

康丽芳, 左倩媚, 王振国, 等. 琼东南盆地新近系莺二段物源体系及其控制下的深水重力流沉积[J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 62–75, doi:10.12284/hyxb2021045

Kang Lifang, Zuo Qianmei, Wang Zhenguo, et al. Provenance systems and their control on the deep-water gravity flow deposition of the Member 2 of Neogene Yinggehai Formation, Qiongdongnan Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 62–75, doi:10.12284/hyxb2021045

琼东南盆地新近系莺二段物源体系及其控制下的深水重力流沉积

康丽芳¹, 左倩媚², 王振国¹, 何小胡², 宋爱学²

(1. 中海油中联煤层气有限责任公司, 山西 太原 030000; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要: 近年来在琼东南盆地超深水区莺歌海组发现了多个深水气藏, 展现了广阔的勘探前景。但随着油气勘探进一步推进, 关于莺二段的储层物性问题日益凸显, 严重制约了下一步的勘探进程。本文研究基于前人总结的区域地质资料, 结合岩芯、测井和三维地震等资料, 建立了莺二段三级层序格架, 综合分析了层序格架内物源体系及其控制下的重力流沉积特征。研究表明, 重力流沉积体系主要发育在莺二段下、中层序, 具有南、北、轴向三大物源体系。不同物源体系控制了重力流储集体的空间展布和沉积特征: (1) 南物源控制的海底峡谷充填深海泥岩, 而北物源控制的海底峡谷充填的厚层浊积水道砂岩, 孔渗物性好, 是良好的储集层; (2) 轴向物源影响的溢岸漫滩沉积, 由于物性条件好, 可以作为良好的油气储层; (3) 南物源控制海底扇砂岩的厚度薄、粒度细、泥质含量较高, 而北物源和轴向物源供应的海底峡谷和海底扇朵体的砂体面积广、厚度大、粒度粗、物性好, 是深水区莺二段最重要的优质产气储层。

关键词: 琼东南盆地; 莺歌海组; 物源体系; 重力流沉积; 砂体展布; 沉积特征

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)03-0062-14

1 引言

近年来在琼东南盆地超深水领域莺歌海组陆续钻获了良好的油气显示^[1], 并获得了多个商业发现气田, 测试日产天然气超百万方, 具有纯烃含量高、无CO₂、储量丰度高、含气饱和度高的特征, 展现了广阔的勘探前景, 并逐渐成为琼东南盆地深水区油气勘探的热点层位。前人对莺歌海组沉积相和沉积特征方面也做了一系列研究, 如吕明^[2]对琼东南盆地整个沉积演化做了分析, 认为莺歌海组总体为典型的陆架、陆坡体系, 以浅海-半深海泥岩为主。吴时国和秦蕴珊^[3]、黄卫等^[4]和付超等^[5]对莺歌海组不同类型的滑塌体沉积特征进行介绍与对比, 分析琼东南盆地深水

区水道伴生重力流沉积演化过程, 主要依靠地震相特征, 识别了莺歌海组的不同重力流的沉积特征, 认为杂乱相为滑塌体, 充填相为水道, 楔状下超相为天然堤。一些研究分析了中央峡谷西段莺歌海组沉积演化, 并识别出 4 种主要的沉积类型: 水道复合体、水道-天然堤、浊积席状砂、块体流, 认为浊流沉积是峡谷内优良的储集体, 与上部块体流沉积可以形成良好的储盖组合, 具有较好的油气勘探潜力^[6-10]。随着深水油气勘探进一步推进, 关于莺二段的储层物性问题日益凸显, 多个构造揭示钻探储层规模小、厚度薄、粒度细、泥质含量高、物性条件差, 严重制约了下一步的勘探进程。

琼东南盆地深水区在莺歌海组沉积表现为多物

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-06-10。

基金项目: 国家重大科技专项(2016ZX05026-002); 中海石油有限公司综合科研项目(CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ03ZJ)。

作者简介: 康丽芳(1984—), 女, 山西省太原市人, 石油地质工程师, 主要从事琼东南盆地沉积相关研究工作。E-mail: kanglf@cnooc.com.cn

源、相变快、物性变化大等特征,需要提高沉积相研究的精度,明确主力物源供给方向及范围,从而准确预测有利储集砂体的分布范围。为此,本文研究基于前人的研究成果,结合区域地质资料,钻井、岩芯、测井和三维地震等资料,建立了莺歌海组的三级层序格架,综合分析层序格架内物源体系特征及其控制下的重力流沉积体系特征,并总结了莺歌海组的沉积演化和相模式,为指出下一步有利的勘探区提供了理论依据。

2 区域地质背景

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘,整体呈NE向展布,是在中生代基底之上发育的一个大型新生代裂谷型大陆边缘盆地,可划分为北部拗陷带、中部隆起带、中央拗陷带和南部隆起带4个一级构造单元。深水区(水深介于300~1800 m)覆盖了琼东南盆地中央拗陷带和南部隆起带,辖乐东-陵水凹陷、松南-宝岛凹陷、北礁凹陷、长昌凹陷、陵南低凸起、松南低凸起和永乐隆起等“四凹两凸一隆”共7个二级构造单元,面积约 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[11-13]。本次研究工区主要位于琼东南盆地深水西区,覆盖乐东-陵水凹陷、陵南低凸起以及松南低凸起,面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。作为一个新生代沉积盆地,琼东南盆地经历了断陷、断拗、拗陷、热沉降期等几个构造演化阶段,发育了断陷期始新统陆相湖盆沉积和早渐新统崖城组海陆过渡相的半封闭浅海沉积;断拗期晚渐新统陵水组;拗陷期早中新统三亚组陆表海沉积和中中新统梅山组、晚中新统黄流组、上新统莺歌海组、更新统乐东组到现今陆架陆坡海相深水沉积等四套沉积组合,厚度超过10 km^[14-16](表1)。琼东南盆地深水区主要的烃源岩形成于早渐新统崖城组沉积时期,目前钻井自下而上揭示了早第三系、崖城组、陵水组、三亚组、

黄流组和莺歌海组等6套主要的储层,莺歌海组二段的储层由于埋深浅,是深水区重要的含气层段。

3 莺二段层序地层

通过对研究区钻遇上新世莺歌海组的9口井(位置见图1)钻井、测井及古生物等分析资料,结合三维地震剖面,识别出3个三级层序界面(对应T30、T29、T28、T27等4个地震界面)(图2),可将莺二段自下而上划分为II2-ygh2c、II2-ygh2b和II2-ygh2a 3个三级层序。在此基础上,分析了6口新钻井的单井层序地层特征,并通过连井剖面结合地震剖面建立了层序地层格架(图3)。T30地震界面对应于黄流组和莺歌海组之间的区域不整合界面(时间为5.7 Ma BP),研究区表现为连续性中等-好、振幅中-强的地震反射特征,局部多见水道下切充填特征。从Y1井的钻井和岩心观察,水道砂岩岩性多为巨厚-厚层灰色细砂岩夹薄层粉砂岩和泥岩,局部含砾,表现为深水陆坡背景下的浊积水道充填沉积特征。T29、T28地震界面分别对应莺二段内部的两个三级层序界面(时间分别为3.8 Ma BP、3.2 Ma BP)。T29表现为中等-好的连续性、弱-中等的振幅强度,研究区南部T29界面上可见上超现象,反射较强,界面之下为弱振幅的杂乱反射。T29界面上也有较多的水道下切充填特征,但下切幅度相对于T30界面来说,明显减弱。Y2井钻遇了厚层灰色细砂岩,属于浊积水道砂充填沉积;L2、L1井钻遇了薄层粉砂岩,与Y2井差异明显。T28表现为中等-好连续性,中等强度振幅的特征,局部地震界面上可见前积体。T27为莺一段与莺二段的分界面(时间为2.5 Ma BP)对应的地震界面,表现为中等-强的连续性和振幅强度特征,研究区界面之上存在明显的滑塌现象。

4 物源分析

4.1 材料及方法

本文研究主要采用古地貌、地震剖面结合重矿物组合分析方法对研究区莺歌海组开展物源分析。在构建莺歌海组层序地层格架的基础上,利用沉降回剥分析技术,经压实、沉积物重力均衡沉降等校正后,从而恢复莺歌海组发育初期古地貌(图4)。宏观古地貌分析来区分物源区和沉积区,可以直观清晰地识别出古隆起(物源区)、沟谷和水道(运输通道)、沉降中心。从地震剖面中可以识别前积体的下超方向以及下切谷、水道(海底扇)走向和充填方向,并可对重矿物组合特征等分析起到相互印证的作用,也为沉积

