

珠江口盆地始新世—渐新世古环境演化及对冰期事件的响应

王 月^{1,2}, 常晓琳^{1,2,3*}, 陈 莹⁴, 王文楷⁵, 刘欣春^{1,2}, 钟瀚霆^{1,2},
魏 冰^{1,2}, 戚晓婧^{1,2}, 侯明才^{1,2}

1. 成都理工大学 深时地理环境重建与应用自然资源部重点实验室, 成都 610059;
2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;
3. 成都理工大学 科技考古研究中心, 成都 610059;
4. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028;
5. 西昌学院 资源与环境学院, 四川 西昌 615000

[摘要] 始新世—渐新世气候演化经历了全球性的气温骤降事件(EOGM), 并伴随着各类显著的环境变化。烃源岩的形成往往受到古气候条件的限制, 探明盆地烃源岩形成与 EOGM 事件的相互关系对于油气勘探工作十分重要。本文以珠江口盆地始新世—渐新世总有机碳(TOC)数据及孢粉、藻类变化为研究内容, 恢复珠江口盆地始新世—渐新世古气候变化, 探究 EOGM 与盆地气候的耦合关系, 为盆地油气勘探提供古气候方面的证据支撑。研究发现番禺低隆起 PY28-X1 井、阳江凹陷 EP21-X2 井、惠州凹陷 HZ20-X3 井、开平凹陷 KP10-X4 井、KP11-X5 井 TOC 数据在始新世—渐新世世界线附近有明显下降趋势。孢粉研究表明, 白云凹陷 BY7-X6 井、BY13-X7 井和 LH29-X8 井的喜热孢粉即小栎粉含量在始新世—渐新世世界线附近有明显下降趋势, 渐新世珠海组出现的孢粉组合以温带乔木树种为主, 如桉木粉(*Alnipollenites*)、拟榛粉(*Momipites*)和松粉(*Pinuspollenites*), 说明渐新世气温明显下降。最终恢复了珠江口盆地始新世到渐新世古气候变化及古环境演化, 与中国近海主要生油气盆地古气候及全球气候变化进行对比分析, 表明珠江口盆地及其他中国近海主要盆地, 在始新世到渐新世世界线附近存在气温骤降, 是对 EOGM 冰期事件的响应。珠江口盆地气温骤降对应了 TOC 的下降, 指示了 EOGM 事件不利于烃源岩的生成。

[关键词] 始新世—渐新世; 古气候; EOGM; 珠江口盆地; 烃源岩

[分类号] P532

[文献标志码] A

收稿日期: 2024-01-19; 改回日期: 2024-11-06。 责任编辑: 魏 巍。

基金项目: 中海石油有限公司科研项目(YXKY-ZX012021); 国家自然科学基金面上项目(42272023)。

第一作者: 王月(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 沉积环境演化, E-mail: wangyue21@stu.cdut.edu.cn。

*通信作者: 常晓琳(1984—), 女, 副教授, 研究方向: 古海洋学, E-mail: changxiaolin10@cdut.edu.cn。

引用格式: 王月, 常晓琳, 陈莹, 等. 2026. 珠江口盆地始新世—渐新世古环境演化及对冰期事件的响应[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(3): 570—583.

Wang Y, Chang X L, Chen Y, et al., 2026. Eocene–Oligocene paleoenvironmental evolution and response to glacial events in the Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(3): 570—583.

Eocene–Oligocene paleoenvironmental evolution and response to glacial events in the Pearl River Mouth Basin

WANG Yue^{1,2}, CHANG Xiaolin^{1,2,3*}, CHEN Ying⁴, WANG Wenkai⁵, LIU Xinchun^{1,2},
ZHONG Hanting^{1,2}, WEI Bing^{1,2}, QI Xiaojing^{1,2}, HOU Mingcai^{1,2}

1. Key Laboratory of Deep-time Geography & Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Center for Scientific and Technological Archaeology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China;

5. College of Resources and Environment, Xichang University, Xichang 615000, China

Abstract: The Eocene–Oligocene climate experienced a temperature plunge event, which was global and accompanied by various significant environmental changes. As the formation of source rocks is often restricted by paleoclimate conditions, it is important for oil and gas exploration to ascertain the relationship between source rock formation and EOGM-type events. This research takes Eocene–Oligocene TOC data and changes of pollen and algae as the research content, to recover the Eocene–Oligocene paleoclimate changes in the Pearl River Mouth Basin. To this aim, we explore the coupling relationship between Eocene–Oligocene ice age events and basin climate, providing paleoclimatic evidence that supports oil and gas exploration in the basin. It was found that TOC data of the PY28-X1, EP21-X2, HZ20-X3, KP10-X4, and KP11-X5 wells have an obvious downward tendency near the Eocene–Oligocene boundary. A pollen study shows that the content of thermophilic pollen; i.e., *Quercoidites minutus*, in the BY7-X6, BY13-X7, and LH29-X8 wells had an obvious downward tendency near the Eocene–Oligocene boundary. The pollen assemblages in the Oligocene Zhuhai Formation are dominated by temperate tree species, such as *Alnipollenites*, *Momipites*, and *Pinuspollenites*, which indicate that the climate of the Oligocene was cold. Finally, the paleoclimate and paleoenvironmental evolution from the Eocene to Oligocene in the Pearl River Mouth Basin are recovered, which allowed us to conduct a comparative analysis of the paleoclimate of major oil-gas-producing basins in offshore China in relation to global climate changes. The results show that there was an abrupt temperature decline in the Pearl River Mouth Basin and other major basins near the Eocene–Oligocene boundary, likely due as a response to the EOGM event. This abrupt drop corresponds to a decrease in TOC, indicating that EOGM-type events are not conducive to the formation of source rocks.

Key words: Eocene–Oligocene; paleoclimate; EOGM; Pearl River Mouth Basin; source rocks

晚始新世—早渐新世界线处(EO)的全球温度骤降事件(Eocene–Oligocene glacial maximum, EOGM, 距今约33.7 Myr, 持续约0.4 Myr)是新生代以来最著名的温度变化事件之一(拓守廷和刘志飞, 2003)。这一气候事件伴随着各类显著的环境变化(肖国桥等, 2012): 全球深海同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 含量的增加(Shackleton and Kennett, 1975; Miller et al., 1991; Vonhof et al., 2000; Zachos et al., 2001; 拓守廷等, 2006; 靳华龙和万世明, 2019)、二氧化碳浓度的快速降低(Erez and Luz, 1983; Pagani et al., 2005, 2011)、碳酸盐补偿深度(CCD)急速下降(Berger, 1973; Peterson and Backman, 1990; Zachos et al., 1996)、促进大型哺乳动物及微体古

生物的演化(Meng and McKenna, 1998; Francis et al., 2007; Sun et al., 2014)等。

EOGM冰期事件在全球均有响应, 南大西洋DSDP522站点(Zachos et al., 1996)和1265站点(拓守廷等, 2006)的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 含量及CCD数据显示在EO界线处底层海水温度变化均超5.0℃。Janis(1993)发现北海地区在EO界线处温度变化超过10.0℃, 与EOGM事件进程相呼应。此外, Peterson and Backman(1990)以印度洋115段的5个深度样带为研究对象, 收集了超过2 000次的碳酸盐含量测试数据, 表明了印度洋在此期间CCD下降了约500 m, 而在赤道太平洋处, CCD则加深了1 km。大型哺乳动物演化在EO时期也

有显著变化, Meng and McKenna(1998)对中国和蒙古高原 33 个地方动物区系 88 科 210 属 454 种进行了分析,发现始新世的巨型异趾型优势动物区系突然被渐新世的小型啮齿动物、狐形动物优势区系所取代,表明始新世环境是温暖潮湿且植被丰富,而渐新世时期中等物种的缺乏则表明环境是凉爽干旱。欧洲和北美在晚始新世时期还出现了马科动物接近灭绝(Janis, 1993)及多种陆生哺乳动物群灭绝的现象(Stehli and Webb, 1985)。气温骤降同样也影响着植被变化,晚始新世—渐新世北美和西南亚有着明显的硬叶植物类群,极地阔叶落叶林消失(Janis, 1993)。除此之外,中国准噶尔盆地、西宁盆地和塔里木盆地晚始新世陆地植物群主要由阔叶及针叶林组成,然而到了早渐新世则以草本植物类群急剧增加为特征,环境由森林变为了森林—草原(Sun et al., 2014)。

珠江口盆地是中国南海北部最大的含油气盆地,截至 2022 年,珠江口盆地已探明油气地质储量接近 1.6×10^9 t(徐长贵等, 2023),展现出巨大的油气勘探潜能。盆地烃源岩的形成往往受到古气候条件的限制,探明烃源岩形成与古气候变化之间的相互关系及其机制对于油气勘探工作至关重要。EOGM 事件是否对中国近海海域烃源岩的形成产生影响至今不得而知。因此,本文通过对南海北部珠江口盆地总有机碳(TOC)、标志性孢粉与藻类的含量变化,以及浮游有孔虫分布等资料分析,在重新厘定恩平组时代归属的基础上,研究盆地始新世—渐新世古气候演化,厘清 EOGM 事件在珠江口盆地的响应特征,探究这一全球变冷事件与盆地烃源岩形成的耦合关系。

