

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019050901

珠江口盆地西部文昌 A 凹陷断裂特征与成因探讨

张豪^{1,2,3}, 栾锡武^{2,3}, 冉伟民^{2,3}, 王阔^{1,2,3}, 魏新元^{2,3,4}, 石艳锋^{1,2,3},
Mohammad Saiful Islam^{4,5}, 王嘉⁶

1. 中国石油大学(华东), 青岛 266580
2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
4. 山东科技大学, 青岛 266590
5. 达卡大学, 孟加拉, 达卡, 1000
6. 中国海洋大学, 青岛 266100

摘要:在前人勘探解释的基础上,通过三维高分辨率地震资料,应用相干属性分析等技术对区域断裂进行精细化解释。研究表明盆地内发育着典型的犁式、花状构造、旋转正断层等伸展构造样式,在珠三南断裂影响下,南部边界断裂以阶梯状排列形成断阶构造。始新世—中中新世,断裂走向在持续右旋张扭应力场下以NE→EW→NWW顺时针方向旋转,张裂强度逐渐减弱。晚始新世—早渐新世,盆地在太平洋板块俯冲后退、印亚板块碰撞、古南海向南俯冲下发育EW向断裂,晚渐新世在南海扩张事件影响下前期右旋应力场得到加强,形成大量近EW向断裂,中新世后演化为NWW向断裂。文昌A凹陷断裂构造的演化、成因机制与南海北部陆缘应力场变化一致。该研究有利于进一步了解南海北部陆缘含油气盆地的构造特征和演化规律,提高油气勘探开发的效率。

关键词:断裂体系;断层活动性;应力场变化;珠江口盆地;文昌A凹陷

中图分类号:P736.1 **文献标识码:**A

Discussion on fault characteristics and genesis of Wenchang A Sag in the west of the Pearl River Mouth Basin

ZHANG Hao^{1,2,3}, LUAN Xiwu^{2,3}, RAN Weimin^{2,3}, WANG Kuo^{1,2,3}, WEI Xinyuan^{2,3,4}, SHI Yanfeng^{1,2,3}, Mohammad Saiful Islam^{4,5},
WANG Jia⁶

1. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China
2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China
3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China
4. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
5. University of Dhaka, Dhaka 1000, Bangladesh
6. Ocean University of China, Qingdao 266100, china

Abstract: On the basis of previous researches, fine interpretation is made for the fault systems of the Wenchang A Sag with the data of 3D high-resolution seismic survey, coherence attribute analysis and other techniques. The results show that the basin is characterized by typical extensional structures, such as plow-like structures, flower-like structures and rotating normal faults. Affected by the Zhu-3 south fault, the southern boundary of the fault system shows a step-like pattern. During the period from Late Eocene to Early Oligocene, EW faults were developed under the subduction and retreat of the Pacific Plate, the collision with the Indo-subduction plate, and the southward subduction of the ancient South China Sea. During the period of Late Oligocene, however, under the influence of the South China Sea expansion event, the early dextral stress field was strengthened, while formed the nearly EW fault, and then evolved to those in NWW trending. From Late Eocene to middle Miocene, the fault trend rotates clockwise in the direction from NE to EW to NWW under the action of continuous right-hand tensional stress field. The tensile strength gradually weakened later on. Data suggests that the evolution and genetic mechanism of the faults in the

资助项目:中国东盟海上合作基金项目(12120100500017001);青岛海洋科学与技术试点国家实验室基金项目(QNLM201708);自然资源部公益性行业科研专项基金“海底冷泉拖曳式快速成像系统研制及应用”(201511037);海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室开放基金“开平凹陷地区地质与矿产资源勘探”(MMRKF201804);鳌山科技创新项目(2016ASKJ11, 2016ASKJ13, 2017ASKJ02)

作者简介:张豪(1994—),男,硕士,研究方向为油气田勘探开发地球物理技术, E-mail: z17010089@s.upc.edu.cn

通讯作者:栾锡武(1966—),男,研究员,研究方向为海洋地球物理测量与数据处理方法以及大陆边缘构造演化, E-mail: xluan@qnlm.ac

收稿日期:2019-05-09; **改回日期:**2019-11-26. 周立君编辑

Wenchang A Sag are consistent with the variation in stress field on the Northern Continental Margin of the South China Sea. This study is conducive to further understanding the structural characteristics and evolution of the oil-bearing basins on the northern margin of the South China Sea and improving the efficiency of oil and gas exploration and development.

Key words: fracture system; fault activity; stress field variation; Pearl River Mouth Basin; Wenchang A sag

在断陷型含油气盆地的研究中,断裂与盆地之间的联系十分密切,断裂不仅是油气运聚和成藏的重要通道,还可通过断裂反推盆地的演化、盆地形成过程中的动力学机制,具有十分重要的研究意义^[1]。文昌A凹陷位于珠江口盆地西部,是一个以含天然气为主的地区。在对文昌A凹陷近30年的勘探开发中发现上渐新统珠海二、三段为主要含气目的层^[1-5]。前人对文昌凹陷的层序地层^[1-2]、断裂及断裂带^[3,5]、油气成藏^[3,5]都有长期一致的认识,但对南海北部新生代以来的应力场变化与盆地内断裂的演化缺乏耦合性研究。本文利用高分辨率地震资料,综合分析断层的剖面和平面的几何学特征,结合断层的活动速率与走向定量统计分析,来探究盆地内断裂的动力学机制。

1 区域地质背景

珠江口盆地西部位于南海北部大陆边缘,是新生代以来的一个以沉积为主的盆地,其基底为前第

三系变质岩、岩浆岩和喷发岩,区域内包括北部隆起、珠三拗陷和神弧隆起三个一级构造单元,在断裂的控制下,盆地总体特征体现为南北分带、东西分块的构造格局^[6-7]。文昌A凹陷位于珠三拗陷内,属于次一级的构造单元,面积约为3350 km²,北、东部与阳江低凸起相接,南部和神弧隆起相接,西部与琼海凸起、琼海凹陷、文昌B、C凹陷相连(图1)。文昌A凹陷在形成与演化的过程中受到印度与亚欧板块的碰撞、太平洋板块后撤、南海扩张以及珠三南断裂带的多重因素所控制^[8-9]。

