

珠江口盆地文昌凹陷应力场演化 及其对成藏要素的控制作用

李俊良^{1,2}, 雷宝华³, 郑求根⁴, 段亮², 闫义⁵

(1.中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 2.中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 3.青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 4.中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 5.中国科学院 广州地球化学研究所 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 在区域构造背景分析的基础上, 对晚白垩世—中中新世文昌凹陷的断裂系统和地层特征进行了研究, 结果表明文昌凹陷应力场演化受区域扭张应力场控制, 其最小主应力方向沿 NWW→NW→SN→NNE 向顺时针旋转, 整体具有右旋扭张的特征。在该应力场的控制作用下, 文昌凹陷共发育 3 种类型的扭张/压扭模式: 与文昌 A 凹形成有关由弯曲断层控制的扭张下沉/差异隆升模式; 与文昌 B 凹形成有关由分支断层控制的扭张楔形下沉模式; 和与文昌 C 凹形成有关由弯曲和分支断层汇合控制的菱形扭张差异隆升/下沉模式。这三种扭张模式不仅控制了凹陷的变形格局, 形成 3 个不同的沉降中心和 2 个反转构造区, 更对圈闭的形成和油气运聚等成藏要素的发育有一定的控制作用。

关键词: 文昌凹陷; 区域应力场; 扭张模式; 凹陷格局; 沉降中心

中图分类号: P542 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2015)04-0601-09

0 引言

珠江口盆地珠三坳陷有近 30 年的勘探历史(朱伟林等, 1997; 聂逢君, 2011; 张迎朝等, 2011a, 2011b), 其勘探开发的主体为文昌 A、B 凹陷及琼海凸起(王春修和张群英, 1999)。受区域应力场控制, 珠三坳陷断裂十分发育, 具有数量多、类型全、平面和剖面变形样式复杂的特征。前人研究认为, 该区的断裂特征、构造演化与区域构造应力场密切相关, 均受太平洋板块 NWW 向俯冲及印度与欧亚板块 SN 向碰撞的影响; 但对于盆地内的一些特殊构造现象和油气地质特征, 如: 文昌 A 凹以生气为主, 且沉降量巨大(林兴荣和孙志鹏, 1999); 文昌 B 凹以

生气为主, 且发育反转构造;文昌 C 凹发育褶皱剥蚀等构造(朱伟林等, 1997a, 1997b; 姜华等, 2008), 前人并没有给予合理的成因力学解释。

为解释这些疑问, 本文结合前人对珠江口盆地研究的大量成果, 深入分析文昌凹陷的变形机制、构造特征、沉积演化及其与周缘区域应力场演化之间的对应关系, 揭示了珠江口盆地新生代形成与演化的区域背景; 再对研究区内的断裂走向进行分层统计, 分析了研究区应力场的变化规律, 总结出 3 种扭张模式; 最后, 对文昌 A 凹陷、B 凹陷和 C 凹陷的一些构造、沉积及油气成因等问题进行解释, 探讨了珠三坳陷及南海北部陆架盆地的发育、演化及与油气生成的关系。

收稿日期: 2013-012-27; 改回日期: 2014-08-15

项目资助: 国家科技重大专项“近海大中型油气田形成条件及勘探技术”子课题(2008ZX05023-01-007)资助。

第一作者简介: 李俊良(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事石油地质勘探与研究。Email: lij@cnoc.com.cn

1 区域地质背景

珠江口盆地是南海北部大陆架以中-新生代沉积为主的大型陆缘裂陷盆地(Li et al., 1999)。晚白垩世至新生代的 NEE 向及近 E-W 向断裂带控制了大规模张裂和沉积盆地的形成,但后期又被 NW 向断裂带错切,形成了南北分带、东西分块的构造格局(陈汉宗等, 2005)。珠三坳陷位于该盆地的西部,被次级基底断裂进一步分割成 5 凹 2 凸的构造格局,即北部的阳江凹陷和琼海凹陷,中部的阳江低凸起及琼海凸起和南部沉降最深、面积最大的文昌凹陷(本文指文昌 A、B、C 凹陷)(图 1),其凹陷走向皆为 NE 向(李俊良等, 2010)。在剖面上,受主干断裂强烈的控制作用,珠三坳陷表现为一个典型的箕状断陷(图 2)。

珠三坳陷的东南部为神狐隆起,该隆起以新生

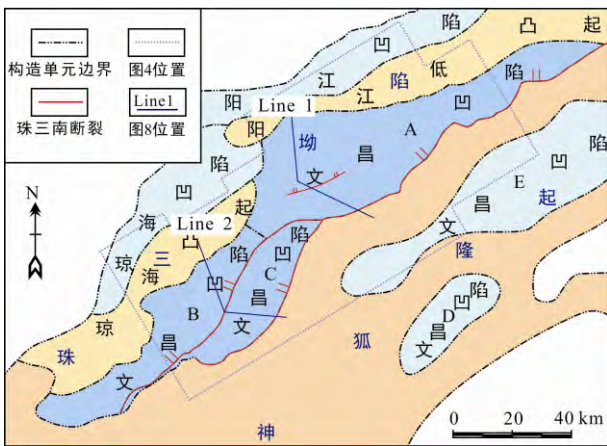


图 1 珠三坳陷构造区划图(李俊良等, 2010)

Fig.1 Diagram showing the tectonic units in the Zhu Depression

代沉积地层为主,其上除文昌 D、E 凹陷发育厚度不大、沉积不完整的古近系外,大部分区域均缺失古近系,最大沉积厚度为 10 km(龚再升等, 1997; 何家雄等, 2008)。

