

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019032702

南海台西南盆地南部海域 TS6 孔常量元素地球化学特征及其古环境意义

唐荣^{1,2,3}, 冯秀丽^{1,2}, 冯利^{1,2}, 肖晓^{1,2}, 冯智泉^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100
3. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180

摘要:通过对南海台西南盆地南部海域 TS6 柱状样沉积物样品常量元素地球化学特征的分析, 结合粒度和 AMS¹⁴C 测年分析结果, 探讨了研究区末次冰消期以来的沉积环境及气候变化特征。常量元素垂向序列显示元素 Mn 在沉积物近表层大量自生富集, 指示近现代底层水高度富氧, 表明研究区水体环境条件十分有利于水成成因的铁锰结核发育; 常量元素统计分析表明, Al、Fe、Mg、K、Ti 代表了陆源元素组合; 陆源常量元素比值 Al_2O_3/TiO_2 、 TFe_2O_3/TiO_2 、 MgO/TiO_2 和 MgO/Al_2O_3 记录了研究区末次冰消期以来的部分气候波动事件, 其中全新世 9.8~9.4 kaBP 和 6.5~5.8 kaBP 阶段发生了两次气候变冷事件, 指示东亚夏季风强度明显减弱, 并且 6.5~5.8 kaBP 阶段冷事件表现出“双峰”特征。各常量元素比值指示末次冰消期 18.5 和 15.8 kaBP 左右可能也出现了气候变冷事件, 其中 15.8 kaBP 出现的冷事件应该对应于 H1 事件。

关键词: 常量元素; 沉积环境; 气候波动; 南海台西南盆地

中图分类号: P736.4 文献标识码: A

Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of the major elements in the sediments of Core TS6 from the southern part of Southwest Taiwan Basin of the South China Sea

TANG Rong^{1,2,3}, FENG Xiuli^{1,2}, FENG Li^{1,2}, XIAO Xiao^{1,2}, FENG Zhiquan^{1,2}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting, Qingdao 266100, China
3. The First Monitoring and Application Center, CEA, Tianjing 300180, China

Abstract: Geochemical characteristics of major elements from the column sample TS6 in the southern part of Southwest Taiwan Basin, together with the grain size and AMS¹⁴C dating data are studied for both the changes in depositional environment and climate of the area since the last deglaciation. Vertical distribution of the major elements shows that Mn is autogenous and abundantly enriched near the surface of sediments, suggesting that the modern bottom water is highly oxygen-enriched. The water environmental conditions of the study area, therefore, are very beneficial for the deposition of hydrogenic ferromanganese nodules. Statistical analysis of major elements suggests that the major elements of Al, Fe, Mg, K and Ti represent the terrigenous element association. The ratios of these terrigenous elements, such as Al_2O_3/TiO_2 , TFe_2O_3/TiO_2 , MgO/TiO_2 and MgO/Al_2O_3 , are closely related to climatic fluctuations since the last deglaciation. Two climatic cooling events are observed in the periods of 9.8 kaBP~9.4 kaBP and 6.5 kaBP~5.8 kaBP respectively, indicating that the intensity of East Asian summer monsoon was significantly weakened then. The cooling event happened during the period of 6.5 kaBP~5.8 kaBP showed a pattern of "double peaks". The ratios of major elements further indicate that there may also be some climatic cooling events around 18.5 kaBP and 15.8 kaBP in the last deglaciation, and the cold event at 15.8 kaBP should correspond to the event of Heinrich 1.

Key words: major elements; sedimentary environment; climatic fluctuation; southwest Taiwan Basin of the South China Sea

南海是目前国际古海洋学研究的热点区域^[1]。近年来, 围绕着第四纪以来南海北部古环境古气候

重建及驱动因素探讨的工作已广泛开展, 并主要集中在陆坡陆架区^[2-5]。国内外学者曾对北部陆坡区

资助项目: 国家重点研发计划项目“ROV 精准取样技术应用与南海北部深海沉积过程研究”(2017YFC0306703)

作者简介: 唐荣(1993—), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: 1244011618@qq.com

通讯作者: 冯秀丽(1962—), 女, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积与工程环境研究, E-mail: fengxiuli@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-03-27; 改回日期: 2019-05-01. 蔡秋蓉编辑

ODP1144、ODP1145、ODP1146 和 MD05-2905 等岩心进行了粒度、地球化学元素、矿物和有孔虫碳氧同位素在内的多指标研究^[6-10], 发现第四纪以来全球气候经历了多次的冰期/间冰期旋回变化, 末次冰期以来较高分辨率的研究也陆续捕捉到高频振荡的气候波动事件^[11-12], 如 Heinrich 事件、新仙女木事件 (YD)、全新世 8.2 和 4.2 ka 等快速变冷事件, 这些气候突变事件的影响范围和成因机制是否相同目前尚无定论。研究表明, 海洋沉积物中的元素地球化学记录能提供丰富的古气候环境信息, 特定的元素或组合可以获取特定的环境及其成因信息, 如源区风化剥蚀程度、海水古生产力变化、东亚季风变迁过程等^[13], 有学者认为 Fe、Mg、Na、Al、K、Ca、P 等常量元素含量主要受控于造岩矿物的类型, 可以反映源区母岩成分的组成^[6,14], 而消除粒度效应的陆源元素比值对气候变冷事件具有明显的指示意义^[15]。

台西南盆地临近台湾岛、巴士海峡和华南大陆, 物质来源和水流体系较复杂, 沉积环境方面的研究相对较少, 对该海域沉积物短时间尺度较高分辨率的研究势必能丰富我们对东亚季风典型影响区环境气候变化的综合理解。本文以盆地南部海域的 TS6 重力柱状样为研究材料, 在建立地层年代框架的基础上, 着重对沉积物的常量元素进行分析, 探讨研究区末次冰消期以来的沉积环境和气候波动特征, 对完善南海北部晚第四纪以来的古环境古气候演变过程及预测未来气候变化趋势具有一

定的科学意义。

1 材料与方法

本文实验样品采样点位于南海东北部下陆坡与海盆交界处、台西南盆地以南海域 (图 1), 是利用重力取样器获得, 取样水深 3 008 m。柱状样长度为 400 cm, 岩性相对均一, 主要由青灰色粉砂组成, 沉积基本连续, 未见明显的沉积间断和浊流沉积层出现, 可以反映研究区的正常海洋环境。

本文对 TS6 柱状样进行连续取样, 取样间隔 2 cm, 共获得 200 个样品进行地球化学和粒度分析, 共测试了 Al、Ca、Fe、Mg、Na、K、Ti、P 和 Mn 等 9 种元素, 另加测了 V、Cr、Co、Ni、Mo 等 5 种微量元素。地球化学测试前取 10 g 左右样品烘干并用玛瑙研钵研磨至 200 目, 采用四酸消解法对样品进行前期处理, 具体步骤如下: 首先取 60 °C 低温烘干后的样品 50 mg 于 Bomb 溶样器中, 加入 1 mL $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} (1 : 1)$, 充分反应, 随后加入 3 mL 纯 HF; 然后放入自动控温电热板上 (温度设定在 160~180 °C) 加热 48 h, 蒸发至快干后加入 1 mL 纯化过的 HClO_4 , 蒸至白烟冒尽; 冷却后加 2 mL 1 : 1 的 HCl, 同样蒸至近干; 再加 2 mL $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} (1 : 1)$, 蒸至近干后继续加入 $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} (1 : 1)$ 1.5 mL, 加热溶解 12 h 后冷却至室温; 加入 0.5 mL 铊内标溶液, 置于电热板上保温 12 h, 冷却至室温; 最后用 $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} (1 : 1)$ 移至 50 mL 容量瓶中, 并用其定

