

https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.068



珠江口盆地珠二坳陷中部“对向拆离型复合洼陷”结构特征及其成因探讨

彭光荣^{1,2}, 郑金云^{1,2}, 蔡嵩^{1,2}, 陈兆明^{1,2}, 韩晋阳^{1,2}, 王梓颐^{1,2}

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518054
2. 中海石油深海开发有限公司, 广东深圳 518054

摘要: 南海北部陆缘深水区始新世多发育单向拆离断层, 而珠二坳陷中部处于珠江口盆地珠二与珠一、珠三坳陷衔接带的南倾单一拆离断裂与北倾多级拆离断裂系交汇区, 形成特有的“对向拆离型复合洼陷”, 然而其结构特征及成因机制有待深入研究. 基于最新高精度全覆盖三维地震数据和始新世全序列钻井数据, 恢复始新世关键地质时期(T80/T83)洼陷构造地貌为窄深分隔型至宽浅汇聚型转换格局, 沉积中心从两侧近源陡坡带向中央带拆离迁移, 对向断裂交汇区隆升断块沿东西向长轴展布; 构造演化序列揭示出对向拆离断裂系启动于始新世关键构造变革期(T83~43 Ma), 响应远程太平洋板块俯冲方向的变化, 区内地壳在伸展应力的作用下拆离减薄, 拆离断面之上广泛发生断块翘倾与差异隆升现象, 从而接受剥蚀成为动态源区, 同时伴生强烈岩浆活动, 重塑了对向分布的箕状断陷结构, 形成对向拆离区内长轴动态供给模型. 厘定对向拆离型复合洼陷长轴动态源区与沉积中心时空配置, 可为深水区始新世裂陷期优质烃一储组合预测提供有力支撑.

关键词: 珠江口盆地; 珠二坳陷中部; 始新世; 对向拆离型复合洼陷; 结构特征; 成因探讨; 石油地质学.

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2024)04-1385-15

收稿日期: 2023-01-09

Structural Characteristics and Genesis of Opposite Detachment Type Composite Sag in Middle of Zhu II Depression, Pearl River Mouth Basin

Peng Guangrong^{1,2}, Zheng Jinyun^{1,2}, Cai Song^{1,2}, Chen Zhaoming^{1,2}, Han Jinyang^{1,2}, Wang Ziyi^{1,2}

1. Shenzhen Branch, CNOOC China Ltd., Shenzhen 518054, China
2. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518054, China

Abstract: In deep water area of the northern continental margin of the South China Sea, unidirectional detachment faults were mostly developed in the Eocene, and the middle part of the Zhu II depression was located in the intersection area of the south dip single detachment fault and the north dip multistage detachment fault system in the junction zone of Zhu-2 and Zhu-1 and Zhu-3 depressions of the Pearl River Mouth basin, forming a unique “opposite detachment type composite sag”. However, its structural characteristics and cause of formation need to be further studied. Based on the latest high-precision 3D seismic data and the complete Eocene drilling data, the tectonic geomorphology of the T80/T83 depression in the key geological period of Eocene is restored to be a narrow and deep separated type to a wide and shallow converging type. The depositional center migrated from the

基金项目: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(No.KJGG2022-0102).

作者简介: 彭光荣(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事油气地质与油气勘探综合研究工作. ORCID: 0000-0003-2014-4653. E-mail: penggr@cnooc.com.cn

引用格式: 彭光荣, 郑金云, 蔡嵩, 陈兆明, 韩晋阳, 王梓颐, 2024. 珠江口盆地珠二坳陷中部“对向拆离型复合洼陷”结构特征及其成因探讨. 地球科学, 49(4): 1385-1399.

Citation: Peng Guangrong, Zheng Jinyun, Cai Song, Chen Zhaoming, Han Jinyang, Wang Ziyi, 2024. Structural Characteristics and Genesis of Opposite Detachment Type Composite Sag in Middle of Zhu II Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 49(4): 1385-1399.

near source steep slope to the central zone on both sides, and the uplift fault block in the intersection area of the opposite faults distributed along the east-west long axis. The tectonic evolution sequence reveals that the opposite detachment fault system started in the key tectonic transformation period of Eocene (T83–43 Ma). In response to the change of the subduction direction of the remote Pacific plate, the crust in the region was detached and thinned under the action of extensional stress. The fault block tilting and differential uplift occurred on the detachment section, and thus became a dynamic source region receiving denuding. At the same time, strong magmatic activity was generated. The dustpan-like fault depression with opposite distribution was reconstructed and the long-axis dynamic supply model in the opposite detachment area was formed. The determination of the spatio-temporal configuration of the long-axis dynamic source area and depositional center of the opposite detachment type composite depression is helpful to serve the prediction of high-quality hydrocarbon reservoir assemblage during the Eocene rift in the deepwater area.

Key words: Pearl River Mouth basin; middle of Zhu II depression; Eocene; opposite detachment type composite sag; structural characteristics; mechanism discussion; petroleum geology.

0 引言

随着 20 世纪 80 年代大西洋 Iberia–Nerfoundland 共轭边缘深海钻探成果以及大量高品质地球物理勘探成果进入地质工作者的视野,结合在 20 世纪末形成的伸展背景下拆离断层发育机制的认识,人们重新审视深水盆地,提出了全新的陆缘伸展拆离薄化模式,且拆离断层被认为在协调地壳伸展的过程中起主要作用(Reid, 1990; Unternehr *et al.*, 2010; Whitney *et al.*, 2013; Morley, 2014; 任建业等, 2015). 珠江口盆地位于南海北部陆缘,在陆缘伸展减薄的过程中横跨浅水陆架区,发育多种类型的拆离断陷,其中位于珠二坳陷的白云凹陷是珠江口盆地中面积最大、新生代地层发育较全的深大凹陷. 随着三维地震资料的大面积覆盖、地震成像品质的提高和勘探程度的深化,学者们在白云凹陷清晰地识别出断至 Moho 面的系列北倾低角度正断层,认为始新世白云凹陷是受南海北部陆缘地壳伸展拆离薄化模式控制的大型低角度拆离裂陷结构(任建业等, 2018; 柳保军等, 2019; 庞雄等, 2022; 郑金云等, 2022). 无独有偶,在白云凹陷西侧的开平凹陷,前人也识别出了大型 NEE 走向的南倾边界拆离断层——神开断层,该断层的水平位移量可达数十千米,几乎横穿整个开平凹陷,且在伸展作用和岩浆作用的共同作用下同期发育可清晰识别的变质核杂岩,并伴有近南北向的典型倾伏褶皱,这些元素共同构成了与白云凹陷北倾拆离体系相对的南倾拆离体系(毛云华等, 2020; 王嘉等, 2021; Ye *et al.*, 2022). 基于对南海北部陆缘深水区拆离断裂特征的分析认识,认为白云凹陷处于南海北部陆缘地壳岩石圈的细颈化带,白云主洼在强烈的伸展减薄作用下仅发育约 6 km 的结晶地壳,属于壳幔拆离体

系;白云西区地壳厚度约 12 km,裂陷早期高角度正断层控制的半地堑地层沉积厚度较大,主拆离期发育壳间拆离体系;白云凹陷东部和西南断阶带的拆离断层在浅部便产生了低角度化,均发育上地壳拆离体系;开平凹陷发育伴随变质核杂岩隆升的壳间拆离体系,拆离强度高于白云西区(郝天珧等, 2008; 任建业等, 2015; 庞雄等, 2018; Zhou *et al.*, 2018; 李洪博等, 2020; 庞雄等, 2021).

目前国内外对拆离体系研究多集中于单一方向拆离作用和背向复合拆离体系,然而对对向的两大拆离体系联合作用下的结构特征及成因机制探讨较为薄弱. 珠二坳陷中部地处白云凹陷和开平凹陷之间的过渡区域,在古近系文昌期分别受白云主洼北倾壳幔拆离体系和开平凹陷南倾壳间拆离体系的作用,断裂体系既有高角度张裂向低角度拆离的转化,也存在后期高角度断裂对拆离断层的切割,洼陷之间的转换带内可见因地层减薄、差异隆升形成的削截面,结构复杂(张智辉, 2017; 李瑞彪等, 2020). 此外,伴随着强烈的断层活动、岩浆喷发、地层抬升和沉积迁移等地质作用,珠二坳陷在文昌期拆离深陷,其上发育有广泛的陆相辫状河三角洲和扇三角洲,拆离作用启动前后在洼陷深部形成以文三、文四段为主的深湖一半深湖相地层是珠江口盆地东部最重要的烃源岩层(蔡国富等, 2022). 本次研究基于最新高精度三维地震资料 and 关键井位的约束,提出研究区“对向拆离型复合洼陷”受先存断裂体系活化、中下地壳隆升以及岩浆作用联合控制的“三元”结构成因机制,厘清其特殊结构对洼陷沉积体系的控制效应并建立了综合模型,为白云深水区后续油气地质勘探工作中更全面地认识洼陷结构、明确勘探方向提供了全新的视角.

