



三峡水库运行后长江中下游分汊河段航道治理

王致维

(长江航道整治中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 三峡水库蓄水运行后, 长江中下游分汊河段出现冲淤不平衡, 汉道分流关系显著调整, 从而导致航道浅滩碍航特性存在差异。在长江中下游分汊河段河床演变、浅滩碍航特性等研究基础上, 探讨分汊河段航道治理思路, 主要结论为: 1) 分汊河道浅滩段以冲刷为主, 逐渐显现洲滩冲刷萎缩、滩槽形态不利调整等特征; 2) 分汊段的洪水主流汊道分流比减小, 顺直分汊与弯曲分汊的洪水分流比下降幅度小于中枯水时期, 而鹅头形分汊河型洪水分流比降幅大于中枯水; 3) 三峡水库蓄水后通航主汊道对分流的控制力度减弱, 进口处出现交错或散乱的不良浅滩形态, 航道条件趋于恶化而浅滩出浅碍航; 4) 分汊河段治理可采取分步控制, 实施洲滩控导、边心滩塑造或支汊调控技术等整治措施, 达到维持或提高航道尺度的目的。

关键词: 三峡水库运行; 分汊河道; 航道整治; 治理思路; 长江中下游

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0143-09

Waterway regulation of braided channel in middle and lower Yangtze River after Three Gorges Reservoir operation

WANG Zhi-wei

(Yangtze River Waterway Regulation Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: After the operation of the Three Gorges Reservoir, the unbalanced erosion and deposition occurred in the bifurcation reaches of the middle and lower reaches of the Yangtze River, and the bifurcation relationship was significantly adjusted, resulting in the difference of navigation-obstruction characteristics of the corresponding shoals. Based on the research of braided reach riverbed evolution and the navigation obstruction characteristics of the shoals in the middle and lower reaches of the Yangtze River, this paper discusses the channel management ideas of the braided reach. The main conclusions are as follows: 1) The shallow reach of the braided river in middle and lower Yangtze River has occurred further scour depth after the impounding and operation of Three Gorges project, associating with the shrinks of bottomland and the adjustments in the characteristics of channels. 2) The flood diversion ratio of the main stream in the branching section decreases, the flood diversion ratio falling ranges is less than low water for the bending and straight braided river, but the flood diversion ratio falling range is less than low water for the goose head shape braided river. 3) The controlled intensity of the navigation main braided channel on distributaries tends to decline after Three Gorges Reservoir impoundment, the inlets of the navigation main braided channel often staggered or scattered bad shoals form, such as channel conditions deterioration, shallow shoal hinders navigation. 4) To maintain or improve the channel scale, the branch reach can be controlled step by step, and the regulation measures such as beach control and guidance, edge and center beach shaping or branch control technology can be implemented.

Keywords: Three Gorges Reservoir operation; braided river; channel regulation; regulation thoughts; middle and lower Yangtze River

收稿日期: 2022-04-21

作者简介: 王致维(1972—), 男, 高级工程师, 从事航道治理理论与技术研究。

长江中下游共有分汊河段 55 个, 约占全部河长的 57%, 主要以顺直分汊、弯曲分汊、鹅头形分汊河段为代表^[1]。三峡水库蓄水前分汊段演变特征表现为河道放宽主流摆动频繁、河势变化剧烈、碍航现象突出, 主支汊周期性交替, 但演变周期差异较大^[2-3]。长江中下游分汊河段由于受边界条件制约, 河道难以自由摆动, 但随着节点控制作用的不同, 沿程各段弯曲率、放宽率也各有不同, 在相邻的河段之间, 或者同一河段在年内及年际不同时期也呈现出不同河型属性^[4]。随着三峡水库水沙下泄条件的改变, 河道清水下泄, 河床冲刷^[5]。另外, 洪峰的调蓄力度将比目前更加显著, 汛末退水速度也将进一步加快。就长江中下游干线航道而言, 部分浅滩特别是下游广泛存在的分汊河道浅滩段可能会发生进一步的冲深。同时, 枯水期水位的持续下降、洲滩冲刷萎缩、滩槽形态的不利调整等仍将持续显现, 甚至更加强烈^[6-7]。

目前对于长江中下游河段浅滩航道整治思路研究主要以局部单滩、河床冲淤规律为基础, 如长江航道局^[8]侧重于“束水攻沙”思路, 提出一系列设计参数计算的经验公式; 谢凌峰等^[9]、赵志舟等^[10]、管效仲等^[11]、陈一梅等^[12]以单滩或局部浅滩群为研究对象, 以平衡河流水沙条件下河床冲淤规律为基础, 分析浅滩河段演变特性, 进而从定性及定量角度研究直接受此影响的沙质河床枯水航道设计水位、整治参数。

三峡工程蓄水至今不过短短 10 余年, 对坝下河段演变规律研究不断深入, 但关于大坝下游如何较好地利用“清水冲刷”效应进行航道治理的研究较少。本文通过分析三峡水库蓄水前后分汊河段的滩槽演变特征, 针对分汊河段表现不同的演变特点和碍航特性, 初步探讨水库运行后分汊

