



南海南沙海区沉积有机质分布特征及其指示意义

陈芬, 黎刚, 朱小畏, 颜文

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

CHEN Fen, LI Gang, ZHU Xiaowei, and YAN Wen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine–continental transitional source rocks in the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173

东海陆坡—冲绳海槽水体剖面地球化学特征与指示意义

Geochemistry of the water profiles at the slope of East China Sea and Okinawa Trough and its implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 102

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈芬, 黎刚, 朱小畏, 等. 南海南沙海区沉积有机质分布特征及其指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 45-54.

CHEN Fen, LI Gang, ZHU Xiaowei, et al. 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 [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 45-54.

南海南沙海区沉积有机质分布特征及其指示意义

陈芬^{1,2}, 黎刚^{1,3}, 朱小畏^{1,3}, 颜文^{1,2,3}

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

摘要:对现在过程的研究可为了解过去沉积环境演变信息提供重要线索。对南海南沙广阔海域 23 个现代表层沉积物样品总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 含量及同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 进行测试分析, 以期通过沉积有机质的现代组成分布特征为反演其历史时空分布变化规律及其驱动机制提供参考。南沙海区表层沉积物 TOC/TN (5.5~7.9, 平均为 6.5 ± 0.6) 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ ($-21.9\text{‰}\sim -18.7\text{‰}$, 平均为 $-21.0\text{‰}\pm 0.7\text{‰}$) 揭示了沉积有机质主要来自海源贡献; $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 与 TOC 和 TOC/TN 的相关性分析表明了 TOC 未受明显的早期成岩作用影响, 因此表层沉积物 TOC 可用于反映现代上层海水生产力状况。南沙海区表层沉积物 TOC (0.32%~0.97%, 平均为 $0.67\%\pm 0.17\%$) 呈现明显的西-东向分布差异, 高值主要位于西部前缘地带, 低值主要分布在东部海域。表层沉积物 TOC 的地理分布特征表明了西南夏季风对南沙海域表层海水生产力的主要调控作用——由夏季风产生的越南上升流和湄公河陆源输入带来的高通量营养盐促进了西部前缘海域浮游植物的勃发, 而随着站位距离的增加其施肥效应越来越弱。表层沉积物 TOC 和 TN 的强相关性 ($R^2=0.95$) 以及 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间分布特征暗示了南沙海域沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 未受陆源河流影响, 记录了上层海水 $\delta^{15}\text{N}$ 信号, 从而指示了相关的氮循环过程。

关键词:表层沉积物; 有机质来源; 海洋生产力; 东亚季风; 南沙海区

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072601

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

CHEN Fen^{1,2}, LI Gang^{1,3}, ZHU Xiaowei^{1,3}, YAN Wen^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanography, CAS, Guangzhou 510301, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. South Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: The knowledge of modern hydrologic process provides important clues for marine palaeoenvironmental and palaeoclimatic evolution. Twenty-three surface sediment samples collected throughout the Nansha sea area of the South China Sea (SCS) were analyzed for sedimentary bulk parameters, including total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and their isotopes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ and $\delta^{15}\text{N}$), in order to understand the controlling factors on the spatiotemporal variations of sedimentary organic matter (OM). Results show that the TOC/TN (5.5~7.9 in range and 6.5 ± 0.6 on average) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ ($-21.9\text{‰}\sim -18.7\text{‰}$ in range and $-21.0\text{‰}\pm 0.7\text{‰}$ on average) reflect the dominance of marine OM input to surface sediments in the Nansha sea area. Correlation analyses of $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ vs TOC and vs TOC/TN indicate that sedimentary TOC was not significantly affected by early diagenesis, thereby TOC can be used as an effective tracer for surface productivity. The values of TOC (0.32%~0.97% in range and $0.67\%\pm 0.17\%$ on average) show a descending trend from the western to eastern parts of the Nansha sea area, indicating clearly the importance of southwesterly summer monsoon in delivering rich nutrients from the productive Vietnam upwelling and Mekong delta. Moreover, strong correlation between TOC and TN ($R^2=0.95$) and clear spatial distribution of $\delta^{15}\text{N}$ manifested the ability of bulk $\delta^{15}\text{N}$ to reflect upper water $\delta^{15}\text{N}$ signal due to the minimal influence of riverine terrigenous inorganic N, thereby indicating the relevant nitrogen cycle process.

Key words: surface sediments; source of organic matter; marine productivity; the East Asian monsoon; Nansha sea area

资助项目:广东省基础与应用基础研究基金“南科 1 井珊瑚礁体生物标志物及其碳同位素组成分布特征及环境意义”(2022A1515012182); 国家自然科学基金面上项目“末次冰期以来南海南部南海中层水的氧化性研究”(42176079), “末次盛冰期以来北阿拉伯海(莫克兰)低氧带的千年尺度变化及其控制机制研究”(41976062); 国家自然科学基金项目“南科 1 井‘混色沉积夹层’的物质组成与微观组构及其成因机制研究”(41976063)

作者简介:陈芬(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: 2578496482@qq.com

通讯作者:朱小畏(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋有机生标与有机单体同位素研究, E-mail: miseraboy@126.com

收稿日期:2022-07-26; **改回日期:**2022-08-16. 文凤英编辑

南海是西太平洋最大的边缘海,不仅受东亚季风系统的控制,而且还受到诸多入海河流的影响,其沉积介质中蕴含了丰富的物源、气候、环境及生态等信息。通过对南海沉积记录的挖掘和研究,了解其沉积过程、环境演化和资源效应有着重要的科学意义和实用价值^[1-3]。

对南海生产力沉积记录的研究一直是南海古气候环境领域的热点,可恢复上层水体初级生产力状况和后期成岩降解过程等历史信息。目前已有诸多学者通过不同指标手段对南海古生产力展开了大量研究,如翦知潜等^[4]依靠底栖有孔虫获得了南海近万年来生产力记录;陈木宏等^[5]利用沉积物粒度重建了过去20万年海水生产力变化;梅西等^[6]基于元素Ba反演了12万年以来的生产力信息;Li等^[7]通过甾醇生物标志物恢复了过去45万年的生产力状况。然而,目前研究主要集中于南海北部和西部海域,对其上层水体生产力研究已十分成熟,并取得了一些基本共识,认为主要受到冬季风引发的强混合/上升流的影响而在冰期生产力较高^[8-9]。相反,由于南海南部相关监测、测量数据不够全面,研究程度较低,其生产力的冰期-间冰期变化特征及其控制机制还存在不少争论^[10]。比如,有学者认为是冬季风主导了南部生产力而在冰期高^[11-12],而其他学者认为主要是受到夏季风的控制而在间冰期高^[13-15]。造成这个争议的原因可能是南海南部有着区域的生产力特征及其影响因素,但也可能是某些代用指标不能客观反映上层水体生产力状况

