

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.104>



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

周杰, 杨希冰, 杨金海, 甘军, 吴昊, 何小胡, 胡斌

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要:为了明确松南低凸起区构造沉积演化特征及对天然气成藏的意义.基于区域长剖面精细解释,利用最新的钻井、测井、地震资料,分析了松南低凸起及围区古近系构造格局、斜坡类型及演化特征、沉积特征及与天然气成藏的关系.结果表明,松南低凸起主要受北部2号、12号断裂,南部11号、10号断裂活动控制,古近纪经历了:(1)差异翘倾抬升,西高东低;(2)加速翘倾抬升,向东抬升"这2个阶段,并以发育旋转掀斜斜坡为主.古地貌具有"隆凹相间"与"西高东低"的特征.断裂活动及翘倾抬升作用控制了物源区的分布、缓坡沉积格局及输砂通道,在东突起上发育了缓坡带扇三角洲沉积.大面积分布的扇三角洲发育了优质的储集体,构造活动形成了多种类型的圈闭,天然气生、运、聚时空匹配良好,松南低凸起古近系有望成为琼东南盆地下一个千亿方级的天然气聚集区.

关键词:琼东南盆地;松南低凸起;构造演化;沉积演化;天然气.

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2019)08-2704-13

收稿日期: 2019-01-21

Structure-Sedimentary Evolution and Gas Accumulation of Paleogene in Songnan Low Uplift of the Qiongdongnan Basin

Zhou Jie, Yang Xibing, Yang Jinhai, Gan Jun, Wu Hao, He Xiaohu, Hu Bin

Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: Based on the detailed interpretation of regional long section and the latest drilling, logging and seismic data, the Paleogene structural pattern, slope type and its evolution characteristics, sedimentary characteristics and their relationship with gas accumulation in Songnan low uplift (SLU) and surrounding areas are analyzed. The purpose is to clarify the tectonic and sedimentary evolution characteristics of the SLU and its influence on gas accumulation. The results show that the SLU is mainly controlled by the No. 2 & No. 12 faults in the north and No. 11 & No. 10 faults in the south. The SLU experienced two stages, namely, the differential up-dip uplift characterized by the "high in the west and low in the east" and the accelerated eastward up-dip uplift. And it was dominated by the development of rotational lift ramp in the Paleogene. The paleogeomorphology has the characteristics of "alternation of uplift and depression" and "high in the west and low in the east" in study area. The faults activity and uplift of upwarping controlled the distribution of material source area, sedimentary pattern of gentle slope and sand transport channel, so fans delta deposit developed in the gentle slope zone on the western bulge. The wide distribution of fan deltas formed high quality reservoir, and the tectonic activity formed many types of traps. The gas generation, transportation and accumulation are well matched in space and time in the SLU Therefore, the Paleogene of SLU is expected to be the next gas accumulation area of about 100 billion cubic meters in the Qiongnan Basin.

Key words: Qiongdongnan Basin; Songnan low uplift; structure evolution; sedimentary evolution; gas.

基金项目:国家科技重大专项:琼东南盆地深水区大中型气田形成条件及勘探关键技术(No. 2016ZX05026-002).

作者简介:周杰(1988—),男,工程师,主要从事南海西部油气勘探研究工作,E-mail:zhouji14@cnooc.com.cn

引用格式:周杰,杨希冰,杨金海,等,2019.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.地球科学,44(8):2704-2716.

0 引言

紧邻生烃凹陷的凸(隆)起及其斜坡区,具有烃源灶,近物源的特征,油气运聚条件有利,为油气聚集的重要构造带,大中型油气田的形成很多与凸(隆)起以及其斜坡带有关(Carmalt and John, 1986; 黄籍中, 2009; 魏国齐等, 2015; 杨跃明等, 2016; 王振升等, 2017; Ge et al., 2018; Zhang et al., 2018)。凸(隆)起及其斜坡区可以发育基岩潜山储层、碎屑岩三角洲砂岩、生物礁等多种类型储集体,能够形成构造、地层、岩性等多种类型油气藏(孙龙德等, 2007; 李顺利等, 2017; 唐历山等, 2017; 蔡华等, 2019)。勘探实践表明,不同类型油气藏的形成与凸(隆)起及其斜坡区的形成演化机制有关,而构造(断裂)的时空演化是制约凸(隆)起及斜坡形成的关键因素。肖敦清等(2013)认为伸展盆地中凸(隆)起及其斜坡区的形成与基底差异沉降和深大断裂活动有关。王振升等(2017)认为断层活动引起的斜坡旋转掀斜作用利于缓坡带三角洲砂体发育及多种类型圈闭的形成。近年来琼东南盆地深水勘探取得重大突破,所发现气田绝大部分位于深水区西部的乐东—陵水凹陷新近系中央峡谷领域(谢玉洪, 2014; 杨金海等, 2014; 王振峰等, 2016; 李绪深等, 2017)。作为新区的深水区东部构造—沉积演化复杂,构造(断裂)活动控制着天然气的成藏。但是总体钻井少,勘探程度偏低。2018年Y-1井在深水区东部的松南低凸起钻遇古近系三角洲及基岩潜山储层,并获得优质天然气藏发现,取得了新的研究进展,展现了松南低凸起古近系良好的勘探前景。

目前对于松南低凸起古近系的研究主要集中在预测输导体系及成藏组合(郭明刚等, 2017)。而对松南低凸起及其斜坡区形成机制,构造控沉积规律,目前少有论述,制约了持续勘探,成为亟需攻关的关键问题。随着中央峡谷领域勘探潜力变小,琼东南盆地深水区急需寻找天然气储量接替区,早日破解上述难题就显得非常必要。本文从新的钻井及地球物理资料入手,通过对研究区主干断裂结构、变形特征分析,明确其对斜坡及凸起的控制作用,指明松南低凸起构造发育特征,研究构造控制下的沉积及成藏规律,为松南低凸起天然气持续勘探提供地质理论支撑。

1 区域地质背景

琼东南盆地是新生代以来南海北部准被动大陆边缘伸展构造背景上发育的大型拉张型沉积盆地(朱伟林等, 2008; Zhou et al., 2008; 何家雄等, 2010),具有“多拗多隆”的构造格局。其深水区(水深>300 m),自西向东主要由乐东凹陷、陵水凹陷、陵南低凸起、北礁凹陷、松南低凸起、松南—宝岛凹陷、长昌凹陷组成。松南低凸起位于琼东南盆地中部,整体处于深水区(水深约400~1 200 m),其东、南、西、北面分别被长昌凹陷,北礁凹陷,陵水凹陷和松南—宝岛凹陷包围,呈典型的“凹间凸”构造格局。该低凸起被次一级断层切割,可划分为北突起、西突起和东突起(图1)。新生代以来琼东南盆地主要经历了断陷期(T100-T80)、拗断期(T80-T60)、断拗期(T60-T50)、拗陷期(T50-现今)4幕构造演化阶段(张迎朝等, 2017)。古近纪,琼东南盆地以“断控—伸展”作用为主,受西太平洋板块沿NNW方向向欧亚板块俯冲,南海扩张、西北次海盆形成等周缘构造事件的影响,发育以NE及E-W向为主的伸展断裂系统(Taylor and Hayes, 1983; Xie et al., 2006; Zhao et al., 2013; 能源等, 2013; Lei et al., 2016; 张远泽等, 2019)。松南低凸起主要经历了三大构造运动(古新世—始新世神狐运动,渐新世珠琼运动,渐新世末期—中新世南海运动)(吕宝凤等, 2012; 赵卫, 2013; Sun et al., 2015),多期活动的深大断裂对松南低凸起的形成及演化产生重要影响,控制了多种类型储集体及圈闭的发育。松南低凸起在始新世为古低凸起,缺失始新统地层,受后期构造控制,局部在古近纪沉积了崖城组和陵水组地层。中新世开始,构造活动减弱,整体沉降,自下而上沉积了中新统(三亚组、梅山组、黄流组)、上新统莺歌海组和更新统乐东组(图2)。从成藏角度看,松南低凸起被“多凹环抱”,发育古潜山、三角洲等多种类型储集体,具有形成大中型油气田的地质条件。

