

文章编号: 0253-2697(2013)S2-091-11 DOI: 10. 7623/syxb2013S2011

琼东南盆地古近纪海侵及沉积环境演化

蔡国富¹ 邵磊¹ 乔培军¹ 梁建设²

(1. 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092; 2. 中海油研究总院 北京 100027)

摘要:综合应用地震、测井、钻井岩心、古生物及地球化学资料,对琼东南盆地古近纪的海侵历史与沉积环境演化进行了分析。琼东南盆地古近纪经历了始新世陆相沉积向渐新世海相沉积的转变,盆地北部凹陷带自崖城组三段沉积晚期开始发生明显海侵,从而使得下渐新统崖城组与上渐新统陵水组形成截然不同的沉积格局。崖城组沉积环境为半封闭古海湾,与广海沟通有限,构造沉降控制了区域海平面的升降,持续而较缓慢的海侵使得沉积体系丰富多样,中央凹陷带两侧持续且广泛发育扇三角洲、潮坪和潟湖等海陆过渡相沉积体系;陵水组沉积环境为开阔海,以滨、浅海相为主,在陵水组二段全区海侵明显,全球海平面变化对区域海平面的上升具有较大影响。琼东南盆地是南海海盆西部及北部的大陆边缘盆地中最早发生海侵的盆地之一,南海的初始扩张是盆地发生初始海侵的主要原因。

关键词:琼东南盆地;南海;古近纪;海侵;沉积环境

中图分类号:TE111.3

文献标识码:A

Marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin, South China Sea

CAI Guofu¹ SHAO Lei¹ QIAO Peijun¹ LIANG Jianshe²

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: This study investigated records of marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin (QDNB) by analyzing data of seismic reflections, geophysical loggings, drilling cores, fossils, and geochemistry. Results show that the Paleogene strata of QDNB underwent change from the Eocene non-marine deposits to the Oligocene marine deposits. Significant marine transgression occurred from the late depositional stage of the third member of Yacheng Formation in the northern depression belt of QDNB, leading to formation of completely different sedimentary frameworks of the Lower Oligocene Yacheng Formation and the Upper Oligocene Lingshui Formation. During deposition of Yacheng Formation, QDNB acted as a semi-enclosed palaeo-gulf with restrictive access to the open sea; tectonic subsidence controlled the regional eustatic fluctuation; together with persistent and slow transgression resulted in the formation of a wide range of depositional systems; additionally, transitional facies such as fan delta, tidal flat, and lagoon were widely developed in the two flanks of the central depression belt. During the deposition of Lingshui Formation, open marine facies were developed in QDNB and the sedimentary environment was dominated by littoral and neritic facies; the second member of Lingshui Formation witnessed a significant transgression, and the global eustatic fluctuation imposed a strong influence on the regional sea-level rise. QDNB is among the earliest basins associated with marine transgression in the western marine basin and northern continental margin basin of South China Sea. The main cause of marine transgression in QDNB is the initial expansion of South China Sea.

Key words: Qiongdongnan Basin; South China Sea; Paleogene; transgression; depositional environment

琼东南盆地在古近纪经历了先陆后海沉积充填过程,是南海北部大陆边缘盆地中海侵时间最早的盆地之一^[1],其沉积环境演变与南海早期的形成演化密切相关。目前普遍认为南海经历了由陆缘张裂至海底扩张的过程,但在扩张方式和时间上仍存在较多争议,

特别是对南海初始扩张认识不一^[2-4]。而大陆边缘盆地的沉积充填与海盆演变事件密切相关^[5],因此,通过开展边缘盆地海侵历史的研究,有助于认识沉积环境的演化。针对琼东南盆地,前人应用层序地层学^[6-8]、古生物学^[9-11]等手段和方法,对沉积环境演化历史进

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 91128207)、国家重大科技专项(2011ZX05025-006)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB219400)资助。

第一作者:蔡国富,男,1989年11月生,2011年获同济大学学士学位,现为同济大学硕士研究生,主要从事沉积学、沉积地球化学研究。Email: guofu_cai@hotmail.com

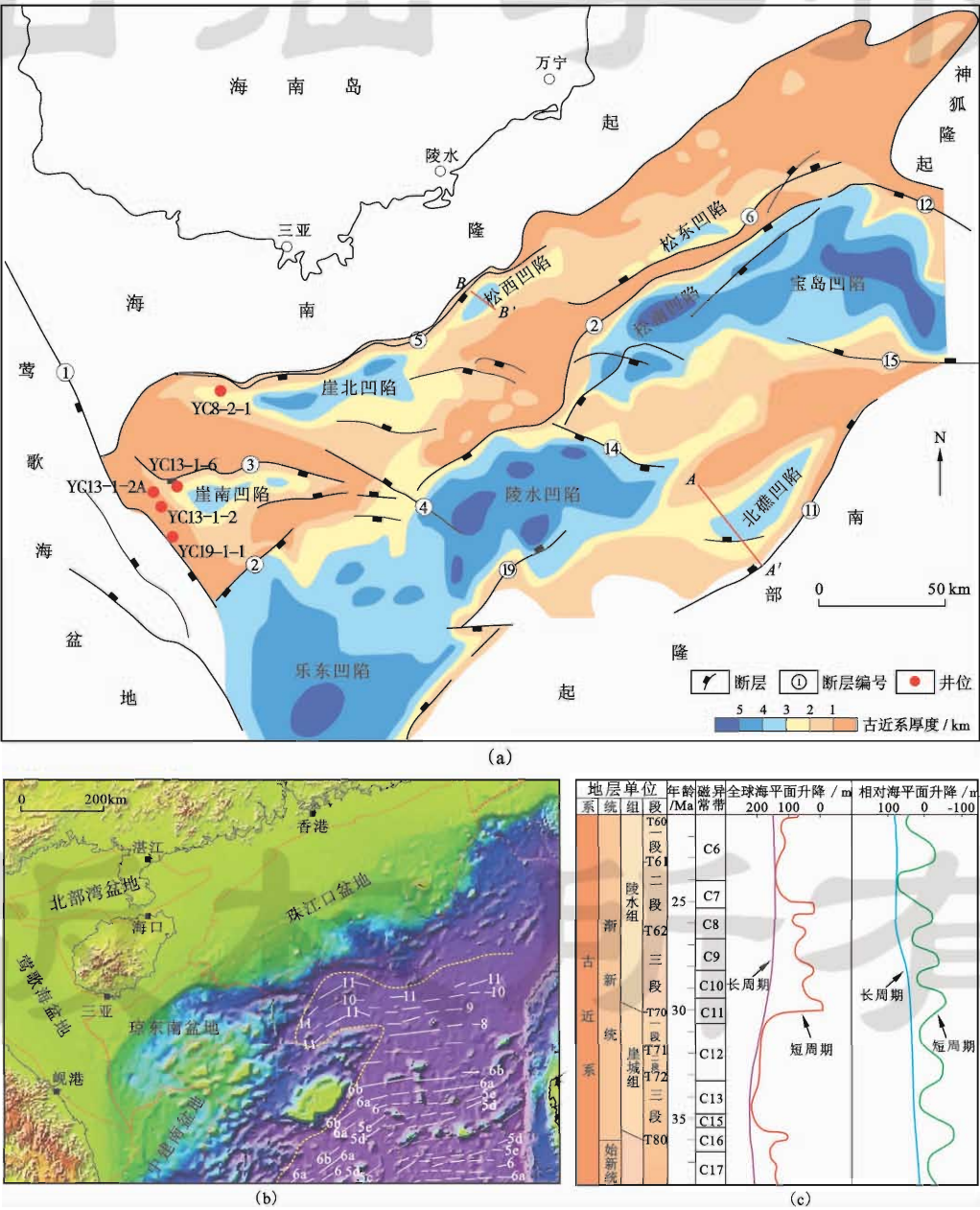
通信作者:邵磊,男,1960年10月生,1996年获德国基尔大学博士学位,现为同济大学海洋与地球科学学院教授、博士生导师,主要从事沉积地质学方面的教学与研究工作。Email: lshao@tongji.edu.cn

