



水库调控下黄河口沉积有机碳的分布、来源与输运特征

党 瑶, 刘夙睿, 王厚杰, 卢泰安, 吴 晓, 毕乃双, 胡利民

Distribution, source, and transport of particulate organic carbon in the Yellow River estuary as affected by the water-sediment regulation

DANG Yao, LIU Surui, WANG Houjie, LU Taian, WU Xiao, BI Naishuang, and HU Limin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023012401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

调水调沙期间黄河口羽状流的逐时变化

Hourly change in sediment plume at the Yellow River mouth during the water-sediment regulation

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 41-51

南黄海废黄河口近岸海域近底部悬沙输运观测

Observation of near-bottom transport of suspended sediment in the offshore area of abandoned Yellow River mouth

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 38-48

苏北废黄河口表层沉积物分布特征及其控制因素

Distribution pattern of surface sediments around the abandoned Yellow River estuary of North Jiangsu Province and its controlling factors

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 118-126

南极罗斯海柱样沉积物中有机碳和氮元素地球化学特征及其来源

Geochemical characteristics and source of organic carbon and nitrogen in the column sediments from the Ross Sea, Antarctica

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 83-90

椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制研究

Suspended transportation and flux mechanism of sediment in the Jiaojiang Estuary in spring

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 41-51

辽河口海岸带沉积物中¹³⁷Cs的分布特征及来源

Distribution pattern and source of ¹³⁷Cs in the sediment cores from the Liao River Estuary

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 91-99



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

党瑶, 刘凤睿, 王厚杰, 等. 水库调控下黄河口沉积有机碳的分布、来源与输运特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 120-130.
DANG Yao, LIU Surui, WANG Houjie, et al. Distribution, source, and transport of particulate organic carbon in the Yellow River estuary as affected by the water-sediment regulation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 120-130.

水库调控下黄河口沉积有机碳的分布、来源与输运特征

党瑶¹, 刘凤睿², 王厚杰¹, 卢泰安¹, 吴晓¹, 毕乃双¹, 胡利民¹

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. 黄河水利委员会山东水文水资源局利津水文站, 东营 257400

摘要:黄河是全球输沙量最大的河流之一, 陆源颗粒有机碳通量高。然而, 近年来流域水库调控对黄河下游水文格局和颗粒有机碳输送产生了重要影响, 小浪底水库调水调沙时期成为黄河水沙和有机碳入海的关键时段。为揭示水库调控对河口水动力和有机碳分布的影响机制, 基于2020年7月调水期和调沙期黄河口的水动力观测结果, 结合沉积物有机碳测试结果, 研究了水库调控不同阶段下河口沉积物粒度参数和表层沉积物有机碳的时空分布。研究结果表明, 水库不同阶段下悬浮颗粒物的物源和主要扩散、沉积区域的变化, 使得黄河口表层沉积物的粒度组成特征发生明显变化; 在高径流量的调水期期间, 粗颗粒泥沙携带颗粒有机碳在河口距离口门12 km范围内大量埋藏, 河口区域表层沉积物的有机碳含量相较于调沙期明显偏低。调水期黄河口陆源有机碳主要来自下游河床冲刷, 颗粒较粗, 调沙期则转变为水库释放的细颗粒有机碳和流域C₃维管植物碎屑。水库调控的不同阶段使得黄河下游河流水动力格局和泥沙运输机制改变, 从而引起黄河口沉积有机碳来源和分布的显著变化。因此, 人类活动对调节有机碳向海洋的输送及其在近岸海域的分布具有主导性作用。

关键词: 调水调沙; 颗粒有机碳; 沉积物输运; 黄河口

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023012401

Distribution, source, and transport of particulate organic carbon in the Yellow River estuary as affected by the water-sediment regulation

DANG Yao¹, LIU Surui², WANG Houjie¹, LU Taian¹, WU Xiao¹, BI Naishuang¹, HU Limin¹

1. College of Marine Geosciences/Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technologies, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Lijin Hydrological Station, Shandong Hydrology and Water Resources Bureau, YRCC, Dongying 257400, China

Abstract: The Yellow River, one of the highest sediment-laden rivers, discharges a huge amount of terrestrial particulate organic carbon (POC) to the sea. However, the reservoir regulations over recent decades have significantly affected the downstream hydrology and POC delivery. The Water-Sediment Regulation Scheme (WSRS) has become a critical time window for the impulse discharges of water, sediment, and POC to the estuary. We investigated the impacts of the WSRS on the estuarine dynamics and POC distribution based on the sampling and observations in the Yellow River estuary in July 2020 corresponding to the two stages (water-regulation stage and sediment-regulation stage) of the WSRS. The distributions of grain-size composition and POC content of surface sediments were presented according to the datasets of in-laboratory analysis. Results indicated that there was a clear turning point of variation in sediment source, grain-size composition, and the POC distribution at the two stages. At the water-regulation stage, the water discharge was high and sediments were relatively coarser and mostly deposited nearshore (<12 km off the river mouth) with low POC content, while at the sediment-regulation stage, fine-grained sediments were delivered offshore with significant increase in POC content. POC in surface sediments at the water-regulation stage was sourced mainly from the lower river erosion, while that at the sediment-regulation stage was composed of the dam-released soil carbon and C₃ vascular plant debris. The rapid changes in POC source and distribution in the Yellow River estuary were controlled by the reservoir regulation, which significantly changed the

资助项目: 国家自然科学基金“黄河流域生态系统变化与生态屏障效应”(42041005), “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); 山东省泰山学者项目(ZR2018BD028, 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: 党瑶(1998—), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: 364906824@qq.com

通讯作者: 王厚杰(1972—), 男, 教授, 主要从事近海沉积动力学研究, E-mail: hjwang@mail.ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-01-24; **改回日期:** 2023-03-11. 文凤英编辑

downstream hydrology and sediment transport. Therefore, human intervention can play an important role in regulating the seaward POC delivery and distribution in the coastal sea.

Key words: Water-Sediment Regulation; POC; sediment transport; Yellow River estuary

河流是连接陆地和海洋两大碳库的重要通道, 全球河流每年向海洋输送颗粒有机碳(POC)通量高达 200 Mt/a ($1 \text{ Mt} = 10^6 \text{ t}$), 河口作为陆地-海洋关键界面, 是入海颗粒有机碳的主要埋藏区域^[1]。随着河流筑坝等人类活动日益加剧, 河流至河口的水动力格局和有机碳输运过程受到显著影响。黄河是世界上输沙量最大的河流之一, 其年泥沙和 POC 通量分别高达 1080 Mt/a 和 4.5 Mt/a^[2-3]。近年来, 受到流域内气候变化和强烈人类活动(水库蓄水拦沙、水土保持、引水引沙等)的叠加影响, 黄河下游来水来沙显著降低^[4], 水沙关系不平衡导致下游出现河槽严重淤积萎缩、悬河加剧等现象^[5]。为缓解下游防洪压力和解决河道淤积问题, 2002 年黄河水利委员会开始实施调水调沙, 通过调控中游水库释放大量水沙, 使其在短时间内脉冲式冲刷下游河道并集中入海。近 20 年来, 调水调沙已经成为控制黄河下游及河口沉积环境演化最重要的工程措施之一^[6-8]。调水调沙期间大量水沙和有机碳脉冲式输送入海, 改变了河流水动力格局, 这将进一步影响河口水动力和有机碳循环过程。

