

引用格式: 杨文强, 贾小辉, 王志宏, 等, 2023. 广西北海地区 ZKA02 钻孔剖面新近纪孢粉组合及古植被演替 [J]. 地质力学学报, 29 (4): 584–598. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023047

Citation: YANG W Q, JIA X H, WANG Z H, et al., 2023. Neogene spore-pollen assemblages and paleovegetation succession of Borehole ZKA02 in Beihai, Guangxi [J]. Journal of Geomechanics, 29 (4): 584–598. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023047

广西北海地区 ZKA02 钻孔剖面新近纪孢粉组合及古植被演替

杨文强^{1,2}, 贾小辉^{1,2}, 王志宏^{1,2}, 雷勇³

YANG Wenqiang^{1,2}, JIA Xiaohui^{1,2}, WANG Zhihong^{1,2}, LEI Yong³

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;
2. 中国地质调查局古生物与生命-环境协同演化重点实验室, 湖北 武汉 430205;
3. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801

1. *Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;*
2. *Key Laboratory for Paleontology and Coevolution of Life and Environment, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;*
3. *College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China*

Neogene spore-pollen assemblages and paleovegetation succession of Borehole ZKA02 in Beihai, Guangxi

Abstract: The history of vegetation and climate change during the Cenozoic has been reconstructed by systematically analyzing the sporopollen assemblage from Borehole ZKA02 in Beihai, Guangxi. Through the analysis of spore-pollen data, four sporopollen assemblages can be recognized. From the Early Miocene to the Middle Miocene, this area was covered mainly by deciduous broad-leaved mixed forest-wet meadow vegetation, with a mild and semi-humid climate. From the end of the Middle Miocene to the early Late Miocene, the study area was dominated by coniferous and broad-leaved mixed forest-wet meadow vegetation, with mild and semi-humid. The middle Late Miocene was a mixed deciduous broad-leaved forest-wet meadow vegetation, with increasing conifers and ferns, and the climate was warm and humid. In the late Late Miocene to Pliocene, it was deciduous broad-leaved mixed forest-wet meadow vegetation. The species of evergreen broad-leaved trees in tropical rain forests and subtropical low mountains increased obviously, and the fern molecules decreased obviously. The climate in the Late Pliocene was warm and semi-arid, drier than the previous three stages. Spore-pollen assemblages reflected the climate change characteristics during the Neogene, which have good comparability with the trend of global climate change.

Keywords: spore-pollen assemblage; Neogene; paleo-vegetation; paleoclimate; Beihai

摘要: 通过对广西壮族自治区北海市新生代钻孔 ZKA02 中的孢粉化石的系统研究, 初步恢复了该地区新近纪植被变化历史和气候变化过程。根据孢粉化石数据, 将该钻孔自下而上划分出 4 个孢粉组合。早中新世—中中新世该地区的植被以落叶阔叶混交林-湿生草甸植被为主, 气候偏温和半湿润; 中中新世末期—晚中新世早期以针叶阔叶混交林-湿生草甸植被、温和半湿润气候为主; 晚中新世中期为落叶阔叶混交林-湿生草甸植被, 针叶树和蕨类植物逐渐增多, 整体气候为温暖湿润型; 晚中新世晚期—上新世为落叶阔叶混交林-湿生草甸植被, 热带雨林和亚热带低山常绿阔叶树种明显增加, 蕨类分子明显减少, 相较

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230226, DD20190047); 山西省优秀博士来晋工作奖励基金 (SXYBKY2019032); 山西农业大学科技创新基金项目 (2020BQ47)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants DD20230226 and DD20190047), the Shanxi Incentive Fund for Distinguished Doctorates (Grant SXYBKY2019032), and the Innovation Fund of Science and Technology of Shanxi Agricultural University (Grant 2020BQ47).

第一作者: 杨文强 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事地层古生物研究与区域地质调查。E-mail: yangwq36@126.com

收稿日期: 2023-04-01; 修回日期: 2023-07-23; 责任编辑: 王婧

于前三阶段, 该阶段气候更加干旱, 整体气候为偏温暖半干旱型。孢粉组合所反映的新近纪气候变化特征与全球气候变化趋势具有较好的可比性。

关键词: 孢粉组合; 新近纪; 古植被; 古气候; 北海

中图分类号: P52; P532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 04-0584-15

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023047

0 引言

孢子和花粉由于其个体小、易于保存, 对恢复古植被以及古气候方面有重要的指示意义, 在中新生代的古环境研究中得到广泛应用(杨振京和徐建明, 2002; 潘安定等, 2008; 杜金利等, 2009; 王伟铭, 2011; 戴璐等, 2012; 向轲等, 2020; Shen et al., 2021)。广西壮族自治区北海地区新生代孢粉的研究工作始于20世纪70年代, 主要是随着石油勘探的发展而兴起。由于北海地区被第四系或海水覆盖, 多数孢粉化石研究的材料来源于钻孔。该地区孢粉的研究集中于涠洲岛及海域的北部湾盆地(Li et al., 2010; 谢金有等, 2012; 傅宁等, 2017; 李君等, 2020a, 2020b; 黄向青等, 2022), 北部的合浦盆地和沿岸的南康盆地仅有零星报道(杨世蓉, 1993; 杨荣玉, 1996; 张金岩等, 2015)。现有的研究内容多聚焦于古近纪与烃源岩相关的层位以及第四纪全新世沉积, 而对新近纪的孢粉研究相对较少。吴作基(1976)将涠洲岛新近纪的孢粉划分了3个组合带, 认为中新世早期为温暖潮湿的亚热带气候, 后期雨量减少, 向半干旱发展, 至上新世变为半干旱或干旱的气候。已有研究对北部湾盆地新近纪孢粉进行详细分析, 部分学者对其建立了4个孢粉组合带, 认为新近纪整体为炎热潮湿的热带气候, 上新世较中新世热带性质减弱, 较凉较干(中华人民共和国石油勘探公司南海分公司等, 1981); 也有学者对其建立了3个孢粉组合和2个亚组合, 认为新近纪由亚热带温干气候向温凉气候过渡(中华人民共和国石油公司南海分公司等, 1981)。杨祖年(1982)通过对北部湾盆地新近纪孢粉的研究, 建立了3个组合带, 但未进行古气候方面的探讨。蒋仲雄等(1994)在北部湾盆地的新近系建立了4个孢粉组合, 认为早中新世早期为偏冷偏干的温带气候, 早中新世中晚期—上新世为热带—亚热带潮湿气候。之后的几十年由于油气勘探目标的原因, 对新近纪的孢粉关注较少。张清如(2009)对合浦盆地的新近纪孢粉进行了研究, 只列举了孢粉的鉴定结

果, 未进行详细的植被特征分析及古气候研究。李君等(2020a, 2020b)通过北部湾盆地2个钻孔的早中新世孢粉研究, 分别建立了1个孢粉组合, 均代表温暖湿润的热带—亚热带气候。总的来说, 北海地区新近纪孢粉成果较少, 研究程度不高, 在孢粉组合以及古气候演变方面尚未达成共识, 需要进行更深入的研究。

为了建立北海地区新近纪的孢粉组合序列, 并获得相应的区域性植被面貌和气候信息, 以位于北海市福成镇的钻孔 ZKA02 中获取的孢粉为研究对象, 通过研究该钻孔的孢粉组合, 恢复古植被面貌, 从而揭示新近纪的古气候变化。

1 区域地质背景

北海市位于北部湾坳陷带, 是南海北部大陆架西部的一个以新生代沉积为主的走滑拉分盆地(广西壮族自治区地质调查研究院, 2017)。盆地基底由古生代和中生代褶皱和岩体组成。盆地堆积的新生代沉积地层主要为古近系—新近系, 厚度较大, 可达3500 m, 第四系厚数几米至百余米不等。古新世—早始新世, 受合浦—北流断裂的影响发生断陷; 早始新世末期, 在喜马拉雅运动第一幕的影响下, 断裂活动加剧, 发育一系列横贯盆地呈北东70°方向的阶梯式断裂带, 由断陷盆地转化为断拗盆地(广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 王明明等, 2009); 中新世中—晚期, 随着南海盆地转为后裂谷沉降阶段(许浚远和张凌云, 1999), 区内形成一系列北东东向、往南陷落的半地堑断陷盆地, 发育河湖—滨海相沉积; 晚更新世后期, 出现大规模海退, 盆地暴露并间歇性抬升, 形成海蚀阶地。

北海地区新生代地层自下而上依次为古新统长流组、始新统流沙港组、渐新统涠洲组、中新统一上新统南康组、下更新统湛江组、中更新统北海组、上更新统望高组和全新统桂平组, 地表仅出露南康组、北海组和桂平组, 在北侧合浦盆地出露古近系邕宁群(图1)。

