



台风“莫拉克”（2009）对浙闽沿岸泥质中心沉积有机质组成与分布的影响

李云海, 林云鹏, 王 亮, 龙邹霞, 郑斌鑫

Impact of Typhoon Morakot (2009) on the compositions and distributions of sedimentary organic matter in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast

LI Yunhai, LIN Yunpeng, WANG Liang, LONG Zouxia, and ZHENG Binxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024071001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏特征

The characteristics of sedimentary organic carbon in the mud area in the western North Yellow Sea since the Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 110–119

南海南沙海区沉积有机质分布特征及其指示意义

Spatial distribution of organic matter in surface sediments from the Nansha sea area of the South China Sea and its implications for marine productivity and monsoon

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 45–54

东海内陆架夏季台风与冬季寒潮沉积动力过程的差异—基于现场观测的认识

Differences in sedimentary dynamic processes between summer typhoons and winter cold waves on the inner shelf of the East China Sea: Insights from in-situ observations

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(5): 96–105

南极罗斯海阿蒙森海2019—2020年夏季表层悬浮颗粒有机质组成及其控制因素

Composition of organic materials and the control factors of suspended particulates in the surface water of the Ross Sea–Amundsen Sea in marginal sea of the southwestern Antarctic in austral summer 2019–2020

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 24–38

南黄海中部泥质区沉积物碎屑锆石U–Pb年龄物源判别

Detrital zircon U–Pb age and provenance discrimination in sediments of the central mud area in the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 70–82

水库调控下黄河口沉积有机碳的分布、来源与输运特征

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

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 120–130



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李云海, 林云鹏, 王亮, 等. 台风“莫拉克”(2009)对浙闽沿岸泥质中心沉积有机质组成与分布的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 27-37.

LI Yunhai, LIN Yunpeng, WANG Liang, et al. Impact of Typhoon Morakot (2009) on the compositions and distributions of sedimentary organic matter in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 27-37.

台风“莫拉克”(2009)对浙闽沿岸泥质中心沉积有机质组成与分布的影响

李云海^{1,2}, 林云鹏¹, 王亮^{1,2}, 龙邹霞³, 郑斌鑫^{1,2}

1. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005

2. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 厦门 361005

3. 华侨大学先进碳转化技术研究院, 厦门 361021

摘要: 台风是天气尺度上对海洋环境影响最大的海气相互作用过程之一, 在短时间内会对影响海域的海洋环境(包括沉积有机质等)产生巨大的影响。本文基于夏季台风前、后采集的浙闽沿岸泥质中心沉积物的粒度、总有机碳(TOC)、总氮(TN)以及碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的测试结果, 分析了台风“莫拉克”(2009)对研究区沉积有机质来源及分布的影响, 对比了台风“莫拉克”与其他不同路径的台风对沉积有机质分布影响的差异, 探讨了影响差异的机制。结果显示, 台风“莫拉克”(2009)对浙闽沿岸泥质区沉积物中 TOC 的来源和分布产生了显著影响。端元分析结果表明, 浙闽沿岸泥质中心沉积物中有机碳主要来源于长江三角洲沉积物以及海洋自生有机质, 在台风的影響下, 浙闽沿岸泥质中心的初级生产力升高, 进而增加了沉积物中海源有机碳的比例。同时, 在台风的动力作用下, 近岸沉积物发生了明显的侵蚀与再搬运, 导致近岸沉积物中 TOC 的含量显著降低。受控于台风不对称风场造成的沉积动力差异, 不同路径的台风会对研究区的物源输入、海洋生物地球化学以及沉积物的搬运改造等产生不同的影响, 进而影响到沉积有机质的组成和分布。研究结果为全面认识极端海况影响下近岸陆架“碳埋藏”提供了科学依据。

关键词: 台风“莫拉克”; 沉积有机质; 端元混合; 沉积物再搬运; 浙闽沿岸泥质沉积中心

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024071001

Impact of Typhoon Morakot (2009) on the compositions and distributions of sedimentary organic matter in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast

LI Yunhai^{1,2}, LIN Yunpeng¹, WANG Liang^{1,2}, LONG Zouxia³, ZHENG Binxin^{1,2}

1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China

3. Academy of Advanced Carbon Conversion Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China

Abstract: Typhoons are one of the most significant ocean-atmosphere interaction processes at the weather scale, exerting a large impact on the marine environment (including the deposition of organic matter) within a short period. The effects of Typhoon Morakot (2009) on the compositions and distributions of sedimentary organic matter (SOM) were analyzed. The distinct influence of typhoons following different paths on SOM was compared, and their mechanisms were discussed based on the analysis on grain size, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of sediments collected in the Mud Depo-center of the Zhejiang-Fujian Coast before and after Typhoon Morakot (2009). Results indicate that Typhoon Morakot (2009) significantly affected the compositions and distributions of TOC in the study area. The findings from a three end-member mixing model revealed that the sedimentary organic carbon in the study area originated primarily from the sediments of the Yangtze River Delta and marine phytoplankton. The influence of Typhoon Morakot led to an increase in primary productivity in the study area, resulting in a higher proportion of marine-sourced organic carbon in the sediments. Additionally, nearshore sediments experienced significant erosion and re-transport due to the dynamic effects of Typhoon Morakot, leading to a reduction in

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“厦门湾海洋微塑料污染演变及其物源耦合”(42176220), “台风对泉州湾入海污染物“从源到汇”过程的影响研究”(41976050)

作者简介: 李云海(1980—), 男, 博士, 研究员, 从事现代海洋沉积过程研究, E-mail: liyunhai@tio.org.cn

收稿日期: 2024-07-10; **改回日期:** 2024-08-16. 文凤英编辑

TOC content in the sediment. The differential response of sediment dynamics caused by the asymmetric wind field of typhoons with varying paths led to distinct impacts on material sources, marine biogeochemical processes, and sediment transport and modification processes within the same study area and thus had different impacts on the compositions and distributions of SOM. These findings provide a scientific basis for the comprehensive understanding of carbon burial in the coast and shelf under the influence of extreme marine dynamics.

Key words: Typhoon Morakot; sedimentary organic matter; endmember mixing; sediment re-transport; the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast

大河影响下的陆架海面积虽然仅占全球海洋面积的8%,但其沉积物中埋藏的有机碳量可占全球海洋有机碳埋藏总量的80%以上^[1-3],是全球碳循环和气候变化研究的重点区域^[4-5]。中国东海陆架是世界上最宽广的陆架之一,其内陆架区域分布着厚达数十米、绵延近千公里的远端泥质沉积条带(浙闽泥质区)^[6-7]。浙闽泥质区的沉积物主要来自冬季浙闽沿岸流携带的长江入海物质,并受到福建、浙江近岸中小型河流以及台湾山溪型河流的影响^[8-9],具有相对稳定的矿物学和地球化学性质,沉积记录保存较好^[7,10-11],是中国东部陆架海现代海洋沉积学研究的理想区域。

