



近9 ka以来泰国湾高分辨的生物硅记录及其古生产力意义

刘璇, 陈敏, 戚洪帅, Apitida Wasuwatcharapong, Apichai Kanchanapant, 王承涛, 许亚

High-resolution record of biogenic silica and its paleoproductivity implication in the Chanthaburi coast, Gulf of Thailand over the last 9 000 aBP

LIU Xuan, CHEN Min, QI Hongshuai, Apitida Wasuwatcharapong, Apichai Kanchanapant, WANG Chengtao, and XU Ya

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023070401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西北孟加拉湾中更新世早期的硅质生物生产力变化

Changes in siliceous paleoproductivity during the early Middle Pleistocene in the Northwest Bay of Bengal

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 83–93

70万年以来西太平洋暖池区硅质生产力记录及其气候效应

Silicic productivity record in the Western Pacific Warm Pool in the last 700 ka and its climatic effect

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 30–37

南极罗斯海末次冰盛期以来的古生产力变迁

Evolution of paleoproductivity in the Antarctica Ross Sea since the Last Glacial Maximum

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 109–120

南海琼东上升流区过去1 900年海洋生产力记录

A 1 900-year record of marine productivity in the upwelling area of east continental shelf of Hainan Island, South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 97–106

MIS 5期以来南极威德尔海生产力演化及其古海洋意义

Productivity evolution in the antarctic Weddell Sea and its paleoceanographic implication since MIS 5

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 144–156

晚更新世以来南极罗斯海陆坡沉积物岩芯常量元素地球化学特征及其古环境意义

Geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of major elements in sediments from the continental slope of the Ross Sea, Antarctica since late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 1–11



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘璇, 陈敏, 戚洪帅, 等. 近 9 ka 以来泰国湾高分辨的生物硅记录及其古生产力意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 121-129.
LIU Xuan, CHEN Min, QI Hongshuai, et al. High-resolution record of biogenic silica and its paleoproductivity implication in the Chanthaburi coast, Gulf of Thailand over the last 9 000 aBP[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 121-129.

近 9 ka 以来泰国湾高分辨的生物硅记录及其古生产力意义

刘璇^{1,2}, 陈敏^{1,2,3}, 戚洪帅¹, Apitida Wasuwatcharapong⁴, Apichai Kanchanapant⁴, 王承涛¹, 许亚¹

1. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005
2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306
3. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 厦门 361005
4. 泰国自然资源与环境部矿产资源局, 曼谷 泰国 10400

摘要:以 2017 年在泰国湾尖竹汶海岸获取的 LSC05 和 WLE08 沉积物柱样为研究对象, 对其进行了高分辨率的生物硅和有机碳分析, 结合 AMS¹⁴C 测年结果, 探讨了 9 ka 以来泰国湾古生产力的变化情况。结果表明, LSC05 和 WLE08 柱样中的生物硅含量分别为 0.41%~1.56% (平均值为 0.88%) 和 0.60%~1.52% (平均值为 1.11%), 属于南海中的低值海域, 主要受到区域内无上升流导致的低硅质骨骼和壳体供给量和陆源物质输入稀释的影响。将生物硅含量曲线与南亚夏季风替代指标曲线和南海区域温度异常值曲线进行对比发现, 生物硅含量较高的时期所对应的海表初级生产力高值期可能是由于夏季风阶段性势力较强导致, 有机碳含量曲线印证了对夏季风的响应。此外, 生物硅含量曲线与格陵兰冰芯、董歌洞石笋以及阿曼 Qunf 岩洞石笋记录的对比结果显示, 泰国湾古生产力的变化趋势与全球尺度的环境变化具有相关性, 反映了泰国湾古环境变化对全球环境变化的响应。

关键词:生物硅; 古生产力; 古气候; 全球气候变化; 泰国湾

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023070401

High-resolution record of biogenic silica and its paleoproductivity implication in the Chanthaburi coast, Gulf of Thailand over the last 9 000 aBP

LIU Xuan^{1,2}, CHEN Min^{1,2,3}, QI Hongshuai¹, Apitida Wasuwatcharapong⁴, Apichai Kanchanapant⁴, WANG Chengtao¹, XU Ya¹

1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China
4. Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok 10400, Thailand

Abstract: Based on the LSC05 and WLE08 core samples obtained from the Chanthaburi coast of the Gulf of Thailand in 2017, the biogenic silica, total organic carbon, and AMS¹⁴C dating were analyzed. High-resolution data including grain size and biogenic silica content were obtained to explore the changes of paleoproductivity in the Gulf of Thailand since 9 ka. Results show that the contents of biogenic silica in the samples were 0.41%~1.56% (on average of 0.88%) for LSC05 and 0.60%~1.52% (on average of 1.11%) for WLE08, belonging to the low-value sea area of the South China Sea. This area was mainly affected by low supply of siliceous bones caused by the absence of upwelling in the study area, and the input dilution of regional inland-sourced materials. By comparing the biogenic silica content curve with the South Asian summer monsoon substitution index curve and the temperature anomaly curve in the South China Sea, we found that the high-value period of sea surface primary productivity corresponds to the period with high biogenic silica content, which might be due to the strong phased force of the summer monsoon. The organic carbon content curve confirmed the reconstruction results of paleoproductivity by biogenic silica. In addition,

资助项目:福建省自然科学基金计划资助项目(2023J011378); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2019018, 海三科 2020017); 国家重点研发计划资助(2019YFE0124700); 东盟海上合作基金“海洋珍稀动物保护合作研究”项目

作者简介:刘璇(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋地质研究, E-mail: liuxuan5531@126.com

通讯作者:陈敏(1980—), 女, 正高级工程师, 主要从事海洋地质和古海洋学研究, E-mail: chenmin@tio.org.cn

收稿日期:2023-07-04; **改回日期:**2023-09-24. 张现荣编辑

comparison between the biogenic silica content curve and the records of Greenland ice core, Dongge cave stalagmite, and Qunf cave in Oman stalagmite showed that the trend of paleoproductivity in the Gulf of Thailand was significantly correlated with the global environmental changes, reflecting the response of paleoenvironmental changes in the Gulf of Thailand to global environmental changes.

