

石晓光. 珠江口盆地恩平凹陷新生代断裂特征与盆地成因[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 1-9.

珠江口盆地恩平凹陷新生代断裂特征与盆地成因

石晓光

(中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257000)

摘要:以恩平凹陷为主要研究对象,在断裂体系及盆地结构的精细刻画的基础上,结合断层活动速率计算和平衡剖面分析,恢复盆地发育演化过程,揭示盆地动力学成因机制。结果表明,盆地的发育演化过程受基底先存构造与区域动力背景联合控制。裂陷早期:太平洋板块俯冲速率降低及俯冲带后撤与印度板块俯冲联合作用下,导致了NW—SE向拉张应力场环境,造成了早期NE向低角度逆断层负反转,形成了NE向断裂控制的拆离半地堑;裂陷晚期:印支地块旋转挤出与古南海向南俯冲联合作用下,导致应力场由NW—SE向拉张转变为近SN向拉张,造成了控盆断裂由NE向向近EW向转变,岩石圈伸展模式由宽裂谷方式向窄裂谷方式转变,造成了盆地格局由孤立半地堑趋于相互连通扩展;裂陷拗陷期:岩石圈减薄中心向南迁移至南海扩张中心,整体处于裂后热沉降阶段;构造活化期:吕宋岛弧NWW向与欧亚板块发生弧-陆碰撞作用下,产生NNE向拉张,派生近EW向和NW向的共轭剪切作用,造成了先存近EW断裂复活及次级走滑断裂带的形成,导致了复杂断块升降运动。

关键词:成因机制;盆地演化;断裂特征;新生代;恩平凹陷;珠江口盆地

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.167

0 引言

断裂是盆地构造活动的主要变形样式,不仅控制了盆地的发育与演化,同时也是含油气盆地中油气主要的运移通道,控制油气藏的形成与分布^[1],一直以来是构造地质学和石油地质学的重要研究对象。作为南海北部陆缘珠江口盆地内部次级构造单元,恩平凹陷新生代以来经历了多期构造运动^[2-3],断裂体系发育特征复杂^[4-5],盆地结构也具有明显特殊性^[6-7]。目前,对于恩平凹陷的研究主要集中在盆地结构控制下的沉积填充模式^[6,8]、生储盖组合特征^[9-12]及断裂控藏等方面^[4,13-14],在发现一大批油气藏的同时,也揭示了一系列特殊的地质现象:①与周缘凹陷高角度断层控制的盆地结构样式不同,恩平凹陷表现为低角度断层控制的半地堑结构,属伸展拆离盆地还是裂陷盆地?盆地类型还存在争议;

②典型被动大陆边缘成熟后期构造活动相对稳定,但恩平凹陷在裂后拗陷期发生了明显的断块升降活动。鉴于此,本文以断裂发育演化为主线,在断裂体系与盆地结构静态刻画基础上,明确断裂体系时空发育特征,恢复盆地垂向叠合演化过程,揭示盆地发育与转型的动力学机制,这对于南海及其周缘盆地的发育演化有着一定的借鉴意义,同时对恩平凹陷油气勘探起到一定指导作用。

1 区域地质特征

珠江口盆地位于南海北部陆缘,构造位置处于欧亚板块、印度板块和太平洋板块3大板块交汇处,其周缘构造环境复杂多变^[15]。珠江口盆地新生代经历了多期构造运动,盆地演化过程整体可以划分为裂陷期、拗陷期以及构造活化期3大演化阶段,形成了断拗复合的盆地结构样式^[16]。珠江口盆地整体呈NE—SW向展布,具有“三隆(北部隆起带、中央隆起带和南部隆起带)夹两坳(北部拗陷带和南部拗陷带)”的构造格局,其中,恩平凹陷位于北部拗陷带内一个次级构造单元,整体呈NE—SW向走向,面积约5 000 km²,东西分别与西江凹陷及阳

收稿日期: 2021-06-11

资助项目: 中石化胜利油田分公司科技项目“滩海新近系断砂输导及薄储层描述技术研究”(20CX06015A)

作者简介: 石晓光(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事油气地质综合研究与勘探方面的研究工作。E-mail: 290093425@qq.com

江凹陷相接,南北与东沙隆起及北部隆起带相邻(图 1a)。盆地自下而上钻遇了古近系的神狐组(E_{2sh})、文昌组(E_{2w})、恩平组(E_{2e})、珠海组(E_{3z})和新近系의珠江组(N_{1z})、韩江组(N_{1h})、粤海组(N_{1y})、万山组(N_{2w})及第四系(Q)^[5](图 2)。

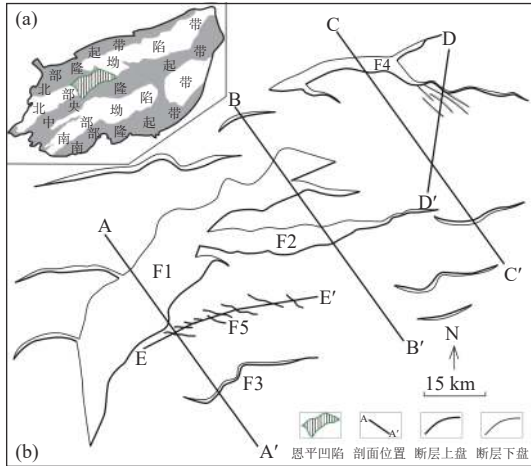


图 1 恩平凹陷新生代主干断裂体系分布

Fig.1 Distribution map of Cenozoic main fault systems in the Enping Sag

地质年代	地层	代号	年龄/Ma	地震界面
第四纪	第四系	Q	2.6	T20
新近纪	上新世	万山组	5.3	T30
	中新世	粤海组	10.0	T32
		韩江组 上段	13.8	T35
		韩江组 下段	16.0	T40
		珠江组	23.0	T60
古近纪	渐新世	珠海组	33.9	T70
	始新世	恩平组	38.0	T80
		文昌组	49.0	T90
		神狐组	65.0	Tg
	古新世			
	新生界基底			

