高邮凹陷真武断裂构造演化特征

吴 林1,束宁凯1,陈清华1,肖 斐2

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2.胜利油田森诺胜利工程有限公司,山东东营 257000)

摘要:真武断裂是苏北盆地高邮凹陷重要的基底断裂,研究其演化规律对认识高邮凹陷的构造演化特征至关重 要。在断裂构造解释的基础上,根据区域应力场状态将真武断裂的构造演化分为挤压、反转和伸展共3个主要时 期。挤压期,真武断裂为印支期板块碰撞所形成的逆冲断裂;反转期,真武断裂继承性演化为真①断层和吴①断 层,二者的构造演化特征存在差异;伸展期,受真①断层和吴①断层影响,形成真②断层和吴②断层等一系列次级 断层,共同组成了真武断裂带和吴堡断裂带。高邮凹陷真武断裂伸展期砂箱模拟实验结果表明,区域拉张应力场 和作为基底断裂的真武断裂是高邮凹陷南部边界断裂带构造演化的2个重要因素。

关键词:构造演化 基底断裂 砂箱模拟实验 真武断裂 高邮凹陷

中图分类号:TE111.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)01-0037-05

Tectonic evolution of Zhenwu fault in Gaoyou sag

Wu Lin¹, Shu Ningkai¹, Chen Qinghua¹, Xiao Fei²

(1.School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China;
2.Sennuo Shengli Engineering Co., Ltd., Shengli Oilfield, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: Zhenwu fault is an important basement fault in Gaoyou sag, which is crucial to understanding the structural characteristics of Gaoyou sag. Based on the fault interpretation and the regional stress field, the evolution of Zhenwu fault could be divided into three stages: compression stage, inversion stage and extension stage. During the compression stage, Zhenwu fault was a thrust fault formed by the collision of the Indosinian plate; during the inversion stage, Zhenwu fault evolved inherently into Zhen① fault and Wu① fault which differ from each other; during the extension stage, a series of secondary faults formed under the influence of Zhen① fault and Wu① fault, such us Zhen② fault and Wu② fault, which resulted in the formation of Zhenwu fault zones and Wubao fault zones. The results of sandbox experiment modeling Zhenwu fault during the extension stage show that Zhenwu fault, as the basement fault, and regional stress field are the most important two factors that control the evolution of southern boundary fault zones in Gaoyou sag.

Key words: tectonic evolution; basement fault; sandbox modeling experiment; Zhenwu fault; Gaoyou sag

高邮凹陷南部断裂带是苏北盆地油气富集程 度最高的地区,针对其构造演化特征的研究成果较 为丰富^[1-8]。前人研究认为,真①断层作为高邮凹陷 南部控凹边界断层,其早期为印支期基底逆冲断 层^[2-3],晚期由于区域应力场发生改变反转形成伸展 性质的正断层;真①断层为基底断裂的继承性发 育,与深部的逆冲断层相接。同样为控凹边界断层 的吴①断层,目前仅有少数学者认为其与真①断层 同样为早期基底逆冲断层^[3]。由于对该断裂构造演 化规律认识不清,导致对吴堡断裂带性质没有统一的定论,如右行走滑性质^[3-4]、早期左行走滑晚期右行走滑性质^[2]以及斜滑性质^[5-6]等。近年来,关于裂陷盆地基底断裂的研究越来越受到重视^[5-12],中外大量的研究成果和砂箱模拟实验结果证实^[9-12],基底断裂对盆地盖层的变形具有重要影响,控制着裂陷盆地的结构和构造演化^[8-12],甚至控制其沉积规律^[13]和油气分布特征^[14-15]。真武断裂是高邮凹陷重要的基底断裂,但对其与南部真武断裂带和吴堡断

收稿日期:2014-11-01。

作者简介:吴林(1987一),男,安徽六安人,在读博士研究生,从事油气区构造解析研究。联系电话:(0532)86981250,E-mail:19534644@so-hu.com。