Key words: biogenic silica; paleoproductivity; paleoclimate; global climate change; gulf of Thailand

生物硅(BSi), 又称生物蛋白石, 主要由上层水体中的硅质浮游生物(如硅藻、放射虫、硅鞭藻等)死亡后的骨骼或细胞壁堆积而成^[1-2], 是海洋沉积物中重要的生源物质组成部分^[3], 其含量与表层水体中的生物量密切相关^[4]。在上述硅质生物种群中, 硅藻遍布于各类水体, 为海洋提供了 40% 左右的初级生产力^[5-6], 是海洋 BSi 中最主要的组成部分^[7-8]。因此, 沉积物 BSi 的时空分布常作为古海洋初级生产力的变化指标^[9]。由于生产力的波动与表层海水营养物质的供应量关系密切, 因此可以将 BSi 沉积记录与可能导致海水营养盐供给变化的大尺度气候和海洋过程(如季风、洋流等)联系起来, 作为重建过去海洋环境变化的重要工具^[10-12]。

南海是西太平洋最大的边缘海, 地理位置独特, 其环境受东亚季风的强烈影响, 是追溯冰期-间冰期旋回中东亚季风演变历史的热点区域之一^[13-15]。泰国湾(Gulf of Thailand), 旧称暹罗湾, 是南海重要的组成部分, 位于南海西南部的巽他陆架之上, 处于太平洋及其附属海的最西端, 是南海最大的海湾之一, 为典型的半封闭型陆架海, 其面积约 35 000 km²。泰国湾属于热带季风气候, 其风向和海流与亚洲季风关系密切^[16-17]。在西南季风影响的 5—10 月, 该海域沿岸流呈顺时针运动, 而在受东北季风影响的 11 月至次年 2 月沿岸流则呈逆时针运动^[18]。近年来有关研究表明, 南海古生产力的变化与亚洲季风的周期性变化具有密切联系^[10, 12, 19-22], 然而这些研究主要集中在南海海盆和北部沿岸地区, 有关南海西部和西南部, 尤其是泰国湾的古生产力研究则少有涉及。因此本研究选取位于泰国湾北部沿岸海域的两根沉积物柱状样 LCS05 和 WLE08, 通过对柱样中 BSi 含量的分析, 探讨近 9 ka 以来泰国湾古生产力的状况。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所用的 LCS05 和 WLE08 沉积柱样, 系由自然资源部第三海洋研究所和泰国自然资源与环境部矿产资源局合作于 2017 年 5 月 12 日在泰国湾尖竹汶海岸通过重力及回旋取样结合的方法取

得。其中, LCS05 柱样(12°21'29"N、101°58'36"E)长 1.58 m, 水深 18 m; WLE08 柱样(12°17'28"N、102°10'18"E)长 1.98 m, 水深 13 m^[17], 具体采样位置见图 1。在自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质实验室以 2 cm 连续间隔对两根柱样进行分样。LCS05 柱样共挑选 27 个样品进行 BSi(Si)和有机碳(TOC)测试分析; WLE08 柱样共挑选 33 个样品进行 BSi(Si)和有机碳(TOC)测试分析。有机碳(TOC)分析在自然资源部第三海洋研究所完成; BSi 分析工作在中国海洋大学海洋地球科学学院地球化学实验室完成。

1.2 生物硅分析

BSi 测试采用钼酸铵分光光度法测定萃取物中溶解的二氧化硅^[23]。对沉积物样品研磨烘干(65℃烘 48 h, 106℃下烘 2 h), 称取 130~140 mg 干样于 50 mL 塑料离心管中, 加 5 mL 10% 的 H₂O₂ 溶液, 混匀后静置 30 min。加 5 mL 1:9 的 HCL 混匀, 静置 30 min。加 20 mL 去离子水, 离心 20 min, 之后对样品进行干燥。干燥后的样品加 40 mL 浓度为 2 mol/L 的 Na₂CO₃ 提取液, 放置在 85℃水浴中加热提取。之后每隔 1 h 取出离心, 取 125 μL 上清液用于测定 Si 浓度, 连续提取 8 h。利用分光光度法测定提取液中的硅^[24-25]。测得的提取液中的 Si 含量数据和对应的提取时间点作图, 曲线直线部分的反向延长线与 Y 轴的交点为样品的 BSi 含量^[23-24]。全过程标准偏差控制在 5% 以内。

1.3 AMS¹⁴C 测年分析

根据粒度测试结果选取 LCS05 柱样的 4 个层位和 WLE08 柱样的 3 个层位中的贝壳或植物碎屑样品进行 AMS¹⁴C 测试。样品送美国 BETA 实验室完成, BETA 实验室已对原始测年数据进行了日历年龄校正, 海洋碳库效应校正由于附近没有已知点故选取全球海洋修正, 具体测试结果见表 1。本文年代采用日历年。

