



移动阅读

梁磊, 许国强, 黄武轩, 等, 2023. 北部湾东南部末次冰期以来环境演化与驱动机制[J]. 沉积与特提斯地质, 43(4): 702–711. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09001

LIANG L, XU G Q, HUANG W X, et al., 2023. Environmental evolution and its driving mechanisms of southeastern Beibu Gulf since the Last glacial period[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(4): 702–711. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09001

北部湾东南部末次冰期以来环境演化与驱动机制

梁磊^{1,2}, 许国强^{2*}, 黄武轩^{1,3}, 梁定勇^{1,2}, 李孙雄^{1,2}, 郝强⁴, 黄蓉^{1,2}

(1. 海南省地质综合勘察院, 海南 海口 570206; 2. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口 570206; 3. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206; 4. 成都理工大学工程技术学院资源勘查与土木工程系, 四川 乐山 614000)

摘要: 应用单道浅层地震、等离子体质谱仪(ICP-MS)和X射线衍射(XRD)等测试技术对地层结构及主微量元素地球化学、黏土矿物组成和结晶学特征等气候代用指标进行分析, 高精度刻画了北部湾东南部末次间冰期以来的气候演化及驱动机制。指标变化显示南海西北部75千年(75 ka)以来物源供给受气候及海平面变化的协同控制。晚更新世受海因里希(Heinrich)全球气候变冷事件及青藏高原巨大高度和纬度效应的调控导致56 ka、41 ka和28 ka东亚季风的冬季风较夏季风阶段性增强, 步入全新世以来, 北部湾东南部历经多次干湿交替性升温过程, 逐步演化到现今气候阶段。

关键词: 黏土矿物; 东亚季风; 更新世; 南海

中图分类号: P567

文献标识码: A

Environmental evolution and its driving mechanisms of southeastern Beibu Gulf since the Last glacial period

LIANG Lei^{1,2}, XU Guoqiang^{2*}, HUANG Wuxuan^{1,3}, LIANG Dingyong^{1,2}, LI Sunxiong^{1,2},
HAO Qiang⁴, HUANG Rong^{1,2}

(1. *Comprehensive Geologic Survey of Hainan Province, Haikou 570206, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China*; 3. *Geologic Survey of Hainan Province, Haikou 570206, China*; 4. *The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China*)

Abstract: The stratigraphic structure, the geochemistry of major and trace elements, and the composition of clay minerals and the crystallographic characteristics have been analyzed by single-channel shallow seismic, ICP-MS, EDS, and XRD. The climate evolution and its driving mechanisms since the last interglacial period in the southeastern Beibu Gulf have been accurately characterized. The variation of indices shows that the provenance supply of the northwest South China Sea has been controlled by climate and sea level changes since 75 thousand years (75 ka) ago. In the late Pleistocene, the Heinrich event and the differential

收稿日期: 2021-06-18; 改回日期: 2021-09-17; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 梁磊(1989—), 男, 硕士, 工程师。主要从事第四纪地质与海洋地质研究。E-mail: 2010876@tongji.edu.cn

通讯作者: 许国强(1985—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向为区域地质与环境。E-mail: 617788576@qq.com

资助项目: 海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目基金(2019RC348); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室自主课题(ZZ[2020]2019256-02); 成都理工大学工程技术学院院基金(C122018032)

uplift of the Qinghai-Tibet Plateau caused the East Asian monsoon, especially the winter monsoon, to gradually increase at 56 ka, 41 ka, and 28 ka. Since the Holocene (11.5 ka ago), the southeastern part of the Beibu Gulf has experienced several drying-humid warming processes, which gradually evolved into the current climate stage.

Key words: clay mineral; East Asian monsoon; Pleistocene; South China Sea

0 引言

自 Raymo et al. (1988) 提出“构造—风化—气候”假说以来, 构造尺度上隆升控制下的大陆风化一直被认为是平衡全球碳循环和调节全球气候的关键制约因素(邵菁清等, 2012); 而在轨道及千年尺度上的沉积环境变化, 由于区域地质背景变化较小, 细致刻画气候变化需采用能迅速指示环境变化的代用指标(杨希冰等, 2019; Hilton R G and West A J, 2020; Kump L R, 2000; 密蓓蓓等, 2020)。过去 40 年来, 化学蚀变指数 (chemical index of alteration, CIA) 广泛应用在长江、南亚诸河(恒河、湄公河、印度河、红河)、亚马逊流域等地的硅酸盐化学风化程度研究(Nesbitt H W and Young G M, 1982)。同时, 黏土矿物组合特征结合精确的光释光(OSL)定年, 可建立高分辨率的黏土矿物组合时间序列, 进而揭示区域性气候变化及在地质运动背景下的演化过程(程捷等, 2003; 史兴民等, 2007; 何海军等, 2016)。

南海作为紧邻西太平洋岛弧和亚洲大陆的低纬边缘海, 因其较高的沉积速率而成为研究从源到汇过程、古气候演化、特别是东亚季风的天然实验室, 我国主导了 3 次以南海气候变化和成因为重点的“国际大洋钻探计划(ODP)”航次, 多方面论证了低纬驱动效应以及南海是特提斯洋闭合过程中形成的弧后盆这一观点, 否定了 Tapponnier 所认为的青藏高原碰撞逃逸模型。南海是国际上全球变化研究的重点区域(Tapponnier P et al., 1990; 孙卫东等, 2018), 而北部湾是南海最大且三面环陆的半封闭型浅水海湾, 受海洋活动影响有限, 混染较弱, 更易于源区信号的剥离, 对正确判识和解读晚第四纪东亚季风, 尤其是对 Heinrich 事件的响应研究具有指示意义。

1 研究区概况

研究区位于海南岛昌化江入海口南侧之近岸浅水海域(图 1), 处在东西向压性构造带昌江—琼海深大断裂的西端, 其海底地形受海岸及等深流制

约, 自南东向北西呈现滩槽相间的地形格局。气候上受控于亚热带—热带季风气候, 风向季节变化显著, 尤以冬季东北季风为最, 1 月平均风速可达 6~8 m/s, 多年平均气温约 24.5℃。太平洋半日潮自吕宋海峡由东南方向进入南海, 其分支转向西北传入北部湾, 平均海平面与风场和气压场分布有关, 季节性变化明显。水动力以季风影响下的表层流为主(何海军等, 2016)。区域上, 海流全年均沿逆时针方向旋转, 外海水沿东侧北上, 湾内水顺西南下形成环流, 夏季因风向变化环流强度明显减弱。

