

下扬子区新生代断陷盆地的断裂构造特征与活动规律

徐 曦^{1,2,3}, 孙连浦^{4*}, 肖梦楚¹, 李 筱¹, 朱晓颖¹, 高顺莉⁵

1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京100083; 2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;
3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058; 4. 华夏吉泰(北京)科技有限公司, 北京 100015;
5. 中海石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200030

摘要: 下扬子海陆域新生代沉积盆地是中国东部主要含油气盆地之一, 成盆断裂特征与活动规律是该区油气勘探研究的基础。文章基于高覆盖率的地震勘探线, 以构造断裂解析为突破口, 探究盆地断裂的变形特征与活动规律。依据断裂组合样式与构造活动特征, 断裂可分为伸展、走滑、挤压一反转三种样式, 构造活动分为伸展断裂与伸展—走滑断裂两种构造体系。成盆断裂显著受控于郯庐断裂右行走滑变形, 主要与郯庐断裂带不同构造走向的区段位置和与郯庐断裂带的距离这两个因素或变量有关, 盆地断裂呈现了“东西有别, 中部不同”的特点。下扬子区新生代多变应力场, 控制着作为油气运移通道断裂的开启状态, 是油气资源评价的重要依据。

关键词: 下扬子; 苏北—南黄海盆地; 断裂构造; 断裂活动

中图分类号: P618.130.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7493 (2018) 05-0723-11

Structural Characteristics and Activity Rules of Faults in the Cenozoic Faulted-Basins in the Lower Yangtze Region

XU Xi^{1,2,3}, SUN Lianpu^{4*}, XIAO Mengchu¹, LI Xiao¹, ZHU Xiaoying¹, GAO Shunli⁵

1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
4. Sino Getech (Beijing) Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China;
5. Shanghai Branch of CNOOC China Ltd., Shanghai 200030, China

Abstract: The Cenozoic sedimentary basins cluster in the onshore and offshore Lower Yangtze region are representative of the petroliferous province in eastern China, in which the characteristics and activity rules of faults are key foundation for the study of petroleum exploration. In this study, we address the deformation characteristics and activity rules of fault by using structural fault analyses based on high-coverage seismic prospecting data. Results show that the faults can be classified into three types based on the style of fault assemblage, i. e., extended, strike-slip and extruded-reversed. According to the characteristics of fault activity, the basinal faults can be divided mainly into two structural systems, i. e., extensional and combined extensional with strike-slip. Tectonically, the basinal faults were prominently controlled by the dextral deformation of the Tan-Lu fault, and their structural activities are related to the regional location and the distance to the Tan-Lu fault. The basinal faults are characterized by apparent division between the east and the west and unique in the central. The varied stress field of the Lower Yangtze region during the Cenozoic controls the opening and closing of the fault as oil and gas migration pathway. This is an important criteria for the evaluation of oil and gas resources.

Key words: Lower Yangtze region; Subei—South Yellow Sea Basin; fault structure; fault activity

Corresponding author: SUN Lianpu, Professor; E-mail: sunlianpu@hotmail.com

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-03-22

基金项目: 羌塘及塔里木等盆地航空物探调查(121201003000172001); 国家科技重大专项项目(2011ZX05023-003)联合资助

作者简介: 徐曦, 男, 1986年生, 博士, 工程师, 主要从事含油气盆地构造与油气评价研究; E-mail: winbreak@163.com

通讯作者: 孙连浦, 男, 1970年生, 博士, 首席研究员, 主要从事含油气盆地构造与油气评价研究; E-mail: sunlianpu@hotmail.com

下扬子海陆域新生代含油气盆地是中国东部主要的含油气盆地之一,陆域苏北盆地油气接替储量有限,海域的南黄海盆地则是一直未实现商业开发的近海盆地,因此下扬子区新生代盆地的油气资源潜力一直是国内外学者关注的焦点。

国内外学者对下扬子苏北—南黄海盆地沉积、构造与石油地质等进行了广泛的研究与讨论(能源等,2009;金之钧等,2013;刘寅等,2014;徐旭辉等,2014;吴林等,2015),但油气勘探多年,成效不大,究其原因,盆地断裂体系多样,活动规律复杂,具有明显的差异性和不均衡性。以往的盆地断裂研究大多局限于陆域苏北盆地或海域南黄海盆地等单一盆地,对海陆全区盆地的断裂构造特征与活动规律缺乏全面的认识,尤其是海陆含油气盆地断裂构造的对比与综合研究。盆地断裂构造与下伏的中古生界的内幕结构,海陆域盆地断裂构造等是否存在关联等基本的构造问题还未被充分地认识(徐旭辉等,2014;徐曦等,2015;高顺莉等,2015),这在一定程度上制约了油气勘探思路,致使勘探潜力不明。

下扬子海陆域新生代盆地断裂构造与活动规律研究是下扬子区油气勘探突破的重要基础和关键,是海相中古生界油气勘探与评价的重要窗口,对深入研究下扬子海陆区含油气盆地资源分布规律,加快下扬子地区大中型油气的发现步伐,提高大中小型油气田的发现速度与油气勘探效益具有重要实践意义。

1 地质概况

下扬子区位于扬子地块东段,是扬子地块的重要组成部分。在构造上,下扬子及其周缘地块被一系列区域性断裂带所分割与围限,西侧以郯庐断裂带与苏鲁—大别碰撞带、中朝地块、中扬子地块相邻,南以江绍断裂带与华南地块相邻,东与朝鲜半岛相邻,下扬子地块或区域是多个构造单元与力学体系的交接区域,呈西南部窄、东北部宽的楔形构造几何特征(徐曦和高顺莉,2015)。下扬子区新生代构造继承了晚侏罗—早白垩世的构造格局,由此奠定了中国东部伸展变形构造体系与构造地貌单元的总体格架(徐曦等,2015;高顺莉等,2015;徐曦和高顺莉,

2015)(图1)。

下扬子区新生代盆地,又称下扬子断陷盆地系统(LYBFS),在本文中简称为下扬子断陷盆地,或苏皖—南黄海断陷盆地,起始于长江下游平原的沿江盆地群(如潘阳盆地和潜山盆地等)、苏北盆地,延伸潜没于南黄海之下南黄海盆地。其中南黄海盆地被NEE向的中部隆起分割为南黄海南部盆地与南黄海北部盆地南北两个结构单元(图1)。

