



长江城陵矶—武汉河段航道最大稳定航深研究 *

单敏尔¹, 雷雪婷¹, 刘 鑫², 芦 冉²

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040;

2. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 为探明城陵矶—武汉河段的航道水深资源, 根据每一水道的河相关系参数对研究河段进行区段划分, 并采用稳定航深估算法对不同区段的航道最大稳定航深进行计算, 进而确定研究河段的航道最大水深。结果表明: 研究河段依据水道河相关系参数变化规律, 可自上游至下游分为仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道区段; 这 3 个区段在 98% 设计通航保证率流量、航宽 200 m 下的航道最大稳定水深自上而下分别为 6.133、11.268 和 6.433 m, 故城陵矶—武汉河段在 200 m 规划航宽下基于自然禀赋的最大稳定航深为 6.1 m。

关键词: 城陵矶—武汉河段; 航道潜力; 最大稳定航深; 稳定航深估算法

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0094-05

Maximum stable channel depth of Chenglingji to Wuhan section of the Yangtze River

SHAN Min'er¹, LEI Xueting¹, LIU Xin², LU Ran²

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

2. Changjiang Waterway Survey and Design Institute (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: To explore the water depth resources of the channel in Chenglingji to Wuhan reach, the study section is divided according to the river phase relationship parameters of each channel. The maximum stable channel depths of the channels in different sections are calculated by the stable channel depth estimation method to determine the maximum water depth of the channel in the study section. The results show that the study section is based on the change rule of the river phase relationship parameters of the channel, it can be divided into three sections from upstream to downstream, such as Xianfeng waterway to Xindi waterway, Shitouguan waterway to Paizhou waterway, and Shuihongkou waterway to Baishazhou waterway. The maximum stable water depths of the channels under 98% design navigation guarantee rate and 200 m navigation width of the three sections are 6.133 m, 11.268 m and 6.433 m respectively from upstream to downstream, so the maximum stable channel depth of Chenglingji to Wuhan reach under 200m planned channel width is 6.1m.

Keywords: Chenglingji to Wuhan reach; channel potential; maximum stable navigation depth; stable depth estimation method

近年来, 随着长江中游经济不断发展, 对城陵矶—武汉河段的航道潜力开发提出了新的要求^[1-2]。水深是制约长江中游航道尺度提升的关键影响因素, 而探明水深潜力则是充分利用航道水

深资源的前提条件^[3-4], 因此亟需对城陵矶—武汉航道水深资源潜力展开研究。目前对于航道水深潜力的估算多采用稳定航深估算法^[5-6], 该方法的本质是利用河相关系进行最大稳定航深估算^[7]。

收稿日期: 2023-02-24

*基金项目: 长江航道局科研项目(2022230001); 长江航道规划设计研究院科研项目(2022-L-02)

作者简介: 单敏尔 (1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事航道规划、设计及研究。

稳定航深法在西江^[8]、岷江^[9]、长江上游^[10-12]、长江下游^[13]等流域已有应用, 但其在长江中游的应用尚缺乏足够的经验; 另一方面前人在采用稳定航深法计算航道最大稳定航深时, 多是对研究区域直接采用稳定航深法进行计算, 但当所研究河段较长, 河段的不同区域可能会存在明显差异的河相关系, 若未对河段进行有效划分将会导致稳定航深法估算存在误差较大的问题。

基于以上现有研究中存在的问题, 本文基于长江城陵矶—武汉河段实测水文地形资料, 以水道为单位对城武段河相关系进行分析, 并利用河相关系参数对研究河段进行区段划分, 采用稳定航深估算法确定城陵矶—武汉河段各区段基于自然禀赋在中游 200 m 规划航宽、98%通航保证率流量下的最大稳定航深, 可为城陵矶—武汉河段后续规划开发提供一定参考和支撑。

1 研究河段概况及数据来源

1.1 研究河段概况

长江中游城陵矶—武汉河段上起岳阳城陵矶, 下迄武汉长江大桥^[14], 属于平原河段, 全长 227.5 km, 共计 22 个水道。该河段主要有单一顺直、单一弯曲和顺直分汊等 3 种平面形态^[15], 河段入口和出口分别有洞庭湖和汉江汇入, 城陵矶—武汉河段内主要有城陵矶、螺山、石矶头、汉口等水位站或水文站^[16]。

