

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.001

王金华, 闻云呈, 章卫胜. 不同水文条件下通州沙河段沿程分流分沙特征[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 1-7. (WANG Jinhua, WEN Yuncheng, ZHANG Weisheng. Water-sediment diversion ratio along Tongzhousha shoal reach under different hydrological conditions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 1-7. (in Chinese))

不同水文条件下通州沙河段沿程分流分沙特征

王金华, 闻云呈, 章卫胜

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 通州沙河段受径流与潮流双重作用, 江中沙洲、暗滩交替分布, 江心洲滩冲淤演变剧烈, 航道边界条件不稳定。通过三维水沙数学模型对天然河段洪、枯季水流条件的沿程分流、分沙比及滩槽过渡断面的水沙交换特征进行分析。结果表明, 通州沙东水道是主要的涨落潮通道, 落潮时上游分流比约 90%, 往下游分流比逐渐减小至 75% 左右; 涨潮时东水道下游分流比约 70%, 上游段受西水道漫滩流影响东水道分流比增至 85%~90%。洪、枯季落潮期间通州沙东水道的分沙比较对应的分流比有所增加, 洪季涨潮期间通州沙东水道的分沙比较对应的分流比有所减小, 枯季时变化相对不明显。通州沙下段左缘水流交换和悬沙交换的格局相同, 均以槽向滩为主, 狼山沙右缘水沙交换通量较小。

关 键 词: 通州沙; 潮流泥沙数学模型; 分流比; 分沙比

中图分类号: TV147; O352

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)03-0001-07

长江下游通州沙河段, 受径流与潮流双重作用, 江中沙洲、暗滩交替分布, 江心洲滩冲淤演变剧烈, 航道边界条件极不稳定^[1], 是长江南京以下 12.5 m 深水航道工程的主要碍航浅段之一。该河段分布有通州沙、狼山沙、新开沙、裤子港沙以及铁黄沙等沙体。通州沙沙体上有五干河对开斜向甬沟和左缘姚港对开甬沟发育, 通州沙及狼山沙沙体间有萎缩的狼山沙中水道, 水流结构复杂。

通州沙东水道、狼山沙东水道的航道主导右边界持续冲刷后退, 河道展宽, 深槽向宽浅方向发展而导致水流分散, 新开沙和裤子港沙下段不断淤积南下, 左岸近岸低边滩淤积南压挤压主航槽, 造成通州沙东水道与狼山沙水道之间存在浅段, 局部水深不足, 成为海轮进江航道的阻碍^[1]。

针对通州沙河段相继开展了包括现场观测^[2-3]、物理模型^[4-7]及数学模型^[8-10]等研究工作, 这些研究增进了对该河段河床冲淤变化的认识, 为河段整治规划提供了有力支撑。现有数学模型研究主要采用二维潮流泥沙数学模型。由于该河段水流结构较为复杂, 且考虑到通州沙河段的分流分沙特性与该河段的滩槽演变紧密相关, 对天然河段条件下沿程的分流分沙变化规律仍有待深入研究。综合上述因素, 本文基于三维水沙数学模型, 在模型验证基础上着重对通州沙河段不同水沙条件下的水沙交换特性进行模拟分析。

1 数学模型建立与验证

采用三维非结构有限体积波流泥沙耦合数学模型^[11-12]进行模拟。模型垂向采用 Sigma 坐标系, 使用改进后的 Mellor-Yamada 2.5 阶紊流闭合模型^[13]和 Smagorinsky 公式^[14]分别计算垂向与水平涡黏性系数, 利用模分离技术求解动量方程。

收稿日期: 2016-06-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401505); 国家自然科学基金资助项目(51309157); 交通运输部重大科技专项资助项目(201132874660)

作者简介: 王金华(1984—), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 博士, 主要从事潮流泥沙数值模拟研究。

E-mail: whj6610@163.com

模型范围为上游的江阴至下游的徐六泾,总长约 90 km。上下游开边界采用水位和流量进行控制,网格单元数 60 591 个,节点数 31 112 个,垂向分为 8 个 Sigma 层。模型选取 2010 年 7 月和 2012 年 12 月作为洪、枯季的代表水文条件。

