

罗传秀, 王晓静, 苏翔, 等. 海洋沉积证据在低纬过程气候变化中的应用及展望[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 1-10.

LUO Chuanxiu, WANG Xiaojing, SU Xiang, et al. Application and prospect of marine sedimentary evidence to climate change in low-latitude processes[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 1-10.

海洋沉积证据在低纬过程气候变化中的应用及展望

罗传秀^{1,2}, 王晓静^{3*}, 苏翔^{1,2}, 马婷⁴, 杨艺萍^{1,2}, 杜恕环^{1,2}, 杨子杰^{1,2,5}, 孙玉慧^{1,2,5}, 梁诗晴^{1,2,5}

(1 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 2 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301;

3 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054; 4 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室珠海基地, 珠海 519087;

5 中国科学院大学, 北京 110190)

摘要: 在国内外研究的基础上, 对印太暖池区的沃克环流和厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、热带辐合带(ITCZ)等低纬过程的空间分布和随时间的变化规律及其研究方法进行初步归纳, 并指出研究中存在的问题。本文论述了厄尔尼诺-南方涛动变率在全新世早期及中世纪气候异常期(1000~700 a BP)的晚期逐渐增强, 介绍了热带辐合带在BA暖期(Bølling-Allerød Warm Period)和前北方期(pre-Boreal, 10.3~9.5 ka BP)的北移, 以及在新仙女木事件(Younger Dryas Event, 12.5~11.5 ka BP)和北大西洋冷期(距今7.5~5 ka BP)期间的南移。对低纬过程长时间尺度轨道周期的探讨表明, 末次冰盛期赤道东太平洋出现了较偏南的热带辐合带锋面系统, 甚至在1.65 Ma冰期, 热带辐合带也有快速南移的证据。海洋沉积的粒度、黏土矿物、陆源粉尘、元素和同位素、有孔虫分析等研究方法在推测厄尔尼诺-南方涛动和热带辐合带位移中有很好的应用, 建议以陆源生态系统对气候的响应为切入点、以孢粉为手段来探讨陆源植被、气候、火灾和海-陆大气环流等低纬过程的变化特征, 进而反演沃克环流(或厄尔尼诺-南方涛动)演化和热带辐合带位移的影响。

关键词: 暖池区; 地质时期; 厄尔尼诺-南方涛动; 热带辐合带; 孢粉

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.155

0 引言

低纬过程包括季风和厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、沃克环流(Walker Circulation)、热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)等。印度洋-太平洋暖池(Indo-Pacific Warm Pool, IPWP)是全球赤道附近大气加热最强的海区, 其在热带海气相互作用中扮演着重要角色, 是驱动全球大气环流的最大热源之一(图1)。

收稿日期: 2022-05-10

资助项目: 国家自然科学基金“末次冰盛期以来南海沉积孢粉的南北变化及季风信息”(41876062)

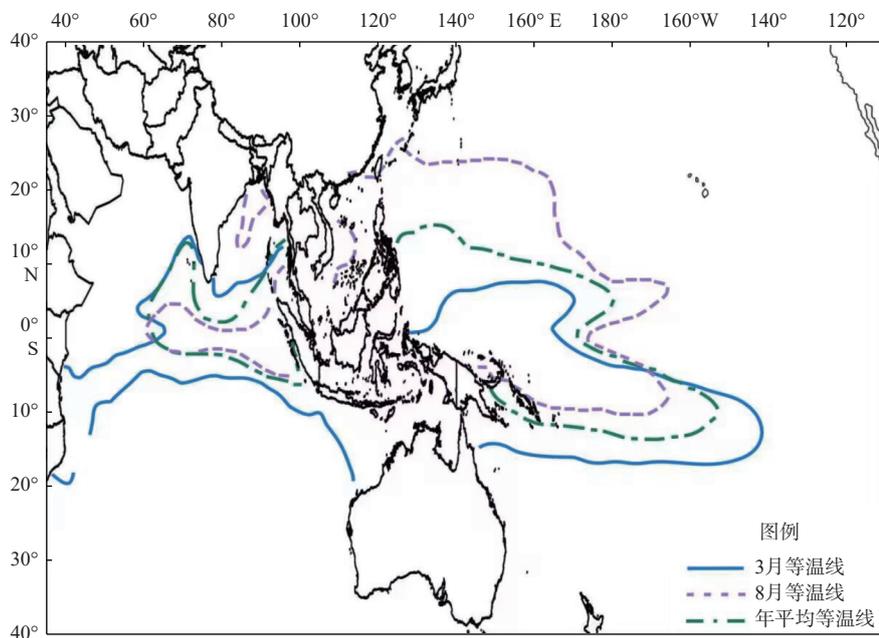
第一作者: 罗传秀(1970—), 女, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: xiu104@scsio.ac.cn

* 通讯作者: 王晓静(1979—), 博士, 讲师, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: geo2004@126.com

暖池区的异常波动与亚洲-太平洋区域的气候、甚至全球气候变化和某些自然灾害的形成和变化有密切联系^[1]。同时, 作为热带以外地区热量和水汽的一个主要来源地, 暖池与亚洲季风和南方涛动等活动密切相关^[2]。在年际和年代际尺度上, 通过厄尔尼诺-南方涛动作用, 暖池对全球短期气候异常的影响更为显著^[3]。在地质研究历史上, 关于印度洋-太平洋暖池区厄尔尼诺-南方涛动变化的研究存在很大分歧^[4], 且难以在充分的资料基础上讨论其与古季风的关系, 研究中还有很多未解的问题, 这些低纬过程的地质演变, 正是需要探索研究的新领域^[5]。沃克环流是赤道海洋表面因水温的东西差异而产生的纬圈热力环流, 其对太平洋东西两岸的气候调节有重要作用, 如果东太平洋的洋面温度升高, 就会导致“厄尔尼诺”。在厄尔尼诺期间, 温暖的表层水东移, 导致西太平洋暖池的表层海水温度小幅下降、暖池中心降水量减少^[6-7]以及东南亚火灾增