珠江口盆地西部的构造演化在晚白垩纪—早渐新世为断陷阶段,该时期发生的三期张裂相应地发育了神弧组、文昌组和恩平组的断陷陆相沉积^[6]。晚渐新世—中中新世为拗陷阶段^[2],整个时期的构造活动逐渐趋于稳定,盆地内开始广泛而普遍的沉降。晚渐新世由于海底扩张,盆地内经历了海侵阶段,覆盖了晚渐新世—中中新世的沉积序列,该时期发育的珠海组、珠江组均为海相沉积;晚中新世后为南海扩张期后,沉积相为开阔浅海相^[9]。盆地

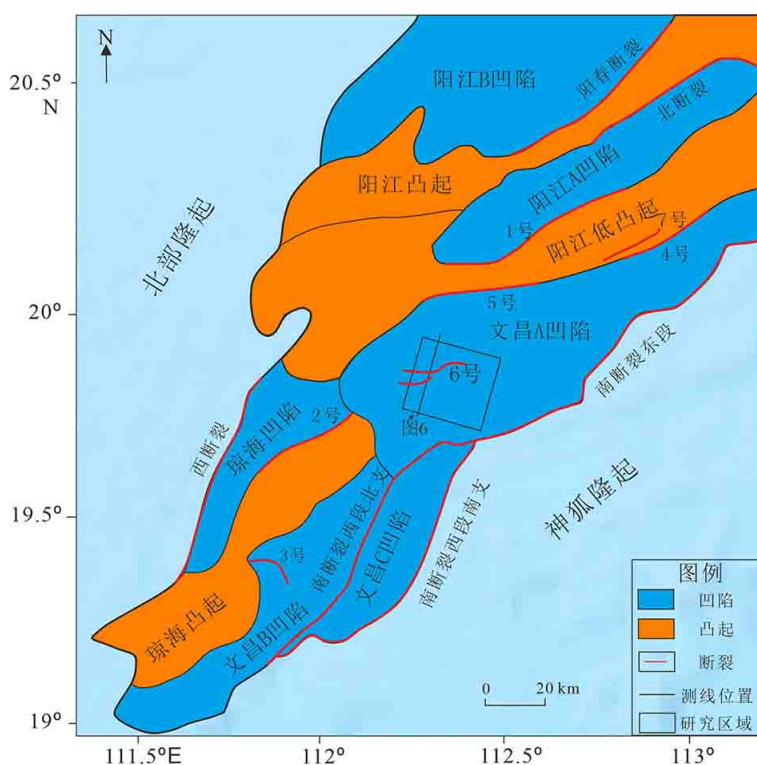


图1 珠江口盆地西部珠三拗陷构造单元划分 (据文献[2]修改)

Fig.1 Division of tectonic units in the Zhu III Depression in the west of the Pearl River Mouth Basin (modified from reference[2])

在新生代沉积中发育了3个十分重要的层序地层(图2):古新统神狐组顶面(T90)、始新统文昌组顶面(T80)、下渐新统恩平组顶面(T70),并分别对应着珠江运动I、珠江运动II以及南海运动这3个重要的区域性构造运动^[1];南海北部大陆边缘发生的最后一次的构造运动为东沙运动,自此南海北部整体进入了广泛而普遍的区域性热沉降期^[10-11]。

2 数据和方法

为研究文昌A凹陷内的构造和成因,本文利用高分辨率的三维地震资料(地震采样率为2ms,区域面积约为250km²)。在前人对地层和断裂的研究基础上^[1-4],解释了地震资料中相对应的层位,划分了从晚始新世到中新世期间的8个层位并对区域内的断裂特征进行精细解释,绘制各层的反射层

平面图,在平面图的基础上结合地震属性方法追踪识别出区域内的断层并绘制断裂平面分布图。定量化统计平面断裂走向,根据上下盘岩层厚度的不同,确定断层活动程度,然后计算各阶段的断层活动速率,分析断层性质,探讨盆地的构造及断裂成因。

3 断裂几何学特征

珠江口盆地文昌A凹陷位于复杂断裂带,断层活动性强,并且十分发育,垂向分辨率均在40m以上,在近N-S拉张应力下断层发育多种构造样式,区域内剖面上断层依据几何学形态分为平直正断层和铲式正断层。本文以地震反射层T70为分界线划分为早、晚期断层^[4]。

