

宋怡菲, 林新怡, 罗佳贝, 等. 黄河现行流路与启用刁口流路不同情景下调水调沙期间入海水沙扩散特征与影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 15-26.

SONG Yifei, LIN Xinyi, LUO Jiabei, et al. Dispersal of water and sediment off the Yellow River mouth during Water-Sediment Regulation Scheme in present and Diaokou Channel scenarios[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 15-26.

黄河现行流路与启用刁口流路不同情景下调水调沙期间入海水沙扩散特征与影响因素

宋怡菲¹, 林新怡¹, 罗佳贝¹, 刘舒¹, 徐金亚¹, 毕乃双^{1,2}, 王厚杰^{1,2}, 吴晓^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 青岛海洋科技中心海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

摘要:《黄河流域综合规划(2012—2030年)》中指出,规划期内仍主要利用清水沟流路行河,保持流路相对稳定,清水沟流路使用结束后,优先启用刁口备用流路。为探究黄河启用刁口流路后入海水沙扩散特征及其与现行流路的差异,本研究选取黄河水沙入海的主要时期——调水调沙期,通过FVCOM三维数值模式,模拟研究了黄河调水调沙期间经两条流路入海情况下的盐度、悬沙浓度及河口动力特征,对比发现(1)两条流路沿岸流系总体变化趋势一致,入海径流受地转偏向力影响整体向东偏转,局部流场存在差异,刁口流路入海时无明显环流;(2)两种流路下羽流和悬沙的扩散特征对调水调沙不同阶段的水沙变化存在一致性的响应;然而,受河口地形和岸线的影响,刁口流路情景下羽流和悬沙的扩散范围显著大于现行流路;(3)伴随着流路变化,三角洲不同区域的演化特征将产生快速响应:刁口流路启用后,现行河口三角洲将进入蚀退期,刁口三角洲叶瓣进入快速造陆期。此外,模型结果显示,由于刁口外较浅的水深和平缓的地貌特征,相同条件下刁口流路情景下三角洲的造陆速率在短期内可能高于现行流路。

关键词:尾间改道;调水调沙;羽流;水沙输运;黄河三角洲

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024082501

Dispersal of water and sediment off the Yellow River mouth during Water-Sediment Regulation Scheme in present and Diaokou Channel scenarios

SONG Yifei¹, LIN Xinyi¹, LUO Jiabei¹, LIU Shu¹, XU Jinya¹, BI Naishuang^{1,2}, WANG Houjie^{1,2}, WU Xiao^{1,2}

1. College of Marine Geoscience/Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technologies, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: The “Comprehensive Plan for the Yellow River Basin (2012-2030)” outlines that during the planning period, the Yellow River will primarily use the Qingshuigou Channel to stabilize its flow. Once the Qingshuigou Channel is no longer in use, the Diaokou Channel will serve as the backup. We investigated the characteristics of sediment and water dispersal into the sea after the river course switch to the Diaokou Channel, considering the current channel dynamics and focusing on the water and sediment regulation (WSR) period, a key phase of river management. Using a validated three-dimensional numerical model, we simulated and analyzed the salinity, suspended sediment concentration, and estuarine dynamics during WSR for both channels. Results reveal that: (1) although the overall trends of coastal flow systems along the two channels are consistent, local flow fields are different; (2) the dispersion of plumes and suspended sediments responds consistently to the changes in water and sediment flow during different stages of WSR. Due to estuarine topography and shoreline influences, the Diaokou Channel showed a significantly larger dispersion range; and (3) the switch of the channels will lead to rapid changes in delta evolution: the modern

资助项目:国家自然科学基金“黄河口关键过程及物质输运协同效应重大科学考察实验研究”(42149301),“水库调控影响下黄河河流-河口连续体陆源颗粒有机碳输运的多界面耦合过程及其动力约束机制”(42330407),“黄河流域生态系统变化与生态屏障效应”(42041005);山东省泰山学者项目(TS20190913,TSQN202211054);山东省高等学校“青创团队计划”团队项目(2022KJ045);东营市市校合作重点项目“黄河三角洲海岸非均衡演化及应对策略”(SXHZ-2022-02-15);中央高校基本科研业务费专项“人新世河口海岸”(202241007)

作者简介:宋怡菲(2004—),女,本科生,地球信息科学与技术专业,E-mail: 2715196534@qq.com

通讯作者:吴晓(1989—),男,副教授,主要从事河口海岸学研究,E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

收稿日期:2024-08-25; **改回日期:**2024-09-26. 文凤英编辑

estuarine delta will experience erosion and retreat, while the Diaokou delta will undergo rapid land buildup. Moreover, outcome of the modelling suggests that, due to the shallower depths and gentler slopes in the Diaokou Channel, the rate of land buildup may surpass that of the current channel in a short term under similar conditions.

Key words: channel shift; Water-Sediment Regulation Scheme (WSRS); river plume; water and sediment transport; Yellow River Delta

河流是连接陆地与海洋的关键枢纽,在全球物质循环中发挥着重要作用^[1-3]。河流携带的巨量淡水、泥沙、营养盐和重金属等在河口与外海高盐水相遇,引起各种复杂的物理和生物化学过程,对于沿海地区的地貌形态和生态环境等产生了重要影响^[4-9]。在过去几十年里,受筑坝、水土保持、农业生产、城市化和改道等人类活动的强烈扰动,全球大型流域的水文格局都发生了显著变化,影响了河口的物质循环、三角洲演化和生物群落结构^[10-13]。在全球变暖和水循环逐渐增强的气候背景下,研究气候变化和人类活动共同影响下的河口物理和生物化学过程具有重要意义^[14],可以为维持区域性生态环境稳定和经济社会可持续发展提供重要参考。

黄河作为中国第二大河,是我国重要的生态屏障和重要的经济地带,在我国经济社会发展和生态安全方面具有重要的地位。由于黄河挟带大量泥沙,进入下游平原地区后迅速沉积,主流在漫流区游荡,行洪河道不断淤积抬高,形成高出两岸的“地上河”。在洪水来临时易决溢泛滥,改走新道,因此黄河下游河道迁徙变化的剧烈程度,在世界上具有显著特色。1855年黄河改道回渤海以来,尾间改道频繁,引起沿海环境与冲淤格局发生显著变化^[15-18]。

1855年以来,黄河口共发生了11次改道^[19],每条入海流路的行河年限平均10年左右。1976年,黄河尾间河道由原刁口流路人工改道至清水沟流路,行河至今已47年。目前,黄河清水沟流路西河口以下河长为63 km,接近历史最大河长65 km,清8汊已处于“重新出汊”阶段,进入流路自然演变的末期^[14]。由于缺少来自黄河的泥沙供应,北部废弃的刁口河自1976年以来经历了严重的侵蚀,南部废弃的清水沟自1996年以来也经历了严重的侵蚀,出现陆地后退的现象^[20]。2013年3月,国务院正式批复的《黄河流域综合规划(2012-2030年)》中指出,规划期内仍主要利用清水沟流路行河,保持流路相对稳定,清水沟流路使用结束后,优先启用刁口河备用流路。一旦刁口流路被重新启用,黄河口区域的动力条件、入海冲淡水和泥沙输运扩散规律均会发生变化^[21],这会进一步影响河口物理化学环境以及整个河口生态系统的平衡^[22]。

为充分评估重新启用刁口流路对河口水文环

境与沉积动力过程的影响,本研究拟通过数值模拟的手段,分别模拟现行流路和刁口流路入海情况下河口区海水温度、盐度、悬沙浓度等因素的状况,选取黄河水沙入海的主要时期——调水调沙期间,探讨启用刁口流路作为备用河道背景下黄河口水沙输运与沉积动力特征,并将其与现行清8流路入海情况进行对比,揭示刁口流路与清水沟流路不同情景下河口区水沙扩散特征与影响因素。研究认识将为黄河备用刁口流路启用提供重要的科学支撑,也为黄河口国家公园建设提供理论指导。

1 区域概况

黄河三角洲位于渤海西缘,北临渤海湾,东靠莱州湾。地理坐标为37°11'~38°13'N、118°11'~119°15'E,地势平坦,属温带季风气候区^[23]。受季风影响,其海洋动力条件有明显的季节差异。

黄河以水少沙多、含沙量高而著称,其中90%以上的泥沙来自中游黄土高原的土壤侵蚀,使得黄河口及其所在的渤海成为了全球最浑浊的海域之一^[21]。1855年以来,黄河尾间发生多次改道,并在不同时期形成多条分流河流(图1a)。1934年黄河分流点下移形成以渔洼为顶点的现代三角洲。1976年黄河由刁口流域改道清水沟流路,由于失去泥沙和淡水供给,刁口流路附近海岸线开始蚀退,附近淡水湿地受到影响,面积萎缩。1996年黄河经人工改汊由清8汊流路入海,导致原清水沟河口废弃,而后受2007年黄河汛期影响,老清8河道再次向北移动,并最终稳定于北偏东方向^[24]。

