

莺歌海盆地东方区黄流组大型强振幅体 沉积内幕及其油气意义

廖计华¹, 吴克强¹, 郭刚¹, 甘华军², 孙鸣³, 蔡露露¹, 朱石磊¹, 刘子玉¹

[1. 中海油北京研究中心, 北京 100028; 2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074;

3. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760]

摘要:综合利用岩心、钻井、测井以及地震数据,系统查明了莺歌海盆地东方区黄流组一段大型强振幅体外部几何形态、内部沉积要素构成、发育期次、平面展布及演化规律,揭示了有利储集体特征与分布,探讨了其油气意义,并预测了东方区有利勘探方向。研究表明:大型强振幅体整体呈“扇形”,内部由浊积水道、水道间漫溢和天然堤3种沉积要素构成,为发育在浅海陆架背景下的大型“重力流沉积”。其垂向上可划分出3个期次,从第一期到第三期呈现出规模逐渐增大、向北西方向不断迁移、向南东方向逐步推进的演变趋势。浊积水道砂岩在东方区纵横广布、三期叠置,为该区主力储层类型。强超压环境对于改善东方区黄流组一段储集体物性具有重要促进作用。与大型强振幅沉积体相关的圈闭主要为砂岩上倾尖灭型岩性圈闭和砂岩透镜体型岩性圈闭,前者分布在底辟构造带的翼部(底辟活动区),后者主要位于底辟构造带外围(底辟活动波及区),勘探前景均十分广阔。

关键词:强振幅体;沉积内幕;岩性油气藏;莺歌海盆地;南海

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of the large-scale high-amplitude reflections and its significance in hydrocarbon exploration in the Huangliu Formation of Dongfang area of the Yinggehai Basin, South China Sea

Liao Jihua¹, Wu Keqiang², Guo Gang¹, Gan Huajun², Sun Ming³, Cai Lulu¹, Zhu Shilei¹, Liu Ziyu¹

[1. Research Institute of CNOOC, Beijing 100028, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou, Guangdong 510760, China]

Abstract: Based on substantial cores, drilling data, well logging, 2-D and 3-D seismic data, the geometry, facies associates, depositional phases, distribution and evolution of the large-scale high-amplitude seismic reflection package in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area were studied. In addition, characteristics of the favorable reservoirs was revealed and its significance in hydrocarbon exploration was discussed. Finally, the exploration strategy of Dongfang area was suggested. The results show that the large-scale high-amplitude reflection packages were gravity flow fan deposit. It consists of turbidite channel fill, overbank deposits and levee. Furthermore, it can be subdivided into three phases vertically. From the first phase to the third, the fan size increased gradually, while the fan migrated toward northwest step by step, with concurrent movement in the direction of southeast. Turbidite channel sand fill bodies are the most important reservoirs in Dongfang area proved by drilling, which were widely distributed and three-phases superimposed. The overpressure played an important role to improve reservoir properties in the 1st member of the Huangliu Formation in Dongfang area. There are mainly updip pinchout lithologic reservoirs in the flaps of diapiric domes, and lenticular sandstone lithologic reservoirs in western Dongfang area which is not associated with diapiric domes. Both of them are associated with the large-scale high-amplitude reflection and have very great exploration potential.

收稿日期:2017-04-08;修订日期:2017-11-16。

第一作者简介:廖计华(1984—),男,博士、工程师,应用沉积学、层序地层学。E-mail:liaojh2@cnooc.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472084);国家科技重大专项(2016ZX05026)。

Key words: high-amplitude seismic reflection, sedimentary characteristics, lithologic reservoir, Yinggehai Basin, South China Sea

随着大型整装构造油气藏发现的难度越来越大,以地层和岩性为主要控制因素的隐蔽油气藏探明储量所占比重逐渐增大,业已成为全球油气资源增储上产的极其重要领域^[1-3]。在隐蔽油气藏勘探中,对油气储集层的研究更显突出,尤其是对沉积储集体内幕结构的精细刻画已经成为隐蔽油气藏勘探研究的重点、难点和突破口^[4-6]。

“优质储层是否发育”是长期制约莺歌海盆地中深层高温高压领域(压力系数 >1.8)天然气勘探的瓶颈之一^[7]。近年来,DF14井在莺歌海盆地东方区黄流组一段钻遇了一套大型强振幅体,揭示了87m厚的优质细砂岩,获得了日产 $64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产优质天然气流(地层压力系数1.9,地层温度143)^[8],随后东方13-1和东方13-2两大高产优质商业性天然气藏被相继发现^[9]。大型强振幅体高效的成藏特性、巨大的勘探潜力以及对于莺歌海盆地中深层高温高压领域天然气勘探的领域性突破意义引起了学术界和勘探界的广泛关注。前人或从区域供源系统、构造作用和相对海平面变化等诸多因素入手,探讨了大型强振幅体的成因类型、沉积特征、主控因素及堆积机制^[10-12];或从含气储层地球物理识别技术攻关的角度,预测了优质含气储层的分布规律^[13],或从中深层高温高压气藏成藏机理与控藏要素的角度构建了大型强振幅体的油气成藏模式^[9],取得了诸多富有成效的研究成果。本文在前人研究的基础上,整体遵循地质与地球物理相结合的研究理念,综合利用大量岩心、钻井、测井、覆盖整个东方区的 $2\,400 \text{ km}^2$ 高分辨率3D地震数据以及大量区域2D测线,对大型强振幅体的外部形态、内部结构、垂向期次、空间展布与演化特征开展系统剖析,揭示了有利储集体特征,探讨了其油气意义,并预测了东方区有利勘探方向。本次研究旨在揭示优质储集体的分布与特征,促进莺歌海盆地中深层高温高压领域油气勘探实践,提高勘探成效。

1 区域地质概况

莺歌海盆地是南海北部大陆架西区发育的新生代转换-伸展型含油气盆地^[14],具有高温超高压特性^[15-16],其整体近似菱形,呈NNW-SSE向展布,面积约 $12.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。盆地内部可细分为河内坳陷、中央坳陷、临高凸起、莺东斜坡带和莺西斜坡带

共5个二级构造单元。东方区位于中央坳陷中北部,面积约 $2\,400 \text{ km}^2$,系塑性流引起的泥底辟构造发育区,区块北部和南部分别发育了D1和D2两大底辟构造。盆地构造演化经历了同裂陷期和裂后拗陷期两大阶段^[15]。古近系为同裂陷期充填,从下到上依次发育始新世岭头组、渐新世崖城组和陵水组;新近系为裂后期充填,从下到上依次为中新世三亚组、梅山组和黄流组,上新世莺歌海组以及第四纪乐东组,最大厚度超过 $10\,000 \text{ m}$ 。三亚组、梅山组和黄流组对应裂后热沉降幕,莺歌海组和乐东组对应裂后加速沉降幕,均发育三角洲-滨浅海-半深海-深海相沉积组合^[16]。

勘探上将莺歌海盆地上新统莺歌海组二段上部-第四系乐东组储盖组合划分为浅层,属于常压压力过渡带(压力系数 $1.0 \sim 1.5$),将中中新统梅山组-上新统黄流组储盖组合称为中深层,为异常高温高压区(压力系数 >1.8),其勘探风险高、难度大^[7]。古环境资料分析揭示,黄流组一段沉积期东方区整体处于地势相对平坦、构造稳定的浅海陆架环境^[17]。依据层序地层学划分方案和区域地层对比,黄流组一段为三级层序地层单元,处于裂后热沉降阶段晚期,顶底层序界面分别为 S_3^0 和 S_3^1 ,对应的地震反射界面为 T_3^0 和 T_3^1 ^[12,16]。在东方区黄流组一段层序全区分布,整体呈“南厚北薄”的展布特征,厚度为 $250 \sim 725 \text{ m}$,厚度中心主要位于D2底辟构造带的南部,最大厚度值达 725 m ,地层最薄区位于D1底辟构造带的北部,地层厚度约为 $250 \sim 425 \text{ m}$;而D1和D2底辟构造带之间的地层厚度为 $425 \sim 600 \text{ m}$ 。

