



珠江口盆地陆丰凹陷西北洼原型盆地及迁移演化特征

钟 锴, 肖张波, 朱伟林, 黄 鑫, 边利豪, 吴琼玲, 冯凯龙

Tectonic migration of prototype basins in Northwest Sub-sag of Lufeng Sag, the Pearl River Mouth Basin

ZHONG Kai, XIAO Zhangbo, ZHU Weilin, HUANG Xin, BIAN Lihao, WU Qiongleng, and FENG Kailong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024040203>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地陆丰凹陷南部古近系断裂发育特征与油气成藏

Fault characteristics and hydrocarbon accumulation in the southern Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 132-143

珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析

Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 106-118

珠江口盆地边缘洼陷油气勘探潜力

Exploration potential of marginal sags in the Pearl River Mouth Basin: An example from the Xijiang 36 Sag

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 146-158

断陷盆地边缘洼陷优质烃源岩形成机制—以珠江口盆地惠州26洼东北次洼为例

Formation mechanism of high quality source rocks in the depression of faulted basin margin: A case study of Huizhou 26 northeast subsag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 140-148

珠江口盆地白云凹陷始新世—中新世沉积物物源研究

Provenance of the Eocene-Miocene sediments in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 19-28

珠江口盆地西江凹陷南部文昌组层序地层及沉积体系研究

Study on sequence stratigraphy and sedimentary systems of the Wenchang Formation in the southern Xijiang depression of the Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 146-158



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

钟锺, 肖张波, 朱伟林, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷西北洼原型盆地及迁移演化特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(1): 168-177.
ZHONG Kai, XIAO Zhangbo, ZHU Weilin, et al. Tectonic migration of prototype basins in Northwest Sub-sag of Lufeng Sag, the Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(1): 168-177.

珠江口盆地陆丰凹陷西北洼原型盆地及迁移演化特征

钟锺^{1,2}, 肖张波^{3,4}, 朱伟林^{1,2}, 黄鑫^{3,4}, 边利豪^{1,2}, 吴琼玲^{3,4}, 冯凯龙^{1,2,5}

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
2. 同济大学海洋资源研究中心, 上海 200092
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000
4. 中海石油深海开发公司, 深圳 518000
5. 广东海洋大学船舶与海洋工程系, 湛江 524005

摘要: 陆丰凹陷西北洼是发育在珠一坳陷惠陆低凸起上的古近系残留型洼陷, 总体表现为古近系“北断南削”型箕状半地堑和新近系坳陷型洼陷的双层结构特征, 具有较好的油气勘探潜力。基于对研究区高精度三维地震的精细解释、平衡剖面恢复、洼陷结构和构造演化分析, 揭示了研究区西段、中段和东段在原型盆地及其动力学机制、洼陷结构和构造演化、岩浆底侵期次及强度等方面存在显著的分段差异性, 并表现出由东向西的迁移性演化特征。由东到西, 洼陷变形机制由脆-韧性变形转变为脆性变形, 洼陷伸展量、伸展率逐渐变大; 岩浆底侵作用总体上东强西弱, 强烈底侵期东早西晚; 控洼断裂的滑脱作用东强西弱, 滑脱时期东早西晚; 早断陷期下段沉积厚度总体上东厚西薄, 晚断陷期恩下段西厚东薄; 古近系地层翘倾、剥蚀作用总体上东强西弱, 时间上东早西晚。结合研究区地温梯度及岩浆底侵作用的横向差异, 提出了热机制是西北洼成盆机制及分段差异演化的主控因素, 并导致了西北洼从东到西、由早到晚的迁移性演化特征。西北洼迁移性演化特征的新认识将对其石油地质条件分段差异性的深入研究及推动勘探进程提供科学指导。

关键词: 残留型洼陷; 原型盆地; 洼陷演化; 岩浆底侵; 热机制; 陆丰凹陷西北洼

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024040203

Tectonic migration of prototype basins in Northwest Sub-sag of Lufeng Sag, the Pearl River Mouth Basin

ZHONG Kai^{1,2}, XIAO Zhangbo^{3,4}, ZHU Weilin^{1,2}, HUANG Xin^{3,4}, BIAN Lihao^{1,2}, WU Qiongling^{3,4}, FENG Kailong^{1,2,5}

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Center for Marine Resources, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. Shenzhen Branch of CNOOC(China) Ltd., Shenzhen 518000, China
4. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518000, China
5. Naval Architecture and Shipping College of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524005, China

Abstract: The Northwest Sub-sag is adjacent to the main oil and gas production area of the Lufeng Sag in Pearl River Mouth (Zhujiangkou) basin. It is a Paleogene residual sag developed on the Huilu Low Uplift and characterized by the double-layered structure of the Paleogene half graben and the Neogene depression, with good oil and gas exploration potential. Based on the detailed interpretation of 3D seismic data, the restoration of balanced profiles, and the analysis on the sub-sag structure and evolution, significant segmented differences were revealed in the western, middle, and eastern segments in terms of prototype basin type, deformation mechanism, magma underplating stage and intensity, structural and sedimentary evolution, and stratigraphic development and occurrence. Results reveal obvious tectonic migration from east to west. The amount and rate of the extension or depression increased from west to east and transformed from brittle deformation to ductile deformation. The magma underplating is stronger and earlier in the east than in the west. The detachment effect of the depression-controlling fault is stronger in the east and weaker in the west, and the detachment period is earlier in the east and later in the west. The sedimentary thickness of the Lower Member of the Wenchang Formation (Eocene) is in overall thicker in the east than in the west, while that of the Lower Member of the Enping

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“南亚-东南亚特提斯演化的油气资源效应”(92055203); 中海油深圳分公司科研项目(CCL2023SZPS0055)

作者简介: 钟锺(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事石油地质与海洋油气勘探研究, E-mail: zhongkai@tongji.edu.cn

通讯作者: 朱伟林(1956—), 男, 特聘教授, 主要从事海洋油气勘探研究和管理, E-mail: zhuwl@tongji.edu.cn

收稿日期: 2024-04-02; 改回日期: 2024-05-05. 周立君编辑

Formation (Oligocene) is thicker in the west than in the east. During the rifting period, the strata tilting and erosion are weaker in the west than in the east, and the timing is earlier in the east than in the west. Based on the horizontal differences in geothermal gradients and magmatic underplating in the study area, we believe that the thermal mechanism was the main factor on the basin formation and the segmented differential evolution of the Northwest Sub-sag, leading to the migratory evolution characteristics of the Northwest Sub-sag from east to west and from early to late. This understanding shall have important guiding significance for the in-depth study of the segmented differences in petroleum geological conditions in the Northwest Sub-sag and for the promotion of oil and gas exploration.

