

吴婷婷, 张丽丽, 吴哲, 等. 珠江口盆地前新生代先存断裂特征及动力背景——以惠州凹陷和番禺 4 洼为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 54-62.

WU Tingting, ZHANG Lili, WU Zhe, et al. Characteristics and dynamic background of pre-existing fractures in pre-Cenozoic of Pearl River Mouth Basin: cases of Huizhou Sag and Panyu 4 Depression[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 54-62.

珠江口盆地前新生代先存断裂特征及动力背景 ——以惠州凹陷和番禺 4 洼为例

吴婷婷, 张丽丽, 吴哲, 李洪博, 雷胜兰, 于飒, 劳妙姬

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054)

摘 要:前人针对珠江口盆地前新生代开展过大量研究,但对盆地的原始构造格局仍缺乏统一认识。在高精度三维地震资料的基础上,笔者采用“定性+定量”先存断裂综合识别技术,识别出珠江口盆地惠州凹陷和番禺 4 洼前新生代基底发育的先存断裂 583 条。按照断裂是否断穿 Tg 和断裂倾角大小,将先存断裂分为 4 类:高角度节理、低角度节理、高角度活化断层和低角度活化断层;按断裂走向划分,将先存断裂分为 NW-NWW 向和 NE-NEE 向 2 组。燕山期晚侏罗—早白垩世,古太平洋板块对华南板块沿 NW 向正向俯冲,形成 NE-NEE 向逆冲断裂;燕山期晚白垩世,古太平洋板块对华南板块斜向俯冲产生左旋挤压应力场导致 NW-NWW 向逆冲断裂形成。这些先存断裂从源头上控制了珠江口盆地的构造格局,为研究盆地后续演化提供了重要支撑。

关键词:珠江口盆地;前新生代基底;先存断裂;成因机制

中图分类号:P736;P542.3

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.162

0 引言

与板内断陷盆地和大西洋型陆缘断陷盆地不同,珠江口盆地是在中生代主动-被动大陆边缘背景之上产生的新生代陆缘伸展断陷盆地,是“陆缘的伸展陆缘”。只有明确了基底先存的构造背景,才能正确理解珠江口盆地构造的特殊性,才能从科学的角度探索珠江口盆地的形成与演化,对进一步深入勘探中国南海海域石油天然气具有重要指导意义。印支期造山杂岩、燕山期杂岩、燕山期沉积岩夹火山岩和变质岩构成了珠江口盆地中生代基底的主要岩性,这些岩类的形成与展布多由盆地内发育的数条区域性基底大断裂控制^[1]。中生代燕山期,整个盆地基底处于异常活跃状态,形成了分布范围

广泛的先存断裂,珠江口盆地基底的基本构造框架由此形成。

前人多根据断裂切割地层的层位,将所有穿过基底的断裂笼统称作基底断裂^[2]。通过地震剖面和重磁解释,在珠江口盆地前新生代基底识别出 NW 向和 NE 向 2 组基底断裂,但由于各家资料状况和解释方案不一,基底断裂展布差异较大^[2-9],2 组断裂形成的先后顺序一直存在争议。在所有断穿基底的断裂中,到底哪些是前新生代时期形成的先存断裂,哪些是向下断穿基底的新生代断裂,至今没有统一的认识。同时,前人在划分先存断裂类型时,较少考虑花岗岩岩体内部节理和断层的区别,导致先存断裂研究程度还不够深入细致。

近年来,随着深层(尤其是基底)地震资料采集、处理技术的飞速发展,基底地震成像效果日趋清晰,为基底先存断裂的研究增加了许多可靠信息。因此,为了全面了解珠江口盆地前新生代先存断裂的特征,本文以珠一坳陷惠州凹陷和番禺 4 洼为例,在综合分析研究前人和最新地质地球物理成果的基础上,通过大量三维地震剖面解释,明确了研究

收稿日期:2021-06-07

资助项目:中海石油(中国)有限公司重大生产科研项目“珠江口盆地(东部)浅水区古近系油气成藏条件及勘探突破方向”(SCKY-2020-SZ-21)

