

东营凹陷负反转构造样式及其运动学特征

阳怀忠¹, 任建业¹, 陆金波²

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

摘要: 中、新生代强烈的负反转作用是东营凹陷构造演化的一个重要特色。为了解负反转构造对东营凹陷中、新生代盆地形成过程中的意义, 以高分辨率三维地震资料解释为基础, 详细刻画了东营凹陷负反转构造几何学样式, 并综合运用计算断层活动速率和负反转率以及编制地层位移—距离曲线等方法, 对东营凹陷负反转断层运动学特征进行了系统的定量研究。结果表明, 东营凹陷 J_3-K_1 和 E_k-E_{s4} 两期盆地的主体均是印支期逆冲断层发生负反转作用所致, 总的负反转率约为 3.367~8.3, 其中 J_3-K_1 时期负反转率为 1.388~3.904; 负反转构造最终定型于 $E_{s3}-E_{s2}$ 时期; 负反转作用在空间上呈现出 SW 至 NE 逐渐增强的演变规律。东营凹陷负反转构造的研究对于盆地内部深层油气藏的勘探具有重要的理论意义和实际应用价值。

关键词: 东营凹陷; 负反转构造; 构造样式; 定量研究。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2009)03-0493-09

收稿日期: 2008-12-26

Tectonic Styles and Kinematic Characteristics of Negative Inversion Structure in Dongying Depression

YANG Huai-zhong¹, REN Jian-ye¹, LU Jin-bo²

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

2. College of Resources and Information, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The strong negative inversion structure in Mesozoic—Cenozoic is a prominent characteristic during the tectonic evolution of Dongying depression. In order to understand the significance of the negative inversion structure in the process of Mesozoic—Cenozoic basin formation in Dongying depression, this paper describes in detail the geometry styles of negative inversion structures in Dongying depression on the basis of the interpretation of the new high resolution 3D seismic profiles. And by utilizing the methods of calculating the fault activity velocity, negative inversion ratio, and displacement-distance curve, the authors quantitatively analyse the kinematic characteristics of the negative inversion structures in Dongying depression. The result indicates that in the Dongying depression, the extension basins developed in J_3-K_1 and E_k-E_{s4} stages were mainly controlled by the negative inversion of the thrust faults formed in Indo-Chinese epoch. The total negative inversion ratio is 3.367—8.3, and the ratio in J_3-K_1 stage is 1.388—3.904. The negative inversion structures accomplished ultimately in the $E_{s3}-E_{s2}$ stage. The distribution of the negative inversion ratios indicates an increase in deformational degree from SW to NE in the whole region. The research of negative inversion structures in Dongying depression has important theoretic and practical significance in the exploration of the deep hydrocarbon reservoirs.

Key words: Dongying depression; negative inversion structure; tectonic style; quantitative analysis.

东营凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷内的一个次级凹陷, 位于中国东部巨型郯庐断裂带的中段西侧, 属于华北板块的一部分(图 1a)。华北板块自晚古生代以来, 经历了多期板块碰撞作用和陆内造山作用(魏文

博等, 2007), 区域应力场变化频繁。在中生代中晚期, 构造体制发生了巨大的转变, 总体上挤压构造体制转变为拉伸体制(翟明国等, 2004; 叶兴树和王伟峰, 2008)。东营凹陷就是在这一构造背景的基础上演化

形成的一个中生代叠合盆地. 区域构造背景决定了该研究区应力场的多期变化, 主要经历了早期挤压、后期强烈拉张的构造演化过程, 不仅发育有大量的伸展断层, 也使得相当数量的早期逆冲断层发生负反转作用, 形成了大量的负反转构造.

反转构造(inversion tectonics), 又称盆地反转(basin inversion)、构造反转(structure inversion), 指同一地质体, 在不同的演化阶段, 由于应力场的改变, 造成伸展或挤压构造上的叠加. 早在 20 世纪 20 年代, 地质工作者就认识到盆地存在反转现象, 并提出了反转作用的概念(Lamplyugh, 1920). 20 世纪 80 年代, Glennie and Boegner (1981) 首先提出了“反转构造”(inversion tectonics or structure inversion)的概念. 认为“构造反转指盆地逆转为隆起, 反之亦然”. 从此, 反转构造开始引起国内外地质研究人员的普遍关注(Harding, 1985; Cooper and Williams, 1989; Letozey, 1990; Buchanan and McClay, 1991; 陈发景等, 1992; Mitra, 1993; 陈昭年和陈景发, 1995; 张功成和金利, 1997; 姚超等, 2004). 但总体来看, 国内外对反转构造的研究主要集中在正反转构造, 对负反转构造的研究较少, 甚至对“负反转”术语的使用及其地质意义都存在较大争议(Cooper and Williams, 1989). 济阳拗陷是负反转构造发育的典型地区, 前人曾对此进行过研究和分析(谭明友等, 1996; 陈洁等, 1999; 郝雪峰等, 2001; 常国贞等, 2002; 李丕龙等, 2003; 郑德顺等, 2005; Su *et al.*, 2009). 近年来, 由于油气勘探的迫切需要, 该拗陷施工积累了大量的覆盖全盆地的 3D 地震资料, 同时也积累了丰富的钻井资料, 这为开展更为精细的负反转构造的几何学和运动学描述, 定量研究负反转构造的形成和演化提供了重要的资料. 本文以济阳拗陷东营凹陷负反转构造为研究对象, 定量分析东营凹陷负反转断层运动学特征, 并探讨负反转构造对盆地发育的控制机制.

