

渤海西部海域百年以来有机碳来源和影响机制

吴淑玉,刘 俊,褚宏宪,白大鹏,冯永财,李梦婷,阎 琨,鲍宽乐,陶昱君,常 青

Sources and influencing mechanisms of organic carbon in the western Bohai Sea over the past century

WU Shuyu, LIU Jun, CHU Hongxian, BAI Dapeng, FENG Yongcai, LI Mengting, YAN Kun, BAO Kuanle, TAO Yujun, and CHANG Qing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024021901

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海有机碳埋藏对近百年沉积汞的约束

Constraints of organic carbon burial on sedimentary mercury in the Bohai Sea over the past century 海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 129-139

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

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

极地峡湾有机碳来源和埋藏研究进展

Review of organic carbon source and burial in polar fjords 海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 73-83

初级生产力主导了辽河水系颗粒态有机碳的来源

Riverine primary productivity dominated the source of particulate organic carbon in Liaohe River System 海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 107–118

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

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

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 27-37



关注微信公众号,获得更多资讯信息

吴淑玉, 刘俊, 褚宏宪, 等. 渤海西部海域百年以来有机碳来源和影响机制 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(1): 1-17. WU Shuyu, LIU Jun, CHU Hongxian, et al. Sources and influencing mechanisms of organic carbon in the western Bohai Sea over the past century[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(1): 1-17.

渤海西部海域百年以来有机碳来源和影响机制

吴淑玉1,2,3,4,5,刘俊1,5,褚宏宪1,白大鹏1,冯永财1,李梦婷1,阎琨1,鲍宽乐1,

陶昱君1,常青1

1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心,自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站,烟台 264000

2. 中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074

3. 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310012

4. 中国地质科学院, 北京 100037

5. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要:渤海西部海域沉积物中有机碳百年以来演化的控制因素和来源尚不明确。本文选取该海域4个柱状样沉积样品 (ZY009、ZY035、ZY045和ZY054),基于²¹⁰Pb年代学测定,分析了样品的粒度、有机碳、总氮、碳氮同位素变化特征,探讨了有 机碳的来源、埋藏通量以及影响有机碳分布的控制因素。结果表明,百年以来黄河入海口及近岸海域沉积物主要为陆源和海 源有机质的混合。有机碳主要富集在细粒沉积物中,其中ZY009柱状样75 cm以下以陆源有机质为主,而75 cm以上则以海 洋溶解碳占主导;ZY054样品中的有机碳主要以黄河C3 陆生植物为主。此外,有机碳的分布对黄河入海口5 次迁移极为敏 感,其中入海口的北移导致研究区有机碳含量增加,而南移则有机碳含量降低。在有机碳埋藏通量方面,自1886年以来, ZY009样品显示逐年递减的趋势,这可能与气候事件、黄河径流量和输沙量的减少有关,同时由于其距离河口较远,受到流域 以及人类干扰较小。相反,ZY054样品自1886年以来有机碳埋藏通量呈现增加趋势,但在1988年后,由于黄河断流等因素, 通量开始下降。2002年以后,由于人为调水调沙措施以及海岸带人类活动的增强,海洋初级生产力得到提升,进而导致靠近 黄河入海口区域的有机碳埋藏通量增加。百年以来渤海西部海域沉积物中有机碳来源复杂,粒度特征、黄河入海口迁移和人 类活动对有机碳的分布和埋藏通量具有显著影响。

关键词:有机碳来源; 粒度; 影响机制; 百年尺度; 渤海西部海域 中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024021901

Sources and influencing mechanisms of organic carbon in the western Bohai Sea over the past century

WU Shuyu^{1,2,3,5}, LIU Jun^{1,5}, CHU Hongxian¹, BAI Dapeng¹, FENG Yongcai¹, LI Mengting¹, YAN Kun¹, BAO Kuanle¹,

TAO Yujun¹, CHANG Qing¹

1. Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey; Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Ministry of Natural Resources, Yantai 264000, China

4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

5. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: The controlling factors and sources of organic carbon in sediments of the western Bohai Sea over the past 100-year remain unclear. Taking the sediment samples of four stations (ZY009, ZY035, ZY045 and ZY054) in the western Bohai Sea as example, the grain size, organic

褚宏宪(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事海洋地球物理研究, E-mail: chx-8@163.com

^{2.} School of Engineering, China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, China

^{3.} Key Laboratory of Submarine Geosicences, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

资助项目:自然资源综合调查指挥中心科技创新基金"2.28 Ma 年以来渤海西部古河道时空分布及有机碳埋藏成因研究"(KC20220011);自然资源部海底科学重点实验室开放基金"南黄海盆地中部隆起石炭纪—早二叠世非均质孔隙型碳酸盐岩储层刻画技术及油气潜力分析"(KLSG2304);中国地质调查局项目"渤海近海海域海岸带自然资源综合调查"(DD20230073),"1:25 万威海幅海洋区域地质调查"(DD20230412),"渤海曹妃甸海域1:5 万海洋区域地质调查"(DZ20220602)

作者简介:吴淑玉(1984—),女,硕士,正高级工程师,主要从事地震资料解释和地质综合分析, E-mail: hnwushuyu@163.com

通讯作者:刘俊(1978—),男,博士,正高级工程师,从事海洋地球物理和海洋地质研究,E-mail: vnlj@163.com

carbon (TOC), total nitrogen (TN), and carbon, and oxygen isotopes (δ^{13} C and δ^{15} N) in the samples were analyzed and dated based on ²¹⁰Pb chronology. The source of organic carbon, burial flux, and controlling factors on the distribution of organic carbon were studied. Results show that the organic matter in the sediment cores of the Yellow River estuary and coastal zone of the Bohai Sea is essentially a mixture of terrestrial and marine organic matter. Specifically, in borehole ZY009 below 75 cm is mainly terrestrial organic matter, and above 75 cm is mainly marine dissolved carbon, while in borehole ZY054, organic carbon from C3 land plants of the Yellow River were dominant. The distribution of organic carbon is highly sensitive to the five migrations of the Yellow River estuary in the last 100 years. The northward migration of the Yellow River estuary led to the increase of organic carbon content in the study area, while the southward migration led to the decrease of organic carbon content. Since 1886, the organic carbon burial flux revealed in ZY009 core has been decreasing year by year due to the climatic change and reduction of the runoff and sediment transport in the Yellow River. As ZY009 is far from the estuary, the organic carbon burial flux is less disturbed by the river and human beings. Since 1886, the organic carbon burial flux in ZY054 core has been increasing, and began to decline since 1988 when the Yellow River was drying up. After 2002, due to artificial water and sediment control measures and increased human activities in the coastal zone, the primary productivity of the ocean has been increased, which in turn has led to an increase in the organic carbon burial flux in the area near the Yellow River estuary, resulting in the increase of organic carbon flux near the Yellow River estuary. In the past 100 years, the western Bohai Sea witnessed a complex interplay of factors on the sources of organic carbon in sediments. The characteristics of sediment grain size, the migration patterns of the Yellow River, and the effects of human activities each have exerted a notable impact on the distribution and burial flux of organic carbon in this region.