台风是天气尺度上对海洋环境影响最大的海气相互作用过程之一,对影响海域的物质源汇过程与生物地球化学循环具有不可忽视的“事件性”影响。台风引起的海水垂向混合及其导致的埃克曼输运所产生的上升流,会将海洋下层富含营养盐的水体泵送到海表真光层,同时台风带来的强降雨也导致河流向海洋输入大量的陆源营养盐,这些过程会导致相关海域浮游生物的爆发,从而提高海洋初级生产力,影响到海洋物质循环(包括碳循环等)^[12-14]。台风强降雨还会在短时间内增加河流携带入海的陆源有机质通量,进而增加河口及其周边海域沉积物中有机质的含量^[15]。此外,在水深较浅的陆架及近岸海域,台风的强动力作用还能直接引起海底未固结沉积物(包括沉积物中的有机质)发生再悬浮,显著提高水体中悬浮颗粒物的浓度,并随着台风动力改造下的海流进行再分配^[16-17]。然而,海表浮游植物的爆发过程不仅受控于台风自身的特征(强度、路径和移动速度等),还受其所处的海洋环境的背景条件约束,导致台风影响下河口近岸与开阔大洋的生物爆发机制出现差异^[18-19],进而在固碳效率上明显不同。同时,不同路径和强度的台风对河口与陆架海域的沉积物搬运改造过程也存在着明显的差别^[20]。因此,需要开展更多的研究来不断补充和完善台风影响下的陆架边缘海物质循环过程(包括碳循环)的相关理论。

本研究基于台风“莫拉克”(2009)过境前、后在

浙闽泥质沉积中心采集的沉积物样品的分析测试结果,对比了台风前、后沉积物粒度和有机碳氮分布特征,分析了沉积物中有机碳的来源及其在台风影响下的变化,探讨了不同路径的台风对浙闽泥质沉积中心沉积有机碳分布影响的差异及其机制,为台风影响下陆架泥质区沉积物碳埋藏过程的研究提供了科学的参考,对认识新气候态下陆架物质源汇过程的变异具有重要的科学价值。

1 研究区与台风“莫拉克”概况

1.1 研究区概况

研究区位于浙闽近岸海域,属于东海内陆架的一部分(图1a)。该区域潮汐主要为半日潮,春季平均潮差为4~5 m,秋季平均潮差为2~3 m。该区域陆架环流主要由两个系统组成:近岸的浙闽沿岸流(ZFCC)和远岸的台湾暖流(TWC)(图1a)。浙闽沿岸流夏季沿岸向北流动,冬季则沿岸向南流动,主要受东亚季风的风向控制^[21-22],而台湾暖流则常年向北流动^[23]。ZFCC的季节性交替在东海陆架沉积物的迁移和沉积方面发挥着重要作用。夏季,沿岸向北的ZFCC有效地阻碍了长江输入入海的泥沙沿岸向南的扩散,使这些泥沙被迫在长江口附近迅速沉积;到了冬季,长江口的沉积物往往会在频繁的冬季风暴作用下再次悬浮,并被ZFCC向南带到浙江甚至福建近岸沉降^[10]。ZFCC和TWC之间水团性质的差异导致大致沿50 m等深线存在明显的海洋锋面,阻碍了近岸沉积物的离岸迁移^[24-25]。

研究区西部的瓯江是一条山溪型河流,全长388 km,流域面积18 000 km²。瓯江年入海泥沙通量较小,为 3.32×10^6 t,年径流量为457 m³/s^[26]。径流和泥沙主要在汛期(每年6—9月)排入河口,洪水携带的泥沙多为粗泥沙,细泥沙很少。

1.2 台风“莫拉克”

“莫拉克”于2009年8月2日形成热带低压,并于8月3日逐渐发展为热带风暴,命名为“莫拉

克”。“莫拉克”在向台湾移动的过程中逐渐加强,到 8 月 5 日,升级为台风。台风规模较大,气压持续下降,但最大风力增强相对较少。8 月 7 日,达到最高强度,风速为 41.7 m/s,并在当天登陆台湾中部。

掠过台湾海峡后于 8 月 9 日再次登陆中国大陆,登陆前强度减弱为强热带风暴(图 1a)。“莫拉克”登陆时福建陆上的风速约为 33.0 m/s,台风中心距离研究区约 100 km,台风在海上的风速超过了 40.0 m/s

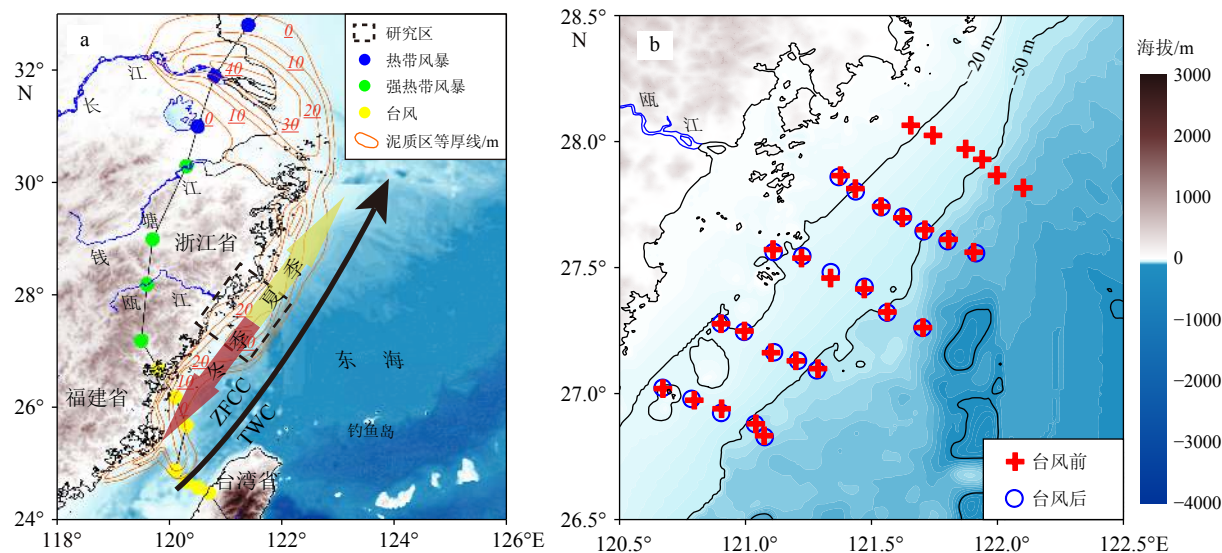


图 1 研究区 (a) 与采样站位分布 (b)

Fig.1 Location of study area (a) and the sampling stations (b)