Key words: residual sag; prototype basin; migration evolution; magma underplating; thermal mechanism; Northwest Sub-sag of Lufeng Sag

陆丰凹陷西北洼(以下简称为西北洼)位于珠江口盆地珠一坳陷的惠州凹陷和陆丰凹陷 13 洼之间,总体发育在 NW 向的惠陆低凸起上(图 1),水深约 100~120 m,面积约 210 km²。西北洼毗邻的惠州凹陷和陆丰 13 洼均为珠一坳陷的富生烃凹/洼陷及油气主产区^[1-8],但由于其发育在低凸起区,为珠一坳陷典型的古近系残留型洼陷之一,长期以来勘探和研究程度相对较低^[9]。鉴于珠一坳陷的隆/凸起及低凸起区的部分残留洼陷近年来陆续获得油气勘探的商业性突破^[10-14],因此,有必要重新认识西北洼的基本石油地质条件和油气勘探潜力。

西北洼及邻区已被 2014 年采集的高精度三维地震全覆盖,且地震资料信噪比高,分辨率较好(频带宽度 8~48 Hz,主频 26 Hz)。此外,西北洼周边已钻探井 4 口(图 1),其中洼陷西北缘 1 口、西南侧斜坡带 1 口,东侧与陆丰 13 西洼相隔的洼中隆 2 口,均获油气显示,初步揭示了较好的油气勘探前景。前人研究^[9]也基于西北洼的洼陷结构和演化特征,通过烃源研究和盆地模型预测其油气资源量约 1.21 亿方油当量,为潜在的富生烃洼陷。

然而,西北洼的 NW 走向与相邻凹陷 NE-NEE

走向迥异,加上位于 NW 向的惠陆断裂带和 NE 向的盆地基底断裂带的交汇部位,岩浆底侵和改造作用可能较强(图 2),因而洼陷形成和演化的动力学机制更为复杂。此外,西北洼的洼陷结构及其演化也表现出了显著的东、西横向差异性。因此,进一步厘定西北洼各段的原型盆地类型与变形机制、洼陷样式与构造-沉积演化的横向差异性以及岩浆底侵期次与强度等基础地质问题,对科学认识其基础石油地质条件并推动其油气勘探进程均具有重要的指导意义。

1 区域地质背景

惠陆低凸起是珠江口盆地珠一坳陷的 NW 向正向构造单元,分隔了陆丰凹陷和惠州凹陷(图 1);其下伏的惠陆断裂带是盆地的 NW 向前新生代基底断裂带,在区域地球物理场上特征显著:区域航磁异常表现为 NW 向串珠状高磁异常带^[15],布格重力异常表现为 NW 向的异常梯度带,综合研判该断裂带应为一条区域性的深大断裂。航磁异常上的串珠状高磁异常带应为沿着深大断裂侵入的高磁

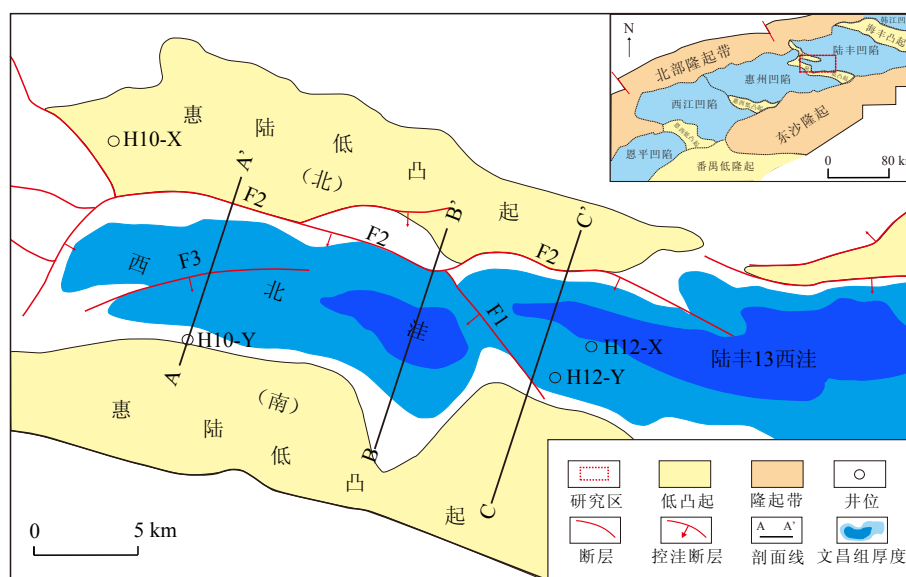


图 1 珠江口盆地陆丰凹陷西北洼构造纲要图

Fig.1 The structural outline of the Northwest Sub-sag in the Lufeng Sag of Pearl River Mouth Basin

