

编者按:2018年度大禹水利科学技术奖评选结果已经揭晓,共有54项科技成果获此殊荣,其中特等奖2项,一等奖13项,二等奖20项,三等奖19项。为宣传作出突出贡献的科学技术人员和科研单位及高校、展示推广水利科技成果,本刊遴选了水旱灾害防御领域的《长江中下游河道整治研究与实践》《中国山洪灾害调查评价关键技术及应用》等6项获奖成果,希望以宣传促发展,将这6项成果的先进技术和经验进行推广,同时进一步发挥科技奖励的激励和导向作用,充分调动广大水利科学技术人员的积极性和创造性,继续为水利科学技术事业的发展和现代化建设努力奋斗。



大禹水利科学技术奖 / 一等奖

长江中下游河道整治研究与实践

完成单位

长江水利委员会长江科学院、长江勘测规划设计研究有限责任公司、武汉大学

1 立项背景

长江中下游干流河道自宜昌至河口段全长约1 893 km,流经湖北、湖南、江西、安徽、江苏及上海6省(直辖市),以湖口为界分为中游、下游。长江中游长约955 km,其中枝城至洞庭湖出口的城陵矶称为荆江河段,长约340 km,素有“万里长江,险在荆江”之称。湖口以下为长江下游,长约938 km。沿江两岸有武汉、南京、上海等重要城市,是长江流域经济最为发达区域,拥有沟通我国腹地东、中、西部的“黄金水道”之称,承担着泄流、航运、水沙资源及岸线开发利用及生态载体等多重功能,在国民经济与社会发展中具有十分重要的作用。

长江中下游干流河道流经宽阔的冲积平原,沿程河型多样,有顺直型、弯曲型、蜿蜒型和分叉型四大类,以分叉型为主,其长度约占其河道长度的70%,分叉型河道越往下游越发育。因河床边界条件存在差异,各类河型河道演

变特点亦各异。长江中下游干流河道两岸支流、湖泊众多,江湖关系复杂。

长江中下游干流河道自然条件下河道演变剧烈,主要存在以下问题:江岸崩坍严重,威胁防洪安全和两岸国民经济设施的正常运行,据不完全统计,近68年来,长江中下游干流河道两岸崩岸线超过1 600 km,约占岸线总长的42.3%;部分河段河道冲淤幅度大、河势变化剧烈、河道泄洪不畅,严重影响防洪安全、河势稳定;有些河段主流摆动,浅滩变化频繁,碍航现象严重;有些河段淤积严重,影响港口、码头和泵站等涉水工程正常运行以及岸线资源利用与保护,迫切需要整治。但长江中下游河道水沙过程年内年际间变化大、河床边界条件复杂,人类活动影响强烈,制定科学的整治方案与综合整治关键技术难度很大。

长江水利委员会长江科学院等单位近几十年来先后开展了长江中下游水沙运动和河道演变及整治关键技术研究与实践。由于问题的复杂性、受经济社会发展水平及研究手

段的限制,1990年以前对复杂条件下的水沙运动和河道演变规律的认识不够深入,整治研究手段较为单一,同时三峡水库兴建等人类活动影响越来越强烈,影响范围广、持续时间长,整治面临的难题更多、难度更大,关键技术亟待突破。1990年以来,针对长江中下游河道整治涉及的复杂水沙运动与河床演变、整治技术等关键科技问题,构建了集原型资料分析、多维数学模型耦合计算、室内与现场试验及工程实践相结合的综合研究平台,开展了深入研究,在长江中下游河道泥沙输移和分汊河道水沙运动规律、水沙变化条件下长江中下游不同类型河道演变规律及其整治系列关键技术等方面取得了创新性研究成果,逐步完善了长江中下游河道整治基础理论和技术体系,促进了河道整治等相关学科的发展,取得了较好的整治效果和显著的经济、社会效益。