行了研究并取得较好的成果,但由于所用资料不同,在具体演化过程上还存在诸多争议。为此,在综合应用地震、测井、钻井岩心、古生物及地球化学资料的基础上,对琼东南盆地古近纪沉积环境进行了详细分析,并对海侵过程与南海早期演化的关系进行了探讨,这为深入了解南海海盆的形成提供了新视角。

1 地质概况

琼东南盆地是位于南海北部大陆边缘西北部的新生代伸展型沉积盆地,盆地西侧以①号断裂与莺歌海盆

地分界,东北部毗邻珠江口盆地,北部和南部分别为海南隆起带和南部隆起带,盆地东部呈半敞的喇叭口状,经由西沙海槽与南海西北次深海盆相连接[图 1(a)、图 1(b)]。盆地经历了古近纪裂陷沉积充填和新近纪拗陷及新构造运动阶段^[12],并被 NE、NW 和 NEE 向基底断裂分割成“多隆多凹、隆凹相间”的构造格局^[13]。古近纪裂陷阶段依次经历 3 期次级沉降幕,分别对应始新统(54~36 Ma)、下渐新统崖城组(36~30 Ma)和上渐新统陵水组(30~21 Ma)3 套地层^[14-15][图 1(c)],形成众多呈 NE 向分布的凹陷,沉积规模广,地层厚度大。



(a)琼东南盆地古近系构造-沉积格局(据文献[16]修改);(b)南海北部构造区划,白色虚线为 Briaies 等^[2]提出的磁异常条带;(c)琼东南盆地古近系地层划分,全球海平面升降曲线据 Haq 等^[17],相对海平面升降曲线据魏魁生等^[6]。

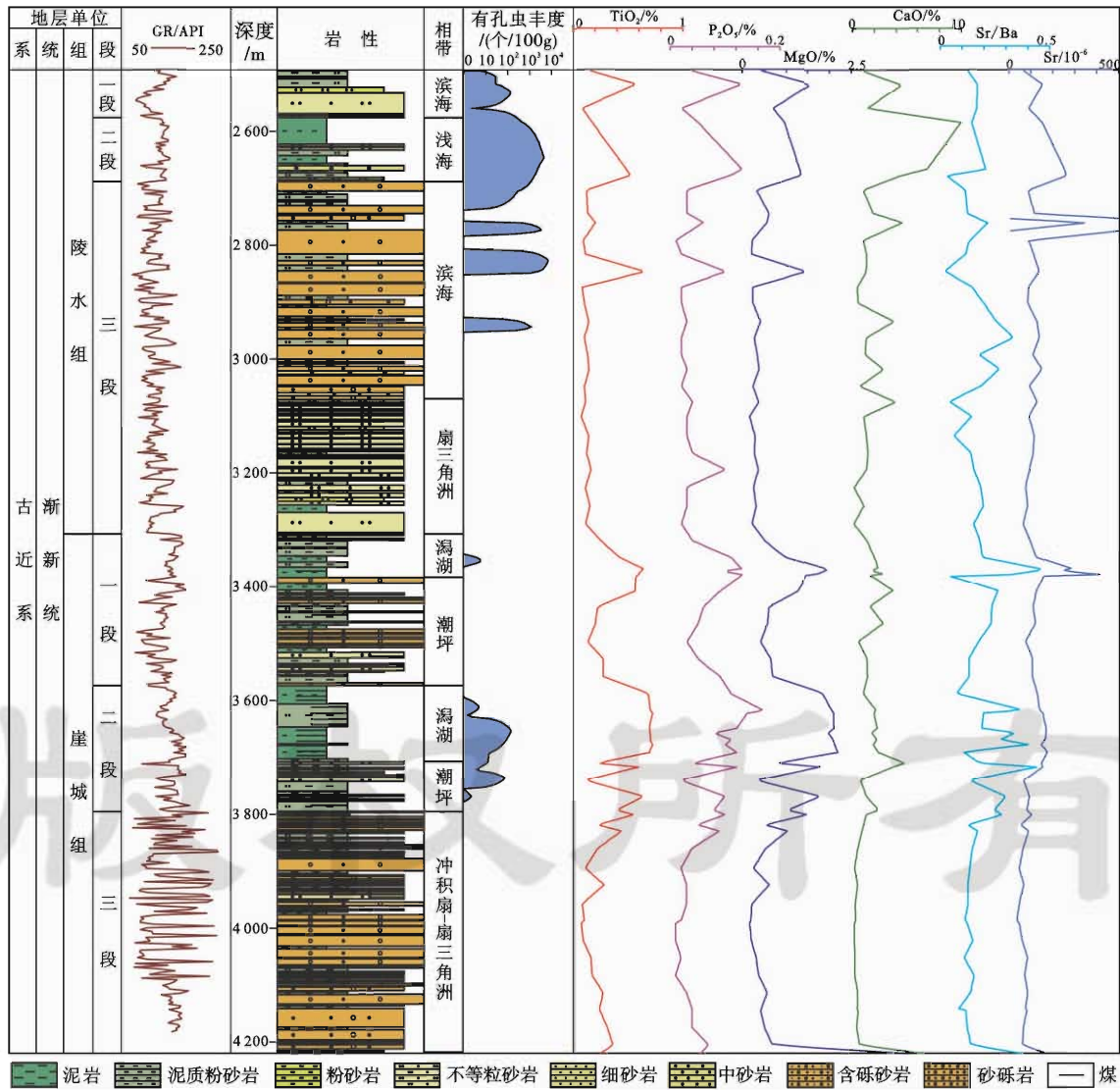
图 1 琼东南盆地古近系构造-沉积格局与地层划分
Fig. 1 Paleogene tectonic-sedimentary pattern and stratigraphic division of Qiongdongnan Basin

2 研究方法

识别海陆相沉积环境最有效的方法是古生物。地层中有孔虫和钙质超微化石的分布情况以及孢粉藻类组合,是判断沉积环境的常用方法,但如果只单用古生物方法又有一定的局限性,特别是在较为复杂的海陆过渡相沉积环境中,因此,必须结合地球化学和岩石矿物学等多方面的综合分析,才能较为可靠地推断古沉积环境^[18]。

地层中元素的分布、分配与其形成环境密切相关,因此,相关元素含量的高低及其比值大小已成为判别沉积环境的良好标志^[19]。某些常量元素是海洋中的特征元素,与海洋生物及海水组成有密切关系,如CaO、P₂O₅、MgO等,而有些元素主要是从大陆搬运而

来的陆壳风化产物,如SiO₂、Al₂O₃等,这些元素对于海陆变迁等沉积环境的变化较为敏感。目前在沉积环境判别上应用比较广泛的微量元素有Sr、Ba、Ga、Ru、B、K及其比值^[20]。在表生过程中,Sr和Ba的化学性质有很大的差异。海相环境一般富集Sr,离海岸越远,Sr/Ba比值越大,所以Sr/Ba比值能定性反映介质的古盐度,因此,Sr及Sr/Ba比值在海侵研究上得到了较为广泛的应用^[21-22]。除了受沉积环境的影响外,元素的含量也受物源的控制。但相关研究表明琼东南盆地西北部物源在渐新世较为稳定^[9,23],因此,相对来说,本次研究中样品的海洋特征元素及其比值(如CaO、P₂O₅、MgO、TiO₂、Sr、Sr/Ba)主要受沉积环境的影响,这也得到了古生物指标的印证,两者之间具有很好的对应性(图2)。



