

文章编号: 1000-0550(2003)02-0255-05

# 构造断阶对沉积的控制: 来自地震、测井和露头的实例<sup>①</sup>

程日辉 王璞<sup>珏</sup> 刘万洙

(吉林大学地球科学学院 长春 130061)

**摘 要** 构造断阶是裂谷盆地(特别是裂谷盆地发育早期)或断陷盆地边缘发育的一种构造样式,反映盆地边缘因断块差异沉降所形成的沉积斜坡地形的阶梯变化。在地震剖面可以解释出许多不同类型的断阶带,并在此框架下根据地震反射结构解释地震相和沉积相。构造断阶带的不同类型控制了不同的沉积样式。构造断阶的识别约束了地震解释的多解性。测井资料的运用可以证实断阶带的沉积控制作用,约束地震解释,也可以进行沉积微相及空间分布的精细研究。地震、测井的实例分别来自松辽盆地徐家围子断陷和渤海湾盆地沾化凹陷。来自胶莱盆地野外露头的实例从另一方面证实了这种控制作用。与钻井或测井资料相比,露头资料具有连续性。露头的详细分析可得到构造断阶对沉积和地层结构控制的细节。构造断阶(带)与沉积作用关系的模式可以提供油气勘探的地质模型。

**关键词** 构造断阶 沉积作用 地层结构

**第一作者简介** 程日辉 1963年出生 副教授 博士 沉积学和石油地质

**中图分类号** P512.2 文献标识码 A

## 1 引言

在裂谷盆地(特别是裂谷盆地发育早期)或断陷盆地的边缘普遍发育有构造断阶和断阶带。发育在这样构造地形上的沉积作用及其类型是通过水流和沉积物供给得到控制的<sup>[1]</sup>。类似的构造—沉积体组成的体系也称裂谷边界体系<sup>[2]</sup>。

现在赋存的或正在发育的盆地基本在沉积物和水体的覆盖之下,三维空间上的构造与沉积作用的了解是通过地震资料的解释和测井资料的验证取得的。由于裂谷边界体系的范围大,断裂规模也大,在露头上是难以较完整识别的。

来自山东胶莱盆地莱阳组的露头实例不仅展示断阶带的构造样式,而且展示了响应于构造条件的特殊沉积型式和地层结构。虽然露头实例的规模比地震资料解释的实例小,但可反映出沉积和地层的精细组成结构。露头实例一方面证实了构造断阶对沉积的控制,而且也显示出在各种级别上构造样式均对沉积型式施加控制与影响。

## 2 构造断阶对沉积的控制—来自地震和测井剖面的解释

构造断阶是指盆地边缘因断块差异沉降所形成的沉积斜坡地形呈阶梯变化的一种构造样式<sup>[3]</sup>,是运用地貌学中阶地的概念来反映由断层作用在盆地边缘所

形成构造地貌。构造断阶根据组成断阶的断层面倾斜方向与盆地总体斜坡方向的关系分为正向断阶(简称断阶)和反向断阶<sup>[4]</sup>。多个构造断阶在盆地中组成了构造断阶带,控制了盆地边缘斜坡的地形特征。这种构造与沉积作用关系的建立是通过地震反射资料的解释,并通过测井资料的验证取得的。虽然地震资料解释具有多解性,但因为具有空间连续性,可以揭示出许多露头或测井无法揭示的现象。

构造断阶控制沉积作用是通过地形变化,影响水动力条件和沉积物供给实现的,类似于陆架边缘坡折,因此将断阶带上地形转折处称为构造坡折<sup>[5]</sup>。从地震反射剖面的构造—地层解释来看,构造断阶不仅控制地层几何特征,而且控制地层结构和沉积类型。图 1 是松辽盆地徐家围子断陷的一条地震解释剖面,反映出断阶带的几何样式以及对应的地层特征。松辽盆地发育早期(晚侏罗世—早白垩世)断裂十分发育,徐家围子断陷同沉积断裂对地层和沉积的控制表现在如下几个方面: 1)断层上盘厚度大于下盘厚度; 2)上盘的砂泥岩互层数多于下盘; 3)粗碎屑多以楔形体和透镜体存在,而靠近断层面厚度变大; 4)在一套地层的上部构造断阶对沉积体的控制作用减弱,如层序的高位体系域; 5)在横向上砂泥岩多为互层,大型砂体为透镜状。上述地层沉积特征可以从地震反射结构上解译出来。根据地震相特征可以判别沉积相类型,得到沉积相及其组合剖面。图 1 主要展示徐家围子断陷在断阶带控

