https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.276



南海西北部过去~55 ka以来元素地球化学 记录的古气候环境演变

田成静¹,蔡观强¹,李明坤²,李 波¹,赵 利¹

广州海洋地质调查局,自然资源部海底矿产资源重点实验室,广东广州 510075
华南师范大学地理科学学院,广东广州 510631

摘 要:南海西北部的西沙碳酸盐台地北坡受到陆源和海洋自生物质的供应,蕴含丰富的气候变化信息.为探究该区域的古气候环境演变历史,选取长828 cm的SS7岩心,利用AMS¹⁴C测年以及有孔虫氧同位素建立该区域的年代学框架,并进行元素地球化学分析.该岩心底部年龄为~55 ka BP,沉积物的元素主要受到陆源碎屑输入、海洋自生作用、氧化还原条件、海洋化学沉积作用等因素的控制.碎屑组分元素比值K/Rb和K/Ti能用于反映源区地表化学风化程度,进而反映源区过去55 ka的东亚夏季风的演化.区域东亚夏季风在约40 ka BP明显减弱,且对Heinrich、新仙女木等北半球快速变冷的事件有明显地响应.过去55 ka的东亚夏季风,不仅受到北半球低纬度夏季日照辐射量的控制,还受到赤道太平洋大气动力(如太平洋沃克环流)的影响. 关键词:南海;东亚夏季风;元素;西沙群岛;末次冰期;地球化学.

中图分类号: P76 **文章编号:** 1000-2383(2021)03-975-11 **收稿日期:** 2020-05-14

Paleoclimatic and Paleoenvironmental Changes Recorded by Elemental Geochemistry in the Northwestern South China Sea since the Past ~55 ka

Tian Chengjing¹, Cai Guanqiang¹, Li Mingkun², Li Bo¹, Zhao Li¹

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

2. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: The north slope of Xisha carbonate platform in the northwestern South China Sea is supplied by land and marine biogenic materials, so the sediments contain abundant information on climate change. In order to explore the evolution history of paleoclimate and environment in this area, the 828 cm-long core SS7 was selected for elemental geochemical analysis in combination with the chronological framework established by the AMS¹⁴C and oxygen isotope of forams. The results show that the core age at bottom is \sim 55 ka BP, and the elements within sediments are mainly controlled by the terrigenous clastic input, marine authigenesis, redox conditions, and marine chemical deposition. The K/Rb and K/Ti can be used to reflect the surface chemical weathering in the source area and the evolution of the East Asian summer monsoon (EASM) over the past 55 ka. The regional EASM apparently decreased at about 40 ka BP, and the decreases of K/Rb and K/Ti values responded to the rapidly cooling events in the northern hemisphere, including the Heinrich events and the Younger Drays. The EASM over the past 55 ka is not only controlled by the summer insolation in the low-latitude of the northern hemisphere, but also

引用格式:田成静,蔡观强,李明坤,等,2021.南海西北部过去~55 ka以来元素地球化学记录的古气候环境演变.地球科学,46(3):975-985.

基金项目:中国地质调查局项目(Nos. DD20190627, DD20191002, DD20190209);国家自然科学基金项目(No. 41576049);中国博士后科学基金项目(No. 2019M652936);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(No. GML2019ZD0209).

作者简介:田成静(1989-),女,工程师,硕士,主要从事海洋地质与地球化学研究.ORCID:0000-0001-7248-9843. E-mail: tianchengjingpx@163.com

affected by the atmospheric dynamics in the equatorial Pacific (such as the Walker circulation in the Pacific). **Key words:** South China Sea; East Asian summer monsoon; elements; Xisha Islands; last glacial period; geochemistry.

0 引言

东亚季风,在很大程度上影响着东亚地区的人 类生存和发展.南海在气候上主要受到东亚季风的 控制.南海北部宽阔的大陆架和陆坡,接受了大量 陆源风化物质的输入,因此其沉积物具有相当高的 沉积速率,能提供高分辨率的古气候记录.目前,前 人在南海北部已获取包括国际大洋发现计划(IO-DP)岩心在内的多个岩心,并获得了过去数百万年 以来的东亚季风演变记录(Wei et al., 2004; 汪品 先, 2014).然而,关于东亚夏季风的驱动机制还存 在争议.尽管在轨道尺度上,日照辐射驱动东亚夏 季风的机制已经得到认可,但近年来的研究表明赤 道太平洋的大气动力条件(如太平洋沃克环流)也 对东亚季风产生较大影响(如,Yan et al., 2011; Yu et al., 2016).因此,还需要更多的高分辨率记录来 讨论东亚夏季风的气候演变规律和驱动机制.

南海西北部大陆架一陆坡的地形复杂,主要受 红河陆源风化物质的补给(邱燕等,2017)(图1).过 去的研究仅限于末次冰期晚期以来的沉积记录 (Yan et al., 2011; 吴敏等,2011; Wan et al., 2015; Li et al., 2019).例如,Li et al. (2019)利用PC338岩 心的粒度指标,重建了红河流域过去~36 ka的气候 变化历史,并发现该区气候变化与华南石笋、湖泊 等记录的东亚夏季风的演化规律一致,均明显受到 北半球夏季日照辐射量的调控.再如,Wan et al. (2015)发现,PC337岩心能高分辨率地记录中晚全 新世以来红河流域气候变化的信息.鉴于东亚季风 的时空演变非常复杂(Wang et al., 2001;杨桂芳 等,2018; Zhang et al., 2018),重建更早时期、高分 辨率的季风演化历史,对理解红河流域气候演变及 东亚夏季风的变迁有重要意义.

