

裂陷盆地伸展方位与构造作用及对构造样式的控制

——以苏北盆地高邮凹陷南部断阶带为例

吴林^{1,2},陈清华²,刘寅²,王玺²,张晓丹³,孙珂²,陈传浩²

[1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;

3. 中国石油东方地球物理公司新兴物探开发处,河北 涿州 072751]

摘要:南部断阶带为苏北盆地高邮凹陷边界构造带,由吴堡断阶带和真武断阶带两个部分组成,具有复杂的构造作用过程和构造样式。在南部断阶带几何学特征研究基础上,以应力-应变分析理论为指导,利用平衡剖面法反演所得的伸展率进行横向对比,明确高邮凹陷各时期的优势伸展方位,从而分析南部断阶带的构造作用及其对构造样式的控制。结果表明,高邮凹陷优势伸展方位经历了NW向($K_2t^2-E_2d$),NS向(E_2s)和NW向($Ny-Qd$)的变化过程,首次从定量角度深入认识了高邮凹陷晚白垩世以来的构造应力场方向。由于不同时期优势伸展方位与断阶带呈不同角度斜交,吴堡断阶带经历了纯伸展、右行走滑-伸展与纯伸展3期构造作用,形成了平面斜交式和剖面马尾状的简单断层组合样式;真武断阶带经历了左行走滑-伸展、右行走滑-伸展和左行走滑-伸展3期构造作用,形成了平面网格状与剖面复式马尾状的复杂断层组合样式。伸展速率与走滑速率研究表明,断阶带伸展与走滑作用主要发生在阜宁组、戴南组和三垛组,多期次的走滑-伸展作用是南部断阶带构造样式的主要控制因素。

关键词:伸展;走滑;伸展方位;构造样式;断阶带;高邮凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Extension direction and tectonism in rift basins and their control on structural style: A case study on the south fault terrace in the Gaoyou Sag, Subei Basin

Wu Lin¹, Chen Qinghua², Liu Yin², Wang Xi², Zhang Xiaodan³, Sun Ke², Chen Chuanhao²

[1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

3. New Resources Geophysical Exploration Division, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou, Hebei 072751, China]

Abstract: As the tectonic boundary belt, the south fault terrace, which consists of Wubao fault terrace and Zhenwu fault terrace, has complicated tectonic history and style. Based on the geometrical characteristics of the south fault terrace, guided by the stress-strain theory and extensional rate from the balanced section, we figured out the dominate extensional direction in different periods and analyzed the amount of extension and strike-slip of the south fault terrace, and their control on structural style. The evolution of the dominate extension direction of the Gaoyou sag can be divided into three stages since the late Cretaceous, including NW($K_2t^2-E_2d$), NS(E_2s), and NW($Ny-Qd$). Detailed understanding of the direction of stress field in the Gaoyou sag was obtained since the late Cretaceous in a quantitative way for the first time. Because the dominate extensional direction is not always parallel with the axis of fault terrace, Wubao fault terrace experienced 3 periods of tectonism, extension, right-lateral slip-extension, and extension. This resulted in the simple faults style with skew traces in plane view and horse tail-like in profiles. Similarly, Zhenwu fault terrace also experienced 3 periods of tectonism, left-lateral slip-extension, right-lateral slip-extension and left-lateral slip-extension, which resulted in the complicated faults style of grid fault trace in plane view and duplex horse tail-like in profiles. The study on the history of extension rate and strike-slip shows that E_1f , E_2d and E_2s were the main periods of extension and strike-slip, which played a key role in the formation of structural style.

收稿日期:2015-04-14;修订日期:2016-12-12。

第一作者简介:吴林(1987—),男,博士,含油气盆地分析与构造地质学。E-mail:wulin06@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472176)。

Key words: extension, strike-slip, extensional direction, structural style, fault terrace, Gaoyou Sag, Subei Basin

晚中生代—新生代是中国东部断陷盆地发育的主要时期,这一时期区域应力场频繁变化、断层活动强烈,加强该时期的构造作用研究,对油气勘探具有重要的现实意义^[1-3]。苏北盆地是中国东部重要的含油气盆地,高邮凹陷作为内部最为典型与重要的凹陷之一,其运动学研究一直备受关注^[4-7]。受到郯庐断裂带活动的影响,高邮凹陷发育于走滑—拉分背景之下,这时区域伸展方向与边界主断层走向斜交,易发生斜滑作用而产生走滑分量^[8-9]。然而前人对高邮凹陷的区域伸展方向和伸展程度分析不清晰,缺乏考虑走滑因素^[9-11],也忽略了断阶带内部不同位置构造样式的差异性,不能准确全面地认识断阶带的构造作用过程。因此,本文在南部断阶带几何学特征研究基础上,利用平衡剖面法反演出地质剖面各时期的伸展率,再通过不同地质剖面同一时期伸展率大小的横向对比,明确高邮凹陷各时期的优势伸展方位,进一步分析南部断阶带的构造(伸展与走滑)作用及其对构造样式的控制,并计算南部断阶带各阶段伸展量与走滑量,实现断阶带断陷盆地发育期的运动学研究,为高邮凹陷油气勘探提供科学依据。

1 地质背景

高邮凹陷是在晚白垩世仪征运动基础上发展起来的中、新生代断陷盆地,凹陷结构表现为南断北超,其构造演化与中国东部区域应力场密切相关^[8]。中生代时期,板块碰撞引起的区域推覆作用使高邮凹陷基底形成了真武断裂^[9]。晚白垩世以来,下扬子地区由古特提斯构造域演变为太平洋构造域,其构造演化主要受控于太平洋板块运动^[7]。由于西太平洋区伊泽纳崎板块 NNW 向高速俯冲于欧亚大陆之下,下扬子地区处于弧后扩张环境^[8],岩石圈减薄,发生 NW—SE 向区域性伸展作用,真武断裂复活并微弱活动,继承性演化为真①断层、吴①断层,沉积泰州组(K_2t , 65 ~ 83 Ma)。古近纪时期,高邮凹陷进入断陷盆地发育阶段,从老到新依次沉积阜宁组(E_1f , 54.9 ~ 65 Ma)、戴南组(E_2d , 50.5 ~ 54.9 Ma),真②断层和吴②断层强烈活动,成为南部控凹边界断层,同时发育一系列与之平行或斜交的次级断层,这些断层共同构成南部断阶带。晚始新世,太平洋板块的俯冲方向由 NNW 向转为 NWW 向,与此同时印度板块与欧亚板块的碰撞使中国大陆东部产生近 EW 向的区域挤压应力场^[8],而