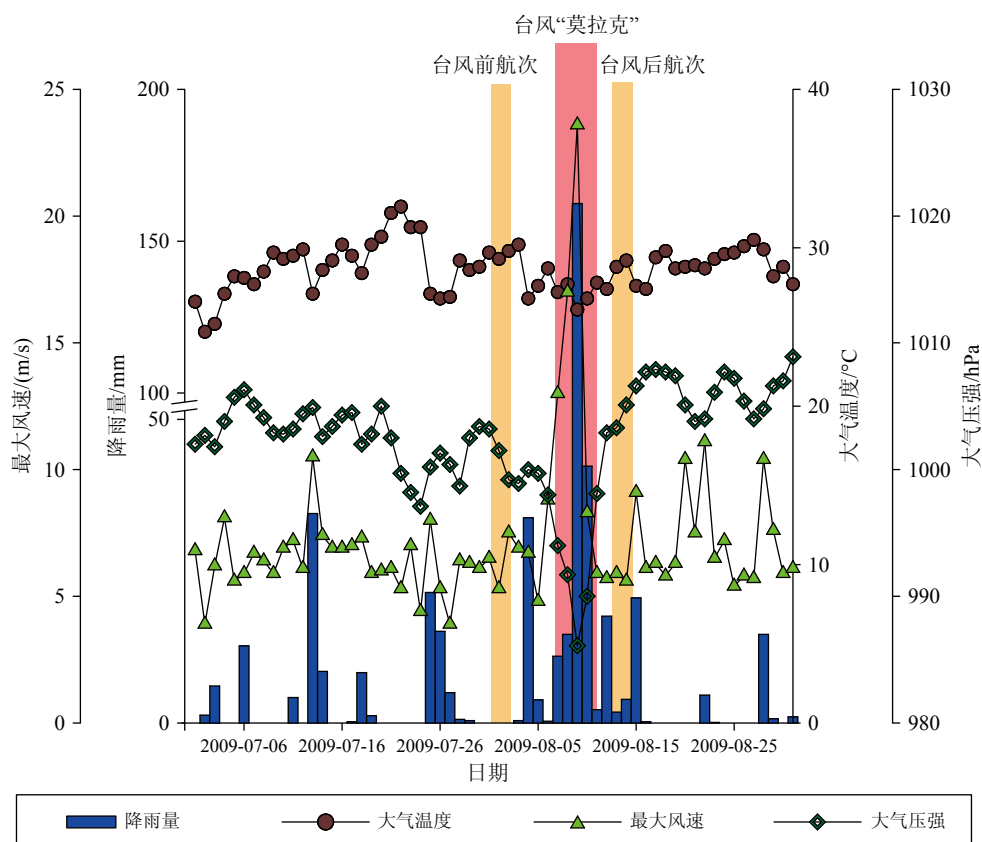


图 2 野外调查期间的气象条件

橙色阴影区域为调查期间,红色阴影区域为台风过境时间。

Fig.2 The meteorological condition of the study area during field surveys

The orange-shaded area indicate survey periods, and the red-shaded area indicates the typhoon period.

(图 2)。随后,“莫拉克”向北移动,影响逐渐减弱,最终于 8 月 12 日消失。在研究区附近逗留的 4 天时间里,“莫拉克”给浙江带来了平均约 1 240 mm 的降雨量。受台风“莫拉克”的影响,浙闽近岸水体发生了显著的垂向混合,破坏了夏季的温盐跃层,同时,台风的动力过程引起海底沉积物的再悬浮与再搬运,进而改变了沉积物的物理和化学特征^[27-31]。

2 材料与方法

2.1 航次设置与样品采集

本研究共开展了两次野外调查航次(站位如图 1b 所示),在每个站位使用抓斗采集表层沉积物,使用金属勺挖取最上层 2 cm 厚的沉积物,使用锡纸包裹后保存至样品袋中,用于粒度和有机元素测试。台风前和台风后的调查分别于 2009 年 8 月 1 日和 8 月 12 日进行,均持续了约 3 天,分别采集了 29 个和 23 个表层沉积物样品。台风前航次天气平静,南风风速小于 10.7 m/s,浪高小于 1.6 m;台风后航次受台风影响,天气不佳,浪高 2.0 ~ 2.5 m,风速大于 13.0 m/s,调查期间由于海况急剧恶化,未采集研究区最北端 5 个站点(图 1b)的样品。

2.2 样品分析

2.2.1 粒度分析

使用 10 mL 30% 的双氧水(H_2O_2)溶液与 1 mL 稀 HCl 对 0.5 g 左右的新鲜沉积物进行预处理,氧化其中的有机物并去除碳酸钙,清洗盐酸后加入六偏磷酸钠作为分散剂,然后用超声仪分散匀质 30 s。处理结束后使用激光粒度仪(Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Ltd., UK)进行粒度测定。仪器测量误差在 3% 以内。测试结果中粒径 $< 4 \mu m$ 为黏土粒级,粒径 $4 \sim 63 \mu m$ 为粉砂粒级,粒径 $> 63 \mu m$ 为砂粒级,并使用矩法计算粒度参数。

2.2.2 总有机碳(TOC)、总氮(TN)和稳定碳同位素组成($\delta^{13}C$)的测定

用 1.2 mol/L 的稀 HCl 对沉积物进行酸化处理以去除无机碳。酸化后使用纯净水进行多次清洗至中性以去除残留的 HCl。洗酸后在 60℃ 下干燥样品,并研磨成粉末。酸化前后样品质量差为无机碳酸盐含量。称取 25~30 mg 无碳酸盐样品包裹在锡杯中,使用元素分析仪-稳定同位素质谱仪联机(EA-IRMS, Integra 2, SerCon, UK)测量 TOC、TN 含

量和 $\delta^{13}C$ 值。样品前设置 3 个空白样,每隔 12 个样品插入 2 个标准样品,以此校正仪器造成的误差。 $\delta^{13}C$ 以美洲似箭石国际标准(Pee Dee Belemnite, PDB)作为参考标准,计算公式如下:

$$\delta = \left(\frac{(^{13}C/^{12}C)_{\text{样品}}}{(^{13}C/^{12}C)_{\text{标准}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

测试后的 TOC 与 TN 含量经由酸化获取的无机碳酸盐含量校正,获得原始沉积物中的 TOC 与 TN 含量。TOC 测定精度为 $\pm 0.02\%$, TN 测定精度为 $\pm 0.002\%$, $\delta^{13}C$ 测定精度为 $\pm 0.2\%$ 。样品分析在自然资源部第三海洋研究所完成。

2.3 三端元混合模型

在河口区域,河流输入的陆源有机质和海源有机质混合后沉降进入沉积物中。这些有机质在沉积物中经历了初始的降解、蚀变和埋藏过程,表现出与初始陆源和海源有机质不同的特征。河口沉积物中经过修饰的有机物随后会在水动力或生物扰动的影响下重新悬浮进入水柱中,并通过波浪、潮汐和海流等动力过程被输送到大陆架,甚至是深海区域。

本文采用三端元混合模型对研究区沉积有机碳的来源进行分析。端元参数($\delta^{13}C$ 和 N/C)来自 Zhang 等^[32]为河流、三角洲和海洋三种有机碳来源指定的平均值和标准差(表 1),并且遵循正态分布特征。采用蒙特卡罗(MC)模拟策略,在考虑端元参数值扩散的情况下,分析沉积物中不同来源有机碳的贡献比例。该程序在 Enthought Python Distribution 7.2 中运行,代码由 Li 等^[33]提供。从每个端元的正态分布中随机抽取 40 000 000 个样本中的 400 000 个样本,以便同时满足下列方程:

$$\delta^{13}C_{\text{河流}}f_{\text{河流}} + \delta^{13}C_{\text{三角洲}}f_{\text{三角洲}} + \delta^{13}C_{\text{海洋}}f_{\text{海洋}} = \delta^{13}C_{\text{样品}} \quad (2)$$

$$N/C_{\text{河流}}f_{\text{河流}} + N/C_{\text{三角洲}}f_{\text{三角洲}} + N/C_{\text{海洋}}f_{\text{海洋}} = N/C_{\text{样品}} \quad (3)$$

$$f_{\text{河流}} + f_{\text{三角洲}} + f_{\text{海洋}} = 1 \quad (4)$$

式中, $f_{\text{河流}}$ 、 $f_{\text{三角洲}}$ 、 $f_{\text{海洋}}$ 分别为河流源、三角洲源和

表 1 三端元混合模型中使用的端元值^[32]

Table 1 The end-member values used in the three end-member mixing model^[32]

	河流端元	三角洲端元	海洋端元
$\delta^{13}C$	$-8.70\% \pm 1.0\%$	$-22.1\% \pm 1.5\%$	$-20\% \pm 1.0\%$
N/C	0.080 ± 0.019	0.057 ± 0.007	0.154 ± 0.053