多^[8-9]。美国国家航空航天局(NASA)、美国国家海洋大气局(NOAA)发布的网络数据显示,东南亚水文气候条件的变化取决于厄尔尼诺-南方涛动事件

的类型。印度尼西亚最严重的旱灾和野火事件与东太平洋厄尔尼诺事件有关^[9],婆罗洲的森林主要由与 ENSO 型干旱事件相关的气候变率驱动^[8]。



图中等温线均为 50 年平均 28.5 °C 等温线

图 1 以 28.5 °C 等温线为界的暖池^[10]

Fig.1 The warm pool that defined by the area with SST higher than 28.5 °C^[10]

GORGUES 等^[11]认为厄尔尼诺-南方涛动是全球大部分地区年际气候变化的主要来源,是发生在热带太平洋中的海气相互作用事件。古气候学记录发现厄尔尼诺-南方涛动不是长期存在的气候现象^[12],但越来越多的沉积记录证明,在地质历史时期,西太平洋暖池也存在类似于现代厄尔尼诺-南方涛动过程的“类 ENSO 世”变化^[13]。只是由于器测气候参数的时间序列太短,严重制约了对厄尔尼诺-南方涛动变率演化过程及其驱动机制的理解^[14],使人们对地质时期的厄尔尼诺-南方涛动变化知之甚少,一般认为厄尔尼诺-南方涛动变化在晚全新世活跃增加,全新世早期至中期的厄尔尼诺-南方涛动年际活跃减少^[15]。因此,应该更深入地研究沃克环流及厄尔尼诺-南方涛动活动在过去不同时间尺度上对外部压力的响应。

热带辐合带是热带地区热量、水汽最集中的地区,也是降雨最多的地区,其随太阳直射点的移动发生季节性迁移。²¹⁰Pb 年代石笋氧同位素千年尺度变化记录显示,在 17.6~11.5 ka BP,澳大利亚-印尼季风突然南移,指示热带辐合带在此期间显著南移^[16]。然而,YAN 等^[17]发现小冰河期(550~100 a BP)热带辐合带没有严格意义的南北迁移,只是

季节性迁移的纬度范围的收缩。可见,热带辐合带在晚更新世的位移也是值得进一步研究的热点问题。

目前,已有针对海洋沉积物多种指标的研究,如粒度分析、黏土矿物、陆源粉尘、炭屑、元素和同位素、有孔虫和硅藻等指标,能够揭示上述低纬过程的变化。植被的生长分布与气候变化有着密切的关系,而海洋孢粉是否可作为新的低纬过程气候变化替代性指标尚未充分论证。本文主要以印太暖池区为例,试图在国内外研究的基础上,对季风和厄尔尼诺-南方涛动、热带辐合带等低纬过程的空间分布、随时间的变化规律、研究方法及科学问题等进行初步归纳。本着“将今论古”的原则,从轨道尺度到全新世,对各个时间尺度的低纬过程研究进展综合论述,最后对研究低纬过程的长期变化提出具体建议,并对关于海洋孢粉是否可作为新的低纬过程替代性指标进行探讨。

1 基于海洋沉积进行低纬过程研究的主要方法

海洋沉积的粒度分析、黏土矿物、陆源粉尘、

元素和同位素、有孔虫等多种研究方法在推测厄尔尼诺-南方涛动和热带辐合带位移中已有很好的应用。

1.1 有孔虫和硅藻、颗石藻等微体古生物

基于古生物群落定量统计的 SST 估计方法存在很大的局限性^[18], 随着测试技术的发展, 一些新的指标(长链不饱和烯酮 UK 37、有孔虫壳体 Mg/Ca、古菌生物标志物 TEX₈₆)被应用于暖池区的海表温度重建中。有孔虫壳体 Mg/Ca 温度计因其灵敏度高、适用范围广、时段长等优点是目前暖池区 SST 恢复中应用最广泛和最成功的方法^[18]。例如: DANG 等^[4]分析了 *G. ruber*(250 ~ 350 μm) 和 *P. obliquiloculata*(350 ~ 440 μm) 的 Mg/Ca 和 δ¹⁸O, 测定了 2 种属种的外壳的 δ¹⁸O, 重建了印度-太平洋暖池 25 ka BP 以来的温跃层温度, 揭示了暖池温跃层变暖降低了全新世早期至中期的厄尔尼诺-南方涛动年际活动。RONGE 等^[19]通过提供来自 ODP 1236 站点(距智利北部约 1100 km)从表层到深层浮游有孔虫物种的 Mg/Ca 温度估算, 重建了热带东太平洋温跃层的时空演化, 并对热带辐合带的位置有了新的认识。

颗石藻是一个重要的浮游生物类群, 在生物地球化学循环和气候中发挥着重要作用。颗石藻的下沉通量约占世界沉积物中 CaCO₃ 总埋藏通量的 60%^[20], 这使其成为高分辨率生产力研究的理想工具。颗石藻是卡里亚科盆地上升流季节浮游植物繁盛的主要组成部分。随着上升流的消退, 热带辐合带向北迁移, 将与其相关的雨带带到卡里亚科盆地上空。因此, 颗石藻成为指示委内瑞拉卡里亚科盆地热带辐合带迁移的古生态学指标^[21]。

1.2 地球化学及沉积学证据

降雨是较难重建的气候参数之一, 且在气候数学模型中的代表性也较差。降雨是基于沉积物中保存的单细胞藻类脂质中重氢和轻氢的比例重建的。从婆罗洲昂鲁克塔贝尔群岛(Island of Ngeruktabel)帕劳(Palau)海洋湖泊的沉积物中分离到的藻脂(algal lipid dinosterol)氢同位素比值在 7.7 ~ 4.5 kaBP 期间增加了 50%, 表明降水减少。在同一时期, 亚洲和非洲的季风系统减弱。造成这些变化的可能原因是由于地球轨道几何形状的变化, 热带雨带向南移动^[22]。