NNE 走向的郯庐断裂带同时发生右行走滑作用,两种力学环境派生出近 SN 向拉张应力场,该时期沉积的三垛组(E_2s , 38 ~ 50.5 Ma)中真②断层三段式、右行左列的分布方式(图 1b)也证明了 SN 向的拉张应力场。新近纪,高邮凹陷进入拗陷阶段,郯庐断裂带活动性明显减弱,高邮凹陷重新接受 NW—SE 向区域性伸展作用,但与古新世 NW—SE 向伸展相比有明显的减弱,披覆性沉积盐城组(N_2y , 2 ~ 24.6 Ma)和东台组(Qd , 0 ~ 2 Ma)。

2 南部断阶带几何学特征

南部断阶带为高邮凹陷边界构造带,南邻苏南隆起和吴堡低凸起(图 1a, b),北邻高邮凹陷深凹带,由东段的吴堡断阶带和西段的真武断阶带组成^[9],长约 100 km。平面走向北东东—北东向,呈条带状,剖面倾向北西西—北西向,呈台阶状北掉。南部断阶带最大沉积厚度达 5 000 m,油气富集程度较高,前人对于南部断阶带内部主要断层已有较为详细的总结^[8,10-11],可分为 I 级、II 级和次级断层,约 200 余条。

2.1 吴堡断阶带

指吴①断层、吴②断层及周围次级断层组成的构造带,即南部断阶带东段部分,该构造带总体走向 NE 向(图 1b, c)。吴①断层同为控制凹陷和断阶带发育的 I 级边界断层,平面呈线型发育,走向 NE 向,剖面形态呈板式(Gz64.48 测线)、铲式(Gz72.28 测线),且断层倾角从 Gz48.68 到 Gz72.28 有逐渐变小的趋势。吴①断层切穿了晚白垩世泰州组,上、下盘各时期地层厚度不一致,属于生长断层,加强吴①断层活动性分析对高邮凹陷构造演化研究至关重要。吴②断层为后期替代吴①断层控制凹陷发育的 II 级断层,西段斜交于吴①断层中部,走向 NE。吴②断层剖面形态呈板式(Gz64.48 测线),在深部相交于吴①断层,并组合成“Y”字型(Gz56.88 测线),吴②断层切穿了新生界,也具有生长性质。次级断层总体走向近 EW 向,与吴①断层、吴②断层斜交发育,剖面上多呈阶梯状组合出现(Gz48.68、Gz72.28 测线),部分与吴②断层组合成马尾形态(Gz64.48 测线)。

2.2 真武断阶带

指真①断层、真②断层及周围次级断层组成的构造带,即南部断阶带西段部分,该构造带总体走向 NEE

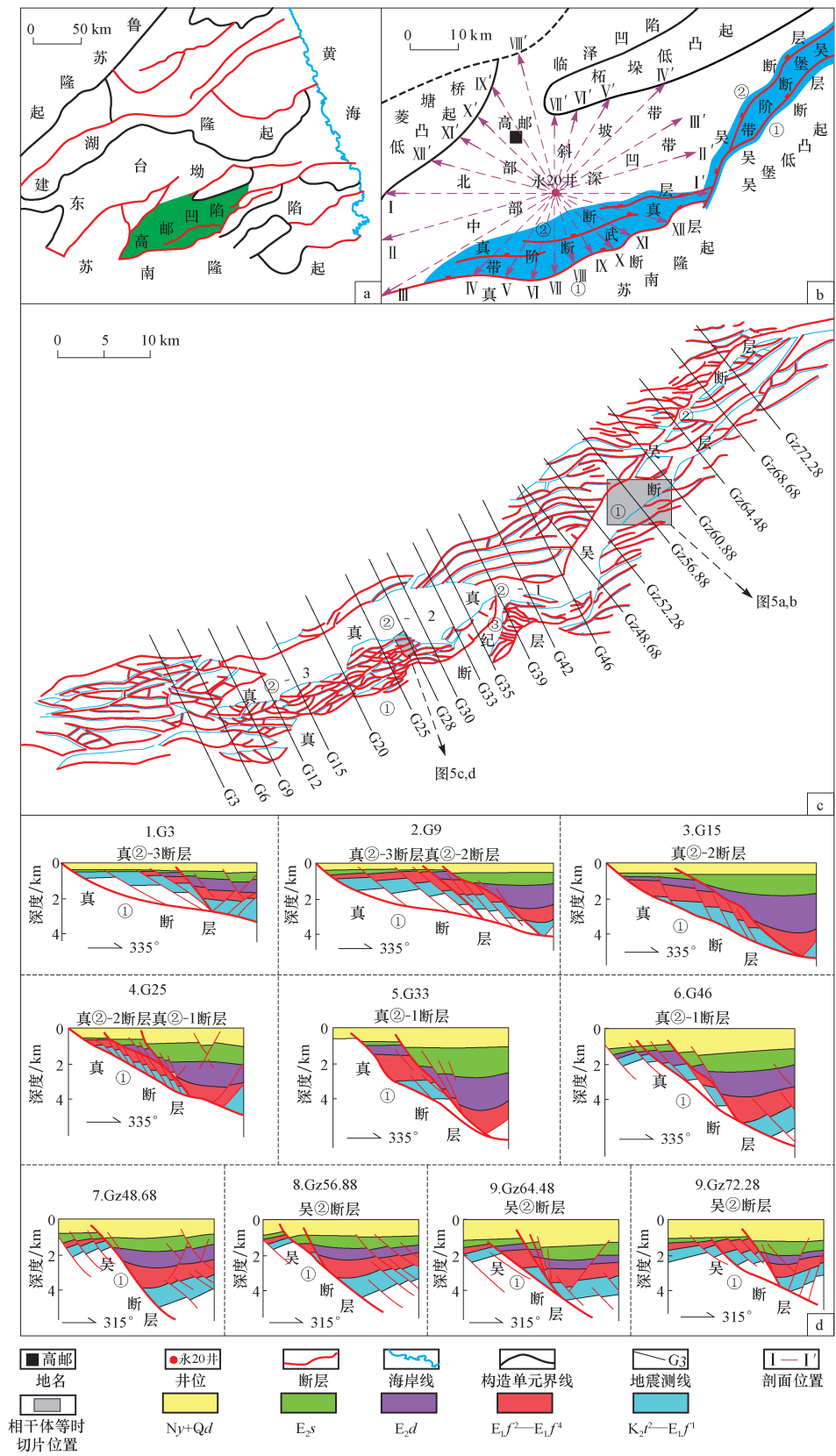


图 1 高邮凹陷南部断阶带构造单元特征

Fig. 1 Structural elements characteristics of the south fault terrace in the Gaoyou Sag

