

黄河口挑河河口悬沙分布与输移特征研究

权永峥¹, 边淑华², 刘建强², 冯秀丽¹, 王景川²

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于实测资料对黄河废弃河道挑河河口段的悬沙分布及输移特点进行了研究。结果表明: 挑河河口段悬沙浓度与潮流流速正相关, 风浪作用则导致悬沙质量浓度大大提高; 在空间尺度上悬沙浓度呈河口高、河道上游低的特点; 挑河河口附近, 涨潮流输沙明显占优势, 向河道内侧, 悬沙输移率有所降低, 且逐渐转变为落潮输沙占优势。结合河口外侧海域冲淤演变趋势以及悬沙输运动力机制, 认为河口段河道总体处于弱淤积状态, 而风浪作用可以加速河道淤积。本研究可为挑河的河口演变和航道整治等提供参考。

关键词: 挑河; 悬沙分布特征; 单宽输沙率; 风浪作用

中图分类号: P736.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)12-0143-07

doi: 10.11759/hyqx20131024002

作为人类生产生活的重要场所, 河口海岸区域是陆海相互作用最为敏感、最为活跃的地带。河口段悬沙的分布和输移规律一直是河口演变、航道整治、海岸环境工程等研究中令人关注的问题。掌握河口段悬沙浓度的分布和输移特征, 不仅有助于提高对河口悬沙运动规律的认识, 而且可为河口治理、规划提供技术支持^[1]。许多学者对长江^[2]、黄河^[3]、珠江^[4]、闽江^[5]、椒江^[6]等河口的水沙特征进行了研究, 并对其输移规律和动力机制进行了探讨。挑河为在废弃的黄河三角洲岸段入海的一条小型河流, 处于黄河故道神仙沟、刁口河以西。黄河东迁后, 该河河道径流量大大减少, 河口外岸段遭受了侵蚀。黄河改道清水沟流路后, 神仙沟、刁口河以及西侧的废黄河三角洲岸段调查资料较少, 对在该岸段入海河流的河口演化趋势、水文泥沙特征及水动力机制等认识较为缺乏。本文依据挑河东支 2012 年海流、悬沙以及水深等实测资料, 对该河河口海流、悬沙特征进行了分析, 对悬沙输移进行了分析计算, 并结合河口外区域侵蚀背景, 对挑河的演化趋势进行了探讨。

1 区域概况

挑河位于山东省利津县境内, 目前为一条季节性排水河道。1917 年黄河的一股支流在该河道入海, 行水 9 a 后黄河改道刁口河入海, 该河道废弃。1973 年利津县政府为治理内涝大兴水利, 疏浚了挑河河道, 故挑河又称新挑河, 东侧的支流则称作挑河东

支流。

黄河改道后挑河河口因得不到泥沙供应, 停止向前淤进, 且在波浪水流作用下, 潮滩和岸线向后蚀退, 在落潮滩面归槽水的冲刷下, 潮滩上形成了纵横的潮水沟体系^[7-8]。涨潮时潮水沟进水, 落潮时水流汇集到本河道流向外海。

挑河总流域面积 504 km², 全长 32.6 km^[9], 水深 1~3 m, 口外有拦门沙发育(图 1 根据 2012 年实测水深数据绘制)。挑河河口外侧海域为不正规半日潮, 年平均潮差 0.89 m。波浪以风浪为主, 涌浪较少, 最大月平均波高 1.18 m, 出现在冬季, 月平均最小值为 0.46 m, 出现在夏季。NE 向平均风速最大, 为 8.4 m/s; 其次为 NNW 向, 平均风速为 8.1 m/s^[10]。

2 资料与方法

本文收集了 2012 年 10 月大潮期间挑河河口段海流、悬沙周日定点观测资料以及悬沙大面巡测资料, 对悬沙分布及运移特征进行了分析研究(表 1, 图 2)。定点观测设置 2 站, 于 2012 年 10 月 29 日 10 时

收稿日期: 2013-10-24; 修回日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41276084)

作者简介: 权永峥(1990-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积与工程环境方面研究, 电话: 15165247560, E-mail: quanyzh8@163.com; 边淑华, 通信作者, 女, 河北唐山人, 研究员, 博士, 主要从事海洋工程环境及海岸动力地貌方向的研究及工程应用工作, 电话: 0532-88965357, E-mail: bianshuhua@fio.org.cn

