

# 北部湾盆地始新世古环境演化及沉积学意义

黄侠超<sup>1,2</sup>, 钟瀚霆<sup>1,2,3</sup>, 曹海洋<sup>1,3</sup>, 肖伶俐<sup>4</sup>, 陈莹<sup>4</sup>, 王文楷<sup>5</sup>,  
常晓琳<sup>1,2,3</sup>, 刘欣春<sup>1,2,3</sup>, 王琛宇<sup>1,2</sup>, 高凌雪<sup>1,2</sup>, 侯明才<sup>1,2,3</sup>

1. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;
2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;
3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 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]** 保存在地层中的孢粉化石是研究古植被、古气候变化的关键对象之一, 对于重建古环境、预测烃源岩富集、指导油气勘探具有重要意义。本研究选取中国南海北部湾盆地乌石凹陷的 WS-X1 井、WS-X2 井、海中凹陷的 WZ-X3 井、福山凹陷的 JH-X4 井始新世时期的孢粉进行分析, 以揭示北部湾盆地始新世植被特征及其反映的古环境演化。研究共发现孢粉化石 4 大类共 49 个孢粉类型, 以被子植物花粉占优势, 其中栎粉 *Quercoidites(microhenrici+minutus)*、三沟粉 *Tricolpopollenites*、桉木粉 *Alnipollenites* 含量较高; 裸子植物中以松粉 *Pinuspollenites* 为主; 蕨类植物孢子以水龙骨科单缝孢 *Polypodiaceasporites*、紫萁孢 *Osmundacidites* 为主; 同时出现大量藻类, 以盘星藻 *Pediastrum* 为主。4 口井中, 始新世亚热带类群丰富且花粉含量高, 孢粉组合反映了北部湾盆地该时期发育以常绿栎类丰富为特征的林地, 盆地低山地带发育常绿和落叶阔叶混交林为主的森林植被, 林下为蕨类植被, 指示了北部湾盆地始新世时期为温暖湿润的热带—亚热带气候。始新世早期分布的喜热植被较晚期更多, 且在始新世晚期出现喜温的植被, 推测始新世早期到晚期气候呈逐渐变凉的趋势。此外, 孢粉组合中出现大量藻类, 推测当时的沉积环境主要以湖泊和滨海的河流沼泽相为主。通过对北部湾盆地始新世时期的孢粉资料进行分析, 为该盆地始新世时期的气候研究提供了更多依据。

**[关键词]** 始新世; 孢粉; 古气候; 古植被; 北部湾盆地

**[分类号]** P52

**[文献标志码]** A

## Paleoenvironmental evolution and sedimentological significance of the Beibuwan Basin in the Eocene

HUANG Xiachao<sup>1,2</sup>, ZHONG Hanting<sup>1,2,3</sup>, CAO Haiyang<sup>1,3</sup>, XIAO Lingli<sup>4</sup>,  
CHEN Ying<sup>4</sup>, WANG Wenkai<sup>5</sup>, CHANG Xiaolin<sup>1,2,3</sup>, LIU Xinchun<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Chenyu<sup>1,2</sup>, GAO Lingxue<sup>1,2</sup>, HOU Mingcai<sup>1,2,3</sup>

**[收稿日期]** 2023-10-12。

**[基金项目]** 中海石油有限公司科研项目(YXKY-ZX 01 2021)。

**[第一作者]** 黄侠超(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 沉积学, E-mail: huangxiachao@stu.cdut.edu.cn。

**[通信作者]** 钟瀚霆(1987—), 男, 讲师, 研究方向: 硅质岩、白云岩及古地理重建, E-mail: zhonghanting@cdut.edu.cn。

**[引用格式]** 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.

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. State key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (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:** Sporopollenin fossils preserved in strata are important for studying ancient vegetation and climate change. They can be used to reconstruct the ancient environment, predict the enrichment of the source rocks for hydrocarbons, and guide oil and gas exploration. In this study, we considered the WS-X1 and WS-X2 wells in the Wushi Sag of the Beibuwan Basin in the South China Sea, WZ-X3 well in the Haizhong Sag, and JH-X4 well in the Fushan Sag to analyze the data on sporopollenins from the Eocene period, and identify the characteristics of vegetation of the Beibuwan Basin and its paleoenvironmental evolution. We identified 49 types of sporopollenin fossils belonging to four major categories that were dominated by angiospermic pollens. *Quercoidites (microchrici+minutus)*, *Tricolpopollenites*, and *Alnipollenites* were found to have higher content in oak pollens. *Pinuspollenites* were the main pollen in gymnosperms, while the spores of ferns were mainly *Polypodiaceae* and *Osmundacites*. A large number of algae were observed, most of which were the disk-shaped *Pediastrum*. The four wells considered here were abundant in subtropical taxa, and had had a high pollen content during the Eocene, which reflected the development of forests that were characterized by abundant evergreen species of oak in the Beibuwan Basin in this period. Forest vegetation mainly consisted of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests in the low mountain areas of the basin, with fern vegetation below it indicating a warm and humid tropical-subtropical climate during the Eocene. Thermophilic vegetation was more widely distributed in the Early Eocene than in the Late Eocene. We think that the climate of the area cooled gradually trend from the Early to the Late Eocene. In addition, a large volume of algae appeared in the sporopollenin assemblage, indicating that the sedimentary environment at the time had been dominated by lake and coastal river swamp facies.

**Key words:** Eocene; sporopollenin; paleoclimate; ancient vegetation; Beibuwan Basin

气候演化是当今人类最关心的问题之一(Zachos et al., 2001), 其中孢粉化石可以直接体现古植被的丰度、种类、形态和存在时间, 研究孢粉化石对古气候重建和演化具有极其重要的意义。始新世是新生代最明显的温室时期之一, 其特征是均匀分布的湿热气候(Wang et al., 2013)。始新世早期, 南海地区为温暖湿润的气候环境, 出现与现今相似的热带雨林气候; 始新世中晚期, 全球气候开始变得寒冷, 过渡为草原半干旱气候(Herman et al., 2017)。始新世时期, 受大洋环流变化以及地质构造演化等多个方面因素的影响, 南海地区的气候变化较为复杂。总体上说, 始新世时期的气候经历了从温暖湿润到干旱寒冷的转变, 这一全球事件导致了环境和生态系统的变化, 如海水缺氧(Chun et al., 2010; Nicolo et al., 2010)、底栖有孔虫灭绝(Kennett and Stott, 1991)、奇蹄及灵长类

动物出现(Gingerich, 2003)和陆生动物大范围迁徙等(Smith et al., 2006)。

古环境研究可以为分析及预测全球环境变化提供重要信息。植物能敏感地反映气候和环境的变化, 因此对保存在地层中的孢粉化石进行分析, 是研究古植被、古环境和古气候变化的关键手段, 受到广泛应用(Traverse, 2007; 李洁等, 2013; 韩箫屿, 2020; 余海东等, 2021; 张誉洋等, 2022)。北部湾盆地发育了深厚的暗色有机沉积岩, 自下而上分别沉积了古新统长流组、始新统流沙港组、渐新统涠洲组以及中新统下洋组、角尾组、灯楼角组、上新统望楼港组, 为环境气候研究提供了优越的材料和条件。

谢金有等(2012)对北部湾盆地涠洲组和流沙港组的钻井所获岩屑进行孢粉分析, 以孢粉组合优势和特征分子为依据, 划分出流沙港组 4 个孢

粉组合, 涠洲组 3 个组合 8 个亚组合, 并且通过孢粉学依据, 确定始新统与渐新统的界线位于流沙港组与涠洲组之间; 罗威等(2013)采用孢粉定量统计分析与黏土矿物分析相结合的方法, 对海中凹陷中始新世—晚渐新世的古气候进行了研究, 在流沙港组二段时期气候相对温暖湿润, 为南亚热带湿润—半湿润气候, 流沙港组一段沉积时期气候开始转凉, 为中亚热带湿润—半湿润气候; 任拥军等(2016)对乌石凹陷古近系流沙港组烃源岩的有机质来源、形成环境进行研究, 指出流二段油页岩中孢粉含量低, 藻类和无定形有机碎屑含量高, 流三段和流二段泥岩中孢粉含量较高, 藻类和无定形有机碎屑含量中等, 流一段泥岩孢粉含量高, 藻类和无定形有机碎屑含量很低; 李君等(2020)对北部湾盆地涠西南凹陷晚始新世—早中新世孢粉进行了研究, 通过孢粉组合推测区域内晚始新世为温暖、潮湿的亚热带气候和半咸水的近海沉积环境。本研究选取分布在北部湾盆地乌石凹陷、海中凹陷和福山凹陷的 4 口井中的始新世时期孢粉资料, 结合前人研究成果, 揭示了北部湾盆地始新世时期的植被特征及气候类型。通过对始新世早期到晚期的植被、气候、沉积环境变化进行分析, 探讨了始新世时期气候的变化与区域气候事件之间的联系, 进而对北部湾盆地始新世时期的气候研究提供更多依据。

## 1 区域地质背景

北部湾盆地位于南海北部大陆架的西部, 是中国近海重要的富油盆地之一(朱洁琼等, 2023)。该盆地为新生代陆内裂谷盆地, 处在华南板块的西南边缘, 总面积约  $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 可以划分为 5 个一级构造单元, 分别为北部坳陷、企西隆起、南部坳陷、徐闻凸起、东部坳陷。一级构造单元下又可分为涠西南、海中、纪家、海头北、乌石、迈陈、福山、雷东 8 个凹陷(徐长贵等, 2022), 其中北部坳陷于北部湾盆地西北部, 整体表现为一个北西断、南东超、呈北东东向展布的新生代箕状断陷盆地, 为盆地内重要的组成部分, 包括涠西南凹陷、海中凹陷、涠西南低凸起和乐民凹陷 4 个次级构造单元(图 1)。北部湾盆地靠近板块边缘, 在古太平洋板块俯冲、消减及南海扩张的共同作用下(卢林等, 2007), 古近纪受到多期张裂活动的影响, 盆地经历了古新世—始新世裂陷阶段、渐新世走滑弱伸展阶段和新近纪裂后热沉降阶段(张佰涛等, 2014); 始新世中晚期, 属于珠琼运动构造时期, 北部湾盆地断陷活动持续发展, 控洼断裂活动强烈, 是重要的构造运动时期之一。受盆地断裂活动和湖盆快速扩张作用影响, 湖盆进入全盛发育时期, 在盆地内沉积了以半深湖—深湖环境为主的巨厚的流沙港组泥页岩及油页岩地层(图 2), 该套地

