

Doi: 10.20062/j.cnki.CN 37-1453/N.2024.03.002

基于 MIKE21 的黄河三角洲泥沙冲淤数值模拟预测

石洪源¹ 李龙盛^{1b} 孙纪伟^{1b} 赵升年^{1b} 李岩^{1b} 张丽丽^{1b} 李庆杰²

(1.鲁东大学 a.海岸研究所; b.水利工程学院, 山东 烟台 264039; 2.自然资源部烟台海洋中心, 山东 烟台 264006)

摘要: 在人类活动影响与全球气候变化等因素持续影响下,黄河三角洲海岸始终处于动态调整状态。探究三角洲海岸线调整规律以及未来发展趋势,对三角洲地区经济发展和生态环境保护具有重要工程意义。本文基于 MIKE21 数学模型,建立 2015 年和 2023 年两个年份岸线条件下的泥沙冲淤模型,对比验证了刁口附近海域 2015—2023 年冲淤变化,验证了黄河泥沙模型设置的准确性;并在此基础上,设置了 3 组径流和泥沙工况,预测了现行河口附近海域 2023—2030 年的冲淤变化。结果显示:在 2015—2023 年间黄河 2016 年最小径流量下的输沙量工况下,现行河口处有少量冲刷,孤东近岸海域基本冲淤平衡,废黄河口处少量冲刷;在 2015—2023 多年平均径流量和输沙量工况下,孤东近岸海域东岸向有 3 m 左右淤积,现行河口和废弃河口处持续冲刷,最严重处达 3 m 左右;在黄河多年平均径流和输沙量的 85% 工况下,现行河口和废弃河口处持续冲刷,最严重处达 3 m 左右,孤东近岸海域东岸淤积可以达到 1.5 m。研究结果可以更好地理解黄河三角洲海岸线的变化,为未来黄河口海岸带开发治理和可持续发展提供科学指导。

关键词: 黄河三角洲; 泥沙冲淤; MIKE21; 数值模拟

中图分类号: P736 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2024)03-0201-09

作为流域物质与海洋的重要连接点,河口不仅是流域物质的主要集散地,而且象征着海洋的起点,是陆地与海洋之间的重要过渡带。河口沿岸地带也是水陆地相互作用的重点关注之地,土壤形成时间短^[1],涉及多种耦合复杂的过程,演变机制复杂而多变,生态环境异常敏感且脆弱^[2]。由于水、风的侵蚀,大河流域总会携带一部分泥沙等物质,随着河流从上游到下游的不断流动,携带的泥沙量也逐渐增多直至河流入海泥沙扩散^[3]。在河口区域,泥沙输移的复杂性涉及多个因素的考虑,其中包括挟沙径流的入海扩散、潮汐、波浪、沿岸流、淡水和盐水的混合以及河口地形的演变等^[4-7]。这些因素之间相互交织,使得情况变得更加错综复杂。此外,由于河口地区的河道比降较小,水域较为宽广,水流动力作用相对减弱,径流作用影响大^[8],因此在长距离输送至河口的过程中,泥沙主要由极细的黏粒和胶粒组成^[9]。当这些泥沙与含有一定盐度的海水相遇时,可能引发絮凝现象,导致沉淀速度显著提

高^[10]。因此,在处理河口段的泥沙输移时需要特别注意这些复杂性和影响因素。河口海岸是研究河海相互作用的关键地区^[11],随着河流海洋的剧烈转变,泥沙的输运也会发生很大变化。

黄河作为中国的母亲河,流域地区的矿产资源丰富,人口基数大,在河流周围诞生许多经济发达的城市,研究黄河口泥沙冲淤具有深远意义。黄河影响区域众多,携沙量巨大,为地球最大输沙量河流:黄河利津水文站 2021 年的年径流量为 $441.1 \times 10^9 \text{ m}^3$,输沙量为 $2.43 \times 10^9 \text{ t}$;1952 年以来的多年平均径流量为 $288.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、平均输沙量分别为 $6.38 \times 10^9 \text{ t}$ 。在其中,上游地区易引发泥沙淤积问题,到黄河口处由于河口海洋动力弱,泥沙沉积和扩散输运方式更加复杂,泥沙淤积情况严重^[12]。河口三角洲演变具有时空波动性强、变化响应敏感、边缘效应显著以及环境异质性高的特性,属典型的易失衡区。近年来,黄河入海的水沙量明显减少,由原先的水多沙少逐渐演变为水减沙稀^[13],尤其是流域内大型水库的兴建和涉及

收稿日期: 2023-12-19; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42330406); 山东省自然科学基金(ZR2023QE310)

通信作者简介: 李庆杰(1986—),男,工程师,研究方向为物理海洋学研究。E-mail: lqjwainxl@126.com

水沙调配的人类活动对黄河入海水沙量以及近岸海域的动力环境产生了重要的影响。在新情势下,黄河三角洲水文、地貌、生态演变与响应机制更加复杂。同时,三角洲的沉积作用将会影响其上游河道的演变,而这些自然过程可能对人类的生存环境和经济发展造成重大影响,生态修复显得至关重要^[14]。许多学者通过实测数据和数值模型对黄河口泥沙冲淤已做过大量研究,分析了黄河口泥沙扩散和输运演化情况。白晓霞等^[15]研究发现:废弃河道的冲淤演化除受生态调水、海洋动力侵蚀等影响外,更多地受到河道周边油田开发以及两岸的农田和林业发展等因素的影响。师长兴^[16]利用黄河三角洲水下地形测量数据,基于三角洲地貌的发育特征,对清水沟和刁口河岸段进行分时段三角洲平原与前缘的沉积量和侵蚀量进行计算,并指出:如果未来海上输沙量保持较低水平,从河口及三角洲岸坡向远海的泥沙扩散速率将继续减小。