2 古近系构造及演化特征

2.1 古近系深大断裂性质及分布特征

断裂活动是盆地形成和演化的控制因素之一,研究区及周缘的主干断裂活动对松南低凸起的结构发育及演化有重要的控制作用(谢文彦等, 2007)。最新的区域解释成果显示(图1、图3),琼东南盆地基底断裂整体呈NE-SW向展布。控制松南—宝岛

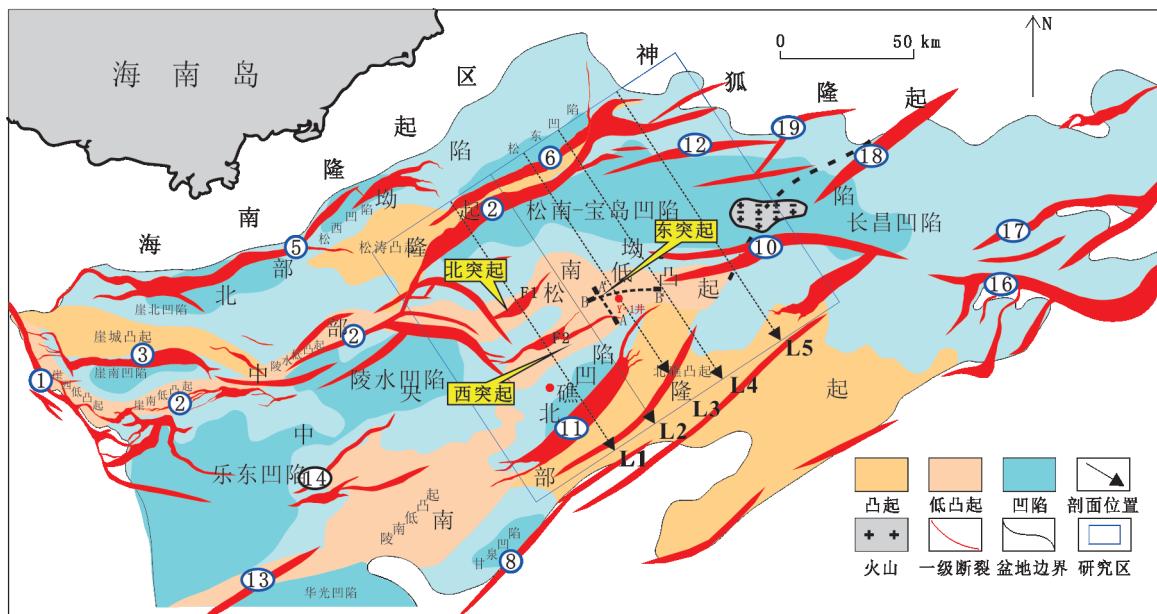
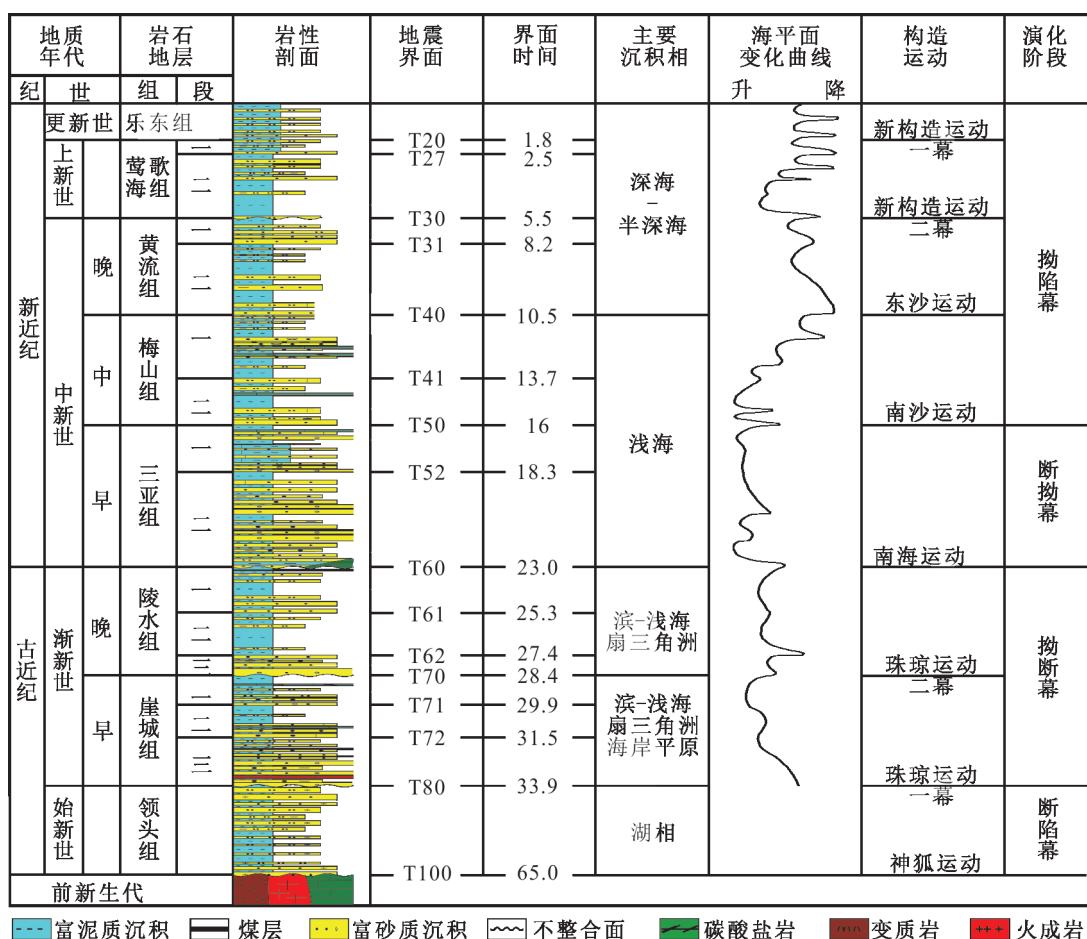


图 1 琼东南盆地构造纲要

Fig.1 Tectonic framework of the Qiongdong Basin showing the study area, seismic dataset, faults



凹陷—松南低凸起—北礁凹陷形成的深大断裂主要为:北部的2号、12号断裂,南部的11号、10号断裂。松南低凸起东突起(11号断裂和10号断裂之间)主干断裂并不发育。

2号断裂是在琼东南盆地形成和演化过程中形成的大规模基底断裂带(于俊峰等,2008;谢玉洪等,2015),平面上呈NE向展布,是北部隆起区与中央坳陷区的分界线,剖面上古近系表现为上陡下缓的铲式断层特征,倾向SE,为控制盆地整体形态特征的“控盆断层”。11号断裂为琼东南盆地南部的重要断层,平面上呈NE走向,东西延伸约97 km,向东延伸至松南低凸起上。剖面上表现为典型的上陡下缓的铲式正断层,倾向NW方向,亦为北礁凹陷“控凹断裂”。2号断裂和11号断裂之间还存在两条规模较小的基底断裂F1、F2,走向NE,倾向NW,与11号断裂走向及倾向一致。12号断裂为宝岛凹陷北部边界断裂,平面上近E-W走向,延伸约70 km,剖面上表现为板式正断层特征,倾向S。10号断裂为宝岛凹陷南部边界断裂,平面上近E-W展布,延伸长度约100 km,剖面上表现为板式正断层特征,倾向N。

