

徐禾禾, 刘凤睿, 陈健斌, 等. 河南“7·20”暴雨洪水影响下黄河口水文特征变化[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(2): 78-91.

XU Hehe, LIU Surui, CHEN Jianbin, et al. Variations of hydrological characteristics off the Yellow River Estuary induced by the “7·20” rain-storm flood in Henan Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(2): 78-91.

河南“7·20”暴雨洪水影响下黄河口水文特征变化

徐禾禾¹, 刘凤睿², 陈健斌³, 王厚杰^{1,4}, 毕乃双^{1,4}, 俞永庆⁵, 王亚梅⁵, 吴晓^{1,4*}

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 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 257000;

3 山东省黄河三角洲可持续发展研究院, 东营 257000; 4 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

5 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 东营 257000)

摘要:在全球变暖的背景下,以暴雨洪水为代表的极端天气事件的频率和强度显著增加。暴雨洪水不仅对人类社会和自然环境产生深远的影响,还极易改变陆源物质向海输送通量,引起水沙扩散格局的变化,对河口演变至关重要。2021 年 7 月 17—23 日,河南省郑州市及其周边地区遭遇特大暴雨事件,在黄河下游形成了为期 1 周的暴雨洪水事件。本文通过实测资料,结合卫星遥感手段,探讨了洪水前、洪水初期、洪水后期和洪水后的黄河口水文特征、水体层化结构与动力机制。结果表明:暴雨洪水期间利津站的日均径流量为 $1.95 \times 10^8 \text{ m}^3$,输沙量为 $1.58 \times 10^6 \text{ t}$,分别是洪水前、后的 2.71 倍和 9.38 倍;由于高流量持续时间与洪水周期均短于调水调沙的调水阶段,因此本次暴雨洪水的入海水沙通量略低于调水阶段;暴雨洪水注入导致黄河口的浊度和盐度在洪水期间发生了显著变化,浊度的最高值和高浊度范围明显变大,冲淡水呈 NW—SE 向向外海扩张,但在潮流切变锋等因素的影响下,泥沙在河口近岸迅速沉积,扩散范围远小于冲淡水;与人工洪水相比,暴雨洪水对河口盐度的影响相对较小,羽流扩散范围较为局限,泥沙扩散范围与人工洪水差异较小,符合潮流切变峰阻隔下入海泥沙的沉降范围;洪水的汇入还造成了河口地区较高级别的水体层化,水体浮力频率最高可达到 0.1 s^{-2} 以上,与洪水后的浮力频率值有着量级上的差异。

关键词:暴雨洪水;黄河口;泥沙扩散;冲淡水;层化

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.025

0 引言

近年来,全球变暖及其引发的极端气象水文事件频率和强度逐渐增加,对社会、经济和生态系统产生了巨大影响,引起了国内外的广泛关注。其中,频发的暴雨及其诱发的洪水事件导致河流水文格

局发生迅速变化,给社会经济发展和人民生活安全带来严峻威胁。

河流是陆源物质输送入海的主要通道,全球河流每年向海洋输送大量的陆源物质。流域内暴雨洪水会在短时间内引起河流水文格局的迅速调整^[1],河流流量的快速增加可能导致其冲刷潜力显著增强^[2],不仅加速了河道迁移进程,也显著增加了陆源物质向海的输送通量^[3]。河口位于陆海相互作用的关键地带,在径流、潮汐等多变的水动力条件影响下,河口区域的物质输运沉积过程和相互作用尤为活跃和复杂^[4]。当流域暴雨洪水发生时,河口水动力作用和泥沙收支快速调整^[5-7],河口三角洲的形态^[8-9]、河口最大浊度带的分布^[10]也会随之发生变化。同时,洪水中携带的大量化学物质和营养物质,还会导致河口生物地球化学过程和生态环境发生

收稿日期: 2024-01-19

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42330407); 山东省杰出青年基金项目(ZR2024JQ016); 山东省泰山学者项目(TSQN202211054); 山东省高等学校青创科技支持计划(2022KJ045); 东营市市校合作项目(SXHZ-2024-02-5)

第一作者: 徐禾禾(1999—),女,在读硕士,主要从事河口海岸沉积动力方面的研究工作。E-mail: 957994911@qq.com

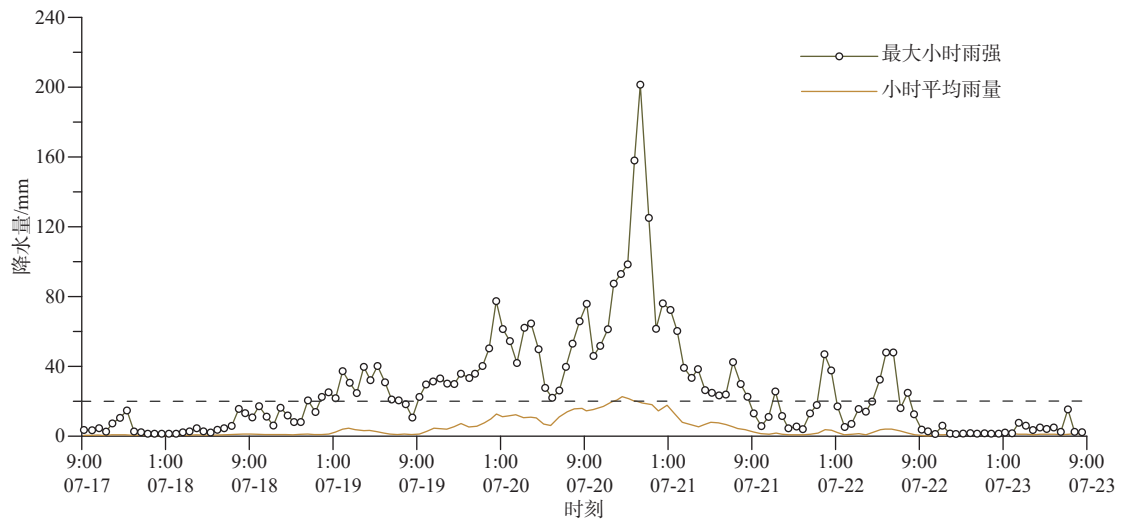
* 通讯作者: 吴晓(1989—),男,博士,教授,主要从事河口海岸学方面的研究工作。E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

剧烈变化^[11]。此外,若暴雨洪水与风暴潮同时发生,产生复合洪水,对河口区域的经济社会发展将产生更大威胁^[12]。因此,河口区域是全球气候变化的集中体现区、敏感区和脆弱区,开展河口地区对流域暴雨洪水的响应研究不仅是系统认识全球变化对河流-河口系统影响的关键,也是应对和缓解全球变化、科学指导防灾减灾的重要基础。

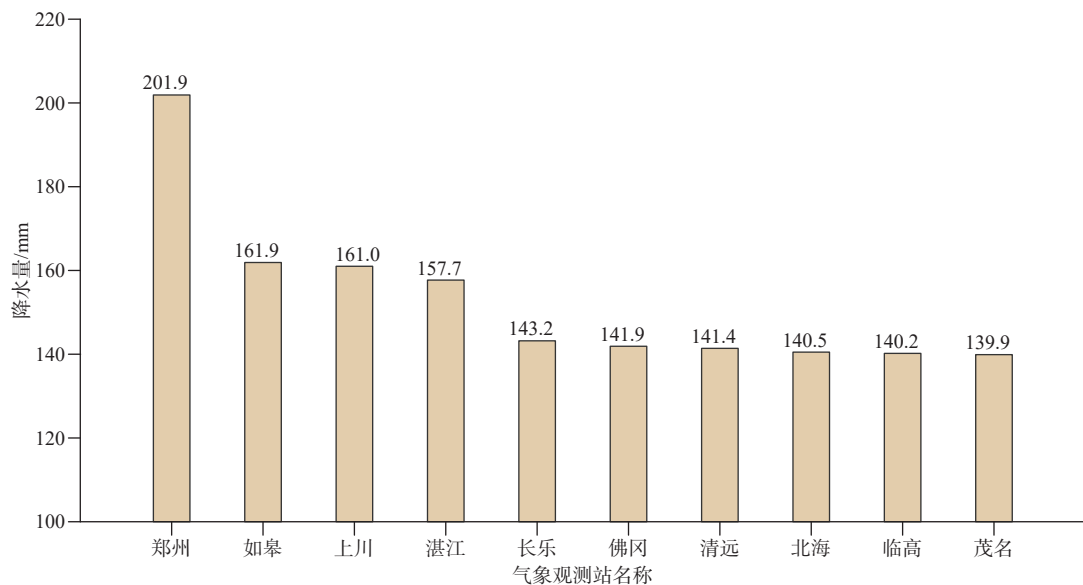
黄河是中国的第二大河流,因其下游独特的“地上悬河”的特点,历史上黄河灾难性洪水多发。据统计,近 2 500 年来黄河共发生洪涝灾害 1 593 次,下游河道迁移 26 次,其中 9 次为大规模改道^[13]。自 20 世纪 50 年代以来,强烈的人类活动极大地改变了黄河流域生态环境,流域内诸多大型水库修建、