随着黄河入海流路不断变迁,以及入海水沙的波动,黄河三角洲邻近海域水体中的温盐、泥沙等环境要素也发生了巨大的变化。1976年以前,黄河入海径流通过刁口流路注入渤海湾,因此,渤海湾是渤海中盐度较低的区域;而1976年黄河改道之后,低盐水主要聚集在莱州湾。1976—1996年,黄河淡水通过清水沟流入莱州湾。冬季冲淡水被困在莱州湾顶;夏季径流量大,冲淡水自莱州湾向东北延伸。入海泥沙在河口处不断淤积,导致河口不断向海推进^[21]。

黄河口区域的潮汐主要是大洋潮汐胁迫振

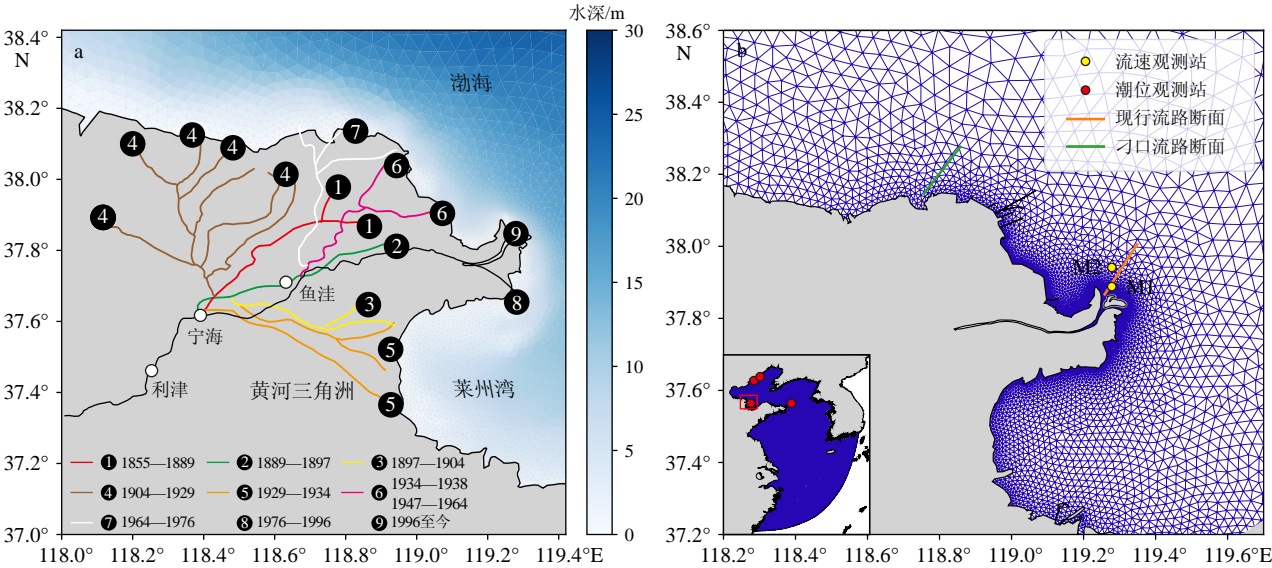


图 1 黄河三角洲区域概况图

a: 1855 年至今黄河尾间河道改道情况及邻近海域水深地形, b: 模拟区域非结构化三角网格分布及潮位和流速观测站位置(现行流路断面和刁口流路断面用于模型结果输出)。

Fig.1 Overview of the Yellow River Delta Region

a: Historical channel shifts of the lower Yellow River since 1855 and the topography of the adjacent sea area, b: The unstructured triangular grid distribution in the study area and the position of the observatories of tide level and velocity (two sections in the present river mouth and Diaokou were used for model output).

动。当潮汐从外海进入渤海海峡之后,同时受到水底地形以及地转偏向力的影响,分别向辽东湾和莱州湾传播,在渤海内部形成两个无潮点,一个在辽东湾的西南方,另一个在神仙沟附近。黄河口海域的潮汐为不规则半日潮,莱州湾的涨潮时间与渤海湾的涨潮时间相差半小时左右,潮流基本为与岸线平行的往复流。河口处涨潮时流向东南,落潮时流向东北^[25]。

黄河流域的余流情况较复杂,总体来说可分为 3 个系统:黄河口南部的顺时针余流、北部的逆时针余流以及五号桩附近的顺时针环流。风生余流是该区域最常见的类型,分布广泛^[25]。表层余流受风的影响显著,在冬季北风的作用下向南流,在夏季南风的作用下向北流。风是引起黄河口附近海域波浪的主要因素,黄河口海域的波浪具有成长快、消失快的特征,强浪向是东北风向,次强浪向为西北向,常浪为南向^[25]。

2 数据与方法

2.1 数值模式

本研究利用的水动力模块是有限体积海岸海洋模型(FVCOM, Finite-Volume Coastal Ocean Model),主要包括水质模块、泥沙输运模块、流场-

波浪-泥沙耦合模块等^[26-27]。FVCOM 是一种三维自由表面、非结构网格、有限体积海洋环流模型。FVCOM 模式中所使用的有限体积法,融合了传统有限元法的几何灵活特性,同时有着灵活的无结构网格构建以及自由的局部加密特性。该模型在水平方向采用的三角形网格可更好地拟合岸线复杂曲折的海岸区域,垂直方向采用的 σ 坐标能够较好地模拟海底地形,采用干湿判别法能较好地模拟海水涨潮和落潮期间滩涂被淹没或露出的情况。

2.2 模型配置

本研究中, FVCOM 模型的开边界位于开阔外海(图 1b), 网格分辨率由开边界向黄河口逐渐提高, 网格大小由 20~25 km 逐步过渡至河口区的 100~200 m(图 1b)。模型网络中包含 32488 个三角网格、17288 个节点, 在垂向上采用 σ 坐标, 平均划分为 20 层。模型采用内外模态分裂求解方案, 外模时间步长为 3 s, 内模时间步长为 5 s, 模型运行时间为 2020 年 1 月 1 日至 12 月 31 日。水动力边界强迫设置方面, 潮位边界来自全球潮汐模型预测的 8 个分潮: K1、O1、P1、Q1、M2、S2、N2 和 K2。在研究区域内, 初始温度统一设置为 1.5℃, 初始盐度统一设置为 30 PSU。河流径流量来自现场观测数据, 以逐天方式输入。模型网格分辨率采用固定间隔和渐变间隔, 开边界采用固定间隔, 网格边长

为 5 km, 除开边界外其余岸线采用渐变间隔, 由大网格向小网格过渡, 网格分辨率为 0.1~5 km。

SWAN 模型利用了与 FVCOM 水动力模型相同的三角网格和风场数据, 模型中整个频谱平均划分为 36 个方向频带, 频域均分为 25 个单元, 频率范围为 0.025~1 Hz, 运行时间步长为 1 h, 模型考虑了底摩擦、白帽耗散、水深诱导的波浪破碎以及多波相互作用等物理过程。SWAN 模型能很好地模拟地形和流场变化引起的波浪破碎、折射、变浅、反射、透射和波浪增水等现象, 并能给出计算范围内测点的有义波高、平均周期、波长、波陡、波向角等重要波浪参数, 可为海洋工程提供参考意见。

FVCOM 模型泥沙模块中设置了 3 种不同类型的泥沙组分, 包括非黏性组分砂以及黏性组分砂、黏土, 泥沙相关物理参数的设置参考已发表文献 [28], 模型采用混合底床性质, 设置了两层底床, 每层厚度为 10 m, 初始 SSC 为 0。

泥沙运动数值模拟以水动力模型为基础, 同时考虑潮流、波浪的变化对冲淤的影响, 采用底拖曳力表示的 Meyer-Peter-Muller 公式来计算推移质输沙率, 其中计算底拖曳系数和底部剪切应力的公式如下, 模型中相关物理参数设置参考已发表文献 [29]。

$$\bar{\tau}_b/\rho_0 = c_f \bar{u}b|\bar{u}b|\bar{\tau}_b = \rho_0 c_f \bar{u}b|\bar{u}b|$$

