



北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏特征

王培杰, 胡利民, 闫天浩, 王厚杰, 毕乃双, 王楠, 张洋, 吴晓

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

WANG Peijie, HU Limin, YAN Tianhao, WANG Houjie, BI Naishuang, WANG Nan, ZHANG Yang, and WU Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023041802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南极罗斯海柱样沉积物中有机碳和氮元素地球化学特征及其来源

Geochemical characteristics and source of organic carbon and nitrogen in the column sediments from the Ross Sea, Antarctica
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 83–90

近百年以来楚科奇海域沉积环境变化的有机碳、氮记录

Records of organic carbon and total nitrogen for environmental changes in the Chukchi Sea during the past 100 years
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 13–24

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194–205

苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布研究进展

Research progress on distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu-western South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 40–54

对数比变换在因子分析法提取东亚冬季风敏感粒级中的应用——以南黄海中部泥质区H07孔为例

APPLICATIONS OF LOGARITHM RATIO TRANSFORMATION TO EXTRACTION OF THE SENSITIVE GRAIN SIZE OF EAST ASIAN WINTER MONSOON BY THE METHOD OF FACTOR ANALYSIS: A CASE STUDY OF CORE H07 FROM THE CENTRAL MUD AREA OF THE SOUTH YELLOW SEA
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 151–161

下刚果盆地M区块Madingo组烃源岩的岩相特征与有机质富集机制

LITHOFACIES AND ORGANIC MATTER ENRICHMENT IN MADINGO FORMATION OF BLOCK M, LOWER CONGO BASIN
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 157–168



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王培杰, 胡利民, 闫天浩, 等. 北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 110-119.
WANG Peijie, HU Limin, YAN Tianhao, et al. The characteristics of sedimentary organic carbon in the mud area in the western North Yellow Sea since the Holocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 110-119.

北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏特征

王培杰¹, 胡利民^{1,2}, 闫天浩¹, 王厚杰^{1,2}, 毕乃双^{1,2}, 王楠², 张洋³, 吴晓^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 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
3. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心, 青岛 266100

摘要: 北黄海西部泥质区沉积环境稳定、沉积记录连续, 是重建过去周边流域变化与黄海海洋环境信息的良好载体。目前围绕北黄海西部泥质区沉积有机碳的研究工作多局限于通过表层沉积物揭示其现代分布特征, 对于该泥质区长时间尺度沉积有机碳埋藏过程与机制的研究相对薄弱。通过北黄海西部泥质区 W03 岩芯的总有机碳指标, 重建了全新世以来北黄海西部沉积有机碳的埋藏特征, 探讨了气候及海洋环境变化对北黄海西部沉积有机碳埋藏的控制机制。研究表明: 海平面上升的停滞期 (10.3~9.8 cal.kaBP), 发育硬质黏土层, 有机碳以陆源输入为主 (60.7%), 动荡的沉积环境导致总有机碳含量相对较低, 平均含量仅为 0.22%; 海平面上升期 (9.8~7.0 cal.kaBP), 海源有机碳的贡献增加 (47.7%), 相对稳定的沉积环境有利于该时期有机碳的埋藏; 高海平面以来 (7.0 cal.kaBP 至今), 黄海环流体系逐渐形成, 陆源有机碳输入随着东亚冬季风驱动的沿岸流强度变化发生相应的改变, 海源有机碳的贡献继续增加 (50.0%), 总有机碳的含量升高至 0.58%。北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏主要受控于海平面变化和海洋环流体系的运动。

关键词: 泥质区; 全新世; 沉积有机碳; 北黄海

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023041802

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

WANG Peijie¹, HU Limin^{1,2}, YAN Tianhao¹, WANG Houjie^{1,2}, BI Naishuang^{1,2}, WANG Nan², ZHANG Yang³, WU Xiao^{1,2}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 261000, China
3. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 261000, China

Abstract: The sedimentary environment of the mud area in the western North Yellow Sea is stable, and the sedimentary record is continuous, making it an excellent proxy for reconstructing paleoenvironment of the local region and surrounding watershed. Previous researches on the sedimentary organic carbon in the mud area are limited to its modern distribution characteristics through surface sediment analysis, and works on the long-term sedimentary processes and mechanisms of organic carbon remain insufficient. Core W03 in the mud area was used to reconstruct the sedimentary environment of organic carbon since the Holocene using sedimentary total organic carbon index, and to clarify the impact of climate and oceanic environmental changes on the source and deposition of organic carbon. During the period of sea level rise stagnation (10.3~9.8 cal.kaBP), a hard clay layer was developed rich in terrestrial organic carbon (60.7%). The turbulent sedimentary environment resulted in a relatively low total organic carbon content (average of only 0.22%). During the period of sea level rising (9.8~7.0 cal.kaBP), marine-sourced organic carbon (47.7%) boomed in a relatively stable sedimentary environment, which was conducive to the burial of organic carbon. Since the high sea level period (7.0 cal.kaBP to present), the Yellow Sea circulation system has been formed gradually, and the input of terrigenous organic carbon has changed correspondingly with the change of coastal current intensity under the East Asian winter monsoon scheme. The contribution of marine organic carbon was increased continuously to 50.0%, and so did the content of total organic

资助项目: 山东省泰山学者项目 (TS20190913, TSQN202211054); 国家自然科学基金项目“黄河口关键过程及物质输运协同效应重大科学考察实验研究” (42149301); 山东省高等学校“青创团队计划”团队项目 (2022KJ045); 中央高校基本科研业务费专项“山东半岛泥质区千年尺度有机碳埋藏特征的区域差异与机制分析” (202161012), 中央高校基本科研业务费专项“人新世河口海岸” (202241007)

作者简介: 王培杰 (1997—), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: wangpeijie@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 吴晓 (1989—), 男, 副教授, 从事河口海岸学研究, E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-04-18; **改回日期:** 2023-05-26. 文凤英编辑

carbon (0.58%). Therefore, sedimentary organic carbon in the mud area since the Holocene is controlled by sea level fluctuation and the resultant ocean circulation system.