数学模型验证主要针对水位、水流及含沙量,验证点位置见图 1,选择 2010 年 7 月洪季实测水文条件进行验证。图 2 给出了模拟水位与实测值对比结果,可以发现模型较好地再现了模拟河段的水位变化过程,潮汐振幅及高低潮发生时刻均与实测值吻合良好,潮位平均误差小于 0.10 m。洪季大潮水流流速流向验证结果见图 3,模拟的表、中、底层水流流速、流向及水流变化过程与实测结果吻合良好;水流流速表层较大,向底层流速渐小,几个测点处的表底层流向较为一致;模拟期间的上游来流量较大,导致模拟区域的上游流向基本为落潮流向,区域下游附近涨潮动力较强,在一个周期内出现一段涨潮流,涨潮历时小于落潮历时。图 4 给出了含沙量分层验证结果,几个测点的含沙量模拟结果与实测值吻合良好,再现了悬沙的垂向及沿程变化。验证结果表明建立的数学模型较好地模拟了长江三沙河段的水沙运动特性,为下文水沙交换的研究奠定了基础。

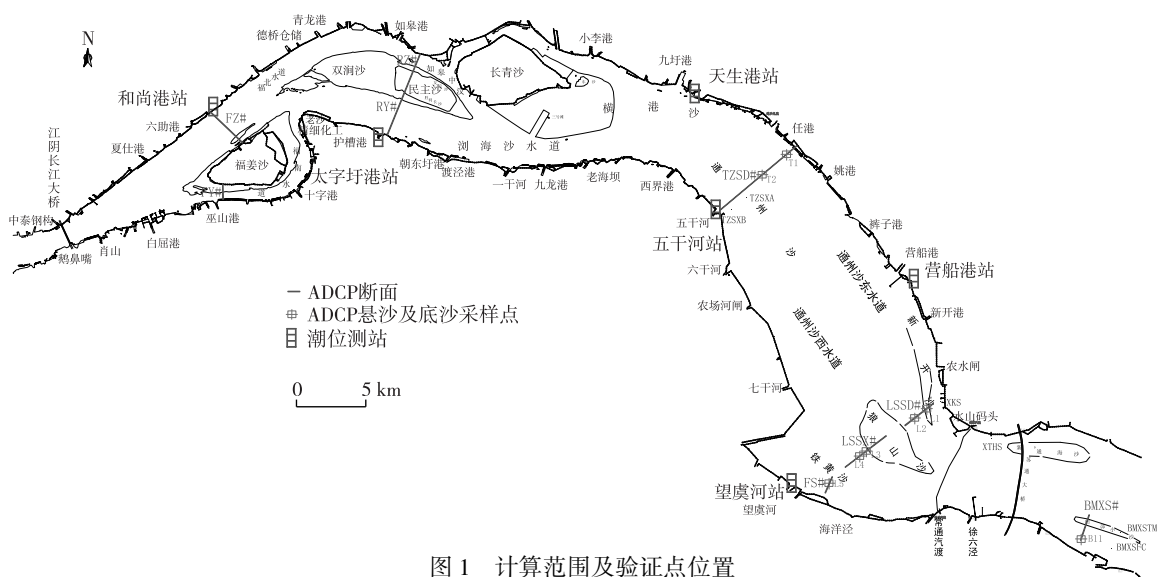


图 1 计算范围及验证点位置

Fig. 1 Calculation area and positions of verification points

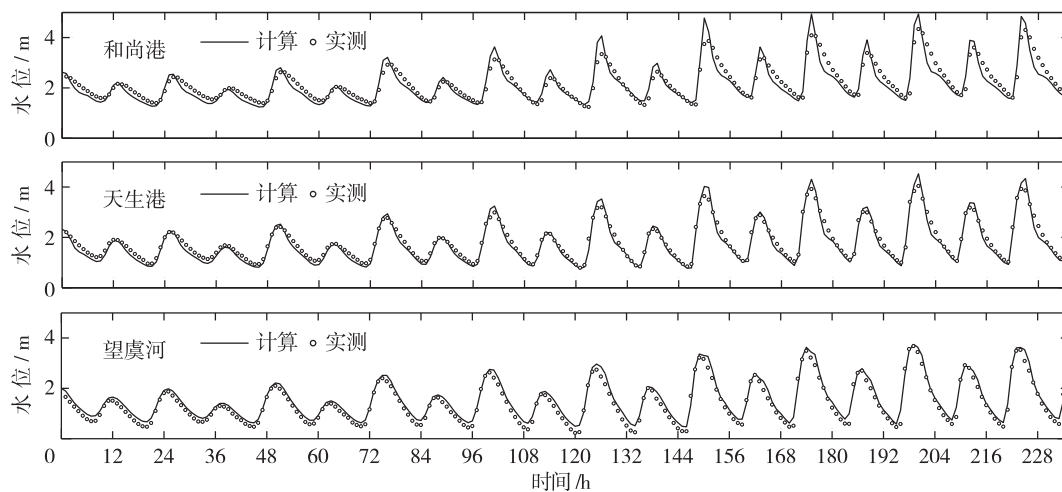


