

# 江心洲头部冲淤动力临界特性

韩剑桥, 孙昭华, 冯秋芬

(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:** 不同流量级下, 分汊河段进口主流摆动导致江心洲头部的平面冲淤分布呈现出复杂变化特征。为探究江心洲头部冲淤与来流过程之间的响应关系, 借助长江中下游多个分汊河段内水沙、地形资料, 对江心洲头部水动力特征实施了数值模拟, 并对不同流量级下的河床变形强度进行综合比较。研究表明: 江心洲头部低滩的冲淤动力随着流量涨落呈现出明显的临界特性, 冲淤过程中存在大、小两个临界流量  $Q_1$  与  $Q_2$ , 在介于两个临界流量之间的流量级持续作用下, 洲头低滩发生冲刷; 流量大于  $Q_1$  或小于  $Q_2$  时, 洲头低滩表现为淤积。由于不同流量级造成的冲淤效果不同, 因而水文过程中各级流量的持续时间, 是影响洲头低滩年内、年际变形的主要因素。

**关键词:** 分汊河道; 江心洲; 冲淤动力; 临界特性

**中图分类号:** TV147      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2013)06-0842-07

江心洲分汊河型在长江中下游大量存在, 通常由于节点限制而呈现出顺直(微弯)单一与放宽分汊河道顺次相连的格局<sup>[1]</sup>, 江心洲头部的泥沙输移受到上下游共同影响而呈现出复杂的变化特点, 洲滩槽格局极不稳定, 严重制约河道分流和航槽稳定, 历来受到工程界关注<sup>[1-2]</sup>。认识洲头分汊河道进口展宽段的变化规律和机理, 对于该类问题治理具有重要意义。

分汊河道进口展宽段的水沙输移和河床冲淤具有复杂的动态调整特性, 其汛枯期之间的复归性调整规律早已引起国内外众多学者的注意<sup>[3-5]</sup>。如余文畴<sup>[3]</sup>从断面平均的角度比较了进口展宽段不同流量下沿程水动力特性变化, 发现以某一临界流量为界, 河段内存在洪淤枯冲的规律, 从而能够保持年际间的纵向输沙平衡。然而, 大量实测资料表明, 分汊河道进口展宽段内以洲头低滩为代表的局部河床形态调整, 更多地表现为平面上的冲淤分布不均, 随着年际之间来水来沙不同而左冲右淤或左淤右冲, 这显然是从纵向水沙输移平衡角度难以描述的现象。尽管分汊河道进口展宽段内主流带左右摆动, 分流点位置上提下移, 横比降位置及强度随水位涨落而不断变化等规律早已被天然河道和室内试验资料所证实<sup>[6-7]</sup>, 但进口位置的洲滩平面变形究竟受哪些流量级所主导, 一直存在争议; 河床变形与水流动力条件是否存在类似纵向水沙输移的临界特性, 还需深入研究。

本文结合长江中下游多个分汊河道的实测资料, 通过理论分析和数值试验, 探讨不同流量下分汊河道进口放宽段冲淤动力在沿程和平面上的变化规律, 归纳洲头低滩冲淤动力的临界变化特性, 从而为分汊河段河床演变分析及治理提供参考。

## 1 典型分汊河段进口的洲滩冲淤现象

本文所指的洲头低滩, 是形成于高大江心洲头部上游的低矮滩体, 这种低滩与江心洲头部高滩之间往往存在明显窄沟或较大高程梯度。洲头低滩在形态上虽具有一定独立性, 但其位置、高程、面积等形态特征往往随着江心洲洲头冲淤而不断变化, 可视为江心洲头部冲淤变形的直接反映。低滩中高水期淹没、枯期出露, 因而低滩冲淤可用多年平均枯水位与滩顶高程之间的面积变化来表征。

收稿日期: 2012-10-08; 网络出版时间: 2013-09-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20130912.1140.008.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助课题(2012BAB04B04); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012206020212)

