

黄河三角洲孤东近岸悬沙质量 浓度变化和底沙再悬浮*

陈一强¹, 陈沈良¹, 马宗文², 彭俊¹, 刘锋¹

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要:根据黄河三角洲孤东潮位站 1 a 的表层逐日悬沙质量浓度、逐时潮位和风速风向以及多年黄河入海水沙资料, 采用线性回归和相关分析等统计方法, 分析了孤东近岸悬沙质量浓度的变化规律及其动力机制。结果表明, 黄河三角洲孤东近岸悬沙质量浓度具有明显的冬高夏低季节性变化, 大小潮周期内悬沙质量浓度呈锯齿状波动, 区别于常见的大潮高小潮低的变化规律。进一步分析认为, 孤东近岸悬沙质量浓度季节变化是由向岸风浪引起的泥沙再悬浮过程控制, 而非黄河入海水沙造成。潮差小, 潮流弱, 潮汐动力不足以掀动底沙, 是造成悬沙质量浓度大小潮周期内变化规律特别的原因所在。

关键词:悬沙质量浓度; 底沙再悬浮; 时间变化; 黄河三角洲

中图分类号: P743.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2011)02-0157-06

悬沙输移是粉沙淤泥质河口、海岸地区重要的泥沙运移形式, 也是各种营养盐和污染物的重要载体^[1]。因此, 悬沙质量浓度(SSC)变化及其成因机制不仅是沉积学、地貌学以及生物学、生态学和生物地球化学等学科的重要研究内容^[2], 而且对岸滩演变、近岸港口航道工程和河口环境修复等意义重大。悬移质泥沙同时受到波浪、潮汐、径流等动力因子, 以及海底地形、泥沙来源等多重因素的共同影响, 因此, 悬沙质量浓度变化规律往往非常复杂。在不同的水动力环境中, 悬沙质量浓度变化特征往往十分不同^[3-6]。因此, 悬沙质量浓度变化规律必须根据具体研究区域的特点来分析。以往对黄河三角洲孤东近岸水域的悬沙质量浓度变化研究主要根据不同季节或者特定气象条件下的短期实测资料来分析^[7-8], 缺少对长时间尺度的悬沙变化规律的认识, 而这对深入认识孤东近岸滩演变过程和三角洲海岸的防护都具有重要的科学意义。为此, 本文收集了近期孤东近岸悬沙质量浓度的长期观测资料, 试图分析该水域悬沙质量浓度的时间变化规律, 并深入探讨其动力成因机制。

1 资料来源及处理

孤东海域位于现行黄河入海口北侧孤东油田近岸水域。观测站位于孤东潮位站栈桥前沿一固定点(图 1), 距岸约 50 m, 平均水深约 3 m, 所在区域属于黄河三角洲强侵蚀岸段。每日白天高潮位时在观测点取表层水样, 连续收集 1 a(2008-10-04—2009-10-05), 共获取样品 363 个。将现场采集的水样用 0.45 μm 孔径的滤纸在室内进行过滤、烘干、称重后, 计算悬沙质量浓度。然后对个别缺测点进行线性插值后, 获得悬沙质量浓度长序列资料。为探讨悬沙质量浓度的成因机制, 同时收集了黄河入海水沙控制站——利津站的同步水沙资料, 资料来源于 2008、2009 年黄河泥沙公报。特别地, 将 2 a 的 10 月份表层悬沙数据并为一个月处理, 因此 10 月份黄河入海水沙是根据当月悬沙采集天数按比例折算后累加得到的。另外, 收集了水样采集期间

* 收稿日期: 2010-04-14

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目——我国大河三角洲脆弱性调查及灾害评估技术研究(200805063); 河口海岸学国家重点实验室科研业务课题——我国大河三角洲海岸侵蚀灾害评价与对策(2008KYYW06)

作者简介: 陈一强(1987-), 男, 浙江青田人, 博士研究生, 主要从事河口海岸方面研究。E-mail: chen-yiqiang0821@163.com

(张 骞 编辑)

