

# 高邮凹陷真武断裂带断层活动及演化规律

华 伟<sup>1</sup> 陈廷东<sup>1</sup> 季红军<sup>1</sup> 李春雷<sup>2</sup> 罗申玥<sup>1</sup>

(1. 中石化江苏油田分公司物探技术研究院, 江苏 南京 210046; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**真武断裂带是高邮凹陷主要含油构造带之一, 圈闭落实是该区油气勘探关键; 断层活动及演化规律研究是建立地震解释模式、提高构造解释精度的前提。通过真武断裂带区域构造背景、构造样式、断层活动速率及平衡剖面等研究, 明确了该区构造特征、断层活动及演化规律, 为该区复杂小断块精细解释及断层组合提供了地质依据, 取得较好的应用效果。

**关键词:**高邮凹陷; 断裂带; 构造样式; 断层活动; 构造演化

**中图分类号:** P542<sup>+</sup>.31      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2012)03-0605-07

陆相伸展盆地一般以半地堑式断陷盆地最为常见。半地堑式断陷盆地是指盆地某一侧边界发育大型正断层(常为铲形), 边界正断层的活动控制着盆地的形成与演化。边界大断层的强烈活动, 往往在其旁侧上盘伴生一系列同向正断层, 形成断阶带。对于半地堑式盆地断阶带形成与演化的理解, 是认识盆地发育与演化规律的重要途径。高邮凹陷为典型的半地堑式盆地发育模式, 受控于南部边界北东东—南西西走向、北倾的真武①断层。该大型边界断层旁侧上盘发育了密集的同向正断层, 构成了一个典型的断阶带, 西部为真武断裂带, 东部为吴堡断裂带。对于该断阶带形成与演化规律的认识, 是理解高邮凹陷发育规律的关键。以往这方面研究程度相对有限, 对其演化规律一直没有系统而深入的认识。本次研究通过对真武断裂带地震剖面的系统解释、断层活动速率分析及一系列平衡剖面工作, 揭示该区构造演化的丰富信息, 系统分析该断裂带的活动特征与演化规律, 为该区小断块精细识别及断层组合提供理论指导和地质依据。

## 1 区域构造背景

高邮凹陷强烈的断陷活动与盆地充填开始于晚

白垩世晚期的仪征运动, 上白垩统上部泰州组与古新统阜宁组构成了盆地下构造层。下构造层发育期, 整个高邮凹陷以广泛发育正断层为特征, 并以北倾为主, 剖面上呈现为阶梯状断层组合, 属于分散断陷型盆地, 类似于宽裂谷盆地(Benes and Davy, 1996)。阜宁组沉积之后的古新世末期, 高邮凹陷发生了一次以抬升为主的盆地反转事件, 即吴堡事件, 造成盆地内早期沉积一定程度的剥蚀。随后盆地再次断陷, 充填了始新统的戴南组与三垛组, 构成了盆地中构造层。中构造层发育期间, 高邮凹陷以真武②断层和汉留断层强烈活动为特征, 其间发育了地堑式的深凹带, 充填了巨厚的戴南组与三垛组, 属于集中断陷型盆地, 类似于窄裂谷盆地。古近纪末三垛事件使得盆地整体抬升, 遭受长期的强烈剥蚀造, 造成高邮凹陷渐新统沉积缺失。新近纪至第四纪期间, 高邮凹陷转变为坳陷式盆地, 披盖式沉积了新近系盐城组与第四系东台组, 其间发生过一次盐城抬升事件<sup>[1-3]</sup>。

