doi:10.3799/dqkx.2017.008

# 珠江口盆地珠一坳陷裂后期断裂作用: 迁移、转换及其动力学

叶青1,施和生2,梅廉夫1\*,舒 誉2,刘海伦1,田 巍1,颜 豪1

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074

2. 中海石油有限公司深圳分公司研究院,广东广州 510240

**摘要:**珠江口盆地裂后期断裂作用对新近系油气成藏具有重要影响,但人们对其发育特征及动力学演化规律的认识一直不够.利用钻井约束的高精度三维及二维地震资料对珠一坳陷裂后期断裂的几何学与运动学特征进行了分析,结果表明珠一坳 陷裂后期存在南海期和东沙期两期断裂作用,从南海期断裂作用到东沙期断裂作用,断裂的几何学、运动学特征以及动力学 机制均发生了转换.南海期断裂作用具有从南向北迁移的特征;而东沙期断裂具有由东向西迁移的特征.两期断裂都以伸展 为主,其中东沙期断裂具有微弱扭性特征.南海期断裂区域伸展方向为 NNE10°~15°,东沙期为 NNE20°~25°,区域伸展方向 发生了5°~10°的顺时针偏转.南海期断裂作用发生于南海同扩张期,可能与南海扩张期间北部陆缘残留的伸展作用有关.东 沙期断裂作用形成于南海后扩张期的东沙运动,该时期区域主应力轴 σ₂ 方向与吕宋岛弧和欧亚大陆的挤压碰撞方向一致.东 沙期断裂特征进一步证实了东沙运动是中中新世以来吕宋岛弧与欧亚大陆碰撞的结果.研究结果对整个南海地区裂后期南 海运动与东沙运动的进一步认识具有重要意义.

关键词: 珠一坳陷;裂后期;断裂;迁移;转换;构造.

**中图分类号:** P548 **文章编号:** 1000-2383(2017)01-0105-14

#### **收稿日期:** 2016-06-28

# Post-Rift Faulting Migration, Transition and Dynamics in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin

Ye Qing<sup>1</sup>, Shi Hesheng<sup>2</sup>, Mei Lianfu<sup>1\*</sup>, Shu Yu<sup>2</sup>, Liu Hailun<sup>1</sup>, Tian Wei<sup>1</sup>, Yan Hao<sup>1</sup>

Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China
 Shenzhen Branch of CNOOC Ltd, Guangzhou 510240, China

Abstract: Post-rift fault plays an important role in hydrocarbon accumulation of the Neogene in Pearl River Mouth basin, but understanding of the features and dynamics evolution is to be enhanced in this paper, post-rift fault system in Zhu I depression is studied by geometric and kinematic analysis methods using high quality 3D seismic reflection data. The analysis reveals two episodes of faulting in the post-rift stage, namely, Nanhai-phase faulting and Dongsha-phase faulting. Transition of fault geometry and kinematics from Nanhai-phase to Dongsha-phase indicates a change of dynamics. Both Nanhai-phase faulting and Dongsha-phase faulting have migration. The former migrates from south to north, and the latter migrates from east to west. The two periods of faulting are both extensional faults, with a slight component of shear in Dongsha-phase faulting, with  $5^{\circ}-10^{\circ}$  clockwise rotation. The Nanhai-phase faulting is related to the remaining extension in the northern margin of SCS. The Dongsha-phase faults formed after the cease of the sea-floor spreading of SCS. Coincidently, direction of the regional intermediate principal strain ( $\sigma_2$ ) during the Dongsha-phase faulting is consistent with the collision direction between the Luzon arc and the Eurasian plate. This feature of the Dongsha-phase faulting in Zhu I depression confirms the conclusion that Dongsha

基金项目:国家科技重大专项(No. 2011ZX05023-001-015).

作者简介:叶青(1991-),男,博士研究生,主要从事含油气盆地构造分析.ORCID:0000-0002-7200-5586. E-mail: tqye91@163. com \* 通讯作者:梅廉夫,ORCID:0000-0002-1531-5748. E-mail: lfmei@cug. edu. cn

movement is the result of the collision between the Luzon arc and the Eurasian plate since Middle Miocene. This study is significant for better understanding of Nanhai movement and Dongsha movement.

Key words: Zhu I depression; post-rift; fault; migration; transition; tectonics.

# 0 引言

裂陷盆地的演化按沉降阶段可划分为由断裂作 用控制的同裂陷期(syn-rift)沉降阶段和热作用控 制的裂后期(post-rift)沉降阶段(McKenzie, 1978; Ziegler and Cloetingh, 2004). 对于有新生洋壳生成 的裂谷盆地而言,大陆岩石圈的破裂标志着裂陷盆 地裂陷阶段的结束,以及海底扩张阶段或裂后期沉 降的开始.陆内裂陷阶段大陆地壳发生大范围断陷, 裂后期海底扩张开始以后,裂陷扩展主要位于洋中 脊,早先裂陷的大陆地壳部分不再发生显著的裂陷 作用,盆地演化进入稳定的热沉降阶段.随着人们对 裂谷盆地研究的深入,发现裂谷盆地裂后期演化并 非简单受控于热衰减与负载,其构造活动也较活跃, 表现有岩浆活动、地震活动、隆升作用、流体作用、异 常沉降、构造反转等.裂后期构造变形对伸展盆地及 被动大陆边缘的构造与沉积充填具有强烈的影响 (Cloetingh et al., 2008). Holford et al. (2014)通 过对澳大利亚南部陆缘 Otway 盆地裂后期挤压变 形特征的综合研究,认为被动大陆边缘裂谷盆地裂 后期沉降通常会伴随着挤压变形,发育长波长宽缓 褶皱、隆升剥蚀、低角度不整合等. 断裂作为一种常 见的构造变形,在裂后期构造活动中也极其发育.勘 探实践表明裂后期断裂活动对裂谷盆地的油气运移 成藏具有重要作用.裂谷盆地裂陷期通常是优质烃 源岩发育时期,而裂后期往往是盆地重要的构造圈 闭发育与定型时期,断层能起到沟通下部烃源岩与 上部圈闭的作用.另一方面裂后期断裂作用同时也 会破坏盖层的封闭性,影响油气的保存.因而裂谷盆 地裂后期断裂作用的研究对丰富裂谷盆地裂后期演 化认识以及裂谷盆地油气勘探具有重要意义.

