

珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析

蔡 嵩,彭光荣,陈兆明,姜大朋,李克成,吴建耀,张楚婧

Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

CAI Song, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, JIANG Dapeng, LI Kecheng, WU Jianyao, and ZHANG Chujing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072702

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程:碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116

构造--沉积耦合过程的数值模拟:以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain 海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

西湖凹陷Y构造花港组气藏特征及成藏主控因素

Characteristics of gas reservoir and controlling factors for gas accumulation in the Huagang Formation in Y Structure, Xihu Sag 海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 174

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



关注微信公众号,获得更多资讯信息

蔡嵩,彭光荣,陈兆明,等.珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 106-118. CAI Song, PENG Guangrong, CHEN Zhaoming, et al. Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 106-118.

珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析

蔡嵩1.2, 彭光荣1.2, 陈兆明1.2, 姜大朋1.2, 李克成1.2, 吴建耀1.2, 张楚婧1.2

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

2. 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054

摘要:开平凹陷位于珠江口盆地珠 II 坳陷西南部深水油气勘探区,处于南海北部陆缘洋陆过渡带。由于该区构造特征极为复杂,加之油气勘探及研究程度较低,因此针对该区开展裂陷演化及沉积充填特征与烃源发育条件的分析研究,对于油气勘探 及其油气地质评价等均具有重要的参考借鉴意义。基于开平凹陷研究区的高分辨率三维地震资料,重点对该区洼陷结构和断 裂体系进行了深入解剖,系统阐述了古近纪断裂展布特征,并对研究区主干断裂活动特征进行了定量分析,探讨了古近纪裂 陷期断裂体系演化规律及沉积中心迁移过程,并运用平衡剖面技术,恢复了开平凹陷古近纪以来的裂陷演化过程。研究表明 开平凹陷古近系表现出"北断南超"的构造格局,裂陷期发育 NE-NEE 向和 NWW 向两组主要断裂,控制了凹陷构造变形及沉 积充填特征,其控洼断层具有拆离伸展的断裂特征。尚须强调指出,开平凹陷主干断层活动强度整体表现为早始新世文昌期 逐渐增强,晚始新世恩平期减弱并停止的特征,在始新世文昌组-恩平组沉积期发生过多次沉积中心迁移。因此,根据断裂体 系展布特征和平衡剖面分析结果,综合判识确定开平凹陷是在南海北部陆缘晚中生代构造变形基础之上形成的新生代伸展断 陷盆地,其裂陷演化过程经历了早文昌期的断陷伸展阶段、晚文昌期的拆离伸展阶段和恩平时期的底侵拗陷阶段。总之,开 平凹陷古近系构造演化,总体上均受控于"先存构造约束、拆离薄化主导、岩浆作用参与"的珠江口盆地动力学机制。 关键词:构造特征;断裂活动;构造演化;动力学机制;开平凹陷;珠江口盆地

中图分类号:P744.4 文献标识码:A **DOI**: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072702

Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

CAI Song^{1,2}, PENG Guangrong^{1,2}, CHEN Zhaoming^{1,2}, JIANG Dapeng^{1,2}, LI Kecheng^{1,2}, WU Jianyao^{1,2}, ZHANG Chujing^{1,2}

1. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518054, China

2. CNOOC Deep Sea Development Co., Ltd., Shenzhen 518054, China

Abstract: The Kaiping Sag is located in the western part of Zhu II Depression, Pearl River Mouth Basin in the ocean-continent transition zone of the northern continental margin of the South China Sea. The tectonic characteristics of Kaiping Sag are very complex while the degree of research is relatively low. Therefore, we studied the evolution process of rifting in this area to reveal the conditions of sedimentation and hydrocarbon source development. Based on the high-resolution 3D seismic data of the Kaiping Sag, the geo-structure and fault system in this area were dissected, the distribution and development characteristics of the Paleogene faults were expounded systematically, the activity characteristics of main faults were quantitatively discussed, the evolution of fault system and the migration of sedimentary center in the Paleogene rift period were clarified, and the balanced profile of the rifting evolution of Kaiping Sag since the Paleogene was reconstructed. Results show that the Kaiping Sag shows a tectonic pattern of "north faulting and south surpassing". Two groups of main fault sets, NE-NEE and NWW, are developed during the rifting period, which controlled the tectonic deformation and sedimentary filling of the sag, and its depression-controlling faults are characteristic of detachment and extension. The activity intensity of the main faults in Kaiping Sag gradually increased in the Wenchang Stage of the Early Eocene, and weakened-ceased in the post-Enping Stage of the Late Eocene. The sedimentary center migrated many times during the sedimentary period of Wenchang-Enping Formations in the Paleogene. The distribution of the fracture system and balance profile analysis suggest that Kaiping Sag is a Cenozoic extensional faulted basin formed based on the late Mesozoic tectonic deformation in the northern continental margin of the South China Sea, and its evolution can be divided into three stages: the early-Wenchang fault extension stage, the late-Wenchang detachment extension stage, and the Enping Formation underplating-depression stage. The tectonic evolution of Kaiping Sag is controlled by the dynamic mechanism of "Pre-existing tectonic constraints, detachment and thinning domination,

资助项目:中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目"南海北部深水区勘探关键技术"(KJGG2022-0102)

作者简介:蔡嵩(1986一), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事构造地质学及油气勘探研究, E-mail: caisong@cnooc.com.cn 收稿日期: 2022-07-25; 改回日期: 2022-08-29. 张现荣编辑

and magmatism involvement" in the Pearl River Mouth Basin.

