

河流分汊成因与演变机制研究综述

王长金¹, 胡鹏¹, 李薇¹, 李志威²

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于较系统的文献调研, 介绍了分汊形成机制如中心沙坝沉积、横向沙坝转换、斜槽切断、复合沙坝切割和河道决口, 水沙分配影响因素如汉道几何形态、汉道河床地形、汉道内的水力特性和潮汐等因素, 和水沙分配计算方法等主要方面的研究进展, 并以长江中下游分汊河段为例, 总结了其分汊河道的水力特征和演变规律。最后探讨了分汊河道研究中还需解决的问题, 以及数值模拟方法在分汊形成与演变研究中的应用及前景。

关键词: 河流分汊; 水沙分配; 分汊河道; 数值模拟方法; 长江中下游

中图分类号: TV147.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)03-0112-10

A review on formation and evolution mechanism of river bifurcation// WANG Changjin¹, HU Peng¹, LI Wei¹, LI Zhiwei² (1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on systematic literature reviewing, the formation mechanism of bifurcating channels was introduced, such as central bar deposition, transverse bar conversion, chute cutoff, dissection of multiple bars and avulsion. Factors influencing water and sediment distribution include geometrical form, riverbed topography and hydraulic characteristics of bifurcating channels. The research progress of water and sediment distribution calculation method was also introduced. Taking the middle and lower Yangtze River as an example, the hydraulic characteristics and evolution characteristics of bifurcating channels were summarized. Finally, the problems that still need to be solved in the study of bifurcating channels were discussed, especially the application status and prospect of numerical simulation in the study of bifurcations formation and evolution.

Key words: river bifurcation; water-sediment fluxes partition; bifurcating channel; numerical simulation method; middle and lower Yangtze River

早期地貌学者 Leopold 将河流分为顺直、弯曲和辫状 3 种河型^[1]。随着河流地貌学者对于河流形态认识的加深, 发现并不能将所有多河道河流都归于辫状河流。比如长江中下游河段, 此河段的河流形态与典型的辫状河流存在一定差别, 具有更稳定和尺寸更大的江心洲, 各支汊之间明显分开, 相距较远。这一类河流被归于“分汊型河流”。分汊是辫状河流和分汊型河流的组成部分, 分汊的存在和形态演变, 改变了分汊河段的流量和泥沙分配。所以, 分汊是对河网行为具有基本重要性的单元过程。

辫状河流和分汊型河流作为冲积河流的基本类型, 前人利用野外观测、物理模型试验、理论分析和数值模拟等方法研究了其分汊从形成到消亡的整个演变过程。然而对于这两种河流, 关注重点有所不

同。对于辫状河流, 重点主要集中于分汊的形成。对辫状河流形成时的沉积与侵蚀过程, 以及其相关的水力条件进行研究的过程中, 总结并提出了 5 种分汊的形成机制; 中心沙坝的沉积^[2]、横向沙坝向复合沙坝的转换^[2-3]、斜槽切断^[2,4]、复合沙坝的切割^[5]以及河道切口^[4,6]。对于分汊型河流, 重点主要集中于分汊处的水沙分配上。分汊型河流相比于辫状河流, 相对稳定性较高, 河道形态短时间内不易改变。分汊形成后, 由于汉道自身的几何形态、河床地形, 以及壅水效应和潮汐等因素的影响, 分汊处的水沙分配往往极不均匀。这使得分汊型河流往不同的方向演变, 这也造就了多种多样的汉道形态^[7-8]。

河流分汊是冲积扇、辫状河流、分汊河流和河口三角洲等冲积地貌系统的重要组成部分。泥沙运动

基金项目: 国家自然科学基金(11772300); 浙江省自然科学基金(LR19E090002)

作者简介: 王长金(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事河流与海岸泥沙运动研究。E-mail: wangchangjin@zju.edu.cn

通信作者: 胡鹏(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事水沙动力学和泥沙运动研究。E-mail: pengphu@zju.edu.cn

是分汉形成与演变的最基本动力,即河道通过分汉控制水流和泥沙的分配,水流和泥沙的分配反过来影响分汉河道的演变。对辫状河流和分汉型河流的形成和演变进行的广泛研究,有助于人们加深对其河道演变特点的理解,也为未来河道的治理提供了广泛的参考。本文以分汉的形成到演变为脉络,综述了辫状河流和分汉型河流的研究进展,其中包括辫状河流中分汉的形成机制、分汉型河流汉道分流分沙的计算和影响汉道内水沙分配的因素;以长江中下游河道为对象,总结了其分汉河段的水力特点及演变情况,并探讨了相关研究中仍待解决的问题。

1 辫状河道的分汉形成机制

早期,人们对冲积河流辫状成因的解释可分为两大类。第一种将辫状的成因与外部环境因素(如河流流量、河道或河谷坡度、泥沙粒径和河岸阻力)的特定组合相关联^[1]。或者,通过河床形态的稳定性分析解释直河道演变为辫状河道的原因。稳定性分析表明,如果河道坡度和宽深比足够小,直河道将演变为弯曲河道,不会形成辫状河道。如果坡度和宽度深度足够大,则直河道将最终演变为辫状河道^[9]。

这两种方法都没有明确考虑伴随分汉形成的沉

积与侵蚀过程,这需要仔细的描述和分析,然后才能对现象进行全面的解释。在顺直河道演变为辫状河道的过程中,泥沙的侵蚀与沉积是分汉形成最基本的原因。区别在于,在不同的水力条件和地貌条件下形成分汉的方式不同。前人通过物理模型试验、数值模拟和野外观测等方法,总结出了形成分汉的5种机制^[2,4],包括中心沙坝沉积和横向沙坝向复合沙坝的转换两种沉积机制,斜槽切断、复合沙坝切割以及河道决口等3种侵蚀机制。

