

文章编号: 0253-9985(2009)02-0215-08

珠江口盆地惠州凹陷新近系坡折带成因类型及对地层沉积的控制作用

龙更生¹, 施和生¹, 王英民², 杜家元¹, 刘军¹, 张晓宇¹, 刘豪³

(1. 中国海洋石油总公司 深圳分公司 广东 广州 510240 2. 中国石油大学, 北京 102249 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 惠州凹陷新近系地处浅海陆架背景, 地层发育相对平缓, 通过地震、钻测井等地质资料的综合研究, 发现依然存在沉积坡折带、断裂坡折带和挠曲坡折带 3 种主要类型的坡折带。这些坡折带在平面上呈顺源多级坡折带组合、斜交组合、梳状组合和平行山梁组合 4 种组合类型。并且坡折带的演化具有明显的继承性、间歇性、规模递变性和迁移旋回性。研究进一步揭示, 盆地北缘和南部的坡折带对地层的叠置样式及沉积体系的发育和空间展布起着明显的控制作用。

关键词: 陆架坡折带; 低位域; 地层; 沉积体系; 惠州凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Genetic types of the Neogene slope-breaks and their controls on deposition in Huizhou Depression in Pearl River Mouth Basin

Long Gengsheng¹, Shi Hesheng¹, Wang Yingmin², Du Jiayuan¹, Liu Jun¹, Zhang Xiaoyu¹, Liu Hao³

(1. CNOOC Shenzhen Branch, Guangzhou, Guangdong 510240 China; 2. China University of Petroleum, Beijing 102249 China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083 China)

Abstract The Neogene in Huizhou Depression were deposited in neritic shelf environment and is gentle in dip. However, a comprehensive study of seismic, drilling log data indicates that three types of slope-breaks (i.e. deposition breaks, fault breaks and flexural breaks) occur in the area. On the plane, these breaks combine with one another in four patterns, including multistage, diagonal, comb-shaped and ridge-parallel. Their evolution presents such evident features as inheritance, periodicity, scale grading and migration cyclicity. Slope-breaks in the north margin and south of the basin control the superimposing pattern of the sequences and the development and spatial distribution of depositional systems.

Key words shelf slope-break; low stand system tract; stratigraphy; depositional system; Huizhou Depression; Pearl River Mouth Basin

全球油气分布规律表明, 地层岩性油气藏与特定的层序地层格架下的特殊沉积体系以及储层发育密切相关, 地层岩性油气藏多发育于陆架坡折带控制的低位域沉积中^[1]。据 Stow (2000) 估计世界上有 1 200~1 300 个油气田是来自于陆架坡折带上下的深水沉积体系中, 其中巨型油气田有 40 余个, 地层岩性油气藏占相当重要的地位。

珠江口盆地惠州凹陷 (图 1) 新近系处于大陆架背景, 以发育海相地层为主, 且地层相对比较平

缓, 这样的浅海盆地中能否借鉴上述国外的成功勘探经验? 首要前提是要确定该地区是否发育有坡折带地貌。

1 坡折带的识别方法

坡折带在地震剖面上表现为 T_0 时间急剧变化, 在地质剖面上表现为地层厚度急剧变化, 通过地层等厚图的编制, 可以明显看到坡折带处等

收稿日期: 2008-07-26。

第一作者简介: 龙更生 (1970—), 男, 研究生、工程师, 层序地层学与沉积学。

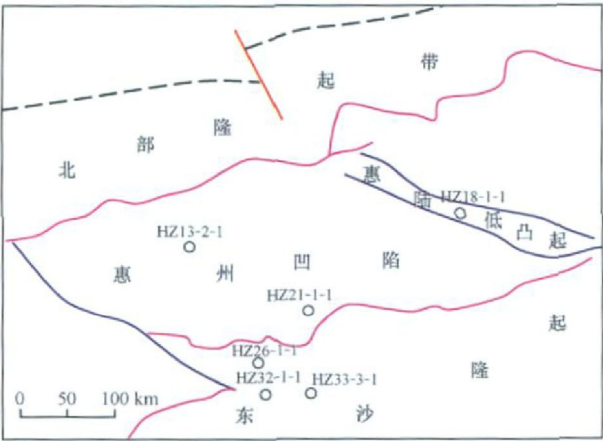


图 1 惠州凹陷位置图

Fig. 1 Location of Huizhou Depression

值线密集, 地层厚度由坡折到坡脚急剧增厚。通过平面组合后可以获得坡折带在平面上的展布, 通过断裂分析可以确定坡折带的类型^[2]。

由于后期的埋藏压实、构造变动改变了坡折带的地形特征, 从而难以直接确定。识别古坡折带的关键是要识别出陡坡带, 然后就易于确定坡折脊和坡折槽。陡坡带最重要的特征是上覆地层厚度的急剧变化, 并且上覆地层有明显的上超, 下伏地层在坡折脊附近可能出现削蚀。这在地质、地震剖面 and 地层厚度平面图上均有清楚的反映。