1.2 数据来源

城陵矶—武汉河段枯水平均比降由该河段的设计最低通航水位推求得到, 为 0.021‰~0.027‰, 河床糙率 n 取值范围为 0.020~0.021, 计算河宽采用长江中游规划航宽 200 m^[17]。螺山站位于城陵矶—武汉河段的区间内, 在洞庭湖和汉江汇处之间, 故选取螺山站作为研究河段的代表性水文站, 在螺山站 98% 通航保证率流量即 $7711 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为河段的枯水期特征流量, 再由该站水位-流量关系确定特征流量下的特征水位, 并由设计最低通航水位插值得到各水道在特征流量下的水位。选取近期 2020 年 3 月枯水期地形作为稳定航深计

算的基准地形进行各水道的河相关系参数计算, 选取如图 1 所示城陵矶—武汉河段区间优良河段中的 243 个断面(河道形态顺直或微弯, 多年冲淤变化不大)作为研究河段稳定航深潜力计算的优良断面。

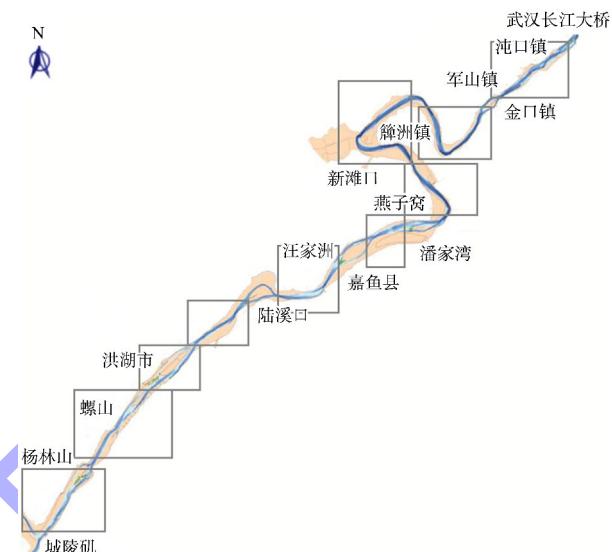


图 1 城陵矶—武汉河段优良河段分布

2 研究方法

本文以城陵矶—武汉河段每一水道为单位(不含武桥水道), 由河相关系参数划分该河段的不同河相关系区段, 进而采用稳定航深估算法计算城陵矶—武汉河段及其所划分每一区段的航道最大稳定航深。稳定航深估算法基于优良河段断面形态应当是航道整治后理想上最稳定断面形态的这一认识, 故其基本原理是假定在航道整治工程实施后, 全河段的断面形态同整治前的优良断面形态相似, 因此整治后河段也应该具有与优良河段断面相类似的河相关系, 从而由河相关系确定某一特征流量下的该河段基于自然禀赋的最大稳定航深, 稳定航深估算法计算过程如下。

假定某一河段航道整治前后, 河道断面通过的流量 Q 、河床糙率 n 及平均水面比降 J 等均保持不变, 由水流连续方程和曼宁公式联立可得:

$$Q = \frac{1}{n} B H^{5/3} J^{1/2} \quad (1)$$

由稳定航深法原理, 假定在航道整治工程实施后,

全河段的断面形态同整治前的优良断面形态相似，则某一特征流量下的河相关系可表达为：

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = \alpha H^\beta \quad (2)$$

将式(1)与(2)联立，则可得断面平均水深 H 的计算公式：

$$H = \left(\frac{nQ}{\alpha^2 J^{1/2}} \right)^{\frac{1}{2\beta+11/3}} \quad (3)$$

断面平均水深 H 与稳定航道水深 h 的线性关系为：

$$H = \eta h \quad (4)$$

将式(3)与(4)联立可推得河段在航道整治后所能达到的最大稳定航深 h 的计算公式：

$$h = \frac{H}{\eta} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{nQ}{\alpha^2 J^{1/2}} \right)^{\frac{1}{2\beta+11/3}} \quad (5)$$