作者简介:吴婷婷(1988—),女,硕士,工程师,主要从事油气勘探方面的研究工作。E-mail: wutt6@cnooc.com.cn

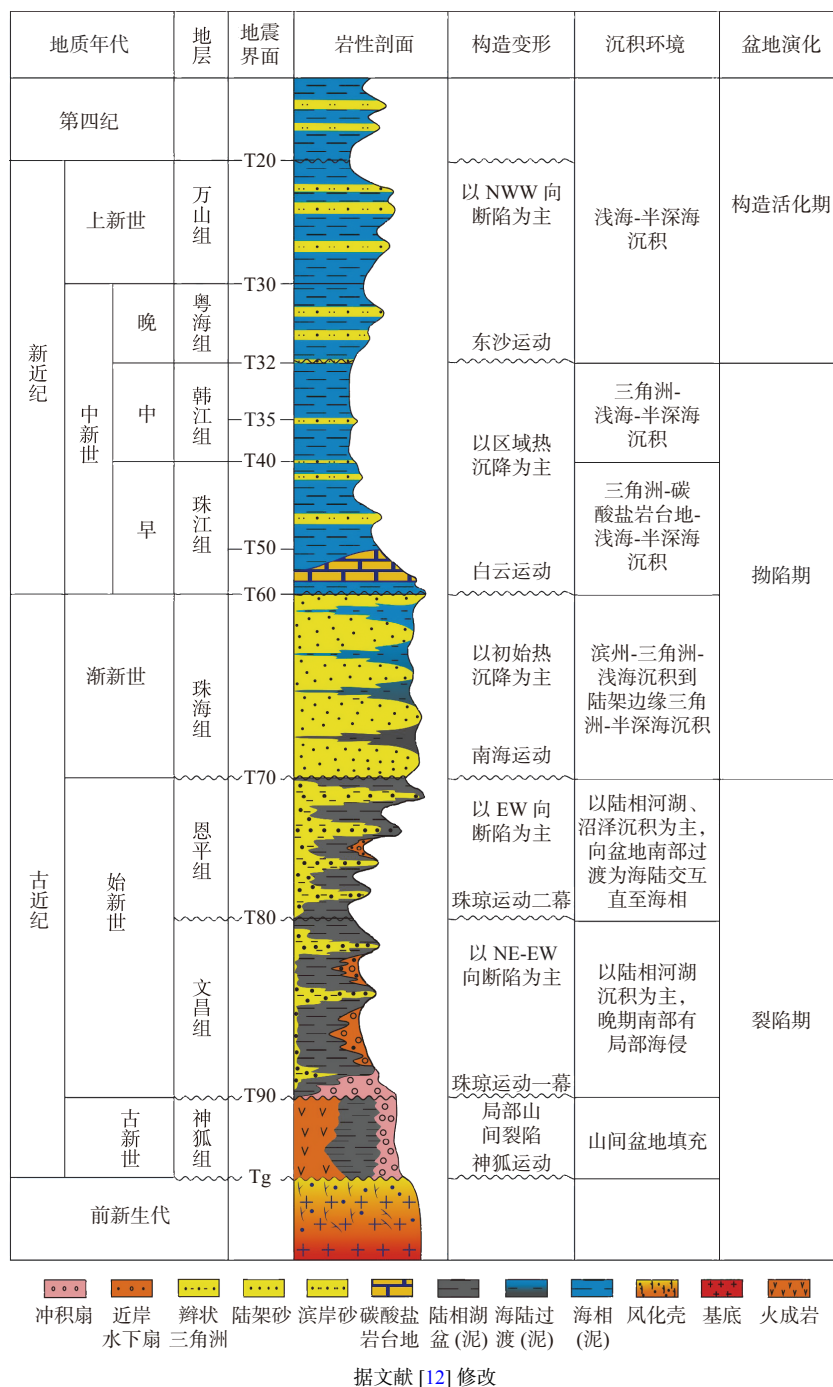


图2 珠江口盆地综合地层柱状图

Fig.2 Comprehensive stratum column of Pearl River Mouth Basin

在惠州凹陷和番禺 4 洼花岗岩基底发现大量密集分布、多高角度近垂直的断面, 这些断面只分布在基底面(Tg)以下, 其形态特征与江西三清山、安徽黄山等地区的大型花岗岩节理相似^[13-14]。所以, 本文将此类断裂划归为节理, 这些节理按形成原因归类可分为原生节理和构造节理。按照热胀冷缩的原理, 在花岗岩冷凝过程中其内部将产生很多裂缝, 这些裂缝被称为“原生节理”。石英和长石类矿物含量越高, 岩石抗剪能力越差、脆性越强,

在岩浆侵位过程中岩石越容易形成构造节理。节理多分布在东沙隆起与凹陷内部次级隆起这种新生代伸展构造不发育的地方, 断层在全区均有分布, 但是隆起上断层的水平位移普遍小于凹陷内的断层。

对于那些断穿 Tg 且新生代有活动、有明显断距的正断层而言, 很难直接判定它是否属于先存断裂。本次研究采用“两方法一特征”来确定其先存属性: 第 1 种方法, 如果沿该断层走向观察到部分段位于 Tg 之下, 即新生代未活化, 则认为该断层是

活化断层;第2种方法,如果该断层任意一盘基底内部保留有大量新生代未活化、产状与其相似的先存断面,也认为该断层是活化断层。“一特征”是以 Tg 为界,活化断层的上下两段交汇处有明显转折点,与新生代断层由浅至深的流畅断面有所不同。本次研究按照断裂倾角大小和断裂是否断穿 Tg 将区内先存断裂分为 4 类,即高角度节理、低角度节理、高角度活化断层和低角度活化断层,以 45°倾角作为高低角度先存断裂的分界线。