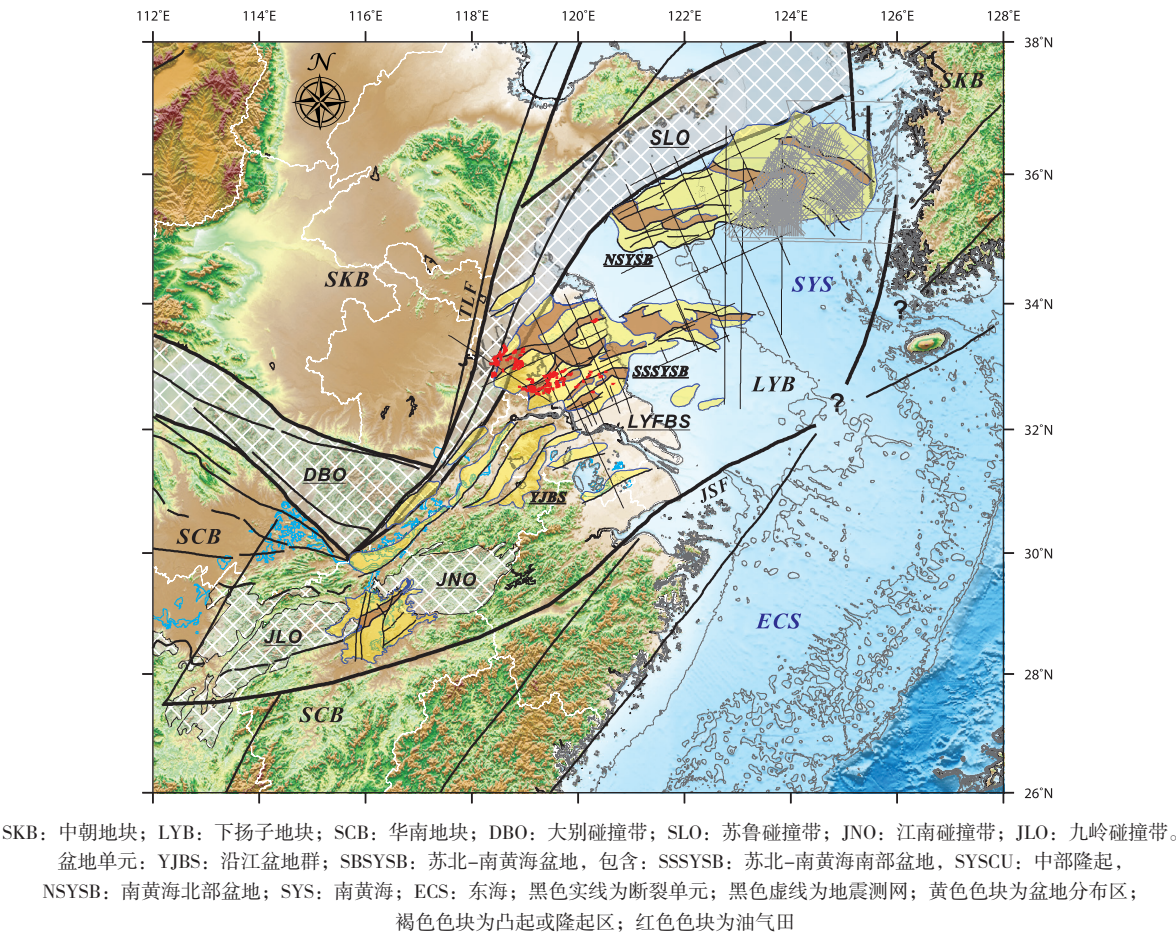
下扬子区新生代盆地,表现为正断裂控制的断陷和新近系—第四系“毯状”坳陷构成的断拗结构(图2)。盆地共发育约30个相对独立的断陷,在剖面上呈半地堑状、地堑构造特征。断陷主要受正断裂控制,走向为NNE向,NE向,NEE向—近EW向。断陷少数为双断型,多数为单断型,即一边为正断裂边界,另一边为超覆,沉降—沉积中心多位于主控断裂一侧,常见“北断南超”或“南断北超”现象(图1)。在平面上,从空间展布与区域格架上看,断陷总体呈NNE—NEE—NEE走向带状展布,发育NNE、NE和NEE向三组走向延伸的沉积单元,且由陆至海,断陷结构呈NNE—NE—NEE向弧形演化趋势,这很可能与近NNE—NE—NEE向弧形展布的印支—燕山期先存基底断裂控制有关(徐曦等,2015;高顺莉等,2015;徐曦和高顺莉,2015)。

2 盆地断裂变形特征

2.1 盆地断裂的形成演化

下扬子区新生代断陷盆地内的断裂十分发育,分布复杂而密集,由于不同规模、不同级别的断层,在盆地形成演化过程中,对盆地形成演化至关重要的控盆断裂形成与演化,关乎盆地的沉积格局、油气聚集与运移。

古近纪,在下扬子地区,受区域伸展格局驱动,断陷盆地的形成演化受前新生代前陆变形构造薄弱带控制(图2),控盆断裂继承先存印支—燕山期的构造断裂,利用了下伏的海相先存逆冲断层,沿先存NNE、NE、NEE等走向断裂发生伸展,自西向东呈NNE—NE—NEE向弧形展布,形成独具特色的弧形伸展构造系统(徐曦等,2015)。新近纪,盆地伸展停止,进入坳陷沉降



SKB: 中朝地块; LYB: 下扬子地块; SCB: 华南地块; DBO: 大别碰撞带; SLO: 苏鲁碰撞带; JNO: 江南碰撞带; JLO: 九岭碰撞带。
盆地单元: YJBS: 沿江盆地群; SBSYSB: 苏北-南黄海盆地, 包含: SSSYSB: 苏北-南黄海南部盆地, SYSCU: 中部隆起,
NSYSB: 南黄海南部盆地; SYS: 南黄海; ECS: 东海; 黑色实线为断裂单元; 黑色虚线为地震测网; 黄色色块为盆地分布区;
褐色色块为凸起或隆起区; 红色色块为油气田

图1 下扬子区及其周缘构造单元与新生代盆地分布

Fig. 1 Distribution of tectonic units and Cenozoic basins in the Lower Yangtze region and its surrounding area