黄土高原水土保持等工程活动有效地调节了黄河径流特征,降低了黄河的洪水发生风险。然而,持续上升的温室气体浓度及其引发的全球气候变化使黄河流域的极端降水强度和频率有所增加,黄河流域面临的洪水威胁加大^[14]。

2021 年 7 月 17—23 日,河南省郑州市及其周边地区遭遇特大暴雨事件(图 1a)。此次暴雨具有降雨范围广、短时降水强度大且累积雨量大的特征。200 mm 以上过程降水量面积达 $7.52 \times 10^4 \text{ km}^2$,最大小时雨量为 201.9 mm,突破中国大陆小时降雨历史极值(图 1b),最大 24 h 雨量高达 702 mm,超过郑州市年平均雨量(640.8 mm)^[15-16]。针对这一特大暴雨事件,本文通过水文资料收集、现场调查和卫



(a) 2021年7月17日9时—23日9时河南省郑州市逐时最大雨强和平均雨量^[15]



(b) 中国大陆小时降雨排名前10站点的雨量统计 (数据来自中国气象数据网)

图 1 “7·20”暴雨事件降雨量统计

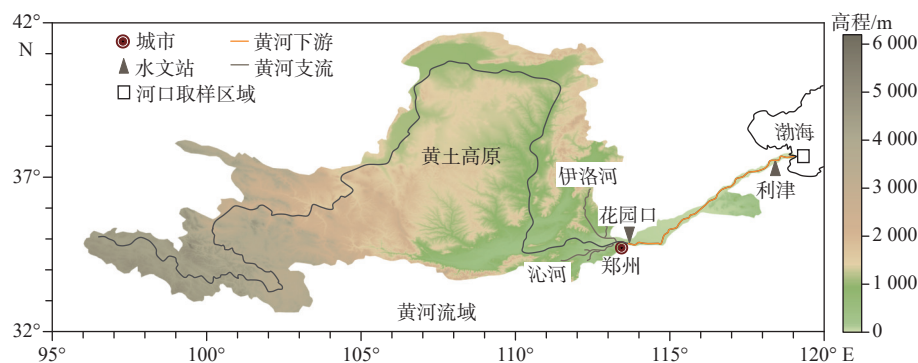
Fig.1 Statistics of rainfall in the “7·20” rainstorm flood

星遥感等手段,揭示了河南“7·20”暴雨诱发的下游洪水特征,探讨了黄河口水文环境对暴雨洪水的响应特征与机制。

1 研究区域

黄河发源于青藏高原北部,全长 5 464 km,流域面积约 752 000 km²(图 2a)。黄河干流可划分为上、中、下游 3 段,上游地貌以山地高原为主,中游

途经黄土高原,自河南省郑州市桃花峪至入海口为黄河下游;因流经地势平缓的华北平原,泥沙大量淤积而形成了举世闻名的“地上悬河”;最后汇入半封闭的浅海渤海。受季风和大气环流的影响,黄河流域具有明显的气候差异,大部分地区年均降水量为 200~650 mm,下游地区则 > 650 mm^[4,17],黄河夏季排入渤海的水沙总量中,有 60% 以上与降雨密切相关^[18]。



(a) 黄河流域干流花园口、利津站及暴雨中心城市郑州的位置

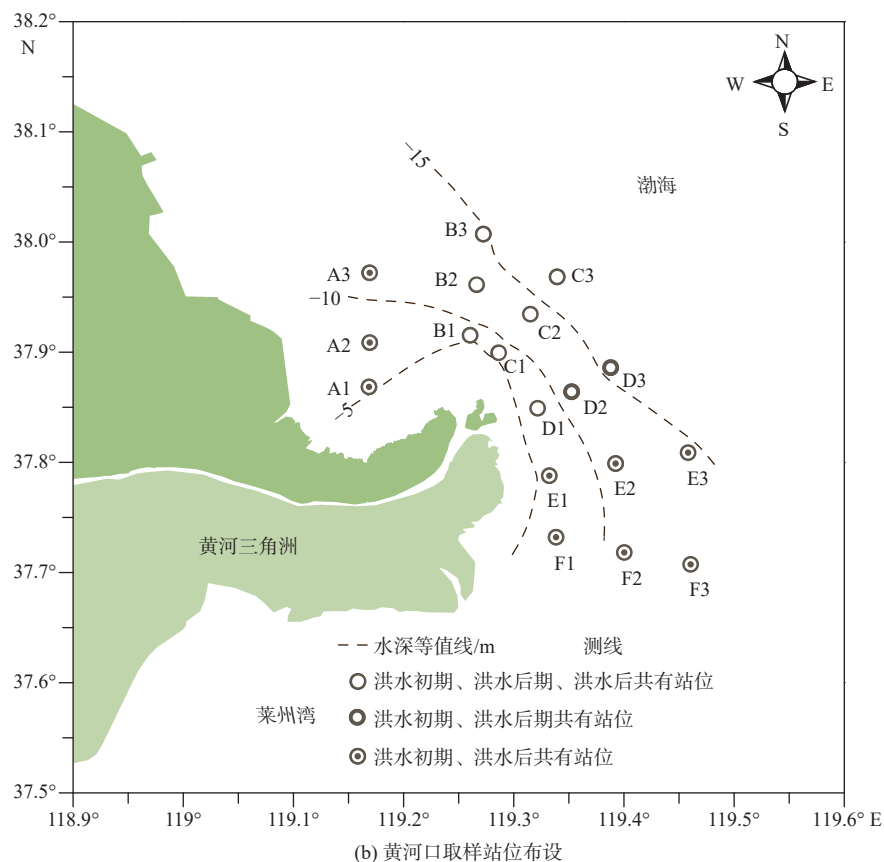


图 2 研究区位置及黄河口取样站位布设

Fig.2 Location of the study area and deployment of the sampling station in the Yellow River estuary

黄河入海口地处黄河、渤海湾与莱州湾的交汇区域,自清水沟流路改为清 8 流路后逐步塑造成鸟

嘴状河口,形成北、东两汉的入海格局(图 2b)^[19]。黄河口水文特征受暖温带大陆性季风气候和黄河

入海径流影响显著, 年平均水温为 12~15 ℃, 平均盐度为 20~31 PSU; 7、8 月份黄河进入伏汛期, 径流量增大, 河口温度达到最高, 盐度大幅下降^[19-20]。黄河口区域夏季常以 3~4 级的弱东南风为主, 7 月份平均风速为全年最小^[19-21]。黄河口属于弱潮河控型河口, 潮流沿岸线往复流动, 涨潮时为南偏东流向, 退潮时为西北流向, 平均流速为 0.5~1.0 m/s, 此外, 河口存在沿岸向北的表层余流, 在 38°N 附近转向东^[21-22]。

2 数据与方法

2.1 实测数据与水文数据

2021 年 7 月 24 日—8 月 3 日在黄河口海域开展了洪水初期(7 月 24—25 日)、洪水后期(7 月 27 日)和洪水后(8 月 3—4 日)3 个走航航次, 获取了不同站位的温盐和浊度等数据, 用以揭示洪水发生对河口区水文特征的影响。黄河干流关键站位(花园口站、利津站)的逐日流量、含沙量数据来自黄河水利委员会公开发布的水情日报(<http://www.hwsj.com.cn/>)。

本文以花园口站洪水周期(8 d)为准, 计算花园口站和利津站在洪水前、后 8 d 内的水沙通量, 径流量(W)和泥沙通量(F_s)计算公式分别为:

$$W = \Sigma Q \quad (1)$$

$$F_s = \Sigma(Q \times C_s) \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ;

