

黄河调水调沙对河口及邻近海域悬沙浓度和浮游生态系统影响的数值模拟

徐泽宇¹, 钟 威¹, 刘建时², 林 军^{1,3,4}

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 海洋出版社有限公司, 北京 100161; 3. 上海海洋大学 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 200137)

摘 要: 为了研究2021年调水调沙期间黄河口水沙分布及生态环境变化, 探讨调水调沙对黄河口地区水动力和生态环境的影响机制。本文基于非结构网格有限体积海洋模型(Finite volume community ocean model, FVCOM)建立渤海三维水动力模型和生态模型, 并结合遥感资料, 分析调水调沙期间黄河口冲淡水、悬浮泥沙、营养盐及叶绿素a质量浓度的时空变化特征。结果表明, 调水调沙显著改变了黄河口冲淡水和悬浮泥沙的分布与扩散特征。调水调沙期间, 黄河口海域悬浮泥沙和营养盐浓度明显增加, 悬浮泥沙扩散范围在排沙期和排水期基本一致, 但因入海径流量减少, 排沙期扩散范围有所限制。陆源物质主要集中在河口南北两侧, 南侧扩散范围大于北侧。同时, 调水调沙期间氮磷比增大, 营养盐输入促进浮游植物生长, 导致叶绿素a质量浓度显著升高。然而, 悬浮泥沙浓度上升引发光限制效应, 部分抵消了营养盐增加对初级生产的促进作用。研究表明, 将排沙期设置在调水期之后, 对降低光限制效应和抑制有害藻华具有重要作用。本研究为优化黄河口调水调沙方案、有效防控藻华及维护生态环境提供了科学依据。

关键词: 调水调沙; 叶绿素a; 泥沙输运; 生态模型; 数值模拟; 黄河口

中图分类号: X 145

文献标志码: A

黄河口海域是黄河与渤海交汇之地, 位于渤海湾和莱州湾之间, 具有复杂的生态环境。黄河以高含沙量著称, 每年向渤海输送约 $1.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 淡水和 $6.9 \times 10^8 \text{ t}$ 泥沙, 占汇入渤海泥沙总量的90%以上^[1-2]。为缓解下游河道淤积与洪灾风险, 黄河水利委员会自2002年实施调水调沙工程, 通过水库联合调度形成人工洪峰冲刷河道, 实现水沙通量的动态平衡。在调水调沙过程中, 入海径流冲淡水、泥沙、营养盐等在黄河口海域短时间内急剧增加, 对黄河口及其邻近海域动力环境与生态系统产生深远影响。

黄河入海泥沙多淤积在黄河三角洲附近, 受涨落潮影响较大, 高浓度悬沙输移方向与涨落潮方向基本一致^[3-4]。调水调沙时黄河口泥沙运动和径流羽流扩散都受到了影响, 泥沙和羽流扩散范围都有所增长^[5-6]。

在调水调沙期间黄河口生态环境也有所变化, 研究显示黄河口海域浮游植物初级生产力和年均丰度与陆源输入的营养物质平均浓度呈正相关关系^[7], 叶绿素a、营养盐和化学需氧量等含量在调水调沙期间都有所改变^[8]。虽然调水调沙期间冲淡水携带的陆源营养盐入海通量可达当年总输运量的半数左右, 但对黄河下游营养盐年变化模式未产生显著影响^[9-10]。

渤海海域叶绿素a质量浓度周年变化呈现为显著的双峰结构, 一般在春夏暴发水华, 河口附近浅水区的发生时间往往早于深水区^[11-12]。由于黄河口营养物质丰富, 黄河口附近海域是藻华暴发频发的区域, 藻华爆发通常集中在5—8月^[13-14], 近年来黄河口氮磷比呈现持续升高趋势, 增加有害藻华的风险, 有学者认为调水调沙缓解了黄河口浮游植物磷限制和硅限制, 对近岸环境

收稿日期: 2024-10-30

修回日期: 2025-04-09

基金项目: 中国海油海洋环境与生态保护公益基金会项目(CF-MEEC/2025-7)

作者简介: 徐泽宇(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为物理海洋学。E-mail: 1034390451@qq.com

通信作者: 林 军, E-mail: jlin@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

及黄河口生态系统健康带来有利影响^[15-16]。

现有研究多基于数值模型分析调水调沙对黄河口悬沙浓度及其时空输运特征的影响,或基于现场调查和采样数据研究其对生态环境的影响。受限于调查成本,现场观测难以全面揭示调水调沙期间生态环境因子的时空变动规律。本研究以2021年黄河调水调沙期为例,采用非结构网格有限体积海洋模型(Finite volume community ocean model, FVCOM)和浮游生态系统动力学模型(Nutrient-phytoplankton-zooplankton-detritus, NPZD),通过物理-生态耦合的数值模拟方法,全面评估水沙调控对黄河口及邻近海域的泥沙运输、营养盐分布、浮游植物生长等关键生态因子的影响,以期对调水调沙作业的生态环境影响评估提供基础数据,促进黄河口及其邻近海域生态系统健康与可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河入海口位于渤海湾和莱州湾之间,近岸

海域潮汐类型复杂,以不规则半日潮为主,平均潮差0.6~0.8 m。黄河口海域属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均降雨量590 mm,降雨多集中于夏季,占全年降雨量的70%。在东亚季风气候影响下,河口海域夏季以南风为主,冬季以东北或西北风为主。黄河调水调沙开展的时间一般在每年6月下旬至9月上旬的汛期,持续时间不等。

黄河入海径流量和泥沙输送量的主要数据来源于黄河下游的利津水文站(<http://www.yrcc.gov.cn/>)。2021年是黄河典型的丰水年,年均径流量达到了1 400 m³/s,本文选择2021年为研究样本。2021年黄河调水调沙时间为6月19日—7月13日(25天),工程分两个阶段开展:6月19日—7月9日为排水期,径流量从1 500 m³/s阶梯式增至4 000 m³/s;7月10日—13日为排沙期,径流量回落至856 m³/s;泥沙浓度呈现滞后响应,7月10日达到峰值34.5 kg/m³后急剧下降至7.76 kg/m³(图1)。

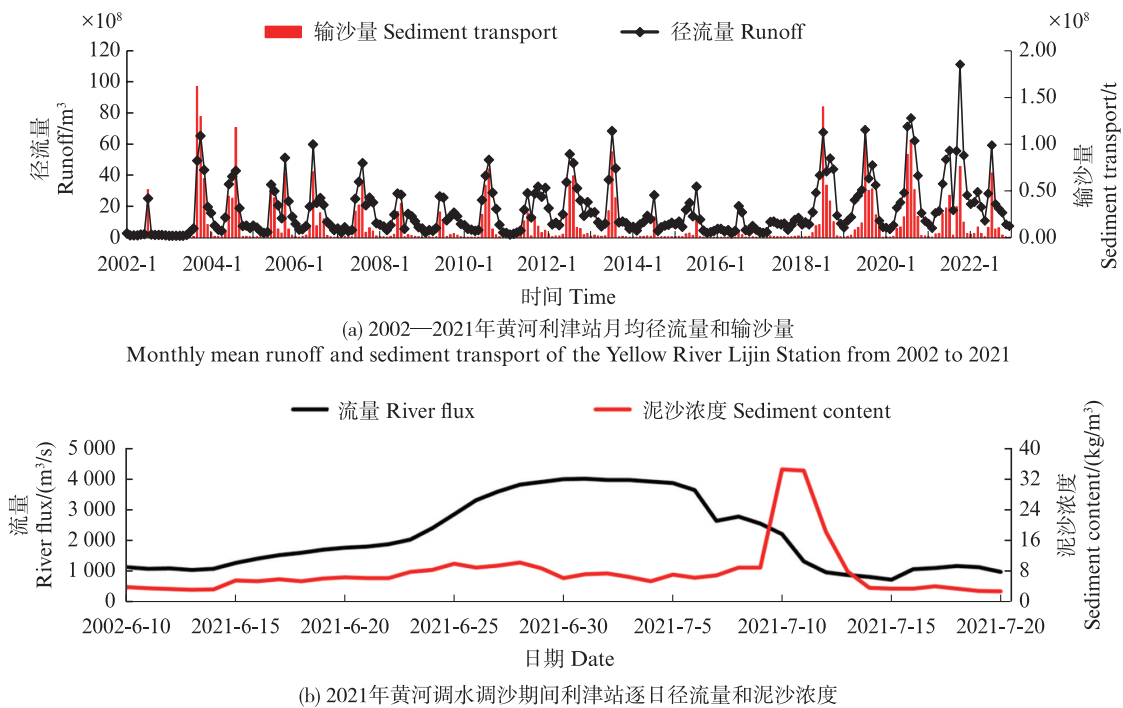


图1 利津站水沙时间序列统计

Fig. 1 Water and sediment time series statistics of Lijin Station

1.2 数值模型控制方程

本文使用的FVCOM模型^[17]平面采用非结构

三角网格,垂向使用 σ 坐标,可较好地拟合复杂岸线,并实现局部加密,适用于近岸海域高分辨率

的水动力模拟。除水动力模块外, FVCOM 还耦合了海冰、海浪、泥沙、生态、水质、质点追踪、示踪剂等多模块, 且包含了多种湍流参数化方案, 因此该模型被广泛应用于河口近岸地区的数值模拟研究^[18-19]。

FVCOM 的动量控制方程和连续性方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (P_H + P_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: t 为时间; x, y, z 分别为地理的东西、南北以及垂直方向; u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的流速分量; ρ_0 为海水密度; P_a 为海表的大气压强; P_H 为静水压强; q 为非静水压强; f 为科氏力参数; K_m 为垂向涡黏系数; F_u, F_v, F_w 分别为 x, y, z 方向上的动量分量; 水体总深度为 $h = H + \zeta$, H 为平均水深, ζ 为相对于海表的水位。

FVCOM 泥沙沉积物模块 (FVCOM sediment module, FVCOM-SED) 采用质量与体积守恒来计算泥沙对流扩散过程, 主要包括悬移质、推移质输移, 海底动床层的计算等^[20]。本文仅考虑悬移质泥沙的对流扩散过程。悬移质泥沙控制方程如下:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial u C_i}{\partial x} + \frac{\partial v C_i}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_i) C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \quad (5)$$

