



基于防洪-通航协同的长江中游航道整治方法*

刘林双^{1,2}, 李明^{1,2}, 江凌², 周泓伶¹, 余文钧²

(1. 长江航道规划设计研究院, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 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: 针对长江中游河段面临的通航和防洪双重问题, 分析了长江中游航道治理特点, 基于水流连续性方程和运动方程, 推导分析了调整型和守护型等传统航道治理措施对水深、水位的影响, 提出守护型、调整型和疏浚措施相结合的航道整治方法, 分析了其对通航和防洪的影响。结果表明, 相对于仅采用传统整治措施, “守、调、疏”相结合的航道整治方法使得航槽水深明显增加、断面水位则明显降低, 有利于防洪和通航双重目标的协同实现。

关键词: 航道整治方法; 守护型措施; 调整型措施; 防洪与通航协同

中图分类号: U617; TV147.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0099-08

Regulation method in middle reaches of Yangtze River based on coordination of flood control and navigation

LIU Linsong^{1,2}, LI Ming^{1,2}, JIANG Ling², ZHOU Hongling¹, YU Wenjun²

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

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

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

Abstract: In response to the dual problems of navigation and flood control in the middle reaches of the Yangtze River, this paper analyzes the characteristics of waterway regulation in the middle reaches of the Yangtze River. Based on flow continuity equations and motion equations of water flow, the paper deduces and analyzes the impact of traditional waterway adjustment measures and guardian measures on water depth and water level. A new method of waterway regulation measure that combines adjustment, guardian and dredging measures is proposed, and its impact on navigation and flood control is calculated and analyzed. The results show that, compared to traditional measures, the water depth of the navigation channel increases significantly, while the water level decreases significantly by using the new measure, which is beneficial for the coordination of flood control and navigation.

Keywords: waterway regulation method; guardian measure; adjustment measure; coordination of flood control and navigation

长江干线航道具有通航里程长(2 838 km)、货运量大(2021 年货运量 35.9 亿 t)、辐射范围广(占全国 GDP40% 以上)等特点。20 世纪 90 年代前, 长江中游航道主要利用自然水深通航, 局部河段需疏浚以保障航道尺度; 1990—2002 年仍采

用疏浚, 少量局部碍航河段基于“束水攻沙”理论^[1-2], 采用丁坝、顺坝、鱼骨坝等调整型措施, 达到重塑航道断面、改善航道条件的目的; 三峡水库蓄水后, 受清水下泄影响^[3-5], 2003—2017 年, 长江中游航道整治从“固滩冲槽”思路出发^[6-7],

收稿日期: 2023-10-16

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203404); 国家自然科学基金项目(U2340217)

作者简介: 刘林双(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

提出守护洲滩、冲刷河槽的思路。

长江中游河段面临着较为复杂的通航^[8-10]和防洪^[11-13]问题,尤其是长江中游的荆江等河段,历来是防洪问题最突出的河段^[14]。三峡水库蓄水运行后,长江中游防洪形势明显缓解,但仍面临着冲刷条件下河床调整剧烈、河道岸坡稳定性不足以及局部浅区航道条件不足等问题^[15-18],而传统航道整治调整型措施和守护型措施均可能会带来水位的壅高,对防洪造成不利影响。疏浚则一般针对河道局部区域,且未改变河道整体河势、滩槽格局和水沙、水动力条件,仅能在短时期或应急时作为航道养护措施,保障航道尺度稳定^[19-20],难以避免回淤等问题。

本文基于防洪限制下的长江中游航道碍航特点,提出守护型、调整型和疏浚措施相结合的航

道整治方法,即在类似长江中游的防洪限制较为严格的碍航河段,在洲滩守护的基础上,按防洪要求控制调整力度,并辅以疏浚措施,在提高航道通航尺度的同时,达到增强对强冲刷条件适应性,降低对防洪影响等目的,并计算分析其对通航和防洪的影响,旨在为内河航道整治技术发展提供支撑。

1 防洪限制下的长江中游航道碍航特点

如图 1、2 所示,长江中游上起宜昌,下至湖口,大埠街以上为低山丘陵区向江汉平原过渡的砂卵石河段^[21-23],大埠街以下为江汉平原与洞庭湖平原之间的沙质河段^[24-26],碍航问题历来较为突出,是长江干线航道维护最为困难的河段。