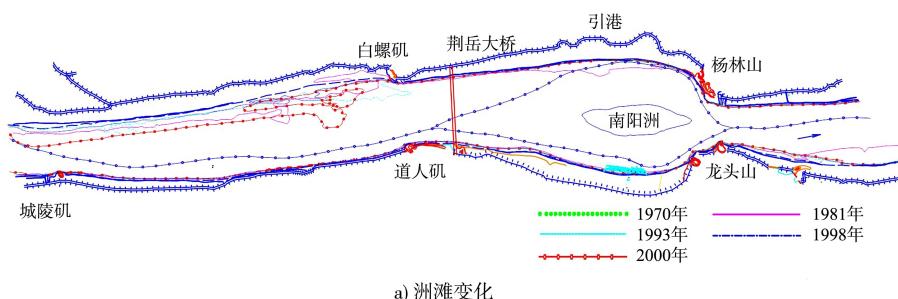
河道航道治理思路, 可为长江中下游分汊河段航道整治工程提供技术支撑。

1 三峡水库蓄水前长江中下游分汊河段演变特征

1.1 顺直分汊河段

顺直河型主要集中在长江中游的城陵矶—汉口河段, 包括道仁矶、杨林岩、界牌及武汉河段, 以道仁矶—杨林岩河段为对象进行分析。三峡工程运行前, 1970—1981 年间道仁矶—杨林岩河段 20 m 线逐渐向右岸发展, 最大摆幅近 1 km, 丁家洲边滩大幅增长, 见图 1a); 至 1993 年 20 m 线向左岸移动, 但白螺矶上游附近 20 m 线却向江中移动, 表明该处发生了淤高; 到了 1998 年, 由于大洪水的作用, 20 m 线向左岸有较大摆动, 白螺矶上游附近遭遇冲刷; 至 2001 年, 20 m 线再次向江中大幅摆动, 最远处距大堤近 1.5 km, 白螺矶上游边滩恢复形成; 到 2006 年, 20 m 线有所左移, 边滩范围缩小; 2006—2011 年间, 20 m 线再次大幅向下游延伸, 白螺矶上游边滩形成; 2011—2019 年, 白螺矶上游 20 m 等高线冲淤交替, 但左右摆动幅度不大。

深槽变化见图 1b), 1970—2019 年间, 深泓线平面变化较小, 受上游弯道环流作用的影响, 主流自上而下始终紧贴右岸下行, 且河段深泓线互有交错。这主要是由于城螺河段上游进口河段为洞庭湖与下荆江来水的汇流区, 洞庭湖来水平稳进入工程河段, 下荆江来水则基本垂直从左岸进入工程河段, 逼向右岸的城陵矶, 由于工程河段右岸地质条件良好, 致使主流的平面位置多年来变化不大, 但是受上下河势变化、最深河道内洲滩抗冲性、不利水文条件等作用, 界牌河段发生了主支汊交替现象, 深槽位置极不稳定且航道条件差, 此后实施了系统性的航道整治工程。



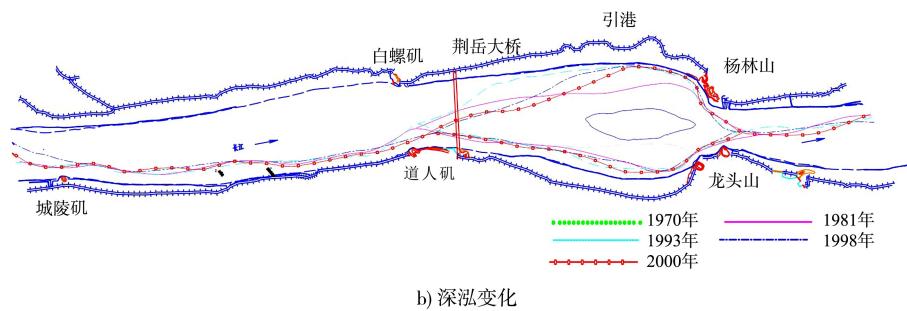


图1 道仁矶~杨林岩河段洲滩与深泓演变

1.2 弯曲分汊河段

分汊河段的年际演变过程中,深槽随汊道兴衰变化表现出此冲彼淤。由图2戴家洲水道深泓纵剖面历年变化可以看出:1958—1987年,凸岸

汊由两汊相持(两汊分流比接近)向绝对主汊(分流比明显高于支汊)发展,凸岸汊深泓呈冲刷趋势;1987年以后,凸岸汊由绝对主汊向两汊相持发展,凹岸深泓则呈冲刷趋势,凸岸深泓呈淤积趋势。

