

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.542>



# 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素

张远泽<sup>1,2</sup>, 漆家福<sup>1,2\*</sup>, 吴景富<sup>3</sup>

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249  
2. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249  
3. 中海石油研究总院勘探院, 北京 100027

**摘要:** 利用地震资料、油气勘探资料分析了南海北部大陆边缘珠江口—琼东南新生代盆地断裂系统的时空差异及动力学成因机制。珠江口—琼东南盆地古近系裂陷构造层以 NE 向、近 EW 向基底正断层构成的伸展断裂系统的几何学、运动学沿着盆地走向有明显变化, 盆地内部隐伏的区域性和局部的 NW 向断裂及相关构造变形带构成伸展断裂系统之间的构造变换带。在空间上, 区域性的云开、松涛—松南等 NW 向构造变换带以西为 NE-NEE 向正断层构成的“非拆离”伸展断层系, 以东为 NE 向正断层、近 EW 向正断层(走滑正断层)复合而成的拆离伸展断层系。在时间上, 古近纪裂陷作用可划分为早(文昌组沉积期)、中(恩平组/崖城组沉积期)、晚(珠海组/陵水组沉积期)3 个有明显差异的裂陷期。裂陷早期, 盆地西部以平面式正断层控制的简单地堑、半地堑为主, 伸展量相对较小, 东部则以铲式正断层控制的复式地堑、半地堑为主, 伸展量相对大, 断层向深部收敛在中地壳韧性层构成拆离的伸展断层系统。裂陷中期, 琼东南盆地、珠江口盆地西部断裂具有继承性活动特点, 珠江口盆地东部发育 NWW-EW 向伸展断层, 并向深层切割早期浅层拆离断层, 形成深层拆离伸展断层系统, 而沿着云开构造变换带发育反转构造。裂陷晚期, 琼东南盆地、珠江口盆地西部断裂具有活动性减弱特点, 琼东南盆地东部发育 NWW-EW 向伸展断层, 形成深层拆离伸展断层系统, 而沿着琼中央构造变换带发育反转、走滑构造。珠江口—琼东南盆地不同区段断裂系统及其构造演化的差异性受盆地基底先存构造、地壳及岩石圈结构及伸展量等多方面因素的影响, 拆离伸展断层系统与发育 NWW 向“贯穿”断裂的基底构造薄弱带、现今地壳局部减薄带相关。南海扩展由东而西的迁移诱导北部大陆边缘块体沿着先存 NW 向深大断裂发生走滑旋转是导致变换构造带两侧差异伸展的动力学原因, 应力场及岩石圈热结构变化是引起拆离断层深度变化的重要因素。

**关键词:** 断裂构造; 拆离断层; 构造差异性; 变换带; 构造动力学; 南海北部。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2019)02-0603-23

收稿日期: 2018-12-09

## Cenozoic Faults Systems and Its Geodynamics of the Continental Margin Basins in the Northern of South China Sea

Zhang Yuanze<sup>1,2</sup>, Qi Jiafu<sup>1,2\*</sup>, Wu Jingfu<sup>3</sup>

1. State Key Lab of Petroleum Resources and Prospecting, China Petroleum University, Beijing 102249, China  
2. Department of Earth Sciences, China Petroleum University, Beijing 102249, China  
3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

**Abstract:** We employ recently updated seismic reflection data to investigate spatial-temporal difference of Cenozoic faults systems and its dynamic mechanism of the Pearl River Mouth Basin and Qiongdongnan Basin in the Northern of South China Sea. It shows geometry, kinematics of extensional faults systems in the Paleogene rift zone of the Pearl River Mouth basin and Qiongdongnan basin change significantly along strike, which is composed of NE- and EW-trending normal basement faults. The con-

基金项目: 国家自然科学基金委员会面上基金项目(No.41572202)。

作者简介: 张远泽(1986—), 男, 博士后, 主要从事构造地质学研究。ORCID: 0000-0001-9838-3035. E-mail: zyz011051@163.com.

\* 通讯作者: 漆家福, ORCID: 0000-0002-4750-472X. E-mail: qjiafu@cup.edu.cn.

引用格式: 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.

cealed regional and local NW-trending faults with associated deformation zone constitute the transfer zones between the extensional faults systems. The "non-detachment" extensional fault system consists of NE- and NEE-trending normal faults to the west of NW-trending Yunkai and Songtao-Songnan transfer zones, and the detachment fault system is composed of NE- and EW-trending normal/strike-slip faults to the east. Paleogene rifting experienced three distinguished stages. In the early period (Wenchang Formation), simple (half) grabens in western basins was controlled by planar normal faults with relatively small extension, and composite (half) grabens in eastern basins are dominated by listric normal faults with large extension, where normal faults converge and terminate at detachment fault within mid-crust. In the middle period (Enping/Yacheng Formation), faults in the west are characterized by inherited activity, whereas NWW- and EW-trending faults in the east of Pearl River Mouth Basin form deep detachment system by cutting antecedent mid-crust detachment fault, with inversion along the Yunkai transfer zone. In the late stage (Zhuhai/Lingshui Formation), the activities of faults decline in the west, whereas NWW- and EW-trending faults form deep detachment system in the east of the Qiongdongnan Basin, with inversion and strike-slip structures along the Songtao-Songnan transfer zone. The influencing factors of differential fault systems and tectonic evolution include pre-existing basement fabrics, rheology of crust and lithosphere, and extension amount. The detachment systems are associated with the NWW-trending throughgoing crustal faults within basement weak belts and present local crustal thinning zone, the geodynamic mechanisms for differential extension on both sides of the transfer zones result from the strike-slip movement along the NWW-trending pre-existing faults induced by the opening of the South China Sea from east to west, and changes of the stress field and lithospheric thermal structure account for the depth variation of the detachment systems.

**Key words:** fault structure; detachment fault; differential tectonics; transfer zone; geodynamic; Northern South China Sea.

## 0 引言

南海属于太平洋、欧亚和印—澳板块相互作用形成的边缘海(图1),南海北部陆缘发育一系列新生代被动裂陷盆地,珠江口—琼东南盆地作为主要盆地,保留了陆缘裂解到南海扩张过程的构造变形、沉积地层记录,由于特殊大地构造位置及丰富油气资源,一直为热点研究区。珠江口—琼东南盆地经历了多期裂陷作用,断陷方向表现为古新世至中新世,由早期 NE 向至中晚期 EW 向、NW 向的顺时针旋转(茹克等,1988; Zhou *et al.*, 1995; 龚再升等,1997; 闫义等,2005),形成 NE 向、NEE 向、NW 向、近 EW 向等多组断裂控制的“南北分带、东西分段”构造—沉积格局(李绪宣等,2006; 钟志洪等,2014)。前人对珠江口—琼东南盆地结构、构造样式、裂陷演化和形成机制开展了大量研究(李平鲁等,1989; 姚伯初等,1998; 孙珍等,2005a; 谢文彦等,2007; 张功成等,2010; 任建业等,2011; 于水明等,2012; Hu *et al.*, 2013; 能源等,2013; 陈建军等,2015; 解习农等,2015),但对盆地构造运动形式、动力来源等问题尚未取得一致认识(李思田等,1998; 周蒂等,2002),具有不同运动学特征的多方向断裂叠加复合表现出复杂的构造时空差异性,导致盆地演化的关键问题分歧较大,如珠江口—琼东南盆地构造迁移过程,部分学者认为晚始新世以来由东向西呈“剪刀式”拓展(Zhou *et al.*, 1995; 夏斌等,2007; 吕宝凤等,2008),

也有学者认为自西而东反向传播(李三忠等,2012)。前人对盆地构造的研究主要集中于一个盆地或特定时期,缺乏不同盆地构造的系统对比研究,伸展构造与走滑构造时空组合关系、控盆构造(如白云凹陷)的演化特征及其主要成因并不明晰,因此,亟待开展盆地尺度的构造差异性研究,对于深化认识盆地形成、南海扩张演化和油气勘探具有重要意义。

本文运用覆盖研究区的详细地质—地球物理资料,开展南海北部珠江口—琼东南盆地裂陷期构造特征及其成因研究,在精细地震剖面构造解释的基础上根据盆地结构特征划分不同伸展断裂系统,通过详细分析平面—剖面组合的几何学、运动学特征确定构造演化序列,对比不同断裂系统构造变形特征及与构造变换带的关系,结合盆地主控构造定量化活动规律恢复盆地幕式伸展裂陷过程,从而探讨统一应力场下盆地构造差异性的主要成因。

## 1 地质背景

南海北部前生代经历了印支期华南地块与印支地块的碰撞缝合、燕山期古太平洋板块向欧亚板块的俯冲等复杂构造演化历史(Hall, 1996),形成海南岛中部近 E-W 向印支期滇琼缝合带(Li *et al.*, 2002; Cai and Zhang, 2009),中生代则发育以 NE 向为主的压剪性断裂系(陈汉宗等,2005; 周蒂等,2006)。伴随新生代 32.0~20.5/15.5 Ma 的南海海盆扩张,南

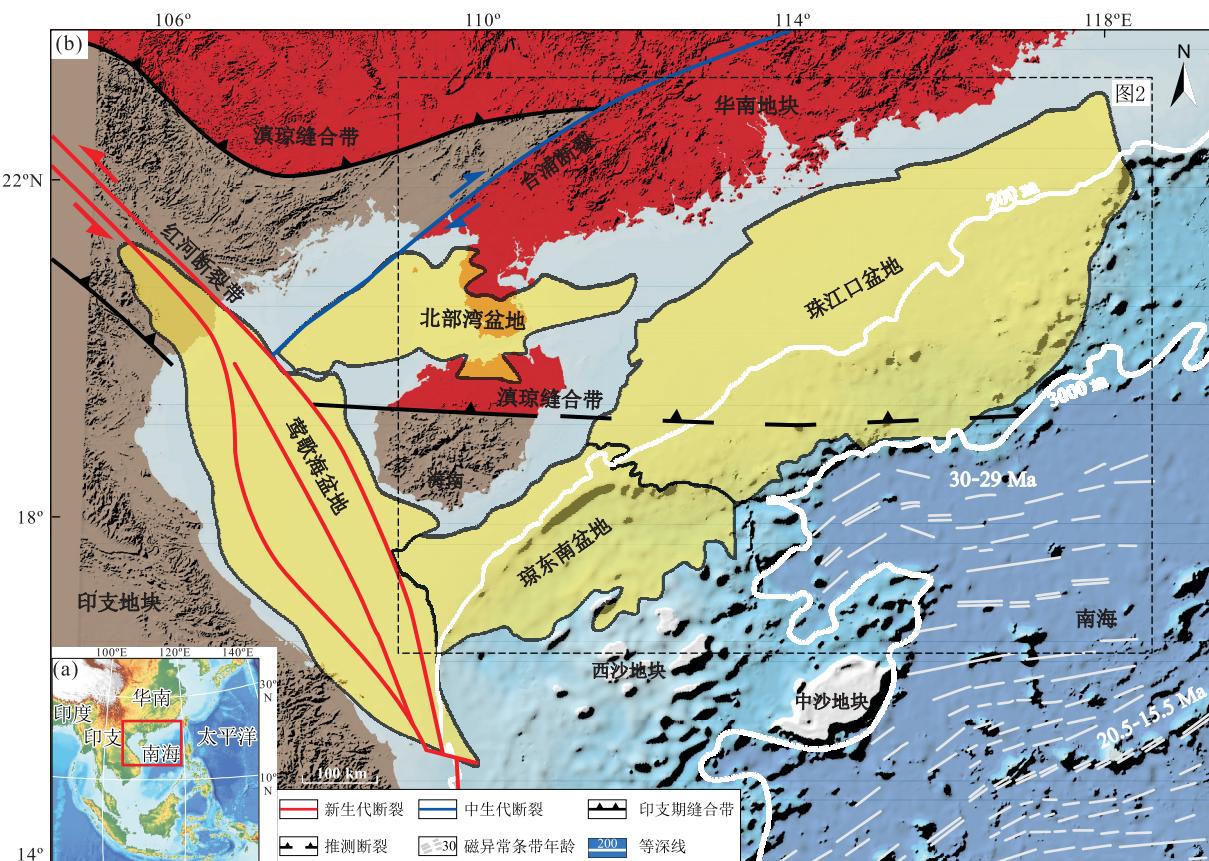


图1 南海北部大地构造位置及区域构造地质简图

Fig.1 Tectonic setting and geologic maps of the Northern South China Sea

据 Hu et al.(2013); Barckhausen et al.(2014)修改

海北部演化为张裂减薄型被动大陆边缘(Briais et al., 1993; Barckhausen et al., 2014)(图1)。

### 1.1 琼东南—珠江口盆地构造—地层格局

琼东南—珠江口盆地呈NE向展布,由北部~80 m浅水陆架区向南过渡为200~2 000 m深水陆坡区。盆地呈隆凹相间构造格局:琼东南盆地被崖南—陵水—松涛凸起和北礁凸起分隔为北部坳陷带(崖北、崖南、松西、松东凹陷)、中央坳陷带(乐东、陵水、北礁、松南、宝岛、长昌凹陷)和南部坳陷带(永乐凹陷);珠江口盆地以神狐—番禺—东沙隆起带和南部隆起带为界,分为北部坳陷带(珠一、珠三坳陷)、中央坳陷带(顺德—开平、白云凹陷)和南部坳陷带(荔湾凹陷);中央坳陷带分别被松南低凸起和云开低凸起一分为二(图2)。研究区新生代经历了神狐运动、珠琼运动、南海运动、白云运动和东沙运动五期区域性构造运动,由此将盆地演化分为始新世—渐新世断陷、中新世早期拗陷沉降、中新世晚期以来断块升降3个阶段(龚再升等,1997;陈长民等,2003)。盆地沉积地层自下而上依次为:古近系古新统、中下

始新统(珠江口盆地文昌组/琼东南盆地由地震反射特征揭示)、上始新统一下渐新统(恩平组/崖城组),下渐新统(珠海组/陵水组)以及新近系中新统、上新统和第四系(图3)。

### 1.2 资料与研究方法

本研究采用覆盖研究区的二维地震剖面编制了珠江口—琼东南盆地6个主要反射界面构造图(Tg, T80, T70, T60, T50, T40)(如图6),绝大多数地区地震剖面密度间距NW向达2~5 km, NE向达6~10 km,道距12.5 m,垂直分辨率为~30 m,如西江凹陷等有三维数据部分地区精度更高。珠江口盆地西北部地区地震剖面相对较少,综合修改自发表资料(朱伟林等,2010;李辉等,2014;李俊良等,2015),确保了主要构造的可靠性。

在此基础上选取覆盖所有构造单元双程时5~12 s的115个骨干地震剖面进行详细构造解释,综合分析凹陷结构、断裂系统平面—剖面组合的几何学、运动学特征,并将各时期活动断裂与地层初始沉积厚度叠加,编制了盆地不同裂陷期构造活动演化