海源有机碳对样品的贡献比例。由于瓯江排放进入研究区的陆源物质远低于长江源物质, 研究区主要考虑来自长江的河流和三角洲端元贡献。通过对每个参数值随机抽样 5 次, 每个端元的均值变异小于 0.2‰, 保证了模型的统计稳定性。

3 结果

3.1 沉积物粒度分布特征

研究区沉积物不同粒度组分含量与中值粒径的统计信息如表 2 所示。两次调查期间的沉积物

均以细粒的粉砂和黏土组分为主, 砂含量较低。台风过境后, 研究区沉积物粒度变粗, 主要表现为粉砂粒级含量的增加和黏土粒级含量的减少, 同时研究区东南部砂粒级含量出现了明显的增加(图 3)。台风过境前, 研究区的中值粒径较小, 仅在近岸与远岸边缘出现斑块状高值区, 台风过境后, 研究区沉积物中值粒径显著增大, 粗化过程主要发生在研究区北部与东南部, 指示了台风期间强水动力对研究区沉积物的显著影响。

3.2 沉积物 TOC、TN、C/N 和 δ¹³C 的分布特征

研究区沉积物 TOC、TN 含量、C/N 以及 δ¹³C 值

表 2 浙闽泥质沉积中心沉积物的粒度组成和有机元素特征结果统计

Table 2 Statistics of grain-size and organic element characteristics of the sediments in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast

		砂/%	粉砂/%	黏土/%	Md/μm	TOC/%	TN/%	C/N	δ ¹³ C/‰
台风过境前	最大值	7.15	81.84	26.26	12.09	0.75	0.098	13.52	-21.8
	最小值	0.01	72.69	15.90	7.78	0.47	0.040	9.14	-22.3
	平均值	2.63	76.22	21.16	9.27	0.60	0.064	11.15	-22.0
台风过境后	最大值	8.54	83.48	25.84	16.15	0.75	0.083	11.90	-21.9
	最小值	0.37	73.00	13.16	7.87	0.37	0.029	9.60	-23.1
	平均值	3.17	78.01	18.82	10.73	0.58	0.061	10.65	-22.1

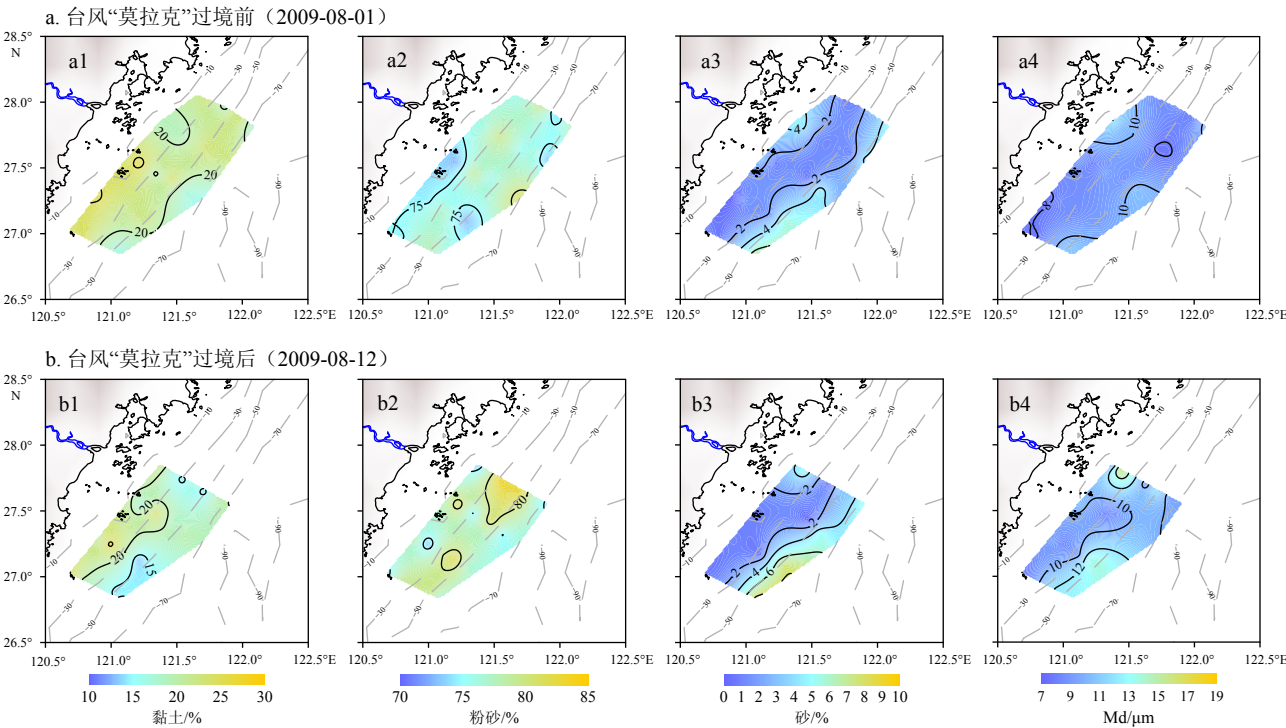


图 3 台风前后浙闽泥质沉积中心沉积物的黏土(第一列)、粉砂(第二列)和砂(第三列)的百分含量以及中值粒径 Md(最后一列)的空间分布特征

Fig.3 The distribution of clay (first column), silt (second column), sand (third column), and median grain-size (last column) in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast before and after the typhoon

的统计信息如表 2 所示。台风前、后沉积物 TOC 和 TN 含量的平均值相近,但空间分布存在一定的差异:台风过境前,TOC 的分布较为均匀,TN 则表现出明显的近岸低、远岸高的特征,二者分布特征存在较大差异;台风过境后,近岸的 TOC 含量明显降低,且 TN 表现出与 TOC 相似的空间分布特征(图 4)。台风后 C/N 发生显著的降低,降低区域主要发生在近岸(图 4b3)。夏季 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布表现出明显的中间高、近岸和远岸低的特征,台风过境后,研究区东南缘沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著降低。

4 讨论

4.1 沉积有机碳的来源及其在台风“莫拉克”影响下的变化

$\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 是追踪沉积有机碳来源的重要指标。海洋与陆地植物初级生产过程中碳同位素的差异性分馏导致陆源有机碳(C3 植物)的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要为 $-33\text{‰} \sim -22\text{‰}$ (平均 -27‰),而海源有机碳则多为 $-22\text{‰} \sim -18\text{‰}$ (平均 -20‰)^[34]。类似地,由于海洋和陆地植物中碳和氮组成的差异,通常认为 C/N 大于 12 的为陆源有机碳,C/N 小于 8 的为海源有机

碳,介于二者之间则为混合来源有机碳^[35-36]。本研究的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 结果表明,研究区沉积有机碳主要为海陆混合来源,然而, $\delta^{13}\text{C}$ 值的结果指示了其以海源为主,C/N 值却指示了其以陆源为主(表 2)。研究区夏季沉积物中有机质发生的明显降解过程可能是造成这一结论相悖的主要原因。由于有机质降解时会优先降解富氮的有机物(例如蛋白质),导致剩余有机质的 C/N 升高,但这一过程并不会改变有机质本身的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,因而会出现 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C/N 指示不同来源的情况。除此之外,富氮有机质的降解还会导致沉积物中 TOC 与 TN 之间相关性变差(图 5)。台风莫拉克过境后,研究区沉积物的 C/N 显著降低(表 2),且 TOC 与 TN 之间的相关性明显增强(图 5),表明台风“莫拉克”的过境增加了沉积物中富氮的新鲜有机质。然而,台风强动力的侵蚀与搬运导致沉积物中总有机碳含量并未明显增加(表 2),相反地,近岸沉积物中有机碳含量在台风的侵蚀下显著降低^[29-30]。