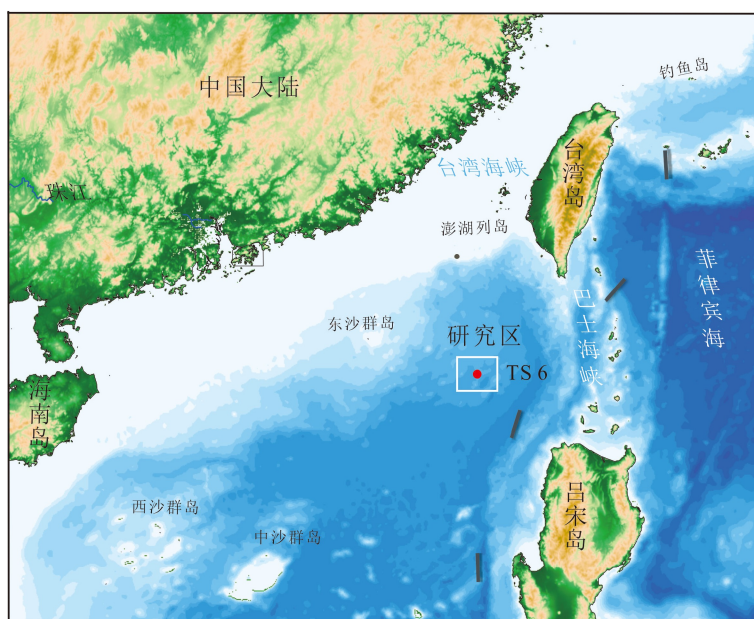


图 1 TS6 孔站位示意图

Fig.1 Location map of column sample TS6

容, 摇匀待测。样品后期上机测试在澳实分析检测(广州)有限公司实验室进行, 常量元素用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定, 微量元素用电感耦合等离子体质谱仪分析仪(ICP-MS)测定, 主、微量元素分析误差 $<5\%$ 。粒度测试具体实验步骤如下: 取约 0.5 g 样品于 50 mL 小烧杯中, 加入 10 mL 30% 的 H_2O_2 反应直至不再产生气泡, 以去除样品中的有机质; 再向烧杯中加入 0.25 mol/L 的 HCl 5 mL 静置 24 h 以去除样品中的有孔虫等钙质壳体; 反应完全后, 加入去离子水离心清洗 3 次确保去除样品中的酸根离子; 向烧杯中加入 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠溶液 5 mL, 用超声仪振荡 15 min, 充分分散后使用 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪进行上机测试。仪器测量范围为 0.01~2 000 μm , 粒级分辨率为 0.01 Φ , 重复测量的相对误差 $<1\%$ 。

本文从 TS6 柱状样中挑选了 5 个层位的浮游有孔虫进行 AMS¹⁴C 测年。样品前处理在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室进行, 首先取约 15 g 样品到 500 mL 烧杯中加入稍过量 10% 的 H_2O_2 去除有机质, 充分分散后过 0.063 mm 的筛子进行冲洗, 然后将筛子中的样品冲洗到烧杯中进行烘干, 挑选粒径为 0.025~0.035 mm 的浮游有孔虫单种 *Globorotilia menardii*, 后期测试在美国迈阿密的 Beta 测年实验室完成, 其中碳储库 ΔR 为 $61\pm 78a$, 通过线性内插和外推建立 TS6 柱状样完整的年代框架。

2 实验结果

2.1 年代框架

AMS¹⁴C 测年结果(表 1)显示 TS6 柱状样沉积连续, 大致涵盖了末次冰消期以来的沉积记录(默认表层样品是现代沉积)。柱状样从老到新沉积速

率整体呈降低趋势, 其中 18.9~16.3 kaBP 的沉积速率大于 40 cm/ka; 16.3~14.7 kaBP 的沉积速率稍下降, 平均沉积速率 35.4 cm/ka; 随后沉积速率开始明显降低, 到约 3 kaBP 沉积速率只有约 10.3 cm/ka(图 2)。

2.2 粒度特征

采用 Shepard 命名法, TS6 柱状样沉积物全部为黏土质粉砂, 各粒级组分中粉砂最多, 含量变化范围为 53.32%~78.56%, 342 cm 层位含量最高, 32 cm 层位含量最低, 平均含量 62.29%; 黏土组分含量范围为 21.31%~46.26%, 16 cm 层位含量最高, 342 cm 层位含量最低, 平均含量 36.87%; 砂组分含量极少, 平均含量 0.84%; 无砾石组分(表 2)。根据沉积物组成和粒度参数的垂向变化特征, 可以将 TS6 柱状样自上而下划分成 4 个特征沉积层位: I 层(0~18 cm)沉积物偏细, 各粒级组分变化不大, 粉砂平均含量为 58.10%, 黏土平均含量为 41.56%, 各粒度参数波动频率较小; II 层(18~175 cm)是整个柱状样中粒度参数波动频率最大的一层, 分选较差, 砂组分含量达到最高, 平均含量为 1.25%, 黏土组分含量稍降低, 在约 80 和 130 cm 沉积物出现较明显的变粗; III 层(175~250 cm)沉积物砂组分含量较上层变少, 粉砂组分含量较上两层增加, 平均含量为 61.68%, 沉积物自上而下呈现逐渐变粗的趋势; IV 层(250~400 cm)是整个岩心沉积物中粒度最粗的层位, 粉砂组分明显比前三层增多, 平均含量为 67.08%, 各粒度参数波动频率较 III 层明显变大, 沉积物分选变差, 在约 330 cm 沉积物粒度明显变细(图 3)。

2.3 常量元素变化特征

TS6 柱状样常量元素含量(以氧化物形式计算和讨论)如表 3 所示, Al_2O_3 的平均含量达到了 13.85%, 是除了 SiO_2 (本文未讨论)之外含量最高的元素, CaO 和 TFe_2O_3 次之, 平均含量分别为 6.34%

表 1 TS6 柱状样浮游有孔虫 AMS¹⁴C 年龄
Table 1 AMS¹⁴C dating results of column sample TS6

| 柱状样 | 深度/cm | 样品种类 | AMS ¹⁴ C 年龄/aBP | 日历年龄/cal aBP |
|-----|---------|------------|----------------------------|---------------|
| TS6 | 30~31 | G.menardii | 3 220±30 | 3 169~2 752 |
| | 130~131 | G.menardii | 9 210±40 | 10 167~9 634 |
| | 232~233 | G.menardii | 13 020±40 | 15 169~14 309 |
| | 287~288 | G.menardii | 13 980±40 | 16 585~16 000 |
| | 397~398 | 混合种 | 16 070±40 | 19 048~18 663 |

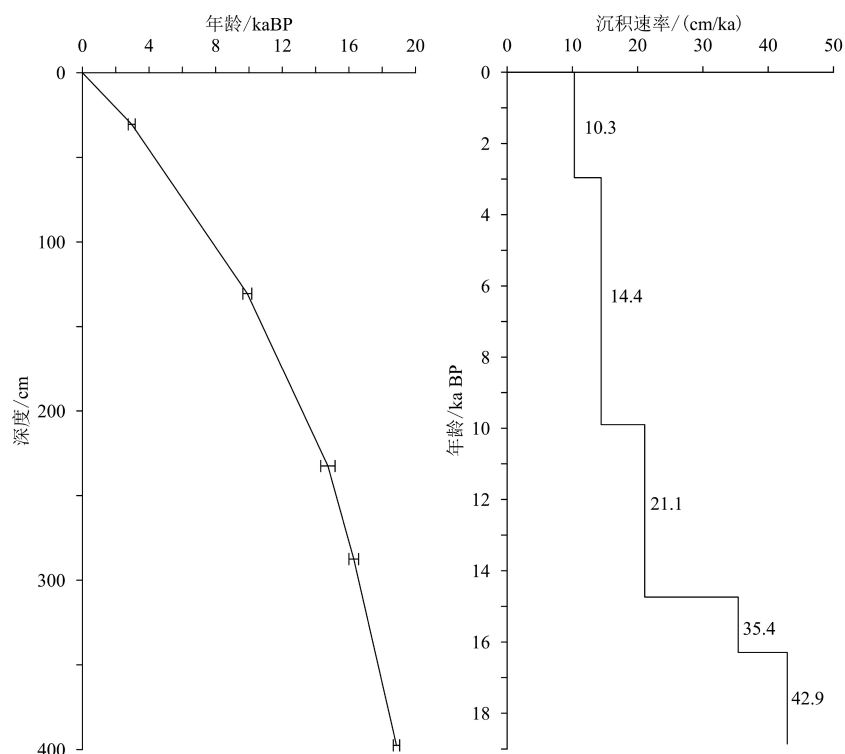


图 2 TS6 柱状样年代框架和沉积速率

Fig.2 Chronological framework and Change in sedimentation rate revealed by the column sample TS6