基于粒度数据集和深入的统计分析, ZHENG

等^[23]提出了一个新的反映冬季风强度的指标。来自冲绳海槽的沉积学证据(粒度、黏土矿物和元素 Ti、Fe、Ca 组成)显示了热带辐合带和厄尔尼诺-南方涛动变化对全新世东亚冬季风变化的影响及热带辐合带的南移^[23]。将新提出的粒度指数(GSI)和元素比值数据(Ti/Ca)与董哥洞石笋记录的时间趋势进行比较, 可以发现全新世东亚冬季风与东亚夏季风之间存在显著的反相关关系, 表明热带辐合带的迁移对东亚冬季风具有调节作用。

1.3 珊瑚礁

快速生长的大型 *hermatypic* 珊瑚(生长速度高达 2 cm/a)在其骨骼中含有一系列地球化学示踪剂^[24]。因此, 珊瑚记录可以为连续的、每月或每年分辨率的古气候和古海洋学研究提供高保真的记录^[25-29]。珊瑚骨骼中氧同位素(δ¹⁸O)的分析一直是季节和年际变化的主要信息来源^[30-31]。珊瑚 Sr/Ca-SST 异常也可以作为厄尔尼诺-南方涛动变化的敏感和可靠指标。例如, JIANG 和 YU^[32]利用南海北部群岛西沙群岛的器测海表温度和再分析数据集, 分析了厄尔尼诺-南方涛动对该地区的影响。

1.4 陆源粉尘

在数百千米范围内输送的尘埃颗粒大小一般 < 10 μm, 如果强大的向上平流气流将这些尘埃颗粒提升到更高的高度, 这些颗粒就可以被长距离运输, 或对流层中风带诱导粉尘快速输送^[33-35]。另外一个控制粒度分布的因素是干湿沉积的相对贡献^[36]。这些粉尘粒径尺寸分布的变化反映了热带辐合带的位置。在北半球夏季, 当东南信风气流更强盛时^[37-38], 热带辐合带位于 10°N 附近, 最大的上升流和来自南美洲的大量风沙沉积都发生在赤道东太平洋(EEP)^[39]。2-4 月, 当东南气流较弱时^[37], 热带辐合带向南迁移, 沙尘输入减少, 上升流减弱。

在一套较新的高分辨率赤道东太平洋早更新世记录里, 海洋钻探项目 ODP1240 和 1238 站点的底栖生态系统对在 1.85 Ma 前后冰期记录的高生产力表现出不同的响应, 指示将有机物输送到深海的过程也发生了变化。1.85 Ma 之前, 热带辐合带位于赤道, 局地风力减弱, 沙尘湿沉降增强。1.85 Ma 以后, 冰期热带辐合带向北移动, 带来了更强的气流, 促进了东太平洋(E/P)的上升流^[40]。

综上所述, 海洋沉积的粒度分析、黏土矿物、陆

源粉尘、元素和同位素、有孔虫等指标在推测厄尔尼诺-南方涛动和热带辐合带位移中有很好的应用。但植被作为反映气候变化的重要参数,却未在上述研究方法中充分体现。孢粉作为植物的繁殖器官,其保留在沉积物中的外壁化石可以反映从轨道周期到全新世的各种时间尺度的植被演化。

2 主要的低纬过程气候变化及其第四纪自然变率

2.1 更新世

新生代至上新世之前,全球重要海洋通道发生了重大构造重组,特别是巴拿马地峡的逐渐关闭和印度尼西亚海道的收缩显著地影响了太平洋温跃层的结构。RONGE等^[19]利用来自海水次表层和温跃层的有孔虫的Mg/Ca温度估算,重建了东南太平洋温跃层从上新世向更新世的演化过程及其与大气环流变化的关系。数据显示,早在3.8~3.5 Ma温跃层的变深就可能与热带辐合带北移和南太平洋高压系统有关。进入第四纪,低纬过程的气候波动更为剧烈,越来越多的证据表明,继2.2~2 Ma太平洋沃克环流的发展之后,这种环流和海-气相互作用在冰川期-间冰期时间尺度上塑造了印度洋地区的水文气候条件变化。然而,目前为止还没有连续的长期记录来确定印度洋受太平洋影响气候转变的时间和机制。克海峡通流(MCT)的流动速度在(2.1±0.1)Ma之前相对较弱且稳定,此后开始增加,与太平洋沃克环流的加强相一致,在冰期有较强的增加,在中更新世过渡时期达到最大值(0.9~0.64 Ma),在间冰期被弱的流水速度中断^[41]。

SCHMIDT和SPERO^[42]比较了过去3个冰期西加勒比ODP999A岩芯和西赤道太平洋806B岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 和Mg/Ca数据,发现热带气候与格陵兰冰芯记录的高纬度温度变率密切相关,特别是格陵兰冰盖 $\delta^{18}\text{O}$ 冰期记录中的突然降温事件与大西洋热带辐合带的向南迁移、印度和东亚季风系统的减弱以及南美季风系统的增强同步出现。由于这种高纬度到低纬度的气候遥相关显著地改变了全球热带水文循环,其在冰川期-间冰期时间尺度上调节全球气候发挥着关键作用^[42]。

基于影像中心MD01-2378中古生产力和陆地植被(降水)的地球化学和孢粉记录,重建了西帝汶海和邻近的澳大利亚西北部近460 ka的气候变化。

降水减少和生产力提高是冰期的特征,而降水增加和生产力降低是间冰期的典型特征。在花粉记录中可以清楚地识别,降水的长期减少在约300 ka BP和180 ka BP分2步发生。帝汶海和邻近陆块的古生产力和古气候的变化似乎是由岁差控制的澳大利亚季风系统有关的类似机制所驱动。这一观点支持了STOTT等^[43]提出的假说,即印度洋-太平洋暖池在冰川期经历了类似厄尔尼诺-南方涛动的条件。

