

赵周平, 李超, 骆正骅, 等. 马来西亚东北部 Setiu 潟湖 1970 年以来沉积环境演化及其对 ENSO 的响应[J]. 海洋学报, 2024, 46(4): 79–89, doi:10.12284/hyxb2024045

Zhao Zhouping, Li Chao, Luo Zhenghua, et al. Evolution of sedimentary environment in Setiu Lagoon, northeastern Malaysia, and its response to ENSO[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(4): 79–89, doi:10.12284/hyxb2024045

马来西亚东北部 Setiu 潟湖 1970 年以来沉积环境演化及其对 ENSO 的响应

赵周平¹, 李超^{1*}, 骆正骅¹, Nicholas Ng Chia Wei¹, 戴璐¹

(1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 马来半岛位于低纬热带地区, 厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 如何影响该区域的气候, 尤其是降水仍然存在争议。本文以马来半岛东北部登嘉楼州 Setiu 潟湖钻孔 NTT-3 为研究对象, 通过分析粒度、总有机碳及总氮含量、C/N 比值和 XRF 岩心扫描等, 探讨该钻孔的沉积环境变化及其对 ENSO 的响应。研究结果显示, 钻孔记录中自 1970 年前后 (84 cm 处) 出现两种不同的变化趋势。1970 年之前钻孔下部沉积物粒度、有机和无机地球化学特征趋势波动明显, 沉积速率较低。而 1970 年以来, 潟湖沉积环境总体稳定, 沉积物中的有机组分主要来自红树林, 同时伴有河流输入的淡水浮游植物的贡献。频谱分析结果显示 1970 年以来钻孔上部存在明显的 ENSO 周期变化。强厄尔尼诺现象基本对应低 Zr/Rb 比值和低 Zr/Ti 比值, 而强拉尼娜 (La Niña) 现象基本对应高 Zr/Rb 比值和高 Zr/Ti 比值。该结论不仅支持了现代观测对马来半岛东部沿海地区气候变化的认识, 同时也在地质记录中发现了 ENSO 变化的直接证据, 对全面认识和理解 ENSO 对亚洲气候变化的影响、区域陆海相互作用过程和环境响应等方面具有重要现实意义。

关键词: Setiu 潟湖; 沉积记录; 频谱分析; ENSO

中图分类号: P736.21^{†3}

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)04-0079-11

1 引言

马来半岛位于低纬热带地区, 东临南海, 在赤道以北, 中部多山且发育湖泊和河流。马来半岛地表气候受西南季风(夏季)和东北季风(冬季)控制, 属于亚洲-澳大利亚季风系统的一部分, 其变化一般认为与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、马登朱利安振荡 (Madden Julian Oscillation, MJO) 和印度洋偶极子 (Indian Ocean Dipole, IOD) 有一定关联^[1]。马来半岛气候受东亚季风影响显著, 尤其是来

自南海的东北季风给马来半岛东部沿海地区带来充沛的降水^[2]。除了中央山脉的高地外, 马来半岛大部分地区常年温度处于 23~32°C 之间, 年平均降雨超过 2 000 mm, 气象条件稳定^[3]。但近些年马来半岛经历了多次长时间高温的现象, 一般认为与 ENSO 的异常有关, 如 1997–1998 年的极强厄尔尼诺事件^[4–5] 和 2016 年的强厄尔尼诺事件^[6], 而且其气温升高的速率与极端高温出现的频率都远超过全球平均水平^[7–8]。尽管我们对当前马来半岛的气温异常与 ENSO 之间的关系取得了一定认识, 但对于马来半岛降水与 ENSO

收稿日期: 2024-02-01; 修订日期: 2024-03-06。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF0800504); 国家自然科学基金项目 (42273057, 42076063); 上海市自然科学基金项目 (21590712700)。

作者简介: 赵周平 (2002—), 女, 河南省安阳市人, 主要从事海洋沉积地球化学研究。E-mail: zpzhao@tongji.edu.cn

* 通信作者: 李超 (1983—), 男, 山东省莱芜市人, 博士, 副教授, 主要从事海洋沉积地球化学研究。E-mail: cli@tongji.edu.cn

之间的内在联系仍有不同看法。有学者认为马来半岛的降水与 ENSO 并无显著相关性,但强 ENSO 事件会导致降水有 4~8 个月的滞后效应^[9-10],也有学者认为厄尔尼诺事件在 6~12 个月时间尺度上会显著降低马来半岛东部地区的降水^[11]。

近海或湖泊中的钻孔沉积物记录了沉积环境和气候演化的重要信息^[12-13]。本文研究了马来西亚东北部登嘉楼地区近岸潟湖的钻孔沉积记录,通过分析钻

孔记录中总有机碳及总氮含量、C/N 比值和 XRF 岩心扫描等数据,揭示近百年来潟湖沉积环境的变化,并探讨沉积环境与 ENSO 之间的联系。

2 样品与方法

岩心钻孔 NTT-3 于 2019 年 8 月采自马来半岛东北部登嘉楼州的 Setiu 潟湖(5.64°N, 102.77°E, 图 1a, 图 1b; 钻孔水深 1~2 m),由超声振动钻探获得。柱

