

珠江口盆地西江主洼低角度边界正断层特征及成因演化

邓棚^{1,2,3},梅廉夫³,杜家元⁴,叶青³,许新明⁴,吴静⁴,董小云⁴

[1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126; 2. 浙江大学 地球科学学院,浙江 杭州 310027;
3. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室,湖北 武汉 430074;
4. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司研究院,广东 深圳 518000]

摘要:西江主洼位于珠江口盆地珠一坳陷的中西部,是珠江口盆地重要的富生烃凹陷之一。为了认识珠江口盆地西江主洼边界断层(Fxj33)属性特征,基于钻井约束的高精度三维地震资料,对Fxj33断层几何学和运动学进行了综合分析。研究揭示Fxj33边界断层为低角度生长正断层,倾角 $5^{\circ}\sim 36^{\circ}$,呈NEE走向,长度约55 km,最大水平位移达9.5 km左右。在多幕裂陷演化过程中,Fxj33断层沿走向上表现为分段差异活动特征,并与两排EW向高角度断裂共同控制着西江主洼各次级洼陷的发育演化。中生代基底中发育的叠瓦状构造、残留山和先存断面等一系列构造表明Fxj33边界断层为中生代先存逆冲构造体系在新生代反转形成,并且在断陷中晚期进一步被一系列EW向高角度断面切割改造,形成现今形态。期望研究结果对被动陆缘断陷盆地边界断层的形成和演化研究有指示意义。

关键词:先存构造体系;多幕裂陷作用;低角度正断层;西江主洼;珠江口盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Characteristics and genetic development of a low-angle boundary normal fault in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin, China

Deng Peng^{1,2,3}, Mei Lianfu³, Du Jiayuan⁴, Ye Qing³, Xu Xinming⁴, Wu Jing⁴, Dong Xiaoyun⁴

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;
3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 4. Research Institute of Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: The Xijiang Main Sag, located in the west-central Zhu-1 Depression, is one of the most important hydrocarbon-rich sags in the Pearl River Mouth Basin, China. To recognize the properties of the boundary fault (Fxj33) in the Xijiang Main Sag, we comprehensively analyze the geometry and kinematics of Fxj33, using high-resolution 3-D seismic data under the constraints of well data. The results show that the boundary fault Fxj33 of about 55 km long and up to 9.5 km displacement at most, is a NEE-trending low-angle normal fault with a dip of $5^{\circ}\sim 36^{\circ}$. During the evolution of multistage rifting, the fault Fxj33 is characterized by differential activities of different segments along the strike, and jointly controls the evolution of the sub-sags in the Xijiang Main Sag together with the two lines of EW-trending high-angle normal faults. Various structures developed in the Mesozoic basement, including imbricate structures, residual hills and pre-existing fault planes, indicate that the boundary fault Fxj33 was developed by the inversion of the pre-existing Mesozoic thrusting system in the Cenozoic, and subsequently reformed by the EW-trending high-angle fault planes cutting into it during the middle-to-late rifting stage. The research results are expected to be of referential meaning to the study of the boundary faults during rifting in passive margin faulted basins.

Key words: pre-existing structural system, multistage rifting, low-angle normal fault, Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin

收稿日期:2019-03-03;修订日期:2020-02-10。

第一作者简介:邓棚(1990—),男,博士、助理研究员,石油勘探构造分析。E-mail: dengpeng_003@163.com。

通讯作者简介:梅廉夫(1961—),男,教授、博士生导师,盆地构造分析。E-mail: lfmei@cug.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05026-003-001)。

大陆地壳在伸展过程中的正断层角度通常以高角度为初始特征^[1-2],例如在世界一些典型的裂谷系统内部,如东非裂谷^[3]、苏伊士湾^[4]以及北海地区^[5]等。低角度正断层(LANFs)于20世纪初就被发现,但直到20世纪末才被地质学家普遍接受,现已作为正断层的主要类型之一^[6]。低角度正断层有别于传统认识上的高角度正断层,其具有较低的倾角($<30^\circ$)和较大的水平位移量。低角度正断层在许多构造环境中均有发育,大部分是在造山带地区,例如美国的盆岭省地区^[7],同时在缓慢扩张的洋中脊等地区也有发育^[8-9]。近年来,大陆裂谷盆地中也发现有大量的低角度正断层发育,例如泰国丹老盆地^[10-11],这些断裂多作为盆地的边界断层,在盆地沉积演化中起重要控制作用。低角度正断层虽然在自然界中广泛发育,但是由于其不符合传统的安德森理论模式^[1],因而人们对低角度断裂形成仍然存在较大争议。前人提出一些机制用来解释断裂在低角度情况下滑动:1)受岩浆侵入作用^[12]或基底牵引作用^[13-14]导致主应力方向发生旋转;2)高孔隙流体压力、层状硅酸盐等因素导致断裂带异常薄弱^[15-18];3)断裂带附近的应力局部旋转^[19-21]。在碰撞后伸展背景下发育的低角度正断层大部分被解释为先存低角度逆冲断裂活化^[22-26],而沿低角度逆断裂滑动通常也与断裂带异常流体压力^[27-29]或富含层状硅酸盐矿物^[30-31]有关。

近年来越来越多学者关注珠江口盆地低角度正断层发育特征及其对盆地演化的控制作用,前人对珠江口盆地南部陆坡深水区的白云凹陷和荔湾凹陷^[32-33],以及北部陆架区珠一坳陷恩平凹陷的低角度边界断层^[34-35]开展了相关研究,在一定程度上提升了人们对南海北部陆缘低角度正断层发育特征的认识。然而目前前人在珠江口盆地揭示的低角度正断层案例仍然比较少,对低角度正断层的成因认识也存在争议。本文基于珠一坳陷西江主洼地区高精度三维地震资料,揭示了该洼陷的边界断层为典型的低角度生长正断层,同时对该断层的几何学和运动学进行了系统研究,并探讨了低角度正断层的成因演化。研究成果对揭示南海北部陆缘断陷盆地低角度边界正断层的成因和演化过程有重要的借鉴意义。

1 区域地质背景

1.1 区域构造演化及地层发育概况

南海位于欧亚大陆的东南部,是西太平洋地区的最大边缘海之一。珠江口盆地是南海北部陆缘最大的

中生代沉积盆地,盆地走向 NE-SW 向,面积约 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地在 NE 向基底大断裂和 NW 向走滑断裂共同控制下,总体上呈现“南北分带、东西分块”的构造格局(图 1a)。珠江口盆地自北向南依次可划分为北部隆起带、珠一坳陷带、珠三坳陷带、中央隆起带、珠二坳陷带和南部隆起带等构造单元(图 1a)。珠一坳陷是珠江口盆地北部坳陷带的一个负向构造单元,走向 NE 向。珠一坳陷西北部为北部隆起带,西南部紧邻珠三坳陷带,东南部则毗邻东沙隆起和番禺低隆起。珠一坳陷自西向东依次发育恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷和韩江凹陷等 5 个凹陷带,各个凹陷之间通常被 NWW 向低凸起分割(图 1a)。

珠江口盆地于中始新世—早渐新世期间经历了两幕主要裂陷作用(图 1b):珠琼运动一幕和珠琼运动二幕。强烈的断陷作用使得珠江口盆地地壳减薄,尤其是在南部白云凹陷地区,其地壳厚度局部小于 $6 \sim 8 \text{ km}$ ^[36]。珠江口盆地在经历了强烈断陷作用之后,于渐新世中期 32 Ma 左右随着洋壳打开,进入南海扩张构造时期^[37-39](图 1b)。此时,珠江口盆地形成了区域性破裂不整合面 T_7 ^[40],盆地由断陷期转为拗陷期,坳陷内部发生强烈沉降作用,存在异常沉降^[41-43]。该时期,在珠江口盆地南部深水区的白云凹陷,于中新世 23.8 Ma 左右发生了一次重要构造运动——白云运动,使得白云凹陷陆架坡折带跃迁至北坡,主体处于陆坡斜坡深水沉积环境^[44]。

