

中国东-南部裂陷盆地断裂系统复杂性的 表现形式及成因机制

——以南堡凹陷和涠西南凹陷为例

童亨茂¹⁾, 范彩伟²⁾, 孟令箭³⁾, 赵宝银³⁾, 范晋煜¹⁾

1) 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京,102249; 2) 中海油湛江分公司研究院,广东湛江,524000; 3) 中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院,河北唐山,063004

内容提要:中国东-南部裂陷系列盆地油气资源十分丰富,而断层的分布演化十分复杂,是油气进一步勘探开发需要解决的关键问题。本文应用广义断层模式,在大量三维地震资料构造解析的基础上,以渤海湾盆地的南堡凹陷和北部湾盆地的涠西南凹陷为例,对中国东-南部盆地复杂的断裂系统进行了解剖和归纳,并提出了伸展变形区预测断层性质的伸展应变椭圆。结果表明,中国东-南部裂陷盆地断裂系统的复杂性存在 9 种表现方式,从成因上进一步归纳为 3 个方面:①断层的走向和性质多样;②断层在平、剖面上存在复杂多变的组合形式;③断层形成和演化存在复杂的时-空关系。造成复杂性的根本原因是先存断裂分布的复杂性和不同方向(北西-南东向和近南北向)伸展变形的叠加。不同盆地、同一盆地不同区域应力场演化具有很大的相似性:40Ma 以前,北西-南东向伸展;38Ma 以来,近南北向伸展。断层分布和演化差异主要是由先存构造分布差异造成的。

关键词:裂陷盆地;断层;复杂性;伸展;成因机制;广义断层模式

与世界上其他区域相比,中国裂陷盆地内的油气资源特别丰富,按盆地类型,在石油工业中相对重要性处于首位(在世界上,被动大陆边缘盆地处于首位),已探明的石油储量和产量曾分别约占国内石油总探明储量和总产量的三分之二(Jin et al., 1998),裂陷盆地在中国石油工业中的重要性不言而喻。

裂陷盆地的断层十分发育。裂陷盆地或与裂陷作用相关的盆地(大陆裂陷盆地、被动大陆边缘盆地、走滑拉分盆地等)内,沉积物的充填、沉积层序的发育和分布、油气藏的形成、分布和演化(包括圈闭的形成及有效性、油气运移、聚集和成藏等)都与断层的分布和活动密切相关(Tong Hengmao et al., 2009a),断层研究是此类盆地油气勘探的关键基础地质问题,也是盆地构造研究的核心内容,是近期国际上构造研究中的热点(Martin and John, 2006; Maniatis et al., 2008; Gall et al., 2008)。

按照传统的构造模式(Anderson 断层模式)和 Mckenzie 的伸展变形模式,裂陷盆地发育的断层主要为走向与伸展方向垂直的高角度正断层(Anderson, 1951),构造变形样式主要为垒堑式

(Mckenzie, 1978)。然而,随着油气勘探的深入,特别是高精度的反射地震资料的广泛应用,表明裂陷盆地内断层分布十分复杂。不同的裂陷盆地都有自己的特点,世界上没有两个盆地断层的分布是一致的(Martin and John, 2006),中国东-南部的裂陷盆地尤为如此。

笔者自 20 世纪 90 年代初开始,结合油气勘探项目,对中国东-南部的裂陷盆地(包括渤海湾盆地、北部湾盆地、琼东南盆地、珠江口盆地、松辽盆地和东海陆架盆地等)的断裂系统进行了较为系统的构造解析。结果表明,中国东-南部不同裂陷盆地及其不同构造单元(拗陷和凹陷)断层的分布均十分复杂,但其表现形式存在明显的相似性(Xu Junyuan, 1997; Allen et al., 1997; Xu Junyuan and Zhang Linyun, 2000),具有共性也有规律性。考虑到渤海湾盆地的南堡凹陷和北部湾盆地的涠西南凹陷勘探程度相对较高,高精度的三维地震资料全部覆盖、又有大量的钻井资料约束,先存构造分布又具有代表性(如南堡凹陷有北北东-北东向的郯庐断裂系和北西向蓬莱-张家口断裂系发育)(Tong Hengmao et

注:本文为国家油气重大专项(编号 2016ZX05024-005-004)和国家自然科学基金项目(编号 41272160)资助成果。

收稿日期:2017-12-12;改回日期:2018-03-23;责任编辑:周健。

作者简介:童亨茂,男,1967 年生。教授,博士生导师,从事盆地构造分析研究和教学工作。Email: tonghm@cup.edu.cn。

al., 2013)。为此,本文选择以渤海湾盆地的南堡凹陷、北部湾盆地的涠西南凹陷为例,阐述分析中国东-南部裂陷盆地断层复杂性的表现形式,并应用广义断层模式(先存构造条件下的断层作用模式)(Tong Hengmao et al., 2009b; Tong and Yin, 2011; Tong et al., 2010, 2014)论述其成因机制。

本文的研究分析表明,中国东-南部裂陷盆地断裂系统的复杂性大体可概括为以下几个方面:①裂陷盆地内可以发育多种性质的断层,包括正断层、斜滑正断层、正斜滑断层、正走滑断层和走滑断层等;②同一盆地不同凹陷的边界断层及同一凹陷的不同边界断层、主断层和次级断层的走向可存在很大的差异;③存在多种类型的断层平面组合方式(如“帚状”、“梳状”、“雁列状”、“平行交织状”等);④剖面上的断层组合类型(构造样式)十分丰富;⑤断层的分布在“时-空”上存在显著的不均一性;⑥同一断层在不同反射层的走向、长度和性质可发生很大的变化;⑦一个构造变形期内可以有不同规模、不同性质、不同活动期次的断层;⑧同一断层在不同的构造演化阶段性质会产生显著的变化;⑨存在不同方向、同时活动的“正断层”。

裂陷盆地上述复杂的断层分布现象无法用经典构造地质学理论——Anderson模式(Anderson, 1951)作出合理的解释,但用广义断层模式不仅可以作出合理的解释,而且可以对其形成演化作出相对比较准确的预测。

本文的研究表明,造成中国东-南部裂陷盆地断裂系统复杂性的根本原因是不同裂陷盆地、裂陷盆地的不同区域先存构造的分布和性质存在差异,其次还受区域构造应力场变化的影响。

上述在中国东-南部裂陷盆地总结出来的断裂系统复杂性的表现形式,不光适用于中国东-南部裂陷盆地,对世界上的其他裂陷盆地也适用。

1 区域构造背景

中国东-南部存在一系列中(Mz)—新生代(Kz)的裂陷盆地(图1),其中大陆裂陷盆地包括:渤海湾盆地(Kz)、松辽盆地(Mz)、二连盆地(Mz)、海拉尔盆地(Mz)、南华北盆地(Mz)、江汉盆地(Kz)等;主体为大陆裂陷盆地,拗陷阶段存在海相沉积的盆地包括:苏北-南黄海盆地(Mz-Kz)、东海陆架盆地(Kz)、北部湾盆地(Kz)等;被动大陆边缘盆地包括琼东南盆地(Kz)和珠江口盆地(Kz)。琼东南盆地和珠江口盆地虽然属于被动大陆边缘盆地,但被动

大陆边缘发育的时间较短(5.5Ma以来),裂陷构造层的厚度相对较大,断层也十分发育,构造演化与普通的裂陷盆地存在很大的相似性,构造分析可以按普通的裂陷盆地对待。

所有裂陷系列的盆地均经历裂陷和拗陷两大构造演化阶段,由两大构造层(裂陷构造层和拗陷构造层)组成。一般情况下,裂陷盆地的断层主要在裂陷构造层发育,但中国的裂陷盆地存在一定的特殊性,断层在部分裂陷盆地(或裂陷盆地的部分区域)的拗陷构造层中也十分发育,如渤海湾盆地的海域部分,包括渤中拗陷、济阳拗陷、黄骅拗陷、辽东湾拗陷等;松辽盆地;东海陆架盆地;北部湾盆地;珠江口盆地及琼东南盆地等,表明这些盆地在拗陷阶段也经历了不同程度的伸展作用。断层在拗陷构造层十分发育的现象是中国裂陷盆地的一大特色。

