

热西提·亚力坤, 单玄龙, 郝国丽, 等. 珠江口盆地西江主洼泥-流体底辟及其发育条件[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 58-69.

YALIKUN·Rexiti, SHAN Xuanlong, HAO Guoli, et al. Mud-fluid diapir and its development conditions in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(7): 58-69.

珠江口盆地西江主洼泥-流体底辟及其发育条件

热西提·亚力坤, 单玄龙*, 郝国丽, 李康

(吉林大学地球科学学院, 长春 130061)

摘要: 珠江口盆地西江主洼存在垂向的反射成像浑浊区域, 这种垂向模糊区的地质成因多与盆地底辟活动相关。对西江主洼 33 西洼古近系地震资料中垂向模糊区的地震剖面特征形态及其地震波阻抗特征进行研究, 并结合研究区盆地古近纪发育演化的特点认为, 该模糊区拥有深、浅部反射不同的二元结构, 可能是一处泥-流体底辟构造。西江主洼的古近系文昌组深湖相分布广泛, 可以作为泥-流体底辟的泥源物质存在; 33 西洼钻井恩平组底部恩四段地层存在高压异常, 恩平组顶部地层广泛发育的泥岩, 可作为封存箱盖层, 西江主洼具备形成封存箱的超压条件。而珠海期的岩浆侵入破坏了封存条件, 诱发了盆地的泥-流体底辟活动, 在 33 西洼古近系地层形成了深埋型-弱刺穿的锥状泥-流体底辟。

关键词: 西江主洼; 地震模糊区; 泥-流体底辟; 封存箱; 岩浆侵入; 珠江口盆地

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.288

0 引言

南海北部大陆边缘盆地新近纪以来沉积充填了陆相低渗透性页岩、泥质粉砂岩和泥岩, 短期内盆地快速沉降易于使泥岩欠压实从而形成超压状态。盆地深部的文昌组生烃作用最强, 具有泥底辟形成发育的有利因素^[1]。长期以来, 对于泥-热流体底辟现象的研究主要集中在莺歌海盆地, 有大量关于该区域底辟成因及其对油气成藏的贡献等方面的研究, 这是因为该区域中央坳陷带存在一系列规模庞大的泥底辟构造带^[2-3]。随着地震处理技术的提高和勘探程度的加深, 开始注意到邻近的琼东南盆地乐东-陵水凹陷内的泥-流体底辟和气烟囱等地质现象, 以及珠江口盆地东北部台西南盆地中的伴生泥底辟和泥火山。董冬冬等^[4]对珠江口盆地南

部深水白云凹陷北坡番禺低隆起泥底辟及气烟囱进行了研究, 发现底辟成因与超压流体释放有关, 泥底辟与气烟囱分布在油气田附近; 吴娟等^[5]在恩平凹陷内西北部陡坡带也发现了气烟囱构造。由此可见, 泥-流体底辟构造不仅是南海北部诸多伸展断陷盆地中的常见地质现象, 在珠江口盆地中也有发育, 仅在其地震形态、发育程度等方面存在差异。

泥-热流体底辟是一类与盆地油气活动直接相关的底辟构造, 对泥-流体底辟构造的研究不但有利于认识西江主洼的地质特征, 也有利于促进研究区的油气勘探。首先, 泥底辟物质来源是厚泥质层, 是研究区未勘探到的早文昌组沉积期深湖相广泛发育的直接证据; 其次, 底辟与盆地流体活动密切相关, 形成泥底辟的流体往往是烃源岩演化过程油气积聚产生的超压作用下的结果, 这一点在其他伸展盆地勘探中常见; 最后, 泥-流体底辟是盆地的垂向构造, 易形成沟通深浅部地层的油气运移通道, 或形成与底辟构造相关的圈闭。

收稿日期: 2022-12-15

资助项目: 中海石油重大科技专项“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ135ZDXM37SZ); 国家自然科学基金(41790453, 41972313)

作者简介: 热西提·亚力坤(1997-), 男, 在读硕士, 主要从事盆地构造和石油地质方面的研究工作。E-mail: 2669585747@qq.com

* 通讯作者: 单玄龙(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非常规油气地质方面的研究工作。E-mail: shanxl@jlu.edu.cn

1 区域地质概况

西江主洼位于珠江口盆地北部坳陷带(图 1a), 与南部番禺 4 洼和西江 36 洼共同组成西江凹陷(图 1b), 西江凹陷东接惠西低凸起, 西接恩西低凸

起, 北部发育裂陷期残洼。这些洼陷和凸起极大地阻隔了北部隆起带和南部东沙隆起的大型物源输入, 西江主洼在珠江运动一幕文昌组沉积期整体处于欠补偿的背景^[6], 为文昌组发育泥岩提供了条件; 珠江运动二幕恩平组沉积期虽然湖盆面积扩大, 但仍是文昌组沉积期活动的继承性发展, 湖盆面积不断扩大。西江主洼在中始新世—早渐新世珠江运动一幕(T_g-T_{80})盆地裂陷初始形成, 发育河流-湖泊-三角洲环境的文昌组, 与前古近系花岗岩基底呈不

整合接触; 早渐新世—中渐新世珠江运动二幕($T_{80}-T_{70}$)盆地进一步裂陷, 发育湖泊-沼泽环境的恩平组, 可见煤层, 珠江运动时期的盆地快速沉降, NEE 向边界断裂剧烈活动, 活动速率在文昌期最大。而在恩平组沉积期由早到晚趋于稳定, 同时湖泊面积变大, 至恩一二段($T_{72}-T_{70}$)沉积时期, 在西江主洼发育区域性泥岩, 厚度介于 200~400 m, 向洼陷周围缓坡区逐渐尖灭, 是盆地重要的盖层。珠海组沉积期盆地进入拗陷期, 构造沉降速率明显降低, 以热成降作用为主, 珠海组及以上地层处于古珠江入海口, 地层的含砂率极高, 泥岩层少发育, 缺乏有效的区域性盖层。

2 底辟构造地质剖面特征

底辟构造最重要的特征是地震模糊带, 模糊带是一种地震上表现异常反射的结构, 底辟构造内包含的低速流体使地震波阻抗差减小, 或者侵入体混入原有围岩形成物性均匀体, 从而在地震资料中形成信噪比低、地层接触关系不清的数据区。根据地质成因, 地震模糊带的形成分为 2 大类, 一类是地震信息采集处理造成的, 与浅层含气强反射层屏蔽作用或地震波受到断层干扰有关; 另一类是受到气烟囱、泥底辟、泥拱、泥火山、火山、古潜山、礁、盐丘等地质体的影响^[7-11]。根据组成底辟岩体的不同, 分为岩浆底辟、盐底辟和泥-流体底辟 3 类, 且由于底辟构造形成机制的不同而具有不同的发育形态。

2.1 岩浆底辟

岩浆底辟与地壳构造岩浆活动和深部断裂的发育相关, 岩浆沿大断裂侵入围岩, 使沉积盖层产状发生变化形成底辟构造。岩浆底辟主要分布在中国东部沿海的一系列中—新生代断陷盆地中, 如在珠一拗陷阳江东凹内发育的基底卷入型岩浆底辟(图 2a)。此外, 岩浆沿断裂带侵入沉积盖层或者喷出地表, 顶部沉积地层超覆在火山岩体上^[12], 或者未喷出地表的岩株在拱张作用下使上覆岩层发生弯曲或抬升^[13-14], 形成刺穿盖层型岩浆底辟(图 2b)。