## 2 断裂带构造特征

高邮凹陷为一典型的南断北超型半地堑式盆地, 其断陷活动主要受控于南界的真武断裂带。真武断裂带由南侧的真武①断层、北侧的真武②断层及其间的

一系列正断层构成,表现为典型的断阶形式,剖面上呈现为一系列同向正断层构成的阶梯状组合<sup>[3-4]</sup>。

真武断裂带真武①断层总体呈北东东-南西西走向,向北或北北西倾,其东端与吴堡①断层相连,西端中止于柳菱断层,呈波状弯曲,具有大型伸展断层的波瓦状(corugation)特征。剖面上,真武①断层呈现为上陡下缓的铲形,为一典型的半地堑式盆地的控盆边界正断层;浅部真武①断层自西向东由缓变陡,而深部一致较缓。真武②断层是由3条总体北东东向、左阶雁列状北倾正断层组成,自东向西分别为真武②-1断层、真武②-2断层和真武②-3断层。这3条真武②断层在走向上各自也呈现为东西-北东东向过渡的波状弯曲,具有随真武①断层协同弯曲变化的规律。真武②-1与真武②-2断层之间和真武②-2与真武②-3断层之间的断层叠置段构成了两个构造调节带,分别为许庄构造带与方巷构造带。这两个构造调节带西接深凹带,东连断阶带,为西深东浅的断坡带,也是目前真武断裂带已发现的两个重要的富含油气构造带。构造调节带内断层更为发育,走向上主要平行边界上的真武②断层。由

地震剖面上可见,真武②-2与真武②-3断层倾角相近,相互平行;而真武②-1与真武②-2断层叠置段处,前者明显切割后者,反映后者形成较早(图1)。

真武断裂带断阶内部是断层密集发育区。一系列正断层皆向北或北北西倾,属于真武①断层上盘的同向平行正断层。断层走向以北东东-南西西向为主,其次为近东西向,局部存在北北东走向断层(如较大型的纪3断层)。它们的走向也具有随真武①断层的协同变化规律,表明断层发育受真武①断层的控制。真武断裂带西部由于真武①断层较缓,剖面上断阶内部的断层构成梳状组合(图1 G7线剖面);中部出现了双重伸展构造(图1 G24线剖面),真武①断层与真武②-2断层的两套梳状组合叠置,并皆被真武②-1断层所截切;东部较陡的真武①断层使得该处断阶内部断层构成“y”状组合(图1 G41线剖面)。