海洋沉积物的元素地球化学特征能十分灵敏地指示源区陆地的气候环境演变(Wei et al., 2004).金海燕等(2011)对ODP1144岩心分析发现Ba/Al和K/Al可分别指示海洋表层生产力和陆地化学风化的变化,且都具有明显的岁差和半岁差周期,可能与东亚夏季风的变化有关.Huang et al. (2016)利用元素特征识别出台湾岛河流为KNG5岩心的主要物源,并利用元素比值参数(如



Fig.1 Location of the studied core SS7 and surrounding topography

底图来源于自然资源部数据服务栏目,审图号:GS(2016)2891号

化学蚀变指数(CIA)、Rb/Sr、Al/Ti、K/Al等)的 变化特征反映出早全新世的地表风化加强,对应 着温暖潮湿的早全新世气候适宜期.最近,周航等 (2018)对南海北部陆坡的DLW3101孔沉积物进 行粒度和地球化学分析发现,K/Ti和Al/Ti可作 为记录地表风化程度的指标.本文在精确的有孔 虫AMS¹⁴C和氧同位素定年基础上,分析西沙碳 酸盐台地北部陆坡SS7岩心的元素地球化学含 量,探讨其对东亚季风演变的记录,以丰富人们对 南海西北部气候环境变化的认识.

1 材料与方法

本研究采用的SS7 岩心是由广州海洋地质调 查局"海洋四号"考察船于2014年获得的重力活塞 柱状样.该岩心位于琼东南盆地与西沙碳酸盐台地 北部陆坡的过渡区域,经、纬度分别为111.1189°E、 16.96205°N,水深1220m,柱长828 cm(图1).在船 上取心后,立即对岩心进行描述.整根岩心的岩性 均一,主要为灰色粉砂;顶部3 cm呈黄褐色,肉眼可 见有较多有孔虫.这表明SS7的沉积条件相对稳定,沉积序列基本无后期扰动.

为了准确地获得测年的数据,从岩心深度分 别为30 cm、60 cm、120 cm、180 cm、250 cm、300 cm、400 cm、500 cm、600 cm、700 cm和828 cm这 11个位置处挑选有孔虫壳体样品.对样品进行冲 洗、过筛后,在显微镜下挑选体积较为均一且没 有自生碳酸盐岩污染的浮游有孔虫 Globigerinoides.ruber 壳体大约10~20 g,送至美国Beta实验 室进行 AMS¹⁴C测年.原始测年数据使用 CALIB 软件校正至日历年龄.有孔虫的氧同位素、沉积 物的常量和微量元素测试的取样间隔为10 cm, 这些分析测试工作均在广州海洋地质调查局实 验测试所完成.主要分析步骤如下:

(1)有孔虫的氧同位素分析:在小于 60 ℃的 温度状态下烘干洗净的有孔虫样品,待冷却后 在显微镜下挑取新鲜且没有自生碳酸盐岩污染 的个体(*G.ruber*)若干;加入适量无水酒精,超声 振荡清洗约 10~15 s,倒去浊液后,置于约 60 ℃ 的烘箱中烘烤 24 h;然后,在 70 ℃的温度下经磷 酸溶解后放出 CO₂,在 MAT253 稳定同位素比质 谱仪上测定氧同位素比值.分析精度为 δ¹⁸O 小 于 0.07 ‰,分析结果以 PDB 显示.

(2) 主量元素分析: 用于主微量元素分析的样 品低温烘干后研磨至200目以下.烧失量(LOI)分 析采用重量法测试,即取试样在1000℃灼烧至恒 重,灼烧减少的量为烧失量.精确称量0.05g样品置 于PTFE(聚四氟乙烯)内胆中,加入1.5 mL体积分 数为68%的硝酸,1.5mL体积分数为48%的氢氟 酸,1mL体积分数为36%的盐酸后盖上密封盖放 入不锈钢套内,置于烘箱在190℃下加热48h.冷却 后取出PTFE内胆,置于电热板上加热蒸干后,加入 1 mL体积分数为2%的硝酸蒸干(去除残余的氢氟 酸和盐酸).然后,加入4mL体积分数为20%的盐 酸和 0.5 mL 质量浓度为 1 µg/mL 的 Rh 内标 . 盖上 密封盖放入不锈钢套内,置于烘箱在150℃下加 热 12 h. 冷却后取出 PTFE 内胆,转移至 100 mL PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)瓶内,用体积分数 2%的硝酸定容至50g,摇匀后待测.利用Optima3000 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES) 测试常量元素 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、 K₂O、Na₂O、MnO、P₂O₅和 TiO₂,使用动物凝胶法 测 SiO₂. 元素分析分别进行了若干样品的重复分 析与标样分析,分析元素的相对误差小于5%.

(3) 微量元素分析:使用 Thermo Fisher Scientific X Series 2型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS) 测试 Co、Ni、Cu、Zn、V、Sc、Ba、Cr、Zr、Sc、Ga、Pb、 Li、Rb、Nb、Cs、Ta、W、Th和U这20种微量元素.随 机选取10%的平行样进行测试,并采用GSD-9国际 标准样进行校正,相对误差小于0.5%.