a. 苏北盆地构造单元;b. 高邮凹陷构造单元;c. 南部断阶带 T₃ 反射层断裂系统及主干测线位置;
d. 部分主干测线地质解释剖面

向(图 1b,c)。真①断层为控制凹陷和断阶带发育的 I 级边界断层,平面呈弯曲线型发育,走向 NEE 向,剖面形态呈铲式(G15,G25 和 G46 测线)、坡坪式(G9 和 G33 测线),且断层倾向从 G3 到 G46 有逐渐变大的趋势。真①断层切穿了晚白垩世泰州组,上、下盘各时期地层厚度不一致,属于生长断层,加强真①断层活动性分析对高邮凹陷构造演化研究同样重要。II 级断层包括真②断层和纪③断层。真②断层总体平行于真①断层发育,走向 NNE 向,自西至东又分为真②-3 断层(G3 和 G9 测线)、真②-2 断层(G9,G15 和 G25 测线)、真②-1 断层等 3 段(G25,G33 和 G46 测线),3 段式真②断层呈雁列式叠置发育,并在深部相交于真①断层,剖面形态呈板式(G3 和 G15 测线)、铲式(G25 和 G33 测线),真②断层切穿了新生界,也具有生长性质。纪③断层平面走向 NE 向,连接真①断层和真②-1 断层。次级断层发育明显受高级别断层控制,走向包括近 EW,NE 和 NEE 向,其延伸距离、断层规模较小,大多只切穿新生界部分层位。值得注意的是,真②断层将次级断层分为特征不同的南、北两个部分:南部次级断层分布在真①断层和真②断层之间,数量较多,平面组合成斜交式、网格式形态,剖面多呈阶梯式组合发育(G25 测线),且在深部交于真①断层,与真①断层组合成马尾状形态(G9,G15 和 G25 测线);北部次级断层分布在真②断层北部,数量较少,平面组合成斜交式、平行式形态,且在深部交于真②断层,与真②断层组合成马尾状形态(G25 和 G33 测线)。

3 高邮凹陷优势伸展方位

3.1 优势伸展方位数学模型

在复杂的伸展构造应力场作用下,盆地不同方位均呈现不同程度的构造变形响应^[12-13],其中伸展程度(即伸展率)最大的方位即为优势伸展方位,加强该内容研究是分析断阶带伸展与走滑作用的重要前提^[14-16]。为此本次建立如下二维数学模型^[17],假设某地质体在持续的 X 轴向拉伸作用下发生均匀递进变形,变形过程中的第 i 期应变椭圆和第 j 期应变椭圆如图 2 所示,考虑到变形过程中的面积守恒定律,相对于第 i 期来说,第 j 期应变椭圆存在挤压区和伸展区,下面对伸展区的优势伸展方位进行论证。

如图 2,假设第 i 期应变椭圆的长轴、短轴分别为 a_i 和 b_i ,应变椭圆上第一象限的任意一变形点 A 的坐标为 (x_i, y_i) , $x_i > 0, y_i > 0$,该变形点与坐标原点的连线即为变形长度 d_i , d_i 与 X 轴夹角为 θ_i , $\theta_i > 0$,则有如下

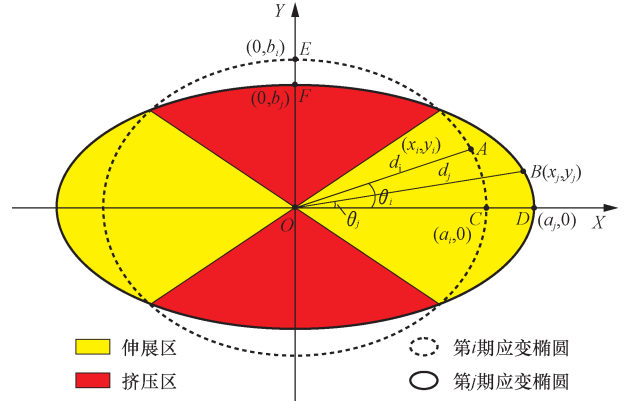


图 2 均匀递进变形过程中应变椭圆变化示意图

Fig. 2 Variation of strain ellipse in uniform progressive deformation

公式:

$$x_{i2}/a_{i2} + y_{i2}/b_{i2} = 1 \quad (1)$$

$$x_i/y_i = \tan \theta_i \quad (2)$$

$$d_i = (x_{i2}^2 + y_{i2}^2)^{1/2} \quad (3)$$

经计算可得:

$$x_i = a_i b_i / (b_{i2} + a_{i2} \tan \theta_{i2})^{1/2}; \quad (4)$$

$$y_i = a_i b_i / (b_{i2} \tan \theta_{i2} + a_{i2})^{1/2}; \quad (5)$$

$$d_i = a_i b_i (1 + \tan \theta_{i2})^{1/2} / (b_{i2} + a_{i2} \tan \theta_{i2})^{1/2} \quad (6)$$

假设伸展变形作用后的第 j 期应变椭圆的长轴、短轴分别为 a_j 和 b_j ,由于变形过程中面积守恒,变形点 X 坐标值增大, Y 坐标值相应减小,第 j 期变形点 $B(x_j, y_j)$ 对应第 i 期变形点 $A(x_i, y_i)$, $x_j > 0, y_j > 0$,变形长度为 d_j , d_j 与 X 轴夹角为 θ_j , $\theta_j > 0$,则有如下关系式:

$$x_i < x_j; y_i > y_j; \theta_i > \theta_j; a_i < a_j \quad (7)$$

$$b_i > b_j; a_i > b_i; a_j > b_j; d_i < d_j \quad (8)$$

$$a_i b_i = a_j b_j \quad (9)$$

同理可得 d_j, x_j, y_j 的计算公式。由前述伸展率计算公式可知,变形点 $A(x_i, y_i)$ 到 $B(x_j, y_j)$ 的伸展率即为 $d_j/d_i - 1$, X 轴方向伸展率为 $a_j/a_i - 1$,因此优势伸展方位的论证即转化为 d_j/d_i 与 a_j/a_i 的大小关系比较问题,以 t 表示该比值,设 $a_i b_i = a_j b_j = m$ (定值),则有:

$$\begin{aligned} t^2 &= (a_j/a_i)^2 / (d_j/d_i)^2 = a_{j2} d_{i2} / (a_{i2} d_{j2}) \\ &= \{ (a_{j2} b_{j2} / b_{i2}) [m^2 (1 + \tan \theta_{i2}) / (b_{i2} + m^2 \tan \theta_{i2} / b_{i2})] \} / \\ &\quad \{ (a_{i2} b_{i2} / b_{j2}) [m^2 (1 + \tan \theta_{j2}) / (b_{j2} + m^2 \tan \theta_{j2} / b_{j2})] \} \\ &= [(1 + \tan \theta_{i2}) / (1 + \tan \theta_{j2})] \times \\ &\quad [(1 + a_{j2} \tan \theta_{j2} / b_{j2}) / (1 + a_{i2} \tan \theta_{i2} / b_{i2})] \quad (9) \end{aligned}$$

均匀变形过程中局部面积也守恒,由 A 对应 B 可知,扇形 AOC 和扇形 BOD 面积相等。根据椭圆中扇形面积的数学计算公式可知:

$$\begin{aligned} & 1/2 a_i b_i \arctan[(\tan \theta_i) a_i / b_i] \\ & = 1/2 a_j b_j \arctan[(\tan \theta_j) a_j / b_j] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{即: } a_i \tan \theta_i / b_i = a_j \tan \theta_j / b_j \quad (11)$$

代入 t 可得:

$$t^2 = (1 + \tan \theta_{i2}) / (1 + \tan \theta_{j2}) \quad (12)$$

由于 $\theta_i > \theta_j$, $\tan \theta_i > \tan \theta_j$, 则 $t > 1$, 即 $a_j / a_i > d_j / d_i$ 。不难得出结论, X 轴向拉伸作用下发生的均匀递进变形, 该方向的伸展率也最大, 即优势伸展方位上的伸展率最大, 而定义伸展率最大的方位即为优势伸展方位。因此, 优势伸展方位和伸展率最大方位为互等命题, 找出伸展率最大的方位即可明确区域伸展方向。

3.2 高邮凹陷优势伸展方位

利用平衡剖面技术, 对断阶带不同方位的地质剖面进行构造演化分析^[12], 可以得出多组伸展量与伸展率数据, 根据前述论证结果分析出优势伸展方位。

地质剖面的选取需注意以下几个原则: ①同组地质剖面尽量以一点为中心放射状平均分布; ②同组地质剖面的数量越多, 越能全面地反映不同方位的伸展率大小; ③选取地质剖面尽量少地切过两种走向大或急剧变化的断层; ④多考虑几组地质剖面, 检验不同方案所表达的地质认识是否一致。本次以高邮凹陷中部永安地区永 20 井为中心(图 1), 选取了 12 条区域地质剖面, 呈“米”字形从不同方向切过整个高邮凹陷, 相邻剖面之间间隔 15° 。根据前人对高邮凹陷构造演化的认识, 分 5 个时期讨论了高邮凹陷晚白垩世以来

的优势伸展方位(表 1; 图 3)。

1) $K_2 t^2 - E_2 d$

$K_2 t^2 - E_2 d$ 时期, 优势伸展方位为 NW - SE 向, 伸展率达 16.75%, 明显大于其它方向伸展率, 表明 NW - SE 向构造应力场开始对高邮凹陷形成拉伸作用。泰二段时期, 盆地开始接受区域伸展作用, 边界 I 级断层真①断层和吴①断层同时开始活动(图 4), 活动速率约 50 m/Ma, 两断层的东部边缘活动性稍小。边界断层的活动拉开了断陷盆地发育的序幕^[8]。

$E_1 f^2 - E_1 f^4$ 时期, 伸展率较泰二段一早一段时期明显增大, 约 5% ~ 15%, 优势伸展方位依然为 NW - SE 向, 伸展率达 17.33%, 同时相邻的 NWW - SEE 和 NNW - SSE 方向伸展率接近 NW - SE 方向, 约 15% 左右, 表明 NW - SE 方向强烈拉伸增强了相邻方向的拉伸作用, 该时期高邮凹陷伸展作用强烈^[8]。真①断层和吴①断层达到活动高峰, 活动速率达到 100 m/Ma 以上, 二者中部活动性最大达 300 m/Ma 左右。受真①断层控制, 真②断层和纪③断层开始形成于真①断层的東西两端(图 4), 其活动速率约为 50 m/Ma, 相对小于真①断层。

$E_2 d$ 时期, 优势伸展方位依然为 NW - SE 向, 伸展率达 9.23%, 总体伸展率较一早四段时期明显减小, 约 5% ~ 10%, 同时 NNE - SSW 方向伸展率也不可忽略, 显示了优势伸展方位的变化迹象。真①断层活动性呈现阶段性变化, 不同段活动速率相差较大, 介于 0 ~ 100 m/Ma, 这与凹陷内部强烈发育的真②断层有关, 在统一拉张作用下, 二者活动性相互补偿^[8]。若真①断层某段活动速率小, 则该段平行处则发育活动速率较大的真②断层。吴①断层走向变化相对较小,

表 1 高邮凹陷不同走向剖面伸展率(剖面位置见图 1b)

Table 1 Extensional rate of different strike profiles in the Gaoyou Sag (the profile location was shown in Fig. 1b)

地质剖面	走向	方位角/ $(^\circ)$	伸展率/%				
			$K_2 t^2 - E_1 f^1$	$E_1 f^2 - E_1 f^4$	$E_2 d$	$E_2 s$	$N_y - Qd$
I - I'	W - E	90	—	—	—	—	—
II - II'	NEE - SWW	75	—	—	—	—	—
III - III'	NEE - SWW	60	—	—	—	—	—
IV - IV'	NE - SW	45	—	—	3.85	3.09	3.14
V - V'	NNE - SSW	30	—	7.17	5.11	2.85	3.35
VI - VI'	NNE - SSW	15	—	9.85	4.59	4.42	3.87
VII - VII'	N - S	0	—	10.94	4.78	10.50	3.43
VIII - VIII'	NNE - SSW	345	7.49	14.37	7.29	7.22	4.21
IX - IX'	NNE - SSW	330	11.21	15.49	8.52	4.75	5.68
X - X'	NW - SE	315	16.75	17.33	9.23	3.51	7.76
XI - XI'	NWW - SEE	300	12.13	15.87	7.29	3.78	4.75
XII - XII'	NWW - SEE	285	8.60	11.45	4.78	—	3.82