表 2 TS6 柱状样沉积物粒度参数与组分

Table 2 Grain size composition and parameters of sediments of the column sample TS6

| 粒度参数/组分 | M_z | M_d | σ_1 | Sk_1 | K_g | 砂/% | 粉砂/% | 黏土/% |
|---------|-------|-------|------------|--------|-------|------|-------|-------|
| 平均值 | 0.005 | 0.006 | 1.408 | 0.103 | 1.040 | 0.84 | 62.29 | 36.87 |
| 最大值 | 0.008 | 0.008 | 1.613 | 0.249 | 1.400 | 5.19 | 78.56 | 46.26 |
| 最小值 | 0.004 | 0.004 | 1.162 | -0.079 | 0.878 | 0 | 53.32 | 21.31 |

和 5.35%, MgO、Na₂O 和 K₂O 的含量也超过了 2%, TiO₂、P₂O₅ 和 MnO 的平均含量低于 1%。各常量元素的变异系数为 0.05~0.24, 其中 MnO 和 CaO 的变异系数(CV)较大, 尤其是 MnO 变异系数大于 2, 说明它们在岩心中的含量变化程度较大, 分异明显。

从整个垂向序列来看(图 4), 结合 AMS¹⁴C 测年建立的年代框架和沉积物粒度特征, 大致以约 175 cm(约 12 kaBP)划分为末次冰消期和全新世沉积, Al₂O₃、K₂O、TiO₂、MgO 和 TFe₂O₃ 含量垂向变化趋势较一致, 全新世时期各元素含量平均值普遍比末次冰消期阶段高, 并且全新世时期各元素的波动相对末次冰消期剧烈。全新世早期, 约 122~124 cm(约 9.4 kaBP) Al₂O₃、K₂O、TiO₂ 含量突然增加, 几乎达到最高值; 全新世晚期, 约 4 kaBP 开始各元素含量都较高并持续到现代。MnO 和 P₂O₅ 垂向变化较相似, 末次冰消期和全新世早中期含量变化相对平缓; 全新世晚期(约 3 kaBP) MnO 和 P₂O₅ 含

量突然增加, 并呈现出逐渐增长的趋势, 其中 MnO 在岩芯深度 8 cm 以上的含量是下层平均含量的近 8 倍。研究区沉积物中 CaO 的垂向变化特征与其他元素都不太相似, 其在 16~4 kaBP 阶段含量明显高于末次冰消期早期和全新世晚期。研究表明, 元素 Ca 化学活动性较强, 是斜长石和黏土矿物蒙脱石中的常见元素^[16], 而长石类矿物在暖湿条件下极易被风化, Ca 淋滤流失最终导致其含量下降, 但研究区沉积物中 CaO 在全新世时期的相对高含量分布特征明显表明其很难保持化学风化的“印记”。也有学者指出宽阔海区沉积物中的 Ca 元素大部分是由钙质生物壳体提供^[17], CaO 含量变化与生物活动密切相关^[18], 在靠近陆地的边缘海地区其含量变化可能还会受到陆源物质的影响。通过对比 30°N 夏季日照辐射量^[19], 可以看到研究区沉积物 CaO 的变化与其高度一致, 由于研究区地处东亚季风典型影响区, 而太阳辐射是影响季风强度的主

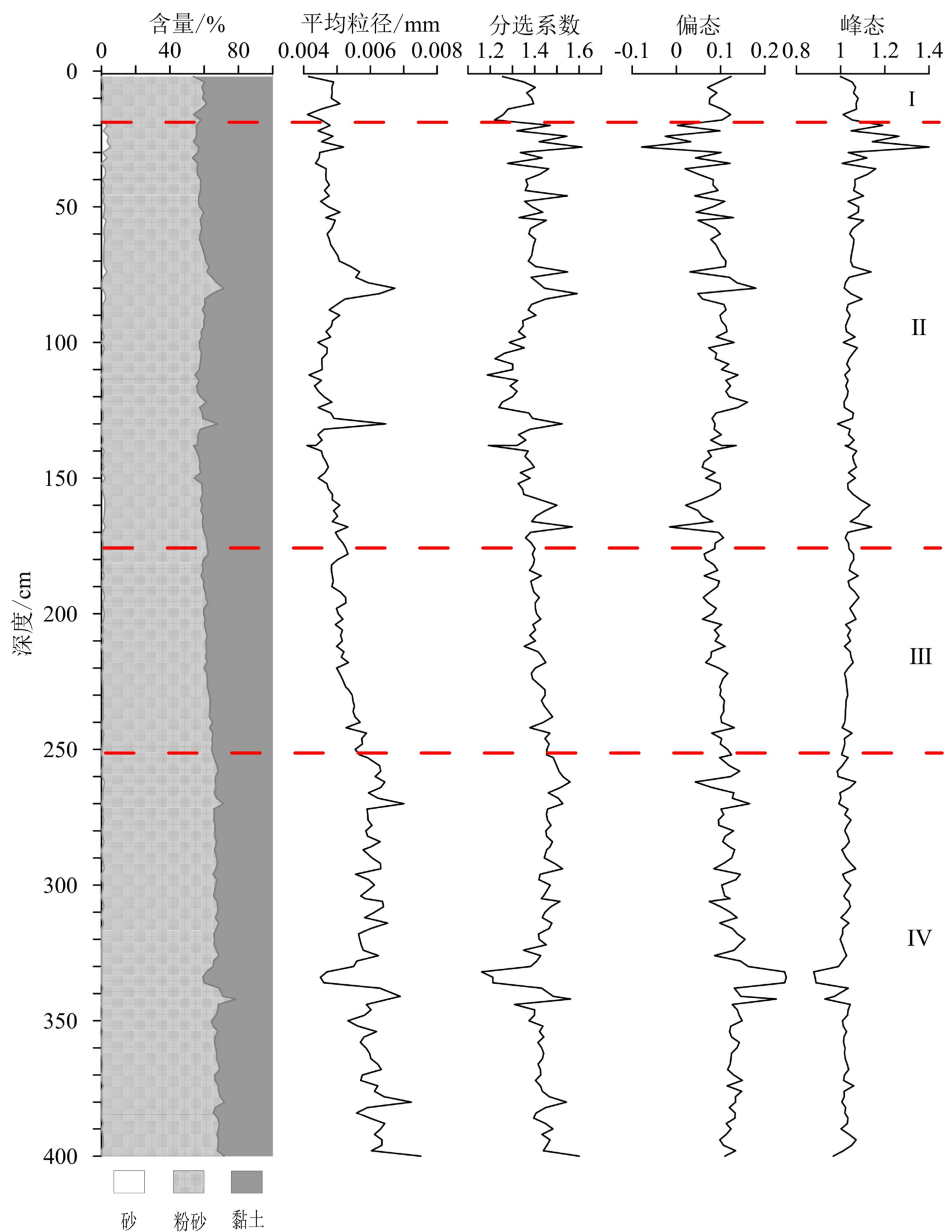


图3 TS6柱状样沉积物组成与粒度参数垂向变化图

Fig.3 Vertical variation of sediment composition and grain size parameters of column sample TS6

