



潮汐河口宽浅弯道的水流动力特性分析*

张俊勇^{1,2}, 吴华林¹, 赵德招¹

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201;

2. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003)

摘要: 以长江口北槽河道为例, 以大量实测资料为基础, 分析潮汐河口宽浅弯道的水流动力特性及演变特征, 探讨北槽航道回淤集中于弯道段与潮汐河口宽浅弯道演变的关联性。研究成果表明, 尽管受多种因素干扰以及河槽较强的二维性, 潮汐河口弯道仍呈现了一定程度弯道水流特征和演变特征, 北槽中部航槽的弯道形态可能对航道回淤起到一定的促进作用。

关键词: 潮汐河口; 宽浅弯道; 航道回淤; 水流动力特性

中图分类号: TV 131.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)11-0119-05

Flow dynamics characteristics of wide-shallow tidal estuary meandering river

ZHANG Jun-yong^{1,2}, WU Hua-lin¹, ZHAO De-zhao¹

(1. Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China; 2. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Shanghai 200003, China)

Abstract: Taking the north passage of the Yangtze River estuary for example and based on a large number of field measured data, we analyze the flow dynamics characteristics and evolution characteristics on the wide-shallow tidal estuary meandering river and explore the relationship between the fact of silting concentration in the bend section of the north channel and the evolution of wide-shallow tidal estuary meandering river. The result shows that despite the disturbance of multiple factors and the strong two-dimensional characteristics of the channel, the tidal estuary meandering river still presents bend flow characteristics and characteristics of evolution to a certain degree. The bend on the middle north channel may promote silting concentration.

Key words: tidal estuary; wide-shallow meandering river; silting; flow dynamics characteristics

一般说来, 潮汐河口河道平面上往往呈上游往口外沿程放宽的态势, 形态上很难采用传统意义上的河型划分(如顺直、弯曲、分汊等), 更难直接定义为弯曲河流; 但另一方面, 河口河道主流在很多河段呈现较显著的弯曲特性, 尤其从深槽形态看来(如某个水深的等深线下), 常常为典型的弯曲形态, 如长江口北港河段、北槽河段等; 而且由于河口潮汐具有定常的特性, 这种河口河段的弯曲形态不仅分布的范围较广、维持的时间也往往较长。相对于内河, 这些潮汐河口

河道更为宽浅, 宽深比大于100者比比皆是。由于径流-潮流双向往复流以及波浪、盐淡水的作用, 潮汐河口弯道的水流动力特性更为复杂, 外观形态和演变规律与内河弯道也不尽相同。

长江口北槽河道就是典型的潮汐河口宽浅弯道。在长江口深水航道治理及后期维护过程中, 积累了大量的水沙、地形资料。本文仅以实测资料为基础, 对潮汐河口宽浅弯道的水流动力特性及实测资料进行分析, 并探讨当前北槽航道回淤集中于弯道段与潮汐河口宽浅弯道演变特性的关联性。

收稿日期: 2013-08-25

*基金项目: 国家自然科学基金(51209135)

作者简介: 张俊勇(1977-), 男, 博士, 从事航道规划及河口治理研究。

1 长江口北槽河道概况及实测资料情况

长江口北槽河道位于长江口南港下段，九段沙、横沙岛及横沙东滩之间，河道全长约60 km，自1983年开始，北槽即为长江口入海的主航道。自1998年长江口深水航道治理工程实施以来，北槽更是得到了较为全面的人工控制，当前北槽河道两侧有整治建筑物（南北导堤及丁坝合计共169 km），中间为宽350~400 m，深12.5 m的深水航道。北槽整体呈微弯河道、转弯点在W3附近。

经过一至三期工程的艰苦建设，北槽形成了上下贯通、平面呈现微弯、覆盖航槽的深槽；长江口12.5 m深水航道已经贯通，但当前北槽航道回淤量依然较大，且回淤量空间上集中于中段即转弯段^[1]。据统计，仅转弯段约10 km范围，回淤量长期占全槽的50%以上。