前人通过大量的研究基本揭示了河口环境对水库调控这一事件性过程的响应^[9-13]。调水调沙在短期内将大量沉积物输送至河口区域, 河口区域沉积环境发生快速改变, 表层沉积物粒度发生了显著变化, 在调水调沙的不同时段, 沉积物的来源和粒度组成结构有显著差异, 这对河口有机碳的来源与输运过程有重要影响。目前已有的研究更多地集

中在某一固定阶段下的沉积物中有机碳的分布和来源情况^[14-16], 而对于调水调沙的不同阶段(调水期和调沙期)下有机碳物源和输运特征的改变以及其对河口动态水文格局的响应却鲜有研究报道。

本研究于 2020 年 7 月黄河调水调沙期间在黄河干流和黄河口海域展开调查, 收集了黄河利津水文站水体样品, 以分析悬浮体浓度及悬浮颗粒物的粒度组成, 并采集了黄河口的水样和表层沉积物, 分析了沉积物总有机碳含量(TOC)及碳稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}$), 并结合沉积物粒度特征, 对河口水动力影响下的沉积物有机碳的时空变化特征开展研究, 同时根据 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 建立了基于蒙特卡洛模拟的三端元混合模型, 定量研究了黄河口表层沉积物中不同来源有机碳的贡献和分布特点, 探讨水库调控不同环节下黄河口沉积有机碳的变化, 以揭示动态水文过程对河口有机碳输运的影响和调控机制。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在 2020 年黄河调水调沙期间, 于 6 月 20 日至 7 月 26 日在黄河利津水文站逐日采集水体样品, 并使用醋酸纤维膜现场抽滤以计算悬浮体浓度。在黄河口海域, 于 7 月 9—10 日(调水期)、7 月 16—17 日(调沙期)在河口进行了两次大面站采样调查, 第一次大面站的站位设置分为 A、B、C 三条

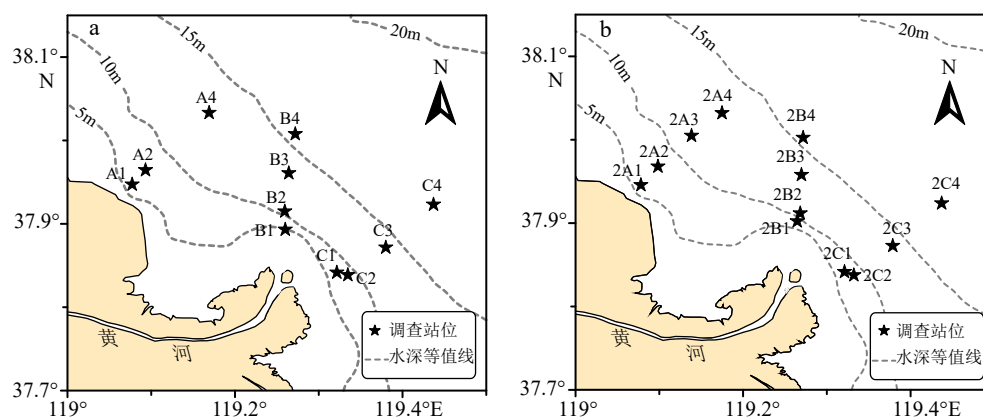


图 1 黄河口概况与调水期(a)和调沙期(b)的调查站位分布

Fig.1 Bathymetric map of the Yellow River estuary and deployment of sampling and observation station at water-regulation stage (a) and sediment-regulation stage (b)

断面(共11个站位),第二次大面站站位设置分为2A、2B、2C三条断面(共12个站位)(图1)。表层沉积物使用蚌式抓泥斗采集,现场装袋密封于-20℃条件下冷冻保存,用于沉积物有机碳氮含量及碳稳定同位素组成分析,另取一部分沉积物装袋密封保存用于沉积物粒度测试。

1.2 样品分析方法

使用经过50℃烘干并称重的醋酸纤维膜(0.45 μm)对水体样品进行现场抽滤,采用质量法计算水体中悬浮泥沙含量。取适量样品先后加入30%的过氧化氢和1 mol/L的盐酸去除样品中的有机质和碳酸盐,反应完全后进行离心处理,经过超声波震荡分散后,使用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000,英国马尔文)测定沉积物样品的粒度组成。沉积物样品经过冻干并研磨,使用1 mol/L的稀盐酸反应24 h以去除无机碳,使用元素分析仪(Vario MICRO Cube EA)—稳定同位素比值质谱(Isoprime IRMS)联用仪测定有机碳氮含量及碳稳定同位素参数。

1.3 基于蒙特卡洛模拟的三段元混合模型

为了估算黄河口表层沉积物有机碳中流域土壤来源、陆源C₃维管植物来源和海洋浮游植物来源三者的相对贡献,基于δ¹³C、C/N建立蒙特卡洛三段元混合模型:

$$\begin{aligned} C/N_{\text{样品}} &= f_{\text{土壤}} \times C/N_{\text{土壤}} + f_{\text{C}_3} \times C/N_{\text{C}_3} + f_{\text{海源}} \times C/N_{\text{海源}} \\ \delta^{13}\text{C}_{\text{样品}} &= f_{\text{土壤}} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{土壤}} + f_{\text{C}_3} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3} + f_{\text{海源}} \times \delta^{13}\text{C}_{\text{海源}} \\ f_{\text{海源}} + f_{\text{C}_3} + f_{\text{土壤}} &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,δ¹³C_{土壤}、δ¹³C_{C₃}及δ¹³C_{海源}分别为流域土壤有机碳、C₃维管植物有机碳及海洋浮游植物有机碳的δ¹³C端元值;C/N_{土壤}、C/N_{C₃}及C/N_{海源}分别为流域土壤有机碳、C₃维管植物有机碳及海洋浮游植物有机碳的C/N端元值;f_{土壤}、f_{C₃}及f_{海源}分别为流域土壤有机碳、C₃维管植物有机碳及海洋浮游植物有机碳的贡献率。由于黄河流域的植被分布以C₃维管植物为主,C₄维管植物较少^[15],因此未考虑C₄维管植物的贡献。

基于蒙特卡洛模拟的三段元混合模型,可以通过在端元值范围内随机产生1亿个符合正态分布的数字,再按正态分布随机选取符合公式(1)的100万个数字进行计算,最终得到流域土壤有机碳、C₃维管植物有机碳及海洋浮游植物有机碳的贡献率。该方法稳健、准确,已成功应用于黄河干

