

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.015

椒江河口输沙过程和机制转变研究

侯阿飞,陶建峰,朱思雨

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于 2005 年和 2014 年洪季水、沙、地形资料,采用三维水沙数学模型和悬沙通量机制分解分析了人类活动影响下椒江河口水沙动力变化规律,探讨了河口输沙过程和机制转变特征及其影响因素。结果表明:受河道地形整体变化的主导,椒江河口潮动力和泥沙动力变化显著;以石仙妇为界,上游涨潮优势增强、下游涨潮优势减弱,但河道沿程涨落潮流速均增大;河口最大浑浊带分布向上游移动超过 36 km,庙龙港至石仙妇和石仙妇至海门河段平均含沙量分别增大约 5.3 kg/m^3 ;上游潮汐不对称增强和含沙量增大导致河口潮泵输沙作用加强,大、小潮输沙总量和方向发生变化,引起河口输沙机制由“上游向海、下游向陆”的空间分布差异向“大潮向陆、小潮向海”的潮型分布差异转变,进而影响河床冲淤特征。

关键词:椒江河口;输沙机制;悬沙通量机制分解;最大浑浊带;河床冲淤

中图分类号:TV148⁺.1

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)04-0124-11

Research on sediment transport process and mechanism change in the Jiaojiang River Estuary, China

HOU Afei, TAO Jianfeng, ZHU Siyu

(College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the flow, sand, and topographic data during the flood seasons of 2005 and 2014, the three-dimensional (3D) numerical model of flow and sediment and the mechanism decomposition of suspended sediment flux were utilized to analyze the changing rules of the hydrodynamics and sediment dynamics in the Jiaojiang River Estuary under the influence of human activities. In addition, the process of sediment transport in the estuary was discussed, as well as the change in the mechanism and its influencing factors. The results show that dominated by the overall topographic change of the river, the tidal dynamics and sediment dynamics in the estuary change significantly; by taking Shixianfu as the demarcation, the upstream flood tide advantage is enhanced, and the downstream flood tide advantage is weakened, but the current velocity of the flood tide and the ebb tide along the river is increased. The distribution of the estuarine turbidity maximum moves upstream for more than 36 km, and the average sediment concentration in the section between Miaolonggang and Shixianfu increases by about 5 kg/m^3 , while that in the section between Shixianfu and Haimen increases by about 3 kg/m^3 . The increase in the sediment concentration and tidal asymmetry in the upper reaches of the river leads to a stronger tidal pumping effect on sediment transport in the estuary and varying total amounts and directions of sediment transport during the spring and neap tides. This in turn causes a mechanism shift from the “estuarine sediment transport to the sea at the upstream and to the land at the downstream” in terms of spatial characteristic difference to the “sediment transport to the land during spring tide and to the sea during neap tide” in terms of the tidal type distribution difference, which thus affects the characteristics of riverbed erosion and deposition.

Key words: the Jiaojiang River Estuary; sediment transport mechanism; mechanism decomposition of suspended sediment flux; turbidity maximum; riverbed erosion and deposition

河口受海陆因素共同作用,是高强度人类活动和全球气候变化双重影响下的敏感地带^[1]。河流下泄和海洋上溯的悬浮泥沙大量聚集于河口局部区域,极易形成河口最大浑浊带^[2-3],引起港口、航道淤积和河口滩

基金项目:国家自然科学基金项目(52071129);国家重点研发计划项目(2023YFC3008100)

作者简介:侯阿飞(1999—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力与泥沙输运研究。E-mail:huafei@126.com

通信作者:陶建峰(1980—),男,教授,博士,主要从事河口海岸水沙过程与环境效应研究。E-mail:aoetao@hhu.edu.cn

引用本文:侯阿飞,陶建峰,朱思雨.椒江河口输沙过程和机制转变研究[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):124-134.

HOU Afei,TAO Jianfeng,ZHU Siyu. Research on sediment transport process and mechanism change in the Jiaojiang River Estuary, China[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(4):124-134.

槽地形的演变,对此文献[3-5]从现场观测、遥感解译、理论解析和数值模拟等角度,对河口最大浑浊带的基本特征、形成机制和悬沙输运规律研究进展进行了系统分析。

随着社会经济的发展,人类不断对河口进行治理和开发^[6-11],如河道采砂、航道疏浚、河口滩涂圈围等。人类活动会改变河口地形和岸线形态,从而引起河口动力^[6-7]和泥沙输运^[8]发生变化,进而影响河口滩槽地貌演变,增加河口向不利于人类经济活动方向演变的风险^[12]。Winterwerp^[13]讨论了 Ems 河口在航道疏浚后从低浊度河口向高浊度河口转变、最大浑浊带上移的原因,认为航道疏浚增强了潮汐不对称性,改变了输沙机制;de Jonge 等^[14]则认为 Ems 河口航道疏浚使水深增大、底部摩擦阻力减小,引起含沙量增大、最大浑浊带上移;Zhang 等^[15]分析长江口北支的动力地貌时发现,2007 年以前围垦工程增强了潮汐变形,引起北支中上段航道淤积,2007 年以后中上段的航道疏浚和下段的航道束窄,减缓了潮波变形,使航道内冲淤平衡。可见,人类活动对河口动力特征、泥沙输运和地形地貌的影响一直是学者们持续关注的问题。

椒江河口位于浙江海岸中部台州湾顶端,其最大浑浊带分布范围超过 20 km^[16]。近几十年来,椒江河口人类活动频繁,引起河口水动力、泥沙输运和地形地貌显著变化。1990 年后的河道采砂引起河口潮动力增强、河床冲淤显著调整^[17],河口滩涂围垦也引起潮动力增强和冲淤变化^[17-18],而河口航道疏浚则会引起河口输沙通量变化甚至增加浮泥层厚度^[19]。近期的实测水沙资料分析也表明,河口最大浑浊带内外的输沙机制差异较大^[20]。上述研究主要集中于动力泥沙条件变化和地形冲淤分析,对于近年来河口人类活动对泥沙输运机制的影响研究还较少。本文结合 10 a 尺度的水、沙、地形资料和三维水沙数值模拟方法,并运用通量机制分解法,对 2005—2014 年人类活动影响下的椒江河口输沙过程和机制转变等进行探讨,以为河口治理和可持续利用提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域和数据

椒江河口位于浙江沿海中部,由灵江、椒江和椒江口 3 段组成,灵江流经临海市至石仙妇下游的三江口后称为椒江,经牛头颈(口门)流入台州湾,口门以外为椒江口和台州湾。椒江河口平面形态呈喇叭状,受基岩节点控制,牛头颈处河宽仅约 1 km,自牛头颈向下游迅速扩宽,至白沙-琅玕山一线达约 19 km,东侧水域开阔。椒江上游属于典型山溪性河流,河口属于强潮河口,多年平均潮差约 4.0 m,最大潮差可达 6.3 m,多年平均涨潮和落潮历时分别为 5.1 h 和 7.3 h,为不规则半日潮型。椒江河口悬沙主要由粉砂和黏土组成,径流来沙较少,多为海域来沙,中值粒径为 4~9 μm,河床近底常发育有浮泥层^[19]。相关研究^[17-18]表明:1983—2004 年,灵江和椒江河道采砂量超过 4 000 万 m³,平均河床高程下降 1.98 m;1984—2013 年,椒江口南北两侧海岸线持续向海推进,其中南侧台州浅滩平均向海推进 5 000 m/a、北侧南洋海涂和北洋海涂平均向海推进分别为 67 m/a 和 110 m/a,累计滩涂圈围约为 106 km²。大规模人类活动导致椒江河口的水动力和河床地形快速调整^[17-18]。