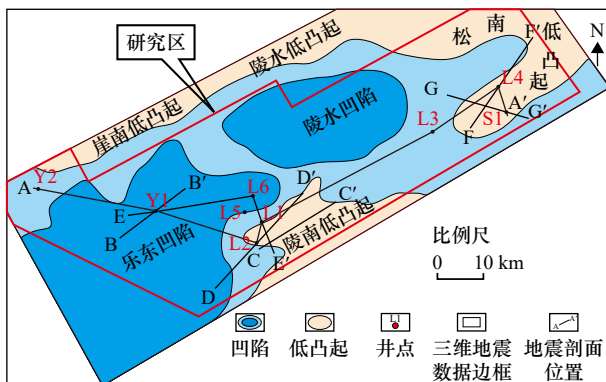


图1 研究区构造区划分

Fig. 1 The structural of study area

表 1 琼东南盆地地层划分

Table 1 Stratigraphic division of the Qiongdongnan Basin

| 地层系统 | | | | 地震界面 | 界面年龄 | 三级层序 | 海平面变化曲线 200 — -100 |
|------|---------|------|-----|-------|-----------|-----------|-----------------------|
| 系 | 统 | 组 | 段 | | | | |
| 第四系 | 全新统至更新统 | 乐东组 | 一段 | T20 | 1.8 | II2-ygh1 | |
| | | | ~三段 | | | | |
| 新近系 | 上新统 | 莺歌海组 | 一段 | T27 | 2.5 | II2-ygh2a | |
| | | | 二段 | T28 | 3.2 | II2-ygh2b | |
| | | | 二段 | T29 | 3.8 | II2-ygh2c | |
| | | | 一段 | T30 | 5.7 | II2-hl1 | |
| | | | 一段 | T31 | 6.98 | II2-hl1 | |
| | 上中新统 | 黄流组 | 二段 | T36 | 10.5 | II2-hl2a | |
| | | | 二段 | T40 | 11.6 | II2-hl2b | |
| | | | 一段 | T41 | 13.65 | III1-ms1 | |
| | | | 二段 | T41 | 13.65 | III1-ms2 | |
| | | | 一段 | T50 | 15.97 | III1-sy1a | |
| 中中新统 | 梅山组 | 一段 | T51 | 16.7 | III1-sy1b | | |
| | | 一段 | T52 | 18.3 | III1-sy2 | | |
| | | 二段 | T52 | 18.3 | III1-sy2 | | |
| | | 一段 | T60 | 23.03 | I3-ls1 | | |
| 古近系 | 上渐新统 | 陵水组 | 一段 | T61 | 25.3 | I3-ls2 | |
| | | | 二段 | T62 | 27.4 | I3-ls3 | |
| | | | 三段 | T70 | 28.4 | I2-yc1 | |
| | 下渐新统 | 崖城组 | 一段 | T71 | 29.9 | I2-yc2 | |
| | | | 二段 | T72 | 31.5 | I2-yc3 | |
| | | | 三段 | T72 | 31.5 | I2-yc3 | |
| | 始新统 | | | T80 | 33.9 | | |
| | 前古近系 | | | | T100 | 65.0 | |

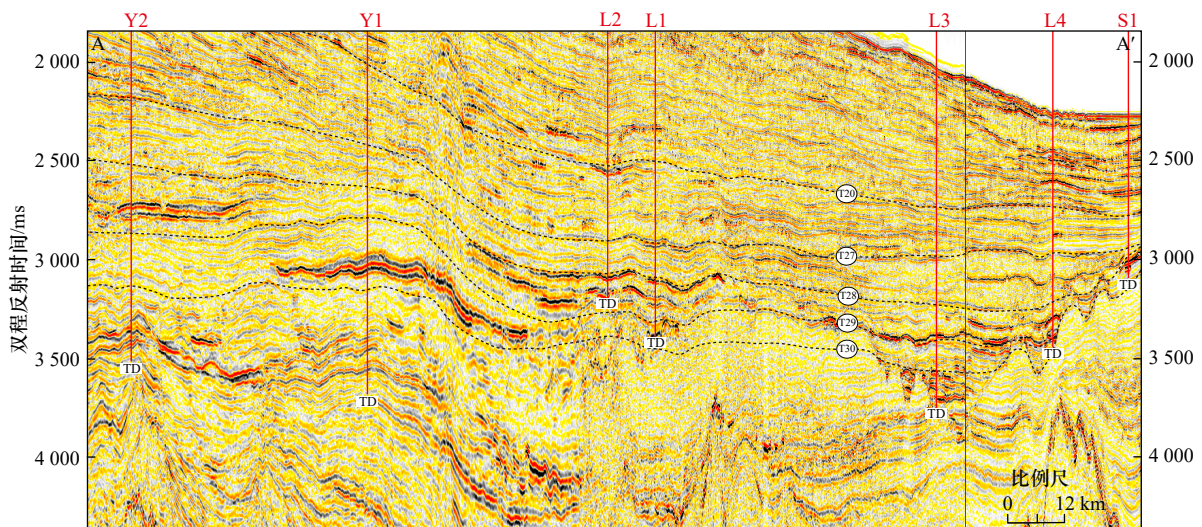


图 2 莺二段层序地层格架(地震测线位置见图 1)

Fig. 2 The sequence stratigraphic framework of the Member 2 of Yinggehai Formation (see Fig.1 for the location of seismic survey line)

相解释提供了环境信息^[9]。

重矿物组合分析是应用重矿物进行物源分析的

常见方法。不同类型的母岩其矿物组分不同,经风化破坏后会产生不同的重矿物组合。在同一沉积盆地

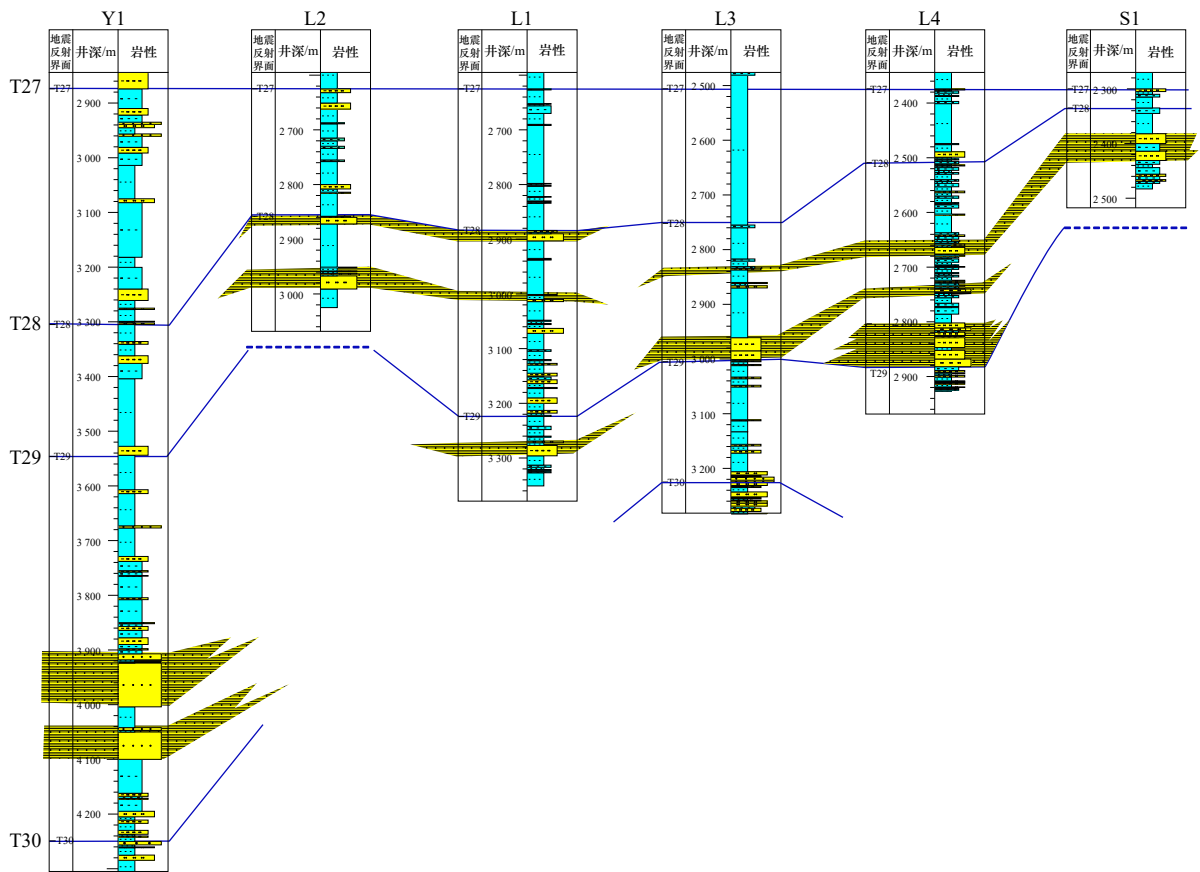


图3 莺二段地层连井对比

Fig. 3 Stratigraphic comparison of well profiles of the Member 2 of Yinggehai Formation