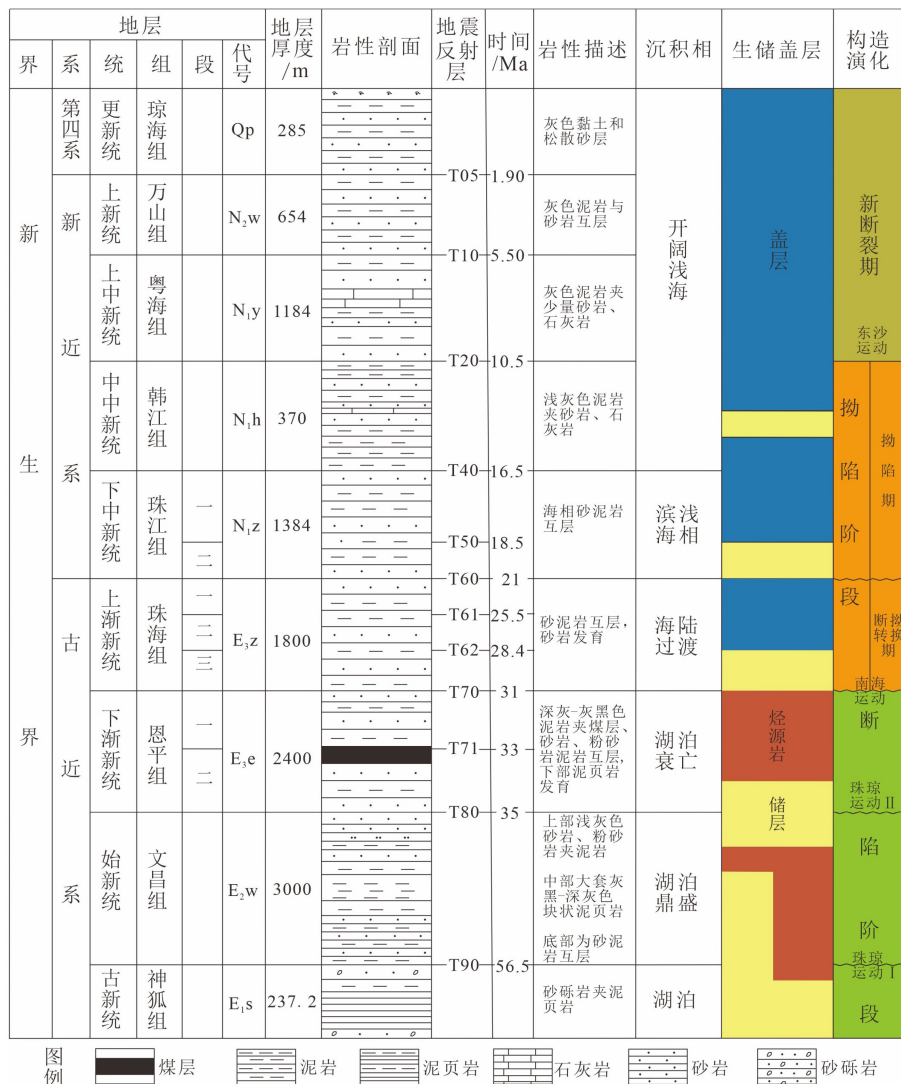


图2 珠江口盆地西部综合柱状图 (据文献[4, 12]修改)

Fig.2 A comprehensive histogram of the western Pearl River Mouth Basin (modified from reference[4, 12])

3.1 断裂剖面组合类型

结合盆地内的地震剖面,主干断层和小型断层组合成多种断裂组合形式,包括阶梯状断层、X 形共轭断层、Y 字形断层、负花状断层。

(1)阶梯状断层:断层在与本区构造走向相垂直的主测线剖面上呈阶梯状样式,由一系列正断层组合而成^[13],从北部缓坡或南部断裂带向凹陷中心依次下降形成阶梯状断层,其断层产状、倾向基本一致。

(2)Y 字形断层:由一组主断层与反向倾斜的次级断层组合为 Y 形^[14]。Y 形断裂的主干断层一般控制凹陷或局部构造,另一侧的浅部地层中相伴而生发育着次级小型断层,两组断层呈 Y 字形相交。一组复杂 Y 形断裂体系中,由主干断层上的次级断层依次反向发育所形成(图 3a)。

(3)X 型共轭断层:两组不同方向、不同级别以及不同时期的断层呈交叉组合形成,其所夹锐角为 60° 左右^[15]。早、晚期发育的断裂由于应力场差异在主干断裂两侧形成交叉剪切带,并在盆地内广泛发育。图 3b 所示为一条主干断层被多组次级断层切割形成复杂的共轭断裂体系。

(4)负花状断层:区域张扭应力场条件下与走滑断层相伴而生,由一条主干断层向上以分叉形式散开,在该断层两端发育多组小型断层,剖面上呈现花状特征,称为负花状断层(图 3c),平面上呈雁列式分布^[16]。

3.2 断裂平面组合特征

盆地内断裂复杂,为确保其解释的高效性及其精确性,使用具有良好识别断层的相干技术,对三维资料进行断层精细化解,分析断层的分布和断层的平面组合类型。通过沿层相干分析技术对断裂平面分析可知(图 4),在整个研究区域断层十分发育并识别出平面组合类型有雁列式、平行式、帚状 3 种。

(1)平行式:由多组规模一致、成因及其性质相似的断层组合而成^[2],在平面上呈现平行式排布,在盆地内最为常见,多为晚期形成的近 EW 向伸展断裂,在同一构造应力影响下所形成。

(2)雁列式:由多组性质相同的断层组合而成,在平面上呈雁列式形态排布。盆地内局部呈现雁列式排布特征,多为晚期形成的近 EW 向、NWW 向走滑断裂,主要是在渐新世的右旋张扭应力场下所形成。

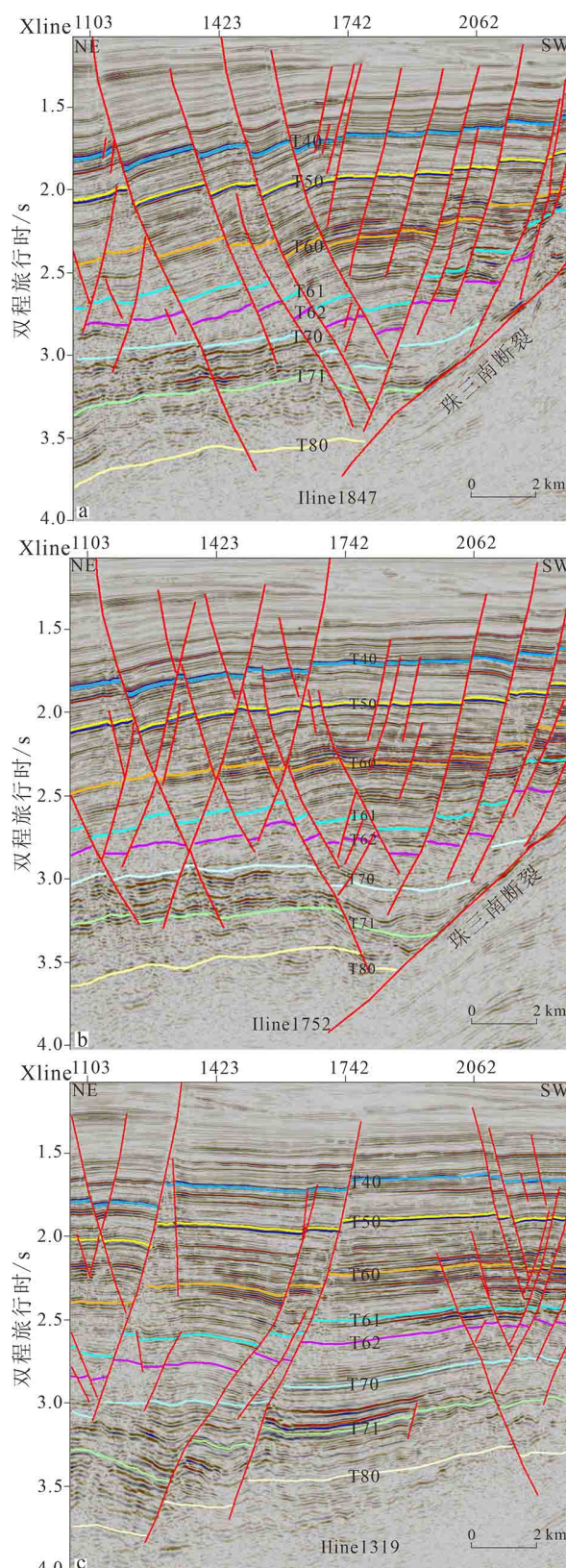


图 3 文昌 A 凹陷断裂组合类型

a. 阶梯状断层与 Y 形断层组合类型, b. X 形共轭断层组合类型, c. 负花状断层。

Fig.3 Fault systems in the Wenchang A asaga

a. combination type of stepped faults and Y-shaped faults, b. type of X-shaped conjugate fault assemblage, c. negative flower-like fault.