昌化江由东向西所携带的下行陆相泥砂、沿岸支流汇流补给泥砂以及随潮流所裹挟泥砂在研究区东侧入海。受河口堤坝及水利枢纽影响, 近年来随潮流和径流进入三角洲河网内的泥砂比例大幅减小, 据海南省宝桥水文站观测显示(表 1), 1957 年—1994 年, 多年平均输沙量约为 82×10^4 t; 大广坝水利枢纽建成后下游输沙量骤减, 1995 年—2014 年, 多年平均输沙量减至 40.9×10^4 t 且变化幅度较大, 最小 5.78×10^4 t(1998 年), 最大达 104×10^4 t(2001 年)。

2 研究方法与结果

2.1 沉积地层格架

2.1.1 地震层序特征

地震反射相特征显示, 北侧海底可连续追踪 6 个反射界面, 自海底往下依次编号为 T0(海底)、T1、T2、T3、T4 及 T5(基岩或界面), 相应划分为 6 个层序, 编号依次为 I、II、III、IV、V 和 VI(图 2)。

I 层: 反射波频率高、振幅高, 同向轴连续性好, 全区可连续追踪。厚度变化呈现为由陆向海逐渐变厚。钻探揭露情况显示, 岩性以砂泥质沉积物为主, 见大量贝壳类生物碎屑, 自西向东砂质含量有所升高。

II 层: 本层底(T2)为一强波阻抗面、呈小幅度波状起伏; 层内部上层为波状反射结构, 下层呈近空白反射结构, 对下伏地层有明显的削截现象, 全区可连续追踪。

III 层: 本层底(T3)为一强波阻抗面; 反射波具

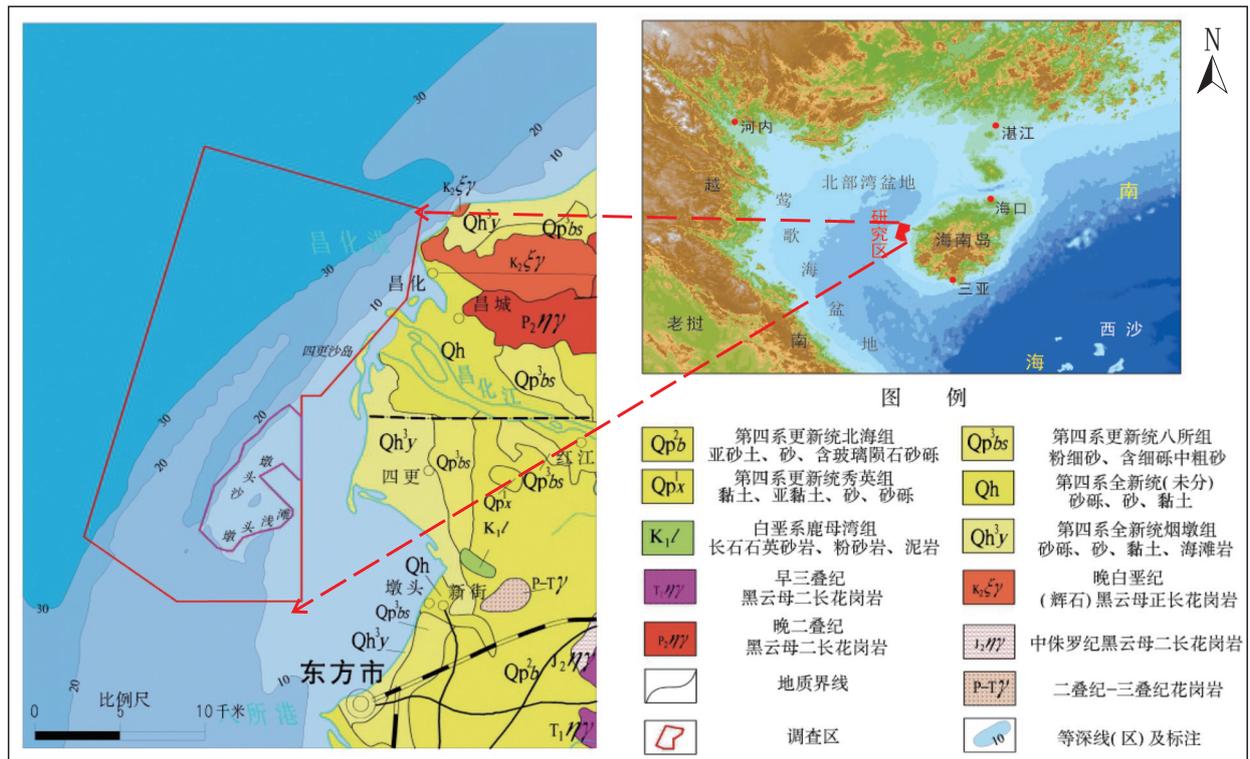


图1 南海东北部数字高程影像及研究区地质图

Fig. 1 Digital elevation model and geological map of the study area in the northeastern South China Sea

表1 宝桥水文站流量泥沙资料统计表

Table 1 Statistical table of flow and sediment data in Baoqiao Hydrological Station

统计年份	1957—1994	1995—2014
年平均流量 (m ³ /s)	116.6	134.2
年径流量 (亿m ³)	37.55	41.75
年最大流量 (m ³ /s)	20 000	14 800
平均含沙量 (kg/m ³)	0.173	0.089
多年平均输沙量 (10 ⁴ t)	82.0	40.9

有中高频率, 中强振幅、连续性好等特点; 内部结构由空白或无反射(靠陆一侧)到斜交形前积结构, 外部形态整体上呈楔形结构, 由东向西倾斜沉积。

IV层: 该层底界为 T4 反射界面, 具有中振幅、中频率, 连续性中等。内部反射结构从靠岸一侧开始呈近空白反射—近平行反射—杂乱反射过渡, 外部整体呈席形披盖状, 全区可连续追踪。