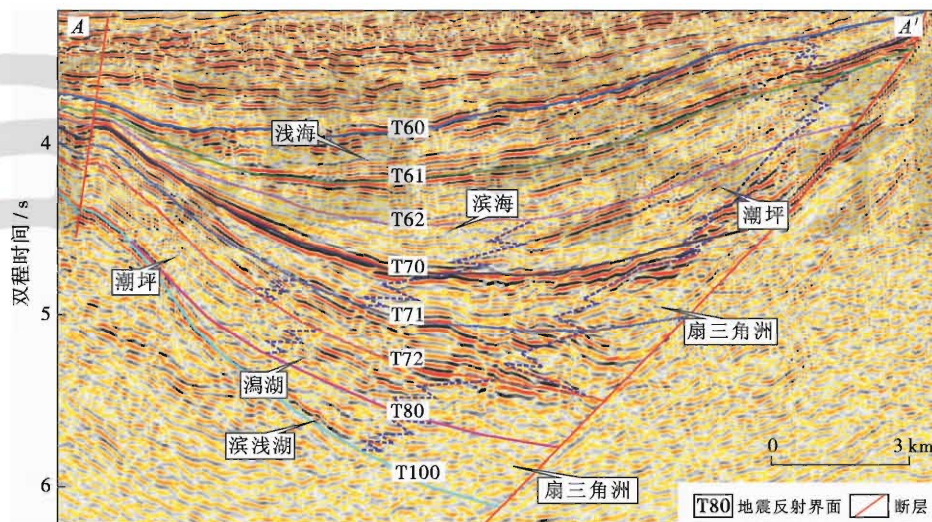
注:岩性剖面据参考文献[24]修改,有孔虫丰度数据来自参考文献[10]。

图2 YC8-2-1井古近系沉积相及主要特征元素含量和比值垂向变化

Fig.2 Sedimentary facies and vertical changes of element contents and element ratios of Paleogene from Well YC8-2-1

本次研究以取心井为出发点,对岩心的沉积结构和构造进行详细观察,识别出不同沉积相,然后通过30余口钻井资料单井相的纵向分析了解沉积相的演化规律。对于钻井较少的琼东南盆地而言,地震相研究具有非常重要的意义。琼东南盆地南北凹陷带具有相似的沉积充填历史,依据地震反射参数、反射

结构和几何外形等地震相标志,识别出7类较为典型的沉积体系:扇三角洲相、滨浅湖相、深湖相、潟湖相、潮坪相、滨海相和浅海相(图3),以此,在三级层序界面控制下,并结合地层厚度,圈定出沉积相的分布范围,进而建立整个琼东南盆地各时期沉积相的展布特征。



注:扇三角洲相为弱振幅、差连续性杂乱前积反射,见乱岗状楔形反射;滨浅湖相为弱—中等振幅、中等频率杂乱前积反射;潟湖相为强振幅、中等—好连续性、低频席状反射;潮坪相为弱振幅、低—中等连续性、低频反射;滨海相为弱振幅、弱连续性、低频反射;浅海相为弱振幅、差连续性席状反射,也含中等振幅、中等—好连续性、平行反射。

图3 琼东南盆地典型地震相反射特征[剖面位置见图1(a)]

Fig. 3 Reflection characteristics of typical seismic facies in QDNB[location see Fig. 1(a)]

3 沉积环境演化

3.1 始新世小型陆相断陷湖盆

琼东南盆地始新统对应南海初始裂陷期,目前尚无钻井揭示,但是根据气测结果和地震相分析,认为琼东南盆地发育始新统。在北部凹陷附近的钻井中,烃类检测显示有深湖相烃源岩生成的油气,在地震剖面上发育强振幅高连续地震相(图4)。从松西凹陷Ying9井陵水组及松东凹陷ST24-1-1井三亚组来看,其原油具有高蜡低硫特征,含丰富的C₃₀₋₄甲基甾烷,其地化特征与北部湾盆地始新统中深湖相烃源岩生成的石蜡型原油极为相似^[14,25],证明琼东南盆地始新统存在中深湖相烃源岩。此外,始新统反射特征与珠江口盆地文昌组湖相沉积具有良好的可比性^[1]。

琼东南盆地在始新世尚未发生海侵,被众多的隆起、凸起分割,形成小型半地堑,NE向断裂活动控制了各凹陷的沉积充填,陆相沉积展布具有明显的分带性和南北差异性。从地震相上看,分带性表现为地层主要发育在北部凹陷带的崖北凹陷、松西凹陷和松东凹陷,以及南部凹陷带的乐东凹陷、北礁凹陷和长昌凹

陷,中部凹陷基本不发育;南北差异明显,北部凹陷始新统发育扇三角洲相、滨浅湖相和深湖相,南部凹陷只发育扇三角洲相和滨浅湖相,缺少深湖相(图3—图5)。

3.2 早渐新世分割性古海湾

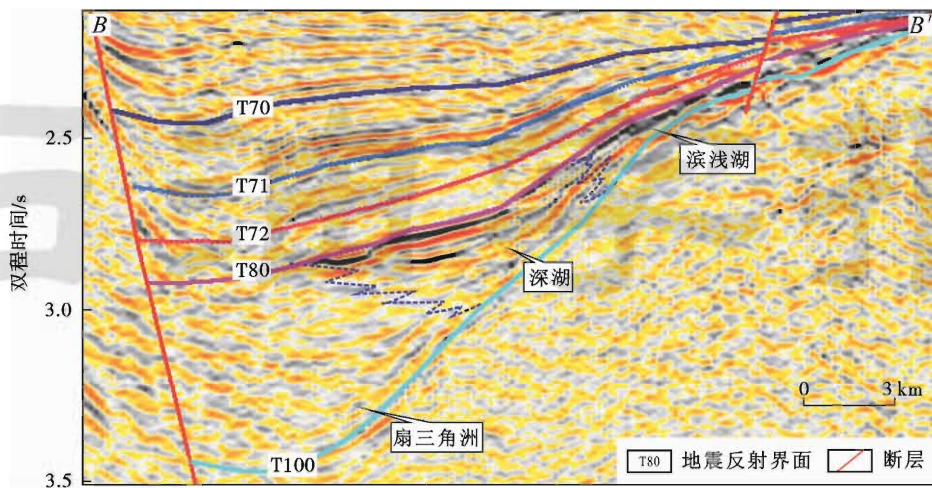
早渐新世崖城组沉积期处于盆地的主裂陷幕时期,盆地大规模海侵与盆地凹陷的快速沉降相伴而生,并沉积一套海陆过渡相地层。由于凹陷差异构造沉降明显,深化了盆地裂陷早期的构造格局,隆凹相间依然明显,一系列地堑及半地堑组合成中间厚、两侧薄的“碟形”盆地^[26],其水体与外海的沟通受周缘隆起的限制,使琼东南盆地也表现出两侧水浅中部水深、由北部海南隆起带和南部隆起带夹持的分割性古海湾特征。

3.2.1 崖北凹陷

在崖城组三段(崖三段)沉积时期,位于北部陆坡的YC8-2-1井发育一套细砾岩—含砾中粗砂岩,在3903.62~3912.31 m井段见有灰白色细砾岩[图6(a)],夹黑色含砾泥岩[图6(b)],含较多黄铁矿,指示强还原环境,细砾岩中发育交错层理[图6(c)],向上过渡到层理不发育的黑色泥岩及含砾泥岩。主量元素

P_2O_5 (0.01%~0.1%, 平均 0.04%)、 CaO (0.20%~1.49%, 平均 0.57%) 以及 TiO_2 (0.07%~0.55%, 平均 0.23%) 和 MgO (0.21%~1.79%, 平均 0.61%) 含量较低, 微量元素 Sr [(41.8~122.9) $\times 10^{-6}$, 平均 79.4×10^{-6}] 及 Sr/Ba 比值 (0.10~0.33, 平均 0.17)