C_s 为含沙量, kg/m^3 。

2.2 层化参数计算

为了对黄河口水体层化与混合进行定量研究, 根据 3 个走航航次获得的温盐数据, 计算反映水体层化的密度(ρ)和浮力频率(N^2)。

本文采用基于盐度(S)、温度(t)和海水压强(p)的函数 K 来计算密度^[23]:

$$\rho(S, t, p) = \frac{\rho(S, t, 0)}{1 - p/K(S, t, p)} \quad (3)$$

在一个标准大气压下($p = 0$), 海洋水体的密度为^[23]:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + A \times S + B \times S^{3/2} + C \times S \\ A &= 8.2449 \times 10^{-1} - 4.0899 \times 10^{-3} t + 7.6438 \times \\ &\quad 10^{-5} t^2 - 8.2467 \times 10^{-7} t^3 + 5.3875 \times 10^{-9} t^4 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} B &= -5.7247 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4} t - \\ &\quad 1.6546 \times 10^{-6} t^2 \end{aligned}$$

$$C = 4.8314 \times 10^{-4}$$

ρ_0 为水的密度,

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 9.9984 \times 10^2 + 6.7940 \times 10^{-2} t - 9.0953 \times \\ &\quad 10^{-3} t^2 + 1.0017 \times 10^{-4} t^3 - 1.1201 \times \\ &\quad 10^{-6} t^4 + 6.5363 \times 10^{-9} t^5 \end{aligned}$$

浮力频率 N^2 是层化水体中水团在浮力作用下运动时的最大频率。浮力频率大, 表示混合程度较低, 层化程度较高; 反之则表示混合程度较高, 层化程度较低。高浮力频率值通常出现在主要密度跃层带^[24]。由温盐转化得出的垂向高频密度数据 ρ , 按式(5)计算浮力频率^[25]:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度;

z 为垂向深度。

2.3 卫星数据与反演方法

GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)-II 是韩国地球静止卫星搭载的水色传感器, 空间分辨率达到 250 m, 时间分辨率高达 1 h, 可有效观测黄河口盐度与浊度的时空变化。GOCI-II 影像来自韩国海洋卫星中心(KOSC)官方网站, 经筛选获得 15 张 L2 影像, 该影像已经过辐射定标、几何校正和瑞利大气校正处理, 在匹配实测数据与卫星数据时, 将卫星过境时间与实测时间间隔限定在 ± 2 h 内。

本文参照郑鹭飞^[26]的浊度模型建立方法, 选择瑞利校正反射率 $\text{RhoC}(490)$ 、 $\text{RhoC}(555)$ 、 $\text{RhoC}(660)$ 和 $\text{RhoC}(680)$ 4 个波段进行了 8 种排列组合, 得出相关系数最高的波段组合形式 X , 并将其与实测数据进行二次拟合, 获得以下浊度反演算法且反演精度良好(图 3a):

$$\text{Turbidity} = 0.99 \times e^{14.197X} \quad (6)$$

式中:

$$X = \frac{\text{RhoC}(490) + \text{RhoC}(680)}{\text{RhoC}(490)/\text{RhoC}(680)}$$

海表盐度方面, 本文参考 LIU 等^[27]的盐度反演模型, 结合实测数据进行参数修正, 改进了盐度反演模型, 与实测数据对比显示能够较好地反演黄河口海表盐度特征(图 3b)

$$\begin{aligned} \text{Salinity} &= 5.172 \times \text{RhoC}(490) - 6.558 \times \\ &\quad \text{RhoC}(555) + 0.175 \times \text{RhoC}(660) + 1.595 \end{aligned} \quad (7)$$

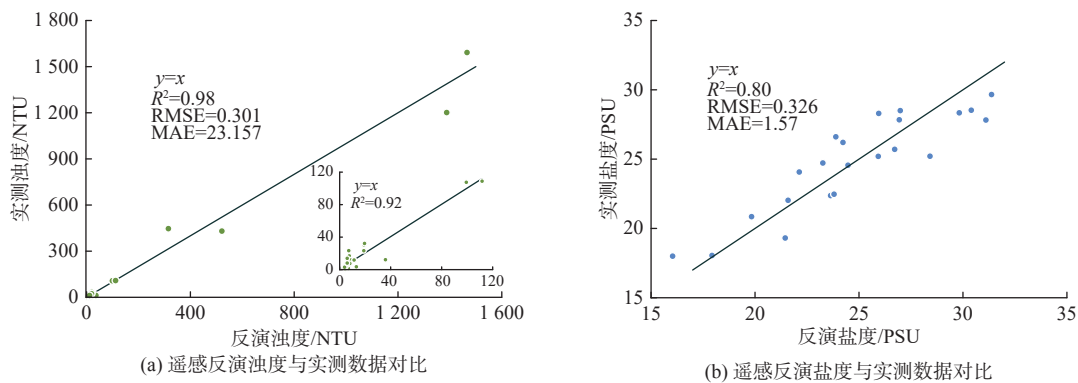


图3 遥感反演浊度、盐度与其实测数据的对比

Fig.3 Comparison of turbidity and salinity inverted by remote sensing with measured data

3 研究结果

3.1 黄河下游暴雨洪水演进过程

“7·20”特大暴雨事件使郑州市及周边地区的水体淹没面积明显增加,地表径流的汇入使黄河干流花园口站于7月20—27日形成峰值流量为 $3\,650\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水,含沙量迅速增加至 $19.3\text{ kg}/\text{m}^3$ (图4)。为了降低洪灾威胁,黄河支流伊洛河、沁河等支流水库通过滞蓄洪水起到了有效的削峰作用^[28],支流水库在调蓄与泄洪的同时延长了洪水持续周期。在此次暴雨事件影响下,花园口站8 d过洪量合计 $14.73\times 10^8\text{ m}^3$,输沙量为 $10.26\times 10^6\text{ t}$,分别是暴雨前后的2.2和5.9倍。暴雨洪水经2~3 d演进至利津站,洪峰流量为 $3\,553\text{ m}^3/\text{s}$,与花园口站大致相当,泥沙运输较洪水流量变化略有滞后。总体而言,虽然利津站含沙量峰值($13.2\text{ kg}/\text{m}^3$)较花园口站略低,但洪水大部分时期均高于花园口站。洪水后期泄洪流量相对降低,洪水传输速度减缓,在利津站

形成了分明的2次洪峰(图4)。经统计,利津站于本次洪水期间的日均水沙通量为 $1.95\times 10^8\text{ m}^3$ 和 $1.58\times 10^6\text{ t}$,分别是洪水前、后的2.71和9.38倍。

3.2 暴雨洪水影响下河口水文要素的平面分布特征

受暴雨洪水影响,河口区海表盐度发生快速变化,与洪水前相比,洪水期间河口低盐度区域明显扩大(图5)。洪水前,河口26 PSU等盐度线可到达 119.5°E 以东,22和24 PSU的等盐度线均位于 119.4°E 以东。洪水初期,26 PSU的等盐度线范围更广,24 PSU的等盐度线扩展至 119.5°E 以东,冲淡水具有明显的EW向扩散趋势,且向东扩散范围更广,这一方面与河口近岸地区的潮流运动方向有关,由于涨潮流为南偏东流向,退潮流为西北流向^[22],另一方面,在科氏力和地形约束下,河口羽流在潮流作用下大部分向南沿莱州湾西岸延伸,而非向北扩散^[29-30]。由于黄河的径流量是影响河口盐度的重要因素^[29],随着洪水径流的持续输入,洪水后期低盐水体分布范围更加广泛,22 PSU的等盐度

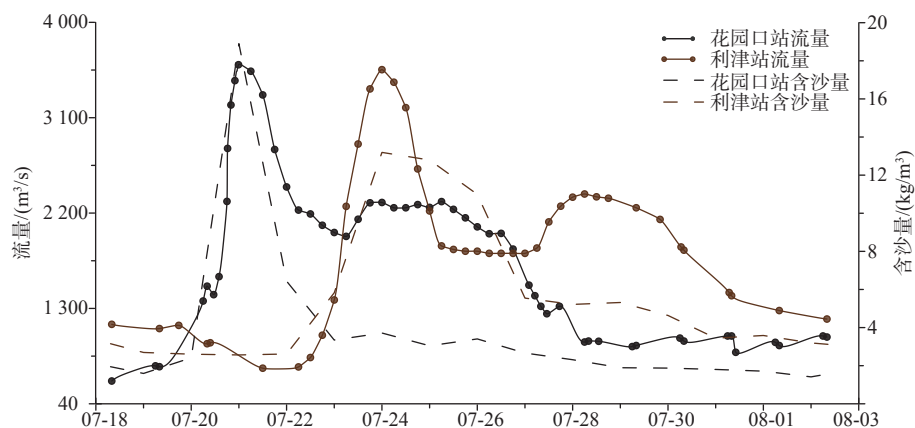


图4 2021年7月18日—8月3日花园口站和利津站的水沙变化过程

Fig.4 River discharge and suspended sediment concentration at Huayuankou and Lijin stations from July 18 to August 3, 2021

