

“构造坡折带”

——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念

林畅松¹ 潘元林² 肖建新¹ 孔凡仙² 刘景彦¹ 郑和荣²

(1. 中国地质大学能源地质系, 北京 100083; 2. 胜利油田石油管理局, 东营 257001)

摘要: 构造坡折带是指由同沉积构造长期活动引起的沉积斜坡明显突变的地带. 渤海湾等盆地的研究表明, 断陷湖盆中存在的构造坡折带制约着盆地可容纳空间的变化, 对层序的发育、沉积体系域及砂体的分布起重要的控制作用. 在半地堑盆地中可划分出凸起-缓坡边缘、缓坡-洼陷边缘、陡坡-洼陷边缘、凸起-陡坡边缘等断裂坡折带, 识别了“梳状构造”、“帚状构造”、“叉型构造”等同沉积的构造(断裂)坡折带样式, 它们控制着特定的沉积相域和砂体的展布形式. 构造坡折带是油气藏形成的极有利地带. 洼陷边缘断裂坡折带, 如“梳状构造”等构成盆地深部预测勘探的重要领域.

关键词: 构造坡折带; 砂体预测; 断陷盆地.

中图分类号: P618.130.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0260-07

作者简介: 林畅松, 男, 教授, 博士生导师, 1958年生, 1988年毕业于中国地质大学, 获博士学位, 现从事沉积盆地分析与模拟研究.

源于被动大陆边缘盆地的层序地层学原理如何应用于构造活动盆地进行层序和体系域分析是当前国际上的一个热点课题^[1]. 近年来, 国内外对陆相湖盆地层序地层, 尤其是对构造活动盆地的层序地层分析取得了显著进展, 揭示了构造作用在层序形成过程中的重要作用. 如在断陷盆地中, 构造演化的阶段性、沉降速率的幕式变化常控制着高级别层序和沉积体系域的发育; 裂陷期的脉冲式断裂作用控制水进-水退层序及体系域演化旋回等^[1-3]. 断陷湖盆沉积体系域的研究也产生新的认识和进展^[4,5].

在层序地层学中, “沉积坡折”(slope-break)是一个重要的概念. 是否发育一类层序界面首先取决于陆架坡折的存在. 在低水位期, 坡折带以上为剥蚀区或暴露区, 坡折带以下为沉积区^[6]. 在海洋盆地中, 人们已发现一些盆地的陆架坡折的形成与同沉积断裂的活动有关^[7]. 近年来对渤海湾等第三纪湖盆的研究发现, 长期活动的同沉积断裂形成的“构造坡折带”, 制约着盆地充填可容纳空间的变化, 控制着低水位体系域、高水位域三角洲-岸线体系的发

育部位, 对沉积体系的发育和砂体分布起重要的控制作用. 这一概念不仅在构造活动盆地的构造地层分析理论和方法上, 而且在油气预测勘探上具有重要的意义.

1 构造坡折带的概念

“构造坡折带”(tectonic slope-break)是指由同沉积构造长期活动引起的沉积斜坡明显突变的地带^[1]. 由于同沉积构造的长期活动, 构造坡折带对盆地充填的可容纳空间和沉积作用可产生重要的影响, 制约着盆地沉积相域(facies tracts)的空间分布. 在断陷盆地中, 规模较大的同沉积断裂(系)常构成断裂坡折带. 对我国东部中、新生代断陷盆地, 如百色、二连、渤海湾等盆地的研究表明, 断裂坡折带具有下列特点:

(1) 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. 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. 对第三纪渤海湾盆地沾化凹陷的研究表明, 断裂坡折带



图1 半地堑湖盆构造坡折带与沉积体系分布(以渤海湾沾化凹陷为例)

Fig. 1 Distribution of structural slope-breaks and their control on the development of depositional systems in a half-graben lacustrine basin

1. 扇/扇三角洲; 2. 河流-三角洲; 3. 三角洲前缘-浊流沉积; 4. 灰岩/石膏层; 5. 深湖泥质沉积; 6. 河流-浅湖泥质沉积; 7. ①以第三系沙河街组沙四段为例; ②以第三系沙河街组沙三段为例; ③以第三系沙河街组沙二段为例