全球很多裂谷盆地裂后期均发育包括逆断层、 正断层、扭性断层等在内的不同程度的断裂活化,其 类型丰富、机制复杂.其中以挤压构造(如逆断层发 育或裂陷期正断层反转)更为普遍,其作用机制主要 为裂后期盆地板块边缘的构造作用(包括海底扩张 期洋中脊对两侧板块的挤压作用、板块俯冲与碰 撞).例如巴西东北陆缘 Rio do Peixe 盆地(Nogueira *et al.*, 2015)、巴西东南陆缘的部分盆地(Cogné *et al.*, 2011)、北美东部陆缘一系列裂陷盆地 (Withjack et al., 1998; Schlische et al., 2003; Withjack and Schlische, 2005)、伊比利亚西南陆缘 的裂谷盆地(Pereira et al., 2011)、非洲西部陆缘 Morocco 地区(Bertotti and Gouiza, 2012)、北美 Midcontinent 裂谷(Soofi and King, 1999, 2002)、 澳大利亚南部陆缘 Otway 盆地(Holford et al., 2014)、中国东部松辽盆地(宋鹰,2010)等. 裂谷盆地 裂后期正断层的发育以重力滑脱机制偏多,在近端 伸展区发育正断层,远端挤压区发育逆断层(Rowan et al., 2004). 例如巴西东北陆缘亚马逊河口盆地 (Silva et al., 1998)、墨西哥湾北部陆缘盆地 (Dooley *et al.*, 2013)、非洲西部尼日尔三角洲 (Cohen and McClay, 1996)等.其次,裂后期岩浆作 用、底辟作用、流体活动以及裂后期岩石圈应力释放 等也会伴生裂后期断裂发育.板块边界的挤压作用 在特殊情况下也会造成陆缘裂谷盆地裂后期正断裂 的发育,如澳大利亚板块与班达岛弧新近纪俯冲碰 撞在澳大利亚西北陆缘形成裂后期正断层活化 (Obrien et al., 1999). 部分裂后盆地裂后期基本无 断裂活动,如北海(Gabrielsen et al., 2001).

裂后期的断裂作用在我国南海北部陆缘裂陷盆 地表现尤为明显,且主体以正断层的发育为特征. Sun et al. (2014)认为南海北部珠江口盆地白云凹 陷裂后期 32.0~13.8 Ma 时期断裂作用主要是重 力作用的结果,而后期13.8 Ma以来的断裂作用与 菲律宾板块与欧亚板块碰撞相关. 琼东南盆地裂后 期晚中新世以来包括断裂作用在内的构造活化与海 南地幔柱密切相关(Mao et al., 2015). 莺歌海盆地 裂后期断裂活动与活跃的超压流体活动有关(殷秀 兰等,2002). 饶春涛等(1993) 对珠江口盆地的 1818 条断裂进行统计分析,认为断裂的发育时间主要集 中在3个阶段,分别是早渐新世以前(833条)、晚渐 新世一早中新世(321条)以及中中新世以后(1479 条),其中后两个阶段发生在裂后期.许新明等 (2014)通过对珠一坳陷恩平凹陷断裂活动性的统 计,结果表明裂后期断裂活动性在晚珠江期(早中新 世)和粤海期(晚中新世)达到两个高峰.珠一坳陷是 南海北部大陆边缘珠江口盆地北部坳陷带次一级负 向单元,裂后期断裂作用对新近系油气成藏具有重 要的影响(李平鲁,1994;姚伯初,1998;田鹏等,

2008;于水明等,2012).多年来的勘探成效揭示了珠 一坳陷浅层新近系油气勘探的良好前景,由于浅层 无生烃能力,因而裂后期断裂体系对古近系油源和 浅层有效圈闭的沟通是浅层成藏的关键.且构造圈 闭目前是珠一坳陷新近系勘探的主要圈闭类型,其 中断裂圈闭占 90%以上.因而开展珠一坳陷裂后期 断裂作用研究对新近系油气勘探具有重要意义.

虽然人们对珠一坳陷裂后期断裂作用开展了长时间的研究,目前也取得了丰富的成果,但仍存在一些关键问题未能得到很好地解决:(1)裂后期两期断裂几何学特征的区别;(2)南海期与东沙期断裂作用到分别具有什么样的演化规律;(3)南海期断裂作用到东沙期断裂作用是如何转换的;(4)两期断裂作用的动力学机制仍存在些许争议.本文利用珠一坳陷大量高分辨率三维及二维地震资料,对珠一坳陷裂后期南海期与东沙期共3000余条断裂的几何学、运动学特征进行了统计分析,揭示了断裂作用的迁移规律以及两期断裂之间的转换关系;并基于珠一坳陷断裂特征及演化对裂后期南海运动和东沙运动的动力学机制进行了相关分析和探讨.

# 1 区域地质概况

珠江口盆地位于华南大陆南缘,南海北部大陆 边缘,是在古生代及中生代复杂褶皱基底上形成的 新生代裂谷盆地.珠一坳陷隶属于珠江口盆地北部 坳陷带,位于南海北部大陆边缘陆架区,呈 NE 向展 布,大致与海岸线平行.西北邻北部隆起带,东南部 受控于东沙隆起和番禺低隆起,西南与珠三坳陷相 邻.自西向东依次可划分为5个凹陷,分别为恩平凹 陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷、韩江凹陷(朱红 涛等,2016).本次研究范围覆盖恩平凹陷、西江凹 陷、惠州凹陷和陆丰凹陷一部分,面积约为 20000 km<sup>2</sup>(图1).研究区裂陷期发育 NE-NEE 向 边界断裂,呈左阶式雁行排列,控制着坳陷内部不同 的负向构造单元.坳陷内发育恩西低凸起、惠西低凸 起、惠中低凸起以及惠陆低凸起等正向构造单元.

珠一坳陷以 T70 地震反射层为界,具有下断上 拗的双层结构及下陆上海的沉积特点. 盆地自下而 上依次沉积了古近系文昌组(Tg-T80)、恩平组 (T80-T70)和珠海组(T70-T60),新近系珠江组 (T60-T40)、韩江组(T40-T32)、粤海组(T32-T30)、 万山组(T30-T20)及第四系(T20-海底),先后经历 了多期构造运动(李平鲁,1993)(图 2). 裂后期持续 稳定的海相沉积地层精确地记录了裂后期构造事 件,为珠一坳陷裂后期断裂演化研究提供了基础,南 海在 32 Ma 前后打开并分离出南海南北大陆,在 15.5 Ma 左右停止扩张(Briais et al., 1993; Sun et al., 2006). 基于整个南海演化的动力学背景,可以 将珠一坳陷的演化划分出3大构造演化阶段:(1)同 裂陷期,南海扩张前的陆内裂陷阶段(Tg-T70),这 一阶段珠一坳陷经历了两幕裂陷作用: 文昌组 NNW 向裂陷 I 幕,恩平组近 SN 向裂陷 Ⅱ幕:(2) 同扩张期,陆内裂陷结束,南海运动导致岩石圈破裂



图 1 珠一坳陷区域位置及构造单元 Fig. 1 Regional location and structural units of Zhu I depression





(T70),南海洋盆打开,整个阶段持续至中中新世 (早韩江期);(3)后扩张期,南海停止扩张以后,中中 新世以来受东沙运动的影响,盆地晚期构造活化(赵 淑娟等,2012;田巍等,2015).