1.1 沉积机制

中心沙坝沉积和横向沙坝转换是形成分汉的两种沉积机制。在剪切应力较小的河道中,粗颗粒泥沙沉积,并逐渐形成一个细长的沙丘(图1(a)①)^[6]。随着粗颗粒泥沙在这些沙丘附近不断堆积,中心沙坝的沉积核得以形成(图1(a)②)。沉积核堆积生长直到露出水面,导致水流分汉^[4]。这是中心沙坝沉积的过程。横向沙坝转换机制下分汉的形成是从横向沙坝^[3]开始的。这个沙坝的明显特征是下游粗颗粒泥沙的堆积,进而形成较为陡峭的滑动面(图1(b)①)。该单元沙坝在平均流量期间通常被水流淹没,粗颗粒泥沙持续在其中部堆积(图1(b)②),堆积的泥沙形成沙坝导致水流分汉(图1(b)③),堆积的泥沙形成沙坝导致水流分汉(图1(b)④),堆积的泥沙形成沙坝导致水流分汉

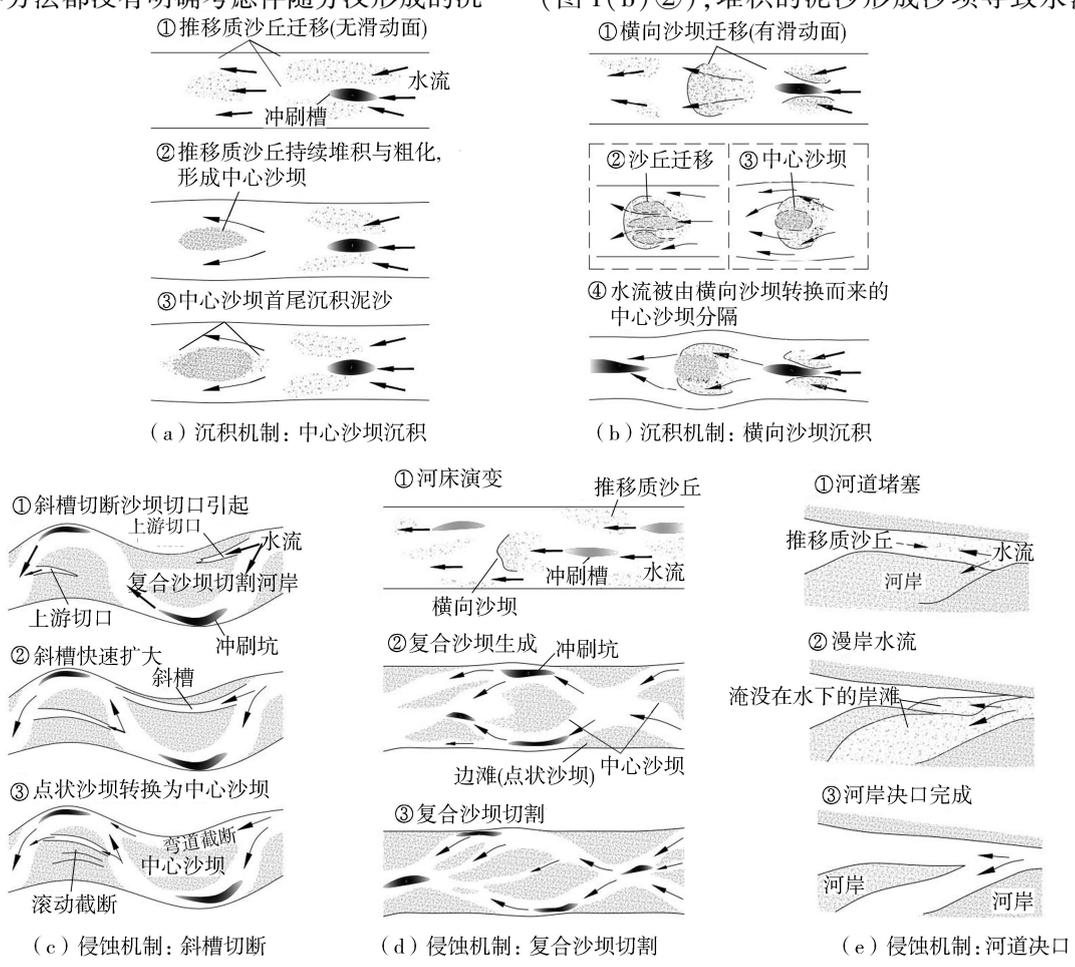


图1 5种分汉机制

(图1(b)③)。该横向沙坝转变为一个中心沙坝和左右两个新的横向沙坝(图1(b)④),未来这两个横向沙坝仍有可能继续上述演变。

横向沙坝转换在许多方面与中心沙坝机制相似。两者之间的区别在于,横向沙坝转换中的泥沙流动性较高,这将导致河床局部的侵蚀与沉积差异较大,从而促使沙坝的形成^[4,10]。

1.2 侵蚀机制

斜槽切断和复合沙坝切割是常见的形成分汉的侵蚀机制,斜槽切断机制通过在点状沙坝上形成斜槽通道来形成分汉^[2]。点状沙坝是与河岸相连的可侵蚀边滩。斜槽的产生方式有两种(图1(c)①):沙坝或河岸下游端的切口因漫滩流量不断向上游扩大^[11];沙坝或河岸前端侵蚀性裂口向下游延伸^[12]。点状沙坝上的斜槽因水流的侵蚀而逐渐扩大,直到该点状沙坝上的截断河道完全形成。点状沙坝被截断后,存在于河中的部分将发展为“中心沙坝”(图1(c)③),由于该中心沙坝对水流的顶冲作用,导致点状沙坝与河岸相邻的部分将被冲刷殆尽^[2]。此外,由于河道坡度的差异,斜槽切断存在两种类型:通过点状沙坝上的斜槽进行的滚动斜槽截断^[13];通过切口穿过点状沙坝的弯道截断^[14]。

在复合沙坝切割机制中,最初,水流集中在孤立的、不连续的冲刷槽中,推移质沿着这些冲刷槽输移,泥沙通常在这些冲刷槽的下游末端形成沙丘^[5]和横向沙坝(图1(d)①)。随着泥沙的不断堆积,各单元沙坝不断生长与合并,形成各种中心沙坝和点状沙坝(图1(d)②)。沙坝的形成与合并迫使水流加速和水位抬升,漫滩水流侵蚀沙坝,产生多条分汉水道。被切割后的沙坝作为“中心沙坝”留在辫状河道中(图1(d)③)。复合沙坝切割机制与斜槽切断的过程相似,发生条件的区别主要取决于河道几何结构的差异,比如复合沙坝切割仅限于宽深比非常高的河道中^[4]。