Key words: organic carbon source; grain size; influencing mechanism; centennial time scale; western Bohai Sea

海岸带作为陆地和海洋生态系统的交汇区,在 全球碳循环中扮演着至关重要的角色。事实上,全 球将近80%的有机碳主要在海岸带区域沉积,形成 了庞大的碳储库,对全球气候变化产生了深远的影 响。因此,研究大陆边缘海岸带的有机质来源及组 成,解析有机碳的埋藏机制,已成为全球碳循环领 域的焦点^[1-5]。海岸带有机碳来源具有复杂多样性, 一方面,陆源有机质通过地表径流和大气沉降等方 式进入海洋;另一方面,河口区域的浮游植物通过 光合作用产生有机质,海洋通过其自身的初级生产 过程所形成的海源有机质,也在海岸带中发挥着重 要作用。这使得海岸带成为陆地和海洋有机碳循 环交汇的枢纽地带,其有机质的多样性和交互作用 对于理解和预测全球碳循环具有关键意义^[6-7]。

渤海作为中国重要的边缘海,其有机碳的空间 分布和物源分析吸引了众多学者的关注,并取得了 一系列有意义的研究成果。于广磊^[8]研究指出,黄 河口附近海域表层沉积物中有机质主要来源于陆 源、河口源和海源,其中陆源有机质随着离岸距离 的增加而减少,而海源有机质呈现相反的趋势。这 表明黄河的泥沙输送不仅影响了河口周边有机质 组成,还促进了陆源有机质在河口区域的埋藏。张 明亮^[9]通过对莱州湾21个表层样的研究发现,海洋 浮游植物是该区域沉积物有机质的主要来源,且近 岸河口浮游植物的贡献更为显著,黄河口周围海域 为高含量的陆源有机质。陈彬^[10]的研究进一步证 实了渤海湾表层沉积物的混合来源,其中陆源有机 质在近岸和河口地区占据主导地位。高立蒙^[11]基 于蒙特卡洛模拟的三端元混合模型分析了渤海中 部的有机碳来源,指出海洋浮游植物是主要的有机 碳贡献者,尤其是在渤海中部泥质区以及离岸较远 的区域,而土壤有机碳和 C3 陆生植物有机碳则主 要沉积在河口附近及近岸区。莫力佳^[12]对北黄海 中北部的研究揭示了有机碳来源随时间的变化。 在 1780年以前,沉积物中的有机物主要来自海源的 贡献,然而在 1780—1865年期间,受人类活动影响, 陆源有机质含量经历了先增加后减少的过程,自 1865年以后,由于养殖和港口等建设的影响,水体 出现富营养化,导致海源有机物贡献有所增加。

综合分析表明,渤海海域的有机碳来源具有显 著的复杂多样性,其分布和埋藏受到陆源输入、海 洋生产力以及人类活动等多种因素的影响。尽管 当前的研究主要集中于表层沉积物,对渤海有机碳 的现代过程有了一定的认识,但对于长时间尺度 上,如百年来有机碳的研究相对比较缺乏。在过去 的几十年时间里,中国的快速经济发展和城市化进 程对环境产生了深远的影响,特别是在环渤海沿海 地区[13-14]。因此,基于高精度的沉积物年代学分析, 揭示该研究区历史环境变化及人类活动对碳循环 的长期影响,成为一个亟待深入探究的课题。此 外,准确识别有机碳的具体来源,对于深入理解陆 源与海源有机碳的埋藏和保存机制同样至关重 要。为了解决这些关键问题,本文通过对渤海西部 海域4个柱状样进行²¹⁰Pb测年和粒度分析,并在此 基础上测定有机碳(TOC)、总氮(TN)和碳、氮稳定 同位素(δ^{13} C和 δ^{15} N),定量解析百年来该海域沉积

物有机质来源组成,估算研究区有机碳的埋藏通 量,揭示有机碳分布的影响机制。

1 地质背景

渤海西部海域在大地构造上位于渤海湾盆地, 属于华北板块的一部分,经历了从太古宙至古元古 代地台结晶基底的形成、形变和固结阶段,中-新 元古代至古生代稳定地台盖层发展,以及中一新生 代克拉通解体、陆相盆地盖层形成等阶段[15-16]。现 今的渤海是一个半封闭的内海,由辽东湾、渤海 湾、莱州湾、渤海海峡环绕,总面积约7.13×10⁵ km², 最大水深 86 m, 平均水深约 38 m^[17-19](图 1)。渤海 西部海域海洋本身初级生产力较高,另外,还得益 于黄河、辽河、滦河、海河等多条河流的地表径流 入海带来的养分,形成了繁盛的河口浮游植物群落 和丰富的陆源有机质输入。特别是黄河,作为中国 第二大河流,每年有约1.08×10°t的泥沙输送至海 洋,其泥沙年输送量居世界第二位^[20-21]。黄河携带 的悬浮泥砂以粉砂为主,其含量超过50%,平均粒 径通常大于 0.05 mm, 黄河入海的物质主要通过三 条路径输送:一是向西北方向进入渤海湾南部;二 是向东、东南方向延伸至莱州湾一渤海海峡南部 一山东半岛的东部及南部;三是向北东方向输送至 渤海中央的区域[22-23]。渤海西部海域因此成为河流 输送泥沙关键沉积区,成为研究有机碳埋藏的理想 区域[24]。

2 材料和方法

2.1 样品采集

本研究的样品为烟台海岸带地质调查中心 2021年在渤海湾西部利用振动取样器采集获得 ZY009(38.90861944°N、118.3545417°E,水深17.85 m, 长度2.82 m),ZY035(38.76499167°N、118.5152556°E, 水深27.63 m,长度2.97 m),ZY049(38.69331111°N、 118.5154861°E,水深22.99 m,长度2.9 m)和ZY054 (38.41335114°N、118.582923°E,水深25.15 m,长度 2.37 m)四个沉积柱状样(图1)。柱状样采集后用锡 纸包好,存放于冰柜-20 ℃保存。其中,对于²¹⁰Pb 测试,ZY035 和ZY049柱状样取样间隔为6 cm, ZY054柱状样取样间隔为10 cm;ZY009、ZY035、 ZY049 和ZY054 四个柱状样粒度取样间隔为4 cm; ZY009 和ZY054 两个柱状样进行有机碳及碳同位 素测试,取样间隔为4 cm。

2.2 ²¹⁰Pb 测年

²¹⁰Pb测年在中国海洋大学海洋地球化学研究 所完成,将取得的样品冻干后,用研钵体研磨后用 80目(孔径为180 μm)的标准铜筛进行筛选,称取 5g样品加入酸浸取,加入适量浓度的²⁰⁸Po示踪剂, 分离后制成镀液,自镀到银片上,放入美国 ORTEC 公司生产的 HPGe 伽马能谱仪,抽真空至 6~7 Pa, 测试镀在银片上的²¹⁰Pb 的子体²¹⁰Po 和²⁰⁸Po 的α谱 图。

大气中的²²²Rn 放射衰变成²¹⁰Pb, 在近 100~150 a 中²¹⁰Pb 通量是恒定的,应用²¹⁰Pb 比活度计算沉积物 年龄有两种方法,即 CIC 模式(即常量初始浓度模 式)和 CRS 模式(即恒定放射性通量模式),应用这 两种公式的前提条件是²¹⁰Pb 沉积物的沉积通量是 恒定的,长期处于平衡状态且沉积体系内未发生后 期迁移^[29-30]。

CIC 模式计年公式:

$$t_h = \ln\left(\frac{C_0}{C_h}\right)\lambda^{-1} \tag{1}$$

式中, C_0 和 C_h 分别表示沉积物表层和深处h处²¹⁰Pb_{exe}比活度。

CRS 模式计年公式:

$$t_h = \ln\left(\frac{A_0}{A_h}\right)\lambda^{-1} \tag{2}$$

式中, t_h 为一定深度h的沉积物年代, A_0 为沉积物中 ²¹⁰Pb_{exe}的总累计输入量, A_h 为一定深度h以下各层 沉积物中²¹⁰Pb_{exe}的总累计输入量, λ 为²¹⁰Pb 放射性 衰变常数(λ =0.03114 a⁻¹)。