本文收集了 2005 年 9 月和 2014 年 6 月大、小潮全潮水文泥沙测验资料,研究区域和各测站布置如图 1 所示,图中采用 CGCS2000 国家大地坐标系,同时也收集了 2005 年、2014 年和 2018 年椒江河口实测地形资料。

1.2 研究方法

1.2.1 数学模型

采用 Delft3D 软件建立椒江河口三维水沙盐数学模型(图 1),模型水平和垂直方向分别采用正交曲线坐标系和 σ 坐标系。三维水流和盐度输运控制方程基于 N-S 方程和盐度对流扩散方程^[21],悬沙输运方程如下:

$$\frac{\partial [(d + \zeta)c]}{\partial t} + \frac{1}{H_\xi H_\eta} \left\{ \frac{\partial [(d + \zeta)uH_\eta c]}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d + \zeta)vH_\xi c]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial [(\omega - w)c]}{\partial \sigma} = \frac{d + \zeta}{H_\xi H_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{H_\eta}{H_\xi} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{H_\xi}{H_\eta} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + F \quad (1)$$

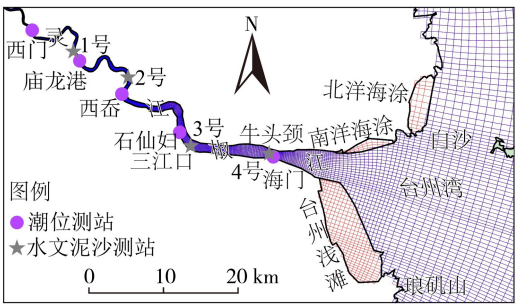


图 1 椒江河口测站位置与数学模型网格
Fig. 1 Observation stations along the Jiaojiang River Estuary and numerical model grid

式中: ξ,η,σ 为正交曲线坐标和 σ 坐标; u,v,ω 分别为 ξ,η,σ 方向的流速; d 为静水深; ζ 为潮位; H_ξ,H_η 为拉梅系数; c 为含沙量; w 为泥沙的沉降速度; D_H,D_V 分别为水平和垂向扩散系数; F 为床底沉积和再悬浮泥沙通量,采用 Partheniades-Krone^[22] 公式计算。模型参数见表 1。

模型的计算范围包括椒江河口和口门外海域,上游边界位于西门上游约 6 km 处,外海边界为以海门为中心向外海扩展 70 km 的弧线。模型水平网格数为 739×616 ,垂向平均分为 10 层,河道网格进行加密,沿河宽方向网格约为 25 m、河长方向网格约为 70 m,外海网格平均约为 $1\,200\text{ m}\times 1\,900\text{ m}$,2014 年模型网格在 2005 年模型网格基础上,移除台州浅滩、南洋海涂和北洋海涂围垦区域内的网格。计算地形分别由 2005 年和 2014 年实测地形和海图数据插值给定。模型上游潮位边界根据 2005 年和 2014 年西门潮位外推设定,盐度边界盐度设为 0,泥沙边界由 1 号垂线实测含沙量外推给定,外海潮位边界由 TPXO^[24] 获得的 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、MF、MM、M4、MS4、MN4 分潮参数给出,盐度设置为 28‰~30‰、泥沙边界含沙量设为 0。

1.2.2 模型验证

模型分别采用 2005 年 9 月 4 日和 2014 年 6 月 14 日实际地形下大潮期间的潮位、潮流和含沙量进行验证(部分结果见图 2~4),经统计,2005 年潮位、流速、流向和含沙量的实测值与模拟值相关系数分别为 0.921、0.780、0.852 和 0.536,2014 年分别为 0.988、0.815、0.865 和 0.642,说明模型能够很好地模拟椒江河口的动力过程和泥沙运动规律。

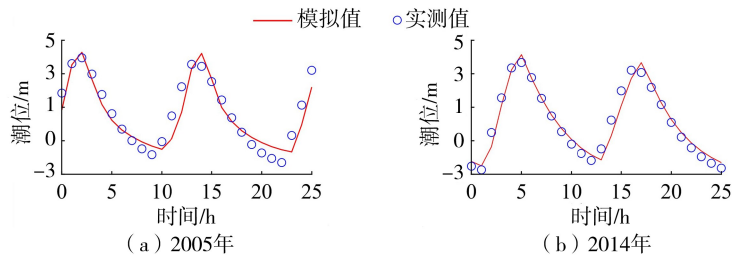


图 2 西岙潮位模型模拟结果验证

Fig. 2 Verification of simulated tidal level at Xi'ao

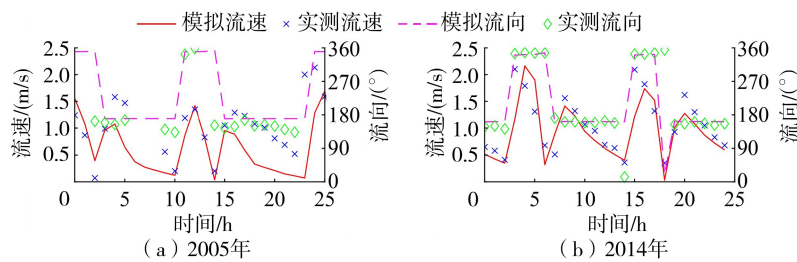


图 3 2 号垂线潮流模型模拟结果验证

Fig. 3 Verification of simulated tidal current at Vertical Line 2

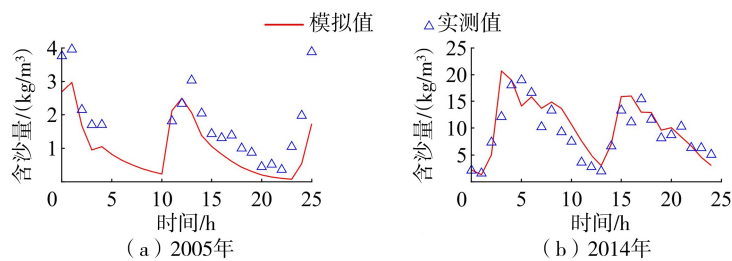


图 4 2 号垂线含沙量模型模拟结果验证

Fig. 4 Verification of simulated sediment concentration at Vertical Line 2

1.2.3 悬沙通量机制分解

采用下式^[25]对模拟的单宽悬沙通量进行分解:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c dz dt = h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \langle h_t \bar{u}_t \rangle \bar{c}_0 + \langle h_t \bar{c}_t \rangle \bar{u}_0 + h_0 \langle \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \langle \bar{u}' c' \rangle + \langle h_t \bar{u}' c' \rangle \quad (2)$$

式中: P_s 为单宽悬沙总通量; T 为积分周期; h 为水深;下标 0 和 t 分别表示周期平均量和周期变化量; $\langle \rangle$ 表示周期平均;上划线表示垂线平均。等式右边前面两项之和为水体平流输沙项,第 3、4、5 项之和为潮泵输沙项,后两项之和为垂向净环流输沙项。