V层: 该层底界为 T5 反射界面。T5 界面为一强波阻抗面, 呈波浪状起伏, 整体表现为中强振幅、中低频率、连续性较差, 部分地段追踪困难。层内部表现为亚平行结构, 外部形态表现为席状披盖状, 由陆向海倾斜。

VI层: 该层位于 T5 界面以下, 未见底。T5 为

一强波阻抗面, 中强振幅、中低频率, 连续性较差, 整体由陆向海倾斜, 界面以下反射波的能量明显减弱, 多数呈无反射状, 局部可见一些细、密、倾斜状的平行反射线条和次级的波阻抗面。据此, 可以认为本层为固结程度比较好的沉积层或基岩。

2.1.2 沉积地层特征

通过地震和钻孔揭露, 研究区晚第四纪地层大致可以划分为现代海洋沉积层、陆—海交互沉积层和古河道沉积层(图3)。地层从老到新分述如下:

(1) 古河道沉积层

灰白色—灰黄色—棕红色砂砾层, 不含生物碎屑, 磨圆较好、分选程度不一(图4)。

(2) 陆—海交互沉积层

灰黄色粉砂、灰色—浅绿黏土互层, 局部泥质呈团块状, 少见粗砂、砾石, 偶见生物碎屑。平行层理发育, 见生物潜穴。本层沉积环境陆相和海相交替频繁, 与下伏河道相沉积层整合接触。

(3) 现代海洋沉积层

全新世以来的海相沉积, 受昌化江径流、海流、潮汐等因素影响, 沉积物变化较大, 以灰白色砂和灰色—黑色泥质(图4)为主, 多见生物碎屑。研究区内大致沿 45° 方向区分, 西北一侧为泥质沉积, 南