2.3 粒度分析

粒度分析是在烟台海岸带地质调查中心完成, 原始样品需要经过一系列前期处理:称取一定量的 沉积物样品,将其充分混合,加入 6% 的过氧化氢溶 液去除有机质,再加入 0.2 N稀盐酸溶液去除钙质 胶结物和生物壳体,用清水清洗,直至清洗液的酸 度至中性为止。经上述步骤处理后,加入 0.5 N的 六偏磷酸钠溶液,浸泡 24 h,使样品充分分散,用于 进行激光粒度测试。仪器采用英国 Malvern 公司 Matersizer 2000 型激光粒度仪进行测定,测量范围 0.5~2000 μm,重复测量相对误差小于 1%,参数采 用 Folk 和 Ward^[31]的粒度参数公式进行计算。计算 公式如下:



Fig.1 Geography and water circulation patterns in the Bohai Sea

LCC: Liaonan coastal current, BSCC: Bohai Coastal Current, YSWC: Yellow Sea Warm Current. The circulation patterns are according to the references [25-27] with modifications; M-1, M-3, and M-7 cores are from reference [28].

偏

平均粒径:
$$Mz = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$$
 (3)

态: Sk =
$$\frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$
 (5)

标准偏差:
$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$$
 (4) 峰态

拳态: Kg =
$$\frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$
 (6)

2.4 有机碳氮和稳定碳氮同位素测试

柱状样的有机碳、总氮和稳定碳氮同位素测试 在核工业北京研究院分析测试研究中心完成。样 品经真空冻干机冷冻干燥后,用玛瑙研钵研磨至 200目,保证样品的均匀性。有机碳的测定是称取 0.1~0.5g风干的样品置于试管中,加入 0.1g硫酸 银,10 mL 重铬酸钾-硫酸标准溶液,边加边摇散。 在加热条件下将样品中的有机碳氧化成二氧化碳, 剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液回滴,按照重 铬酸钾的消耗量,计算样品中有机碳的含量。

总氮的测试是称取 0.2~0.5 g 经过烘干研磨的 沉积物样品,加入 20 mL 水后再加 2.5 mL 过硫酸钾 溶液,盖紧盖子放入高压蒸汽消煮器中,加压到 1.1~1.4 kPa(温度 120~125 ℃),保持 30 min 后冷 却,压力降至 0 kPa 后取出样品冷却到室温,放置到 比色管中加入 0.5 mL 盐酸溶液振摇,稀释均匀和消 煮后按照硝酸盐方法进行测定。

稳定碳氮同位素测试首先称取 1~2 mg 去除碳酸盐后的样品,在流动氧装置中分解燃烧并氧化,分别充分转化为 CO₂ 和 NO₂,放置于 MAT-253 稳定同位素质谱仪上进行碳稳定同位素(δ^{13} C)和氮稳定同位素(δ^{13} N)测定,其中 δ^{13} C 和 δ^{15} N 均要校准到国际标准 PDB 值和大气中的氮标准, δ^{13} C 和 δ^{15} N 值的测量精度分别为±0.2‰和±0.3‰。

2.5 有机质的二端元混合模型

通过二端元混合模型来评估研究区海源有机 质和陆源有机质在沉积物中的贡献^[32-33]:

$$\delta^{13}C = \delta^{13}C_{\text{terr}} \times F_{\text{terr}} + \delta^{13}C_{\text{mar}} \times F_{\text{mar}}$$
(7)

 $1 = F_{\text{terr}} + F_{\text{mar}} \tag{8}$

 $\text{TOC}_{\text{terr}} = F_{\text{terr}} \times \text{TOC}$ (9)

$$TOC_{mar} = F_{mar} \times TOC \tag{10}$$

式中, δ^{13} C 为实测样品有机碳 δ^{13} C 值, δ^{13} C _{terr} 为陆源 有机碳 δ^{13} C 端元值, δ^{13} C_{mar} 为海源有机碳 δ^{13} C 端元 值, F_{terr} 为陆源有机碳贡献比, F_{mar} 为海源有机碳贡 献比。TOC_{terr} 为陆源有机碳含量, TOC_{mar} 为海源有 机碳含量。渤海海域沉积物中陆源有机质主要来 自黄河, 此外整个华北地区陆地 C3 植物占主导地 位。参考陆地 C3 植物的 δ^{13} C 值为-27‰^[5], 黄河颗 粒有机碳的 δ^{13} C 值为-24‰^[34:35], 将两者取平均值 -25.5‰作为研究区陆源有机碳的 δ^{13} C 端元值。中 国边缘海海洋生物 δ^{13} C 值为-20.9‰, 海源有机碳 的 δ^{13} C 值为-20‰^[56], 取两者平均值-20.5‰作为研 究区海源有机碳δ¹³C端元值。

2.6 有机碳埋藏通量

有机碳埋藏通量公式为:

$$B_{\text{flux}} = \text{TOC}_{\text{sediment}} \times \rho \times v$$
 (11)

式中, B_{flux} 为有机碳埋藏通量(g·cm⁻²·a⁻¹), TOC_{sediment} 为沉积物中有机碳含量(%), ρ 为沉积物干密度 (g/m³), v 为沉积速率(cm/a)。

3 结果

3.1 沉积序列和沉积速率

通过分析 ZY035、ZY049 和 ZY054 三个柱状样 沉积样品的²¹⁰Pb 测年数据(图 2),可以看出随着深 度的增加,²¹⁰Pb 和²¹⁰Pb_{exe}呈现指数衰减的趋势,其 中²¹⁰Pb_{exe}变化幅度尤为显著。具体来说,ZY035 样 品中²¹⁰Pb_{exe}从表层的 20.49 dpm/g 逐渐衰减到 83 cm 深度的 0.8 dpm/g,并在 83 cm 以下维持稳定,接近 自然本底水平。这一清晰的指数衰减趋势使得 ZY035 样品成为确定沉积速率和年代的理想剖 面。然而,ZY009 样品的²¹⁰Pb_{exe}出现异常的倒置现 象,这使得其不适用于年代和沉积速率确定,因此 以邻近的 ZY035 柱状样作为参考。

对 ZY035 柱状样沉积样品采用线性、CIC 和 CRS 三种不同模型计算的沉积速率进行分析(图 3), 结果显示线性模型计算的沉积速率偏高,约为 1.1 cm/a,而 CIC 和 CRS 模型计算的百年来的沉积 速率大致相同,约为 0.8 cm/a。1977—2011 年沉积 速率呈现下降趋势,分别为 0.6 cm/a 和 0.4 cm/a,此 后沉积速率约为 0.5 cm/a,并趋于稳定。CIC 模型 计算沉积速率的前提是假设沉积速率是保持恒定, 若沉积速率实际是变化的,则 CRS 模型更为适用。 综合考虑, CRS 模型计算得到的沉积速率更能反映 地层变化的实际规律。

对 ZY035、ZY045 和 ZY054 三个柱状样沉积样 品采用 CRS 模型计算得到的沉积速率见图4, ZY035 样品在百年时间尺度上的沉积速率相对稳 定,平均约为0.7 cm/a。ZY054 样品的沉积速率在 百年尺度上也保持稳定,但速率较 ZY035 样品稍 高,平均为1.0 cm/a。ZY049 样品在百年时间尺度 上的沉积速率变化较为显著,尤其在1960—1999 (对应深度为25~68 cm),沉积速率峰值超过 1.8 cm/a,平均沉积速率为1.2 cm/a。总体而言,从北