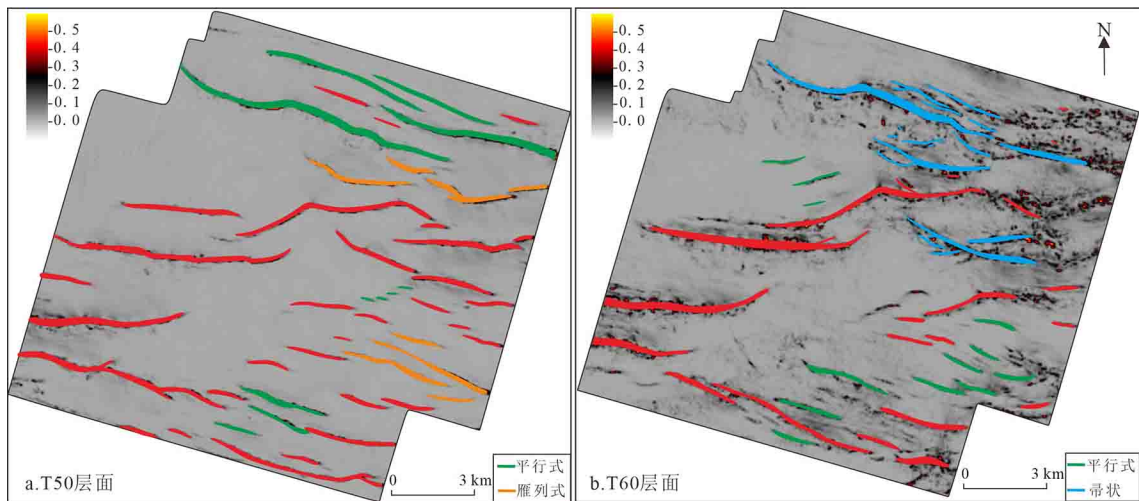


图4 相干切片及断裂平面组合分布

Fig.4 Distribution of coherent slices and fracture planes combination

(3)帚状:由多组次级断层和一条主干断层组合而成,次级断层向一端收敛,另一端呈敞开状态^[2]。在渐新世期间,应力场由NW-SE向转换为N-S向,早期存在的张性断裂在右旋走滑作用叠加下变为伸展-走滑断裂,断裂特征为张扭性,发育近东西向帚状断裂。

4 断裂运动学规律

4.1 断层走向变化特征

表1为晚始新世到中新世各层位断层的平面走向演化,对比各玫瑰花走向图可知:文昌组(T90-T80)断裂以NE走向为主。恩平组(T80-T70)断裂以近EW走向为主,在此时期近东西走向的断裂大量发育。珠海组(T70-T60)为近EW向,晚渐新世期间,盆地内仍以近NW向的断裂为主,并且NE向的断裂随着时间不断的推移开始逐渐停止活动,反映了该时期近N-S向拉张应力场不断占据着主导地位。珠江组(T60-T40)近EW向断裂逐渐发育为NWW向断裂,从T60至T40近东西向断裂减弱,北西西向断裂不断发育。统计结果表明,文昌A凹陷地层从老到新的断裂走向呈NE→EW→NWW向变化,方向为顺时针旋转。

珠江口盆地断裂走向的整体趋势与研究区走向保持一致,应力场方向由NNE向NWW逐渐呈顺时针旋转变化^[17]。始新一早渐新世(T80-T70),右旋张扭应力场下生成了大量的近EW向断层;晚渐新世(T70-T60)在南海运动过后,N-S向拉张应力得到加强,应力场呈进一步右旋状态,形成以近EW

向为主的断裂,中新世生成的NWW断裂易形成有利于勘探开发的背斜、半背斜构造。

4.2 断裂运动规律

断层活动速率分析:断层活动速率是指在单位时间内相同地层的上下盘厚度之差^[18],即:

$$V_f = \frac{\Delta H}{T} = \frac{(H_h - H_f)}{T}$$

式中: V_f 为该断层的活动速率,单位为m/Ma; T 为 T_1 、 T_2 两地层的沉积时间之差,单位为Ma。 H_h 、 H_f 分别为断层下降盘和上升盘的地层厚度,单位为m(图5)。计算所得的断层活动速率值越大,表明该时期的断层活动性越强^[18]。通过比较断层在不同时期的断层活动速率相对值大小来分析断层活动周期和活动运移的相关规律。

依据断裂对构造和沉积等因素的控制作用,文昌A凹陷断裂分为5个等级。文昌A凹陷内分布一级断裂1条(珠三南断裂东段和珠三南断裂西段南支、北支),珠三南断裂东段控制着文昌A凹陷的形成^[19],其发育规模大,切穿层位多,活动时间长;盆地内无控制凹陷发育的二级断裂;控制本区凹陷带的分块或分段断裂3条,分别为4号、5号和6号断裂;四级断裂发育规模较小,长度一般可从几百米到数千米乃至十余千米不等,仅引起局部的构造特征发生变化。断裂复杂化的五级断裂分布居多。

利用地震剖面(图6)分析了资料区域的断裂活动性,其位置如图1所示,由凹陷中心向南部断裂带分布,横跨凹陷内的6号断裂,盆地呈东西走向,层位和断层解释如图6所示。通过盆地内的主干断层6号断裂的断层活动速率和收集前人对珠三