图2 几种典型的同沉积断裂坡折样式与扇三角洲-湖底浊积扇体系分布

Fig. 2 Several types of syndepositional faults and related fan delta and sublacustrine fan systems

a. 以渤海湾盆地孤北洼陷东部沙河街组沉积为例; b. 以渤海湾盆地四扣洼陷东部沙河街组沉积为例; c. 以渤海湾盆地孤南洼陷东部沙河街组沉积为例. 1. 湖泊泥质沉积; 2. 扇三角洲-湖底扇体系; 3. 碎屑供给体系; 4. 同沉积断裂

的主控断裂的生长系数一般在 1.4~2.0. 在半地堑断陷盆地中, 可划分出凸起-缓坡边缘、缓坡-洼陷边缘、凸起-陡坡边缘、陡坡-洼陷边缘等断裂坡折带(图 1). 这些坡折带常是沉积相带和沉积厚度发生突变的地带, 在不同的盆地演化阶段控制着特定的沉积相域的展布.

(2) 在湖盆发育期, 断裂坡折带常构成从浅水或水上环境向深水或水下区过渡的突变界限. 因此, 在低水位期, 断裂坡折带往往控制着低水位沉积体系

的发育区域, 其上游方向是下切谷和剥蚀面最发育的地带; 在高水位期, 常常控制着高位体系域, 如三角洲体系的前缘带或沉积中心. 沿断裂坡折带的差异沉降和脉冲式的断裂活动, 可导致砂体的层数和厚度明显加大, 沉积旋回增多. 在深湖发育期, 洼陷边缘断裂坡折与边缘海盆地的斜坡坡折可以类比^[7].

(3) 断裂坡折带的断裂具有多种组合样式(图 2), 受控于构造应力场、先存断裂系再活动及重力调节等作用. 不同坡折带样式控制着不同砂分散体系、



图 3 横过第三纪渤海湾盆地四扣洼陷的三维地震沉积-构造解译剖面

Fig. 3 3-D seismic profile across the Sikou depression in Bohaiwan basin, showing the relationship between the depositional systems and the syndepositional structures

AF. 冲积扇沉积, 楔状发散不连续-较连续反射结构; FD. 扇三角洲沉积, 较连续-连续前积反射结构; LST. 低位湖底扇-前三角洲沉积, 丘形、叠瓦状、扁透镜状等反射结构; sb3, sb4, sb5 分别为沙河街组沙二、沙三和沙四层序的底界



图 4 过第三纪渤海湾盆地渤南洼陷中部的沉积断面(据三维地震剖面和钻井资料编制)

Fig. 4 Depositional section across the Bonan depression in Bohaiwan basin

1. 湖相泥岩; 2. 湖相泥岩和浊积砂岩; 3. 扇砂砾岩; 4. 扇三角洲/湖底扇砂岩-泥岩; 5. 湖相泥岩; 6. 石膏/泥岩

沉积砂体形态及分布样式. 断裂坡折带对沉积相和砂体的控制是多样化的, 需要结合盆地构造演化、物源供给、气候变化引起的湖平面升降等综合分析.

2 构造坡折带与砂体分布样式

同沉积断裂对沉积的控制主要是通过控制剥蚀-沉积地貌来实现的. 不同的同沉积断裂系决定着不同的沉积坡折带样式, 从而控制着同期砂体分布样式. 这种内在联系的认识对断陷湖盆层序分析和砂体预测具有重要的指导意义.

2.1 同沉积的断阶坡折与沉积相带

在我国东部中、新生代断陷盆地中, 沿陡坡或缓

坡带常发育同沉积的断阶构造, 构成沉积坡折. 在沿盆地的陡坡带常发育两至三个断裂坡折带(同沉积断阶), 控制着多个相带的展布(图 1). 盆内洼陷边缘断裂坡折一般构成盆地演化早期边缘冲积扇或浅水扇三角洲的沉积边界. 随后盆地边缘断阶上超, 形成凸起与斜坡边缘断裂坡折, 并控制着扇三角洲沉积边界, 而洼陷边缘坡折则控制着扇三角洲前缘砂质沉积加厚带(图 3). 进入深水湖盆发育阶段, 洼陷边缘断裂坡折控制着湖底浊积扇和低位期扇三角洲前缘沉积带的分布, 而凸起边缘坡折则控制着近端扇和扇三角洲的展布(图 4).

