

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

袁 帅^{1,2}, 张 辉^{2,3}, 曹 鹏^{2,3,4}, 李小艳^{2,3,4}, 石学法^{2,3,4}, 范德江^{1,4},
Somkiat Khokiattiwong⁵, Narumol Kornkanitnan⁵, 刘升发^{2,3,4*}

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100;

2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 自然资源部 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061;

5. 泰国海洋与海岸带资源研发中心 海洋与海岸带资源室, 泰国 曼谷 10210)

摘 要:以泰国湾 T155 号柱状沉积物为研究对象,利用地球化学和矿物学手段探讨了全新世以来泰国湾古气候演化历史。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}-(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 指示了全新世以来泰国湾西南部物质来源较为稳定,主要来自于马来半岛,季风控制下的沿岸流是其主要驱动力。通过对高岭石/(绿泥石+伊利石) $(\omega_{\text{K}}/(\omega_{\text{c}}+\omega_{\text{l}}))$ 、化学蚀变指数(CIA)和钾铝质量分数比值 $(\omega_{\text{K}}/\omega_{\text{Al}})$ 的变化规律进行综合研究,将全新世以来泰国湾古气候演化过程划分为两个阶段:①早中全新世(12 000~6 500 cal a BP): $\omega_{\text{K}}/(\omega_{\text{c}}+\omega_{\text{l}})$ 值和 CIA 值较高, $\omega_{\text{K}}/\omega_{\text{Al}}$ 值则较低,指示了该段时期强盛的东亚季风;发生于 11 200~10 500 cal a BP 和 8 500~7 500 cal a BP 的冷事件指示了泰国湾对新仙女木事件和 8.2 ka 冷事件的响应;②中全新世(6 500 cal a BP)以来: $\omega_{\text{K}}/(\omega_{\text{c}}+\omega_{\text{l}})$ 值和 CIA 值明显下降, $\omega_{\text{K}}/\omega_{\text{Al}}$ 值则逐渐上升,指示了该段时间东亚季风呈逐渐减弱的趋势;在 3 200~1 800 cal a BP 时地球化学和黏土矿物指标呈现一个明显低值,对应于热带海域“斜氏普林虫低值事件”,揭示了全球气候变化在泰国湾海域良好的区域性响应特征。

关键词:古气候;全新世;稀土元素;黏土矿物;泰国湾

中图分类号:P736.2

文献标志码:A

文章编号:1671-6647(2022)02-0233-14

doi:10.12362/j.issn.1671-6647.2022.02.007

引用格式: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 S, ZHANG H, CAO P, 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.

全新世气候演化及其驱动机制是近年来古气候变化研究的热点内容之一,越来越受到国内外学者的关注^[1-2]。已有研究表明全新世的气候并不稳定^[3-4],全球范围内发生了数次降温事件^[5-7]。Bond 等在北大西洋两个全新世沉积序列中发现了一系列冰筏碎屑(IRD)冷事件^[5],后来的研究也表明这种千年尺度的气候突变具有全球性特征;Wang 等在贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的降水过程中发现了 8 次干旱事件,对应于较弱的夏季风时期,其中有 6 次与北大西洋冷事件一致^[8];近期印度洋-太平洋交汇区古气候重建结果则表明大西洋经向翻转流是联系北大西洋和热带印度洋气候事件的桥梁,并揭示了全新世不同纬度带气候变化的遥相关特征^[9]。在全球变化的大背景下,未来气候变化是地球科学关注的焦点问题,而对未来气候变化的预测离不开对古环境和古气候演化规律和控制机制的了解,因此为了提高我们对全新世气候演化规律及其区

收稿日期:2021-08-23

资助项目:全球变化与海气相互作用专项——南海 SCS-CJ03 区块底质调查与研究(GASI-02-SCS-CJ03)和亚洲大陆边缘“源-汇”过程与陆海相互作用(GASI-GEOGE-03)

作者简介:袁 帅(1998—),男,硕士研究生,主要从事海洋沉积学方面研究. E-mail: yuanshuaibushuai@126.com

* 通信作者:刘升发(1979—),男,研究员,博士,主要从事海洋沉积学方面研究. E-mail: liushengfa@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

域性和全球性响应机制的认识,尚需更多的区域证据来丰富理论研究体系^[10]。

泰国湾位于南海西南部,是中南半岛和马来半岛之间的一个半封闭性海湾。海湾从越南金瓯角至马来西亚哥巴鲁,与南海水域相连,面积约 25 万 km²,平均水深约 45 m。20 世纪以来,陆续有学者对该区域开展了海洋地质研究,并取得了一定的成果^[11-17]。泰国湾沉积物以陆源碎屑沉积为主^[11],主要来自入海河流携带物质^[18]。泰国湾周边有多条较大的入海河流(表 1),泰国湾北部以及西北部的陆源物质主要来源于湄南河^[12],而南部陆源物质则主要来源于马来半岛的吉兰丹河和彭亨河^[13-14],不同来源物质在季节性流系格局控制下形成了多元化的沉积物模式^[15]。由于泰国湾潜在物源区气候变化主要受控于海平面变化和亚洲季风系统,因此湾内柱状沉积物是过去历史时期气候和环境变化的良好载体^[16-17]。尽管近年来已有学者对泰国湾进行了沉积学方面的研究,但大多工作集中于河口区沉积物物源^[19]、污染物分析^[20-21]和海岸带侵蚀^[22]研究,研究成果主要聚焦于人类活动的控制作用,缺乏对泰国湾古气候演化及其对全球变化的响应机制方面的研究,而以沉积学、矿物学、地球化学指标来重建全新世以来古气候演化历史更是十分少见。

表 1 泰国湾周边入海河流基本信息^[23]

Table 1 Basic information of rivers inflow into the Gulf of Thailand^[23]

河 流	长度/km	降水/(mm · a ⁻¹)	流域面积/km ²	径流量/(m ³ · s ⁻¹)	输沙量/(×10 ⁶ t · a ⁻¹)
湄公河	4 909	1 570	811 000	2 140	1 450
湄南河	1 352	1 487	160 000	117	11
湄干河	520	1 147	30 837	273	—
彭亨河	459	2170	29 300	596	20.4
吉兰丹河	280	875	12 691	500	13.9
登嘉楼河	100	3 300	4 600	266	0.8

注:—表示无数据。

因此,本文以泰国湾西南部 T155 柱状沉积物为研究对象,开展系统的地球化学和矿物学研究,定性判别全新世以来沉积物来源,在此基础上,重建泰国湾全新世以来的古气候演化过程,为进一步理解全新世以来全球气候不稳定性变化的区域性响应特征提供理论支撑。

1 材料与方法

T155 号柱状沉积物样品由泰国 Seafdec 号调查船于 2012 年执行中泰海洋地质联合调查航次获取,采自泰国湾西南部区域(101°12′00″E,7°45′36″N)(图 1),样品长 301 cm,水深 44 m。样品剖开后,进行了详细的岩性描述,并按照 2 cm 间隔切割,选取其中的 30 个样品进行地球化学和矿物学分析。

1)粒度测试:首先称取适量的沉积物样品,加入约 15 mL 的 30% H₂O₂ 静置 24 h 以上除去有机质,之后加入 3 mol/L 的稀 HCl 约 5 mL 静置 24 h 以上除去碳酸盐岩,待反应完全后,洗盐直至中性。处理好的样品利用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度测定。粒级标准统一使用尤登—温德华氏等比制值 Φ 粒级标准,粒度参数采用矩法公式进行计算,粒度测试在自然资源部第一海洋研究所完成。

2)元素地球化学测试:将样品烘干、研磨,制成 200 目的粉末后,称取(0.050 0±0.000 5) g 样品于坩埚中。加入 3 mL 1:1 的高纯 HNO₃和 HF,密闭放置于 190 °C 烘箱中保持 48 h,待样品冷却后再用电热板 150 °C 蒸干赶尽 HF 后加入 3 mL 50%的 HNO₃,密闭置于温度 150 °C 的烘箱中提取 8 h 以上,冷却后再用聚乙烯比色管定容,使用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测定稀土元素含量,用等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定常量元素含量。测试过程中,随机选取 10%平行样进行测试,并采用 GSD-9 标准样进行监控,相对误差小于 0.5%,元素地球化学测试在自然资源部第一海洋研究所完成。