Key words: tectonic characteristics; activity characteristics of fault system; tectonic evolution; dynamic mechanism; Kaiping sag; Pearl River Mouth Basin

珠江口盆地位于南海北部大陆边缘,是南海北 部重要的含油气盆地。珠江口盆地经历了多幕裂 陷作用,断陷长轴方向由早期的 NE-NEE 向至中晚 期 E-W 向、NWW 向的顺时针旋转^[1-2],形成了 NE-NEE 向和 EW-NWW 向两组断裂控制的"南北分 带、东西分块"的构造格局^[3]。目前,随着珠江口盆 地珠 I 坳陷油气勘探程度的不断提高,油气储量接 替的压力不断增大^[4],迫切需要加强和拓展深水区 珠 II 坳陷新区域的油气勘探及研究工作。

开平凹陷位于珠江口盆地西南部深水区珠 Ⅱ 坳陷西部,油气勘探程度极低。前人对深水区珠 Ⅱ 坳陷的研究多局限于中部及东北部白云凹陷,但 对西南部的开平凹陷研究甚少。开平凹陷整体表 现为伸展构造环境,处于洋陆过渡带。前人对开平 凹陷控洼断层、石油地质条件和油气成藏特征方面 等进行过一些研究[5-8],但受限于当时有限的地质资 料,而且缺乏对开平凹陷的盆地性质、构造特征及 演化过程的整体认识,其基础地质及构造地质和盆 地分析等研究工作非常薄弱。因此,开展开平凹陷 构造特征、断裂体系与盆地演化的分析研究,对于 理清开平凹陷的基础地质问题,深化对该区油气地 质条件的认识以及推动油气勘探进程与实践等均 具有重要意义。鉴此,本文在充分利用开平凹陷现 有的地质、钻探、地球物理等资料及前人研究成果 的基础上,对开平凹陷三维地震资料开展系统地分 析解释,在此基础上,通过古地质构造恢复和钻井 资料综合分析,对开平凹陷的构造特征进行了深入 解剖,详细分析了断裂体系剖面及平面分布特征, 并结合骨干断裂的活动性、盆地沉积中心变迁及平 衡剖面等多分析手段,恢复重建了不同时期开平凹 陷的构造演化序列,进而为该区油气勘探部署及钻 探目标评价等提供重要的基础地质成果和油气勘 探决策依据。

1 区域地质背景

珠江口盆地南部深水区珠Ⅱ 坳陷呈 NE-SW 向 展布,处在盆地西南部陆架-陆坡过渡带及上陆坡区 (图 1a),而开平凹陷则位于珠江口盆地珠Ⅱ 坳陷西 南部,呈 NE-NEE 向展布,面积约为 5 000 km²。其 东邻云开低凸起,与白云凹陷相隔,其西南部则与 顺德凹陷相连,南北分别与顺鹤隆起、神狐隆起带 相接。该凹陷绝大部分区域位于大陆坡上,水深为 200~1000 m。从开平凹陷及邻区构造单元划分图 (图 1b)可知,开平凹陷由北向南具有明显的分带特 征,其从北向南可分为北部隆起带(包括神狐暗沙 隆起和番禺低隆起)、北部断陷带(包括开平西洼、 开平北洼和白云西洼)、洼中隆起带(包括开平 11 构造带、开平 10 构造带和开平 6 构造带)、洼陷 中心带(包括开平西南洼、开平主洼和开平东洼)、 南部斜坡带。通过对开平凹陷二维和三维地震剖 面的追踪解释、钻井分析以及邻区地层进行对比, 建立了开平凹陷新生代地层格架。开平凹陷新生 代地层系统主要由8套地层构成,从上到下依次为 琼海组、万山组、粤海组、韩江组、珠江组、珠海 组、恩平组和文昌组(图2)。尚须指出,开平凹陷 全区尚未发现古新统神狐组地层¹⁹,其基底主要为 前新生代花岗岩等火成岩。

2 开平凹陷构造特征

开平凹陷新生代经历了多期构造演化,形成了 垂向上分层、平面上分区的构造特征。由于三维地 震资料的限制,本文主要以开平主洼、开平北洼和 开平东洼为剖析对象,通过凹陷结构特征、断层平-剖面组合特征和展布规律及断层活动性等方面的 系统分析,对其古近纪的构造特征进行解析,明确 开平凹陷构造活动特征及其规律性。

2.1 开平凹陷构造分层特征

开平凹陷新生代具有"下断上坳"的双层结构, 下构造层为盆地断陷期所充填的始新统(文昌及恩 平组)陆相沉积,上构造层则为盆地拗陷期所形成 的渐新统-新近系-第四系(珠海组-琼海组)的浅海 相及半深海相沉积,不同构造层之间以明显的角度 不整合接触(图 2)。下构造层底界(Tg)地震反射界 面为文昌组的底界面,同时也是开平凹陷的基底反 射界面,该界面为区域性的不整合界面,也是分布 范围最大的不整合界面。基底之上为断陷盆地湖 相的沉积岩层,断陷湖盆的地层基本呈现超覆的特 征覆盖于基底之上。下构造层为受北部大型伸展 拆离断层 F1 断层(图 3)控制的北断南超的拆离型



图 1 珠江口盆地构造纲要图 (a) 及开平凹陷构造单元划分和断裂分布图 (b) Fig.1 Tectonic outline of the Pearl River Mouth basin (a) and tectonic division and fracture distribution of the Kaiping Sag (b)

复式半地堑。不同类型次洼的地质结构差异较大, 断裂发育数量众多,大小不一,断裂规模总体较大, 反映了开平凹陷该时期构造活动非常活跃,经历了 多期伸展断陷作用的过程。上构造层底界大致相 当于 T70 地震反射标志层,为区域性不整合面。该 套地层几乎不发育大型的控沉积断层,各洼陷沉积 厚度稳定,反映了开平凹陷该时期以后基本为盆地 整体热沉降的海相拗陷期沉积充填地层。结合珠 江口盆地区域构造运动特征可以推测^[10-12],开平凹 陷 T70 界面反映出南海开始扩张的过程,即断陷向 坳陷转换的界面,表明开平凹陷的构造演化与白云 凹陷具有类似的演化特征。