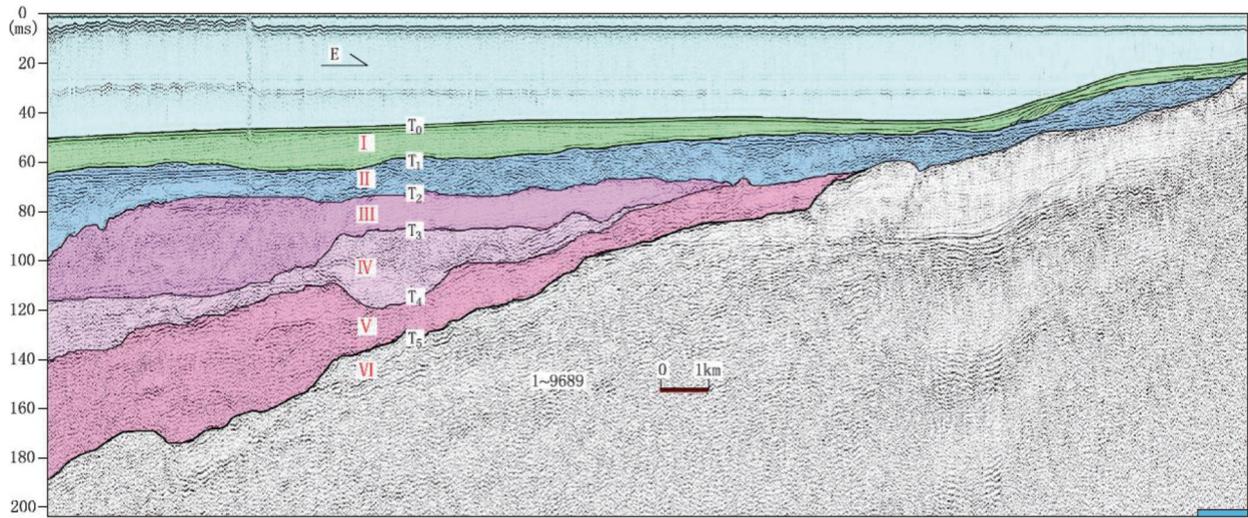


图 2 单道地震浅地层结构及层序划分

Fig. 2 Shallow stratigraphic structure and sequence division

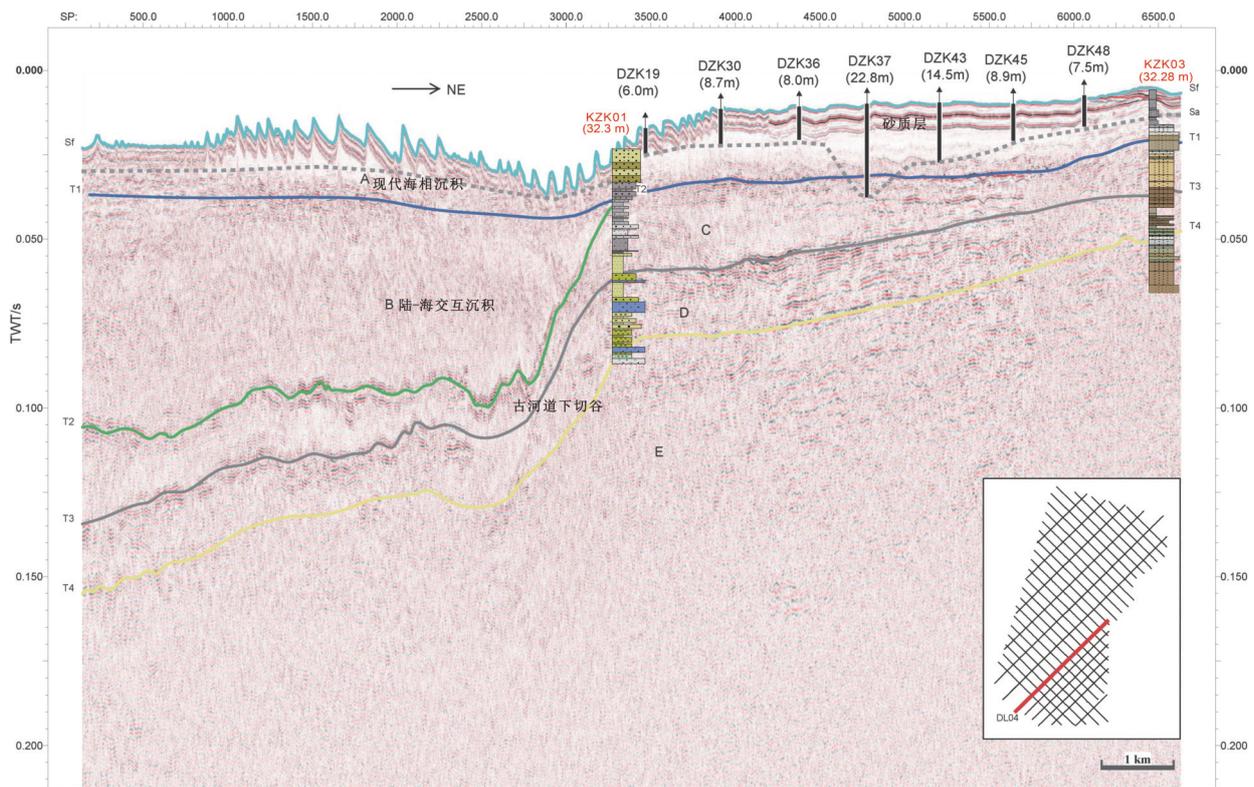


图 3 研究区 DL14 线地震—地质综合剖面图

Fig. 3 Comprehensive seismic-geological profile of DL14 line in the study area

东一侧以砂质沉积为主。在研究区南部形成墩头沙、墩头浅滩等北东向展的水下沙脊。

2.2 风化指标变化

化学蚀变指数(CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O+K₂O)]×100, 其中 CaO*为存在于硅酸盐中的 CaO, 各成分含量均为摩尔分数)能较好地衡量流域内,

尤其是硅酸盐累积的综合化学风化历史,并排除瞬时(季节性)和短时间尺度的气候变化所带来的干扰,因在轨道—构造尺度上能定量地评价风化不彻底的区域和重建古环境特征而得到广泛应用。其与 K₂O/Na₂O、K₂O/CaO、Al₂O₃/Na₂O、MgO/CaO 等多个气候指标结合使用,相互验证可提高古气候信



图4 KZK03孔底部砂砾层(a)和顶部泥质沉积物(b)

Fig. 4 Gravel layer at the bottom of KZK03 (a) and argillaceous sediment on the top of hole KZK03 (shell) (b)

息的准确性和可靠性。

KZK03孔采集沉积物样品103件,经60℃烘干后均匀取样,利用5% HCl剔除碳酸盐岩类中Ca²⁺对指标计算时的干扰,在马弗炉中灼烧>2 h (600℃)称重计算烧失量,待冷却精确称重50±1 mg进行消解。样品按规范要求国土资源部海口矿产资源监督检测中心X-series II型电感耦合等离子体质谱仪完成主量元素测试分析,测试结果参见图5。

2.3 黏土矿物特征

对KZK03柱状样等距离取样,获取106个沉积物样品(含3个表层沉积物)进行黏土矿物分析,使用黏土粒级(<2 μm)定向薄片的X射线衍射方法,详细流程见Liu et al.(2003)。全部分析测试使用海南省地质测试研究中心Ultima IV-185型衍射仪完成。

黏土矿物在乙二醇蒸汽饱和、加热和自然环境三种条件下获得的XRD叠加图谱综合对比发现(图6)伊/蒙混层(001)晶面1.7 nm峰值明显,蒙脱石峰值(1.4 nm)不明显,而伊利石1 nm(001)晶面、高岭石(001)和绿泥石(002)晶面0.7 nm峰值较明显。

3 讨论

3.1 黏土矿物的物质来源

北部湾东南部陆架近岸水浅水动力较强,次生和成岩作用对黏土矿物的影响完全可以忽略,因此,应用沉积物中的黏土矿物判识古气候的先决条件仅取决于物质来源,潜在物源区依据对河流的输沙量大小,依次为红河、近源海南昌化江、越南诸河及沿琼州海峡输来陆源碎屑物质的珠江。

红河是北部湾的最大供给端元,直接输入的悬浮物约125×10⁶ t,以伊利石(含量为44%)为主,高岭石和绿泥石次之,分别为26%和23%及7%的蒙脱石。近源的海南昌化江多年平均输沙量约为82×10⁴ t,相对红河和珠江(69×10⁶ t)而言很小,但因受全年季风影响下逆时针的表层流及陆架浅海区沉积环境的制约,对研究区沉积物的贡献不能忽略。黏土矿物组合上展现出富高岭石,低蒙脱石的端元特征,通过对地震—地质剖面层序特征识别发现其输沙量直接控制着研究区沉积速率;珠江提供的黏土矿物蒙脱石含量极低(图7),在KZK03沉积柱中未见d=14的蒙脱石峰值(图6),这是否意味着珠江通过琼州海峡为研究区输送碎屑物质? Gibbs(1997)和周世文等(2014)认为物理分选导致黏土矿物差异沉降,使得较大粒径的伊利石、高岭石和绿泥石优先沉降在靠近河口的海区,而在远离河口的区域,粒度较小的蒙脱石相对富集,这一特征在亚马逊河、南海东北部和密西西比河等地区研究中均得到了验证;而越南诸河及沿琼州海峡输送来的物质对研究区影响甚微,其多被表层流搬运至盆地内沉积下来。

综上所述,通过黏土矿物组合差异可有效示踪物质来源,研究区主要由红河和昌化江提供陆源碎屑物质,而越南沿岸小河和珠江受距离和水动力分选作用的影响,对区内物质贡献可以忽略。红河和昌化江两物源区具有低蒙脱石的共性,但伊利石和高岭石含量悬殊,红河伊利石含量最高,绿泥石次之,昌化江高岭石含量最高,绿泥石次之(图7)。