图 2 潮位验证

Fig. 2 Tidal level verification

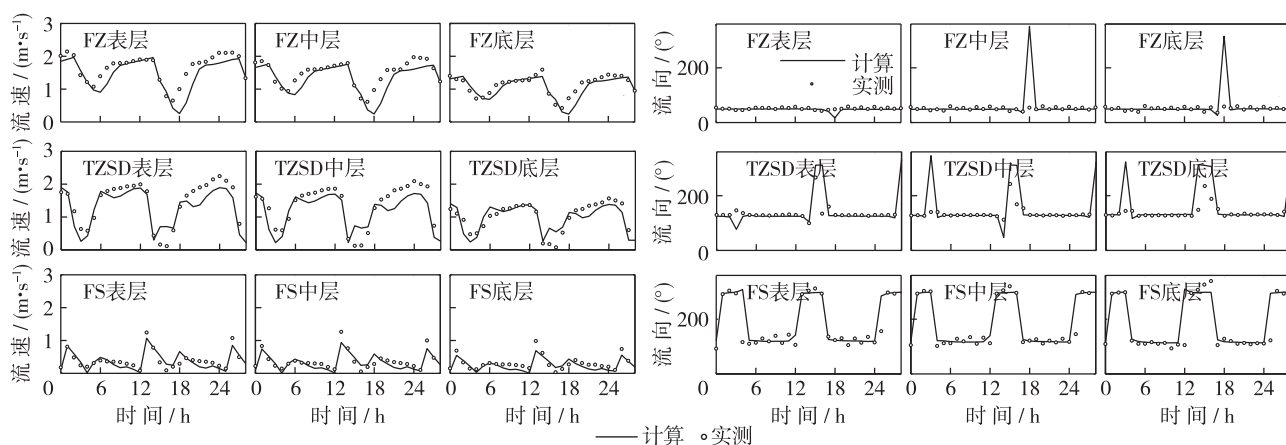


图3 分层流速流向验证

Fig. 3 Tidal velocity and direction verification

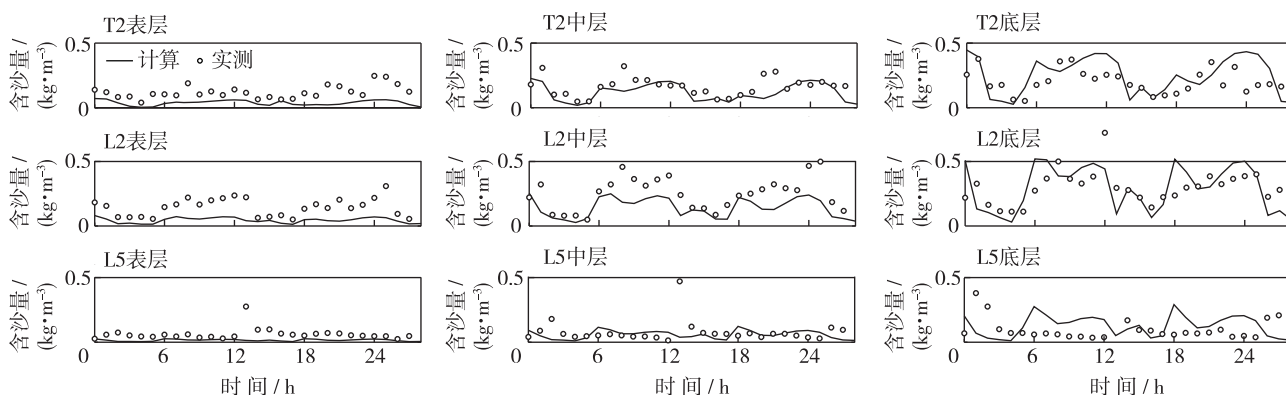


图4 分层含沙量验证

Fig. 4 Multi-level sediment concentration verification

2 通州沙河段分流分沙比

2.1 枯洪季通州沙河段沿程分流比

图5给出了通州沙河段的沿程分流比。从洪、枯季涨落潮期间的分流比来看,通州沙东水道、狼山东水道是通州沙河段的主要涨落潮通道,受滩槽水流交换的影响,沿程分流比发生变化。

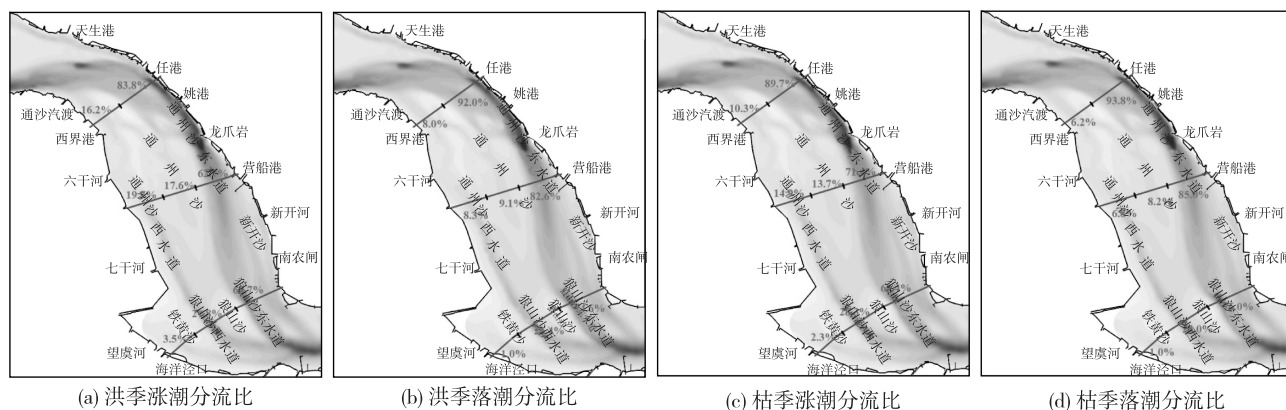


图5 洪枯季通州沙河段沿程分流比

Fig. 5 Diversion ratio of flow along Tongzhousha reach during flood and dry seasons