河道决口是形成分汉的又一种侵蚀机制。决口开始于水流离开原河道,流过漫滩平原。随着流经漫滩平原的水量的增加,泥沙被逐渐带走,新河道因河岸的侵蚀而逐渐形成^[2](图1(e))。斜槽切断也是一种局部的、河道内的决口类型。河道决口可分为3种方式^[15]:第1种是由于原河道淤积堵塞使得水面抬升,从而在临近浅滩中开辟新河道的堵塞性决口;第2种是由于相邻河道堵塞,河岸迅速侵蚀和主流进入地形较低的区域,从而形成新河道的收缩性决口;第3种是由于弯道内的水流加速,以及弯道凸岸点状沙坝的堆积,导致弯道凹岸的侵蚀,从而在弯道凹岸开辟出新河道的顶点决口。

在不同的河流中,不同的机制占据着主导地位。以泥沙的流动性为区分,在河床剪应力仅略高于临界值的河道中,由于泥沙局部运动能力下降和粗推移质的沉积,中心沙坝沉积占主导地位。在具有较高的河床剪应力的河道中,河床局部的侵蚀与沉积差异较大,横向沙坝更为常见,这导致河床的交替侵蚀和沉积更有可能发生。这类河道中,斜槽切断和横向沙坝转换占主导地位^[4]。在同一河流的不同阶段,也由不同的机制所主导。在直河道演变为辫状河道的阶段,斜槽切断和中心沙坝沉积是形成分汉的主要机制。在发育良好的辫状河流中,由局部横向水面梯度引起的复合沙坝切割和斜槽切断是形成分汉的主要机制^[16]。

2 河流分汉的水沙分配

河流中一旦形成分汉,河流的形态以及水动力特性都会发生很大的改变。以分汉为基本单元的河网系统主要包括分汉型河流和辫状河流,其中分汉型河流河道形态上比辫状河流更为稳定。分汉形成后,分汉河流的河道形态短时间内不会发生较大改变。河道分汉是河流中的普遍现象,对于实际河道,研究者比较关注河流分汉处的水沙分配情况,因为它决定着河道后续的演化方向。

2.1 影响水沙分配的因素

影响分汉处水沙分配的因素可分为两类:第一类为河道自身的稳定性,冲积河流中的水流受到扰动后,局部水力特性发生改变,导致河床中泥沙输运存在差异。正是由于水流与河床的相互作用,使得河流存在一种固有的不稳定性^[17],这种河流内在的不稳定性导致了分汉处水沙分配的不均匀,这被称为“自由”机制^[18]。第二类为影响河道水沙分配的外部因素,这类被称为“强迫”机制^[19-20],其中包括河道的坡度^[21]、分汉角角度^[22-23]和分汉河道的弯曲程度^[24]等河道自身的几何形态,以及河道河床地形^[23,25]、水力粗糙度^[26-27]、壅水效应^[28]以及潮汐^[27]等因素。河道内的水沙分配由“自由”和“强迫”机制共同决定,分汉上游河道的宽深比是衡量这两类机制主导地位的参数。当上游河道的宽深比大于其共振临界值时,河流分汉以“自由”机制为主。分汉上游形成交替或辫状沙坝结构,将水流优先导向一条支流中,使流量分配不均匀,增加上游分支的宽深比会增加流量分配的不对称性。当上游河道的宽深比小于其共振临界值(即河道较窄且较深)时,初始对称的分汉将继续保持对称^[19]。如果存在上游曲率和坡度等外部因素,则演变方向取决于各因素之间的相对强度。此时“自由”和“强迫”机制的相互

作用决定分汊的演变方向^[20]。

在“强迫”机制中,汉道的坡度、分汊角和分汊河道的弯曲程度等汉道自身的几何形态是影响分汊河道分汊处水沙分配最直观的因素。分汊河道下游坡度较大的支汊将获得更多的流量分配,此时该支汊为主汊^[28-29]。坡度的相对大小对分汊处的水流结构也会有影响。当下游两支汊的坡度不对称度大于0.2时,坡度较陡的支流中的水流会不稳定,并且可能形成交替沙坝。坡度不对称也影响二次流的强度,随着坡度的增大,分汊处的二次流强度增大^[22]。分汊本身也会引起二次流强度的显著增加,如图2(a)所示,当分汊角的不对称度 $a_{sy} = 1$ 时($a_{sy} = |\alpha - \beta| / \max(\alpha, \beta)$,图2(d)),两支汊的主导地位很容易区分。此时由于分汊的存在,水动力轴线发生弯曲,二次流的横向环流分量使得河床附近的流速指向支汊,较高的近床泥沙量进入支汊,即使在进入支汊的水流量比例相对较小的情况下也是如此。这使得下游两汉道内泥沙量的分配比例与水流量的分配比例不相等。这种情况也被称为 Bulle 效应^[30]。较大的分汊角会导致支汊中较大的流速,并使水流更多地流向支汊^[31],Bulle 效应随着分汊角的增大而增大^[32-33]。此外,分汊角较大时,会在分汊处形成一个水流分离区^[12,33]。分离区的宽度在河床处最小,向水面增加。当分汊角增大时,分汊处的河道曲率相应增大,水流分离区的宽度^[12]与进入下游支流的流速^[22]也跟着增大。由于流动分离区内的流速较小且存在回流,该区域将会堆积大量泥沙,形成沙坝,从而使得汉道入口的宽度减小,而减小的有效宽度将增大支流入口处的流速,这将对河床与河岸造成较大的冲刷^[11]。然而,如果支流中的流量较小,分离区内的大量沉积可能会导致入口堵塞。所以水流分离加大了下游两支汊的流量分配差异。分汊处水流分离带对水沙分配的影响远大于横向环流带来的影响。

