

文章编号:1000-0550(2025)06-2187-15

琼东南盆地松南低凸起YA区渐新统沉积体系

郭原草^{1,2}, 郭建华^{2,3}, 余烨², 陈广³, 李智宇³, 刘辰生³, 吴诗情³

1.湖南科技大学土木工程学院,湖南湘潭 411201

2.湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院,湖南湘潭 411201

3.中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410012

摘要 【目的】系统研究沉积体系与沉积模式是厘清碎屑岩优质储层发育机理的基础。【方法】以松南低凸起YA区渐新统为研究对象,运用钻井取心、薄片鉴定、古生物化石鉴定、粒度分析、测井及地震解释等手段,系统研究其沉积体系及沉积演化,恢复了YA区古近系沉积环境。【结果】渐新统中下部(崖城组)岩性主要为中—粗砂岩、含砾砂岩。砂岩分选性较差,矿物成分自下而上逐渐趋于稳定,成熟度逐渐提高。粒度概率累积曲线呈现悬浮和跳跃特征,化石丰度极低。沉积相类型以扇三角洲、滨浅湖及湖岸平原为主。渐新统中上部(陵水组)岩性以粉细砂岩、泥岩为主,化石丰度显著增加。沉积相类型以滨海、浅水陆棚、深水陆棚为主。研究区在渐新世从海陆过渡相转为浅海相。崖城组沉积时期盆地处于强烈断陷与快速补偿时期。地震相以前积和杂乱反射结构为主要特征。断层活动导致区内形成凹凸相间的构造格局,水体较浅。凹陷中心处发育滨浅湖相,陡坡处及水体较深处发育扇三角洲相,缓坡处及水体较浅处发育辫状河三角洲相。陵水组沉积时期盆地处于快速断陷与欠补偿时期。地震相以平行—亚平行反射结构为主要特征。断裂活动引起沉积水体加深。凹陷中心整体发育浅水陆棚相与深水陆棚相,凹陷周缘零星发育扇三角洲。【结论】YA区渐新统为强烈断陷沉积,沉积相类型及展布受构造运动显著影响。盆地充填样式与沉积演化特点体现了不同时期内盆地沉积模式。

关键词 琼东南盆地;松南低凸起;渐新统;沉积体系;沉积模式

第一作者简介 郭原草,男,1984年出生,博士,讲师,沉积学,E-mail: xctmac@sina.cn

通信作者 郭建华,男,教授,沉积学,E-mail: gjh796@csu.edu.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.121

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.121

0 引言

琼东南盆地古近系渐新统是近年来在南海西北部深水区新查明的一套富有潜力的海陆过渡相烃源岩,包括崖城组(下统)与陵水组(上统)。前人针对盆地古近系物源^[1-3]、沉积相^[4-6]、沉积特征^[7-13]、沉积演化^[14-17]及烃源岩发育^[18-21]等问题开展了诸多有益的研究,尤其是针对扇(辫状河)三角洲沉积体系做了较为详细的研究^[21-24]。研究表明,崖城组为近源沉积,沉积时期物源区范围相对有限,物源来自附近构造隆起,源岩为长英质岩石^[1]。崖城组沉积时期盆地深水区东段为半封闭海湾环境^[7]。崖城组主要由含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩、泥岩、碳质泥岩和煤组成,属于断陷盆地沉积^[8]。松南低凸起南部

北礁凹陷崖城组最大厚度超过2 000 m,为海陆过渡相潟湖—潮坪沉积^[10]。陵水组主要发育三角洲及滨浅海沉积体系,储层岩石类型以岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩为主^[24];煤系烃源岩主要发育在滨岸平原环境,有机质来源为陆生高等植物。扇三角洲前缘与浅海相、半深海相的过渡带是陆源海相泥质烃源岩发育的有利区带,有机质来源为陆生高等植物与浅海生物^[12]。陵三段扇三角洲体系垂向演化分为三个阶段,呈现出越来越强的潮汐作用^[22]。盆地在古近纪经历了始新世陆相沉积向渐新世海相沉积的转变,盆地北部坳陷带自崖三段沉积晚期开始发生明显海侵,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^[14]。渐新统三角洲发育规模及古地貌控制了海陆过渡相煤系和海相陆源型烃

收稿日期:2024-01-16;修回日期:2024-10-24;录用日期:2024-12-20;网络出版日期:2024-12-20

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05026-002)[Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05026-002]

源岩的分布,断陷—坳陷转换期形成的半封闭浅海环境有利于形成生气为主、油气兼生的海相陆源型烃源岩^[19]。

目前,关于琼东南盆地古近系沉积的研究主要集中在崖南凹陷^[4,21-22]、陵南低凸起^[1]、崖北凹陷^[5]、北礁凹陷^[10]、长昌凹陷^[18]等研究区,对松南低凸起及周缘古近系沉积的研究相对偏少^[12,15]。渐新统沉积特征与沉积环境的研究多基于成煤作用及成煤模式开展^[5,8,9,23-24],且关于崖城组沉积研究相对较多,而陵水组相关研究相对偏少^[2,6,11-12,24],对于整个渐新统沉积体系及沉积演化的探究亟须加强^[23]。本文针对松南低凸起YA区古近系渐新统沉积体系、沉积演化与沉积模式开展系统研究,重建区内渐新世纪沉积环境,为查明区内古近系碎屑岩优质储层发育机理及层序格架内生储盖组合等问题奠定基础,也为圈定有利勘探区提供理论依据。

1 区域地质背景

琼东南盆地位于南海西北部,被海南岛、西沙隆起、莺歌海盆地及珠江口盆地所包围。盆地海域面积约 $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,坳陷区面积约占三分之二。盆地沿NE—SW方向展布,总体呈“两隆三坳”之构造格局,正向与负向二级构造单元由北向南呈NE向带状交互展布,依次为北部坳陷带、中部隆起带、中央坳

陷带、南部隆起带、南部坳陷带(图1a)。盆地为新生代陆缘拉张型盆地^[25],基底由前第三纪变质岩、火山岩组成。盆地发育始新统至第四系,自下往上划分出T100、T80、T70、T60、T50、T40、T30、T20等八个区域构造反射界面,其间地层由老到新依次为岭头组、崖城组、陵水组、三亚组、梅山组、黄流组、莺歌海组和乐东组(图1b)。盆地构造演化史分为裂陷期和坳陷期,在垂向上形成双层结构^[25]:下层形成于裂陷期,构造运动强烈,由下至上依次沉积始新统岭头组、渐新统崖城组和陵水组,沉积相类型以湖相和海陆过渡相为主。上层形成于坳陷期,包括中新统三亚组、梅山组和第四系莺歌海组、乐东组,沉积相逐渐转为海相,厚度稳定,构造简单,构造运动强度减弱,地层整体南倾,呈平坦展布。

YA区渐新统分为下统一崖城组和上统一陵水组,根据地震反射特征可识别出T80、T72、T71、T70、T62、T61、T60等7个三级层序界面及6个三级层序。崖城组属裂陷期一幕沉积地层^[26],处于地震反射标志层T80与T70之间,自下而上依次为崖城组三段、崖城组二段、崖城组一段(崖三段、崖二段、崖一段),对应三级层序SQ1、SQ2、SQ3。崖城组在区内超覆于古近系基岩上,具有显著不整合特征,与下伏基底花岗岩潜山之间存在明显岩性突变。陵水组属盆地裂陷期二幕沉积地层^[26],处于地震反射标志层T70与T60

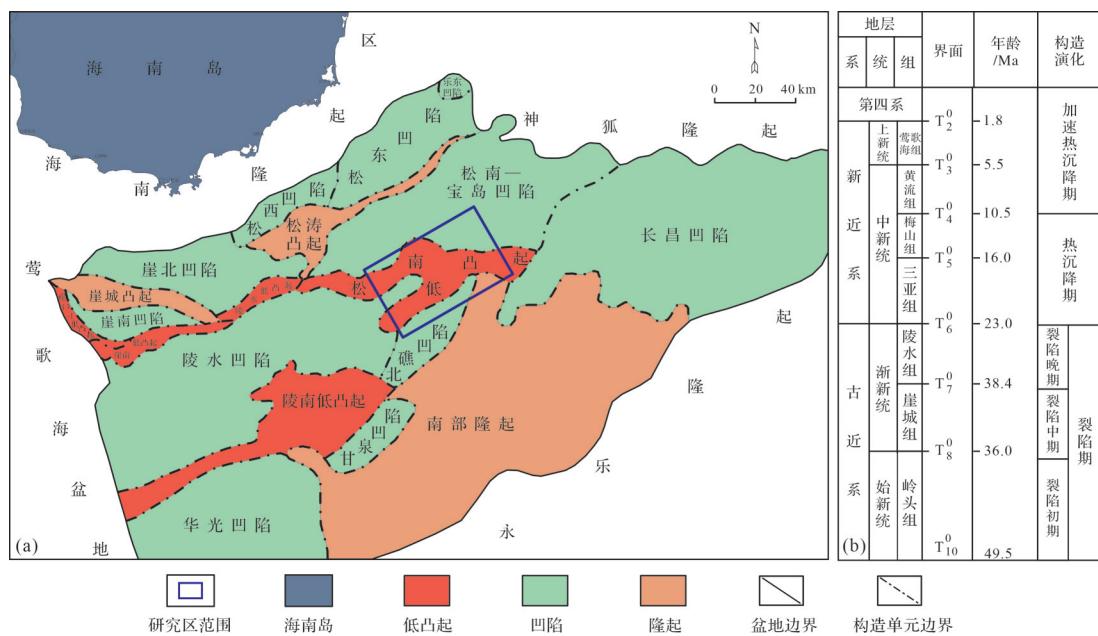


图1 研究区综合地质图
(a)琼东南盆地构造单元区划;(b)地层柱状图
Fig.1 Comprehensive geological map of the study area