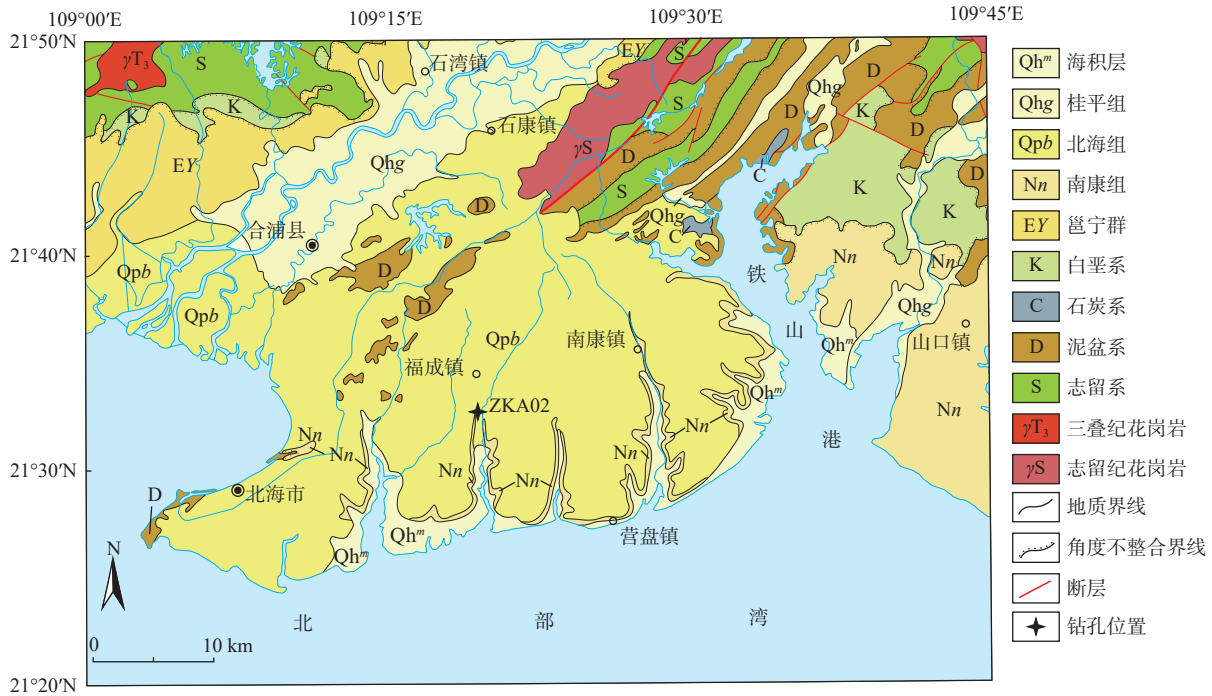


图1 研究区地质简图(据广西壮族自治区地质调查研究院, 2017修改)

Fig. 1 Geologic sketch of the study area (modified from Guangxi Institute of Geological Survey, 2017)

2 材料与方 法

此次研究的ZKA02钻孔位于北海市福成镇, 钻孔深度为125 m。该钻孔涵盖的地层由老至新为中新统一上新统南康组、下更新统湛江组和中更新统北海组(图2)。其中南康组一段分布于井段87.29~125.00 m, 以灰绿色碎屑沉积为特征, 主体岩性为灰绿色—青灰色黏土、砂质黏土、黏土质粉砂、细粉砂, 含海绿石矿物。南康组二段分布于井段37.74~87.29 m, 岩性为浅灰色—灰色黏土、粉砂质黏土、细砂, 夹数层灰黑色炭质黏土或褐煤层。湛江组位于井段8.52~37.74 m, 岩性主要为杂色(灰白色、灰黄色、褐黄色)黏土、粉砂质黏土、含黏土中细砂、砾质粗砂。北海组分分布于井段0.40~8.52 m, 岩性主要为黄色—棕红色粗砂质细砾、黏土质砂、砾质砂、砂质砾石层。

ZKA02钻孔中南康组未见底。根据该钻孔周边5 km范围内“广西合浦煤田福成探区精查勘探”项目的钻孔信息(张家渝, 1987), 新近系底界位于123.5~133.1 m处, 而ZKA02钻孔终孔深度125.00 m, 该范围内地势平坦, 推测ZKA02南康组下部剩余厚度小于10 m。该钻孔南康组携带了新近纪的绝大部分信息。对钻孔新近系部分进行了取样, 采样间

距为20~100 cm, 共采集样品97件。孢粉样品处理采用目前最常用的酸泡—筛滤法。取适量样品用烘箱烘干后在玛瑙研钵中粉碎。根据岩性称取20~40 g(粉砂类和砂类30~40 g, 黏土20~30 g)粉碎样品进行后续处理。用浓度10%的盐酸溶液浸泡3天, 除去样品中的碳酸盐成分, 用过滤水清洗溶液至中性。再用浓度39%的氢氟酸浸泡3~4天, 除去样品中的硅质组分, 用过滤水清洗至中性。之后加浓度10%的盐酸后水浴加热, 并清洗至中性。最后在超声波震荡器上进行筛选(筛布直径10 μm), 取直径大于10 μm 的颗粒进行离心和制片。在光学显微镜下鉴定并进行统计。所有孢粉预处理、鉴定及统计工作均在中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心完成。

3 新近纪地层对比

相邻的北部湾盆地和雷琼盆地新近系自下而上为下洋组、角尾组、灯楼角组和望楼港组(表1), 这些地层与ZKA02钻孔的南康组具有相似的岩性特征。其中ZKA02钻孔106.44~125.00 m岩性与下洋组一致, 为灰绿色含砾粗砂、中细砂夹灰绿色粉砂和黏土; 80.38~106.44 m主体岩性为青灰色—灰绿色黏土、粉砂质泥、泥质粉砂与细砂呈不等厚互

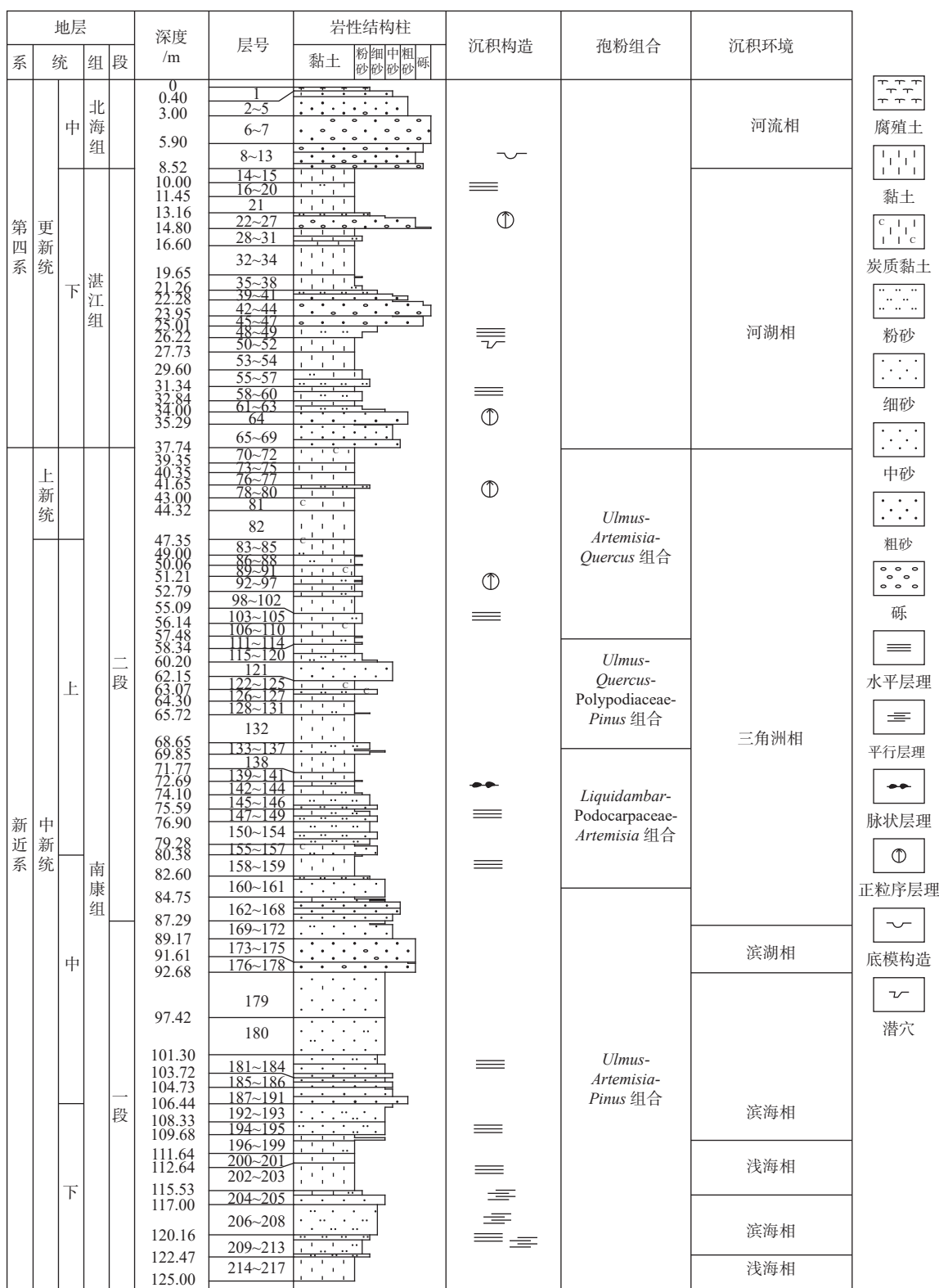


图 2 广西北海市 ZKA02 钻孔地层综合柱状图
 Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of Borehole ZKA02 in Beihai, Guangxi

层, 局部见砂砾石夹层, 与角尾组具可对比性; 47.35~80.38 m 岩性为灰、灰白、灰绿、紫红色中一粗砂、含砾粗砂、砂砾为主, 夹粉砂和黏土, 下部夹少量炭

质泥及褐煤, 可与灯楼角组对比; 37.74~47.35 m 岩性以浅灰色黏土、粉砂质黏土、泥质粉砂、粉砂为主, 上部夹中细砂或含砾砂, 可与望楼港组对比。

表 1 北海地区及邻区新近纪岩石地层序列对比表

Table 1 Correlation of Neogene lithostratigraphic sequence of Beihai area and adjacent basins

地质年代		珠江口盆地	雷琼盆地	北部湾盆地	合浦盆地	北海地区
纪	世					
新近纪	上新世	万山组	望楼港组	望楼港组		
	晚	粤海组	灯楼角组	灯楼角组	白沙江组	南康组
		中	韩江组	角尾组		
	早	珠江组	下洋组	下洋组		

注: 珠江口盆地资料引自解习农等(2011); 雷琼盆地资料引自中华人民共和国石油勘探公司南海分公司等(1981); 北部湾盆地资料引自中华人民共和国石油勘探公司南海分公司等(1981)和吴孔友等(2021); 合浦盆地资料引自张金岩等(2015)