本次对坡折带的识别主要依据地震、钻测井地层对比以及地层等厚图等资料, 以地震剖面中厚度变化、反射结构分析为出发点, 结合钻井地质分析, 首先在线上开展坡折带的识别, 将不同线上坡折带可能发育的位置连接起来进行平面上组合, 再将这种组合投影到地层等厚图上并作局部修改使其更加完善。

研究发现惠州地区坡折带十分发育, 在每个层序里都有出现, 但不同时期坡折带发育的规模、大小以及展布特征不一样。

2 坡折带发育类型及成因

2.1 沉积坡折带

沉积坡折带主要分布在惠州凹陷南部 HZ21-1-1 井区附近, 与这种沉积坡折带有关的层序边界有 SB4、SB5、SB6、SB7、SB8、SB9、SB10、SB11、SB12、SB14、SB15、SB16、SB17 和 SB18 (注: SB4 为层序 SQ4 的底界, 其他类似) (图 2)。

系	统	组	年龄/Ma	地震层位	层序
第四系					
新近系	上新统	万山组	2.6	T ₂₀	
			5.5	T ₃₀	SQ25
	中统	粤海组			SQ24
					SQ23
					SQ22
					SQ21
					SQ20
			10.5	T ₃₂	SQ19
	新统	韩江组	12.5		SQ18
			13.8	T ₃₅	SQ17
					SQ16
					SQ15
			15.5		SQ14
				T ₄₀	SQ13
古近系	渐新统	珠海组			SQ12
					SQ11
					SQ10
					SQ9
			16.5		SQ8
					SQ7
			17.5		SQ6
					SQ5
			18.5	T ₅₀	SQ4
					SQ3
					SQ2
					SQ1
			23.8	T ₅₀	

图 2 惠州凹陷新近系层序地层格架

Fig. 2 Sequence stratigraphy framework of the Neogene in Huizhou Depression

沉积坡折带是由于不同地区沉积速率的差异造成地形坡度突变而形成的。惠州凹陷古珠江水系形成的由老到新的三角洲为沉积坡折带提供了古地貌背景 (图 3)。在三角洲平原与三角洲前缘的结合部一般形成沉积坡折带。在地震剖面上一般与前积反射的顶部相对应。

沉积坡折带发育的另外一个沉积环境为该区的滨岸沉积环境 (图 4)。各种资料分析表明该地区海岸带的海岸线较平直, 向广海没有发育障壁岛, 波浪是该体系的主要水动力条件。本地区滨岸沉积包括后滨、前滨、近滨、过渡带以及滨外带, 近滨带全部处于水下环境, 是浅海波浪作用带, 沉积物始终遭受着波浪的冲洗、挠动, 同时在大的海潮或风暴时期, 由于浪基面降低, 近滨以及更靠岸环境的沉积物不断遭受侵蚀并被带到近滨下部接受沉积, 而过渡带主要处于浪基面之下, 水动力比较弱, 沉积物以泥质等细粒为主。由于近滨和过渡带之间水动力条件存在巨大差异, 导致其沉积速率差别较大, 往往近滨的沉积速

