

文章编号: 0253-9985(2006)04-0451-09

# 兰聊断层的几何学、运动学特征对东濮凹陷构造样式的影响

漆家福<sup>1</sup>, 王德仁<sup>2</sup>, 陈书平<sup>1</sup>, 赵衍斌<sup>1</sup>, 程秀申<sup>2</sup>, 解 宸<sup>2</sup>, 徐政强<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

(2. 中国石油化工股份有限公司 中原油田分公司 地质勘探开发研究院, 河南 濮阳 457001)

**摘要:** 东濮凹陷的古近系充填在由兰聊断层控制的一个复式半地堑断陷中。兰聊断层总体上为铲式断层面形态, 但是沿东濮凹陷轴向断层面形态和拆离深度有明显变化。北段为浅层相对缓倾的铲式正断层, 拆离面深度约 9~12 km; 中段为浅层相对陡倾的铲式正断层, 拆离深度约为 14~16 km; 南段为坡坪式正断层, 浅层的拆离深度约 8 km, 深层拆离深度约 11~13 km。不同区段的兰聊断层在古近纪不同时期的运动学特征也具有明显的差异, 中段的伸展量相对较大。由于兰聊断层的几何学、运动学特征沿东濮凹陷轴向发生变化, 导致凹陷的构造样式、沉积作用、石油地质条件有明显的不同。

**关键词:** 伸展构造; 几何学; 运动学; 兰聊断层; 东濮凹陷

中图分类号: TE111.2 文献标识码: A

## Impact of geometry and kinematics of Lanliao fault on structural styles in Dongpu sag

Qi Jiafu<sup>1</sup>, Wang Deren<sup>2</sup>, Chen Shuping<sup>1</sup>, Zhao Yanbing<sup>1</sup>, Cheng Xiushen<sup>2</sup>, Xie Chen<sup>2</sup>, Xu Zhenqian

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249; 2. Exploration and

Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001)

**Abstract** Paleogene sediment in Dongpu sag had filled in a complex half-graben controlled by Lanliao fault. Except for an obvious change in its surface and detachment depth along the axis of Dongpu sag, the Lanliao fault system can be generally described as having a listric surface. The northern segment of the fault system is a relative low-angle listric normal fault with detachment depth of 9-12 km. The middle segment is a relative high-angle listric fault with detachment depth of 14-16 km. The southern segment is a ramp-flat fault with detachment depth of 8 km in the upper part of the fault and of 11-13 km in the lower part of the fault. The kinematics of these segments also vary in different stages at Paleogene, causing the extension of the middle segment and its proportion to the total extension of Dongpu Sag relatively larger than the rest part of the sag. Under the impact of Lanliao fault geometry and its kinematics changes along the axis of Dongpu sag, the depression had developed quite different structural styles, deposit patterns and geological conditions for hydrocarbon accumulation.

**Key words** extensional structure; geometry; kinematics; Lanliao fault; Dongpu sag

东濮凹陷位于渤海湾盆地南部的东南角, 古近系充填在由正断层控制的北北东向伸展断陷中, 位于凹陷东部边缘的兰聊断层是控制断陷形成和演化的主边界断层。笔者根据地震资料解释和用理论模型图解方法分析了兰聊主断层面的几

何形态, 并根据同沉积地层厚度及伸展断陷结构特征定量计算了兰聊主断层及整个东濮凹陷古近纪不同时期的伸展量, 在此基础上讨论兰聊主断层的几何学、运动学特征对东濮凹陷构造样式的影响。

收稿日期: 2006-03-21

第一作者简介: 漆家福 (1957-), 男, 教授 (博士生导师), 构造地质学和含油气盆地分析

基金项目: 中国自然科学基金项目 (40372072)

## 1 东濮凹陷伸展断陷的构造样式

东濮凹陷古近系伸展断陷的基本构造特征可以概括为“东西分带和南北分段”两方面。“东西分带”是指伸展断陷呈北北东向带状分布,发育大量北北东向断裂,构成由 3 条北北东向断裂带控制的北北东向延伸的“两凹夹一凸”结构特征(图 1)。

“南北分段”是指盆地构造沿盆地走向有明显的差异,分为北、中、南 3 个各具特征的区段,不同区段横剖面上的构造样式、沉积格局、乃至油气聚集均有很大的差异。如凹陷中段沙河街组发育较好烃源岩和一定厚度的膏盐层,而南、北两段的烃源岩明显次之,也未见膏盐层发育;南、北段两段的基底正断层发育,而中段的盖层构造变形更强烈<sup>[1~6]</sup>。

东濮凹陷古近系的“两凹夹一凸”受北北东向基底卷入式正断层控制(图 2)。其中,断陷东部边缘的兰聊断层是一条区域规模的基底正断层,北西西向倾斜,延伸长度 200 km 以上,最大落差大于 7 000 m。兰聊断层不仅是东濮凹陷的东部边界断层,也是北端毗邻的莘县凹陷的边界断层,断层上升盘基本不发育古近系沉积。东濮凹陷内部还发育有大量相当规模的北北东向基底正断层(组),构成两条基底正断层带。其一是由一系列大致沿凹陷轴向延伸、与兰聊断层同向倾斜的基底正断层构成,包括东濮凹陷南部的黄河断层及向北断续延伸的北北东向基底断层组。该基底断层带下盘断块相对上升,并发育大量反向盖层正断层,使东濮凹陷一分为二成为两条北北东向的次级凹陷带,从而导致东濮凹陷表现为“两凹夹一凸”结构。另一条基底正断层带位于东濮凹陷西部边缘,由一系列与兰聊断层反向倾斜的基底正断层组成,其中规模较大的长垣断层只在凹陷南部发育<sup>[2]</sup>,向中、北部被斜列的正断层组取代。这些基底断层都是控制古近系不同层序发育的同沉积断层,但充填的古近系总体上仍然表现为西掀东倾的地层产状和东厚西薄的沉积厚度,表现出兰聊断层对东濮凹陷的古近系断陷的形成和演化有重要影响。