1.4 有机碳测试

有机碳(TOC)分析采用 Vario Isotope cube-IsoPrime 100 型(Elementar)元素分析-稳定同位素比

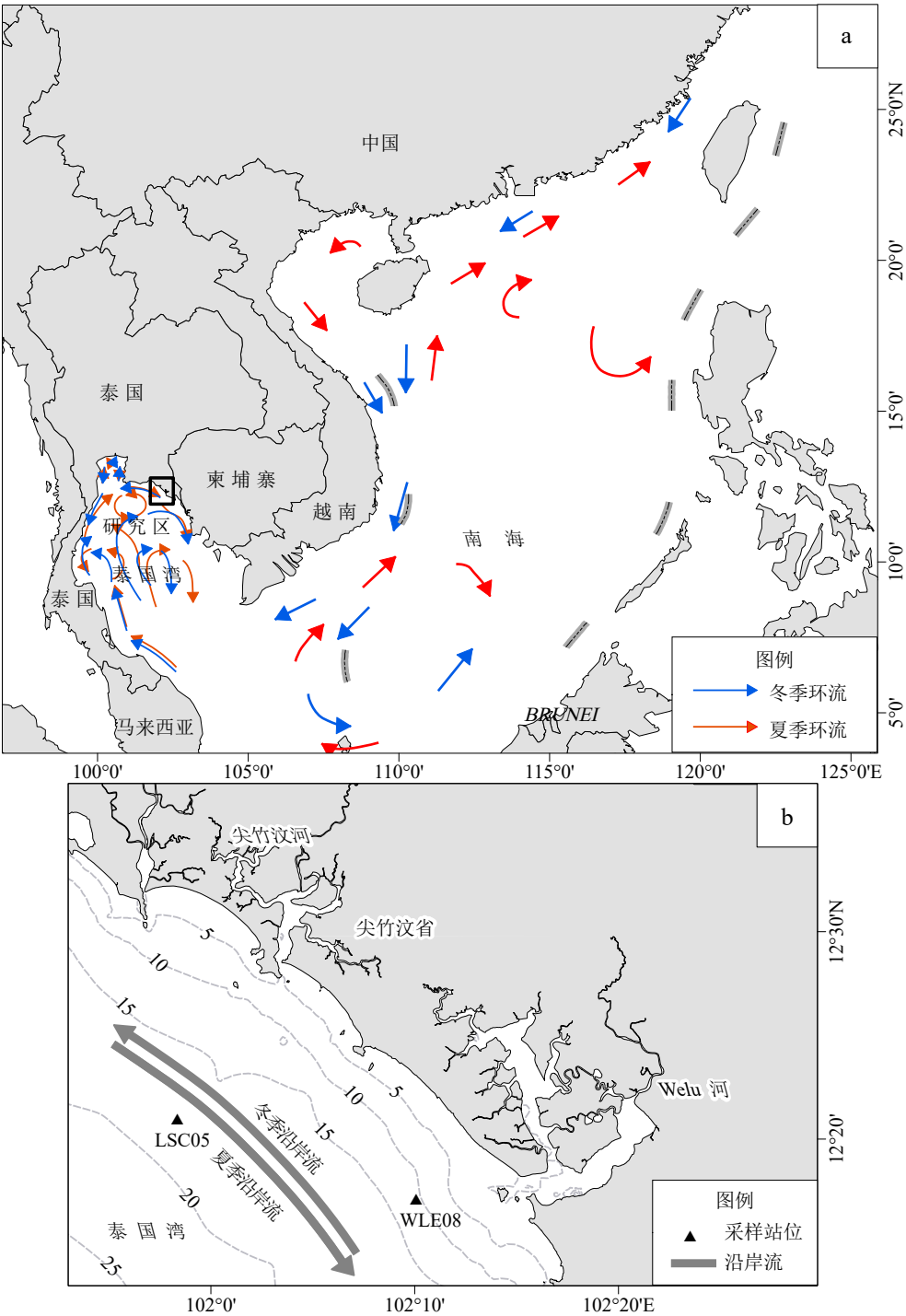


图 1 LSC05、WLE08 柱样调查站位的地理位置以及表层流分布情况

A: 南海及主要洋流^[26], B: 研究区及主要洋流。

Fig.1 The location of Cores LSC05 and WLE08 and the surface currents in the Gulf of Thailand

A: South China Sea and main currents^[26], B: Study area and main currents.

值质谱联用仪(EA-IRMS)完成。前处理取一定量的沉积物样品,加入 4 mol/dm³ 的 HCl 至过量,反应 24 h。用去离子水洗酸至中性,将样品置于烘箱内 60 ℃ 烘干,恒重后称量,研磨成粉末,过 60 目的筛

子,密封备用。用天平准确称取适量固体样品,放入锡箔杯中并紧密包裹成小球状,依次放进 96 孔板内测定。

表 1 LSC05 和 WLE08 柱样^[17]AMS¹⁴C 测年结果
Table 1 AMS¹⁴C dating of Cores LSC05 and WLE08^[17]

柱样名称	样品深度/cm	BETA实验室编号	测年材料	AMS ¹⁴ C测量年代/ (aBP±1σ)	日历年龄/cal. aBP
LSC05	8	Beta-509448	贝壳	3090±30	2857
	18	Beta-509449	贝壳	3210±30	3024
	100~102	Beta-509450	植物碎屑	6880±30	7726
	152~154	Beta-509451	植物碎屑	8480±30	9499
WLE08	12~14	Beta-509452	贝壳	350±30	—
	96~98	Beta-509453	贝壳	1550±30	1109
	184~186	Beta-509454	贝壳	18820±30	1373

2 结果与讨论

2.1 年代地层

LSC05、WLE08 柱样的 AMS¹⁴C 测年数据如表 1, 两根柱样的年龄与深度模型见图 2、3。在沉积物样品测年基础上, 通过线性插值, 获得各样品所代表的年龄, 进而建立柱状样的年代框架。沉积速率的计算是通过两个测年点的线性关系得到, 通常不考虑沉积物的固结压实和沉降作用。对于柱样第一个测年点之上的沉积速率, 选择通过前两个测年点间的沉积速率外推至上部样品。LSC05 柱样的沉积物年龄为 2.7~9.6 cal.kaBP, 18 cm 以上的平均沉积速率约为 59.9 cm/ka, 18~100 cm 的平均速率为 17.4 cm/ka, 100~158 cm 的平均速率为 29.3 cm/ka。WLE08 柱样的年代框架已建立, 建立方法与 LSC05 柱样相同。其沉积物年龄为 1.1~1.4 cal.kaBP, 整根柱子的沉积速率均为 333.3 cm/ka^[17]。LSC05 孔提供了 9 ka 以来平均分辨率达约 2.3 ka 的沉积记录, WLE08 孔提供了 1.3 ka 以来平均分辨率达约 0.3 ka 的高分辨率的沉积记录。

