

珠一坳陷番禺4 洼新生代断裂特征及其区域动力背景

吴智平¹, 胡 阳¹, 钟志洪²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东广州 510240)

摘要:运用丰富的三维地震资料,通过断裂体系静态刻画和动态分析,对番禺4 洼断裂发育的时空差异性及其构造转型机制进行研究。结果表明:受控于滨(环)太平洋、特提斯-喜马拉雅两大构造域的区域演化背景,番禺4 洼新生代断裂体系发育时空差异性明显;拉张裂陷期(E_2w-E_2e)经历了由NE向断裂控洼到NWW、近EW向断裂控洼的转变,裂后拗陷期($E_3z-N_1z-N_1h$)断裂活动减弱、消亡,构造活化期(N_1y-Q)表现为先期发育的NWW向、近EW向断裂复活和新的近EW向断裂的产生,且走滑特征明显;现今断裂体系特征体现了多期构造运动的叠加效应。

关键词:断裂发育特征;成因机制;新生代;番禺4 洼;珠一坳陷

中图分类号:TE 121.2 **文献标志码:**A

引用格式:吴智平,胡阳,钟志洪. 珠一坳陷番禺4 洼新生代断裂特征及其区域动力背景[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):1-9.

WU Zhiping, HU Yang, ZHONG Zhihong. Cenozoic faults characteristics and regional dynamic background of Panyu 4 sub-sag, Zhu I Depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(4):1-9.

Cenozoic faults characteristics and regional dynamic background of Panyu 4 sub-sag, Zhu I Depression

WU Zhiping¹, HU Yang¹, ZHONG Zhihong²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Shenzhen Branch of CNOOC, Guangzhou 510240, China)

Abstract: Using abundant 3D seismic data, this paper analyzed the static and dynamic characteristics of the fault system of Panyu 4 sub-sag, and then studied its spatio-temporal differences and the mechanisms of the structural transformation. The results show that the development of the fault system in Panyu 4 sub-sag is mainly controlled by the regional evolution of the Circum-Pacific and the Tethyan-Himalayan tectonic domains, and its spatio-temporal differences are also significant. During the rifting stage (E_2w-E_2e), the strike of the strongly active sag-controlling faults changed from NE to NWW and subparallel EW. During the depression period ($E_3z-N_1z-N_1h$), the activity of those faults decreased and stopped. In the tectonic activation stage (N_1y-Q), the above NWW and subparallel EW pre-existing faults were reactivated and some new subparallel EW faults were developed with significant characteristics of strike slipping. At present the fault system characteristics reflect the superimposed effects of multistage tectonization.

Keywords: fault development characteristics; genetic mechanism; Cenozoic; Panyu 4 sub-sag; Zhu I Depression

番禺4 洼为珠江口盆地珠一坳陷内部的一个次级构造单元,其位于西江凹陷的东南侧,北邻西江36 洼,西侧和南侧分别以断裂与西江中低凸起、恩平凹陷相接,东侧与东沙隆起相接^[1-2]。番禺4 洼陷的发育演化经历了文昌组(E_2w)—恩平组(E_2e)沉

积期的早期裂陷期、珠海组(E_3z)—珠江组(N_1z)—韩江组(N_1h)沉积期的裂后拗陷期和粤海组(N_1y)—万山组(N_2w)—第四系(Q)沉积期的构造活化期3个演化阶段^[3-5],形成了下断上坳、先陆后海的构造-沉积响应特征^[6],各阶段断裂体系的发

收稿日期:2015-01-16

基金项目:中海石油(中国)有限公司重大科技攻关项目(YXKY-2012-SZ-01);中央高校基本科研业务费专项(13CX06015A)

作者简介:吴智平(1967-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为地质学。E-mail:wuzp@upc.edu.cn.

育特征存在明显差异,体现了多方向、多期次的叠加复合效应。作为一个已证实的“小而肥”的富生烃洼陷,番禺4洼已发现的油气藏多为以下部文昌组深湖相暗色泥岩为源岩、以上部珠江组—粤海组三角洲—滨岸砂体为储层的下生上储的“它源型”油气藏^[7-9],因此断裂体系的发育不仅决定了构造格局的演化,也是油气藏形成与分布的重要控制因素^[10-11]。笔者充分利用研究区丰富的三维地震资料,在断裂体系发育特征的静态刻画和动态分析基础上,明确研究区断裂体系发育特征的时空差异性,

探讨构造转型机制,旨在为该地区油气勘探实践提供指导。

1 断裂体系发育特征

珠江口盆地新生代构造演化经历了珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、东沙运动等多期构造运动,作为其内部的一个次级构造单元,番禺4洼断裂体系的发育特征体现了多期次、多方向、多性质的叠加复合(图1),不同方向断裂切割的地层层系、断裂性质存在差异,不同层系的断裂展布也存在差异。