南海的扩张是不等时的,洋壳最先打开位置在南海东北部,并向西南方向传播^[37,45];南海扩张在经历了 3 期构造作用之后^[46],在中中新世 15.5 Ma 左右停止^[37,39],随后珠江口盆地进入东沙运动构造时期(图 1b)。东沙运动发生在中新世晚期,主要是菲律宾板块持续向 NWW 方向运动导致的吕宋岛弧与欧亚大陆的弧-陆碰撞俯冲挤压作用的结果^[47]。东沙运动在盆地内主要表现为断块的垂直升降,发育大量张性、张扭性断裂,同时有轻微的挤压褶皱,并伴有强烈的岩浆作用,构造运动整体具有西强东弱特点^[47]。

珠江口盆地地层自下而上,分别发育文昌组(T_8 — T_8)和恩平组(T_8 — T_7)2 套断陷期沉积层,以及珠海组(T_7 — T_6)、珠江组(T_6 — T_4)、韩江组、粤海组和上新统(T_3 — T_2)5 套南海期和东沙期沉积层(图 1b)。文昌组是裂陷一幕构造运动的产物,与基底呈角度不整合接触,是珠江口盆地最重要的烃源岩^[48];受强烈断陷作用影响,该时期湖盆水体整体为中-深湖,湖盆之间分隔,沉积相主要为中-深湖相(图 1b)。恩平组是裂陷二幕构造运动的产物,与下伏文昌组呈平行或角度

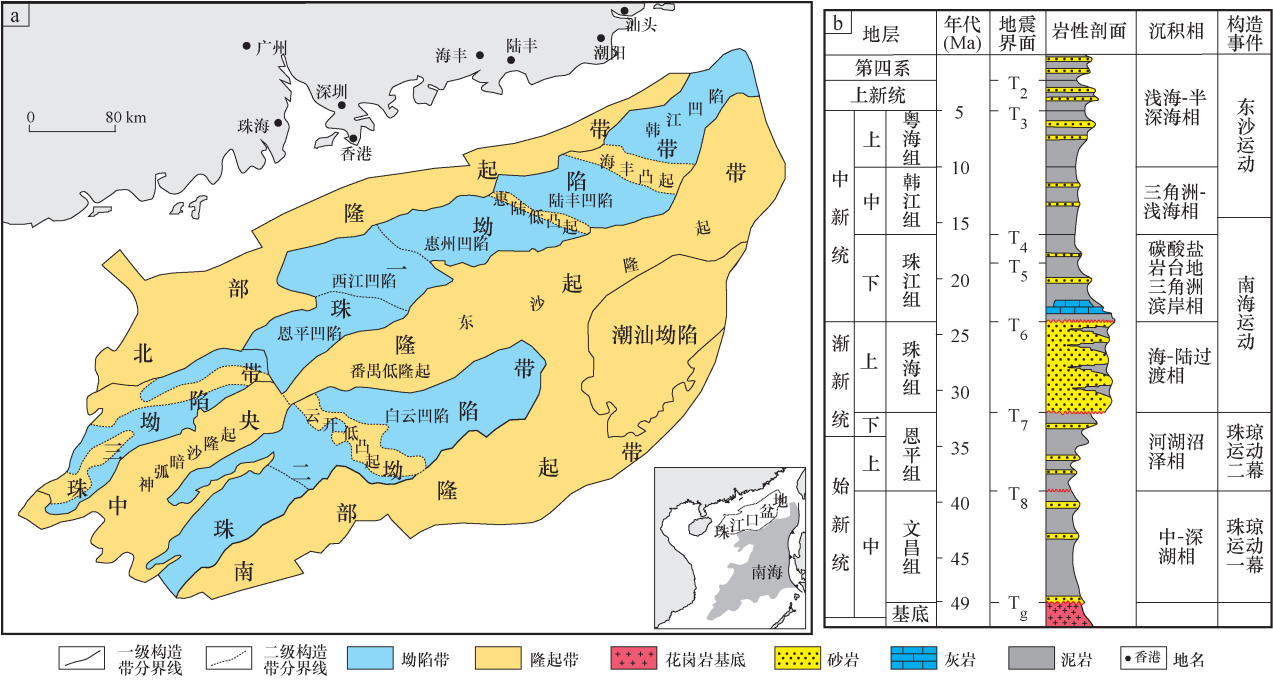


图 1 珠江口盆地区域构造位置(a)及地层综合柱状图(b)
Fig.1 The location of the Pearl River Mouth Basin (a) and the composite stratigraphic column (b)

不整合接触,也是珠江口盆地重要的烃源岩,该时期湖盆水体变浅,湖盆之间开始相互连通,主要为河湖沼泽相(图 1b)。到了珠海组沉积时期,由于受控于南海扩张作用,盆地进入拗陷期,此时主要为海陆过渡相沉积(图 1b)。到了珠江组沉积期,受海侵作用影响,珠江组下段沉积了大套优质的砂岩,岩性为三角洲相和滨海相的砂岩,为珠江口盆地主要储集层段,局部还发育生物礁和碳酸盐岩台沉积;珠江组上段主要为泥岩夹砂岩。因此三角洲砂岩与开阔海相泥岩相匹配形成“黄金储盖组合”^[49]。到了韩江组沉积时期,南海已停止扩张,主体受东沙运动影响,韩江组及以上沉积主体为三角洲相、浅海相及半深海相沉积(图 1b)。

1.2 研究区西江主洼基本地质概况

本次研究区西江主洼位于珠江口盆地珠一坳陷西部,西江凹陷的北部地区,整体走向近北东向,面积约 2 300 km²,主体处于南海北部陆缘陆架浅水区。西江主洼往西与恩平凹陷相邻,两者之间通过恩西低凸起相隔,南部与番禺 04 洼对望,两者之间夹着西江中低凸起,西江主洼北部和东部则分别为北部隆起和惠州凹陷(图 1a,图 2)。

西江主洼发育西江 33W 洼、西江 33E 洼、西江 28 洼和西江 32 洼 4 个洼陷,前 3 个洼陷由北部边界断层 Fxj33 控制发育,西江 32 洼位于西江主洼西

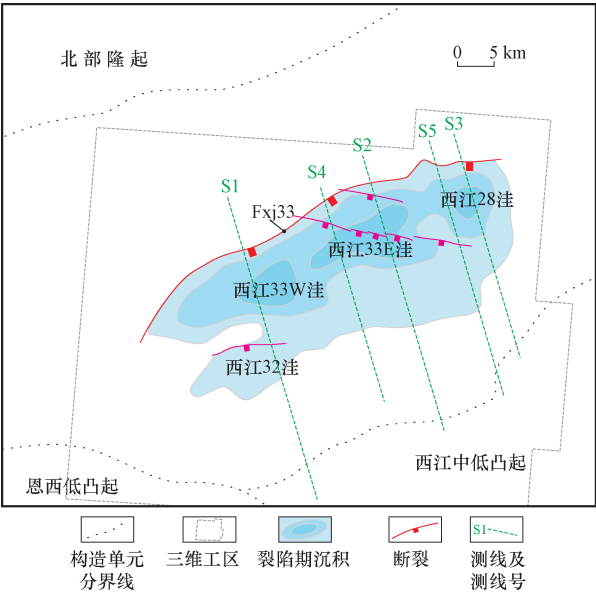


图 2 珠江口盆地西江主洼地区构造单元
Fig.2 A map showing the structural units of the Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin