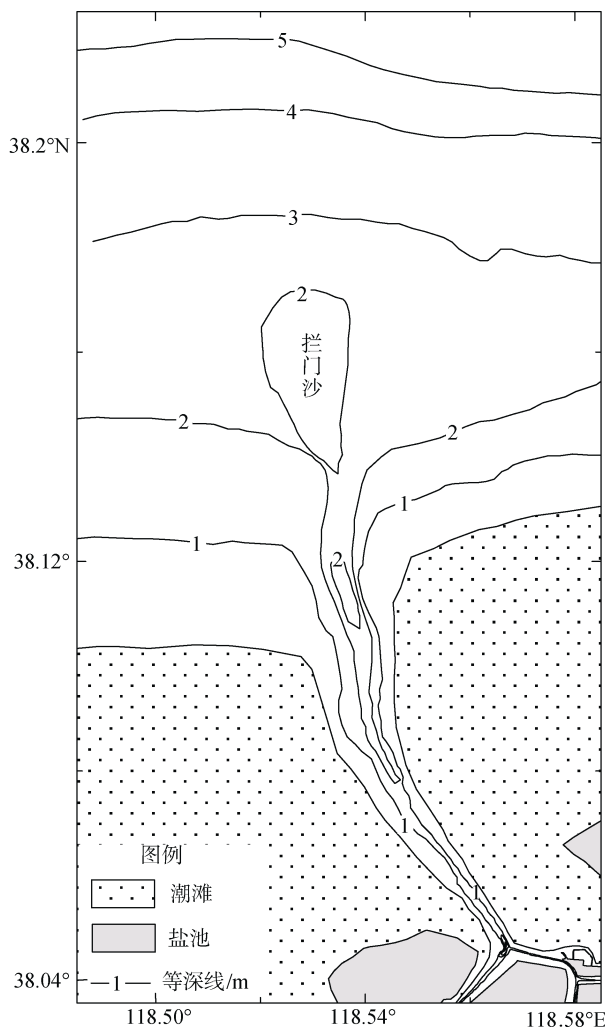


图1 研究区域位置、地形图

Fig.1 The location and topography of the study area

大潮期开始进行 1 个潮周期的观测。其中 L1 站于河道内, 距离河口 0 m 等深线 9.03 km, L2 站也位于河道内且更靠近河口, 距离 0 m 线 6.11 km。悬沙大面巡测设置 19 个站位, 由河道向河口方向分别为 S01~S19, 在涨落急时进行取样。观测开始后 13 h 涨潮时刻, 现场出现 6~7 级偏北风, 持续时间 10 h 左右。

在实验室采用抽滤法测定悬沙量, 滤膜孔径 0.45 μm, 1/10 000 g 电子天平称质量, 根据抽滤前后滤膜质量的变化及水量得出悬沙质量浓度(mg/L)。

表 1 观测资料统计表

Tab. 1 The details of the measured data

观测方式	站位数量(个)	观测时刻	层次	仪器	天气情况
定点观测	2	大潮周日观测(25 h)	中层	安德拉 RCM9 型海流计	23: 00~9: 00 现场出现 6~7 级偏北风
巡测	19	涨急时刻: 10 月 29 日 14 时 落急时刻: 10 月 30 日 8 时	中层	取水器	落急取样时刻, 现场出现 6~7 级偏北风

采用《水文测验手册》推荐公式计算悬沙日单宽输移率^[11]。

3 结果

3.1 潮流特征

挑河河道水流呈现不正规半日潮流性质, 潮流流向与河道走向基本一致, 为较强的往复流(图 3), 且整体上以涨潮流占优势。观测期间, L1 测站涨潮流最大流速为 75 cm/s, 方向为 145°; 落潮流最大流速同样为 75 cm/s, 方向为 327°。L2 测站涨潮流最大流速为 93 cm/s, 方向为 157°; 落潮流最大流速为 64 cm/s, 方向为 339°。由此可知挑河河口段总体涨潮流稍占优势, 而靠近河口处涨潮流优势明显, 且流速较大。