(如无法撇清后期成岩作用的影响)。

通常来说,远洋沉积物总有机碳(TOC)主要来自上层水体初级生产者的贡献,因此常被用作表层生产力的有力指标^[16-18]。然而海洋沉积物TOC也可能受到陆源有机质输入和成岩降解作用的干扰,在实际应用中还需谨慎对待。故此,针对南海南部海区的研究不足及其生产力主要影响机制的争议,本文对南海南沙广阔海域23个现代表层沉积物展开基础沉积参数测试——TOC、总氮(TN)含量及同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$),首先基于TOC/TN和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 等特征参数揭示了沉积TOC主要来自海源贡献且未受显著的成岩降解作用影响,在此基础上,进一步通过对表层沉积物TOC现代分布特征的详细解析阐明了南海南部现代生产力的主要控制因素,为后续重建其古生产力变化特征及其相关的古气候环境演变过程提供重要线索。

1 区域概况

南海是仅次于北极边缘海的世界第二大边缘海,总面积约350万 km^2 ,位于欧亚-太平洋-印度三大板块交汇处,地质构造复杂,地貌类型多样,海底地形亦别具一格。南海常年受热带-亚热带气候系统影响,最主要的风场特征为季风,在冬季盛行东北向季风,形成海盆尺度的气旋式表层环流,在夏季盛行西南向季风,表层环流呈反气旋式(图1)^[19]。此外,受季风的影响,在越南、海南和粤东等岸外发

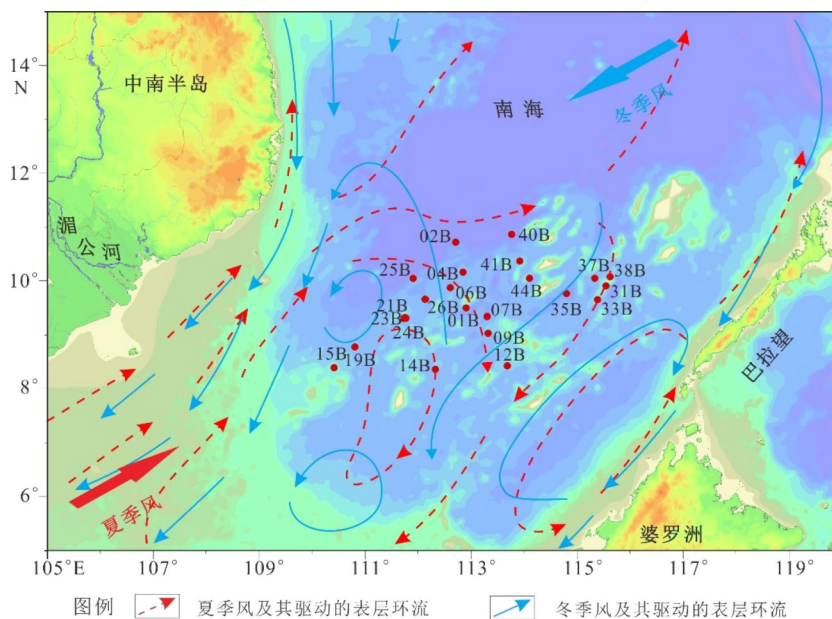


图1 南海南沙海域表层沉积物站点和季节性表层环流^[19]

Fig.1 Surface sediment sites and seasonal surface circulation in the Nansha sea area of the South China Sea^[19]

育了强劲的夏季上升流(图 2a), 在吕宋岸外生成强劲的冬季上升流^[20-22]。南海的陆源物质主要通过河流输入, 在众多注入南海的河流中, 湄公河、红河和珠江物质输入量最大, 其中湄公河影响了南海南部的广阔海域(图 2b)^[20,23-24]。

研究区位于南海南部, 地处南沙群岛(图 1)。南沙群岛是南海诸岛中岛礁最多、分布最广的一个群岛, 按海底地理特征南沙群岛属南海深海盆地内的隆起区, 区内都是珊瑚礁或珊瑚沙所组成的环礁, 呈 NE-SW 向延伸, 南北长约 560 海里, 东西宽约 400 海里, 最南到曾母暗沙, 北至礼乐滩。群岛

区域岛、礁、滩、沙密布, 地势十分复杂^[25-26]。

2 样品与分析

2.1 样品采集

23 个南沙海区表层沉积物(8.4~10.9°N、110.4~115.6°E)通过搭载中科院南海所岛礁中心南沙 2020 共享航次获取, 采样水深为 30~4 215 m(图 1)。在本单位“实验 1”科考船上, 用箱式取样器采集表层无扰动或者扰动较少的样品, 取样层次为 0~

