



长江中游熊城段水流特性研究*

雷雪婷¹, 李 瀛¹, 单敏尔¹, 范淑琴², 陈怡君¹

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040; 2. 长江岳阳航道处, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 针对长江中游熊城段碍航水流问题, 采用数学模型对该河段水流特性进行研究。结果表明: 因河道弯曲狭窄、洲滩不高, 且受洞庭湖出流影响, 熊城段水流三维特性明显, 存在横流、环流、回流等多种水流结构, 对船舶航行影响大; 在干线来流量 2.5 万~3.0 万 m^3/s 且洞庭湖水位偏高时, 易发生船舶事故, 应提醒船舶谨慎航行。

关键词: 长江中游; 熊城段; 三维水流结构; 碍航特性

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0114-05

Flow characteristics of Xiongcheng reach in middle reaches of the Yangtze River

LEI Xueting¹, LI Ying¹, SHAN Min'er¹, FAN Shuqin², CHEN Yijun¹

(1. Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430040, China;

2. Changjiang Yueyang Waterway Division, Yueyang 414000, China)

Abstract: Aiming at the problem of navigation-obstructing flow in Xiongcheng reach of the middle Yangtze River, we use a mathematical model to study the flow characteristics of the reach. The results show that the riverway is narrow and curved, the beach is not high, and affected by the outflow of Dongting Lake, the three-dimensional characteristics of flow in Xiongcheng reach are obvious, and there are many flow structures such as crossflow, circulation and backflow, which have great influence on ship navigation. When the flow of the trunk line is 25,000 m^3/s to 30,000 m^3/s , and the water level of Dongting Lake is high, ship accidents are likely to occur, so it is necessary to remind ships to navigate with caution.

Keywords: middle reaches of the Yangtze River; Xiongcheng reach; three-dimensional flow structure; obstructing characteristic

熊城段地处长江中游, 位于“九曲十八弯”的荆江河段尾部。该河段多急弯、险流, 航道条件差, 且洞庭湖在该河段出口入汇, 汇流区的水流掺混现象严重, 进一步增加了河段水流条件的复杂性, 使其成为长江流域最危险的河段之一^[1-5]。在洪水期, 船舶行驶至该河段易发生倾覆或搁浅, 严重威胁人的生命及财产安全, 影响到航运的未来发展^[6-8]。

国内外已有研究^[9-13]多关注于荆江与洞庭湖水系关系的变化, 较少关注熊城段水流特性。唐

峰等^[14]采用实体模型研究该河段的弯道水流汇流断面垂线平均流速横向分布, 但对于三维水流特性的揭示尚无相关研究。本文对洞庭湖不同入汇流量条件下荆江下游熊城矶河段水流结构进行研究, 以期对熊城段的航道布置及船舶航行提供参考, 具有十分重要的理论意义与实用价值。