① 国家自然科学基金项目(批准号: 49894190-12)资助

收稿日期: 2002-04-23 收修改稿日期: 2002-06-25

制下所形成的构造层序(沙河子组)的特点, A为低位体系域,主要沉积相类型为冲积扇,分布在 F5断层和 F6断层的下降盘,说明这两个断层发育早。 B为水进体系域,主要沉积相类型为湖泊,分布范围广,在 F4、F3和 F2构成的断阶带上发生上超,说明这三个断层发育稍晚。 C为高位体系域主要沉积相类型为三角洲和河流,具有进积特点,发育有侵蚀和下切作用,此间的断裂活动弱。 F1断层是在营城组形成时发育的,因此对沙河子组的形成没有控制作用。构造断阶具有不同的类型<sup>[3]</sup>,对应于不同的沉积作用类型与地层结构。因此构造断阶样式与沉积型式(沉积体几何学)对应性的机制分析可以约束地震解释的多解性。测井资料的运用在分析构造断阶及其对沉积作用方面具有特殊的特点。图 2是渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷的一条连井构造-沉积剖面。济阳坳陷在孔店组-沙河街组形

成阶段,由于断裂的分割作用,形成了东营、沾化、惠民和车镇四个次级凹陷。同沉积断裂控制了沉积体系的发育和沉积模式<sup>[6-7]</sup>。图 2中的断层是根据附近的地震剖面解释展上的,其展示了沙河街组三段的层序和沉积相发育,揭示了一个二级断阶带(由断层 1和断层 2组成)对沉积相带和地层结构的控制。构造断阶带对沉积相带的控制表现在沉积相类型和古地理分区方面。由断层 2活动而形成的构造坡折之上为陆上环境,主要的沉积相类型为冲积扇和扇三角洲平原,而在构造坡折之下是水下环境,主要沉积相类型为扇三角洲前缘和前三三角洲。构造断阶带对地层结构控制表现在,构造坡折之上发育砂岩体以楔形体与泥岩在前端呈指状交互,而在构造坡折之下多为砂泥岩互层。测井资料的运用不仅可以证实构造断阶带的沉积控制作用,约束地震的沉积相解释,而且可以进行沉积微相及空间