表 1 断裂走向演化 (应力场方向据文献[17]修改)
Table 1 Evolution of fault strike

构造期	世	组	段	地震反射层	断裂走向	应力场方向
拗陷期	早中新世	珠江组	一段	T40		
			二段	T50		
断拗转换期	晚渐新世	珠海组	一段	T60		
			二段	T61		
			三段	T62		
断陷阶段	早渐新世	恩平组	一段	T70		
			二段	T71		
	始新世	文昌组	T80			

正断层
 应力方向
 剪切方向
 区域拉张方向

南断裂带、4号断裂、5号断裂^[19-20]的断层活动速率情况来表征凹陷内不同时期的断层活动变化情况。通过对以上4条断层的活动速率进行分析(图7),可以发现研究区内生长断层在断陷阶段内的断层活动速率最高。断拗转换期的断层活动性次之,拗陷期内最低。珠三南断裂东段的断层活动速率明

显高于6号断裂、5号断裂以及4号断裂的活动速率,在断陷阶段的断层活动强度由北向南逐渐递增。该时期盆地内开始裂陷并不断发育,断裂活动速率高,地层对应的沉积厚度大,该时期断裂对沉积的控制能力较强。断拗转换期和拗陷期的活动速率相对裂陷期明显较小且变化程度不大,断裂活

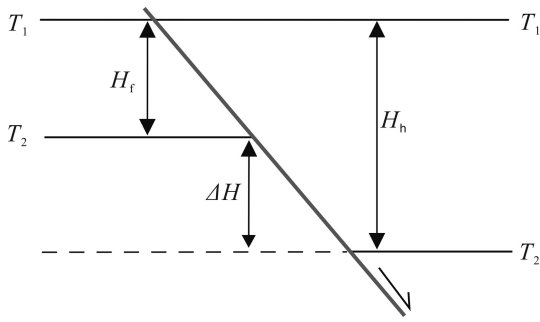


图5 断层活动速率分析
Fig.5 Analysis of fault activity rate

动进入相对稳定的时期。此时期地层进入稳定的沉降期，断裂对沉积的控制迅速减小。

5 断裂成因动力学探讨

珠江口盆地位于南海北部大陆边缘，地处南海板块，西部为印度支那半岛，东部为菲律宾板块。南海的洋壳俯冲、海底扩张必受周边板块的制约^[21]。南海的形成与演化受印度板块与欧亚板块的碰撞、太平洋板块西向俯冲以及古南海南向俯冲消亡产

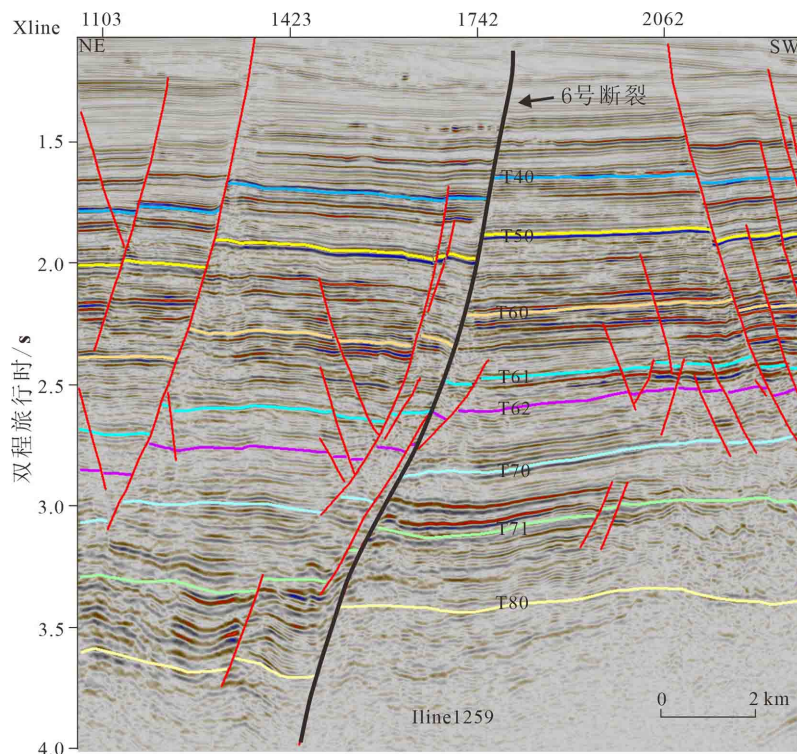


图6 地震剖面L1259测线6号断裂
Fig.6 Seismic section L1259 and fault 6

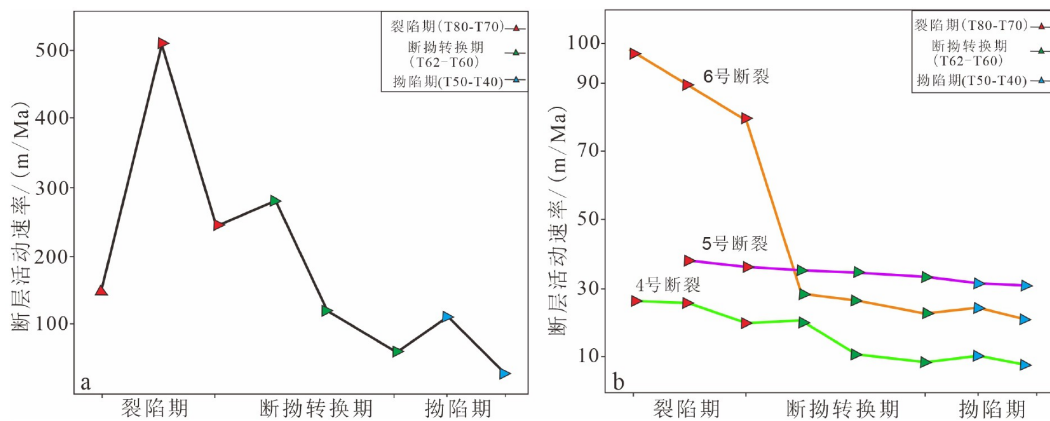


图7 断层活动速率图 (L1259测线, 据文献[19-20]修改)

a. 珠三南断裂东段活动速率, b. 4号、5号、6号断裂活动速率。

Fig.7 Fault activity rate (L1259 survey line, after references[19-20])