流颗粒有机碳^[17-18]、渤海沉积有机碳^[15]及长江口沉积有机碳^[19]等不同区域环境中有机碳来源的估算。

2 结果

2.1 黄河-河口水文要素的时空分布

2020年黄河调水调沙期间,小浪底水库于6月24日开始下泄清水。进入调水期,利津水文站径流量显著增加,由调控前的1400 m³/s增至4000 m³/s。水库下泄清水冲刷下游河道,利津站悬浮颗粒物浓度保持在10 kg/m³。调水期入海泥沙主要来源于河道冲刷的粗颗粒沉积物,河流悬浮颗粒物的中值粒径高达27 μm,悬浮颗粒物以粉砂(84%)和砂(10%)为主,黏土含量低(6%)。在调沙期,小浪底水库通过人工塑造异重流实现排沙出库,小浪底水文站所测泥沙浓度高达200 kg/m³。受水库调控影响,调沙期黄河下游径流量降低(1900 m³/s),悬浮颗粒物浓度显著升高,入海悬浮颗粒物浓度高达20 kg/m³,其主要来自黄土高原和小浪底水库冲刷的细颗粒泥沙,入海悬浮颗粒物中值粒径降低至16 μm,与调水期相比,粉砂组分含量降低至76%,黏土组分含量增加至15%(图2)。

受调水期和调沙期不同的水库调控模式影响,黄河下游的水文特征与河口的水文格局具有显著的阶段性变化。与孙珊等在调水调沙期间黄河口海域调查结果相似^[11],调水期间黄河口口门处盐度、温度等值线密集,冲淡水呈舌状向北扩展,进入调沙期后海域内盐度、温度回升,等值线从河口向外的两侧递增,冲淡水扩散范围明显缩小。在调水期,黄河入海口的两个分汉外各存在一个浊度中心,表明调水期间黄河冲淡水在两个汉口都有流量通过,泥沙扩散范围较大;调沙期间,黄河口北汉外浊度显著上升,表明此阶段有大量的泥沙在口门处快速堆积。

2.2 沉积物粒度参数分布特征

表层沉积物粒度分布特征可反映沉积物所处的沉积环境类型和水动力条件,对于判别物源也有重要指示意义。整个调水调沙期间黄河口表层沉积物的中值粒径(D₅₀)变化范围为9~61 μm(图3),两个阶段均呈现沉积物由近岸到外海逐渐细化的分布规律。由于水库调控期间黄河水动力过程和泥沙物源的改变,黄河口表层沉积物粒度参数分布特征在调水期和调沙期存在显著差异,在黄

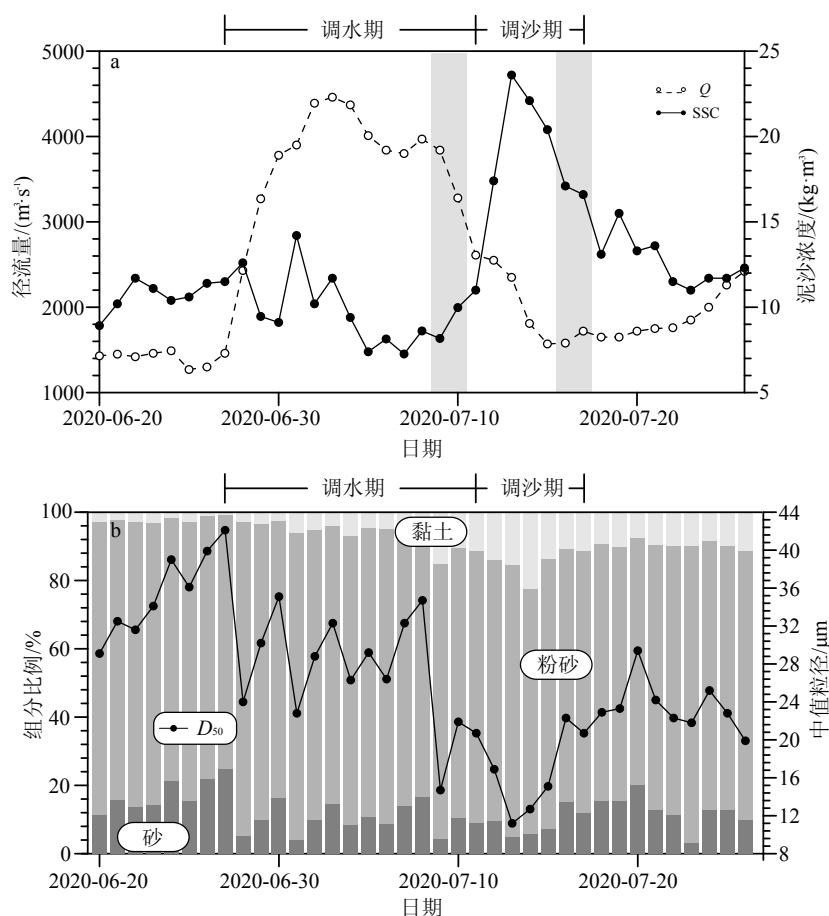


图 2 利津水文站 2020 年调水调沙期间流量 (Q) 和悬浮颗粒物浓度 (SSC) (a) 及粒度参数变化 (b)

其中图 a 阴影代表河口调查时间。

Fig.2 Daily water discharge (Q) and suspended sediment concentration (SSC) (a), parameters of grain-size distribution of suspended sediment (b) at Lijin gauge station during the water-sediment regulation in 2020

The grey stripes (a) indicate the time of field surveys.

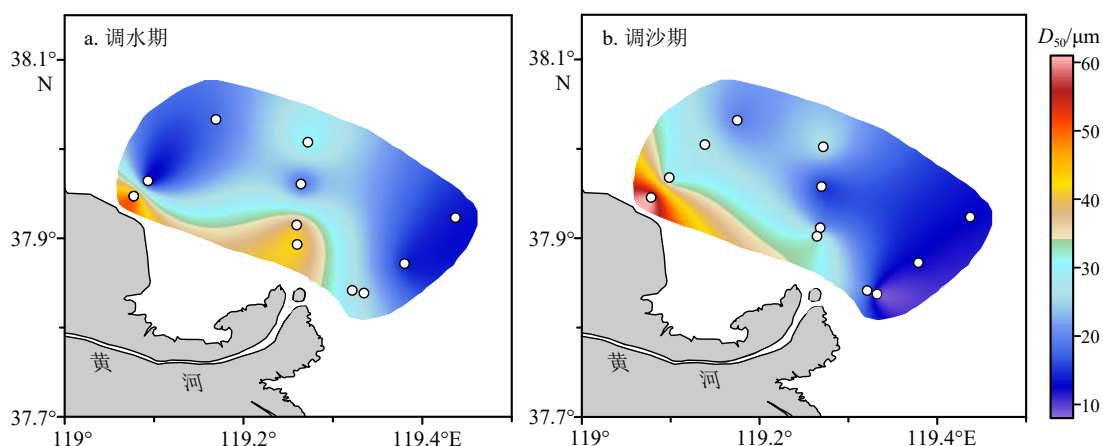


图 3 调水期和调沙期间黄河口表层沉积物中值粒径 (D_{50}) 时空分布

Fig.3 Distribution of the median grain size of surface sediment off the Yellow River estuary at water-regulation stage (a) and sediment-regulation stage (b)

河口门区域, 沉积物中砂、黏土组分含量分别由调水期的 19%、6% 变为调沙期的 13%、12% (图 4)。调水期口门沉积物主要物源来自黄河下游河道冲

刷提供的粗颗粒沉积物, 河口口门北、东两个汉口区域直接接受河流沉积物输入, 其中口门北汉口沉积物较粗, 中值粒径高达 $41\ \mu\text{m}$, 口门东汉口沉积物