也较低, 各元素含量及比值在整个崖三段变化较小, 表明沉积环境和物源输入较稳定 (图 2)。YC8-2-1 井崖三段未见有孔虫产出^[10], 而钙质超微化石丰度也极低^[11]。总体看, 崖北凹陷北坡在崖三段沉积时期未发生明显的海侵, 为冲积扇—扇三角洲沉积环境。



滨浅湖相: 前积地震相, 弱—中等振幅、中等频率杂乱反射; 深湖相: 席状—亚平行地震相, 强振幅、中等—好连续性、中频反射。

图 4 琼东南盆地北部凹陷始新统典型湖相地震相特征 [剖面位置见图 1(a)]

Fig. 4 Typical seismic facies characteristics of lacustrine facies of Eocene in the northern sag of QDNB [location see Fig. 1(a)]

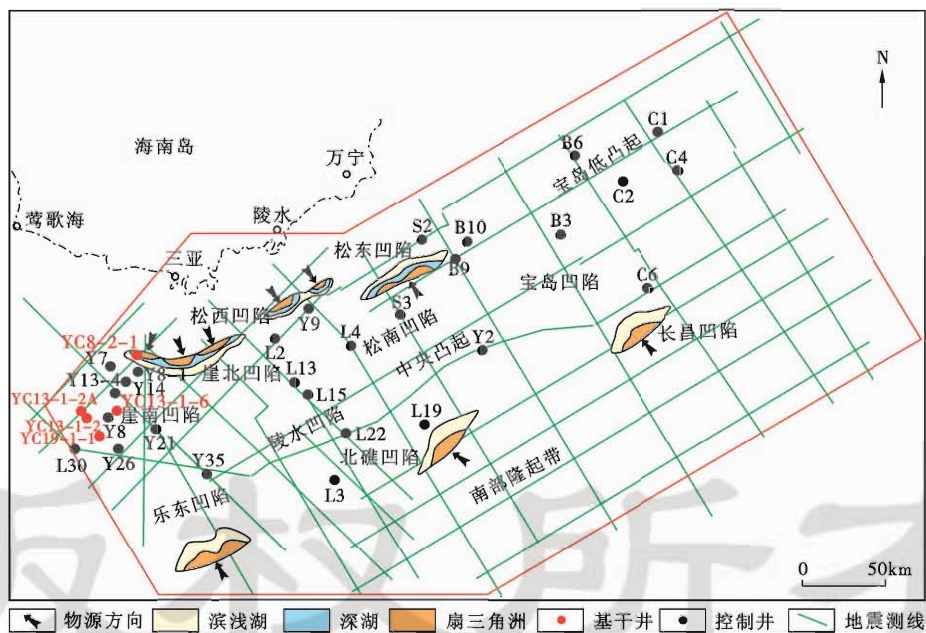


图 5 琼东南盆地始新统沉积相

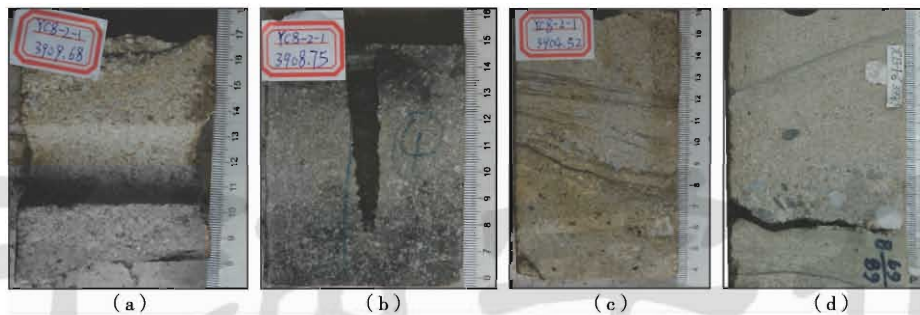
Fig. 5 Distribution of Eocene sedimentary facies of QDNB

崖城组二段—一段沉积时期, 全球海平面有轻微下降, 但琼东南盆地由于经历了持续快速沉降, 相对海平面处于上升趋势, 崖北凹陷北坡转入潮坪—潟湖主导的障壁海岸相沉积。YC8-2-1 井崖城组二段 (崖二段) 主量元素 P_2O_5 、 CaO 、 TiO_2 和 MgO 含量与 Sr/Ba 比值呈现相似的变化趋势, 波动范围大, 且数值明显高于崖三段。其中 CaO 平均 2.60%, Sr/Ba 比值平均

0.30, 表明崖二段已明显受海侵作用的影响, 且水深逐渐加大; 出现有孔虫化石, 钙质超微化石丰度也有明显增加^[10-11], 说明该时期为海相沉积环境。综合分析, 崖北凹陷崖二段沉积环境为受海洋咸水影响明显的潮坪—潟湖。崖城组一段 (崖一段) 沉积早期, P_2O_5 、 CaO 、 TiO_2 和 MgO 含量较崖二段有明显下降, Sr 含量出现轻微降低, Sr/Ba 比值也明显处于较低值, 表明

此时海水较崖二段有所退却。崖一段沉积中后期,海洋特征元素缓慢上升,并在 3 369~3 373 m 之间出现峰值, Sr/Ba 比值 > 0.5 , 而钻井揭示 3 367.47 ~

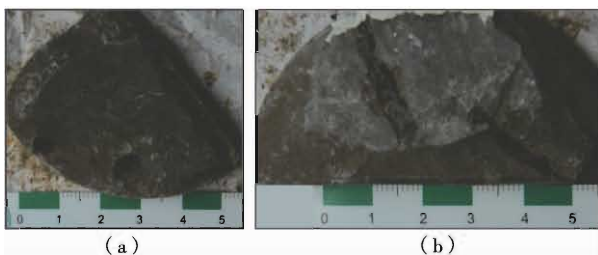
3 377.99 m 为一套深棕色泥岩,岩石破碎,层理不发育,含有较多炭屑以及双壳类生物化石[图 7(a)、图 7(b)],见有钙质超微化石,推断其沉积环境为潟湖。



(a) 灰白色细砾岩, YC8-2-1 井 3 909.68 m; (b) 灰黑色含砾泥岩, YC8-2-1 井 3 3908.75 m; (c) 细砾岩, 见有交错层理, 为水下分流河道, YC8-2-1 井 3 904.52 m; (d) 含砾粗砂岩, 砾石磨圆度好, 具正旋回, 见有冲刷面, 为水下分流河道, YC13-1-6 井 3 996.5 m; 比例尺单位为 1 cm。

图 6 琼东南盆地崖城组三段扇三角洲相沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of fan delta facies in the 3rd member of Yacheng Formation in QDNB



(a) 深棕色含化石泥岩, 具双壳类印模, YC8-2-1 井 3 374.42 m; (b) 深棕色含炭屑泥岩, 层理不发育, YC8-2-1 井 3 369.81 m; 比例尺单位为 1 cm。

图 7 琼东南盆地崖城组一段潟湖相沉积特征

Fig. 7 Sedimentary characteristics of lagoon facies in the 1st member of Yacheng Formation in QDNB

3.2.2 崖南凹陷

崖南凹陷有多口钻井揭示崖城组, 但各井有不同程度缺失。孢粉、藻类化石能较好地指示沉积环境。崖南凹陷西北坡 YC13-1-A2 井崖三段下部 (4055.9m) 的孢粉、藻类组合显示, 孢粉种类较丰富, 含较多被子植物花粉, 包括栎粉诸种 (*Quercoidites* spp.)、小栎粉 (*Quercoidites minutus*)、变桉木粉 (*Alnipollenites metaplasmus*)、莱茵苗榆粉 (*Ostryoiipollenites rhenanus*)、栗粉诸种 (*Cupuliferoipollenites* spp.)、西里拉粉诸种 (*Cyrilaceapollenites* spp.)、东营化香树粉 (*Platycaryaipollenites dongyngensis*)、多孔粉诸种 (*Multiporopollenites* spp.)、网面三孔沟粉诸种 (*Retitricolporites* spp.)、三孔沟粉诸种 (*Tricolporopollenites* spp.); 也见少量蕨类孢子, 如水龙骨单缝孢诸种 (*Polypodiaceasporites* spp.)、