渤海湾盆地是中国东部新生代裂陷盆地的代表(图1),油气资源十分丰富(Jin and McCabe, 1998)。由于渤海湾盆地轮廓的菱形特征,曾经有人认为是走滑拉分盆地(Mann et al., 1983; Chen and Na'belek, 1988; Hou Guiting et al., 2000),但随着油气勘探和研究工作的深入,大部分研究者(Tian et al., 1992; Lu et al., 1997; Allen et al., 1997; Ren et al., 2002; Qi and Yang, 2010; Li et al., 2012)认为渤海湾盆地属于裂陷盆地,目前已没有太大的争议。南堡凹陷是渤海湾盆地的富烃凹陷,油气资源异常丰富(Zhou Haiming et al., 2000, 2001, 2004, 2005; Dong Yuexia et al., 2008)。

渤海湾盆地基底的先存断裂十分发育,特别是北东-北北东走向的先存断裂(以郯庐断裂系(Wan Tianfeng, 1996; Zhu Guang et al., 2001a, 2001b)为代表)和北西-北西西走向的先存断裂(以张家口-蓬莱断裂系为代表, Suo Yanhui et al., 2013),南堡凹陷这两组断裂系也十分发育(Wan Jiahao et al., 2002; Xu Anna et al., 2006; Jiang Hua et al., 2009; Ma Qian et al., 2011; Fan Bojiang et al., 2011)。从后面的分析可以看出,基底复杂的先存断裂是造成裂陷盆地断裂系统复杂性的根本原因。

北部湾盆地主体位于北部湾地区(图1),是南海北部发育的系列盆地之一,也是典型的裂陷盆地,断裂十分发育。它和琼东南盆地和珠江口盆地有相似的构造背景,拗陷构造层中也有海相沉积,但其没有发育陆坡。

包括渤海湾盆地和北部湾盆地在内的中国东-

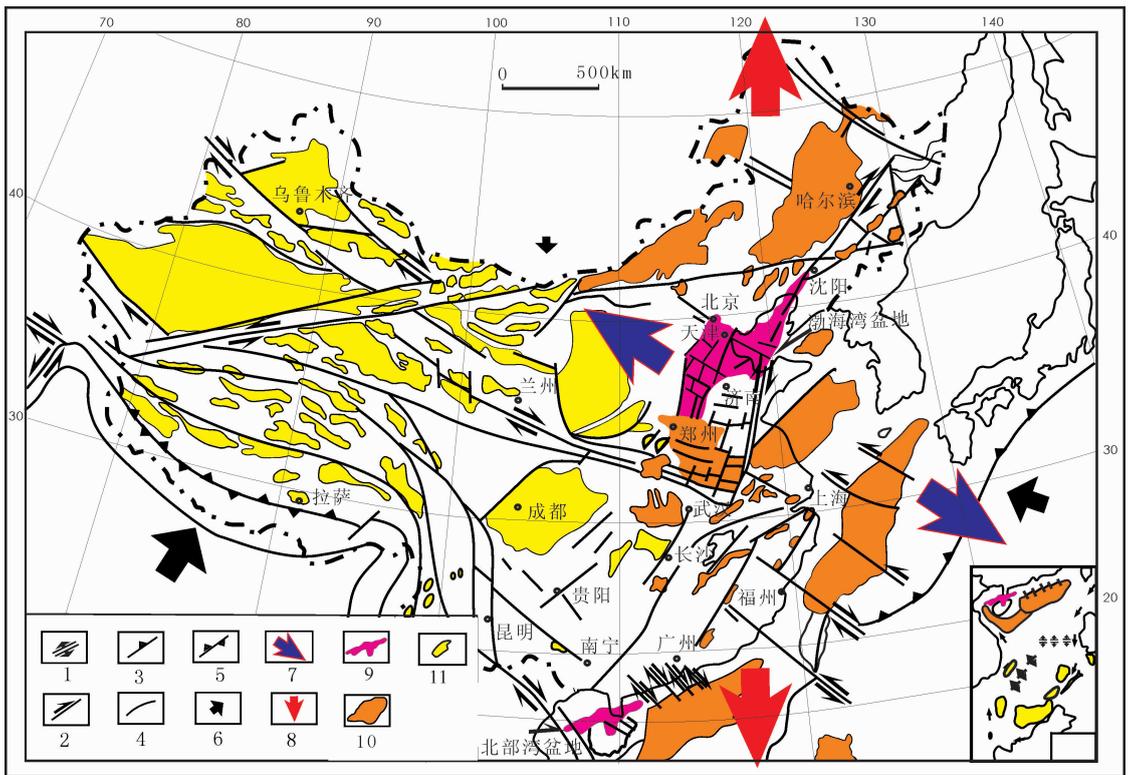


图 1 中国沉积盆地构造格架(据 Wu and Wang, 1997 修改)及东-南部新生代应力场演化模式图

Fig. 1 Tectonic framework map of the Cenozoic basin in China (after Wu and Wang, 1997) and evolution model of Cenozoic tectonic stress fields

1—洋中脊; 2—走滑断层; 3—俯冲带; 4—断层; 5—缝合带; 6—板块运动方向; 7—伸展方向(Pre-40Ma);

8—伸展方向(38Ma 以来); 9—目标盆地; 10—裂陷系列盆地; 11—其他类型盆地

1—Sea floor spreading zone; 2—basement strike-slip fault; 3—subduction zone; 4—basement fault; basin and its borders;

5—suture zone; 6—plate movement direction; 7—extension direction (Pre-40Ma);

8—extension direction (post-38Ma); 9—the studied basin; 10—rift basin; 11—other type basin

南部裂陷盆地的形成演化主要受控于太平洋板块(包括中生代的库拉板块)的活动,裂陷成因主要受控于太平洋板块的俯冲后撤(Allen et al., 1997; Qi and Yang, 2010)。最近的研究表明(Tong Hengmao, 2010; Tong Hengmao et al., 2013),包括渤海湾盆地和北部湾盆地在内的中国东-南部裂陷盆地新生代以来的构造应力场演化具有很大的相似性:40Ma 以前(古新世和始新世)为北西-南东方向伸展,38Ma 以来(渐新世至今)为近南北向伸展,40~38Ma(相当于渤海湾盆地的 E_2s^2)为应力体制的过渡阶段,构造活动相对比较平静。断裂系统的形成和演化受控于上述应力场演化。

2 裂陷盆地断层复杂性的表现形式

2.1 盆地内多种性质的断层

由于裂陷盆地内均或多或少存在先存断裂(Tong Hengmao et al., 2009a; Tong et al., 2010),

裂陷盆地可以形成 3 种成因类型的断层(Tong et al., 2014): ① 先存构造复活断层(weakness reactivated fault, 简称复活断层); ② 先存构造相关断层(weakness related fault, 简称相关断层); ③ 与先存构造无关的库伦断层(weakness unrelated Colomb fault, 简称库伦断层)。复活断层是沿先存构造面重新活动而形成,其产状决定于先存构造面;相关断层与先存构造面近于平行或斜交;库伦断层与伸展方向垂直。

由于先存构造面的产状不受伸展方向的制约,复活断层可以是任意走向的。理论推导和实验研究表明(另文阐述),不同方向复活断层的滑动方向(即断层的性质)是不一致的,可以是正断层($\omega \geq 80^\circ$, ω 为断层滑动方向矢量在断层面的侧伏角,下同)、斜滑正断层($60^\circ \leq \omega < 80^\circ$)、正斜滑断层($30^\circ \leq \omega < 60^\circ$)、正走滑断层($10^\circ \leq \omega < 30^\circ$)和走滑断层($\omega < 10^\circ$)。虽然上述结论是针对复活断层推导出来的,

但对于相关断层也基本适用。

由于滑动矢量的侧伏角主要决定于复活断层走向与伸展方向的夹角 α ,本文提出预测断层性质的伸展应变椭圆图解(图2),该图解根据断层走向和伸展方向的关系,把裂隙盆地的断层大体划分为性质不同的5个区间:正断层区($\alpha \geq 80^\circ$)、斜滑正断层区($60^\circ \leq \alpha < 80^\circ$)、正斜滑断层区($30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$)、正走滑断层区($10^\circ \leq \alpha < 30^\circ$)和走滑断层区($\alpha < 10^\circ$)。这样,应用伸展应变椭圆,可以简单地对裂隙盆地断层的性质进行预测。