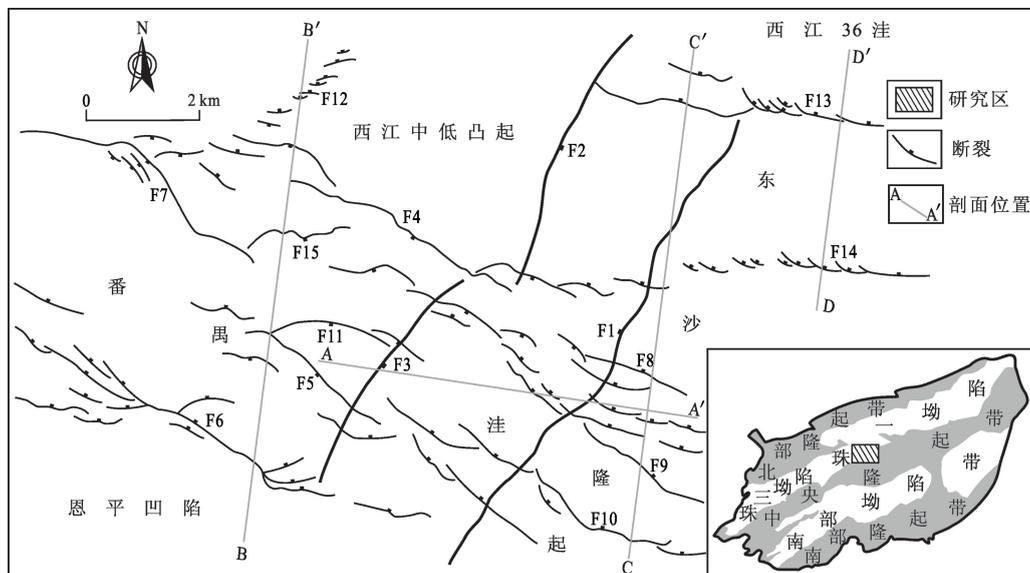


图1 番禺4洼区域构造位置及主干断裂展布

Fig. 1 Regional structural location and main faults of Panyu 4 sub-sag

1.1 主要断裂带发育特征

番禺4洼断裂体系由NE向、NWW向和近EW向不同走向的断裂(或断裂带)组成。

NE向断裂包括F1、F2、F3等断裂,平面上多平行排列,延伸距离长且规模大;剖面上多表现为低角度板式正断层,其下切穿了新生界基底,其上切至珠海组,未切新近系的珠江组,是研究区早期裂陷期的主控断裂,控制了洼陷的形成与演化(图2(a)、(c),图3,图中测线位置如图1所示);此外,发育于研究区西北部的F12断裂带表现为由一系列的近EW向的小断裂沿NE向侧接雁列而成(图3(a)、(b)),剖面上表现为多级“Y”字形(或负花状),地层切割深度较浅,且断层两盘厚度近于相等(图2(b)),属于后期发育的走滑断裂。

NWW向断裂数量较多,整体上可划分为由F6、F7—F5—F10、F4—F8—F9组成的3个近于平行的

断裂带(图1),就其平面展布特征而言,下部层系相对平直(图3(c)、(d)),图3为在对研究区三维地震资料层位精细解释的基础上采用网格化处理得到的主要界面三维可视化图,能够清晰反映现今各界面断裂发育特征)。上部层系断面弯曲,多表现为由多条次级小断裂沿NWW—SEE向侧接成带(图3(a)、(b));剖面上切割地层层系多,下至新生界基底,上可至万山组底面,表现为下缓上陡的铲式正断层,与其他次级断层可形成“Y”字形组合样式(图2(b)、(c))。需要指出的是,以F1断裂为界,东西两侧NWW向断裂发育存在明显差异,西侧除了番禺4洼的西南侧边界断层F6外,F4、F5等NWW向主要断裂多为南倾(图2(b)),而东侧位于东沙隆起区的NWW向断裂(如F8、F9、F10等)则均为北倾,形成列式断阶(图2(c)),这体现了NE向的F1断裂对NWW向断裂发育的分割效应。