平瘤水龙骨孢诸种 (*Polypodiisporites* spp.) 和双束松粉诸种 (*Pinuspollenites* spp.)、破隙杉粉 (*Taxodiaceapollenites hiatus*) 等少量裸子植物花粉, 含极少的浮游藻类, 未发现典型的海相藻类[图 8(a)]。这些

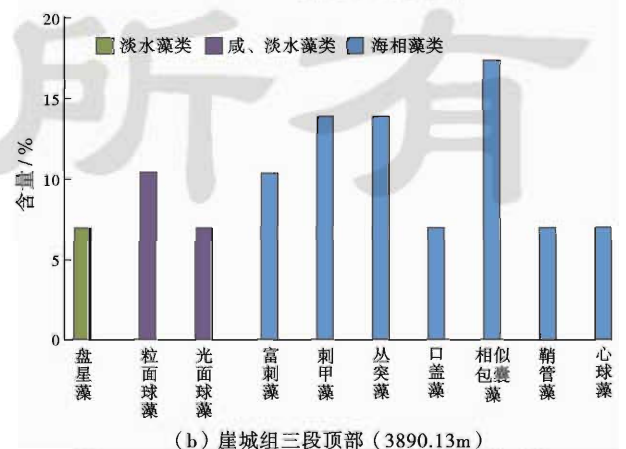
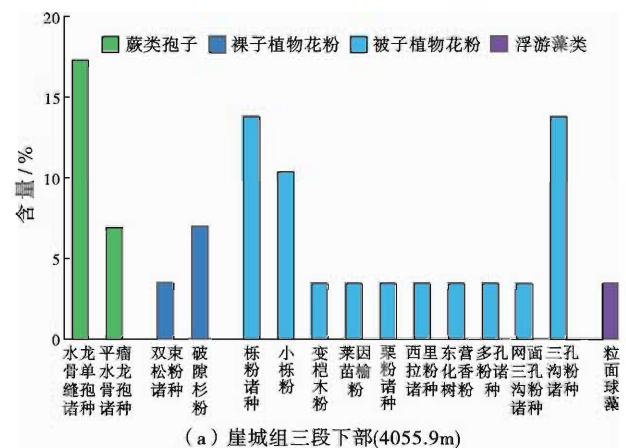


图 8 YC13-1-A2 井崖城组孢粉、藻类组合分布

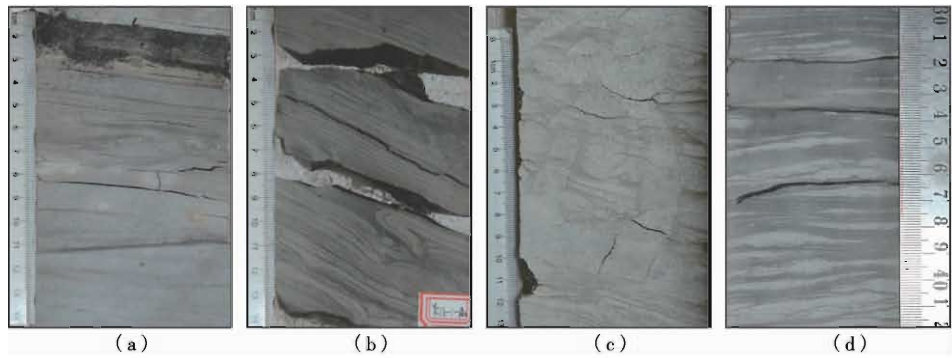
Fig. 8 Distribution of sporopollen and algae assemblages from Yacheng Formation of Well YC13-1-A2

陆相孢子和花粉传播距离有限,多为近源传播,且在该井 4 057 m 及 4 016 m 处均未发现钙质超微化石,这说明在崖三段沉积早期,崖南凹陷与崖北凹陷相似,为近岸淡水环境。而到崖三段顶部(3 890. 13 m),见有大量藻类孢子,其中海相藻类最多,种类也最丰富,含有较多刺甲藻(*Spiniferites spp.*)、丛突藻(*Systematophora spp.*)和相似孢囊藻(*Homotryblium*),富刺藻(*Impletosphaeridium sp.*)、口盖藻(*Operculodinium*)、鞘管藻(*Hystriochokopoma*)、心球藻(*Cordosphaeridium sp.*)次之;出现一定的咸水、半咸水及淡水环境都可出现的藻类,如粒面球藻(*Granodiscus*)、光面球藻(*Leiosphaeridia*);而作为陆生藻类的盘星藻(*Pediastrum*)含量很少[图 8(b)]。丰富的浮游藻类组合以及未见有钙质超微化石和有孔虫,可指示其环境为海陆过渡相。

而从 YC13-1-2A 井崖三段连续 300 多米的取心看,地层沉积连续,底部见石英砂岩夹深灰色纹层状泥

岩,具板状交错层理,含黑色碳质层[图 9(a)],为水深较浅的近岸沼泽环境;向上见具滑塌揉皱构造的水平层理及小型交错层理[图 9(b)],发育生物虫孔[图 9(c)],韵律状层理[图 9(d)]等沉积构造,为潮坪环境。总体上看,该时期的沉积环境由早期的淡水滨岸逐渐向海陆过渡相和滨浅海相转变。

崖城组 P_2O_5 、CaO、 TiO_2 、Sr 含量以及 Sr/Ba 比值较低,且较为稳定(图 10)。YC19-1-1 井崖城组为一套厚层浅—灰色石英中—粗砂岩,含少量粉砂岩;颗粒一般呈次圆状—棱角状;含有菱铁矿,随深度增加,硅质碎屑含量升高;粉砂岩呈灰—深灰色,含钙质及黄铁矿,偶见碳屑;指示为潮坪—滨海环境。整体上看,崖南凹陷在崖城组沉积时期水深较为稳定,持续的凹陷沉降与沉积物充填达到动态平衡状态,稳定的可容纳空间使区域海平面处于缓慢的上升状态,沉积环境由早期的淡水滨岸环境过渡到中晚期的持续滨海环境。



(a)灰白色石英砂岩夹深灰色纹层状泥岩,顶部有 3 cm 厚黑色碳质层,近岸浅水环境,YC13-1-2A 井 4 074. 26 m;
(b)泥质粉砂岩和粉砂质泥岩互层,发育小型交错层理,见有层间揉皱,潮间带环境,YC13-1-2A 井 4 036. 77 m;
(c)灰白色细砂岩,垂直层面虫孔发育,潮间带环境,YC13-1-2A 井 3 868. 5 m;(d)深灰色泥岩夹粉砂岩,见透镜状层理,潮上带环境,YC13-1-2A 井 3 753. 00 m;比例尺单位为 1 cm。

图 9 YC13-1-2A 井崖城组三段沉积特征

Fig. 9 Sedimentary characteristics of the 3rd member of Yacheng Formation in Well YC13-1-2A