要因素之一,因此,推测 TS6 柱状样中的 CaO 主要是生物成因,末次冰消期晚期至早中全新世,东亚夏季风增强,海洋中钙质生物体的生产力上升,导致沉积物中 CaO 含量增加。

3 讨论

3.1 元素 Mn 的地球化学特征及其环境意义

TS6 柱状样沉积物中元素 Mn 的垂向变化特征十分特别,其在沉积物表层 20 cm 以上含量突增,甚至出现了 $>20\,000\text{ ug/g}$ 的极高值,由于在元素周期

表中位于 VII B 族,其更多地表现出过渡金属元素的化学行为。过渡金属元素在海洋地球化学循环中具有多种行为特征,但也有共性,比如 Zn、Cu、Ni、Co、V、Cr 等元素在底层海水、沉积物、孔隙水之间的循环主要受控于氧化还原条件,因此常用于指示底层水氧化还原状态^[20-21]。为进一步探究元素 Mn 的分布特征及其成因,本文选取了部分过渡金属元素与之一起讨论,如图 5 所示,由于陆源碎屑是研究区沉积物的主要来源,为了有效地减少陆源组分影响,本文参照 Wedepohl K H^[22] 的元素地壳平均值数据来分析各过渡金属的自生组分含量变化,从而进一步探讨沉积物氧化还原状态变化。地壳

表 3 TS6 柱状样沉积物常量元素 (氧化物) 含量 (%)
Table 3 Content of major elements (oxides) in the sediments of column sample TS6 (%)

| 常量元素 (氧化物) | 平均值 | 最高值 | 最低值 | 标准偏差 | 分异系数 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|------|------|
| Al ₂ O ₃ | 13.85 | 16.43 | 12.15 | 0.95 | 0.07 |
| CaO | 6.34 | 8.74 | 1.80 | 1.52 | 0.24 |
| TFe ₂ O ₃ | 5.35 | 7.06 | 4.51 | 0.49 | 0.09 |
| MgO | 2.47 | 2.98 | 2.12 | 0.18 | 0.07 |
| Na ₂ O | 3.22 | 3.75 | 2.74 | 0.18 | 0.06 |
| K ₂ O | 2.5 | 3.09 | 2.25 | 0.13 | 0.05 |
| TiO ₂ | 0.57 | 0.66 | 0.51 | 0.03 | 0.05 |
| P ₂ O ₅ | 0.11 | 0.16 | 0.10 | 0.01 | 0.11 |
| MnO | 0.20 | 4.20 | 0.08 | 0.40 | 2.01 |

表 4 TS6 柱状样常量元素因子载荷
Table 4 Factor loading of major elements in the sediments of column sample TS6

| 因子 | Al ₂ O ₃ | CaO | TFe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | MnO |
|----|--------------------------------|--------|---------------------------------|-------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|
| F1 | 0.977 | 0.137 | 0.874 | 0.908 | 0.056 | 0.871 | 0.917 | 0.538 | 0.084 |
| F2 | 0.110 | -0.507 | 0.321 | 0.203 | -0.033 | -0.163 | 0.181 | 0.759 | 0.877 |
| F3 | -0.075 | -0.624 | -0.114 | 0.070 | 0.912 | 0.100 | -0.063 | -0.126 | 0.158 |

中的 Mn 元素平均含量为 716 $\mu\text{g/g}$, 说明表层高含量的 Mn 主要是自生富集。Mn 在富氧的条件下可以与 O 结合沉积下来, 说明研究区海域底层水在近现代处于富氧状态。TS6 柱状样沉积物表层颜色与下层明显不同: 约 0~20 cm 沉积物呈棕黄色, 并有褐色物质散在分布, 下部沉积物呈青灰色, 粒度 I 和 II 特征层位也大致以此为界, 这些现象都说明柱状样约 20 cm 深度是一个比较重要的界限, Mn 元素等指示其可能是研究区沉积物的氧气穿透深度, 在此深度之下 Mn 元素平均含量为 1 050 $\mu\text{g/g}$, 自生富集不明显。元素 Mo 与 Mn 相似, 表层含量 (> 10 $\mu\text{g/g}$) 明显大于地壳中的平均含量 (1.1 $\mu\text{g/g}$), 说明也是自生富集。Mo 在高度还原的条件下可以自生富集, 但其与 Mn 元素的同步变化说明其不是还原自生富集, 而可能是 Mn 在沉积时吸附的组分^[23]。地壳中的 Cr 和 V 平均含量约为 126 和 98 $\mu\text{g/g}$, 研究区沉积物中的 Cr 平均含量只有 63.76 $\mu\text{g/g}$, V 含量稍高于地壳 (118.26 $\mu\text{g/g}$), Cr 元素含量变化特征与陆源元素的相似性说明自生富集的 Cr 非常少, 它们都是在还原条件下自生富集, 说明沉积物中下层的还原程度也较低。

南海是我国铁锰结核分布最丰富的边缘海, 北部湾、东北陆坡和深海盆是主要产区, 其中铁锰微

结核广泛分布于表层沉积物中, 又以中央海盆东北部为高含量区^[24]。铁锰结核在多种环境下均可生长发育, 具有多种成因类型。研究表明南海东北下陆坡区发现的铁锰结核为水成成因 (来源于上覆海水) 类型, 具有典型的边缘海铁锰结核特征^[25]。本文研究区临近东北陆坡区和深海盆, 虽然缺少海底表层物质分布资料, 没有铁锰结核存在的直接证据, 但 TS6 柱状样沉积物中 Mn 元素在近表层的大量自生富集以及部分过渡金属元素指示的近现代底层水体高度富氧都表明该区域环境条件十分有利于水成成因的铁锰结核发育, 对后续铁锰结核勘探具有重要的指导意义。

3.2 常量元素组合分析

使用 SPSS19.0 软件对 TS6 柱状样沉积物 9 个常量元素进行 R 型因子分析, 再根据各元素的地球化学性质和元素组合的成因相似性对分析得到的各因子赋予地质意义, 可以确定代表不同物质来源的元素组合。因子分析结果如表 4 所示, 在累计方差贡献达到 84.21% 的情况下得到了 3 个因子组合, 分别为 F1、F2 和 F3。F1 的方差贡献为 53.36%, 说明其对沉积物常量元素组成具有重要的影响, 该因子的元素组合为 Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、K₂O 和