1 区域地质概况

南海北部陆缘属于华南陆块向海域的自然延伸,现位于欧亚板块东南缘的大陆架至陆坡的位置,在形成过程中主要受太平洋板块向欧亚板块俯冲、印度洋板块与欧亚板块碰撞缝合以及菲律宾板块的挤压作用,在多期构造运动的共同作用下形成了现今复杂的构造面貌(程世秀等,2012;张远泽等,2019).珠江口盆地是发育在南海北部陆缘由陆向海逐渐减薄的地壳岩石圈之上的大型新生代裂陷盆地,盆地整体走向为NE-SW向,在中生代基底内可识别出NE-NEE和NW-NWW两组具有走滑特征的断裂,其中NE-NEE向断裂被认为是受控于古太平洋板块北西向俯冲作用,在燕山期持续发育;NW-NWW向断裂与古太平洋俯冲方向转变形成的左行压扭应力场有关,密集发育于晚白垩世构

造转换期(图 1a)(漆家福等,2019;邓棚等,2020;高阳东等,2022).

新生代以来,珠江口盆地经历了裂陷、拗陷、构造活化3个阶段,沉积地层自下而上依次发育神狐组、文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、粤海组、万山组和第四纪地层(图 1c)(蔡国富等,2021).珠二拗陷位于珠江口盆地深水区,古新世时期以隆升剥蚀供源为主,几乎不发育神狐组,在早始新世因华南挤出开始广泛发育由高角度断层控制的箕状断陷,发育文昌—恩平组地层.其中,文昌期张裂作用形成的NE向断裂把珠二拗陷分割成了两个汇水区,即开平凹陷和白云凹陷,恩平期珠二拗陷成为整个珠江口盆地统一的汇水区(敬嵩,2016).研究区位于白云凹陷和开平凹陷之间,由白云3洼、番禺25-2鼻状构造带、番禺1-1凸起两个正向构造单元组成,北接番禺低隆起,

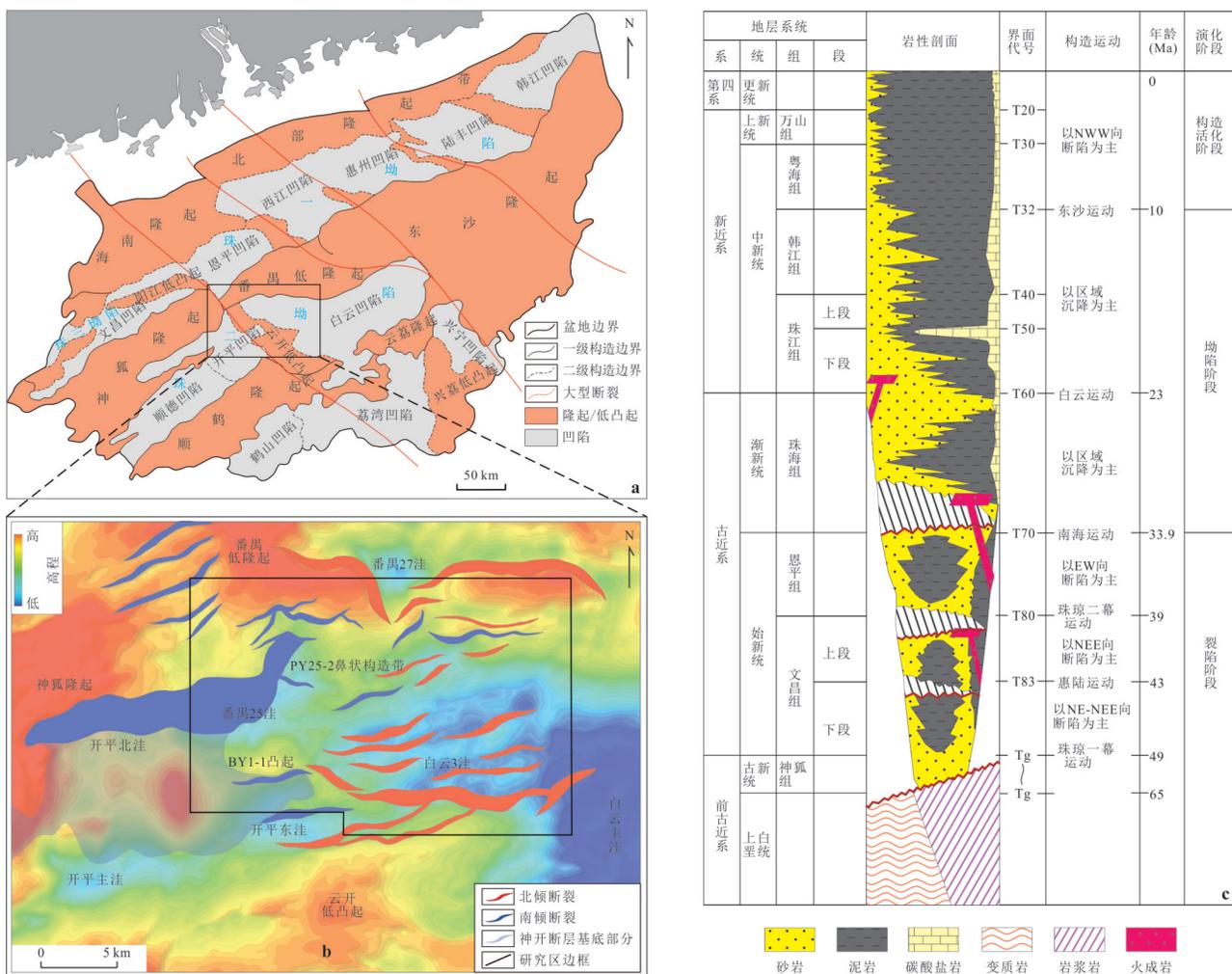


图 1 珠二拗陷中部构造位置图(a)、构造纲要图(b)及珠江口盆地层序地层综合柱状图(c)

Fig.1 Structural location map (a) and structural outline map (b) of the middle of the Zhu II depression and sequence stratigraphy comprehensive bar chart of the Pearl River Mouth basin(c)

西邻神狐隆起,南连云开低凸起,东连白云主洼(图 1b)。白云 3 洼继承白云主洼南断北超构造格局,其中洼陷南部由近 EW 向边界断层控制,自南向北分别为中央隆起带和北部缓坡带;番禺 25 洼部分位于阳江—统断裂带上,洼陷呈 NE 向展布,发育多条 NEE 向南倾控边断裂,并受控于基底断块和南部白云 1-1 凸起(李骥,2018)。

本次研究以始新世文昌—恩平组为目的层段,此时白云凹陷处于裂陷期。除珠江二幕运动、南海运动形成的 T80、T70 两个重要构造面以外,在文昌组早、晚期之间存在一个因惠州运动形成的区域不整合面 T83,界面上下表现为裂陷作用的南北转变和沿断裂走向的迁移、基底隆升、岩浆底辟以及地层剥蚀等(施和生等,2020)。研究区三维地震资料全覆盖,包含 11 口重点井,属于中低勘探区。研究区主裂陷期(文昌期)在活化的 NE-NEE 向先存断裂和 NEE 向生长断裂的控制下发育由盆缘隆起供给的盆内近源沉积体系,裂陷晚期(恩平期)因区域应力顺时针偏转,EW-NWW 向中生代基底断裂开始逐渐活化,裂陷作用减弱,整体地形较平缓,发育由古珠江水系携带物源的盆外远源沉积体系,多见煤层(马晓倩等,2021;郭伟等,2022)。

2 对向拆离型复合洼陷结构样式

珠二坳陷中部处在阳江—统暗沙大型走滑断裂带上,在始新世发育多期断裂活动,应力场方向持续顺时针偏转,区域内形成了复杂多样的断裂系统。为厘清对向拆离型复合洼陷的结构样式,笔者基于最新的高分辨率三维地震资料,通过自西向东清绘系列格架剖面(图 2)对各区带的洼陷结构进行解剖。