2.2 断裂系统剖面发育特征

断层活动是开平凹陷裂陷期的主要构造特征, 并直接控制了盆地的主要构造样式。珠Ⅱ 坳陷在 古近纪裂陷期主要发育 NNE-NE、NEE-EW 和 NWW 走向的主干断裂,控制了盆地裂陷期的沉积演化与 构造格局。系统的地震构造解释表明,珠Ⅱ 坳陷不 同区域内凹陷结构、构造样式、断层产状(特别是 倾向)等存在显著差异。位于珠 II 坳陷西侧的开平 凹陷紧邻受控于南部大型伸展拆离断层的白云凹 陷,由南向北滑脱而形成典型的拆离盆地^[13]。而开 平凹陷是发育在变质核杂岩之上由北部"勺"形主 拆离断层控制下的具有大水平位移的凹陷,拆离断 面之上发育大量不同规模大小的基底断块(图 3)。 从图 3 可以看出,开平凹陷发育了 4 条近 NE-NEE 向大型控挂断裂(F1—F4)和 1 条 NE-NEE 向的反 向主控断层,自西向东分别控制着开平西洼、开平 西南洼、开平主洼、开平北洼和开平东洼。

开平凹陷 F1 断裂称为神开断裂,位于神狐暗沙 隆起的南端,走向为 NE-NEE 向,延伸长度长,为开 平凹陷的北部边界拆离控盆断层(图 3b)。神开断 层的发育对整个开平凹陷的演化起着重要的作 用。F1 断裂活动时间较早,在下文昌组中段后开始 强烈活动,明显控制了下文昌组上段和上文昌组的 沉积,其沿走向断层特征变化非常大,因开平凹陷 岩浆改造作用呈现西强东弱的特征,其剖面构造样 式在开平凹陷东侧和西侧表现出较大的差异。 F1 断裂在剖面上为"陡-缓-陡-缓"近坡坪式特征,

年代地层 层序地层 地震 综合	构造
系 统 组 段 一级 二级 三级 代码 界面 /Ma 地震反射层地	质意义 演化
第 更 琼 四 新 海 系 统 组	
上 万 新 山 统 组	
粤 海 担 新 海 及 工 中 组	拗
近 ¹ ^韩 <u>上</u> ¹	陷
流 温 超 统 珠 层 江 序	府 _底
新 珠 (二级层序	紧~~~~~ 段
$\widehat{\mathbf{x}}$ $\widehat{\mathbf{x}$ $\widehat{\mathbf{x}}$ $\widehat{\mathbf{x}}$ $\widehat{\mathbf{x}$	底
图 图一段 图一段 Ep1 T71 33.9 (区域不)	整合) 断 拗
\mathbb{P} \mathbb{B} <td>转化</td>	转化
组 恩三段 恩 <u>恩三段</u> <u>恩三段</u> <u>尼</u> 序 Ep3 1/2 <u>恩三段</u> <u>恩三段</u> <u>恩三段</u>	
近 χ	≸界面)
	断
$\begin{array}{c c} & & \\ & & & \\ & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & &$	底 陷
4 5 100 100 100 $(二级层内)$	[;] 界面) 阶
系 文五段 文五段	段
$\chi ightarrow Wc6$ Tg $G6.0$ $\chi ightarrow Tg$ $G6.0$	

图 2 开平凹陷新生代地层系统及层序地层特征综合剖面 Fig.2 Stratigraphic comprehensive columns of the Kaiping Sag

与多个次级断层形成一系列基底旋转断块,在地壳 深部断层倾角趋于平缓,并与F2断层合并成一条 断层,具有明显拆离断层的特征(图 3b)。在开平洼 陷中部,F1断裂与F2断裂相连,整体在剖面上表现 为"凹-凸-凹"的低角度拆离断层特征,断裂中段基 底核杂岩受岩浆底侵活动强烈隆升,上覆开平北洼 地层强烈剥蚀,与拗陷期地层呈角度不整合接触,同时拆离断层之上地层褶皱变形,呈一个宽缓的背 斜形态,具有典型的拆离变质核杂岩的地震剖面特征(图 3c)。钻井 KP6-A 揭示井底发育玄武岩,加上 基底内普遍的波状反射和强反射轴等成为开平凹 陷裂陷期被岩浆活动改造的证据。在开平凹陷的 东部,岩浆活动对断裂的改造作用较少,F1 断裂主 要表现为板式正断层或轻微铲式正断层,控制了番 禺 25 洼文昌组地层的发育,与F3 断层控制下的开

平东洼组成多米诺式半地堑(图 3d)。

F2 断层位于神狐暗沙隆起的西南端,为控制开 平主洼和开平西洼的边界断层,走向近 NEE-EW 向,倾向为 SSE 向,呈上陡下缓的铲式正断层,明显 控制了开平主洼下文昌组和开平西洼文昌组的沉 积。下文昌组地层在开平主洼地层厚度最大,向东 西两个方向地层厚度减薄。因此 F2 断层控制下的 开平主洼和开平西洼在文昌组早期为连通的半地 堑盆地,具有典型的箕状断陷特征。剖面上次级断 裂发育,与 F2 断层组合成同向或反向正断层组合, 次级断层下面端点收敛于主干断层,次级断层与 F2 断层在剖面上成"卷心菜"形组合样式(图 3A-A'、 B-B'、C-C')。F3 断层位于开平凹陷东侧,是开平东 洼的主控边界断裂,控制了开平凹陷东洼的沉积, 整体走向近 WE 向,倾向为 S 向。剖面上次级断层 110





The location is seen in Figure 1b.