1 东营凹陷负反转构造几何学样式

东营凹陷负反转构造由 3 条 NW 向负反转断层组成. 从南往北依次为石村断层、王古 1 断层和陈南断层, 其中王古 1 断层是一条新生代停止活动的隐伏断层(图 1a).

1.1 陈南断层

陈南断层是东营凹陷北部的边界断层. 断层东

段呈 NWW 向展布, 断层为铲状, 倾角 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 延伸长度约 45 km, 中、古生界顶界面断开达 5 km 以上. 西段走向为 NEE 向, 倾角较东段缓, 约 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 中、古生界顶界面被断开达 4 km 以上. 剖面上, 古生界地层和下中侏罗统地层呈楔状向断陷盆地内延伸, 形成以“薄底”或“秃底”为主要特征的“负向结构”(图 1b, 1c). 断层形态简单, 后期引张断层直接利用原来的逆冲断层发生负反转作用, 并控制了 J_3-K_1 和 E_k-E_{s4} 地层的沉积. 至 $E_{s3}-E_{s2}$ 时期, 断层基本不活动.

1.2 王古 1 断层

王古 1 断层位于东营凹陷南坡丁家屋子构造带王古 1 井附近, 平面上呈 NW 向展布, 由于后期地层发生旋转(约 25°), 断层产状较缓, 为 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$. 中生代以后王古 1 断层不再活动而成为一条隐伏断层. 与陈南断层相比, 王古 1 断层负反转作用相对复杂. 早期的挤压应力作用形成了由 2 条逆断层组成的冲断系构造. 在后期引张应力作用下, 只有产状较陡的逆断层活化发生了负反转作用; 而产状较缓, 近于平卧的逆断层没有发生明显的负反转作用, 至今仍保持早期逆断层的形态(图 1d, 1e).

1.3 石村断层

石村断层呈 NWW 向延伸, 长约 40 km, 倾向 SW, 断层产状东陡西缓. 其东段与陈南断层类似, 形态简单, 表现为后期引张断层直接利用早期的逆冲断层发生负反转作用; 石村断层西段的负反转作用要比上述 2 条断层复杂得多. 早期的逆冲作用形成了呈叠瓦状展布的 3 条逆冲断层. 由于整体上各逆冲断层产状很缓, 在后期引张应力的作用下, 产生了 1 条产状较陡的张性正断层(现今看到的石村断层), 利用早期逆断层的下部发生强烈的负反转作用. 而这 3 条逆断层本身, 只有最南部的产状略陡的逆断层在新生代早期发生了轻度负反转作用(在剖面上显示上正下逆的结构); 北边的 2 条产状很缓的逆断层一直未经历负反转作用, 至今仍保持逆断层形迹(图 1f, 1g).

2 研究方法

负反转断层运动学主要是为了研究其形成时间、期次以及负反转作用强度等要素, 从而了解其发育演化过程. 断层活动速率可用来定量分析断层挤压或拉张时间、期次以及速率等运动学特征. 目前,