2.1 开平凹陷—南倾拆离体系

开平凹陷受横跨整个洼陷的基底边界拆离大断层——神开断层控制,该断层的西南段、中段、东北段分别呈“反犁式”“座椅式”“犁式”形态,其中在恩平组沉积之前中段活动性最强,西南段次之,东北段最弱,在稳定的波瓦状基底断面之上发育大量的平行式、斜交式、雁列式断裂组合(庞雄等,1995;张志业等,2018)。神开断层在晚文昌拆离作用启动前属于中等角度正断层(35°左右),晚文昌期在强烈拆离作用下发展为低角度拆离断层,并在开平主洼

与开平北洼间基于经典滚动枢纽模式发育与拆离断层同生的变质核杂岩构造,其发育与地壳中非均一热事件形成的近 EW 向隆升带密切相关,在核顶处可清晰识别标志着隆升结束形成的 T80 不整合面(Parsons and Thompson, 1993; Ye *et al.*, 2022)。早文昌期沉积地层主要发育在开平主洼,沉积中心位于神开断裂远端,这可能与晚文昌期拆离伸展滑移有关;晚文昌期沉积地层在整个开平凹陷均有发育,在开平北洼受神开断层控制明显;恩平期神开断层停止活动,湖盆外扩,控边断裂向外迁移。这些沉积现象指示开平北洼的形成和神开断层的主拆离控沉积期应当归属到惠州运动之后,并持续到珠江二幕运动时结束,而对于惠州运动之前的早文昌期地层,则以地壳伸展薄化所引起的中下地壳隆升改造作用为主(图 2a)。

2.2 番禺 25 洼—南倾—北倾复合拆离体系

番禺 25 洼与开平北洼的衔接处位于神开断层的东北翼,拆离面已逐渐伏于基底之下,洼陷内部逐渐出现基底断块(图 2b)。番禺 25 洼主体部分位于近 EW 向隆升带以北,早文昌期受神开断层近端和系列基底断块的控制,沉积中心靠近断裂根部,表现为复式半地堑特征;晚文昌期沉积中心受拆离作用影响向洼陷中心迁移;恩平期湖盆越过白云 1 岩体,与开平东洼连通。开平东洼位于隆升带以南,同时受到神开断裂倾末端和白云 1 岩体南侧发育的高角度正断层控制,发育典型的“犁式”结构。神开断层在番禺 25 洼东部造成的影响较小,基底以多级断块为主,即使是晚文昌主拆离期,沉积地层的增厚主要发生在高角度正断层控制的半地堑根部。

2.3 白云 3 洼—白云主洼北倾拆离体系

白云 3 洼壳间拆离是白云凹陷多级拆离体系的一部分,拆离断层在中地壳内近水平发育,洼陷两侧略微隆起,并在北部向更深处延展,其上发育多条收敛于拆离面的北倾文昌期生长断裂,构成现今看到的早期复式半地堑格局(图 2c)。两个由断至上地壳的北倾断裂控制的半地堑构成了早文昌期白云 3 洼的初始格局,伸展应变主要为地壳脆性变形,虽北侧半地堑因地壳差异隆升失去原始面貌,控洼断裂的壳内延展部分和地层的厚度一定程度上可以反映其初始形态;晚文昌期发生强烈的伸展拆离减薄作用,洼陷结构发生了很大的变化,伸展应变

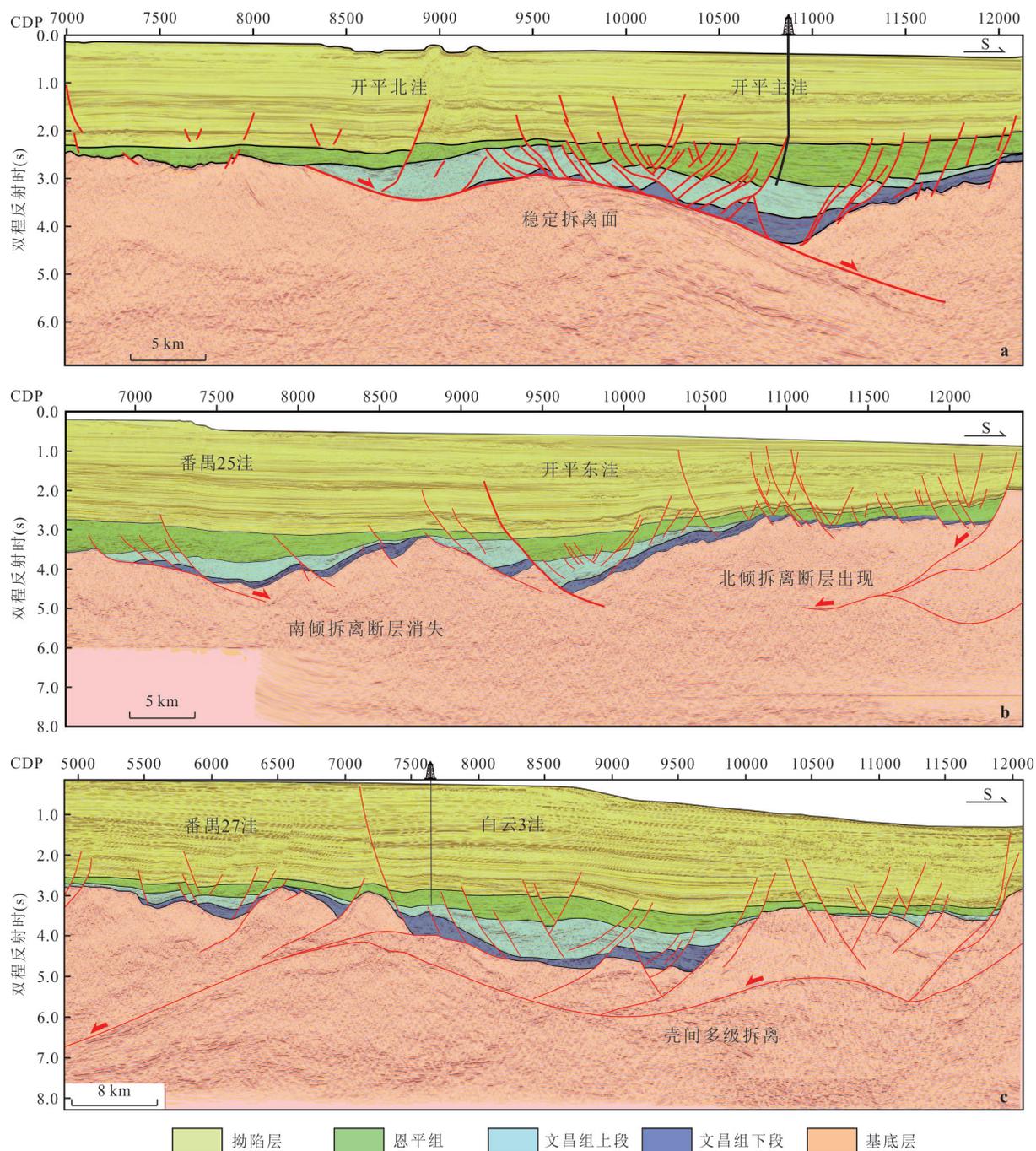


图 2 珠二坳陷中部“对向拆离型复合洼陷”三维地震剖面构造解释图

Fig.2 Structural interpretation diagram of 3D seismic profile of “opposite detachment type composite sag” in the middle of Zhu II depression

a. 开平凹陷南倾拆离体系; b. 番禺 25 洼南倾—北倾复合拆离体系; c. 白云 3 洼北倾拆离体系(剖面位置见图 1b)

主要为地壳韧性变形,北侧番禺低隆起基底块强烈翘倾、旋转,原始孤立半地堑结构转变为南倾的多级断坡结构,中部隆起带与南部控边断裂之间出现多条生长断裂,使白云 3 洼沉积中心由两侧向中心迁移;恩平期白云 3 洼在晚文昌洼陷结构的基础上持续外扩,地层整体结构呈碟形。

3 对向拆离型复合洼陷“三元”结构响应及其成因探讨

3.1 区域应力偏转与先存断裂体系差异活化的响应

前人在珠江口盆地珠一坳陷主要识别出 EW-

NWW 走向和 NE-NEE 走向的两组中生代先存断裂, 而先存断裂作为基底中的相对软弱面, 易于在后期应力场的影响下被激活, 成为断层穿过脆-韧转换面发生低角度化的媒介(叶青, 2019). 通过最新高分辨率三维地震资料, 在云开低凸起、番禺低隆起上分别可以识别出 NEE、EW-NWW 向两组先存断裂体系, 这两组断裂在新生代不同时期控制了盆地的形成及其内部发展(图 3a, 3b).