发育,与此断层伴生发育了一系列同向和反向伴生 次级正断层,与主干断裂F3呈铲式扇的构造样式, 沿走向断层特征变化不明显,主要表现为板式正断 层或轻微铲式正断层,断层活动时间长,从文昌组 到韩江组均有活动。开平东洼构造变形较弱,洼陷 表现为一个典型的半地堑形态(图 3D-D')。F4 断层 为开平西南洼的边界主控断层,倾向 SE 方向,走向 NE,断层面呈"犁式"。F4 断层活动时间长,从文昌 组到韩江组均有活动,在下文昌组中段后开始强烈 活动,明显控制了西南洼下文昌组上段、上文昌组 和恩平组的沉积。剖面上F4 断层与F2 断层组合为 同向平行正断层组合,次级断裂发育较少,呈"羽 毛"形或"Y字"形组合样式(图 3a)。F5 断层也叫 南开断裂,整体走向近 NEE 向,倾向为 NNW 向,呈 上陡下缓的铲式正断层,断层面未切穿前新生代基 底面,断层下面端点均收敛于基底面,分析认为是 F1 控挂断裂强烈拆离活动时产生的反向伴生次级 正断层。F5 断层活动时间较早,对开平凹陷下文昌 晚期到恩平组地层沉积有明显的控制作用(图 3B-B')。

2.3 古近系断裂系统平面发育特征

受南海张裂的影响,开平凹陷经历了多期次、 多性质、多方向构造运动的叠加与改造,断裂构造 十分复杂。通过对开平凹陷始新统文昌组和恩平 组内部 10 个构造层的精细解释, 对开平凹陷深部 构造的发育特征和展布规律进行整体的刻画,发现 断裂体系主要有 NEE 向、近 EW 向、NE 向和 NW 向4组断裂(图4)。断裂构造主要在古近系裂陷层 发育,因而对断裂体系的分析主要针对古近系。开 平凹陷构造样式主要以伸展运动形成的正断层为 主,在地震剖面上表现为阶梯式、多米诺式或垒堑 式等组合样式。在平面上,主要有平行式、雁列式、 梳状、棋盘格式或斜交式等多种组合类型(图 4)。 对比 Tg 到 T70 断裂组合图可以发现, 切割文昌组 (Tg-T80)断裂走向主要有2组:NE-NEE向和 NW-NWW 向。从文昌组到恩平组,活动显著减弱, 断层数量和断距均减少,同时 NE-NEE 向断裂减 少,NW-NWW 向增多,切割恩平组断裂走向更多以 NW-NWW 向为主(图 4)。因此,从文昌组沉积期到 恩平组沉积期断层的分布存在较好的一致性和继 承性,只在断裂走向上发生了顺时针的偏转,代表 区域构造应力场发生顺时针的偏转。

2.3.1 基底断层平面发育特征

由 Tg 断裂分布图可知(图 4a), 切穿基底面的

断层数量相对较少,主要分布在西洼、西南洼和东 洼,表现为控洼边界断层特征。开平凹陷大型伸展 拆离断层的平面展布特征为 NEE 走向,直接控制了 开平西洼、北洼和东洼的地质结构。Tg 面上下盘 水平断距很大,表明边界断层开始活动于北洼一 带,向南逐渐拆离伸展,断层沿走向上可分为3段: 西部、中部和东部,中部断距最大,表明断层活动最 为强烈,现今 NEE 向断层的形成主要由3条断层生 长连接而成,即分别由控制西洼、北洼和东洼的 3条边界断层,垂向上切穿基底面,走向上逐渐传 播,最终连接成为控制开平凹陷的大型伸展拆离断 层。西南洼边界断层为 NE 走向,与大型伸展拆离 断层存在一定的交角。开平凹陷切穿基底的断层 大部分均为 NE、NEE 和近 EW 走向,这表明开平凹 陷是由西北向南东拆离伸展的。

2.3.2 文昌组断层平面发育特征

在 NW-SE 向伸展作用下, 珠江口盆地基本特点 是除了受到基底先存构造影响的局部地区之外, 盆 地整体上呈 NE 或 NEE 向展布。受控于 NW-SE 向 区域构造应力场, 断裂在这一时期最为发育, 开平



图 4 开平凹陷各反射层断裂平面组合特征 Fig.4 The plane combination of horizon fractures of each reflector in the Kaiping Sag

凹陷形成了大量 NE-NEE 向张性断层和少量 NW-NWW 向张扭断层,其中 NE-NEE 向断层规模较大, NW-NWW 向断层规模较小。NE-NEE 向张性断层 主要分布在开平 11 构造带和开平 10 构造带附近 (图 4b)。开平 11 构造带断层基本为 NE-NEE 向展 布,平面上形成斜交式和棋盘格式组合,剖面上形 成"铲式扇"形、"卷心菜"形等断层组合。在开平 10 构造带发育 NW 向断层,这一系列 NW-NWW 向 断层将开平 10 构造带复杂化,平面上形成棋盘格 式构造格局,剖面上形成多级"Y"字形、阶梯式等 断层组合。另外, NW-NWW 向断层主要分布于开 平凹陷南部斜坡区域,为雁列状展布。

2.3.3 恩平组断层平面发育特征

对比 T80 和 T70 断裂组合图(图 4b、c)可以发现,该时期构造活动显著减弱,断层数量和断距均减少,断层由之前的 NE向、NEE向逐渐变为 NW 向或近 EW 向,断裂平面上呈平行状、雁列状、扫帚状和树枝状展布。与盆地发育初期相比,该时期区域构造应力场已发生改变,整体上断层具有顺时针旋转的趋势。根据断层分布规律可分为 3 个大的断裂带:北部断裂带,主要包括神狐暗沙隆起、北洼及东洼一带,断层整体为 NW 向展布;中部断裂带,包括开平 11 构造带,断层整体为近 EW 向或 NWW 向;南部断裂带,包括开平 10 构造带及主洼南部斜坡区域,南部断裂带近弧形展布,由西部 NW 向断层向东逐渐过渡为 NWW 向或近 EW 向。断层的展布特征反映出构造活动非均质性的特点。