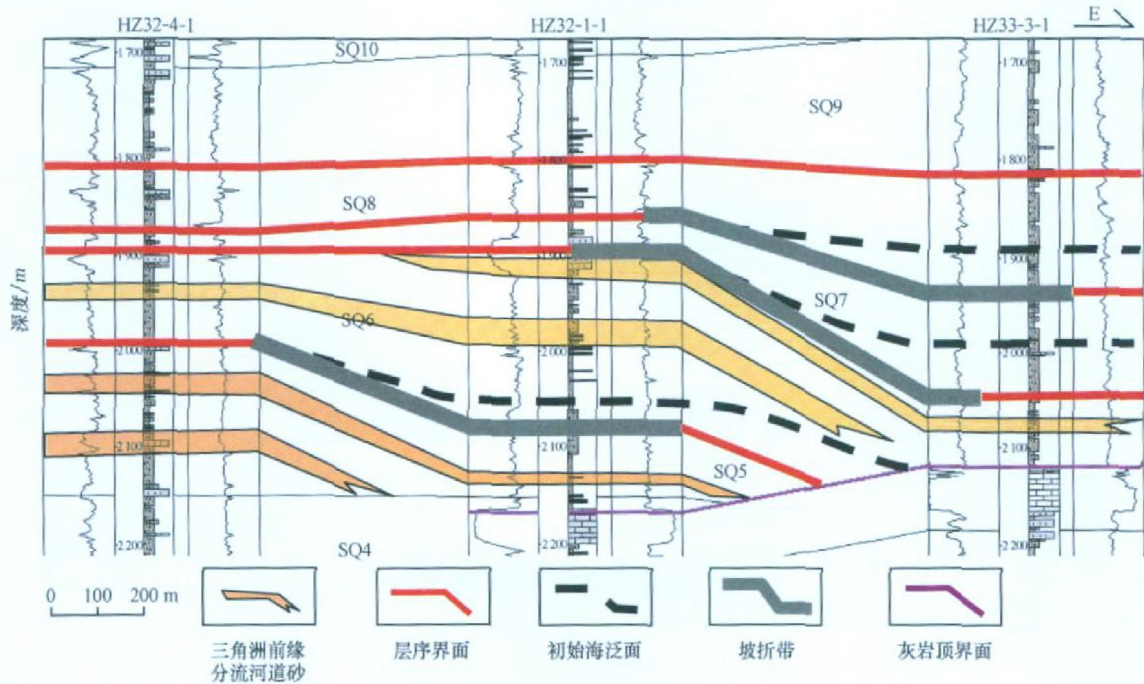


图 3 三角洲前缘叠置与沉积坡折带之间的关系

Fig. 3 Relationship between delta front superimposition and depositional slope-breaks

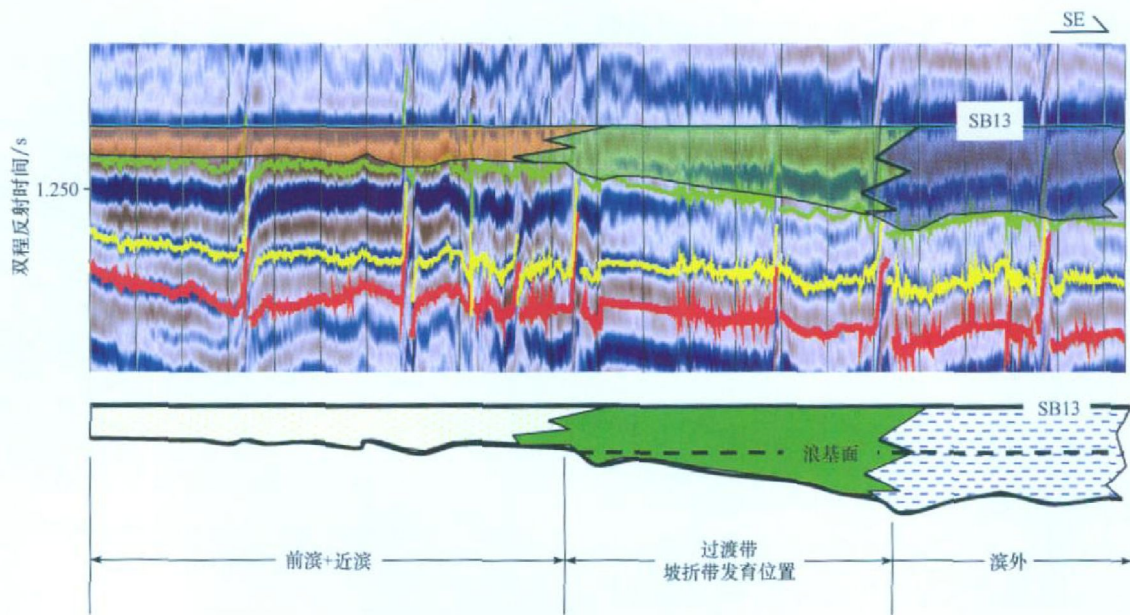


图 4 海岸环境沉积坡折带发育模式

Fig. 4 Patterns of depositional slope-break development on shoreland

(二维 79pr1677, cdp770-4100, 拉平 SB13 层)

率要远大于过渡带, 因此沉积坡折带在该地区比较发育。

2.2 断裂坡折带

断裂坡折带与沉积盆地的同沉积断裂相关 (图 5), 主要分布在盆地周缘, 与断裂坡折带相关的层序有 SQ 16—SQ 24。

断裂坡折带是同沉积断裂活动产生明显差异升降和沉积地貌突变的古构造枢纽带, 构成盆内古构造单元和沉积区域的边界^[3 4]。这些断裂一旦形成, 在整个裂陷期由于应力易于集中而长期活动。识别古断裂坡折带的主要标志是断裂带两盘地层厚度有明显变化, 其生长系数一般在 1.4~2.0 左右。