文昌期, 研究区主控活动断裂为 NEE-NE 向, 该方向的断裂在整个南海北部陆缘广泛发育, 响应于珠琼一幕运动作用下盆地的 NW-SE 向伸展, 是燕山期 NNE-NE 向逆冲断裂的继承与发展; 恩平期, 在珠琼二幕运动的作用下, 盆地伸展方向顺时针旋转至近 N-S 向, 主控断裂也随之转变为近 EW 向, EW-NWW 向晚中生代断裂选择性活化, 并在拗陷期应力持续顺时针偏转至 NNE-SSW 时进一步增强. 此外, 早晚文昌期间由脆性张裂向韧性拆离转变的机制和应力方向与 NEE 向先存断裂的正交程度有着很强的相关性. 前人对惠陆运动的研究中提出地壳伸展强度有限、薄化作用不明显、应变集中等成因与应力场和先存断裂之间夹角的变化相关(图 4).

3.2 中下地壳差异隆升与不整合面的响应

中地壳是由花岗岩、糜棱岩等长英质岩石组成, 岩石中的含水性一般较下地壳高, 而温压条件又较上地壳高, 岩层容易在岩浆侵入的作用下发生韧性变形, 形成韧性层(周永胜等, 2008; Mohn *et al.*, 2012; 张翠梅等, 2022). 盆地伸展的同时, 岩石圈的非均质性使得地壳深部的幔源物质集中在上地壳薄弱处上涌, 引起中下地壳的共轭变形、差异隆升, 这是地壳伸展和岩浆底侵共同作用的结果, 与区域应力的方向和强度直接关联.

在地震剖面上, 中下地壳韧性层常表现为强振幅、强连续性的特征, 与上地壳呈空白杂乱反射特征花岗岩基底之间存在较为明显的界线. 通过对研究区及周边中生代基底中韧性层顶界面的追索成图, 可在云开低凸起、番禺低隆起以及开平凹陷隆升带上发现明显高点(图 5, 图 6), 其中拆离层次较深、伸展系数较高的开平凹陷呈现较高的隆升强度, 达到与伸展拆离同期形成变质核杂岩的级别, 在凹陷呈近 EW 向分布; 在拆离层次较浅的白云西区, 中下地壳的高程点位于白云 3 洼的北部缓坡带处(Ye *et al.*, 2018).

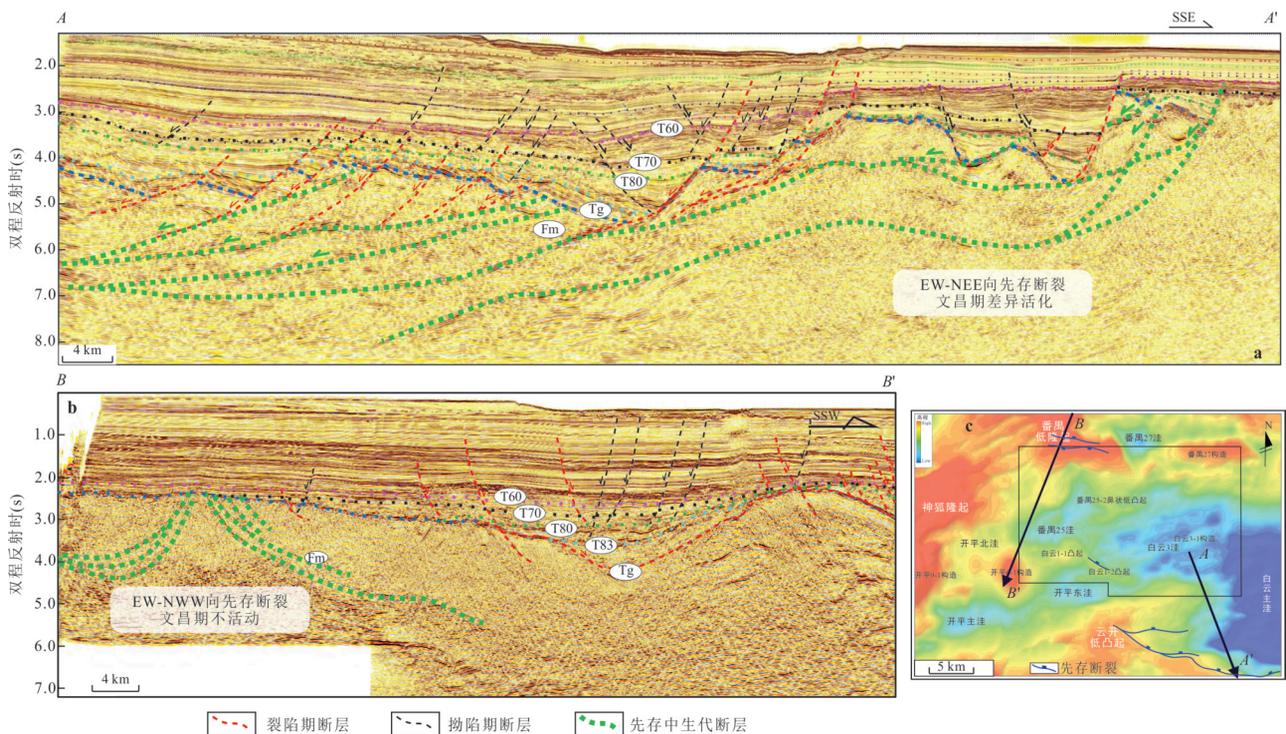


图 3 云开低凸起中生代基底 NEE 向先存断裂(a)、番禺低隆起中生代基底 EW-NWW 向先存断裂(b)以及珠二拗陷中部基底高程图(c)

Fig.3 NEE and EW-NWW preexisting faults of Mesozoic basement in Yunkai low uplift (a) and Panyu low uplift (b) and base-metamorphic elevation map in the middle of Zhu II depression (c)

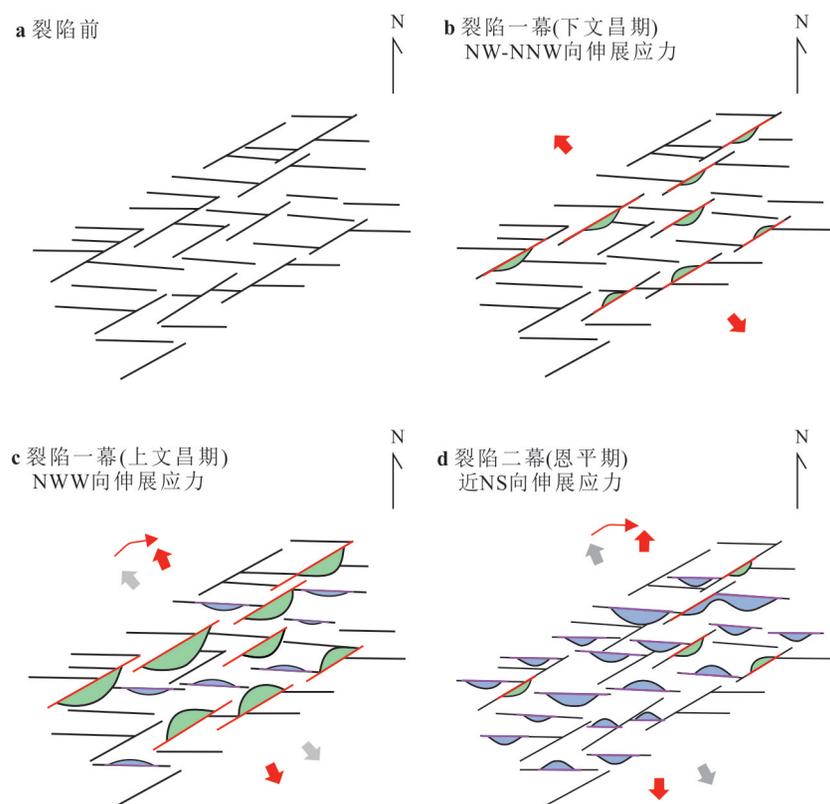


图4 珠二拗陷中部始新世先存断裂体系差异活化示意图(据叶青,2019修改)

Fig.4 The differential activation diagram of Eocene preexisting fault system in the middle of Zhu II depression (modified from Ye, 2019)