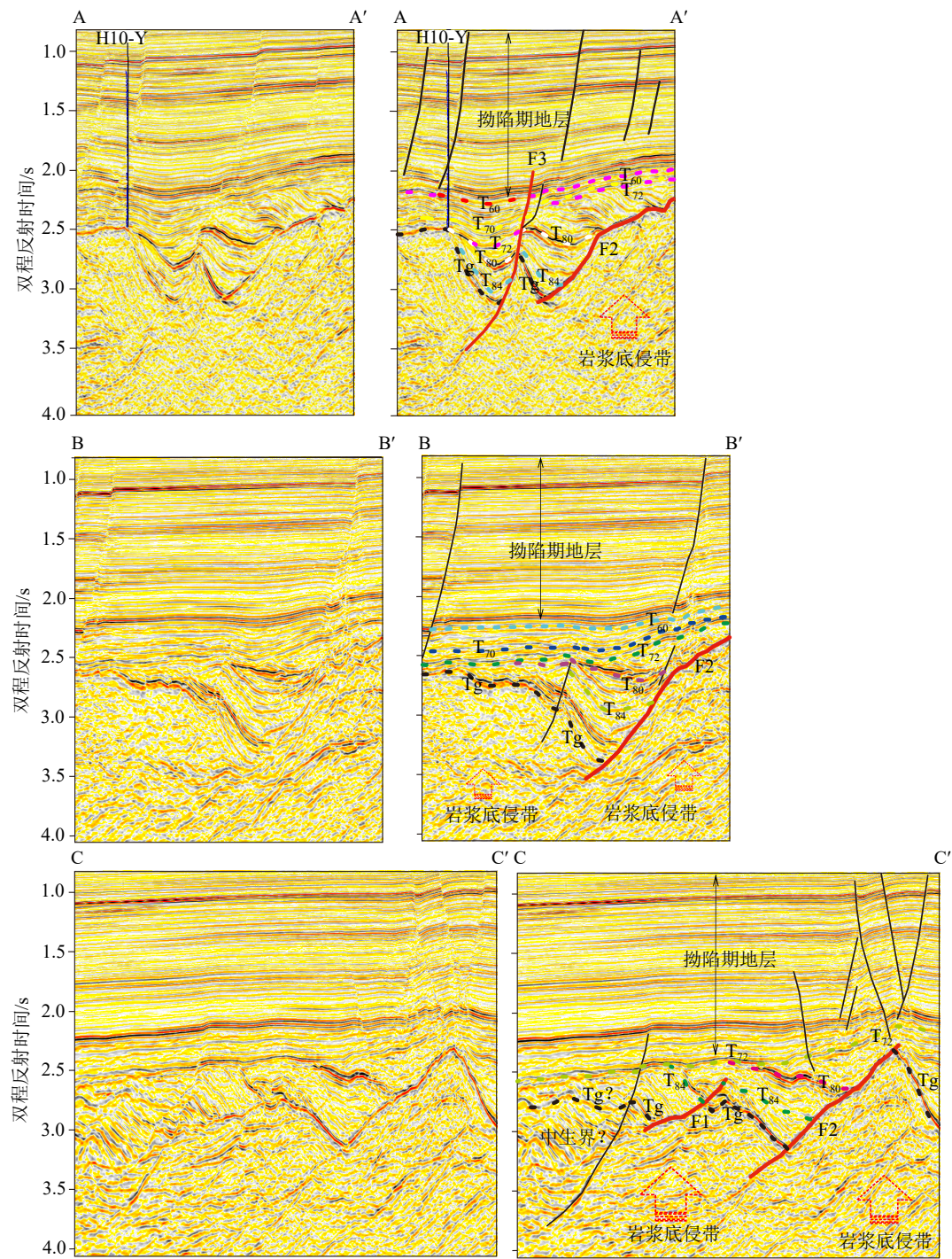


图 2 西北洼典型地震剖面

西段: A-A', 中段: B-B', 东段 C-C', 测线位置见图 1。

Fig.2 Typical seismic profile of the Northwest Sub-sag

The western segment: A-A', middle section: B-B', the eastern segment: C-C'; see locations of survey lines in Fig. 1.

性火成岩体(对应地震剖面中基底内部异常反射界面、内部杂乱的高速高密度异常体)所致(图 2)。

西北洼的形成和演化受控于珠江口盆地晚中生代以来的多期次区域性构造事件,主要包括珠琼运动一幕早期、晚期和珠琼运动二幕,分别对应早断陷期、间歇期和晚断陷期 3 个演化阶段,相应沉

积了(从下至上)断陷期文昌组下段(以下称为“文下段”)、文昌组上段(以下称为“文上段”)和恩平组下段(以下称为“恩下段”),其中文下段包含文昌组五段+六段(以下简称为“文五+文六段”)和文昌组四段(以下称为“文四段”)两套地层。其中珠琼运动一幕晚期在研究区被称为惠州运动,表现为区

域性的整体抬升,因而文上段地层普遍缺失。珠江运动二幕结束后,西北洼进入了断拗转换期至拗陷期,相应沉积了恩平组上段(以下称为“恩上段”)地层、珠海组及上覆新近系(表 1,图 2)。

需要指出的是,由于西北洼所在的惠陆低凸起位于 NW 向的惠陆断裂带以西,是区域构造事件中的构造薄弱带,岩浆底侵作用更为广泛而强烈,尤其是西北洼的东部(图 2)。

上述区域性构造事件在全区可追踪识别的相应地震反射界面为 T_g、T₈₃、T₈₀、T₇₂、T₇₀ 等区域性不整合面^[16],其中 T₇₂ 为西北洼的断拗转换面;T₇₂—T₇₀ 界面的恩平组上段地层为断拗转换期沉积;至 T₇₀—T₆₀ 界面之上,西北洼和整个盆地一起进入了拗陷阶段(表 1,图 2)。

2 洼陷结构与原型盆地分析

2.1 洼陷结构特征

西北洼的洼陷结构特征总体表现为古近系复

式半地堑和新近系拗陷型洼陷的双层结构(图 2)。其中古近系洼陷为 NWW 至近 EW 向展布“北断南削”型复式半地堑,其西段和东段为受控两条控洼断裂前后串联的北断南超半地堑组成,中段为单条控洼断裂控制的北断南超半地堑(图 2);新近系洼陷为典型的拗陷型沉积,西北洼和邻区一起接受了珠一拗陷的区域性整体热沉降。本文主要讨论古近系洼陷的结构和演化特征。

西北洼三幕裂陷作用表现为强—弱—强的阶段性演化差异。其中早断陷期沉积了较厚的文下段地层;至间歇期,惠陆运动导致了研究区的整体抬升,湖盆进入萎缩期,文上段沉积基本缺失;至晚断陷期,控洼断裂再次活化,湖盆强烈扩张,沉积了恩下段地层;T₇₂ 界面之上,为断拗转换期至拗陷期沉积(图 2)。

2.2 原型盆地分析

原型盆地指在相对单一的地球动力学系统或单旋回构造演化阶段所形成的具有特定沉积实体的盆地。由于研究区的盆地原型经历了多期构造

表 1 西北洼构造演化阶段和地层发育简表
Table 1 Structural and stratigraphic evolution stages in the Northwest Sub-sag