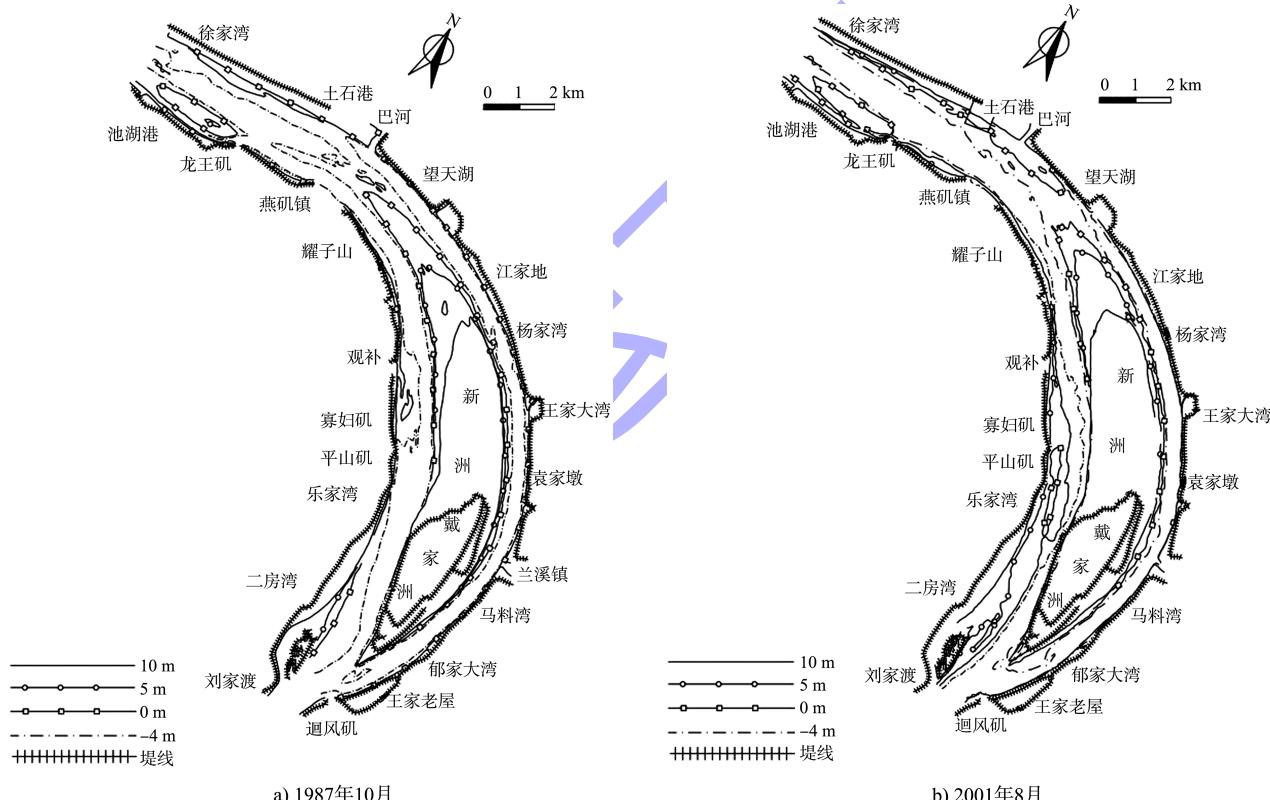


图2 戴家洲水道凸岸汊深泓纵剖面年内变化

以分流比变化较为剧烈的沙市河段为例,沙市河段在形成双分汊河势格局至三峡水库蓄水前,最显著的变化就是新老三八滩的兴衰交替。在老三八滩时期,上段自形成顺直分汊河段以后,北槽分流比始终保持占优,太平口心滩也逐渐淤长成稳定的江心滩。90年代以前,下段微弯分汊段北汊为主汊,进入90年代后,上游来沙量大幅减少,河床产生冲刷,三八滩明显后退,过渡段河道展宽,主流频繁摆动,该段开始出现两汊争流

的局面。其它河段汊道内边心滩延展与汊道的兴衰表现为同步变化。图3为戴家洲水道在各个阶段典型年河势情况,可以看出:当凸岸汊分流比较大时,凹岸边滩及洲头低滩淤积,凸岸边滩冲刷;当凹岸汊分流比较大时,凹岸边滩及洲头低滩萎缩,凸岸边滩淤积。综上,分汊河段凸岸和凹岸边、心滩随两汊兴衰演变而此冲彼淤,但滩体的总体面积变化不大。