Key words: mud area; the Holocene; sedimentary organic carbon; the North Yellow Sea

陆架边缘海地区接受大量的陆源物质输入, 沉积速率较高^[1], 河流输送入海的陆源有机碳中超过 80% 保存在该地区^[2-3], 同时陆架边缘海具有较高的海洋初级生产力^[4-5], 使得该区域成为全球有机碳重要的汇区。中国东部边缘海陆架泥质区具有沉积速率高、物源广泛、沉积连续以及沉积环境信息丰富的特点, 不仅是河流入海细颗粒物质的富集区, 而且是沉积有机碳发生堆积、迁移和转化的主要区域, 有机碳埋藏量约占全球边缘海有机碳埋藏量的 10%^[6-7]。因此东部陆架泥质区是研究全球变化影响下沉积有机碳在边缘海输运与埋藏的理想区域, 在海洋碳源-汇过程中扮演重要角色。

北黄海为黄海北侧半封闭陆架海域, 大部分区域水深小于 70 m^[8], 水体中浮游植物初级生产力贡献丰富的海源有机碳^[9]。同时该区陆源物质供应十分充足, 除黄河长距离输运的沉积物外, 还有鸭绿江等沿岸分布的中小型河流入海沉积物的直接贡献以及黄海暖流北上带来的碎屑物质^[10-15]。北黄海西部泥质区沉积环境稳定、沉积速率较高, 促使海源和陆源有机碳发生快速埋藏, 进而使得该泥质区成为我国东部边缘海重要的碳汇区。北黄海西部泥质区不仅记录了丰富的陆源信号, 其演化过程还受到海平面波动及季节性消长的环流体系的影响, 保存了周边流域及海洋环境的变化信息^[16-18]。因此, 对北黄海西部泥质区沉积有机碳埋藏的历史重建成为系统解读周边流域变化与海洋环境信号的关键“密钥”。

前人围绕北黄海西部泥质区沉积有机碳开展了大量的研究工作, 奠定了对北黄海西部泥质区沉积有机碳的认识基础。但这些研究多局限于通过表层沉积物揭示其现代分布特征^[19-23], 或利用短柱样探讨百年尺度泥质区沉积有机碳埋藏特征^[24], 缺乏长时间尺度沉积有机碳记录重建, 限制了对全新世以来北黄海沉积有机碳源-汇格局与受控机制的系统认识。本文选取北黄海西部泥质区 W03 岩芯为研究对象, 通过¹⁴C 年代学测试建立了 W03 岩芯沉积格架, 结合沉积物粒度、TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 等指标, 重建了北黄海西部泥质区全新世以来沉积有机碳埋藏特征, 定量估算了过去 10.3 cal. kaBP 以来陆源、海源有机碳对该区沉积有机碳埋藏的贡献变化, 探讨了海平面波动、海洋环流变化及东亚冬季

风演化等因素对北黄海西部泥质区沉积有机碳埋藏的影响机理。本研究丰富了北黄海西部泥质区千年尺度有机碳埋藏的研究案例, 取得的研究认识将为深入理解气候和海洋环境变化影响下我国东部边缘海沉积有机碳源-汇格局提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测试方法

W03 岩芯(38°30'N、122°52'E, 水深 54.4 m)位于北黄海西部泥质区(图 1), 于 2020 年 7 月通过重力取样器采集获得。岩芯全长 538 cm, 采集后现场密封低温保存, 样品的描述和分样工作在实验室内完成。分样间隔为 1cm, 共获得 538 个样品。利用有孔虫作为定年材料, 从 W03 岩芯中选取 5 个代表层位挑选有孔虫壳体, 送至美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测试分析。

以 1 cm 间隔取样 538 个进行粒度测试。取大约 0.5 g 沉积物样品加入 5 mL 浓度为 30% 的 H_2O_2 静置 24 h(去除有机质), 再加入 5 mL 浓度为 10% 的 HCl 静置 12 h(去除碳酸钙), 离心洗酸 3~4 次至溶液呈中性。上机前超声振荡至沉积物颗粒充分分散后, 使用英国 Malvern 3000 型号激光粒度仪测试分析, 测量范围为 0.02~2 000 μm , 重复测量误差小于 1%。粒度测试在自然资源部第一海洋研究所完成。

以 4 cm 间隔取样 135 个进行沉积物总有机碳、总氮和稳定碳同位素测试。取约 0.5 g 沉积物样品加入 7.5 mL 10% 的 HCl 静置 12 h(去除无机碳), 离心洗酸 3~4 次至溶液呈中性。冻干样品后混合均匀, 取 5~8 mg 样品包于锡杯后, 使用 EA-IsoLink 元素分析仪和 Thermo Fisher 253 plus 同位素质谱仪联合测试。TOC 和 TN 的含量单位为 %, 分析精度高于 0.01%; $\delta^{13}\text{C}$ 的含量单位为 ‰, 测试误差为 0.06‰。有机碳测试在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。

1.2 数据分析方法

使用 Calib 8.2.0 软件将原始测年数据校正为日历年龄(cal. kaBP), 采用黄渤海区域平均值, 碳库效

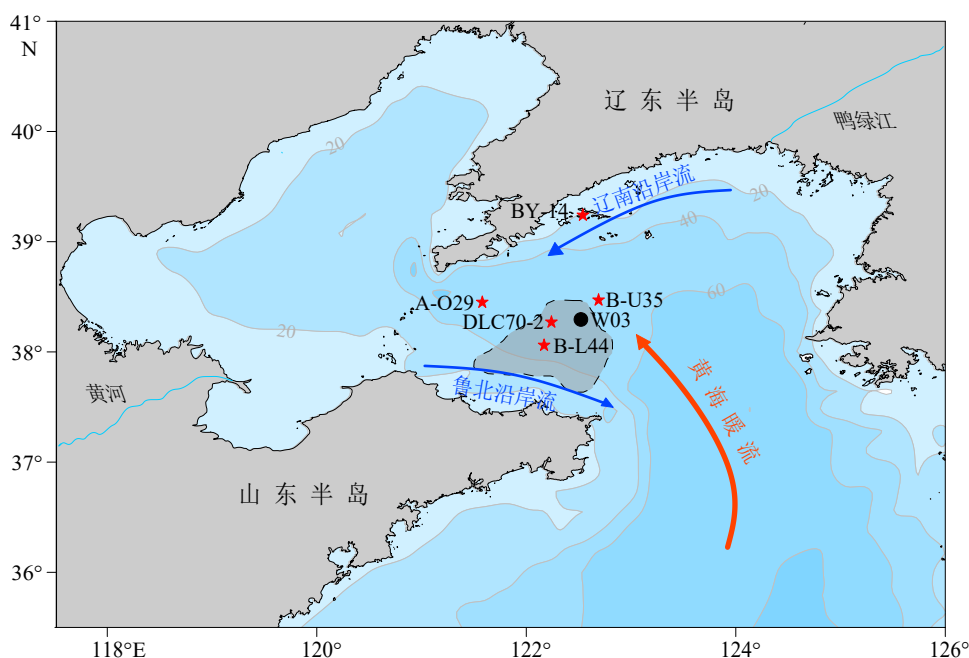


图1 研究区位置图

灰色虚线区域为北黄海西部泥质区^[10]

Fig.1 Map of the research location

The gray area is the western mud area of the North Yellow Sea^[10]

应取 $\Delta R = -139 \pm 59$ a^[25], 年龄转换采用 Marine 20 曲线^[26]。粒度测试结果采用 Udden-Wentworth Φ 值粒级标准^[27], 沉积物分类和命名采用谢帕德分类命名法^[28], 粒度参数采用矩值法进行计算^[29]。

