

# 琼东南盆地深水区新生代海底扇沉积演化 ——以宝南断阶带为例

张毅<sup>1,2,3</sup>, 毛宁波<sup>1,2</sup>, 何丽娟<sup>3</sup>, 何小胡<sup>3</sup>, 刘新宇<sup>3</sup>, 罗威<sup>3</sup>, 苏榆丰<sup>3</sup>

1 长江大学地球物理学院; 2 油气资源与勘探技术教育部重点实验室;

3 中海石油(中国)有限公司湛江分公司研究院

**摘要** 琼东南盆地深水区是油气勘探的重要领域,大型储集体的发育条件及预测研究对该领域下一步的勘探至关重要。以钻井、测井、高精度三维地震等资料为基础,应用井震精细标定、骨架砂体雕刻和高精度三维地貌叠合等技术手段,对琼东南盆地深水区宝南断阶带的物源方向和海底扇展布规律进行了精细研究。结果表明:①宝南断阶带的主物源来自南部隆起;②研究区内主要发育永乐C-1和永乐D-1两个大型海底扇,扇体纵向上多期叠置,扇体内部沟通下伏烃源岩的断裂发育,成藏条件优越,具有重要的勘探意义。

**关键词** 海底扇; 沉积演化; 油气成藏; 新生代; 深水区; 琼东南盆地

**中图分类号**: TE122.2

**文献标识码**: A

琼东南盆地深水区(水深大于300 m)渐新统、中新统和上新统均发育大规模的海底扇,这些扇体为深水区的主要储集体之一。近年来,相继在中央坳陷带乐东—陵水凹陷南部中新统黄流组、乐东—陵水凹陷东部上新统莺歌海组海底扇中获得油气发现,深水海底扇已成为深水区油气勘探的重要领域之一。前人对琼东南盆地海底扇的精细研究主要集中在中央坳陷乐东—陵水凹陷,研究的重点主要在沉积体系、沉积特征和发育条件等方面<sup>[1-4]</sup>。然而,对于宝南断阶带海底扇的发育情况尚未开展研究工作。笔者针对宝南断阶带物源不明确和海底扇分布范围、展布规律不清晰等问题,以钻井、测井、三维地震等资料为基础,应用井震精细标定、骨架砂体雕刻、高精度三维地貌叠合等技术手段,对研究区内的物源方向和海底扇展布规律进行了精细研究。目前研究区内只有一口探井(A-1-1井),该井钻遇陵水组三段和三亚组二段海底扇砂岩,砂体厚度分别约为30 m和80 m,砂岩类型为细砂岩与泥质粉砂岩,储层条件优越。A-1-1井虽无油气显示,

但为该区的进一步研究提供了丰富的钻井资料。通过本次研究,落实了研究区海底扇的物源方向、分布范围和展布规律,展现了琼东南深水区的勘探潜力,并形成了一套适合琼东南盆地深水区海底扇沉积演化研究的方法体系。

## 1 区域地质背景

琼东南盆地位于南海海域西北部,夹持在海南隆起区和永乐隆起区之间(图1),由北部坳陷、中部隆起、中央坳陷和南部隆起构成“两坳两隆”的构造格局<sup>[1,5]</sup>,其中,中央坳陷深水区由乐东—陵水凹陷、北礁凹陷、松南—宝岛凹陷、长昌凹陷、陵南低凸起和松南低凸起构成。中央峡谷主要发育于中新世黄流组沉积时期,西起乐东—陵水凹陷,经松南低凸起、宝岛凹陷、长昌凹陷,向东延伸到西沙海槽,终止于南海西北次海盆,总长约580 km,发育面积约7 000 km<sup>2</sup>。本次的研究区宝南断阶带,位于盆地深水东区中央坳陷带的松南—宝岛凹陷南部,水深1 525~2 425 m,海底地形变化较大。

收稿日期: 2018-11-29; 改回日期: 2018-12-20

本文受“十三五”国家科技重大专项之专题“琼东南盆地深水区面向地质目标的地震资料处理关键技术”(编号:2016ZX05026-02-01)资助

**第一作者**: 张毅,工程师,博士在读,2008年毕业于中国地质大学(武汉)能源地质工程专业,获硕士学位,主要从事油气勘探与研究。通信地址: 524057 广东省湛江市坡头区南油一区中海油湛江分公司研究院; E-mail: zhangyi9@cnooc.com.cn