作者简介: 韩剑桥(1987-), 男, 河南禹州人, 博士研究生, 主要从事河床演变学方面研究。E-mail: hjq13@163.com

通信作者: 孙昭华, E-mail: Lnszh@126.com

图 1 为依据实测水面线和地形资料绘制的武汉天兴洲分汊河段不同流量下的沿程过水面积变化图, 由图 1 可见, 当流量小于 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 分汊进口展宽段断面过水面积沿程递减, 流量大于 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 断面过水面积沿程递增。据此可以判断, 以 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右的流量为界, 流量较小时, 水流流速沿程增大、河道易发生冲刷; 流量较大时, 流速沿程减缓, 河道易发生淤积, 且流量越大越有利于淤积, 发生冲淤交替的分汊进口河段正是洲头低滩所在的区间。该现象与余文畴<sup>[3]</sup>等所提出的长江中下游分汊河段口门处存在洪淤枯冲规律一致, 临界流量数值也与前人提出 $15\,000\sim 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的量级基本吻合。

图 2 和图 3 分别为长江中游陆溪口分汊河段新洲洲头低滩、监利乌龟洲分汊河段洲头低滩的枯季变化图, 可以看出, 陆溪口新洲洲头低滩在枯水流量作用下(2005 年 1~4 月最大流量  $19\,000\text{ m}^3/\text{s}$ )滩头变化不大; 监利乌龟洲分汊河段进口在 2009 年 10 月~2010 年 1 月之间存在明显的左淤右冲现象, 河道左侧低滩淤积 1~3 m, 而右汊主槽内平均冲深 3~4 m。由这两个河段的现象可见, 即使在流量低于冲淤转换临界流量的冲刷期, 在断面总体呈现冲刷态势的情况下, 河床变形在横向上也并不均衡, 表现为主槽一侧冲刷而洲头低滩一侧略有淤积。

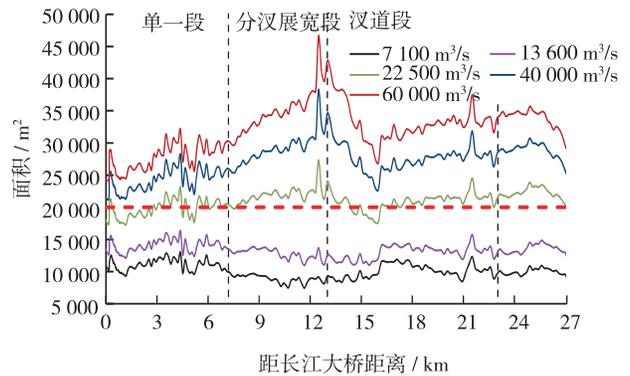


图 1 不同流量下天兴洲河段沿程过水面积变化  
Fig. 1 Cross section area at different discharge in Tianxingzhou reach

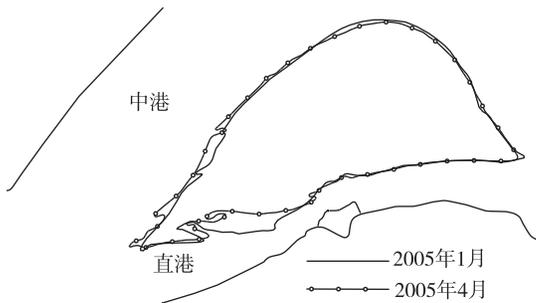


图 2 陆溪口新洲头部低滩变化  
Fig. 2 Variations of Xinzhou low bench

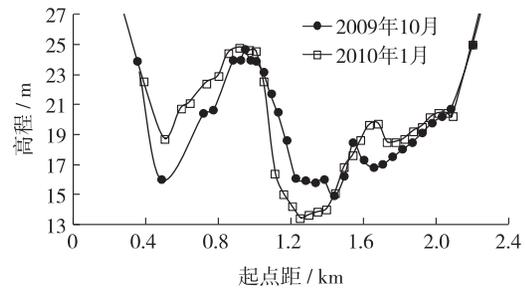


图 3 乌龟洲洲头低滩中部断面变化  
Fig. 3 Change of cross section in the middle of Wuguizhou low bench