基于以上背景,本文基于 Landsat TM/OLI_TIRS 卫星遥感影像获取海岸线,运用 MIKE21 对黄河三角洲水动力场及泥沙冲淤情况进行模拟。分析河口地区岸线演变对水动力的影响,模拟 2015—2023 年的泥沙冲淤,通过验证实测走航数据,确认泥沙冲淤参数,基于不同黄河水沙输入量预测 2023—2030 年冲淤演变趋势,为将来黄河三角洲的保护和利用提供科学指导。

1 研究区域概况

研究区域为现代黄河三角洲附近,包括孤东近岸海域和莱州湾西海岸附近海域,见图 1。从徒骇河东部起始,延伸至支脉沟口以北,形成一个扇形区域,面积约为 5400 km²。黄河三角洲矿产和土地资源丰富,给山东半岛带来了许多发展空间。黄河水体中的泥沙主要为黄土高原的第四纪沉积物,因此其矿物成分类似中游的黄土,悬移质泥沙是黄河泥沙的主要构成,沉积颗粒粉砂粘土占优势^[17]。黄河从 1996 年开始由清水沟转清八岔流路入海,在泥沙淤积下,径流量也开始缓慢下降。为了减轻下游河道淤积,调水调沙工程在 2002 年开展,黄河淤积输沙量和径流量未来将会降低^[18-19]。黄河三角洲的填充物主要包括极细砂、粉砂、极细粉砂以及黏土等松散的细粒河流沉

积物^[20]。黄河三角洲属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,由于受到风生浪的影响,黄河三角洲海域表现出快速的变化和鲜明的季节性特点。NE 风是主要的强风方向,而 S 向和 N 向则是常见的风向。近岸海域的最大波高可达 6.25 m,而平均波高为 0.58 m。全年内,强浪的主要方向为 NE-NNE,次强浪则倾向于 N-NNW^[21]。

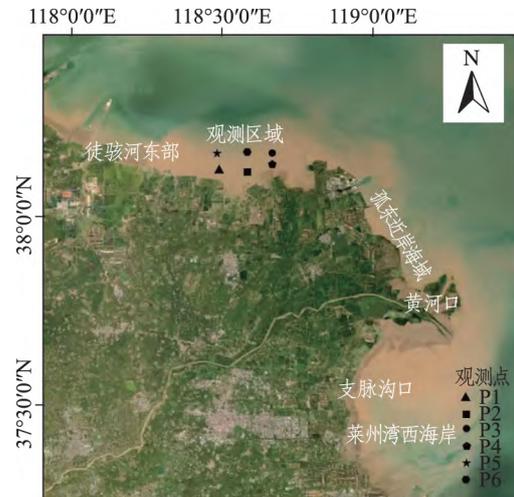


图 1 研究区域卫星图

Fig.1 Satellite image of the study area

2 数值模拟

2.1 MIKE21 模型

MIKE21FM 模拟模型的水动力模块基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stokes 方程,并服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定^[22]。二维非恒定平面浅水流方程组如下。

水体连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS, \quad (1)$$

水体在 x 方向上的动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = \\ \bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial (hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (hT_{xy})}{\partial y} + hu_x S \end{aligned} \quad (2)$$

水体在 y 方向上的动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = \\ & -\bar{f}uh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\ & \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S, \quad (3) \end{aligned}$$

式中: t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标系坐标方向; η 为水位; d 为静止水深; h 为总水深 $h = \eta + d$; \bar{u}, \bar{v} 分别表示 x 和 y 方向上的平均速度; f 为科氏力系数, $f = 2\omega \sin \varphi$ ω 代表地球自转角速度 φ 代表当地纬度; g 为重力加速度; ρ 为海水的密度; ρ_0 为淡水的密度; P_a 为当地大气压强; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力分量; τ_{xx}, τ_{sy} 为水面风应力张量; τ_{bx}, τ_{by} 为河

床床面应力张量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为水平粘滞应力项; S 为源项; u_s, v_s 为源项在 x, y 方向的水流流速。

2.2 模型建立及验证

1) 模型建立

利用 MIKE21 数学模型分别构建 2015 年、2023 年岸线条件下的水动力模型。模拟区域包括 122°E 以西的黄、渤海区域, 为确保模拟结果的准确性, 开边界设置在渤海海峡区域。为提高黄河三角洲海域的模拟精度, 本文在该区域进行了网格加密, 最小网格尺度为 120 m, 最大网格尺度为 5 km, 计算区域网格总数为 398 442 个, 节点 201 643 个, 网格见图 2。