南部,受控于次一级的主控断裂(图 2)。研究区三维地震资料基本全覆盖,满足本次研究的需求。

2 西江主洼低角度边界正断层特征

2.1 低角度断层几何学特征

Fxj33 断层位于西江主洼的北部,为西江主洼的主控边界断层,整体走向约 59°,呈近 NEE 走向展布

发育;在断裂的最东段,走向有些偏转,为 88° 左右,呈近东西向(图 3a)。F_{xj33} 断层在平面上发育整体较平直,断裂长度约 55 km。F_{xj33} 断层倾角 $5^\circ \sim 36^\circ$,沿走向上倾角起伏变化,整体上断裂西段和中段均呈低角度,倾角最小处可达 5° ,到了断裂东段,倾角增大($>30^\circ$),为中等角度(图 3b)。

F_{xj33} 边界断层倾向南东,断裂强烈切割基底,使得基底面在西江 33W 和西江 33E 洼地区埋深达 4 400 ms,在西江 28 洼地区稍微浅一些,但也可达 4 280 ms(图 3a)。值得注意的是,在西江 33E 洼和西江 28 洼之间过渡的位置,F_{xj33} 断面迹线向隆起一侧外凸,呈三角形(图 3a),可能是由于基底断块向洼陷内部滑落导致。同时,在 F_{xj33} 边界断层的中段,发育两排南倾的近 EW 向断裂(图 3a),从三维立体图上可以清晰地看到,在与 F_{xj33} 断面相交的位置,F_{xj33} 断面变得陡立,为高角度的 EW 向断裂向下切割了 F_{xj33} 的断面所致(图 3a)。从 EW 向断裂

的活动速率可以看出,这两排断裂在早期珠江运动一幕时基本不活动,到了珠江运动二幕时期强烈活动,并向下切割了 F_{xj33} 主控断裂的断面(图 3d,e)。

本次研究详细地统计了 F_{xj33} 低角度断层位移与断裂长度之间关系($D-L$)的特征,以基底面(T_g)为标志层,沿断裂走向方向,系统地统计了 F_{xj33} 断裂的位移变化特征(图 3c)。从图中可以看出,F_{xj33} 断裂的水平 and 垂直位移曲线形态相似,都具有 3 个位移的峰值,自西向东,分别对应着西江 33W 洼、西江 33E 洼和西江 28 洼沉积中心,在洼陷之间的过渡部位,断裂位移量变小。F_{xj33} 断裂水平位移量远大于垂直位移量,其水平位移量变化幅度较大,最大水平位移量约为 9.5 km,位于西江 33E 洼处,最小不到 2 km;F_{xj33} 断裂垂直位移量变化幅度则相对较小,最大垂直位移量约为 5.4 km,同样位于西江 33E 洼(图 3c)。自然界中正断层的 $D_{\max}/L$ 比值通常在 $1:10 \sim 1:20$ ^[11,50-52]。基于本次统计的水平 and 垂直位移数据,

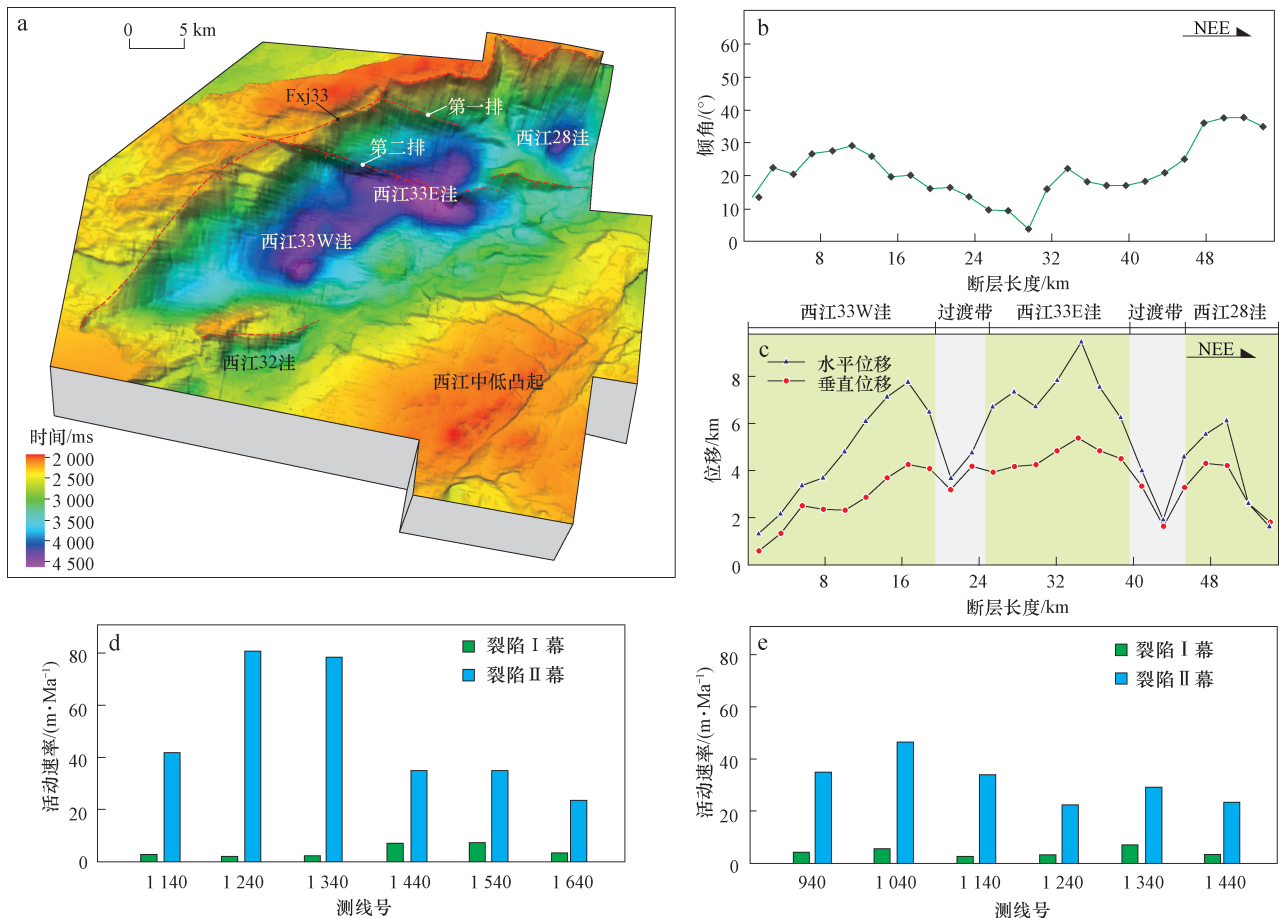


图3 珠江口盆地西江主洼 F_{xj33} 边界断裂三维形态、断裂位移、倾角及相关高角度切割断裂活动性

Fig. 3 The 3D morphology, fault displacement, and dip angle of the boundary fault F_{xj33} in the Xijiang Main Sag, and the activity of the associated EW-trending high-angle normal faults cutting into it, Pearl River Mouth Basin

a. 西江主洼 F_{xj33} 边界断裂三维形态立体图; b. F_{xj33} 边界断层倾角-长度关系; c. F_{xj33} 边界断层位移-长度关系;

d, e. 西江主洼第一排、第二排 EW 向切割断裂活动速率

可以求得 Fxj33 断裂的最大位移值约为 10.1 km, 可以得出其 $D_{\max}/L$ 比值约为 1:5.5 (10.1 km/55 km)。该值明显不处于自然界中正断层 $D_{\max}/L$ 比值正常范围之内, 但是其与 Morley^[11] 报道的泰国各断陷盆地中低角度断层的相似 (图 4), 由此可见低角度正断层通常具有独特的 $D_{\max}/L$ 比值。