1 盆地地质概况

珠江口盆地位于南海北部广东大陆架中部,太平洋板块、印度洋板块和欧亚板块交汇处,北邻广东大陆,处于海南、台湾两岛之间。盆地面积大约 2.67×10^5 km²,总体上以 NE-SW 走向展布,呈现“南北分带、东西分块”的构造格局(高阳东等, 2021; 庞雄等, 2021)。传统观点认为珠江口盆地自北向南由 5 个构造单元组成,即“三隆夹两坳”的构造格局(施和生等, 2009)。但近年来随着油气勘探逐步向深水、超深水迈进,越来越多的学者将南部超深水区作为珠江口盆地的一部分,即“三隆三坳”,自北向南为北部隆起带、北部

坳陷带(包括珠三坳陷和珠一坳陷)、中央隆起带、南部坳陷带(包括珠二坳陷)和南部隆起带和珠四坳陷 6 个构造单元(陆蕾蕾等, 2021)(图 1)。

盆地古近系共经历了神狐运动(66 Ma)、珠琼运动一幕(56 Ma)、珠琼运动二幕(38 Ma)、南海运动(33.9 Ma)、白云运动(23.03 Ma)以及东沙运动(10 Ma)6 次区域性构造活动。纵向上,珠江口盆地地层从老到新分别为:神狐组、文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组及万山组。地层划分上,珠江口盆地文昌组划归为始新统,珠海组划归为渐新统(雷作洪和方青, 1990)的观点已被大多数人接受。但由于盆地是南海北部大陆架—陆坡上的一个大型新生代为主的沉积盆地,是在中生代复杂褶皱基底上形成的早期断陷、晚期拗陷的叠合盆地,发育 2 套不同的沉积层序,对于断—拗转换作用发生的时间,即恩平组的时代,因缺乏古生物标准分子及其他年代学证据,其归属问题一直颇有争议。历史上恩平组出现过 3 种划分方案:晚始新世,晚始新世—早渐新世及早渐新世,3 种划分方案一直未有定论,此争议导致该区域的 EOGM 事件研究层段的不统一。张丽丽等(2020)重新讨论了恩平组的时代划分问题,选择在云开低凸起中对植被、气候反应灵敏的化石类型或组分进行孢粉地层分析,还选择了对于沉积环境变化反应灵敏的藻类,一起与有孔虫分带进行对比,发现恩平组孢粉组合总体特征与文昌组更为相似,以反映温暖气候环境的三沟类、三孔沟类花粉为主,且组内含有典型的晚始新世有孔虫,说明 T80 即恩平组底界的形成时代一定为始新世,结合锆石年龄,其底界绝对地质年代为 $39 \pm$ Ma,并依据文昌组顶部碎屑锆石年龄测定、大洋钻探和深拖地磁资料等珠海组底部最古老微体化石年代证据,判定恩平组顶界年龄为 33~34 Myr。因此本文将恩平组时代归为晚始新世—早渐新世。

2 珠江口盆地沉积与古环境演化

新生代珠江口盆地是在中生代基底的基础上于 66.0 Ma 启动裂解,形成演化可分为 3 个阶段:古新世—早渐新世为断陷阶段,沉积了文昌组和恩平组;晚渐新世—早中新世为拗陷阶段,沉积了珠海组;中中新世—第四纪为被动陆缘稳定沉降阶段(陈长民等, 2003; 王福国等, 2008)。

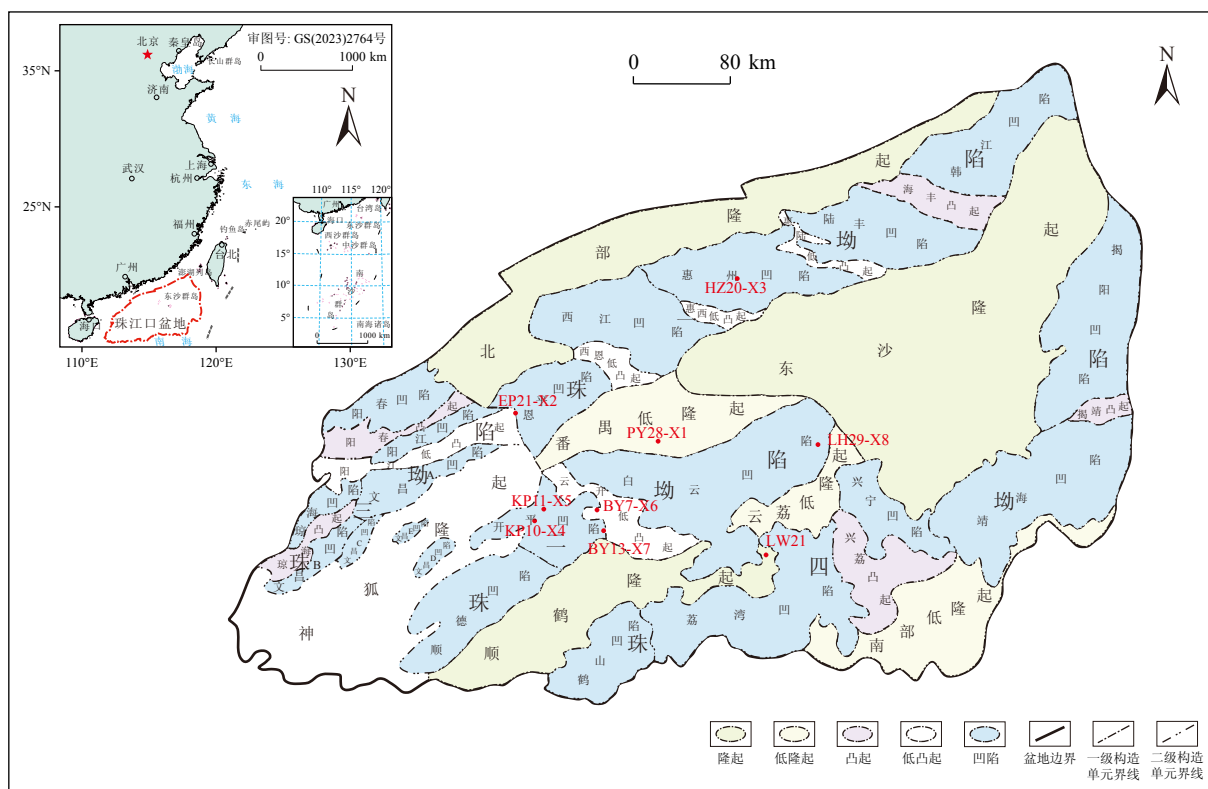


图1 珠江口盆地构造单元划分图(据张功成等, 2013 修改)

Fig. 1 Tectonic unit division map of the Pearl River Mouth Basin

2.1 早始新世(文昌组沉积期)

文昌组沉积时期盆地处于快速裂陷期, 盆内整体格局为隆凹相间(何家雄等, 2012), 发育多个沉积中心。东西向从陆丰凹陷至文昌凹陷, 南北向从白云凹陷至北部隆起, 形成了一系列互不连通的凹陷沉积, 珠一、珠三坳陷带北部形成较大的三角洲-滨浅湖-中深湖沉积体系, 南部隆起带形成规模较小的扇三角洲和湖泊沉积体系, 藻类勃发和细粒沉积物快速堆积, 有机质十分富集, 是主力烃源岩形成时期。

早始新世时期, 盆地整体为陆相沉积(张丽丽等, 2019), 古生物化石含量丰富, 整体孢粉组合为五边粉(*Pentapollenites* spp.)-小栎粉(*Quercoidites minutus*)组合, 其中被子植物花粉和淡水浮游藻类占优势地位, 裸子植物花粉中等, 蕨类孢子含量较少, 见零星有孔虫及钙质超微化石, 藻类中盘星藻和球藻含量较多, 说明文昌组时期多为生产力高且富营养化的淡水湖盆环境, 晚期部分凹陷零星出现海相沟鞭藻, 开始了海侵过程。

2.2 晚始新世(恩平组沉积期)

恩平组岩性主要为粗砂岩、砂岩, 细粒沉积含量较少, 并常见平行层理、板状交错层理等强

水动力作用的沉积构造。盆地珠一、珠三坳陷带北部区域发育大型沼泽-河流-三角洲沉积体系, 形成大面积的三角洲平原区, 珠一、珠三坳陷带南部则发育一系列沼泽-滨海-浅海体系, 盆地东南部则发育滨海、浅海及半深海等海相沉积。

晚始新世时期, 海水持续上涌, 南海北部海平面缓慢上升(于兴河等, 2016), 盆地由南向北接受海侵, 沉积相逐渐由陆相转为海相。微体古生物化石中, 被子植物花粉仍处于优势地位, 裸子植物花粉和蕨类孢子含量中等, 孢粉组合为倍什高腾粉(*Gothanipollis bassensis*)-柯氏双沟粉(*Dicolpopollis kockelii*)组合, 零星出现有孔虫与钙质超微化石, 与早始新世时期不同的是, 蕨类孢子含量增加, 淡水浮游藻类含量显著减少, 整体处于水体较浅的浅水湖盆环境, 部分区域海侵过程持续进行。