1 河道概况

熊城段上起熊家洲、下至城陵矶, 全长约 40 km, 由熊家洲水道、八仙洲水道、观音洲水道

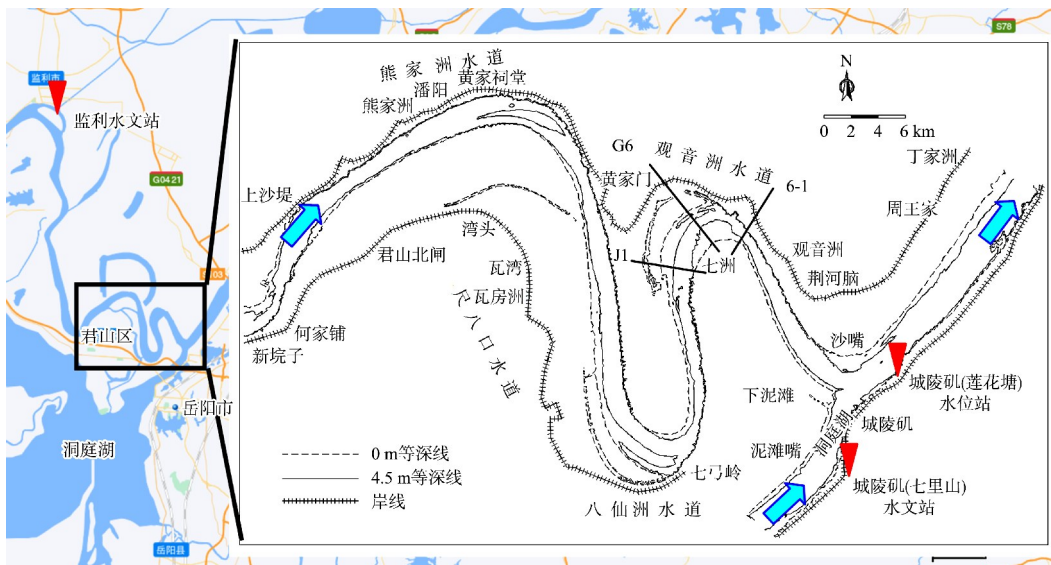
收稿日期: 2023-07-22

*基金项目: 长江航道局科技项目 (2022230001)

作者简介: 雷雪婷 (1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口、航道设计与研究。

3 个反向的高弯曲度的河弯和长顺直的尺八口水道组成, 其中八仙洲水道弯道曲率为 8.2, 最窄处河

宽仅 700 m, 观音洲水道弯道曲率为 4.02, 最窄处河宽 920 m, 见图 1。



注: 绘图基面为当地航行基准面。

图 1 熊城段平面位置及 2023 年 3 月地形

2 水文特性

熊城段上游 22 km 的监利水文站、洞庭湖出口城陵矶(七里山)水文站和下游距洞庭湖出口 29 km 的螺山水文站多年径流量统计资料见表 1^[15-16]。可以看出, 三峡工程蓄水运用后, 熊城段上游来流量增加约 5.7%, 洞庭湖入汇长江干线流量减少约 13.5%, 两流汇流后, 螺山总流量减少约 3.7%。

表 1 三峡水库蓄水前后研究河段主要水文站径流量
亿 m³

时间	监利站	螺山站	城陵矶(七里山)站
2002 年前	3 576	6 460	2 868
2003—2021 年年均	3 803	6 255	2 492
2019 年	3 942	6 768	2 873
2020 年	4 750	8 156	3 404
2021 年	4 228	6 850	2 670
2022 年	3 368	5 627	2 289

注: 监利站、螺山站、城陵矶(七里山)站 2002 年前的统计年份分别为 1951—2002 年、1954—2002 年、1956—2002 年。

各站水位-流量关系见图 2。可以看出, 监利、城陵矶(七里山)水文站水位-流量相关性差, 水位与流量呈现明显的多值关系, 同流量下水位变化很大, 体现了洞庭湖对长江干线水位的顶托影响, 螺山站水位-流量关系则相对较好。

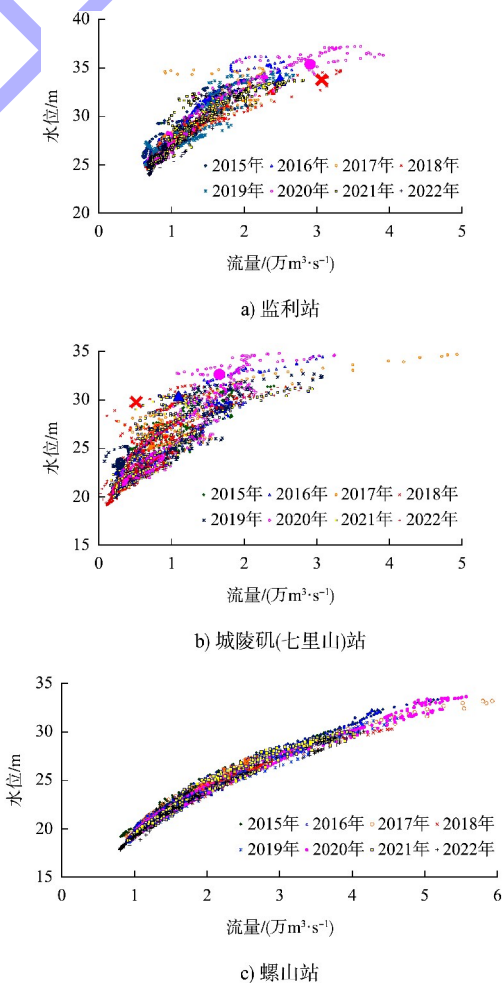


图 2 各水文站水位-流量关系

3 熊城段三维数学模型的建立与验证

3.1 基本控制方程

本文利用 Mike3 模型水力模块进行熊城段水流相关问题的模拟计算。该模块基于水流连续性方程及雷诺平均化的 Navier-Stokes 方程,并用 $k-\varepsilon$ (紊动动能-耗散率) 方程及 Smagorinsky 公式描述紊流影响,其基本公式如下。