前人通过研究,将其构造演化划分为三个阶段:早期断陷阶段发育的文昌组、恩平组湖相沉积是盆地主要的烃源岩(图 2);断坳期的沉积环境由湖相转为滨浅海相,因此沉积了以砂泥互层为主的珠海组和珠江组,构成了凹陷主要的储集层(图 2);坳陷期的韩江组沉积了巨厚的浅海相泥岩,形成一套区域性盖层,而粤海组和万山组为浅海相砂泥岩互层(图 3)(吕学菊等, 2008; 姜华等, 2009b)。

雷宝华等(2012)应用断裂三维定量构造几何学和不同时期断裂活动多参数-走向长度关系分析方法,对珠三南断裂几何特征、形成演化、活动强度及其对沉积中心迁移的控制进行较细致和定量的研究,认为在神狐组-文昌组沉积时期,珠三南断裂西段南支活动较为强烈,控制了文昌 C 凹陷的形成,而此时珠三南断裂西段北支的活动控制了文昌 B 凹陷,并且与珠三南断裂东支相连,控制文昌 A 凹陷的沉降中心。恩平组-珠海组沉积时期,珠三南断裂西段南支与西段北支强烈的差异活动造成位于其上升盘的文昌 C 凹陷强烈抬升剥蚀(图 2)。珠江组之后,盆地进入坳陷期,沉积趋于稳定。

2 区域应力场演化

为了分析文昌凹陷的应力场特征,本文对区内神狐组-珠江组的 13 个地层界面(图 3)进行了构造-层序解释,并对延伸长度大于 2 km 的断裂的走向进

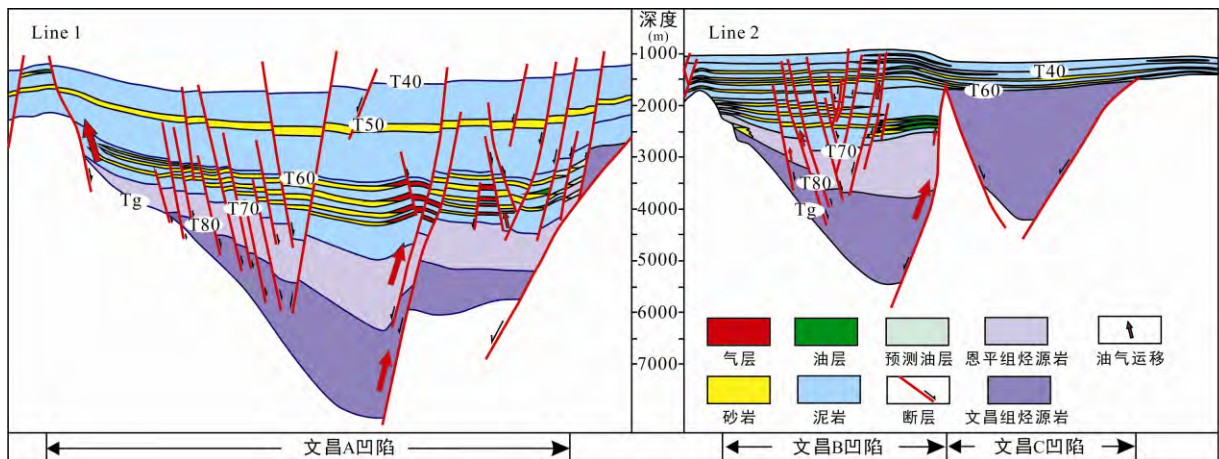


图 2 珠江口盆地文昌凹陷油气成藏模式图

Fig.2 Reservoir-forming model for the Wenchang Sag in Pearl River Mouth Basin

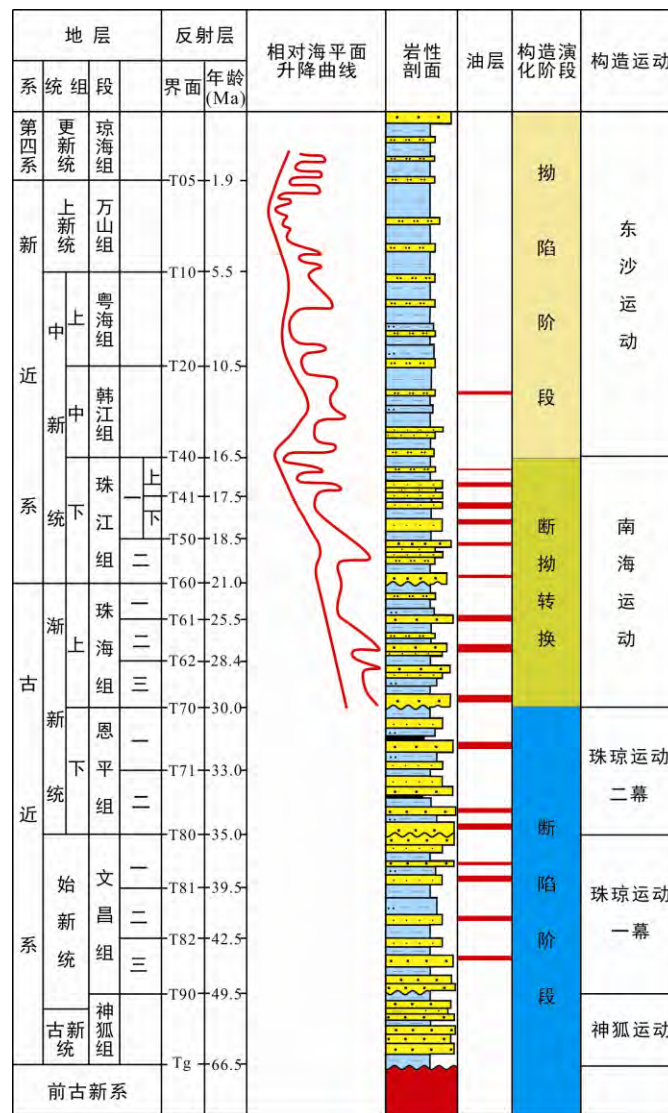


图 3 珠江口盆地珠三拗陷地层与构造运动事件图(据姜华等, 2009a 修改)