**通信作者**: 毛宁波,教授,博士生导师,主要从事地震勘探教学与科研工作。通信地址: 430100 湖北省武汉市蔡甸区蔡甸街大学路111号长江大学; E-mail: maonb@yangtzeu.edu.cn

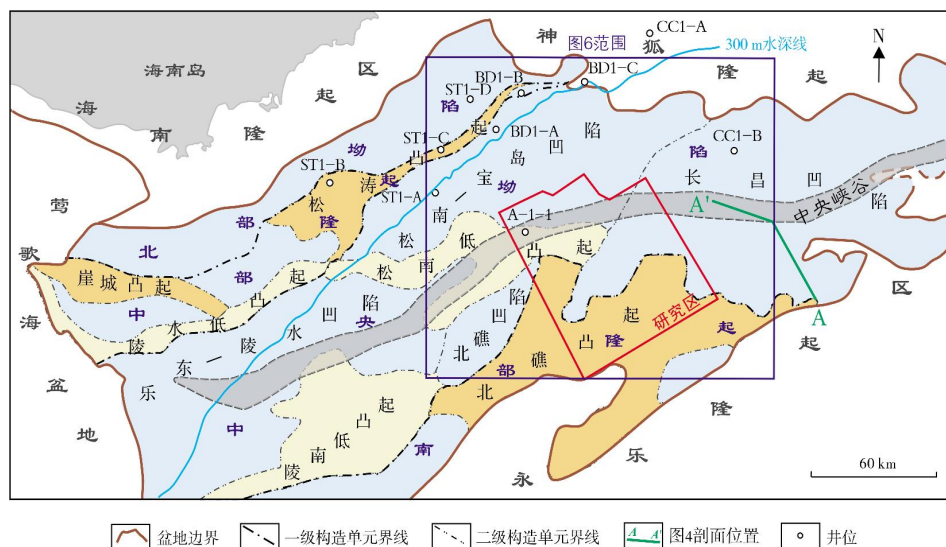


图1 琼东南盆地构造单元划分及研究区位置图

宝南断阶带成藏条件优越,是深水东区有利的勘探区带之一。油气主要来自于宝岛凹陷始新统湖相烃源岩、渐新统崖城组煤系和海陆过渡相烃源岩<sup>[5-12]</sup>。储层主要为渐新统陵水组、中新统三亚组海底扇和黄流组浊积水道砂体,上覆的浅海、半深海和深海相泥岩为可靠的区域性盖层。断裂是油气运移的主要通道,除此之外,还发育古近系输导砂体、古构造脊和不整合面等优势通道。

研究区的 A-1-1 井完钻深度为 4 108 m, 钻遇乐东组、莺歌海组、黄流组、三亚组、陵水组和崖城组,精细地层对比表明,缺失黄流组二段、梅山组和三亚组一段(图2),这与黄流组沉积时期中央峡谷的侵蚀作用有关。陵水组三段岩性为黄色泥质粉砂岩与蛋青色泥岩互层,沉积相解释为海底扇中扇,沉积微相为水道砂和席状砂;三亚组二段岩性为黄色细砂岩、黄色泥质粉砂岩与蛋青色泥岩不等厚互层,砂岩较发育,沉积相解释为海底扇中扇,沉积微相为水道砂和席状砂(图2b)。地球化学分析表明,崖城组和陵水组的烃源岩质量好。

对 A-1-1 井进行微体古生物分析(图2b):从上新统陵水组开始,微体古生物中浮游有孔虫百分含量均在 95%以上;陵水组一段、二段中,已经出现了指示半深海环境的底栖类有孔虫 *Uvigerina*、*Rectobolivina*(冲绳海槽常见的中深层水底栖有孔虫分子<sup>[13]</sup>)。由此证明,宝南断阶带晚渐新世后期为半深海沉积环境。