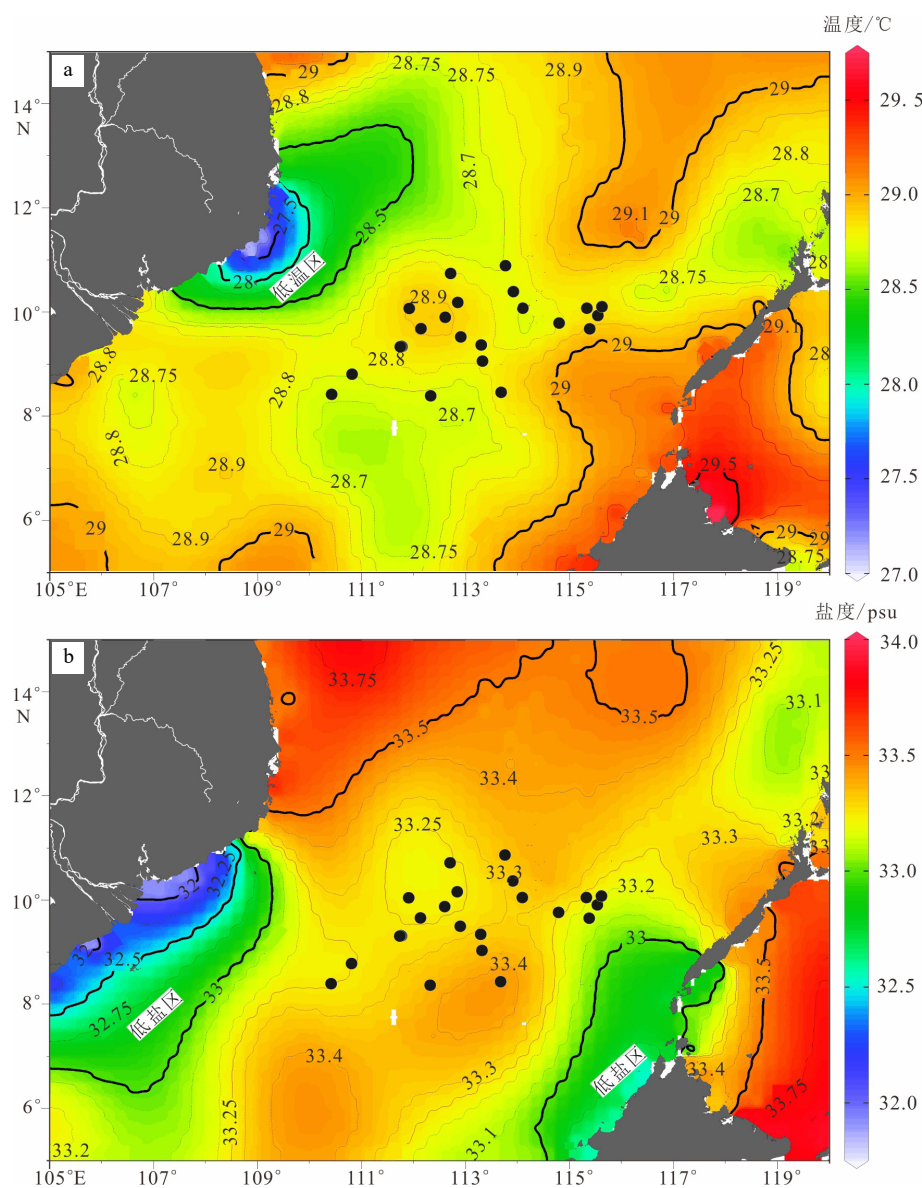


图 2 南海南沙海区夏季表层海水温度 (a)、盐度 (b)

a. 低温区为夏季越南上升流区, b. 低盐区为夏季湄公河(左)和婆罗洲-巴拉望入海河流(右)影响区。温盐数据来自 World Ocean Atlas^[27]。

Fig.2 Surface seawater temperature (a) and salinity (b) in the Nansha sea area of the South China Sea in summer

a: The low temperature area is the upwelling area of Vietnam in summer, b: the low salt area is the influence area of Mekong River (left) and Borneo Palawan seaward River (right) in summer. Temperature and salt data are from World Ocean Atlas^[27].

2 cm; 样品取完后立即用盖子封好, -20°C 冷冻保存后带至实验室冷冻干燥磨碎以备后续分析。

2.2 实验分析

表层沉积物 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分析测试在广东海洋大学海洋与气象学院完成, 主要采用高温氧化燃烧法, 使用元素分析仪-稳定同位素质谱仪 (EA Isolink-253 PLus, Thermo Scientific) 进行测量, 具体实验过程如下:

测定 TOC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 时, 称取 5 mg 样品于 5 mm \times 9 mm 银杯中, 加入适量浓度为 1 mol/L 的稀盐酸, 完全除去无机碳之后, 放入存有高氯酸镁和烧碱的密封盒里, 除去过量的水和盐酸后用 5 mm \times 9 mm 锡杯把装有样品的银杯包起来, 将锡杯密封并压密实。 $\delta^{15}\text{N}$ 和 TN 的测定则不需要进行酸化前处理, 称取约 25 mg 未酸化过的样品于 5 mm \times 9 mm 锡杯中, 将锡杯密封并压密实。沉积物 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 用元素分析仪-稳定同位素质谱仪联机测定。根据标准物质的质量、含量和测试积分面积, 以及样品测试积分面积, 得出样品颗粒物 TOC 和 TN 的质量, 将其质量除以样品质量, 得到沉积物 TOC 和 TN 含量。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值以国际标准物 VPDB (Vienna Peedee Belemnite) 作为参考标准, $\delta^{15}\text{N}$ 值以空气中 N_2 作为参考标准。

为了保证测试精度, 采用标准物质和平行样双重控制法。TOC 和 TN 含量标准物质使用 IVA33802153 (TOC=1.86%, TN=0.122%), $\delta^{13}\text{C}$ 标准物质使用 IVA33802151 ($\delta^{13}\text{C}=-28.85\text{‰}$), $\delta^{15}\text{N}$ 标准物质使用 IVA33802153 ($\delta^{15}\text{N}=5.78\text{‰}$)。标准物质的 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 测试精度分别小于 0.05%、0.005%、0.2‰和 0.2‰, 相对误差分别小于 8%、8%、1% 和 5%; 平行样的相对标准方差 (RSD) 小于 2%, 高分析精度表明了测试结果完全可靠。

3 结果

3.1 TOC、TN 和 TOC/TN

南海南沙海区 23 个表层沉积物 TOC 含量为 0.32%~0.97%, 平均值为 $0.67\% \pm 0.17\%$, TN 含量为 0.06%~0.16%, 平均值为 $0.11\% \pm 0.03\%$ (表 1), 两者具有非常好的相关性 ($R^2=0.95$; 图 3a)。TOC/TN 比值为 5.5~7.9, 平均值为 6.5 ± 0.6 (表 1)。

从空间分布看, TOC (及 TN) 在南沙海区西部较高, 最高/次高含量分别位于西北的 25B 站位和西南

的 14B 站位, 在中部含量较低, 最低含量位于东部的 4 个站位, 东部、中东部含量较低, 中北部、西南部含量较高, 整体上呈现由西往东递减的分布趋势 (图 4a)。

3.2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$

南沙海区 23 个表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值为 $-21.9\text{‰} \sim -18.7\text{‰}$, 平均值为 $-21.0\text{‰} (\pm 0.7\text{‰})$, 整体分布没有显著的空间差异 (表 1)。 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $3.08\text{‰} \sim 6.74\text{‰}$, 平均值为 $5.83\text{‰} (\pm 0.7\text{‰})$, 高值位于东南侧 (35B) 和西北侧 (如 25B) 站位, 最低值出现在东部的 3 个站位 (图 4b, 表 1)。

4 讨论

4.1 南海南沙海区沉积有机质来源

在不同生物来源的有机质中, TOC/TN 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 表现出不同的特征值范围, 因而常用于示踪有机质来源。通常来说, 海洋浮游生物光合作用产生的有机质由于氮含量较高, 其 TOC/TN 值偏低 (5~7 左右); 而陆源生物产生的有机质由于碳含量较高, 其 TOC/TN 值较高 (>12)^[28-30]。此外, 由于同化作用过程中 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏差异, 陆源高等植物和海洋藻类产生的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 截然不同。一般情况下, 陆源 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值为 -26‰ , 海洋 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值为 -21‰ 左右^[31-33]。然而, TOC/TN 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 会受到早期成岩的作用而影响其适用性。由于含氮的蛋白质氨基酸 ($\delta^{13}\text{C}$ 偏重) 比富碳类脂物等 ($\delta^{13}\text{C}$ 偏轻) 更易降解, 因此, 在早期成岩降解过程中, TOC/TN 值升高, 而 TOC、TN 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 降低^[34]。

