

文章编号: 0253-2697(2012)04-0617-08

琼东南盆地南部梅山组强振幅体成因及油气地质意义

何云龙^{1,2} 解习农¹ 陆永潮¹ 李绪深³ 徐伟⁴ 邹卓超³

(1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 湖北武汉 430074; 2. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室 广东广州 510640;
3. 中海石油有限公司湛江分公司 广东湛江 524057; 4. 中海油研究总院 北京 100027)

摘要:基于高精度三维地震资料,利用等比例方差体切片技术,发现琼东南盆地南部深水区梅山组发育有一系列的强振幅地质体。通过对这些强振幅体的精细研究发现,平面上强振幅地质体的规模大小不等,长度约2~15 km,宽度约500~5 000 m,整体走向为近东西向。在强振幅地质体内部发育一系列的小断层系。强振幅体在东西部表现出不同的特征:东部表现为不规则的斑点状;西部表现为条带状。同时,在垂直于其走向的剖面上,强振幅体多表现为“V”或者“U”型的外部形态。这些强振幅地质体主要发育在隆起上的梅山组中,其下往往有断陷期开始发育的隐伏断层,且走向与渐新世末期断层的展布一致。盆地裂后期断层的活化使下伏古近系中的流体向上输导,深部流体沿梅山组内发育的断层系发生水-岩反应和随后可能的流体充注,导致了强振幅地质体的形成。这套强振幅地质体的发现对于琼东南盆地南部的深水油气勘探具有重要的指导作用。

关键词:南海北部;琼东南盆地;深水区;梅山组;断层活化;强振幅地质体

中图分类号:TE111 文献标识码:A

Origin of high-amplitude reflections in Meishan Formation of the southern Qiongdongnan Basin and its significance in hydrocarbon exploration

HE Yunlong^{1,2} XIE Xinong¹ LU Yongchao¹ LI Xushen³ XU Wei⁴ ZOU Zhuochao³

(1. Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd. Zhanjiang 524057, China; 4. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract:Based on 3D high-resolution seismic data, a series of the high-amplitude reflections (HARs) were discovered in Meishan Formation in deepwater areas of the southern Qiongdongnan Basin using an isometric variance slice technique. The detailed observation of these HARs revealed that the generally E-W oriented HARs have variable scales, being 2-15 km in length and 500-5 000 m in width. Small-scale faults are well developed within the HARs. Furthermore, the HARs show various features in different parts of the study area, for instance, they come in an irregular spotted shape in the east but stripped shape in the west. In sections perpendicular to the strike, the HARs are generally V-shaped or U-shaped by appearances and develop mainly on the uplifted Meishan Formation, beneath which there often exist buried faults formed during the rift-subsidence stage and having a strike consistent with the extension of terminal Oligocene faults. Therefore, the origin of HARs was attributed to the fault activation after the rifting of the basin, which resulted in an upward migration of fluids from underlying Paleogene strata, a water-rock interaction of deep fluids along the fault system developed within Meishan Formation, and probably a fluid charge thereafter. The discovery of the HARs in the study area is of directive importance in hydrocarbon exploration in deepwater areas of Qiongdongnan Basin.

Key words: northern South China Sea; Qiongdongnan Basin; deepwater area; Meishan Formation; fault activation; high-amplitude reflection

随着科技的进步,20世纪末深水油气勘探取得了突飞猛进的发展,逐渐成为世界油气勘探最重要的领域^[1-2]。由于与世界其他被动大陆边缘盆地具有相似的油气地质背景,南海北部大陆边缘盆地被认为具有

丰富的油气资源潜力^[1-3]。但由于构造演化和深水沉积系统的复杂性以及深水油气勘探的高风险性,整个南海北部海域的深水油气勘探仍处于初始阶段^[2]。与其他南海北部大陆边缘盆地类似,琼东南盆地主要的

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 91028009)、中国科学院边缘海地质重点实验室和广州地球化学研究所开放基金项目(MSGL11-04)、教育部高等学校博士学科点博导类科研基金项目(20100145110002)与湖北省自然科学基金重点项目(2008CDA095)资助。
第一作者及通讯作者:何云龙,男,1983年11月生,2009年获得中国地质大学(武汉)硕士学位,现为 中国地质大学(武汉)和英国阿伯丁大学联合培养博士研究生,主要从事海洋沉积学及其油气效应研究。Email:heyunlong06@163.com

油气勘探活动都集中于北部陆架浅水区域,深水区域油气钻井非常有限。

以琼东南盆地南部隆起区梅山组强振幅地质体为研究目标,利用高精度三维地震资料,对这种特殊的地质体进行解剖,精细刻画了其平面和剖面的外部形态及内部结构特征,阐明了其成因机制。此研究对更进一步认识琼东南盆地深水区的含油气系统以及相应的深水油气勘探活动具有重要指导作用。

1 区域地质背景

作为南海北部陆坡深水盆地之一,琼东南盆地位于海南岛东南部、珠江口盆地以西的海域,为新生代发育的被动大陆边缘拉张性盆地(图1)。琼东南盆地在大地构造背景上位于印度板块、欧亚板块和太平洋