在断阶不发育时, 单一断裂坡折一直控制着盆地的沉积边缘, 沿下降盘一侧粗碎屑体系垂向加积,

图5 过第三纪渤海湾盆地渤南洼陷斜坡带的沉积断面(据三维地震剖面和钻井资料编制)

Fig.5 Depositional section across the hinge margin of the Bonan depression in Bohaiwan basin

1. 砾岩; 2. 含砾砂岩; 3. 砂岩; 4. 泥岩; 5. 泥灰岩

随着湖水的加深,边缘扇从早期的冲积扇向扇三角洲、深水扇三角洲或湖底扇演化^[8]。在低水位期,水系可越过早期的堆积高地貌向盆地方向推进形成低水位的进积三角洲沉积体。在高水位期,沿陡的扇三角洲前缘—前三角洲带的重力滑动产生再搬运,可发育浊积湖底扇沉积。

在缓坡带,斜坡与洼陷边缘断阶坡折往往控制着盆地早期的主要沉积边缘,随后被超覆;凸起边缘断阶坡折则限定湖盆地扩张期的沉积边界,而洼陷边缘坡折则成为制约着三角洲前缘加厚带、浊积扇及低水位期进积楔状体的发育部位。在渤海湾盆地沾化凹陷罗家斜坡带,沙三期发育了二至三级断裂坡折,凸起边缘断裂坡折制约着沙河街组沙三、沙四段河流—三角洲平原和扇三角洲的沉积相带,而洼陷边缘断裂坡折带控制着三角洲前缘、深湖浊积或低水位相带的总体展布(图4,5)。

2.2 梳状断裂系的砂体分布样式

沿不同断裂坡折带粗碎屑体系或砂质沉积中心的定位又与沿坡折带的次一级的同沉积断裂的分布和物源供给系统有关。由主干同沉积断裂和与之垂向的一组伴生次级断裂构成的“梳状断裂构造”,常控制着一个“沉积相域”的总体分布(图2a)。这种构造的形成可能与沿主干断裂走向的断裂调整有关。沿主干断裂的走向,不同部位断距的差异必然会导致垂直的调整断裂的发育。典型的实例见于渤海湾盆地孤北等陡坡断裂—洼陷带。与主干断裂近于垂向的梳状次级断裂控制着水道的主要发育部位,碎屑体系的推进一般是沿这些次级同沉积断裂向盆地

方向推进的。如在沾化凹陷孤北五号桩油田,构成主力储集层的沙三期湖底浊积扇和沙四期扇三角洲沉积就受到一组梳状断裂系的控制。在沙三沉积期,近南北向的洼陷边缘主干断裂坡折带控制着湖底浊积扇相带的发育,而与之近于垂向的东西向梳状断裂控制着主要砂体的发育部位和延伸方向(图6)。



图6 第三纪渤海湾盆地孤北洼陷沙三上砂体厚度分布与梳状同沉积断裂系关系

Fig.6 Isopach map of sandstones of upper interval 3 of the Shanhejie Formation and related comb-shape syndepositional faults the Gubei depression in Bohaiwan basin

1. 钻井位置; 2. 主要的物源方向; 3. 同沉积断裂; 4. 砂岩厚度 20~60 m; 5. 砂岩厚度 60~100 m; 6. 砂岩厚度 >100 m

图 7 第三纪渤海湾盆地四扣洼陷沙三沉积砂体与同沉积断裂分布

Fig. 7 Distribution of sandstones of interval 3 of the Shanhejie Formation and syndepositional faults in Sikou depression in Bohaiwan basin

1. 深湖沉积; 2. 同沉积断裂; 3. 物源方向; 4. 扇三角沉积; 5. 湖底扇或浊流沉积; 6. 辫状河三角洲沉积; 7. 浅湖沉积

2.3 叉形或帚状断裂系的砂体分布

叉形断裂系是由两条同沉积断裂带相交形成的叉形断裂构造, 其内叉角是构造低部位, 多发育较厚的所谓“断角砂体”, 控制着沉积中心. 如图 2c 所示, 沿主断裂的上游端可能捕获主要的水系, 碎屑体系沿断裂带向洼陷推进. 在渤海湾盆地的孤南洼陷东端的孤东断裂带是这类构造的典型例子. 来自长堤凸起或垦东凸起的碎屑体系的堆积受到该断裂带的控制. 来自孤岛凸起的水系则沿孤南断裂南端堆积, 形成叉状的砂质沉积带.