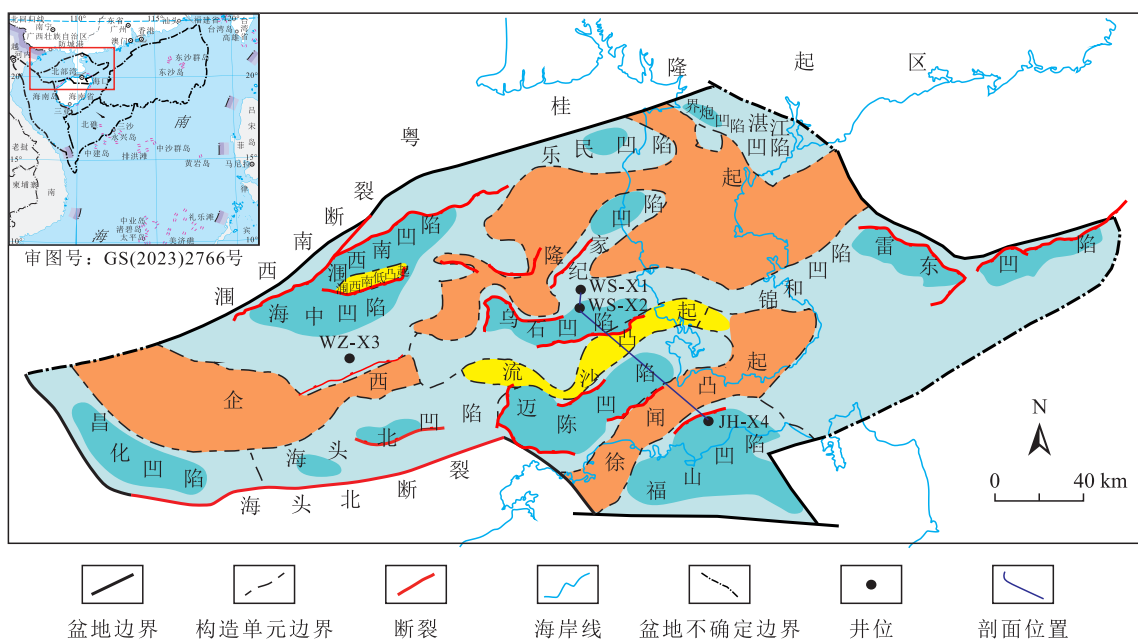


图 1 北部湾盆地构造单元划分及研究井位分布示意图(改编自杨希冰, 2016)

Fig. 1 Schematic diagram of the division of structural units and locations of the wells in the Beibuwan Basin

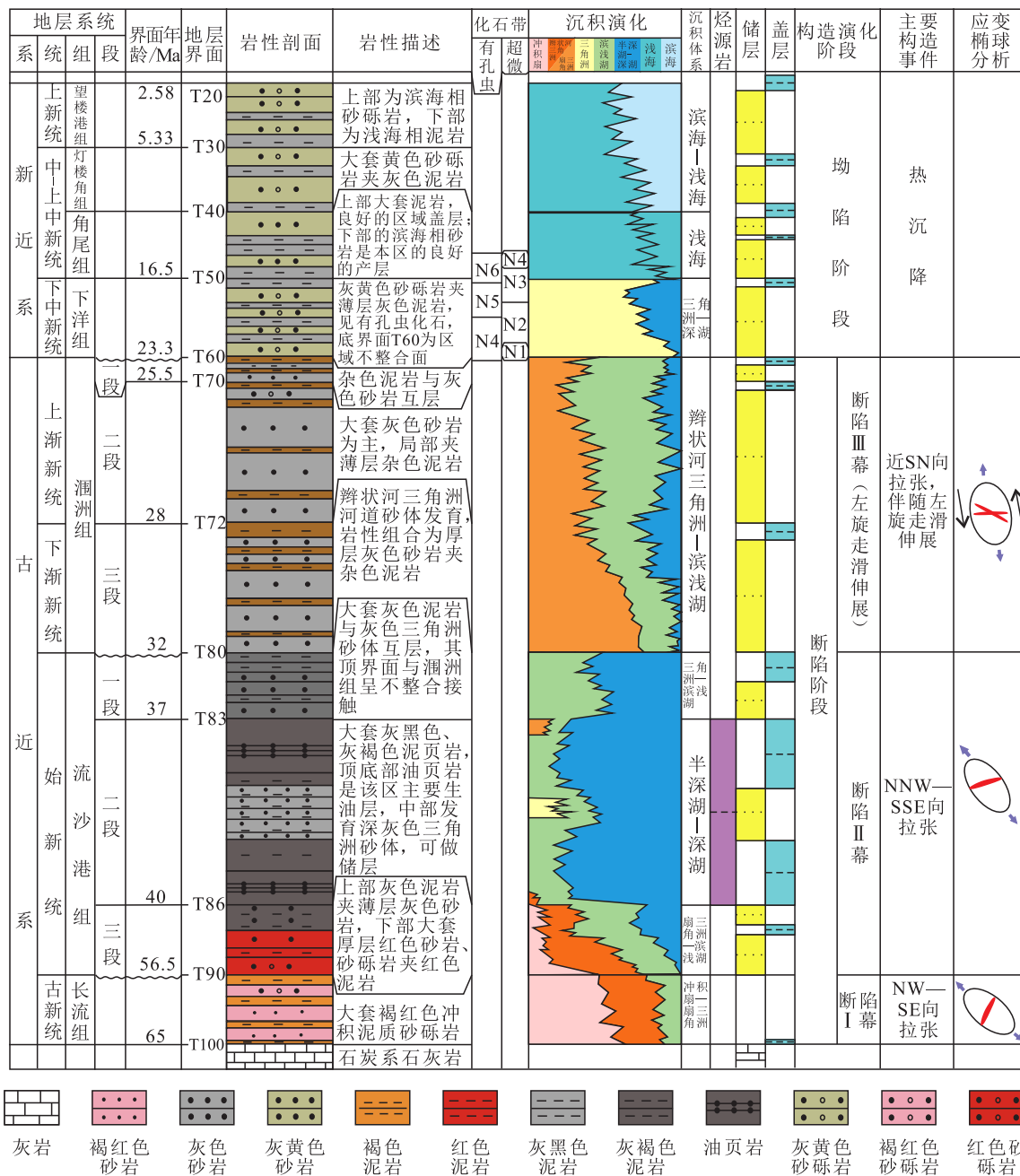


图 2 北部湾盆地地层综合柱状图(改自李春荣等, 2012; 杨希冰, 2016)  
 Fig. 2 Comprehensive stratigraphic histogram of the Beibuwan Basin

层也是本区主要烃源岩发育层位(于水等, 2020)。

流二段沉积时期, 北部湾盆地气候温暖湿润, 发育大型富营养淡水湖泊, 藻类繁盛, 同时湖盆深部热流体较活跃, 地温梯度高, 为有机质富集及油页岩发育提供了有利的物质条件(傅宁等, 2017)。盆地流二段底部及顶部发育 2 套稳定分布的油页岩层, 尤以涠西南凹陷和乌石凹陷分布最为广泛。流二段油页岩主要分布于控凹断层下降盘凹陷沉降中心及周缘, 其中涠西南凹陷油页岩主要分布

于涠西南一号断裂下降盘与二号断裂周缘, 面积大于 1 000 km<sup>2</sup>; 乌石凹陷油页岩主要分布于七号断裂下降盘及南部凹陷周缘(龚志伟, 2020)。

## 2 材料与方法

本次分析样品分别取自北部湾盆地不同构造单元的 4 口探井, 以 4 口井的岩屑样品为基础进行古气候研究。其中, WS-X1 并于 2015 年钻于乌石凹陷, 完钻层位为始新统流三段; WS-X2 井

于 2014 年钻于乌石凹陷,完钻层位为始新统流二段;WZ-X3 井于 1985 年钻于海中凹陷,完钻层位为边界断层下盘前古近系基底;JH-X4 井于 2009 年钻于福山凹陷,完钻层位为边界断层下盘前古近系基底。孢粉取样 WS-X1 井以 30 m 采样间距在始新统流沙港组 1 860~2 603 m 井段取样 25 个,WS-X2 井以 30 m 采样间距在始新统流沙港组 3 300~3 720 m 井段采样 14 个,WZ-X3 井以 20 m 采样间距在始新统流沙港组 2 595~2 660 m 井段取样 4 个,JH-X4 井以 30 m 采样间距在始新统流沙港组 2 610~3 368 m 井段取样 27 个。样品的分析化验在中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心湛江实验中心进行,实验中心按照国家石油天然气行业

标准 SY/T 5915—2000《孢粉分析鉴定》(罗威等, 2013)对孢粉样品进行物理及化学方法处理,使孢粉化石分离,经水洗过筛后将大于 10  $\mu\text{m}$  的物质富集于试管中,以备制片作透射光显微镜观察用。在 Leica DM4000B 生物显微镜下对孢粉化石进行鉴定和统计,最后应用 Tilia 专业软件绘制出本研究区的孢粉百分含量图。

### 3 孢粉分析结果

经实验室分析处理,对每个样品进行鉴定统计,总共鉴定孢粉 7 182 粒,共鉴定出孢粉 4 大类共 49 个孢粉类型,蕨类植物 8 个类型、裸子植物 5 个类型、被子植物 33 个类型、藻类 3 个类型(表 1)。WS-X1 井鉴定统计孢粉 3 583 粒,共鉴定出

表 1 北部湾盆地始新世孢粉植物群主要孢粉类型列表

Table 1 List of types of sporopollenins of the Eocene palynoflora in the Beibuwan Basin