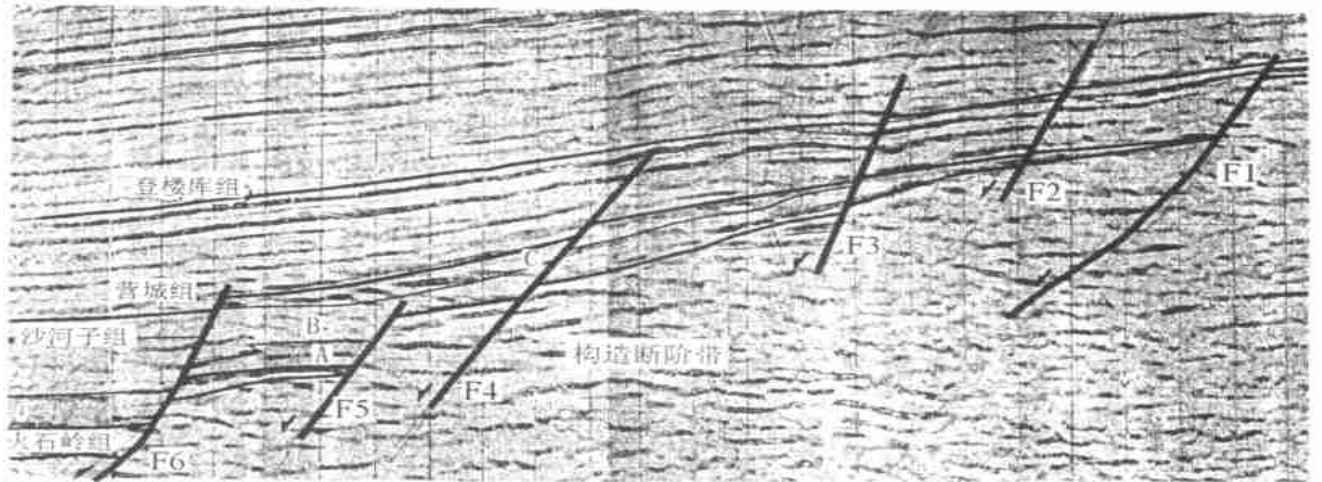


图 1 徐家围子断陷 37.0测线构造断阶样式与地层发育

Fig. 1 Fault terrace style and stratigraphy on seismic profile 37.0 in Xujiawanzi fault depression

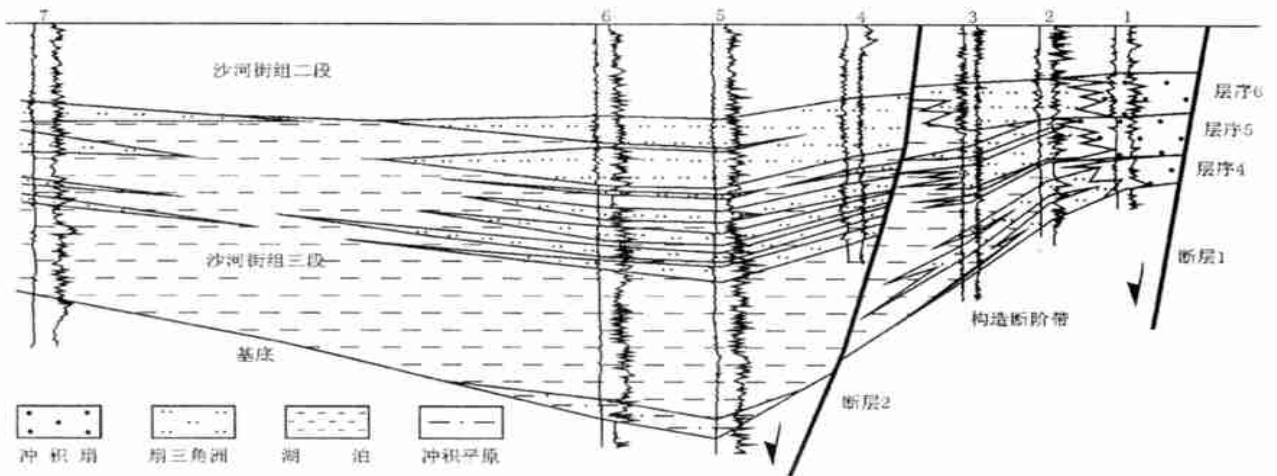


图 2 渤海湾盆地沾化凹陷连井构造沉积剖面图

Fig. 2 Structural-sedimentary section of wells, Zhanhua depression, Bohaiwan Basin

分布的精细研究

### 3 野外露头的实例

露头剖面的观察与分析对于沉积相的研究是无法替代的,因为具有连续性,可以在三度空间进行研究,进行精细化研究。但对于发育在盆地边缘的构造断阶带往往不易观察,或出露不全,或范围太大。

胶莱盆地是白垩纪发育的走滑拉分盆地<sup>[8]</sup>,属于沂沭断裂走滑体系。也有人认为其是在挤压背景的局面拉张陷落的条件下开始发育形成的<sup>[9]</sup>。早白垩世早期胶莱盆地充填的地层为莱阳组,主体为一套湖相沉积。由于后期构造活动的改造,现在许多地点已经出露并遭受到强烈的剥蚀。山东省诸城市皇华店一带,莱阳组出露良好。诸城地区位于胶莱盆地的西南角,是沂沭断裂系的收敛位置。盆地狭小,发育冲积扇、扇三角洲或三角洲沉积(图 3)。在三角洲前缘沉积中,发育一系列可能受附近的较大级别的断层活动或地震的诱发所形成的同生断裂,形成了构造断阶,组成了断阶带(图 3)。这个断阶带由三个断阶组成,其中 F1 和 F3 断层的断距较大,活动性强;而 F2 断层的断距较小,活动性弱。由断阶所形成的沉积斜坡向盆地内部倾斜,斜坡的方向指示了沉积物的传输方向。由露头照片和解释图可以清楚地看出,构造断阶对地层结构具有明显的控制作用。由于整个断阶带位于三角洲前缘相带中,构