## 2 物源分析

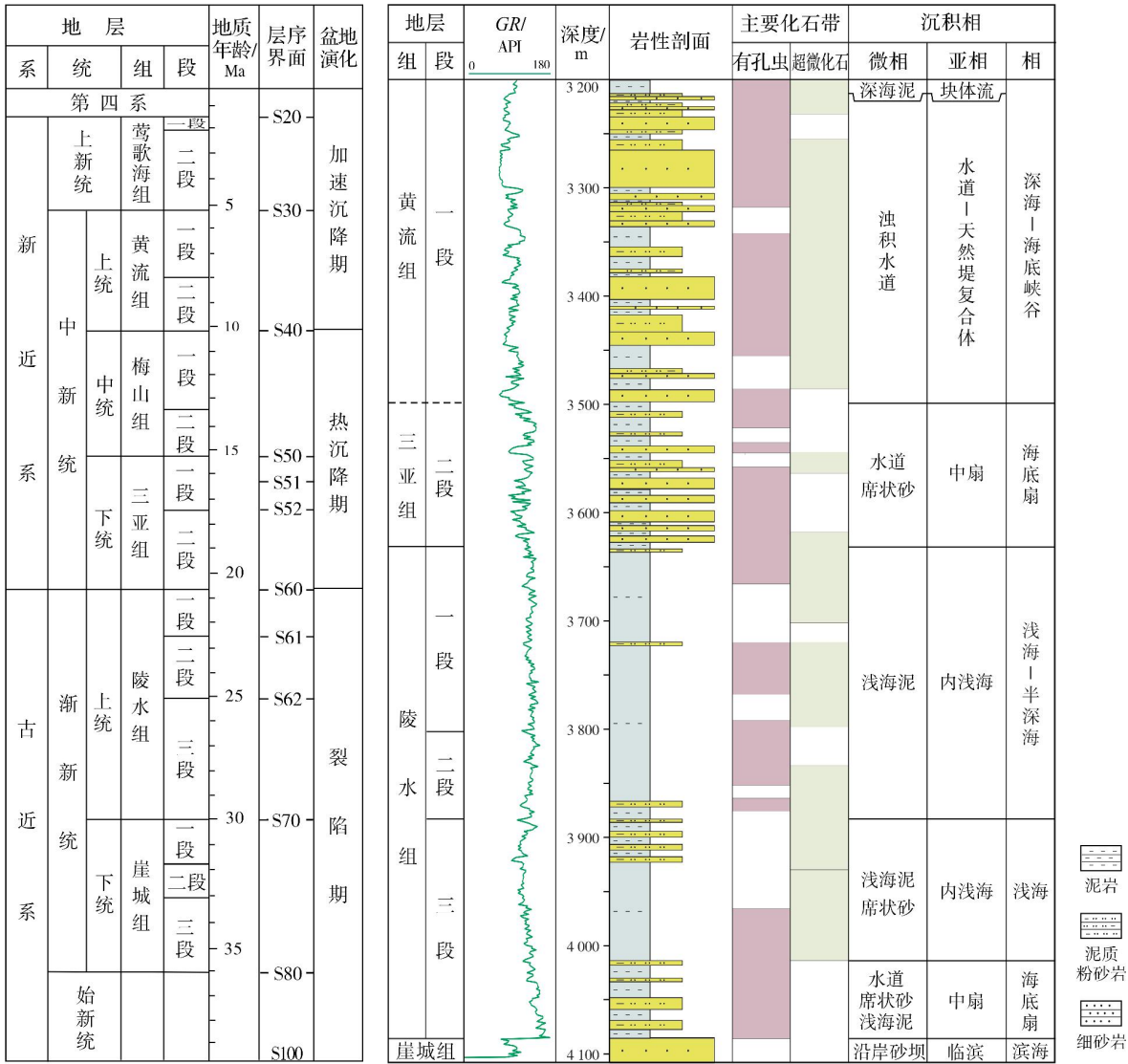
基于古地貌、地震相、重矿物组合等综合分析研究,确定了宝南断阶带海底扇的主物源来自南部隆起。

### 2.1 古地貌

本文通过未剥蚀地层趋势法恢复地层剥蚀量,根据地层压实公式校正地层厚度,并依据古生物方法计算古水深,最终将三者叠合来恢复研究区的古地貌。如图3所示,在陵水组三段沉积时期,盆地南部和北部的剥蚀区范围较大,物源供给充足,三角洲发育,盆地中央快速变深,南北两侧的三角洲沉积经二次搬运至深凹区可形成海底扇(图3a);在三亚组二段沉积时期,盆地呈南北高中中央深的格局,剥蚀区集中在南部的隆起区,凹陷边缘三角洲发育,且经二次搬运至凹陷中央可形成海底扇(图3b)。