帚状断裂系是由主干断裂的末端发散的一组呈帚状的次级断裂组成的断裂系. 主干断裂系发散的部位控制着砂质沉积中心, 主要断裂的延伸控制着碎屑体系向盆内的推进方向(图 2b). 这种断裂系的发育与走滑作用的叠加有密切关系.

图 7 是根据三维地震、钻井资料等综合分析编制的沾化凹陷四扣洼陷同沉积断裂与碎屑沉积体的分布关系. 不难看出, 同沉积断裂与沉积砂体的分布密切相关, 并表现出相当的复杂性. 无疑, 为了阐明同沉积断裂与沉积砂体分布的关系必须结合各种资料进行综合分析.

3 构造坡折带是油气藏形成的极有利部位

从断陷盆地油气藏的分布和形成条件看, 构造(断裂)坡折带是油气藏形成的极有利地带:

(1) 断裂坡折带是砂岩厚度和砂岩层数的加厚带, 沿坡折带走向的碎屑体系供给部位可找到加厚的储集砂岩体; (2) 断裂坡折带多位于油气运移的上倾方向, 同沉积断裂是重要的油气通道, 又由于这些断裂的生长系数大, 容易造成侧向岩性封堵, 形成有利的断层封闭; (3) 断裂坡折带上除断块圈闭发育外, 同沉积断裂的明显活动和砂体的发育又有利于滚动背斜的形成, 在渤海湾等断陷盆地中, 无论是缓坡或陡坡带的构造坡折带都是滚动背斜发育的有利部位; (4) 在发生过构造反转的裂陷盆地中, 构造坡折带是应力易于集中的部位, 形成构造反转背斜或反转强化的先存滚动背斜圈闭. 同时, 构造坡折带还是不整合面开始发育的部位, 对分布和寻找不整合圈闭具有重要意义.

4 讨论

控制着沉积和剥蚀作用的沉积基准面变化是构造升降、全球海平面变化、沉积物供给、气候条件等的函数。在被动大陆边缘盆地中,构造差异沉降小,沉积斜坡小,海平面变化成为层序发育和盆地充填过程的主导性控制因素。但在断裂活动的湖盆中,构造升降速率随时空的变化是盆地沉积基准面和可容纳空间变化最重要的控制因素。当然,气候变化也可能是影响湖盆水容积变化的重要因素之一。定量回剥分析表明:中国东部中新代盆地在裂陷期的沉降速率高达 $250 \sim 700 \text{ m/Ma}$ ^[9],裂陷期的盆地充填厚达数 km 或万余 m,其内还发育一系列构造运动产生的不整合面。这些不整合面构成主要的层序界面并与沉降速率的突变有关^[4]。同时,构造差异升降作用还是物源区和沉降区分布的决定性因素。因此,在探讨这些盆地的充填动力学过程和层序发育演化时,应更注重研究构造的主导性作用。近年的研究成果和油气的勘探实践已表明,结合层序地层学的基本原理和盆地古构造分析的方法——构造地层学(tectonostratigraphy)^[10],可能是阐明构造活动盆地充填过程、层序-沉积体系域分布和砂体预测的更有效的方法,而“构造坡折带”则是在这一探索过程中提出的一个具有普遍意义的概念。

参考文献:

- [1] 林畅松,刘景彦,张燕梅. 沉积盆地动力学与模拟研究[J]. 地学前缘, 1988, 5: 119~125.
- [2] Ravnas R, Steel R J. Architecture of marine rift-basin successions [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82: 110~146.
- [3] Lambias J J. A model of tectonic control of lacustrine stratigraphic sequences in continental rift basins [J].

AAPG Memoir, 1991, 50: 137~149.