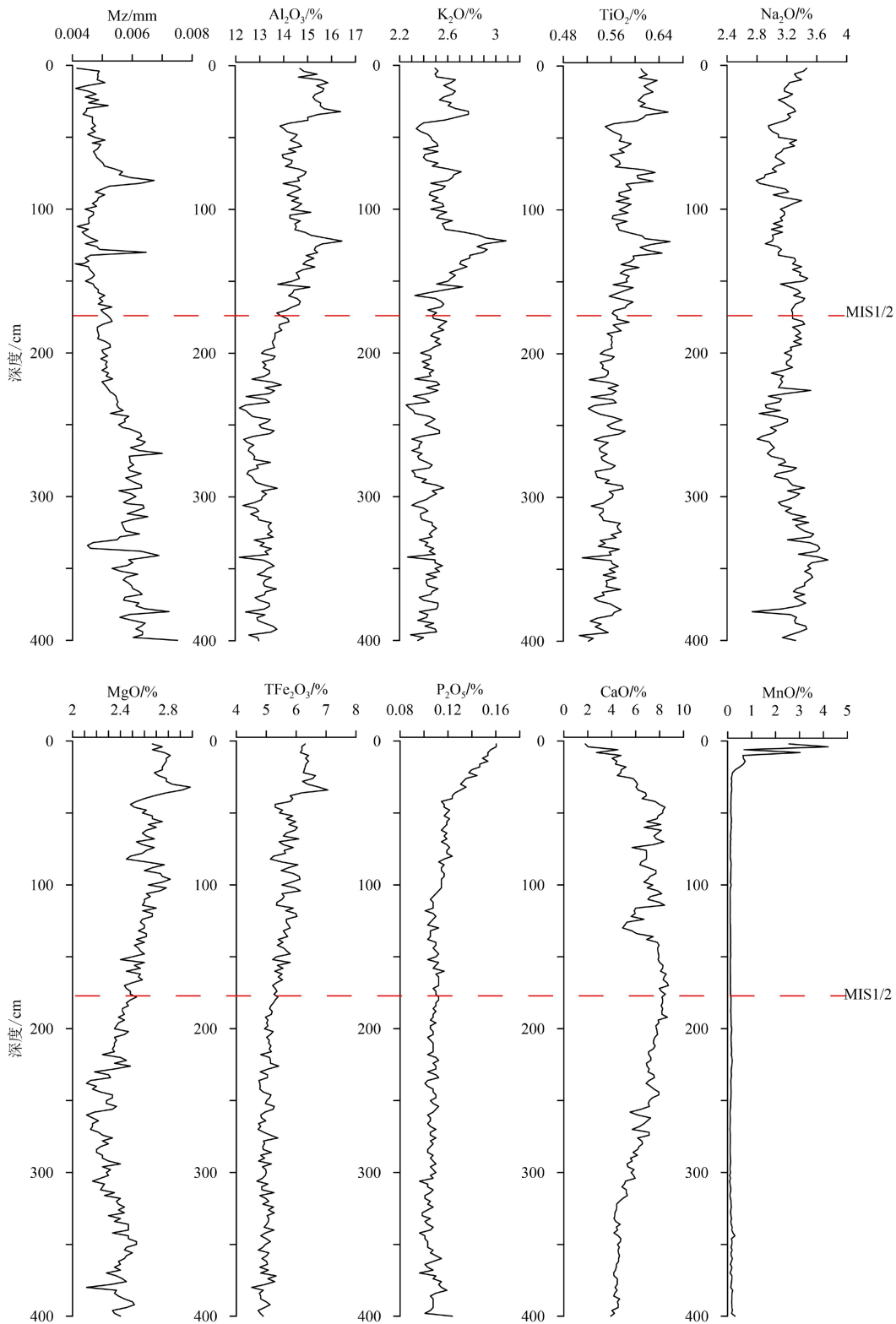


图4 TS6柱状样常量元素含量垂向变化图

Fig.4 Vertical variation of major element content in the sediments of column sample TS6

TiO₂, 并且都是正载荷。其中Ti在海水中的含量很低,且属于惰性元素,基本上是以赋存于陆源碎屑中的形式被搬运到海洋中沉积下来^[26-27], Al₂O₃、TFe₂O₃和K₂O与陆源组分密切相关^[6,14],而MgO含

量与古气候变化有关,其高值对应暖湿气候期,低值指示干冷气候期^[28-29],其与Al₂O₃的比值能进一步指示陆源物质的输入量变化,因此,F1可以代表陆源元素组合。F2的方差贡献为19.02%,该因子的

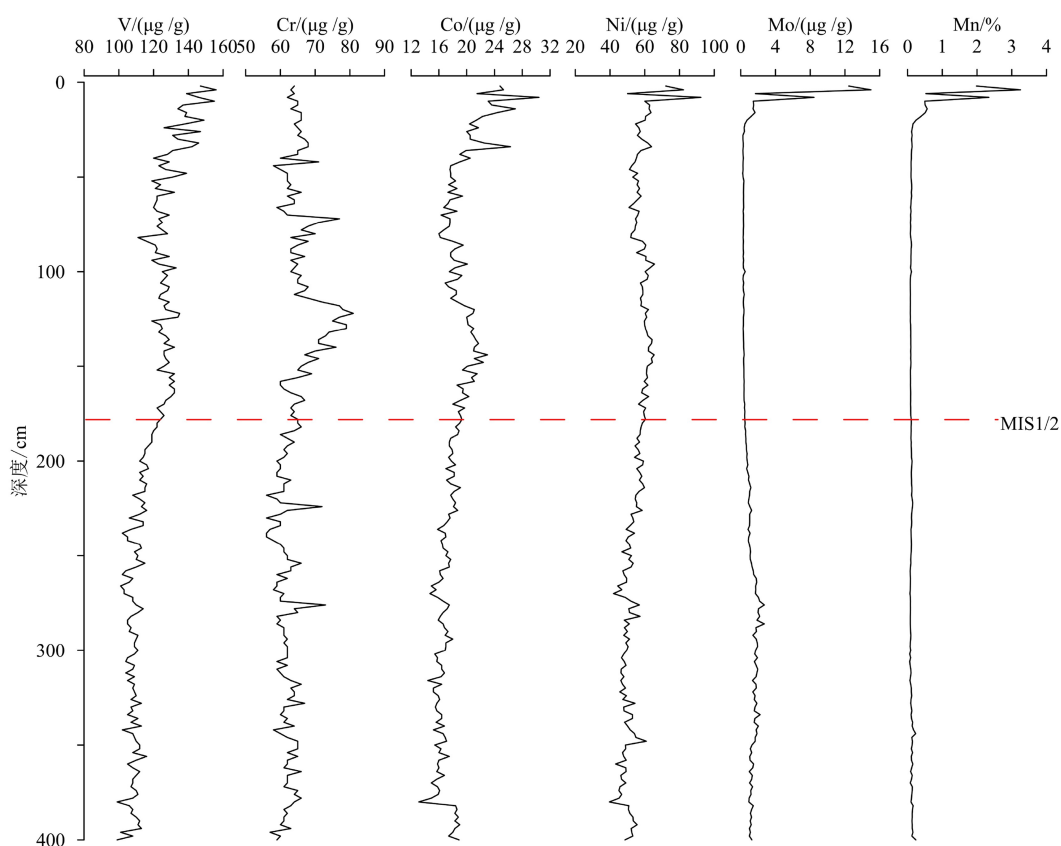


图 5 TS6 柱状样部分过渡金属元素含量垂向变化图

Fig.5 Vertical variation of some transitional metals content in the sediments of column sample TS6

元素组合为正载荷的 P_2O_5 和 MnO , Mn 元素含量一般受底层水体的含氧量影响, 含氧量越高, Mn 也越易被保存于沉积物中, 而底层水的含氧量受表层海水生产力影响^[29], P 元素也被认为与生物活动有关^[30-31], 直接影响水体生产力, 因此, F_2 可以代表研究区附近海水环境与生产力变化。 F_3 的方差贡献是 11.83%, 该因子的元素组合为正载荷的 Na_2O , Na 元素是表生地球化学中活动性较强的元素, 除了大陆含钠岩石的风化作用可以使 Na 进入到海水中, 海底火山活动也是其重要的物质来源^[32-33]。由于本文样品前处理时没有进行洗盐, 海盐成分可能会对样品测试结果造成影响。图 4 所示 Na_2O 的垂向分布与其他陆源元素也不太一致, 说明其应该不能指示陆源物质, 因此, F_3 可能叠加了多重因素的影响。

3.3 陆源常量元素比值对沉积环境及东亚季风的指示意义

海洋沉积物中的化学成分较易受到粒度分异的制约(粒控效应)^[34], 在探讨元素对沉积环境的指示意义时, 采用特定元素比值来消除粒度对其的影响。一般来说, Al 和 Ti 是常用的参比元素, 它们被广泛用于校正其他元素^[7,35-36], 由于南海深水沉积物

