

鞠东, 邱燕, 黄文凯, 等. 南海主要控凹断层活动特征与新生代地壳初始张裂[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(9): 59-70.

JU Dong, QIU Yan, HUANG Wenkai, et al. Activity characteristics of main sag-controlling faults and Cenozoic initial crustal rifting in the South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(9): 59-70.

南海主要控凹断层活动特征与新生代地壳初始张裂

鞠东^{1,2}, 邱燕^{1,2*}, 黄文凯^{1,2}, 杜文波^{1,2}

(1 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 510075)

摘要:基于贯穿南海南、北陆缘 2 条长地震剖面的资料解释, 分析了南海海域主要控凹断层的活动特征及其新生代地壳初始张裂特征。南海陆缘大部分断层于新生代张裂期开始发育并强烈活动, 控凹断层基本上都发育在凹陷的边界, 又称之为控凹边界断层。多数控凹断层早期以断块旋转滑脱、形成铲状断层为特征, 北部陆缘主要控凹断层多数还具有幕式断裂的活动特点。控凹断层的初始活动时间主要集中在早始新世—晚渐新世, 在南海北部陆缘东部早于西部, 东部断层初始活动时间为早始新世甚至更早, 西部断层初始活动时间多为晚始新世; 南海南部陆缘的控凹断层初始活动时间晚于南海北部陆缘, 主要集中在中始新世甚至晚始新世。南海海域地壳新生代初始张裂活动时间具有“东早西晚、北早南晚”的特点。此外, 这些控凹断层部分于南海的漂移期继续活动或开始活动, 少数断层于中中新世重新活动。

关键词:控凹断层; 断层活动特征; 陆缘区; 新生代地壳初始张裂; 南海

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.224

0 引言

南海位于东亚陆缘, 中生代以来受到欧亚大陆板块、菲律宾板块和印度-澳大利亚板块的共同作用, 成为西太平洋活动大陆边缘的一部分, 是现今构造活动最活跃的地区之一^[1]。由于多个板块之间作用强烈, 导致本区岩石圈断裂、基底和盖层断裂分布广、期次多, 各地块的运动和地块之间的相互作用造成了南海陆缘区大规模的断裂活动^[2]。华南地块与南海地壳拉张伸展构造活动始于 65 Ma^[3], 强烈的拉张活动一直持续至中始新世末或晚始新世末; 后期拉张活动虽有所减弱, 但并未完全停止。与华南大陆连为一体的南海陆缘, 新生代初期以伸展作用为主的大规模拉张活动, 导致一系列 NE 和

ENE 走向的小型断陷盆地的形成。这些断陷盆地的凹陷边界一般都为多期次发育的大型正断层, 称之为控凹边界断层。控凹边界断层发生时间早, 活动时间长, 基本上控制了断陷与拗陷盆地的沉降与发育, 同时比较完整地记录了南海的张裂活动, 尤其具体地反映了本区地壳初始张裂活动的时间和特征。

虽然前人对南海的断裂特征及活动做了一定的研究工作^[4-12], 但主要集中在对断裂展布形态的刻画以及断裂体系的建立等方面, 缺乏针对控凹边界断层活动的具体分析。了解控凹断层的活动对于分析地壳伸展活动具有一定的指示作用, 是研究区域性地壳拉张特征不可缺少的环节。本文以南海地球物理调查资料为基础, 结合前人的成果, 分别对南海南、北部陆缘主要控凹边界断层的活动进行系统分析, 同时对应分析南海海陆缘不同区域地壳初始张裂特征, 期望能为南海构造演化过程的精确厘定提供一定的研究成果。

1 地质背景

南海海域陆缘区发育了诸多面积不同、类型各

收稿日期: 2021-08-25

资助项目: 国家联合基金项目(U20A20100); 中国地质调查局项目(DD20221712)

作者简介: 鞠东(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质调查研究工作. E-mail: clickjd@163.com

* 通讯作者: 邱燕(1956—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事石油地质、海洋地质、大地构造等方面的研究工作. E-mail: zqiyuan60@163.com