### 3 断层活动规律

近年来的研究表明,古近纪期间中国东部区域应力场表现为近南北向的拉张,其动力学机制为太

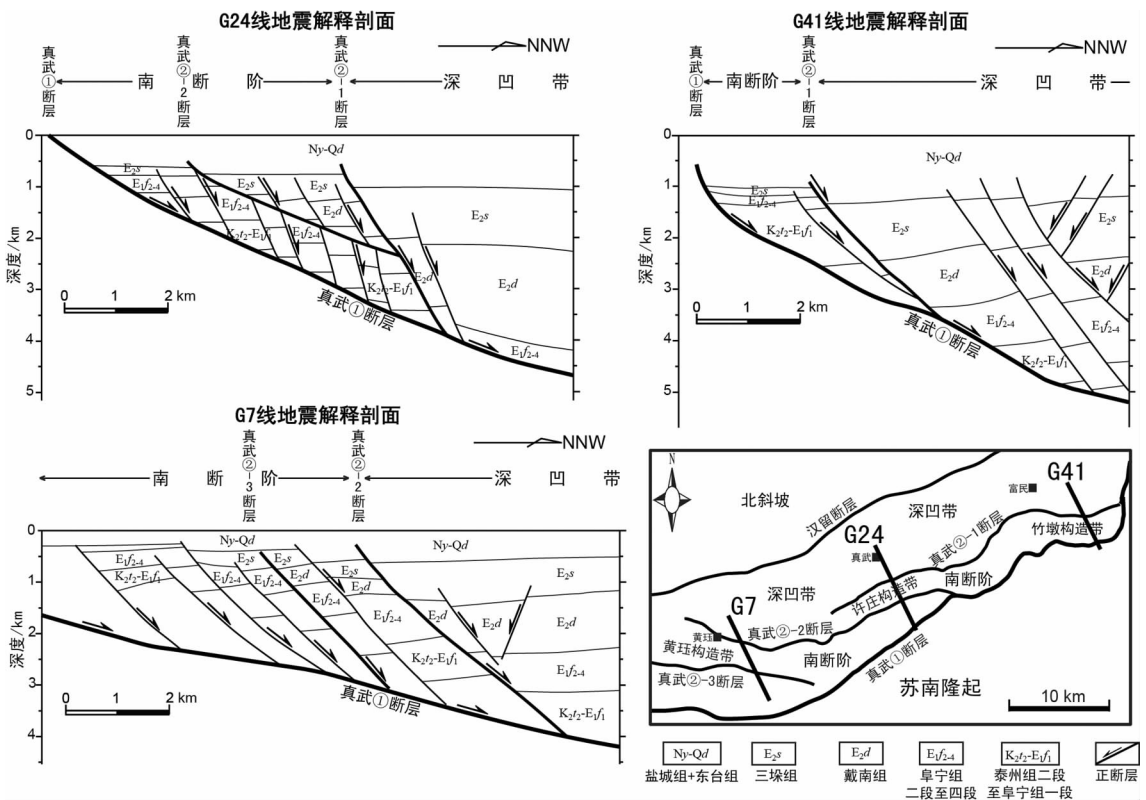


图1 真武断阶带地震解释剖面及平面断层组合样式  
Fig.1 Seismic geological interpretation profile and plane fault combination style of Zhenwu fault zone

平洋板块俯冲作用下的远场弧后扩张<sup>[5-6]</sup>。处于苏鲁造山带南部的苏北盆地,存在着印支期北东东走向、北倾的前陆逆冲断层<sup>[7-8]</sup>。本次研究应用一系列切过真武①、真武②断层的地震剖面,应用实测古落差,进而再依据被错断地层的发育时间,对其各个阶段的活动速率和活动性进行了系统分析(图 2)。

高邮凹陷南界真武①断层,主体上为北东东走向,局部为近东西走向。该边界断层是在北东东向基底逆冲断层基础上发育起来的,其局部的东西向段应是新生断层,属于追踪基底断层而发育的大型盆缘正断层。真武①断层在高邮凹陷晚白垩世晚期至新生代期间持续活动,但其活动强度随时间与空间而发生变化。在空间上,该断层从早到晚总体上均表现为中部活动强、两侧活动较弱的活动特点。在时间上,该断层最强的活动期为阜二至阜四期,至戴南、三垛期活动强度显著减弱;在盐城期整个高邮凹陷属于弱伸

展背景下的拗陷式盆地发育期,真武①断层同样也呈现为弱活动特征。因而,真武①断层以泰一至阜一期的弱伸展活动开始(实际泰一期就开始了活动),至阜二至阜四期达到活动高峰,至戴南、三垛期活动不断减弱,具有由弱至强再减弱的活动变化规律。

真武②断层是由 3 条总体呈北东东向、左阶雁列状北倾正断层组成,自西向东分别为真武②-3 断层、真武②-2 断层和真武②-1 断层。真武②-3 断层从阜二期(真武①断层活动高峰期)开始活动,在阜二至阜四期呈现为两侧活动强、中部活动弱的特点;戴南期断层活动达到高峰期,与阜二至阜四期不同的是,断层活动呈现西强东弱的特点;三垛期断层活动逐渐减弱,至盐城期基本停止活动。真武②-2 断层从戴南期开始活动,并很快进入活动高峰期;三垛期虽仍具有较强的活动性,但其活动强度已明显弱于戴南期;至盐城期该断层逐渐减弱为弱伸展活