LSC05 与 WLE08 柱样均从表层 (0 cm) 开始向下取样, 但两根柱样均出现了顶部近代沉积物缺失的情况。根据 WLE08 柱样的 ²¹⁰Pb 测试结果显示, 示其活度随深度增加并没有呈现指数衰减趋势^[27], 说明 WLE08 孔的 ²¹⁰Pb 活度值为本底值, 缺少现代沉积物留存。有研究表明汇入该区域内的尖竹汶河与 Welu 河流量较小, 入海泥沙量也相对较小^[27], 而其所在海域底层流流速均大于泥沙颗粒启动流速^[28], 在此沉积动力环境下, 该区域很难大量接收现代河流沉积, 并导致现代沉积物缺失。

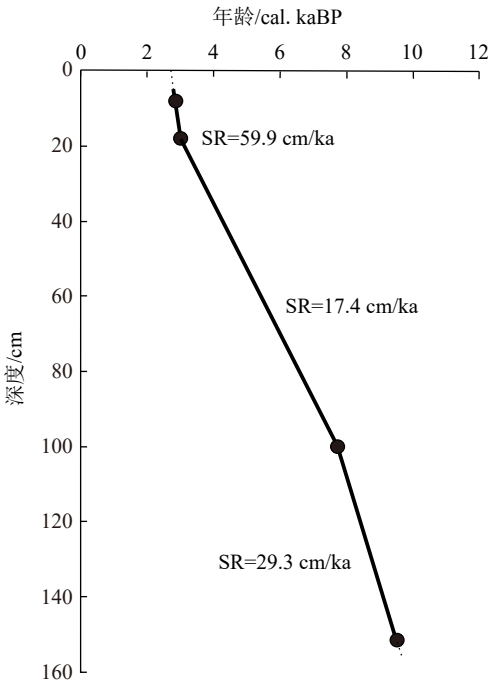


图 2 LSC05 年龄-深度模型
Fig.2 Age-depth model for Core LSC05

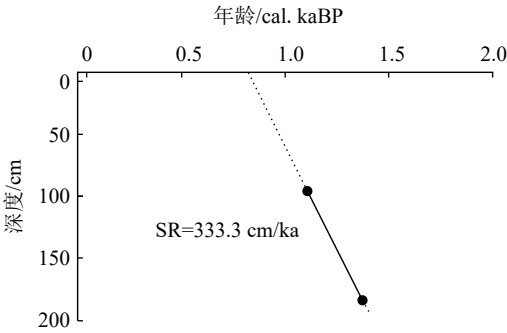


图 3 WLE08 年龄-深度模型
Fig.3 Age-depth model for Core WLE08

2.2 有机碳含量及其古海洋学意义

除了 BSi 以外, 直观反映了海表有机质丰度来体现海表初级生产力的有机碳含量 (TOC) 被视为

衡量海表生产力的替代指标^[29-30]。LSC05 和 WLE08 柱样 TOC 含量变化范围分别为 0.03%~1.60% 和 1.83%~4.10%, 平均值分别为 0.90% 和 2.68%(图 4B)。TOC 含量在 9~6.5 cal.kaBP 期间逐渐增加, 在 6.5~3 cal.kaBP 期间含量整体较低, 变化较小, 较为稳定, 在 1.4~0.84 cal.kaBP 期间含量较高。

在全球变暖的背景下, 泰国湾的有机碳的输

送、扩散和埋藏与热带季风气候控制的降水等条件密切相关^[31]。研究区的 TOC 自 6.5 cal.kaBP 以来的变化趋势与王承涛等^[17]研究得到的泰国湾中晚全新世以来沉积物的敏感粒级变化趋势吻合度较高, 指示了研究区的西南夏季风在 6.5~3 cal.kaBP 处于较弱的稳定期, 在 1.4 cal.kaBP 以来有所增强。在 6.5 cal.kaBP 以前的时期, 本研究 TOC 含量较低, 与中晚全新世以来沉积物的敏感粒级的研究结果差异较大, 可能是由于王承涛等^[17]研究的 WLE12 柱样位于河口内, 但 LSC05 柱样距河口位置明显更远, 因此 LSC05 接收到的来自河流携带的有机物汇入较少。

2.3 生物硅含量及其影响因素

LSC05 和 WLE08 柱状沉积物中 BSi 含量如图 4A 所示。LSC05 和 WLE08 柱样 BSi 含量变化范围分别为 0.41%~1.56% 和 0.60%~1.52%, 平均值分别为 0.88% 和 1.11%。结合研究区周边与南海部分海域的 BSi 研究成果(表 2)可以发现, 研究区属于南海中的低值海区, 与南海南部(巽他陆架东部)和南海北部陆坡(珠江口外)水深小于 200 m 的陆架浅水区沉积物 BSi 含量^[19, 32]较为接近。

沉积物中 BSi 含量的最主要的影响因素是硅质骨骼或细胞壁的供给量和溶解作用^[33], 两者的动态平衡关系主导了 BSi 的总体分布^[34], 再加上不同沉积物物质来源以及物质稀释的影响, 共同决定了 BSi 最终的分布格局。LSC05 和 WLE08 柱样采样站位水文环境条件与其他南海相关研究有所不同, 季风的盛行导致南海存在较多的上升流区^[35-37]。上涌的下层水体将营养物质携带至海表, 为海表硅藻等硅质生物勃发提供了良好的生境, 因此上升流区 BSi 含量明显较高。除本研究区以外, 表 2 中涉及的其他站位均靠近南海上升流区^[38-39], 但有研究表明泰国湾区域无上升流发育^[36], 这就导致了泰国湾硅质骨骼与壳体供给量低于其他有上升流的南海海域, 因此 BSi 含量偏低。

碳氮比值(C/N)是古生产力研究中重要的参考性指标, 可以用来反映沉积物的来源^[40]。海洋自身有机物的 C/N 一般为 5~8^[31, 41], 陆源有机物的 C/N 则大于 12^[31]。研究区 9 ka 以来, LSC05 和 WLE08 柱样的 C/N 比值偏高, 平均值为 14.81, 较多时期的 C/N 比值高于 12(图 4C, 8.6~8.8 cal.kaBP 和 9.0~9.4 cal.kaBP 数据缺失), 说明研究区中陆源有机质输入量较高。LSC05 与 WLE08 两根柱样的采样位置均位于近岸区域, 水深为 10~20 m, 其沉积物物