除了以上定性标准,针对低角度活化断层的识别还有一套定量标准。前人^[15]通过研究认为,低角度活化断层的水平最大位移与断层长度比值较高,介于 0.1~1,从惠州凹陷和番禺 4 洼采样绘制的散点图来看(图 3),惠西南和番禺 4 洼的低角度活化断层符合这一标准,说明本次解释分类工作扎实可靠。

3 基底先存断裂特征

研究利用高精度的 3D 地震反射资料在盆地北部珠一坳陷惠州凹陷和番禺 4 洼共识别出先存断裂 583 条(图 4)。识别出基底内部 2 组不同走向的先存断裂(图 5),分别为 NE-NEE 向先存断裂和 NW-NWW 向先存断裂。

3.1 NE-NEE 向先存断裂

NE-NEE 向先存断裂主要分布在凹(洼)陷与隆

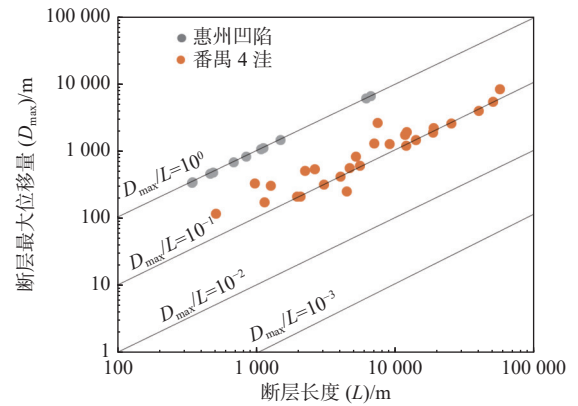


图 3 惠州凹陷和番禺 4 洼低角度活化断层最大位移-长度相关图

Fig.3 Maximum displacement-length correlation of low-angle re-active faults in the Huizhou Sag and the Panyu 4 Depression 起交界处限定凹(洼)陷的分布范围,或凹(洼)陷内部次级隆起边缘。在番禺 4 洼与东沙隆起交界处保留了该方向先存断裂的典型特征。如图 6 所示切过番禺 4 洼的东西向地震剖面上见典型的叠瓦状逆冲构造,以未活化的低角度节理和低角度断层为主,向基底深部终止于一个统一的滑脱面。鉴于以上地震反射特征,本文认定番禺 4 洼边界断裂是由早期先存的 NEE 向逆冲断层反转而成。

3.2 NW-NWW 向先存断裂

高密度、高角度、强振幅反射是珠江口盆地很多地区基底在地震剖面上所呈现的共同特征,在惠州凹陷、番禺 4 洼及东沙隆起上尤为突出。对于上述地震反射特征,一部分人认为可能是基底层状地

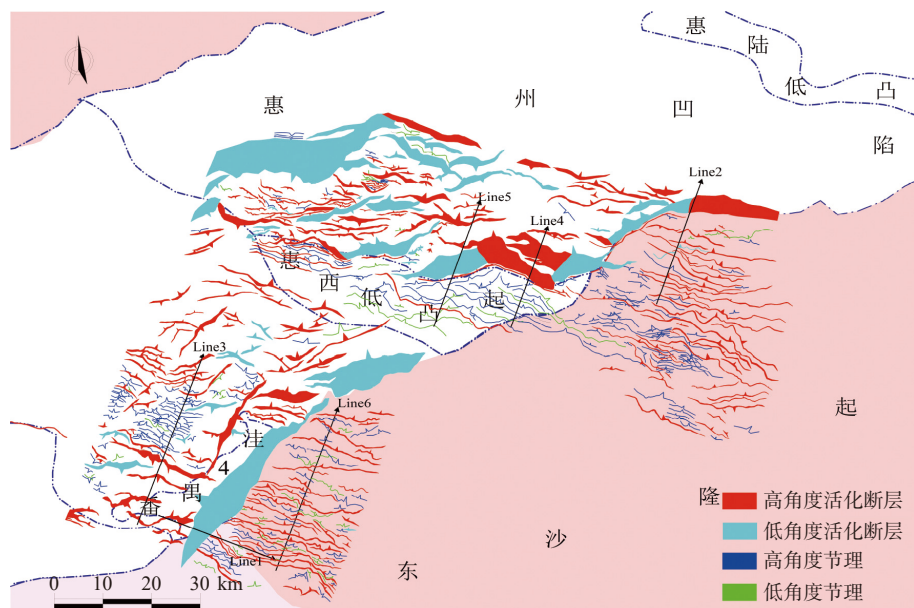


图 4 惠州凹陷和番禺 4 洼先存断裂现今平面分布图

Fig.4 Present plane distribution of pre-existing faults in the Huizhou Sag and the Panyu 4 Depression