北海地区南康组时代为中新世—上新世(广西壮族自治区地质矿产局, 1997; 广西壮族自治区地质调查研究院, 2017); 北部湾盆地和雷琼盆地地下洋组和角尾组时代分别为早中新世和中中新世(中华人民共和国石油勘探公司南海分公司等, 1981); 灯楼角组和望楼港组时代分别为晚中新世和上新世(广东省地质矿产局, 1996)。根据与邻区北部湾盆地和雷琼盆地的地层对比情况, 将ZKA02 钻孔 106.44~125.00 m 地层时代定为早中新世; 80.38~106.44 m 地层时代定为中中新世; 47.35~80.38 m 地层时代定为晚中新世; 37.74~47.35 m 地层时代归为上新世。

4 孢粉组合分析

4.1 孢粉类型

此次共分析了ZKA02 钻孔的 97 件孢粉样品, 其中 51 件样品获得 150~690 粒不等的孢子花粉粒, 平均 332 粒/件。少量样品中发现零星孢子花粉颗粒, 由于数据极少, 不具有统计意义, 未计入孢粉谱分析, 其他样品未见孢粉颗粒。共计鉴定出 55 个孢子花粉类型, 利用全部孢子和花粉总数计算每个类型的百分含量。代表性孢粉类型图片见图 3。

孢粉组合总体以落叶乔木花粉为主, 平均含量 49.2%, 以榆属(*Ulmus*)为主, 平均含量 16.2%, 其次为枫香属(*Liquidambar*; 平均含量 8.8%)、栎属(*Quercus*; 平均含量 7.7%)和冬青科(*Aquifoliaceae*; 平均含量 5.1%), 其他类型还有桦木属(*Betula*)、梧桐科(*Sterculiaceae*)、豆科(*Leguminosae*)、茜草科(*Rubiaceae*)、山榄科(*Sapotaceae*)等, 含量均较少。

灌木和草本花粉居次, 平均含量为 25.0%。灌木和草本花粉以蒿属(*Artemisia*; 平均含量 10.9%)为主, 其次为禾本科(*Gramineae*, 平均含量 5.3%)和莎草科(*Cyperaceae*, 平均含量 2.4%), 其他类型还有少量的藜科(*Chenopodiaceae*)、蓼科(*Polygonaceae*)、菊

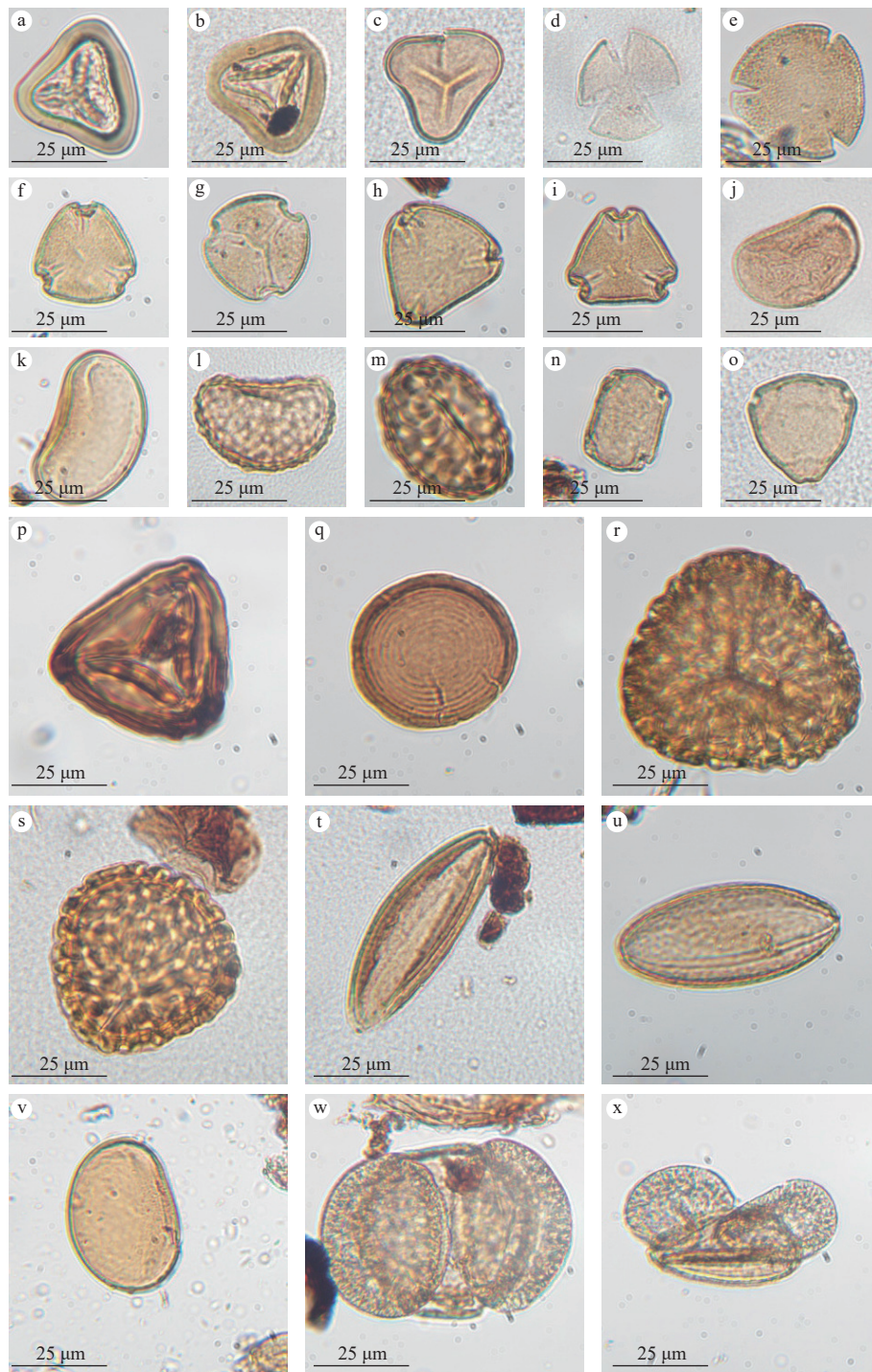
科(*Compositae*)、麻黄属(*Ephedra*)、桃金娘科(*Myrtaceae*)、眼子菜科(*Potamogetonaceae*)、十字花科(*Brassicaceae*)、锦葵科(*Malvaceae*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)等。

针叶树花粉平均含量占 12.7%, 以松属(*Pinus*, 平均含量 6.0%)含量占优势, 罗汉松科(*Podocarpaceae*)居次, 平均含量为 4.4%。其他常见类型还有铁杉(*Tsuga*)、落叶松(*Larix*)、杉科(*Taxodiaceae*)。

蕨类植物孢子平均含量为 11.1%, 以水龙骨科(*Polypodiaceae*, 平均含量 7.3%)为主, 其他类型主要为里白科(*Gleicheniaceae*)、中国蕨孢(*Sinopteridaceae*)、水蕨科(*Parkeriaceae*)、卷柏科(*Selaginellaceae*)、骨碎补科(*Davalliaceae*)和凤尾蕨科(*Pterisporites*)。水生藻类分子含量较低, 平均含量仅占 2.1%, 但个别样品含量达 19.6%, 主要以刺甲藻科(*Spiniferitaceae*)为主, 平均含量占 1.0%, 个别样品含量达 15.2%。其余还有双星藻(*Zygnema*)、环纹藻属(*Concentricystes*)和拟多甲藻科(*Phthanoperidinaceae*)。

4.2 孢粉组合

根据孢粉母体的生态习性, 将钻孔的孢粉按湿度指示意义不同划分为喜热型、喜温型和广温型 3 类, 按湿度指示意义的不同划分为早生型、湿生型和中生型 3 种类型(叶得泉等, 1993; 雷华蕊等, 2018)。ZKA02 钻孔中喜热型孢粉包括: *Myrtaceae*、*Loranthaceae*、*Euphorbiaceae*、*Liquidambar*、*Carya*、*Palmae*、*Rubiaceae*、*Aquifoliaceae*、*Sapotaceae*、*Rutaceae*、*Moraceae*、*Tsuga*、*Taxodiaceae*、*Podocarpaceae*、*Polypodiaceae*、*Gleicheniaceae*、*Parkeriaceae*、*Davalliaceae*、*Pterisporites*; 喜温型孢粉包括: *Artemisia*、*Gramineae*、*Compositae*、*Labiatae*、*Caryophyllaceae*、*Potamogeton*、*Ranunculaceae*、*Quercus*、*Ulmus*、*Juglans*、



a、b—凤尾蕨属; c—里白属; d、e—铃子香属; f—栎树属; g—蔷薇属; h、i—山矾属; j、k—石韦属; l、m—水龙骨科; n—榆属; o—榛属; p—凤尾蕨属; q—环纹藻属; r、s—金粉蕨属; t、u—麻黄属; v—石韦属; w、x—松属

图 3 钻孔主要孢粉类型图片

Fig. 3 Photos of the main spore-pollen types in Borehole ZKA02

(a and b) *Pteris*; (c) *Hicriopteris*; (d and e) *Chelonopsis*; (f) *Koelreuteria*; (g) *Rosa*; (h and i) *Symplocos*; (j and k) *Pyrrosia*; (l and m) *Polypodium*; (n) *Ulmus*; (o) *Corylus*; (p) *Pteris*; (q) *Concentricystes*; (r and s) *Onychium*; (t and u) *Ephedra*; (v) *Pyrrosia*; (w and x) *Pinus*

Tilia, *Trema*, *Betula*, *Salix*, *Oleaceae*; 广温型孢粉包括 *Chenopodiaceae*, *Cyperaceae*, *Polygonaceae*, *Liliaceae*, *Rosaceae*, *Ephedra*, *Typha*, *Myriophyllum*,