- [4] Lin C S, Li S T, Wan Y X, et al. Depositional systems, sequence stratigraphy and basin filling evolution of Erlian fault lacustrine basin, Northeast China [A]. In: Liu B, Li S, eds. Basin analysis, global sedimentary geology and sedimentology, Proceedings of the 30th IGC [C]. Utrecht: VSP International Science Publishers, 1997. 163~175.
- [5] Cohen A S. Tectono-stratigraphic model for sedimentation in lake Tanganyika, Africa [J]. AAPG Memoir, 1991, 50: 137~149.
- [6] Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Global cycles of relative changes of sea level [J]. Am Ass Petrol Geol, 1977, 26: 99~116.
- [7] Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al. The stratigraphic signatures to tectonics, eustasy and sedimentation: an overview [A]. In: Einsele, ed. Cycles and events in stratigraphy [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 615~659.
- [8] Lin C S, Yang Q, Li S T. Structural and depositional patterns of the Tertiary Baise basin, Guangxi autonomous Region (Southeastern China): a predictive model for fossil fuel exploration [A]. In: Anadon P, Cabrera L, Kelts K, eds. Lacustrine facies analysis [C]. Blackwell: Spec Publs Int Ass Sediment, 1991. 75~92.
- [9] Lin C S, Li S T, Zhang Q M, et al. Subsidence and stretching of some Mesozoic rift basins in east China [A]. In: Liu B, Li S, eds. Basin analysis, global sedimentary geology and sedimentology, Proceedings of the 30th IGC [C]. Utrecht, Netherlands: VSP International Science Publishers, 1997. 176~1195.
- [10] Strecker U, Steidtmann J R, Smithson S B. A conceptual tectonostratigraphic model for seismic facies migrations on a fluvio-lacustrine extensional basin [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83: 43~61.

STRUCTURAL SLOPE-BREAK ZONE: KEY CONCEPT FOR STRATIGRAPHIC SEQUENCE ANALYSIS AND PETROLEUM FORECASTING IN FAULT SUBSIDENCE BASINS

Lin Changsong¹ Pan Yuanlin² Xiao Jianxin¹ Kong Fanxian² Liu Jingyan¹ Zheng Herong²

(1. Department of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Shengli Oil Administration Bureau, Dongying 257001, China)

Abstract: The structural slope-break zone, resulting in the abrupt change of the depositional slope, is initiated by the long-term activity of syndepositional structure. The researches into the Bohaiwan basin indicate that the structural slope-break zone in the fault subsidence lacustrine basin constrained the change in the accommodation space of the basins, controlling the development of the depositional sequence and the distribution of the depositional system tracts and the sand bodies. The half-graben basin may accommodate the following four kinds of structural slope-break zones: uplift-gentle-slope margins, gentle slope-depression margins, steep-slope-depression margins, and uplift-steep-slope margins. Furthermore, several syndepositional structural (fault) slope-break patterns are identified such as “comb-like structure” and “broom-like structure”. These structures controlled the distribution patterns of the specific depositional systems tracts and the sand bodies in the basin. The structural slope-break zone is favorable for the formation of petroleum accumulation. The structural slope-break zone at the depression margin such as the “comb-like structure” has proved important for the prediction and exploration of the deep-seated subtle traps in the basin.

Key words: structural slope-break zone; sand-body prediction; fault basin.

* * * * *

(上接 231 页)

晋宁期奥长花岗岩锆石 Pb-Pb 年龄为 $(913 \pm 4) \sim (1011 \pm 4)$ Ma, U-Pb 同位素一致线年龄为 (703 ± 15) Ma, 表明该期侵入岩的形成年龄应大于 703 Ma, 在 1 000 Ma 左右, 为新元古代早-中期的产物. 通过白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测定表明: 该期侵入岩在加里东期晚期遭受了强烈的变质变形的改造, 产生变质并形成片麻理, 变质时间为 (386.8 ± 0.8) Ma \sim (389.44 ± 3.70) Ma.

东昆仑造山带为一多期复合造山带, 大面积出露海西-印支期侵入岩. 东昆仑晋宁期岩浆活动及

其后期遭受的加里东期变质作用的确定, 无疑为研究东昆仑晋宁及加里东期造山带形成及演化提供了重要的依据, 并对研究青藏高原的早期演化有重要意义.

参考文献:

- [1] 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 125~143.
- [2] 姜春发, 冯秉贵, 杨经绥, 等. 昆仑地质构造轮廓[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1986, 15: 70~79.
- [3] 古风宝, 吴向农, 姜常义. 东昆仑华力西-印支期花岗岩组合及构造环境[J]. 青海地质, 1996, (1): 18~30.