式中： Q 为流量， m^3/s ； h 为最大稳定航道水深， m ； B 为河宽， m ； H 为断面平均水深， m ； α 、 β 为河相关系参数，其中 α 为河相系数， β 为河相指数； η 为水深修正系数。

3 分析过程与结果

3.1 城陵矶—武汉河段的研究区段划分

为对研究河段枯水期的稳定航深潜力进行估算，同时保证所选取断面的代表性和全面性，叠加城武段各水道不同年份枯水期地形，以水道为单位按照 500 m 间隔对每一水道横断面进行截取，将不同年份各个水道的横断面对比后选取断面形态变化不显著的断面作为优良河段断面。之后选取近期 2020 年 3 月枯水期地形作为稳定航深计算的基准地形进行各水道的河相关系参数计算。基于以上优良河段断面选取方法，共选取 21 个水道的 243 个断面，分别统计各断面在 98% 设计通航保证率流量下的 H 和 B ，根据式(3)点绘 $H-\sqrt{B}/H$ 曲线并由幂函数拟合，由此确定各水道断面河相关系参数 α 、 β ，结果见表 1。

表 1 城陵矶—武汉河段各水道河相系数参数和优良断面数量

序号	水道名称	河相关系参数特征值		优良断面数量
		α	β	
1	仙峰	74.977	-1.346	6
2	道人矶	50.069	-1.152	5
3	杨林岩	77.999	-1.428	9
4	螺山	85.913	-1.442	11
5	界牌	101.680	-1.501	13
6	新堤	445.990	-2.115	6
7	石头关	71.512	-1.316	9
8	陆溪口	41.745	-1.243	23
9	龙口	80.486	-1.363	21
10	嘉鱼	无有效值	无有效值	0
11	王家渡	87.911	-1.401	10
12	燕子窝	无有效值	无有效值	0
13	汉金关	73.414	-1.323	7
14	花口	88.672	-1.409	15
15	簰洲	81.167	-1.369	14
16	水洪口	119.530	-1.531	17
17	邓家口	84.797	-1.352	5
18	煤炭洲	81.176	-1.367	20
19	金口	63.454	-1.271	22
20	沌口	63.952	-1.234	22
21	白沙洲	99.567	-1.457	8

因 α 、 β 由式(2)率定得到，故河相关系参数可在一定程度上反映各水道的河相关系变化规律，将各水道的河相系数 α 和河相指数 β 依据水道在城陵矶—武汉河段中所处位置依次绘制在同一图中，结果如图 2 所示。

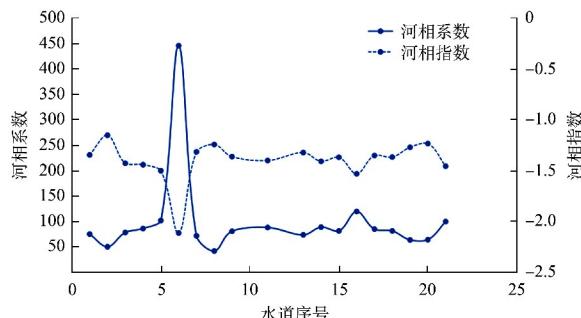


图 2 城陵矶—武汉河段各水道河相系数和河相指数分布

结果表明，河相指数与河相系数存在一定的负相关关系，即河相系数增大，则河相指数减小，而河相系数减小，则河相指数增大。同时河相系数与河相指数均存在局部区域的极大值或极小值，

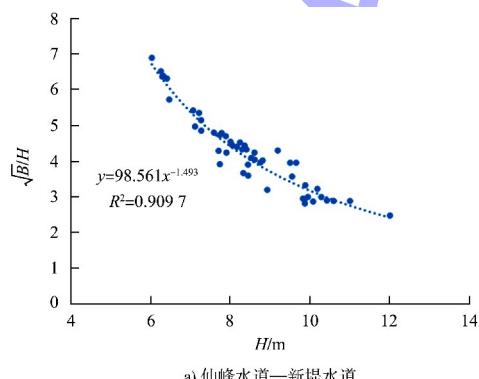
在城陵矶—武汉研究河段内, 新堤水道和水洪口水道的河相系数是所有水道中的局部区域极大值点, 同时它们的河相指数也是所有水道中的局部区域极小值点, 因河相系数与河相指数同优良河段河相关系有较为紧密的联系, 故以新堤水道和水洪口水道为界, 将城陵矶—武汉河段划分为 3 段, 自上游至下游依次为仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道。