(4) 总有机碳(*TOC*)测试:有机碳分析采用 K₂Cr₂O₇法,即在加热条件下将样品中有机碳氧化成 CO₂,剩余的K₂Cr₂O₇用FeSO₄标准溶液回滴,按照 K₂Cr₂O₇的消耗量,计算样品中有机碳的含量.

2 结果

2.1 年代地层框架的确定

加速器¹⁴C(AMS¹⁴C)测年已成为晚更新世和全 新世以来年代构建的重要技术手段,可测定50 ka BP以来的样品,尤其是对年代不老于40ka BP的样 品结果,一般认为可信(Fairbanks et al., 2005; Reimer et al., 2009).这种方法在南海沉积物年代测定 中被广泛应用(Wan et al., 2015; Li et al., 2019). 除此之外,有孔虫的氧同位素曲线,是获得更老的 海底柱状沉积物地层年代的有效方法.AMS¹⁴C年 代结果如图2,顶部500 cm样品的年龄与深度之间 呈良好的线性关系(图2).底部3件样品(600 cm、 700 cm 和 828 cm 处)的年龄均老于 40 ka BP, AMS ¹⁴C 难以获得准确的年龄结果.SS7 的氧同位素曲线 完整、特征明显、峰谷形态清晰.通过与ODP1148钻 孔的氧同位素曲线(Zhao et al., 2001)进行对比,并 结合AMS¹⁴C测年结果,用插值法建立钻孔的年代 框架,对其氧同位素期次进行了划分(图2).综合分 析表明,120 cm年龄为10.84 ka BP,为全新世和更 新世的分界;340 cm 年龄为25 ka BP,为氧同位素 2/3期(MIS2/3)界线;由于底界(828 cm)未到氧同 位素 3/4(MIS3/4)界线,根据与标准氧同位素曲线 形态的对比,将底界年龄定为55 ka BP.

2.2 主量元素组成及特征

主量元素含量的剖面变化如图 3 所示.主量元 素含量最高的是 SiO₂(34.37%~48.91%,平均值为 42.19%),其次是 Al₂O₃(11.24%~15.61%,平均值 为 13.70%)和 CaO(7.54%~19.63%,平均值为 12.96%),其他元素的平均含量均小于 10%.SiO₂、 Al₂O₃和 TiO₂的变异系数小,均小于 10%.CaO 和 MnO 的变异系数较高,分别为 22.30%和 26.49%.



图 2 南海西沙海槽 SS7 柱沉积物年代地层框架 Fig.2 The chronological framework of core SS7

SS7的SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O、TiO₂含量变 化一致:底部(828~600 cm)的含量较高,且由下 向上缓慢增加;600~450 cm段含量突然降低; 450~200 cm段含量呈现缓慢增加趋势;200~ 100 cm段的含量出现明显低谷;100~0 cm段含量 总体呈现降低趋势.CaO含量分布特征与SiO₂等 呈现明显相反的变化特征.Na₂O含量由下往上在 828~200 cm段呈增大趋势,在200~0 cm段呈降 低趋势,振荡频率较其他元素高.MnO和P₂O₅含 量整体变化不大,纵向变化趋势不明显.

2.3 微量元素组成及特征

微量元素含量的剖面变化如图4所示.在所有 微量元素中,Ba和Sr的含量最高,平均含量分别为 606 µg/g和494 µg/g,Zn、V、Zr、Rb的平均含量分别 为113 µg/g、108 µg/g、116 µg/g 和124 µg/g,其他 元素含量均低于100 µg/g.微量元素变异系数普遍 偏低,QSr元素变异系数高达21.3%.微量元素含 量的纵向变化与常量元素存在一定相似性,其中与 陆源碎屑组分相关的Co、V、Cr、Zr、Sc、Ga、Pb、Rb、Nb、Cs、Ta、Th与SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O、TiO₂相似(图3和图4),与生源组分相关的Sr、Ba的变化与CaO相似,变价元素Ni、Cu、Zn、U可能受氧化还原环境影响,纵向变化特征存在一定差异.

3 讨论

3.1 元素的主控因素及东亚夏季风代用指标的选取

为了分析各元素之间的内在联系,利用统计学 软件 IBM SPSS Statistics 19对所有测试的主、微量 元素进行主成分分析,进而对元素进行归类.结果 显示,SS7 岩心的元素组合主要由3个主要成分控 制(表1,图5).3个主成分的累积方差为85.33%,且 高荷载元素的荷载系数值基本都可达0.8,表明主成 分分析方法能有效实现对这些元素的降维和分类.

主成分1(PC1)中,较高荷载系数的元素包括



Fig.3 Distribution of major elements of core SS7



SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Ga、Rb、Sc、Nb、Cs、Fe₂O₃、V、 K₂O、Zr、Th、Cr、Ta、Mg、Co和Pb这18种元素, 而CaO、Sr、LOI和Ba则呈现较高的负的荷载系 数.SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Sc、Zr、Th等元素是典型的 陆源碎屑组分元素,而CaO、Sr主要来源于海洋 自生作用产生的钙质组分(蔡观强等,2010),陆 源碎屑组分与海洋自生成分之间呈此消彼长的 关系(图3和图4).例如,SiO₂、TiO₂和Al₂O₃呈现 明显一致的规律,但它们与CaO之间呈现反向变 化(图3).因此,该成分可能主要受陆源风化物质 的输入和生物钙质沉积的共同影响.