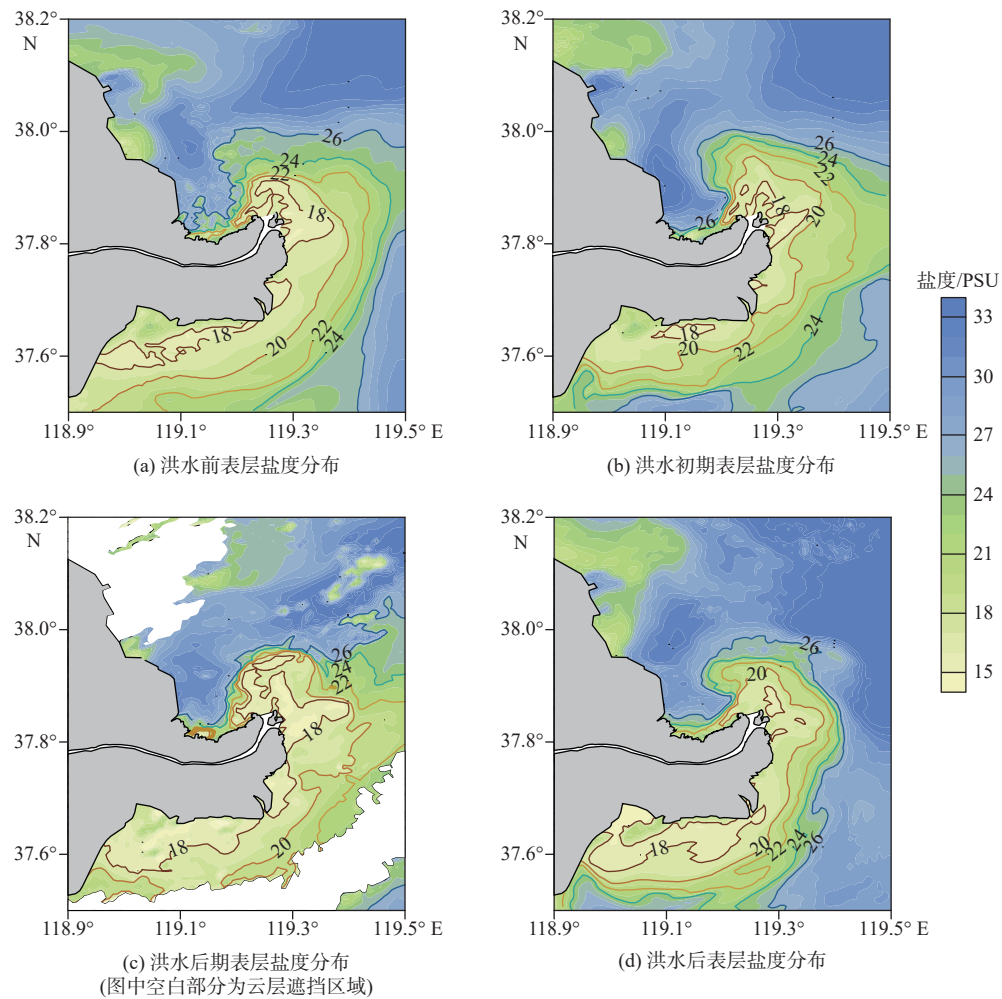


图 5 GOCI 影像反演的洪水期表层盐度分布

Fig.5 Sea surface salinity distributions during the flood period derived from GOCI images

线扩散至 119.5°E 以东, 盐度为 18 PSU 的水体范围相较于洪水前、后也有明显扩大。洪水事件后, 低盐度水体范围明显收缩。

与盐度类似, 浊度分布在洪水期间与洪水前、后的浊度亦呈现出明显差异, 但浊度分布具有局限性, 无论是洪水期间还是非洪水时期, 浊度高值区多局限在北汊和东汊的河口口门附近, 这主要归因于泥沙的迅速沉降(图 6)。洪水事件发生前, 河口近岸的浊度主要约为 3 000 NTU。洪水初期, 洪水径流携带大量泥沙抵达河口, 高浊度范围(>4 500 NTU)明显扩大, 浊度显著增加, 最高达到 9 000 NTU。洪水后期, 高浊度范围有所缩小, 主要是由于洪水后期含沙量降低至洪水初期的 1/3, 入海沙量降低所致。此外, 洪水期间浊度水平梯度加大, 浊度为 9 000 NTU 的区域从北汊和东汊两出水口延伸至 7 km 后急剧降低, 推测是由于河口潮流切边锋的存在, 抑制了泥沙的向外扩散。洪水过后, 河口高浊度区域全部消失, 浊度显著降低, 最高为

3 000 NTU。

3.3 暴雨洪水影响下河口水文要素的剖面分布特征

为进一步分析暴雨洪水对河口水文要素的影响, 本文以位于北、东两汊之间且数据齐全的 C 断面为主, 以 B 断面为辅进行研究讨论(断面位置见图 2b)。

洪水初期, 受洪水径流影响, 近岸的 C1 站位的表层盐度低至 12 PSU, 盐度跃层较为明显, 位于 1~3 m 深度, 26 PSU 的等盐度线分布在约 3.7 m 深度; 离岸 11 km 的 C2 站位的表层盐度最低值约为 21 PSU, 26 PSU 的等盐度线的深度变浅, 位于约 2 m; 在离岸约 16 km 的 C3 站位, 表层盐度最低值约为 23 PSU, 26 PSU 等值线深度与 C2 站位大致相同, 说明羽流可扩散至 16 km 以外(图 7a)。洪水后期, C 断面的表层盐度升高, 介于 22~26 PSU, 26 PSU 的等盐度线在离岸 12 km 以内主要分布在约

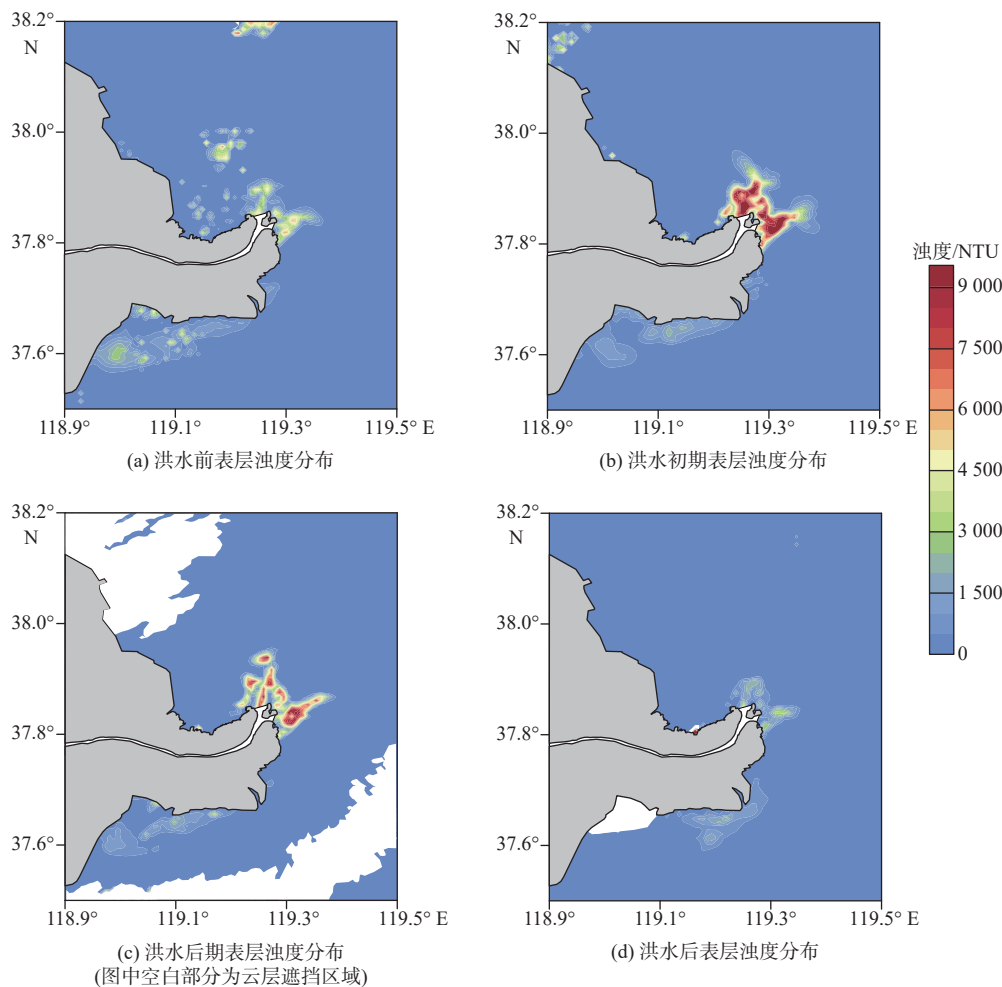


图 6 GOCI 影像反演的洪水期表层浊度分布

Fig.6 Sea surface turbidity distributions during the flood period derived from GOCI images