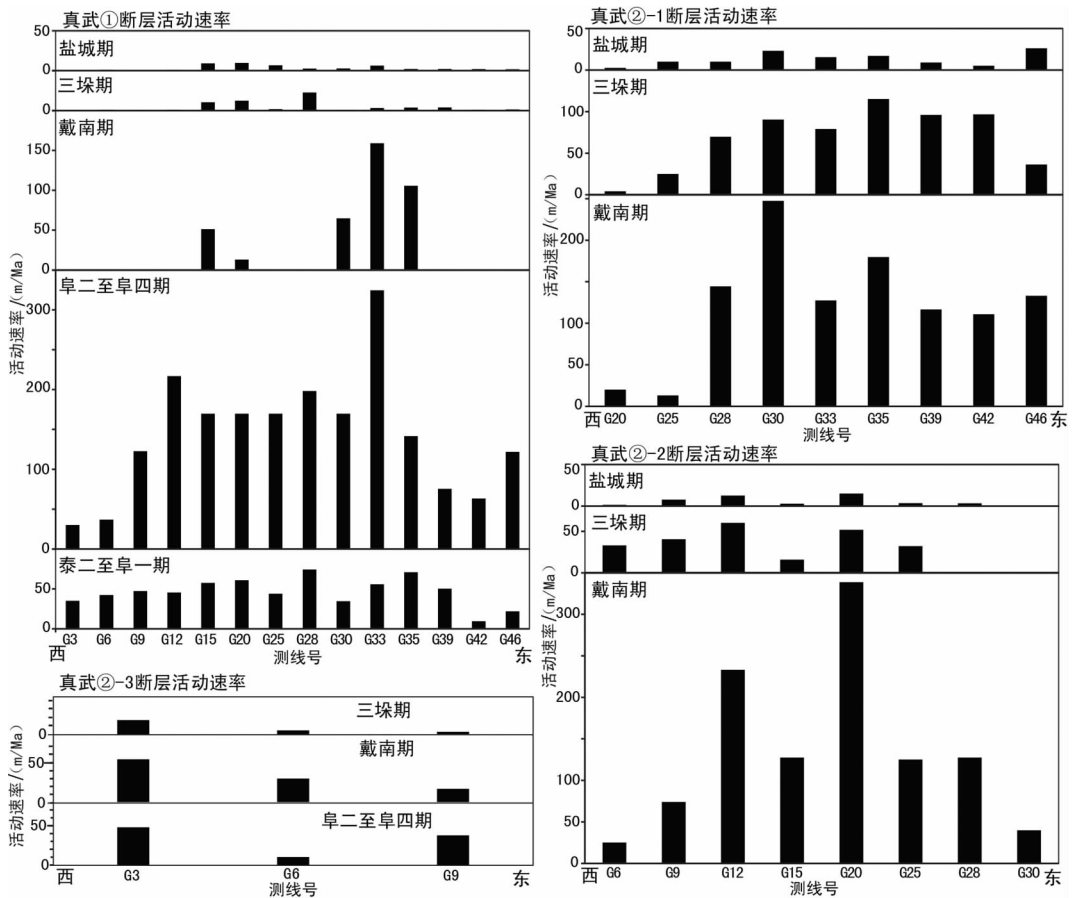


图 2 真武①与真武②断层各阶段活动速率直方图

Fig.2 Activity velocity histograms of Zhenwu-① and Zhenwu-② faults for different periods

动状态;空间上,该断层活动强度在戴南、三垛期总体上具有中部强、两侧弱的特点。断层活动也是从戴南期开始,但稍晚于真武②-2 断层,大致在戴南中期开始活动;断层活动高峰期仍为戴南期,至三垛期减弱,盐城期变为弱活动状况;空间上,该断层的活动强度中部最大,东部次之,西部最弱。

对比 3 条真武②断层的活动性可见,它们的活动峰期均在古近纪戴南期,峰期时以真武②-2 断层活动最强,真武②-1 断层次之,真武②-3 断层最弱。三垛期,3 条真武②断层皆表现活动性减弱,活动强度变为以真武②-1 断层相对较强,真武②-2 断层次之,真武②-3 断层最弱。至盐城期,真武②-3 断层停止活动,真武②-2 和真武②-1 断层表现为弱伸展活动,活动强度以真武②-1 断层相对较强。空间上,真武②-3 与真武②-2 断层及真武②-2 与真武②-1 断层之间的断层叠置段(调节构造带),均出现了这 3 条断层各自活动性减弱的现象。这显然是由于在总伸展量不变的情况下,当盆地下掉由两条真