2.2 松南低凸起及周缘构造格局

2.2.1 隆凹相间半地堑构造格局 研究区经历多期构造运动后,断裂及其分割的断块体现了盆地的构造格局。一组自西向东的区域大剖面显示,受控于不同断裂,松南—宝岛凹陷—松南低凸起及周缘表现出不同的构造格局(图3)。

图3剖面L1~L4显示研究区西部古近系北部2号和南部11号断裂都表现出上陡下缓的铲式断层特征,受其活动控制形成了两组倾向相反的断裂;一组断裂受2号断裂活动控制与2号断裂倾向一致,倾向SE;另一组断裂受11号断裂活动控制与11号断裂倾向一致,倾向NW。其中L1~L3剖面显示松南低凸起西部古近系主要发育一组与11号断裂旋转方向一致的断裂(F1、F2),显示出主要受控于11号断裂的构造特征。两组断裂的共同控制形成了近对称分布隆凹相间的半地堑构造格局。受断裂空间分布及发育规模的影响,自西向东2号断裂对松南低凸起的影响逐渐增强,11号断裂影响逐渐减弱,11号断裂消失以后,松南低凸起东部主要受2号断裂活动控制,发育一组与2号断裂倾向一致的断裂,形成了半地堑结构。L3剖面显示处于过渡带的松南低凸起东段(东突起)古近系,受2号和11号断裂相向旋转翘倾控制,区域形成了两组倾向相反的

断裂,发育了地垒—地堑与背斜构造。

2.2.2 隆凹隆地堑构造格局 L5剖面显示在宝岛凹陷东部12号、10号板式断裂开始发育,古近系断裂上盘旋转翘倾作用停止,相对于主、次凹持续沉降活动,凹陷周缘凸(隆)缓慢抬升,形成地堑结构,靠近松南低凸起东缘的宝岛凹陷斜坡区发育了顺向断阶带。

综上所述,古近系松南低凸起及其周缘发育了两类斜坡(图4),以发育铲式断裂控旋转掀斜斜坡为主,主要分布于松南低凸西部以及北礁凹陷缓坡带。位于松南低凸东倾末端的宝岛凹陷南部发育受板式断裂控制的阶状断裂斜坡—宝南断阶带。关于宝南断阶带的构造沉积演化特征,已有专门论述(周杰等,2017,2018),本文不做重点论述。

2.3 松南低凸起构造演化特征

基于研究区内15口钻井、2 000 km二维地震和10 000 km²三维地震等资料,编制了研究区始新统一崖城组、陵水组地层厚度图,利用沉积地层厚度响应来反映古凸(隆)起形态,并通过分析断层活动速率对2号及11号断裂的活动性进行了研究。通过地层厚度与断裂活动速率叠合对比分析,以此来揭示松南低凸起古近系构造演化与2号和11号断裂活动特征之间的具体响应关系。

研究表明(图5),始新统一崖城组沉积期11号断裂活动强度大于2号断裂,最大活动速率几乎是2号断裂两倍,11号断裂活动导致上盘强烈的翘倾抬升,形成了F1、F2两条断裂,以及松南低凸起的北突起和西突起。空间上11号断裂活动性具有西强东弱的特点,北礁凹陷沉积中心位于西部,导致西部上盘翘倾抬升更剧烈,所对应的松南低凸起具有西高东低,整体向东倾没的特点。空间上2号断裂显示出明显的分段性,崖城组沉积期以6号测点为界可划分为松南段和宝岛段,松南段最大活动速率为265 m/Ma,宝岛段最大活动率为270 m/Ma,松南—宝岛凹陷厚度图上出现了东、西两个沉积中心,中段活动率最低,因此断裂活动对松南低凸起东部影响不大,没有大规模抬升。陵水组沉积期2号断裂中段活动强度显著增强,达到550 m/Ma,形成了位于松南—宝岛凹陷中部的沉积中心,沉积厚度超过5 000 m,位于2号断裂上盘的松南低凸起东段,再一次强烈的翘倾抬升,并伴随基底隆升,形成了突起的构造格局。陵水组沉积期11号断裂继承性活动,并且活动中心逐渐东移,对松南低凸起东部的影响

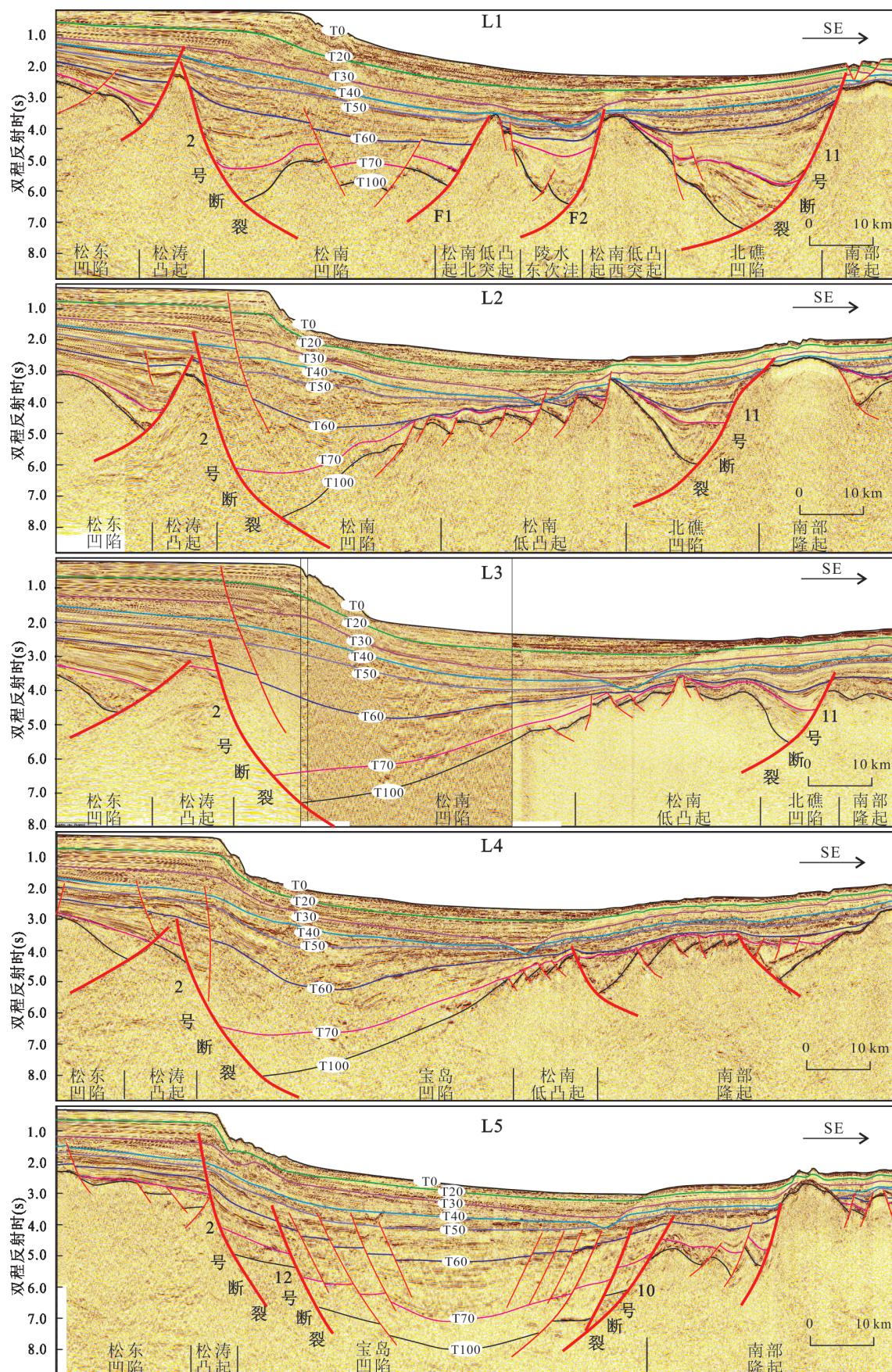


图3 研究区典型区域大剖面(剖面位置见图1)