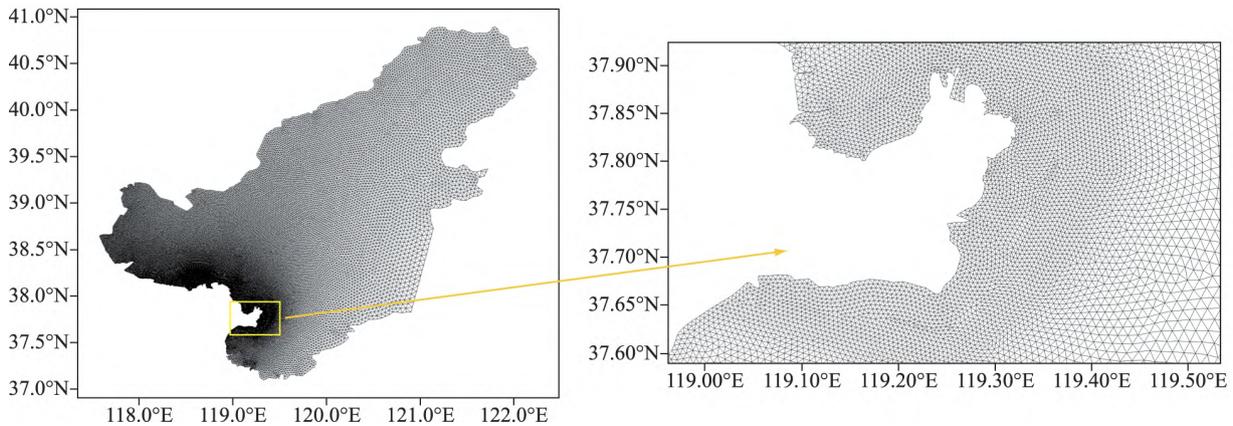


图 2 研究区域位置及精细化计算网格

Fig.2 The location of the study region and refined computing grid

模型采用冷启动方式, 本研究中底床糙率采用曼宁系数, 曼宁系数取为 0.014 493, 时间步长为 1 h, 水深数据采用 Etopo 水深数据加走航实测水深数据叠加。模拟时间为 2023 年 3 月 23 日至 4 月 11 日。

2) 模型验证

潮流验证数据选用渤海海域内 4 个测点: P1 (118°29.390'E, 38°07.493'N)、P2 (118°35.041'E, 38°07.015'N)、P3 (118°40.010'E, 38°10.031'N) 和 P4 (118°40.017'E, 38°08.293'N)。潮位实测数据选用渤海海域内 3 个测点: P2 (118°35.041'E, 38°07.015'N)、P5 (118°29.032'E, 38°10.021'N)、P6 (118°34.9877'E, 38°10.193'N)。站位分布见图 1, 观测时间为 2023 年 4 月 5 日—6 日。验证结果如图 3 所示。结果表明: 模拟的潮位值、流速和流向与实测值基本一致, 模型模拟精度较高。

采用皮尔逊相关系数表征模拟结果的准确

性, 其计算公式为:

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (4)$$

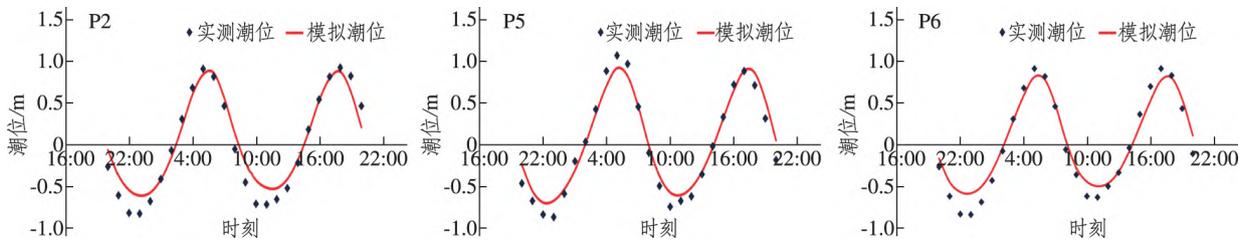
当相关系数值位于 (0.8, 1] 时为极强相关, (0.6, 0.8] 为强相关, (0.4, 0.6] 为中等程度相关, (0.2, 0.4] 为弱相关, 而在 (0, 0.2] 则表明极弱相关或无相关。各站模拟与实测相关系数见表 1。其中, 潮位和流向各站点模拟与实测均为极强相关; 流速 P1 站为中等程度相关, P2 站为强相关, P3 站和 P4 站均为极强相关。因此数值模拟计算结果合理, 模型设置可行。