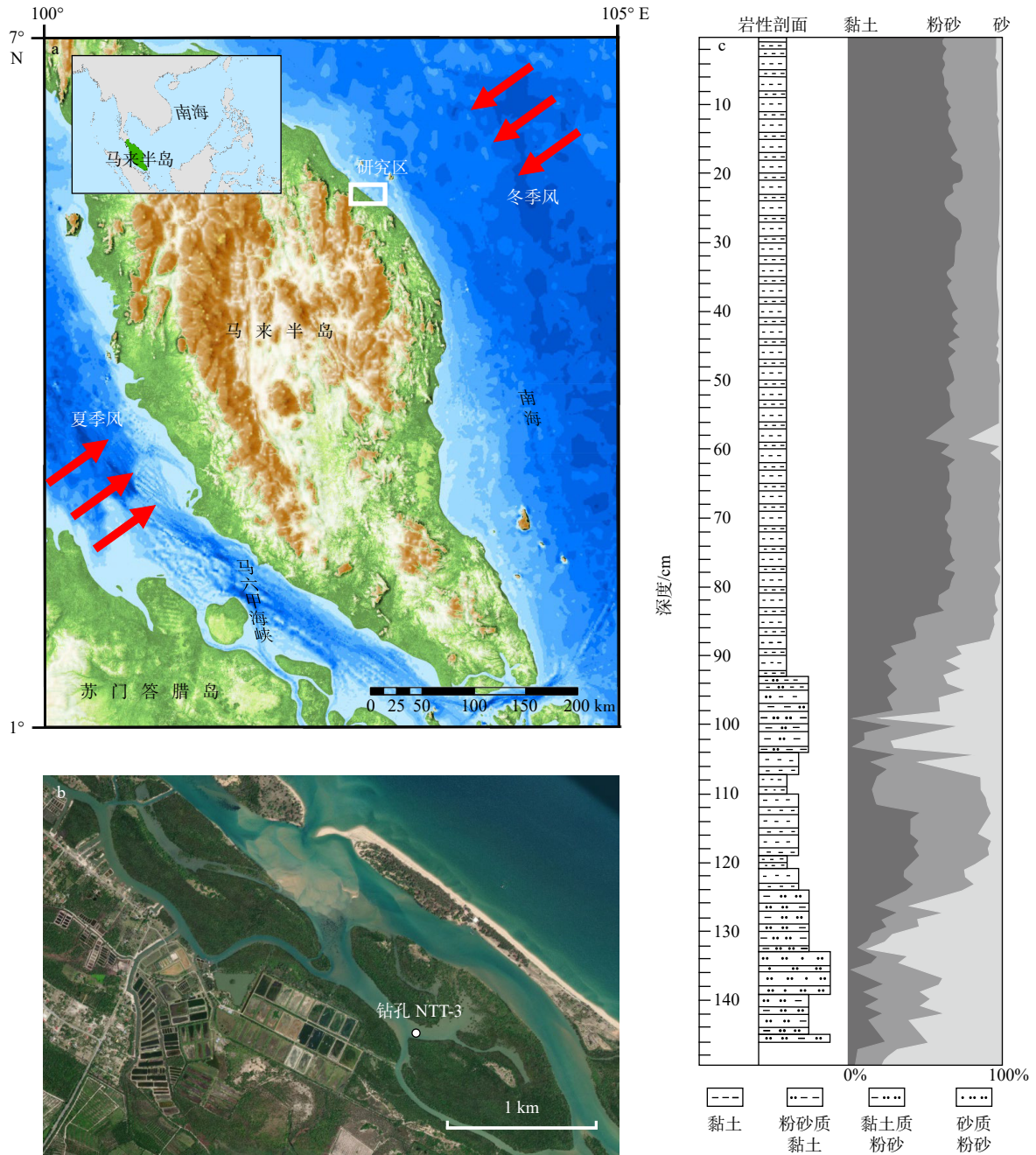


图 1 研究区域、钻孔点位及岩心剖面

Fig. 1 Study area, drilling locations, and core profile diagram

- a. 马来半岛研究区域及夏、冬季风方向; b. 研究区卫星图片(来自谷歌地球); c. 钻孔 NTT-3 岩性和粒度组成
- a. Study area of the Malay Peninsula and the direction of summer and winter winds; b. satellite image of the study area (from Google Earth);
- c. Lithology and particle size composition of Borehole NTT-3

状岩心总长 144 cm, 以 1 cm 间隔进行分样。

2.1 粒度测试

取 0.1~0.3 g 湿样于离心管中, 向其加入 15 mL 浓度为 10% 的 H_2O_2 去除样品中的有机质。将离心管充分摇晃均匀, 在 60°C 条件下水浴加热振荡反应 6 h, 直至没有气泡产生, 加入离子水并离心直至上清液呈中性。再向离心管中加入 20 mL 浓度为 10% 的 HCl 去除样品中的碳酸盐组分, 重复上述操作步骤直至上清液呈中性。

测试前先向离心管加入 10 mL 去离子水以及数滴 2% 六偏磷酸钠, 摇晃均匀并超声振荡 10 min, 用以分散样品防止固结。样品使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行测试分析, 测试遮光度通常控制在 8%~12%, 粒度测试范围为 0.04~2 000 μm , 重复测量的相对误差小于 1%。

2.2 年代学测试

NTT-3 钻孔沉积物年代的确定, 采用了 ^{210}Pb 法和 ^{14}C 法 2 种定年方法。其中 ^{210}Pb 以及 ^{137}Cs 测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。根据 ^{210}Pb 随深度衰变的规律, 选取深度为 6~7 cm、15~16 cm、25~26 cm、36~37 cm、51~52 cm、71~72 cm、93~94 cm、104~105 cm、110~111 cm 和 120~121 cm 处共 10 个样品进行 ^{210}Pb 测试。预处理步骤如下: 首先称量约 10 g 湿样, 用干净样品袋包装后置入冻干机中, 在 -60°C 真空条件下冻干约 72 h。随后用玛瑙研钵研磨冻干后的样品, 再用 100 目孔径筛子筛去有机质碎屑, 将样品装入密封盒封存约 3 个星期以使放射能量平衡, 留待测试。使用美国 AMETEK 公司生产的井式高纯锗低本底多道 γ 能谱仪 (GWL-120-15-LB-AWT) 测试样品中的 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 和 ^{137}Cs 的比活度, 具体测试方法见参考文献 [14]。

^{14}C 定年法选取了钻孔中 5 个不同层位的植物碎屑, 由美国迈阿密 Beta 实验室进行加速器质谱 (AMS) ^{14}C 年龄测试。具体样品层位为 93~94 cm、104~105 cm、120~121 cm、124~125 cm 和 145~146 cm。利用在线程序 Calib Rev.8.2.0 (<http://calib.org/calib/calib.html>) 中的 IntCal20 北半球曲线对所得 ^{14}C 年龄原始数据进行校正 (0 cal a BP = 1 950 AD), 转化为日历年龄, 具体见文献 [15], 以 2σ 区间端点的平均值作为最终年龄。

2.3 有机地球化学测试

将 NTT-3 钻孔沉积物按间距 1 cm 分样, 取 144 个样品开展总有机碳 (TOC) 和总氮 (TN) 的测试分析。先将样品 -50°C 冻干, 在真空条件下干燥 48 h, 至样品水分完全冻干。用玛瑙研钵研磨冻干后的样

品, 直至样品可以完全过 200 目筛。然后称取约 1 g 的沉积物样品于 50 mL 离心管中, 加入适量 1 mol/L 盐酸浸泡一段时间, 在 60°C 条件下水浴, 并且每隔 2 h 对样品进行震荡, 使其充分反应, 直至离心管底部样品不再出现小气泡, 尽量除去样品中的无机碳 (主要是碳酸钙)。随后用去离子水离心清洗至中性, 在 60°C 烘箱中烘干。称取 10~20 mg 去除碳酸盐后的样品, 用锡舟包裹好后在德国 Vario EL III 元素分析仪上测得碳的质量数; 称取 10~20 mg 原始样品测得总碳 (TC) 和总氮 (TN) 的质量数。由二者质量之差 (酸洗前后之差) 校正计算可得原始样品中有机碳 (TOC) 的质量数。

NTT-3 钻孔沉积物的稳定碳同位素 ($\delta^{13}C$) 测试在自然资源部第一海洋研究所完成。称取 4~10 mg 去除碳酸盐的 40 个样品, 用锡箔舟包裹后进行上机测试。分析仪器为 Thermo Fisher 公司的 253 plus 稳定同位素质谱仪以及 EA-Isolink 元素分析仪, $\delta^{13}C$ 值以 PDB (Pee Dee Belemnite) 国际标准物质作为参考标准。