Fig.3 Typical seismic profile of studying area

斜坡类型	斜坡剖面结构	斜坡立体模式	主要特点	典型实例地震剖面
旋转拗斜型斜坡			主干铲式断裂活动造成断层上盘翘升抬高，凹陷呈半地堑或箕状结构，发育控陡坡和缓坡带，遭受剥蚀，遭受剥蚀。	
阶状断裂型斜坡			一组产状大致相近的板式正断层，断层（凸）向凹陷中点的基底不均匀差异沉降控制，各自的上盘依次下降，剖面上呈阶梯状的断层组合。	

图4 研究区斜坡类型

Fig.4 Types of slopes in the study area

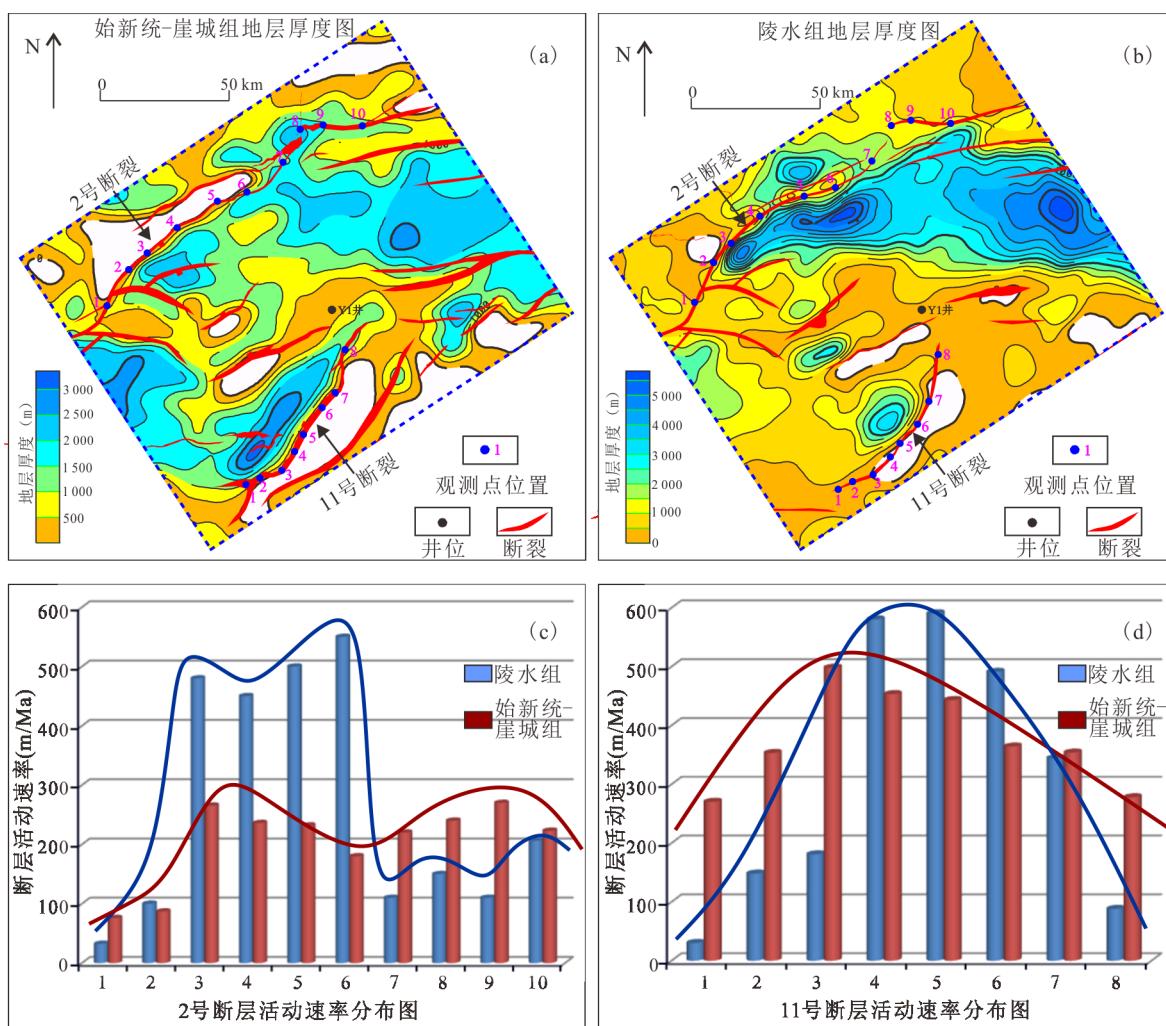


图5 始新统-陵水组沉积厚度图与2号11号断裂叠合图

Fig. 5 Overlapping map of thickness of Eocene-Lingshui formation, NO.2 and NO.11 faults activity rate

范围进一步增大,加速了东突起的抬升。

以上分析表明松南低凸起古近纪经历了复杂

的构造运动,主要经历了始新世—早渐新世旋转翘倾抬升及宽缓斜坡形成,晚渐新世加速翘倾斜抬升

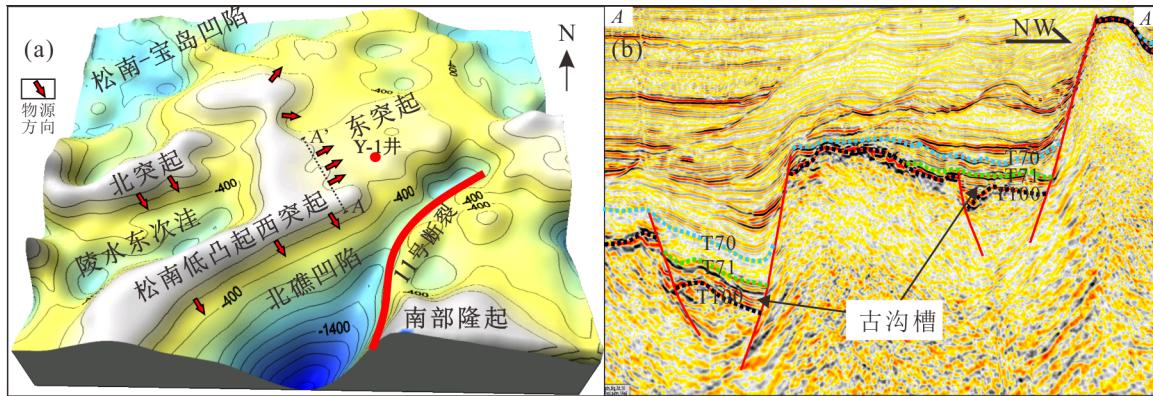


图 6 松南低凸起早渐新世晚期崖城组古地貌图与典型地震剖面

Fig.6 Paleogeomorphologic map and typical seismic profile of the Yacheng formation in the late Early Oligocene of Songnan low uplift

及基底隆升两个构造演化阶段：

(1) 始新世—早渐新世(差异翘倾抬升及宽缓斜坡, 西高东低). 2号断裂与11号断裂之间形成了近对称隆凹相间构造格局, 11号断裂剧烈活动导致松南低凸起西突起区强烈翘倾抬升, 形成隆起区. 该时期2号断裂影响较小, 且11号断裂在松南低凸起东部逐渐消亡, 松南低凸起东部主要表现为向NW方向倾斜的宽缓斜坡背景(图5a).