2.2 低角度断层多幕裂陷活动特征

西江主洼地区与珠江口盆地大部分地区一样, 裂陷期经历了两幕裂陷作用 (图 1b), Fxj33 边界断裂在西江主洼多幕裂陷作用中起到了重要控制作用。珠琼运动一幕时期, Fxj33 边界断层净位移值整体较大 (该处的位移是指某个断陷时期断裂的净位移值, 即等于该时期的累积总位移值减去之后一时期的累积位移值, 以反映该时期边界断裂的活动强度), 表明断裂处于强烈活动, 其中最大净位移处于 Fxj33 断裂的中段, 西段次之, 东段净位移值相对最小 (图 5)。同时, 还可以明显看到 Fxj33 断裂的净位移曲线在断裂的西、中和东段均发育 1 个峰值 (图 5), 表现出 3 峰型特征, 峰型的位置分别对应西江 33W 洼, 西江 33E 洼和西江 28 洼。珠琼运动二幕时期, Fxj33 断层净位移值相对裂陷一幕时期大幅减小 (图 5)。表明该时期洼陷沿走向的活动强度减弱; 净位移曲线表现出轻微的峰形起伏形态, 且峰形幅度不如珠琼运动一幕时期明显 (图 5), 表明洼陷之间演化差异性也减弱。

因此, Fxj33 边界断层从珠琼运动一幕到珠琼运动二幕的主要演化特征如下: 在珠琼运动一幕时期, Fxj33 断裂整体呈 NE-NEE 走向强烈活动发育, 并且该时期 Fxj33 断裂呈分段活动特征, 发育 3 个主要的强烈活动中心, 分别控制着西江 33W 洼、西江 33E 洼和西江 28 洼发育, 其中位于中部的西江 33E 洼活动最强烈 (图 5)。到裂陷珠琼运动二幕, Fxj33 断层继承性活动, 断裂平面形态没有差异性变化, 但断裂活动性整体较弱 (图 5), 表明西江洼陷裂陷 II 幕时期断陷强度整体比裂陷 I 幕时期弱。可见, 整个裂陷作用阶段, 西江主洼 Fxj33 边界断层沿走向表现为分段性差异演化特征, 在分段差异演化的作用下使得沿其走向方向发育多个裂陷洼陷。

2.3 低角度断层控洼结构特征

在 Fxj33 低角度断裂主控下, 西江主洼自西向东分别发育西江 33W 洼、西江 33E 洼和西江 28 洼 3 个主要洼陷 (图 2)。珠琼运动一幕时期, 3 个洼陷结构相似, 均表现为北断南超的半地堑结构形态, 靠近北

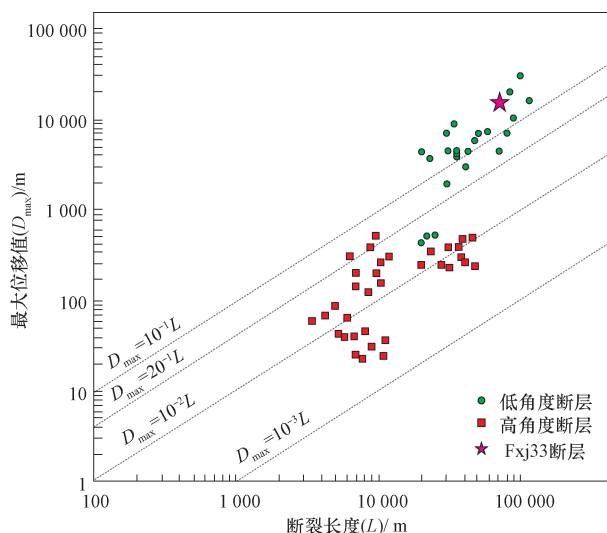


图4 珠江口盆地西江主洼 Fxj33 边界断层最大位移与长度关系 (据文献[11]修改)

Fig.4 Maximum displacement vs. fault length for the boundary fault Fxj33 in the Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin (modified after reference [11])

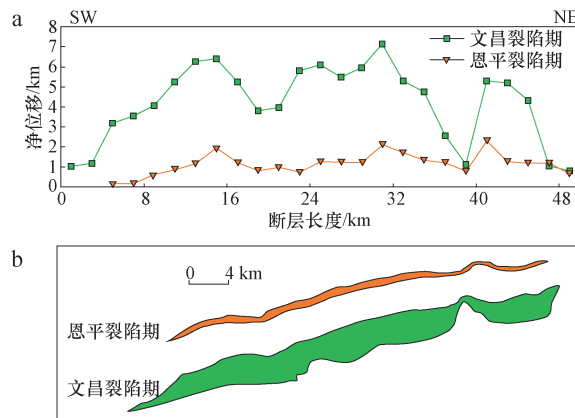


图5 珠江口盆地西江主洼 Fxj33 边界断层多幕裂陷位移曲线(a)及演化示意图(b)

Fig.5 Schematic diagrams showing the displacement variations (a) and the evolution (b) of the boundary fault Fxj33 during the multiphase rifting, Pearl River Mouth Basin

部 Fxj33 边界断层一侧地层厚度最大, 向南部超覆减薄, 地层呈典型的楔形 (图 6a—c)。西江 33W 洼位于最西部, 洼陷走向为 67° , 呈 NEE 向, 该时期洼陷最大发育厚度约 2 800 m (图 6a)。西江 33E 洼位于西江主洼的中部, 受控于 Fxj33 低角度断裂的中段 (图 6b), 洼陷走向约 72° , 与西江 33W 洼走向一致, 呈 NEE 向, 洼陷最大厚度约 2 900 m。西江 28 洼则位于西江主洼地区最东部, 主体受控于北部边界断层 Fxj33 的东段, 裂陷一幕时期, 洼陷结构同样表现为楔形半地堑样式 (图 6c), 与西江 33W 洼和西江 33E 洼不同的是, 该洼陷走向约 86° , 呈 EW 走向展布 (图 3a), 洼陷最大发育