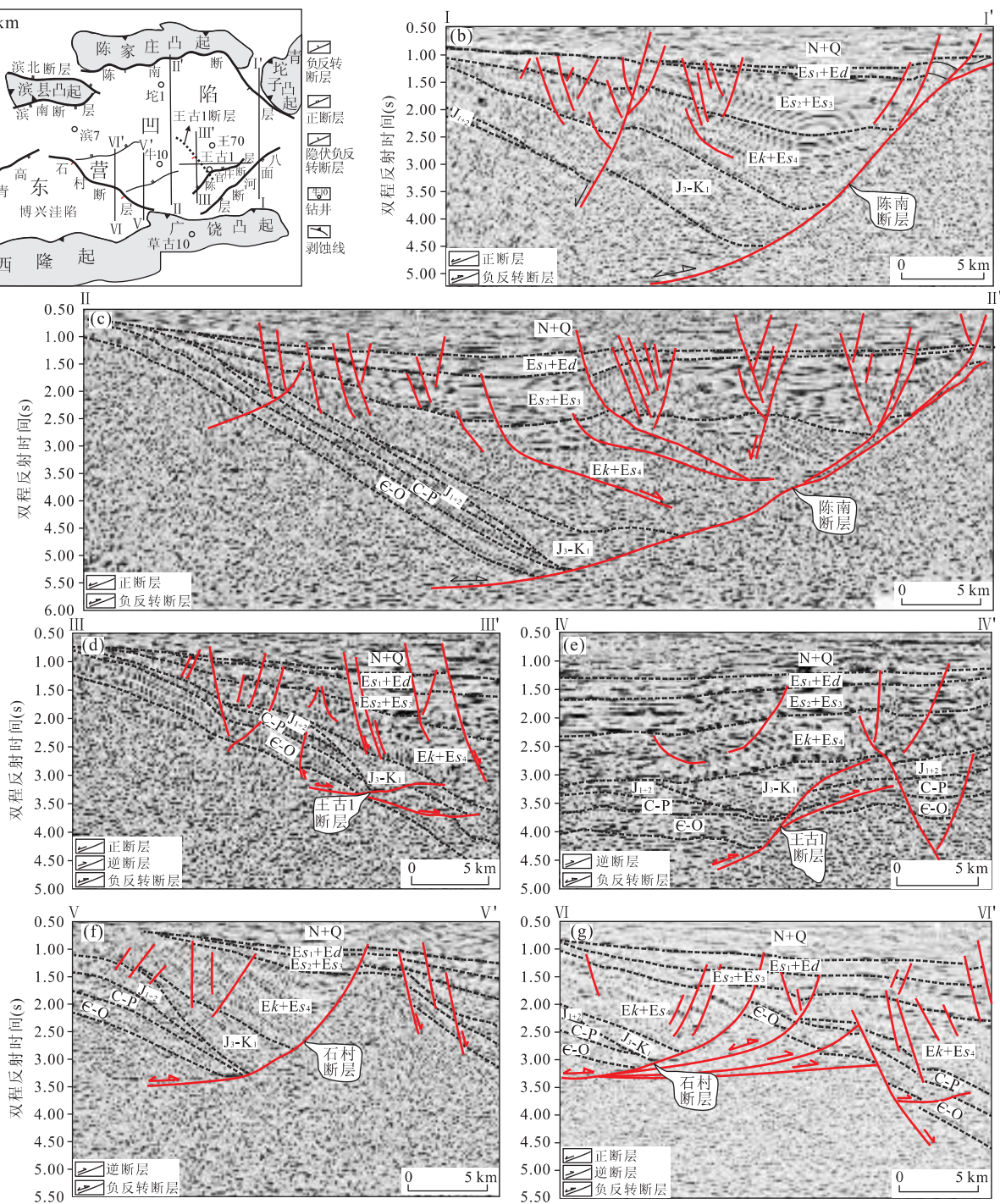


图 1 (a) 东营凹陷构造单元; (b)~(g) 过各负反转断层地震剖面及解释成果(位置见图 1a)

Fig. 1 (a) Geological sketch of Dongying depression; (b)–(g) are the seismic profiles through negative inversion faults and their geological interpretation. See location in Fig. 1a

广泛用于反转作用强度分析的反转率和位移—距离曲线等方法主要是针对正反转构造研究. 因此, 本文在定量分析东营凹陷负反转构造时, 结合前人的研究成果 (Song, 1997; Su *et al.*, 2009), 根据负反转构造自身发育的特点对这些方法进行了改进.

2.1 断层活动速率

断层活动速率(v_f)是指某一地层单元在一定时期内,因断裂活动形成的落差与相应沉积时间的比值(王燮培等,1990).该参数既不受断层两盘是否存在地层缺失的限制,又体现出地质时间的概念,能很好地表现断层在时间轴上的强弱变化.因此,本文选

用该参数来描述负反转断层的活动性.

负反转断层早期均为逆断层, 断层活动速率(v_f)为:

断层活动速率(v_f) = (—上盘剥蚀厚度—下盘沉积厚度)/时间 ($v_f < 0$);

当断层发生负反转作用时, 逆断层转变为正断层. 针对东营凹陷负反转断层不同类型, 本文确定了不同的计算方法:

当负反转作用后断层下盘接受沉积(可以为 0)时,

断层活动速率(v_f) = (上盘沉积厚度—下盘沉积厚度)/时间 ($v_f > 0$);

当负反转后断层下盘遭受剥蚀时,

断层活动速率(v_f) = (上盘沉积厚度+下盘剥蚀厚度)/时间 ($v_f > 0$).

2.2 负反转率

用断层的反转率来表示反转作用强度的方法最早是由 Williams *et al.* (1989) 提出的. Song (1997) 曾根据松辽盆地的反转作用对该方法加以改进. 这两种方法都是针对正反转构造的定量研究. 本文在前人研究的基础上, 结合东营凹陷负反转构造自身的特点, 提出了一种针对负反转构造研究的负反转率的计算方法.

定义断层负反转率 R_{ni} 为平行于断层面向正伸展位移 de 与反向挤压位移 dc 的比率, 即:

$$R_{ni} = de/dc.$$
 (1)

断层发生负反转作用之前, 挤压位移量 dc 相当于上盘 1 层底界面相对于下盘 1 层底界面的位移量 (图 2a), 它等于上盘 1 层的剥蚀量沿断面长度 dc_1 与下盘相应沉积的 2 层沿断面长度 lh_2 (可以为 0) 之和, 即:

$$dc = dc_1 + lh_2.$$
 (2)

在计算断层正向伸展位移量 de 时, 笔者引用 Δdi 作为断层负反转作用之后断层上下盘沉积地层底部净断距. 并规定: 当该断层发生负反转作用之后, 底部显示正断距时 Δdi 为正 (图 2b); 底部显示逆断距时, Δdi 为负 (图 2c). 这样, 不论在负反转作用过程中断层下盘是否发生过剥蚀, de 都可以表示为:

$$de = \Delta di + dc,$$
 (3)