在主成分2(PC2)中,TOC、Li、Na₂O、W、Cu、U 具有较高的载荷系数,而P₂O₅、MnO₂和MgO具有 较高的负的荷载系数(表1).TOC含量的升高,往往 对应着具有较高有机质埋藏的还原条件,而Cu、U、 MnO₂的含量变化与海洋的氧化还原条件有关(林 治家等,2008).因此,主成分2应代表主要受海洋氧化还原环境影响的元素.主成分3(PC3)中,Zn、Ni和Co的荷载系数均大于0.6.另外,Pb亦有相对高的荷载系数(~0.4).在海洋环境中,这几种重金属元素可能部分通过铁锰胶体粒的吸附而富集(李粹中,1987),主要受海洋化学沉积作用的影响.

主成分1中呈现正荷载的元素代表陆源碎屑的 输入,它们的含量与陆地风化和搬运、沉积过程有 关.在风化过程中,碱金属元素(如K、Na)易被淋 滤,而Al、Ti、Rb等是相对稳定的元素,因此它们之 间的比值可代表地表风化强度(Nesbitt *et al.*, 1980; Nesbitt and Young, 1982; 陈红瑾等, 2019). 由于海洋沉积物的元素受到水动力分选、粒度和碳 酸盐稀释的影响,记录地表化学风化强度的化学元 素指标历来有争议(Hu *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2016).SS7 岩心沉积物中的 Na₂O 主要受控于主成



图 5 元素或氧化物的主成分 1 和主成分 2 的荷载关系 Fig.5 Relationships between the loading of principal components 1 and 2 of the elements or oxides

分2(表1),表明海洋的氧化还原环境也会对Na的含量产生影响.因此,在选取记录地表化学风化指标时,应排除Na元素.在地表岩石风化过程中,K被淋滤出来后易被粘土矿物吸附或与粘土矿物结合,因而它在风化产物中较为富集(Nesbitt *et al.*,1980).这些细粒风化物质,易随着洋流搬运至深海区域.因此,K元素与稳定元素的比值,可有效指示源区地表化学风化强度.

通过对全岩和酸溶组分元素的对比,Wei et al. (2003)发现,南海沉积物中的Al同时受到陆源风化

和海洋自生作用的影响,而Ti是相对稳定的惰性 元素,主要来自稳定陆源碎屑的输入.因此,K/Ti 比值被认为能很好记录源区地表化学风化程度 (Wei et al., 2003;周航等, 2018).Wei et al. (2003) 对南海 ODP1144 岩心的分析发现,K/Ti 值在间冰 期明显高于冰期,代表地表化学风化的加强,并对 应着源区湿润的气候条件.此外,Rb 也是一个在海 洋沉积物中能稳定存在的元素.Hu et al. (2012, 2015)通过对比南海北部沉积物的 CIA、K/AI、K/ Rb等地球化学参数,发现K/Rb是一个适用于反映 南海北部陆坡地区地表风化的有效指标.在风化 物质搬运至海洋的过程中,K和 Rb 也都容易被保 存,而不易受海洋自生作用的影响.综上所述,本 文选取 K/Rb和 K/Ti 比值作为反映区域地表化学 风化的参数,并反映源区夏季风的演化.

3.2 区域夏季风演化的元素记录及驱动机制

图 6 显示,在大约 55~40 ka BP之间,岩心具有 相对较高的 K/Rb 和 K/Ti 值,并在 40~15 ka BP之 间具有逐渐下降的趋势,之后在~15 ka BP 至今呈 明显上升的趋势.有意思的是,在~10~12 ka BP、~ 15~18 ka BP、19~23 ka BP、~29~31 ka BP、~ 38~45 ka BP、~49~51 ka BP 时期,K/Rb 和 K/Ti 比值明显下降,与格陵兰岛 GISP2冰心和葫芦洞石 笋 记录的新仙女木 (Younger Dryas event,简称

元素/氧化物	成分1	成分2	成分3	元素/氧化物	成分1	成分2	成分3
CaO	-0.984	-0.061	-0.097	Та	0.841	0.097	0.073
SiO_2	0.981	-0.057	-0.049	MgO	0.795	-0.556	0.143
TiO_2	0.977	-0.137	-0.026	Со	0.712	-0.125	0.608
Sr	-0.976	-0.048	0.037	Pb	0.588	0.361	0.397
LOI	-0.970	0.201	-0.011	Ва	-0.577	0.432	0.318
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	0.964	0.110	0.155	P_2O_5	0.023	-0.888	0.122
Ga	0.963	-0.065	0.192	TOC	-0.390	0.849	-0.161
Rb	0.962	-0.061	0.228	Li	0.191	0.829	0.231
Sc	0.942	-0.165	0.221	Na ₂ O	-0.020	0.791	0.043
Nb	0.941	0.164	0.058	W	0.224	0.785	0.074
Cs	0.936	-0.230	0.218	Cu	0.025	0.780	0.275
$\mathrm{Fe_2O_3}$	0.931	-0.210	0.260	MnO	0.278	-0.777	0.231
V	0.910	-0.001	0.259	U	-0.290	0.716	0.083
K_2O	0.897	-0.374	0.072	Zn	0.254	-0.125	0.868
Zr	0.891	-0.158	-0.263	Ni	0.007	0.414	0.815
Th	0.848	0.222	0.317	方差(%)	58.62	19.77	6.94
Cr	0.844	-0.258	0.118	累积方差(%)	58.62	78.39	85.33