本文表层沉积物样品中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 与 TOC/TN 呈较好的正相关关系, 而与 TOC (及 TN) 呈现较弱的负相关关系 (图 3b、c), 表明早期成岩降解的影响是不显著的, TOC/TN 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 可用于指示有机质组成来源。此外, 表层沉积物水深和 TOC 含量呈弱正相关 (图 5), 说明研究区水柱降解过程对 TOC 影响不大。

本文所分析的南沙海区 23 个表层沉积物样品 TOC/TN 值为 5.5~7.9 (平均为 6.5 ± 0.6), $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 为 $-21.9\text{‰} \sim -18.7\text{‰}$ (平均为 $-21.0\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$), 均揭示了沉积有机质主要来自海洋浮游植物的贡献, 与前人报道的结果一致。南沙群岛西部海域沉积柱中 TOC/TN 值为 6.8~7.8, 同样指示了沉积有机质主要来自海洋输入^[35]。王博士等^[36]对 ODP1143 沉积柱

表 1 南海南沙海区表层沉积物沉积参数
Table 1 Sedimentary parameters of surface sediments in the Nansha sea area of the South China Sea

站位	位置	水深/m	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	TN /%	$\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}/\text{‰}$	TOC/%	TOC/TN
NS2020-01B	9.50°N、112.90°E	1703	4.8	0.06	-20.1	0.44	7.4
NS2020-02B	10.72°N、112.71°E	3835	6.1	0.13	-21.8	0.71	5.7
NS2020-04B	10.16°N、112.85°E	2038	6.2	0.12	-21.0	0.73	6.1
NS2020-06B	9.87°N、112.61°E	1996	5.9	0.13	-21.3	0.84	6.5
NS2020-07B	9.34°N、113.30°E	2771	6.6	0.12	-20.8	0.74	6.1
NS2020-09B	9.03°N、113.32°E	1525	6.0	0.09	-21.1	0.59	6.3
NS2020-12B	8.43°N、113.68°E	1483	5.9	0.11	-21.5	0.75	6.7
NS2020-14B	8.36°N、112.32°E	1683	5.8	0.15	-21.3	0.91	6.2
NS2020-15B	8.39°N、110.42°E	636	5.3	0.10	-21.5	0.69	6.6
NS2020-19B	8.78°N、110.81°E	1058	5.6	0.13	-21.0	0.81	6.3
NS2020-21B	9.31°N、111.76°E	1211	6.1	0.14	-20.8	0.84	6.1
NS2020-23B	9.32°N、111.76°E	870	5.9	0.12	-21.3	0.76	6.5
NS2020-24B	9.31°N、111.74°E	535	5.3	0.08	-21.3	0.55	6.8
NS2020-25B	10.04°N、111.91°E	3167	6.2	0.16	-21.7	0.97	6.2
NS2020-26B	9.66°N、112.14°E	2559	6.1	0.15	-21.2	0.91	6.2
NS2020-31B	9.91°N、115.54°E	30	3.1	0.06	-18.7	0.47	7.9
NS2020-33B	9.65°N、115.39°E	1214	6.5	0.06	-21.9	0.32	5.5
NS2020-35B	9.76°N、114.80°E	2932	6.7	0.10	-20.7	0.61	6.0
NS2020-37B	10.05°N、115.33°E	1669	6.3	0.07	-20.9	0.47	6.9
NS2020-38B	10.08°N、115.62°E	1320	6.4	0.06	-20.6	0.47	7.2
NS2020-40B	10.86°N、113.76°E	4215	5.6	0.13	-21.5	0.72	5.6
NS2020-41B	10.37°N、113.92°E	1623	5.8	0.09	-20.9	0.58	6.5
NS2020-44B	10.05°N、114.10°E	1670	6.1	0.07	-20.5	0.51	7.1

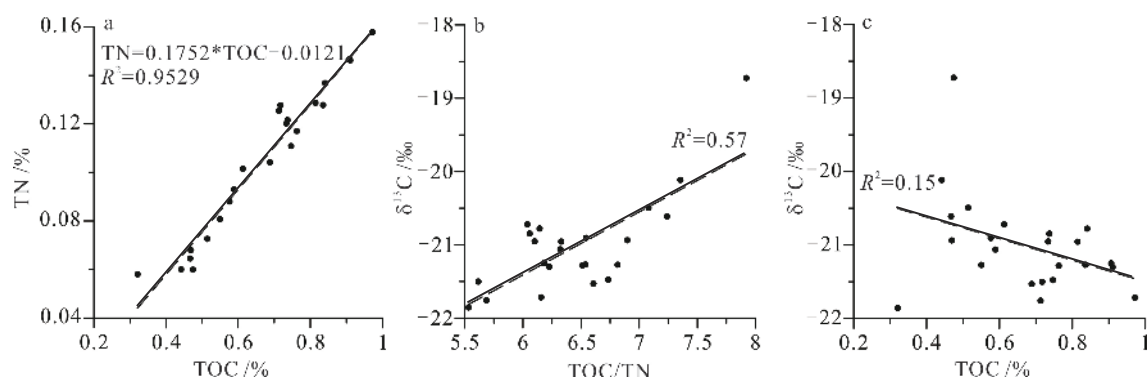


图 3 TOC 与 TN (a) 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 与 TOC/TN (b) 和 TOC (c) 相关性分析

Fig.3 Correlations of TOC vs TN (a), $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ vs TOC/TN (b), and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ vs TOC (c)

的分析发现 TOC/TN 值大多 < 8 (平均为 4.7), 也反映了海源有机质的主要贡献。此外, 其他学者在南海南部的生物标志物研究也显示了海源有机质特

征, 如杨丹等^[37]通过对数个表层沉积物正构烷烃的研究发现 $n\text{-C}_{23}/n\text{-C}_{24+}$ 平均值为 2.2, 揭示了以海洋有机质来源为主; 段毅等^[38]对南沙海域沉积柱中正