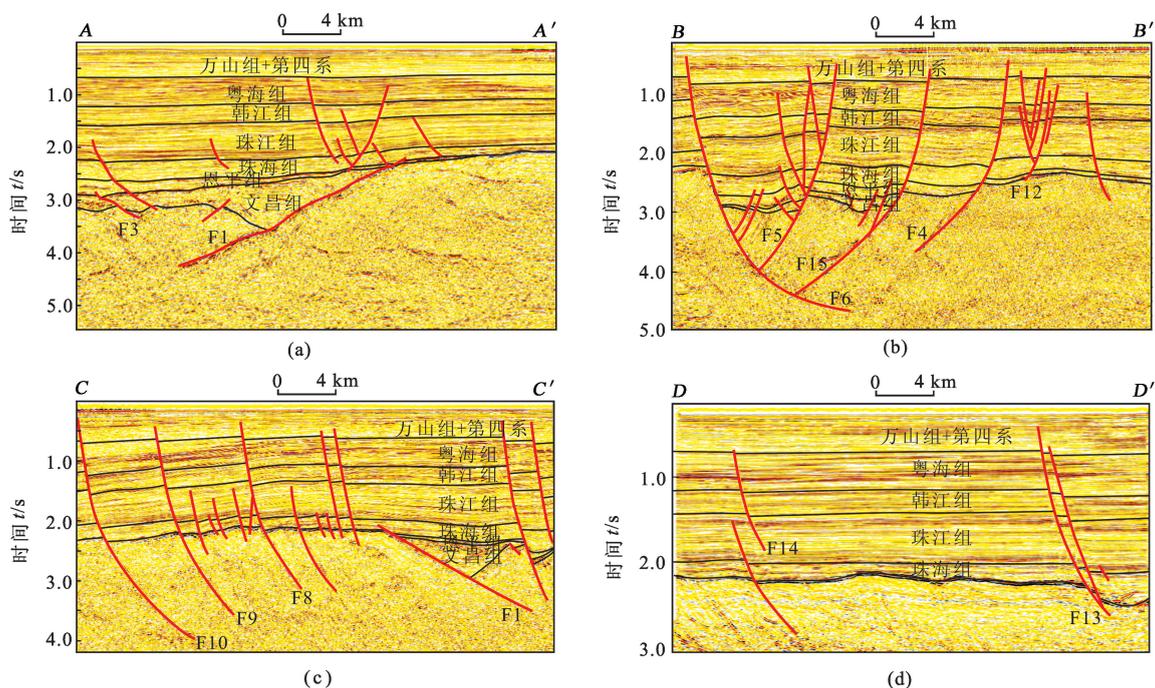


图 2 番禺 4 注典型地震剖面

Fig. 2 Typical seismic profiles of Panyu 4 sub-sag

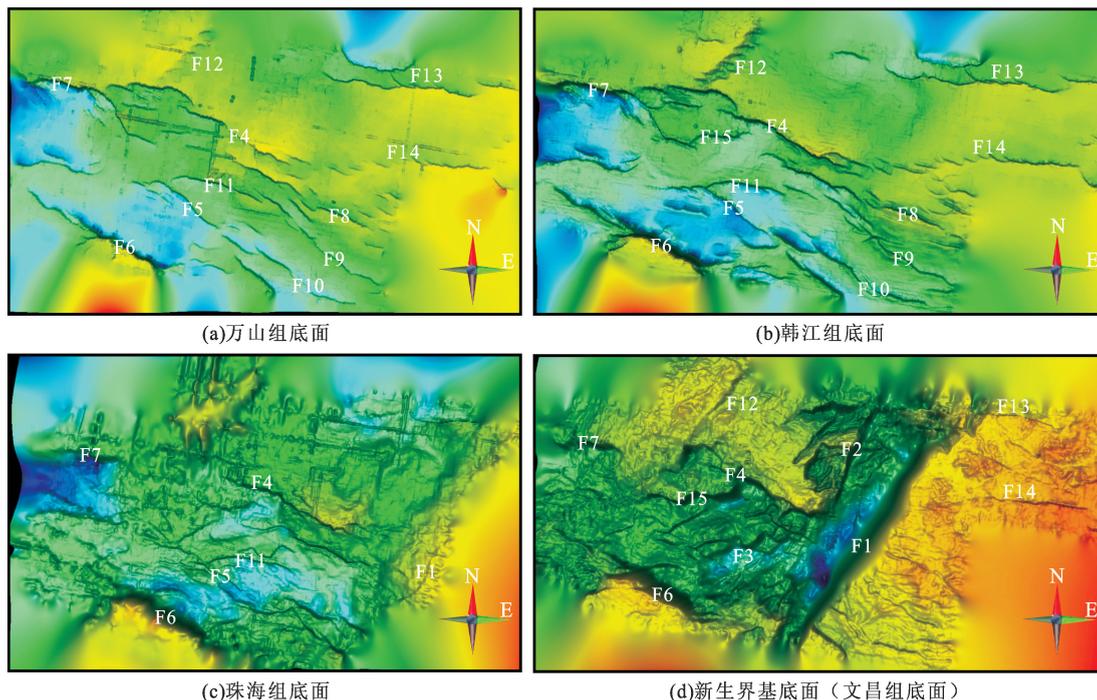


图 3 番禺 4 注现今各界面(深、浅层系)断裂展布特征

Fig. 3 Present fault distribution features of all interfaces (deep and shallow layer series) of Panyu 4 sub-sag

近 EW 向断裂在番禺 4 注发育相对较弱,在 F1 断裂的西侧,EW 向断裂延伸距离短,断面弯曲,剖面上切割地层层系多,表现为铲式正断层,与次级小断层形成多级“Y”字形组合(如图 2(b)中的 F15);在 F1 断裂东侧的东沙隆起上发育的 F13、F14 断裂,在平面上表现为左阶侧列或侧接的特点,明显具

有右旋走滑的性质,剖面上断面倾角较大,多为北倾(图 2(d))。

对比现今不同层系断裂的发育特征可知:下部裂陷层系(文昌组和恩平组)以 NE 向与 NWW 向断裂为主,形成共轭断裂体系,仅少量近 EW 向断裂切至新生代基底面(图 3(c)、(d));拗陷层系(珠海

组—珠江组—韩江组) NE 向断裂不发育, NWW 向断裂成为主控断裂, 近 EW 向断裂开始发育(图 3(b)); 构造活化层系(粤海组—万山组—第四系)近 EW 向断裂与 NWW 向断裂成为主控断裂, NE 向断裂基本不发育, 雁列、帚状构造样式发育, 整体体现走滑特征(图 3(a))。

1.2 断裂类型划分

综合各断裂的平面、剖面特征, 可将研究区的断裂体系划分为拉张断裂、拉张—走滑断裂和走滑断裂 3 类不同性质的断裂。

拉张断裂带的主断层表现为铲式正断层, 下降盘发育与主断裂近于平行的次级断裂, 剖面上形成翘倾断块和堑垒组合(图 4(a)), 研究区下部层系发育的 F1、F2 等 NE 向断裂及由 F6、F7—F5—F10、F4—F8—F9 组成的 3 个近于平行的 NWW 向断裂带均表现拉张断裂性质。