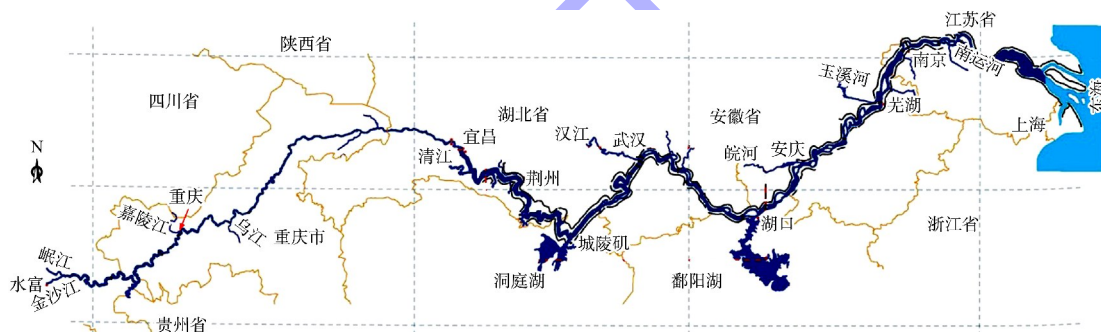


图 1 长江中游地理位置

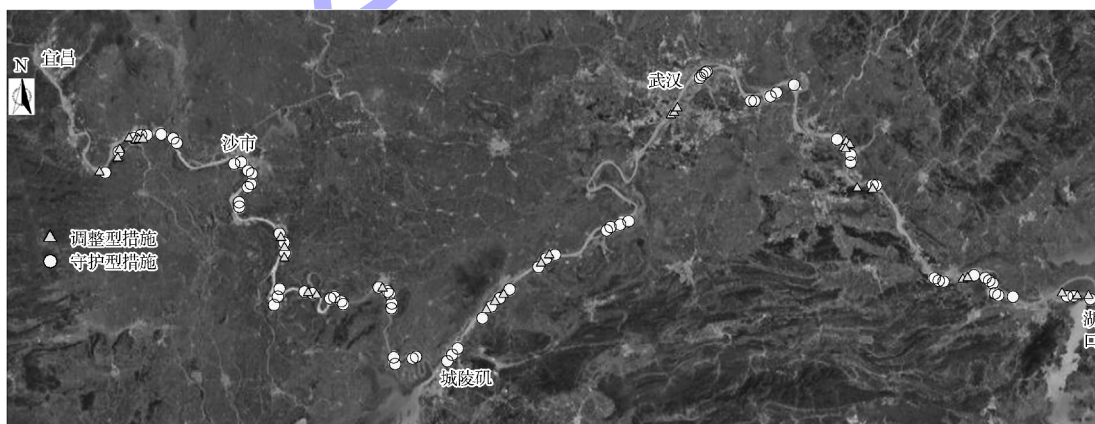


图 2 长江中游河势及工程布置

1.1 航道碍航特点

天然情况下长江中游河段河型众多^[27-29],河床组成复杂,天然节点较少,两岸抗冲性弱。

同时中游河道与众多大小支流、湖泊相连,包括清江、汉江入汇,洞庭湖水系的湘、资、沅、澧四水入汇,鄱阳湖水系的赣、抚、信、饶、

修五河入汇, 以及荆江三口分流。众多因素导致河床演变剧烈, 洲滩变迁频繁, 滩多水浅, 航槽极不稳定, 碍航情况频发, 历来是长江航道治理的重、难点, 也是船舶航行最为困难的河段^[30-32]。

三峡水库蓄水运行后, 中游河段水沙条件发生根本性改变, 因为一方面水库拦截大量泥沙, 清水下泄, 坝下来沙大幅减少^[33-34]; 另一方面三峡工程“蓄洪调枯”, 坝下来流过程延长, 汛后退水速度加快, 流量过程趋平。中游河段水沙输移特性改变, 出现以河床冲刷为主的适应性调整, 沿程水位不同程度下降。砂卵石河段坡陡流急、航道水浅问题较为突出, 沙质河段局部岸线崩退、洲滩冲刷、断面展宽、支汊发展现象明显^[35-36], 这些不利变化将随着三峡水库的持续运行逐步加剧。

1.2 河道防洪特点

长江中游河段由于河型复杂, 两岸堤防外平原区地面高程普遍低于汛期洪水位数米至数十米, 河道洪灾频繁且严重, 河道防洪等级高、压力大。

三峡水库运行后, 中游防洪形势明显缓解, 但仍面临着上游枢纽建成后中游河段河势及江湖防洪关系长时间局部剧烈调整、冲刷条件下保障防洪的主体建筑(岸坡)仍存在较大冲刷损毁风险、流域部分地区极端水文事件发生频次增加导致局部洪灾严重等问题^[37-38]。对此, 在长江中游尤其是荆江河段开展了大量的护岸工程, 尽管如此, 由于部分河弯堤外无滩或滩窄, 深泓逼岸, 防洪形势十分严峻。目前航道整治工程主要位于河道滩槽内, 防洪要求较高, 在保证整治效果的同时, 应尽量减小对防洪的影响。