水流连续性方程为:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_s \quad (1)$$

水流的动量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_i + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] &+ u_i S_s \end{aligned} \quad (2)$$

k 方程为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left[\nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \right. \\ &\left. c_{3\varepsilon} \beta g_i \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

Smagorinsky 方程为:

$$\nu_T = l^2 \sqrt{S_{ij} S_{ji}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中: g_i 为重力矢量, ρ 为水密度, P 为大气压强, t 为时间, l 为特征长度, c_s 为水的状态参数, u_i 、 u_j 分别为 x_i 、 x_j 方向的速度分量, $c_{1\varepsilon}$ 、 $c_{2\varepsilon}$ 、 $c_{3\varepsilon}$ 、 σ_T 、 σ_k 、 σ_ε 为特征值, Ω_{ij} 为克氏张量, S_s 为各点源汇项, S_{ij} 、 S_{ji} 为时均应变张量, ν_T 为紊动黏性系数, δ_{ij} 为克罗奈克函数, β 为容量扩散系数, ϕ 为浮力指标。

3.2 模型范围

模型上边界选取在熊家洲汉道上游 4 km 处,洞庭湖进口边界选取在出湖口 5 km 处,下边界距离洞庭湖出口下游约 9 km,模型范围如图 1 所示。采用 2019 年 2 月实测地形作为计算的初始地形,利用 2020-08-13—2020-08-16 的水文观测资料进行验证,典型断面结果见图 3。可以看出,断面水位最大误差为 0.048 m,垂线断面流速分布与实际流速分布接近,断面流量与实际断面流量误差小于 5%,精确度符合 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[17] 要求,可以利用本模型开展研究河段的水流运动规律研究。

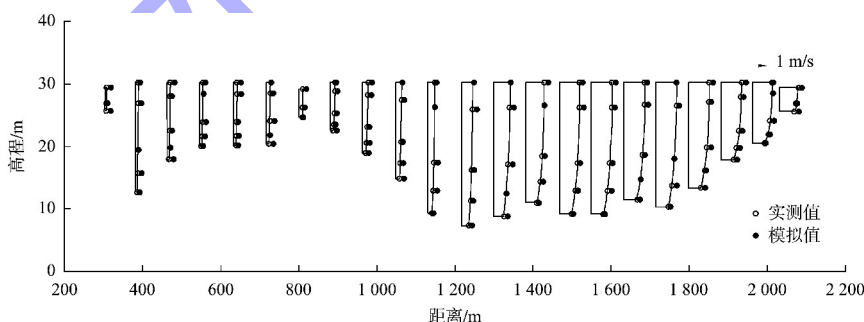


图3 G6断面流速验证结果

4 熊城段水流特性研究

4.1 模拟工况

近年来在熊城段曾发生 3 次船舶搁浅、沉没事故^[18]。从事故发生时干线和洞庭湖的水位-流量来看,主要发生在干线流量相对较大而同流量下水位较低、洞庭湖水位同流量下相对较高的时间段:上游监利站流量范围为 2.460 万~3.070 万 m^3/s ,其

对应水位为 33.60~35.39 m;城陵矶(七里山)站流量为 0.519 万~1.660 万 m^3/s ,其对应的水位范围为 29.71~32.56 m,图 2a)、b) 中加大的点即为 3 次事故时的水位-流量。

综合研究河段水位、流量历时,以及近年来船舶搁浅、沉没事故时水位-流量情况,上游洪季流量分别选取 2 万和 3 万 m^3/s 作为初始流量,洞

庭湖流量分别选取 0.5 万、1.0 万、1.5 万 m^3/s 作为洞庭湖出流流量, 模型出口水位根据螺山站水位流量曲线拟合后推算确定, 见表 2。

表 2 试验工况

工况	监利流量/ (万 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	城陵矶流量/ (万 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	螺山 水位/m
1	2.5	1.0	28.76
2	2.5	1.5	30.01
3	3.0	0.5	28.76
4	3.0	1.0	30.01
5	3.0	1.5	31.16