海洋中沉积总有机碳 (TOC) 的来源包括陆源 (外来源) 和海源 (自生源)^[30]。有机碳来源的不同会导致碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生变化^[31]。合成海洋有机碳的浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-22\text{‰} \sim -19\text{‰}$, 陆地输入的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负, 为 $-33\text{‰} \sim -22\text{‰}$ ^[32]。因此, 依据 $\delta^{13}\text{C}$ 值在陆源、海源有机碳中的差异可以大体区分海洋沉积物中有机碳的来源, 使用 $\delta^{13}\text{C}$ 二端元混合模型估算陆源、海源有机碳在总有机碳中的贡献比^[33]。由于北黄海西部泥质区沉积物中陆源有机碳主要来自黄河^[21], 且在整个华北地区陆地 C_3 植物中占主导地位^[34]。因此, 参考黄河颗粒有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值 (-24.0‰)^[35-36], 陆地 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (平均值为 -27.0‰)^[37], 取两者平均值 -26.0‰ 作为本文陆源有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值。海源有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值取自海洋的平均值 -20‰ ^[37], 计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C} = \delta^{13}\text{C}_m \times F_m + \delta^{13}\text{C}_t \times F_t \quad (1)$$

$$F_m + F_t = 1 \quad (2)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}_m$ 为海源有机碳的端元值, $\delta^{13}\text{C}_t$ 为陆

源有机碳的端元值, F_m 为海源有机碳的贡献比, F_t 为陆源有机碳的贡献比。

2 研究结果

2.1 年代框架及沉积速率

从 W03 岩芯中共挑取 5 个层位的有孔虫样品进行 AMS¹⁴C 测年, 每个样品校正后的日历年龄进行线性插值并线性外推计算岩芯最底部的年龄为 10.3 cal. kaBP。根据测年结果建立了 W03 岩芯的年代框架 (图 2), AMS¹⁴C 测年结果显示 W03 岩芯记录了北黄海西部早全新世以来的沉积。W03 岩芯整体平均沉积速率约为 52.23 cm/ka, 各阶段沉积速率变化较大, 为 20.84~167.80 cm/ka。其中在岩芯的底部 400~500 cm (对应 9.5~10.1 cal. kaBP), 沉积物的沉积速率最高, 达到 167.80 cm/ka; 300~400 cm (4.7~9.5 cal. kaBP), 沉积速率最低, 仅有 20.84 cm/ka。

2.2 粒度特征

W03 岩芯粒度组分和参数的垂向变化如图 3 所示, 沉积物以粉砂为主, 含量大于 50%, 平均含量 64.3%, 砂含量波动剧烈 (0~34.1%), 黏土含量为

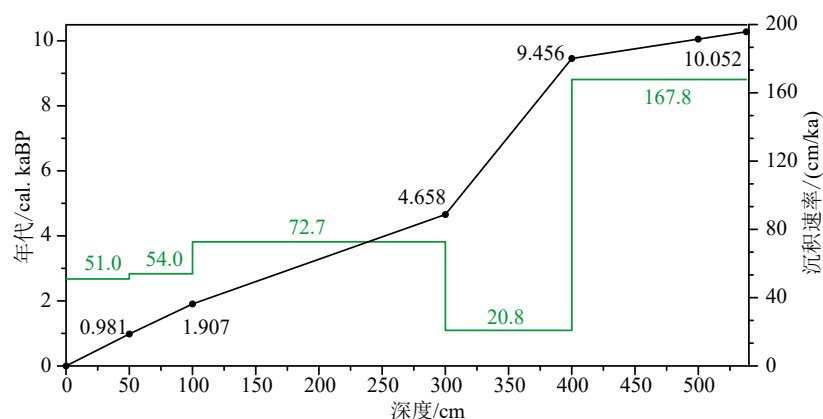


图2 W03岩芯年代框架及沉积速率

Fig.2 The age frame and deposition rate of Core W03

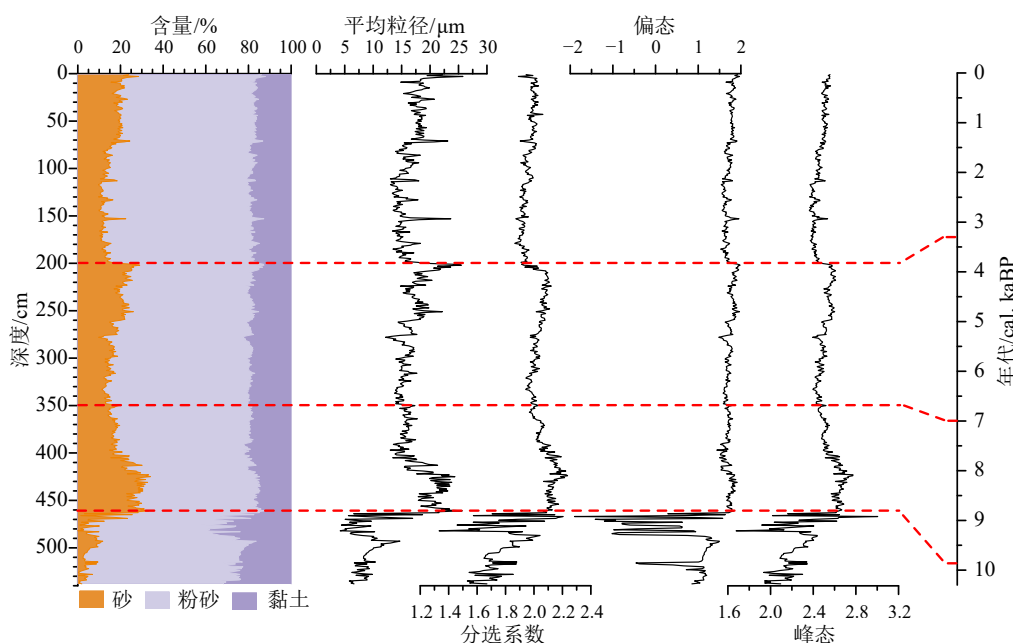


图3 W03岩芯粒度组分、参数随深度变化

Fig.3 Variation of grain size components and parameters with depth in Core W03

12%~45%。平均粒径 4.2~25.8 μm ; 分选系数为 1.3~2.2, 分选较差; 偏态为 -1.9~2.0, 表现为极正偏; 峰态为 1.7~3.0, 表现为平坦—正态。总体而言, 根据 W03 岩芯粒度组分和参数可以划分为 4 个部分。

461~538 cm: 该段形成于 10.3~9.8 cal. kaBP, 岩性特征为硬质黏土层, 沉积物以黏土质粉砂为主, 各组分含量变化较大, 粒度参数波动剧烈。砂组分含量最少, 平均含量 6.5%; 粉砂含量为 50.0%~73.8%; 黏土含量 12.7%~45.2%。平均粒径均值为 9.2 μm ; 分选系数 1.3~2.2, 分选较差; 偏态为 -1.9~1.8, 表现为正偏、负偏来回波动; 峰态主要表现为平坦—正态(1.7~3.0)。