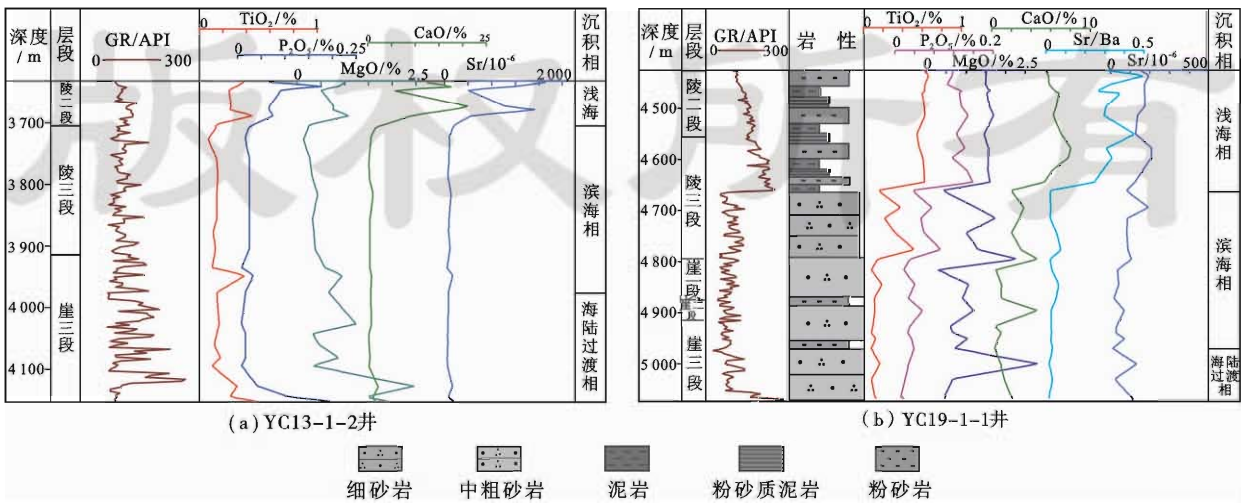


图 10 YC13-1-2 井及 YC19-1-1 井古近系元素含量与比值垂向变化

Fig. 10 Vertical changes of element contents and element ratios of Paleogene from Well YC13-1-2 and Well YC19-1-1

3.2.3 琼东南盆地

琼东南盆地从崖三段开始出现海相沉积,但水体较浅,范围有限。底部存在广泛的淡水滨岸环境^[9]以及煤系地层中有机质以陆源输入的高等植物为主^[27],显示该时期沉积环境刚从陆相转变成海陆过渡相。崖三段主要的沉积相类型包括扇三角洲相、滨海相(包含潮坪和潟湖)以及浅海相(图11)。除了崖北凹陷、崖南凹陷,在松西凹陷、松东凹陷和北礁凹陷断裂活动剧烈

的陡坡带也见有扇三角洲。这一时期,滨海环境覆盖到盆地中央广大区域,并已达到崖南凹陷西北坡,乐东凹陷局部为浅海相。在盆地南、北边缘地层厚度较小的地区[图1(a)],当古地貌显示为封闭环境时,以潟湖环境为主;而当古地貌显示为开阔环境时,以潮坪环境为主。由此,潟湖沉积环境主要发育在崖北凹陷西部、松西凹陷和北礁凹陷;潮坪沉积环境则主要发育在陵水凹陷东南部、长昌凹陷南部、崖北凹陷南部和松东凹陷。

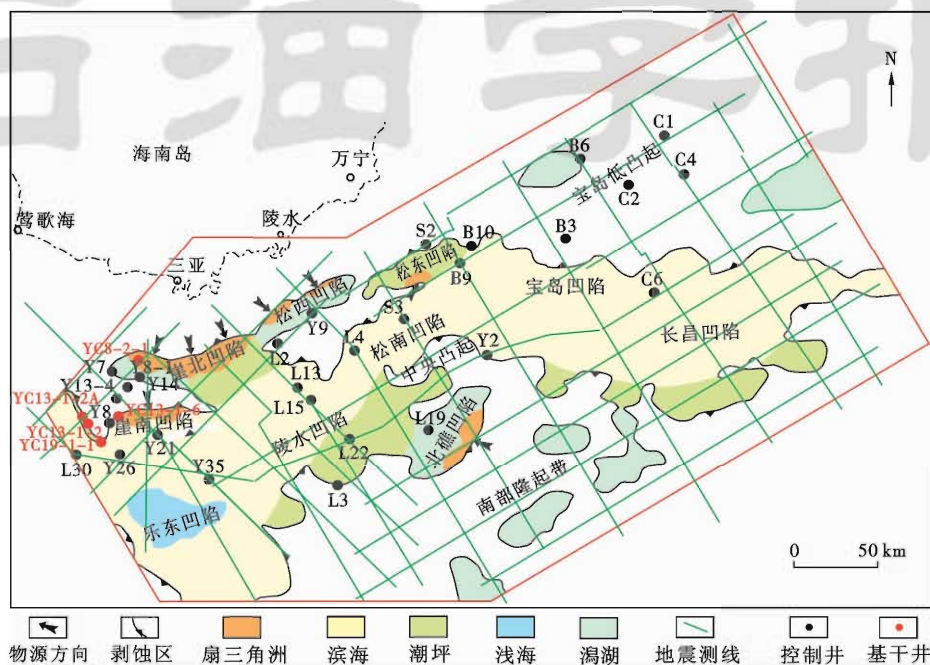


图11 琼东南盆地崖城组三段沉积相

Fig. 11 Sedimentary facies of the 3rd member of Yacheng Formation of QDNB

与崖三段相比,崖二段沉积时期水体不断加深,整个盆地中部以浅海沉积为主,但并未贯穿全盆地。滨海相发育于盆缘的缓坡区。此时,松西凹陷和北礁凹陷都不再是封闭的海湾,而是为位于剥蚀区与凸起之间的潮坪。随着崖北凹陷西部沉积可容纳空间的波动,潟湖环境与潮坪环境交替出现。除了松东凹陷,崖北凹陷、崖南凹陷、松西凹陷和北礁凹陷控边断裂活动依然较为活跃,因而继续发育扇三角洲。崖一段沉积环境与崖二段基本相似,只是浅海有所扩大,覆盖了全盆地。

3.3 晚渐新世开阔海

上渐新统陵水组沉积时,处于琼东南盆地裂陷衰退期,沉降速率有所缓和,“东西分块”现象逐渐不明显,各凹陷出现均一化沉降并逐渐连接成片,特别是在陵水组沉积晚期,琼东南盆地内部的主要凸起以及崖城组沉积时期处于剥蚀状态的盆地周缘的西沙隆起、神狐隆起逐渐转变为水下并接受沉积。随着水深的进一步加大和隆起阻隔的消亡,琼东南盆地在该时期逐

渐进入以滨、浅海为主的开阔海沉积环境。

陵水组沉积早期,全球海平面较崖城组沉积时期快速下降了约150 m[图1(c)],而此时琼东南盆地整体由快速沉降扩张阶段转入整体相对缓慢沉降衰减阶段^[28]。YC8-2-1井陵水组三段(陵三段)下部CaO、P₂O₅含量以及Sr/Ba比值较低,而在上部有所增长(图2),指示陵水组沉积早期为三角洲环境、晚期为滨海环境,与崖北凹陷北部陆坡陵三段沉积环境一致。崖南凹陷西北陆坡井位随着与凹陷中心距离的不同,沉积环境存在差异。远离凹陷中心的YC13-1-2井陵三段海洋特征元素含量较低且无明显变化,显示水体较为稳定,继承了崖一段沉积格局;而靠近沉积中心的YC19-1-1井陵水组下部主要为灰绿、黄绿色石英砂岩[图10(b)],含泥砾和顺层碳屑以及菱铁矿;发育生物扰动构造和平行层理,见有交错层理;海洋特征元素含量明显高于崖一段,显示明显海侵,为内—中陆棚环境。

从YC19-1-1井陵三段上部、YC13-1-2井陵水组二段(陵二段)及YC8-2-1井陵二段开始,海洋特征元

素均具有明显增长的趋势(图 2、图 10)。YC8-2-1 井陵二段是渐新世有孔虫丰度、浮游有孔虫比例以及钙质超微化石丰度和分异度达到最大的阶段,海洋特征元素及其比值也有明显响应, CaO 、 P_2O_5 、 Sr 含量相对陵三段出现明显上升;YC13-1-2 井陵二段 CaO 含量最高可达 20%, P_2O_5 含量达到 0.2%, Sr 含量最高可达 $1\,000 \times 10^{-6}$;YC19-1-1 井陵三段上部与陵二段 CaO 、 P_2O_5 、 Sr 的平均含量依次为 7.8%、0.13%、 240×10^{-6} ,均表现出显著的上升,另外, Sr/Ba 比值也由陵三段下部的较低水平(一般小于 0.1)上升到陵三段上部的 0.29 以上,最高可达 0.60。综合分析可知,从陵三段沉积晚期或陵二段沉积时期开始,琼东南盆地经历一次广泛的海侵,海平面明显上升,浅海沉积覆盖盆

