

莺歌海盆地坡折带特征及其对沉积体系的控制

谢玉洪^{1,2}, 王振峰^{1,2}, 解习农¹, 任建业¹, 姜涛¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 坡折带是层序样式划分的重要依据。大量地震剖面的精细解剖表明, 莺歌海盆地坡折带可划分为构造坡折带和沉积坡折带, 进而将层序构成样式划分为四类, 即挠曲坡折型、断裂坡折型(生长断裂型)、沉积坡折型(陆架陆坡型, 相当于Ⅰ类层序)和缓坡型。不同类型层序样式控制不同低位体的空间分布。挠曲坡折、断裂坡折和沉积坡折控制了各三级层序中斜坡扇和盆底扇的分布, 而缓坡控制强制性海退型低位三角洲的分布。详细的构造研究表明, 莺歌海盆地裂后期边缘断裂, 如①号断裂和莺东断裂在不同时期不同部位仍表现出程度不同的活动性。正是由于这些断层的活动性及其在空间上的差异性, 控制了盆地内坡折带的发育。

关键词: 坡折带类型; 沉积模式; 莺歌海盆地。

中图分类号: P539.1; P618.13

文章编号: 1000-2383(2004)05-0569-06

收稿日期: 2004-06-12

Patterns of Slope-Break Zone and Their Depositional Models in the Yinggehai Basin

XIE Yu-hong^{1,2}, WANG Zhen-feng^{1,2}, XIE Xi-nong¹, REN Jian-ye¹, JIANG Tao¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Zhanjiang Filiale, CNOOC China Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: The slope-break is thought to be an important criterion to distinguish the patterns of sequences. In the Yinggehai basin, the slope-break can be classified into two types: structural and sedimentary slope-break zones, which can be divided further into four patterns, that are bend slope-break, fault slope-break (growing fault), sedimentary slope-break (shelf/slope-break) and gentle slope types. Different patterns of sequences control different distributions of lowstand sandstones. The bend slope-break, fault slope-break and sedimentary slope-break restrict the distribution of slope fans and basin floor fans in the third-order sequences, and the gentle slope-break limits the distribution of lowstand deltas which were formed in the course of restricted sea-level decrease. The results of tectonic researches show that the marginal faults, such as the No. 1 fault and the Yingdong fault, still are active during the post-rifting stage, which controlled the formation of slope-break in this basin.

Key words: pattern of slope-break; depositional model; Yinggehai basin.

随着近年来油气勘探和研究工作的深入, 刻划层序内部特征的层序样式也越来越多。从被动大陆边缘盆地到陆相盆地的层序地层研究中, 坡折带(slope-break)是层序样式划分中非常重要的一个依据(李思田等, 1999)。坡折带是一个地貌学概念, 指地形坡度发生突变的地带。Wagoonier *et al.* (1988)

根据陆架陆坡的存在与否提出了经典的被动大陆边缘盆地的Ⅰ类、Ⅱ类层序样式。在低位体系域形成时期, 当海平面下降到坡折带(或陆坡)以下时, 坡折带之上成为剥蚀或暴露区, 形成不整合和下切谷, 坡折带以下则可能形成盆底扇或斜坡扇, 而无坡折地区则低位体不发育。因此, 坡折带的存在与否是发育低

位体的关键(林畅松等,2000)。

近年来,基于地震地层学、层序地层学的进一步发展、高精度地震资料的采集和处理水平的提高而迅速发展的高精度层序地层学已成为油气勘探领域中最最重要的一个发展方向(Galloway, 1988; Mitchum and Wagoner, 1991; Posamentier, 1992; Cross, 1994; 胡宗全和朱筱敏,2002;李思田等,2002)。国内外隐蔽油气藏勘探已在低位扇领域取得了重大突破。由于其在油气勘探中的应用效果显著而引起国际石油地震与勘探领域专家和学者们的重视,成为当前沉积盆地分析、油气地质勘探与开发等领域广泛关注的课题,也是近期国际上跨国石油公司、国际会议和文献讨论的热点问题之一。