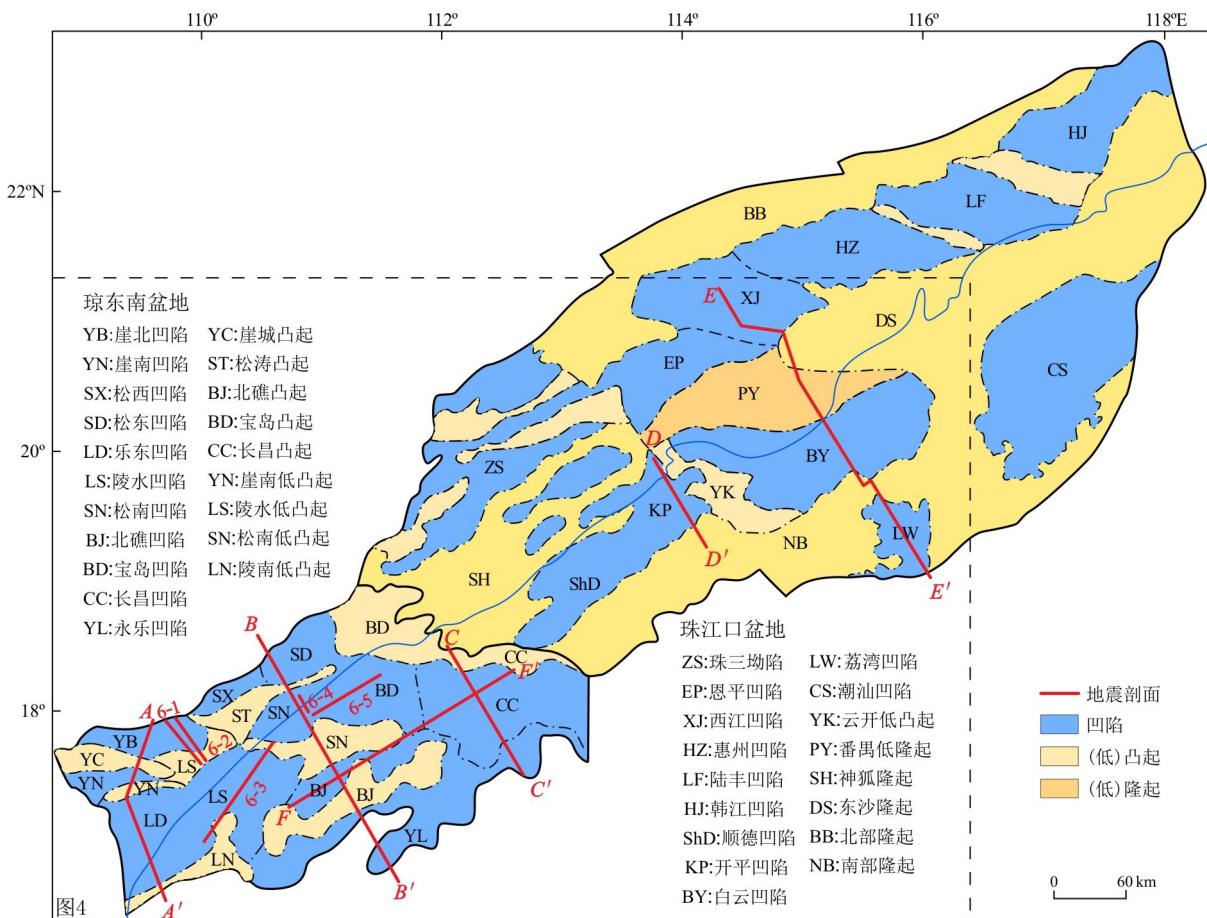


图 2 琼东南盆地和珠江口盆地新生代构造单元及研究区地震剖面

Fig.2 Cenozoic tectonic units and seismic profile network of the Qiongdongnan basin and the Pearl River Mouth basin

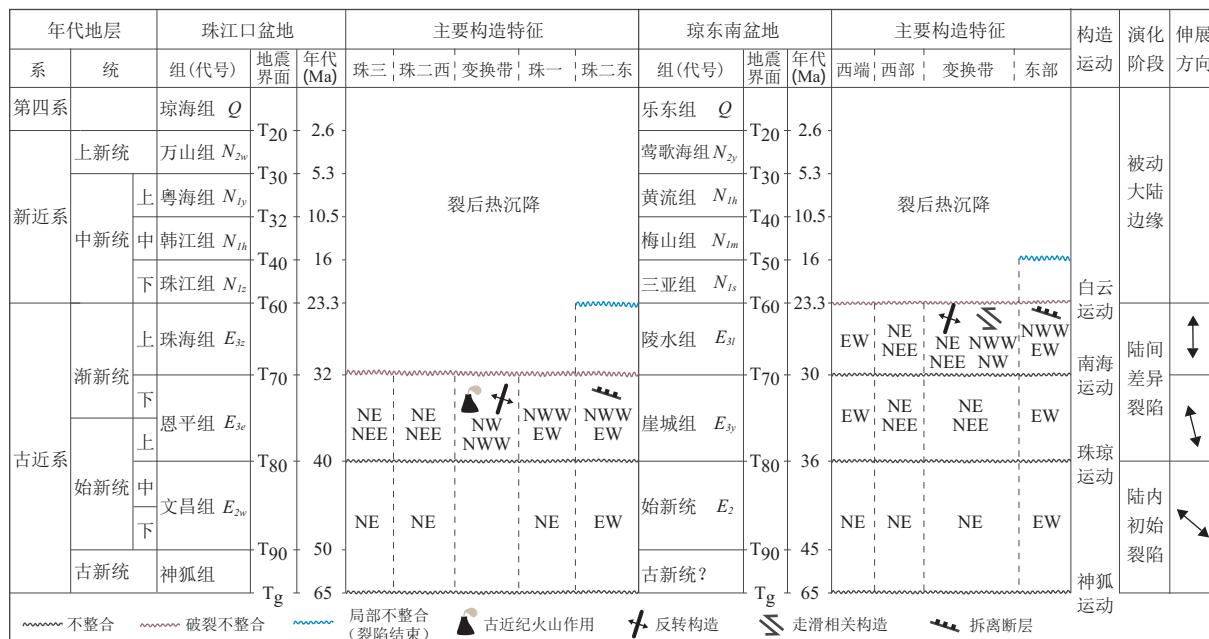


图 3 琼东南盆地和珠江口盆地地层划分及构造演化阶段表

Fig.3 Geological time chart of the sedimentary strata and tectonic evolution of the Qiongdongnan basin and the Pearl River Mouth basin

据 Zhang et al.(2013); 钟志洪等(2014)修改

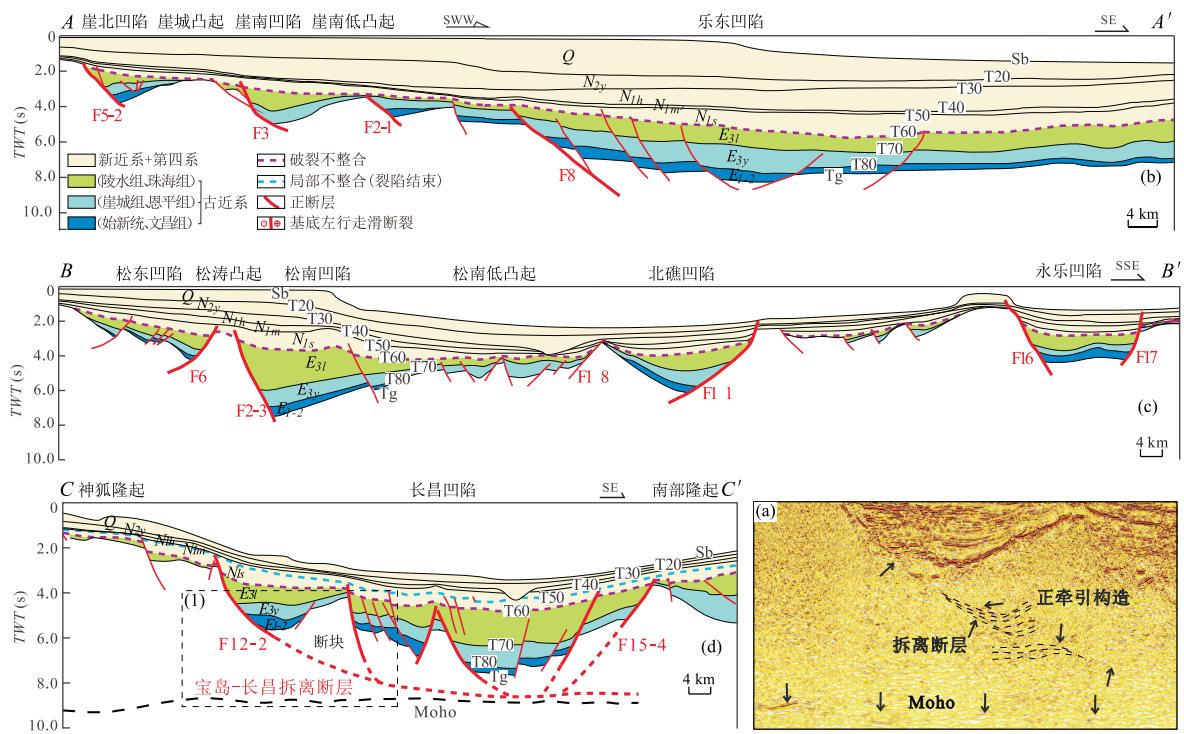


图4 琼东南盆地不同区域构造剖面图及相关构造地震解释图

Fig.4 Structural cross sections through the Qiongdongnan basin and relating interpreted seismic profiles  
剖面AA'、BB'、CC'位置见图2;AA'西部崖北—崖南—乐东凹陷剖面;BB'中东部松南—北礁—乐东、松东凹陷剖面;CC'东部长昌凹陷剖面和拆离断裂地震解释

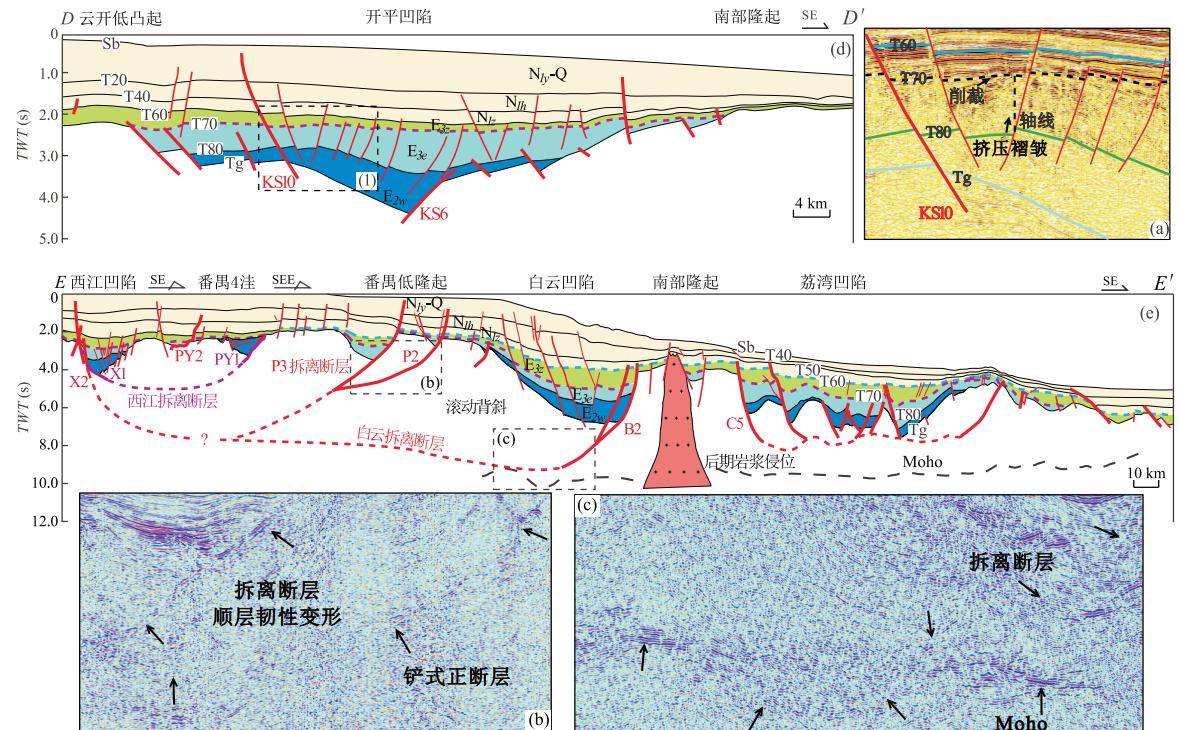


图5 珠江口盆地不同区域构造剖面图及相关构造地震解释

Fig.5 Structural cross sections through the Pearl River Mouth basin and relating interpreted seismic profiles  
剖面DD'、EE'位置见图2;DD'西部开平凹陷剖面和云开构造调节带反转构造地震解释;EE'东部西江-番禺4-白云-荔湾联合剖面和拆离断裂地震解释

图,直观反映出断层和沉积中心的关系(图 10).本研究还采用断层活动速率法对断层活动强度进行定量计算(图 9),断层落差与相应地层沉积时间跨度的比值即为该时期断层活动速率,以对比盆地不同分区断层系统差异性活动特征和演化期次规律(图 3).

### 1.3 琼东南盆地结构特征

琼东南盆地表现为古近系受伸展断裂系统控制的断陷结构,新近系—第四系呈毯状覆盖于古近系断陷及分隔凸起之上.裂陷结构沿盆地走向上呈分段性,以中部 NW 向松涛—松南一级变换带为界,西部凹陷以 NE 向为主,在崖城—陵南次级变换带以西过渡为 NEE-EW 向;东部凹陷以 EW 向为主兼有 NE 向(图 6).

盆地西部崖北凹陷为北断南超(翘)半地堑,北侧 NE 向 F5-2 号断层是控制北部坳陷带古近系地层的主边界断层(图 4a),上盘充填的古近系向南减薄,呈楔状层序.崖南、崖北凹陷结构类似,但缺失始

新统沉积,以崖城—陵水组沉积为主(图 6).乐东凹陷为双断式地堑(图 4a),北部 F2-1 号和 F8 号断层控制古近系充填,发育同向次级基底断层,上盘地层厚度均匀.

盆地中部松西、松南和北礁凹陷均为半地堑,仅南部永乐凹陷为地堑,NE 向主边界断层控制各凹陷古近系充填.相向的松南、北礁半地堑断陷,构成类地堑结构:松南凹陷北部发育与 F2-3 号高角度平面式主边界断层同向的次级基底断层,构成凹陷西部的走向斜坡并向东消失(图 4b),古近系北厚南薄,始新统地层尖灭于松南低凸起,崖城—陵水组呈薄层状向南超覆;北礁凹陷南部 F11 号断层为铲式主边界断层,充填箕状古近系沉积.