地层系统			年龄 /Ma	地震 界面	构造 运动	构造 阶段划分	区域构造 应力方向
系	统	组					
古 近 系	渐 新 统	珠海组	33.9	T ₇₀	南海运动	拗陷期	
		恩平组上段				断—拗转换期	
		恩平组下段	?	T ₇₂		晚断陷期	
	始 新 统	上段	38.0	T ₈₀	珠江运动二幕	间歇期	
		下段	43.0	T ₈₃	珠江运动一、二幕晚期/惠州运动	早断陷期	
		文昌组下段		T ₈₄			
前古近系	文五段 + 文六段		49.0	T _g	珠江运动一、二幕早期		

事件、特别是岩浆底侵作用的影响和改造,恢复各期原型盆地,对理清其后续构造、沉积演化及科学认识石油地质条件等均具有重要意义。

西北洼裂陷期原型盆地总体为 NWW 走向、北断南超的箕状半地堑。通过选取西北洼西段、中段和东段的三条典型地震剖面(图 1、图 2)以及平衡剖面的恢复(图 3),可以发现西北洼的古近系原型盆地存在一定横向差异(图 2、图 3)。其中,洼陷西段原型盆地为两条控洼断裂控制下的两排北断南超箕状半地堑串联而成(图 2 中 A-A'剖面),中段则为单条断裂控制的半地堑(图 2 中 B-B'剖面),到东段恢复为两条控洼断裂控制下的两排北断南超箕状半地堑(图 2 中 C-C'剖面)。总体上,西北洼属于珠江口盆地陆架区典型箕状半地堑群的一部分,具有脆性变形为主的特征。

需要指出的是,随着珠江一幕早期(文四段沉积期)区域构造应力方向的顺时针旋转,西北洼受到了沿惠陆断裂带的岩浆底侵作用(主要在洼陷东段),控洼断裂产状相应变缓,基底以深断裂部分沿着岩浆底侵薄弱带发生向南的滑脱作用,导致文四

段沉积范围变大,湖盆扩张,同时洼陷南侧的文四段地层发生轻微的抬升剥蚀作用(图 2、图 3)。

至珠江一幕晚期(惠陆运动),惠陆断裂带发生了强烈的岩浆底侵作用,西北洼随着惠陆低凸起整体抬升;控洼断裂的下盘因岩浆强烈底侵作用而导致洼陷北侧低凸起区产生局部差异性抬升,控洼断裂上盘的地块产生顺时针旋转,南侧缓坡带沉积的文下段地层和同期沉积的文上段地层相应发生掀斜翘倾,接受了较为强烈而广泛的抬升和剥蚀,导致了文上段沉积普遍缺失(图 2、图 3)。

珠江二幕(恩下段沉积期),随着区域构造应力场的进一步顺时针旋转,西北洼及其南、北两侧均发生了广泛而强烈的岩浆底侵作用,控洼断裂向深部继续滑脱(图 2、图 3)。之后,西北洼开始进入了断拗转换阶段,至新近纪开始随着珠一坳陷一起进入了拗陷阶段。

3 西北洼构造演化的横向差异性

裂陷盆地的形成和演化受到区域构造应力、先

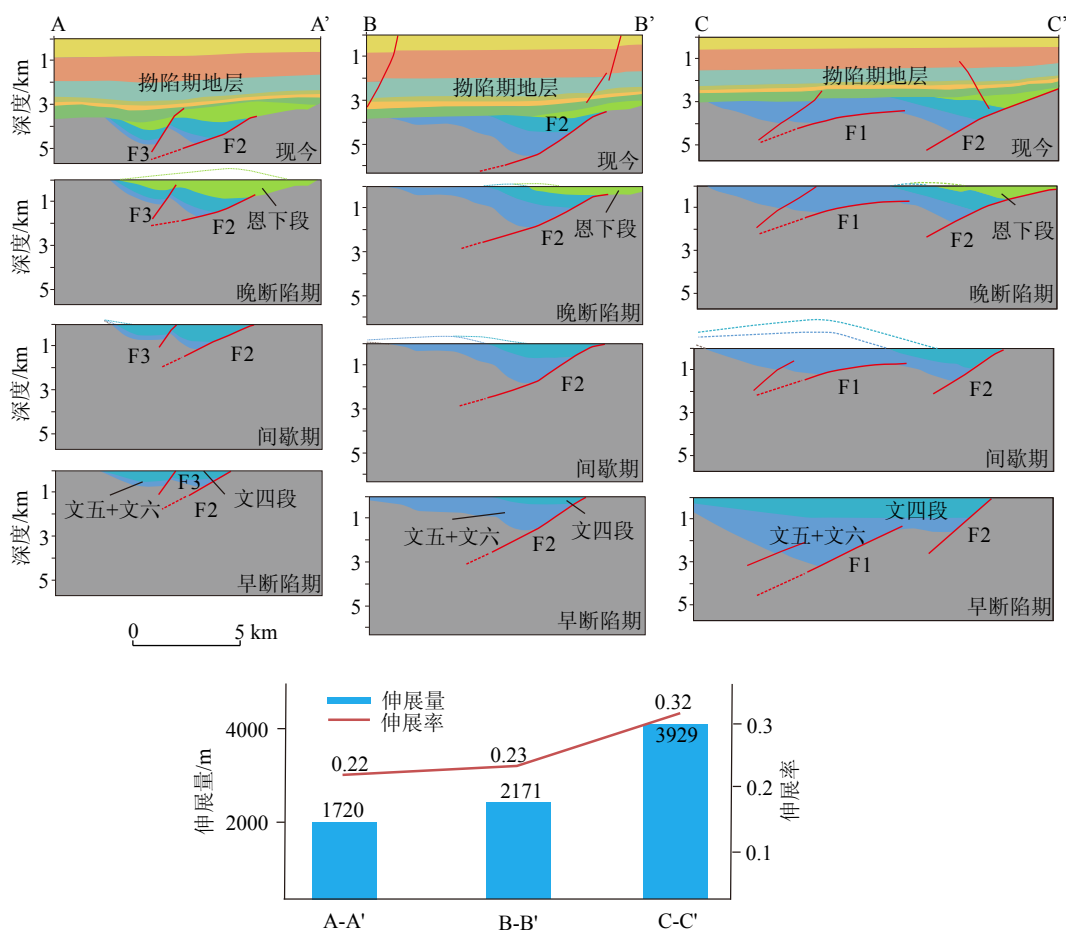


图 3 西北洼各段构造演化剖面 and 伸展率、伸展量统计

Fig.3 The structural evolution profiles, and the rate / amount of extension of each segment in the Northwest Sub-sag