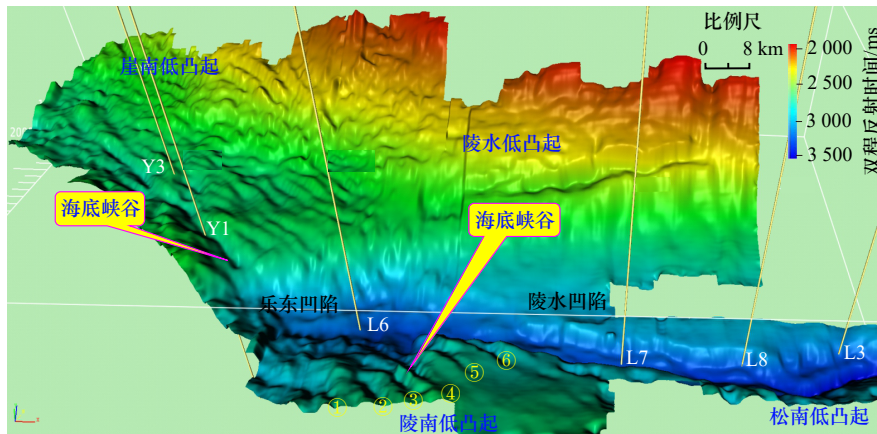


图4 莺歌海组沉积时期古地貌特征

Fig. 4 Palaeogeomorphological characteristics of the Yinggehai Formation

中,同时期的沉积物的碎屑组分一致,而不同时期的沉积物所含的碎屑物质不同,据此,利用不同时期水平方向上重矿物种类和含量变化,可指示物质来源的方向,分析不同物源区的地质特征。由于重力流砂体主要发育在莺二段下、中层序,因此本文研究主要统计了研究区6口钻井莺二段下、中层序的砂岩重矿物样品分析数据,总共200余个样品。通过重矿物代表值法,即用某井位同一层位的全部样品分析结果中的

各重矿物百分含量的算术平均值,来代表该时期井位的重矿物组合类型和百分含量。为了保证统计的准确性,绝大多数代表值的求取都使用了至少3个以上的样品数,能够较可靠地反映重矿物总体特征。

4.2 古地貌和地震剖面特征

盆地古地貌特征控制了物源供给的形式,进而会影响到盆地中深水储集体的平面和纵向展布特征^[17-18]。从图4中可以看出,研究区总体表现为“两高

一槽”古地貌格局,对应北(海南隆起)、南(永乐隆起)、轴向(红河和越南昆嵩隆起东部)三大物源体系。研究区的沉降中心位于乐东-陵水凹陷中央位置,对应黄流组中央峡谷的发育区。研究区北部为典型的陆架陆坡地貌特征,但不同的地貌特征也控制了海底峡谷、浊积水道的发育以及海底扇的空间展布特征。西北部陆架宽缓,陆坡斜度低,发育的峡谷水道缓而长,峡谷内以浊积水道砂岩充填为主;东北部陆坡较陡,延伸至陆架区的峡谷不太发育,主要以滑塌为主。研究区的南部主要为深海斜坡的地貌特征,在斜坡向凹陷中央的转折点,坡度突然急剧变陡,发育一系列陡而短的峡谷,峡谷内主要充填海相泥岩。海底扇等沉积体系主要发育在两个凹陷的中央位置。

从地震剖面上看,南、北物源海底扇砂体的接触关系和地层样式存在明显的区别。南物源海底扇砂体先沉积在乐东凹陷中央,地震同相轴短而粗。北物源海底扇砂体上超在南物源海底扇砂体之上,且砂体特征与地震振幅强弱有很好的相关性,随着海底扇体系向盆地中央延伸,振幅逐渐减弱,砂体的厚度和岩性也逐渐减薄、变细(扇端)。

4.3 重矿物组合特征

莺歌海组的重矿物总体可识别出 39 种,其含量变化较大。一般来看,颗粒百分含量大于 10%(平均值)的矿物有:锆石、磁铁矿、赤褐铁矿、白钛矿和黄铁矿;颗粒百分含量(平均值)在 5%~10%之间的矿物有电气石、重晶石或局部富集的帘石类;石榴石、金红石和锐钛矿普遍出现在各时期井位中,但是含量一般较低;含量极少或只在个别时期的井位出现的矿物有:十字石、楣石、板钛矿、辉石、红柱石、磷灰石和独居石等(表 2)。

据区域调查认识来看,海南隆起物源区主要以出露海西-印支期和燕山晚期花岗岩和基性-超基性火

山岩为特征,重矿物组合呈现为高含量的锆石、电气石、白钛矿及黄铁矿的组合特征,轴向(红河和越东)物源受高级变质岩的影响大,以磁铁矿+石榴石+锆石+电气石含量偏高为特征。关于南部物源的重矿物特征,受资料限制等因素,目前很少有资料涉及,根据区域地震地质资料及西沙岛礁少量钻井揭示,基底主要为晚白垩世的角闪斜长片麻岩和黑云母二长花岗岩。

从莺二段下和莺二段中层序统计的重矿物组合特征来看,乐东凹陷北坡以磁铁矿+白钛矿+锆石+电气石含量偏高为特征,受低级变质岩、中基性岩浆岩影响大,推测主要受到海南隆起物源的影响;陵南低凸起区以石榴石+白钛矿+锆石+赤褐铁矿,局部辉石含量偏高为特征,受中高级变质岩、中基性岩浆岩影响大,推测受南部隆起基底物源的影响较大,还可能与南部隆起局部由火山活动形成的海山影响有关。而莺二段中层序凹陷中央的钻井揭示砂岩重矿物组合以磁铁矿+白钛矿+赤褐铁矿+锆石组合为主,与红河、越东物源的重矿物特征更相似,同时又具有受南、北、轴向 3 个方向物源混源的影响(图 5,图 6)。

5 物源体系控制下的重力流沉积特征

5.1 莺二段重力流沉积体系的空间展布特征

莺歌海组二段下层序(NII2-ygh2c)沉积时期,菲律宾海板块由向西俯冲转为北西西向俯冲,受此影响,研究区总体进入加速热沉降阶段,南、北物源加强,大量碎屑沉积物经海底峡谷首先注入到琼东南盆地西部乐东凹陷,发育大规模的重力流沉积体系。南北陆坡区均发育海底峡谷,陵南低凸起区在海底斜坡底部发育多条陡而短的海底峡谷,来自南部物源的碎屑物质在峡谷口下方迅速堆积形成海底扇群,峡谷后期则被深海泥岩充填。乐东凹陷北坡也发育一条缓

表 2 乐东-陵水凹陷钻井莺二段重矿物统计 (%)

Table 2 Heavy mineral statistics of the Yinggehai Formation from wells of the Qiongdongnan Basins (%)

| 井名 | 层段 | 锆石 | 电气石 | 石榴石 | 绿帘石 | 磁铁矿 | 赤褐铁矿 | 白钛矿 | 绿泥石 | 角闪石 | 楣石 | 金红石 | 十字石 | 锐钛矿 | 板钛矿 | 辉石 | 独居石 |
|----|-----------|------|-----|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| Y1 | 莺二段下 | 13.2 | 6.1 | 22.3 | - | 1.6 | 3.2 | 44.3 | 0.9 | - | - | 2.3 | - | 2.7 | - | - | 0.2 |
| L1 | (T29-T30) | 3.5 | 1.5 | 3.4 | 0.2 | - | 86.9 | 4.1 | - | 0.1 | - | 0.1 | - | 0.2 | - | - | - |
| L3 | 莺二段中 | 7.9 | 6.1 | 2.9 | 2.0 | 5.5 | 57.4 | 16.6 | - | 0.3 | 0.3 | - | 0.6 | - | - | 0.1 | 0.3 |
| L4 | (T28-T29) | 2.9 | 1.9 | 2.0 | 1.2 | - | 52.6 | 38.8 | 0.1 | - | - | 0.1 | 0.5 | - | - | - | - |
| Y1 | | 11.2 | 5.2 | 0.3 | - | 8.2 | 17.6 | 36.2 | - | - | - | 2.7 | - | 3.6 | 0.3 | - | 0.3 |
| L2 | | 9.1 | 3.8 | 1.8 | - | 22.0 | 22.3 | 38.5 | - | - | - | 0.3 | 0.1 | 1.3 | - | - | 0.6 |
| S1 | | 0.9 | - | - | - | 4.5 | 77.5 | 3.6 | 0.9 | - | - | 0.0 | - | 0.0 | - | 12.6 | - |