2 结果与分析

2.1 实测地形冲淤特征

椒江河口在采砂、围垦等活动综合影响下,地形产生了较大变化^[17-18]。图 5 为 2005—2018 年椒江河口地形变化(淤积为正、冲刷为负,以西门上游 5 km 处为纵向距离 0 km 位置),2005 年河道沿程坡度变化范围大,西门至西岙河段下降较快,西岙至石仙妇河段转为负坡度,石仙妇至海门河段较为平缓,3 个河段平均坡度分别为 0.175‰、-0.195‰和 0.062‰,至 2014 年变为 0.099‰、0、0.048‰,2018 年变为 0.093‰、0、0.076‰。产生如此大坡度变化的原因是河床冲淤变化,经统计,2005—2014 年河床淤积总量达 4 400 万 m³(图 5(b)),其中灵江河段淤积最大,大部分河道淤积近 2 m,最大淤积达 4 m;石仙妇至海门河段整体淤积程度较轻,除弯道凹岸和牛头颈位置淤积超过 2 m 外,其他区域淤积在 1 m 以内;海门外侧为冲刷区域,冲刷深度约为 1 m,航道处最大冲刷达 2 m,可能与航道疏浚有关。而 2014—2018 年(图 5(c))西门至海门河段有冲有淤,但冲淤量较小,合计冲刷仅 29 万 m³,说明河道基本处于动态平衡状态。

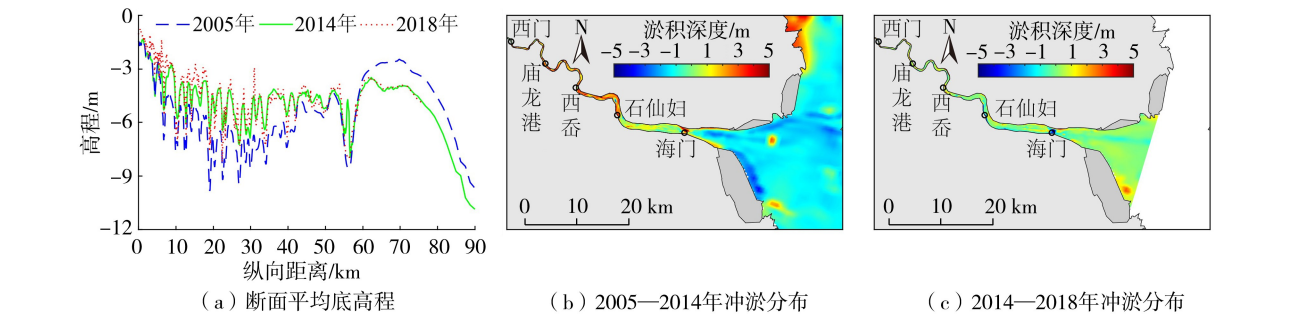


图 5 椒江河口河道地形变化
Fig. 5 Topographic changes in the Jiaojiang River Estuary

2.2 实测水沙时空分布特征

根据椒江河口 2005 年(9 月 3 日 20:00 至 9 月 4 日 21:00)和 2014 年(6 月 14 日 18:00 至 6 月 15 日 19:00)洪季大潮水文泥沙资料,1 号垂线潮量和输沙率、流速过程(落潮为正,涨潮为负)和含沙量过程如图 6~8 所示(图中起始时间为不同的潮汐时刻,图 7 和图 8 中上图为 2005 年、下图为 2014 年的流速和含沙量过程),同时统计了潮平均的潮差、流速和含沙量,结果见表 2。

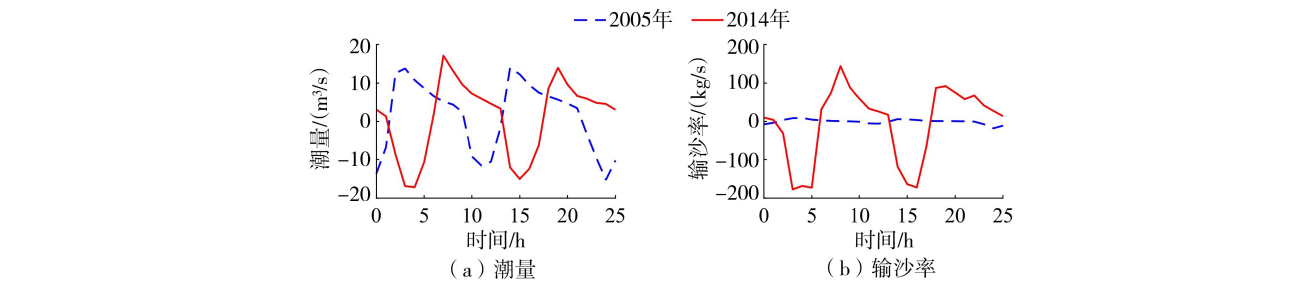


图 6 椒江河口 1 号垂线潮周期变化
Fig. 6 Variations in Vertical Line 1 during tidal cycles in the Jiaojiang River Estuary

由图 7 和表 2 可见,与 2005 年大潮相比,2014 年灵江河道内流速增大,1 号和 3 号垂线涨潮平均流速分别增大约 0.40 m/s 和 0.30 m/s,2 号垂线则基本不变,但在测验的部分潮周期内,涨潮流速仍有显著增大,

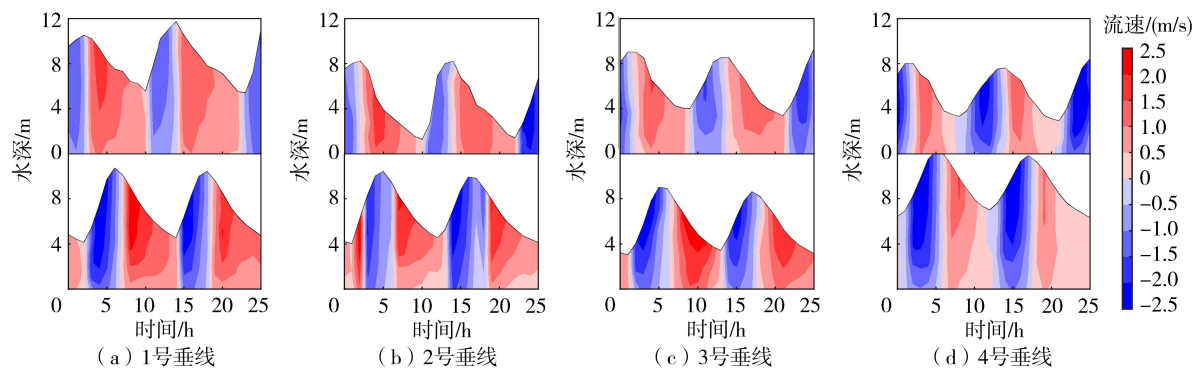


图7 椒江河口流速潮周期变化

Fig. 7 Variations in current velocity during tidal cycles in the Jiaojiang River Estuary