Ericaceae, *Malvaceae*, *Leguminosae*, *Sterculiaceae*, *Pinus*, *Larix*, *Zygnemataceae*, *Concentricystes*, *Spiriferitaceae*, *Peridiniopsis*。湿生型孢粉包括: *Pteris-*

porites、Cyperaceae、Gramineae、Polygonaceae、Liliaceae、*Typha*、*Myriophyllum*、*Potamogeton*、Palmae、*Salix*、Sterculiaceae、Taxodiaceae、Polypodiaceae、Parkeriaceae、Zygnemataceae、*Concentricystes*、Spiniferitaceae、*Peridiniopsis*、Ranunculaceae; 早生型孢粉包括: Chenopodiaceae、Compositae、*Ephedra*、Labiatae、

Caryophyllaceae、Malvaceae、*Ulmus*; 其余为中生型孢粉。

依据孢粉主要组分随钻孔深度含量变化特征, 以及代表性科属对气候温度和湿度变化的指示, 将ZKA02钻孔孢粉化石自下而上划分为4个孢粉组合(图4), 较完整地记录了北海地区新近纪的区域性植被面貌演变特征。

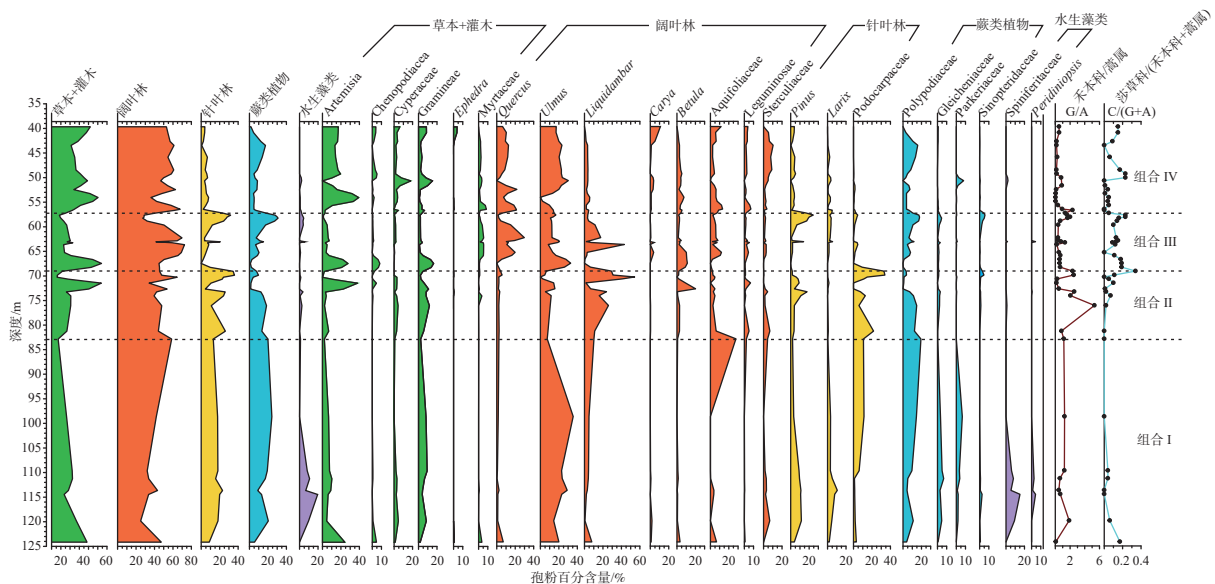


图4 广西北海市ZKA02钻孔新生代地层孢粉百分比图谱与孢粉组合划分

Fig. 4 Neogene spore-pollen percentage diagram and spore-pollen assemblages from Borehole ZKA02 in Beihai, Guangxi

(1) 孢粉组合 I (深度 82.80~124.20 m): *Ulmus*-*Artemisia*-*Pinus* 组合 (榆属-蒿属-松属组合)

该组合总体以落叶阔叶树花粉含量占优势为特征, 平均含量 36.7%; 灌木和草本花粉含量居次, 平均含量 22.6%。针叶树花粉平均含量 17.3%; 水生藻类含量相对较多, 平均含量 7.9%。灌木和草本花粉以蒿属 (*Artemisia*, 平均含量 9.7%)、禾本科 (Gramineae, 平均含量 6.0%) 为主。莎草科 (Cyperaceae, 平均含量 2.2%)、眼子菜属 (*Potamogeton*, 平均含量 1.0%) 和藜科 (Chenopodiaceae, 平均含量 1.0%) 较低。其他类型还有极少量的菊科 (Compositae)、桃金娘科 (Myrtaceae)、唇形科 (Labiatae)、十字花科 (Brassicaceae)、锦葵科 (Malvaceae)、蓼科 (Polygonaceae)、麻黄属 (*Ephedra*) 等。蒿属/藜科 (A/C) 花粉含量比值范围 5.38~14.43, 平均 9.07; 禾本科/蒿属 (G/A) 花粉比值范围 0.07~1.87, 平均 0.92; 莎草科/(禾本科+蒿属) (C/(G+A)) 花粉比值 0~0.17, 平均 0.04。钻孔 120~110 m 处有先降低再升高的波动。落叶阔叶树花粉以榆属 (*Ulmus*) 占绝对优势, 平均含量 24.1%。枫香属 (*Liquidambar*, 平

均含量 3.8%)、梧桐科 (Sterculiaceae; 平均含量 2.5%) 和冬青科 (Aquifoliaceae, 平均含量 2.1%) 含量较少。其他类型还有极少量的栎属 (*Quercus*)、山核桃属 (*Carya*)、茜草科 (Rubiaceae)、桦木属 (*Betula*)、豆科 (Leguminosae) 和樟科 (Lauraceae) 等。针叶树花粉以松属 (*Pinus*) 为主, 平均含量 8.4%; 其他类型还有少量的落叶松属 (*Larix*)、铁杉 (*Tsuga*) 和罗汉松科 (Podocarpaceae)。

湿生蕨类植物孢子平均含量 15.5%。以水龙骨科 (Polypodiaceae) 为主, 平均含量 7.6%。里白科 (Gleicheniaceae) 居次, 平均含量 3.7%。其他类型还见少量的水蕨科 (Parkeriaceae)、骨碎补科 (Davalliaceae)、凤尾蕨科 (Pterisporites) 和中国蕨孢 (Sinopteridaceae)。水生藻类分子中以刺甲藻科 (Spiniferitaceae) 含量居多, 平均含量 6.3%, 其中个别样品含量达 15.2%。拟多甲藻科 (Phthanoperidiniaceae) 居次, 平均含量 1.5%。其余还有极少量环纹藻属 (*Concentricystes*), 平均含量不足 1%。

(2) 孢粉组合 II (深度 69.00~82.80 m): *Liquidambar*-*Podocarpaceae*-*Artemisia* 组合 (枫香属-罗汉松科-

蒿属组合)

该组合落叶阔叶类花粉含量较上一组合明显增加,平均含量48.5%,占明显优势;灌木和草本花粉含量较上一组合减少,平均含量19.8%。同时,蕨类植物孢子增加,平均含量21.1%;而水生藻类分子大幅度减少,平均含量仅为1.0%。

灌木和草本花粉仍以蒿属(*Artemisia*,平均含量8.3%)略占优势,且较上一组合减少。禾本科(*Gramineae*,平均含量5.9%)和莎草科(*Cyperaceae*,平均2.1%)均占少量。其他类型还有藜科(*Chenopodiaceae*)、蓼科(*Polygonaceae*)、菊科(*Compositae*)、百合科(*Liliaceae*)、麻黄属(*Ephedra*)、唇形科(*Labiatae*)、桃金娘科(*Myrtaceae*)、眼子菜科(*Potamogetonaceae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)等,但含量均不足1%。蒿属/藜科(A/C)花粉含量比值位于0.87~56.00之间,平均13.93;禾本科/蒿属(G/A)花粉比值范围0.16~5.32,平均1.83;莎草科/(禾本科+蒿属)(C/(G+A))花粉比值0~0.34,平均0.07。

落叶阔叶树花粉以枫香属(*Liquidambar*)占绝对优势,平均含量22.7%,个别样品含量高达54.3%,较上一组合明显增加。榆属(*Ulmus*,平均含量7.9%)居次,但较上一组合明显减少。冬青科(*Aquifoliaceae*)在该组合中的平均含量为5.8%,较上一组合增加。其余类型如栎属(*Quercus*)、桦木属(*Betula*)、豆科(*Leguminosae*)、梧桐科(*Sterculiaceae*)、胡桃属(*Juglans*)、棕榈科(*Palmae*)、茜草科(*Rubiaceae*)、芸香科(*Rutaceae*)和木犀科(*Oleaceae*)等均见少量。针叶树花粉以罗汉松科(*Podocarpaceae*)花粉含量最高,平均含量13.7%,较上一组合明显增加。松属(*Pinus*,平均6.2%)居次,同时见极少量铁杉(*Tsuga*)、落叶松(*Larix*)和杉科(*Taxodiaceae*)。

蕨类孢子和藻类分子含量较少,平均含量仅占9.6%和1.0%。其中蕨类孢子仍以水龙骨科(*Polypodiaceae*)为主,平均含量6.8%,但较上一组合减少。同时藻类分子仅见极少量刺甲藻科(*Spiniferitaceae*)、拟多甲藻科(*Phthanoperidinaceae*)和双星藻属(*Zygnema*),含量均不足1%。

(3)孢粉组合Ⅲ(深度57.20~69.00 m):*Ulmus-Quercus-Polypodiaceae-Pinus*组合(榆属-栎属-水龙骨科-松属组合)