式中: C_i 为第 i 类悬浮泥沙的浓度; A_H, K_H 分别为水平与垂直涡黏系数; w_i 为第 i 类泥沙沉降速度。

除水动力和泥沙模块外, 本文还使用通用生态系统模块 (General ecosystem module, GEM) 进行浮游生态系统数值模拟。FVCOM-GEM 最多可由 7 组状态变量组成, 包括营养盐、浮游植物、

浮游动物、碎屑、溶解性有机物、细菌和辅助变量, 可根据海区的实际情况选择合适的生物参数, 建立适用于研究区域的生态模型^[17]。本文所设置生态模型包括氮和磷 2 种营养盐, 硅藻和甲藻 2 种浮游植物, 1 种浮游动物以及 1 种碎屑, 共计 6 个状态变量。模型中浮游植物考虑其呼吸和死亡, 其中呼吸作用产物转化为营养盐, 死亡部分转化为碎屑; 浮游动物包括摄食、死亡和呼吸, 浮游动物呼吸作用产物同样转化为营养盐, 死亡部分转化为碎屑, 浮游动物摄食浮游植物和碎屑, 浮游动物摄食时伴随有主动呼吸, 浮游动物摄食部分可分为主动呼吸生成营养盐, 摄食同化部分以及摄食损失成为碎屑的部分, 这 3 部分比值之和为 1; 碎屑被浮游动物摄食或矿化为营养盐。

1.3 地球静止水色卫星遥感数据

为验证所构建数值模型的模拟精度, 本文使用地球静止水色卫星 (Geostationary ocean color imager, GOCI) 遥感数据与数值模拟结果进行对比, 评估模型悬沙和叶绿素 a 质量浓度模拟结果的可信度。GOCI- II 卫星是由韩国海洋卫星中心发射的静止轨道海洋水色卫星, 于 2020 年 2 月发射, 共有 13 个波段, 空间分辨率为 250 m, 每天生成 10 景影像图^[21-22]。其 L2 数据产品也更为丰富, 涵盖了叶绿素、悬浮泥沙、海流、盐度、遥感反射率等多种数据产品。本研究采用 2021 年 GOCI- II 的 L2 级影像, 分别下载 2021 年 6 月 19 日 (调水调沙前) 至 2021 年 7 月 18 日 (调水调沙后) 的悬沙和叶绿素 a 质量浓度数据。

2 模型设置与验证

2.1 水动力及泥沙模型设置

模型计算区域为 $117.5^\circ\text{E} \sim 122.5^\circ\text{E}$ 和 $37^\circ\text{N} \sim 41^\circ\text{N}$, 覆盖了整个渤海海域, 并对黄河口区域进行了局部加密 (图 2), 共有 42 402 个三角网格单元和 21 849 个顶点, 水平方向空间分辨率最小为 500 m, 最大为 5 km, 垂向使用 σ 坐标, 分为 15 层, 并对表层和底层进行加密, 模型水深和岸线使用 2021 年海图数据。模型的外模时间步长设置为 1 s, 内模为 10 s, 考虑斜压效应。模型初始场和开边界处的温度和盐度数据使用 HYCOM+NCODA Global 1/12° Analysis data (GLBa0.08) 海洋再分析数据集, 流速和水位初始值设为零。模

型热通量和风场数据来自于ECMWF的再分析数据(<https://cds.climate.copernicus.eu/>),时间分辨率为1 h。

黄河入海径流携带的泥沙约占整个渤海湾泥沙输入量的90%^[23],因此模型中只考虑黄河径流输入,黄河径流的上边界设置在利津站,日均流量来自于黄河水利委员会网站(yrcc.gov.cn)。模型开边界处采用潮位驱动,开边界调和

常数来自EOT20潮汐模型^[24],考虑了 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 等8个主要分潮,并用s_tide工具包^[25]提取开边界水位。模型计算时间覆盖2021年全年。

泥沙模块主要考虑黏土、粉砂和砂3类,底床中3组泥沙占比分别为0.2、0.6、0.2,参数设置参考已有研究^[26-27],具体设置如表1所示。

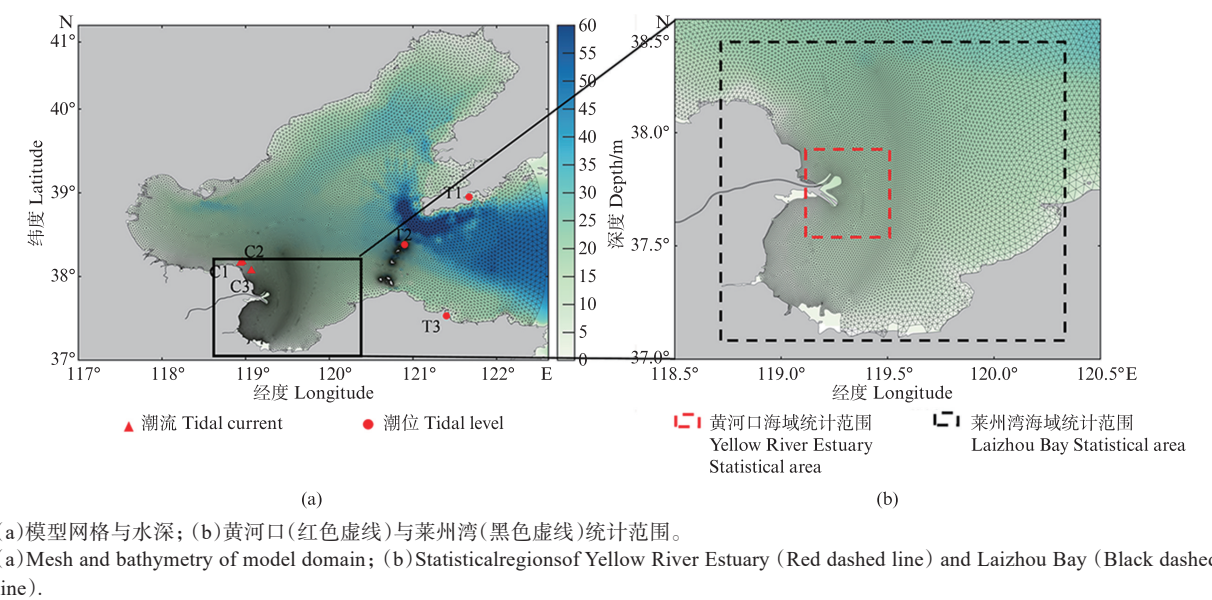


图2 数值模型计算域及网格剖分

Fig. 2 Simulated domain and mesh of numerical model

表1 泥沙参数设置

Tab. 1 Setting of sediment parameters

参数名称 Variable name	黏土 Clay	粉砂 Silt	砂 Sand
中值粒径 Median grain diameter/mm	0.003	0.015	0.250
泥沙密度 Grain density/(kg/m ³)	2 650	2 650	2 650
沉降速度 Particle settling velocity/(mm/s)	0.3	0.5	15.0
侵蚀速率 Erosion rate/(kg/m ² ·s)	0.4×10 ⁻⁶	0.4×10 ⁻⁶	0.4×10 ⁻⁶
临界启动侵蚀应力 Critical shear stress for erosion/(N/m ²)	0.03	0.08	0.16

2.2 生态模型设置

模型中各参数以氮计量,氮磷比取16:1。浮游植物、硝酸盐、磷酸盐初始场参考《渤海黄海东海海洋图集》,以渤海多年平均值作为初始值,碎屑初始值设为0.5 mmol N/m³,浮游动物初始值设为1.0 mmol N/m³。河流输入营养盐浓度主要受流量控制,营养盐浓度设置为定值。由于渤海水深较浅,平均深度仅为18 m,且冬季垂向分层不明显,参数初始场设置为垂向均匀分布。生态模

型与水动力、泥沙模型为离线耦合。为了使生态模型状态变量初始场与物理场达到动态平衡,生态模型以2021年边界条件计算3个模型年,取第3年的数据用于后续分析。

由于自然条件和生物特性差异,不同海域生态模型中的参数设定也不尽相同,本文参数设定参考了前人研究^[28-33],并进行参数率定和敏感性分析(表2)。

表 2 生态变量参数
Tab. 2 Ecological variable parameters

变量名称 Variable name	变量符号 Variable symbol	取值 Value	单位 Unit
硅藻硝酸盐半饱和系数 Half-saturation constant for nitrate in diatoms	K_{11}	1	mmol N/m^3
硅藻磷酸盐半饱和系数 Half-saturation constant for phosphate in diatoms	K_{21}	0.1	mmol P/m^3
硅藻最大生长率 Maximum growth rate of diatoms	U_{\max_1}	1.2	day^{-1}
硅藻死亡率 Mortality rate of diatoms	PD_1	0.1	day^{-1}
硅藻最高生长温度 Maximum growth temperature of diatoms	T_{\max_1}	35	$^{\circ}\text{C}$
硅藻生长温度系数 Temperature coefficient for diatom growth	KT_1	3.5	
硅藻最适生长温度 Optimal growth temperature of diatoms	T_{OPT_1}	20	$^{\circ}\text{C}$
硅藻最适生长光照强度 Optimal light intensity for diatom growth	I_{OPT_1}	110	W/m^2
硅藻呼吸率 Respiration rate of diatoms	R_{P_1}	0.01	day^{-1}
硅藻沉降速度 Settling velocity of diatoms	w_p	0.3	m/day
甲藻硝酸盐半饱和系数 Half-saturation constant for nitrate in dinoflagellates	K_{12}	1	mmol N/m^3
甲藻磷酸盐半饱和系数 Half-saturation constant for phosphate in dinoflagellates	K_{22}	0.062 5	mmol P/m^3
甲藻最大生长率 Maximum growth rate of dinoflagellates	U_{\max_2}	0.8	day^{-1}
甲藻死亡率 Mortality rate of dinoflagellates	PD_2	0.1	day^{-1}
甲藻最高生长温度 Maximum growth temperature of dinoflagellates	T_{\max_2}	35	$^{\circ}\text{C}$
甲藻生长温度系数 Temperature coefficient for dinoflagellate growth	KT_2	3.5	
甲藻最适生长温度 Optimal growth temperature of dinoflagellates	T_{OPT_2}	18	$^{\circ}\text{C}$
甲藻最适生长光照强度 Optimal light intensity for dinoflagellate growth	I_{OPT_2}	70	W/m^2
甲藻呼吸率 Respiration rate of dinoflagellates	R_{P_2}	0.01	day^{-1}
光合有效辐射占短波辐射的比例 Proportion of photosynthetically active radiation to shortwave radiation	par	0.46	
纯水消光系数 Attenuation coefficient of pure water	k_w	0.04	m^{-1}
叶绿素 a 消光系数 Attenuation coefficient of chlorophyll-a	k_{chl}	0.025	$(\text{mgchl})^{-1}/\text{m}^2$
碎屑遮光系数 Light attenuation coefficient due to detritus	k_D	0.01	m^{-1}
浮游动物最大生长率 Maximum growth rate of zooplankton	G_{\max}	0.8	day^{-1}
浮游动物最大死亡率 Maximum mortality rate of zooplankton	M_Z	0.05	day^{-1}
浮游动物摄食碎屑同化系数 Assimilation efficiency of zooplankton feeding on detritus	$effi_D$	0.4	
浮游动物摄食甲藻同化系数 Assimilation efficiency of zooplankton feeding on dinoflagellates	$effi_P_1$	0.4	
浮游动物摄食硅藻同化系数 Assimilation efficiency of zooplankton feeding on diatoms	$effi_P_2$	0.4	
浮游动物摄食指数 Zooplankton grazing index	σ_D	0.2	mmol N/m^3
浮游动物生长最适温度 Optimal growth temperature of zooplankton	T_{optz}	20	$^{\circ}\text{C}$
碎屑矿化率 Mineralization rate of detritus	D_{RN}	0.212	day^{-1}

