



# 土桥水道碍航特性突变分析\*

黄姿菡<sup>1</sup>, 李义天<sup>1</sup>, 余文钧<sup>2</sup>, 高雨龙<sup>3</sup>

(1. 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;

2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 3. 长江航道测量中心, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 长江下游土桥水道自1998年开始航道条件恶化, 但不同时期碍航特性不同。以1955—2014年土桥水道的实测地形、水文资料及大通站水沙资料为基础, 用有序聚类法分析了大通站输沙量的变化特点, 以及各类碍航特性变化的原因。结果表明: 目前土桥水道碍航特性已从断面形态宽浅及淤沙碍航变为左汊分流比下降, 其主要原因是三峡蓄水后大通站水沙过程的变化。该水沙过程不利于左汊分流比的维持, 特别是175 m蓄水方案运行后, 左汊分流比明显下降, 成为影响航道条件的主要因素。

**关键词:** 土桥水道; 碍航特性; 突变; 三峡水库蓄水

中图分类号: U 697.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0094-06

## Mutation of navigation-obstructing characteristics in Tuqiao waterway

HUANG Zi-han<sup>1</sup>, LI Yi-tian<sup>1</sup>, YU Wen-jun<sup>2</sup>, GAO Yu-long<sup>3</sup>

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

2.Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430010, China;

3.Changjiang Waterway Survey Center, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The navigational condition of Tuqiao waterway has deteriorated since 1998, but the navigation-obstructing characteristics have varied with time. Therefore, this dissertation attempt to delve into the mutation of the navigation-obstructing characteristics. Firstly, it draws on data from the topography and hydrology of Tuqiao as well as the date of water and sediment from Datong hydrological station during 1955 to 2014. Secondly, by using the ordered cluster method it analyzes the changes of sediment discharge of Datong hydrological station, and the reasons of the variations of navigation-obstructing characteristics. The results show that the navigation-obstructing characteristics have changed from the problems of section shape and silty-sand to the declining split ratio of the left branch. The main reason is the changes in the water and sediment process of Datong hydrological station after the impoundment of Three Gorges Reservoir. The new process of water and sediment is detrimental to the maintenance/stabilization in the flow diversion ratio of the left branch, which specially causes a significant decrease in the flow diversion ratio after the operation of 175 m water impoundment scheme, and has become the main reason of the worsening navigational condition.

**Keywords:** Tuqiao waterway; navigation-obstructing characteristics; mutation; the water-impoundment of TGR

土桥水道是长江下游典型顺直分汊水道, 也是长江下游重点碍航水道之一。自1998年开始土

桥水道航道条件恶化, 但不同时期碍航特性不同, 主要可以分为3类: 1) 左汊中上段浅滩水深不足

收稿日期: 2016-06-22

\*基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2042016kf1068)

作者简介: 黄姿菡 (1993—), 女, 硕士研究生, 从事河流泥沙工程学研究。

6 m; 2) 左汊内部出现游移浅包导致 6 m 水深的航宽不足 200 m; 3) 左汊分流比持续下降且低于 50%。根据河床演变学原理, 顺直分汊河道的演变特征是主流周期摆动, 左右汊交替发展<sup>[1]</sup>。该特征会对航道条件产生不利影响。如马当南水道因支汊发展、主汊进口处断面宽浅, 标准航宽无法维持; 扬中河段鳊鱼沙水域因水动力轴线改变, 心滩位置不定, 造成航道淤浅等<sup>[2-4]</sup>。孙昭华<sup>[5]</sup>在对长江中游城陵矶—湖口分汊河道的研究中认为, 分汊河道碍航成因主要有 2 类: 1) 河势周期性变化引起浅滩条件调整; 2) 滩槽格局对水沙条件波动适应性差。虽然已有研究对分汊河段各类碍航特性做了较全面的分析, 但对于同一河段碍航特性突变的方面分析较少, 且目前成果没有系统分

析土桥各类碍航特性<sup>[6]</sup>。因此本文将在土桥水道已有研究成果的基础上, 结合 1955—2014 年大通水文站的水沙资料以及近年的实测地形和水文断面资料, 深入分析土桥水道不同时期的碍航特性, 以及碍航特性突变的原因, 为后期的航道治理提供参考。