(2) 晚渐新世(加速翘倾抬升及基底隆升, 向东抬升). 2号断裂中段剧烈活动与11号断裂继承性活动, 2号断裂对松南低凸起东部的控制作用显著增强, 松南低凸起东部再一次差异翘倾抬升, 并伴随基底隆升, 后期基本定型, 形成东突起(图5b).

3 古近系沉积特征

受主干断裂控制及2期构造演化影响, 松南低凸起古近系总体具有西高东低, 陡缓分明的古地貌格局, 对沉积体系形成及展布具有明显的控制作用.

3.1 物源及缓坡沉积格局

古地貌恢复结果显示(图6a), 松南低凸起崖城组沉积期整体表现为NE-SW向古凸起, 展布方向与11号断裂走向一致, 具有南北向坡度陡, 长轴方向坡度较缓的特征, 东部表现为宽缓的斜坡背景. 11号断裂活动导致上盘翘倾抬升形成松南低凸起西突起及北突起剥蚀区, 成为松南低凸起上主要的物源区, 因此松南低凸起崖城组具多物源的特点. 前文所述受11号断裂持续活动影响, 断层上盘突起区(西突起)的强烈抬升剥蚀, 边抬边剥, 成为主物源区, 持续向东部及南部斜坡区供应物源, 形成了松南低凸起东部大型缓坡三角洲沉积格局. 同时受北

部2号断裂和南部11号断裂控制, 松南低凸起古近系断裂走向与主干断裂保持一致, 为NE-SW走向, 并切入西部的剥蚀区, 形成了多个小型地堑, 这种地堑受到暴露风化作用, 形成古沟槽, 成为碎屑物质的搬运通道(图6b). 陵水组沉积期受11号断裂持续活动影响, 松南低凸起西物源区(西突起)持续供源, 而随着松南低凸起东突起的相对抬升, 以及晚渐新世后期海平面的相对上升, 松南低凸起东部缓坡沉积格局逐渐消失, 可容纳空间减少, 物源供应逐渐减小.

3.2 沉积相及沉积演化模式

古近纪松南低凸起崖城组—陵水组沉积期为填平补齐时期, 主要发育近物源的扇三角洲—浅海陆棚沉积体系. 松南低凸起东突起Y-1井钻探表明崖城组以近源粗粒沉积为主, 岩性以灰色砂砾岩、细砾岩夹红褐色泥岩及杂色砾、泥岩为主, 并可见红色暴露标志, 岩性以正旋回为主, 主要为扇三角洲平原沉积, 发育分流河道及分流间湾沉积. 壁心及薄片鉴定表明, 分流河道岩性主要为砂砾岩, 砾石砾径2~28 mm, 杂色(以棕红为主, 次为深灰、浅灰色)砂砾岩, 成份以石英、长石为主, 次为花岗岩岩屑, 次圆一次棱, 见棱角状, 砂粒为粉—粗粒; 泥质胶结, 较致密—疏松(图7). 电性曲线表现为钟形及漏斗形. 成像测井揭示主要发育块状层理, 普遍含砾石, 分选中等—差, 发育冲刷面, 并可见多期砂体相互叠置的现象, 反映水动力较强. 地震剖面上可以见到崖城组—陵水组两期扇三角洲沉积, 陵水组扇三角洲规模有所减小, 地震反射特征表现为席状外形、平行—亚平行—前积内部结构、强—中振幅连续反射特征(图8). 平面上崖城组三角洲分布较广, Y-1井钻遇东突起上规模最大的三角洲, 该三

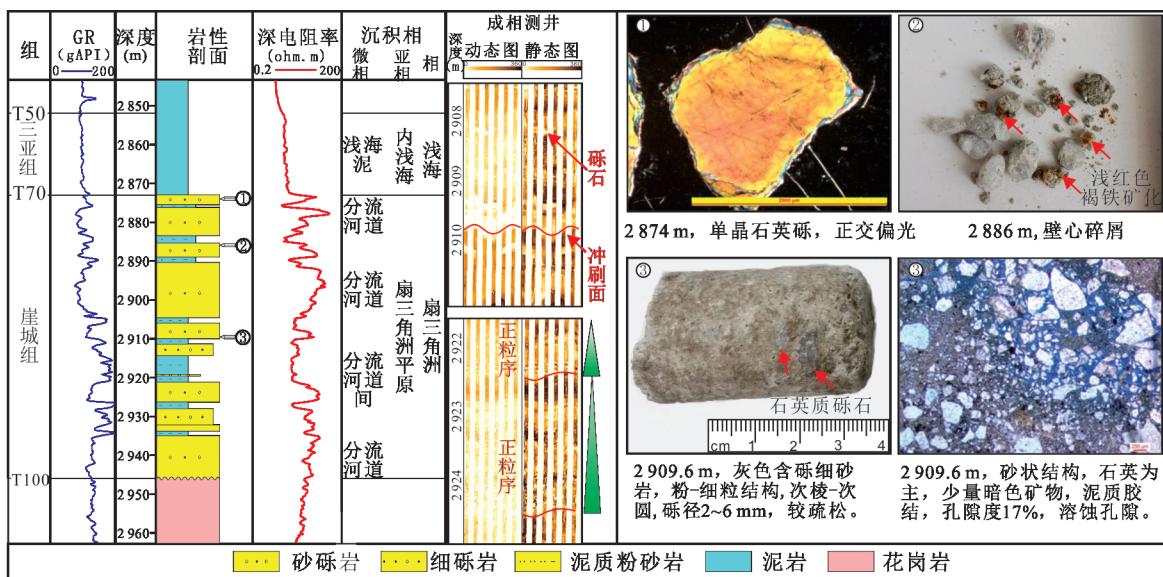


图7 Y-1井崖城组扇三角洲岩电特征

Fig.7 Fan delta rock and log characteristics of Yacheng formation, Y-1

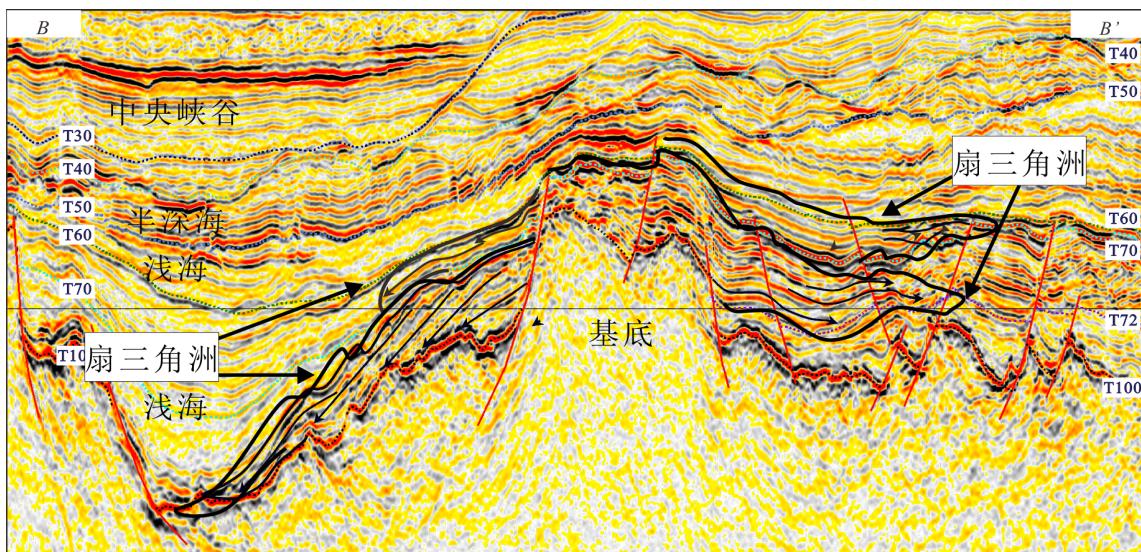


图8 过松南低凸起扇三角洲典型地震剖面(剖面位置见图1)