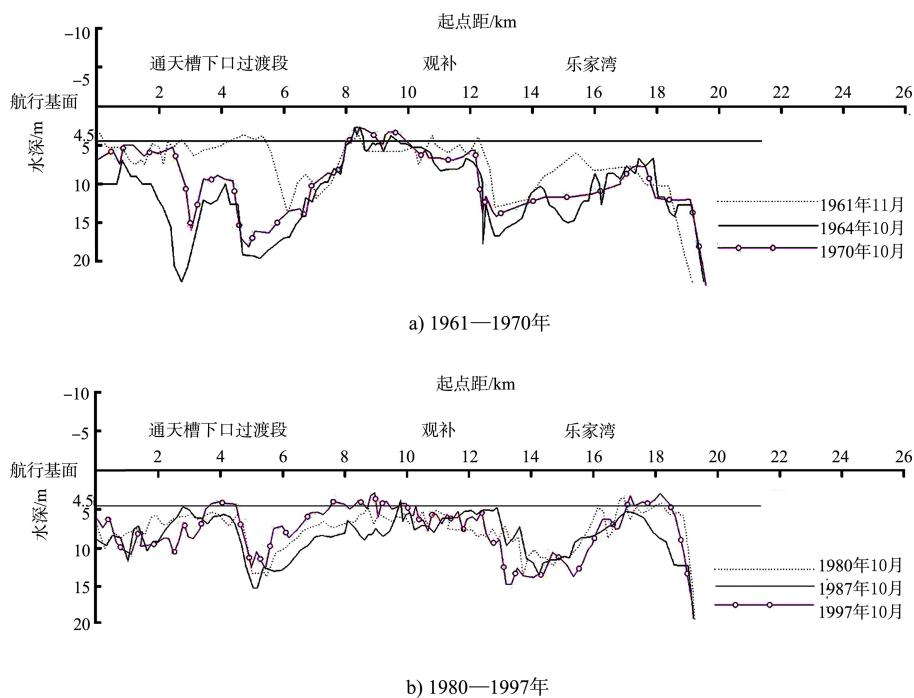


图 3 戴家洲水道 1961—1993 年右汊深泓变化过程

1.3 鹅头分汊河段

陆溪口水道在汊道格局转换期间形成极为恶

劣的碍航局面, 转换完成以后, 洲滩低矮、散乱等不良形态也会导致航道条件的恶化, 见图 4。

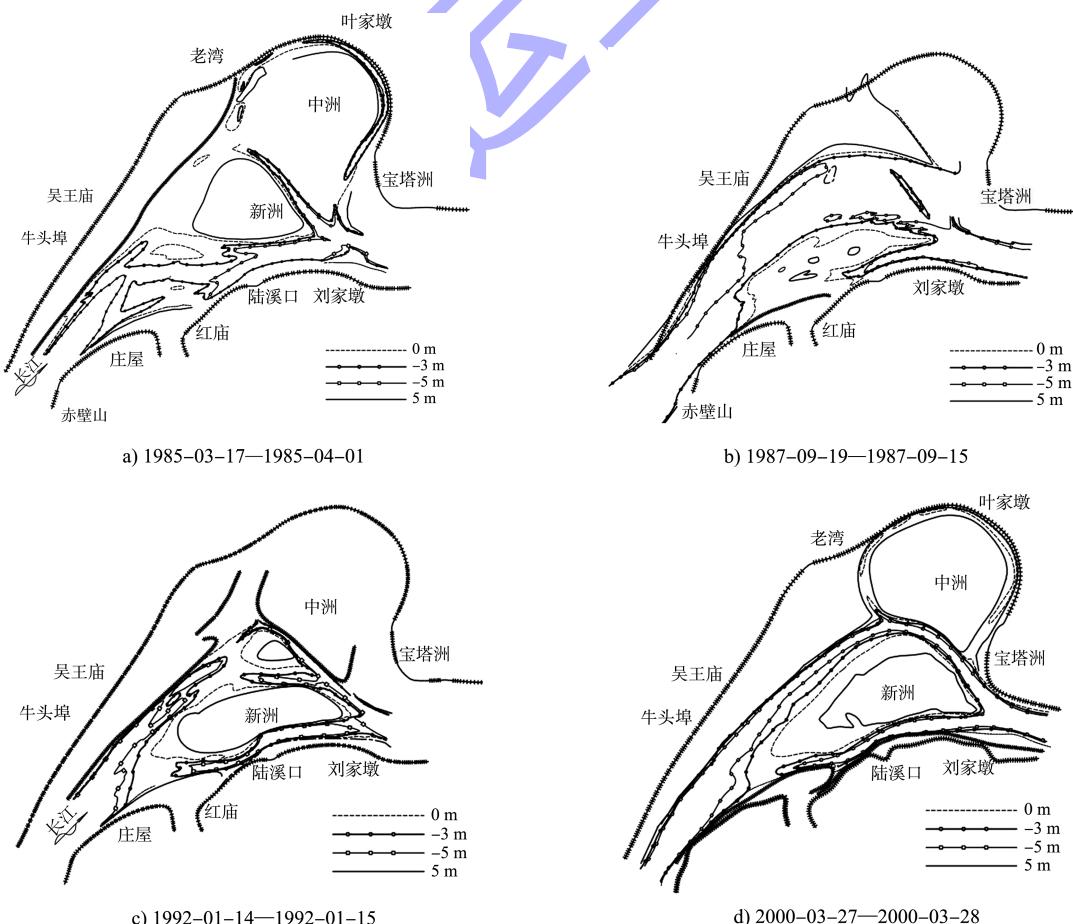


图 4 陆溪口水道滩槽变化

1.4 分汊河段代表断面年内演变特征

从年内演变来看, 汉道内凹岸边滩表现为“洪冲枯淤”, 凸岸边滩及洲头低滩表现为“洪淤枯冲”。图5为陆溪口水道新洲头部典型断面年内变化, 从图中可以看出, 1998年9月相对于1998年3月, 洲头心滩明显淤积, 而汛后则冲刷明显。由于实测资料缺乏, 难以直接分析凹岸边滩年内演变规律, 但可以从其它实测资料推测, 主流区由于流速大、水流挟沙力大, 河道冲刷, 而大水年主流区的冲刷尤为明显。图6为天兴洲河段汉口边滩典型断面1996—1998年冲淤变化, 可以看出1998年大水过后, 汉口边滩冲刷明显, 即大水时主流位于凸岸一侧, 小水时主流偏离凹岸一侧, 因此, 凹岸边滩年内遵循“洪冲枯淤”的演变规律。