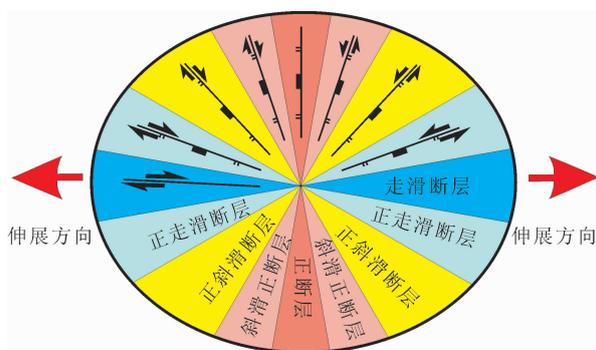


图2 伸展应变椭圆图解

Fig. 2 Extensional strain ellipse diagram

由于地震剖面只能解释断层的垂向位移,对走滑位移则无能为力,而利用伸展应变椭圆,不仅可以预测裂隙盆地断层的性质,还可以结合地震资料解释结果预测断层的走滑位移分量。

由于先存构造的活动性与其走向有关,随着 α 的减小,先存构造的活动性不断减弱(Tong Hengmao et al., 2009b),对应的复活断层数量也不断减小。因此,一般情况下,裂隙盆地不同性质断层发育数量从多到少的排列次序为:正断层→斜滑正断层→正斜滑断层→正走滑断层区→走滑断层(图3a),真正意义上的走滑断层($\alpha < 10^\circ$)在裂隙盆地是很少出现的(图3a,图3b和图4)。但如果先存构造在盆地内广泛存在的情况下,可能出现斜滑正断层(甚至正斜滑断层)的数量超过正断层的情况(见图4):如南堡凹陷 E_2s^3 期的断层十分发育,由于应力场(伸展方向)的改变, E_2s^3 期形成的断层均成为南北向伸展变形(E_2s^1 以来)的先存构造,导致复活断层和相关断层(断层性质主要为斜滑正断层和正斜滑断层,图4中粉色和黄色的断层)的数量占主导地位。

2.2 盆地内断层走向的差异

裂隙盆地断层走向的差异表现为:同一盆地的

不同凹陷的边界断层及同一凹陷的不同边界断层、主断层和次级断层的走向可存在很大的差异。

裂隙盆地(包括盆地内的二级单元拗陷和三级单元凹陷)的边界断层很多受先存构造控制(McClay, 1990; Boccaletti, 1998; Arreola and Morandi, 2005; Morley, 2007),多是在先存断裂基础上发育的复活断层(Tong Hengmao et al., 2009a; Tong et al. 2014),而复活断层的走向受控于先存断裂,结果导致同一盆地的不同凹陷的边界断层及同一凹陷的不同边界断层的走向产生很大的差异。如:①在渤海湾盆地,边界断层受郯庐断裂系先存断裂控制的区域,其走向多为北北东走向(如辽东湾拗陷区各凹陷的边界断层, Qi et al., 2010),济阳拗陷区的凹陷边界断层则多为近东西向(Liu Zhaolu and Xia Bin, 2007);②渤海湾盆地的南堡凹陷的北部边界是由两条走向差异迥异的断层组成:北东走向的西南庄断层和北西走向的柏各庄断层(图3),这两条断层均是在先存构造基础上发育的(Tong Hengmao et al., 2013),其中柏各庄断层是张家口-蓬莱断裂系先存断裂复活断层的典型代表。

裂隙盆地内的主干断层很多也是先存构造复活断层(Tong et al., 2014),而次级断层一般是相关断层或库伦断层,这样,主次断层的走向自然可以出现很大的差异。如南堡凹陷的1号构造带(主控断层是南堡断层,图4)和4号构造带(主控断层是蛤坨断层,图4),其主控断层分别为北东向和北西向,而次级断层为北东东和近东西向(图4)。

2.3 断层的平面组合方式

三维地震资料构造解释成果表明,裂隙盆地存在多种类型的断层平面组合方式,如“帚状”、“梳状”、“雁列状”、“平行状”、“平行交织状”、“分叉状”等(图5)。

“梳状”:主次断层的一种组合方式,次级断层在主干断层的一侧发育,次级断层与主干断层斜交,顶到主干断层上,形似梳子而得名(图5b)。如柏各庄断层主次断层的组合关系属于此类型(图4)。

“帚状”:与“梳状”构造组合具有一定的相似性:①均是主次断层的组合关系,②次级断层均在主干断层的一侧发育(图5a和5b)。区别是次级断层向主干断层靠近时,与主干断层的夹角是否减小(对比图5a和5b)。“帚状”和“梳状”构造组合是可以逐渐过渡的,一个构造带可以同时发育上述两种的构造组合,图南堡凹陷1号构造带,南侧发育“梳状”构造,北侧南堡断层末端则是“帚状”构造(图4)。

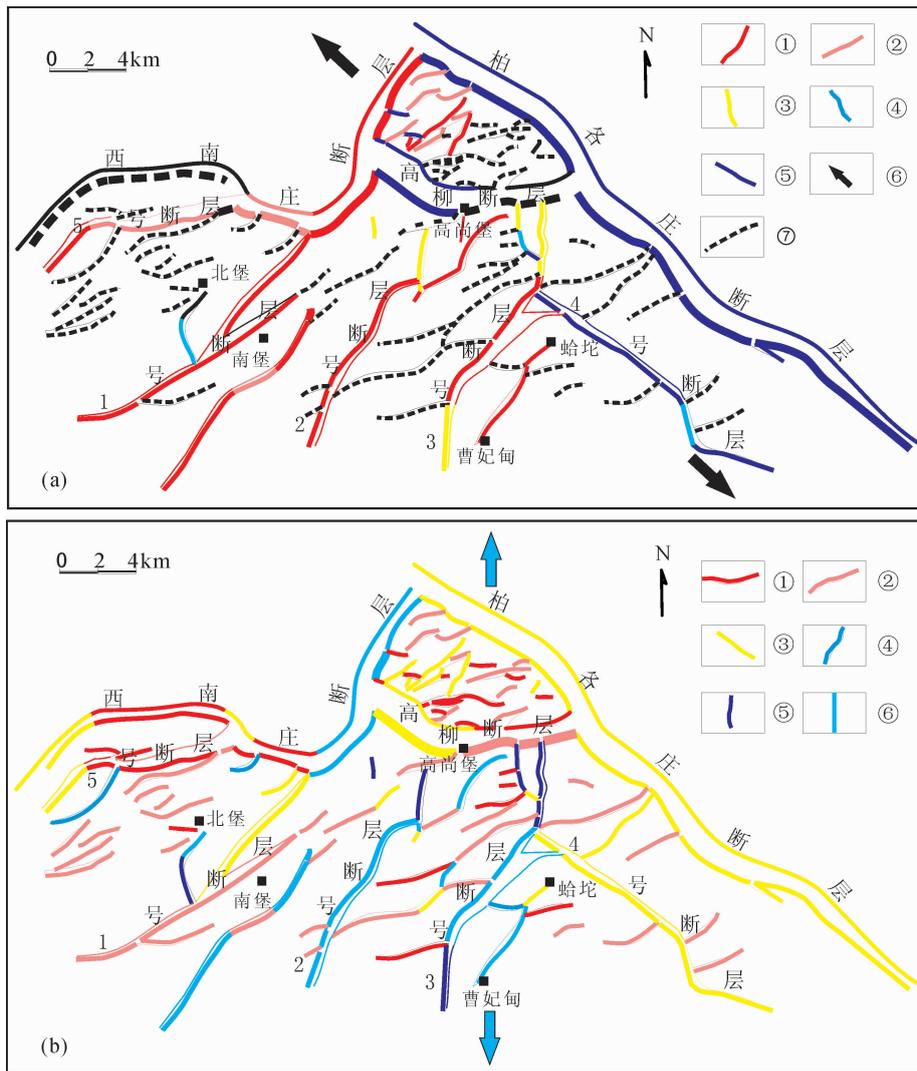


图 3 南堡凹陷 E_2s^3 底界北西-南东向(E_2s^3 时期) (a) 和南北向($E_3s^1-N_2m$ 时期) (b) 伸展时期断层性质分析预测图

Fig. 3 Fault properties prediction map of E_2s^3 bottom in Nanpu sag at the stage of NW direction extension (a) and N-S direction extension (b)