板块的结合部位,其发育演化受到3大板块相互作用的影响^[4]。在复杂的构造背景下,琼东南盆地的形成演化经历了多个阶段:始新世到渐新世的裂陷期和中新世以来的裂后期。同时受到中新世以来周缘板块活动以及南海张裂后其大规模岩浆活动的影响,琼东南盆地裂后期根据其沉降速率又可分为裂后热沉降期和加速沉降期^[5]。盆地沉积充填总体上可以分为上、下两个超层序组:裂陷期超层序组和裂后期超层序组^[6]。裂陷期沉积包括古近系裂陷期的始新统、渐新统崖城组和陵水组,沉积环境由早期的湖相逐渐过渡到滨浅海相;裂后期沉积主要包括新近系的中新世三亚组、梅山组(从下而上分为梅山组二段和梅山组一段)和黄流组、上新世莺歌海组,沉积环境早期为滨浅海相,后期随着相对海平面上升逐渐变为半深海—深海沉积环境^[5,7]。

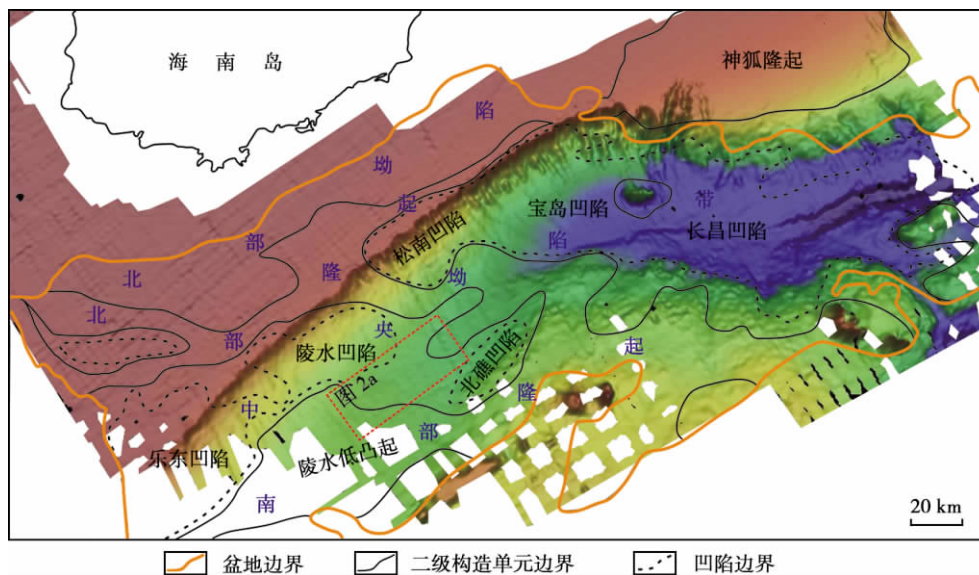


图1 琼东南盆地地质概况及研究区位置

Fig. 1 Geological background of Qiongdongnan Basin and the location of study area

自20世纪80年代以来,琼东南盆地相继发现了多个气田,被证明具有良好的油气勘探前景^[8]。盆地不同的沉积演化阶段发育不同类型的储层,从下至上包括:始新世—早渐新世的河流、扇三角洲相砂岩储层;晚渐新世的三角洲—滨浅海相砂岩储层;中新世滨浅海相砂岩、碳酸盐生物礁储层和深水浊积砂岩储层;上新世的深水中央峡谷中分布的浊积水道复合体砂岩储层^[8-11]。与此对应,琼东南盆地主力烃源岩自下而上—共有3套,分别为始新世湖相烃源岩、渐新世海陆过渡相烃源岩和中新世半深海—深海相烃源岩^[7]。

2 强振幅地质体特征

为了对研究区内的梅山组强振幅地质体进行更精细的研究,同时鉴于梅山组地层产状比较平缓,且内部

绝大部分地层的地震反射都表现为平行或者亚平行反射,利用等比例切片和层间属性提取等相关技术对梅山组强振幅地质体进行了平面刻画。整个研究区梅山组等比例切片揭示,强振幅地质体主要发育于梅山组一段地层中[图2(a)和图2(b)]。

2.1 基本特征

研究区位于琼东南盆地陵水凹陷与南部的陵水低凸起之间,北礁凹陷西北部,现今水深约1500 m(图1)。强反射地质体在研究区内非常发育,而且发育层位非常局限,仅仅出现于梅山组。虽然三亚组局部地层中也会出现零星的强振幅地质体,但是无论是长度、厚度还是数量相对于梅山组而言都非常少[图2(c)]。剖面上,这些强振幅地质体与同时期地层的地震反射特征差异性非常明显,表现为不连续的强振幅地震反射体。