# 2 珠一坳陷裂后期断裂发育特征

#### 2.1 断裂活动期次

同生断层的活动速率是反映断裂活动时期和断裂活动强度的重要指标,是指某一地层单元在一定时期内,因断裂活动形成的落差与相应沉积时间的比值.为厘清珠一坳陷裂后期断裂的活动速率进行了统计,并通过求平均值的方法来反映3个凹陷各时期断裂的整体活动强度(图3).结果显示,珠一坳陷恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷裂后期各沉积时期断裂的平均活动速率都不超过20m/Ma,裂后期断裂活动速率存在3个峰值,分别是珠海期、晚珠江时期、晚韩江一粤海期.其中珠海期(Ia)与晚珠江期(Ib)断裂活动处于南海同扩张期,为南海期断裂作用,晚珠江期断裂活动较珠海期强.晚韩江期





#### 2.2 断裂系统的划分

图 4 为自西向东分别过恩平凹陷、西江凹陷与 惠州凹陷这 3 条垂直构造走向的剖面,它们基本反 映了珠一坳陷断裂发育类型.珠一坳陷裂陷期发育 珠琼一幕和珠琼二幕两期断裂作用,裂陷期大部分 断裂活动止于 T70,部分断裂裂后期持续活动.基于 断裂的活动期次,笔者大致可以以 T35 界面将裂后 期断裂构造层划分为南海期断裂构造层和东沙期断 裂构造层.南海期新生断裂发育层位主要位于下珠 江组一下韩江组,向下不切穿 T70,向上不切穿 T35;东沙期新生断裂主要发育在上韩江组以上地



图 4 珠一坳陷断层系统剖面 Fig. 4 Typical seismic profiles of fault system in Zhu I depression 剖面位置见图 1

层,向下一般不切穿 T40. 部分东沙期断裂向下切割 层位较深到南海期构造层,但其在南海期不具有 活动性.

裂陷期在裂陷层中发育的大量伸展性断层成为 裂后期断裂发育的先存薄弱面,对裂后期断裂的发 育具有重要影响.在同样应力状态下,先存断层的重 新活动或沿薄弱带产生破裂比新形成相同产状的断 层要容易得多(Morley et al., 2004;童亨茂等, 2009).裂陷期断裂在裂后期是否有继承性活动取决 于很多因素,比如裂后期构造强度、裂后期伸展方 向、裂陷期断面之间的交角大小等.本次研究聚焦裂 后期断裂,对其自裂陷期向裂后期断裂的过渡不作 深入探讨.不论是南海期断裂作用还是东沙期断裂 作用,都发育继承性断裂和新生断裂.其中新生断裂 直接表现,其特征最能反映构造动力学属性.因此, 为研究南海期与东沙期断裂作用动力学特征,有必 要对裂后期两期断裂作用的继承与新生断裂分开进 行研究.笔者基于断裂的继承发育规律,将南海期活 动断裂划分成3类:Ic珠琼一幕开始发育,持续活 动至南海期的断裂(包括东沙期继续活动的断裂IIa); Ib珠琼二幕开始发育,持续活动至南海期的断裂(包 括东沙期继续活动的断裂IIb);Ia南海期新生断裂(包 括东沙期继续活动的断裂IIc).笔者将东沙期活动断 裂划分成4类:IId珠琼一幕开始发育,持续活动至东 沙期的断裂;IIb南海运动开始发育,持续活动至东沙 期的断裂;IIb南海运动开始发育,持续活动至东沙期

南海期断裂与东沙期断裂继承性较强,多数南 海期断裂都会在东沙期持续活动.东沙期新生断裂 表1 珠一坳陷裂后期不同类型断裂发育统计

第	42	卷
11		<u> </u>

Table 1 The statistics of different types of post-rift faults in Zhu $ { m I} $ depression										
断裂 期次	类型	恩平凹陷		西江凹陷		惠州凹陷		珠一坳陷		
		数量 (条)	总长度 (km)	数量 (条)	总长度 (km)	数量 (条)	总长度 (km)	数量 (条)	走向平均值 (°)	总长度 (km)
东沙期	∏ a	42	147	30	124	105	304	177	112	575
	∏ b	80	285	21	58	47	193	148	108	536
	∏ с	73	621	17	106	28	141	118	104	868
	∏ d	28	228	21	152	96	907	145	103	1 287
	总数	223	1 281	89	440	276	1 545	588	—	3 266
南海期	Ιa	151	372	30	78	70	147	251	104	597
	Ιb	129	835	18	40	71	277	218	103	$1\ 152$
	Ιc	50	232	37	259	169	1 192	256	101	1 683
	总数	330	1 439	85	377	310	1 616	725	_	3 4 3 2



#### 图 5 珠一坳陷南海期断裂发育分布 Fig. 5 The distribution of Nanhai stage faults in Zhu I depression a. 断裂走向玫瑰花图;b. 断裂倾角玫瑰花图;①~⑦见图 9

以高角度平板式断面为特征,其在番禺4洼东南部东 沙隆起之上表现尤为明显. 南海期断裂倾角相对东沙 期断裂较缓,断面在地震剖面上以铲式为主.继承性 断裂([b、[c、]]b、][c、]]d)以铲式断面为主,长期继承性 断裂(IId)断裂在裂陷期通常为洼陷边界断裂.

#### 2.3 断裂几何学特征

笔者通过切过断裂的地震剖面分析并基于断裂 的发育层位及活动速率,对珠一坳陷南海期、东沙期 活动断裂进行筛选. 珠一坳陷南海期发育断裂达 725条,东沙期断裂达580条,不同类型断裂数量、 长度和走向统计如表1所示. 南海期活动断裂普遍 切穿 T50 反射界面,其在 T50 界面断裂平面图上的 分布如图 5 所示. 东沙期活动断裂普遍切穿 T32 反 射界面,将东沙期活动断裂在 T32 界面断裂平面图 上分类成图(图 6). 从不同类型断裂发育数量与平 面展布特征来看,无论是南海期断裂还是东沙期断 裂,断裂类型都以继承性断裂为主,新生断裂较少. 其中珠琼一幕继承性发育的断裂( ] c、 Ⅱ d)数量在 坳陷东部多于西部,凹陷西部以珠琼二幕继承性断 裂([b, ]] c)为主,反映了珠一坳陷断裂继承性活动 东部比西部强.