之间,自下而上依次为陵水组三段、陵水组二段、陵水组一段(陵三段、陵二段、陵一段),对应三级层序SQ4、SQ5、SQ6。该组在局部基底隆升区或邻近边缘隆起区直接超覆于基底之上,与下伏地层呈平行或角度不整合接触。

区内古近系断裂系统发育,将YA区分为北礁凹陷和松南低凸起两个构造单元,松南低凸起又分为北凸起、陵水东次洼和南凸起。区内断裂系统以北东东向为主,北北东向次之,北北西向最少(图2)。北东东向断裂为基底断裂,主要分布在松南低凸起东部(YA-AA、YA-BA等井区周围),断层数量多,活动时间早。北北东向断裂发育在陵水次洼东北部和北礁凹陷东北部,包括控洼—长期活动断裂及次一级同沉积断裂。北北西向断裂分布于北礁凹陷西部及陵水次洼北部,断裂长度变化较大,活动时间较晚。区内断层活动时间和强度各不相同,对沉积作用的控制范围和强度也不同,最终影响油气运移特征。

2 单井沉积相分析

研究区钻遇古近系的探井总体较少。综合利用YB-AA井、YC-AA井、YD-AA井壁心、古生物化石、粒度分析、测井资料确定区内沉积相类型,通过沉积相剖面对比结合地震解释资料确定沉积相平面展布。

2.1 岩性特征

YB-AA井取心相对较多。下部(崖三段、崖二段中下部)岩性主要为灰绿色及浅灰色砂质砾岩、中一粗粒砂岩,次棱角—棱角状,坚硬,固结程度高,分选差,轻微钙质胶结,常见石英砾、岩屑碎片,可见冲刷面(图3a)。中部(崖二段中上部、崖一段中下部)岩性主要为浅灰色砾质砂岩、中一粗粒砂岩,次棱角状,分选差,胶结好,轻微含钙,常见岩屑碎片(图3b)。上部(崖一段中上部至陵水组)岩性主要为暗灰色泥岩与粉砂岩互层,夹薄层砾质中粗砂岩。砾质中粗砂岩呈浅棕灰色,次棱角状—圆状,分选中

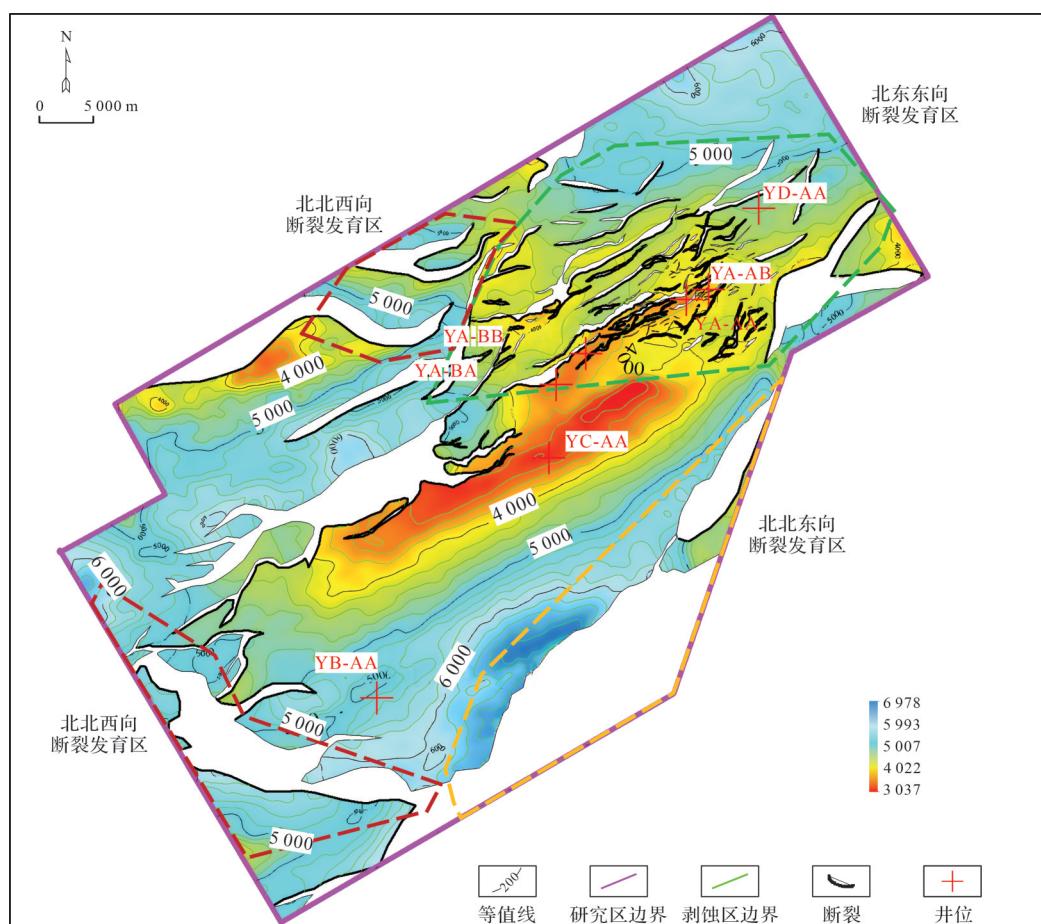


图2 琼东南盆地松南低凸起YA区T100反射界面深度图(断裂发育分区图)

Fig.2 Depth of T100 reflection interface in the YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin (fault development zoning map)

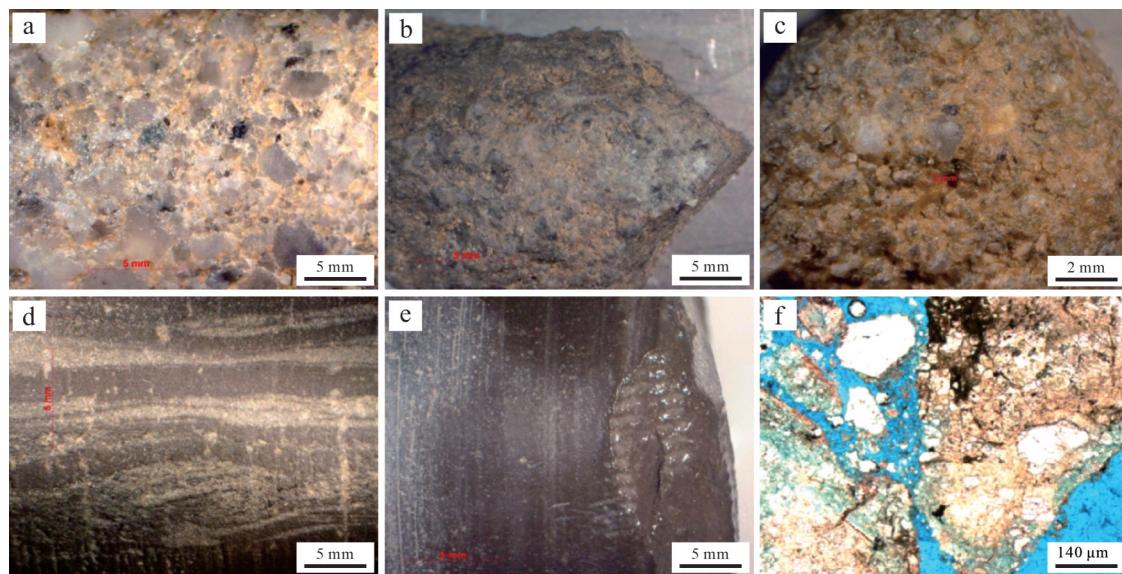


图3 琼东南盆地松南低凸起YB-AA井渐新统壁心照片

(a)浅灰色块状砂质砾岩,砾石含量大于60%,分选差,底部发育冲刷面,崖三段,5 021 m;(b)浅灰色砾质砂岩,次棱角状,分选较差,基质支撑,崖二段,4 720 m;(c)浅棕色砾质中粗粒砂岩,分选中等,次棱角状,基质支撑,崖一段,4 135 m;(d)浅灰一暗灰色粉砂质泥岩,具波状一透镜状层理,崖一段,4 077 m;(e)暗灰色泥页岩,水平层理发育,含少量炭屑,陵一段,3 578 m;(f)砂岩,分选中等,次棱角一次圆状,崖三段,单偏光

Fig.3 Photograph of the Oligocene wall core, well YB-AA, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