2.3 渐新世(恩平组顶部-珠海组沉积期)

早渐新世珠海组时期, 伴随着新南海的产生、洋壳的形成、扩张脊跃迁等一系列构造活动, 盆地从断陷阶段转变为拗陷阶段, 此时盆内沉降逐渐稳定, 无明显缺失, 沉积中心无变化, 北部隆起带区域已经被剥蚀。

陆缘地壳的冷却收缩导致北部陆缘整体发生朝南的倾斜沉降,盆地经历了逐步的海侵,作用有所增强,范围有所扩大,但总体海平面上升幅度仍然不大。微体古生物化石以植物孢粉为主,淡水藻类和海相藻类为辅,孢粉组合为桉木粉(*Alnipollenites* sp.)-双束松粉(*Pinuspollenites*)组合,藻类主要为盘星藻、球藻和海相沟鞭藻,有孔虫含量随凹陷水深不同而产生差异。

晚渐新世时期,南部隆起带、白云凹陷、开平凹陷、顺德凹陷以及云开低凸起均被海水淹没,盆地大环境已转换成海相,进入到了大陆边缘的海洋沉积环境。但沉积厚度普遍小于 1 km,只有白云凹陷处沉积了较厚地层,厚度达 1 400 m 以上,以砂岩沉积为主,夹杂少量泥岩,盆地整体以灰色粉砂质泥岩与灰白色细砾岩与砂质岩呈不等厚互层沉积。主要发育一套滨浅海相及三角洲相沉积(庞凌云, 2012),北部古珠江物源供给充分,大型三角洲相因此在北部斜坡区较为发育,夹杂零星扇三角洲沉积,盆地东南部大范围滨海、浅海和半深海等海相沉积,花粉主要为被子植物花粉和裸子植物花粉,孢粉组合仍然为桉木粉-双束松粉组合,海相沟鞭藻含量增加,显示温暖湿润的气候条件。

3 TOC 与孢粉组合特征

浮游动植物、细菌及高等植物等生产者,是水体古生产力的重要来源,古生产力同时又是有机质富集的控制机制(高阳东等, 2022),因此选取番禺低隆起 PY28-X1 井、恩平凹陷 EP21-X2 井、惠州凹陷 HZ20-X3 井和开平凹陷 KP10-X4 井、KP11-5 井进行总有机碳的分析(图 1)。

不同植物类型具有不同形态的孢粉,气候的变化影响着植被的演替,继而影响孢粉组合的不同。耐酸碱、耐高温高压等特性,使得孢粉成为研究地质历史时期古植被、古气候与古环境的最佳手段之一。

3.1 前期处理及测试方法

3.1.1 TOC 前期处理及测试方法

样品处理时,先将岩屑样品,用纯净水反复在 100 目的筛子中冲洗,然后晾干。按砂岩或泥岩进行挑样,把泥砂分别挑出。每个样品取 2 g 岩样,碎样成 100 目左右,后用稀盐酸分解掉无机碳,放入烘箱 60 ℃ 烘干后,使用美国 LECO 公司

CS230 碳硫分析仪对所有样品进行固态红外检测法观察,以 GB/T19145—2022 沉积岩中总有机碳测定(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2022)为检测依据,检测环境温度为 20 ℃,湿度为 55%RH,用于分析岩石有机碳。

本研究在番禺低隆起 PY28-X1 井共测试样品 22 个,样品为泥岩,井段范围为 3 100~3 750 m;在阳江凹陷 EP21-X2 井,共测试样品 18 个,样品岩性均为泥岩,井段范围为 2 650~3 915 m;在惠州凹陷 HZ20-X3 井,共测试样品 6 个,样品岩性都为泥岩,井段范围为 4 001~4 514 m;在开平凹陷 KP10-X4 井,共测试样品 113 个,样品岩性有灰色、褐灰色泥岩及灰色粉砂质泥岩,井段范围为 2 262~3 102 m;在开平凹陷 KP11-X5 井,共测试样品 18 个,全部为泥岩,样品井段范围为 2 317.5~3 822.0 m。

3.1.2 孢粉前期处理及测试方法

样品处理时,先将岩屑样品,用纯净水反复在 100 目的筛子中冲洗,然后晾干。按砂岩或泥岩进行挑样,把泥砂分别挑出。

样品处理采用中外各石油公司孢粉分析的常规方法,处理过程中不使用氧化剂。先用 HCl 去除碳酸钙质,再用 HF 去除硅质,经水洗筛选(筛布孔径 7 μm)或者重液(比重 2.10 左右)浮选后取得全部筛选或悬浮物质。将所得物质洗净后制片作透射光显微镜观察用,对样品中包括孢粉、浮游藻类在内所有的有机壁微体化石和有机屑进行鉴定和统计,鉴定所用显微镜为 LEICA(DMR)生物显微镜。单个样品以统计孢子、花粉化石 100 粒以上为获得具有统计意义孢粉组合的基本条件。

部分井微体古生物测试分析在中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油深圳实验中心完成。

云开低凸起 BY7-X6 井分析鉴定井段为 2 407~3 501 m,样品为井壁取心共 29 块,其中在 2 777~2 870 m 珠海组井段,共测试了样品 5 块,在 3 155~3 422 m 恩平组井段,共测试了样品 9 块。在开平凹陷 BY13-X7 井 2 200~2 670 m 共处理、鉴定样品 42 份,其中 39 份岩屑样品,3 份岩心样品,样品间距为 1~10 m。

3.2 TOC 变化

番禺低隆起 PY28-X1 井,恩平组到珠海组

TOC数据为0.13%~2.97%,平均值为0.80%,恩平组底部,TOC数据经历了一个小高峰,数值从0.24%达到1.97%,随后数值减小,稳定在0.60%左右,恩平组3480~3580 m范围内,TOC值到达最大,为2.97%,随后从恩平组顶部到珠海组开始减小,范围稳定在0.70%左右。

阳江凹陷EP21-X2井,文昌组到珠海组TOC数据为0.25%~4.21%,平均值为1.80%,TOC值在恩平组—文昌组时期大致维持在2.00%~2.50%水平,在文昌组3545 m处到达一个高峰值3.66%,随后骤降到1.85%,又上升到达测试样品的最大值4.21%,之后迅速降低至0.25%。向上沉积到达珠海组,TOC数值稳定在0.25%~0.75%,珠海组TOC整体数值水平较文昌组与恩平组已经处于低值。

惠州凹陷HZ20-X3井,恩平组到珠海组TOC数据为3.08%~6.03%,平均值为4.00%,TOC数值在恩平组底部从4.84%降低至3.15%,随后缓慢上升至3.73%,而后到达最大值6.03%,在恩平组4300~4400 m范围内,又从最大值6.03%下降至3.19%,最后一个样品数据降到测试最低值3.08%。

开平凹陷KP10-X4井,恩平组到珠海组TOC数据为0.28%~1.53%,平均值为0.65%,TOC数值

波动较大,恩平组内有多处TOC峰值,底部数值较大,为1.04%、1.05%,随后下降又上升至1.11%,继而从0.60%快速上升至最大值1.53%,而后又下降到0.43%,到了珠海组沉积期,组内整体上已经维持低值,范围在0.37%~0.75%。

开平凹陷KP11-X5井,文昌组到珠海组TOC数据为0.026%~2.910%,平均值为0.540%,文昌组到恩平组中部,TOC数值维持在较低值范围内,即0.022%~0.350%,均值为0.085%。在恩平组上部,TOC值迅速增加,数据先爬升到0.740%,随后上升到2.750%和2.910%,在恩平组2600~2700 m范围内,TOC数值从2.910%骤降至1.080%,下降了1.830%,沉积到珠海组时,TOC值已经下降到0.500%左右,始新世—渐新世时期,TOC数值在恩平组迅速上升又迅速下降(图2)。

3.3 孢粉化石分布特征

3.3.1 BY7-X6井孢粉组合特征

BY7-X6井孢粉、藻类化石组合特征如下:样品中裸子类松科花粉双囊粉(*Bisaccate pollen*)、被子类栗粉(*Cupuliferoipollenites* spp.)、桦科中拟榛粉(*Momipites* spp.)、桉木粉(*Alnipollenites* spp.)含量相对高,零星见到海岸红树林分子弗氏粉(*Florschuetzia* spp.),另还见少量小榆粉(*Ulmipoll-*