1 坡折带类型及特征

根据坡折带的成因机制可划分为构造坡折带和沉积坡折带。构造坡折带是指由于同沉积构造长期活动引起地形坡度发生明显突变的地带。能够形成坡折带的同沉积构造活动主要有断裂和挠曲作用。因此,相应地可划分为断裂坡折带和挠曲坡折带。断裂坡折带是由于同生断裂活动而形成地形突变地带,挠曲坡折带则是由于盆地中央和边缘差异沉降而导致坡折带,挠曲坡折带常常受深部隐伏断裂的控制。

1.1 构造坡折带特征

莺歌海盆地在盆地裂后期主要以热沉降作用为主,但是在这个时期,盆缘①号断裂和莺东断裂仍表现为较强的活动性,控制了不同层段的初始沉积坡度变化。莺歌海盆地东部边缘即莺东斜坡带大致可分为 2 个构造坡折带区,即沿①号断裂和莺东断裂带的断裂坡折带区和沿 4524—4540 线附近的挠曲坡折带区(图 1)。在盆地演化过程中,这 2 类坡折带的平面位置及其对层序形成演化的控制作用也不完全相同,比如在有些三级层序中断裂活动极其微弱,低位体系域的展布主要受控于挠曲坡折带,而有些三级层序的低位体系域的形成则主要受控于断裂坡折带。

1.2 沉积坡折带特征

沉积坡折带是由于不同地区沉积速率差异而造成地形坡度突变而形成的。Wagoner *et al.* (1990)提出的 I 类层序,即所谓陆架陆坡型层序,主要受控于全球平面升降变化,在莺东斜坡带莺歌海

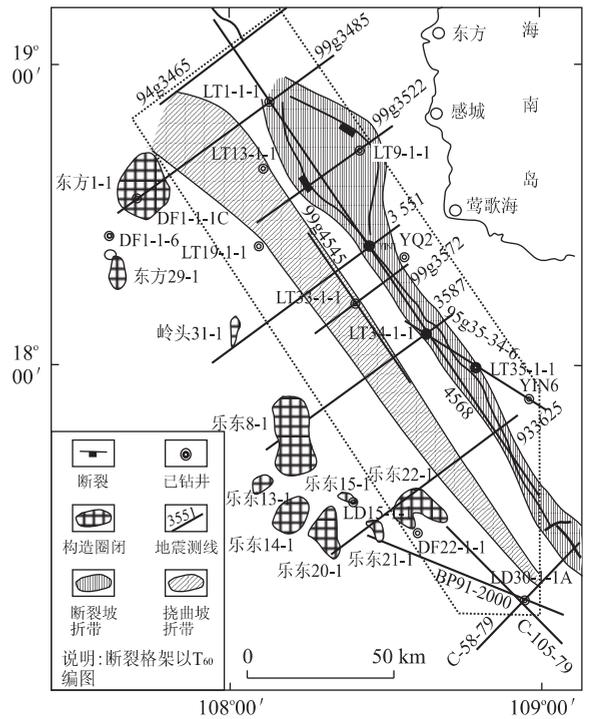


图 1 莺歌海盆地东侧不同类型坡折带分布

Fig. 1 Distribution of different slope-breaks in the eastern part of Yinggehai basin

组沉积时期为典型的陆架陆坡形成时期,沉积物的过度供给导致陆坡向盆地中央和东南侧推进。

2 莺歌海盆地坡折带类型及层序样式

大量地震剖面的精细解剖表明,莺歌海盆地自陵水组末期进入热沉降作用阶段后,层序构成样式主要与不同类型的坡折带有关。莺歌海盆地层序样式可划分为四类,即挠曲坡折型、断裂坡折型(生长断裂型)、沉积坡折型(陆架陆坡型,相当于 I 类层序)和缓坡型。不同时期形成不同成因的坡折带类型,同时也控制着不同的层序样式、低位体构成以及各体系域沉积体系的平面分布。