2.3 模型验证

2.3.1 潮位验证

本研究选取 T1、T2、T3(图 2)等 3 个站点的数值模拟潮位结果与国家海洋信息中心编制、海洋出版社出版的潮汐表数据进行比对(图 3),验证时间为 2021 年的 7 月 1 日 0 时至 7 月 15 日 23 时,利用相关系数(Correlation coefficient, CC)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)、技能得

分(Skillscore, SS)等 3 种统计学参数^[34]对模拟结果的精度进行量化评价。

潮位验证结果显示,3 个站点相关系数均在 0.95 以上,技能得分均在 0.90 以上,均方根误差均小于 0.25(表 3),表明模型结果与潮汐表数据验证良好,模型潮位模拟能力优秀,能较好地模拟渤海海域的潮位变化。

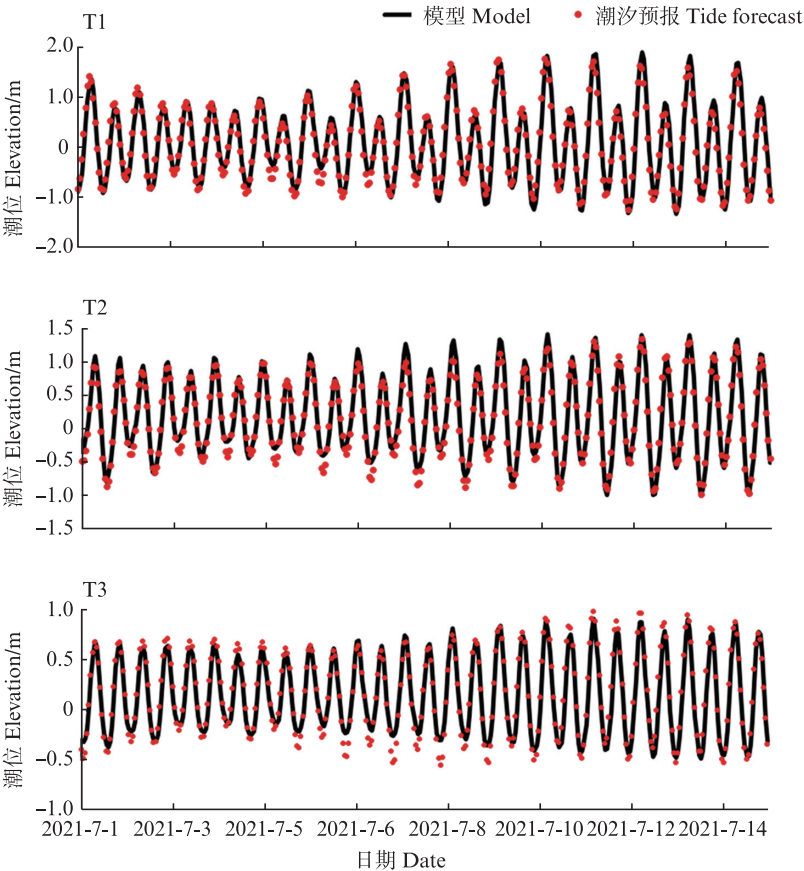


图3 潮位时间序列验证
Fig. 3 Tidal level time series verification

表3 潮位误差统计表 Tab. 3 Tide level error statistics table			
站点 Sites	均方根误差 RMSE	相关系数 CC	技能得分 SS
T1	0.21	0.97	0.99
T2	0.20	0.99	0.98
T3	0.22	0.98	0.93

2.3.2 流速流向验证

本文使用2009年10月9日—10月12日C1、C2站点,以及2018年8月29日—8月30日C3站点(图2)的文献实测数据^[35]验证模型流速流向。流速验证结果显示(图4),模型可较好地模拟3个站点处的流速量级与涨落潮流速变化趋势。流向验证结果除了C1靠近岸线精度略差外,模型能较好地体现表底层涨落潮流向的变化。统计学指标也说明了模型对黄河口及其邻近海域水动力条件的模拟较为准确(表4)。综上,本文

所构建水动力模型验证良好,可用于后续泥沙输运以及生态模型研究。
2.3.3 悬沙浓度验证

本文分别选取2021年调水调沙前(6月19日)与调水调沙后(7月18日)的GOCI-Ⅱ卫星遥感影像反演得到的L2级悬沙浓度产品验证本文悬浮泥沙模拟结果(图5)。结果显示,受云层遮蔽和泥沙浓度过高等影响,近岸区域遥感影像缺失,仅捕捉到河口泥沙锋面的位置。与调水调沙前相比,调水调沙后的泥沙锋面呈现出向黄河口北侧和南侧扩展的趋势(图5b和5d)。模型模拟得到的泥沙锋面位置与遥感影像捕捉到的泥沙锋面边界位置基本一致,且模拟得到的调水调沙后的泥沙锋面同样呈现出向黄河口北侧和南侧扩展的特征。综上,本文所构建泥沙模型可较好地模拟调水调沙过程对河口悬浮泥沙输运的影响。

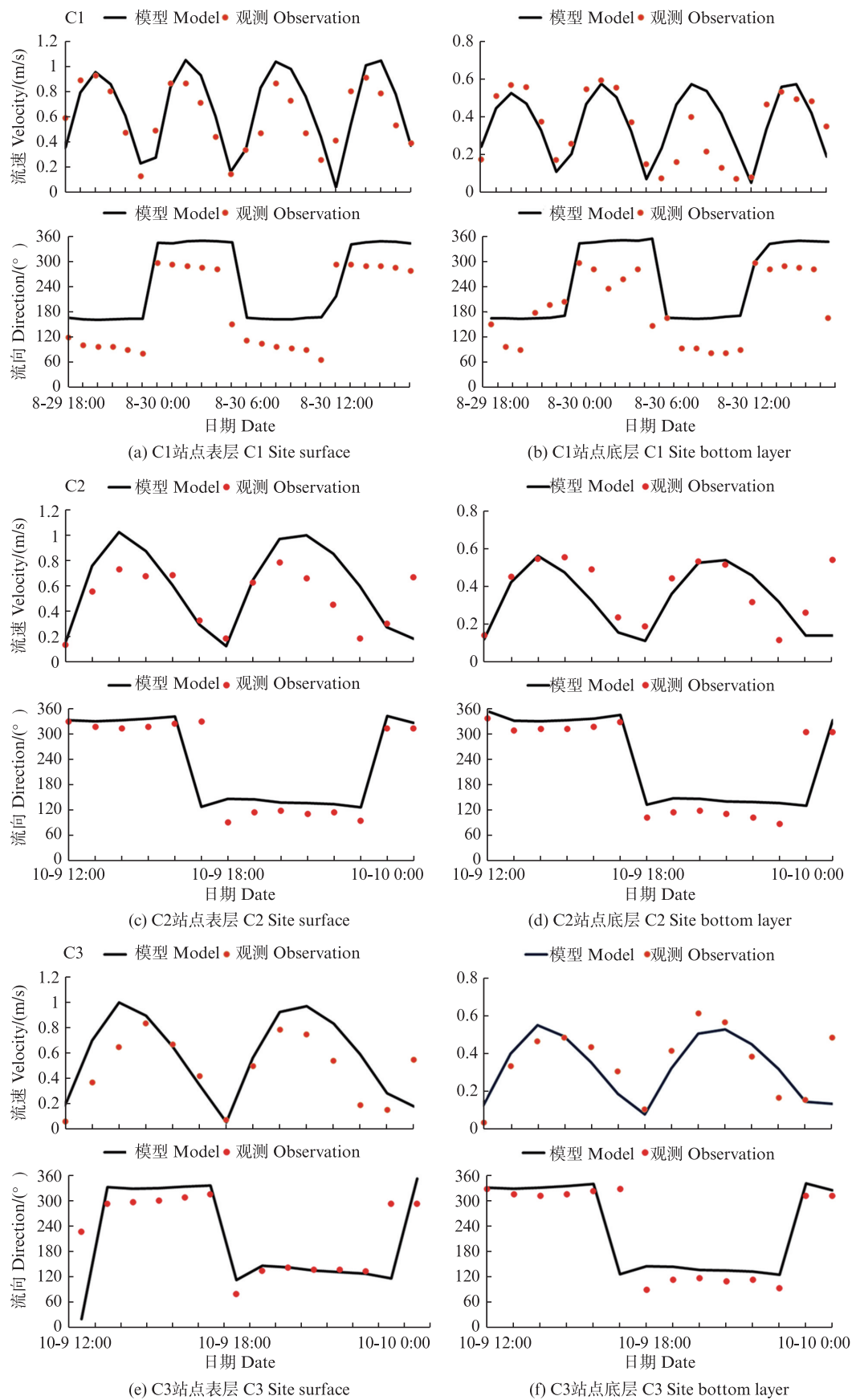
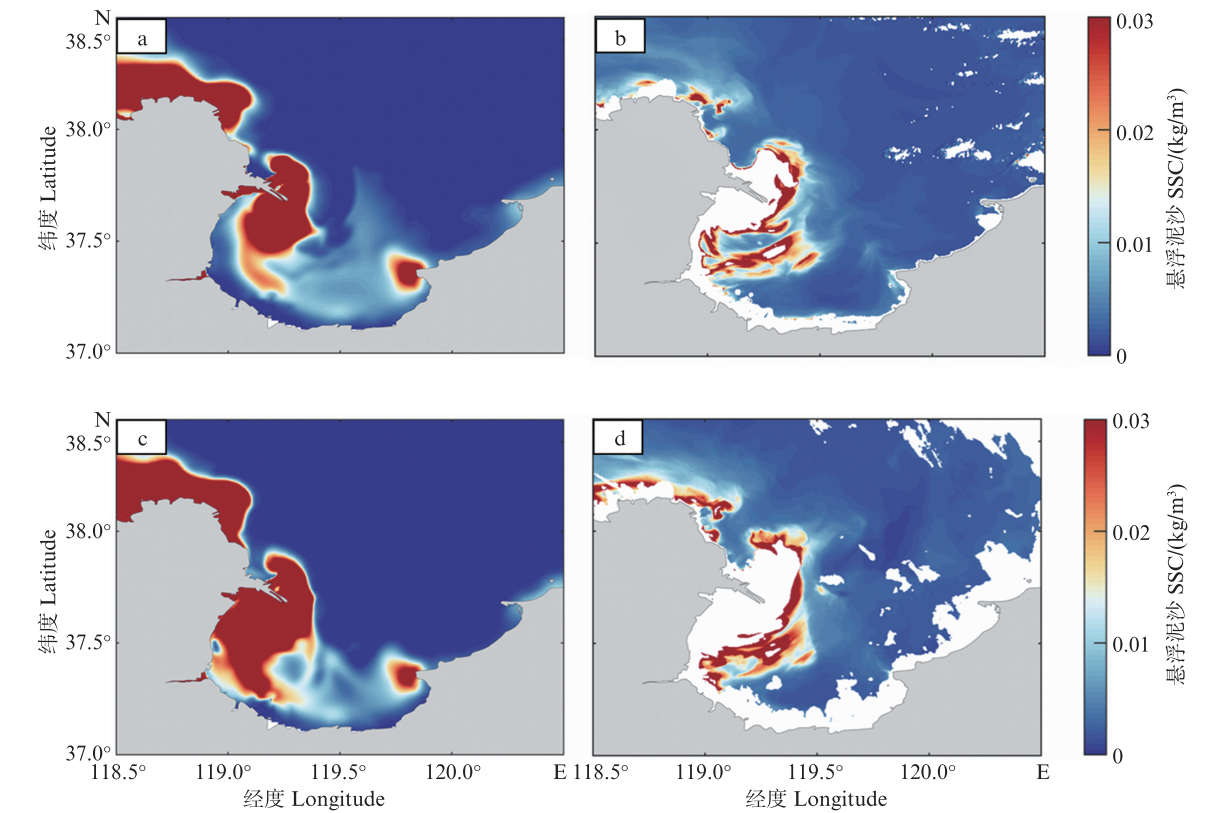