存构造和岩石圈热-流变结构的共同控制;其中区域构造应力是裂隙变形产生的力源,先存构造决定了应力和应变的分配,而岩石圈的热-流变结构决定了最终的变形机制和方式。

前人对珠江口盆地大陆边缘裂隙变形机制进行了大量的研究^[17-19]。其中,陆架区裂隙发育在陆壳上,以脆性变形为主,裂隙样式多为经典的箕状半地堑或地堑;而陆坡区裂隙发育在洋-陆过渡壳上,受地壳厚度减薄及其热机制以及广泛的岩浆底侵作用,以韧性变形为主,裂隙样式多为拆离型的宽广拗陷。

需要强调的是,西北洼发育在珠一坳陷NW向的惠陆低凸起上,位于珠一坳陷的区域性深大断裂带,成为晚中生代—新生代多期区域性构造事件的相对构造薄弱带,岩浆沿深大断裂的底侵作用频繁,在中、上地壳相应发育了局部侵入体和熔融层,对古近系箕状半地堑的原型盆地产生了深刻的改造作用,包括变形机制由脆性向韧性转换、基底控注断裂的深部滑脱作用及其导致的下盘地块局部抬升、上盘地块的翘倾掀斜及剥蚀或褶皱变形等。

由于受到主要控注断裂几何学、运动学的横向差异控制以及后期岩浆底侵作用的差异性改造,西北洼古近系复式箕状洼陷表现出明显的东段、中段和西段的分段差异演化特征(图2、图3)。

3.1 西北洼西段洼陷结构和演化特征

西北洼西段古近系原型盆地为典型的北断南超复式箕状半地堑,由两条控注断裂F2(北)和F3(南)分别控制的两个半地堑串联组成,在裂隙一幕晚期和珠琼运动二幕中期均受到岩浆底侵作用而发生不同程度的改造,洼陷伸展量和伸展率均相对不大,临近探井的地温梯度为30℃/km,总体表现为珠江口盆地陆架区典型的脆性变形特征(图2、图3)。

(1) 珠琼运动一幕早期(早文昌期)

珠琼运动一幕早期,F2和F3两条控注断裂产状平直且较陡,分别控制了南、北两个半地堑文五、文六段的沉积,奠定了该期洼陷和湖盆发育的雏形;至晚期,受到洼陷深部岩浆弱底侵作用,F2断裂深部产状趋缓,南部半地堑的文四段地层发生抬升并接受轻微剥蚀。

(2) 珠琼运动一幕晚期(晚文昌期)

晚文昌期,受区域应力场调整的影响,惠陆低凸起发生了整体抬升,西北洼整体进入了湖盆萎缩期,文上段一方面沉积厚度普遍较薄,另一方面受

到后期翘倾抬升的剥蚀作用较强而普遍缺失。

(3) 珠琼运动二幕(早恩平期)

珠琼运动二幕早期,北部半地堑控注断裂F2再次活化且表现为向深部的明显滑脱作用,导致该期湖盆范围迅速扩大,F3活动性相对较弱,对恩下段地层的控制作用不明显,西北洼恩下段地层呈现明显的北厚南薄的箕状形态。

珠琼运动二幕中期,洼陷北侧F2下盘-北凸起区有强烈的岩浆底侵作用,北部半地堑恩下段地层发生了整体较为强烈的掀斜和斜坡带南侧地层的抬升,恩下段地层发生明显的褶皱和抬升,普遍接受了明显的大角度强烈剥蚀作用。

珠琼运动二幕晚期,随着F3断裂活动性的增强,南部半地堑成为恩下段沉积中心,并最终导致了恩下段残留地层呈现出南厚北薄的分布特征。

需要指出的是,西北洼西段的断拗转换面是T₇₂界面,标志着断陷期的结束;至晚恩平期,洼陷进入了断拗转换期,至T₆₀界面开始接受了全盆地范围的拗陷期沉积。

3.2 西北洼中段洼陷结构和演化特征

西北洼中段,F3断裂合并至F2断裂,古近系原型盆地转变为单断裂控制的北断南超箕状半地堑,洼陷伸展量和伸展率较西段有所增强,相邻探井的地温梯度为31℃/km,总体仍为脆性变形特征(图2、图3)。此外,西北洼中段也遭受了洼陷南、北两侧的基底以下岩浆底侵作用(图3)。

(1) 珠琼运动一幕(早文昌期)

F2断裂控制了文五、文六段的沉积,湖盆范围相对较广;至晚期,受到岩浆底侵作用,F2断裂深部发生向南的滑脱作用,洼陷南部随着抬升翘倾,导致斜坡带的文四段地层发生抬升并接受了较为广泛和强烈的剥蚀。

(2) 珠琼运动一幕晚期(晚文昌期)

和西段类似的是,洼陷中段的文上段沉积地层明显变薄;不同的是,F2的向南滑脱作用还造成了洼陷南侧斜坡带文上段地层的抬升和剥蚀。

(3) 珠琼运动二幕(早恩平期)

控注断裂F2受到深部滑脱作用的持续,其产状平缓,活动性总体较弱,对恩下段地层沉积控制作用较弱,标志着该期已经进入了断拗转换期。

3.3 西北洼东段洼陷结构及演化特征

(1) 珠琼运动一幕(早文昌期)

珠琼运动一幕早期(文五、文六沉积期),F1和

F2 两条控洼断裂产状平直且角度较陡, 分别控制了南、北两个半地堑文五、文六段沉积; 其中 F1 活动性明显强于 F2, 其控制的南部半地堑沉积厚度和范围也明显大于北侧半地堑, 因而成为西北洼东段的沉积中心(图 2、3)。