向南,3个柱状样的沉积速率呈现逐渐增加的趋势, 这一现象表明研究区的沉积速率与黄河的沉积物 输送量密切相关。

3.2 沉积粒度

ZY009 粒级组分中砂含量范围为 0~3.69%, 平

均值为 0.42%; 粉砂含量范围为 66.32%~79.95%, 平均值为 72.06%; 黏土含量范围为 19.97%~33.68%, 平均值为 27.52%。粒度的频率分布呈现单峰态, 平均粒径范围为 6.62~7.43 Φ, 平均值为 7.07 Φ, 表明 粒度总体上居中。频率累计曲线反映出悬浮组分 占主导地位(图 5a), C-M 图进一步确认了海洋悬浮





图 5 柱状样的粒径曲线(实线)和概率曲线(虚线) Fig.5 Particle size curves (solid line) and probability curves (dashed line) of columnar samples



图 6 研究区柱状样的 C-M 图和岩性三元图 Fig.6 C-M depositional dynamic and lithological ternary plot of four columnar samples

组分的特征(图 6a)。岩性上主要由黏土质粉砂组 成,在岩性三元图中主要归类为粉砂(图 6b)。分选 系数平均值为 1.62,变化范围为 1.47~1.82,显示分 选程度为中等。偏态值平均为 0.17, 波动范围为 0.14~ 0.24, 主要表现为正偏态分布,少数呈现正态分布。 峰态值平均为 1.01, 波动范围为 0.98~1.13, 多数为 中等形态,少数为尖锐形态(图 5a)。

ZY035 粒级组分中砂含量为零;粉砂含量范围 为 63.25%~75.41%,平均值为 68.81%;黏土含量范 围为 24.59%~36.75%,平均值为 31.19%。粒度的频 率分布曲线呈现单峰态,平均粒径范围为 7.02~ 7.61 Φ,平均值为 7.35 Φ,表明粒度整体为中等,频 率累计曲线和 C-M 图解均表明该样品以海洋悬浮 组分为主(图 5b、6a)。岩性上主要由黏土质粉砂构 成,在岩性三元图中归类为粉砂(图 6b)。分选系数 平均为 1.48,变化范围为 1.39~1.57,表明总体上分 选程度为中等。偏态值平均为 0.24,波动区间为 0.20~0.28,主要表现为正偏态分布。峰态值平均 为 0.99,波动范围为 0.97~1.03,大多数呈现中等形 态(图 5b)。

ZY049 粒级组分中砂岩含量为零;粉砂含量范 围为 66.29%~71.68%,平均值为 69.38%;黏土含量 范围为 28.32%~33.71%,平均值为 30.62%。粒度的 频率分布呈现单峰态,平均粒径范围为 7.18~7.47 Φ, 平均值为 7.32 Φ,表明粒度整体为中等,频率累计 曲线和 C-M 图解均表明该样品以海洋悬浮组分为 主(图 5c、6a)。岩性主要由黏土质粉砂构成,在岩 性三元图中归类为粉砂(图 6b)。分选系数平均为 1.49,变化范围为1.43~1.55,表明总体上分选程度 为中等。偏态值平均为0.24,波动区间为0.22~0.27, 主要表现为正偏态分布。峰态值平均为0.99,波动 范围为0.97~1,主要为中等形态分布(图 5c)。

ZY054 粒级组分中砂岩含量为零;粉砂含量为 66.95%~74.78%,平均值为71.87%;黏土含量范围 为25.23%~33.05%,平均值为28.18%。粒度的频率 分布呈现单峰态,平均粒径范围为7.04~7.41 Φ,平 均值为7.18 Φ,表明粒度整体为中等,频率累计曲 线和 C-M 图解均表明该样品以为海洋悬浮组分 (图 5d、图 6a)。岩性为黏土质粉砂,在岩性三元图 中归类为粉砂(图 6b)。分选系数平均为1.51,变化 范围为1.45~1.58,表明总体上分选程度为中等。 偏态值平均为0.24,波动区间为0.21~0.26,主要表 现为正偏态分布。峰态值平均为1,波动范围为 0.97~1.03,主要为中等形态分布(图 5d)。

四个柱状样品的粒度分析显示,沉积物主要由 中等粒度的粉砂构成,伴随黏土成分,且整体呈现 出中等分选程度,沉积物主要通过海洋悬浮的方式 搬运。这些特征指示研究区主要物源由黄河输送, 并通过海洋环流作用分散输运至渤海西部。

3.3 有机碳、氮及其稳定同位素与有机碳埋藏通量

对渤海西部海域两个柱状样沉积样品 ZY009 和 ZY054 进行分析, ZY009 柱状样的 TOC 的分布 范围为 0.69%~0.91%, 平均值为 0.79%; TN 含量为 0.04%~0.06%, 平均值为 0.05%; C/N 比值为 12.01~ 21.25, 平均值为 16.34; δ¹³C 分布范围-25.11‰~ -20.90‰, 平均值为-23.711‰; δ¹⁵N 分布区间为 2.9‰~7.3‰, 平均值为 4.53‰; 有机碳埋藏通量范 围为 64.84~129.62 g·m⁻²·a⁻¹, 平均值为 95.8 g·m⁻²·a⁻¹ (图 7a)。相比之下, 靠近黄河的 ZY054 样品显示出 略高的 TOC 含量, 范围为 0.7%~0.91%, 平均值为 0.82%; TN 含量与 ZY009 样品一致, 范围为 0.04%~ 0.05%, 平均值为 0.05%; C/N 比值稍高, 分布区间为 13.43~20.72, 平均值为 17.38, δ¹³C 分布范围 -24‰~-22.1‰, 平均值为 -23.14‰; δ¹⁵N 分布范围 2.6‰~6.2‰, 平均值为 4.2‰; 有机碳埋藏通量也 较高,分布范围为 99.68~139.67 g·m⁻²·a⁻¹,平均值为 122.5 g·m⁻²·a⁻¹(图 7b)。

通过对 ZY009 和 ZY054 两个柱状样分析, 观察 到 TOC 和 TN 含量随时间的变化出现特定的趋势 和阶段。对于 ZY009 样品, TOC 含量出现四个明显 的阶段: 1921 年之前变化较大, 呈现先增后减的趋 势, 极大值和极小值分别为 0.869% 和 0.69%; 1921— 1952 年呈现下降趋势, 从 0.861% 降至 0.694%; 1952— 1989 年逐渐上升, 从 0.694% 增至 0.908%; 1989 年后 衰减而 1995 年开始增加的趋势。TN 含量分为 3 个 阶段: 1921 年前持续上升, 从 0.0456% 增至 0.056%; 1921—1952 年为衰减趋势, 从 0.056% 降至 0.0473%;



The age was obtained from the ZY035 columnar sample in CRS model.