造断阶对更细沉积相带控制不明显,但仍可以显示出一些沉积作用的特点。从地层结构和沉积序列上看,1)该套沉积序列由二个沉积旋回组成,每个旋回是由缓慢沉积到快速堆积;2)三个断层并非同时活动

地层结构在四个断阶上是不同的。断阶 1 上只发育有层 1 和层 4,显然两层之间存在间断;断阶 2 上虽然层 1~4 均发育,但层 2 和层 3 部分缺失,说明存在剥蚀作用;断阶 3 上同样也发育有层 1~4,但只是层 1 部分缺失;断阶 4 上发育层 2 层 3 和层 4。从沉积物的颜色和粒度来看,该套沉积总体上为粉砂岩—细砂岩。层 1 为灰绿色粉细砂岩;层 2 为黑灰色粉细砂岩,但粒度稍粗而且泥质含量高;层 3 为灰绿色粉细砂岩;层 4 在断阶 1 和断阶 2 上以灰黑色粉细砂岩为主,而在断阶 3 和断阶 4 上主要为灰绿色粉细砂岩。

因此根据这四种不同的地层结构、断阶带构造样式以及沉积物特征可以分析形成过程。层 1 是形成在三角洲前缘的原始斜坡之上的,而其分布范围没有超过 F3 断层的位置。该过程中断层的活动弱,断阶的作用不明显。随后是 F1 断层、F2 断层和 F3 的依次活动,即 F1 首先活动, F3 最后活动,形成构造断阶,组成断阶带。在层 2 的发育过程中,首先是在断阶 1 和部分断阶 2 上的层 1 被剥蚀,之后与来自上游的沉积物一起,以 F2 断层所形成的断阶为通道,成为断阶 3 和断阶 4