2.1 挠曲坡折型层序

莺歌海盆地自陵水末期进入热沉降作用阶段,盆地内以挠曲沉降作用为主,盆地中央和盆地边缘沉降速率的差异导致了挠曲坡折带的形成。挠曲坡折带主要位于①号断裂下盘的 4524—4540 测线附近。在低位体系域沉积时期,海平面位于坡折带之下,因而在坡折带之上为暴露和下切谷发育区,而在坡折带之下,发育斜坡扇和盆底扇。如 S_{40} — S_{60} 之间的三级层序。

2.2 断裂坡折型层序

莺歌海盆地随着热沉降作用的继续,热沉降作用的范围进一步扩大,相应地低位体系域沉积范围也进一步向陆地推进,此时,①号断裂和莺东断裂带构成了低位体系域沉积时的构造坡折带,下切谷仅发育①号断裂上升盘,毗邻于断裂附近则形成低位楔状体或斜坡扇,如莺东斜坡带中段 S_{30} — S_{31} 层序。

2.3 沉积坡折型层序

莺歌海盆地自上新世早期进入典型陆架陆坡发育阶段,总体上看,该层序具有以下特点:(1)层序界面剥蚀不明显,多表现为较连续的、振幅较强的平行、亚平行和前积反射结构;(2)高位体系域大多可区分出3~4期陆坡进积体,即四级层序单元(图2)。在莺东断裂附近还可见滑脱断层,是在快速沉积过程中由于重力作用所致;(3)这类层序盆底扇较发育,但规模较小。在盆地中部 S_{28} 和 S_{29} 层序界面上由于流体压裂而出现弱振幅的波状反射或杂乱反射,因而盆底扇识别较困难。

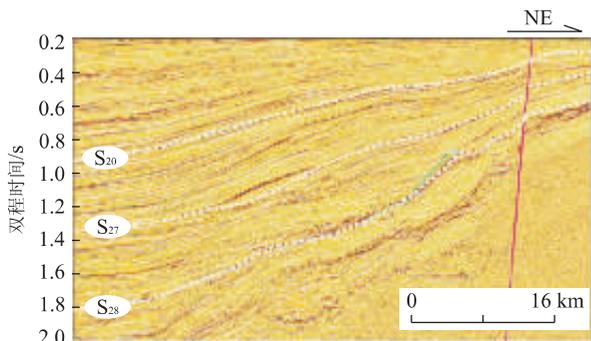


图 2 莺歌海盆地发育陆架—陆坡体系的层序样式

Fig. 2 Sequence pattern of shelf-slope system in Yinggehai basin

2.4 缓坡型层序

这类层序不发育明显的坡折带。随着盆地进一步充填,莺歌海盆地逐渐形成以大陆架为主体的海域。即自 S_{27} 层序之后形成这类层序,在这种宽阔的大陆架上由于海平面变化导致较大范围的暴露,一般不发育盆底扇和斜坡扇,而形成一些强制性海退型低位三角洲。

3 古构造对坡折带的控制

坡折带对沉积相和砂体的控制是通过通过对沉积基准面和古构造斜坡的控制而实现的。对裂陷期构造坡折带的研究可以通过详细的构造研究进行。

对于裂后期演化阶段,盆地的沉降主要是受沉积负荷、热动力和海平面变化所控制的。莺歌海盆地是一发育在古红河断裂带基础之上的转换—伸展型盆地(龚再升等,1997; Morley, 2001),经历了构造活动强烈、断裂作用控制的同裂陷阶段和裂后期演化阶段。即使在裂后期阶段,盆地仍然有很高的沉降速率和较强的构造活动性,主要表现为盆地的沉降中心在裂后期演化过程中仍然有大幅度的迁移;盆地中央发育了强烈的底辟构造带,并伴有构造热流体活动;盆地内一些主要断裂系统仍然表现出一定的活动性。正是由于盆地裂后期活动性及主要断裂的活动控制了坡折带的发育和古地貌的变化。