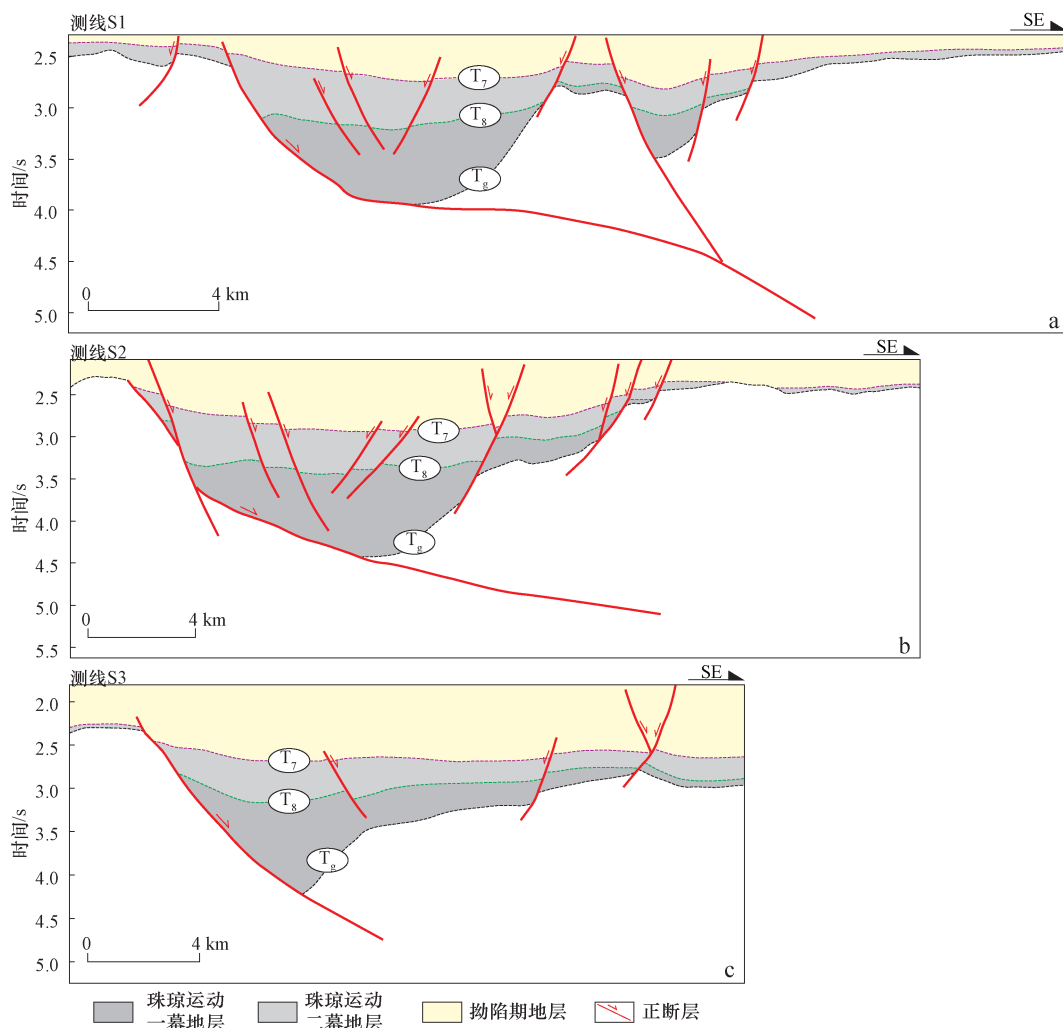


图6 珠江口盆地西江主洼裂陷结构特征剖面(测线位置见图2)

Fig. 6 The cross section of the rift architecture of the Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin (see Fig. 2 for the seismic lines)

a. 西江 33W 洼结构; b. 西江 33E 洼结构; c. 西江 28 洼结构

厚度约 2 400 m。

珠琮运动二幕时期,西江主洼呈继承性发育,仍然主体受控于 Fxj33 断裂,但地层整体呈近等厚水平展布发育,剖面形态为席状(图 6a—c)。该时期由于边界断层活动性大幅减弱(图 5),洼陷地层厚度较珠琮一幕时期减少许多,最大厚度约 1 830 m。此外,珠琮运动二幕时期,西江 33E 洼受北部边界断层 Fxj33 控制的同时,也受一系列同向和反向的 EW 向断裂控制,这些 EW 向断裂表现为高角度切割西江 33E 洼的陡坡带和缓坡带(图 3a,图 6b),并控制洼陷地层发育(图 3d,e)。其中北部两排 EW 向断裂南倾,切割陡坡带,并向下切断了边界断层 Fxj33 的断面,南部两排 EW 向断裂表现为北倾,则切割了洼陷缓坡带,使得缓坡带被改造成了多级断阶带(图 6b)。由于受控于北部边界断层 Fxj33 以及同向和反向 EW 向高角度断裂的共同控制,使得西江 33E 洼在珠琮运动二幕时期表现为

似地堑结构样式(图 6b)。

3 西江主洼低角度边界正断层成因讨论

传统安德森模式^[1]认为在水平拉伸或铅直上隆状态下,最容易发生正断层作用,形成的断层多以高角度为主,即正断层块体通常在高角度断面上才会发生滑动。随着低角度正断层的大量发现,人们认识到低角度正断层也是自然界中正断层的主要类型之一,然而对低角度正断层的成因一直存在较大争议,部分学者认为低角度正断层由高角度的正断层旋转为低角度而成^[53-54],然而近年来越来越多的研究者支持低角度正断层初始形成时就为低角度^[11,21,55],并且提出了相关机制来解释正断层断块在低角度断面上滑动^[12-13,15,17-18,21]。本文以珠江口盆地浅水陆架区西江主洼的低角度边界正断层为例,基于该区高精度

三维地震资料,对低角度正断层的成因及演化进行相关讨论。

从西江主洼三维地震剖面上可以清晰地看到,西江主洼基底中发育许多强振幅、中等连续性的反射(图7a—e),这些地震反射与切割裂陷层的断面反射特征相似,为一系列基底内部发育的断裂或破裂面反射。很显然,这些断面大部分向上未断开基底面(T_g),表明这些断面是在裂陷作用之前就存在了,即为一系列先存断面。这些先存断裂有些未活化,有些发生活化,但整体活化程度较低(图7);测得的这些先存断面倾角总体较低,大部分为低角度断裂(图7a,c)。通过分析本文认为低角度的边界断层 Fxj33 与基底的先存低角度断面性质一致,即 Fxj33 断层的前身同样为先存体系,主要有以下关键证据:1) Fxj33 断层未切割基底内部的先存断面,从图7a地震剖面中可以看到, Fxj33 边界断层上下盘均发育一系列先存断裂,如果 Fxj33 断层为裂陷期新生断层,在活动中切割了基底内部的

先存断裂,那么 Fxj33 边界切割的各个先存断裂之间断距大体相等,而实际统计可知, Fxj33 边界断层上盘的 I—IV 号先存断裂(错断之前分别对应下盘的①—④号断裂)的断距分别为 8.34, 9.32, 7.81 和 7.59 km,各断裂之间的断距并不相等,可见 Fxj33 断裂并未切割基底内部的先存体系,而是之前已经存在的先存断面,到断陷期重新活动;2) 基底的部分先存断面本身即为 Fxj33 边界断层的一部分,两者共同组成向上发散的帚状样式(图7c,d);3) 与研究区紧紧相邻的恩平凹陷(图1a),其边界断层性质也证实为先存体系^[34]。此外,我们也注意到基底的先存断面也未切割 Fxj33 边界断层的断面(图7a,b),表明两者应为同时期发育的同一套先存断裂体系。

那么这些先存断裂性质如何,是先存正断裂还是先存逆断裂?从三维地震资料中可以看到,边界断层与上盘的同倾断裂共同组成典型的逆冲叠瓦状组合样式(图7a),同时在洼陷的南部隆起带上还发育一些反