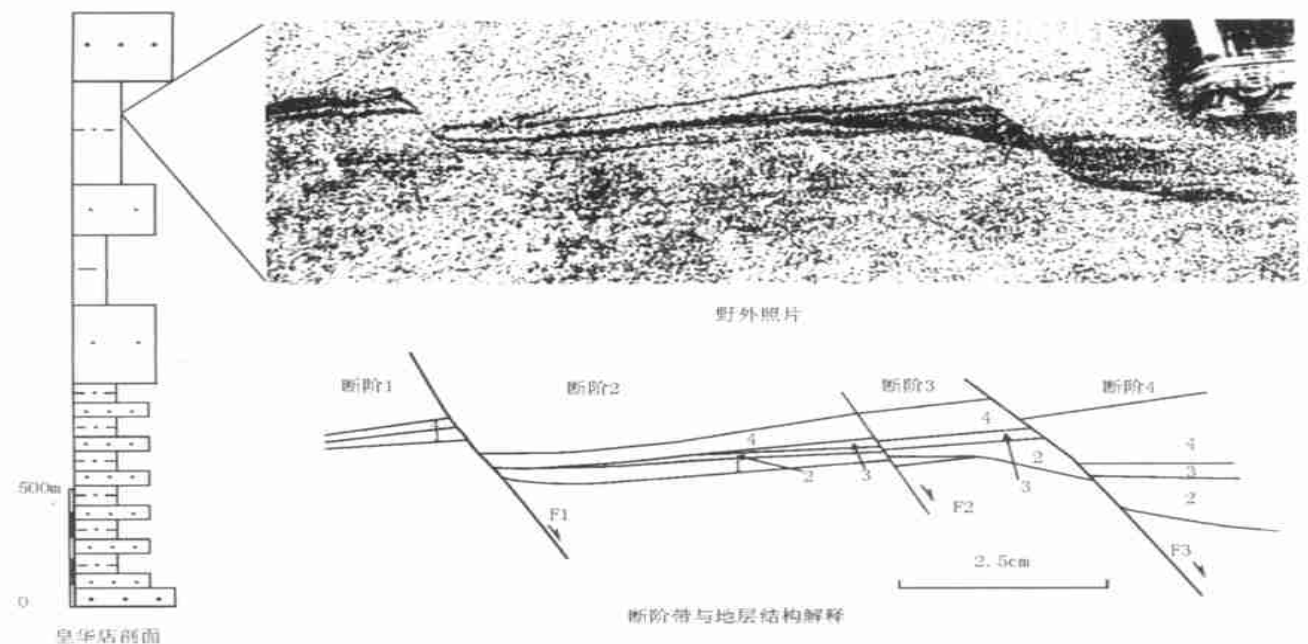


图 3 诸城市皇华同莱阳组三角洲前缘沉积中构造断阶对沉积地层的控制

Fig. 3 Sedimentary and stratigraphic controls of fault terraces developed on the delta front of Laiyang Formation, Huanghuadian Section of Zhucheng City

或更远的沉积物源,大部分堆积在断阶 4 上。在这个过程中,沉积物通道上(即 F2 断层的下、上盘)遭受严重的剥蚀,在断阶 3 上的层 1 已大部分被剥蚀,其下伏地层亦被剥蚀,形成了明显的侵蚀不整合面。以黑灰色为主的沉积物具有浊流性质。层 3 形成于断层活动的平静期,因此断层上、下盘沉积的地层厚度差别不大。层 4 的发育过程与层 2 具有相似之处,是在断层的又一个活动期形成的。差别是层 4 的沉积物大部分为灰绿色粉细砂岩,缺少事件流的沉积特征,反映出本期断裂活动速率小于层 2 形成时期断裂活动的速率。

## 4 讨论

有关构造断阶对沉积型式和地层结构的控制,实际是断裂活动塑造地形,而地形控制了水流和沉积物流,进而控制沉积型式。由于断裂活动的强烈程度在时间和空间上均都存在差异,伴随断层传播(fault propagation<sup>[10]</sup>),因此形成不同的地层结构。在断阶构造样式(构造几何学)与沉积体几何学(尤其是粗碎屑沉积体—砂体)存在着对应关系,暗含着沉积作用的动力学特征。构造断阶和构造断阶带是个三维的样式。在平面上断层有不同的组合方式和联结方式,同时还要考虑伴生褶皱与之的关系,这些同样影响沉积体类型与空间分布,影响地层结构。

运用地震反射资料对于三维构造断阶的构造样式与沉积体几何学的对应性的认识是重要的,但往往存在多解性和不确定性。由于分辨率的限制,精细的沉积体叠置关系和地层结构的认识或识别是困难的。测井资料的应用应得因运用地震资料而受到的限制大大改善,使精细的研究成为可能。由于不连续的问题,测井解释同样存在多解性。露头对于研究细节无疑提供了巨大的帮助。但问题是露头的连续性也局限在相对小的范围内。因此地震、测井和露头的综合研究对于确立构造与沉积作用的关系是必要的,起到相互补充和验证与修正的作用。

这方面研究的意义在于: 1) 了解断阶构造样式对沉积作用的方式和物质表现; 了解断层发育过程中沉积作用类型的演变和地层结构的形成与时空分异。2) 系统化的模式可以做为油气勘探的地质模型,因为这种特殊的构造与沉积类型的组合模式不仅可以预测砂体的形成与分布(近来的研究表明火山岩的发育与赋存也受断阶带的控制<sup>[11]</sup>),而且可以预测成藏。