2 建设目标

(1)进一步掌握长江中下游河道不同河型的水沙运动规律、河道演变规律,完善长江中下游河道整治基础理论体系,为开展整治研究及工程实践提供理论基础及科学依据。

(2)攻克长江中下游河道整治系列关键技术,结合长江中下游重点河段的整治实践,稳定长江中下游河势,保障防洪、航运安全,落实长江大保护方针,为长江经济带发展提供水利支撑与保障。

(3)通过项目的实施,培养一批国家及省部级高级治江科技骨干人才,出版一系列专著,编制河道整治及长江中下游护岸工程设计规范性文件,为长江中下游可持续保护与治理提供人才储备和技术积累,并促进河道整治等相关学科的发展,为河道整治设计、施工及运行管理提供技术支撑。

3 建设内容

(1)进一步掌握长江中下游河道不同河型的水沙运动规律、河道演变规律,解决不连续宽级配床沙输移模拟及分汊河道主支汊演变定量预测、河道演变与近岸河床变形、二元结构河岸的崩塌机理、三峡水库运用后不同类型河道演变新特征等技术难题,为开展整治研究及工程实践提供理论基础,为长江中下游河道整治关键技术与方案研究提供科学依据。

(2)攻克长江中下游河道整治系列关键技术,系统开展河道整治方案研究,形成河道整治技术理论体系,为河

道整治设计、施工及运行管理提供技术依据。

(3)重点研发以防洪航运、城市生态环境保护与综合利用、汉道分流调控、潮汐河段洲滩稳定和岸线综合利用、三峡水库运用后荆江河段抑制河床下切等为主要目标的河道整治关键技术,为长江中下游河道防洪与航运安全、生态环境保护与综合利用、洲滩岸线保护与利用、沿江港口、码头和泵站等涉水工程正常运行等经济社会发展提供有利的河势条件及基础保障。

4 项目成果

4.1 系统揭示了长江中下游河道宽级配床沙输移和分汊河道水沙运动规律

本项研究系统揭示了长江中下游河道水流阻力与紊动特性、连续和不连续宽级配床沙组成的泥沙起动及输移规律,建立了来水来沙变化对分汊河道主支汊冲淤影响的计算公式,确定了分流区冲淤平衡的临界流量,揭示了不同形态分汊河道水沙运动与主支汊冲淤变化的耦合机理,解决了不连续宽级配床沙输移模拟及分汊河道主支汊演变定量预测的技术难题,为提高模拟精度、开展整治研究及工程实践提供了理论基础。

(1)定量揭示了长江中下游各河段综合阻力系数随流量变化的规律,首次采用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)观测并分析揭示了长江天然河道不同特性河段的水流紊动特性及变化规律。

(2)系统研究揭示了长江中下游典型顺直、弯曲与鹅头型分汊河道的水沙运动规律。确定了分流区冲淤平衡的临界流量,大于该流量分流区发生淤积,小于该流量发生冲刷;揭示了汉道冲淤对来水来沙变化的响应机理并提出了相应的计算公式,解决了分汊河道主支汊演变定量预测的技术难题。

来水来沙变化对主支汊冲淤影响的计算公式:

$$\varphi = \left[1 - \frac{1}{\alpha c} \left(\frac{\xi_m}{\xi' + \xi_m} \right) \left(1 + \frac{\eta'}{\eta_m} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: φ 为主汊输沙率变率, $\varphi > 0$ 表示淤积, $\varphi < 0$ 表示冲刷, $\varphi = 0$ 表示不冲不淤; ξ_m 为主汊分沙比; ξ 为主汊分沙比变化量; η_m 为主汊分流比; η' 为主汊分流比变化量; αc 为反映来水来沙与沿程变化的统合系数; m 约为 1.3。

(3)针对中下游河道泥沙运动与河床组成沿时空分布

的差异性,揭示了不同粒径泥沙的运动规律,建立了适用于长江的泥沙起动流速公式(2)和悬移质水流挟沙力公式;试验研究揭示了不连续宽级配床沙的输移规律,明晰了其不同于连续宽级配床沙输移的间断性和跳跃性特征,构建了相应的计算公式(3):

$$U_c = 1.08 \sqrt{gd_{50} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \left(\frac{H_0}{d_{50}}\right)^{0.7}} \quad (2)$$