生的拉张应力的综合作用影响^[22-25]。

古新世到始新世早期(图 8a), 南海北部大陆边缘受到广泛的地壳伸展减薄作用, 形成大范围的盆地沉降和裂陷; 始新世晚期到渐新世早期为区域扩张阶段, 盆地裂陷区域进一步扩大, 渐新世之后南海海底开始扩张^[26-27]。许多学者普遍认为, 印支地块是新生代晚期印度与欧亚板块碰撞时从华南板块挤出而成^[22-24], 表征着新生代以来印度板块与欧亚板块的碰撞控制了东南亚地区的构造格局; 印支地块的挤出、华南地块的断裂以及南海的断陷和扩张^[28-30], 都反映了印-亚碰撞对南海北部的影响。综上所述, 印度板块向欧亚板块东北向移动导致的持续碰撞, 与晚白垩世以来古太平洋俯冲带向欧亚板块的俯冲后撤共同作用, 为南海北部地区提供了一个良好的伸展构造背景, 同时为南海北部的断裂和扩张提供了应力来源。

神狐运动始于晚白垩世末, 晚白垩世后太平洋板块的俯冲过程发生明显改变, 俯冲方向由 NE 向转为 NNW 向, 俯冲速率由白垩世的 130 mm/a 降至始新世的 78 mm/a, 导致西太平洋俯冲带向后撤退^[31]。在文昌凹陷南部边界和凹陷中心形成了一些 NNE、NE 向的断裂^[1], 拉开了盆地伸展裂陷的序幕。珠琼运动一幕始于早始新世, 太平洋板块的俯冲速率进一步下降至 38 mm/a^[31], 文昌凹陷发生抬升与剥蚀, NE 向断裂大量发育, 形成 NE-NEE 向的断裂^[17]。

珠琼运动二幕发生于晚始新世—早渐新世(图 8b), 始新世中晚期受特提斯洋东段闭合的影响, 印度板块与欧亚板块发生碰撞^[13], 印支地块向南东方向不断挤出, 加上晚始新世后太平洋板块向欧亚板块俯冲方向由 NNW 向变换为 NWW 向, 与此同时菲律宾板块向北持续移动并楔入太平洋板块, 古南海开始向婆罗洲俯冲产生向南的拖曳力^[9, 24, 32-33]。该时期断层具有较强的活动性, 在文昌 A 凹陷内形成大量的近东西向的断裂, 是盆地演化的重要时期, 文昌 A 凹陷为南海北部大陆边缘的裂陷盆地, 早期断裂的成因与上述的构造运动事件密切相关。

南海运动始于晚渐新世, 古南海加速向婆罗洲俯冲产生向南的拖曳力, 其西段封闭并逐渐向东段过渡, 印度板块与欧亚大陆的碰撞达到顶峰, 印支半岛继续向东南方向挤出, 哀牢山-红河断裂带发生左行运动, 同时形成南北向区域伸展^[28]。许多学者认为印支半岛的挤出为南海扩张提供了主要的动力来源^[32-33], 并通过在南海发现 EW 向磁异常条带, 更加确认了南海海底的扩张^[34]。此应力场导致了

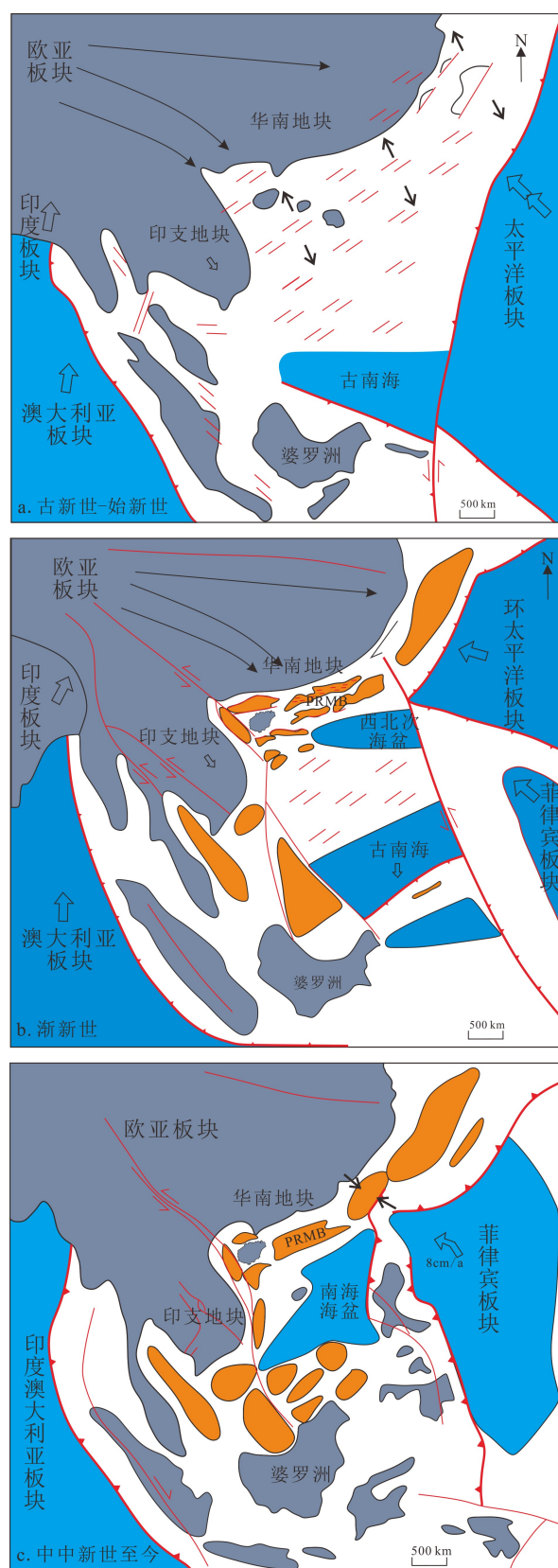


图 8 华南陆缘及其周缘构造演化过程 (据文献^[23-24]修改, PRMB 为珠江口盆地)

图 8 华南陆缘及其周缘构造演化过程 (据文献^[23-24]修改, PRMB 为珠江口盆地)

Fig.8 Tectonic evolution of the South China continental margin and its periphery (PRMB is the Pearl River Mouth Basin)