4.2 计算结果分析

4.2.1 平面流速特征

利用建立的三维水流数学模型对河段水流特性进行模拟, 表层和底层平面流速分布见图 4。平面流速主要特点为: 1) 因河道弯曲狭窄, 流向在河段内发生多次偏转。进弯前, 水动力轴线位于河流中心, 在弯顶处开始改变, 逐渐靠近凹岸, 并在出弯的颈口处完成改向。2) 因弯道边界形态复杂, 流速变化大。流速大小变化则由进弯前的增大, 到进弯后至弯顶处减小, 再从弯顶处至出弯口增大, 这一变化主要与弯道河宽从进弯至弯顶, 先从窄变宽; 而弯顶至出弯, 则从宽变窄的边界形态的改变相关。3) 受漫滩横流和弯道水流作用, 在弯道顶部和出弯靠凸岸处存在回流区, 如观音洲弯道顶部、七弓岭弯道出弯处(八姓洲一侧)、观音洲弯道出弯处(七姓洲一侧)以及荆江与洞庭湖出流汇流左岸(沙嘴附近)均出现较大回流区。回流区中心流速接近 0 m/s , 流态复杂, 回流区的存在将严重影响船舶的航行稳定性。

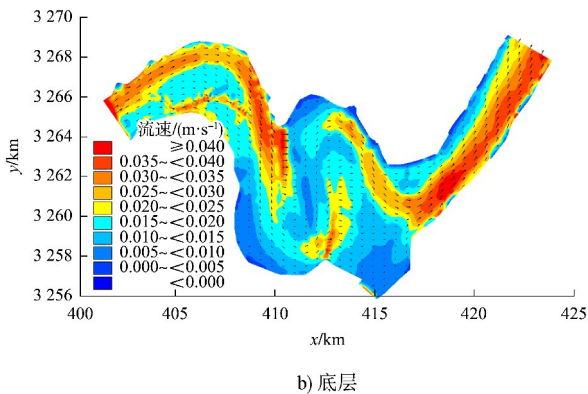
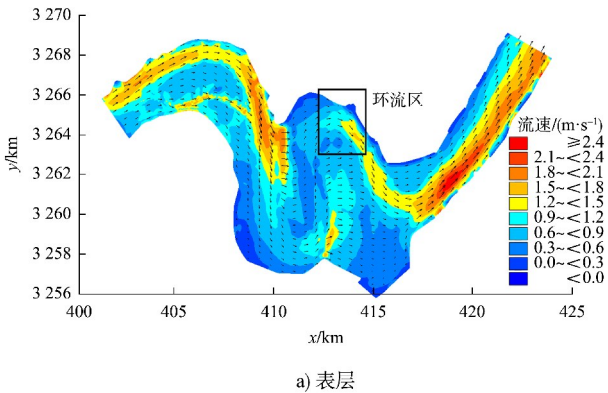


图 4 工况 3 的平面流速分布

4.2.2 垂向水流结构特征

洞庭湖因急弯段存在, 水流呈典型三维流动, 水流沿横向、纵向、垂向方向均在发生变化, 在弯顶段表层水体向凹岸流动、底层水体向凸岸流动, 存在 1~3 个环流, 结构十分复杂, 见图 5。

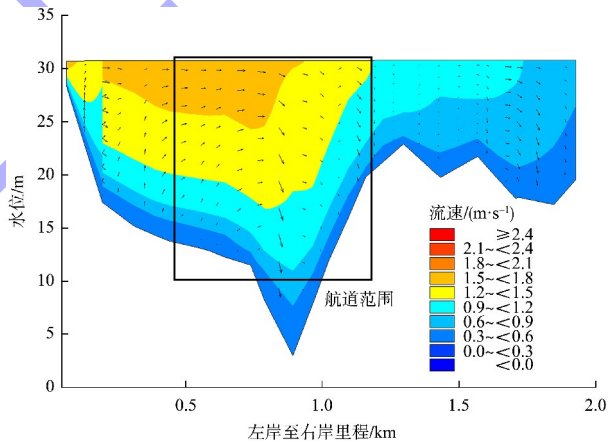


图 5 工况 3 的 G6 断面垂向流速分布云图

5 碍航水流特性分析

熊城段航道狭窄弯曲, 沿程水深变化大, 根据上述对熊城段三维水流结构的计算模拟和分析, 结合航道布置, 分析该河段碍航水流主要表现如下。

- 1) 因弯道曲率大, 在急弯段水流流向与航道交角大, 存在明显的横流, 对于顶流上行船舶和顺流下行船舶影响均较大。
- 2) 急弯段内表层和底层水流流速、流向均不一致, 存在弯道环流, 将造成船舶两侧所受水动力不同, 增加船舶航行的难度。