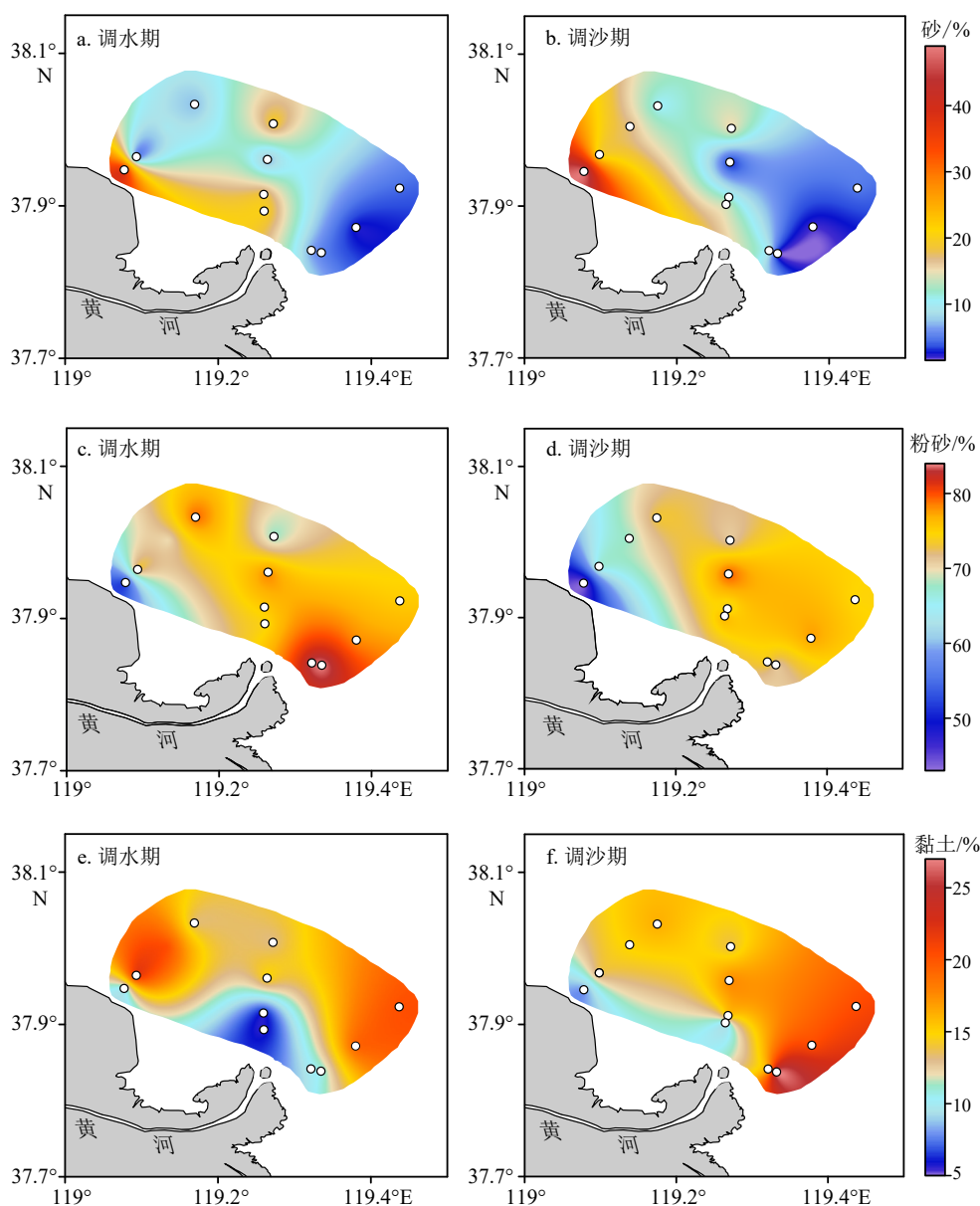


图 4 调水调沙期间黄河口表层沉积物各粒级组分百分含量时空分布

Fig.4 Distributions of fractional percentage of surface sediment off the Yellow River estuary at the water-regulation stage and sediment-regulation stage

中值粒径可达 $26\ \mu\text{m}$, 由岸向外海沉积物中值粒径降低至 $10\sim 20\ \mu\text{m}$; 在调沙期, 水库排放大量细颗粒泥沙入海, 黄河口近岸沉积物中值粒径转细, 口门区域北汉口和东汉口处沉积物中值粒径分别降低至 $27\ \mu\text{m}$ 和 $14\ \mu\text{m}$, 沉积物中值粒径 $31\ \mu\text{m}$ 的等值线在空间上向岸收缩。在调水调沙整个过程中, 孤东近岸接受的河流物质供给有限, 沉积物粒度一直保持较粗的状态。

2.3 沉积物有机碳及碳稳定同位素的时空分布

在调水调沙期间, 黄河口表层沉积物中 TOC 含量均值约为 0.4% , 整体波动范围不大。其中, 调水

期沉积物 TOC 含量均值($0.3\%\pm 0.2\%$)略低于调沙期沉积物 TOC 含量的均值($0.4\%\pm 0.2\%$), 呈现离河口越远 TOC 逐渐增大的空间分布特征(图 5)。在调水期, 黄河口门粗颗粒沉积区的沉积物 TOC 含量较低(小于 0.2%), 在调沙期, 小浪底水库排放的细颗粒沉积物被输送入海, 伴随着河口区域表层沉积物粒径相对变细, 沉积物 TOC 含量也相应地升高, 尤其在口门区域的东汉口处, TOC 含量达到了 0.4% 以上, 整个调查区的东侧沉积物 TOC 含量保持在较高水平。

在调水期, 研究区域内表层沉积物中有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 $-24.9\%\sim -22.8\%$, 平均为 -23.8% ; 调