图 2 珠江口盆地新生代地层划分

Fig.2 Cenozoic stratigraphic chart of Pearl River Mouth Basin

2 断裂特征与盆地结构

恩平凹陷新生代经历了多期构造运动^[2],现今断裂体系具有多走向、多类型、多期次的叠加改造特征,断裂体系多样性决定了盆地结构样式的复杂性。

2.1 断裂体系的静态特征

恩平凹陷现今断裂体系主要由 NE 向和近 EW 向断裂或断裂带组成,不同方向断裂或断裂带平面上组合样式及垂向上断穿层位存在明显差异。

NE 向断裂主要包括 F1 断裂,为恩平凹陷边界主要控凹断裂,发育规模最大,平面上延伸距离长,可达 70 km(图 1b),剖面表现为坡坪式正断层,倾角相对较小,约 25°,往往与近 EW 向次级断裂组合成复式 Y 字形构造样式,垂向上切割层系较少,仅断穿了文昌组和恩平组,向上逐渐消亡于恩平组(图 3)。

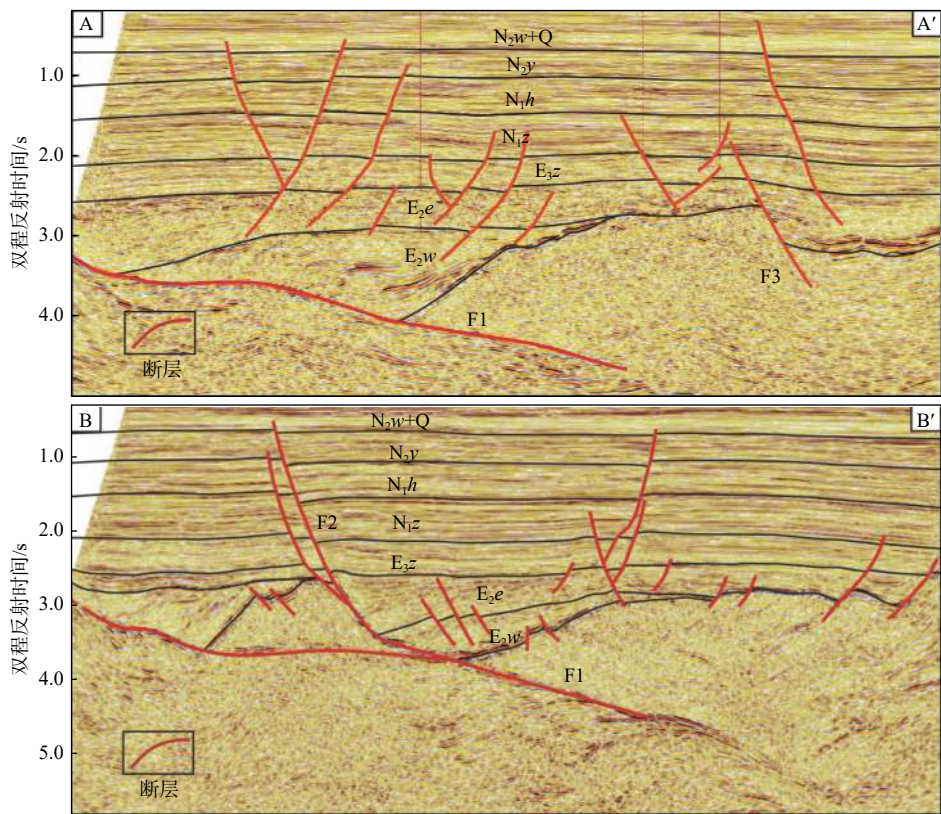
近 EW 向断裂在研究区发育数量较多,主要由 F2、F3、F4 和 F5 等断裂或断裂带组成,平面上多表现平行排列(如 F2、F3)或与伴生次级断裂组合成帚状(如 F4 断裂带)或雁列状(如 F5 断裂带)组合样式(图 1),延伸距离约 60 km(图 1);剖面上多表现为高角度铲式正断层,倾角约 45°,具有多级 Y 字型或负花状构造样式(图 4),垂向上切割层系较多,向下断穿新生界基底,向上断至万山组(图 4)。结合断裂的平面及剖面组合样式特征,近 EW 向断裂或断裂带整体上具有伸展作用和走滑作用共存的特征。

恩平凹陷现今断裂体系体现的是多期构造作用过程的叠加改造效应。通过分析深、浅层系断裂体系展布的差异性,可以揭示不同构造演化阶段应力场特征及盆地构造格局。本文利用地震解释软件,在层位精细解释基础上,结合主干断裂体系几何学静态特征的精细描述结果,明确了研究区现今主要层序界面的断裂体系展布图,系统总结深、浅层系断裂体系展布的差异性。

深部层系(Tg 界面)断裂体系主要以 NW 向断裂和近 EW 向断裂为主,平面上断裂走向多呈弯曲状(图 5),体现了拉张性质;在中部层系(T70 界面)早期 NE 向断裂逐渐消亡或被近 EW 向断裂所取代,并开始大量发育,次级断裂数量明显增多(图 5);至浅部层系(T32 界面)断裂体系以近 EW 向或 NW 向断裂沿近 EW 向雁列排列,断裂数量明显减少,近 EW 向断裂多表现为左阶侧接(图 5),具有明显走滑效应。整体而言,中、深层系断裂体系以拉张性质为主,浅部层系具有明显走滑特征,反映了盆地应力场性质由早期拉张性质向走滑性质转变。