东部宝岛—长昌凹陷被中新世火山构造所分隔,均为复式地堑,主控构造为 EW 向 F12 号和 F15 号雁列式断阶带(图 4c),但近主边界断层充填的古近系掀斜明显(图 6),基底逐渐抬升.此外,松东凹

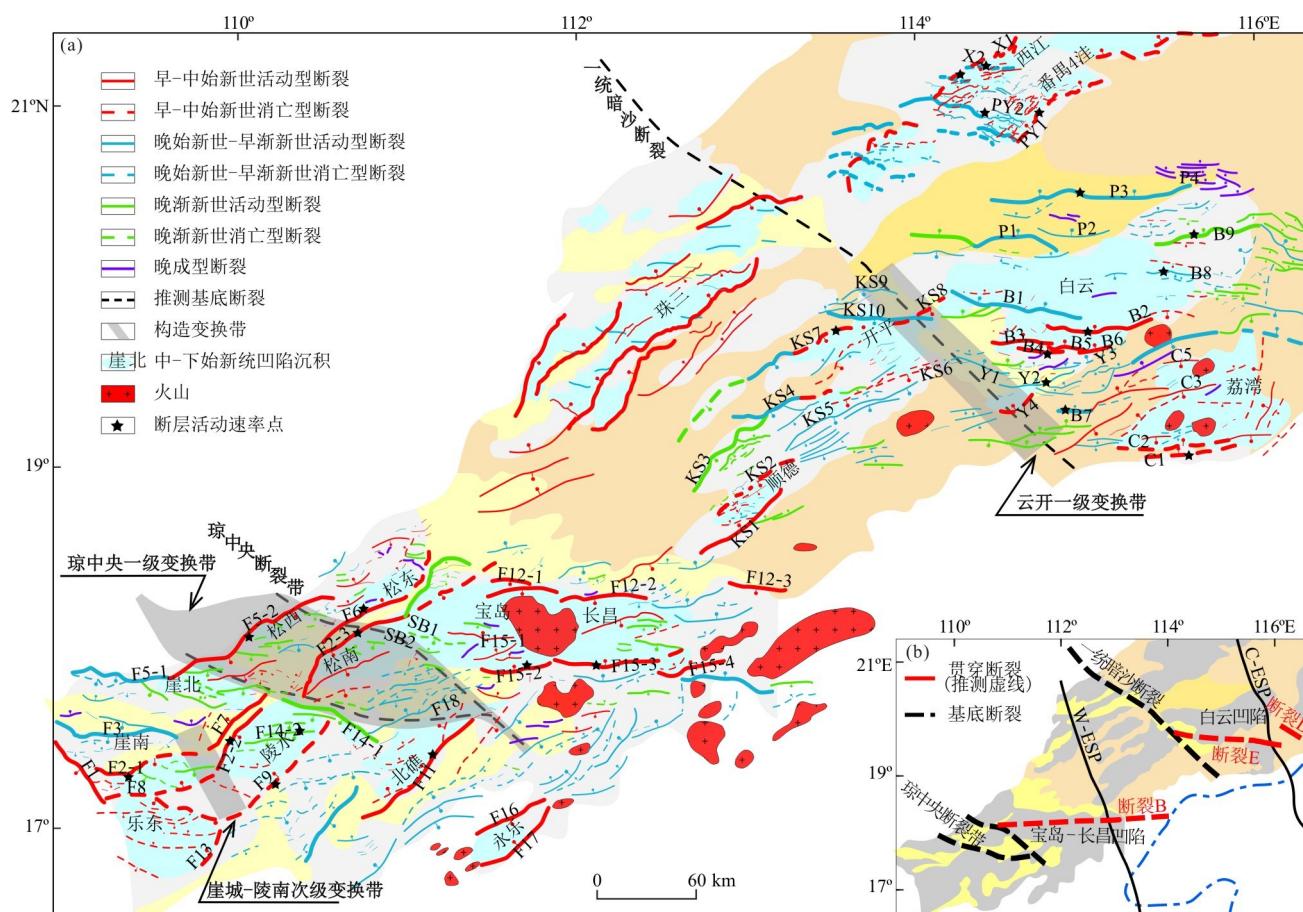


图 6 琼东南盆地和珠江口盆地 T90-Tg 基底断裂系统和裂陷早期沉积分布

Fig.6 Basement fault system of T90-Tg in the Qiongdongnan basin and the Pearl River Mouth basin

1. 断裂系统裂陷期活动类型图;2.南海北部贯穿断层分布图(据 Hayes et al., 1995 修改)

陷为南断北超复式半地堑,南侧NE向F6号铲式正断层为主控断层(图4b),发育同向铲状基底断层,充填楔状层序古近系沉积,始新统较薄。

琼东南盆地东、西部剖面结构存在重要差异。西部凹陷以简单(半)地堑为主,凹陷内部结构单一,断层限制于T60界面以下,崖城组沉积最厚( $\sim 3000$  m)(图10)。东部凹陷以复式(半)地堑为主,基底被次级断裂分隔为断块结构,断层可延续至裂后期T5界面,T7-T5界面之间密集发育NW-NWW向次级断裂,与EW向基底断层构成“Y”字型等构造样式,陵水组沉积最厚( $\sim 2500$  m)。处于构造变换带的中部凹陷呈过渡特征,虽然与西部凹陷走向一致,但其凹陷结构、构造样式和古近系充填表现出与类似东部凹陷的复杂特征。

#### 1.4 珠江口盆地结构特征

珠江口盆地裂陷结构沿盆地走向的分段性特征与琼东南盆地相似,以中部NW向云开一级变换带为界,西部凹陷以NE向为主;东部凹陷由EW向和NE向复合而成(图6)。

西部顺德—开平凹陷为NE向南断北超半地堑,基底埋深较浅约 $3500\sim 5000$  m,裂陷期文昌—恩平组表现出叠合盆地特征(图5d)。文昌组为楔状层序结构,中部沉积最厚,向北厚度逐渐减薄;恩平组转变为地堑结构,以平行层序为主,沉积厚度增大,内部发育大量NWW向次级断层,多局限于T70界面以下,两者间T80界面存在明显削截;上覆坳陷期珠海—韩江组(T70-T40)以平行层序为主。

东部NW-SE向纵贯剖面揭示出相向的NE向西江凹陷和番禺4洼半地堑断陷构成类地堑结构,基底埋深较浅约 $\sim 3000\sim 4000$  m,主边界断层控制了T70界面以下裂陷期文昌—恩平组地层,恩平组内部发育大量NW-NWW向次级断层,多局限于T70界面以下。白云—荔湾凹陷为半地堑和大型不对称地堑组合成的复式断陷区(孙珍等,2005a;能源等,2013;钟志洪等,2014;吕彩丽等,2017)。白云主凹为NWW-EW向主干断层控制的南断北超半地堑(图5e),基底埋深大于 $\sim 12000$  m。文昌组以楔状层序为主,局部被恩平组削截;恩平组由下至上从楔状向亚平行结构转变;珠海组为平行层序并向北减薄超覆。荔湾凹陷为地堑一半地堑复合结构,文昌组内部为杂乱弱反射,恩平组为弱平行结构,向南减薄。

## 2 盆地新生代断裂系统的差异性发育特征

考虑断层所控地层层序及活动时间(于水明等,2012;谢玉洪等,2015),新生代断层可划分为“活动型”(裂陷期形成活动持续至坳陷期)、“消亡型”(裂陷期形成中止于坳陷期)、“晚成型”(坳陷期形成),对应于早中始新世(文昌期)、晚始新世—早渐新世(崖城/恩平期)及晚渐新世(陵水/珠海期)3个裂陷期(图6)。

### 2.1 琼东南盆地

**2.1.1 西部断裂系统** 琼东南盆地西部断裂系统包括NE向崖北—松西F5-2、F7号,松南F2-3号,北礁F11号,陵水F2-2、F9号,永乐F16、F17号断层,剖面上均为单一断层,属于始新世以来“活动型”断层(图6)。北部坳陷带F5-2号主断层为铲式正断层;而中央坳陷带主边界断层以平板式为主(图4b),平面上笔直延伸,仅末端发生同倾向弯曲形变。相较长时期活动的主边界断层,次级断层能更好反映出不同时期断裂系统的变化,凹陷及凸起内部NE向次级断层多为始新世“消亡型”;松南低凸起、北部和南部坳陷带则形成规模、密度更大的崖城期NEE向“消亡型”次级断层,如松南低凸起NEE向次级断层尖灭于T70以下(于俊峰等,2010),表明其为区域应力场下基底统一变形,平面上NEE向次级断裂与NE向主断裂呈锐角夹角。

崖城—陵南次级构造变换带以西的断裂系统包括崖北F5-1号,崖南F3号,乐东F2-1、F8和F13号断层(图6)。中央坳陷带的主边界断层走向过渡为NEE-EW向,剖面上以平板式为主(图4a),主断层与凹内部同向、反向次级断层皆属于始新世“消亡型”,断层向上终止于陵水组顶面(T60)以下。北部坳陷带F3号、F5-1号断层是仅有的EW向主边界断层,以铲式正断层为主,为崖城期“活动型”断裂。

**2.1.2 东部断裂系统** 东部断裂系统以近EW向宝岛—长昌F12、F15号断裂带为主,平面上由平行并列分支断层组成(图6),剖面上为阶梯式断阶带,均为始新世“活动型”断层,虽然盆地为地堑构造形态,但古近系地层受断块旋转掀斜翘起(图4c)。而NE向边界断层(F6、F2-3东段)则为始新世“消亡型”断层,规模逐渐减小。东部凹陷内次级断层皆属于“活动型”,尤其陵水期NW-NWW向次级断层明显增加,坳陷期(T60以上)NWW-EW向“晚成型”盖层

断层密集发育,部分下切至基底.

## 2.2 珠江口盆地

**2.2.1 西部断裂系统** 珠江口盆地西部断裂系统以顺德—开平凹陷为例,以 NE 向 KS1~KS8 号断层为主(图 6),文昌期形成的 KS2、KS6~KS8 等边界断层及凹内次级断层多为“消亡型”,向上尖灭于恩平组(图 5d);恩平期 NE 向边界断裂向中部拓展至中部 KS4、KS5 号边界断层,凹陷内部新生大量 NEE 向次级断裂,与 NE 向主断裂呈锐夹角。

**2.2.2 东部断裂系统** 东部断裂系统由珠一坳陷和白云—荔湾凹陷组成.白云—荔湾凹陷断裂表现出分区、分期活动特征,总体受控于南部 NWW-EW 向边界断裂带(图 6).白云主凹西南部(B2~B6 号)和荔湾凹陷(C1~C5)EW 向边界断层为文昌期“活动型”断层,分段并列的 B2~B6 号边界断层,剖面上构成断阶带(图 5e);凹陷西北部、南部隆起和番禺低隆起恩平期 NWW-EW 向“活动型”断层明显增加(B1、B7、P1~P3),云开低凸起附近的断层(Y1~Y3、KS8~KS10)平面上表现为同期右阶斜列样式,具有左旋走滑特征(图 6);凹陷中部断层不发育;凹陷东部和东沙隆起以恩平—珠海期 NW-NWW 向“活动型”次级断层为主,坳陷期 NWW-EW 向“晚成型”盖层断裂密集发育,为下切至古近系的高倾角非控层断层(图 5e).

珠一坳陷的西江—番禺 4 凹陷表现为不同时期、不同方向断层的叠加改造.NE 向南北边界主断层(X1、PY1)和凹内 NE-NEE 向次级断层均为文昌期“消亡型”,尖灭于恩平组顶面以下(图 5e);恩平期新生大量 NWW-EW 向“活动型”断层,其中 X2 号主断层切割了早期 X1 号主断层,次级断裂多局限于恩平组内.相邻恩平凹陷也表现出相同的构造特征(王家豪等,2011),反映出珠一坳陷断裂系统演化受控于统一的区域应力场变化。

综合分析表明琼东南—珠江口盆地古近系裂陷构造层由中部构造变换带为界可分为东、西部两个伸展构造系统(图 6),两者在构造组合特征及活动性质等方面存在显著差异.西部伸展系统由 NE-NEE 向正断层组成,以单一边界断层继承性控凹为特征,属于坳陷期(T60 以上)停止活动的“消亡型”;东部伸展系统由 EW 向和 NE 向正断层复合组成,以复式断裂带或改造性控凹构造为特征,属于坳陷初期持续活动的“活动型”和“晚成型”。

## 3 盆地构造变换带与拆离断层的分布

琼东南—珠江口盆地不同断裂系统通过两条 NW 向构造变换带调节转接(图 6),表现为 NW-NWW 向、NE-NEE 向和近 EW 向 3 组断裂交切的堑垒结构.Hayes *et al.*(1995)在盆地东部 W-ESP 和 C-ESP 地学断面识别出以 NWW-EW 向为主的大型贯穿正断层(图 6b),表现为倾角 25°~40°切穿地壳的地震反射,其在陆缘盆地裂陷过程中起到关键作用(董冬冬等,2014;任建业等,2015).本次研究深入分析 NW-NWW 向断裂对不同伸展系统时空上的叠加改造作用及其构造变形特征表明,琼东南—珠江口盆地东部的贯穿断层实为大型控凹拆离断层,其与构造变换带的发育密切相关。

### 3.1 琼东南盆地

琼东南盆地中央变换带位于背斜式松南低凸起(李绪宣等,2006;雷超等,2011; Zhang *et al.*, 2013),包括陵水—松南、松涛—松南两个次级变换带(图 6).

陵水—松南变换带北段崖北、松西凹陷边缘区域发育密集等列 NW-NWW 向断层,部分断层与 NE 向 F5-2 号主断层相交形成波状弯折处的分支断裂,剖面上表现为 T70 以来的“Y”型组合(图 4a),虽然局部强度、应力及岩性变化可导致断层沿走向的形变(Ferrill *et al.*, 1999; Peacock, 2002),但对于百余公里的 NE 向边界断层,其瓦楞状形迹主要受到相邻 NW-NWW 向断层影响(Martel, 1999; Crider and Peacock, 2004).NW-NWW 向断层 T70 以上发育花状构造(图 7b),表明其具有走滑分量;附近陵水组地层发生构造反转,形成与断层相关的上凸下正型宽缓背形褶皱(图 7a),源于 NW-NWW 向走滑—正断层造成局部挤压应力.变换带南段陵水凹陷 F14-1 号边界断层为最大规模 NW 向断层,剖面上高角度平板式正断层切割了新生代所有地层,但上下盘地层厚度变化较小(图 7c),说明 NW 向断层对 NE 向凹陷控层作用较弱,具有走滑断层特征,凹陷内伴生 NWW 向 F14-2 号左阶雁列式正断层,对两盘陵水组地层控制明显(图 7c).变换带中部松南低凸起 NEE 向断层多为“消亡型”局限于 T70 以下,但受 NW-NWW 向断层交连影响的 NEE 向断层则表现为“活动型”特征(如 F18 号断层,图 4b).