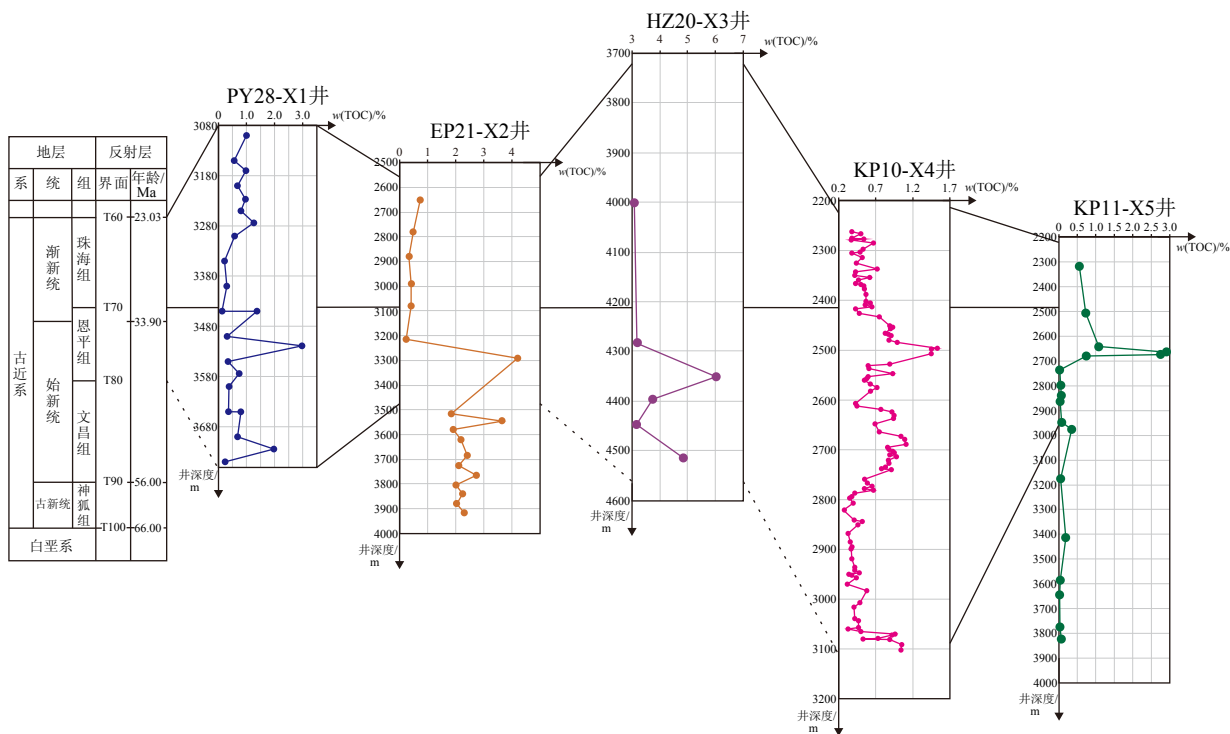


图2 珠江口盆地多口钻井总有机碳变化曲线

Fig. 2 Total organic carbon of multiple wells in the Pearl River Mouth Basin

enites minor)。于样品 2 836 m 中开始出现倍什高腾粉(*Gothanipollis bassensis*),藻类化石中淡水藻类(*Algae cysts*)及海相沟鞭藻均有较高含量。最值得注意的是柯氏双沟粉(*Dicolpopollis kockelii*),其数量占比在深度 3 099 m 与 3 111 m 之间显现了明显的由高变低变化,即由深度 3 111 m 处的 9.0%,至深度 3 099 m 处下降为 3.9%,从此持续低值。

在深度 3 155~3 422 m 恩平组井段,共测试了样品 9 块(图 3),样品中被子类棕榈科(*Palmae*)的柯氏双沟粉(*Dicolpopollis kockelii*)含量高,被子类倍什高腾粉(*Gothanipollis bassensis*)、小榆粉(*Ulmipollenites minor*)、克氏脊榆粉(*Ulmoideipites krempii*)较为连续出现,开始出现厚壁瘤纹三孔沟粉(*Verrustricolporites pachydermus*)并于 3 405 m 见一粒五边粉(*Pentapollenites* sp.),零星见到海岸红树林分子弗氏粉(*Florschuetzia* sp.),藻类化石以淡水藻类为主。同一深度附近,裸子植物花粉和蕨类孢子含量的变化更加明显,即深度 3 129 m 以下裸子植物花粉含量较低,数量占比为 22.8%~29.0%,而该

深度以上其数量占比为 20.6%~45.0%,且多数样品达到和超过 35.0%;蕨类孢子含量的变化与之相反,在深度 3 129 m 以下数量占比为 19.8%~32.7%,而该深度以上其含量略有下降,为 11.8%~29.0%。

3.3.2 BY13-X7 井孢粉组合特征

在 BY13-X7 井所分析的 42 份样品中,27 份样品包含孢粉、藻类化石,可获具有统计意义的孢粉与藻类组合(图 4)。而其余的 15 份样品中孢粉、藻类化石稀少或贫乏,主要分布在井深 2 640~2 670 m 层段、2 400~2 463 m 层段和 2 215~2 245 m 层段。

本次分析共鉴定得孢粉、藻类化石种类 115 个,其中蕨类孢子种类 17 个、裸子植物花粉种类 9 个、被子植物花粉种类 66 个、浮游藻类种类 23 个。孢粉中,被子植物花粉数量占比最高,为 44.0%~75.5%(占孢粉、藻类,下同);数量占比明显较低的蕨类孢子和裸子植物花粉分别为 8.5%~33.6% 和 4.1%~26.5%。

深度 2 532~2 631 m 井段孢粉中常绿栎类粉最多,数量占比为 16.0%~33.0%(占孢粉,下

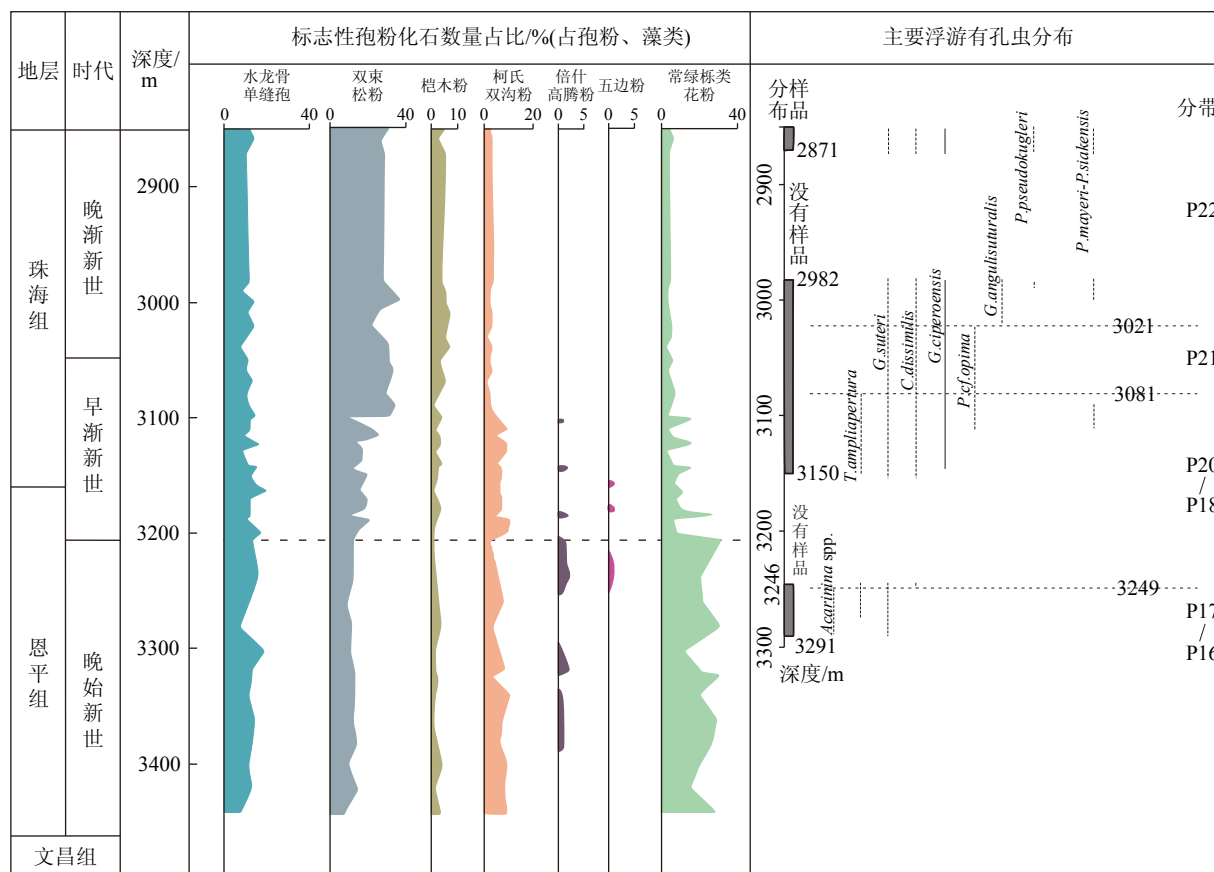


图 3 珠江口盆地 BY7-X6 井孢粉变化
Fig. 3 Palynology changes of Well BY7-X6 in the Pearl River Mouth Basin