3.2 悬沙特征

3.2.1 悬沙质量浓度周日变化

L1, L2 两测站定点观测表明, 挑河河道内, 一个潮周期内的悬沙质量浓度变化范围为 14.0~142.7 mg/L, 悬沙浓度与潮流流速以及风浪作用正相关。由潮流流速以及悬沙质量浓度过程线可知(图 4), L1, L2 两测站悬沙浓度基本随潮流速度的变化而变化, 极值都出现在涨急、落急时刻附近, 且多滞后涨落急时刻 1~2 h。其中 L1 悬沙质量浓度最高值为 27.4 mg/L, 出现在落急时刻, L2 测站悬沙质量浓度最高值为 142.7 mg/L, 出现在涨急时刻; 从不同潮段来看, 10 月 30 日 0: 00 以后的涨落潮段较之前的涨落潮段相比, L1, L2 两测站的流速和悬沙质量浓度显著增大, 结合现场观测情况可知, 该时段研究海域出现了 6~7 级偏北风, 且持续时间达 10 h 左右。观测期间, L1, L2 测站悬沙浓度最高值均出现在偏北风时段, 悬沙质量浓度的增大显然与偏北向风浪作用密切相关。

由表 2 可以看出 L2 站相关系数大于 L1 站, 这是由于河道上游容易受到来自河口高悬沙量涨潮水的影响, 并且流速降低时部分悬沙未及时沉降。风浪作用整体提高了悬沙量导致 L1, L2 两个测站相关系数都不高。流速滞后 1~2 h 后与浓度的相关系数明显

