https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.381



南海北部珠江口盆地西南段断裂特征与成因讨论

王 嘉¹,栾锡武^{2,3*},何兵寿^{1,3},冉伟民^{2,3},张 豪^{2,3,4},杨佳佳²

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院,山东青岛 266100

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,山东青岛 266071

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室,海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东青岛 266237

4. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580

摘 要:珠江口盆地是南海北部陆缘新生代发育的裂陷型盆地,其油气资源丰富,且地处洋陆过渡带,盆地内部断裂特征复杂.在前人研究基础上,利用高分辨率三维地震数据,结合多属性分析技术,完善了区域断裂的精细化解释.将断裂构造类型 依据断裂级别与规模划分为控盆一级断裂、控凹二级断裂、控带三级断裂、控圈四级断裂和控层五级小断裂;在盆地西南段发 育典型的犁式、旋转正断层等单剖面断裂样式,在地震剖面上形成阶梯状、"Y"字型等多种断层组合,其中珠三坳陷的文昌A 凹陷内部常可见树枝状构造,珠二坳陷的开平凹陷广泛分布独特的卷心式断层;而在二维平面上也分布有平行式、斜交式、雁 列式等多种组合类型.受新生代以来的持续右旋应力场作用,盆地西南段整体断裂走向以NE→EW→NW顺时针方向发生旋 转,且断裂活动速率逐渐降低.结果表明受印度-欧亚板块碰撞、太平洋板块俯冲后撤和古南海持续南移的联合影响,盆地西南 段处在伸展拉张应力场环境之下,形成了始新世-渐新世NE-NEE向、EW向和中新世NWW-NW向3组断裂发育.珠江口盆 地西南段断裂构造的演化、成因机制与南海北部陆缘应力场变化均保持良好的一致性.

关键词:珠江口盆地西南段;断裂走向;断层活动速率;应力场环境;海洋地质.

中图分类号: P736 **文章编号:** 1000-2383(2021)03-916-13 **收稿日期:** 2020-12-21

Characteristics and Genesis of Faults in Southwestern Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea

Wang Jia¹, Luan Xiwu^{2,3*}, He Bingshou^{1,3}, Ran Weimin^{2,3}, Zhang Hao^{2,3,4}, Yang Jiajia²

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

- 2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China
- 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
- 4. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: The Pearl River Mouth basin is a rift basin developed in the Cenozoic on the continental margin of the northern South China Sea, which is located in the ocean-continent transition zone with rich oil and gas resources. It is very important to analyze the internal fracture characteristics of the Pearl River Mouth basin. Based on previous studies, this paper uses three-dimensional high-resolution seismic data, combined with the application of coherent attribute analysis technology to refine the interpretation of regional faults. The faults are classified into the first-level basin-controlling faults, the second-level sag-controlling faults, the third-

*通讯作者:栾锡武, E-mail: xluan@qnlm. ac

基金项目:国家基金重大研究计划项目(No.92055211);中国一东盟海上合作基金项目(No.12120100500017001).

作者简介:王嘉(1996-),男,硕士生,研究方向为油气田与煤田地球物理勘探方法与技术.ORCID:0000-0002-8764-3767. E-mail: 13643419871@163.com

引用格式:王嘉,栾锡武,何兵寿,等,2021.南海北部珠江口盆地西南段断裂特征与成因讨论.地球科学,46(3):916-928.

level belt-controlling faults, and the fourth-level ring-controlling faults in the area based on the level and scale of the faults. Single-section fault styles such as normal faults, form step-shaped, "Y"-shaped and other fault combinations on the seismic section. Among them, negative flower-like structures present in the Wenchang A sag in the Zhusan sag and unique core-shaped faults are widely distributed in the Kaiping depression of the Zhuer sag. During the Late Oligocene-Early Miocene, the fault direction rotated clockwise from NE \rightarrow EW \rightarrow NWW under the continuous right-handed stress field since the Cenozoic, and the activity intensity gradually weakened. It is also believed that affected by the collision of the India-Eurasia Plate, the subduction and retreat of the Pacific Plate and the continuous southward movement of the Paleo-South China Sea, the basin formed a typical extensional tensile stress field environment, which contributed to the development of three fault groups in NE-NEE and EW direction during the Eocene-Oligocene, and in the NWW-NW direction in Miocene. Moreover, the evolution and genetic mechanism of the fault structure in the southwestern part of the Pearl River Mouth basin are in good agreement with the changes in the stress field at the northern margin of the South China Sea.

Key words: southwest section of Pearl River Mouth basin; fracture trend; fault activity rate; stress field environment; marine geology.