珠琯运动一幕中期(文四段沉积期), 洼陷东段的沉积沉降中心迁移至 F2 控制的北部半地堑(图 2、图 3)。F1 发生了明显的深部滑脱作用, 产状变缓直至逐渐“躺平”, 活动性趋于沉寂, 不再控制文四段沉积; 而 F2 活动性则显著增强, 湖盆进入扩张期, 文四段沉积期的沉积中心迁移至北部半地堑, 呈现出北厚南薄的分布特征。文四段洼陷结构开始出现脆性-韧性过渡的变形特征。

珠琯运动一幕晚期, 西北洼东段受到了广泛而强烈的岩浆底侵作用, 发生了整体强烈隆升, 洼陷南侧斜坡带文五+文六段及文四段地层发生大范围抬升和强烈剥蚀, 仅东段的北部半地堑残留了较厚的文四段沉积(图 1-3)。

(2)珠琯运动一幕晚期(晚文昌期)

珠琯运动一幕晚期, 西北洼东段也总体进入了湖盆萎缩期, 文上段沉积厚度薄, 由于受到该期地壳整体均衡抬升作用, 文上段地层仅局限于北部半地堑, 而斜坡带缺失。

(3)珠琯运动二幕(早恩平期)

珠琯运动二幕早期, 西北洼东段进入了断拗转换期, F2 产状有所变缓, 对恩下段沉积的控制作用明显减弱, 恩下段沉积范围迅速扩大至整个洼陷。T₇₂ 界面也成为洼陷东段的断拗转换面, 表明其断拗作用的转换要早于中段和西段(图 2)。

总体而言, 西北洼东段受更为强烈而广泛的岩

浆底侵和火山作用(图 2), 相邻探井的地温梯度高达 48℃/km, 其变形机制由裂陷早期的脆性变形逐渐向晚期的韧性变形转变, 洼陷东段的伸展量和伸展率也明显大于中段和西段(表 2)。

3.4 西北洼伸展作用的横向差异性

洼陷主干测线的平衡剖面恢复可用来计算洼陷的伸展率和伸展量, 进而可用来定量表征裂陷作用的相对强弱和水平方向的变形伸展尺度。通过对西北洼西、中、东三段的洼陷伸展率和伸展量分析可以看出, 洼陷东段明显高于中段, 洼陷西段最低, 反映了洼陷伸展作用东段最强、西段最弱的横向差异性(图 2、图 3)。与之巧合的是, 三口探井也分别揭示了洼陷西、中、东三段的地温梯度也存在由西向东、逐渐升高的变化趋势。

笔者将西北洼各段的洼陷结构、伸展量与伸展率、岩浆底侵作用时期和强弱以及裂陷期各段地层的发育和产状做了类比(表 2), 进一步揭示了西北洼各段从几何学和运动学特征、深部动力学背景到地层发育及产状均存在明显的横向差异。

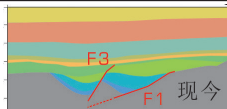
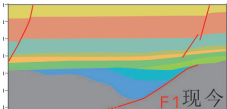
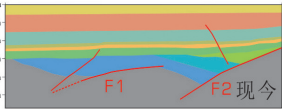
4 西北洼的迁移性演化特征及其主控因素

综上所述, 西北洼从西到东各段的结构样式、岩浆底侵作用和变形机制、地层发育和产状均存在明显的分段差异性。

尤为重要的是, 西北洼的构造、沉积演化也表现出明显的由东向西逐渐迁移演化的特征。具体表现为: ① 洼陷的变形机制由西到东, 由脆性逐渐

表 2 西北洼各段构造-沉积演化横向差异性对比

Table 2 Comparison of tectono-sedimentary evolution in different segments of the Northwest Sub-sag

西北洼	结构样式		动力学背景		岩浆底侵作用		地层残留厚度及产状			
	原型盆地	洼陷结构	地温梯度	变形机制	晚文昌期	早恩平期	文五+六段	文四段	文上段	恩下段
西段	双断半地堑		30℃/km	脆性	-	强	较薄	厚	沉积间断期	厚、剥蚀较强、褶皱明显
中段	单断半地堑		31℃/km	脆性	较强	-	较厚	较厚		较厚、轻微剥蚀、少见褶皱
东段	底侵改造型、双断半地堑		48℃/km	脆性-韧性	强	-	厚	较厚, 仅在北半地堑; 南半地堑剥蚀殆尽		较薄、局限在北半地堑

过渡为韧性变形;②控洼断裂的滑脱作用西弱东强,滑脱时期西晚东早;③岩浆底侵作用总体上西弱东强,强烈底侵期西晚(早恩平)东早(晚文昌);④裂陷期洼陷内地层翘倾、剥蚀作用总体上西弱东强,时间上西晚(恩下段)东早(文下段);⑤断拗转换时间也呈现出东早西晚的变化趋势。

基于研究区周边探井的地温梯度特征(表2),在西北洼也表现为明显的东热西冷的地温场特征;与之对应的是,从基底以深的地震反射特征来看,西北洼东段的岩浆底侵现象也表现得尤为显著。

结合研究区所处的区域构造位置来看,西北洼东段位于NW向惠陆断裂带和NE向先存基底断裂(惠州-陆丰地区的总体构造走向)的交接部位,成为新生代多期构造事件的构造薄弱带。岩浆强烈底侵作用在晚文昌期达到顶峰,进而发育了上地壳内岩浆熔融体构成的底侵带和基底控洼断裂向深部滑脱的熔融层,不仅导致了洼陷东段的变形机制以韧性变形为主,还造成了控洼断裂的强烈滑脱作用以及断裂上盘文下段沉积地层的明显翘倾和强烈抬升剥蚀。而洼陷中段和西段距离构造薄弱带相对更远,深部岩浆底侵作用由东向西逐渐拓展,强度随之降低,因而中段和西段的变形机制仍以脆性变形为主。此外,不论是控洼断裂的滑脱作用,还是地层翘倾和剥蚀作用,强度上有所降低,时间上则更晚,主要集中在早渐新世(恩下段沉积期)。

上述西北洼的热机制差异直接控制了洼陷各段的变形方式,进而造成了洼陷各段构造-沉积演化的分段差异性,最终导致了西北洼各段的石油地质条件和油气成藏主控因素横向差异性。