洪季大潮涨潮时,狼山沙东水道、西水道、福山水道的分流比分别为 68.7%、27.8%和 3.5%,随着涨潮流上溯,一部分狼山沙东水道的水体经狼山沙与通州沙之间的甬沟向通州沙中部及西水道运动,在营船港断面处通州沙东水道、沙体中部、西水道分流比分别为 62.7%、17.6%和 19.7%,在任港、西界港断面处东水道的分流比达到 83.8%。

洪季大潮落潮时,通州沙河段上游任港与西界港断面处,东水道分流超过 90%;下游通州沙东水道部分水流向通州沙中部及通州沙西水道分流,至营船港断面处,通州沙东水道、中间甬沟、西水道的分流比分别为 82.6%、9.1%和 8.3%;在狼山沙断面处,部分东水道内的水流传经狼山沙与通州沙之间的甬沟向狼山沙西水道分流,狼山沙东水道的分流比进一步减小至 74.6%,西水道的分流比增加至 24.4%,而铁黄沙西侧的福山水道分流比仅占 1.0%。

枯季大潮涨落潮期间的分流比见图 5(c)和(d)。可以发现枯季大潮在涨落潮期间各断面分流比与洪季大潮期间各断面分流比基本相同,洪、枯季虽然上游来流量不同,但受通州沙水下地形格局控制,涨落潮分流比仍以通州沙东水道为主。其中涨、落潮时通州沙东水道分流比较洪季有所增加,涨、落潮时营船港断面处东水道分流比增加了 8.7%和 2.4%,这是由于枯季时水位较洪季偏低,涨落潮流主要集中于主水道内,浅滩流相对较弱所导致。