TIAN和JIANG^[44]使用国际古气候模拟的结果显示,末次冰盛期(LGM)(约21 ka BP)年平均沃克环流较工业化革命前期减弱,且其西边界和环流中心位置东移;上述变化与赤道印度洋和太平洋之间的东西向海平面气压差、赤道太平洋低层信风的减弱紧密相关。²³⁰Pb年代石笋氧同位素千年尺度变化记录显示,在17.6~11.5 ka BP,澳大利亚-印尼季风突然南移,指示热带辐合带在此期间显著南移^[16]。

过去360 ka BP以来,印度洋-太平洋暖池上层(0~200 m)海洋热含量的研究表明,西太平洋暖池海区的温跃层海水温度同时受控于南、北半球低纬太阳辐射量的经向梯度,是岁差和半岁差周期上热带太平洋类ENSO型气候变化的核心枢纽^[4,14]。

基于赤道海-气耦合模式,CLEMENT等^[45]发现过去500 ka BP以来,在特定的轨道结构下,厄尔尼诺-南方涛动相转换期间其振荡可以突然停止几个世纪,随着厄尔尼诺-南方涛动振动的停止,赤道东西太平洋海洋表层海水的温度(sea surface temperature, SST)梯度增大,产生类似拉尼娜(La Nina)的变化;La Nina使赤道大西洋输出的淡水量减少,从而减慢了大西洋热盐循环,引起全球性的快速降温,故认为快速气候变化事件就是赤道太平洋变化驱动的结果;这涉及到东太平洋冷舌-西太平洋暖池-哈德莱环流-沃克环流耦合系统对太阳辐射量波动的非线性响应^[3,45]及热带辐合带重组等海洋环境的径向变化。

综上所述,更新世期间热带过程的研究方法主要为古气候模拟、海-气耦合模式、 $\delta^{18}\text{O}$ 、Mg/Ca SST重建、沉积物成分研究等,发现了末次冰盛期赤道东太平洋出现了较弱的冷舌-热带辐合带锋面系统、较偏南的热带辐合带锋面系统。但在更新世期间,暖池区的热带过程研究中很少采用与植被方面相关的指标,由于气候与植被地理分布之间的密切关系,今后可以尝试利用更多的植被指标。

2.2 全新世

DANG 等^[4]整理了印度洋—太平洋暖池 25 ka BP 以来的温跃层温度记录, 揭示了暖池温跃层变暖降低了全新世早期至中期的厄尔尼诺-南方涛动年际活动。PRASAD 等^[46]对从印度中部 Lonar 湖长 10 m 的沉积物钻孔研究发现了 4.6~3.9 ka BP 和 2~0.6 ka BP 的 2 次长时间干旱(PD, 多年至百年季风弱期)。将多种数据进行比较表明: ①印度洋-太平洋暖池区域变暖通过经向翻转环流和异常沃克环流位置的变化在印度夏季风弱期(PD)的发生中起重要作用; ②厄尔尼诺-南方涛动等条件对印度夏季风(Indian Summer Monsoon, ISM)的长期影响仅开始于约 2 ka BP, 并与南部印度洋-太平洋暖池的变暖一致。

MOY 等^[47]展示了热带太平洋东岸厄瓜多尔南部拉古纳帕尔卡查 12 ka BP 以来的连续沉积记录, 结果表明, 研究区受到厄尔尼诺-南方涛动变化的强烈影响。厄尔尼诺-南方涛动活动在全新世期间比较频繁, 直到 1.2 ka BP 以来, 才下降到现在的频率。HOPE^[48]利用孢粉数据展示了巴布亚新几内亚岛欧文·斯坦利山脉的环境变化和火灾, 在 7.6~5.4 ka BP 厄尔尼诺-南方涛动强度减弱、频率降低。JIANG 和 YU^[32]利用南海化石珊瑚礁 Sr/Ca-SST 异常重建的结果表明, 由厄尔尼诺活动所控制的厄尔尼诺-南方涛动变率在中世纪气候异常期(MCA, 1000~700 a BP)晚期逐渐增强。在更长的时间尺度上, 从末次盛冰期开始(LGM, 25~19 ka BP)到全新世早期(12~9 ka BP), 观察到在印度洋-太平洋暖池温跃层 4 °C 变暖的温度记录^[49-51], 可能导致早全新世厄尔尼诺-南方涛动活动的减少^[52-53]。

MOY 等^[47]认为高频率和低频率的厄尔尼诺-南方涛动活动以约 2 000 a 为周期交替出现。GAGAN 等^[53]也认为热带太平洋地区的古厄尔尼诺-南方涛动记录确定了现代厄尔尼诺-南方涛动周期的开始, 约 5 ka BP 厄尔尼诺-南方涛动量级突然增加。然而, 这种千年尺度的变化仍需要其他厄尔尼诺-南方涛动记录指标的进一步确认。而且关于 12 ka BP 以来世厄尔尼诺-南方涛动活动的研究还比较少, 大多数热带西太平洋古厄尔尼诺-南方涛动资料的时间跨度较短, 跨越几个冰期-间冰期旋回的记录更少^[54]。

热带太平洋作为全球气候系统的重要中介, 在全新世期间经历了一次深刻的气候变化。从婆罗

洲昂鲁克塔贝尔群岛帕劳海洋湖泊的沉积物中分离到的藻脂氢同位素比值在 7.7~4.5 ka BP 增加了 50%, 表明降水减少。这时期的干燥与婆罗洲帕劳西南部的降雨增加、北半球季风减弱、南半球季风增强以及陆地光合作用向赤道移动相吻合。受日照的影响, 热带辐合带向南移动, 是气候和生物圈变化最可能的原因^[22]。

来自冲绳海槽的沉积学证据(粒度、黏土矿物和元素 Ti、Fe、Ca 组成)显示了热带辐合带和厄尔尼诺-南方涛动变化对全新世东亚冬季风变化的影响, 及热带辐合带的南移^[23]。颗石藻也是指示委内瑞拉卡里亚科盆地热带辐合带迁移的古生态学指标, 指示在 BA 暖期和前北方期热带辐合带的北移与在新仙女木事件和全新世中期热带辐合带的南移交替发生^[21]。