2 m, 向海至 16 km 处消失, 与洪水初期相比扩散范围缩小(图 7b)。C 断面在洪水后的水体盐度明显高于洪水期间, 表层水体盐度均高于 26 PSU(图 7c)。通过 B 断面的盐度剖面分布(图 8a)发现, 洪水后期 B1 站位表层存在 8 PSU 的低盐水体, 远低于 C1 站位, 而 B1 站位 26 PSU 的等盐度线依然位于约 2 m 深度, 与 C1、C2 站位相当, 表明洪水流量降低背景下低盐水体在水平和垂向扩散上的局限性。

断面的浊度垂向分布总体表现为底层水体高于表层水体, 近岸区域高于离岸区域, 但洪水初期的浊度显著高于洪水后期和非洪水时期(图 7d—f)。洪水初期, 断面的浊度可达到 2 400 NTU, 同时可以看出, 从 C2 站位附近向海方向浊度在整个水体中锐减至 100 NTU 以下, 表明了泥沙由河口输出后几乎均沉积在 C2 站位向陆的河口附近区域。洪水后期与洪水后的水体浊度大致相当, 介于 0~180 NTU, 这可能与洪水后期径流减小, 泥沙携带能力降低有关。与 C 断面的浊度分布类似, B2 站位也观测到

底层水体高于表层的特征, 但在 B1 站位, 表层水体的浊度值约是底层水体的 2 倍以上, 出水方向可能是导致 B1 和 C1 站位水沙垂向分布差异的原因(图 8c、d)。

C 断面 3 个站位的密度和浮力频率垂向剖面如图 9 所示, 整体而言, 水体密度由表及底增加, 浮力频率由表及底降低, 洪水期间水体密度更低($1\,011\sim1\,020\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、浮力频率更高($>10^{-2}\text{ s}^{-2}$)。洪水初期, C1 站位具有较大的密度梯度, 密度跃层与盐度跃层位置较为一致, 跃层内浮力频率可达到 10^{-1} s^{-2} 以上, 随着离岸距离的增加, C2、C3 站位的密度梯度和浮力频率降低, 浮力频率 $<10^{-1}\text{ s}^{-2}$ 。洪水后期, C1 站位的密度梯度相较于洪水初期有所降低, 浮力频率也相应减小, C2、C3 站位与洪水初期的情况大体一致。洪水事件后, 3 个站位表层水体的密度升高, 密度梯度减小, 仅 C1 站位存在 $>10^{-2}\text{ s}^{-2}$ 的浮力频率值。对于 B 断面而言, 近岸的 B1 站位洪水后期的密度剖面与盐度类似, 表层水体出现低

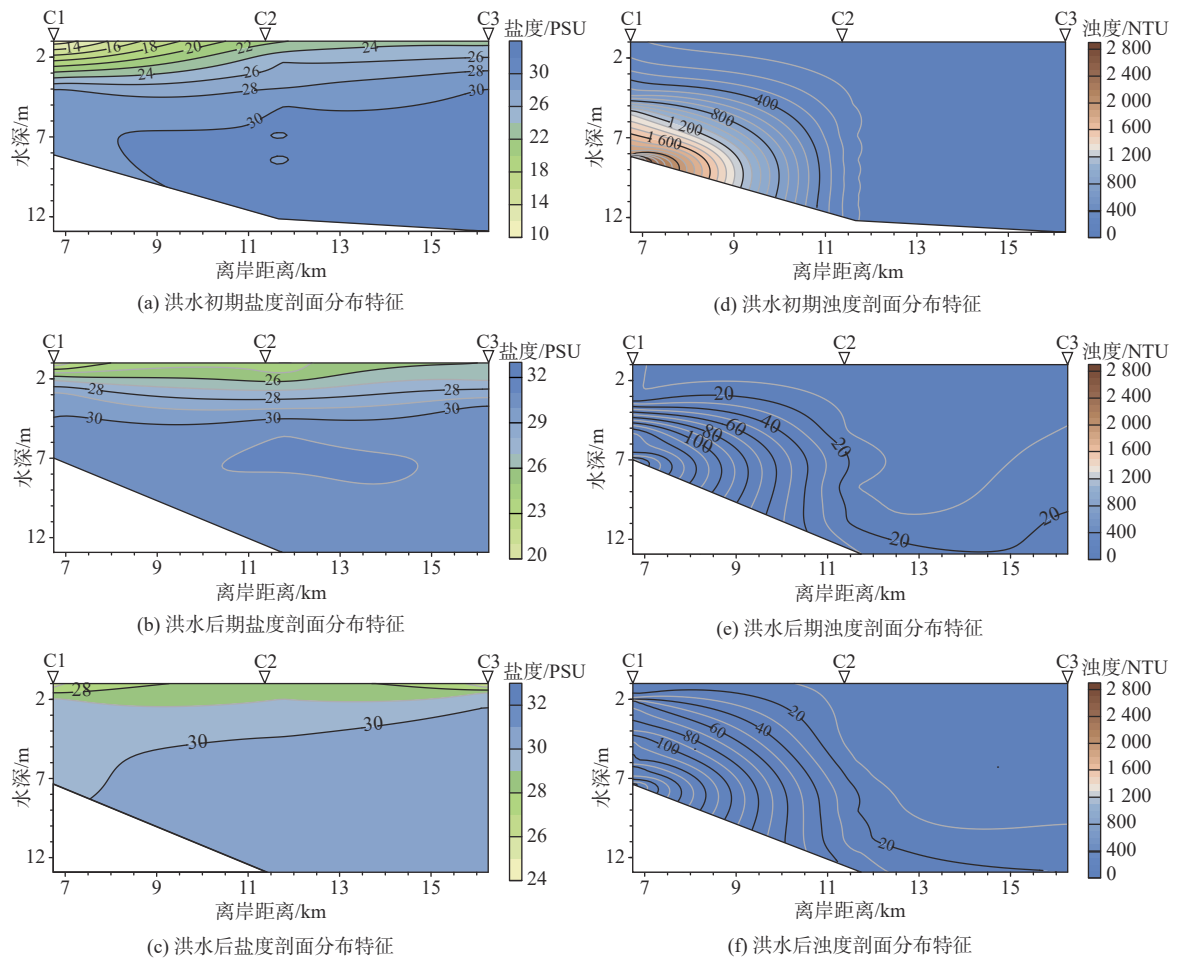


图 7 C 断面洪水初期、洪水后期和洪水后的盐度与浊度剖面分布特征

Fig.7 Variations in salinity and turbidity in the early, late, and after flood at section C

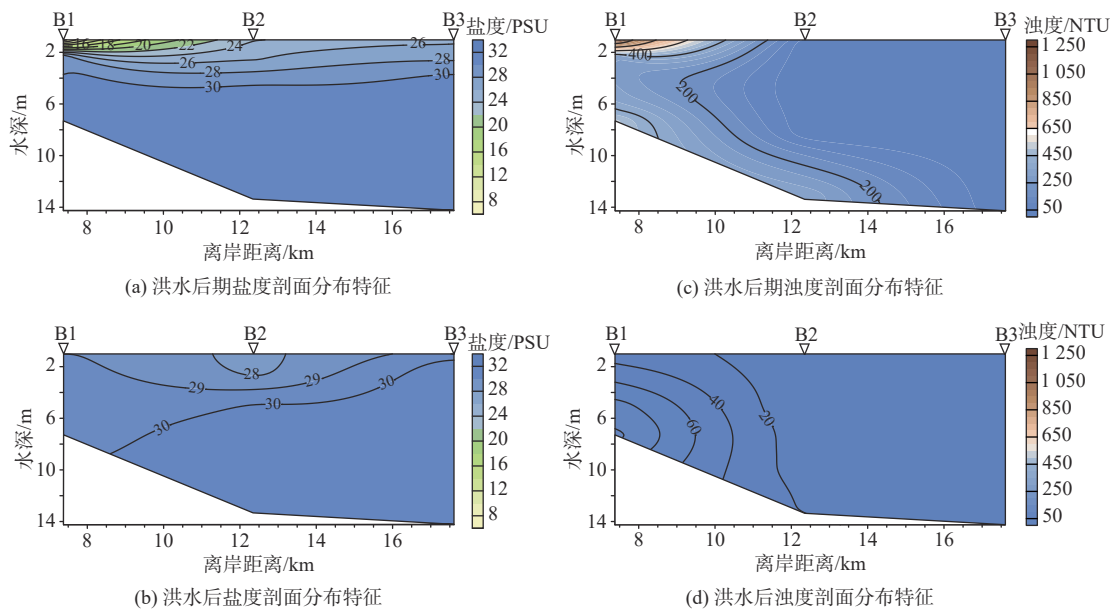


图 8 B 断面洪水后期和洪水后的盐度与浊度剖面分布特征

Fig.8 Variations of salinity and turbidity in the late and after flood at section B