2.3.4 珠海组断层平面发育特征

珠海组时期,开平凹陷以稳定区域热沉降为 主,构造活动较弱,主要发育的是拗陷期热沉降产 生的断裂和断陷晚期开始形成的 NWW 向伸展断层,少量早期伸展的控挂断层,断裂平面上呈平行状、雁列状、扫帚状和树枝状展布(图 4d)。该时期 开平 11 和开平 10 构造带活动强度均不大,其断裂 展布与 T70 反射层构造图相比具有相似性,整体上 也可分为 3 个断裂带:北部断裂带断层为 NW 向展 布,呈雁列状排列,断层长度和断距均较小,但数量 较多;中部断裂带,主要为开平 11 构造带,断层长 度和断距较小,数量较少,从西向东,由 EW 向逐渐 过渡为近 NWW 向;南部断裂带,包括开平 10 构造 带及主挂南部斜坡区域,断裂带整体仍为弧形展 布,从西向东由 NW 向逐渐过渡为近 EW 向。该时 期开平 10 构造带 NW 向断层较为发育,主洼内部 断层数量较少,反映构造带在拗陷期活动近乎停止。

2.4 断层活动时序和活动强度分析

断裂活动性的定量表征方法有多种,通常使用 的有断层古落差法、断层生长指数法和断层活动速 率法3种^[14-18]。由于前两种方法计算比较简单且分 析结果均受到不同程度的限制,而同生断层活动速 率是客观反映断裂活动强度和时期的重要指标^[19]。 因此本文主要采用断层活动速率法对开平凹陷内 主干断裂的垂向活动强度进行定量计算。

分析断裂活动速率(图 5)可知,断裂体系活动 强度变化具有明显阶段性。开平凹陷主干断裂活 动整体为早期活动、晚期消亡型断裂,具有单峰式 活动特点,其断层活动强度整体表现为逐渐增强后 减弱的趋势。断裂在下文昌组沉积时期开始活动, 其活动速率最大为开平主洼控洼断裂 F2 断裂,可 达 352 m/Ma。进入上文昌沉积时期,除了 F2 断裂 停止活动外,其余主干断裂活动明显增强,活动强





Fig.5 The activity rate of main controlling faults developed in different stages of the Paleogene in the Kaiping Sag

度均达到各断层活动速率最大值,其中活动性最强的为开平东洼控洼断裂 F3 断裂,可达 384 m/Ma。 而后进入恩平组沉积时期,断陷作用急剧减弱,断 裂活动强度迅速下降,F1 和 F3 控洼断裂停止活动, 受岩浆活动影响,该时期活动性最强为开平主洼南 侧的 F5 断层,活动速率达 37 m/Ma,珠海组沉积期 以后主干断层活动强度持续降低并停止活动。

总之,断裂活动特征主要具有以下特点:① 主 干断裂基本为文昌期同沉积断层;② 断裂活动从整 体上看,文昌组时期表现为北部控洼断裂活动性 强,南侧调节断裂活动性较弱的特征,恩平组—珠 海组时期表现为南侧调节断裂活动性相对强,北部 控洼断裂基本终止活动的特征;③ 断裂活动特征与 区域构造所经历的多期断陷-断拗-拗陷的幕式演化 过程相吻合。

3 开平凹陷沉积中心迁移特征

开平凹陷发育巨厚文昌组地层,恩平组地层相 对较薄,整体的发育演化是从断陷到拗陷的过程。 其构造活动具有周期性规律,形成3个断陷期、拆 离期、底侵拗陷幕演化阶段。主控断裂的强弱转化 和产状变化,造就了各时期地层的展布和沉积中心 迁移转变。

下文昌组沉积时期为强烈裂陷期,边界断裂的 强烈伸展活动,沉积厚度明显受到断层的控制 (图 6a)。下文昌组地层有3个相对独立的沉积中 心(开平主洼、开平北洼和开平东洼),构造格局表 现为"三洼一凸"。沉积厚度最大的位置在主洼内, 沉积中心呈 NEE 向展布,洼陷范围陡而窄,主要位 于强烈活动的 NEE 向断裂(F2)下降盘附近。东洼 和北洼文昌组下段地层相对较薄,整体也具有 NEE 向展布的特征,反映了北部边界断裂对各次洼 早期形态有一个明显的控制作用。

上文昌组沉积时期,开平凹陷进入拆离活动 期,在此沉积期断陷范围迅速扩大,受边界断层拆 离活动的影响,其洼陷区变得宽缓,沉积中心发生 了明显迁移,远离主要的边界断层(图 6b)。下文昌 组地层整体厚度较大的位置分布在主洼和西南洼, 但主洼地层厚度更大,范围更广,主洼和西南洼呈 现出连片的趋势。与下文昌时期相比,西南洼、主 洼和东洼相连接呈现 NEE-SWW 向的条带状特征, 主洼和东洼的沉积中心均表现出向南迁移的特征, 表明主控断层性质发生转变。上文昌地层在北洼 呈现零散的较厚区域的分布,形成数个相对独立的





受基底拆离旋转断块控制的沉积中心。

恩平组沉积时期,开平凹陷进入类拗陷沉积时 期,地层的分布范围快速扩张,主洼和西南洼完全 连成一片,各个洼陷基本全发育且地层厚度相对均 匀,体现了拗陷期均匀沉降的特点(图 6c)。在此阶 段,受控于区域构造作用^[20],西北部神狐暗沙隆起 和东南部云开低凸起发生强烈抬升,神狐暗沙隆起 上出现部分削蚀缺失区。受周缘隆起抬升影响,恩 平组地层整体厚度最大的位置分布在西南洼、主洼 内,沉积中心相对上文昌组地层从主洼南部向西南 洼偏移。