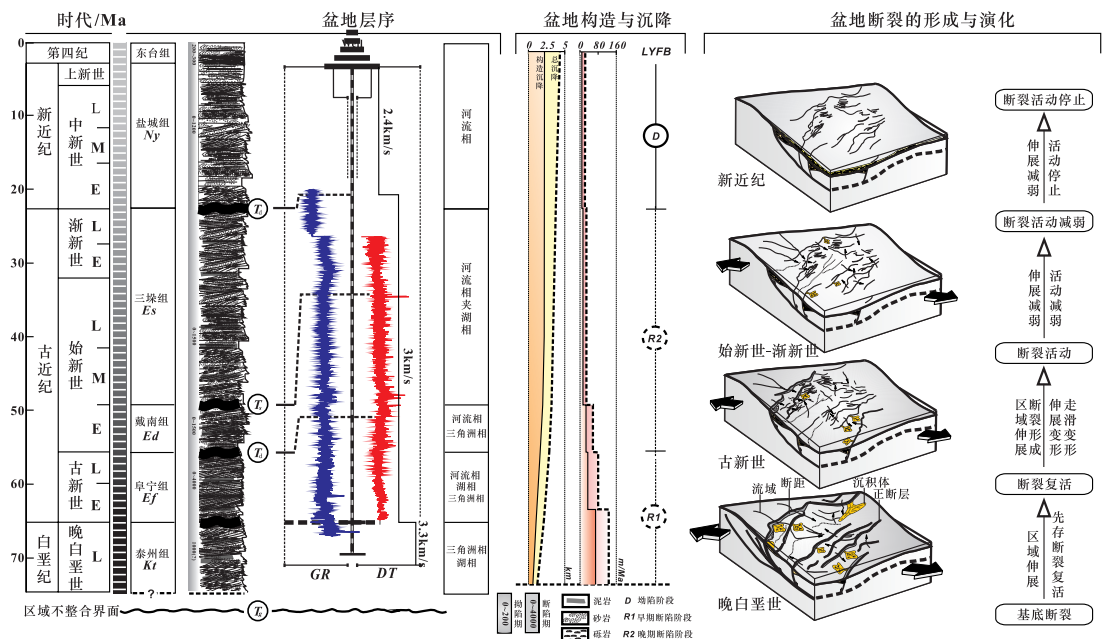


图2 下扬子区新生代盆地层序与断裂形成演化

Fig. 2 Sequence and formation and evolution of fault in the Lower Yangtze region during the Cenozoic

阶段,控盆断裂停止发育(图2),但在局部地区,如在南黄海北部盆地北部凹陷,因新近纪区域挤压,断裂的走向与主应力方向垂直,进而形成反转断裂构造(高顺莉等,2015),且还存在因新近纪区域挤压而形成的反转变形构造。

在空间上,由于盆地断裂与海相内幕先存断裂的叠置关系,控盆断裂走向、盆地长轴与海相内幕基底构造线基本一致(徐曦和高顺莉,2015),断陷盆地的形成是控盆断裂自西向东沿着NNE-NE-NEE向基底断裂构造线弧形展布。郯庐断裂带自中三叠世至早白垩世的左行平移走滑(Zhang et al., 2012),海相内幕先存断裂被左行牵引,在构造走向上,逐渐呈现弧形展布特征,因而靠近郯庐断裂带的控盆断裂走向由NE向NNE向转变的弧形变化,而远离郯庐断裂带且平行于苏鲁造山带的控盆断裂走向自西向东呈NE向至NEE向转变,最终盆地轴向与控盆断裂均呈现弧形展布的特征(徐曦等,2015)。

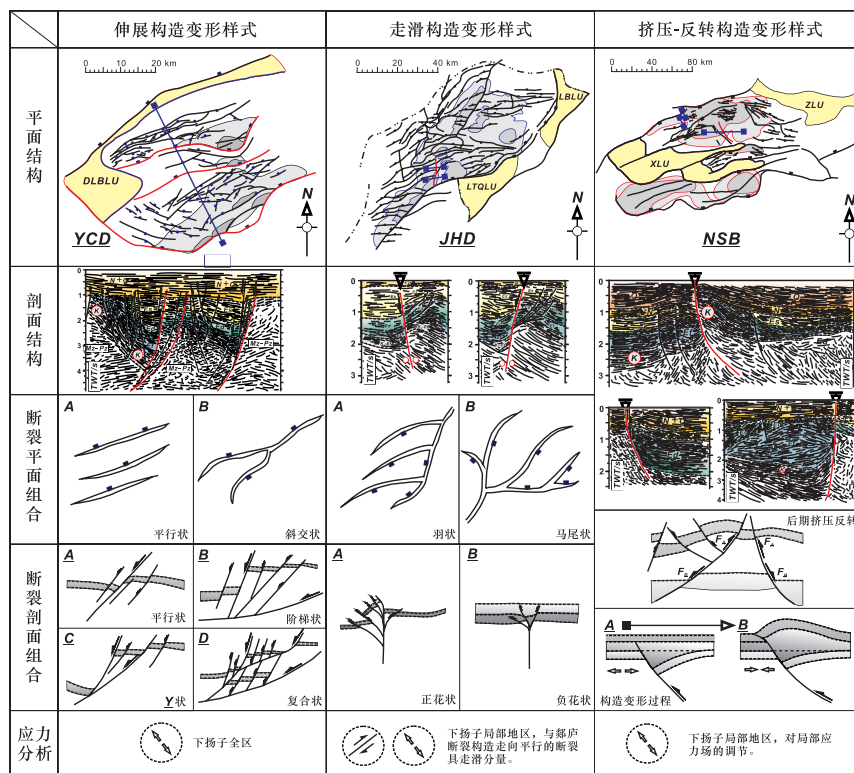
在新生代盆地构造中,伸展断裂构造占主导

地位,然而海陆域多年的油气地质勘探实践发现,盆内除由伸展作用而形成的张性构造之外,存在因扭动作用而形成的走滑变形构造与挤压变形构造。伸展构造背景下,走滑构造的出现,是由于主控断裂的走向与伸展应力的方向,存在着一定的应力角度,复活断裂呈现张性特征时兼具一定的走滑性质(图3)。

在盆地凹陷内,一条控盆或控凹主断裂带,一条或多条主干断裂与伴生或派生的次级断裂共同组成,伴生或派生的次级断裂的形成机制多样性,断裂组合样式在平面与剖面上呈现多样性特征,其分布也具有一定的规律性。次级断裂的形成,与主控断裂的形成具备本质差别,次级断裂的不继承于海相先存逆断裂,而是对伸展应力场的构造响应(图3)。

2.2 伸展构造变形样式

下扬子区新生代伸展变形构造的基本样式是由铲式或坡坪式正断裂控制的半地堑,正断裂是伸展构造的主要型式,控制着箕状半地堑的形成



DLBU: 大喇叭低凸起; LTQLQ: 菱塘桥低凸起; LBLU: 柳堡低凸起; WU: 西部隆起; EU: 东部隆起;
YCD: 盐城凹陷; JHD: 金湖凹陷; NSB: 南黄海北部盆地

图3 下扬子区苏北-南黄海盆地构造变形样式及其构造特征

Fig. 3 Deformation styles and structural features of the Subei-South Yellow Sea Basin in the Lower Yangtze region

与演化。伸展构造变形,是下扬子区新生代盆地形成与演化过程的基本变形方式和总体特征。控制各地堑或半地堑的主干正断裂,在平面组合方式上,具有多种展布形式与形态,如平行状或斜交状等(图3)。