2 航道整治工程对防洪和通航的影响

航道整治措施一般可分为守护型措施和调节型措施, 相应的工程类别也可划分为边滩守护工程、心滩守护工程、高滩守护工程、护底工程和调节型工程, 见表 1。截至 2021 年底, 长江中游已竣工航道整治工程共 36 项, 已竣工建筑物 266 座, 其中采取守护型措施 184 处、调节型措施 82 处。

表 1 长江中游航道整治工程分类			
航道组成因子	守护型措施	调节型措施	工程类别
边滩	护滩带等	丁坝、锁坝等	边滩守护工程
心滩	护滩带等	顺坝、鱼骨坝、锁坝、潜坝等	心滩守护工程
高滩	护坡、枯水平台、护底、补坡、护岸加固等	-	高滩守护工程
航槽	护底带、填槽、护底加糙等	-	护底工程
全因子	-	丁坝、顺坝、锁坝、潜坝、鱼骨坝等	调节型工程

航道整治工程为涉水工程, 其对航槽水深的影 响是工程方案要考虑的首要因素; 而航道整治工程对水位壅高的影响也是防洪需考虑的最重要因素。因此, 工程对水深及水位的影响分析是提出防洪-通航协同的长江中游航道整治方法的基础。

2.1 水流连续性、运动方程推导

考虑充分长且顺直的宽浅矩形河道, 河宽沿程不变, 没有取水或者旁侧入流, 来自上游的水量和沙量都能通过河段下泄的情况, 见图 3。

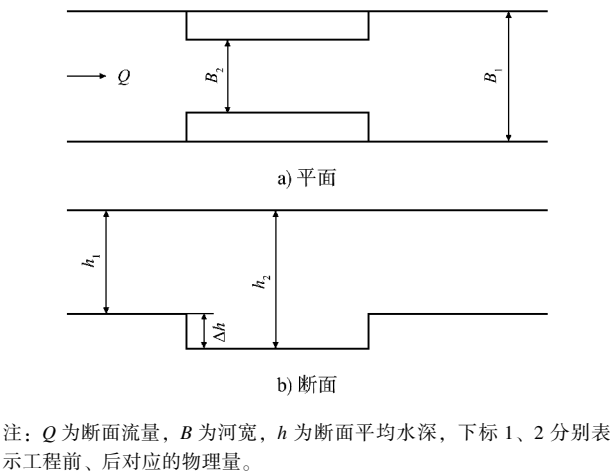


图 3 航道整治工程平面及断面

水流连续性方程:

$$Q = Buh \quad (1)$$

水流运动方程:

$$Q = CBh^{\frac{3}{2}}i^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: C 为谢才系数, i 为底坡。

2.2 输沙率公式推导

采用张瑞瑾水流挟沙力公式^[39]:

$$c = K \left(\frac{u^3}{ghw} \right)^m \quad (3)$$

式中: c 为床沙质饱和含沙量, g 为重力加速度, w 为悬移质中粒径大于 0.05 mm 部分的泥沙加权平均沉速, K 、 m 为根据实测资料确定的常数。

式(3)可改写为^[40]:

$$s_q = huc = K \frac{u^4}{2650gw} \quad (4)$$

式中: s_q 为单宽输沙量。泥沙输移公式可简化为:

$$s_q = pu^n \quad (5)$$

式中: p , n 为常数。对于水流挟沙力公式, $n=4$; 对于 Engelund-Hansen 公式, $n=5$ 。进而, 河道断面总泥沙输移量 S :

$$S = Bpu^n = BpC^n h^{\frac{n}{2}} i^{\frac{n}{2}} \quad (6)$$

考虑平衡输沙条件, 工程前后流量和输沙量不变。则:

$$Q_1 = Q_2 \quad (7)$$

$$S_1 = S_2 \quad (8)$$

结合式(2)、(6)~(8)得:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^{\frac{1-n}{n}} \quad (9)$$

2.3 整治工程影响分析

设断面平均地形高程为 H_{Zd} , 则断面平均水位 H_Z 为:

$$H_Z = h_Z + H_{Zd} \quad (10)$$

对于整治工程:

$$\Delta H_Z = H_{Z2} - H_{Z1} = (h_{Z2} - h_{Z1}) + (H_{Zd2} - H_{Zd1}) \quad (11)$$