式中: U_c 为泥沙起动流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; d_{50} 为中线粒径, mm; γ 、 γ_s 分别为水和泥沙的重度, kg/m³; H_0 为行进水流水深, m。

$$G = 568.67 \frac{\theta_b (\sigma_d)^{2.114} \left(\frac{d_{max1}}{d_m}\right)^{-1.9757} \left(\frac{d_m}{d_{min1}}\right)^{-1.9548}}{(P_{min0})^{2.0605}} \quad (3)$$

式中: G 为不连续宽级配床沙推移质输沙率; θ_b 为水流强度的特征变量; σ_d 为床沙均方差; d_m 为床沙加权平均粒径, mm; d_{max1} 为床沙中粗颗粒部分的代表粒径, mm; d_{min1} 为床沙细颗粒部分的代表粒径, mm; P_{min0} 为床沙细颗粒泥沙所占的比例。

4.2 深入揭示了水沙变化条件下长江中下游不同类型河道演变规律

针对水沙变化条件下河道演变与近岸河床变形等科学难题,提出了基于河道平面形态指标的河型分区判据,揭示了二元结构河岸的崩塌机理和三峡水库运用后不同类型河道演变新特征,为长江中下游河道整治关键技术与方案研究提供了科学依据。

(1)提出了表征河道平面形态的特征参数与河型判据。单一河段以转折角(α)1.0弧度和2.27弧度为顺直型、弯曲型和蜿蜒型的界限。分汊河段以 $B/L=0.21\alpha^{-1}$ 和 $B/L=0.54\alpha^{-1}$ 为顺直、弯曲和鹅头分汊型界限(图1、图2) (B 为河宽, m; L 为弦长或步长, 单一段为两过渡段中点之间的直线距离, m; S 为弯曲长度, m; b_0 为以弦长为基线的边滩宽度, m; b 为平滩流量下的边滩宽度, m; α 为转折角, 弧度)。

(2)试验揭示了三峡水库运用后长江中下游不同类型

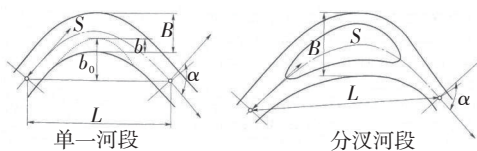


图1 平面形态指标示意图

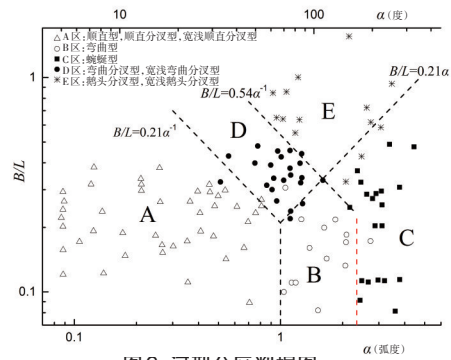


图2 河型分区判据图

河道演变新特征。长顺直型河段主流朝单向移动趋势明显,长顺直过渡段主流有趋直的趋势,水流顶冲部位发生移位;弯曲(蜿蜒)型河道凸岸边滩冲刷且难以恢复,滩槽格局与断面形态发生明显调整,急弯段“切滩撇弯”现象更易发生,试验成果被三峡水库运用后河道实际变化所印证(图3、图4);分汊型河道洲滩演变速度趋缓,主流摆幅减弱,河道总体朝稳定方向发展,短汊发展速度相对要快。