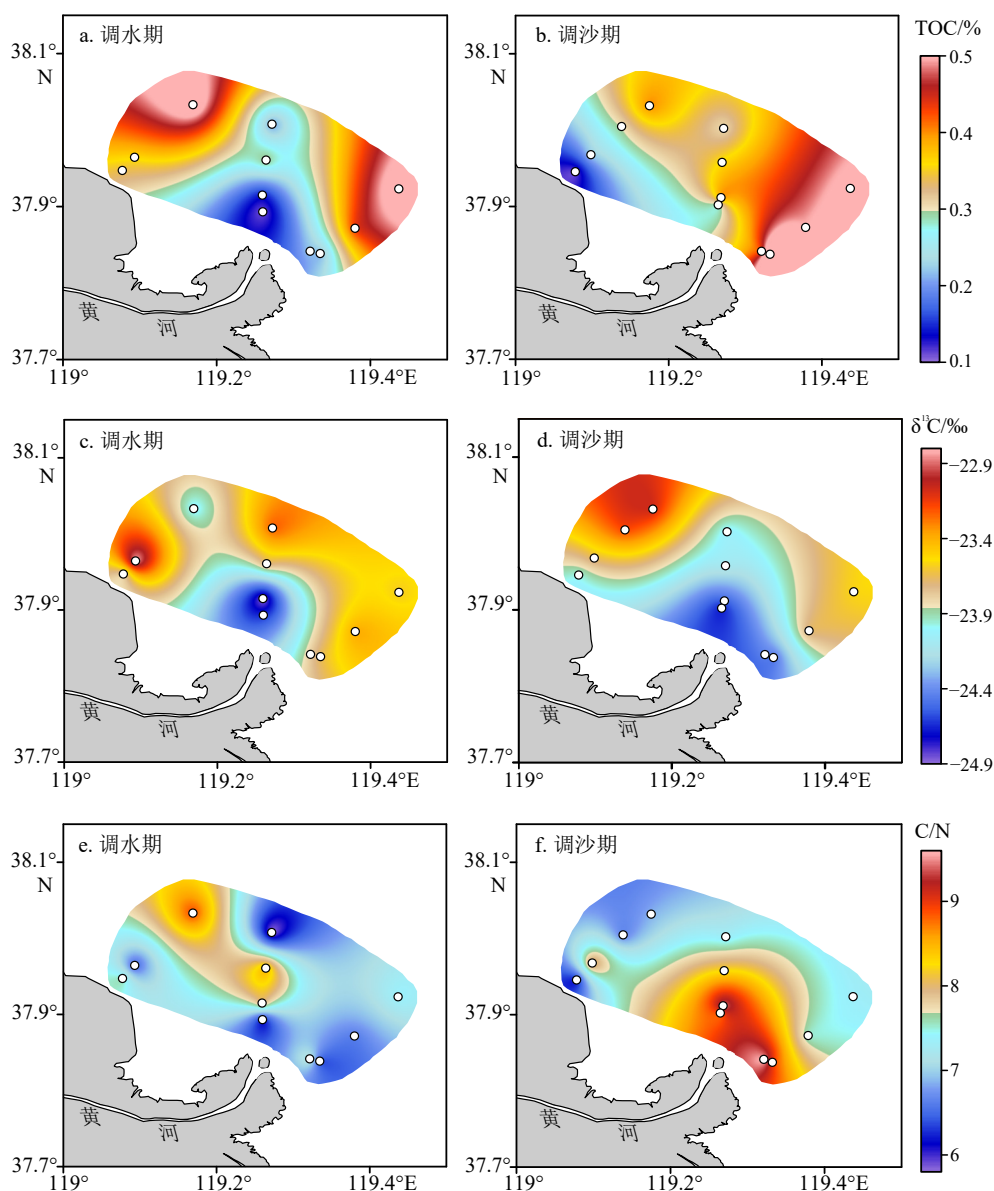


图 5 调水调沙期间黄河口表层沉积物有机碳含量 (TOC)、碳稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 和碳氮比 (C/N) 时空分布

Fig.5 Distributions of total organic carbon (TOC) content, stable isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and carbon-nitrogen ratio (C/N) off the Yellow River estuary at the water-regulation stage and sediment-regulation stage

沙期为 $-24.7\text{‰} \sim -23.1\text{‰}$, 平均为 -23.9‰ 。从图 5c、d 可看出, 调水期沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 亏损的区域主要分布在黄河口距离口门 12 km 的范围内, 调沙期表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负区域范围则更大, 最远可达 B4 站位 (17 km 以内)。在整个水库调控期间, 黄河口邻近海域的表层沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 分布规律始终为在近河口处均表现较为亏损, 并向外海逐渐偏正。C/N 比 (摩尔比) 在水库调控期间的范围为 5.8~9.6。在调水期近河口处表层沉积物的 C/N 约为 6.4~7.6, 高值 (7.8 以上) 主要出现在远离河口的 A4、B3 站位的西北方向; 在调沙期表层沉积物 C/N 高值主要集中在近河口区域 (8.4 以上), 向外逐渐减小。

3 讨论

3.1 水库调控不同阶段黄河口沉积物的物源变化

研究表明, 调水调沙的持续时间平均每年只有约 20 天, 但向海输送的淡水量和沉积物量分别占全年总量的 28% 和 54%^[20]。自 2002 年调水调沙施行以来, 黄河入海泥沙中值粒径从 $18\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $27\text{ }\mu\text{m}$ ^[21], 黄河下游冲刷河床的粗颗粒沉积物成为入海泥沙的重要物源^[22]。在 2020 年 7 月初调水期径流量增长至非汛期的 4~5 倍, 此阶段相较于调沙

期会产出更多下游河床冲刷的粗颗粒沉积物;在调沙期,黄河径流量逐渐降低,小浪底水库释放高浓度的异重流出库,沉积物浓度上升至 200 kg/m^3 以上,利津水文站黄河含沙量迅速升高,由调水期 10 kg/m^3 迅速提升至调沙期的 24 kg/m^3 ,此阶段入海沉积物颗粒较细,主要来源为黄土高原和水库冲刷产生的细颗粒物。调水调沙不同阶段下黄河下游干流的沉积物物源和水动力格局的变化,导致黄河口外海域水文格局和沉积物的粒度参数特征也随之改变。

调水期水库释放清水出库,高径流量冲刷下游河道,大量粗颗粒沉积物入海,造成河口口门沉积物粗化明显,砂和粉砂组分含量较高,黏土组分含量较低;在调沙期,水库排放大量细颗粒沉积物入海,由于河口区域水动力较弱,细颗粒沉积物在口门大量沉降,在调水期粗颗粒沉积之上形成细颗粒沉积盖层,黄河口近岸沉积物中值粒径由粗转细,表层沉积物黏土含量增加。夏季调水调沙期间,黄河入海后的沉积物主要分布在河口近口门附近,尤其是粗颗粒沉积物集中在近口门 12 km 以内,外海粒度变化则较小,这表明黄河入海沉积物在河口区域快速就地沉积,其中黄河径流量较低、冲淡水扩散受限,河口存在切变锋的阻碍作用,以及夏季河口稳定的沉积环境都在一定程度上限制了沉积物的向外扩散。

3.2 黄河口沉积有机碳分布的粒控效应

黄河自 2002 年开始实施调水调沙工程,入海沉积物普遍以异轻羽状流的形式向外海输运,绝大多数沉积在离河口 20 km 以内的区域^[23]。黄河入海沉

积物主要来源于中游的黄土高原,产沙模数可达 $10^3 \sim 10^4 \text{ t/km}^2$ ^[24]。黄土沉积物颗粒有机碳(OC)含量较低,研究表明,黄土高原典型土壤有机碳含量(SOC)范围分布于 $0.07\% \sim 0.8\%$ ^[25]。Zhang 等^[26]沿黄河干流采集多年的悬浮体样品进行检测,结果表明黄河中下游悬浮颗粒物有机碳 POC 集中在 $0.2\% \sim 0.8\%$ 左右。Ran 等^[27]在黄河利津每月一次采集水样测得颗粒有机碳含量范围为 $0.4\% \sim 0.8\%$ 。黄河入海的悬浮颗粒物中的 POC 作为河口区域沉积物沉积有机碳的重要来源,成为影响沉积物中 TOC 分布及含量变化的因素之一。本次调水调沙期间在黄河口采集表层沉积物的 TOC、TN 数据的整体浮动范围与乔淑卿等^[28]、Liu 等^[14]、于广磊等^[29]已发表文献数据相近,并呈现显著的沉积物粒径控制效应。