地的大部分区域。

渐新统陵水组在琼东南盆地南北边缘以滨海相为主,盆地中部以浅海和半深海相为主。陵三段在盆地南部局部为潮坪和潟湖相,在崖南凹陷、崖北凹陷、松西凹陷和北礁凹陷的控边断裂附近发育扇三角洲沉积。陵二段沉积时期,海平面上升,滨海范围缩小,崖南凹陷、崖北凹陷、松西凹陷、松东凹陷和北礁凹陷已被浅海所覆盖,盆地中央坳陷带的沉积特征与陵三段基本相似(图 12)。陵二段沉积时期为一次重要的海侵事件,其形成的大套致密浅海相泥岩,已证实是形成大型油气圈闭的良好盖层^[29]。至此,琼东南盆地开阔海沉积格局基本形成,分割性的隆凹相间沉积格局已不明显。

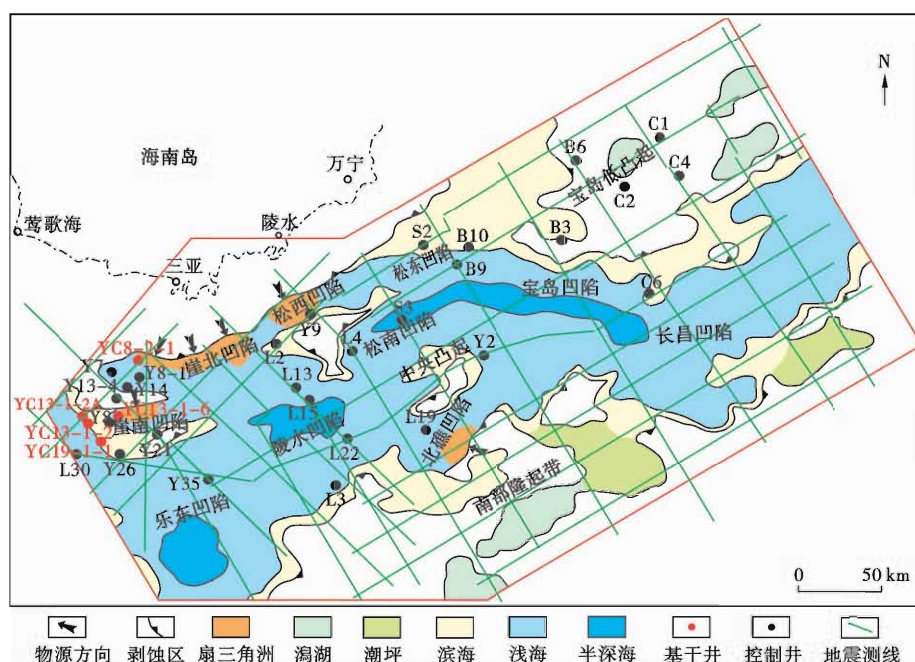


图 12 琼东南盆地陵水组二段沉积相

Fig. 12 Sedimentary facies of the 2nd member of Lingshui Formation of QDNB

4 琼东南盆地海侵过程与南海早期形成演化

琼东南盆地自经历始新世的河湖相沉积后,在渐新世早期开始海侵,形成以海陆过渡相为特征的半封闭型海湾沉积,至渐新世晚期接受滨、浅海相沉积,总体为一个大的海侵过程。渐新世早期,崖城组沉积体系分布模式与陵水组明显不同。崖城组沉积体系丰富多样,扇三角洲、潮坪和潟湖等海陆过渡相沉积体系在中央凹陷带两侧广泛且持续发育,且沉积有独特的煤系地层,并在低位、海侵和高位体系域中具有较强的聚煤效应^[30-31]。这一方面是琼东南盆地受南部隆起带的阻隔,与广海沟通有限,海水只能通过东西两侧通道侵

入,此外,盆地内部广泛分布的古隆起(崖城脊、陵水低凸起、松涛凸起、中央凸起)对海水也有一定的屏障作用;另一方面,这也反映出该时期相对海平面上升较为缓慢,水深总体较为稳定。渐新世早期,南海在扩张之前处于次深海环境,到扩张初期为一 EW 向的狭长海湾^[2-3],据此推测琼东南盆地可能是该海湾的西端延伸部分,但在崖城组下部没有见到明显的海侵沉积,说明这一时期琼东南盆地与广海沟通有限。伴随南海洋壳在 32 Ma 的打开,崖三段沉积晚期至崖二段沉积时期,开始发生明显海侵,但总体水深较浅,至崖一段沉积时期开始广泛出现浅海沉积。陵水组沉积时期,琼东南盆地沉积体系较为单一,海陆过渡相分布较为局限,盆地大部地区为滨、浅海相,并将大部分古隆起淹没,特

别是到陵二段沉积时期,大范围的海侵使整个琼东南盆地覆盖了厚度大的浅海相泥岩。与此形成鲜明对比的是,这一时期琼东南区域沉降速率却趋于缓和^[28]。魏魁生等^[6]认为陵水组沉积中期的大海侵与全球海平面变化完全一致。位于琼东南盆地东侧的珠江口盆地,也经历了相似的海侵过程,从渐新世珠海组沉积中晚期开始,盆地自 SW 向 NE 发生明显海侵^[32]。在渐新世晚期,南海东部持续扩张并向南扩展,促使洋盆的大范围张裂,从而与西太平洋形成良好沟通,此时构造沉降对琼东南盆地北部凹陷带沉积充填的控制可能已处于较次要地位,而全球海平面的升降已对琼东南盆地甚至整个南海北部形成重要影响,并促使南海北部区域陵水组沉积中期海平面明显上升。

南海北部大陆边缘盆地在渐新世开始发生海侵,位于琼东南盆地南部的中建南盆地在该时期也发育海相沉积^[33-34],另外,在南海西南的万安盆地,该时期虽然以河流—三角洲沉积为主^[35],但在盆地东侧也发生了海侵^[36]。南海诸多盆地海侵事件存在一致性,这说明南海扩张是各盆地发生海侵的主要原因。