CRAUSBAY 等^[55]研究指出, 基于孢粉和炭屑的生境分布模型为信风逆温(trade wind inversion, TWI)漂移假说提供了支持, 表明这些强烈的植被变化与热带辐合带的位置有关。一个明显的例子是热带山地多雾林(tropical montane cloud forest, TM-CF)物种从 5.9 ka BP 到最近几十年的长期下降, 与热带辐合带的稳定南移直到最近才向北移动有关。云林类群的上限位置部分受到与信风逆温和厄尔尼诺驱动的干旱及火灾有关的水分平衡控制^[55-56]。

综上所述, 全新世期间热带过程的研究指标主要为藻脂氢同位素比值、植被变化、石笋记录等, 显示了在全新世早期出现类似于现代的活跃增加的厄尔尼诺-南方涛动活动^[57], 其他来自东赤道太平洋的厄尔尼诺-南方涛动活动的指标记录显示在这一时期很少或没有厄尔尼诺-南方涛动活动, 说明对印度洋-太平洋暖池上层海洋热结构过去变化的理解还不完全明确^[4]。

3 利用孢粉分析开展第四纪低纬过程研究

深海的年代地层学结合氧同位素阶段和碳同位素测年, 有利于建立可靠的年代框架, 使深海孢粉分析的结果更具有说服力。目前, 海洋孢粉仅停留在探讨陆源植被变化的应用, 例如海洋孢粉在西太-东印周边的植被重建方面有较好的应用。

3.1 热带西太平洋及周边孢粉研究

孢粉可以反映区域降水变化, 但是海洋中的孢

粉多来自陆地,了解孢粉传播机制和陆源地是从古环境角度正确解释海洋沉积孢粉资料的基础。海洋沉积物中孢粉的系统分布模式与陆源植物组成、花粉产量与散布、风、河流和海洋传播等环境和沉积因素有关。因此,要正确解释孢粉资料,需了解孢粉传播机制和陆源区的表土孢粉特征。

海洋孢粉信号与植被之间有较好的相关性^[58-59]。KAARS等^[58]测试了澳大利亚西部海岸38个钻孔顶部沉积物中的花粉含量,按花粉组合的分布将澳大利亚西部海岸分为5个主要的生物气候带,与陆地上降雨总量和季节性以及陆地植被分布关系密切^[58]。大多数情况下,海洋表层流对海洋沉积物中孢粉的分布影响很小,但这个影响在有强大边界流流动的大陆坡却是相当大的。例如在澳大利亚西岸较北部样点的沉积物中的蕨类孢子的出现反映了诸如李氏洋流(Leeuwin Current)等来自印度尼西亚的表层流的影响^[58]。

通常风力输送的花粉主要出现在离岸较远的深海沉积物^[60-61]。戴璐和翁成郁^[59]通过分析2008年12月—2009年1月收集到的气传花粉和海水花粉样品,发现距北部陆地2000多千米的东菲律宾海上空也存在着以蒿和藜为主的花粉;在赤道地区,虽然风力较弱,但是空气中也有丰富的花粉,温带花粉减少而热带地区孢粉明显增多。海水样品中的蕨类孢子数量远多于空气样品中的量,说明海水中的蕨类孢子主要是通过水流传入的。本研究于2017年冬季10—11月采集的西太现代孢粉的成果显示,菲律宾东南洋面空气中存在一些松属和蒿属花粉,而水中仅出现三缝孢子。

关于热带西太平洋现代孢粉研究现状,目前仅有上述极少报道,而且关于孢粉传播方面的问题还存在一些疑问,需要进一步厘清。

3.2 东印度洋暖池区及周边孢粉研究

目前东北印度洋地区钻孔孢粉的研究还很少^[62],尤其是利用印度洋钻孔孢粉的分析结论尚缺乏对该区域孢粉现代过程的研究作为参考^[63],缺乏关于孢粉从陆地到海洋的传播机制的现代实验可供对比,因此,难以证明保存在海洋序列中的孢粉粒能够代表临近陆地的植被。

LUO等^[62]选取了印度洋东北部33个海底表层沉积物、36个空气、26个表层海水的样品进行孢粉分析。以90°E的印度海岭为分界线,在该线的西部或西北部出现了较多的三缝孢子(主要是鳞盖

蕨孢子)和草本花粉,推测其可能来源于热带草原、稀树草原为主的斯里兰卡和印度。水龙骨科孢子和木本花粉(松属除外)在边界东部或东南部较多,可能来源于热带雨林覆盖的苏门答腊岛。主成分分析表明,从东南流向西北的洋流以及与周围陆地的距离对研究区的孢粉含量均有影响。根据印度洋东北部YDY05岩芯的孢粉化石分析,确定自16 ka BP以来,孢粉陆地来源由苏门答腊岛(以热带雨林为主)变为斯里兰卡岛和印度(以热带草原、稀树草原为主)^[64]。然而,上述研究仅仅止步于沿岸植被的重建,没有进一步深入探讨植被与热带过程气候变化之间的内在联系。

3.3 孢粉可以反演陆源地植被受到的沃克环流(或厄尔尼诺-南方涛动)演化和热带辐合带位移的影响

孢粉可以反映陆源地植被受到的沃克环流(或厄尔尼诺-南方涛动)和热带辐合带位移的影响。HOPE^[48]利用孢粉数据展示了巴布亚新几内亚岛欧文·斯坦利山脉的环境变化和火灾,在7.6~5.4 ka BP之间厄尔尼诺-南方涛动强度减弱、频率降低。SHULMEISTER和LEES^[65]从来自澳大利亚的花粉证据推断,在7 ka BP大洋洲就发生了显著的厄尔尼诺-南方涛动事件。厄尔尼诺-南方涛动与热带和东澳大利亚的降雨模式的年度变化密切相关,而有机物沉降速率和花粉浓度是有效降水的2个关键指标^[65-66]。孢粉谱中落叶组分和草本含量敏感地反映了降雨量变化的变化,反映出雨林—季雨林(开阔)的转变。位于赤道南北不同位置钻孔的植被变化与热带辐合带的位置南北移动有密切的关系。由于孢粉组合可以指示雨林和季雨林比例的变化,因此可以利用孢粉数据重建植被变化,进而反演热带辐合带等低纬过程的变化。