### 2.2 地震相

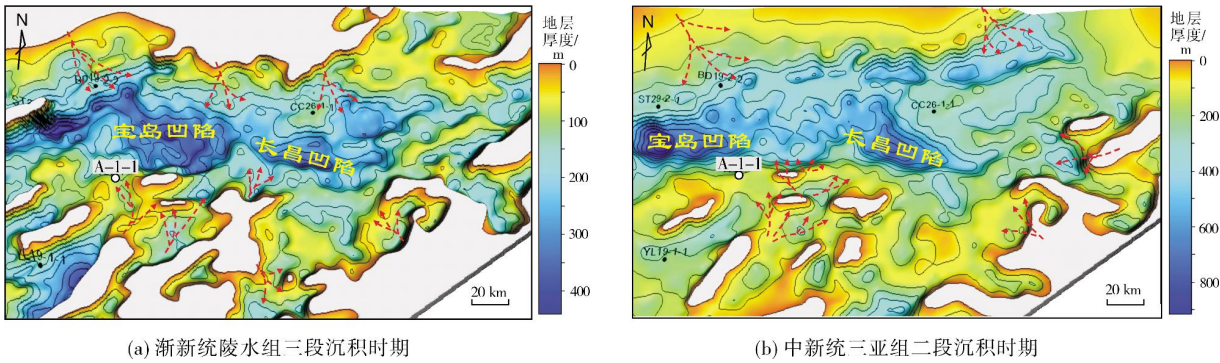
由盆地东部一条北西向的典型地震剖面(图4)可见:三亚组一段沉积时期,东南方向靠近隆起区,断裂坡折之上发育具有前积地震相特征的三角洲;往西北方向,断裂坡折之下发育下切形态明显的水道,可以作为有效的沉积物输送通道,紧邻水道处发育具有低频、中连续、强振幅反射特征的海底扇,组成三角洲—海底扇沉积体系。



(a) 盆地年代地层简图(据文献[6]修改)

(b) A-1-1井地层综合柱状图

图 2 琼东南盆地年代地层及宝南断阶带 A-1-1 井渐新统—中新统地层综合柱状图



红色箭头示意三角洲展布

图 3 琼东南盆地东部不同时期的古地貌



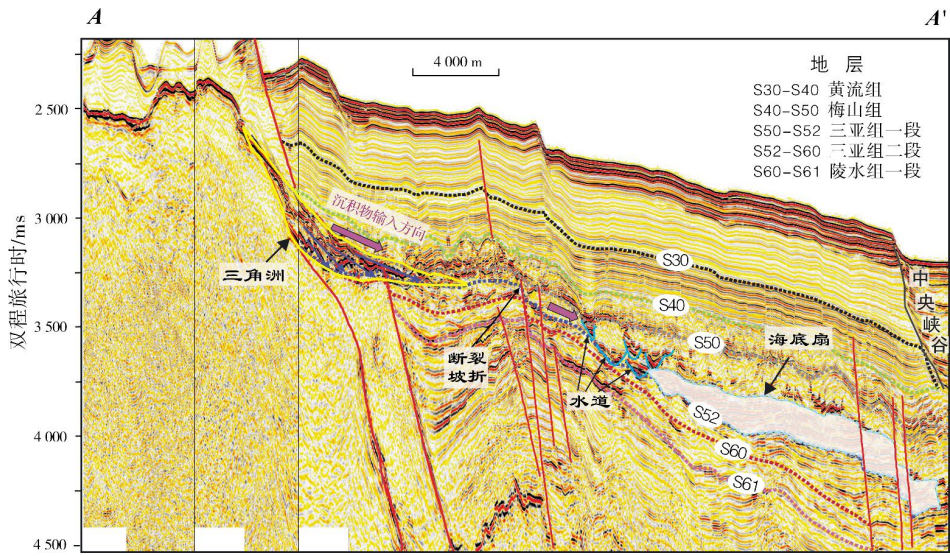


图4 琼东南盆地东部典型地震地质解释剖面  
剖面位置见图1

2.3 重矿物组合

以琼东南盆地东部三亚组重矿物组合为例,如图5所示,中央坳陷北部各井的样品所反映的北部物源区,重矿物组合以赤褐铁矿+白钛矿+电气石

+锆石含量高为主要特征;坳陷南部A-1-1井重矿物组合以高含量的白钛矿+锆石+磁铁矿为主要特征,与北部物源重矿物组合有较明显的区别,据此推断南部断阶带三亚组沉积物主要来自南部隆起。