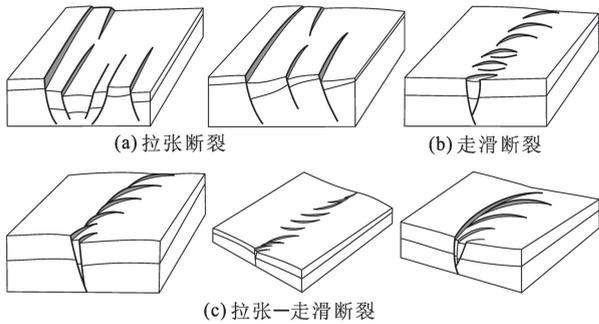


图 4 番禺 4 洼的断裂类型划分与形态模式

典型的走滑断裂在番禺 4 洼整体发育较弱, 最为典型的是 NE 向的 F12 断裂带, 平面上没有形成主破裂面, 多由一系列次级小断层左阶雁行排列而成, 剖面上表现为“Y”字型组合(图 4(b)), 属弱走滑断裂。

拉张—走滑断裂是在走滑基础上叠加拉张作用的结果, 通常表现为由几条断裂沿主走滑方向侧接(或侧列)而成, 主断裂多为高角度铲式正断层, 下降盘发育的次级断层多与主断裂呈羽状相交, 在剖面上多表现为多级“Y”字型组合(图 4(c)), 如近 EW 向断裂 F13 和 F14; 此外下部层系表现为拉张断裂的 NWW 向断裂带在上部层系则转换为拉张—走滑性质。

总体而言, 番禺 4 洼下部层系的断裂以拉张性质为主, 上部层系的断裂走滑作用增强; NE、NWW 向断裂以拉张为主, 近 EW 向断裂走滑明显。

2 断裂体系动态演化

上述现今断裂体系发育特征并非一次构造运动的结果, 体现的是多期构造运动的叠加效应, 因此通过断裂活动性的分析, 从现今复杂的叠合效应中离析出各构造阶段的活动断裂是明确整个断裂体系形成和演化过程的关键。

2.1 断裂活动性分析

关于断裂活动性的定量表征方法前人已经有了系统的阐述^[12], 本文中采用断层活动速率法对研究区 15 条主干断裂的垂向活动强度进行定量计算(图 5)。

Fig. 4 Faults types and modes of Panyu 4 sub-sag

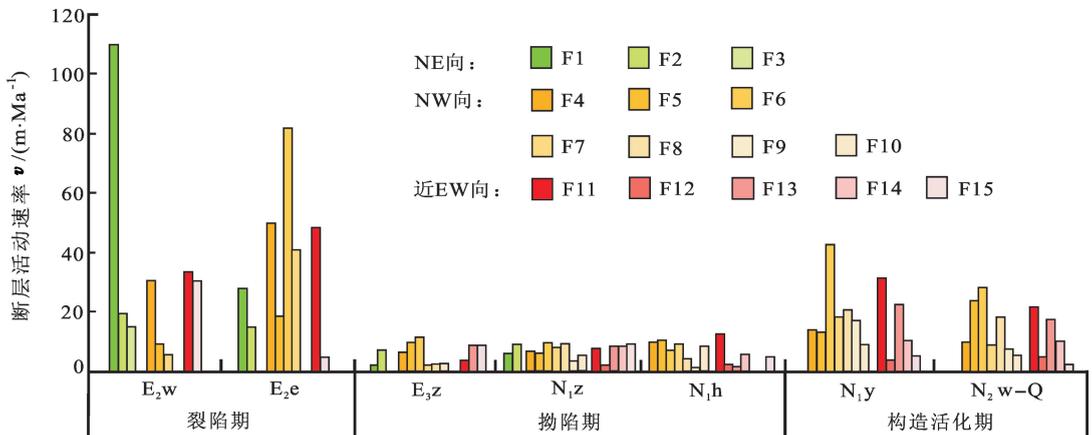


图 5 番禺 4 洼主干断裂的不同时期活动速率

Fig. 5 Slip rates of the main faults of Panyu 4 sub-sag

对比各方向断裂的活动强度变化可以发现 NE 向断裂在文昌期活动强度最大, 如 F1 断裂, 其活动速率可大于 100 m/Ma, 而后活动强度迅速回落, 至珠海期—珠江期仅不足 10 m/Ma, 进入韩江期以后

彻底消亡。

NWW 向断裂整体活动持续时间长, 文昌—恩平期活动断裂数量少, 但强度大, 作为裂陷期番禺 4 洼的西南边界断层的 F6 在恩平期强度可达到 50

m/Ma,珠海—韩江期的活动断裂数量明显增多,但强度大幅降低(小于 15 m/Ma),粤海期以后活动强度又明显增强。

近 EW 向断裂在早期整体不发育,仅 F11 和 F15 活动,进入珠海期断裂数量开始逐渐增多,但垂向活动性较弱,直至粤海组沉积期达到峰值,具有晚期活动特征。

整体而言,断裂体系垂向活动强度的变化具有明显的阶段性,文昌期—恩平期断层活动速率最大,平均可大于 40 m/Ma;珠海期—珠江期—韩江期活动强度最小,各断裂活动速率小于 15 m/Ma;至粤海期以后,垂向活动强度又有所回升,平均可大于 20 m/Ma,这一特征吻合于区域构造所经历的早期裂

陷—裂后拗陷—构造活化的幕式演化过程。

2.2 断裂体系演化过程

依据上述断裂活动性研究的结果,结合平衡剖面分析所得到的各方向测线不同阶段的伸展率变化,可将番禺 4 洼断裂体系发育划分为 3 个大的演化阶段:

(1)文昌期(E_2w)—恩平期(E_2e)为以 NE 向和 NWW 向断裂为主控断层的裂陷发育阶段。裂陷早期(E_2w),NE 向断裂是主控断裂,尽管断裂数量少,但活动强度大,如 F1、F2 和 F3,其中 F1 断裂活动速率可大于 100 m/Ma(图 5),控制了番禺 4 洼的形成,NW—SE 向成为研究区该时期的优势伸展方向(图 6(a)),图 6 中显示的为各地质时期主要活动断

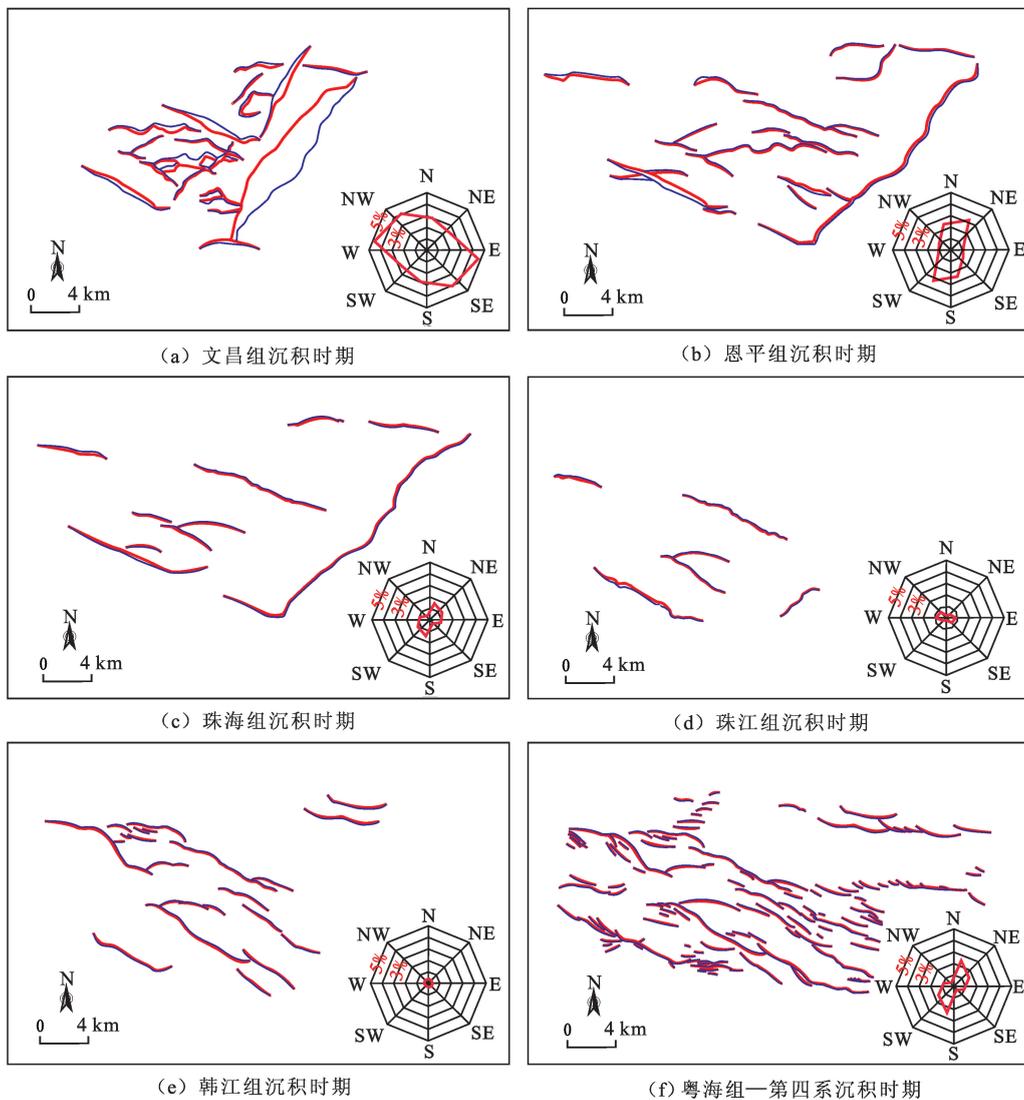


图 6 番禺 4 洼断裂体系演化

Fig. 6 Evolution of fault system of Panyu 4 sub-sag

层;伸展率蛛网图揭示的是依据不同方向测线经过平衡剖面分析所得到的各阶段伸展率大小及方向的

变化);裂陷晚期(E_2e),NE 向断裂的活动强度明显减弱(如 F1 断裂,活动速率降低至 30 m/Ma),NWW

向断裂活动性增强,如番禺4洼的西南边界断层F4和F6,恩平期活动强度可大于50 m/Ma,成为研究区的主控断层,优势伸展方向由NW-SE向转变为NNE-SSW方向。整个裂陷发育阶段近EW向断裂仅F11和F15等少数断裂在活动(图6(b)),但活动强度大,可达30 m/Ma。

(2) 珠海期(E_3z)—珠江期(N_{1z})—韩江期(N_{1h})为构造宁静期,先期发育的NE向断裂趋于消亡,仅有少量NW向断裂继承性活动,但活动强度明显减弱,研究区伸展速率明显降低,体现了拗陷发育阶段的特点(图6(c)、(d))。

(3) 粤海期(N_{1y})—第四纪(Q)为构造活化期,先期发育的NW向断裂开始复活,如F6,断裂活动强度迅速回升,可大于20 m/Ma(图5),近EW向断裂增多,且整个断裂体系明显具有走滑特征,近EW向断裂左阶右行、NW向断裂则表现为右阶左行(图6(f));此外,先期仅在F1断裂西侧番禺4洼内发育的NW向断裂和一些近EW向断裂开始跨越F1断裂的分割,延伸至东侧的东沙隆起上。