Fig.8 Typical seismic profile off an delta in the Songnan Low Uplift

角洲呈NE-SW向展布;陵水组沉积期受构造活动的影响,而Y-1井区局部再次抬升,形成小型地垒块,并未沉积陵水组地层,因此Y-1井并未钻遇陵水组扇三角洲沉积(图9)。

综上所述,崖城组沉积期2号断裂与11号断裂活动引起的上盘相向差异翘倾抬升最终控制了松南低凸起西突起持续供源以及东部崖城组扇三角洲的形成。受断裂活动控制,松南低凸起局部发育垒块及背斜构造,碎屑物质沿着断裂古沟槽搬运,低洼地方填平补齐之后,原先相对高的垒块上开始沉积了扇

三角洲,陵水组沉积期进一步的差异翘倾抬升,形成了现今看到凸起格局。研究区内形成了断层差异旋转翘倾缓坡带控三角洲沉积模式(图10)。

4 天然气成藏条件

4.1 紧邻凹陷的斜坡和凸起被多凹环抱,油气来源充足,源储匹配良好

始新世—渐新世,在琼东南盆地深水区的陵水、松南—宝岛、长昌、北礁凹陷普遍发育有始新统

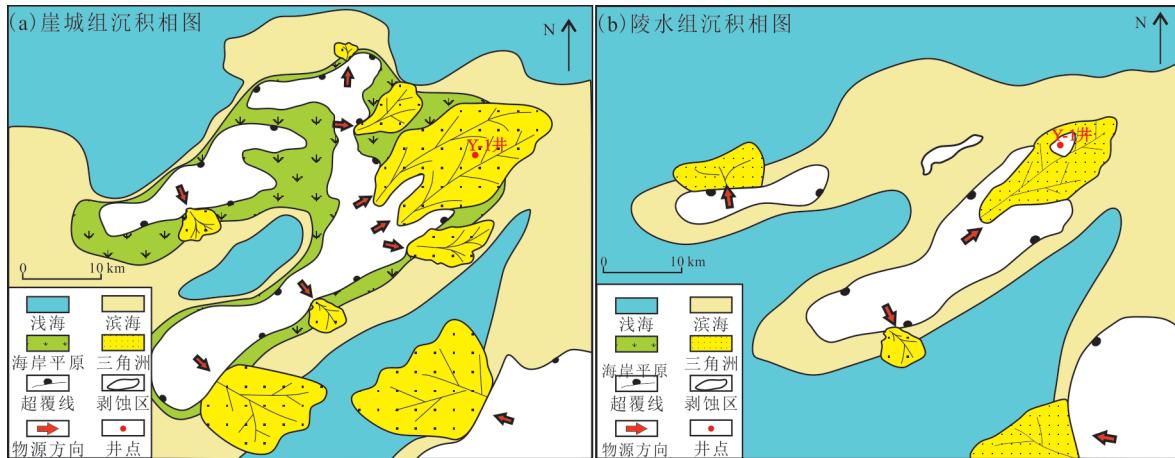


图9 松南低凸起崖城组-陵水组沉积相

Fig.9 Sedimentary facies map of Yacheng formation and Lingshui formation of the Songnan low uplift

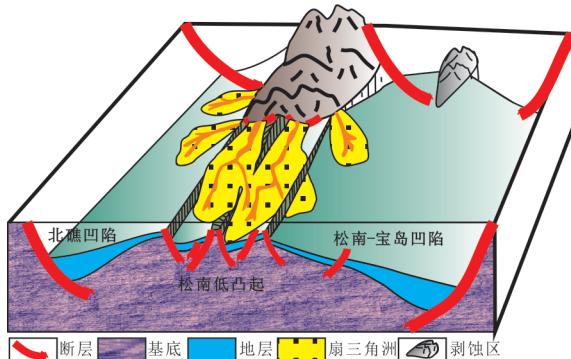


图10 断层差异旋转翘倾缓坡带控三角洲沉积模式

Fig.10 Deltaic sedimentation model controlled by fault differential rotation tilting gentle slope zone

湖相、渐新统崖城组含煤烃源岩(黄保家等, 2012; 王子嵩等, 2014; Huang *et al.*, 2016). 两套烃源岩生排烃高峰期主要为早渐新世和早—中中新世、上新世—现今(张迎朝等, 2015). 烃源岩进入排烃阶段后, 内部形成异常超压. 而作为古高地的松南低凸起区, 埋深浅, 形成相对压力低势区, 成为油气优势运移指向区.

4.2 缓坡区发育的多个扇三角洲形成了优质的储层

2号断裂与11号断裂差异翘倾活动, 形成了翘倾抬升的突起区, 持续提供物源, 紧邻物源区形成了多个缓坡带. 持续的断裂活动引起突起区的持续抬升, 暴露剥蚀, 提供充足物源, 沿着缓坡发育了多个规模不等的扇三角洲. 扇三角洲近物源, 多为含砾砂岩, 埋深浅, 压实较弱, 物性条件好, 形成了大面积分布的优质储层. 松南凸起Y1井在古近系崖

城组钻遇砂砾岩 53 m, 平均孔隙度 24.5%, 平均渗透率 $187 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于高—中为主、局部特高孔, 高渗储层.

4.3 构造抬升及断层上盘旋转翘倾掀斜作用形成了多个构造—岩性—地层圈闭

崖城组沉积期受到2号和11号控凹边界断裂剧烈活动影响, 松南低凸起区差异翘倾抬升, 崖城组沉积期发育扇三角洲的缓坡带局部形成断块、断背斜—背斜圈闭. 陵水组沉积期断裂持续活动, 同时沉降中心发生迁移, 松南低凸起进一步差异抬升(沉降), 形成新高点及背斜地貌特征, 中新世后断裂活动减弱, 以热沉降作用为主, 圈闭基本定型, 发育了多个大型的断背斜—背斜圈闭(图11).

4.4 构造活动形成优势运移通道, 源储匹配良好, 利于天然气成藏

构造活动形成了分布于松南低凸起周缘的沟源断裂及延伸到凹陷中心的多条构造脊(郭明刚等, 2017), 油气在构造脊的约束下, 沿着扇三角洲砂体, 向低势区的松南低凸起区多种类型的圈闭内运聚成藏. 松南低凸起古近系圈闭大多形成于崖城—陵水组沉积期, 而此后松南低凸起没有发生大规模构造运动, 研究区圈闭形成时间和油气运移时间配置较好, 三亚组及上覆厚层深海泥岩盖层形成很好的封盖作用. 2018年松南低凸起上Y-1井钻获了优质天然气藏, 获得了该领域古近系天然气勘探的重大突破. 证实了松南低凸起古近系具有优越的成藏条件. 松南低凸起古近系有望成为琼东南盆地下一个千亿方级的天然气聚集区(图11).