莺歌海盆地的东部边缘裂后期充填的三亚组、梅山组和黄流组总体表现为向东减薄、向西加厚的楔状形态。沉降史回剥分析表明不同时期盆地中央的沉降速率远大于盆地边缘的沉降速率。由于盆地沉降速率的差异,导致了前述莺东斜坡带以缓坡型或挠曲型的坡折带为特征的古沉积地貌类型(图3a)。

由于其所处的特殊的大地构造背景,莺歌海盆地在裂后期沉降阶段仍然有比较强烈的断裂活动,并造成了不同类型的坡折带。其活动的特点有2种情况:第1种情况是基底断裂活动,差异沉降,从而导致上覆沉积发生局部被动弯曲,形成台阶式陡倾单斜褶曲带和缓倾褶曲带交替排列的坡折带(图3b),①号断层的北段和南段,特别是南段是这种类型坡折带的主要发育区段;第2种情况是①号断层和莺东断层发生斜向拉伸,导致贯通式正断作用,叠加在上述热沉降造成的缓斜坡背景上,致使盆地边缘的古沉积地貌复杂化,形成前述的断坡式构造

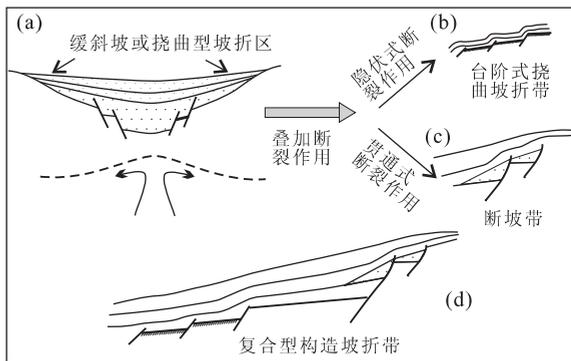


图 3 莺歌海盆地裂后期古沉积地貌发育的构造背景

Fig. 3 Structural setting of formation of paleo-depositional topography during post-rifting stage in Yinggehai basin

坡折带(图 3c). 实际发育过程常常是热、构造动力、沉积动力等作用的综合效应, 因而形成复合型的坡折带(图 3d).

综上所述, 裂后期演化阶段古沉积地貌的发育, 既不同于同裂陷阶段断坡式构造坡折带, 也不同于传统的大规模陆架推进形成的陆架—陆坡型坡折带, 其形成、发育和演化有其特定的区域构造背景.

4 坡折带演化及其对沉积体系的控制

莺歌海盆地裂后热沉降阶段沉积演化主要受全球海平面变化和构造运动及沉积物供给量的控制. 其中坡折带的发育演化对本区的层序构成样式和沉积体系分布的控制最为关键.

(1) 莺歌海盆地东缘 2 个坡折带, 即断裂坡折带和挠曲坡折带明显控制沉积体系分布. 在断裂坡折带发育区, 断裂坡折带控制了低位楔的形成, 也就是在断裂上升盘为下切谷发育区, 在断裂下降盘沉积了扇三角洲或三角洲沉积物. 由于沉积坡度的存在, 在重力流作用下, 扇三角洲或三角洲沉积物受改造并被搬运到盆地中央沉积, 形成盆底扇沉积体. 在挠曲坡折带发育区, 挠曲坡折带控制了斜坡扇的形成, 在挠曲坡折带上方形成下切谷, 在挠曲坡折带处形成由三角洲或扇三角洲沉积物所构成的斜坡扇, 同样, 由于重力流作用, 在挠曲坡折带下方形成浊积成因的盆底扇体.