3.2 古气候指示与事件对比

Heinrich(海因里希)事件是异常冰筏碎屑(ice-

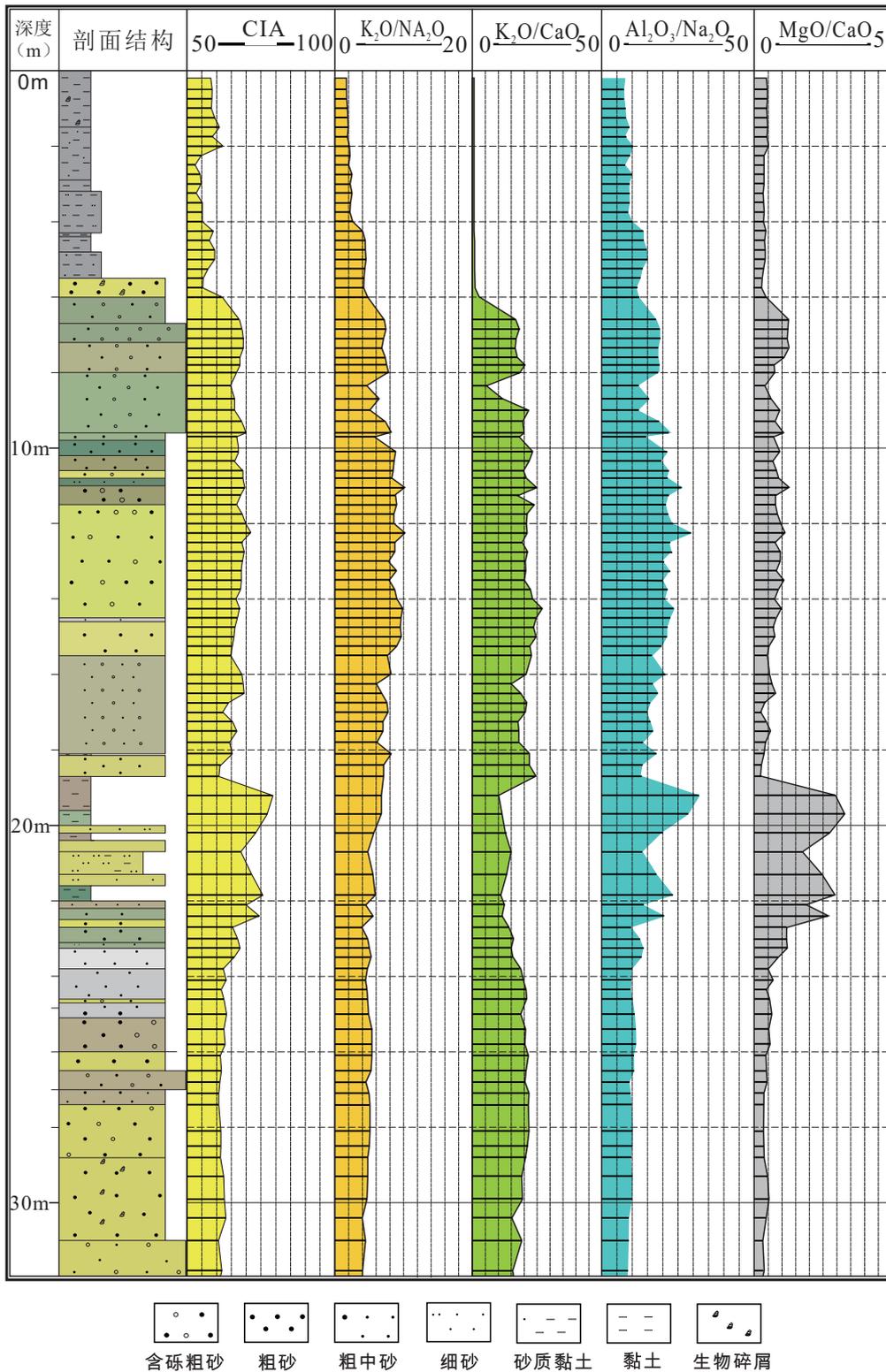


图 5 KZK03 孔岩性与多气候指标差异性对比

Fig. 5 Comparison chart of lithology and multi-climatic index in KZK03

rafted debris, IRD)沉积的寒冷气候事件的极端表现,具有全球遥相关特征,最早由 Heinrich(1988)在研究北大西洋东部海山时发现末次冰期时期具

有粗碎屑颗粒多次突然增加的现象而提出的。Broecker et al.(1992)和 Bond et al.(1993)通过高分辨率取样(以 1 cm 为间隔)结合 AMS ¹⁴C 测年确定

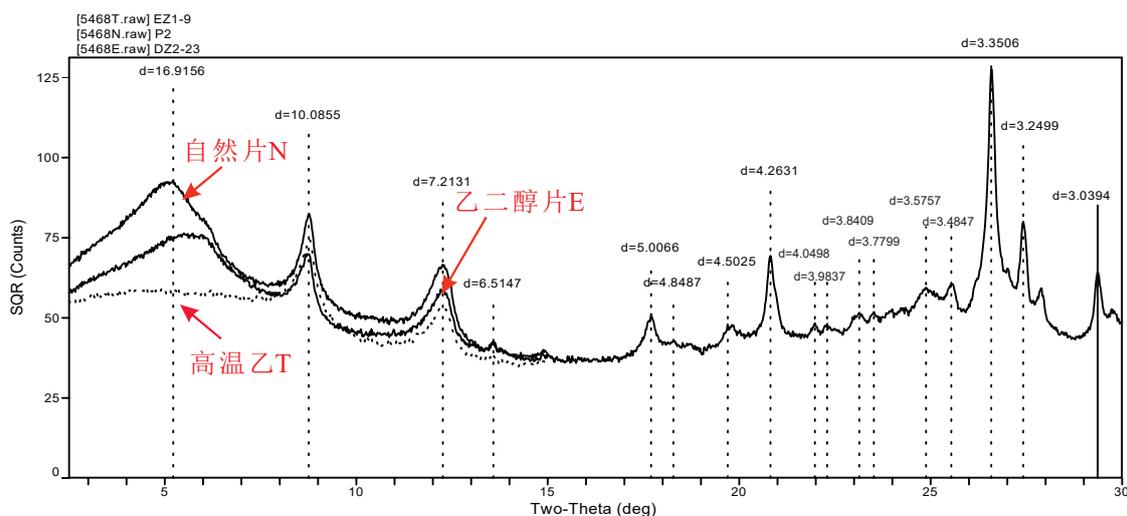
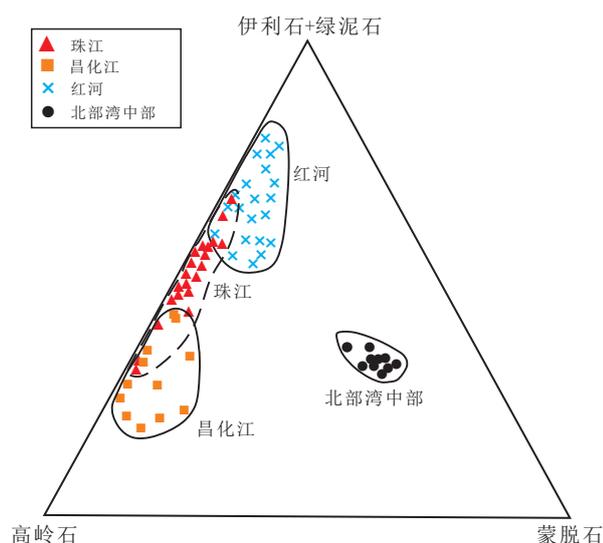