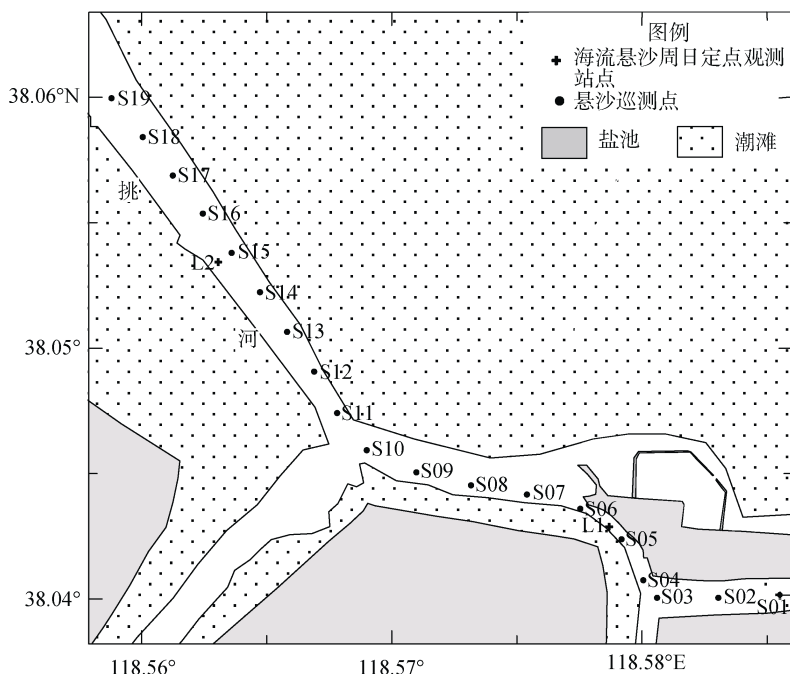


图 2 站位分布图

Fig. 2 The position of the measurement stations

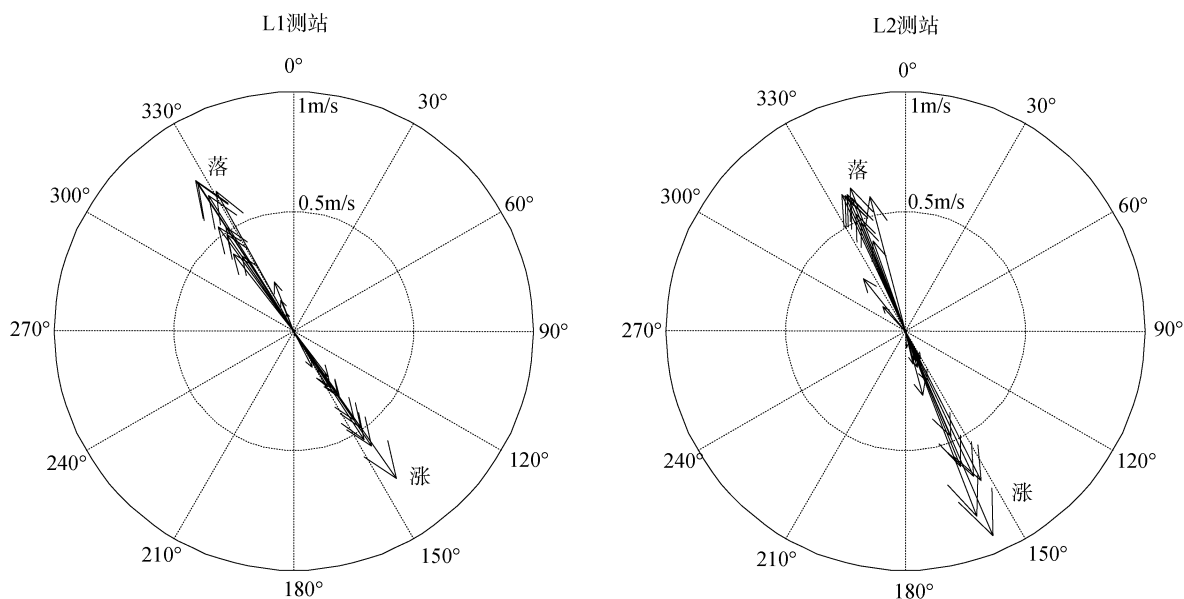


图 3 L1, L2 测站潮流矢量图

Fig. 3 The tidal current vector at L1 and L2 stations

表 2 L1, L2 测站流速-悬沙质量浓度相关系数表

Tab. 2 The correlation coefficient of current velocity-suspended sediment concentration in L1 and L2 stations

站位	流速-悬沙质量浓度相关系数		
	无滞后时间	流速滞后 1 h	流速滞后 2 h
L1	0.39	0.28	0.08
L2	0.51	0.31	-0.01

降低, 说明即使部分悬沙极值滞后于流速 1~2 h, 但是时间对应的流速浓度相关性最强。

3.2.2 大面悬沙质量浓度巡测观测结果

挑河河道内悬沙质量浓度沿程变化明显, 水体含沙量由河口向河道内逐渐减少, 但局部出现浑水区, 而河道上游的凹入水域悬沙质量最低(图 5), 表现为浑水由河口向河道上游输移的态势。

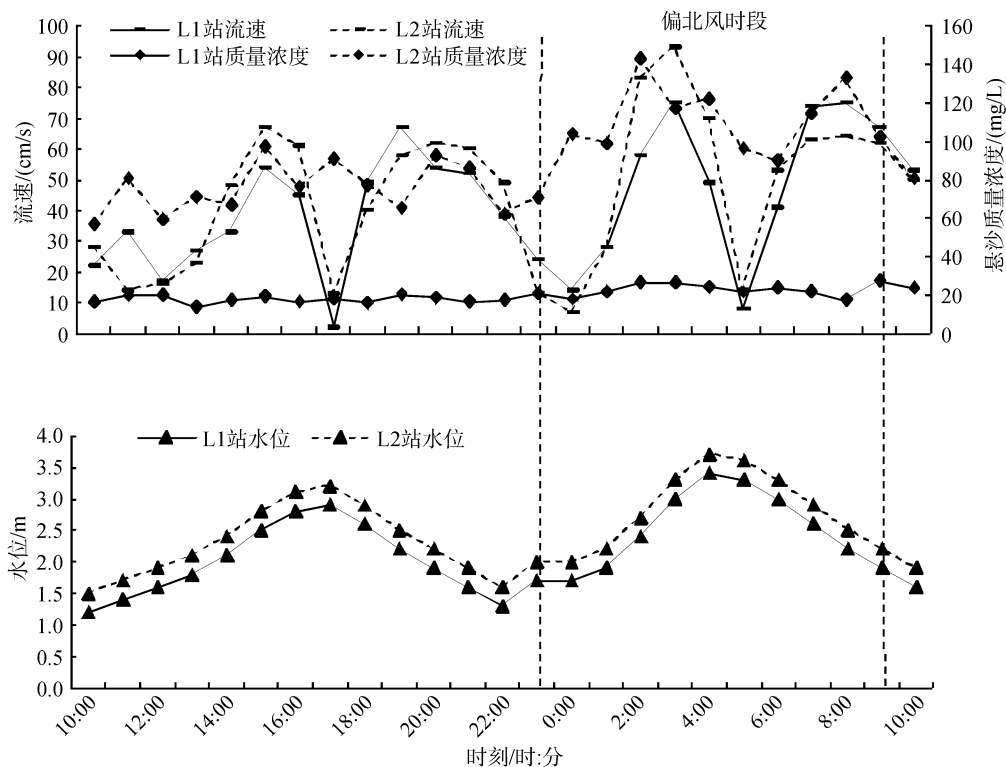


图4 2012-10-29~2012-10-30 L1、L2 站大潮期悬沙质量浓度与流速过程线

Fig. 4 Time-series of current speeds and suspended sediment concentration at L1 and L2 stations at 2012-10-29~2012-10-30