0 引言

断裂构造活动作为盆地形成的关键性因素,同 时也是区域油气勘探的重要依据,且断裂的发育和 演化大大制约了盆地油气系统的生成与分布(曹敬 贺等,2014;张迎朝等,2014).珠江口盆地作为南海 北部大陆边缘洋陆过渡带上发育起来的新生代裂 陷型盆地,油气资源含量丰富,整体呈NE向平行于 我国海岸线展布,是晚中生代以来发育的大型沉积 盆地,是我国南海开采油气最多的盆地(蔡周荣等, 2015).前人对珠江口盆地西南段的整体研究比较 少,通常都只局限于某个凹陷,而对盆地内区域断 裂整体演化特征与南海北部区域应力场变化缺乏 耦合性研究.本文利用北部坳陷带的文昌A凹陷与 南部坳陷带的开平凹陷两块三维高分辨率地震数 据对珠江口盆地西南段断裂特征进行联合分析,并 引入多种地震属性分析技术来进一步实现对断裂 的有效识别,从而刻画不同凹陷断层地震剖面和平 面展布特征,并结合对断裂走向的定量统计分析, 来综合评价区域断层的联动体系和成因机制.

1 区域地质概况

南海北部陆架陆坡区上由西向东分布着一系 列伸展拉张型新生代盆地,由于其特殊的大地构造 位置,前人普遍认为其在印澳一欧亚板块陆陆碰 撞、太平洋板块俯冲挤压、以及南海南部板块伸展 拉张的共同影响下,经历了多期裂陷作用才形成了 当今南海北缘的构造格局(程世秀等,2012;张亮, 2012;张远泽等,2019).珠江口盆地是新生代以来以 沉积为主的盆地,在盆地基底近 NW 和近 NE 向断

裂的综合控制下珠江口盆地呈现出南北分带、 东西分块的隆坳构造格局(王家林等,2002;施 和生等,2017;张豪等,2020).中海油深圳分公 司依据地震解释及油气勘探成果将盆地划分为 古近系文昌组与恩平组"坳陷"和渐新世珠海 组及新近系-第四系"隆起"的二级构造单元, 且盆地内二级构造单元的分布还与珠江口盆地 展布方向保持一致(漆家福等,2019).在本文中 所述的珠江口盆地西南段主要包括珠三坳陷、 神狐一暗沙隆起和珠二坳陷带西部的顺德凹 陷、开平凹陷以及南部隆起带西段.而西南段 各区域的勘探研究程度也大相径庭,本文依据 前人研究内容较为丰富的文昌A凹陷和前人研 究存在不足的开平凹陷两个区块的地震资料开 展对比解译研究,并以此为基础来分析珠江口 盆地西南段的整体构造特征,从而来实现对盆 地西南段的断裂成因分析(图1).

1.1 文昌A凹陷

文昌A凹陷整体上属于珠江口盆地北部坳陷 带西部的次级构造单元,是珠三坳陷中的重要组成 部分(如图1中左侧红色区域).而珠三坳陷是断裂 系统显著发育的箕状断陷型盆地,内部断裂的形成 和演化过程受到欧亚板块、印度板块、太平洋板块 的联合影响,在古新世时期盆地内发生初始裂陷, 并在经历了多期次裂陷运动之后于南海北部大陆 边缘发生最后一次大型构造运动——东沙运动,自 此盆地整体进入了广泛而普遍的区域性热沉降期 (姜华等,2009;Lu et al., 2017).在珠三南断裂的影 响下,由于伸展、扭曲等多种构造作用,整个区域形 成了不同的复杂断裂体系.该盆地经历了3个主要



图1 珠江口盆地区域位置(a)及珠江口盆地构造单元划分(b)

Fig.1 The regional location map of the Pearl River Mouth basin (a) and the structural unit division map of the Pearl River Mouth basin (b)



时期:古新世一晚渐新世珠琼运动下的裂陷期、 早渐新世一中中新世南海运动后的断坳转换 期、早中新世一更新世东沙运动后的新断裂期 (张豪等,2020). 如图2所示,珠江口盆地西南端北部区域包含3 个主要的一级构造单元:北部隆起、珠三坳陷和神 弧隆起,而珠三坳陷在断裂控制作用下总体呈现出 与整个珠江口盆地相同的南北分带、东西分块的分 布特征(李俊良,2015).其中文昌A凹陷位于珠 三坳陷内,属于次一级的构造单元,整个凹陷面 积约为3350 km²,北部与阳江低凸起相临,东部、 南部与神狐隆起相接,西部与琼海凸起、琼海凹 陷、文昌B、C凹陷相连(张豪,2020),且盆地整体 位于浅海陆架区域.

1.1.1 文昌A凹陷断裂剖面组合 依据断裂级别和规模,本文将文昌A凹陷内部断裂划分为4个级别(如图2所示).文昌A凹陷内以南断裂为主要控盆一级断裂,其中控制文昌A凹陷形成与演化的是南断裂东段(胡高伟,2019),该分支断裂规模较大、活动周期长,且贯穿了多个层位.二级断裂以横跨凹陷的6号断裂为主;而发育于文昌A凹陷北部的4号断裂、5号断裂为主要三级控带断裂.四级断裂发育规模较小,长度一般可从几百米到数千米不等,仅引起区域内局部的构造特征变化(胡小强等,2017).