2.4 XRF 岩心扫描测试

NTT-3 钻孔沉积物的 X 射线荧光岩心扫描 (XRF) 使用荷兰 Avaatech 公司的 XRF 岩心扫描仪 (XRFCS) 完成, 其空间分辨率可达 0.1~12 mm。本文选取 10 mm 分辨率进行扫描, 扫描前对岩心剖面进行了平整处理, 同时覆盖一层 Ultralene 薄膜 (4 μm) 用以进一步降低表面粗糙度, 测试电压为 10 kV 和 40 kV, 计数时长为 10 s。XRF 岩心扫描结果代表的是元素的相对强度, 为半定量数据, 以每秒钟接收的轰击次数为计量标准 [以秒计数 (counts per second, cps)], 其值越高代表元素含量越高。

3 结果

3.1 粒度特征

钻孔沉积物的平均粒径在垂向上明显呈现两种不同的分布特征。以 84 cm 深度为界, 84~0 cm 段 (简称上部) 沉积物粒度非常均一, 平均粒径稳定在 0.97~1.95 μm 之间。而在 144~84 cm 段 (简称下部), 平均粒径有 2 次较大波动, 分别位于 128 cm 和 100 cm 深度附近。这两处沉积物粒度在整个钻孔中最粗, 二者平均粒径达到 125~250 μm 。

3.2 年代框架

NTT-3 钻孔的年代框架由两种方法确定, 分别是 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测年以及 AMS ^{14}C 测年。其中 AMS ^{14}C 测年结果见表 1, 主要采用经校正后的日历年龄, 即 94 cm、105 cm、121 cm、125 cm、146 cm 深度处沉积

表 1 马来西亚东北部近岸 NTT-3 孔沉积物
AMS ^{14}C 测年结果

Table 1 The AMS ^{14}C dating results of sediments from NTT-3 core in the northeastern coastal area of Malaysia

深度/cm	测年材料	^{14}C 年龄/ (a BP)	校正年龄/ (cal a BP)(2σ)	平均日历年龄/ (A.D.)
93~94	植物	-30 ± 30	$-5 \sim -7$ (0.85)	1956
104~105	植物	-15 ± 30	$-5 \sim -7$ (0.95)	1955
120~121	植物	-660 ± 30	$-50 \sim -54$ (0.89)	2001
124~125	植物	360 ± 30	$410 \sim 315$ (0.47)	1588
145~146	植物	890 ± 30	$834 \sim 732$ (0.60)	1167

物的日历年龄分别为 1956 a、1955 a、2001 a、1588 a 和 1167 a。假设采样点沉积环境相对稳定,即每相邻两组测年点的沉积速率是恒定的,根据等间距插值法可以计算得到整个钻孔岩心其他深度的年龄。值得注意的是,120~121 cm 处的 ^{14}C 年龄约为 (-660 ± 30) a BP, 经过校正后的日历年龄为 2001 年,相较于其上、下 2 个点位的年龄明显偏新,推测可能存在新碳的混入,故在年代框架建立中未予采用。

钻孔在 84~0 cm 段沉积物粒度较细且均一(基本都为黏土),为泥质沉积(图 1c)。据此推断 84~0 cm 段沉积环境较为稳定,沉积物堆积速率以及表层沉积物 ^{210}Pb 活度近似恒定,故选择恒定通量恒定沉积模式(Constant Flux Constant Sedimentation, CFCS)对过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) 的垂向分布进行拟合(图 2a)。计算结果得出平均沉积速率为 1.7 cm/a, 然后采用内插法计算中间各深度的年龄值。假设最顶部沉积时间为采样时的日期,即 0 cm 深度的 ^{210}Pb 年龄约为 2019 a, 由此计算整个钻孔沉积物的 ^{210}Pb 年龄,即 7 cm、16 cm、26 cm、37 cm、52 cm、72 cm、84 cm、94 cm、105 cm、111 cm、121 cm 深度的 ^{210}Pb 年龄分别约为 2016 a、2010 a、2004 a、1998 a、1989 a、1977 a、1970 a、1964 a、1958 a、1954 a、1948 a, 如图 2b 所示。

比较钻孔 ^{14}C 年龄和 ^{210}Pb 年龄,我们发现 105 cm 深度的沉积物 ^{210}Pb 年龄为 1958 a,而同样是该深度样品的 ^{14}C 年龄为 1955 a。也就是说在 105 cm 处,两种方法的定年结果极为吻合,故本文将综合以上两种定年方法来确定本钻孔的年代框架。考虑到在近百年时间段内 ^{210}Pb 的年代确定更加准确,故本文在 105 cm 深度以上参考 ^{210}Pb 年龄框架,而在 105 cm 深度以下主要参考 ^{14}C 年龄框架来建立整个钻孔的年代(图 2b)。

3.3 有机地球化学指标垂向分布特征

NTT-3 钻孔沉积物的 TOC 含量、TN 含量、

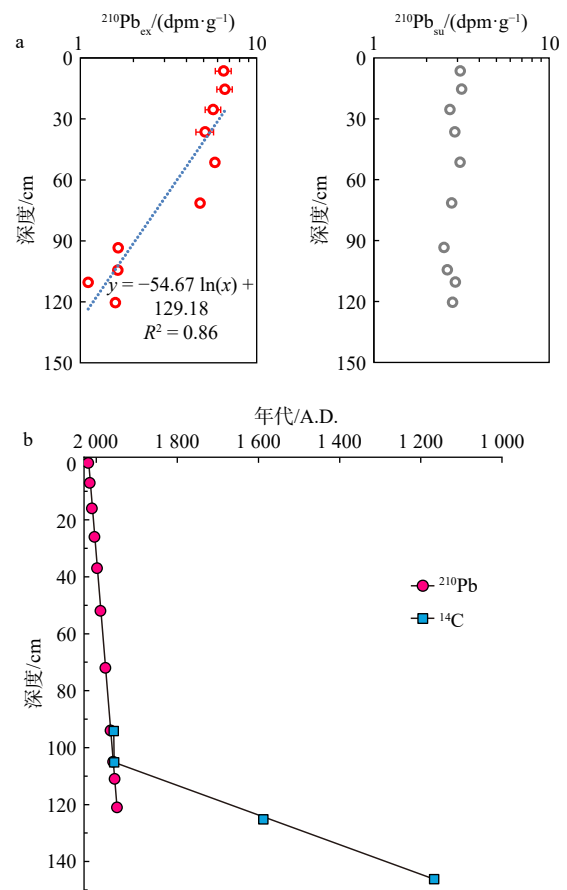


图 2 NTT-3 钻孔定年结果

Fig. 2 Dating results of Core NTT-3

a. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{su}}$ 剖面; b. ^{210}Pb 和 ^{14}C 定年结果
a. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and $^{210}\text{Pb}_{\text{su}}$ profile; b. ^{210}Pb and ^{14}C dating result