图 4 流速验证

Fig. 4 Flow velocity verification

表 4 流速流向误差统计表
Tab. 4 Statistical table of flow velocity and direction errors

站点 Sites	水层 Water layer	流速分量 Velocity component	CC	RMSE	SS
C1	表层 Surface	流速	0.69	0.25	0.97
		流向	0.83	55.23	0.99
	底层 Bottom	流速	0.65	0.14	0.98
		流向	0.87	53.98	0.97
C2	表层 Surface	流速	0.78	0.11	0.98
		流向	0.73	10	0.99
	底层 Bottom	流速	0.74	0.02	0.9
		流向	0.86	6.09	0.97
C3	表层 Surface	流速	0.79	0.06	0.88
		流向	0.90	63.54	0.85
	底层 Bottom	流速	0.69	0.11	0.88
		流向	0.79	62.52	0.82



a, c. 遥感2021年6月19日与7月18日悬浮泥沙分布; b, d. 模型2021年6月19日与7月18日悬浮泥沙分布。
a, c. Suspended sediment distribution of remote sensing images on June 19 and July 18, 2021; b, d. Suspended sediment distribution of model on June 19 and July 18, 2021.

图 5 模型与遥感影像悬浮泥沙对比
Fig. 5 Comparison of suspended sediment between model and remote sensing image

2.3.4 营养盐、叶绿素 a 质量浓度验证

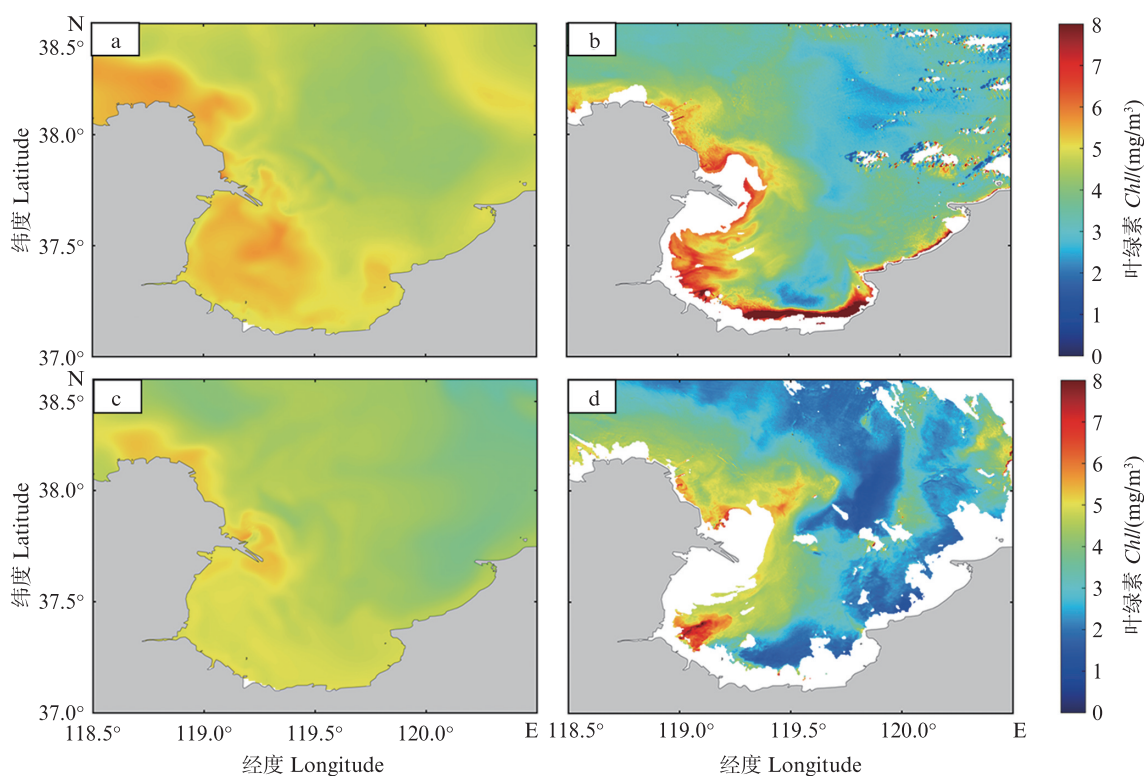
本文使用《中国区域海洋学-化学海洋学》^[36]中的渤海海域表层硝酸盐与磷酸盐数据验证模型结果。模型所得营养盐浓度空间分布特征与海洋图集结果基本一致,在四季均呈现河口近岸

高、远岸低的空间分布特征。渤海海域的氮磷比远大于 16:1,在黄河口更是常年高于 60:1,磷限制是浮游植物生长的主要影响因子。硝酸盐浓度受黄河径流影响,黄河口(>50 mmol/m³)及莱州湾(>20 mmol/m³)浓度显著高于其他区域,模

型结果同样呈现出这一特征。与硝酸盐空间分布特征一致,磷酸盐浓度也表现为黄河口区域浓度较高,在 0.5 mmol/m^3 左右。

通过对比 GOCI- II 卫星的遥感影像的叶绿

素 a 验证了模型调水调沙开始时与结束后的叶绿素 a 的分布(图 6),模型叶绿素 a 分布范围与遥感影像叶绿素 a 分布趋势基本一致。



a, c. 模型 2021 年 6 月 19 日与 7 月 18 日叶绿素 a 分布; b, d. 遥感影像 2021 年 6 月 19 日与 7 月 18 日叶绿素 a 分布。

a, c. Model chlorophyll-a distribution on June 19 and July 18, 2021; b, d. Remote sensing images chlorophyll-a distribution on June 19 and July 18, 2021.