3)黏土矿物测试:样品用 30% 的 H_2O_2 除去有机质,用 0.5% 稀盐酸除去碳酸盐后,用去离子水反复清洗,直到具有抗絮凝作用发生。根据 Stokes 沉降原理所确定的沉淀时间,将小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒吸出,离心。采用刮片方法制成样品定向薄片,使用 X 射线衍射方法测试黏土矿物含量,黏土矿物测试在自然资源部第一海洋研究所完成。

4)年代测试:根据 T155 号柱状沉积物岩性特征,共选择 6 个层位样品进行年代测试,其中上部 4 个层位测年材料为底栖有孔虫,下部 2 个层位测年材料为泥炭。测年结果利用 Calib 8.2 程序进行了日历年龄校正^[24],区域碳库校正值为 $(-19\pm 70)\text{ a}$,年代测试在美国伍兹霍尔海洋研究所完成。

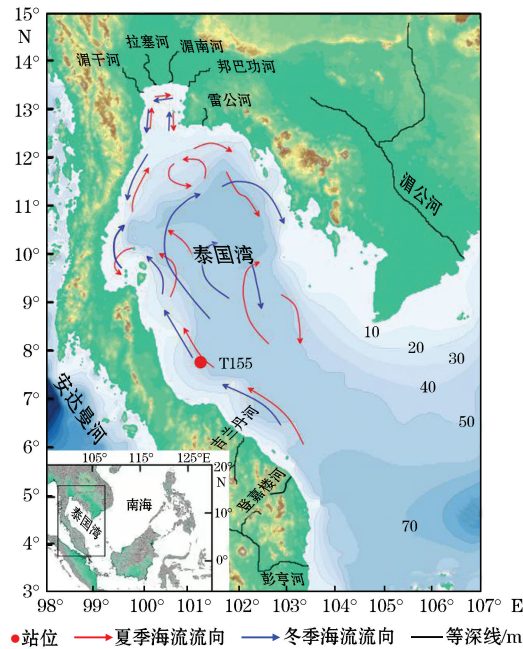


图 1 T155 号柱状沉积物位置^[17]

Fig.1 Location of core T155 in the Gulf of Thailand^[17]

2 结果

2.1 年代框架与沉积速率

T155 号柱状沉积物的 6 个样品 AMS ^{14}C 测年结果见表 2,通过线性内插和外推法,可获取每个样品的年代数据,最底部年龄为 11 508 a BP。依据日历年龄计算可得:沉积速率介于 $11.40\sim 94.30\text{ cm/ka}$,平均值为 23.40 cm/ka ,表现出明显的阶段性变化特征(图 2)。

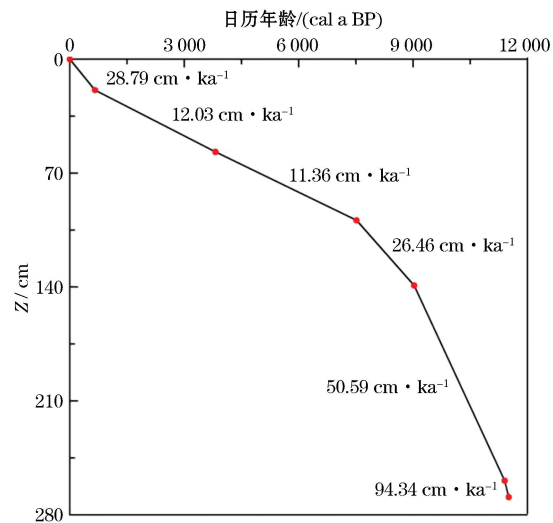


图 2 T155 号柱状沉积物年代框架及沉积速率

Fig.2 Age model of core T155 and sedimentation rates

表 2 泰国湾 T155 号柱状沉积物 AMS ¹⁴C 年代结果
Table 2 AMS ¹⁴C age dating results of core T155 in the Gulf of Thailand

深度/cm	¹⁴ C 年龄/ (a BP)	年龄误差/a	δ ¹³ C/a	年代范围上限/ (a BP)	年代范围下限/ (a BP)	校正后年龄/ (cal a BP)
18~20	1 080	25	-0.17	570	576	530
56~58	3 840	25	-0.16	3 707	3 915	3 647
98~100	7 010	25	-0.26	7 450	7 576	7 340
138~140	8 400	35	-1.02	8 926	9 154	8 800
258~260	9 970	45	-26.67	11 271	11 408	10 870
268~270	10 100	45	-25.25	11 360	11 376	11 041

2.2 粒度特征

T155 柱状沉积物的粒度组成垂向上变化明显,可以分为 3 段(图 3)。①80~0 cm,沉积物逐渐变粗,砂质量分数约为 1%、粉砂质量分数增加至 81%、黏土质量分数减少至小于 20%,平均粒径约 6.6Φ。②260~80 cm,沉积物主要为粉砂和黏土,粒度组成和参数比较稳定,砂质量分数低于 1.5%、粉砂质量分数约为 68%,平均粒径 7.2Φ,分选差。③从底部到 260 cm,沉积物类型变化较大,平均粒径为 5.2Φ~8.3Φ,分选差,主要成分为粉砂和黏土,粉砂质量分数为 46.2%~75.6%,黏土质量分数为 6.9%~58.3%,砂质量分数低于 1%。其中在 271~283 cm,砂质量分数突然急剧增加至 15%,粉砂质量分数增加至 70%,黏土质量分数降低至 8%。