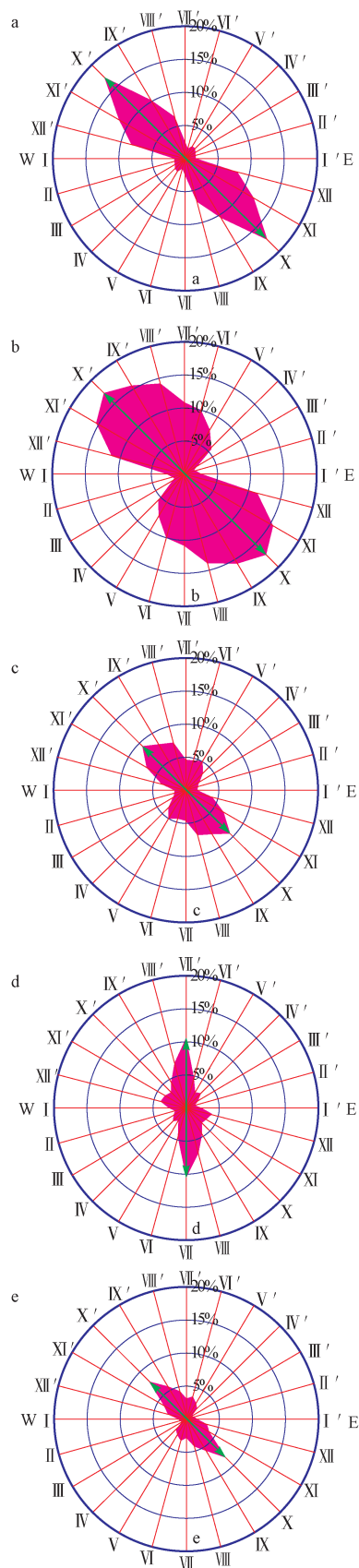


图3 高邮凹陷不同走向剖面各时期伸展率玫瑰花图
Fig. 3 Rose diagrams of extensional rate of different strike profiles during each period in the Gaoyou Sag
a. $K_2t^2-E_1f^1$; b. $K_1f^2-E_1f^4$; c. E_2d ; d. E_2s ; e. $Ny-Qd$

主体段活动性依然较大,其走向转折端形成吴②断层^[11],二者活动速率约 $100 \sim 200 \text{ m/Ma}$,也呈现相互补偿的特征。

2) NS 向伸展期(E_2s)

三垛组,各方向伸展率依然较小,但优势伸展方位变为 NS 方向,伸展率约 10.5% ,表明此时构造应力场转为 NS 向拉伸。真①断层不同段活动性差距较小,活动速率为 10 m/Ma 左右,吴①断层活动性继续减弱,活动速率介于 $0 \sim 10 \text{ m/Ma}$ 。真②断层 3 段式正式形成^[10](图 4),由西至东依次为真②-3 断层、真②-2 断层、真②-1 断层,呈右旋叠置而形成调节带,活动速率为 $10 \sim 100 \text{ m/Ma}$ 左右。吴②断层沿走向延伸发育,活动性较戴南组时期有所减小,活动速率为 $10 \sim 100 \text{ m/Ma}$ 左右。

3) NW 向伸展期($Ny-Qd$)

盐城组之后,高邮凹陷全区统一坳陷沉降^[6-7],各方向伸展率明显减小,优势伸展方位又变为 NW-SE 方向,NW-SE 向拉伸作用逐渐衰退。各级断层活动性明显减小(图 4),活动速率约为 $0 \sim 10 \text{ m/Ma}$ 左右,断阶带东西两侧活动性明显小于中部。

为了使计算结果更为可信,研究中还选取了吴堡断阶带北部地区的一组“米”字形剖面进行了验证。基于伸展率大小划分高邮凹陷优势伸展方位,其定量研究结果较前人构造演化认识^[5-6,8,10]更为精确,同时各伸展期的伸展程度与断层活动性程度一致性较好。

4 南部断阶带伸展与走滑作用

前已述及,晚白垩世高邮凹陷发育以来,构造应力场先后表现为 NW,NS 和 NW 向拉伸,而真武断阶带和吴堡断阶带走向分别为 NEE 和 NE 向,因此二者不同时期表现出不同类型的伸展与走滑作用。本次自西而东选取 21 条地质剖面(图 1c)对伸展量和走滑量进行计算,其中前 14 条剖面走向 NNW 向,垂直切过真武断阶带,后 7 条剖面走向 NW 向,垂直切过吴堡断阶带。

4.1 吴堡断阶带

泰州组-戴南组沉积时期,吴堡断阶带接受 NW 向垂向拉伸,发生纯伸展作用,此时并无走滑分量。通过对 NWW 向 7 条地质剖面的计算认为,吴堡断阶带平均伸展量约为 1.9 km ,其中 $K_2t^2-E_1f^1$, $E_1f^2-E_1f^4$ 和 E_2d 的伸展量分别约为 $0.3, 1.1$ 和 0.5 km 。