表 1 SS7 岩心元素和氧化物的主成分分析结果

Table 1 Principal component analysis of elements and oxides of core SS7

田成静等:南海西北部过去~55 ka以来元素地球化学记录的古气候环境演变





Fig.6 Comparison of elemental ratios with regional and global climate change a. SS7 岩心的沉积速率; b. 全球相对海平面,据Rohling et al. (2009); c. K/Rb; d. K/Ti; e. 湖光岩玛珥湖的热带季雨林孢粉含量,据Mingram et al. (2004); f. 湖光岩玛珥湖木本/草本木质素比值,据Fuhrmann et al. (2003); g. 亚洲季风区平均有效湿度,据Herzschuh (2006); h. 黄土高原蓝田剖面磁化率,据Liu et al. (2005); i. 印度尼西亚Towuti湖的叶蜡正构烷烃碳同位素,据Russell et al. (2014); j. 热带太平洋东、西部的表层海水温度差,据Dyez and Ravelo (2014); k. 北纬 30°夏季日照辐射量,据Berger and Loutre (1991); l. 华南石 笋氧同位素,据Dykoski et al. (2005), Wang et al. (2001); m. 格陵兰岛冰心 GISP2 的氧同位素,据Dansgaard et al. (1993)

YD)、末次盛冰期(last glacial maximum,简称 LGM)、及Heinrich事件(H1、H3、H4、H5)等北 半球急速变冷的事件(Dansgaard *et al.*, 1993)对 应(图 6c、6d、6m),表明K/Rb和K/Ti值可以反 映区域气候变化的信息.

研究表明,LGM 是北半球高纬度地区变冷的 时期,此时的北极冰盖扩大,全球海平面下降至比 现代低 120 m(图 6b)(Rohling et al., 2009).K/Rb和 K/Ti 值在大约 12 ka BP、30 ka BP、38 ka BP 和 50 ka BP 时期明显降低,依次对应着YD、H3、H4、 H5这4个千年尺度的气候事件,表明LGM和H事 件在北半球低纬度也产生深刻的影响(Wang and Sun, 1994; Wang et al., 2001; Zhou et al., 2016; Li et al., 2019), 而H2事件没有被很好地记录, 可 能与 25~29 ka BP 期间沉积物速率较低有关(图 6a). 值得注意的是, 15 ka BP以来, K/Ti和K/Rb呈 现出明显不一致的变化:K/Ti在YD时期有明显的 降低,而在早全新世(约10~8 ka BP)则增大,与亚 洲夏季风的加强一致(图6):K/Rb在15 ka BP以来 呈明显的上升趋势,与海平面上升的趋势基本一 致,而对YD事件的响应并不明显(图6b~6c).前人 对南海陆坡沉积物的研究表明,K/Rb的升高,可能 与沉积物颗粒变细有关(Hu et al., 2015).在海 平面上升时期,河口距离研究区的位置逐渐变 远,沉积物经历了更长距离的搬运,因此逐渐变 细.Li et al. (2019)对附近的 PC338 岩心的粒度 分析表明,最细粒组分(0~2 µm)从15 ka BP的 7%逐渐增加到全新世的10%.尽管在LGM时 期,全球海平面逐渐上升,但由于南海特殊的地 形,直到约15 ka BP,海平面达到约90 m时,南 海北部大陆架才逐渐被淹没,沉积物搬运距离 因此发生较大变化(图1).尽管如此,全新世的 K/Ti和K/Rb值比LGM和H1时期大,指示全新 世为更加温和的气候条件(Zhao et al., 2009).

值得关注的是,在约40 ka BP时,K/Rb和K/Ti 值均出现明显的降低(图 6c、6d),指示源区地表化 学风化作用的减弱.尽管40 ka BP前后的海平面发 生波动,但这种波动较小,对物质搬运距离的影响 较小(图 6b),所以元素比值的变化应与源区夏季风 强度的减弱有关.前人研究表明,在约40 ka BP,湖 光岩玛珥湖的热带季雨林孢粉含量和草本/木本比 值明显降低(Fuhrmann *et al.*, 2003; Mingram *et al.*, 2004)(图 6e、6f),黄土高原的磁化率和 d¹³C 值 都明显降低(An and Porter, 1997; Liu *et al.*, 2005),均指示气候的明显变干(图 6h、6i).Herzschuh(2006)通过集成亚洲季风区的古气候记录 而建立的平均有效湿度,也显示在约40 ka BP时期 的湿度降低(图 6g).南半球赤道附近的印度尼西亚 Towuti 湖泊沉积物的叶蜡烷烃碳同位素记录也显示,在约40ka BP时区域气候明显变干(图6i)(Russell et al., 2014),这些结果表明不同区域之间的气候存在潜在的联系.然而,长江下游的石笋氧同位素中并没有明显的记录(图61)(Wang et al., 2001),表明不同区域间的东亚季风强度存在差异.