## 1 河段概况

土桥水道位于长江下游的安徽省铜陵市境内, 为衔接大通弯道和太阳洲弯道的过渡段, 上起羊山矶, 下迄古家堰, 全长 30 km (图 1), 是长江下游第一个顺直分汊河型。该水道主体部分被成德洲分为左右两汊, 左汊为通航主汊, 右汊为支汊。

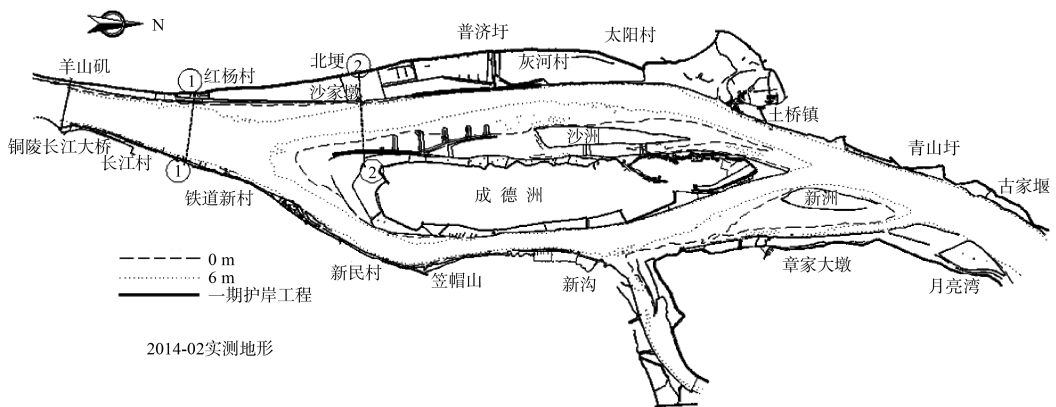


图 1 土桥水道近期河势

目前土桥水道所在的铜陵至南京段航道建设标准为 6.0 m×200 m×1050 m, 保证率为 98%。其航道问题主要在于左汊中上段河道宽浅, 6 m 水深的航宽不足 200 m。根据航道部门提供的实测资料, 1998 年以前, 左汊航道条件较好, 深泓高程一般低于航基面以下 6 m; 1998 年以后航道条件有所恶化, 中上段深泓淤高, 出浅频率增加, 特别是 2003 年以来, 红杨树边滩刷低、缩窄, 成德洲左缘低滩冲刷后退, 左汊中上段河道进一步宽浅, 汛后水流冲刷力度降低导致的淤沙碍航现象时有发生, 表 1 为土桥出现碍航现象年份的具体情况。

表 1 枯水期左汊中上段最小通航尺度统计 m

时间	不同水深的航宽		深泓水深 最小值
	4.5 m	6 m	
2001-11	610	190	6.3
2003-02	440	129	6.2
2006-03	930	70	5.8
2007-03	1 050	715	5.9*
2008-03	948	567	5.7*
2009-02	595	354	7.1*
2010-10		400	5.8*

注: \* 表示该年份 6 m 线贯通, 但航槽内存在浅包。

因此 2009 年汛后长江航道局对土桥水道实施了一期航道整治工程, 限制了左汊中上段进一步宽浅化发展, 工程后淤沙碍航现象基本消失, 航道

条件有所好转；但是近几年来左汉分流比持续下降，已有部分年份左汉分流比低于 50%，该现象直接威胁到左汉作为主汉的通航地位，是目前土桥水道通航需要关心的首要问题。

## 2 水沙条件

土桥水道上游约 10 km 设有大通水文站，其间无大的支汇入流，因此，大通水文站资料可作为本河段的来水来沙条件分析的依据。

图 2 给出了大通站近 60 年来的流量变化分布情况，从图 2 中可以看出，来水过程以枯水 ( $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ) 频率最大，中水 ( $Q = 20\,000 \sim 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ) 频率次之，洪水 ( $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ) 来流频率最小。但各级流量随着时间的推移不停的 occurring 调整。2003 年以后  $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$  来流频率明显上升，由之前的 15% 上升至 22%，而  $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$  以上来流频率则由之前的 10% 下降为 5%。