1952—1966年为上升趋势。C/N比值的变化也分 为3个阶段:1909年前先增后减,1903年达到极大 值 21.3; 1909—1952 年保持稳定; 1952—1989 年上 升,从17.12 增加到22.45; 1989年之后开始下降,从 22.45 降至 16.91。δ¹³C 和 δ¹⁵N 总体的上升趋势反映 了海洋初级生产力的增强。自1898年以来,有机碳 埋藏通量呈现逐渐较少的趋势(图 7a)。ZY054 样品 TOC 含量分为 4 个阶段: 1921 年之前先降后 升,极小值和极大值分别为0.701%和0.864%;1921-1946年下降,从0.864%降至0.809%;1951—1989年 上升,从0.809% 增至0.842%; 1989 年之后先降后 升,2005年达到极小值0.739%。TN含量的变化分 为4个阶段:1891-1960年持续下降,从0.0522%降 至 0.04%; 1960 年之后上升, 在 1974 年和 1980 年达 到极大值,分别为0.0504%和0.0503%;1980—1995 年下降;1995年之后开始上升,从1995年的0.0425% 增至 2011 年的 0.0496%。C/N 比值在 1921 年前先 降后升,之后保持稳定。δ¹³C呈现波动上升的趋 势, 而δ¹⁵N 在 1921 年之前波动较大, 之后呈现下降 趋势。自1886年以来,有机碳埋藏通量呈现逐渐增 加的趋势(图 7b)。

根据二端元公式(公式 7—10), 计算得到 ZY009 和 ZY054 两个柱状样的陆源和海源有机碳占比及 其对应的有机碳含量(图 7)。在 ZY009 样品中, 陆 源有机碳的占比为 37.78%~77.78%, 海源有机碳占 比为 22.22%~62.22%。自 1886 年以来, 陆源有机 碳的占比呈现逐年下降的趋势, 相反, 海源有机碳 的占比逐年上升。陆源有机碳含量平均值为 0.38%, 海源有机碳含量平均值为 0.42%(图 7a)。在 ZY054 样品中, 陆源有机碳的占比为 35.56%~77.78%, 海 源有机碳的占比为 22.22%~64.44%。与 ZY009 相 似, 自 1886 年以来, 陆源有机碳的占比逐年减少, 海源有机碳的占比逐年增加, 但变化幅度较 ZY009 样品小。陆源有机碳含量平均值为 47.95%, 海源有 机碳含量平均值为 52.05%(图 7b)。

4 讨论

4.1 沉积物有机碳来源分析

一般来说,海源有机质大致符合 Redfield 比值,
C/N 比值分布范围 5~9^[37-38],δ¹³C 为-21‰~-18‰^[39],δ¹⁵N 为 3‰~12‰^[37];陆源有机质由于含有木质素、腐殖酸等高分子化合物,C/N 比值范围为 10~1000^[40](相对较高),δ¹³C 为-33‰~-22‰^[41],δ¹⁵N 为

1‰~3.5‰^[38]。根据以上不同区域单标志物的分布 范围,对比 ZY009 与 ZY054 两个柱状样 C/N 比值的 分布区间(图 7),表明研究区沉积物中存在陆源有 机质的可能;而分析δ¹³C和δ¹⁵N的分布区间,沉积 物存在海源和陆源两种有机质的可能。综合 C/N 比值、δ¹³C和δ¹⁵N的示踪结果,大致推断出研 究区海域沉积物有机质实际为陆源和海源有机质 的混合。

通过二端元公式计算得到的 *F*_{terr} 和 *F*_{mar} 揭示 了 ZY009 和 ZY054 两个柱状沉积样中有机质的来 源特征(图 7)。结果显示, ZY009 样品在 75 cm 以 下主要由陆源有机质构成, 而 75 cm 以上则逐渐转 为以海源有机质为主, 这一变化指示自 1995 年以来 海洋有机质的输入相对增多。相比之下, ZY054 样 品整个深度主要受陆源有机质的影响, 仅在顶部的 个别层段中有海源有机质的影响。两个柱状样品 的有机质组成呈现出陆源比例逐步减少而海源贡 献比例逐步增加的趋势。特别是 ZY054 样品, 由于 其位置靠近黄河, 受到黄河的近端沉积物输运显著 影响, 陆源有机质占据主导地位。

Lamb^[42] 通过综合分析前人关于 δ¹³C 和 C/N 比 值的测试结果,得到了用于区分不同有机质来源的 交会图。本文将 ZY009 和 ZY054 两个柱状沉积样 品的 δ^{13} C 和 C/N 比值投射到该图中(图 8),结果表 明研究区沉积物中的有机质主要来源于C3陆生植 物和海洋溶解碳。C3 陆生植物的有机质主要来源 于黄河入海物质的一部分,这部分物质向北输送至 渤海湾,并通过悬浮搬运模式(图 6)在黄河口附近 区域沉积。根据先前的研究,黄河口附近的海域颗 粒有机碳(POC)含量较高^[43]。特别是 ZY054 样品 位于黄河细粒沉积物的卸载区(图1),其中有机碳 埋藏通量呈现逐年增加趋势(图9)。另一方面,位 于北部的 ZY009 样品相对比较靠近滦河入海口。 滦河主要携带粗粒沉积物, 而风浪和环流模式的作 用导致稍粗粒沉积物在研究区沉积(图 10a), ZY009样品的粒度数据显示逐年变粗的趋势,而通 常有机碳埋藏主要富集在海洋的细粒沉积物中。 因此随着沉积物粒度变粗,有机碳埋藏通量也呈现 逐年递减的趋势(图 7、9),这与 Xu 等^[28]的研究一 致, 通过分析 3 个柱状样品的 C/N 比值和多种生物 标记物(C27+C29+C31长链正构烷烃,C24+C26 + C28 中链正构烷醇和分支与类异戊二烯四醚指 数)得出结论, 渤海南部的 M-1 样品以陆源有机质 为主, 而 M-3 和 M-7 则以海源有机质为主(位置见 图 10a)。







图 9 柱状样的有机碳和粒度相关性热图分析

Fig.9 The heatmap analysis of correlation between organic carbon and particle size of columnar samples

4.2 有机碳分布的主要影响因素

4.2.1 沉积物粒度对有机碳的影响

总体来看,靠近黄河入海口的 ZY054 样品相较 于北部的 ZY009 样品,其有机碳含量和埋藏通量均 呈现较高的水平,而两者的有机氮含量则相对一致 (图7)。这一差异可能反映了黄河输入物质对沉积 物有机质组成的显著影响,以及沉积环境在空间分 布上的变化。

通过对比分析 ZY009 和 ZY054 两个柱状沉积 样品的有机碳含量、粒度特征以及岩性的相关性热 图(图 11)发现, ZY009 样品的 TOC 与 TN、C/N 比 值和δ¹³C表现出显著的相关性,相关系数分别为 0.42, 0.66 和 0.62。TN 与δ¹³C、平均粒径和黏土含量 之间的相关性也较为显著,相关系数分别为 0.45、 0.53 和 0.93(图 11a),从图 7a 的曲线可以看出, TOC 和 TN 随着平均粒径的变细而增加,在细粒沉积物 中则升高,而在粗粒沉积物中则降低,表明该样品 中有机碳和总氮主要吸附在细粒颗粒上,并在黏土 沉积物中富集。

ZY054样品的 TOC 与平均粒径的相关性较弱, 相关系数为-0.28; TN 与平均粒径的相关性也相对 较弱,为0.15。而粉砂含量与TOC、C/N比值及 δ¹³C的相关性较好,相关系数分别为 0.37、0.45 和 0.42。TOC 与 C/N 比值之间存在较强的相关性,相 关系数为 0.59, 但 TOC 与 TN 的相关性较弱, 仅为 0.085(图 11b),分析图 7发现,在 1921年之前, TOC 和 TN 的变化趋势不一致, TOC 和 TN 与平均 粒径变化趋势相反,在细颗粒沉积物中 TOC 和 TN的值较低。这可能是因为大部分有机碳在成岩 过程中矿化并释放养分,沉积物中的有机碳经历了 一系列微生物分解过程,消耗不同的电子受体(氧 化剂),导致活性有机碳组分迅速分解。随着氧气 向下扩散减弱, 矿化作用更加严重^[44-45]。Zhang 等^[46] 通过对渤海柱状样的分析发现,沉积物中 TOC 的矿 化程度随埋深的增加而增加。因此, ZY054 柱状样 在 1921 年之前可能反映了长期矿化后 TOC 的损失 程度, 1921年之后 TOC、TN 与粒径的变化趋于一 致,在细粒的沉积物中有机碳和总氮富集。