等,含少量轻微钙质杂基和岩屑,指示风暴或重力流沉积特征(图3c)。泥岩呈暗灰色,质地坚硬,固结好,致密,中等含钙,泥土光泽,含少量炭屑(图3d~f)。综上,YB-AA井崖三段至崖一段中下部表现出扇三角洲辫状河道沉积特征,崖一段中上部至陵水组指示浅海陆棚沉积特征。YC-AA井古近系仅发育崖二段、崖一段,岩性以杂色一灰色砂砾岩、灰色泥质中砂岩和蓝色泥岩为主。灰色砂砾岩成分以石英为主,次圆一次棱角状,分选差,砾径2~3 mm,泥质胶结(图4)。灰色泥质中砂岩成分以石英为主,长石次之,含少量燧石,偶见石英砾,分选较差,次圆一次棱角状。泥岩质纯且质地较软,具可塑性。综上,YC-AA井崖二段、崖一段发育扇三角洲平原和前缘亚相。扇三角洲平原以辫状河道和泛滥平原沉积为主,自然伽马(GR)测井曲线形状表现为锯齿状箱型和直线型。扇三角洲前缘以水下辫状河道、河口砂坝、远砂坝及支流间湾沉积为主,GR测井曲线形状表现为锯齿状箱型、漏斗形和直线型(图4)。

2.2 粒度分析

薄片鉴定结果显示,YB-AA井始新统、崖三段主要为岩屑砂岩,崖二段为长石岩屑质砂岩,崖一段为石英砂岩,砂岩矿物成分向上趋于稳定,成分成熟度逐渐提高,反映了逐渐远离物源区、沉积水体逐渐加深之规律。粒度累积概率曲线以悬浮总体为主,跳

跃总体次之,表现为重力流机制影响的一段式(崖三段5 001~5 004 m、4 932~4 935 m)和辫状河道沉积的两段式(崖三段5 097~5 100 m和5 061~5 064 m、崖二段4 761~4 764 m),具有扇三角洲沉积特征(图5a)。YD-AA井崖一段、陵三段粒度累积概率曲线表现出两段式特征,跳跃总体分选相对较好,悬浮总体和跳跃总体粒度介于4~5 Φ ,具有河口砂坝沉积特征(图5b)。从YB-AA井砂岩分选性特征可以看出,崖三段、崖二段砂岩分选性较差,可能与扇三角洲近源堆积、搬运距离短有关(图5c)。崖一段、陵三段砂岩分选性同样较差,可能与扇三角洲泥质含量较高、搬运距离较近及沉积环境水动力较弱有关(图5d)。YD-AA井崖一段发育扇三角洲前缘河口砂坝、辫状河道,GR测井曲线表现为漏斗形和锯齿箱型。陵三段早期同样以扇三角洲沉积为主,依次发育扇三角洲前缘和前扇三角洲,指示河口砂坝、远砂坝特征的漏斗形GR测井曲线较为明显,基本继承了崖一段沉积特征。陵三段晚期到陵一段岩性以厚层泥岩夹薄层砂岩为主,表现为浅水陆棚沉积特征(图6)。

2.3 古生物化石特征

本研究古生物化石主要取自陵水组,崖城组生物化石采样较少。针对YD-AA井3 660~4 080 m井段、YB-AA井2 640~5 237 m井段累计采集岩屑样品252个,经镜下鉴定与比对,共发现有孔虫化石59属

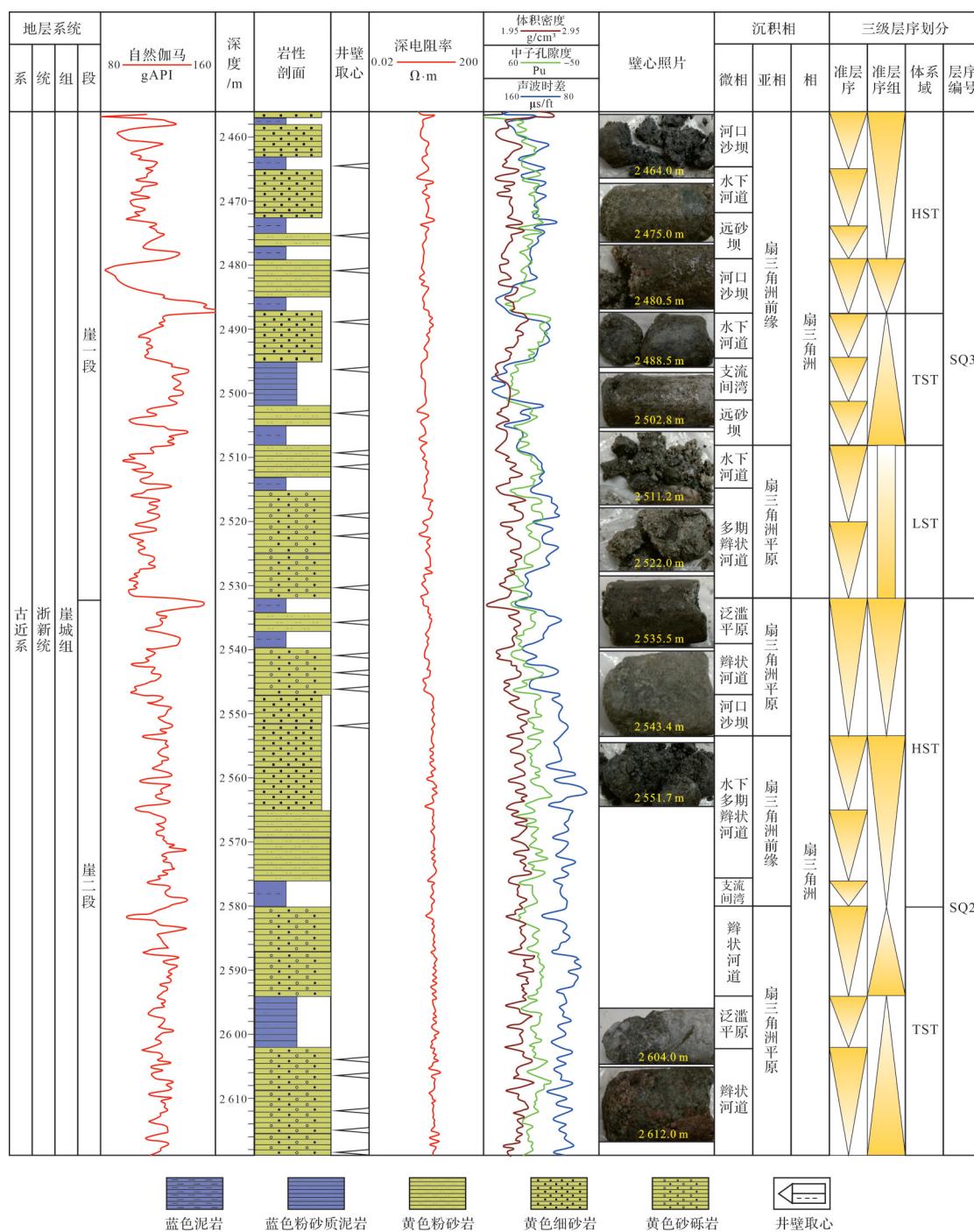


图4 琼东南盆地松南低凸起YC-AA井渐新统崖城组综合柱状图

Fig.4 Comprehensive bar chart of the Oligocene Yacheng Formation, well YC-AA, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

136种。其中浮游类15属83种,有孔钙质底栖类29属34种,砂质壳10属13种,瓷质壳5属6种。依据古生物化石类型可判断地层归属,根据化石丰度、分异度可大致推测古沉积水体深度及沉积环境。YD-AA井陵三段早期、陵二段早期0.25 mm、0.125 mm粒径有孔虫化石丰度相对较低,沉积水体较浅,推测其为滨海沉积或扇三角洲沉积。陵三段中期、陵二段中

晚期、陵一段粒径大于0.25 mm、大于0.125 mm样品中有孔虫化石丰度相对较高,说明沉积水体相对较深,推测其可能为浅水陆棚沉积环境(图6)。YD-AA井钙质超微化石丰度在崖一段、陵三段早期较低,推测沉积环境为扇三角洲或滨浅海。陵三段晚期至陵一段钙质超微化石丰度逐渐增加,表现为水体逐渐加深的过程,指示从内陆棚过渡到外陆棚的变化趋