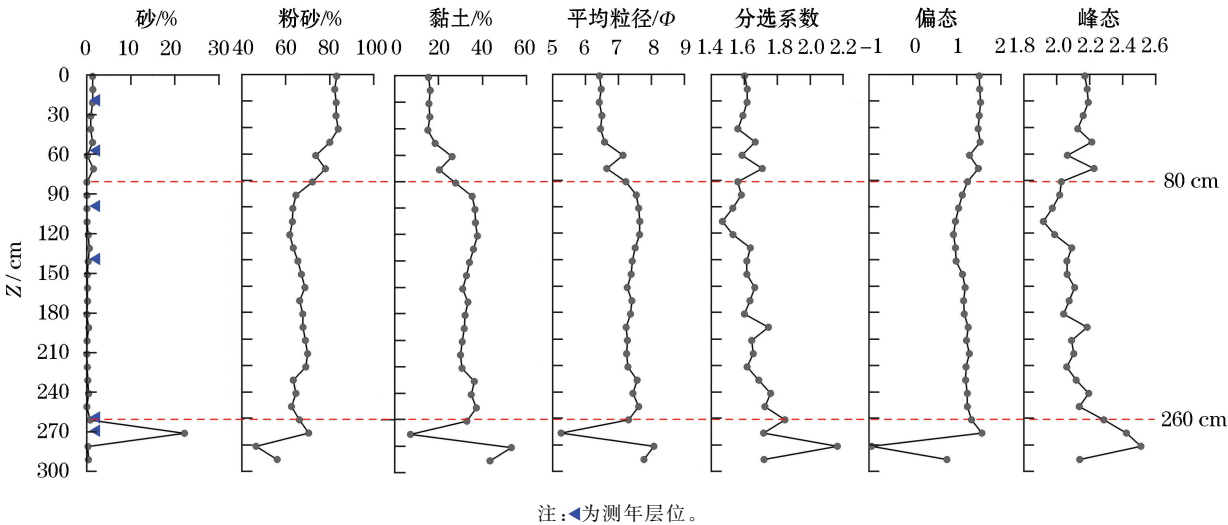


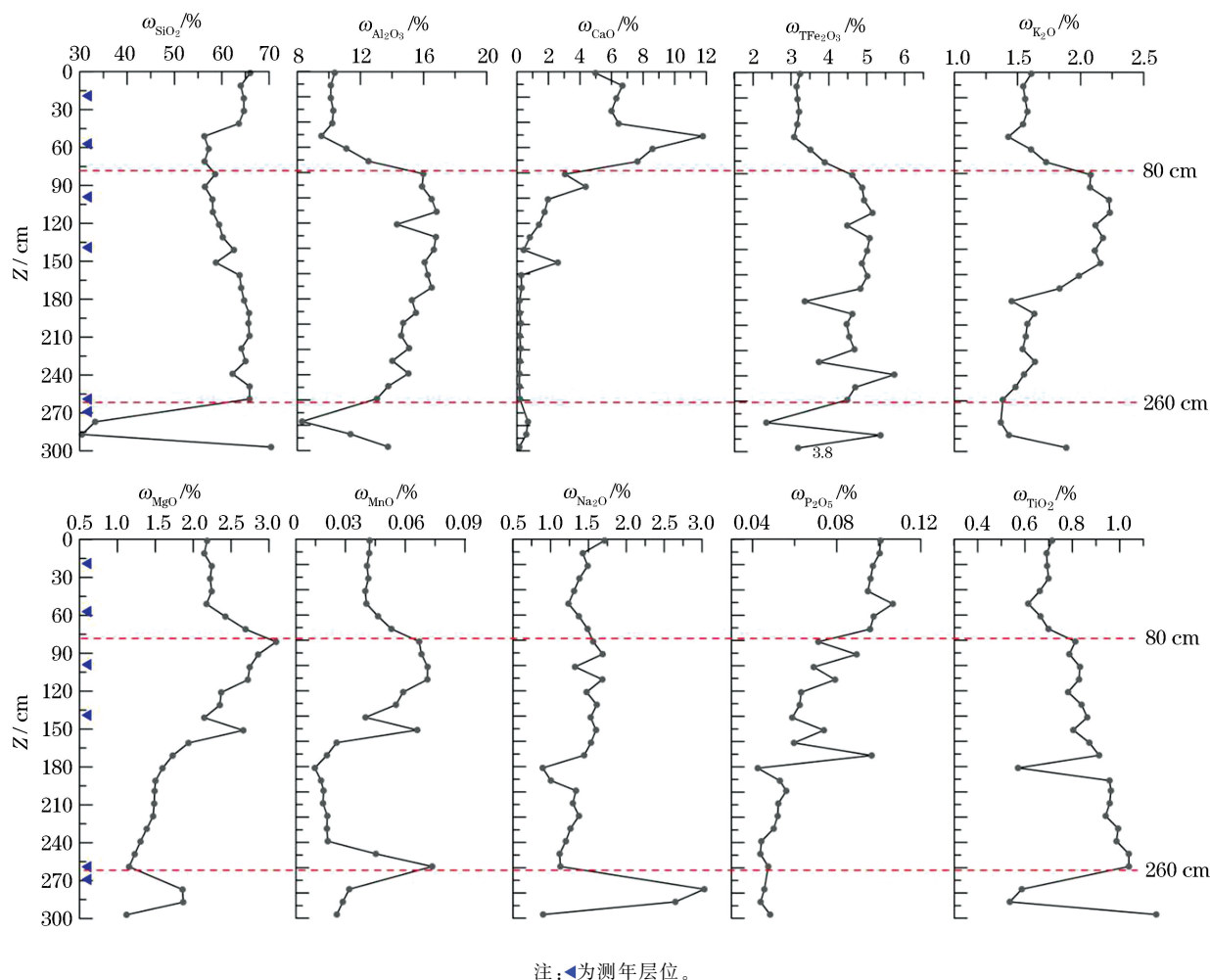
图 3 T155 柱状沉积物粒度参数垂向变化

Fig.3 Vertical variations of grain size parameters in the sediment of core T155

2.3 常量元素特征

T155 号柱状沉积物常量元素含量变化特征如图 4 所示,其垂向上大致可划分 3 层:80~0 cm,所测常量元素垂向分布变化明显,SiO₂和 P₂O₅质量分数呈小幅升高,Al₂O₃、TF_{e2}O₃(全铁)、K₂O、MgO 和 MnO 等质量分数则呈小幅降低;260~80 cm,SiO₂、TF_{e2}O₃和 Na₂O 等质量分数垂向变化较小,K₂O、MgO 和 P₂O₅等质量分数自下向上逐渐增大,CaO 和 MnO 等质量分数则表现为先稳定后逐渐增大的趋势;301~260 cm,

SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 和 TiO_2 等质量分数变化明显,达到各自的最大值或最小值。



注:▲为测年层位。

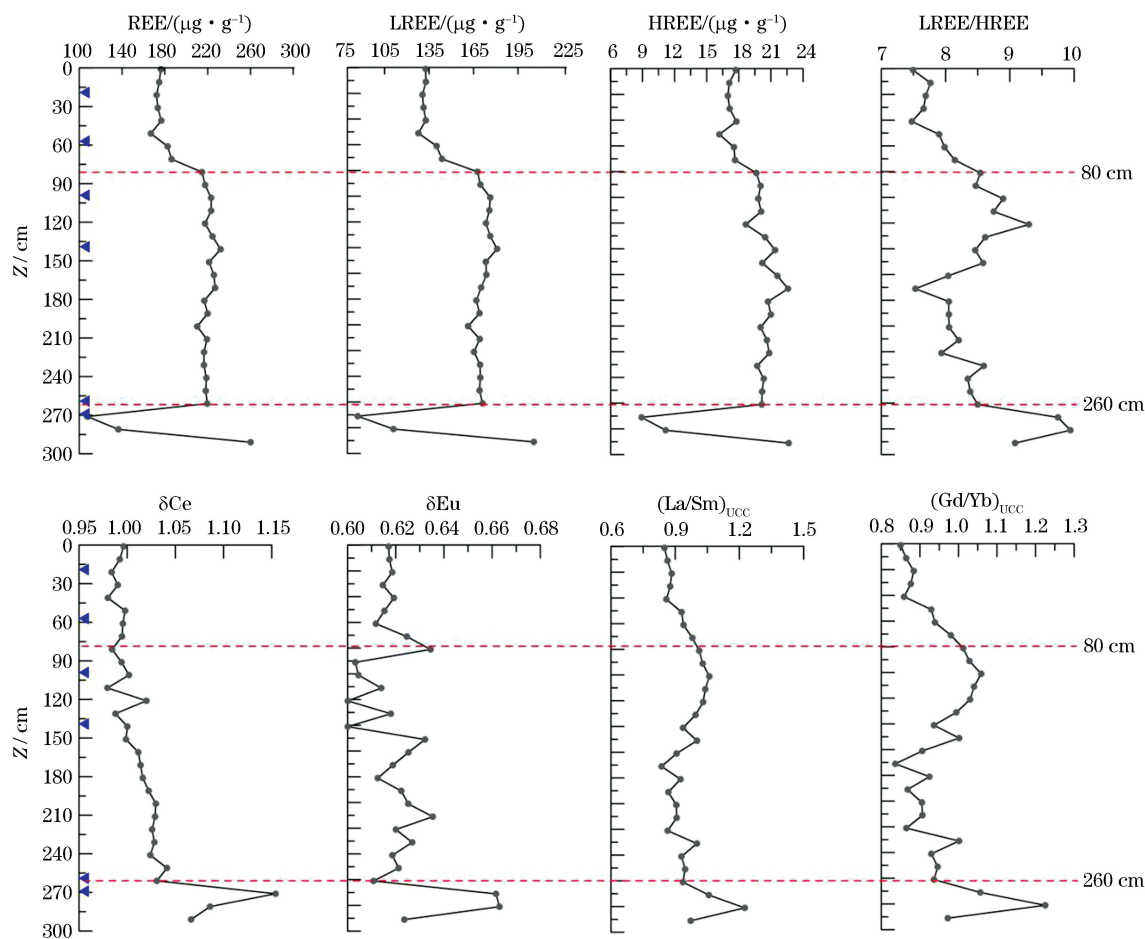
图4 T155 柱状沉积物常量元素质量分数垂向变化

Fig.4 Vertical variations of major elements in the sediment of core T155

2.4 稀土元素特征及配分模式

T155 号柱状沉积物的稀土元素含量及主要稀土指标如图 5 所示,稀土元素垂向分布大致可以分为 3 层:80 cm 以上层位,稀土总量、轻稀土、重稀土含量自下向上逐渐降低,至上部 50 cm 稀土总量约为 $180 \mu\text{g/g}$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ (La 质量分数与 Sm 质量分数比值)和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ (Gd 质量分数与 Yb 质量分数比值)也呈明显的下降趋势;260~80 cm 层位,稀土总量、轻稀土、重稀土含量及轻重稀土比值、 δCe (铈异常)、 δEu (铕异常)等参数均变化较小,而 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ 由下至上波动较为明显,但整体呈波动升高的趋势,相对于 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ 来说, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 波动较小,但整体上来说也呈现升高的趋势,指示了早全新世较为稳定的物质来源或沉积环境;260 cm 以下层位,各个参数垂向分布规律性不显著。