东濮凹陷总体上为兰聊断层控制的复杂半地

堑构造<sup>[3]</sup>。(图 2)北段,兰聊断层产状相对较缓,其上盘发育 2~3 条同向倾斜的基底正断层,构成多米诺式半地堑系。其中,基底正断层上盘或半地堑斜坡上发育有反向次级断层,使半地堑系的构造样式复杂化(图 2a)。中段,兰聊断层产状较陡,其上盘发育的同向和反向基底正断层的位移都明显小于兰聊断层,剖面上构成一个大型复式半地堑构造。其中,中央凸起上还发育大量反向次级断层,而西部边缘的反向基底正断层并未构成凹陷的西部边界断层,断层下盘仍表现为构造斜坡特征,半地堑内的盖层构造变形也明显比北段复杂(图 2b)。南段,兰聊断层上盘的黄河断层、长垣断层断错古近系的落差大致与兰聊断层相当,西部次凹表现为一个不对称的地堑,而东部次凹的构造斜坡上则发育大量同向倾斜的次级基底断层,基底构造变形相对复杂(图 2c)。从图 2 可以看出,东濮凹陷不同区段的构造样式有明显的差异,而这种差异源于兰聊断层的几何学、运动学特征沿走向的变化。

## 2 兰聊断层的几何学特征

宏观上看,兰聊断裂是一条深大断裂。然而,地震剖面和构造图都显示东濮凹陷内部地层总体上向南东东向倾斜,东濮凹陷古近系总体上表现为半地堑断陷结构,表明控制古近系凹陷形成和演化的边界断层总体上应该呈铲式断层面的几何形态,向深层延伸在一定深度拆离滑脱。国家地震局完成的长治—濮阳—金乡地壳测深资料表明,兰聊断层西侧的地壳中存在相对高速层和低速层,兰聊断层可能向深层分为两支,一条总体上向西倾斜并在一定深度拆离滑脱,另一条相对陡倾切割到上地幔(图 3)。伸展断陷的主边界断层向深层拆离滑脱具有普遍性<sup>[7,8]</sup>,甚至控制伸展断陷的主干正断层会分别在不同层次拆离滑脱。

断陷半地堑边界断层的深层几何形态也可以根据半地堑形态和主干边界断层的位移来确定。Verrall<sup>①</sup>提出了根据主边界断层的倾角、位移量及半地堑中某些标志层的变形形态等可观测到的构造信息“图解”深层产状的方法。这一方法最初假设断层上盘变形符合“垂直剪切模型”,后来又被

① Verrall P. Structural interpretation with applications on North Sea problems[M]. Joint Association of Petroleum Exploration Course Notes No (3). 1982