在航道整治及维护过程中，开展了大量的水文、地形观测。主要包括：

1) 固定垂线测验。为单点的水文测验。测验内容包括垂线流速流向(六点法)、含沙量、含盐度等；

2) ADCP流速测验。通过ADCP流速仪测验断面流速流向，部分经标定后还可施测含沙量的断面分布。

3) 坐底架观测。可测量水体流速剖面过程，近底三维点流速过程，包括水流紊动特性，近底悬浮泥沙浓度、盐度和温度变化过程以及河床床面变化等。测验仪器包括：1 MHz声学多普勒流速剖面仪、2 MHz Nortek Aquadopp 声学多普勒流速剖面仪、Nortek Vector三维点式流速仪、OBS-3A浊度仪系统等（图1）。



图1 坐底架观测系统仪器布置及三脚架野外释放

4) 越堤水流观测。主要采用小阔龙以及OBS-3A浊度仪施测导堤越堤水流流速流向以及含沙量等。

5) 河床底质采样。包括疏浚土物质取样，固定垂线采样以及沉积物钻孔取样等。

6) 河床地形测量等。包括1:60 000的河势监测（约每3个月1次）和1:5 000的航道监测（测量范围为航道及两侧边坡，每年不少于30次）。

2 长江口北槽弯道段水流特征

1) 水流流速垂向分布。

通常认为，二维流中，最大流速位于水面；在三维流中，因水流受河岸的影响较大，最大流速往往不在水流，而位于稍低于水面的位置^[2]。北槽河道宽深比较大（超过1:300），水流二维性相对较强。但实测资料表明，北槽流速垂线分布不均衡，最大流速集中在水面以下（0~0.4H），甚至在0.6H（图2）。初涨时还往往发生表底层流向分异现象：即底层水流已经涨潮，而表层水流依然为落潮（图3），形成“垂向环流”，由于涨落潮方向为平行航槽的纵向，可称为“纵向垂向环流”。

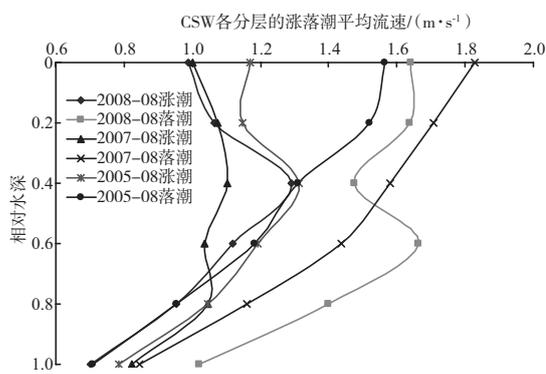


图2 CSW测点潮平均流速垂线分布

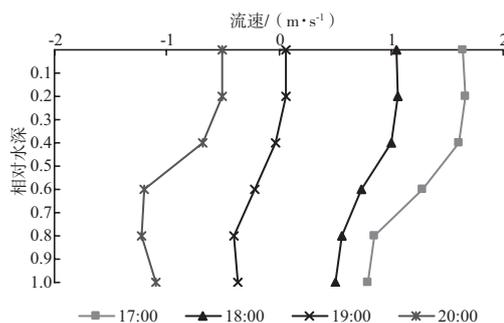


图3 CSW测点瞬时流速垂线分布 (2011-08, 流速负值为涨潮流)

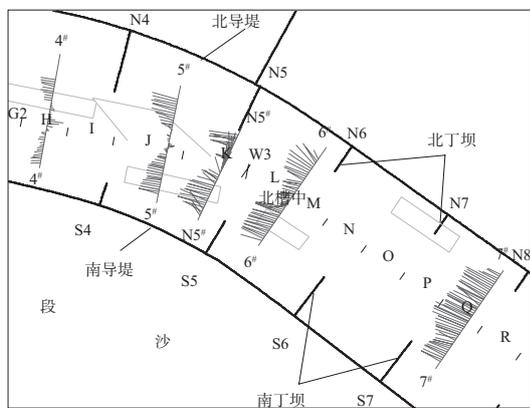
2) 水流流速平面分布。

图4 a)~f) 分别为北槽转弯段初涨、涨急、涨憩、初落、落急、落憩6个时刻的ADCP断面垂线平均流速流向分布图。可见:

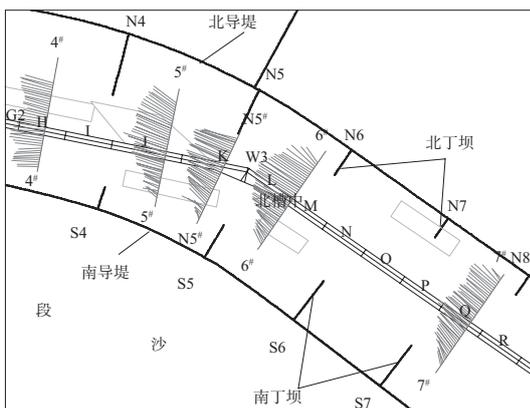
①边滩先涨先落、主槽后涨后落; 初涨初落时边滩流速大于主槽流速, 涨急落急时主槽流速大于边滩流速。