该组合仍以落叶阔叶类花粉占优势,平均含量49.4%;灌木和草本居次,平均含量21.3%。而与上

一组合相比,该组合针叶树花粉含量明显减少(平均含量13.2%),蕨类植物孢子较上一组合高,平均含量14.3%。

灌木和草本花粉仍以蒿属(*Artemisia*,平均含量7.6%)略占优势,禾本科(*Gramineae*,平均含量4.8%)居次。其他类型如藜科(*Chenopodiaceae*)、桃金娘科(*Myrtaceae*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)均占少量。可见极少量的狐尾藻属(*Myriophyllum*)。蒿属/藜科(A/C)花粉含量比值位于1.43~9.00之间,平均4.56;禾本科/蒿属(G/A)花粉比值范围0.20~2.00,平均0.85;莎草科/(禾本科+蒿属)(C/(G+A))花粉比值0~0.23,平均0.14。

落叶阔叶树花粉以榆属(*Ulmus*,平均含量17.3%)占优势,较上一组合明显增加;栎属(*Quercus*,平均含量9.8%)居次,较前两个组合均明显增加。枫香属(*Liquidambar*)大幅度减少,平均含量7.4%。其余类型如桦木属(*Betula*)、冬青科(*Aquifoliaceae*)、豆科(*Leguminosae*)等均较上一组合略微增加或持平。针叶树花粉较上一组合减少,平均含量13.2%。仍以松属含量为主(平均含量8.1%),较上一组合略增加。罗汉松科(*Podocarpaceae*,平均含量2.5%)明显减少。其余见少量的铁杉属(*Tsuga*)和落叶松属(*Larix*)。

蕨类孢子仍以水龙骨科(*Polypodiaceae*,平均含量9.2%)占多数,较上一组合略微增加。此外出现极少量的卷柏科(*Selaginellaceae*)。水生藻类孢子仅见极少量双星藻属(*Zygnema*)、刺甲藻科(*Spiniferitaceae*)和拟多甲藻科(*Phthanoperidinaceae*)。

(4)孢粉组合Ⅳ(深度39.60~57.20 m):*Ulmus-Artemisia-Quercus*组合(榆属-蒿属-栎属组合)

该组合落叶阔叶类花粉(平均含量54.5%)以及灌木和草本(平均含量32.7%)的含量均较上一组合明显增加,且仍以落叶阔叶类花粉占明显优势。针叶树花粉和蕨类植物孢子含量均明显减少,平均含量分别占4.9%和7.3%。

该组合灌木和草本花粉仍以蒿属(*Artemisia*,平均含量16.1%)占优势,且较上一组合明显增加。禾本科(*Gramineae*,平均含量5.0%)、莎草科(*Cyperaceae*,平均含量4.2%)和藜科(*Chenopodiaceae*,平均含量1.7%)均占少量,并出现极少量的麻黄属(*Ephedra*)和香蒲属(*Typha*)。蒿属/藜科(A/C)花粉含量比值位于2.40~106.30之间,平均20.56;禾本科/蒿属(G/A)花粉比值范围0.03~2.33,平均0.47;莎草

科/(禾本科+蒿属)(C/(G+A))花粉比值0~0.23,平均0.08。

落叶阔叶树花粉仍以榆属(*Ulmus*, 平均含量17.2%)最多,与上一组合持平。栎属(*Quercus*, 平均含量11.1%)居次,较上一组合增加。其余类型如冬青科(Aquifoliaceae)、山核桃属(*Carya*)、茜草科(Rubiaceae)、梧桐科(Sterculiaceae)等均较上一组合略增加。而枫香属(*Liquidambar*)、桦木属(*Betula*)均略减少。针叶树花粉仍以松属含量最高,但平均含量仅占2.9%,其余仅见极少量铁杉属(*Tsuga*)、落叶松属(*Larix*)和罗汉松科(Podocarpaceae)。

蕨类孢子仍以水龙骨科(Polypodiaceae, 平均含量5.8%)占多数。该组合中藻类分子含量极少,平均含量仅0.6%,较上一组合明显减少。仅见极少量刺甲藻科(Spiniferitaceae)和双星藻属(*Zygnema*)。

5 古植被演替与气候变化

整个ZKA02钻孔地层中木本植物花粉占优势,其中既出现了榆粉、胡桃粉、枫香粉、山核桃粉等落叶阔叶树的花粉,同时也出现了冬青粉、桃金娘粉等常绿阔叶树的花粉以及松粉、罗汉松粉和杉粉等针叶树花粉。该钻孔的孢粉的整体特征与南海北部大陆架(包括北部湾和雷琼半岛;李响等,2019;李君等,2020b;张宗言等,2020)、南海西南莺琼盆地的孢粉特征类似(中华人民共和国石油勘探公司南海分公司等,1981;王伟铭,1992;谢金有等,2014),处于古热带植物区(王伟铭,1992)。

根据ZKA02钻孔孢粉组合呈现出的变化特征,新近纪的植被演替及其所反映的古气候和古环境变迁可分为4个阶段。

(1)早中新世—中中新世,研究区植被以孢粉组合I为代表。主要类型为落叶阔叶混交林-湿生草甸植被,此时以落叶阔叶含量占优势,其中以榆属为主,枫香属、梧桐科和冬青科植物含量较少。灌木和草本植物中以反映中生和旱生环境的蒿为主,禾本科居次,水生湿生草本莎草科、眼子菜属含量较低。针叶树含量较少,以松属为主,见少量落叶松属、铁杉和罗汉松科。湿生蕨类植物较少,以水龙骨科为主。该段喜湿润的水生藻类分子较多,见代表海相咸水环境的刺甲藻科和拟多甲藻科,以及淡水环纹藻属,个别样品的刺甲藻化石含量可达15.2%,该段底部亦可见大量有孔虫内膜,咸水藻类

和淡水藻类同时出现,说明此时为海水弱影响的滨海环境。很多研究表明蒿属/藜科(A/C)、禾本科/蒿属(G/A)和莎草/(禾本科+蒿属)(C/(G+A))等花粉含量比值可以作为气候变化的指示参数,其值越大表明气候越湿润(El-Moslimany, 1990; 翁成郁等, 1993; 唐领余等, 2009)。土壤盐度、植被群落组成以及样品来源沉积物的类型等会影响不同植被区的比值,所以这些比值的绝对比值会因地区而异,但同一地区该比值变化趋势仍然可以指示气候的变化(Herzschuh, 2007; Zhao et al., 2012)。如果蒿属和藜科花粉在孢粉组合中不占优势,则A/C值就不再适用(唐领余等, 2009; 黄壬晖等, 2019)。ZKA02钻孔地层中藜科含量很低,很多样品中未发现该植物,故只能参考G/A、C/(G+A)的比值。该阶段整体比值中等,G/A和C/(G+A)均在120~110 m处出现了降低再升高的波动,说明经历了一次变干再变湿的过程。利用喜热型孢粉所占的比例可以反映气候冷暖变化,而湿生型孢粉的比例则可以反映气候的湿润程度(雷华蕊等, 2018)。该组合中喜热孢粉比例为18.2%~72.6%,平均31.9%。湿生型孢粉比例为8.8%~55.7%,平均34.0%,说明气候偏温,湿润程度中等。大量研究表明,在沉积物来源稳定的前提下,近岸沉积物粒径的变化可反映气候及海平面的变化。粒度较粗说明悬浮颗粒较少,跳跃颗粒多,可以反映地面植被差,指示气候干旱,反之,细粒颗粒含量高,指示风力较小,气候湿润(Weltje, 1997; 万世明等, 2007)。该阶段沉积物以含砾中粗砂、细砂为主夹粉砂和黏土,反映半湿润的气候。综合该阶段的植被类型特征与沉积物粒度特征,判断研究区该段气候偏温和半湿润(图4,图5),主要受中新世较强夏季季风作用的影响(Tada et al., 2016; Clift, 2020)。

北海地区古近纪主要为河流相和湖泊相,早中新世—中中新世期间海域扩大,研究区沉入水中,发展成滨浅海,并经历了滨海与浅海的波动。雷州半岛也由古近纪的河湖相转变为滨浅海相(李响等, 2019)。受东西向断裂控制的雷琼裂谷在新近纪裂陷,形成的古琼州海峡包括了整个雷州半岛在内的浅海(赵焕庭等, 2007)。东侧毗邻的珠江口盆地自晚渐新世开始由陆相沉积向海相沉积转化,并在中新世随着南海进一步扩张而海平面上升幅度及变化速率加快(朱锐等, 2015; 毛雪莲等, 2019)。中新世,北海与北部湾地区的海水与西南方向的莺