图 6 黏土矿物典型 X 射线衍射图谱

Fig. 6 Typical X-ray diffraction patterns of clay minerals



红河和珠江数据来自于刘志飞 (2010); 北部湾数据来自周世文 (2014)。

图 7 周边源区沉积物黏土矿物组合对比三角端元图

Fig. 7 Ternary diagram of the clay mineral assemblages in potential provenance

了事件的年龄, 从新到老共划分 6 个期次 (H1—H6), 分别为 14、21、28、41、52 和 69 ka B. P., 关注点也从之前的物质来源转至大气—海洋相关作用与气候变化的关系上, 对于 Heinrich 事件的触发机制与气候反馈机制, 学术界一直争论不休, 至今仍未盖棺定论, 但是, 在冰冻圈、大气圈和海洋圈的共同作用下, 其代表全球性的变冷事件这一点已被认可。

黏土矿物的组合类型、结晶程度和化学指数

对风化程度和气候变化具有不同的指示作用。伊利石多为钾长石风化而成, 是寒冷少雨气候下的代表产物, 当气候转为湿热, 大陆风化水解作用增强, 则将进一步转化为高岭石。伊利石和绿泥石含量的增加常被认为是物理风化发育, 而化学风化受到抑制的产物, 实际应用中结晶度和化学指数往往可以更直观地指示物源和气候变化, 结晶度和化学指数大小分别与气候稳定性和风化程度呈正相关, 当化学指数 < 0.4 时, 为富 Fe-Mg 伊利石 (反映较强的物理风化); 化学指数 > 0.4 时, 为富 Al 伊利石 (反映高度化学风化)。蒙脱石作为一种次生矿物, 一般是来自火山岩蚀变的产物 (刘志飞等, 2010)。

研究区内气候环境快速、极端的变化在黏土矿物指标 (组合类型) 上反映敏感。如图 8 所示, 在 Heinrich 期间反映寒冷少雨气候的伊利石及物理风化发育的绿泥石明显升高, 在 H3 和 H4 时期, 尽管伊利石整体含量骤降, 但代表较强物理风化的 Fe-Mg 伊利石 (化学指数 < 0.4) 及绿泥石相对含量上升, 同时因海平面下降, 大河流域传输物质减少, 近源碎屑物质供给相对提高, 导致因主控源区的变化, 从而使高岭石含量明显上升, 并与伊利石含量呈负相关。受定年样品密度和年龄限制, 56 ka 冷事件与 H5 (52 ka) 相差近 4 ka, 而 H2 和 H6 对北部湾东南部的影响相对其它期次较小。不同元素在特定环境下具有不同的迁移和富集能力 (图 5), 考虑到海陆交互区的开放性系统, 将 K_2O/Na_2O 、 K_2O/CaO 、 Al_2O_3/Na_2O 、 MgO/CaO 和 CIA 等多个比值结合起来作为气候变化的指标, 能更准确地代表

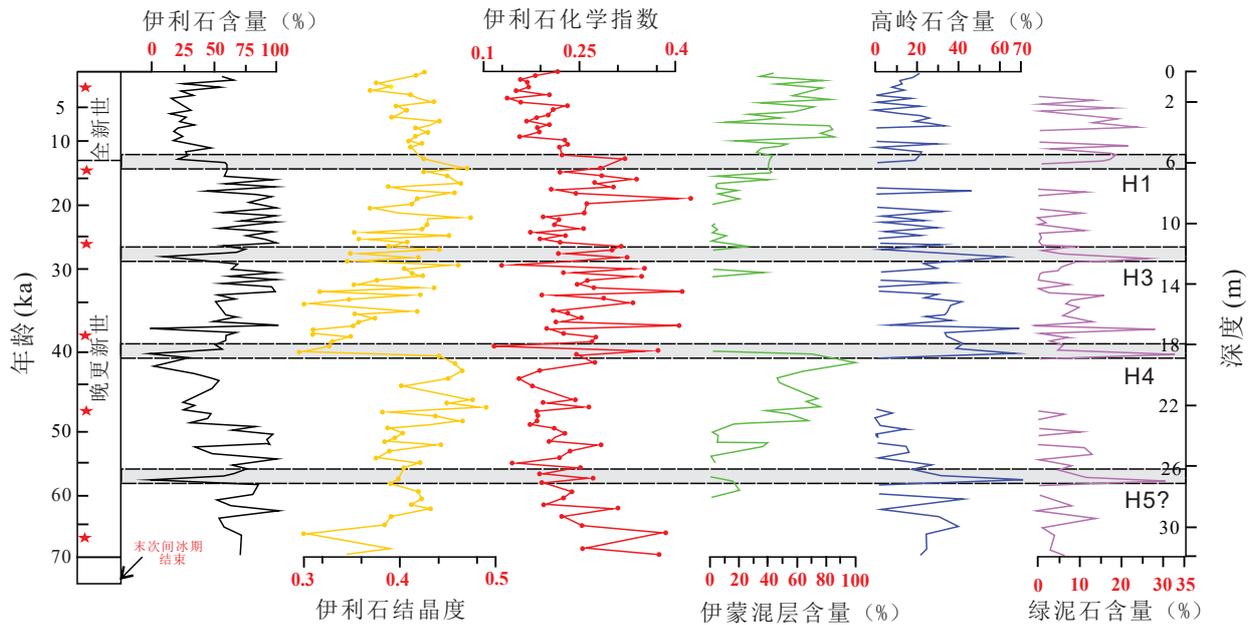


图8 近75 ka以来黏土矿物组成以及结晶度指数变化

Fig. 8 Variation of clay mineral assemblages and crystallinity index since about 75000 years ago