目前,关于东亚季风在低纬度的驱动机制,主 要包括高纬度冰盖、中低纬度日照辐射和赤道太平 洋海洋大气动力学等几种观点.传统观点认为,北 大西洋经向翻转环流(Atlantic meridional overturning circulation,简称AMOC)的减弱或停止,引起了 快速变冷的气候事件(如,H、YD事件),造成北半球 表面温度的下降并驱动热带辐合带(intertropical convergence zone,简称 ITCZ)向南移动,并导致东 亚夏季风的整体减弱(Wang et al., 2001).如果 ITCZ的移动对低纬度地区气候产生重大影响,那 么南半球应该在 MIS2 阶段明显变湿. 然而, 大量 的地质记录显示,南半球在MIS2并未明显变湿. 例如,印度尼西亚Towuti湖在MIS2期间及H事 件时期,均呈现出与北半球同步变干的气候状况 (图 6i)(Russell et al., 2014). 另外,印度季风和东 亚季风区对H事件的响应程度并不一致,也说明 ITCZ的南北移动并不是东亚季风区千年尺度的 气候事件的主要驱动(Zhou et al., 2016).因此,由 北半球高纬度冰盖驱动而造成的ITCZ的摆动,不 是造成东亚季风变化的主要原因.

尽管在晚更新世以来,葫芦洞石笋氧同位素记 录的夏季风强度与低纬度夏季日照辐射量基本呈 现同步变化的趋势(Wang et al., 2001),但它们在 55~35 ka BP 期间,显然不同步.这个期间的葫芦洞 石笋氧同位素的快速振荡,与华南和黄土高原的古 气候记录并不一致,这可能是受到了一些区域尺度 降雨的影响(Zhang et al., 2018)(图 6c~6f、6i).实 际上,东亚季风与西风的相互作用,对长江中下游 地区的气候有很大影响,并导致末次冰期至全新世 期间我国南、北方气候记录与华中地区的不一致 (Zhang et al., 2018).约35 ka BP以来,本研究及其 他东亚季风区的气候记录,与北半球低纬度夏季日 照辐射量基本对应;但在55~35 ka BP,东亚季风与 日照辐射量的变化有很大差别,即约40 ka BP东亚 季风的突然减弱,对应着日照辐射的增强(图 6c~ 6f、6g~6i).这说明,北半球低纬度地区夏季日照辐 射的驱动机制,尽管起到很重要的外部驱动作用,

但不能完全解释东亚季风的演变.

实际上,除了ITCZ南北移动的影响外,赤道太平 洋的海洋大气动力变化(即,东一西方向的大气动力 变化)也对南海气候产生了较大的影响.热带太平洋 上空最重要的海洋大气动力——沃克环流,是由于热 带太平洋东、西温度差异而造成的热力环流,是引起 厄尔尼诺和南方涛动(El Nio/Southern Oscillation, 简称 ENSO) 的主要原因. Yan et al. (2011) 通过研究 西沙群岛湖泊沉积物的古气候记录指标发现,热带地 区2 ka BP以来的降雨主要受到太平洋沃克环流的影 响.Yu et al. (2016)通过研究西菲律宾海的粘土矿物 指标发现,2.36 Ma以来吕宋群岛的降雨量与赤道太 平洋东、西部的温度差具有同步变化的趋势,并认为 热带太平洋的类ENSO气候条件可驱动东亚地区的 降雨量.Zhou et al. (2016)认为与类ENSO气候条件 相反的类拉尼拉(La Niña)事件的出现,是造成东亚季 风区H1时期极端干旱的诱因.La Niña和ENSO主要 受控于热带太平洋东、西部的表层海水温度差.通 常,温度差越大,La Niña越容易出现,反之ENSO 易于出现(图 61). 南海北部的季风气候记录与热带 太平洋东、西部的表层海水温度差基本一致(图 61) (Dyez and Ravelo, 2014). 例如,在约40 ka BP的夏 季风减弱,对应着热带太平洋东、西部的海水表层 温度差的增加(图 6f).这表明,此时的东亚季风区呈 现类La Niña气候条件.南海与印度尼西亚同属太 平洋西部,因此气候变化的规律有一致性(图 6i).这 表明,东亚季风区的古气候变化在一定程度上,也 受到了热带太平洋大气动力的影响.

4 结论

(1)南海西沙群岛碳酸盐台地北坡沉积物的元 素受到陆源碎屑、海洋自生、氧化还原条件、海洋化 学沉积作用等因素的控制.碎屑组分元素比值K/ Rb和K/Ti能用于反映源区地表化学风化程度,进 而反映源区过去55ka的东亚夏季风的演化.

(2)SS7 岩心与雷州半岛湖光岩玛珥湖记录均显示,东亚夏季风在约40 ka BP减弱,这与葫芦洞石笋氧同位素明显不一致.另外,SS7的K/Rb和K/Ti值对全球性的冷事件(如Heinrich事件和新仙女木事件)有明显的响应.

(3)过去55 ka的东亚夏季风,不仅受到北半球 低纬度夏季日照辐射量的控制,还受到赤道太平洋 大气动力(如太平洋沃克环流)的影响.