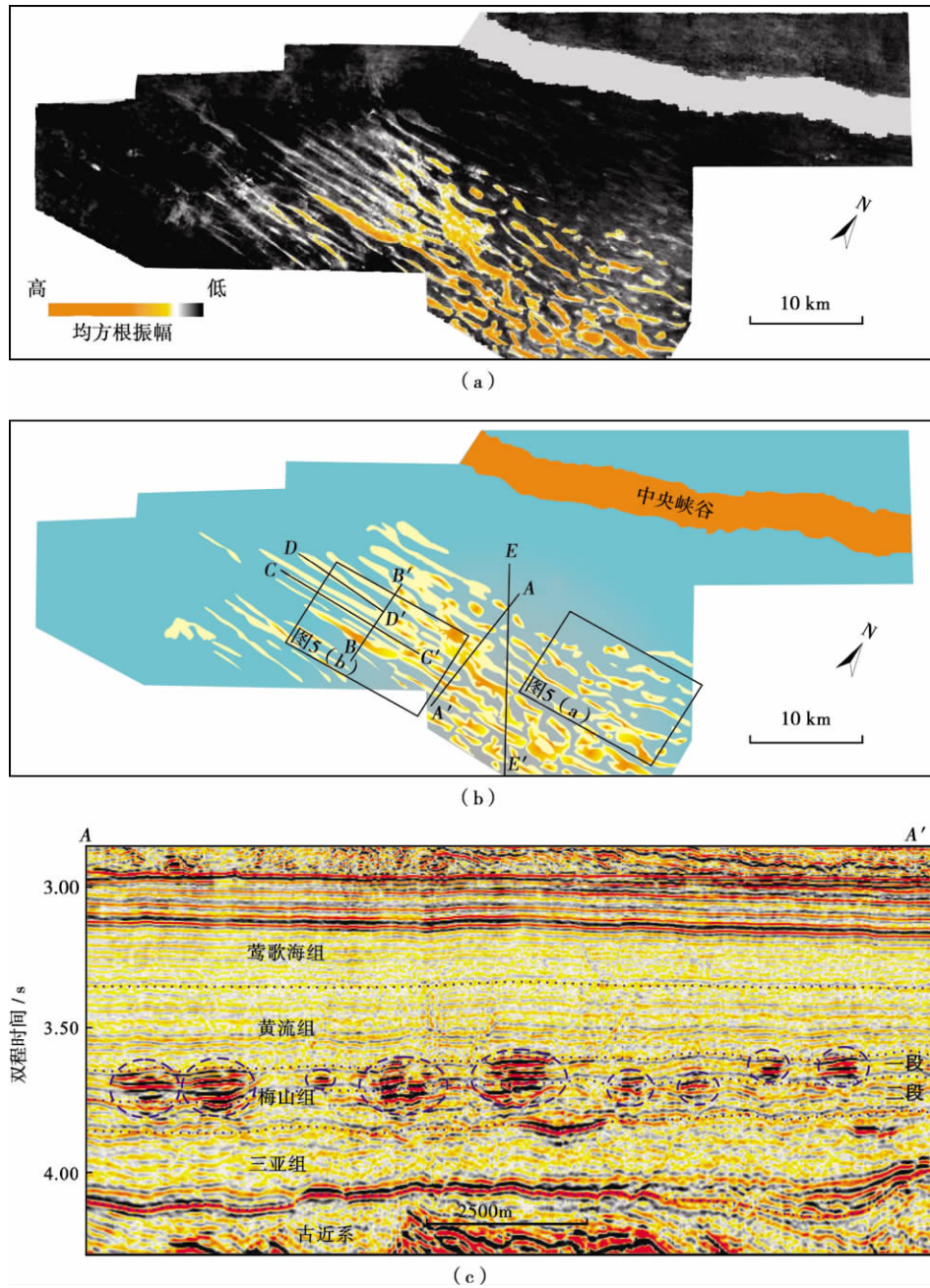


图 2 琼东南盆地梅山组强振幅地质体基本特征

Fig. 2 Features of the high amplitude reflections in Meishan Formation in Qiongdongnan Basin

2.2 平面展布

梅山组强振幅地质体在平面上主要分布于三维工区中央峡谷以南的区域,在研究区的北部和最西段均无强振幅地质体的发育[图 2(a)]。强振幅地质体规模大小不等,长度变化范围为 2~15 km,宽度约 500~5 000 m[图 2(c)]。这些强振幅地质体在平面上的走向为近东西向。同时,这些地质体的分布还表现出一定的规律性:在其发育的东部区域,强振幅地质体主要表现为不规则的斑点状,规模较小,平面上不同的强振幅地质体之间的联通性较差;在其发育的西部地区,强振幅地质体规模较大,表现为条带状。另外,强振幅地

质体还表现出双层结构:外围的边部(浅色)和内部的核心(深色)。这种双层结构同时也反映出这些地质体的厚度变化特征:核部的强振幅地质体厚度大于边部。当强振幅地质体厚度大时,其在平面上表现出的均方根振幅值也相应较高[图 2(c)],据此可以得到强振幅地质体在平面分布上的另外一个特征:东部强振幅地质体的厚度大于西部。

2.3 剖面特征

在走向与强振幅地质体斜交或者垂直的剖面上,这些强振幅地质体整体上常常表现出“V”型或者宽缓的“U”型[图 3(a)],这个特征与深海浊积水道的外部

形态特征有一定的相似性。与此同时,这些强振幅地质体的内部结构及其与周围地层的接触关系也显示出其特殊的性质:首先,强振幅地质体内部的地震反射同相轴的连续性非常好,同相轴之间为平行或者亚平行关系,内部结构比较简单。相比而言,深水浊积水道内部的结构特征比较复杂,沉积充填类型多样^[12],通常发育多个相互切割关系的侵蚀面等,一般在地震剖面