在近盆地伸展方向的剖面上,晚文昌期地壳的差异隆升集中在拆离断陷的翘倾端,上拱应力顺下一级拆离断层的下盘由深部向浅部传导,导致上部中生代基底和文昌组地层均出露水体遭受剥蚀,形成与隆升带在发育位置上响应良好的T80不整合面。在番禺低隆起上,上文昌发育较晚,T80界面的削截现象发育范围有限,更多表现为沉积体系转变后的超覆现象,隆升更多是对早文昌期半地堑次注的上拱改造和对上覆基底地块掀斜翘倾作用的叠加增强,以至于使白云3洼北部早文昌期活动的控洼断裂接近水平,形成响应隆升改造而发育的T83不整合面;云开低凸起文昌组上段较薄但持续发育,可以见到对应隆升改造结束的T80不整合面(图6a);开平凹陷的差异隆升作用强,在近东西向隆升带处的T80界面均可识别出大范围的不整合现象,反映开平凹陷晚文昌期在周缘中下地壳的强烈隆升下处于剥蚀供给量和隆升改造强度均较高的背景(图6b)。

3.3 伸展拆离背景下各时期的岩浆活动特征

南海北部陆缘属于岩浆活动较活跃的被动大陆边缘。通过珠二拗陷中部钻井资料以及三维地震

资料的精细解析,揭示出的始新世至渐新统之间多期次岩浆活动与对向拆离型复合洼陷关系密切。研究区见到的火成岩地震相主要可以归纳为以下几种:薄层状火山岩,在地震剖面上多表现为低频、连续、强振幅反射,多为顺层或穿层侵入的岩体;弧形薄层状火山岩,在剖面上表现为对称性较好的弧形低频、连续、强振幅反射,两端波阻分异清晰,常穿过或斜交与沉积地层,多反映溢流相玄武岩;厚层丘状火山岩,顶底界面呈低频、连续、强振幅反射,而内部为杂乱弱振幅反射,多反映火山口或火山边缘相(图7a)。

从岩浆作用的时空分布规律(图7b)上看:早文昌期研究区以上地壳张裂为主,地壳未发生大规模减薄,在番禺25洼和开平东洼的南倾控边断裂处随裂陷作用局部发育小规模侵入型岩浆作用,白云3洼内未见明显岩浆活动的迹象;晚文昌期拆离作用启动,断裂倾角显著减小,地壳强烈伸展减薄,岩浆作用显著增强,主要体现为研究区西侧幔源物质上涌引起的东西向分布韧性地壳隆升、番禺25-2构造转换带处沿断裂点状侵入以及白云3洼中部沿拆离断层NEE走向分布的片状侵入和点状喷出;恩平

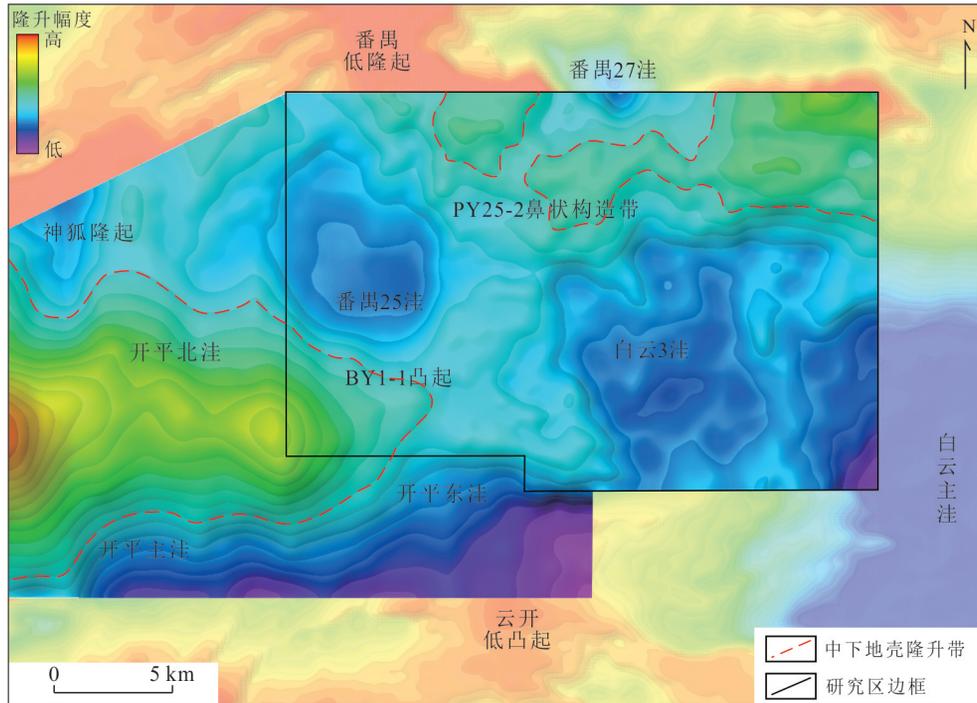


图 5 珠二坳陷中部基底韧性地壳顶界面 T0 图

Fig.5 T0 diagram of the top interface of the basement ductile crust in the middle of Zhu II depression

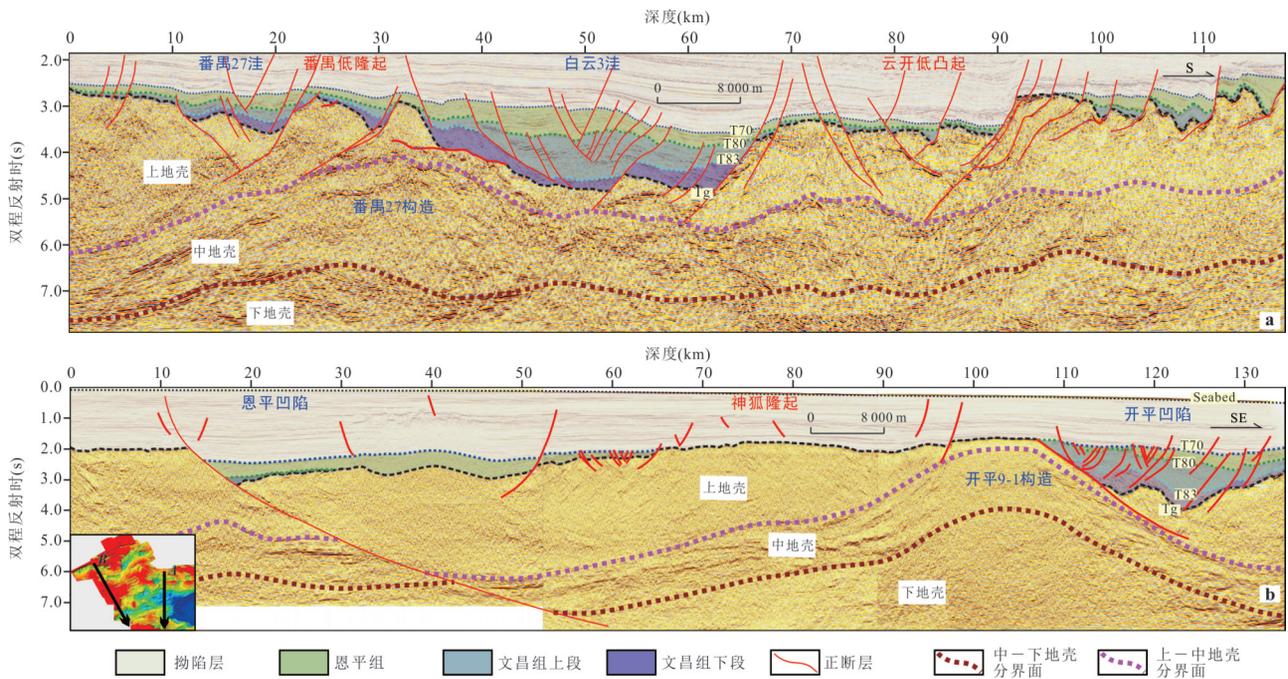


图 6 珠二坳陷中部中下地壳隆升剖面

Fig.6 Middle and lower crust uplift profile in the middle of Zhu II depression

a. 白云 3 洼北倾拆离体系; b. 开平凹陷南倾拆离体系

期使湖盆外扩的两大拆离体系的近端断阶带和远端缓坡带均有活跃的岩浆活动现象,平面上分布的规律性减弱,洼陷中心新生岩浆活动显著减少,以继承性点状侵入/喷出为主.