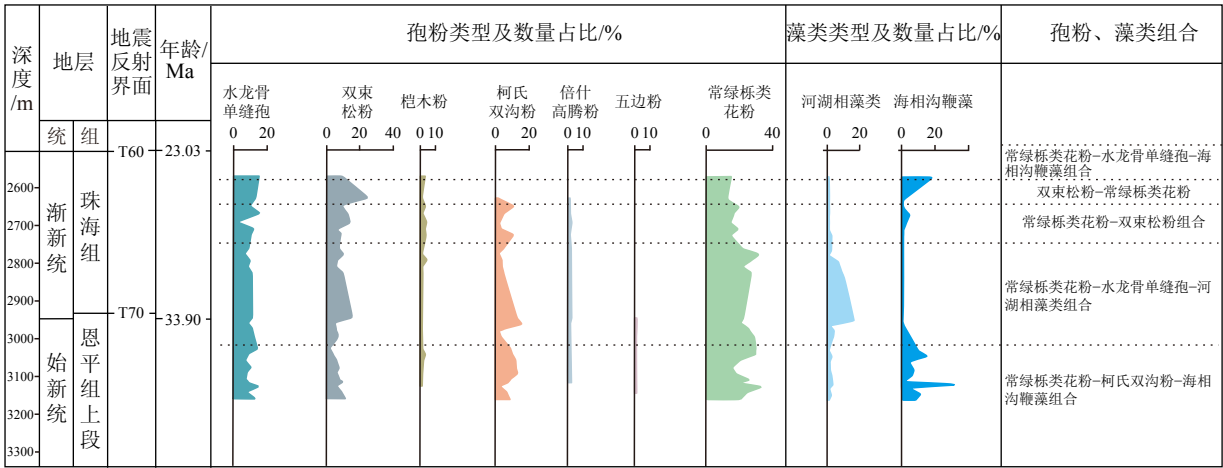


图 4 珠江口盆地 BY13-X7 井孢粉变化
Fig. 4 Palynology changes of Well BY13-X7 in the Pearl River Mouth Basin

同)。常见类型为双束松粉、破隙杉粉、柯氏双沟粉、落叶栎类花粉、栗粉、水龙骨单缝孢、平瘤水龙骨孢等。其中数量占比尤其显著的是柯氏双沟粉、水龙骨单缝孢和平瘤水龙骨孢,分别为 3.0%~13.0%、6.9%~15.0% 和 3.0%~17.0%,三者数量占比变化大,整体数量占比高于珠海组时期。浮游藻类中海相沟鞭藻(数量占比为 2.0%~30.8%,占孢粉、藻类,下同)普遍多于河湖相藻类(数量占比为 0~3.8%)。前者主要包含 *Cleistosphaeridium diversisposum*、*Cleistosphaeridium* spp.、*Cordosphaeridium* spp.、*Hystriocholpoma* spp.、*Lingulodinium machaerophorum*、*Operculodinium* spp.、*Polysphaeridium subtile*、*Polysphaeridium zoharyi*、*Systematophora* spp.等;后者主要包含球藻类、盘星藻和环纹藻。珠海组常绿栎类粉含量最多,数量占比为 13.0%~31.7%。较常见的类型是双束

松粉、破隙杉粉、柯氏双沟粉、枫香粉、水龙骨单缝孢、平瘤水龙骨孢等。其中数量占比较高的的是水龙骨单缝孢和双束松粉,分别为 2.9%~15.7% 和 4.9%~15.5%。

3.3.3 LH29-X8 井孢粉组合特征

在 LH29-X8 井处,双束松粉在 2 500~2 850 m 范围内,数量占比较高,为 23.0%~48.0%(占孢粉),柯氏双沟粉在 2 850~3 050 m 范围内,数量占比为 5%~10%(占孢粉)。藻类中,海相沟鞭藻在始新世数量占比较多,为 32%~52%(占藻类),在深度约 2 970 m 井段处海相沟鞭藻数量占比短时间内快速降低,后又升高至 28%(图 5)。

4 讨论

4.1 始新世—渐新世古气候演化特征

古气候的变化对沉积物的组成和供应、古生

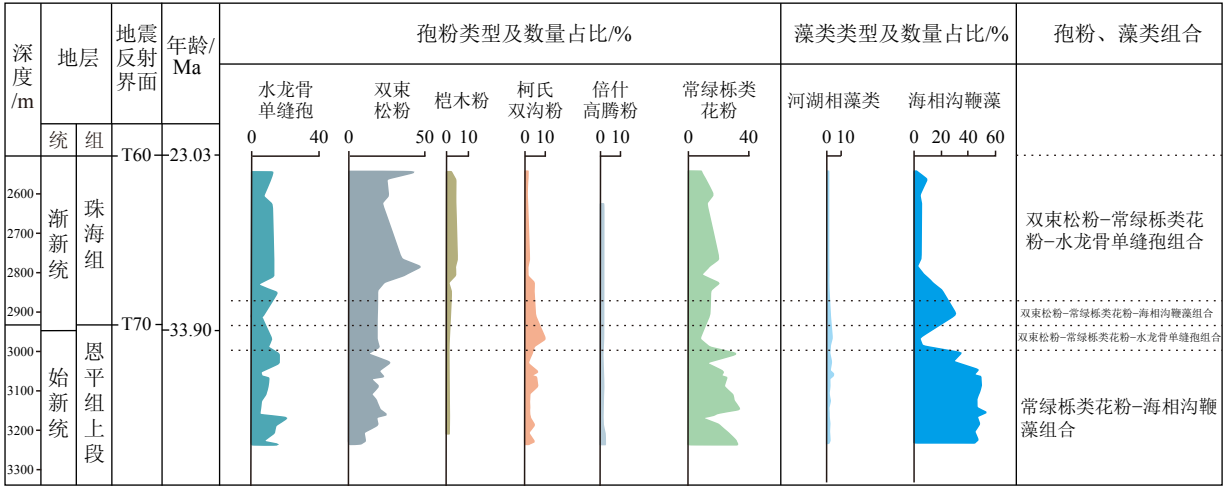


图 5 珠江口盆地 LH29-X8 井孢粉变化
Fig. 5 Palynology changes of Well LH29-X8 in the Pearl River Mouth Basin

产力、生物的类型、生物的丰度及分异度等有着深远的影响,并间接影响有机质的富集与保存(Han et al., 2024)。TOC 的变化可以间接反映盆地的沉积环境及古气候变化,而微体古生物化石的类别和含量也可以重建古环境的演化过程,其中孢粉化石反映了沿岸的植物群落特征,不仅能够对比地层,还是重建地质历史时期古气候、古地理及古环境的重要指标之一(郝诒纯和茅绍智, 1989; 王伟铭, 2009)。因此,珠江口盆地沉积记录中 TOC 含量变化及孢粉等微体古生物组合记录了始新世—渐新世盆地沉积环境及气候的演变过程。

文昌组沉积期,钻井岩性、沉积构造、电测曲线等证据显示盆地沉积以陆相湖泊—三角洲沉积体系为主,沉积物中古生物以陆相被子植物、裸子植物孢粉、高含量的淡水藻类化石为主(图 6)。盆地喜热的常绿栎类孢粉占优势,裸子植物中,分布于热带、亚热带地区的松科植物花粉如双束松粉占主体地位。以孢粉恢复的古植被显示,文昌期常绿、落叶阔叶林及灌木种类居多,生长环境多为山地,总体气候特征温暖干燥。据珠一、珠二坳陷多口钻井古生物分析显示文昌组藻类化石以生活于富营养的淡水湖泊的盘星藻和球藻为主(张丽丽等, 2019)。虽然研究中文昌组有机质丰度中等,TOC 含量平均值及最高值均低于恩平组,但文昌组中高丰度的盘星藻和球藻组合说明文昌期的湖盆为水体较深、富营养且

表层生产力水平较高的淡水湖。

恩平组沉积期,盆地北部的大部分地区仍以陆相浅水湖泊—河流三角洲沉积体系为主,沉积物中古生物化石以陆相孢粉为主,淡水藻类化石明显少于文昌组沉积期。而盆地南部的荔湾凹陷在海侵作用之下此时以海相陆架沉积为主,地层中可见海相有孔虫及沟鞭藻化石。珠二坳陷云开低凸起 BY7-X6 井在此时期,占孢粉、藻类最多的种类为喜热类孢粉常绿栎类花粉,但其在始新世—渐新世界线附近有明显下降趋势(图 3),裸子植物中,油杉属、金钱松属、雪松属、银杉属等松科植物花粉分布于亚热带地区,晚期这些植物逐渐被耐寒的落叶松属、云杉属和冷杉属树种所替代。开平凹陷 BY13-X7 井恩平组井段包含的孢粉组合为常绿栎类花粉—柯氏双沟粉—海相沟鞭藻组合与常绿栎类花粉—水龙骨单缝孢—河湖相藻类组合(图 4)。其中水龙骨单缝孢含量变化不大,喜热的三沟、三孔沟类花粉多,小栎粉、小亨氏栎粉较高含量。多见紫萁孢、平瘤水龙骨孢、水龙骨单缝孢、粗网孢等花粉。白云凹陷 LH29-X8 井中,水龙骨单缝孢总体上含量变化不大,恩平组沉积期常绿栎类花粉、倍什高腾粉和柯氏双沟粉含量较多。总的来说,恩平组沉积期常绿阔叶植被和喜湿植被繁盛,气候为温暖湿润,但向渐新世过渡,喜热类被子植物逐渐被耐寒类裸子植物替代,气候转冷。恩平期多口钻井 TOC 值存在较大波动,该期主体温暖湿润的