5 西北洼石油地质条件的分段差异性

西北洼目前属于珠一坳陷的勘探新区,对其原型盆地和迁移性构造、沉积演化的认识将对其石油地质条件分段差异性的深入分析提供理论支撑,尤其是对其优质烃源灶和大中型勘探目标的寻找和落实,将成为推动西北洼油气勘探进程的重要先决条件。

前人^[2-8,20-21]也通过邻区陆丰13洼多口探井钻遇下文昌组文四段为主力烃源岩发育层段,TOC为1.75%~4.46%,平均为2.66%,有机质类型以Ⅱ1型、综合评价以好-很好烃源岩为主。朱文奇等^[9]认为西北洼的主力烃源岩为文四段中-深湖相泥岩。

从西北洼文四段残留地层厚度分布来看,西北洼的文四段集中在洼陷东段的北部半地堑,其次是

西段的北部半地堑。一方面,从珠一坳陷文昌组优质烃源岩的发育条件来看,洼陷周边火山和岩浆的频繁活动往往提供了湖盆富营养化的充足矿物元素,有利于藻类的勃发;另一方面,早始新世的岩浆底侵作用导致了洼陷南侧斜坡带文四段地层发生了不同程度的抬升和剥蚀,给文四段烃源岩的保存带来了一定不利影响。

总体而言,西北洼东段的北部半地堑和西段的北部半地堑文四段地层发育和保存更好,而东段北部半地堑因岩浆底侵作用更早,加上相对更热,对文四段优质烃源岩的发育和演化更为有利。

环绕西北洼周边的整个惠陆低凸起上累计钻探10口井,以珠江组下段-恩平组为主要目的层,其中油流井1口、油层井7口、显示井2口,累计探明储量超过1000万方,尚未突破商业性开发的经济瓶颈。因此,能否在西北洼落实大中型钻探目标,进而推动大中型油气田的发现成为开辟勘探新区的关键。

西北洼的分段差异性构造-沉积演化有利于不同类型大-中型构造圈闭或有利沉积相带的发育。如西段北部半地堑的恩下段地层发生明显的褶皱作用,发育大-中型背斜或断背斜构造,建议落实并重点评价。而西北洼东段晚文昌岩浆大范围底侵后,洼陷变形机制向韧性变形转换,F1断裂的产状及活动性变缓,有利于物源区水系和流域规模的扩大,文昌期可能发育更为有利的沉积相带和沉积体系。另一方面,晚文昌期和早恩平期的强烈岩浆活动有利于烃源岩的热演化或二次生烃,洼陷东南侧探井的地温梯度接近50℃/km,因此,建议加强成藏期次的研究,兼顾天然气成藏条件的研究。

6 结论

(1)陆丰凹陷西北洼位于NW向惠陆断裂带以西,是发育惠陆低凸起上的古近系残留型洼陷。其原型盆地总体为古近系“北断南削”型箕状半地堑和新近系坳陷型洼陷的双层结构;其中西段和东段由南、北两个北断南超箕状半地堑串联组成,中段为单条控洼断裂控制的北断南超箕状半地堑。

(2)受到洼陷控洼断裂几何学、运动学特征的横向差异以及后期岩浆底侵作用的差异性改造,西北洼各段的洼陷结构样式、热体制与伸展作用、岩浆底侵期次与强度、地层发育与产状均存在显著的分段差异性。

(3)西北洼的构造演化还表现出明显的由东向

西的迁移性演化特征,具体表现为洼陷由西到东地温梯度明显升高、洼陷伸展量和伸展率逐渐变大,变形机制由脆性变形逐渐过渡为脆-韧性变形;控洼断裂的滑脱作用东强西弱,滑脱时期东早西晚;文下段沉积厚度总体上东厚西薄;恩下段沉积厚度西厚东薄;岩浆底侵作用总体上东强西弱,强烈底侵期东早(晚文昌)西晚(早恩平);裂陷期洼陷内地层翘倾、剥蚀作用总体上西弱东强,时间上东早(文下段)西晚(恩下段)。

(4)西北洼的热机制直接控制了洼陷各段的差异变形方式,进而造成了洼陷各段构造-沉积演化的分段差异性,导致了西北洼各段的石油地质条件和油气成藏主控因素的横向差异。从烃源岩发育和保存条件看,东段北部半地堑最为优越;从圈闭规模来看,西段北部半地堑更为有利;西北洼的构造-沉积分段差异性演化还有利于不同类型圈闭及有利沉积相带的发育。此外,晚文昌期和早恩平期的强烈岩浆活动有利于烃源岩的热演化或二次生烃。

(5)西北洼目前仍属于珠一坳陷的勘探新区,对其原型盆地和迁移性演化的新认识将有助于对其石油地质条件分段差异性的深入研究,为切实推动勘探进程提供重要参考。

参考文献 (References)