注: -代表实验过程中未检测到相关数据。

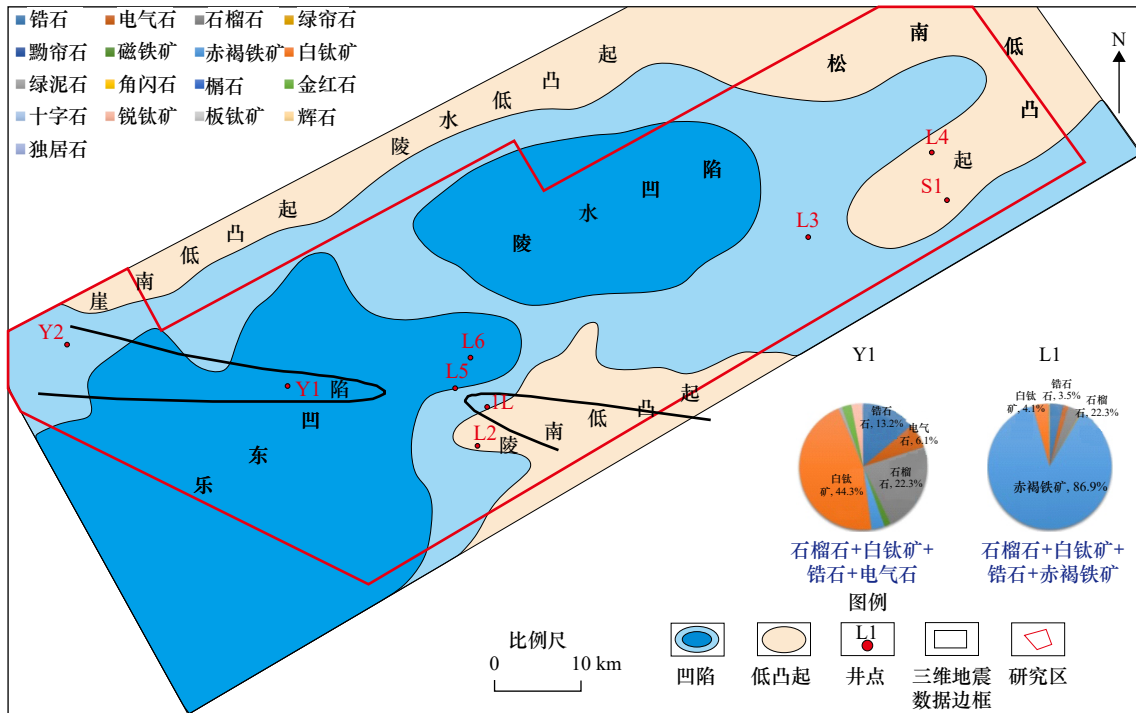


图5 莺二段下层序(II2-ygh2c)砂岩重矿物组合特征

Fig. 5 Heavy mineral assemblages of II2-ygh2c

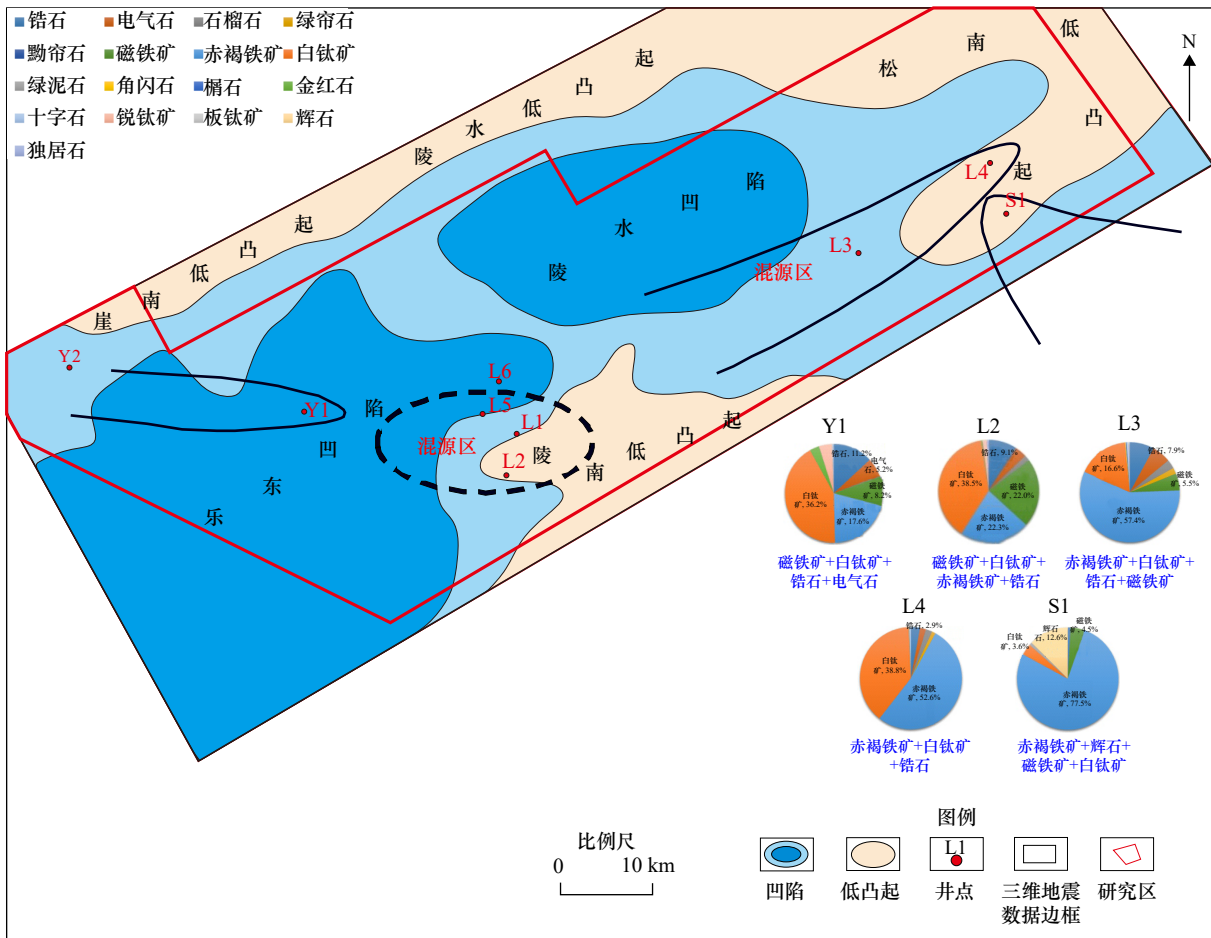


图6 莺二段中层序(II2-ygh2b)砂岩重矿物组合特征

Fig. 6 Heavy mineral assemblages of II2-ygh2b

而长的海底峡谷,来自北物源(海南隆起)的碎屑物质源源不断地通过峡谷堆积到乐东凹陷中央,形成乐东

凹陷北坡海底扇,同时由于物源充沛,海底峡谷后期也被粗碎屑充填(图 7a,图 8)。

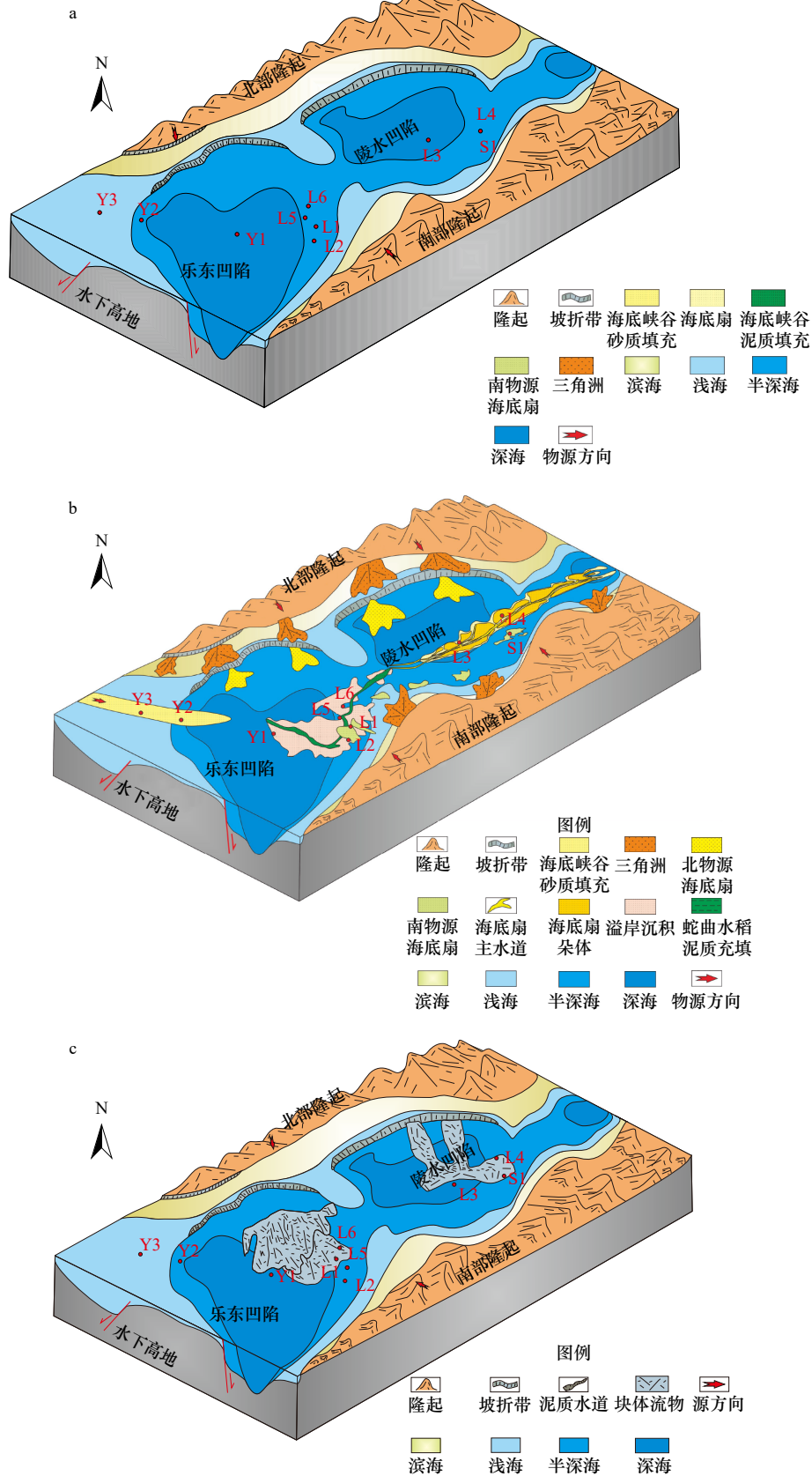


图 7 莺二段重力流沉积体系空间展布特征

Fig. 7 Spatial distribution characteristics of gravity flow sedimentary system of the Member 2 of Yinggehai Formation