2.2 盆地结构样式

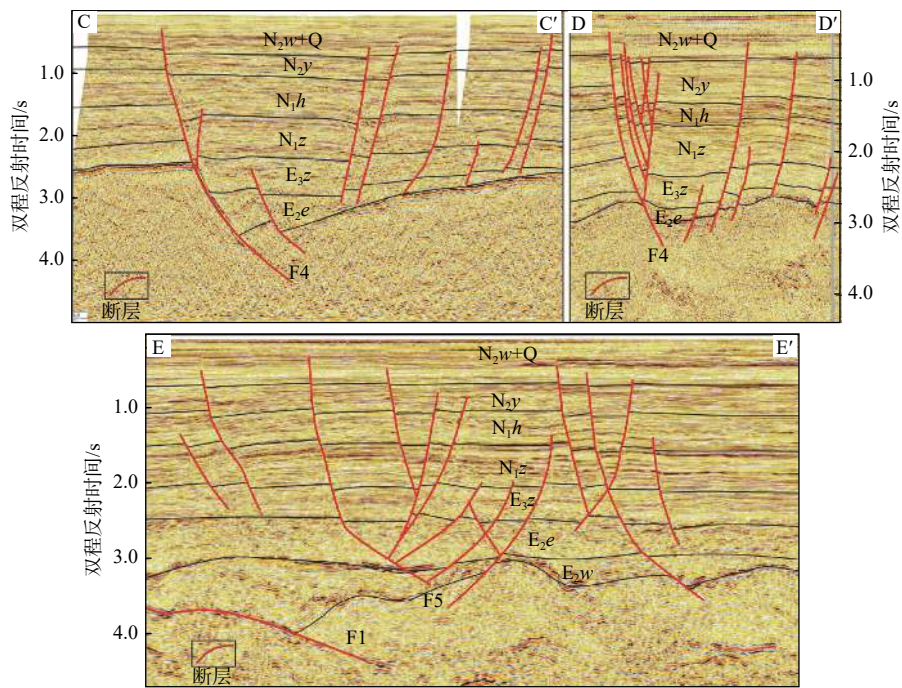
本文在上述断裂体系的平面、剖面静态特征精



剖面位置见图 1

图 3 恩平凹陷 NE 向主干断裂剖面特征

Fig.3 Characteristics of NE trending main fault section in Enping Depression



剖面位置见图 1

图 4 恩平凹陷近 EW 向主干断裂剖面特征

Fig.4 Characteristics of near EW trending main fault section in Enping Depression

细描述的基础上,建立了研究区盆地结构模型。恩平凹陷新生代盆地结构整体上表现为下断上坳(图 3)。上部坳陷层系主要发育近 EW 向断裂为主,对地层沉积的控制作用较弱,整体呈披覆式。

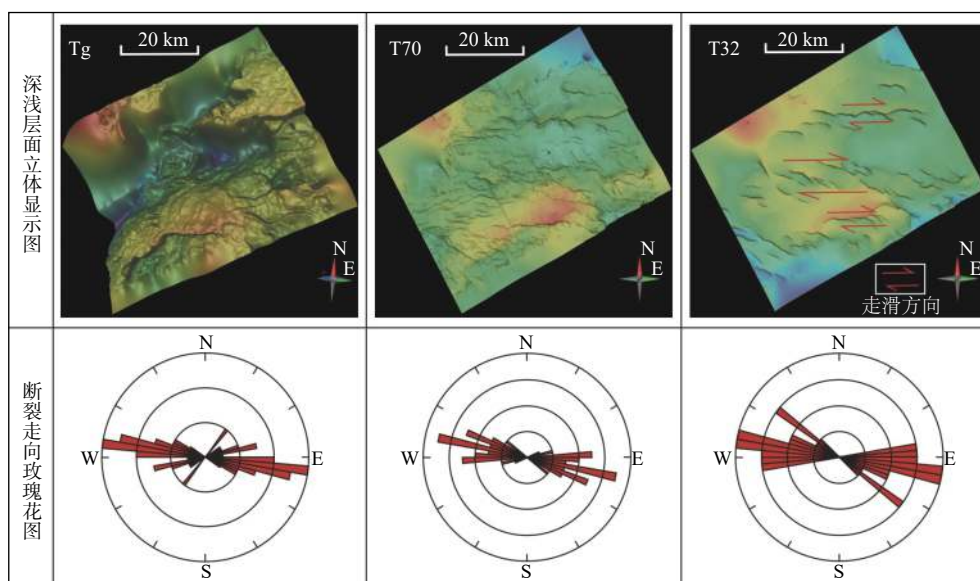


图5 恩平凹陷现今深、浅层系断裂体系展布特征

Fig.5 Distribution characteristics of present deep and shallow fault systems in Enping Depression

就下部断陷层系而言,整体上表现为受 NE 向 F1 坡坪式断裂控制的拆离半地堑(图 3),同时受近 EW 向 F2 断裂的切割复杂化,形成 3 个彼此孤立的洼陷(图 1)。除此之外,在研究区北部发育近 EW 向 F4 铲式断裂控制的滚动半地堑(图 4)。

3 盆地发育演化过程

本文在断裂体系与盆地结构的几何学特征精细表征的基础上,利用断层活动速率的计算方法,分析不同走向断层活动强度差异性,厘定出各关键时期主要控盆断裂,并结合沉积地层展布特征及平衡剖面分析,恢复了恩平凹陷新生代盆地发育演化及叠合改造过程。