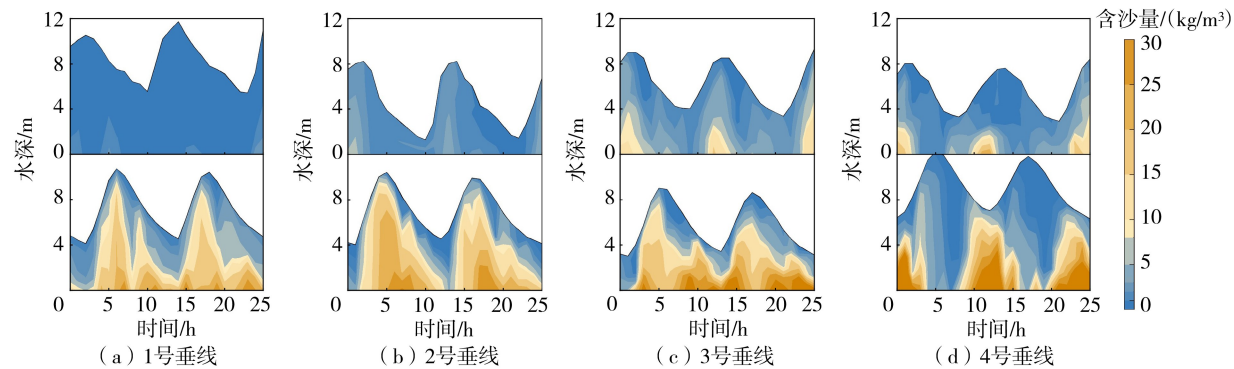


图8 椒江河口含沙量潮周期变化

Fig. 8 Variations in sediment concentration during tidal cycles in the Jiaojiang River Estuary

表2 椒江河口潮平均潮差、流速和含沙量

测站/测线	潮差/m		流速/(m/s)		含沙量/(kg/m ³)	
	2005 年	2014 年	2005 年	2014 年	2005 年	2014 年
西门	5. 71/5. 92	6. 31/6. 35				
1 号			0. 95/0. 95	1. 33/0. 99	0. 53/0. 38	9. 51/ 8. 25
2 号			1. 30/0. 95	1. 25/0. 89	2. 34/1. 44	9. 57/ 9. 40
3 号			0. 84/0. 80	1. 17/0. 91	4. 90/3. 00	13. 90/15. 54
4 号			1. 27/0. 55	1. 06/0. 48	4. 06/2. 19	11. 00/ 9. 42
海门	5. 10/5. 06	5. 03/5. 08				

注:“/”前后分别为涨潮和落潮数据。

4号垂线涨潮平均流速减小约0.20m/s,而落潮平均流速仅3号垂线比2005年增大约0.10m/s,其他垂线均无明显变化。虽然两次测验时间相差近10a,但统计时间均在洪季的非洪水期,从图6和表2可以看出,上游1号垂线潮量差异较小,径流条件相差不大,同时海门站潮差基本接近,表明从外海传入椒江口的潮波能量基本一致,但至上游西门站,2014年潮差比2005年增大约0.50m,表明潮波变形加剧,引起了河道内较大的流速变化,且涨潮平均流速增大更为显著。

2014年椒江河口含沙量和悬沙运动范围较2005年均显著增大。2005年,涨潮过程中3号和4号垂线近底含沙量超过8kg/m³,到2号垂线降至5kg/m³,到1号垂线不足2kg/m³,表明部分悬沙沿程落淤;落潮开始后,2号垂线含沙量迅速降至2kg/m³以下,而3号和4号垂线在落潮末期含沙量略有增大,表明在落潮过程中部分悬沙会落淤在2号和4号垂线之间的河段,1号垂线输沙率较小。2014年,由于流速增大,含沙量和悬沙分布范围显著增大,1号垂线输沙率较大,部分时刻近底含沙量在1号和2号垂线超过20kg/m³、3号和4号垂线超过30kg/m³,但与流速过程对比发现,在落潮末期至下个涨潮初期含沙量较高,说明含沙量相较于流速有较大的滞后。从潮平均含沙量来看,除2014年各垂线潮平均含沙量均比2005年大幅增加外,涨落潮之间的含沙量差异也有所变化。2005年,3号和4号垂线涨潮平均含沙量比落潮大约2kg/m³、2号垂线

大约 0.9 kg/m^3 ,至 1 号垂线已基本相同。2014 年,4 号垂线涨潮平均含沙量比落潮大 1.6 kg/m^3 左右,而 3 号垂线涨潮平均含沙量却比落潮小约 1.6 kg/m^3 、2 号垂线涨落潮平均含沙量接近,至 1 号垂线涨潮平均含沙量再次比落潮大约 1.3 kg/m^3 。

2.3 水沙分布特征模拟结果

为了更清晰地分析椒江河口沿程水沙分布特征,基于三维水沙数学模型模拟结果,分别绘制了 2005 年和 2014 年涨落潮垂线平均流速分布(图 9,落潮为正、涨潮为负)和不同时刻浑浊带运动过程(图 10)。

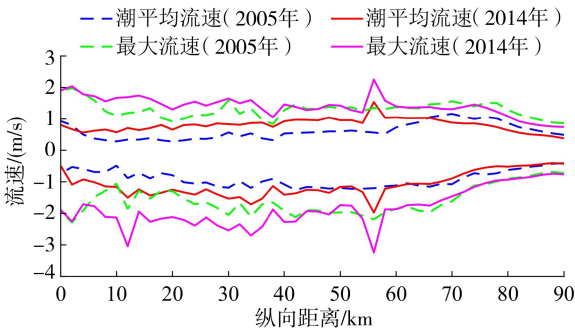


图 9 椒江河口涨落潮垂线平均流速分布

Fig. 9 Distribution of average current velocity of flood and ebb tides along vertical lines in the Jiaojiang River Estuary

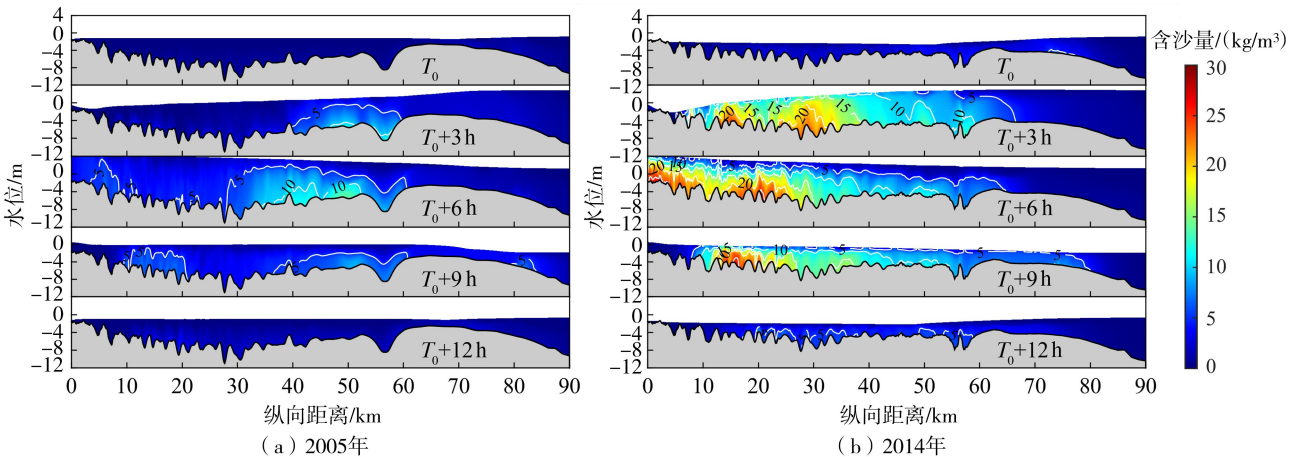


图 10 椒江河口最大浑浊带运动过程

Fig. 10 Movement process of turbidity maximum in the Jiaojiang River Estuary

由图 9 来看,以海门为界,2014 年口门内涨落潮垂线平均流速比 2005 年显著增大,口门外流速变化较小。2005 年西门至石仙妇河段涨潮平均流速基本在 1 m/s 左右,涨潮最大流速在 2 m/s 以内,庙龙港附近略小于其他河段;落潮平均流速和最大流速沿程变化较小,分别在 0.5 m/s 和 1 m/s 左右。2014 年西门至石仙妇河段涨潮平均流速比 2005 年大约 0.2 m/s ,最大流速已超过 2 m/s ,结合地形变化来看,2014 年相对平缓的河床更有利于潮流上溯;落潮最大流速比 2005 年增大相对较少,而平均流速在西门至海门河段均有显著的增大。