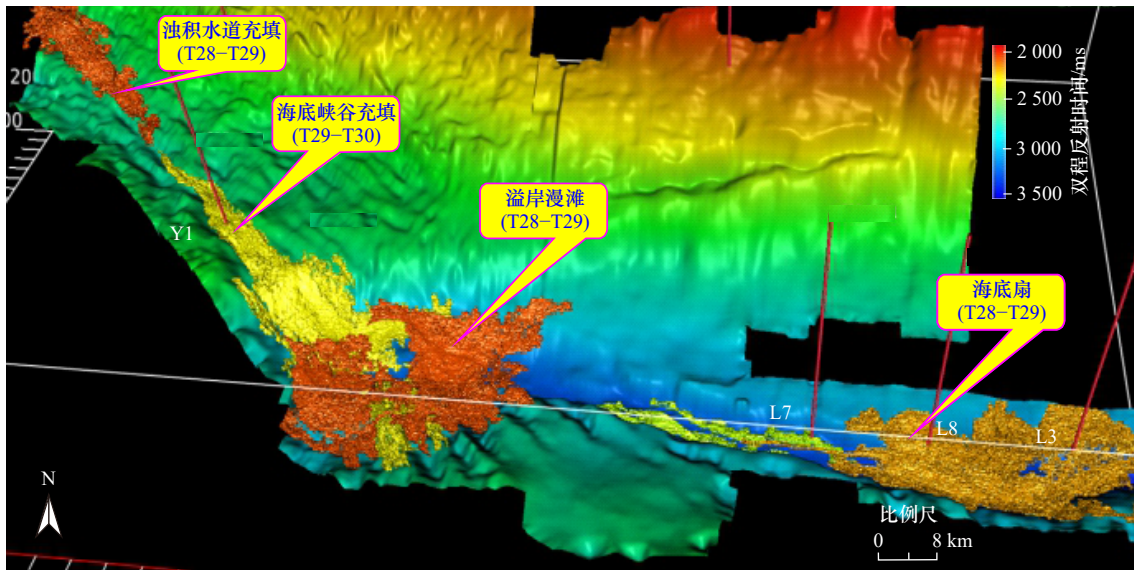


图8 莺歌海组砂体镂空显示叠加古地貌

Fig. 8 Superposition of paleogeomorphological and hallowed out sandbodies of the Yinggehai Formation

莺歌海组二段中层序(NII2-ygh2b)沉积时期,尽管水深进一步加大,但来自轴向、南、北隆起物源供给能力进一步加强,乐东凹陷、陵水凹陷都处于“多源汇聚”有利地区,重力流沉积体系规模相较莺歌海组二段下层序(NII2-ygh2c)明显增大,砂体展布范围广。由于前期乐东凹陷峡谷基本被充填满,南北海底峡谷带来的沉积物顺着盆地中央的低洼地形,搬运至更远的陵水凹陷堆积起来。乐东凹陷主要表现为水道-溢岸漫滩沉积,而最终沉积在陵水凹陷的海底扇由于混合更多南、北、轴向物源的影响,海底扇的面积超1200 km²,扇体中间厚两边薄,最厚达120 m。扇体南北两侧均受到早期中央峡谷内壁的限制,在平面上表现为拉长的朵体形态,其边缘形态同早期中央峡谷内壁相吻合。同时,该沉积时期,南部隆起物源也持续供砂。在研究区南部陵南低凸起和松南低凸起区发育“点源供应”的小型海底扇(群)(图7b,图8)。

莺歌海组二段上层序(NII2-ygh2a),水深进一步增加,各方向物源供给减弱,研究区无稳定浊流供给。由于构造运动的影响,北部陆坡区的泥质沉积物发生滑塌,使得研究区的海底扇受到了两期块体流改造(图7c),第一期块体流对海底扇顶界面侵蚀作用明显,使其顶界面表现为明显的不整合界面;第二期块体规模较大,能量较强,在扇体中部形成明显的叠瓦状逆冲断层,这种逆冲断层使得部分扇体沉积物发生明显的高角度倾斜。这两期块体流造成了部分扇体沉积物的侵蚀,但是块体流混杂的岩性、极差的侧向连续性和垂向连续性使其能够形成良好的盖层条

件,有效的保存了海底扇中储集的油气。

5.2 物源体系控制下的重力流沉积特征

莺二段下、中层序的重力流沉积体系可进一步划分为海底峡谷浊积充填沉积、水道-溢岸漫滩沉积、海底扇等沉积单元,通过对深水钻井的岩芯观察、测井、地震相分析,可以发现不同物源体系不同沉积单元砂岩的沉积特征差别较大。

海底峡谷充填主要发育在莺二段下层序,是沉积物从陆地和陆架搬运到深海的主要通道,表现出强烈的“V”形或“U”形的侵蚀特征,后期可被砂岩或者泥质充填。不同物源不同位置的海底峡谷水道,其侵蚀特征和沉积充填方式呈现出明显的差异。陵南低凸起区海底峡谷主要发育在海底斜坡的下端,下切深度大,表现为明显的“V”形或“U”形下切特征,后期主要充填弱振幅、杂乱反射的陆坡滑塌泥岩。北物源海底峡谷水道也表现为明显的“V”形或“U”形下切特征,峡谷后期充填的浊积水道砂岩表现为强振幅、低频、连续反射特征。研究区有多口钻井(Y1井)钻遇海底峡谷充填的厚层砂岩,厚度超百米,以厚层块状深灰色、灰色中砂岩、细砂岩为主,局部可见深灰色泥质粉砂岩、泥岩夹层。发育块状层里,底部可见冲刷面。粒度概率图上表现为明显的三段式,C-M图反映为典型的重力流特征(图9)。测井曲线自然伽玛为微齿化箱形或钟形,孔隙度达到7.8%~18.2%,渗透率为 $20 \times 10^{-3} \sim 465 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,物性较好。