基金项目:国家科技重大专项"煤层气开发技术经济评价"(2009ZX05042-001)。

裂带的关系尚不明确,且对于基底断裂与盖层断裂 之间的构造演化模式也鲜有研究。为此,笔者利用 地震、地质等资料对真武断裂进行解释,并根据区 域应力场状态对真武断裂的构造演化特征进行分 期研究,以期为高邮凹陷油气地质研究提供指导。

1 区域地质概况

高邮凹陷是在晚白垩世仪征运动的基础上发 展起来的中一新生代叠合盆地,为南断北超、南陡 北缓的半地堑式裂陷盆地^[2];其东西长约为100 km, 南北宽约为30 km, 面积约为2 670 km²。高邮凹陷 内部主要发育真武断裂带、吴堡断裂带和汉留断裂 带等,其断层主要呈北东东、东西和北北东向展 布。真①断层和吴①断层为一级控凹边界断层,真 ②断层和吴②断层为控制深凹带发育的二级断层, 其中真②断层自东向西可进一步分为真②-1、真 ②-2和真②-3断层。在泰州组沉积末期,真①断层 和吴①断层开始活动。阜四段沉积时期,断层活动 达到高峰,同时真②-3断层和吴②断层开始活动, 而真2-1断层和真2-2断层则发育于戴南组沉积 早期。始新世,真②断层、汉留断层和吴②断层强 烈活动,在高邮凹陷形成了南部断阶带、中部深凹 带和北部斜坡带3个构造单元。三垛组沉积末期, 研究区各断层的活动速率明显减小,至盐城组沉积 时期停止活动。

勘探实践证实,穿过高邮凹陷的NG-13,G44和G78共3条二维地震剖面对明确其区域地质结构具有重要作用^[16-17]。这3条地震剖面分别位于高邮凹陷的西部、中部和东部(图1),均为北北西走向,由南至北主要涉及溱潼凹陷、通扬隆起、高邮凹陷、金湖凹陷和建湖隆起等多个构造单元。NG-13,G44和G78地震剖面显示,研究区南部边界断裂均延伸至深部古生界,表现为铲式断裂特征,但倾角略有差



图 1 高邮凹陷构造单元及南部断裂系统划分 Fig.1 Tectonic units and southern fault system of Gaoyou sag

异,分别为45°~60°,35°~50°和30°~45°,由西至 东断裂倾角呈减小趋势。

在区域构造及基底断裂解释过程中发现,高邮 凹陷南部发育1条磁性基底界面突变带和印支运动 构造界面突变带,其西段和东段的走向分别为北东 东和北东向,是研究区重要的地质界面^[17]。重力和 磁力异常数据也显示在高邮市与扬州市之间发育1 条北东走向的异常带^[17],均反映出大规模基底断裂 的构造形迹。同时为了提高地层和构造解释的准 确度,须结合钻、测井及地质分层数据作为控制点 进行标定;例如根据获2井的分层数据,准确地标定 了G78地震剖面古生界与中生界的分界线。

2 真武断裂构造演化特征

2.1 挤压期

真武断裂是由区域应力场挤压所形成,其活动 特征与力学机制密切相关。三叠纪,扬子板块强烈 俯冲于华北板块之下,古地磁数据显示,扬子板块 与华北板块最南端(苏鲁与大别的分界点)先接触 并碰撞^[18]。下扬子地区以苏鲁与大别的分界点为 顶点、以南西—北东走向的北侧板块边界为轴,发 生逆时针旋转,自南西至北东方向与华北板块发生 剪刀式拼贴碰撞。下扬子地区北部南西段具有碰 撞较早、持续时间长、挤压作用力大以及变形程度 高的特点,而北东段则具有碰撞较晚、持续时间短、 挤压作用力小以及变形程度低的特点。

印支运动晚期,变形波及扬子板块内部,其构 造变形程度由苏鲁造山带和郯庐断裂带向东、南方 向逐渐传递并减弱,地层也由西北向东南方向越来 越新^[19]。下扬子地区北部形成苏北冲断区,发育金 湖一高邮推覆带等多个推覆构造带^[20]。真武断裂 是金湖—高邮推覆带南部的边界逆冲断层,为高邮 凹陷和金湖凹陷的重要基底断裂(图2)。地震资料