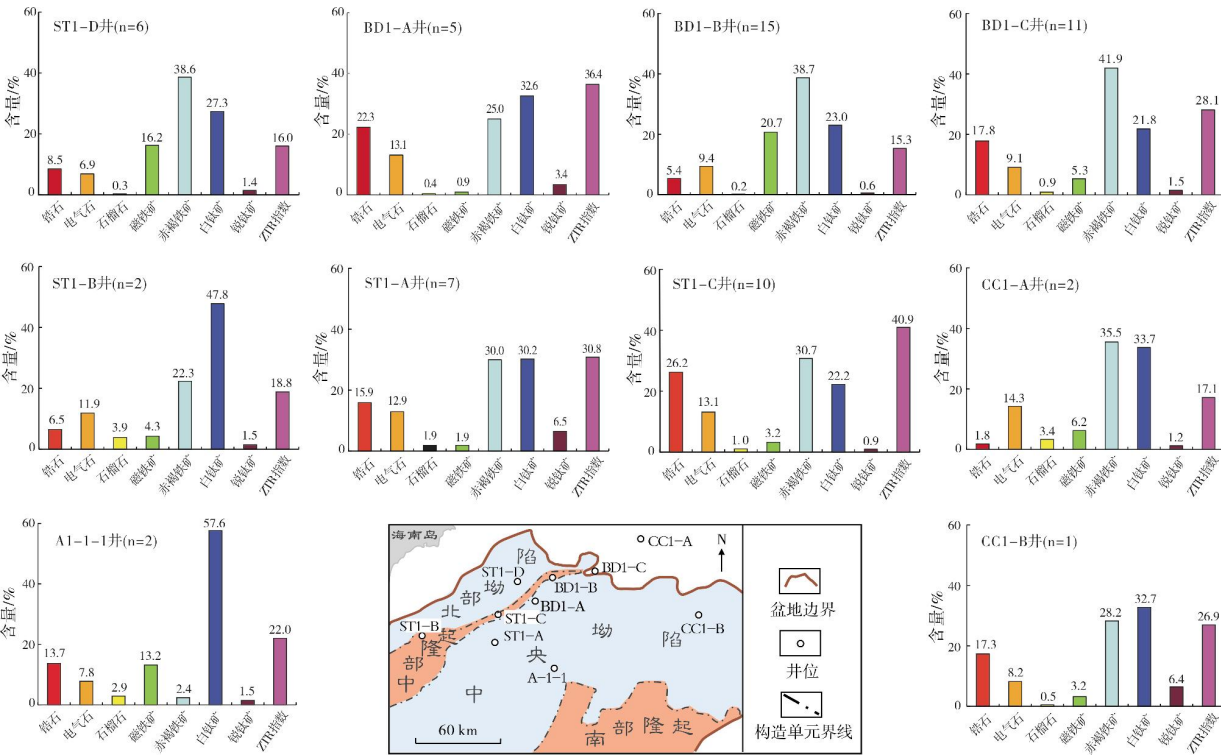
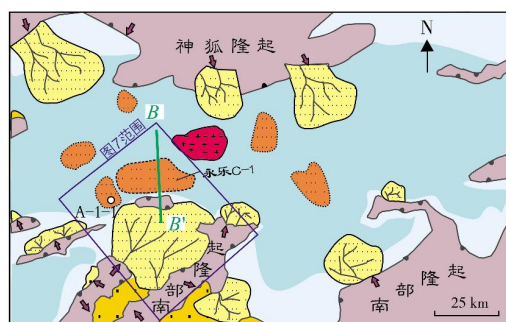