由分汊角引起的横向环流水流结构和弯道的

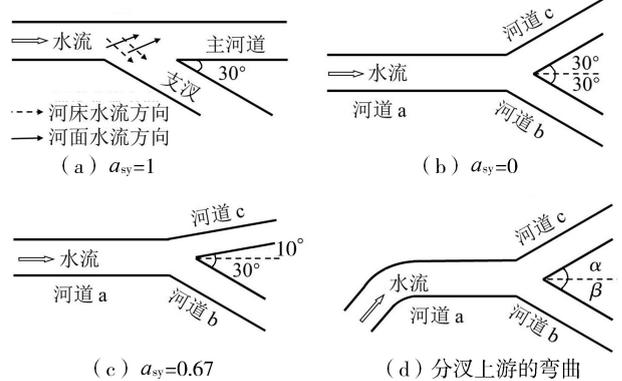


图2 Bulle 效应

流结构之间有很强的相似性。弯道中会产生一个类似的二次流结构,使得水面处的水流流向外弯道,河床处的水流流向内弯道。所以,如果分汊上游存在弯道,将会导致与凹岸相连的支汊水流量更大,与凸岸相连的支汊泥沙含量更大^[21-22]。弯道中的横向环流会对泥沙产生分选作用,使得凹岸主要分布粗颗粒泥沙,凸岸分布细颗粒泥沙^[24]。这将导致与凹岸相连的分汊成为主流河道,与凸岸相连的分汊支流泥沙沉积较多,甚至会被堵塞闭合^[26]。分汊上游的弯道强烈地调节水流和泥沙的分配,加剧了分汊的不对称性。

除了汉道自身的几何形态外,壅水效应、河床形态以及河床的粗糙度等汉道内水流的水力特性对分汊水沙的分配也具有较大影响。比如,壅水会改变分汊河道下游支汊的水面坡比,从而改变下游支汊的主导地位。在不同流量时,壅水效应会阻止一个支汊流量的迅速增长,所以这对分汊具有稳定作用。河床形态也是影响汉道内水流运动特性的重要因素。分汊河道下游支汊入口处常常会形成倒坎(图3),倒坎的存在,会使分汊区域出现横向河床坡度,使得水流更多地进入水面高程较低的河道^[23,25]。横向河床坡度对以悬移质输运为主的河道的影响较小^[29]。此外,河床的冲淤会改变河床原本的糙率,汉道的粗糙度与水下沙丘的发育有关,水力粗糙度与沙丘坡度呈正相关关系^[34],水力粗糙度的降低增加了可用于推移质输运的总床面剪应力的比例,将会导致泥沙输运量增加^[26],并且汉道内的水流结构还受到地形粗糙度引起的水深扰动的强烈影响^[35]。

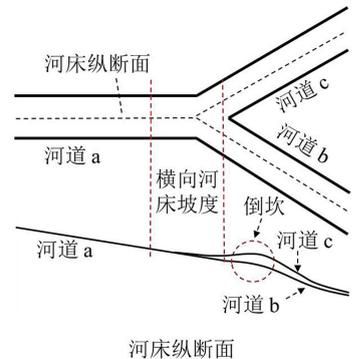


图3 倒坎与横向河床坡度

对于河口区域的分汊河道,潮汐运动是对分汊处水沙分配有着巨大影响的因素。潮汐的存在可能改变甚至逆转上述因素的影响。比如,潮汐的存在会加剧由坡度造成的流量分配不均匀性。但与此相反,潮汐会逆转河床粗糙度对流量分配的影响。在没有潮汐运动的情况下,河床糙率最低的支流获得了较大的河流流量。然而,潮汐的存在会产生一个由低粗糙度支流向高粗糙度支流的净流量,增大高粗糙度支流的

流量分配比例。这时,潮汐的存在会减小分汉处流量分配的不均匀性^[27]。此外,潮汐还会导致分汉下游支流中的水流过程出现不同程度的滞后,这些相位差对分汉处流量的分配具有一定影响^[36-37]。

2.2 分汉河道水沙分配的计算

获得分汉河道水沙分配比例最直观且最准确的方法是使用仪器测量,然而这种方法受到野外不确定因素的影响较大,且成本也较高。此外,理论计算也是一种选择,虽然这种方法对于现实中特定河段的计算准确性较差,但其对于理论性研究具有重要作用^[7-8]。国内外学者在这方面都做了大量的研究,提出了一系列理论计算方法。这些方法不但可以较为简便地计算分汉处水沙的分配比例,对分汉河道最终演变的研究也具有重要作用。

在理论计算方法的研究方面,国内外学者展现出极大的不同。国内学者更加关注分汉处泥沙的分配比例计算,所以提出了在不同情况下使用的计算公式,如表1所示。

表1 不同情况下汉道分沙比的计算方法(国内)

研究者	分沙比计算公式	工况
丁君松等 ^[38]	$\frac{Q_{sb}}{Q_{sc}} = \frac{(C+\xi)Q_b}{CQ_c}$	支汉进口存在倒坎
丁君松等 ^[39]	$\frac{Q_{sb}}{Q_{sc}} = \frac{Q_b + iQ_a l h_a f(c) / B_a r}{\frac{CQ_c}{C+\xi} - iQ_a l h_a f(c) / B_a r}$	支汉进口存在倒坎以及横向环流
秦文凯等 ^[40]	$\frac{Q_{sb}}{Q_{sc}} = A_0 + 2c_a \frac{h_0}{B_a} \theta A_2$	由分汉角引起横向环流
余新明等 ^[41]	$\frac{Q_{sb}}{Q_{sc}} = \frac{Q_b S_b + B_b q_{sn} + B_b D}{Q_b S_b + Q_c S_c}$	考虑了汉口的单向横向环流

注: Q_s 、 Q 分别为汉道内的泥沙输运量和水流量;下标a、b和c对应上游主河道a、下游支汉b和c。其余参数含义参见原文。

国外学者也提出了一些适用于不同条件的水沙分配计算方法(表2),但与国内学者研究重点不同,

表2 不同情况下汉道分沙比的计算方法(国外)