武②断层共同承担时,各自的活动强度均减弱。

#### 4 断裂带演化规律

对比真武①断层与 3 条真武②断层的活动速率可见(图 3),真武①断层从仪征运动后的泰州期开始活动,随后活动性不断增强,至阜二至阜四期达到了活动高峰。当真武②断层主体开始出现时,真武①断层的活动性明显减弱,两者表现为明显的互为消长关系。这种消长关系表明真武②断层是真武①断层的派生断层。在南北向拉张下,主体北东东走向的真武①断层处于斜向拉张,即拉张方向不垂直于活动的断层走向,从而产生右行分量。该右行分量决定了真武①断层所派生的 3 条真武②断层具有西早东晚的发育规律,真武②-3 断层开始形成于阜二至阜四期,真武②-2 断层形成于戴南早期,而真武②-1 断层开始于戴南中期。此外,3 条真武②断层呈现的左阶雁列状,也符合右行张扭作用下所派生正断层的排列规律,进一步证实了真武②断层是真武①断

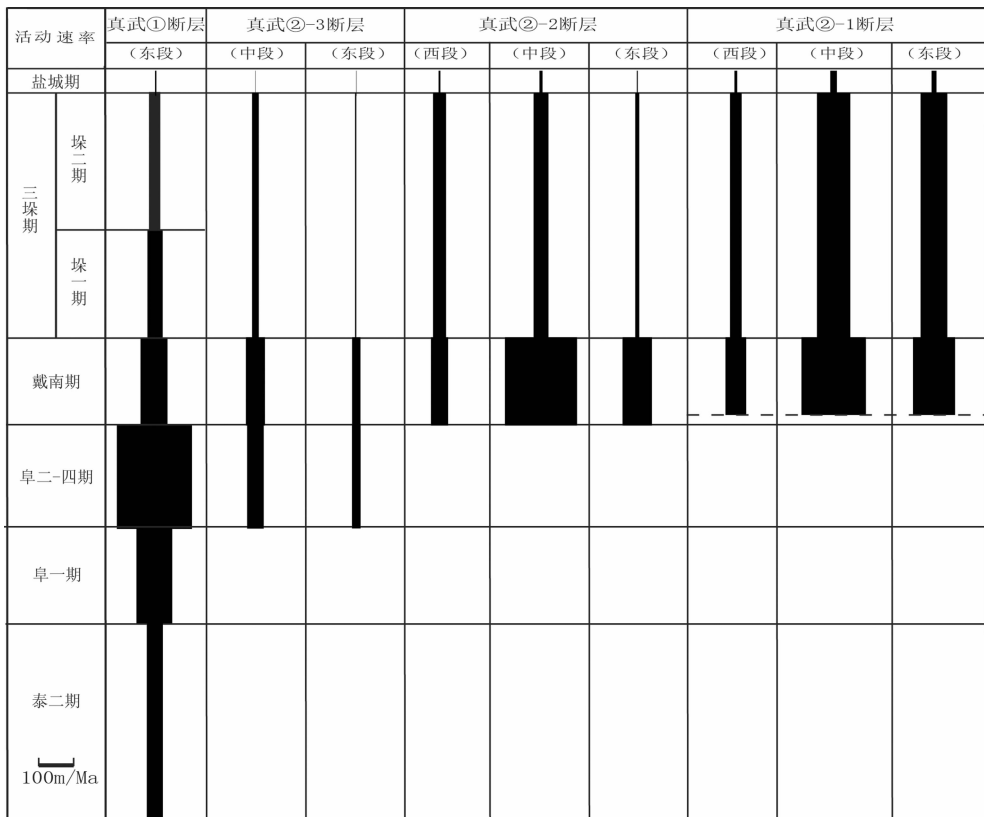


图 3 真武①断层与真武②断层活动速率对比图

Fig.3 Activity velocity comparison between Zhen-① and Zhen-②

层的派生断层。

此外,由平衡剖面分析所获得的真武断阶带分段伸展率结果看(图 4),断阶带的伸展率(或活动强度)在阜二至阜四期最强,与真武①断层的活动规律一致;其峰期活动时具有由西向东变强的特征。图 4 所示的断阶带伸展率实际上包括了 3 条真武②断层的贡献,若不考虑北界上 3 条真武②断层的活动,实际上戴南—三垛期断阶带的伸展率与活动性大为减弱,属于弱活动状况。实际的沉积记录也表明,断阶带内基本没有接受戴南组沉积,并且阜宁组上部在戴南期还部分遭受了剥蚀,这也表明断阶带在真武②断层活动的峰期(戴南期),是处于上升盘的整体抬升状况,其内部并没有强烈的正断层活动。而三垛期断阶带开始接受较薄的沉积,但内部仍处于较弱的活动状况。