解释结果表明,真武断裂在平面上呈弯曲线性、剖面上呈铲式发育,延伸长度大于100 km(即G78与NG-13 地震剖面之间的垂直距离)。其西段走向北东东,倾向北北西,倾角较大;东段走向北东,倾向北西,倾角较小。由于构造变形程度西强东弱,致使真武断裂具有西段陡、东段缓的特点。

2.2 反转期

早白垩世晚期,西太平洋区伊泽纳崎板块持续 向北北西方向俯冲,下扬子地区处于弧后扩张环 境,岩石圈减薄,发生北北西一南南东向区域性伸 展作用,从而取代了早期的挤压应力场[5]。苏北冲 断区发育的一系列推覆构造带停止向南挤压逆冲, 真武断裂受拉张应力作用,断层和地层发生反转 (类似于渤海湾盆地)^[21],习称为黄桥转换事件。苏 北地区向南东方向翘起、倾向北西的古生界遭受剥 蚀,残余古生界沿真武断裂旋转回滑,形成高邮凹 陷雏形(图3),而苏北地区的11个箕状断陷也在该 时期形成。分析真武断裂带和吴堡断裂带深部和 上升盘的地层及构造特征认为,在反转期,真武断 裂继承性演化为真①断层和吴①断层,其主要原因 为逆冲推覆带在自身重力作用下沿原逆冲断裂回 滑而形成^[22]。事实上,苏北地区印支期挤压作用与 燕山期伸展作用的受力方向一致,但其受力大小不 同;因此,在后期拉张应力作用下,真武断裂处于构 造破裂的优势带而优先活动,受其控制的次级逆冲 断层活动顺序次之。后期发育的真①断层和吴① 断层继承真武断裂及其构造形态,二者在反转期为



同一断层。其中,真①断层位于真武断裂西段,为 北东东走向,北北西倾向;吴①断层位于真武断裂 东段,为北东走向,北西倾向。相对于吴①断层来 说,真①断层的走向与区域拉伸方向(北北西向)垂 直而处于优势伸展方向,且真①断层的倾角大于吴 ①断层,因此在反转期真①断层的活动性大于吴① 断层。

2.3 伸展期

早白垩世一古新世,在经历了短暂的反转期 后,高邮凹陷形成并受到北北西向拉张应力作用。 始新世—渐新世,太平洋板块的俯冲方向由北北西 向转变为北西西向,同时印度板块与欧亚板块的碰 撞使中国大陆向东挤出,二者共同作用使中国东部 产生近东西向的区域挤压应力场,因而在北北东走 向的郯庐断裂带发生右行走滑运动,高邮凹陷受到 近东西向的区域挤压及郯庐断裂右行走滑的双重 影响^[5],二者派生出近南北向的拉张应力场。在北 北西向和南北向拉张应力作用下,高邮凹陷进入裂 陷盆地发育阶段。为了明确伸展期高邮凹陷的构 造演化特征,利用砂箱模拟实验模拟晚白垩世—渐 新世真武断裂的构造演化过程。

2.3.1 实验模型及结果

砂箱模拟实验采用的砂箱模型为30 cm×20 cm,选择一定湿度的金刚砂、石英砂及混合砂。由于基底断裂对于构造格局的演化和形成具有重要的控制作用,因此在砂箱底层利用塑料薄膜模拟出真武断裂作为基底断裂。设置受力环境对实验结果至关重要,考虑研究区的区域应力场背景,分4个阶段进行砂箱模拟实验。其中,第1和第2阶段分别对应晚白垩世和古新世,第3和第4阶段分别对应始新世和渐新世。

第1阶段 在模型边界施加北北西一南南东向 拉张应力。真武断裂开始活动,局部曲折化,根据 产状可分为北东东走向的真①断层和北东走向的 吴①断层。其中,真①断层的走向与应力场方向垂 直,活动性较大;吴①断层的走向与应力场方向斜 交,活动性较小(图4a)。

第2阶段 在模型边界继续施加北北西一南南 东向拉张应力。真①断层和吴①断层持续活动,在 曲折边界处产生次级断裂。真①断层北部开始出 现3条雁列式组合的次级断层,且走向与真①断层 平行,同时在吴①断层转折处发育北东走向的次级 断层(图4b)。