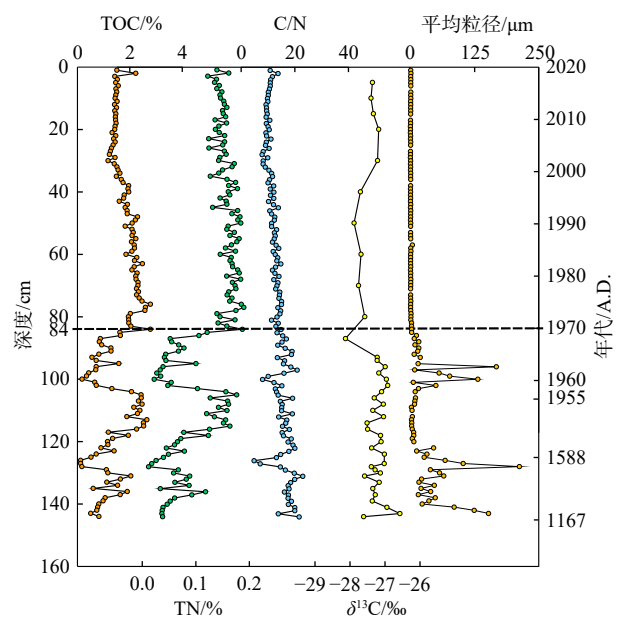


图 3 NTT-3 钻孔有机地球化学指标垂向变化曲线

Fig. 3 Vertical variation of organic geochemical parameters in Core NTT-3

C/N 比值以及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的垂向变化如图 3 所示。TOC 含量、TN 含量变化趋势总体一致, 在钻孔上部比较稳定, 下部变化波动较大。TOC 含量在 0.12%~2.79% 之间波动, 平均为 1.61%; TN 含量在 0.01%~0.19% 之间波动, 平均为 0.13%; C/N 比值主要集中在 8~16 之间, 最大值为 23, 最小值为 4.81, 平均值为 13.53; 变异系数为 0.12, 趋势变化较为稳定。 $\delta^{13}\text{C}$ 值在钻孔中均为负值, 变化范围为 -28.13%~-26.58‰, 平均值约为 -27.30‰, 总体波动不显著。综合以上几个参数随深度的变化规律, 钻孔在垂向上可分为两段。

(1) 钻孔 144~84 cm 段, 即 1970 年前, TOC 含量、TN 含量、C/N 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值都有着较为显著的波动起伏, 且出现过 2 次极低值。在该阶段, TOC 含量和 TN 含量的变化趋势一致。C/N 比值自下向上呈递减趋势, 在 128 cm 和 100 cm 处出现了 2 次低值, 波动不显著。

(2) 钻孔 84~0 cm 段, 即 1970 年后, TOC 含量、TN 含量、C/N 比值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值和平均粒径都没有显著的波动, TOC 含量、TN 含量、C/N 比值都呈自下向上的递减趋势; $\delta^{13}\text{C}$ 值先降低后增高, 相对稳定。

3.4 无机地球化学指标垂直分布特征

与 3.3 节有机指标变化相似, XRF 岩心扫描显示各元素随深度的变化也可以分为两个阶段(图 4)。

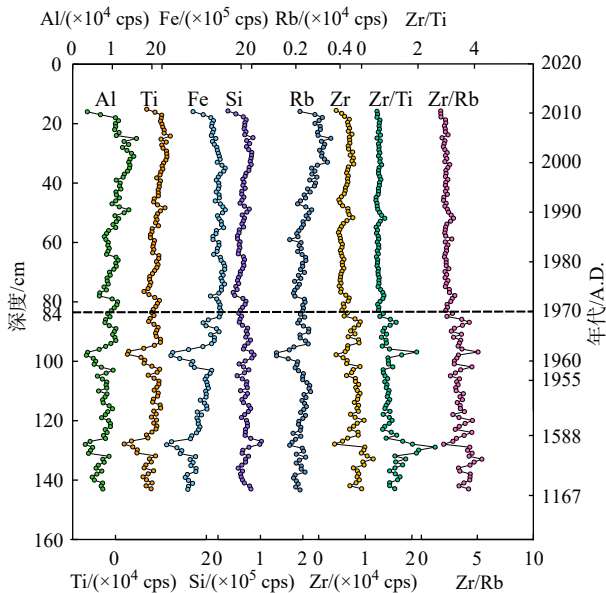


图 4 NTT-3 钻孔元素含量及比值的垂向变化曲线

Fig. 4 Vertical variation of elemental contents and ratios in Core NTT-3

(1) 钻孔深度 144~84 cm 段, 即 1970 年前, 各元素波动相对上部更明显。其中 Al、Ti、Fe、Si、Zr、Rb 元素含量在 128 cm 和 98 cm 深度处都显示有 2 次

明显的降低, 而 Si 元素含量在该深度则明显升高。Zr/Ti 比值在 128 cm 和 98 cm 也存在 2 次峰值, Zr/Rb 比值在 128 cm 处有 1 次降低, 在 98 cm 处为高值。总的来说, Al、Ti、Fe、Rb 元素含量在该阶段含量变化非常相似, 整体上呈增加趋势, Si 元素含量在该阶段整体变化不大, Zr 元素含量整体上呈递减趋势。Zr/Ti 和 Zr/Rb 比值呈递减趋势。

(2) 钻孔深度 84~18 cm 段, 即 1970 年后, Al、Ti、Fe、Si、Rb 元素含量表现出阶段性的升高, 如 Al、Ti、Si、Rb。相比之下, Zr/Ti 和 Zr/Rb 比值的变化并不明显。

4 讨论

根据钻孔沉积物粒度、有机地球化学和 XRF 岩心扫描的结果(图 3, 图 4), 初步可以判断钻孔上部 84~0 cm 段(即 1970 年以来)沉积环境相对较为稳定, 沉积速率也较高。而钻孔下部沉积速率慢, 结合粒度、 ^{14}C 定年及地球化学指标推测下部可能存在事件性沉积或沉积间断。因此, 本文将重点围绕钻孔上部 84~0 cm 部分来讨论钻孔沉积环境变化及其环境响应。

4.1 钻孔沉积物有机质来源解析

马来半岛东海岸的红树林大多位于东北部登嘉楼、吉兰丹等地区的河口、潟湖、海湾处, Setiu 潟湖面积超过 2 000 hm^2 , 由混合红树林植被组成^[16], 记录了 10~18 种红树林^[17]。钻孔所在地为沿海地区的潟湖, 作为一个半封闭半开放的湖泊, 其沉积物有机质来源可能为流域周边红树林植物碎屑、陆地河流或潮汐输入的海洋有机质。不同来源的有机质, 其 C/N 比值以及 $\delta^{13}\text{C}$ 值会存在显著差异^[12], 利用沉积物的 C/N 比值以及 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以评估沉积物中有机质的来源^[18]。前人研究表明, 陆源植物有机质的 C/N 比值一般在 15 以上, $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 -27‰^[19], 而陆地 C_3 类型植物通常拥有相对低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-20‰~-35‰), C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更高(-10‰~-16‰)^[20]; 海源有机质以低等藻类为主, C/N 比值一般低于 7^[21], 海洋水生藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比陆地植物更高, 一般在 -19‰~-22‰ 之间^[18]。