图 4 为天兴洲洲头低滩在汛期变化的图, 2008 年汛期过后(最大流量  $45\,200\text{ m}^3/\text{s}$ ), 低滩滩头明显冲刷后退, 而水量较大的 2010 年汛期过后(最大流量  $58\,900\text{ m}^3/\text{s}$ ), 低滩大幅度淤积上延, 展现了截然不同的现象。从整个断面变化(图 5)来看, 虽然断面整体呈现淤积性质, 但仅仅是右侧的主河槽维持单一的淤积态势, 左侧低滩变形却因流量级的不同而存在冲或淤两种可能。

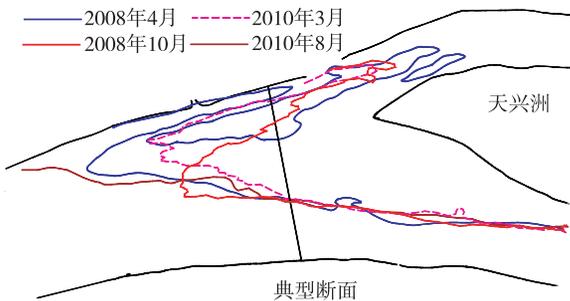


图 4 天兴洲洲头低滩(10 m)形态汛期变化  
Fig. 4 Variations of Tianxingzhou island's head bench in flood season

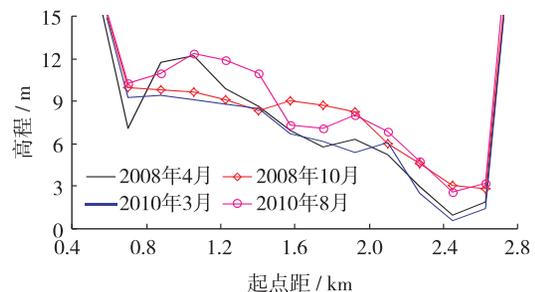


图 5 天兴洲洲头低滩中部典型断面汛期变化  
Fig. 5 Change of cross section in the middle of Tianxingzhou low bench

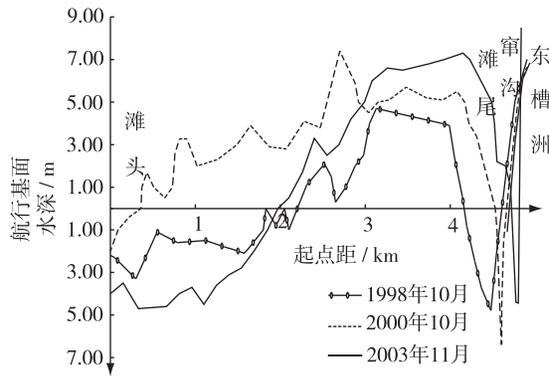


图6 罗湖洲洲头低滩滩脊变化

Fig. 6 Variations of bench ridge of Luohuzhou island's head

图6为罗湖洲分汊河段洲头低滩滩脊变化图,由图6可见,在连续大水年(1998—2000年)作用下滩体全面淤高,最大幅度达6m左右,而洲尾窜沟冲深1m;在连续中小水年(2001—2003年)作用下,滩脊高程剧烈冲刷下降,洲尾窜沟淤积抬高。实际上,洲头低滩这种在大水年滩体淤积,尾部窜沟冲刷发展;在中小水年,滩体冲刷,窜沟淤积的现象,在长江中游陆溪口、天兴洲等其他分汊河段也大量存在<sup>[7]</sup>。

以上多个河段的现象显示,虽然从纵向水沙输移的角度,分汊河段进口具有洪淤枯冲的特征,但从横向或者平面上的冲淤分布来看,汉道进口低滩的冲淤特征并非单一的洪淤枯冲或洪冲枯淤,而是随着流量级大小的不同,呈现出冲、淤的多次转换,枯水时冲槽淤滩,大水时冲滩淤槽或是滩槽均淤,洲头低滩冲淤性质随流量增大存在着由淤到冲,由冲到淤两种转换。