第3阶段 在模型边界施加南北向拉张应力。 真①断层和吴①断层活动性减小,但次级断层的规



Fig.4 Sandbox modeling experiment of the extensional Zhenwu fault in Gaoyou sag

模和数量增大。其中,真①断层北部3条雁列式组 合的次级断层规模增大,局部重叠组成真②断层, 自东至西依次命名为真②-1断层、真②-2断层和真 ②-3断层,且这3条次级断层的平面形态由于拉张 应力方向的转变而发生弧形弯曲。吴①断层转折 处北东走向次级断层的规模增大成为吴②断层。 此外,在模型北部边界发育近东西向的汉留断层 (图4c)。

第4阶段 在模型边界继续施加南北向拉张应 力。真①断层和吴①断层基本停止活动,但次级断 层的规模和数量继续增大。真①断层与真②断层 之间发育的次级断层增多,真②断层末端变为北东 走向,其北侧次级断层与真②断层斜交或平行;在 真②-1、真②-2和真②-3断层之间产生近南北向的 变换断层。吴①断层与吴②断层之间发育的次级 断层亦增多,二者之间产生走滑位移。汉留断层的 规模继续增大,其延伸距离也相应加大,发育一系 列与其斜交的次级断层(图4d)。

2.3.2 基于砂箱模拟实验的构造演化认识

从砂箱模拟实验结果(图4)可以看出,真①断 层与真②断层之间发育的次级断层以平行式组合 为主,也有斜交式组合,走向为近北东东向或北东 向;吴堡断裂带发育的断层以斜交式组合为主,走 向为近东西向或北东向。断层剖面形态均为铲式, 局部复杂化为坡坪式。其中,真武断裂带的断层组 合表现为阶梯状和Y型;吴堡断裂带的断层组合较 为复杂,表现为阶梯状和Y型组合,以及莲花状和帚 状组合等^[5]。

基于砂箱模拟实验,归纳出高邮凹陷真武断裂 伸展期构造演化特征的6点认识:①真武断裂和区 域拉张应力场是高邮凹陷构造演化的2个重要因 素。②直武断裂作为基底断裂,对高邮凹陷南部边 界断裂带的发育演化具有重要的控制作用,后期断 裂的发育均为继承真武断裂或受其影响所形成, 月 级别低于真武断裂。③真武断裂在拉张初期分段 演化为真①断层和吴①断层,继而出现真②断层和 吴②断层等一系列次级断层,最终形成真武断裂带 和吴堡断裂带,研究区北部受其影响形成汉留断裂 带,共同组成高邮凹陷的主要断裂体系。④在拉张 应力作用早期,次级断裂的形成主要受主干断裂控 制,其走向平行或斜交于主干断裂;拉张应力作用 晚期,次级断裂的演化主要受区域应力场控制,其 走向逐渐垂直于区域拉伸方向。研究区早期断裂 主要为北东东和北东走向,后期断裂主要为东西走 向(图5)。⑤距离主干断裂越近,次级断裂受其控 制作用越强,反之则越弱。⑥吴堡断裂带的成因为 斜滑作用[5-6],当区域拉张应力场方向与主干断裂走 向斜交时,二者之间的角度越小,越易于产生走滑 位移,发育走滑断层。



3 结论

通过地震资料解释和区域应力场状态分析,认 为真武断裂是高邮凹陷重要的基底断裂,其构造演 化主要分为挤压期、反转期和伸展期3个阶段,且具 有不同的特征。挤压期,真武断裂形成于印支期板 块碰撞,是金湖一高邮推覆带的前锋逆冲断裂;反 转期,真武断裂继承性演化为西段的真①断层和东 段的吴①断层;伸展期,受真①断层和吴①断层影 响,形成真②断层和吴②断层等一系列次级断层, 组成了真武断裂带、吴堡断裂带和汉留断裂带等主 要断裂体系。分析真武断裂伸展期砂箱模拟实验 结果认为,区域拉张应力场和真武断裂是高邮凹陷 南部边界断裂带构造演化的2个重要因素。因此, 在研究区构造解析中须重视基底断裂的构造演化 及其对盆地的控制作用。

参考文献:

 [1] 刘玉瑞.苏北盆地油藏类型与成因机制探讨[J].油气地质与采 收率,2011,18(4):6-9.