东沙期断裂在平面上发育共轭雁行断裂系(图 6),是沿共轭剪切破裂面的雁行张性破裂,其中一组 呈左阶式排列,另一组为右阶式排列,并且左阶式展 布断裂系更加发育.两组断裂系之间夹角为 45°~ 55°. 南海期断裂倾角为50°~75°,集中于60°左右;



图 6 珠一坳陷东沙期断裂发育分布 Fig. 6 The distribution of Dongsha stage faults in Zhu I depression a. 断裂走向玫瑰花图; b. 断裂倾角玫瑰花图



图 7 珠一坳陷典型扭曲断面立体图 Fig. 7 3D geometry of a typical twisted fault surface in Zhu I depression 断裂位置见图 6

东沙期,断层倾角较大,以 70°~80°为主.南海期一 东沙期继承发育断裂的断面在空间上发生明显的扭 曲现象,断面呈下缓上陡的特征(图 7).

对断层走向统计有助于分析断裂形成时期应力 场.南海期断裂和东沙期断裂走向均为 NWW 向, 断裂在平面展布上以弧形为主.南海期新生断裂 ([a)走向优势方向在 100°~105°,平均方位角为 104°;珠琼二幕继承性断裂([b)平均方位角为 103°;珠琼一幕继承性断裂([c)走向平均方位角为 101°(图 5).东沙期新生断裂([[a)走向优势方向在 110°~115°,其平均方位角为112°;南海期继承性断裂(Ⅱb)平均方位角为108°;珠琼二幕继承性断裂(Ⅱc)平均方位角为104°;珠琼一幕继承性断裂(Ⅱd)平均方位角为103°(图6).继承性断裂走向相对于新生断裂发生了微弱逆时针的旋转,反映了先存裂陷期断裂对裂后期断裂作用的影响.

断裂的长度反映了断裂发育规模.珠一坳陷南 海期、东沙期断裂长度从几百米到十几千米不等.新 生断裂(Ⅱa、Ⅲa)延伸短,大部分长度不超过4km (图 8).继承性断裂平面延伸相对较长,南海期、东









沙期不同类型断裂的长度统计结果显示:继承期次 越多的断裂其平面延伸长度越大( [ a< [ b< ] c, Ⅱ a< Ⅱ b< Ⅱ c< Ⅱ d),东沙期断裂长度较南海期断 裂长度更大.

## 3 裂后期断裂作用迁移与转换

#### 3.1 断裂作用迁移

断裂作用迁移是指在同一时期的不同地区,以 及不同时期相同地区或不同地区,断裂的规模、强 度、性质随区域地球动力的变化而呈现一定方向的 变化规律(孙晓猛等,2005),这是构造演化过程中的 一种普遍现象.在靠近构造运动发起端构造活动较 强,构造发育时间早,向远处构造变形逐渐减弱,构 造发育时间变晚.构造迁移类型是鉴别不同地球动 力学机制的直接且非常重要的标志之一.

珠一坳陷裂后期断裂发育在平面上具有迁移性 规律,反映其断裂活动性在空间分布上具有一定变 化规律.笔者在珠一坳陷内自西向东选取了7块小 区域(位置见图5),分别位于恩平凹陷、西江凹陷和 惠州凹陷南北边界附近,对所选区域内裂后期断裂 的活动速率进行统计分析(图 9),通过珠一坳陷南 海期与东沙期断裂活动高峰时间的变化来反映断裂 的迁移规律.珠海期断裂活动(Ia)虽然也属于南海 期断裂活动,但是由于珠海期南海刚从陆内裂陷进 入扩张期,断裂活动受陆内裂陷的影响较强,实践中 笔者在研究南海期断裂迁移时以第二期断裂活动高 峰(Ib)的迁移变化为依据.

从7个统计点的活动速率直方图都可以看出, 不同区域南海期、东沙期断裂活动高峰期在时间上 有所差异.①~⑤区域南海期断裂活动速率都在晚 珠江期(T50)达到最大,而北部⑥~⑦区域南海期 断裂活动速率最大值在早韩江组期(T40).珠一坳 陷东部⑤~⑦区域(惠州凹陷)东沙期断裂活动速率 在晚韩江期(T35)达到最大,而西部①~④区域(西 江凹陷与恩平凹陷)东沙期断裂活动峰值在粤海期. 上述现象表明珠一坳陷裂后期南海期断裂发育具有 南早北晚的特征,断裂由南向北迁移(图5);而东沙 期断裂发育东部早,西部晚,断裂演化具有自东向西 迁移的特征(图6).南海期断裂与东沙期断裂迁移方 向的差异反映了两期断裂作用动力学机制的转变.

#### 3.2 断裂作用转换

3.2.1 断裂特征变化 珠一坳陷裂后从南海期到 东沙期,断裂的几何学与运动学特征发生了转变.笔 者通过对典型南海期与东沙期新生断层几何学与运 动学特征的研究,揭示出从南海期到东沙期断裂的 走向、倾角以及断裂的活动速率等参数发生了较大 变化(图 10).南海期新生断裂走向为 100°~105°, 到东沙期以后断裂走向顺时针偏转,集中于 110°~ 115°.南海期断裂倾角集中在 50°~75°,集中于 60 左右,与自然界中常见正断层的倾角一致.东沙期, 断层倾角增大,为 70°~80°,体现出扭动作用分量对 断层 的影响.南海期断裂活动速率普遍大于



图 9 珠一坳陷裂后期断裂作用迁移特征 Fig. 9 The migration pattern of post-rift faulting in Zhu I depression



图 10 南海期新生断裂与东沙期新生断裂特征对比 Fig. 10 Different features of Nanhai and Dongsha stage faults



 $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3, \sigma_3 \le 0$ 

图 11 珠一坳陷裂后期应力场转换 Fig. 11 The transition of post-rift stress field in Zhu I depression

15 m/Ma,到东沙期断裂活动性减弱,整体不超过 10 m/Ma.