浙闽泥质沉积中心的沉积物主要来源于长江入海物质在冬季的长距离搬运,其周边河流直接输入的物质相对较少^[8,10]。因此,简单的海陆双端元并不能很好地概括有机碳的来源。由此,前人提出了三端元混合模型,即河流端元(陆源)、海洋端元

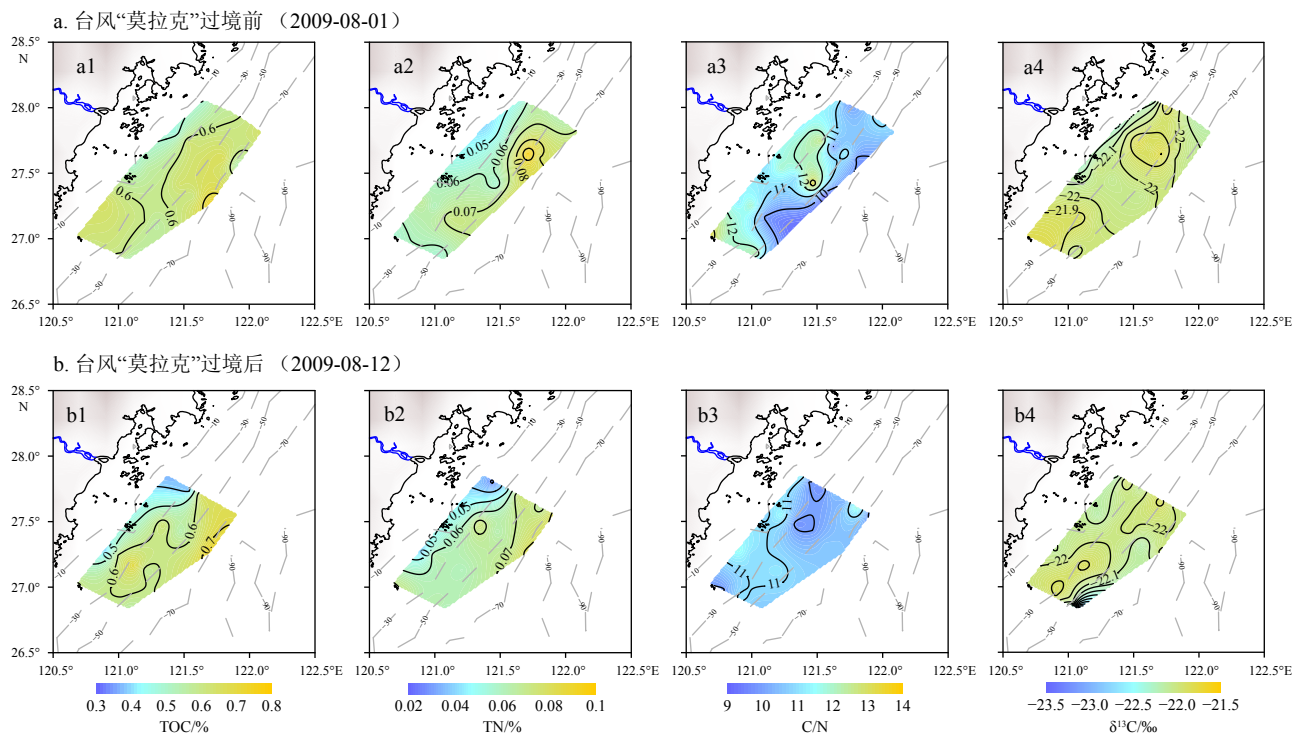


图 4 不同时期浙闽沿岸泥质沉积中心沉积物中 TOC 含量(第一列)、TN 含量(第二列)、C/N(第三列)以及 $\delta^{13}\text{C}$ (最后一列)的空间分布特征

Fig.4 The distribution of TOC (first column), TN (second column), C/N (third column), and $\delta^{13}\text{C}$ (last column) in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast before and after the typhoon

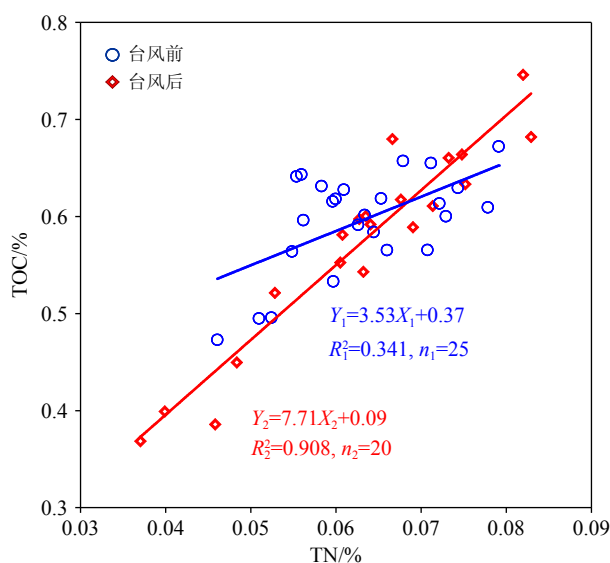


图 5 TOC 与 TN 之间的线性关系图

Fig.5 Bi-plot of TOC vs. TN

以及长江三角洲端元,来量化浙闽泥质沉积中心有机碳的来源^[16,33]。其中,长江三角洲端元为海陆混合端元,其沉积有机碳的信号是海洋沉积物与河流沉积物混合后沉降进入沉积物中并接受了初步改造(如降解)的结果。结果显示,浙闽泥质沉积中心沉积有机碳主要为三角洲来源(表 3),这是由于该区域的沉积物主要来源于长江三角洲沉积物在冬

季的再悬浮与再搬运^[10,37],大量的三角洲有机碳随之搬运而来。台风前,三角洲源有机碳主要分布在研究区中部和近岸区域,指示了冬季浙闽沿岸流的搬运与沉积作用,且在夏季正常天气条件下并未受到大规模的改造(图 6)。相比之下,海源有机碳的高贡献比例主要分布在离岸区域。同时,由于研究区距离长江口较远,且瓯江入海颗粒物通量远低于长江三角洲的供给,因此河流源有机碳的贡献最低。

为了消除沉积有机碳含量变化对来源识别的影响,本文计算了研究区台风前后不同来源有机碳的绝对含量,以探究不同来源有机碳在台风影响下的变化。其结果显示,台风过境前研究区的河流源、三角洲源以及海源有机碳含量平均值分别为 0.09%、0.31% 与 0.20%,台风后分别为 0.09%、0.27% 与 0.21%。台风后三角洲源有机碳发生了明显的降低,这也是造成台风后研究区总有机碳含量降低的主要原因。由于三角洲源有机碳大多都属于惰性较强的有机碳,不易在短时间内发生降解,因此,台风作用下的二次搬运可能是造成其含量下降的主要原因^[16]。台风后研究区三角洲源有机碳的分布特征发生了明显的变化,近岸含量降低而远岸含量增加(图 7),表明在台风影响下研究区可能发生了沉积物(携带着有机碳)的离岸输运。研究区远岸