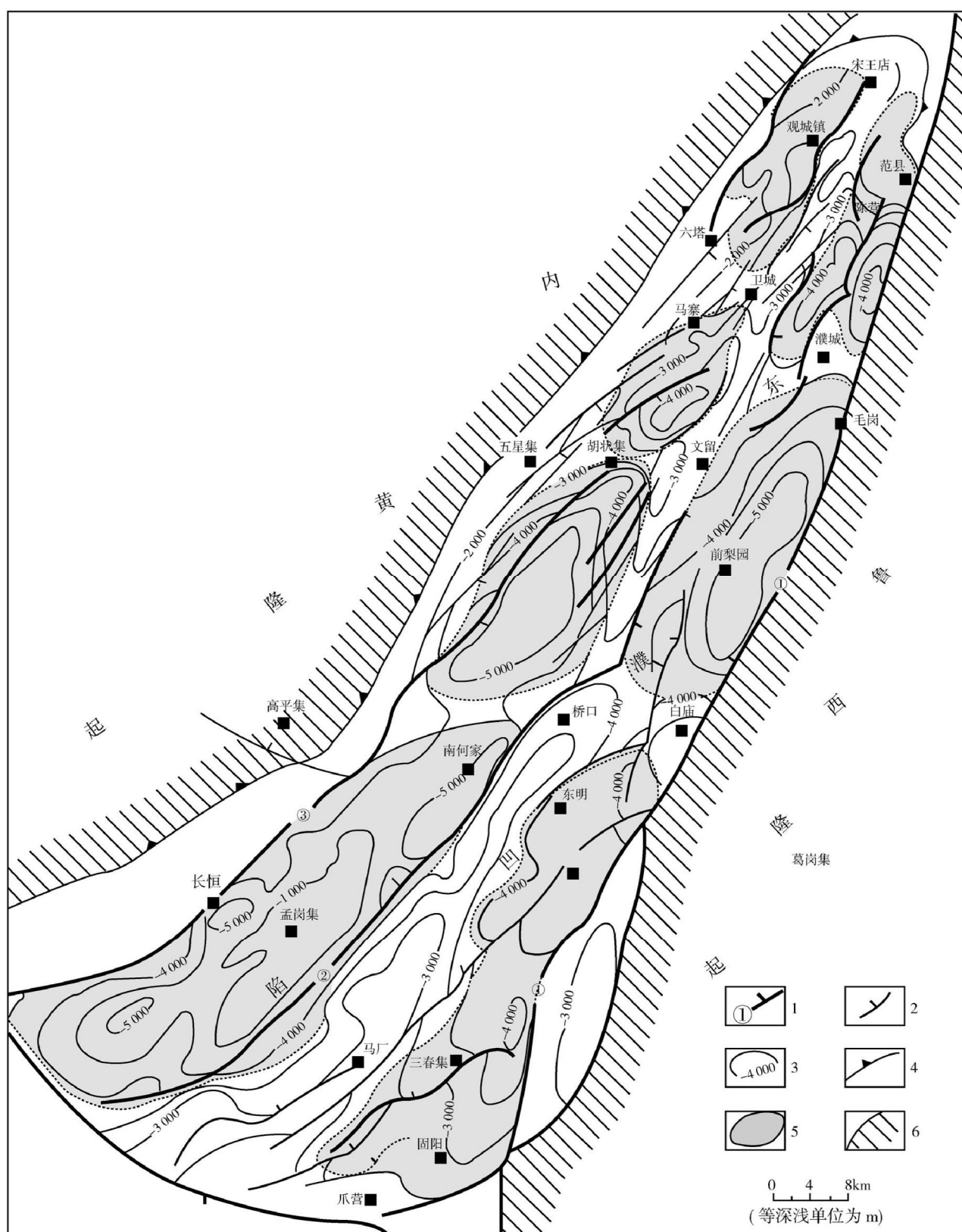


图 1 东濮凹陷古近系构造图

Fig. 1 The Paleogene structure in Dongpu sag

1—主干基底断层, ①兰聊断层, ②黄河断层, ③长垣断层; 2—次级基底断层; 3—始新统沙河街组三段 2 亚段底面构造等高线;  
4—古近系分布的剥蚀边界, 三角尖指向剥蚀区; 5—古近纪洼陷分布的大致范围; 6—古近纪隆起区

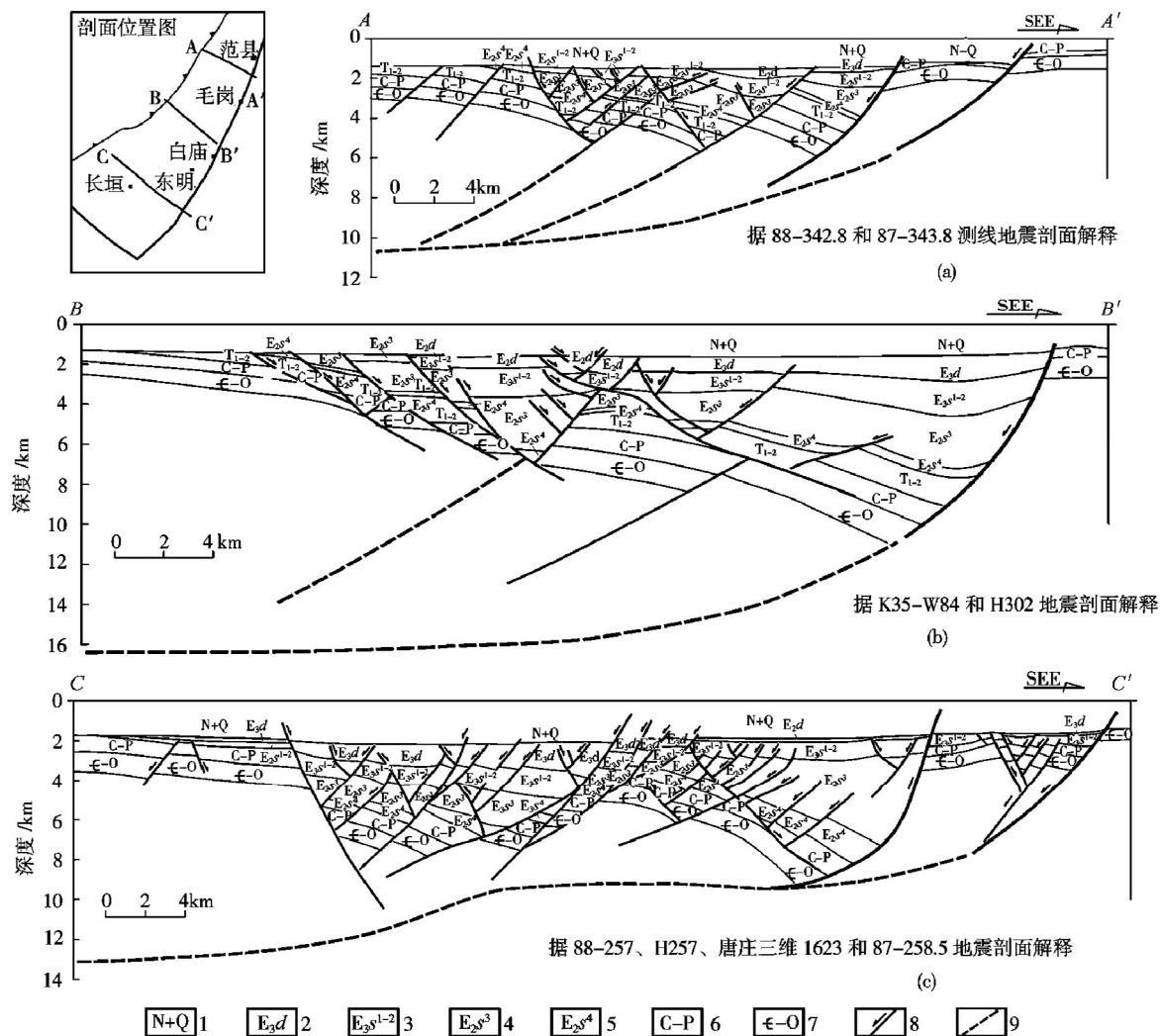


图 2 东濮凹陷横剖面图

Fig. 2 Schematic cross section of Dongpu sag

a—东濮凹陷北段构造剖面；b—东濮凹陷中段构造剖面；c—东濮凹陷南段构造剖面；1—新近系和第四系；2—渐新统东营组；3—渐新统沙河街组一、二段；4—始新统沙河街组三段；5—始新统沙河街组四段；6—石炭—二叠系；7—寒武—奥陶系；8—地震资料解释的正断层；9—推测的深层拆离正断层