3.2.2 应力场转换 利用各种地质构造形变痕迹 反推形变作用发生时期的构造应力方向,是确定构 造应力方向的一种重要地质方法(万天丰,1983).依 据安德森理想断层形成模式,形成正断层的应力状 态是最大主应力(σ1)直立,即垂直于地表;中间主应 力(o<sub>2</sub>)水平,且与断层走向一致;最小主应力(o<sub>3</sub>)水 平,且与断层倾向一致.对于非均匀介质和先存构造 与薄弱面发育的地质体而言,不能直接依据安德森 模式利用断裂走向来判断主应力方向. 先存断裂和 薄弱面会造成局部应力场的偏转(Morley et al., 2004; Morley, 2010; Corti et al., 2013),利用其 走向来恢复构造运动中区域应力场的方向会造成较 大偏差(Philippon et al., 2015). 构造期新生断裂 较少受早期先存断裂的影响,是应力场在地质体中 的直接表现,其走向最能反映构造期间区域应力场 方向(童亨茂等,2009).因而利用 [ a 和 ] a 断裂走 向能最准确地分别恢复南海期与东沙期区域伸展方 向. 初始张性破裂和共轭雁行排列的初始张节理可 以较好地确定断裂形成构造期主应力方向. 笔者根 据珠一坳陷南海期、东沙期新生断裂的走向以及东 沙期共轭雁行排列断裂的展布,确定出珠一坳陷裂 后期南海运动与东沙运动应力场(图 2,图 11). 南海 期区域伸展方向(σ<sub>3</sub>)为NNE10°~15°,东沙期为 NNE20°~25°,两期构造运动伸展方向发生了5°~ 10°顺时针的偏转.从南海期到东沙期主应力大小也 发生了变化,一方面,伴随着南海扩张的结束,最小 主应力σ<sup>3</sup> 增大;另一方面,来自东部菲律宾板块吕 宋岛的挤压使得中间主应力σ<sup>2</sup> 增大并接近最大主 应力轴σ<sup>1</sup>.中间主应力σ<sup>2</sup> 的增大导致断层发育过程 中剪切角变小(Mogi, 1967),正断层倾角变大;若进 一步增大成最大主应力,其会沿着共轭雁行张性破 裂的排列方向形成共轭剪切面,进而发育走滑断层. 两期断裂作用伸展方向及主应力的变化,是裂后期 动力学机制转换的重要标志.

5°~10

 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \sigma_2 > 0$ 

# 4 动力学讨论

南海同扩张期断裂发育的动力学机制是一个值 得深思的问题.北大西洋扩张期间对两岸的陆块强 烈的推挤造成了北美东部大陆边缘裂陷盆地裂后期 的构造反转(Schlische et al., 2003).南海作为西太 平洋的边缘海,周围为大陆,洋壳俯冲和海底扩张必 然受周围大陆运动所制约(李三忠等,2012).南海北 部陆缘珠江口盆地裂后期的演化必然受周边板块作 用影响.珠一坳陷南海期断裂发育处于南海海盆同 扩张期,面对来自南部岩石圈的强烈扩张运动不但 没有强烈挤压作用的构造形迹(林长松等,2006),反 而在区域伸展应力背景下发育了广泛分布的正断 裂,具有很独特的演化特征.Sun et al.(2014)认为 珠江口盆地白云凹陷裂后期 32.0~13.8 Ma 的断

裂活动主要与差异沉降导致的重力作用有关,其主 要证据是在白云凹陷内部观察到与伸展构造并存的 挤压痕迹,且呈随机分布.但笔者在盆地北部珠一坳 陷没有观察到这一现象.在区域构造位置上珠一坳 陷位于陆缘近端带(proximal domain),而白云凹陷 处于减薄带(necking domain),其断裂发育规律以 及动力学机制可能存在差异.从珠一坳陷南海期断 裂由南向北迁移的特征来看,南海期断裂的发育可 能与南部南海海盆的扩张有直接关系.另一方面,珠 一坳陷南海期断裂活动高峰期主体为晚珠江期 (18.5~16.5 Ma),在时间上与整个珠江口盆地裂 后期异常沉降时间(Zhou et al., 2009;赵中贤等, 2010;刘明辉等,2015)近一致.二者时间上的吻合是 否表明南海期断裂作用与裂后期异常沉降有成因上 的联系,有可能南海扩张期残留的伸展作用仍然在 南海北部大陆产生影响.

东沙运动的形成机制一直以来存在较大的争 议,目前大多数学者认为其是由菲律宾海板块向 NWW 方向运动,在台湾地区发生的吕宋岛弧与欧 亚大陆的弧一陆碰撞引起的(李平鲁,1993;姚伯初, 1998; Lüdmann and Wong, 1999; Huang et al., 2001; Sibuet et al., 2002;赵淑娟等, 2012;程世秀 等,2012). 这次构造运动具有东强西弱的特点 (Briais et al., 1993;李平鲁, 1994;蔡周荣等, 2010; 赵淑娟等,2012),在发育时间上与吕宋岛弧与欧亚 大陆的碰撞时间相对应(赵淑娟等,2012).该弧陆碰 撞自作用区往西具有差异性构造表现,碰撞使得台 湾中央山脉隆起和逆断层发育,台西盆地消亡而成 为残留弧后前陆盆地,珠江口盆地和台西南盆地出 现近 SN 向雁列的宽缓褶皱变形(程世秀等,2012). 而该构造运动到珠一坳陷表现为 NWW 向张扭性 断裂广泛发育,且具有从东向西迁移的特征.前人研 究表明,中中新世以来的菲律宾海板块吕宋岛弧与 欧亚大陆的碰撞方向为 NWW290°~310°(Suppe, 1984; Seno et al., 1993; Huang et al., 2001, 2006; Kao et al., 2000;孙金龙等, 2011). 通过对珠 一坳陷东沙期断裂走向分析,笔者认为该时期区域 应力场中间主应力轴  $\sigma_2$  方向为  $110^{\circ} \sim 115^{\circ}$ (即 290°~295°),这和吕宋岛弧与欧亚大陆的碰撞方向 十分接近.东沙运动由岛弧一陆缘一内陆构造活动 强度逐渐降低,该碰撞挤压在靠近碰撞带的区域表 现为最大主应力 σ1 水平是压应力,而发育有逆断 层、背斜等挤压变形;往西部远离碰撞带至珠一坳陷 压应力强度减小,表现为中间主应力 $\sigma_2$ ,为珠一坳

陷 NWW 向张扭性断裂发育提供了应力条件. 东沙 期从吕宋岛弧与欧亚板块碰撞带从东向西主应力轴 方位的转变目前主要体现在构造变形的差异上,未 来更多工作获得的证据可能会进一步支撑这一认 识. 珠一坳陷东沙期断裂特征进一步证实了东沙运 动是吕宋岛弧与欧亚大陆边缘弧一陆碰撞的结果. 目前,人们对于东沙运动影响的范围以及作用时间 存在一定的争议. 大多数学者认为东沙运动主要发 生在南海东北部海区及其邻区,以东沙隆起和潮汕 坳陷表现最为明显(Briais et al., 1993; Huang et al., 2001;陈汉宗等, 2005),在珠一坳陷东北部的 韩江凹陷也有明显的影响(吴时国等,2004;夏斌等, 2007). 从珠一坳陷裂后期断裂研究结果来看, 东沙 运动向西至恩平凹陷仍有强烈的表现,至于其是否 对西部珠三凹陷、琼东南盆地等也有影响需要进一 步研究. 赵淑娟等(2012)根据区域不整合面的发育 以及断裂的活动时间认为东沙运动在晚中新世末/ 早上新世初(5.5 Ma,T30)停止活动. 而笔者在珠一 坳陷断裂活动的研究中发现多数东沙期断裂在 T30 界面处仍然有较大断距,部分断裂甚至切穿 T20 界 面到达海底. 这表明在5.5 Ma以后局部地区断裂仍 然有强烈活动.