4.2.2 黄河入海位置变化对有机碳的影响

百年以来黄河入海口迁移主要发生在 1934、 1953、1964、1976 和 1996 年。基于这些时间,我们 划分为 5 个阶段,第 1 阶段 1934—1953 年南移到甜 水沟流路,第 2 阶段 1953—1964 年北移到神仙沟流 路,第 3 阶段 1964—1976 年北移到刁口河流路,第 4阶段 1976—1996 年南移到清水沟流路, 第5阶段 为1996年之后清八汊河流路(图10c)。通过分析 本研究区 ZY009 和 ZZY054 两个柱状样, 在第1阶 段 ZY009 和 ZY054 的 TOC、TN 减小,此时黄河入 海口向南移;第2阶段 ZY009和 ZY054的 TOC、 TN 都是增大,此时黄河入海口向北移动;第3阶段 ZY009 和 ZY054 的 TOC、TN 持续增大,此时黄河 入海口也是北移; 第4阶段 ZY009 和 ZY054 的 TOC、TN 都减小,此时黄河入海口是南移;第5阶 段 ZY009 的 TOC、TN 都是增大的, ZY054 的 TOC、 TN 先减小后增大,黄河入海口位于现今位置。说 明研究区有机碳氮的分布受黄河入海口5次迁移 变化影响非常敏感,入海口北移时 TOC、TN 增大而 南移时减小。Wu等[47]分析了黄河入海口南部 M-1 岩芯(位置见图 10a)的甘油二烷基甘油四醚 (GDGTs),发现土壤有机质的代用指标 BIT 指数^[48] 受近80年来黄河入海口的5次主要迁移事件影响 也非常显著,尽管1976年和1996年的变化比1953 年和 1964 年的变化更为明显南移(图 10c), 1976 年 河口向南 M-1 位置移动导致 BIT 值升高, 而 1953 年和1996年河口向北移动则BIT值降低。

4.2.3 人类活动对海域有机碳的影响

全球河流向海洋输送的有机碳受到水库拦截 和地表水调节等人为因素的影响,尤其在干旱及半 干旱地区,这些活动导致了土壤流失量的增加。数 据显示,由于人类的调水活动,全球河流每年输送 至海洋的溶解有机碳(DOC)通量平均减少了13.36± 2.45 Tg C/a, 且这一减少趋势随时间推移而加剧, 尤 其是在太平洋及大西洋地区,从1981年的9.13 Tg C/a (4.83%)增加到了 2013 年的 16.45 Tg C/yr(6.20%)^[51]。 自1970年以来,黄河的入海径流量和泥沙量整体呈 下降趋势,1987年开始几乎年年断流,水沙通量急 剧下降,其原因主要包括:①ENSO事件的频繁发 生且强度增强,对区域降水的影响较大,尤其在黄 河流域导致降水量减少[52];②水土保持措施降低了 黄河中游的产沙量^[53];③新近建成的小浪底水库截 留了大量中上游泥沙^[54]。在自然条件下,黄河的化 石颗粒有机碳通量(POC_{fossil})大约为 3.13 Tg/a, 占全 球有机碳通量的5%。然而,由于气候变化和黄河 中上游用水量的增加,黄河下游的生态需水量减 少,导致黄河三角洲地区干涸和土壤盐渍化。黄河 输沙量减少,使得 POC 流入海洋的通量下降了超 过 90%^[55],这改变了下游地区的悬移沙输运方式,从 高比重流向低比重流转变[56],可能降低了黄河河口 三角洲地区陆相有机质的埋藏效率。



图 10 1976—2022 年渤海地区岸线侵蚀淤积变化图

a: 渤海地区岸线侵蚀淤积图(红色为正,表示淤积速率,绿色为负,表示侵蚀速率,黑色虚线指示其位置;蓝色柱状样引自文献[49]); b:变迁速 率统计曲线; c: 不同年代黄河入海通道(根据文献[28,50]修改)。

Fig.10 Map of shoreline erosion and sedimentation changes in the Bohai Sea area from 1976 to 2022.

a: Coastal erosion and sedimentation of the Bohai Sea (Red bar is positive, indicating the rate of sedimentation, and green bar is negative, indicating the rate of erosion); b: Statistics of transition rate curve; c: Channels of the Yellow River entering the sea in different years (modified after reference [28, 50]).

环渤海地区作为中国社会经济发展的重要引 擎,其人类活动频繁,包括油田开发、滩涂围垦、基 础设施建设以及农业和土地利用的变化,这些活动 通过外来河流输入,显著增加了渤海湾的碳埋藏 量。人类活动引入氮和磷等营养物质,促进了海岸 带的初级生产力提升,进而导致藻类和浮游植物的 大量繁殖,这些生物的死亡和沉积进一步促进了有 机碳的埋藏。Qin等^[57]研究表明,工业废水排放、 船舶燃料油泄露和海上石油开采等活动是导致有 机碳增加的重要因素。Sun等^[58]通过环渤海地区 24条入海河流分析,揭示了溶解有机碳的组成、来 源和输送通量。研究发现,河流中的溶解有机碳主 要与河流中的浮游植物和微生物活动有关,其次是 流域内的陆生有机质与污水排放。环渤海河流中 的有色溶解性有机物主要由色氨酸类蛋白质和陆 源有机质组成,其中河道内的生物生成作用占主 导,而陆源腐殖质的贡献相对较小。环渤海河流的 溶解性有机碳浓度及其流域单位面积的 DOC 与国 内其他河流相比均处于较高水平。小河流作为入 海有机碳与营养盐的重要输送者,在人类活动的持



图 11 ZY009 和 ZY054 柱状样不同来源 TOC 与黄河年径流量和输沙量对比 黄河年径流量和输沙量收集来自利津水文站 1950—2015 年的数据^[9-60]。

Fig.11 Comparison of TOC from different sources of ZY009 and ZY054 columnar samples with annual runoff and sediment transport of the Yellow River

Annual runoff and sediment transport of the Yellow River were collected from Lijin Hydrology Station from 1950 to 2015, according to references [59-60].

续影响下,对渤海的碳循环、碳汇过程和生态环境 的演变等产生深远的影响。

自1886年起, ZY009柱状样有机碳埋藏通量一 直处于持续衰减的过程,深度上表现为陆源有机质 含量的递减,而海洋有机质逐渐占据主导地位(图 9a)。 ZY009与黄河、海河以及滦河存在一定的距离 (图 10c),因此可以推断其受到流域和人类活动的 影响较小,然而,ZY054自1886年以来有机碳埋藏 通量呈现增长的趋势。在1988年后,这一通量开始 出现衰减,推断与黄河的断流有关。值得注意的 是,自2002年起,随着人为进行调水调沙措施的实 施,黄河断流现象得到缓解,有机碳埋藏通量也随 之回升(图 9b)。此外随着黄河三角洲新淤土地的 形成,潮间带岸线整体呈现出向海方向的淤积现 象。根据遥感解译的数据,从1976到2022年,渤海 海岸线在黄河入海口周围地区整体向海推进了 18 km (图 10b)。特别地,靠近黄河口区域的有机质主要 由黄河搬运的C3陆源植物组成,表明黄河的泥沙 和径流量对 ZY054 的有机碳埋藏通量具有显著的 影响。因此,2002年之后,随着时间的推移 ZY054 的有机碳埋藏通量呈现增长的趋势。