2 大型强振幅体沉积内幕

2.1 外部几何形态

利用横跨东方区的区域二维长地震测线以及 $2\,400 \text{ km}^2$ 高分辨率三维地震数据开展地震相精细解释,明确了黄流组一段大型强振幅体整体呈扇形,“西窄东宽”,东西向展布,从东方区西侧一直延伸至东侧,覆盖了除东北隅的整个东方区,面积近 $2\,000 \text{ km}^2$ (图1)。其厚度整体呈现出“南厚北薄”的分布特征,变化区间为 $75 \sim 475 \text{ m}$,厚度中心位于D2底辟构造带西侧及其南部区域,厚度值为 $275 \sim 475 \text{ m}$,厚度最薄区位于D1底辟构造带西翼及其以北的区域,最小厚度值为 75 m 。

在 NE-SW 向地震剖面中(图 2),大型强振幅体表现为中高频强振幅丘形/透镜状杂乱反射,中间厚,两侧逐渐减薄并下超尖灭于浅海泥岩之中,与周缘地层的地震相截然。其内部显示出大量的水道下切形态,对下伏黄流组二段地层产生了强烈的冲刷侵蚀,导致黄流组一段底界面 T_3^1 凹凸起伏。在地震剖面上观察到 D2 构造以西 T_3^1 界面侵蚀下部地层最为剧烈,甚至可侵蚀至 T_4^0 界面,向东、北方向则逐渐减弱。

2.2 内部沉积结构要素

综合岩心、测井、录井以及地震反射结构特征,在东方区黄流组一段大型强振幅体内主要识别出了 3 种沉积结构要素:浊积水道、水道间漫溢沉积和天然堤。

1) 浊积水道

浊积水道主要由灰白色细砂岩、灰白色含泥屑细砂岩和灰色极细砂岩构成,以正粒序组合为特征(图 3)。

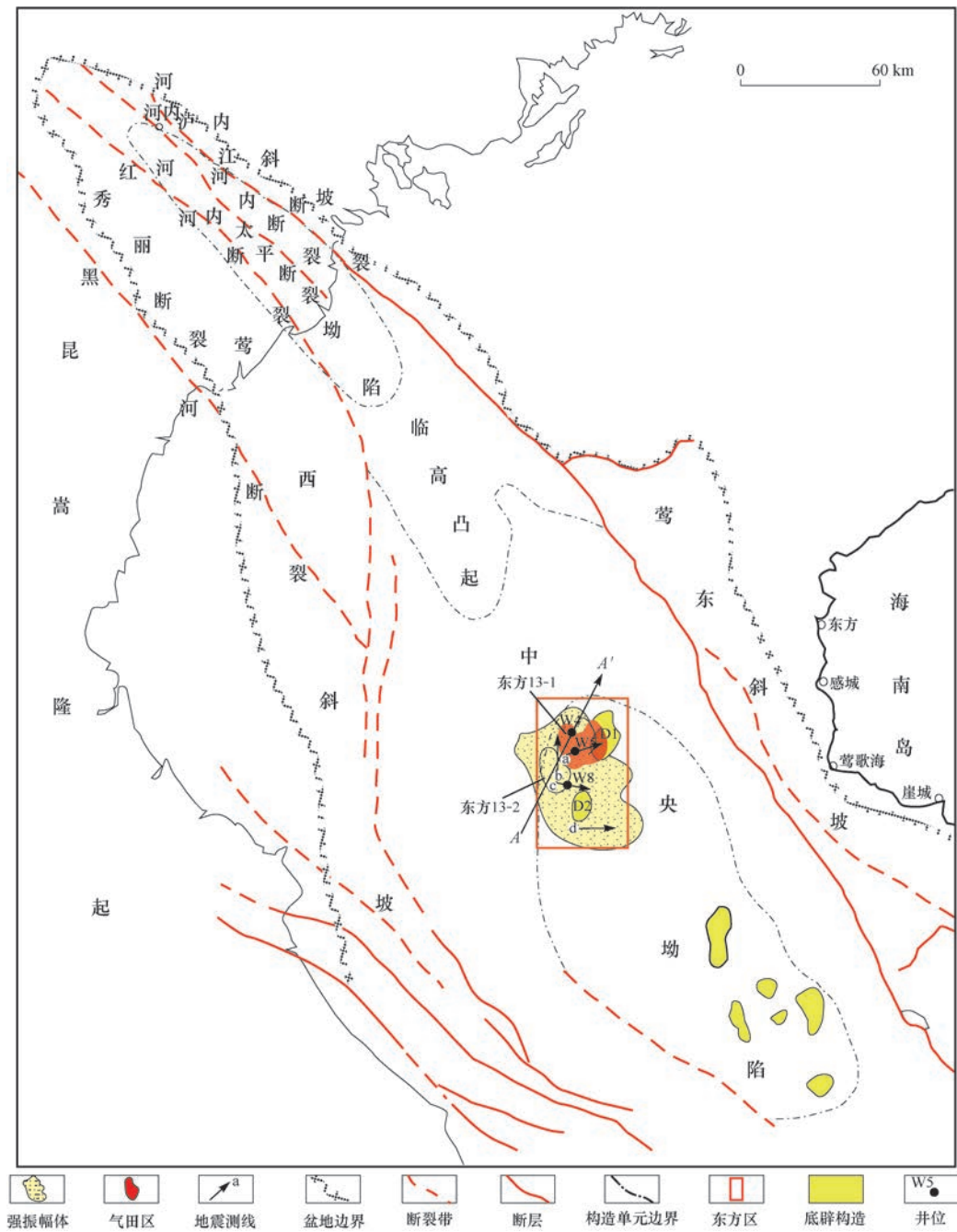


图 1 莺歌海盆地构造区划及东方区黄流组一段大型强振幅体的位置

Fig.1 Tectonic subdivision of the Yinggehai Basin and location of the high-amplitude reflections in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area

AA'为图 2 剖面的位置;a,b,c,d 为图 5 剖面的位置

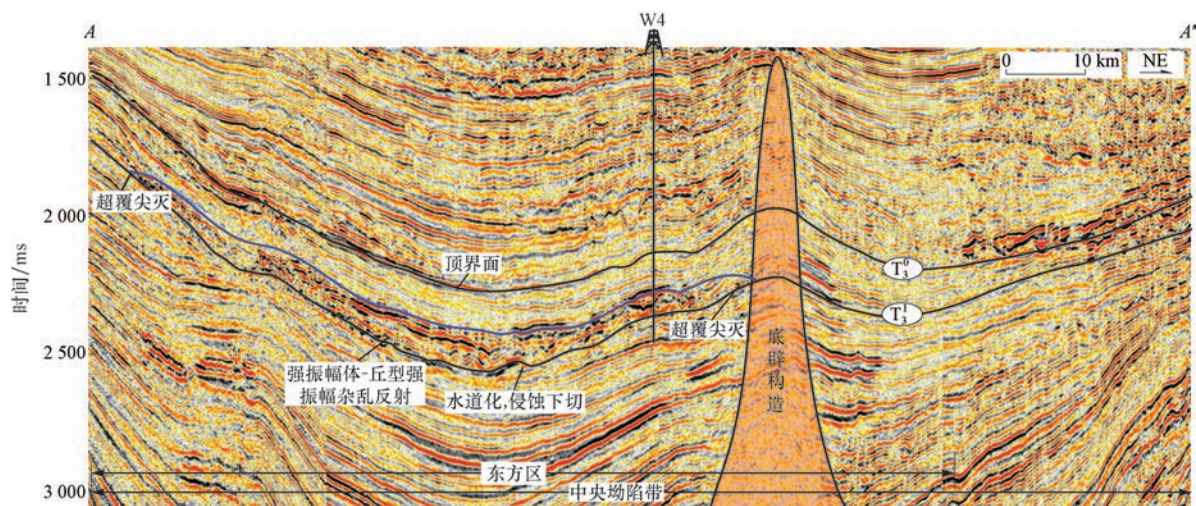


图2 莺歌海盆地东方区黄流组一段大型强振幅体剖面形态特征(剖面位置见图1中AA'所示)

Fig.2 Typical seismic profile for morphological characteristics of the high-amplitude reflections in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area, the Yinggehai Basin(See Fig. 1 for the location of AA')