三垛组沉积时期,吴堡断阶带接受 NS 向斜向拉伸,以伸展作用为主,同时发生右行走滑作用。计算该

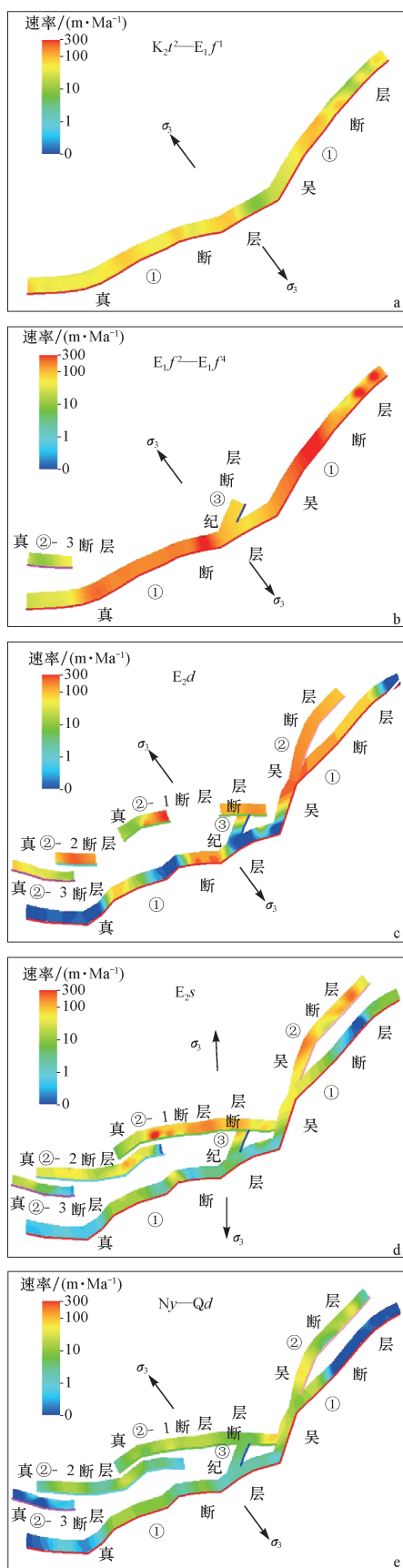


图 4 高邮凹陷南部断阶带各时期主要断层活动速率

Fig. 4 Displacement rate of major fault for each period of the south fault terrace in the Gaoyou Sag

时期吴堡断阶带的平均伸展量约为 0.7 km。同时测量吴堡断阶带总体走向为 NE45°, 与区域构造应力场方向锐夹角为 45°, 因此计算其走滑量约为 0.7 km。同样需要注意, 三垛组走滑位移为 -0.7 km。相干体是地震数据中地质信息的集中反映, 等时切片往往可以反映沉积体的发育情况^[18]。图 5a, b 为吴堡断阶带周庄地区 1 376 ms 和 1 446 ms 相干体等时切片, 该时间域对应了戴南组二段时期, 经历了后期三垛组 NS 向的一期斜向伸展作用。图中冲积扇体发育明显, 且深部扇体发育在浅部扇体的东北部, 钻井、岩心数据表明二者为同一扇体, 且物源相同。综合分析认为, 该冲积扇体由于右行走滑作用而发生顶部偏移。根据扇体物源通道中间点的错动距离, 测算走滑量为 687 m, 与理论计算结果一致性较好。

盐城组之后沉积时期, 吴堡断阶带重新接受 NW-SE 向垂向拉伸, 再次变为纯伸展作用, 其伸展量约为 0.3 km。

4.2 真武断阶带

泰州组-戴南组沉积时期, 真武断阶带接受 NW 向斜向拉伸, 以伸展作用为主, 同时发生左行走滑作用。通过对 NWW 向 14 条地质剖面的计算认为, 真武断阶带平均伸展量为 3.5 km, 其中 $K_2t^2-E_1f^1$, $E_1f^2-E_1f^4$ 和 E_2d 的伸展量分别约为 0.5, 1.9 和 1.1 km。同时测量真武断阶带总体走向为 NE65°, 该时期区域构造应力场方向 NW45°, 因此计算其走滑量约为 1.3 km, 其中 $K_2t^2-E_1f^1$, $E_1f^2-E_1f^4$ 和 E_2d 的走滑量分别约为 0.2, 0.7 和 0.4 km。

三垛组沉积时期, 真武断阶带接受 NS 向斜向拉伸, 以伸展作用为主, 同时发生右行走滑作用。计算该时期真武断阶带的平均伸展量约为 1.6 km, 而此时断阶带走向与受力方向之间锐夹角为 65°, 因此其走滑量约为 0.7 km。假设左行走滑位移为正, 则三垛组右行走滑位移为 -0.7 km。

盐城组之后沉积时期, 真武断阶带再次接受 NW 向斜向拉伸, 发生左行走滑-伸展作用, 伸展量为 0.8 km, 同理计算其走滑量约为 0.2 km。图 5c, d 为真武断阶带曹庄地区 830 ms 和 840 ms 相干体等时切片, 该时间域对应了三垛组末期, 经历了后期盐城组 NW 向的一期斜向伸展作用。图中河道沉积体发育明显, 二者之间形态略有变化, 但均被真②-2 断层切割并错开, 发生左行走滑作用。根据河道中间相当点的错动距离, 测算走滑量约 190 m 左右, 与理论计算结果一致性较好。

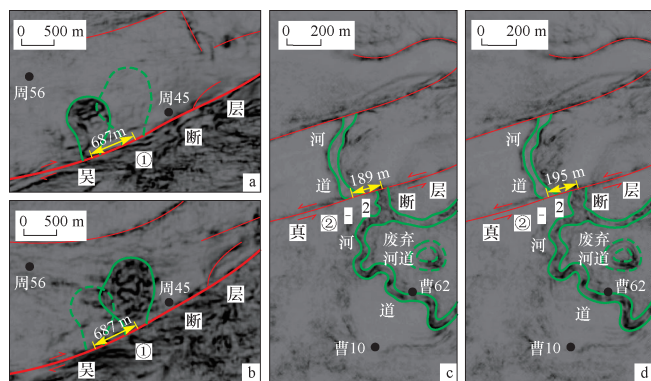


图5 高邮凹陷南部断阶带相干体等时切片的地质解释(位置见图1c)

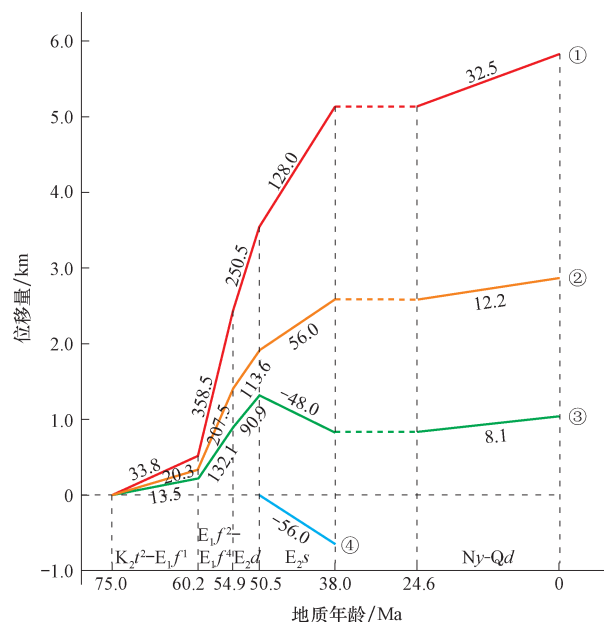
Fig. 5 Geological interpretation of seismic variance in seismic time slices of the south fault terrace in the Gaoyou Sag (the profile location was shown in Fig. 1c)