另外,炭屑可用于研究陆源区的天然火灾事件或人类用火活动^[41,67-68]。炭屑是有机体不完全燃烧或高温分解所产生的深褐色或黑色多孔无机碳化物,由于炭屑对化学过程和生物代谢具有较强的惰性,能在地质环境中长期稳定的保存。炭屑通量记录了过去火灾的发生,CRAUSBAY等^[55]使用HYPERNICHE 2.0(MjM软件设计)中的非参数乘法回归(NPMR)建立了栖息地分布模型并关联植被动态(松林类群和云林类群的花粉积累率;80年中位分辨率)对火灾变化(木炭积累,15年插值分辨率),热带辐合带的纬度位置(HAUG等^[69],5年分

分辨率)和厄尔尼诺频率(MOY 等^[47], 100 年分辨率)的响应。CRAUSBAY 等^[55]的研究指出, 基于孢粉和炭屑的生境分布模型为信风逆温漂移假说提供了支持, 表明这些强烈的植被变化与热带辐合带的位置有关。而厄尔尼诺-南方涛动事件导致季节性极端干旱, 也可引起热带森林严重的火灾, 因此, 利用炭屑分析揭示火灾事件, 有望进一步探讨沃克环流和厄尔尼诺-南方涛动活动及其对热带森林造成的严重影响^[8-9,70]。

4 结论

未可尝试以深海沉积孢粉作为替代指标反演区域陆源植被的变化, 来追溯西太平洋-东印度洋暖池区域环流的变化特征及古海洋的演变历史。可以在现代孢粉研究基础上, 在暖池区采集钻孔沉积物样品进行热带过程演变的研究。采集钻孔样品时有以下 3 点建议: ①尽量寻找几万年记录的钻孔材料, 其位置跨赤道南北约 10 个纬度, 且对热带辐合带的响应最为敏感; ②所选钻孔应位于亚洲季风区域的边界之内; ③钻孔位置应位于洋流的影响范围之内, 洋流可携带附近陆地和岛屿的孢粉流经钻孔, 并沉积下来。通过对分布于生物及气候敏感区、暖池区的若干个海陆钻孔的孢粉及炭屑分析, 旨在重建深海沉积孢粉组分指示的陆源区生态环境, 并追踪其变化与热带辐合带位移、沃克环流演变以及厄尔尼诺-南方涛动的关系。该研究有助于探讨热带气候变化与南北半球气候变化的关系, 并试图揭示热带气候对全球变化的重要作用。

参考文献:

- [1] 李克让, 周春平, 沙万英. 西太平洋暖池基本特征及其对气候的影响[J]. *地理学报*, 1998, 53(6): 511-519.
- [2] WEBSTER P J, MAGANA V O, PALMER T N, et al. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C7): 14451-14510.
- [3] CANE M A. A role for the Tropical Pacific[J]. *Science*, 1998, 282: 59-61.
- [4] DANG H W, JIAN Z M, WANG Y, et al. Pacific warm pool subsurface heat sequestration modulated Walker circulation and ENSO activity during the Holocene[J]. *Science Advances*, 2020, 6(42): 402-416.
- [5] WANG P X. Global monsoon in a geological perspective[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 1113-1136.
- [6] DAI A G, WIGLEY T M L. Global Patterns of ENSO-induced Precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(9): 1283-1286.
- [7] SAGAWA T, YOKOYAMA Y, IKEHARA M, et al. Shoaling of the western equatorial Pacific thermocline during the last glacial maximum inferred from multispecies temperature reconstruction of planktonic foraminifera[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 346-347: 120-129.
- [8] TAUFIK M, TORFS P J J F, UIJLENHOET R, et al. Amplification of wildfire area burnt by hydrological drought in the humid tropics[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 428-433.
- [9] PAN X H, CHIN M, ICHOKU C M, et al. Connecting Indonesian fires and drought with the type of El Niño and phase of the Indian Ocean Dipole During 1979–2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(15): 7974-7988.
- [10] YANG Y X, HUANG F, WANG D X. The variation of the INDO-PACIFIC Warm Pool[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(4): 296-303.
- [11] GORGUES T, MENKES C, SLEMONS L, et al. Revisiting the La Niña 1998 phytoplankton blooms in the equatorial Pacific[J]. *Deep-Sea Research I*, 2010, 57(4): 567-576.
- [12] PHIPPS S J, BROWN J N. Understanding ENSO dynamics through the exploration of past climates[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2010, 9(1): 012010.
- [13] 张洋, 徐继尚, 李广雪, 等. 西太平洋暖池冰期旋回中的类 ENSO 式演化及其驱动机制[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 168.
- [14] JIAN Z M, WANG Y, DANG H W, et al. Half-precessional cycle of thermocline temperature in the western equatorial Pacific and its bihemispheric dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(13): 7044-7051.
- [15] PIERREHUMBERT R T. Climate change and the tropical Pacific: the sleeping dragon wakes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(4): 1355-1358.
- [16] AYLIFFE L K, GAGAN M K, ZHAO J X, et al. Rapid inter-hemispheric climate links via the Australasian monsoon during the last deglaciation[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 3908.
- [17] YAN X H, HO C R, ZHENG Q, et al. Temperature and size variabilities of the Western Pacific Warm Pool[J]. *Science*, 1992, 258(5088): 1643-1645.
- [18] 王晓燕, 李保华. 浅谈浮游有孔虫群落海水古温度估算[J]. *微生物学报*, 2006, 23(2): 182-190.
- [19] RONGE T A, NÜRNBERG D, TIEDEMANN R. Plio-Pleistocene variability of the East Pacific thermocline and atmospheric systems[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2020, 35(1): e2019PA003758.
- [20] HONJO S. Fluxes of particles to the interior of the open oceans[J]. *Particle Flux in Open Ocean*, 1996.
- [21] MERTENSK N J M, LYNN M, AYCARD M, et al. Coccolithophores as palaeoecological indicators for shifts of the ITCZ in the Cariaco Basin during the late Quaternary[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(2): 159-174.
- [22] SACHS J P, BLOIS J L, MCGEE T, et al. Southward shift of the Pacific ITCZ during the Holocene[J]. *Paleoceanography*