结合公式(1)可得, 断层负反转率 R_{ni} 为:

$$R_{ni} = 1 + \Delta di/dc.$$
 (4)

Δdi 可以在剖面上直接测量, 这样, 只需要计算出断层早期的挤压位移量 dc , 就可以计算出该断层

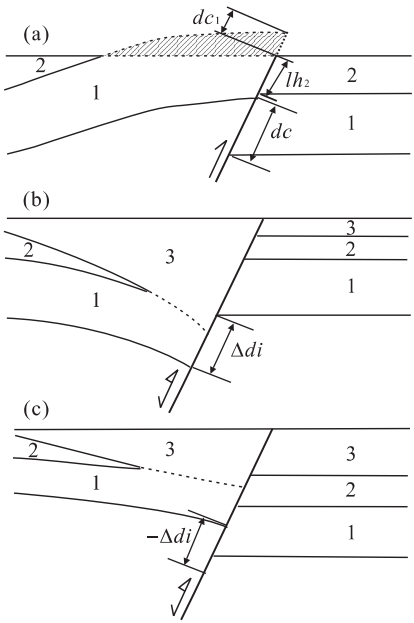


图 2 负反转率计算示意图

Fig. 2 Parameters of calculating negative inversion ratio

的负反转率, 从而定量断层负反转作用强度.

2.3 位移—距离曲线

位移—距离曲线图也是研究反转强度的一种有效方法. Williams *et al.* (1989) 修改后的位移—距离曲线可以直观地反映正反转作用程度 (图 3a). 选取断陷期层序顶部作为基准点, 纵坐标为该点到断层上盘各地层的距离 (平行于断层面测量或计算). 以零点位置为界, 横坐标右边表示断层上盘地层对应于下盘相应地层在断面上的伸展位移量, 左边则表示地层的挤压位移量.

对于负反转构造而言, 由于上盘早期地层遭受过剥蚀, 地层位移—距离曲线图中 (图 3a) 纵坐标并不能像正反转构造中那样完整地表现出断层上盘地层沿断层面到基准点的距离. 因此, Williams 的位移—距离曲线图不能直接用于对负反转构造的分析. 要准确地反映早期挤压隆升与晚期伸展沉降之间的关系, 必须恢复早期地层遭受的剥蚀量. 图 3b 为改进过的地层位移—距离曲线图. 纵坐标为对早期地层进行剥蚀量恢复之后, 断层上盘各地层平行与断层面到基准点的距离. 以基准点为界, 横坐标左边表示地层遭受挤压沿断层面的收缩位移, 右边表示上盘地层沿断层面的伸展位移. 由于 1 层不是同生长断层, 并且经历过先挤压后拉张作用, 在该地层位移—距离曲线图上, 1 层顶部在横坐标左边的值表示其早期的收缩位移, 右边的值代表相当于 2 层底界的

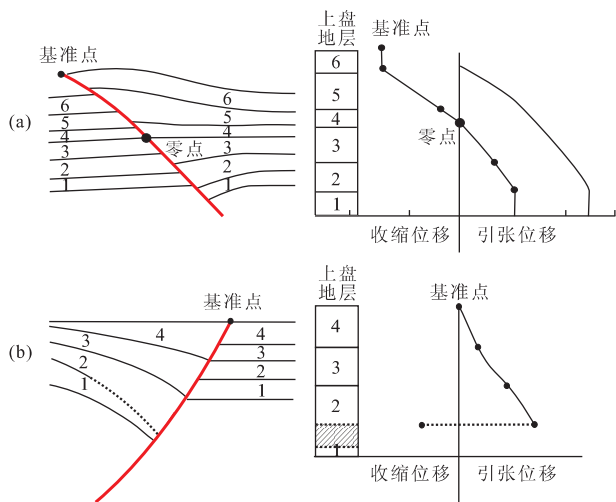


图 3 (a) 正反转断层位移—距离曲线示意图 (Williams *et al.*, 1989) 和 (b) 负反转断层位移—距离曲线示意图

Fig. 3 (a) Sketch of displacement-distance curve of inversion fault suggested by Williams *et al.* (1989) and (b) sketch of displacement-distance curve of negative inversion fault

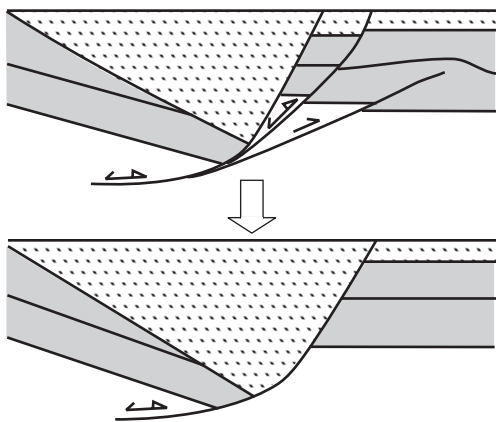


图 4 冲断系负反转率计算示意图

Fig. 4 Sketch map of calculating negative inversion ratio in inversion thrust belt