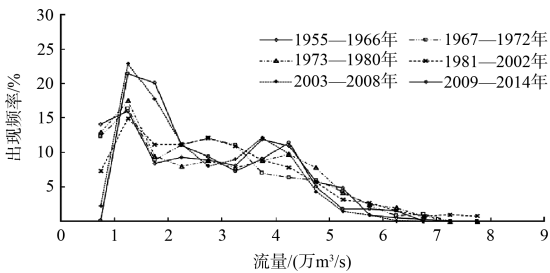


图 2 1955—2014 年大通水文站流量出现频率变化

图 3 为大通站近 60 年的输沙量变化。可以看出，20 世纪 90 年代以后来沙量明显降低，这主要与 1989 年实施的长江上游水土保持重点防治工程有关。由于土桥水道碍航现象主要发生在 1998 年以后，现利用有序聚类分析法推求 1990—2014 年大通水文站输沙量序列的最优分割点，也就是突变点。具体方法过程在文献[7-8]中有详细说明，计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出，1990 年以后大通站输沙量变化的突变年份为 2003 年，主要与修建三峡水库有关。

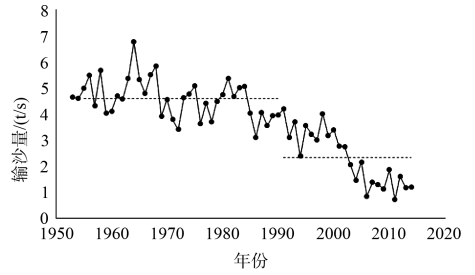


图 3 1955—2014 年大通站输沙量变化

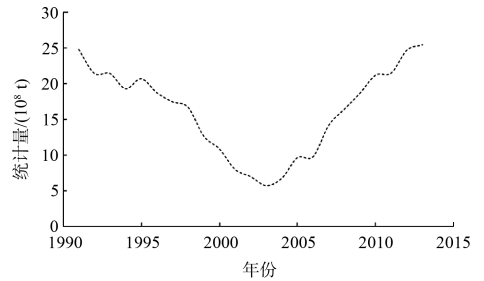


图 4 大通站有序聚类法输沙量突变分析结果

综合大通站来水来沙变化看，大通站多年来水规律符合中枯水来流频率大，洪水来流频率小的分布特点，近年来伴随着上游梯级水库的建造，来流呈现出枯水来流频率增大，洪水来流频率下降的变化趋势，尤其是三峡水库蓄水之后；而上游含沙量也因三峡水库蓄水呈现出大幅减少趋势。

## 3 碍航特性

土桥水道出现的 3 类碍航特性在不同时期成为阻碍土桥水道顺利通航的主要问题。

1) 左汉中上段浅滩处水深不足发生碍航。

1998 年以来，左汉中上段深泓淤高，航道条件恶化，2002 年 10 月、2006 年 3 月、2007 年 3 月均存在高于基面以下 6 m 的深泓段，2009 年一期工程实施以来，左汉航道条件略有好转。

2) 左汉中上段出现游移浅包导致碍航。

自 2003 年以来，左汉内部出现了部分游移性碍航浅包，其平面位置及规模在年内、年际均不稳定(表 2)，2006 年特枯水年，洪峰历时短、水流归槽时间久，碍航浅包仍然出现，因此左汉内游移性碍航浅包的出现与年内退水过程长短无明显对应性。另外，2009 年以后游移性碍航浅包基本消失。

表 2 土桥水道左汉中上段游移性碍航浅包位置及规模统计

时间	6 m 等深线		最大浅包 长度/m	浅包 数/个	最下游浅包 尾距灰河口 距离/km
	贯通 与否	最小 宽度/m			
2003-02	贯通	129	484		+1.35
2004-03	贯通	510	96	1	+2.51
2005-03	贯通	630	880	1	-0.18
2006-03	不贯通		1 487	已成浅区	-0.94
2007-03	贯通	715	622	8	-0.17
2008-03	贯通	567	323	3	-1.17
2009-03	贯通	320			
2011-03	贯通	414			
2013-03	贯通	337			

注：“+”表示灰河口上游，“-”表示灰河口下游。

3) 近年来左汉分流比明显下降, 且枯水期低于 50%。

成德洲左汉分流比近年来虽然在某些时期保持稳定, 但总体表现为下降趋势, 尤其是 1998 年至今, 洪水分流比也发生大幅度下降。以枯水期分流比 50% 作为判别标准, 成德洲左汉在 2006 年以后出现分流比小于 50% 的现象, 2009 年以来左汉基本已由主汉转为支汉。

