



多因子影响下的钱塘江通航保证率研究*

郑国诞, 刘 焯, 唐子文, 胡成飞, 樊立东, 杨元平
(浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020)

摘要: 钱塘江闻堰—八堡段为钱塘江河流河口段, 河床冲淤剧烈, 水深受地形影响变化较大, 直接影响船舶通航, 此外受上游径流及涌潮影响, 航道通航保证率计算较为复杂。为此, 利用2007年以来历年的水下地形, 综合考虑涌潮、径流、水深等因子对钱塘江闻堰—八堡段的实际通航保证率进行分析。结果表明, 2007—2020年满足3.8 m水深条件的通航保证率为60.1%~79.8%, 满足3.5 m水深条件的通航保证率为71.9%~87.5%, 满足3.2 m水深条件的通航保证率为81.1%~97.0%, 与实际较为吻合。研究方法对河床冲淤变幅较大且动力条件较为复杂的河口区通航保证率分析具有参考意义。

关键词: 钱塘江航道; 涌潮; 径流; 水深; 通航保证率

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0105-06

Navigation guarantee rate of Qiantang River under influence of multiple factors

ZHENG Guodan, LIU Ye, TANG Ziwen, HU Chengfei, FAN Lidong, YANG Yuanping

(Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary(Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China)

Abstract: The section from Wenyan to Babao is located at the mouth of Qiantang River, the riverbed undergoes severe erosion and siltation, and the water depth is greatly affected by the terrain, which directly affects the navigation of ships. In addition, the calculation of navigation guarantee is complicated due to the influence of upstream runoff and tidal bore. Therefore, this paper analyzes the actual navigation guarantee rate of the Wenyan to Babao section of Qiantang River using the underwater terrain of various years since 2007, taking into account factors such as tidal bore, runoff, and water depth. The results show that during the period from 2007 to 2020, the navigation guarantee rates under the water depth of 3.8 m, 3.5 m and 3.2 m are 60.1%–79.8%, 71.9%–87.5%, and 81.1%–97.0%, respectively, which is consistent with the reality. The research method is of reference significance to the analysis of navigation guarantee rate in estuarine areas with large changes in riverbed erosion and sedimentation, and complex dynamic conditions.

Keywords: Qiantang River channel; tidal bore; runoff; depth of water; guarantee rate of navigation

航道年通航保证率指全年航道实际通航时间扣除不可抗力因素导致停航时间后的全年总时间占比^[1], 以百分率表示, 它是航道设计和经济效益评估的重要指标, 一般是通过全年的航道水位位于设计通航高低水位区间的天数占全年通航天数并扣除大雾、大风、暴雨等超过安全通航标准的时

间占比进行确定, 该方法一般适用于河床变幅较小的水域, 其通航水深变化仅考虑水位变化即可。

钱塘江航道(杭州段)下游起自八堡船闸, 上游至梅城三江口后分为两支, 南支终于兰江与兰溪分界的将军岩, 西支终于建德下施线十里埠。闻堰以上河床变幅有限, 水深条件较好; 闻堰至

收稿日期: 2024-03-05

*基金项目: 浙江省水利厅科技计划重大项目(RA2210); 浙江省自然科学基金项目(LY22E090007)

作者简介: 郑国诞(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水动力数值模拟、物模模型试验研究等。

通讯作者: 唐子文(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为河床演变、防灾减灾等。E-mail: tangzw2000@foxmail.com

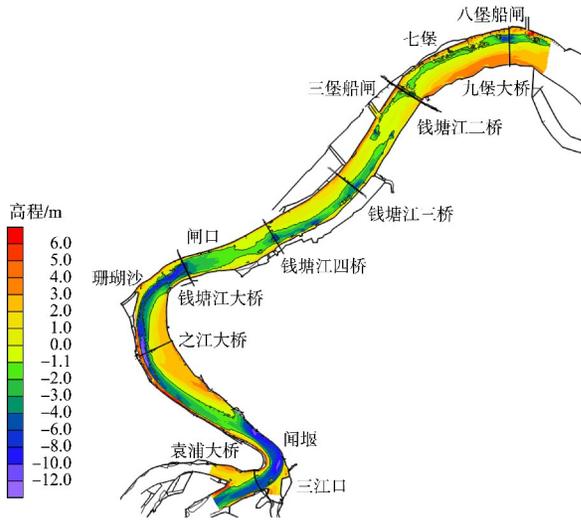
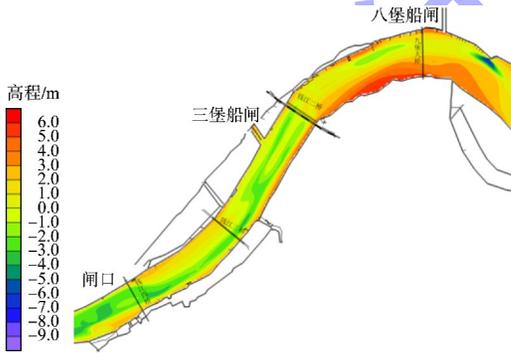
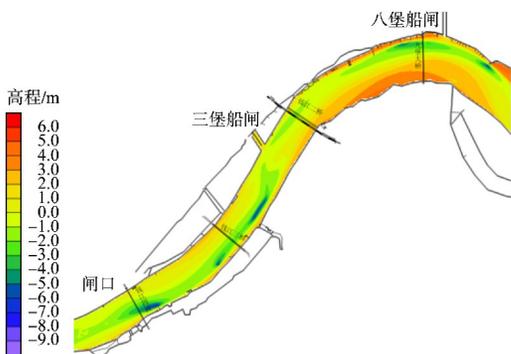