350~461 cm: 该段形成于 9.8~7.0 cal. kaBP, 沉

积物为砂质粉砂和黏土质粉砂, 砂和粉砂的变化范围较大, 砂含量为 14.1%~34.1%, 平均为 24.1%, 较 461~538 cm 明显增加; 粉砂的含量有所减少(51.0%~66.8%); 黏土含量在 14.1%~23.1% 之间波动, 相对较稳定。各粒度参数较上一段变化较小, 平均粒径为 13.0~24.4 μm , 逐渐变细; 分选系数均值为 2.1, 分选差; 偏态表现为极正偏(1.4~1.9); 峰态为 2.4~2.8, 表现为平坦—正态。

201~350 cm: 该段形成于 7.0~3.3 cal. kaBP, 沉积物类型从黏土质粉砂到砂质粉砂, 砂组分含量呈增加趋势(9.7%~29.0%); 粉砂含量为 57.4%~69.1%; 黏土含量波动较小, 均值为 18.4%。平均粒径在该段逐渐变粗, 变化范围为 12.2~25.5 μm ; 分选系数 1.9~2.1, 分选差; 偏态为 1.5~2.0, 表现为极正偏;

峰态主要表现为平坦—正态(2.4~2.6)。

0~201 cm: 该段形成于3.3 cal. kaBP以来, 沉积物为黏土质粉砂和砂质粉砂, 砂的含量在200 cm处明显降低, 为9.7%~28.4%, 平均值为15.4%; 粉砂仍是主要组分(59.5%~71.4%); 黏土含量为12.1%~21.4%。各粒度参数较稳定, 平均粒径为13.0~25.8 μm ; 分选系数1.9~2.1, 分选差; 偏态表现为极正偏(1.5~2.0); 峰态为2.4~2.6, 表现为平坦—正态。

选取4个部分代表层位绘制粒度频率曲线(图4), 发现461~538 cm段(500 cm)的粒度频率曲线为双峰分布, 其他3个层位的粒度频率曲线形态大致相同, 呈三峰分布, 表明W03岩芯大多数时间受到多个沉积作用的影响。

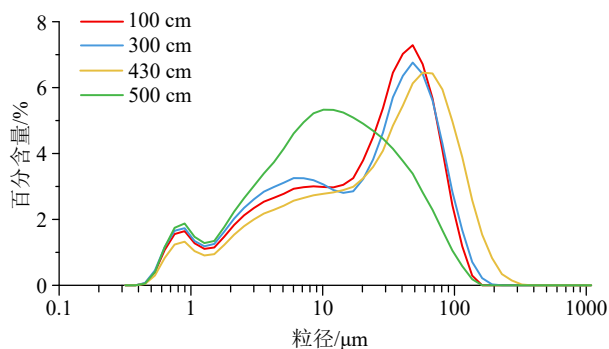


图4 W03岩芯部分层位沉积物粒度频率曲线

Fig.4 Curve of grain size frequency of some layers of Core W03

2.3 沉积有机碳变化及来源特征

全新世以来W03岩芯总有机碳含量及稳定碳同位素变化如图5所示。TOC含量变化范围为0.14%~0.87%, 平均含量为0.51%; $\delta^{13}\text{C}$ 的范围为-24.9‰~-22.3‰, 平均值为-23.1‰; TN含量变化范围为0.03%~0.14%, 均值为0.07%。TOC含量与平均粒径的相关性不明显($R^2=0.04$, 图6a), 表明有机碳埋藏受粒度影响不显著。TOC和TN的含量在全新世以来变化趋势相似, 两者呈良好的线性相关性($R^2=0.75$, 图6b), 说明沉积物中的碳、氮埋藏特征及来源较为一致。沉积物中的总氮TN包括有机氮和无机氮, 在应用C/N指标辨别沉积有机碳的来源时, 需要考虑沉积物中无机氮的影响。在TOC和TN的相关分析中, 可利用截距大体估算沉积物中无机氮的含量, 由图6b可知, W03岩芯沉积物的无机氮含量较高, 达到了0.02%, 使用C/N指标来区分W03岩芯沉积有机碳的来源时可能会出现偏差, 因此本研究重点依据 $\delta^{13}\text{C}$ 指标开展W03岩芯沉积有机碳来源判别研究。

W03岩芯总有机碳含量及稳定碳同位素的阶段性变化平均值如表1所示。(1)10.3~9.8 cal. kaBP, TOC和TN含量较低, 平均值仅为0.22%和0.04%; $\delta^{13}\text{C}$ 偏负, 波动大, 平均为-23.6‰。(2)9.8~7.0 cal. kaBP, TOC和TN在9.5 cal. kaBP之后总体保持稳定, 变化范围分别为0.24%~0.74%和0.03%~0.10%;

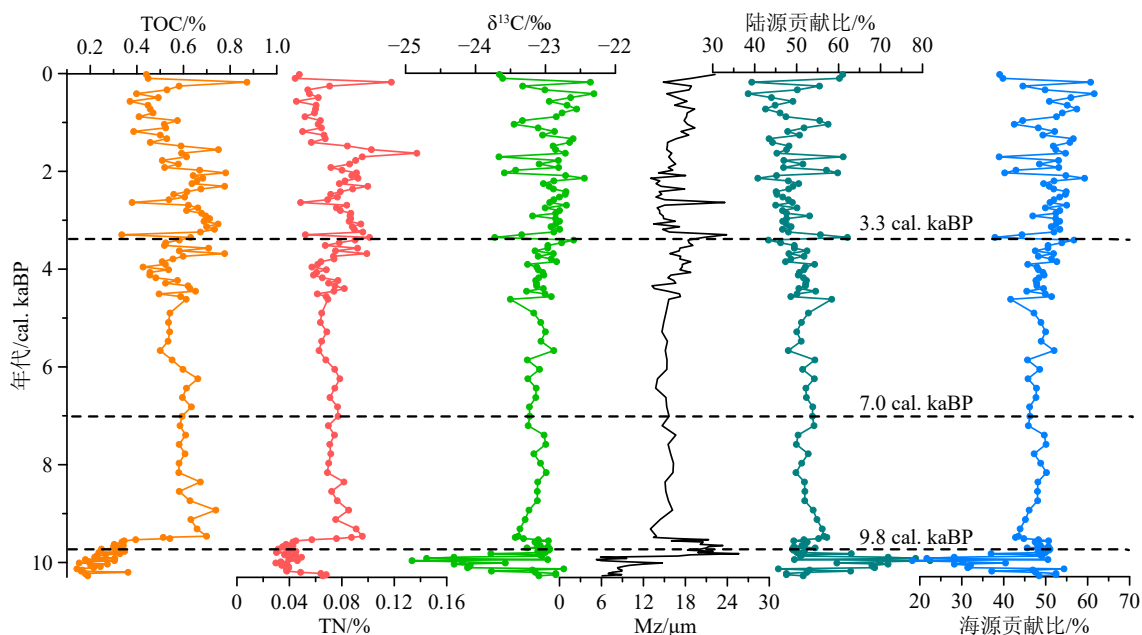


图5 全新世以来W03岩芯总有机碳及来源变化趋势

Fig.5 Trend of variations in total organic carbon and its source in Core W03 since the Holocene