值($1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 浮力频率较大($>10^{-1}\text{ s}^{-2}$), 远岸的 C2、C3 站位的密度升高($1\,013\sim 1\,020\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),

浮力频率降低($10^{-2}\sim 10^{-1}\text{ s}^{-2}$)。洪水事件后, B 断面的密度和浮力频率剖面特征与 C 断面 3 个站位

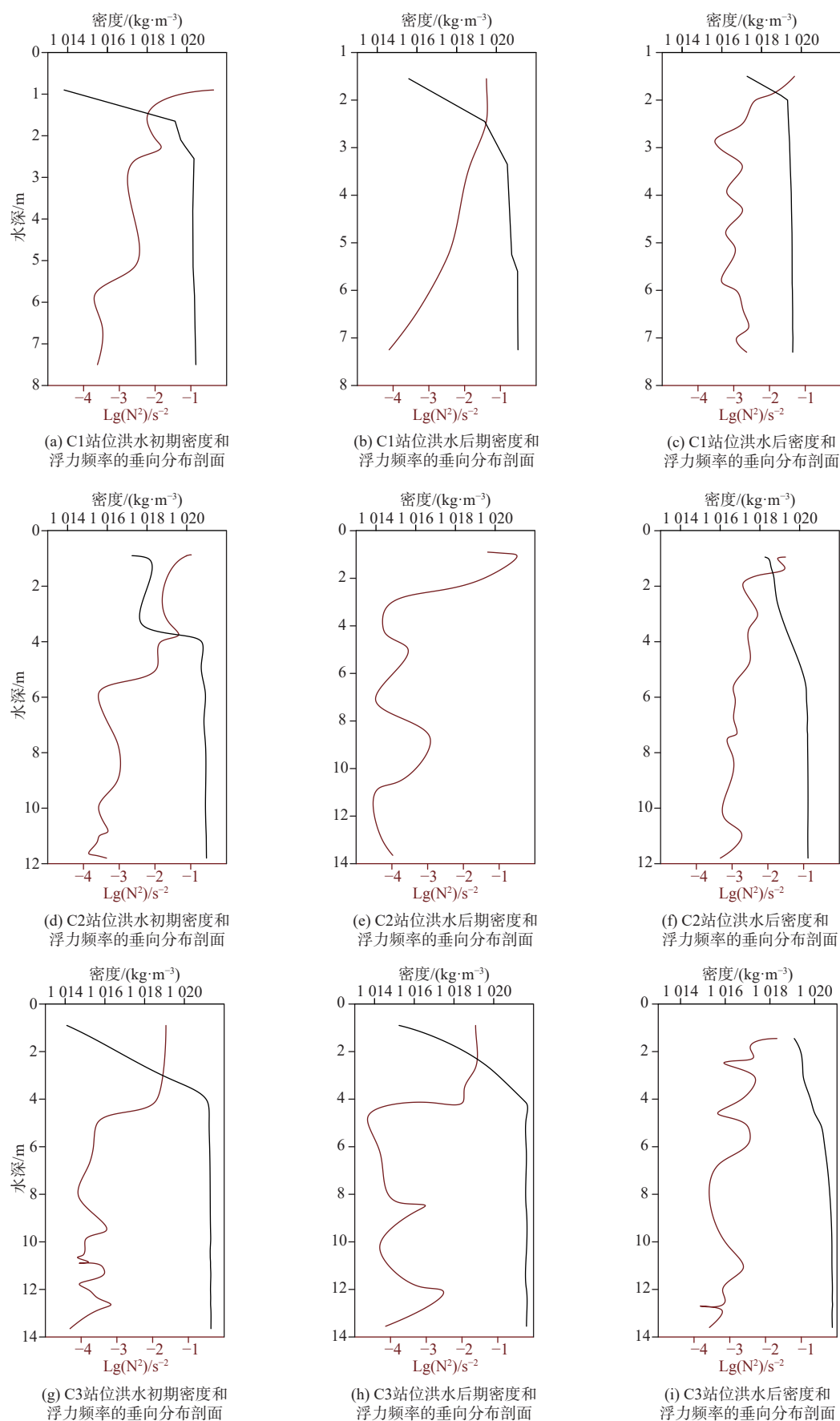


图9 C1、C2、C3 站位在洪水初期、洪水后期和洪水后的密度和浮力频率的垂向分布剖面

Fig.9 Vertical profiles of density and buoyancy frequency in the early, late, and after flood at station C1, C2 and C3

大致相同,表现出相较于洪水期间密度升高,浮力频率降低的趋势(图 10)。上述现象表明,在暴雨洪

水的淡水输入影响下,河口水体层化强度增加。

GEYER 等^[31]在落潮时 3 个测量时段的实测

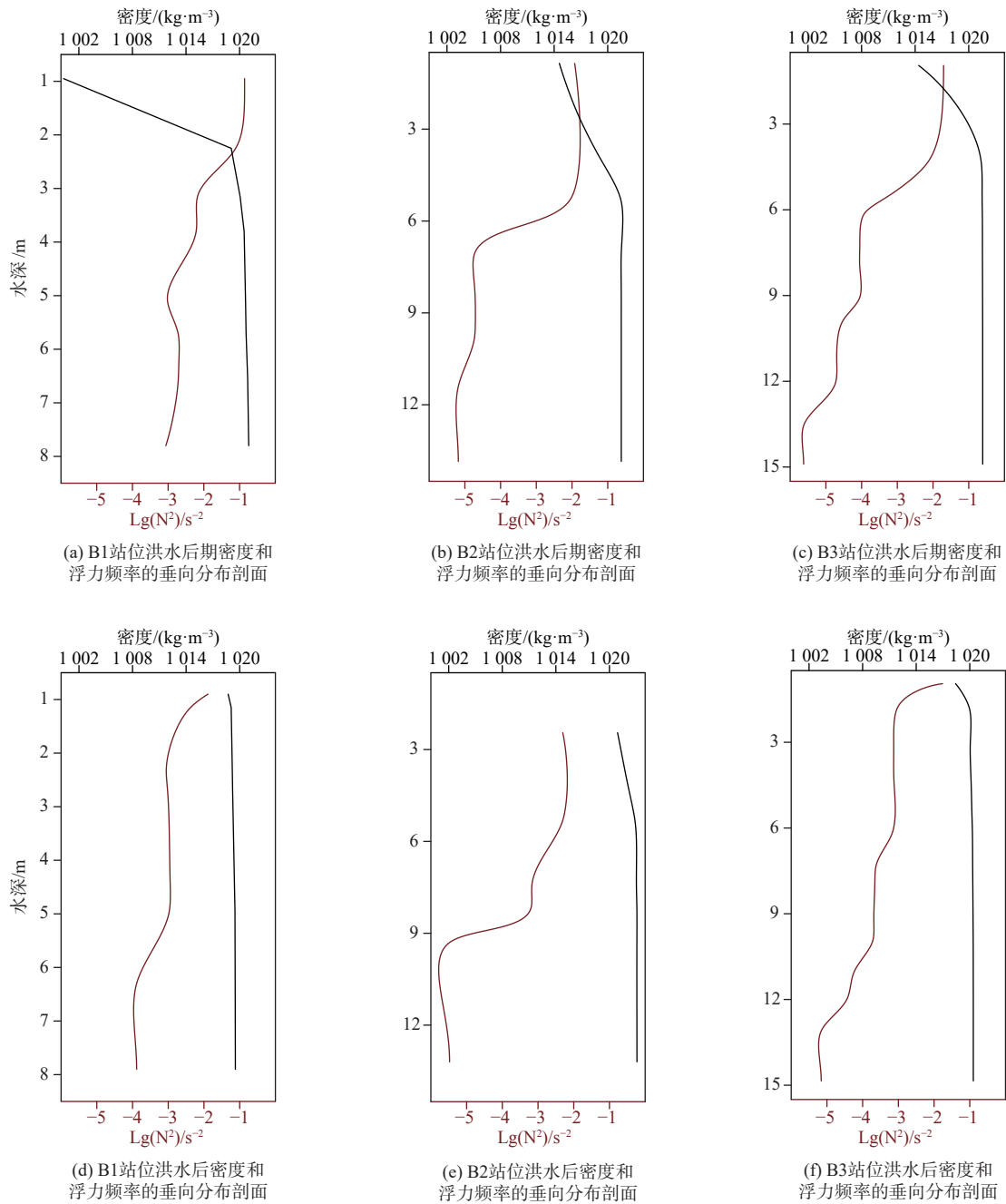


图 10 B1、B2、B3 站位在洪水后期和洪水后的密度和浮力频率的垂向分布剖面

Fig.10 Vertical profiles of density and buoyancy frequency in the late and after flood at station B1, B2 and B3