综上所述,开平凹陷受断裂活动强度变化影

响,沉积中心在裂陷期发生了明显迁移。开平凹陷 断陷期的地层整体呈现多个洼陷中心的特征,且各 个洼陷的发育时期也存在有先后顺序,主洼相对形 成最早且在整个演化过程中存在有较好的继承性 特征。在断陷初期,开平主洼为沉积中心,文昌组 地层沉积期随着伸展作用的持续进行逐渐扩展到 东洼、西南洼和北洼一带;恩平组地层沉积期构造 活动逐渐减弱,没有较为明显的沉积中心,整体上 沉积中心具有由东北向西南逐渐迁移的特征,反映 开平凹陷构造活动具有很强的迁移性。

4 构造演化阶段与性质

珠江口盆地发育多个受上地壳低角度拆离断 层控制的断陷,这些拆离断裂的形成通常受岩浆侵 位和(或)先存断裂的影响^[21]。开平凹陷是发育在 晚中生代构造变形基础之上的新生代伸展断陷盆 地,伸展构造变形同样受岩浆侵位和(或)先存断裂 的共同影响。开平凹陷经历了多期次的构造演化 叠加改造,始新世至今构造格局体现了原始盆地格 局与后期改造作用的叠加效应,从而给确定始新世 断裂特征、盆地结构、演化过程期以及原型盆地恢 复带来了极大的困难。本文基于本次研究成果(包 括盆地断裂空间组合、断裂活动特征、地层沉积变 化、多层构造变形匹配关系)分析了新生代盆地形 成演化过程,选取了典型地震地质剖面进行平衡剖 面分析,进而恢复盆地结构的动态演化过程。

为精细刻画开平凹陷地质结构和构造演化,选 取一条三维区过开平北洼、开平11构造带、开平主 洼和南部斜坡带的地震剖面,制作平衡剖面,分析 开平主洼和北洼盆地演化。分析认为,开平凹陷经 历了断陷期、拆离期和底侵期3个大的裂陷演化阶 段,其中断陷期进一步细分为初始断陷幕(E₂w⁶沉 积时期)、断陷扩展幕(E₂w⁵沉积时期)、断陷强烈 幕(E₂w⁴沉积时期),拆离期又可分为拆离伸展幕 (E₂w³²沉积时期)及拆离萎缩幕(E₂w¹沉积时期)。 因此,研究认为开平凹陷经历"早断陷-中拆离-晚底 侵"三期六幕裂陷演化过程(图 7)。

在下文昌组的断陷期,在E₂w⁶沉积时期,开平 凹陷以高角度伸展为主,基底先存断裂差异活动, 主洼部分的控洼断裂率先张裂形成高角度断层控 制的北断南超半地堑盆地。进入断陷扩展幕 (E₂w⁵沉积时期)后,该控洼断裂持续强烈活动,盆 地持续深陷,湖盆面积扩大,地层朝南部缓坡带持 续超覆沉积。在断陷强烈幕(E₂w⁴沉积时期),因裂 陷作用增强,开平北洼的先存断层继续活化张裂, 发育多级高角度断阶,裂陷中心开始往北洼迁移, 开平主洼缓坡带因断层活动而发生旋转作用,文四 段地层被抬升削蚀。

在上文昌组时期,开平凹陷进入拆离期,以上 陡下缓的拆离断层的发育为主要特征。在拆离伸 展幕阶段(E₂w³⁻²沉积时期),这个时期开平凹陷先 存低角度断层完全活化,并成为主要控洼断裂,发 生低角度拆离活动,强烈的拆离活动导致了基底核 杂岩的隆升。此时开平凹陷断裂伸展活动量集中 到了北部的控洼断裂上,开平主洼的控洼断裂基本 停止活动并与主洼下文昌地层作为统一的上盘断 块发生掀斜现象,裂陷洼陷沉积中心集中在开平北 洼,主洼作为复式半地堑的缓坡带,发育地层削截 和上超沉积现象。进入拆离萎缩幕(E₂w¹沉积时 期)之后,控洼断裂拆离活动发育到顶峰并逐渐停 止,核顶地层隆升并遭受局部剥蚀,洼陷内部形成 一系列因强烈低角度拆离和核杂岩强烈隆升活动 形成的共轭调节断裂。沉积中心因拆离活动的减 弱和北洼核杂岩抬升的共同作用而发生迁移至开 平主洼,开平北洼与主洼形成统一的洼陷。

在恩平组的底侵拗陷幕(E₂e沉积时期), 控洼 断裂因岩浆沿着控洼断裂的岩浆底侵增强而逐渐 停止拆离活动, 整体发育底侵岩浆控制坳陷型盆 地。通过前文的分析, 开平凹陷的主控洼断裂活动 基本停止在 T80 界面之下, 同时恩平组地层往周缘 隆起和核杂岩隆起上超覆沉积, 可以推断此时开平 凹陷伸展断控作用基本停止, 发育坳陷型盆地。

5 动力学机制探讨

开平凹陷位于珠江口盆地的珠Ⅱ 坳陷带,其演 化过程和珠Ⅱ 坳陷带其他凹陷——顺德凹陷、白云 凹陷和荔湾凹陷具有一定的相似性,同时又受控于 整个珠江口盆地演化过程的限制。

综合研究表明,珠江口盆地具有分带差异演化 模式。前人^[2-24]基于珠江口盆地断裂系统、构造变 形、盆地与地壳薄化过程耦合关系的分析,构建了 "先存构造约束、拆离薄化主导、岩浆作用参与"的 珠江口盆地构造三元耦合控凹的动力学模式。结 合前人的区域研究成果和本文的综合分析认为,开 平凹陷裂陷期动力学机制亦与珠江口盆地三元耦 合动力学模式相吻合。在中生代晚期的前裂陷期, 古太平洋板块/特提斯洋板块向欧亚板块的俯冲,形 成呈 NE 向展布的陆缘弧、弧前盆地、俯冲增生带





in the Kaiping Sag

The location is seen in Fig.1.