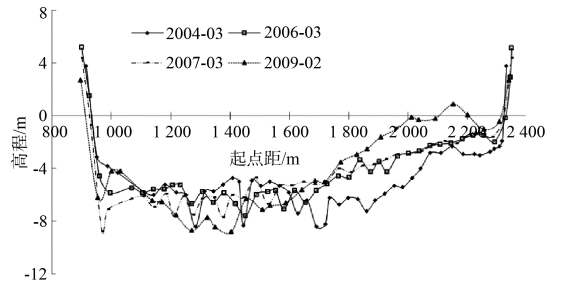
从碍航特性的分析可以发现, 土桥水道自 1998 年以来, 碍航特性已由左汉中上段浅滩水深不足及游移碍航浅包问题突变为左汉分流比下降问题。

#### 4 碍航特性变化机理

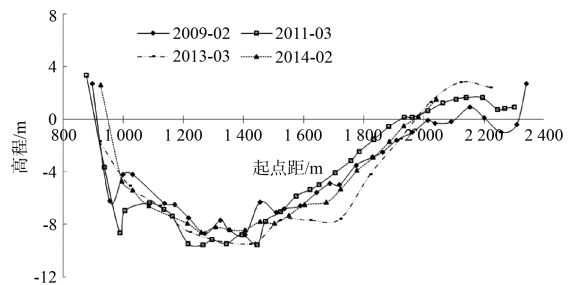
1) 浅滩处水深不足发生碍航主要是受水沙过程及滩槽形态制约。

左汉浅滩的变化规律为洪淤枯冲, 因此遇洪水持续时间较长、退水较快的不利水文年, 左汉中上段航道条件将出现恶化, 局部水深不足或航宽过窄, 是左汉中上段出现碍航问题的主要原因。另外, 从图 5 来看, 左汉浅区断面在 2004—2009 年呈现宽浅型发展趋势, 减弱了汛后水流冲刷动力, 使 2006—2008 年的航道条件进一步恶化,

因此针对此问题对土桥实施了一期工程, 改善了左汉中上段的断面形态。工程实施后断面形态有所改善, 且基本保持稳定。



a) 2004—2009年



b) 2009—2014年

图 5 左汉 2# 断面变化

2) 成德洲左缘冲刷后退, 红杨树边滩下移切割, 大量泥沙淤入航槽未及时冲走, 形成游移浅包导致碍航。

图 6 a) 为红杨树边滩 2 m 等深线变化, 图 6 b) 为土桥水道左汉 6 m 等深线变化。2002 年 1 月红杨树边滩大幅淤长, 长 7 740 m, 宽 720 m, 2003 年 3 月红杨树边滩泥沙向下移动, 与成德洲左缘低滩均向河心淤长, 形成碍航局面, 至 2005 年 3 月, 由于红杨树边滩上冲下淤, 成德洲左边滩 6 m 等深线向成德洲方向崩退, 航道条件转好, 浅包个数 1 个, 位置由灰河口上游 2.51 km 移至灰河口下游 0.18 m。2005 年为大水年, 红杨树边滩淤长, 退水期泥沙下移并发生切割, 至 2006 年 3 月, 航道条件最差, 在灰河口一带河槽内存在长达 3 km 的斜向浅区, 其高程在 5.1~6 m。因此 2006 年碍航浅包还由于红杨树边滩切割后大量泥沙进入航槽来不及冲刷进入下游而形成。