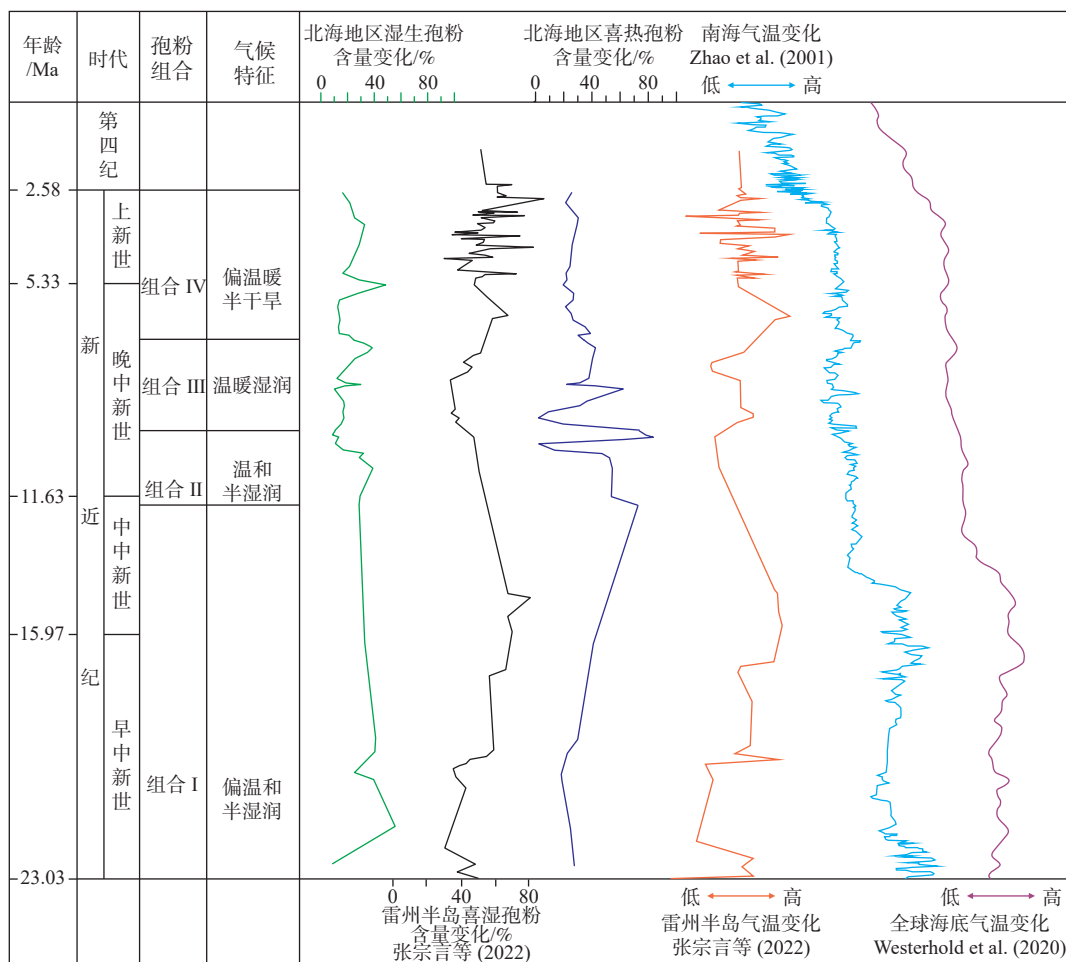


图 5 广西北海市 ZKA02 钻孔新近纪地层孢粉组合反映的气候变化与全球气候变化对比

Fig. 5 The comparison between the climate change reflected by the Neogene spore-pollen assemblages in Borehole ZKA02, Beihai, Guangxi and the global climate change

歌海盆地及与东部的珠江口连成一片(吴长林, 1984), 在北海与珠江口之间的雷琼裂谷低地发育潮流并开始接受北海地区以及南海两个方向的海浪潮流冲刷(赵焕庭等, 2007), 形成现今琼州海峡的初期地貌。

(2)中中新世末期—晚中新世早期, 研究区植被以孢粉组合 II 为代表。主要类型为针叶阔叶混交林—湿生草甸植被, 此时仍以落叶阔叶含量占优势, 较前一阶段明显增加。其中以枫香属为主, 较前一阶段大幅度增加, 而冬青科等常绿阔叶树减少。灌木和草本植物较前一阶段减少, 其中仍以中生和旱生植物蒿属为主, 禾本科居次。针叶树明显增多, 其中以罗汉松属为主且明显增多。该阶段喜湿润的蕨类植物早期较多, 晚期减少。水生藻类分子明显减少, 仅见极少量咸水环境的刺甲藻科和拟多甲藻科, 以及淡水双星藻属。G/A 与 C/(G+A) 比值含量中等, 整体较前一阶段高, 反映气候较前一阶段更

加湿润。钻孔中喜热孢粉比例为 2.3%~83.5%, 平均含量 52.2%; 湿生型孢粉比例为 8.7%~39.0%, 平均含量 20.1%。喜热的孢粉比例有所上升, 反映气温逐渐增高。该阶段沉积以灰色—青灰色砂、粉砂、黏土不等厚互层, 为三角洲相沉积, 水体相对第一阶段较浅, 但细粒沉积物含量有所增加, 反映气候仍为半湿润型。综合沉积物粒度和植被类型特征, 认为此阶段气候为温和半湿润型(图 4, 图 5)。

(3)晚中新世中期, 研究区植被以孢粉组合 III 为代表, 主要类型为落叶阔叶混交林—湿生草甸植被, 此时仍以落叶阔叶含量占优势, 其中以榆属为主, 较前一阶段明显增加, 枫香属明显减少。灌木和草本植物较前一阶段略微增加, 其中仍以蒿属为主, 禾本科居次, 且均较前两阶段略减少。针叶树早期较少, 晚期增多, 其中罗汉松属明显减少。蕨类植物早期较少, 晚期增多, 总体较前一阶段明显增加, 主要是受东亚季风增强的影响(杨小强等,

2022)。喜湿润的水生藻类分子略微增加,其中淡水双星藻属增多。G/A 比值与 C/(G+A) 比值中等,但 G/A 比值相对平稳,整体比前一阶段偏低,而 C/(G+A) 较前一阶段略有增大,且波动幅度较大。钻孔中喜热孢粉比例为 2.0%~62.2%,平均 33.2%,湿生型孢粉比例 10.1%~38.5%,平均 22.8%,表明与前一阶段相比气温有所降低,但湿润程度稍微有所增加。该阶段仍为三角洲相,沉积物以浅灰色黏土、粉砂质黏土、泥质粉砂、粉砂为主,夹中细砂,整体粒度偏细,反映气候为湿润型。综合植被类型特征与沉积物特征,认为此段较前一段气候湿润,整体气候类型为温暖湿润型(图 4,图 5)。

(4)晚中新世晚期—上新世,研究区植被以孢粉组合 IV 为代表,主要类型为落叶阔叶混交林—湿生草甸植被,此时仍以落叶阔叶含量占优势,且较前一阶段明显增加。仍以榆属为主,热带雨林和亚热带低山常绿阔叶树种栎属、冬青科、豆科等植物明显增加。枫香属明显减少。灌木和草本植物较前一阶段略微增加,其中仍以蒿为主,且较前一阶段明显增加。禾本科、莎草科增加,藜减少,出现极少量的旱生麻黄属植物。针叶树明显减少,其中松属和罗汉松属均减少。蕨类植物和水生藻类分子均较前一阶段明显减少,其中藻类分子仅见极少量刺甲藻科和双星藻属。G/A 和 C/(G+A) 比值整体偏低,说明较前一阶段气候变干。钻孔中喜热孢粉比例为 19.6%~38.9%,平均 26.5%;喜湿孢粉比例为 12.6%~48.6%,平均 21.7%,反映温度与湿润程度都较前一阶段降低。该阶段仍处于三角洲环境,沉积物以细粒的黏土和粉砂为主,含炭质层,炭质层干酪根以壳质组腐殖无定形体和底栖藻无定形体占主体。结合植被类型特征,可以看出由于受季风波动的影响(Clift, 2020; Wang et al., 2021),该段较前三段气候均干旱,整体气候类型为偏温暖半干旱型(图 4,图 5)。

研究区的孢粉植物演化模式与南海北部大陆架植物演化趋势相似(杨祖年, 1982; 王伟铭, 1992; 赵飞等, 2017; 张宗言等, 2022),其所反映的气候变化特征也与南海、全球气温变化具有较好的一致性(图 5; Zhao et al., 2001; 朱照宇等, 2002; Zachos et al., 2008; 张一凡等, 2017; Westerhold et al., 2020; 裴军令等, 2021; 陈平等, 2022)。ZKA02 钻孔反映气候温度与湿度变化的喜热型孢粉与湿生型孢粉比例变化曲线与雷州半岛、南海和全球气候变化曲线相似(图 5)。早中新世早期,受南极冰盖扩张的影响

(Zhao et al., 2001; 裴军令等, 2021),气温逐渐降低,喜热植物减少,对应 Mila 降温事件(Miller and Mountain, 1996),此阶段气候湿度出现先增大再减小的变化,整体仍然为半湿润的气候。早中新世中期—中中新世,喜热植物增多,气温有逐渐变暖的趋势(Zachos et al., 2008),出现中中新世适宜期(MMCO)(Westerhold et al., 2020),与雷州半岛、南海及全球气候变化趋势相似,可能是受南极冰盖消融的影响(Zhao et al., 2001)。南海和全球深海氧同位素反映的气温都在中中新世中期达到最高(Zhao et al., 2001; Westerhold et al., 2020),但是研究区可能受夏季季风的影响,直到中中新世末期才达到顶峰,具有明显的滞后。此阶段气候湿度有所降低,但仍属于半湿润的气候。中中新世末期—晚中新世早期,气候温度与湿度均波动较大,整体呈现变冷变干的趋势,与北半球冰盖的形成有关(Zhao et al., 2001),喜热型与湿生型植物均有所有减少,属于温和半湿润的气候。晚中新世中期,延续了晚中新世早期波动的特征,但温度与湿度略有回升,喜热型与湿生型植物比例小幅增加,表现为温暖湿润的特征。晚中新世晚期—上新世,气温变化幅度小,稳步下降,旱生植物逐渐增多,表现为偏温暖半干旱的特征,同样由北半球冰盖的持续扩张引起的(Zhao et al., 2001)。

6 结论

通过对北海地区 ZKA02 钻孔的孢粉化石数据的系统分析,自下而上划分出 4 个孢粉组合:早中新世—中中新世期 *Ulmus-Artemisia-Pinus* 组合(榆属—蒿属—松属组合);中中新世末期—晚中新世早期 *Liquidambar-Podocarpaceae-Artemisia* 组合(枫香属—罗汉松科—蒿属组合);晚中新世中期 *Ulmus-Quercus-Polypodiaceae-Pinus* 组合(榆属—栎属—水龙骨科—松属组合);晚中新世晚期—上新世 *Ulmus-Artemisia-Quercus* 组合(榆属—蒿属—栎属组合)。

孢粉序列揭示早中新世—中中新世发育落叶阔叶混交林—湿生草甸植被,气候偏温和半湿润;中中新世末期—晚中新世早期针叶阔叶混交林—湿生草甸植被组合,气候为温和半湿润;晚中新世中期落叶阔叶混交林—湿生草甸植被,气候变为温暖湿润型;晚中新世晚期—上新世落叶阔叶混交林—湿生草甸植被组合,气候明显干旱,为偏温暖半干旱