References

- An, Z. S., Porter, S. C., 1997. Millennial-Scale Climatic Oscillations during the Last Interglaciation in Central China. *Geology*, 25(7): 603-606. https://doi.org/ 10.1130/0091-7613(1997)0250603: mscodt>2.3.co;2
- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation Values for the Climate of the Last 10 Million Years. Quaternary Science Reviews, 10(4): 297-317. https://doi.org/ 10.1016/0277-3791(91)90033-Q
- Cai, G. Q., Qiu, Y., Peng, X. C., et al., 2010. The Geochemical Characteristics of Trace Elements and Rees in Surficial Sediments of the Southwestern South China Sea and Their Implications. *Marine Geol*ogy & Quaternary Geology, 30(5): 53-62 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. J., Xu, Z. K., Cai, M. J., et al., 2019. Provenance of Clay-Sized Detrital Sediments and Its Paleoenvironmental Implications at Site U1456 in the Eastern Arabian Sea since 30 ka. *Earth Science*, 44(8): 2803– 2817 (in Chinese with English abstract).
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., et al., 1993. Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-kyr Ice-Core Record. *Nature*, 364(6434): 218-220. https://doi.org/10.1038/364218a0
- Dyez, K. A., Ravelo, A. C., 2014. Dynamical Changes in the Tropical Pacific Warm Pool and Zonal SST Gradient during the Pleistocene. *Geophysical Research Letters*, 41(21): 7626-7633. https://doi.org/10.1002/ 2014GL061639
- Dykoski, C. A., Edwards, R. L., Cheng, H., et al., 2005. A High-Resolution, Absolute-Dated Holocene and Deglacial Asian Monsoon Record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 71-86. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.036
- Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Chiu, T. C., et al., 2005. Radiocarbon Calibration Curve Spanning 0 to 50 000 Years BP Based on Paired ²³⁰Th/²³⁴U/²³⁸U and ¹⁴C Dates on Pristine Corals. *Quaternary Science Re*views, 24(16-17): 1781-1796. https://doi.org/ 10.1016/j.quascirev.2005.04.007
- Fuhrmann, A., Mingram, J., Lücke, A., et al., 2003. Variations in Organic Matter Composition in Sediments from Lake Huguang Maar (Huguangyan), South China during the last 68 ka: Implications for Environmental and Climatic Change. Organic Geochemistry, 34(11): 1497– 1515. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(03)00158-X
- Herzschuh, U., 2006. Palaeo Moisture Evolution in Monsoonal Central Asia during the Last 50, 000 Years. *Qua*-

ternary Science Reviews, 25(1-2): 163-178. https:// doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.02.006

- Hu, D. K., Böning, P., Köhler, C. M., et al., 2012. Deep Sea Records of the Continental Weathering and Erosion Response to East Asian Monsoon Intensification since 14 ka in the South China Sea. *Chemical Geology*, 326-327: 1-18. https://doi.org/10.1016/j. chemgeo.2012.07.024
- Hu, D. K., Clift, P. D., Wan, S. M., et al., 2015. Testing Chemical Weathering Proxies in Miocene—Recent Fluvial-Derived Sediments in the South China Sea. *Geologi*cal Society, London, Special Publications, 429(1): 45— 72. https://doi.org/10.1144/sp429.5
- Huang, J., Wan, S. M., Xiong, Z. F., et al., 2016. Geochemical Records of Taiwan-Sourced Sediments in the South China Sea Linked to Holocene Climate Changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441: 871-881. https://doi.org/10.1016/j. palaeo.2015.10.036
- Jin, H. Y., Jian, Z. M., Xie, X., et al., 2011. Late Quaternary East Asian Monsoonal Evolution Recorded by High Resolution Elemental Ratios in the Northern South China Sea. *Quaternary Sciences*, 31(2): 207-215 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. Z., 1987. Geochemistry of Elements in Surface Sediments of the South China Sea Basin. *Donghai Marine Science*, 5(1-2): 77–91 (in Chinese).
- Li, M. K., Ouyang, T. P., Tian, C. J., et al., 2019. Sedimentary Responses to the East Asian Monsoon and Sea Level Variations Recorded in the Northern South China Sea over the Past 36 kyr. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171: 213–224. https://doi. org/10.1016/j. jseaes.2018.01.001
- Lin, Z. J., Chen, D. F., Liu, Q., 2008. Geochemical Indices for Redox Conditions of Marine Sediments. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(1): 72-80 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. G., Huang, Y. S., An, Z. S., et al., 2005. Summer Monsoon Intensity Controls C₄/C₃ Plant Abundance during the Last 35 ka in the Chinese Loess Plateau: Carbon Isotope Evidence from Bulk Organic Matter and Individual Leaf Waxes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220(3-4): 243-254. https: //doi.org/ 10.1016/j.palaeo.2005.01.001
- Mingram, J., Schettler, G., Nowaczyk, N., et al., 2004. The Huguang Maar Lake—AHigh-Resolution Record of Palaeoenvironmental and Palaeoclimatic Changes over the Last 78, 000 Years from South China. *Quaternary*

International, 122(1): 85-107. https://doi.org/ 10.1016/j.quaint.2004.02.001

- Nesbitt, H. W., Markovics, G., Price, R. C., 1980. Chemical Processes Affecting Alkalis and Alkaline Earths during Continental Weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659–1666. https://doi.org/10.1016/ 0016-7037(80)90218-5
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715-717. https://doi.org/10.1038/299715a0
- Qiu, Y., Peng, X. C., Wang, Y. M., et al., 2017. Erosive Process and Sedimentary Characteristics of the Quaternary Sediments in the Northern South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Reimer, P. J., Baillie, M. L., Bard, E., et al., 2009. IntCal09 and Marine09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50, 000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 51(4): 1111–1150. https: //doi.org/10.1017/ s0033822200034202
- Rohling, E. J., Grant, K., Bolshaw, M., et al., 2009. Antarctic Temperature and Global Sea Level Closely Coupled over the Past Five Glacial Cycles. *Nature Geosci*ence, 2(7): 500-504. https://doi.org/10.1038/ngeo557
- Russell, J. M., Hendrik, V., Konecky, B. L., et al., 2014. Glacial Forcing of Central Indonesian Hydroclimate since 60,000 y B.P. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111: 5100-5105. https://doi.org/10.1073/pnas.1402373111
- Wan, S. M., Toucanne, S., Clift, P. D., et al., 2015. Human Impact Overwhelms Long - Term Climate Control of Weathering and Erosion in Southwest China. *Geology*, 43(5): 439-442. https: //doi.org/ 10.1130/g36570.1
- Wang, P. X., 2014. China's Participation in the Ocean Drilling Program: Decade Retrospect and Future Prospect. Advances in Earth Science, 29(3): 322-326 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Sun, X. J., 1994. Last Glacial Maximum in China: Comparison between Land and Sea. *Catena*, 23 (3-4): 341-353. https://doi.org/10.1016/0341-8162 (94)90077-9
- Wang, Y. J., 2001. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. Science, 294(5550): 2345-2348. https://doi.org/ 10.1126/science.1064618
- Wei, G. J., Liu, Y., Li, X. H., et al., 2004. Major and Trace Element Variations of the Sediments at ODP Site