蕨类植物(pteridophytes)(8 类)	
水龙骨单缝孢属 <i>Polypodiaceaesporites</i>	紫萁孢属 <i>Osmundacidites</i> sp.
石松孢属 <i>Lycopodiumsporites</i>	凤尾蕨属 <i>Pterisporites</i>
沼泽光叶藤属 <i>Stenochlaena palustris</i>	粗网孢属 <i>Crassoretitriletes</i>
粗肋孢属 <i>Magnastriatites</i>	三缝孢属 <i>Triletes</i>
裸子植物(gymnosperms)(5 类)	
松粉属 <i>Pinuspollenites</i>	杉粉属 <i>Taxodiaceapollenites</i>
雪松粉属 <i>Cedripites</i>	罗汉松粉属 <i>Pocodarpidites</i>
铁杉粉属 <i>Tsugaepollenites</i>	
被子植物(angiosperms)(33 类)	
栎粉属 <i>Quercoidites</i>	壳斗粉属 <i>Cupuliferoiipollenites</i>
榆粉属 <i>Ulmiipollenites</i>	胡桃粉属 <i>Juglansipollenites</i>
枫香粉属 <i>Liquidambaripollenites</i>	桤木粉属 <i>Alnipollenites</i>
拟榛粉属 <i>Momipites coryloides</i>	柳粉属 <i>Salixipollenites</i>
倍什高藤粉属 <i>Gothaniipollis bassensis</i>	芸香粉属 <i>Rutaceoiipollis</i>
漆树粉属 <i>Rhoipites</i>	眼子菜粉属 <i>Potamogetonacidites</i>
三瓣粉属 <i>Trilobapollis</i>	冬青粉属 <i>Ilexipollenites</i>
主要腊瓣花粉属 <i>Corylopsis princeps</i>	三孔沟粉属 <i>Tricolporopollenites</i>
三沟粉属 <i>Tricolpopollenites</i>	单沟粉属 <i>Monocolpopollenites</i>
山核桃粉属 <i>Caryapollenites</i>	栎粉属 <i>Carpiniipites</i>
金缕梅粉属 <i>Tricolpites tenuicarpus</i>	楝粉属 <i>Meliaceoidites</i>
紫树粉属 <i>Nyssaipollenites</i>	无患子粉属 <i>Sapindaceapites</i>
椴粉属 <i>Tiliaepollenites</i>	网纹三沟粉属 <i>Retitricolpites</i>
蓼粉属 <i>Persicarioipollis</i>	禾本粉属 <i>Graminidites</i>
多孔粉属 <i>Multioporopollenites</i>	藜粉属 <i>Chenopodiipollis</i>
拟桦粉属 <i>Betulaceoiipollenites</i>	
满点枫香粉属 <i>Liquidambaripollenites stigmosus</i>	
封维汉边沟孔粉属 <i>Margocolporites vanwijhei</i>	
藻类植物(algae)(3 类)	
百色藻 <i>Bosedinla corrugis</i>	盘星藻 <i>Pediastrum</i>
粒/光面球藻 <i>Granodiscus/Leiosphaeridia</i>	

孢粉 4 大类 39 个孢粉类型;WS-X2 井鉴定统计孢粉 1 538 粒,共鉴定出孢粉 4 大类 32 个孢粉类型;WZ-X3 井鉴定统计孢粉 799 粒,共鉴定出孢粉 4 大类 42 个孢粉类型;JH-X4 井鉴定统计孢粉 1 262 粒,共鉴定出孢粉 4 大类 31 个孢粉类型。

### 3.1 WS-X1 井孢粉组合特征

WS-X1 井,1 860~2 603 m 井段化石种类丰富,总体上以被子植物花粉(11.4%~89.5%)和其他类(3.0%~88.6%)为主,其次为裸子植物花粉(1.2%~23.8%)和蕨类植物孢子(0.6%~19.7%)(图 3)。

孢粉组合特征:①被子植物花粉以栎粉(包括小亨氏栎粉和小栎粉) *Quercoidites* (*microhenrici* + *minutus*) 为主,其次为粗糙栎粉 *Quercoidites asper*、壳斗粉 *Cupuliferoipollenites*、三沟粉未定多种 *Tricolpopollenites* spp.、榆粉未定种 *Ulmipollenites* sp.、胡桃粉 *Juglanspollenites*、枫香粉 *Liquidambarpollenites*、桤木粉 *Alnipollenites*、拟榛粉 *Momipites coryloides*、柳粉 *Salixipollenites*,此外还出现少量倍什高

藤粉 *Gothaniipollis bassensis*、主要腊瓣花粉 *Corylopsis princeps*、芸香粉 *Rutaceoipollis*、漆树粉 *Rhoipites*、眼子菜粉 *Potamogetonacidites*、三瓣粉 *Trilobapollis*、冬青粉 *Ilexpollenites*、金缕梅粉 *Tricolpites tenuicolpus*、漆树粉 *Rhoipites*、紫树粉 *Nyssapollenites*、椴粉 *Tiliaepollenites*、无患子粉 *Sapindaceapites*、山核桃粉 *Caryapollenites*、棟粉 *Meliaceoidites*、网面鸡爪肋粉 *Randiaipollis reticulatus*。②裸子植物花粉以松粉 *Pinuspollenites* 为主,出现少量杉粉 *Taxodiaceapollenites*、雪松粉 *Cedripites*、罗汉松粉 *Pocodarpidites*。③蕨类植物孢子以光面水龙骨单缝孢 *Polypodiaceasporites* 为主,其次为紫萁孢未定种 *Osmundacidites* sp.,出现少量石松孢 *Lycopodiumsporites*、粗网孢 *Crasoretitriletes*、沼泽光叶藤 *Stenochlaena palustris*、凤尾蕨 *Pterisisporites*、三缝孢未定多种 *Triletes* spp.、瘤纹水龙骨单缝孢 *Polypodiisporites*。④藻类出现大量粒/光面球藻 *Grano-discus/Leiosphaeridia* 和盘星藻 *Pediastrum*。

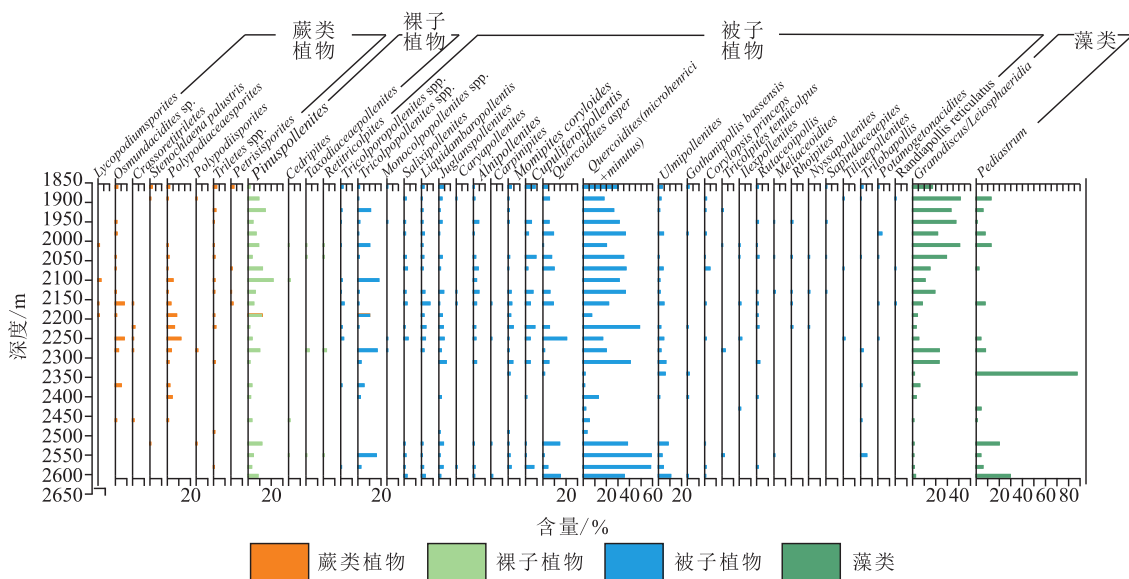


图 3 WS-X1 井主要孢粉化石百分含量分布图

Fig. 3 Distribution (percentage content) of main sporopollenin fossils in Well WS-X1

### 3.2 WS-X2 井孢粉组合特征

WS-X2 井,3 300~3 720 m 井段孢粉化石含量丰富,被子植物花粉占主要优势(30.5%~69.1%),其次是藻类化石(5.0%~62.4%),裸子植物花粉和蕨类植物孢子稀少出现(6.4%~19.5%和 0.7%~15.6%)(图 4)。

孢粉组合:①被子植物花粉以小栎粉和小亨氏栎粉 *Quercoidites* (*microhenrici* + *minutus*) 为主,断续出现三沟粉未定多种 *Tricolpopollenites* spp.、胡桃粉 *Juglanspollenites*、柳粉 *Salixipollenites*、拟榛粉 *Momipites coryloides*、榆粉未定种 *Ulmipollenites* sp. 和克氏脊榆粉 *Ulmoideipi-*

tes krempii、粗糙栎粉 *Quercoidites asper*、桤木粉 *Alnipollenites*、壳斗粉 *Cupuliferoiipollenites*、金缕梅粉 *Tricolpites tenuicolpus*、三孔沟粉未定多种 *Tricolporopollenites* spp.、三瓣粉 *Trilobapollis*、枫香粉 *Liquidambarpollenites*、芸香粉 *Rutaceipollis*、漆树粉 *Rhoipites*、倍什高藤粉 *Gothanipollis bassensis*、桤粉 *Carpiniipites*、山核桃粉 *Caryaipollenites*、冬青粉 *Ilexpollenites*、拟桦粉 *Betulaceoiipollenites*；②藻类化石以粒/光

面球藻 *Granodiscus/Leiosphaeridia*（高达 61.0%）为主，盘星藻 *Pediastrum* 和百色藻 *Bosedinia corrugis* 断续出现；③裸子植物花粉以松粉为主，零星出现雪松粉 *Cedripites* 和杉粉 *Taxodiaceapollenites*、罗汉松粉 *Pocodarpidites*、铁杉粉 *Tsugaepollenites*；④蕨类植物孢子零星出现光面水龙骨单缝孢 *Polypodiaceasporites*、紫萁孢未定种 *Osmundacidites* sp. 和粗网孢 *Crasoretitriletes* 等。

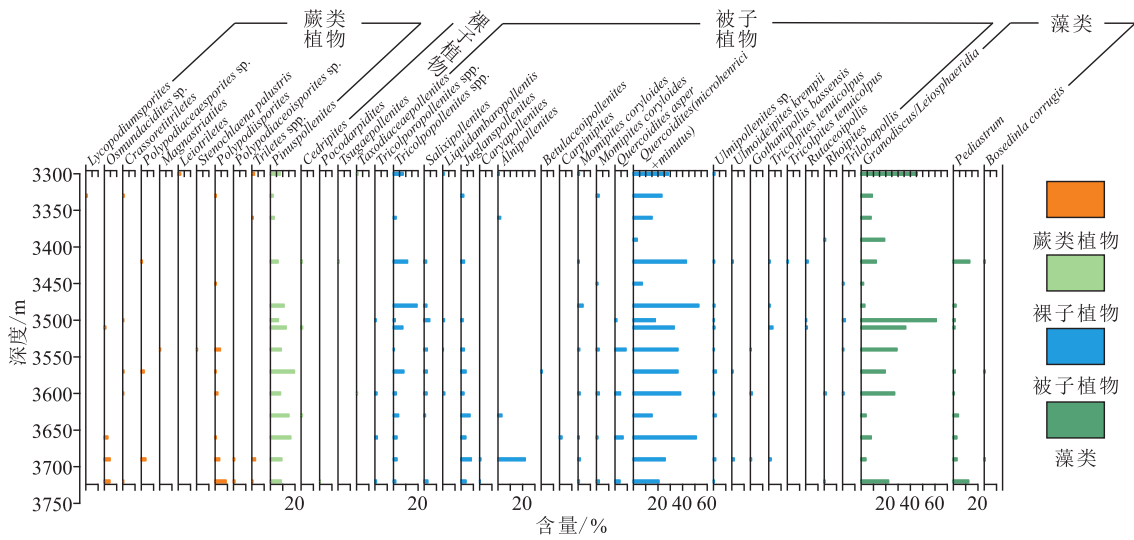


图 4 WS-X2 井主要孢粉化石百分含量分布图  
Fig. 4 Distribution (percentage content) of the main sporopollenin fossils in Well WS-X2