图 6 模型与遥感影像叶绿素 a 浓度对比

Fig. 6 Comparison of chlorophyll-a between model and remote sensing image

3 结果与讨论

3.1 调水调沙对河口悬沙浓度的影响

3.1.1 调水调沙时期黄河口附近海域余流

黄河口海域欧拉余流场受径流潮控作用显著,调水调沙期间表层余流呈现强东向输运特征。调水调沙期间,口门区余流最大流速超过 20 cm/s ,冲淡水扩散形成 3 支流向:第一支沿东北向延伸至 38.3°N 后转为东向,流速最高达 25 cm/s ;第二支直接向东输运,流速约为 7 cm/s ;第三支受科氏力作用向南偏转,进入莱州湾形成顺时针环流结构,其流速较小,与前人结果相似^[37-38]。欧拉余流显示了夏季潮周期的流速平均,欧拉余流在一定程度上可以体现出物质输运的方向,可以看出研究区域的余流受到黄河径流

影响很大,口门处冲淡水的余流方向影响了莱州湾内的环流形态,夏季的高径流量也使得口门处的余流得到了增强。

3.1.2 调水调沙期间黄河口悬浮泥沙分布

数值模拟结果显示,2021 年调水调沙工程显著改变了黄河口悬浮泥沙分布格局。调水调沙前河口表层最大悬沙浓度为 0.6 kg/m^3 ,排水期随径流量增加,泥沙锋面向外海扩展,浓度峰值升至 2.1 kg/m^3 ;排沙期的悬浮泥沙扩散范围与排水期悬浮泥沙扩散范围基本一致,口门处悬浮泥沙最大值为 1.6 kg/m^3 ,其原因是排沙期虽然入海径流含沙量高,但是径流量减小,大量泥沙因水动力减弱而堆积在口门处,而排水期的含沙量虽然小于排沙期,但是黄河入海径流量大,扩大了河口泥沙随冲淡水扩散的范围。

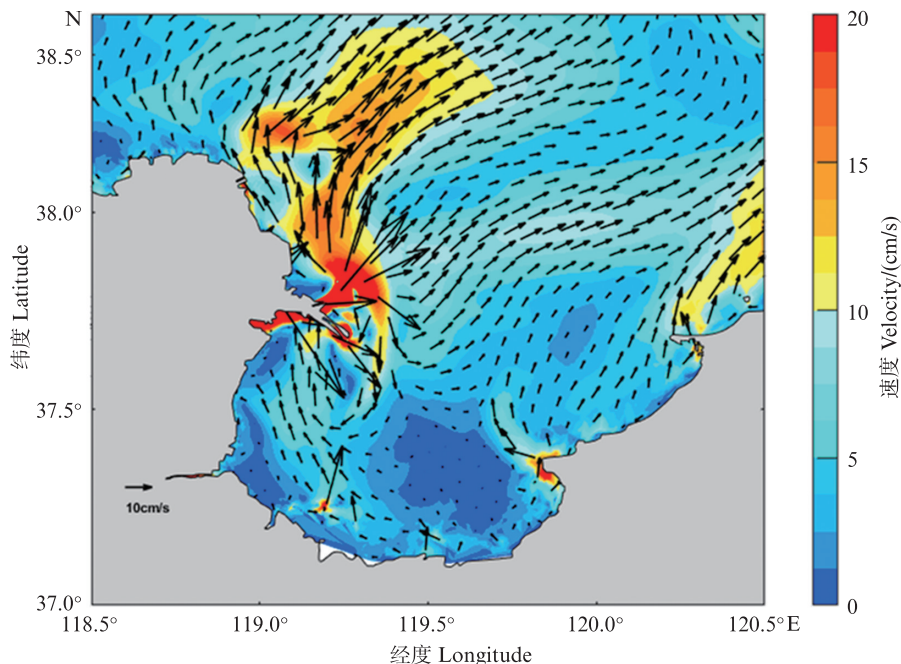


图7 黄河口附近海域表层欧拉余流场

Fig. 7 Surface Eulerian residual current field in the vicinity of the Yellow River Estuary

空间分布上,底层悬沙浓度普遍高于表层,整体呈现环状扩散特征。潮流顶托作用使径流输沙能力衰减,泥沙在潮致余流驱动下沿河口南北侧运移,形成两处高值区(图8)。调水调沙后,莱州湾悬沙浓度增幅最大区域集中于口门附近,北侧受西北向余流影响显著,表层和底层浓度分别增加0.6和0.8 kg/m³。

3.2 调水调沙前后黄河口海域生态环境变化

3.2.1 营养盐变化

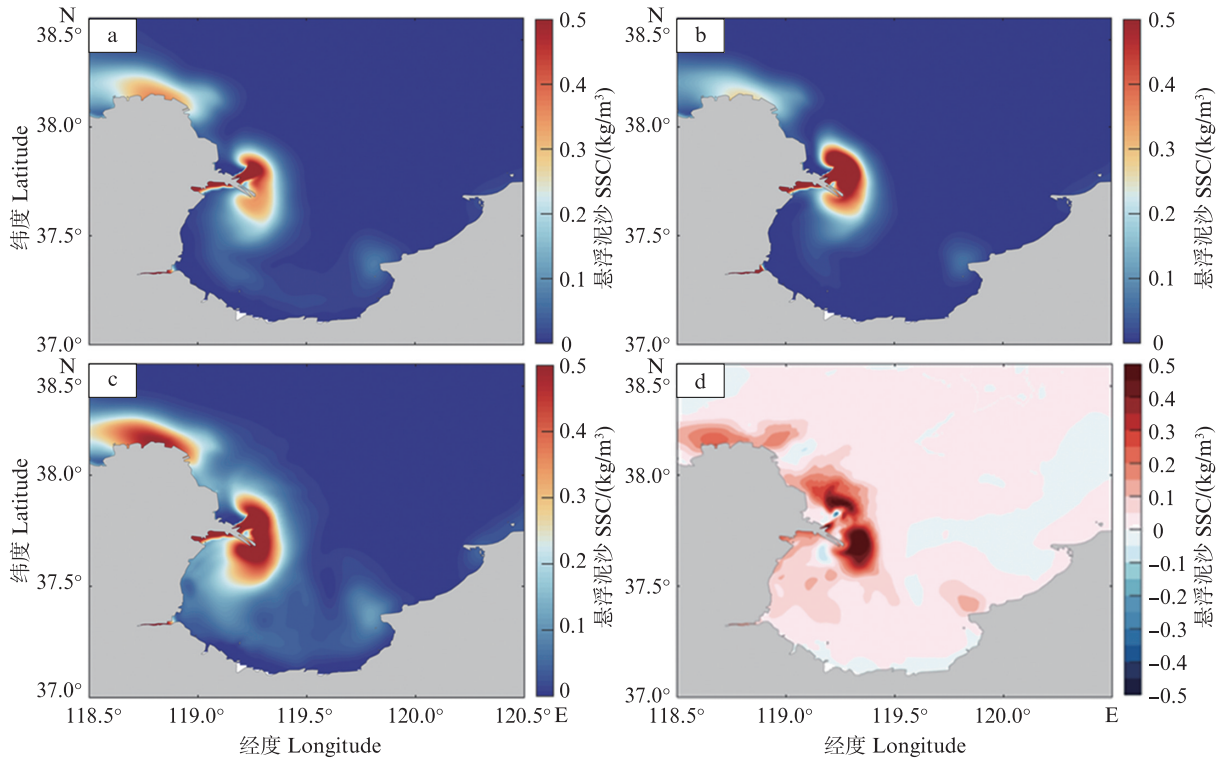
夏季黄河口海域硝酸盐平均浓度在32 mmol/m³左右,调水调沙前硝酸盐浓度呈现由西向东降低的趋势,莱州湾湾顶浓度高于湾口,浓度等值线近似与岸线平行分布。排水期高径流量带来丰富的营养盐输入,使得黄河口口门区域硝酸盐浓度增加,硝酸盐浓度等值线向外扩展。调水调沙结束后,莱州湾内大部分区域硝酸盐浓度都有所增加,黄河口附近硝酸盐浓度增加约5 mmol/m³,河口南侧硝酸盐浓度增加了约1.6 mmol/m³,硝酸盐的扩散范围可以达到莱州湾口门东侧。

调水调沙前后磷酸盐空间分布特征与硝酸盐类似,调水调沙开始时磷酸盐浓度较低,浓度在0.4 mmol/m³左右。调水调沙前后对比,莱州湾

湾内磷酸盐浓度明显增加,莱州湾内磷酸盐浓度比调水调沙前增加了约0.18 mmol/m³。

3.2.2 调水调沙前后黄河口海域叶绿素a质量浓度变化

调水调沙开始时叶绿素a分布较为均匀,叶绿素a质量浓度在5 mg/m³左右,莱州湾湾顶浓度高于湾口;排水期结束时,大量营养盐进入莱州湾,莱州湾叶绿素a质量浓度明显增加,河口处含量较高在5.5 mg/m³左右,叶绿素a质量浓度从河口向外侧减少;与排水期相比,排沙期叶绿素a质量浓度有所下降,但是扩散范围增加。调水调沙结束时较调水调沙开始时莱州湾大部分区域的叶绿素a质量浓度都有所增加,黄河口处叶绿素a增加了约1.2 mg/m³,可以看到黄河口处叶绿素a质量浓度的增加要高于莱州湾湾内。根据调水调沙期间叶绿素a的分布来看调水调沙影响了整个莱州湾的生态系统,最大影响范围可达到黄河口北侧以及老黄河口的部分地区。有学者对比了调水调沙前后浮游植物群落的变化,河口处淡水藻类数量有所增加,并促进了浮游植物细胞丰度增加,但对优势种群组成的影响较小^[38-39],还有研究表明调水调沙期间入海有机物的增加使得河口生态系统的净生产力向异养状态倾斜^[40]。

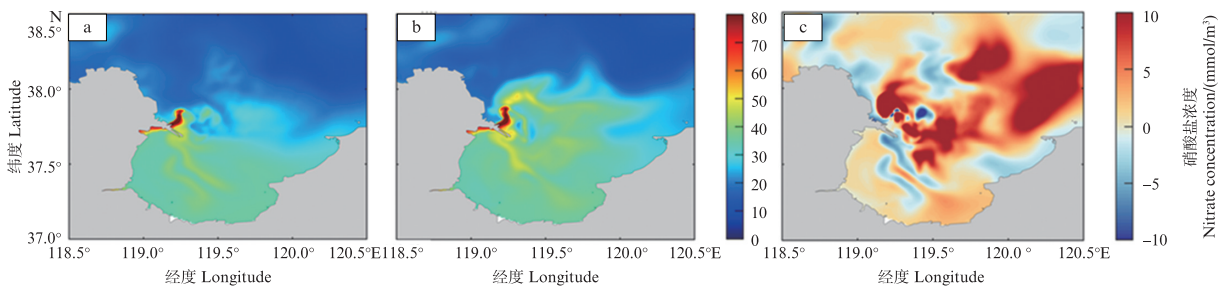


a. 调水调沙开始时表层悬浮泥沙浓度; b. 排水期表层悬浮泥沙浓度; c. 排沙期表层悬浮泥沙浓度; d. 调水调沙前后表层悬浮泥沙浓度差异。

a. Surface suspended sediment concentration at the beginning of water and sediment regulation; b. Surface suspended sediment concentration during drainage period; c. Surface suspended sediment concentration during sediment discharge period; d. Difference in surface suspended sediment concentration before and after water and sediment regulation.