盆地在伸展拉张应力作用下断裂广泛发育, 且研究区断裂走向以NE向、近EW向、NW向为 主.主断裂和次级断裂之间可构成多种断裂组 合样式,通过对研究区域内部地震剖面分析,并 结合前人地质认识,本文识别了文昌A凹陷内 部断裂剖面的多种组合类型,主要包括有阶梯 状断层、"Y"字型断层、树枝状断层.

(1)阶梯状断层:它是由多条走向、倾向基本相同的一系列正断层组合而成,在主测线剖面上呈现阶梯状分布(蔡周荣等,2015).该类断

裂组合在研究区较为普遍,常发育于断陷型盆 地边缘或浅层缓坡区域.如图 3a 所示,研究区南 部断裂带向文昌A凹陷中心逐渐下降构成阶梯 状断层,且均未出现贯穿基底特征.

(2)"Y"字型断层:主干断层与其反向倾斜的 次级断层在地震剖面上构成"Y"字型的断裂组 合,在伸展裂陷型盆地中也广泛分布(冉伟民等, 2019)."Y"字型断层组合中的主干断层一般规模 较大、延伸较广,主要控制凹陷或断裂带.而另一 侧次级断裂相对规模较小,反向倾斜于主干断层 呈现"Y"字型相交.如图 3b 所示,在研究区北部各 个层位间均可识别出该类断裂组合.

(3)树枝状断层:一条断层出现多次的分叉,而 次级断层又会形成更次一级的分支断层,在地震剖 面上构成了树枝状组合(熊忠等,2018).树枝状断层 可间接反映不同程度的局部张力扭动,有多个断层 共同控制的断裂走滑特征.如图 3c 所示,受早期主 要的压扭应力和晚期次要张性应力的作用,在主干 走滑断层附近发育次级张扭型小断层,该种标志性 复杂构造类型在研究区分布较为广泛.

1.1.2 文昌A凹陷断裂平面组合在文昌A凹陷研究工区内,断裂平面组合特征较为复杂.本次研究通过地震属性分析技术有效实现了在平面上识别断裂组合,应用常规的等T。平面图(图4a)和目前断裂识别效果较好的断裂似然度属性(thinned fault likelihood属性)(图4b)相结合来对沿层反射界面断裂组合样式进行划分,识别出平行、交叉、截断等多



图 3 文昌 A 凹陷断裂组合类型Fig.3 Fault assemblage types of Wenchang A saga.阶梯状断层; b."Y"字型断层; c.树枝状断层





Fig.4 Distribution characteristics of fault plane combination along T₇₀ in Wenchang A depression a.等T₀平面图; b.断裂似然度属性



图 5 文昌 A 凹陷断裂走向演化 Fig.5 Evolution of fault strike in Wenchang A sag 据张豪等(2020)修改

种关系,并从标志性地震反射界面T₇₀层上大致区 分出平行式、雁列式和斜交式3种平面组合类型.

(1)平行式组合:由若干规模相同、走向大体一 致的断层组合而成,同一组合中各断层断面倾向或 相同、或相反,即仅发生同类断层间组合关系,呈现 平行式组合分布.该组合在文昌A凹陷研究区内广 泛发育,主要受控于伸展拉张作用,在图4中渐新世 T₇₀层上可明显看到北部地区在伸展拉张作用下分 布着近EW向的平面组合型断裂.

(2) 雁列式组合:以一系列走向大致平行且 斜向排列的断裂或褶皱组合而成,单条断裂规 模较小、性质相近,且各条断裂在区域上组合形 成断裂带.在图4中西部、西南部均可识别出雁 列式构造组合,该类雁列式分布是由盆地演化 阶段太平洋板块持续向欧亚板块碰撞致使区域 应力场方向顺时针旋转而造成的.

(3)斜交式组合:该类组合往往是由两条或两 条以上互不垂直的断裂相交,相交处后期断裂普遍 终止于先前断裂,最终形成了斜交的样式.在Tno反 射层上的东部、南部地区可见斜交式组合分布,其 通常是由于在盆地断陷期至断坳转换期受多期构 造运动的作用,发生多期次断裂的相互叠加,从而 呈现出多角度斜交特征.

1.1.3 文昌A凹陷断裂运动学规律为进一步分析文昌A凹陷断裂运动学规律,笔者对该研究区地 震界面内断裂走向进行定量化统计,由断裂走向玫 瑰花图(图5)可大致反映晚始新世至中新世时期不 同层位断裂平面走向演化呈现NE→EW→NWW





向顺时针变化,具体如下:自文昌组时期($T_g \sim T_{80}$), 断裂走向呈现近 NE 向展布.恩平组($T_{80} \sim T_{70}$)时 期,断裂走向发生顺时针转变,NEE 向断裂逐渐 发育,并开始伴随近 EW 向断裂.珠海组 ($T_{70} \sim T_{60}$)断裂走向则以 EW 向开始大量分布,反 映了晚渐新世近南北向拉张应力场逐渐占据了断 裂控制的主导地位.直至珠江组($T_{60} \sim T_{40}$)时期, 断裂走向由近 EW 向逐渐转变为 NWW-NW 向展 布.研究区断裂走向与整个珠江口盆地断裂走向 演化趋势基本保持一致,应力场方向由近 NE 向 逐渐向 NW 向顺时针旋转(李俊良等,2015).