等构造单元^[25-26]。同时,伴随左行走滑,形成多条 NW向走滑断裂带。随着陆缘弧的发育,岛弧两侧 发育大量 NE-NEE 向低角度逆冲断层,经过剥削 后,部分低角度断面将残留在地壳内。开平凹陷位 于陆缘弧的外缘,其东部边界受控一统-暗沙断裂 带,西部受控于珠Ⅲ坳陷前陆造山推覆带,处于多





期构造叠加形成的三角破碎带(图 8a)。后期强烈 的裂陷伸展作用可能诱发早期逆冲断裂破碎带的 重新活动^[27],同时伴随着岩浆的大量侵入,形成了 "先存构造约束、拆离薄化主导、岩浆作用改造"的 动力学机制。在上述作用的耦合控制下,开平凹陷 裂陷期3个阶段的形成演化动力学机制可分为:

(1)初始裂陷期: 开平地区地壳岩石圈相对较 厚, 伸展模式以岩石圈整体伸展、均匀纯剪切变形 为特征的纯剪切模式为主^[28]。伸展作用早期, 主要 发育与基底先存断裂延伸方向一致或近于一致的 断层^[29], 受 NE-NEE 向先存逆冲断层的约束, 开平凹 陷发育多个 NE 向高角度断层控制的断陷盆地 (图 8b)。

(2)拆离断陷期:随着伸展作用的继续和伸展 量的不断增加,初始裂陷期形成的主控断层向下延 伸至残留断面后,将沿该残留断面发育,向下延伸 至地壳韧性层。同时由于地壳的强烈伸展薄化导 致岩浆底侵^[30],强烈的岩浆作用使开平地区地壳韧 性增强并通过伸展塑性变形减薄地壳,同时强烈的 岩浆底辟造成基底强烈抬升,导致断面强烈变形, 从而形成上陡下缓的类核杂岩型拆离断层,开平凹 陷整体发育拆离裂陷期(图 8c)。

(3)底侵拗陷期:随着地壳岩石圈的持续伸展 减薄、下地壳层的抬升和岩浆底侵活动的逐渐增 强,使得地壳的流变性质随着热状态的升高而进一 步向韧性转变,从而导致开平凹陷从脆性伸展的断 陷盆地逐渐过渡为韧性形变的坳陷盆地(图 8d)。

6 结论与认识

(1)开平凹陷发育复杂断裂系统,具有拆离伸展的断裂特征。断裂的剖面和平面构造样式均显示同一条断层在不同时期不同区段活动强度差异大,其主干断层活动强度整体表现为文昌期逐渐增强、后恩平期减弱并停止的特征。

(2)开平凹陷在古近纪文昌组-恩平组沉积期发

生过多次沉积中心迁移。在文昌组时期,开平主洼 为沉积中心,文昌组地层沉积期随着伸展作用的持 续进行逐渐扩展到东洼、西南洼和北洼一带;恩平 组地层沉积期构造活动逐渐减弱,没有较为明显的 沉积中心,整体上沉积中心具有由东北向西南逐渐 迁移的特征,反映开平凹陷构造活动具有很强的迁 移性。

(3)开平凹陷是在南海北部陆缘晚中生代构造 变形基础之上形成的新生代伸展断陷盆地,其经历 的裂陷演化过程可以分为3个阶段:早文昌期的断 陷伸展阶段、晚文昌期的拆离伸展阶段和恩平组时 期的底侵拗陷阶段。开平凹陷的构造演化受控于 珠江口盆地"先存构造约束,拆离薄化主导,岩浆作 用参与"的动力学机制。

参考文献 (References)

- [1] 闫义,夏斌,林舸,等.南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2):53-61.
 [YAN Yi, XIA Bin, LIN Ge, et al. The sedimentary and tectonic evolution of the basins in the north margin of the South China Sea and geodynamic setting [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2):53-61.]
- [2] 程燕君, 吴智平, 张杰, 等. 西江凹陷早新生代断裂演化及其对南海 北缘应力场顺时针旋转的响应[J]. 地球科学, 2020, 45 (6): 2199-2209. [CHENG Yanjun, WU Zhiping, ZHANG Jie, et al. Early Cenozoic evolution of fault system in Xijiang Sag and its implication to clockwise rotation of extension stress in northern margin of South China Sea [J]. Earth Science, 2020, 45 (6): 2199-2209.]
- [3] 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, 2014, 26(5): 20-29. [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): 20-29.]
- [4] 于开平,张功成,梁建设,等.珠江口盆地恩平凹陷油气成藏条件研究[J].石油实验地质,2011,33(5): 509-512. [YU Kaiping, ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe, et al. Petroleum accumulation conditions in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(5): 509-512.]
- [5] 庞雄,陈隽,戴一丁,等. 珠江口盆地白云西-开平凹陷油气聚集及勘探目标研究[J].中国海上油气(地质),1995,9(4):15-23. [PANG Xiong, CHEN Jun, DAI Yiding, et al. Study on hydrocarbon accumulation and exploration targets in west Baiyun-Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995,9(4):15-23.]
- [6] 董冬冬. 南海北部陆缘深水区构造演化及其资源效应[D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2008. [DONG Dongdong. Structural evolution and resource effect of the deepwater area, the northern margin of the South China Sea[D]. Doctor Dissertation of Institute of

Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.]