上的同相轴反射特征表现为杂乱反射和连续反射并存,内部反射连续性较差。其次,强振幅地质体与周围地层的沉积具有一致性,具体表现为强振幅地质体内部的反射同相轴能够跟其外部地层的反射同相轴相连通,只是在振幅上表现出很强的差异性;深水浊积水道一般具有较强的侵蚀能力,与其外围地层表现为削蚀关系,一般具有明显且连续的侵蚀边界^[12]。

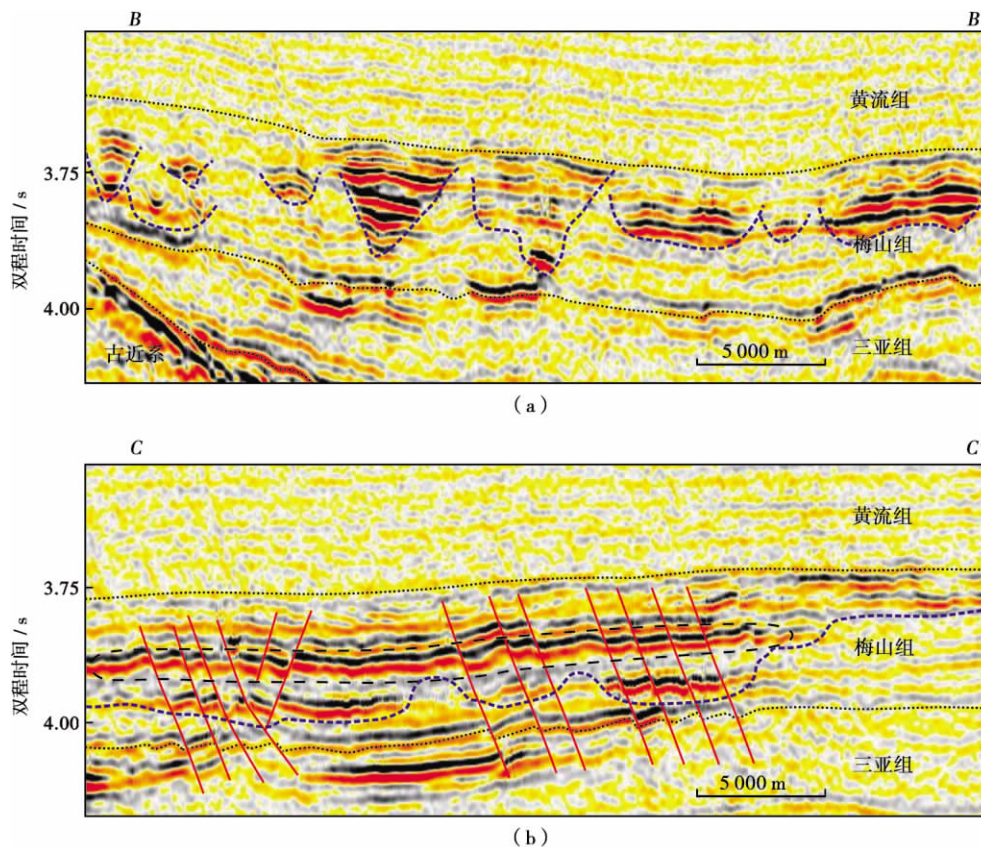


图3 梅山组强振幅地质体的剖面特征[剖面位置见图2(b)]

Fig. 3 Characteristics of high amplitude reflections in sections in Meishan Formation[location see Fig. 2(b)]

在沿强振幅地质体走向的剖面上,强振幅地质体和周围地层之间的差异仅仅表现为地震反射振幅强弱的相对变化[图3(b)],强振幅地质体的主体发育于梅山组地层的中部。在此套同相轴对应的地层之下,强振幅地质体的发育规模急剧缩小,而在其之上的强反射地质体的平面展布的规模可能更大,但是振幅要相对变弱。

2.4 小断层系

伴随强振幅地质体还发育有大量规模很小的断层,其断距一般不会超过50m。同一组断层中相邻断层之间的水平距离在200~2000m变化不等(图4)。同时,这些断层的发育层位比较局限,梅山组之下的三亚组地层中基本不发育。梅山组之上的黄流组地层中由于地震反射同相轴的振幅变弱,连续性变差,实际发育状况不易判定,但是局部仍然可以观察到小断层向

上部的黄流组地层中有一定的延伸(图4)。沿强振幅体的沿层方差体切片中,这种小规模的不规则斑点状的和西部条带状的强振幅地质体中都有发育(图5)。在平面上,这种断层的走向基本上与强振幅地质体的走向处于垂直相交的关系,他们在走向上