的逐时实测潮位和风速风向,资料由孤东潮位站提供。鉴于区内波浪以风浪为主,且缺少实测波浪资料,故本文采用风的资料来代替波浪资料。本研究的向(离)岸风指数指向(离)岸风频率与其平均风速的乘积^[9]。根据潮汐资料计算逐日潮差,从小潮开始,经过大潮,再经过小潮,以 14 d 为周期,分别分配潮差和日悬沙质量浓度到 14 列,然后对每列求平均值,探讨大小潮周期变化。

2 悬沙质量浓度的变化特征

黄河三角洲孤东近岸悬沙质量浓度存在明显的季节性变化特征(图 2)。全年平均悬沙质量浓度为 $0.1614 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,月平均悬沙质量浓度最大值出现在 11 月,为 $0.3311 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,最小值出现在 6 月,为 $0.0609 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,月平均最大值约为月平均最小值的 5 倍多。月平均悬沙质量浓度表现出显著的冬高夏低特征。夏半年(4—9 月)平均悬沙质量浓度仅为 $0.0880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,而冬半年(10 月至翌年 3 月)平均悬沙质量浓度可达 $0.2364 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。平均而言,冬半年悬沙质量浓度约为夏半年的 2.7 倍。

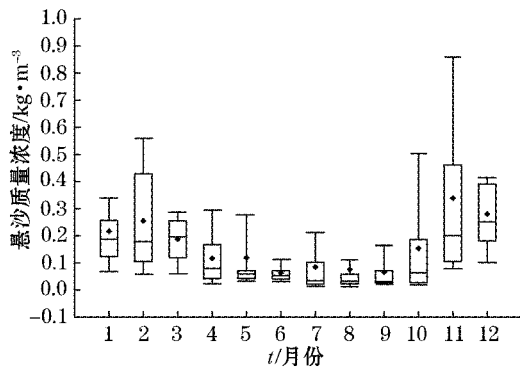


图 2 孤东近岸悬沙质量浓度季节变化
Fig. 2 Seasonal variations of SSC in the Gudong nearshore area

潮汐存在大小潮的周期变化。大潮时,潮流流速较大,易使底沙再悬浮进入水体;而小潮时,水流流速则较小,不易启动底沙,更有利于悬浮泥沙的落淤。因此,悬沙质量浓度往往随潮汐作用呈现大潮高小潮低的大小潮周期变化。但是,孤东潮位站日悬沙质量浓度的大小潮周期内变化规律比较特别(图 3),具体表现为大潮悬沙质量浓度不高,小潮悬沙质量浓度甚至超过大潮悬沙质量浓度,且在整个大小潮周期内悬沙质量浓度呈现锯齿形上下波动。

3 悬沙质量浓度变化的动力机制

3.1 黄河入海泥沙扩散的影响

河流入海泥沙是海洋(尤其是近岸海域)泥沙的主要来源,因此研究近岸悬沙质量浓度变化必须关注入海泥沙的影响。黄河是世界上著名的多沙河流,年入海泥沙达 1.08 Gt ^[10]。从图 4 可以看出,黄河入海水沙

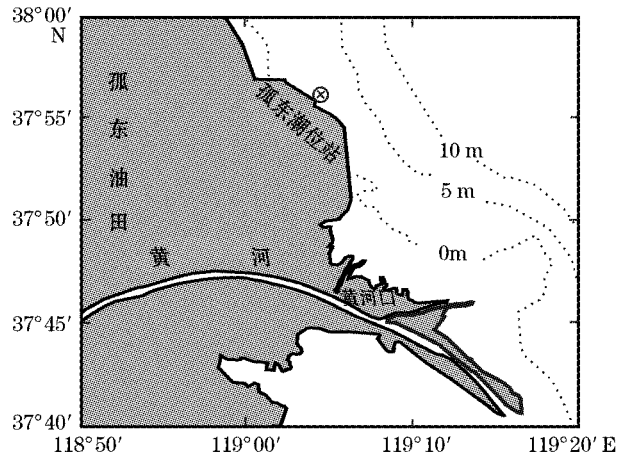


图 1 研究区域及观测站位

Fig. 1 Location of study area and observation stations

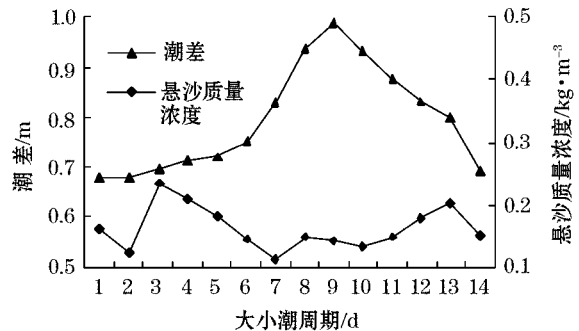


图 3 大小潮悬沙质量浓度和潮差变化
Fig. 3 Changes in the SSC during a spring-neap cycle and in the tidal range