伸展断裂在剖面上的组合方式,主要有平行状断裂组合、阶梯状断裂组合、“Y”字形断裂组合和复合型断裂组合四种类型。其中,平行状断裂组合,由若干条走向基本一致的断裂组合而成,平面上相互平行,剖面上依次叠置,具有等规模与等间距特征,如高邮凹陷的斜坡带,由一系列三级断裂所构成;阶梯状断裂组合,由一系列倾向相同的正断裂,上盘依次断落,呈现阶梯状,主要有旋转式平面正断裂型式的多米诺式阶梯状组合和非旋转平面正断裂型式的阶梯状组合两种类型,如真武断裂带西部,下降盘上的一系列正断裂与倾向一致真①断裂构成阶梯状;“Y”字状断裂组合,主要是主干断裂与其派生的次级断裂呈“Y”字型;复合状断裂组合,是其他三种基本形状的组合形式的统称。

2.3 走滑构造变形样式

与郯庐断裂带NE至NNE构造走向一致的断陷一级断裂旁侧发育近东西向羽状小断裂,NW—SE向区域伸展主应力方向与北东向断裂斜交而产生一定的走滑分量,而具有走滑分量的张性断裂大多形成于靠近郯庐断裂带的盆地凹陷,如金湖凹陷和高邮凹陷。受控于下扬子西侧郯庐断裂右行扭动作用,高邮凹陷中的吴①、吴②断裂在平面上呈明显右行羽状排列。真①断裂带在平面上是明显的马尾状构造组合,是真①断裂带北东走向段右行走滑主位移动带末段分化的产物。金湖凹陷的石港断裂、汉涧断裂与石港断裂,高邮凹陷的吴堡断裂均属于右行走滑断裂,其与正断裂均为统一应力场条件下不同性质断裂的具体表现,其形成与演化与郯庐断裂带右行走滑活动密切相关(图3)。

2.4 挤压—反转构造变形样式

在下扬子区新生代盆地中,新近纪地块受控于印度—欧亚板块碰撞的东西推挤驱动,地块近东西向挤压缩短,处于挤压构造变形构造背景之下(徐曦等,2015),先存正断裂发生逆向活化

活动,地层缩短错断或弯曲,呈现“上逆下正”或“上弯下正”的构造特征,因此基于断裂力学性质与变形过程,本文将由于挤压作用而导致的正断裂逆向活动的变形构造称为“挤压—反转构造变形样式”。近东西向的挤压应力造成了下扬子区断陷盆地断块差异活动与强烈抬升,新生代沉积地层发生构造反转与剥蚀。在区域上,由挤压应力场引起的挤压—反转构造变形强度表现为,东西强,中部弱,在古近纪与新近纪之间存在长达17.4 Ma的沉积间断与缺失,这一构造变形的直接表现就是挤压—反转构造导致沿江地区断陷盆地古近系大部分隆升与缺失(图1),南黄海北部盆地东缘挤压—反转构造断裂在地震剖面上呈现显著的几何与变形特征(图3)。古近—新近系不整合面特征、断裂几何形态与运动学关系表明,新生界地层,主要经历了晚渐新世与晚上新世两期挤压—反转变形时期,变形方式主要以正断裂逆向活化与挤压褶皱为主。下扬子地区新近纪挤压—反转构造的形成与演化,在盆地构造解释与应力场模拟中也得到验证(高顺莉等,2015;马洪坤等,2015;徐楠等,2017)。

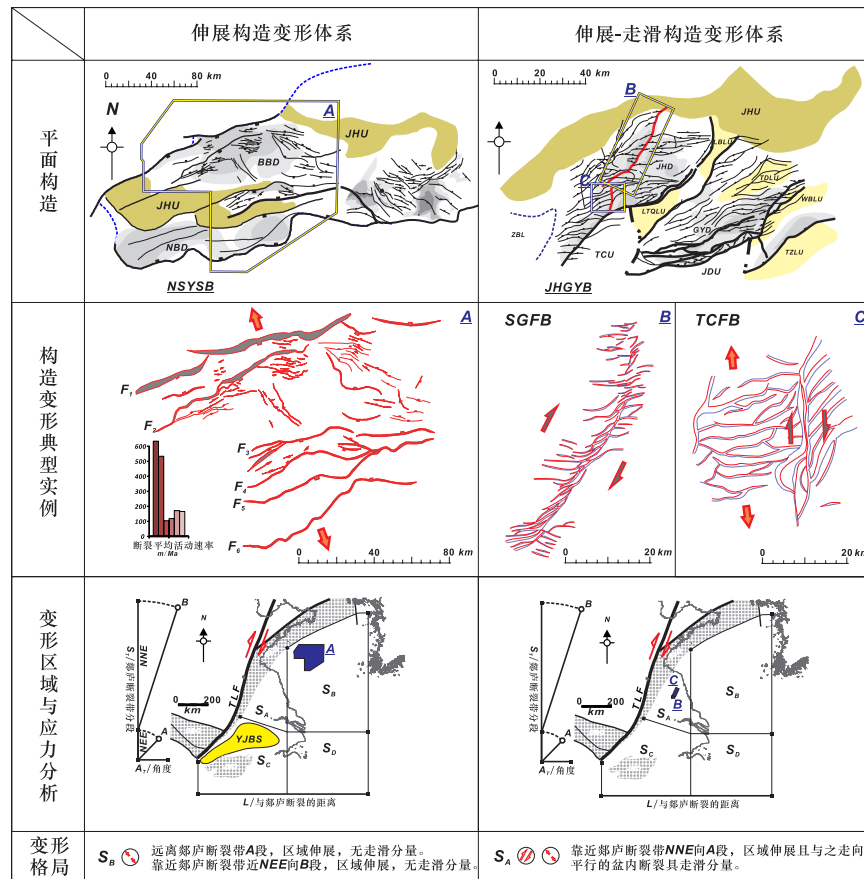
3 盆地断裂的运动学特征

3.1 盆地断裂体系

下扬子区新生代盆地,在伸展构造变形过程中,在不同的盆地位置上产生了一系列不同类型的次级构造,相应的断裂构造也具有显著的相似展布规律,由构造变形所形成的断裂组合在变形区域内均有相应的构造区位(图4)。在下扬子区新生代盆地中,不同级别的断裂有数百条,依据断裂的构造变形性质,盆地断裂体系可分为伸展断裂体系和走滑断裂体系两种类型(图4)。

3.1.1 伸展变形构造断裂体系

伸展断裂体系,又称正断裂体系,在下扬子海陆区各地分布广泛,发育多组不同规模、序次与走向的断裂系,断裂构造走向主要有NNE、NE与NEE和近EW向,其最明显的特征是在剖面上呈现上陡下缓的犁式结构,这种结构多出现于主控断裂中,通常为断陷的主控边界断裂或断陷次级断裂构造带的主断裂,主次级断裂可组合成多种类型的断裂,如阶梯状、“Y”字状等类型,但其