- ①—正断层; ②—斜滑正断层; ③—正斜滑断层; ④—正走滑断层; ⑤—走滑断层; ⑥—伸展方向; ⑦—后期形成断裂(尚未形成)
- ①—Normal fault; ②—oblique-slip normal fault; ③—normal oblique-slip fault; ④—normal strike-slip fault;
- ⑤—strike-slip fault; ⑥—extension direction; ⑦—late formed fault (not yet formed)

“雁列状”: 次级断层雁行排列的组合方式(图 5c)。如北部湾的涠西南凹陷的 2 号断层带, 2 号断层的分支断层构成盆地尺度、非常壮观的雁列构造(图 6a 中的灰色断层); 辽河西部凹陷的中央构造带“雁列状”构造也十分发育(Tong Hengmao et al., 2008)。最近的研究表明, 雁列构造并非是走滑构造的“专利”(Morley, 2007), 中国东-南部裂陷盆地内出现“雁列状”构造有一定的普遍性。

“帚状”、“梳状”和“雁列状”构造组合以前是作为走滑构造的判别标志, 而大量高精度的三维地震资料的精细构造解释表明, 典型的裂陷盆地(如渤海湾盆地、北部湾盆地)内, “帚状”、“梳状”和“雁列状”

构造是经常出现的断层平面组合现象。不仅“雁列状”, “帚状”、“梳状”构造也不是走滑盆地特有的现象, 这一点非常值得有关研究人员的注意。

“平行状”: 同一级别的断层组合方式(图 5d), 是平行或近于平行断层的平面组合。“平行状”构造是一种常见的断层平面组合, 经常在远离先存构造(变形介质相对比较均匀)的区域出现。

“平行交织状”: 同一级别断层的一种组合方式(图 5d), 是近于平行的断层和少量斜交的断层交织在一起形成的一种断层平面组合方式。南堡凹陷的 2 号构造带是“平行交织状”发育比较典型的地区(图 4)。

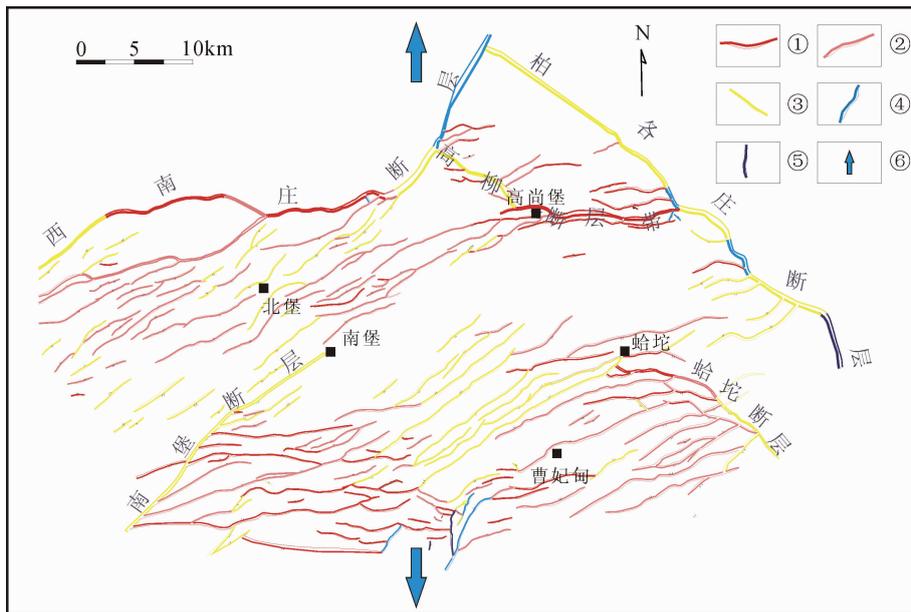


图4 南堡凹陷馆陶组底界(南北向伸展)断层性质(N₂m时期)分析预测图

Fig. 4 Fault properties prediction map (N-S direction extension) of N₁g bottom in Nanpu sag

- ①—正断层; ②—斜滑正断层; ③—正斜滑断层; ④—正走滑断层; ⑤—走滑断层; ⑥—伸展方向
- ①—Normal fault; ②—oblique-slip normal fault; ③—normal oblique-slip fault; ④—normal strike-slip fault;
- ⑤—strike-slip fault; ⑥—extension direction

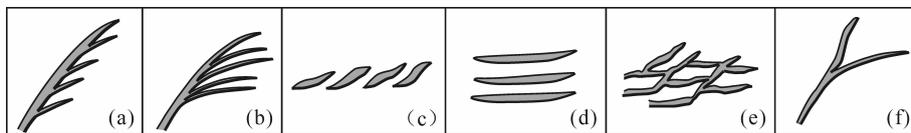


图5 裂陷盆地断层平面组合型式

Fig. 5 Fault plane assemblage in rift basins

- (a)—“梳状”构造; (b)—“帚状”构造; (c)—“雁列状”构造; (d)—平行状构造; (e)—平行交织状构造; (f)—分叉状
- (a)—comb structure; (b)—broom structure; (c)—en-echolen structure; (d)—parallel structure;
- (e)—parallel interwoven structure; (f)—bifurcation structure

“分叉状”: 主次断层或规模接近断层的一种组合方式(图 5f), 是两条斜交的断层相交后成为一条断层的组合方式。南堡凹陷的西南庄断层与 5 号断层、高柳断层、柏各庄断层之间均是“分叉状”断层组合方式(见图 3)。

2.4 断层的剖面组合型式

由于裂陷盆地(伸展变形区)褶皱作用相对比较简单, 断层作用是构造变形的主要表现方式, 断层的组合形式也通常称之为盆地的构造样式(实际应用中, 构造样式通常为剖面上断层的组合形式)。

三维地震资料的解释结果显示, 中国东—南部裂陷盆地剖面上的断层组合类型十分多样, 即构造样式类型十分丰富(图 7), 常见的有“y”形(包括复式“y”形, 图 7a)、“x”形(包括复式“X”形, 图 7b)、“v”形(包括复式“v”形, 图 7c)、阶梯式(图 7d)、“多

米诺”式(7e)、垒堑式(7f)、“铲式扇”(图 7g)、“负花状构造”(图 7h)等等。丰富多彩的构造样式类型是裂陷盆地断裂系统复杂性的重要表现。

复式“Y”形构造和“负花状构造”由于形态比较相似, 经常被混淆, 值得注意: 复式“Y”形构造的主控断层是铲式正断层或铲式斜滑正断层, 向深部倾角逐渐变小; “负花状构造”的主控断层则是近直立的走滑断层。由于这两个构造样式之间主控断层的性质和产状存在显著区别, 应避免混淆。

“负花状构造”是走滑构造变形的标志, 但并非是走滑盆地特有的现象。裂陷盆地的走滑构造主要扮演变换构造带(变换断层-transfer fault 和变换带-transfer zone, Morley, 1990)的角色, 在渤海湾盆地的辽东湾地区、渤中地区广泛发育(Qi and Yang, 2010)。

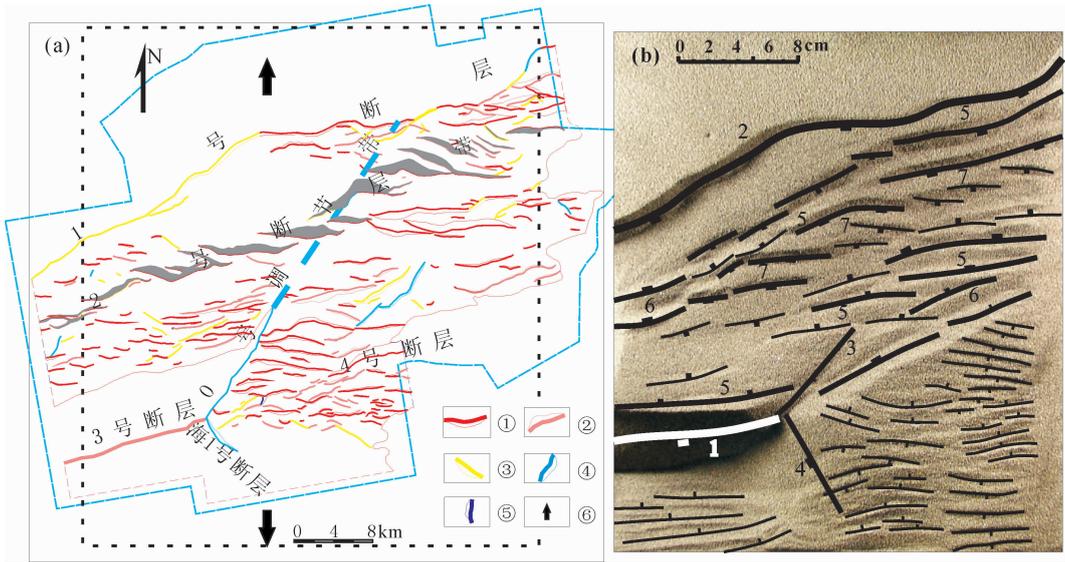


图 6 北部湾盆地涠西南凹陷断裂系统分布(T60)(a)与沙箱实验结果(b)对比图(据 Tong,2012)