2.2 盐底辟

盆地内的盐底辟是由于受到差异负载和重力滑脱作用的影响, 盐泥地层发生强烈塑性变形, 在

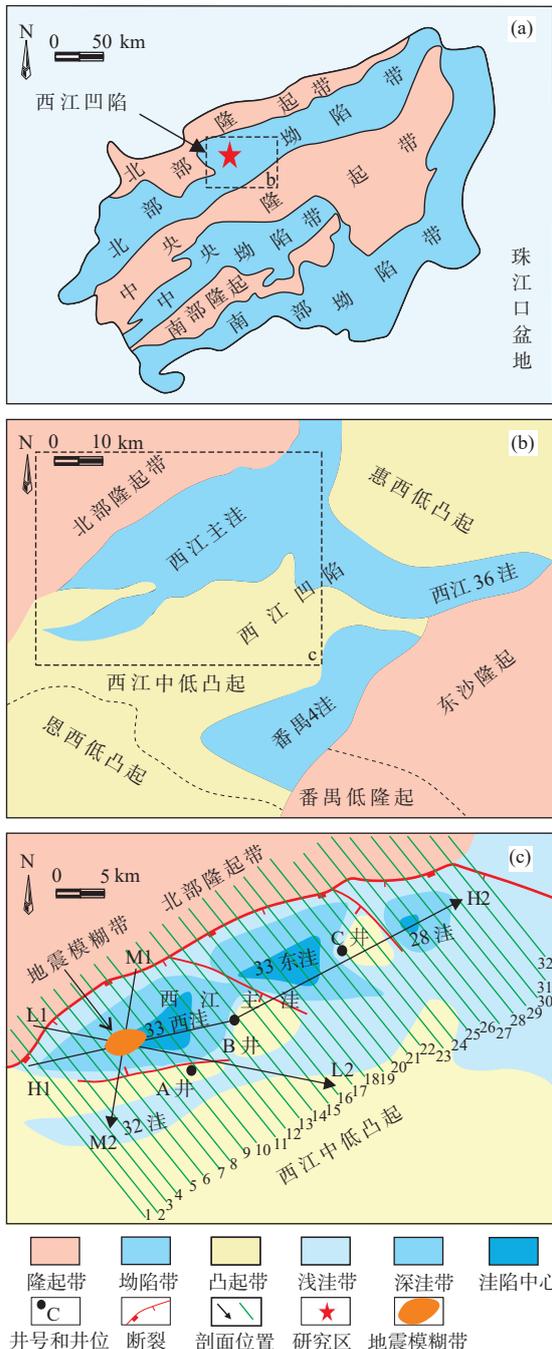
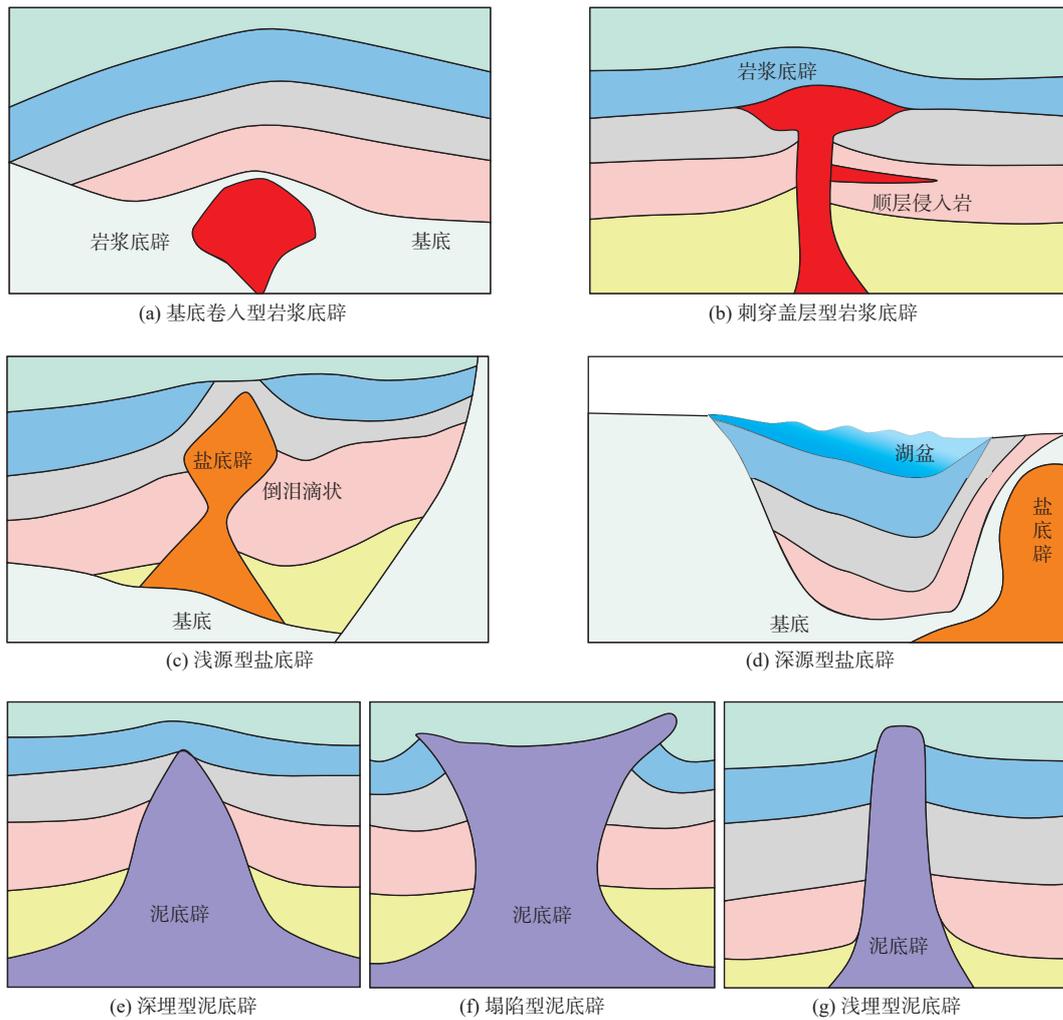


图 1 西江主洼区域位置^[6]

Fig.1 Location of the Xijiang Main Sag area^[6]



(a)据文献 [11-12] 修改; (b)据文献 [13-14] 修改; (c)据文献 [15] 修改; (d)据文献 [16] 修改; (e、f、g)据文献 [17] 修改

图2 不同类型底辟构造发育形态特征

Fig.2 Morphological facies characteristics of different types of diapir development

地震剖面上的隆起刺穿特征特别明显^[15],其接触的与围岩底部抽空会导致上覆层下凹,形成伴生正断层和龟背构造,且正断层呈放射状展布,地震剖面上表现为连续反射中断,轮廓明显的杂乱反射、弱反射。盐岩处于凸起斜坡或倾斜断面的底板上,与其上覆围岩产生静压力差,大套的塑化泥岩层裹挟脆性的砂泥岩地层流动,形成倒泪滴状浅源型盐底辟(图2c);此外还有基底卷入型盐底辟构造,其形成深度大,影响区域构造变形^[16],与新盆地形成前的盐岩基底有关(图2d)。

2.3 泥-流体底辟

由于泥底辟的活动往往也伴随着流体底辟活动,由此称为泥-流体底辟。在中国南海沉积盆地里有丰富的该类型底辟构造,尤其是在莺歌海盆地研究程度较高。前人按照发育形式的不同,将其分为泥底辟、气烟囱、流体泄漏通道和海底麻坑

等类型,本质上是低密度砂泥岩与热流体塑性上拱的不同演化阶段和不同程度的底辟作用,底辟体侵入到上覆岩层则形成泥底辟,如果刺穿到地表则形成泥火山^[18-19]。赵宝峰等^[20]以底辟空间组合方式为基础,结合底辟伴生断裂和水力破裂2类垂向疏导体要素,将泥底辟分为张扭型、上拱型和下凹型3种类型,将流体底辟划分为模糊带和气烟囱2种类型;杨东升等^[21]根据疏导泄压通道的不同将泥-流体底辟划分为裂缝型底辟和断裂型底辟2类;何家雄等^[17]根据底辟埋藏深度由深到浅、活动能量由弱到强等,分为深埋型、浅埋型和塌陷型3类(图2e、f、g)。