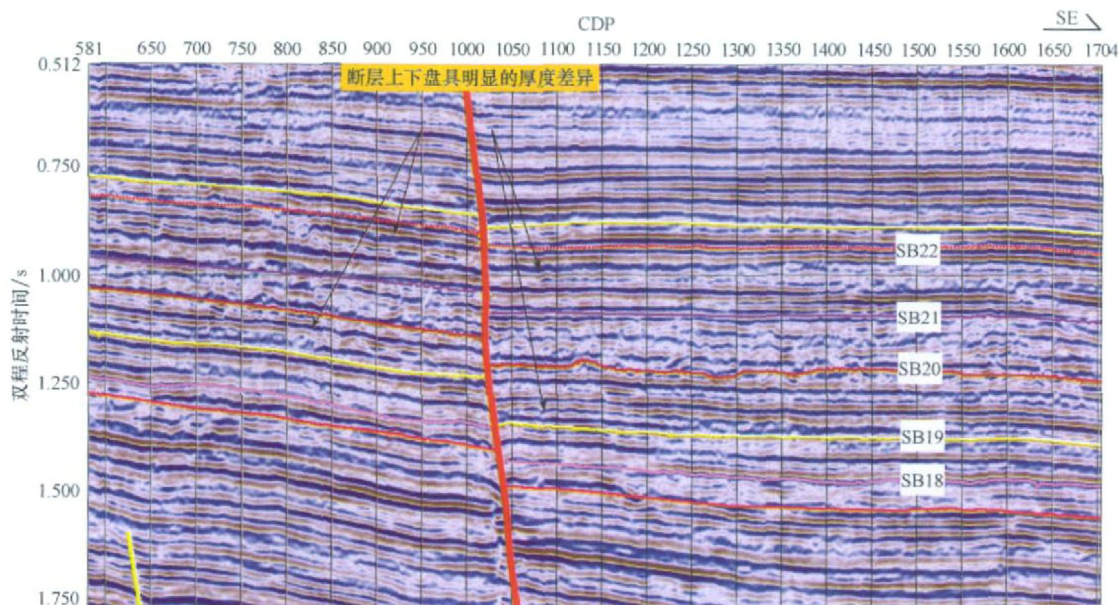


图 5 断裂坡折带在地震剖面中的响应

Fig. 5 Response of fault slope-break on seismic profile

(剖面来自二维 79pr1620 线)

惠州地区发育的断裂坡折主要与该地区的同沉积断裂有关,从同沉积断裂的发育特征看,断裂的同沉积活动时期主要集中在中、上中新统一现今,大致相当于 T35 或 13.8 Ma 年以来,断裂在平面上以东西向展布为主,发育在研究区南北两侧。这些同沉积断裂大都能形成坡折带,对地层的控制比较明显。

2.3 挠曲坡折带

挠曲坡折带主要发育在研究区的南西端靠北,由于地处盆地凹陷边缘,该地区地层相对抬升,与盆内存在构造沉降差异导致盆缘的挠曲坡折带出现(图 6)。在盆地内部特别是南部受东沙隆起的影响持续性出现地层抬升为隆,也是挠曲坡折带发育的良好场所。

惠州地区构成挠曲坡折带的成因主要包括深部构造活动和继承性古隆起。

1) 深部构造活动

指的是早期控制盆地边界的深大断裂,在后期基本上停止活动。深大断裂早期活动使得断裂上、下盘沉积厚度差异较大,巨大的构造沉降差异伴随着后期地层不断的沉积覆盖,在浅层就可见到明显的地层因挠曲而变形的现象。在惠州地区控制盆地边界的深部断裂主要位于盆地南北两侧,主要活动时期为 21 Ma 以前,早期的这些深大

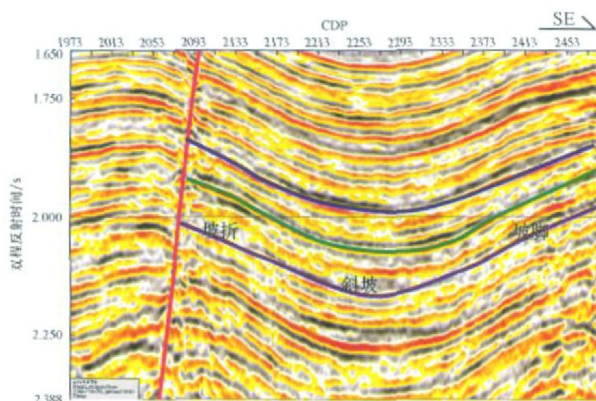


图 6 挠曲坡折带在地震剖面上的响应

Fig. 6 Response of flexural slope-break on seismic profile

(剖面来自二维 79pr1608 线)