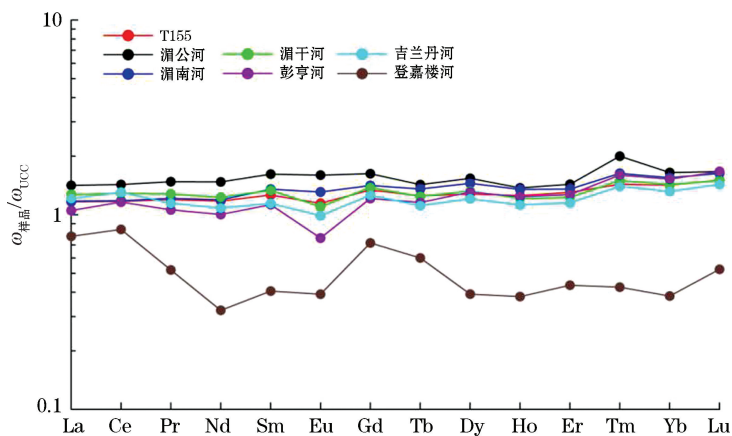
用上陆壳(the Upper Continental Crust, UCC)作为标准对 T155 柱状沉积物稀土元素标准化,从配分模式图(图 6)可以看出:相比上陆壳数据,T155 柱状沉积物重稀土相对富集,轻稀土相对亏损,不存在明显的 Ce 异常,存在 Eu 的负异常,与湄南河和彭亨河以及湄干河的配分模式较为相似,均呈明显左倾,不同之处是彭亨河左倾程度更加明显,其余三者则较为平缓。



注: ▲为测年层位。

图5 T155柱状沉积物稀土元素质量分数垂向变化

Fig.5 Vertical distribution of rare earth elements in the sediment of core T155



注: 湄公河数据引自文献[25]; 湄南河和湄干河数据引自报告①; 彭亨河和吉兰丹河数据引自文献[23];

登嘉楼河数据引自文献[26]; 上地壳(UCC)标准化数据引自文献[27]。

图6 T155柱状沉积物及周边区域沉积物稀土元素配分模式

Fig.6 UCC-normalized pattern of the rare earth element composition of the core T155 and adjacent area

① 石学法, 刘升发, 王昆山, 等. 南海 SCS-CJ03 区块底质调查与研究技术总结报告, 2013: 164-175.

2.5 黏土矿物分布特征

T155 号柱状沉积物的黏土矿物质量分数见图 7,黏土粒级组分含量在 80 cm 以上层位呈逐渐降低的趋势,而在 80 cm 以下波动较小,约为 35%。4 类黏土矿物垂向分层明显:190 cm 以上部分,蒙皂石波动明显,可分为 3 次高低旋回,伊利石含量则基本呈连续增加的趋势,高岭石大致表现出与伊利石相反的趋势,含量自下向上持续降低,绿泥石在这一层位变化不大,其质量分数为 13%~14%;190 cm 以下部分,蒙皂石和绿泥石垂向分布规律性不明显,高岭石自下向上呈逐渐增加的趋势,伊利石质量分数变化不大,介于 30%~40%。

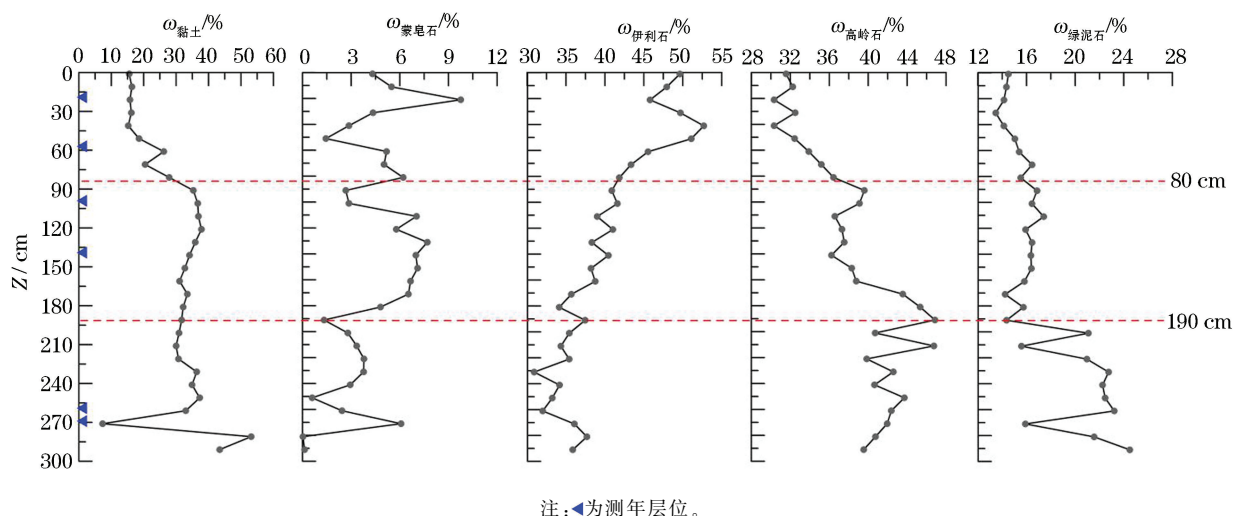


图 7 T155 柱状沉积物黏土矿物质量分数垂向变化

Fig.7 Vertical variations of clay minerals in the sediment of core T155

3 讨 论

3.1 沉积物来源判别

随着现代分析技术的发展,沉积物物源分析方法日趋增多,并不断地相互补充和完善。由于元素在理化性质上的差异,不同来源的沉积物在搬运和沉积过程中会出现不同的地球化学响应特征,这就为利用地球化学方法实现物源的精准分析奠定了理论基础^[28]。作为高场强元素,稀土元素在岩石的风化过程中很保守,容易被碎屑颗粒吸附或结合,能随碎屑颗粒进行长距离搬运和沉积,被视为判断源岩类型及物源区构造背景的有效工具^[29]。Liu 等认为 δEu 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 等稀土元素比值往往与源岩岩性有关,有着良好的物源指示意义,已广泛用于亚洲大陆边缘物质的“源-汇”研究中^[30]。本文采用 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}$ 和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 作为物源判别参数,但在使用这些参数之前,需要排除主要的干扰因素。首先,由前文分析可知, T155 柱状粒级组分以粉砂为主(粉砂组分平均质量分数为 70%),砂组分含量很少(平均质量分数仅为 1%),且黏土粒级组分含量变化不大,所以可排除矿物组成对所用稀土元素指标的影响。另外,为了排除粒度和化学风化强度的影响,我们将所用指标与化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration, CIA)^[31] 和平均粒径(M_z)进行了相关性分析(图 8),从分析结果可知这几者之间并不具备明显的相关性($R^2 < 0.12$),所以可确定在泰国湾使用 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}} - (\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ 图判别物源是可行的。