White等<sup>[9]</sup>发展为“斜向简单剪切模型”(图 4)。Withjack等<sup>[10]</sup>通过实例和模拟实验模型研究表明,剪切角为  $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$  (大致与反向断层角度一致)的“斜向简单剪切模型”所图解的断层面与实际断层面几何形态基本一致。我们利用地震剖面观测到的兰聊断层的倾角、位移量及东濮凹陷内部古近系基底面(或石炭—二叠系底面)的变形形态等资料,用剪切角为  $65^{\circ}$  的“斜向简单剪切模型图解法”对 28 条区域地震剖面的兰聊断层面深层几何形态进行了定量分析。同时根据剖面上的古近系面积、伸展量计算出的各剖面的拆离正断层深度。综合这些研究成果编制了反映兰聊断层几何学特征的断层面构造等高线图(图 5)。显然,

伸展断陷内部的构造变形与理想的变形模型会有一定的差异,选择不同的变形模型图解或计算同一半地堑的边界断层深层的几何形态所得到的结果会有一定的偏差<sup>[11~15]</sup>。但是,用同一构造变形模型来分析同一半地堑不同位置的主边界断层的深层几何形态还是具有可比性。因此,图 5 所反映的兰聊断层几何形态沿走向的变化趋势是合理的。地震资料观测到的不同地段的兰聊断层在古近系中的断层倾角也有明显的差异,中段比南北两段相对陡一些。由古近系断陷深度和剖面面积推测兰聊断层深层的拆离滑脱深度也是随断层走向发生变化的。

图 5 表明,东濮凹陷北部的兰聊断层在盆地浅

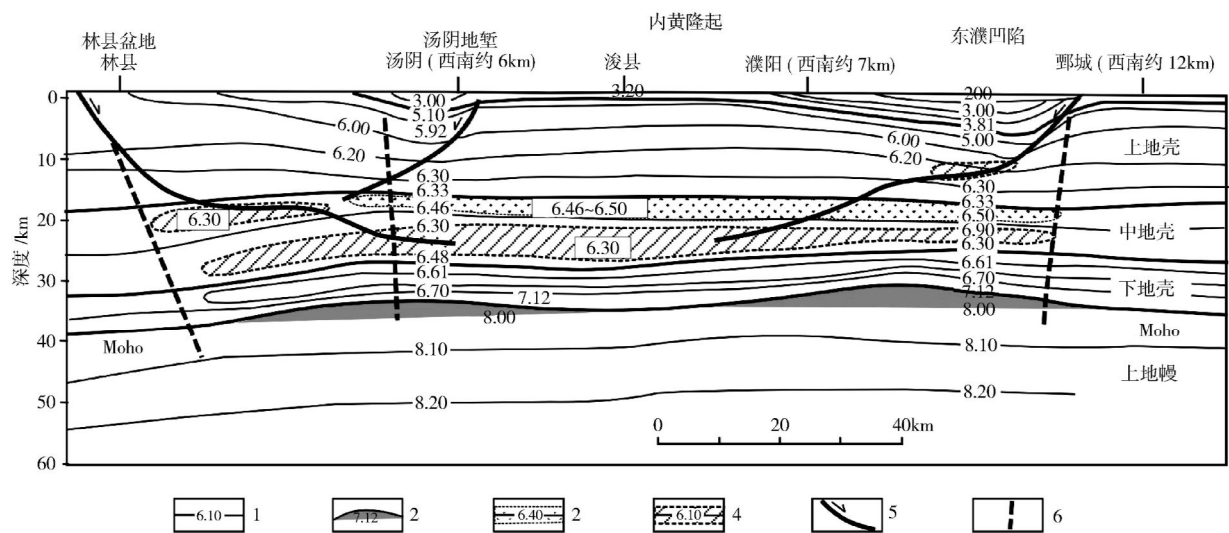


图 3 穿过东濮凹陷的地壳速度结构剖面及其解释<sup>①</sup>

Fig. 3 Velocity profile of seismic wave penetrating the crust in Dongpu sag and its interpretation

1—地震 P 波速度等值线 (km/s); 2—上地幔隆起部位; 3—相对高速带, 可能的强硬地壳层; 4—相对低速带, 可能的软弱地壳层; 5—控制新生代盆地的主干边界正断层; 6—深部断裂, 新生代可能的右旋走滑断裂带

层的产状相对平缓, 断层面等高线相对稀疏, 向深层的拆离滑脱深度约为 9~12 km。中部的兰聊断层在浅层的产状相对陡倾, 断层面等高线相对密集, 向深层的拆离滑脱深度约为 14~16 km。南区的兰聊断层有 2~3 条分支断层, 主断面在盆地浅层的产状也虽走向有明显变化, 向深层则呈坡坪式延伸, 对应于东部次凹带的拆离滑脱深度约为 8~10 km, 而对应于西部次凹带的拆离滑脱深度约为 11~13 km。在北部与中部、中部与南部的结合部位, 深层的兰聊断层实是两个相向倾斜的侧向断坡带, 使兰聊断层中部与南北两段连接在一起。