华南陆缘地带岩石圈处于拉伸减薄的状态,这种动力学背景为南海北部大陆边缘地区提供了持续的南北向拉张应力。南海北部的右旋应力在此基础上进一步加强,盆地内形成以近EW走向为主的断裂。而南海海盆的扩张脊由西北次海盆到中央海盆再到西南次海盆的移动,表现了南海海盆扩张脊由北向南迁移的规律^[34-36]。扩张脊的不断南迁,导致盆地内断裂的动力来源逐渐减弱,与此同时,文昌A凹陷的断裂活动强度逐渐降低。

早中新世,随着南海海盆扩张脊的不断南迁,断裂活动强度不断衰减,盆地内处于稳定的构造期。中中新世后(图8c)菲律宾板块发生逆时针旋转并与欧亚板块的东缘不断发生碰撞,印澳联合板块向北俯冲,古南海向加里曼丹-苏禄地区俯冲消亡,同时南海海底停止扩张^[24, 37-38]。东亚陆缘处于压扭作用下,于东沙地区发现受挤压作用控制形成的褶皱带^[39-40],此次东沙运动仅为局部构造运动,影响范围自东向西不断减弱,对珠江口盆地西部的影响较小^[6, 40],盆地在这一时期大规模发育NWW向断裂并进入热沉降阶段。

6 结论

(1)高分辨的地震资料有利于对文昌A凹陷进行详细的构造解析,盆地内整体受近南北拉张应力场影响,断裂发育为正断层,走向有北东向、近东西向、北西西向三组;断层的剖面有X共轭状、Y字形、负花状、阶梯状、半地堑多种组合样式;断层平面组合类型为雁列式、平行式、帚状。珠三南断裂控制着南部盆地的边界,在斜向伸展下形成断阶构造。

(2)在欧亚板块、太平洋板块、印度-澳大利亚板块的相互作用以及古南海向南拖曳的综合作用下:文昌A凹陷始新世—中新世的应力机制呈持续右旋状态,张裂强度持续减小。始新世期间太平洋板块的俯冲后退为盆地提供了一个良好的伸展构造背景,早期发育的NE向的断裂活动较强;晚始新世—早渐新世在珠琼运动二幕强烈的运动下发育EW向断裂,晚始新世随着南海海盆扩张脊的南迁,断裂活动逐渐减弱,盆地进入断拗转换期;中新世后发育断裂为NWW向,进入热沉降阶段,断裂活动较弱。

参考文献 (References)

- [1] 张迎朝, 张坤坤, 袁冰, 等. 文昌凹陷新生界断裂体系与构造样式及对油气成藏的控制作用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(23): 26-31. [ZHANG Yingzhao, ZHANG Kunkun, YUAN Bing, et al. Fault system and structural style of Cenozoic and their controlling effects on hydrocarbon-forming in Wenchang sag [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(23): 26-31.]
- [2] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三拗陷层序地层样式分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 87-93. [JIANG Hua, WANG Hua, LI Junliang, et al. Analysis on sequence formation styles of Zhu-3 depression in Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(1): 87-93.]
- [3] 李辉, 陈胜红, 张迎朝, 等. 珠江口盆地珠三拗陷断裂特征与油气成藏[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 115-124. [LI Hui, CHEN Shenghong, ZHANG Yingzhao, et al. Faults in the Zhu-3 depression of Pearl River Mouth basin and their control over hydrocarbon accumulation [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(3): 115-124.]
- [4] 甘军, 张迎朝, 邓勇, 等. 珠江口盆地西部文昌A凹陷古近系天然气富集主控因素与勘探方向[J]. 中国海上油气, 2009, 21(6): 367-371. [GAN Jun, ZHANG Yingzhao, DENG Yong, et al. Main controls over Palaeogene natural gas accumulation and its exploration direction in Wenchang A sag, the western Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(6): 367-371.]
- [5] 姜华, 王华, 李俊良, 等. 珠江口盆地珠三拗陷断层特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2008, 30(5): 460-466. [JIANG Hua, WANG Hua, LI Junliang, et al. Fault characteristics and control on petroleum accumulation in the Zhu III depression, the Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(5): 460-466.]
- [6] 曹敬贺, 夏少红, 孙金龙, 等. 珠江口盆地北部断裂构造特征对比及其地质学意义[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2364-2369. [CAO Jinghe, XIA Shaohong, SUN Jinlong, et al. Comparison of fault structure characteristics in the northern Pearl River Mouth Basin and its geological implication [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2364-2369.]
- [7] 夏玲燕, 林畅松, 李筱, 等. 珠江口盆地断裂构造特征及对沉积盆地的控制作用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2018, 33(5): 1-8, 16. [XIA Lingyan, LIN Changsong, LI Xiao, et al. Characteristics of fault structures in Pearl River Mouth Basin and control effect of them on Sedimentary Basin [J]. Journal of Xi'an Petroleum University: Natural Science Edition, 2018, 33(5): 1-8, 16.]
- [8] 雷宝华, 郑求根, 李俊良, 等. 珠三拗陷珠三南断裂形成演化及其对沉积中心迁移的控制[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 807-813. [LEI Baohua, ZHENG Qiugen, LI Junliang, et al. Formation and evolution of Zhu-3 south fault and its control on the depocenter shift in Zhu-3 depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 807-813.]
- [9] 张亮. 南海构造演化模式及其数值模拟[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2012 [ZHANG Liang. Tectonic evolution of the South China Sea and a numerical modeling[D]. Doctor Dissertation of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2012.]
- [10] 栾锡武, 刘鸿, 彭学超. 南海北部东沙古隆起的综合地球物理解释