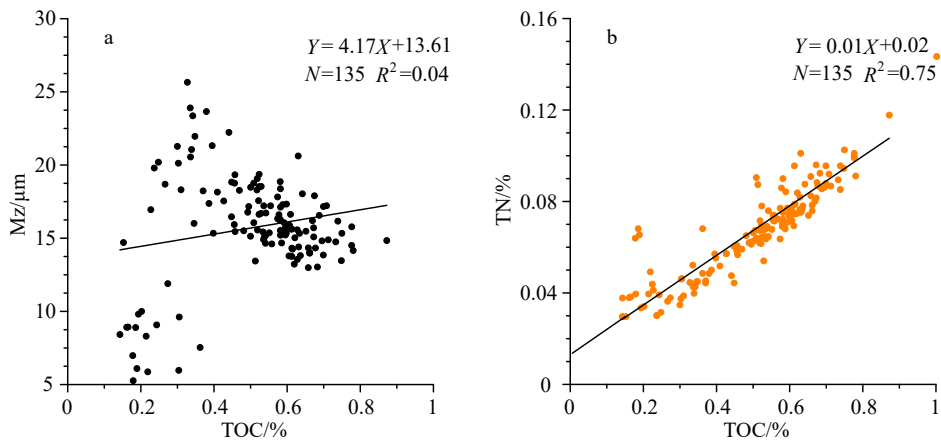


图 6 W03 岩芯沉积物 TOC 与 Mz (a)、TN (b) 的相关性分析
Fig.6 Correlation between TOC and Mz (a) or TN (b) in Core W03

表 1 总有机碳指标在不同阶段的平均值					
Table 1 Average value of total organic carbon index in different stages					
年代	TOC/ %	TN/ %	δ ¹³ C/ ‰	陆源贡献比/ %	海源贡献比/ %
3.3 cal. kaBP 至今	0.56	0.07	-23.0	49.3	50.7
7.0~3.3 cal. kaBP	0.57	0.07	-23.1	51.5	48.5
9.8~7.0 cal. kaBP	0.49	0.06	-23.1	52.3	47.7
10.3~9.8 cal. kaBP	0.22	0.04	-23.6	60.7	39.3

δ¹³C 值较上一阶段偏正, 变化范围为-23.1‰~-22.9‰。(3) 7.0~3.3 cal. kaBP, TOC 和 TN 含量先减少后增加, TOC 的变化范围为 0.43%~0.78%, TN 含量的平均值为 0.07%; δ¹³C 值持续正偏, 平均为-23.1‰。(4) 3.3 cal. kaBP 至今, TOC 和 TN 含量波动性增强, 总体呈逐渐降低的趋势, 变化范围分别为 0.33%~0.87% 和 0.04%~0.14%; δ¹³C 值持续正偏, 波动剧烈, 变化范围为-23.7‰~-22.3‰。

基于 δ¹³C 二端元混合模型估算了陆源、海源有机碳的贡献变化(图 5), 平均值如表 1 所示。(1) 10.3~9.8 cal. kaBP, 陆源、海源贡献比波动剧烈, 陆源贡献比平均为 60.7%, 海源贡献比平均为 39.3%, 表明此阶段以陆源输入为主;(2) 9.8~7.0 cal. kaBP, 陆源贡献迅速降低后继续下降, 海源贡献呈相反趋势, 此阶段陆源、海源贡献比均值分别为 52.2% 和 47.8%;(3) 7.0~3.3 cal. kaBP, 陆源贡献持续减少, 海源贡献逐渐增加, 陆源、海源贡献比均值分别为 51.5% 和 48.5%;(4) 3.3 cal. kaBP 至今, 陆源、海源贡献比的波动性逐渐增强, 陆源贡献进一步降低, 海源贡献持续增加, 陆源、海源贡献比均值分别为 49.3% 和 50.7%, 表明此阶段海源贡献开始占据主导。

3 讨论

北黄海西部泥质区表层沉积物的矿物学^[38]和地球化学^[39]证据揭示了泥质区的沉积物主要来自长距离输运而来的黄河物质。鲁北沿岸流将黄河物质由河口输送到山东半岛北岸, 北上的黄海暖流限制了黄河物质继续向东和东北方向的扩散, 最终在北黄海西部逐渐沉积下来^[10,14]。其中陆源有机碳主要由黄河物质供应, 影响其输运和埋藏的因素复杂, 不仅受控于环流体系, 还受陆源输入的影响^[40-41]。全新世早期海侵时期, 黄河物质直接供应至研究区^[10-11]; 高海平面以来, 随着环流体系的形成, 作为现代环流体系的驱动因素, 强盛的冬季风有利于沿岸流输运更多的黄河物质^[42]。海源有机碳主要来自海洋浮游植物初级生产力^[9], 影响初级生产力的因素包括海平面的变化和海洋环流体系。海平面的上升有利于浮游植物的生长, 环流体系的形成和增强对浮游植物生产力有明显促进作用^[43-44]。

根据测年结果及海平面变化(图 7i), 全新世以来北黄海西部的沉积演化可以划分 3 个阶段: 海平面上升停滞期(10.3~9.8 cal. kaBP), 海平面上升期(9.8~7.0 cal. kaBP)和高海平面时期(7.0 cal. kaBP 至今)。与周边 B-U35 和 B-L44 岩芯相比, W03 岩芯海平面上升停滞期沉积速率较高, 海平面上升及达到最大后, 沉积速率与 B-U35 岩芯相当^[38]。根据 W03 岩芯粒度特征和总有机碳指标重建的全新世以来北黄海西部沉积有机碳的埋藏特征, 结合全新世气候和海洋环境记录, 探讨北黄海西部泥质区全新世以来不同阶段沉积有机碳埋藏的受控机制。