由图 10 可见,大潮期间,2005 年最大浑浊带含沙量在 15 kg/m^3 内,2014 年最高达 30 kg/m^3 ,增加约 15 kg/m^3 。以 10 kg/m^3 的含沙量为界,2005 年最大浑浊带向上游最远运动到距口门 54 km ,位于石仙妇与西岙中部,长度在涨潮后 6 h 达到最大(16 km)。而 2014 年最大浑浊带上游运动至西门,上移 36 km ,长度达 53 km ,最大浑浊带的分布范围和运动范围均有很大的增大。此外,最大浑浊带存在的时间也有所增加,2005 年最大浑浊带在涨潮后 3 h 和 6 h 较为明显,涨潮后 9 h 含沙量减小到 10 kg/m^3 以下,而 2014 年涨潮后 9 h 仍有约 46 km 长的河段含沙量在 10 kg/m^3 以上。综合以上对比结果,椒江河口 2005—2014 年径流与外海潮波条件基本一致,而流速增大,含沙量增大,输沙范围扩大,最大浑浊带特征和运动规律发生转变,表明椒江河口输沙机制已经历了显著的调整。

3 讨 论

3.1 沿程泥沙输运转变机制

根据模型模拟结果,采用式(2)对椒江河口河道断面中心处 2005 年和 2014 年悬沙通量进行了机制分解,结果如图 11 所示(正值向海,负值向陆),由于垂向净环流输沙贡献较小,未在图中显示,重点分析平流输沙与潮泵输沙。由图 11 可见,椒江河口泥沙输运主要由潮泵作用主导,平流作用为辅,两种作用相对变化引起河口输沙机制转变。

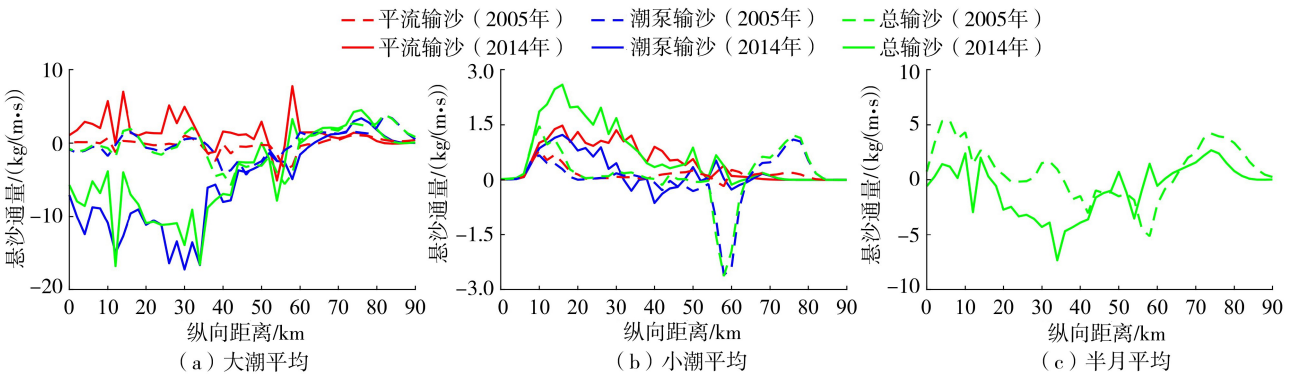


图 11 椒江河口悬沙通量机制分解

Fig. 11 Mechanism decomposition of suspended sediment flux in the Jiaojiang River Estuary

大潮期间(图 11(a)),从悬沙总通量来看,2005 年西门至海门河段在 56 km 位置存在零值,西门至该位置整体表现为向海输沙,该位置至口门表现为向陆输沙,2014 年悬沙总通量为零的位置消失,口门内河道均表现为向陆输沙。从分量来看,2005 年和 2014 年均由潮泵作用主导输沙过程,平流作用对总输沙的贡献相对较小。与 2005 年相比,由于 2014 年涨落潮流速均有所增大,且涨潮流速增大更为明显(图 9),使得 2014 年西门至石仙妇河段向陆的潮泵作用悬沙通量平均增大约 $10\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,最大增大约 $17\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,而向海平流悬沙通量平均增大仅约 $2\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,最大增大约 $4.5\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,从而引起椒江河口大潮期间总输沙方向的转变。海门至外海,两个年份大潮期间最大悬沙通量位置虽有不同,但均表现为潮泵作用主导的向海输沙。小潮期间(图 11(b)),2005 年的悬沙总通量与大潮期间基本接近,平衡位置略向下游移动,位于 53 km 处,但 2014 年总输沙方向在西岙与石仙妇之间转变为向海输沙,这是因为小潮期间潮波能量减小,潮泵作用下的悬沙通量减小,且在西门至西岙河段向海输沙,平流作用仍保持向海输沙,对总输沙贡献增大。海门至外海,两个年份仍向海输沙,但 2014 年悬沙通量大幅减小。

由图 11(a)(b)可见,对于口门外侧海域,两个年份均表现为向海输沙,对于口门内河道,2005 年沿程输沙平衡位置在石仙妇至西岙之间,表现为“上游向海、下游向陆”的空间分布差异,大、小潮平衡位置变化不大,2014 年大、小潮期间的河道沿程输沙方向相反,表现为“大潮向陆、小潮向海”的潮型分布差异,因此需要考虑更长周期的泥沙输运。由图 11(c)可见,2005 年半月平均悬沙通量与单个潮周期内一致,平衡位置在 55 km 处,易发生淤积。2014 年大潮期间潮泵作用引起大量泥沙向陆输运,庙龙港至海门河段半月平均向陆输沙,在西门至庙龙港河段,潮泵作用输沙方向随大、小潮的循环转变,半月平均则表现为向海输沙,悬沙通量比 2005 年小,在西门附近最大减小达 $4\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,纵向输沙平衡位置在庙龙港,上移约 18 km。口门外航道中,2005 年向海悬沙通量最大达 $5\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,2014 年较小,最大约为 2005 年的一半。