型。古气候变化过程能较好地与全球气温变化的趋势相吻合, 揭示出中新世以来夏季季风气候对研究区的影响。

致谢: 感谢中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心张明震老师在孢粉鉴定分析中提供的帮助。感谢编辑部老师和评审专家对本文提出的宝贵意见、建议。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 1985. Regional geology of Guangxi Zhuang autonomous region[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province, 1996. Stratigraphy (lithostratic) of Guangdong province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Guangxi Zhuang autonomous region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- CHEN P, WANG R, QIN J G, et al., 2022. Oligocene-miocene palynostratigraphy and paleoclimate of well WN-A from deep water area, southeast Hainan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 52(2): 390-402. (in Chinese with English abstract)
- CLIFT P D, 2020. Asian monsoon dynamics and sediment transport in SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195: 104352.
- DAI L, WENG C Y, LU J, et al., 2012. Pollen and spore distribution in the surface sediments of the Northern South China Sea and their transportation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(2): 93-108. (in Chinese with English abstract)
- DU J L, LI W Z, XU X M, et al., 2009. Geological characteristics of Qianan formation, Kangbao county, Hebei province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 25(1): 14-19. (in Chinese with English abstract)
- EL-MOSLIMANY A P, 1990. Ecological significance of common non-arboreal pollen: examples from drylands of the Middle East[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 64(1-4): 343-350.
- 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 Off-shore Oil and Gas*, 29(5): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- Guangxi Institute of Geological Survey, 2017. Regional geology of Guangxi Zhuang autonomous region[R]. (in Chinese)
- HERZSCHUH U, 2007. Reliability of pollen ratios for environmental reconstructions on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Biogeography*, 34(7): 1265-1273.
- HUANG R H, HOU S G, MA C M, et al., 2019. Review on palynological records in snow and ice[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(3): 362-378. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X Q, CUI Z A, LIN H, et al., 2022. The driving factors on climatic and palaeo-ecological evolution of Beibu gulf since Holocene[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(2): 129-143. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Z X, ZENG L, LI M X, et al., 1994. Tertiary in petroliferous regions of China (VIII): the north continental shelf region of South China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- LEI H R, JIANG Z X, ZHOU H K, 2018. Analysis of paleoclimate evolution of the hyperthermal period in the early paleogene: taking the Dongying depression as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 176-184. (in Chinese with English abstract)
- LI J, WANG R, QIN J G, et al., 2020a. 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 with English abstract)
- LI J, ZHU Y H, QIN J G, 2020b. Late eocene to early miocene palynological assemblages of well WZ6-X in the southwest Weizhou sag, Beibuwan Basin, South China Sea and their paleoenvironment[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 37(2): 175-187. (in Chinese with English abstract)
- LI X, ZHANG Z Y, ZHANG J Y, et al., 2019. New progress in 1: 50 000 regional survey in Leizhou peninsular area, Western Guangdong Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 35(3): 293-305. (in Chinese with English abstract)
- LI Z, ZHANG Y L, LI Y X, et al., 2010. Palynological records of Holocene monsoon change from the Gulf of Tonkin (Beibuwan), northwestern South China Sea[J]. *Quaternary Research*, 74(1): 8-14.
- MAO X L, XU S L, LIU X Y, 2019. Late Cenozoic high resolution bio-stratigraphy and its bearing on sea-level fluctuation in the western Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(3): 40-50. (in Chinese with English abstract)
- MILLER K G, MOUNTAIN G S, 1996. Drilling and dating New Jersey Oligocene-Miocene sequences: ice volume, global sea level, and Exxon records[J]. *Science*, 271(5252): 1092-1095.
- Nanhai Branch of Petroleum Corporation of the People's Republic of China, Guangzhou Branch of Geological Exploration Company of the China, Editorial Board of the Tertiary of north continental shelf of South China Sea, 1981. Tertiary of north continental shelf of South China Sea[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. (in Chinese)
- PAN A D, CHEN B S, LIU H P, et al., 2008. Numerical techniques of spore-pollen data analysis on paleoclimate reconstruction[J]. *Tropical Geography*, 28(6): 493-497. (in Chinese with English abstract)
- PEI J L, ZHAO Y, ZHOU Z Z, et al., 2021. Impact of Cenozoic Antarctic continent-ocean configuration patterns on global climate change[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(5): 867-879. (in Chinese with English abstract)
- SHEN H, ZHAO K L, GE J Y, et al., 2021. Early and Middle Pleistocene vegetation and its impact on faunal succession on the Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Quaternary International*, 591: 15-23.
- South Sea Branch of Petroleum Corporation of the People's Republic of China, China National Geological Exploration Corporation Guangzhou Branch, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, et al., 1981. Tertiary palaeontology of North continental shelf of South China Sea[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. (in Chinese)

- TADA R, ZHENG H B, CLIFT P D, 2016. Evolution and variability of the Asian monsoon and its potential linkage with uplift of the Himalaya and Tibetan Plateau[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 3(1): 4.
- TANG L Y, SHEN C M, LI C H, et al., 2009. Pollen-inferred vegetation and environmental changes in the central Tibetan Plateau since 8200 yr BP[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 52(8): 1104-1114. (in Chinese)
- WAN S M, LI A C, STUUT J B W, et al., 2007. Grain-size records at ODP site 1146 from the northern South China sea: implications on the east Asian monsoon evolution since 20 Ma[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 50(10): 1536-1547.
- WANG M M, ZHOU B G, JI F J, et al., 2009. Fault activity on the Hepu Basin section of the Hepu-Beilui fault[J]. *Seismology and Geology*, 31(3): 470-487. (in Chinese with English abstract)
- WANG M Y, WANG H Y, ZHU Z X, et al., 2021. Late Miocene-Pliocene Asian summer monsoon variability linked to both tropical Pacific temperature and Walker Circulation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 561: 116823.
- WANG W M, 1992. Palynofloristic changes in the neogene of South China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 9(1): 81-95. (in Chinese with English abstract)
- WANG W M, 2011. Remarks on some possible bias in reconstructing neogene vegetation and environment in China[J]. *Quaternary Sciences*, 31(4): 589-596. (in Chinese with English abstract)
- WELTJE G J, 1997. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 29(4): 503-549.
- WENG C Y, SUN X J, CHEN Y S, 1993. Numerical characteristics of pollen assemblages of surface samples from the West Kunlun Mountains[J]. *Acta Botanica Sinica*, 35(1): 69-79. (in Chinese with English abstract)
- WESTERHOLD T, MARWAN N, DRURY A J, et al., 2020. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years[J]. *Science*, 369(6509): 1383-1387.
- WU C L, 1984. Nan Hai (The South China Sea) movement and development of Basins in the South China Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 3(2): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- WU K Y, LIU Y L, HU D S, et al., 2021. Types and evolution of faults in the east area of the Wushi Sag, Beibuwan Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 52-62. (in Chinese with English abstract)
- WU Z J, 1976. Characteristics of sporopollen assemblage and its stratigraphic significance in Well Weiqian-1, Weizhou Island, Beibuwan Basin[R]. (in Chinese)
- XIANG K, LIU G Y, WEI F H, et al., 2020. Quaternary palynological record from the borehole CZ04 in the Anxiang Sag of the Dongting Basin and its palaeoenvironmental significance[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 36(2): 104-116. (in Chinese with English abstract)
- XIE J Y, LI J, MAI W, et al., 2012. Palynofloras and age of the Liushagang and Weizhou Formations in the Beibuwan Basin, South China Sea[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 51(3): 385-394. (in Chinese with English abstract)
- XIE J Y, QIN J G, LI J, et al., 2014. Palynological assemblages of the Oligocene and Pliocene in the Yinggehai-Qiongdongnan Basin of the Northern South China Sea and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 31(1): 85-97. (in Chinese with English abstract)
- XIE X N, ZHANG C, REN J Y, et al., 2011. Effects of distinct tectonic evolutions on hydrocarbon accumulation in northern and southern continental marginal basins of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3280-3291. (in Chinese with English abstract)
- XU J Y, ZHANG L Y, 1999. Genesis of Cenozoic basins in the eastern margin of Eurasia Plate: dextral pulling-apart[J]. *Oil & Gas Geology*, 20(3): 187-191. (in Chinese with English abstract)
- YANG R Y, 1996. Association and time of Eocene sporo-pollen in Hepu Basin, Guangxi[J]. *Guangxi Geology*, 9(3): 31-41. (in Chinese with English abstract)
- YANG S R, 1993. Paleocene palynology of the Shangyang Formation, Hepu Basin, Guangxi, China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 10(2): 213-222. (in Chinese with English abstract)
- YANG X Q, ZHENG S J, YAN Y G, et al., 2022. Response of terrigenous flux to the uplift of the Tibetan Plateau and summer monsoon evolution during the Late Miocene-Pliocene in the northern South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 42(3): 650-661. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z J, XU J M, 2002. Advances in studies on relationship among pollen, vegetation and climate[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 26(S1): 73-81. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z N, 1982. Zonation of Tertiary predominant palynological assemblages (TPPA) of Eastern China[J]. *Marine Geological Research*, 2(4): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- YE D Q, ZHONG X C, YAO Y M, et al., 1993. Tertiary in petroliferous regions of China (I): introduction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- ZACHOS J C, DICKENS G R, ZEEBE R E, 2008. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics[J]. *Nature*, 451(7176): 279-283.
- ZHANG J Y, 1987. Geological report of intensive survey in Fucheng exploration area, Hepu County, Guangxi[R]. (in Chinese)
- ZHANG J Y, TAO M H, WANG J Y, et al., 2015. Stratigraphic division and correlation in Well Xi-2X in Hepu Basin, Guangxi[C]//Proceedings of the abstracts of the second meeting of the ninth session of the Chinese paleontological society palynology branch. Guiyang: Palaeontological Society of China. (in Chinese)
- ZHANG Q R, 2009. A preliminary summary of cretaceous neogene sporopollen fossil assemblage sequence in central South China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- ZHANG Y F, LIU D S, ZHANG X H, 2017. Neogene palynological assemblages from Qiongdongnan Basin and their paleoclimatic implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(1): 93-101. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z Y, LIU X, LI X, et al., 2020. The Late Oligocene-Early Pleisto-