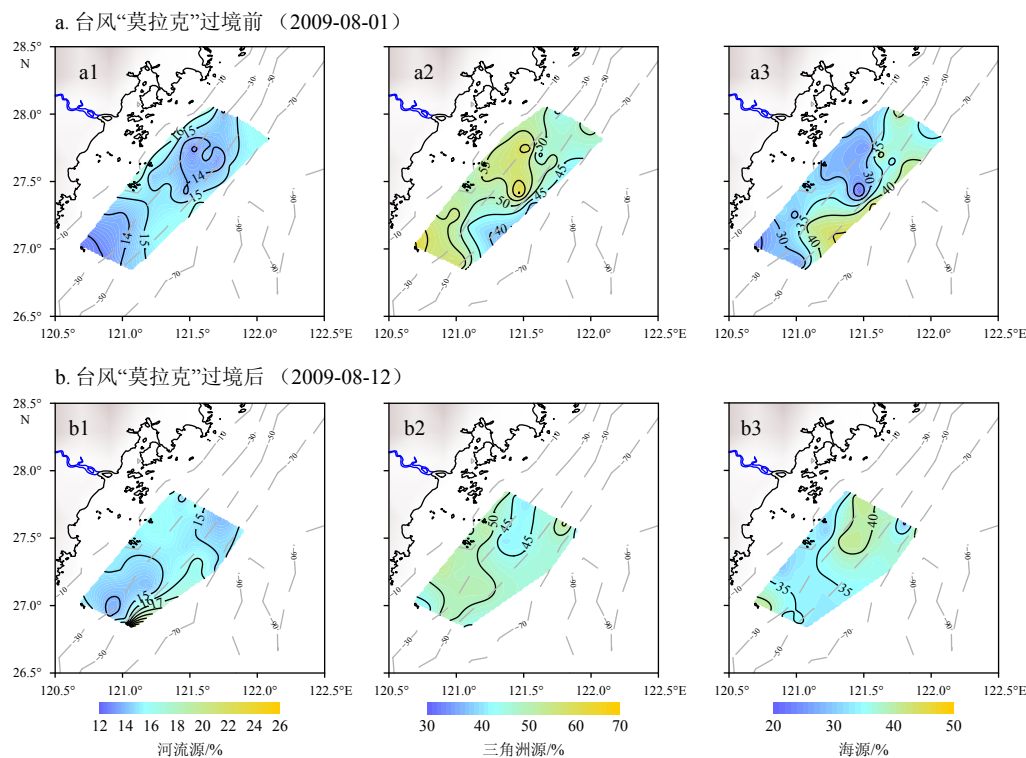


图 6 不同来源有机碳对研究区沉积有机碳的贡献比例特征

Fig.6 Contribution ratio of organic carbon from different sources to the sedimentary organic carbon in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast before and after the typhoon

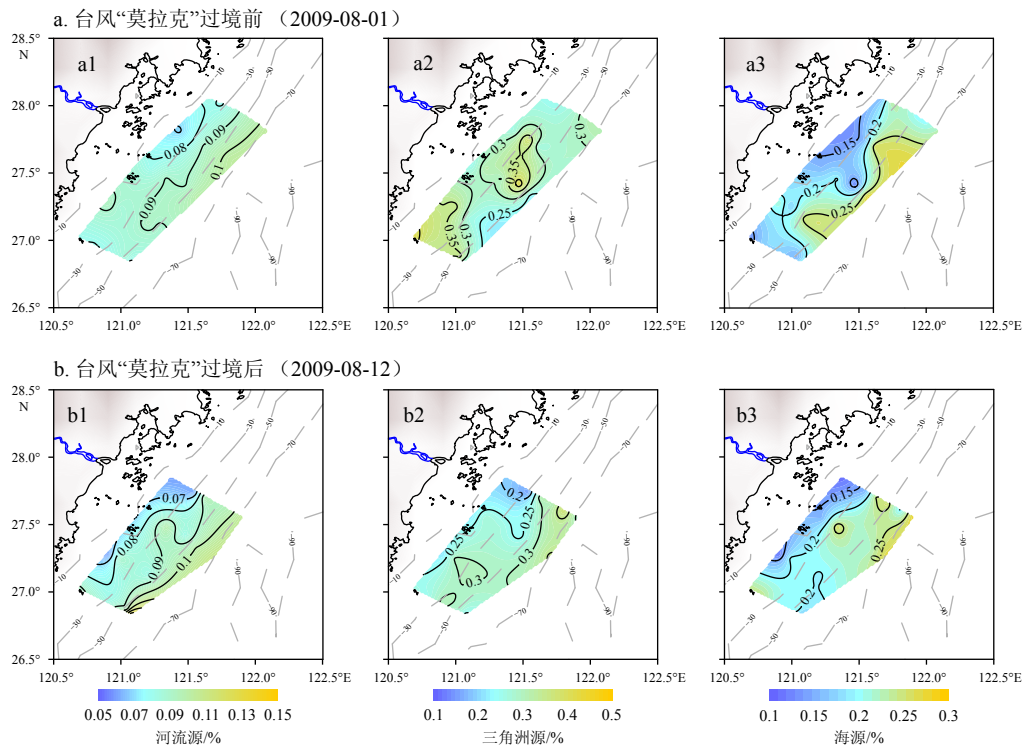


图 7 研究区不同来源有机碳绝对含量的分布特征

Fig.7 The distribution of sedimentary organic carbon contents from different sources in the Mud Depo-center of Zhejiang-Fujian Coast before and after the typhoon

区域在台风后沉积物粒度明显的粗化也是近岸物质离岸运输的重要证据之一(图 3)。通常情况下,台风在登陆前会引发近岸水体的堆积,进而导致近岸底层形成下降流,裹挟近岸物质发生离岸运输^[38-39]。同时,台风后近岸高水位的释放也会携带近岸物质离岸运输^[40]。这些过程都可能是台风“莫拉克”过境后研究区近岸陆源(包括河流源与三角洲源)有机碳含量降低而远岸升高的重要原因(图 7)。相比于台风过境前,台风后研究区海源有机碳略微增加,含量的升高主要发生在研究区中部(图 7)。在台风“莫拉克”(2009)刚过境时,由于水体浊度的增加和云层遮挡造成了日照的减弱,限制了初级生产力的提高,导致台风“莫拉克”所引发的浮游植物爆发相对于台风过境的时间存在 4~7 天的滞后^[28]。因此,本研究中第二航次(台风过境后 3~5 天)所采集的沉积物中有机碳含量并没有明显增加,其增加的海源有机碳主要来源于台风前水体中的浮游植物,与水体叶绿素 a 的观测结果相吻合^[28]。