3.2 泥沙输运机制影响因素

为了进一步分析影响泥沙输运机制转变的原因,根据前文分析和已有研究成果^[17-19,26],选取岸线和地形作为变量,设置了 4 个方案进行模拟分析,方案的具体设置见表 3。表 3 中岸线变量分别选取 2005 年岸线(未实施围垦)和 2014 年岸线(已实施围垦),通过改变模型网格实现(图 1);地形变量以 2005 年地形为基准,根据河床冲淤特点,以石仙妇为界分为上游地形和下游地形分别

表 3 模型模拟方案设置			
Table 3 Settings of model simulation schemes			
方案	岸线变量 (是否实施围垦)	地形变量	
		上游地形	下游地形
S1	是	2005 年	2005 年
S2	否	2014 年(淤积)	2014 年(冲刷)
S3	否	2014 年(淤积)	2005 年
S4	是	2005 年	2014 年(冲刷)

进行设置;模型其余边界条件和参数统一使用 2014 年模型进行设置。

3.2.1 潮波传播特征

对 2005 年、2014 年和 4 个方案模拟的河道沿程潮位结果进行调和分析,并计算 M2 和 M4 分潮偏度以评估潮汐不对称性,结果见图 12。由图 12 可见,方案 S1 和 S3 与 2005 年潮波传播特征基本一致,M2 分潮振幅从口门外进入围垦区域后迅速减小,M2 分潮迟角和 M4 分潮振幅增大,非线性效应增强。潮波进入口门后,M2 分潮振幅沿河道向上游继续增大。与此相比,方案 S2 和 S4 则与 2014 年相同,口门处 M2 分潮振幅没有减小的过程,进入口门后振幅持续增大,其中西门站振幅增大 0.4 m。此外,方案 S2 和 S4 的 M2 分潮迟角和 M4 分潮振幅、迟角相对方案 S1 和 S3 均较小。

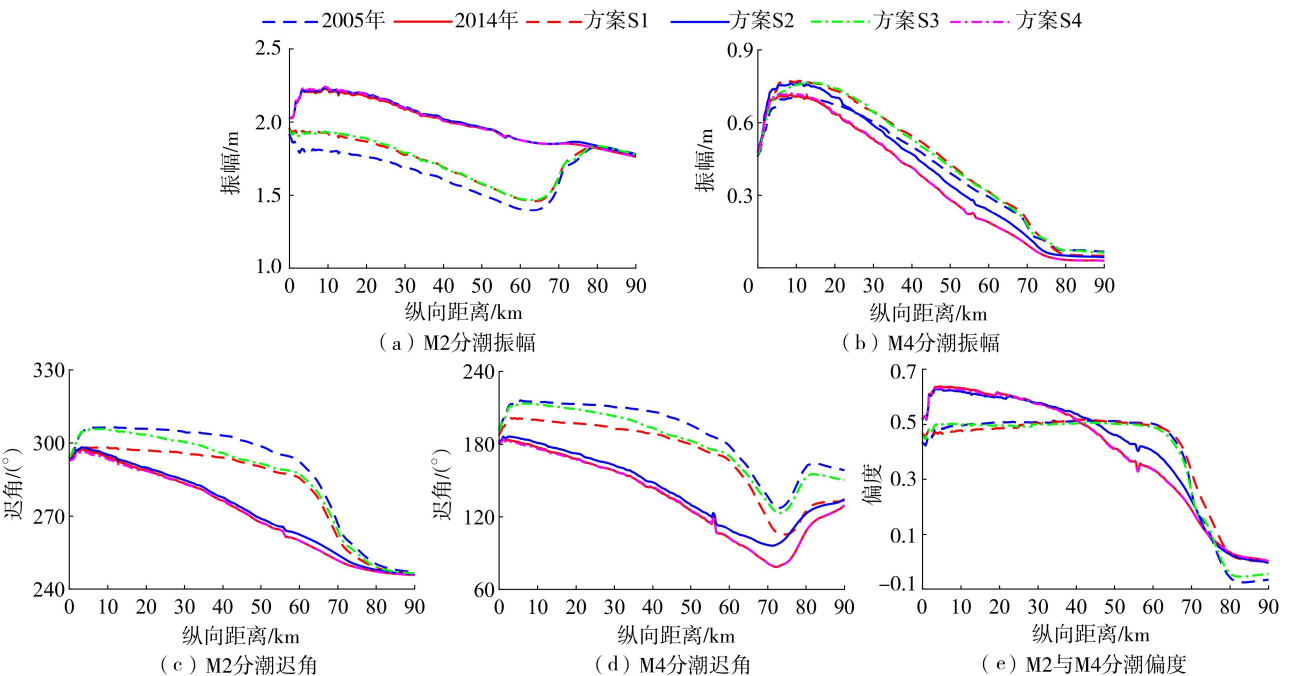


图 12 椒江河口潮波和潮汐不对称性变化

Fig. 12 Changes in tidal wave and tidal asymmetry in the Jiaojiang River Estuary

从分潮偏度来看,潮波传入海湾后,S1 和 S3 的偏度在围垦区域迅速增大,进入河道后则基本不变,维持在 0.5 左右,同样与 2005 年一致,为涨潮占优。而对于 S2 和 S4,口门外偏度增长较慢,但进入河道后偏度会持续向上游增大,在石仙妇附近达到 0.5,因此不对称性在石仙妇上游河段涨潮优势得到增强,在石仙妇下游河段涨潮优势减弱。该分析表明导致 2005—2014 年椒江河口潮波变化和潮汐不对称性分布的主要原因是口门河床的冲刷。

3.2.2 悬沙分布和输运特征

椒江河口大潮平均垂线平均含沙量分布如图 13 所示。2005 年潮平均含沙量在石仙妇至海门河段最大,其他河段潮平均含沙量在 3 kg/m^3 以下。2014 年潮平均含沙量最大位置上移至西门至西岙河段,最大潮平均含沙量约 10.5 kg/m^3 。经统计,在滩涂围垦和地形变化共同作用下,西门至石仙妇河段潮平均含沙量增大 5 kg/m^3 ,石仙妇至海门河段增大 3 kg/m^3 ,海门外增大较小。方案 S1 和 S2 的潮平均含沙量分布分别与 2005 年和 2014 年相似,表明口门围垦对河道内的潮平均含沙量分布影响不大。方案 S3 与 2005 年相比,增加了西门至石仙妇河段的淤积,此河段内潮平均含沙量平均比 2005 年增大约 2.2 kg/m^3 ,其他区域内变化较小,表明河道中含沙量分布主要受下游地形影响。方案 S4 与 2014 年相比则减少了西门至石仙妇河段的淤积,潮平均含沙量与

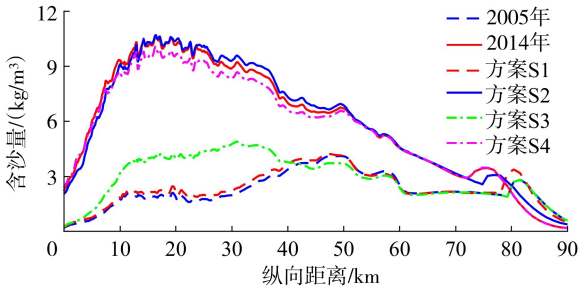


图 13 椒江河口大潮平均垂线平均含沙量

Fig. 13 Spring-tide average depth-mean sediment concentration in the Jiaojiang River Estuary