3 2015—2023 年的泥沙冲淤分析

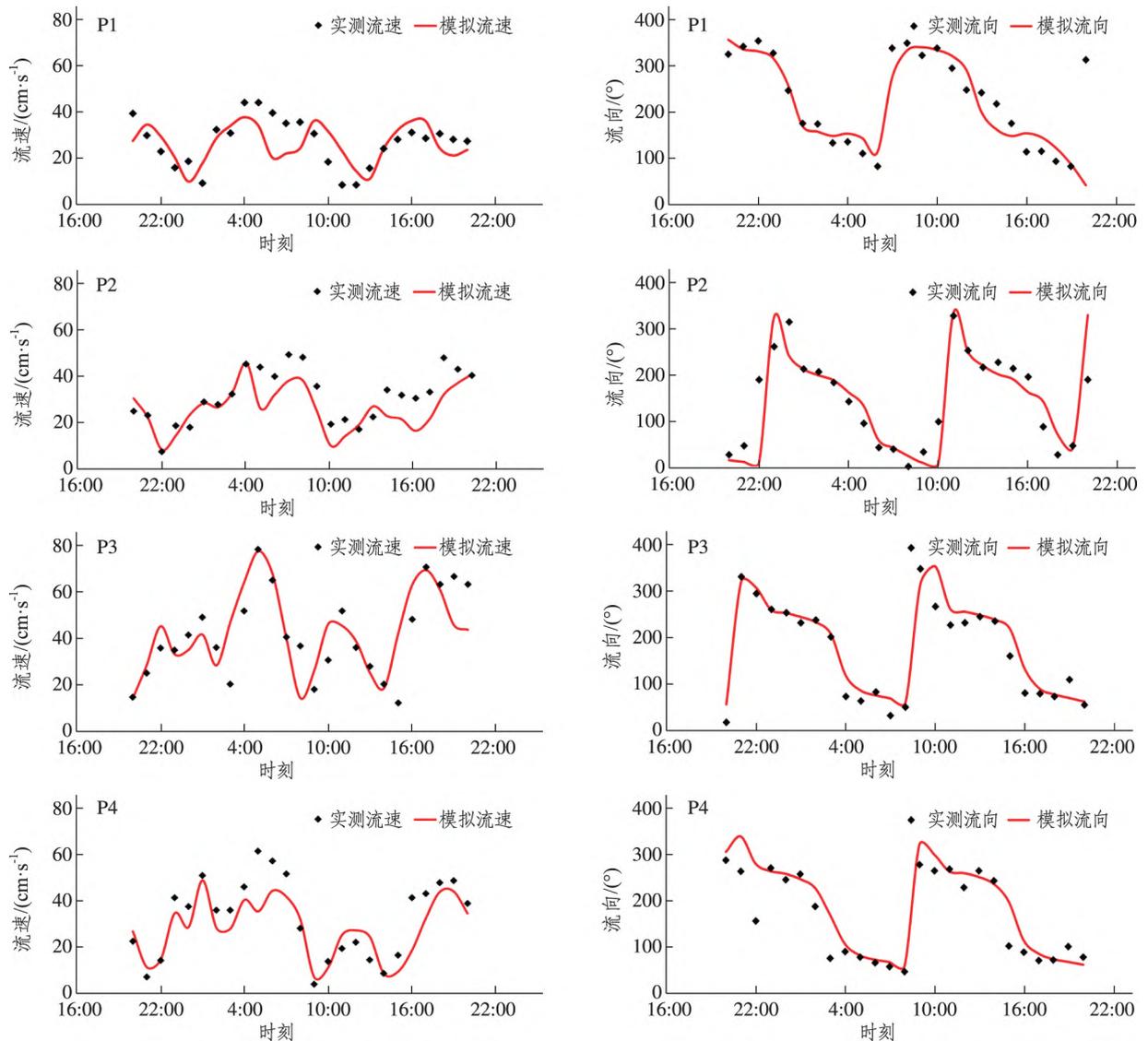
在黄河入海口处设置河流边界, 采用水利部

黄河水利委员会网站(www.yrcc.gov.cn) 利津站的径流量和输沙量,获取 2015—2023 年黄河入海水沙变化,如表 2 所示。基于 Mud Transport 模块,添加了 2 种类型的泥沙,底床床层设置为 2 层,考虑了絮凝影响,采用低阶运算。不考虑外来输沙,泥沙输入全部来自黄河。利用 ArcMap 10.8 软件采

用克里金插值法对走航数据测量的水深数据进行插值,获得水下 DEM 模型。同时为研究其冲淤形势,对经过高程校对的 2015 年海图水深数据进行插值,验证走航水深最终获得 2015—2023 年的水下冲淤模型。



(a) 潮位



(b) 流速与流向

注: 横轴标值从左到右分别表示 4 月 5 日的 16:00、22:00 以及 6 日的 4:00、10:00、16:00 和 22:00。

图 3 观测点水动力模拟结果与实测数据对比

Fig.3 Comparisons of dynamic simulation results with measured data of observed water

表 1 各站点实测与模拟相关系数

Tab.1 Correlation coefficients of actual measurement and simulation at each site

站名	流速相关系数	流向相关系数	潮位相关系数	站名	流速相关系数	流向相关系数	潮位相关系数
P1	0.570	0.955		P4	0.811	0.966	
P2	0.741	0.910	0.982	P5			0.985
P3	0.845	0.910		P6			0.989

表 2 2015—2023 年黄河入海水沙变化

Tab.2 Changes in sediment in the inflow of the Yellow River from 2015 to 2023

年份	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
年径流量/亿 m ³	133.60	81.88	89.58	333.80	312.20	359.60	441.10	260.90	368.09
年输沙量/亿 t	0.31	0.11	0.08	2.97	2.71	3.14	2.43	1.25	2.21

2023 年 4 月 26 日主要采用深蓝声信科技有限公司开发的单波束测深系统进行刁口外业水深测量。基于对调查区域历史水深的调研, 设置水深测量范围为 0~40 m, 增幅为 4, 坐标系为 WGS84, 中央子午线为 118°E, 高程标准采用 1985 国家高程基准坐标系, 对测量区 2023 年 4 月 26 日 5: 10—13: 40 时的水深情况进行测