异的中、新生代沉积盆地^[13]。包括北部的北部湾、莺歌海、琼东南、珠江口、台西南、西沙海槽、笔架南等盆地;西部的中建南、万安、涓公、郑和等盆地;南部的曾母、北康、南薇西、南薇东、南沙海槽、文莱-沙巴、礼乐、巴拉望(可分为北巴拉望和南巴拉望盆地)等盆地;东部的西吕宋海槽和中部的中央海盆等(图1)^[14]。

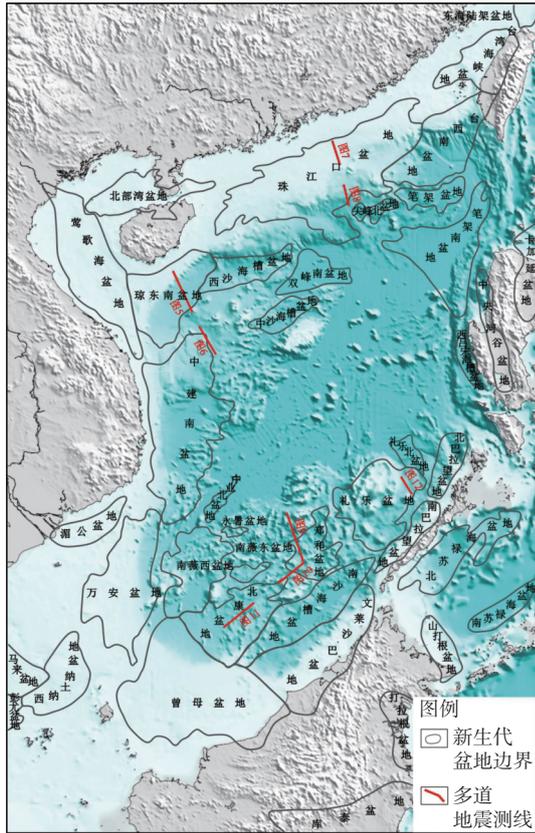


图1 南海新生代沉积盆地与测线位置^[15]

Fig.1 The Cenozoic sedimentary basins of South China Sea and location of the seismic transections^[15]

南海陆缘古近纪发育若干NE或ENE向的大型断陷带。这些大型断陷带由一些大型沉积盆地的古近纪断陷组成,多为箕状断陷或双断地堑型断陷。箕状半地堑控凹边界断层多为铲式正断层,特点为断层面上陡下缓,凹面向上,呈犁型或铲型

(图2a); 堑垒断块是伸展断陷盆地常见的断层组合样式,由数条倾向相反的正断层组成。当2个倾向相同的正断层共用一个下盘时形成地垒,共用一个上盘时形成地堑(图2b)。这些箕状断陷和地堑型断陷的边界基本为大型正断层。

本区古近纪大型拗陷带主要有华南地块内的北部湾盆地和茂名盆地等古近纪断陷组成的ENE向拗陷带^[16]、琼东南盆地北部拗陷与珠江口盆地北部拗陷组成的NE-SW向拗陷带、琼东南盆地中部拗陷与珠江口盆地南部拗陷组成的NE-SW向拗陷带(图3)以及琼东南盆地南部拗陷与西沙海槽盆地古近纪断陷组成的NE-SW向拗陷带;南部陆缘由北康盆地东北拗陷、西部拗陷与郑和盆地九章拗陷、以及礼乐盆地西北拗陷组成的古近纪NE-SW向拗陷带,由北康盆地东南拗陷、郑和盆地安渡北拗陷、礼乐盆地西北拗陷、东部拗陷、南部拗陷等共同组成的NE-SW向拗陷带(图4)。

2 数据与方法

2.1 数据资料

本文使用广州海洋地质调查局实测的2条横跨南海南北大陆边缘的多道地震剖面进行解释研究(图1)。多道地震数据采集由2008—2009年“探宝号”船完成。采用648道Seal数字电缆,电缆深度12m,道间距12.5m,采样率2ms,最小偏移距250m,作业炮间距为50m,震源为BOLT枪阵,总容量为6400in³,资料记录长度为16s。地震资料处理流程为预处理、叠前去噪、SRME压制多次波、Radon变换压制多次波技术、绕射多次波压制、振幅一致性处理、反褶积、速度分析、叠前偏移归位处理等。