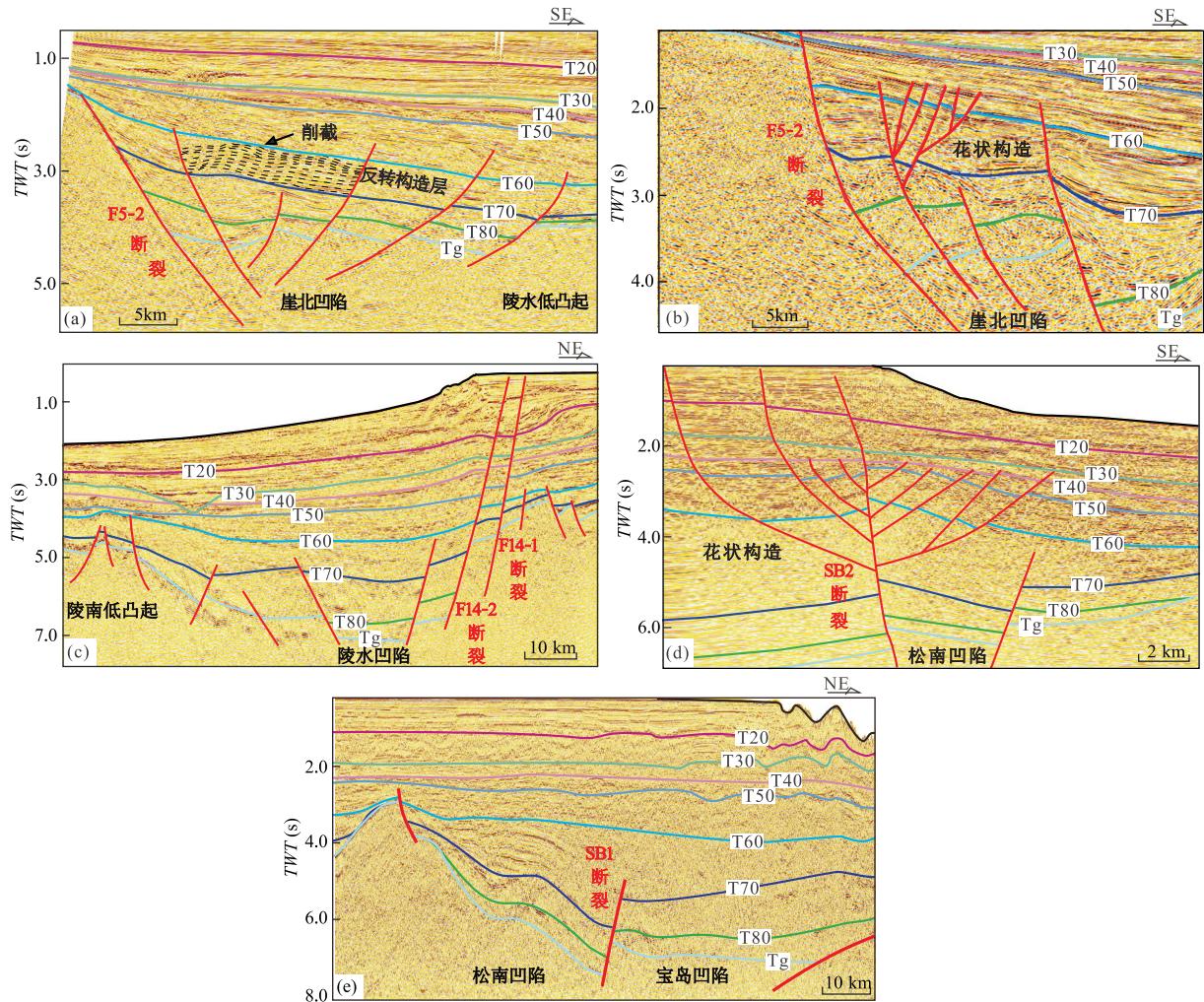


图7 琼东南盆地构造变换带相关构造地震剖面

Fig.7 Seismic profiles of tectonics in main transfer zone across the Qiongdongnan basin

剖面1~5位置见图2;陵水—松南调节带:1.反转构造地震解释;2.走滑构造震解释;3.雁列正断层地震解释;4.松涛—松南调节带;5.雁列正断层地震解释

松涛—松南变换带北段由NE向北断南超的松西简单半地堑转变为南断北超的松东复式半地堑(图4b),松东凹陷内NWW-EW向陵水期“活动型”和拗陷期“晚成型”盖层断裂密集出现,平面上与早期NE-NEE向断层相交织(图6),剖面上构成复式“Y”型、共轭“X”型复杂组合(谢玉洪等,2015)。变换带南段中央坳陷带断裂由NE-NEE向转变为NWW-EW向,松南凹陷东部NW向SB2号断层,主断层陡倾,陵水组以来分支断裂浅层发散形成花状构造,浅部地层形成局部背斜(图7d);松南、宝岛凹陷边界断层为NWW向SB1号高角度正断层,上下盘陵水组地层厚度落差达~750 m(图7e)。

在运动学的时空联系上,陡倾的NW向主干断裂以左旋走滑特征为主,改造了NE-NEE向断裂形迹和构造组合样式,并在NE向凹陷斜坡区形成同

期压扭型花状、反转构造;沿NW向基底断层左旋走滑位移诱导产生的多组NWW向次级伸展断层平面上斜列呈带分布,构成松南、宝岛凹陷的边界断裂,并向东与宝岛—长昌凹陷近EW向断裂连接,形成NWW-EW向边界断阶带。因此,琼东南盆地中央构造变换带NW-NWW向断裂形成于晚渐新世陵水期并叠加于始新世—早渐新世伸展断裂系统(图10-3a)。

在变形特征上,西部断裂系统以脆性变形特征为主(图4a),断层向深部尖灭消失(图8),伸展系统内崖城—陵南次级变换带(F2-1、F7、F8、F2-2)对构造变形没有影响,为无断层相互作用的低应力调节带(图6)(McClay *et al.*, 2002; Hu *et al.*, 2013),因此,西部伸展系统属于“非拆离”断层系统。

东部断裂系统表现出显著韧性变形特征,宝

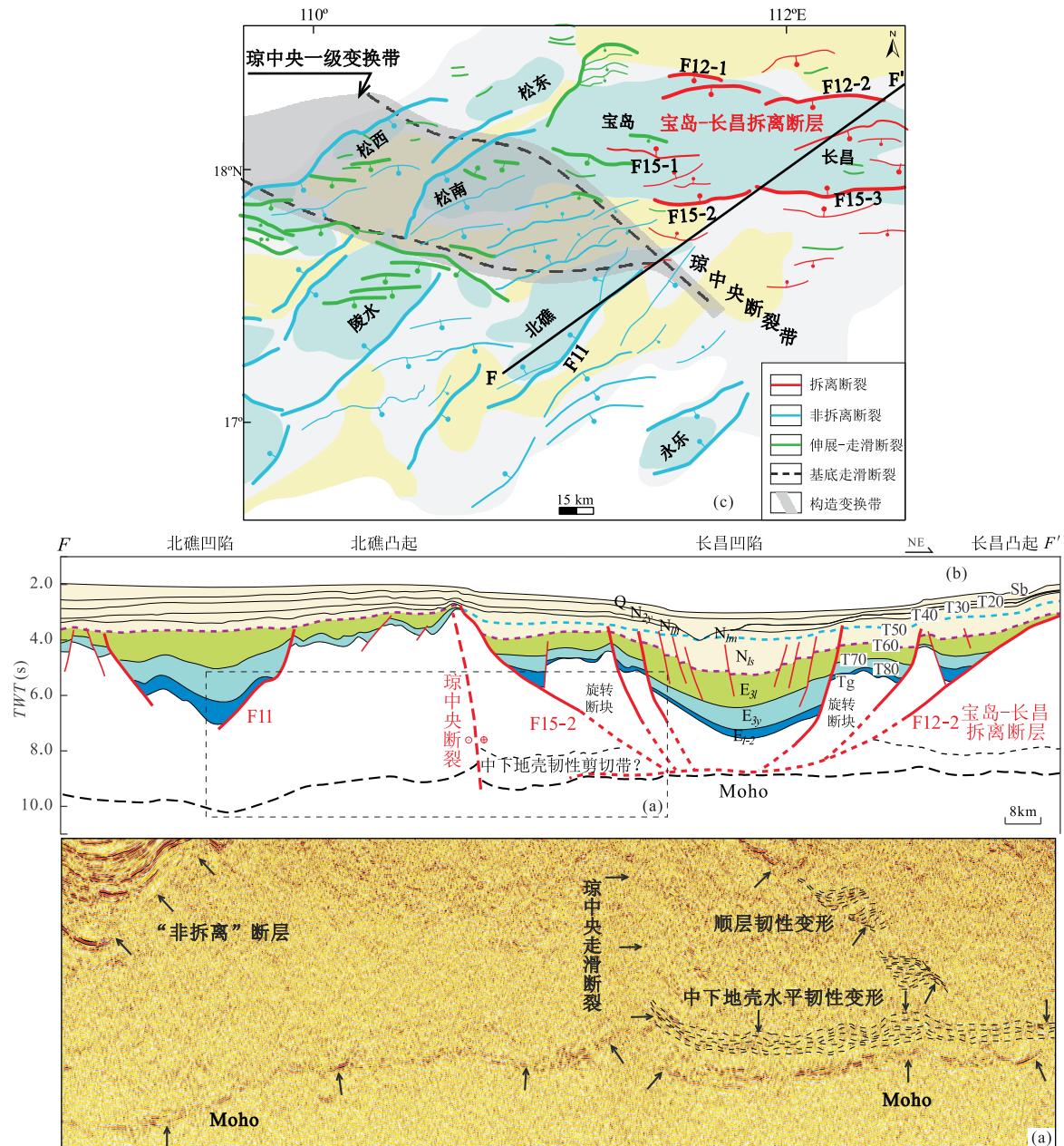


图 8 琼东南盆地 NW 向琼中央走滑断裂与 NWW 宝岛—长昌拆离断层剖面图及相关构造地震解释(剖面 F 位置见图 2).

Fig.8 Structural cross sections through the Qiongdongnan basin with NW trending strike-slip fault and NWW-EW trending detachment fault and relating interpreted seismic profiles

岛—长昌凹陷 NWW-EW 向断层可识别出基底以下连续强反射,两侧反射层向其弯曲平行(图 4a, 图 8a),该结构类似非连续 S-C 组构被认为顺层剪切地震相(Torvela *et al.*, 2013),为受断层拖曳形成的正牵引构造.断层面深部转为低角度缓倾,汇聚于中下地壳水平断续弱反射(7~8 s 双程时),其它方向地震相终结于该水平反射,代表了深部拆离滑脱相(Torvela *et al.*, 2013),长昌凹陷该时深范围存在较上下地层低速的壳内层(5.5~6.0 km/s)(Qiu *et al.*, 2013),推测其与珠江口盆地东部 7~18 km

深度 3~6 km 厚的壳内弱化低速层(赵明辉等, 2007),在构造上均表现为韧性剪切带.地壳底部显示低频高振幅近水平连续强反射波组(8.5~9.5 s 双程时),指示了莫霍面界面(Zhao *et al.*, 2015),由凹陷边缘向内部莫霍面呈上隆形态,凹陷中心基底厚度减薄明显.因此,以 F12、F15 断阶带为主的东部断裂系统为延伸汇聚于中下地壳韧性滑脱层的拆离断层系统.

### 3.2 珠江口盆地

珠江口盆地伸展系统经中部云开构造变换带自西向东由 NE-NEE 向转变为以 NWW-EW 向为主.