1144, South China Sea, during the Last 230 ka and Their Paleoclimate Implications. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 212(3-4): 331-342. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.06.011

- Wei, G., Liu, Y., Li, X., et al., 2003. Climatic Impact on Al, K, Sc and Ti in Marine Sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea. Geochemical Journal, 37(5): 593-602. https://doi.org/ 10.2343/geochemj.37.593
- Wu, M., Li, S. R., Chu, F. Y., et al., 2011. Paleoclimate Environmental Significance of Clay Mineral Analysis of Core B106 at Offshore Hainan Island. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 20(1): 85-91 (in Chinese with English abstract).
- Yan, H., Sun, L., Oppo, D. W., et al., 2011. South China Sea Hydrological Changes and Pacific Walker Circulation Variations over the Last Millennium. Nature Communications, 2: 293. https://doi.org/ 10.1038/ncomms1297
- Yang, G. F., Chen, Z. H., Zhang, H. J., et al., 2018. Paleoclimatic Variations in Ningjinpo Area since Late Pleistocene as Indicated by N - Alkanes. *Earth Science*, 43 (11): 4001-4007 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. J., Wan, S. M., Colin, C., et al., 2016. Co-Evolution of Monsoonal Precipitation in East Asia and the Tropical Pacific ENSO System since 2.36 Ma: New Insights from High-Resolution Clay Mineral Records in the West Philippine Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 446: 45-55. https://doi.org/10.1016/j. epsl.2016.04.022
- Zhang, H., Griffiths, M. L., Chiang, J. C. H., et al., 2018. East Asian Hydroclimate Modulated by the Position of the Westerlies during Termination I. Science, 362(6414): 580-583. https://doi.org/10.1126/ science.aat9393
- Zhao, Q. H., Jian, Z. M., Wang, J. L., et al., 2001. Neogene Oxygen Isotopic Stratigraphy, ODP Site 1148, Northern South China Sea. Science China Earth Sciences, 44(10): 934-942. https://doi.org/10.1007/ BF02907086
- Zhao, Y., Yu, Z. C., Chen, F. H., et al., 2009. Vegetation Response to Holocene Climate Change in Monsoon-Influenced Region of China. *Earth-Science Reviews*, 97 (1-4): 242-256. https://doi.org/10.1016/j. earscirev.2009.10.007
- Zhou, H., Liu, L. J., Xu, Y. Q., et al., 2018. Sediment Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Core DLW3101 from Northern Slope of the South China

985

Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(7): 103-115 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X., Sun, L. G., Chu, Y. X., et al., 2016. Catastrophic Drought in East Asian Monsoon Region during Heinrich Event 1. Quaternary Science Reviews, 141: 1-8. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.03.029

附中文参考文献

- 蔡观强,邱燕,彭学超,等,2010.南海西南海域表层沉积物 微量和稀土元素地球化学特征及其意义.海洋地质与 第四纪地质,30(5):53-62.
- 陈红瑾,徐兆凯,蔡明江,等,2019.30 ka以来东阿拉伯海 U1456站位粘土粒级碎屑沉积物来源及其古环境意 义.地球科学,44(8):2803-2817.
- 金海燕, 翦知湣, 谢昕, 等, 2011. 南海北部晚第四纪高分辨 率元素比值反映的东亚季风演变. 第四纪研究, 31(2): 207-215.
- 李粹中, 1987. 南海中部沉积物的元素地球化学特征. 东海

海洋,5(1-2):77-91.

- 林治家,陈多福,刘芊,2008. 海相沉积氧化还原环境的地 球化学识别指标.矿物岩石地球化学通报,27(1): 72-80.
- 邱燕,彭学超,王英民,等,2017.南海北部海域第四系侵蚀 过程与沉积响应.北京:地质出版社.
- 汪品先,2014. 我国参加大洋钻探的近十年回顾与展望. 地 球科学进展,29(3):322-326.
- 吴敏,李胜荣,初凤友,等,2011.海南岛近海B106柱粘土 矿物学指标的古气候环境意义.淮海工学院学报,20 (1):85-91.
- 杨桂芳, 陈正洪, 张慧娟, 等, 2018. 宁晋泊晚更新世以来气候变化的正构烷烃分子记录. 地球科学, 43(11): 4001-4007.
- 周航,刘乐军,徐元芹,等,2018. 南海北部陆坡区 DLW3101孔沉积物特征及古环境意义.海洋学报,40 (7):103-115.