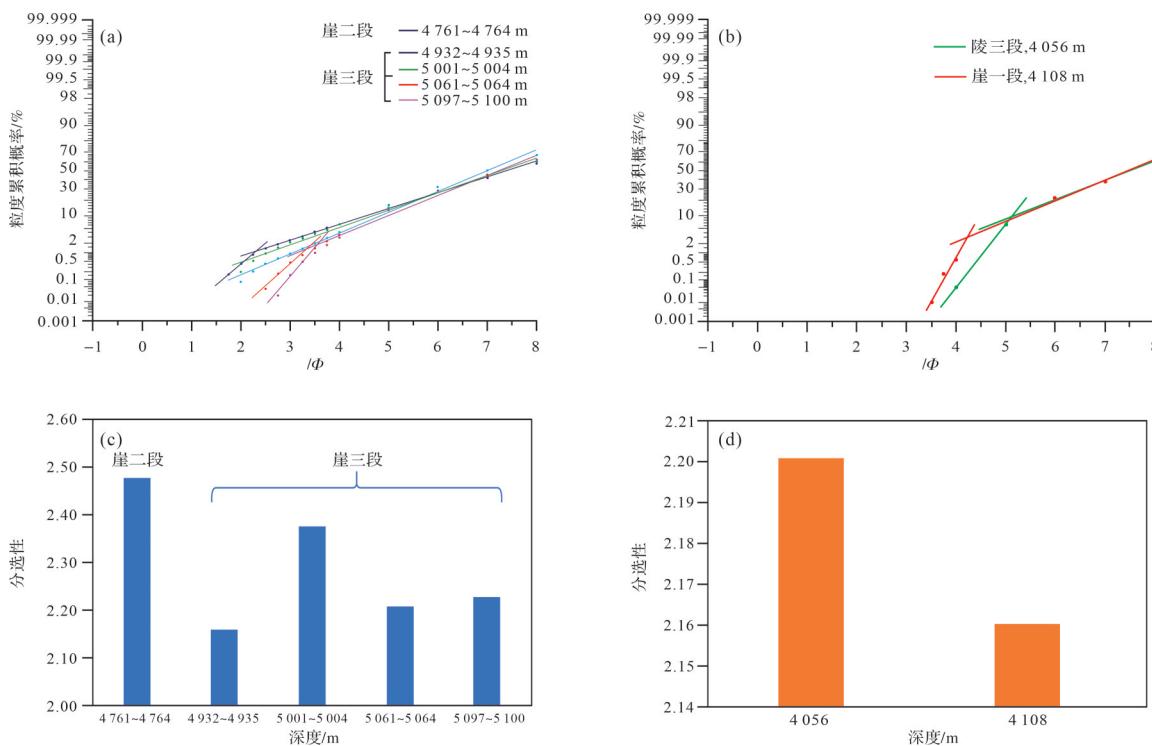


图5 琼东南盆地松南低凸起YA区渐新统样品粒度及分选特征

(a)YB-AA井样品粒度累积概率曲线;(b)YD-AA井样品粒度累积概率曲线;(c)YB-AA井砂岩分选性特征;(d)YD-AA井砂岩分选性特征

Fig.5 Grain size and sorting characteristics of Oligocene samples in the YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

势(图6)。YD-AA井孢粉总粒数在崖一段至陵一段变化不甚明显,但总颗粒数相对较多,整体表现为沉积盆地内大量碎屑沉积物堆积现象,推测沉积区到物源区距离不太远(图6)。

2.4 沉积相对比分析

由于研究区钻井较少,沉积对比剖面选取钻遇古近系的YB-AA井、YC-AA井、YA-AA井和YD-AA井,从北礁凹陷西南区域跨松南低凸起向北东方向进入松南宝岛凹陷(图7)。剖面显示:崖三段沉积时期在北礁凹陷YB-AA井附近主要为潮坪和扇三角洲沉积,而松南低凸起由于地势较高主要为剥蚀区。崖二段沉积时期随着断陷湖盆扩张、海平面上升及盆地热沉降,松南低凸起等低洼地区接受沉积,发育扇三角洲沉积。崖一段沉积时期北礁凹陷YB-AA井早期发育潮坪沉积,晚期主要发育浅水陆棚沉积,在松南低凸起大部分区域则发育扇三角洲沉积。陵三段时期由于局部构造抬升,松南低凸起部分区域遭受剥蚀(如YA-AA井附近),周围主要发育扇三角洲沉积。在北礁凹陷YB-AA井和靠近松南宝岛凹陷的YD-AA井附近主要发育浅水陆棚沉积。陵二段、陵一段基

本继承了陵三段沉积特征,在北礁凹陷和松南宝岛凹陷主要发育浅水陆棚沉积,而在松南低凸起周缘除发育扇三角洲沉积外,还发育滨海相沉积。

3 沉积体系展布

地震相分析是在少井、无井地区研究沉积相的重要技术手段。地震相标志常与沉积相标志具有较好的相似性与对应关系,是反映区域地层厚度和岩性(波阻抗)变化规律、鉴定沉积环境的重要依据。根据地震反射特征、钻井资料及构造背景,在YA区内共识别出8种地震相,分别与沉积相类型对应(图8)。基于地震反射属性与沉积环境对应关系,寻找弱振幅背景下的高RMS振幅、低频率、强相位、窄带宽区域,在单井砂泥岩层段反射属性分析的基础上开展多属性融合研究,确定沉积相展布与有利勘探区带。

在渐新世盆地演化各阶段中,崖城组和陵水组地震相类型差异较大,同一层系不同沉积幕期地震相类型也不相同。地震剖面解释结果表明,崖城组沉积时期水体较浅,盆地处于强烈断陷与快速补偿时期,地震相以前积和杂乱反射结构为主要特征。

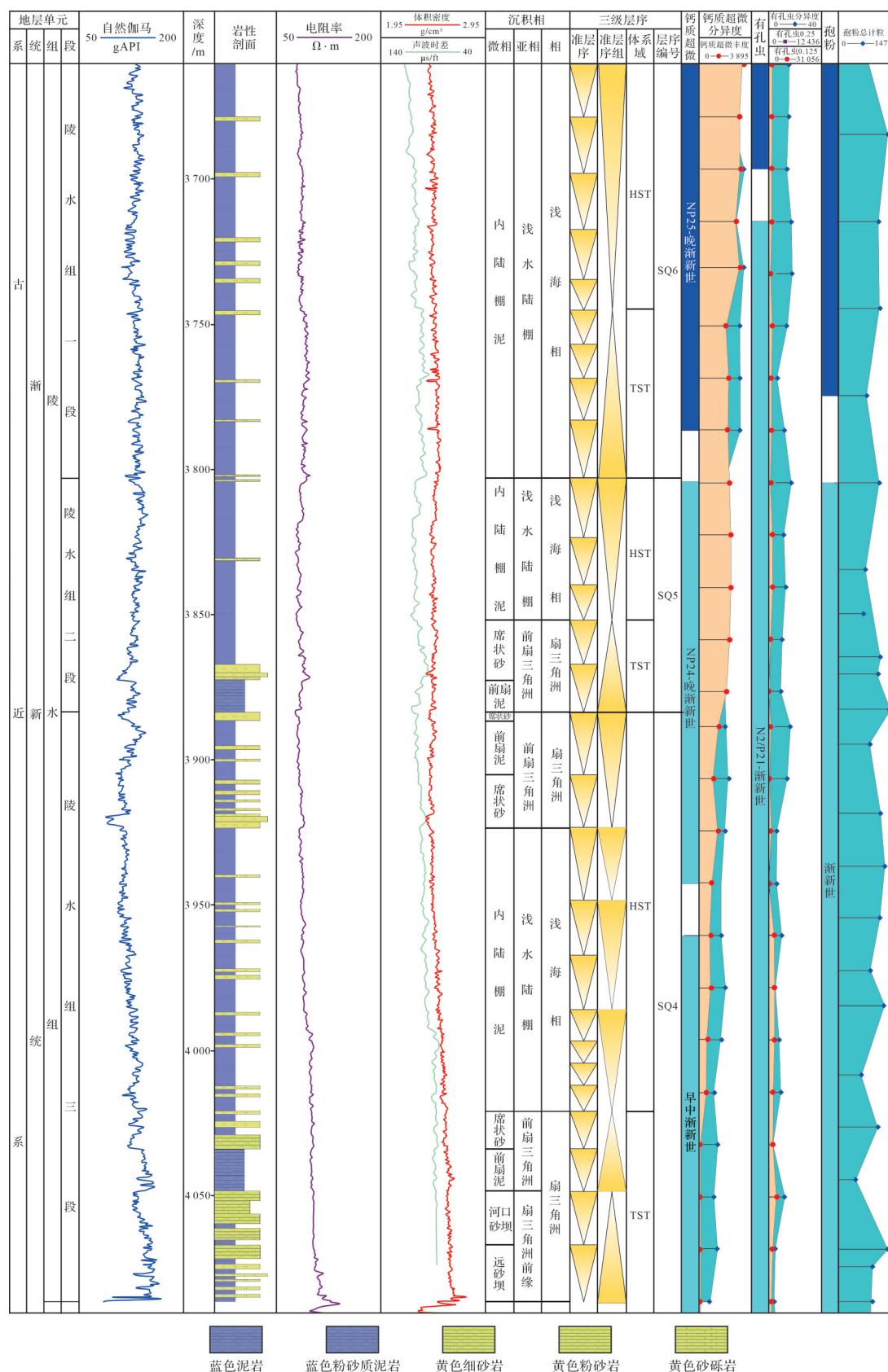


图 6 琼东南盆地松南低凸起 YD-AA 井渐新统陵水组综合柱状图

Fig.6 Comprehensive bar chart of the Oligocene Linshui Formation, well YD-AA, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