拉张量,同时表明断层在该时期发生过负反转作用。

很明显,在负反转率计算和位移—距离曲线研究负反转构造时,都涉及到剥蚀量的恢复问题。目前进行剥蚀量恢复的方法很多,但尚无成熟有效的方法(庞雄奇,2003)。本文在对东营凹陷负反转断层早期地层进行剥蚀量恢复时,采用的是应用较广泛的构造趋势分析法(牟中海等,2001)。

上述方法是本文对东营凹陷负反转断层进行定量研究的基础。这些方法是建立在以下几种假设的前提之下的(Song, 1997)。首先,地层的沉积要与断

层滑动保持一致;其次,负反转作用过程中,地层的变形为简单的物质位移;最后,断层再次活动而发生负反转作用时,刚性的基底不能发生相应的韧性变形。应当指出的是,这些方法只适用于单条断层负反转作用的定量研究。由于断层反向挤压位移量和负反转作用后正向伸展位移量被多条断层所分配,该方法对于早期逆冲而形成的一系列叠瓦状冲断系的负反转作用是不适合的。而在实际的负反转构造研究中,这类负反转断层又十分常见,如东营凹陷石村断层西段。为了解决这个问题,笔者建议,用一条集中了冲断系负反转断层所有的挤压滑移量和伸展滑移量的负反转断层来进行计算,即用一条负反转断层等价代替该冲断系的负反转作用(图 4)。

3 东营凹陷负反转断层运动学特征

空间位置的不同,断层的产状乃至构造样式往往发生变化。因此,为了尽可能准确地揭示东营凹陷负反转构造运动特征及在空间上的分布规律,本文在每一条断层上都取了若干点进行定量分析(图 5, 6)。

研究表明(图 5, 6),东营凹陷负反转断层主要活动时期为 T_3 、 J_{1+2} 、 J_3-K_1 和 $Ek-Es_4$ 。在 T_3 和 J_{1+2} 时期,各断层活动速率均为负值。其中,陈南断层活动速率最大, T_3 时期为 $-27.43 \sim -42.08$ m/Ma, J_{1+2} 时期为 $-15.04 \sim -22.1$ m/Ma;石村断层次之, T_3 时期为 $-22.05 \sim -27.85$ m/Ma, J_{1+2} 时期 $-10.5 \sim -17.23$ m/Ma;由于断层规模较小,王古 1 断层在该阶段活动性最弱, T_3 时期为 $-17.85 \sim -22.17$ m/Ma; J_{1+2} 时期为 $-10.28 \sim -15.4$ m/Ma。位移—距离曲线上显示此阶段地层发生大规模的挤压位移,古生界地层和下

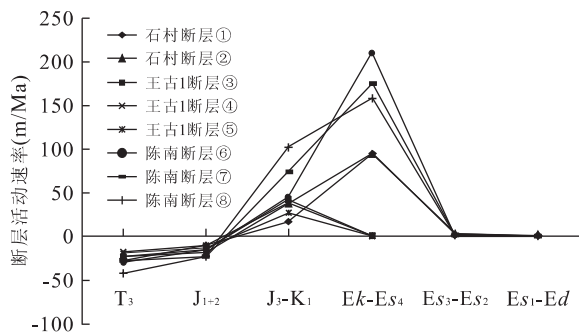


图 5 东营凹陷负反转断层各时期活动速率图

Fig. 5 Activity velocity of negative inversion faults with time in Dongying depression