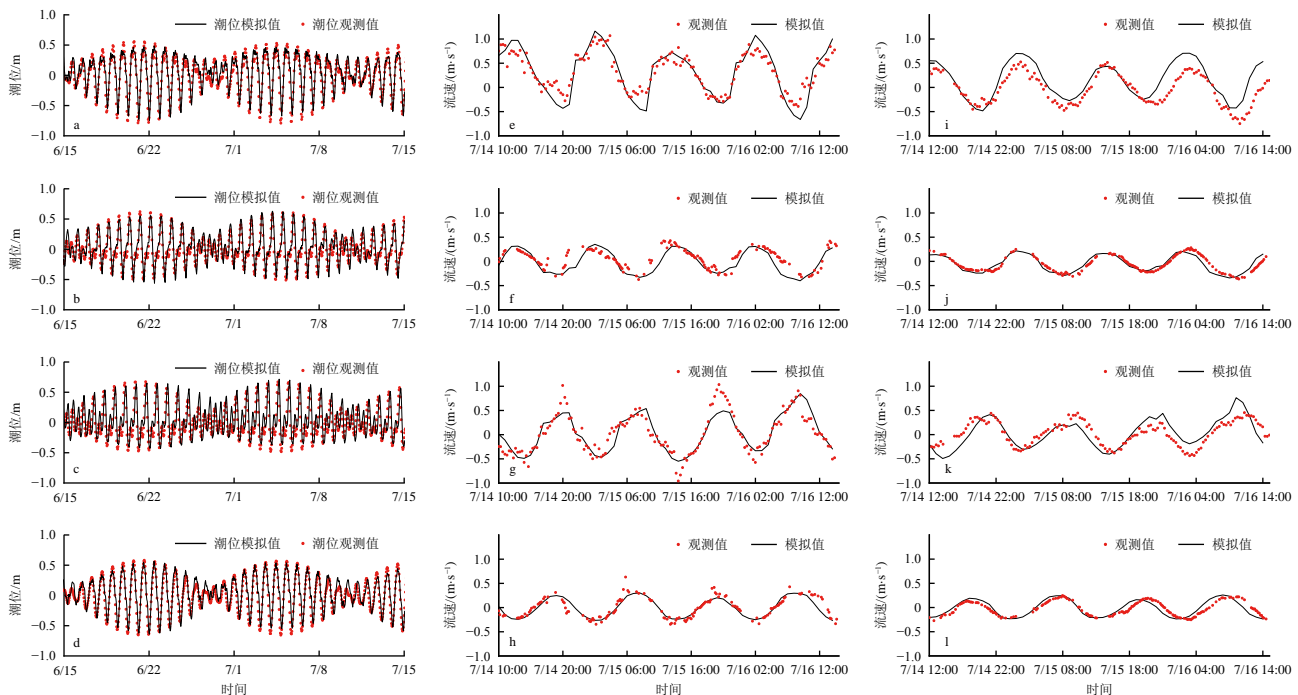


图2 模型验证图

a-d: 4个站位的潮位验证, e-l: M1、M2 站流速验证。

Fig.2 The model validations

a-d: Tide level validation at four stations, e-l: current velocity validation at M1 and M2 stations.

2.3 模型验证

通过在CHINWANGTAO_IHO、OFF_SHANTUNG_PROMIHO_1、OFFING_IN_PWOK_HAIHO_1以及TEMPLE_HEAD_LIAUIHO四个站位的2020年6月15日到7月15日的潮位实测值与该模型计算出的模拟值进行成图对比(图2), 结果显示模拟潮位的变化趋势与实测潮位基本一致, 相位的模拟值和实测数据无明显偏差。潮位实测数据来源于 Delft Dashboard, 潮流数据来自 2020 年黄河口实测数据, 流速实测采用 ADCP 搭载三脚架进行观测。此外, 我们还给出了 2020 年 7 月 14—16 日的两个断面表、底层东西方向和南北方向的流速对比图, 模拟值与实测值有较好的一致性, 结果显示 FVCOM 模型可以精准地模拟黄河口流路的水动力过程。

3 结果

3.1 现行流路与刁口流路不同情景下黄河口羽流和流场分布特征

自 2002 年以来, 黄河流域调水调沙成为控制黄河入海水沙最关键的工程措施之一。调水调沙人

为控制了黄河入海径流量、输沙量等,从而进一步影响了河口悬浮泥沙的沉降速率、悬浮泥沙浓度等。调水期,径流量达峰值;调沙期,径流量降低但仍高于非调水调沙期,含沙量达峰值;非调水调沙期,径流量、含沙量均维持较低水平。径流量也对切变锋有所影响,如锋面离岸距离、锋面强度等。同时由于不同流路地形不同,径流量对其影响程度也不同。本研究选取了调水调沙前(6月6日)、调水期(7月3日)、调沙期(7月13日)现行流路和启用刁口流路入海情景下24 h表、底层的潮均盐度值(图3)以及余流场分布图(图4),对其水动力特征进行了分析。

现行流路情景下,从空间分布来看,黄河入海羽流主要沿北东方向注入渤海,现行河口东侧及南侧区域存在广泛的低盐中心(图3)。从跨等深线的断面分布上来看,河口发育明显的垂向环流结构,表层低盐度冲淡水向海扩散,底层高盐水以补偿流

的形式向岸输运(图4)。然而,径流量的变化显著影响了羽流扩散和河口水动力环境(图3)。调水调沙前,黄河入海径流量小,羽流扩散范围小,河口附近流场受径流作用影响弱,模拟区域内整体流速偏小,表层流速略大于底层(图3 a、b)。调水期间,黄河入海径流量显著增加,河口附近表层流速显著升高,表层羽流扩散范围显著扩大并在离岸区域发生顺时针方向的偏转,向莱州湾方向流动。与表层相比,河口附近底层流速显著降低,羽流扩散范围明显减小,且主要向莱州湾方向扩散(图3d)。调沙期间,河流流量相较于调水期有所减少,河口表层流速降低,表层羽流扩散范围相对减小;相比之下,底层流速和羽流扩散范围均显著低于表层(图3 f)。

与现行流路相比,刁口流路情景下汇入莱州湾方向的顺时针环流消失,羽流沿正北方向直接注入渤海湾,且在入海后向两侧发生明显的沿岸扩散(图3)。从跨等深线的断面分布特征来看(图4),