(2) 坡折带的发育控制了本区的层序构成样式

(表 1). S_{60} — S_{40} 层序受挠曲坡折带和断裂坡折带组合形成的台阶状坡折带控制(图 3). 挠曲坡折带控制了本区的低位体系域分布范围, 形成了挠曲坡折带之下的盆底扇和在挠曲坡折带部位的斜坡扇沉积(图 4). 高位体系域受①号断层和莺东断层控制, 在断裂坡折带部位发育了高位扇三角洲. S_{40} — S_{27} 层序发育受①号断层和莺东断层形成的断坡带控制. 由于海平面的迅速抬升, 构造沉降的减弱, 低位体系域主要受莺东断裂带和①号断层控制, 形成了沿局部断裂分布的低位楔沉积. 在更远的盆地中央发育了由低位楔进一步迁移形成的盆底扇和斜坡扇, 局部可见到低位楔进一步迁移所形成的浊积水道. 这一点在莺东断裂带附近表现得最为明显. 本时期高位体系域在断裂坡折带向陆一侧. 盆地在 S_{27} — S_{20} 时期为经典的陆架陆坡型层序沉积.

(3) 盆地内构造活动的差异性导致坡折带复杂化和沉积体系分布差异. 盆地东缘的基本构造格架为一继承性发育的单斜构造, 但是研究区内局部区段变形组合样式仍然显示明显的变化, 有台阶式、单断式和滑脱断层等多种变形样式组合. 这些变形组合导致该斜坡带的结构复杂化, 进而控制了不同时期沉积的古地貌形态, 控制了对油气勘探有重要意义的特殊沉积体和构造圈闭的形成、发育和展布. 比如①号断层和莺东断层具有明显的区段性和幕式演化的特征, 这些变化对莺东斜坡带的古地貌形态有重要的影响, 进而控制了层序样式和沉积体系分布(图 5).

表 1 4 种层序样式的沉积体系及其配置样式

Table 1 Depositional pattern and distribution in four kinds of sequences in Yinggehai basin

类型	体系域	①号断裂上盘	断裂坡折带和①号断裂下盘	挠曲坡折带	盆地中央	发育层位
挠曲坡折型	HST	暴露或剥蚀区	三角洲或扇三角洲	三角洲或浅海	浅海或三角洲沉积	S_{31} — S_{60} 层序
	TST	暴露或剥蚀区	滨海、浅海	滨海、浅海	浅海或半深海	
	LST	暴露或剥蚀区	局部发育下切谷	斜坡扇	盆底扇	
断裂坡折型	HST	三角洲或扇三角洲	三角洲或扇三角洲	三角洲或扇三角洲	浅海或三角洲	莺东斜坡带中段 S_{30} — S_{31} 层序
	TST	滨海	滨海、浅海	滨海、浅海	浅海或半深海	
	LST	暴露或剥蚀区 局部发育下切谷	局部发育低位楔或斜坡扇	有时发育斜坡扇	盆底扇	
陆架陆坡型	HST	滨海或三角洲	陆架陆坡	挠曲	深海	S_{27} — S_{30} 层序
	TST	滨海、内陆架	外陆架	坡折带	深海	
	LST	无沉积区	斜坡及滑塌体	不存在	盆底扇	
无坡折型	HST	滨海或三角洲	浅海	挠曲	外陆架	S_{20} — S_{27} 层序
	TST	滨海、内陆架	浅海	坡折带	外陆架	
	LST	无沉积区	不发育	不存在	不发育	