数据显示,浮力频率(N)在 $0.03 \sim 0.34 \text{ s}^{-1}$ 范围内为高度层化的盐楔河口,据此可见,本次暴雨洪水造成了河口的较高度度的层化,符合冲淡水主要通过表层羽流扩散的特征,体现了洪水对河口水体层化的重要影响。另外,洪水期间远岸站位(B2、B3、C2 和 C3)比近岸站位(B1 和 C1)具有更低的浮力频率,这说明洪水对层化的影响随离岸距离增加而减弱,体现了洪水输入对河口层化的关键作用。

4 讨论

4.1 暴雨洪水与人工洪水的水沙输送量

21 世纪以来,黄河汛期的入海水沙主要来自调水调沙的人工洪水,人工洪水的持续时间一般为 15~20 d,流量约是人工洪水前的 3 倍,含沙量约是

人工洪水前的7倍,入海水沙通量分别占年通量的30%和50%^[32-34,35-37]。黄河中游流经全国水土流失最严重的黄土高原地区,来沙量占流域的90%^[4],是黄河泥沙的主要源区。而本次暴雨主要发生在黄河小浪底站至花园口站区间,未流经黄土高原地区,因此,暴雨洪水与人工洪水的调水期类似,携带入海的泥沙主要来源于相对较高的流量对河道的冲刷,利津站输沙量(12.64×10^6 t)相对于花园口站输沙量(10.26×10^6 t)的增加可以证实这一论断。根据2009、2013和2018年人工洪水的统计数据,调水期的日均径流量为 2.45×10^8 m³,输沙量为 1.68×10^6 t^[36-38],二者均高于暴雨洪水。由于调水期周期长于暴雨洪水并且流量持续保持在较高水平,持续较高的流量也对下游河道形成冲刷作用,因而调水期相对于此次暴雨洪水有着较高的径流量和输沙量。此外,本次暴雨洪水发生前,黄河经历了汛前调水调沙,人工洪水对下游河道的冲刷在一定程度上减少了河床表层泥沙并造成泥沙粒径粗化^[32],河床对水流的泥沙补给减少且阻力增加^[37],导致水流携沙能力下降,可能成为此次暴雨洪水的日均输沙量低于调水阶段的另一方面原因。

4.2 暴雨洪水与人工洪水的水沙扩散范围与动力机制

黄河径流是影响河口盐度的重要因素^[21],短时间尺度的洪水事件会造成河口盐度的显著变化。前人对人工洪水期间河口盐度的观测结果显示,约7 m水深处表层水体盐度 <15 PSU,某一时段甚至 <5 PSU^[4,11]。本次暴雨洪水期间,在约7 m水深的B1和C1站位,同样观测到 <15 PSU的盐度值,最低盐度为8 PSU,未观测到 <5 PSU的盐度值,但本文的大面站调查时间为涨潮时段,该时段的盐度值通常高于落潮^[4]。此外,与人工洪水相比,远岸4个站位(B2、B3、C2和C3站位)表层水体的盐度值相对较高,26 PSU等值线分布深度相对较浅,说明本次暴雨洪水的影响范围相较于人工洪水存在局限性,这可能与两类洪水的洪峰流量持续时间、日均径流量不同关系密切(图7、8)。

由于夏季水动力条件较弱,黄河口水沙扩散格局主要受潮流和径流控制^[39]。较高的河流流量是促进羽流扩散的重要原因^[40],洪水期间利津站的流量大约是非洪水时期的2~3倍,以26 PSU等盐度线为羽流扩散边界^[41],洪水期间在距离河口16 km处记录到羽流,而洪水后距离河口7 km处未观测

到羽流(图7),洪水期间羽流扩散范围明显大于非洪水时期。然而,与人工洪水相比,暴雨洪水期间的羽流扩散范围较小,虽然两类洪水的羽流在水平方向均可到达13~14 m水深处,但暴雨洪水羽流垂向扩散深度不及人工洪水^[11]。

黄河入海泥沙的扩散范围与冲淡水扩散范围相比较为局限。对于黄河三角洲而言,径流是造成其高浊度的最重要因素^[34],洪水初期较高的流量侵蚀并携带下游河道松散层之下的粗结沉积物^[42],这些沉积物入海后迅速沉降,使高浊度集中分布在河口附近的有限区域内(图6),最远扩散至离岸约12 km,而冲淡水可以扩散至16 km以外(图7a、d)。前人研究表明,潮流切变锋的捕集效应对近岸和外海的泥沙交换起着重要作用,由于切变锋面两侧水动力特征的显著差异^[32],黄河入海泥沙都被限制在10~15 m等深线以内^[18,22],向近海地区输运的泥沙也被潮流切变锋阻挡而滞留于远海区域。因此,受泥沙沉降和潮流切变锋阻隔等因素影响,黄河入海泥沙向海的扩散范围小于冲淡水的扩散范围。于帅^[4]的研究结果表明,人工洪水期间泥沙由北汉出水口输出后几乎均沉积在约11.5 km以内区域,虽与本文研究结果略有差别,但两类洪水均符合潮流切变锋阻隔下入海泥沙的沉降范围^[18,22]。

5 结论

2021年7月河南省发生了历史罕见的特大暴雨,导致黄河下游发生暴雨洪水事件。基于2021年7月24日—8月3日在黄河口的3次现场调查资料,并结合GOCI遥感影像反演表层盐度与浊度分布,开展了暴雨洪水影响下的黄河口水文特征变化研究,主要结论为:

(1)本次暴雨洪水使黄河的入海水沙通量发生巨大变化。日均径流量 1.95×10^8 m³,输沙量为 1.58×10^6 t,分别是洪水前、后的2.71倍和9.38倍。由于高流量持续时间与洪水周期均短于调水调沙的调水阶段,因此本次暴雨洪水的入海水沙通量略低于调水阶段。

(2)黄河口的浊度和盐度在洪水期间与洪水前、后区别显著。洪水期间浊度的最高值和高浊度范围明显变大,冲淡水也呈NW—SE向明显扩张,但在潮流切变锋等因素的影响下,泥沙在河口近岸迅速沉积,扩散范围远小于冲淡水。与人工洪水相比,暴雨洪水对河口盐度的影响相对较小,羽流扩散范

围较为局限, 泥沙扩散范围与人工洪水差异较小, 符合潮流切变锋阻隔下入海泥沙的沉降范围。

(3)洪水期间较高的径流量还造成了河口地区较程度的水体层化, 水体浮力频率最高可达到 10^{-1} s^{-2} 以上, 与洪水后的浮力频率值有着量级上的差异。

参考文献:

- [1] PAERL H W, HALL N S, HOUNSHELL A G, et al. Recent increases of rainfall and flooding from tropical cyclones (TCs) in North Carolina (USA): implications for organic matter and nutrient cycling in coastal watersheds[J]. *Biogeochemistry*, 2020, 150: 197-216.
- [2] KITHEKA J U, OBIERO M, NTHENGE P. River discharge, sediment transport and exchange in the Tana Estuary, Kenya[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(3): 455-468.
- [3] RALSTON D K, WARNER J C, GEYER W R, et al. Sediment transport due to extreme events: the Hudson River estuary after tropical storms Irene and Lee[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(20): 5537-5563.
- [4] 于帅. 黄河调水调沙影响下河口入海泥沙扩散及地貌效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
YU S. Suspended sediment dispersal off the Huanghe (Yellow River) River Mouth and its morphological effects under impact of the Water-Sediment Regulation Scheme[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [5] CROKE J, FRYIRS K, THOMPSON C. Channel-floodplain connectivity during an extreme flood event: implications for sediment erosion, deposition, and delivery[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(12): 1444-1456.
- [6] KOITER A J, OWENS P N, PETTICREW E L, et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 125: 24-42.
- [7] BRACKEN L J, TURNBULL L, WAINWRIGHT J, et al. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(2): 177-188.
- [8] HOROWITZ A J. A quarter century of declining suspended sediment fluxes in the Mississippi River and the effect of the 1993 flood[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(1): 13-34.
- [9] KOLKER A S, LI C Y, WALKER N D, et al. The impacts of the great Mississippi/Atchafalaya River flood on the oceanography of the Atchafalaya Shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 34: 17-33.
- [10] FAN H S, YAN H Z, TENG L Z, et al. The effects of extreme flood events on the turbidity maximum zone in the Yangtze (Changjiang) Estuary, China[J]. *Marine Geology*, 2023, 456: 106993.
- [11] WU X, BIN N S, YUAN P, et al. Sediment dispersal and accumulation off the present Huanghe (Yellow River) Delta as impacted by the Water-Sediment Regulation Scheme[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 126-138.
- [12] ZELLOU B, RAHALI H. Assessment of the joint impact of extreme rainfall and storm surge on the risk of flooding in a coastal area[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 647-665.
- [13] XU J X. Sediment flux to the sea as influenced by the changing human activities and precipitation: example of the Huanghe River, China[J]. *Environmental Management*, 2003, 31(3): 328-341.
- [14] ZHANG Q, PENG J T, SINGH V P, et al. Spatio-temporal variations of precipitation in arid and semiarid regions of China: the Yellow River Basin as a case study[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 114: 38-49.
- [15] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22.
WANG Z Y, YAO C, DONG J L, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 17-22.
- [16] 李威, 叶殿秀, 赵琳, 等. 从全球气候变化角度看 2021 年河南“7·20”特大暴雨[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(4): 38-44.
LI W, YE D X, ZHAO L, et al. Examining “7·20” extreme rainstorm disaster in Henan Province in 2021 from global warming perspective[J]. *China Flood and Drought Management*, 2022, 32(4): 38-44.
- [17] GUO Y, WANG X J, LI X L, et al. Impacts of land use and salinization on soil inorganic and organic carbon in the middle-lower Yellow River Delta[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(6): 839-848.
- [18] 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.
- [19] 蒋超. 黄河口动力地貌过程及其对河流输入变化的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
JIANG C. Morphodynamic processes in the Yellow River estuary and their responses to variation of riverine supply[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [20] 殷鹏. 黄河口及近海域碳参数与营养盐调查研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
YIN P. The study of carbon system parameters and nutrients in the Yellow River Estuary and adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [21] YANG Z S, JI, Y J, BI, N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) Delta and the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [22] BIN N S, YANG Z S, WANG H J, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period[J]. *Estu-*

- arine, *Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 352-362.
- [23] MILLERO F J, POISSON A. International one-atmosphere equation of state for sea water[J]. *Deep-sea Research*, 1981, 28(A): 625-629.
- [24] 倪智慧, 陈辉, 董礼先, 等. 长江口外羽状流水体中的垂向混合与层化的观测与分析[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(11): 1862-1873.
- NI Z H, CHEN H, DONG L X, et al. Measurement and analysis of vertical mixing and stratification on within the plume outside the Changjiang River Estuary[J]. *Journal of Shanghaijiaotong University*, 2012, 46(11): 1862-1873.
- [25] TRITTON D J. *Physical Fluid Dynamics*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1988.
- [26] 郑鹭飞. 东中国海水体浊度遥感算法及时空分布规律研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- ZHENG L F. Study on remote sensing algorithm and the temporal-spatial distribution of turbidity in the East China Seas[D]. Nanjing: Nanjing University of Information and Technology, 2017.
- [27] LIU R J, ZHANG J, YAO H Y, et al. Hourly changes in sea surface salinity in coastal waters recorded by Geostationary Ocean Color Imager[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 196: 227-236.
- [28] 徐卫红, 刘昌军, 吕娟, 等. 郑州主城区 2021 年“7·20”特大暴雨洪涝特征及应对策略[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(5): 5-10.
- XU W H, LIU C J, LYU J, et al. Characteristics of “7·20” extreme rainstorm and flood-waterlogging and countermeasures of the main urban area of Zhengzhou City[J]. *China Flood and Drought Management*, 2022, 32(5): 5-10.
- [29] CHENG X Y, ZHU J R, CHEN S L. Dynamics of the extension of the Yellow River plume in the Bohai Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 222: 104438.
- [30] WANG Q, GUO X Y, TAKEOKA H. Seasonal variations of the Yellow River plume in the Bohai Sea: a model study[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113: C08046.
- [31] GEYER W R, SCULLY M E, RALSTON D K. Quantifying vertical mixing in estuaries[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2008, 8: 495-509.
- [32] 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.
- [33] WANG H J, WU X, BI N S, et al. Impacts of the dam-oriented 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.
- [34] JIA W F, YI Y J. Numerical study of the water-sediment regulation scheme (WSRS) impact on suspended sediment transport in the Yellow River Estuary[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1135118.
- [35] HU B Q, LI J, BI N S, et al. Seasonal variability and flux of particulate trace elements from the Yellow River: impacts of the anthropogenic flood event[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 91(1): 35-44.
- [36] CHEN J B, LIU M, BI N S, et al. Variability of heavy metal transport during the water-sediment regulation period of the Yellow River in 2018[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149061.
- [37] 付春兰, 李庆银, 王庆斌, 等. 小浪底水库调水调沙对黄河下游河道冲淤的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(5): 173-175.
- FU C L, LI Q Y, WANG Q B, et al. Influence of water and sediment regulation of the Xiaolangdi reservoir on the channel scouring and silting of lower reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(5): 173-175.
- [38] BI N S, YANG Z S, WANG H J, et al. Impact of artificial water and sediment discharge regulation in the Huanghe (Yellow River) on the transport of particulate heavy metals to the sea[J]. *Catena*, 2014, 121: 232-240.
- [39] QIAO S Q, SHI X F, ZHU A M, et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) Mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 337-344.
- [40] SALMELA J, KASVI E, ALHO P. River plume and sediment transport seasonality in a non-tidal semi-enclosed brackish water estuary of the Baltic Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106986.
- [41] WANG Y C, LIU Z, GAO H W, et al. Response of salinity distribution around the Yellow River Mouth to abrupt changes in river discharge[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31: 685-694.
- [42] MATHEW R, WINTERWERP J C. Sediment dynamics and transport regimes in a narrow microtidal estuary[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(4): 435-462.

Variations of hydrological characteristics off the Yellow River Estuary induced by the “7·20” rainstorm flood in Henan Province

XU Hehe¹, LIU Surui², CHEN Jianbin³, WANG Houjie^{1,4}, BI Naishuang^{1,4},
YU Yongqing⁵, WANG Yamei⁵, WU Xiao^{1,4*}

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Lijin Hydrological Station of Shandong Hydrology and Water Resources Bureau Yellow River Commission, Dongying 257000, China; 3 Administration Center of the Yellow River Delta Sustainable Development Institute of Shandong Province, Dongying 257000, China; 4 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 261000, China; 5 Shengli Oilfield Branch of SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: The frequency and intensity of extreme weather events such as extreme rainstorm floods have been increasing significantly with the global warming. Rainstorm floods could not only have profound impacts on both human society and the natural environment, but also change the fluxes of terrestrial materials to the sea, causing the diffusion path and range of water flow and sediment, which is very significant for the evolution of estuaries. An extraordinary rainstorm event occurred in Zhengzhou, Henan on July 17-23, 2021, causing severe flooding in the lower reaches of the Yellow River. Based on measurement data and satellite remote sensing, we discussed the hydrological characteristics, stratification structure, and dynamic mechanism of the Yellow River Estuary before and after the flood and in the early and late stages. Results show that the average daily runoff at Lijin station was $1.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ and the sediment transport amounted to $1.58 \times 10^6 \text{ t}$ during the flood, which is 2.71 times and 9.38 times of that in non-flood period, respectively. Since the duration of high flow and flood cycle were shorter than those during the period of the water-sediment regulation scheme (WSRS), the runoff and sediment flux into the sea during this rainstorm flood is slightly lower than that of the WSRS. Moreover, the turbidity and salinity of the Yellow River estuary changed significantly during the flood, which were associated with the enormous water and sediment discharge of the Yellow River. The turbidity increased obviously and the range of high turbidity zone became wider. In addition, diluted water expanded to the surface to the northwest and southeast directions. However, sediments were blocked by the tidal shear front near the coast, which narrowed the diffusion range of sediments significantly. Compared with artificial floods, the impact of rainstorm flood on estuarine salinity was relatively small, the plume diffusion range was relatively limited, and the sediment diffusion range was less different from that of artificial flood, which is in line with the sedimentation range of sediment entering the sea under the barrier of tidal shear front. The runoff of the flood event also caused a high degree of water stratification in the Yellow River Estuary. The buoyancy frequency of the surface water mass could reach more than 10^{-1} s^{-2} , which was an order of magnitude difference from the buoyancy frequency after the flood. However, the buoyancy frequency of the middle and bottom water column change less during and after the flood, which is mixes well than the surface water column.

Key words: rainstorm flood; Yellow River Estuary; sediment dispersal; diluted water; stratification