通过对断裂几何学特征与运动学规律的综合 分析,结合前人对研究区基底断层的研究(张迎朝 等,2014),笔者依据应力场方向特征(图6)对应将 文昌A凹陷的断裂发育演化划分为3个期次;第1 期断裂活动对应于早期神狐运动,在盆地基底断裂 发育基础上,受NW-SE向区域拉张应力场影响,形 成了NE-NEE向断裂.第2期断裂活动对应于晚渐 新世的南海运动时期,受南北向拉张应力影响,断 裂形成自东向西的生长发育模式,EW向断裂大量 发育.第3期的断裂活动对应于中中新世东沙运动, 在NE-SW向区域拉张的应力场下,形成了NWW-NW向断裂,尤其可见于珠江组T40地震反射界面.

1.2 开平凹陷

开平凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷西南部,向 东与云开低凸起相邻,向西与顺德凹陷相连,向北 与神狐一暗沙隆起相接,向南与南部隆起带相碰, 整体呈 NE-SW 走向,与珠江口盆地整体走向分布 表现一致(王升兰等,2014).本次研究区主要包含开 平凹陷的中东部约1500km²的区域(如图1中右侧 红色区域).其中北部的大型边界拆离断层——神开 断层横跨整个三维地震工区基底,整个开平凹陷构 造演化过程也正是受神开断层影响而形成了如今 的伸展拆离盆地(张志业等,2018).

开平凹陷在大型边界断层影响下,发育多期断 裂演化活动,断裂分布也较为广泛,目在应力场方 向持续顺时针转变的大背景下,区域内部形成了复 杂多样的断裂展布特征.因此,为实现整个珠江口 盆地西南端的断裂特征研究,笔者通过类比文昌A 凹陷的断裂分类方式,对开平凹陷及邻区断裂进行 分类.同样,基于研究区三维高分辨率地震资料对 断裂进行精细构造解释,以实现研究区断裂不同级 别的分类分级(图7).其中F1断层为基底边界大断 层——神开断层,为控盆的一级大断层;控制开平 凹陷隆坳构造格局的为二级区域断层,如F2西南 断层、F3南开断层等;而控制局部构造带的为三级 断裂,其在研究区分布较为广泛,如北部断裂带的 1号断裂、kp11断裂带的2号断裂、kp10断裂带的3 号断裂、西南断裂带的4号断裂、东南斜坡断裂带 的6号断裂等;其余规模较小、走向多变且控制构 造圈闭的均划分为四级断裂.

1.2.1 开平凹陷断裂剖面组合 开平凹陷内部剖 面断裂分布与文昌 A 凹陷具有一致性,单剖面类型 仍然以犁式正断层为主,断裂组合样式也包括"Y" 字型断层、阶梯状断层等多种组合样式,但其工区 内常见卷心式断裂组合类型(图8).该类断裂组合



图7 珠江口盆地西南部开平凹陷构造单元划分

Fig.7 Division of structural units in Kaiping sag, southwest of Pearl River Mouth basin



Fig.8 Combination patterns and distribution characteristics of fault sections in Kaiping sag a.阶梯状断层;b.卷心式断层;c."Y"字型断层

是在区域伸展构造环境下,由下伏地层向上部发生 张拱作用,使上覆地层出现减薄或发生张裂而形成 的.该类断裂样式往往无主控断裂,且由倾向完全 相反的低序级断裂交错而成,间接反映较强走滑、 较弱拉张的应力场特征.卷心型组合活动范围大, 断裂分布复杂,错断层位较多,在整个凹陷中广为



a.等T₀平面图;b.断裂似然度属性



图 10 开半凹陷断裂走问演化 Fig.10 Evolution of fault strike in Kaiping sag

分布,但尤其在 kp11 断裂带附近分布较为集中. 1.2.2 开平凹陷断裂平面组合 针对开平凹陷研 究工区内部复杂的断裂平面组合特征,笔者同样引 用在文昌 A 凹陷中所提及的等 T₀平面图和断裂似 然度属性(thinned fault likelihood 属性)分析方法, 来对沿该区 T₇₀层反射界面断裂组合样式进行划 分,依旧能够从 T₇₀层上大致区分出平行式、雁列 式和斜交式等断裂平面组合形式.结合图 9 与图 7 来进行综合分析,笔者可识别出集中分布于 kp10 与 kp11 断裂带上呈现 NWW、近 EW 向排列的平 行式断裂组合、主要分布于东南斜坡带和北部断 裂带呈 NWW 向雁列式排布的雁列式组合,以及 在西南和北部断裂带偶有分布的多期次、多角度 结合的斜交式断裂平面组合.