4.2 不同路径台风对浙闽泥质沉积中心有机碳分布影响的差异及其作用机制

台风作为对海洋环境影响最为剧烈的天气系统之一,其不对称的风场会在路径两侧产生差异性

的沉积动力响应。当台风垂直向岸移动时,其路径右侧的向岸风会引发水体显著的向岸运动并将夏季近岸上升流转换为下降流,相反地,其路径左侧的离岸风作用下则会形成明显的离岸流^[38]。因此,不同路径的台风对同一区域物质输运过程产生的影响也会出现明显的差异^[20]。此外,不同台风所引发的生态效应也存在明显差别。一般而言,台风的强动力会引发水体的垂向混合,将底层高营养盐的水体泵至表层,进而引起初级生产力的显著升高,同时,台风带来的强降雨会增加河流输入海的营养盐通量,同样会使河口及其周边海域的初级生产力显著升高^[18]。然而,不同台风所造成的生态效应的响应时间也是不同的。例如,台风“莫拉克”(2009)所引发的浮游植物爆发相对于台风过境的时间存在 4~7 天的滞后^[28]。相比之下,从研究区东北侧过境的台风“灿鸿”(2015)在短时间内(台风过境 3 天内)引发了研究区初级生产力的显著提高并产生了大量的 POC,其主要受控于“灿鸿”影响下南向输运的长江冲淡水所携带的大量营养盐供给,而该时期瓯江输入的营养盐以及水体垂向混合的供给几乎可以忽略不计^[17]。显著提高的初级生产力使台风“灿鸿”过后海源有机碳对浙闽泥质沉积中心沉积有机碳的贡献超过了 50%^[16-17],远高于本研

表 3 沉积物中不同端元的有机碳贡献比例
Table 3 Different endmember contributions to sedimentary organic carbon contents

		河流源	三角洲源	海源
台风过境前	平均值	14.8%	51.4%	33.8%
	最小值	12.5%	37.5%	20.1%
	最大值	17.3%	67.2%	46.2%
台风过境后	平均值	15.6%	47.8%	36.6%
	最小值	13.9%	40.9%	29.1%
	最大值	25.4%	56.6%	43.5%

究的结果,这也体现了不同台风所造成的生态影响之间的显著差异。

不同路径台风过程对沉积物输运过程产生的影响也存在差异。台风能量由外海向近岸传输过程中引起的近岸水体的强扰动会直接导致沉积物的再悬浮与再搬运^[41-43]。相比于正常条件下潮流冲刷所控制的沉积物侵蚀^[44-45],在台风的影响下,风暴潮和波浪成为近岸海域沉积物再悬浮的主要驱动力,这些再悬浮的沉积物(包括其所携带的有机碳)在台风改造下的余流的搬运下进行输运,其通量可比正常天气下的通量高数十倍^[39, 46]。在陆架区域,受控于台风产生的埃克曼输运所引发的下降流^[20, 38-39]、台风与地形协同作用产生的重力流^[47-49]等,台风影响下再悬浮的沉积物还可能发生跨陆架输运,产生与正常沿岸流影响下明显不同的输运过程,进而影响到陆架区域沉积有机碳的分布特征及埋藏效率。这些局地沉积物的再悬浮与再搬运过程主导了台风影响期间近岸与陆架海域的沉积物输运机制,但不同台风的路径和强度差异控制着沉积物侵蚀与堆积的最终结果^[20, 50]。台风对沉积物的改造及其引发的输运过程会对沉积物中的有机质特征产生显著的影响。例如,在台风“灿鸿”(2015)所引发的浙闽近岸沉积物跨岸输运的影响下,台风后大量产生的原位有机质主要沉降在离岸区域,增加了该区域的沉积物碳通量^[16]。同时,离岸的深水区域在台风后的动力扰动相对较弱,更有利于沉积有机质的进一步埋藏^[16]。类似地,台风“莫拉克”(2009)影响期间,浙闽近岸沉积物发生了明显的再悬浮、再搬运与再沉积,导致沉积物的粒度、重金属含量、生物硅含量以及硅藻组合等物理、化学和生物特征发生了显著的变化^[30-31, 51]。在本研究中,尽管台风作用下短时间内新产生的有机碳数量有限,但是台风造成的动力改造对沉积物中有机碳的分布特征

产生了显著的影响。在台风“莫拉克”的影响下,研究区近岸有机碳含量(主要是陆源有机碳)显著降低而远岸明显增加,同时其有机碳海量在沿岸方向上也发生明显的再分配过程(图 7)。然而,尽管同样出现近岸的侵蚀,但由于台风路径的差异,台风“灿鸿”所导致的沉积物离岸输运过程明显要强于台风“莫拉克”。这一过程主要受控于不同路径台风引发的埃克曼输运方向和强度的差异。

综上所述,不同路径的台风由于造成的水体扰动、沉积物输运等过程的差异(主要受控于台风不对称的风场结构),进而对沉积物中有机碳的来源及其分布特征产生差异性的影响。然而,由于台风自身的复杂性,导致每次观测研究都会有新的认识,难以用简单的模式来概括其过程。同时,受台风路径难以准确预测、台风期间海况恶劣等的限制,现场观测资料极为缺乏,严重影响了对相关问题的认识程度和研究水平。因此,在后续的工作中,还需要结合更多的研究手段,如现场观测、样品分析以及数值模拟等,来进一步开展多台风的对比研究,以获取更为系统的数据资料,形成更加系统和完善的理论。

5 结论

(1)台风“莫拉克”过境前浙闽泥质沉积中心沉积有机碳主要以长江三角洲来源为主,达 51.4%,其次为海洋初级生产来源(33.8%),河流来源比例最低(14.8%)。台风过后,海源有机碳比例明显增加(36.6%),而三角洲源有机碳比例明显降低(47.8%),河流源有机碳几乎不变(15.6%),表明台风“莫拉克”的过境提高了浙闽泥质沉积中心的初级生产力。

(2)台风“莫拉克”的强动力过程通过对沉积物的侵蚀和搬运影响了沉积物中有机质的分布特征。在台风影响下,研究区北部近岸区域发生了明显的侵蚀,沉积物粒度变粗,沉积有机质含量显著降低。

(3)不同路径的台风会对同一研究区产生差异性的影响,对物源输入、海洋生物地球化学过程以及沉积物的搬运改造过程等产生的影响都会出现差异,这主要受控于台风不对称风场造成的沉积动力与生态效应的差异性响应。

致谢: 感谢参加野外调查和样品测试分析的所有人员,包括自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质研究室的黄财宾、黄思添以及测试分析中

心的尹希杰研究员等的全力协作。气象数据下载自国家气象数据中心中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>)。几位审稿专家提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高,谨致谢忱。

参考文献 (References)