量。将 L1~L5 的 5 条实际测线作为典型断面对其 2015—2023 年期间的剖面形态变化进行研究, 如图 4 所示。由图 4 可知, 在合理的误差影响范围内, 测量区域的 5 条剖面形态总体上变化较大, 研究区域内出现较大的侵蚀变化, 水深加深, 变动范围基本位于 -6~1 m 内。

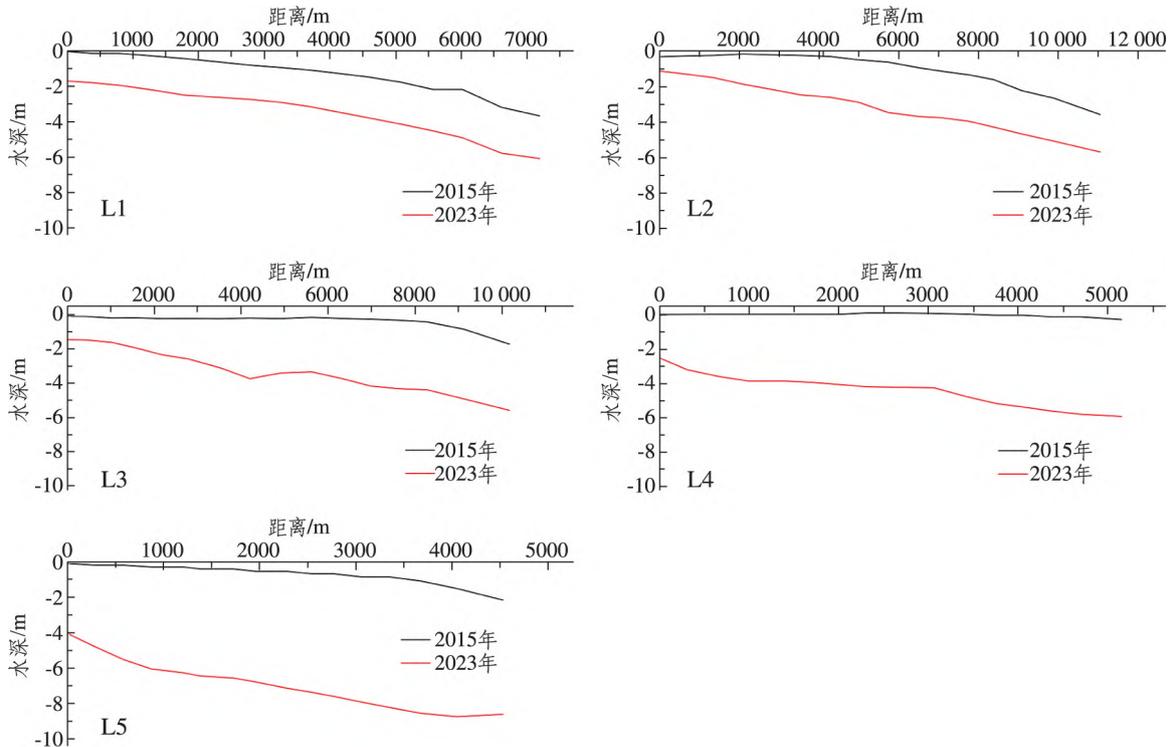


图 4 测线位置与剖面形态变化

Fig.4 Positions of survey lines and changes of profile shape

图 5 为 2015—2023 年冲淤变化结果。由图 5 可知: 2015—2023 年间, 测量区总体水深变化在 -8~0 m 之间, 冲淤速率大部分范围在 -0.86~0.11 m · a⁻¹, 考虑测线间间隔较大的影响, 可能

会出现数据不精确的情况, 存在一定的误差, 在合理的误差影响范围内, 测量区域的冲淤情况总体上变化较大, 符合黄河三角洲侵蚀明显的特征。

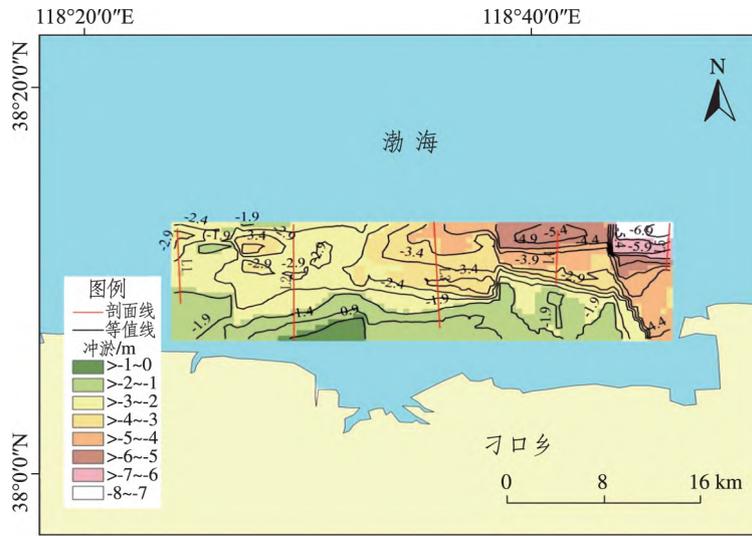


图 5 刁口区域实走航测水深冲淤变化

Fig.5 Changes of erosion and deposition in Diaokou region by aerial measurement

图 6 为数值模拟计算结果,可知:刁口区域东北角冲刷最严重,冲刷强度可达 7 m,中部冲刷在 0~2 m,从冲淤趋势和数值量级大小对比走航实测可以得出模型参数设置基本准确。