2014 年基本一致,表明西门至石仙妇河段的淤积仅在含沙量较小时对潮平均含沙量分布影响明显,而含沙量较大时对潮平均含沙量分布影响减弱。

椒江河口 2005 年、2014 年和方案 S1~S4 的河道断面中心处悬沙总通量分布见图 14,方案 S1 和 S3 悬沙总通量分布和 2005 年沿程分布一致,而方案 S2 和 S4 则与 2014 年一致。综合以上分析,椒江河口 2005—2014 年在滩涂围垦和地形变化作用下,下游河道和口门附近河床降低,使潮波传入口门时非线性效应减弱,石仙妇上游潮汐不对称性增大,同时河道流速和含沙量增大,导致潮泵输沙作用加强,引起椒江河口的输沙总量增大、输沙机制转变。此外,在方案 S3 中,西门至海门河段也出现了“大潮向陆,小潮向海”的悬沙输运特征,且小潮时西门附近有较大的悬沙总通量,达到 $5\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。方案 S3 中分潮和不对称性与 2005 年相比无明显变化,表明在潮动力相同时,西门至石仙妇河段的淤积仍可能对灵江内的悬沙输运有加强作用,进而使水体中含沙量增大。方案 S4 与 2014 年相比悬沙总通量变化不明显,即河道中含沙量较大时,上游河道淤积对输沙过程影响同样减弱。此外,方案 S1 和 S2 相较于 2005 年和 2014 年无明显变化,表明滩涂围垦对椒江河口输沙作用不明显。

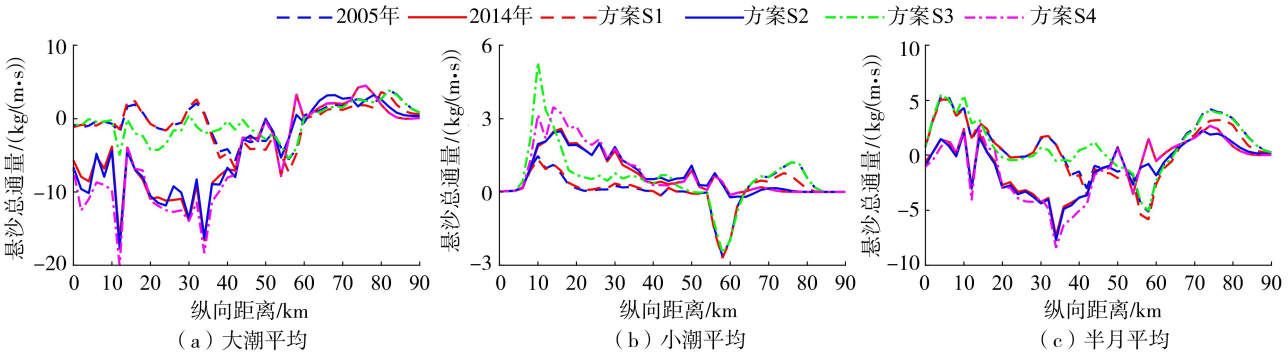


图 14 椒江河口悬沙总通量分布

Fig. 14 Distribution of total suspended sediment flux in the Jiaojiang River Estuary

3.3 河床冲淤特征

输沙机制的转变可能引起河床冲淤特征的变化,因此对 2005 年和 2014 年模型添加动床地貌参数,模拟椒江河口 1 a 时长的地形冲淤变化,图 15 为河道断面平均底高程变化模拟结果。由图 15 可见,2005 年石仙妇下游河段冲刷显著,模拟初期迅速冲刷,泥沙上移至石仙妇附近并开始落淤,在庙龙港附近完成沉降,导致庙龙港至石仙妇河段持续淤积。2014 年庙龙港至石仙妇河段的地形变化较小,河床发生轻微冲刷,石仙妇至海门河段呈现冲刷状态,海门外河床高程变化较小,全河段河床整体比 2005 年更加稳定。结合此前对椒江河口冲淤的相关研究^[17-18],在采砂、围垦等综合影响下,2005 年椒江河口地形处于非自然冲淤状态,至 2014 年河道内产生大量淤积,导致 2005—2014 年输沙机制发生转变,进一步对冲淤特征产生了显著影响,最终使河床更趋于稳定。

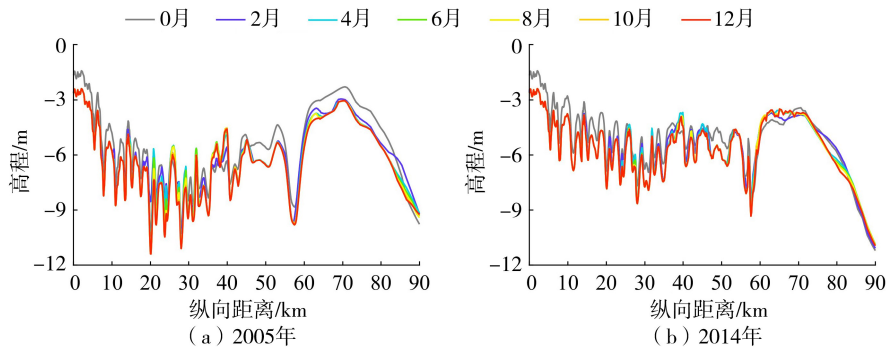


图 15 椒江河口地形变化模拟结果

Fig. 15 Simulated results of topographic changes in the Jiaojiang River Estuary

4 结 论

a. 在采砂和围垦等综合影响下,2005—2014 年椒江河口地形变化显著,海门上游河段水深和平均坡度

减小,淤积总量约 4 400 万 m³。受地形变化影响,椒江河口口门内潮差和流速增大且涨潮流速增大更为明显,口门外流速减小。含沙量增大超过 3 kg/m³,最大浑浊带运动范围增大近 36 km,输沙机制发生变化。

b. 海门外侧河床高程降低使椒江河口潮汐不对称性在西门至石仙妇河段涨潮优势增强、石仙妇至口门河段涨潮优势减弱。潮泵输沙作用的增强使得椒江河口大、小潮输沙总量和方向发生变化,输沙机制由“上游向海、下游向陆”的空间分布差异转变为“大潮向陆、小潮向海”的潮型分布差异。滩涂围垦对椒江河口输沙机制影响较小。

c. 椒江河口输沙机制转变使输沙平衡位置移动,引起冲刷和淤积位置变化,由 2005 年庙龙港至石仙妇河段淤积、海门外侧冲刷,转变为 2014 年冲淤强度均减小,地形更趋于稳定。

参考文献:

[1] 陈吉余,陈沈良. 中国河口研究五十年:回顾与展望[J]. 海洋与湖沼,2007,38(6):481-486. (CHEN Jiyu,CHEN Shenliang. China estuarine research for 50 years:retrospect and prospective[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2007,38(6):481-486. (in Chinese))

[2] 沈焕庭,贺松林,茅志昌,等. 中国河口最大浑浊带刍议[J]. 泥沙研究,2001,26(1):23-26. (SHEN Huanting,HE Songlin,MAO Zhichang,et al. On the turbidity maximum in the Chinese estuaries[J]. Journal of Sediment Research,2001,26(1):23-26. (in Chinese))

[3] JAY D A, TALKE S A, HUDSON A, et al. Estuarine turbidity maxima revisited: instrumental approaches, remote sensing, modeling studies, and new directions[J]. Developments in Sedimentology, 2015, 68:49-109.