3 兰聊断层的运动学特征

伸展断层的运动方式表现在两盘断块的变形和同沉积记录中。兰聊断层的下盘基本上缺失古近系, 新近系馆陶组直接覆盖上石炭—二叠系或寒武—奥陶系之上, 而且寒武—奥陶系的地层产状平缓, 反映兰聊断层下盘断块在东濮凹陷古近系充填过程中处于相对稳定或整体抬升的剥蚀状态。兰聊断层上盘, 无论是盆地基底地层, 还是充填在东濮凹陷内部的古近系, 地层产状总体上都表现为向兰聊断层面倾斜, 体现了受兰聊断层上陡下缓的铲式或坡坪式正断层形态约束发生相关

褶皱变形的特征。由于兰聊断层面的形态沿走向有明显的差异, 因而其上盘地层的变形也表现出差异 (图 2)。此外, 兰聊断层的运动学特征的差异性还表现在断层的位移量和活动时间上。图 5 中的曲线分别表示了兰聊主断层、整个东濮凹陷在古近纪不同时期的水平伸展量沿盆地走向的变化, 其中兰聊主断层的水平伸展量是根据同沉积地层厚度和断层面产状计算出来的, 整个东濮凹陷的水平伸展量是依据地震剖面解释的构造特征, 按照地层长度守恒原则计算得到的。

无论是兰聊断层, 还是整个东濮凹陷的水平伸展量沿断层走向有显著变化, 而且分段性特征十分明显。从图 6a 可以看出, 古近系沉积时期东濮凹陷南段 (白庙以南)、中段 (大致在毛岗—白庙之间) 的水平伸展量相对较大, 约 8~12 km, 北段 (毛岗以北) 逐渐减小为 3~5 km, 但是中段的兰聊主断层的伸展量所占比例相对较大。沙四段沉积时期, 兰聊断层的南段和中段的位移明显大于北段, 但是整个东濮凹陷的伸展量总体上是由南向北逐渐减小的, 中段的伸展量主要是由兰聊断层贡献的。沙三段沉积时期是兰聊主断层的活动高峰期, 南段和中段的伸展位移较大, 北段的伸展位移相对较小, 但伸展位移最大的区段相对于沙四段沉积时期有向北迁移的迹象。沙二段、沙一段

① 刘国栋. 深部物探成果. 国家地震局地质研究院

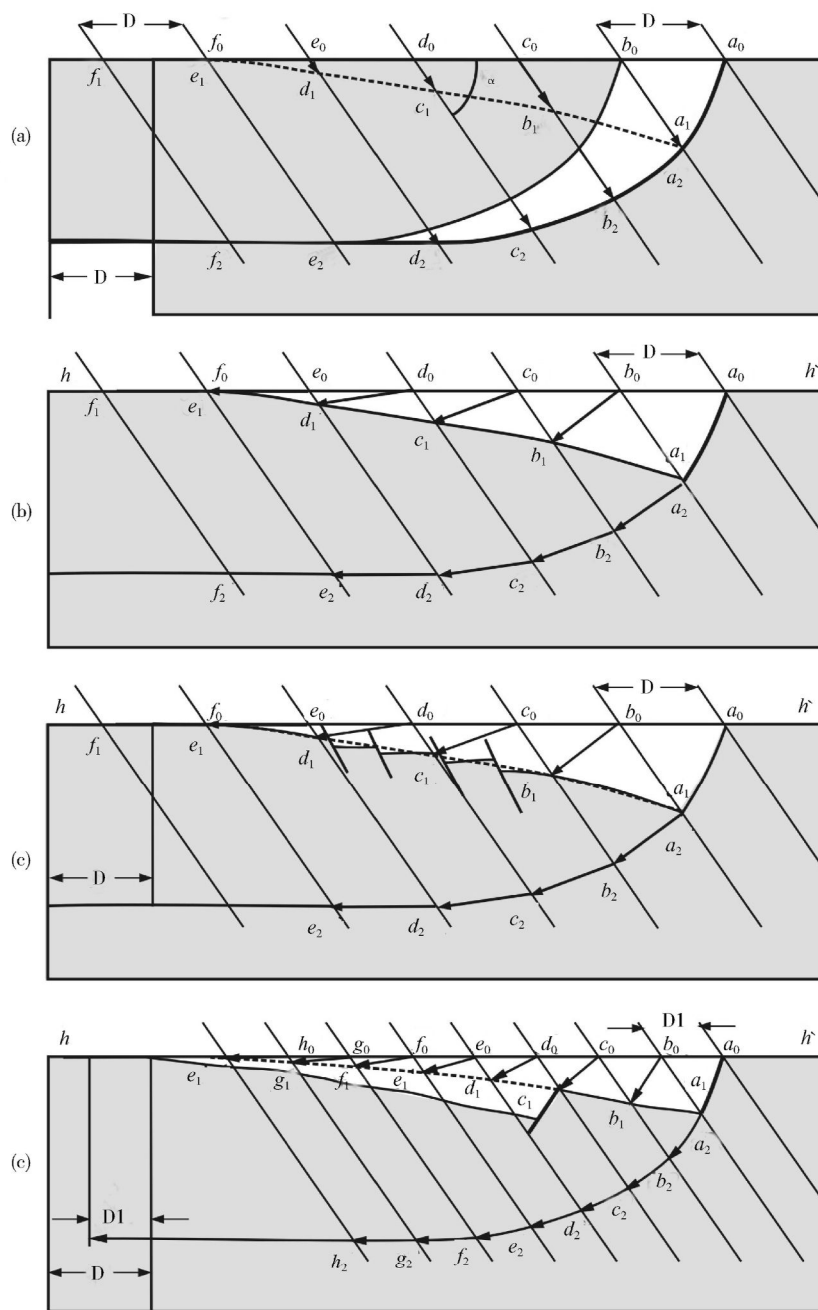


图 4 斜向剪切模型图解半地堑主边界断层形态的方法

Fig. 4 Structural contour map of the main fault surface and deep detachment surface of Lanliao fault