1.2.3 开平凹陷断裂运动学规律 为系统分析开 平凹陷的断裂运动学规律,同样类比文昌A凹陷的 断裂运动学分析,依据研究区内部地层划分所存在 的不同,将各个阶段地层界面上的断裂均进行定量 化统计(毛云华等,2020).由开平凹陷断裂走向玫瑰 花图(图10)来反映始新世一早中新世各阶段地层 界面的断裂走向演化特征;断陷早中期文昌组 (T₈₅~T₈₀),主要以近NE-NEE向断裂走向为主.断 陷晚期恩平组(T₇₁~T₇₀),NEE向断裂发育减弱并 趋于活动停止状态,在持续右旋应力场背景下,断 裂走向转变为 EW 向. 直至断坳转换期珠海组 (T₆₀),断裂走向转变为近NWW走向,并于坳陷期 EW 向断裂活动强度持续减弱,断裂走向以NWW 向为主,并逐渐发展为NWW-NW向断裂分布特 征.开平凹陷内部层序地层自古新世到中新世整体 断裂走向大致发生 NE 向→NEE 向→EW 向→ NWW 向→NW 向的顺时针转变特征(戴一丁等, 1998; 童亨茂等, 2010; Luan et al., 2019).

2 断裂成因机制探讨

珠江口盆地西南段断裂体系不仅能够作为整 个盆地演化的地质记录和表现形式,而且也对南海 北部陆缘断裂分布特征提供必要的指示和借鉴(陈 汉宗等,2005).南海的形成与演化受印度板块与欧 亚板块碰撞、太平洋板块西向俯冲以及古南海向南 俯冲消亡产生的拉张应力的综合影响(姚伯初等, 2004;雷超等,2015).其中文昌A凹陷在形成与演化 过程中受到印度与亚欧板块的碰撞、太平洋板块后 撤、南海扩张以及珠三南断裂带等多重因素影响 (Bahorich et al., 1995;Kumar et al., 2018).开平凹 陷的形成与演化过程中也受到印度与亚欧板块的 陆一陆碰撞、太平洋板块俯冲后撤、南海海底扩张 以及基底神开断层的联合控制(栾锡武等,2009).

古新世到始新世早期(图11a),南海北部陆缘 受到广泛的地壳伸展减薄作用而形成区域范围内 的沉降和裂陷盆地,区域应力场方向也由前中生代 的挤压状态转变为新生代拉张状态(曹敬贺等, 2014).早期神狐运动引起下地壳和岩石圈上地幔发 生东南方向的蠕动,导致地壳显著抬升,造成了北 西一南东向的伸展裂陷活动,南海北部在新生代褶 皱基底之上逐步发育 NE 向的走滑断裂和伸展变 形.在早中始新世,珠琼运动一幕时期,软流圈物质 不断上涌,华南地块继续伸展,古南海开始南移,南 海北部地壳进一步伸展拉分,造成盆地裂陷阶段大 量发育 NE 向断裂,如在文昌 A 凹陷内可识别出与 裂陷活动期紧密相关的早期大量 NE 向断裂.与此 同时,在开平凹陷内部也可明显观察到广泛不整合 和近 NE 向张性断裂发育,且断裂活动强度较大.

晚始新世一早渐新世(图 11b),印度板块与欧 亚板块发生陆陆碰撞,印支地块不断向东南方向挤 出,太平洋板块向欧亚板块俯冲的方向发生改变, 由NNW向转变为NWW向,同时菲律宾板块持续 北移并向太平洋板块锲入,古南海开始向婆罗洲方 向发生俯冲拖拽(姚伯初等,2004;张亮,2012).整个 珠江口盆地在复杂应力场作用下发育近NEE向断 层,此时的南海北部地壳处于右旋走滑活动期,在 地震剖面上可将同期断裂与后期断裂进行区分,且 断裂活动强度较大,控制着珠江口盆地西南端的沉 积物分布.与此同时,在构造应力场NE向伸展和持 续右旋走滑作用下,近EW向、NEE向断裂大量发 育,在文昌A和开平凹陷中也均可见该时期在平面 上呈现出的平行式、雁列式等组合类型.

晚渐新世一早中中新世(图11c),古南海的西 段逐渐封闭,并继续向东段发展,印度板块与欧亚 板块的碰撞到达顶峰,受古南海俯冲作用和哀牢 山-红河断裂带左行走滑运动影响,盆地发生南北 向区域伸展(闫义等,2005;蔡周荣等,2010).在此应 力场下华南陆缘上地壳处于持续拉伸减薄状态,南 海北部右旋应力场也在不断加强,该阶段珠江口盆 地西南端大量的近EW 向断裂发育,此时的断裂活 动强度发生削弱.进入中中新世后,构造格局发生 重大变化,太平洋板块北移并不断发生顺时针旋 转,印澳板块快速北冲,印支地块内部构造走向发 生强烈转变,古南海闭合,新南海也相继形成(刘雨 晴等,2019;Lei et al., 2016).中新世末(图 11d),菲 律宾板块由NWW向彻底锲入欧亚大陆,此时的珠 江口盆地西南端开始发育NWW、近NW向断裂,断 裂活动发生进一步的削弱,盆地进入了热沉降期. 整个珠江口盆地西南缘在始新世一渐新世期间发 育的NE、近EW向断裂,以及中新世后发育的NW



图 11 南海及其周缘构造演化过程 Fig.11 Tectonic evolution of the South China Sea and its surroundings 据雷超等(2015)和Leyla *et al.*(2018)修改

向3组断裂与南海北缘盆地的基底断裂和后期再生断裂走向分布均保持良好的一致性(吴世敏等, 2001).由此可见,珠江口盆地西南端与南海北部陆 缘在区域构造演化和断裂构造成因上紧密相关.