研究者	节点条件	工况
Wang 等 ^[42]	$\frac{Q_{sb}}{Q_{sc}} = \left(\frac{Q_b}{Q_c}\right)^k \left(\frac{b_b}{b_c}\right)^{1-k}$	适用于悬移质
Bolla-Pittaluga 等 ^[7]	$\begin{cases} \frac{1}{2}(1-p) \frac{d\eta_b}{dt} + \frac{q_b - q_a b_a / (b_b + b_c)}{\alpha b_a} - \frac{q_y}{b_b} = 0 \\ \frac{1}{2}(1-p) \frac{d\eta_c}{dt} + \frac{q_c - q_a b_a / (b_b + b_c)}{\alpha b_a} + \frac{q_y}{b_c} = 0 \end{cases}$	见下面4行
Bolla-Pittaluga 等 ^[7]	$q_y = q_a \left(\sin\delta_f - \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad \sin\delta_f = \frac{v}{\sqrt{v^2 + u^2}}$	由横向河床坡度造成的横向泥沙输运
Miori 等 ^[25]	$b_i = 0.87 (\rho g Q_i S_i)^{0.559} D^{-0.445}$	可侵蚀河岸
Kleinans 等 ^[21]	$q_y = q_a \frac{f(\theta) \sin\delta_f - \partial \eta / \partial y}{f(\theta) \cos\delta_f - \partial \eta / \partial x} \quad \tan\delta_f = \frac{v}{u} - \arctan A \frac{h}{R_a}$	由横向河床坡度和上游弯道共同造成的横向泥沙输运
Bertoldi 等 ^[8]	$q_a = \int_0^1 \psi(y, t) dy$	沙坝造成的分沙不均
van der Mark 等 ^[32]	$\frac{Q_{sc}}{Q_{sa}} = \frac{Q_c}{Q_a} + \left(\frac{cQ_c b_a}{Q_a b_c}\right)^{b/3} \frac{R\theta}{b_a} \left(\frac{1}{\cos\delta_f} - 1\right)$	由分汉角引起的横向环流

注: q 为单位宽度泥沙输运量;下标a、b和c对应上游主河道a、下游支汉b和c。其余参数含义参见原文。

他们更加关注分汉河道的演变状态,所以将所提出的分沙比计算公式作为节点条件代入一维理论模型中,研究分汉河道的冲淤变化。Wang 等^[42]首次将分汉处的泥沙分配关系作为节点条件代入一维理论模型中,虽然该方法具有一定的局限性,但也为分汉河道稳定性的研究开辟了一条新的思路。Bolla-Pittaluga 等^[7]提出了更为普遍适用的节点条件,建立了研究分汉河道稳定性的一维理论模型(BRT模型)。之后 Bertoldi 等^[8,21,25]等对 BRT 模型的节点条件进行了拓展,使其适用范围进一步扩大。此外,Mark 等^[32]对分汉角引起的 Bulle 效应,提出了一种新的节点关系。上述学者提出的节点条件如表2所示。

Bolla-Pittaluga 等^[7]提出的节点条件由于其良好的可拓展性而被广泛使用。以该节点关系为基础构成的一维理论模型可以同时研究多种因素对于分汉处水沙分配的影响,并进一步研究分汉河道的演变状态^[20,28-29]。野外和试验观测表明,BRT模型具有良好的定性一致性和合理的定量一致性^[18]。

3 典型分汉型河流——长江

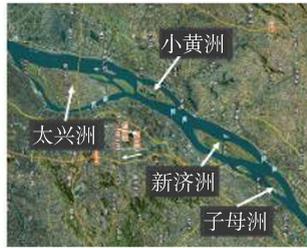
分汉型河流作为一种独立于辫状河流的河型被提出^[43],与辫状河流具有一定的差别。比如,分汉河流是为江心洲分割开的,而辫状河流则是由很多沙洲分割开的,这些江心洲相对于河宽,尺寸比较大。此外,分汉型河道各汉道之间明显分开,相距较远,位置也更为固定。长江的中下游部分就是这种典型的分汉型河段(图4)。虽然分汉型河流从辫状河流中独立出来,但其分汉的形成与演变仍可以用上述5种分汉机制概括。而长江中下游分汉河型的形成,除了普遍的泥沙的侵蚀与沉积机制以外,更重



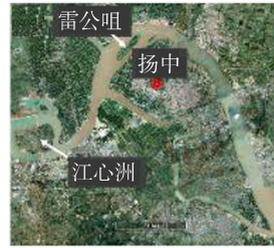
(a) 总体河势



(b) 铜陵土桥河段



(c) 马鞍山河段



(d) 扬中河段

1—关洲;2—松滋口;3—马洋洲;4—太平口;5—突起洲;6—藕池口;7—乌龟洲;8—熊家洲;9—南阳洲;10—南门洲;11—中州;12—白沙洲;13—燕子窝;14—团州;15—白沙洲;16—天兴洲;17—罗湖洲;18—戴家洲;19—沙洲;20—黄连洲;21—新洲;22—单家洲;23—江州;24—棉船洲;25—玉带洲;26—清洁洲;27—江心洲;28—铁板洲;29—船碗洲;30—长沙洲;31—和悦洲;32—天然洲;33—陈桥洲;34—八卦洲;35—世业洲;36—双山岛;37—开沙岛。

图4 长江中下游典型分汉河段

要的是与长江特殊的地形条件有关。其中,节点(在河床演变中,把对河道变化起控制作用,具有某种固定边界而平面位置相对稳定的窄段叫作节点^[44],比如岸边的山体、石矶、阶地和人工护岸)是最为重要的影响因素之一。由于长江两侧河岸分布着许多对河道的侵蚀有着巨大约束作用的节点,导致节点间的分汉河段相对独立,且平面形态存在较大差异(具体又可分为顺直、微弯和鹅头形分汉河道^[45])。节点的存在会使其上游和下游的水流结构产生差异。在上游因节点的存在而产生壅水效应,有利于泥沙落淤。节点的下游则是水流扩散,加速泥沙落淤^[46]。节点对分汉河道演变起着重要的作用:其一,节点加速了江心洲的形成和稳定;其二,节点控制了分流区主流的摆动,使各分汉河段具有相对的独立性和滞后性,从而增强了分汉河道的稳定性。