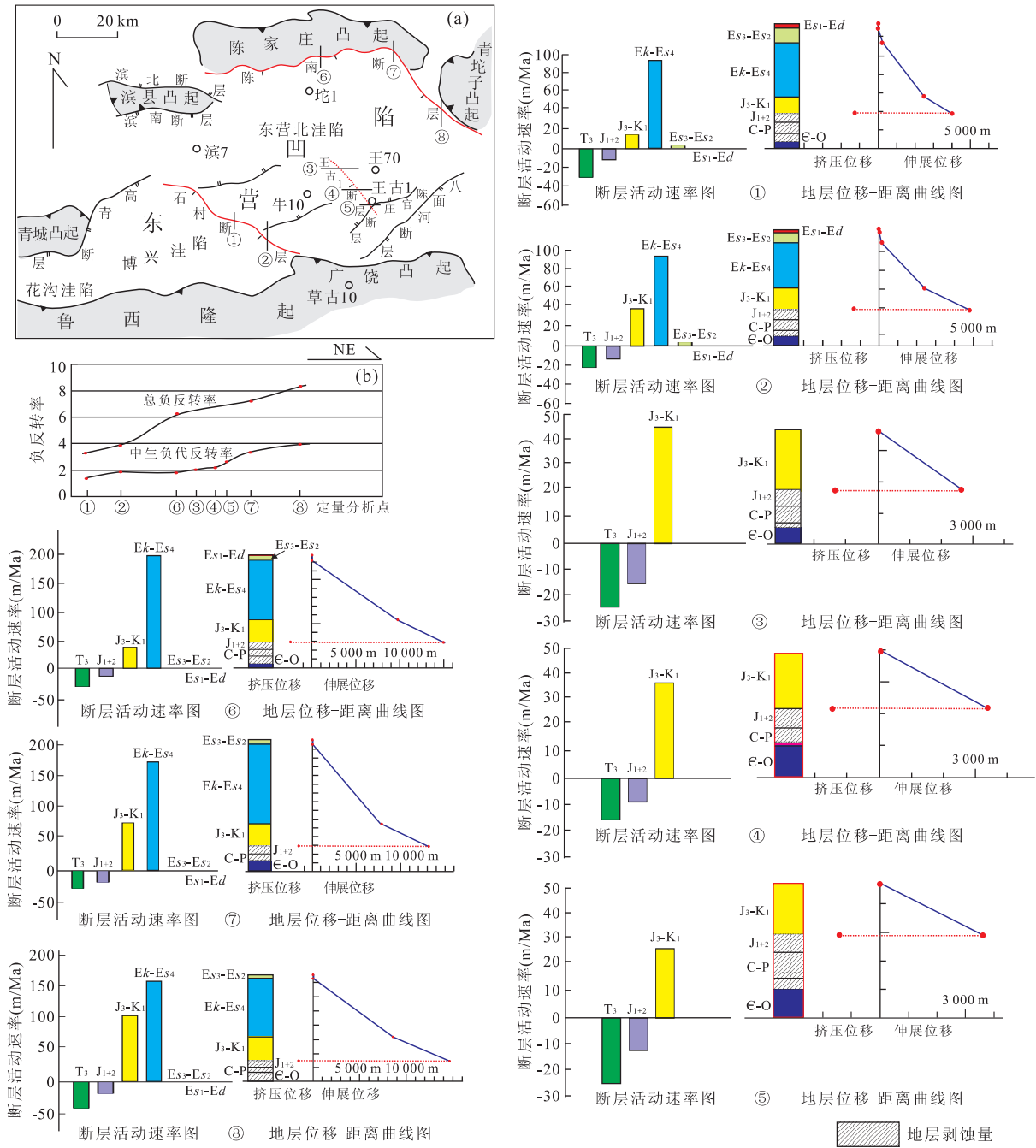


图 6 东营凹陷负反转断层定量分析综合图

Fig. 6 Analytical results of negative inversion faults in Dongying depression

a. 定量分析点位置(①~⑧); b. 断层负反转率分布图; ①~⑧. 断层活动速率分布图和地层位移-距离曲线图

中侏罗统地层均遭受了不同程度的剥蚀(剥蚀量恢复结果见图 6)。以上结果表明,在 T_3 和 J_{1+2} 时期,陈南断层、王古 1 断层和石村断层均为逆断层。

J_3-K_1 时期,各断层活动速率开始转变为正值(图 5,6),其中石村断层为 17.9~38.04 m/Ma,王古 1 断层 27.1~42.86 m/Ma,陈南断层活动速率更是高达 45.6~102.5 m/Ma,在位移-距离曲线

图上, J_3-K_1 地层开始出现伸展位移。二者表明在 J_3-K_1 时期,陈南断层、王古 1 断层和石村断层开始发生负反转作用。负反转率 1.388~3.904,均大于 1,负反转作用强烈(表 1)。

Ek-Es₄ 时期,除了王古 1 断层不再活动(断层活动速率为 0)之外,陈南断层(活动速率 158.5~210.13 m/Ma)和石村断层(活动速率 94.6~

表 1 东营凹陷负反转断层负反转率统计表
Table 1 Calculation result of the negative inversion ratio in Dongying depression

断层名称	取点位置	J ₃ -K ₁ 时期 负反转率	J ₃ -K ₁ 与 Ek-Es ₄ 总负反转率
石村断层	①	1. 388	3. 367
	②	1. 880	3. 600
	③	2. 040	2. 040
王古 1 断层	④	2. 190	2. 190
	⑤	2. 600	2. 600
	⑥	1. 830	6. 400
陈南断层	⑦	3. 170	7. 200
	⑧	3. 904	8. 300

注:①~⑧ 定量分析取点位置(见图 6)。

95. 3 m/Ma)活动速率均达到断层活动史上的最大值。在位移—距离曲线图(图 6)上,自 Ek-Es₄ 地层底界开始,各断层位移—距离曲线变陡(由于王古 1 断层该时期不活动,③、④、⑤位置研究结果未体现这种变化),意味着该阶段伸展作用更为强烈。结合断层活动速率和位移—距离曲线的变化特征,可以看出,在 Ek-Es₄ 时期,东营凹陷经历了第二次负反转作用,并且此次负反转作用更为强烈。

Es₃-Ed 时期,定量分析结果表明,陈南断层、王古 1 断层、石村断层均未发生明显的活动。东营凹陷负反转构造在该时期基本定型。

定量分析的结果还表明,负反转断层活动性在区域分布上存在明显差异性。在断层活动的几个阶段,由 SW 到 NE,按照石村断层—王古 1 断层—陈南断层,断层的活动性明显增强。这一特征在 J₃-K₁ 与 Ek-Es₄ 时期尤为明显。断层活动性的差异必然导致负反转作用强度区域上的不同。负反转率在区域上的分布特点(图 6b)也显示出东营凹陷,由 SW 至 NE,负反转作用增强的规律。