中存在自生源 Al , 所以经常用 Ti 来取代 Al 进行参比^[14,37]。

元素组合分析显示代表陆源元素组合的 F_1 方差贡献超过 50%, 说明研究区沉积物应该主要来源于周围大陆和河流所提供的陆源碎屑, 因此, 源区的气候变化直接影响到研究区的沉积物组成, 通过对研究区沉积物的分析可以反演区域气候环境变化特征。前人研究表明以大陆侵蚀产物为主要陆源组分的海洋沉积物中, Al 、 Fe 、 Mg 、 Na 等元素与 Ti 的比值可以作为指示源区古气候环境的重要替代性指标^[6], 本文选取具有代表性的 Al_2O_3/TiO_2 、 TFe_2O_3/TiO_2 和 MgO/TiO_2 这 3 组元素比值来反映源区的化学风化强度, 这几组元素比值越高说明源区化学风化越强, 指示相对暖湿的气候环境, 反之则指示相对干冷的气候环境^[6,38]。如图 6 所示, 整体来看全新世时期各元素比值比末次冰消期高, 反映出全新世以来气候变暖的趋势。由于研究区气候主要受控于东亚季风, 因此, 各元素比值可以进一步指示东亚季风的变化。末次冰消期气候相对寒冷, 指示东亚冬季风增强; 全新世以来气候变得暖湿, 指示东亚夏季风增强。值得注意的是在全新世整体气候变暖的大背景下各替代性指标也记录了儿

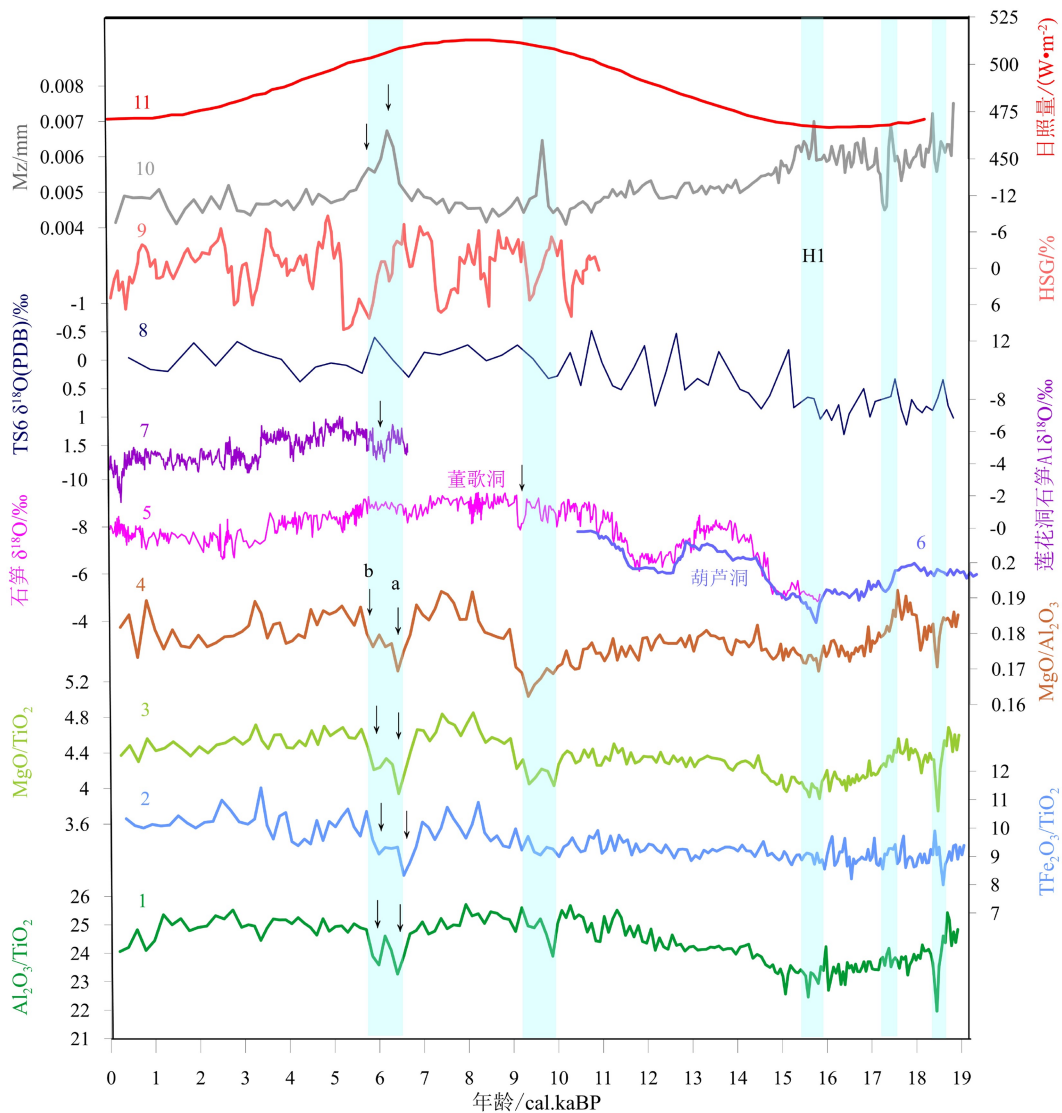


图6 TS6柱状样常量元素比值与周边地区石笋等记录变化对比图

1-4: TS6柱状样 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 MgO/TiO_2 和 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值; 5: 董歌洞 D4 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列; 6: 葫芦洞 PD 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列;
7: 莲花洞 A1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列; 8: TS6 柱状样浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 序列; 9: 北大西洋赤铁矿颗粒含量(HSG)^[39];
10: TS6 柱状样平均粒径; 11: 北纬 30°夏季日照辐射^[19]。

Fig.6 Ratio of major elements of the Column samples and correlation with the records of stalagmites in surrounding areas

1-4: the results of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, MgO/TiO_2 and $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ in sediments of column sample TS6; 5: the $\delta^{18}\text{O}$ record of Dongge Cave (Stalagmite D4); 6: the $\delta^{18}\text{O}$ record of Hulu Cave (Stalagmite PD); 7: the $\delta^{18}\text{O}$ record of Lianhua Cave (Stalagmite A1); 8: the $\delta^{18}\text{O}$ record of planktonic foraminifera in sediments of core TS6; 9: the Hematite-stained grains(HSG) content of North Atlantic; 10: the average grain diameter in sediments of core TS6; 11: 30°N summer insolation.

次气候变冷事件: 9.8~9.4 kaBP 和 6.5~5.8 kaBP 阶段各元素比值都出现了较明显的减小, 沉积物平均粒径在这两个时间段都出现明显的变大, 而用于指示陆源物质输入量变化的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值^[40] 在这两个阶段也出现了显著降低, 指示陆源物质输入量明显增加, 这些记录变化的高度一致性都指示全新世时期 9.8~9.4 kaBP 和 6.5~5.8 kaBP 阶段气候变冷, 东亚夏季风出现了明显的减弱。

为了进一步探究 TS6 柱状样沉积物中陆源常量元素比值所反映的气候变冷事件在受东亚季风影响的其他地区是否有记录, 本文将搜集到的中国南方石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录等与之进行对比, 3 个石笋分别位于中国西南(贵州荔波董歌洞)、中南(湖南湘西龙山莲花洞)和东南(南京汤山葫芦洞)地区, TS6 柱状样沉积物记录到的 6.5~5.8 kaBP 阶段的气候变冷事件在董歌洞 D4 石笋^[41] $\delta^{18}\text{O}$ 序列中反映

不明显,但在湖南莲花洞 A1 石笋^[42] $\delta^{18}\text{O}$ 记录中可以看到该阶段 $\delta^{18}\text{O}$ 值有小幅度的升高,9.8~9.4 kaBP 阶段的变冷事件在董歌洞 D4 石笋中也有所体现,但其记录到的时间稍偏晚(约 9 kaBP),这说明研究区沉积物记录到的变冷事件在东亚其他季风影响区也有不同程度的响应。