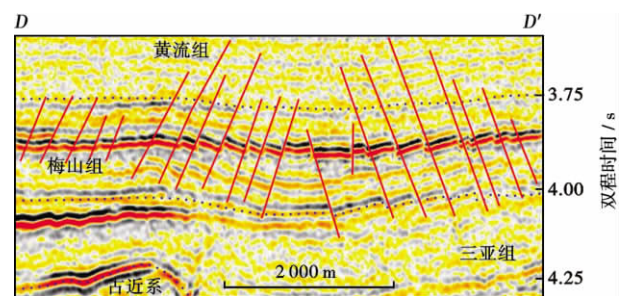


图4 强振幅地质体内部发育的小断层[剖面位置见图2(b)]

Fig. 4 Features of mini-faults developed in high amplitude reflections in sections[location see Fig. 2(b)]

的延伸距离一般都比较小,通常不会超过1 km。同时,在西部的条带状强振幅地质体发育的区域,这些小断层的长度更大,可达1 km,而在东部的不规则斑点状的强振幅地质体中,这些小断层的长度一般低于500 m。

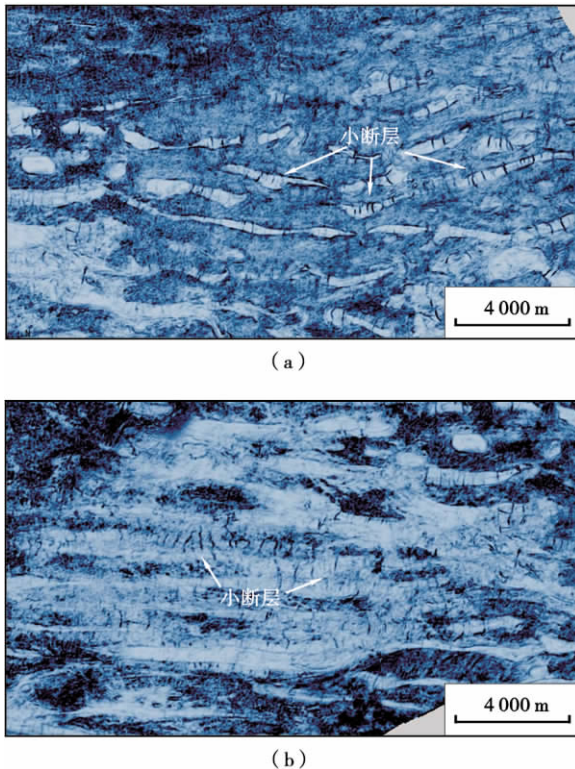


图5 强振幅地质体方差体沿层切片反映其内部小断层的平面特征[位置见图2(b)]

Fig. 5 Distribution of mini-faults developed in the high amplitude reflections in horizontal variance-slices [locations see Fig. 2(b)]

前人研究表明,在琼东南盆地南部梅山组顶部和黄流组底部以及东部早-中中新世的地层中发育有一系列的具有微小断距的张性多边形断层系^[13]。这种断层的倾角一般大于45°,长度不超过1500 m,这些剖面特性与研究区内强振幅地质体内的断层具有一定的可比性。通过断层平面和剖面特征的对比发现,研究区内的梅山组强振幅地质体内发育的小断层规模比前人研究中描述的多边形断层的规模相对较大,且平面展布具有一定的规律性:相邻断层之间表现为平行或者亚平行关系,同时走向与强振幅地质体的走向保持垂直关系。因此,研究区内梅山组发育的小断层系不具有琼东南盆地南部和东部发育的多边形断层典型的平面和剖面特征,不属于多边形断层。

3 成因探讨

3.1 沉积环境

琼东南盆地中央坳陷带在始新统时期发育两个分割的大型湖泊区:东部为松南—宝岛凹陷,西部为陵

水—乐东凹陷^[14]。同时,利用琼东南盆地北部的钻井连续岩心,通过以微体古生物学为手段的古生态学研究,邵磊等^[7]认为琼东南盆地在渐新世早期海水可能从东、西湖泊群两个方向进入琼东南盆地,在局部区域形成东、西两个浅海区,随后渐新世晚期—中新世,琼东南盆地的水深在海侵作用下进一步加深。晚中新世以来,琼东南盆地北部的陆架—陆坡体系开始发育^[15]。同时,由于沉积物供给和构造活动的差异性,琼东南盆地东、西部的陆架—陆坡体系具有不同的特征^[15-16]。伴随陆架—陆坡体系的出现,一系列深水沉积物重力流在琼东南盆地深水区开始发育^[17-19]。

尽管琼东南盆地北部陆架—陆坡体系以及相邻深水凹陷区受到来自盆地北部陆源碎屑沉积物的影响,但是中中新世以来,琼东南盆地南部隆起区由于远离物源,供给量有限的陆源碎屑很难到达盆地南部。例如,在本研究区的东南部的西沙海域西部,礁相碳酸盐的面积可达2500 km²,累计厚度达1400 m^[20]。研究认为,在梅山组时期水深相对现在较小时,盆地南部的构造高部位及其边缘地带是生物礁及碳酸盐岩台地发育的有利区带^[11]。在距离研究区较近的北礁凹陷周围,梅山组时期的陆架边缘环礁非常发育,甚至于在乐东—陵水凹陷中,也有小块的礁体发育^[21]。虽然晚中新世梅山组时期北部陆架—陆坡体系就已经形成,同时上新世受到西部红河及海南岛充足物源供给的影响,陆架—陆坡快速向前推进^[15]。然而红河物源的沉积物供给速率在晚中新世时期达到最低,随后在上新世和更新世时期再逐渐加快^[22]。综上所述,陵水低凸起晚中新世梅山组受到北部陆源碎屑的影响较小,南部碳酸盐台地物源可能有一定的贡献。同时,由于研究区本身处于南部隆起边缘的陵水低凸起之上,结合环北礁凹陷生物礁的发育推断,研究区可能会在局部发育自生碳酸盐岩沉积。