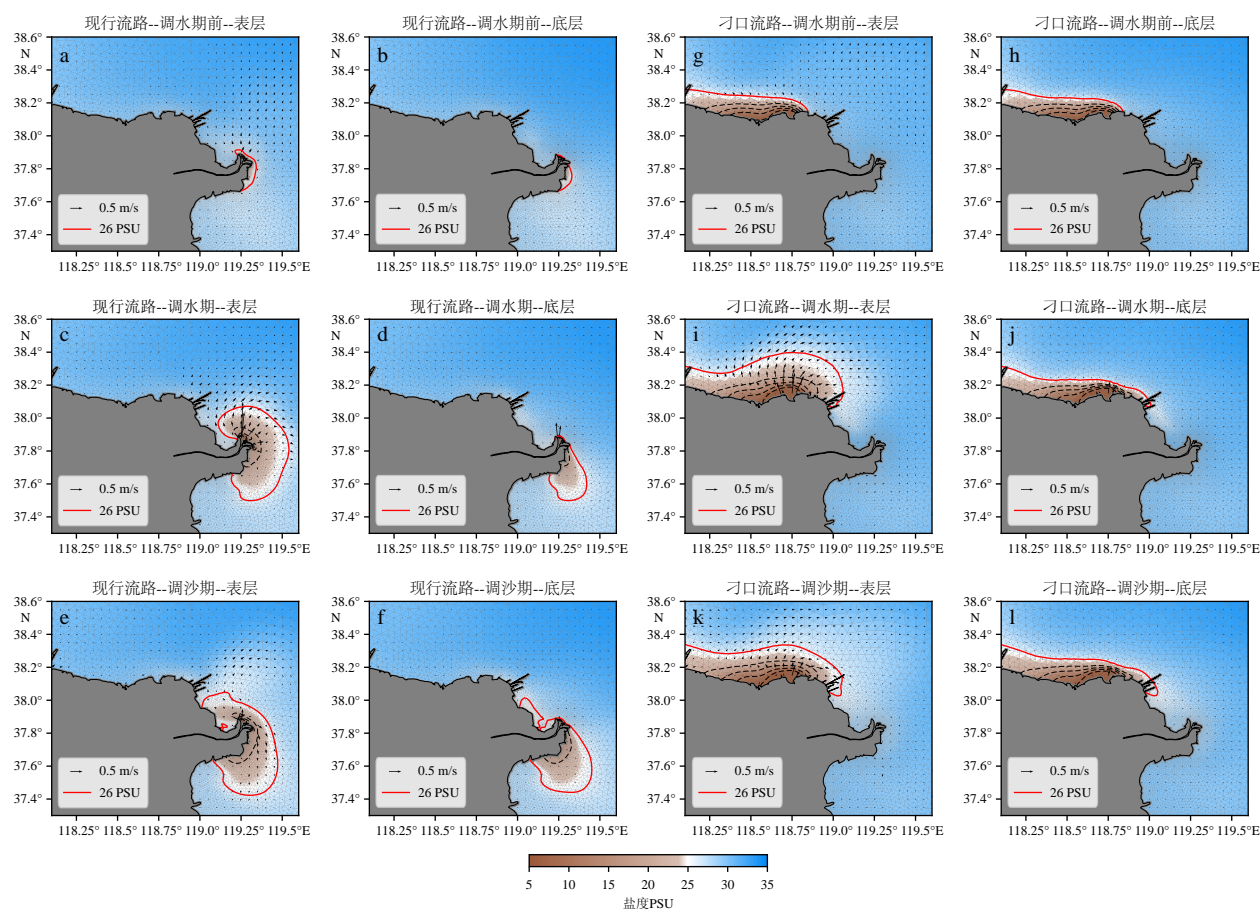


图3 不同情境下黄河口盐度分布图

a-f: 现行流路情景下调水调沙不同阶段的流场和盐度分布特征, g-l: 刁口流路情景下余流场和盐度分布特征。

Fig.3 Salinity distribution of the Yellow River mouth under different scenarios

a-f: Flow field and salinity distribution at different stages of the Water-Sediment Regulation Scheme (WSRS) under the present course scenario; g-l: Flow field and salinity distribution at different stages of the Water-Sediment Regulation Scheme (WSRS) under Diaokou course scenario.

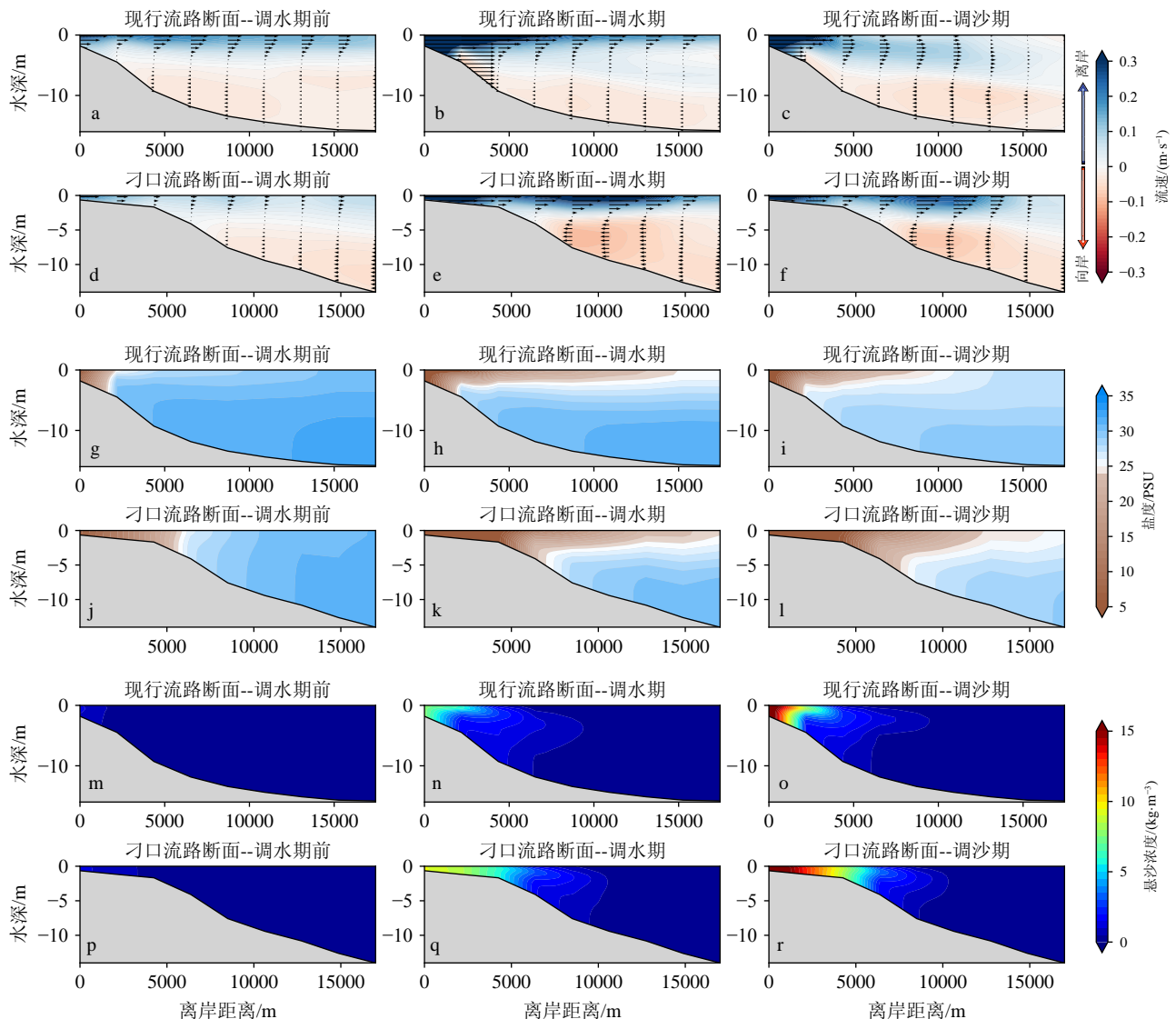


图4 沿断面流量、盐度和悬沙分布图

a-f: 现行流路断面和刁口流路断面流场, g-l: 盐度, m-r: 悬沙。断面位置见图1。

Fig.4 Flow field, salinity, and suspended sediment distribution along the cross-section

a-f: Distribution characteristics of the flow field, g-l: salinity, m-r: suspended sediment along the present river mouth section and Diaokou section (see Fig. 1 for section locations).

两种流路情景下由表层至底层, 流速均逐渐减小, 自河口向外, 表、底层流速逐渐衰减。口门附近水体呈现低盐、低悬沙的特征, 盐度值为 $0 \sim 10$ PSU, 悬沙浓度为 $0 \sim 5 \text{ kg/m}^3$ 。然而, 若以盐度 26 PSU 作为界定羽流扩散范围的基准, 可见在调水调沙不同阶段刁口流路下的羽流扩散范围和面积均显著大于现行流路(图 3、4)。调水调沙之前, 在相同低流量的条件时, 刁口流路情景下口门流速显著低于现行流路, 而羽流扩散范围显著高于现行流路(图 3 a、g)。相比之下, 离岸区域流速相差不大(图 4)。调水期间, 较高的径流量使得两种流路情景下河口流速和羽流扩散范围均显著增加(图 3), 然而与现

行流路相比, 刁口流路情景下羽流的扩散范围更大, 且沿岸向两侧发生明显延伸(图 3 i、j)。调沙期间, 河流径流量下降, 河口流速显著降低(图 4 a-f), 两种流路下羽流的扩散范围均有缩小, 但是现行流路情景下表底层冲淡水均呈现向莱州湾方向的输运, 而刁口流路情景下则呈现明显的向渤海湾方向的沿岸输运, 两种情境下底层冲淡水扩散范围均大于调水期(图 3)。

3.2 现行流路与刁口流路不同情景下黄河口悬沙扩散特征

现行流路情景下, 入海泥沙被限制在距岸约

2 km 处, 悬沙浓度高值区分布于河口及其南北两侧, 主要向莱州湾方向输运。伴随着调水调沙期间入海水沙的变化, 河口泥沙浓度和悬沙扩散范围也呈现快速响应。具体而言, 在调水调沙实施前, 研究区域内的悬浮泥沙浓度整体维持在较低水平, 仅在河口附近的有限区域内观察到较高的悬沙浓度 (图 5 a、b)。进入调水期后, 黄河携带大量泥沙入海, 在口门处迅速形成高浓度的悬沙中心, 浓度峰值可达 10 kg/m^3 , 随后, 这些高浓度悬沙在离岸扩散过程中迅速发生沉降 (图 4)。调沙期, 黄河入海泥沙浓度达到最大值, 河口附近悬沙浓度相较于调水期进一步上升, 达到 $10 \sim 15 \text{ kg/m}^3$, 表层悬沙扩散范围较调水期有所扩展, 底层悬沙扩散范围与调水期相差不大 (图 5 e、f)。