Fig.3 Strata and tectonic events of the Zhu Depression in Pearl River Mouth Basin

行分层统计, 编制了断裂走向玫瑰图(图 4, 表 1)。对比 T90 到 T40 断裂走向玫瑰图可以发现: 神狐组(T90)断裂走向以 NNE 向为主; 文昌组(T82-T80)断裂的走向主要 2 组, 一组为近 NE 向, 一组为近 EW 向。从文昌组三段(T82)到文昌组一段(T80), 近 NE 向断裂减弱, 近 EW 向增强。从恩平组(T71-T70)到珠海组(T62-T60), 断裂走向以近 EW 向为主; 珠江组(T50-T40)断裂走向以近 NWW 向为主。因此, 由老到新断裂走向由 NNE 向→近 EW 向→NWW 向变化。

前人研究表明, 同沉积断裂可以反映应力场变化: 在伸展作用下, 断裂(主要为远离基底先存断裂的新生盖层断裂)走向与最小主应力方向(或伸展方向)基本垂直(董亨茂, 2010)。因此据表 1 可知, 神狐组沉积时期, 最小主应力方向(或伸展方向)为近

NWW 向; 文昌组沉积时期, 最小主应力方向为 NW、NNW 向; 恩平组沉积时期, 最小主应力方向为近 SN 向; 珠海组沉积时期, 最小主应力方向为近 NNE 向。总体上, 从神狐组到珠江组, 研究区最小主应力方向沿 NWW→NW→SN→NNE 向顺时针旋转, 具有右旋扭张的特征。这里的“右旋扭张”是指主伸展应力方向顺时针旋转与先存基底断裂总体走向斜交, 引起基底断裂斜向伸展, 即“oblique extension”(Morley et al., 2004), 本文主要指 T80 之后的主伸展应力方向与珠三南断裂总体走向斜交; 而斜向伸展是指伸展方向与盆地边界基底先存断裂斜交的伸展作用。

而珠江口盆地断裂系统的发育与研究区内的断裂演化特征整体一致, 均受从 NWW 向到 NNE 向的

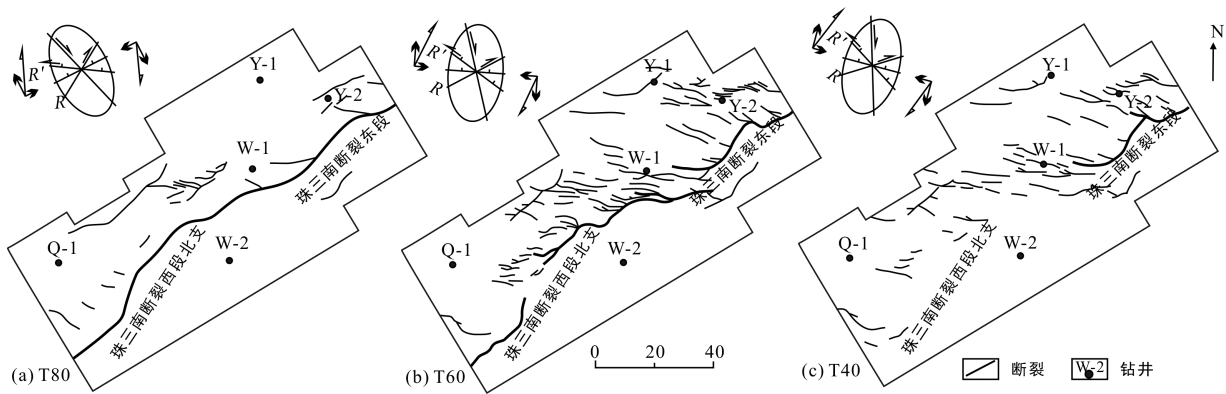


图 4 文昌凹陷 T80、T60 和 T40 层断裂组合图

Fig.4 Fault patterns of T80, T60 and T40 in the Wenchang Sag

表 1 文昌凹陷断裂走向变化

Table 1 Variations of fault strikes in the Wenchang Sag

组	层位	统计数量(条)	断裂走向	组	层位	统计数量(条)	断裂走向	组	层位	统计数量(条)	断裂走向
神弧组	T90	5		恩平组	T71	68		珠海组	T60	107	
文昌组	T82	224		恩平组	T70	140		珠江组	T50	165	
文昌组	T81	131		珠海组	T62	118		珠江组	T41	93	
文昌组	T80	38		珠海组	T61	131		珠江组	T40	76	

顺时针旋转的扭张应力场控制。中生代末，盆地形成之前的裂陷作用使大部分断裂开始活动，产生了一系列彼此分离的地堑、半地堑及 NNE 向断裂(表 1, T90); 晚白垩世后，扭张应力场的产生导致了研究区内 NE 向伸展断裂带的形成(图 5a)(表 1, T82-T70)，这一时期的构造活动主要表现为垂直差异升降、断层发育、沉积速率高的特征；晚渐新世，受南海运动影响，前期右旋扭张应力场得到增强，使南海发生了一次南北向水平运动，形成了研究区内近 EW 向断裂(表 1, T62-T60)，并随后演化为 NWW 向断裂(表 1, T50-T40)，产生了一批背斜和半背斜，这些构造同时也是目前认为最有勘探前景的构造圈闭；