对断阶带断层活动性的系统分析表明,真武①断层是泰州—阜宁期高邮凹陷南界分离正断层(break-away fault)<sup>[9]</sup>,其承担了大量的盆地下掉;至戴南—三垛期新生的真武②断层成为接替的分离正断层,承担着高邮凹陷南界上的主要盆地下掉,相应真武①断层的活动性明显减弱,同时伴随着真武②断层南侧断阶带的活动性减弱。正是因为戴南—三垛期真武②断层成为接替的分离断层而强烈活动,北部又同时发育了南倾的汉留断层强烈活动,从而控制形成了高邮凹陷地堑式深凹带。

泰州—阜宁期,高邮凹陷主要受控于真武①断层活动,该断层上盘分散发育了一系列北倾为主要的同向正断层,为一典型的半地堑式盆地;期间仅局部发育了真武②-3 断层西段和汉留断层西段。相应的,泰州—阜宁期的真武断阶带活动也直接受控于真武①断层,在真武①断层的上盘发育了密集的同向阶梯状正断层,形成断阶带。至戴南—三垛期,由真武①断层所派生的真武②断层成为高邮凹陷南界上的接替分离断层,真武②断层与汉留断层的活动共同主导着高邮凹陷的发育,强断陷集中在沉凹带,相当于出现了垮塌地堑,转变为集中断陷型盆地。这期间的真武断阶带内部正断层(不包括真武②断层)与真武①断层活动性显著减弱,整体上成为真武②断层的上升盘而发生抬升,断层主要活动已让位于北界上的 3 条真武②断层(图 5)。随后至盐城期,断阶带与整个高邮凹陷一样转变为弱伸展背景下的拗陷式盆地。

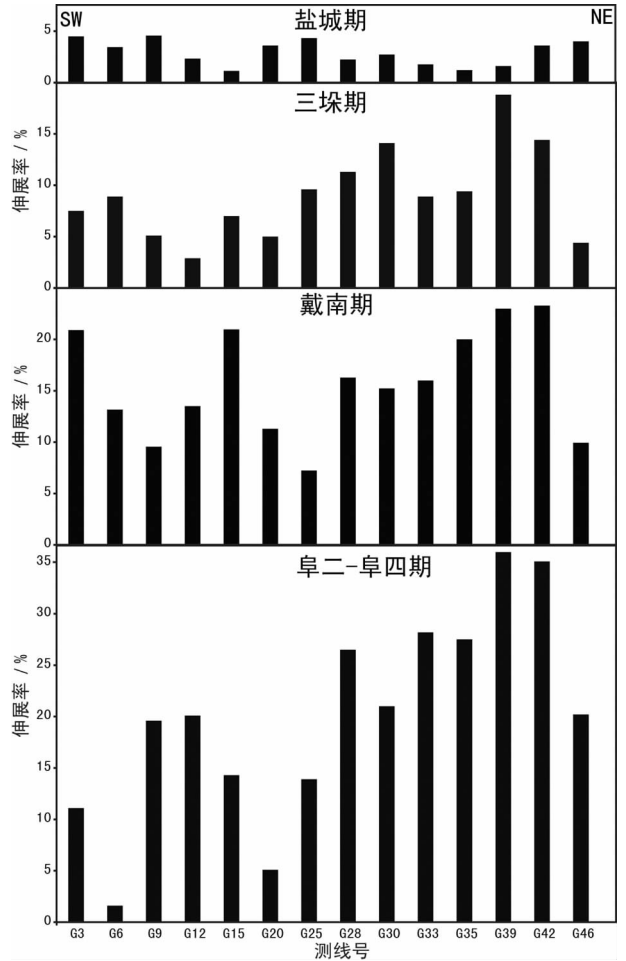


图 4 真武断阶带伸展率直方图(依据平衡剖面分析结果)  
Fig.4 Extension rate histograms of Zhenwu fault step zone (based on cross-section balance analysis)