3 西江主洼泥-流体底辟地震特征

西江主洼泥-流体底辟呈下部泥底辟和上部流体底辟的二元底辟结构。下部泥底辟在地震剖面

上最显著的特征是形成地震模糊区。泥底辟由于各种砂泥组分相互混杂, 改变了地层和围岩的产状, 形成地震反射界面不清楚的模糊异常体, 模糊带呈侵入状, 其内没有地震界面或反射界面不清楚。上部流体底辟对地震波速产生微小影响, 形成地层上拉的柱状实体^[22-23]。流体底辟则沿裂缝或微断层依靠自身能量突破, 使上覆地层产状发生变化, 发生地震畸变现象, 但基本保持原地层的连续性^[24-26]。

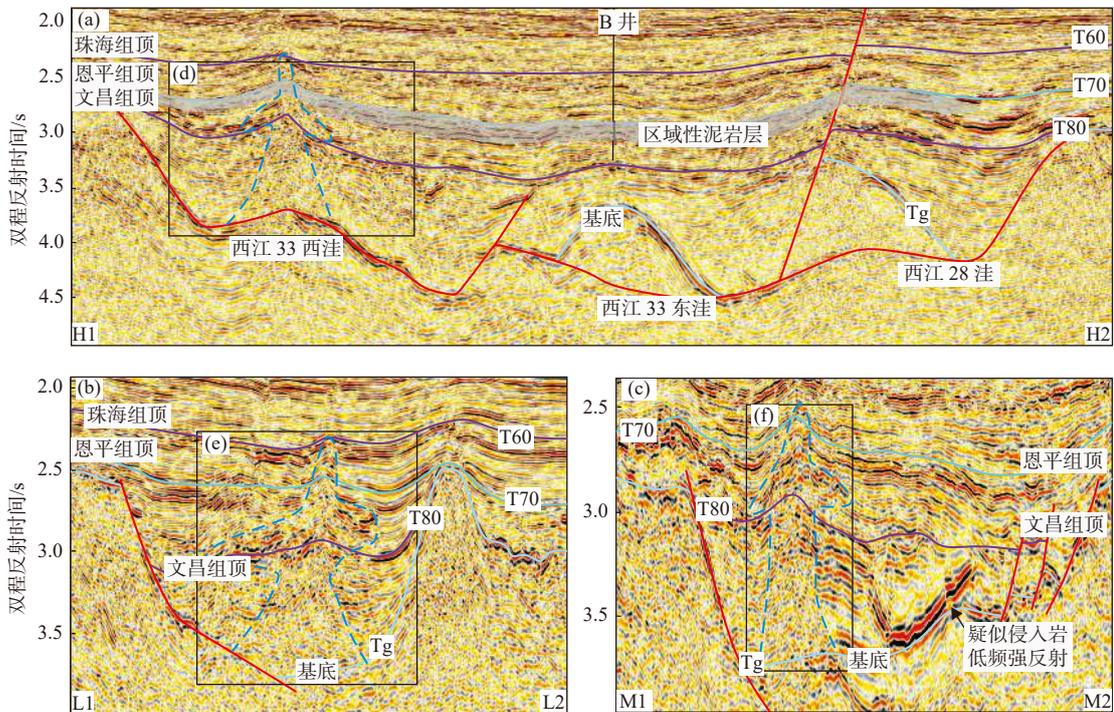
3.1 地震模糊体特征

西江主洼位于珠一坳陷内, 分别由西江 33 西洼、西江 33 东洼和西江 28 洼 3 个次级洼陷构成 (图 1c), 在地震反射上, 西江主洼地震反射品质虽然较差, 但在平行控洼断层方向的长剖面上仍具有相当好的连续性, 仅在西江 33 西洼内发现一处明显的地震异常体, 平面上呈 NEE 向近椭圆状分布 (图 1c), 在地震剖面上贯穿文昌组(T₈₀)界面、恩平组(T₇₀)界面, 在接近珠海组顶界面(T₆₀)处反射变为正常 (图 3a), 其上珠江组地层反射特征正常。西江主洼的地震异常模糊体有以下几个特征: ①具有分层结构。在文昌组内部表现为连续性中断的弱振幅杂乱反射, 在靠近缓坡的边界处不连续过渡到正常地层 (图 3b); 而在恩平组地层中, 则表现为连

续的反射层上移, 地震轴连续性没有变化, 振幅异常的加强或减弱, 同时有横柱状层内延伸的特征 (图 3b)。②异常体的根部原本反映盆地滑脱面的主控洼断层消失, 表现为基底强反射界面的突然中断 (图 3a), 顶部地震异常在珠海组顶界面附近(T₆₀)消失, 上部地层不具有披覆结构; 泥-流体底辟与成岩作用流体在孔隙中渗流不同, 地震同相轴上移主要是受到上覆岩层中流体底辟影响, 因此出现了恩平-珠海组反射上拱强烈但却找不到相应的削截面的现象 (图 3c)。恩平组下伏地层出现一个与正常地层连续的低频波状强反射异常体 (图 3b), 在白云凹陷的中央泥-流体底辟带也发现过类似的水平模糊带构造^[27]。③在模糊体附近缓坡处发现了疑似侵入岩的强反射 (图 3c), 侵入岩的层速度往往因高于沉积围岩而表现为低频, 顶底由于岩性差异巨大易形成强反射界面, 总体表现为低频强反射特征, 同时与周围围岩相比存在明显的“穿层”现象, 这是侵入岩的典型识别特征, 其出现是深部岩浆活动的表现。

3.2 地震波形显示特征

地震道的波形显示的是波阻抗曲线, 这种反射波波形是地震子波在地下各反射界面上发生反射



剖面位置见图 1

图 3 西江主洼地震模糊区地震相特征

Fig.3 Seismic facies characteristics of seismic fuzzy area in the Xijiang Main Sag

时形成的,波阻抗与地层的速度和密度呈正相关。地震记录中波阻抗的振幅大小取决于反射系数的绝对值,波阻抗的极性取决于反射系数的正负,波阻抗的垂向位置取决于地层的深度(图4)。而地震反射系数是通过测井等手段确定的,其变化受到地层结构、岩性变化、流体分布等控制^[28],因此,可以通过这种连续地层中地震反射波的异常特征,从地质解释的角度分析其成因。

根据底辟体及其周围地层的波阻抗特征变化,

将西江主洼泥流体底辟地震波显示剖面中的波阻抗分为3个类型:①波阻抗变化强烈,表现为强振幅的连续地震反射,表明该深度存在差异较大的接触界面,珠海组和恩平组的不受底辟体影响的地层即为这类情况(图5d、g);②在波阻抗的总变化量很大的情况下也存在振幅斜坡状缓慢变化的情况,在地震记录上为断续弱地震反射,沉积地层实际上仍然为砂泥岩互层,反映了较复杂的沉积环境下形成的地震噪声,也可能与地震处理中地震道空间间隔