长江的中下游部分是宽深比较小的分汉型河段。汉道内的水沙分配主要受上游河道曲率、地形坡度和分汉角角度等因素影响。汉道的演变方向取决于各因素之间的相对强度(即分汉的演变主要以“强迫”机制为主)。河型转化(即分汉河道的一支流淤积堵塞,使得分汉河道向单一河槽转化)是长江中下游分汉河道常见的演变形式。壅水直到汉道形成稳定的主流流路是河型转化的必要水流条件,

随着河床再造过程的发展,汛期壅水高度逐年抬升,河型转化的范围向上游延伸^[47]。壅水高度不同将造成淤积强度的差异。汛期壅水高度越高,水流动力轴线越趋于直线,回流区流速越小,范围越大,水流输沙能力降低,泥沙更容易落淤,浅滩淤积发展速度越快,而河型转化发生的时间也相应提前^[48]。天然分汉河道河型转化存在两种形式——淤汉和堵汉,河床宽深比是决定分汉段以淤满整个汉道(淤汉)形式还是淤堵汉口(堵汉)形式而发生河型转化的重要因素。河床宽深比愈大,愈有利于汉道以淤汉形式向单一河道转化,否则有利于泥沙淤堵汉道口门而引起河型转换。此外,汉道口门迎流条件决定了河型转化的大致方向,即迎流汉道往往会成为河型转化后单一河道的主槽^[47]。

长江分汉河道水流运动的一个重要特征是动力轴线的分汉。分汉的形式可归纳为两种类型:一种类型的主流动力轴线紧贴洲头,分汉明显,分汉角较大,有“鱼嘴分流”之称。另一种类型的主流远离洲头,动力轴线分汉点不明显,分汉角较小,形成大面积的分流区^[46]。主流摆动是长江分汉河道水流运动的又一重要特征。顺直放宽河段的边滩周期性冲淤,弯曲河段凹岸岸线的频繁崩退、凸岸边滩的切割以及河型转化,分汉河段主支汉交替发展、主支汉移位以及河势周期性演替都与主流摆动密切相关^[49]。

主流摆动在分汊河段的冲淤调整中起到了关键的作用。自然状况下,水流动力轴线在两汊间交替,使两汊交替冲淤,是维持主汊、支汊地位的有利条件之一^[50-52]。但是大坝枢纽的修建打破了这一平衡。比如,三峡蓄水后,由于清水下泄影响,水流挟沙力沿程逐步恢复饱和,两汊交替均为冲刷。在清水下泄河段总体冲刷背景下,河段的演变主要以沙质河床冲刷为主,局部区域的淤积则主要表现为推移质的淤积,这对分汊河段分流格局的稳定有着巨大影响。

4 研究展望

在分汊形成机制的研究中,大部分学者倾向使用模型试验和野外观测的方法,因为这类方法可以更好地观察分汊形成的冲淤过程。利用数学模型对分汊形成机制进行研究的工作较少。一些学者利用数学模型对沙坝的发育或辫状河流的发展过程进行研究,但这些研究更加关注沙坝的形态^[53-54]或是辫状河流的演变^[55-57],缺乏对分汊形成机制的讨论。虽然数值模型没有在分汊机制的研究中被广泛使用,但并不代表数值模型不能用于分汊机制的研究。相反,由于数值模型可以提供更理想化的条件,避免试验以及野外观测中不可避免的诸多干扰。可以预见,今后数值模型将在分汊机制研究中大有可为。

5种分汊机制中,河道决口对江河防洪安全具有最为直接的影响^[58]。河道决口发生的临界条件是人们重点关注的问题。尽管前人也进行了大量的研究^[59-62],但河流决口会在何时何地发生,仍然没有一个准确的方法进行预测。此外,尽管形成分汊的机制有上述5种之多,但Richardson等^[63]在测量了孟加拉国Brahmaputra-Jamuna辫状河流的三维流场和支流形态演变后,发现大流核(在河道断面流速的等值线图上,将等值线集中的大流速部位称为流核)在单河道内被分割成多个小流核后,河道的截面形态才会被分割,这可能是分汊形成的必要前提。因此,分汊的形成根本上是水流条件、河床地貌与泥沙之间相互作用的结果。

在分汊河道中,除了汊道的几何形态、河床地形、水力粗糙度、壅水效应以及潮汐等影响水沙分配的因素外,植被的覆盖情况^[23]、河道中的采砂作业^[64]和分汊角对汊道内的水动力特性都存在影响。其中,关于分汊角不对称性对分汊处水沙分配的影响存在不同的见解,分汊角不对称性与分汊演化的定量关系值得进一步研究。

对于分汊处水沙分配的研究,最终目的是为了预测分汊河道的演变,进而为河道治理提供建议。长江中下游分汊河段主流交替,虽然这有利于分汊

河道的稳定,但对于航道的维持却极为不利。主流摆动的物理作用机制是通过改变高流速带的平面位置,引起主输沙带的移位,从而造成主流带冲刷、缓流带淤积的不均匀冲淤分布。这种冲淤的不均匀性将进一步产生一系列的累积效应,长江中下游各种河型河床演变典型特征都是这种累积效应的体现。尽管对汊道中主、支流交替的原因——水动力轴线的摆动已有所了解,但河道中影响水动力轴线摆动的因素及限制措施需要进一步研究。

参考文献:

- [1] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River channel patterns, braided meandering and straight [J]. Professional Paper, 1957, 9: 39-85.
- [2] ASHMORE P E. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1982, 7(3): 201-225.
- [3] SMITH N D. Sedimentology and bar formation in the upper Kicking Horse River, a braided meltwater stream [J]. Journal of Geology, 1974, 82(2): 205-224.
- [4] ASHMORE P E. How do gravel-bed rivers braid? [J]. Canada Journal: Earth Science., 1991, 28(28): 326-341.
- [5] FUJITA Y. Bar and channel formation in braided streams. In River meandering [J]. American Geophysical Union, Water Resources Monograph, 1989, 12: 417-462.
- [6] FERGUSON R I. Understanding braiding processes in gravel bed rivers: progress and unsolved problems [J]. Geological Society Special Publication, 1993, 75(1): 73-87.
- [7] BOLLA-PITTALUGA M, REPETTO R, TUBINO M. Channel bifurcation in braided rivers: Equilibrium configurations and stability [J]. Water Resource Research, 2003, 39(3): ESG11-ESG113.
- [8] BERTOLDI W, ZANONI L, MIORI S, et al. Interaction between migrating bars and bifurcations in gravel-bed rivers [J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): 136-148.
- [9] ENGELUND F, SKOVGAARD O. On the origin of meandering and braiding in alluvial streams [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1973, 57(2): 289-302.
- [10] ASHMORE P E, PARKER G. Confluence scour in coarse braided streams [J]. Water Resources Research, 1983, 19(2): 392-402.
- [11] ZINGER J A, RHOADS B L, BEST J L. Extreme sediment pulses generated by bend cutoffs along a large meandering river [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(10): 675-678.
- [12] CONSTANTINE J A, DUNNE T, PIEGAY H, et al. Controls on the alluviation of oxbow lakes by bed-material load along the Sacramento River, California [J]. Sedimentology, 2010, 57(2): 389-407.
- [13] GRENFELL M, AALTO R, NICHOLAS A. Chute channel dynamics in large, sand-bed meandering rivers [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(3): 315-331.

- [14] van DLIJK W M, SCHURMAN F, van DELAGEWEG W I, et al. Bifurcation instability and chute cutoff development in meandering gravel-bed rivers [J]. *Geomorphology*, 2014, 213(15) :277-291.
- [15] LEDDY J O, ASHWORTH P J, BEST J L. Mechanisms of anabranch avulsion within gravel-bed braided rivers: observations from a scaled physical model [J]. *Geological Society Special Publication*, 1993, 74(1) :119-127.
- [16] SCHURMAN F, KLEINHANS M G. Bar dynamics and bifurcation evolution in a modelled braided sand-bed river [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10) :1318-1333.
- [17] CALLANDER R A. Instability and river channels [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, 36(3) :465-480.
- [18] BERTOLDI W, TUBINO M. River bifurcations: experimental observations on equilibrium configurations [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(10) :W10437.
- [19] REDOLFI M, ZOLEZZI G, TUBINO M. Free instability of channel bifurcations and morphodynamic influence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 799 :476-504.
- [20] REDOLFI M, ZOLEZZI G, TUBINO M. Free and forced morphodynamics of river bifurcations [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(4) :973-987.
- [21] KLEINGANS M G, JAGERS H R A, MOSSELMAN E, et al. Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one dimensional and three-dimensional models [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44 :W08454.
- [22] HARDY R J, LANE S N, YU D. Flow structures at an idealized bifurcation: A numerical experiment [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(15) :2083-2096.
- [23] THOMAS R E, PARSONS D R, SANDBACH S D, et al. An experimental study of discharge partitioning and flow structure at symmetrical bifurcations [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(15) :2069-2082.
- [24] KASTNER K, HOITINK A J F. Flow and suspended sediment division at two highly asymmetric bifurcations in a river delta: implications for channel stability [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(10) :2358-2380.
- [25] MIORI S, REPETTO R, TUBINO M. A one-dimensional model of bifurcations in gravel bed channels with erodible banks [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(11) :1-12.
- [26] KLEINHANS M G, WILBERS A W E, TEN BRINKE W B M. Opposite hysteresis of sand and gravel transport upstream and downstream of a bifurcation during a flood in the River Rhine, the Netherlands [J]. *Geologie en Milieu/Netherlands Journal of Geosciences*, 2007, 86(3) :273-285.
- [27] BUSCHMAN F A, HOITINK A J F, van der VEGT M, et al. Subtidal flow division at a shallow tidal junction [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12) :137-139.
- [28] KLEINHANS M G, COHEN K M, HOEKSTRA J, et al. Evolution of a bifurcation in a meandering river with adjustable channel widths, rhine delta apex, the Netherlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(15) :2011-2027.
- [29] van DENDEREN R P, SCHIELEN R M J, BLOM A, et al. Morphodynamic assessment of side channel systems using a simple onedimensional bifurcation model and a comparison with aerial images [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(6) :1169-1182.
- [30] BULLE H. Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen [R]. Berlin: VDI, 1926.
- [31] DUTTA S, GARCIA M H. Nonlinear distribution of sediment at river diversions: brief history of the bulle effect and its implications [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(5) :36-44.
- [32] van der MARK C F, MOSSELMAN E. Effects of helical flow in one-dimensional modelling of sediment distribution at river bifurcations [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(5) :502-511.
- [33] DUTTA S, WANG D, TASSI P, et al. Three-dimensional numerical modeling of the Bulle-effect: the non-linear distribution of near-bed sediment at fluvial diversions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(14) :2322-2337.
- [34] YANG S Q, TAN S K, LIM S Y. Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(9) :477-487.
- [35] MIORI S, HARDY R J, LANE S N. Topographic forcing of flow partition and flow structures at river bifurcations [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(6) :666-679.
- [36] BUSCHMAN F A, van der VEGT M, HOITINK A J E, et al. Water and suspended sediment division at a stratified tidal junction [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(3) :1459-1472.
- [37] WU Y, ZHANG W, ZHU Y, et al. Intra-tidal division of flow and suspended sediment at the first order junction of the Pearl River Network [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 209 :169-182.
- [38] 丁君松, 丘凤莲. 汉道分流分沙计算 [J]. *泥沙研究*, 1981(1) :59-66. (DING Junsong, QIU Fenglian. Calculation of diversion and sediment distribution in bifurcating channel [J]. *Journal of Sediment Research*, 1981(1) :59-66. (in Chinese))
- [39] 丁君松, 杨国禄, 熊治平. 分汉河段若干问题的探讨 [J]. *泥沙研究*, 1982(4) :39-51. (DING Junsong, YANG Guolu, XIONG Zhiping. Some problems about braided reaches in alluvial river [J]. *Journal of Sediment Research*, 1982(4) :39-51. (in Chinese))
- [40] 秦文凯, 府仁寿, 韩其为. 汉道悬移质分沙模型 [J]. *泥沙研究*, 1996(3) :22-30. (QIN Wenkai, FU Renshou, HAN Qiwei. A model of suspended load diversion in branched channel [J]. *Journal of Sediment Research*, 1996