3.2 构造活动

发育在前古近系基底之上的琼东南盆地构造演化比较复杂。受到印度—欧亚大陆碰撞作用的影响,琼东南盆地古近系始新世—早渐新世和晚渐新世两期的伸展作用,形成了半地堑和地堑两种裂陷构造样式以及“南北分带、东西分段”的裂陷结构特征。琼东南盆地的构造样式对于盆地内部3套烃源岩、储层以及区域盖层的发育有重要的控制作用^[23]。同时,与大多数断陷盆地类似,琼东南盆地的构造活动多集于盆地的裂陷期,裂后期盆地主要断裂的构造活动性都大为降低^[5]。新近系以来,对盆地的层序及沉积体系的发育起控制作用的断层非常少,而且主要发育在盆地北部的陆架坡折区域^[24]。

琼东南盆地南部深水區梅山組強振幅地質體,其形成機制跟新近系以來的較微弱的斷層活動密切相關。通過強振幅地質體發育的相對位置與下伏古近系斷層的空間配置關係可以發現,几乎所有的強振幅地質體的下部,都對應着古近系控制局部地塹發育的斷層,而且似乎規模越大的斷層,其上發育的強振幅地質體的規模越大,數目也更多(圖6)。同時,這些斷層都具有一個相似的特徵:始新世—漸新世,其活動性逐漸

變小,新近系中在地震剖面上很難找到這些斷層活動的跡。除此之外,這些強振幅的平面展布,跟漸新世末期研究區內發育的斷層以及隆凹結構也具有很好的一致性:強振幅地質體發育的位置主要集中在研究區南部,對應于琼东南盆地南部的陵水低凸起上的隆起區;強振幅地質體在平面上的走向為近東西向,這與漸新世末期盆地斷裂的整體近東西走向也具有一致性(圖7)。

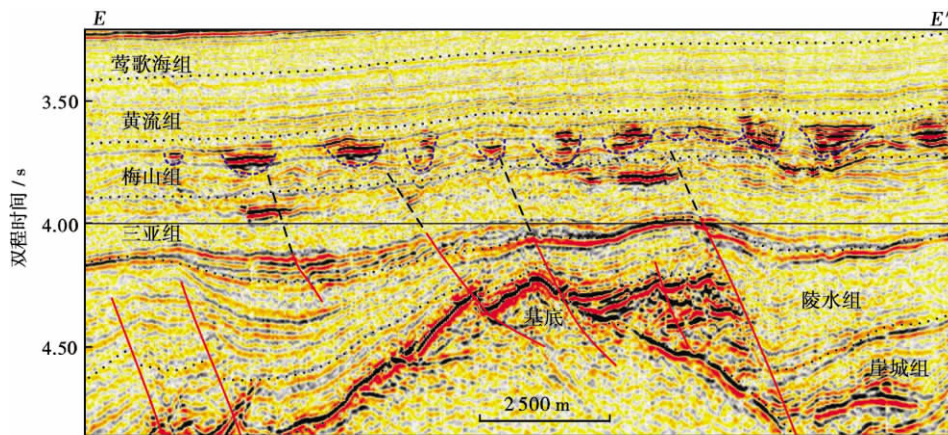


图6 强振幅地質體與下伏斷層位置關係[剖面位置见图2(b)]

Fig. 6 Relationship between distribution of the high amplitude reflections and the underlying faults [location see Fig. 2(b)]

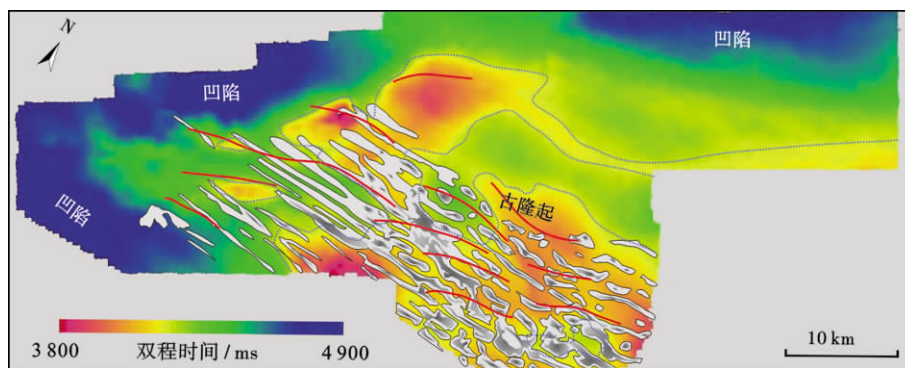


图7 研究區漸新世末期隆凹格局及主要斷層發育特徵

Fig. 7 Patterns of uplift and depression, and distribution of the main faults in Late Oligocene in study area