2.2 枯洪季通州沙河段沿程悬沙分沙比

各汊道悬沙的分沙比与分流比沿程变化情况基本相似(图 6),洪季大潮涨潮时,悬沙随涨潮流从狼山沙东、西水道向上游输移,其中狼山沙东水道悬沙所占比例较大约 75%,在通州沙中部,部分东水道泥沙越过滩面向西水道及中间甬沟输运,而在通州沙沙头附近滩面上的泥沙又部分汇入东水道。落潮时,通州沙东水道水体中部分悬沙进入滩面,悬沙输移仍以通州沙东水道为主,分沙比超过 90%。枯季涨落潮期间的分沙比与洪季时相似。对比洪枯季的沿程分流、分沙比,洪、枯季落潮期间通州沙东水道的分沙比较对应的分流比有所增加,洪季涨潮期间通州沙东水道的分沙比较对应的分流比有所减小,枯季时变化相对不明显。分析其原因,主要是因为洪季落潮流较大、通州沙东水道悬沙量有所增加,而涨潮期间,受上游大径流顶托影响,东水道悬沙量有所减小有关。

2.3 滩槽交界处水沙交换

为进一步了解滩槽交界处的水沙交换过程,选取了图 6(d)中分别位于通州沙与狼山沙甬沟及狼山沙右缘滩槽交界处的 E、W 两点,给出了洪季、枯季两个点位处的水位、单宽流量、单宽泥沙通量过程(见图 7),其中单宽流量、泥沙量的正值代表滩向槽方向的输运,而负值代表槽向滩方向的输运。

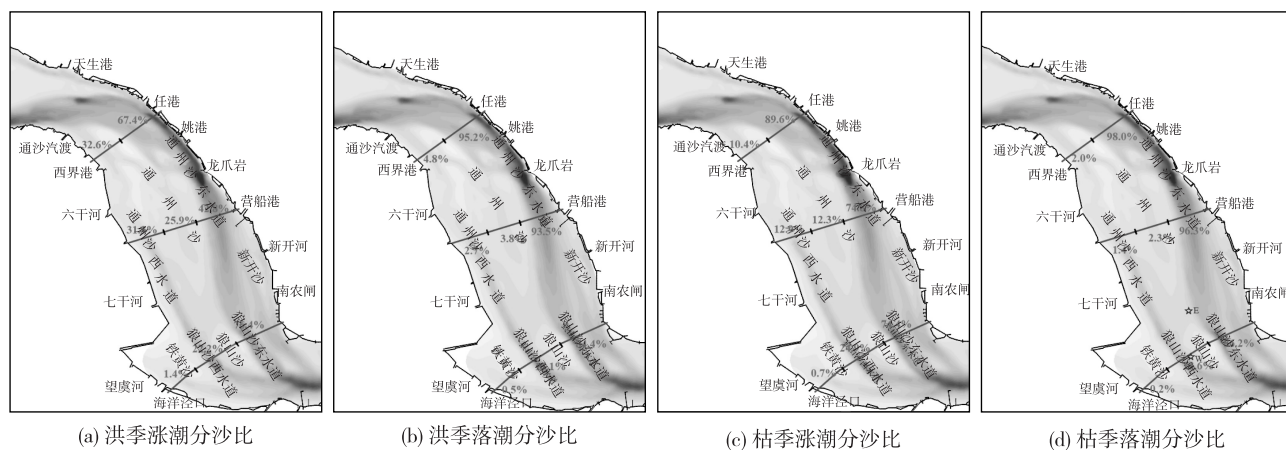


图 6 洪枯季通州沙河段沿程分沙比

Fig. 6 Diversion ratio of sediment along Tongzhousha reach during flood and dry seasons