中中新世末，南海停止扩张，东亚陆缘部分地区再次进入左行压扭体制(图 5b)，造成了部分先前形成的局部构造发生反转，使早期聚集的油气重新分配，并形成新的构造圈闭。

3 变形机制分析

珠三南断裂(图 1、图 6)为珠三坳陷的南部边界断裂，倾向 NW，自西向东走向由 NE 转为 NEE，是区内唯一一条一级控盆断裂。珠三南断裂分为三段，即：东段、西段北支和西段南支；分别控制文昌 A 凹陷、文昌 B 凹陷和文昌 C 凹陷的南部边界。在右

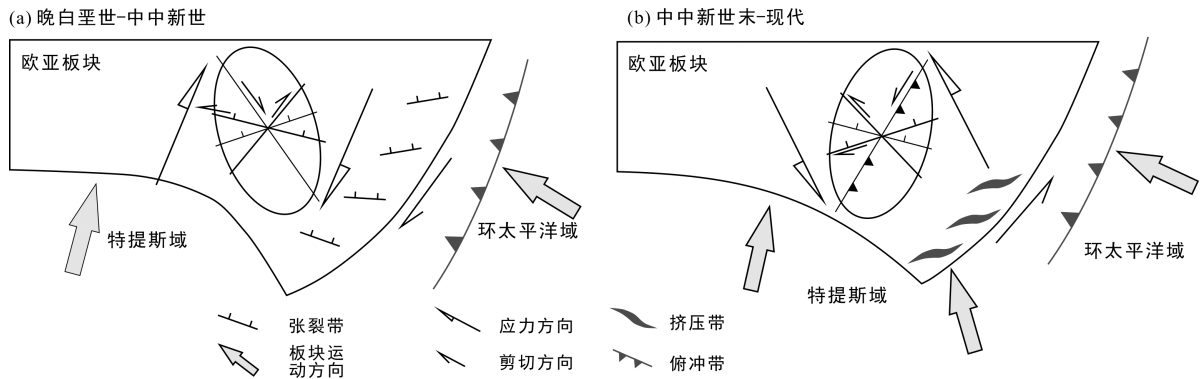


图 5 珠江口盆地主要断裂体系成因动力学分析图(据周蒂等, 2002, 有改动)
 Fig.5 Geodynamic models of the major fault systems in the Pearl River Mouth Basin

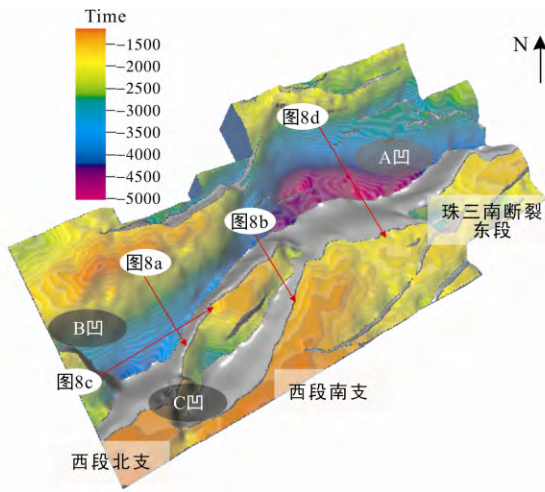


图 6 文昌凹陷基底三维图
 Fig.6 3D map of the basement of the Wenchang Sag

旋扭张应力场作用控制下, 珠三南断裂的不同分支和组合对珠三拗陷的构造变形具有 3 种不同的控制模式。

模式一: 在弯曲断层条件下, 松开(或施压)弯曲处, 在沿着断弯处会形成扁长形或透镜状的张性下沉带(或挤压隆升带)(图 7a-1、7a-2)。该弯曲断层对应珠三南断裂西段北支和东段弯曲位置, 分别控制文昌 A 凹及其沉降中心的形成和文昌 B 凹陷局部隆升。

模式二: 分支断层的伸长楔形块体在扭张应力作用下被拉开下沉(图 7b)。它由珠三南断裂西段北支的南部和 NW 走向的珠三 3 号断裂组成, 控制文昌 B 凹陷及其沉降中心的形成。

模式三: 弯曲和分支断层汇合, 所夹的菱形块体在走滑作用下被拉分(或挤压)(图 7c-1、7c-2)。它由珠三南断裂西段南支和西段北支组成, 控制文昌 C 凹陷的沉降(或隆升)。

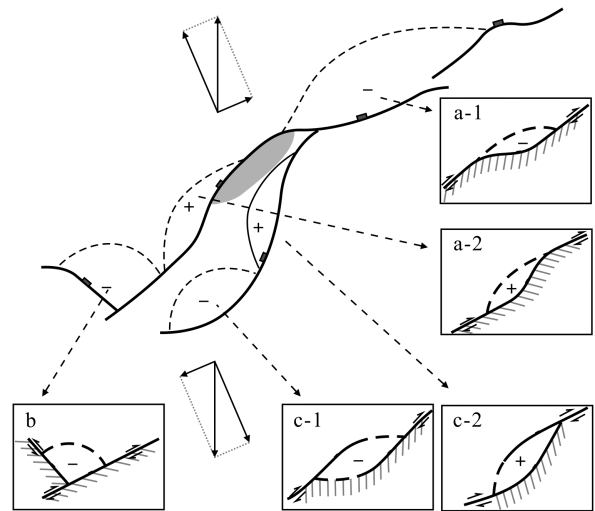


图 7 拉分与挤隆构造形成的力学模型
 Fig.7 Mechanical models for the formation of pull-apart tectonics and extrusion-uplift tectonics