②涨落急主流线存在分异。由于惯性力作用, 涨落潮主流越过转弯点后均有保持直线运动的趋势, 故主流偏北; 因此带来拐弯段上段落潮主流居中而涨潮主流偏北, 下段涨潮主流居中而落潮主流偏北, 从潮汐河口演变的一般规律看来, 涨落急主流线的分异有利于泥沙落淤。

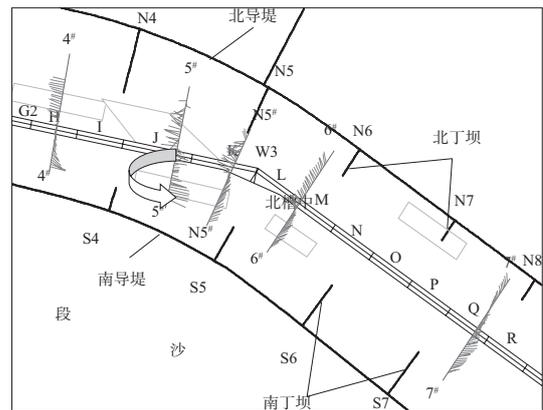
③转流时水流流态最为散乱, 往往出现较为明显的平面环流, 如图4 c) 南边滩已经开始落潮, 北边滩还在涨, 平面上形成了一个穿越航道的逆时针环流, 即“平面环流”。图4 d) 初落阶段则表现为位于上下顺直段的4#和7#断面南北水流基本对称, 而弯道段南北存在较大的流速差。



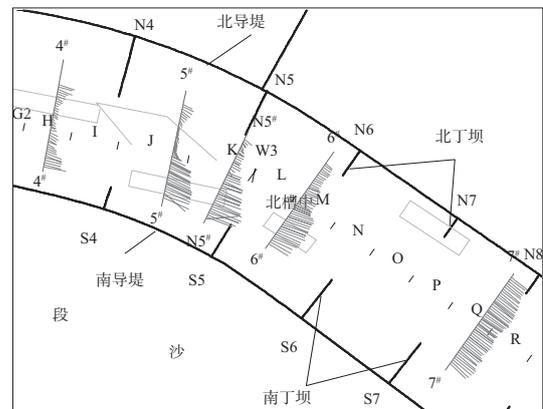
a) 初涨



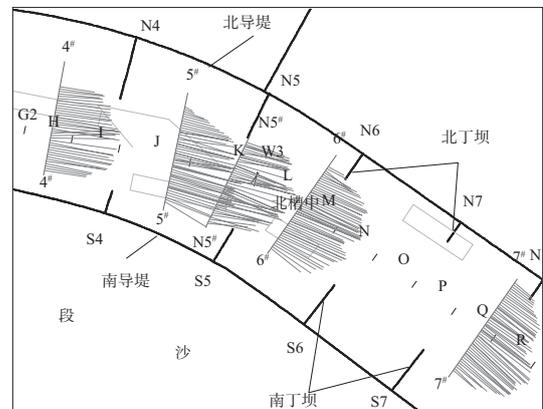
b) 涨急



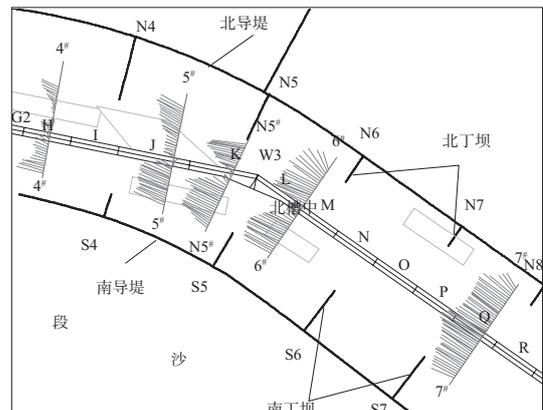
c) 涨憩



d) 初落



e) 落急



f) 落憩

图4 北槽转弯段ADCP断面瞬时流速流向分布(2008-08)