WU: 西部隆起; EU: 东部隆起; BBD: 北部凹陷; NBD: 南部凹陷; JHU: 建湖隆起; JHD: 金湖凹陷; GYD: 高邮凹陷; TCU: 天长凸起; JDU: 金都隆起; DLBLU: 大喇叭低凸起; LTQLQ: 菱塘桥低凸起; LBLU: 柳堡低凸起; WBLU: 吴堡低凸起; SGFB: 石岗断裂带; TCFB: 桐城断裂带

图4 下扬子伸展构造变形体系与伸展—走滑构造变形体系

Fig. 4 Tectonic systems of extensional and extension-strike-slip deformation in the Lower Yangtze region

最基本的构造特征是断裂上下盘沿犁式伸展断裂面相对错动(图4)。

在区域上,盆地的伸展构造断裂走向具有明显的弧形展布特征。在下扬子区断陷盆地系统西部的潜山与望江盆地以NNE—NE向为主,中部的句容—南陵盆地与苏北盆地等以NE—NEE向为主,南黄海南部盆地以NEE—近EW向为主,且东部的南黄海北部盆地以NEE—近EW向为主。与此同时,盆地或凹陷的构造走向与沉降—沉积中心亦呈现相似的弧形变化规律,这种规律变化其实受控于基底先存逆冲断裂的构造走向特征(徐曦等,2015;徐曦和高顺莉,2015)(图1)。

在区域构造上,下扬子区古近纪断陷的伸展断裂走向具有明显的弧形展布特征,根据控盆或控凹断裂的走向特征,可以确定伸展构造变形期内的区域应力场,在下扬子苏皖沿江地区,构造

伸展的区域应力场为NW—SE向,由陆至海,自西向东,区域应力方向,呈逆时针方向旋转,在中部的苏北—南黄海南部盆地地区,应力方向为NNW—SSE向,入海至南黄海北部盆地西部为近S—N向,而至南黄海北部盆地东部时却为近NNE—SSW向。区域应力场的转向特征,可能与下扬子楔形地块的几何形状、基底断裂带的构造走向格局、郯庐断裂带的NE—NNE走向以及地块板缘边界条件等因素有关(徐曦等,2015;高顺莉等,2015;徐曦和高顺莉,2015)。

3.1.2 伸展—走滑变形构造断裂体系

在平面上,走滑断裂构造体系具有显著的共生断裂组合特征,伸展或挤压构造与同期主断裂相结合,呈雁行或马尾状等断裂组合特征。但在下扬子地区,走滑断裂构造,是在下扬子统一的伸展应力场下构造走向与郯庐断裂带走向平行或

近似平行的断裂体系，其与区域主应力斜交，具有一定的走滑分量，因此本文将此下扬子区内的走滑断裂构造体系，称之为伸展—走滑断裂构造体系（图4）。

苏北盆地中，真①与真②的北东段、吴①、吴②、汉留、杨村、石港与铜城等断裂均为下扬子区盆内的伸展—走滑断裂构造体系的典型实例，这些断裂均复活于中三叠世至侏罗世的印支—燕山期的褶皱冲断断裂。由于晚白垩世以来的区域伸展，断裂上下盘错动，断距显著，表现为张性断裂，但在伸展变形过程中断裂的北东走向段表现出相应的走滑分量，呈现右行走滑的基本特征。

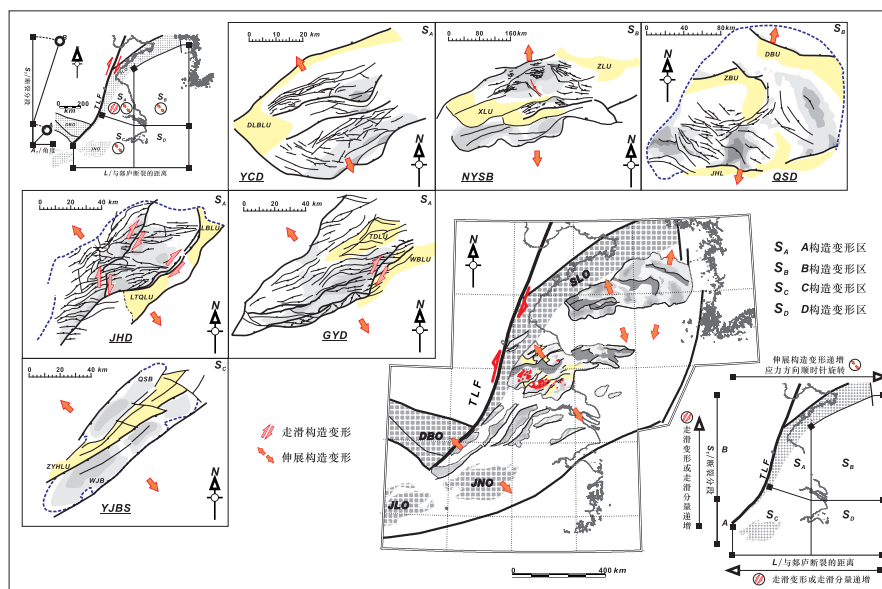
3.2 断裂构造变形体系

3.2.1 断裂变形体系划分

依据与郯庐断裂带不同构造走向的区段位置 S 、与郯庐断裂带的远近距离 L 两个因素或变量确定下扬子区新生代构造变形类型，结合控盆地或控凹断裂的构造走向与确定构造变形相关断裂的活动规律（图5）。

通过对下扬子海陆全区盆地断裂构造、展布区域与应力体系等方面的综合比对与分析，下扬子区新生代断裂变形类型与活动规律主要与郯庐

断裂带不同构造走向的区段位置 S 、与郯庐断裂带的远近距离 L 两个因素或变量有关。据此，下扬子区可分为四个构造变形体系或变形区，分别为 S_A 、 S_B 、 S_C 和 S_D 。位于郯庐断裂带NNE走向的区段且距离郯庐断裂带近的区域 S_A ，如苏北盆地金湖与高邮凹陷，具有显著的伸展—走滑变形构造特征，表现为正断裂错断，兼具走滑分量，而位于郯庐断裂带NNE向走向的区段且距离郯庐断裂带远的区域 S_B ，如南黄海北部盆地，则主要表现为伸展构造变形，少见走滑分量，呈现典型箕状凹陷，具有北断南超、北陡南缓与北深南浅的特征；位于郯庐断裂带NE向走向的区段且距离郯庐断裂带近的区域 S_C ，如潜山盆地与望江盆地，主要表现为典型的伸展变形构造，盆地主控断裂未见走滑分量；位于郯庐断裂带NE向走向的区段且距离郯庐断裂带远的区域 S_D ，如勿南沙凹陷，伸展变形构造不明显，较其他区域伸展强度弱，凹陷主要表现为小规模断裂弱伸展活动，主干断裂走滑分量亦未见。由此可见，在郯庐断裂右行走滑变形的调节与控制下，下扬子区新生代盆地断陷结构东西有别，西部断陷规模大，构造沉降幅度大，结构复杂，而东部断陷规模小，构造沉降幅度小，结构简单。总体上，区南的沿江盆地群与