1970 年以来, 研究区钻孔沉积物中的 C/N 比值变化范围为 7.81~15.1, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -27.88‰~-27.18‰。利用 Meyers 图解^[22] 比较钻孔 C/N 比值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图 5)可以发现, 钻孔沉积物中的 C/N 比值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值都与陆地 C_4 类型植物有机质相差很大, 陆地 C_3 类型植物和淡水浮游植物代表着新鲜的陆源植物碎屑, 海洋浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对更偏正。有研究说明, 红树林是陆源物质的拦截者^[23], 也是近岸沉积物中有机质的主要来源^[24]。据此图可以看到, 钻孔沉积

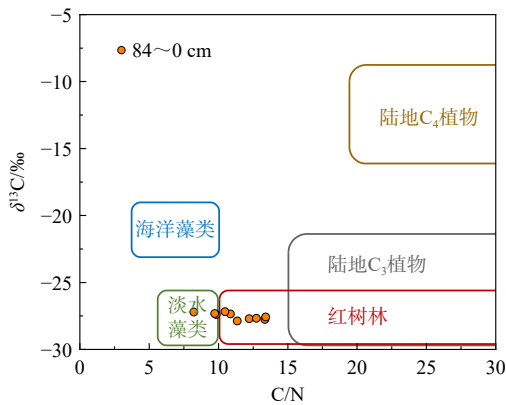


图5 NTT-3 钻孔沉积物 C/N 比值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值
(据 [20] 修改)

Fig. 5 C/N ratio and $\delta^{13}\text{C}$ value in Core NTT-3 (modified according of reference [20])

物有机质组成为混合来源,主要来源为周边的红树林。图 3 中, TOC 含量和 TN 含量的变化几乎一致,在年际尺度上 TOC 含量与 TN 含量的变换更多反映不同有机质来源输入的变化。在该阶段, TOC 含量总体上先波动减少, $\delta^{13}\text{C}$ 值基本不变, C/N 比值总体上降低,可能意味着该阶段潟湖自生的储碳能力相对减弱,沉积环境偏向于淡水环境,有机质来源在以流域红树林为主的基础上,淡水浮游植物代表的有机质相对增加。当 TOC、TN 含量趋于稳定时,河流输入及潟湖自生的有机质与输出保持平衡。总的来说,钻孔 84~0 cm 段沉积物有机质为混合来源,主要来源为原位的红树林以及河流输入的淡水藻类, TOC 含量和 TN 含量的变化可能指示了河流输入有机质的变化。

4.2 沉积记录中地球化学指标变化的周期

由图 3 和图 4 可知, Al、Si、Fe、Ti 等元素含量及 Zr/Rb、Zr/Ti、C/N 比值在钻孔 84~18 cm 段都表现出了一定周期性波动。考虑到该段钻孔沉积速率较快,分辨率可达 0.59 a/cm,为了更好地探讨沉积记录对短周期气候事件的响应规律,本文对钻孔上部代表性有机指标和特征元素采用 Past 4.03 软件的 REDFIT 功能进行了频谱分析。频谱分析结果(图 6)显示,在 95% 置信区间, Al、Si、Fe、Ti 的元素含量及 Zr/Ti 比值都表现出了 2.5~7.1 a 显著的周期性特征; Zr/Rb 比值和有机地球化学指标 TOC 含量、TN 含量则显示了 2.1~9.3 a 的周期。上述 Al、Si、Fe、Ti 的元素含量及 Zr/Ti 比值等指标的主要周期为 2~7 a (95% 置信区间),这与 ENSO 的 2~7 a 准周期相符合; Zr/Rb 比值和 TOC 含量、TN 含量等指标的周期与 2~10 a 的类 ENSO 周期接近 [25-26],暗示了马来半岛东北部 Se-

tiu 潟湖过去几十年来的沉积过程可能受到了 ENSO 的影响。

4.3 钻孔沉积环境变化对 ENSO 的响应

Niño 3.4 指数是指示 ENSO 强弱的重要指标,其定义是 5°S~5°N, 120°~170°W 之间区域的平均表层海水温度相对于 1971-2000 年平均温度的异常值 [27]。美国海洋大气局 (NOAA) 以 Niño 3.4 区海表温度距平 (SSTA) 的 3 个月滑动平均值连续 5 个月大于等于 0.5°C (或小于等于 -0.5°C) 定义为一次厄尔尼诺 (或拉尼娜) 事件。为了更好地表征 ENSO 强度特征,量化 ENSO 与沉积物地球化学数据的关系,本文根据 Niño 3.4 指数将平均指数大于 1°C 的时期定义为强厄尔尼诺事件 (红色阴影部分), 而将 Niño 3.4 指数中平均指数小于 -1°C 定义为强拉尼娜事件 (蓝色阴影部分)。从图 7 可以看到, 1972-1973 年、1982-1983 年、1997-1998 年、2015-2016 年等出现了强厄尔尼-诺现象; 1973-1974 年、1988-1989 年、1999-2000 年、2007-2008 年等出现了强拉尼娜现象。

沉积记录中特征元素含量或者元素比值的变化,是沉积过程中气候环境变化的反映 [13, 28]。例如, Al 多富集于黏土矿物中, Si 常以石英 (SiO_2) 形式存在, 因此 Al 和 Si 常用来表征河流输入的陆源物质信号 [29-31]。Ti 元素主要来自陆源碎屑沉积物且趋于在粒度较细的矿物中富集, 其变化趋势通常与降雨和陆地径流相关, 常常被用于校正陆源物质输入变化 [32-33]。Zr 和 Rb 都是典型的陆源元素, Zr 常与重矿物共生 [34], 被认为是稳定的不迁移元素, 一般富集于粗颗粒物中。黏土和粉砂更容易吸附 Rb, 因而 Rb 常富集于细粒组分中, 其通常表现出与伊利石、氧化铝、氧化钾等含量有很好的正相关性 [35]。因此 Zr/Rb 可以反映沉积物中的石英、长石等矿物与黏土矿物的相对比例 [36]。潟湖中 Zr、Rb 元素沉积有两种方式: 一是通过地表径流搬运, 降水过程中随着大量地表颗粒物进入湖泊; 二是通过风力搬运, 当气候较为干旱时, 物理风化使得地表碎屑物质被搬运进入湖泊 [37]。因此, 沉积物中的 Zr/Rb 比值可指示颗粒搬运时水动力的强弱 [38]。与 Zr/Rb 比值类似, Zr/Ti 比值具有同样的效果, 也可以用来指示沉积物粒度的变化 [39]。

通过对比 Zr/Rb、Zr/Ti 比值与 Niño 3.4 指数 (指数数据来自美国海洋大气局气候预测中心 CPC 网站 <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>) 可以发现 (图 7), Zr/Rb、Zr/Ti 比值都表现出了与 Niño 3.4 指数良好的对应关系。结果表明, 强厄尔尼诺现象基本对应低 Zr/Rb 比值和低 Zr/Ti 比值, 如 1972-1973 年、1982-