## 2 洲头低滩冲淤动力的临界特性

### 2.1 分流区内的水流特征

分汊河段的江心洲一般汛期仍能出露,水流分股输移是该类河道的主要特点。然而,处于汉道进口的分流区虽然也存在处于江心或偏于一岸的低滩,但这些低滩往往中枯水期难以出露,分流区虽然存在相应于汉道数量的多个大流速区,但这些大流速区之间并不为出露的洲滩所分隔,相互之间仍存在水量、动量交换,由此造成分流区的水流运动呈现出不同于分汊区的一些特点:首先,不同流量下低滩上淹没水深和阻力不同,造成流核(大流速区)分离点<sup>[3,6-7]</sup>高水下移、低水上提并且左右摆动;其次,由于下游两侧汉道过流能力差异,导致低滩上存在明显的由支汊一侧指向主汊一侧的横比降,并且横比降的强度和位置随流量级而变化,造成低滩上漫滩斜流(横流)也上下转移。例如图7中给出了武穴水道分流区不同流量下的断面流速分布图,可见流量为 $10\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,分流点位于细吴镇附近,主流带居于河道左侧,而至火焰山附近主流带已移至河道右侧;流量为 $51\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时,分流点下移至火焰山附近,主流带显著位于河道左侧,至葫芦山附近河道左右侧流速分布均匀,主流带明显存在向右侧主汊移动的趋势。

由以上特点可见,汉道进口的分流区虽然具有两个以上大流速区,但其主流带仍具有单一河段主流带在不同流量级下上提下移、左右摆动的特点。这种主流带的摆动必然造成洲头低滩在不同流量级下交替处于缓流区和大流速区,也造成漫滩横流的强度呈现强弱转换,这正是导致分流区低矮滩体冲淤多变的水动力成因。低滩冲淤转换是否具有临界特征,取决于主流带摆动以及横流强度强弱转换是否具有临界性。

### 2.2 分汊展宽段内大流速区与缓流区的转换特点

以枯期流速分离点附近断面为考察对象,以断面流速分布中流速最大点距支汊一侧河岸的相对距离(绝对距离除以河道总宽度)作为衡量主流位置的依据,点绘不同流量下的主流带位置见图8,在这个固定断面上,流量大小与主流距支汊侧河岸距离存在负相关关系,流量越大,主流越靠近支汊一侧河岸。采用与图8类似的处理方法,点绘沿程不同断面的主流位置(图9),主流位置自上游向下游存在一个逐渐向主汊一侧偏

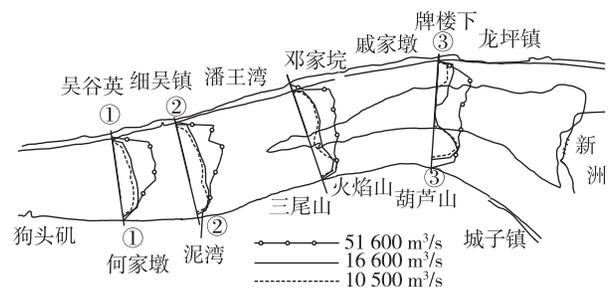


图7 2002年武穴水道断面流速分布变化

Fig. 7 Velocity distribution of on the cross section in Wuxue reach(2002)

转的过程, 流量级越大, 主流偏转向主汊一侧的位置越靠下。

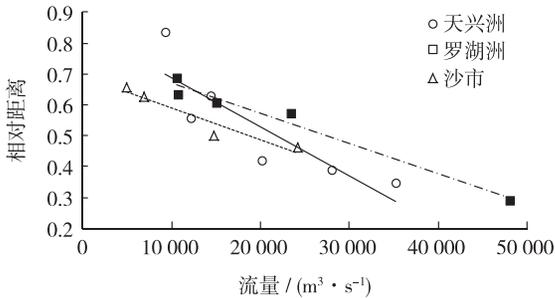


图 8 枯期分流点附近主流位置随流量变化  
Fig. 8 Location of flow dynamic axis at different discharge near diversion point