具有明显夏高冬低的季节变化特征,这与孤东近岸悬沙质量浓度冬高夏低的季节变化规律相反。相关分析表明,孤东月均悬沙质量浓度与黄河月均入海水沙量均成一定负相关。这种负相关并不能理解为悬沙质量浓度随入海水沙的增加而降低,但是这至少说明了黄河入海径流不可能是造成孤东近岸悬沙质量浓度季节变化的主要控制因子。事实上,河流入海泥沙对近岸海域悬沙质量浓度的影响,与入海泥沙的扩散范围有密切关系。黄河携带泥沙进入滨海区后,水流平面扩散迅速导致流速减小,同时受到往复潮流的阻挡,大量泥沙沉积在口门附近。入海悬沙虽能向北扩散到孤东海域,但从其扩散路径看,多输移至孤东外侧深水区^[11-12],对近岸浅水区影响很小。

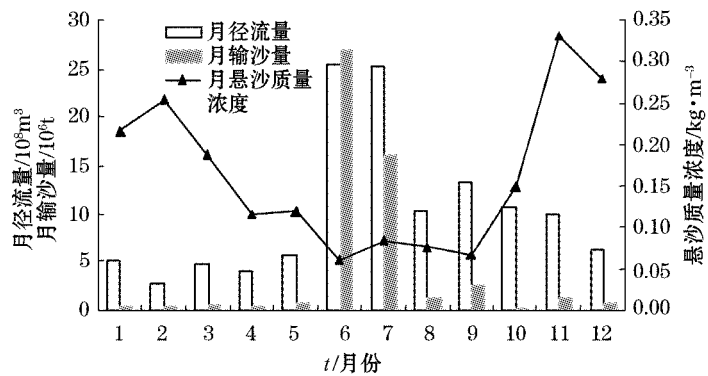


图4 孤东月均悬沙质量浓度与同期利津站入海水沙量
Fig. 4 Average monthly SSC in Gudong and the water and sediment discharge entered into the sea from the Huanghe River at the Lijin Station in the same period

3.2 海洋动力对悬沙质量浓度的影响

底部泥沙的再悬浮是影响悬沙质量浓度变化的另一个重要因子,主要是海洋动力作用的结果,包括潮汐和波浪等。孤东海域位于黄河三角洲神仙沟外无潮点附近,据孤东验潮站 2005 年潮位资料的调和分析,该海域为不规则全日潮,大潮潮差多为 0.8~1.3 m^[13],潮位变化很小,属于弱潮海区。实测潮流流速较低,底部泥沙起动力明显远大于实测最大流速,也就是说潮流不足以掀起底沙^[7]。这也正是造成孤东潮位站日悬沙质量浓度半月周期变化不遵循大潮高小潮低规律的原因所在。

据 2008—2009 年孤东实测逐时风速风向资料统计,该区强风向为 NE,最大风速为 20.9 m·s⁻¹;次强风向为 NW,最大风速为 18.7 m·s⁻¹。常风向为 SW,频率为 36.2%;次常风向为 NE 和 SE 向,频率为 23.9%及 23.0%。根据测站位置,向岸风(包括 N,NW,NE,E)主要为北向风,离岸风(包括 S,SW,W,SE,由于南侧黄河口沙嘴的阻挡,SE 向风风区较短,可视作离岸风)主要为南向风。对各月向(离)岸风指数、向(离)岸风平均风速和频率的统计表明研究区风况具有明显的季节变化特征(表 1)。全年以离岸风为主,频率达 60.0%。月向岸风频率最高为 53.4%(2 月),最低为 29.2%(6 月)。夏半年(4—9 月)向岸风频率为 33.5%,冬半年(10 月至翌年 3 月)达 46.6%。但是,向岸风平均风速明显大于离岸风平均风速,年平均向岸风速为离岸风速的 1.3 倍。向岸风平均风速最大月为 12 和 3 月,最小月为 8 月。夏半年月平均向岸风风速为 5.5 m·s⁻¹,冬半年达 6.4 m·s⁻¹,为夏半年的 1.2 倍。全年中仅 6 月份的离岸风平均风速大于向岸风平均风速,其余均为向岸风平均风速较大。向(离)岸风指数的季节变化更为明显。夏半年各月离岸风指数均大于向岸风指数。冬半年则完全相反,各月向岸风指数均大于离岸风指数。