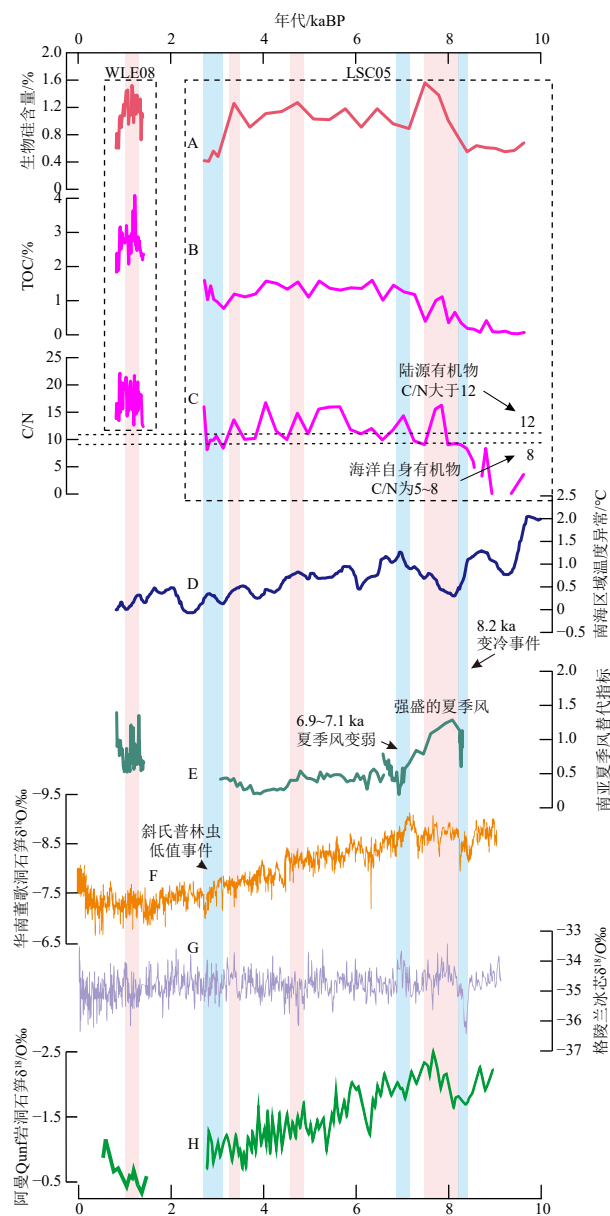


图4 LSC05、WLE08 柱样 BSi 含量、TOC 含量、C/N 比值与其他气候、环境变化序列对比
粉红色条带代表 BSi 含量高值带, 粉蓝色条带代表 BSi 含量低值带。

Fig.4 Comparison among biogenic silica content, TOC content, C/N in LSC05, and WLE08 with other climate and environmental variation sequences

Redish bands represent the high value band of BSi content and the bluish bands represent the low value band of BSi content.

表 2 南海部分海域 BSi 含量对比
Table 2 Comparison of BSi content in the South China Sea

研究海域	沉积物性质	水深/m	BSi 含量占比/%		参考文献
			范围	平均值	
南海西部泰国湾（本文）	LSC05 柱样	15~20	0.41~1.56	0.88	—
	WLE08 柱样	10	0.60~1.52	1.11	
南海北部陆坡	ODP1144 钻孔	2 037	—	1.50（1 050~900 ka）	[42-43]
				3.80（900 ka 后）	
南海北部	表层沉积物	<200	—	1.59	[19]
		>200	—	2.06	
南海中部	ODP1143 钻孔	2 722	1.31~3.38	-	[22, 43]
南海南部	表层沉积物	<200	0.37~1.86	—	[32]
		>1 000	3.39~9.00	—	
东印度洋爪哇岛以南	CJ01-185 柱样	1 538	—	1.41	[3]

源受到海洋与陆地的双重影响。末次冰消期以来，泰国湾的沉积物均来自于中南半岛^[44]，较多陆源沉积物的输入稀释了 BSi 含量。

由此可见，泰国湾低 BSi 含量这一特征与 BSi 的来源、堆积过程及其保存环境密切相关，低硅质骨骼与壳体供给量和陆源物质的稀释共同作用形成了该 BSi 低含量海域。

2.4 生物硅指示的古生产力演化过程

沉积物中的 BSi 与有机质关系密切^[45]，虽然只有约 3% 的 BSi 能长期存在于海底沉积物中，但是相对于生源有机碳，BSi 的埋藏效率明显更高，更能保存上层水体的生产力及环境信息^[46]。因此 BSi 常作为指示生产力的有效替代性指标，可以用来指示表层水体生产力的演变。

研究区 BSi 含量最高值出现于 7.5 cal.kaBP，最低值出现于 2.8 cal.kaBP，最高值为最低值的 3.8 倍。柱样中的 BSi 含量共有 4 个高值带，分别是 8.1~7.5、4.8、3.4 和 1.0 cal.kaBP 左右。同时有 3 个低值带，分别是 8.2、7 和 3 cal.kaBP 左右。

海洋初级生产力是各种物理、化学和生物因素的综合效应的表现^[47]。东亚冬季风对于南海的生产力起着重要的作用^[4,15,18,22,48-49]。亚洲季风的变化引起泰国湾降水、水体营养浓度、叶绿素含量、浮游植物丰度等环境变化^[31, 48-50]。若亚洲夏季风势力强盛，带来大量的降雨，使地表河流径流量增加，从而携带更多营养物质汇入海洋^[10]，BSi 含量则随之增加，这就反映了海表初级生产力提高。