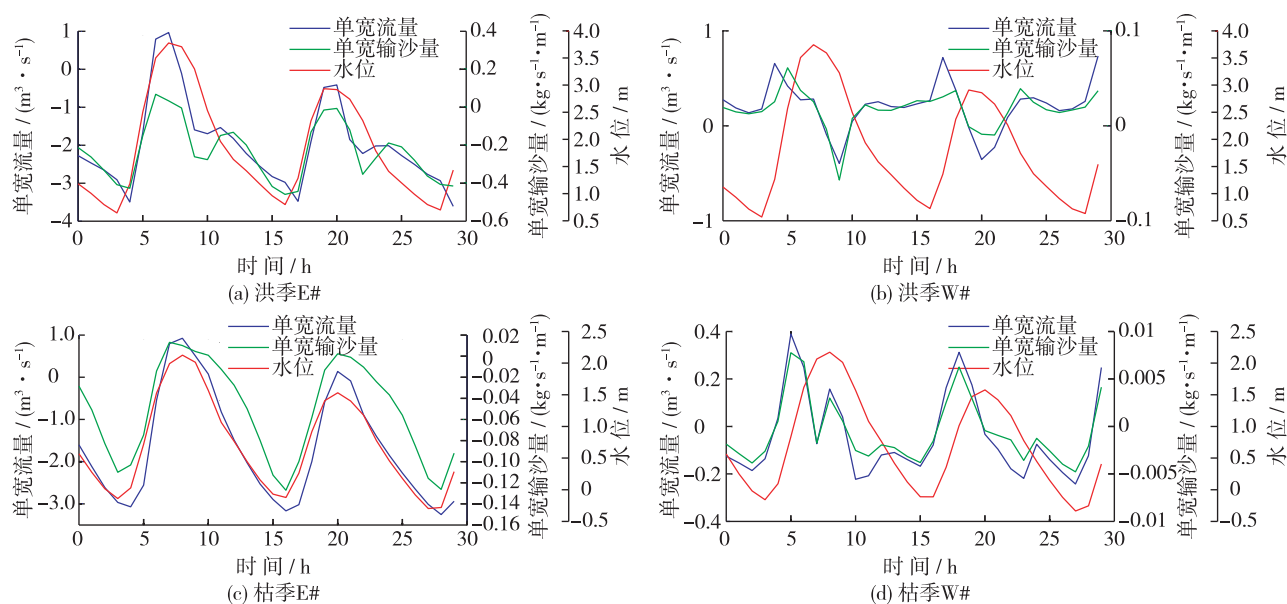


图7 洪枯季滩槽水沙交换过程

Fig. 7 Water-sediment exchange along shoal-ditch section during flood and dry seasons

洪季大潮时,通州沙滩槽交界上(E点)的单宽流量、输沙过程线与相位基本一致,与水位存在1~2 h的相位差,涨落潮时以向滩方向输沙占主导,其中向滩方向最大单宽输沙量约 $0.5 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 发生于低潮位后1~2 h,随水位升高向滩方向的输沙量渐减,滩槽水沙交换量与现场实测结果相近^[3]。狼山沙滩槽交界上(W点)滩向槽、槽向滩的单宽泥沙通量均相对较小,最大值仅为 $0.05 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$,滩向槽的最大单宽输沙量发生于高水位前2 h左右,槽向滩的发生于高水位后2~3 h。枯季大潮时,E点单宽流量、输沙过程变化特征与洪季类似,槽向滩的输沙占主导,其最大单宽输沙量约 $0.15 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 发生于低潮位后1 h左右,随水位升高输沙量渐减。W点滩向槽、槽向滩的单宽泥沙通量均相对较小,最大约 $0.01 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$,滩向槽最大单宽输沙量发生于高水位前3 h左右,槽向滩的发生于高水位后2~3 h。

图8给出了狼山沙断面在洪、枯季涨落潮期间的滩槽断面流速及含沙量分布,近底含沙量大小与河床底部水动力大小紧密相关。从流速分布来看槽内流速相对较大,对应的东西水道内近底层含沙量也相对较高,洪季流速大于枯季,其近底含沙量也大于枯季,模拟结果与现场观测结果吻合较好^[15]。滩槽断面的流速、含沙量分布也在一定程度上决定了该河段滩槽交界处的水沙交换特征。