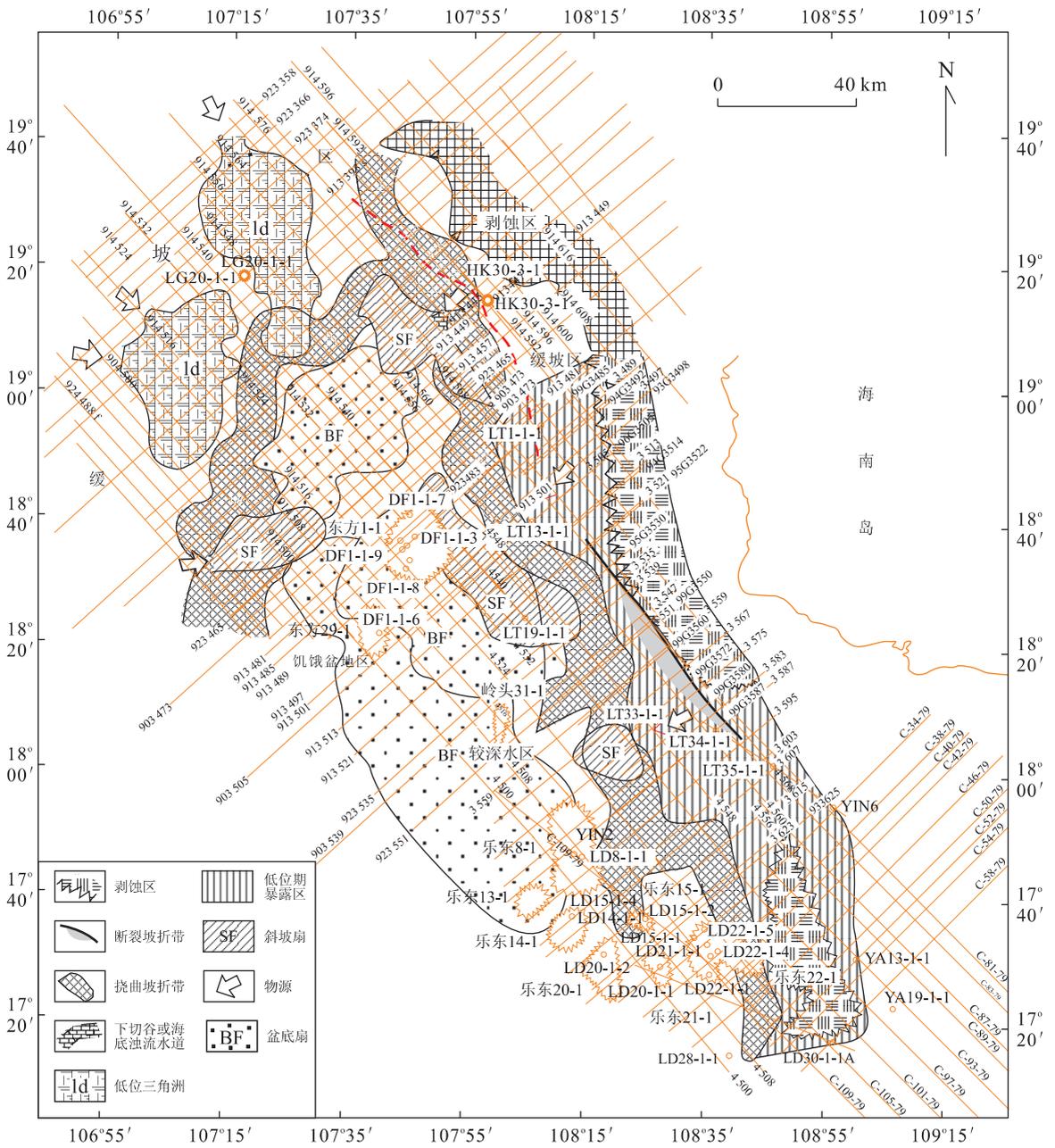


图 4 莺歌海盆地梅山组二段低位体平面分布及其与古地貌关系

Fig. 4 Distribution of lowstands bodies and its relationship with paleo-topography in Yinggehai basin