- a. 吴堡断阶带 1 376 ms; b. 吴堡断阶带 1 446 ms;
c. 真武断阶带 830 ms; d. 真武断阶带 840 ms

结果表明,晚白垩世以来,真武断阶带和吴堡断阶带一直以伸展作用为主,伸展量不断积累增大,并且发生着不同形式的走滑作用,形成了南部断阶带平面带状、剖面箕状的盆地结构,这也是断陷盆地发育的典型盆地结构。吴堡断阶带经历了纯伸展、右行走滑-伸展与纯伸展3期作用,真武断阶带经历了左行走滑-伸展、右行走滑-伸展与左行走滑-伸展3期作用。结合沉积时间可计算出伸展速率与走滑速率。图6表明,断阶带伸展与走滑作用伴随着高邮凹陷的形成演化,并具有初期弱、中期强、晚期弱的特点,其中较强的时期主要指阜宁组、戴南组和三垛组。上述计算的伸展量、走滑量均是针对整个断阶带来说的,而不是某一条断层,但这些应变量可能是该期活动性较强的某一条或几条断层贡献的。同时在计算过程中,忽略了盆地张开过程中断阶带的平面和剖面形态变化。

5 伸展方位与走滑作用对构造样式控制

近年来,国内外关于正向、斜向裂陷作用及其构造样式研究越来越受重视,前人研究成果表明^[19-23],当中间主应力方向与先存边界断层平时(图7a),可产生平面平行式、剖面马尾状的断层组合样式,其主要成因机制为伸展作用,对应正向裂陷作用;当中间主应力与先存边界断层斜交时(图7b),可产生平面斜交式、剖面马尾状的断层组合样式,其主要成因机制为伸展-走滑作用成因^[22-23],对应斜向裂陷作用。漆家福



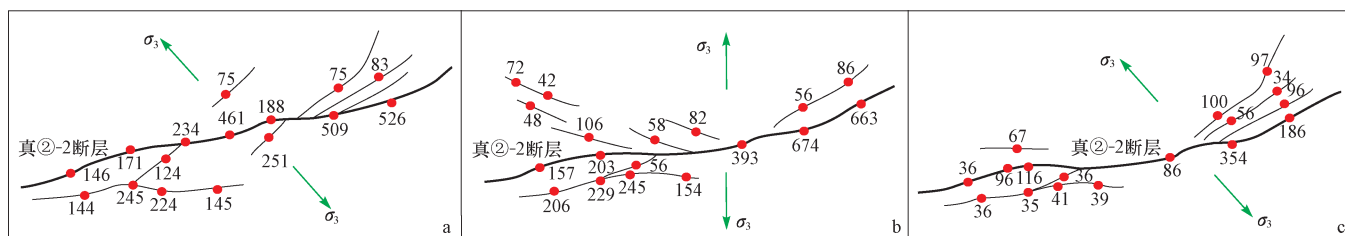


图8 高邮凹陷南部断阶带西部地区次级断层落差(m)

Fig. 8 Secondary fault's throw(m) in the west of the south fault terrace in the Gaoyou Sag

a. 戴南组一段; b. 三垛组一段; c. 盐城组一段

断层斜交,剖面上马尾状或阶梯状断层组合被真②断层分割为两组,认为真武断阶带为伸展-走滑成因,而且很可能发育多期次不同形式的伸展-走滑作用。研究认为,近EW走向次级断层与主断层的锐夹角指示了三垛期的右行走滑-伸展作用,右行右列的3段式真②断层也可证明这一点;近NE走向次级断层与主断层的锐夹角指示了泰州组-戴南组、盐城组-东台组的左行走滑-伸展作用。

以南部断阶带西部为例,该地区断层发育程度高(图1c),其走向主要分为3组,分别为NEE,NE和NW向,本次统计了该地区13条断层不同时期的断层落差,断层活动可分为3期。戴一段时期,在NW向伸展作用下,NEE走向的真②-2断层形成较大落差,同时发育了NE走向的次级断层,斜交于真②-2断层(图8a),形成了第1期平面斜交式、剖面马尾状构造样式。垛一段时期,真②-2断层在NS向伸展作用下继续活动,而NE走向次级断层活动性明显减弱(图8b),形成了另外一组与真②-2断层斜交的NW走向次级断层,即第2期平面斜交式、剖面马尾状构造样式。盐一段时期,伸展方向又变为NW向,NE走向次级断层再次活动,斜交于真②-2断层,而NW走向的次级断层并无断层落差(图8c),即形成了第3期平面斜交式、剖面马尾状构造样式,类似于第1期。因此,当多期次断层活动可叠合形成复杂的断层组合样式。

6 结论

1) 在应力-应变分析和理论推导的基础上,利用平衡剖面法反演所得的伸展率进行横向对比,可明确盆地各时期的优势伸展方位,尽管这种地质剖面反演法是一种老思路,但应用到盆地构造应力场定量分析研究中并不多见,可为成熟探区构造解析提供新的思路。高邮凹陷各时期的优势伸展方位经历了NW向($K_2t^2-E_2d$),NS向(E_2s)和NW向($Ny-Qd$)

的变化过程,首次从定量角度深入认识了高邮凹陷晚白垩世以来的构造应力场方向。不同伸展方向下,南部断阶带内部吴①、吴②、真①、真②断层具有不同的活动特征。

2) 由于吴堡断阶带和真武断阶带走向不同,在 $K_2t^2-E_2d$, E_2s 和 $Ny-Qd$ 时期,吴堡断阶带经历了纯伸展、右行走滑-伸展、纯伸展3期作用,真武断阶带经历了左行走滑-伸展、右行走滑-伸展、左行走滑-伸展3期作用。断阶带不同时期的伸展量、伸展速率、走滑量、走滑速率计算结果表明,伸展与走滑作用主要发生在阜宁组、戴南组和三垛组时期。

3) 多期次、多形式的走滑-伸展作用对南部断阶带构造样式具有控制作用,吴堡断阶带一期右行走滑-伸展作用形成了平面斜交式、剖面马尾状的简单断层组合样式,真武断阶带3期走滑-伸展作用形成了平面网格式、剖面复式马尾状的复杂断层组合样式。