5 结 论

琼东南盆地早渐新世崖城组沉积环境为具有分割性的半封闭海湾,构造控制了区域海平面的升降。在崖城组三段沉积晚期,盆地从陆相沉积环境转变为海陆过渡相环境,海水影响范围有限,反映此时盆地与广海沟通有限,持续而较和缓的海侵造成盆地在崖城组沉积时期沉积体系丰富多样,扇三角洲、潮坪和潟湖等海陆过渡相沉积体系在中央凹陷带两侧广泛且持续发育。晚渐新世陵水组沉积时期,盆地为开阔海沉积环境,以滨、浅海为主,在陵水组二段沉积时期,海侵明显,全球海平面变化对区域海平面的上升具有较大影响。琼东南盆地是南海西部及北部的大陆边缘盆地中海侵时间最早的盆地之一,南海的初始扩张是造成盆地发生初始海侵的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 朱伟林,张功成,高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报,2008,29(1):1-9.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1):1-9.
- [2] Briaire A, Patriat P, Capponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea; implication for the Tertiary tectonics of southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [3] 汪品先, 剪知潜, 赵泉鸿, 等. 南海演变与季风历史的深海证据[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2228-2239.
Wang Pingxian, Jian Zhimin, Zhao Quanhong, et al. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep-sea records[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(23): 2549-2561.
- [4] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 1-13.
Yao Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(2): 1-13.
- [5] 汪品先. 追踪边缘海的生命史: “南海深部计划”的科学目标[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1807-1826.
Wang Pingxian. Tracing the life history of a marginal sea: on “The South China Sea Deep” research program[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 3093-3114.
- [6] 魏魁生, 崔旱云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 59-66.
Wei Kuisheng, Cui Hanyun, Ye Shufen, et al. High-precision sequence stratigraphy in Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(1): 59-66.
- [7] 张功成, 刘震, 米立军, 等. 珠江口盆地-琼东南盆地深水区古近系沉积演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 632-641.
Zhang Gongcheng, Liu Zhen, Mi Lijun, et al. Sedimentary evolution of Paleogene series in deep water area of Zhujiangkou and Qiongdongnan basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 632-641.
- [8] 蔡佳, 王华. 琼东南盆地陵水组层序格架及沉积体系的时空配置关系[J]. 海洋石油, 2011, 31(1): 16-21.
Cai Jia, Wang Hua. The temporal and spatial configure relation of sedimentary systems and sequence stratigraphic framework of Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin[J]. Offshore Oil, 2011, 31(1): 16-21.
- [9] 邵磊, 李昂, 吴国璋, 等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 548-552.
Shao Lei, Li Ang, Wu Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 548-552.
- [10] 张义娜, 张功成, 梁建设, 等. 琼东南盆地长昌凹陷渐新统崖城组沉积充填及烃源岩特征[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(5): 7-14.
Zhang Yina, Zhang Gongcheng, Liang Jianshe, et al. Sediment filling and source rock characteristic of Oligocene Yacheng Formation in Changchang depression of Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology Frontier, 2012, 28(5): 7-14.
- [11] 刘传联. 琼东南盆地渐新统烃源岩微观沉积特征与沉积环境[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 573-578.
Liu Chuanlian. Sedimentary environment and micro-sediment characteristics of Oligocene source rocks in Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 573-578.
- [12] Zhu W L, Zhong K, Li Y C, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deepwater basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 3121-3129.
- [13] 李绪宣, 钟志洪, 董伟良, 等. 琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 713-721.
Li Xuxuan, Zhong Zhihong, Dong Weiliang, et al. Paleogene rift structure and its dynamics of Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 713-721.
- [14] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源

- 前景[M].北京:石油工业出版社,2008;34-43.
- He Jiaxiong, Liu Hailing, Yao Yongjian, et al. Northern South China Sea margin basin geology and resources of oil and gas prospects[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008; 34-43.
- [15] 廖计华, 王华, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水区长昌凹陷构造演化及其对层序样式的控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(8): 3121-3132.
- Liao Jihua, Wang Hua, Sun Zhipeng, et al. Tectonic evolution and its controlling on sequence pattern of Chang-chang sag, deepwater area of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(8): 3121-3132.
- [16] 李绪宣, 朱光辉. 琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J]. 中国海上油气, 2005, 17(1): 1-7.
- Li Xuxuan, Zhu Guanghui. The fault system and its hydrocarbon carrier significance in Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(1): 1-7.
- [17] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [18] 同济大学海洋地质系. 海、陆相地层辨认标志[M]. 北京: 科学出版社, 1980; 7-8.
- Department of Marine Geology of Tongji University. Identification sign of marine and continental strata[M]. Beijing: Science Press, 1980; 7-8.
- [19] 刘本立. 地球化学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994; 186-187.
- Liu Benli. Geochemical basis[M]. Beijing: Peking University Press, 1994; 186-187.
- [20] 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 202-210.
- Ye Liming, Qi Tianjun, Peng Haiyan. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 202-210.
- [21] Chen Z Y, Chen Z G, Zhang W G. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze delta, Eastern China, with special reference to marine transgressions[J]. Quaternary Research, 1997, 47(2): 181-191.
- [22] Chagué-Goff C. Chemical signatures of palaeotsunamis: a forgotten proxy? [J]. Marine Geology, 2010, 271(1-2): 67-71.
- [23] 钟志洪, 王良书, 李绪宣, 等. 琼东南盆地古近纪沉积充填演化及其区域构造意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 29-36.
- Zhong Zhihong, Wang Liangshu, Li Xuxuan, et al. The Paleogene basin-filling evolution of Qiongdongnan Basin and its relation with seafloor spreading of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(1): 29-36.
- [24] 蔡佳. 琼东南盆地古近系古地貌恢复及其对层序样式和沉积特征的控制[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009; 50-56.
- Cai Jia. Paleo-morphologic restoration of Paleogene in Qiongdongnan Basin and its control on sequence architecture and sedimentary characteristics[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009; 50-56.
- [25] 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. 中国海上油气, 2012, 24(4): 1-7.
- Huang Baojia, Li Xushen, Wang Zhenfeng, et al. Source rock geochemistry and gas potential in the deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(4): 1-7.
- [26] 能源, 吴景富, 漆家福, 等. 南海北部深水新生代盆地三层结构及其构造演化[J]. 地质学报, 2013, 87(3): 403-414.
- Neng Yuan, Wu Jingfu, Qi Jiafu, et al. Three structural layers and its evolution of Cenozoic basins in deep water area of northern margin, South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 403-414.
- [27] 李文浩, 张枝焕, 李友川, 等. 琼东南盆地古近系渐新统烃源岩地球化学特征及生烃潜力分析[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 700-708.
- Li Wenhao, Zhang Zhihuan, Li Youchuan, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation of Paleogene Oligocene source rocks in Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 700-708.
- [28] 廖计华, 王华, 肖军, 等. 琼东南盆地古近纪幕式裂陷及构造、层序和沉积的综合响应过程[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(4): 970-983.
- Liao Jihua, Wang Hua, Xiao Jun, et al. Episodic riftting and integrated response process of tectonic, sequence stratigraphy and sedimentary filling in Paleogene of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(4): 970-983.
- [29] Hao S S, Huang Z L, Liu G D, et al. Geophysical properties of cap rocks in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(4): 547-555.
- [30] 李增学, 何玉平, 刘海燕, 等. 琼东南盆地崖城组煤的沉积学特征与聚煤模式[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 542-547.
- Li Zengxue, He Yuping, Liu Haiyan, et al. Sedimentology characteristics in Yacheng Formation and coal-forming models of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 542-547.
- [31] 米立军, 王东东, 李增学, 等. 琼东南盆地崖城组高分辨率层序地层格架与煤层形成特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 534-541.
- Mi Lijun, Wang Dongdong, Li Zengxue, et al. High-resolution sequence stratigraphic framework and coal-forming features in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 534-541.
- [32] 傅宁, 邓运华, 张功成, 等. 南海北部叠合断陷盆地海陆过渡相烃源岩及成藏贡献——以珠二坳陷白云凹陷为例[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 559-565.
- Fu Ning, Deng Yunhua, Zhang Gongcheng, et al. Transitional source rock and its contribution to hydrocarbon accumulation in superimpose rift-subsidence basin of northern South China Sea: taking Baiyun Sag of Zhu II Depression as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 559-565.
- [33] Fyhn M B W, Nielsen L H, Boldreel L O, et al. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the northwest Phu Khanh Basin, offshore Central Vietnam[J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 26(1): 1-24.
- [34] Fyhn M B W, Boldreel L O, Nielsen L H. Geological development of the central and south Vietnamese margin: implications for the establishment of the South China Sea: indochinese escape tectonics and Cenozoic volcanism[J]. Tectonophysics, 2009, 478(3-4): 184-214.
- [35] Matthews S J, Fraser A J, Lowe S, et al. Structure, stratigraphy and petroleum geology of the SE Nam Con Son Basin, offshore Vietnam[M]//Fraser A J, Matthews S J, Murphy R W. Petroleum Geology of Southeast Asia. London: Geological Society, Special Publication, 1997, 126: 89-106.
- [36] Lee G H, Lee K, Watkins J S. Geologic evolution of the Cuu Long and Nam Con Son basins, offshore southern Vietnam, South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 1055-1082.