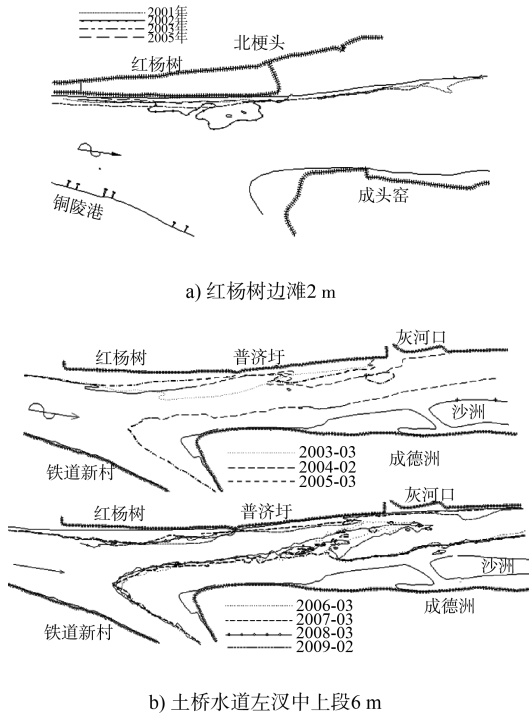


图6 等深线变化

图7为1990年后各阶段流量级的持续时间，由于在分汉进口段的水流冲淤动力横向分布不均，主流位置随流量增大不断左偏，当流量大于40 000 m<sup>3</sup>/s时，主流位于左汉；当流量在20 000~40 000 m<sup>3</sup>/s时，主流位于两汉中间，顶冲两汉之间的成德洲洲头滩体<sup>[9]</sup>。这就解释了2002—2009年红杨树边滩及成德洲洲头滩体的变化原因，同时也反映出该处滩体对水沙过程变化的适应性较差。

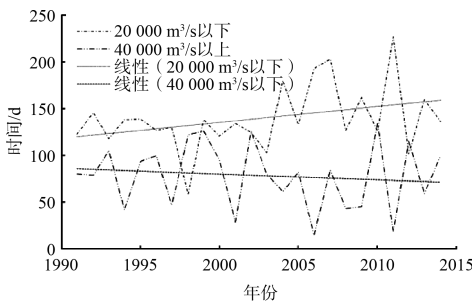


图7 20世纪90年代后大通站各阶段流量级持续时间

3) 左汉通航条件好坏与左汉分流比大小呈正相关，因此左汉分流比下降不利于航道条件维护。

河道地形冲淤变化是分流比的直接影响因素，流量过程影响着汉道冲淤，而汉道冲淤控制着分流比变化，因此流量过程是以汉道冲淤为媒介控制着分流比的变化。通过分析土桥水道左右汉分流比与流量过程的变化关系，可以发现，近年来左汉分流比下降的主要因素是流量过程变化，即土桥水道冲刷动力最大区域随流量增大向左摆动，流量小于20 000 m<sup>3</sup>/s的持续时间越短，大于40 000 m<sup>3</sup>/s的持续时间越长，越利于左汉的冲刷发展及左汉分流比的提升。

根据实测资料，选取航道条件较差的时段资料(6 m等深线最小宽度在350 m以下)，点绘枯水条件下6 m等深线宽度随时间的变化规律(图8)，可以发现其规律与左汉分流比随时间的变化规律一致(图9)。

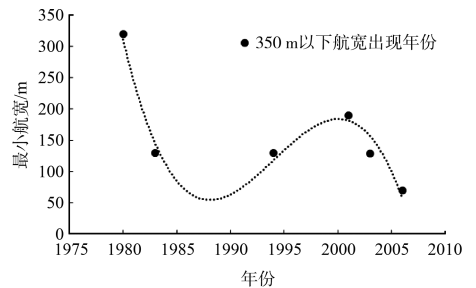


图8 左汉进口处航道条件较差年份

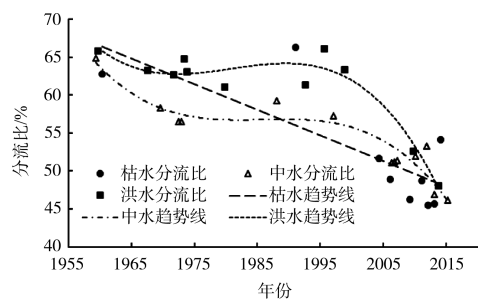


图9 不同时期分流比变化

进一步选取近期游移性浅滩碍航现象较明显的时段资料，点绘枯水条件下6 m等深线宽度与左汉分流比对应关系(图10)。可以看出，左汉通航条件与左汉分流比基本呈正相关，也就是说左汉分流比越小，越不利于航道条件的维护。