4 对成藏要素的控制作用

4.1 对凹陷格局的控制

在扭张应力作用下, 当应力场较稳定时, 断陷盆地主要表现为拉张性质; 当应力场方向变化较大时, 先前形成的断裂走滑分量突然增加, 使得断陷盆地具有扭张性质。通过对比不同时期断裂走向(表 1), 应变椭球体中破裂面与应力场及不同破裂面之间的关系后发现(图 4), 研究区内存在的 3 个应力场变化较大的时期分别是: 神狐组沉积时期、文昌组沉积时期和珠海组沉积时期; 其水平最小主应力方向从 NWW→NW, NW→SN, SN→NNE 向变化。

神狐组沉积时期为盆地形成早期, 此时断裂发育少, 珠三南断裂西段南支首先形成(文昌 C 凹边界)

并控制凹陷的形成和发育(焦养泉等, 1997), 随后形成的珠三南断裂西段北支(文昌 B 凹边界), 控制了神狐组的沉积, 此时区域变形主要表现为伸展作用。文昌组和珠海组沉积时期, 断裂较发育、规模较大, 且后期应力场方向的变化使得先存活动断裂走滑分量增加。表现为在珠三南断裂附近, 模式一控制文昌 B 凹陷中部局部隆升(图 7a-2)、模式三控制文昌 C 凹陷北部, 形成 2 个压扭挤隆构造(图 7c-2); 同时, 模式一控制文昌 A 凹陷沉降中心(图 7a-1)、模式二控制文昌 B 凹陷沉降中心(图 7b)、模式三控制文昌 C 凹陷沉降中心, 形成 3 个扭张拉分构造(图 7c-1)。因此, 受珠三南断裂和扭张/压扭应力场控制, 在文昌凹陷形成 3 个扭张拉分构造和 2 个压扭挤隆区的构造格局(图 7)。

4.2 对凹陷反转构造的控制

由于应力场顺时针方向变化, 使得先存边界断裂的逆时针拐角处(图 7 中“+”附近)产生局部挤压分量, 进而造成地层上隆。在文昌 B 凹陷中部和文昌 C 凹陷北部的压扭挤隆构造区, 形成局部挤压, 从而使地层隆升反转。表现为地层沉积减薄或者遭受部分剥蚀, 使现今所见到的地层沉积中心远离控拗

断裂, 向盆地中部迁移。

在文昌 B 凹陷中部, 至少有 2 期明显的构造反转现象, 分别是: 珠海组沉积时期(晚渐新世), 其顶部存在明显不整合, 主干断裂附近的地层减薄; 珠江组沉积以后(中中新世末, 东沙运动在珠三拗陷西南部边界大断层处引起发生强烈的挤压作用)(王春修和张群英, 1999), 地层隆升明显, 韩江组形成同沉积背斜(图 8a、8c)。在文昌 C 凹陷东部, 文昌组地层(晚渐新统)发生构造反转, 并强烈褶皱剥蚀(图 8b)。

4.3 对沉降中心区的控制

在持续性扭张应力作用下, 断层活动性强(童亨茂等, 2009), 断陷强烈, 使靠近边界断裂的地层沉降速率较快, 故而形成沉降中心。

研究发现, 从晚白垩世至中中新世后期, 在右旋扭张应力场的控制下, 模式一、模式二、模式三分别形成了文昌 A、B 和 C 凹陷的沉降中心(图 6、7), 并在文昌 B 凹陷西部和文昌 A 凹陷中部形成滚动背斜构造或正牵引构造(陈书平等, 1999), 其地层表现为多期扭张和拉张构造的叠合区, 断层样式表现为铲式或坡坪式断层(图 8c、8d)。