## 5 结论

(1)真武①断层是控制半地堑式高邮凹陷的大型铲状边界断层,在整个高邮凹陷发育期持续活动。该断层活动开始于晚白垩世晚期仪征运动之后的泰州期,至阜二至阜四期达到活动高峰期,在戴南—三垛期活动显著减弱,各阶段都呈现为中部活动强、两侧变弱的特点。

(2)真武②-3 断层活动开始于阜二至阜四期,真武②-2 断层开始于戴南早期,而真武②-1 断层在戴南中期才开始发育,总体上具有西早东晚、向东扩展发育的规律。3 条真武②断层的活动峰期都出现在戴南期,在三垛期活动逐渐减弱。

(3)3 条真武②断层是真武①断层强烈活动的

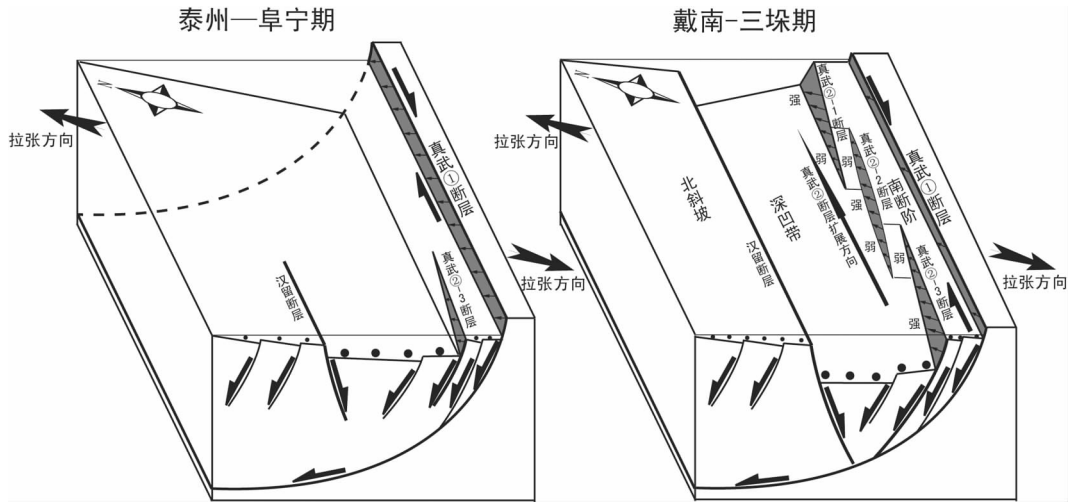


图 5 高邮凹陷南部断阶带演化模式图

Fig.5 Evolution model of southern fault step zone in Gaoyou sag

派生断层，其左阶雁列状是真武①断层在斜向拉张中右行分量的结果。戴南期真武②断层的集中出现并强烈活动，成为接替真武①断层新的盆缘分离断层，使得其南侧的真武断阶带与真武①断层在戴南—三垛期活动大为减弱。

(4)真武断阶带总体上表现为一系列同向阶梯状正断层的活动。在泰州—阜宁期主要受控于南界的真武①断层活动，阜二至阜四期同样是断阶带活动的高峰期。在戴南—三垛期，随着 3 条真武②断层的强烈活动，其南侧的断阶带整体转变为上升盘的抬升，活动性大为减弱。真武②断层的强烈活动，与北部南倾的汉留断层共同控制形成了南断阶北部的深凹带，使得高邮凹陷由分散断陷型转变为集中断陷型盆地。