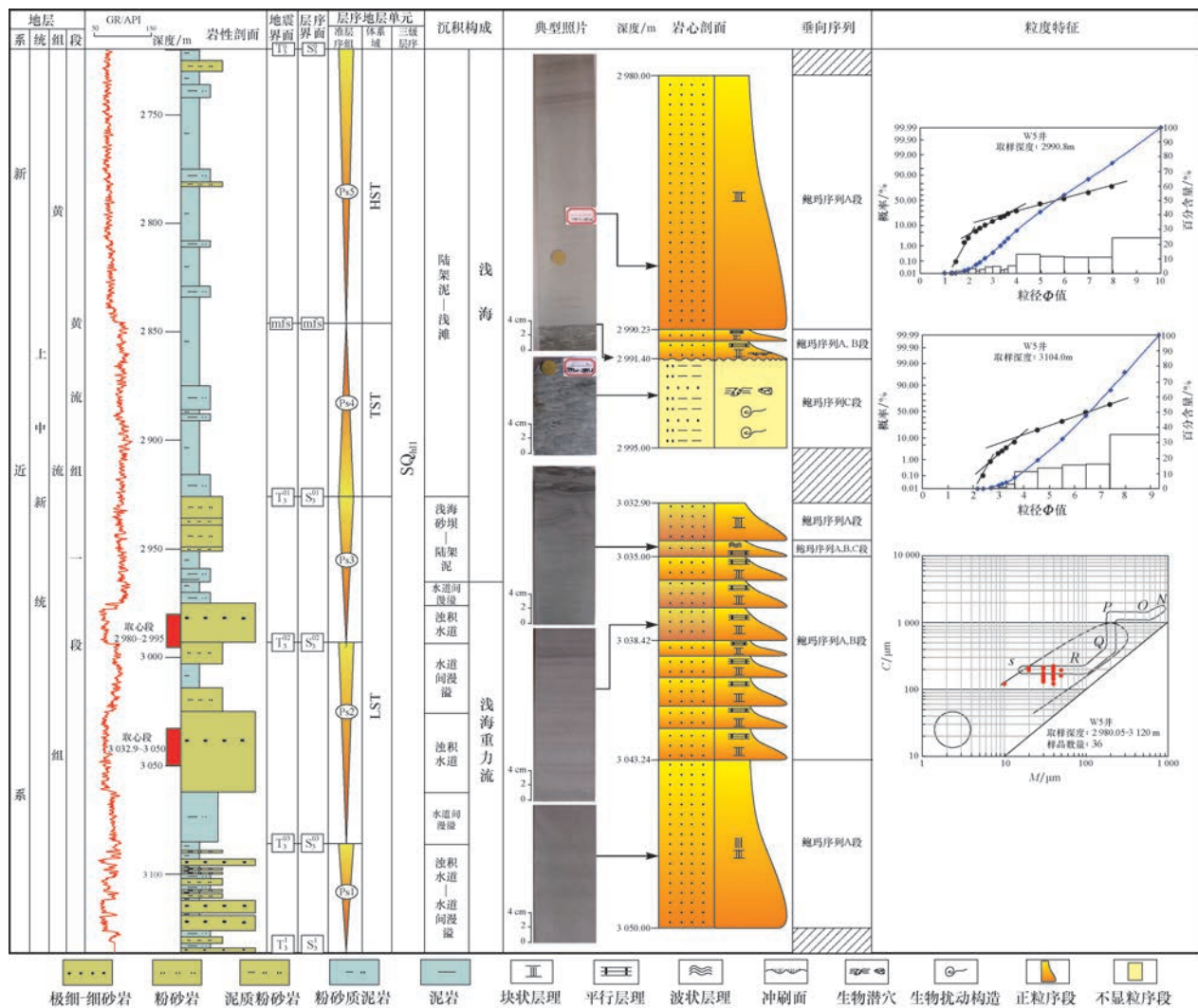


图3 莺歌海盆地 W5 井黄流组一段沉积层序解释以及典型岩心特征与粒度分析(W5 井的位置见图1)

Fig.3 Interpretation of sedimentary sequence, characteristics of typical cores and grain size analysis in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area, the Yinggehai Basin(See Fig. 1 for the location of Well W5)

概率累积曲线呈“低斜二段式”或“低斜三段式”,其中悬浮组分占 70% 以上,但分选较差,跳跃组分小于 30%,不发育滚动组分;在 $C-M$ 图解中,样品点群整体均表现为平行于 $C=M$ 基线,反映出以悬浮载荷为主的浊流搬运沉积的典型特征。主要发育块状层理、平行层理以及少量的波状层理,垂向序列上显示出鲍玛序列 A 段、AB 段以及少量 ABC 段组合等特征;此外,还发育了反映沉积物快速堆积的多种准同生变形构造,如负载构造、火焰状构造、球枕构造等。冲刷面可见,表现为切割较平整的岩性突变面,如 W5 井 2 991.40 m 处发育了一典型冲刷面构造,冲刷面之下为深灰色粉细砂质泥岩夹灰色粉砂岩,之上为灰白色

块状细砂岩。
GR 测井响应表现为大型高幅值齿状箱形、高幅值钟形以及中-高幅值小型齿化箱形组合(图 4),砂岩厚度最厚可达 87 m,最薄为 2 m,平均为 10~20 m,薄层状水道砂岩常与粉砂质泥岩、泥质粉砂岩呈互层状产出。根据浊积水道产出形式,可将其分为单一大型水道、横向上连片状展布的小型分支水道以及垂向上相互叠置的多期小型分支水道复合体等 3 种类型,并以后两种占主导。地震剖面上均呈现出强烈的侵蚀下切特征,剖面形态呈“U”或“V”形,其中单一大型水道整体呈“U”形,两侧为中-弱振幅较连续楔状反射,整体呈现出“海鸥翼状”(图 5)。

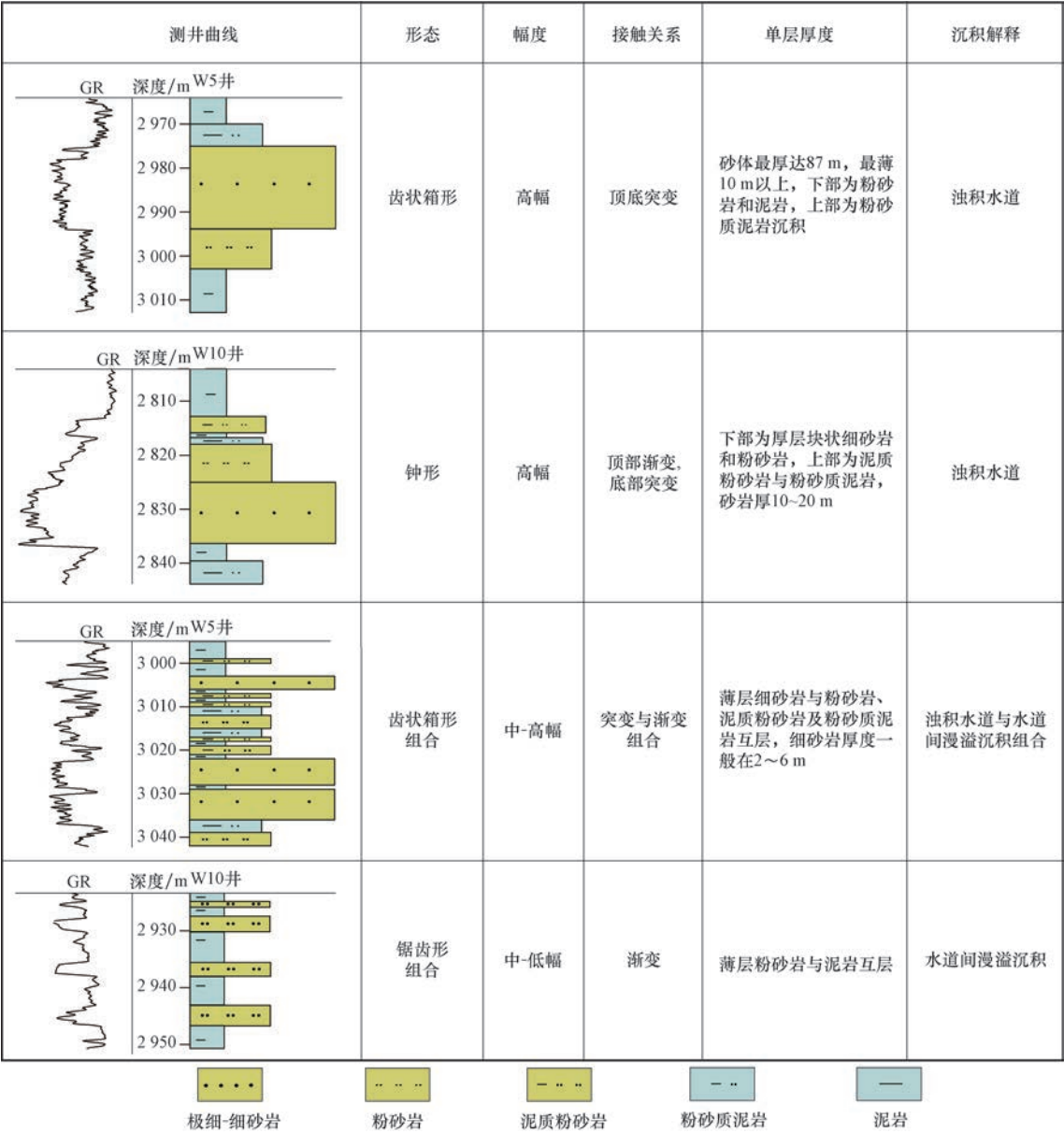


图 4 莺歌海盆地东方区黄流组一段大型强振幅体典型测井响应特征

Fig.4 Logging response of the high-amplitude reflections in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area,the Yinggehai Basin