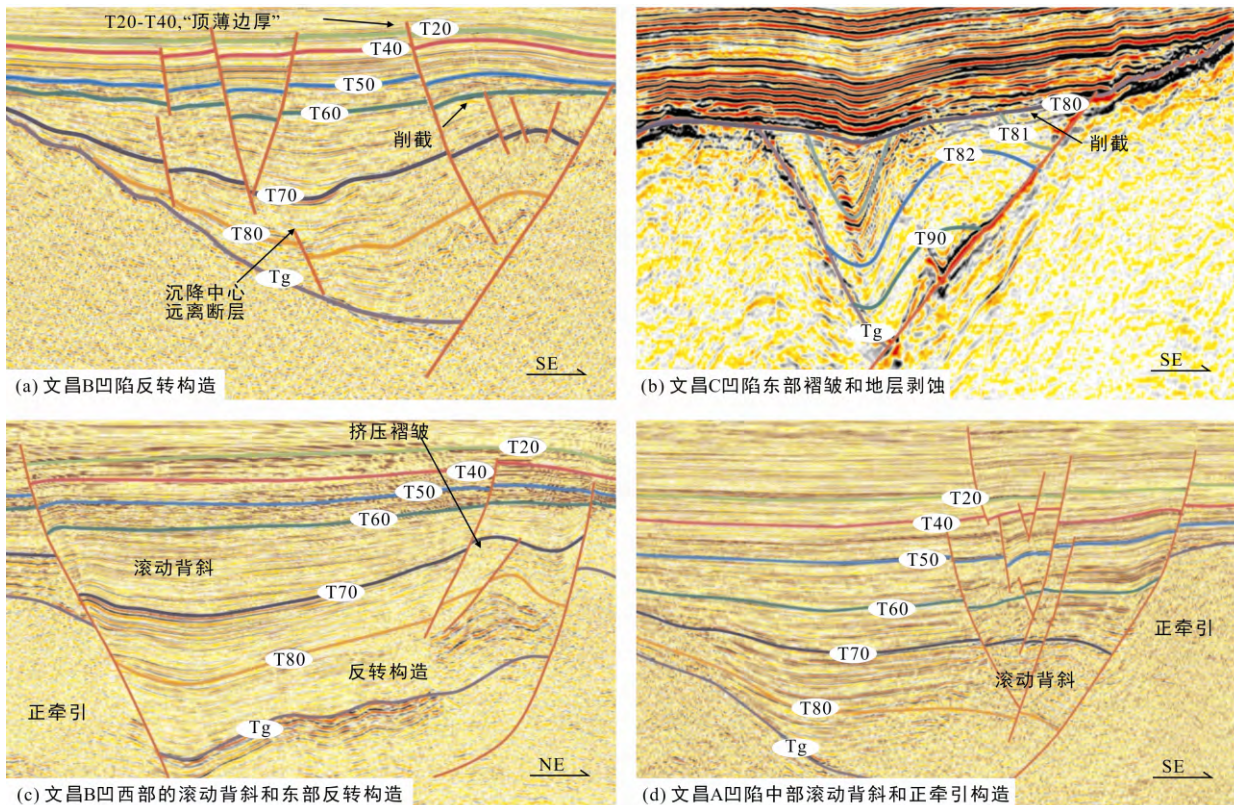


图 8 文昌凹陷典型地震剖面(剖面位置见图 6)

Fig.8 Typical seismic profiles in the Wenchang Sag (section position as shown in Fig.6)

4.4 对油气成因的控制

盆地分析表明, 不同的构造活动导致了不同的沉积相带, 而不同的沉积相又使烃源岩具有不同的地球化学特征。比如, 珠三南断裂的活动强度具有早期强烈晚期减弱的特征, 致使不同时期的沉积演化有所差异, 即形成了以滨浅湖相为主的文昌组烃源岩和以河沼相为主的恩平组烃源岩, 前者主要生油, 后者主要生气。同时, 珠三南断裂活动的差异性也造成了凹陷在不同时期沉积中心的迁移(图 8a), 从而改变了原先的沉积相态, 对烃源的分布产生了一定影响, 使得文昌凹陷文昌组的烃源岩主要集中在主干断裂的下降盘且成熟早, 而恩平组成熟烃源岩的分布范围相对较广泛(谢瑞永, 2012)。

构造活动研究认为, 文昌 A 凹在扭张应力作用下, 盖层断裂表现为长期持续活动的张性正断层, 是油气垂向近距离运移的良好通道(周雯雯和张伙兰, 2000)。早期文昌组烃源岩生成的原油由于缺乏区域性盖层, 或沿断裂逸散或侧向运移至凹陷边部; 随着后期构造活动的减弱和盖层的发育, 恩平组烃源岩生成的气能够沿断裂垂向运移, 从而进入珠海组聚集成藏(甘军等, 2009)。因此, 在珠三南断裂东段弯曲断层控制下形成的文昌 A 凹陷是找气的有利地区。

文昌 B 凹陷西部由扭张模式二控制的沉降中心是文昌组湖相厚层烃源岩的发育区; 文昌 B 凹陷中部由压扭模式一(图 7a-2)控制, 珠三 3 号断裂带下降盘文昌组湖相烃源岩沉积期末经历了构造反转抬升, 因而埋深较浅, 具有延迟生、排油, 多期持续油气充注的成藏过程, 其成熟烃源岩主要为文昌组。同时, 反转构造区易于形成背斜和断背斜等挤压构造圈闭, 有利于油气聚集成藏(张迎朝等, 2011a, 2011b)。因此, 由模式二控制的文昌 B 凹陷是找油的有利地区, 其过渡区为油气的复合带(朱伟林等, 1997)。

综上所述, 晚渐新世的张扭构造和中中新世末的剪切构造是主要的含油气局部构造, 且后者又是圈闭的定形期。在这一成藏背景下, 坳陷内存在 2 套含油气体系, 分别为文昌 A 凹陷恩平组-珠海组含气体系和文昌 B 凹陷的文昌组-珠海组、珠江组含油体系; 二者的生、排、运、聚的高峰均为中中新世之后(周雯雯等, 2004)。

5 讨论

在前面的几个章节, 我们从珠江口盆地珠三坳陷的断裂系统出发分析了区域应力系统并对其控制

作用进行了阐述, 结果显示其水平最小主应力方向具有从 NWW→NW, NW→SN, SN→NNE 向变化的特征, 并在一定程度上控制了研究区的成藏要素。但珠三坳陷只是华南陆缘的一小部分, 珠三坳陷的形成演化与华南陆缘的演化是否一致? 南海各板块的俯冲碰撞与珠三坳陷的变形特征、成因机制、断裂系统、火山活动、演化阶段又有怎样的对应关系?

王洪才等(2013)重建了 55 Ma 以来的典型时期海陆格局, 认为中生代末, 东亚陆缘受古太平洋板块早期 NWW 方向转为 NNW 方向俯冲的影响(王洪才等, 2013; Zhou et al., 1995), 呈左行压扭状态(Ru and Pigott, 1986; Briaies et al., 1989; Pautot et al., 1990; Ru et al., 1994; 许浚远和张凌云, 1999), 由此构成华南陆缘新生代构造演化的基础(周蒂等, 2002)。此后, 南海北部区域应力场经历了 3 次影响深远的转变, 而这 3 次区域性的变革事件对珠江口盆地珠三坳陷内断裂系统的形成以及成藏要素的发育均有重要影响。