对于刁口流路情景, 其在调水调沙各阶段口门处悬沙浓度及扩散范围的变化规律与现行流路相似。然而, 值得注意的是, 与现行流路相比, 刁口流路下泥沙的扩散范围在调水调沙的各个阶段均展现出显著的扩大趋势 (图 4 m-r), 入海泥沙主要被限制在离岸约 7 km 范围内, 且悬沙高值区集中分布

在刁口口门的東西兩側。

4 讨论

4.1 启用刁口流路后水沙扩散的变化特征及驱动因素

作为大陆和海洋之间的主要纽带, 全球河流在向海洋输送颗粒和溶解物质方面发挥着主导作用^[8]。河流流量与近岸潮汐的交互作用在三角洲地貌演化中起关键作用, 是控制河口水动力和沉积物分布的重要因素^[15, 30-31]。因此, 流路的变化势必会对河口的水动力环境和泥沙输运过程造成显著影响。

在黄河口, 潮汐切变锋是控制入海泥沙输运的关键动力要素, 显著影响着河口生态环境和三角洲演化^[32-33]。对比可见, 流路的变化对河口切变锋的位置和强度均产生了显著影响 (图 6)。在刁口流路行水情景下, 刁口口门处内落外涨型切变锋的位置在调水期发生了明显的向海迁移, 两种类型切变锋的强度也显著升高 (图 6 i、j); 在调沙期间, 刁口口门处切变锋的位置与现行流路相比无明显变化, 但

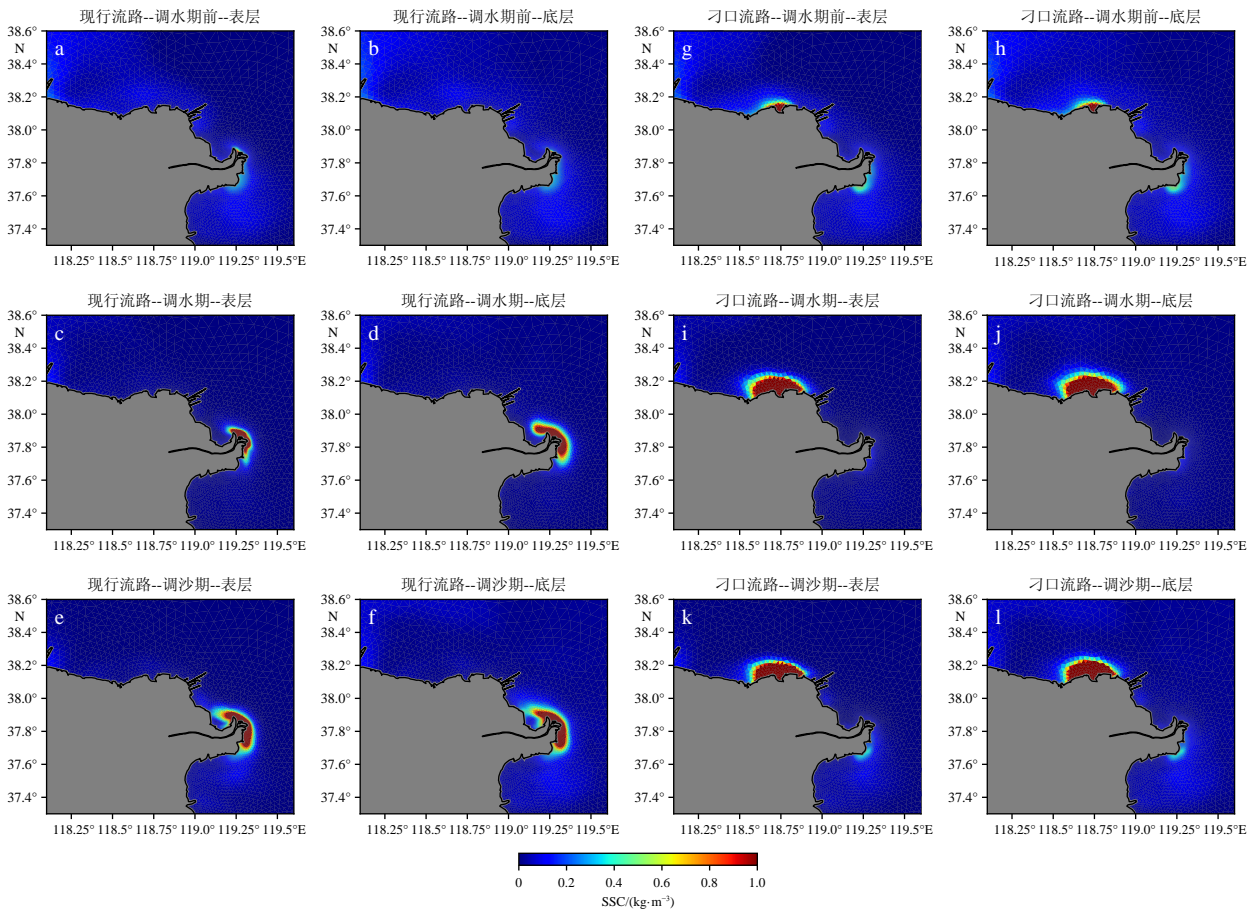


图 5 现行流路和刁口流路情景下调水调沙不同阶段的悬沙扩散特征
Fig.5 Suspended sediment diffusion at different stages of WSRS in present and Diaokou scenarios

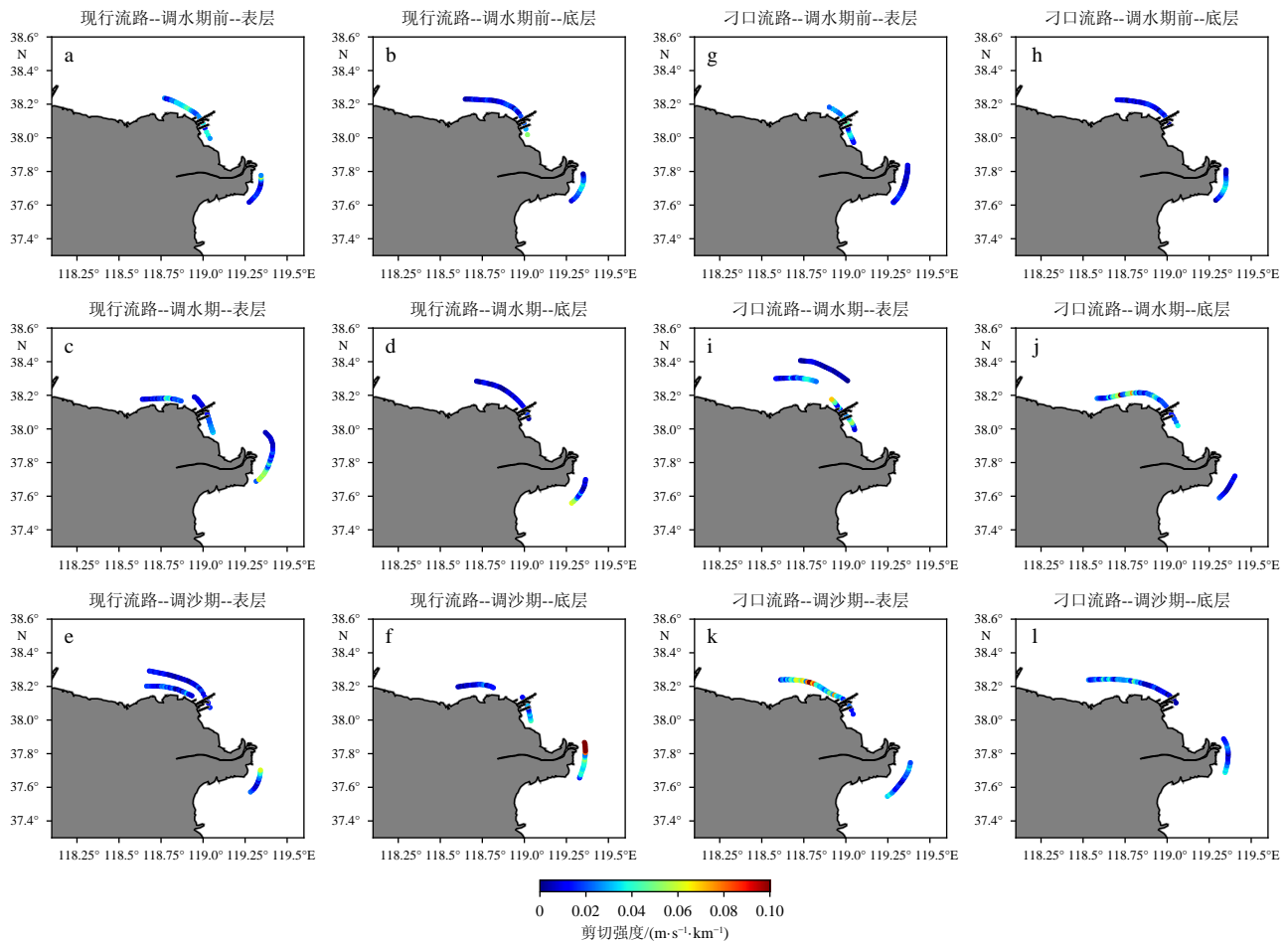


图6 现行流路和刁口流路情下调水调沙不同阶段的内落外涨型 (IEOF) 和内涨外落型 (IFOE) 切变锋的分布和剪切强度
Fig.6 Distribution and shear strength of IEOF and IFOE shear fronts at different stages of WSRS in present and Diaokou scenarios