3.4 “三元”结构响应及成因探讨

通过对珠二坳陷中部始新世伸展拆离背景下各时期先存断裂体系的活化次序、韧性地壳的差异隆升以及岩浆活动特征这“三元”结构响应的系统

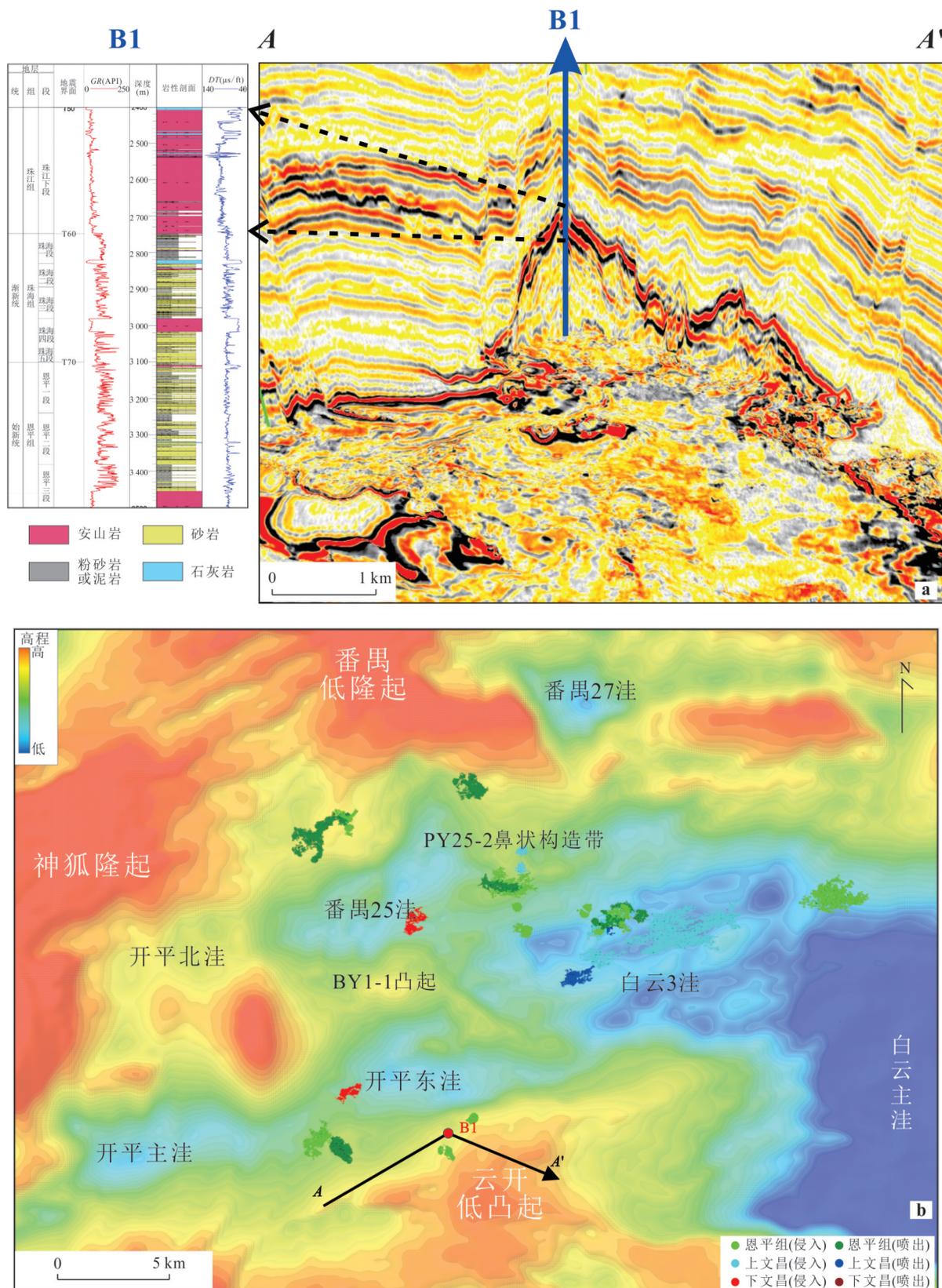


图7 珠二拗陷中部典型火成岩地震相剖面与钻井标定(a)以及始新世火山机构平面展布图(b)

Fig.7 Typical igneous seismic facies profile and drilling calibration(a) and planar layout of volcanic structures in in the middle of Zhu II depression in Eocene(b)

梳理和分析,可以认为其特殊结构的成因机制主要包括周缘板块运动时伸展应力方向的偏移、中生代基底先存构造格局以及岩石圈圈层流变性的差异等.

早文昌期处于断陷 I a 亚幕,对应珠琼一幕运动,主应力方向为 NW-SE 向,斜交于云开低凸起的中生代 NEE 向先存断裂,先存断裂活化程度也有限,大部分生长断裂以高角度正断层的形式仅延伸至上地壳,形成大量分散、以高角度断控为主(部分低角度断控)的半地堑或复式半地堑,湖盆窄深,沉积体楔形明显,以洼陷伸展方向短轴供给为主(图 8a). 该时期研究区处于纯剪切阶段,以上地壳张裂为主,地壳基本未减薄,应变分散,地壳抬升剥蚀强度低,随裂陷作用伴生小规模点状岩浆作用,几乎不参与控制和影响裂陷结构.

晚文昌期处于断陷 Ib 亚幕,对应惠州运动,主应力方向偏转至 NNW-SSE 向,与先存 NEE 向断裂正交,先存断裂大量活化,延伸至具塑性流变属性的中地壳,同时岩浆通过被活化的先存断裂大量侵入,导致下地壳韧性增强,中下地壳通过韧性隆

升这一形式填补上盘空间不断扩大导致的重力缺失. 此时湖盆因拆离作用由窄深向宽浅转化,局部水体较深,研究区开始显示短轴向长轴供给转变的特征(图 8b). 该时期断层倾角减小,垂向断距减小,而水平断距增大,应变集中明显,处于简单剪切阶段,中下地壳的隆升增强源区供给能力,具有明显的裂陷迁移或转换特征,且随拆离作用发育较大规模的面状岩浆作用,对裂陷结构具有显著的控制和影响.

恩平期处于断陷 II 幕,对应珠琼二幕运动,是裂陷期构造运动的继承和延续,应力方向持续顺时针偏转至 NS 向,与先存 NEE 向基底断裂和番禺低隆起上的 EW-NWW 向基底断裂均斜交,使得 EW-NWW 向断裂开始大量活化,可见新生断裂对文昌期断裂的切割,湖盆进一步外扩并变浅,白云主洼成为整个珠江口盆地的沉积中心,研究区物源体系由盆内供给向盆外供给转化,承担白云主洼西北侧主通道这一角色. 该时期拆离作用停止,新生的近 EW 向高角度断裂联合断陷 I 幕形成的断裂控制洼陷,地层发生区域性抬升,物源供给强,且伴有强烈