3.3 强振幅地質體成因

研究區內的強振幅地質體,一方面,其剖面上平直、連續性較好的地震反射內部結構特徵跟一般的油積水道的雜亂與連續交替的地震反射結構特徵相比具有較大的差異;另一方面,在平面形態上,強振幅地質體不僅具有斑點狀和不連續的特徵,同時連續的強振幅反射形態也非常平直,與一般的水道平面上發育的連續和曲折蜿蜒的特徵相異。因此,強振幅地質體並非一般的水道體系。

琼东南盆地在梅山組時期,發育大規模的碳酸鹽沉積,並且在研究區內也局部發育。同時,國內外研究實例表明,構造熱液作用導致的水—岩反應在碳酸鹽

岩地層中是很普遍的。尤其是在灰岩地層中,構造熱液作用導致的水岩反應能使其變為熱液白雲岩^[25-27]。例如,塔里木盆地發育的熱液白雲岩是盆地內最好的儲層之一,其孔隙度可以達到6%~15%^[27]。

琼东南盆地在晚中新世時期進入加速熱沉降階段。儘管多數盆地的斷裂在裂後期都已經停止活動,但是加速熱沉降使盆地內局部的斷層活化^[5]。在盆地南部,由於這些斷層往往是控制盆地地塹群發育,斷層活化作用致使這些斷層系統成為漸新世崖城組和陵水組中的流體向上運移的良好通道。另外,梅山組中發育的一系列的走向與強振幅地質體垂直的小斷層使流體能夠更好的與周圍的地層接觸,隨之發生的水—岩反應,

使原始沉积地层岩性的改变,或者形成溶蚀孔洞在后期得到流体的充注,从而导致强振幅地质体的形成。平面上强振幅地质体东西部表现出来的特征差异可能跟下伏断裂的活动性以及向上输导的流体量有关。西部的断裂更靠近乐东—陵水凹陷,断裂活动较强,相应地深部流体更多,对梅山组沉积物成岩改造更明显,因此能够形成平面上成条带状的单层强振幅体;而在东部断裂活动较弱,相同时间内流入的流体量可能较少,相应的成岩改造范围有限,仅仅是沿这些断层活动形成平面上规模较小斑点状的,同时却很“厚”的强振幅地质体。

4 油气地质意义

经过数十年的油气勘探,琼东南盆地被证明具有很好的油气前景^[2,8],但是盆地油气勘探领域及范围主要集中于陆架浅水区,深水区的油气勘探活动非常有限^[1]。尽管如此,浅水区的油气勘探证明,在琼东南盆地北部一些小型凹陷中都能够有良好的烃源岩发育。通过盆地级别的沉积体系演化发现,盆地深水区中央拗陷带更大规模的凹陷中,烃源岩也应当更加发育^[7]。同时,古近系的陆相以及海陆交互的砂岩的广泛发育为油气提供了良好的储层^[9],特别是琼东南盆地中央拗陷带新近系发育的中央峡谷,其中沉积的大量深水浊积砂岩规模相当可观^[10]。另外,琼东南盆地南部隆起及其周缘区域,发育了大规模的生物礁及碳酸盐台地,也可作为良好的储层^[11,20-21]。

琼东南盆地南部深水区梅山组强振幅地质体的形成,对于深水区的油气勘探具有重要的指导意义。尽管琼东南盆地裂后期的构造活动被认为在中新世以来趋于停滞状态,连接烃源岩和储层通道的缺乏一直是制约盆地裂后期油气成藏的最主要因素之一^[13]。深水区强振幅地质体的成因跟盆地深部隐伏断裂后期再活动密切相关。梅山组强振幅地质体的出现证明了裂后期盆地深水区的构造活动仍存在,能够作为良好的流体运移通道,使下伏烃源岩生成的油气向上运移到新近系的储层中成为可能。同时,梅山组一直被认为是研究区内发育良好的区域盖层,但是其中发育的强振幅地质体指示着裂后期的构造活动有可能对其垂向封堵性造成一定的影响。

5 结论

琼东南盆地南部深水区梅山组发育一系列的强振幅地质体。这些地质体在剖面上展示出“V”或者“U”型的似“水道”的外部形态特征。然而,其内部却以平行或者亚平行的地震反射为特征,这跟一般浊积水道内部侵蚀面发育的浊积水道又有明显的不同。在平面

上,强振幅地质体走向为近东西向。同时,在其发育的东西部有具有不同的平面展布特征:西部表现为条带状,整体厚度较薄;东部表现为不规则斑点状,厚度较大。另外,在强振幅地质体中还发育一系列的走向与其自身走向垂直的小断层系。

这种强振幅地质体的成因归结于新近系盆地裂后期局部断层的活化。深部隐伏断裂再活动将古近系的流体向上流入到梅山组,致使沿断裂带水—岩反应的发生及相应的成岩改造和流体充注,导致了强振幅地质体的形成。强振幅地质体的发育对研究区深水油气勘探具有重要的作用:一方面,强振幅地质体的发育证明了盆地南部隆起区裂后期发育的深部断层在裂后期得到活化,使其能够成为良好的油气输导通道;另一方面,这些断层的活动可能对区域梅山组地层的垂向封堵性造成一定的影响。