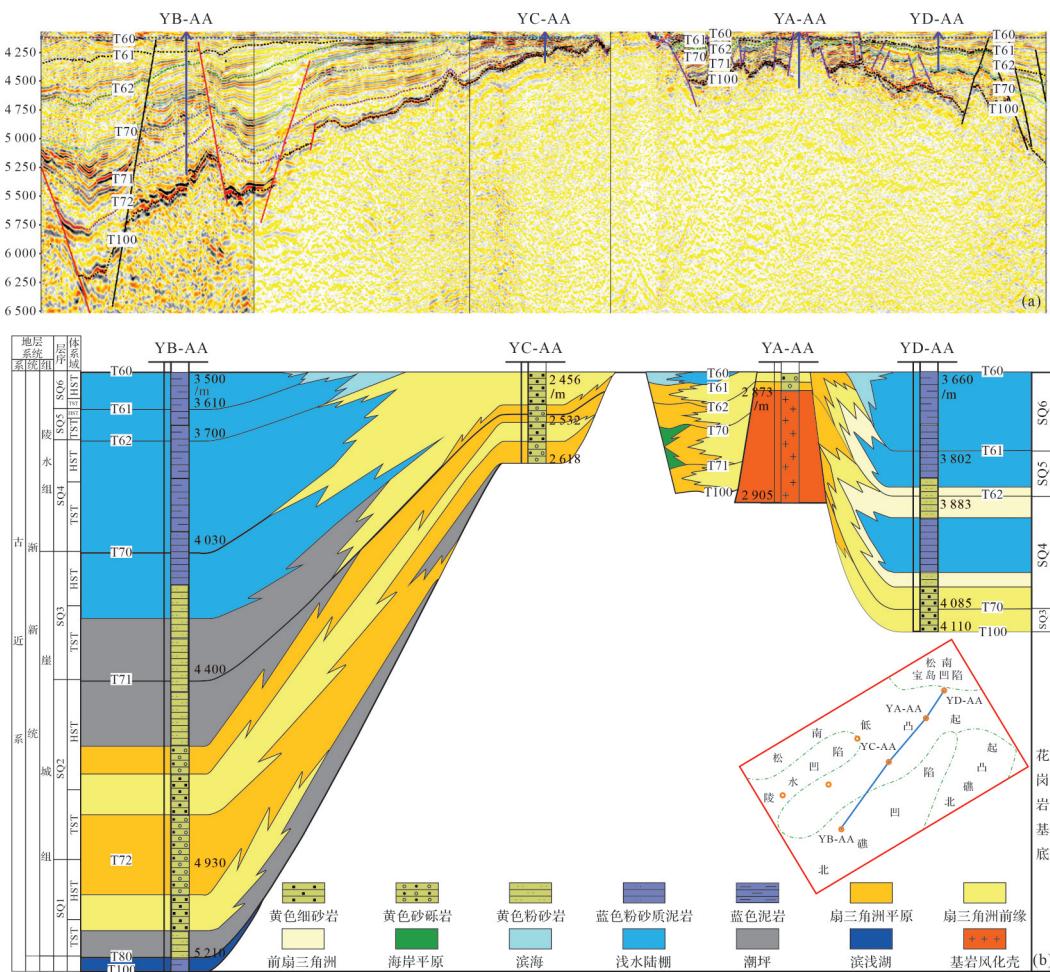


图7 琼东南盆地松南低凸起YA区YB-AA井—YD-AA井渐新统地震剖面及沉积相对比剖面

(a)地震剖面;(b)沉积相对比剖面

Fig.7 Oligocene seismic profiles and sedimentary facies correlation profiles of the well YB-AA-well YD-AA, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

陵水组沉积时期水体较深,盆地处于快速断陷与欠补偿时期,以平行—亚平行反射结构为主要地震相特征。根据崖城组、陵水组地震相类型和展布特征,结合区域构造背景、测井、钻井及分析测试资料,确定不同地震相类型对应的沉积相类型并绘制出各层段沉积相平面展布图。

崖三段地震相呈东西向条带状展布,研究区内大部分区域以前积反射结构、平行—亚平行反射结构、杂乱反射结构为主要特征,以发育连续性较差的高能地震相为主(图9a)。区内各类扇体发育,指示出高能浅水沉积环境。崖三段沉积时期物源充足,沉积相类型包括扇三角洲相、辫状河三角洲相、浊积扇相、滨—浅湖相及湖岸平原相(图9b)。该时期扇三角洲相较发育,以北礁凹陷尤为明显。受物源供给影响,北礁凹陷断裂陡坡带扇体数量多、规模大、

厚度厚。陵水东次洼物源供给弱,扇体数量、规模相对较小,厚度较薄。辫状河三角洲相发育在北礁凹陷缓坡带,运输水道较细长,相邻扇体上部(辫状河三角洲平原亚相)地震相连续性好;浊积扇相少量发育在扇三角洲前端深水区域。虽然崖三段大部分为浅水沉积,但在断裂幕式活动期间会伴有短时深水沉积,期间断裂活动加快,坡度变陡,诱发扇体前端重力滑塌形成浊积扇。滨湖相围绕湖岸发育,可根据地震相和地层厚度识别,与浅湖相有明显区别,湖岸平原相为滨湖与湖岸的过渡带(图9b)。

崖二段在研究区内多以前积反射和亚平行反射结构为主要特征,指示出高能沉积环境特征。沉积中心连续性较好的地震相展布范围更广,以中—低频、中—强振幅、中连续平行—亚平行反射结构为主,中强振幅高连续平行反射结构次之,指示出较为

地震相			发育位置	沉积相	地震相特征	
反射强度	连续性	反射结构				
中强—中等	中—差	楔形前积、杂乱前积	断裂陡坡带		近岸水下扇	
中等—中弱	差	杂乱反射、杂乱前积	缓坡带、陡坡带		扇三角洲	
强—中强	中—差	杂乱反射、丘状反射	扇体前端坡折深水区		浊积扇	
中强—强	强—中	S型前积、楔形前积	平缓坡带		辫状河三角洲	
中弱	中	杂乱结构平行—亚平行反射	近岸缓坡			
			北礁凹陷	陵水东次洼		
中强—中等	强—中	亚平行、平行—亚平行、杂乱反射	缓坡区带			
			北礁凹陷	陵水东次洼		
强—中强—中等	强—中	平行、平行—亚平行反射	深水区			
			北礁凹陷	陵水东次洼		
强	中—强	平行反射	沉降中心		浅水陆棚相	

图8 琼东南盆地松南低凸起YA区渐新统沉积相地震反射特征

Fig.8 Seismic reflection characteristics of the Oligocene sedimentary facies, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

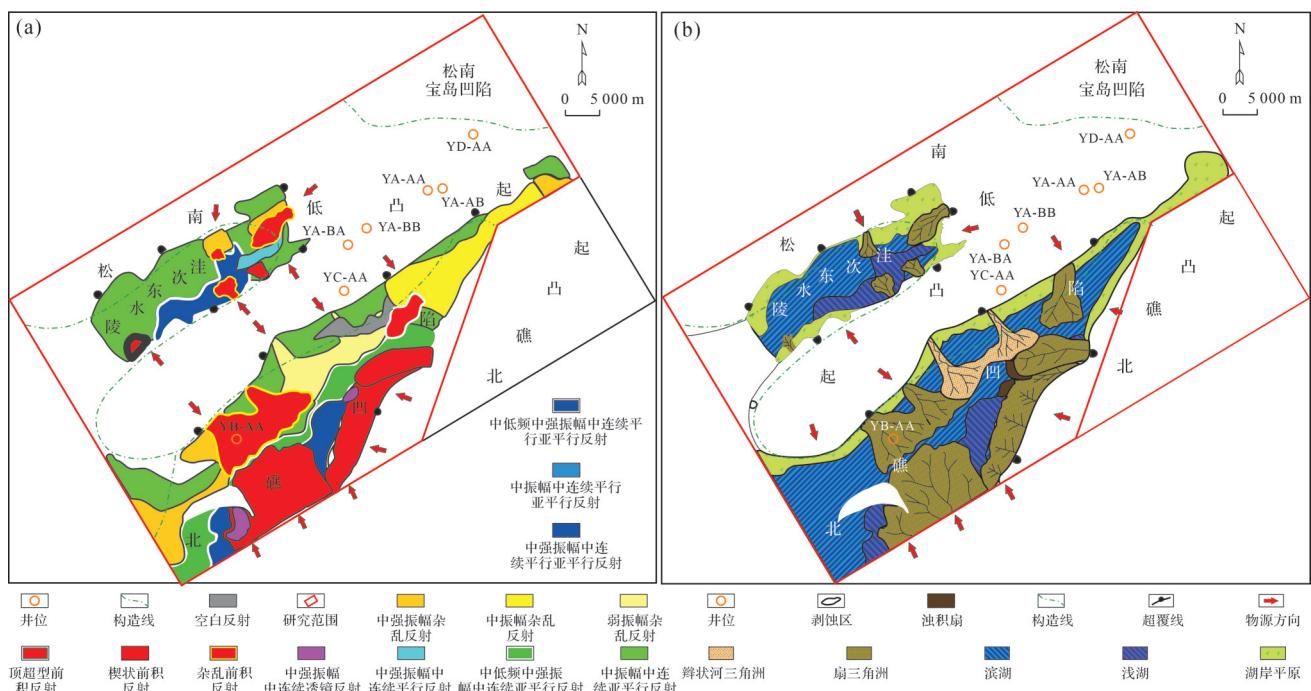


图9 琼东南盆地松南低凸起YA区渐新统崖三段地震相与沉积相平面图

(a) 地震相平面图; (b) 沉积相平面图

Fig.9 Seismic and sedimentary facies in the Third member of the Oligocene Yacheng Formation, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