溢岸漫滩沉积主要发育在乐东凹陷莺二段中层序,主要受到轴向物源的影响。溢岸漫滩沉积是伴随

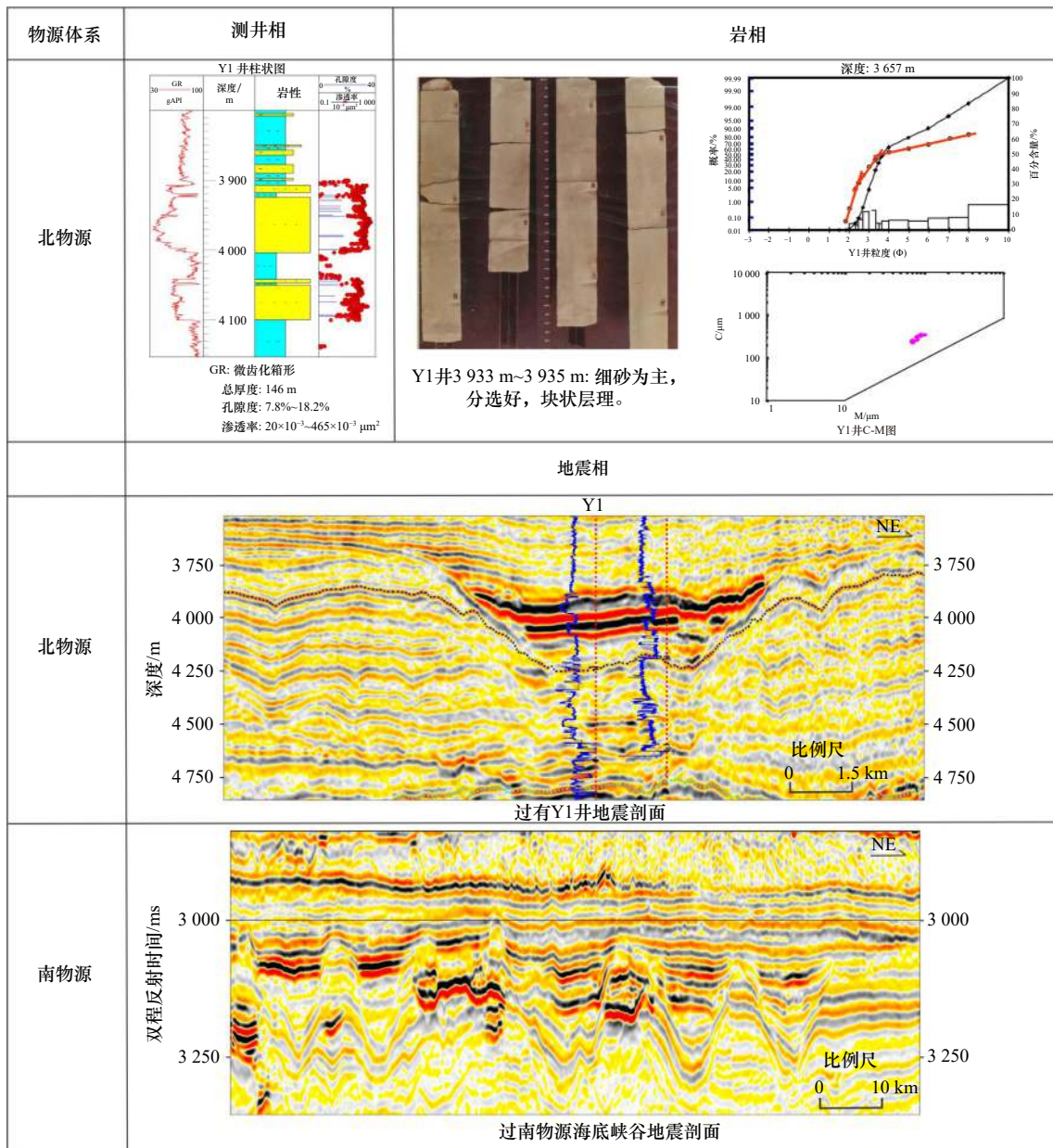


图 9 莺二段下层序 (II2-ygh2c) 海底峡谷沉积充填特征 (地震测线位置见图 1)

Fig. 9 Sedimentary characteristics of submarine canyon of II2-ygh2c (see Fig.1 for the location of seismic survey line)

着水道的发展而相伴相生的。该区的水道早期是陵水凹陷大型海底扇的输砂通道, 平面上表现为明显的蛇曲特征, 曲率大, 在地震剖面上表现为宽缓的“U”形特征, 后期被泥质沉积所充填, 水道内部为弱振幅、较杂乱的反射特征(图 10)。溢岸漫滩沉积位于水道两侧, 特别是在水道弯道外侧, 具有较强振幅, 极好连续性的反射特征。它们是浊流沉积物中细粒组成部分, 往往以粉砂岩为主。溢岸沉积往往不是单次沉积事件, 而是多期次溢岸沉积相互叠加, 因此具有一定的沉积厚度, 同样可以作为良好的油气储层。L2 井揭示岩性以粉砂岩为主, 共钻获两套砂体(分别

厚 14 m、24 m), 伽玛曲线呈齿化钟型及齿化箱型, 电阻率曲线表现为高幅度漏斗型、箱型及低幅度弱齿化特征, 平均孔隙度为 35%, 平均渗透率超过 $1 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含水饱和度为 93.2%, 为中高孔储层。

海底扇是莺二段深水重力流沉积体系的最重要的沉积单元, 在莺二段下、中层序均有发育。不同物源体系的海底扇, 即使在同一区域同一层系, 其沉积特征也存在较大区别。莺二段下层序的海底扇主要发育在乐东凹陷, 地震剖面上可以看到来自南北物源的海底扇在乐东凹陷中央汇聚。南物源的海底扇砂体表现为低频、中-强振幅、同相轴连续特征, 但经

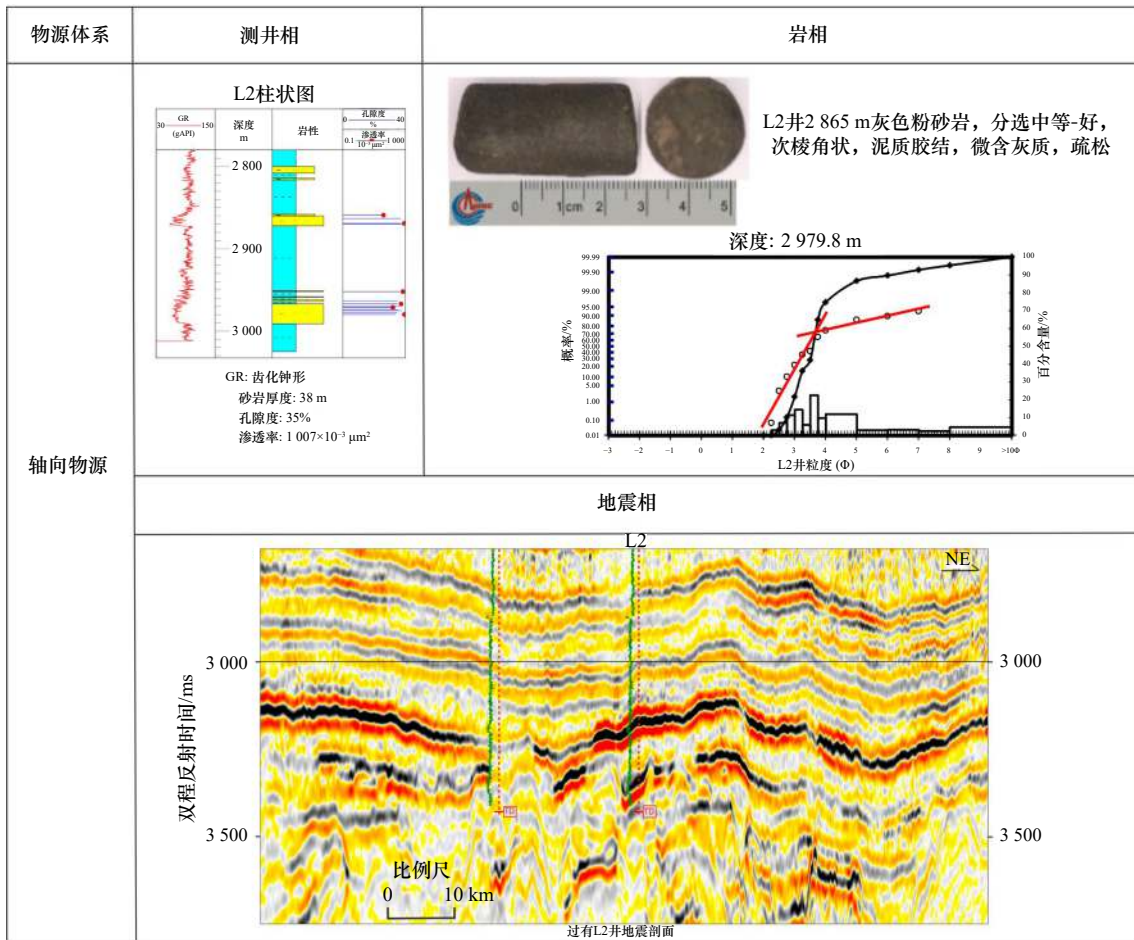


图 10 莺二段中层序(II2-ygh2b)溢岸漫滩沉积特征(地震测线位置见图 1)

Fig. 10 Sedimentary characteristics of flood plain of II2-ygh2b (see Fig.1 for the location of seismic survey line)

过 L1 井钻探证实, 砂体总厚度为 22 m, 单层厚度 19 m, 岩性以泥质粉砂岩为主, 泥质含量为 14%~38%, 平均孔隙度为 11%, 平均渗透率仅为 $0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。北物源的海底扇与 Y1 井钻探的浊积水道砂体的地震反射轴有很好的连续性, 随着海底扇体系向盆地中央延伸, 扇端振幅逐渐减弱, 砂体的厚度和岩性也逐渐减薄、变细。L6 井钻遇了该套海底扇扇端砂体, 总厚度约 45 m, 最大单层厚度约 20 m, 岩性为粉砂岩和细砂岩, 泥质含量为 7%~12.8%, 孔隙度为 21%~25%, 渗透率超过 $49 \times 10^{-3} \sim 62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 11)。

莺二段中层序的大型海底扇主要发育在陵水凹陷, 由于它同时受到南、北、轴向物源区的影响, 规模庞大。可进一步分为主水道、分支水道和朵体等沉积微相。其主水道位于海底扇的头部, 在均方根振幅属性上, 表现为明显的强振幅特征, 水道宽度逐渐增大, 并平滑连接到扇朵体上。内部为明显上凸强振幅充填特征, 是典型的富砂质水道充填特征(图 12a)。随着主水道向前延伸, 逐渐分支演变为宽缓的“U”形