参考文献

- [1] 何家雄,施小斌,夏斌,等.南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景[J].地球科学进展,2007,22(3):261-270.
He Jiaxiong, Shi Xiaobin, Xia Bin, et al. The status of the petroleum exploration in the Northern South China Sea and the resource potential in the deep-water areas[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(3): 261-270.
- [2] 张功成,米立军,吴时国,等.深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J].石油学报,2007,28(2):15-21.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area: the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. Acta Petroli Sinica, 2007, 28(2): 15-21.
- [3] 朱伟林,张功成,高乐.南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J].石油学报,2008,29(1):1-9.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petroli Sinica, 2008, 29(1): 1-9.
- [4] 龚再升.中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏[J].地球科学——中国地质大学学报,2004,35(5):513-517.
Gong Zaisheng. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 35(5): 513-517.
- [5] Xie X N, Muller R D, Li S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(7): 745-765.
- [6] 魏魁生,崔旱云,叶淑芬,等.琼东南盆地高精度层序地层学研究[J].地球科学——中国地质大学学报,2001,32(1):59-66.
Wei Kuisheng, Cui Hanyun, Ye Shufen, et al. High-precision sequence stratigraphy in Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2001, 32(1): 59-66.
- [7] 邵磊,李昂,吴国璋,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.
- [8] 王振峰,李绪深,孙志鹏,等. 琼东南盆地深水油气成藏条件和勘探潜力[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(1): 7-13.
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.
- [9] 何仕斌,张功成,米立军,等. 南海北部大陆边缘盆地深水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.
- [10] 苏明,李俊良,姜涛,等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 85-93.
Su Ming, Li Junliang, Jiang Tao, et al. Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan Basin, Northern South China sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 85-93.
- [11] 马玉波,吴时国,许建龙,等. 琼东南盆地南部深水凹陷生物礁及碳酸盐岩台地发育模式[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(1): 119-124.
Ma Yubo, Wu Shiguo, Xu Jianlong, et al. Distribution and model of reef and carbonate platforms in the South Deepwater Sag of Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1): 119-124.
- [12] Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels—Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24: 388-405.
- [13] 吴时国,孙启良,吴拓宇,等. 琼东南盆地深水多边形断层的发现及其油气意义[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 22-26.
Wu Shiguo, Sun Qiliang, Wu Tuoyu, et al. Polygonal fault and oil-gas accumulation in deep-water area of Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 22-26.
- [14] 张功成,刘震,米立军,等. 珠江口盆地—琼东南盆地深水古近系沉积演化[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.
- [15] Xie X N, Muller R D, Ren J Y, et al. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2008, 247: 129-144.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 何云龙,解习农,陆永潮,等. 琼东南盆地深水块体流构成及其沉积特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 905-913.
He Yunlong, Xie Xinong, Lu Yongchao, et al. Architecture and characteristics of mass transport deposits (MTDs) in Qiongdongnan Basin in northern South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 905-913.
- [19] Su M, Xie X O, Li J L, et al. Gravity Flow on Slope and Abyssal Systems in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2011, 85: 243-253.
- [20] 魏喜. 西沙海域晚新生代礁相碳酸盐岩形成条件及油气勘探前景[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
Wei Xi. Forming condition of Late-Cenozoic reef facies carbonate rocks in Xisha Sea area and their oil and gas exploration potential [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [21] Wu S G, Yuan S Q, Zhang G C, et al. Seismic characteristics of a reef carbonate reservoir and implications for hydrocarbon exploration in deepwater of the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 817-823.
- [22] Clift P D, Sun Z. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: Implications for Tibetan uplift and monsoon intensification[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111, B06405.
- [23] 赵民,张晓宝,吉利明,等. 琼东南盆地构造演化特征及其对油气藏的控制浅析[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(3): 494-502.
Zhao Min, Zhang Xiaobao, Ji Liming, et al. Characteristics of tectonic evolution in the Qiongdongnan Basin and brief discussion about its controlling on reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(3): 494-502.
- [24] 王华,陆永潮,廖远涛,等. 琼东南盆地中东部三亚组层序构成及有利区带预测[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(5): 609-614.
Wang Hua, Lu Yongchao, Liao Yuantao, et al. Sequence architecture and favorable reservoir prediction of Sanya Formation in the Central and Eastern Qiongdongnan Basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(5): 609-614.
- [25] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [26] 李朋,任建业,阳怀忠,等. 巴楚地区断裂带内热液流体活动及对碳酸盐岩改造的特征分析[J]. *大地构造与成矿*, 2011, 35(3): 378-385.
Li Peng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, et al. Hydrothermal activities in the fault system and their effects on carbonate rocks in the Bachu Area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(3): 378-385.
- [27] 焦存礼,何治亮,邢秀娟,等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 277-284.
Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 277-284.

(收稿日期 2011-11-29 改回日期 2012-04-05 责任编辑 熊英)