晚白垩世, 太平洋板块向欧亚板块的汇聚速率降低, 导致东南亚大陆边缘出现应力场松弛。在这种背景下, 西太平洋俯冲带发生了后撤, 使东亚陆缘产生了左行压扭体制向右行张扭体制的巨大变革(朱夏和徐旺, 1990; 万天丰, 1993), 形成了东南亚陆缘 NE 向伸展断裂系(图 5a)。此次被称为神狐运动的区域性构造事件是南海扩张前岩石圈减薄作用的反映(周蒂等, 2002), 且该时期的 NE 向伸展断裂控制南海北部各盆地的形成与发育。

早渐新世初, 太平洋板块运动方向由 NNW 向俯冲后撤转为近 EW 向拉张, 这种动力学背景使得东亚陆缘的右行张扭应力场进一步发展, 并导致了陆壳的破裂及南海扩张。该时期的南海运动主要形成了近 EW 向的伸展断层。

中中新世末, 受澳大利亚陆架与班达弧碰撞及菲律宾岛弧向南海仰冲的影响, 南海停止扩张, 东亚陆缘再次进入左行压扭体制(图 5 b)。该时期的东沙运动造就了一些挤压褶皱带(周蒂等, 2002)。

因此, 珠三坳陷的 3 期断裂活动与华南陆缘区域应力场的 3 次变革相对应, 主要为 50~40 Ma、30~28 Ma 和 10~5 Ma(吴世敏等, 2001)。在变形运动学上, 分别为伸展作用、右旋转换伸展作用、左旋剪切作用。在成因动力学上, 分别为南海北部陆缘简单剪切、纯剪及受台湾地区的弧-陆碰撞挤压的影响(吴世敏等, 2001)。在断裂特征上, 分别为 NE 向、近 EW 向及 NW 向三组断裂(姚伯初, 1993; 张志杰等, 2004; 孙珍等, 2005)。

6 结 论

(1) 白垩世至早中新世后期, 文昌凹陷研究区的应力场与区域构造应力场基本一致, 受从 NWW 向到 NNE 向的右旋扭张应力场控制。

(2) 整个文昌凹陷受 3 种扭张模式控制。模式一: 弯曲断层控制的扭张下沉/差异隆升; 模式二: 分支断层控制的扭张楔形下沉; 模式三: 弯曲和分支断层汇合控制的菱形扭张下沉/差异隆升。

(3) 受珠三南断裂和扭张/压扭应力场控制, 在文昌凹陷形成 3 个不同的沉降中心和 2 个反转构造区(文昌 B 凹陷至少 2 期反转构造和文昌 C 凹陷文昌组反转造成的褶皱剥蚀)。

(4) 在模式一控制下, 文昌 A 凹陷和文昌 B 凹陷中部分别形成张性下沉带和挤压隆升带, 通过对拗陷内成藏要素的控制, 形成了 2 套含油气体系: 即文昌 A 凹陷恩平组-珠海组含气体系和文昌 B 凹陷的文昌组-珠海组、珠江组含油体系。

(5) 区域讨论分析认为, 珠三拗陷的 3 期断裂活动不仅与华南陆缘区域应力场的 3 次变革事件相互对应, 在区域演化阶段、变形特征和成因机制上也能够进行对比。

致谢: 向本文的审稿人、编辑部老师以及在论文撰写过程中提出的宝贵意见和帮助的同志们致以诚挚的感谢。

参考文献(References):

陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 王万银, 郝沪军. 2005. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析. 热带海洋学报, 24(2): 52-61.

陈书平, 王智帮, 刘军, 孙海龙. 1999. 沾化车镇地区滚动背斜研究. 石油大学学报: 自然科学版, 23(3): 6-8.

甘军, 张迎朝, 邓勇, 王振峰, 李绪深, 陆江, 杨金海, 郑榕芬. 2009. 珠江口盆地西部文昌A凹陷古近系天然气富集主控因素与勘探方向. 中国海上油气, 21(6): 367-371.

龚再升, 李思田, 谢泰俊. 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社: 1-507.

何家雄, 刘海龄, 姚永坚. 2008. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景. 北京: 石油工业出版社: 1-185.

姜华, 王华, 李俊良, 陈少平, 林正良, 方欣欣, 蔡佳. 2009a. 珠江口盆地珠三拗陷油气成藏模式与分布规律. 石油与天然气地质, 30(3): 275-281.

姜华, 王华, 肖军, 林正良, 吕学菊, 蔡佳. 2008. 珠江口盆地珠三拗陷构造反转与油气聚集. 石油学报, 29(3): 372-377.

姜华, 王华, 刘军, 赵淑娥, 林正良, 方欣欣, 蔡佳. 2009b. 珠江口盆地珠三拗陷神狐组-恩平组沉积时期南断裂活动性对沉积的控制作用. 地质科技情报, 28(2): 49-53.

焦养泉, 李思田, 解习农, 任建业. 1997. 多幕裂陷作用的表现形式——以珠江口盆地西部及其外围地区为例. 石油实验地质, 19(3): 222-227.

雷宝华, 郑求根, 李俊良, 李琦, 刘豪, 王海荣. 2012. 珠三拗陷珠三南断裂形成演化及其对沉积中心迁移的控制. 石油学报, 33(5): 807-813.

李俊良, 王海荣, 张建新, 李琦, 刘豪. 2010. 珠江口盆地西部珠江组潮流砂脊的分布、形态和水动力机制. 石油与天然气地质, 31(5): 671-677.

林兴荣, 孙志鹏. 1999. 文昌A凹陷天然气成藏条件. 天然气工业, 19(1): 47-51.

吕学菊, 肖力, 林正良, 岳勇. 2008. 珠江口盆地西部珠三拗陷沉降史分析. 新疆石油地质, 29(2): 195-197.