- [7] 张志业,何登发,李智,等. 珠江口盆地开平凹陷边界断层三维几何 学与运动学[J]. 地球物理学报, 2018, 61 (10): 4296-4307.
 [ZHANG Zhiye, HE Dengfa, LI Zhi, et al. 3D geometry and kinematics of the boundary fault in the Kaiping depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61 (10): 4296-4307.]
- [8] 朱俊章,施洋,熊万林,等.开平凹陷古近系稠油和砂岩储层沥青质成因分析[J].中国海上油气,2020,32(2): 34-43. [ZHU Junzhang, SHI Yang, XIONG Wanlin, et al. Genesis analysis of Paleogene heavy oil and asphaltene in sandstone reservoir in Kaiping Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 34-43.]
- [9] 聂国权,何登发,李小盼,等.珠江口盆地开平凹陷构造沉降史及其 主控因素[J].海相油气地质,2021,26(3):253-262. [NIE Guoquan, HE Dengfa, LI Xiaopan, et al. Tectonic subsidence and its main controlling factors of Kaiping Sag in Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(3):253-262.]
- [10] 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制 作用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2005, 33 (9): 1177-1181. [SHAO Lei, LEI Yongchang, PANG Xiong, et al. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Tongji University:Natural Science, 2005, 33 (9): 1177-1181.]
- [11] 董冬冬, 王大伟, 张功成, 等. 珠江口盆地深水区新生代构造沉积演 化[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33 (5): 17-22,29.
 [DONG Dongdong, WANG Dawei, ZHANG Gongcheng, et al. Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of deepwater area, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33 (5): 17-22,29.]
- [12] 孙杰, 詹文欢, 丘学林. 珠江口盆地白云凹陷构造演化与油气系统的 关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31 (1): 101-107. [SUN Jie, ZHAN Wenhuan, QIU Xuelin. Relationship between tectonic evolution and petroleum systems in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31 (1): 101-107.]
- [13] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 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[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 102-114. [REN Jianye, PANG Xiong, LEI Chao, et al. 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 [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 102-114.]
- Thorsen C E. Age of growth faulting in Southeast Louisiana [J].
 Transactions, Gulf Coast Association of Geological Societies, 1963, 13: 103-110.
- [15] 王燮培, 费琪, 张家骅. 石油勘探构造分析[M]. 武汉: 中国地质大学 出版社, 1990. [WANG Xiepei, FEI Qi, ZHANG Jiahua. Petroleum Tectonics Analysis[M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 1990.]
- [16] 李勤英, 罗凤芝, 苗翠芝. 断层活动速率研究方法及应用探讨[J]. 断 块油气田, 2000(2): 15-17,4. [LI Qinying, LUO Fengzhi, MIAO Cuizhi. Research on fault activity ratio and its application [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2000(2): 15-17,4.]

- [17] 赵勇,戴俊生.应用落差分析研究生长断层[J].石油勘探与开发,2003, 30(3): 13-15. [ZHAO Yong, DAI Junsheng. Identification of growth fault by fault fall analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13-15.]
- [18] 雷宝华. 生长断层活动强度定量研究的主要方法评述[J]. 地球科学 进展, 2012, 27(9): 947-956. [LEI Baohua. Review of methods with quantitative studies of activity intensity of the growth fault [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 947-956.]
- [19] 刘哲, 吕延防, 孙永河, 等. 同生断裂分段生长特征及其石油地质意 义: 以辽河西部凹陷鸳鸯沟断裂为例[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(5): 793-799. [LIU Zhe, LÜ Yanfang, SUN Yonghe, et al. Characteristics and significance of syngenetic fault segmentation in hydrocarbon accumulation: An example of Yuanyanggou fault in western sag, Liaohe depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(5): 793-799.]
- [20] 庞雄,任建业,郑金云,等. 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区白云凹陷为例[J].石油勘探与开 发,2018,45(1): 27-39. [PANG Xiong, REN Jianye, ZHENG Jinyun, et al. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: A case study of Baiyun Sag in the deepwater area of northern South China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 27-39.]
- [21] 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.]
- [22] 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 南海北部陆坡白云深水区油气成藏条件探讨[J]. 中国海上油气, 2006, 18(3): 145-149. [PANG Xiong, CHEN Changmin, ZHU Ming, et al. A discussion about hydrocarbon accumulation conditions in Baiyun Deep-water Area, the northern continental slope, South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(3): 145-149.]
- [23] 米立军,张向涛,庞雄,等.珠江口盆地形成机制与油气地质[J].石

油学报, 2019, 40 (S1): 1-10. [MI Lijun, ZHANG Xiangtao, PANG Xiong, et al. Formation mechanism and petroleum geology of Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40 (S1): 1-10.]

- [24] 郑金云,代一丁,刘军,等. 南海北部陆缘地壳结构及其伸展破裂过程的差异性[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2022, 19(3): 12-22.
 [ZHENG Jinyun, DAI Yiding, LIU Jun, et al. Differences in continental crust structure and its extensional fracture process in northern South China Sea [J]. Journal of Yangtze University:Natural Science Edition, 2022, 19(3): 12-22.]
- [25] 赵美松, 刘海龄, 吴朝华. 南海南北陆缘中生代地层—构造特征及碰撞造山 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1454-1464. [ZHAO Meisong, LIU Hailing, WU Chaohua. Mesozoic stratigraphic and structural features and collisional orogeny between the northern and southern continental margins of South China Sea [J]. Progress in Geo-physics, 2012, 27(4): 1454-1464.]
- [26] 朱荣伟, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海西南次海盆两侧陆缘中生代晚期 构造接触关系[J]. 地球科学, 2021, 46(3): 885-898. [ZHU Rongwei, YAO Yongjian, LIU Hailing, et al. Tectonic contact relationship of continental margins of the southwest sub-basin, South China Sea in Late Mesozoic [J]. Earth Science, 2021, 46(3): 885-898.]
- [27] 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.
- [28] 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61 (12): 4901-4920. [REN Jianye, PANG Xiong, YU Peng, et al. Characteristics and formation mechanism of deepwater and ultra-deepwater basins in the northern continent-al margin of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61 (12): 4901-4920.]
- [29] 侯泉林. 高等构造地质学(第二卷: 新理论与应用)[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [HOU Quanlin. Advanced Structural Geology[M].
 Beijing: Geological Publishing House, 2018.]
- [30] 任建业.中国近海海域新生代成盆动力机制分析[J].地球科学,2018,
 43 (10): 3337-3361. [REN Jianye. Genetic dynamics of China off-shore Cenozoic basins [J]. Earth Science, 2018, 43 (10): 3337-3361.]