水动力分选对颗粒有机碳的分布和输运发挥关键作用,具有较高比表面积和吸附能力的细颗粒物是有机碳的主要载体,沉积物有机碳含量与粒度相关性显著,且细粒级沉积物的总有机碳百分比一般高于粗粒级沉积物^[30]。黄河 80% 以上颗粒有机碳富集在粒径 $< 32 \mu\text{m}$ 的沉积物颗粒中,小浪底水库调水调沙期间,沉积物粒度的显著变化进一步影响了河口有机碳的输运过程。近口门的粗颗粒沉积物对应着较低的 TOC 含量,而外海细颗粒区域的 TOC 含量较高,表层沉积物的 TOC 含量空间分布与沉积物中值粒径呈现相反的分布特征。本文的结果显示,在水库调控期间,黄河口表层沉积物中的有机碳含量与中值粒径存在显著的负相关关系(图 6),反映了沉积物粒度对 TOC 含量分布的控制效应。

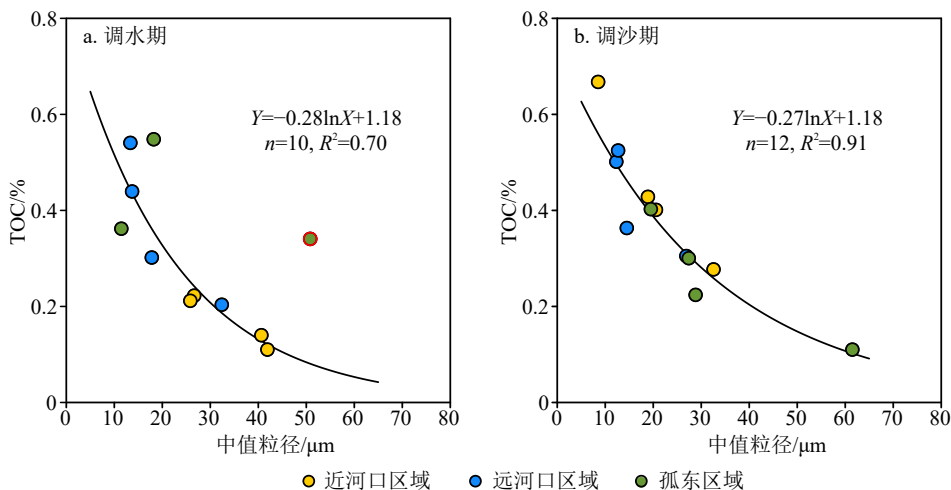


图 6 调水期与调沙期表层沉积物 TOC 与中值粒径分布散点图

Fig.6 Relationships between median grain size of sediment and TOC at water-regulation stage and sediment-regulation stage

从沉积物 TOC 含量和粒度组分含量的空间分布来看, 调水期和调沙期的沉积物有机碳含量分布与黏土组分含量分布更为相似, 基于 SPSS 软件分别对调水期和调沙期的实验数据进行 Spearman 相关性分析, 结果见表 1。在水库调控的两个阶段中, TOC 含量与粉砂和黏土含量存在一定的正相关关系, 而与粗粒的砂组分含量有负相关关系, 其中与黏土之间的相关系数值分别为 0.75、0.94, 呈显著正相关, 表明黄河口细颗粒组分具有更高的有机碳富集能力。在调沙期, 河口沉积物粒度变细, 黏土组分增加, 细颗粒沉积物携带高含量有机碳, 有利于陆源有机碳被输运到离河口较远的区域。

按照采样站位距离河口的位置, 将研究区分为近、远河口和孤东三大区域。进一步分析发现, 在调水期, TOC、TN 含量与黄河口门距离呈现显著的线性相关; 在调沙期, TOC、TN 含量与黄河口门距离的线性相关性减弱, 可能是调沙期间黄河口表层沉积物受黄河运输的影响有所减弱。在整个水库调控期间, 孤东区域的整个断面的表层沉积物 TOC、TN 含量变化范围较为分散, 整体表现出离河口越近值越低的变化规律; 远河口区域的表层沉积物 TOC、TN 含量在调水期和调沙期变化不大, 表明其受调水调沙影响较小; 而近河口区域的表层沉积物 TOC、TN 含量在调水期较低、调沙期升高, 表明水库调控不同阶段下影响区域主要是在近河口区域内。

3.3 水库调控下黄河口沉积有机碳物源解析

C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 通常用于指示有机碳物源^[31-32], 不同来源的有机碳类型有不同范围的 C/N 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 。一般认为, 海洋浮游生物来源的 C/N 值为 5~7, 陆生植物大于 15 以上^[33]; 黄土高原的陆源有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 $-21.4\text{‰} \sim -30\text{‰}$ ^[34], 海源有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 $-21\text{‰} \sim -19\text{‰}$ ^[35]。为了进一步定量计算水库调控不同阶段黄河口表层沉积物中不同来源有机碳的保存情况, 本文利用陆源和海源有机碳具有不同的 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的机理, 采用基于蒙特卡洛模拟

的三端元混合模型来估算河口沉积物中流域土壤来源、 C_3 维管植物来源以及海洋浮游生物有机碳的相对贡献。在前人研究基础上^{[17][19]}, 本文端元值采用黄河流域土壤有机碳的 C/N 为 4.8 ± 1.2 、 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-24.1\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$, C_3 维管植物有机碳的 C/N 为 30.7 ± 17.4 、 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-28.1\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$, 海洋浮游生物有机碳的 C/N 为 6.5 ± 1.5 、 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-20.0\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$ 。

调水期和调沙期黄河口表层沉积物的三端元混合模型的结果见图 7。在整个水库调控期间, 陆源有机碳(包括流域土壤来源和 C_3 维管植物来源)始终是沉积有机碳的主要来源, 占 50% 以上(图 7), 其中流域土壤来源有机碳贡献始终最高(除调水期 A2 站位为 49% 外, 其余均在 50% 以上)。在调水期到调沙期间, C_3 维管植物碎屑来源贡献占比整体有所升高, 从平均 16.8% 增至 19.6%。由黄河口向渤海延伸, 陆源有机碳贡献占比在整个水库调控期间呈下降趋势, 而海洋浮游生物来源有机碳贡献占比在水库调控期间均值一直为 26%~27%, 波动范围不大, 且向外海逐渐升高。

在调水期, 流域土壤有机碳的贡献呈现由河口向外海逐渐降低的趋势, 其最高值出现在近河口的 B1 站位, 达到 62%。 C_3 维管植物来源的有机碳贡献较高值出现在河口向 A4 站位方向的路径上, 与 $\delta^{13}\text{C}$ 较低和 C/N 高值分布区域相吻合, 初步推断可能是密度低的植物碎屑被冲淡水输运至更远的距离, 最终在西北区域沉积; 在调沙期, C_3 维管植物来源有机碳贡献高值主要出现在近河口站位, 比调水期明显增强, 这可能是由于径流量降低导致黄河水动力不足, 使得更多的植物碎屑快速堆积在近河口区域, 因而调沙期近河口的表层沉积物呈现低 $\delta^{13}\text{C}$ 、高 C/N 值的特征。此外, 在调沙期, 河口大部分区域的流域土壤来源的有机碳贡献占比数值集中, 表明此期间来自入海沉积物的扩散较为均匀, 孤东区域沉积物中流域土壤来源的有机碳贡献占比同调水期的变化较小, 其物源供应处于较为稳定的状态。