### 5 结论

(1)珠一坳陷裂后期存在南海期和东沙期两期 断裂活动.两期断裂几何学特征存在较大的差异,且 动力学机制发生了转换.南海期断裂区域伸展方向 为 NNE10°~15°,东沙期为 NNE20°~25°,区域伸 展方向发生了 5°~10°的顺时针偏转.东沙期断裂具 有张扭性特征,发育共轭雁行断裂系,断层倾角大, 珠一坳陷东部裂后期断裂继承性比西部强.

(2)珠一坳陷南部南海期断裂活动强烈时期为 晚珠江期,而北部地区断裂活动强烈时期为早韩江 期.南海期断裂作用具有从南向北迁移的特征,且断 裂活动高峰期与裂后期异常沉降时间相吻合,可能 与南海扩张期间南海北部陆缘残留的伸展作 用有关.

(3)珠一坳陷东部惠州凹陷东沙期断裂活动强 烈时期位于早韩江期,而西部西江凹陷和恩平凹陷 为粤海期.东沙期断裂作用具有自东向西迁移、东强 西弱的特征,其发育时间和吕宋岛弧与欧亚大陆的 碰撞时间相对应,且东沙期区域主应力方向 σ<sub>2</sub> 与吕 宋岛弧与欧亚大陆的碰撞方向近一致.东沙期断裂 作用特征进一步证实了东沙运动是中中新世以来吕 宋岛弧与欧亚大陆弧一陆碰撞的结果.

#### References

- Bertotti, G., Gouiza, M., 2012. Post-Rift Vertical Movements and Horizontal Deformations in the Eastern Margin of the Central Atlantic: Middle Jurassic to Early Cretaceous Evolution of Morocco. International Journal of Earth Sciences, 101 (8): 2151 – 2165. doi: 10. 1007/ s00531-012-0773-4
- Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea; Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*; *Solid Earth*, 98 (B4); 6299 – 6328. doi: 10.1029/92JB02280
- 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).
- 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).
- Cloetingh, S., Beekman, F., Ziegler, P. A., et al., 2008. Post-Rift Compressional Reactivation Potential of Passive Margins and Extensional Basins. *Geological Society*, *London*, Special Publications, 306(1):27-70. doi:10. 1144/SP306.2
- Cogné, N., Gallagher, K., Cobbold, P. R., 2011. Post-Rift Reactivation of the Onshore Margin of Southeast Brazil: Evidence from Apatite (U-Th)/He and Fission-Track Data. *Earth and Planetary Science Letters*, 309 (1):118-130. doi:10.1016/j.epsl.2011.06.025
- Cohen, H. A., McClay, K., 1996. Sedimentation and Shale Tectonics of the Northwestern Niger Delta Front. Marine and Petroleum Geology, 13(3): 313-328. doi:10. 1016/0264-8172(95)00067-4
- Corti, G., Philippon, M., Sani, F., et al., 2013. Re-Orientation of the Extension Direction and Pure Extensional Faulting at Oblique Rift Margins: Comparison between the Main Ethiopian Rift and Laboratory Experiments, *Terra Nova*, 25(5);

396-404. doi:10. 1111/ter. 12049

- Dooley, T. P., Jackson, M. P. A., Hudec, M. R., 2013. Coeval Extension and Shortening above and below Salt Canopies on an Uplifted, Continental Margin: Application to the Northern Gulf of Mexico. AAPG Bulletin, 97(10):1737-1764. doi:10.1306/03271312072
- Gabrielsen, R. H., Kyrkjebo, R., Faleide, J. I., et al., 2001. The Cretaceous Post-Rift Basin Configuration of the Northern North Sea. *Petroleum Geoscience*, 7(2):137-154. doi:10.1144/petgeo.7.2.137
- Holford, S. P., Tuitt, A. K., Hillis, R. R., et al., 2014. Cenozoic Deformation in the Otway Basin, Southern Australian Margin: Implications for the Origin and Nature of Post-Breakup Compression at Rifted Margins. *Basin Research*, 26(1):10-37. doi:10.1111/bre.12035
- Huang, C. Y., Xia, K., Yuan, P. B., et al., 2001. Structural Evolution from Paleogene Extension to Latest Miocene-Recent Arc-Continent Collision Offshore Taiwan: Comparison with on Land Geology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(5): 619-639. doi: 10.1016/S1367-9120 (00)00065-1
- Huang, C. Y., Yuan, P. B., Tsao, S. J., 2006. Temporal and Spatial Records of Active Arc-Continent Collision in Taiwan: A Synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, 118(3-4):274-288. doi:10.1130/B25527.1
- Kao, H., Huang, G. C., Liu, C. S., 2000. Transition from Oblique Subduction to Collision in the Northern Luzon Arc-Taiwan Region: Constraints from Bathymetry and Seismic Observations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105 (B2): 3059 – 3079. doi: 10. 1029/1999JB900357
- Li,P. L., 1993. Cenozoic Tectonic Movement in the Pearl River Mouth Basin. China Offshore Oil and Gas (Geology), 7 (6):11-17 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. L., 1994. Structural Features and Oil-Gas Accumulation in Pearl River Mouth Basin. *Guangdong Geology*, 9 (4):21-28 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Suo, Y. H., Liu, X., et al., 2012. Basin Dynamics and Basin Groups of the South China Sea. *Marine Geol*ogy & Quaternary Geology, 32(6):55-78 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Gao, J. Y., Yu, X. J., et al., 2006. Characteristics of Tectonic Movement in the Northern Part of South China Sea during the Cenozoic. Acta Oceanologica Sinica, 28(4):81-86 (in Chinese with English abstract).
- Liu, M. H., Mei, L. F., Yang, Y. J., et al., 2015. Temporal-Spatial Differences of Subsidence between Syn- and Post-Rift Stages in Northern Huizhou Sag of Pearl Riv-

er Mouth Basin and Their Main Control Factors. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(2):31-43 (in Chinese with English abstract).