- and *Paleoclimatology*, 2018, 33(12): 1383-1395.
- [23] ZHENG X F, LI A C, WAN S M, et al. ITCZ and ENSO pacing on East Asian winter monsoon variation during the Holocene: Sedimentological evidence from the Okinawa Trough[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4410-4429.
- [24] YU K F, ZHAO J X, SHI Q, et al. Recent massive coral mortality events in the South China Sea: was global warming and ENSO variability responsible?[J]. *Chemical Geology*, 2012, 320: 54-65.
- [25] COBB K M, CHARLES C D, CHENG H, et al. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium[J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 271-276.
- [26] CORRÈGE T, DELCROIX T, RÉCY J, et al. Evidence for stronger El Niño, Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral[J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(4): 465-470.
- [27] MCGREGOR H V, FISCHER M J, GAGAN M K, et al. A weak El Niño/Southern Oscillation with delayed seasonal growth around 4, 300 years ago[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(11): 949-953.
- [28] TIERNEY J E, ABRAM N J, ANCHUKAITIS K J, et al. Tropical sea surface temperatures for the past four centuries reconstructed from coral archives[J]. *Paleoceanography*, 2015, 30(3): 226-252.
- [29] TUDHOPE A W, CHILCOTT C P, MCCULLOCH M T, et al. Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle[J]. *Science*, 2001, 291(5508): 1511-1517.
- [30] COLE J E, FAIRBANKS R G, SHEN G T. Recent variability in the Southern Oscillation: Isotopic results from a Tarawa Atoll coral[J]. *Science*, 1993, 260(5115): 1790-1793.
- [31] YU K F, ZHAO J X, WEI G J, et al. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and ⁸¹⁸O records of *Porites* corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea[J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2-4): 301-316.
- [32] JIANG L L, YU K F. ENSO variability during the Medieval Climate Anomaly as recorded by *Porites* corals from the northern South China Sea[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2021, 36(4): e2020PA004173.
- [33] TEGEN I, LACIS A A, FUNG I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils[J]. *Nature*, 1996, 380(6573): 419-422.
- [34] WINDOM H L. Eolian contributions to marine sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1975, 45(2): 520-529.
- [35] JEONG G Y, KIM J Y, SEO J, et al. Long-range transport of giant particles in Asian dust identified by physical, mineralogical, and meteorological analysis[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(1): 505-521.
- [36] GUERZONI S, MOLINAROLI E, CHESTER R. Saharan dust inputs to the western Mediterranean Sea: Depositional patterns, geochemistry and sedimentological implications[J]. *Deep Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1997, 44(3/4): 631-654.
- [37] CHELTON D B, ESBENSEN S K, SCHLAX M G, et al. Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical Pacific[J]. *Journal of Climate*, 14(7): 1479-1498.
- [38] KOUTAVAS A, LYNCH-STIEGLITZ J. Variability of the marine ITCZ over the eastern Pacific during the past 30, 000 years: Regional perspective and global context [M]//*The Hadley circulation: Present, past and future*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004: 347-369.
- [39] MOLINA-CRUZ A. The relation of the southern trade winds to upwelling processes during the last 75, 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1977, 8(3): 324-338.
- [40] POVEA P, CACHO I, MORENO A, et al. Atmosphere-ocean linkages in the eastern equatorial Pacific over the early Pleistocene[J]. *Paleoceanography*, 2016, 31(5): 522-538.
- [41] VAN DER LUBBE H J L, HALL I R, BARKER S, et al. Indo-Pacific Walker circulation drove Pleistocene African aridification[J]. *Nature*, 2021, 598(7882): 618-623.
- [42] SCHMID M W, SPEROH J. Meridional shifts in the marine ITCZ and the tropical hydrologic cycle over the last three glacial cycles[J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(1): PA1206.
- [43] STOTT L, POULSEN C, LUND S, et al. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales[J]. *Science*, 2002, 297(5579): 222-226.
- [44] TIAN Z P, JIANG D B. Weakening and eastward shift of the tropical Pacific Walker circulation during the Last Glacial Maximum[J]. *Boreas*, 2019, 49(1): 200-210.
- [45] CIEMENT A C, CANE M A, SEAGER R. An orbitally driven tropical source for abrupt climate change[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(11): 2369-2375.
- [46] PRASAD S, ANOOP A, RIEDEL N, et al. Prolonged monsoon droughts and links to Indo-Pacific Warm Pool: a Holocene record from Lonar Lake, central India[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 391: 171-182.
- [47] MOY C M, SELTZER G O, ROBBELL D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch[J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 162-165.
- [48] HOPE G. Environmental change and fire in the Owen Stanley Ranges, Papua New Guinea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(23/24): 2261-2276.
- [49] XU J, HOLBOURN A, KUHN T W, et al. Changes in the thermocline structure of the Indonesian outflow during Terminations I and II[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1/2): 152-162.
- [50] BOLLIET T, HOLBOURN A, KUHN T W, et al. Mindanao Dome variability over the last 160 kyr: Episodic glacial cooling of the West Pacific Warm Pool[J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(1): PA1208.
- [51] DANG H W, JIAN Z M, BASSINOT F, et al. Decoupled Holo-