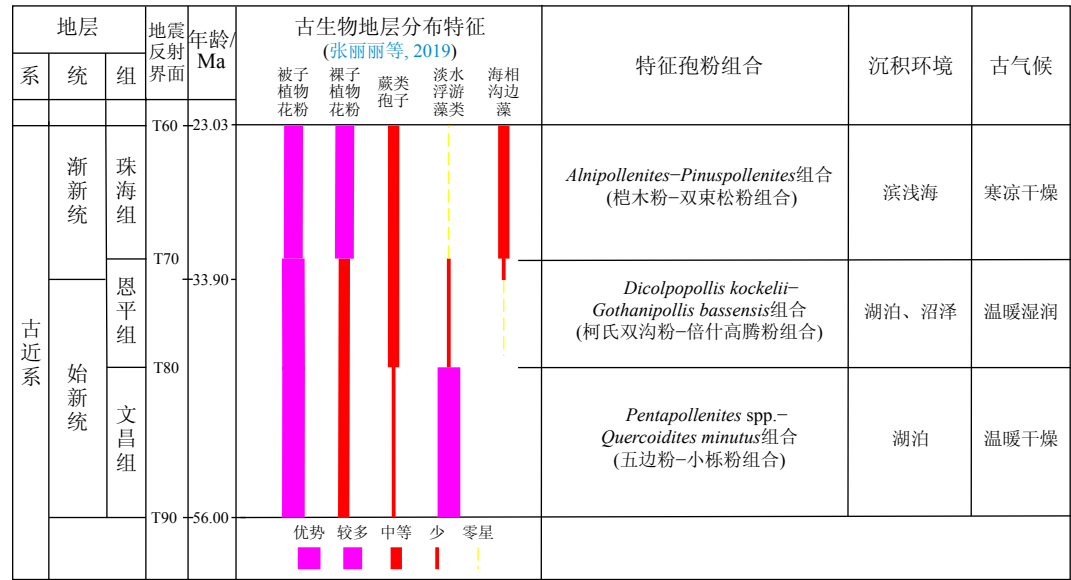


图 6 珠江口盆地气候演化(文昌组资料引自雷作淇, 1985)
Fig. 6 Climate evolution in the Pearl River Mouth Basin

气候有利于生产力的提高及有机质富集,研究钻井揭示的 TOC 含量升高可能与湿润气候下陆源营养物质的注入及初级生产力提高有关。而后在始新世末期研究的 5 口钻井 TOC 含量全都出现了不同程度的迅速降低,如番禺低隆起 PY28-X1 井 TOC 值降低了 2.47%、恩平凹陷 EP21-X2 井 TOC 值骤降约 4%、惠州凹陷 HZ20-X3 井下降 2.9%、开平凹陷 KP-X2 井下降 1.9%。不同凹陷在此时段内有机质丰度的同时下降与孢粉组合的演替共同指示了此时期应发生了气温骤降。

珠海组沉积期,盆地整体接受海侵,沉积以滨浅海为主,化石组合以海相沟鞭藻、有孔虫及周边陆相孢粉为主。云开低凸起 BY7-X6 井中,双束松粉与耐寒裸子植物花粉在渐新世时期含量逐渐增多,该时期占优势的双束松粉与桉木粉,对应着山地针叶植物,指示气温较低。开平凹陷 BY13-X7 井常绿栎类花粉含量较多但持续下降,双束松粉、水龙骨单缝孢及海相沟鞭藻占优势。白云凹陷 LH29-X8 井的常绿栎类花粉、倍什高腾粉和柯氏双沟粉含量在始新世—渐新世界线附近最低,而耐寒的桉木粉及双束松粉纵向上增多,指示出气温持续降低,且湿润度降低(图 5)。总体上珠海组出现的孢粉组合以温带乔木树种为主,说明渐新世已气候寒冷,温带植物群大量由北方向南方迁移(雷作淇和方青, 1990; 李振雄和马俊荣, 1992; 吴国瑄等, 2003; 赵鹏肖, 2020)。此时期番禺低隆起 PY28-X1 井、阳江凹陷 EP21-X2 井、惠州凹陷 HZ20-X3 井和开平凹陷 KP10-X4 井、KP11-X5 井 5 处 TOC 含量均较低且无明显波动,可能指示了珠海组沉积期在气温下降及海侵的双重影响下,盆地生产力持续较低。

珠江口盆地孢粉、藻类分析表明,文昌组孢粉为五边粉(*Pentapollenites* spp.)—小栎粉(*Quercoidites minutus*)组合,气候温暖湿润,植被较为繁盛。恩平组沉积期孢粉变为倍什高腾粉(*Gothanipollis bassensis*)—柯氏双沟粉(*Dicolpopollis kockelii*)组合,常绿栎类花粉开始显著减少,意味着原本占优势的常绿阔叶植物,不再占主导地位。向上沉积,桉木粉和双束松粉等亚热带—温带成分数量增加,珠海组孢粉已经变为桉木粉(*Alnipollenites* sp.)—双束松粉(*Pinuspollenites*)组合,珠海组中的桦科(桉木粉、拟榛粉和苗榆粉属)植物,是典型的图

尔盖植物群(也称温带植物群)的主要分子,图尔盖植物群的典型分子能够富集于热带地区珠海组中,指示出了珠江口盆地史前曾有过大范围(全球性的)降温作用,这与始新世到渐新世时期,气候由温暖湿润向寒冷干燥过渡情况十分吻合(图 6)。唐松等(2009)在南海北部 ODP1148 站钻探的孢粉结果显示,珠江口盆地渐新世存在上、下 2 个不同的孢粉序列,下部恩平组特征为高含量双沟粉,上部珠海组特征为高含量桉木粉。李燕等(2016)对珠江口盆地恩平组与珠海组进行孢粉分析,结果显示珠海组孢粉以温带针叶树花粉为主,恩平组—珠海组沉积时期气候曾发生重大变化。

4.2 气候对比与 EOGM 冰期事件的识别

如上所述,珠江口盆地孢粉、藻类组合、有机质丰度等证据表明,在始新世—渐新世转换时期气候出现明显的变冷趋势。而古气候的变化应是大范围乃至全球性的,与中国近海主要生油气盆地以及全球气候指标进行对比,有助于识别 EOGM 冰期事件在珠江口盆地的响应。

4.2.1 与中国近海重要盆地气候变化对比

中国近海海域主要生油气盆地以渤海湾盆地、珠江口盆地、北部湾盆地及琼东南盆地为主。孢粉数据显示,各盆地古新世—始新世热带、亚热带植物孢粉含量普遍高于温带植物,始新世多为温暖湿润气候(常吟善等, 2019; 甘军等, 2019; 赵鹏肖, 2020; 李君等, 2020; 黄侠超等, 2024)。始新世与渐新世界线附近,各盆地纵向上都出现气温下降趋势,渐新世变为寒冷干燥气候(图 7),通过近海盆地古气候对比,进一步证明了珠江口盆地及中国近海各盆地对 EOGM 冰期事件的响应,指示了 EOGM 事件不利于烃源岩的生成。但始新世温暖(炎热)的气候为生物的繁盛提供了有利的环境条件,结合地堑地垒等构造共同为盆地提供了良好的烃源岩发育环境。

4.2.2 珠江口盆地与全球气候变化对比

通过珠江口盆地各个时期的主要孢粉组合演化与 TOC 数据变化,恢复了珠江口盆地始新世和渐新世的古气候变化过程(图 8),大致可以将盆地始新世—渐新世气候划分为 3 个阶段,即增温期、降温期和低温期。