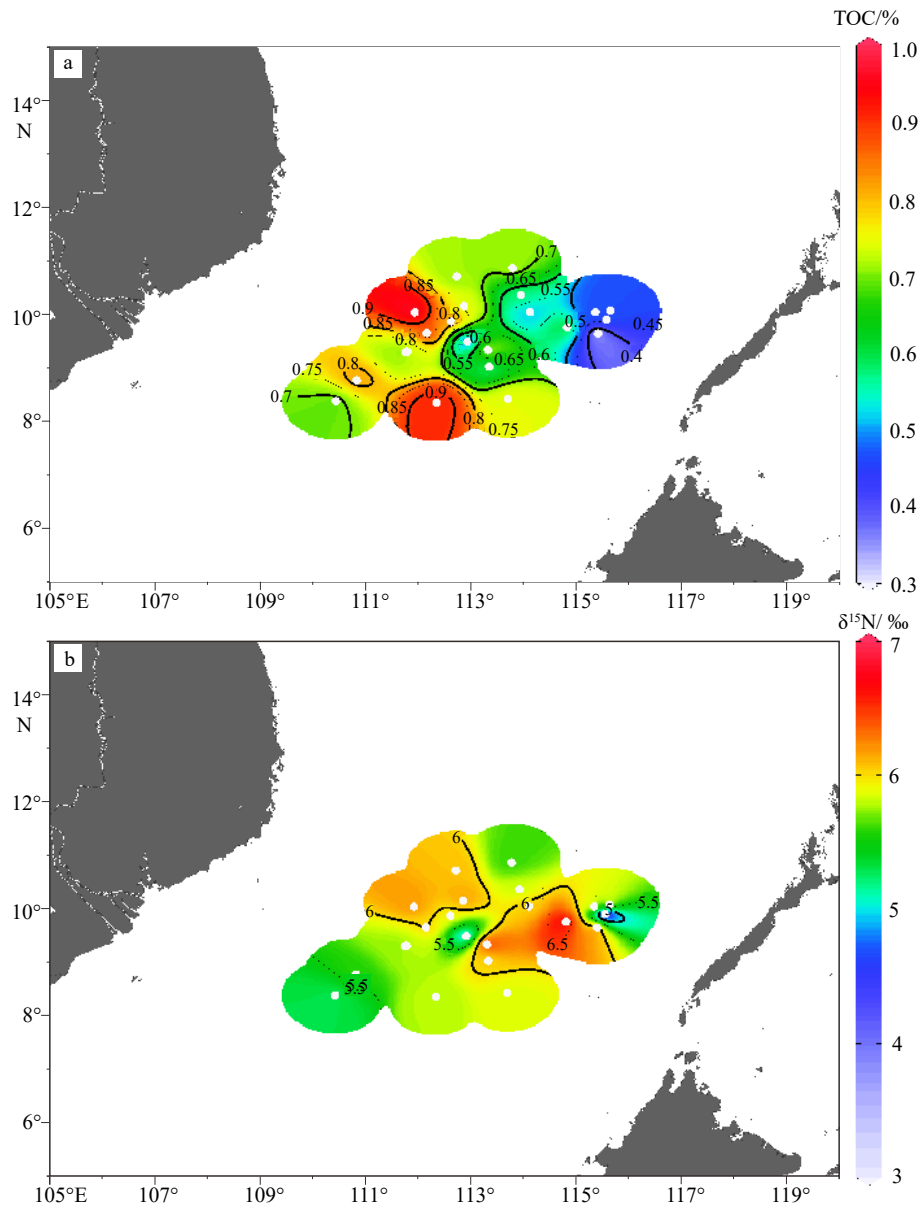


图4 南沙海区表层沉积物 TOC 和 $\delta^{15}N$ 分布图

Fig.4 Distribution of TOC and $\delta^{15}N$ in surface sediments in the Nansha sea area

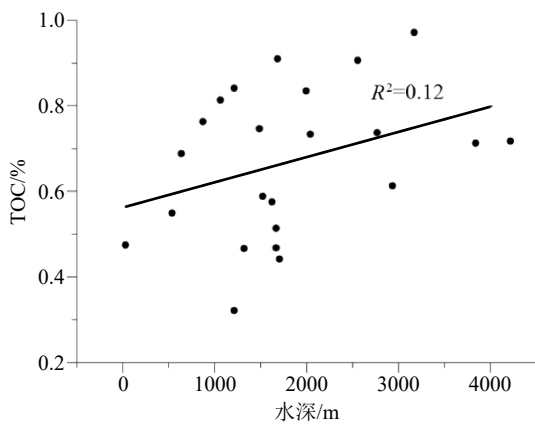


图5 TOC 与水深相关性

Fig.5 Correlation between TOC and water depth

构烷烃、类异戊二烯烷烃、甾烷和藿烷的分析同样表明了沉积有机质主要来自海洋生物贡献。

4.2 南沙海区海洋生产力分布特征及其与季风的关系

如前所述,表层沉积物 TOC/TN 和 $\delta^{13}C_{TOC}$ 均反映了以海源有机质为主,且未受到早期成岩降解作用的影响,因此其 TOC 可用于反映现代上层水体生产力状况 [36,39-40]。前人基于南海南部水柱中沉降颗粒物所计算的生产力数据,发现南沙海区西南部生产力水平略高于东部 [41]。现代生产力研究常用浮游植物生物量的观测数据反映生产力水平,如宋星宇等 [42] 报道中与研究区一致的站点的春夏季浮游

植物数量分布基本与本文中 TOC 含量分布一致;高珊^[43]基于遥感对南沙海区叶绿素实测数据的研究表明,叶绿素浓度高值区出现在加里曼丹岛西北外海域、湄公河口以及越南东部外海域,其反映的生产力分布情况也与本文的研究结果大体吻合。此外,张兰兰等^[44]利用生物硅指标反映南沙海区深水区生产力及上升流状况,研究显示南沙海区中北部硅质生物生产力水平较高,且位于上升流发育分布区内,该学者对南沙海区放射虫丰度的相关研究也显示西南部生物丰度最高^[45],这些研究证实了 TOC 作为南沙海区生产力指标的可用性。

众多研究表明,营养盐是影响浮游植物生长的最主要因素^[46-49]。南沙海区毗邻中南半岛、婆罗洲和巴拉望,入海河流会带来大量的陆源营养盐(图 2b 中的低盐区);此外,东亚季风系统可以通过影响上层水体结构来调控海洋营养盐的分布和运移,比如夏季越南上升流(图 2a)、冬季吕宋上升流和水体混合都会把深部的高通量营养盐带到透光层中促进浮游植物的勃发。下面我们将通过现代表层沉积物 TOC 的空间分布特征初步探讨何种来源(如陆源或海源、夏季上升流或冬季上升流/混合)的营养物质主导了南沙海区上层水体生产力分布。

如图 4a 所示,表层沉积物 TOC 含量呈现由西往东逐渐变低的分布趋势,暗示了在西南夏季风的驱动下,表层环流将越南上升流中的高海洋营养盐和湄公河三角洲中的高陆源营养盐输运至南沙海区,随着向东运移距离的不断增加,输送的营养物质逐渐变少,浮游植物生产力越来越低,表层沉积物 TOC 越来越少。南沙海区东部 4 个站位记录了最低的 TOC 含量(图 4a),表明婆罗洲-巴拉望河流陆源营养盐的影响很弱,极可能受到(反)气旋的影响导致营养盐常年在近岸水域循环(图 1)。此外,东部 4 个站位的低 TOC 特征也说明了冬季东北向(吕宋上升流和水体混合)丰富的营养物质远远未影响该区域上层水体生产力。据此,我们认为西南夏季风很可能是南沙海区生产力的主要控制因素,这与前人的众多结果是一致的。比如,陆均等^[50]通过对现代水体和表层沉积物中硅藻的研究认为西南夏季风是影响硅藻(主要初级生产力贡献者)丰度的主要因素;ODP1143 沉积柱中的蛋白石^[13,51]和硅藻^[52]等研究也揭示了夏季上升流对研究站位上层水体生产力的关键控制机制。