YCD: 盐城凹陷; NYSB: 南黄海北部盆地; QSB: 群山凹陷; JHD: 金湖凹陷; GYD: 高邮凹陷; YJBS: 沿江盆地; QSB: 潜山盆地; WJ: 望江盆地; LTF: 郯庐断裂; DBO: 大别造山带; SLO: 苏鲁造山带; JLO: 九岭造山带; JNO: 江南造山带

图5 下扬子新生代盆地断裂构造与变形特征

Fig. 5 Fault structure and deformation in the Cenozoic basins of the Lower Yangtze region

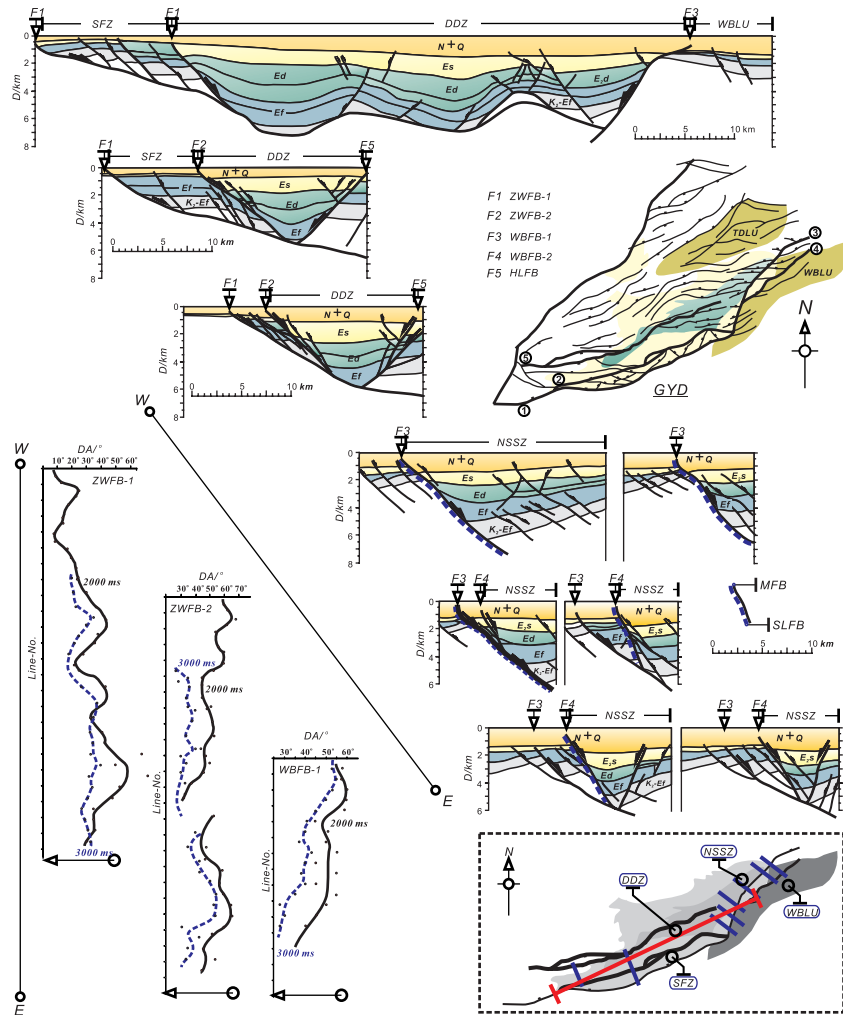
区北的南黄海北部盆地断裂未见显著走滑分量，而位于中部的苏北盆地西部断裂呈现显著走滑分量，且越靠近郯庐断裂，走滑分量越大。

3.2.2 断裂的伸展构造活动

下扬子区伸展构造变形的控盆或控凹断裂，构造走向为NEE向或近EW向，位于郯庐断裂带NNE向走向的区段且距离郯庐断裂带远的区域 S_B ，主要表现为张性活动，构造伸展，盆地具有典型箕状结构，呈现北断南超、北陡南缓与北深南浅的特征。

在伸展构造变形的区域应力场下，控盆地或控凹断裂，构造走向为NEE向或近EW向，大多继承于基底先存逆冲同走向断裂，呈现张性活动规律，

长期发育，多次活动，在剖面上一级断裂表现为上陡下缓的犁式或铲式几何特征（图6）。如高邮凹陷中的走向为NE至NEE向的真①断裂，是一条长期发育与多次活动的一级控凹断裂，在NNW—SSE向的应力场下，活动于泰州组—盐城组沉积时期，最大断距约为700~3000 m（马婷婷，2017），现为下降盘地层向下凸出，发育一系列呈阶梯状的北倾次级正断裂。真①断裂在泰州组沉积时期，活动速率小，活动性弱，而在阜宁与戴南组沉积时期活动速率大，活动性强，至三垛组沉积时期，活动性持续减弱，到盐城组时基本上停止活动。高邮凹陷其他断裂亦呈现相同的活动特征。在真①断裂倾角变化曲线图上（王玺等，2013），断裂倾角呈波



F1: 真武1断裂带; F2: 真武2断裂带; F3: 吴堡1断裂带; F4: 吴堡2断裂带; F5: 汉留断裂带; MFB: 主控边界张性断裂; SLFB: 具走滑分量的主控边界断裂; 构造单元: WBLB: 吴堡低凸起; DDZ: 深凹带; SFZ: 断阶带; NSSZ: 北斜坡带; 剖面修编自文献(姜芹芹, 2013); 断裂倾角变化曲线图修编自文献(王玺等, 2013)

图6 苏北盆地高邮凹陷主控断裂带构造变形与断裂活动

Fig. 6 Structural deformation and activity of the main faults in the Gaoyou say, Subei Basin

状起伏,中浅层(2000 ms)倾角可达 60° ,而深层(3000 ms)倾角都低于 30° ,总体上,真①断裂断面西缓东陡,为上陡下缓的铲式正断裂。真②断裂与汉留断裂亦呈现相同特征,且真②断裂在深部相交于真①断裂。主控断裂的倾角变化,说明了新生代伸展断裂继承自基底先存逆冲断裂的可能性(图6)。

南黄海北部盆地的北部凹陷,为北断南超的典型半地堑结构,以楔状层序充填,盆地沉降—沉积中心位于NEE向海域段嘉山—响水断裂带的南侧附近(高顺莉等,2015)。控制最大沉降—沉积中心的边界断裂为NEE或近EW向的正断裂,NEE向F1, F2, F3和F5断裂,线性延伸特征清楚,是控制断陷古近系充填最重要的主断裂。其中F1和F2断面较陡立,向下切割深,盆地基底切割落差由百米至数千米不等。地震剖面上,断裂为上盘下掉的伸展变形特征。沿走向断裂垂直位移分量差异明显,在相邻剖面上同一断裂呈现不同的位移分量。