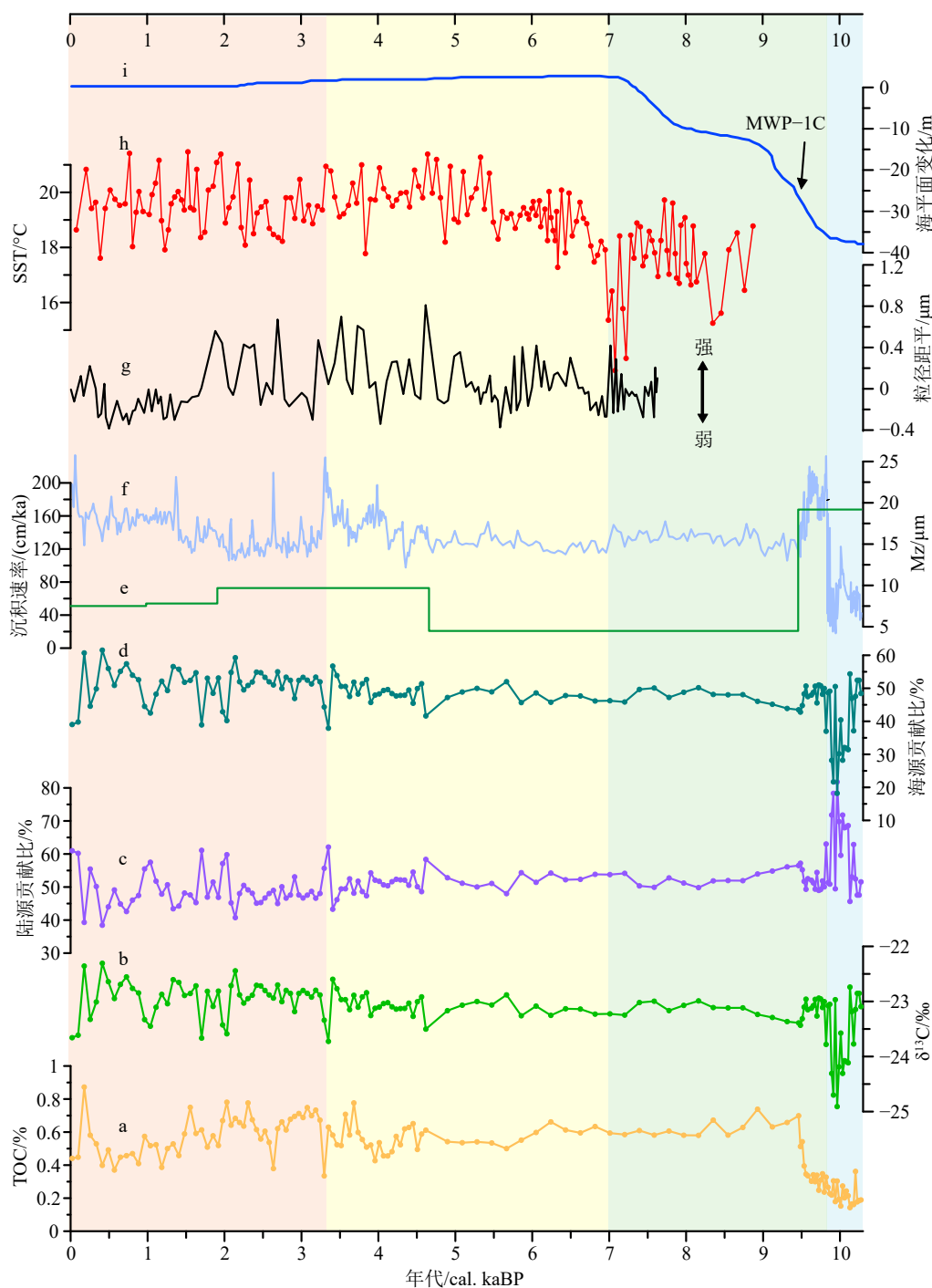


图 7 全新世以来 W03 岩芯总有机碳指标与气候、海洋记录对比

a: TOC 含量, b: $\delta^{13}\text{C}$, c: 陆源有机碳贡献比, d: 海源有机碳贡献比, e: 沉积速率, f: 平均粒径, g: PC-6 岩芯重建的东亚冬季风记录^[46], h: B-Y14 岩芯的 SST 记录^[18], i: 海平面变化^[10-11]

Fig.7 Comparison of the total organic carbon index of Core W03 with climatic and oceanic records since the Holocene

a: Total organic carbon content, b: $\delta^{13}\text{C}$, c: The contribution of terrestrial organic carbon, d: The contribution of marine organic carbon, e: Linear sedimentary rate, f: Mean grain size, g: East Asian winter monsoon intensity reconstructed from the PC-6 Core record^[46], h: Sea surface temperature records from B-Y14 Core^[18], i: Sea level change^[10-11]

3.1 沉积有机碳埋藏对海平面停滞的响应

10.3~9.8 cal. kaBP 期间, W03 岩芯沉积特征表现为硬质黏土层, 粒径较细(图 7f)。此沉积也曾

北黄海中部泥质区 DLC70-2 岩芯^[39]和辽东半岛东岸泥质区 A-O29 岩芯^[45]发现, 被认为是在末次冰消期新仙女木事件(12.9~11.6 cal. kaBP)海平面缓慢上升时期所形成。根据 W03 岩芯硬质黏土层形成

的时间,发现此阶段为融水脉冲事件 MWP-1B(11.6~11.3 cal. kaBP)到 MWP-1C(9.8~9.0 cal. kaBP)之间海平面的停滞时期^[47](图 7i)。该时期黄河在渤海海峡附近入海,距离研究区域比较近^[10-11],沉积速率较高(图 7e)。近距离输入导致该时期 W03 岩芯沉积有机碳记录中陆源供应占据主导, $\delta^{13}\text{C}$ 值明显偏负(图 7b),陆源贡献比例达到 60% 以上(图 7c)。另外,前人通过矿物和元素测试结果揭示此阶段泥质区处于弱还原甚至氧化性环境^[47],不利于海源有机碳的保存^[37],从而更加凸显了陆源有机碳的贡献优势。此阶段粒度参数(图 3)和总有机碳指标(图 5)均波动剧烈,指示此阶段的沉积环境并不稳定,动荡的海洋环境不利于沉积有机碳的保存,导致此阶段 TOC 含量相对较低,平均含量仅为 0.22%(图 7a)。

3.2 海平面上升对沉积有机碳埋藏的影响

大约 9.8 cal. kaBP 发生的 MWP-1C 事件导致我国东部边缘海海平面快速上升(图 7i),沉积环境发生快速变化。由于海平面的快速上升,黄河口迅速西退至渤海西侧^[10-11],远离研究区,陆源物质输运到研究区域的距离增加, $\delta^{13}\text{C}$ 值迅速偏正(图 7b),陆源贡献比例快速降低,海源贡献比例快速增加(图 7c-d)。此时研究区的粗颗粒物不利于沉积有机碳的吸附和保存^[9],因此 TOC 含量并没有明显的增加(图 7a)。

随着海平面上升的速度减慢,研究区的沉积速率显著降低(图 7e),砂组分开始减少,沉积物的平均粒径变细(图 7f)。粒度及总有机碳指标变化趋于稳定,有研究表明此阶段北黄海西部泥质区的细颗粒沉积系山东半岛水下三角洲向北黄海西部扩散而来,沉积环境相对稳定^[10-11,38]。海平面的上升,促进了浮游植物的生长,浮游植物初级生产力逐渐提高^[44],海源供应比例增加(47.7%;图 7d), $\delta^{13}\text{C}$ 正偏(图 7b)。因此,研究区 TOC 含量由前一阶段的 0.22% 增加至 0.49%(图 7a)。