3.1 断裂活动性分析

通过对恩平凹陷 6 条主干断裂的活动速率进行了定量计算,发现不同走向断裂的活动强度和发育时期存在差异。

(1) NE 向断裂

F1 断裂在文昌期开始发育,且断层活动速率达到峰值,可达 300 m/Ma;恩平期断层活动速率迅速降低,降至 100 m/Ma(图 6),进入珠海期以后断裂逐渐消亡(图 6),具有单峰特征。整体属于早期活动晚期消亡型断裂。

(2) 近 EW 向断裂

属于长期继承性活动型断裂,断裂活动强度整体表现为强-弱-强的特征(图 6)。如 F2 断裂文昌

期开始发育,其断裂活动强度仅为 120 m/Ma,至恩平期断裂活动速率达到最大,可达 250 m/Ma,进入珠海期以后断层活动强度逐渐减弱,仅为 20 m/Ma,至粤海期断裂活动强度明显增大,其活动速率升高至 40 m/Ma。与 F2 断裂发育特征不同的是,F4 断裂自恩平期开始发育,断层活动速率可达 >250 m/Ma,进入珠海期以后断裂活动强度逐渐减弱,至粤海期断裂活动强度有所增强,升高至 40 m/Ma(图 6)。除此之外,F5 断裂带属于晚期活动型断裂,早期不发育,自粤海组沉积时期以来开始发育,整体断裂活动强度相对较弱,断层活动速率约 40 m/Ma(图 6)。

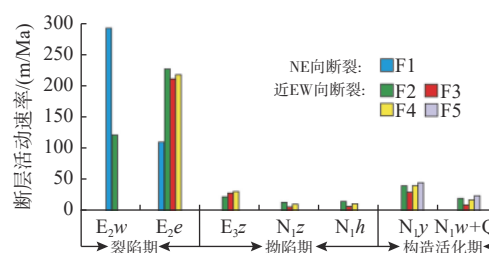


图6 恩平凹陷主干断裂活动速率

Fig.6 Activity rates of main faults in Enping Depression

整体而言,恩平凹陷新生代不同走向断裂的活动强度具有明显的阶段性,文昌组沉积时期期和恩平组沉积时期断层活动强度最大,断层活动速率均 >200 m/Ma,进入珠海组沉积时期以后,断裂活动强度逐渐减弱,断裂活动速率 <20 m/Ma,至粤海组沉积时期,断层活动强度有所增强,平均可达 40 m/Ma,不同时期断裂体系活动强度的变化过程与整个珠江口盆地新生代经历的裂陷、裂后拗陷和构造活化演化背景相一致。

3.2 盆地发育演化过程

在不同走向断裂体系活动强度的定量计算基础上, 结合现今沉积地层厚度及平衡剖面恢复结果, 恢复了各关键时期古构造格局, 明确研究区盆地不同期次的叠合改造过程, 整体上经历了裂陷早期(文昌组沉积时期)、裂陷晚期(恩平组沉积时期)、裂后拗陷期(珠海组沉积时期-珠江组沉积时期-韩江组沉积时期)及构造活化期(粤海组沉积时期至今)4个演化阶段(图 7)。

(1) 裂陷早期(文昌组沉积时期)

控盆断裂体系以 NE 向和近 EW 向断裂为主, 其中, NE 向断裂活动强度最大, 活动速率约 300 m/Ma, 近 EW 向断裂活动强度相对较弱, 断裂活动速率约 200 m/Ma, 反映了应力场环境整体处于 NE-SE 向拉张。盆地古构造格局整体表现为受 NE 向断裂 F1 控制的拆离半地堑结构, 同时受近 EW 的 F2 断裂分割, 形成 3 个孤立半地堑(图 8)。由于边界断层活动强度大, 断块旋转强, 洼陷分布面积相对较小, 彼此孤立且分割性强, 具有一断控一洼的半地堑结构特征(图 8)。

(2) 裂陷晚期(恩平组沉积时期)

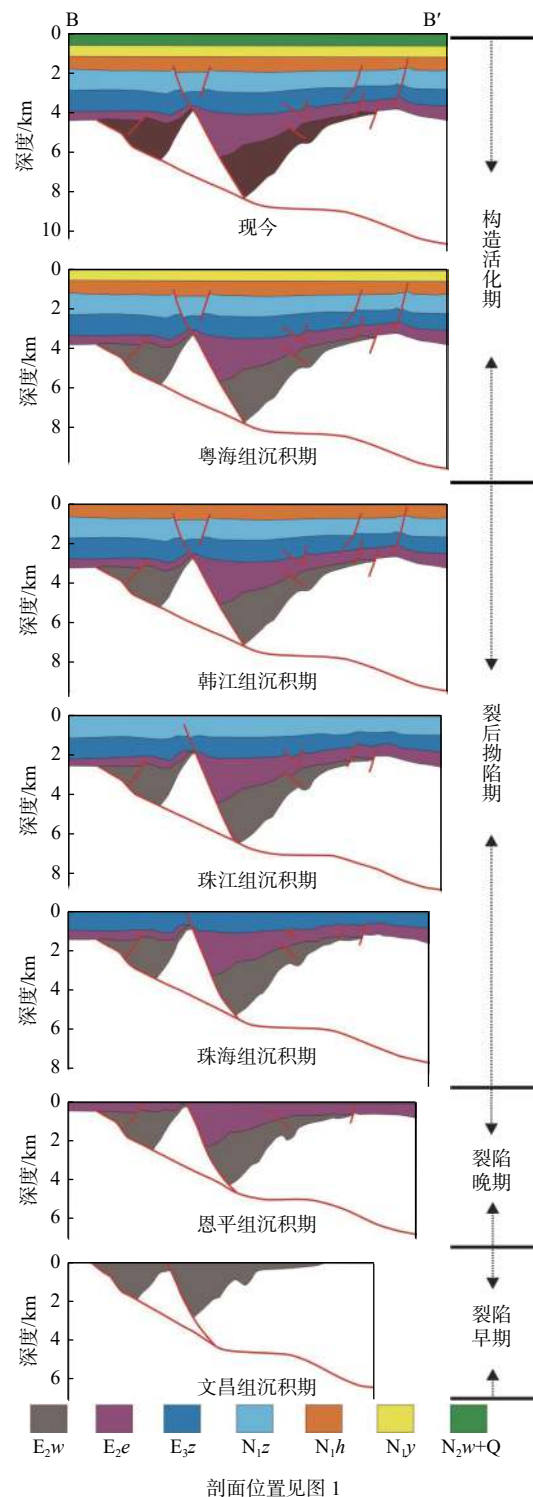
主要控盆断裂和盆地结构样式发生明显的转型。就主要控盆断裂体系而言, 先期活动强度较强的 NE 向控盆断裂活动强度逐渐减弱, 而近 EW 向断裂活动强度逐渐增强, 断裂活动强度达到最大值(图 6), 主要控盆断裂由早期 NE 向转变为近 EW 断裂控盆(图 9)。同时, 在恩平凹陷北部隆起区新发育了一系列近 EW 向控盆断裂(如 F4 等)(图 9), 反映了区域拉张应力场顺时针旋转为近 SN 向。就盆地结构样式而言, 整体上由 NE 向断裂控制低角度拆离半地堑结构向近 EW 向断裂控制的高角度滚动半地堑结构转变, 早期彼此孤立的半地堑开始相互连通, 合并成整个洼陷(图 9), 裂陷范围明显向南北扩张, 湖盆范围进一步增大(图 9)。