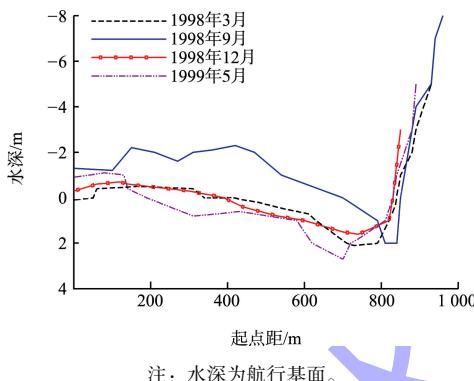


图5 陆溪口水道新洲头部断面年内变化

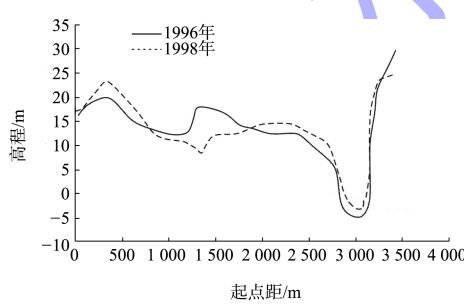


图6 天兴洲汉口边滩典型断面变化

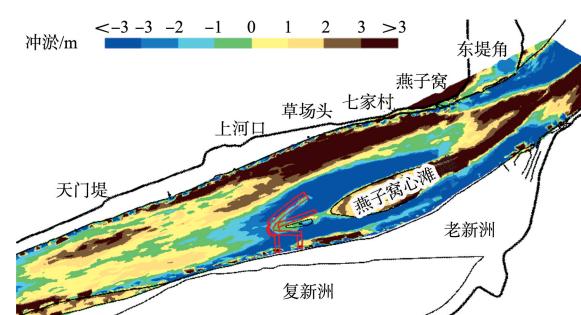
2 三峡水库蓄水后分汊河段演变特征及碍航特性

三峡工程运行前, 因系统性的航道整治工程尚未实施, 分汊河段以演变特征分析为主。三峡工程运行后, 以滩槽格局变化特征、分流比变化特点、冲淤部位和航槽位置关系等分析为主, 并在此基础上进一步研究蓄水后分汊河段碍航特性。

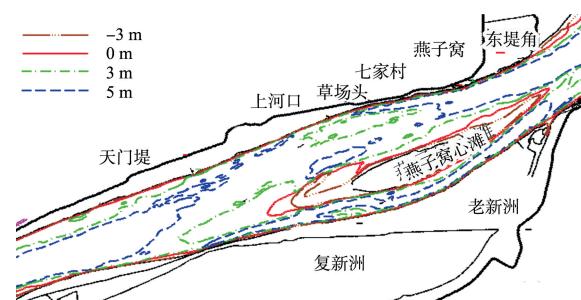
2.1 滩槽格局变化

三峡水库蓄水运行后, 长江中下游中水流量

出现频率增大, 漫滩以上的洪水流量出现几率减小, 年内流量过程更为均匀, 同时由于水库的拦沙作用, 使进入长江中下游河道的悬移质中值粒径细化, 粗颗粒比例明显减小, 进一步加剧了输沙量减少所带来的清水下泄程度。在演变特征上, 三峡水库蓄水后长江下游分汊河道一定程度上仍遵循蓄水前的演变特征, 同时表现出一定的新特点: 持续的清水下泄使得江心洲洲体头部受到顶冲, 稳定性大幅降低, 如太平口水道三八滩(弯曲分汊)、藕池口水道倒口窑心滩(弯曲分汊)、窑监河段(弯曲分汊)乌龟洲及洲头低滩、戴家洲河段(弯曲分汊)戴家洲及洲头低滩等滩体均出现了萎缩现象。同时, 来水来沙条件变化引起汊道格局的适应性调整: 城陵矶以上河段由于沙量减小, 水流不饱和程度增加, 使得主流大幅摆动的分汊河段支汊发展较为显著, 如瓦口子水道(弯曲分汊)、马家嘴水道(弯曲分汊); 城陵矶以下河段明显恢复, 在洪峰削减、中水持续时间延长、枯水流量增加等条件下, 适应中小水流路的汊道逐渐冲刷发展, 如燕子窝水道(顺直分汊)(图7)右汊为支汊, 中枯水有利其进流, 蓄水初期右汊发展, 同时燕子窝(鹅头形分汊)心滩洲头低滩受冲趋于散乱, 蓄水前较好的滩槽格局受到破坏, 航道条件逐渐变差。



a) 2005—2012年冲淤变化



b) 2012年2月滩槽等深线

图7 燕子窝水道近期变化

分汊河段的洲滩稳定性较差、此消彼涨仍是洲滩演变的常态，三峡水库蓄水后加剧了这一变化过程，主支兴衰演变的现象时有发生，如太平口水道、藕池口水道、天兴洲河段等。其中，河宽较大的鹅头形分汊河段如陆溪口、新洲等洲滩“生成-淤长-并岸或者冲失-再次重新生成”的周期性变化相当普遍，汊道也发生相应的兴衰更替。

2.2 分流比变化

三峡水库蓄水前后，相同流量下的分流比变化也产生一些新特点，图 8 分别为顺直分汊、弯曲分汊、鹅头形分汊河型典型河段分流比变化，分析表明：三峡水库蓄水后，太平口水道北槽分流比一直处于降低状态；天兴洲水道弯曲分汊型河段左汊分流比随流量增大而增大，汊道分流比中洪水年际之间虽未有明显的趋势性变化，但枯水分流比出现了明显的降低趋势。陆溪口水道分流比在蓄水后发生了质的改变，河道左汊(中港)洪水分流比由 2002 年的 62% 降低为 2012 年的 48%，减幅为 14%；枯水分流比在 2009 年之后开始下降，至 2012 年下降幅度为 48%。三峡水库蓄水后，分汊段分流比变化基本规律为：洪水主流倾向汊道分流比减小，顺直分汊及弯曲汊道洪水分流比下降幅度小于中枯水，而鹅头形分汊洪水分流比下降幅度大于中枯水。