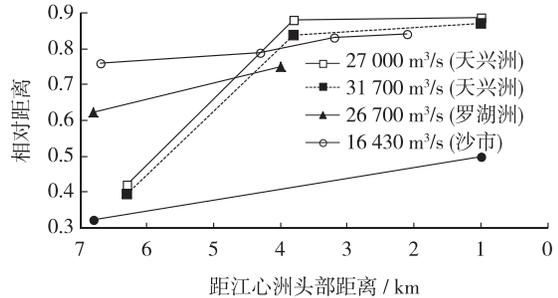


图 9 分流区内主流位置沿程变化  
Fig. 9 Variations of flow dynamic axis along flow in bifurcation region

以上现象蕴含了分汊河型产生和维持的内在机理, 即大水时主流倾向于指向流路衔接较为平顺的支汊, 枯水时主流倾向于指向主流较低的主汊, 这种转换必然伴随了以某两个临界流量为界, 洲头低滩上交替处于大流速区与缓流区。以天兴洲洲头低滩为例, 由图 8 可见, 当流量小于 20 000 m<sup>3</sup>/s 时, 主流始终位于右侧主汊一侧, 整个洲头低滩区域处于缓流区; 随流量增大至 30 000 m<sup>3</sup>/s 以上时, 主流带位置左摆(图 9), 由此必然导致由左向右的过渡带位置移至低滩上。虽然缺乏更大流量下的断面流速资料, 但可以推断的是, 当流量继续增大, 主流自左向右过渡的位置必然在洲头低滩尾部即贴近洲头高滩附近完成, 此时洲头低滩上大部分区域将再次处于缓流区。事实上, 天兴洲洲头高滩正是由于 1998 年、1999 年等连续的大洪水作用向下游崩退了近 1 000 m, 与此同时洲头前沿大幅淤积并形成低滩, 长江中游许多江心洲头部低滩与高滩之间也曾观测到大洪水后甬沟冲刷发展的现象。由此可见, 洲头低滩在流量由枯水向洪水增大过程中, 滩面流速将依次经历缓流速、大流速、缓流速的转换, 洲头低滩冲刷对应的大流速期应存在大、小两个临界流量。

### 2.3 洲头低滩上的横流强度变化特点

图 8 给出了天兴洲头部低滩上游附近某固定断面的实测横比降与流量之间的关系, 横比降随流量增加而展现出了先增大后减小的变化特点, 流量低于 25 000 m<sup>3</sup>/s 时, 横比降持续增加, 流量处于 25 000 ~ 35 000 m<sup>3</sup>/s 时, 横比降为最大。该现象说明, 分汊河段进口的横比降变化也存在临界特性, 即对于各位置而言, 应存在某个流量区间, 当流量处于该区间时横比降最大。由于横比降大小一定程度上也意味着横流强度的大小, 因而根据低滩上横流位置在大流量下逐渐下移的特点可以推断, 越近下游的位置, 横比降达到最大时对应的流量区间也应增大。对于天兴洲头部的低滩而言, 其位置比图 8 中的断面位置更加靠下, 显然低滩上横比降最大的流量区间应较图 10 中偏大。

从天兴洲河段 2011 年汛期实测 ( $Q = 31\,700\text{ m}^3/\text{s}$ ) 低滩中部的断面流速及含沙量分布来看(图 11), 含沙量分布左大右小, 与流速分布的左小右大极不匹配, 且河道断面中央即低滩的右侧形成了明显的高含沙区。说明了低滩上漫滩横流的存在, 使低滩发生冲刷, 泥沙横向输移至右侧深槽。

由以上实测资料反映的现象可见, 洲头低滩上的漫滩横流强度在某个流量区间时最强, 流量大于或小于该流量区间, 横流强度都将减弱。

### 2.4 典型河段洲头低滩冲淤动力的临界特性

以天兴洲河段为例, 借助于平面二维水流数学模型, 对临界流量的大小进行定量估算。模型的建立见文献[8], 受制于文章篇幅, 本文仅列出计算结果, 率定与验证过程不再赘述。