图 2 2022 年 6 月闻堰—八堡船闸段河势

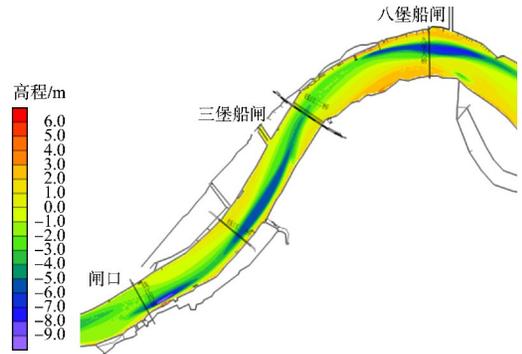
钱塘江二桥和三桥河段为七格弯道和七甲弯道过渡段, 河势多变, 落潮流经上游南岸主槽后北偏, 在二桥一带落潮主槽处于河道偏北的中槽, 涨潮流经下游北岸主槽上溯, 贴北岸上行, 在二桥一带涨潮主槽处于河道北槽, 受径、潮流势力对比的影响, 主槽变幅较大, 主要表现为分汊、北槽、中槽 3 种河势(图 3), 以上河势造就了钱塘江地形复杂多变的特征。



a) 2007年7月分汊河势



b) 2022年4月北槽河势



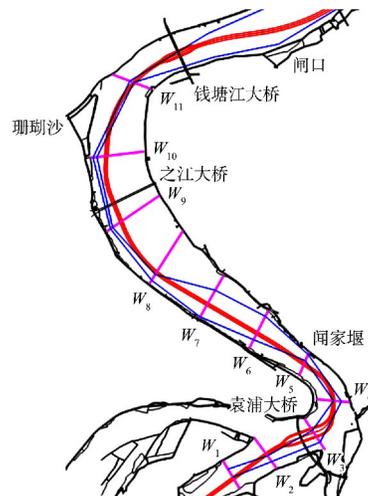
c) 2016年7月中槽河势

图 3 二桥一带主槽河势

1.2 主槽摆动分析

为了获得更好的天然水深, 航道选线一般结合主槽分布, 避免大规模疏浚。闻堰—八堡段受径流和潮汐共同作用, 动力条件多变, 主槽摆动频繁, 利用多年地形对闻堰—闸口段以及闸口—八堡船闸段的主槽摆动规律进行分析。

如图 4 所示, 受闻堰弯道和珊瑚沙弯道控制, 闻堰—闸口段主槽分布稳定, 通航水深条件好, 仅弯道过渡段 W_6 — W_7 断面受径流丰枯变化影响, 深泓摆动幅度较大, 水深较浅, 个别时期可能出现碍航情况。闸口—八堡船闸段深泓年内变化呈洪冲潮淤态势, 年内深泓摆动频繁, 弯道过渡段深泓位置变幅较大, 弯道顶部深泓较为稳定地贴近凹岸, 受径、潮动力条件变化影响, 弯道过渡段主槽摆动范围更大, 若航线与主槽位置偏离较远, 则可能出现碍航情况。