式中: ΔH_Z 为整治工程前后水位差值, $h_{Z2} - h_{Z1}$ 为整治工程前后水深变化项 ΔH_{ZL} , $H_{Zd2} - H_{Zd1}$ 为工程前后地形高程变化项。在输沙平衡条件下, 可假设河槽河床在工程前后平均高程不变, 即 $H_{Zd2} = H_{Zd1}$,

代入式(9):

$$\Delta H_Z = h_{Z1} \left[\left(\frac{B_{Z2}}{B_{Z1}} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right] \quad (12)$$

式中: B_{Z2} 、 B_{Z1} 分别为整治工程前、后河宽。

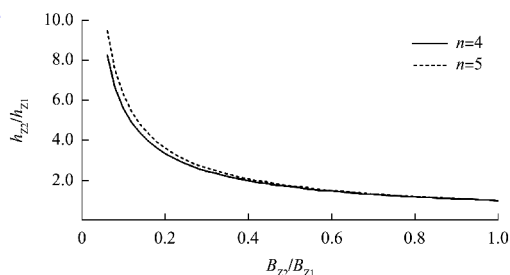
工程占用河道宽度 ΔB_Z :

$$\Delta B_Z = B_{Z1} - B_{Z2} \quad (13)$$

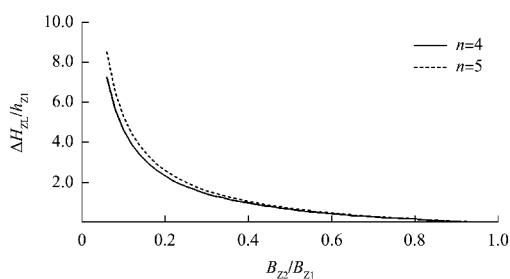
代入式(12)得:

$$\Delta H_{ZL} = h_{Z2} - h_{Z1} = h_{Z1} \left[\left(1 - \frac{\Delta B_Z}{B_{Z1}} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right] \quad (14)$$

如图 4a) 所示, 整治工程对水深的影响计算分析表明, 在工程前水深和河宽一定的情况下, 工程后河宽越窄, 相应水深增加越明显, 即河宽的缩窄可以增加水深; 工程后航深增加有利于通航, 但从航槽组成要素来看, 一定的航宽也是保证航道通行的基本要素。因此, 在工程方案制定中, 应综合考虑航深和航宽。如图 4b) 所示, 工程对水位的影响计算分析表明, 工程后河宽越窄, 相应航槽水位增加越明显, 即河宽的缩窄也抬高了断面水位, 对河段防洪会造成不利影响。



a) 水深



b) 水位

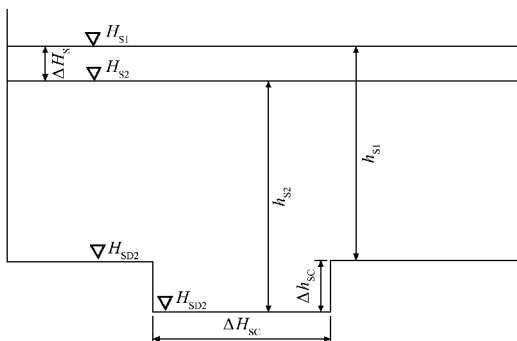
图 4 整治工程影响计算结果

3 “守、调、疏”相结合的航道整治方法

3.1 疏浚影响分析

考虑充分长且顺直的宽浅矩形河道, 河宽沿

程不变,没有取水或者旁侧入流,来自上游的水量和沙量都能通过河段下泄的情况。疏浚一般主要对航槽进行局部开挖,疏浚断面各参数见图5。



注: H_{S1} 、 H_{S2} 分别为疏浚前后的水位高程, H_{SD1} 、 H_{SD2} 分别为疏浚前后航槽断面地形平均高程, h_{S1} 、 h_{S2} 分别为疏浚前后水深值, ΔH_s 为疏浚前后断面平均水位变化值, ΔB_{SC} 为疏浚槽宽, Δh_{SC} 为疏浚槽深。

图5 航道疏浚工程断面

为计算断面水位水深变化值,引入谢才公式(15)、曼宁公式(16):

$$u = C \sqrt{RJ} \quad (15)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (16)$$

$$R = A/W \quad (17)$$

式中: u 为断面平均流速, C 为谢才系数, R 为水力半径, J 为坡降, n 为糙率, A 为过水面积, W 为湿周。

对于矩形断面,则:

$$R = h_s B_s / (B_s + 2h_s) \quad (18)$$

根据式(11),断面水位变化主要与断面水深变化和断面地形变化有关,考虑长江中游航道疏浚主要浚深局部浅区,不改变河宽($B_1 = B_2$)。结合式(1)、(7)、(18)可得断面平均水深变化公式(19)以及断面平均水位变化公式(20):

$$\Delta h_s = h_{S2} - h_{S1} = \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} \left(\frac{J_1}{J_2} \right)^{1/2} - 1 \right] h_{S1} \quad (19)$$