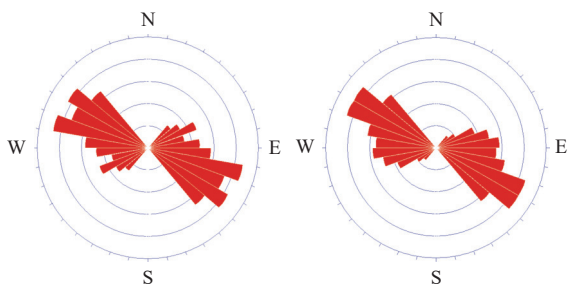


图 5 惠州凹陷 (左) 和番禺 4 洼 (右) 先存断裂走向

Fig.5 Strike of pre-existing faults in the Huizhou Sag(left) and the Panyu 4 Depression (right)

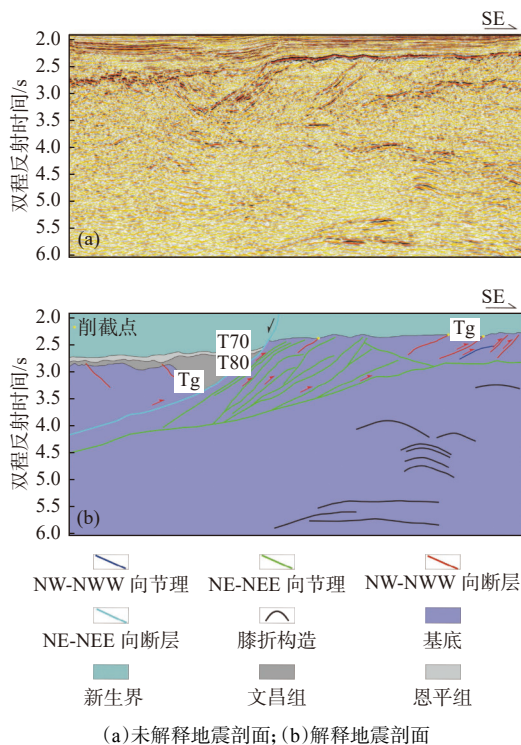


图 6 番禺 4 洼 NE-NEE 向先存断裂地震剖面 (Line 1)

Fig.6 Seismic sections of NE-NEE pre-existing faults in the Panyu 4 Depression (Line 1)

层的地震响应或是地震资料品质不高而导致的假反射。但本文认为其属于花岗岩经强烈构造挤压而破裂形成的裂缝,原因有以下 3 点:①惠州凹陷、番禺 4 洼及东沙隆起大部分钻至基底的井都揭示了以花岗岩为主的基底岩性,而不是喷出岩、变质岩或沉积岩;②高密度的地震反射面呈现出一定的组合特征,而非杂乱无章;③高密度的地震反射面既可以单独在新生代活化形成继承性断层,又可与新生代才开始发育的新生断层合并连接在一起形成不同的构造样式。同时,据鲁宝亮等^[16]和刘海伦^[17]的研究认为,珠江口盆地惠州凹陷和番禺 4 洼的前新生代基底普遍具有中等—高的重力异常和磁异常(磁化率最高可超过 $10\,000 \times 4\pi \times 10^{-6}$ SI),这一点与

花岗岩的重磁特征吻合,进一步说明了研究区的基底岩性为花岗岩,而非其他,如此更加印证了基底的高密度、高角度、强振幅反射是花岗岩破裂导致的裂缝。

研究区中生代基底 NW-NWW 向先存断裂与 NE-NEE 向先存断裂特征存在较大区别。首先, NW-NWW 向先存断裂的数量远大于 NE-NEE 向 (图 4);其次, NW-NWW 向先存断裂在隆起上以高角度节理为主,在洼陷内部以高角度逆冲断层为主。

由惠州凹陷东部东沙隆起、番禺 4 洼西部缓坡带和惠州凹陷南缘与东沙隆起交界区的 NE-SW 向地震剖面可以看出, NW-NWW 向先存断裂由密集分布、强振幅反射的高角度节理和高角度断层组成 (图 7—9),整体来看呈叠瓦状,为强烈挤压变形导致, Tg 不整合面 truncates 了大多数断层,从而导致这些断层并未在新生代活化。这些高角度先存构造向基底深部方向或终止于一个统一的、呈凹凸起伏的滑脱面。其中东沙隆起 NW-NWW 向先存断裂的平面展布特征在东沙隆起基底以下 60 ms 深度的三维地震相干体切片上清晰可见 (图 10)。