- (3):22-30. (in Chinese))
- [41] 余新明,谈广鸣. 河道冲淤变化对分流分沙比的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(1):44-48. (YU Xinming, TAN Guangming. Research on diversion model of discharge and sediment with the erosion and deposition of river[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2005,38(1):44-48. (in Chinese))
- [42] WANG Z B, FOKKINK R J, de VRIES M. Stability of river bifurcations in 1D morphodynamics models[J]. Journal of Hydraulic Research,1995,33(6):739-750.
- [43] BRICE J C. Report FHWA/RD-82/021[R]. Washington D. C.: U. S. Federal Highway Administration,1982.
- [44] 余文畴. 长江下游分汊河道节点在河床演变中的作用[J]. 泥沙研究,1987(4):12-21. (YU Wentao. Action of nodes of the braided channel at the lower Yangtze river in the fluvial processes[J]. Journal of Sediment Research,1987(4):12-21. (in Chinese))
- [45] 张伯年,何登耀. 长江中淤分汊河段特性初步分析[C]//湖北省水利学会1962年年会议文集,武汉:湖北省水利学会,1962:1-10.
- [46] 中国科学院地理研究所地貌研究室长江模型实验小组. 长江中下游分汊河道演变的实验研究[J]. 地理学报,1978(2):128-141. (The Experimental Group of the Yangtze Model, Division of Geomorphology, Institute of Geography, Academia Sinica. Experimental study on the evolution of bifurcating channel in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica,1978(2):128-141. (in Chinese))
- [47] 舒安平,黄金堂,丁君松. 水库变动回水区分汊河型转化问题的试验研究[J]. 泥沙研究,1992(4):54-62. (SHU Anping, HUANG Jintang, Ding Junsong. Experimental study on the transformation of the braided channel pattern in the fluctuating backwater zone of the reservoir[J]. Journal of Sediment Research,1992(4):54-62. (in Chinese))
- [48] 陈立,仰雨菡,陈珊,等. 鹅头分汊河段河道交替演变动力和周期的变化分析[J]. 水力发电学报,2014,33(4):126-131. (CHEN Li, YANG Yuhan, CHEN San, et al. Hydrodynamics of alternative evolution and its period variation of goose-head bifurcated channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(4):126-131. (in Chinese))
- [49] 朱玲玲,陈迪,葛华. 长江中游主流摆动效应研究[J]. 泥沙研究,2014(1):21-26. (ZHU Lingling, CHEN Di, GE Hua. Study on effect of mainstream swing in middle Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research,2014(1):21-26. (in Chinese))
- [50] 冯源,陈立,周银军,等. 近坝段年内交替型分汊河段河床调整特点[J]. 泥沙研究,2012(5):8-15. (FENG Yuan, CHEN Li, ZHOU Yinjun, et al. Study of riverbed adjustment in annually alternate braided reach in near-dam[J]. Journal of Sediment Research,2012(5):8-15. (in Chinese))
- [51] 刘林双,李明,郑力. 长江中下游砂卵石分汊河段演变机理[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(3):346-353. (LIU Linshuang, LI Ming, ZHENG Li. Evolution mechanism of sand and gravel braided reach in middle and lower Yangtze River[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2017,50(3):346-353. (in Chinese))
- [52] 雷云龙,胡鹏,曹志先,等. 特征流量级对甬沟形成和发展影响的数值研究[J]. 水力发电学报,2019,38(4):43-52. (LEI Yunlong, HU Peng, CAO Xianzhi, et al. Preliminary study on effect of characteristic flow rates on formation and development of channelized ditches[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2019,38(4):43-52. (in Chinese))
- [53] CROSATO A, MOSSELMAN E, DESTA F B, et al. Experimental and numerical evidence for intrinsic nonmigrating bars in alluvial channels[J]. Water Resources Research,2011,47(3):77-79.
- [54] WU F C, SHAO Y C, CHEN Y C. Quantifying the forcing effect of channel width variations on free bars: Morphodynamic modeling based on characteristic dissipative Galerkin scheme[J]. Journal Geophysical Research,2011,116(3):F03023.
- [55] MORON S, EDMANDES D A, AMOS K. The role of floodplain width and alluvial bar growth as a precursor for the formation of anabranching rivers[J]. Geomorphology,2017,278(SupC):78-90.
- [56] MORON S, AMOS K J. Downstream grain-size changes associated with a transition from single channel to anabranching[J]. Sedimentology,2018,65(5):1590-1610.
- [57] SCHUURMAN F, TA W, POST S, et al. Response of braiding channel morphodynamics to peak discharge changes in the Upper Yellow River[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2018,43(8):1648-1662.
- [58] WANG Z Y, LIANG Z Y. Dynamic characteristics of the Yellow River mouth[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2000,25(7):765-782.
- [59] ASSINE M L. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil[J]. Geomorphology,2005,70(3/4):357-371.
- [60] PHILLIPS J D. Universal and local controls of avulsions in southeast Texas Rivers[J]. Geomorphology,2011,130(1/2):17-28.
- [61] ZHENG S, WU B S, WANG K C, et al. Evolution of the Yellow River Delta, China: impacts of channel avulsion and progradation[J]. International Journal of Sediment Research,2017,32:34-44.
- [62] ZHENG S, HAN S, TAN G, et al. Morphological adjustment of the Qingshuigou channel on the Yellow River Delta and factors controlling its avulsion[J]. Catena,2018,166:44-55.
- [63] RICHARDSON W R, THORNE C R. Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river: brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh[J]. Geomorphology,2001,38(3/4):185-196.
- [64] 张强,张小峰. 采砂区布置对分汊河道的影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2009,42(2):153-157. (ZHANG Qiang, ZHANG Xiaofeng. Analysis of effect of sand mining area on braided channel[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2009,42(2):153-157. (in Chinese))

(收稿日期:2021-06-11 编辑:郑孝宇)