图3 七弓岭弯道2008年模型预测成果

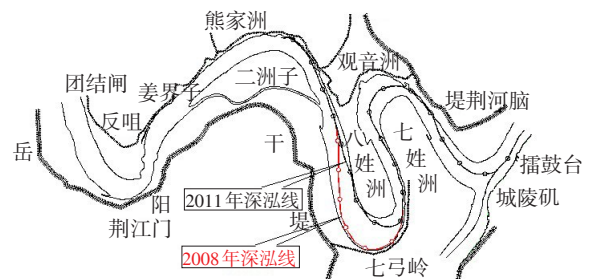
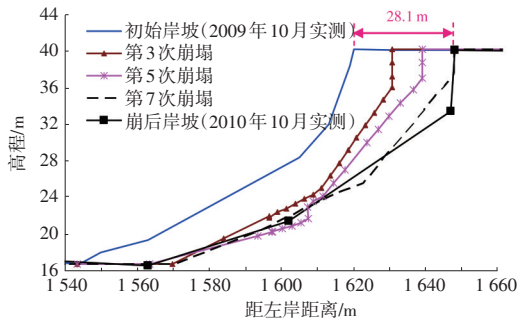


图4 原型实测结果

(3)揭示了不同类型二元结构河岸的崩塌机理。对上部黏性土层较厚的二元结构河岸,表现为平面或圆弧滑动崩塌,提出了相应的河岸稳定性计算方法;对于上部黏性土层较薄的二元结构河岸,表现为“绕轴型”崩坍,并推导出了黏土层临界悬空宽度的表达式:

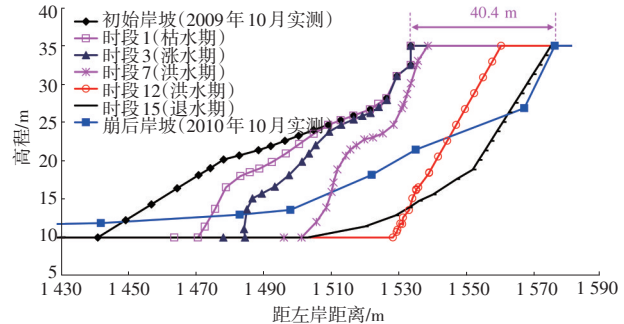
$$B_c = \sqrt{2\sigma_i H_i (1 - H_i/H_1)^2 / [3(1 + \beta)\gamma_s]} \quad (4)$$

式中: B_c 、 H_1 、 γ_s 分别为黏土层临界悬空宽度(m)、高度(m)、容重; σ_i 为水深, m; H_i 为河岸顶部张拉裂隙的深度, m; β 为黏土层的抗拉应力与抗压应力之比, $\beta = \sigma_t / \sigma_c$, σ_t 、 σ_c 分别为土体的抗拉及抗压强度。



(a) 上荆江-荆34#

在机理认识的基础上,建立了考虑近岸水沙运动、岸坡土体力学特性等主要因素的二元结构河岸崩塌过程模拟方法,较好地模拟了荆江河段崩塌过程。进一步将崩岸模型嵌入一维水沙动力学模型,实现了河床冲淤与二元结构河岸崩退过程的同步模拟(图5)。



(b) 下荆江-荆98#

图5 2010年荆江崩岸过程模拟效果

4.3 攻克了长江中下游河道整治系列关键技术

针对不同河型河道河势控制、多目标综合整治、护岸工程设计和施工中的关键技术问题,系统开展了河道整治方案与关键技术研究,攻克了河道整治中的诸多关键技术难题,形成了河道整治技术体系,为河道整治设计、施工及运行管理提供了技术依据。

(1)研究提出了长江中下游不同河型河道的河势控制参数(表1)。可通过工程措施控制调整相关参数,以促进优良河势的形成,成果已成功应用于下荆江北碾子湾、盐船套长顺直段和安庆官洲汉道等河段河势控制实践。

表1 长江中下游不同河型河道的河势控制参数

河道类型	控制参数			
	L/B	S/B	R/B	其他
顺直型河道	6.8	7.0	6.3	
弯曲型河道	7.9	10.5	0.7	
分汊型河道	顺直分汊型	7.0	7.0	$R > 4.76SB/L$
	弯曲分汊型	3.5	3.5	$1.85SB/L < R < 4.76SB/L$
	鹅头分汊型	1.3	1.5	$R > 1.85SB/L$