在基底不整合面之下发育早期逆冲断裂上盘被剥蚀后残余的基底残山、膝折构造以及花岗岩基

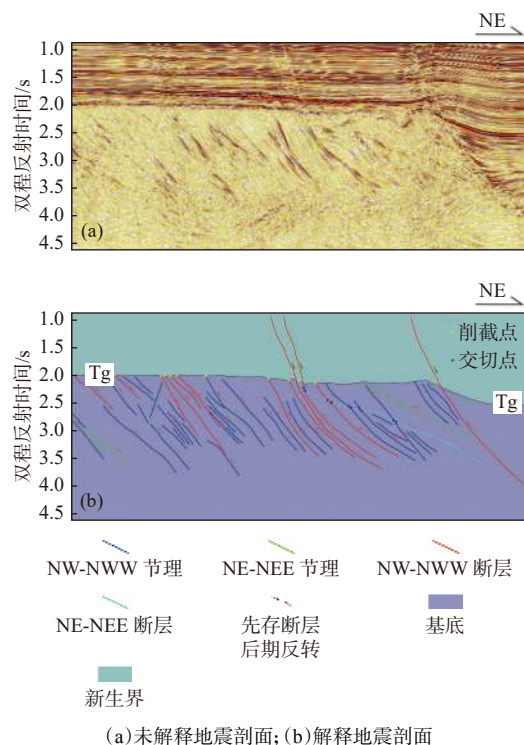


图 7 东沙隆起 NW-NWW 向先存断裂地震剖面 (Line 2)

Fig.7 Seismic sections of NW-NWW pre-existing faults in the Dongsha Uplift (Line 2)

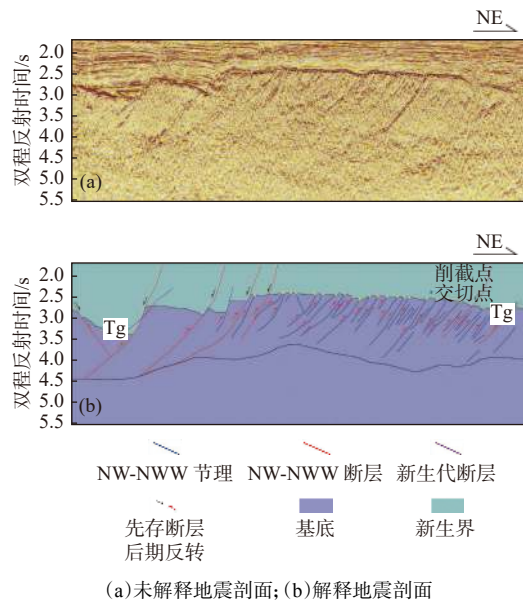


图 8 番禺 4 洼西部缓坡 NW-NWW 向先存断裂地震剖面 (Line 3)

Fig.8 Seismic sections of NW-NWW pre-existing faults in western slow slope of the Panyu 4 Depression (Line 3)

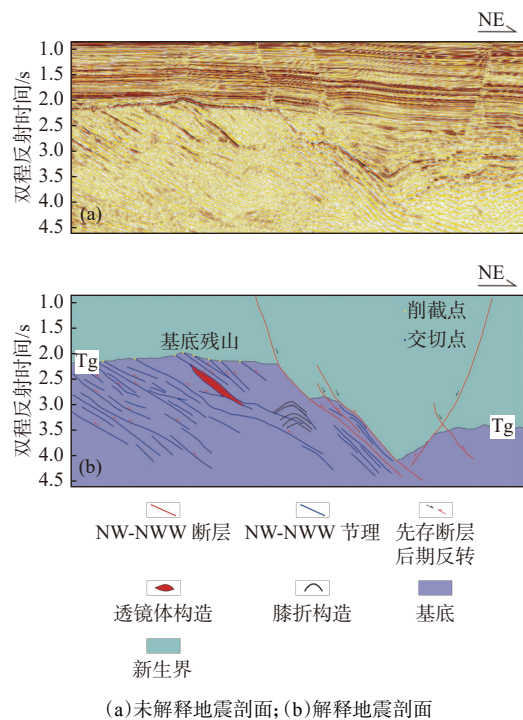


图 9 惠州凹陷南部隆起 NW-NWW 向先存断裂地震剖面 (Line 4)

Fig.9 Seismic sections of NW-NWW pre-existing faults in the southern uplift of the Huizhou Sag (Line 4)

底被大量断面切割形成的透镜体构造等特殊构造样式(图 9),表明惠州凹陷和番禺 4 洼的先存断裂不是仅靠花岗岩冷凝收缩成缝而形成,这些花岗岩基底曾遭受过强烈挤压变形。

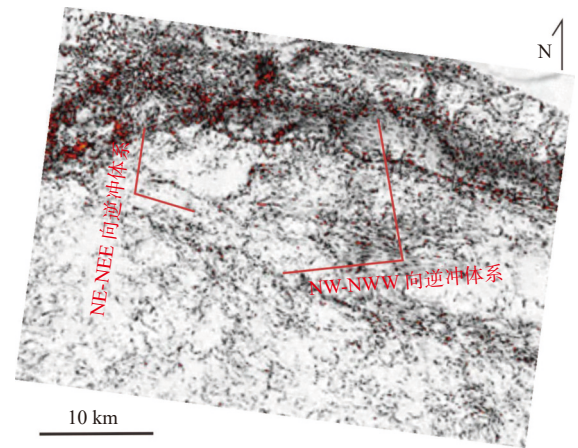


图 10 东沙隆起沿基底向下 60 ms 相干体切片

Fig.10 Coherent body slice from 60 ms below the basement of the Dongsha Uplift

在研究区 NE-NEE 向逆冲断裂上盘以及下盘基底块内通常可见大量被切割后残留的断面,尤其是在隆起区(图 6、7)。NE-NEE 断面呈断续不连贯状, NW-NWW 断面基本连续成流线型。如图 11、12 所示,地震反射剖面上密集组合的 NW-NWW 向逆冲断裂体系广泛切割角度相对平缓、间隔距离更大的 NE-NEE 向逆冲断裂。同时,在图 10 中基底以下 60 ms 相干体切片上亦可见二者在平面上的切割关系。