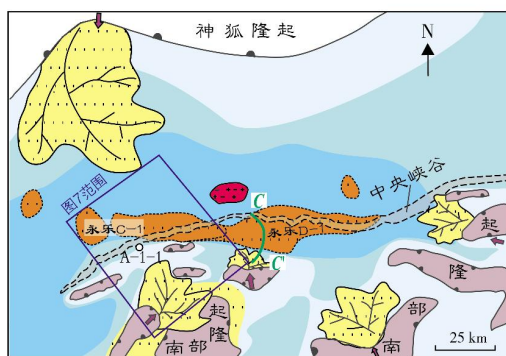
图5 琼东南盆地中新统三亚组二段重矿物组合分布图

### 3 海底扇沉积特征

基于精细的地震地质解释,以宝南断阶带为主体,编制了盆地东部渐新统、中新统重点储层发育段的沉积相图。如图 6 所示,区内主要有陵水组三段永乐 C-1 海底扇和三亚组一段永乐 C-1、永乐 D-1 海底扇,它们主要发育在南部隆起一侧断裂坡折之下的浅海、半深海(图 4)。陵水组三段沉积时期,永乐 C-1 海底扇发育于浅海环境,近东西向展布(图 6a);三亚组一段沉积时期,海底扇发育于浅海—半深海,永乐 C-1 海底扇继承性发育,与东侧的永乐 D-1 海底扇汇聚在一起(图 6b),形成面积超过 2 000 km<sup>2</sup> 的大型储集体,近东西向展布,并被晚期中央峡谷水道切割为南北 2 块。



(a) 陵水组三段



(b) 三亚组一段

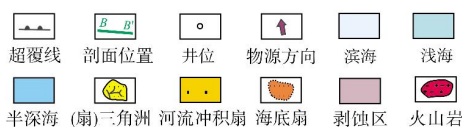
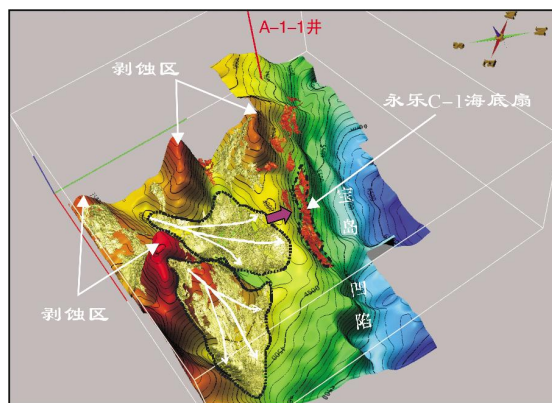


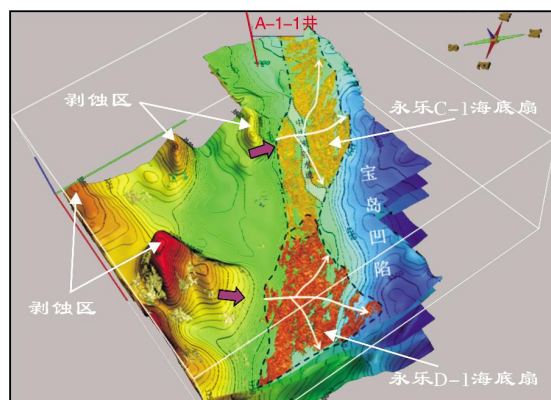
图 6 琼东南盆地东部渐新统和中新统沉积相图(范围见图 1)

为更直观、更清晰地展示宝南断阶带的主物源方向和海底扇展布,采用骨架砂体雕刻和高精度三维地貌叠合技术进行了分析。图 7 清晰展示了宝南

断阶带的“源-汇”关系;在陵水组三段和三亚组一段沉积时期,南部隆起剥蚀区分布范围较大,可以提供大量的碎屑物质,发育(扇)三角洲,并经二次搬运在断裂坡折之下形成海底扇。



(a) 陵水组三段



(b) 三亚组一段

图 7 琼东南盆地宝南断阶带不同时期海底扇源-汇特征  
建模范围见图 6

典型地震剖面上,陵水组三段永乐 C-1 海底扇表现为中—强振幅、较连续反射特征(图 8),后被断层切割而复杂化,主体部位扇体外形清晰,远离物源方向,扇体呈楔形减薄。三亚组一段永乐 C-1 海底扇表现为中—强振幅、连续反射特征(图 8),后被中央峡谷切割为南北 2 块,水道部位缺失部分地层。其中,南块近物源方向楔形减薄特征明显;北块被断层切割复杂化,主体部位扇体外形清晰,远离物源方向,扇体呈楔形减薄。