本文使用的地震剖面数据,海上采集参数设置、施工调查以及地震剖面处理方法,均采用目前较为

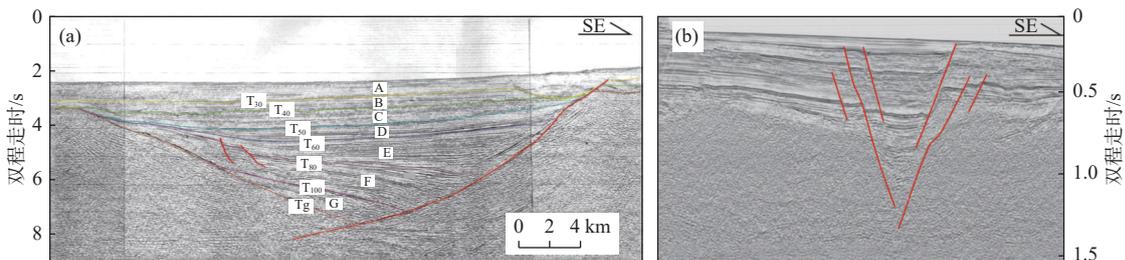


图2 南海北部陆缘的古近纪地堑、半地堑裂谷结构

Fig.2 The structure of the Paleogene graben and half graben rift in the northern margin of South China Sea