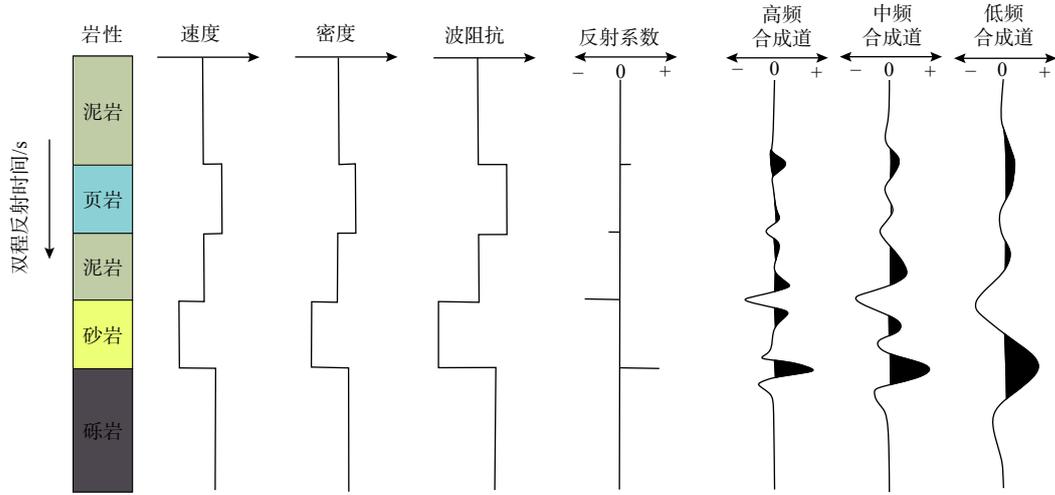


图4 岩石岩性变化与地震波阻抗关系^[29]

Fig.4 Relationship between rock lithology variation and seismic wave impedance^[29]

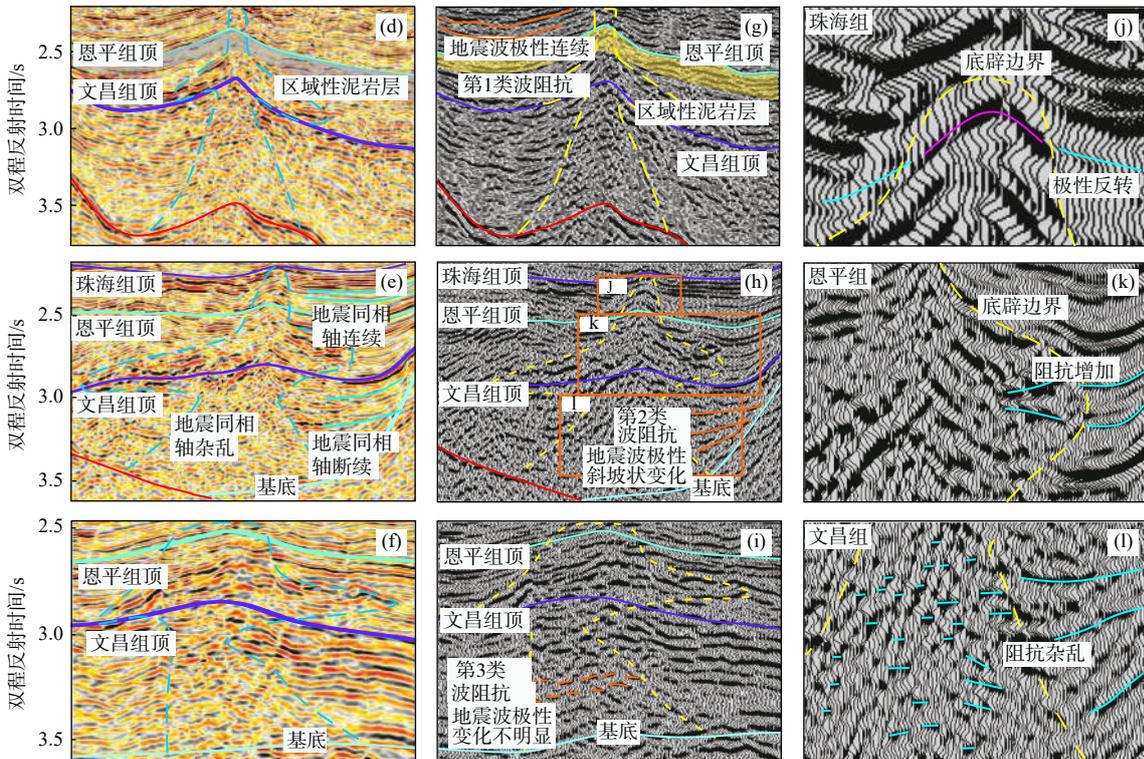


图5 西江主洼泥-流体底辟地震道波形特征

Fig.5 Seismic trace of waveform characteristics of mud fluid diapir in Xijiang Main Sag

的选择有关^[30] (图 5e、h), 如发育河流-湖泊相复杂沉积体系的文昌组未受底辟影响时的地层波阻抗; ③波阻抗的变化量并不大, 地震波的极性特征不明显, 如盆地基底岩性均一往往为杂乱空白反射, 在成层性好的沉积地层中出现此类特征, 可能与地层形成后的破坏作用有关(图 5f、i)。

3.3 波阻抗异常的地质意义

文昌组内地层的连续性较差, 但从波阻抗曲线的垂向变化来看, 在垂直控洼断裂剖面(图 5h、i)上, 虽然文昌组在地震道波形连续性差但反射系数变化相对较小, 说明文昌组仍具备一定的成层特征, 发育均质厚泥岩层, 由于受到早期强烈伸展活动和晚期多期构造叠加影响使其连续性变差。而在泥-流体底辟中心区, 地震波极性变化频繁, 总体偏向于负极性域。此外, 文昌组泥-流体底辟中心区波阻抗起伏相对较小, 而波阻抗值是地层密度和速度的乘积, 较低的波阻抗值说明该区域岩层的密度和速度均相对较低, 显然与随着深度的加深地层在压实作用下的密度变大且层速度也逐渐增大相违背。

因此, 本研究认为文昌组沉积层存在入射角度增大带来的极性偏移, 泥岩上拱破坏了原有的沉积层结构, 沉积层的抬升使入射角增加从而使振幅极性偏移(图 5l、6a)。由于地震波反射系数绝对值偏低, 此时无论振幅极性如何, 实际地震道中很难分清这些小斜率的正负号。这种极性偏移可能是泥岩上拱发育的证据。

恩平组底辟体的核部位置仍具有阻抗杂乱的现象, 但底辟体内部极性偏移相较文昌组更不明显, 且底辟体内的极性较连续, 说明泥岩的上拱作用相较文昌组减弱。恩平组中的异常主要表现为区域性泥岩之下的顺层异常波阻抗与正常波阻抗之间存在明显的边界, 并且异常体内表现为较高的波阻抗绝对值, 恩平组下部为一套砂泥岩互层地层, 符合含油气砂岩 B 的振幅响应模式(图 6b)^[30], 原有的砂岩层为含盐水砂岩, 在受到深部来源的油水流体侵入后的叠加响应(图 5k、6b), 与原来相比振幅的绝对值明显变化, 在西江主注恩平组表现为从低阻抗变为高阻抗层。因此, 恩平组既具有泥岩上拱, 也具有流体顺层侵入的发育特征。

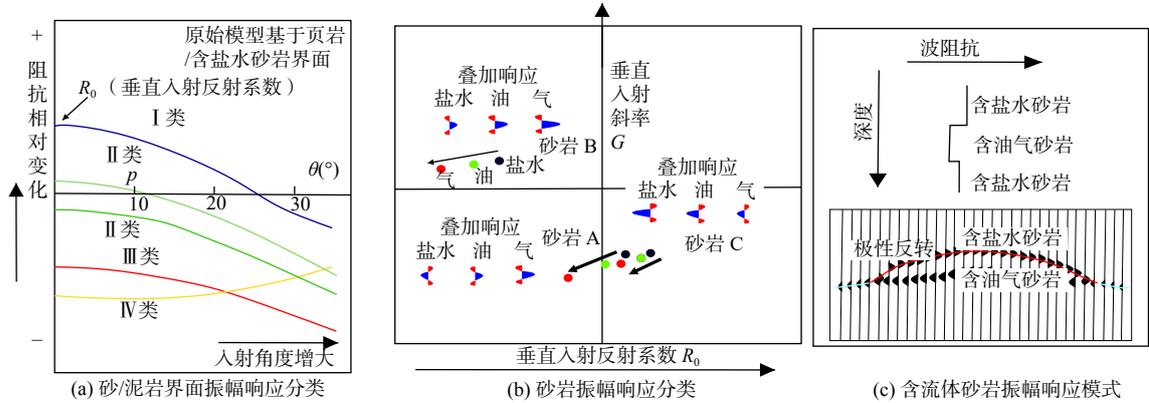


图 6 沉积岩地震振幅响应不同控制因素^[29]