式中: Δh_s 为疏浚前后断面平均水深变化值, R_1 、 R_2 分别为疏浚前后水力半径, n_1 、 n_2 分别为疏浚前后糙率值, J_1 和 J_2 分别为疏浚前后坡降。

$$\Delta H_s / h_{S1} = - \left(\frac{\Delta h_{SC}}{h_{S1}} \right) \left(\frac{\Delta B_{SC}}{B_{S1}} \right) - \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} \left(\frac{J_1}{J_2} \right)^{1/2} \right] \quad (20)$$

式中: B_{S1} 为疏浚工程所在河宽。

对于疏浚工程,航槽疏浚区水深变化:

$$\Delta h'_s = (h_{S2} - h_{SD2}) - (h_{S1} - h_{SD1}) = \Delta h_{SC} \left(1 - \frac{\Delta B_{SC}}{B_{S1}} \right) - \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} \left(\frac{J_1}{J_2} \right)^{1/2} \right] h_{S1} \quad (21)$$

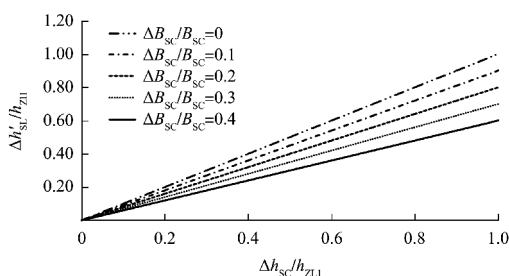
即

$$\frac{\Delta h'_{SL}}{h_{S1}} = \left(1 - \frac{\Delta B_{SC}}{B_{S1}} \right) \frac{\Delta h_{SC}}{h_{S1}} - \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} \left(\frac{J_1}{J_2} \right)^{1/2} \right] \quad (22)$$

式中: $\Delta h'_s$ 为疏浚前后航槽水深变化值。

为分析疏浚前后断面水深和水位的变化,结合长江中游疏浚实际经验, $\Delta B_{SC}/B_{S1}$ 取 0~0.4; 考虑长江中游航道整治目前最小维护水深为 3.8~4.5 m, 较少出现航槽淤满后再进行疏浚, $\Delta h_{SC}/h_{S1}$ 取为 0~1.0; 由于长江中游航道疏浚目的一般为挖出浅包,平顺航槽,疏浚后整个河道糙率降低,但由于疏浚一般位于河槽局部浅区,一般疏浚平面面积小于河道总平面面积 1%,糙率、水力半径、比降变化均较小,因此, $(n_2/n_1)(R_1/R_2)^{2/3}(J_1/J_2)^{1/2}$ 项接近于 1,本次理论计算中取 1。

如图 6a) 所示,疏浚对水深影响计算分析表明,航槽水深与疏浚槽结构有关,随疏浚槽深度增加水深增加,而随疏浚槽宽度增加水深减少,实际疏浚中,疏浚槽宽度主要以航道维护宽度作为主要参考因素,不宜任意扩宽。如图 6b) 所示,疏浚对断面水位影响分析表明,断面水位变化与疏浚槽结构有关,疏浚实施后,随疏浚槽深度、宽度增加水位均明显下降。



a) 水深

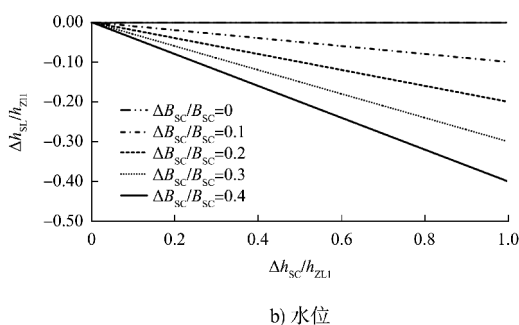


图6 疏浚前后水深和水位变化

3.2 “守、调、疏”相结合方法对水深及水位影响

采用“守、调、疏”相结合方法,结合式(14)、(22),河槽水深变化为:

$$\Delta h = h_{z1} \left[\left(\frac{B_{z2}}{B_{z1}} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right] + \Delta h_{sc} \left(1 - \frac{\Delta B_{sc}}{B_{s1}} \right) \quad (23)$$