a) 闻堰—闸口段

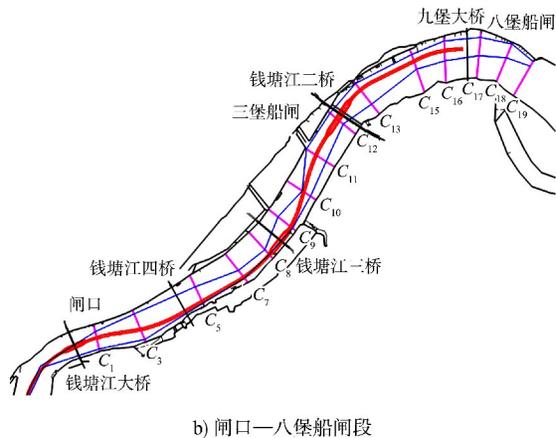


图4 闻堰—八堡船闸深泓摆动

总体而言,闻堰—闸口段主槽分布稳定,闸口—八堡船闸段主槽摆动范围大,对于航线选取较为不利,固定航线条件下容易出现碍航情况。

2 水深条件分析

根据前期对钱塘江通航水位的研究成果^[9],航段低水位可按八堡船闸设计通航低水位 2.7 m 控制。本文以 3.8 m 水深为例,对 2007 年以后地形-1.1 m 以下主槽保证率进行分析,即地形低于-1.1 m 时可满足设计低水位下通航水深 3.8 m 的要求,结果见图 5。由图可知,闸口下游段航段水深条件保证率在 30%~70%;钱塘江四桥—三桥间整体水深条件较好,钱塘江四桥下游 2.5 km 范围内航道水深保证率在 90% 以上,钱塘江三桥上游 0.6~1.7 km 范围单线航道水深保证率在 60%~90%,跨钱塘江三桥航道水深条件基本满足通航要求;钱塘江三桥—二桥中间段(3 km)水深条件一般,局部航段水深保证率仅 20%,其余航段水深保证率达 70%~90% 以上;钱塘江二桥—九堡大桥段水深保证率在 30%~80%,中间局部航段(1.3 km)保证率在 30%~40%,其余大部分航道水深保证率在 50%~60%。

总体而言,闸口—八堡船闸段的上游段即闸口—钱塘江三桥下游 1 km 间航道的总体水深保证率比较好,碍航位置出现于闸口—钱塘江四桥局部河道展宽段;受钱塘江纵向沙坎影响,下游段的钱江三桥下游 1 km 至九堡大桥间的航道水深条件变差,大部分航段保证率在 50%~70%,其中三

堡船闸外侧和二桥下游 1.4 km 航段的水深条件较差,保证率在 20%~40%。年内梅汛后 7 月测次保证率最好,梅汛前 4 月测次接近平均水准,枯水大潮汛后 11 月测次保证率最差。

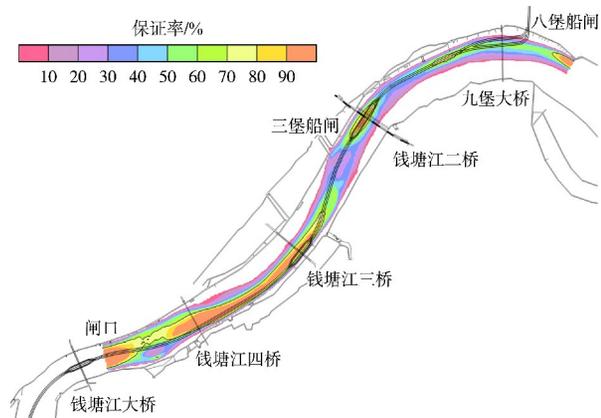


图5 2007—2022年-1.1 m以下主槽保证率分布

3 设计航路通航保证率分析

由以上分析可知,闸口以下保证率相对较低,局部河段甚至低于 40%,若仅根据低水位控制,研究航段的整体保证率远低于预期。综合考虑涌潮、径流并以实际水深进行通航条件的判断,得出不同水深要求下的通航保证率。

3.1 涌潮对通航的影响分析

涌潮是钱塘江河口由于潮波传播过程中剧烈变形而形成的特殊水力现象。钱塘江河口涌潮在激浦和尖山附近形成,上溯过程中逐渐增大。最大涌潮高度出现在丁桥—大缺口一带,可达 3 m 以上,之后,向上游推进过程中强度减弱。从大缺口—仓前附近,属于涌潮强度平稳衰减的地段,而从七堡再往上游,涌潮高度接近于潮差,水位曲线出现双峰现象,与一般潮位曲线大相径庭,这主要是由于七堡以上涌潮从涨潮波的前峰演变成整个涨潮波的波面所致。从闸口再往上至富阳一带,涌潮已不再存在。

当七堡潮差大于 1.0 m 时,船舶航行及进出船闸必将受到涌潮的影响。钱塘江涌潮在强潮时可上溯至闻家堰,八堡船闸—闻家堰约 30 km,涌潮传播时间为 70~80 min。为了不使船只在闻家堰—八堡船闸航段内遇上涌潮,根据三堡船闸 20 多年的防涌潮运行经验和操作规程,对涌潮涨潮前后若干小时船舶进出八堡船闸口门及在钱塘江上航行进行限制^[10]。