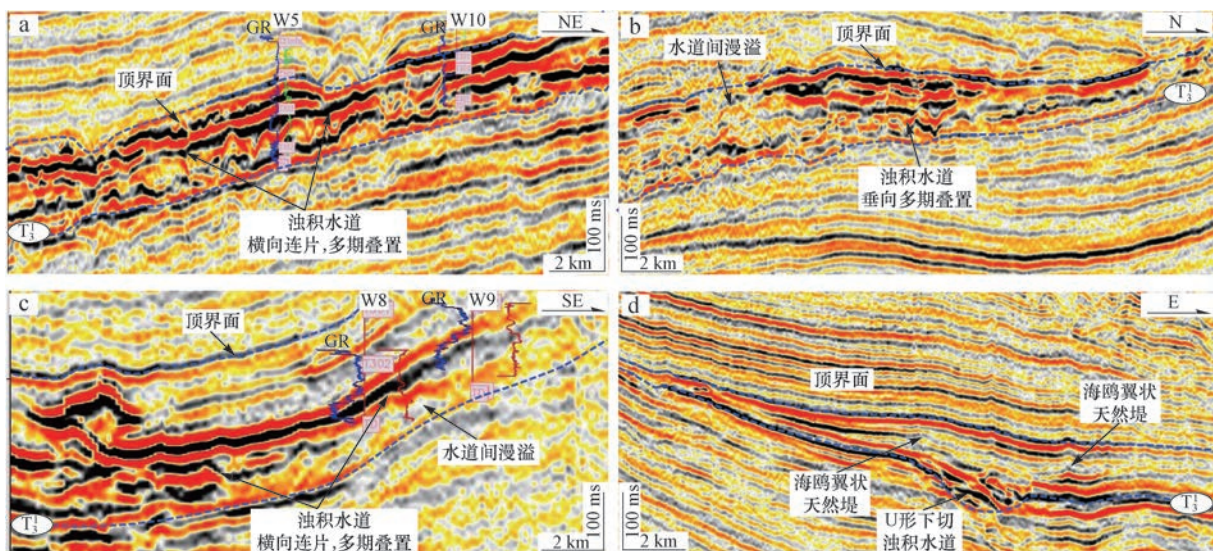


图5 莺歌海盆地东方区黄流组一段大型强振幅体典型地震相特征(剖面位置见图1)

Fig. 5 Seismic facies of the high-amplitude reflections in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area, the Yinggehai Basin (See Fig. 1 for the location)

a, c. 浊积水道横向连片、垂向多期叠置; b. 浊积水道垂向多期叠置; d. 水道-堤岸复合体特征

2) 水道间漫溢沉积

水道间漫溢沉积是指由溢出水道的水道间低流态浊流形成的薄互层状粉砂岩、泥质粉砂岩与粉细砂质泥岩组合,主要呈灰-深灰色,水道不发育,以鲍玛序列C段为典型特征,含大量生物潜穴和生物扰动构造(图3),GR曲线上表现为中-低幅锯齿形组合特征(图4),地震相以中-弱振幅差-较连续反射为特征(图5)。

3) 天然堤

天然堤是指由于低流态浊流溢出堤岸并侧向延伸,大量细粒悬浮物质沿着河道边缘沉积,随着垂向加积作用的不断发展,在河道两侧形成的堤状沉积物,主要由薄层状粉细砂岩、粉砂质泥岩与泥岩不等厚互层沉积,发育平行层理(鲍玛序列B段)和波纹层理(鲍玛序列C段)。因为流体溢出时流速下降很快,使得近源天然堤比远源天然堤堆积了更多的沉积物,最终形成了近源天然堤厚而远源天然堤-漫溢沉积较薄并逐渐尖灭的楔状体^[18]。在研究区内,钻井并未直接揭示天然堤,其主要分布在单一大型水道的两侧,地震上表现为中弱振幅较连续的楔状反射,整体呈“海鸥翼状”,与大型水道构成了水道-堤岸沉积复合体(图5)。

2.3 垂向发育期次

利用高精度层序地层学的研究思路,对黄流组一段层序内部体系域界面、准层序组界面(四级界面)开展井-震联合解释,将大型强振幅体纳入东方区黄流组一段高精度层序地层格架之下,从而在等时性和

成因相关性两个基础之上划分其垂向发育期次。东方区黄流组一段层序(SQ_{hl1})可划分为5个准层序组单元(四级层序),从下到上依次为Ps1($S_3^1-S_3^0$),Ps2($S_3^0-S_3^2$),Ps3($S_3^2-S_3^1$),Ps4(S_3^1-mfs)和Ps5($mfs-S_3^0$)(图3,图6),其中Ps1,Ps2和Ps3位于低位体系域(LST),而Ps4和Ps5分别对应于海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)^[12]。大型强振幅体主要发育在低位体系域,且Ps1,Ps2和Ps3内均有发育,以细砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩不等厚互层沉积为特征,GR曲线表现为齿化箱形与钟形组合,而海侵体系域和高位体系域则均以泥质沉积为主。准层序组界面 S_3^0 和 S_3^2 表现为海泛面或与之可对比的次级侵蚀面,可位于泥岩段内部,也可表现为岩性或GR曲线形态的突变面,其将大型强振幅体在垂向上划分出3个期次,即Ps1—Ps3三个准层序组单元内各包含了一期大型强振幅体的生成过程。

2.4 平面展布特征

结合三维地震多属性提取与地震相精细刻画,建立起岩心、钻井、测井、地震相、地震属性与大型强振幅体内部沉积结构要素之间的对应关系,从而查明不同期次的平面沉积展布特征。

1) 第一期沉积展布特征

第一期大型强振幅体发育在准层序组Ps1内,在东方区 $T_3^1-T_3^{01}$ 层间均方根振幅属性图上显示为广泛分布的强振幅异常区(图7a),对应的地震相表现为

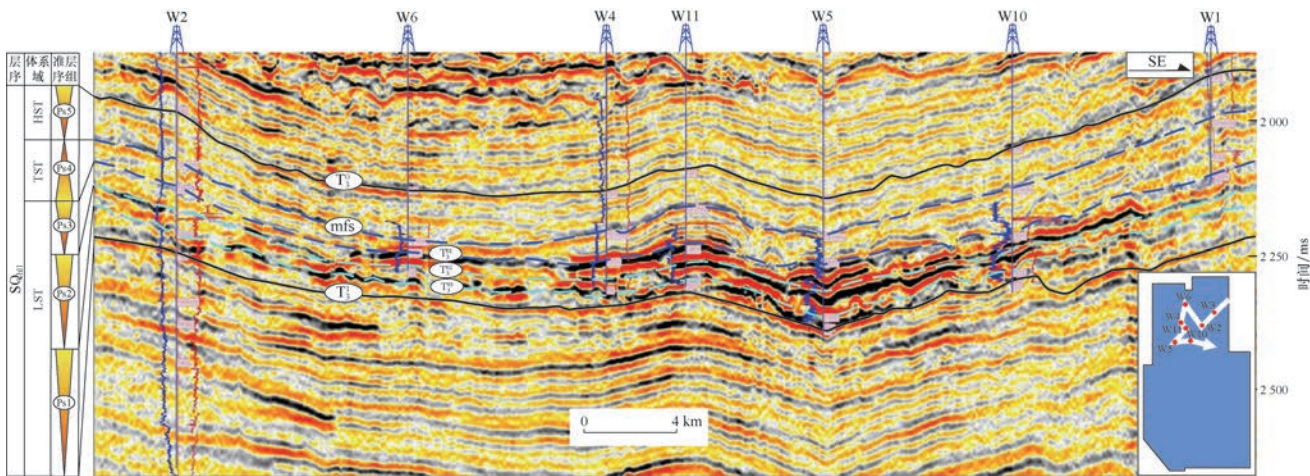


图 6 莺歌海盆地东方区黄流组一段高精度层序地层格架与大型强振幅体垂向期次划分

Fig. 6 High resolution sequence stratigraphy framework and vertical phases division of the high-amplitude reflections of the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area, the Yinggehai Basin