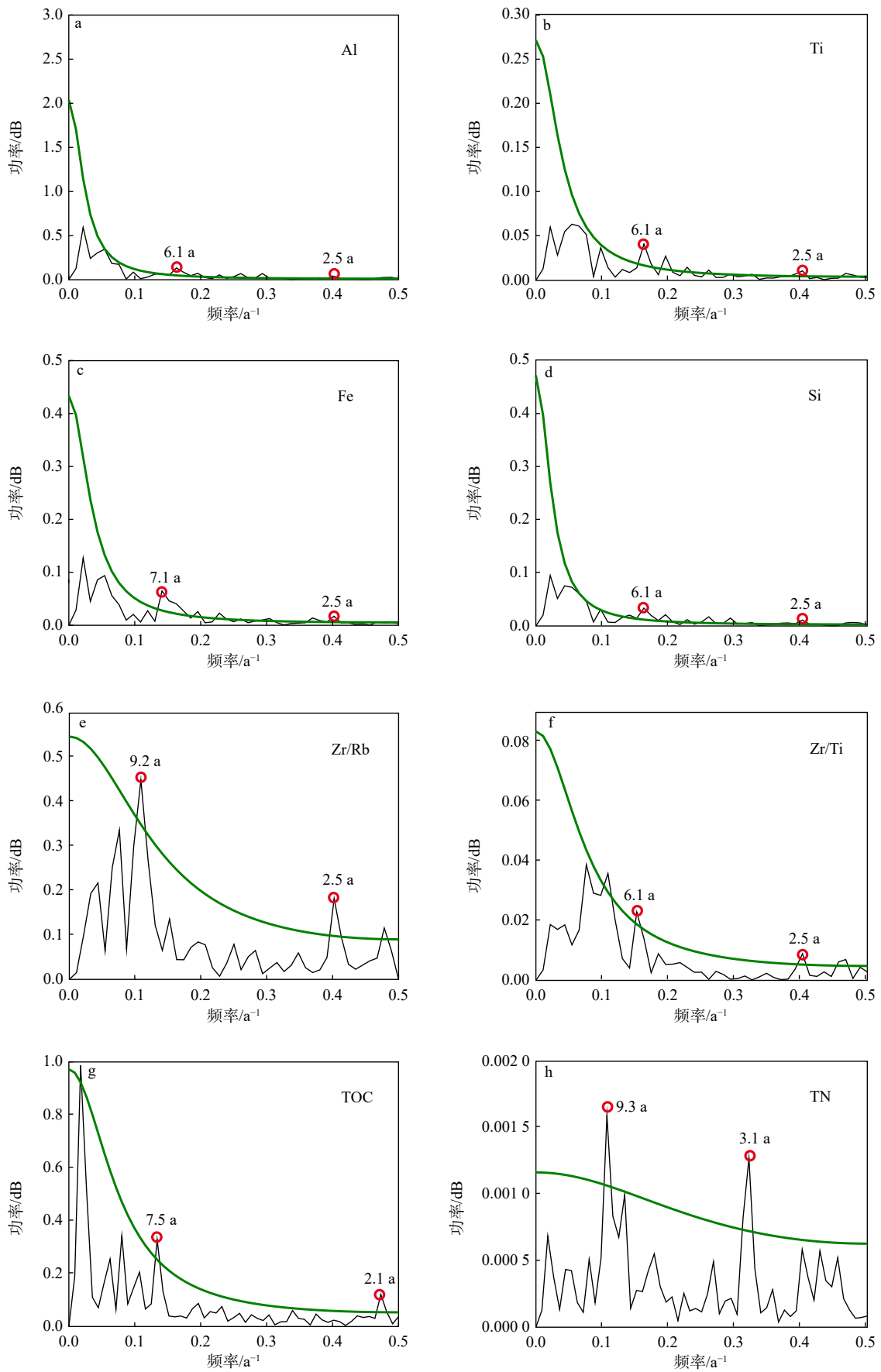


图 6 地球化学指标频谱分析(95% 置信区间)

Fig. 6 Geochemical indices spectrum analysis (95% confidence interval)

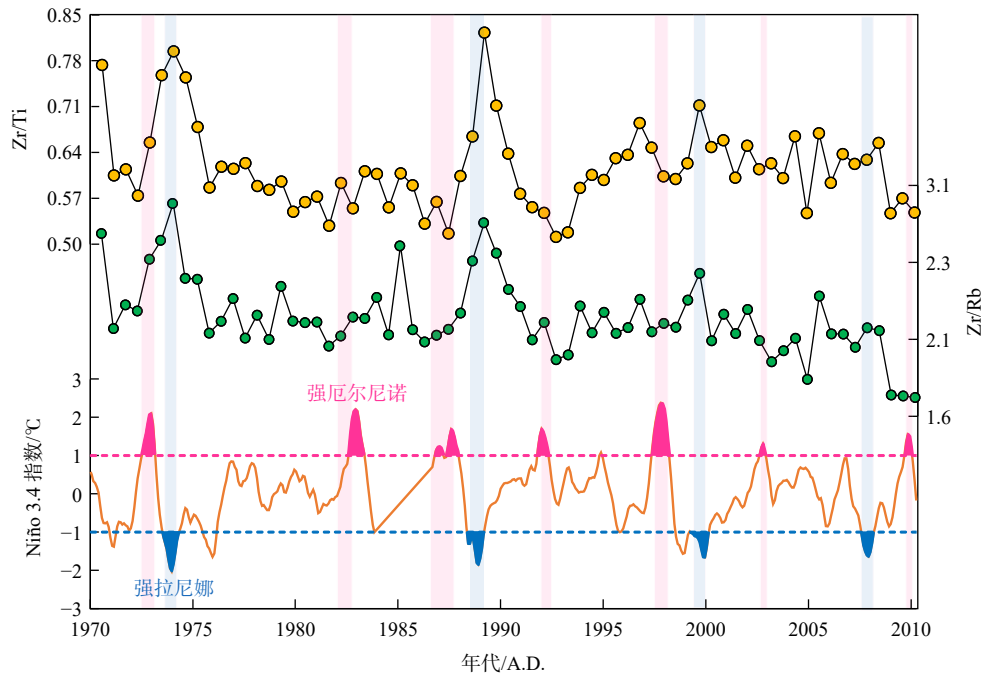


图7 NTT-3 钻孔 Zr/Rb、Zr/Ti 比值记录与 Niño 3.4 指数对比

(Niño 3.4 指数来自 <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>)

Fig. 7 The ratios of Zr/Rb and Zr/Ti in Core NTT-3 and comparisons with Niño 3.4 index