判别方法:根据七堡站 2007—2020 年逐潮高、低潮位,当涨潮潮差超过 1 m 时,则低潮位潮前 0.5 h 和潮后 1.5 h 时间段内为禁航时段。经试算,统计序列采用 10 min 间隔较合适,如 01:25:00 时刻为低潮位,则 00:55:00—02:55:00 之间整 10 min 时刻 01:00:00、01:10:00、01:20:00、…、02:50:00 判定为不可通航。

3.2 径流对通航的影响分析

根据最新的《杭州市港航行政执法队“三防”应急预案》^[11]的通知,当富春江水库大坝泄洪流量超过 6 000 m³/s 并有增大趋势时,钱塘江沿线各大队根据辖区流速、水位等实际情况,对客渡船采取停航的管制措施,其他船舶视情停航,港口码头视情停止船舶装货作业等。本次保证率计算时考虑富春江电站出库流量超过 6 000 m³/s 时,本航段不可通航。

根据 2007—2020 年电站逐时流量资料,同样将其插值为整 10 min 时刻序列,得出径流超过 6 000 m³/s 时刻的占比在 0%~2.3%。

3.3 水深对通航的影响分析

采用 2007—2020 年 4、7、11 月测次地形资料和 2007—2020 年七堡站逐时潮位资料分析推荐航路水深变化情况。1) 根据地形资料和航路平面布

置方案,通过线性插值方式得到航道沿线高程变化,以高程最高点作为碍航点高程;2) 以梅汛前 4 月地形表征 2—5 月地形,梅汛后 7 月地形表征 6—9 月地形,枯水大潮汛后 11 月表征 10—次年 1 月地形;3) 基于碍航点高程和七堡站逐时潮位变化统计分析 2007—2020 年间任意时期推荐航路的水深对通航的影响。4) 为与涌潮对通航的影响序列保持一致,将 2007—2020 年逐时的水深变化插值成整 10 min 时刻序列。

3.4 不同水深通航保证率分析

2007—2020 年满足 3.8、3.5 和 3.2 m 水深要求的平均保证率分别为 79.0%、89.4% 和 95.8%,见表 1。在航路 3.8 m 水深限制条件下的通航保证率为 65.0%~87.6%,叠加涌潮影响后保证率平均下降 5.8%,为 61.4%~81.5%;再加上径流影响后,通航保证率继续下降约 1.1%,最终为 60.1%~79.8%。在航路 3.5 m 水深限制条件下考虑水深、涌潮以及径流影响下的通航保证率为 71.9%~87.5%,涌潮对其保证率的影响平均约为 6%,在此基础上径流影响约为 1%。在航路 3.2 m 水深限制条件下考虑水深、涌潮以及径流影响下的通航保证率为 81.1%~97.0%,涌潮对其保证率的影响平均约为 7.1%,在此基础上径流影响约为 1.2%。

表 1 不同水深要求的通航保证率计算成果

年份	丰枯特征	3.8 m 水深通航保证率/%			3.5 m 水深通航保证率/%			3.2 m 水深通航保证率/%		
		水深	水深+涌潮	水深+涌潮+径流	水深	水深+涌潮	水深+涌潮+径流	水深	水深+涌潮	水深+涌潮+径流
2007	特枯年	65.0	63.5	62.9	87.3	85.8	85.2	99.1	97.6	97.0
2008	枯水年	73.8	71.4	71.0	88.4	85.9	85.5	97.1	94.6	94.2
2009	枯水年	75.6	73.3	73.1	90.1	87.8	87.5	98.5	96.2	95.9
2010	丰水年	86.2	76.8	75.0	93.3	83.5	81.7	98.0	88.1	86.3
2011	平水年	69.4	61.4	60.1	81.6	73.3	71.9	92.4	84.0	82.6
2012	丰水年	78.5	69.0	67.9	85.3	75.5	74.3	92.4	82.3	81.1
2013	平水年	77.4	69.5	69.4	88.6	80.5	80.4	94.5	86.4	86.3
2014	丰水年	79.6	74.6	73.1	89.5	84.5	82.9	96.1	91.0	89.5
2015	丰水年	82.9	76.5	75.3	92.4	85.8	84.6	97.4	90.8	89.6
2016	丰水年	87.6	78.5	77.6	93.9	84.8	83.8	98.8	89.7	88.7
2017	平水年	80.3	74.2	72.8	87.9	81.8	80.3	94.4	88.2	86.7
2018	枯水年	76.1	73.5	73.5	89.4	86.8	86.8	97.0	94.4	94.4
2019	丰水年	87.3	81.5	79.8	92.1	86.3	84.6	95.5	89.7	88.0
2020	丰水年	86.9	80.7	78.5	92.3	86.1	83.9	97.6	91.3	89.1
平均		79.0	73.2	72.1	89.4	83.4	82.4	95.8	88.7	87.5