参考文献

- [1] 于建国,韩文功,王金铎. 中国东部断陷盆地中-新生代构造演化:以济阳坳陷为例[M]. 北京:石油工业出版社,2009:35-76.
Yu Jianguo, Han Wengong, Wang Jinduo. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the faulted basins in eastern China: an example from the Jiyangdepression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:35-76.
- [2] 陈发景,赵海玲,陈昭年,等. 中国东部中-新生代伸展盆地构造特征及地球动力学背景[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1996,21(4):356-365.
Chen Fajing, Zhao Hailing, Chen Zhaonian, et al. Structural characteristics and geodynamic setting of Mesozoic and Cenozoic extensional basins in eastern China [J]. Earth Science: Journal of China University of Geoscience, 1996, 21(4): 356-365.
- [3] 王伟峰,陆诗阔,金强. 中国大陆东部盆地构造动力学分析[J]. 石油大学学报:自然科学版,1999,23(4):1-5.
Wang Weifeng, Lu Shikuo, Jing Qiang. Structural dynamics analysis of eastern basin in China [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1999, 23(4): 1-5.
- [4] 钱基. 苏北盆地油气田形成与分布-与渤海湾盆地比较研究[J]. 石油学报,2001,22(3):12-17.

- Qian Ji. Oil and gas fields formation and distribution of Subei basin-research compared to Bohai bay basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2001, 22(3): 12-17.
- [5] 邱海峻, 许志琴, 乔德武. 苏北盆地构造演化研究进展[J]. *地质通报*, 2006, 25(9-10): 1117-1120.
- Qiu H aijun, Xu Zhiqin, Qiao Dewu. Progress in the study of the tectonic evolution of the Subei basin, Jiangsu, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(9-10): 1117-1120.
- [6] 舒良树, 王博, 王良书, 等. 苏北盆地晚白垩世一新近纪原型盆地分析[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(4): 534-543.
- Shu Liangshu, Wang Bo, Wang Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin from late Cretaceous to Neogene[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005(4): 534-543.
- [7] 刘寅, 陈清华, 胡凯, 等. 渤海湾盆地与苏北—南黄海盆地构造特征和成因对比[J]. *大地构造与成矿学*, 2014(1): 38-51.
- Liu Yin, Chen Qinghua, Hu Kai, et al. Comparison of the Bohai bay basin and Subei-south Yellow Sea basin in the structural characteristics and forming mechanism[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014(1): 38-51.
- [8] 王玺, 陈清华, 朱文斌, 等. 苏北盆地高邮凹陷边界断裂带构造特征及成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2013(1): 20-28.
- Wang Xi, Chen Qinghua, Zhu Wenbin, et al. Structural characteristics and origin of boundary fault belts of the Gaoyou sag in the Subei basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013(1): 20-28.
- [9] 朱光, 姜芹芹, 朴学峰, 等. 基底断层在断陷盆地断层系统发育中的作用——以苏北盆地南部高邮凹陷为例[J]. *地质学报*, 2013, 87(4): 441-452.
- Zhu Guang, Jiang Qinqin, Piao Xuefeng, et al. Role of basement faults in faulting system development of a rift basin: an example from the Gaoyou sag in southern Subei basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013(4): 441-452.
- [10] 华伟, 陈廷东, 季红军, 等. 高邮凹陷真武断裂带断层活动及演化规律[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 605-611.
- Hua Wei, Chen Tingdong, Ji Hongjun, et al. Fault activity and evolution of the Zhenwu fault zone in Gaoyou sag[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 605-611.
- [11] 马晓鸣, 戴俊生. 应用落差分析研究高邮凹陷南断阶主控断层[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2007, 22(4): 31-34.
- Ma Xiaoming, Dai Junsheng. Study on the control faults in south fault terrace of Gaoyou sag by fault throw analysis[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2007(4): 31-34.
- [12] 颜丹平, 田崇鲁, 孟令波, 等. 伸展构造盆地的平衡剖面及其构造意义——以松辽盆地南部为例[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2003, 28(3): 275-280.
- Yan Danping, Tian Chonglu, Meng Lingbo, et al. Balanced geological section for extensional tectonic basin and its implication: an example from southern Songliao basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geoscience*, 2003, 28(3): 275-280.
- [13] 李春荣, 张功成, 梁建设, 等. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气
- 气的控制作用[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 195-203.
- Li Chunrong, Zhang Gongcheng, Liang Jianshe, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwan basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33(2): 195-203.
- [14] 童亨茂, 宓荣三, 于天才, 等. 渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用[J]. *地质学报*, 2008, 82(8): 1017-1026.
- Tong Hengmao, Mi Rongsan, Yu Tiancai, et al. The strike-slip tectonics in the western Liaohe depression, Bohai bay basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1017-1026.
- [15] 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义[J]. *石油学报*, 2001, 22(2): 19-25.
- Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Yao Changhua. Strike-slip and pull-apart structure study and its significance to petroleum exploration on Laizhouwan sag, Bohai area[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2001, 22(2): 19-25.
- [16] 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 等. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J]. *地学前缘*, 2009, 16(4): 97-104.
- Tong Hengmao, Nie Jinying, Meng Lingjian, et al. The law of basement pre-existing fabric controlling fault formation and evolution in rift basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 97-104.
- [17] 戴俊生. 构造地质学及大地构造[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 22-55.
- Dai Junsheng. Structural geology and tectonics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 22-55.
- [18] 林承焰, 张宪国. 地震沉积学探讨[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1141-1144.
- Lin Chengyan, Zhang Xianguo. The discussion of seismic sedimentology[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1141-1144.
- [19] Mortimer E, Paton D A, Scholz C A, et al. Orthogonal to oblique rifting: effect of rift basin orientation in the evolution of the North basin, Malawi Rift, East Africa[J]. *Basin Research*, 2007, 19(3): 393-407.
- [20] Mouslopoulou V, Nicol A, Little T A, et al. Displacement transfer between intersecting regional strike-slip and extensional fault systems[J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(1): 100-116.
- [21] Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, et al. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: examples from the rifts of Thailand. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(10): 1803-1829.
- [22] 漆家福, 杨桥. 陆内裂陷盆地构造动力学分析[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 19-26.
- Qi Jiafu, Yang Qiao. Dynamic analysis of continental rifting basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 19-26.
- [23] 赵利, 李理, 张航. 东营凹陷新生代早期断裂系统的运动学特征及动力学机制[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(3): 18-24.
- Zhao Li, Li Li, Zhang Hang. Fault systems kinematic characteristics and dynamic mechanism during early Cenozoic in Dongyingsag[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 38(3): 18-24.