- cene sporopollen assemblages and paleovegetation succession of core ZkA01 in Hetou town, Leizhou Peninsula of Guangdong Province[J]. Geological Bulletin of China, 39(6): 880-892. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z Y, LIU X, LI X, et al., 2022. Palynological study of the Late Oligocene-Early Pleistocene in Leizhou Peninsula, Guangdong, China: coexistence analysis and paleoclimate reconstruction[J]. Earth Science Frontiers, 29(2): 303-316. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO F, ZHU Y H, JI X K, et al., 2017. Late Oligocene to Early Miocene palynological assemblages of well LW5 in the deep water area, pearl river mouth Basin, northern South China Sea[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 34(2): 201-210. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H T, WANG L R, YUAN J Y, 2007. Origin and time of Qiongzhou strait[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 27(2): 33-40. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Q H, JIAN Z M, WANG J L, et al., 2001. Neogene oxygen isotopic stratigraphy, ODP Site 1148, northern South China Sea[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 44(10): 934-942.
- ZHAO Y, LIU H Y, LI F R, et al., 2012. Application and limitations of the *Artemisia/Chenopodiaceae* pollen ratio in arid and semi-arid China[J]. The Holocene, 22(12): 1385-1392.
- ZHU R, ZHANG C M, DU J Y, et al., 2015. Controls of neogene sea level change on sand bodies in the pearl river mouth basin[J]. Geological Journal of China Universities, 21(4): 685-693. (in Chinese with English abstract)
- ZHU Z Y, QIU Y, ZHOU H Y, et al., 2002. A summary review of research progress on global change in the South China Sea[J]. Journal of Geomechanics, 8(4): 315-322, 314. (in Chinese with English Abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈平, 王任, 覃军干, 等, 2022. 琼东南盆地深水WNA井渐新世—中新世孢粉地层学及古气候[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 52(2): 390-402.
- 戴璐, 翁成郁, 陆钧, 等, 2012. 南海北部表层沉积物的孢粉分布及其传播机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 32(2): 93-108.
- 杜金利, 李卫忠, 徐旭明, 等, 2009. 河北康保县迁安组的沉积环境、孢粉组合及时代[J]. 华南地质与矿产, 25(1): 14-19.
- 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.
- 广东省地质矿产局, 1996. 广东省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 广西壮族自治区地质调查研究院, 2017. 广西壮族自治区区域地质志[R].
- 广西壮族自治区地质矿产局, 1985. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 广西壮族自治区地质矿产局, 1997. 广西壮族自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 黄壬晖, 侯书贵, 马春梅, 等, 2019. 雪冰孢粉记录研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 41(3): 362-378.
- 黄向青, 崔振昂, 林海, 等, 2022. 北部湾全新世气候与古生态环境演替特征及其驱动因素[J]. 地球学报, 43(2): 129-143.
- 蒋仲雄, 曾麟, 李明兴, 等, 1994. 中国油气区第三系(VIII): 南海北部大陆架油气区分册[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 雷华蕊, 姜在兴, 周红科, 2018. 早古近纪极热时期古气候演化分析: 以东营凹陷为例[J]. 地学前缘, 25(4): 176-184.
- 李君, 王任, 覃军干, 等, 2020a. 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.
- 李君, 祝幼华, 覃军干, 2020b. 南海北部湾盆地涠西南凹陷WZ6-X井晚始新世—早中新世孢粉组合及其古环境[J]. 微体古生物学报, 37(2): 175-187.
- 李响, 张宗言, 张榷钰, 等, 2019. 粤西雷州半岛地区1:5万区域地质调查成果与主要进展[J]. 华南地质与矿产, 35(3): 293-305.
- 毛雪莲, 徐守立, 刘新宇, 2019. 珠江口盆地西部新近纪高分辨率生物地层及海平面变化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(2): 40-50.
- 潘安定, 陈碧珊, 刘会平, 等, 2008. 孢粉学定量重建古气候方法探讨[J]. 热带地理, 28(6): 493-497.
- 裴军令, 赵越, 周在征, 等, 2021. 南极新生代海陆格局变迁对全球气候变化的影响[J]. 地质力学学报, 27(5): 867-879.
- 唐领余, 沈才明, 李春海, 等, 2009. 花粉记录的青藏高原中部中新世以来植被与环境[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(5): 615-625.
- 万世明, 李安春, STUUT J B W, 等, 2007. 南海北部ODP1146站粒度揭示的近20Ma以来东亚季风演化[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 37(6): 761-770.
- 王明明, 周本刚, 计凤桔, 等, 2009. 合浦—北流断裂带西支合浦盆地段断裂活动性研究[J]. 地震地质, 31(3): 470-487.
- 王伟铭, 1992. 中国南方晚第三纪孢粉植物群的变迁[J]. 微体古生物学报, 9(1): 81-95.
- 王伟铭, 2011. 中国新近纪植被和环境研究中的几个问题讨论[J]. 第四纪研究, 31(4): 589-596.
- 翁成郁, 孙湘君, 陈因硕, 1993. 西昆仑地区表土花粉组合特征及其与植被的数量关系[J]. 植物学报, 35(1): 69-79.
- 吴长林, 1984. 南海运动与南海诸盆地的发育[J]. 海洋通报, 3(2): 47-53.
- 吴孔友, 刘煜磊, 胡德胜, 等, 2021. 北部湾盆地乌石凹陷东区断裂类型及其形成演化[J]. 地质力学学报, 27(1): 52-62.
- 吴作基, 1976. 北部湾涠洲岛涠浅一井的孢粉组合特征及其地层意义[R].
- 向轲, 刘庚寅, 魏方辉, 等, 2020. 洞庭盆地安乡凹陷CZ04孔第四纪孢粉记录及其古环境意义[J]. 华南地质与矿产, 36(2): 104-116.
- 谢金有, 李君, 麦文, 等, 2012. 北部湾盆地涠洲组 and 流沙港组孢粉组合及时代[J]. 古生物学报, 51(3): 385-394.
- 谢金有, 覃军干, 李君, 等, 2014. 南海莺琼盆地渐新世—上新世孢粉组合序列及其古环境意义[J]. 微体古生物学报, 31(1): 85-97.
- 解习农, 张成, 任建业, 等, 2011. 南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制[J]. 地球物理学报, 54(12): 3280-3291.
- 许浚远, 张凌云, 1999. 欧亚板块东缘新生代盆地成因: 右行剪切拉分作用[J]. 石油与天然气地质, 20(3): 187-191.
- 杨荣玉, 1996. 广西合浦盆地第三系孢粉组合及时代[J]. 广西地

- 质, 9(3): 31-41.
- 杨世蓉, 1993. 广西合浦盆地古新世上洋组孢粉组合及其地层意义[J]. 微体古生物学报, 10(2): 213-222.
- 杨小强, 郑思静, 闫永刚, 等, 2022. 南海北部晚中新世-上新世期间碎屑物质输入对青藏高原隆升与季风演化的响应[J]. 第四纪研究, 42(3): 650-661.
- 杨振京, 徐建明, 2002. 孢粉-植被-气候关系研究进展[J]. 植物生态学报, 26(S1): 73-81.
- 杨祖年, 1982. 广东第三系孢粉优势组合带与我国东部各盆地的对比[J]. 海洋地质研究, 2(4): 63-71.
- 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.
- 张家渝, 1987. 广西壮族自治区合浦县合浦煤田福成探区精查地质报告[R].
- 张金岩, 陶明华, 王婧雅, 等, 2015. 广西合浦盆地西2X井地层划分对比研究[C]//中国古生物学会孢粉学会第九届二次学术年会论文摘要集. 贵阳: 中国古生物学会.
- 张清如, 2009. 中南地区白垩纪-新近纪孢粉化石组合序列的初步总结[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张一凡, 刘东生, 张训华, 2017. 琼东南盆地新生代孢粉组合及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 37(1): 93-101.
- 张宗言, 刘祥, 李响, 等, 2020. 广东雷州半岛河头镇ZKA01钻孔剖面晚渐新世一早更新世孢粉组合及古植被演替[J]. 地质通报, 39(6): 880-892.
- 张宗言, 刘祥, 李响, 等, 2022. 广东雷州半岛晚渐新世一早更新世孢粉共存因子分析及古气候变化重建[J]. 地学前缘, 29(2): 303-316.
- 赵飞, 祝幼华, 季兴开, 等, 2017. 南海北部珠江口盆地深水区长LW5井晚渐新世一早中新世孢粉组合[J]. 微体古生物学报, 34(2): 201-210.
- 赵焕庭, 王丽荣, 袁家义, 2007. 琼州海峡成因与时代[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(2): 33-40.
- 中华人民共和国石油公司南海分公司, 中华人民共和国地质勘探公司广州分公司, 《南海北部大陆架第三系》编委会, 1981. 南海北部大陆架第三系[M]. 广州: 广东科技出版社.
- 中华人民共和国石油勘探公司南海分公司, 中华人民共和国地质勘探公司广州分公司, 中国科学院南京地质古生物研究所, 等, 1981. 南海北部大陆架第三纪古生物图册[M]. 广州: 广东科技出版社.
- 朱锐, 张昌民, 杜家元, 等, 2015. 珠江口盆地新近纪海平面升降过程及其对砂体的控制[J]. 高校地质学报, 21(4): 685-693.
- 朱照宇, 邱燕, 周厚云, 等, 2002. 南海全球变化研究进展[J]. 地质力学学报, 8(4): 315-322, 314.

勘误声明

《地质力学学报》2022年5期

题名: 《中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破》

作者: 李文渊

Doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222810

810页3.1节关于镍金属资源量换算有误, 现更正为“镍金属资源量近 $5 \times 10^5 t$ ”。各数据平台已完成该文电子版替换, 特此声明!