断裂为后期的挠曲坡折带的形成提供了背景。发育于这种类型坡折带上的地层不整合特征明显,常见上超、削截现象。

2) 继承性古隆起

继承性古隆起或断隆的侧翼也是形成挠曲坡折带的有利场所。在惠州地区继承性古隆起主要发育在南部地区,受南部凹陷边界深部断裂的影响,断裂下盘地层抬升为后期隆升的古地貌提供了地质构造背景。由于古隆起的存在与不断生长,往往容易导致在隆起边缘产生差异沉降,为坡折带的形成创造了有利条件。

3 坡折带平面组合特征

3.1 顺源多级坡折带组合

这是惠州地区最主要的坡折带组合,即从物源至盆地方向发育多个倾向一致、走向大致相同的坡折带,这种坡折带组合可以为同一成因类型的坡折带,也可为不同成因坡折带,它反映了自陆向盆之间的古地貌阶梯状变化特征^[2]。大部分层序都具有顺源多级坡折带组合。

3.2 斜交组合

两个坡折带之间呈一定钝角相交的坡折带组合。斜交坡折带组合的成因有很多,主要包括:

1)两个断裂坡折带相交。主要受同沉积或深部同期活动的锯齿状断裂系的控制,交角处一般是地形坡度变化最剧烈的部位。2)挠曲坡折带-断裂坡折带之间的斜交。多见于盆地边缘,由于深部主干断裂的活动,导致形成的平行于盆地边缘的挠曲坡折带与主干断裂派生的次级断裂所形成的断裂坡折带相交而成。在盆地中南部继承性古隆起附近也可形成上述坡折带组合。3)挠曲坡折带之间的斜交。受深部断裂应力方向的影响,导致部分挠曲坡折带之间存在一定的交角,这种斜交组合主要发育在盆地周缘,如SQ1、SQ2、SQ3、SQ4、SQ6、SQ7、SQ9以及SQ10等。此外还可能存在沉积坡折带与断裂坡折带、沉积坡折带与挠曲坡折带相交等。

3.3 梳状组合

该组合实际上与斜交组合中挠曲坡折带-断裂坡折带之间的斜交的成因是一样的,只不过该组合表现为断裂坡折带展布方向与挠曲坡折带的延伸方向近于垂直。在惠州地区梳状组合主要为挠曲坡折带和断裂坡折带两种类型,断裂坡折带所代表的断裂为深部盆地边界断裂的调整断裂,如SQ17。

3.4 平行山梁组合

由两个反向的坡折带组成,在地貌上表现为山梁。这种组合主要发育在盆地南部继承性古隆起上,沿着古隆起两侧形成了比较明显倾向相反

的坡折带组合。

4 坡折带演化特征

惠州地区坡折带演化具有明显的继承性、间歇性、坡折带规模递变性以及迁移旋回性等规律。

4.1 继承性

惠州地区各种类型的坡折带都具有由老至新较明显的继承性发育特点。

4.1.1 沉积坡折带的继承性发育

在凹陷西南部,自珠江组开始至粤海组顶,三角洲都十分发育。古珠江水系持续性提供的物源形成了多期的三角洲体系为沉积坡折带的发育奠定了基础,在三角洲前缘带,即HZ26-1-1井附近,从SB4到SB18除了SB13界面上沉积坡折带不明显外,坡折带都呈继承性发育。

另外,在凹陷正北缘,多期的滨岸体系十分发育,沿着HZ18-1-1井南北形成的不同时期的东西向或北东-南西向沉积坡折带,是滨岸与滨外陆棚环境的分隔带,在纵向上它们也具有明显的继承性。

4.1.2 断裂坡折带的继承性发育

由于地处凹陷南北两端的同沉积断裂的多期继承性发育,势必也控制了断裂坡折带的这种纵向发育特征。以凹陷南缘HZ21-1-1井呈东西向展布的断裂坡折带为例,该坡折带始于层序SQ6在SQ6-SQ24大部分层序中存在,且位置大致相同,只是在坡折带的宽度、纵向距离、高差上存在不同。