Fig. 6 Comparison maps between fault system distribution (T60) (a) and sandbox modeling result (b) (after Tong,2012)

- ①—正断层;②—斜滑正断层;③—正斜滑断层;④—正走滑断层;⑤—走滑断层;⑥—伸展方向;(b)中数字为断层形成的先后次序号
- ①—Normal fault; ②—oblique-slip normal fault; ③—normal oblique-slip fault;
- ④—normal strike-slip fault; ⑤—strike-slip fault; ⑥—extension direction;the number in (b) is the order number of fault formation

| | | | | | | |
|----------|----|----------|----|----------|----|---------|
| (a) “Y”型 | | (b) “X”型 | | (c) “V”型 | | (d) 阶梯状 |
| 单式 | 复式 | 单式 | 复式 | 单式 | 复式 | |
| | | | | | | |
| (e) 多米诺式 | | (f) 垒堑式 | | (g) 铲式扇 | | (h) 负花状 |
| | | | | | | 简单型 |
| | | | | | | 复杂型 |
| | | | | | | |

图 7 裂陷盆地断层的剖面组合型式

Fig. 7 Sectional structural types in rift basins

2.5 断层形成、分布和演化

地震资料构造解析和平衡构造演化研究表明,中国东-南部裂陷盆地内断层的形成演化存在复杂的表现形式,具体表现为:断层分布在“时-空”上存在显著的不均一性;同一断层在不同反射层的走向、长度和性质可发生很大的变化;一个构造变形期内可以有不同规模、不同性质、不同活动期次;同一断层在不同的构造演化阶段性质会产生显著的变化;存在不同方向、同时活动的“正断层”。

(1)断层分布在“时-空”上存在显著的不均一性;横向上,裂陷盆地的断层集中分布在边界断层下

降盘附近,如南堡凹陷的西南庄断层和柏各庄断层的下降盘(图 4)和盆地(凹陷)内的构造带上,如南堡凹陷的 1、2、3、4 号构造带,断层均十分发育(图 4),而盆地的深凹带,断层一般不太发育。纵向上,断层一般在裂陷构造层比较发育,拗陷构造层一般不太发育。但在中国东-南海域地区发育的裂陷盆地地区,断层在拗陷构造层也十分发育,如渤海湾盆地南堡凹陷中的拗陷构造层(图 4),但断层的发育型式在拗陷构造层和裂陷构造层中存在显著的差别:裂陷构造层发育的断层断距大、数量少,而拗陷构造层发育的断层数量多,但断距一般较小(对比图 3 和

图 4)。

(2)同一断层在不同反射层的走向、长度和性质可发生很大的变化:三维地震资料的构造解释表明,中国东-南部裂陷盆地内同一断层在不同反射层的走向、长度和性质可发生很大的变化具有很大的普遍性,其中北部湾盆地的 2 号断层是十分典型的例子。2 号断层在基底反射层(Tg)中在平面上是一条北东东走向的、连续分布的断层(文献 Tong, 2012 中的图 2),向上(T70 反射层以上),该断层在平面上转化为十几条“雁列状”分布的断层(图 6a),这些“雁列状”断层在剖面上均为 2 号断层向上延伸的结果。从基底反射层到 T70 以上的反射层,走向从北东东向转为近东西向(对比图 6 和文献 Tong, 2012 中的图 2),延伸长度从 38.5km 变化为 5.5~12.7km,断层性质(在南北向伸展时期)从斜滑正断层转化为正断层(部分是斜滑正断层和斜滑断层,图 6)。

(3)一个构造变形期内发育的断层可以有不同规模、不同性质、不同活动期次:地震资料构造解析和模拟实验结果表明(Tong et al., 2014),裂陷盆地中一个构造变形期内发育的断层:①先存构造复活断层规模相对最大,往往构成控盆断裂(一级断裂)、控凹断裂(二级断裂)或控带断裂(三级断裂),其次是先存构造相关断裂,最次是与先存构造无关的库伦断层;②先存构造复活断层最先形成,其次是先存构造相关断裂,与先存构造无关的库伦断层最后形成,而且不同的复活断层和相关断层形成的先后次序也有一定的差异;③不同方向的先存构造复活断层和相关断层的性质存在明显的差异,如图 3,西南庄断层和柏各庄断层均为先存构造复活断层(Tong Hengmao et al., 2013),但断层的性质存在差异,甚至同一断层(如西南庄断层,图 3)的不同段落断层的性质也存在差异。

(4)同一断层在不同的构造演化阶段性质会产生显著的变化:随着应力场的改变(裂陷盆地以区域伸展方向的改变为标志),同一断层的性质也会发生改变(对比图 3a 和 3b)。如南堡凹陷的柏各庄断层,在北西-南东向伸展阶段是一条走滑断层(变换断层,图 3a),而在南北向伸展阶段则是一条正斜滑断层(图 3b)。

(5)存在不同方向、同时活动的“正断层”:由于反射地震资料只能解释断层断距的垂向分量,而无法解释断距的水平分量,结果有正断距的断层都被解释为“正断层”。在裂陷盆地内,断层在活动时期

都会对沉积产生控制作用,因此,在有高精度三维地震资料的条件下,断层在剖面上表现出的活动性(包括活动期次和不同期次中的活动量)可以得到比较精确的解释。结果表明,裂陷盆地内不同方向的“正断层”同时活动是一种十分普遍的现象。

实际上,这些不同方向的“正断层”性质是不一致的(图 3 和图 4),可能是正断层、斜滑正断层、正斜滑断层和正走滑断层。

3 裂陷盆地断裂系统复杂性的成因机制

裂陷盆地断层分布复杂及规律和成因难以认识,究其原因,最根本的是先前指导裂陷盆地断裂系统构造分析的理论——Anderson 断层模式(Anderson, 1951)是基于均匀介质的。而在中国东-南部裂陷盆地中由于经历多期的构造运动,先存构造普遍存在,导致裂陷盆地内出现显著的非均质性,Anderson 断层模式的应用前提实际上已不复存在。而广义断层模式(先存构造条件下的断层作用模式, Tong Hengmao et al., 2009a; Tong et al., 2010, 2014; Tong & Yin, 2011)把 Anderson 断层模式从均匀介质扩展到有先存构造的非均匀介质,根据该理论,裂陷盆地断裂系统的分布特征、演化规律和成因机制均可以得到合理的解释,并且能够很好地预测。结果表明,造成中国东-南部裂陷盆地复杂断裂系统的根本原因是:不同裂陷盆地和同一裂陷盆地内的不同区域先存构造的分布存在差异、裂陷盆地在构造演化过程中伸展方向产生变化。

上述从中国东-南部裂陷盆地归纳出来的、断裂系统复杂性 9 个方面的表现形式从成因上剖析可以归纳为 3 个方面:

(1)断层的走向和性质多变(包括在引言中描述的断层复杂性表现①和②)。

(2)断层平剖面复杂多样的组合形式(包括在引言中描述的断层复杂性表现③和④)。

(3)断层形成和演化存在复杂的时-空关系(包括在引言中描述的断层复杂性表现⑤~⑨)。

3.1 断层走向和性质多变的成因机制

中国东南部裂陷盆地在盆地形成前存在多个方向的先存断裂(Tong Hengmao et al., 2013),如南堡凹陷存在:①以西南庄断层北东段为代表的北北东向先存断裂;②以柏各庄断层为代表的北西向先存断裂;③在南堡凹陷广泛分布的北东向先存断裂(如 1 号、2 号、3 号和 5 号断层,图 3a)。渐新世以