结构, 下蚀作用逐渐减弱。海底扇朵体沉积则位于分支水道尽头, 是最终浊流沉积的产物, 其在均方根振幅属性上表现为明显的强振幅特征。顺沉积方向上表现为平行的强振幅、连续反射特征。多口深水钻井也揭示了这套海底扇的沉积特征。以 L4 井为例, 该井钻遇了海底扇的分支水道砂体, 岩性为厚层粉砂岩夹泥质粉砂岩, 总厚度为 77 m, 平均孔隙度为 38%, 平均渗透率为 $1.203 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为特高孔-特高渗储层, 平均含气饱和度为 83.1%, 为优质气层。尽管这套海底扇岩性较细, 但由于它处在中央凹槽区, 受到了深水底流改造的影响, 提高了重力流砂体的砂地比, 改善了储集砂体物性。

在 L4 井南侧, 位于松南低凸起的 S1 井揭示了来自南部隆起物源小型海底扇砂岩的沉积特征(图 12b)。钻井共钻获 2 套砂岩, 厚度分别为 18 m 和 17 m, 平均测井孔隙度为 23%, 两套砂岩但由于其泥质含量较高, 且钙质胶结严重, 渗透率偏低, 从而导致其含气饱和度和低, 平均含气饱和度仅有 25%。钻后分析认为,

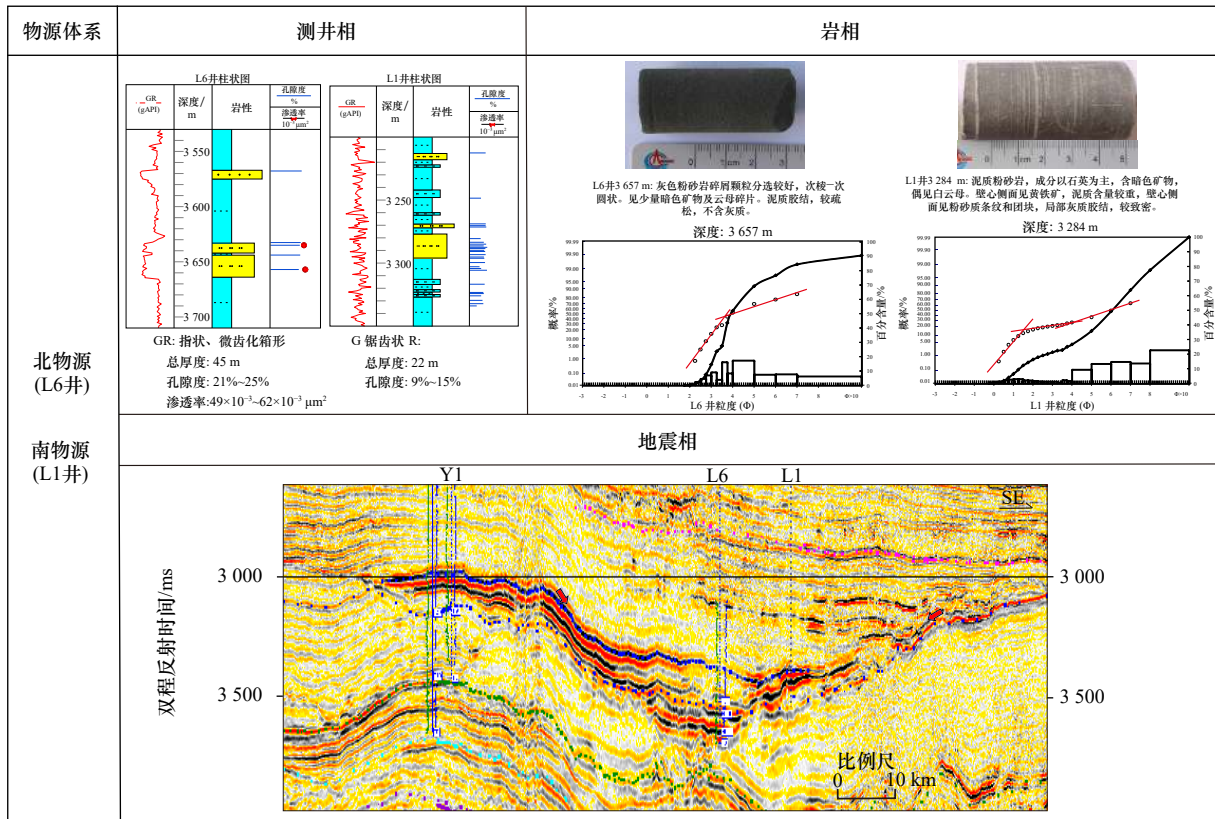
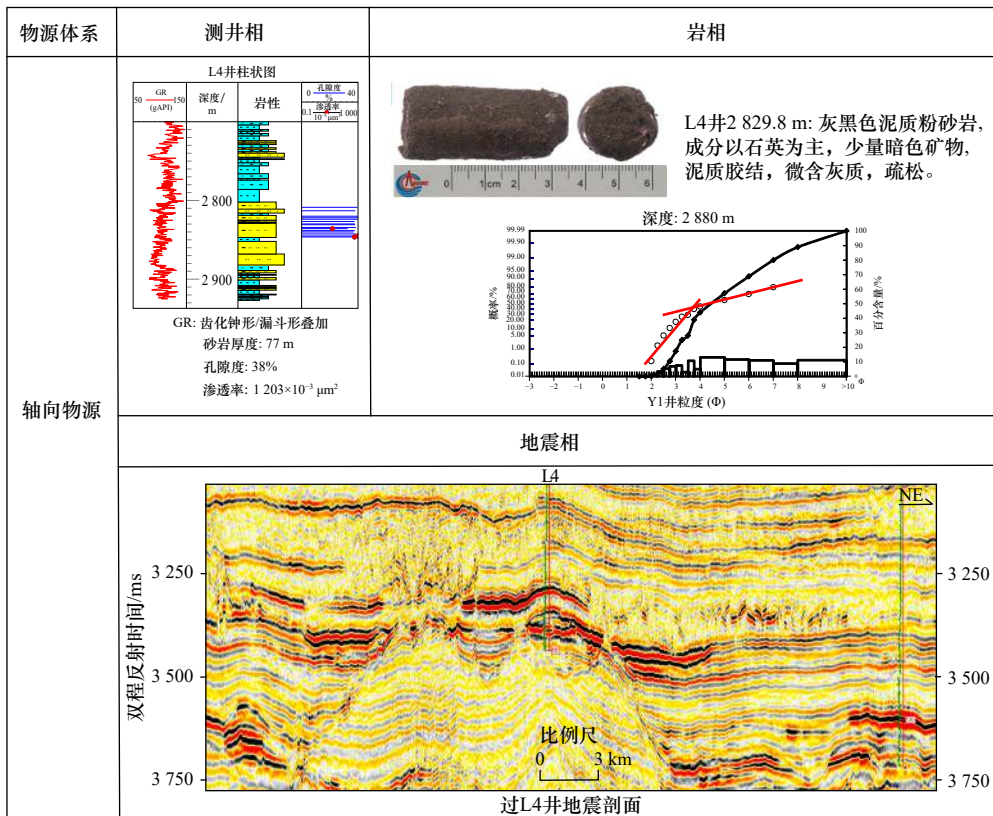


图 11 莺二段下层序 (I12-ygh2c)海底扇沉积特征(地震测线位置见图 1)

Fig. 11 Sedimentary characteristics of submarine fan of I12-ygh2c (see Fig. 1 for the location of seismic survey line)



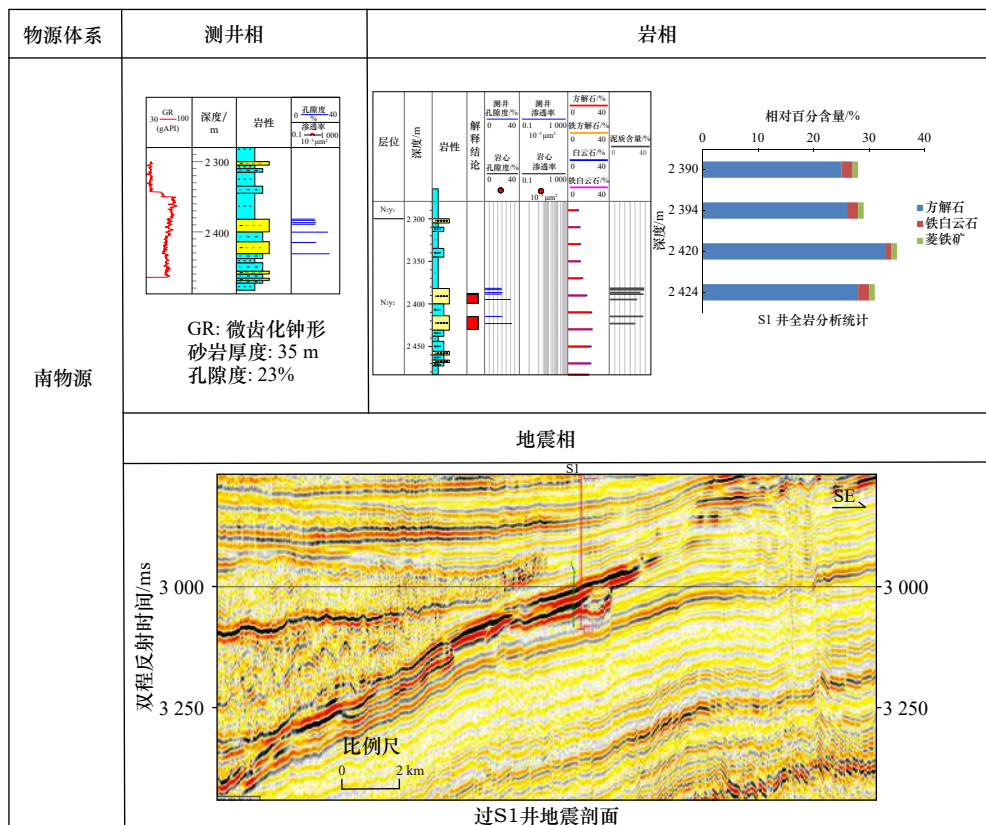


图 12 莺二段中层序 (II2-ygh2b) 海底扇沉积特征 (地震测线位置见图 1)