4.3 南沙海区沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 分布特征及其指示意义

南海氮同位素记录着海洋氮循环的关键信息,

为了解地质历史时期海洋环境演变及现代生物地球化学循环提供了很好的研究工具,过去对南沙海区氮循环的研究并不深入,但是近年来,由于人类活动对海洋生态系统的干预,氮循环对环境变化的响应引起了人们的重视^[53]。

前人在南海(尤其南海北部)的研究发现沉积物 TN 中无机氮的比例非常高^[54-55],这在很大程度上制约了沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 作为上层海水 $\delta^{15}\text{N}$ 代用指标的有效性。南沙海区表层沉积物 TOC 和 TN 含量呈现非常强的线性相关($R^2=0.95$),且 TN 在 TOC 上的截距为负(图 3a),反映了 TN 主要来自有机氮的贡献。进一步结合 TOC 指示的海源有机质特征,沉积物 TN 主要反映了海洋有机氮的输入,进而可以指示上层海水 $\delta^{15}\text{N}$ 信息。此外,表层沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 分布特征也暗示了陆源无机氮的影响可以忽略不计。通常来说,陆源无机氮 $\delta^{15}\text{N}$ 远远低于海洋有机氮 $\delta^{15}\text{N}$ ^[54-55],而某些近岸沉积物样品中 $\delta^{15}\text{N}$ 却显示了高值特征(如 33B 的 $\delta^{15}\text{N}=6.5\%$,图 4b)。

海底沉积物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与氮循环密切相关,氮的生物地球化学循环主要包括生物固氮作用、氨的同化作用、硝化作用、反硝化作用、硝酸根的同化作用以及厌氧氨氧化作用,不同的氮循环过程会导致不同的同位素分馏值, $\delta^{15}\text{N}$ 的高值通常与反硝化作用有关, $\delta^{15}\text{N}$ 的低值则与固氮作用有关^[56],因此可以根据 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间变化,同时结合生产力分布,探讨南海南部氮循环过程。南沙海区西部的 $\delta^{15}\text{N}$ 值略高,高值位于西北侧及东南侧(图 4b),可能与反硝化作用有关,然而东部沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 普遍偏轻,可能是由于较低的生产力导致了固氮作用增强($\delta^{15}\text{N}$ 变小)^[12],因为河流陆源输入对该海域影响极其微弱(见上文)。此外, $\delta^{15}\text{N}$ 也可以作为上升流指标^[57],高生产力使浮游生物大量繁殖,导致真光层缺氧,形成低氧环境,发生反硝化作用,从而导致 $\delta^{15}\text{N}$ 值偏高,但是南海整体上属于寡营养海区,因此其指示作用并不高。

5 结论

(1) TOC/TN(平均为 6.5 ± 0.6) 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ (平均为 $-21.0\pm 0.7\%$) 揭示了 TOC 主要来自海源贡献,并且未受到显著的早期成岩降解作用的影响,因而可以指示上层水体生产力状况。

(2) TOC 整体上呈现由西至东逐渐降低的趋势,暗示了西南夏季风对南沙海区上层水体营养盐及其驱动的浮游植物生产力的主要控制机制。

(3) TN 主要来自海洋有机氮输入, 因此沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 可用于反演上层海水 $\delta^{15}\text{N}$ 相关信息。

(4) 南沙海区西北侧及东南侧 $\delta^{15}\text{N}$ 值略高, 可能与反硝化作用有关, 然而东部沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 普遍偏轻, 可能是由于较低的生产力导致了固氮作用增强。

本文对南沙海区表层沉积物基础沉积参数的研究为进一步探讨、反演地质历史时期碳、氮循环过程及夏季风演化提供了重要的参考依据, 尤其是南沙西部海域 TOC 的沉积记录可用于反映海水表层生产力及夏季风相关信息, 同时 $\delta^{15}\text{N}$ 的沉积记录在指示上层水体氮循环过程中有很好的应用潜力。今后通过基础沉积参数, 并与其他独立指标体系(如生物标志物)相结合, 有望在南沙海区古环境和古气候研究领域取得新突破。

致谢: 感谢中科院南海所岛礁中心南沙 2020 共享航次以及“实验 1”科考人员和船员在表层沉积物样品采集中提供的帮助; 广东海洋大学海洋与气象学院陈淳青分析测试沉积物基础参数。衷心感激两位匿名审稿专家提出的修改意见!

参考文献 (References)