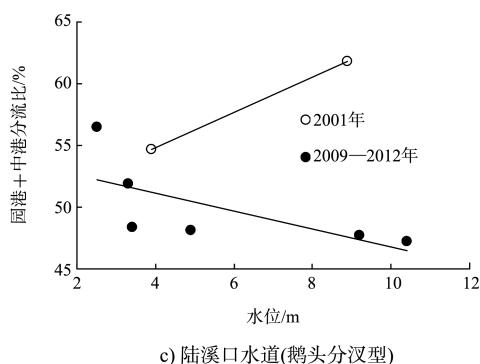
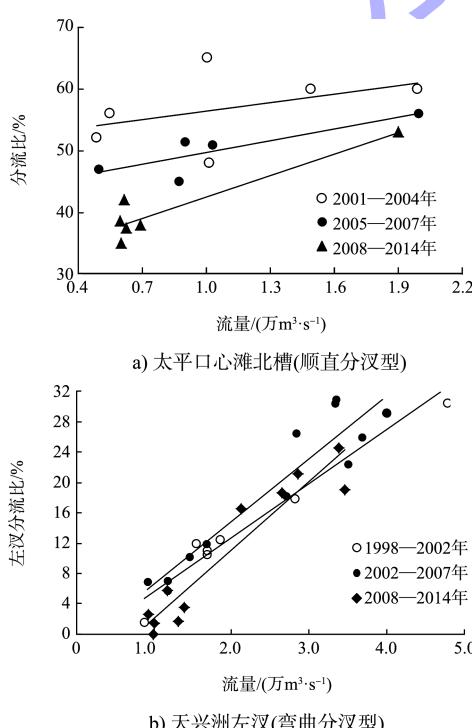


图 8 长江中下游典型分汊河段分流比变化

2.3 冲淤部位和航槽位置关系

三峡水库蓄水后长江中下游河段滩槽形态冲淤调整依然剧烈，且部分水道出现了滩体冲刷变化，下游河道冲刷能够增加过流面积，但航道水深与之并无简单的线性对应关系，而是取决于河槽的冲刷部位与航槽位置是否一致。冲刷条件下，航道条件变差的原因包括以下几个方面：1)水流的持续顶冲使得江心洲体稳定性大幅降低，对汊道分流的控制力度逐渐减弱，分流区域河宽增大，主航道所在汊道进口处往往出现交错或散乱的不良浅滩形态，导致出浅碍航。2)受洲头冲刷及中洪水历时延长的影响，位于中洪水流路上的汊道在中洪水长历时作用下逐渐冲刷发展，通航主汊道分流比降低，使得主航道所在汊道内部航道条件急剧恶化，各类型浅滩均有可能出现，易导致出浅碍航。3)随着分流比变化，水流交汇夹角及主支汊地位发生变化，往往使得原有稳定河槽发生变迁，极易形成交错、散乱等不良浅滩，易导致出浅碍航。

3 分汊河段治理思路

3.1 双分汊河段治理

1)对于主汊分流超过 90% 的分汊型河段，主要采取稳定洲滩格局的守护措施，必要时调整主汊汊道内的滩槽形态。当边心滩的变化影响到分流格局稳定时，一般采用边心滩整体守护的工程形式，若支汊发育有较深的倒套，还需兼顾对支汊的适当控制。以长江中游瓦口子、马家嘴水道等典型代表滩段为例，见图 9，航道整治工程实施后，处于发展阶段的支汊得到有效控制，主航道所在汊道分流比及浅滩航道条件较为稳定；当支汊接近衰

亡状态、发展可能性较低时，一般只对洲头低滩进行守护，以稳定或改善主汊口门处的滩槽格局。如窑监河段的航道整治工程实施后(图 10)，形成较为理想的洲头低滩滩形，退水期起到了引导水流平顺进入主汊的作用，整治效果明显。

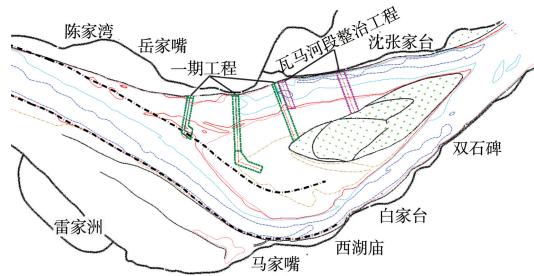


图9 马家嘴水道的支汊控制工程

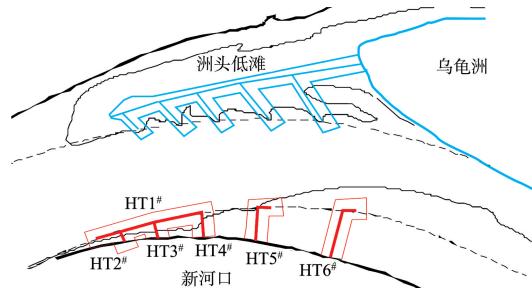


图 10 长江中游窑监河洲头低滩守护

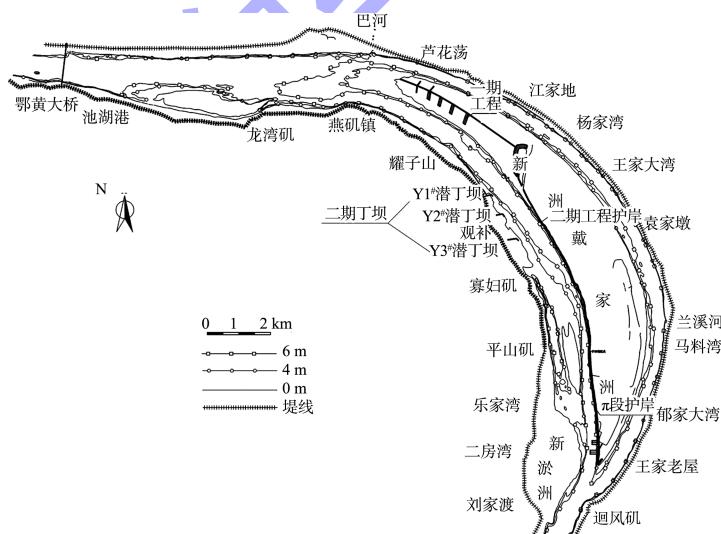


图 12 戴家洲河段航道整治工程

3.2 多分汊河段治理

3.2.1 顺直多分汊河段

东流水道为长江下游典型的顺直多分汊河段,见图13,河段内分布有娘娘树边滩、老虎滩、莲花洲、玉带洲等滩体,汊道分为东港、西港及莲花洲汊道。碍航特征主要为汊道分流关系不稳定,