式中: Δh 为采用“守、调、疏”相结合方法前后水位差值。将整治工程和疏浚工程按同一工程考虑,将符号统一,则工程前水位河宽分别统一为 h_1 、 B_1 。式(23)可优化为:

$$\frac{\Delta h}{h_1} = \left(1 - \frac{\Delta B_z}{B_1} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 + \frac{\Delta h_{sc}}{h_1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta B_{sc}}{B_1} \right) \quad (24)$$

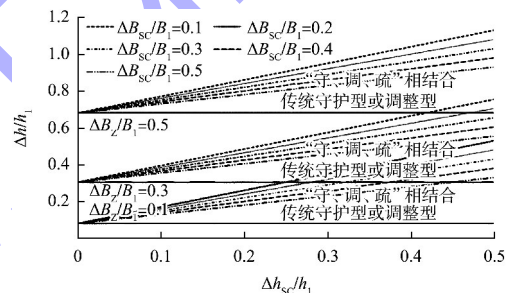
相应的断面水位增量计算公式为:

$$\frac{\Delta H}{h_1} = \left(1 - \frac{\Delta B_z}{B_1} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 - \frac{\Delta h_{sc}}{h_1} \cdot \frac{\Delta B_{sc}}{B_1} \quad (25)$$

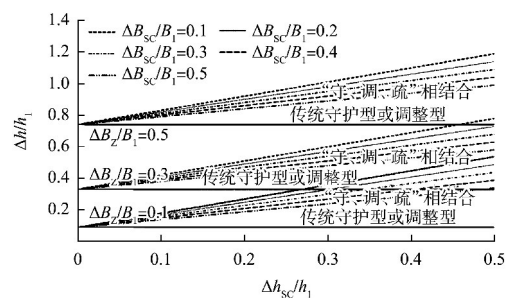
因此,“守、调、疏”相结合方法实施后,断面水深、水位主要与 $\Delta B_z/B_1$ 、 $\Delta h_{sc}/h_1$ 和 $\Delta B_{sc}/B_1$ 3项相关,即与整治工程宽度与河宽比、疏浚槽深和水深比、疏浚槽宽和河宽比相关。方法对航槽水深影响计算分析表明(图7),随整治工程宽度与河宽比($\Delta B_z/B_1$)增加,水深增加幅度逐步增大,即整治工程宽度增大,航槽水深增加明显;对于疏浚而言,随疏浚槽深和水深比($\Delta h_{sc}/h_1$)增加,水深增加幅度逐步增大,即疏浚深度越大,航槽水深增加越明显,但随疏浚槽宽和河宽比($\Delta B_{sc}/B_1$)增加,水深增加幅度逐步减小,即疏浚区疏浚宽度越大,航槽水深减小明显。采用“守、调、疏”相结合方法,相对于仅采用整治措施,航槽水深明显增加。但采用疏浚措施时,不宜过度扩展疏浚槽宽,以免造成航槽水深的降低。

方法对航槽水深影响分析表明(图8),随整

治工程宽度与河宽比($\Delta B_z/B_1$)增加,水深增加幅度逐步增大,即整治工程宽度增大,断面水位增加明显;对于疏浚而言,随疏浚槽深和水深比($\Delta h_{sc}/h_1$)增加,水位逐步降低,即疏浚区疏浚深度越大,断面水位降低越明显,但随疏浚槽宽和河宽比($\Delta B_{sc}/B_1$)增加,水深降低幅度逐步增大,即疏浚区疏浚宽度越大,断面水位降低明显。采用“守、调、疏”相结合方法,相对于仅采用整治措施,断面水位明显降低。同时水位变幅分为“正值”区域和“负值”区域,“正值”区域分析表明,相对仅实施整治工程,“守、调、疏”相结合的航道整治措施实施后,断面水位明显下降,可降低对防洪的不利影响;“负值”区域分析表明,在采用一定的整治工程和疏浚工程配合系数下,断面整体水位将下降,有利于防洪。