- cene variability in surface and thermocline water temperatures of the Indo-Pacific Warm Pool[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(1): L01701.
- [52] WHITE S M, RAVELO A C, POLISSAR P J. Dampened El Niño in the Early and Mid - Holocene Due to Insolation - Forced Warming/Deepening of the Thermocline[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(1): 316-326.
- [53] FORD H L, RAVELO A C, POLISSAR P J. Reduced El Niño-Southern Oscillation during the Last Glacial Maximum [J]. *Science*, 2015, 347(6219): 255-258.
- [54] GAGAN M K, HENDY E J, HABERLE S G, et al. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Niño-Southern oscillation[J]. *Quaternary International*, 2004, 118: 127-143.
- [55] CRAUSBAY S D, MARTIN P H, KELLY E F. Tropical montane vegetation dynamics near the upper cloud belt strongly associated with a shifting ITCZ and fire[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(4): 891-903.
- [56] MARTIN P H, SHERMAN R E, FAHEY T J. Tropical montane forest ecotones: climate gradients, natural disturbance, and vegetation zonation in the Cordillera Central, Dominican Republic[J]. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(10): 1792-1806.
- [57] CAROLIN S A, COBB K M, ADKINS J F, et al. Varied Response of Western Pacific Hydrology to Climate Forcings over the Last Glacial Period[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1564-1566.
- [58] KAARS S V D, DECKKER P D. Pollen distribution in marine surface sediments offshore Western Australia[J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2003, 124(1/2): 113-129.
- [59] CROUCH E M, MILDENHALL D C, NEIL H L, et al. Distribution of organic-walled marine and terrestrial palynomorphs in surface sediments, offshore eastern New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2010, 270(1/4): 235-256.
- [60] DAI L, WENG C Y. A survey on pollen dispersal in the western Pacific Ocean and its paleoclimatological significance as a proxy for variation of the Asian winter monsoon[J]. *Science China: Earth Science*, 2010, 40(7): 893-902.
- [61] LUO C X, CHEN M H, XIANG R, et al. Modern pollen distribution in marine sediments from the northern part of the South China Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 108: 41-56.
- [62] LUO C X, JIANG W M, CHEN C X, et al. Modern pollen distribution in the northeastern Indian Ocean and its significance[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(8): 1471-1488.
- [63] PRABHU C N, SHANKAR R, ANUPAMA K, et al. A 200-ka pollen and oxygen-isotopic record from two sediment cores from the eastern Arabian Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 214(4): 309-321.
- [64] LUO C X, XIANG R, LIU J G, et al. Study of modern pollen distribution in the northeastern Indian Ocean and their application to paleoenvironment reconstruction[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2018, 256: 50-62.
- [65] SHULMEISTER J, LEES B G. Pollen evidence from tropical Australia for the onset of an ENSO-dominated climate at c. 4000 BP[J]. *Holocene*, 1995, 5(1): 10-18.
- [66] PITTOCK A B. Climatic change and the patterns of variation in Australian rainfall[J]. *Search*, 1975, 6(11): 498-504.
- [67] LUO Y L, SUN X J, CHEN H C. Millions of years of natural fire in northern South China Sea areas and climate: ODP1144 hole in deep sea sediment charcoal records[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 8: 942-950.
- [68] XIAO X Y, HABERLE S G, SHEN J, et al. Postglacial fire history and interactions with vegetation and climate in southwestern Yunnan Province of China[J]. *Climate of the Past*, 2017, 13(6): 1-23.
- [69] HAUG G H, HUGHEN K A, SIGMAN D M, et al. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene[J]. *Science*, 2001, 293(5533): 1304-1308.
- [70] KAWAMURA H, HOLBOURN A, KUHN W. Climate variability and land-ocean interactions in the Indo Pacific Warm Pool: a 460-ka palynological and organic geochemical record from the Timor Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 59(1): 1-14.

Application and prospect of marine sedimentary evidence to climate change in low-latitude processes

LUO Chuanxiu^{1,2}, WANG Xiaojing^{3*}, SU Xiang^{1,2}, MA Ting⁴, YANG Yiping^{1,2},
DU Shuhuan^{1,2}, YANG Zijie^{1,2,5}, SUN Yuhui^{1,2,5}, LIANG Shiqing^{1,2,5}

(1 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China;

2 Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, CAS, Guangzhou 510301, China;

3 College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

4 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China;

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on domestic and international research, this paper preliminarily summarizes the spatial distribution and temporal changes of the Walker circulation, El Niño Southern Oscillation (ENSO), Tropical Convergence Zone (ITCZ), and other low-latitude processes in the Indo-Pacific Warm Pool (IPWP) region, as well as their research methods, and points out current problems in the research. We found that the ENSO variability gradually increased in the early Holocene and the late medieval climate anomaly period (1000–700 a BP), and then introduced the northward movement of ITCZ during the Bølling-Allerød Warm Period and the pre-Boreal period (10.3 ka BP–9.5 ka BP), and the southward movement during the Younger Dryas event (12.5–11.5 ka BP) and the North Atlantic cold period (7.5 to 5 ka BP from now). In addition, we discussed the long-term orbital period of the low-latitude process. During the LGM (Last Glacial Maximum), a southerly ITCZ frontal system appeared in the equatorial eastern Pacific Ocean; and even during the 1.65 Ma ice age, there was evidence of rapid southward movement of ITCZ. At present, there are many research methods for marine sediments. The good applications of grain size analysis, clay minerals, terrestrial dust, elements and isotopes, and foraminifera in the prediction of ENSO and ITCZ displacement in marine sediments were summarized. Finally, based on the progress of marine pollen research, it is suggested to use the response of terrestrial ecosystems to climate changes as a starting point, and conduct palynological analysis to explore the changes in low-latitude processes such as terrestrial vegetation, climate, fires, and sea-land atmospheric circulation, to clarify the evolution of the Walker circulation (ENSO) and the impact of ITCZ displacement.

Key words: warm pool area; geological period; El Niño Southern Oscillation; Tropical Convergence Zone; sporopollen