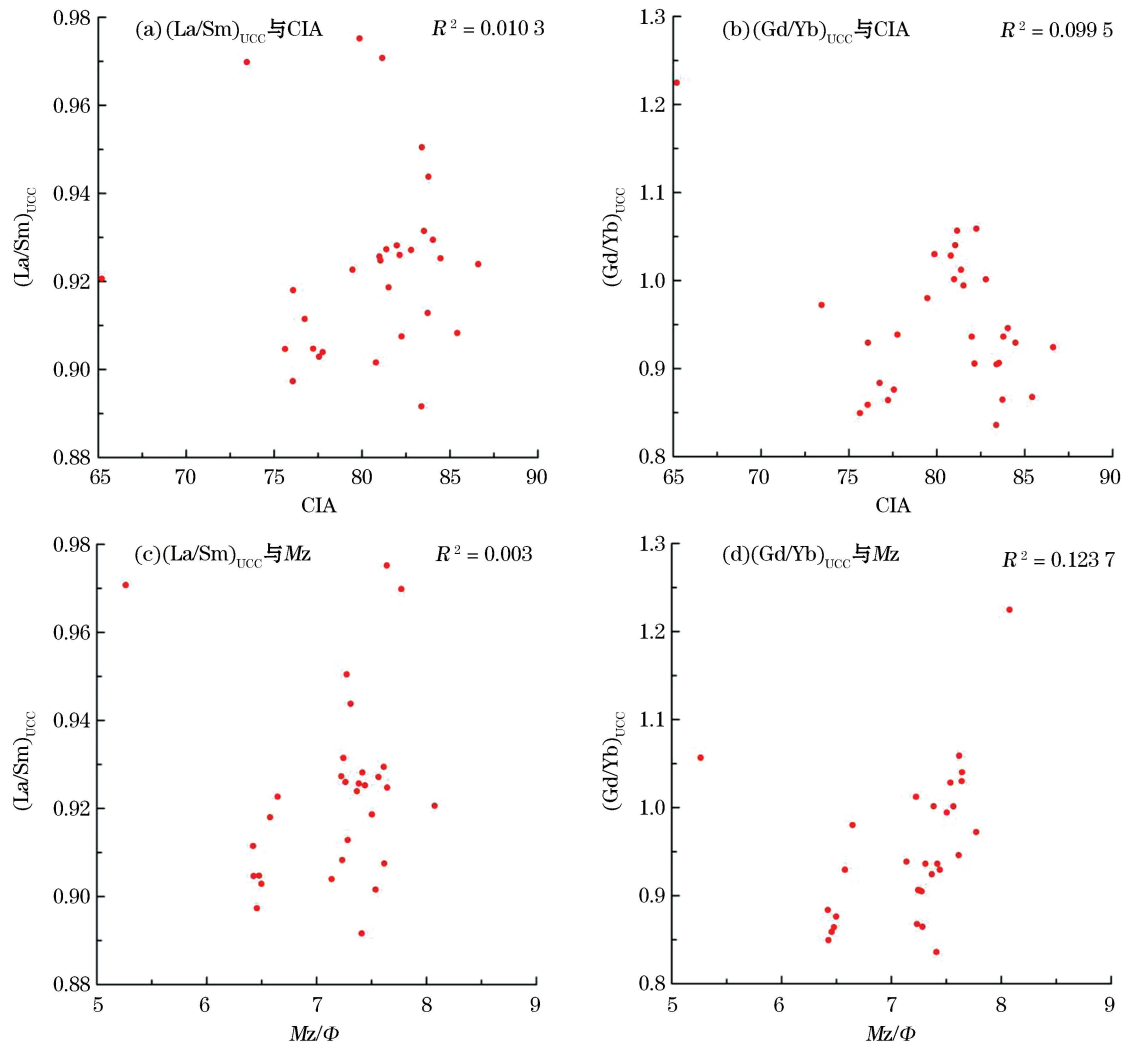
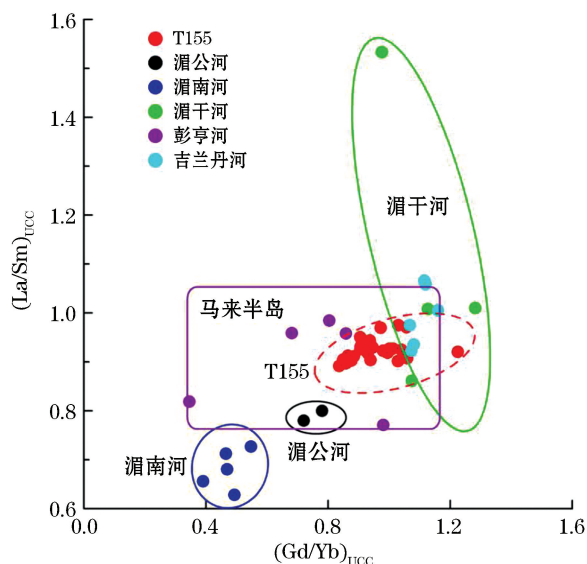


图8 稀土元素指标与 Mz 和 CIA 的相关性判别

Fig.8 Correlation between rare earth element proxies and Mz, CIA

泰国湾主要以陆源碎屑沉积为主,海洋自生等其他沉积作用基本可以忽略不计^[16,33]。陆源碎屑物质主要来自入海河流携带物质^[34],所以我们选取泰国湾周边几条主要河流作为物源端元,分别是马来半岛的吉兰丹河^[23]、彭亨河^[23],北部曼谷湾主要入海河流湄南河^①和湄干河以及南海西部主要入海河流湄公河^[25],将物源端元数据和 T155 柱状沉积物数据投点到 $(La/Sm)_{UCC} - (Gd/Yb)_{UCC}$ 图(图 9),结果显示 T155 柱状沉积物大部分点较为集中,基本落在彭亨河与吉兰丹河所在端元内,而与泰国湾北部入海河流端元区分明显。考虑到湄公河远离研究区,陆源物质难以运移至泰国湾西南近岸,这就表明全新世以来泰国湾西南部沉积物主要来自马来半岛,主要驱动力为东亚夏季风控制下的沿岸流。现代泰国湾物质来源揭示了周边不同入海河流的控制范围^[33],T155 柱状沉积物同样位于马来半岛物质控制区,陆源入海物质主要受到沿岸流的影响,沉积物运移方向为 SE—NW。另外,巽他陆架沉积物输运模式研究结果表明,吉兰丹河入海物质主要沿岸向北输运,可到达泰国湾中部近岸区域,为泰国湾西南部主要的沉积物源区^[15],而碎屑矿物组成同样指示了泰国湾西部与马来半岛一致的原岩背景^[13]。

① 石学法,刘升发,王昆山,等.南海 SCS-CJ03 区块底质调查与研究技术总结报告,2013: 164-175.

图 9 $(La/Sm)_{UCC} - (Gd/Yb)_{UCC}$ 物源判别图Fig.9 $(La/Sm)_{UCC} - (Gd/Yb)_{UCC}$ diagram for discriminating sediment provenances