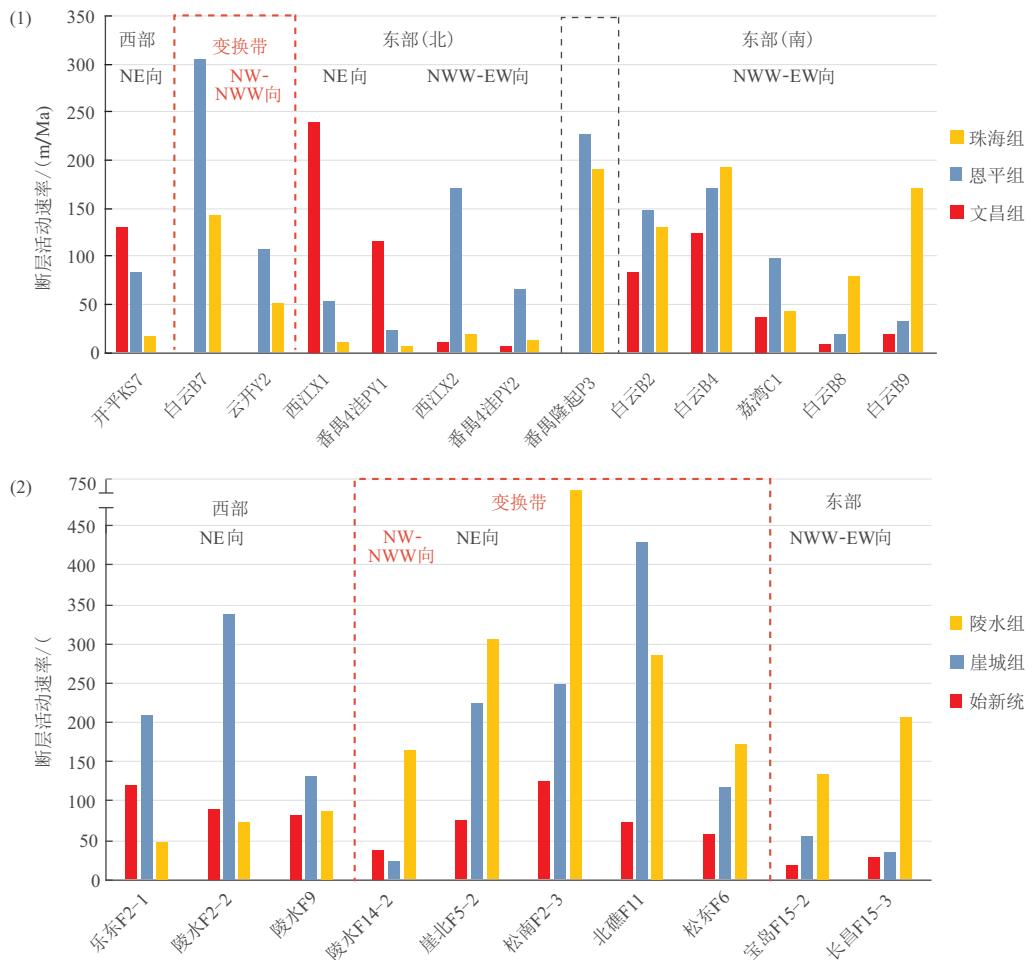


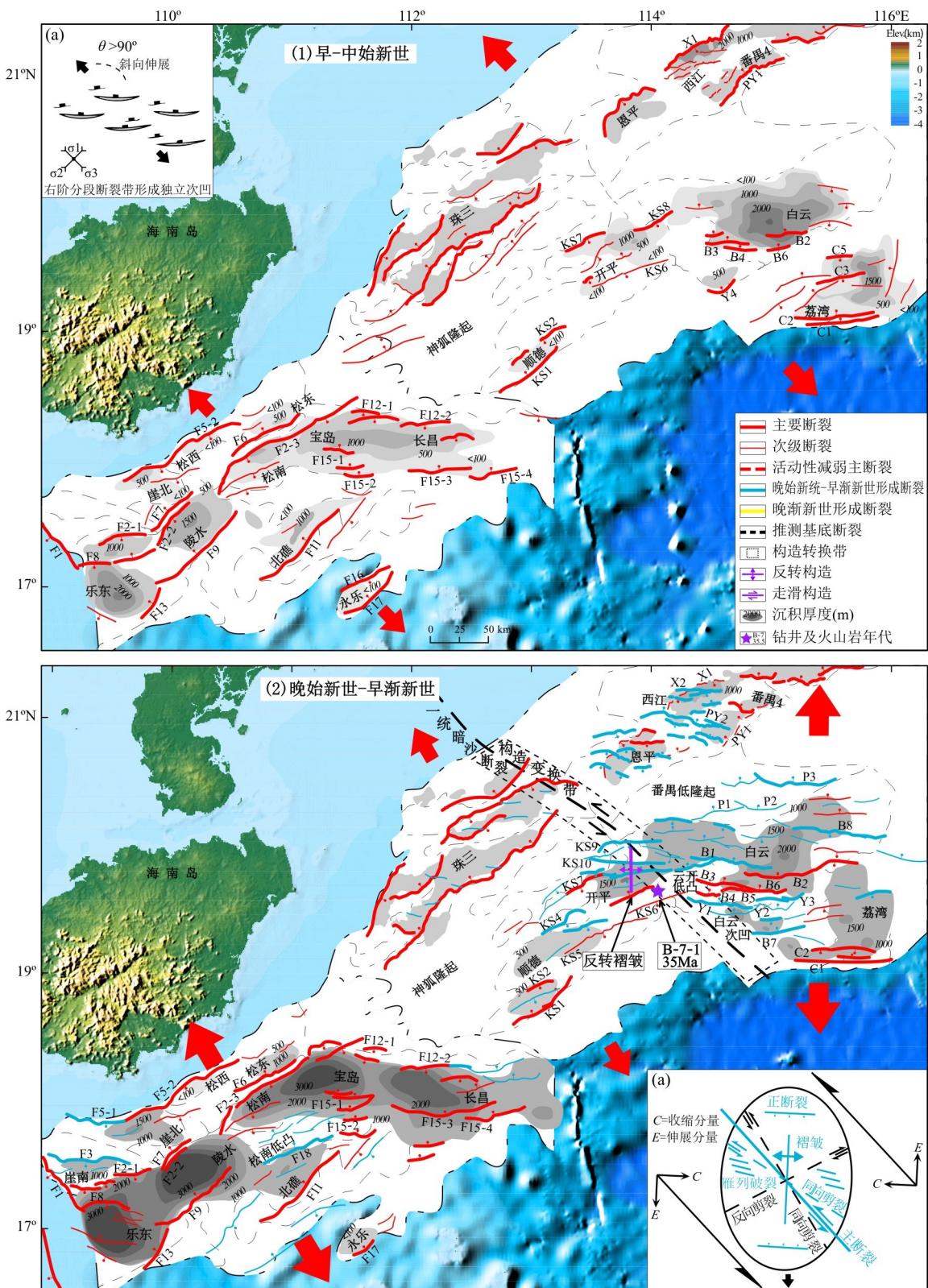
图9 珠江口盆地(1)和琼东南盆地(2)不同区域主干断层分期活动速率(位置见图5-1)

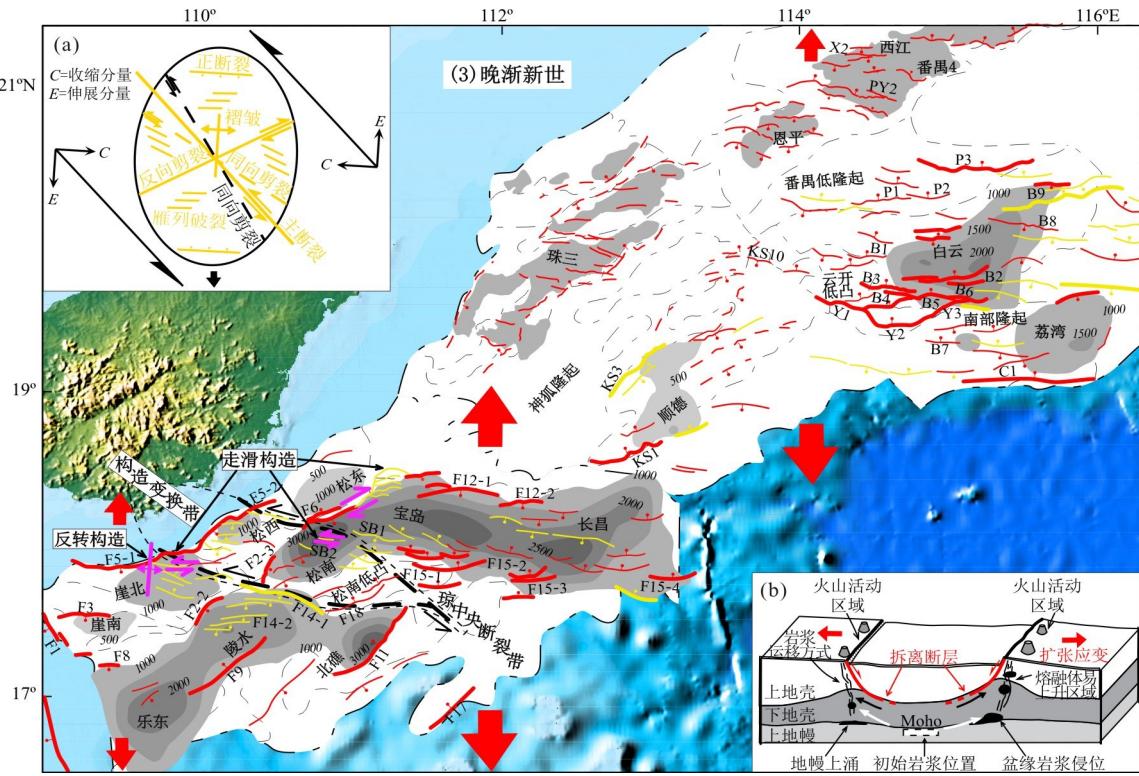
Fig.9 Slip rates of the main faults in the Qiongdongnan Basin and the Pearl River Mouth basin

变换带恩平期新生 NW-NWW 向断层替代了尖灭于恩平组地层的 NE-NEE 向“消亡型”断层(图 5d), NW 向 KS10 号陡倾断层下切至基底, 控层作用较弱, 附近恩平组地层发生构造反转形成大型断层限制褶皱, 顶部被 T70 剥蚀界面所削截(图 5-1), 源于该走滑断层造成局部挤压应力, 根据褶皱长轴与断层夹角判断具有左旋走滑特征(图 10-2a)(Wang et al., 2013). 同生的 NWW 向 KS9 号左阶斜列正断层则构成开平主凹恩平期北部边界(图 6), 南部恩平期 NW-NWW 向 Y1~Y3 号右阶斜列断裂带替代了文昌期 NE 向 Y4 号断层, 构成云开低凸起南断北超半地堑的边界断裂, 并向东与白云凹陷 EW 向断裂连接, 形成 NWW-EW 向边界断阶带。因此, 珠江口盆地云开构造变换带 NW-NWW 向断裂形成于晚始新世—早渐新世并叠加于早—中始新世伸展断裂系统(图 10-2a)。

西部断裂系统以脆性变形特征为主, 平面式断层在基底以下尖灭(图 5d), 属于“非拆离”断层系

统。东部断裂系统呈韧性变形特征, 白云主凹西南部(B2~B6)和荔湾凹陷北部(C5)NWW-EW 向边界断裂带, 可识别出断层向下汇聚的强反射, 铲式断层面产状逐渐变缓, 汇于 7~8 s 双程时水平拆离滑脱面(图 5-3), 地震剖面双程时 9~10 s 存在近水平的莫霍面连续强反射, 除白云凹陷内上隆明显外, 莫霍面总体向南海方向抬升, 基底地壳呈细颈化特征, 厚度由白云凹陷 7 km 减薄至荔湾凹陷 5 km。白云、荔湾凹陷之间南部隆起属于“H”型地块(图 5f), 形成于两侧主拆离断层由早期高角度正断层向拆离断层转变的陆缘伸展减薄过程(Lavier and Manatschal, 2006; Péron-Pinvidic and Manatschal, 2010), 拆离面上盘系统发育旋转断块等相关构造, 如番禺低隆起即为白云主拆离断层上盘大型滚动背斜, 恩平期形成的 NWW-EW 向 P1~P3 号铲式正断层(于水明等, 2007; 曹敬贺等, 2014), 主控隆上恩平组充填的南断北超半地堑(图 5-2), 其构造组合与沙箱实验揭示的伴随边界拆离断层伸展同生的上盘断坡





续图 10

(P3) 和背斜顶部(P2) 同向调节次级断层一致(漆家福等, 1997), 反映出白云拆离断层和番禺低隆断层同时形成于恩平期。

北部西江凹陷 X1 号和番禺 4 洼 PY1 号边界铲式正断层向深部收敛为近水平, 推测在双程时 $\sim 5$  s 深度连锁形成文昌期 NE 向拆离断层系统(图 5f), 强烈伸展导致上盘系统发生断块旋转形成中央横弯背斜式凸起。平剖面上揭示出恩平期新生 NWW-EW 向断层(X2)切穿了 NE 向“消亡型”西江拆离断层(图 6), 成为恩平组地层的主控构造。

通过对比发现西江凹陷、番禺低隆起凹陷恩平期均受 NWW-EW 向铲式正断层控制, 具有南北对称中部隆起恩平组地层缺失的特点, 深部缓倾断层的顺层韧性剪切明显(图 5-2), 由此推测 X2 和 P3 号边界断层在中下地壳连锁拆离滑脱, 番禺低隆起凹陷楔状充填与西江凹陷亚平行层序的差异则反映了恩平期区域应力场来源于南部白云主拆离断层, 从而构成东部统一的拆离断层系统。

## 4 讨论

### 4.1 南海北部盆地新生代裂陷期构造演化

南海北部盆地新生代差异构造演化与多幕伸展

裂陷有关(龚再升等, 1997; 姚伯初等, 1998; 李绪宣等, 2006; 董冬冬等, 2009; 吕宝凤等, 2012; Franke *et al.*, 2014; 解习农等, 2015), 本研究依据前述不同伸展、走滑系统活动期次、构造组合及结构特征对比分析, 结合边界断层活动性变化规律, 将古近纪裂陷作用分为早—中始新世(文昌期)、晚始新世—早渐新世(恩平/崖城期)、晚渐新世(珠海/陵水期)3 个差异裂陷期。

**4.1.1 早—中始新世裂陷作用** 南海北部古新世裂陷作用局限于珠江口盆地东、西部的陆丰、文昌凹陷, 沉积厚度小于 1 000 m 神狐组碎屑冲积相, 反映出断裂活动普遍较弱(焦养泉等, 1997; 陈长民等, 2003; 钟志洪等, 2014)。

本研究通过地震资料反射对比确认琼东南盆地存在始新统(尚无钻井揭示)(图 3), 早—中始新世作为主要裂陷期, 范围覆盖珠江口—琼东南盆地(图 10-1)。珠江口盆地形成 NW 向—统暗沙断裂为界的东西部差异性初始裂陷结构, 西部发育 NE 向基底正断层主控的简单半地堑(包括云开低凸起南洼), 具有数量少、规模大( $>50$  km)、活动强度较高的特点, 开平凹陷边界断层(KS7)速率可达 130 m/Ma(图 9-1), 沉积厚度 500~1 000 m(图 10-1)。东部形成近 EW 向和 NE 向复合伸展断层系统, 西江—番

禺地堑 NE 向边界断层(X1、PY1)达速率峰值 116~240 m/Ma, 白云复式半地堑南部 EW 向边界断带(B2、B4)活动较强为 83~122 m/Ma, 东北缘断层(B8、B9)活动微弱仅约 10 m/Ma, 对沉积无控制, 构造分段和活动差异导致多洼多层次的特点, 由南部楔状层序向周缘亚平行层序转变。

琼东南盆地同期以 NW 向琼中央断裂为界同样表现出东西部断陷结构的初始差异, 西部由 NE 向基底正断层控制的半地堑、地堑组成, 北部裂陷带(F5-2)和中央裂陷带(F2-1、F2-2、F9、F2-3、F11)边界断层整体活动强度较高, 分别达到 75 m/Ma 和 73~128 m/Ma。东部形成近 EW 向和 NE 向复合伸展断层系统, 活动强度偏低, 宝岛—长昌复式地堑 EW 向边界断阶带(F15-2、F15-3)速率最低仅为 17~27 m/Ma, 松东复式半地堑 NE 向边界断层最大也不超过 60 m/Ma(图 9-2)。

以上分析表明, 早一中始新世断陷期珠江口—琼东南盆地东、西部伸展系统已经具有一定差异性, 构造样式上西部以平面式单一边界断层为主, 东部则为铲式边界断裂带, 整体上 NE 向构造活动性更强, 形成多个呈 NE 向展布的小型孤立凹陷, 反映出在 NW-SE 向区域引张应力场下 NE 向为盆地优势伸展构造的特点(图 10-1)(茹克, 1988; 吕宝凤等, 2008; 李辉等, 2014; 朱伟林等, 2015), 其中, 珠江口盆地东部伸展断陷作用最强, 导致 NE 向断层优势伸展发育向深部收敛的中地壳西江拆离伸展系统(图 5e), 相应同沉积厚于 2 000 m。

#### 4.1.2 晚始新世—早渐新世—统暗沙断裂控制的差异伸展裂陷作用

晚始新世—早渐新世珠江口盆地 NW 向—统暗沙断裂发生左旋走滑运动, 形成云开变换带复杂的伴生构造(图 10-2a), 恩平组地层内新生系列 NW-NWW 向雁列断层(图 5d), 成为云开低凸起上小型复式半地堑的主控构造, 并在白云凹陷西部与 EW 向断层叠加形成 NWW-EW 向断裂带(B1、B7、Y1~Y3), 活动强度高达 108 m/Ma(图 9-2), 根据与 NW-NWW 向伸展—走滑断层相关的 NNE 轴向反转褶皱可以限定走滑运动时代约为 40~32 Ma(图 3)。