3 结论

(1)本文选取珠江口盆地北部坳陷带的文昌 A凹陷和南部坳陷带的开平凹陷两块高分辨率 地震数据资料来对整个珠江口盆地西南段进行 具体的断裂构造特征分析.首先依据级别和规 模,断裂可被划分为控盆一级断裂、控凹二级断 裂、控带三级断裂、控圈四级断裂和控层五级小 断裂;区域内单剖面发育以正断层为主,识别出 的剖面组合类型包括阶梯状、Y字形、地垒一地 堑等多种组合样式,其中珠三坳陷的文昌A凹陷 内部可见特殊的树枝状构造,珠二坳陷的开平凹 陷分布有独特的卷心式断层;盆地在二维平面上 也大量分布着平行式、斜交式、雁列式等多种组 合类型;结合研究区应力场分布和对两个研究区 自古新世到中新世的断裂走向玫瑰花图的分析, 珠江口盆地西南端断裂走向돷现出NE向→NEE 向→近EW向→NWW向→NW向的顺时针转变 特征.文昌A凹陷在珠三南断裂控制下形成复杂 断阶构造,而开平凹陷受区域性基底断层一神开 断层的影响,呈现出多个洼陷的伸展断陷活动. (2)在太平洋与欧亚板块俯冲碰撞、印度与澳 大利亚板块陆陆碰撞、华南陆缘南北向伸展以及古 南海的俯冲拖拽综合作用下,珠江口盆地西南段受 持续右旋应力场影响,自早中始新世时期太平洋板 块俯冲后撤、印欧板块发生陆陆碰撞,盆地内部开 始大量发育 NE 向断裂,且断裂活动强烈.在渐新 世,太平洋板块俯冲方向发生转变,哀牢山一红河 断裂带的左行走滑以及古南海向南的俯冲拖拽,致 使南北向伸展作用加强,盆地广泛发育近EW 向断 裂,断裂活动强度依然较强,但活动速率开始下降. 早中中新世,印澳板块向北加速俯冲,与此同时,南 海海底扩张运动结束,直至中新世末,菲律宾板块 完全锲入欧亚板块,珠江口盆地西南部发生了大规 模区域性隆升和下降,断裂走向转变为 NW-NWW 向,断裂活动微弱,活动速率逐渐趋于稳定.

References

- Bahorich, M., Farmer, S., 1995. 3-D Seismic Discontinuity for Faults and Stratigraphic Features: The Coherence Cube. *The Leading Edge*, 14(10): 1053-1058. https:// doi.org/10.1190/1.1437077
- Cai, Z. R., Liu, W. L., Wan, Z. F., et al., 2010. Determination of Cenozoic Tectonic Movement in the Northern South China Sea and the Relationship between Oil-Gas Reservoir and Tectonic Movement. *Marine Science Bulletin*, 29(2): 161–165 (in Chinese with English abstract).
- Cai, Z. R., Yin, Z. X., Ye, J., et al., 2015. Characteristics and Formation Mechanism of the Ladder - Like Faults towards the Sea in Pearl River Mouth Basin. *China Sciencepaper*, 10(3): 322-326, 330 (in Chinese with English abstract).
- Cao, J. H., Xia, S. H., Sun, J. L., et al., 2014. Comparison of Fault Structure Characteristics in the Northern Pearl River Mouth Basin and Its Geological Implication. *Progress in Geophysics*, 29(5): 2364-2369 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. Z., Wu, X. J., Zhou, D., et al., 2005. Meso-Cenozoic Faults in Zhujiang River Mouth Basin and Their Geodynamic Background. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 52-61 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S. X., Li, S. Z., Suo, Y. H., et al., 2012. Cenozoic Tectonics and Dynamics of Basin Groups of the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(6): 79-93 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Y. D., Pang, X., Li, P. L., 1998. Dynamic Character-

istics of Tectonic Evolution and Hydrocarbon Resources in Cenozoic Sedimentary Basins in the South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 10(1):12–18 (in Chinese with English abstract).