注: B 为河宽, L 为弦长或步长, S 为弯曲长度, R 为弯曲半径, 单位均为 m。

(2)针对不同河型河段演变特性和整治需求,分别攻克了以防洪航运、城市河段综合利用、洲滩控制、抑制河床下切为主要目标的河道整治关键技术,并成功应用于工程实践。

(3)研发了多种护岸工程新技术,提出了护岸工程设计准则及方法。针对传统抛石等散粒体护岸工程整体性较

差的不足,研发了混凝土铰链排、土工布压石和钢筋混凝土护底促淤网架等水下护脚新技术;针对生态环境的需求,研发了土工格栅石垫和宽缝加筋生态混凝土水上护坡、网模卵石排水下护脚等生态护岸工程新技术已广泛应用于中下游护岸工程实际。

通过试验和理论分析,系统揭示了散粒体、排体及刚性体护岸工程破坏机理,并阐明了相应的适用条件。提出了不同边界、水流和河势条件及崩岸强度下各种结构护岸工程设计标准和相关参数的定量确定方法和公式,形成了长江中下游护岸工程技术规范性文件。公式如下:

防冲石方量定量计算公式:

$$W = W_1 + W_2 \quad (5)$$

其中 $W_1 = K_1 B_i (S_i m_2 / m_1 - S_i + m_2 H)$ (6)

$$W_2 = K B_i m_2 (H_{\max} - H) \quad (7)$$

式中: W 为防冲石量, m^3/m ; W_1 为初期防冲石量, m^3/m ; W_2 为最大冲深防冲石量, m^3/m ; K_1 为系数,一般取 1.1; B_i 为坡脚处抛石厚度, m; S_i 为坡脚处抛石宽度, m; m_1 、 m_2 分别为工程实施前和稳定后的河床边坡系数; H 为工程初期河床冲刷调整基本结束时守护前缘可能发生的最大冲深值, m; H_{\max} 为可能发生的最大冲深度, m, 其值可参照同类地段已实施工程的实测资料分析确定; K 为安全系数,水深流急、迎流顶冲段可取 1.2~1.3, 其他段取 1.1~1.2。

块石漂距计算公式:

$$S = K_2 V H / W^{1/6} \quad (8)$$

式中： S 为块石漂距， m ； K_2 为综合影响系数； V 为流速， m/s ； H 为水深， m ； W 为块石重量， kg 。

稳定的块石粒径计算式：

$$D = \frac{3}{2} \left[\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right] \left\{ \frac{\frac{a}{\sqrt{1-a^2}} \lambda_x \cos \phi + \lambda_y}{\cos \theta - \frac{a}{\sqrt{1-a^2}} \sin \theta \sin \phi} \right\} \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

式中： D 为简化为球体的块石粒径， m ； ρ 、 ρ_s 分别为水和块石的密度； a 为与力臂相关的待定系数，与球体的相对突起高度有关； λ_x 和 λ_y 分别为球体在水流中受力的推移力系数和上举力系数； v 为垂线平均流速， m/s ； g 为重力加速度， m/s^2 ； ϕ 为块石失去稳定时的翻滚方向与水平方向的交角， $(^\circ)$ ； θ 为斜坡坡角， $(^\circ)$ 。

5 项目创新点

(1) 系统揭示了长江中下游河道宽级配床沙输移和分叉河道水沙运动规律。通过试验与理论研究揭示了不连续宽级配床沙输移具有不同于连续宽级配床沙的间断性和跳跃性的规律，构建了不连续宽级配泥沙起动与输沙率计算公式。系统揭示了顺直、弯曲及鹅头形分叉河道的水沙运动规律，确定了分流区冲淤基本平衡的临界流量；揭示了汉道冲淤对来水来沙变化的响应机理并建立了相应的计算公式，解决了分叉河道主支汉演变定量预测的技术难题。