Fig.6 Different control factors of seismic amplitude response of sedimentary rocks^[29]

珠海组底辟体波阻抗连续性好, 虽受到一定的极性偏移影响, 但振幅下降的幅度不明显, 最显著的特征为底辟体顶部明显具有极性反转的现象(图 5j、6c), 这类现象常发生在油水界面之间^[31]。珠海组发育大套砂岩地层, 当深部流体进入背斜核部砂岩层时, 含油气砂岩波阻抗相较于含盐水砂岩阻抗增加, 相较原有地层极性变化时称为极性反转(图 6c)。很少量的流体饱和度即可强烈降低纵波速度, 但与原岩石的性质及流体密度有关, 因此认为珠海组内异常主要受含盐水砂岩混入油气流体影响。

综合来看, 文昌-恩平组均具有沉积岩层被破坏而引起振幅极性偏移的现象, 原有沉积层产状改变造成地震波极性杂乱, 恩平组下部顺层振幅增大是油气流体侵入的影响, 而珠海组振幅极性偏移小, 但出现了极性反转, 是含盐水砂岩混入油气流体的证据。

4 泥底辟的形成机制

对于该模糊区构造带的认识, 前人研究很少, 有内部观点认为是中酸性岩浆侵入围岩。在西江

主洼南部的番禺4洼文昌组有钻井证实的辉绿岩侵入体,但并无类似的大规模模糊体结构,同时,西江主洼模糊区特征为从深层到浅层、从底辟核部到周缘地震成像由模糊变正常,而岩浆岩与沉积围岩一般接触界面清晰,为突变接触;西江主洼内的模糊体虽然规模大,刺穿了多个层位,但缺乏与如此大规模底辟活动相关的不整合面,说明原有地层的产状变化有限,这正是深埋-弱刺穿型泥-流体底辟(图2e)的发育特点。泥底辟和流体底辟往往是叠加伴生的,在地震剖面上表现为二元结构,而西江主洼内的模糊体文昌组和恩平-珠海组有截然不同的2种结构。文昌组($T_{80}-T_g$)内部为杂乱反射,找不到连续地震同相轴,砂泥混杂物在一定条件下通过泄压通道塑性流动;在恩平组及以上地层($T_{60}-T_{80}$)内原同相轴基本连续,仅表现为地震波频率降低的特征,这是由于流体底辟相对底部泥底辟对岩层破坏更小,地震上具有垂向扰动的管状结构。因此,此处模糊体可能是塑性物质的底辟作用。西江主洼泥-流体底辟表现为典型的下部泥底辟-上部流体底辟的二元结构特征。

目前主流观点认为,区域应力作用、高温高压、快速沉降充填等条件是形成盆地泥底辟构造的基本条件^[32-34]。泥底辟的地震形态根据成因构造不同而形态各异,但都表现为垂向构造,其形成应具备的重要条件是:①盆地内有大量泥岩快速沉积作为泥源层,在欠补偿环境下地层的快速沉降导致地层欠压实,富含有机质的厚层泥岩生排烃作用进一步加剧地层压力;②顶部具有盖层形成压力封存箱,古近系时断拗转换,大部分断裂活动性减弱,在以泥岩为主的盖层底部超压逐渐形成,随着新地层充填深埋深部压力持续增加;③33西洼基底面倾斜角度较大,是地层产生差异负荷发生密度倒转的重要前提;④结合西江主洼在文昌组中的疑似侵入岩判

断,晚期构造运动时的岩浆侵入活动和断裂活动对泥-流体底辟的形成具有促进作用。

4.1 厚泥源物质层

被动大陆边缘由于沉积厚度大,沉积速率快,巨厚沉积层、异常高温高压发育,火山活动频繁,使这些地区泥-流体底辟构造发育,泥岩层和丰富的流体活动为底辟的形成发育提供了物质基础^[35-39]。针对西江主洼洼陷内文昌组烃源岩潜力的研究缺乏钻井证实,目前已有的钻至文昌组的钻井均在南部斜坡构造带上,从3个方面推测西江主洼文昌组为中深湖-深湖相泥岩沉积:①对珠一坳陷富生烃洼陷研究表明,控洼断裂活动速率 >100 m/Ma时,即可形成半深湖-深湖相文昌组^[40]。在西江主洼选取垂直控洼断层的32条测线(剖面位置见图1)统计文昌组和恩平组的残余厚度(图7),结果表明,恩平组残余厚度约为1400 m,文昌组为2500 m,洼陷中心文昌组沉降速率 >200 m/Ma。此外,恩平组沉积期断裂活动相对文昌组沉积期较弱,而斜坡钻井揭示,恩平组为浅湖-沼泽相沉积,结合珠一坳陷内其他洼陷的钻井揭示,断陷活动更为强烈的文昌组很有可能为深湖-半深湖相泥岩发育。②洼陷东南部的34-3构造上的钻井油源研究表明该构造存在2种类型的油样^[41],一种原油贫4-甲基甾烷,另一种原油富4-甲基甾烷。受到西江低凸起的遮挡,能为34-3构造提供油源的只有西江主洼洼陷区,而西江主洼恩平组的油源为贫4-甲基甾烷,因此,西江主洼文昌组具有良好的生烃潜力。③在地震剖面上,珠一坳陷其他洼陷文昌组为强振幅低频连续反射,而西江主洼文昌组以不连续的弱反射为主,据地震沉积学分析,这可能揭示了文昌组为广泛的块状泥岩沉积^[42]。

综上所述,通过对西江主洼文昌组地震相-沉积

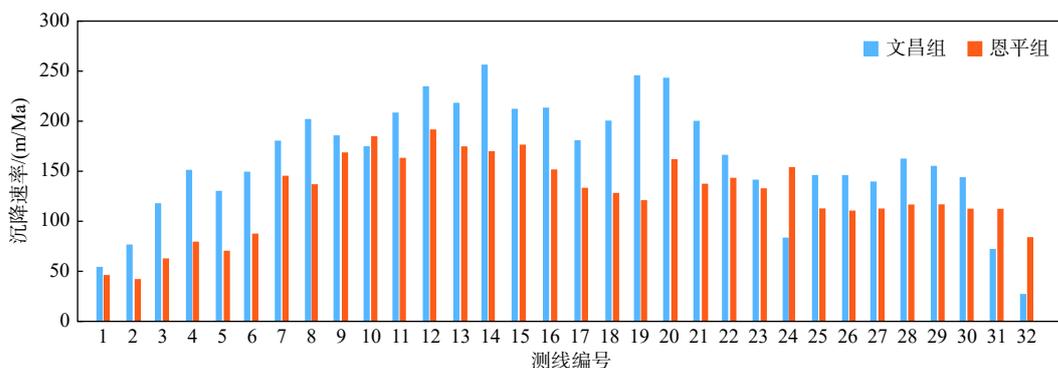


图7 西江主洼文昌-恩平组沉积期沉降速率

Fig.7 Subsidence rate in the Wenchang-Enping period in the Xijiang Main Sag

相研究, 结合部分斜坡区钻井揭示结果以及断陷演化规律, 认为西江主洼文昌组具有成为泥底辟发生的泥源层的潜力(图 5)。文昌组沉积期接受来自西江低凸起的近物源沉积, 有利于形成半深湖-深湖相细粒沉积, 厚层富有机质泥岩的存在是形成泥-流体底辟的物质条件。