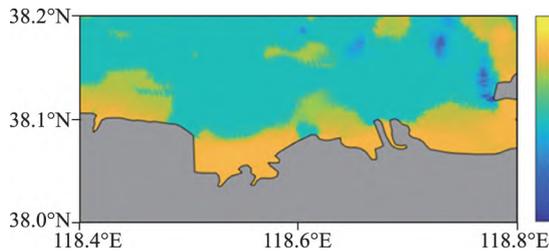


图 6 刁口区域冲淤变化数值模拟

Fig.6 Numerical simulation of erosion and deposition change in Diaokou region

黄河口区域模型模拟时间为 3 个月,加速因子设置为 32 结果如图 7 所示。冲淤计算结果表明:现行河口近岸及其 15.45 km 内的海域有明显的淤积,淤积强度可达 3 m;废弃河口处侵蚀加剧且黄河三角洲东北方向 17.7 km 处出现侵蚀现象,最大侵蚀强度可达 2 m。在潮流动力条件下,黄河携带的泥沙主要在现行河口处淤积,距离河口越近,淤积程度越大。废弃老河口区域呈现侵蚀状态,河口处侵蚀强度最大,此处的滩涂面积在输沙停止后逐渐减少^[23]。黄河三角洲以北为逆时针环流,以南为顺时针环流。受余流方向影响,泥沙向东北方向淤积,且逐渐向北部偏移。

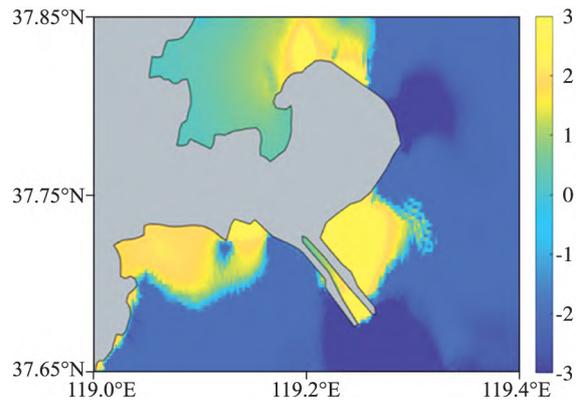


图 7 黄河口 2015—2023 年冲淤变化数值模拟

Fig.7 Numerical simulation of erosion and sedimentation in the Yellow River estuary from 2015 to 2023

4 2023—2030 年冲淤趋势预测

针对未来 7 年黄河径流量和输沙量可能发生的变化设置了 3 种工况。第一种工况是采用多年黄河最小的径流和输沙量,模拟预测冲淤结果见图 8,在 2016 年黄河最小径流量及所携带的泥沙的作用下,黄河口近海区域有少量侵蚀,孤东近岸海域冲淤平衡,废弃老河口处持续冲刷。第二工况是采用黄河 2015—2023 年平均径流量和输沙量,模拟预测冲淤结果见图 9,孤东近岸海域东岸有 3 m 左右淤积,黄河口和老河口处持续冲刷,最严重处可以达到 3 m。人类活动已经对黄河的输沙起到了抑制作用,导致年输沙量低于原始条件下(无人活动影响)的多年平均输沙量^[19],因此,第三种工况采用 2015—2023 年多年

平均沙量和径流量的 85%,结果见图 10,现行河口和废弃河口处持续冲刷,最严重处冲刷强度约为 3 m,孤东近岸海域东岸淤积可以达到 1.5 m。

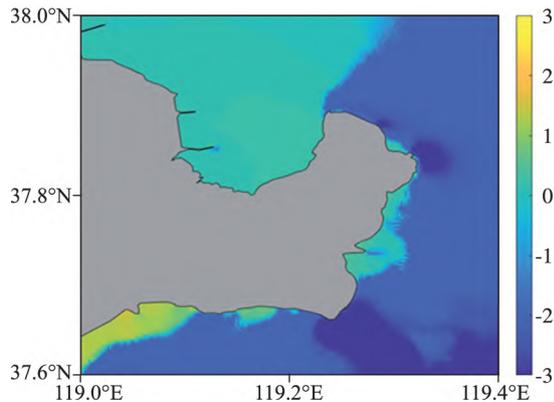


图 8 2030 年冲淤数值模拟预测结果
(多年径流和输沙量最小值)

Fig.8 Prediction result of erosion and deposition in 2030 by numerical simulation (minimum multi-year runoff and sediment transport)

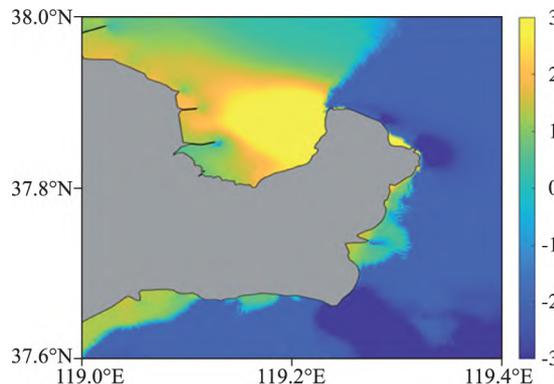


图 9 2030 年冲淤数值模拟预测结果
(多年平均径流量和输沙量平均值)