2) 对于主汊分流比大于 70%、支汊虽有一定的分流但水域资源利用程度不高的情况, 若支汊出现发展态势, 主要采用心滩守护和支汊控制相结合的工程方式。如张家洲水道洲头整治工程实施后(图 11), 稳定了洲头心滩, 同时对支汊进行适当控制, 改善了主汊的航道条件。

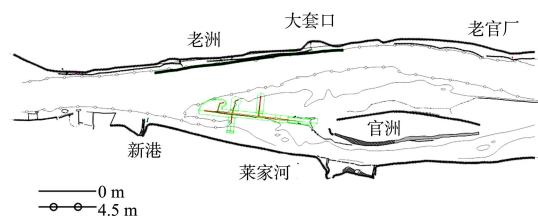
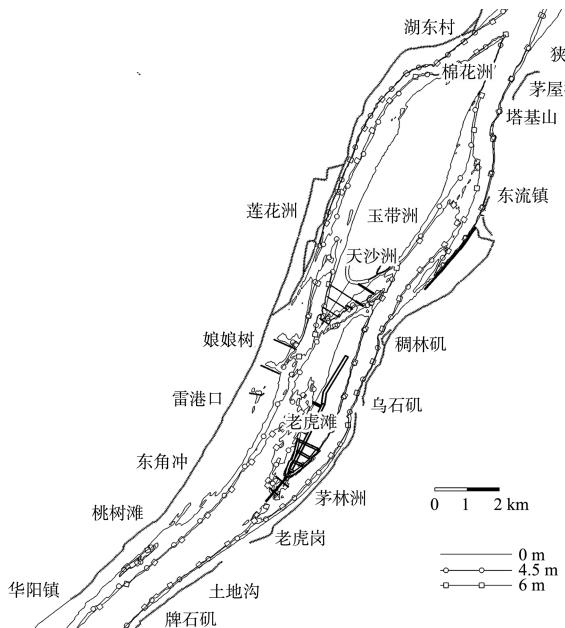


图 11 张家洲水道航道整治工程

3)当主支地位不明显且各汊道均有较高的水域资源利用程度时,治理难度较大,如太平口水道、戴家洲河段(图12)、东流水道等浅滩段。对于分汊型浅滩,航道整治一般不实施汊道限制工程,在围绕总体治理目标实现上,采取分步控制,塑造优良边、心滩形态,巩固或调整滩槽格局,达到维持或提高航道尺度的目的。

三峡工程运行后边滩冲刷后退、典型洪水过程、河道采砂及桥梁工程等使得东港和西港出现了枯水期主汊和支汊交替现象。从航道整治工程治理思路上，应稳定汊道分流关系、稳定洲滩形态及格局、塑造优良的滩槽形态、集中水流以达到浅



注: 1. 根据 2014 年 2 月长江航道测量中心 1:10 000 测图绘制, 测时水位 2.22 m。2. 绘图基面: 当地航行基准面, 黄海高程东流 2.53 m。

图 13 东流水道航道治理方案布置

3.2.2 多级并列型分汊河段

马当河段为长江下游多级并列型分汊河段, 见图 14, 三峡工程运行以来因护岸工程的实施, 河道主汊和支汊的地位基本稳定, 北侧非主航道汊道为衰退态势; 马当南水道双槽格局仍将长期存在, 马当南水道、马阻水道的汊道分流关系不稳定、洲滩仍处在萎缩态势, 马当矶限制了枯水期主航道双汊通航。在马当河段 4.5 和 6.0 m 水深航道整治中, 遵循分期实施的思路, 需要稳定汊道分流格局、守护洲滩边界与格局、改善浅区的水动力冲刷条件等。为此, 实施了长江下游马当河段航道整治一期工程(2009—2011 年)、长江下游马当南水道航道整治工程(2013—2016 年)和长江干线武汉—安庆段 6 m 水深航道整治工程(马当河段, 2018—2021 年)。