4.1.3 挠曲坡折带的继承性发育

前面已经述及到挠曲坡折带发育的一些成因机制,总体上都是以构造活动为主。无论在凹陷边缘或是凹陷南部古隆起,挠曲坡折带的继承性发育与构造运动中的继承性演化是分不开的。在凹陷边缘,由于边界断裂断距和上、下盘地层厚度差异大,为边缘地带的差异构造沉降和差异可容空间提供了原始的基础和条件,特别是可容空间的较大差异,对晚期新地层的叠置和堆积产生了较大的影响,而这种差异和影响在一定的时期内

是持续和惯性发展的,故其控制的挠曲坡折带在纵向上表现为继承性发育。

由古隆起控制的挠曲坡折带的继承性发育特征就不难理解了,在盆地南缘受东沙隆起和边缘断裂的控制,古隆起在多个时期都存在,同时也控制了多个时期的坡折带发育。

4.2 间歇性

所谓坡折带发育的间歇性,指的是在一定地理位置、时期范围内,受同一成因机制控制下的坡折带在发育过程中表现为坡折带的产生和消亡的交替出现的规律。

惠州地区坡折带间歇性发育的规律也较明显,以惠州南部沉积坡折带为例,自下而上, SQ4—SQ12 坡折带较发育, SQ13 坡折带不发育, SQ14—SQ18 坡折带又发育, SQ18 之上坡折带逐渐消失,沉积坡折带的间歇性发育表明沉积物供给和海平面升降的差异。

断裂坡折带和挠曲坡折带也具有类似特征,主要与幕式性构造活动有关,在此不作赘述。

4.3 递变性

递变性又可以称作坡折带发育呈规模大小的渐变性。坡折带的递变性在断裂和挠曲两种成因类型中尤为明显,但在沉积坡折带也能见到类似情况。

首先就断裂坡折带而言,由于受控的同沉积断裂在其发育的地质历时期,可能存在一个或多个活动规模的大小变化,而每次变化必将出现断裂活动由初始—发展—壮大—萎缩—消亡的过程,进而直接影响到坡折带有规律的递变。盆地南缘和北部的断裂坡折带都有这样的渐变特征。

挠曲坡折带的纵向发育过程中也具备渐变性的规律,譬如北部坡折带在整个研究层段中就发育了 4 个渐变周期。

沉积坡折带在其发育的规模上也呈一定的递变性,以研究区南部沉积坡折带为例,受沉积物供给量和海平面升降的影响,早期 (SQ4—SQ5) 坡折带发育较小,早中期 (SQ6—SQ8) 伴随海平面下降和大量沉积物供给,坡折带规模达到最大,到了早晚期后 (SQ9—SQ18),坡折带发育规模逐渐减小,尽管期间有大有小,但大小的起伏不大。

4.4 时空迁移旋回性

所谓时空迁移指的是同一类型坡折带在同一地理位置范围内在不同时期沿陆—海方向的来回迁移。惠州凹陷南部沉积坡折带在不同时期具有明显的迁移规律,不同时期形成的一个迁移周期就构成了一个迁移旋回,在 SB4—SB18 之间共有 5 个迁移周期,分别反映 5 个较大的沉积和海平面升降变化旋回。

5 坡折带对层序及沉积的控制

在纵向上,层序内部主要表现为不同时期地层叠置型式的变化。而地层的形成与破坏受可容空间大小的控制,地层叠置模式受可容空间变化速率和沉积物供给速率之间比值 (A/S) 的控制^[5,6],可容空间的大小由基准面与初始沉积表面(地貌)的差值所决定^[7]。在任一位置,基准面与地表面都随时间而变化,这就决定了可容空间随时间的演化。因此不难看出,基准面和地貌是通过可容空间控制沉积响应的关键因素。其中地貌大都表现为本次研究中的坡折带^[8],因为只有类似这些在横向和纵向上具有一定规模的坡折带才可能对地层的叠置样式及沉积体系的发育和演化产生明显的影响,同时坡折带又可通过与其他因素如基准面、沉积物供给等的相互影响来控制沉积层序。

5.1 坡折带控制地层不整合

坡折带是地形坡度的突变带,在坡折带下方往往容易形成地层超覆。但是由于研究区地处陆棚环境,地形发育比较平缓,在大部分地区很难见到大规模的地层超覆,且平面展布的连续性较差,只有那些具有明显坡度突变的坡折带附近才具有发育地层超覆的条件,在惠州地区与地层超覆有关的坡折带主要为北部的挠曲—断裂坡折带以及南部的沉积坡折带。北部坡折带受深部盆地边界大断裂的控制,坡折带上、下地层厚度差异趋势明显,坡折带的坡度较大;另外在惠州地区南部沉积坡折带主要由比较大的前积体——滨线斜坡构成,一般坡度和斜坡规模较大,对地层超覆控制比较明显。在惠州地区发育超覆的层序界面包括 SB1、SB3、SB6、SB8、SB9、SB12、SB13、SB14、SB16