#### 参考文献 (References):

- [1] Benes V, Davy P. Modes of continental lithospheric extension: experimental verification of strain localization processes [J]. *Tectonophysics*, 1996, 254:69-87.
- [2] 柯光明, 郑荣才, 石和. 苏北盆地古近纪构造-层序岩相古地理特征与演化[J]. *中国地质*, 2006, 33(6):1305-1311.  
Ke Guangming, Zheng Rongcai, Shi He. Lithofacies and paleogeography of Paleogene tectonic sequences in the Subei basin and their evolution[J]. *Geology in China*, 2006, 33(6):1305-1311 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘玉瑞, 刘启东, 杨小兰. 苏北盆地走滑断层特征与油气聚集关系[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(3):279-293.  
Liu Yurui, Liu Qidong, Yang Xiaolan. Relation between features of

strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in Subei basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(3):279-293 (in Chinese with English abstract).

- [4] 陈安定. 苏北箕状断陷盆地形成的动力学机制 [J]. *高校地质学报*, 2001, 7(4):28-33.  
Chen An Ding. Dynamic mechanism of formation of dustpan subsidence, Northern Jiangsu [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(4):28-33(in Chinese with English abstract).
- [5] 葛肖虹, 马文璞, 刘俊来, 等. 对中国大陆构造格架的讨论[J]. *中国地质*, 2009, 36(5):949-965.  
Ge Xiaohong, Ma Wenpu, Liu Junlai, et al. A discussion on the tectonic framework of Chinese mainland [J]. *Geology in China*, 2009, 36(5):949-965(in Chinese with English abstract).
- [6] 徐纪人, 赵志新, 等. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征[J]. *中国地质*, 2006, 33(4):782-792.  
Xu Jiren, Zhao Zhixin, et al. Regional characteristics of the lithospheric stress field and tectonic motions in China and its adjacent areas [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (4):782-792 (in Chinese with English abstract).
- [7] 侯明金, Jacques Mercier, Pierre Vergely, 等. 郯庐断裂带的两大发展阶段——广义的逆冲推覆断裂带和狭义的水平断裂带 [J]. *中国地质*, 2006, 33(6):1267-1275.  
Hou Mingjin, Jacques Mercier, Pierre Vergely, et al. Two development stages of the Tanlu fault zone: the stages of the overthrust fault zone sensu lato and the wrench fault zone sensu stricto [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (6):1267-1275 (in Chinese with English abstract).
- [8] 朱光, 朴学峰, 张力, 等. 合肥盆地伸展方向的演变及其动力学机制[J]. *地质论评*, 2011, 57(2):153-166.  
Zhu Guang, Piao Xuefeng, Zhang Li, et al. Evolution of extensional direction in the Hefei basin and its dynamic mechanism [J].

- Geological Review, 2011, 57(2):153–166(in Chinese with English abstract).
- [9] Morley C K, Haranya, 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[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26:1803–1829.

## Fault activity and evolution of the Zhenwu fault zone in Gaoyou sag

HUA Wei<sup>1</sup>, CHEN Ting-dong<sup>1</sup>, JI Hong-jun<sup>1</sup>, LI Chun-lei<sup>2</sup>, LUO Shen-yue<sup>1</sup>

(1. Geophysical Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Nanjing 210046, Jiangsu, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Zhenwu fault zone is the main oil-bearing structural belt in Gaoyou sag, where the trap defining is the key factor for oil exploration. The research on fault activity and evolution is the premise for the building of the interpretation model and the improvement of the interpretation accuracy. Based on researches on the regional tectonic background, structural style, activity velocities and cross-section balance, the authors ascertained the tectonic characteristics, fault activity and evolution of Zhenwu fault zone, which yielded good application effects, thus providing the geological basis for accurate structure interpretation and fault combination.

**Key words:** Gaoyou sag; fault zone; structural style; fault activity; tectonic evolution

---

**About the first author:** HUA Wei, male, born in 1971, senior engineer, mainly engages in comprehensive study and management of oil and gas exploration; E-mail: huaw.jsyt@sinopec.com.