稳定的构造沉积环境。崖二段沉积相类型与崖三段基本相似。该时期北礁凹陷陡坡带处扇三角洲规模缩小,但仍大于缓坡带扇体。北礁凹陷东部发生小规模断裂活动,构造格局在较小范围内发生改变,河流改道,致该处扇三角洲迁移。辫状河三角洲仍然发育在北礁凹陷缓坡带,受物源供给和构造沉积演化影响,缓坡带中部一辫状河扇体演化消亡,中部一扇三角洲演化成辫状河三角洲。该时期浅湖相展布面积相比崖三段增大,表明水体加深。受湖平面上升影响,滨湖相展布范围向外推进。

崖一段沉积范围扩展到东北部宝岛凹陷。研究区地震相大部分以中—强振幅、中等连续平行—亚平行反射结构和前积结构为主,整体表现出相对稳定的沉积环境(图10a)。崖一段湖相沉积转为海相沉积,沉积相类型与崖二段相差较大,包括扇三角洲相、近岸水下扇相、浊积扇相、滨海相、浅水陆棚相和深水陆棚相(图10b)。北礁凹陷陡坡带扇三角洲规模继续缩小,水体加深造成断裂带部分扇体入海转变为近岸水下扇。陵水东次洼由于物源供给不足,扇三角洲规模减小,北部凸起扇三角洲展布面积增大,海平面相对上升,平原河流作用减弱,没有较长的近水运输通道发育,故辫状河三角洲不发育。根据沉积厚度及地

震相特征可以识别出滨海相、浅水陆棚相和深水陆棚相,深水陆棚相主要发育在受断裂控制区域。

陵水组沉积时期区内海平面相对较高,沉积相平面展布总体变化较小。陵水组地震相整体以发育广泛的平行反射结构和平行—亚平行反射结构为主要特征,地震相振幅及连续性有降低趋势。北礁凹陷平行反射结构地震相展布范围扩大,断裂区前积结构进一步萎缩,表明陵水组沉积环境更为稳定(图11a)。陵三段沉积时期海平面快速上升,凹陷断裂活跃,盆地加速沉降。松南低凸起隆升造成前期沉积的崖城组暴露剥蚀,区内构造格局发生变化。扇三角洲主要发育在松南低凸起上,数量多且规模小。北凸起扇体维持相对稳定,东凸起构造抬升造成短时间内物源供给丰富,发育大量扇三角洲。区内北礁凹陷扇三角洲数量和规模减小(研究区外北礁凹陷仍发育扇体,但未推进至区内)。近岸水下扇相比崖一段展布范围显著缩小但厚度增大,与海平面快速上升、盆地欠饱和有关,至陵二段时期消失(图11b)。低凸起构造抬升导致局部地区水位相对下降而暴露,沉积物堆积形成冲积扇。陵三段沉积时期水体较深,凹陷断裂带及宝岛凹陷发育浅水陆棚相,深水陆棚相展布面积相比崖一段更大。

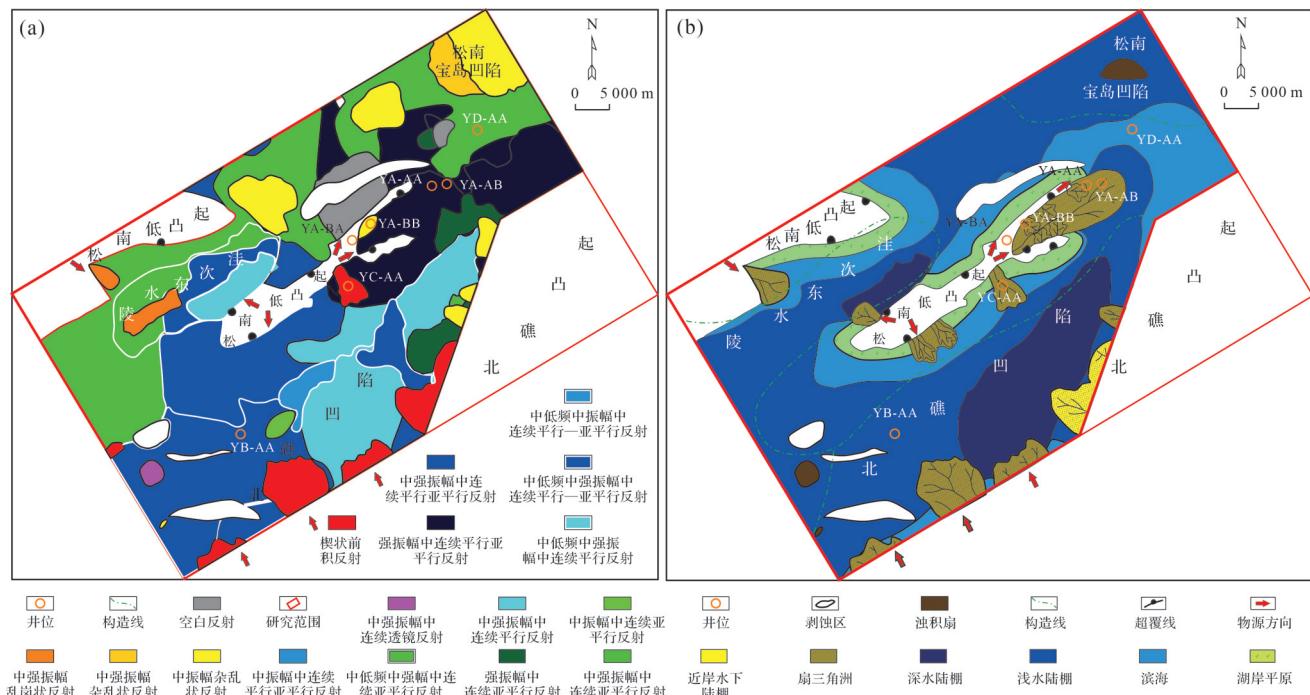


图 10 琼东南盆地松南低凸起 YA 区渐新统崖一段地震相与沉积相平面图

(a) 地震相平面图; (b) 沉积相平面图

Fig.10 Seismic and sedimentary facies in the First member of the Oligocene Yacheng Formation, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

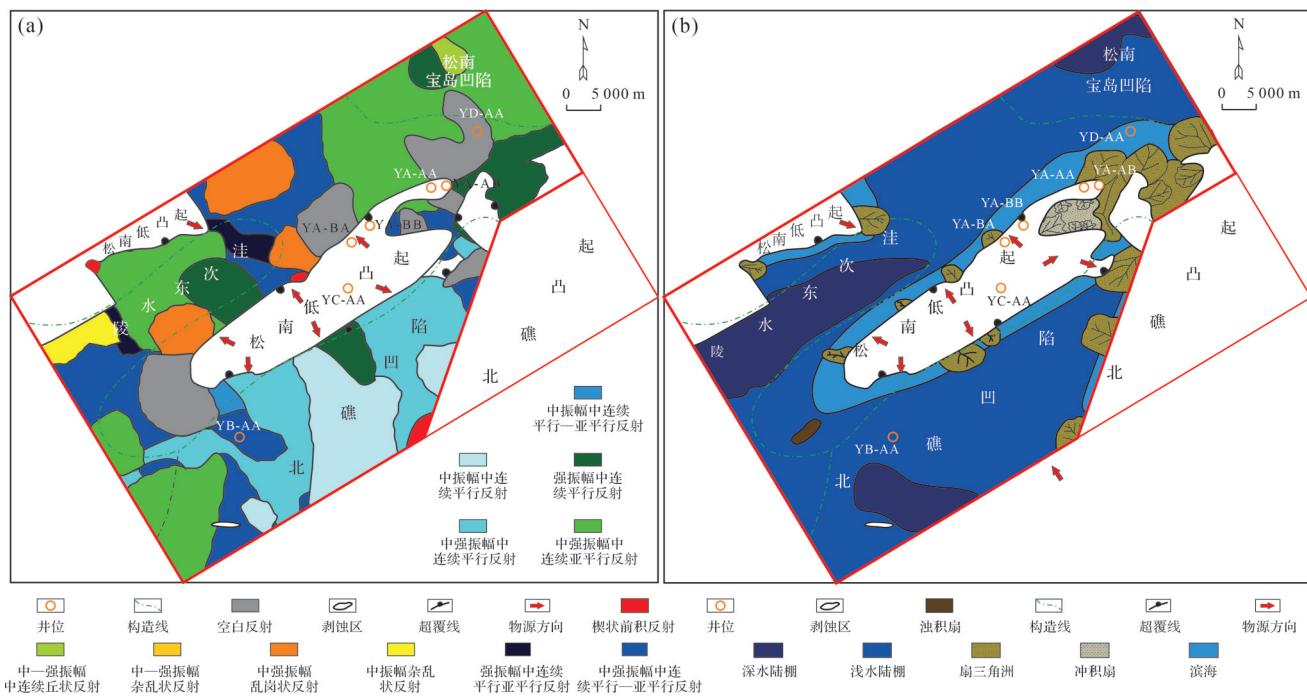


图 11 琼东南盆地松南低凸起 YA 区渐新统陵二段地震相与沉积相平面图

(a) 地震相平面图; (b) 沉积相平面图

Fig.11 Seismic and sedimentary facies in the Second member of the Oligocene Lingshui Formation, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