注:通航保证率计算结果未考虑大雾、大风等气象因素。

4 结论

1) 钱塘江航道闻堰—闸口段主槽相对稳定,通航水深条件较好,仅在弯道过渡段会出现个别碍航点;闸口—八堡船闸段深泓摆动频繁,且较易出现分汊河势,通航水深条件相对较差。

2) 如以通航水深 3.8 m 作为控制条件,采用通航低水位 2.7 m 作为控制水位,全线航道-1.1 m 以下的保证率相对较差,局部航道保证率仅 20%。总体上梅汛后 7 月测次保证率最好,梅汛前 4 月测次接近平均水准,枯水大潮汛后 11 月测次保证率最差,因此仅以水位作为通航保证率的控制因子,会大大降低实际通航保证率。

3) 采用七堡站逐时潮位资料,并同时考虑涌潮和径流的影响,利用 4、7 和 11 月的地形进行推荐航路通航保证率分析,2007—2020 年满足 3.8 m 水深条件的通航保证率为 60.1%~79.8%,满足 3.5 m 水深条件的通航保证率为 71.9%~87.5%,满足 3.2 m 水深条件的通航保证率为 81.1%~97.0%,与实际较为符合。

4) 在地形变幅较大、水动力条件较为复杂水域,其通航保证率仅通过实际水位与设计通航低水位进行比较确定,会大大降低实际的通航保证率,应通过实际通航水深及相关动力条件组合分析确定。

参考文献:

[1] 王昆. 浅谈航道年通航保证率[J]. 中国水运(下半月),

2019, 19(10): 27-28.

[2] 潘存鸿, 韩曾萃. 钱塘江河口保护与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

[3] 熊绍隆. 潮汐河口河床演变与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.

[4] 韩曾萃. 钱塘江河口治理开发[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[5] 金国强, 史英标, 李浙江, 等. 京杭运河沟通钱塘江八堡船闸口门综合整治方案[J]. 水运工程, 2022(12): 98-105.

[6] 王卫标, 曾剑, 谢东风, 等. 一种基于实际水深的通航保证率计算方法: 以钱塘江河口七堡段为例[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 1-4, 22.

[7] 谢玉杰, 余祥, 李家世, 等. 嘉陵江亭子口枢纽变动回水区通航流量及保证率分析[J]. 水运工程, 2021(1): 174-177, 201.

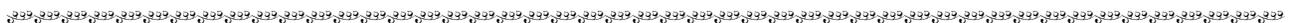
[8] 张华, 黄志扬, 肖烈兵, 等. 感潮河段深水航道乘潮保证率及疏浚维护[J]. 水运工程, 2015(4): 8-12.

[9] 浙江数智交院科技股份有限公司. 钱塘江中游航道水文研究项目[R]. 杭州: 浙江数智交院科技股份有限公司, 2021.

[10] 浙江省水利河口研究院. 京杭运河浙江段三级航道整治工程八堡船闸口门治理方案深化研究[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2016.

[11] 杭州市港航行政执法队. 关于印发《杭州市港航行政执法队“三防”应急预案》的通知[A]. 杭州: 杭州市港航行政执法队, 2020.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 104 页)

[9] KIM D H, WOO J H, YOON H S, et al. Efficiency, tranquillity and stability indices to evaluate performance in the artificial reef wake region [J]. Ocean engineering, 2016(1): 253-261.

[10] XUE D W, WANG C Y, HUANG T, et al. Flow field effects and physical stability of pyramidal artificial reef with different slope angles[J]. Ocean engineering, 2023, 283: 1-11.

[11] LI J, ZHENG Y X, GONG P H, et al. Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs [J]. Ocean

engineering, 2017, 134: 96-104.

[12] 黄远东, 付登枫, 何文荣. 人工鱼礁开口比对流场效应影响的三维数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 39-43.

[13] 兰孝政, 万荣, 唐衍力, 等. 圆台型人工鱼礁单体流场效应的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(8): 47-53.

[14] CHEN Q W, ZHANG J Y, CHEN Y C, et al. Inducing flow velocities to manage fish reproduction in regulated rivers[J]. Engineering, 2021, 7(2): 105-122.

(本文编辑 王璵)