- Lüdmann, T., Wong, H. K., 1999. Neotectonic Regime on the Passive Continental Margin of the Northern South China Sea. *Tectonophysics*, 311(1):113-138. doi:10. 1016/S0040-1951(99)00155-9
- Mao, K. N., Xie, X. N., Xie, Y. H., et al., 2015. Post-Rift Tectonic Reactivation and Its Effect on Deep-Water Deposits in the Qiongdongnan Basin, Northwestern South China Sea. Marine Geophysical Research, 36(2):227– 242. doi:10.1007/s11001-015-9248-x
- McKenzie, D., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1): 25 – 32. doi: 10. 1016/0012 – 821X(78) 90071–7
- Mogi, K., 1967. Effect of the Intermediate Principal Stress on Rock Failure. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 72 (20): 5117 - 5131. doi: 10. 1029/ JZ072i020p05117
- Morley, C. K., 2010. Stress Re-Orientation along Zones of Weak Fabrics in Rifts: An Explanation for Pure Extension in 'Oblique' Rift Segments? *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3):667-673. doi:10.1016/j.epsl. 2010.07.022
- Morley, C. K., Haranya, C., Phoosongsee, W., et al., 2004. Activation of Rift Oblique and Rift Parallel Pre-Existing Fabrics during Extension and Their Effect on Deformation Style: Examples from the Rifts of Thailand. Journal of Structural Geology, 26 (10): 1803 – 1829. doi: 10.1016/j. jsg. 2004. 02.014
- Nogueira, F. C. C. , Marques, F. O. , Bezerra, F. H. R. , et al. , 2015. Cretaceous Intracontinental Rifting and Post-Rift Inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin. *Tectonophysics*, 644 – 645: 92 – 107. doi: 10. 1016/j. tecto. 2014. 12. 016
- Obrien, G. W., Lisk, M., Duddy, I. R., et al., 1999. Plate Convergence, Foreland Development and Fault Reactivation: Primary Controls on Brine Migration, Thermal Histories and Trap Breach in the Timor Sea, Australia. Marine and Petroleum Geology, 16(6): 533-560. doi: 10.1016/S0264-8172(98)00070-1
- Pereira, R., Alves, T. M., Cartwright, J., 2011. Post-Rift Compression on the SW Iberian Margin (Eastern North Atlantic): A Case for Prolonged Inversion in the Ocean-Continent Transition Zone. Journal of the Geological Society, 168 (6): 1249 – 1263. doi: 10. 1144/0016 – 76492010-151

- Philippon, M., Willingshofer, E., Sokoutis, D., et al., 2015. Slip Re-Orientation in Oblique Rifts. *Geology*, 43(2): 147-150. doi:10.1130/G36208.1
- Rao, C. T., Li, P. L., Zhong, H. P., 1993. Discussion on Fault Features and Their Sealing in Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 7(4): 7-15 (in Chinese with English abstract).
- Rowan, M. G., Peel, F. J., Vendeville, B. C., 2004. Gravity-Driven Fold Belts on Passive Margins. AAPG Memoir, 82: 157 - 182. doi: 10. 1306/61EECE28 - 173E -11D7-8645000102C1865D
- Schlische, R. W., Withjack, M. O., Olsen, P. E., 2003. Relative Timing of CAMP, Rifting, Continental Breakup, and Basin Inversion: Tectonic Significance. *Geophysical Monograph Series*, 136:33-59. doi:10.1029/136gm03
- Seno, T., Stein, S., Gripp, A. E., 1993. A Model for the Motion of the Philippine Sea Plate Consistent with NUVEL-1 and Geological Data. *Journal of Geophysi*cal Research, 98 (B10): 17941 – 17948. doi: 10. 1029/ 93JB00782
- Sibuet, J. C., Hsu, S. K., Pichon, X. L., et al., 2002. East Asia Plate Tectonics since 15 Ma: Constraints from the Taiwan Region. *Tectonophysics*, 344(1):103-134. doi: 10.1016/S0040-1951(01)00202-5
- Silva, S. R. P., Maciel, R. R., Severino, M. C. G., 1998. Cenozoic Tectonics of Amazon Mouth Basin. *Geo-Marine Letters*, 18(3):256-262. doi:10.1007/s003670050077
- Song, Y. ,2010. The Post-Rift Tectonic Inversion of Songliao Basin, NE China and Its Dynamical Background (Dissertation). China University of Geoscience, Wuhan, 5-12 (in Chinese with English abstract).
- Soofi, M. A., King, S. D., 1999. A Modified Beam Analysis Effect of Lateral Forces on Lithospheric Flexure and Its Implication for Post-Rift Evolution of the Midcontinent Rift System. *Tectonophysics*, 306(2):149-162. doi:10. 1016/S0040-1951(99)00048-7
- Soofi, M. A., King, S. D., 2002. Post-Rift Deformation of the Midcontinent Rift under Grenville Tectonism. *Tectonophysics*, 359(3): 209-223. doi: 10.1016/S0040-1951 (02)00512-7
- Sun, J. L., Xu, H. L., Cao, J. H., 2011. Crustal Movement and Its Dynamic Mechanism of the Taiwan-Luzon Convergent Zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3016-3025 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Wang, P. J., Hao, F. J., et al., 2006. Space-Time Distribution Features, Migration Regularities and Genetic Types of Regional Fault System of Meso-Cenozoic in the Central Section of Epicontinent of the East China, *Journal*

第1期

of Jilin University (Earth Science Edition), 35(5):554– 563 (in Chinese with English abstract).

- Sun, Z., Xu, Z., Sun, L., et al., 2014. The Mechanism of Post-Rift Fault Activities in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. Journal of Asian Earth Sciences, 89: 76-87. doi:10.1016/j.jseaes. 2014.02.018
- Sun, Z., Zhou, D., Zhong, Z. H., et al., 2006. Research on the Dynamics of the South China Sea Opening: Evidence from Analogue Modeling. *Science in China* (*Series D*), 49(10): 1053 - 1069. doi: 10. 1007/s11430 - 006 -1053-6
- Suppe, J., 1984. Kinematics of Arc-Continent Collision, Flipping of Subduction, and Back-Arc Spreading near Taiwan. Memoir of the Geological Society of China, 6: 21-33.
- Tian, P., Mei, L. F., Yu, H. L., et al., 2008. The Faults in Huizhou Sag and Their Controls on the Petroleum Accumulation. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(5): 591-594 (in Chinese with English abstract).
- Tian, W., He, M., Yang, Y. J., et al., 2015. Complex Linkage and Transformation of Boundary Faults of Northern Huizhou Sag in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 40 (12):2037-2051 (in Chinese with English abstract).
- Tong, H. M., Nie, J. Y., Meng, L. J., et al., 2009. The Law of Basement Pre-Existing Fabric Controlling Fault Formation and Evolution in Rift Basin. *Earth Science Frontiers*, 16 (4):97-104 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., 1983. Tension Joints and Its Mechanism. Earth Science, (3):58-61,148 (in Chinese with English abstract).
- Withjack, M. O., Schlische, R. W., 2005. A Review of Tectonic Events on the Passive Margin of Eastern North America. 25th Annual Bob F. Perkins Research Conference: Petroleum Systems of Divergent Continental Margin Basins, Houston, 203 – 235. doi: 10. 5724/gcs. 05. 25. 0203
- Withjack, M. O., Schlische, R. W., Olsen, P. E., 1998. Diachronous Rifting, Drifting, and Inversion on the Passive Margin of Central Eastern North America: An Analog for Other Passive Margins. AAPG Bulletin, 82 (5): 817-835. doi: 10. 1306/1d9bc60b 172d 11d7 8645000102c1865d
- Wu, S. G., Liu, Z., Wang, W. Y., et al., 2004. Late Cenozoic Neotectonics in the Dongsha Islands Region and Its Responds to Collision between Chinese Continental Margin and Luzon. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 35(6): 481-490 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., Lü, B. F., Wu, G. G., et al., 2007. The Cenozoic Tectonic Transport and Its Control on the Source Rock in the