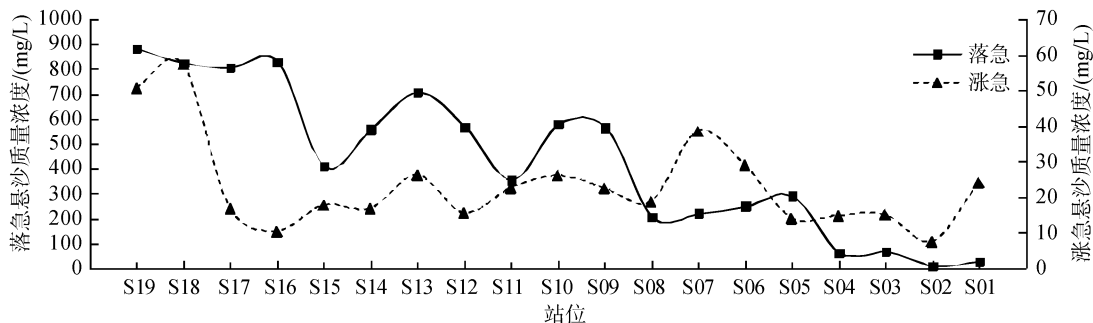


图5 悬沙质量浓度分布图

Fig. 5 The distribution map of suspended sediment concentration

涨急时刻, 悬沙量最大值为 57.2 mg/L, 出现在河口附近的 S18 站; 最小值为 7.5 mg/L, 出现在河道内凹入水域的 S02 站; S18 站的悬沙质量浓度为 S02 的 7.6 倍。悬沙质量浓度基本呈由河口向河道递减的趋势, 河口处悬沙质量浓度大于 50 mg/L, 而河道内悬沙质量浓度在 15~30 mg/L(图 5)。

落急时刻, 河口处 S19 站出现悬沙质量浓度最大值为 878.3 mg/L, 河道内凹入水域的 S02 站悬沙质量浓度最低为 6.5 mg/L, S19 站悬沙浓度为 S02 站的 135.1 倍。根据悬沙质量浓度分布图(图 5)可知, 河口处悬沙浓度大于 800 mg/L, 而河道内悬沙质量浓度在

200~600 mg/L 之间。落急时刻现场偏北风 6~7 级, 河道内流入高含沙量滩面归槽水并且存在渔船作业, 因此河道内含沙量较涨急时刻明显增大, 且河道中央较河道两侧浑浊, 大面巡测于河道中央取样, 而定点观测站设于河道一侧, 导致定点观测悬沙质量较巡测小。

由涨、落急大面巡测结果可知, 越靠近河口, 落急悬沙质量浓度与涨急悬沙质量浓度的差别越大: 靠近河口处的 S16 站落急悬沙质量浓度变为原来的 80.3 倍, 而河道内的 S07 测站仅为涨急的 5.7 倍。位于凹入水域的 S1、S2 两个测站, 落急含沙量较涨急含沙量略有减少。

从悬沙质量浓度分布图(图 5)可以看出,河道内尽管悬沙浓度较小,但是存在局部浑水区域。涨急时刻浑水区域出现在挑河东支流,是由河道突然变窄流速增大造成的。落急时刻存在两个浑水区,分别位于挑河东支流、挑河主流交汇处和河口以南的河道中。其中第一个浑水区是两股落潮水流相互作用带动河床泥沙造成的,第二个是潮滩上的浑水回流导致的。

3.3 单宽输沙率的计算

挑河河道内悬沙单宽输沙率为 113.9~1 015.6 kg/(m·d),净输沙率由河口向河道内有所降低。位于挑河口门附近 L2 站单宽输沙率为 1 015.6 kg/(m·d),方向为涨潮方向,而河道内的 L1 测点单宽输沙率为 113.9 kg/(m·d),方向为落潮方向(表 3)。上述结果表明,挑河口门附近,涨潮流输沙明显占优势,向河道内侧,悬沙输沙率有所降低,且逐渐转变为落潮流输沙占优势。