表 1 孤东逐月风速风向资料统计

Table 1 A temporal trend of linear correlation coefficients between SSC and wind

项 目	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
离岸风平均风速/m·s ⁻¹	4.4	4.1	5.5	5.5	5.3	5.9	5.0	3.6	4.0	3.9	4.2	4.4
向岸风平均风速/m·s ⁻¹	5.6	5.8	7.3	6.9	5.8	5.6	5.2	4.5	5.3	5.9	6.5	7.3
向岸风频率/%	50	54	42	34	33	29	31	41	34	45	49	42
离岸风频率/%	50	46	58	66	67	71	69	59	66	55	51	58
向岸风指数/m·s ⁻¹	279	316	309	237	190	164	158	183	180	263	317	306
离岸风指数/m·s ⁻¹	220	188	318	363	359	418	345	215	265	217	213	255

风浪的大小受风速、风时、风区等风况条件控制，而风浪大小也是风浪再悬浮能力的表征。因此，风的各方面特征变化都有可能影响风浪的再悬浮能力，进而影响水体悬沙质量浓度的变化。

孤东站平均悬沙质量浓度与不同方向风的回归分析表明，平均悬沙质量浓度与离岸风指数相关性很小，而与向岸风指数相关性则很大。月平均悬沙质量浓度与向岸风指数成显著正相关，相关系数达 0.91，置信水平达 99%(图 5)。因此，可以认为就月平均而言，孤东近岸悬沙质量浓度主要受向岸风控制。这是因为不同风向的风掀起波浪能力的大小不同。研究区域为近岸水域，总体而言，向岸风分区较离岸风风区长。持续的向岸风作用下往往容易形成大风浪。而离岸风风区很短，这就限制了其掀起大浪的能力，即使风速很大，也不容易形成大浪。

为探讨近岸悬沙质量浓度与向岸风速大小的关系，将向岸风按平均风速大小划分为风速 $u < 1, 1 \leq u \leq 2, \dots, 8 \leq u < 9, u > 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 共 10 组，然后统计各组的悬沙质量浓度。结果显示，近岸悬沙质量浓度随向岸风速的增加而增加(图 6)。当向岸风速 $u < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，平均悬沙质量浓度仅为 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，即底沙基本未再悬浮。当向岸风速继续增大时，平均悬沙质量浓度随风速增加而迅速增加。在风速为 $3 \leq u \leq 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，平均悬沙质量浓度在 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右，约为第一阶段的 2 倍，即底沙已少量再悬浮。风速 $u > 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，平均悬沙质量浓度可超过 $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，约为第一阶段的 4 倍，这表明底沙已大量再悬浮。

相关系数时间趋势图显示日悬沙质量浓度与风之间的关系是随时间变化的函数(图 7)。离岸风指数与日悬沙质量浓度的相关系数随时间呈现 U 型负相关，相关性在采样约 20 h 时达到最大，为 -0.33 (置信水平 99%)。向岸风指数及平均风速与日悬沙质量浓度的相关性特征相似，均表现为明显的正相关，曲线形状为倒 U 型。其中向岸风指数与日悬沙质量浓度的相关性较大。采样时的向岸风指数($t=0$)与悬沙质量浓度相关系数为 0.45。随着时间延长相关系数增加，采样前 20 h 向岸风指数与悬沙质量浓度相关系数最高，达 0.60(置信水平 99%)。然后，两者相关系数逐渐下降。相关系数随时间的变化，表明黄河三角洲孤东近岸悬沙质量浓度主要受前 20 h 向岸风影响，这在很大程度上也反映了孤东海域海底沉积物被风浪掀起后在水体中的滞留时间。