a—假设的斜向剪切模型, 伸展量为  $D$ , 断层上盘岩层沿剪切角为  $\alpha$  的斜线发生简单剪切变形, 水平的区域基准线变形至虚线位置, 断层上盘形成半地堑; b—图解半地堑主边界断层方法, 以伸展量  $D$  为间隔, 确定斜向剪切角 ( $60^\circ - 70^\circ$ ) 画出一系列斜线, 连接原始区域基准线 ( $h-h'$ ) 与变形后的岩层面的  $b_0-b_1, c_0-c_1, d_0-d_1$  等与边界断层平行, 将其平移、首尾相联并与观测的边界断层衔接就图解出边界断层的形态; c—半地堑内部发育反向调节断层的处理方法, 斜向剪切模型中的反向调节断层被视为主边界断层上盘斜向剪切破裂, 因而其位移是主边界断层伸展量的一部分, 先拟合一条代表上盘岩层变形的曲线 (图中虚线) 再用 (b) 图所示方法来图解主边界断层的形态; d—半地堑内部发育同向调节断层的处理方法, 斜向剪切模型中的同向调节断层被视为主边界断层上盘的分支断层, 因而主边界断层伸展量不应该包含分支断层的位移, 根据断层的变形延伸完成主断层的引起的岩层变形 (图中虚线) 再用 (b) 图所示方法来图解主边界断层的形态, 然后还可以将主断层引起的岩层变形作为分支断层的区域基准线, 根据分支断层的位移图解出分支断层深层的形态

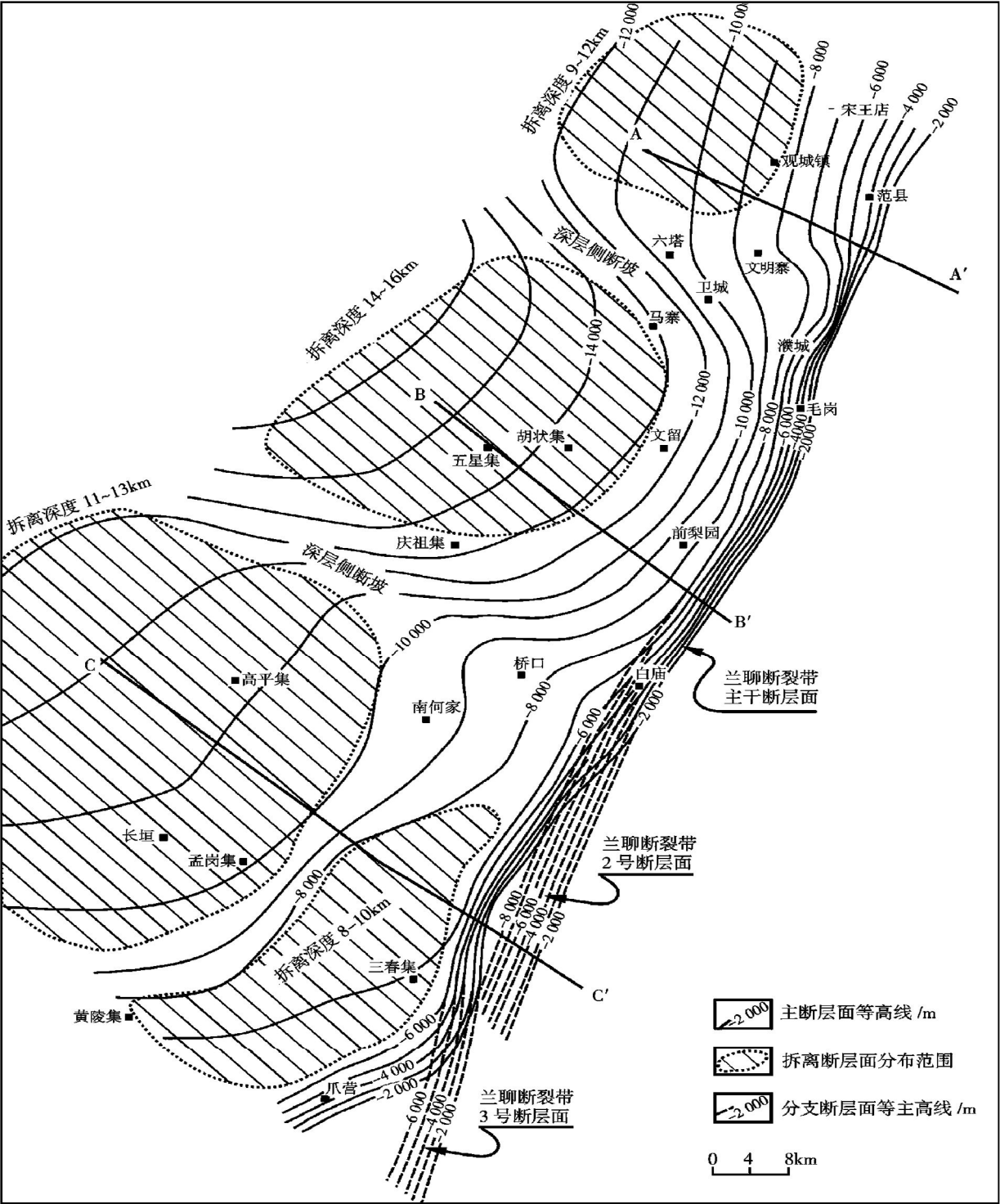


图 5 兰聊断层主断层面及深层拆离断层面构造等高线图

Fig. 5 Curves showing variation of the extensions of Lanliao fault and Dongpu sag along the axis of the basin