永乐 D-1 海底扇临近南部隆起物源区(图 9),扇体可分为 5 期。早期物源充足,朵体进积叠置;晚期海平面上升,朵体退积叠置,顺斜坡进行沉积。扇



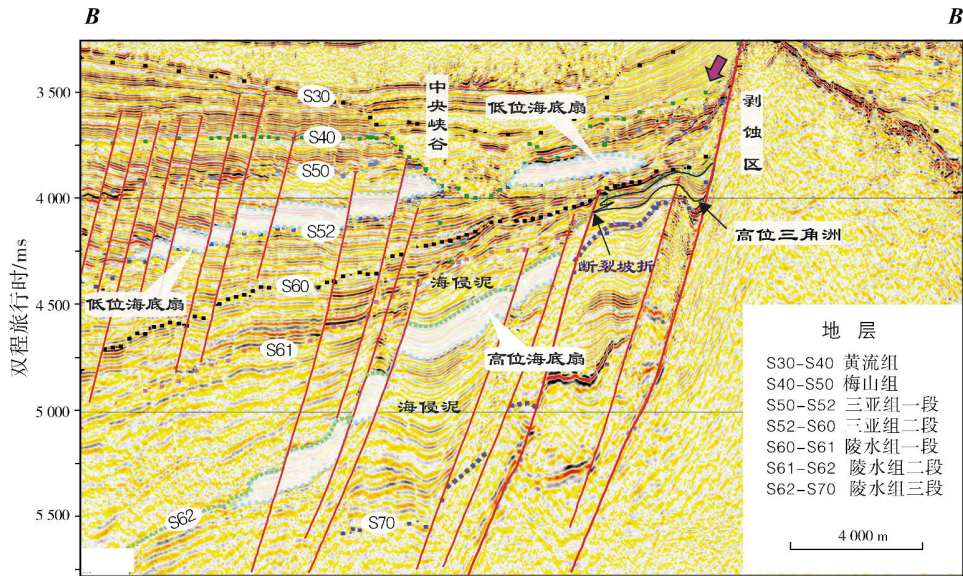


图8 过永乐C-1海底扇典型地震解释剖面  
剖面位置见图6a

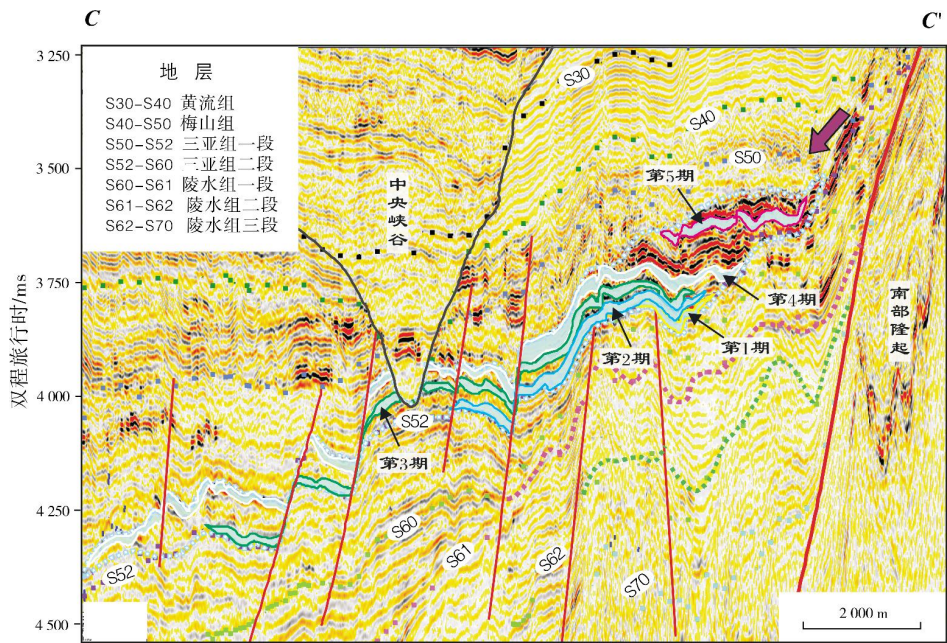


图9 过永乐D-1海底扇典型地震解释剖面  
剖面位置见图6b

体由多期次砂泥岩互层构成,下切侵蚀特征不明显;靠近物源方向表现为上超特征,远离物源,扇体边界模糊。

上述海底扇纵向上多期叠置,分布范围广泛,扇体内部断裂发育,可以沟通下伏渐新统烃源岩,成藏条件优越,故可作为深水区的有利勘探目标。

#### 4 结 论

在重矿物组合、古地貌和地震相等常规物源分析的基础上,应用骨架砂体雕刻技术,能够直观地反映出琼东南盆地宝南断阶带发育大型海底扇,这些海底扇来自南部隆起的沉积物在断裂坡折之