5 结论

(1) 针对莺歌海盆地构造演化特点, 提出坡折带是层序样式划分中非常重要的依据. 根据坡折带的成因机制将其划分为构造坡折带和沉积坡折带; 进而将层序样式划分为四类, 即挠曲坡折型、断裂坡折型(生长断裂型)、沉积坡折型(陆架陆坡型, 相当于 I 类层序)和缓坡型. (2) 不同成因坡折带控制了盆地的沉积古地貌单元. 盆地内构造活动的差异性导

致坡折带复杂化. 特别是盆地东缘台阶式和单断式等多种变形组合样式导致该斜坡带的坡折带结构复杂化, 进而控制了不同时期沉积的古地貌形态, 特别是很好地控制了低位扇体的分布. (3) 莺歌海盆地坡折带演化控制了本区裂后期的沉积样式和层序构成. S_{60} — S_{30} 层序总体受构造坡折带的控制, 其中低位体系统主要受控于挠曲坡折带, 局部受断裂坡折带的控制, 在莺东断层附近断裂坡折带最为清楚. S_{30} — S_{20} 总体受沉积坡折带的控制, 形成典型的陆架

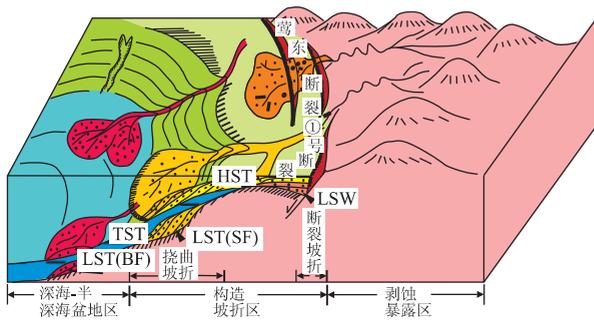


图 5 莺歌海盆地不同坡折类型及其沉积模式

Fig. 5 Patterns and depositional models of slope-breaks in Yinggehai basin

陆坡型层序,反映了盆地裂后期经历从以构造坡折带为主的层序样式到典型陆架—陆坡型层序样式的演化过程。

References

- Cross, T. A., 1994. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. Proceedings of northwestern European sequence stratigraphy congress, 105—123.
- Galloway, W. E., 1988. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, II: Application to Northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin. *AAPG Bulletin*, 73: 143—154.
- Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., 1997. Distribution of continental margin basins and hydrocarbon accumulation in the northern of South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Hu, Z. Q., Zhu, X. M., 2002. Sequence stratigraphic simulation of depression lake basin with topographic ramp. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 217—221 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins; Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 592—598 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Wang, H., Lu, F. X., et al., 1999. Basin geodynamics—fundamental idea and some approaches. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

Lin, C. S., Pan, Y. L., Xiao, J. X., et al., 2000. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 260—266 (in Chinese with English abstract).

Mitchum, R. M., Wagoner, V. J. C., 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns; Sequence stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sediment Geol.*, 70: 131—160.

Morley, C. K., 2001. Combined escape tectonics and subduction rollback-back arc extension; A model for the evolution of Tertiary rift basins in Thailand, Malaysia and Laos. *Journal of the Geological Society*, 158: 461—474.

Posamentier, H. W., 1992. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance. *AAPG*, 76(7): 1687—1709.

Wagoner, V. J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., et al., 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. *Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub.*, 42: 39—45.

Wagoner, V. J. C., Mitchum, R. M., Campion, K. M., et al., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies. *AAPG, Methods in Exploration Series*, (7): 55.

附中中文参考文献

- 龚再生, 李思田, 谢泰俊, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集. 北京: 科学出版社.
- 胡宗全, 朱筱敏, 2002. 具有地形坡折带的凹陷湖盆层序地层模拟. *沉积学报*, 20(2): 217—221.
- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等, 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震勘探基础上的层序地层学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 592—598.
- 李思田, 王华, 路凤香, 等, 1999. 盆地动力学—基本思路与若干研究方法. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等, 2000. “构造坡折带”——断陷盆地分析和油气预测的重要概念. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(3): 260—266.