切变锋的强度明显升高(图 6 k)。

切变锋两侧显著的速度梯度是阻挡河流泥沙及冲淡水向海扩散的主要动力机制,其受到河口岸线形态、水深地形等的综合影响^[33]。为进一步评估流路变化所带来的影响,我们选取了现行流路和刁口流路情景下河口断面中泥沙浓度衰减最快的两个点计算速度梯度变化,并与沿断面的悬沙和羽流变化进行对比(图 7)。结果表明,流速梯度的增强直接限制了悬沙浓度和冲淡水扩散的范围,反之,流速梯度的减小则促进了悬沙和冲淡水的更远距离传播(图 7)。值得注意的是,两种流路情景下河口地形与岸线的显著差异,导致了切变锋在位置、形态及强度上的显著不同,进而显著改变了羽流和悬沙的扩散特征(图 6)。以 7 月 3 日为例:现行流路情景下,悬沙浓度在距离河口 2 km 内迅速降低(图 7a),随后衰减速率逐渐减缓,在距离河口 11 km 处悬沙浓度基本接近 0。刁口流路情景下,悬沙浓度距离河口 5 km 处开始快速减少,13 km 之外开始逐渐衰减,13~17 km 处悬沙浓度基本接

近于 0(图 7b)。进一步分析 7 月 3—13 日的长时间序列数据发现,现行流路下泥沙可扩散至 2~4 km 处,大部分在 2 km 以内,冲淡水(26 PSU)可扩散至 10~12 km 附近(图 7)。相比之下,刁口流路下泥沙可扩散至 4~6 km 处,大部分在 6 km 以内,冲淡水(26 PSU)可扩散至 15 km 附近。显然,与现行流路相比,刁口流路情景下冲淡水和泥沙呈现更远的离岸扩散范围。

与现行流路相比,刁口流路河口地形和岸线的差异可能是导致两种情景下入海泥沙输运规律存在显著区别的重要原因^[33-34],河口处的水下地形可以通过影响底部剪切应力影响入海泥沙的扩散,底部剪切应力越强,泥沙更易再悬浮^[33]。具体而言,刁口流路河口附近水深较浅(图 4),这一特征导致了近河口处存在更大的底拖曳系数和更强的底部剪切应力(图 8),这可能是刁口流路情景相比于现行流路近岸悬沙浓度较高且范围较大的重要原因(图 8)。

此外,岸线和水深变化也会通过影响底拖拽系

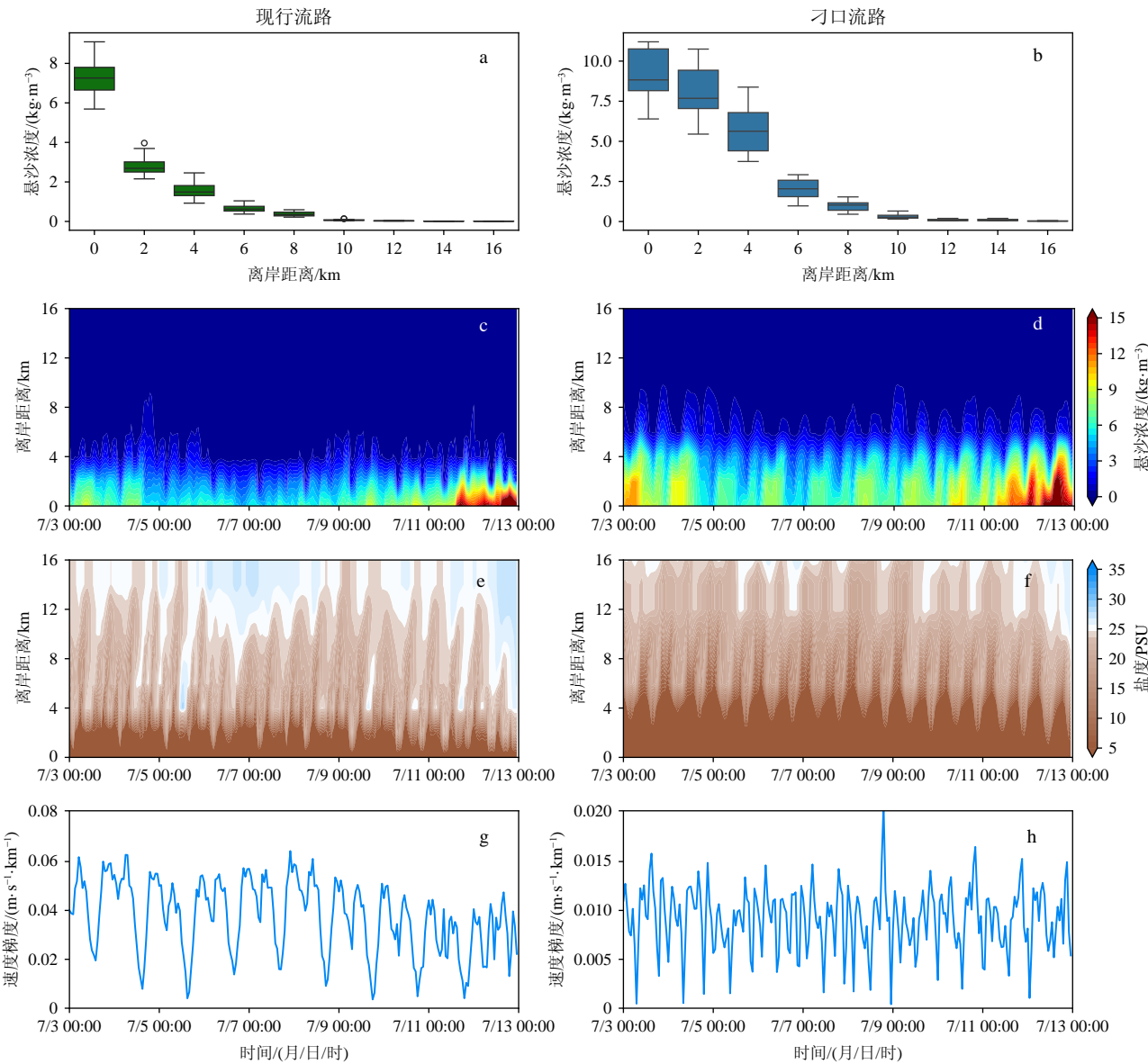


图 7 河口断面悬沙、盐度和速度梯度时序变化图

a-b: 现行流路和刁口流路情景下沿断面逐时的悬沙浓度变化, c-f: 表层悬沙浓度和盐度时间序列, g-h: 断面上悬沙浓度下降最快的两点之间的速度梯度变化。

Fig.7 Temporal variation of suspended sediment, salinity, and current gradient along the cross-section off the river mouth
a-b: Hourly changes of suspended sediment concentration along sections , c-f: time series of suspended sediment concentration and salinity, g-h: time series of the gradient of current between the two points on sections where the suspended sediment concentration decreases the fastest (in present and Diaokou scenarios).