Liu Yurui.Feature and genesis of reservoir fluid distribution in Subei epigenetic-faulted basin[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4):6–9.

- [2] 舒良树,王博,王良书,等.苏北盆地晚白垩世—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,2005,11(4):534-543.
- [3] 邱旭明.苏北盆地真武吴堡断裂带的构造样式及圈闭类型[J]. 石油天然气学报,2005,27(3):278-280.
 Qiu Xuming.Structural style and trap type of Zhenwu- Wubao fault zone in Subei basin[J].Journal of Oil and Gas Technology, 2005,27(3):278-280.
- [4] 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):279-283.
 Liu Yurui, Liu Qidong, Yang Xiaolan.Relation between features of strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in Subei basin
 [J].Oil and Gas Geology,2004,25(3):279-283.
- [5] 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,2013,37(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, 37(1):20-28.
- [6] 白鹏,刘岩,杨晓文,等.吴堡断裂带构造特征与成因[J].特种 油气藏,2012,19(4):14-17.

Bai Peng, Liu Yan, Yang Xiaowen, et al.Tectonic style and genesis of Wubao fault zone [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(4):14–17.

- [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,2014,38(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,2014,38(1):38-51.
- [8] 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, 87(4): 441-452.

- [9] Morley C K.How successful are analogue models in addressing the influence of pre-existing fabrics on rift structure? [J].Journal of Structural Geology, 1999, 21(8):1 267-1 274.
- [10] 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 [J].Journal of Structural Geology, 2004, 26 (10) : 1 803-1 829.
- [11] 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.

[12] 童亨茂,孟令箭,蔡东升,等.裂陷盆地断层的形成和演化—— 目标砂箱模拟实验与认识[J].地质学报,2009,83(6):759-774.

Tong Hengmao, Meng Lingjian, Cai Dongsheng, et al.Fault formation and evolution in rift basins: Sandbox modeling and cognition [J].Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6):759–774.

- [13] 刘金华,廖光明,奥立德,等高邮凹陷真武油田转换式沉积演 化模式[J].油气地质与采收率,2014,21(1):6-9.
 Liu Jinhua, Liao Guangming, Ao Lide, et al.Study on transformation style of sedimentary evolution model in Zhenwu oilfield, Gaoyou Sag [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(1):6-9.
- [14] 吴林,陈清华,肖斐,等.井斜轨迹对储层构型及其油水分布研究的影响[J].油气地质与采收率,2014,21(2):75-79.
 Wu Lin, Chen Qinghua, Xiao Fei, et al.Influence of well deviation trajectory on reservoir architecture and its distribution of oil and water [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21 (2):75-79.
- [15] 杨贵丽.青东凹陷走滑构造对油气成藏的控制作用[J].油气地 质与采收率,2014,21(5):18-21.

Yang Guili.The strike slip structure and its influences on the formation of petroleum reservoir in Qingdong Sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5):18–21.

- [16] 金之钧,刘光祥,方成名,等.下扬子区海相油气勘探选区评价 研究[J].石油实验地质,2013,35(5):473-479.
 Jin Zhijun, Liu Guangxiang, Fang Chengming, et al.Evaluation of selected areas for petroleum exploration in marine strata of lower Yangtze region [J].Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35 (5):473-479.
- [17] 曾萍.G78区域大剖面综合解释与苏北盆地构造特征[J].石油 天然气学报,2007,29(3):82-86.
 Zeng Ping.Integrated interpretation of G78 large cross-section and structural features of Subei basin[J].Journal of Oil and Gas Technology,2007,29(3):82-86.
- [18] 朱日祥,杨振宇,马醒华,等.中国主要地块显生宙古地磁视极 移曲线与地块运动[J].中国科学:D辑地球科学,1998,28 (S1):1-16.

(下转第62页)