- [J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3217-3232. [LUAN Xiwu, LIU Hong, PENG Xuechao. The geophysical interpretation of a Dongsha ancient uplift on the northern margin of South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3217-3232.]
- [11] 栾锡武, 张亮, 彭学超. 南海北部东沙海底冲蚀河谷及其成因探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 55(1): 149-158. [LUAN Xiwu, ZHANG Liang, PENG Xuechao. Dongsha erosive channel on northern South China Sea Shelf and its induced Kuroshio South China Sea Branch [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(1): 149-158.]
- [12] 朱伟林, 米立军, 张厚利, 等. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 102 [ZHU Weilin, MI Lijun, ZHANG Houhe, et al. Atlas of Oil and Gas Basins, China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 102.]
- [13] 蔡周荣, 殷征欣, 叶军, 等. 珠江口盆地向海阶梯状断裂特征及成因分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(3): 322-326, 330. [CAI Zhouong, YIN Zhengxin, YE Jun, et al. Characteristics and formation mechanism of the ladder-like faults towards the sea in Pearl River Mouth Basin [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(3): 322-326, 330.]
- [14] 冉伟民, 栾锡武, 邵福福, 等. 东海陆架盆地南部生长断层活动特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 100-112. [RAN Weimin, LUAN Xiwu, SHAO Zhufu, et al. Research on characteristics of growth faults in the southern East China Sea Shelf Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(1): 100-112.]
- [15] 李德伦, 王恩林. 构造地质学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2001: 111-116 [LI Delun, WANG Enlin. Structural Geology[M]. Changchun: Jilin University Press, 2001: 111-116.]
- [16] 熊忠, 江志强, 孙鹏, 等. 南海海盆地北部坳陷北凹断裂特征与构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 75-84. [XIONG Zhong, JIANG Zhiqiang, SUN Peng, et al. Characteristics and tectonic evolution of the fault system in the north sag of Northern Depression of South Yellow Sea basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 75-84.]
- [17] 李俊良, 雷宝华, 郑求根, 等. 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[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(4): 601-609. [LI Junliang, LEI Baohua, ZHENG Qiugen, et al. Stress field evolution and its controls on oil accumulation in the Wenchang sag [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(4): 601-609.]
- [18] Leyla B H, Zhang J X, Yang L L. Quantitative analysis of faults in Huizhou Sub-basin, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(1): 169-181.
- [19] 陈少平, 王华, 刘丽芳, 等. 断裂时空差异性演化及其对生烃凹陷形成的控制——以珠江口盆地珠三坳陷为例[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 1-6. [CHEN Shaoping, WANG Hua, LIU Lifang, et al. Space-time diversity evolution of faults and its control on formation of hydrocarbon generation sag: Taking Zhu III Depression in Pearl River Mouth Basin as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(1): 1-6.]
- [20] 雷宝华. 珠江口盆地文昌凹陷断裂构造及其对沉积充填的控制[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2010: 63-65 [LEI Baohua. The fault structure of Wenchang sag in the Pearl River Mouth Basin and its control of the filling[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2010: 63-65.]
- [21] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55-78.]
- [22] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2004, 29(5): 543-549. [YAO Bochu, WAN Ling, LIU Zhenhu. Tectonic dynamics of Cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 543-549.]
- [23] 雷超, 任建业, 张静. 南海构造变形分区及成盆过程[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2015, 40(4): 744-762. [LEI Chao, REN Jianye, ZHANG Jing. Tectonic province divisions in the South China Sea: Implications for basin geodynamics [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 744-762.]
- [24] 栾锡武, 张亮. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 59-74. [LUAN Xiwu, ZHANG Liang. Tectonic evolution model of south China sea: passive spreading under complex actions [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(6): 59-74.]
- [25] Luan X W, Ran W M, Wang K, et al. New interpretation for the main sediment source of the rapidly deposited sediment drifts on the northern slope of the South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 171: 118-133.
- [26] 蔡周荣, 刘维亮, 王志峰, 等. 南海北部新生代构造运动厘定及与油气成藏关系探讨[J]. 海洋通报, 2010, 29(2): 161-165. [CAI Zhouong, LIU Weiliang, WAN Zhifeng, et al. Determination of Cenozoic tectonic movement in the northern South China Sea and the relationship between oil-gas reservoir and tectonic movement [J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(2): 161-165.]
- [27] Bowin C, Lu R S, Lee C S, et al. Plate convergence and accretion in Taiwan-Luzon region [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(9): 1645-1672.
- [28] 魏新元, 栾锡武, 冉伟民, 等. 印尼马都拉海峡盆地晚渐新世至早中新世珊瑚礁特征及其古地理指示[J]. 地球科学, 2019: 1-19. [WEI Xinyuan, LUAN Xiwu, RAN Weimin, et al. Characteristics and paleogeographic indications of the Late-Oligocene to Early-Miocene coral reefs in the Madura Strait Basin, Indonesia [J]. Earth Science, 2019: 1-19.]
- [29] 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.]
- [30] 张功成, 贾庆军, 王万银, 等. 南海构造格局及其演化[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4194-4215. [ZHANG Gongcheng, JIA Qingjun, WANG Wanyin, et al. On tectonic framework and evolution of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4194-4215.]
- [31] 谢文彦, 张一伟, 孙珍, 等. 琼东南盆地断裂构造与成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 71-78. [XIE Wenyan, ZHANG

- Yiwei, SUN Zhen, et al. Characteristics and formation mechanism of faults in Qiongdongnan Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 71-78.]
- [32] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 19(1): 113-157.
- [33] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431-437.
- [34] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the south China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [35] 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 等. 南海的右行陆缘裂解成因[J]. *地质学报*, 2002, 76(2): 180-190. [ZHOU Di, CHEN Hanzong, WU Shimin, et al. Opening of the South China Sea by dextral splitting of the East Asian continental margin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 180-190.]
- [36] 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 南海的发育机制研究: 相似模拟证据[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 49(10): 1053-1069. [SUN Zhen, ZHONG Zhihong, ZHOU Di, et al. Research on the dynamics of the South China Sea opening: evidence from analogue modeling [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1053-1069.]
- [37] 吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(4): 419-426. [WU Shimin, ZHOU Di, QIU Xuelin. Tectonic setting of the northern margin of South China Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(4): 419-426.]
- [38] 叶青, 施和生, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地地壳一拗陷裂后期断裂作用: 迁移、转换及其动力学[J]. *地球科学*, 2017, 42(1): 105-118. [YE Qing, SHI Hesheng, MEI Lianfu, et al. Post-rift faulting migration, transition and dynamics in Zhu I depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science*, 2017, 42(1): 105-118.]
- [39] Lei C, Ren J Y. Hyper-extended rift systems in the Xisha Trough, northwestern South China Sea: Implications for extreme crustal thinning ahead of a propagating ocean [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 846-864.
- [40] Lu Y T, Luan X W, Lyu F, et al. Seismic evidence and formation mechanism of gas hydrates in the Zhongjiannan Basin, Western margin of the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 84: 274-288.