4 结论及讨论

根据以上研究结果,得出以下结论:

- (1) 东营凹陷经历了 J₃-K₁ 和 Ek-Es₄ 时期 2 次强烈的负反转作用,负反转率为 3. 367~8. 300,其中 J₃-K₁ 时期负反转率为 1. 388~3. 904,至 Es₃-Es₂ 时期,各负反转断层趋于稳定,负反转构造定型。
- (2) 东营凹陷负反转构造经历了挤压抬升(T₃-J₁₊₂)、初始负反转(J₃-K₁)、二次负反转(Ek-Es₄)以及构造定型(Es₃-Es₂)4 个演化阶段。
- (3) 东营凹陷负反转作用在空间上具有差异性,

整体上自 SW 至 NE 负反转作用逐渐增强。
东营凹陷发生的负反转作用直接控制了 J₃-K₁ 和 Ek-Es₄ 时期伸展断陷盆地的发育。同时这些在印支期形成的逆冲断裂,在燕山晚期发生负反转作用,也造就了东营凹陷南坡上古潜山的发育,如由王古 1 断层负反转作用的形成的王古 1 潜山等,该潜山是近年胜利油田新发现的一种深层油气藏类型。因此,东营凹陷负反转构造的研究对于中国东部中新世代盆地的发育机制的分析和盆地内部深层油气藏的勘探具有重要的理论意义和实际应用价值。

值得注意的是,Es₃-Es₂ 时期东营凹陷仍处于同裂陷期,本文研究结果却显示,在 Ek-Es₄ 时期强烈活动的陈南断层和石村断层在 Es₃-Es₂ 时期突然停止活动,趋于稳定。这种突变可能是因为在这 2 个时期东营凹陷区域应力场的改变所引起的(任建业, 2004)。在 Ek-Es₄ 时期,东营凹陷主要受控于近 NS 向的拉伸应力作用,导致 NWW 向的陈南断层和石村断层发生强烈的负反转作用。而 Es₃-Es₂ 时期,东营凹陷处于 NW-SE 向拉伸应力场作用下,拉伸应力作用的结果主要是形成了大量的 NE 向同沉积断层,而走向与应力场几乎平行的陈南断层、石村断层,不再发生明显的伸展作用。另外,作为华北古生界统一地台的一部分,东营凹陷可能存在三叠系的原始沉积(朱炎铭等, 2001)。本文在研究过程中,对早期地层进行剥蚀量恢复时,没有考虑三叠系的原始沉积。因此,存在负反转率计算结果偏大的可能。

致谢:本文在研究过程中得到了教育部构造与油气资源重点实验室和教育部含油气盆地构造研究中心的资助,在此表示衷心感谢!

References

Buchanan, P. G., McClay, K. R., 1991. Sandbox experiments of inverted listric and planar fault systems, *Tectonophysics*, 188(1-2): 97-115.

Chang, G. Z., Bi, C. Q., Lin, H. M., 2002. Reverse tectonic evolution, reservoir-forming system and exploration of low buried-hill—Taking Gubei low buried-hill, Shengli oilfield as an example, *Fault-Block Oil & Gas Field*, 9(5): 19-23 (in Chinese with English abstract).

Chen, F. J., Wang, X. Q., Zhang, G. Y., et al., 1992. Structure and geodynamic setting of oil and gas basins in the People's Republic of China, *Geoscience*, 6(3): 317-327 (in Chinese with English abstract).

Chen, J., Dong, D., Qiu, M. W., 1999. Negative inversion structure in the Jiyang depression and its petroleum ge-