1.4~0.8 cal.kaBP 期间，BSi 含量为 0.60%~1.52%（平均含量 1.11%），属于本研究中偏高的一段时期。此时正处于东亚夏季风偏强的中世纪暖期时期，这说明该时期内的海表初级生产力较高可能是由于夏季风势力较强所致。8.5~8.2、7.1~6.9 cal. ka BP 两段时间内，BSi 含量较低，这可能是由于此时南亚夏季风势力较弱导致的。8.2 cal.kaBP 时，BSi 含量快速下降并近乎到达最低值。此时夏季风也处于该时期内最低值，表明夏季风存在一次较大的衰弱期，响应了 8.2 cal.kaBP 全球范围的气候突变事件^[17,51]，指示了此段时间内由于夏季风的衰减致使研究区海表初级生产力降低。

对比研究区柱样 BSi 含量曲线和南海区域温度异常值曲线^[52]（图 4A、D）可以发现，温度变化与 BSi 含量变化也有相近的变化趋势，但 BSi 含量的变化略滞后于南海区域温度异常的变化。这反映出 BSi 作为古生产力的替代指标与古气候在一定程度上具有对应性^[4]。但我们发现 8.2 cal.kaBP 时期冷事件之前的曲线呈现相反的变化趋势，南海温度异常增加，BSi 含量反而降低，这反映了由于夏季风过度强盛而引起的异常暖事件反而可能会抑制硅质生物的生长，导致海表初级生产力降低^[10]。

将 BSi 含量与格陵兰冰芯^[53]、华南董歌洞石笋^[54]以及阿曼 Qunf 岩洞石笋记录^[55]（图 4F、G、H）对比，可以发现泰国湾 9 ka 以来有部分时期能够吻合。3~2.7 cal.kaBP 时期，BSi 含量出现明显低值带，此时期董歌洞石笋与阿曼 Qunf 岩洞石笋记录均出现了对应的低值区，可能指示了一次冷事件的出现，

这与4~2 cal.kaBP时期出现的热带海域“斜氏普林虫低值事件”对应^[56-57]。8.2 cal.kaBP变冷事件时期^[51],格陵兰冰芯、董歌洞石笋以及阿曼 Qunf 岩洞石笋记录同样能找到相应的低值记录,格陵兰冰芯甚至达到最低值。以上对应事件说明研究区古生产力的变化趋势与全球尺度的环境变化具有相关性,指示了泰国湾古环境变化对全球环境变化有一定程度的响应。

3 结论

(1) LSC05 和 WLE08 柱样中 BSi 含量分别为 0.41%~1.56% 和 0.60%~1.52%,为低值海域,最高值和最低值分别出现于 7.5、2.8 cal.kaBP 时期。区域内无上升流导致的低硅质骨骼和低壳体供给量以及陆源物质输入的稀释是 BSi 含量低的主要原因。

(2) 本研究柱样中共出现了 4 个 BSi 含量高值带与 3 个 BSi 含量低值带。TOC 含量自 9 cal.kaBP 以来呈现逐渐增加-平稳较低-继续增加的趋势。将 9 ka 以来研究区生物硅含量曲线与南海气候曲线进行对比发现,生物硅含量与南海气温异常曲线和南海夏季风替代指标值期有一定的对应性,但 BSi 曲线略滞后于南海气温异常曲线,且 1.4~0.84 cal.kaBP 这一海表生产力高值期正处于东亚夏季风偏强的中世纪暖期时期,指示了高生物硅含量对应的海表高初级生产力时期可能是由于夏季风阶段性势力较强导致。但 8.2 cal.kaBP 冷事件之前的南海异常高温却对应了生物硅含量低值区,这可能反映了夏季风过强引起的过度高温反而不利于海表初级生产力的提高。

(3) 研究区生物硅含量与格陵兰冰芯、董歌洞石笋以及阿曼 Qunf 岩洞石笋记录有较好的对应性,BSi 含量低值带与热带海域“斜氏普林虫低值事件”和 8.2 cal.kaBP 冷事件对应,表明研究区古生产力的变化趋势与全球尺度的环境变化具有明显的相关性,这指示了泰国湾古环境变化对全球环境变化的响应。

致谢: 感谢所有在航次调查期间帮助采样和采集数据的中泰合作项目组成员。

参考文献 (References)

- [1] 刘素美,张经. 沉积物中生物硅分析方法评述 [J]. 海洋科学, 2002, 26(2): 23-26. [LIU Sumei, ZHANG Jing. A Study on the measurement of biogenic silica[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(2): 23-26.]
- [2] 赵颖璐,刘素美,叶曦雯,等. 黄、东海柱状沉积物中生物硅含量的分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 423-428. [ZHAO Yingfei, LIU Sumei, YE Xiwen, et al. The Analysis of Biogenic Silica in the Sediments of the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2002, 26(2): 23-26.]
- [3] Xu Y H, Wang L, Lai Z K, et al. The biogenic silica variation and paleoproductivity evolution in the eastern Indian Ocean during the past 20000 a[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(1): 78-84.
- [4] 刘升发,石学法,刘焱光,等. 近 2 ka 以来东海南陆架泥质区高分辨率的生物硅记录及其古生产力意义 [J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 321-327. [LIU Shengfa, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. High-Resolution Record of Biogenic Silica and Its Paleoproductivity Implication in Mud Area, East China Sea Inner Shelf over the Last 2000 Years BP[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 321-327.]
- [5] Armbrust E V. The life of diatoms in the world's ocean[J]. *Nature*, 2009, 459: 185-192.
- [6] Tréguer P, Bowler C, Moriceau B, et al. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 27-37.
- [7] Danelian T. Radiolarians in the Sedimentary Record[J]. *Revue De Micropaléontologie*, 2001, 47(1): 53.
- [8] 陈敏,戚洪涛,沈林南,等. 海洋风暴沉积的微体生物研究进展 [J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(3): 516-523. [CHEN Min, QI Hongshuai, SHEN Linnan, et al. Research progress of microorganisms from marine storm deposits[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(3): 516-523.]
- [9] Sha L B, Li D L, Liu Y G, et al. Biogenic silica concentration as a marine primary productivity proxy in the Holsteinsborg Dyb, West Greenland, during the last millennium[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(9): 78-85.
- [10] 王汝建,翦知湔,肖文申,等. 南海第四纪的生源蛋白石记录: 与东亚季风、全球冰量和轨道驱动的联系 [J]. 中国科学 (D 辑:地球科学), 2007, 37(4): 521-533. [WANG Rujian, JIAN Zhimin, XIAO Wenshen, et al. Quaternary biogenic opal records in the South China Sea: Implications for the East Asian monsoon, global ice volume, and orbital forcing[J]. *Science China(Series D:Earth Sciences)*, 2007, 37(4): 521-533.]
- [11] Ragueneau O, Tréguer P, Leynaert A, et al. A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy[J]. *Global Planetary Change*, 2000, 26: 317-365.
- [12] 贾国东,翦知湔,彭平安,等. 南海南部 17962 柱状样生物硅沉积记录及其古海洋意义 [J]. 地球化学, 2000, 29(3): 293-296. [JIA Guodong, JIAN Zhimin, PENG Pingan, et al. Biogenic silica records in core 17962 from southern South China Sea and their relation to paleoceanographical events[J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 293-296.]
- [13] 邹杨浩,冉莉华, Wiesner M G, 等. 140kaBP 以来南海西南部上升流影响区沉积记录及其古海洋环境变化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 123-133. [ZOU Yanghao, RAN Lihua, Wiesner M G, et al. Sediment records and their paleoceanographic implications in the upwelling area of the southwestern South China Sea during the last 140,000 years[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019,