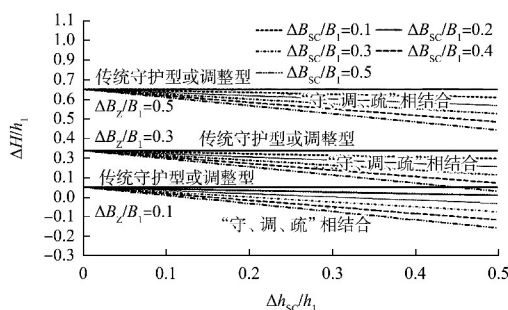


a) n=4



b) n=5

图7 “守、调、疏”相结合方法实施后航槽水深变化



a) n=4

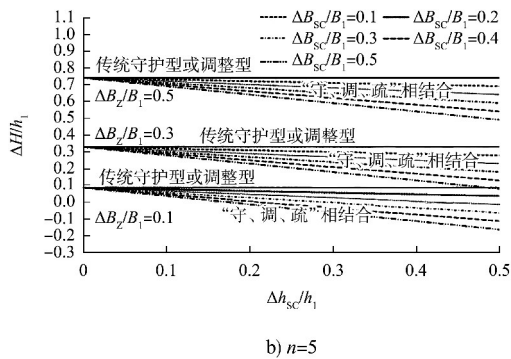


图8 “守、调、疏”相结合方法实施后断面水位变化

表2为不同航道整治措施适应条件的对比分析,由表可知,传统调整型措施主要在中小河道、长江上游、以及长江中下游河段早期治理中应用较多;守护型措施则在长江中下游等坝下冲刷河段治理中应用较多;疏浚主要应用于部分不利年份时的航道维护尺度应急疏通。“守、调、疏”相结合的方法适应河道组成复杂的大型河流且防洪、通航等多目标协同下的航道治理。

表2 不同航道治理方法对比

治理方法	原理	适应条件
调整型	束窄河道横断面,提高水流挟沙能力,刷深河槽,提高航道尺度	中小河道、长江上游以及中下游河段早期治理
守护型	守护洲滩等航道边界,利用清水下泄冲刷航槽,提升航道尺度	长江中下游等坝下冲刷河段治理
疏浚	通过航槽浅区泥沙清除,保障航道尺度	部分不利年份时航道维护尺度的应急疏通
“守、调、疏”相结合	在洲滩守护的基础上,按防洪要求控制调整力度,并辅以疏浚措施,在提高航道通航尺度的同时,达到增强对强冲刷条件适应性、降低对防洪影响等目的	河道组成复杂的大型河流且防洪、通航等多目标协同下的航道治理

4 结论

1) 基于河流连续方程和运动方程推导计算了调整型和守护型措施对河道航槽水深和断面水位的影响。结果表明,整治后河宽越窄,水深增加越明显,越有利于通航,但也会抬高断面水位,对防洪造成不利影响。单纯的疏浚则由于未改变整体河势、滩槽格局和水沙、水动力条件,将难以避免回淤等问题,仅能在短时期或应急时作为航道养护措施,保障现有航道尺度的稳定。

2) 提出“守、调、疏”相结合的航道整治方法,即在类似长江中游的防洪限制较为严格的碍航河段,在调整断面、洲滩守护的基础上,按防洪要求控制调整力度,并辅以疏浚措施,在提高航道通航尺度的同时,达到增强对强冲刷条件适应性、降低对防洪影响等目的。计算分析表明,相对于传统整治措施,采用“守、调、疏”相结合的航道整治方法可使航槽水深明显增加、断面水位明显降低,有利于防洪和通航目标的协同实现。

参考文献:

[1] 郭涛. 潘季驯治理黄河实践与杰出贡献: 纪念潘季驯500周年诞辰[J]. 水利学报, 2022, 53(12): 1433-1444.
[2] 陈一梅, 张梦成. 基于SVM的丁坝群束水攻沙功能预测[J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 25-31.

[3] 王华琳, 郑珊, 谈广鸣, 等. 三峡水库运行后宜昌-城陵矶河段冲刷重心下移与时空演变[J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1470-1481.
[4] 许全喜, 董炳江, 袁晶, 等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 650-661.
[5] 周炜兴, 孙昭华, 周坤, 等. 三峡水库蓄水前后长江中下游流量频率分布特征及其对洪水造床作用的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 616-629.
[6] 何传金. 长江中游荆江河段航道治理思路、对策及初步成效[J]. 水运工程, 2015(2): 174-181.
[7] 闫军, 刘怀汉, 岳志远, 等. 心滩守护工程对航道冲淤特性影响的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2012, 27(5): 589-596.
[8] YANG Y P, ZHENG J H, ZHANG M J, et al. Sandy riverbed shoal under anthropogenic activities: The sandy reach of the Yangtze River [J]. China, Journal of Hydrology, 2021, 603: 1-17.
[9] WANG H Y, Zuo L Q, LU Y J, et al. Waterway carrying capacity assessment: Model development and application in the lower Yangtze River, China [J]. Ecological indicators, 2022, 142: 1-12.
[10] YANG X H, XIONG H B, LI D F, et al. Disproportional erosion of the middle-lower Yangtze River following the operation of the Three Gorges Dam [J]. Science of the