表 3 大潮期各站单宽输沙率统计

测站	单宽输沙率(kg/(m·d))			单宽输沙率方向(°)		
	涨潮	落潮	全潮	涨潮	落潮	全潮
L1	857.7	970.2	113.9	146	327	334
L2	5751.9	4737.2	1015.6	157	337	159

4 讨论

4.1 挑河河口段悬沙运动的动力机制

挑河为季节性排水河道,河道多硬化,并且径流远远小于河道的纳潮量,径流的作用可以考虑不计,根据分析和计算结果,挑河河道内的悬沙输移主要受潮流和波浪的影响,悬沙运动与潮流、波浪作用均呈正相关关系。

4.1.1 潮流作用

悬沙运动与潮流作用的相关性主要体现在如下方面:(1)悬沙浓度及输沙率空间分布上呈河口高,河道上游低的特点,这与潮流流速的分布特征是一致的,位于河口的 L2 站流速明显高于河道内的 L1 站,如 L2 站最大流速为 93 cm/s, L1 站最大流速为 75 cm/s;(2)悬沙质量浓度时间变化与流速有较强的正相关关系,悬沙极大值都出现在最大速度附近;(3)悬沙输移趋势受涨落潮优势流控制,在河口海域涨潮流优势明显,悬沙净输移方向指向涨潮流向,在河道内,落潮流较大,悬沙净输移方向也转为落潮流向。所以

正常天气情况下,潮流是该海域的主要水动力因子,潮流速度决定了悬沙质量浓度。当潮流流速增大时,水体与河底的剪切力及携带泥沙的能力增加,带动泥沙运动;流速降低时,水体载荷能力降低,泥沙部分沉降,悬沙质量浓度降低^[12]。

4.1.2 波浪作用

风浪是挑河河口处悬沙质量浓度高、悬沙输移率骤然增大的主要原因。在粉砂淤泥质海岸,波浪是掀沙的主要动力。研究区北向风区较长,产生了较强的风浪,风浪传播到水深较浅的河口时发生破碎,能量在海底迅速释放,造成河口处悬沙浓度大幅度提高。本次观测结果中有风天位于河口的 S16 的悬沙量高达正常天气情况的 80.3 倍。边淑华^[13]、赵群^[14]等在粉砂淤泥质海岸的现场观测,也证明大风会显著增加悬沙质量浓度。波浪在河口破碎后能量变小,在河道内传播时逐渐减弱,挟沙能力降低,悬沙逐渐沉降,因而浓度减小。研究区观测期间,河道沿程涨、落急大面测站悬沙浓度空间分布存在着明显的河口高、河道上游低的特点,大潮周日定点观测结果也呈现河口的 L2 站较河道内的 L1 站悬沙浓度高的特点。上述规律,在风浪天气情况下最为明显,落急取样时,因现场出现 6~7 级偏北风,河口处悬沙浓度急剧升高,并向河道上游方向逐渐降低,导致河口处的 S19 站悬沙浓度为河道内 S02 站的 135.1 倍。

此外,在研究海域还存在着北向风作用下的增水现象,并且在波浪作用下潮流流速也有所增加,上述现象在 L1, L2 站的观测结果中均有所体现,具体表现为北向风出现后水位及潮流流速较之前时段均有明显增高(图 4)。无疑,河道增水、流速加大也是除掀沙效应外波浪作用导致悬沙质量浓度增高,进而悬沙输移率增大的另一个因素。

4.2 悬沙运动及河道冲淤演变趋势分析

结合挑河河口外侧海域冲淤演变趋势以及挑河河口段悬沙质量浓度及运动特征综合分析,认为挑河河口段的河道目前处于弱淤积态势。

挑河的发育与黄河的迁徙息息相关。1917 年黄河经挑河入海,造成河口向海方向延伸,1926 年黄河改道刁口河入海^[9],至 1976 年以前黄河主要在神仙沟以西岸段入海,黄河走刁口和神仙沟流路,受黄河入海泥沙西向扩散的影响,挑河河口岸外也有所淤积,该海域出现了宽广的潮坪(图 6,根据文献[18-20])