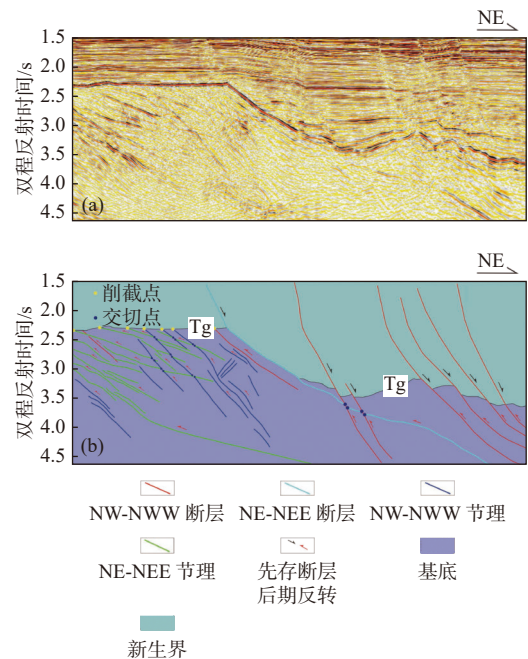


图 11 惠州凹陷 NW-NWW 向先存断裂切割 NE-NEE 向先存断裂地震剖面 (Line 5)

Fig.11 Seismic sections of NW-NWW pre-existing faults cutting through NE-NEE pre-existing faults in the Huizhou Sag (Line 5)

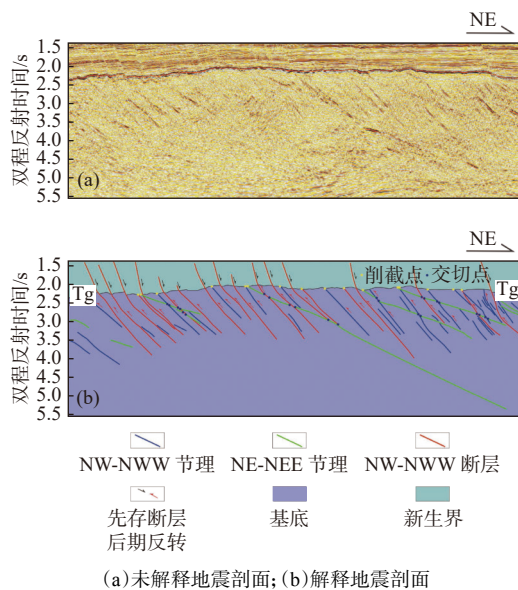


图 12 东沙隆起 NW-NWW 向先存断裂地震剖面 (Line 6)

Fig.12 Seismic sections of NW-NWW pre-existing faults in the Dongsha Uplift(Line 6)