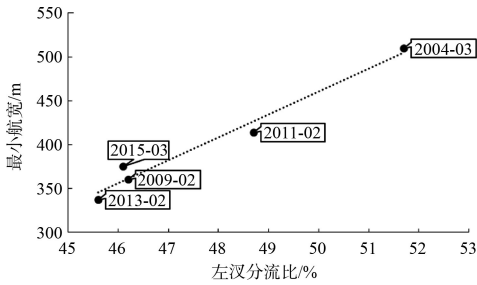


图 10 枯水期浅区分流比与 6 m 航宽关系

从上述分析可知, 土桥水道碍航问题主要是由河道断面形态及上游水沙条件的变化引起的。但土桥水道在不同时期引发碍航问题的主要原因有所不同。1998 年之后左汉航道条件恶化, 主要是因为断面形态宽浅, 加上 1998 年、1999 年及 2002 年的洪水持续时间较长、退水时间较快, 上游来的大量泥沙不能及时带走, 使航道水深不足, 红杨树边滩淤积; 2003 年三峡水库蓄水后, 流量调平, 退水时间大幅减小, 红杨树边滩泥沙未能及时冲走, 下切进入航道成为主要碍航问题; 2009 年之后, 针对上述碍航问题实施的土桥一期整治工程限制了断面宽浅化的发展, 加强了退水过程中的水流冲刷动力, 并清理了水道中的碍航浅包, 航道条件满足通航标准。且三峡蓄水后, 来沙也大幅减小, 红杨树边滩大幅淤积可能性减小, 该类碍航问题基本得以解决。但 2009 年三峡水库实行 175 m 蓄水后, 流量过程进一步平坦化, 来流消峰补枯的变化特点更加明显, 该来水过程使土桥右汉持续冲刷, 导致左汉在断面形态较稳定的前提下分流比加速下降, 2009 年枯水期左右分流比已不足 50%。因此可以认为土桥水道主要的碍航特性已在一期工程后由断面形态和泥沙淤积突变为左汉分流比下降, 且在目前三峡水库调节后来水来沙条件已成定局的前提下, 左汉分流比下降会是未来影响左汉航道条件的首要因素。需要说明的是, 这三种碍航特性并不是孤立的: 分流比下降、浅区断面趋向宽浅型、退水加快等问题均减弱了水流输沙能力, 红杨树边滩下切泥沙在左汉内运移速度减慢, 易形成碍航局面, 近期碍航几率增加皆因为此。而左汉分流比在 2009 年后持续衰减将减小进入左汉的流量, 左汉断面流速将有所降低, 汛后退水加快又减少了左汉浅区冲刷

的作用时间, 在这两方面的影响下, 浅区断面向宽浅型发展的可能性加大, 从而导致左汉内一期工程效果难以保证, 因此, 未来航道条件将随着左汉分流比的降低呈现恶化的趋势。

## 5 结论

1) 一期工程前土桥水道出现碍航现象的主要原因是断面形态宽浅, 且三峡蓄水后上游流量调平, 退水时间减少, 红杨树边滩泥沙不能被及时带走, 下移切割进入河道, 加上成德洲洲头左缘低滩冲刷的泥沙一起, 形成游移浅包。

2) 由于三峡水库蓄水改变了水沙过程, 加上一期工程限制了左汉断面形态, 清理了游移浅包, 原先的碍航问题得以控制, 土桥水道能够满足通航标准; 但该流量过程的变化会导致左汉分流比下降, 且 175 m 蓄水实行后分流比问题更为凸显, 若左汉分流比持续下降, 将引发左汉其他碍航问题, 不利于航道条件的维护。通过分析可以认为土桥水道碍航问题自 2009 年之后已由原先的断面形态宽浅、滩体对水沙条件波动适应性差, 突变为左汉分流比下降引发的航道问题。

## 参考文献:

- [1] 谢鉴衡. 河床演变及整治[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990.
- [2] 杨芳丽, 陈飞, 付中敏, 等. 长江“南京—南通”河段演变及碍航特性分析[J]. 人民长江, 2011(42): 15-18.
- [3] 蔡大富. 长江中游戴家洲河段河床演变及碍航特性分析[J]. 泥沙研究, 2011(2): 47-54.
- [4] 杨芳丽. 长江下游马当河段近期演变及碍航特性[J]. 水运工程, 2016(5): 92-97.
- [5] 孙昭华, 李义天, 黄颖, 等. 长江中游城陵矶—湖口分汉河道洲滩演变及碍航成因探析[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1 398-1 406.
- [6] 江凌, 吴翠微, 杨利红. 长江下游土桥水道碍航特性及整治措施研究[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 16-19.
- [7] 刘茜, 王延贵. 江河水沙变化突变性与周期性分析方法及比较[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 17-23.
- [8] 许全喜, 张小峰, 袁晶. 长江上游河流输沙量时间序列越变现象研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 555-562.
- [9] 余文钧, 李义天, 韩剑桥. 长江下游土桥水道分流比的影响因素及发展趋势[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5): 68-72.