3.2 古气候演化历史重建

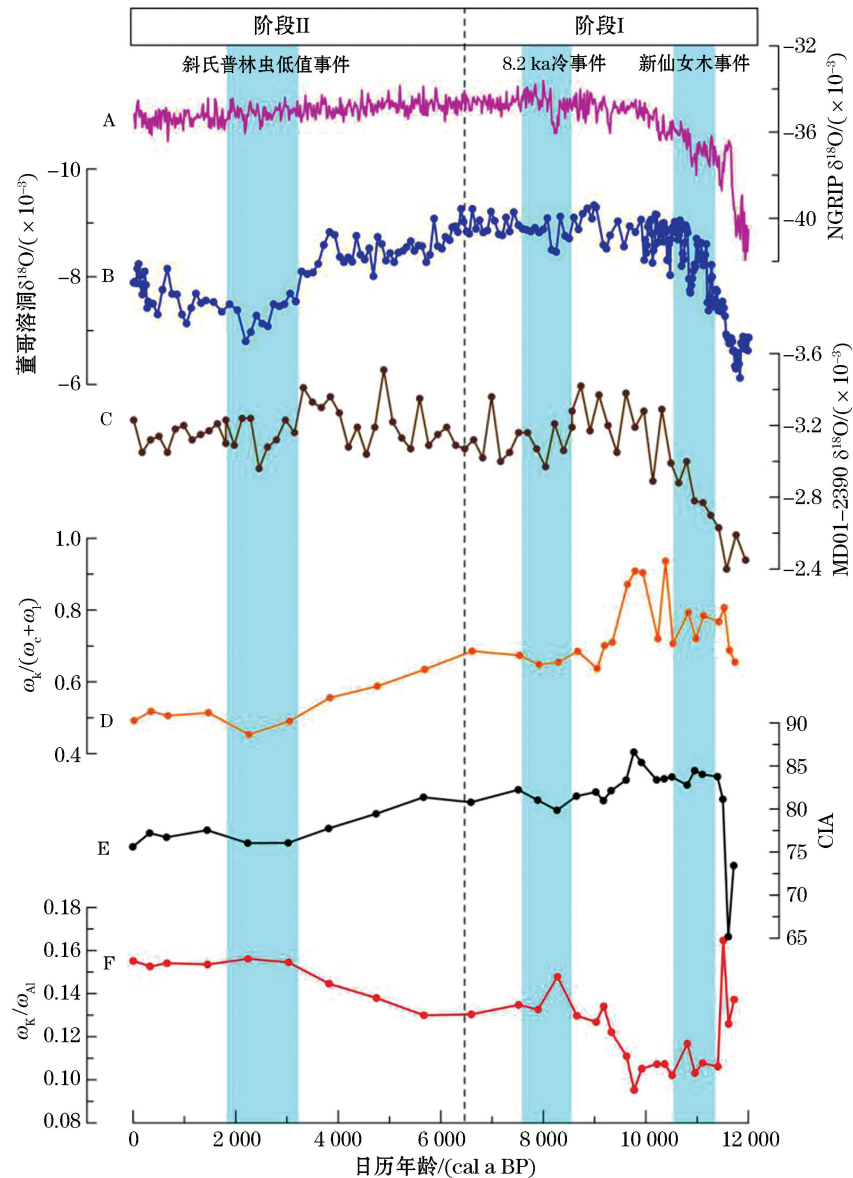
过去气候和环境演化历史可在连续性海洋沉积物中得到很好的记录,选取可靠的替代性指标可反演特定时期海洋环境特征^[35-36]。海洋沉积物中黏土矿物含量主要受到源区气候的影响^[37],对相应源区的古气候有着很好的指示作用^[38],其结果与有孔虫、孢粉等微体古生物组合反映的气候特征曲线极为相似^[39-40]。不同类型黏土矿物对气候和环境的响应关系差别很大,高岭石多发育于热带土壤中,指示暖湿气候条件下强烈的水解作用,高岭石含量越高,表明当时的气候越温暖湿润;而伊利石和绿泥石则相反,它们形成于干冷的气候环境中,伊利石和绿泥石含量越高,说明当时的气候比较寒冷干燥^[12,41-42]。前文分析表明 T155 号柱状沉积物中黏土矿物含量垂向分布具有明显的阶段划分,且物源较为单一,表明黏土矿物指标对泰国湾全新世以来的气候波动具有较好的指示意义。考虑到黏土矿物之间的稀释效应,一般不采用单个黏土矿物含量指示古气候变化,而使用几种矿物含量的比值^[42]。因此,本文采用高岭石与伊利石和绿泥石质量分数比值($\omega_k/(\omega_i + \omega_c)$)作为源区古气候的矿物学标志,此值的高低反映了夏季风的强弱。

沉积物中元素地球化学组成对气候和环境的变迁反应敏感,是气候地质事件内在成因和环境信息外在因素的综合体现和良好标志^[43-45]。由于 T155 号柱状沉积物的物源区属于东亚季风控制区,气候的冷暖波动必然会对沉积物中元素的含量及其组合特征产生同步影响,而沉积物的化学风化程度可以比较直观地反映出元素含量对气候变化的响应。K 随化学风化强度的增强易于从沉积物中淋滤出来,而 Al 则在化学风化过程中相对保守,易于在风化产物中富集^[32],因此 ω_K/ω_{Al} 可用于指示源区的风化强度。Nesbitt 等提出以 CIA 判别源区化学风化的强度,CIA 值与风化强度成正比,CIA 值越大,风化强度越大^[31],因此 CIA 也可用于指示源区风化强度的变化,并广泛应用于边缘海沉积过程研究^[30]。

本文利用 $\omega_k/(\omega_c + \omega_i)$ 、CIA 和 ω_K/ω_{Al} 与格陵兰冰芯^[46]、董哥洞氧同位素记录^[47] 和巽他陆架 MD01-2390 孔 MD01-2390 孔有孔虫壳体氧同位素记录^[48] 进行对比,从而探讨全新世以来泰国湾古气候演化过程(图 10)。全新世以来泰国湾古气候演化历史可分为 2 个阶段:

1) 阶段 I, 早中全新世(12 000~6 500 cal a BP)

该段时期 $\omega_k/(\omega_c + \omega_i)$ 和 CIA 均呈一个明显高值, ω_K/ω_{Al} 值则处于明显波动期,较高的 $\omega_k/(\omega_c + \omega_i)$ 反映了较为强盛的季风降雨,而较高的 CIA 与对应较低的 ω_K/ω_{Al} 则反映出源区风化强度较强,这都表明这段时期的东亚夏季风比较强盛,气候较为温暖湿润。然而,这段时期内气候状态并不稳定,矿物学和地球化学



注: 曲线 A 为格陵兰冰芯 NGRIP 氧同位素^[59]; 曲线 B 为董哥溶洞氧同位素^[47]; 曲线 C 为南海 MD01-2390 孔有孔虫壳体氧同位素^[48]; 曲线 D 为 T155 柱状沉积物 $\omega_k/(\omega_e + \omega_i)$; 曲线 E 为 T155 柱状沉积物 CIA; 曲线 F 为 T155 柱状沉积物 ω_k/ω_{Al} 。

图 10 全新世以来泰国湾古气候演化历史

Fig.10 Paleoclimate evolution in the Gulf of Thailand since the Holocene

指标均波动较为明显,在 10 500~11 200 cal a BP 期间 $\omega_k/(\omega_e + \omega_i)$ 和 CIA 出现了一个明显低值区,而 ω_k/ω_{Al} 值则呈现一个明显的高值区,这种气候突变事件与巽他陆架 MD01-2390 孔的氧同位素记录较一致,指示了一次明显的冷事件,这次冷事件是全新世最强烈的一次变冷事件,气温的最大降幅可达 8~10 °C^[49],极端的气候条件在泰国湾得到了很好的记录。在 7 500~8 500 cal a BP 期间 $\omega_k/(\omega_e + \omega_i)$ 和 CIA 又出现一个低值期, ω_k/ω_{Al} 值则对应呈现一个明显的高值,这个异常值的出现也指示了全新世早期南海南部的气候突变,此次变冷事件与北半球普遍发生的 8 200 cal a BP(8.2 ka 冷事件)降温事件时间较为接近,8.2 ka 冷事件早在 1983 年由 Beget 提出^[50],随后在北半球各地相继发现了这次气候突变事件,如在格陵兰冰芯^[46]、贵州董哥洞石笋^[8]、北大西洋浮冰碎屑^[5]、北欧孢粉^[51]、青藏高原原泥碳纤维^[52] 等中均能找到相应记录,反映了

全球气候变化的区域性响应特征。这两次千年尺度气候事件时期,地球化学和黏土矿物指标的变化规律也很好地说明了在全球气候寒冷期,东亚夏季风会出现较为明显的减弱,从而影响源区物质的风化、侵蚀和搬运强度,这进一步揭示了气候条件对热带区域陆海相互作用过程的控制。