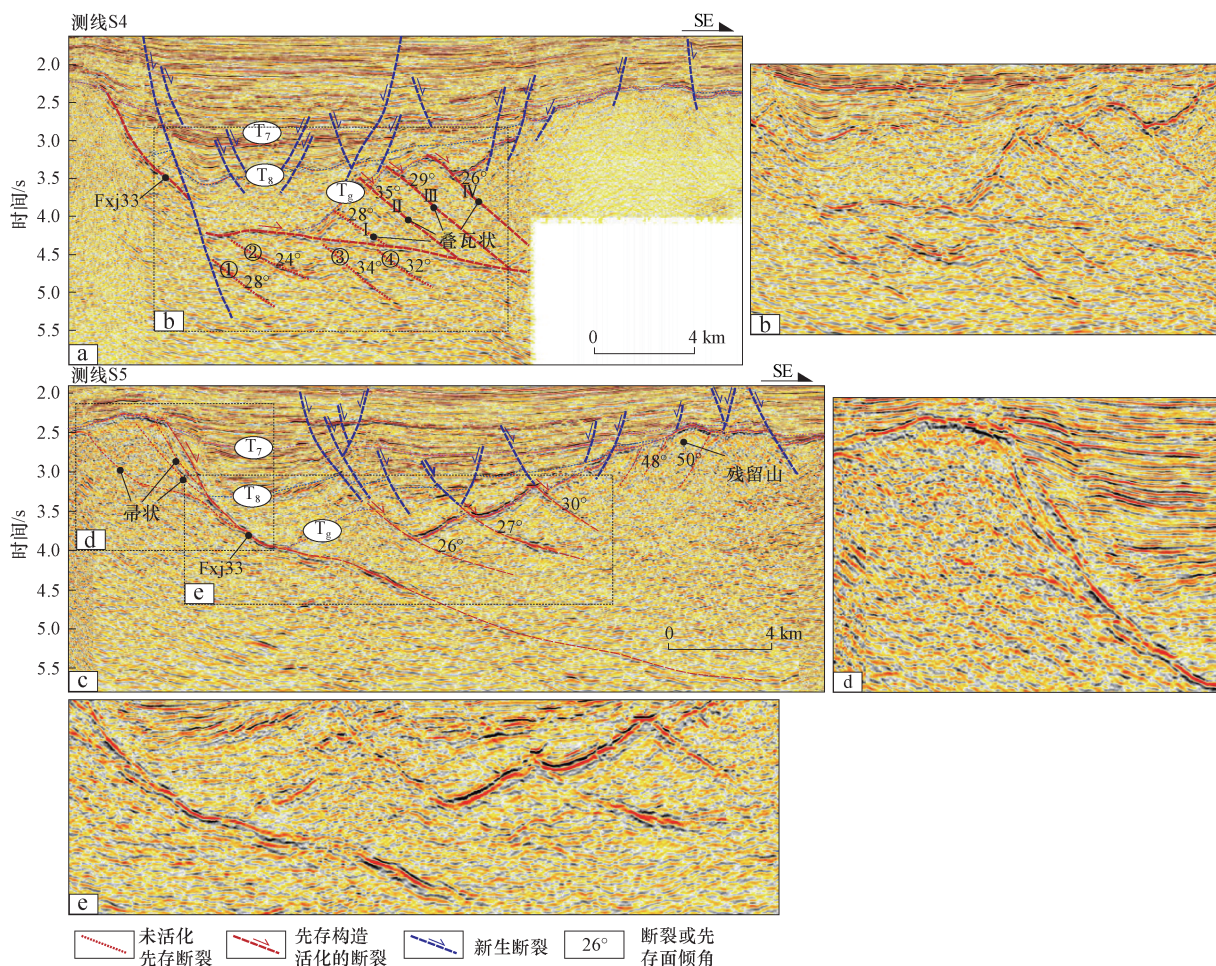


图7 珠江口盆地西江主洼基底先存构造发育特征(测线位置见图2)

Fig.7 Seismic profiles showing the characteristics of the pre-existing structures in the basement of the Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin (see Fig.2 for the seismic lines)

a. 过地震测线 S4 的基底先存构造; b. S4 测线反射特征局部放大; c. 过地震测线 S5 的基底先存构造; d, e. S5 测线反射特征局部放大

冲断裂,这些反冲断裂上盘同时还控制发育挤压形成的残留山(图7c)。此外,在与西江主洼西侧相邻不远的恩平凹陷(图1a),基底内部同样发育许多叠瓦状构造和背冲构造,且其边界断裂已经证实为先存低角度逆冲断裂反转^[34]。因此,本文认为这些先存断裂体系为一系列的先存逆冲断裂体系,而西江主洼低角度边界断层 Fxj33 则由先存低角度逆断裂在裂陷期构造负反转形成。

珠江口盆地新生代断陷主要是在与俯冲作用相关的晚中生代花岗岩基底上发育形成的,这些侵入岩同位素年龄数据在 130 ~ 70.5 Ma^[56],表明它们形成于中生代末期的白垩纪。珠江口盆地也存在中生代残留盆地基底,主要分布于东南部潮汕凹陷,钻井 MZ-1-1 揭示其为中侏罗统一白垩系^[56],此外在恩平凹陷、陆丰凹陷和惠州凹陷局部也有发育^[34]。地震剖面和重磁解释识别出珠江口盆地中生代基底中广泛分布 NE 向压剪性和 NW 向左行剪性共轭的压扭断裂体系^[57-58]。上述中生代花岗岩侵入体、沉积盆地以及断裂体系与华南沿海陆域具有相似的时空分布、地质特征及构造属性,它们属于同一岩浆-沉积-构造体系^[58],它们的形成通常被认为是古太平洋板块向南海北部-华夏地块俯冲增生而导致的。并且,地球物理资料表明,沿台西南盆地至南海北缘一带存在一条 NE 向隐伏俯冲带^[59-60]。可见,中生代末期珠江口盆地由于受古太平洋板块向欧亚板块的持续俯冲,处于典型的活动大陆边缘,而这为西江主洼 NEE 向基底先存逆冲断裂体系的形成提供合适动力学环境。

到白垩纪末,印度板块以 100 ~ 110 mm/a 的平均速率,沿着 NNE 方向向欧亚板块运动并初始碰撞,导致中国东部处于 SE - NW 向的右旋张扭应力场作用下^[61],并开始大规模伸展裂陷。同时,太平洋板块以 120 ~ 140 mm/a 的平均速率向欧亚板块俯冲,俯冲方向为 NNW 向,板块俯冲角度发生由 10° 变成 80°^[62]。而高角度的俯冲潜没,使得地幔楔内对流变为以垂向上涌为特征,也使得中国东南部陆缘地壳拉伸、减薄,发生裂陷作用^[63-64]。该时期,西江主洼的先存逆断裂体系发生构造负反转,开始强烈活动并控制西江主洼的形成演化。因此,结合区域动力学背景,西江主洼低角度边界断层的形成及控洼陷演化过程如下:1) 中生代末期,在太平洋板块俯冲背景下,珠江口盆地整体处于挤压构造环境,在西江主洼花岗岩基底中发育一系列 NEE 向逆冲断裂体系,这些逆冲断裂体系组合形成叠瓦状构造样式或帚状样式(图8a);2) 白垩纪末或古新世初,由于受西部印度-欧亚板块碰撞的特提斯构

造域和东部的太平洋-欧亚板块俯冲的太平洋构造域共同作用下,珠江口盆地中由生代的压扭构造应力转变为张扭构造应力^[61,63-64],盆地发生裂陷作用,在西江主洼地区,先存的逆冲断裂体系发生构造负反转作用,断块沿低角度的先存薄弱面滑动,形成低角度边界正断层,并控制西江主洼文昌组沉积演化,同时许多上盘的断裂部分活化,控制小部分的断陷沉积,此外,也有先存断裂未活化(图8b);3) 到了晚始新世,西江主洼进入珠江运动二幕演化期,区域构造应力由 NWW 向伸展转变为近 SN 向区域伸展方向^[65],此时,低角度边界断裂活动性迅速减弱(图5),而 EW 向高角度断裂强烈活动,并且向下切割了 Fxj33 边界断层的断面,与 NEE 向 Fxj33 断裂共同控制西江主洼恩平组沉积演化(图8c)。前人研究表明岩石圈裂解的完整演化过程是从纯剪切伸展形成均匀分布的断陷盆地群开始的,随后是沿着大型的拆离断层,并以简单剪切变形为特征的应变集中和拆离盆地的发育为特征,同时变形从弥散式到集中式,并向岩石圈最后裂解、形成洋壳的方向迁移^[66]。从上述演化分析可知西江主洼在珠江运动一幕时期受控于低角度的边界断裂控制,而该低角度断裂(Fxj33)是一条连锁的大型中上地壳层次发育的“向洋倾斜的低角度拆离断层”的北端部分^[67],在 NWW 向引张作用下发生“拆离型”伸展变形,洼陷结构表现为不对称式半地堑(图6a-c)。到了珠江运动二幕,西江主洼发育 EW 向高角度正断层,向深层切割

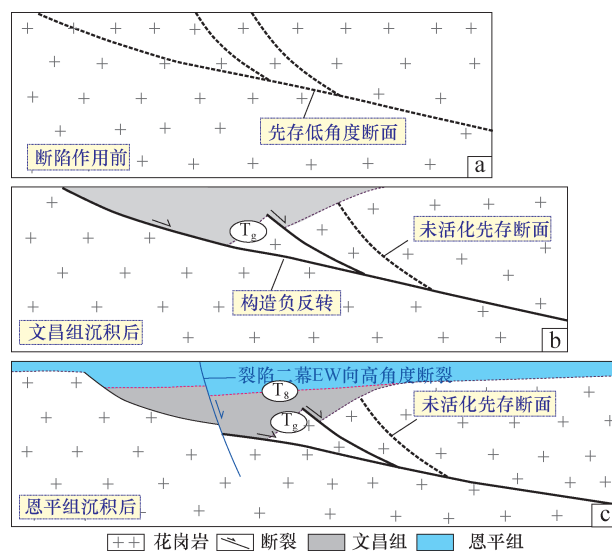


图8 珠江口盆地西江主洼 Fxj33 边界正断层演化模式特征

Fig. 8 Schematic diagrams showing the development pattern of the boundary fault Fxj33 in the Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin

a. 中生代末期断陷作用前西江主洼; b. 中始新世裂陷一幕结束时期西江主洼; c. 早渐新世裂陷二幕结束时期西江主洼

早期的拆离断层,表现为在近 SN 向引张作用下的“非拆离型”伸展变形^[67],该时期拆离伸展变形向洋迁移,而西江主洼早期拆离边界断层则被遗弃,洼陷结构表现为似地堑样式(图 6a—c)。