(1)增温期:始新世早期。气温稳定上升,盆地喜热的常绿栎类孢粉较多,裸子植物中,分布

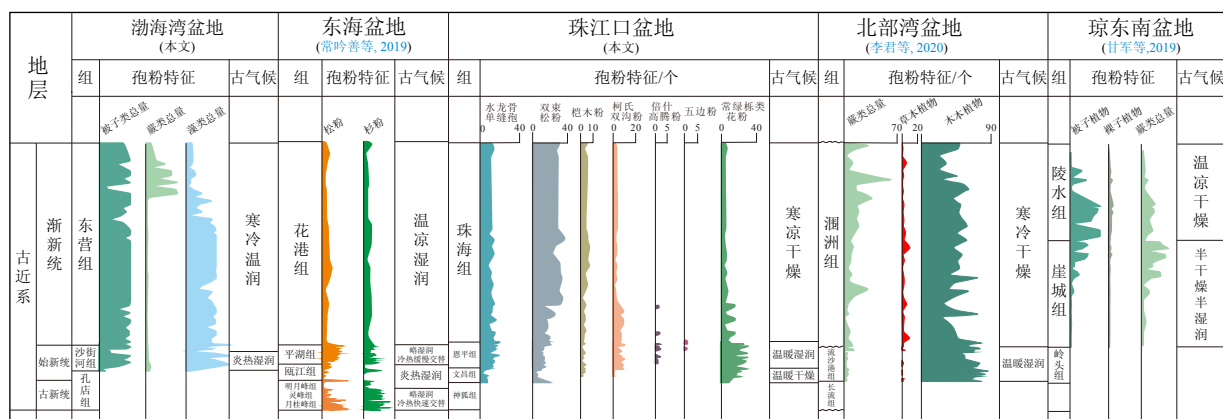


图 7 中国近海各盆地孢粉、古气候对比图

Fig. 7 Comparison of palynology and paleoclimate in basins in coastal China

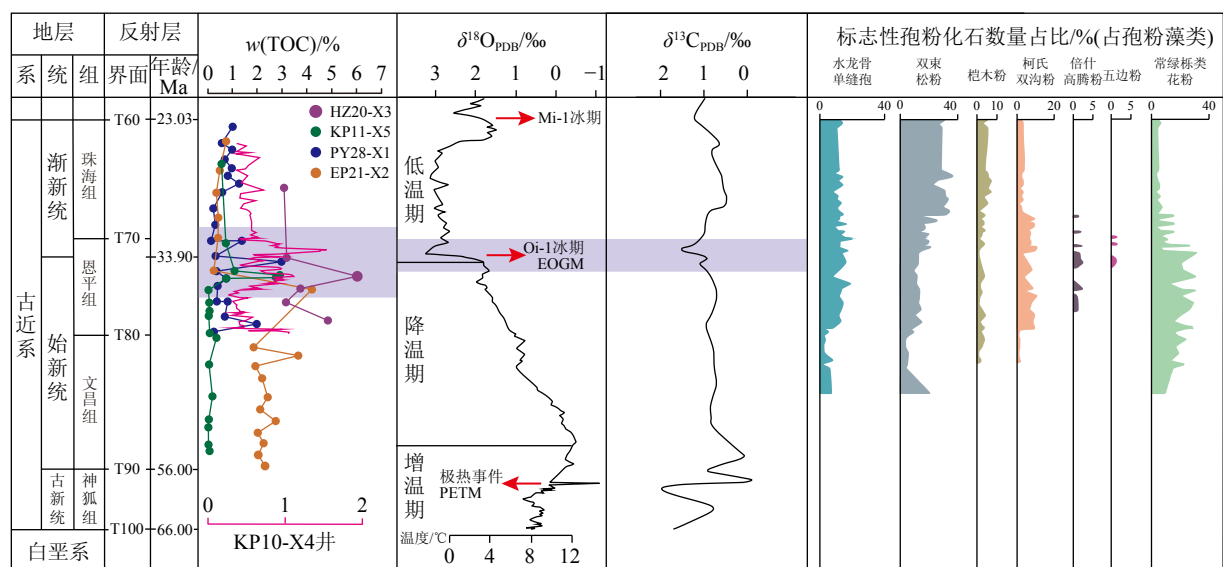


图 8 珠江口盆地气候演化与全球气候变化对比(碳氧同位素数据引自 Zachos et al., 2001, 文昌组孢粉数据引自赵鹏肖, 2020)

Fig. 8 Comparison of climate evolution in the Pearl River Estuary Basin with changes in the global climate

于热带、亚热带地区的松科植物花粉占主体地位。以孢粉恢复的古植被显示,常绿、落叶阔叶林及灌木种类居多,生长环境多为山地,后阔叶林和沼泽湿地面积开始减少,针叶林面积开始增加(张一勇, 1995)。盆地在古新世与始新世界线附近经历 PETM(Paleocene–Eocene thermal maximum)极热事件(短时期内,全球深海温度上升了 5~6℃,大于 1.0‰碳氧同位素偏移)(Zachos et al., 2001),全球海平面稳定上升后下降。

(2)降温期:始新世中晚期—渐新世早期。全球气温经历峰值后,开始稳定下降,在始新世与渐新世界线附近经历 EOGM 冰期事件。始新世中期,盆地仍然以热带、亚热带植物孢粉为主,常绿、落叶阔叶林由多数逐步减少,变为了

喜湿的热带、亚热带植物占主要地位,气候温暖湿润,但晚期已经有气温强烈下降趋势,喜寒植物逐步增多。全球海平面在始新世晚期轻微波动,但整体呈上升趋势(常吟善等, 2019)。

(3)低温期:渐新世。喜寒植物孢粉,如双束松粉,在此时期已经占主体地位,古植被开始以温带针叶林、水生蕨类为主,表明温度降低,相较于上一气候阶段,此时盆地已经变成凉爽且干燥了,与全球气温在此期间变化相吻合。盆地海侵作用逐渐增强,范围逐渐扩大(刘志峰等, 2013),全球海平面持续上升。

5 结论

(1)珠江口盆地始新世—渐新世出现气温骤

降现象。孢粉分析表明,喜热的常绿栎类树种在始新世—渐新世界线附近数量大幅下降,耐寒的双束松粉纵向上大幅增多。TOC数据显示,多口钻井恩平期 TOC 值存在较大波动,恩平早中期 TOC 含量升高可能与湿润气候下陆源营养物质的注入及初级生产力提高有关,晚期 TOC 含量全都出现了不同程度地迅速降低。始新世—渐新世孢粉组合的演替及有机质丰度的同时下降共同指示了此时期应发生了气温骤降。盆地古气候变化趋势也可与渤海湾盆地、东海盆地、北部湾盆地与琼东南盆地等中国近海主要生油气盆地进行良好对比。

(2)EOGM 冰期事件在珠江口盆地存在响应。EOGM 冰期事件具有全球性,在南海北部珠江口盆地,根据孢粉组合变化及 TOC 数据,恢复其始新世—渐新世古气候及古环境演化,与全球气候变化进行对比分析,揭示了 EOGM 冰期事件在珠江口盆地存在响应。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

- 常吟善,赵洪,覃军,等,2019. 古近纪气候变化在东海盆地内的化石记录[J]. 沉积学报, 37(2): 320—329.
- Chang Y S, Zhao H, Qin J, et al., 2019. Sedimentary response to paleoclimate change in the East China Sea Shelf Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(2): 320—329. (in Chinese)
- 陈长民,施和生,许仕策,等,2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社.
- 甘军,张迎朝,梁刚,等,2019. 琼东南盆地深水区烃源岩沉积模式及差异热演化[J]. 地球科学, 44(8): 2627—2635.
- Gan J, Zhang Y Z, Liang G, et al., 2019. Deposition pattern and differential thermal evolution of source rocks, deep water area of Qiongdongnan Basin[J]. *Earth Science*, 44(8): 2627—2635. (in Chinese)
- 高阳东,林鹤鸣,汪旭东,等,2022. 珠江口盆地陆丰凹陷文昌组沉积地球化学特征及古环境意义[J]. 现代地质, 36(1): 118—129.
- Gao Y D, Lin H M, Wang X D, et al., 2022. Geochemical constraints on the sedimentary environment of Wenchang Formation in Pearl River Mouth Basin and its paleoenvironmental implications[J]. *Geoscience*, 36(1): 118—129. (in Chinese)
- 高阳东,张向涛,彭光荣,等,2021. 珠江口盆地成盆—成烃—成藏: 代序[J]. 大地构造与成矿学, 45(1): 1—5.
- Gao Y D, Zhang X T, Peng G R, et al., 2021. Basin formation, hydrocarbon maturation and oil accumulation of the Pearl River Mouth Basin: preface[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1): 1—5. (in Chinese)
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会, 2022. 沉积岩中总有机碳测定: GB/T 19145—2022[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 郝诒纯,茅绍智,1989. 微体古生物学教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 何家雄,陈胜红,马文宏,等,2012. 南海东北部珠江口盆地成演化与油气运聚成藏规律[J]. 中国地质, 39(1): 106—118.
- He J X, Chen S H, Ma W H, et al., 2012. The evolution, migration and accumulation regularity of oil and gas in Zhujiangkou Basin, northeastern South China Sea[J]. *Geology in China*, 39(1): 106—118. (in Chinese)
- 黄侠超,钟瀚霆,曹海洋,等,2024. 北部湾盆地始新世古环境演化及沉积学意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(2): 193—209.
- Huang X C, Zhong H T, Cao H Y, et al., 2024. Paleoenvironmental evolution and sedimentological significance of the Beibuwan Basin in the Eocene[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(2): 193—209. (in Chinese)
- 新华龙,万世明,2019. 新生代气候变冷机制研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(5): 71—86.
- Jin H L, Wan S M, 2019. The mechanism of Cenozoic cooling: a review of research progress[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(5): 71—86. (in Chinese)
- 雷作淇,1985. 珠江口盆地第三纪孢粉组合及其意义[J]. 植物学报, 27(1): 94—105.
- Lei Z Q, 1985. Tertiary sporopollen assemblage of Zhujiangkou (Pearl River North) Basin and its stratigraphical significance[J]. *Acta Botanica Sinica*, 27(1): 94—105. (in Chinese)
- 雷作淇,方青,1990. 珠江口盆地上、下第三系划分[J]. 中国海上油气(地质), 4(4): 5—11.
- Lei Z Q, Fang Q, 1990. Pick-up of boundary between Paleogene & Neogene in Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 4(4): 5—11. (in Chinese)
- 李君,王任,覃军干,等,2020. 北部湾盆地涠西南凹陷古、新近系古生物记录及古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 40(2): 29—36.
- Li J, Wang R, Qin J G, et al., 2020. Paleogene—Neogene micropaleontological records of the Weixinan Depression, Beibuwan Basin and their paleoenvironmental significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(2): 29—36. (in Chinese)
- 李燕,邓运华,李友川,等,2016. 珠江口盆地河流—三角洲体系