4.2 超压和封存箱

根据张启明和董伟良^[43]对中国含油气盆地的超压研究, 中国东部新生代伸展盆地与转换伸展盆地普遍存在超压, 且一般由生烃作用和压实不均衡造成。封存箱是裂谷盆地中的常见构造, 具体以异常压力体的形式存在, 盆地快速沉降使箱内压力增大而不能排出, 从而形成异常高压, 前人已经在白云凹陷的泥-流体底辟带的研究表明盆地存在高温-高压现象, 田立新等^[44]认为洼陷中心的恩平-文昌组处于超压封存箱内, 最大压力系数可以达到 1.8~1.9; 对恩平凹陷也做过凹陷的压力封存箱研究, 恩平凹陷 4570 m 文昌组顶部地层压力系数实测从恩平组 1.0 骤然增大到接近 1.5, 均符合中海油公司分类方案中异常高压的标准^[44-45]。从西江主洼 B 井揭示的恩平组地层压力变化来看(图 8), 4400 m 以上地层处于常压, 而在 4400 m 以下的恩四段处于高压异常状态, 同时, 地层层速度在 4300 m 变小后继续增大, 说明了该层位存在低速带。而在 B 井该段对应的是恩平组区域性厚泥岩层, 泥岩的渗透

率很低, 底辟体中的流体可以沿断层面运移上来发生沿层扩散, 在顶部及内部的含气砂岩层会有较高的振幅值, 这可能是该底辟体恩平组及以上地层中出现顺层强反射的成因(图 3f)。

何敏等^[45]运用地震手段预测西江主洼的地层压力并认为, 西江主洼盆地中心区发育超压, 其中, 恩平组发育弱超压, 文昌组压力系数为 1.1~1.5; 西江主洼文昌组深部可能发育的超压是其形成泥底辟的必要条件, 同时也符合地震相上文昌组和恩平组内的模糊带不同的地震特征。此外, 恩平组沉积期洼陷湖盆范围持续扩大和稳定沉积, 使盆地内恩平组发育了区域性盖层泥岩(图 9), 近洼陷的 B、C 井恩平组含砂率低而泥岩含量高, 恩一二段盖层厚度达 400 m; 向洼陷边缘靠近缓坡隆起上的 A 井, 这套泥岩盖层有所减薄, 但也接近 200 m。恩平组上下地层砂地比存在差异, 这一点在 A 井恩平组表现明显, 恩三段火山岩层上下砂地比明显不同, 恩三段下部和恩四段以厚层中砂岩为主, 而在恩三段上部和恩一二段主要为粉砂岩, 且泥岩比例显著增高; 珠海组的厚层砂岩不具备形成盖层的条件, 因此, 恩一二段区域性泥岩盖层的存在是盆地超压形成保存的关键因素。

4.3 重力滑脱作用

重力因素是形成泥-流体底辟的重要条件之一, 也是塑性岩层上涌的自身性质所决定的(图 10a), 深层泥岩由于与邻近围岩的岩性、岩相和厚度变化上存在不同, 在差异负载作用下发生密度倒转。西江主洼深部文昌组泥岩在基底斜坡发生重力滑塌作用, 以泥底辟作用为主, 超压状态下的泥岩受重力作用与上覆岩层混合, 大量泥岩上涌, 文昌组内地震反射中断的模糊区可能是一个小断层密集、砂泥岩破碎混合区; 而在恩平组原有的地震反射基本连续, 模糊区为较规则的指状上升通道, 可能是深部高压的泄压通道, 泄压通道主要为流体破碎带, 泥岩的上拱作用并不强, 因此, 原地震反射基本连续, 恩平组出现低频的特征是流体顺层侵入的原因, 形成了埋深大、活动能量较弱的埋藏-弱刺穿型锥体状泥-流体底辟。

5 泥-流体底辟发育模式

西江主洼位于珠江口盆地靠近大陆一侧, 距离地幔热源更远, 地壳更厚, 属于低地温断陷; 但文昌

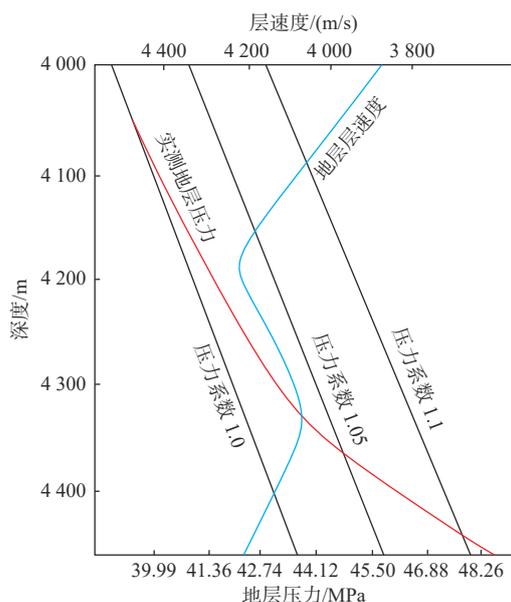


图 8 西江主洼 B 井地层压力变化曲线^[46]

Fig.8 Variation curve in formation pressure of Well B in Xijiang Main Sag^[46]