- Hu, G. W., Deng, Y., Pan, G. C., et al., 2019. Application of Two-Azimuth and High-Density 3D Seismic Data in the Exploration of Wenchang Depression. *Progress in Geophysics*, 34(6): 2444-2450 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. Q., Tang, D. Q., Wang, L. L., et al., 2017. Fault Structures in the Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 117-127 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H., Wang, H., Li, J. L., et al., 2009. Sequence Stratigraphic Pattern Analysis in the Zhu III Depression, the Pearl River Mouth Basin. *Marine Geology* & Quaternary Geology, 29(1): 87-93 (in Chinese with English abstract).
- Kumar, P. C., Mandal, A., 2018. Enhancement of Fault Interpretation Using Multi-Attribute Analysis and Artificial Neural Network (ANN) Approach: A Case Study from Taranaki Basin, New Zealand. *Exploration Geophysics*, 49(3): 409-424. https: //doi.org/ 10.1071/EG16072
- Lei, B. H., 2010. Faulted Structure and Its Controlling the Sedimentation Filling of Wenchang Sag in the Pearl River Mouth Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Ren, J. Y., 2016. Hyper-Extended Rift Systems in the Xisha Trough, Northwestern South China Sea: Implications for Extreme Crustal Thinning Ahead of a Propagating Ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 77: 846-864. https://doi.org/10.1016/j. marpetgeo.2016.07.022
- Lei, C., Ren, J. Y., Zhang, J., 2015. Tectonic Province Divisions in the South China Sea: Implications for Basin Geodynamics. *Earth Science*, 40(4): 744-762 (in Chinese with English abstract).
- Leyla, B. H., Zhang, J. X., Yang, L. L., 2018. Quantitative Analysis of Faults in Huizhou Sub-Basin, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Earth Science*, 29(1): 169– 181. https://doi.org/10.1007/s12583-018-0823-3
- Li, J. L., Lei, B. H., Zheng, Q. G., et al., 2015. Stress Field Evolution and Its Controls on Oil Accumulation in the Wenchang Sag. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(4): 601-609 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Wu, Z. P., Cheng, Y. J., et al., 2019. Spatial

and Temporal Difference of Paleogene Rift Structure and Its Controlling Factors in the Northern South China Sea: A Case Study of Pearl River Mouth Basin. *Journal* of China University of Mining & Technology, 48(2): 367-376 (in Chinese with English abstract).

- Lu, Y. T., Luan, X. W., Lyu, F. L., et al., 2017. Seismic Evidence and Formation Mechanism of Gas Hydrates in the Zhongjiannan Basin, Western Margin of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 84: 274– 288. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.04.005
- Luan, X. W., Ran, W. M., Wang, K., et al., 2019. New Interpretation for the Main Sediment Source of the Rapidly Deposited Sediment Drifts on the Northern Slope of the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171: 118–133. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.11.004
- Luan, X. W., Zhang, L., 2009. Tectonic Evolution Modes of South China Sea: Passive Spreading under Complex Actions. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29 (6): 59-74 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Y. H., Zhao, Z. X., Sun, Z., 2020. Extensional Thinning Mechanism of the Western Continental Margin of the Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 45(5): 1622-1635 (in Chinese with English abstract).
- Qi, J. F., Wu, J. F., Ma, B. S., et al., 2019. The Structural Model and Dynamics Concerning Middle Section, Pearl River Mouth Basin in North Margin of South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 203-221 (in Chinese with English abstract).
- Ran, W. M., Luan, X. W., Shao, Z. F., et al., 2019. Research on Characteristics of Growth Faults in the Southern East China Sea Shelf Basin. *Marine Geology* & *Quaternary Geology*, 39(1): 100-112 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Shu, Y., Du, J. Y., et al., 2017. Petroleum Geology of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Tong, H. M., 2010. Fault Formation and Evolution Model under Uncoordinated Extension in Rift Basin. *Geologi*cal Bulletin of China, 29(11): 1606-1613 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. L., Zhang, X. B., Wu, J. S., et al., 2002. Integrated Geophysical Researches on Base Texture of Zhujiang River Mouth Basin. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2):13-22 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. L., Liu, H., 2014. Seismic Reflection and Depositional System of the Enping Formation in the Kaiping Depression of the Zhujiangkou Basin. Science & Technology Review, 32(Z2): 64-69 (in Chinese with

English abstract).

- Wu, S. M., Zhou, D., Qiu, X. L., 2001. Tectonic Setting of the Northern Margin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, 7(4): 419-426 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z., Jiang, Z. Q., Sun, P., et al., 2018. Characteristics and Tectonic Evolution of the Fault System in the North Sag of Northern Depression of South Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(3) : 75-84 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y., Xia, B., Lin, G., et al., 2005. The Sedimentary and Tectonic Evolution of the Basins in the North Margin of the South China Sea and Geodynamic Setting. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(2):53-61 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Wan, L., Liu, Z. H., 2004. Dynamic Characteristics of Tectonic Evolution and Hydrocarbon Resources in Cenozoic Sedimentary Basins in the South China Sea. *Earth Science*, 29(5):543-549 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Luan, X. W., Ran, W. M., et al., 2020. Discussion on Fault Characteristics and Genesis of Wenchang a Sag in the West of the Pearl River Mouth Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(6):96-106 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., 2012. Tectonic Evolution of the South China Sea and a Numerical Modeling (Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Qi, J. F., Wu, J. F., 2019. Cenozoic Faults Systems and Its Geodynamics of the Continental Margin Basins in the Northern of South China Sea. *Earth Science*, 44(2): 603-625 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Zhang, K. K., Yuan, B., et al., 2014. Fault System and Structural Style of Cenozoic and Their Controlling Effects on Hydrocarbon-Forming in Wenchang Sag. Science Technology and Engineering, 14(23): 26-31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., He, D. F., Li, Z., et al., 2018. 3D Geometry and Kinematics of the Boundary Fault in the Kaiping Depression, Pearl River Mouth Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 4296-4307 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡周荣,刘维亮,万志峰,等,2010. 南海北部新生代构造运动 厘定及与油气成藏关系探讨.海洋通报,29(2): 161-165.