和东营组沉积时期, 兰聊主断层南段仍有一定幅度的伸展位移, 但位移量明显比中段和北段小, 而这一时期整个东濮凹陷的水平伸展量也是自南向北逐渐减小。兰聊断层南段的伸展位移相对较小, 黄河断层和长垣断层等基底断层的伸展位移则相应增大。兰聊断层带在分段界线 (大致在白庙、毛岗处) 附近局部区段的伸展位移始终相对

较小。

4 讨论与结论

1) 古近纪时期, 兰聊断层作为控制东濮凹陷形成和演化的区域性伸展断层, 其断层面的几何形态和运动学特征对东濮凹陷内部的构造变形样

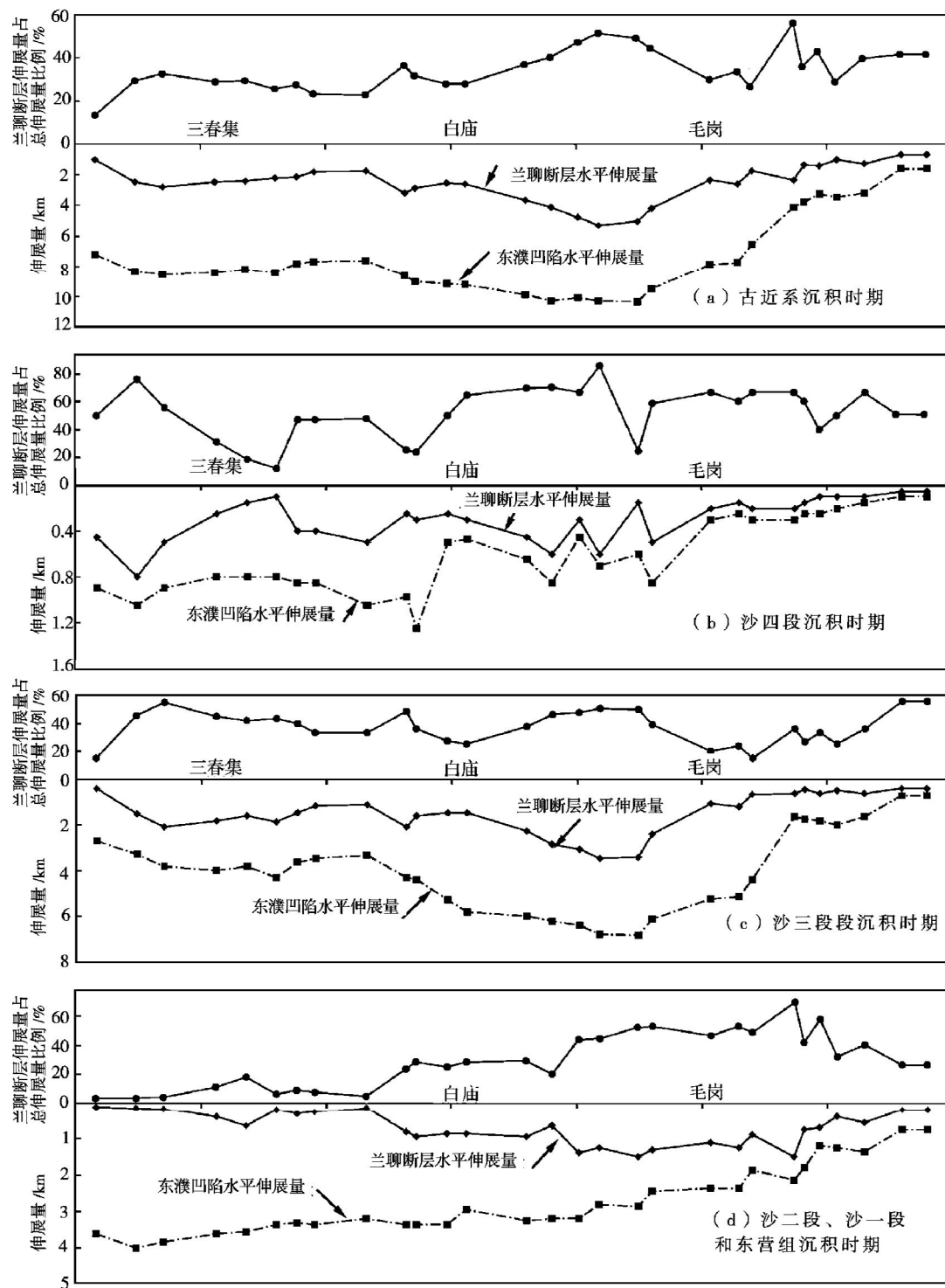


图 6 古近纪时期兰聊断层和东濮凹陷伸展量沿盆地轴向的变化曲线

Fig. 6 Curves showing variations of extension of Lanliao fault and Dongpu sag along the axis of basin in Paleogene