(2) 深入揭示了水沙变化条件下长江中下游不同类型河道演变规律。提出了表征河道平面形态的特征参数以及区分单一河段、分叉河段不同类型的河型判据；通过试验研究和原型观测揭示了三峡水库运用后中下游不同类型河道演变新特征；揭示了不同类型（上部黏性土层较厚、上部黏性土层较薄）二元结构河岸崩塌机理；建立了考虑近岸水沙运动、岸坡土体力学特性等主要因素的二元结构河岸崩塌过程模拟方法，实现了河床冲淤与二元结构河岸崩退过程的同步模拟。

(3) 攻克了长江中下游河道整治系列关键技术。提出了不同河型河道优良河势控制参数；攻克了5类不同整治目标（防洪和航运相结合、城市河段生态环境保护 and 综合利用、汉道分流调控、潮汐河段洲滩稳定和岸线综合利用、抑制河床下切）的河道整治关键技术；研发了多种护岸工程新技术，提出了护岸工程设计准则及方法，形成了长江

中下游护岸工程技术规范性文件。

6 项目应用案例

本项目有力支撑了流域综合及相关专项规划编制、洪水调度方案和三峡水库优化调度方案制定、以及防汛抢险和河道管理，规范了河道整治工程设计，提高了工程整治工程效果，提升了河道管理水平，在长江中下游重点河段河势控制及荆江、武汉、南京、镇扬等20多个河段整治工程的设计、施工及运行管理中得到广泛应用，在保障河势稳定、防洪安全、航道畅通及水沙和岸线资源利用中发挥了重要作用。部分成果被《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)和《河道整治设计规范》(GB 50707—2011)等国家标准采纳，项目核心成果在长江、黄河及淮河等流域90项工程实践中得到应用，并支撑形成19项二次成果。项目应用在长江干流上的典型工程案例如下。

6.1 界牌河段综合治理工程

以防洪航运为主要整治目标的“基于防洪安全的岸线控导技术+改善航道条件的低滩航槽调控技术”，应用于界牌河段综合治理工程中，工程实施后河势得到有效控制，以往过渡段深泓大幅上提下移现象得以明显抑制，主流顶冲点位置基本稳定，防洪能力大幅提升，同时，过渡段航道条件明显改善，新堤夹分流比有所增大，防洪问题得到有效解决、通航条件明显改善（图6、图7），达到了预期的效果。

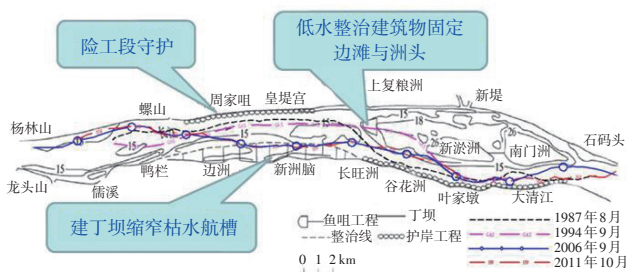


图6 界牌河段整治方案及整治后河势图

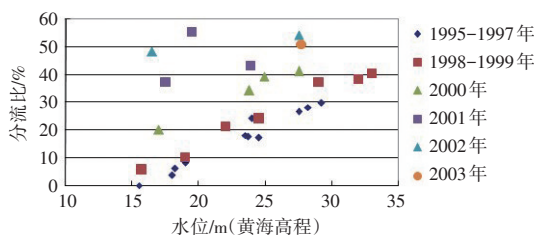


图7 界牌河段整治后新堤夹分流比图

6.2 龙王庙险段整治工程和汉口江滩综合治理工程

以城市河段生态环境保护 and 综合利用为主要整治目标的“多级滩槽疏填结合下防洪与生态环境双改善的综合整治技术”,应用于武汉等多个沿江城市河段的整治实践,如武汉河段龙王庙险段整治工程实施后,彻底解决了龙王庙险段两江交汇处岸脚淘刷严重和年年出险、年年加固的突出防洪问题,改善了武汉河段的防洪航运条件和两江四岸的景观环境;武汉市汉口江滩综合治理工程实施后,有力地整治了汉口江滩的防洪条件,极大地改善了江滩的环境,为中心城区的市民提供了一个绿色亲水空间和文化休闲乐园,实现了人与自然协调治水的新思路和可持续发展的要求,使武汉成为国内外城市河段治理的典范(图8、图9)。