- 煤系烃源岩发育特征及有利相带[J]. 东北石油大学学报, 40(1): 62—71.
- Li Y, Deng Y H, Li Y C, et al., 2016. Characteristics and favorable facies of coal-measure source rocks in river-delta system of Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 40(1): 62—71. (in Chinese)
- 李振雄, 马俊荣, 1992. 珠江口盆地恩平组孢粉组合及其地质时代[J]. 石油学报, 13(2): 258—267.
- Li Z X, Ma J R, 1992. Polynological assemblages of Enping Formation in the Pearl River Mouth[J]. Acta Petrolei Sinica, 13(2): 258—267. (in Chinese)
- 刘志峰, 刘志鹏, 肖伶俐, 等, 2013. 珠三坳陷北部珠海组-韩江组沉积演化及储盖组合[J]. 海洋地质前沿, 29(9): 25—31.
- Liu Z F, Liu Z P, Xiao L L, et al., 2013. Facies evolution and reservoir-seal assemblages in the Zhuhai and Hanjiang Formations, north of Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 29(9): 25—31. (in Chinese)
- 陆蕾蕾, 姜素华, 索艳慧, 等, 2021. 南海珠江口盆地走滑构造与油气成藏机制[J]. 大地构造与成矿学, 45(1): 108—122.
- Lu L L, Jiang S H, Suo Y H, et al., 2021. Relationship between strike-slip structure and hydrocarbon accumulation in the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 45(1): 108—122. (in Chinese)
- 庞凌云, 2012. 南海北部边缘盆地古近系沉积体系特征、展布及油气分布关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- Pang L Y, 2012. The characteristics and extension of depositional system and their relationship with hydrocarbon distribution in Paleogene in north margin basins, South China Sea[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese)
- 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等, 2021. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 48(5): 1069—1080.
- Pang X, Zheng J Y, Mei L F, et al., 2021. Characteristics and origin of continental marginal fault depressions under the background of preexisting subduction continental margin, northern South China Sea, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(5): 1069—1080. (in Chinese)
- 施和生, 秦成岗, 张忠涛, 等, 2009. 珠江口盆地白云凹陷北坡—番禺低隆起油气复合输导体系探讨[J]. 中国海上油气, 21(6): 361—366.
- Shi H S, Qin C G, Zhang Z T, et al., 2009. A discussion on the complex hydrocarbon transport system in the north slope of Baiyun sag-Panyu low uplift, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 21(6): 361—366. (in Chinese)
- 唐松, 邵磊, 吴国瑄, 等, 2009. 南海北部 ODP 1148 站沉积物特征及其来源[J]. 海洋地质动态, 25(7): 7—13.
- 拓守廷, 刘志飞, 2003. 始新世—渐新世世界线的全球气候事件: 从“温室”到“冰室”[J]. 地球科学进展, 18(5): 691—696.
- Tuo S T, Liu Z F, 2003. Global climate event at the Eocene—Oligocene transition: from greenhouse to icehouse[J]. Advances in Earth Science, 18(5): 691—696. (in Chinese)
- 拓守廷, 刘志飞, 赵泉鸿, 等, 2006. 渐新世初大冰期事件: 南大西洋 ODP1265 站的记录[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 151—158.
- Tuo S T, Liu Z F, Zhao Q H, et al., 2006. The earliest Oligocene glacial maximum: records from ODP Site 1265, South Atlantic[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 31(2): 151—158. (in Chinese)
- 王福国, 梅廉夫, 施和生, 等, 2008. 珠江口盆地珠一坳陷古近系构造样式分析[J]. 大地构造与成矿学, 32(4): 448—454.
- Wang F G, Mei L F, Shi H S, et al., 2008. Structural styles of Paleogene in Zhu I Depression of Pearl River Mouth Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(4): 448—454. (in Chinese)
- 王伟铭, 2009. 中国孢粉学的研究进展与展望[J]. 古生物学报, 48(3): 338—346.
- Wang W M, 2009. Progress and prospect of studies on palynology in China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 338—346. (in Chinese)
- 吴国瑄, 覃军干, 茅绍智, 2003. 南海深海相渐新统孢粉记录[J]. 科学通报, 48(17): 1868—1871.
- 肖国桥, 张仲石, 姚政权, 2012. 始新世—渐新世气候转变研究进展[J]. 地质论评, 58(1): 91—105.
- Xiao G Q, Zhang Z S, Yao Z Q, 2012. The Eocene—Oligocene climate transition: review of recent progress[J]. Geological Review, 58(1): 91—105. (in Chinese)
- 徐长贵, 赖维成, 张新涛, 等, 2023. 中国海油气勘探新进展与未来勘探思考[J]. 中国海上油气, 35(2): 1—12.
- Xu C G, Lai W C, Zhang X T, et al., 2023. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 35(2): 1—12. (in Chinese)
- 于兴河, 李胜利, 乔亚蓉, 等, 2016. 南海北部新生代海陆变迁与不同盆地的沉积充填响应[J]. 古地理学报, 18(3): 349—366.
- Yu X H, Li S L, Qiao Y R, et al., 2016. The Cenozoic changes of seas and lands and sedimentary filling responses of different basins in northern South China Sea[J]. Journal of Palaeogeography, 18(3): 349—366. (in Chinese)
- 张功成, 谢晓军, 王万银, 等, 2013. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. 石油学报, 34(4): 611—627.
- Zhang G C, Xie X J, Wang W Y, et al., 2013. Tectonic types of petroliferous basins and its exploration potential in the South

- China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34(4): 611—627. (in Chinese)
- 张丽丽, 舒梁锋, 冯轩, 等, 2020. 再论珠江口盆地恩平组时代归属[J]. *中国海上油气*, 32(5): 9—18.
- Zhang L L, Shu L F, Feng X, et al., 2020. Further discussion on the age assignment of Enping Formation in the Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 32(5): 9—18. (in Chinese)
- 张丽丽, 舒誉, 蔡国富, 等, 2019. 珠江口盆地东部始新世—渐新世沉积环境演变及对烃源条件的影响[J]. *石油学报*, 40(增刊1): 153—165.
- Zhang L L, Shu Y, Cai G F, et al., 2019. Eocene–Oligocene sedimentary environment evolution and its impact on hydrocarbon source conditions in eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 153—165. (in Chinese)
- 张一勇, 1995. 中国早第三纪孢粉植物群纲要[J]. *古生物学报*, 34(2): 212—227.
- Zhang Y Y, 1995. Outline of Palaeogene palynofloras of China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 34(2): 212—227. (in Chinese)
- 赵鹏肖, 2020. 珠江口盆地 HD1 井孢粉相及其沉积环境的研究[J]. *西部探矿工程*, 32(4): 45—48.
- Berger W H, 1973. Deep-sea carbonates: evidence for a coccolith lysocline[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 20(10): 917—921.
- Erez J, Luz B, 1983. Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(6): 1025—1031.
- Francis J E, Ashworth A, Cantrill D J, et al., 2007. 100 million years of Antarctic climate evolution: evidence from fossil plants[R]. Washington: National Academies Press: 19—28.
- Han S B, Du X, He Y F, et al., 2024. Sedimentary paleoenvironment and organic matter enrichment characteristics of lacustrine Shahezi shale in Songliao Basin: insights from the continental scientific drilling[J]. *ACS Omega*, 9(19): 21097—21115.
- Janis C M, 1993. Tertiary mammal evolution in the context of changing climates, vegetation, and tectonic events[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 24: 467—500.
- Meng J, McKenna M C, 1998. Faunal turnovers of Palaeogene mammals from the Mongolian Plateau[J]. *Nature*, 394(6691): 364—367.
- Miller K G, Wright J D, Fairbanks R G, 1991. Unlocking the Ice House: Oligocene–Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B4): 6829—6848.
- Pagani M, Huber M, Liu Z H, et al., 2011. The role of carbon dioxide during the onset of Antarctic glaciation[J]. *Science*, 334: 1261—1264.
- Pagani M, Zachos J C, Freeman K H, et al., 2005. Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Pleistocene[J]. *Science*, 309: 600—603.
- Peterson L C, Backman J, 1990. Late Cenozoic carbonate accumulation and the history of the carbonate compensation depth in the western Equatorial Indian Ocean[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 115: 467—507.
- Shackleton N J, Kennett J P, 1975. Paleotemperature history of the Cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation: oxygen and carbon isotope analyses in DSDP sites 277, 279 and 281[J]. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 29: 743—755.
- Stehli F G, Webb S D, 1985. The great American biotic interchange[M]. New York: Plenum Press.
- Sun J M, Ni X J, Bi S D, et al., 2014. Synchronous turnover of flora, fauna and climate at the Eocene–Oligocene Boundary in Asia[J]. *Scientific Reports*, 4(1): 7463.
- Vonhof H B, Smit J, Brinkhuis H, et al., 2000. Global cooling accelerated by early late Eocene impacts?[J]. *Geology*, 28(8): 687—690.
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. *Science*, 292(5517): 686—693.
- Zachos J C, Quinn T M, Sarmy K A, 1996. High-resolution (10^4 years) deep-sea foraminiferal stable isotope records of the Eocene–Oligocene climate transition[J]. *Paleoceanography*, 11(3): 251—266.