3.3 WZ-X3 井孢粉组合特征

WZ-X3 井, 2 595~2 660 m 井段孢粉化石数量较少, 以被子植物花粉为主, 含量为 59.8%~

83.7%, 其次为蕨类植物孢子, 其含量为 9.2%~22.6%, 藻类较为常见, 含量为 5.6%~16.2%, 裸子植物花粉含量较低, 仅为 0.9%~5.6%(图 5)。

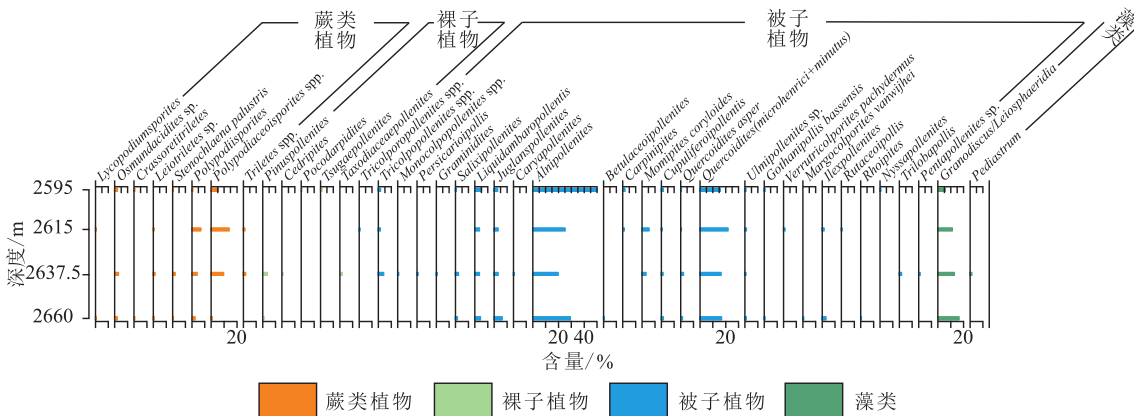


图 5 WZ-X3 井主要孢粉化石百分含量分布图  
Fig. 5 Distribution (percentage content) of the main sporopollenin fossils in Well WZ-X3

孢粉组合: ①被子植物花粉以桤木粉 *Alnipollenites* 为主, 其含量为 19.6%~50.0%,

其次是栎粉 *Quercoidites*, 含量为 15.8%~21.6%, 此外还出现少量枫香粉 *Liquidam-*

barpollenites、胡桃粉 *Juglanspollenites*、榆粉未定种 *Ulmipollenites* sp.、粗糙栎粉 *Quercoidites asper*、倍什高藤粉 *Gothanipollisbassensis* 和柳粉 *Salixipollenites*、柳粉 *Salixipollenites*、冬青粉 *Ilexpollenites*、壳斗粉 *Cupuliferoipollenites*、拟榛粉 *Momipites coryloides*、三沟粉未定多种 *Tricolpopollenites* spp.、桤粉 *Carpinipites*、三瓣粉 *Trilobapollis*、五角粉未定种 *Pentapollenites* sp.、山核桃粉 *Caryaipollenites*、禾本粉 *Graminidites*、单沟粉未定多种 *Monocolpopollenites* spp.、蓼粉 *Persicarioipollis*、拟桦粉 *Betulaceoipollenites*、封维汉边沟孔粉 *Margocolporites vanwijhei*、紫树粉 *Nyssapollenites*、漆树粉 *Rhoipites*、芸香粉 *Rutaceoipollis*、三孔沟粉未定多种 *Tricolporopollenites* spp.；②裸子植物花粉断续出现松粉 *Pinuspollenites*、杉粉 *Taxodiace-*

*aepollenites* 和铁杉粉 *Tsugaepollenites*、雪松粉 *Cedripites*、罗汉松粉 *Pocodarpidites*；③蕨类植物孢子常见水龙骨单缝孢未定多种 *Polypodiaceasporites* spp.，其次为瘤纹水龙骨单缝孢 *Polypodiisporites*，出现少量沼泽光叶藤 *Stenochlaena palustris* 和石松孢 *Lycopodiumsporites*、紫萁孢未定种 *Osmundacidites* sp.、粗网孢 *Crassoretitriletes*、光面三缝孢未定种 *Leiotriletes* sp.、光面水龙骨单缝孢 *Polypodiaceasporites*、三缝孢未定多种 *Triletes* spp.；④藻类化石粒/光面球藻 *Granodiscus/Leiosphaeridia* 较常见，偶见盘星藻 *Pediastrum*。

### 3.4 JH-X4 井孢粉组合特征

JH-X4 井, 2 610~3 368 m 井段孢粉化石数量较多, 以被子植物花粉为主, 其次为蕨类植物孢子, 藻类较为常见, 裸子植物花粉含量较低(图 6)。

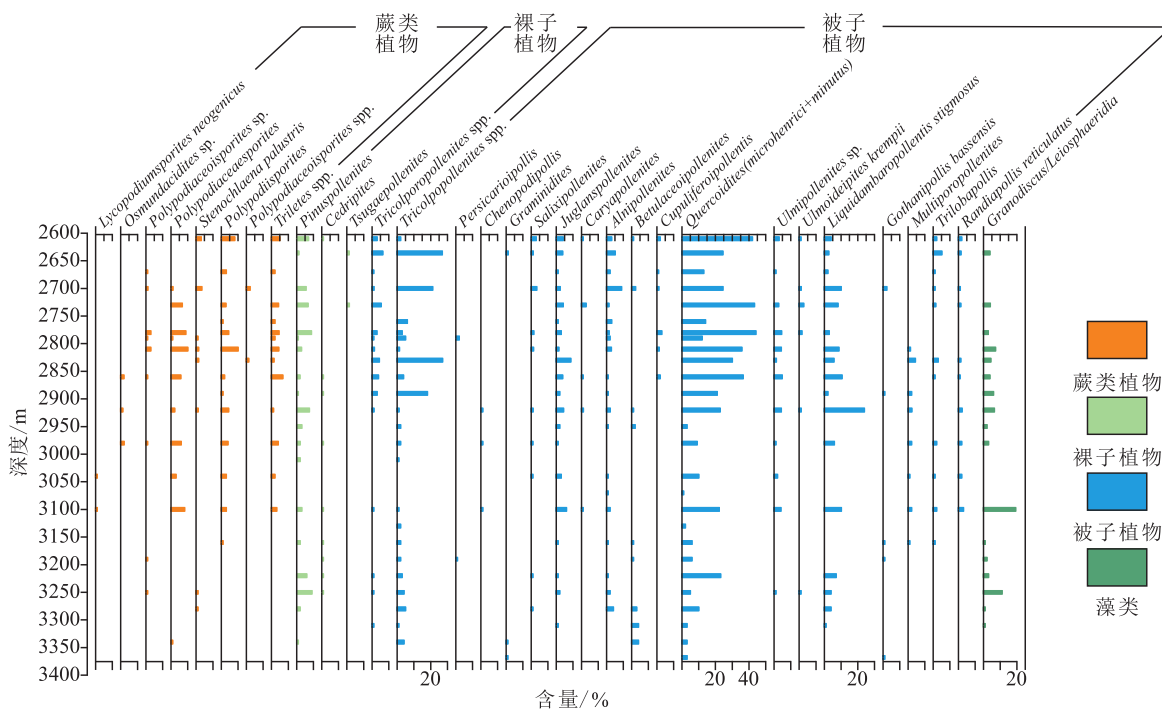


图 6 JH-X4 井主要孢粉化石百分含量分布图

Fig. 6 Distribution (percentage content) of the main sporopollenin fossils in Well JH-X4

孢粉组合：①被子植物花粉以栎粉(包括小亨氏栎粉和小栎粉) *Quercoidites (microhenrici + minutus)* 为主, 其次为三沟粉未定多种 *Tricolpopollenites* spp.、满点枫香粉 *Liquidambarpollenites stigmatosus*、胡桃粉 *Juglanspollenites*、桤木粉 *Alnipollenites*, 还少量出现三沟粉未定多种 *Tricolpopollenites* spp.、榆粉未定种 *Ulmipol-*

*nites* sp.、三瓣粉 *Trilobapollis*、网面鸡爪肋粉 *Randiaipollis reticulatus*、拟桦粉 *Betulaceoipollenites*、多孔粉 *Multioporopollenites*、柳粉 *Salixipollenites*、壳斗粉 *Cupuliferoipollenites*、克氏脊榆粉 *Ulmoideipites krempii*、倍什高藤粉 *Gothanipollis bassensis*、禾本粉 *Graminidites*、藜粉 *Chenopodiipollis*、蓼粉 *Persicarioipollis*、波形榆

*U. undulosus* 和小榆粉 *U. minor*; ② 蕨类植物孢子以光面水龙骨单缝孢 *Polypodiaceasporites* 和瘤纹水龙骨单缝孢 *Polypodiisporites* 为主,其次为三缝孢未定多种 *Triletes* spp.、沼泽光叶藤 *Stenochlaena palustris*、具环瘤面孢未定种 *Polypodiaceasporites* sp.、少见紫萁孢未定种 *Osmundacidites* sp.、水龙骨单缝孢未定多种 *Polypodiaceasporites* spp.; ③ 藻类化石出现粒/光面球藻 *Granodiscus/Leiosphaeridia*; ④ 裸子植物花粉少量出现松粉 *Pinuspollenites*、雪松粉 *Cedripites*、铁杉粉 *Tsugapollenites*。