总结上述各构造阶段断裂发育特征,可将番禺4洼新生代断裂体系划分为早期消亡型、继承改造型、晚期新生型3类。

F1、F2和F3等NE向断裂属早期消亡型,其仅在裂陷期活动,表现为张性低角度板式(或铲式)正断层,仅切割下部地层,控制番禺4洼的形成,同时也控制了文昌组、恩平组两套烃源岩层系的发育,至珠海组沉积期后基本消亡。

NW向断裂和少量洼陷内部的近EW向断裂属于继承改造型断裂,其活动持续时间长,在裂陷期开始活动,表现为张性断层,之后断裂活动强度逐渐衰弱,至粤海期断裂活动强度明显增强,在早期断裂发育的基础上,性质由拉张转变为具有走滑-拉张特征。这类断层切割地层层系多,在油气成藏过程中往往起到沟通下部源岩和上部储层的作用,成为油源断层。

在F1断裂东侧东沙隆起上发育的近EW向和NW向断裂多为晚期新生型断裂,其在新近纪粤海期开始大量发育,其平面上以雁列、侧列和帚状组合为主,剖面表现为负花状构造和列式组合,体现了走滑特征。

3 断裂体系发育与演化的区域动力背景

珠江口盆地是在前新生代褶皱基底上发育的裂

陷盆地,其构造演化受控于滨(环)太平洋、特提斯-喜马拉雅两大构造域。作为珠江口盆地内部的一个次级构造单元,番禺4洼的断裂体系发育演化及转型过程是复杂区域动力背景的体现。

白垩纪后期随着伊佐奈歧向北漂移,太平洋板块逐渐由欧亚大陆东南部北移至东部,俯冲方向由SWW转为NNW向,俯冲速率明显增大;至古近纪初期(约距今60 Ma),在印度板块自NE方向向欧亚板块高速俯冲的背景下,太平洋板块俯冲速率突然急剧降低、NNW向俯冲带后撤^[13]。这种不对称的板块作用导致中国大陆软流圈向东蠕散,拖曳岩石圈相应发生减薄,导致中国东部包括珠江口盆地在内的南海北部地区在古近纪初期由挤压环境转变为NW-SE向拉张环境(图7(a),图7(c)中右旋走滑应变椭球体中,PDZ表示主位移带;P表示次级同向断层;R表示同向走滑断层;R'表示反向走滑断层;T表示正断层),发生区域性裂陷作用^[14-16];该时期南海北部陆缘的岩浆活动主要表现为钙碱性系列的安山岩、流纹岩和玄武岩,且稀土和微量元素特征揭示了岩浆来自与板块俯冲作用有关的岩石圈地幔,也证实了该时期区域应力场表现为拉张环境^[17]。文昌组沉积期(49~38 Ma)是太平洋板块俯冲强度最弱的时期^[18-19],在NW-SE向区域伸展动力背景控制下,番禺4洼NE向断裂活动强度最大,如F1断裂,断层活动速率可大于100 m/Ma(图5),为文昌组主控断层;NW和近EW向属于次级调节断裂,活动性相对较弱,如F11和F15,活动强度仅为30 m/Ma(图5)。

至恩平组沉积时期(38~33.9 Ma),西侧太平洋板块俯冲方向由NNW向转变为NW向且俯冲速率突然增大^[19-20],正向俯冲于欧亚大陆;在东侧太平洋板块加速俯冲的挤压背景下,西侧印度板块以NE向与欧亚板块发生陆-陆“硬碰撞”作用,造成印支地块旋转挤出^[21],进而驱动古南海向南俯冲于婆罗洲地块之下,其板后拖曳力导致包括珠江口盆地在内的南海北部地区受到近NS向伸展作用^[22],从而使区域应力场方向由NW顺时针转变为近NS向(图7(b))。在东西两侧挤压及近NS向拉张作用背景下,番禺4洼断裂体系发生转型,NW-SE向不再是优势伸展方向,先期NE向控洼断裂活动性明显减弱,并逐渐消亡,如F1断裂活动强度迅速降低至小于30 m/Ma(图5),F3断裂停止活动;而先期活动强度较弱的NW向、近EW向断裂与NS向伸展方向更匹配,活动性明显增强^[23],成为主控断