2) 阶段 II, 中全新世(6 500 cal a BP)以来

该段时期 $\omega_K/(\omega_c + \omega_l)$ 值和 CIA 指示的源区风化强度均呈明显降低的趋势,这与周边地区石笋和海洋沉积物氧同位素记录变化趋势一致^[47-48],反映了逐渐减弱的东亚夏季风趋势,但 3 个指标的波动并不明显,可能受控于这一阶段的 T155 孔沉积速率降低,导致这 3 个指标的时间分辨率降低。整体上来说,这一阶段的季风强度呈降低趋势,这与前人关于全新世以来东亚季风的研究结果吻合,即早全新世时季风较为强盛,中全新世后季风逐渐减弱^[6,8,53-54]。这一时期内, $\omega_K/(\omega_c + \omega_l)$ 和 CIA 在 3 200~1 800 cal a BP 时期呈现明显低值,对应于 ω_K/ω_{Al} 的高值期,这可能也同时指示了一次冷事件的发生。此次冷事件与在全球发现的全新世晚期距今 4~2 cal ka BP 的变冷事件(斜氏普林虫低值事件)一致^[55],该变冷事件与中国大陆湖泊、石笋、海洋沉积物记录的这一时期东亚夏季风减弱相对应^[44,56-57]。印度洋-太平洋交汇区的微体古生物同样记录了发生在 4.5~3.0 cal ka BP 时期的“斜氏普林虫低值事件”^[58]。由此可见,全新世高海平面以来东北印度洋和南海南部气候变化具有很好的 consistency,反映了热带海域气候态对全球变化的响应关系。

4 结 论

本文以泰国湾西南部 T155 号柱状沉积物为研究对象,综合分析了矿物学和地球化学规律,定性判定了沉积物来源,并恢复了全新世以来泰国湾古气候演化过程,其主要结论如下:

1) 全新世以来泰国湾西南部沉积物来源较为单一,主要来自于马来半岛输入的陆源物质,主要驱动力为东亚夏季风控制下的沿岸流。

2) 早中全新世东亚夏季风较为强盛,波动较为剧烈, $\omega_K/(\omega_c + \omega_l)$ 和 CIA 出现两个低值区(10 500~11 200 cal a BP 和 7 500~8 500 cal a BP),对应于 ω_K/ω_{Al} 出现的两个高值区,指示了两次千年尺度的冷事件的发生,推断是新仙女木事件和 8.2 ka 冷事件在泰国湾的响应。

3) 中全新世以来东亚季风强度逐渐减弱, $\omega_K/(\omega_c + \omega_l)$ 和 CIA 呈明显下降趋势,而 ω_K/ω_{Al} 则呈现上升趋势,在 3 200~1 800 cal a BP 时呈现一个明显的冷事件,指示了热带海域“斜氏普林虫低值事件”的发生。

参考文献(References):

- [1] 殷雅倩,党皓文,王跃,等. 末次冰消期西太平洋暖池上层海温千百年尺度变化[J]. 科学通报, 2019, 64(20): 2151-2162. YIN Y Q, DANG H W, WANG Y, et al. Millennial-and centennial-scale variations in the upper-water temperature of Western Pacific Warm Pool during the last deglaciation[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(20): 2151-2162.
- [2] MOHTADI M, PRANGE M, OPPO D W, et al. North Atlantic forcing of tropical Indian Ocean climate[J]. Nature, 2014, 509(7498): 76-80.
- [3] DANSGAARD W, JOHNSEN S, CLAUSEN H, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. Nature, 1993, 364: 218-220.
- [4] MAYEWSKI P A, ROHLING E E, STAGER J C, et al. Holocene climate variability[J]. Quaternary Research, 2004, 62(3): 243-255.
- [5] 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.
- [6] AN Z S, KUTZBACH J E, WU X H, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(8): 743-762.
- [7] CULLEN H M, DEMENOCAL P B, HEMMING S, et al. Climate change and the collapse of the Akkadian empire: evidence from the deep sea[J]. Geology, 2000, 28(4): 379-382.
- [8] WANG Y J, CHENG H, EDWARDS L R, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic Climate[J].

- Science, 2005, 308(5723): 854-857.
- [9] LIU S F, YE W X, CAO P, et al. Paleoclimatic responses in the tropical Indian Ocean to regional monsoon and global climate change over the last 42 kyr[J]. Marine Geology, 2021, 438(2): 106542.
- [10] ANWAR T, KRAVCHINSKY V A, ZHANG R, et al. Holocene climatic evolution at the Chinese Loess Plateau: testing sensitivity to the global warming-cooling events[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 166: 223-232.
- [11] SHI X F, LIU S F, FANG X S, 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: 390-398.
- [12] 王昆山, 石学法, 刘升发, 等. 泰国湾西部表层沉积物重矿物分布特征: 对物质来源和沉积环境的指示[J]. 第四纪研究, 2014, 34(3): 623-634. WANG K S, SHI X F, LIU S F, et al. Spatial distribution of heavy minerals in the surface sediments from the western Gulf of Thailand: implications for sediment provenance and sedimentary environment[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(3): 623-634.
- [13] WU K K, LIU S F, SHI X F, et al. Distribution of rare earth elements in surface sediments of the western Sunda Shelf: constraints from sedimentology and mineralogy[J]. Continental Shelf Research, 2020, 206: 104198.
- [14] SATHIAMURTHY E, COLIN C. Chemical weathering in Malay Peninsula and North Borneo: clay mineralogy and element geochemistry of river surface sediments[J]. Science China (Earth Sciences), 2011, 54(2): 272-282.
- [15] LIU S F, ZHANG H, ZHU A M, et al. Distribution of rare earth elements in surface sediments of the western Gulf of Thailand: constraints from sedimentology and mineralogy[J]. Quaternary International, 2019, 527: 52-63.
- [16] 张杨硕, 乔淑卿, 石学法, 等. 泰国湾底质沉积物输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(1): 86-92. ZHANG Y S, QIAO S Q, SHI X F, et al. Moving trend of bottom sediments in Gulf of Thailand[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(1): 86-92.
- [17] ZHANG H, LIU S F, WU K K, et al. Evolution of sedimentary environment in the Gulf of Thailand since the last deglaciation[J]. Quaternary International, 2021: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.02.018>.
- [18] LIU Z F, ZHAO Y L, LI J R, et al. Late Quaternary clay minerals off middle Vietnam in the western South China Sea: implications for source analysis and East Asian monsoon evolution[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(11): 1674-1684.
- [19] 郭瑜璇, 乔淑卿, 石学法, 等. 曼谷湾河口区百年来沉积物重金属变化趋势及污染来源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 61-69. GUO Y X, QIAO S Q, SHI X F, et al. Variation trend and contamination source of heavy metals in sediments from estuary area of Bangkok Bay in the past century[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(2): 61-69.
- [20] CHEEVAPORN V, MENASVETA P. Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47(1): 43-51.
- [21] HUNGSPREUGS M, YUANGTHONG C. A history of metal pollution in the upper Gulf of Thailand[J]. Marine Pollution Bulletin, 1983, 14(12): 465-469.
- [22] THAMPANYA U, VERMAAT J E, SINSAKUL S, et al. Coastal erosion and mangrove progradation of southern Thailand[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68(1): 75-85.
- [23] WU K K, LIU S F, KANDASAMY S, et al. Grain-size effect on rare earth elements in Pahang River and Kelantan River, Peninsular Malaysia: implications for sediment provenance in the southern South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2019, 189: 103977.
- [24] SOUTHON J, KASHGARIAN M, FONTUGNE M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. Radiocarbon, 2002, 44(1): 167-180.
- [25] 童胜琪. 珠江、红河及湄公河流域表层沉积物元素地球化学研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 1-62. TONG S Q. Elemental geochemistry of surface sediments in Pearl River, Red River and Mekong River Basins[D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 1-62.
- [26] SULTAN K, SHAZILI N A. Rare earth elements in tropical surface water, soil and sediments of the Terengganu River Basin, Malaysia[J]. Journal of Rare Earths, 2009, 27(6): 1072-1078.
- [27] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(4): 632-635.
- [28] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999(2): 63-66. YANG S Y, LI C S. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. Advance in Earth Science, 1999(2): 63-66.
- [29] 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 物源分析的研究与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2000(4): 104-110. WANG Z J, CHEN H D, ZHANG J Q. Provenance analysis: perspectives[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000(4): 104-110.
- [30] LIU S F, SHI X F, YANG G, et al. Distribution of major and trace elements in surface sediments of the western Gulf of Thailand: evidence for understanding modern sedimentation[J]. Continental Shelf Research, 2016, 117: 81-91.
- [31] NESBITT H W, YONG G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [32] HONDA M, SHIMIZU H. Geochemical mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands[J]. Sedimentology, 1998, 45: 1125-1143.