4 结论

1) 西江主洼边界断层 Fxj33 为低角度生长正断层,倾角 $5^{\circ} \sim 36^{\circ}$,断裂呈 NEE 走向,约 59° ,发育长度约 55 km。Fxj33 断层平面形态较平直,在西江 33E 洼和西江 28 洼之间过渡位置,由于基底断块向洼陷内部滑落导致 Fxj33 断层平面迹线向隆起一侧外凸,呈三角形,同时 Fxj33 断层中段受两排 EW 向高角度断裂切割。由于受控于低角度控制, Fxj33 断层水平位移量远大于垂直位移量,水平位移量最大可达 9.5 km 左右,其垂直位移量相对小些,最大垂直位移量约为 5.4 km。

2) 珠琼运动一幕时期, Fxj33 边界断层强烈活动,沿走向上表现为分段差异活动特征,在分段差异演化作用下自西向东分别控制西江 33W 洼、西江 33E 洼和西江 28 洼的发育,各洼陷表现为地堑结构。珠琼运动二幕时期, Fxj33 断裂活动性减弱,与两排 EW 向高角度断裂共同控制着西江主洼各洼陷的发育演化,各洼陷结构转变为似地堑结构样式。

3) Fxj33 低角度正断层为中生代先存逆冲构造体系在新生代构造负反转形成,主要演化过程如下:①珠江口盆地中生代整体处于挤压构造环境,在西江主洼地区形成了 Fxj33 断层的低角度先存逆冲断裂体系;②白垩纪末或古新世初,珠江口盆地中构造应力转变为张扭构造应力,盆地发生裂陷作用,西江主洼 Fxj33 断层的先存的逆冲断裂体系重新活化反转, Fxj33 低角度边界正断层形成,并控制西江主洼沉积演化;③到了晚始新世,西江主洼进入珠琼运动二幕演化时期,由于区域构造应力转变为近 SN 向,两排 EW 向高角度断裂强烈活动,并且向下切割了 Fxj33 边界断层的断面,与 Fxj33 边界正断层共同控制西江主洼沉积。

参 考 文 献

- [1] Anderson E M. The dynamics of faulting (2nd edition) [M]. Edinburgh, UK: Oliver and Boyd, 1951.
- [2] Jackson J A, White N J. Normal faulting in the upper continental crust: Observations from regions of active extension [J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11(1-2): 15-36.
- [3] Morley C K. Extension, detachments and sedimentation in continental rifts (with particular reference to East Africa) [J]. Tectonics, 1989, 8(6): 1175-1192.
- [4] Jackson J A, White N J, Garfunkel Z, et al. Relations between normal-fault geometry, tilting and vertical motions in extensional terranes: An example from the southern Gulf of Suez [J]. Journal of Structural Geology, 1988, 10(2): 155-170.
- [5] Whipp P S, Jackson C A-L, Gawthorpe R L, et al. Normal fault array evolution above a reactivated rift fabric: A subsurface example from the northern Horda Platform, Norwegian North Sea [J]. Basin Research, 2013, 26: 1-27.
- [6] Axen G J. Research focus: Significance of large-displacement, low-angle normal faults [J]. Geology, 2007, 35(3): 287-288.
- [7] Wernicke B. Low-angle normal faults in the basin and range province: Nappe tectonics in an extending orogen [J]. Nature, 1981, 291: 645-648.
- [8] Garcés M, Gee J S. Paleomagnetic evidence of large footwall rotations associated with low-angle faults at the Mid-Atlantic Ridge [J]. Geology, 2007, 35(3): 279-282.
- [9] Tucholke B E, Lin J, Kleinrock M. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (B5): 9857-9866.
- [10] Morley C K. Geometry and evolution of low-angle normal faults (LANF) within a Cenozoic high-angle rift system, Thailand: Implications for sedimentology and the mechanisms of LNF development [J]. Tectonics, 2009, 28: 1-30.
- [11] Morley C K. The widespread occurrence of low-angle normal faults in a rift setting: Review of examples from Thailand, and implications for their origin and evolution [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 133: 18-42.
- [12] Parsons T, Thompson G A. Does magmatism influence low-angle normal faulting? [J]. Geology, 1993, 21(3): 247-250.
- [13] Lister G S, Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA [J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11(1-2): 65-94.
- [14] Westaway R. The mechanical feasibility of low-angle normal faulting [J]. Tectonophysics, 1999, 308: 407-443.
- [15] Colletini C, Sibson R H. Normal faults, normal friction? [J]. Geology, 2001, 29(10): 927-930.
- [16] Numelin T, Marone C, Kirby E. Frictional properties of natural fault gouge from a low-angle normal fault, Panamint Valley, California [J]. Tectonics, 2007, 26: 1-14.
- [17] Haines S H, van der Pluijm B A, Ikari M J, et al. Clay fabric intensity in natural and artificial fault gouges: Implications for brittle fault zone processes and sedimentary basin clay fabric evolution [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: 1-22.
- [18] Haines S H, van der Pluijm B A. Patterns of mineral transformations in clay gouge, with examples from low-angle normal fault rocks in the western USA [J]. Journal of Structural Geology, 2012, 43: 2-32.
- [19] Faulkner D R, Mitchell T M, Healy D, et al. Slip on 'weak' faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone [J]. Nature, 2006, 444 (7121): 922-925.
- [20] Healy D. Anisotropy, pore fluid pressure and low angle normal faults [J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31(6): 561-574.
- [21] Lecompte E, Le Pourhiet L, Lacombe O. Mechanical basis for slip