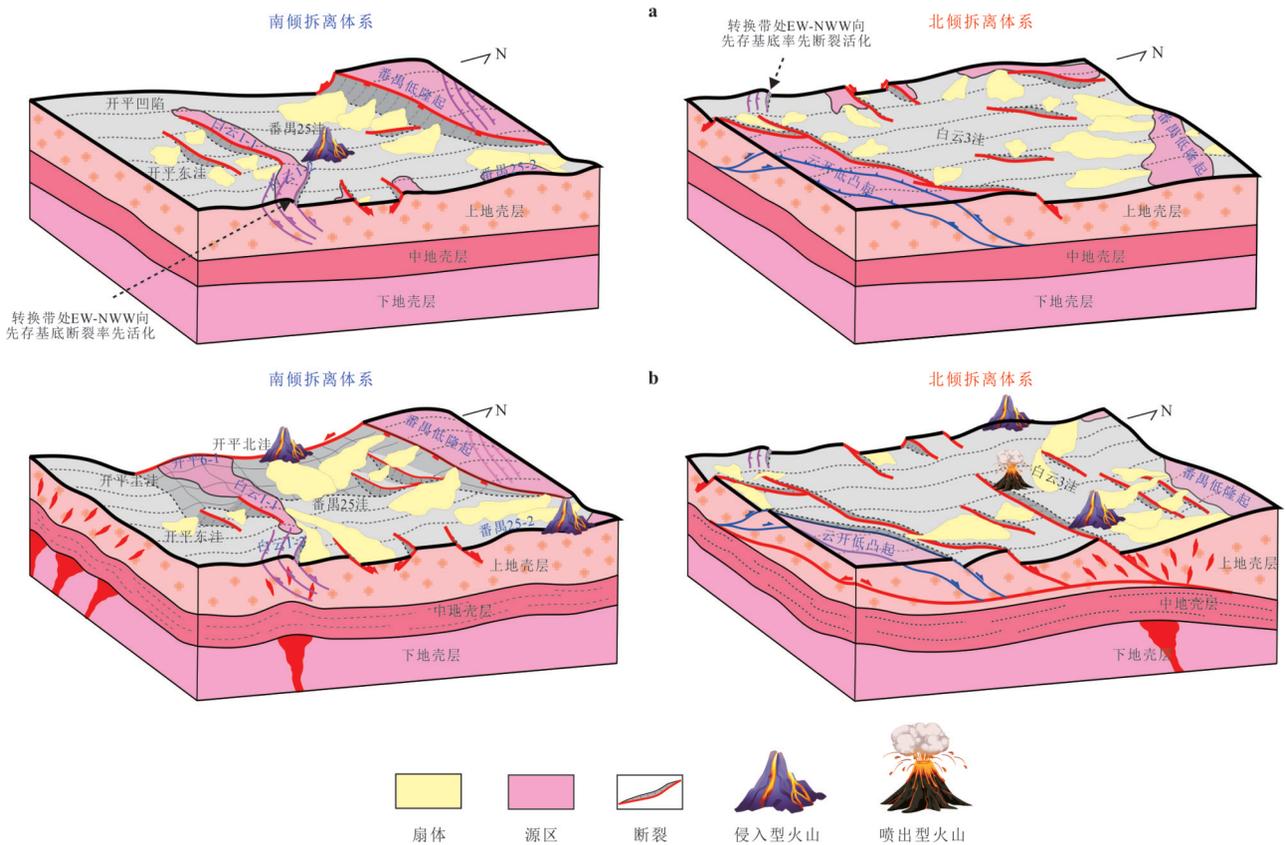


图 8 珠二拗陷中部始新世对向拆离作用演化模型

Fig.8 Evolution model of antidirectional detachment during Wenchang period in the middle of Zhu II depression in Eocene

a. 下文昌脆性张裂期; b. 上文昌韧性拆离期

洼内部的喷出型火山机构带出的火山灰可能促进藻类的勃发,且岩浆强烈活动区块下部的继承性岩浆灶可能在后续烃源岩热演化过程中对文昌期的烃源岩起到破坏或催熟作用(何文渊等,2023;刘琼颖和何丽娟,2023)。

5 结论

(1)研究区主体划分为番禺 25 洼、白云 3 洼以及洼间岩体构成的衔接带。其中位于西侧的番禺 25 洼可以归属为开平凹陷南倾拆离体系的东北段;位于东侧的白云 3 洼则归属为白云凹陷北倾拆离体系的西北侧侵没端;转换带处于南北两大拆离体系的交汇区,应力释放模式复杂。同时在伸展拆离的作用下中下地壳的隆升和火山活动均对凹陷结构有一定改造作用,在始新世多期构造运动的背景下形成了对向拆离型复合洼陷这一特殊结构。

(2)珠二坳陷中部对向拆离型复合洼陷面貌形成的主要因素包括伸展强度和幔源物质上涌两大方面。其中伸展强度具体包含伸展应力的大小、伸展应力与中生代先存断裂的正交程度以及岩石圈层流变性的差异,这也是不同层次拆离作用发生的主控因素;幔源物质上涌则是断裂作用、拆离作用发生时幔源物质因上部压力缺失“抽拉上返”,进而发生火山活动、中下地壳韧性隆升的主控因素。

(3)在均一张裂、韧性拆离、断—坳转换这 3 个阶段的演化中,研究区经历了复式半地堑结构控制的深湖—半深湖—扇三角洲沉积体系、对向拆离作用控制下短轴向长轴供给转换过程中的半深湖—滨浅湖—辫状河三角沉积体系以及古珠江水系介入形成的大型远源轴向三角洲—滨浅湖沉积体系。在此构造—沉积演化过程中,结合断块旋转、地壳隆升带来的物源供给强弱变化,可认为优质烃源层主要发育在早文昌断陷阶段的深湖—半深湖湖相地层、晚文昌拆离阶段中期物源供给较弱的欠补偿区域(动态源区剥蚀量减小、可容空间较大)以及在恩平期长轴三角洲覆盖前的空窗期局部发育的煤系地层中;优质储层主要发育在早文昌期陡坡带控制下的扇三角洲前端砂体、晚文昌期缓坡带湖架破折以下的辫状河三角洲前缘砂体以及转换带局部发育的滩砂、坝砂处。

References

Cai, G.F., Peng, G.R., Wu, J., et al., 2022. Sedimentary

Filling Response to Detachment Structural Deformation in Shallow-Water Continental Shelf of Pearl River Mouth Basin: A Case Study of Enping Sag. *Earth Science*, 47(7): 2391–2409(in Chinese with English abstract).

Cai, G.F., Zhang, X.T., Peng, G.R., et al., 2021. Neogene Volcanism and Tectonics along the Yangjiang-Yitong' ansha Fault Zone in the Northern South China Sea Margin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1): 40–52(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).

Deng, P., Mei, L.F., Du, J.Y., et al., 2020. Characteristics and Genetic Development of a Low-Angle Boundary Normal Fault in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin, China. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 606–616(in Chinese with English abstract).

Gao, Y.D., Zhang, X.T., Zhang, L.L., et al., 2022. Geological Characteristics and Tectonic Settings of Mesozoic Continental Margin Magmatic Arc in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2317–2327(in Chinese with English abstract).

Guo, W., Xu, G.Q., Liu, B.J., et al., 2022. Structure-Sedimentary Response Relationship of Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2433–2453(in Chinese with English abstract).

Hao, T.Y., Huang, S., Xu, Y., et al., 2008. Comprehensive Geophysical Research on the Deep Structure of Northeastern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(6): 1785–1796(in Chinese with English abstract).

He, W.Y., Liu, B., Zhang, J.Y., et al., 2023. Geological Characteristics and Key Scientific and Technological Problems of Gulong Shale Oil in Songliao Basin. *Earth Science*, 48(1): 49–62(in Chinese with English abstract).

Jing, S., 2016. Research on the Structural Feature during Rifting in the Western Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).

Li, H.B., Zheng, J.Y., Pang, X., et al., 2020. Structural Patterns and Controlling Factors of Differential Detachment in the Northern Continental Margin of the South China Sea: Taking Baiyun-Liwan Deep Water Area in the Pearl River Mouth Basin as an Example. *China Offshore Oil and Gas*, 32(4): 24–35(in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Li, J., 2018. The Research on Sedimentary System in the Wenchang and Enping Formation of Pearl River Mouth Basin Baiyun West Depression and Panyu 27 Sag (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, R. B., Shi, N., Chen, Z. M., et al., 2020. Characteristics and Genetic Analysis of the “Near Critical Fluids” of Oil 1 Reservoir in Western Baiyun Sag. *Journal of Guilin University of Technology*, 40(3): 494–499(in Chinese with English abstract).
- Liu, B.J., Pang, X., Wang, J.H., et al., 2019. Response Process of Sedimentary System under the Background of Crustal Thinning of Extended Continental Margin in Deep Water Area of Pearl River Mouth Basin and Its Significance for Oil and Gas Exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 40(S1): 124–138(in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.Y., He, L.J., 2023. Neoid Major Tectono-Thermal Events and Their Potential Impacts on Deep Geothermal Energy. *Earth Science*, 48(3): 835–856(in Chinese with English abstract).
- Ma, X.Q., Liu, J., Zhu, D.W., et al., 2021. Sedimentary Response of Multi-Stage Pull-apart Basin: Insights from the Pearl River Mouth Basin in the Northern South China Sea Margin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(1): 64–78(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).
- Mohn, G., Manatschal, G., Beltrando, M., et al., 2012. Necking of Continental Crust in Magma-Poor Rifted Margins: Evidence from the Fossil Alpine Tethys Margins. *Tectonics*, 31(1): TC1012. <https://doi.org/10.1029/2011TC002961>
- Morley, C. K., 2014. The Widespread Occurrence of Low-Angle Normal Faults in a Rift Setting: Review of Examples from Thailand, and Implications for Their Origin and Evolution. *Earth Science Reviews*, 133: 18–42. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.02.007>
- Pang, X., Chen, J., Dai, Y.D., et al., 1995. Study on Hydrocarbon Accumulation and Exploration Targets in West Baiyun-Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 7(4): 237–245(in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Ren, J.Y., Zheng, J.Y., et al., 2018. Petroleum Geology Controlled by Extensive Detachment Thinning of Continental Margin Crust: A Case Study of Baiyun Sag in the Deep-Water Area of Northern South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 27–39(in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Zheng, J.Y., Mei, L.F., et al., 2021. Characteristics and Origin of Continental Marginal Fault Depressions under the Background of Preexisting Subduction Continental Margin, Northern South China Sea, China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(5): 1069–1080(in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Zheng, J.Y., Ren, J.Y., et al., 2022. Structural Evolution and Magmatism of Fault Depression in Baiyun Sag, Northern Margin of South China Sea. *Earth Science*, 47(7): 2303–2316(in Chinese with English abstract).
- Parsons, T., Thompson, G. A., 1993. Does Magmatism Influence Low-Angle Normal Faulting? *Geology*, 21(3): 247. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)0210247:dmlan>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)0210247:dmlan>2.3.co;2)
- 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).
- Reid, I. D., 1994. Crustal Structure of a Nonvolcanic Rifted Margin East of Newfoundland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B8): 15161–15180. <https://doi.org/10.1029/94jb00935>
- Ren, J.Y., Pang, X., Lei, C., et al., 2015. 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. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 102–114(in Chinese with English abstract).
- Ren, J.Y., Pang, X., Yu, P., et al., 2018. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra-Deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(12): 4901–4920(in Chinese with English abstract).
- Shi, H. S., Du, J. Y., Mei, L. F., et al., 2020. Huizhou Movement and Its Significance in Pearl River Mouth Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 447–461(in Chinese with English abstract).
- Untermeier, P., Péron-Pinvidic, G., Manatschal, G., et al., 2010. Hyper-Extended Crust in the South Atlantic: In Search of a Model. *Petroleum Geoscience*, 16(3): 207–215. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-904>