1983年、1987–1988年、1992–1993年、1997–1998年、2010–2011年等。而强拉尼娜现象基本对应高Zr/Rb、Zr/Ti比值,如1973–1974年、1988–1989年、1999–2000年、2007–2008年等。在强厄尔尼诺现象发生时期,随着西太平洋气压上升,东太平洋气压下降,沿赤道的信风减弱。信风强度异常减弱造成赤道地区自东向西流动的洋流减弱,西太平洋的海水温度异常降低,东太平洋冷水上翻现象消失,太平洋赤道地区的风向和风速发生变化^[40–42]。厄尔尼诺的远程影响通常会给东南亚地区如马来西亚、印度尼西亚等国家带来干旱天气,尤其像1982–1983年和1997–1998年的强事件^[41]。受此影响,马来半岛地区冬季风带来的降水显著减少,该区域气候相对较干,从而影响河流沉积物搬运和有机质输入,潟湖中表现为较低的Zr/Rb、Zr/Ti比值。拉尼娜经常产生与厄尔尼诺大致相反的气候影响^[41],在强拉尼娜现象发生时期,信风加强,赤道东太平洋的深层海水剧烈上翻导致海水表面温度异常降低。西太平洋暖湿气流上升运动强烈,东北冬季风给马来半岛东海岸带来大量降水。此时,潟湖积水动力相对较强,搬运能力较强。在降水冲刷和河流搬运下,大量沉积物在潟湖沉积,因而在沉积记录中显示了较高的Zr/Rb、Zr/Ti比值。值得注意的是,虽然频谱分析结果显示Zr/Ti、Zr/Rb比值的波动变化与ENSO周期确实存在一定联系,但是仍然有

个别样品Zr/Ti、Zr/Rb比值的变化并非与ENSO异常年份一一对应。其原因可能是钻孔沉积速率并非恒定,因此具体到某一个特定年份时,其定年结果可能存在一些误差,即在识别特定年份事件可能会提前或者滞后一些,从而导致Zr/Ti、Zr/Rb比值与ENSO事件年份对应上的些微偏差。

由此可知,在周期性ENSO影响下,马来半岛东部降水的波动可引起地表径流冲刷的改变并导致进入潟湖的沉积物组成发生变化,最终在Setiu潟湖的钻孔沉积物中产生周期性的元素波动记录。此外,有机质含量也显示了一些较明显的波动趋势(图3),这可能源于沉积物粒度和有机指标对水动力分选(沉积物搬运迁移)的差异化响应。对于沉积物中的有机质组分,其赋存形式并不简单依赖于粒度的变化,沉积物矿物成分的变化、氧化还原环境等因素都可以引起有机质的改变^[43]。经频谱分析发现了有机质的周期性变化规律(图6),并且与ENSO事件相关联,可能是降水增加导致周边红树林植被更加繁盛,从而产生了更多的有机碎屑。该发现表明,ENSO事件不仅对西太平洋地区的气候产生了重要的影响^[44–45],对东南亚的赤道太平洋地区也有显著作用。该结论不仅支持了现代尺度马来半岛东部地区气候变化的认识^[46–48],同时也在地质记录中发现了ENSO变化的直接证据,对全面认识和理解ENSO对亚洲气候变化的

影响、区域陆海相互作用过程和环境响应等方面具有重要现实意义。

5 结论

马来半岛东北部登嘉楼州 Setiu 潟湖 NTT-3 钻孔记录中各参数在 1970 年(深度 84 cm)前后出现两种不同的变化趋势。1970 年之前沉积物粒度、有机和无机地球化学特征均显示可能存在事件性沉积或沉积间断,沉积速率非常慢。而 1970 年以来,潟湖沉积物中的有机组分主要来自周边红树林,同时伴有部分河流输入的淡水浮游植物的贡献。1970 年以来,钻孔中 Al、Ti、Fe、Si、Zr、Rb 等元素的垂向变化和频谱分析结果显示,钻孔存在明显的 ENSO 周期变化。强

拉尼娜现象总是对应高 Zr/Rb、Zr/Ti 比值,而强厄尔尼诺现象总是对应低 Zr/Rb、低 Zr/Ti 比值。ENSO 引起的降水变化改变了地表径流冲刷,导致进入潟湖的沉积物粒度发生变化,从而在潟湖沉积记录中产生周期性的元素波动记录。本结论进一步证实了 ENSO 对东南亚地区干湿的影响,从而有助于了解 ENSO 在亚洲的影响范围及程度。

致谢: 本文得到同济大学吴伊婧、南京师范大学胡竹君、自然资源部第一海洋研究所白亚之在各项试验工作中的指导。感谢同济大学陈俊飞在样品测试过程中的协助,感谢中国海洋大学胡利民教授参与数据讨论。

参考文献:

- [1] Tangang F T, Juneng L, Salimun E, et al. Climate change and variability over Malaysia: gaps in science and research information[J]. *Sains Malaysiana*, 2012, 41(11): 1355–1366.
- [2] Tan M L, Duan Zheng. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 720.
- [3] Suhaila J, Yusop Z. Trend analysis and change point detection of annual and seasonal temperature series in Peninsular Malaysia[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2018, 130(5): 565–581.
- [4] Juneng L, Tangang F T. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in Southeast Asia region and its relationship with atmosphere-ocean variations in Indo-Pacific Sector[J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(4): 337–350.
- [5] Yusof F, Hui-Mean F, Suhaila J, et al. Characterisation of drought properties with bivariate copula analysis[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(12): 4183–4207.
- [6] Othman M, Ash'aari Z H, Muharam F M, et al. Assessment of drought impacts on vegetation health: a case study in Kedah[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 37: 012072.
- [7] Tan M L, Juneng L, Tangang F T, et al. Changes in temperature extremes and their relationship with ENSO in Malaysia from 1985 to 2018[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(S1): E2564–E2580.
- [8] Alexander L V. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2016, 11: 4–16.
- [9] Wong C L, Venneker R, Uhlenbrook S, et al. Variability of rainfall in Peninsular Malaysia[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2009, 6(4): 5471–5503.
- [10] Wong C L, Liew J, Yusop Z, et al. Rainfall characteristics and regionalization in Peninsular Malaysia based on a high resolution gridded data set[J]. *Water*, 2016, 8(11): 500.
- [11] He Qing, Chun K P, Tan M L, et al. Tropical drought patterns and their linkages to large-scale climate variability over Peninsular Malaysia[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(9): e14356.
- [12] Meyers P A, Lallier-Vergés E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 21(3): 345–372.
- [13] 成艾颖, 余俊清, 张丽莎, 等. XRF 岩芯扫描分析方法及其在湖泊沉积研究中的应用 [J]. *盐湖研究*, 2010, 18(2): 7–13. Cheng Aiyong, Yu Junqing, Zhang Lisha, et al. XRF core scanning and applications on lake sediments[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2010, 18(2): 7–13.
- [14] Sanchez-Cabeza J A, Ruiz-Fernández A C. ^{210}Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 82: 183–200.
- [15] Reimer P J, Austin W E N, Bard E, et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP)[J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 725–757.
- [16] Mallinson D J, Culver S J, Corbett D R, et al. Holocene coastal response to monsoons and relative sea-level changes in northeast Peninsular Malaysia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 91: 194–205.
- [17] Jaafar N M S, Nor S M M, Omar W B W, et al. Mangroves of the east coast of Peninsular Malaysia[J]. *Malayan Nature Journal*, 2020, 72(4): 441–450.
- [18] Fry B, Sherr E B. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems[J]. *Contributions in Marine Science*, 1984, 27: 13–47.