5 结论

(1)通过对渤海西部柱状样的²¹⁰Pb测年分析, 百年以来该区域的沉积速率为 0.65~1.2 cm/a,从北 往南沉积速率逐渐加大,这与黄河流域沉积物的输 送模式密切相关。柱状样中的沉积物粒度以中等 为主,以粉砂为主,其次为黏土,分选程度为中等, 海洋悬浮搬运是该区域沉积物输运的主要方式。

(2)利用二端元混合模型对研究区沉积物有机 质的来源进行判别,结果显示沉积物有机质主要以 海源和陆源混合而成。靠近黄河口的 ZY054 柱状 样以陆源有机质为主,而北边的 ZY009 柱状样 75 cm 以下以陆源有机质为主,75 cm 以上以海源有 机质为主。此外黄河细粒沉积物包含的 C3 陆生植 物,通过海洋悬浮的搬运方式,在 ZY054 柱状样以 南区域被卸载。相比之下 ZY009 靠近滦河和海河 入海口附近,粒度较粗,主要以海洋溶解碳的形式 存在。

(3)研究区 ZY009 和 ZY054 柱状样的有机碳 和总氮主要富集于细粒沉积物中。ZY054 柱状样 在 1921 年之前可能受到矿化作用的影响,导致细粒 中的有机碳有所损失。通过对比黄河 5 次入海口 位置变化,黄河入海口的南移使得研究区有机碳和 总氮含量减小(以 1934 年和 1976 年为例),而黄河 入海口的北移使得有机碳和总氮含量增加(以 1953 年、1964 年和 1996 年为例)。

(4) 自 1886 年以来, ZY009 柱状样的有机碳埋 藏通量呈现逐年递减的趋势,可能与气候事件、黄 河径流量以及输沙量的减少有关,导致海洋中的 POC 流入通量下降,进而降低了有机碳的埋藏效率。此 外, ZY009 距离河口有一定距离,因此受到流域以 及人类干扰相对较小,使得有机碳埋藏通量持续衰 减。自1886年以来 ZY054 柱状样有机碳埋藏通量 呈现增加的趋势。1988年有机碳埋藏开始衰减与 黄河断流有关,但在2002年之后得益于人为的调水 调沙措施,黄河入海口的海岸线淤积,加之人类活 动对氮和磷的输入提高了海洋的初级生产力,这些 因素共同作用导致靠近黄河入海口的 ZY054 柱状 样有机碳埋藏通量有所增加。

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 Nianzhi, 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] 韩广轩, 宋维民, 李远, 等. 海岸带蓝碳增汇: 理念、技术与未来建 议 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 492-503. [HAN Guangxuan, SONG Weimin, LI Yuan, et al. Enhancement of coastal blue carbon: concepts, techniques, and future suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 492-503.]
- [3] 赵美训, 丁杨, 于蒙. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义 [J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(9): 70-76. [ZHAO Meixun, DING Yang, YU Meng. Sources of sedimentary organic matter in China marginal sea surface sediments and implications of carbon sink[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(9): 70-76.]
- [4] 包锐. "碳中和"目标背景下我国海洋碳汇与碳年龄的思考 [J]. 中国海洋大学学报, 2023, 53(4): 1-7. [BAO Rui. Evaluating the carbon sink in Chinese marginal seas in the context of carbon neutrality goals: insight from carbon ages[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(4): 1-7.]
- [5] Emerson S, Hedges J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments[J]. Paleoceanography, 1988, 3(5): 621-634.
- [6] Andrews J E, Greenaway A M, Dennis P F. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: hunts bay, Kingston Harbour, Jamaica[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 46(5): 743-756.
- [7] Wang C L, Qiu Y F, Hao Z, et al. Global patterns of organic carbon transfer and accumulation across the land–ocean continuum constrained by radiocarbon data[J]. Nature Geoscience, 2024, 17(8): 778-786.
- [8] 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.]
- [9] 张明亮, 姜美洁, 付翔, 等. 莱州湾沉积物有机质来源 [J]. 海洋与湖 沼, 2014, 45(4): 741-746. [ZHANG Mingliang, JIANG Meijie, FU Xiang, et al. The source of organic matter in the sediment of Laizhou

Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(4): 741-746.]

- [10] 陈彬, 胡利民, 邓声贵, 等. 渤海湾表层沉积物中有机碳的分布与物源贡献估算[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 37-42.
 [CHEN Bin, HU Limin, DENG Shenggui, et al. Organic carbon in surface sediments of the Bohai Bay, China and its contribution to sedimentation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 37-42.]
- [11] 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.]
- [12] 莫力佳, 石勇, 高建华, 等. 辽东半岛东岸泥区有机碳来源及其对流域和海岸环境变化的响应 [J]. 地球化学, 2021, 50(2): 199-210.
 [MO Lijia, SHI Yong, GAO Jianhua, et al. Source and distribution of lignin in mud deposits along the southeastern coast of Liaodong Peninsula and its response to environmental changes of the catchment[J]. Geochimica, 2021, 50(2): 199-210.]
- [13] 孙晓明, 吴登定, 肖国强, 等. 环渤海地区地下水资源与环境地质若 干问题探讨 [J]. 地质调查与研究, 2006, 29(1): 47-56. [SUN Xiaoming, WU Dengding, XIAO Guoqiang, et al. Discussion on ground water research and geo-environment research in Circum-Bohai-Sea Region, China[J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(1): 47-56.]
- [14] Gao X L, Yang Y W, Wang C Y. Geochemistry of organic carbon and nitrogen in surface sediments of coastal Bohai Bay inferred from their ratios and stable isotopic signatures[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(6): 1148-1155.
- [15] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏 [J].
 地 学前缘, 2010, 17(4): 64-89. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 64-89.]
- [16] Wu S Y, Liu J, Chen J W, et al. Characteristics of Milankovitch cycles recorded in Eocene strata in the eastern depression of North Yellow Sea Basin, North China[J]. China Geology, 2021, 4(2): 276-289.
- [17] Sun J, Guo F, Wu H C, et al. The sedimentary succession of the last 2.25 Myr in the Bohai Strait: implications for the Quaternary Paleoenvironmental evolution of the Bohai Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2022, 585: 110704.
- [18] Yuan X D, Hu R J, Feng X L, et al. Sedimentary records and implications for the evolution of sedimentary environments inferred from BH1302 during the late Quaternary in the Bohai Sea, China[J]. Marine Geology, 2023, 456: 106986.
- [19] Wang Z L, Zheng H B, Meng X J, et al. Late Quaternary sedimentation and neotectonics in Liaodong Bay, northern Bohai Sea[J]. Regional Studies in Marine Science, 2022, 55: 102581.
- [20] Milliman J D, Li F, Zhao Y Y, et al. Suspended matter regime in the Yellow Sea[J]. Progress in Oceanography, 1986, 17(3-4): 215-227.
- [21] Wu S Y, Liu J, Chu H X, et al. Identification of three stages of paleochannels and main source analysis beginning in the middle Pleistocene in the western Bohai Sea in North China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2024, 296: 108601.