SB18 SB19 SB22 SB23 SB24以及 SB25。

削截主要发育在北部坡折带和南部继承性古隆起的西侧逆源坡折带附近, 对应于低级别层序界面, 主要发育在层序组和二级构造层序界面的下部。

5.2 坡折带对沉积的控制

在惠州地区坡折带对沉积的控制表现比较明显, 主要体现在盆地北缘和南部坡折带对沉积体系的控制(图 7)。

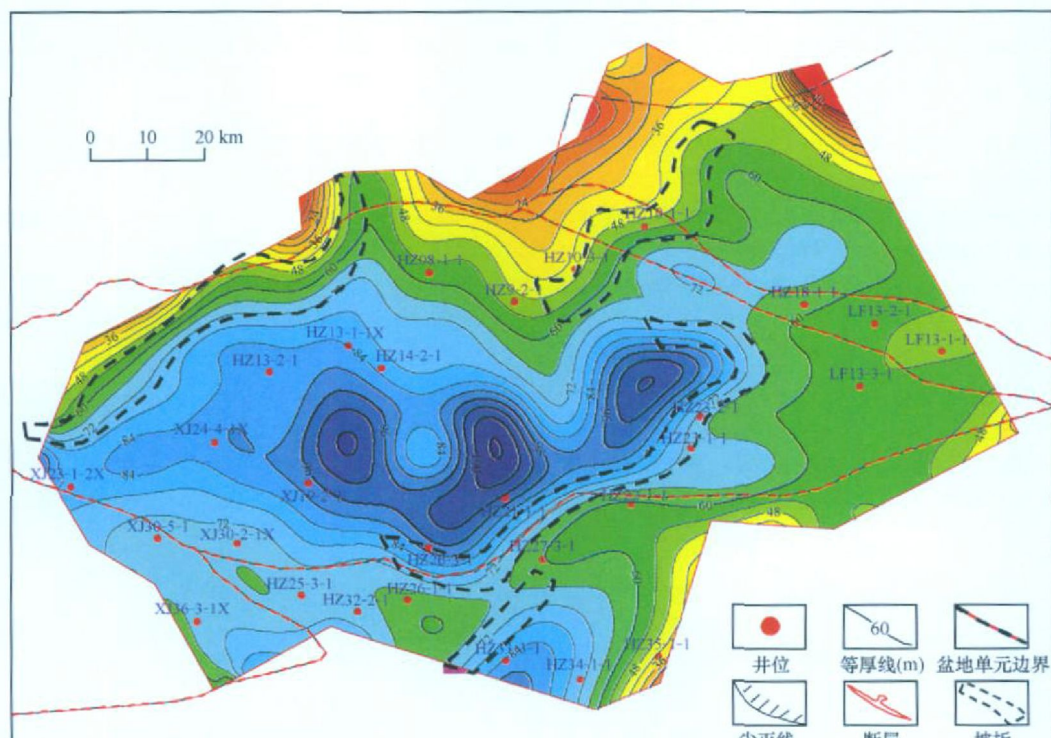
凹陷北部以 HZ13-2-1 井北坡折带为主, 呈北东南西向展布, 是三角洲沉积体系中平原亚相和前缘亚相的分界带, 自陆相向海方向, 坡折带上部发育粗粒沉积为主的三角洲平原亚相, 在坡折位置处逐渐过渡为三角洲细粒沉积, 地震剖面上在斜坡带及坡脚向海发育广泛的前积反射结构, 是三角洲前缘相带的主体部位。惠州地区大多数层序内在该部位发育的坡折带都具有上述控制作用。

在凹陷正北方向 HZ18-1-1 井附近的沉积坡折带对研究区的滨岸体系也有一定的控制作

用, 该坡折带正好是近滨和滨外的分界带, 其控制着陆架砂体的分布。这种类型坡折带且对滨岸体系起到明显控制的层序包括 SQ2 SQ4 SQ8 SQ9 SQ14 SQ15 SQ16 SQ18 SQ19 SQ21 以及 SQ23 等。

凹陷南部与三角洲沉积有关的沉积坡折带对其上覆地层——三角洲前缘的陆架砂沉积起一定的控制作用。由于该坡折带本身坡度较大, 在坡折带下部还可局部发育低水位体系域, 因远离物源区, 沉积物的粒度较细甚至完全转化为泥岩。具有沉积坡折带对陆架砂控制的层序包括 SQ6 SQ7 SQ8 SQ11 SQ12 SQ14 SQ15 以及 SQ17 等。