Northern South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 18(5): 629–634 (in Chinese with English abstract).

- Xu, X. M., Chen, S. H., Wang, F. G., et al., 2014. Structural Features and Its Impacts on Hydrocarbon Accumulation of Neogene in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Geosci*ence, 28(3):543-550 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 1998. The Tectonic Evolution and Sedimentary Basins of South China Sea in Cenozoic. *Geological Re*search of South China Sea, (10): 1-17 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. L., Li, S. T., Yang, J. H., et al., 2002. Correlations between Overpressure Fluid Activity and Fault System in Yinggehai Basin. Acta Geoscientia Sinica, 23 (2): 141-146 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. M., Chen, X. F., Mei, L. F., et al., 2012. The Effect of Fault Zone Characteristics of Zhu I Depression on Hydrocarbon Accumulation. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(1): 50-54 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. J., Wu, S. G., Shi, H. S., et al., 2012. Structures and Dynamic Mechanism Related to the Dongsha Movement at the Northern Margin of South China Sea. *Pro*gress in Geophysics, 27 (3): 1008 – 1019 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. X., Zhou, D., Liao, J., et al., 2010. Lithospheric Stretching Modeling of the Continental Shelf in the Pearl River Mouth Basin and Analysis of Post-Breakup Subsidence. Acta Geologica Sinica, 84(8):1135-1145 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Sun, Z., Liao, J., et al., 2009. Filling History and Post-Breakup Acceleration of Sedimentation in Baiyun Sag, Deepwater Northern South China Sea. Journal of Earth Science, 20(1):160-171. doi:10.1007/s12583-009-0015-2
- Zhu, H. T., Li, S., Liu, H. R., 2016. The Types and Implication of Migrated Sequence Stratigraphic Architecture in Continental Lacustrine Rift Basin: An Example from the Paleogene Wenchang Formation of Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 41(3): 361-372 (in Chinese with English abstract).
- Ziegler, P. A., Cloetingh, S., 2004. Dynamic Processes Controlling Evolution of Rifted Basins. *Earth-Science Re*views, 64(1): 1-50. doi: 10.1016/S0012-8252(03) 00041-2

#### 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):

- 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.
- 李平鲁,1993.珠江口盆地新生代构造运动.中国海上油气 (地质),7(6):11-17.
- 李平鲁,1994.珠江口盆地构造特征与油气聚集.广东地质,9 (4):21-28.
- 李三忠,索艳慧,刘鑫,等,2012. 南海的盆地群与盆地动力 学. 海洋地质与第四纪地质,32(6):55-78.
- 林长松,高金耀,虞夏军,等,2006.南海北部新生代的构造运动特征.海洋学报,28(4):81-86.
- 刘明辉,梅廉夫,杨亚娟,等,2015.珠江口盆地惠州凹陷北部 裂陷期与拗陷期沉降作用时空差异及主控因素.地球 科学与环境学报,37(2):31-43.
- 饶春涛,李平鲁,钟宏平,1993.珠江口盆地断层特征及封闭 性研究.中国海上油气(地质),7(4):7-15.
- 宋鹰,2010. 松辽盆地裂后期构造反转及其动力学背景分析 (博士学位论文). 武汉:中国地质大学,5-12.
- 孙金龙,徐辉龙,曹敬贺,2011.台湾一吕宋会聚带的地壳运动特征及其动力学机制.地球物理学报,54(12): 3016-3025.
- 孙晓猛,王璞珺,郝福江,等,2005.中国东部陆缘中区中一新 生代区域断裂系统时空分布特征,迁移规律及成因类 型.吉林大学学报(地球科学版),35(5):554-563.
- 田鹏,梅廉夫,于慧玲,等,2008. 惠州凹陷断裂特征及其对油 气成藏的控制. 新疆石油地质,29(5): 591-594.

- 田巍,何敏,杨亚娟,等,2015.珠江口盆地惠州凹陷北部边界 断裂复合联接和转换.地球科学,40(12):2037-2051.
- 董亨茂,聂金英,孟令箭,等,2009.基底先存构造对裂陷盆地 断层形成和演化的控制作用规律.地学前缘,16(4): 97-104.
- 万天丰,1983. 张节理及其形成机制. 地球科学,(3):58-61,148.
- 吴时国,刘展,王万银,等,2004.东沙群岛海区晚新生代构造 特征及其对弧一陆碰撞的响应.海洋与湖沼,35(6): 481-490.
- 夏斌,吕宝凤,吴国干,等,2007. 南海北部新生代盆地构造迁 移及其对烃源岩的制约作用. 天然气地球科学,18(5): 629-634.
- 许新明,陈胜红,王福国,等,2014.珠江口盆地恩平凹陷断层 特征及其对新近系油气成藏的影响.现代地质,28(3): 543-550.
- 姚伯初,1998. 南海新生代的构造演化与沉积盆地. 南海地质 研究,(10): 1-17.
- 殷秀兰,李思田,杨计海,等,2002. 莺歌海盆地超压流体活动 与断裂系统的相互关系. 地球学报,23(2): 141-146.
- 于水明,陈雪芳,梅廉夫,等,2012.珠一坳陷断层特征及对油 气成藏的作用.石油天然气学报,34(1):50-54.
- 赵淑娟,吴时国,施和生,等,2012. 南海北部东沙运动的构造 特征及动力学机制探讨. 地球物理学进展,27(3): 1008-1019.
- 赵中贤,周蒂,廖杰,等,2010.珠江口盆地陆架区岩石圈伸展 模拟及裂后沉降分析.地质学报,84(8):1135-1145.
- 朱红涛,李森,刘浩冉,等,2016.陆相断陷湖盆迁移型层序构 型及意义:以珠 [ 坳陷古近系文昌组为例.地球科学, 41(3):361-372.