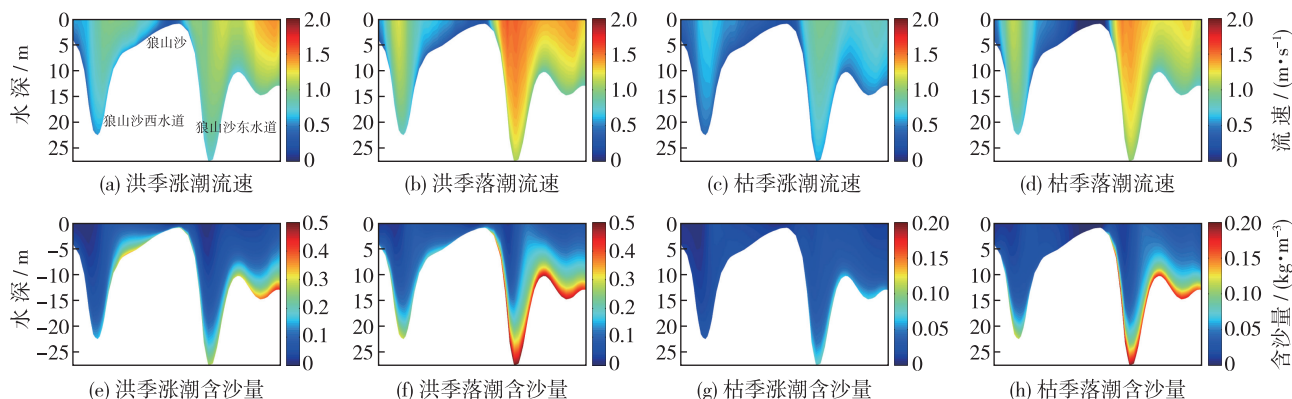


图8 洪枯季滩槽断面流速和含沙量分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of flow and sediment along shoal-ditch section during flood and dry seasons

3 结 语

建立了三沙河段三维水沙数学模型,模拟分析结果与实测值吻合良好,再现了洪、枯季水流条件下三沙河段的水沙运动过程,在此基础上着重分析了通州沙天然河段洪、枯季的沿程分流、分沙变化,以及滩槽过渡断面的水沙交换特征。

研究表明,通州沙东水道是主要的涨落潮通道,落潮时上游分流比约 90%,往下游分流比逐渐减小至 75%左右,西水道分流比逐渐增加;涨潮时东水道下游分流比约 70%,至上段受西水道漫滩流影响东水道分流比增至 85%~90%。对比洪枯季的沿程分流、分沙比,通州沙东水道沿程分流比与分沙比变化趋势相同,洪、枯季落潮期间通州沙东水道的分沙比较对应的分流比有所增加,洪季涨潮期间通州沙东水道的分沙比较对应的分流比有所减小,枯季时变化相对不明显。通州沙下段左缘水流交换和悬沙交换的格局相同,均以槽向滩为主,狼山沙右缘水沙交换通量较小。

参 考 文 献:

- [1] 曹民雄, 应翰海, 钱明霞. 长江南京以下 12.5 m 深水航道建设一期工程的主要技术问题与研究成果[J]. 水运工程, 2012(11): 5-13. (CAO Minxiong, YING Hanhai, QIAN Mingxia. Main technical problems and research achievement of 12.5 m deep-water channel construction phase I of the Yangtze River below Nanjing city[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(11): 5-13. (in Chinese))
- [2] 杜亚南, 浦泽良. 长江下游“三沙”航道整治工程表面流速流向观测[J]. 海洋测绘, 2006, 26(1): 47-49. (DU Ya'nan, PU Zeliang. The observing of the surface current velocity and direction in three shoals renovating in Yangtze River[J]. Hydrograph Surveying and Charting, 2006, 26(1): 47-49. (in Chinese))
- [3] 王爱春, 瞿月平, 张华, 等. 太仓—南通河段滩槽水沙交换及其演变关联性研究[J]. 水道港口, 2014, 35(5): 509-516. (WANG Aichun, QU Yueping, ZHANG Hua, et al. Study on water-sediment exchange and its evolution correlation in shoal and deep groove of the Taicang-Nantong reach[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(5): 509-516. (in Chinese))
- [4] 杜德军, 夏云峰, 吴道文, 等. 通州沙和白茆沙 12.5 m 深水航道整治方案试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 1-9. (DU Dejun, XIA Yunfeng, WU Daowen, et al. Experimental studies on 12.5 m deep waterway regulation of Tongzhou shoal and Baimao shoal[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(5): 1-9. (in Chinese))
- [5] 刘高峰, 贾晓, 吴华林, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程整治物模试验效果[J]. 水运工程, 2013(5): 11-18. (LIU Gaofeng, JIA Xiao, WU Hualin, et al. Physical model study on phase I project of 12.5 m deep-water navigation channel from Nanjing down the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(5): 11-18. (in Chinese))
- [6] 刘高峰, 贾晓, 吴华林, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程整治效果多水文条件物模研究[J]. 水运工程, 2013(11): 87-94. (LIU Gaofeng, JIA Xiao, WU Hualin, et al. Physical model study on the first phase project of 12.5 m deep-water navigation channel from Nanjing in the Yangtze River under multi-hydrological conditions[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(11): 87-94. (in Chinese))
- [7] 沈洪, 吴华林, 刘高峰, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程通州沙河段齿坝方案研究[J]. 水运工程, 2013(4): 1-6. (SHEN Qi, WU Hualin, LIU Gaofeng, et al. Groin engineering of channel regulation project in Tongzhousha shoal reach[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(4): 1-6. (in Chinese))
- [8] 闻云呈, 夏云峰, 王晓俊, 等. 非均匀非平衡输沙数学模型在长江南京以下深水航道整治一期工程中的运用[J]. 水运工程, 2013(5): 1-10. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, WANG Xiaojun, et al. Application of numerical nonuniform nonequilibrium sediment model in deep water channel phase I project from Nanjing down the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(5): 1-10. (in Chinese))
- [9] 闻云呈, 夏云峰, 吴道文, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程总平面方案优化[J]. 水运工程, 2013(3): 1-10. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, WU Daowen, et al. Optimization on general layout scheme of 12.5 m deepwater channel phase I project from Nanjing down the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3): 1-10. (in Chinese))
- [10] 张玮, 倪兵, 陈乾阳. 长江澄通河段通州沙西水道整治工程对分流比影响研究[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 39-44. (ZHANG Wei, NI Bing, CHEN Qianyang. Research on influence of regulation works on diversion ratio of Tongzhousha west

- channel in Chengtong reach[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(1): 39-44. (in Chinese))
- [11] WANG J H, SHEN Y. Development and validation of a three-dimensional, wave-current coupled model on unstructured meshes [J]. Science China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2011, 54(1): 42-58.
- [12] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [13] GALPERIN B, KANTHA L H, HASSID S, et al. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(1): 55-62.
- [14] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [15] 徐华, 刘桂平, 吴道文, 等. 潮汐多汊河段滩槽水沙交换特性研究与应用——以长江通州沙河段为例[J]. 人民长江, 2015(7): 12-15. (XU Hua, LIU Guiping, WU Daowen, et al. Study on characteristic of flow-sediment exchange between beach and channel at multi-branch tidal reach and application: case of Tongzhou sand shoal reach[J]. Yangtze River, 2015 (7): 12-15. (in Chinese))

Water-sediment diversion ratio along Tongzhousha shoal reach under different hydrological conditions

WANG Jinhua, WEN Yuncheng, ZHANG Weisheng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The river regime of the Tongzhousha shoal is controlled by both the actions of the river runoff and tidal current. There are many shoals and ditches existing in the river, and a rapid evolution by erosion and deposition makes the channel boundary conditions become unstable. Using a three-dimension mathematical model, the analyses of the diversion ratio of flow and sediment in flood and dry seasons and the water-sediment exchange characteristics along the shoal-ditch section were carried out. The analysis results indicate that the east waterway is the main channel. During the ebb tide, the upstream diversion ratio is about 90%, and the diversion ratio decreases by 75% at the downstream. The diversion ratio is about 70% in the downstream, and increases by 85% ~ 90% during the flood tide as a result of the overflow from the west waterway. During the ebb tide, the sediment diversion ratio, comparing corresponding diversion ratio, increases in both flood and dry seasons. In contrast, the diversion ratio of sediment during the flood tide in the flood season decreases, comparing corresponding diversion ratio, while no significant changes are found during the dry season. The same water-sediment exchange characteristics are found along the left side at the lower Tongzhousha shoal, and the primary transport direction is from the ditch to the shoal, and there is a smaller water-sediment exchange flux at the right side of the Langshansha shoal.

Key words: Tongzhousha shoal; mathematical model for tidal current and sediment; diversion ratio of flow; diversion ratio of sediment