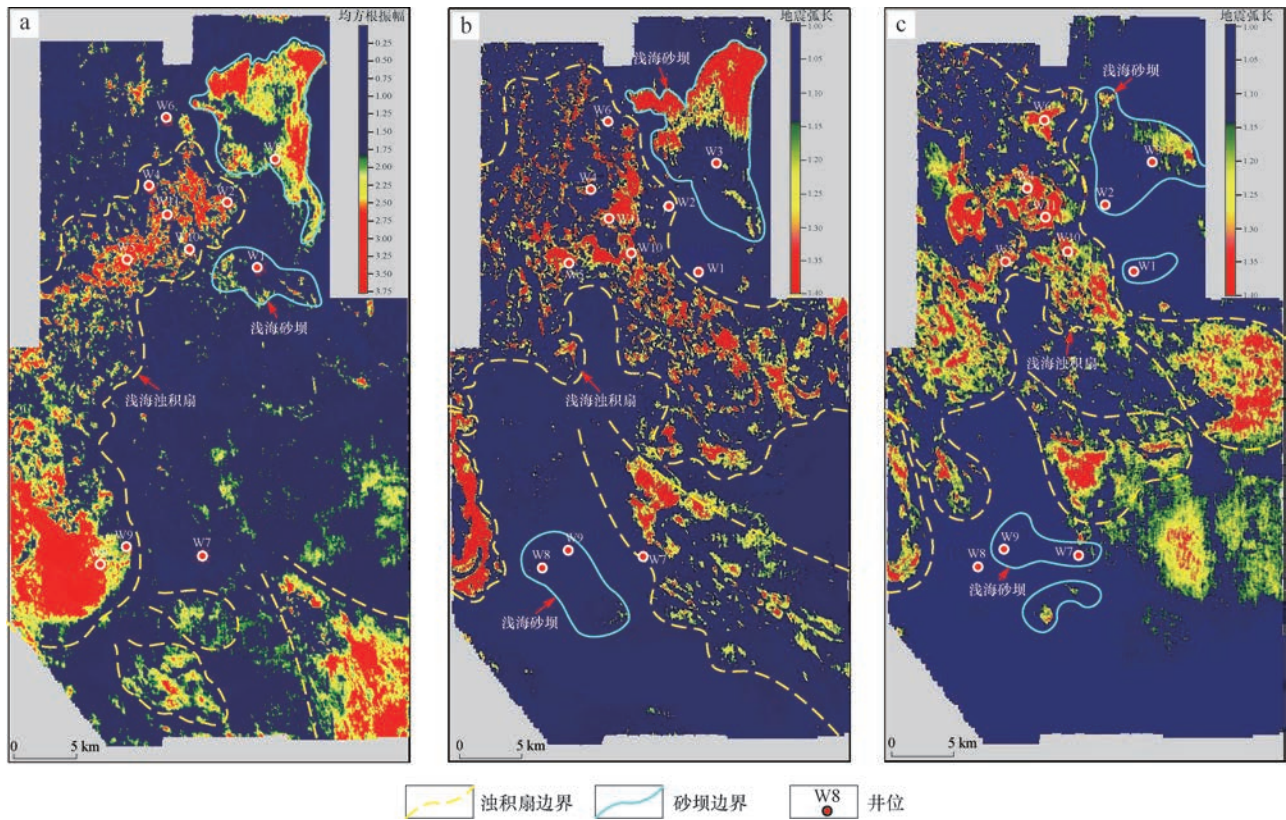


图 7 莺歌海盆地东方区黄流组一段大型强振幅体地震属性特征及沉积解释

Fig. 7 Seismic attributes and sedimentary interpretation of the high-amplitude reflections in the 1st member of the Huangliu Formation of Dongfang area, the Yinggehai Basin

a. $T_3^1-T_3^{03}$ 层间均方根振幅属性与沉积解释; b. $T_3^{03}-T_3^{02}$ 层间地震弧长属性与沉积解释; c. $T_3^{02}-T_3^{01}$ 层间地震弧长属性与沉积解释

强振幅较连续反射,且水道化侵蚀下切特征广布(图 8a)。其主体分布在 D1 底辟构造带和 D2 底辟构造带西侧,呈大型扇形、自西向东发散状连续展布;此外,在东方区东南隅可见 3 个相对独立的中小型扇形体,系大型强振幅体向 SE 方向再次搬运沉积的产物。

浊积水道与水道间漫溢沉积为最主要的沉积要素构成,其中浊积水道呈 NW-SE 和 SW-NE 向展布,前者延伸至东方区东南隅,后者可推进至 W2 井。东方区西侧因靠近物源,浊积水道规模较大,W8 井和 W9 井均钻遇大套浊积水道细砂岩,厚度分别约 50 m 和

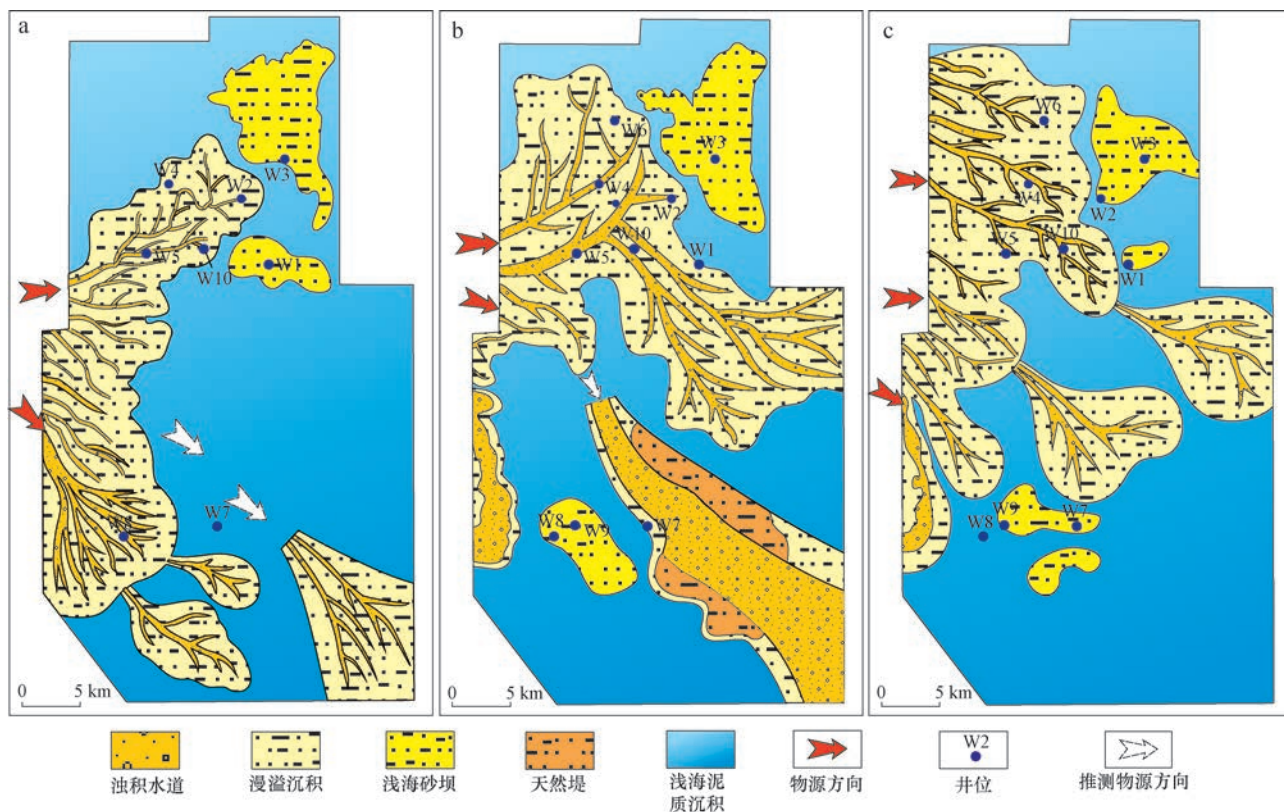


图8 莺歌海盆地东方区黄流组一段大型强振幅体平面沉积相展布

Fig. 8 Distribution pattern of the high-amplitude reflections in the 1st member of the Huangliu Formation of