凹陷南部 HZ21-1-1 井附近的逆源坡折带是另外一种控制三角洲前缘沉积的样式。由于逆源坡折带的形成与盆地内部的局部古隆起的发育有关, 在惠州地区古隆起常常继承性发育在盆地南缘, 东沙隆起的西侧, 沿着古隆起的西翼因为隆起而发育了该类型的坡折带, 在成因上是挠曲型的。正因为这种逆源坡折带向海逐渐抬升, 对三角洲前缘继续向前进积起到了明显的限制作用, 在平面上多表现为前缘亚相的边缘与逆源坡



折带平行发育,在层序 SQ4 SQ5 SQ10 SQ12 SQ13 SQ15 SQ16 SQ18 SQ19 SQ20 SQ21 以及 SQ22 等可见到。

6 结语

惠州凹陷新近系存在 3 种不同成因类型的坡折带: 沉积坡折带、断裂坡折带和挠曲坡折带。坡折带在平面上存在 4 种组合类型: 顺源多级坡折带组合、斜交组合、梳状组合和平行山梁组合。坡折带的演化具有明显的继承性、间歇性、规模递变性及迁移旋回性等规律。坡折带的存在对地层的叠置样式以及沉积体系的发育和空间展布起着明显的控制作用。根据国内外油气勘探的经验, 相信在惠州凹陷陆架坡折带控制的低位域沉积体系中, 也能找到一定数量一定规模的油气资源^[9]。

参 考 文 献

- 徐怀大. 寻找非构造油气藏的新思路 [J]. 勘探家, 1996, 1 (1): 43~45
- 王英民, 金武弟, 刘书会, 等. 断陷湖盆多级坡折带的成因类型、展布及其勘探意义 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24 (3): 199~214
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析与油气预测的重要概念 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2000, 25 (3): 260~266
- 姜秀芳, 宗国洪, 郭玉新, 等. 断裂坡折带低位扇成因及成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23 (2): 143~144
- Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning rationale for stratigraphic model evaluation and high Resolution stratigraphic correlation [A]. Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J eds Sequence Stratigraphy Concepts and Applications [C]. NPF Special Publication, 1998, 8: 171~195
- 邓宏文. 沉积物体积分配原理——高分辨率层序地层学的理论基础 [J]. 地学前缘, 2000, 7 (4): 305~313
- Posamentier H W, Jervey M T. Eustatic controls on clastic deposition I-Conceptual frameworks [A]. In: Xilgus C W, eds Sea-level changes an interpreted approach [C]. Houston, TX, United States Spec Publ Soc Econ Paleont Miner 1988, 42: 104~114
- 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木早古生代原盆地古隆起地貌和古地理格局与地层圈闭发育分布 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 29 (2): 189~197
- 龙更生, 施和生, 杜家元. 珠江口盆地惠州地区中新统地层岩性圈闭形成条件分析 [J]. 中国海上油气, 2006, 18 (4): 229~235
- 王旭, 范宜仁, 张庚骥. 基于双侧向测井资料的裂缝孔隙度计算及其标定 [J]. 物探化探计算技术, 2008, 30 (5): 377~380
- 吴兴能, 刘瑞林, 雷军, 等. 电成像测井资料变换为孔隙度分布图像的研究 [J]. 测井技术, 2008, 32 (1): 53~56
- 邢玉忠, 樊太亮, 郑丽辉. 沈 229 元古界潜山储层特征及物性参数解释 [J]. 测井技术, 2006, 30 (5): 429~431
- 刘震, 梁全胜, 肖伟, 党虎强, 等. 内蒙古二连盆地岩性圈闭早期形成和多期形成特征分析 [J]. 现代地质, 2005, 19 (3): 403~408
- 金章东, 卢新卫, 张传林. 江西德兴斑岩铜矿田断裂分形研究 [J]. 地质论评, 1998, 44 (1): 57~62
- 沈忠民, 马祖钧, 周光甲. 断裂体系分维与油田分布 [J]. 地球科学, 1995, 20 (1): 73~78
- Scholz C H, Aviles C A. Fractal dimension of the 1906 San Andreas fault and 1915 Pleasant valley faults [J]. Earthquakes Notes, 1985, 55 (1): 20
- 谢和平, Pariseau W G. 岩石节理粗糙系数 (JRC) 的分形估计 [J]. 中国科学 (B 辑), 1994, 38 (5): 524~530
- 石雨田, 潘保芝. 分维的应用——定量描述裂缝发育程度 [J]. 物探与化探, 2000, 24 (6): 426~430

(编辑 高 岩)

(上接第 194 页)

(编辑 董 立)