下汇聚而成。

宝南断阶带早渐新世发育有陵水组三段的永乐 C-1 海底扇, 早中新世发育有三亚组一段的永乐 C-1、永乐 D-1 海底扇; 三亚组扇体被晚期的中央峡谷分割为南北 2 块。宝南断阶带的海底扇成藏条件优越, 可作为有利的勘探目标。

#### 参考文献

- [1] 谢玉洪, 范彩伟, 周家雄, 等. 琼东南盆地中中新世重力流海底扇沉积特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 220-228.
- [2] 左倩媚, 张道军, 王亚辉, 等. 琼东南盆地深水区新近系海底扇沉积特征与资源潜力[J]. 海洋学报, 2016, 38(11): 105-116.
- [3] 姚哲, 朱继田, 左倩媚, 等. 琼东南盆地深水区重力流沉积体系及油气勘探前景[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 21-29.
- [4] 王振峰, 裴健翔, 郝德峰, 等. 莺-琼盆地中新统大型重力流储集体发育条件、沉积特征及天然气勘探有利方向[J]. 中国海上油气, 2015, 27(4): 13-21.
- [5] 游君君, 孙志鹏, 李俊良, 等. 琼东南盆地深水区松南低凸起勘探潜力评价[J]. 中国矿业, 2012, 21(8): 56-59.
- [6] 郭明刚, 苟再辉, 孙志鹏, 等. 南海北部琼东南盆地深水区陵水凹陷南部油气成藏条件[J]. 海相油气地质, 2016, 21(4): 34-42.
- [7] 张新顺, 黄志龙, 范彩伟, 等. 琼东南盆地宝岛凹陷北斜坡油气运聚模式探讨[J]. 高校地质学报, 2014, 20(4): 602-610.
- [8] 韩光明, 李绪深, 王立峰, 等. 琼东南盆地宝岛凹陷北坡断裂体系新认识及与天然气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 352-355.
- [9] 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.
- [10] 王子嵩, 刘震, 黄保家, 等. 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[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 360-371.
- [11] 王振峰, 李绪深, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2011, 23(1): 7-13.
- [12] 吴景富, 杨树春, 张功成, 等. 南海北部深水区盆地热历史及烃源岩热演化研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 170-180.
- [13] 汪品先, 成鑫荣. 东海底质中钙质超微化石的分布[J]. 海洋学报, 1988, 10(1): 76-87.

编辑: 董庸

## Sedimentary evolution of submarine fan of Cenozoic in deep-water area of Qiongdongnan Basin: a case study in Baonan fault terrace zone

ZHANG Yi, MAO Ningbo, HE Lijuan, HE Xiaohu, LIU Xinyu, LUO Wei, SU Yufeng

**Abstract:** Deep-water area is one of the most important fields for oil and gas exploration in Qiongdongnan Basin, so it is very important for the next exploration to predict large-scale reservoirs in this area. Based on drilling, logging and high-precision three-dimensional seismic datum, the sediment source direction and submarine fan distribution of Baonan fault terrace zone in deep water area of southeastern Qiongdongnan Basin are studied by means of well-seismic fine calibration, skeleton sand body carving and high-precision three-dimensional geomorphological superposition. The results show that: (1) the main sediments of Baonan fault terrace zone came from the southern uplift; (2) two large submarine fans, Yongle C-1 and Yongle D-1, developed in the study area are of great significance for exploration, which are consisted of superimposed fans of different periods with faults communicating underlying source rocks.

**Key words:** submarine fan; sedimentary evolution; hydrocarbon accumulation; Cenozoic; deep-water area; Qiongdongnan Basin

ZHANG Yi, First author: PhD in progress at Geophysics Institute of Yangtze University, Geological Engineer. Add: Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China

MAO Ningbo, Corresponding author: Professor in Geophysics Institute of Yangtze University, Doctoral Supervisor. Add: Geophysics Institute of Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China