层,如番禺4 洼的西南边界断层 F4 和 F6,恩平期活

动强度可大于 50 m/Ma,成为主控断层。

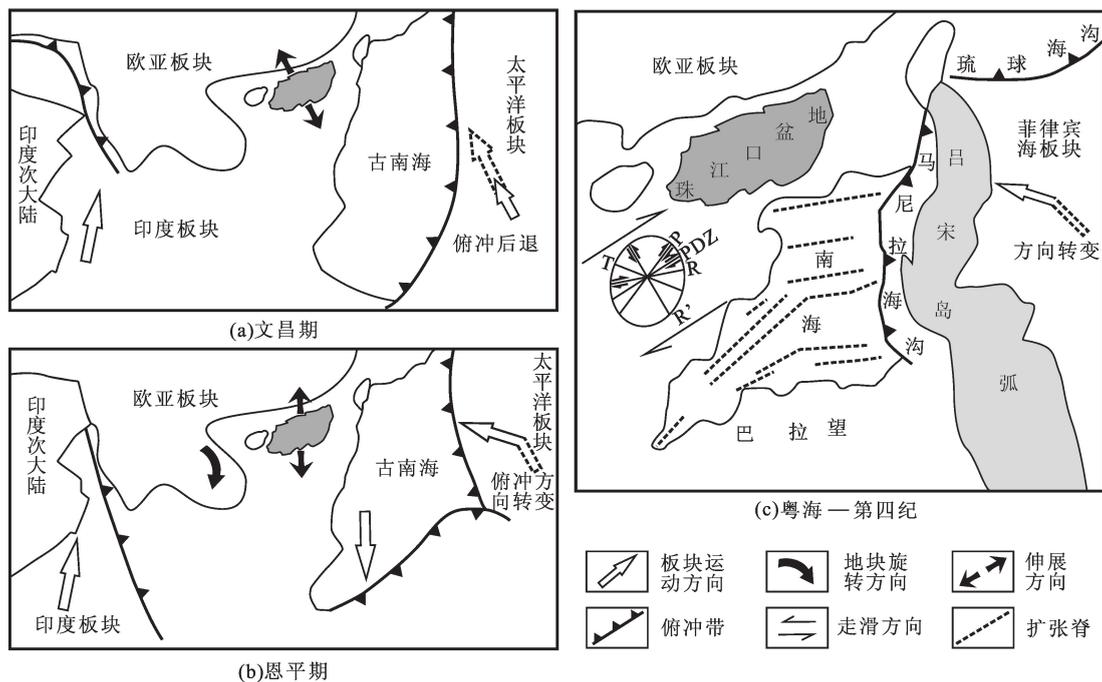


图7 番禺4 洼断裂体系发育关键期的区域背景

Fig. 7 Regional background of fault system in key development period

珠海组—韩江组沉积期(33.9 ~ 10.5 Ma)为南海运动阶段,该时期古南海自北向南加速向加里曼丹—苏禄地区俯冲直至消亡,新南海开始扩张形成,南沙块体向南漂移^[24]。该时期整个南海地区的扩展中心位于新南海扩张中心,而包括珠江口盆地在内的南海北缘块体处于裂后沉降阶段,处于构造宁静期,断裂活动相对较弱(图5),仅有少数断裂继承性活动。

进入粤海组沉积期(10.5 Ma)或是更早(韩江组沉积后期 11.6 Ma),研究区又经历了一次重要的构造运动——东沙运动。该时期南海已停止扩张,菲律宾海板块运动方向由 NW 向转变为 NWW 向,同时其前锋的吕宋岛弧与欧亚板块发生弧—陆碰撞^[25-27]。由于受到来自东部 NWW 向挤压及弧—陆碰撞联合作用下,造成了 NE 向展布的珠江口盆地由 NW、NWW 挤压转变为 NE 向剪切^[28],从而在南海北部大陆边缘表现为 NE 向右旋走滑应力场(图7(c))。在此背景下,从而使番禺4 洼陷内先存 NWW 向和近 EW 向断裂复活,并在西江中低凸起和东沙隆起上产生新的断裂,整体表现为 EW 向、NE 向断裂具有左阶右行, NW 向断裂具有右阶左行的特点。

4 结论与启示

(1) 番禺4 洼新生代断裂体系发育特征具有时

空差异性。拉张裂陷期(E_2w-E_2e)经历了由 NE 向断裂控洼到 NWW、EW 向断裂控洼的转变,裂后拗陷期($E_3z-N_1z-N_1h$)断裂活动减弱、消亡,构造活化期(N_2y-Q)表现为先期发育的 NWW 向、近 EW 向断裂复活和新的近 EW 向断裂的产生,且走滑特征明显。现今断裂体系特征体现了多期构造运动的叠加效应。

(2) 断裂体系发育的时空差异性受控于滨(环)太平洋、特提斯—喜马拉雅两大构造域的区域背景演化。 E_2w 期 NE 向控洼断裂的发育为太平洋板块 NNW 向俯冲带后撤及俯冲速率的降低导致 NW-SE 向拉张效应; E_2e 期古南海向南俯冲造成了拉张应力场方向顺时针转变为近 NS 向,导致了研究区断裂发育由 NE 向断裂控洼向近 EW 和 NWW 向断裂控洼的转型; N_1y-Q 先存 NWW 和近 EW 向断裂的活化及近 EW 向走滑断裂的形成是吕宋岛弧与欧亚板块弧—陆碰撞产生 NE 向右旋走滑作用的结果。

(3) 番禺4 洼具有“下生上储”的油气成藏特征,断裂垂向输导决定了油气藏的分布。继承改造型的 NWW 向断裂和晚期新生型的近 EW 向断裂其切割地层层系多,能够有效沟通源岩与储层,且晚期构造活化与源岩的生排烃时期匹配关系良好,具备了成为油源断裂的条件,因此 NWW 向、EW 向断裂在油气垂向输导和侧向分流中所起的作用应成为研

究区油气勘探研究的重点。

参考文献:

- [1] 代一丁. 珠江口盆地西江南洼古近系构造演化与沉积特征[J]. 中国海上油气(地质), 2013, 25(3): 1-7.
DAI Yiding. Paleogene tectonic evolution and sedimentation in South Xijiang sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(3): 1-7.
- [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: 31-162.
- [3] 刘从印, 周平兵, 曾驿, 等. 番禺4洼地区新近系油气成藏主控因素分析[J]. 中国海上油气(地质), 2009, 21(2): 91-94.
LIU Congyin, ZHOU Pingbing, ZENG Yi, et al. Analysis of the main controls on Neogene hydrocarbon accumulation in Panyu 4 sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(2): 91-94.
- [4] 陈雪芳, 李洪博, 高鹏, 等. 珠一坳陷浅层新领域油气勘探潜力条件分析[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(4): 52-56.
CHEN Xuefang, LI Hongbo, GAO Peng, et al. Analysis of shallow hydrocarbon exploration potential in the new region of Zhu I depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(4): 52-56.
- [5] 余焯, 张昌民, 李少华, 等. 惠州凹陷珠江组泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(1): 41-42.
YU Ye, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. Geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Zhujiang formation of Huizhou depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(1): 41-42.
- [6] 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(地质), 2014, 26(5): 21-24.
ZHONG Zhihong, SHI Hesheng, ZHU Ming, et al. A discussion on the tectonic-stratigraphic framework and its origin mechanism in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 21-24.
- [7] 李松峰, 徐思煌, 施和生, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(1): 115-120.
LI Songfeng, XU Sihuang, SHI Hesheng, et al. Characteristics of Paleogene source rocks and prediction of petroleum resource in Huizhou depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(1): 115-120.
- [8] 彭光荣, 温华华, 刘从印, 等. 珠江口盆地珠一坳陷浅层油气勘探实践及潜力探讨: 以番禺4洼为例[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(3): 22-28.
PENG Guangrong, WEN Huahua, LIU Congyin, et al. Practice of shallow oil and gas exploration in Zhu I depression of the Pearl River Mouth Basin; a case from Panyu 4 sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(3): 22-28.
- [9] 王有功. 断圈聚油机理及含油气性预测——以珠江口盆地东部番禺4洼和惠州凹陷为例[D]. 大庆: 东北石油大学地球科学学院, 2011.
WANG Yougong. Oil accumulation mechanism of fault traps and petroliferous prediction: a case study on Panyu 4 sag and Huizhou sag in Pearl River Mouth Basin[D]. Daqing: Earth Science Department, Northeast Petroleum University, 2011.
- [10] 于水明, 陈雪芳, 梅廉夫, 等. 珠一坳陷断层特征及对油气成藏的作用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 50-54.
YU Shuiming, CHEN Xuefang, MEI Lianfu, et al. The effect of fault zone characteristics of Zhu I depression on hydrocarbon accumulation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(1): 50-54.
- [11] 彭光荣, 刘从印, 吴建耀, 等. 珠江口盆地番禺4洼晚期断裂系统对油气成藏的控制作用[J]. 特种油气藏, 2013, 20(3): 42-45.
PENG Guangrong, LIU Congyin, WU Jianyao, et al. The control action of late-stage fracture system on hydrocarbon accumulation in the Panyu 4 sag in Pearl River Mouth Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(3): 42-45.
- [12] 吴智平, 李伟, 郑德顺, 等. 沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 405-407.
WU Zhiping, LI Wei, ZHENG Deshun, et al. Analysis on features and origins of the Mesozoic and Cenozoic faults in Zhanhua Sag[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(3): 405-407.
- [13] 赵利, 李理, 张航. 东营凹陷新生代早期断裂系统的运动学特征及动力学机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 18-24.
ZHAO Li, LI Li, ZHANG Hang. Fault system's kinematic characteristics and dynamic mechanism during early Cenozoic in Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(3): 18-24.
- [14] 包汉勇, 郭达峰, 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): 337-338.
BAO Hanyong, GUO Zhanfeng, ZHANG Luolei, et al.

- Tectonic dynamics of eastern China since the formation of the Pacific plate [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(3):337-338.
- [15] 周蒂,陈汉宗,吴世敏,等.南海的右行陆缘裂解成因[J]. *地质学报*, 2002, 76(2):180-188.
ZHOU Di, CHEN Hanzong, WU Shimin, et al. Opening of the South China Sea by dextral splitting of the east Asian continental margin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2):180-188.
- [16] 任继舜,陈廷愚,牛宝贵,等.中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M].北京:科学出版社, 1990:22-30.
- [17] 吴世敏,周蒂,丘学林.南海北部陆缘的构造属性问题[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(4):420-424.
WU Shimin, ZHOU Di, QIU Xuelin. Tectonic setting of the northern margin of South China Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(4):420-424.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] MARUYAMA S, SEND T. Orogeny and relative plate motions: example of the Japanese Islands [J]. *Tectonophysics*, 1986, 127(3):305-329.
- [21] 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, 243:431-437.
- [22] 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.
ZHANG Liang. Tectonic evolution of the South China Sea and a Numerical modeling [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, the University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [23] 周维维,王伟锋,安邦,等.渤海湾盆地隐性断裂带识别及其地质意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, 11:1527-1538.
ZHOU Weiwei, WANG Weifeng, AN Bang, et al. Identification of covert fault zones and its geological significance in Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 11:1527-1538.
- [24] HALL R. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean [J]. *Tectonophysics*, 2012, 570:25-30.
- [25] 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.
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):1016-1017.
- [26] 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.
FAN Jianke. The seismic tomographic study for the western margin of the Philippine Sea Plate [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, the University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [27] 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):130-133.
GENG Wei, ZHANG Xunhua, WEN Zhenhe, et al. A review on response of arc-continent collision in coastal range, Eastern Taiwan Island [J]. *Geological Review*, 2013, 59(1):130-133.
- [28] LÜDMANN T, WONG H K. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 1999, 311(1):120-122.

(编辑 徐会永)