结合 TOC 和粒度空间分布分析, 两个阶段尤其是调水期的黄河近河口区域表层沉积物 TOC 普遍较低、粒度较粗, 且端元模型计算结果显示调水期近河口区域的流域土壤来源有机碳贡献占比较高, 这可能是粗颗粒沉积物的矿物颗粒具有明显的稀释效应, 造成有机碳含量低; 而远河口区的沉积物的沉积环境可能受河流流量的影响较小, 其有机碳主要来源于海洋浮游植物的贡献, 导致了沉积物中 TOC 较高, $\delta^{13}\text{C}$ 更偏正, C/N 值较低, 这与端元模型

表 1 TOC 含量与各粒级组分含量相关性分析

Table 1 Correlations of TOC content and each fractional percentage of sediment

不同时期黄河口表层沉积物 TOC 含量	砂含量	粉砂含量	黏土含量
调水期	-0.54	0.10	0.75**
调沙期	-0.90**	0.50	0.94**

注: *为 $p < 0.05$, **为 $p < 0.01$ 。

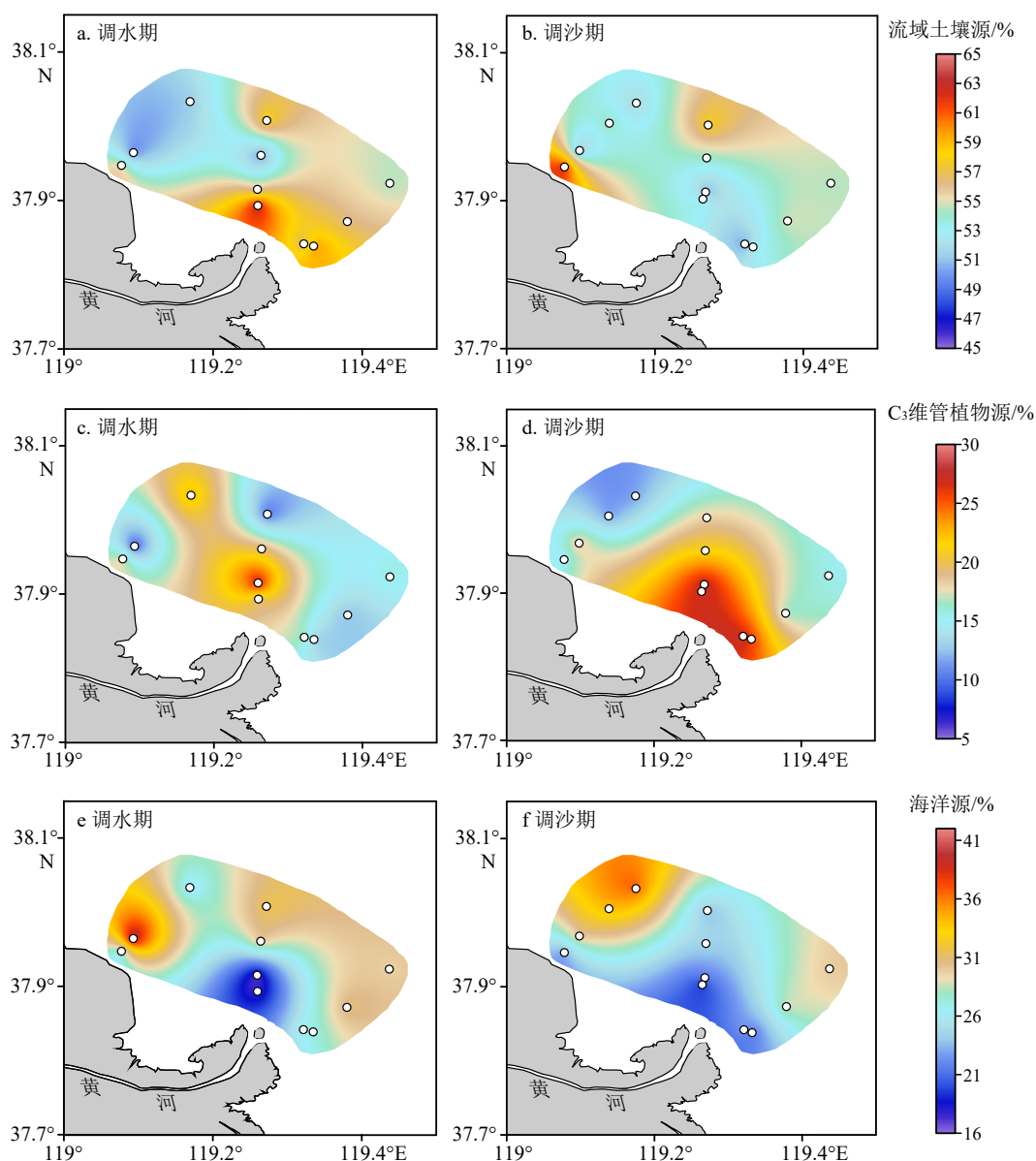


图 7 调水期和调沙期黄河口表层沉积物各组分有机碳贡献分布图

Fig.7 Distributions of percentage of organic carbon source from soil, C_3 plant, and marine phytoplankton off the Yellow River estuary at the water-regulation stage and sediment-regulation stage

的计算结果一致。

4 结论

(1) 黄河的输入和河口水动力环境对沉积物有机碳氮含量及碳稳定同位素的空间分布有显著的控制作用, 在河口区域, 沉积物粒径与 TOC 含量存在显著的负相关关系, 呈现离岸越远沉积物越细、TOC 越高的整体变化规律。在水库调控期间, 黄河入海物质由下游河床冲刷产生的粗颗粒沉积物转变为水库排放的细颗粒沉积物和 C_3 维管植物碎屑, 河口区域表层沉积物的 TOC、C/N、 $\delta^{13}C$ 的空间

分布也发生不同程度的改变, 相较于调水期, 调沙期沉积物整体的 TOC 含量更高, C/N、 $\delta^{13}C$ 值显示更强的陆源信号和更大扩散范围。

(2) 基于蒙特卡洛模拟的三端元混合模型计算结果表明, 在整个水库调控期间河口近岸区域以陆源有机碳为主, 在离岸区域海源有机碳贡献占比有所升高; 从调水期到调沙期, 河口区域表层沉积物中流域土壤来源有机碳的贡献降低, 陆地 C_3 维管植物的有机碳贡献占比增加, 这可能是在调沙期黄河口表层沉积物的 TOC 含量偏高、 $\delta^{13}C$ 更为亏损的原因。

参考文献 (References)