图 12 为天兴洲分汊进口段各流量级下的主流线变化图, 流量在 30 000 m<sup>3</sup>/s 以下时, 进口段的主流明显位于右汊深槽, 而洲头低滩处于缓流区; 流量大于 60 000 m<sup>3</sup>/s 时, 主流一直位于河道左侧, 在洲头位置才转移并偏向于右汊, 而低滩与河道右侧河槽位于缓流区; 流量在 30 000 ~ 50 000 m<sup>3</sup>/s 之间时, 主流在低滩滩

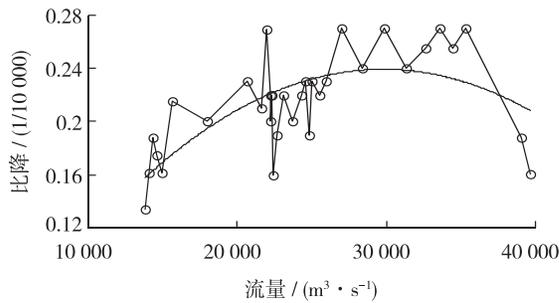


图10 2005年低滩上游附近横比降与流量之间关系

Fig. 10 Relationship between horizontal gradient and flow(2005)

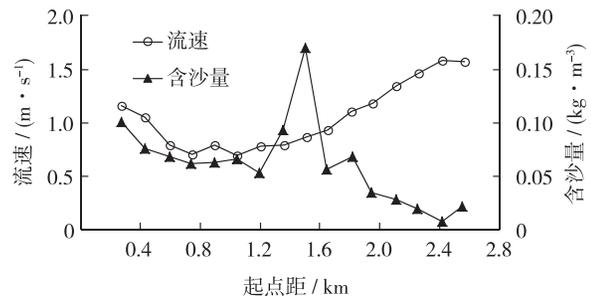


图11 低滩中部断面的流速及含沙量分布

Fig. 11 Distribution of velocity and sediment concentration at low bench

面上完成从左向右的过渡, 低滩上存在大流速区。据此可以确定, 使洲头低滩上形成较强冲刷动力的上、下两个临界流量  $Q_1$  与  $Q_2$  分别为  $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$  与  $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

将河道沿中心线分为左右两侧, 在天兴洲头上游 10 余 km 距离内统计左右两侧流量的沿程变化, 可以发现河道左侧的过流量沿程减小, 而右侧过流量沿程增大, 这显然是由于水量横向交换所致。将沿程进入右侧的累积流量除以该区内进入右侧的总流量, 得到的量纲一数显示了沿程自左向右横向水量交换的强度 (图 13)。流量小于  $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 大于 40% 的横向流量交换发生于洲头低滩上游; 流量大于  $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 超过 40% 的横向流量交换发生在天兴洲头部, 而流量处于  $30\,000 \sim 50\,000\text{ m}^3/\text{s}$  之间时, 低滩上的横向流量交换占了较大比重。进一步证明, 对于天兴洲河道而言,  $Q_1$  与  $Q_2$  分别为  $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$  与  $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