在区域伸展的构造格局下,盆地凹陷主控断裂张性活动,凹陷次级断裂阶段性发育,各级断裂与之组合为伸展型构造样式。主次断裂活动性,受控于区域构造伸展作用,晚白垩世至渐新世,断裂张性伸展,盆地沉降与沉积。中新世,断裂张性活动停止,断裂停止发育,盆地进入区域热沉降阶段。断裂活动时期的平均速率表明,自晚白垩世以来,断裂伸展活动强度逐渐减小,晚白垩世—古新世是断裂张性活动的高峰时期。断裂差异活动引起的差异沉降是盆地沉积充填的主控因素,主控断裂的差异伸展控制了盆地最大的沉降—沉积中心与厚度(图2, 6)。

3.2.3 断裂的伸展—走滑构造活动

盆地或凹陷的主控边界断裂,在空间格局上,位于郯庐断裂带NNE向走向的区段且距离郯庐断裂带近的区域 S_A ,且构造走向为NE向或NNE向,在伸展构造变形的同时,多伴随走滑变形特征,断裂表现为张性活动,且具有一定的走滑分量,如高邮凹陷的真①与真②的北东段、吴①与吴②,金湖凹陷的汉留、杨村、石港与铜城等断裂均为下扬子盆地内的典型伸展—走滑断裂实例(图5)。

在盆地或凹陷内部,远离伸展边界的断裂主要受到区域伸展应力方向的影响而趋于垂直伸展应力

场方向,而靠近边界断裂的断裂由于边界断裂的构造活动而趋于平行于边界断裂的走向,因此在下扬子区盆地断裂的走向与活动性质多与边界断裂的构造走向和区域构造应力方向密切相关。如杨村断裂的北东段与北东东段,断裂北东段走滑强度强于北东东段,杨村断裂北东段与次级断裂呈羽状组合特征,而北东东段与次级断裂呈近似平行,或低角度相交。

在盆地凹陷内部以伸展构造变形活动为主,但与伸展应力场斜交的控盆或控凹断裂,则表现为沉积正断裂兼具走滑断裂性质,在平面上,次级断裂与主断裂斜交,呈羽状组合特征,在剖面上,浅层次级断了与主断裂相交,呈花状构造特征,断裂面周边地层拖拽特征显著(图6)。在同一应力场下,主控断裂的构造走向与应力场方向相交的角度不同,所表现出的走滑强度会有较大的差别,相交角度大,则走滑强度大,反之亦然。如杨村断裂和石港断裂,总体上都呈现“伸展+走滑”的活动特征。

盆地凹陷主控断裂,虽兼具走滑性质,但其在时空活动速率及其对沉积充填的控制作用,主要受控于伸展构造变形(图5)。如杨村断裂其时空活动速率存在明显差异,金湖凹陷阜宁组沉积时期,断裂活动强度最大,活动速率表现为“单峰特征”,峰值达260 m/Ma,位于龙岗次凹,其活动强度远大于其他地区,凹陷的沉降—沉积中心与杨村断裂的构造走向一致(葛金虎等,2015)。

在盆地凹陷的构造位置相近时,凹陷与郯庐断裂带的距离 L ,则是盆地凹陷主控断裂兼具走滑性质比重高低的主控因素。距离郯庐断裂带较近的盆地凹陷主控断裂表现出较强的走滑性质。

4 断裂活动规律与油气意义

下扬子区油气勘探,特别是南黄海区域,虽然经历了三十多年的研究,但至今仍然进展不大,下扬子地区,尤其是苏北—南黄海地区,具有相当好的生油条件,破解油气勘探的难题的关键在于明确新生代断裂活动规律与油气运聚的关系,明晰多应力场与断裂开闭的变化规律,从而进一步指导该地区的油气勘探方向。

始新世至渐新世(52~24 Ma)是下扬子区断陷

盆地与陆相生油岩系形成的关键时期(图2),断陷盆地格局继承了古新世盆地的构造走向与范围,盆地断裂持续活动,最终形成了古近纪沉积盆地的断陷格局,形成了下扬子沿江盆地群,苏北—南黄海南部盆地与南黄湖北部盆地等构成的下扬子断陷盆地群。在太平洋板块自西向东俯冲与挤压的板缘边界条件下,中国东部地区最大主应力轴为NW—SEE向(Wan, 2011),总体上呈现区域NW—SEE向缩短挤压与NNE—SEE向伸展拉张的构造格局(徐曦等, 2015)。此应力场下,盆地中靠近郯庐断裂带的NE—NNE向断裂及次级断裂呈现为伸展—右行走滑活动,断裂伸展拉张兼具走滑分量,断裂闭合,张裂有限,阻碍了油气的运移散失,相当部分的油气保存于邻近的构造圈闭中;而远离郯庐断裂带的NE—EW向断裂,呈现为伸

展拉张活动,是始新统一渐新统烃源岩系油气运移有利通道,油气运移散失,在局部有利圈闭中有所保留。

渐新世末(24~0.78 Ma),太平洋板块东向后退,传递至板内的板缘边界构造作用力减弱,澳大利亚—印度板块北向运移,朝东亚大陆俯冲推挤,受控于此,中国东部地区最大主应力轴为近N—S向(Wan, 2011),总体上呈现区域近N—S向缩短挤压与近E—W向伸展拉张的构造格局,NE—NNE向断裂带张裂,成为有利的油气运移通道,油气运聚成藏(图7b),而在现代应力场作用下(图7c),该断裂带紧闭,从而有效地控制油气资源的过度散失,形成了良好的保存条件;NEE—EW向断裂表现为紧闭状态,断层封堵,油气运聚受阻。