数进而影响流场变化。在刁口流路情景下,近河口区域较大的拖拽系数伴随了相对较小的潮流流速(图 8 a、c)。相比之下,现行流路河口附近水深较大,且岸线更为复杂,其潮流流速显著快于刁口流路(图 8 a、c)。这种流速差异加剧了羽流与潮流之间的相互作用,形成了更为复杂的流场结构。因此,现行流路近岸区域的流速梯度显著增强(图 8d),使得随现行流路冲淡水向海传播的泥沙在河口区域遭到更强的潮流阻碍,导致泥沙更容易被滞留在河口附近(图 7、8)。综上所述,刁口流路与现行流

路之间河口地形与岸线的显著差异,通过影响底部切应力、泥沙再悬浮、流场结构及潮流与羽流的相互作用,共同塑造了两种流路下显著不同的入海泥沙输运规律。

4.2 启用刁口流路对黄河三角洲演化的影响

随着流域水土保持和调水调沙工程的实施,黄河三角洲的地貌演化特征总体呈稳定态势,主要表现为现行河口淤进、废弃河口蚀退^[15-16],而伴随着刁口流路的重新启用,黄河三角洲的演化规律势必发

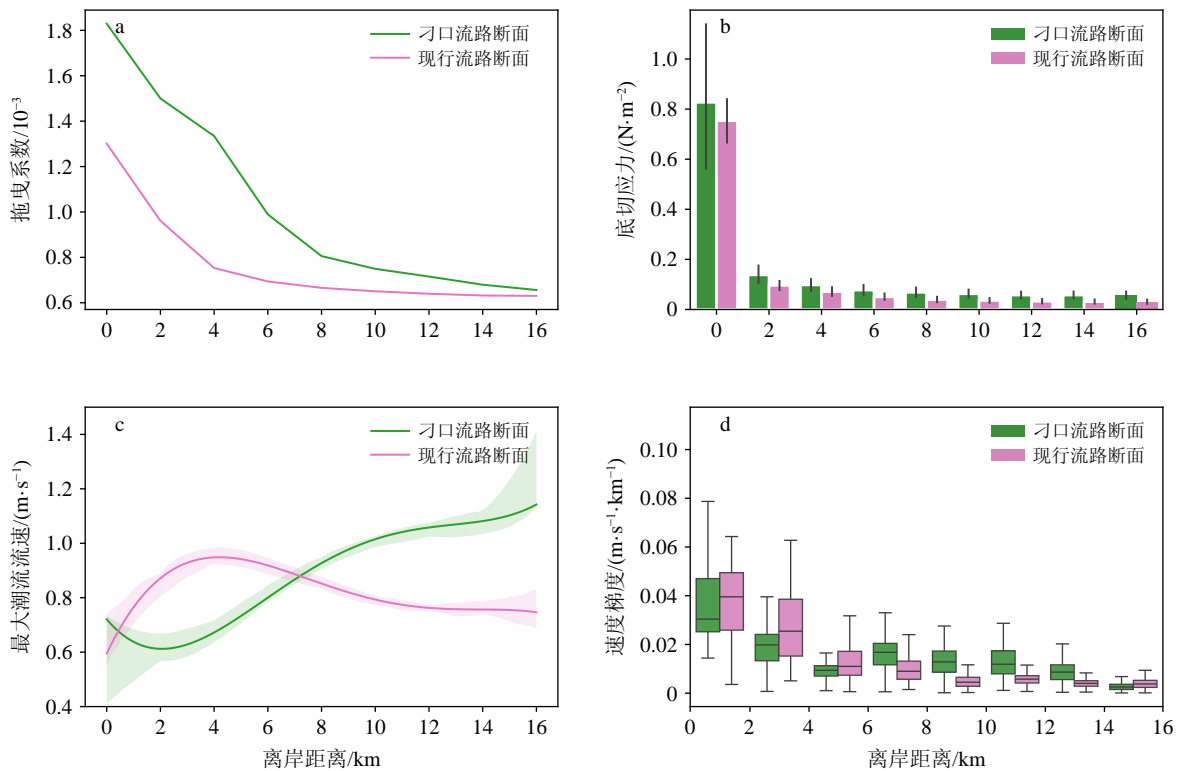


图8 现行流路和刁口流路情景下沿河口断面的底拖曳系数 (a)、底切应力 (b)、最大潮流流速 (c) 和速度梯度变化 (d)

Fig.8 Changes of bottom drag coefficient (a), bottom shear stress (b), maximum tidal flow velocity (c), and gradient of current (d) along sections in present and Diaokou scenarios

生快速调整和响应。黄河调水调沙工程例行于每年6月中旬到7月初实施,整个调控流程历时约20天,向海洋输送全年约30%的径流量和50%的泥沙量,这一工程极大地改变了水文过程的自然节律,对河口区域的沉积动力过程及三角洲演化格局产生了重要影响^[6,35-36]。鉴于此,本研究聚焦于2020年调水调沙期间,旨在评估刁口流路启用情景下黄河三角洲的差异性演化模式。

通过对比现行流路与刁口流路在不同调水调沙情景下的河口区域底床侵蚀淤积情况,发现整个调水调沙过程结束后,河口区域均沉积了大量泥沙,沉积中心位于4~5 m等深线位置,大部分泥沙被限制在12 m等深线以内(图9)。通过与调水调沙不同阶段的切变锋位置进行对比可知,切变锋对泥沙扩散起到了明显的阻隔作用(图9),这与前人基于观测和模拟手段所得出的结论相一致^[32,37]。然而,相较于现行流路,刁口流路的启用显著改变了黄河三角洲现阶段的演化趋势。在刁口流路情景下,黄河三角洲的刁口叶瓣呈现出显著的快速淤积趋势,而相比之下,现行河口三角洲叶瓣则发生了轻微的侵蚀现象(图9b),这种侵蚀状态在冬季强水动力条件下可能会进一步加剧^[37],从而促进现行河

口三角洲叶瓣的蚀退。此外,在刁口流路启用情景下,悬沙的扩散模式和沉积范围相较于现行流路均展现出显著差异,水下三角洲在调水调沙期间的造陆面积也表现出明显的不同。以底床淤积厚度为1 m的等厚度线为例,在相同泥沙供应条件下,刁口流路下的包络面积达到510 km²,显著大于现行流路下的388 km²(图9),考虑到刁口流路口门附近较浅的水深和平缓的地貌条件,可以合理推测在短期内刁口流路情景下的造陆面积可能高于现行流路情景。

5 结论

本研究利用验证良好的高分辨率三维水动力数值模式(FVCOM),模拟研究了黄河调水调沙期间经现行流路和刁口流路入海的不同情景下的河口口水沙扩散特征:

(1)黄河调水调沙期间经现行流路和刁口流路沿岸流系的总体变化趋势一致,局部流场结构存在差异。现行流路情景下,表层入海径流先向东北向前进,呈顺时针方向偏向东南,最终汇入莱州湾。刁口流路情景下,表层入海径流整体向东北方向偏转前进,无明显环流。

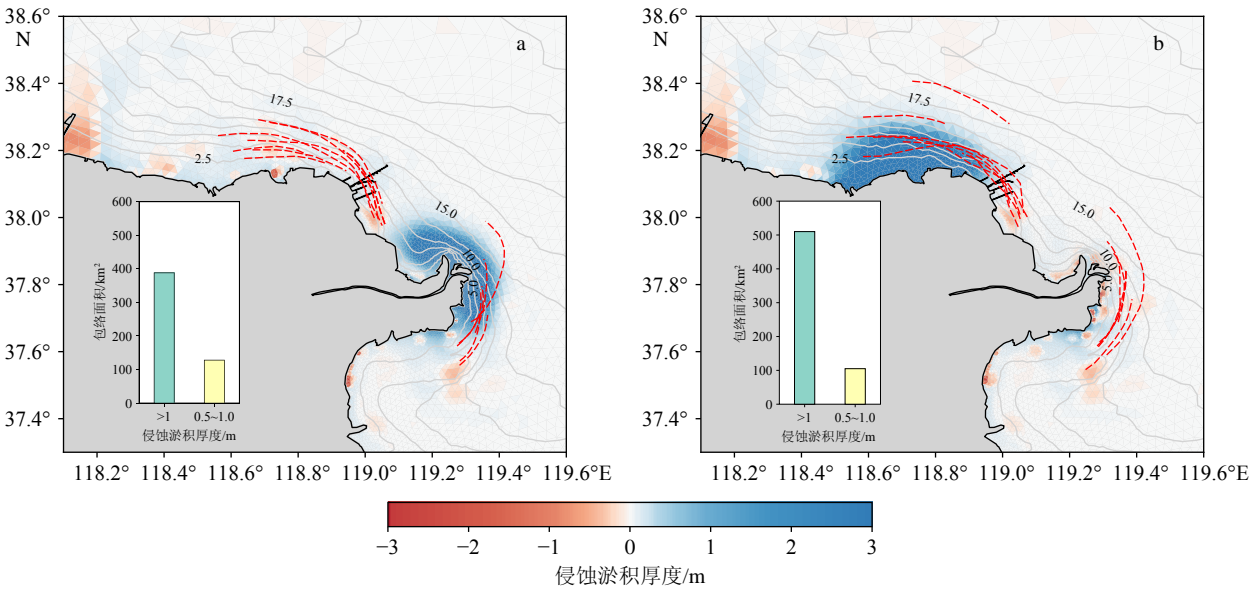


图 9 现行流路 (a) 和刁口流路 (b) 情景下调水调沙前至调水调沙结束为期 40 天的三角洲侵蚀淤积情况及切变锋位置 (红色虚线)

Fig.9 Erosion and deposition of the Yellow River Delta for 40 days from before to the end of the Water-Sediment Regulation Scheme in present (a) and Diaokou scenarios (b), as well as locations of tidal shear fronts (red dashed line).