Dongfang area, the Yinggehai Basin

a. 第一期; b. 第二期; c. 第三期

70 m。在 D1 底辟构造带附近发育 2 个孤岛状的浅海砂坝, 分别呈 SN 和近 EW 向展布, W3 井揭示为灰白色粉砂岩夹泥质粉砂岩, 生物扰动构造强烈, 在层间均方根振幅属性图上显示为孤立分布的强振幅异常区, 地震相表现为中-强振幅好连续透镜状或席状反射。

2) 第二期沉积展布特征

第二期大型强振幅体在准层序组 Ps2 内继承性发育, 在 $T_3^{01}-T_3^{02}$ 层间地震弧长属性图上异常区的范围较 Ps1 时期更为广泛(图 7c), 且整体向北迁移至 D1 底辟构造带西侧, 而 D2 底辟构造带西侧少见(图 8b)。浊积水道与水道间漫溢沉积仍为最主要的沉积要素构成, 其中 SW-NE 向浊积水道向北延伸至 W2 井和 W6 井处, 在 W2 井中见小型浊积水道砂岩, W6 井主要为砂质泥岩, 推测为水道间漫溢沉积。在 W10 井位置浊积水道发生分支改道, 进而继续向 SE 方向延伸, 使得强振幅体的规模进一步扩大。此外, 在东方区东南隅见一 NW-SE 向展布的大型浊积水道, 在地震弧长属性平面图上显示为条带状的异常区, 地震相表现为大型水道下切充填特征, 内部呈强振幅杂乱反射, 两侧发育天然堤。东北隅的浅海砂坝继承性发育, 长轴方向

呈 SN 向展布, 长约 15 km, 宽约 7 km, 地震上显示为中-强振幅好连续反射, 在东方区南部也发育了一小型浅海砂坝, W8 和 W9 井均有钻遇。

3) 第三期沉积展布特征

第三期大型强振幅体在准层序组 Ps3 内继承性发展, 在东方区 $T_3^{02}-T_3^{03}$ 层间地震弧长属性图上异常区清晰可辨(图 7c), 整体呈 NW-SE 向延伸, 由 1 个大型扇体和 2 个中小型扇体构成, 浊积水道几乎全部呈 NW-SE 向展布(图 8c); W5 井揭示浊积水道岩性为灰白色纯净细砂岩, 分选磨圆好, 见块状层理、平行层理, GR 曲线呈大中型光滑箱形, 见不完整鲍玛序列, 为 A 段或 AB 段组合; W4 井 GR 曲线呈大型齿化箱形。东方区仍为浅海陆架沉积背景, 在东北隅和南部共发育了 4 个小型浅海砂坝。

2.5 成因与演化规律

谢玉洪等认为盆地西部较大规模的蓝江水系以及莺西断裂坡折带对东方区黄流组一段大型强振幅体起到了主控作用, 将其定义为海底扇^[10]; 王英民等认为其沉积物主要来自于红河, 并将其命名为“红河海底

扇”,并与红河三角洲以及相关的海底峡谷共同构成红河沉积体系^[11];王华等认为来自盆地西部的蓝江物源、大规模海退作用以及沉积基底的幕式差异性沉降作用共同控制了大型强振幅体的形成^[12],由此可见,虽然对于大型强振幅体的物源区还存在蓝江物源体系和红河物源体系的不同观点,但都一致认为大型强振幅体为大型重力流沉积的产物。

大型强振幅体第一发育期到第三发育期的平面沉积展布特征记录了其从初始孕育期-快速发展期-稳定发展期的时空演化过程(图8)。整体呈规模逐渐增大、向北西方向不断迁移、向东南方向逐步推进的动态演变趋势,进而使得D2底辟构造带西侧发育的扇体规模不断减小,而D1底辟构造带西侧发育的扇体规模不断增大,且全区浊积水道的展布方向由最初的NW-SE向和SW-NE向演变为NW-SE向占绝对主导。从D1底辟构造带西侧浊积水道的产出规模来看,以第一期内发育的浊积水道规模最小,第二期内浊积水道明显增大,侵蚀能力增强,尤其是在D2构造带的东南侧发育了一大型水道-天然堤复合体,这与海平面的快速下降、碎屑物快速向盆地方向推进相吻合;第三期内浊积水道的规模介于二者之间,其向SE方向稳定延伸、在平面上广泛分布,形成了多个次级小型浊积扇,向SE方向稳定延伸。

3 讨论及油气意义

3.1 有利储集体特征

中央坳陷底辟区中深层高温超压领域自20世纪90年代后期开始,作为莺歌海盆地天然气勘探的战略接替区而备受期待^[16]。东方区处于莺歌海盆地腹地,远离岸线和物源输送端,以往多认为该区中深层主要发育富泥质沉积,而十几年的钻探实践也揭示了中深层储集层厚度薄、粒度细、物性差。如W2、W3和W7井分别在D1和D2底辟构造带附近揭示了黄流组一段浅海砂坝砂岩储层(图8),岩性均以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,夹多层粉砂质泥岩,其中W3井揭示其孔隙度为13.7%~21.9%,平均为17.4%,渗透率为 $(0.1 \sim 8.32) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔隙度、低-特低渗透率储层;W2井DST(Drill Stem Test)测试产气 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,产水 $16 \text{ m}^3/\text{d}$,但由于储层薄、物性差、规模小,未获得商业性突破^[7-8]。因此,优质储层无法落实是严重制约莺歌海盆地中深层高温高压领域天然气勘探的主要瓶颈。

东方区黄流组一段大型强振幅体为发育在低位体

系域的大型重力流沉积,系低位扇的范畴,为发育在浅海陆架背景下的“浅海重力流沉积”,并以细粒浊流为主。其内部浊积水道砂岩纵横广布、三期叠置,以岩屑石英细砂岩、岩屑石英极细砂岩为主,泥质含量低,分选中等-好,磨圆度中等,次棱角-次圆状,胶结类型为孔隙式或充填交代-孔隙式,填隙物主要为铁方解石和铁白云石,呈泥晶集合体状或粉晶状零星产出,部分长石颗粒发生溶解,石英加大边少见,颗粒支撑、点接触为主,少量点-线接触。单个砂体的厚度最大为87 m,最小为2 m,平均厚度为10~20 m,W2和W4井揭示其孔隙度分别为19.9%~21.8%和14.6%~15.7%,渗透率分别为 $(2.4 \sim 6.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(2.5 \sim 7.4) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 主要流通孔喉半径均值在0.42~1.49 μm ,孔喉配位数1~4,为中孔、中-低渗储层,储集性能整体较好,为该区主力储层。东方13-1和东方13-2气田主力气层Ⅱ、Ⅲ主要发现于第二期和第三期浊积水道砂岩中^[8-9]。此外,大型强振幅体在东方区东南隅发育了天然堤(图8b),其中近端天然堤主要为粉砂岩、泥质粉砂岩与薄层细砂岩不等厚互层,地震上显示为强振幅亚平行反射特征,GR曲线表现为向上变细序列,砂地比可达40%~80%,通常具有较好的孔隙度和渗透率^[18-19],推测其为潜在的有利储集体;远源天然堤较近端天然堤厚度小、粒度细,主要为粉砂质泥岩与泥岩不等厚互层,地震上呈现弱振幅平行反射特征,储集性能通常较差或为非储层。

3.2 强超压对中深层储层物性的影响

受新近纪后期快速沉降的影响,中央坳陷沉积了巨厚的新近系,且由于埋深大,压实作用和成岩作用对中深层储层物性十分不利^[7]。东方区约在2500 m开始出现强超压(压力系数>1.8),如果按照压实曲线计算,黄流组一段储集层(现今埋深2600~3500 m)孔隙度应降至10%以下,而实际资料显示其岩心孔隙度可高达20%,且原生孔隙占主导,占比为52.9%,次生孔隙占47.1%^[20]。前人研究认为,超高压环境对储层物性的改善起到了积极作用。