- [1] 汪品先, 翦知湮, 刘志伟. 南沙海区盛冰期的气候问题[J]. *第四纪研究*, 1996, 16(3): 193-201. [WANG Pinxian, JIAN Zhimin, LIU Zhiwei. The last glacial maximum climate problem in the sea area of the nansha islands, South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 1996, 16(3): 193-201.]
- [2] 李文宝, 王汝建, 万随. 沉积过程中有机碳及 *Globigerinoides ruber* 氧、碳同位素变化特征: 以南海南部为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(4): 730-739. [LI Wenbao, WANG Rujian, WAN Sui. Changes of TOC and $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ from *Globigerinoides ruber* during the deposition process in the Southern South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4): 730-739.]
- [3] 蔡观强, 彭学超, 张玉兰. 南海沉积物物质来源研究的意义及其进展[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 113-121. [CAI Guanqiang, PENG Xuechao, ZHANG Yulan. The significances of and advances in the study of sediment sources in the South China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(1): 113-121.]
- [4] 翦知湮, 王律江, KIENAST M. 南海晚第四纪表层古生产力与东亚季风变迁[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(1): 32-40. [JIAN Zhimin, WANG Lujiang, KIENAST M. Late Quaternary surface paleoproductivity and variations of the east Asian monsoon in the South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(1): 32-40.]
- [5] 陈木宏, 颜文, 涂霞, 等. 南海西南部海区近200ka来的动力环境与东亚古季风[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21(3): 38-46. [CHEN Muhong, YAN Wen, TU Xia, et al. Dynamical environment in southwestern South China Sea and its relation to east Asian paleomonsoon since 200ka B. P. [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21(3): 38-46.]
- [6] 梅西, 张训华, 郑洪波, 等. 南海南部120ka以来元素地球化学记录的东亚夏季风变迁[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(2): 134-141. [MEI Xi, ZHANG Xunhua, ZHENG Hongbo, et al. Element geochemistry record in Southern South China Sea sediments during the past 120 ka and its implications for East Asian summer monsoon variation [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(2): 134-141.]
- [7] Li L, Li Q Y, He J, et al. Biomarker-derived phytoplankton community for summer monsoon reconstruction in the western South China Sea over the past 450 ka [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 122: 118-130.
- [8] He J, Zhao M X, Wang P X, et al. Changes in phytoplankton productivity and community structure in the northern South China Sea during the past 260 ka [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 392: 312-323.
- [9] Zhang H R, Liu C L, Jin X B, et al. Dynamics of primary productivity in the northern South China Sea over the past 24, 000 years [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17(12): 4878-4891.
- [10] 迟光希. 南海南部晚中新世以来沉积物源区及古环境分析[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2020. [CHI Guangxi. Sedimentary source area and paleoenvironment analysis since Late Miocene in the southern South China Sea [D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [11] Jia G D, Peng P, Fang D Y. Burial of different types of organic carbon in core 17962 from South China Sea since the last glacial Period [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58(1): 93-100.
- [12] Dong L, Li Z Y, Jia G D. Archaeal ammonia oxidation plays a part in Late Quaternary nitrogen cycling in the South China Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 509: 38-46.
- [13] 王汝建, 李建. 南海ODP 1143站第四纪高分辨率的蛋白石记录及其古生产力意义[J]. *科学通报*, 2003, 48(4): 363-367. [WANG Rujian, LI Jian. Quaternary high-resolution opal record and its paleoproductivity implication at ODP Site 1143, southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 363-367.]
- [14] Jian Z M, Huang B Q, Kuhnt W, et al. Late Quaternary upwelling intensity and East Asian monsoon forcing in the South China Sea [J]. *Quaternary Research*, 2001, 55(3): 363-370.
- [15] Li G, Rashid H, Zhong L F, et al. Changes in deep water oxygenation of the South China Sea since the last glacial Period [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(17): 9058-9066.
- [16] 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 163-170. [HUANG Yongjian, WANG Chengshan, WANG Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163-170.]
- [17] 陈建芳, 李宏亮, 金海燕, 等. 南海若干古生产力替代指标探讨[J]. *海洋学研究*, 2010, 28(1): 1-10. [CHEN Jianfang, LI Hongliang, JIN Haiyan, et al. A preliminary discussion and evaluation of paleo-production proxies in the South China Sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2010, 28(1): 1-10.]
- [18] 张洪瑞, 刘传联, 梁丹. 热带海洋生产力: 现代过程与地质记录[J].

- 地球科学进展, 2016, 31(3): 277-285. [ZHANG Hongrui, LIU Chuanlian, LIANG Dan. Tropical marine productivity: the modern progress and paleoproductivity records [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(3): 277-285.]
- [19] Fang G H, Fang W D, Yue F, et al. A survey of studies on the South China Sea Upper ocean circulation [J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, 37(1): 1-16.
- [20] 陈法锦, 陈建芳, 金海燕, 等. 南海表层沉积物与沉降颗粒物中有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 对比研究及其古环境再造意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 340-345. [CHEN Fajin, CHEN Jianfang, JIN Haiyan, et al. Correlation of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in surface sediments with sinking particulate matter in South China Sea and implication for reconstructing paleo-environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 340-345.]
- [21] 俞宙菲, 李保华, 李宏亮, 等. 现代浮游有孔虫对南海西南部上升流的响应[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(3): 801-810. [YU Zhoufei, LI Baohua, LI Hongliang, et al. Response of modern planktonic foraminifera to the upwelling activity in the southwestern South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 801-810.]
- [22] Cheng X R, Huang B Q, Jian Z M, et al. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: A present-LGM comparison [J]. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54(1-2): 125-139.
- [23] 宋金明, 王启栋. 近40年来对南海化学海洋学研究的新认知[J]. *热带海洋学报*, 2021, 40(3): 15-24. [SONG Jinming, WANG Qidong. New understanding about Chemical Oceanography in the South China Sea since 1980 [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(3): 15-24.]
- [24] 乔培军, 邵磊, 杨守业. 南海西南部晚更新世以来元素地球化学特征的古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 59-65. [QIAO Peijun, SHAO Lei, YANG Shouye. The paleoenvironmental significance of the character of the element geochemistry in the southwestern South China Sea since Late Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 59-65.]
- [25] 刘军谋. 南海南沙群岛区域的地质勘探概况[J]. *海洋地质信息通报*, 1994(3): 19-21. [LIU Junmou. General situation of geological exploration in the the Nansha Islands area of the South China Sea [J]. *Marine Geological Information Bulletin*, 1994(3): 19-21.]
- [26] 周胜男, 施祺, 周桂盈, 等. 南沙群岛珊瑚礁洲地貌特征[J]. *海洋科学*, 2019, 43(6): 48-59. [ZHOU Shengnan, SHI Qi, ZHOU Guiying, et al. Geomorphic features of coral shingle cays in the Nansha Islands [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(6): 48-59.]
- [27] Zweng M M, Reagan J R, Antonov J I, et al. World ocean atlas 2013. Volume 2: Salinity[R]. U. S. Department of Commerce, NOAA, 2013.
- [28] Stax R, Stein R. Long-term changes in the accumulation of organic carbon in Neogene sediments, Ontong Java Plateau[M]//Berger W H, Kroenke L W, Mayer L A, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1993.
- [29] Bordovskiy O K. Accumulation of organic matter in bottom sediments [J]. *Marine Geology*, 1965, 3(1-2): 33-82.
- [30] Emerson S, Hedges J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments [J]. *Paleoceanography*, 1988, 3(5): 621-634.
- [31] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5-6): 213-250.
- [32] 韦海伦, 蔡进功, 王国力, 等. 海洋沉积物有机质赋存的多样性与物源指标的多疑性综述[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1024-1033. [WEI Hailun, CAI Jingong, WANG Guoli, et al. The diversity of organic matter in marine sediments and the suspiciousness of source parameters: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1024-1033.]
- [33] Cai D L, Shi X F, Zhou W J, et al. Sources and transportation of suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea: Evidence from stable carbon isotopes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(S1): 21-29.
- [34] 雷菲. 百余年来珠江口外浅海区的有机碳埋藏历史[D]. 中国科学院大学硕士学位论文, 2011. [LEI Fei. The organic carbon burial history in costal waters outside the pearl estuary for the last 100 years[D]. Master Dissertation of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [35] 高学鲁, 陈绍勇, 马福俊, 等. 南沙群岛西部海域两柱状沉积物中碳和氮的分布和来源特征及埋藏通量估算[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(3): 38-44. [GAO Xuelu, CHEN Shaoyong, MA Fujun, et al. Distribution and source characteristics of carbon and nitrogen and their burial fluxes in two core sediments from western Nansha Islands sea area [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(3): 38-44.]
- [36] 王博士, 赵泉鸿, 翦知湔. 南海南部中上新世以来沉积有机碳与古生产力变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 73-79. [WANG Boshi, ZHAO Quanhong, JIAN Zhimin. Changes of organic carbon and paleoproductivity in the Southern South China Sea since Middle Pliocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(2): 73-79.]
- [37] 杨丹, 姚龙奎, 王方国, 等. 南海现代沉积物中正构烷烃碳分子组合特征及其指示意义[J]. *海洋学研究*, 2006, 24(4): 29-39. [YANG Dan, YAO Longkui, WANG Fangguo, et al. The molecular assemblage features of n-alkanes in modern sediments from the South China Sea and their significance [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2006, 24(4): 29-39.]
- [38] 段毅, 罗斌杰, 徐雁前, 等. 南沙海洋沉积物中生物标志化合物的组成及地化意义[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(3): 258-263. [DUAN Yi, LUO Binjie, XU Yanqian, et al. Composition and geochemical significance of biomarkers in marine sediments from Nansha Islands Waters, the South China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27(3): 258-263.]
- [39] 吴鹏. 东、黄海典型海域初级生产力和氮、磷营养要素的近代沉积记录[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2007. [WU Peng. Recent sedimentary records of primary production and nutrients in the typical areas of the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2007.]
- [40] 贾国东, 彭平安, 房殿勇, 等. 南海南部约30ka来沉积有机质的生物输入特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(1): 7-11. [JIA Guodong, PENG Ping'an, FANG Dianyong, et al. The characteristics of biological input of the sedimentary organic matter in Southern South China Sea for the last 30ka years [J]. *Marine Geology & Quaternary*