#### 4 古气候与沉积环境分析

孢粉古气候分析的基本原理是不同的孢粉组

合反映不同的植物群落,不同的植物群落对应不同的气候环境,因此可以通过孢粉植被的分析来恢复古气候(范淑贤等,2009;许哲平等,2009;张玉兰等,2010;杨再宝,2019)。根据地层中的孢粉组合特征,参照现代植物的生态习性,可恢复沉积时期的古植被面貌并重建古气候(黄磊等,2023)。一些学者将孢粉植被类型划分为针叶树、常绿阔叶树、落叶阔叶树、灌木与草本,孢粉气候类型划分为热带、亚热带、温带及广温性的热带—亚热带、热带—温带,孢粉干湿度带划分为旱生、中生、湿生、水生和沼生等(赵秀兰等,1992;叶得泉等,1993;钟筱春等,2003;周山富和杨方之,2007)。根据孢粉分析结果,将主要孢粉植物群现存最近亲缘关系的母体植物生态条件及分布特点列为表 2。

表 2 孢粉植物群母体植物生态及分布(据叶得泉等,1993;周山富和杨方之,2007;韩箫屿和舒军武,2020)

Table 2 Ecology and distribution of parent plants in sporopollenin flora

孢粉名称	亲缘关系	湿度类型	生活型	气温类型	分布及生态特点
杉粉属	<i>Taxodiaceae</i>	沼生	针叶	亚热带	中国秦岭、长江流域以南温暖地区及中国台湾地区
罗汉松粉属	<i>Podocarpus</i>	湿生	针叶	热带—亚热带	多生长于热带、亚热带,少数于南温带,中国分布于长江流域以南
雪松粉属	<i>Cedrus</i>	中生	针叶	亚热带	仅分布喜马拉雅山的西段山区,为山地针叶树种,性喜温湿气候
栎粉属	<i>Quercus</i>	中生	常绿/落叶阔叶	热带—亚热带	热带和北温带的高山上
栗粉属	<i>Castaneae</i>	中生	落叶阔叶	热带—亚热带—暖温带	北温带及亚热带,常绿阔叶林及针阔混交林中的主要上层属种,除新疆和青海外均产
桤木粉属	<i>Alnus</i>	湿生	落叶阔叶	亚热带—暖温带	分布于北温带及亚热带地区,喜光,多生于沼泽地、溪沟两岸及低处的湿地
拟桦粉属	<i>Betulaceae</i>	中生	落叶阔叶	温暖带	分布于北美、欧洲和亚洲,喜光,耐寒耐旱
栎粉属	<i>Carpinus</i>	中生	落叶阔叶	温暖带	主产东亚,喜生于较湿润的低海拔山坡
山核桃粉属	<i>Carya</i>	中生	落叶阔叶	热带—亚热带	主产美洲,中国分布在浙江、安徽、云南、贵州湿润林地或河岸,喜凉
胡桃粉属	<i>Juglans</i>	中生	落叶阔叶	温暖带	广布北半球温带及热带地区,喜温耐旱,生态适应性较强
榆粉属	<i>Ulmus</i>	中生	落叶阔叶	亚热带—暖温带	分布于欧洲、亚洲、美洲,喜光,多分布于河谷、湿林地
枫香粉属	<i>Liquidambar</i>	中生	落叶阔叶	热带—亚热带	分布于美洲及亚洲,中国分布于秦岭、淮河以南,喜光,多分布沼泽、湖岸等湿的低地
椴粉属	<i>Tiliaceae</i>	湿生	落叶阔叶	亚热带—暖温带	分布于北半球温带地区,多分布于湿的坡地及河岸
芸香粉属	<i>Rutaceae</i>	中生	常绿/落叶阔叶	热带—亚热带	广布各大洲,以热带、亚热带地区最多,中国多分布于长江流域以南
漆树粉属	<i>Rhus</i>	中生	常绿/落叶阔叶	热带—亚热带	分布在全球热带、亚热带,中国多分布于长江以南
柳粉属	<i>Salix</i>	湿生	落叶阔叶	温暖带	多分布于北温带,喜湿,分布于湿的灌木丛中、湿地及河岸

续表 2

孢粉名称	亲缘关系	湿度类型	生活型	气温类型	分布及生态特点
紫树粉属	<i>Nyssaceae</i>	中生	落叶阔叶	热带—亚热带	主产东亚、北美,中国多分布于长江流域以南,喜温暖湿润和光
无患子粉属	<i>Sapindaceae</i>	中生	落叶阔叶	热带—亚热带	分布于全球的热带及亚热带,温带较少,中国多分布于西南部至东南部,喜光,耐阴,不耐湿,耐干旱与寒冷
单沟粉属	<i>Palmae</i>	中生	常绿阔叶	热带—亚热带	原产于亚洲,中国多分布于黄河流域以南,喜温暖湿润,喜光
禾本粉属	<i>Gramineae</i>	中生	草本	热带—亚热带—暖温带	广布全世界
眼子菜粉属	<i>Potamogeton</i>	水生	草本	热带—亚热带—暖温带	多分布于北温带
紫萁孢属	<i>Osmundaceae</i>	湿生	草本	热带—亚热带—暖温带	多分布于潮湿地区
水龙骨单缝孢属	<i>Polypodiaceae</i>	沼生	草本	热带—亚热带	广布全世界
石松孢属	<i>Lycopodiaceae</i>	湿生	草本	热带—亚热带—暖温带	广布全世界
凤尾蕨属	<i>Pteridaceae</i>	湿生	草本	热带—亚热带	广布全世界
沼泽光叶藤属	<i>Blechnaceae</i>	沼生	草本	热带—亚热带	在中国主要分布于广东、云南及海南等省区,在越南、印度、老挝、柬埔寨等地也有分布

### 4.1 古气候分析

#### 4.1.1 WS-X1 井

该井位于乌石凹陷,孢粉以被子植物花粉占优势,藻类也较丰富,孢粉组合为 *Quercoidites (microhenrici + minutus)*-*Granodiscus/Leiosphaeridia-Pinuspollenites-Tricolpopollenites*。组合中栎粉(包括小亨氏栎粉和小栎粉)、粗糙栎粉、粒/光面球藻和松粉含量较丰富。被子植物花粉中,栎粉(包括常绿栎类花粉和落叶栎类花粉)是该区孢粉组合中最重要的乔木植物花粉,以小栎粉和小亨氏栎粉为主,小栎粉和小亨氏栎粉大多产自常绿栎类(覃军干等,2016)。榆粉、胡桃粉、枫香粉、柳粉、桤木粉、拟榛粉等有一定量出现,枫香粉母体植物主要分布于热带—亚热带气候环境,榆粉、胡桃粉、桤木粉、拟榛粉母体植物广泛分布于温度适中的暖温带气候环境,共同组成了常绿和落叶阔叶林。裸子植物花粉中松粉含量较丰富,松粉属母体植物为广温型的常绿乔木或者山地针叶林,主要生长在温带气候,热带—亚热带植物花粉与温带植物花粉的同时出现说明其沉积时期周围可能存在山地。蕨类孢子中出现生长在热带—亚热带气候环境的水龙骨单缝孢和喜温暖气候的紫萁孢,紫萁孢的母体植物直立或斜生,分布在温带和热带,生长在沼泽或者潮湿山谷,长

在溪边和林下的酸性土上,说明当时气候环境温暖湿润(韩箫屿和舒军武,2020),且蕨类孢子主要集中在本井段中部,指示该时期的水热条件组合相较于早期和晚期更好。本井段孢粉组合中以热带—亚热带植物花粉为主,植被以常绿阔叶林或乔木为主,且出现喜湿的蕨类孢子、杉粉、柳粉、眼子菜粉,总体上反映该井始新世时期以温暖湿润的热带—亚热带气候类型为主。但栎粉从早期到晚期呈现逐渐下降的趋势,在晚期出现了少量早期未曾出现且主要生长在温带的松粉,推测在始新世晚期气候开始逐渐变凉。

#### 4.1.2 WS-X2 井

该井位于乌石凹陷,以被子植物花粉为主,孢粉组合为 *Quercoidites (microhenrici + minutus)*-*Granodiscus/Leiosphaeridia-Pinuspollenites*。该井孢粉类型相较于 WS-X1 井减少,含量也减少。被子植物花粉缺少眼子菜粉、主要腊瓣粉、枥粉、紫树粉、椴粉、无患子粉、楝粉、网面鸡爪肋粉,裸子植物花粉和蕨类植物孢子差别不大,其中缺少的枥粉、紫树粉、椴粉、楝粉、无患子粉的母体植物大多都以落叶乔木为主。裸子植物中同时出现生长在热带—亚热带气候的杉粉、罗汉松和温带气候的松粉,以及少量出现生长在高寒山区、母体植物为山地针叶林、指示寒冷气候的雪松粉,可以推测

该地周围同样有山地存在,不过缺少部分温带气候的植物花粉,推测山地范围较小。该井段以生长在热带—亚热带气候的植物花粉为主,早期蕨类孢子中出现生长在热带—亚热带气候环境的水龙骨单缝孢和喜温暖气候的紫萁孢等,到后期基本未出现,说明始新世早期的气候更加的炎热且湿润。喜炎热湿润环境的山核桃粉也只在始新世

早期出现,晚期则不见山核桃粉分布,推测在始新世早期气候较炎热,后期气候开始逐渐变凉。龚志伟(2020)通过乌石凹陷在流沙港组时期的黏土矿物变化,分析出整个流沙港组时期为温暖湿润的气候环境(图 7)。因此始新世时期该地的气候总体上是以温暖湿润的热带—亚热带气候为主,但有逐渐变凉的趋势。

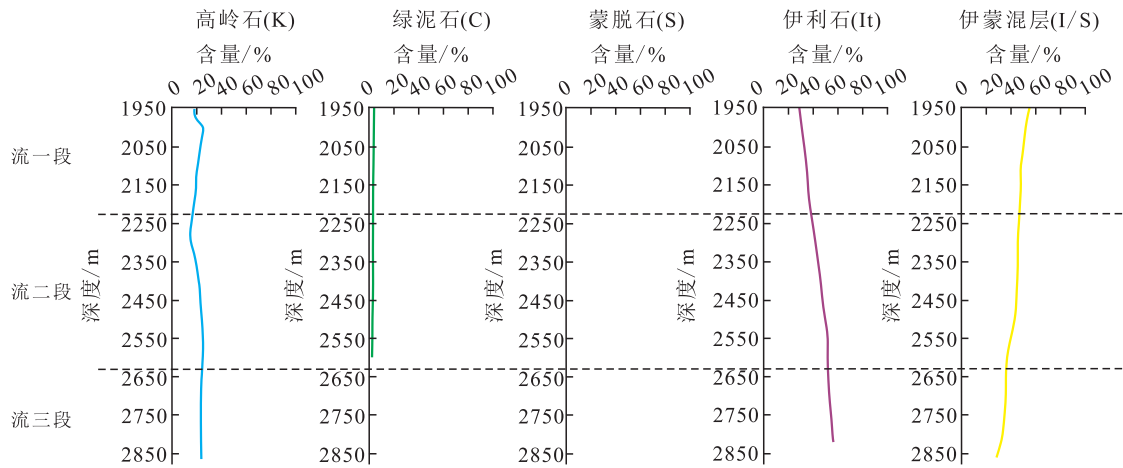


图 7 乌石凹陷黏土矿物含量变化(改自龚志伟,2020)