图8 调水调沙前、排水期和排沙期黄河口表层悬浮泥沙分布

Fig. 8 Surface suspended sediment distribution map of Yellow River estuary before water and sediment regulation, drainage period and sediment discharge period

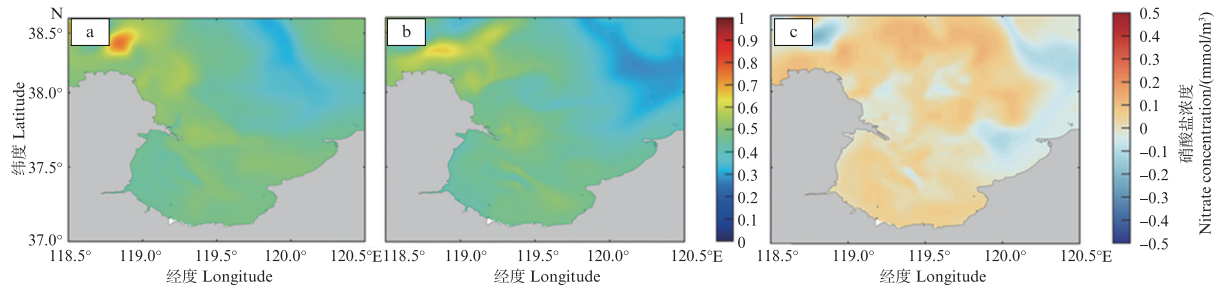


a. 调水调沙开始时(6月19日); b. 调水调沙结束时(7月13日); c. 调水调沙前后的差值。

a. At the beginning of water and sediment regulation; b. At the end of water and sediment regulation; c. Difference before and after water and sediment regulation.

图9 调水调沙前后硝酸盐浓度分布

Fig. 9 Distribution of nitrate concentration before and after water and sediment regulation

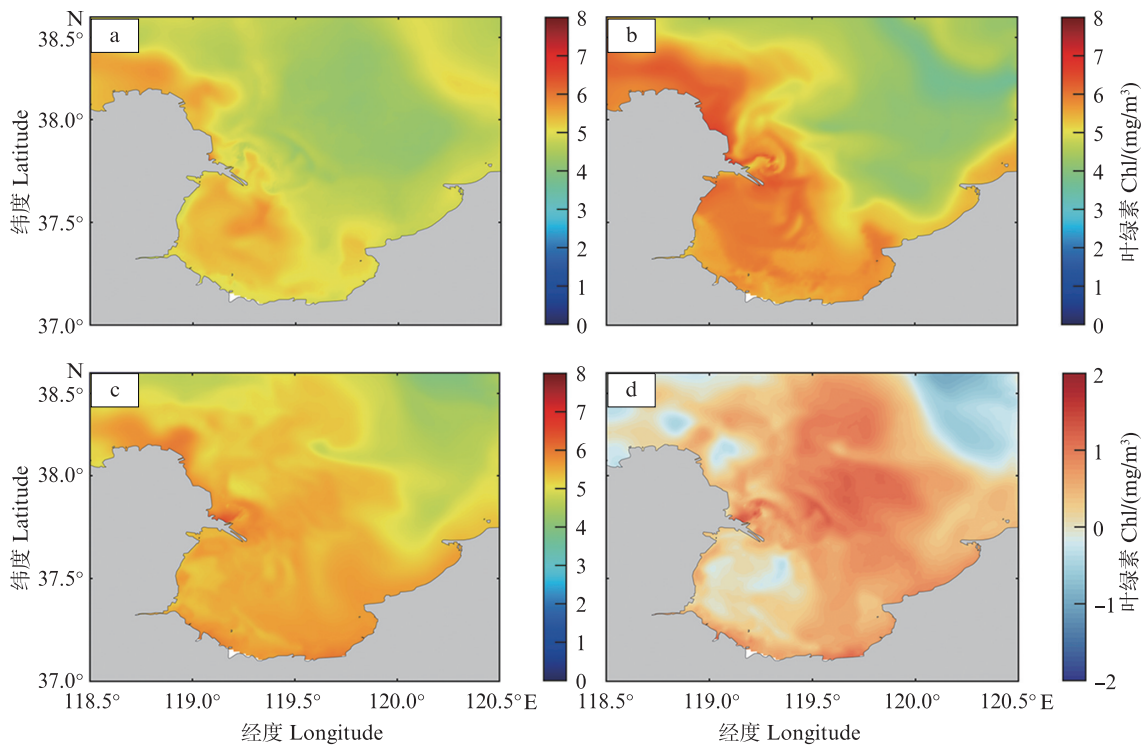


a. 调水调沙开始时; b. 调水调沙结束时; c. 调水调沙前后的差值。

a. At the beginning of water and sediment regulation; b. At the end of water and sediment regulation; c. Difference before and after water and sediment regulation.

图 10 调水调沙前后磷酸盐浓度分布

Fig. 10 Distribution of phosphate concentration before and after water and sediment regulation



a. 调水调沙开始时; b. 排水期结束时; c. 排沙期结束时; d. 调水调沙前后的差值。

a. At the beginning of water and sediment regulation; b. At the end of drainage period; c. At the end of sediment discharge period; d. Difference before and after water and sediment regulation.

图 11 调水调沙前后叶绿素 a 分布

Fig. 11 Chlorophyll-a distribution before and after water and sediment regulation

3.3 叶绿素 a 与悬浮泥沙浓度遥感数据线性相关分析

黄河口临近海域叶绿素 a 遥感值因泥沙浓度过高无法准确反演而缺失,而在悬沙浓度小于 0.3 kg/m^3 的海域则有叶绿素 a 有效遥感值(图 5 和图 6),将图 5b、5d 和图 6b、6d 所示遥感所得悬沙和叶绿素 a 资料绘制点图,并以悬沙浓度 0.05 kg/m^3 为界分别拟合叶绿素 a 质量浓度随悬沙浓度的变化。在遥感数据有效范围内,叶绿素浓度基本呈现随悬沙浓度增加而升高的趋势。悬沙浓度

大于 0.05 kg/m^3 的近河口海域(主要为距离河口 50 km 以内的点,少量 50~100 km 内的点),叶绿素 a 质量浓度随着浊度增加而缓慢升高,斜率(调水调沙前 5.756、调水调沙后 4.290)较小,叶绿素 a 质量浓度维持在较高的水平,表现为截距(调水调沙前 3.814、调水调沙后 3.586)在调水调沙前后接近。悬沙浓度小于 0.05 kg/m^3 的远河口海域(主要为距离河口 50 km 以外的点,少量 50 km 以内的点),叶绿素 a 质量浓度随着浊度增加而急剧升高,斜率(调水调沙前 57.115、调水调沙后

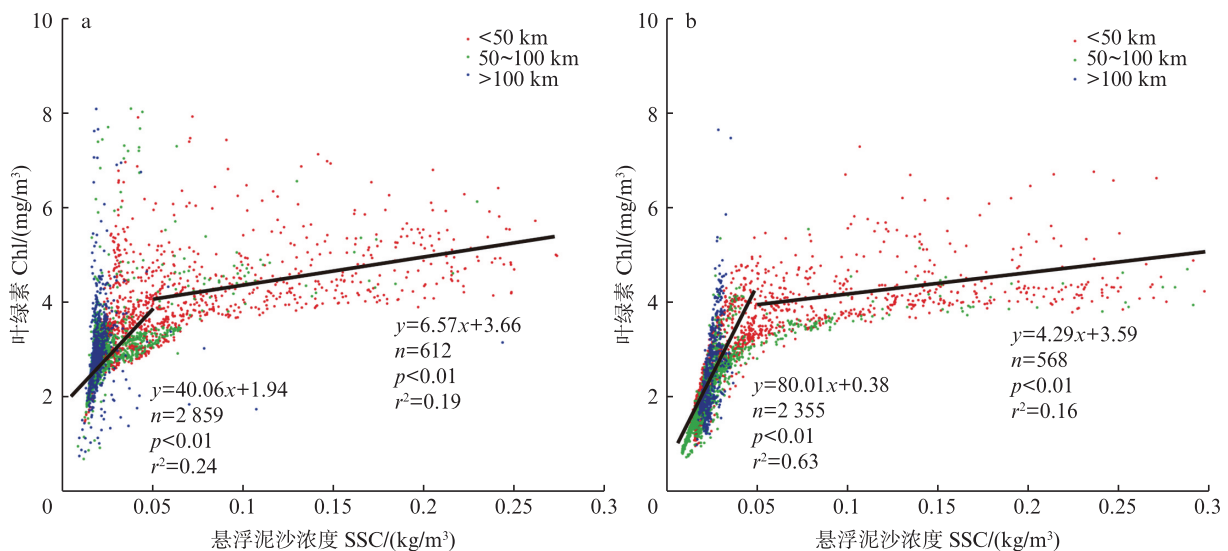
80.011)较大,叶绿素a质量浓度变幅大(1~10 mg/m³),调水调沙后(图12b)远河口低浊度海域叶绿素a质量浓度小于2 mg/m³的点大幅增加,同时近河口区的斜率和截距同步降低,表明调水调沙带来的泥沙浓度升高的光限制效应较营养盐增加对初级生产的促进作用要更显著。

3.4 调水调沙期间的浮游植物生态动力学过程

根据悬浮泥沙扩散的范围对河口附近海域以及莱州湾的悬浮泥沙、叶绿素a和营养盐进行统计分析,统计范围如图2b所示。图13为营养盐和叶绿素a质量浓度变化图,调水调沙前黄河口附近海域硝酸盐平均浓度为37 mmol/m³,调水调沙开始后黄河口硝酸盐浓度有明显上升(图13a),随着小潮到来,悬浮泥沙下降、促进浮游植物(叶绿素a质量浓度)繁殖(图13b),硝酸盐浓度开始下降,在6月30日左右达到调水调沙期的最低,之后随着调水调沙的进行硝酸盐浓度又逐渐升高,在7月10日达到最大值45 mmol/m³,最大氮磷比达90左右;调水调沙结束后硝酸盐浓度开始下降,到7月20日时硝酸盐浓度开始稳定在40 mmol/m³左右,氮磷比减低至80以下。磷酸盐浓度变化与硝酸盐相似,调水调沙前磷酸盐浓度在0.45 mmol/m³左右,调水调沙结束时磷酸盐浓度最大达到0.47 mmol/m³,调水调沙结束后磷酸盐浓度保持平稳并有上升趋势。莱州湾平均硝酸盐浓度较低调水调沙期间变化不大,调水调沙

