]. Chinese journal of ergonomics, 2021, 27(4): 57-60.

[7] HUANG J, XU C, XIN P, et al. A fast algorithm for the prediction of ship-bank interaction in shallow water[J]. Journal of marine science & engineering, 2020, 8 (11): 927-946.

[8] 张丹. 三峡回水变动区船舶航行路径优化及三维环境仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

ZHANG D. Ship route optimization and 3D simulation of navigation environment in the fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.

[9] 梁锴, 任伯浩, 李明伟, 等. 三峡枢纽典型碍航河段复杂流态分析[J]. 水运工程, 2024(7): 138-144, 164.

LIANG K, REN B H, LI M W, et al. Complex flow pattern in typical navigation obstructed region of Three Gorges Project[J]. Port & waterway engineering, 2024 (7): 138-144, 164.

[10] 胡呈维, 余明辉, 渠庚. 不同来流条件下急弯段环流结构演化过程研究[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 259-274.

HU C W, YU M H, QU G. Study on the evolution process of circulating flow structure in sharp bend sections under different inflow conditions [J]. Engineering mechanics, 2025, 42(1): 259-274.

[11] 原辉, 梁秀忠, 赵琼娟. 山区河流航道整治方法综述[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(11): 22-24.

YUAN H, LIANG X Z, ZHAO Q J. Summary of waterway regulation methods in mountainous rivers [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2011, 17(11): 22-24.

[12] 梁东方, 李玉梁, 陈嘉范. 半岛浅水尾流近区流动特性的实验研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(4): 431-435.

LIANG D F, LI Y L, CHEN J F. Study on the evolution process of circulating flow structure in sharp bend sections under different inflow conditions[J]. Progress in natural science, 2004, 14(4): 431-435.

[13] 李德华. 胡家滩航道整治方案数学模型推演[J]. 中国

水运, 2014(9): 52-53.

LI D H. Numerical simulation of waterway regulation schemes for Hujia Beach [J]. China water transport, 2014(9): 52-53.

[14] 吴海根. 重庆胡家滩河段航道整治方案及效果数值模拟研究[J]. 中国水运(下半月), 2014(8): 106-107, 110.

WU H G. Numerical simulation study on the waterway regulation scheme and its effect for the Hujia Beach reach of the Chongqing section [J]. China water transport (the second half of the month), 2014 (8): 106-107, 110.

[15] JIANG D, WU B, CHENG Z Y, et al. Towards a probabilistic model for estimation of grounding accidents in fluctuating backwater zone of the Three Gorges Reservoir [J]. Reliability engineering & system safety, 2021, 205: 107239.

[16] 李祖忠, 张旭东, 江聪, 等. 基于 Landsat 影像的近 40 年来(1982—2021 年)三峡库区水面面积及其蒸发损失变化[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1822-1831.

LI Z Z, ZHANG X D, JIANG C, et al. Evolutions of water surface area and evaporation loss of Three Gorges Reservoir based on Landsat images, 1982 – 2021 [J]. Journal of lake sciences, 2023, 35(5): 1822-1831.

[17] 杨聃, 邵广俊, 胡伟飞, 等. 基于图像的河流表面测速研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(9): 1752-1763.

YANG D, SHAO G J, HU W F, et al. Review of image-based river surface velocimetry research [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2021, 55(9): 1752-1763.

(本文编辑 王璁)

(上接第 127 页)

[7] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[8] 吴澎. 船闸的门槛水深(一): 规范相关规定解读[J]. 水运工程, 2023(6): 92-95.

WU P. Water depth on sill of locks, part 1: relevant stipulations in Chinese code [J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 92-95.

[9] MCMAHON J R. Hydraulic design of deep-draft navigation projects[R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 2006.

[10] 安徽省交通科学研究院. 合裕线航道水文专题分析报

告[R]. 合肥: 安徽省交通科学研究院, 2024.

Anhui Transportation Research Institute. Hydrological special analysis report on the Heyu Line navigation channel [R]. Hefei: Anhui Transportation Research Institute, 2024.

[11] 安徽省交通勘察设计院. 合裕线(施口—裕溪口)航道改造工程初步设计[R]. 合肥: 安徽省交通勘察设计院, 2012.

Anhui Provincial Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd. Preliminary design for the channel renovation project of Heyu Line (Shikou-Yuxikou) [R]. Hefei: Anhui Provincial Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd., 2012.

(本文编辑 赵娟)

征订通知

2026 年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 请登录《水运工程》杂志官方网站 www.sygc.com.cn 首页下载中心下载“2026 年《水运工程》征订通知单”, 有关要求和反馈信息一应俱全。

《水运工程》编辑部