Fig. 7 Changes in clay mineral content in the Wushi Depression

4.1.3 WZ-X3 井

该井位于海中凹陷,始新世时期井段较短,但也鉴定出多种植物花粉,同样以被子植物花粉占优势,孢粉组合为 *Alnipollenites-Quercoidites-Granodiscus/Leiosphaeridia*。桉木粉母体植物主要生长在温暖气候的近岸湿润环境,同时也出现喜热气候的枫香粉、冬青粉,生长在温暖气候环境的胡桃粉、拟榛粉、桤粉,以及喜温暖湿润的柳粉。同样出现能够体现潮湿环境的蕨类植物孢子水龙骨单缝孢、沼泽光叶藤和石松孢。石松孢喜湿,为近岸湿生或沼生的蕨类孢子,化石属被广泛记载,主要见于含煤地层或暗色泥岩中,特别是保存于河流、沼泽相沉积中,化石一般比较完整,生殖叶常与营养叶共存,为生活在潮湿环境的植物,可指示较为潮湿的气候环境。本井段孢粉组合以喜热和喜温暖气候环境的植物花粉为主,共同构成了常绿阔叶林和山地落叶阔叶林或针叶林植被,同时出现喜湿热的蕨类植物孢子,总体上为温暖湿润的亚热带气候。其中桉木粉占多数,且呈现出从始新世早期到晚期逐渐增加的趋势,喜热的山核桃粉逐渐下降,推测气温在逐渐变凉,早期

出现喜热环境的漆树粉,后期未出现,推测早期气温更加炎热。罗威等(2013)也通过位于海中凹陷中部的一口井,利用始新世时期的孢粉分析出在流沙港组二段和一段时期气候为温暖的亚热带气候类型,但流一段与流二段相比,热带类型孢粉含量有所降低,指示气候有变凉的趋势,通过黏土矿物的含量反映出流二段和流一段为相对湿润的气候环境(图 8)。因此可以推测该地始新世总体上为温暖湿润的亚热带气候,在始新世早期较炎热,到晚期逐渐变凉。

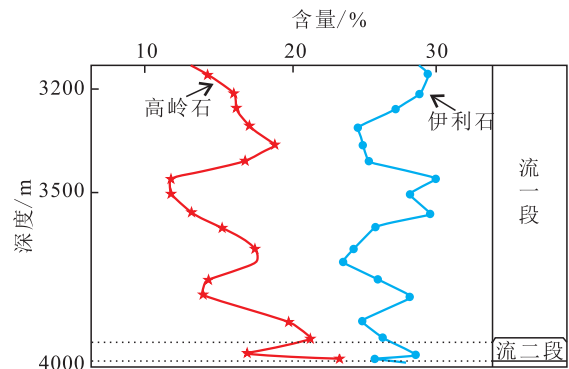


图 8 海中凹陷黏土矿物含量变化(改自罗威等,2013)

Fig. 8 Changes in clay mineral content in the Haizhong Depression

#### 4.1.4 JH-X4 井

该井位于北部湾盆地南部的福山凹陷,孢粉中同样以被子植物花粉占主要优势,孢粉组合为 *Quercoidites (microhenrici + minutus)*-*Tricolpopollenites-Liquidambarpollenites stigmosus*。孢粉组合中以栎粉、三沟粉和满点枫香粉为主,栎粉母体植物为广温型常绿乔木,枫香粉母体植物生长在喜热气候环境。裸子植物花粉中以喜热气候环境的雪松粉和铁杉粉为主,代表潮湿环境的蕨类孢子也大量出现,并且以喜湿热的水龙骨科单缝孢为主。可以看出,该井段中蕨类植物孢子、裸子植物花粉和被子植物花粉中主要以喜热气候环境的花粉占优势,与前面 3 口井相比气候可能更加炎热。喜湿环境的蕨类孢子在始新世早期分布较少,主要分布在始新世晚期,同样喜湿润的三沟粉和栎粉从始新世早期到中期减少,中期到晚期呈增加的趋势,推测从早期到中期气候逐渐干旱,到晚期气候重新变得湿润,温暖湿润的气候更加适宜各类植被的生长,因此始新世晚期孢粉化石大量出现。本井段孢粉组合以喜热气候环境孢粉为主,同时出现喜湿热环境的蕨类植物孢子,且该井位于北部湾盆地南部,纬度位置较低,因此气候较盆地内其他凹陷可能会更加炎热。福山凹陷流三段和流二段整体为温暖气候,但在流二段时期气候变得干旱(Jin et al., 2020)。因此,可以推断始新世时期的气候总体为一个相对湿润的热带气候类型,从早期的温暖湿润逐渐转变为中期的干燥炎热,再到晚期重新转变为温暖湿润的气候。

#### 4.2 沉积环境分析

各井孢粉组合中同时出现了盘星藻、百色藻和疑源类粒/光面球藻等藻类,通过藻类及各花粉的组合情况,可以推测当时的沉积环境。百色藻为非海相沟鞭藻,是低矿化度淡水湖标志,既见与淡水藻类共生,也见与微咸水非海相沟鞭藻共生,在较深水湖相沉积中含量较高(施和生等, 2017)。盘星藻是淡水水域较为常见的绿藻,生活于浅水湖泊、池塘、洼地或小河流,一般水深不超过 15 m,在水体中的含量一定程度上与水质和湖水的深浅有关,水体深浅变化又一定程度反映了降雨量的变化,同时与季风的强弱变化也存在相关性(Downie et al., 1961; 王开发和韩信斌, 1983; 张华等, 2004)。疑源类在中国主要分布在淡水、微咸水湖泊中(施和生等, 2017),粒面球藻是从欧洲

的海相侏罗系首次发现的,类似的分子在德国渐新统和加拿大西部侏罗系的海相沉积中也有发现,光面球藻一般认为是浅水近岸环境生活的微体生物(尹磊明, 1995)。

在 WS-X1 井孢粉组合中,出现大量粒/光面球藻和盘星藻,推测其沉积环境为湖泊; WS-X2 井中藻类化石以粒/光面球藻(高达 61.0%)为主,盘星藻和百色藻断续出现,推测其沉积环境同样为湖泊; WZ-X3 井藻类只出现少量疑源类的粒/光面球藻,被子植物花粉中以喜温的桉木粉为主,推测沉积环境可能为河流三角洲; JH-X4 井蕨类孢子含量较丰富,粒/光面球藻断续出现,并且出现红树林花粉三瓣粉,本井位置位于盆地南部,接受海侵时间较早,因此出现生长在海边的红树林花粉三瓣粉,推测当时的沉积环境为滨海的河湖沼泽相。

## 5 讨论

古新世—始新世极热事件(PETM)是发生在古新世—始新世界线附近( $\sim 55.8$  Ma)的一次极热事件(Zachos et al., 2001; 胡修棉等, 2020; Nwojji et al., 2023),全球平均温度增加约  $4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Jones et al., 2013),中高纬度平均增温  $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zachos et al., 2001; Sluijs et al., 2006; Jones et al., 2013)。碳同位素先快速负偏移,后恢复(Kennett and Stott, 1991),负偏移幅度为  $2\text{ }^{\text{‰}}\sim 7\text{ }^{\text{‰}}$ (McInerney and Wing, 2011)。利用全球深海沉积物岩心碳、氧同位素数据的研究表明,在始新世与渐新世之交,全球存在一个突然变冷事件(Oi-1)(Keigwin, 1980; Zachos et al., 2001),从而导致全球大洋古水温迅速降低约  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并在南极大陆形成大范围的永久性冰盖。

北部湾盆地始新世时期,主要以被子植物常绿阔叶栎类植物花粉占优势,出现喜热气候的被子植物和裸子植物花粉,同时还出现喜湿热环境的蕨类孢子,可以推测在始新世时期,北部湾盆地整体气候以温暖湿润的热带—亚热带气候为主(图 9)。始新世早期植被以生长在温暖环境的常绿阔叶林和落叶阔叶林为主,该时期喜热植被发育,同时生长大量喜湿热环境的蕨类植物,可推测该时期温度较高,为温暖湿润的热带—亚热带气候。通过与全球古气温变化的对比表明,北部湾盆地在始新世早期更加炎热,与古新世—始新世

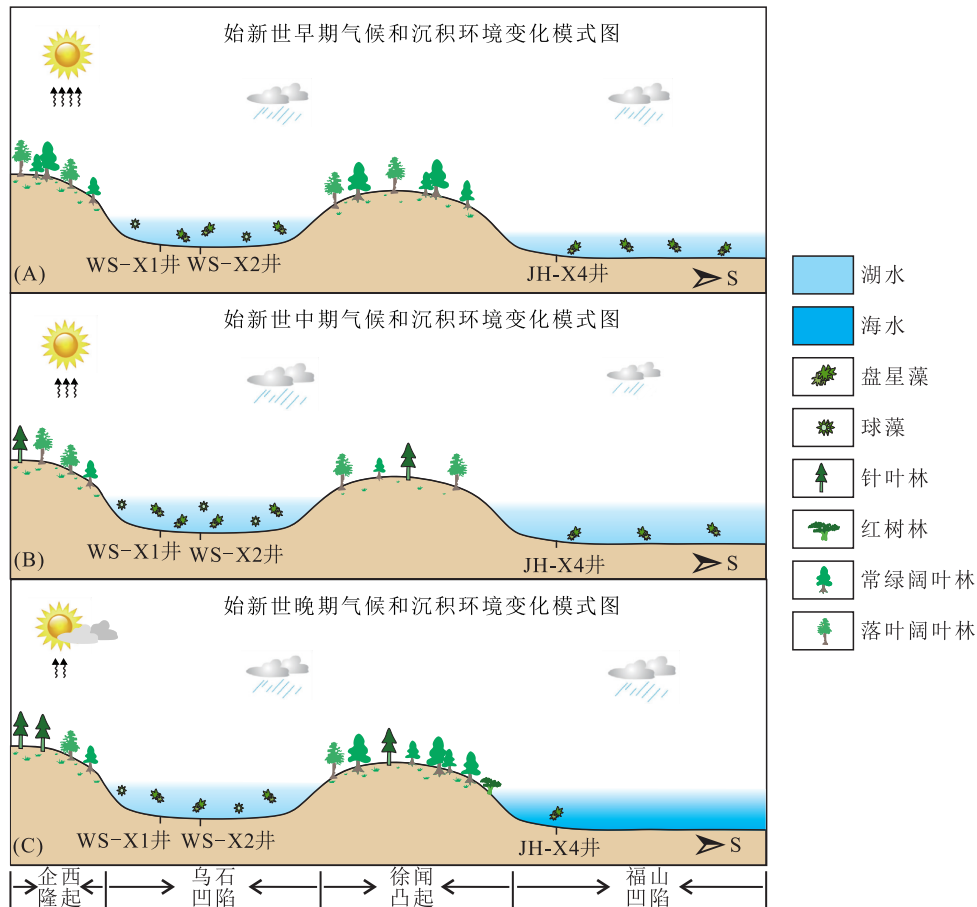


图 9 北部湾盆地气候和沉积环境变化模式图(剖面位置见图 1)