前人研究表明全新世以来发生了多次气候波动事件,其中 8.2 ka 事件被普遍认为是全新世冷事件中强度最大的一次快速气候突变事件,多数学者将其成因解释为北美冰融湖坍塌导致大量淡水注入北大西洋,使北大西洋温盐环流受阻,进而导致北大西洋地区快速降温,随后的大量研究发现 8.2 ka 冷事件在全球多地的沉积记录中都有反映,说明其影响范围较广。但近几年有学者认为在亚洲季风区,情况可能跟高纬地区存在显著差别^[43];张文超等结合中国和印度季风区的石笋、湖泊和海洋沉积等季风记录,对湖北神农架地区大九湖泥炭沉积物的元素和孢粉记录进行了深入研究,发现相对于 8.2 ka 事件,9.2 ka 出现的气候变冷事件突变幅度明显更大,且这一现象在亚洲季风区普遍存在。其成因机制也与 8.2 ka 事件有所不同,学者认为 9.2 ka 事件主要是太阳辐射减少驱动的低纬地区夏季水文循环变化影响到夏季风记录。本文研究区沉积记录中 8.2 ka 事件反映不明显,这可能与北大西洋地区的信号远距离传输出现减弱以及不同地区存在季节性变化差异所致,9.8~9.4 kaBP 阶段的气候变冷事件可能对应于学者提出的 9.2 ka 事件,其在 TS6 柱状样沉积物中的显著记录进一步佐证了张文超等的观点。全新世中期,北大西洋深海沉积记录^[44-45]和西北欧地区出现的“榆树衰败”(Elm Decline)事件都指示约 5.5 kaBP 发生了气候变冷变干事件,后续大量沉积记录也证明了该事件的影响具有全球性^[46]。本文研究区记录到的 6.5~5.8 kaBP 阶段的气候变冷事件可能与之对应,此外这次变冷事件在研究区的记录(风化强度元素比值、粒度和浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 序列)都呈现出“双峰”的特征,冷峰值分别发生在 6.5 kaBP(a)和 5.9 kaBP(b),且 a 阶段的强度要大于 b 阶段。

末次冰消期阶段,约 18.5 kaBP 各常量元素比值突然快速降至极小值,沉积物粒度也出现了变粗的趋势,指示了盛冰期后的一次变冷事件;约 17.5~17.3 kaBP 沉积物粒度变细,各常量元素比值在此阶段有变高的趋势,指示此阶段气候有变暖的趋势;15.8~15.4 kaBP 阶段各常量元素比值出现低值,沉积物粒度在约 270 cm 深度(约 15.8 kaBP)也有所变

粗,南京汤山葫芦洞 PD 石笋^[47] $\delta^{18}\text{O}$ 值在此阶段有明显的正偏,本文认为末次冰期北大西洋冰筏碎屑事件中的 Heinrich 1 事件主要发生在此阶段。

4 结论

(1)南海台西南盆地南部海域 TS6 柱状样沉积物常量元素含量垂向分布显示,元素 Mn 在沉积物近表层大量自生富集,指示研究区海域底层水在近现代处于富氧状态,沉积物约 20 cm 深度是研究区沉积物的氧气穿透深度,这些特征表明研究区水体环境条件十分有利于水成成因的铁锰结核发育,对后续铁锰结核勘探具有重要的指导意义。

(2)常量元素 R 型因子分析指示陆源碎屑是南海台西南盆地南部海域沉积物的主要来源,常量元素 Al、Fe、Mg、K、Ti 代表了陆源元素组合。陆源常量元素比值 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 MgO/TiO_2 和 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 都指示了研究区末次冰消期气候相对寒冷,东亚冬季风增强;全新世以来气候变得暖湿,东亚夏季风增强。此外各替代性指标还捕捉到了全新世时期的两次变冷事件,发生时间分别为 9.8~9.4 kaBP 和 6.5~5.8 kaBP,这两个阶段东亚夏季风强度明显减弱,6.5~5.8 kaBP 阶段冷事件表现出“双峰”特征。末次冰消期期间也出现了多次气候变冷事件,其中 15.8 kaBP 阶段出现的冷事件可能对应于 H1 事件。

参考文献 (References)

- [1] 赵泉鸿,汪品先.南海第四纪古海洋学研究进展[J].第四纪研究,1999,19(6):481-501. [ZHAO Quanhong, WANG Pinxian. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: a review [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(6): 481-501.]
- [2] 周航,刘乐军,徐元芹,等.南海北部陆坡区DLW3101孔沉积物特征及古环境意义[J].海洋学报,2018,40(7):103-115. [ZHOU Hang, LIU Lejun, XU Yuanqin, et al. Sediment characteristics and paleoenvironmental significance of Core DLW3101 from northern slope of the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(7): 103-115.]
- [3] 田成静,钟和贤,徐子英,等.南海北部陆架海域表层沉积物黏土矿物分布特征及物源分析[J].地质学刊,2018,42(1):131-136. [TIAN Chengjing, ZHONG Hexian, XU Ziyang, et al. Distribution characteristics and source analysis of clay minerals in the surface sediments from the shelf of the northern South China Sea [J]. *Journal of Geology*, 2018, 42(1): 131-136.]
- [4] 田旭,徐方建,徐微,等.近400 a南海北部陆架沉积物的东亚季风记录[J].海洋科学,2015,39(9):62-68. [TIAN Xu, XU Fangjian,