- [1] 焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(11): 1393-1421. [JIAO Nian-zhi, LIANG Yantao, ZHANG Yongyu, et al. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(11): 1535-1563.]
- [2] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2-3): 81-115.
- [3] Burdige D J. Burial of terrestrial organic matter in marine sediments: a re-assessment[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): GB4011.
- [4] 姚鹏, 于志刚, 郭志刚. 大河影响下的边缘海沉积有机碳输运与埋藏及再矿化研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 153-160. [YAO Peng, YU Zhigang, GUO Zhigang. Research progress in transport, burial and remineralization of organic carbon at large river dominated ocean margins[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 153-160.]
- [5] Tao S Q, Eglinton T I, Montluçon D B, et al. Diverse origins and pre-depositional histories of organic matter in contemporary Chinese marginal sea sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 191: 70-88.
- [6] 高抒. 河流三角洲沉积体系再析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(3): 1-13. [GAO Shu. Revisiting the concept of river delta sedimentary systems[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(3): 1-13.]
- [7] 李安春, 张凯康. 东海内陆架泥质沉积体研究进展 [J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 705-727. [LI Anchun, ZHANG Kaidi. Research progress of mud wedge in the inner continental shelf of the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 705-727.]
- [8] Liu X T, Li A C, Dong J, et al. Provenance discrimination of sediments in the Zhejiang-Fujian mud belt, East China Sea: implications for the development of the mud depocenter[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 1-15.
- [9] 薛成凤, 贾建军, 高抒, 等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献: 以椒江和瓯江为例 [J]. 海洋学报, 2018, 40(5): 75-89. [XUE Chengfeng, JIA Jianjun, GAO Shu, et al. The contribution of middle and small rivers to the distal mud of subaqueous Changjiang Delta: results from Jiaojiang River and Oujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 75-89.]
- [10] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2141-2156.
- [11] Qiao S Q, Shi X F, Wang G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [12] Li Y X, Yang D Z, Xu L J, et al. Three types of typhoon - induced upwellings enhance coastal algal blooms: a case study[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(5): e2022JC018448.
- [13] Shiah F K, Chung S W, Kao S J, et al. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(15): 2029-2044.
- [14] Rao A D, Joshi M, Jain I, et al. Response of subsurface waters in the eastern Arabian Sea to tropical cyclones[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 89(4): 267-276.
- [15] Lin Y P, Li Y H, Zheng B X, et al. Evolution of sedimentary organic matter in a small river estuary after the typhoon process: a case study of Quanzhou Bay[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 290-300.
- [16] Lin Y P, Li Y H, Liu M, et al. Typhoon Chan-Hom (2015) induced sediment cross-shore transport in the mud depo-center of the East China Sea inner shelf[J]. *Marine Geology*, 2024, 469: 107223.
- [17] Lin Y P, Li Y H, Cong S, et al. Downcoast redistribution of Changjiang diluted water due to typhoon Chan - Hom (2015)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023, 128(4): e2023JC019791.
- [18] Wang B, Chen J F, Jin H Y, et al. Diatom bloom-derived bottom water hypoxia off the Changjiang estuary, with and without typhoon influence[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(4): 1552-1569.
- [19] Lin I, Liu W T, Wu C C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1718.
- [20] Li W J, Wang Z Y, Lee G H, et al. Ecological and sediment dynamics response to typhoons passing from the east and west sides of the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent sea area[J]. *Marine Geology*, 2024, 467: 107188.
- [21] Jan S, Wang J, Chern C S, et al. Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait[J]. *Journal of Marine Systems*, 2002, 35(3-4): 249-268.
- [22] Wu H, Deng B, Yuan R, et al. Detiding measurement on transport of the Changjiang-derived buoyant coastal current[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(11): 2388-2399.
- [23] Zhu J R, Chen C S, Ding P X, et al. Does the Taiwan warm current exist in winter?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(12): L12302.
- [24] Hickox R, Belkin I, Cornillon P, et al. Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai seas from satellite SST data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(18): 2945-2948.
- [25] He S Y, Huang D J, Zeng D Y. Double SST fronts observed from MODIS data in the East China Sea off the Zhejiang-Fujian coast, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 154: 93-102.
- [26] 杨守业, 印萍. 自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 1-10. [YANG Shouye, YIN Ping. Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environmental changes and

- human activities[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 1-10.]
- [27] Li Y H, Wang A J, Qiao L, et al. The impact of typhoon Morakot on the modern sedimentary environment of the mud deposition center off the Zhejiang-Fujian coast, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 37: 92-100.
- [28] Li Y H, Ye X, Wang A J, et al. Impact of Typhoon Morakot on chlorophyll a distribution on the inner shelf of the East China Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 483: 19-29.
- [29] Li Y H, Li D Y, Fang J Y, et al. Impact of Typhoon Morakot on suspended matter size distributions on the East China Sea inner shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 101: 47-58.
- [30] Li Y H, Lin Y P, Wang L. Distribution of heavy metals in seafloor sediments on the East China Sea inner shelf: seasonal variations and typhoon impact[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 129(2): 534-544.
- [31] Li Y H, Wang L, Fan D J, et al. Distribution of biogenic silica in seafloor sediments on the East China Sea inner shelf: seasonal variations and typhoon impact[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 212: 353-364.
- [32] Zhang J, Wu Y, Jennerjahn T C, et al. Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: implications for source discrimination and sedimentary dynamics[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 106(1-2): 111-126.
- [33] Li X X, Bianchi T S, Allison M A, et al. Composition, abundance and age of total organic carbon in surface sediments from the inner shelf of the East China Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2012, 145-147: 37-52.
- [34] Cifuentes L A, Eldridge P M. A mass- and isotope-balance model of DOC mixing in estuaries[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(8): 1872-1882.
- [35] Milliman J D, Xie Q C, Yang Z S. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the ocean[J]. *American Journal of Science*, 1984, 284(7): 824-834.
- [36] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3-4): 289-302.
- [37] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局 [J]. 海洋学报, 1992, 14(2): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. Macro-patterns of suspended matters transported from the Yellow Sea and East China Sea Shelf to its eastern deep sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(2): 81-90.]
- [38] Cong S, Wu X, Ge J Z, et al. Impact of Typhoon Chan-hom on sediment dynamics and morphological changes on the East China Sea inner shelf[J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106578.
- [39] Zhang W Y, Cui Y S, Santos A I, et al. Storm - driven bottom sediment transport on a high - energy narrow shelf (NW Iberia) and development of mud depocenters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(8): 5751-5772.
- [40] Zhang W Z, Hong H S, Shang S P, et al. Strong southward transport events due to typhoons in the Taiwan Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C11): C11013.
- [41] Huang Y G, Yang H F, Wang Y P, et al. Swell-driven sediment resuspension in the Yangtze Estuary during tropical cyclone events[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 267: 107765.
- [42] 王浩斌, 杨世伦, 杨海飞. 台风对长江口表层悬沙浓度的影响 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2019(2): 195-208. [WANG Haobin, YANG Shilun, YANG Haifei. A study of the surficial suspended sediment concentration in response to typhoons in the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2019(2): 195-208.]
- [43] Zang Z C, Xue Z G, Bao S W, et al. Numerical study of sediment dynamics during hurricane Gustav[J]. *Ocean Modelling*, 2018, 126: 29-42.
- [44] Luo Z F, Zhu J R, Wu H, et al. Dynamics of the sediment plume over the Yangtze Bank in the Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(12): 10073-10090.
- [45] Choi S M, Seo J Y, Ha H K. Contribution of local erosion enhanced by winds to sediment transport in intertidal flat[J]. *Marine Geology*, 2023, 465: 107171.
- [46] Lu J, Jiang J B, Li A C, et al. Impact of Typhoon Chan-hom on the marine environment and sediment dynamics on the inner shelf of the East China Sea: in-situ seafloor observations[J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 72-83.
- [47] Pope E L, Talling P J, Carter L, et al. Damaging sediment density flows triggered by tropical cyclones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 458: 161-169.
- [48] Porcile G, Bolla Pittaluga M, Frascati A, et al. Typhoon-induced megarips as triggers of turbidity currents offshore tropical river deltas[J]. *Communications Earth & Environment*, 2020, 1: 2.
- [49] Gavey R, Carter L, Liu J T, et al. Frequent sediment density flows during 2006 to 2015, triggered by competing seismic and weather events: observations from subsea cable breaks off southern Taiwan[J]. *Marine Geology*, 2017, 384: 147-158.
- [50] Xu K H, Mickey R C, Chen Q, et al. Shelf sediment transport during hurricanes Katrina and Rita[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 90: 24-39.
- [51] Chen M, Li Y H, Qi H S, et al. The influence of season and Typhoon Morakot on the distribution of diatoms in surface sediments on the inner shelf of the East China Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2019, 146: 59-74.