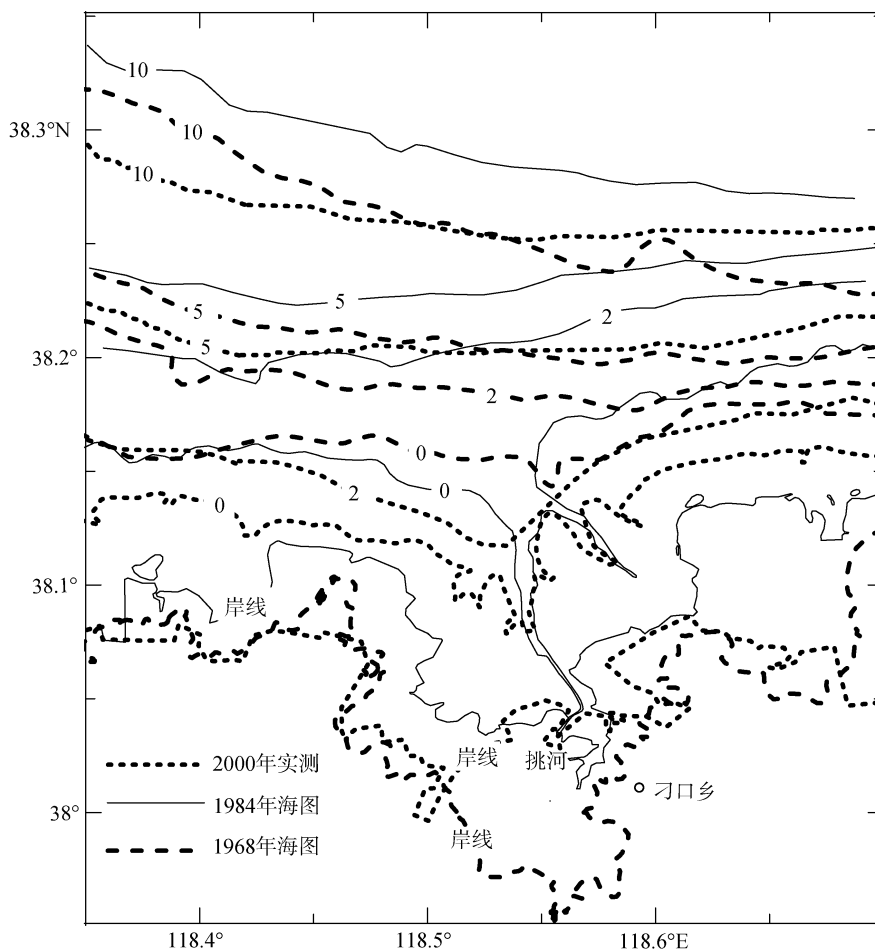


图 6 岸线水深(m)变化图

Fig. 6 the changes of coastline and bathymetric (m)

中 1968 年海图)。随着潮滩加宽, 原有潮沟系统便难以完成疏干潮滩滞留水的功能要求, 潮水沟体系进一步发育, 废弃的挑河河道逐渐发育为潮水沟体系主干(图 6 中 1984 年海图)。1976 年以后, 黄河改走清水沟流路, 挑河河口外侧处于强烈侵蚀状态(图 6 中 2000 年实测), 但随着时间的推移侵蚀强度减小, 并逐渐趋于稳定^[15-17]。

在挑河河口段, 特别是靠近口门部分, 涨潮流输沙优势明显, 且悬沙质量浓度呈现由河口向河道内逐渐减小的趋势, 该趋势表明, 从河口至河道内悬沙逐渐落淤, 占优势的涨潮流将河口外的悬浮泥沙净向河道内搬运, 因此造成挑河河道内淤积。挑河河口外侧 NW 向风区较长, 在大风作用下, 风浪作用明显。风浪会引起悬沙量的急剧增加, 因此大风天气时河口附近和外侧河道河底的粉砂都会大量起动, 在优势涨潮流的作用下造成河道内靠近河口部分河段的淤积。而在内侧河道, 涨潮流态势减弱, 潮水沟内归槽水流的优

势体现出来, 河道内落潮流占优势, 又会将河道内的泥沙向外搬运。总体而言, 在风浪、涨潮流以及归槽的落潮流流等的综合作用下, 挑河河道目前处于弱淤积状态, 其淤积的泥沙来源于挑河口外的岸滩侵蚀泥沙, 但从现状来看, 无论是挑河口外岸滩的侵蚀还是挑河河道的淤积, 其侵淤变化幅度都比较小。