陵二段、陵一段沉积时期断裂活动减缓,盆地沉降速度降低,海平面下降,松南低凸起持续隆升。东部剥蚀区面积增大造成扇三角洲在东凸起周缘更为发育,北礁凹陷由于水体变浅,近岸水下扇演化为扇三角洲。陵二段陵水东次洼水体相比北礁凹陷深,浅水陆棚相展布面积更大(图11b)。陵一段扇三角洲规模相比陵二段有萎缩趋势,但陵水东次洼南部扇三角洲发育面积扩大,北凸起扇三角洲消亡,在其西部新发育少量扇三角洲。松南低凸起发育冲积扇相,北礁凹陷水体继续变浅,主要为浅水陆棚相,宝岛凹陷以及陵水东次洼相对水体加深,发育深水陆棚相。

4 沉积模式及演化

盆地在渐新世处于强烈断(裂)陷期。根据边界断裂活动强度及沉积特征,崖城组为快速断陷与快速补偿沉积。崖三段沉积时期松南低凸起南北两侧边界断层持续活动,形成低凸起及周缘凹凸相间的构造格局。该时期水体总体较浅,断层活动较强,北礁凹陷和松南低凸起为主要物源区且物源供给充足。凹陷缓坡带水体较浅,区域沉积颗粒较粗,发育

辫状河三角洲,地势较陡区域水体较深,发育扇三角洲。凹陷陡坡带相对近源,发育扇三角洲沉积。凹陷中心(沉降中心)以滨浅湖(海)沉积为主,在重力作用下垮塌形成冲积扇相。

崖二段沉积时期海平面持续上升,盆地沉积范围扩大,物源区持续供给充足的陆源碎屑物,与崖三段沉积体系相似,但北礁凹陷扇体数量及规模减小。崖一段沉积时期海平面快速上升,沉积水体加深,沉积范围持续扩大,沉积中心以半深湖沉积为主,凹陷开始发育浅水陆棚相,断裂处扇体规模开始减小。断裂陡坡带近海陡崖风化产物受重力作用快速崩塌,入水沉积形成近岸水下扇。崖城组晚期盆地短暂抬升造成海平面下降,水体变浅导致高处暴露剥蚀,形成T70不整合界面,盆地构造格局调整(图12)。

陵水组仍为强烈断陷期沉积。陵三段沉积时期断裂活动频繁,沉积水体较深,之后逐渐趋于稳定,沉积中心发育浅水陆棚相。由于快速断陷,松南低凸起发生区域性构造隆升,低凸起东部由凹陷转凸起,成为新物源区,在其周缘开始发育扇三角洲和冲积扇沉积。盆地中心水体快速加深,可容纳空间快速增大,形成浅水—深水陆棚低能沉积环境。虽然北礁凸起物源供给充足,但盆地沉降速度仍大于沉

积速度,盆地处于欠饱和状态,砂砾岩等粗粒陆源碎屑物只能快速堆积在近岸处形成近岸水下扇沉积,而泥岩和粉砂岩等细粒陆源碎屑物可通过长距离搬运大量沉积在凹陷中心,形成浅水陆棚和深水陆棚细粒沉积。该时期沉积模式为断裂处发育粗粒厚沉积,凹陷中央处发育细粒薄层楔形沉积(图13)。

陵二段沉积时期断层活动仍然强烈,北礁凹陷中心沉积水体进一步加深,以页岩沉积为主。松南低凸起东部扇三角洲和冲积扇沉积继续发育。陵一段沉积时期断裂活动较为稳定,北礁凹陷中心沉积水体仍然较深,以浅海沉积环境为主。这一时期盆地整体抬升,陵水组局部遭受剥蚀或缺失,形成T60不整合界面(图13)。

总体来看,崖城组主要发育扇三角洲相、辫状河三角洲相、近岸水下扇相、冲积扇相、滨海湖(海)相

及湖岸平原相,陵水组主要发育浅水陆棚相、深水陆棚相、滨海相、扇三角洲相和冲积扇相。断陷盆地沉积相类型及分布受到构造运动影响,不同断陷期沉积相类型和展布范围不同,盆地沉积充填样式与沉积演化特点体现了一段时期内盆地沉积模式。

5 结论

(1) 岩性特征及生物化石资料表明,松南低凸起YA区渐新统自下而上呈现逐渐远离物源区、沉积水体加深之规律。早渐新世末期(崖一段)出现的有孔虫化石是海侵的重要标志。

(2) 松南低凸起YA区渐新统属强烈断陷期沉积。沉积相类型及展布受到构造运动显著影响,不同断陷时期沉积相类型和展布范围不同,盆地充填样式与沉积演化特点体现了不同时期内盆地沉积模式。

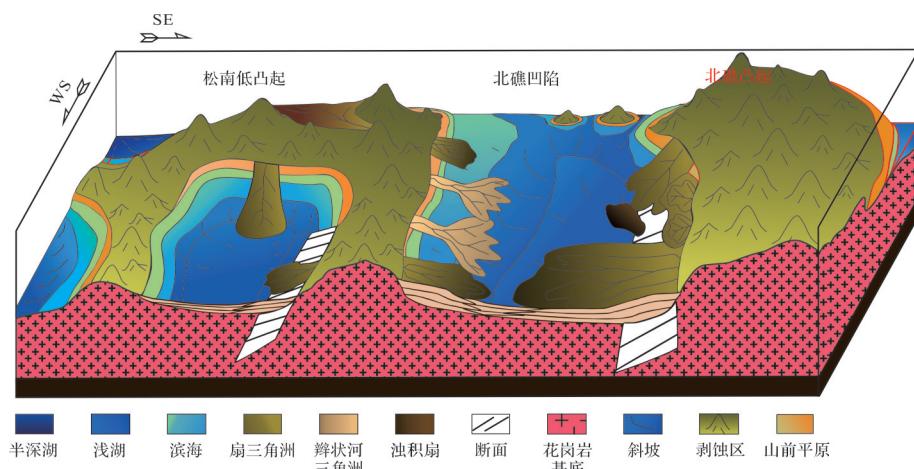


图12 琼东南盆地松南低凸起YA区渐新统崖城组沉积模式

Fig.12 Sedimentary model of the Oligocene Yacheng Formation, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

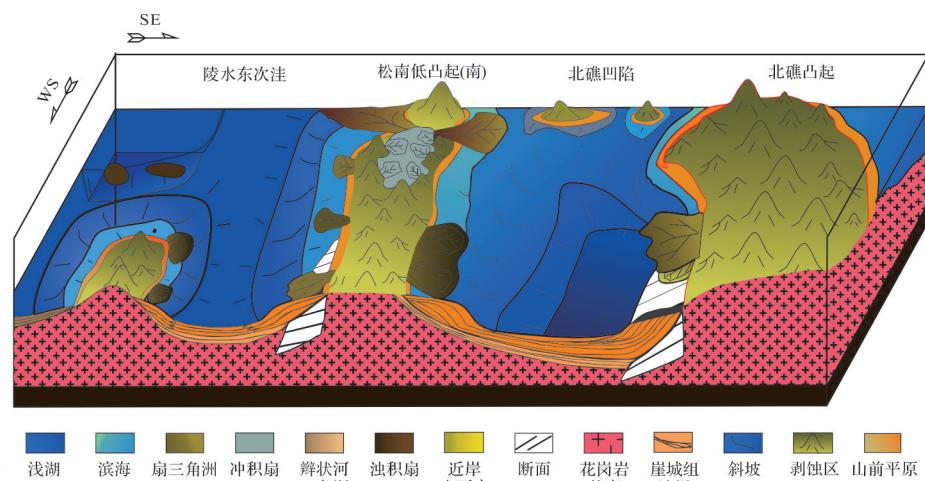


图13 琼东南盆地松南低凸起YA区渐新统陵水组沉积模式

Fig.13 Sedimentary model of the Oligocene Linshui Formation, YA area, Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin

(3) 松南低凸起YA区崖城组沉积具有快速裂陷与快速补偿之特征,因此可形成多套碎屑岩优质储集体。

(4) 松南低凸起YA区渐新统沉积演化过程指示琼东南盆地在渐新世处于强烈伸展环境,构造运动及全球海平面变化控制了区域海平面升降。

致谢 感谢项目组全体人员辛勤付出,使得本文得以顺利完成!感谢三位评审专家及编辑部老师的宝贵意见,使得本文得以更好地呈现!