流域内平均化学风化,在12 ka、40 ka期间 Na^+ 、 Ca^{2+} 等离子淋滤受限,指标皆呈下降趋势,化学风化减弱与黏土矿物组合特征吻合。

如前所述,较北部湾其他地区而言,研究区受近源影响相对较大,如北部湾北部和中部地区更多受红河和珠江等大河控制,由于大河均一化作用对整个地区气候事件记录较为完善(夏真,2015;黄向青,2018);而北部湾东南部地区受山溪性小河影响,具有瞬间通量大,极端气候响应敏感等特征,但就气候事件记录完整度上却略显不足。对KZK03黏土矿物进行分析后发现,56 ka、41 ka和28 ka冷事件与雷州半岛北部泥炭有机质和南京葫芦洞匹配度较好(吴江滢,2002;黄向青,2018;刘景昱和方念乔,2019);黏土矿物可能受局部环境影响,H1事件信号强度较弱,而H2事件在黏土矿物特征上并未显现(图8),反之,在20 ka左右,反映化学风化强度的伊利石化学指数有所升高,表现出近源控制对局部古气候事件的响应。

3.3 环境演化的驱动机制

晚更新世气候基本特征是,随着末期间冰期的结束,气温整体呈下降趋势;自末次冰期开始(距今约75 ka),出现了贯穿整个晚更新世晚期短时间内气候振荡变冷旋回(Dansgaard-Oeschger, D-O旋回),在最冷期的D-O旋回中,发生了上文提到的Heinrich事件。KZK03孔(图8)中H3和H4信号

最为显著,期间出现反映远源的伊利石含量接近零值,而近源的高岭石含量和代表物理风化增强的绿泥石、伊利石化学指数迅速升高,盛冰期海平面下降近百米,北部湾东南部暴露在海平面以上由海相转变为陆相沉积环境,传输介质发生的根本变化,即地形坡度和较强的冬季风导致近源影响显著增大,高岭石含量升高,这与地震层序解译的海陆频繁交互现象基本吻合(图3)。从图8曲线的纵向变化上不难发现,在Heinrich事件期间所有黏土矿物都出现降低的情况,而在步入全新世暖期后,随着冰川融化,海平面上升,研究区再未出现陆相沉积,受水体均一化作用影响,黏土矿物组合类型波动相对变小,展现出红河和昌化江协同影响的特征。

末次冰期结束后进入全新世暖期,全球气候呈现前期由低温快速转暖后波动上升的趋势。北部湾东南部气候演变可划分为3个阶段。

第一阶段:晚冰期低温升温期(12.5~11.0 ka),高岭石含量低,伊利石含量达60%,伊蒙混层也呈现出增加趋势,伊利石不断淋失 K^+ ,向蒙脱石演化,反映该期以寒冷干旱的气候为主,并向淋滤作用强的潮湿环境的转变。

第二阶段:迅速升温期(11.0~8.7 ka),伊利石含量降低,表征较强物理风化的化学指数也同步下降,而高岭石含量升高,多个代用指标显示古气候

显著转暖。

第三阶段: 温度波动期(8.7 ka 至今), 本期前半段表现为气候转暖后的小尺度的干湿交替; 5 ka 至今, 伊利石含量再次升高, 表明气温降低, 同期高岭石含量升高可能为海南沿岸地区人类作用影响导致近源剥蚀量增大所致。

中国北部黄土和季风敏感区神农架石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中均表现出在 Heinrich 时期亚洲(夏)季风减弱的证据, 事件期间短时间内大量冰川淡水倾泻北大西洋导致水文重组, 即北大西洋深层水(North Atlantic Deep Water, NADW)盐度、密度发生巨大变化, 三圈(冰冻圈、海洋圈和大气圈)相互作用, 引起远程气候响应(陈仕涛等, 2006; 刘景昱和方念乔, 2019); 在巨大的高度和纬度效应的影响下, 青藏高原不仅能迅速地响应冷事件, 而且会放大这一过程, 最为直观的表现就是冰川覆盖面积及东亚冬季风的显著脉冲式增强, 从而导致冰期时在海平面下降的背景下, 地形坡度和较强的冬季风共同作用, 导致北部湾东南部地区主控源区发生对应转换。

4 结论

(1) 通过地震和钻孔揭露, 研究区晚第四纪地层层序可以划分为现代海洋沉积层、陆海交互沉积层和古河道沉积层, 晚更新世陆相和海相交替频繁, 全新世以来皆为海相沉积。

(2) 黏土矿物 XRD 衍射分析显示, 周缘源区物质供给类型差异显著, 红河携带物质高伊利石和绿泥石, 低高岭石, 偶见蒙脱石, 而昌化江以高高岭石、低伊利石为典型特征。冷事件期间河流介质传输能力减弱, 坡度和季风影响下的近源供给增强。

(3) Heinrich 事件中, 三圈(冰冻圈、海洋圈和大气圈)相互作用, 引起远程气候响应; 在青藏高原高度和纬度效应影响下迅速地响应变冷事件并放大气候信号。在晚更新世北部湾东南部产生海陆频繁交互作用, 传输介质转换导致黏土矿物组合发生相应变化; 全新世以来, 皆为海相沉积环境, 呈现多次干湿交替性升温过程, 逐步演化到现今气候特征。

致谢: 两位审稿专家提出的富有建设性的修改意见对提升文章质量有较大帮助, 在此, 谨致以衷心的感谢!