- total environment, 2023, 859: 1-12.
- [11] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 78-88.
- [12] WANG K, WANG Z Z, LIU K L, et al. Optimizing flood diversion siting and its control strategy of detention basins: A case study of the Yangtze River, China[J]. Journal of hydrology, 2021, 597: 1-14.
- [13] YANG P, ZHANG S Q, XIA J, et al. Analysis of drought and flood alternation and its driving factors in the Yangtze River Basin under climate change[J]. Atmospheric research, 2022, 270: 1-13.
- [14] ZHOU M R, XIA J Q, SHI Xi, et al. Hydrologic and geomorphic effects on the reduction of channel discharge capacity in the middle Yangtze River[J]. Science of the total environment, 2023, 866: 1-13.
- [15] 夏军强, 刘鑫, 姚记卓, 等. 近期长江中游枯水河槽调整及其对航运的影响[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 1-11.
- [16] 李明, 胡春宏, 周成成, 等. 新水沙条件下长江中游芦家河水道“坡陡流急”段演变机理分析[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 158-168.
- [17] 赵维阳, 杨云平, 张华庆, 等. 三峡大坝下游近坝段沙质河床形态调整及洲滩联动演变关系[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 862-874.
- [18] 夏军强, 林芬芬, 周美蓉, 等. 近期界牌河段河床调整及其对航道条件的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(1): 27-39.
- [19] 杨传华, 黄蓓蓓, 李明, 等. 长江中游太平口水道维护性疏浚技术[J]. 水运工程, 2019(11): 100-106, 117.
- [20] 索文, 刘林双, 于海波, 等. 芦家河水道枯水跌坎形成原因及航道治理效果分析[J]. 水运工程, 2020(3): 69-73, 128.
- [21] 杨云平, 张明进, 孙昭华, 等. 基于河段单元尺度长江中游河床形态调整过程及差异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(1): 70-84.
- [22] 刘林双, 李明, 郑力. 长江中下游砂卵石分汉河段演变机理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 346-353, 394.
- [23] 程伟, 陈立, 许文盛, 等. 三峡水库蓄水后下游近坝段水位流量关系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(4): 434-438, 444.
- [24] 韩剑桥, 孙昭华, 黄颖, 等. 三峡水库蓄水后荆江沙质河段冲淤分布特征及成因[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 277-285, 295.
- [25] 孙昭华, 李义天, 葛华, 等. 长江中游沙卵石-沙质河床过渡带冲刷趋势研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 789-797.
- [26] 江凌, 李义天, 孙昭华, 等. 三峡工程蓄水后荆江沙质河段河床演变及对航道的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 1-10.
- [27] 吴昌洪, 林木松, 柳小珊, 等. 河型分类研究现状与展望[J]. 人民长江, 2014, 45(1): 6-10, 65.
- [28] 陈立, 余博闻, 许全喜, 等. 长江三峡水库坝下游荆江段断面形态冲刷调整成因分析[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 279-286.
- [29] 陈立, 崔超, 袁晶, 等. 长江中游典型顺直分汉河段冲刷调整的特性与机理[J]. 泥沙研究, 2023, 48(1): 1-7.
- [30] 邹磊, 张彦, 陈婷, 等. 汉江流域降水与径流演变特征研究[J]. 水文, 2023, 43(2): 103-109.
- [31] 方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 36-41.
- [32] 方春明, 关见朝, 史红玲. 鄱阳湖入江水道输沙能力与出湖沙量关系及冲淤调整规律[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 997-1004.
- [33] 姚仕明, 邢国栋, 陈栋. 三峡建库前后长江中游河道输沙率变化分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(8): 10-16.
- [34] 吴宇飞, 韩会明, 姚斯洋. 三峡建库前后水沙对城汉河段剩余水深的影响研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 40-43.
- [35] 刘鑫, 夏军强, 邓珊珊, 等. 下荆江急弯段凸冲凹淤演变过程与机理[J]. 科学通报, 2022, 67(22): 2672-2683.
- [36] 许全喜, 董炳江, 袁晶, 等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 650-661.
- [37] 柴元方, 邓金运, 杨云平, 等. 长江中游荆江河段同流量-水位演化特征及驱动成因[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 101-113.
- [38] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 78-86.
- [39] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [40] 李煜, 汪德燿, 谈永锋. 束水攻沙的理论分析[C]//中国水利学会. 第五届中国水论坛论文集, 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 422-425.

(本文编辑 王传瑜)