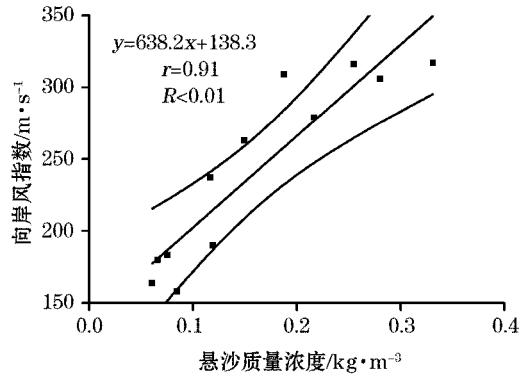


图 5 月均悬沙质量浓度与向岸风指数的关系
Fig. 5 Relationship between the average monthly SSC and the shoreward wind index

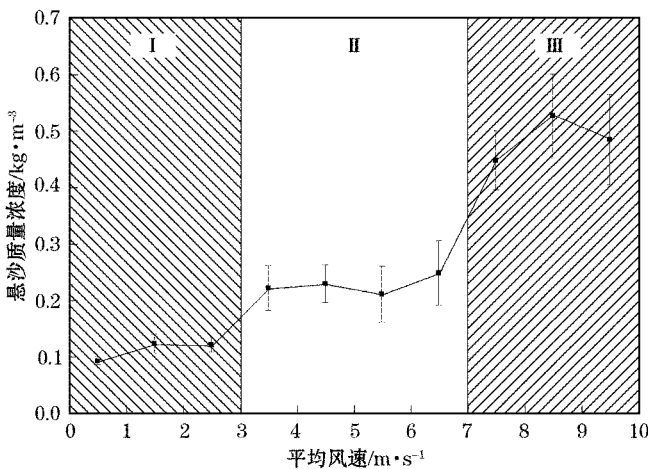


图 6 悬沙质量浓度与向岸风平均风速的关系
Fig. 6 Relationship between the SSC and the mean speed of the shoreward winds

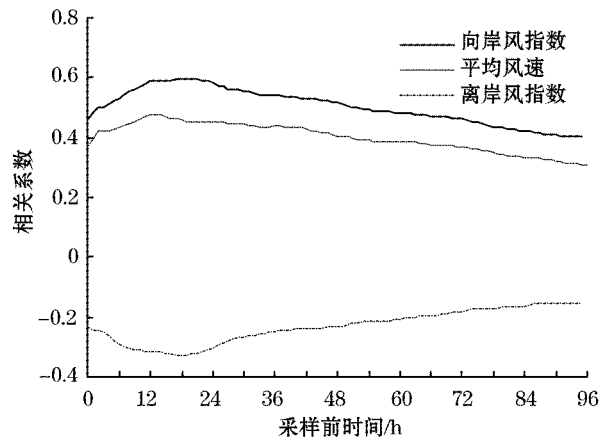


图 7 悬沙质量浓度与风的相关系数时间趋势图
Fig. 7 A temporal trend diagram of linear correlation coefficients between SSC and wind

4 结 论

黄河三角洲孤东近岸悬沙质量浓度存在明显的冬高夏低季节性变化,大小潮周期内悬沙质量浓度成锯齿状上下波动。悬沙质量浓度与黄河入海水沙量的季节性变化相关性较小,表明黄河入海径流不是孤东近岸悬沙质量浓度季节变化的主要原因,这与黄河入海水沙的扩散路径有关。向岸风浪引起的底沙再悬浮控制了孤东悬沙质量浓度的季节变化。月均悬沙质量浓度与向岸风指数成显著正相关。日悬沙质量浓度主要受前 20 h 向岸风影响,并随向岸风速的增加而增加。孤东海域潮差小,潮流弱,潮汐动力不足以掀动底沙。因此,造成了悬沙质量浓度大小潮周期内上下锯齿形的波动特征,并不遵循大潮高小潮低的变化规律。

参考文献(References):