- [1] 施和生,代一丁,刘丽华,等.珠江口盆地珠一坳陷油气藏地质特征与分布发育基本模式[J].石油学报,2015,36(增刊2): 120-133. [SHI Hesheng, DAI Yiding, LIU Lihua, et al. Geological characteristics and distribution model of oil and gas reservoirs in Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S2): 120-133.]
- [2] 张向涛,汪旭东,舒誉,等.珠江口盆地陆丰凹陷大中型油田地质特征及形成条件[J].中南大学学报:自然科学版,2017,48(11): 2979-2989. [ZHANG Xiangtao, WANG Xudong, SHU Yu, et al. Geological characteristics and forming conditions of large and medium oilfields in Lufeng Sag of Eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2017, 48(11): 2979-2989.]
- [3] 米立军,张向涛,汪旭东,等.陆丰凹陷古近系构造-沉积差异性及其对油气成藏的控制[J].中国海上油气,2018,30(5): 1-10. [MI Lijun, ZHANG Xiangtao, WANG Xudong, et al. Tectonic and sedimentary differences of Paleogene and their control on hydrocarbon accumulation in Lufeng sag, Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(5): 1-10.]
- [4] 汪旭东,张向涛,林鹤鸣,等.珠江口盆地陆丰13洼复式油气成藏条件、分布规律及勘探潜力[J].中国海上油气,2018,30(3): 19-27. [WANG Xudong, ZHANG Xiangtao, LIN Heming, et al. Reservoir-forming conditions, oil distribution and exploration potential of compound hydrocarbon reservoirs in the Lufeng 13 sag in Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(3): 19-27.]
- [5] 汪旭东,张向涛,林鹤鸣,等.珠江口盆地陆丰13洼陷中央背斜带地质构造特征及对油气成藏的控制作用[J].石油学报,2019,40(1): 56-66. [WANG Xudong, ZHANG Xiangtao, LIN Heming, et al. Geological structure characteristics of central anticline zone in Lufeng 13 subsag, Pearl River Mouth Basin and its control effect of hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1): 56-66.]
- [6] 代一丁,牛子钺,汪旭东,等.珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J].石油学报,2019,40(s1): 41-52. [DAI Yiding, NIU Zicheng, WANG Xudong, et al. Differences of hydrocarbon enrichment regularities and their main controlling factors between Paleogene and Neogene in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(s1): 41-52.]
- [7] 彭光荣,庞雄奇,徐帆,等.珠江口盆地陆丰南地区古近系全油气系统特征与油气藏有序分布[J].地球科学,2022,47(7): 2494-2508. [PENG Guangrong, PANG Xiongqi, XU Zhi, et al. Characteristics of Paleogene Whole Petroleum System and Orderly Distribution of Oil and Gas Reservoirs in South Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2494-2508.]
- [8] 贺勇,邱欣卫,雷永昌,等.珠江口盆地陆丰13东洼新生代构造演化与油气成藏特征[J].岩性油气藏,2023,35(1): 74-82. [HE Yong, QIU Xinwei, LEI Yongchang, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation characteristics of Cenozoic in eastern Lufeng 13 subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(1): 74-82.]
- [9] 朱文奇,黄胜兵,郭刚,等.珠江口盆地陆丰13西北洼古近系构造沉积演化及资源潜力[J].中国海上油气,2023,35(2): 13-22. [ZHU Wenqi, HUANG Shengbing, GUO Gang, et al. Tectonic and sedimentary evolution of Paleogene and resource potential in Northwestern Lufeng 13 Sag, Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(2): 13-22.]
- [10] 彭光荣,张向涛,许新明,等.南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J].中国石油勘探,2019,24(3): 267-279. [PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, XU Xinming, et al. Important discoveries and understandings of oil and gas exploration in Yangjiang sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(3): 267-279.]
- [11] 高阳东,林鹤鸣,汪旭东,等.幕式裂陷控洼背景下的烃源岩分布及岩浆改造——以珠一坳陷番禺4洼为例[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(3): 151-160. [GAO Yangdong, LIN Heming, WANG Xudong, et al. Source rock distribution pattern in an episodic rifted sag and later stage magmatic reformation: a case from Panyu 4 sag, Zhu I depression[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 151-160.]
- [12] 王梓颐,李洪博,郑金云,等.珠江口盆地番禺27洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制[J].石油与天然气地质,2023,44(3): 626-636. [WANG Ziyi, LI Hongbo, ZHENG Yunjin, et al. Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 Sag in Pearl River Mouth Basin during rifting[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 626-636.]

- [13] 蔡国富, 彭光荣, 吴静, 等. 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 [J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2391-2409. [CAI Guofu, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Sedimentary Filling Response to Detachment Structural Deformation in Shallow-Water Continental Shelf of Pearl River Mouth Basin: A Case Study of Enping Sag[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2391-2409.]
- [14] 蔡国富, 彭光荣, 吴静, 等. 珠江口盆地阳江凹陷始新统古湖泊环境与优质烃源岩发育模式 [J]. *石油学报*, 2023, 44(5): 809-825. [CAI Guofu, PENG Guangrong, WU Jing, et al. Paleolacustrine environment and development pattern of high-quality source rock of Eocene in Yangjiang sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(5): 809-825.]
- [15] 夏玲燕, 林畅松, 李筱珠, 等. 珠江口盆地断裂构造特征及对沉积盆地的控制作用 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2018, 33(5): 1-8. [XIA Lingyan, LIN Changsong, Li Xiao, et al. Characteristics of fault structures in Peral River Mouth basin and control effect of them on sedimentary basin[J]. *Journal of Xian Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2018, 33(5): 1-8.]
- [16] 阙晓铭, 雷永昌, 张向涛, 等. 陆丰南地区断拗转换界面厘定及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2022, 96(11): 3943-3954. [QUE Xiaoming, LEI Yongchang, ZHANG Xiangtao, et al. Determination and geological significance of fault- depression transformation interface in the southern Lufeng area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(11): 3943-3954.]
- [17] 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 1069-1080. [PANG Xiong, ZHENG Jinyun, MEI Lianfu, et al. Characteristics and origin of continental marginal fault depressions under the background of preexisting subduction continental margin, northern South China Sea, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 1069-1080.]
- [18] 赵忠贤. 珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析 [J]. *地质学报*, 2010, 84(8): 1135-1145. [ZHAO Zhongxian. Lithospheric Stretching Modeling and Post-breakup Subsidence Analysis in Continental Shelf, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(8): 1135-1145.]
- [19] . 刘海伦, 梅廉夫, 施和生, 等. 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 [J/OL]. *地球科学*, 2023: 1-17. [LIU Hailun, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. Rift style controlled by basement attribute and regional stress in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J/OL]. *Earth Science*, 2023: 1-17.]
- [20] 何雁兵, 肖张波, 郑仰帝, 等. 珠江口盆地陆丰 13 洼转换带中生界潜山成藏特征 [J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 18-28. [HE Yanbing, XIAO Zhangbo, ZHENG Yangdi, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of Mesozoic Lufeng 7-9 buried hill in Lufeng 13 subsag transition zone, Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 18-28.]
- [21] 刘军, 蔡哲, 庞雄奇, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系多动力-多期次-多要素复合成藏区定量预测与评价 [J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2481-2493. [LIU Jun, CAI Zhe, PANG Xiongqi, et al. Quantitative Prediction and Evaluation of Paleogene Favorable Hydrocarbon Accumulation Areas with Multi-Dynamic-Stage-Factor Combination in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2481-2493.]