- [19] Pancost R D, Boot C S. The paleoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/2/3/4): 239–261.
- [20] Leng M J, Marshall J D. Paleoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 811–831.
- [21] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of seawater[J]. *The Sea*, 1963, 2: 26–77.
- [22] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4): 289–302.
- [23] Valiela I, Cole M L. Comparative evidence that salt marshes and mangroves may protect seagrass meadows from land-derived nitrogen loads[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(1): 92–102.
- [24] Gonnee M E, Paytan A, Herrera-Silveira J A. Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(2): 211–227.
- [25] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch[J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 162–165.
- [26] D'Arrigo R, Cook E R, Wilson R J, et al. On the variability of ENSO over the past six centuries[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(3): L03711.
- [27] Nicholls N. Recent trends in the seasonal and temporal behaviour of the El Niño-Southern Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): L19703.
- [28] Richter T O, Van der Gaast S, Koster B, et al. The Avaatech XRF Core Scanner: technical description and applications to NE Atlantic sediments[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2006, 267(1): 39–50.
- [29] Nizou J, Hanebuth T J J, Heslop D, et al. The Senegal River mud belt: A high-resolution archive of paleoclimatic change and coastal evolution[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/2/3/4): 150–164.
- [30] Blanchet C L, Thouveny N, Vidal L, et al. Terrigenous input response to glacial/interglacial climatic variations over southern Baja California: a rock magnetic approach[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(25/26/27/28): 3118–3133.
- [31] Kleiven H F, Kissel C, Laj C, et al. Reduced North Atlantic deep water coeval with the glacial Lake Agassiz freshwater outburst[J]. *Science*, 2008, 319(5859): 60–64.
- [32] Vidal L, Bickert T, Wefer G, et al. Late Miocene stable isotope stratigraphy of SE Atlantic ODP Site 1085: relation to Messinian events[J]. *Marine Geology*, 2002, 180(1/2/3/4): 71–85.
- [33] Kissel C, Laj C, Kienast M, et al. Monsoon variability and deep oceanic circulation in the western equatorial Pacific over the last climatic cycle: insights from sedimentary magnetic properties and sortable silt[J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(3): PA3215.
- [34] Taylor S R. The application of trace element data to problems in petrology[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1965, 6: 133–213.
- [35] Fralick P W, Kronberg B I. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources[J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 113(1/2): 111–124.
- [36] 梅西, 李日辉, 张训华. 南黄海 DLC70-3 孔晚更新世以来 Rb/Zr 值特征及环境意义 [J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(2): 10–17.
Mei Xi, Li Rihui, Zhang Xunhua. Characteristics of Rb/Zr ratio of DLC70-3 core from South Yellow Sea and its environmental implication since late Pleistocene[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(2): 10–17.
- [37] 谭玲玲, 钟巍, 薛积彬, 等. 新疆巴里坤湖全新世湖沉积物中 Zr/Rb 比值特征及其环境意义 [J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(11): 109–114.
Tan Lingling, Zhong Wei, Xue Jibin, et al. Variation of Zr/Rb ratios from the Holocene Lacustrine sediments in Balikun Lake in Xinjiang and its environmental implications[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(11): 109–114.
- [38] Dypvik H, Harris N B. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr + Rb)/Sr ratios[J]. *Chemical Geology*, 2001, 181(1/2/3/4): 131–146.
- [39] Oldfield F, Wake R, Boyle J, et al. The late-Holocene history of Gormire Lake (NE England) and its catchment: a multiproxy reconstruction of past human impact[J]. *The Holocene*, 2003, 13(5): 677–690.
- [40] Cai Wenju, Santoso A, Wang Guojian, et al. ENSO and greenhouse warming[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(9): 849–859.
- [41] McPhaden M J, Zebiak S E, Glantz M H. ENSO as an integrating concept in earth science[J]. *Science*, 2006, 314(5806): 1740–1745.
- [42] Wang Chunzai, Deser C, Yu Jinyi, et al. El Niño and southern oscillation (ENSO): a review[M]. //Glynn P W, Manzello D P, Enochs I C. *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. Dordrecht: Springer, 2017: 85–106.
- [43] Håkansson S. A review of various factors influencing the stable carbon isotope ratio of organic lake sediments by the change from glacial to post-glacial environmental conditions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1985, 4(2): 135–146.
- [44] 许武成, 马劲松, 王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述 [J]. *气象科学*, 2005, 25 (2): 212–220.
Xu Wucheng, Ma Jinsong, Wang Wen. A review of studies on the influence of ENSO events on the climate in China[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2005 (2): 212–220.
- [45] 任福民, 袁媛, 孙丞虎, 等. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾 [J]. *气象科技进展*, 2012, 2(3): 17–24.
Ren Fumin, Yuan Yuan, Sun Chenghu, et al. Review of progress of ENSO studies in the past three decades[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(3): 17–24.

- [46] Tangang F, Farzanmanesh R, Mirzaei A, et al. Characteristics of precipitation extremes in Malaysia associated with El Niño and La Niña events[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 696–716.
- [47] Tangang F, Juneng L, Ahmad S. Trend and interannual variability of temperature in Malaysia: 1961–2002[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, 89(3/4): 127–141.
- [48] Sammathuria M K, Ling L K. Regional climate observation and simulation of extreme temperature and precipitation trends[C]//Proceedings of the 14th International Rainwater Catchment Systems Conference, Kuala Lumpur, Malaysia. 2009: 3–6.

Evolution of sedimentary environment in Setiu Lagoon, northeastern Malaysia, and its response to ENSO

Zhao Zhouping¹, Li Chao¹, Luo Zhenghua¹, Nicholas Ng Chia Wei¹, Dai Lu¹

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The impact of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on the climate of the low-latitude tropical region of the Malay Peninsula, particularly with regard to precipitation, remains a topic of debate. This study focuses on the NTT-3 drill core from Setiu Lagoon in Terengganu, northeastern Malay Peninsula. By employing analyses such as grain size, total organic carbon/nitrogen content, C/N ratio, and XRF core scanning, this research investigates the sedimentary environmental changes in the drill core and their response to ENSO. The results reveal two distinct trends in the drill core record, appearing around 1970 (at 84 cm depth). Sediment characteristics such as grain size and geochemical features of both organic and inorganic components suggest the possible occurrence of episodic sedimentation or sedimentary interruptions, with exceptionally slow sedimentation rates observed in the lower part of the core before 1970. Since 1970, the organic components in the lagoon sediment primarily originate from mangroves, accompanied by contributions from freshwater phytoplankton associated with river inputs. Spectral analysis indicates a pronounced ENSO periodic variation in the upper part of the drill core since 1970. The variations in Zr/Rb and Zr/Ti ratios correlate well with the occurrences of strong El Niño and La Niña events. This conclusion not only supports contemporary observations of climate change in the eastern coastal region of the Malay Peninsula but also provides direct geological evidence of ENSO variations in the sedimentary record. This discovery holds significant practical implications for a comprehensive understanding of the impact of ENSO on climate change in Asia, regional land-sea interaction processes, and environmental responses.

Key words: Setiu Lagoon; sedimentary environment; spectral analysis; El Niño-Southern Oscillation (ENSO)