- Wang, J., Luan, X.W., He, B.S., et al., 2021. Study on the Structural Characteristics and Dynamic Mechanism of Faults in the Kaiping Sag of Zhujiang River Mouth Basin. *Haiyang Xuebao*, 43(8): 41–53(in Chinese with English abstract).
- Whitney, D. L., Teyssier, C., Rey, P., et al., 2013. Continental and Oceanic Core Complexes. *Geological Society of America Bulletin*, 125(3/4): 273–298. <https://doi.org/10.1130/b30754.1>
- Wu, K.Q., Xie, X.J., Liao, J.H., et al., 2023. The Rules of Reservoir Characteristics and Dissolution of Paleogene Clastic Rocks in Offshore China. *Earth Science*, 48(2): 385–397(in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., 2019. The Late Mesozoic Structure Systems in the Northern South China Sea Margin: Geodynamics and Their Influence on the Cenozoic Structures in the Pearl River Mouth Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Mei, L. F., Jiang, D. P., et al., 2022. 3-D Structure and Development of a Metamorphic Core Complex in the Northern South China Sea Rifted Margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2): e2021JB022595. <https://doi.org/10.1029/2021jb022595>
- Ye, Q., Mei, L. F., Shi, H. S., et al., 2018. 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. *Tectonophysics*, 731: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.03.003>
- Zhang, C.M., Sun, Z., Zhao, M.H., et al., 2022. Crustal Structure and Tectono-Magmatic Evolution of Northern South China Sea. *Earth Science*, 47(7): 2337–2353(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, Z. H., 2017. Study on Characteristics of Hydrocarbon Conduit System in the West of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing(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).
- Zheng, J.Y., Gao, Y.D., Zhang, X.T., et al., 2022. Tectonic Evolution Cycles and Cenozoic Sedimentary Environment Changes in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7): 2374–2390(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.S., He, C.R., Yang, X.S., 2008. Water and Deformation Mechanism in Ductile Shear Zone of Middle Crust. *Science in China (Series D)*, 38(7): 819–832(in Chinese).
- Zhou, Z. C., Mei, L. F., Liu, J., et al., 2018. Continentward-Dipping Detachment Fault System and Asymmetric Rift Structure of the Baiyun Sag, Northern South China Sea. *Tectonophysics*, 726: 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.02.002>

中文参考文献

- 蔡国富, 彭光荣, 吴静, 等, 2022. 珠江口盆地浅水陆架区拆离断陷的构造变形与沉积充填响应: 以恩平凹陷为例. *地球科学*, 47(7): 2391–2409.
- 蔡国富, 张向涛, 彭光荣, 等, 2021. 南海北部阳江—统暗沙断裂带与新近纪岩浆活动. *大地构造与成矿学*, 45(1): 40–52.
- 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.
- 邓棚, 梅廉夫, 杜家元, 等, 2020. 珠江口盆地西江主洼低角度边界正断层特征及成因演化. *石油与天然气地质*, 41(3): 606–616.
- 高阳东, 张向涛, 张丽丽, 等, 2022. 珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景. *地球科学*, 47(7): 2317–2327.
- 郭伟, 徐国强, 柳保军, 等, 2022. 珠江口盆地白云凹陷文昌组构造—沉积响应关系. *地球科学*, 47(7): 2433–2453.
- 郝天珧, 黄松, 徐亚, 等, 2008. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. *地球物理学报*, 51(6): 1785–1796.
- 何文渊, 柳波, 张金友, 等, 2023. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索. *地球科学*, 48(1): 49–62.
- 敬嵩, 2016. 珠江口盆地白云西凹裂谷期构造特征研究(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学(北京).
- 李洪博, 郑金云, 庞雄, 等, 2020. 南海北部陆缘差异拆离作用结构样式与控制因素: 以珠江口盆地白云—荔湾深水区为例. *中国海上油气*, 32(4): 24–35.
- 李骥, 2018. 珠江口盆地白云西凹与番禺 27 洼文昌及恩平组沉积体系研究(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学(北京).
- 李瑞彪, 石宁, 陈兆明, 等, 2020. 白云西洼油藏的“近临界流体”特征及成因分析. *桂林理工大学学报*, 40(3): 494–499.

- 柳保军, 庞雄, 王家豪, 等, 2019. 珠江口盆地深水区伸展陆缘地壳减薄背景下的沉积体系响应过程及油气勘探意义. 石油学报, 40(S1): 124—138.
- 刘琼颖, 何丽娟, 2023. 挽近重大构造—热事件及其对深层地热能的潜在影响. 地球科学, 48(3): 835—856.
- 马晓倩, 刘军, 朱定伟, 等, 2021. 多期走滑拉分盆地的沉积响应: 以南海北部珠江口盆地为例. 大地构造与成矿学, 45(1): 64—78.
- 毛云华, 赵中贤, 孙珍, 2020. 珠江口盆地西部陆缘伸展—减薄机制. 地球科学, 45(5): 1622—1635.
- 庞雄, 陈隽, 戴一丁, 等, 1995. 珠江口盆地白云西—开平凹陷油气聚集及勘探目标研究. 中国海上油气地质, 7(4): 237—245.
- 庞雄, 任建业, 郑金云, 等, 2018. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征: 以南海北部陆缘深水白云西—开平凹陷为例. 石油勘探与开发, 45(1): 27—39.
- 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等, 2021. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因. 石油勘探与开发, 48(5): 1069—1080.
- 庞雄, 郑金云, 任建业, 等, 2022. 南海北部陆缘超伸展区白云西—开平凹陷结构演化与岩浆作用. 地球科学, 47(7): 2303—2316.
- 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.
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等, 2015. 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. 地学前缘, 22(1): 102—114.
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等, 2018. 南海北部陆缘深水—超深水盆地成因机制分析. 地球物理学报, 61(12): 4901—4920.
- 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等, 2020. 珠江口盆地惠州运动及其意义. 石油勘探与开发, 47(3): 447—461.
- 王嘉, 栾锡武, 何兵寿, 等, 2021. 珠江口盆地开平凹陷断裂构造特征与动力学机制探讨. 海洋学报, 43(8): 41—53.
- 吴克强, 谢晓军, 廖计华, 等, 2023. 中国近海古近纪碎屑岩储层特征与溶蚀作用规律. 地球科学, 48(2): 385—397.
- 叶青, 2019. 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(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张翠梅, 孙珍, 赵明辉, 等, 2022. 南海北部陆缘结构及构造—岩浆演化. 地球科学, 47(7): 2337—2353.
- 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.
- 张智辉, 2017. 珠江口盆地白云西洼油气输导体系特征研究(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学.
- 郑金云, 高阳东, 张向涛, 等, 2022. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁. 地球科学, 47(7): 2374—2390.
- 周永胜, 何昌荣, 杨晓松, 2008. 中地壳韧性剪切带中的水与变形机制. 中国科学(D辑), 38(7): 819—832.