珠江口盆地东部断裂系统发生重大转变, 恩平—西江凹陷 NE 向边界断层(X1、PY1)活动减弱至 22~53 m/Ma(图 9-1), 而西南缘新生 NW-NWW 向 X2 和 PY2 号控凹断层活动速率高达 170 m/Ma 和 65 m/Ma, 后者切穿前者并向凹内过渡为 NWW-EW 向(图 10-2), 将 NE 向凹陷分隔为

多个次洼(王家豪等, 2011; 许新明等, 2014)。盆地西部珠三坳陷 NE 向构造以继承性活动为主(李辉等, 2014; 钟志洪等, 2014), 顺德—开平凹陷 NE 向边界断裂(KS4、KS7)拓展延伸并维持了较强活动速率 83 m/Ma。

琼东南盆地西部 NE 向控凹断裂拓展至最大规模(图 10-2), 中部坳陷带活动总体强于北部坳陷带, 速率高达 113~450 m/Ma 和 225 m/Ma, 平均 250 m/Ma 以上, 盆地东部长昌—宝岛凹陷边界断层(F15-2、F15-3 号)仍然维持较低的 35~55 m/Ma。

上述分析揭示出晚始新世—早渐新世—统暗沙走滑断裂带控制的盆地显著差异性伸展裂陷过程。其以西的珠江口—琼东南盆地 NE 向控凹构造继承性活动增强, 裂陷范围进一步扩大, 沉积厚度大于 3 000 m, 形成 NE 轴向的较大规模断陷盆地, 凹内发育众多与 NE 向断裂(KS1、F11)斜交的 NEE 向次级断裂(F18), 指示了区域引张应力场由先前 NW-SE 向转变为 NNW-SSE 向, 在此应力场下琼东南盆地东部 EW 向斜向伸展断裂带活动相对较弱。其以东的珠江口盆地 NW—NWW 向构造改造了早期 NE 向构造并叠加于 EW 向构造, 造成恩平—西江凹陷由 NE 向至 NWW-EW 向的构造迁移, 反映出区域引张应力场从 NW-SE 向至 SN 向的转变(吴智平等, 2015)。白云主凹 NWW-EW 向边界断层(B2、B4)在强烈活动的同时, NWW-EW 向裂陷范围向西南缘和北部扩大并与西部 NE 向开平凹陷连片, 新生的南断北超白云次凹和番禺隆起洼陷的主控断层(B7、P3)活动达极值 305 m/Ma 和 228 m/Ma, 因此, 相对西部更大的伸展量导致 NWW-EW 向断层优势伸展以中下地壳连锁方式构成统一的白云拆离伸展断层系统(图 5e)。

#### 4.1.3 晚渐新世琼中央断裂带控制的差异伸展裂陷作用

晚渐新世琼东南盆地 NW 向琼中央断裂带发生左旋走滑运动, 形成琼中央构造变换带使盆地构造样式复杂化(图 10-3a), 发育同向和反向剪切走滑构造, NW-NWW 向左行走滑断裂发育陵水组以上浅层花状构造, 先前 NE 向伸展断层(F2-3)转变为伸展—右行走滑断层呈马尾状构造, 伴生 4 组 NWW 向左、右阶雁列正断层(F14-2)活动强度由前期 24~39 m/Ma 增至陵水期 165 m/Ma, 受变换带影响盆地中部 NE 向构造(F5-2、F2-3)活动剧烈增强, 速率达极值 172~720 m/Ma, 平均 350 m/Ma 以上(图 9-2)。依据 NW-NWW 向走滑构造及相关 NNE 轴向反转褶皱确定琼中央断裂带走滑运动起

始于 $\sim 30$  Ma 并持续至 $\sim 16$  Ma(图 7, 图 3).

琼中央断裂带控制了琼东南盆地差异分化的伸展裂陷过程, 西部 NE 向控凹构造收缩消亡, 活动性减弱至 49~72 m/Ma, 东部新生 NWW 向构造叠加于 EW 向构造(图 8), 形成 NWW-EW 向控凹构造(F15-2、F15-3)(图 10-3), 活动速率高达 135 m/Ma 和 206 m/Ma, 强度显著超过西部, 反映出南海北部引张应力场整体转变为 SN 向, 东部较大的伸展量导致优势构造向深部收敛滑脱形成 NWW-EW 向宝岛—长昌拆离系统, NWW-EW 轴向的裂陷带成为盆地最大规模的沉积中心, 厚于 2 500 m.

在 SN 向统一引张应力场下, 珠江口盆地西部 NE-NEE 向构造也基本消亡, 受一统暗沙左旋走滑断裂活动减弱和南海扩张的共同影响, 东部 NWW-EW 向构造继承活动性总体较前期有所减弱, 呈现北弱南强的特点(图 9-1), 恩平—西江边界断裂(X2、PY2)骤减至 $\sim 15$  m/Ma, 白云凹陷边界断裂(B4)虽然速率较高 240 m/Ma, 但同构造沉积范围明显收缩.

#### 4.2 南海北部盆地裂陷期时限

在盆地裂陷时限这一问题上尚未统一认识, 多数学者认为珠江口盆地在 32 Ma(T7 界面)裂陷结束进入裂后期(龚再升等, 1997; 戴一丁等, 1998; 刘铁树等, 2001; 孙珍等, 2005a; 庞雄等, 2007), 但部分学者认为北部坳陷带和白云凹陷裂陷作用均持续至 23~25 Ma(Clift and Lin, 2001; 张功成等, 2010). 琼东南盆地通常认为在 23 Ma(T7 界面)转入裂后期(Xie et al., 2006; 雷超等, 2011).

晚渐新世珠江口—琼东南盆地在“东强西弱”的断裂系统控制下具有“东裂西坳”特征. 破裂不整合面作为裂陷期与坳陷期分界, 通常将后期活动断层数量及地层断距骤减、均厚沉积分布扩大等特征作为重要识别标准(Driscoll et al., 1995). 珠江口盆地 32 Ma 以来西部断裂构造消亡活动停止, 珠海组呈毯状披覆于裂陷期恩平组上(图 5d), 最先进入裂后热沉降期, 东部恩平—西江凹陷断裂活动减弱停止, 裂后期珠海组均匀超覆于裂陷期恩平组地层, 但白云凹陷主拆离断裂带(B2)继承性活动较强, 珠海组地层垂向断距较大(图 4E), 与下覆恩平组向北掀斜减薄特征一致而区别于全区均匀披覆的珠江组, 我们认为珠江口盆地白云—荔湾凹陷裂陷期持续至 23 Ma(图 3), 这与近来盆地沉降史、沉积不整合面等研究结果相符(董冬冬等, 2008; Morley, 2016). 图 8f 剖面显示, 琼东南盆地 30 Ma 以来西部控凹断

造活动减弱并尖灭于 T60 以下并在 23 Ma 转入裂后期, 裂后期三亚组呈薄层状披覆于陵水组上, 东部长昌凹陷拆离断裂活动增强, 导致陵水组内次级断层密集控层活动持续至 T50, 裂陷期三亚组垂向断距较大(F15-2), 沉积较西部偏厚, 宝岛凹陷也存在这一现象(Zhang et al., 2013), 表明东部凹陷裂陷期延续至 16 Ma(图 3). 因此, 虽然珠江口盆地(T70)和琼东南盆地(T60)区域破裂不整合面的形成与 32 Ma 南海自东向西扩张和 24 Ma 洋中脊向南跃迁有关, 但破裂不整合面不能完全代表裂陷期与裂后期的分界(Morley, 2016), 裂陷期延长还与局部构造迁移相关, 在时限上与盆地 NW 向深大断裂走滑运动重合.

#### 4.3 南海北部盆地差异性构造演化的影响因素及区域动力学背景

关于南海北部新生代盆地动力学成因机制, 前人已有大量讨论. 一种观点认为珠江口—琼东南盆地古近纪属于 NE-NEE 向伸展型盆地, 受地幔柱及侧向地幔流控制(李思田等, 1998; 任建业等, 2011), 另一种观点认为琼东南盆地的形成与印支地块旋转挤出相关, 从时间序列上动力学机制分为始新世—早渐新世红河断裂左行走滑和古南海俯冲联合的 SE-SSE 向伸展以及晚渐新世南海扩张产生的 NS 向伸展(李绪宣等, 2006; 谢文彦等, 2007). 也有学者将珠江口—琼东南盆地与华南大陆 NNE 向构造相联系, 为始新世以来 NNE 向断裂持续右行走滑派生形成的系列 NE-EW 向伸展—拉分区, 并被中新世 NW-NWW 向左行走滑断裂错断(程世秀等, 2012). 还有一些学者强调了先存构造和岩石圈结构在盆地南北部坳陷带发育过程中的重要性(孙珍, 2005b, 2009; 钟志洪等, 2014; 谢玉洪等, 2015). 以上盆地发育模式从不同角度对当时某些构造特征作出合理解释, 但是在解决珠江口—琼东南盆地构造差异性等近年争议的问题上, 具有一定局限性, 如琼东南盆地被认为断裂系统在晚渐新世由 NE 向转变为 NE-EW-NWW 向(雷超等, 2011; Zhang et al., 2013), 但也有学者认为这种差异始新世已经存在(Hu et al., 2013). 白云凹陷也存在西南、北东两组 NW-EW 向张剪性断裂群主控地堑和南部 EW 向正断层主控半地堑等不同认识(孙珍等, 2005a; Wang et al., 2013; 吕彩丽等, 2017).

本文认为珠江口—琼东南盆地初始裂陷的形成主要受基底先存构造的影响, 包括先存构造走向及其与伸展方向的关系两方面因素, 东西部伸展系统

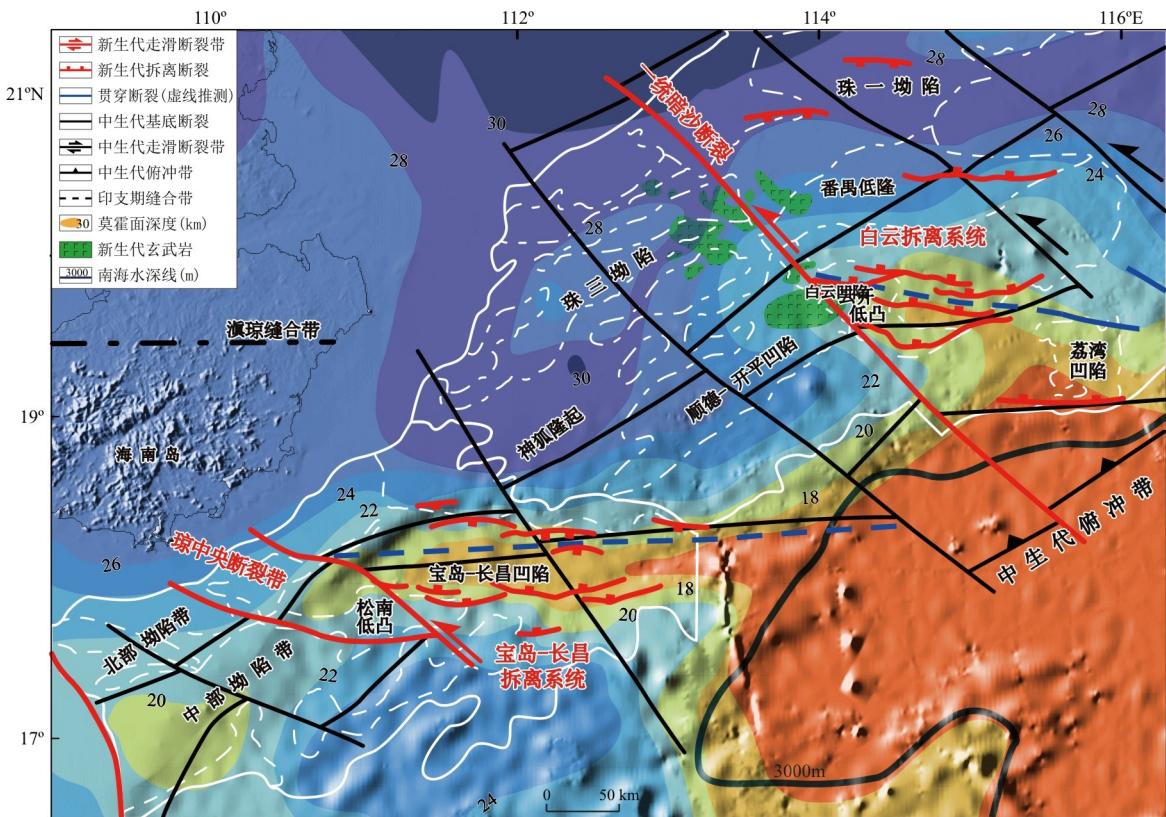


图 11 南海北部盆地差异性裂陷伸展作用的构造动力学成因模式

Fig.11 Geodynamic model of differential extension in the Northern South China Sea

莫霍面据龚再升等(1997)、唐晓音等(2014)、Zhao et al.(2015);前新生代构造据于鹏等(1999)、宋海斌(2002)、陈汉宗等(2005)、庞雄等(2007)、鲁宝亮等(2011)、孙晓猛等(2014)修改;古近纪火山岩引自 Yan et al.(2006)

走向是不同的,西部主要为 NE 向伸展断层,东部主要为 EW 向伸展断层,也复合有 NE 向伸展断层,这些伸展断层走向主要受中生代 NE 向、EW 向先存构造的影响(图 11),表现为中生代先存构造的重新活动或受先存构造控制.当伸展方向同先存构造呈角度斜交时发育的断裂具有斜列带分布特点(图 10-1a)(McClay et al., 2002; Morley et al., 2004),在 NW—SE 区域引张应力场下,沿 EW 向先存构造薄弱带斜向伸展形成盆地东部右阶斜列断阶带控制的复式裂陷,与伸展方向正交的 NE 向先存构造活化形成延伸较长的大规模 NE 向断裂.初始岩石圈结构也制约了盆地东西部张裂方式(Buck, 1991),盆地东部相对与西部地壳厚度较薄,莫霍面埋深较浅(图 11),西部在相对冷岩石圈下,脆韧性层厚度比较大(孙珍, 2009),以脆性破裂为主,形成单一平面式正断层控制的简单半地堑、地堑,东部在相对热岩石圈下,脆韧性层厚度比较小,韧性变形较强,脆性破裂较小,形成铲式正断层或断阶带控制的复式地堑、半地堑.此外,受太平洋板块俯冲控制的 NW—SE 向伸展应力场源于东部,早—中始新世裂陷作用

具有东强西弱的特征,在珠江口盆地东部优势伸展的 NE 向断层活动性达到区域峰值(图 9),较大的伸展量导致断块旋转从而形成早期浅层拆离伸展系统(图 5e).