3.2 各研究区段的河相参数和航道水深关系计算

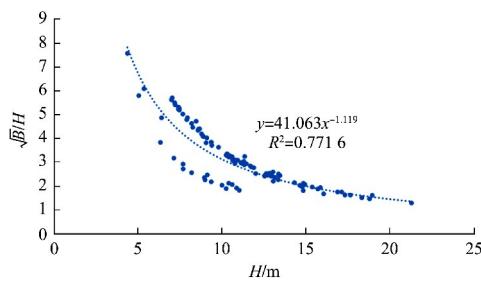
3.2.1 各区段河相参数计算

按照 3.1 节的区段划分, 分别将仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道区段的优良河段断面进行 98% 通航保证率流量下的河相关系参数拟合计算, 率定得到各区段的河相系数 α 和河相指数 β , 分别绘制 3 个区段的断面河相关系如图 3 所示。

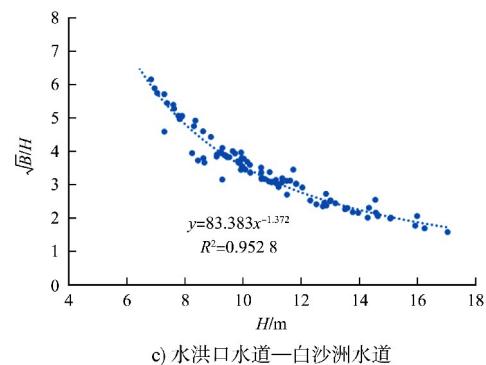
拟合结果表明, 城陵矶—武汉河段各区段在 98% 设计通航保证率流量下的断面平均水深 H 与河相表达式 \sqrt{B}/H 之间存在较好的幂函数相关性, 故由该幂函数拟合得到的河相系数 α 和河相指数 β 能较好地反映每一河段的断面河相关系。



a) 仙峰水道—新堤水道



b) 石头关水道—簰洲水道



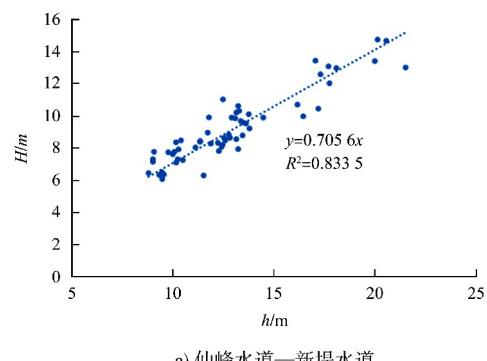
c) 水洪口水道—白沙洲水道

图 3 3 个区段断面河相关系

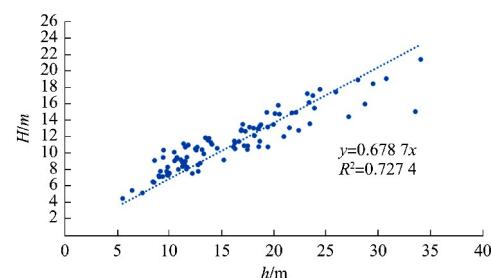
3.2.2 航道水深关系计算

统计城陵矶—武汉河段各区段在 98% 设计通航保证率流量下的断面平均水深 H 和拟定航宽 200 m (长江中游规划航宽) 时对应的航道边缘水深 h 值, h 是通过对每一断面在拟定航宽下的航道水深进行量取得到。点绘 $H-h$ 关系, 并由线性拟合分别得到仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道的水深修正系数 η , 如图 4 所示。