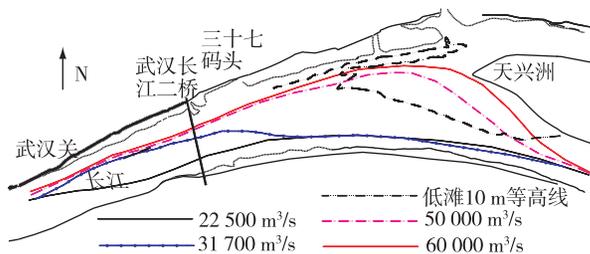


图12 不同流量下主流线变

Fig. 12 Variations of flow dynamic axis at different discharge

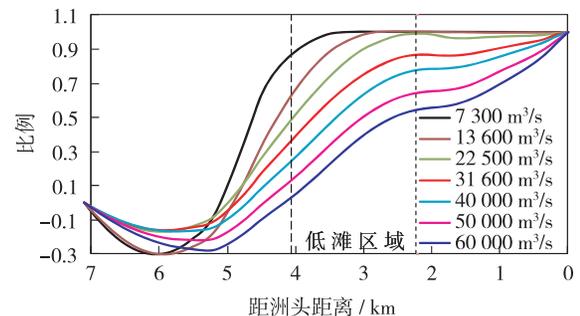


图13 不同流量下流量横向交换强度变化

Fig. 13 Lateral exchange of flow at different discharge

### 3 水文过程与河床冲淤之间响应关系

由于分汊河段进口低滩上的水流冲淤动力条件具有明显的临界特性, 因而可以推断, 不同的水文过程中由于各流量级持续时间不同, 必然将造成不同幅度甚至不同性质的洲滩变形。本文选取天兴洲和罗湖洲分汊放宽段内的近期地形资料和水文资料, 点绘洲头低滩在一定时段内面积变化和临界区间内流量作用时间的关系, 见图 14 (其中罗湖洲  $Q_1$ 、 $Q_2$  根据实测资料确定, 分别为  $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ), 低滩面积指多年平均枯水流量对应水位以上的面积。可以看出, 时段内介于  $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$  与  $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$  的流量天数越多, 面积减少幅度越大; 而大于  $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$  的流量持续作用时间越长, 低滩面积增幅越大。尽管由于沙量波动等方面影响, 点据显现了一定程度的分散, 但流量级持续时间与低滩变形幅度之间的相关性十分明显。

综上所述, 流量介于  $Q_1$  与  $Q_2$  的时段越长, 分汊河段进口低滩冲刷越严重, 流量大于  $Q_1$  的时段越长, 低滩淤积幅度越大。由于江心洲头部低滩变形对该位置的航槽稳定及航道水深影响甚大, 而根据图 14 中的关系, 一定程度上能够对特定水文过程作用下的低滩变形幅度进行预判, 因而这一结论对航道演变分析显然具

有指导意义。需要说明的是, 本文涉及的河段, 大多位于下荆江监利河段以下, 在三峡水库蓄水前基本处于输沙平衡状态, 三峡水库蓄水后这些河段床沙质也基本能够恢复, 因而讨论水动力条件影响时, 未考虑沙量波动的影响, 而这一因素也不至于影响本文的结论。

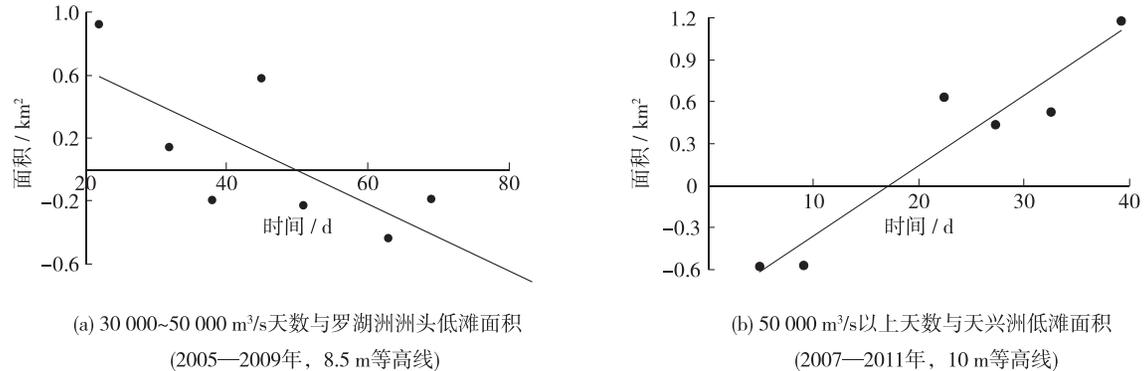


图 14 临界流量持续天数与洲头低滩面积变幅相关关系

Fig. 14 Relationship between the duration of discharge and the area of head bench

## 4 结 论

(1) 从分汊河段洲头分流区低滩变形的典型现象来看, 进口展宽段水流冲淤动力横向分布不均匀, 洲头低滩在不同流量下存在着冲淤性质转换的规律。

(2) 进口展宽段内的水流运动特性, 决定了低滩在大流速区与缓流区之间转换, 横流强度随流量增大而先增大后减小, 从而使低滩在  $Q_1$  与  $Q_2$  之间冲淤性质为冲刷, 其他流量范围为淤积的临界特性。