来(38Ma 以来),伸展方向由北西-南东方向转为近南北向,先期北西-南东方向伸展作用(南堡凹陷为 E_2s^3 期)形成的断裂均作为该期伸展的先存构造。这样,中国东南部裂陷盆地存在两种类型的先存构造:基底先存断裂和先期形成的断裂。

伸展作用开始后,不同方向的先存构造先后开始活动,依次形成先存构造复活断层、先存构造相关断层和与先存构造无关的库伦断层(Tong et al., 2014)。由于复活断层是沿先存构造面复活而形成,其产状决定于先存构造面(Tong et al., 2014),先存构造相关断层与复活断层近于平行或斜交(Tong et al., 2014),而库伦断层与伸展方向垂直(Tong et al., 2014),结果形成不同方向的断层。根据伸展应变椭圆(图 2),这些不同方向的断层中,与伸展方向近于垂直的断层为正断层,随着与伸展方向角度的减小,依次表现为斜滑正断层、正斜滑断层、正走滑断层和走滑断层(图 2)。其中复活断层往往作为边界断裂和主干断裂,相关断层和库伦断层往往是次级断裂。这样就可以很好地解释:①裂陷盆地内可以发育多种性质的断层,包括正断层、斜滑正断层、正斜滑断层、正走滑断层和走滑断层(如北西向的西南庄断层和 4 号断层)等(如图 3a,图 3b,图 4);②同一盆地的不同凹陷的边界断层及同一凹陷的不同边界断层、主断层和次级断层的走向可存在很大的差异(如图 3a,图 4)。

值得注意的是,裂陷盆地的走滑断层是伸展构造作用下形成的,并非走滑应力体制的产物。这种在非走滑应力体制下(伸展应力体制或挤压应力体制)形成的走滑断层被称为“被动走滑断层”(另文详述),它们与走滑应力体制下形成的走滑断层存在明显的差异,充当变换断层,其中渤海湾盆地内的郯庐断裂系(渐新世以来活动的北北东向断裂)是比较典型的被动走滑断层系(伸展机制下形成的走滑断层系)。

3.2 断层平剖面复杂多变组合形式的成因机制

地震资料构造解析表明,中国东-南部裂陷盆地在深部构造层(如南堡凹陷的 E_2s^3),断层发育的数量较少,平-剖面组合也相对比较简单(如图 3);比较复杂的断层组合主要出现的中、浅构造层(如南堡凹陷的 E_3s^1 及以上地层),是南北向伸展、递进变形过程中的产物。

渐新世以来(38Ma 以来),当伸展方向由北西-南东方向转为近南北向后,先期(40Ma 以前,古新世-渐新世北西-南东向伸展时期)形成的断层均作

为该期伸展构造变形的先存断裂。在南堡凹陷,在近南北向伸展作用下,这些先存构造大部分(如边界断层,1 号断层、4 号断层和 5 号断层)重新活动,少量断层停止活动(如 2 号断层和 3 号断层),先存构造相关断层和库伦断层大量发育(图 4)。

主控断层性质的不同、产状的差异就会导致断层不同的平-剖面组合样式:①斜滑正断层、正走滑断层和走滑断层(主干断层)与库伦断层(次级断层)以一定的角度斜交,平面上容易形成“帚状”、“梳状”、“分叉状”构造组合(斜交的两条先存断裂同时活动也可以形成“分叉状”构造组合);②当先存构造与伸展方向斜交时,先存构造相关断层往往雁列状排列,在平面上形成“雁列状”构造;③当先存构造相关断层与库伦断层交织在一起时(如南堡凹陷的 2 号和 3 号构造带之间,见图 4),在平面上就形成“平行交织状”组合;④当变形区介质比较均匀时,一般形成与伸展方向垂直的断层,平行排列,形成“平现状”构造;⑤“Y”形(包括复式“Y”形)、“X”形(包括复式“X”形)、“V”形(包括复式“V”形)、阶梯式、“多米诺”式、垒堑式、“铲式扇”是比较典型的伸展构造样式(Ma Xinyuan et al., 1983;陆克政等, 2001),其成因机制已比较清晰,本文不再赘述。⑥“负花状构造”是张扭走滑作用的典型构造样式,但其中的主干走滑断层是伸展体制下的产物,是被动走滑断层。

3.3 断层形成和演化复杂时-空关系的成因机制

构造解析表明,中国东南部裂陷盆地断层形成和演化复杂的时-空关系主要受三方面因素的控制:不同伸展方向的构造变形叠加、有先存构造及构造演化过程中的沉积充填。

中国东南部的裂陷盆地在新生代构造演化期间均经历了不同方向伸展变形的叠加(Tong Hengmao et al., 2013):40Ma 以前(古新世和始新世)为北西-南东方向伸展,38Ma 以来(渐新世至今)为近南北向伸展(图 1,40~38Ma(相当于渤海湾盆地的 E_2s^2)为应力体制的过渡阶段,构造活动相对比较平静)。上述在先存构造条件下的叠加构造变形模式,不仅可以合理地解释中国东南部裂陷盆地断裂系统众多的复杂表现,而且在多个地区还得到模拟实验的验证,如渤海湾盆地南堡凹陷(Zhou Tianwei et al., 2009;Liang Jie et al., 2013)、北部湾盆地的涠西南凹陷(图 6, Tong et al., 2009a)。

断层的时-空分布方面:横向上,由于先存构造分布在平面上是不均一的,而先存构造复活断层和相关断层均受先存构造控制,导致横向上断层分布

存在显著的不均一性;纵向上,主要由于不同构造演化阶段构造作用强度的差异、伸展方向的不同、以及不同构造层力学性质的差异,造成纵向上断层分布存在很大的差异。

北部湾盆地的2号断层是同一断层在不同反射层的走向、长度和性质发生很大变化的典型例子,成因机制也以此为例如来说明。2号断层是一基底先存构造复活断层(Tong et al, 2012),在基底反射层(T_g),断层沿先存断裂发育,形成一条连续的断层(文献Tong, 2012中的图2)。向上(T_{70} 反射层以上),伸展方向从北西-南东向伸展转为近南北向,断层方向开始受伸展方向控制而变为近东西向。由于应力集中带受北东东走向的2号断层先存构造控制,东西向断层延伸一定长度后就会越出应力集中带而停止发育,进而出现新的东西向断层,从而形成“雁列状”分布的断层(图6),这一过程在物理模拟实验中得到了很好的再现(Tong, 2012),结果导致同一断层在不同构造层的长度、走向和性质发生变化。

断层形成和演化存在复杂的时-空关系其他方面(在引言中描述的断层复杂性表现的⑦~⑨:一个构造变形期内可以有不同规模、不同性质、不同活动期次;同一断层在不同的构造演化阶段性质会产生显著的变化;存在不同方向、同时活动的“正断层”。)的成因机制已在现象描述中已作了阐述,这里不再赘述。

从前面的分析可以看出,导致中国东南部裂陷盆地断裂系统复杂性的根本原因是先存断裂分布的复杂性和不同方向(北西-南东向和近南北向)伸展变形的叠加。不同盆地、同一盆地不同区域应力场演化具有很大的相似性,均经历了北西-南东向(40Ma以前)和近南北向(38Ma以来)伸展变形的叠加,断层分布和演化差异是由先存构造分布差异造成的。裂陷盆地断层分布和演化虽然复杂,但具有很好的规律性,用广义断层模式理论可以得到很好的解释。中国东南部裂陷盆地断裂系统复杂性这一密码的破解,预期对该区域油气的深化勘探和开发将有很好的促进作用。

4 讨论

中国东-南部裂陷盆地断裂系统复杂多变的表现形式,曾经对学术界造成很大的困扰和争论,对油气勘探和开发也带来很多困难和挑战,究其原因是指导盆地构造分析的基本理论——Anderson断层