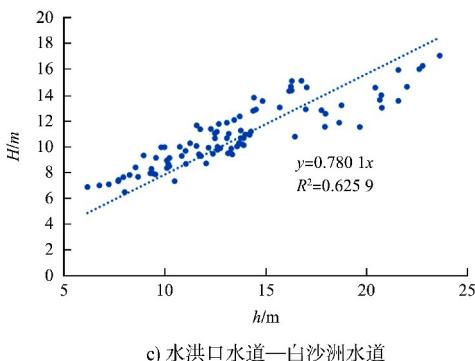
结果表明, 城陵矶—武汉河段的断面平均水深 H 与航道边缘水深 h 存在良好的相关性, η 可较好地反映城陵矶—武汉河段的航道水深关系, 可以作为该河段各区段稳定航深计算的依据。



a) 仙峰水道—新堤水道



b) 石头关水道—簰洲水道

图 4 3 个区段断面 H - h 拟合结果

3.3 研究河段的最大稳定航深计算结果

采用 1.2 节的枯水平均比降、河床糙率、河宽、98% 设计通航保证率时的流量数据, 稳定航深法计算所需的 α 、 β 、 η 数据均已由 3.2.1 和 3.2.2 节计算得到, 利用式(5)计算得到仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道的最大稳定航深分别为 6.133、11.268、6.433 m。

计算结果表明, 城陵矶—武汉河段各区段在 98% 设计通航保证率流量、航宽 200 m 下的航道最大稳定水深由大到小依次为石头关水道—簰洲水道航道、水洪口水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道。综合来看, 依据选取 3 个区段中最小值确定城陵矶—武汉河段的航道最大稳定航深的原则, 城陵矶—武汉河段在 200 m 航宽下的最大稳定航深为 6.1 m。

4 结论

1) 以城陵矶—武汉河段每一水道为单位, 由各水道的河相关系参数变化规律可将该河段划分为仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道等 3 个区段。

2) 仙峰水道—新堤水道、石头关水道—簰洲水道、水洪口水道—白沙洲水道在 98% 设计通航保证率流量、航宽 200 m 下的航道最大稳定水深分别为 6.133、11.268 和 6.433 m, 综合可得城陵矶—武汉河段在 200 m 航宽下基于自然禀赋的最大稳定航深为 6.1 m。

3) 本文由优良断面河相关系推得城陵矶—武汉河段全部水道的整体最大稳定航深, 因在河段优良断面选取时存在一定程度的经验性, 不同的优良断面集合将会出现不同的最大稳定航深计算结果, 后续应对优良断面的具体选取指标展开研究。此外若具体估算每一水道尤其是重点碍航水道的最大稳定航深, 需要在把握该水道河相关系的基础上, 同时结合水道所在区域的碍航特征和滩槽演变规律对该水道的水深可提升潜力做具体讨论分析。

参考文献:

- [1] 赵艺, 张培林. 长江航道承载力概念研究[J]. 水运工程, 2018(3): 124-128, 165.
- [2] 程稳, 钱红露, 尹维清, 等. 多目标协同下长江航道承载力研究: I. 理论[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(5): 1061-1070.
- [3] 杨云平, 周良平, 张华庆, 等. 三峡工程运行后荆江河段分汇段航道水深资源及碍航驱动机制[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 684-695.
- [4] 彭松柏, 黄成涛, 江凌. 长江干线宜昌至安庆段航道尺度提升可行性研究[J]. 人民长江, 2017, 48(8): 1-4.
- [5] 冯宏琳. 西江航道尺度开发潜能研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [6] 解中柱. 提升长江干线泸州至重庆河段航道等级研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [7] 曾亚东. 老堡口—新圩河段Ⅳ级航道建设条件分析[J]. 水运工程, 2016(8): 135-138.
- [8] 姜继红, 冯宏琳, 张玮, 等. 天然河流航道整治定级的理论计算方法[J]. 中国港湾建设, 2006(1): 20-22.
- [9] 张有林, 吕彪, 李欢. 岷江下游龙溪口枢纽至合江门河段航道开发尺度估算研究[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(12): 256-258, 250.
- [10] 朱代臣, 解中柱, 吕晓兵. 长江干线泸州至重庆河段航道开发潜能初探[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 7-10.
- [11] 龙浩, 李文杰, 陈川, 等. 长江上游兰家沱至温中坝航道潜能提升初探[J]. 人民珠江, 2019, 40(6): 82-86.

(下转第 113 页)