3) 因各急弯段间滩地不高, 在洪水期淹没, 将有部分水流漫滩后直接汇入下一个弯道, 进一步增加了回流、环流等, 对船舶航行不利。

4) 从熊城段近年来船舶发生搁浅、沉没事故的时间, 以及对河段三维水流结构特点的模拟及分析来看, 在干线流量 2.5 万~3.0 万 m^3/s , 同流量下干线水流相对较低而洞庭湖水位较高时, 易发生航行事故; 且因河道弯曲狭窄, 流速较小时段, 受干流漫滩、洞庭湖汇流影响, 河段内水流结构复杂, 也曾发生船舶事故, 航行船舶不可大意。

6 结论

1) 长江中游熊城段水位、流量呈明显的多值关系, 体现了洞庭湖对长江干线水位的顶托影响。

2) 通过数学模型对熊城段水流特性进行研究, 计算结果表明, 受河道弯曲狭窄、河中洲滩高度不高及洞庭湖入汇等影响, 熊城段三维水流结构特性明显, 表现为横流、环流和回流等特点。

3) 在干线流量 2.5 万~3.0 万 m^3/s 且洞庭湖水位偏高时, 易发生船舶事故, 要注意提醒船舶谨慎航行; 其他时段, 航道内水流流速不大, 但因水流结构复杂, 对过往船舶的航行影响仍有一定影响, 不可大意。

参考文献:

- [1] 徐涛, 王敏, 周曼, 等. 三峡水库不同调控方式对坝下游河道演变影响[J]. 人民长江, 2016, 47(24): 6-11.
- [2] 袁帅. 下荆江七弓岭弯道崩岸与颈口裁弯水动力模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [3] LIU T. Internal logic of water level and shipping logistics system based on system dynamics [C]//ICMMCE. Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering. Dordrecht: Atlantis Press, 2016: 1337-1343.
- [4] 刘玉, 李景保, 李欢, 等. 三峡水库调洪调度对江湖汇流区洪水相互顶托的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 114-121, 129.
- [5] 渠庚, 郭小虎, 朱勇辉, 等. 三峡工程运用后荆江与洞庭湖关系变化分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 163-172.
- [6] 交通运输部. 交通运输部关于推进长江航运高质量发展的意见[J]. 集装箱化, 2019, 30(7): 26-30.
- [7] 唐冠军. 以党的十八大精神为指导 在新的起点上加快推进长江航运科学发展[J]. 交通科技, 2013(1): 161-164.
- [8] XU K J, LIU Q, XU L. Research on continuous traffic safety evaluation of Yangtze River shipping[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 442: 617-628.
- [9] 付湘, 赵秋湘, 孙昭华. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1713-1725.
- [10] 余康. 荆江-洞庭湖系统水动力特征与鱼卵漂流规律模拟[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [11] 刘旻, 张可能, 戴明龙, 等. 荆江—洞庭湖河网一二维嵌套水动力学模型研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(5): 576-583.
- [12] 谢作涛, 方红卫, 仲志余. 荆江-洞庭湖水沙数学模型研究现状[J]. 泥沙研究, 2009(5): 76-80. 李琳琳. 荆江-洞庭湖耦合系统水动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [13] 李琳琳. 荆江-洞庭湖耦合系统水动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [14] 唐峰, 李发政, 渠庚, 等. 长江城陵矶汇流河段水流运动特性试验研究[J]. 人民长江, 2011, 42(7): 43-46.
- [15] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2023.
- [16] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2020.
- [17] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [18] 武汉大学. 长江中游荆江河段典型弯道水流三维结构及其对船舶航行安全的影响研究[R]. 武汉: 武汉大学, 2021.

(本文编辑 王璁)