兰聊断层伸展量为断层水平离距, 东濮凹陷伸展量为剖面上同沉积地层顶界面

与底界面长度之差, 标志点为实测数据剖面位置

式有深刻的影响。兰聊断层总体上表现为上陡下缓, 并过渡到深层近水平的拆离断层面的几何形态, 但是不同区段的断层面形态和拆离深度有明显的差异, 而这种差异也是导致东濮凹陷内部构

造样式沿盆地轴向发生变化的根本原因。东濮凹陷大致沿白庙-桥口、毛岗-马寨发育两条东西向的区域性构造变换带, 将古近系伸展断陷可以分为南、中、北三个区段。

2) 东濮凹陷北段的兰聊主断层面表现为相对较缓的铲式形态,但是主断层面的伸展位移只占伸展断陷总伸展量相对较小,因而总体上表现为多米诺式半地堑系。东濮凹陷中段的兰聊主断层面表现为浅层陡倾、拆离深度相对较大的铲式形态,主断层面的伸展位移所占伸展断陷总伸展量相对较大,所以总体上表现为相对简单的半地堑。东濮凹陷南段的兰聊主断层面表现为坡坪式形态,而且主断层面的伸展位移所占伸展断陷总伸展量的比例随着断陷演化发生剧烈变化,所以断陷结构相对复杂。兰聊断层深层拆离断层在白庙-南何家、毛岗-柳屯发育两条侧断坡,导致东濮凹陷内部发育两条构造变换带,兰聊主断层的伸展位移量在其附近也相对较小,而主断层面上盘发育大量小位移断层吸收了主断层带的伸展位移。

3) 兰聊主断层的几何学、运动学特征沿走向的变化也是导致东濮凹陷古近系沉积和石油地质条件具有南北差异的重要因素之一。东濮凹陷中段的拆离断层面深度较大,古近系断陷也相对较深,其上盘的前梨园次凹成为断陷期生油岩最发育的区段。南段的主边界断层表现为坡坪式形态,且主边界断层面上盘的黄河断层、长垣断层在断陷演化过程中的伸展位移相对较大,因而断陷表现为宽而浅、沉降-沉积中心不稳定的特点,不利于断陷期生油岩发育。与中段相比,北段的拆离断层深度、主边界断层的伸展位移量都相对较小,更有利于储集层发育,总体上的石油地质条件也逊于中段。

#### 参 考 文 献

- 1 漆家福,陈发景. 下辽河-辽东湾新生代裂陷盆地构造解析[M]. 北京:地质出版社, 1985: 152  
Qi Jiafu, Chen Fajing. Tectonic analysis of the Cenozoic Xiaoliuhe-Liaodongwan rifted basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 152
- 2 孙思敏,彭仕宓,汪新文,等. 东濮凹陷长垣断层系中转换斜坡的特征与油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 22~24  
Sun Simin, Peng Shimib, Wang Xinwen, et al. The Characteristic of relay ramps in fault system of the placanticline in Dongpu Sag and their relevance to hydrocarbon exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 22~24
- 3 苏玉山,樊生利. 东濮凹陷半地堑分析[J]. 断块油气田, 1994, 1(3): 13~20  
Su Yushan, Fan Shengli. The analyses of halfgrabens in Dongpu

- depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1994, 1(3): 13~20
- 4 中原石油勘探局. 东濮凹陷及邻区构造特征与油气关系研究[M]. 北京:石油工业出版社, 1991  
Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau. Relationship structural features and hydrocarbons in Dongpu sag and peripheral area[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991
- 5 孙思敏,彭仕宓,汪新文. 东濮凹陷长垣断层的生长特征与半地堑演化[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 123~125  
Sun Simin, Peng Shimib, Wang Xinwen. Growing characteristics of Changyuan fault and halfgraben evolution in Dongpu depression[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 123~125
- 6 侯艳平,孙向阳,任建业. 东濮凹陷盐滑脱变形构造及其在油气勘探中的意义[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 58~61  
Hou Yanping, Sun Xiangyang, Ren Jianye. Detached deformation Salt Structures and the significance in petroleum exploration in Dongpu depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 58~61
- 7 漆家福,陈发景. 辽东湾一下辽河盆地构造样式[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 272~283  
Qi Jiafu, Chen Fajing. Structural Style in Liaodongwan-Xialiaohu basin[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 272~283
- 8 刘和甫,李晓清,刘立群,等. 伸展构造与裂陷盆地成藏区带[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 537~552  
Liu Hefu, Li Xiaqing, Liu Liqun, et al. Petroleum plays in rift basins and extensional structures[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 537~552
- 9 White N J, Jackson J A. The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls[J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8: 897~910
- 10 Withjack M O, Islam Q T, LaPointe P R. Normal faults and deformation in hanging wall deformation: an experimental study[J]. AAPG Bull, 1995, 79: 1~18
- 11 Groshong R H. Halfgraben structure: balanced models of extensional fault-bend folds[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 96~105
- 12 Williams G, Vann I. The geometry of listric normal faults and deformation in their hanging walls[J]. Journal of Structural Geology, 1987, 9: 789~795
- 13 Dula W F. Geometric models of listric normal faults and rollover folds[J]. AAPG Bull, 1991, 75: 1609~1625
- 14 Matos R M. Geometry of the hanging wall above a system of listric normal faults - a numerical solution[J]. AAPG Bull, 1993, 77: 1839~1859
- 15 彭君,何显莉,孙青,等. 东濮凹陷黄河南低含油丰度区的油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 304~308, 318  
Peng Jun, He Xianli, Sun Qing, et al. Oil and Gas Exploration in low oil-abundance area the south of Yellow River in Dongpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 304~308, 318

(编辑 陈喜禄)