References

- Broecker W, Bond G, Klas M, et al., 1992. Origin of the northern Atlantic's Heinrich events[J]. *Climate Dynamics*, 6 (3) : 265 - 273 .
- Bond G, Broecker W, Johnsen S, et al., 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice[J]. *Nature*, 365 (6442) : 143 - 147 .
- Gibbs R J, 1997. Clay mineral segregation in the marine environment[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 47 (1) : 237 - 243 .
- Hilton R G and West A J, 2020. Mountains, erosion and the carbon cycle[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 (6) : 284 - 299 .
- Heinrich H, 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years[J]. *Quaternary Research*, 29: 142 - 152 .
- Liu Z F, Trentesaux A, Clemens S C et al, 2003. , Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years[J]. *Marine Geology*, 201 (1) : 133 - 146 .
- Nesbitt H W and Young G M, 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299 (5885) : 715 - 717 .
- Raymo M E, Ruddiman W, Froelich P N, 1988. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles[J]. *Geology*, 16 (7) : 649 - 653 .
- Chen S T, Wang Y J, Wu J Y, et al., 2006. An event of the East Asian monsoon responding to Heinrich Event 2: Evidence from high-resolution stalagmite record[J]. *Geochimica*, 35 (6) : 586 - 92 (in Chinese with English abstract) .
- Cheng J, Tang D X, Zhang X J, et al., 2003. Research on the holocene climate in source area of the Yellow River by clay minerals[J]. *Geoscience*, 17 (1) : 47 - 51 (in Chinese with English abstract) .
- He H J, Gan H Y, Shi Y H, et al., 2016. Distribution features of clay mineral of sediments in the Beibu Gulf and their environmental significance[J]. *Geology and Exploration*, 52 (3) : 584 - 593 (in Chinese with English abstract) .
- Huang X Q, Liang K, Xia Z, et al., 2018. The sedimentary characteristics of Upper Pleistocene and its palaeo-environmental records in northern Beibu Gulf[J]. *Quaternary Sciences*, 38 (2) : 454 - 471 (in Chinese with English abstract) .
- Kump, L R., 2000. Chemical Weathering, Atmospheric CO₂, and Climate[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 28: 611 - 667 .
- Liu J Y, Fang N Q, 2019. Heinrich events and Heinrich (-like) events[J]. *Advances in Earth Science*, 34 (6) : 618 - 628 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Z F, Li X J, Colin C, et al., 2010. A High-resolution clay mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum and its time series provenance analysis. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (35) : 4058 - 4068.
- Mi B B, Zhang Y, Mei X, et al., 2020. The rare earth element content

- in surface sediments of coastal areas in eastern China's sea areas and an analysis of material sources[J]. *Geology in China*, 47 (5) : 1530 – 1541 (in Chinese with English abstract).
- Sun W D, Lin Q T, Zhang L P, et al., 2018. The formation of the South China Sea resulted from the closure of the Neo-Tethys: A perspective from regional geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (12) : 3467 – 3478 (in Chinese with English abstract).
- Shao J Q, Yang S Y, 2012. Does cbeniical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin?[J]. *China Sci Bull*, 57: 1178 – 1187.
- Shi X M, Li Y L, Yang J C, 2007. Environmental significance and clay mineral characteristic of Mogu Lake sediment of Manas River[J]. *Early Dry Zone Geography*, 30 (1) : 84 – 88 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P P H, et al., 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 343 (6257) : 431 – 437.
- Wu J Y, Wang Y J, Shao X H, et al., Instability of the Late Pleistocene East Asian Monsoon Climate-Evidence from the Variation of the Stable Isotope Composition of a Cave Stalagmite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002,76(3): 413-419 (in Chinese with English abstract).
- Xia Z, Lin J Q, Zheng Z C, et al., 2015. Comprehensive study on offshore marine geological environment in Pearl River Delta[M]. Beijing: Science Press, 106-155 (in Chinese with English abstract).
- Yang X B, Fu H, He X H, et al., 2019. Cenozoic sedimentary systems and their tectonic-sedimentary evolution in southern uplift zone of the Qiongdongnan Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (3) : 1 – 10 (in Chinese with English abstract).
- Zhou S W, Liu Z F, Zhao Y L, et al., 2014. A High-resolution clay mineralogical record and its paleoenvironmental significance in the Northeastern gulf of tonkin over the past 2000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 34 (3) : 600 – 610 (in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 陈仕涛, 汪永进, 吴江滢, 等, 2006. 东亚季风气候对 Heinrich2 事件的响应: 来自石笋的高分辨率记录[J]. *地球化学*, 35 (6) : 586 – 92.
- 程捷, 唐德翔, 张绪教, 等, 2003. 粘土矿物在黄河源区古气候研究中的应用[J]. *现代地质*, 17 (1) : 47 – 51.
- 何海军, 甘华阳, 石要红, 等, 2016. 北部湾沉积物粘土矿物分布特征及其环境意义[J]. *地质与勘探*, 52 (3) : 584 – 593.
- 黄向青, 梁开, 夏真, 等, 2018. 北部湾北部上新统的沉积特征及其记录的古环境[J]. *第四纪研究*, 38 (2) : 454 – 471.
- 刘景昱和方念乔, 2019. 海因里希事件与类海因里希事件[J]. *地球科学进展*, 34 (6) : 618 – 628.
- 刘志飞, 李夏晶, Christophe C, 等, 2010. 南海北部末次冰盛期以来高分辨率粘土矿物记录及其时间序列物源区分析[J]. *科学通报*, 55 (29) : 2852 – 2862.
- 密蓓蓓, 张勇, 梅西, 等, 2020. 中国东部海域表层沉积物稀土元素赋存特征及物源探讨[J]. *中国地质*, 47 (5) : 1530 – 1541.
- 孙卫东, 林秋婷, 张丽鹏, 等, 2018. 跳出南海看南海-新特提斯洋闭合与南海的形成演化[J]. *岩石学报*, 34 (12) : 3467 – 3478.
- 邵菁清和杨守业, 2012. 化学蚀变指数 (CIA) 反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候?[J]. *科学通报*, 57 (11) : 933-942.
- 史兴民, 李有利, 杨景春, 2007. 新疆玛纳斯河蘑菇湖沉积物中粘土矿物及其环境意义[J]. *干旱区地理*, 30 (1) : 84 – 88.
- 吴江滢, 汪永进, 邵晓华, 等, 2002. 晚更新世东亚季风气候不稳定性的洞穴石笋同位素证据[J]. *地质学报*, 76 (3) : 413 – 419.
- 夏真, 林进清, 郑志昌, 等, 2015. 珠江三角洲近岸海洋地质环境综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 106-155.
- 杨希冰, 傅恒, 何小胡, 等, 2019. 琼东南盆地南部隆起带新生界沉积体系及其构造-沉积演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (3) : 1 – 10.
- 周世文, 刘志飞, 赵玉龙, 等, 2014. 北部湾东北部 2000 年以来高分辨率粘土矿物记录及古环境意义[J]. *第四纪研究*, 34 (3) : 600 – 610.