期间平均浓度为27.2 mmol/m³,磷酸盐浓度与黄河口附近海域的磷酸盐浓度变化相似,但浓度低于黄河口附近海域的磷酸盐浓度,调水调沙期间平均浓度为0.45 mmol/m³。

从悬浮泥沙和叶绿素a的变化可以看出,调水调沙前黄河口附近海域表层悬浮泥沙浓度为0.17 kg/m³,调水调沙开始后悬浮泥沙浓度开始迅速上升,6月25日(农历十六)达到排水期平均浓度最大值0.26 kg/m³,此后开始下降,排沙期开始时悬浮泥沙浓度有上升的趋势,并在7月11日达到最大值0.29 kg/m³,调水调沙结束后悬浮泥沙浓度开始下降,7月20日时表层悬浮泥沙浓度下降到0.13 kg/m³。黄河口海域悬浮泥沙浓度既受到7月10~13日排沙期的影响,又具有明显的潮周期规律。调水调沙开始时,黄河口叶绿素a质量浓度在5 mg/m³左右,调水调沙开始时叶绿素a质量浓度迅速上升,在7月10日达到最大值5.6 mg/m³,调水调沙结束后叶绿素a质量浓度开始下降,7月25日叶绿素a质量浓度降到4.8 mg/m³。黄河口附近海域叶绿素a质量浓度明显受到悬浮泥沙浓度和营养盐浓度变化的综合影响。莱州湾整体悬浮泥沙变化趋势与黄河口附近海域变化一致,调水调沙期间有所升高,但变化不大。调水调沙期间莱州湾悬浮泥沙和叶绿素a质量浓度呈现基本同步的变化规律,但浓度显著偏低(图13b)。

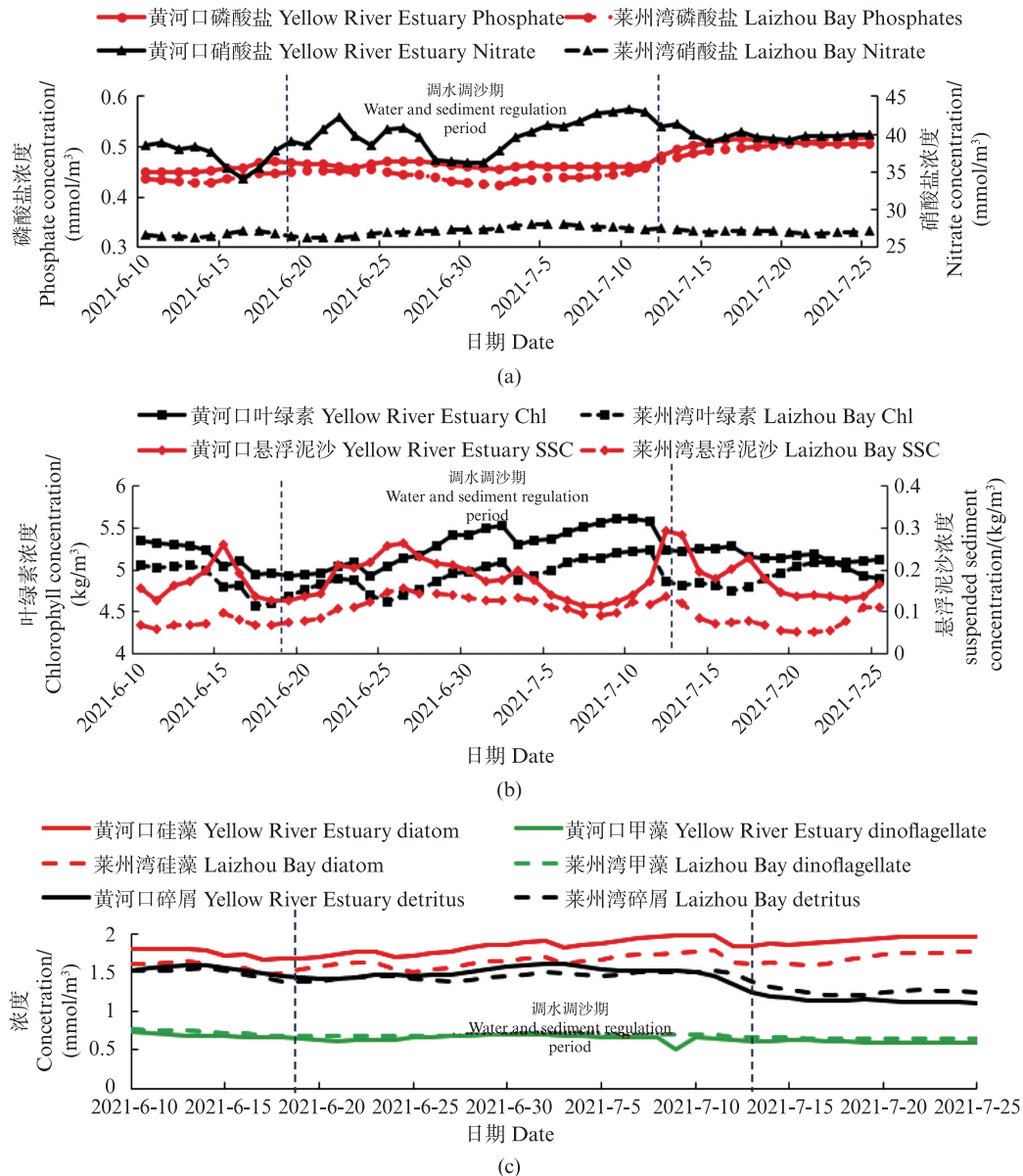


a. 2021年6月19日(调水调沙前); b. 2021年7月18日(调水调沙后)。

a. June 19, 2021 (before water and sediment regulation); b. July 18, 2021 (after water and sediment regulation).

图12 遥感叶绿素a与悬浮泥沙线性拟合

Fig. 12 Linear fitting diagram of remote sensing chlorophyll-a and suspended sediment



a. 营养盐变化曲线; b. 叶绿素 a 和悬浮泥沙变化曲线; c. 浮游植物和碎屑变化曲线。

a. Nutrient salt change curve; b. Chlorophyll-a and suspended sediment change curve; c. Phytoplankton and detritus change curves.

图 13 调水调沙前后营养盐和叶绿素 a 质量浓度变化

Fig. 13 Changes in chlorophyll-a mass concentration before and after water and sediment regulation

调水调沙期间黄河口和莱州湾海域的硅藻生物量都有所增加,黄河口硅藻生物量要大于莱州湾的硅藻生物量,而黄河口和莱州湾的甲藻生物量变化不大,调水调沙期间保持在 0.7 mmol/m^3 ,原因可能是调水调沙期间的水温超过了甲藻的最适生长温度。黄河口和莱州湾海域的有机碎屑浓度的变化接近,在调水调沙期间有所增加,调水调沙结束后伴随着叶绿素 a 质量浓度降低、磷酸盐浓度增加而减小(图 13a、13b、13c),表明有机碎屑矿化减少的量大于浮游植物死亡增加的量。与此同时,硝酸盐浓度在调水调沙后较

调水调沙高峰期降低表明本海域硝酸盐增量更多来源于黄河等入海径流的陆源输入。

4 结论

通过分析遥感资料和生态动力学数值模型结果,黄河调水调沙过程会影响河口附近海域的悬浮泥沙输运和浮游生物量变化,结论如下:

(1) 调水调沙能显著改变河口处冲淡水 and 悬浮泥沙的分布和扩散。调水调沙开始时,河口处泥沙浓度最大值为 0.6 kg/m^3 ,排水期表层悬浮泥沙的扩散范围明显比非调水调沙期的范围大,河

口处最大值为 2.1 kg/m^3 ;排沙期悬浮泥沙扩散范围与排水期悬浮泥沙扩散范围基本一致,口门处悬浮泥沙最大值为 1.6 kg/m^3 ,说明排沙期虽然含沙量高,但是河流流量减小,大量泥沙更多堆积在临近口门处。

(2)根据示踪剂的扩散和盐度、悬沙变化范围,表明调水调沙期间黄河口陆源物质输入主要集中在河口南北两侧,南侧扩散范围较北侧大。

(3)调水调沙活动显著影响了黄河口附近海域的营养盐和叶绿素 a 分布。调水调沙前海域硝酸盐浓度即呈现由西向东降低趋势,莱州湾湾顶浓度高于湾口,调水调沙期间氮磷比增大,径流带来丰富的营养盐有助于促进浮游植物的生长。本研究更多聚焦于营养盐-悬浮泥沙-浮游植物之间的相互作用,但实际有害藻华的爆发是多重生态环境因子耦合作用的结果,包括温度、光照周期、微量元素、水体层化、混合状态及背景环流等。本研究结论仅作为解析复杂生态系统机制的一部分,未来需结合多因素综合分析以更全面地揭示藻华动态发展机制。