- [33] SHI X F, LIU S F, FANG X S, 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: 390-398.
- [34] 秦蕴珊. 全球变化与陆架沉积[J]. *沉积学报*, 1992(3): 40-46. QIN Y S. Global changes and sedimentation on continental shelf[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992(3): 40-46.
- [35] 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30(1): 1-18. WANG P X. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(1): 1-18.
- [36] PETSCHICK R, KUHN G, GINGELE F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography[J]. *Marine Geology*, 1996, 130(3/4): 203-229.
- [37] LIU S F, SHI X F, LIU Y G, et al. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 2306-2314.
- [38] 朱凤冠. 东海陆架区全新世地层中黏土矿物研究[J]. *东海海洋*, 1985, 3(4): 32-40. ZHU F G. Clay minerals of the East China Sea area in the recent epoch stratum[J]. *Donghai Marine Science*, 1985, 3(4): 32-40.
- [39] 何良彪, 刘秦玉. 黄海与长江沉积物中黏土矿物的化学特征[J]. *科学通报*, 1997, 42(7): 730-733. HE L B, LIU Q Y. Chemical characteristics of clay minerals in sediments of the Yellow Sea and the Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(7): 730-733.
- [40] 蓝先洪. 黏土矿物作为古气候指标矿物的探讨[J]. *地质科技情报*, 1990, 9(4): 31-35. LAN X H. Clay minerals as an index of paleoclimate[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1990, 9(4): 31-35.
- [41] 吴月英, 陈中原, 王张华. 长江三角洲平原黏土矿物分布特征及其环境意义[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 1: 92-98. WU Y Y, CHEN Z Y, WANG Z H. Distribution of clay minerals in the Yangtze Delta Plain and its paleoenvironmental implication[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2005, 1: 92-98.
- [42] 刘志飞, COLIN C, TRENTESAUX A, 等. 南海南部晚第四纪东亚季风演化的黏土矿物记录[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(3): 272-279. LIU Z F, COLIN C, TRENTESAUX A, et al. Clay mineral records of the late Quaternary East Asian monsoon evolution in the southern South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(3): 272-279.
- [43] 颜文, 古森昌, 陈列忠, 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): 75-831. YAN W, GU S C, CHEN L Z, et al. Characteristics of main elements and their palaeoenvironment significance of Core 191 in the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21(2): 875-831.
- [44] 赵宏樵, 韩喜彬, 陈荣华, 等. 南海北部 191 柱状沉积物主元素特征及其古环境意义[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 85-93. ZHAO H Q, HAN X B, CHEN R H, et al. Characteristics of main elements and their palaeoenvironment significance of Core 191 in the northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(6): 85-93.
- [45] TRIPATHY G R, SINGH S K, BHUSHAN R, et al. Sr-Nd isotope composition of the Bay of Bengal sediments: impact of climate on erosion in the Himalaya[J]. *Geochemical Journal*, 2011, 45(3): 175-186.
- [46] SVENSSON A, ANDERSEN K K, BIGLER M, et al. A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology[J]. *Climate of the Past*, 2008, 4(1): 47-57.
- [47] YUAN D, CHENG H, EDWARDS R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575.
- [48] STEINKE S, CHIU H Y, YU P S, et al. On the influence of sea level and monsoon climate on the southern South China Sea freshwater budget over the last 22,000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(13/14): 1475-1488.
- [49] FANNING A F, WEAVER A J. Temporal-geographical meltwater influences on the North Atlantic conveyor: implications for the Younger Dryas[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(2): 307-320.
- [50] BEGET J E. Radiocarbon-dated evidence of worldwide early Holocene climate change[J]. *Geology*, 1983, 11(1983): 389-393.
- [51] SEPPÄ H, BLRKS H J B, GLESECKE T, et al. Spatial structure of the 8200 cal yr BP event in Northern Europe[J]. *Climate of the Past Discussions*, 2007, 3(9): 165-195.
- [52] HONG Y T, HONG B, LIN Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 215(1): 317-318.
- [53] LI N N, SHARIFI A, CHAMBERS F M, et al. Linking Holocene East Asian monsoon variability to solar forcing and ENSO activity: multi-proxy evidence from a peatland in Northeastern China[J]. *The Holocene*, 2021, 31(6): 966-982.
- [54] DONG J, LI A C, LU Z Y, et al. Millennial-scale interaction between the East Asian winter monsoon and El Niño-related tropical Pacific precipitation in the Holocene[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021(573): 110442.
- [55] 翦知潜, 李保华, PFLAUMANN U, 等. 西太平洋晚全新世变冷事件[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(5): 461-466. JIAN Z M, LI B H, PFLAUMANN U, et al. Late Holocene cooling event in the Western Pacific[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1996, 26(5): 461-466.

- [56] PENG Y, XIAO J, NAKAMURA T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of coresediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005(233): 467-479.
- [57] WANG Y J, CHENG H, EDWARDS L R, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and north Atlantic climate[J]. *Science*, 2005(308): 854-857.
- [58] SIJINKUMAR A V, NATH B N, POSSNERT G, et al. Pulleniatina minimum events in the Andaman Sea (NE Indian Ocean): implications for winter monsoon and thermocline changes[J]. *Marine Micropaleontology*, 2011, 81(3): 88-94.
- [59] STUIVER M, GROOTES P, BRAZIUMAS T. The GISP $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(33): 341-354.

Holocene Paleoclimate Evolution in the Gulf of Thailand: Evidence From Geochemistry and Mineralogy

YUAN Shuai^{1,2}, ZHANG Hui^{2,3}, CAO Peng^{2,3,4},
LI Xiao-yan^{2,3,4}, SHI Xue-fa^{2,3,4}, FAN De-jiang^{1,4}, SOMKIAT Khokiattiwong⁵,
NARUMOL Kornkanitnan⁵, LIU Sheng-fa^{2,3,4}

(1. *College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

3. *Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, MNR, Qingdao 266061, China;*

4. *Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China;*

5. *Marine and Coastal Resources Research and Development Institute, Department of Marine and Coastal Resources, Bangkok 10210, Thailand)*

Abstract: To understand the history of paleoclimate changes in the Gulf of Thailand, we performed systematic geochemical and mineralogical study on the core T155 collected from the Gulf of Thailand. The rare earth element index of $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{UCC}}-(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{UCC}}$ diagram for sediments indicate that the sediment source in the southwestern Gulf of Thailand was relatively stable since the Holocene and mainly from the Malay Peninsula, and the coastal current controlled by the seasonal monsoon was the main driving force. Based on the proxies of kaolinite/(chlorite+illite), chemical alteration index (CIA) and potassium aluminum ratio (K/Al) in the core T155, this study divided the Holocene paleoclimate evolution into the following two stages, ①The early-middle Holocene (12 000 cal a BP—6 500 cal a BP): the values of kaolinite/(chlorite+illite) and CIA were high, indicating the strong East Asian summer monsoon in this period. During this stage, kaolinite/(chlorite+illite) value and CIA appeared two low value periods, corresponding to two high value of K/Al, which occurred in 11 200 cal a BP—10 500 cal a BP and 8 500 cal a BP—7 500 cal a BP, respectively, indicating the response of the Gulf of Thailand to two global millennium scale climate events (the younger dryas event and the 8.2 ka cold event). ②After the middle Holocene (6 500 cal a BP): the values of kaolinite/(chlorite+illite) and CIA have decreased significantly, indicating that the East Asian summer monsoon has gradually weakened during this period. At the period that from 3 200 cal a BP to 1 800 cal a BP, the geochemical and clay mineral indexes showed an obvious low value, which corresponds to the “Pulleniatina Minimum Events” in the tropical sea area, implying the good regional response to global climate change in the Gulf of Thailand.

Key words: paleoclimate; Holocene; rare earth element; clay mineral; Gulf of Thailand

Received: August 23, 2021