Fig. 9 Patterns of changes in the climate and the sedimentary environment

之交的极热事件(PETM) (Zachos et al., 2001; 胡修棉等, 2020; Nwojiji et al., 2023) 具有较好的对应性, 该时期凹陷内藻类发育, 推测沉积环境以湖泊沉积为主(图 9-A)。始新世中期, 总体以发育喜热植被为主, 喜冷植物针叶林开始少量发育, 推测气候有逐渐变凉的趋势, 该时期总体为温暖湿润的热带—亚热带气候, 但福山凹陷在始新世中期变得干旱, 植被发育较少(图 9-B), 为干热气候。始新世中期为湖盆全盛阶段, 断陷活动进一步加剧, 湖盆发育达到极盛时期(杨希冰, 2016), 水体逐渐加深, 此时期藻类发育繁盛(图 9-B), 是有机质富集的良好条件, 为该时期烃源岩发育的优势条件之一。始新世晚期, 喜热植被逐渐减少, 喜冷植被增多(图 9-C), 总体依然为温暖湿润的热带—亚热带气候, 但此时期气候明显变冷。李君等(2020)通过对涠西南凹陷的孢粉和藻类分析, 指出北部湾盆地在渐新世时期的气温和湿度都有明显地下降, 因此北部湾盆地始新世晚期气

候变冷, 与始新世和渐新世之交的骤冷事件(Oi-1) (Kennett and Stott, 1991; Zachos et al., 2001) 具有较好的对应性。福山凹陷在该时期又转变回温暖湿润的气候, 且福山凹陷位于盆地南部, 气温较高, 因此在该时期刚好形成了适宜植被生长的气候环境, 蕨类孢子、被子植物和裸子植物花粉都大量出现。该时期盆地北部凹陷内依然发育藻类, 沉积环境以湖泊沉积为主, 南部福山凹陷球藻少量发育, 且出现生长在海边的红树林花粉三瓣粉(图 9-C), 推测为滨海沉积环境。

## 6 结论

a. 北部湾盆地始新世 4 口井共鉴定出孢粉 49 个类型, 表现为以被子植物花粉中的栎粉占优势, 裸子植物花粉中松粉含量较高, 蕨类植物孢子中水龙骨单缝孢及紫萁孢含量较高, 并出现大量球藻、盘星藻等藻类。孢粉组合中, 热带—亚热带类群丰富且孢粉含量较高。

b. 根据孢粉组合推断,始新世时期为常绿和阔叶落叶混交林为主的森林植被,指示了北部湾盆地始新世时期整体为温暖湿润的热带—亚热带气候。通过 WS-X1 井、WS-X2 井和 WZ-X3 井分析结果可以看出,始新世早期气候更加炎热,该事件与古新世—始新世之交的一次极热事件具有较好的对应性;到始新世晚期,气候开始逐渐变凉,该事件与始新世—渐新世之交的全球突然变冷事件具有较好的对应性。

c. 通过藻类及其他花粉组合的分析,推测 WS-X1 井和 WS-X2 井沉积环境为湖泊沉积;WZ-X3 井藻类只出现少量疑源类的粒/光面球藻,推测沉积环境可能为河流三角洲;JH-X4 井出现生长在海边的红树林花粉三瓣粉,推测当时的沉积环境为滨海的河湖沼泽相。

d. 始新世中期,北部湾盆地整体为温暖湿润的亚热带气候,植被和藻类发育繁盛,为优质湖相烃源岩发育提供了物质基础,同时盆地处于第二张裂幕的鼎盛时期,盆地内断裂活动强烈,为有机质的保存提供了条件。因此,始新世中期为北部湾盆地优质烃源岩发育的有利时期。

### [ 参 考 文 献 ]

- 范淑贤, 刘海坤, 赵华, 等, 2009. 3.2 Ma B P 以来河北黄骅地区孢粉地层学与古气候变迁[J]. 微体古生物学报, 26(2): 173—180.
- Fan S X, Liu H K, Zhao H, *et al.*, 2009. Palynostratigraphy and paleoclimate changes in the Huanghua area of Hebei Province since 3.2 Ma B P[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 26(2): 173—180. (in Chinese)
- 傅宁, 林青, 王柯, 2017. 北部湾盆地主要凹陷流沙港组二段主力烃源岩再评价[J]. 中国海上油气, 29(5): 12—21.
- Fu N, Lin Q, Wang K, 2017. Main source rock reevaluation of Member 2 of Liushagang Formation in the sags of Beibuwan basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 29(5): 12—21. (in Chinese)
- 龚志伟, 2020. 北部湾盆地典型凹陷断陷期沉积差异及对烃源岩的影响[D]. 北京: 中国地质大学档案馆.
- Gong Z W, 2020. Sedimentary Differences of Typical Depression during Fault Depression Period in Beibu Gulf Basin and Its Impact on Source Rock[D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 韩箫屿, 2020. 抚顺盆地古城子组孢粉组合特征及其古植被和古气候[D]. 吉林: 吉林大学档案馆.
- Han X Y, 2020. Palynoflora from the Guchengzi Formation of the Fushun Basin and Its Paleoenvironment Implications[D]. Jilin: The Archive of Jilin University. (in Chinese)
- 韩箫屿, 舒军武, 2020. 抚顺盆地东露天煤矿早始新世孢粉组合特征及其古气候意义[J]. 世界地质, 39(1): 72—89.
- Han X Y, Shu J W, 2020. Early Eocene palynological assemblages from Donglutian Coal Mine in Fushun Basin and their paleoclimatic significance[J]. Global Geology, 39(1): 72—89. (in Chinese)
- 胡修棉, 李娟, 韩中, 等, 2020. 中生代两类极热事件的环境变化、生态效应与驱动机制[J]. 中国科学: 地球科学, 50(8): 1023—1043.
- Hu X M, Li J, Han Z, *et al.*, 2020. Two types of hyperthermal events in the Mesozoic-Cenozoic: Environmental impacts, biotic effects, and driving mechanisms[J]. Scientia Sinica (Terrae), 50(8): 1023—1043. (in Chinese)
- 黄磊, 张晓晶, 李钢柱, 等, 2023. 鄂尔多斯东北部中侏罗世孢粉化石及古气候意义[J]. 地质学报, 97(5): 1390—1406.
- Huang L, Zhang X J, Li G Z, *et al.*, 2023. Sporopollen assemblage from the middle Jurassic of the northeastern Ordos Basin, Inner Mongolia, and their paleoclimatic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 97(5): 1390—1406. (in Chinese)
- 李春荣, 张功成, 梁建设, 等, 2012. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J]. 石油学报, 33(2): 195—203.
- Li C R, Zhang G C, Liang J S, *et al.*, 2012. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 33(2): 195—203. (in Chinese)
- 李洁, 许清海, 张生瑞, 等, 2013. 相对花粉产量及其在古植被定量重建中的应用[J]. 第四纪研究, 33(6): 1101—1110.
- Li J, Xu Q H, Zhang S R, *et al.*, 2013. Relative pollen productivity and its use in quantitative reconstruction of paleovegetation [J]. Quaternary Sciences, 33(6): 1101—1110. (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 Depres-