- 39(2): 123-133.]
- [14] 汪品先. 追踪边缘海的生命史: “南海深部计划”的科学目标 [J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1807-1826. [WANG Pinxian. Tracing the life history of a marginal Sea-On the “South China Sea Deep” Research Program[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(20): 1807-1826.]
- [15] 汪品先, 赵泉鸿. 十五万年来的南海: 南海晚第四纪古海洋学研究阶段报告 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 1-4. [WANG Pinxian, ZHAO Quanhong. The South China Sea in the past 150, 000 years: A report on the Late Quaternary paleo-oceanographic study of the South China Sea[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 1-4.]
- [16] Shi X F, Liu SF, Fang X H, et al. Distribution of clay minerals in surface sediments of the western Gulf of Thailand: Sources and transport patterns[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105(4-5): 390-398.
- [17] 王承涛, 陈敏, 戚洪帅, 等. 中晚全新世泰国湾 Chanthaburi 海岸 Welu 河口区沉积物的敏感粒级组分及其对季风气候变化的指示意义 [J]. *地球与环境*, 2021, 49(5): 480-491. [WANG Chengtao, CHEN Min, QI Hongshuai, et al. Sediment Sensitive Grain-size Fractions and Its Implication for Monsoon Variability during the Mid-late Holocene in the Welu Estuary of Chanthaburi Coast, Gulf of Thailand[J]. *Earth and environment*, 2021, 49(5): 480-491.]
- [18] Duc D M, Mai T N, Chu V N, et al. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, Northern Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(4): 558-565.
- [19] Ma Y W, Yang B, Zhou N, et al. Distribution and dissolution kinetics of biogenic silica in sediments of the northern South China Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1-15.
- [20] 王汝建, 林隽, 郑连福, 等. 1993—1995 年南海中部的硅质生物通量及其季节性变化: 季风气候和 El Nino 的响应 [J]. *科学通报*, 2000, 45(9): 974-978. [WANG Jianru, LIN Jun, ZHENG Lianfu, et al. Siliceous biofluxes and their seasonal variations in the Central South China Sea from 1993 to 1995: monsoon climate and El Nino responses[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(9): 974-978.]
- [21] 王汝建, 殷殿勇, 邵磊, 等. 南海北部陆坡渐新世的蛋白石沉积 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2001, 31(10): 867-872. [WANG Jianru, FANG Dianyong, SHAO Lei, et al. Oligocene opal deposits on the northern continental slope of the South China Sea[J]. *Science China (Series D: Earth Sciences)*, 2001, 31(10): 867-872.]
- [22] 王汝建, 李建. 南海 ODP1143 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(1): 74-77. [WANG Jianru, LI Jian. The Quaternary high-resolution opal record at ODP1143 in the South China Sea and its paleoproductivity significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 74-77.]
- [23] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [24] Lyle M, Murray D W, Finney B P, et al. The record of Late Pleistocene biogenic sedimentation in the eastern tropical Pacific Ocean[J]. *Paleoceanography*, 1988, 3(1): 39-59.
- [25] Demaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(10): 1715-1732.
- [26] Liu Z, Zhao Y, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [27] 王承涛. 泰国湾尖竹汶海岸沉积物组成和分布特征及其环境意义 [D]. 自然资源部第三海洋研究所. [WANG Chengtao. Grain-Size composition and distribution characteristics of sediments in the Chanthaburi coast, Gulf of Thailand and its environmental significance[D]. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources.]
- [28] 陈敏, 王承涛. 泰国尖竹汶海岸古环境演变历史研究 (内部资料未发表) [M]. 自然资源部第三海洋研究所. 2019. [CHEN Min, WANG Chengtao. A study on the evolution history of the Ancient environment the Chanthaburi coast, Gulf of Thailand[M]. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources.]
- [29] 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 Yunfang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163-170.]
- [30] 李丽, 王慧, 罗布次仁, 等. 南海北部 4 万年以来有机碳和碳酸盐含量变化及古海洋学意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 79-85. [LI Li, WANG Hui, LUO Burenci, et al. The characterizations and paleoceanographic significances of organic and inorganic carbon in northern South China Sea during past 40 ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 79-85.]
- [31] Wu B, Wu X D, Shi X F, et al. Influences of tropical monsoon climatology on the delivery and dispersal of organic carbon over the Upper Gulf of Thailand[J]. *Marine Geology*, 2020, 426: 10629.
- [32] 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 Lannan, 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.]
- [33] 王琦, 朱而勤. 海洋沉积学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-253. [WANG Qi, ZHU Erqin. Marine Sedimentology[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-253.]
- [34] 刘升发, 刘焱光, 于永贵, 等. 东海内陆架泥质区沉积物生物硅分布及其影响因素 [J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(1): 50-58. [LIU Shengfa, LIU Yanguang, YU Yonggui, et al. Distribution of Sedimentary Biogenic Silica in the Muddy Area of Inner Continental Shelf of the East China Sea and Its Influence Factors[J]. *Advances in Marine Sciences*, 2014, 32(1): 50-58.]
- [35] Huang C Y, Wu S F, Zhao M X, et al. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation[J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 71-94.
- [36] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 245-284.
- [37] Akhir M F, Daud N R. Why South China Sea upwelling water does not enter the Gulf of Thailand?[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2018, 20.
- [38] Liu K, Chao S, Shaw P, et al. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study[J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research*