(3) 水文过程中介于  $Q_1$  与  $Q_2$  两个临界流量之间的流量级持续时间, 是决定低滩冲淤变形的关键因素, 这一结论对于分汊河道进口航道条件分析具有指导意义。

本文在江心洲河段纵向“洪淤枯冲”演变规律的基础上, 从冲淤动力平面分布不均的角度提出江心洲头部冲淤状态转化存在一大一小两个临界流量, 是对已有研究成果的细化。临界流量的数值与江心洲头部上游控导作用、下游主汊吸流作用, 河段自身形态特征等因素有关, 在各个河段中可能存在差异, 从某一河段上得出的定量数值并不具有普遍性, 临界流量的定量确定还有待深入研究。

### 参考文献:

- [1] 孙昭华, 李义天, 黄颖, 等. 长江中游城陵矶一湖口分汊河道洲滩演变及碍航成因探析[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1398-1406. (SUN Zhaohua, LI Yitian, HUANG Ying, et al. Fluvial process of sandbars and shoals in branching channels of the middle Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1398-1406. (in Chinese))
- [2] 刘杰, 陈吉余, 徐志扬. 长江口深水航道治理工程实施后南北槽分汊段河床演变[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 605-612. (CHEN Jie, CHEN Jiyu, XU Zhiyang. River-bed evolution in the braided reach of the south and north passage after implementing Yangtze estuary deep water navigational improvements[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 605-612. (in Chinese))
- [3] 余文畴. 长江分汊口门水流及输沙特性[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1987(1): 13-25. (YU Wenchou. Some characteristics of water flow and sediment transportation at the entrance region of the braided channel with stable islands in the middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Water Resource and Hydropower Research Institution, 1987(1): 13-25. (in Chinese))
- [4] ASHMORE P. Intensity and characteristic length of braided channel patterns[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(10): 1656-1666.
- [5] MAARTEN G, JAN H. River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method[J]. Earth Surface and Processes and Landforms, 2011, 36: 721-738.

- [6] 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其对航道条件的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 1-10. (JIANG Ling, LI Yitian, SUN Zhaohua, et al. Channel evolution of Jingjiang reach and its influence on waterway after impoundment of the Three Gorges Project[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(1): 1-10. (in Chinese))
- [7] 唐金武. 长江中下游河道演变及航道整治方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2012. (TANG Jinwu. Deformation and channel regulation method of Middle and Lower Yangtze River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012. (in Chinese))
- [8] 张细兵, 殷瑞兰. 平面二维水流泥沙数值模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 665-669. (ZHANG Xibing, YIN Ruilan. Planar 2-D flow and sediment mathematical modeling[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6): 665-669. (in Chinese))

## Critical features of flow dynamics at the entrance of multi-branched channels \*

HAN Jianqiao, SUN Zhaohua, FENG Qiufen

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** At the entrance reach of multi-branched channels, the temporal and spatial distribution of sediment erosion or deposition often changes due to the position of main stream shifting with different income discharge. In order to investigate the relation between the magnitude of bed deformation and flow discharge, numerical simulations of flow fields are carried out and channel morphology comparisons were made across different discharge in several braided reaches of the middle Yangtze. It is found that flow dynamics exhibits a critical character when incoming discharge changes. That indicates the existence of two critical discharges  $Q_1$  and  $Q_2$ . The head of sandbar will be eroded when the incoming discharge ranging between  $Q_1$  and  $Q_2$ . The head of sandbar will be deposited when the incoming discharge is above  $Q_1$  or below  $Q_2$ . Because the impacts of incoming discharge on river bed deformation are different according to different discharge magnitudes, the seasonal or annual adjustment of bed morphology at the head of sandbars will mainly depend on the duration of discharge process.

**Key words:** multi-branched channels; middle bar; flow dynamics; critical features

---

\* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-year Plan Period (No. 2012BAB04B04) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2012206020212).