- sion, Beibuwan Basin and their paleoenvironmental significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(2): 29–36. (in Chinese)
- 卢林,汪企浩,黄建军,2007. 北部湾盆地涠西南和海中西凹陷新生代局部构造演化史[J]. *海洋石油*, 27(1): 25–29+57.
- Lu L, Wang Q H, Huang J J, 2007. Local tectonic evolutionary history of the Cenozoic in the Weixinan and Haizhong depressions of the Beibuwan Basin[J]. *Offshore Oil*, 27(1): 25–29+57. (in Chinese)
- 罗威,谢金有,刘新宇,等,2013. 北部湾盆地海中西凹陷古近纪古气候研究[J]. *微体古生物学报*, 30(3): 288–296.
- Luo W, Xie J Y, Liu X Y, *et al.*, 2013. Paleogene paleoclimate research in the Haizhong Depression of the Beibu Gulf Basin[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 30(3): 288–296. (in Chinese)
- 覃军干,吴国璋,李君,等,2016. 琼东南盆地渐新统一上新统孢粉、藻类记录[J]. *微体古生物学报*, 33(4): 335–349.
- Qin J G, Wu G X, Li J, *et al.*, 2016. Spores, pollen, freshwater algae and dinoflagellate cysts recorded in the Oligocene–Pliocene from the southeast Hainan Basin, South China Sea[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 33(4): 335–349. (in Chinese)
- 任拥军,徐志尧,李福来,等,2016. 北部湾盆地乌石凹陷东部地区流沙港组烃源岩孢粉相特征及其意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 40(2): 34–42.
- Ren Y J, Xu Z Y, Li F L, *et al.*, 2016. Palynofacies of source rocks of Liushagang Formation in East Wushi Depression, Beibuwan Basin and its significance[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 40(2): 34–42. (in Chinese)
- 施和生,舒誉,杜家元,等,2017. 珠江口盆地古近系断陷盆地石油地质[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- Shi H S, Shu Y, Du J Y, *et al.*, 2017. *Petroleum Geology of the Paleoproterozoic Faulted Basin in the Zhujiangkou Basin*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- 王开发,韩信斌,1983. 我国东部新生界环纹藻化石研究[J]. *古生物学报*, 22(4): 468–473+511–512.
- Wang K F, Han X B, 1983. Study on the fossilized Cenozoic annelid algae in the eastern part of China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 22(4): 468–473+511–512. (in Chinese)
- 谢金有,李君,麦文,等,2012. 北部湾盆地涠洲组和流沙港组孢粉组合及时代[J]. *古生物学报*, 51(3): 385–394.
- Xie J Y, Li J, Mai W, *et al.*, 2012. Pollen assemblages and ages of the Weizhou Formation and Liushagang Formation in the Beibu Gulf Basin[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 51(3): 385–394. (in Chinese)
- 徐长贵,邓勇,范彩伟,等,2022. 北部湾盆地涠西南凹陷页岩油地质特征与资源潜力[J]. *中国海上油气*, 34(5): 1–12.
- Xu C G, Deng Y, Fan C W, *et al.*, 2022. Geological characteristics and resource potential of shale oil in Weixinan sag of Beibu Gulf Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 34(5): 1–12. (in Chinese)
- 许哲平,陈建强,肖景义,2009. 云南昆明盆地中更新世晚期以来的孢粉记录及古气候演化[J]. *地质学报*, 83(1): 65–77.
- Xu Z P, Chen J Q, Xiao J Y, 2009. Palynological records and paleoclimatic evolution since the late middle Pleistocene in the Kunming Basin, Yunnan Province [J]. *Acta Geology Sinica*, 83(1): 65–77. (in Chinese)
- 杨希冰,2016. 南海北部北部湾盆地油气藏形成条件[J]. *中国石油勘探*, 21(4): 85–92.
- Yang X B, 2016. Hydrocarbon accumulation conditions in Beibu-gulf Basin, northern South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 21(4): 85–92. (in Chinese)
- 杨再宝,2019. 南海南部孢粉分布特征及其对周边地区 4 万年来气候环境演化历史的指示[D]. 青岛:中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)档案馆.
- Yang Z B, 2019. Distribution Characteristics of Sporopollen in the Southern South China Sea and Its Implications for Regional Climate and Environmental Evolution since 40 ka[D]. Qingdao: The Archive of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences). (in Chinese)
- 叶得泉,钟筱春,姚益民,等,1993. 中国油气区第三系 I 总论[M]. 北京:石油工业出版社.
- Ye D Q, Zhong X C, Yao Y M, *et al.*, 1993. *Tertiary in Petroliferous Regions of China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 尹磊明,1995. 扬子地台前寒武纪—寒武纪界线地层的微体植物化石群[J]. *地层学杂志*, 19(4): 299–307+329.
- Yin L M, 1995. Microsomal plant fossil assemblages from the Precambrian-Cambrian boundary strata of the Yangzi Plateau[J]. *Journal of Stratigraphy*, 19(4): 299–307+329. (in Chinese)
- 于水,邓运华,李宏义,等,2020. 北部湾盆地流二段油页岩形成条件与分布控制因素[J]. *中国海上油气*,

- 32(2):24-33.
- Yu S, Deng Y H, Li H Y, *et al.*, 2020. Forming conditions and distribution controlling factors of oil shale in Liu 2 Member of Beibuwan basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 32(2):24-33. (in Chinese)
- 余海东, 张洪亮, 肖明, 等, 2021. 重庆云阳恐龙化石埋藏地新田沟组孢粉化石组合特征及意义[J]. *矿物岩石*, 41(2):99-108.
- Yu H D, Zhang H L, Xiao M, *et al.*, 2021. Characteristics and significance of palynological assemblage of Xintiangou Formation at the Yunyang dinosaur burial site, Chongqing [J]. *Mineralogy and Petrology*, 41(2):99-108. (in Chinese)
- 张佰涛, 唐金炎, 王文军, 等, 2014. 北部湾盆地北部坳陷构造—沉积特征及其演化[J]. *海洋石油*, 34(2):7-12.
- Zhang B T, Tang J Y, Wang W J, *et al.*, 2014. Characteristics of tectonic sedimentary evolution in northern depression of Beibuwan Basin[J]. *Offshore Oil*, 34(2):7-12. (in Chinese)
- 张华, 郑卓, 王建华, 等, 2004. 海南岛近 2500a 来盘星藻记录的周期性气候变化[J]. *热带地理*, 24(2):109-112+122.
- Zhang H, Zheng Z, Wang J H, *et al.*, 2004. Climate changes for the last 2500 years based on pediastrum record from Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 24(2):109-112+122. (in Chinese)
- 张玉兰, 李珍, 赵晶, 2010. 南海深海柱状样沉积孢粉藻类组合及其古气候与古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 30(1):77-82.
- Zhang Y L, Li Z, Zhao J, 2010. Sporepollen and algal assemblages in deep-sea sediments in the South China Sea and paleoclimate and paleoenvironment[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(1):77-82. (in Chinese)
- 张誉洋, 李永军, 郑孟林, 等, 2022. 新疆车排子油田车探 1 井 3538~3774 m 井段孢粉组合及地质意义[J]. *西北地质*, 55(2):157-165.
- Zhang Y Y, Li Y J, Zheng M L, *et al.*, 2022. Sporopollen assemblage and geological significance of 3538~3774 m section in Well Chetan 1, Chepaizi Oilfield, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 55(2):157-165. (in Chinese)
- 赵秀兰, 赵传本, 关学婷, 等, 1992. 利用孢粉资料定量解释我国第三纪古气候 [J]. *石油学报*, 13(2):215-225.
- Zhao X L, Zhao C B, Guan X T, *et al.*, 1992. Quantitative interpretation of the Tertiary paleoclimate in China using spore pollen data [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 13(2):215-225. (in Chinese)
- 钟筱春, 赵传本, 杨时中, 等, 2003. 中国北方侏罗系 II : 古环境与油气[M]. 北京:石油工业出版社.
- Zhong X C, Zhao C B, Yang S Z, *et al.*, 2003. Jurassic System in the North of China Volume II : Palaeoenvironment and Oil-Gas Source[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 周山富, 杨方之, 2007. 孢粉地质学[M]. 杭州:浙江大学出版社.
- Zhou S F, Yang F Z, 2007. Palynogeology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press. (in Chinese)
- 朱洁琼, 李廷辉, 廖飞燕, 等, 2023. 断裂分段特征对凹陷构造—沉积分异的控制作用——以北部湾盆地福山凹陷临高断裂为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 50(5):637-646.
- Zhu J Q, Li T H, Liao F Y, *et al.*, 2023. The controlling effect of fault segmentation characteristics on tectonic-sedimentary differentiation in depression—A case study of Lingao fault in Fushan Sag, Beibuwan Gulf Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 50(5):637-646. (in Chinese)
- Chun C O J, Delaney M L, Zachos J C, 2010. Paleoredox changes across the Paleocene-Eocene thermal maximum, Walvis Ridge (ODP Sites 1262, 1263, and 1266): Evidence from Mn and U enrichment factors [J]. *Paleoceanography*, 25(4):1-13.
- Downie C, Williams G L, Sarjeant W A S, 1961. Classification of fossil microplankton[J]. *Nature*, 192(4801):471-471.
- Gingerich P D, 2003. Mammalian responses to climate change at the Paleocene-Eocene boundary: Polecat Bench record in the northern Bighorn Basin, Wyoming[J]. *Geological Society of America, Special Papers*, 396:463-478.
- Herman A B, Spicer R A, Aleksandrova G N, *et al.*, 2017. Eocene-early Oligocene climate and vegetation change in southern China: Evidence from the Maoming Basin [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 479:126-137.
- Jin S, Wang H, Cao H, *et al.*, 2020. Lake-type controls on sedimentary infill and petroleum source rocks in the Palaeogene Fushan Depression, Beibuwan Basin, South China [J]. *Geological Journal*, 55(5):3936-3956.

- Jones T D, Lunt D J, Schmidt D N, *et al.*, 2013. Climate model and proxy data constraints on ocean warming across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum[J]. *Earth-Science Reviews*, 125:123–145.
- Keigwin Jr L D. 1980. Palaeoceanographic change in the Pacific at the Eocene-Oligocene boundary[J]. *Nature*, 287(5784):722–725.
- Kennett J P, Stott L D, 1991. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene[J]. *Nature*, 353(6341):225–229.
- McInerney F A, Wing S L, 2011. The Paleocene-Eocene Thermal Maximum; A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1):489–516.
- Nicolo M J, Dickens G R, Hollis C J, 2010. South Pacific intermediate water oxygen depletion at the onset of the Paleocene-Eocene thermal maximum as depicted in New Zealand margin sections[J]. *Paleoceanography*, 25(4):1–12.
- Nwojiji C, Marret F, Caswell B, *et al.*, 2023. Benthic foraminiferal turnover and trait changes across the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) at ODP site 1265A, Walvis Ridge, SE Atlantic Ocean [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5):1–17.
- Sluijs A, Schouten S, Pagani M, *et al.*, 2006. Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum [J]. *Nature*, 441(7093):610–613.
- Smith T, Rose K D, Gingerich P D, 2006. Rapid Asia-Europe-North America geographic dispersal of earliest Eocene primate *Teilhardina* during the Paleocene-Eocene thermal maximum[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(30):11223–11227.
- Traverse A, 2007. *Paleopalynology, Second Edition (Topics in Geobiology)* [M]. Pennsylvania: Springer Science & Business Media.
- Wang D, Lu S, Han S, *et al.*, 2013. Eocene prevalence of monsoon-like climate over eastern China reflected by hydrological dynamics[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62:776–787.
- 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.

(责任编辑:魏 威)

(上接第 192 页)

- Flügel E, 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application (2nd edition)* [M]. London: Springer.
- Tucker M E, 1992. The Precambrian-Cambrian boundary: Seawater chemistry, ocean circulation and nutrient supply in metazoan evolution, extinction and biomineralization [J]. *Journal of the Geological Society*, 149(4):655–668.
- Wilson J L, 1975. *Carbonate Facies in Geological History* [M]. New York: Springer.
- Wood R A, Zhuravlev A Y, Sukhov S S, *et al.*, 2017. Demise of Ediacaran dolomitic seas marks widespread biomineralization on the Siberian Platform[J]. *Geology*, 45(1):27–30.
- Yu X T, Xiang F, Su Z T, *et al.*, 2021. Miniaturized trace fossils in microbialites from the Cambrian Series 2 Qingxudong Formation in the Panhsi area, eastern Guizhou, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, (2):110514.

(责任编辑:黄维婷)