模式是基于均匀介质的。而广义断层模式(先存构造条件下的断层作用模式, Tong Hengmao et al., 2009a; Tong et al., 2010, 2014; Tong & Yin, 2011)把Anderson断层模式从均匀介质扩展到先存构造的非均匀介质,比较符合裂陷盆地的地质实际。本文应用该新理论,结合大量三维地震资料的构造解析,揭示了中国东南部裂陷盆地复杂性的实质:不同盆地、同一盆地不同区域应力场演化(断裂系统形成和演化的外因)具有很大的相似性,均经历了北西-南东向(40Ma以前)和近南北向(38Ma以来)伸展变形的叠加,断层分布和演化差异主要是由先存构造分布差异(还包括岩性分布的差异,断裂系统形成和演化的内因)造成的,先存构造分布差异是造成裂陷盆地断裂系统复杂性和多样性的一级控制因素。抓住先存构造这一核心因素,并以广义断层模式为理论指导,裂陷盆地断裂系统复杂性这一难题就能迎刃而解。

5 结论

(1)本文把中国东-南部裂陷盆地断裂系统的复杂性归纳为9种表现方式(包括提出了伸展变形区预测断层性质的伸展应变椭圆),从成因上进一步可以归纳为3个方面:①断层的走向和性质多样;②断层在剖面上存在复杂多变的组合形式;③断层形成和演化存在复杂的时-空关系。

(2)中国东南部裂陷盆地断裂系统复杂性的根本原因是先存断裂分布的复杂性和不同方向(北西-南东向和近南北向)伸展变形的叠加。

(3)不同盆地、同一盆地不同区域应力场演化具有很大的相似性,均经历了北西-南东向(40Ma以前)和近南北向(38Ma以来)伸展变形的叠加,断层分布和演化差异是由先存构造分布差异造成的。

References

- Allen M B, Macdonald D I M, Xun Z, Vincent S J, Brouet-Menzies C. 1997. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai basin, northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 14: 951~972.
- Anderson E M. 1951. *The Dynamics of Faulting*. 2nd edition. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Arreola M A, Morandi M. 2005. Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting. *Tectonophysics*, 409: 19~38.
- Boccaletti M, Bonini M, et al. 1998. Quaternary oblique extensional tectonics in the Ethiopian rift (Horn of Africa). *Tectonophysics*, 287: 97~116.

- Chen W-P, Na' belek J. 1988. Seismogenic strike-slip faulting and the development of the North China basin. *Tectonics*, 7: 975~989.
- Fan Bojiang, Liu Chenglin, Pang Xiongqi, Zhang Jian, Li Xiaohui, Ma Junbao. 2011. Control of fault system on hydrocarbon accumulation in Nanpu sag, the Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 32(2): 192~199.
- Gall B Le, Nonnotte P, Rolet J. 2008. Rift propagation at craton margin. Distribution of faulting and volcanism in the North Tanzanian Divergence (East Africa) during Neogene times. *Tectonophysics*, 448: 1~19.
- He Bing. 2001. On dynamics of the Bohaihai Bay complex faulted basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(1): 27~31.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. 2000. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time. *Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium)*, 37(6): 845~851.
- Jiang Hua, Wang Hua, Lin Zhengliang, Fang Xinxin, Zhao Shue, Ren Guiyuan. 2009. Periodic rifting activity and its controlling on sedimentary filling of Paleogene Period in Nanpu sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 977~983.
- Jin Qiang, McCabe P J. 1998. Genetic features of petroleum systems in rift basins of eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 15(2): 343~358.
- Li S, Zhao G, Dai L, et al. 2012. Cenozoic faulting of the Bohai Bay basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 80~93.
- Liang Jie, Yu Fusheng, Liu Guoxi, Wang Tongkui, Li Dinghua, Ma Kui. 2014. Deformation superimposition characteristics resulting from stretching direction changes in Nanpu sag; insight from physical modeling. *Geoscience*, 28(1): 139~148 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhaolu, Xia Bin. 2007. Relationship between Cenozoic tectonic evolution and plays in Jiyang depression. *Natural Gas Geoscience*, 18(2): 209~215.
- Lu Kezheng, Qi Jiafu, Yang Qiao, Tong Hengmao. 1997. Tectonic Model of Bohai Bay Cenozoic Petroliferous in China. Beijing: Geological Publishing House, 72~86 (in Chinese with English abstract).
- Ma Qian, Zhang Junyong, Li Jianlin, Li Wenhua, Liu Guoyong, Fen Zhaorong. 2011. Characteristics of the shear structures in Nanpu sag and their controls on hydrocarbon accumulation. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 183~189 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xinyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, Wang Yipeng. 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 22~32 (in Chinese with English abstract).
- Maniatis G, Hampel A. 2008. Along-strike variations of the slip direction on normal faults: Insights from three-dimensional finite-element models. *Journal of Structural Geology*, 30: 21~28.
- Mann P, Hempton M R, Bradley D C, Burke K. 1983. Development of pull-apart basins. *Journal of Geology*, 91: 529~554.
- Martin P J, John J W. 2006. Localization of normal faults in multilayer sequences. *Journal of Structural Geology*, 28: 816~833.
- McClay K R. 1990. Extensional fault system in sedimentary basins: a review of analogue model studies. *Marine and Petroleum Geology*, 7: 206~233.
- McKenzie D. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet Science Letter*, 40(1): 25~32.
- Morley CK. 2007. Variations in Late Cenozoic-Recent strike-slip and oblique-extensional geometries, within Indochina: The influence of pre-existing fabrics. *Journal of Structural Geology*, 29(1): 36~58.
- Qi J, Yang Q. 2010. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 757~771.
- Ren J, Tamaki K, Li S, Zhang J. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent area. *Tectonophysics*, 344: 175~205.
- Suo Yanhui, Li Sanzhong, Liu Xin, Dai Liming, Xu Liqing, Wang Pengcheng, Zhao Shujuan, Zhang Bingkun. 2013. Structural characteristics of NWW-trending active fault zones in East China: A case study of the Zhangjiakou-Penglai fault zone. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 953~966 (in Chinese with English abstract).
- Tian Z, Han P, Xu K. 1992. The Mesozoic-Cenozoic East China rift system. *Tectonophysics*, 208: 341~363.
- Tong H. 2010. A new model for the origin and evolution of the rift basin fault-systems in the east and south China: a case study from Beibuwan basin. Abstract of Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia Conference being held in Ankara, Turkey, on 4~8 October 2010.
- Tong H. 2012. Sandbox modeling of fault formation and evolution in the Weixinan sag, Beibuwan basin, China. *Petroleum Science*, 9: 121~128.
- Tong H, Yin An. 2011. Reactivation tendency analysis: A theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state. *Tectonophysics*, 503: 195~200.
- Tong H, Cai D, Wu Y, Li X, Meng L. 2010. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain. *Science China (Earth Science)*, 53: 1~11.
- Tong H, Koyi H, Huang S, Zhao H. 2014. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models. *Tectonophysics*, 626: 197~212.
- Tong Hengmao, Mi Rongsan, Yu Tiancai, Liu Baohong, Meng Lingjian, Yang Jingyong. 2008. The strike-slip tectonics in the western Liaohe depression, Bohai Bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1017~1026 (in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Meng Lingjian, Cai Dongsheng, Wu Yongping, Li