中更新世以来(0.78Ma~至今),受控于印度

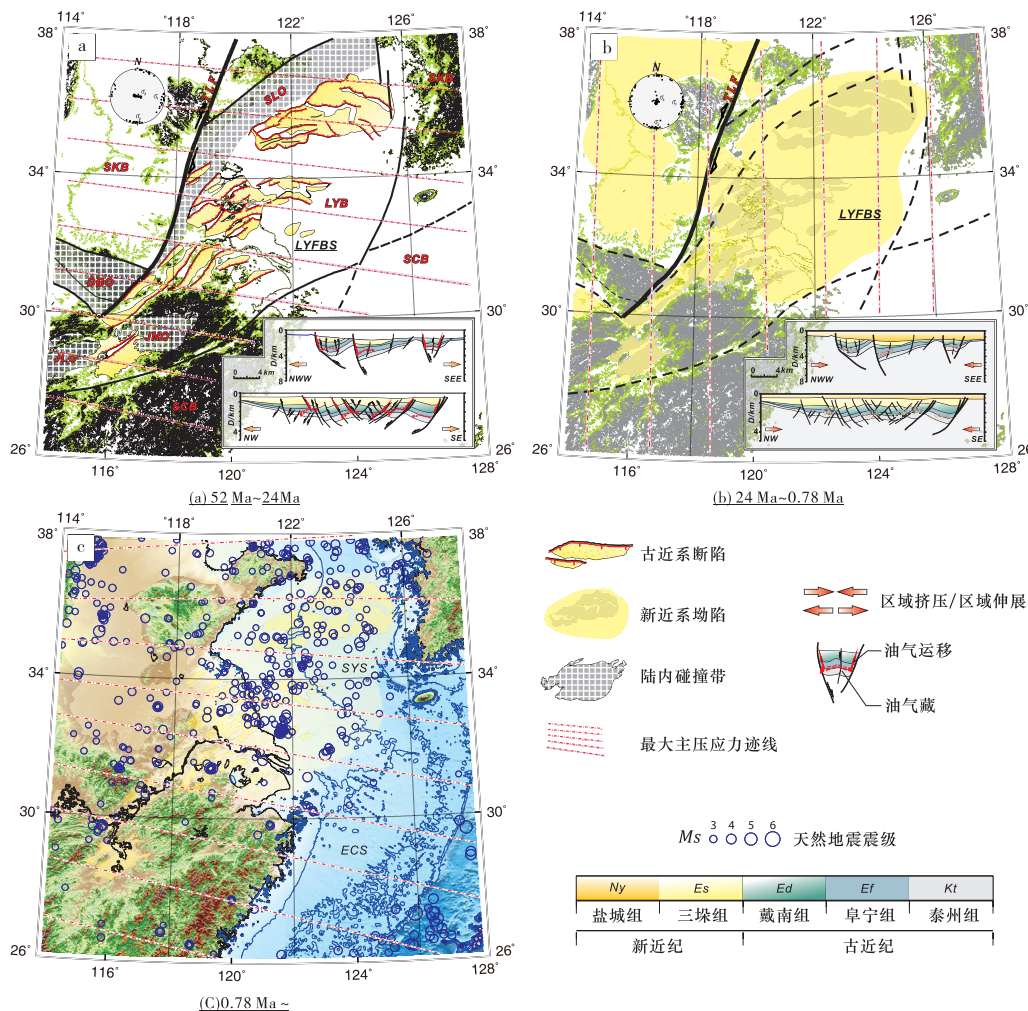


图7 下扬子区新生代盆地断裂的活动规律与油气意义

Fig. 7 Activity rules of the faults and its significance for hydrocarbon accumulation in the Cenozoic basin of the Lower Yangtze region

板块—中亚板块碰撞与青藏高原侧向推挤的运程应力作用，中国东部呈近东西走向向东撒开的最大主压应力现代构造应力场（Wan, 2011），区内NE—NNE向断裂带受较强的东西向挤压，断裂紧闭，成为油气资源保存的良好条件。而近NEE—EW向断裂开启，油气在断裂带中运移，并在有利圈闭中保存。

5 讨论与结论

在下扬子区域的盆地尺度上，盆内断裂十分发育，分布复杂而密集，控盆断裂继承先存印支—燕山期的构造断裂，利用了下伏的海相先存逆冲断层，在空间展布上，自西向东呈现弧形展布特征。依据断裂组合样式与构造活动性质可分为伸展、走滑、挤压—反转三个构造样式，伸展断裂与伸展—走滑断裂两种构造体系。

新生代下扬子区域伸展构造变形与郯庐断裂右行走滑共同构成了一个“右行侧向扩展变形”系统，受控于下扬子及其周缘地块之间的相互运动，是太平洋板缘边界条件的陆内调节与构造响应（徐曦等，2015；徐曦和高顺莉，2015；徐楠等，2017）。郯庐断裂右旋走滑变形调节着下扬子地块的侧向伸展活动，区内盆地的断裂构造显著地受控于郯庐断裂右行走滑变形的控制，呈现了盆地断陷“东西有别，中部不同”的特点，具体表现为盆地张性断裂具有走滑分量，走滑分量的存在与否和大小主要与郯庐断裂带不同构造走向的区段位置S和与郯庐断裂带的距离L两个因素或变量有关。

受控于下扬子区新生代多变应力场，NE—NNE向与NEE—EW向两组断裂的开闭状态控制着油气运移通道的有效性，成为油气资源评价的重要依据。

参考文献 (References)

- 高顺莉, 徐曦, 周祖翼. 2015. 南黄海北部盆地晚白垩世以来构造变形与盆地成因[J]. 石油与天然气地质, 36(6): 924–933.
- 葛金虎, 罗红霞, 阳芬, 等. 2015. 金湖凹陷杨村断裂及控藏作用研究[J]. 复杂油气藏, 8(2): 19–24.
- 姜芹芹. 2013. 高邮凹陷南断阶断裂成因分析与数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 金之钧, 刘光祥, 方成名, 等. 2013. 下扬子区海相油气勘探选区评价研究[J]. 石油实验地质, 35(5): 473–486.
- 刘寅, 陈清华, 胡凯, 等. 2014. 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, 38(1): 38–51.
- 马洪坤, 王新新, 商琳, 等. 2015. 苏北盆地金湖凹陷铜城断裂带的构造演化特征[J]. 地质论评, 61(4): 767–776.
- 马婷婷. 2017. 真武断裂带西部构造演化特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(华东).
- 能源, 杨桥, 张克鑫, 等. 2009. 苏北盆地高邮凹陷晚白垩世—新生代构造沉降史分析与构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 29(2): 25–32.
- 王玺, 陈清华, 朱文斌, 等. 2013. 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, 37(1): 20–28.
- 吴林, 陈清华, 庞飞, 等. 2015. 下扬子地区中—新生代构造变形单元及构造变形样式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(6): 1722–1734.
- 徐曦, 高顺莉. 2015. 下扬子区新生代断陷盆地的构造与形成[J]. 地学前缘, 22(6): 148–166.
- 徐曦, 高顺莉, 王兴建, 等. 2015. 下扬子区新生代伸展构造变形及其区域构造意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 40(12): 1968–1986.
- 徐旭辉, 周小进, 彭金宁. 2014. 从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J]. 石油实验地质, 36(5): 523–531.
- 徐楠, 徐曦, 周波, 等. 2017. 下扬子区新生代构造变形物理模拟及其主控因素[J]. 石油实验地质, 39(3): 409–416.
- Wan T F. 2011. The Tectonics of China: Data, Maps and Evolution [M]. Beijing: Springer Science & Business Media.
- Zhang J, Yang X, Sun W, et al. 2012. New data on the evolution of the Tan-Lu fault belt: Constraints from geological-geophysical surveys in the Southern Segment [J]. International Geology Review, 54(13): 1562–1578.