- Geology*, 2001, 21 (1): 7-11.]
- [41] 李文宝, 王汝建, 陈建芳, 等. 南海表层沉积物与水柱中沉降颗粒物对比研究及其古环境再造意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28 (4): 73-83. [LI Wenbao, WANG Rujian, CHEN Jianfang, et al. Correlation of surface sediments with sinking particulate matters in the South China Sea and implication for reconstructing paleoenvironment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28 (4): 73-83.]
- [42] 宋星宇, 黄良民, 钱树本, 等. 南沙群岛邻近海区春夏季浮游植物多样性研究[J]. *生物多样性*, 2002, 10 (3): 258-268. [SONG Xingyu, HUANG Liangmin, QIAN Shuben, et al. Phytoplankton diversity in waters around Nansha Islands in spring and summer [J]. *Biodiversity Science*, 2002, 10 (3): 258-268.]
- [43] 高姗. 基于遥感的南海初级生产力时空变化特征与环境影响因素研究[D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 2008. [GAO Shan. Spatial and temporal distribution of ocean primary productivity and its relation with oceanic environments in the South China Sea based on remote sensing [D]. Master Dissertation of Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008.]
- [44] 张兰兰, 陈木宏, 向荣, 等. 南海南部表层沉积物中生物硅的分布及其环境意义[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26 (3): 24-29. [ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, XIANG Rong, et al. Distribution of biogenic silica in surface sediments from southern South China Sea and its environmental significance [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26 (3): 24-29.]
- [45] 张兰兰, 陈木宏, 陆钧, 等. 南海南部上层水体中多孔放射虫的组成与分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24 (3): 55-64. [ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, LU Jun, et al. Living polycystine radiolarian fauna in Upper water column of Southern South China Sea and its distribution [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24 (3): 55-64.]
- [46] 杨东方, 陈生涛, 胡均, 等. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. *海洋环境科学*, 2007, 26 (3): 201-207. [YANG Dongfang, CHEN Shengtao, HU Jun, et al. Magnitude order of the effect of light, water temperature and nutrients on phytoplankton growth [J]. *Marine Environmental Science*, 2007, 26 (3): 201-207.]
- [47] 彭欣, 宁修仁, 孙军, 等. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应[J]. *生态学报*, 2006, 26 (12): 3959-3968. [PENG Xin, NING Xiuren, SUN Jun, et al. Responses of phytoplankton growth on nutrient enrichments in the northern South China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (12): 3959-3968.]
- [48] 杨东方, 高振会, 孙培艳, 等. 胶州湾水温和营养盐硅限制初级生产力的时空变化[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24 (2): 203-212. [YANG Dongfang, GAO Zhenhui, SUN Peiyan, et al. Spatial and temporal variations of the primary production limited by nutrient silicon and water temperature in the Jiaozhou bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24 (2): 203-212.]
- [49] 杨东方, 于子江, 张柯, 等. 营养盐硅在全球海域中限制浮游植物的生长[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27 (5): 547-553. [YANG Dongfang, YU Zijiang, ZHANG Ke, et al. The limitation of nutrient silicon for phytoplankton growth in the global marine areas [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27 (5): 547-553.]
- [50] 陆钧, 陈木宏, 陈忠. 南海南部现代水体与表层沉积硅藻的分布特征[J]. *科学通报*, 2006, 51 (S2): 76-80. [LU Jun, CHEN Muhong, CHEN Zhong. Distribution of diatoms in the water and surface sediments of southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (S2): 76-80.]
- [51] 李建如, 王汝建, 李保华. 南海南部12Ma以来的蛋白石堆积速率与古生产力变化[J]. *科学通报*, 2002, 47 (7): 5936-598. [LI Jianru, WANG Rujian, LI Baohua. Variations of opal accumulation rates and paleoproductivity over the past 12 Ma at ODP Site 1143, southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (7): 5936-598.]
- [52] 陆钧, 陈木宏, 王汝建, 等. 南海南部ODP1143站晚中新世沉积硅藻记录[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22 (5): 1-7. [LU Jun, CHEN Muhong, WANG Rujian, et al. Late miocene diatom records of ODP site 1143 in Southern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22 (5): 1-7.]
- [53] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle [J]. *Science*, 2010, 330 (6001): 192-196.
- [54] Wang T T, Ravelo A C, Ren H J, et al. Nitrogen isotope variations in the Northern South China Sea since marine isotopic Stage 3: reconstructed from foraminifera-bound and bulk sedimentary nitrogen [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2018, 33 (6): 594-605.
- [55] Kienast M, Higginson M, Mollenhauer G, et al. On the sedimentological origin of down-core variations of bulk sedimentary nitrogen isotope ratios [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20 (2): PA2009.
- [56] Galbraith E D, Kienast M, The NICOPP Working Group Members. The acceleration of oceanic denitrification during deglacial warming [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6 (7): 579-584.
- [57] Gaye B, Nagel B, Dähnke K, et al. Amino acid composition and $\delta^{15}\text{N}$ of suspended matter in the Arabian Sea: implications for organic matter sources and degradation [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10 (11): 7689-7702.