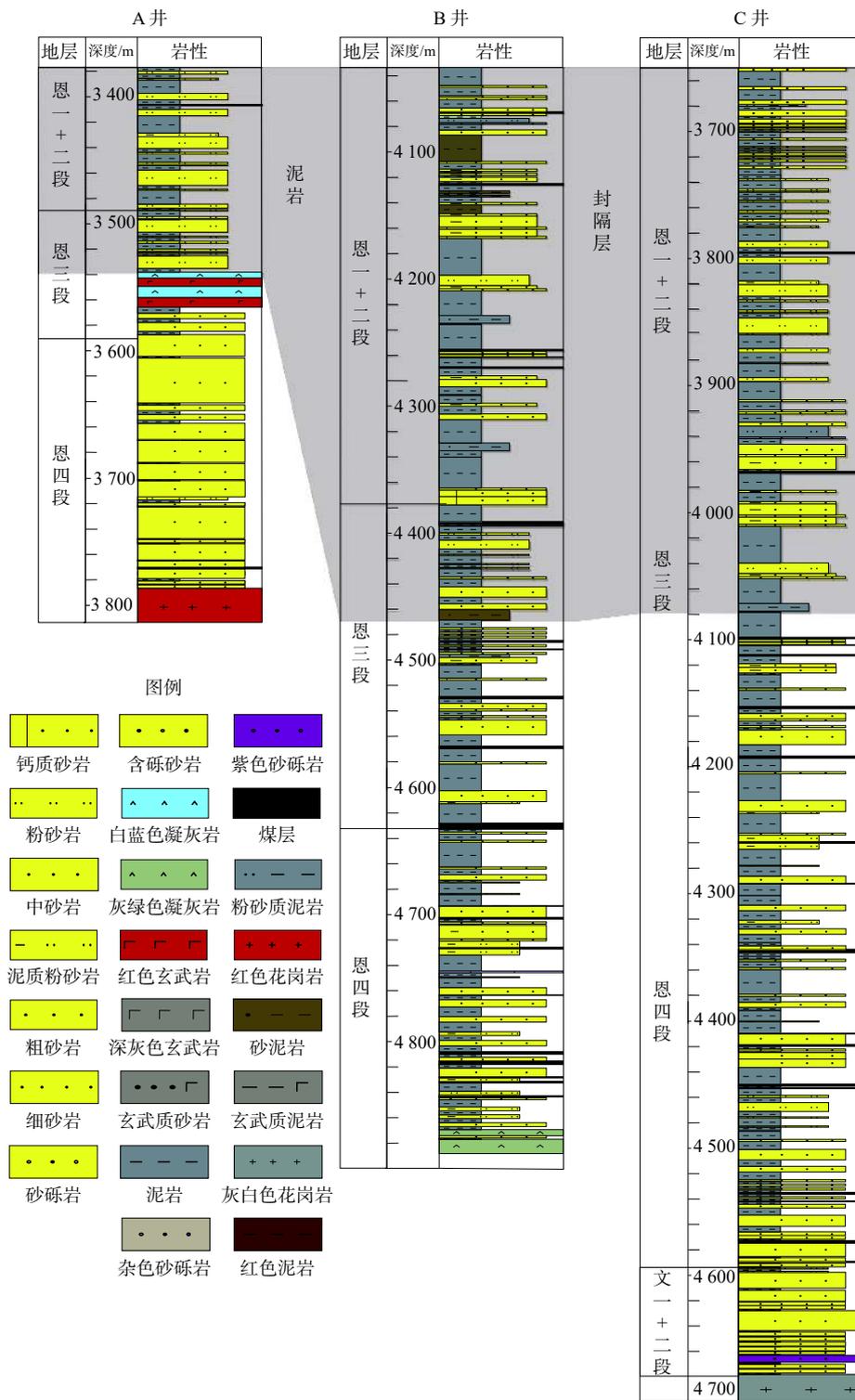


图9 西江主洼恩平组区域性泥岩柱状图

Fig.9 Regional mudstone histogram of the Enping Formation in the Xijiang Main Sag

组地层发现可能是岩浆侵入的地震异常体。同时，向巧维等^[47]对珠一坳陷的研究表明，西江主洼古近系文昌组砂岩中GR值高于泥岩，认为是地下深处的富U⁴⁺流体通过联通基底大断裂富集的结果，其存在可能揭示了西江主洼深部存在岩浆热液活

动，盆地深部热液上涌是由超压驱动的，而这种高温高压环境是泥-流体底辟构造发育的有利条件^[48]。古近纪西江主洼快速沉降使文昌组形成了异常高压，而较高的地温和地温梯度，促使古近系有机质成熟并裂解生烃，高地温背景下的水热增压及生烃

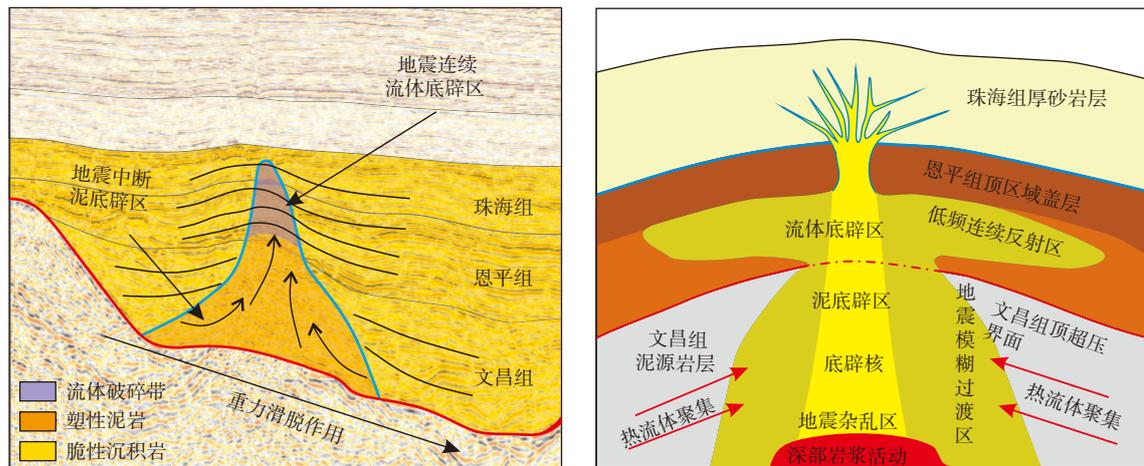


图 10 西江主洼泥-流体底辟 (a) 及其发育模式 (b)

Fig.10 The Xijiang Main Sag mud-fluid diapir (a) and its development model (b)

增压使压力升高^[49],超压进一步加剧,是泥-流体底辟形成的原始驱动力。断层活动可能为深部高温高压的热流体向上运动提供了通道,造成文昌组内的超压释放^[50-51],导致超压箱的破裂,形成流体的垂向幕式突破,沿断层及裂缝向上运动形成泥-流体底辟(图 10b)。

6 结论

(1)西江主洼地震模糊区具有典型的二元结构,文昌组内部表现为大范围的杂乱反射,在恩平组及以上地层内部则为沿断裂上拱的柱状实体,地震的反射异常从模糊体中部向边部逐渐过渡为正常反射,顶部地层缺乏披覆构造。泥底辟上拱改变了原地层入射角,文昌组地震波有极性偏移特征,流体顺层侵入恩平组区域性泥岩下地层使其振幅增强,珠海组底辟顶部背斜与相邻地层间存在极性反转,说明了该底辟是典型的下部泥底辟上部流体底辟的二元底辟结构。

(2)泥-流体底辟的存在进一步佐证了西江主洼古近系文昌组具有广泛发育的深湖相厚泥岩层,而恩平组沉积期盆地稳定经历了湖盆扩张的过程,形成广泛的泥岩等细粒沉积,作为底部超压的顶部隔板,使盆地文昌组发育了超压系统,而西江 33 西洼由西向东的基底斜坡面相对洼陷其他地区角度更大,在差异负荷作用下易发生密度倒转,是西江主洼泥-流体底辟发育在西江 33 西洼的重要条件。

(3)泥-流体底辟的驱动力是盆地深部的超压作用,岩浆作用下的盆地深部热流体活动形成超压,在岩浆侵入作用下过压沉积物发生液化,岩浆侵入

或构造活动使岩层薄弱处的地层压力达到破裂压力,封存箱内的超压被释放,形成了能量较弱的深埋型弱刺穿锥体状泥-流体底辟。

参考文献:

- [1] 何家雄,李福元,王后金,等.南海北部大陆边缘深水盆地成因机制与油气资源效应[J].海洋地质前沿,2020,36(3):1-11.
- [2] 黄春菊,陈开远,李思田.莺歌海盆地泥底辟活动期次分析[J].石油勘探与开发,2002,29(4):44-46,71.
- [3] 何家雄,夏斌,张树林,等.莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系[J].中国地质,2006,33(6):1336-1344.
- [4] 董冬冬,孙运宝,吴时国.珠江口盆地深水区地层超压演化的数值模拟:以 ODP1148 站位为例[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(5):165-172.
- [5] 吴娟.珠江口盆地珠一坳陷油气富集规律[D].武汉:中国地质大学(武汉),2013:1-124.
- [6] 单玄龙,郝国丽,徐宏节,等.珠一坳陷受岩浆改造型洼陷烃源潜力及有利勘探方向[R].深圳:中海石油(中国)有限公司深圳分公司,2021.
- [7] 钟佳,尤丽,张迎朝,等.琼东南盆地乐东-陵水凹陷黄流组峡谷水道储层成岩作用与孔隙演化[J].天然气地球科学,2018,29(5):708-718.
- [8] 宋瑞有.南海北部陆缘声浑浊体成因机制及地震响应特征[J].中国海上油气,2020,32(3):43-50.
- [9] 邓勇,潘光超,李辉,等.莺歌海盆地底辟模糊区成因分析及成像对策[J].中国海上油气,2020,32(3):59-68.
- [10] 韩文明.尼日尔三角洲深水区地震模糊区成因及与油气成藏的关系[J].海洋石油,2013,33(1):54-58.
- [11] 蔡国富,张向涛,彭光荣,等.南海北部阳江-一统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动[J].大地构造与成矿学,2021,45(1):40-52.
- [12] 龚承林,王英民,雷怀彦,等.侵入岩的地震信息识别及其与油气的关系[J].天然气地球科学,2009,20(5):749-753.
- [13] 谭俊敏,孙志信.火成岩侵入形成的构造物理模拟实验及实