伸展方向的变化以及深大断裂带走滑运动造成伸展量分配的差异是盆地裂陷中、后期东西部构造差异性形成的重要因素.在南海由东而西扩展迁移的背景下,晚始新世—渐新世两裂陷期受到区域引张应力场由 NW—SE 向至 SN 向顺时针偏转影响,但变换带中 NNE 向反转皱褶、NW—NNW 向走滑—伸展构造不能用纯拉张应力场解释,上地壳变形是岩石圈深部变形的浅层表现,重磁地球物理场特征研究表明珠江口—琼东南盆地的 NW 向—统暗沙、琼中央断裂带为隐伏的中生代深断裂带(图 11)(于鹏等, 1999; 宋海斌, 2002; 陈汉宗等, 2005),在地震剖面上可识别出深大断裂为切割莫霍面的岩石圈断裂(图 8),在空间位置上变换带与深大断裂上下重叠,因此,盆地构造变换带与深断裂带构成了 NW 向地壳尺度垂向强变形带,统一于晚始新世—渐新世叠加的两期左旋剪切应力场(图 10-2a, 图 10-3a).

珠江口—琼东南盆地西部 NE-NEE 向断层以岩石圈脆性破裂伸展变形继承性发育,且伸展量相对较小,形成“非拆离”伸展断层系统,盆地东部由于 NW 向深大断裂的走滑旋转进一步导致盆地东部伸展量增大,在近 N-S 向拉张应力场作用下,NWW-EW 向断层成为优势伸展构造,断层垂直位移显著增大,沿盆地东部发育的 NWW 向“贯穿”断裂的基底构造薄弱带(Hayes *et al.*, 1995)上地壳铲式正断层向下变缓收敛于中下地壳韧性层,形成深层拆离伸展断层系统。拆离断层的深度变化除了与垂直位移、伸展量因素有关,还受到岩石圈热结构变化影响(Morley, 1989),如珠一坳陷中生代处于火山弧区域,新生代火山活动规模较小(周蒂等,2006),在岩石圈热流逐渐降低和地壳韧性层加厚条件下,拆离断层呈现由地壳浅层向深层拓展的规律。

NWW-EW 向大型拆离系统与 NW 向走滑深断裂具有密切时空成因联系。在空间上,变换带断层具有伸展和走滑运动的双重性质,NWW 向雁列式断层以正断层为主,一些断面呈铲式变缓归顺到 EW 向伸展断层中,构成东部伸展凹陷部分拆离边界断层(如白云次凹),在深部拆离系统相关韧性变形局限于构造变换带以东(图 8)。在时序上,晚始新世—早渐新世白云拆离断层活动,下盘软流圈抬升和岩浆汇聚(图 10-3b),并在构造变换带交汇处侵位喷发(孙珍等,2005a),形成一统暗沙断裂交汇处 36 Ma 较大规模连续玄武岩记录(BY-7-1 井)(图 11)(Yan *et al.*, 2006);晚渐新世—早中新世宝岛—长昌拆离断层活动形成的凹内次级断层与转换带内局限于陵水—三亚组的走滑构造同期发育(图 8, 图 7-4),反映出两者活动时间一致。

从岩石圈尺度看,珠江口—琼东南盆地东部白云—荔湾、长昌—宝岛凹陷存在地壳局部强减薄带,岩石圈地幔上涌明显,莫霍面向北、向西深度逐渐增加(图 11)。古近纪喷发的玄武岩源于软流圈地幔熔融(Corti *et al.*, 2003),说明岩石圈发生减薄,以下地壳大规模韧性伸展减薄为主(张云帆等,2014),因此,拆离断层系统与现今地壳局部减薄带相关。

## 5 结 论

(1)珠江口—琼东南盆地古近系裂陷构造层为 NE 向、近 EW 向基底正断层构成的伸展断裂系统,根据几何学、运动学沿盆地走向的明显变化分为两个断裂系统。西部为 NE-NEE 向正断层构成的“非

拆离”伸展断层系,东部为 NE 向正断层、近 EW 向正断层(走滑正断层)复合而成的拆离伸展断层系。

(2)珠江口盆地的一统暗沙断裂带和琼东南盆地的琼中央断裂带在晚始新世—早渐新世和晚渐新世先后发生左旋走滑运动,这些切割莫霍面的岩石圈深大断裂与盆地的云开构造变换带和琼中央构造变换带构成了 NW 向地壳尺度垂向强变形带,对两侧显著的差异性构造变形具有调节作用。

(3)古近纪裂陷作用可划分为早(文昌组沉积期)、中(恩平组/崖城组沉积期)、晚(珠海组/陵水组沉积期)3 个有明显差异的裂陷期:a.早—中始新世,盆地西部以平面式正断层控制的简单地堑、半地堑为主,伸展量相对较小,东部则以铲式正断层控制的复式地堑、半地堑为主,伸展量相对大,断层向深部收敛在中地壳韧性层构成拆离的伸展断层系统;b.晚始新世—早渐新世,琼东南盆地、珠江口盆地西部断裂具有继承性活动特点,珠江口盆地东部发育 NWW-EW 向伸展断层,并向深层切割早期浅层拆离断层,形成深层拆离伸展断层系统,而沿着云开构造变换带发育反转构造;c.晚渐新世区,琼东南盆地、珠江口盆地西部断裂具有活动性减弱特点,琼东南盆地东部发育 NWW-EW 向伸展断层,形成深层拆离伸展断层系统,而沿着琼中央构造变换带发育反转、走滑构造。

(4)珠江口盆地和琼东南盆地东西部差异性伸展裂陷作用造成局部裂陷期延长是穿时性破裂不整合面形成的重要成因,盆地内部呈现“西早东晚”的特点。

(5)珠江口—琼东南盆地不同区段断裂系统及其构造演化的差异性受盆地基底先存构造、地壳及岩石圈结构及伸展量等多方面因素的影响,拆离伸展断层系统与发育 NWW 向“贯穿”断裂的基底构造薄弱带、现今地壳局部减薄带相关,南海扩展由东而西的迁移诱导北部大陆边缘块体沿着先存 NW 向深大断裂发生走滑旋转是导致变换构造带两侧差异伸展的动力学原因,应力场及岩石圈热结构变化是引起拆离断层深度变化的重要因素。

致谢:两位审稿专家的建议对提高文章质量有很大帮助,在此表示衷心感谢!

## References

- Barckhausen, U., Engels, M., Franke, D., et al., 2014. Evolution of the South China Sea: Revised Ages for Breakup and Seafloor Spreading. *Marine and Petroleum Geology*

- gy, 58: 599—611.doi:10.13039/501100002347
- 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
- Buck, W.R., 1991. Modes of Continental Lithospheric Extension. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96 (B12): 20161—20178.doi:10.1029/91jb01485
- Cai, J.X., Zhang, K.J., 2009. A New Model for the Indochina and South China Collision during the Late Permian to the Middle Triassic. *Tectonophysics*, 467(1—4): 35—43.doi:10.1016/j.tecto.2008.12.003
- Cao, J., Xia, S., Sun, J., et al., 2014. Comparison of Fault Structure Characteristics in the Northern Pearl River Mouth Basin and Its Geological Implication. *Progress in Geophysics*, 29(05): 2364—2369 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. M., 2003. Formation conditions of tertiary oil/gas reservoirs in Pearl River Mouth Basin (East). *Science Press*, Beijing, 316. (in Chinese).
- Chen, H., Wu, X., Zhou, D., et al., 2005. Meso-Cenozoic Faults in Zhujiang River Mouth Basin and Their Geodynamic Background. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(02): 52—61 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Ma, Y., Chen, J., et al., 2015. Tectonic Dynamics of Northern Continental Margin Basins in the South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(03): 38—47 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S., Li, S., Suo, Y., et al., 2012. Cenozoic Tectonics and Dynamics of Basin Groups of the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(06): 79—93 (in Chinese with English abstract).
- Clift, P., Lin, J., 2001. Preferential Mantle Lithospheric Extension under the South China Margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18(8): 929—945.doi:10.1016/s0264-8172(01)00037-x
- Corti, G., Bonini, M., Conticelli, S., et al., 2003. Analogue Modelling of Continental Extension: A Review Focused on the Relations between the Patterns of Deformation and the Presence of Magma. *Earth-Science Reviews*, 63 (3—4): 169—247.doi:10.1016/s0012-8252(03)00035-7
- Crider, J.G., Peacock, D.C.P., 2004. Initiation of Brittle Faults in the Upper Crust: A Review of Field Observations. *Journal of Structural Geology*, 26(4): 691—707.doi:10.1016/j.jsg.2003.07.007
- Dai, Y., Pang, X., Li, P., 1998. Study on Hydrocarbon Accu-mulation in Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 12(01): 12—18 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D.D., Wu, S.G., Li, J.B., et al., 2014. Tectonic Contrast Between the Conjugate Margins of the South China Sea and the Implication for the Differential Extensional Model. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44 (5): 1059—1070 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D. D., Wu, S. G., Zhang, G. C., et al., 2008. Rifting Process and Formation Mechanisms of Syn-rift Stage Prolongation in the Deepwater Basin, Northern South China Sea. *Science Bulletin*, 53(19): 2342—2351 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D., Wang, D., Zhang, G., et al., 2009. Cenozoic Tectonic and Sedimentary Evolution of Deepwater Area Pearl River Mouth Basin. *Journal of China University of Petroleum*, 33(5): 17—22 (in Chinese with English abstract).
- Driscoll, N. W., Hogg, J. R., Christie-Blick, N., et al., 1995. Extensional Tectonics in the Jeanne D'Arc Basin, Offshore Newfoundland: Implications for the Timing of Break-Up between Grand Banks and Iberia. *Geological Society, London, Special Publications*, 90(1): 1—28.doi:10.1144/gsl.sp.1995.090.01.01
- Ferrill, D.A., Stamatakos, J.A., Sims, D., 1999. Normal Fault Corrugation: Implications for Growth and Seismicity of Active Normal Faults. *Journal of Structural Geology*, 21(8—9): 1027—1038.doi:10.1016/s0191-8141(99)00017-6
- Franke, D., Savva, D., Pubellier, M., et al., 2014. The Final Rifting Evolution in the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 704—720.doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.11.020
- Gong, Z.S., Li, S.T., Xie, T.J., et al., 1997. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea. *Science Press*, Beijing, 510 (in Chinese).
- Hall, R., 1996. Reconstructing Cenozoic SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 106(1): 153—184.doi:10.1144/gsl.sp.1996.106.01.11.
- Hayes, D.E., Nissen, S.S., Buhl, P., et al., 1995. Throughgoing Crustal Faults along the Northern Margin of the South China Sea and their Role in Crustal Extension. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B11): 22435—22446.doi:10.1029/95jb01867
- Hu, B., Wang, L. S., Yan, W. B., et al., 2013. The Tectonic Evolution of the Qiongdongnan Basin in the Northern Margin of the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77: 163—182.doi:10.1016/j.jseaes.2013.08.022

- Jiao, Y., Li, S., Jie, X., et al., 1997. Manifestation of Multi-stage Episodic Rifting—Take Western Pearl River Mouth Basin And Its Peripheral Area as an Example. *Experimental Petroleum Geology*, 19(3):222—227 (in Chinese with English abstract).
- Jie, X., Ren, J., Wang, Z., et al., 2015. Difference of Tectonic Evolution of Continental Marginal Basins of South China Sea and Relationship with SCS Spreading. *Earth Science Frontiers*, 22(1):77—87 (in Chinese with English abstract).
- Lavier, L.L., Manatschal, G., 2006. A Mechanism to Thin the Continental Lithosphere at Magma-Poor Margins. *Nature*, 440(7082):324—328.doi:10.1038/nature04608
- Lei, C., Ren, J., Pei, J., et al., 2011. Tectonic Framework and Multiple Episode Tectonic Evolution in Deepwater Area of Qiongdongnan Basin, Northern Continental Margin of South China Sea. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 36(1):151—162 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Chen, S., Zhang, Y., et al., 2014. Faults in the Zhu-3 Depression of Pearl River Mouth Basin and Their Control over Hydrocarbon Accumulation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(3):115—124 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Lei, B., Zheng, Q., et al., 2015. Stress Field Evolution and Its Controls on Oil Accumulation in the Wenchang Sag. *Geotectonica et Metallogenesis*, 39(4):601—609 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Wang, W., He, Y., et al., 1989. The Tectonic Characters and Evolution of the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 3(1):11—18 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Lin, C., Zhang, Q., et al., 1998. Dynamic Process of Episodic Rifting in Continental Marginal Basin and Tectonic Events Since 10 Ma in South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 43(8):797—810 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Suo, Y., Liu, X., et al., 2012. Basin Dynamics and Basin Groups of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(6):55—78 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Zhou, H.W., Chung, S.L., et al., 2002. Geochemical and Sm-Nd Isotopic Characteristics of Metabasites from Central Hainan Island, South China and Their Tectonic Significance. *The Island Arc*, 11(3):193—205.doi:10.1046/j.1440-1738.2002.00365.x
- Li, X.X., Zhong, Z. H., Dong, W. L., et al., 2006. Paleogene Rift Structure and Its Dynamics of Qiongdongnan Ba-sin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(6):713—721 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T.S., He, S.B., 2001. Deepwater Hydrocarbon Potential along the North Continental Margin, the South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 15(3):9—15 (in Chinese with English abstract).
- Lu, B., Wang, P., Zhang, G., et al., 2011. Basement Structures of an Epicontinental Basin in the Northern South China Sea and Their Significance in Petroleum Prospect. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4):580—587 (in Chinese with English abstract).
- Lü, B., Yin, Z., Cai, Z., et al., 2012. Cenozoic Tectonic Evolution Sequence in Northern South China Sea and Its Oil/Gas Significance. *Acta Geologica Sinica*, 86(8):1249—1261 (in Chinese with English abstract).
- Lü, B., Yuan, Y., 2008. The Sedimentary-Structure Difference of Deep Water Basins and Its Petroleum Significance in the Northern South China Sea. *Geotectonica et Metallogenesis*, 32(4):441—447 (in Chinese with English abstract).
- Lü, C. L., Zhang, G. C., Yang, D. S., 2017. Differential Structure and Dynamic Mechanism of Wenchang Formation in the Zhu II Depression of the Pearl River Basin. *Earth Science Frontiers*, 24:1—9 (in Chinese with English abstract).
- Martel, S. J., 1999. Mechanical Controls on Fault Geometry. *Journal of Structural Geology*, 21(6):585—596.doi:10.1016/s0191-8141(99)00054-1
- McClay, K. R., Dooley, T., Whitehouse, P., et al., 2002. 4-D Evolution of Rift Systems: Insights from Scaled Physical Models. *AAPG Bulletin*, 86:935—960.doi:10.1306/61eedbf2-173e-11d7-8645000102c1865d
- Morley, C. K., 1989. Extension, Detachments, and Sedimentation in Continental Rifts (with Particular Reference to East Africa). *Tectonics*, 8(6):1175—1192.doi:10.1029/tc008i006p01175
- Morley, C. K., 2016. Major Unconformities/termination of Extension Events and Associated Surfaces in the South China Seas: Review and Implications for Tectonic Development. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120:62—86.doi:10.1016/j.jseas.2016.01.013
- 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
- Neng, Y., Wu, J., Qi, J., et al., 2013. Three Structural Layers and Its Evolution of Cenozoic Basins in Deep Area of Northern Margin, South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 87(3):