3) 横向水流及越堤水流。

长江口深水航道治理工程中南北导堤的作用是“导流、挡沙、减淤”，堤顶高程2 m而涨潮流高程往往超过4 m，存在较大的越堤水流。其中北导堤自横沙五期工程完成，N23潜堤以西段已经不过水；但南导堤和北导堤东段越堤水流仍普遍存在，其中南导堤进入北槽水流流量远大于越堤出去流量，北导堤下段越堤出北槽水流流量远大于进入北槽流量（图5），给拐弯段提供了大量的横向水流来源。据上海河口海岸科学研究中心2011年4月通量观测成果，大潮、中潮其南导堤越堤潮量分别为北槽上口进入北槽潮量的4.0倍和1.7倍。

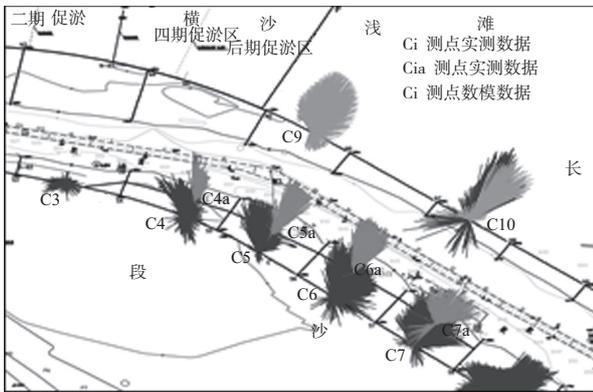


图5 越堤水流玫瑰图 (2011-08-09)

北槽局部水流通量结果表明，北槽航道沿线存在较大的横向水流，2011年8月横向水流在量级上已不亚于纵向水流（表1）。由于该局部水流通量是由一个约1 km × 1.5 km的方形区域测得（位于拐弯点以下8 km的主槽区），考虑到北槽横向水流的长度远大于纵向水流的宽度，总横向水流占纵向水流的比重还可能更大。

表1 2011-08北槽局部水流通量测验

横纵向水流通量对比

潮型	纵向水体运动量/ 万m ³	横向水体运动量/ 万m ³	纵、横向 输水强度比
小潮	164 281	35 252	4.66
中潮	213 906	44 980	4.76
大潮	309 771	62 310	4.97

上海河口海岸科学研究中心通过在航道临近布置坐底观测系统还测验到底部有指向航道的横向水流^[3]，2009年华东师范大学何青等也有类似的

发现，该底部横向水流与表层流向不一致甚至相反，且方向垂直航槽，形成“横向垂线环流”。该“横向垂线环流”与内河河道的弯道环流具有一定的相似性。

3 长江口北槽弯道段河床演变特征

北槽为宽浅河道，深泓位于人工开挖的航槽。从河槽地形上看，即使在转弯段，地形上凹凸岸特征也不显著，没有形成内河弯道常见的深槽多居于凹岸的形态。图6、图7分别为北槽转弯段弯顶及弯顶下游断面地形变化，由图可见2006—2008年的变化以及2010—2012年略有凹岸冲刷、凸岸淤积的典型弯曲河道变化规律。由于期间长江口深水航道治理二期、三期工程均有丁坝建设（建设期分别为2002—2004年，2009年），虽南北丁坝同时建设可消除部分丁坝的影响，该“凹冲凸淤”趋势仍可能受该因素的干扰。