(3) 裂后拗陷期(珠海组-珠江组-韩江组沉积时期)

该时期整体处于构造宁静期。裂陷期强烈活动的断裂活动强度逐渐减弱, 如裂陷早期 NE 向控盆断裂逐渐衰弱至消亡, 而继承性活动的近 EW 向断裂活动强度明确减弱。地层整体呈披覆式, 具有整体裂陷后期热沉降的特点(图 7)。

(4) 构造活化期(粤海组沉积时期至今)

断裂整体活化, 断裂活动强度明显增强, 早期



剖面位置见图 1

图 7 恩平凹陷 NW-SE 向构造演化剖面

Fig.7 NW-SE structural evolution profile of Enping Sag

NE 向断裂控盆被近 EW 向断裂所取代, 控制了浅层断块活动。同时新生大量近 EW 向断裂呈雁列状排列(如 F5), 具有明显走滑特征(图 10), 剖面上新生的近 EW 向断裂切割层系较多, 大都切穿至古近系裂陷构造层, 对早期裂陷构造格架改造强烈, 从而形成了现今多期叠置改造盆地构造格局。

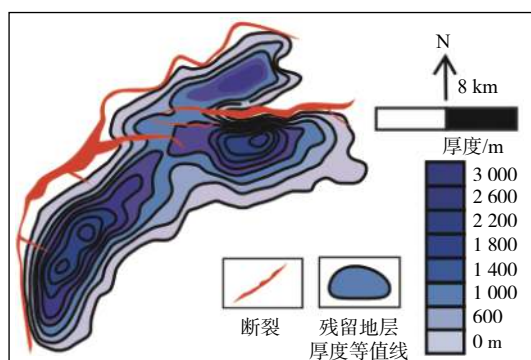


图 8 恩平凹陷文昌组沉积期主要控盆断裂及沉积地层展布

Fig.8 Distribution of synsedimentary faults and sedimentary strata of Wenchang Formation in Enping Depression

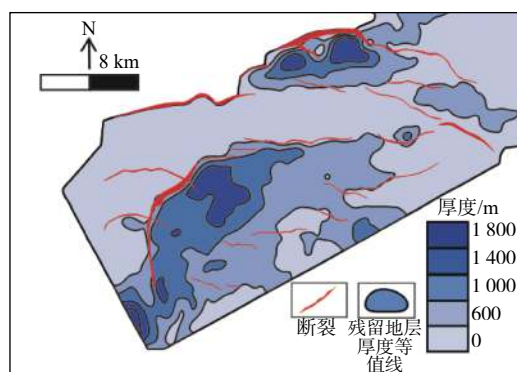


图 9 恩平凹陷恩平组沉积期主要控盆断裂及沉积地层展布

Fig.9 Distribution of synsedimentary faults and sedimentary strata of Enping formation in Enping Depression

4 盆地成因及区域动力背景探讨

珠江口盆地构造上处于特提斯构造域和太平洋构造域交汇处, 周缘区域动力背景复杂。基底先存构造与区域动力背景联合控制了珠江口盆地的

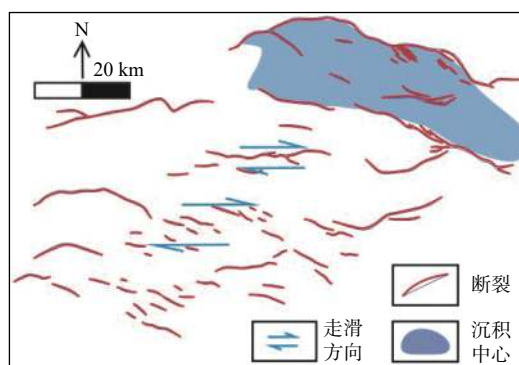


图 10 恩平凹陷构造活化期主要断裂发育特征及沉积地层展布

Fig.10 Development characteristics of main faults and distribution of sedimentary strata during tectonic activation in Enping Depression