Fig.9 Prediction result of erosion and deposition in 2030 by numerical simulation (multi-year average annual runoff and sediment discharge)

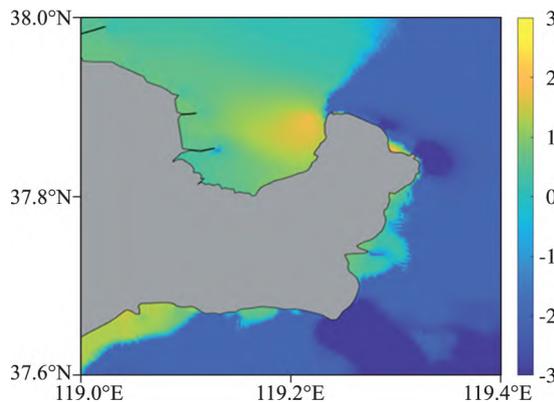


图 10 2030 年冲淤数值模拟预测结果(85%沙)

Fig.10 Prediction result of erosion and deposition in 2030 by numerical simulation (85% sand)

总的来说,3 种工况下,预测黄河口区域 2023—2030 年间淤积都主要集中在孤东近岸海域东岸,现行河口处均会出现 1~2 m 的冲刷,废弃老河口区域处均会有 3 m 左右的冲刷。

5 结论

由黄河泥沙冲淤带来的岸线变化是非常明显的,本文以利津水文站作为入海流量和含沙量的数据基础,利用丹麦 DHI 公司开发的 MIKE21 数学模型模拟了黄河不同径流量和输沙量下 2023—2030 年的冲淤变化,得出以下结论。

1) 3 种工况下黄河口未来冲淤方向逐渐由现行河口处转向孤东近岸海域东岸,废弃老河口区域还会持续冲刷。

2) 黄河径流在 3 种不同工况变化下对未来黄河口处的冲淤方向影响程度较小,但在冲刷和淤积程度上影响较大。

3) 根据 3 种工况结果来看,低径流量和输沙量下黄河口区域淤积和冲刷强度都变小,在 2016 年最小径流和输沙量下孤东近岸海域冲淤基本平衡。所以应继续保持调水调沙工程,降低入海沙量和黄河径流量。

本文数值模拟的未来 7 年黄河口不同工况下的冲淤演化研究结果可以为黄河入海径流管理及生态保护提供科学依据。黄河口区域的冲淤变化与黄河入海径流量的变化情况密切相关,未来应继续保持调水调沙工程,降低入海沙量和黄河径流量,建设古贤、桃花浴水与库滩区生态治理可以基本实现黄河下游 50 年河床不淤高^[24],使黄河口区域尽力达到冲淤平衡。

参考文献:

- [1] 张少华,徐腾飞,王海洋,等.黄河三角洲湿地保护现状与管理新思路[J].湿地科学与管理,2022,18(6):69-73.
- [2] 何超.近二十年长江口邻近海域悬沙分布比较研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [3] 李帅,田洁,詹思楚,等.近海三维泥沙输运数值模拟研究及其应用进展[J].鲁东大学学报(自然科学版),2023,39(4):322-327.
- [4] 乔守文,李凡,秦华伟,等.黄河口门位置及入海径流变化对莱州湾盐度分布的影响[J].海洋科学,2022,46(9):12-24.
- [5] 王海霞,秦华伟,乔守文,等.黄河入海径流对河口