5 结论

- 1) 挑河河口段在空间尺度上悬沙浓度呈河口高, 河道上游低的特点; 悬沙分布与潮流流速有较强的正相关关系, 风浪作用则导致悬沙质量浓度大大提高。
- 2) 挑河河道内的悬沙输移主要受潮流和波浪的影响。挑河河口附近, 涨潮流输沙明显占优势, 向河道内侧, 悬沙输移率有所降低, 且逐渐转变为落潮输沙占优势。
- 3) 挑河河道目前处于弱淤积状态, 其淤积的泥沙来源于挑河口外的岸滩侵蚀泥沙。

致谢：本文实测数据来自利津县刁口一级渔港工程水文气象及泥沙冲淤调查研究课题组，谨致谢忱。

参考文献：

- [1] 章宏伟. 椒江河口悬沙运动的二维数值模拟[D].杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 何超, 丁平兴, 孔亚珍. 长江口及其邻近海域洪季悬沙分布特征分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008, 2: 15-21.
- [3] 庞重光, 杨作升, 张军. 黄河口汛期泥沙分布特征及其对水流结构的影响[J]. 泥沙研究, 2001, 4: 47-52.
- [4] 赵焕庭. 珠江河口的水文和泥沙特征[J]. 热带地理, 1989, 9(3): 201-212.
- [5] 李东义, 陈坚, 王爱军, 等. 闽江河口洪季悬浮泥沙特征及输运过程[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 70-80.
- [6] 袁杜帆. 椒江河口流速和悬沙浓度沿垂线分布的研究[D].杭州: 浙江大学, 2004.
- [7] 张忍顺, 王雪瑜. 江苏省淤泥质海岸潮沟系统[J]. 地理学报, 1991, 46(2): 195-206.
- [8] 张忍顺. 渤海湾淤泥质海岸潮汐汉道的发育过程[J]. 地理学报, 1995, 50(6): 506-513.
- [9] 利津县地方志编纂委员会. 利津县志[M]. 北京: 东方出版社, 1990: 265-266.
- [10] 利津县刁口一级渔港工程水文气象及泥沙冲淤调查研究分析报告[R]. 青岛: 青岛海洋工程勘察设计研究院, 2013.
- [11] 水利电力部水利司. 水文测验手册. 第一册 野外工作[M].北京: 水利电力出版社, 1975.
- [12] 陈斌, 周良勇, 刘健, 等. 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 73-81.
- [13] 边淑华, 胡泽建, 迟万清, 等. 粉砂质海岸大风天泥沙运动研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(12): 4-8.
- [14] 赵群. 基于 SWAN 和 ECOMSED 模式的大风作用下黄骅港波浪、潮流、泥沙的三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 2007, 4: 17-26.
- [15] 周长江, 申宪忠. 黄河海港海洋环境[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 114-119.
- [16] 黄世光. 套尔河湾海域泥沙冲淤特征——兼论黄河改道后三角洲的冲淤演化[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(2): 197-204.
- [17] 孙效功, 杨作升, 陈彰榕. 黄河三角洲埕北海区泥沙冲淤分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1993, S1: 37-44.

Distribution and transport characteristics of suspended sediment in the estuary of the Tiaohe River in the Yellow River Estuary

QUAN Yong-zheng¹, BIAN Shu-hua², LIU Jian-qiang², FENG Xiu-li¹, WANG Jing-chuan²

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Oct., 24, 2013

Key words: the Tiaohe River; suspended sediment distribution; sediment transport rate; wind wave

Abstract: The distribution and transport characteristics of suspended sediment in the abandoned Tiaohe River Estuary of the Yellow River were analyzed. The results show that the suspended sediment concentration (SSC) in estuary is higher than that in river upstream on the spatial scale, and there is a strong positive correlation between the SSC and tidal current velocity, and wind wave can greatly improve SSC; flood current transport sediment dominates near the mouth of the Tiaohe River, ; the suspended sediment transport rate becomes smaller inside, and the ebb tide transport sediment dominates gradually. Combined with the silting evolution trend and suspended sediment transport mechanism, we can conclude that the Tiaohe River is weak deposited and wind wave can accelerate the deposit.

(本文编辑: 刘珊珊)