因为超高压的存在,孔隙流体承载了大部分的上覆地层压力,减小了岩石骨架承载的荷重,使得部分被超压孔隙流体充填的原生孔隙在较深部位得以有效保存,这是莺歌海盆地中央底辟带深部储层具有高孔隙度的最主要原因^[21]。按照Scherer的研究成果,每超压50MPa约保存2%的孔隙度^[22]。孟元林等通过化学动力学模型研究认为^[23],超压可以抑制粘土矿物的转化,导致了泥岩中 Si^{4+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Na^{+} 等阳

离子生成量的减少和相邻砂岩中许多胶结作用的延迟甚至停止,从而减少了原生孔隙的损失,有利于深部优质储层的发育。东方区压力异常面之下有机质、粘土矿物和孔隙演化趋势均出现明显的延缓现象。张伙兰等认为是由于超压环境减缓了粘土矿物和有机质的演化^[21],同时延长了有机质热演化生成油气过程中有机酸和 CO_2 的大量产出期,增加了酸性流体溶蚀铝硅酸盐矿物和碳酸盐胶结物的时间和强度,从而产生了大量次生孔隙。东方区黄流组一段储集层普遍可见颗粒被完全溶解形成铸模孔以及碳酸盐溶解残余,次生孔隙类型以长石粒内溶孔、铸模孔、粒间溶孔和岩屑溶孔为主,溶解强烈处可见伸长状孔隙或超大孔。此外,超压流体压裂突破过程中产生了大量的微裂缝,这些微裂缝虽然对孔隙度的影响不大,但其可以有效地提高了储层渗透性。综上可知,强超压环境对原生孔隙的有效保护、对粘土矿物转化的抑制、对次生孔隙生成的促进及其产生的微裂缝对储层渗透性的改善作用是东方区黄流组一段储集体具有较好储层物性的关键所在。

3.3 岩性圈闭及油气藏预测

钻探证实,与大型强振幅体相关的圈闭类型主要

为砂岩上倾尖灭型岩性圈闭和砂岩透镜体型岩性圈闭(图9)。在东方13-1气田区,浊积水道砂岩整体自西向东延伸,其远端直接尖灭于浅海泥岩之中,终止在W2井东侧。进入上新世以后,由于D1和D2底辟构造开始抬升降起,在底辟构造带的翼部呈现出砂体上倾尖灭超覆状沉积结构样式,且主要分布在底辟构造带的西翼和南翼,超覆边界与浅海泥岩截然,从而形成了具有良好侧封条件的砂岩上倾尖灭型岩性圈闭。东方13-2气田区位于D1底辟构造的外围,受底辟构造抬升降起的影响较小,地势较为平坦,因更靠近物源,这一区域的浊积水道砂岩堆积厚度大、多期叠置,表现为上凸下凹的透镜状特征,并为浅海相泥岩所包围,从而形成了具有良好封堵的砂岩透镜体型岩性圈闭。

幕式底辟活动在底辟构造带核部及其翼部均产生了大量断裂和裂缝,其向下沟通了三亚组和梅山组烃源岩,向上可断入至乐东组,从而为深部天然气向浊积水道砂岩储层聚集提供了垂向运移通道^[9]。在D1和D2底辟构造带核部及其翼部,黄流组一段的砂岩上倾尖灭型岩性圈闭位于油气垂向运移必经之路。在底辟活动静止期,断裂和裂缝关闭,烃源岩排出的天然气在深部大量累积,而在底辟活动期,断裂和裂缝开启,由于上下地层巨大的剩余压力差,天然气沿断裂和裂缝

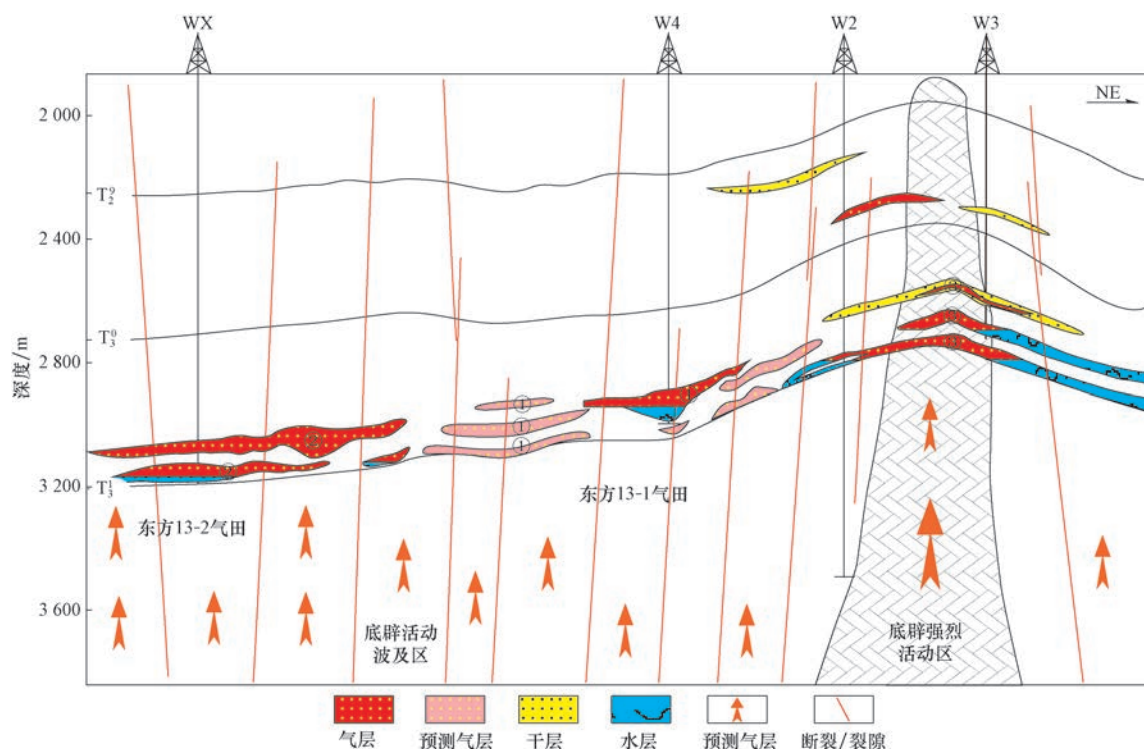


图9 莺歌海盆地东方区黄流组圈闭类型、分布及高温超压气藏成藏模式(据王振峰等,2011^[8],有修改)

Fig. 9 Types and distribution of traps in the Huangliu Formation, and accumulation model of high temperature and overpressure gas reservoir in Dongfang area, the Yinggehai Basin(modified after Wang Zhenfeng, et al, 2011^[8])

① 砂岩上倾尖灭型岩性圈闭;② 砂岩透镜体岩性圈闭;③ 构造-岩性复合型圈闭

向上快速充注至圈闭之中而成藏^[24]。对于远离底辟构造带核部的外围区,由于强超压的存在,中深层存在大量的水力破裂现象,形成了一系列小型断裂或裂隙,断距小或者无断距,可作为深部天然气垂向运移的“隐形”通道。在东方区西侧,当地层压力超过岩石破裂压力时,“隐形”通道开启,天然气沿着小型断裂或裂隙垂向运移,由于砂岩透镜体型岩性圈闭临近烃源岩,天然气垂向运移距离较短,更有利于捕获油气。此外,因为底辟构造翼部和底辟构造带外围在空间上距离底辟构造核部较远,受多幕底辟构造活动的影响相对较小,后期保存条件较为有利,尤其以底辟构造外围区域最为突出,这正是东方13-2气田“高效优质聚集”的重要原因。

东方13-1和东方13-2大型优质高温超压天然气藏的成功钻探,正式拉开了莺歌海盆地天然气勘探由常温常压领域向高温高压领域成功迈进的历史序幕,具有重要的领域性突破意义。东方区黄流组一段大型浅海重力流浊积水道砂岩储层垂向上三期叠置、横向上连片广布,勘探前景十分可观。更为重要的是,它为进一步向中深层的梅山组,乃至深层的三亚组及古近系勘探奠定了坚实的基础,开创了莺歌海盆地油气勘探的崭新局面,在我国高温超压领域油气勘探发展历程中必将书写浓墨重彩的一笔。