Fig. 12 Sedimentary characteristics of submarine fan of II2-ygh2b (see Fig.1 for the location of seismic survey line)

这是由于莺二段中沉积时期,南部隆起物源供给能力有限,碎屑物在经过较长距离搬运后,形成扇体规模较小,砂体单层厚度小,岩性偏细,泥质含量较高所致。

6 结论

(1)研究区莺歌海组的重力流沉积体系主要发育在莺二段下、中层序,具有北(海南隆起)、南(永乐隆起)、轴向(红河和越南昆崙隆起东部)三大物源体系。乐东凹陷北坡主要受北物源的影响,陵南低凸起、松南低凸起区受南部隆起基底物源和局部火山活动形成的海山的影响较大,乐东-陵水凹陷中央的重力流沉积具有受南、北、轴向3个方向物源混源的影响。

参考文献:

- [1] 王振峰,孙志鹏,朱继田,等.南海西部深水天然气地质与大气田重大发现[J].*天然气工业*,2015,35(10):11-20.
Wang Zhenfeng, Sun Zhipeng, Zhu Jitian, et al. Natural gas geological characteristics and great discovery of large gas fields in deep water area of the western South China Sea[J].*Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 11-20.
- [2] 吕明.琼东南盆地沉积相展布及演化[C]//第十届全国古地理学及沉积学学术会议论文集.成都:中国矿物岩石地球化学学会,中国地质学会,中国石油学会,2008.
Lü Ming. Distribution and evolution of sedimentary facies in Qiongdongnan Basin[C]//Abstracts of the 10th National Conference on Paleogeography and Sedimentology. Chengdu: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, Geological Society of China, Chinese Petroleum Society, 2008.

(2)不同的物源体系控制了重力流沉积的类型、空间展布。陵南低凸起海底斜坡区的多条峡谷受南部物源匮乏的影响,后期则被深海泥岩所充填,而受北物源控制的乐东凹陷北部海底峡谷充填的厚层浊积水道砂岩,孔渗物性好,是良好的储集层。乐东凹陷受轴向物源影响的溢岸漫滩沉积,由于物性条件好,也可以作为良好的油气储层。而不同物源体系的海底扇砂体,即使在同一区域同一层系,其沉积特征也存在较大区别。南物源控制海底扇砂岩的厚度薄、粒度细、泥质含量较高。而北物源和轴向物源供应的海底峡谷和海底扇朵体的砂体面积广、厚度大、粒度粗、物性好,是深水区莺二段最重要的优质产气储层。

- [3] 吴时国, 秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 922-930.
Wu Shiguo, Qin Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 922-930.
- [4] 黄卫, 解习农, 何云龙, 等. 琼东南盆地中央峡谷西段莺歌海组沉积演化及储层预测[J]. 沉积学报, 2013, 33(4): 809-816.
Huang Wei, Xie Xinong, He Yunlong, et al. Evolution and reservoir prediction of Yinggehai formation in western central canyon in Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 33(4): 809-816.
- [5] 付超, 于兴河, 金丽娜, 等. 琼东南盆地莺歌海组重力流沉积演化过程[J]. 沉积学报, 2017, 35(3): 552-560.
Fu Chao, Yu Xinghe, Jin Li'na, et al. Sedimentary evolution of gravity flow disposition of Yinggehai formation in Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 552-560.
- [6] 李冬, 王英民, 王永凤, 等. 琼东南盆地中央峡谷深水天然堤—溢岸沉积[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 689-684.
Li Dong, Wang Yingmin, Wang Yongfeng, et al. The sedimentary and foreground of prospect for levee-overbank in Central Canyon, Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 689-684.
- [7] 张道军, 王亚辉, 赵鹏肖, 等. 南海北部琼东南盆地陵水段峡谷沉积建造及勘探意义[J]. 海洋学报, 2015, 37(2): 25-35.
Zhang Daojun, Wang Yahui, Zhao Pengxiao, et al. Sedimentary Formation and exploration significance of the Lingshui Canyon system in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(2): 25-35.
- [8] 李伟, 左倩媚, 张道军, 等. 琼东南盆地深水区中央峡谷黄流组储层特征及主控因素[J]. 海洋学报, 2016, 38(11): 117-124.
Li Wei, Zuo Qianmei, Zhang Daojun, et al. Characteristics and controlling factors about the reservoir of Huangliu Formation in the central canyon of Qiongdongnan Basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(11): 117-124.
- [9] 左倩媚, 张道军, 何卫军, 等. 琼东南盆地深水区中央峡谷黄流组物源特征[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 15-23.
Zuo Qianmei, Zhang Daojun, He Weijun, et al. Provenance analysis of Huangliu Formation of the central canyon system in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(5): 15-23.
- [10] 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): 21-30.
Yao Zhe, Zhu Jitian, Zuo Qianmei, et al. Gravity flow sedimentary system and petroleum exploration prospect of deep water area in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 21-30.
- [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, 31.
Wang Zhenfeng, Li Xushen, Sun Zhipeng, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the deep-water region, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(1): 7-13, 31.
- [12] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水区油气成藏与勘探[J]. *科学通报*, 2012, 57(24): 3121-3129.
Zhu Weilin, Zhong Kai, Li Youchuan, 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] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇[J]. *科学通报*, 2011, 56(14): 1488-1494.
Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1488-1494.
- [14] 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.
Zuo Qianmei, Zhang Daojun, Wang Yahui, et al. Sedimentary characteristics and exploration potential of Neogene submarine fan in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(11): 105-116.
- [15] 能源, 吴景富, 漆家福, 等. 南海北部深水区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.
- [16] 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.
- [17] 何云龙, 解习农, 李俊良, 等. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(2): 118-122.
He Yunlong, Xie Xinong, Li Junliang, et al. Depositional characteristics and controlling factors of continental slope system in the Qiongdongnan Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(2): 118-122.
- [18] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 70-79.
Wang Hairong, Wang Yingmin, Qiu Yan, et al. Geomorphology and its control of deep-water slope of the margin of the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(2): 70-79.

Provenance systems and their control on the deep-water gravity flow deposition of the Member 2 of Neogene Yinggehai Formation, Qiongdongnan Basin

Kang Lifang¹, Zuo Qianmei², Wang Zhenguo¹, He Xiaohu², Song Aixue²

(1. China United Coalbed Methane Corporation of CNOOC Ltd., Taiyuan 030000, China; 2. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: In recent years, several deep-water gas fields of Yinggehai Formation have been discovered in ultra-deep water area of Qiongdongnan Basin, showing a broad exploration prospect. However, the reservoir physical property prediction of the Member 2 of Neogene Yinggehai Formation have become increasingly prominent which seriously restricts the further exploration of oil and gas. Based on the regional geological data summarized by predecessors, combined with core, logging and three-dimensional seismic data, the third-order sequence framework of the Member 2 of Neogene Yinggehai Formation is established, and the provenance systems in the sequence framework and the sedimentary characteristics of gravity flow under its control are comprehensively analyzed. The results show that gravity flow sedimentary system mainly developed in II 2-ygh2c and II 2-ygh2b, and include three major provenance systems which are the south, the north and the axis. Different rovenance systems control the spatial distribution and sedimentary characteristics of gravity flow reservoirs. (1)The submarine canyons controlled by the south provenance are mainly filled by abyssal mudstone, while the canyons controlled by the north provenance are mainly filled with thick turbidite channel sandstone with fine porosity and permeability, which is a good reservoir. (2) The flood plain deposit affected by axial provenance can also be a good oil and gas reservoir because of its good physical properties. (3) The submarine fans controlled by the south provenance is characterized by thin sandstone with fine grain size and high argillaceous content. While the submarine canyons and fans controlled by the north and the axis provenance formed large scale sandstone with big thickness, coarse grain size and good reservoir physical properties, which are the most important high-quality gas-producing reservoirs of deep water area.

Key words: Qiongdongnan Basin; Yinggehai Formation; provenance systems; gravity flow deposition; sandbody distribution; sedimentary characteristic