- Xushen, Liu Mingquan. 2009a. Fault formation and evolution in rift basins—sandbox modeling and cognition. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 759~774 (in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Nie Jinying, Meng Lingjian, Zhang Hongba, Li Xiaoning. 2009b. The law of basement pre-existing fabric controlling fault formation and evolution in rift basin. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 97~104 (in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Zhao Baoyin, Cao Zhe, Liu Guoxi, Dun Xiaomei, Zhao Dan. 2013. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu sag, Bohai Bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1~17 (in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng, Zhu Hong, Zhao Lei, Lin Jianping, Cheng Jie, Chen Jin. 1996. Formation and evolution of Tancheng-Liujiang fault zone: a review. *Geoscience*, 10(2): 159~168 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiahao, Wang Hua, Zhou Haimin, Dong Yuexia. 2002. Tectonic activity and petroleum enrichment in the Laoyemiao oilfield in the Nanpu depression in Hebei. *Geoscience*, 16(2): 205~208 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qizhi, Wang Tonghe. 1997. *Tectonic Evolution and Oil Gas Accumulation of Petroliferous Basin in China*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Xu Anna, Zheng Hongju, Dong Yuexia, Wang Zecheng, Yin Jifeng, Yan Weipeng. 2006. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies prediction in Dongying Formation of Nanpu sag. *Petroleum Exploration and Development*, 33(4): 437~443 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junyuan. 1997. Similarities between Cenozoic basins of different magnitudes in East Asia continental margin. *Petroleum Geology and Experiment*, 19(4): 297~304 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junyuan, Zhang Lingyun. 2000. Genesis of Cenozoic basins in Northwest Pacific Ocean margin (1): comments on basin-forming mechanism. *Oil & Gas Geology*, 21(2): 93~98 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Haimin, Dong Yuexia. 2001. *The Theory and Practice of Oil and Gas Exploration in Faulted Depression Basin—A Case Study of Nanpu Sag in Bohai Bay Basin*. Dongying: China University of Petroleum Press (in Chinese with English abstract).
- Zhou Haimin, Wei Zhongwen, Cao Zhonghong, Cong Liangzi. 2000. Relationship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu sag. *Oil & Gas Geology*, 21(4): 345~349 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Haimin, Dong Yuexia, Xie Zhan'an. 2004. *Fine Exploration of Fault-depressed Basins: Practice and Understanding of Fine Exploration in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press, 156~631 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Haimin, Cong Liangzi, Dong Yuexia. 2005. Hydrocarbon Accumulation Dynamics and Hydrocarbon System Characterization in Faulted Depression Basin: A Case Study of Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 11~131 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Tianwei, Zhou Jianxun, Dong Yuexia, Wang Xudong, Chang Hongwei. 2009. Formation mechanism of Cenozoic fault system of Nanpu sag in Bohai Bay basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 33(1): 12~17 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Song Chuanzhong, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, Xu Jiawei. 2001a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology in the Tan-Lu strike-slip fault and its tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 31(3): 250~256 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, Song Chuanzhong, Xu Jiawei, Niu Manlan. 2001b. Extensional activities along the Tan-Lu fault zone and its geodynamic setting. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 269~278 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 何斌. 2001. 渤海湾复式盆地动力学探讨. *石油实验地质*, 23(1): 27~31.
- 范柏江, 刘成林, 庞雄奇, 张健, 李晓辉, 马俊宝. 2011. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统对油气成藏的控制作用. *石油与天然气地质*, 32(2): 192~199.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2000. 渤海湾盆地中-新生代构造演化研究. *北京大学学报*, 37(6): 845~851.
- 姜华, 王华, 林正良, 方欣欣, 赵淑娥, 任桂媛. 2009. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制. *沉积学报*, 27(5): 977~983.
- 刘朝露, 夏斌. 2007. 济阳拗陷新生代构造演化特征与油气成藏组合模式. *天然气地球科学*, 18(2): 209~215.
- 陆克正, 漆家福, 杨桥, 童亨茂. 1997. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式. 北京: 地质出版社, 72~86.
- 梁杰, 于福生, 刘国玺, 王童奎, 李定华, 马奎. 2014. 南堡凹陷分期异向伸展变形叠加特征: 来自砂箱物理模拟实验的启示. *现代地质*, 28(1): 139~148.
- 马乾, 张军勇, 李建林, 李文华, 刘国勇, 冯朝荣. 2011. 南堡凹陷扭动构造特征及其对油气成藏的控制作用. *大地构造与成矿学*, 35(2): 183~189.
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 1983. 中国东部中-新生代裂陷作用和伸展构造. *地质学报*, 57(1): 22~32.
- 索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 戴黎明, 许立青, 王鹏程, 赵淑娟, 张丙坤. 2013. 中国东部 NWW 向活动断裂带构造特征: 以张家口-蓬莱断裂带为例. *岩石学报*, 29(3): 953~966.
- 童亨茂, 宓荣三, 于天才, 刘宝鸿, 孟令箭, 杨景勇. 2008. 渤海湾辽河西部凹陷的走滑构造作用. *地质学报*, 82(8): 1017~1026.
- 童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 吴永平, 李绪深, 刘明全. 2009a. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识. *地质学报*, 83(6): 759~774.
- 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 张红波, 李晓宁. 2009b. 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. *地学前缘*, 16(3): 97~104.
- 童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 刘国玺, 顿小妹, 赵丹. 2013. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析. *地质学报*, 87(11): 1~17.
- 王家豪, 王华, 周海民, 董月霞. 2002. 河北南堡凹陷老爷庙油田构

- 造活动与油气富集. 现代地质, 16(2): 205~208.
- 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 林建平, 程捷, 陈进. 1996. 郯庐断裂带的形成与演化综述. 现代地质, 10(2): 159~168.
- 吴奇之, 王同和. 1997. 中国油气盆地构造演化与油气聚集. 北京: 石油工业出版社.
- 许浚远. 1997. 东亚陆缘新生代盆地的相似性. 石油实验地质, 19(4): 297~304.
- 许浚远, 张凌云. 2000. 西北太平洋边缘新生代盆地成因(上)成盆机制述评. 石油与天然气地质, 21(2): 93~98.
- 徐安娜, 郑红菊, 董月霞, 汪泽成, 殷积峰, 严伟鹏. 2006. 南堡凹陷东营组层序地层格架及沉积相预测. 石油勘探与开发, 33(4): 437~443.
- 周海民, 董月霞. 2001. 断陷盆地油气勘探理论与实践——以渤海湾盆地南堡凹陷为例. 东营: 中国石油大学出版社.
- 周海民, 魏忠文, 曹中宏, 丛良滋. 2000. 南堡凹陷的形成演化与油气关系. 石油与天然气地质, 21(4): 345~349.
- 周海民, 董月霞, 谢占安. 2004. 断陷盆地精细勘探——渤海湾盆地南堡凹陷精细勘探实践与认识. 北京: 石油工业出版社, 156~631.
- 周海民, 丛良滋, 董月霞. 2005. 断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征——以渤海湾盆地南堡凹陷为例. 北京: 石油工业出版社, 11~131.
- 周天伟, 周建勋, 董月霞, 王旭东, 常洪卫. 2009. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制. 中国石油大学学报(自然科学版), 33(1): 12~17.
- 朱光, 宋传中, 王道轩, 刘国生, 徐嘉炜. 2001a. 郯庐断裂带走滑时代的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究及其构造意义. 中国科学(D辑), 31(3): 250~256.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 宋传中, 徐嘉炜, 牛漫兰. 2001b. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景. 地质科学, 36(3): 269~278.

Manifestation and Origin Mechanism of the Fault System Complexity in Rift Basins in Eastern-Southern China: Case Study of the Nanbu and Weixinan Sags

TONG Hengmao¹⁾, FAN Caiwei²⁾, MENG Lingjian³⁾, ZHAO Baoyin³⁾, FAN Jinyu¹⁾

1) State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249;

2) Zhanjiang Branch of CNOOC, Zhanjiang, Guangdong, 524057;

3) Exploration and Development Research Institute, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei, 063004

Abstract

Rift basins in eastern and southern China host abundant oil and gas resources. But the complicated evolution and distribution of the faults are the key issues to be solved in future oil and gas exploration and development. Based on the structure interpretation of a large number of 3D seismic data and the generalized faulting model, this study selected the Nanpu Sag in the Bohai Bay Basin and the Weixinan Sag in the Beibuwan Basin as study examples so as to analyze and summarize the complicated fault system of basins in eastern and southern China. An extension strain ellipse was proposed to predict fault nature in extensional deformation zone. The results show that there are nine ways by which fault system complexity of rift basins in the east-south China are presented. They can be further summarized into three aspects, (1) variety of the fault strike and nature, (2) variable assemblages in the plane and profile, (3) complicated spatiotemporal relation of fault distribution and evolution. The fundamental reasons for complexity of the fault system are the distribution complexity of the pre-existing faults and the superposition of extensional deformation in different directions (NW-SE and near N-S). The evolution of tectonic stress field in different basins and even in different parts of a basin shows great similarities, NW-SE extension before 40Ma and north-south extension since 38Ma. Therefore, the distribution and evolution of faults are mainly affected by the differences in the distribution of pre-existing faults.

Key words: rift basin; fault; complexity; extension; origin mechanism; generalized fault model