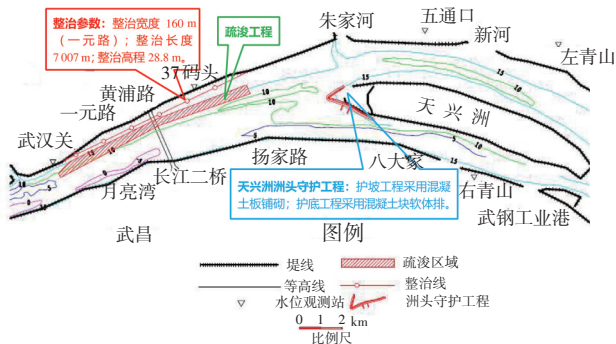


图8 汉口江滩综合治理方案



(a)整治前

(b)整治后

图9 汉口江滩综合治理前后对比

6.3 马鞍山、镇扬分汊河道治理工程

以汉道分流调控为主要目标的“节点、洲头位置和滩体形态协同控制与汉道分流调控技术”,成功应用于马鞍山、镇扬等分汊河段整治。其中主汉动深水(60m水深,2~3m/s流速)潜坝控流整治技术成功应用于长江下游镇扬河段和畅洲汉道分流调控整治工程(图10),并攻克了坝体选材、坝工结构设计、施工与防护技术难题,工程实施后有效扭转了和畅洲左汊快速发展的态势(图11)。

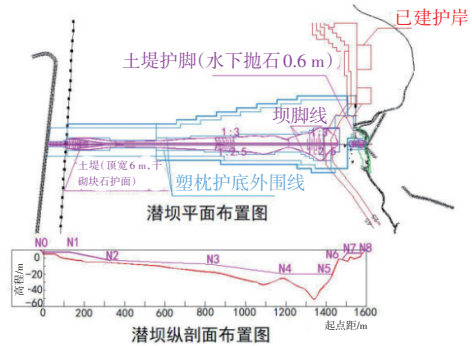


图10 和畅洲潜坝整治方案

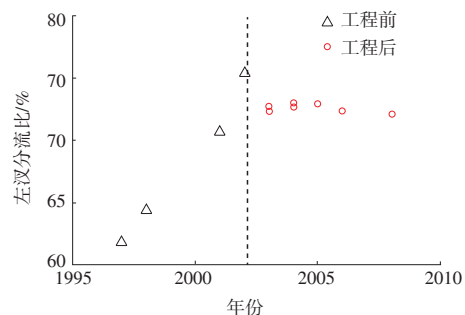


图11 潜坝工程实施前后左汊分流比(流量5000~40000 m³/s)变化图

6.4 澄通河段整治工程

如表2所示,以潮汐河段以洲滩稳定和岸线综合利用为主要目标的“滩面串沟封堵、束水归槽、优良河道断面塑造关键技术”已成功应用于澄通河段整治,工程实施后通州沙西水道分流比增加1%左右,有效改善了岸线、航道条件及滩涂生态环境。

表2 澄通河段通州沙东、西水道实测分流比变化统计表

测量时间(年-月)	东水道分流比/%	西水道分流比/%	大通流量/(m ³ ·s ⁻¹)
2012-12	90.7	9.3	
2015-09	91.1	8.9	
2016-02	89.5	10.5	19 000~21 900
2016-08	89.7	10.3	47 900~53 200

7 主要完成人

主要完成人员:卢金友、余文畴、侯卫国、夏军强、林木松、董耀华、姚仕明、张细兵、罗恒凯、陈前海、朱勇辉、廖小永、徐海涛、杨光荣、何勇。
责任编辑 马 啸