参考文献(References)

- [1] 修淳,翟世奎,霍素霞,等. 琼东南盆地陵南低凸起崖城组沉积物源的地球化学与碎屑锆石U-Pb年龄记录[J]. 矿物岩石地球化学通报,2018,37(6):1102-1113. [Xiu Chun, Zhai Shikui, Huo Suxia, et al. Provenance of sediments of the Yacheng Formation in the Lingnan low uplift, Qiongdongnan Basin: Evidences from U-Pb dating of detrital zircons and geochemistry of the sediments [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(6): 1102-1113.]
- [2] 陈欢庆,朱筱敏,张功成,等. 井震结合深水区物源分析:以琼东南盆地深水区古近系陵水组为例[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(4):552-558. [Chen Huanqing, Zhu Xiaomin, Zhang Gongcheng, et al. Material source analysis in deep water area based on well-to-seismic integrated studies, a case study on Lingshui Formation of Paleogene in deep water area in southeast Hainan Basin of South China Sea[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(4): 552-558.]
- [3] 邵磊,李昂,吴国瑄,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.]
- [4] 卢骏,刘震,张功成,等. 南海北部小型海陆过渡相断陷地震相分析及沉积充填演化史研究:以琼东南盆地崖南凹陷崖城组为例[J]. 海洋地质前沿,2011,27(7):13-22. [Lu Jun, Liu Zhen, Zhang Gongcheng, et al. Seismic facies analysis and filling history reconstruction of small faulted depressions in northern South China Sea: A historical case on Yacheng Formation in Yanan Depression of the Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(7): 13-22.]
- [5] 吴玉坤,胡明毅,刘志峰,等. 琼东南盆地崖北凹陷崖城组沉积相及煤系烃源岩分布[J]. 天然气地球科学,2013,24(3):582-590. [Wu Yukun, Hu Mingyi, Liu Zhifeng, et al. The sedimentary facies and coal measures source rock distribution of Yacheng Formation in Yabei Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 582-590.]
- [6] 李祥,张春生,李鹏,等. 琼东南盆地陵水组层序地层与沉积相分析[J]. 中国地质,2014,41(1):173-186. [Li Xiang, Zhang Chunsheng, Li Peng, et al. The sequence stratigraphy and sedimentary facies analysis of Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 173-186.]
- [7] 孙瑞,韩银学,曾清波,等. 琼东南盆地深水区东段崖城组沉积特征及对海相烃源岩的控制[J]. 石油学报,2019,40(增刊2):57-66. [Sun Rui, Han Yinxue, Zeng Qingbo, et al. Sedimentary characteristics of Yacheng Formation in the eastern deepwater area in Qiongdongnan Basin and their control on marine source rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(Suppl. 2): 57-66.]
- [8] 李莹,张功成,吕大炜,等. 琼东南盆地崖城组沉积特征及成煤环境[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(1):1-5. [Li Ying, Zhang Gongcheng, Lu Dawei, et al. Depositional characteristics and coal forming environment of Yacheng Formation, Qiongdongnan Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1): 1-5.]
- [9] 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 Zeng-xue, He Yuping, Liu Haiyan, et al. Sedimentology characteristics and coal-forming models in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 542-547.]
- [10] 张义娜,张功成,何玉平,等. 琼东南盆地北礁凹陷崖城组沉积与烃源岩发育特征[J]. 天然气地球科学,2013,24(4):725-732. [Zhang Yina, Zhang Gongcheng, He Yuping, et al. Sedimentation and source rock characteristics of Yacheng Formation in Beijiao Sag of Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 725-732.]
- [11] 张亚雄,朱筱敏,张功成,等. 中国南海琼东南盆地渐新统陵水组沉积特征[J]. 天然气地球科学,2013,24(5):956-964. [Zhang Yaxiong, Zhu Xiaomin, Zhang Gongcheng, et al. Sedimentary characteristics of Oligocene Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 956-964.]
- [12] 刘仕友,陈泓燕,李德勇,等. 琼东南盆地陵水凹陷渐新统陵水组沉积特征及烃源岩发育模式[J]. 海相油气地质,2019,24(1):63-70. [Liu Shiyou, Chen Hongyan, Li Deyong, et al. Sedimentary characteristics and source rock development model of the Oligocene Lingshui Formation in Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(1): 63-70.]
- [13] 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.]
- [14] 蔡国富,邵磊,乔培军,等. 琼东南盆地古近纪海侵及沉积环境演化[J]. 石油学报,2013,34(增刊2):91-101. [Cai Guofu, Shao Lei, Qiao Peijun, et al. Marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(Suppl. 2): 91-101.]
- [15] 周杰,杨希冰,杨金海,等. 琼东南盆地松南低凸起古近系构

- 造—沉积演化特征与天然气成藏[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2704-2716. [Zhou Jie, Yang Xibing, Yang Jinhai, et al. Structure-sedimentary evolution and gas accumulation of Paleogene in Songnan low uplift of the Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2704-2716.]
- [16] 何仕斌, 张功成, 米立军, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水区储层类型及沉积演化[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 51-56. [He Shibin, Zhang Gongcheng, Mi Lijun, et al. Reservoir type and sedimentary evolution in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 51-56.]
- [17] 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 Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 632-641.]
- [18] 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 characteristics of Oligocene Yacheng Formation in Changchang Depression of Qiongdongnan Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(5): 7-14.]
- [19] 甘军, 张迎朝, 梁刚, 等. 琼东南盆地深水区烃源岩沉积模式及差异热演化[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2627-2635. [Gan Jun, Zhang Yingzhao, Liang Gang, et al. Deposition pattern and differential thermal evolution of source rocks, deep water area of Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2627-2635.]
- [20] 吴飘, 侯读杰, 甘军, 等. 琼东南盆地深水东区渐新统烃源岩发育模式[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 633-647. [Wu Piao, Hou Dujie, Gan Jun, et al. Developmental model of Oligocene source rock in the eastern deep-water area of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 633-647.]
- [21] 屈童, 高岗, 徐新德, 等. 三角洲—浅海沉积体系陆源有机质沉积模拟实验研究:以琼东南盆地崖南凹陷崖城组为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(2): 584-600. [Qu Tong, Gao Gang, Xu Xinde, et al. Sedimentary simulation experiment study on the distribution of terrestrial organic matter in the delta-shallow sea sedimentary system: A case study of the Yacheng Formation in the Yanan Sag, Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(2): 584-600.]
- [22] 解习农, 李思田, 葛立刚, 等. 琼东南盆地崖南凹陷海湾扇三角洲体系沉积构成及演化模式[J]. 沉积学报, 1996, 14(3): 64-71. [Xie Xinong, Li Sitian, Ge Ligang, et al. Internal architectures and evolving model of bay fan delta system in Yanan Sag of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(3): 64-71.]
- [23] 李增学, 宋广增, 王东东, 等. 琼东南盆地渐新统煤系(扇)辫状河三角洲特征[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3471-3484. [Li Zengxue, Song Guangzeng, Wang Dongdong, et al. Characteristics of (fan) braided river delta in Oligocene coal measures of Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3471-3484.]
- [24] 李增学, 周静, 吕大炜, 等. 琼东南盆地崖城组煤系空间展布特征[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(2): 1-8. [Li Zengxue, Zhou Jing, Lü Dawei, et al. Coal-bearing distribution characteristics of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 32(2): 1-8.]
- [25] 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.]
- [26] 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 rifting and integrated response process of tectonic, sequence stratigraphy and sedimentary filling in Paleogene of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(4): 970-983.]

The Oligocene Sedimentary System in the YA Area of the Songnan Uplift, Qiongdongnan Basin

GUO YuanCao^{1,2}, GUO JianHua^{2,3}, YU Ye², CHEN Guang³, LI ZhiYu³, LIU ChenSheng³, WU ShiQing³

1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

2. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410012, China

Abstract: [Objective] Systematic study of sedimentary systems and models is the foundation for clarifying the development mechanism of high-quality reservoirs in clastic rocks. [Methods] A systematic study was conducted using drill cores, thin section and paleontological fossil identification, grain size analysis, well-logging and seismic interpretation of the sedimentary system and evolution of the Oligocene in the study area to restore the sedimentary environment of the Paleogene. [Results] The lithology of the lower part of the Oligocene (Yacheng Formation) is mainly composed of medium coarse sandstone and conglomerate sandstone. The sandstone is poorly sorted, with mineral composition gradually stabilizing and maturity gradually increasing upwards from bottom to top. The cumulative curve of particle size probability shows suspended and jumping characteristics, with extremely low fossil abundance. The sedimentary facies types are mainly fan delta, shore shallow lake and lakeshore plain. The lithology of the upper part of the Oligocene (Lingshui Formation) is mainly composed of fine sandstone and mudstone, with a significant increase in fossil abundance. The sedimentary facies are mainly coastal shallow marine, shallow-water continental shelves and deep-water continental shelves. The study area underwent a transition from marine terrestrial transitional sedimentation to shallow marine sedimentation during the Oligocene. During the depositional period of the Yacheng Formation, the basin was experiencing strong faulting and rapid compensation. The main features of the seismic phases are accumulative and chaotic reflection structures. Fault activity in the area led to the formation of a structural pattern with alternating concave and convex features, resulting in shallow water bodies. Shallow lake facies were developed at the center of the depression and fan delta facies are developed on steep slopes and deeper water bodies. Braided river delta facies are present on gentle slopes and shallower water bodies. During the sedimentation period of the Lingshui Formation, the basin was undergoing rapid faulting and under-compensation. The seismic phase is mainly characterized by parallel sub-parallel reflection structures. Fracture activity caused the deepening of sedimentary water bodies. The overall development resulted in both shallow- and deep-water shelf facies in the center of the depression, with sporadic fan delta facies around the periphery. [Conclusions] The Oligocene in the YA area is a strongly faulted sedimentary system in which the sedimentary facies types and distribution were significantly influenced by tectonic movement. The filling style and sedimentary evolution of the basin reflect its sedimentary pattern during that period of time.

Key words: Qiongdongnan Basin; Songnan low uplift; Oligocene; sedimentary system; sedimentary pattern