- [1] WEBSTER T, LEMCKERT C. Sediment resuspension within a microtidal estuary/embayment and the implication to channel management[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, SI36: 753-756.
- [2] LINDSAY P, BALLS P W, WEST J R. Influence of tidal range and river discharge on suspended particulate matter fluxes in the Forth Estuary (Scotland)[J]. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 1996, 42:63-82.
- [3] CHEN S L, ZHANG G, YANG S L, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangze River Estuary and its adjacent waters[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2):260-266. 陈沈良,张国安,杨世伦,等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. *地理学报*, 2004, 59(2): 260-266.
- [4] YANG S L, ZHANG J, ZHU J. Response of suspended sediment concentration to tidal dynamics at a site inside the mouth of an inlet: Jiaozhou bay(China)[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2004, 8(2): 170-182.
- [5] BOOTH J G, MILLER R L, MKKEE B A, et al. Wind-induced bottom sediment resuspension in a microtidal coastal environment[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 785-806.
- [6] DEMERS S, THERRIault J C. Resuspension in the shallow sublittoral zone of a macrotidal estuarine environment: wind influence[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1987, 32(2): 327-329.
- [7] LI X Y, CHEN S L, HU J, et al. Sediment characteristics and hydrodynamics of nearshore gudong in the Yellow River Delta[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(1):43-49. 李向阳,陈沈良,胡静,等. 黄河三角洲孤东海域沉积物及水动力[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 43-49.
- [8] SUN L C. Distribution of suspended sediment in nearshore of southwest Bohai Bay[J]. *Journal of Sediment Research*, 1991, 1:52-56. 孙连成. 渤海湾西南部近海水域风天含沙量分布特征[J]. *泥沙研究*, 1991, 1: 52-56.
- [9] YANG S L, ZHAO Q Y, DING P X, et al. Annual changes in coastal dynamic and ssc processed as well as their statistic relationships to intertidal bed level: Shanghai coast[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(2): 37-41. 杨世伦,赵庆英,丁平兴,等. 上海岸滩动力泥沙条件的年周期变化及其与滩均高程的统计显示[J]. *海洋科学*, 2002, 26 (2) : 37-41.
- [10] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91: 1-21.
- [11] HU C H, JI Z W, WANG T. Characteristics of ocean dynamics and sediment diffusion in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 1996, 6:1-10. 胡春宏,吉祖稳,王涛. 黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散[J]. *泥沙研究*, 1996, 6:1-10.
- [12] WANG H L, LI G S. Numerical simulation on seasonal transportation of suspended sediment from Huanghe (Yellow) River to Bohai Sea[J]. *Oceanologic et Limnologia Sinica*. 2009, 40(2):129-137. 王海龙,李国胜. 黄河入海泥沙在渤海中悬移输送季节变化的数值研究[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 129-137.
- [13] CHEN X Y, CHEN S L, LI J F, et al. Study on the coastal erosion mechanism in the Yellow River Delta Gudong and Xintan Areas[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 24(4):1-10. 陈小英,陈沈良,李九发,等. 黄河三角洲孤东及新滩海岸侵蚀机制研究[J]. *海岸工程*, 2005, 24(4):1-10.

Variations of Suspended Sediment Concentration and Resuspension of Bottom Sediments in the Gudong Nearshore Area of the Huanghe River Delta

CHEN Yi-qiang¹, CHEN Shen-liang¹, MA Zong-wen², PENG Jun¹, LIU Feng¹

(1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*

2. *School of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: Based on the surficial suspended sediment concentration measured daily for one year, the tidal level measured hourly and the speed and direction of winds measured at a fix station located at Gudong in the Huanghe River Delta and combining with the data of the water and sediments entered into the sea from the Huanghe River, the variations of the suspended sediment concentration (SSC) and their dynamic mechanisms were studied by using linear regression and correlation analysis. The results indicate that the SSC in the Gudong nearshore area of the Huanghe River Delta shows distinctly a seasonal variation, that is, higher in winter and lower in summer. Within a spring — neap tide circle, the concentration of the suspended sediments fluctuates jaggedly, which is different from those commonly observed during the spring — neap tide circle. Further analyses indicate that the seasonal variation of the SSC in the Gudong nearshore area is mainly controlled by the resuspension of bottom sediments caused by shoreward wind waves, rather by the water and sediments entered into the sea from the Huanghe River. The small tidal range, the weak tidal current and the low tidal dynamics are the main reasons for the jagged fluctuation of the SSC in the Gudong nearshore area.

Key words: suspended sediment concentration; resuspension of bottom sediments; seasonal variation; Huanghe River Delta

Received: April 14, 2010