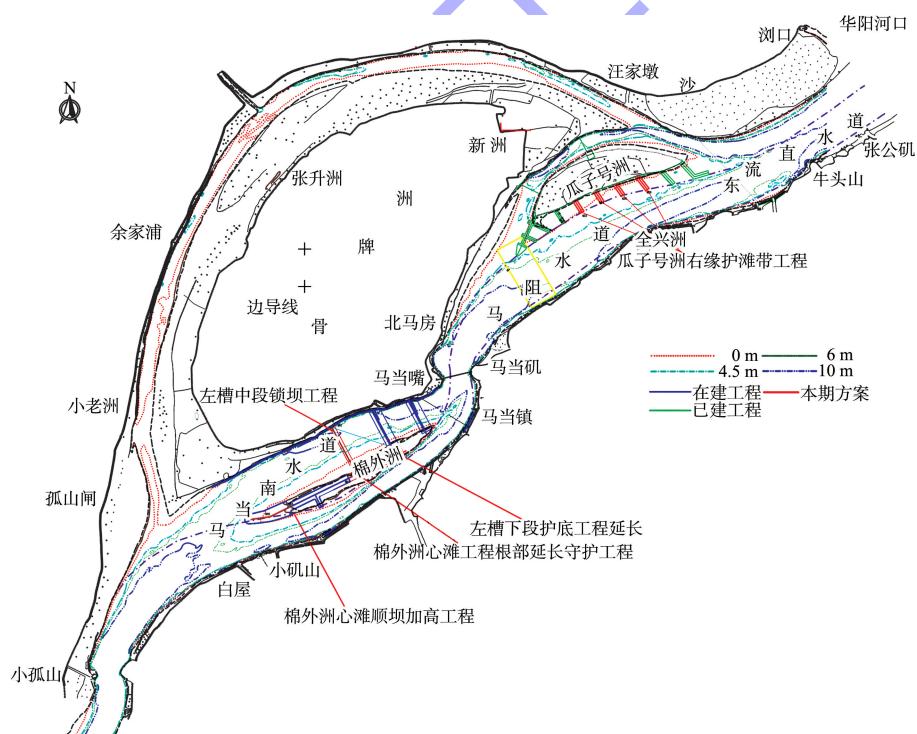


图 14 马当水道航道治理方案布置

4 结论

1)三峡工程蓄水运行后, 长江中下游分汊河道的浅滩段发生进一步冲深, 同时, 洲滩冲刷萎缩、滩槽形态调整等不利效应仍将显现; 分汊段的洪水主流倾向汊道分流比减小, 顺直

分汊及弯曲汊道洪水分流比下降幅度小于中枯水, 而鹅头形分汊河型洪水分流比下降幅度大于中枯水; 蓄水后通航主汊道对分流的控制力度趋于减弱, 主汊道分流比降低, 原有稳定河槽发生变迁, 极易形成交错、散乱等不良浅滩,

易导致河道出浅碍航。

2) 分类提出分汊河段的治理思路及相应整治措施：对于主汊地位占绝对优势，支汊分流较小分汊型河段，当边心滩的变化影响到分流格局稳定时，一般采用边心滩整体守护的工程形式，若支汊发育有较深的倒套，还需兼顾对支汊的适当控制。当主汊分流有一定优势，支汊水域资源利用程度不高但逐渐发展时，主要采用心滩守护和支汊控制相结合的工程方式。对于主支地位不明显的分汊型河段，治理难度大，航道整治一般不实施汊道限制工程，在围绕总体治理目标实现上，采取分步控制，塑造优良边、心滩形态，巩固或调整滩槽格局，以达到维持或提高航道尺度的目的。

参考文献：

- [1] 姚仕明, 张超, 王龙, 等. 分汊河道水流运动特性研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(3): 49-52, 57.
- [2] 李振青, 路彩霞, 杨光荣. 长江中下游分汊河段支汊衰变因素探讨[J]. 水利水电快报, 2005, 26(9): 29-31.
- [3] 余新明, 李雨晨. 长江中游调关水道演变规律及趋势分

析[J]. 水道港口, 2015, 36(3): 224-228.

- [4] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 20-35.
- [5] 伍文俊, 余新明. 三峡水库运行后库区航道条件变化及趋势[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(3): 344-347.
- [6] 刘万利, 伍文俊, 余新明. 长江中游典型分汊河段河床演变[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(5): 613-617.
- [7] 冷魁, 罗海超. 长江中下游鹅头型分汊河道的演变特征及形成条件[J]. 水利学报, 1994(10): 82-89.
- [8] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 1-30.
- [9] 谢凌峰, 陆永军, 王义安, 等. 北江山塘至石角浅滩河段航道整治研究[J]. 泥沙研究, 2001(1): 62-69.
- [10] 赵志舟, 周华君, 黄超, 等. 长江陆溪口水道航道整治方案研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(1): 49-53.
- [11] 管效仲, 郝秀艳, 吕丽霞. 松花江火炉浅滩航道整治工程效果分析[J]. 黑龙江水利科技, 2001, 29(3): 32-33.
- [12] 陈一梅, 王震, 张东生. 闽江竹岐至侯官河段河床演变规律与整治初探[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 79-84.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 74 页)

3 结语

1) 对于阶梯式布置的陆域，应结合进港道路、码头平台、陆域纵深等选择合适的陆域高程和道路纵坡，在陆域高程的确定上，不仅要考虑建设期的投资，还要考虑生产运营期的运营成本、运营安全。

2) 对于山区丘陵地带河港项目陆域形成很难做到完全的土石方挖填平衡，尤其对于大面积挖填陆域，弃渣场或者料场的选择往往成为陆域形成方案选择的制约因素，陆域形成的方案应尽可能高地减少挖、填土石方量。

参考文献：

- [1] 张建新. 港口堆场的设计与研究[D]. 大连: 大连理工大

学, 2003.

- [2] 顾磊. 连云港港区陆域形成方案的探讨和建议[J]. 水运工程, 1998(2): 26-29.
- [3] 殷昕, 马兴华. 南通港通州湾港区二港池水陆域形成建设方案[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(4): 50-54.
- [4] 付文光, 张俊, 杨志银. 大亚湾石化区一期陆域形成及地基处理工程[C]//中国土木工程学会. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册), 北京: [出版者不详], 2006: 841-846.
- [5] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 河港总体设计规范: JTS 166—2020[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2020.
- [6] 俞武华. 长江上游集装箱码头陆域堆场平面布置及港内道路纵坡研究[J]. 水运工程, 2006(S1): 41-47.

(本文编辑 王传瑜)