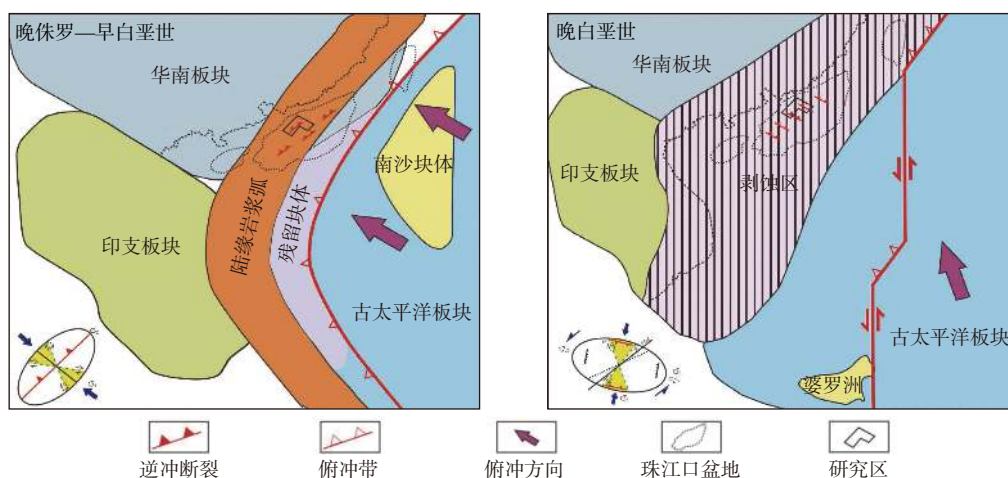
4 应力场及区域动力学背景分析

早在 1982 年,袁奎荣^[18]就已经针对性地研究了花岗岩体内部断裂发育机制,认为花岗岩是坚硬的脆性块体,成分以硅质为主,较均一,这些特征均与成层性较好的沉积岩有较大差别。在强烈构造挤压应力下,断裂作用和动力变质作用在花岗岩体内部普遍发育,其中动力变质主要发生在断裂带两侧,在浅部表现为岩石的转动、位移、变形和破碎,形成构造角砾岩等碎裂岩,在深部能产生矿物的塑性变形、重结晶以及新矿物。

据珠江口盆地所有已钻至基底的钻井岩性统计表明,研究区花岗岩内部广泛发育有断裂构造的重要证据之一便是花岗岩基底钻遇了大量碎裂岩。同时,叠瓦状构造、基底残山、透镜状构造以及膝折构造等逆冲构造体系的典型特征指示这些断裂形成于挤压构造背景。

珠江口盆地断裂体系的发育史完整地记录了华南陆缘的演化过程。前人对于珠一坳陷前新生代基底先存断裂的成因主要有 2 种观点,其中第 1 种^[19]认为先存断裂是在花岗岩冷却结晶后形成,集中在晚白垩世, NW-NWW 向逆冲断裂体系与古太平洋板块俯冲方向转变引起的左行压扭应力场有关, NE 向逆冲断裂体系与古南海的扩张、俯冲过程有关;第 2 种^[5]观点认为珠江口盆地中生代压剪体系以 NE 向压剪和 NW 向左行压剪为特征,主要活动时期为燕山期,华南陆上保留有该时期断裂的明显特征^[20],而根据重磁异常推断的南海北部断裂展布特征与陆上基本一致,因此,大胆推断珠江口盆地和华南陆上的前新生代先存断裂性质一样。在晚三叠世至早白垩世,珠江口盆地受古太平洋 NNW 向俯冲的影响处于 NE 向左行压扭和派生的 NW-SE 向压应力场作用之下,引发了大规模的岩浆活动,同时沿 NE 向剪切面形成左行压扭断裂,沿 NW 向剪切面形成左行张扭断裂。

在前人成果的基础上,本次研究认为,珠江口盆地前新生代基底先存断裂的形成受控于南海北部中生代时期的构造过程,经历燕山运动两期重大构造事件,奠定先存断裂形成背景,其具体形成与演化过程分为以下 2 个阶段(图 13):



据文献 [10] 和 [24] 修改

图 13 晚侏罗—早白垩世 (左) 到晚白垩世古 (右) 太平洋板块向华南板块俯冲

Fig.13 The subduction of the paleo-Pacific Plate into the South China Plate in the Late Jurassic to Early Cretaceous (left) and in the Late Cretaceous (right)

(1)燕山早—中期 印支运动以后,东亚陆缘从受古特提斯域影响转到太平洋域影响。周蒂等^[21]认为,晚中生代是古太平洋板块向东亚大陆汇聚的重要时期,南海北部在晚侏罗—早白垩世存在NE走向的古太平洋俯冲带。该时期古太平洋板块对华南板块NW向正向俯冲^[19],此时岩浆活动频繁激烈,发育面积大、分布广的陆缘岩浆弧,珠江口盆地主体位于该陆缘岩浆弧之中^[19],沿日本西南、经中国台湾、巴拉望—加里曼丹一线^[22-23]至今还残留有形成的俯冲杂岩带,同时形成与NW向挤压应力场垂直的NE-NEE向逆冲断裂。

(2)燕山晚期 晚白垩世,由于运动方向突然转变,古太平洋板块对华南板块开始NNW向斜向俯冲,造就了南海北部区域性的左行压扭构造背景。在此背景下,产生左旋挤压应力场导致NW-NWW向逆冲断裂(R'剪切)形成。由于古太平洋板块俯冲后撤引起板块边缘挠曲回弹,并伴随局部陆-陆碰撞,导致整个珠江口盆地产生区域性抬升剥蚀现象。

5 结论

(1)本次研究形成了一套“定性+定量”先存断裂综合识别技术,应用于惠州凹陷和番禺4洼,首次精细识别出了基底先存断裂里的节理和断层。定性标准是按照断裂是否断穿Tg和断裂倾角大小,将先存断裂分为4类:高角度节理、低角度节理、高角度活化断层和低角度活化断层。定量标准是根据水平最大位移与断层长度比值,进一步确定低角度活化断层。

(2)惠州凹陷和番禺4洼有先存断裂583条,按断裂倾角大小和断裂是否断穿Tg,将先存断裂分为节理和断层2类;按走向划分,将先存断裂分为NE-NEE向和NW-NWW向2组。