4 结论

1) 大型强振幅体呈“扇形”,东西向展布,为发育在浅海陆架背景下的大型“浅海重力流沉积”,且以细粒浊流为主;其内部由浊积水道、水道间漫溢沉积和天然堤3种沉积要素构成。垂向演化可划分出个3期次,从第一期到第三期呈现出规模逐渐增大、向北西方向不断迁移、向南东方向逐步推进的演变趋势。

2) 大型强振幅体内部浊积水道砂岩纵横广布、三期叠置,为该区主力储层,而近端天然堤为潜在的有利储集体;强超压环境对于改善东方区黄流组一段储集体物性具有重要促进作用。

3) 与大型强振幅体相关的圈闭类型主要为砂岩上倾尖灭型岩性圈闭、砂岩透镜体型岩性圈闭,前者分布在底辟构造带的翼部(底辟活动区),后者主要位于底辟构造带外围(底辟活动波及区),勘探前景均十分广阔。大型强振幅体的发现及钻探成功为进一步向中深层梅山组,乃至深层的三亚组及古近系勘探奠定了坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 李思田,潘元林,陆永潮,等. 断陷盆地隐蔽油藏预测及勘探的关键技术—高精度地震探测基础上的层序地层学研究[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2002,27(5):592-597.
Li Sitian, Pan Yuanlin, Lu Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2002,27(5):592-597.
- [2] 李丕龙,张善文,宋国奇,等. 济阳成熟探区非构造油气藏深化勘探[J]. 石油学报,2003,24(5):10-15.
Li Peilong, Zhang Shanwen, Song Guoqi, et al. Exploration potential of nonstructural pools in the matured area of Jiyang district[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(5):10-15.
- [3] 贾承造,赵政璋,杜金虎,等. 中国石油重点勘探领域——地质认识、核心技术、勘探成效及勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2008,35(4):385-396.
Jia Chenzao, Zhao Zhengzhang, Du Jinhu, et al. PetroChina key exploration domains: Geological cognition, core technology, exploration effect and exploration direction[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(4):385-396.
- [4] Luiz J, Tomazelli, Sergio R D. Sedimentary facies and stratigraphy of a last interglacial coastal barrier in south Brazil[J]. Marine Geology, 2007,244:33-45.
- [5] 石万忠,孔敏,宋志峰. 伊通盆地梁家地区奢岭组混源扇三角洲内幕结构[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2008,33(3):365-370.
Shi Wanzhong, Kong Min, Song Zhifeng. Multi-provenance fan delta in the Sheling formation, Liangjia Area, Yitong Basin, China[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008,33(3):365-370.
- [6] 何云龙,解习农,陆永潮,等. 琼东南盆地南部梅山组强振幅体成因及油气地质意义[J]. 石油学报,2012,33(4):617-624.
He Yunlong, Xie Xinong, Lu Yongchao, et al. Origin of high-amplitude reflections in Meishan Formation of the southern Qiongdongnan Basin and its significance in hydrocarbon exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(4):617-624.
- [7] 裴健翔,于俊峰,王立峰,等. 莺歌海盆地中深层天然气勘探的关键问题及对策[J]. 石油学报,2011,32(4):573-579.
Pei Jianxiang, Yu Junfeng, Wang Lifeng, et al. Key challenges and strategies for the success of natural gas exploration in mid-deep strata of the Yinggehai Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(4):573-579.
- [8] 王振峰,裴健翔. 莺歌海盆地中深层黄流组高压气藏形成新模式—DF14井钻获强超压优质高产天然气层的意义[J]. 中国海上油气,2011,23(4):213-217.
Wang Zhenfeng, Pei Jianxiang. A new accumulation model of high pressure gas in Huangliu Formation of the middle-deep interval in Yinggehai Basin: the significance of discovering a good-quality gas pay with overpressure and high production in well DF14[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011,23(4):213-217.

- [9] 谢玉洪,张迎朝,李绪深,等. 莺歌海盆地高温超压气藏控制要素与成藏模式[J]. 石油学报,2012,33(4):601-609.
Xie Yuhong, Zhang Yingzhao, Li Xushen, et al. Main controlling factors and formation models of natural gas reservoirs with high-temperature and overpressure in Yinggehai basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4):601-609.
- [10] 王英民,徐强,李冬,等. 南海西北部晚中新世的红海海底扇[J]. 科学通报,2011,56(10):781-787.
Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(10):781-787.
- [11] 谢玉洪,范彩伟. 莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新认识[J]. 中国海上油气,2011,22(6):354-359.
Xie Yuhong, Fan Caiwei. Some new knowledge about the origin of Huangliu Formation reservoirs in Dongfang area, Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 22(6):354-359.
- [12] 王华,陈思,甘华军,等. 浅海背景下大型浊积扇研究进展及堆积机制探讨:以莺歌海盆地黄流组重力流为例[J]. 地学前缘, 2015, 22(1):21-34.
Wang Hua, Chen Si, Gan Huajun, et al. Accumulation mechanism of large shallow marine turbidite deposits: A case study of gravity flow deposits of Huangliu Formation in Yinggehai Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1):21-34.
- [13] 裴健翔,潘光超,汪洋,等. 莺歌海盆地含气储层地震相识别技术完善及应用[J]. 中国海上油气,2015,27(4):30-36.
Pei Jianxiang, Pan Guangchao, Wang Yang, et al. Improvement and application of seismic facies identification technology for gas-bearing reservoir in Yinggehai Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(4):30-36.
- [14] 孙家振,李兰斌,杨士恭,等. 转换-伸展盆地——莺歌海盆地的演化[J]. 地球科学—中国地质大学学报,1995,20(3):243-249.
Sun Jiazhen, Li Lanbin, Yang Shigong, et al. Evolution of transform-extension Yinggehai Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(3):243-249.
- [15] 龚再升,李思田,谢泰俊,等. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集[M]. 北京:科学出版社,1997:1-498.
Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997:1-498.
- [16] 谢玉洪. 构造活动型盆地层序地层分析及天然气成藏模式——以莺歌海盆地为例[M]. 北京:地质出版社,2009:29-109.
Xie Yuhong. Sequence stratigraphic analysis and hydrocarbon accumulation models in tectonically active basins: A case study on the Yinggehai Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 29-109.
- [17] 何卫军,谢金有,刘新宇,等. 莺歌海盆地 D1-11 井有孔虫生物地层与沉积环境研究[J]. 地层学杂志,2011,35(1):81-87.
He Weijun, Xie Jinyou, Liu Xinyu, et al. Foraminiferal and sedimentary environment reconstruction based on paleontological data from bore hole D1-11, Yinggehai Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2011, 35(1):81-87.
- [18] Bramlett K W, and P A Craig. Core characterization of slope-channel and channel-levee reservoirs in Ram Powell field, Gulf of Mexico, in P Weimer, M R Sweet, M Sullivan, J Kendrick, D R Pyles, and A Donovan, eds. Gulf of Mexico deep-water reservoirs core workshop[C]. Gulf Coast Section SEPM Foundation/AAPG Annual meeting, 2002, 1-12.
- [19] Beaubouef R T. Deep-water leveed-channel complexes of the Cerro Toro formation, Upper Cretaceous, Southern Chile[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88:1471-1500.
- [20] 张伙兰,裴健翔,张迎朝,等. 莺歌海盆地东方区中深层黄流组超压储集层特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(3):284-293.
Zhang Huolan, Pei Jianxiang, Zhang Yingzhao, et al. Overpressure reservoirs in the mid-deep Huangliu Formation of the Dongfang area, Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3):284-293.
- [21] 姜涛,解习农. 莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2005,30(2):215-220.
Jiang Tao, Xie Xinong. Effects of and on quality in the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences. 2005, 30(2):215-220.
- [22] Scherer M. 1987. Parameters influencing porosity in sandstone: A model for sandstone porosity prediction[J]. AAPG Bulletin, 71(5):485-491.
- [23] 孟元林,黄文彪,王粤川,等. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用[J]. 沉积学报,2006,24(4):461-467.
Meng Yuanlin, Huang Wenbiao, Wang Yuechuan, et al. A kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4):461-467.
- [24] 董伟良,黄保家. 东方 1-1 气田天然气组成的不均一性与幕式充注[J]. 石油勘探与开发,1999,26(2):15-18.
Dong Weiliang, Huang Baojia. Heterogeneity of natural gases and the episodic charging process: a case study for Dongfang1-1 gas field, Yinggehai Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(2):15-18.

(编辑 张玉银)