在管理实践中,本研究结果可为优化黄河口调水调沙方案及藻华防控提供科学参考,但相关策略的制定仍需基于长期实地观测、多模型对比验证以及跨学科数据整合,以充分评估生态响应的时空异质性和不确定性。后续研究将结合原位监测与多情景模拟,进一步完善调控措施的科学基础,助力黄河口水生生态系统的可持续发展。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李庆余,王爱美,吴晓,等. 调水调沙影响下黄河口泥沙异重流过程[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(8): 52-63.
LI Q Y, WANG A M, WU X, et al. Water and sediment regulation of the Yellow River and its impact on hyperpycnal flow in the estuary [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(8): 52-63.
- [3] 杨洋,陈沈良,徐丛亮. 黄河口滨海区冲淤演变与潮流不对称[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 13-25.
YANG Y, CHEN S L, XU C L. Morphodynamics and tidal flow asymmetry of the Huanghe River Estuary [J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 13-25.
- [4] 王海龙,韩树宗,郭佩芳,等. 潮流对黄河入海泥沙在渤海中输运的贡献[J]. *泥沙研究*, 2011(1): 51-59.
WANG H L, HAN S Z, GUO P F, et al. Transportation of sediment from Yellow River in Bohai Sea due to tidal currents [J]. *Journal of Sediment Research*, 2011(1): 51-59.
- [5] 曾明,孙效功,范德江. 黄河调水调沙期间入海泥沙沉积动力过程的数值模拟[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(4): 81-92.
ZENG M, SUN X G, FAN D J. Numerical simulating on sediment transportation in the estuary and its adjacent areas during the water and sediment regulation period of the Huanghe River [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(4): 81-92.
- [6] 王柯萌,孙永福,宋玉鹏,等. 调水调沙对黄河三角洲切变锋及冲淡水扩散的影响[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(4): 551-564.
WANG K M, SUN Y F, SONG Y P, et al. Characteristics of shear fronts and dispersal of diluted water during the water-sediment regulation scheme in Yellow River Delta [J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(4): 551-564.
- [7] SNOW G C, BATE G C, ADAMS J B. The effects of a single freshwater release into the Kromme Estuary. 2: Microalgal response [J]. *WATER SA*, 2000, 26(3): 301-310.
- [8] 孙珊,苏博,李凡,等. 调水调沙对黄河口及邻近海域环境状况的影响[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(3): 399-406.
SUN S, SU B, LI F, et al. Effects of water and sediment discharge regulation on environment in the Yellow River Estuary and adjacent waters [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(3): 399-406.
- [9] 姚庆祯,于志刚,王婷,等. 调水调沙对黄河下游营养盐变化规律的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3534-3540.
YAO Q Z, YU Z G, WANG T, et al. Effect of the first water-sediment regulation on the variations of dissolved inorganic nutrients' concentrations and fluxes in the lower mainchannel of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12): 3534-3540.
- [10] 吴念,刘素美,张桂玲. 黄河下游调水调沙与暴雨事件对营养盐输出通量的影响[J]. *海洋学报*, 2017, 39(6): 114-128.
WU N, LIU S M, ZHANG G L. Impacts of water-sediment regulation and rainstorm events on nutrient transports in the lower Huanghe River [J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(6): 114-128.

- [11] 刘浩,尹宝树.渤海生态动力过程的模型研究 I. 模型描述[J]. 海洋学报, 2006, 28(6): 21-31.
LIU H, YIN B S. Model study on Bohai ecosystem I. Model description and primary productivity[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(6): 21-31.
- [12] 刘浩,尹宝树.渤海生态动力过程的模型研究 II. 营养盐以及叶绿素 a 的季节变化[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 20-33.
LIU H, YIN B S. Model study on Bohai ecosystem II. Annual cycle of nutrient-phytoplankton dynamics [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(4): 20-33.
- [13] SONG N Q, WANG N, LU Y, et al. Temporal and spatial characteristics of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952-2014 [J]. Continental Shelf Research, 2016, 122: 77-84.
- [14] WU Z X, YU Z M, SONG X X, et al. The spatial and temporal characteristics of harmful algal blooms in the southwest Bohai sea [J]. Continental Shelf Research, 2013, 59: 10-17.
- [15] 栾青杉,康元德,王俊. 黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化(1960—2010)[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 913-921.
LUAN Q S, KANG Y D, WANG J. Long-term changes of phytoplankton community and diversity in adjoining waters of the Yellow River estuary (1960-2010) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 913-921.
- [16] 吴傲琳,钟正浩,于松,等. 近 20 年黄河口营养盐结构演变及现状研究[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 1-13.
WU A L, ZHONG Z H, YU S, et al. The current status and 20 years of evolution of nutrient structure in the Yellow River estuary [J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 1-13.
- [17] 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.
- [18] 计建强,汪一航,王新怡,等. 夏季黄河入海泥沙的数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 118-127.
JI J Q, WANG Y H, WANG X Y, et al. A numerical study of the transport process of Yellow River sediment in summer[J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 118-127.
- [19] LAI Z G, MA R H, GAO G Y, et al. Impact of multichannel river network on the plume dynamics in the Pearl River estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(8): 5766-5789.
- [20] WARNER J C, PERLIN N, SKYLLINGSTAD E D. Using the Model Coupling Toolkit to couple earth system models[J]. Environmental modelling & software, 2008, 23(10/11): 1240-1249.
- [21] 王泉斌,秦平,赵晓晨. 世界首颗静止轨道海洋水色卫星应用研究进展[J]. 海岸工程, 2017, 36(2): 71-78.
WANG Q B, QIN P, ZHAO X C. Advances in the application study of the first geostationary ocean color imager[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(2): 71-78.
- [22] LEE J, KIM K, RYU J H. A study on the possibility of short-term monitoring of coastal topography changes using GOCI-II [J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2021, 37(5/2): 1329-1340.
- [23] 宋振杰,毕乃双,吴晓,等. 2010 年黄河调水调沙期间河口泥沙输运过程的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2018(1): 34-45.
SONG Z J, BI N S, WU X, et al. Numerical simulation on the process of sediment transport off the Yellow River mouth during the water-sediment regulation scheme in 2010 [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(1): 34-45.
- [24] HART-DAVIS M G, PICCIONI G, DETTMERING D, et al. EOT20: A global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3869-3884.
- [25] PAN H D, LV X Q, WANG Y Y, et al. Exploration of tidal-fluvial interaction in the Columbia River estuary using S_TIDE [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(9): 6598-6619.
- [26] BIAN C W, JIANG W S, GREATBATCH R J, et al. The suspended sediment concentration distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12(3): 345-354.
- [27] LIU Y H, WANG H J, CONG S, et al. Rapid oscillation of sediment transport between the Bohai Sea and the Yellow Sea induced by Typhoon Lekima (2019) [J]. Marine Geology, 2023, 465: 107160.
- [28] 钱思萌. 渤海中部低氧现象的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
QIAN S M. Simulation on formation of summer low oxygen zone in the Bohai Sea [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [29] 刘浩. 渤海生态系统关键物理生物过程的数值研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.
LIU H. Numerical study of the critical physical and biological processes in the Bohai Sea ecosystem [D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2005.
- [30] 魏皓,赵亮,冯士筌. 渤海浮游植物生物量与初级生产力变化的三维模拟[J]. 海洋学报, 2003, 25(S2): 66-72.
WEI H, ZHAO L, FENG S Z. Annual cycle of phytoplankton biomass and primary production in the Bohai Sea simulated by a three-dimensional ecosystem

- model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(S2): 66-72.
- [31] 刘菲菲. 渤海浮游植物生态系统动力学遥感与模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- LIU F F. The remote sensing and modeling study of the phytoplankton dynamics in the Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [32] 林军. 长江口外海域浮游植物生态动力学模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- LIN J. A modeling study of the phytoplankton dynamics off the Changjiang estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [33] MOLL A. Regional distribution of primary production in the North Sea simulated by a three-dimensional model [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, 16(1/2): 151-170.
- [34] COFFEY M E, WORKMAN S R, TARABA J L, et al. Statistical procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions [J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(1): 59-68.
- [35] 程心悦. 黄河口不同流路入海水沙输运扩散研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- CHENG X Y. Transport of river plume and sediments off the Yellow River mouth under changing estuarine outlets [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [36] 洪华生. 中国区域海洋学. 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- HONG H S. Regional Oceanography in China seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [37] 寿玮玮, 宗海波, 丁平兴. 夏季黄河入海径流对黄河口及附近海域环流影响的数值研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(7): 1-13.
- SHOU W W, ZONG H B, DING P X. Numerical study of the circulation influenced by runoff input in the Huanghe (Yellow) River Estuary and adjacent waters in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(7): 1-13.
- [38] 林道荣, 吴文凡, 刘子洲, 等. 莱州湾夏季环流垂向结构及其影响机制的研究[J]. *海洋科学*, 2023, 47(5): 54-65.
- LIN D R, WU W F, LIU Z Z, et al. Vertical structure of summer circulation in Laizhou Bay and its influencing mechanism[J]. *Marine Sciences*, 2023, 47(5): 54-65.
- [39] 孙慧慧. 黄河口邻近海域浮游植物群落结构时空变化及其对调水调沙的响应[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- SUN H H. Temporal and spatial variations of phytoplankton community in response to the water-sediment regulation event in the adjacent sea of the Yellow River Estuary [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [40] 王英, 张晶晶, 吕其明, 等. 调水调沙对黄河口近海浮游植物群落结构时空分布影响[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(3): 369-378.
- WANG Y, ZHANG J J, LYU Q M, et al. Effects of water and sediment regulation scheme on phytoplankton community and abundance in the Yellow River Estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(3): 369-378.

Numerical simulation of the effects of water and sediment regulation in the Yellow River on suspended sediment concentration and plankton ecosystem in the estuary and adjacent waters

XU Zeyu¹, ZHONG Wei¹, LIU Jianshi², LIN Jun^{1,3,4}

(1.College of Marine Science and Ecological Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Ocean Press, Beijing 100161, China; 3.Engineering Research Center of Marine Pasture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4.Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Remediation Technology, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200137, China)

Abstract: To study the water-sediment distribution and ecological environment changes in the Yellow River Estuary during the 2021 water and sediment regulation period, and to explore the impact mechanisms of water and sediment regulation on the hydrodynamics and ecological environment in the estuarine area, this paper is based on the Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM). A three-dimensional hydrodynamic and ecological model for the Bohai Sea was established, and remote sensing data were used to analyze the spatiotemporal variations of freshwater from the Yellow River, suspended sediment, nutrients, and chlorophyll-a concentration during the water and sediment regulation period. The results show that water and sediment regulation significantly altered the distribution and diffusion characteristics of freshwater and suspended sediment in the Yellow River Estuary. During the regulation period, the concentration of suspended sediment and nutrients in the estuarine area increased significantly, and the diffusion range of suspended sediment remained similar during both the sediment discharge and water discharge periods. However, due to the reduced river inflow, the diffusion range was somewhat limited during the sediment discharge period. Land-based substances were mainly concentrated on the southern and northern sides of the estuary, with the southern side having a wider diffusion range than the northern side. Meanwhile, during the water and sediment regulation period, the nitrogen-to-phosphorus ratio increased, and the input of nutrients promoted phytoplankton growth, leading to a significant increase in chlorophyll-a concentration. However, the increase in suspended sediment concentration caused light limitation, which partly offset the positive effect of increased nutrients on primary production. The study suggests that setting the sediment discharge period after the water diversion period is crucial for reducing light limitation and preventing harmful algal blooms. This research provides scientific guidance for optimizing the water and sediment regulation plan in the Yellow River Estuary, effectively controlling algal blooms, and maintaining the ecological environment.

Key words: water and sediment regulation; chlorophyll-a; sediment transport; ecological model; numerical simulation; Yellow River Estuary