[4] BURCHARD H, SCHUTTELAARS H M, RALSTON D K. Sediment trapping in estuaries[J]. Annual Review of Marine Science, 2018, 10:371-395.

[5] 王重洋,周成虎,陈水森,等. 河口最大浑浊带研究的回顾与展望[J]. 科学通报,2021,66(18):2328-2342. (WANG Chongyang,ZHOU Chenghu,CHEN Shuisen,et al. Retrospect and perspective of the estuarine turbidity maximum zone researches [J]. Chinese Science Bulletin,2021,66(18):2328-2342. (in Chinese))

[6] 陈小文,刘霞,张蔚. 珠江河口滩涂围垦动态及其影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):39-43. (CHEN Xiaowen,LIU Xia,ZHANG Wei. Shore reclamation in Pearl River Estuary and its impact analysis[J]. Journal of Hohai University (natural sciences),2011,39(1):39-43. (in Chinese))

[7] 郑金海,鲍仕昱,张蔚,等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):1-6. (ZHENG Jinhai,BAO Shiyu,ZHANG Wei,et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(4):1-6. (in Chinese))

[8] 杨婷,陶建峰,刘桂平,等. 整治工程后长江口南北槽的分流分沙季节特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):338-344. (YANG Ting,TAO Jianfeng,LIU Guiping,et al. Seasonal characteristics of flow and suspended sediment diversion in South and North channels of Yangtze Estuary after implementation of regulation project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(3):338-344. (in Chinese))

[9] DAI Zhijun,LIU J T,WEI Wen,et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang(Yangtze River) submerged delta[J]. Scientific Reports,2014,4:6600.

[10] TESSLER Z D,VÖRÖSMARTY C J,GROSSBERG M,et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world[J]. Science,2015,349(6248):638-643.

[11] SUN Zhilin,HUANG Senjun,JIAO Jiange,et al. Effects of cluster land reclamation projects on storm surge in Jiaojiang Estuary, China[J]. Water Science and Engineering,2017,10(1):59-69.

[12] WANG Wei,LIU Hui,LI Yongqi,et al. Development and management of land reclamation in China[J]. Ocean & Coastal Management,2014,102:415-425.

[13] WINTERWERP J C. Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening[J]. Ocean Dynamics,2011,61(2/3):203-215.

[14] DE JONGE V N, SCHUTTELAARS H M, VAN BEUSEKOM J E E, et al. The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 139:46-59.

[15] ZHANG Qi,FAN Daidu,FENG Tao,et al. Impacts of land reclamation projects on hydrodynamics and morphodynamics in the highly altered North Branch of the Changjiang Estuary[J]. Anthropocene Coasts,2022,5:6. (DOI:10. 1007/s44218-022-00006-2)

[16] 张新周,陈星,窦希萍,等. 山溪性强潮河口最大浑浊带形成机制及其模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):84-92. (ZHANG

Xinzhou, CHEN Xing, DOU Xiping, et al. Study on formation mechanism of turbidity maximum zone and numerical simulations in the macro tidal estuaries[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 84-92. (in Chinese))

[17] 陈甫源, 胡金春, 白咸勇, 等. 江道采砂对椒江河口的影响分析[J]. *泥沙研究*, 2008(3): 46-53. (CHEN Fuyuan, HU Jinchun, BAI Xianyong, et al. Effect of evacuating sand on Jiaojiang River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2008(3): 46-53. (in Chinese))

[18] 张琴, 陶建峰, 张长宽, 等. 台州湾浅海滩涂大规模围垦下水动力变化分析[J]. *海洋通报*, 2015, 34(4): 392-398. (ZHANG Qin, TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan, et al. Effect of the large-scale reclamation of tidal flats on the hydrodynamic characteristics in the Taizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(4): 392-398. (in Chinese))

[19] YAO Yanming, CHEN Xueqian, YUAN Jinxiang, et al. Impacts of channel dredging on hydrodynamics and sediment dynamics in the main channels of the Jiaojiang River Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(9): 132-144.

[20] 刘伟, 范代读, 涂俊彪, 等. 椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 41-51. (LIU Wei, FAN Daidu, TU Junbiao, et al. Suspended transportation and flux mechanism of sediment in the Jiaojiang Estuary in spring[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 41-51. (in Chinese))

[21] DELTARES. Delft3D-hydro-morphodynamics user manual[M]. Delft: Deltares, 2024.

[22] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 91(1): 105-139.

[23] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 105-109.

[24] EGBERT G D, BENNETT A F, FOREMAN M G G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 24821-24852.

[25] DYER K R. Estuaries: a physical introduction[M]. 2nd. Hoboken: John Wiley & Sons, 1997.

[26] 李伯根, 王才洪, 周鸿权, 等. 近 70 a 来椒江河口河床冲淤调整机理[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 89-100. (LI Bogen, WANG Caihong, ZHOU Hongquan, et al. Adjustment mechanism on the erosion and accretion of riverbed in the Jiaojiang Estuary in Zhejiang Province, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(5): 89-100. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-06 编辑: 熊水斌)

(上接第 46 页)

[36] 肖宜, 慈晓虎, 杨冰, 等. 长江中游城市群水资源绿色效率测度与影响因素分析[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(9): 8-16. (XIAO Yi, CI Xiaohu, YANG Bing, et al. Measurement and influencing factors of green efficiency of water resources in urban agglomerations in middle Yangtze River[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(9): 8-16. (in Chinese))

[37] 俞雅乖, 刘玲燕. 中国水资源效率的区域差异及影响因素分析[J]. *经济地理*, 2017, 37(7): 12-19. (YU Yaguai, LIU Lingyan. Regional differences and influence factors of water resource efficiency in China: based on super efficiency DEA-Tobit [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(7): 12-19. (in Chinese))

[38] 王语苓, 何伟. 南水北调工程受水影响区城市水资源利用效率测算与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(1): 438-450. (WANG Yuling, HE Wei. Calculation of urban water resources utilization efficiency and analysis of its influencing fators in water affected areas of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(1): 438-450. (in Chinese))

[39] 傅琴. 长江经济带新型城镇化对农业绿色全要素生产率影响研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2021.

[40] 张玉琴. 国家级大数据综合试验区试点政策对绿色全要素生产率的影响研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2023.

[41] 孙才志, 马奇飞, 李素娟. 中国水资源绿色效率 TFP 变化趋势预测[J]. *人民黄河*, 2018, 40(2): 42-48. (SUN Caizhi, MA Qifei, LI Sujuan. Prediction of water resources green efficiency TFP in China [J]. *Yellow River*, 2018, 40(2): 42-48. (in Chinese))

[42] 袁菊红, 陈拉, 胡绵好. “中四角”绿色水资源利用效率时空分异及其影响因素: 基于非期望产出 SBM-DEA 和地理探测器模型[J]. *生态经济*, 2023, 39(9): 138-147. (YUAN Juhong, CHEN La, HU Mianhao. Spatial-temporal differentiation of green water utilization efficiency and its influencing factors in “Four-City area in middle China”: based on SBM-DEA model with undesired outputs and geographical detector model[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(9): 138-147. (in Chinese))

[43] 曾晨. 沱江流域水资源绿色效率测度及影响因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.

(收稿日期: 2024-05-27 编辑: 刘晓艳)