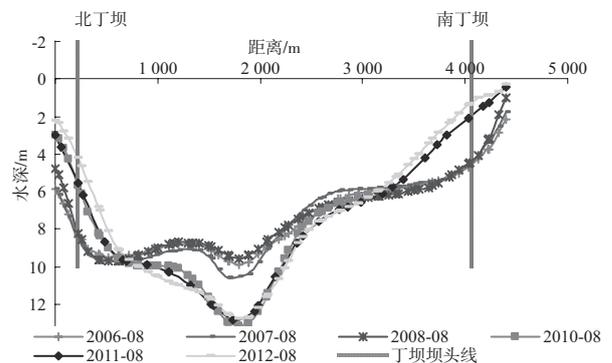


图6 N5#断面北槽转弯段弯顶断面地形变化

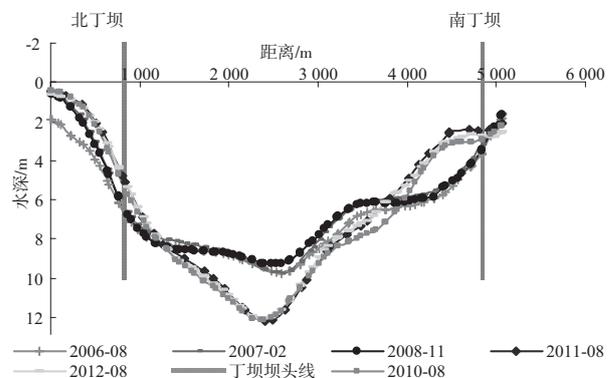


图7 6#断面北槽转弯段弯顶下游断面地形变化

长江口北港下段自横沙岛北端起5 m深槽呈现为典型的微弯河道。第一个弯在横沙岛北侧到长江口航道N23潜堤之间，凹岸位于南侧；第二个弯

在N23潜堤以下, 凸岸位于南侧。2002—2011年的地形冲淤表现了相对更明显的“凹冲凸淤”现象(图8)。由于该河段自横沙东滩串沟封堵后处于自然的演变状态, 该微弯河段“凹冲凸淤”现象具有一定的可信度。

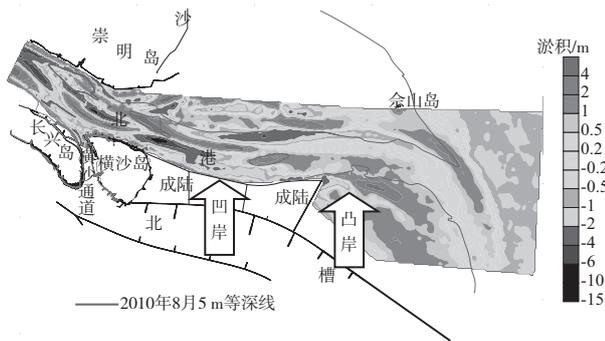


图8 长江口北港下段2002—2011年的地形冲淤

但总体而言, 长江口弯道“凹冲凸淤”、曲率逐渐加大的趋势并不明显, 而主要取决于洲滩变化产生的流路和地形变化。如20世纪50年代到80年代, 横沙东滩串沟的变化引起了北槽弯道形态的变化, 南槽上口江亚南槽的变化引起南槽弯道的变化等。

4 长江口北槽弯道段水沙特性与航道回淤关系初步分析

受复杂动力条件以及因宽深比大而引起二维性较强的影响, 潮汐河口弯道的水沙运动和局部演变特征与内河弯道不尽相同。而对于北槽弯道段, 除上下断面的纵向水流外, 还有南北导堤越堤流形成的横向水流, 加之人类工程的影响, 弯道特有的水沙运动特征如弯道环流、“凹冲凸淤”等规律并不突出。

但从水沙运动和地形变化实测资料分析, 弯道段的存在对航道回淤确为不利因素, 主要表现在:

1) 弯道段必然导致涨落潮主流线的分异。主要受惯性力的影响;

2) “纵向环流”、“平面环流”和“横向环流”三大环流的存在, 使得弯道段水流条件更为紊乱的同时, 加大了滩槽泥沙交换, 使得航道回淤量增大;

3) “凹冲凸淤”淤积特征加剧了航道南北侧的淤积差, 凸岸侧淤积较大。

5 结语

1) 引入河口弯道概念来研究水沙运动和河床演变特征是一种新的尝试。研究表明, 北槽弯道仍呈现了一定程度弯道水流特征和演变特征, 北槽中部航槽的弯道形态可能对航道回淤起一定的促进作用。

2) 由于河口弯道本身是“伪弯道”——仅仅深槽部分呈现弯道形态, 加之河槽二维性突出, 多种因素干扰, 北槽弯道呈现的弯道水流特征和“凹冲凸淤”等演变特征仅是实测资料表现出来的一种现象。到底该现象是河口弯道水沙运动应有的特征, 还是由于导堤越堤水流以及丁坝等人工建筑物的影响, 尚难以从实测资料进行直接区分和明确。河口弯道的研究还有待进一步深入。

参考文献:

- [1] 交通运输部长江口航道管理局. 北槽航道回淤原因及减淤方案效果分析[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2008.
- [2] 谢鉴衡. 河床演变与整治[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
- [3] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口坐底三角架水文泥沙观测成果 [R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)