- 蔡周荣,殷征欣,叶军,等,2015.珠江口盆地向海阶梯状断裂 特征及成因分析.中国科技论文,10(3):322-326,330.
- 曹敬贺,夏少红,孙金龙,等,2014.珠江口盆地北部断裂构造 特征对比及其地质学意义.地球物理学进展,29(5): 2364-2369.
- 陈汉宗,吴湘杰,周蒂,等,2005.珠江口盆地中新生代主要断 裂特征和动力背景分析.热带海洋学报,24(2):52-61.
- 程世秀,李三忠,索艳慧,等,2012. 南海北部新生代盆地群构 造特征及其成因. 海洋地质与第四纪地质,32(6): 79-93.
- 戴一丁, 庞雄, 李平鲁, 1998. 珠江口盆地开平凹陷油气聚集 条件分析. 中国海上油气. 地质, 10(1):12-18.
- 胡高伟,邓勇,潘光超,等,2019. 双方位、高密度地震资料在 文昌凹陷勘探中的应用.地球物理学进展,34(6): 2444-2450.
- 胡小强,唐大卿,王嘹亮,等,2017.北黄海盆地东部坳陷断裂 构造分析.地质科技情报,36(1):117-127.
- 姜华,王华,李俊良,等,2009.珠江口盆地珠三坳陷层序地层 样式分析.海洋地质与第四纪地质,29(1):87-93.
- 雷宝华,2010.珠江口盆地文昌凹陷断裂构造及其对沉积充 填的控制(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 雷超,任建业,张静,2015. 南海构造变形分区及成盆过程. 地球科学,40(4):744-762.
- 李俊良, 雷宝华, 郑求根, 等, 2015. 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. 大地构造与成矿 学, 39(4):601-609.
- 刘雨晴,吴智平,程燕君,等,2019. 南海北缘古近纪裂陷结构 时空差异及控制因素——以珠江口盆地为例.中国矿 业大学学报,48(2):367-376.
- 栾锡武,张亮,2009. 南海构造演化模式:综合作用下的被动 扩张.海洋地质与第四纪地质,29(6):59-74.
- 毛云华,赵中贤,孙珍,2020.珠江口盆地西部陆缘伸展一减 薄机制.地球科学,45(5):1622-1635.
- 漆家福,吴景富,马兵山,等,2019.南海北部珠江口盆地中段 伸展构造模型及其动力学.地学前缘,26(2):203-221.

- 冉伟民,栾锡武,邵珠福,等,2019.东海陆架盆地南部生长断 层活动特征.海洋地质与第四纪地质,39(1):100-112.
- 施和生,舒誉,杜家元,等,2017.珠江口盆地古近系石油地 质.北京:地质出版社.
- 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.
- 王家林,张新兵,吴健生,等,2002.珠江口盆地基底结构的综 合地球物理研究.热带海洋学报,21(2):13-22.
- 王升兰,刘晖,2014. 珠江口盆地开平凹陷恩平组地震反射特 征与沉积体系展布. 科技导报,32(Z2):64-69.
- 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.
- 熊忠,江志强,孙鹏,等,2018. 南黄海盆地北部坳陷北凹断裂 特征与构造演化. 海洋地质与第四纪地质,38(3): 75-84.
- 闫义,夏斌,林舸,等,2005.南海北缘新生代盆地沉积与构造 演化及地球动力学背景.海洋地质与第四纪地质,25 (2):53-61.
- 姚伯初,万玲,刘振湖,2004. 南海海域新生代沉积盆地构造 演化的动力学特征及其油气资源. 地球科学,29(5): 543-549.
- 张豪,栾锡武,冉伟民,等,2020.珠江口盆地西部文昌A凹陷 断裂特征与成因探讨.海洋地质与第四纪地质,40(4): 96-106.
- 张亮,2012. 南海构造演化模式及其数值模拟(博士学位论 文). 青岛:中国科学院海洋研究所.
- 张远泽,漆家福,吴景富,2019.南海北部新生代盆地断裂系 统及构造动力学影响因素.地球科学,44(2):603-625.
- 张迎朝,张坤坤,袁冰,等,2014. 文昌凹陷新生界断裂体系与 构造样式及对油气成藏的控制作用.科学技术与工程, 14(23):26-31.
- 张志业,何登发,李智,等,2018.珠江口盆地开平凹陷边 界断层三维几何学与运动学.地球物理学报,61(10): 4296-4307.