3.3 高海平面时期沉积有机碳埋藏特征

7.0 cal. kaBP 左右海平面达到最大后基本稳定,变化幅度不大(图 7i),黑潮分支黄海暖流进入黄海,现代黄海环流体系逐渐形成^[16,18]。黄海环流体系作用于北黄海西部,使得研究区的沉积环境稳定低能,水动力条件较弱^[10-11],不仅有利于黄河细颗粒物质的汇聚,而且有利于沉积有机碳的保存和埋藏。

黄海环流体系的强弱变化受控于东亚冬季风的强度^[42]。强盛的冬季风不仅会增强沿岸流搬运

黄河入海物质的能力,而且能通过强化黄海暖流的阻隔作用从而使更多黄河物质在研究区沉积。因此,最大海平面以来北黄海西部泥质区陆源有机碳的供应主要受东亚冬季风驱动的黄海环流体系强度的影响^[40]。肖尚斌等^[47]通过提取东海内陆架闽浙沿岸泥中部的 PC-6 孔的敏感粒级,反演了近 8 cal. kaBP 以来东亚冬季风的变化(图 7g)。7.0~4.6 cal. kaBP 期间,东亚冬季风相对较弱,环流体系强度不高,因此输送埋藏至研究区的陆源有机碳有所降低;4.6~3.3 cal. kaBP 期间,随着冬季风的增强,研究区沉积速率增加(图 7e),沉积物粒度粗化(图 7f),反映了较强的冬季风导致沿岸流的输运强度和搬运能力增强,增加了陆源物质对泥质区的供应;3.3 cal. kaBP 至今东亚冬季风强度逐渐减弱,通过沿岸流输送到研究区的黄河物质通量有所减少,进而导致 W03 岩芯沉积速率有所降低(图 7e),陆源有机碳供应比例进一步降低(图 7c)。

海源有机碳作为海洋浮游植物初级生产力的指标,主要受控于黄海环流体系的变化^[44]。南青云等^[18]对北黄海北部 B-Y14 岩芯的 $U_{37}^{K'}$ -SST 分析认为黄海暖流可能始于 7.0 cal. kaBP,并在 7.0~5.5 cal. kaBP 期间逐渐加强,温度与盐度相关性表明现代黄海环流体系正式形成于 5.5 cal. kaBP,并一直强盛至今(图 7h)。随着黄海暖流输送而来的温暖水体及强度的增加(图 7h),促进了研究区浮游植物的生长,提高了浮游植物初级生产力^[44],海源供应比例进一步增加(50.0%;图 7d), $\delta^{13}\text{C}$ 值正偏(图 7b)。但黄海暖流的剧烈波动也使得浮游植物初级生产力并不稳定,体现在总有机碳相关指标的波动性增加,这种现象还有可能与 3 cal. kaBP 以来 ENSO 增强有关,具体作用机理有待进一步研究。

因此,高海平面以来受黄海环流体系的影响,陆源有机碳输入随着东亚冬季风驱动的沿岸流的强度变化发生对应的改变,海源有机碳供应增加,TOC 平均含量为 0.58%(图 7a)。

4 结论

(1)全新世以来北黄海西部泥质区沉积有机碳埋藏过程分为 3 个阶段:融水脉冲 MWP-1B 事件后海平面上升的停滞期(10.3~9.8 cal. kaBP),沉积有机碳以陆源输入为主,同时动荡的沉积环境不利于沉积有机碳的保存;海平面上升期(9.8~7.0 cal. kaBP),MWP-1C 事件导致海平面快速上升,海源有机碳的贡献增加,此阶段相对稳定的沉积环境有利于有机

碳的埋藏, TOC 含量显著增加; 高海平面时期 (7.0 cal. kaBP 至今), 黄海环流体系逐渐形成, 陆源有机碳输入随着东亚冬季风驱动的沿岸流强度变化发生对应的改变, 海源有机碳的贡献继续增加, 总有机碳的含量整体较高。

(2) 全新世以来北黄海西部泥质区沉积有机碳埋藏主要受控于海平面变化和海洋环流体系, 而未来天气变暖导致的海平面上升速率和极端天气发生频率可能会导致海洋环流体系在天气尺度发生重要变化, 进而导致北黄海沉积有机碳源汇过程的调整, 后续的研究需要进一步的关注。

参考文献 (References)

- [1] Mackenzie F T, Lerman A, Ver L M B. Role of the continental margin in the global carbon balance during the past three centuries [J]. *Geology*, 1998, 26(5): 423-426.
- [2] Berner R A. Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effect on atmospheric oxygen over phanerozoic time [J]. *Global and Planetary Change*, 1989, 1(1-2): 97-122.
- [3] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis: authors' closing comments [J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2-3): 137-139.
- [4] De Haas H, van Weering T C E, de Stigter H. Organic carbon in shelf seas: sinks or sources, processes and products [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(5): 691-717.
- [5] 张明宇, 常鑫, 胡利民, 等. 东海内陆架有机碳的源—汇过程及其沉积记录 [J]. *沉积学报*, 2021, 39(3): 593-609. [ZHANG Mingyu, CHANG Xin, HU Limin, et al. Source-to-sink process of organic carbon on the inner shelf of the East China Sea and its sedimentary records [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 593-609.]
- [6] 石学法, 胡利民, 孙淑卿, 等. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏 [J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(3): 313-327. [SHI Xuefa, HU Limin, QIAO Shuqing, et al. Progress in research of sedimentary organic carbon in the East China Sea: sources, dispersal and sequestration [J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(3): 313-327.]
- [7] 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.]
- [8] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989: 1-289. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. *Geology of the Yellow Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1989: 1-289.]
- [9] Xing L, Tao S Q, Zhang H L, et al. Distributions and origins of lipid biomarkers in surface sediments from the southern Yellow Sea [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8): 1584-1593.
- [10] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1-4): 45-67.
- [11] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3-4): 165-187.
- [12] Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2001, 21(4): 212-218.
- [13] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(7): 846-855.
- [14] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1-4): 169-176.
- [15] Li Y, Li A C, Huang P. Sedimentary evolution since the late Last Deglaciation in the western North Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(1): 152-162.
- [16] 李铁刚, 江波, 孙荣涛, 等. 末次冰消期以来东黄海暖流系统的演化 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(6): 945-954. [LI Tiegang, JIANG Bo, SUN Rongtao, et al. Evolution pattern of warm current system of the East China Sea and the Yellow Sea since the last deglaciation [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 945-954.]
- [17] Li T G, Nan Q Y, Jiang B, et al. Formation and evolution of the modern warm current system in the East China Sea and the Yellow Sea since the last deglaciation [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(2): 237-249.
- [18] Nan Q Y, Li T G, Chen J X, et al. Holocene paleoenvironment changes in the northern Yellow Sea: evidence from alkenone-derived sea surface temperature [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 483: 83-93.
- [19] 鲁晓红, 陈颖军, 黄国培, 等. 黄渤海表层沉积物中正构烷烃和甾醇的分布及来源研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(6): 1117-1122. [LU Xiaohong, CHEN Yingjun, HUANG Guopei, et al. Distribution and sources of lipid biomarkers in surface sediments of the Yellow Sea and Bohai Sea [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(6): 1117-1122.]
- [20] 王星辰, 邢磊, 张海龙, 等. 北黄海-渤海表层沉积物中浮游植物生物标志物的分布特征及指示意义 [J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(5): 69-73, 78. [WANG Xingchen, XING Lei, ZHANG Hailong, et al. Distribution of phytoplankton biomarkers in surface sediments from the North Yellow Sea and the Bohai Sea and its implication [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(5): 69-73, 78.]
- [21] Xing L, Hou D, Wang X C, et al. Assessment of the sources of sedimentary organic matter in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea using biomarker proxies [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 176: 67-75.
- [22] 操云云, 邢磊, 王星辰, 等. 渤海-北黄海表层沉积物中正构烷烃的组合特征及其指示意义的探讨 [J]. *中国海洋大学学报*, 2018, 48(3): 104-113. [CAO Yunyun, XING Lei, WANG Xingchen, et al. Study on the indication of n-alkanes in surface sediments from the Bohai Sea and the North Yellow Sea [J]. *Periodical of Ocean University of*