- 403—414 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Chen, C.M., Peng, D.J., et al., 2007. The Pearl River Deep-Water Fan System & Petroleum in South China Sea. *Science Press*, Beijing (in Chinese).
- Peacock, D.C.P., 2002. Propagation, Interaction and Linkage in Normal Fault Systems. *Earth Science Reviews*, 58 (1—2): 121—142. doi:10.1016/s0012-8252(01)00085-x
- Péron-Pinvidic, G., Manatschal, G., 2010. From Microcontinents to Extensional Allochthons: Witnesses of how Continents Rift and Break Apart?. *Petroleum Geoscience*, 16(3): 189—197. doi:10.1144/1354-079309-903
- Qi, J.F., Yang, Q., Tong, H.M., et al., 1997. Sequence Construction Response to Tectonic Process in Extensional Half-Graben Basin. *Earth Science*, 22(6): 45—50 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N., Wang, Z.F., Xie, H., et al., 2013. Geophysical Investigations of Crust-Scale Structural Model of the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 34(3—4): 259—279. doi:10.1007/s11001-013-9182-8
- Ren, J., Lei, C., 2011. Tectonic Stratigraphic Framework of Yinggehai-Qiongdongnan Basins and Its Implication for Tectonic Province Division in South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3303—3314 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J., 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(01): 102—114 (in Chinese with English abstract).
- Ru, K., 1988. The Development of Superimposed Basin on the Northern Margin of the South China Sea and Its Tectonic Significance. *Oil & Gas Geology*, 9(1): 22—31 (in Chinese with English abstract).
- Song, H., Hao, T., Jiang, W., et al., 2002. Researches on Geophysical Field Characteristics and Basement Fault System of South China Sea. *Progress in Geophysics*, 17(1): 24—34 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X., Zhang, X., Zhang, G., et al., 2014. Texture and Tectonic Attribute of Cenozoic Basin Basement in the Northern South China Sea. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(06): 1312—1323 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Pang, X., Zhong, Z., et al., 2005a. Dynamics of Tertiary Tectonic Evolution of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 489—498 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Sun, L., Zhou, D., et al., 2009. Discussion on the South China Sea Evolution and Lithospheric Breakup through 3D Analogue Modeling. *Earth Science*, 34(3): 435—447 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhou, D., Zhong, Z., et al., 2005b. A Study on Basal Controlling Fault Pattern of Ying Qiong Basin through Analogue Modeling. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 70—78 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X., Hu, S., Zhang, G., et al., 2014. Characteristic of Surface Heat Flow in the Pearl River Mouth Basin and Its Relationship with Thermal Lithosphere Thickness. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(6): 1857—1867 (in Chinese with English abstract).
- Torvela, T., Moreau, J., Butler, R.W.H., et al., 2013. The Mode of Deformation in the Orogenic Mid-Crust Revealed by Seismic Attribute Analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(4): 1069—1086. doi:10.1002/ggge.20050
- Wang, J.H., Pang, X., Tang, D.Q., et al., 2013. Transtensional Tectonism and Its Effects on the Distribution of Sand-bodies in the Paleogene Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China. *Marine Geophysical Research*, 34(3—4): 195—207. doi:10.1007/s11001-013-9200-x
- Wang, J., Liu, L., Chen, S., et al., 2011. Tectonic-Sedimentary Responses to the Descend Episode of the Zhu-Qiong Movement in the Enping Depression, Pearl River Mouth Basin and its Regional Tectonic Significance. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4): 588—595 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z., Hu, Y., Zhong, Z., 2015. Cenozoic Faults Characteristics and Regional Dynamic Background of Panyu 4 Sub-sag, Zhu I Depression. *Journal of China University of Petroleum*, 39(4): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Xia, B., Lu, B., Wu, 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).
- Xie, X., Müller, R.D., Li, S., et al., 2006. Origin of Anomalous Subsidence Along the Northern South China Sea Margin and Its Relationship to Dynamic Topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745—765.
- Xie, W., Zhang, Y., Sun, Z., et al., 2007. Characteristics and Formation Mechanism of Faults in Qiongdongnan Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 71—78 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y., Tong, C., Fan, C., et al., 2015. Characteristics and Evolution of Fault System in Qiongdongnan Basin. *Geotectonica et Metallogenesis*, 39(5): 795—807 (in Chinese with English abstract).

- Xu, X., Chen, S., Wang, F., et al., 2014. Structural Features and Its Impacts on Hydrocarbon Accumulation of Neogene in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Geoscience*, 28(3): 543—550 (in Chinese with English abstract).
- Yan P., Deng H., Liu H., et al., 2006. The Temporal and Spatial Distribution of Volcanism in the South China Sea Region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(5): 647—659. doi:10.1016/j.jseas.2005.06.005.
- Yan, Y., Xia, B., Lin, G., et al., 2005. The Sedimentary and Tectonic Evolution of the Basins in the North Margin of the South China Sea and Geodynamic Setting. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(2): 53—61 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., 1998. The Tectonic Evolution and Sedimentary Basins of South China Sea in Cenozoic. *Geological Research of South China Sea*, (10): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J., Sun, Z., Zhu, J., 2010. Cenozoic Tectonic Phases and Their Representing Shapes in Songnan Sag, Qiongdongnan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 21(2): 281—288 (in Chinese with English abstract).
- Yu, P., Wang, J., Zhong, H., et al., 1999. Comprehensive Geophysical Research on the Basement Structure in Qiongdongnan Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 13(6): 55—62 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S., Chen, X., Mei, L., 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).
- Yu, S., Mei, L., Shi, H., et al., 2007. Relationship between Faults and Hydrocarbon Accumulation in Panyu Low Massif and North Slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 34(5): 562—565 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Wang, Z., Sun, Z., et al., 2013. Structural Differences Between the Western and Eastern Qiongdongnan Basin: Evidence of Indochina Block Extrusion and South China Sea Seafloor Spreading. *Marine Geophysical Research*, 34(3): 309—323. doi:10.1007/s11001-013-9187-3
- Zhang, G., 2010. Tectonic Evolution of Deepwater Area of Northern Continental Margin in South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 528—533 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Sun, Z., Pang, X., 2014. The Relationship Between Extension of Lower Crust and Displacement of the Shelf Break. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(3): 488—496 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2007. Distribution and Identification of the Low-Velocity Layer in the Northern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 17(4): 471—479 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Sun, Z., Wang, Z., et al., 2015. The Mechanics of Continental Extension in Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 36(2-3): 197—210.
- Zhong, Z., Shi, H., Zhu, M., et al., 2014. A Discussion on the Tectonic-Stratigraphic Framework and Its Origin Mechanism in Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 26(5): 20—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Chen, H., Wu, S., et al., 2002. Opening of the South China Sea by Dextral Splitting of the East Asian Continental Margin. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 180—190 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Ru, K., Chen, H., 1995. Kinematics of Cenozoic Extension on the South China Sea Continental Margin and Its Implications for the Tectonic Evolution of the Region. *Tectonophysics*, 251(1): 161—177. doi:10.1016/0040-1951(95)00018-6.
- Zhou, D., Wang, W., Pang, X., et al., 2006. Mesozoic Subduction-Accretion Zone in Northeastern South China Sea Inferred from Geophysical Interpretations. *Science China: Earth Sciences*, 36(3): 209—218 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W., Mi, L., Zhang, H., 2010. Altsas of Oil and Gas Basins, China Sea. *Petroleum Industry Press*, Beijing (in Chinese).
- Zhu, W., Wu, J., Zhang, G., et al., 2015. Discrepancy Tectonic Evolution and Petroleum Exploration in China Offshore Cenozoic Basins. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 88—101 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹敬贺,夏少红,孙金龙,等,2014.珠江口盆地北部断裂构造特征对比及其地质学意义.地球物理学进展,29(5): 2364—2369.
- 陈汉宗,吴湘杰,周蒂,等,2005.珠江口盆地中新生代主要断裂特征和动力背景分析.热带海洋学报,24(2):52—61.
- 陈建军,马艳萍,陈建中,等,2015.南海北部陆缘盆地形成的构造动力学背景.地学前缘,22(3):38—47.
- 陈长民,2003.珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件.北京:科学出版社,316.
- 程世秀,李三忠,索艳慧,等,2012.南海北部新生代盆地群构造特征及其成因.海洋地质与第四纪地质,32(6): 79—93.
- 戴一丁,庞雄,李平鲁,1998.珠江口盆地开平凹陷油气聚集条件分析.中国海上油气,12(1):12—18.

- 董冬冬,王大伟,张功成,等,2009.珠江口盆地深水区新生代构造沉积演化.中国石油大学学报(自然科学版),33(5):17—22.
- 董冬冬,吴时国,李家彪,等,2014.南海共轭大陆边缘的构造对比及差异伸展模式.中国科学:地球科学,44(5):1059—1070.
- 董冬冬,吴时国,张功成,等,2008.南海北部深水盆地的裂陷过程及裂陷期延迟机制探讨.科学通报,53(19):2342—2351.
- 龚再升,李思田,谢泰俊,等,1997.南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集.北京:科学出版社,510.
- 焦养泉,李思田,解习农,等,1997.多幕裂陷作用的表现形式——以珠江口盆地西部及其外围地区为例.石油实验地质,19(3):222—227.
- 解习农,任建业,王振峰,等,2015.南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系.地学前缘,22(1):77—87.
- 雷超,任建业,裴健翔,等,2011.琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程.地球科学,36(1):151—162.
- 李辉,陈胜红,张迎朝,等,2014.珠江口盆地珠三角坳陷断裂特征与油气成藏.海洋地质与第四纪地质,34(3):115—124.
- 李俊良,雷宝华,郑求根,等,2015.珠江口盆地文昌凹陷应力场演化及其对成藏要素的控制作用.大地构造与成矿学,39(4):601—609.
- 李平鲁,王维平,贺亚纯,等,1989.珠江口盆地构造特征及演化.中国海上油气,3(1):11—18.
- 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.
- 李思田,林畅松,张启明,等,1998.南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件.科学通报,43(8):797—810.
- 李绪宣,钟志洪,董伟良,等,2006.琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制.石油勘探与开发,33(6):713—721.
- 刘铁树,何仕斌,2001.南海北部陆缘盆地深水区油气勘探前景.中国海上油气,15(3):9—15.
- 鲁宝亮,王璞珺,张功成,等,2011.南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义.石油学报,32(4):580—587.
- 吕宝凤,殷征欣,蔡周荣,等,2012.南海北部新生代构造演化序列及其油气成藏意义.地质学报,86(8):1249—1261.
- 吕宝凤,袁亚娟,2008.南海北部深水盆地沉积—构造的差异性及其油气意义.大地构造与成矿学,32(4):441—447.
- 吕彩丽,张功成,杨东升,2017.珠江口盆地珠二坳陷文昌组构造差异性与动力学成因机制.地学前缘,24:1—9.
- 能源,吴景富,漆家福,等,2013.南海北部深水区新生代盆地三层结构及其构造演化.地质学报,87(3):403—414.
- 庞雄,陈长民,彭大钧,等,2007.南海珠江深水扇系统及油气.
- 北京:科学出版社.
- 漆家福,杨桥,童亨茂,等,1997.构造因素对半地堑盆地的层序充填的影响.地球科学,22(06):45—50.
- 任建业,雷超,2011.莺歌海—琼东南盆地构造—地层格架及南海动力变形分区.地球物理学报,54(12):3303—3314.
- 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.
- 茹克,1988.南海北部边缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义.石油与天然气地质,9(1):22—31.
- 宋海斌,郝天珧,江为为,等,2002.南海地球物理场特征与基底断裂体系研究.地球物理学进展,17(1):24—34.
- 孙晓猛,张旭庆,张功成,等,2014.南海北部新生代盆地基底结构及构造属性.中国科学:地球科学,44(6):1312—1323.
- 孙珍,庞雄,钟志洪,等,2005a.珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学.地学前缘,12(4):489—498.
- 孙珍,孙龙涛,周蒂,等,2009.南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟.地球科学,34(3):435—447.
- 孙珍,周蒂,钟志洪,等,2005b.莺—琼盆地基底控制断裂样式的模拟探讨.热带海洋学报,24(2):70—78.
- 唐晓音,胡圣标,张功成,等,2014.珠江口盆地大地热流特征及其与热岩石圈厚度的关系.地球物理学报,57(6):1857—1867.
- 王家豪,刘丽华,陈胜红,等,2011.珠江口盆地恩平凹陷珠江运动二幕的构造—沉积响应及区域构造意义.石油学报,32(4):588—595.
- 吴智平,胡阳,钟志洪,2015.珠一坳陷番禺 4 洼新生代断裂特征及其区域动力背景.中国石油大学学报(自然科学版),39(4):1—9.
- 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.
- 谢文彦,张一伟,孙珍,等,2007.琼东南盆地断裂构造与成因机制.海洋地质与第四纪地质,27(1):71—78.
- 谢玉洪,童传新,范彩伟,等,2015.琼东南盆地断裂系统特征与演化.大地构造与成矿学,39(5):795—807.
- 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.
- 闫义,夏斌,林舸,等,2005.南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景.海洋地质与第四纪地质,25(2):53—61.
- 姚伯初,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.
- 于俊峰,孙志鹏,朱继田,2010.琼东南盆地松南凹陷新生代重要构造幕及表现形式.天然气地球科学,21(2):281—

- 288.
- 于鹏,王家林,钟慧智,等,1999.琼东南盆地基底结构综合地球物理研究.中国海上油气,13(6):55—62.
- 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.
- 于水明,梅廉夫,施和生,等,2007.珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷北坡断层与油气成藏关系.石油勘探与开发,34(5):562—565.
- 张功成,2010.南海北部陆坡深水区构造演化及其特征.石油学报,31(4):528—533.
- 张云帆,孙珍,庞雄,2014.珠江口盆地白云凹陷下地壳伸展与陆架坡折的关系.中国科学:地球科学,44(3):488—496.
- 赵明辉,丘学林,徐辉龙,等,2007.南海北部沉积层和地壳内低速层的分布与识别.自然科学进展,17(4):471—479.
- 钟志洪,施和生,朱明,等,2014.珠江口盆地构造—地层格架及成因机制探讨.中国海上油气,26(5):20—29.
- 周蒂,陈汉宗,吴世敏,等,2002.南海的右行陆缘裂解成因.地质学报,76(2):180—190.
- 周蒂,王万银,庞雄,等,2006.地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带.中国科学(D辑:地球科学),36(3):209—218.
- 朱伟林,米立军,张厚和,2010.中国海域含油气盆地图集.北京:石油工业出版社.
- 朱伟林,吴景富,张功成,等,2015.中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向.地学前缘,22(1):88—101.