聂逢君, 姜美珠, 李思田. 2011. 珠江口盆地珠三拗陷油气输导系统研究. 石油实验地质, 33(4): 392-401.

孙珍, 周蒂, 庞雄, 陈长民, 孙龙涛. 2005. 南海北部珠江口盆地白云凹陷构造演化动力学研究 // 中国地球物理第二十一届全国年会论文集: 300-301.

童亨茂. 2010. “不协调伸展”作用下裂陷盆地断层的形成演化模式. 地质通报, 29(11): 1606-1613.

童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 张红波, 李晓宁. 2009. 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(4): 97-104.

万天丰. 1993. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用. 北京: 地质出版社: 103.

王春修, 张群英. 1999. 珠三拗陷典型油气藏及成藏条件分析. 中国海上油气: 地质, 13(4): 16-22.

王洪才, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 戴黎明, 程世秀, 许立青. 2013. 南海北部陆缘盆地群新生代构造过程与油气运聚规律. 海洋地质与第四纪地质, 33(1): 73-82.

吴世敏, 周蒂, 丘学林. 2001. 南海北部陆缘的构造属性问题. 高校地质学报, 7(4): 419-426.

谢瑞永, 黄保家, 游君君, 王碧维, 王丽芳. 2012. 文昌凹陷优质烃源岩地化特征与生烃潜力. 中国矿业, 21(9): 69-75.

许浚远, 张凌云. 1999. 欧亚板块东缘新生代盆地成因: 右行剪切拉分作用. 石油与天然气地质, 20(3): 187-191.

姚伯初. 1993. 南海北部陆缘新生代构造运动初探. 南海地质研究(五). 武汉: 中国地质大学出版社: 1-12.

张迎朝, 陈志宏, 李绪深, 徐新德, 李琦. 2011a. 珠江口盆地文昌B凹陷及周边油气成藏特征与有利勘探领域. 石油实验地质, 33(3): 297-302.

张迎朝, 陈志宏, 李绪深, 徐新德. 2011b. 文昌B凹陷陡坡带珠海组二段海侵扇三角洲储层特征及油气成藏

- 特征. 矿物岩石, 31(2): 86–95.
- 张志杰, 于兴河, 侯国伟, 陈瑞. 2004. 张性边缘海的成因演化特征及沉积充填模式——以珠江口盆地为例. 现代地质, 18(3): 284–289.
- 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 俞何兴. 2002. 南海的右行陆缘裂解成因. 地质学报, 76(2): 180–190.
- 周雯雯, 江文荣, 李荣西. 2004. 珠江口盆地珠三拗陷有机包裹体特征及其在含油气系统研究中的应用. 石油勘探与开发, 31(2): 128–134.
- 周雯雯, 张伙兰. 2000. 珠三拗陷有机包裹体应用研究. 岩石学报, 16(4): 677–686.
- 朱伟林, 黎明碧, 段佩潜, 汪品先, 吴国璋, 赵泉鸿. 1997a. 珠江口盆地珠三拗陷古湖泊与油气. 中国海上油气: 地质, 11(1): 13–18.
- 朱伟林, 黎明碧, 吴培康. 1997b. 珠江口盆地珠三拗陷石油体系. 石油勘探与开发, 24(6): 21–23.
- 朱夏, 徐旺. 1990. 中国新生代沉积盆地构造发展概略. 北京: 石油工业出版社: 1–6.
- Briaux A, Tapponnier P and Pautot G. 1989. Constraints of sea beam data on crustal fabrics and seafloor spreading in the South China sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 95(3–4): 307–320.
- Li S T, LIN C S, Zhang Q M, Yang S G and Wu P K. 1999. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 44(1): 10–22.
- Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, Pongwapee S, Kornawan A and Wonganan N. 2004. 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*, 26(10): 1803–1829.
- Pautot G, Rangin C and Briaux A. 1990. The axial ridge of the South China Sea: Seabeam and geophysical survey. *Oceanologica Acta*, 2(13): 129–143.
- Ru K and Pogott J D. 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 9(70): 1136–1155.
- Ru K, Zhou D and Chen H Z. 1994. Basin evolution and hydrocarbon potential of the northern South China Sea. *Oceanology of China Seas*, 2: 361–372.
- Zhou D, Ru K and Chen H. 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 251(1–4): 161–177.

Stress Field Evolution and its Controls on Oil Accumulation in the Wenchang Sag

LI Junliang^{1,2}, LEI Baohua³, ZHENG Qiugen⁴, DUAN Liang² and YAN Yi⁵

(1. Faculty of Resource, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 2. CNOOC Zhanjiang Company, Zhanjiang 524057, Guangdong, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Faculty of Ocean Science, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 5. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Characteristics of the fault system and stratigraphy of the Wenchang Sag during the Late Cretaceous to Early Miocene demonstrate that the stress field was controlled by regional oblique extension. Moreover, the minimum principal stress was characterized by right lateral transtension, which rotated clockwise from NWW to NW and from SN to NNE. We suggest that there were three kinds of transtensional structures developed in the Wenchang Sag: (1) transtensional subsidence or differential uplift controlled by curved faults and related to the formation of the Wenchang Sag A; (2) transtensional wedge subsidence pattern controlled by branch fault and related to the formation of the Wenchang Sag B; and (3) diamond transtensional differential uplift or subsidence pattern controlled by curved and branch fault and related to the formation of the Wenchang Sag C. These three transtensional patterns not only controlled the structural framework of the Wenchang Sag, formed three different subsidence centers and two reversal structure areas, but also have an effect on the hydrocarbon accumulation such as trap formation, migration and accumulation of oil and gas.

Keywords: Wenchang Sag; regional stress field; transtensional patterns; structural framework of Wenchang Sag; subsidence center