- China, 2018, 48 (3): 104-113.]
- [23] Dang T X, Cao Y Y, Xing L. The stable carbon isotopic compositions of *n*-alkanes in sediments of the Bohai and North Yellow Seas: implications for sources of sedimentary organic matter [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20 (2): 340-348.
- [24] 郭世鑫. 近百年来北黄海浮游植物生产力和种群结构变化的生物标志物记录及影响因素[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [GUO Shixin. Biomarker records of phytoplankton productivity and community structure changes of the North Yellow Sea and its influencing factors over the last 100 years[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [25] Liu J G, Li A C, Chen M H. Environmental evolution and impact of the Yellow River sediments on deposition in the Bohai Sea during the last deglaciation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38 (1-2): 26-33.
- [26] Heaton T J, Köhler P, Butzin M, et al. Marine20—the marine radiocarbon age calibration curve (0-55, 000 cal BP) [J]. *Radiocarbon*, 2020, 62 (4): 779-820.
- [27] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30 (5): 377-392.
- [28] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24 (3): 151-158.
- [29] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]. *Techniques in Sedimentology*, Oxford: Blackwell, 1988: 63-85.
- [30] 李学刚, 宋金明. 海洋沉积物中碳的来源、迁移和转化[J]. 海洋科学集刊, 2004, 46(1): 106-117. [LI Xuegang, SONG Jinming. Sources, removal and transformation of carbon in marine sediments [J]. *Studia Marina Sinica*, 2004, 46(1): 106-117.]
- [31] Eckelmann W R, Broecker W S, Whitlock D W, et al. Implications of carbon isotopic composition of total organic carbon of some recent sediments and ancient oils [J]. *AAPG Bulletin*, 1962, 46 (5): 699-704.
- [32] Pancost R D, Boot C S. The palaeoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92 (1-4): 239-261.
- [33] Wu J P, Calvert S E, Wong C S. Carbon and nitrogen isotope ratios in sedimenting particulate organic matter at an upwelling site off Vancouver island [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 48 (2): 193-203.
- [34] Guo Z G, Li J Y, Feng J L, et al. Compound-specific carbon isotope compositions of individual long-chain *n*-alkanes in severe Asian dust episodes in the North China coast in 2002 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (17): 2133-2140.
- [35] Tao S Q, Eglinton T I, Montluçon D B, et al. Pre-aged soil organic carbon as a major component of the Yellow River suspended load: regional significance and global relevance [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 414: 77-86.
- [36] Yu M, Eglinton T I, Haghipour N, et al. Impacts of natural and human-induced hydrological variability on particulate organic carbon dynamics in the Yellow River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (3): 1119-1129.
- [37] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27 (5-6): 213-250.
- [38] 李艳. 北黄海末次冰消期以来沉积特征及物源环境指示[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2011. [LI Yan. Sedimentary characteristics and implication to provenance and sedimentary environment since the last deglaciation in the North Yellow Sea[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [39] 陈晓辉. 北黄海陆架晚第四纪地层结构与物源环境演变研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2014. [CHEN Xiaohui. Sedimentary stratigraphic structure and provenance environmental evolution in the North Yellow Sea during the late Quaternary[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [40] Wu P, Xiao X T, Tao S Q, et al. Biomarker evidence for changes in terrestrial organic matter input into the Yellow Sea mud area during the Holocene [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59 (6): 1216-1224.
- [41] 皮仲, 李铁刚, 类彦立. 中全新世以来南黄海中部沉积过程: 基于岩心粒度和有机质指标[J]. 海洋学报, 2019, 41 (11): 75-88. [PI Zhong, LI Tiegang, LEI Yanli. Sedimentary processes of central South Yellow Sea since the mid-Holocene based on grain size and organic matter indexes [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41 (11): 75-88.]
- [42] Wang L B, Yang Z S, Zhang R P, et al. Sea surface temperature records of core ZY2 from the central mud area in the South Yellow Sea during last 6200 years and related effect of the Yellow Sea Warm Current [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56 (15): 1588-1595.
- [43] Xing L, Zhao M X, Zhang H L, et al. Biomarker evidence for paleoenvironmental changes in the southern Yellow Sea over the last 8200 years [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30 (1): 1-11.
- [44] Zhao X C, Tao S Q, Zhang R P, et al. Biomarker records of phytoplankton productivity and community structure changes in the Central Yellow Sea mud area during the mid-late Holocene [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12 (4): 639-646.
- [45] 李铁刚, 常凤鸣, 于心科. Younger Dryas事件与北黄海泥炭层的形成[J]. 地学前缘, 2010, 17 (1): 322-329. [LI Tiegang, CHANG Fengming, YU Xinke. Younger Dryas event and formation of peat layers in the Northern Yellow Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17 (1): 322-329.]
- [46] 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近8 ka东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2005, 30 (5): 573-581. [XIAO Shangbin, LI Anchun, CHEN Muhong, et al. Recent 8 ka mud records of the East Asian Winter monsoon from the inner shelf of the East China Sea [J]. *Earth Science:Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30 (5): 573-581.]
- [47] 闫天浩. 北黄海中部泥质区W03岩芯全新世以来沉积演化及对海平面变化的响应[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2022. [YAN Tianhao. Sedimentary evolution of W03 core in the central mud area of the North Yellow Sea since Holocene and its response to sea level change[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2022.]