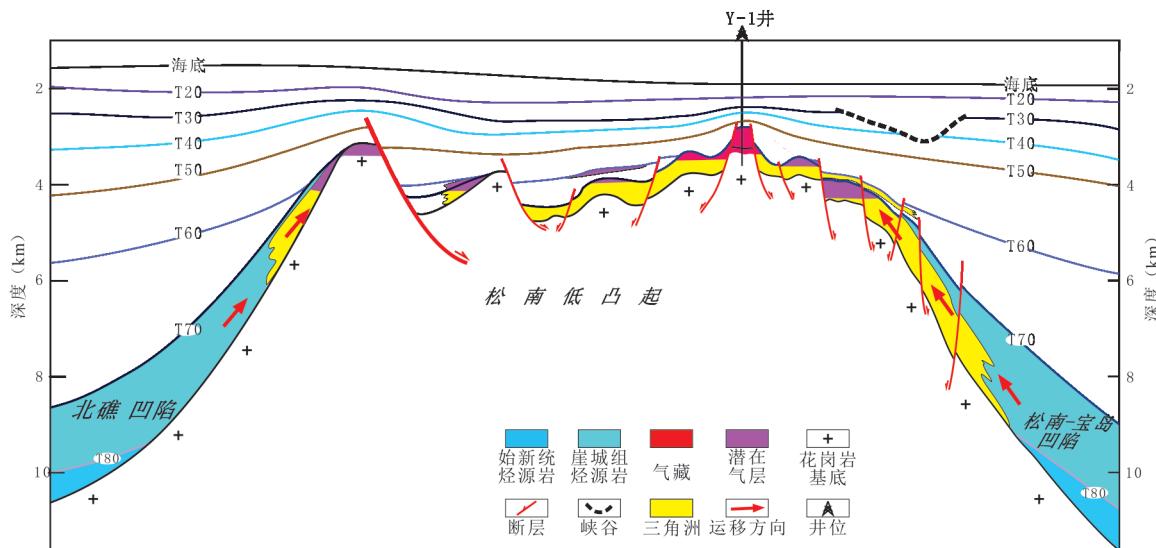


图11 松南低凸起古近系天然气成藏模式

Fig.11 Gas accumulation mode of Songnan Low Uplift in Qingdongnan Basin

5 结论

(1)受2号断裂和11号断裂活动控制,松南低凸起古近纪经历了古新世—早渐新世差异翘倾抬升,西高东低;晚渐新世加速翘倾抬升,向东抬升;2个演化阶段,形成了研究区内近对称分布的隆凹相间构造格局,形成了松南低凸起NE-SW向展布特征及东部宽缓的斜坡背景,主要以发育旋转掀斜斜坡为主。

(2)早渐新世崖城组沉积期松南低凸起整体向东倾倒,具有西高东低,陡缓分明的古地貌格局,断裂活动形成了松南低凸起西突起物源区以及切入剥蚀区的输砂古沟槽,向缓坡区大量输送碎屑物质,发育大型扇三角洲沉积;陵水组沉积期扇三角洲继承发育,但规模有所减小。

(3)古近纪松南低凸起发育了凸起—斜坡的构造格局,四面紧邻大型生烃凹陷,油气来源充足;斜坡区大规模分布的三角洲沉积体系形成了优质的储集体;构造活动形成了分布于凸起及斜坡带的构造—岩性—地层等多种类型圈闭;天然气生、运、聚时空匹配良好。松南低凸起古近系有望成为琼东南盆地下一个千亿方级的天然气聚集区。

References

- Cai, H., Qin, L. Z., Liu, Y. H., 2019. Differentiation and Coupling Model of Source-to-Sink Systems with Transitional Facies in Pingbei Slope of Xihu Sag. *Earth Science*, 44(3): 880—897 (in Chinese with English abstract).
- Carmalt, S. W., John, S. B., 1986. Giant of Oil-Gasfield. *AAPG Memoir*, 40:11—55.
- Ge, X., Shen, C. B., Selby, D., et al., 2018. Neoproterozoic-Cambrian Petroleum System Evolution of the Micangshan Uplift, Northern Sichuan Basin, China: Insights from Pyrobitumen Rhenium-Osmium Geochronology and Apatite Fission-Track Analysis. *AAPG Bulletin*, 102(8): 1429—1453. <https://doi.org/10.1306/1107171616617170>
- Guo, M. G., Zeng, X. Y., Jiang, R. F., et al., 2017. The Forming Condition of Multiple Oil Gas Accumulation and Accumulation Model of Songnan Low Uplift in Deep-Water Area of Qiongdongnan Basin. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 32(4): 577—587 (in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Wu, W.H., Zu, Y.H., et al., 2010. Genetic Types, Migration and Accumulation of Oil & Gas and Exploration Proposal in North Marginal Basins, South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 21(1): 7—17 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B. J., Huang, H., Wang, Z. F., et al., 2015. Kinetics and Model of Gas Generation of Source Rocks in the Deepwater Area, Qiongdongnan Basin. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(4): 11—18. <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0646-3>
- Huang, B. J., Li, X. S., Wang, Z. F., et al., 2012. Source Rock Geochemistry and Gas Potential in the Deep Water Area, Qiongdongnan Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 24(4): 1—7 (in Chinese with English abstract).

- Huang, B. J., Tian, H., Li, X. S., et al., 2016. Geochemistry, Origin and Accumulation of Natural Gases in the Deepwater Area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 72: 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.02.007>
- Huang, J. Z., 2009. The Pros and Cons of Paleohighs for Hydrocarbon Reservoiring: A Case Study of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 29(2): 12–17 (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Ren, J. Y., 2016. Hyper-Extended Rift Systems in the Xisha Trough, Northwestern South China Sea: Implications for Extreme Crustal Thinning Ahead of a Propagating Ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 77: 846–864. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.07.022>
- Li, S. L., Zhu, X. M., Liu, H. Q., et al. 2017. Evaluation and Prediction of Favorable Reservoirs in Source-to-Sink Systems of the Palaeogene, Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 42(11): 1994–2009 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Zhang, Y. Z., Yang, X. B., et al., 2017. New Understandings and Achievements of Natural Gas Exploration in Yinggehai - Qiongdongnan Basin, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 29(6): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Lu, B. F., Yin, Z. X., Cai, Z. R., et al., 2012. Cenozoic Tectonic Evolution Sequence in Northern South China Sea and Its Oil/Gas Significance. *Acta Geologica Sinica*, 86(8): 1249–1261 (in Chinese with English abstract).
- Neng, Y., Wu, J. F., Qi, J. F., et al., 2013. Three Structural Layers and Its Evolution of Cenozoic Basins in Deep Water Area of Northern Margin, South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 403–414 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L. D., Li, Y. J., Jiang, T. W., et al., 2007. The Central Tarim Lower Uplift: A Composite Hydrocarbon Accumulation Play in the Tarim Basin in China. *Chinese Journal of Geology*, 42(3): 602–620 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Wang, Z., Sun, Z., et al., 2015. Structure and Kinematic Analysis of the Deepwater Area of the Qiongdongnan Basin through a Seismic Interpretation and Analogue Modeling Experiments. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(4): 32–40. <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0585-z>
- Tang, Li., S., Zhu, J. T., Yao, Z., et al., 2017. Evolution and Reservoir Formation Conditions of Buried Hills in Songnan Low Uplift of the Qiongdongnan Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 24(1): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and History of the South China Sea Basin. American Geophysical Union Geophysical Monograph, Washington, 27: 23–56.
- Wang, Z. F., Sun, Z. P., Zhang, Y. Z., et al., 2016. Distribution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of the Giant Deepwater Central Canyon Gas Field in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *China Petroleum Exploration*, 21(4): 54–64 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. S., Chen, C. W., Han, G. M., et al., 2017. Rotate-Tilt Slope Zone Structures - Sedimentary Evolution and Petroleum Geologic Significance: A Case study of Banqiao Slope of Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(11): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. S., Liu, Z., Huang, B. J., et al., 2014. Distribution and Evaluation of Oligocene Source Rocks in the East of Central Depression Belt in Deep-Water Area, Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 360–371 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. Q., Yang, W., Du, J. H., et al., 2015. Tectonic Features of Gaoshiti-Moxi Paleo-Uplift and Its Controls on the Formation of a Giant Gas Field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(3): 283–292 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, D. Q., Lu, Y., Fu, L. X., et al., 2013. Slope Structure Feature and Category in Faulted Basin – A Case Study on Qikou Sag Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 27(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Xie, W. Y., Zhang, Y. W., Sun, Z., et al., 2007. Characteristics and Formation Mechanism of Faults in Qiongdongnan Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 71–78 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. H., 2014. A Major Breakthrough in Deepwater Natural Gas Exploration in Self-Run Oil/Gas Field in the Northern South China Sea and Its Enlightenment. *Natural Gas Industry*, 34(10): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. H., Tong, C. X., Fan, C. W., et al., 2015. Characteristics and Evolution of Fault System in Qiongdongnan Basin. *Geotectonica et Metallogenica*, 39(5): 795–807 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Müller, R. D., Li, S. T., et al., 2006. Origin of Anomalous Subsidence along the Northern South China Sea Margin and its Relationship to Dynamic Topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745–765.