(3)燕山期晚侏罗—早白垩世,古太平洋板块对华南板块NW向正向俯冲,形成NE-NEE向逆冲断裂;燕山期晚白垩世,古太平洋板块对华南板块斜向俯冲产生左旋挤压应力场导致NW-NWW向逆冲断裂形成。

参考文献:

- [1] 杨堂荣. 珠江口盆地基底构造的形成和发展及其油气勘探前景[J]. 地质科学译丛, 1989, 4(1): 40.
- [2] 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(D辑: 地球科学), 2014, 44(6): 1312-1323.
- [3] 叶青. 南海北部陆缘晚中生代构造体系: 动力学以及对珠江口盆地新生代构造的制约[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019: 38-48.
- [4] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海区域断裂特征及其基底构造格局[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1544-1553.
- [5] 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.
- [6] 李平鲁, 王维平, 贺亚纯, 等. 珠江口盆地断裂构造及盆地演化[R]. 广州: 中国海洋石油总公司南海东部公司, 1986: 7-24.
- [7] 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: 105-110.
- [8] 张向涛, 张振波, 张青林, 等. 南海北部中生界残留盆地特征及油气潜力[R]. 广州: 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 2015: 238-241.
- [9] 庞雄, 袁立忠, 郑金云, 等. 南海东北部超深水区洋陆转换带盆地形成与演化[R]. 广州: 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 2015: 25-26.
- [10] HALL R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(4): 353-431.
- [11] 田立新, 刘杰, 张向涛, 等. 珠江口盆地惠州26-6大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 1-11.
- [12] 张丽丽, 舒梁锋, 冯轩, 等. 再论珠江口盆地恩平组时代归属[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 9-18.
- [13] 陈安泽, 浦庆余. 黄山花岗岩地貌景观研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-140.
- [14] 崔之久, 陈艺鑫, 杨晓燕. 黄山花岗岩地貌特征、分布与演化模式[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3364-3373.
- [15] WU L L, MEI L F, PATON D A, et al. Basement Structures Have Crucial Influence on Rift development: insights From the Jiangnan Basin, Central China[J]. Tectonics, 2020, 39(2): 1-21.
- [16] 鲁宝亮, 孙晓猛, 张功成, 等. 南海北部盆地基底岩性地震重磁响应特征与识别[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 563-572.
- [17] 刘海伦. 珠江口盆地珠一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018: 35-58.
- [18] 袁奎荣. 花岗岩体中断裂构造的初步研究[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1982, 2: 1-10.
- [19] YE Q, MEI L F, SHI H S, et al. The Late Cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: an overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 187: 186-204.
- [20] 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 12-69.
- [21] 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): 181-190.
- [22] YUI T F, MAKI K, LAN C Y, et al. Detrital zircons from the Tananao metamorphic complex of Taiwan: implications for sediment provenance and Mesozoic tectonics[J]. Tectonophysics, 2012, 541/543: 31-42.
- [23] WAKITA K, METCALFE I. Ocean plate stratigraphy in East and Southeast Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005,

24(6): 679-702.

velopment of SE Asia[J]. [Earth-Science Reviews](#), 2012,

[24] MORLEY C K. Late Cretaceous-Early Palaeogene tectonic de-

115(1/2): 37-75.

Characteristics and dynamic background of pre-existing fractures in pre-Cenozoic of Pearl River Mouth Basin: cases of Huizhou Sag and Panyu 4 Depression

WU Tingting, ZHANG Lili, WU Zhe, LI Hongbo, LEI Shenglan, YU Sa, LAO Miaoji

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: Although previous many studies on the pre-Cenozoic stratigraphy of the Pearl River Mouth Basin have been done, there is still a lack of unified understanding of the original structural pattern of the basin. With available high-precision 3D seismic data, we implemented “qualitative + quantitative” comprehensive identification technology for the recognition of pre-existing fractures, by which 583 pre-existing fractures in the pre-Cenozoic basement of Huizhou Sag and Panyu 4 Depression in the Pearl River Mouth Basin were identified at the end. According to whether the fault runs through reflector Tg (the seismic horizon at the basement) and the fault dip angle, we divided the pre-existing fracture into four types: high-angle joint, low-angle joint, high-angle re-active fault, and low-angle re-active fault. In addition, according to the fractures’ strike, we classified the pre-existing fractures into two groups: NW-NWW and NE-NEE. From the Late Jurassic to Early Cretaceous, the paleo-Pacific Plate subducted into the South China Plate perpendicularly in NW direction and formed NE-NEE thrust faults; in the Late Cretaceous, the paleo-Pacific Plate subducted into the South China Plate obliquely and produced a sinistral compressive stress field, resulting in the formation of NW-NWW thrust faults. These pre-existing fractures control the overall structural pattern of the Pearl River Mouth Basin, and provide an important support to the future study on the subsequent evolution of the basin.

Key words: Pearl River Mouth Basin; pre-Cenozoic basement; pre-existing fracture; formation mechanism