- XU Wei, et al. 4 400 a East Asian monsoon record from sediments in the continental shelf of the northern South China Sea [J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(9): 62-68.]
- [5] 徐方建, 陈世悦, 操应长, 等. 近4 400年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1198-1205. [XU Fangjian, CHEN Shiyue, CAO Yingchang, et al. Geochemical records and geological significance of the continental shelf sediments in the northern south China Sea since 4 400 a [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1198-1205.]
- [6] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212(3-4): 331-342.
- [7] 刘坚, 陆红锋, 苏新, 等. 南海北部BY1钻孔沉积物元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(5): 6-11. [LIU Jian, LU Hongfeng, SU Xin, et al. Element geochemistry of Core BY1 from the northern South China Sea and its paleoenvironmental implication [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 6-11.]
- [8] 万世明, 李安春, Jan-Berend W S, et al. 南海北部ODP1146站粒度揭示的近20Ma以来东亚季风演化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 50(10): 1536-1547. [WAN Shiming, LI Anchun, Jan-Berend W S, et al. Grain-size records at ODP site 1146 from the northern South China Sea: implications on the East Asian monsoon evolution since 20 Ma [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(10): 1536-1547.]
- [9] 杨文光, 郑洪波, 王可, 等. 南海东北部MD05-2905站36 ka BP以来的陆源碎屑沉积特征与东亚季风的演化[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1012-1018. [YANG Wenguang, ZHENG Hongbo, WANG Ke, et al. Sedimentary characteristic of terrigenous clast of Site MD05-2905 in the northeastern part of South China Sea after 36ka and evolution of East Asian monsoon [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(10): 1012-1018.]
- [10] 李小洁, 梁莲姬, 吴枫, 等. 南海北部沉积物常量元素变化、碳酸盐旋回及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 411-421. [LI Xiaojie, LIANG Lianji, WU Feng, et al. Variations of major elements and carbonate cycle of the northern South China Sea sediments and their paleoenvironmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(2): 411-421.]
- [11] 黄元辉, 黄玥, 蒋辉. 南海北部15 kaBP以来表层海水温度变化: 来自海洋硅藻的记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 65-74. [HUANG Yuanhui, HUANG Yue, JIANG Hui. Surface water temperature changes in the Northern South China sea over last CA. 15 000 years: evidence from marine diatoms [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 65-74.]
- [12] 郝鹏, 李铁刚, 常凤鸣, 等. 末次盛冰期以来南海西南海区对快速气候变化的响应特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 34(4): 83-91. [HAO Peng, LI Tiegang, CHANG Fengming, et al. Response of the Southwestern South China Sea to the rapid climate changes since the last glacial maximum [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 34(4): 83-91.]
- [13] 梅西, 张训华, 李日辉, 等. 南海北部晚更新世以来常量元素记录的化学风化作用[J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 846-854. [MEI Xi, ZHANG Xunhua, LI Rihui, et al. Chemical weathering recorded by major element of Northern South Yellow Sea since Late Pleistocene [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 846-854.]
- [14] Wei G J, Li X H, Liu Y, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(4): PA4214.
- [15] 张俊, 孟宪伟, 王湘芹. 晚第四纪南海北部陆坡沉积物常量元素比值对气候变冷事件的指示意义[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 106-111. [ZHANG Jun, MENG Xianwei, WANG Xiangqin. The record of major element ratios in Late Quaternary at northern slope of the South China Sea and its indicative significance on the cooling events [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 106-111.]
- [16] Wan S M, Clift P D, Zhao D B, et al. Enhanced silicate weathering of tropical shelf sediments exposed during glacial lowstands: a sink for atmospheric CO₂ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 200: 123-144.
- [17] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1659-1666.
- [18] 葛倩. 晚末次冰期以来南海古环境和古气候记录[D]. 武汉: 中国地质大学博士学位论文, 2010: 127. [GE Qian. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from the south China sea since the late last glacial period[D]. Wuhan: Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2010: 127.]
- [19] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- [20] 韦刚健, 李献华, 陈毓蔚, 等. NS93-5钻孔沉积物高分辨率过渡金属元素变化及其古海洋记录[J]. 地球化学, 2001, 30(5): 450-458. [WEI Gangjian, LI Xianhua, CHEN Yuwei, et al. High-resolution records of transitive metals of sediments from Core NS93-5 and their paleoceanography implications [J]. *Geochimica*, 2001, 30(5): 450-458.]
- [21] Rosenthal Y, Lam P, Boyle E A, et al. Authigenic cadmium enrichments in suboxic sediments: precipitation and postdepositional mobility [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 132(1-4): 99-111.
- [22] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [23] Calvert S E, Pedersen T F. Geochemistry of Recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record [J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1-2): 67-88.
- [24] 陈忠, 杨慧宁, 颜文, 等. 中国海域固体矿产资源分布及其区划——砂矿资源和铁锰(微)结核—结壳[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(5): 101-108. [CHEN Zhong, YANG Huining, YAN Wen, et al. Distributions and divisions of mineral resources in the sea areas of China: Placer deposit and ferromanganese nodule/crust [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(5): 101-108.]
- [25] 仲义, 陈忠, 莫爱彬, 等. 南海北部铁锰结核成因及元素的赋存状态[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(2): 48-59. [ZHONG Yi, CHEN Zhong, MO Aibin, et al. Genetic types and elemental occurrence phases of ferromanganese nodules in the northern South China

- Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36 (2): 48-59.]
- [26] 韦刚健, 刘颖, 李献华, 等. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22 (1): 23-25. [WEI Gangjian, LIU Ying, LI Xianhua, et al. Excess Al in the sediments from south China Sea [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22 (1): 23-25.]
- [27] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: evidence from ODP site 1144, South China Sea [J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37 (5): 593-602.
- [28] Shen G T, Campbell T M, Dunbar R B, et al. Paleochemistry of manganese in corals from the Galapagos Islands [J]. *Coral Reefs*, 1991, 10 (2): 91-100.
- [29] Delaney M L, Linn L J, Druffel E R M. Seasonal cycles of manganese and cadmium in coral from the Galapagos islands [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57 (2): 347-354.
- [30] 束振华, 杨守业, 窦衍光, 等. 冲绳海槽DGKS9604孔酸不溶相中常量元素组成及环境指示意义[J]. *热带地理*, 2009, 29 (3): 236-240, 273. [SHU Zhenhua, YANG Shouye, DOU Yanguang, et al. Geochemical compositions and paleoenvironmental implication of the residual fractions of core DGKS9604 sediments in the middle Okinawa trough [J]. *Tropical Geography*, 2009, 29 (3): 236-240, 273.]
- [31] 徐兆凯, 李安春, 李铁刚, 等. 东菲律宾海表层沉积物常量元素组成及地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30 (6): 43-48. [XU Zhaokai, LI Anchun, LI Tiegang, et al. Major element compositions of surface sediments in the East Philippine Sea and its geological implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30 (6): 43-48.]
- [32] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 6-40. [LIU Yingjun, CAO Liming, LI Zhaolin, et al. *Elemental Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1984: 6-40.]
- [33] 蒋富清, 李安春, 李铁刚. 冲绳海槽南部柱状沉积物地球化学特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22 (3): 11-17. [JIANG Fuqing, LI Anchun, LI Tiegang. Geochemical characteristics for core sediments of the southern Okinawa trough and their Paleoenvironment implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22 (3): 11-17.]
- [34] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 174. [ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. *Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1994: 174.]
- [35] Sun Y B, Wu F, Clemens S C, et al. Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257 (3-4): 240-246.
- [36] Tian J, Xie X, Ma W T, et al. X-ray fluorescence core scanning records of chemical weathering and monsoon evolution over the past 5 Myr in the southern South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2011, 26 (4): PA4202.
- [37] Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Provenance of the north Pacific sediments and process of source material transport as derived from Rb-Sr isotopic systematics [J]. *Chemical Geology*, 1999, 158 (3-4): 271-291.
- [38] 刘芳, 杨楚鹏, 常晓红, 等. 南海东北部下陆坡20 ka以来稀土元素沉积地球化学特征变化及其对物源的指示[J]. *海洋学报*, 2018, 40 (9): 148-158. [LIU Fang, YANG Chupeng, CHANG Xiaohong, et al. Sedimentary geochemistry properties of rare earth elements from the continental lower slope of the northeastern South China Sea over the last 20 ka and its implication for provenance [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40 (9): 148-158.]
- [39] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294 (5549): 2130-2136.
- [40] 颜文, 古森昌, 陈忠, 等. 南海97-37柱样的主元素特征及其潜在的古环境指示作用[J]. *热带海洋学报*, 2002, 21 (2): 75-83. [YAN Wen, GU Senchang, CHEN Zhong, et al. Characteristics of major elements of sediments in core 97-37 from Southern South China Sea and its potential implications to Paleoenvironment [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21 (2): 75-83.]
- [41] 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 末次冰消期以来气候期划分的准确定位与定年[J]. *地球学报*, 2005, 26 (S1): 209-212. [QIN Jiaming, YUAN Daoxian, LIN Yushi, et al. Accurate locating and dating for division of climate periods since the last deglaciation stage [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26 (S1): 209-212.]
- [42] Cosford J, Qing H R, Matthey D, et al. Climatic and local effects on stalagmite $\delta^{13}C$ values at Lianhua Cave, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280 (1-2): 235-244.
- [43] Zhang W C, Yan H, Dodson J, et al. The 9.2 ka event in Asian summer monsoon area: the strongest millennial scale collapse of the monsoon during the Holocene [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50 (7-8): 2767-2782.
- [44] Risebrobakken B, Jansen E, Andersson C, et al. A high-resolution study of Holocene paleoclimatic and paleoceanographic changes in the Nordic Seas [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18 (1): 1017.
- [45] Moros M, Emeis K, Risebrobakken B, et al. Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: climate influences on northern Europe and Greenland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23 (20-22): 2113-2126.
- [46] Magny M, Haas J N. A major widespread climatic change around 5300 cal. yr BP at the time of the Alpine Iceman [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2004, 19 (5): 423-430.
- [47] 孔兴功, 汪永进, 吴江滢, 等. 南京葫芦洞石笋 $\delta^{13}C$ 对冰期气候的复杂响应与诊断[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 48 (12): 2174-2181. [KONG Xingong, WANG Yongjin, WU Jiangying, et al. Complicated responses of stalagmite $\delta^{13}C$ to climate change during the last glaciation from Hulu Cave, Nanjing, China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48 (12): 2174-2181.]