(2) 现行流路和刁口流路对调水调沙的响应特征具有一致性, 以盐度 26 PSU 为羽流的界限, 调水调沙前, 羽流的扩散范围主要局限于近岸区域及口门附近, 入海悬沙浓度较低且在口门附近快速堆积。调水期间, 由于入海流量的显著增加, 羽流和悬沙的扩散范围明显扩大, 口门处悬沙浓度达 10 kg/m^3 。调沙期, 口门处悬沙浓度进一步升高, 羽流和悬沙扩散范围变化不大。然而, 受不同流路情景下河口水深和岸线影响, 现行流路近河口处受到更强的潮流作用, 存在更大的流速梯度。因此, 在相同条件时, 刁口流路情景下羽流和悬沙的扩散范围显著高于现行流路。

(3) 调水调沙期间河流向海输运了大量泥沙, 且它们大多在近口门处快速堆积, 对黄河三角洲的演化发挥了重要作用。在不同流路情景下, 模型结果表明黄河三角洲的演化特征呈现显著差异: 相比于现行流路, 启用刁口流路将导致现行河口三角洲叶瓣进入快速蚀退期, 而刁口叶瓣将进入快速造陆期。此外, 受到刁口口门附近较浅的水深和较平缓的水下地形影响, 在相同水沙输运条件下, 启用刁口流路后, 黄河三角洲的造陆效率在短期内可能高于现行流路情景。

参考文献 (References)

[1] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to

the oceans[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21.
[2] Meade R H. River-sediment inputs to major deltas[M]//Milliman J D, Haq B U. Sea-Level Rise and Coastal Subsidence: Causes, Consequences, and Strategies. Dordrecht: Springer, 1996: 63-85.
[3] Milliman J D, Farnsworth K L. Runoff, erosion, and delivery to the coastal ocean[M]//Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 13-69.
[4] Damme S V, Struyf E, Maris T, et al. Spatial and temporal patterns of water quality along the estuarine salinity gradient of the Scheldt estuary (Belgium and The Netherlands): results of an integrated monitoring approach[J]. Hydrobiologia, 2005, 540(1-3): 29-45.
[5] Feyrer F, Cloern J E, Brown L R, et al. Estuarine fish communities respond to climate variability over both river and ocean basins[J]. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3608-3619.
[6] Wang H J, Wu X, Bi N H, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review[J]. Global and Planetary Change, 2017, 157: 93-113.
[7] Raimonet M, Cloern J E. Estuary-ocean connectivity: Fast physics, slow biology[J]. Global Change Biology, 2017, 23(6): 2345-2357.
[8] Wu X, Bi N S, Syvitski J, et al. Can reservoir regulation along the Yellow River be a sustainable way to save a sinking delta?[J]. Earth's Future, 2020, 8(11): e2020EF001587.
[9] Wu X, Wang H J, Fan Y Y, et al. Boosting spring runoff into the sea by reservoir regulation and its potential for estuarine fishery recovery[J]. Science China Earth Sciences, 2024, 67(5): 1519-1603.
[10] Milliman J D. Blessed dams or damned dams?[J]. Nature, 1997, 386(6623): 325-327.
[11] Syvitski J, Restrepo-Angel J D, Saito Y, et al. Earth's sediment cycle

- during the Anthropocene[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(3): 1-18.
- [12] Liu S M, Liang W, Guo X Y, et al. Biogeochemistry-ecosystem-social interactions on the Chinese continental margins[J]. *Oceanologia*, 2023, 65(1): 278-296.
- [13] Qiao S W, Yang Y Y, Xu B C, et al. How the water-sediment regulation scheme in the yellow river affected the estuary ecosystem in the last 10 years?[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 927: 172002.
- [14] 王开荣, 李岩, 于守兵, 等. 黄河刁口河备用流路现状及保护工程措施探讨 [J]. *中国水利*, 2017(1): 15-19. [WANG Kairong, LI Yan, YU Shoubing, et al. Functions of backup flow route of Diaokouhe River in Yellow River Estuary and its protection works[J]. *China Water Resources*, 2017(1): 15-19.]
- [15] Wu X, Bi N S, Xu J P, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976-2013): Dominant roles of riverine discharge and sediment grain size[J]. *Geomorphology*, 2017, 292: 115-127.
- [16] Bi N S, Wang H J, Wu X, et al. Phase change in evolution of the modern Huanghe (Yellow River) Delta: Process, pattern, and mechanisms[J]. *Marine Geology*, 2021, 437: 106516.
- [17] Liu L, Wang H J, Yang Z S, et al. Coarsening of sediments from the Huanghe (Yellow River) delta-coast and its environmental implications[J]. *Geomorphology*, 2022, 401: 108105.
- [18] Cheng X Y, Zhu J R, Chen S L. Extensions of the river plume under various Yellow River courses into the Bohai Sea at different times[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 249: 107092.
- [19] 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变: I. 近代历史变迁 [J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(2): 136-141. [PANG Jiazhen, SI Shuheng. The estuary changes of Huanghe River: I. Changes in modern time[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1979, 10(2): 136-141.]
- [20] Bi N S, Wang H J, Yang Z S. Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 70-78.
- [21] 程心悦. 黄河口不同流路入海水沙输运扩散研究 [D]. 华东师范大学博士学位论文, 2022. [CHENG Xinyue. Transport of river plume and sediments off the Yellow River mouth under changing estuarine outlets[D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2022.]
- [22] Alber M. A conceptual model of estuarine freshwater inflow management[J]. *Estuaries*, 2002, 25(6): 1246-1261.
- [23] 王学芹. 黄河三角洲现代生物遗迹的组成与分布特征 [D]. 河南理工大学硕士学位论文, 2019. [WANG Xueqin. The composition and distribution characteristics of the biogenic sedimentary structures in Yellow River delta[D]. Master Dissertation of Henan Polytechnic University, 2019.]
- [24] 王世雄, 范勇勇, 刘猛, 等. 黄河清水沟废弃河口冲淤时空变化特征 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(5): 1-11. [WANG Shixiong, FAN Yongyong, LIU Meng, et al. Temporal and spatial variations of erosion and accumulation off the Qingshuigou mouth of the Yellow River[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(5): 1-11.]
- [25] 卢昱岑, 沈永明, 张明. 地形演变对黄河口切变锋位置及盐度分布的影响 [J]. *水动力学研究与进展*, 2012, 27(3): 348-358. [LU Yucen, SHEN Yongming, ZHANG Ming. Influence of topography evolution on position of tidal shear front and distribution of salinity around Yellow River estuary[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(3): 348-358.]
- [26] 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.
- [27] Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. *Oceanography*, 2006, 19(1): 78-89.
- [28] Ji H Y, Pan S Q, Chen S L. Impact of river discharge on hydrodynamics and sedimentary processes at Yellow River Delta[J]. *Marine Geology*, 2020, 425: 106210.
- [29] Zhu Q G, Xing F, Wang Y P, et al. Hidden delta degradation due to fluvial sediment decline and intensified marine storms[J]. *Science Advances*, 2024, 10(18): eadk1698.
- [30] Wang H J, Yang Z S, Li Y H, et al. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(6): 854-871.
- [31] Wang N, Li K, Song D H, et al. Impact of tidal shear fronts on terrigenous sediment transport in the Yellow River Mouth: Observations and a synthesis[J]. *Marine Geology*, 2024, 469: 107222.
- [32] Wang N, Li G X, Qiao L L, et al. Long-term evolution in the location, propagation, and magnitude of the tidal shear front off the Yellow River Mouth[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 137: 1-12.
- [33] Wu X, Wang H J, Bi N S, et al. Impact of artificial floods on the quantity and grain size of River - Borne sediment: A case study of a dam regulation scheme in the Yellow River catchment[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(5): e2021WR029581.
- [34] Wu X, Wang H J, Saito Y, et al. Boosting riverine sediment by artificial flood in the Yellow River and the implication for delta restoration[J]. *Marine Geology*, 2022, 448: 106816.
- [35] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 239-247.
- [36] Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [37] 张航飞, 曾维特, 吴多誉, 等. 海口湾人工填海前后冲淤演变数值模拟 [J]. *海岸工程*, 2019, 38(2): 105-114. [ZHANG Hangfei, ZENG Weite, WU Duoyu, et al. Numerical simulation of scouring and silting evolution in the Haikou Bay before and after artificial reclamations[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 38(2): 105-114.]