## 5 结论

(1) 构造断阶(带)对沉积作用类型和地层结构的控制可以通过地震解释得到,这种三维的对应关系模

式是测井和露头上不易得到的。

(2) 测井资料对于精细的研究起到了促进,使精细研究成为可能,同时也验证或修正来自地震资料的认识或模式。

(3) 露头研究突出的作用是对构造断阶的沉积—地层控制直接的精细的研究,是所有工作的基础(也包括岩芯研究)。从中揭示作用规律和物质表现,指导地震和测井的解释。

(4) 构造断阶(带)与沉积作用关系的研究具有理论意义—丰富构造沉积学理论,而且具有实际应用意义—提供油气勘探的地质模型。

## 参考文献 (References)

- 程日辉, 林畅松, 崔宝琛. 沉积型式与构造控制研究进展 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 11~ 15 [Cheng Rihui, Lin Changsong and Cui Baochen. Advances in the study of the styles of sedimentation and the tectonic controls [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(1): 11~ 15]
- Magnavita L P, Hercules T F, da Silva. Rift Border System: The interplay between tectonics and sedimentation in the Reconcavo Basin, Northeastern Brazil [J]. AAPG Bull., 1995, 79(111): 1 590 ~ 1 607
- 程日辉, 林畅松, 郑和荣. 构造坡折与砂体预测: 以沾化凹陷富林地区为例 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(3): 203~ 206 [Cheng Rihui, Zheng Herong and Lin Changsong. Structural fault terrace and sand body prediction: an example from Fulin area, Zhanhua sag [J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(3): 203~ 206]
- 程日辉, 林畅松, 郑和荣. 反向断阶构造样式与砂质沉积体发育—以沾化凹陷为例 [J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 146~ 148 [Cheng Rihui, Zhengherong and Lin Changsong. The structural style of antithetic fault terrace and the development of sand bodies [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(2): 146~ 148]
- 林畅松, 潘元林, 肖建新等. “构造坡折带”—断陷盆地层序分析和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~ 265 [Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 260~ 265]
- 国景星, 戴启德, 徐炜. 沾化凹陷东部长堤地区下第三系沉积体系研究 [J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 368~ 374 [Guo Jingxing, Dai Qide and Xu Wei. Study on the sedimentary system of Paleogene in Changdi region of Zhanhua sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 368~ 374]
- 张善文, 隋风贵, 王永诗. 济阳拗陷下第三系陡岸沉积模式 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 219~ 223 [Zhang Shanwen, Sui Fenggui and Wang Yongshi. Depositional models on the steep slope of Paleogene, Jiyang sub-basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 219~ 223]
- 陈书平, 戴俊生, 宋全友等. 胶莱盆地构造应力场特征及数学模拟

- [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(3): 19~ 25 [Chen Shuping, Dai Junsheng, Song Quanyou, *et al.* Features of tectonic stress fields in Jiaolai basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1998, 22(3): 19~ 25]
- 9 李桂群, 范德江, 任景民. 胶莱盆地发育及其油气前景探讨 [J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(3): 413~ 419 [Li Guiqun, Fan Dejiang and Ren Jingmin. The evolution features of the Jiaolai basin and study of its prospective oil and gas deposits [J] Journal of Ocean University of Qindao, 1994, 24(3): 413~ 419]
- 10 Gupta S, Cowie P. Processes and controls in the stratigraphic development of extensional basins [J]. Basin Research, 2000, 12 (3/4): 185~ 194
- 11 Cheng Rihui, Wang Pujun, Liu Wanzhu, *et al.* The sequence Architecture of volcanic basin fillings—an example from Xujiaweizi faulted depression in Songliao basin [J]. Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia, 2001, 4(2): 116~ 119

## Depositional Controls of Structural Fault Terrace Examples from Seismic, Logging and Outcrop Data

CHENG Ri-hui WANG Pu-jun LIU Wan-zhu

(Faculty of Earth Sciences in Jilin University, Changchun 130061)

**Abstract** Structural fault terrace is a kind of structural pattern developed on the margins of rift (especially in the early stage of rift) or fault basins reflecting step changes of depositional relief of slopes formed by different subsidence of marginal blocks. Some different types of fault terrace zones are interpreted from seismic profile under which we interpret seismic facies and sedimentary facies. Different types of fault terraces control different sedimentary types. The using of fault terrace may constrain the seismic interpretation with multiple resolutions. Well logging data may be used to test and confirm the controls of sedimentation on the terrace zones constraining seismic interpretation, and to study some details about sedimentary micro-facies and spatial distributions. The examples from seismic and well logging data are from Xujiaweizi fault depression of Songliao basin and Zhanhua sag of Bohaiwan basin. The example from field outcrop in Jiaolai Basin confirms this controlling process. Comparing with drilling and logging data, the information from outcrop is continuous and the analysis of outcrop may reveal details of sedimentation and stratigraphic architecture under control of structural fault terrace. Models of fault terrace and sedimentation may be applicable to oil and gas exploration.

**Key words** structural fault terrace, sedimentation, stratigraphic architecture