- <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.03.004>
- Yang, J. H., Li, C., Li, T., et al., 2014. Accumulation Condition and Model of Gas Reservoir in Central Canyon in Deepwater Area of Northern South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2141—2149 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. M., Wen, L., Luo, B., 2016. Sedimentary Tectonic Evolution and Reservoir-Forming Conditions of the Dazhou-Kaijiang Paleo-Uplift, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 36(8): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. F., Duan, R. T., 2008. Forming Mechanism and Developing Characteristics of Eastern Segment of No. 2 Fault Zone in Qiongdongnan Basin. *Geotectonica et Metallogenesis*, 32(3): 293—299 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Fan, C. W., Xu, X. D., et al., 2015. Genesis and Sources of Natural Gas in Eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(4): 466—472 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Gan, J., Yang, X. B., et al., 2017. Tectonic Evolution and Its Constraints on the Formation of Deep-water Giant Gas Field in Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin. *Marine Geology Frontiers*, 33(10): 22—31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Qi, J. F., Wu, J. F., 2019. Cenozoic Faults Systems and Its Geodynamics of the Continental Margin Basins in the Northern of South China Sea. *Earth Science*, 44(2): 603—625 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Zhu, G. Y., Zhang, Y. J., et al., 2018. The Origin and Accumulation of Multi-Phase Reservoirs in the East Tabei Uplift, Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 98: 533—553. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.08.036>
- Zhao, W., Fang, N. Q., Zhan, H. M., et al., 2013. Cenozoic Tectonic Migration in the Northern South China Sea. *Marine Geology Frontiers*, 29(4): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. X., Sun, Z., Wang, Z. F., et al., 2013. The Dynamic Mechanism of Post-Rift Accelerated Subsidence in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 34(3/4): 295—308. <https://doi.org/10.1007/s11001-013-9188-2>
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H. Z., et al., 2008. Mesozoic Paleogeography and Tectonic Evolution of South China Sea and Adjacent Areas in the Context of Tethyan and Paleo-Pacific Interconnections. *Island Arc*, 17(2): 186—207. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2008.00611.x>
- Zhou, J., Yang, X. B., Gan, J., et al., 2017. Controls of Faults on Sedimentary Filling in Deep-Water Area of Qiongdongnan Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 24(2): 75—79 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Zhu, J. T., Yang, J. H., et al., 2018. Characteristics of Faults and Their Implication to Gas Geology in Baonan Step-Fault Zone in Deep-Water Area of Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 29(1): 87—95 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Gao, L., 2008. Geological Characteristics and Exploration Objectives of Hydrocarbons in the Northern Continental Margin Basin of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 29(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡华, 秦兰芝, 刘英辉. 2019. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源—汇系统差异性及其耦合模式. 地球科学, 44(3): 880—897.
- 郭明刚, 曾小宇, 江汝锋, 等. 2017. 琼东南盆地深水区松南低凸起油气复式聚集条件与成藏模式. 地质找矿论丛, 32(4): 577—587.
- 何家雄, 吴文海, 祝有海, 等. 2010. 南海北部边缘盆地油气成因及运聚规律与勘探方向. 天然气地球科学, 21(1): 7—17.
- 黄保家, 李绪深, 王振峰, 等. 2012. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力. 中国海上油气, 24(4): 1—7.
- 黄籍中, 2009. 从四川盆地看古隆起成藏的两重性. 天然气工业, 29(2): 12—17.
- 李顺利, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 2017. 沙垒田凸起古近纪源—汇系统中有利储层评价与预测. 地球科学, 42(11): 1994—2009.
- 李绪深, 张迎朝, 杨希冰, 等. 2017. 莺歌海—琼东南盆地天然气勘探新认识与新进展. 中国海上油气, 29(6): 1—11.
- 吕宝凤, 殷征欣, 蔡周荣, 等. 2012. 南海北部新生代构造演化序列及其油气成藏意义. 地质学报, 86(8): 1249—1261.
- 能源, 吴景富, 漆家福, 等. 2013. 南海北部深水区新生代盆地三层结构及其构造演化. 地质学报, 87(3): 403—414.
- 孙龙德, 李曰俊, 江同文, 等. 2007. 塔里木盆地塔中低凸起:一个典型的复式油气聚集区. 地质科学, 42(3): 602—620.
- 唐历山, 朱继田, 姚哲, 等. 2017. 琼东南盆地松南低凸起潜山演化及成藏条件. 特种油气藏, 24(1): 87—91.
- 王振峰, 孙志鹏, 张迎朝, 等. 2016. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律. 中国石油勘探, 21(4): 54—64.
- 王振升, 陈长伟, 韩国猛, 等. 2017. 旋转掀斜斜坡区构造—沉积演化特征及油气地质意义——以渤海湾盆地歧口凹陷

- 板桥斜坡为例. 天然气地球科学, 28(11):1650—1656.
- 王子嵩, 刘震, 黄保家, 等, 2014. 琼东南盆地深水区中央坳陷带东部渐新统烃源岩分布及评价. 天然气地球科学, 25(3): 360—371.
- 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等, 2015. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用. 石油勘探与开发, 42(3):257—265.
- 肖敦清, 卢异, 付立新, 等, 2013. 断陷湖盆斜坡构造类型及特征——以歧口凹陷为例. 石油地质与工程, 27(1):1—6.
- 谢文彦, 张一伟, 孙珍, 等, 2007. 琼东南盆地断裂构造与成因机制. 海洋地质与第四纪地质, 27(1): 71—78.
- 谢玉洪, 2014. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示. 天然气工业, 34(10):1—8.
- 谢玉洪, 童传新, 范彩伟, 等, 2015. 琼东南盆地断裂系统特征与演化. 大地构造与成矿学, 39(5): 795—807.
- 杨金海, 李才, 李涛, 等, 2014. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气成藏条件与成藏模式. 地质学报, 88(11): 2141—2149.
- 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等, 2016. 四川盆地达州—开江古隆起沉积构造演化及油气成藏条件分析. 天然气工业, 36(8): 1—10.
- 于俊峰, 段如泰, 2008. 琼东南盆地 2 号断裂东带发育特征及形成机理. 大地构造与成矿学, 32(3):293—299.
- 张迎朝, 范彩伟, 徐新德, 等, 2015. 南海琼东南盆地东区天然气成因类型与烃源探讨. 石油实验地质, 37(4): 466—472.
- 张迎朝, 甘军, 杨希冰, 等, 2017. 琼东南盆地陵水凹陷构造演化及其对深水大气田形成的控制作用. 海洋地质前沿, 33(10):22—31.
- 张远泽, 漆家福, 吴景富, 2019. 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素. 地球科学, 44(2): 603—625.
- 赵卫, 方念乔, 詹华明, 等, 2013. 南海北部新生代构造迁移特征. 海洋地质前沿, 29(4):1—6.
- 周杰, 杨希冰, 甘军, 等, 2017. 琼东南盆地深水区断裂对沉积充填的控制作用. 特种油气藏, 24(2):75—79.
- 周杰, 朱继田, 杨金海, 等, 2018. 琼东南盆地深水区宝南断阶带断裂特征及天然气地质意义. 天然气地球科学, 29(1):87—95.
- 朱伟林, 张功成, 高乐, 2008. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向. 石油学报, 29(1): 1—9.