- along low-angle normal faults [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: 1–6.
- [22] Enfield M A, Coward M P. The structure of the west Orkney Basin, northern Scotland [J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144 (6): 871–884.
- [23] Jarrige J J. Variation in extensional fault geometry related to heterogeneities within basement and sedimentary sequences [J]. *Tectonophysics*, 1992, 215 (1–2): 161–166.
- [24] Withjack M O, Olsen P E, Schlische R W. Tectonic evolution of the Fundy rift basin, Canada: Evidence of extension and shortening during passive margin development [J]. *Tectonics*, 1995, 14 (2): 390–405.
- [25] Jolivet L, Lecomte E, Huet B, et al. The north cycladic detachment system [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2010, 289 (1): 87–104.
- [26] Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, et al. The Hengshan low-angle normal fault zone: Structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China [J]. *Tectonophysics*, 2013, 606: 97–115.
- [27] Sibson R H. A note on fault reactivation [J]. *Journal of Structural Geology*, 1985, 7 (6): 751–754.
- [28] Collettini C, De Paola N, Holdsworth R E. The development and behaviour of low-angle normal faults during Cenozoic asymmetric extension in the Northern Apennines, Italy [J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28 (2): 333–352.
- [29] Clemenzi L, Storti F, Balsamo F, et al. Fluid pressure cycles, variations in permeability, and weakening mechanisms along low-angle normal faults: The Tellaro detachment, Italy [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127 (11–12): 1689–1710.
- [30] Collettini C, Viti C, Smith S, et al. Development of interconnected talc networks and weakening of continental low-angle normal faults [J]. *Geology*, 2009, 37 (6): 567–570.
- [31] Bolognesi F, Bistacchi A. Weakness and mechanical anisotropy of phyllosilicate-rich cataclases developed after mylonites of a low-angle normal fault (Simplon Line, Western Alps) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2016, 83: 1–12.
- [32] Wang J H, Pang X, Liu B, et al. The Baiyun and Liwan Sags: Two supradetachment basins on the passive continental margin of the northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 95: 206–218.
- [33] Zhao Y H, Ren J Y, Pang X, et al. Structural style, formation of low angle normal fault and its controls on the evolution of Baiyun Rift, northern margin of the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89: 687–700.
- [34] Ye Q, Mei L, Shi H, et al. A low-angle normal fault and basement structures within the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin: Insights into late Mesozoic to early Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea area [J]. *Tectonophysics*, 2018, 731–732: 1–16.
- [35] 何勇, 梅廉夫, 施和生, 等. 低角度断陷盆地成因模式及结构特征——以珠江口盆地恩平低角度断陷为例 [J]. *海相油气地质*, 2018, 23 (3): 73–81.
- He Yong, Mei Lianfu, Shi Hesheng, et al. Structural characteristics and genetic model of the low-angle fault depression: A case in Enping Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23 (3): 73–81.
- [36] Huang C J, Zhou D, Sun Z, et al. Deep crustal structure of Baiyun Sag, northern South China Sea revealed from deep seismic reflection profile [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (11): 1131–1138.
- [37] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (B4): 6299–6328.
- [38] Barckhausen U, Engels M, Franke D, et al. Evolution of the South China Sea: Revised ages for breakup and seafloor spreading [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 599–611.
- [39] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by the deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15 (12): 4958–4983.
- [40] 宫越, 林畅松, 何敏, 等. 中国南海北部珠江口盆地早渐新世末破裂不整合特征及其地质意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40 (4): 851–863.
- Gong Yue, Lin Changsong, He Min, et al. Characteristics and geological significance of unconformities at the late Early Oligocene in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40 (4): 851–863.
- [41] 赵中贤, 孙珍, 谢辉, 等. 白云深水区新生代沉降及岩石圈伸展变形 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54 (12): 3336–3343.
- Zhao Zhongxian, Sun Zhen, Xie Hui, et al. Baiyun deepwater Cenozoic subsidence and lithospheric stretching deformation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54 (12): 3336–3343.
- [42] 廖杰, 周蒂, 赵中贤, 等. 珠江口盆地白云凹陷裂后异常沉降的数值模拟 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41 (4): 504–517.
- Liao Jie, Zhou Di, Zhao Zhongxian, et al. Numerical modeling of the anomalous post-rift subsidence in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41 (4): 504–517.
- [43] Xie H, Zhou D, Li Y, et al. Cenozoic tectonic subsidence in deepwater sags in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2014, 615–616: 182–198.
- [44] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义 [J]. *地质评论*, 2007, 53 (2): 145–150.
- Pang Xiong, Chen Changmin, Shao Lei, et al. Baiyun movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications [J]. *Geological Review*, 2007, 53 (2): 145–150.
- [45] Franke D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 63–87.
- [46] Deng P, Mei L F, Liu J, et al. Episodic normal faulting and magmatism during the syn-spreading stage of the Baiyun sag in Pearl River Mouth Basin: Response to the multi-phase seafloor spreading of the South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2019, 40 (1): 33–50.
- [47] 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): 1008–1019.
- Zhao Shujuan, Wu Shiguo, Shi Hesheng, et al. Structures and dynamic mechanism related to the Dongsha movement at the northern margin

- of South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1008 – 1019.
- [48] 汪旭东, 张向涛, 何敏, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷南部文昌组储层发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1147 – 1155.
- Wang Xudong, Zhang Xiangtao, He Min, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir development in the Wenchang Formation, Southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1147 – 1155.
- [49] 刘志峰, 吴克强, 柯岭, 等. 珠江口盆地珠一坳陷北部洼陷带油气成藏主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 561 – 569.
- Liu Zhifeng, Wu Keqiang, Ke Ling, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in northern subsag belt of the Zhu-1 Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 561 – 569.
- [50] Cowie P A, Scholz C H. Displacement-length scaling relationship for faults: Data synthesis and discussion[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14(10): 1149 – 1156.
- [51] Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. Growth of normal faults: Displacement length scaling[J]. Geology, 1993, 21(12): 1107 – 1110.
- [52] Kim Y S, Sanderson D J. The relationship between displacement and length of faults: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2005, 68(3): 317 – 334.
- [53] Wong M S, Gans P B. Geologic, structural and thermochronologic constraints on the tectonic evolution of the Sierra Mazatan core complex, Sonora, Mexico: New insights into metamorphic core complex formation[J]. Tectonics, 2008, 27(4): 1 – 31.
- [54] Whitney D L, Teyssier C, Rey P, et al. Continental and oceanic core complexes[J]. Geological Society of America Bulletin, 2013, 125(3–4): 273 – 298.
- [55] Colletini C. The mechanical paradox of low-angle normal faults: Current understanding and open questions[J]. Tectonophysics, 2011, 510(3–4): 253 – 268.
- [56] 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 等. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 164 – 169.
- Shao Lei, You Hongqing, Hao Hujun, et al. Petrology and depositional environments of Mesozoic strata in the northeastern South China Sea[J]. Geological Review, 2007, 53(2): 164 – 169.
- [57] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地中生代主要断裂特征和动力背景分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2): 52 – 61.
- Chen Hanzong, Wu Xiangjie, Zhou Di, et al. Meso-Cenozoic faults in Zhujiang River Mouth basin and their geodynamic background[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2): 52 – 61.
- [58] 孙晓猛, 张旭庆, 张功成, 等. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(6): 1312 – 1323.
- Sun X M, Zhang X Q, Zhang G C, et al. 2014. Texture and tectonic attribute of Cenozoic basin basement in the northern South China Sea[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(6): 1312 – 1323.
- [59] 周蒂, 王万银, 庞雄, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2006, 36(3): 209 – 218.
- Zhou D, Wang W Y, Pang X, et al. Subducted accretionary zone revealed by the geophysical data in the northeastern South China Sea[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2006, 36(3): 209 – 218.
- [60] Zhou D, Yao B C. Tectonics and sedimentary basins of the South China Sea: Challenges and progresses[J]. Journal Earth Science, 2009, 20(1): 1 – 12.
- [61] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344(3): 175 – 205.
- [62] 李武显, 周新民. 中国东南部晚中生代俯冲带探索[J]. 高校地质学报, 1999, 5(2): 164 – 169.
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. Late Mesozoic subduction zone of south-eastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5(2): 164 – 169.
- [63] 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2602 – 2618.
- Suo Yanhui, Li Sanzhong, Dai Liming, et al. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2602 – 2618.
- [64] 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(3): 65 – 94.
- Li Sanzhong, Yu Shan, Zhao Shujuan, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental margin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(3): 65 – 94.
- [65] 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): 588 – 595.
- Wang Jiahao, Liu Lihua, Chen Shenghong, et al. Tectonic-sedimentary responses to the second episode of the Zhu-Qiong movement in the Enping Depression, Pearl River Mouth Basin and its regional tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(4): 588 – 595.
- [66] 漆家福, 吴景富, 马兵山, 等. 南海北部珠江口盆地中段伸展构造模型及其动力学[J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 203 – 221.
- Qi Jiafu, Wu Jingfu, Ma Bingshan, et al. The structural model and dynamics concerning middle section, Pearl River Mouth Basin in north margin of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(2): 203 – 221.
- [67] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 102 – 114.
- Ren Jianye, Pang Xiong, Lei Chao, et al. Ocean and continent transition in passive continental margins and analysis of lithospheric extension and breakup process: Implication for research of the deepwater basins in the continental margins of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 102 – 114.

(编辑 梁 慧 张亚雄)