- [1] Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion [J]. *Nature*, 2015, 521(7551): 204-207.
- [2] 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.
- [3] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow rivers (China) [J]. *Marine Chemistry*, 1993, 43(1-4): 235-246.
- [4] 杨作升, 李国刚, 王厚杰, 等. 55年来黄河下游逐日水沙过程变化及其对干流建库的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 9-18. [YANG Zuosheng, LI Guogang, WANG Houjie, et al. Variation of daily water and sediment discharge in the yellow river lower reaches in the past 55 years and its response to the dam operation on its main stream [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 9-18.]
- [5] 胡春宏, 陈建国, 孙雪岚, 等. 黄河下游河道健康状况评价与治理对策[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1189-1196. [HU Chunhong, CHEN Jianguo, SUN Xuelan, et al. Health assessment of river course in Lower Yellow River and measures for regulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1189-1196.]
- [6] 李松, 王厚杰, 张勇, 等. 黄河在调水调沙影响下的入海泥沙通量和粒度的变化趋势[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(7): 20-27. [LI Song, WANG Houjie, ZHANG Yong, et al. Variation in sediment load and grain-size under the influence of Water and Sediment Regulation Scheme (WSRS) of The Huanghe (Yellow) River [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(7): 20-27.]
- [7] 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.
- [8] 于帅, 毕乃双, 王厚杰, 等. 黄河调水调沙影响下河口入海泥沙扩散及沉积效应[J]. 海洋湖沼通报, 2015(2): 155-163. [YU Shuai, BI Naishuang, WANG Houjie, et al. Suspended sediment dispersal off the Huanghe (Yellow River) river mouth and its sedimentary effects under impact of the water-sediment regulation scheme [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(2): 155-163.]
- [9] 王苗苗, 孙志高, 卢晓宁, 等. 调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1256-1262. [WANG Miaomiao, SUN Zhigao, LU Xiaoning, et al. Effects of long-term implementation of the flow-sediment regulation scheme on grain and clay compositions of inshore sediments in the Yellow River estuary [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1256-1262.]
- [10] 葛雷, 姜广艳, 张军锋, 等. 2010年黄河调水调沙对河口近海盐度影响[J]. 河南水利与南水北调, 2013, 42(1): 61-62. [GE Lei, LOU Guangyan, ZHANG Junfeng, et al. Effects of the water and sediment regulation scheme from the Yellow River on salinity near the estuary in 2010 [J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2013, 42(1): 61-62.]
- [11] 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 Shan, SU Bo, LI Fan, 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.]
- [12] 袁萍, 毕乃双, 吴晓, 等. 现代黄河三角洲表层沉积物的空间分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 49-57. [YUAN Ping, BI Naishuang, WU Xiao, et al. Surface sediments at the subaqueous Yellow River delta: classification and distribution [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 49-57.]
- [13] Wang Y Z, Fan Y B, Bu F, et al. Quantifying effects of water and sediment regulation scheme on the sand bar in the Yellow River estuary in 2014 [J]. *Ecology and Hydrobiology*, 2020, 20(4): 475-484.
- [14] Liu D Y, Li X, Emeis K C, et al. Distribution and sources of organic matter in surface sediments of Bohai Sea near the Yellow River Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 165: 128-136.
- [15] 高立蒙, 姚鹏, 王金鹏, 等. 渤海表层沉积物中有机碳的分布和来源[J]. 海洋学报, 2016, 38(6): 8-20. [GAO Limeng, YAO Peng, WANG Jinpeng, et al. Distribution and sources of organic carbon in surface sediments from the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(6): 8-20.]
- [16] Bigot M, Saliot A, Cui X, et al. Organic geochemistry of surface sediments from the Huanghe estuary and adjacent Bohai Sea(China) [J]. *Chemical Geology*, 1989, 75(4): 339-350.
- [17] 吴丹, 姚鹏, 黄新莹, 等. 黄河2017特枯年入海有机碳的输运特征[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(S1): 118-127. [WU Dan, YAO Peng, HUANG Xinying, et al. Transport of organic carbon in the lower Yellow River in the extreme drought year of 2017 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(S1): 118-127.]
- [18] Tao S Q, Eglinton T I, Zhang L, et al. Temporal variability in composition and fluxes of Yellow River particulate organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63(S1): S119-S141.
- [19] Zhao B, Yao P, Li D, et al. Effects of river damming and delta erosion on organic carbon burial in the Changjiang Estuary and adjacent East China Sea inner shelf [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148610.
- [20] Wang H J, Wu X, Bi N S, 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.
- [21] Wang H J, Bi N S, Saito Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(3-4): 302-313.
- [22] 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.
- [23] 于永贵, 石学法, 迟万清, 等. 调水调沙期间黄河口羽状流的逐时变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(5): 41-51. [YU Yonggui, SHI Xuefa, CHI Wanqing, et al. Hourly change in sediment plume at the Yellow River mouth during the water-sediment regulation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 41-51.]
- [24] Zhang J, Huang W W, Shi M C. Huanghe (Yellow River) and its estu-

- ary: Sediment origin, transport and deposition [J]. *Journal of Hydrology*, 1990, 120 (1-4): 203-223.
- [25] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤有机碳和微生物碳分布特征的研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22 (6): 936-945. [DANG Aiya, LI Shiqing, WANG Guodong, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon on the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22 (6): 936-945.]
- [26] Zhang L J, Wang L, Cai W J, et al. Impact of human activities on organic carbon transport in the Yellow River [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10 (4): 2513-2524.
- [27] Ran L, Lu X X, Xin Z. Erosion-induced massive organic carbon burial and carbon emission in the Yellow River basin, China [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11 (4): 945-959.
- [28] 乔淑卿, 石学法, 白亚之, 等. 黄河口及邻近渤海海域悬浮体和沉积物中有机碳、氮的分布特征及其影响因素[J]. 沉积学报, 2011, 29 (2): 354-362. [QIAO Shuqing, SHI Xuefa, BAI Yazhi, et al. Distribution of organic carbon, nitrogen in suspended and surface sediments and their controlling factors off the Huanghe (Yellow River) mouth and the Nearby Bohai Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29 (2): 354-362.]
- [29] 于广磊, 李斌, 李凡, 等. 黄河口附近海域沉积物中碳氮元素地球化学特征及有机质来源研究[J]. 海洋环境科学, 2019, 38 (6): 862-867. [YU Guanglei, LI Bin, LI Fan, et al. Carbon, nitrogen geochemical character and organic matter source study in the coastal sediment of Yellow River Estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38 (6): 862-867.]
- [30] Canfield, D E. Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments [J]. *Chemical Geology*, 1994, 114 (3-4): 315-329.
- [31] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis [J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49 (2-3): 81-115.
- [32] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27 (5-6): 213-250.
- [33] 胡利民, 邓声贵, 郭志刚, 等. 夏季渤海湾及邻近海域颗粒有机碳的分布与物源分析[J]. 环境科学, 2009, 30 (1): 39-46. [HU Limin, DENG Shenggui, GUO Zhigang, et al. Distribution and source of particulate organic carbon in the Bohai Bay and its adjacent Bohai Sea, China [J]. *Environmental Science*, 2009, 30 (1): 39-46.]
- [34] 刘卫国, 宁有丰, 安芷生, 等. 黄土高原现代土壤和古土壤有机碳同位素对植被的响应[J]. 中国科学 (D 辑), 2005, 48 (1): 93-99. [LIU Weiguo, NING Youfeng, AN Zhisheng, et al. Carbon isotopic composition of modern soil and paleosol as a response to vegetation change on the Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2005, 48 (1): 93-99.]
- [35] 胡利民. 大河控制性影响下的陆架海沉积有机质的“源—汇”作用: 以渤、黄海为例[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2010. [HU Limin. Sources and sinks of sedimentary organic matter in the river-dominated continental shelves: a case study in the Bohai and Yellow Seas[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2010.]