- ological significance. *Geology & Experimental Petroleum*, 21(3): 201—206 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. N., Chen, F. J., 1995. Inversion structures and their relationship to traps of oil and gas. *Earth Science Frontiers*, 2(3—4): 96—102 (in Chinese with English abstract).
- Cooper, M. A., Williams, G. D., 1989. Inversion tectonics—A discussion. In: Copper, M. A., Williams, G. D., eds., *Inversion tectonics. Geological Society, Special Publications, London*, (44): 335—347.
- Glennie, K. W., Boegner, P. L. E., 1981. Sole pit inversion tectonics. In: Illing, L. V., Hobson, G. D., eds., *Petroleum geology of the continental shelf of northwest Europe*. Institute of Petroleum, London, 110—120.
- Hao, X. F., Zong, G. H., Li, C. H., et al., 2001. Preliminary analysis of the positive-reversal structure in Jiyang depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 8(3): 8—10 (in Chinese).
- Harding, T. P., 1985. Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structural inversion. *AAPG Bulletin*, 69: 582—600.
- Lamplyugh, G. W., 1920. Structure of the weald and analogues tracts. *Quarterly Journal Geological Society*, 75: LXXIII-XCT (Anniversary Address of the President).
- Letozey, J., 1990. Fault reactivation and structural inversion, backarc and intraplate compressive deformations—Example of the eastern Sunda shelf (Indonesia). *Tectonophysics*, 183(1—4): 341—362.
- Li, P. L., Zhang, S. W., Qu, S. L., et al., 2003. Tectonic evolution and tectonic patterns of ontinental fault basin—volume 1 of petroleum geology and exploration of continental fault basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Mitra, S., 1993. Geometry and kinematic evolution of inversion structures. *AAPG Bulletin*, 77(7): 1159—1191.
- Mu, Z. H., Lu, T. Q., Xie, G. S., et al., 2001. Restoration of the denueed thicknesses of Permian in the southwest part of Talimu basin. *Natural Gas Industry*, 21(2): 41—43 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X. Q., 2003. Modeling of geologic processes. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. Y., 2004. Tectonic significance of S_0 ' boundary in Dongying depression, Bohai Gulf basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 69—76, 92 (in Chinese with English abstract).
- Song, T. G., 1997. Inversion styles in the Songliao basin (northeast China) and estimation of the degree of inversion. *Tectonophysics*, 283(1—4): 173—188.
- Su, J. B., Zhu, W. B., Lu, H. F., et al., 2009. Geometry styles and quantification of inversion structures in the Jiyang depression, Bohai Bay basin, eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 26(1): 25—38.
- Tan, M. Y., Bing, J. Y., Jin, X. X., et al., 1996. Origin analyses of both negative inversion faults and negative inversion structures in Palaeozoic Group in coastal region of North Shandong Province. *OGP*, 31(6): 844—850 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. P., Fei, Q., Zhang, J. H., et al., 1990. Tectonic analysis in oil exploration. China University of Geosciences press, Wuhan (in Chinese).
- Wei, W. B., Ye, G. F., Jin, S., et al., 2007. Three dimensional P-wave velocity structure of the crust of North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(4): 441—452 (in Chinese with English abstract).
- Williams, G. D., Powell, C. M., Cooper, M. A., 1989. Geometry and kinematics of inversion tectonics. In: Cooper, M. A., Williams, G. D., eds., *Inversion tectonics. Geological Society, Sepcial Publications, London*, (44): 3—15.
- Yao, C., Jiao, G. H., Wang, T. H., et al., 2004. The structures of oil and gas-bearing basins of China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Ye, X. S., Wang, W. F., 2008. Plate subduction contrains on the formation of Jiyang depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 235—242 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Meng, Q. R., Liu, J. M., et al., 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285—297 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Jin, L., 1997. On inversion tectonics and structures. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 17(4): 83—90 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, D. S., Wu, Z. P., Li, W., et al., 2005. Faults and their control on the basin during the transfer stage of the Jiyang depression in the Mesozoic-Cenozoic. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 386—394 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. M., Qin, Y., Fan, B. H., et al., 2001. Restoration and significance of the original thickness of Triassic system in Baohaiwan Bay basin. *Journal of China University of Mining and Technology*, 30(2): 195—200 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常国贞,毕彩芹,林红梅,2002.低潜山反转构造演化、成熟体系与勘探——以胜利油区孤北低潜山为例.断块油气田,9(5):19—23.
- 陈发景,汪新文,张光亚,等,1992.中国中、新生代含油气盆地构造和动力学背景.现代地质,6(3):317—327.
- 陈洁,董冬,邱明文,1999.济阳拗陷内的负反转构造及其石油地质意义.石油实验地质,21(3):201—206.
- 陈昭年,陈发景,1995.反转构造与油气圈闭.地学前缘,2(3—4):96—102.
- 郝雪峰,宗国洪,李传华,等,2001.济阳拗陷正反转构造初步分析.油气地质与采收率,8(3):8—10.
- 李丕龙,张善文,曲寿利,等,2003.陆相断陷盆地油气地质与勘探(卷一)——陆相断陷盆地构造演化与构造样式.北京:石油工业出版社,148—158.
- 牟中海,陆廷清,谢桂生,等,2001.塔西南地区二叠系剥蚀厚度恢复.天然气工业,21(2):41—43.
- 庞雄奇,2003.地质过程定量模拟.北京:石油工业出版社.
- 任建业,2004.渤海湾盆地东营凹陷 S_6 界面的构造变革意义.地球科学——中国地质大学学报,29(1):69—76,92.
- 谭明友,邴进营,金学新,等,1996.山东北部滨海地区负反转

断层及古生界负反转结构成因分析.石油地球物理勘探,31(6):844—850.

- 王燮培,费琪,张家骅,等,1990.石油勘探构造分析.武汉:中国地质大学出版社.
- 魏文博,叶高峰,金胜,等,2007.华北地区地壳 P 波三维速度结构.地球科学——中国地质大学学报,32(4):441—452.
- 姚超,焦贵浩,王同和,等,2004.中国含油气构造样式.北京:石油工业出版社,318—403.
- 叶兴树,王伟锋,2008.板块俯冲对济阳拗陷形成的制约.地球科学——中国地质大学学报,33(2):235—242.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,等,2004.华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨.地学前缘,11(3):285—297.
- 张功成,金利,1997.论反转构造.海洋地质与第四纪地质,17(4):83—90.
- 郑德顺,吴智平,李伟,等,2005.济阳拗陷中、新生代盆地转期断裂特征及其对盆地的控制作用.地质学报,79(3):386—394.
- 朱炎铭,秦勇,范炳恒,等,2001.渤海湾盆地三叠系沉积厚度恢复及其意义.中国矿业大学学报,30(2):195—200.