- [22] 张爱滨, 刘明, 廖永杰, 等. 黄河沉积物向渤海湾扩散的沉积地球化 学示踪 [J]. 海洋科学进展, 2015, 33(2): 246-256. [ZHANG Aibin, LIU Ming, LIAO Yongjie, et al. The sedimentary geochemical trace of the Yellow River sediments diffusion in the Bohai Bay[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(2): 246-256.]
- [23] 杨守业, 李从先, LEE C B, 等. 黄海周边河流的稀土元素地球化学及 沉积物物源示踪 [J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1233-1236. [YANG Shouye, LI Congxian, LEE C B, et al. Rare earth element geochemistry and sediment source tracing in rivers around the Yellow Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(11): 1233-1236.]
- [24] 祝贺.曹妃甸近岸海区沉积物特征研究 [D]. 鲁东大学硕士学位论 文, 2016. [ZHU He. Research of the sedimentary characteristics in Caofeidian inshore[D]. Master Dissertation of Ludong University, 2016.]
- [25] Yue F, Fang G H, Zhang Q H. Numerical simulation and dynamic study of the wintertime circulation of the Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000, 18(1): 1-9.
- [26] Yao Z Q, Shi X F, Li X Y, et al. Sedimentary environment and paleotidal evolution of the eastern Bohai Sea, China since the last Glaciation[J]. Quaternary International, 2017, 440: 129-138.
- [27] Yao Z Q, Shi X F, Qiao S Q, et al. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least~880 ka ago[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2827.
- [28] Xu Y P, Zhou S Z, Hu L M, et al. Different controls on sedimentary organic carbon in the Bohai Sea: river mouth relocation, turbidity and eutrophication[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180: 1-8.
- [29] 李凤业,高抒,贾建军,等.黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 364-369. [LI Fengye, GAO Shu, JIA Jianjun, et al. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow Seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 364-369.]
- [30] 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 垂直分布及 年代学意义 [J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 981-987. [CHEN Shiyue, WANG Sumin, CHEN Yingying, et al. Vertical distribution and chronological implication of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in sediments of Dongping Lake, Shandong Province[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(5): 981-987.]
- [31] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [32] Jin L N, Shan X, Vaucher R, et al. Sea-level changes control coastal organic carbon burial in the southern East China Sea during the late MIS 3[J]. Global and Planetary Change, 2023, 229: 104225.
- [33] 李娜,张钰莹,王楠,等. 末次冰消期以来南黄海中部泥质区有机碳 埋藏演化记录 [J/OL]. 沉积学报, 2023: 1-18. https://doi.org/10.14027 /j. issn. 1000-0550.2023. 035. [LI Na, ZHANG Yuying, WANG Nan, et al. Organic carbon burial in the central South Yellow Sea mud since the last Deglaciation[J/OL]. Acta sedimentologica Sinica, 2023: 1-18. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.035]
- [34] 邱璐, 姚鹏, 张婷婷, 等. 黄河下游颗粒有机碳的来源, 降解与输运特征 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1483-1491. [QIU Lu, YAO Peng, ZHANG Tingting, et al. Sources, decay status and transport of particu-

late organic carbon in the lower Yellow River[J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1483-1491.]

- [35] 于靖,张华. 渤海及北黄海河流悬浮颗粒碳氮同位素时空分布及源 解析 [J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 93-102. [YU Jing, ZHANG Hua. Seasonal variations and sources of carbon and nitrogen isotopes in suspended particulate matter in inflow rivers of the Bohai Sea and the North Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2017, 41(5): 93-102.]
- [36] Tao S Q, Wang A J, Liu J T, et al. Characteristics of sedimentary organic carbon burial in the shallow conduit portion of source-to-sink sedimentary systems in marginal seas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2023, 353: 92-111.
- [37] 喻涛. 南海北部表层沉积物不同粒级组分中有机质的来源研究 [D]. 厦门大学硕士学位论文, 2005. [YU Tao. A study on sources of different grain-sized fractions of organic matter in the surficial sediments from the northern South China Sea[D]. Master Dissertation of Xiamen University, 2005.]
- [38] Middelburg J J, Herman P M J. Organic matter processing in tidal estuaries[J]. Marine Chemistry, 2007, 106(1-2): 127-147.
- [39] Goñi M, Ruttenberg K C, Eglinton T I. Sources and contribution of terrigenous organic carbon to surface sediments in the gulf of Mexico[J]. Nature, 1997, 389(6648): 275-278.
- [40] 余婕. 河口潮滩湿地有机质来源、组成与食物链传递研究 [D]. 华东 师范大学博士学位论文, 2008. [YU Jie. Sources, composition and food chain transfer of organic matter in the estuarine tidal ecosystem[D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2008.]
- [41] Dai J H, Sun M Y. Organic matter sources and their use by bacteria in the sediments of the Altamaha estuary during high and low discharge periods[J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(1): 1-15.
- [42] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using δ13C and C/N ratios in organic material[J]. Earth-Science Reviews, 2006, 75(1-4): 29-57.
- [43] 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.
- [44] Henrichs S M. Early diagenesis of organic matter in marine sediments: progress and perplexity[J]. Marine Chemistry, 1992, 39(1-3): 119-149.
- [45] Zhao B, Yao P, Bianchi T S, et al. The remineralization of sedimentary organic carbon in different sedimentary regimes of the Yellow and East China Seas[J]. Chemical Geology, 2018, 495: 104-117.
- [46] Zhang Y, Liu J J, Kang L, et al. Temporal variation of mineralization rates and its influence on carbon storage over the last 50 years in Bohai Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 188: 114624.
- [47] Wu W C, Zhao L, Pei Y D, et al. Variability of tetraether lipids in yellow river-dominated continental margin during the past eight decades: implications for organic matter sources and river channel shifts[J]. Organic Geochemistry, 2013, 60: 33-39.
- [48] Hopmans E C, Weijers J W H, Schefuß E, et al. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 224(1-

2): 107-116.

- [49] Chen B, Hu L M, Liu J H, et al. High-resolution depositional records of lead isotopes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Bohai Sea, China: implications for a sediment footprint of anthropogenic impact[J]. Marine Geology, 2021, 432: 106396.
- [50] Wu X, Bi N S, Xu J P, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976-2013): dominant roles of riverine discharge and sediment grain size[J]. Geomorphology, 2017, 292: 115-127.
- [51] You Y B, Xie Z H, Jia B H, et al. Impacts of anthropogenic water regulation on global riverine dissolved organic carbon transport[J]. Earth System Dynamics, 2023, 14(5): 897-914.
- [52] Zhang H L, Zhang Q, Yue P, et al. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(23): 13901-13918.
- [53] Wu X, Wang H J, Bi N S, et al. Climate and human battle for dominance over the yellow river's sediment discharge: from the mid-Holocene to the Anthropocene[J]. Marine Geology, 2020, 425: 106188.
- [54] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3-4): 331-354.

- [55] Hu B Q, Li J, Bi N S, et al. Effect of human controlled hydrological regime on the source, transport, and flux of particulate organic carbon from the lower Huanghe (Yellow River)[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(8): 1029-1042.
- [56] 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): 302-313.
- [57] Hu L M, Guo Z G, Feng J L, et al. Distributions and sources of bulk organic matter and aliphatic hydrocarbons in surface sediments of the Bohai Sea, China[J]. Marine Chemistry, 2009, 113(3-4): 197-211.
- [58] Sun C C, Liu J, Li M L, et al. Inventory of riverine dissolved organic carbon in the Bohai Rim[J]. Environmental Pollution, 2022, 293: 118601.
- [59] 韩广轩, 王光美, 毕晓丽, 等. 黄河三角洲滨海湿地演变机制与生态 修复 [M]. 北京:科学出版社, 2018. [HAN Guangxuan, WANG Guangmei, BI Xiaoli, et al. Evolution Mechanism and Ecological Restoration of Coastal Wetlands in the Yellow River Delta[M]. Beijing: Science Press, 2018.]
- [60] Wang H J, Wu X, Bi N S, et al. Impacts of the dam-orientated watersediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): a review[J]. Global and Planetary Change, 2017, 157: 93-113.