- 海域盐度影响研究[J].海岸工程,2022,41(2):115-127.
- [6] QIN H W, SHI H Y, GAI Y Y, et al. Sensitivity analysis of runoff and wind with respect to Yellow River estuary salinity plume based on FVCOM [J]. Water, 2023, 15(7): 1378.
- [7] 凡姚申, 龚身堂, 于守兵, 等. 黄河三角洲水文-地貌-生态系统演变与多维调控研究进展[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 984-998.
- [8] 黄文海, 高熠, 席春辉, 等. 黄河下游湿地演变与实测径流相关性研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(5): 1-7.
- [9] 雷新宇. 基于多光谱遥感影像的黄河北干游泥沙浓度反演[D]. 郑州: 河南大学, 2023.
- [10] 于上, 谢卫明, 何青, 等. 黄河口潮滩泥沙絮凝研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(11): 99-110.
- [11] 王芳宇, 陈旧梨, 张启博, 等. 河口海岸水沙动力环境多尺度时空耦合数值模拟研究进展[J]. 水道港口, 2022, 43(3): 334-346.
- [12] 褚言皓, 吴文娟, 李鹏, 等. 黄河口悬浮泥沙时空动态及其驱动机制[J]. 海洋学报, 2022, 44(6): 150-163.
- [13] 胡春宏, 张晓明, 于坤霞, 等. 黄河流域水沙变化趋势多模型预测及其集合评估[J]. 水利学报, 2023, 54(7): 763-774.
- [14] 王金华, 温钊鹏. 粤港澳大湾区河口海岸生态修复策略研究: 以东莞市滨海湾新区为例[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(6): 34-39.
- [15] 白晓霞, 范勇勇, 王厚杰. 黄河刁口废弃流路冲淤演化及其影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 34-42.
- [16] 师长兴. 1976年以来黄河口泥沙淤积与扩散分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 41-45.
- [17] 李栓科. 近代黄河三角洲的沉积特征[J]. 地理研究, 1989, 8(4): 45-55.
- [18] GU D J, ZHANG L J, JIANG L Q. The effects of estuarine processes on the fluxes of inorganic and organic carbon in the Yellow River estuary [J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 8(4): 352-358.
- [19] 杨光彬. 黄河流域未来30-50年泥沙变化趋势预测[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [20] SAITO Y, YANG Z S, HORI K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene [J]. Geomorphology, 2001, 41(2/3): 219-231.
- [21] ZHANG L L, XING H, LI P P, et al. Analysis of the evolution of the Yellow River Delta coastline and the response of the tidal current field [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1232060.
- [22] ZHANG K C, LI Q J, ZHANG J, et al. Simulation and analysis of back siltation in a navigation channel using MIKE21 [J]. Journal of Ocean University of China, 2022, 21(4): 893-902.
- [23] CAO Y, WANG Q, ZHAN C, et al. Evolution of tidal flats in the Yellow River Qingshuigou sub-delta: spatio-temporal analysis and mechanistic changes (1996-2021) [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1286188.
- [24] 鲁俊, 吴默溪, 安催花, 等. 维持黄河下游河道与滩区稳定的泥沙处置方案[J]. 人民黄河, 2023, 45(1): 30-35.

Numerical Simulation Prediction of Sediment Erosion and Deposition in the Yellow River Delta Based on MIKE21

SHI Hongyuan¹, LI Longsheng^{1b}, SUN Jiwei^{1b}, ZHAO Shengnian^{1b}, LI Yan^{1b}, ZHANG Lili^{1b}, LI Qingjie²

(1.a. Institute of Coastal Research; b. School of Hydraulic Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China;

2. Yantai Ocean Center, Ministry of Natural Resources, Yantai 264006, China)

Abstract: Due to natural environmental changes and human interventions, the coastline of the Yellow River Delta has been in constant change, and it is of great significance to explore the changes in the coastline of the delta region for economic development and ecological protection. Based on the MIKE21 mathematical model, this paper establishes a sediment scouring and silting model under shoreline conditions in different years, compares and verifies the changes of scouring and siltation in Diaokou from 2015 to 2023, and verifies the accuracy

of the sediment model setting in the Yellow River. On this basis, three sets of runoff and sediment working conditions were set up to predict the erosion and siltation changes in the waters near the Yellow River estuary from 2023 to 2030. The results are as follows. Under the conditions of the minimum runoff and sediment transport of the Yellow River for many years, there is a small amount of erosion in the Yellow River estuary, the northeast of the Yellow River Delta is basically balanced in scouring and silting, and a small amount of erosion is in the old Yellow River estuary. Under the conditions of multi-year average runoff and sediment transport, there is about 3 m of siltation in the north-northeast direction of the Yellow River estuary, and the Yellow River estuary and the old Yellow River estuary continue to scour, and the most serious part is about 3 m. Under the condition of 85% of the runoff and sediment transport of the Yellow River for many years, the Yellow River estuary and the old Yellow River estuary continue to be scoured, and the most serious part is about 3 m, and the northward siltation of the Yellow River can reach 1.5 m. The results of this study can better understand the changes of the coastline of the Yellow River Delta, and provide scientific guidance for the future development, management and sustainable development of the coastal zone of the Yellow River estuary.

Keywords: the Yellow River Delta; sediment scouring; MIKE21; numerical simulation

(责任编辑 李秀芳)

(上接第 200 页)

Abstract ID: 1673-8020(2024)03-0193-EA

Effects of Atmospheric Corrections on NDVI of Sentinel-2 Images of Coastal Wetlands

LIU Yanzhi¹, SU Bo², WANG Xuehong¹, ZHOU Jie¹, LI Yunzhao¹, YU Junbao¹, GUAN Bo¹, SONG Xiukai²

(1. The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264039, China;

2. Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China)

Abstract: In order to eliminate the atmospheric interference during the imaging process of satellite images and restore the real feature reflectivity, atmospheric correction has become a key link in quantitative remote sensing analysis research. In this paper, based on the Sentinel-2 images of the Yellow River Delta for 5 periods from 2018 to 2022, we explored the necessity of atmospheric correction for NDVI calculation by comparing and analyzing the NDVI before and after atmospheric correction. The results are as follows. (1) the atmospheric correction can significantly affect the overall NDVI of the Sentinel-2 images of coastal wetlands, as well as the NDVI of different land classes, but there is uncertainty in the effect on the NDVI of the Yellow River in different years; (2) there is no significant difference in the changes of spectral characteristics of NDVI between different land classes before and after atmospheric correction, but the atmospheric correction effectively enhances the range of NDVI extreme deviation and improves the differentiation of NDVI between different land classes. This study provides a reference basis for research on the effect of atmospheric correction on NDVI.

Keywords: atmospheric correction; coastal wetlands; Sentinel-2 images; NDVI; the Yellow River Delta

(责任编辑 顾建忠)