- 例[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 324-328.
- [14] 孙志信. 火成岩侵入形成的构造物理模拟实验[J]. *油气地球物理*, 2007, 29(3): 324-328.
- [15] 杨帆, 胡望水, 蔡文杰, 等. Burgos盆地Perdido构造带盐泥底辟构造特征及形成机制[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(6): 31-38.
- [16] 孙和风, 彭文绪, 周心怀. 渤海海域莱州湾凹陷盐构造成因探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3): 352-358.
- [17] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 64(2): 15-18.
- [18] 王翠丽, 周文, 谢玉洪, 等. 莺歌海盆地泥底辟带高温热事件与储层成岩作用[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(4): 35-42.
- [19] 张伟. 南海北部主要盆地泥底辟/泥火山发育演化与油气及天然气水合物成矿成藏[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2016: 1-165.
- [20] 赵宝峰, 陈红汉, 孔令涛, 等. 莺歌海盆地流体垂向导体系及其对天然气成藏控制作用[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2014, 39(9): 1323-1332.
- [21] 杨东升, 赵志刚, 杨海长, 等. 琼东南盆地乐东-陵水凹陷底辟构造及其油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(3): 64-73.
- [22] 张伟, 梁金强, 何家雄, 等. 南海北部陆坡泥底辟/气烟囱基本特征及其与油气和水合物成藏关系[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(7): 11-23.
- [23] 李进, 王淑红, 颜文. 海底泥火山及其与油气和天然气水合物的关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 204-214.
- [24] 张树林, 黄耀琴, 黄雄伟. 流体底辟构造及其成因探讨[J]. *地质科技情报*, 1999, 18(2): 20-23.
- [25] HE H Y, ZHOU H Z, FU D D. Multicomponent seismic exploration in Yinggehai Basin[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(9): 914-920.
- [26] 王家豪, 庞雄, 王存武, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别[J]. *地球科学*, 2006, 31(2): 209-213.
- [27] 满晓, 朱继田, 姚哲, 等. 琼东南盆地深水区泥-流体底辟发育特征与天然气成藏[J]. *地质找矿论丛*, 2018, 33(2): 257-263.
- [28] 王潇, 阎贫, 于俊辉, 等. 东沙岛西南泥火山区的地震烃类检测[J]. *地球科学*, 2021, 46(2): 621-631.
- [29] 培根, 希姆, 莱德肖, 程远锋, 王廷光, 译. 三维地震解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 1-179.
- [30] 刘仕友, 宋炜, 应明雄, 等. 基于密度的含噪声角道集波形聚类地震相分析[J]. *石油物探*, 2019, 58(5): 773-782.
- [31] 刘亚茹. 地震反射对含气饱和度和敏感性分析[J]. *内蒙古石油化工*, 2007, 10(10): 112-113.
- [32] 雷超. 南海北部莺歌海-琼东南盆地新生代构造变形格局及其演化过程分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012, 1-114.
- [33] 丘斌煌, 晏红艳, 李三福, 等. 底辟模糊区地震资料处理关键技术[J]. *工程地球物理学报*, 2014, 11(6): 824-831.
- [34] 周家雄, 刘巍. 乐东气田断层分布特征及其对产能的影响[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 56-61.
- [35] 杨瑞召, 李洋, 庞海玲, 等. 倾角导向体控制的气烟囱识别技术及其在海拉尔盆地贝尔凹陷中的应用[J]. *现代地质*, 2013, 27(1): 223-230.
- [36] 张伟, 梁金强, 何家雄, 等. 南海北部神狐海域GMGS1和GMGS3钻探区天然气水合物运聚成藏的差异性[J]. *天然气工业*, 2018, 38(3): 138-149.
- [37] 彭靖淞, 徐长贵, 韦阿娟, 等. 渤海湾盆地辽中南洼压力封存箱的破裂与油气运移[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 386-395.
- [38] 沙志彬, 王宏斌, 张光学, 等. 底辟构造与天然气水合物的成矿关系[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 283-288.
- [39] 张伟, 何家雄, 卢振权, 等. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2185-2197.
- [40] 宗奕, 梁建设, 郭刚. 珠江口盆地番禺低隆起文昌组断裂活动性特征及其对沉积的影响[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(4): 30-35.
- [41] 丁亮, 郭刚, 郝建荣, 等. 珠一坳陷西江主洼古近系文昌组烃源岩特征及生烃潜力[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(5): 21-26.
- [42] 刘强虎. 断陷盆地低角度正断层控制下层序构型及其定量模拟: 以恩平凹陷古近系文昌组为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013: 1-68.
- [43] 张启明, 董伟良. 中国含油气盆地中的超压体系[J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 1-11.
- [44] 田立新, 张忠涛, 庞雄, 等. 白云凹陷中深层超压发育特征及油气勘探新启示[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(6): 1-11.
- [45] 何敏, 雷永昌, 于水明, 等. 南海北部浅水区低地温断陷成藏特征及勘探启示[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 75-84.
- [46] 曹爱武. 西江主洼生油潜力分析[J]. *中国海上油气*, 1999, 13(3): 54-57.
- [47] 向巧维, 李小平, 丁琳, 等. 珠江口盆地珠一坳陷古近系高自然伽马砂岩形成机制及油气地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(2): 93-103.
- [48] 谢玉洪. 莺琼盆地区中央峡谷源头沉积特征及油气勘探前景[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(5): 69-78.
- [49] 曹立成. 莺歌海-琼东南盆地地区新近纪物源演化研究: 来自稀土元素、重矿物和锆石U-Pb年龄的证据[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014: 1-69.
- [50] CURTIS M L, RILEY T R. Mobilization of fluidized sediment during sill emplacement, western Dronning Maud Land, East Antarctica[J]. *Antarctic Science*, 2003, 15(3): 393-398.
- [51] 黄苓渝, 张昌民, 刘江艳, 等. 东海西湖凹陷古近系砂岩侵入体及其地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(5): 74-80.

Mud-fluid diapir and its development conditions in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin

YALIKUN·Rexiti, SHAN Xuanlong^{*}, HAO Guoli, LI Kang

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: The Xijiang Main Sag in the Pearl River Mouth Basin contains fuzzy areas in vertical reflection imaging, and the geological origin of the fuzzy areas is often related to the basin diapiric activity. Having studied the seismic profile and seismic impedance of the vertical fuzzy area in the Paleogene seismic data from the 33W Sub-sag in the Xijiang Main Sag in combination with the development and evolution of the basin, we believed that the fuzzy area has a dual structure with different deep-and-shallow reflections indicating a mud-fluid diapir structure. The Paleogene Wenchang Formation in the Xijiang Main Sag is a deep lacustrine facies widely distributed as mud source-materials for mud fluid diapir. A high-pressure anomaly was detected in the fourth member of the Enping Formation at the bottom of the 33W Subsag drilling well. The Xijiang Main Sag has the overpressure conditions to form a seal box that is covered by a widely-developed mudstone mudstone at the top of the Enping Formation. The magma intrusion in the Zhuhai period destroyed the sealing, activated mud fluid diapir in the basin, and formed a deeply-buried and weakly punctured conical mud fluid diapir in the Paleogene strata of the 33W Subsag.

Key words: Xijiang Main Sag; seismic fuzzy area; mud-fluid diapir; sealing box; magmatic intrusion; Pearl River Mouth Basin