发育与演化过程^[17-20]。

(1) 裂陷早期 (文昌组沉积时期)

在印度板块高速俯冲与太平洋板块俯冲速率降低及俯冲带后撤的联合作用下^[21-23], 导致了区域应力场环境由早期挤压转变为 NW-SW 向拉张 (图 11a), 形成了以 NE 向断裂控盆为主的裂陷作用。

珠江口盆地新生代裂陷之前整体处于挤压背景, 盆地基底构造表现为 NE 向、轴面南东倾的挤压背斜以及低角度逆冲断层, 岩石圈结构整体具有加厚地壳、减薄的岩石圈地幔的特征^[16]。就北部裂谷带内的恩平凹陷而言, 加厚地壳-减薄的岩石圈结构在 NW-SE 向区域拉张应力场作用下, 岩石圈伸展变形表现为宽裂谷模式^[24], 形成彼此孤立、分割性强的半地堑的断陷盆地群。由于盆地先存 NE 向低角度逆冲断层及挤压背斜构造薄弱带, 在 NW-

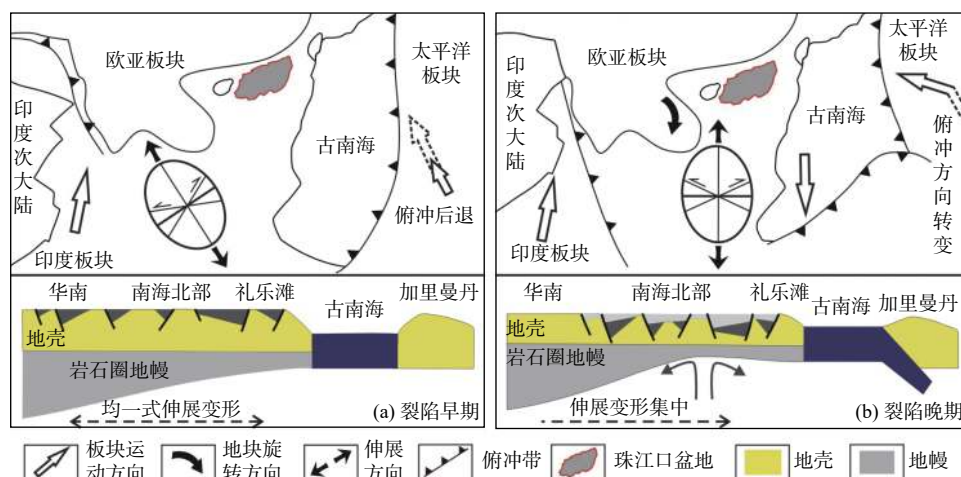


图 11 珠江口盆地新生代裂陷期盆地发育的区域动力背景

Fig.11 Regional dynamic background of fault development and basin transformation during Cenozoic rifting in Pearl River Mouth Basin

SE 向拉张作用下, 优先沿着早期 NE 向低角度逆冲断层发生负反转, 形成低角度 NE 向断裂(倾角 25°)控制的半地堑结构。

通过典型盆地沉积厚度与拉伸量交会图分析发现^[25], 传统裂陷盆地以较小拉伸量为特征, 盆地拉伸量一般 < 20 km, 盆地填充厚度常 > 5 km, 可达 15 km; 而上拆离盆地发育在强烈伸展地区, 具有拉伸速率高, 拉伸量大的特点, 拉伸量一般 > 20 km, 盆地深度浅, 沉积填充厚度较小, 往往 < 3 km。恩平凹陷拉伸量与沉积厚度整体处于传统裂陷盆地范围内(图 12), 与典型上拆离盆地存在明显差异。总拉伸量约为 10 km, 远小于上拆离盆地, 而沉积填充厚度可达 5~7 km, 远大于上拆离盆地, 证实了恩平凹陷是早期逆冲断层后期拉伸负反转形成的低角度半地堑结构。

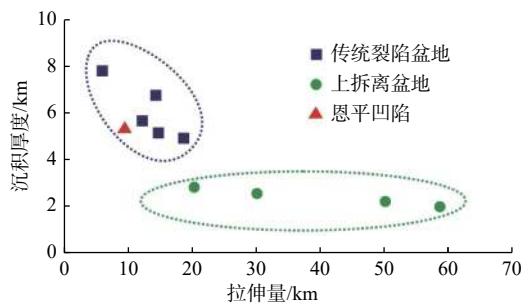


图 12 典型盆地拉伸量与沉积厚度交会
Fig.12 Cross plot of stretching amount and sedimentary thickness of typical basins

(2) 裂陷晚期(恩平组沉积时期)

在印度板块陆-陆“硬碰撞”与太平洋板块 NWW 向俯冲及俯冲速率增大联合作用下^[26-28], 古南海向南俯冲, 其板后拖曳力导致包括珠江口盆地在内的南海北部陆缘应力场环境表现为近 SN 向拉张^[29]。在此背景下, 控盆断裂由 NE 向逐渐转变为近 EW 向断裂控盆, 同时新生了一系列近 EW 向断裂。

经过裂陷早期拉张减薄作用的调整后, 南海北部陆缘岩石圈结构恢复为正常地壳-减薄型的大陆边缘岩石圈结构^[30], 在近 SN 向拉张应力场的作用下, 岩石圈伸展变形表现为窄裂谷模式^[24], 造成了早期彼此独立、分割性强的半地堑相互扩展连通, 湖盆范围显著扩大。

(3) 裂后拗陷期(珠海组—珠江组—韩江组沉积时期)

该时期岩石圈伸展减薄中心迁移至南海扩张中心^[31], 南海北缘块体整体处于裂后热沉降阶段(图 13)。断裂活动微弱(图 5), 整体处于构造宁静

期, 地层整体呈披覆式沉积。

(4) 构造活化期(粤海组沉积时期至今)