- Papers, 2002, 49(8): 1387-1412.
- [39] 向菲, 王汝建, 李建如, 等. 越南岸外上升流区 48 万年来高分辨率的生源组分记录及其古海洋学意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 81-89. [XIANG Fei, WANG Rujian, LI Jianru, et al. High-resolution records of biogenic components and their Paleooceanographic implications in the upper up-welling area of the South China Sea off eastern Viet-nam over past 480 ka[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(6): 81-89.]
- [40] 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, Dang Aicui, Long Aimin. 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.]
- [41] 刘瑞娟, 于培松, 扈传显, 等. 南极普里兹湾沉积物中有机碳和总氮的含量与分布 [J]. 海洋学报, 2014, 36(4): 118-125. [Han Zhengbing, Pan Jianming, Liu Ruijuan, Yu Peisong, Hu Chuanyu. Contents and distributions of organic carbon and total nitrogen in sediments of Prydz Bay, Antarctic[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(4): 118-125.]
- [42] 李建, 王汝建. 南海北部一百万年以来的表层古生产力变化: 来自 ODP1144 站的蛋白石记录 [J]. 地质学报, 2004, 78(2): 228-233. [LI Jian, WANG Rujian. Paleoproductivity Variability of the Northern South China Sea during the Past 1 Ma: The Opal Record from ODP 1144[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 228-233.]
- [43] 周鹏, 李冬梅, 李海涛, 等. 大亚湾西部海域沉积物中生物硅的含量及其分布特征 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(1): 109-117. [ZHOU Peng, LI Dongmei, LI Haitao, et al. Biogenic silica contents and its distribution in the sediments of the west Daya Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(1): 109-117.]
- [44] 陈禹飞, 乔淑卿, 石学法, 等. 末次冰消期以来泰国湾沉积物物源变迁的元素地球化学证据 [J]. 第四纪研究, 2020, 40(3): 726-738. [CHEN Yufei, QIAO Shuqing, SHI Xuefa, et al. Geochemical evidence for the sediment provenance evolution in the Gulf of Thailand since the last deglacial[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(3): 726-738.]
- [45] 侯立军, 刘敏, 闫惠敏, 等. 长江口潮滩沉积物生物硅的分布及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 665-669. [HOU Lijun, LIU Min, YAN Huimin, et al. Distribution of biogenic silica in tidal flat sediments of Yangtze Estuary and its influence factors[J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 665-669.]
- [46] 梁宇钊, 冉莉华, 张兰兰. 中国海表层沉积物生物硅含量与硅藻丰度空间分布规律 [J]. 微体古生物学报, 2021, 38(1): 112-130. [LIANG Yuzhao, RAN Lihua, ZHANG Lanlan, et al. The spatial distribution of biogenic silica content and diatom abundance in the surface sediments of the China seas[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2021, 38(1): 112-130.]
- [47] 张杨硕. 泰国湾 T93 孔沉积特征: 晚更新世以来古温度及东亚季风演化记录 [D]. 国家海洋局第一海洋研究所. [ZHANG Yangshuo. Sediment Characteristics and Change of East Asian Winter Monsoon of Core T93 from Gulf of Thailand[D]. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources.]
- [48] Rujinard S, Pornsilp P, Thaitaworn L, et al. Population dynamics of green *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) associated with the monsoon cycle in the upper Gulf of Thailand[J]. Journal of Phycology, 2008(3): 44.
- [49] Dan Ling Tang, Hiroshi Kawamura, Ping Shi, et al. Seasonal phytoplankton blooms associated with monsoonal influences and coastal environments in the sea areas either side of the Indochina Peninsula[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2006.
- [50] Buranapratheprat A, Yanagi T, Matsumura S. Seasonal variation in water column conditions in the upper Gulf of Thailand[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(17): 2509-2522.
- [51] Beget J E. Radiocarbon-dated evidence of worldwide early Holocene climate change[J]. Geology, 1983, 11(7): 389-393.
- [52] Linsley B K, Rosenthal Y, Oppo D W. Holocene evolution of the Indonesian throughflow and the western Pacific warm pool[J]. Nature Geoscience, 2010, 3: 578-583.
- [53] Grootes P M, Stuiver M. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10-3 to 10-5 year time resolution[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997.
- [54] Yongjin W, Hai C, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. Science, 2005, 308(5723): 854-857.
- [55] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman[J]. Science, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [56] 袁帅, 张辉, 曹鹏, 等. 全新世以来泰国湾古气候演化历史-来自地球化学和矿物学证据 [J]. 海洋科学进展, 2022, 40(2): 233-246. [YUAN Shuai, ZHANG Hui, CAO Peng, et al. Holocene paleoclimate evolution in the Gulf of Thailand: evidence from geochemistry and mineralogy[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(2): 233-246.]
- [57] 翦知湆, 汪品先, 李保华, 等. 西太平洋晚全新世变冷事件 [J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(5): 461-466. [JIAN Zhimin, WANG Pinxian, LI Baohua, et al. Late Holocene cooling event in the western Pacific[J]. Science China(Series D: Earth Sciences), 1996, 26(5): 461-466.]