该时期菲律宾海板块前缘的吕宋岛弧与欧亚板块发生 NWW 向弧-陆碰撞^[15,32-33]。在 NWW 向硬碰撞联合作用下, 区域应力场环境表现为 NNE—SSW 拉张环境, 从而派生了近 EW 向和 NW 向 2 组的共轭剪切作用(图 14)。在近 EW 向的剪切作用下, 导致先存近东西断裂复活, 同时伴生一系列 NWW 向次级断裂与主断裂组合成帚状, 或侧接成带组合成雁列状, 具有明显走滑特征, 造成了粤海期以来的复杂断块活动。

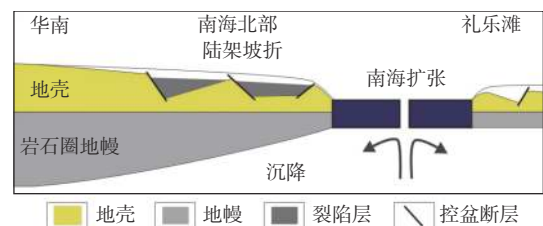


图 13 珠江口盆地拗陷期盆地发育的区域动力背景
Fig.13 Regional dynamic background of basin development in post rift depression of Pearl River Mouth Basin

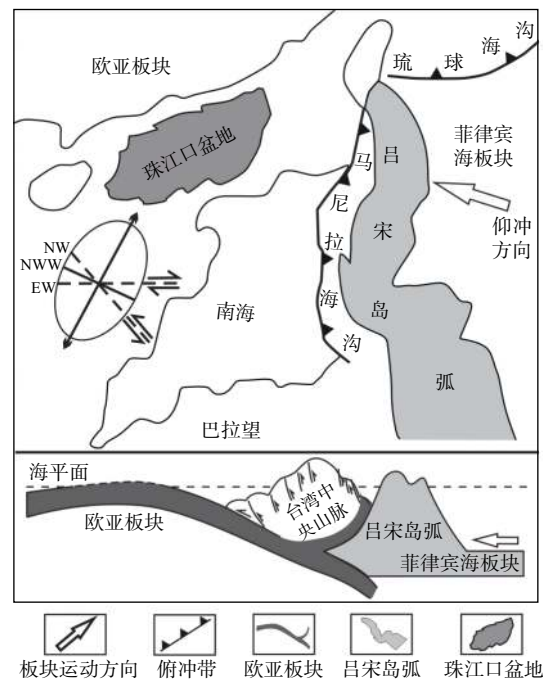


图 14 珠江口盆地构造活化期盆地发育的区域动力背景
Fig.14 Tectonic setting of the active Pearl River Mouth Basin and its tectonic transformation in Cenozoic

5 结论

(1) 恩平凹陷新生代发育 NE 向和近 EW 向断裂体系, 可划分为拉张和走滑 2 种类型。现今断裂

体系在不同层系存在明显差异,深部层系以 NE 向和近 EW 向拉张断裂为主,浅部层系以近 EW 向断裂占主导,具有明显的走滑特征。恩平凹陷整体表现为下断上拗的盆地结构样式,就下部断陷层系而言,整体表现为受 NE 向低角度断裂控制的半地堑结构。

(2)恩平凹陷新生代主要经历了裂陷早期、裂陷晚期、裂后拗陷期和构造活化期 4 期构造演化阶段。裂陷早期:在 NW—SE 向拉张作用下,早期 NE 向低角度逆断层负反转,形成了 NE 向断裂控制的半地堑结构;裂陷晚期:区域应力场顺时针转变为近 SN 向拉张,造成控盆断裂由 NE 向转变为近 EW 向,盆地构造格局由彼此孤立半地堑趋于相互连通,湖盆范围进一步扩大;裂后拗陷期:断裂活动微弱,地层披覆沉积,整体处于裂陷后期稳定热沉降阶段;构造活化期:在 NNE 向拉张应力场派生近 EW 向和 NW 向的共轭剪切作用下,先期近 EW 向断裂复活及新生近 EW 向走滑断裂带,整体表现为复杂断块升降运动。

(3)基底先存构造与区域动力背景联合控制了盆地的发育与转型。裂陷早期:在印度板块高速俯冲与太平洋板块俯冲速率降低及俯冲带后撤的联合作用下,造成了 NW—SE 向的拉张环境,形成了 NE 向断裂控制的半地堑结构;裂陷晚期:在印度板块陆-陆“硬碰撞”与太平洋板块 NWW 向俯冲及俯冲速率增大联合作用下,导致区域应力场转变为近 SN 向拉张,造成了控盆断裂由 NE 向顺时针转变为近 EW 向,岩石圈伸展模式由宽裂谷方式向窄裂谷方式转变,进而造成了盆地格局由孤立半地堑趋于相互连通;裂后拗陷期:石圈减薄中心迁移至南海扩张中心,处于整体热沉降阶段;构造活化期:吕宋岛弧 NWW 向与欧亚板块发生弧-陆碰撞作用下,造成了 NNE 向拉张及派生近 E 向和 NW 向的共轭剪切作用,造成了先存近东西断裂复活及次级走滑断裂带的形成,导致了复杂断块升降运动。

参考文献:

- [1] 吴智平,李伟,任拥军,等. 济阳拗陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 280-286.
- [2] 陈长民,施和生,许仕策,等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 1-20.
- [3] 胡阳,吴智平,钟志洪,等. 珠一坳陷新生代断裂体系特征及其转型机制[J]. 地质科学, 2016, 51(2): 495-508.
- [4] 许新明,陈胜红,王福国,等. 珠江口盆地恩平凹陷断层特征及其对新近系油气成藏的影响[J]. 现代地质, 2014, 28(3): 543-550.
- [5] 王家豪,刘丽华,陈胜红,等. 珠江口盆地恩平凹陷珠琼运动二幕的构造-沉积响应及区域构造意义[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 589-594.
- [6] 刘强虎. 断陷盆地低角度正断层控制下层序构型及其定量模拟: 以恩平凹陷古近系文昌组为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
- [7] 许新明,刘贤来,陈胜红,等. 张扭性断陷盆地构造样式与油气成藏的关系: 以珠江口盆地恩平凹陷新生界为例[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(1): 31-36.
- [8] 曾智伟,杨香华,舒誉,等. 恩平凹陷北部陡坡带文昌组砂砾岩体发育特征及构造沉积响应[J]. 地质科技情报, 2014, 33(6): 60-68.
- [9] 龚丽,朱红涛,舒誉,等. 珠江口盆地恩平凹陷文昌组层序格架中中-深湖相烃源岩空间展布规律及发育模式[J]. 地球科学, 2014, 39(5): 547-550.
- [10] 傅宁,丁放,何仕斌,等. 珠江口盆地恩平凹陷烃源岩评价及油气成藏特征分析[J]. 中国海上油气, 2007, 19(5): 296-299.
- [11] 刘丽华,陈胜红,于水明,等. 恩平凹陷成藏条件分析及商业性突破[J]. 中国海上油气, 2011, 23(2): 77-80.
- [12] 刘培,于水明,王福国,等. 珠江口盆地恩平凹陷海相泥岩盖层有效性评价及应用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 452-459.
- [13] 许新明,姜建,陈胜红,等. 珠江口盆地恩平凹陷断层封闭性评价[J]. 现代地质, 2016, 30(1): 122-129.
- [14] 陈胜红,米立军,施和生,等. 海上一体化地震勘探技术在珠江口盆地东部恩平凹陷油气勘探中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 462-465.
- [15] 赵淑娟,吴时国,施和生,等. 南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1016-1017.
- [16] 钟志洪,施和生,朱明,等. 珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 21-24.
- [17] 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): 1803-1829.
- [18] 童章茂,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): 100-104.
- [19] 詹润,朱光. 济阳拗陷青东凹陷基底断裂复活规律和方式[J]. 地质论评, 2012, 58(5): 816-828.
- [20] 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.
- [21] ENGBRETSON D C, COX A, GORDON R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin[J]. Geological Society of America Special Papers, 1985, 206: 1-60.
- [22] 庞雄,陈长民,彭大钧,等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 49-50.
- [23] 包汉勇,郭战峰,张罗磊,等. 太平洋板块形成以来的中国东

- 部构造动力学背景[J]. 地球科学进展, 2013, 28(3): 339-345.
- [24] BUCK W R. Modes of continental lithospheric extension[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1991, 96(B12): 20165-20170.
- [25] 任建业, 解习农. 大陆裂陷作用及盆地发育系统[J]. 地质科技情报, 1996, 15(4): 26-32.
- [26] TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H, et al. The Ailao Shan-Red River metamorphic belt: tertiary left lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431-437.
- [27] MORLEY C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 2002, 347(4): 189-215.
- [28] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 南海的发育机制研究: 相似模拟证据[J]. 中国科学D辑, 2006, 36(6): 797-810.
- [29] 张亮. 南海构造演化模式及其数值模拟[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [30] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 379-388.
- [31] HALL R. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean[J]. *Tectonophysics*, 2012, 570(11): 26-30.
- [32] 范建柯. 菲律宾海板块西边缘的地震层析成像研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [33] 耿威, 张训华, 温珍河, 等. 台湾东部海岸山脉对弧陆碰撞的响应[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 130-135.

CENOZOIC FAULT CHARACTERISTICS AND BASIN GENESIS OF THE ENPING SAG, PEARL RIVER MOUTH BASIN

SHI Xiaoguang

(Geophysical Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield Branch, Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: Detailed description of fault systems and basin structures is devoted by this paper to the Enping Sag of the Pearl River Mouth Basin, South China Sea. The main basin controlling fault systems formed in different periods are determined and classified by means of fault activity rate calculation and equilibrium profile analysis, upon which the evolution process of the basin is reconstructed, and the dynamic mechanism of basin development and transformation discussed. The results suggest that the evolution of the basin is controlled by both the pre-existing basement structure and the regional dynamic field. During the early rifting stage, the subduction of the Pacific plate retreated as the subduction rate decreased under the joint action of Indian plate, that led to the change in stress into an extension field in NW–SE direction and the negative inversion of the early formed NE trending low angle reverse faults. As the results, a detached half graben was formed under the control of NE trending fault. During the late rifting stage, under the joint action of the rotation and extrusion of Indosinian block and the southward subduction of the paleo-South China Sea, the regional stress field changed from clockwise transformation into nearly NS stretching, and the basin controlling faults changed from NE to nearly EW trending. And the lithospheric extension was changed from a wide rift mode to a narrow rift mode as the basin framework changed from isolated half grabens to connected extensional grabens. During the depression period, the lithospheric thinning center migrated towards the South China Sea spreading center, leading to weak tectonic activity and thermal subsidence. In the tectonic reactivation stage, the NW trending Luzon island arc collided with the Eurasian plate, which caused the NNE stretching, the revival of pre-existing near EW faults and the formation of the secondary strike slip fault zone, in addition to complex uplifting and falling of fault blocks.

Key words: genetic mechanism; basin evolution; fault characteristics; Cenozoic; Enping Sag; Pearl River Mouth Basin