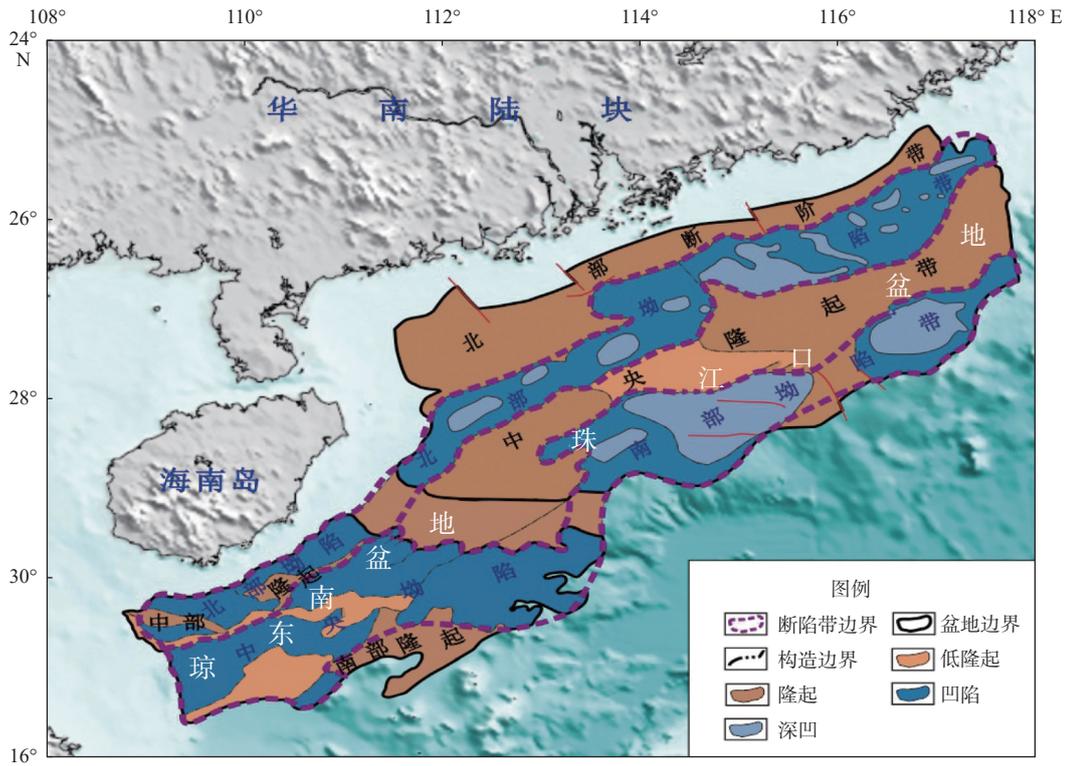


图 3 南海北部主要 NE 向拗陷带分布

Fig.3 The NE-trending depression belt in the northern South China Sea

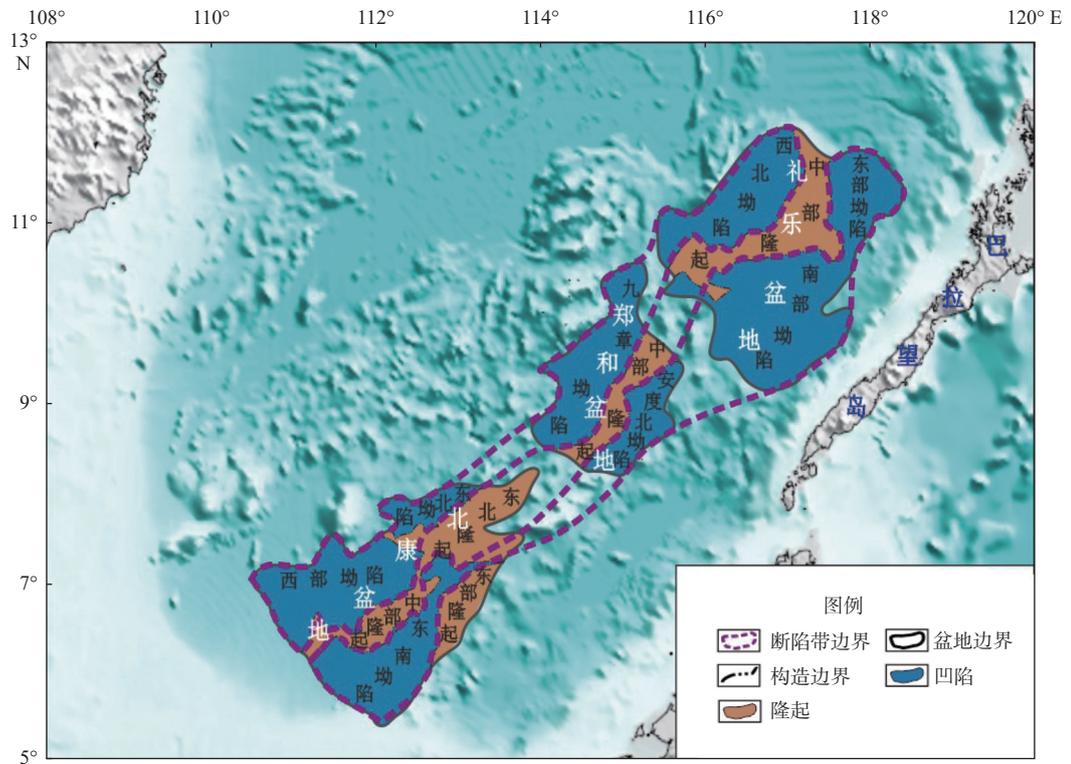


图 4 南海南部主要的 NE 向拗陷带分布

Fig.4 The NE-trending depression belt in the southern South China Sea

先进的技术方法, 所获得的多道地震剖面的反射同相轴清晰、可靠, 其质量和精度完全满足本研究的需要。

2.2 时深转换

盆地沉降量的计算是通过计算机来进行的。

为了用地震剖面确定研究区范围内沉降量的大小,需进行时深转换计算。在南海不同的区域其速度场有所不同,因此,在不同的区域采用了不同的时深转换系数。首先,选取穿过南海海盆并横跨南、北陆缘的地震剖面进行构造-地层综合解释,输出了各地震反射界面的双程反射时间数据,进而根据地球物理的速度谱解释,拟合出各个盆地的时-深转换公式如下:

琼东南盆地和中建南盆地新生代时深转换:

$$Z = 122.807t^2 + 931.579t - 4.386 \quad (t \leq 1.0s) \quad (1)$$

$$Z = 20t^2 + 1490t - 460 \quad (t > 1.0s) \quad (2)$$

珠江口盆地新生代时深转换:

$$Z = 181.286t^2 + 922.807t - 4.093 \quad (t \leq 1.0s) \quad (3)$$

$$Z = 66.667t^2 + 1299.999t - 266.666 \quad (t > 1.0s) \quad (4)$$

郑和盆地新生代时深转换:

$$Z = 304.09t^2 + 787.73t + 8.18 \quad (5)$$

北康盆地新生代时深转换:

$$Z = 291.67t^2 + 745.83t + 12.5 \quad (6)$$

礼乐盆地新生代时深转换:

$$Z = 337.96t^2 + 750.46t + 11.58 \quad (7)$$

式中: Z 为深度值, m;

t 为双程走时, s。

2.3 断层落差和活动速率定量计算

断裂系统的研究,一般应从几何学、运动学和动力学全方位刻画断裂系统的特征,其中对断裂系统运动学的研究主要反映在其活动性上,目前主要的定量分析方法有以下几种:断层生长指数、断层落差、断层活动速率、断层位移-距离法和平衡剖面技术等^[17-20]。对典型断层的落差和活动速率做一些定量分析,可以有效地了解断层的活动性。断层落差是指两盘相当点之间的铅直距离,也称铅直滑距图,断层落差=上盘下降幅度-下盘下降幅度。而断层活动速率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,该参数既保留了断层落差的优点,又能弥补断层生长指数由于缺少时间概念所带来的不足^[19]。

断层活动速率(V_f)的计算公式为:

$$V_f = \Delta H / T = (h_{\text{上}} - h_{\text{下}}) / T$$

式中: $h_{\text{上}}$ 和 $h_{\text{下}}$ 分别为断层上下盘同一层位地层厚度, m;

T 为相应沉积时间, Ma。

本节所分析的断层均命名为 F_{dn} , n 为断层编号,取典型断层之意。

3 南海新生代主要控凹边界断层的活动性

3.1 南海北部陆缘西侧主要控凹断层

发育于南海北部陆缘西侧的琼东南盆地和中建南盆地的4条主要控凹边界断层特征与古落差及其活动速率见图3、4。其中 F_{d1} 和 F_{d2} 断层位于琼东南盆地, F_{d3} 断层和 F_{d4} 断层位于中建南盆地。

F_{d1} 断层发育于琼东南盆地华光凹陷的北部边缘,断层面倾向 SSE 向,是控制该凹陷发育的主断层。断层面倾向 SSE 向,为一大型滑脱面,深部具有拆离断层的性质,断陷内部多条铲式断层往下截止于该断层面。该断层从早始新世开始活动,一直持续到渐新世末,明显控制了深部半地堑凹陷的发育(图5a)。计算结果表明,该断层早始新世—中始新世断层落差高达1700 m,活动速率达到70 m/Ma,晚始新世—早渐新世活动性增强,断层落差接近1000 m,活动速率增至120 m/Ma,晚渐新世活动性减弱,落差仅约250 m,活动速率<40 m/Ma,之后活动停止(图5b)。 F_{d2} 断层发育于琼东南盆地南部坳陷南缘的一个凹陷边缘,该凹陷相比于华光凹陷规模略小一些。 F_{d2} 断层面倾向 NNW 向,是控凹断裂系3条断层中的1条主要断层(图5a)。相比于 F_{d1} 断层, F_{d2} 断层规模较小,其活动时间较晚,主要集中在晚始新世—晚渐新世,最大活动期为晚渐新世(剖面上为 T_7 - T_6 层序),断层落差高达1500 m,活动速率超过200 m/Ma(图5c)。

中建南盆地已有的钻井都未钻至盆地深坳部位,推测该盆地断陷内最老地层为上始新统。位于盆地内的 F_{d3} 断层和 F_{d4} 断层是控制断陷发育的控凹边界断层,2条断层的倾向相反(图6a)。 F_{d3} 断层面倾向 NNW 向, F_{d4} 断层面倾向 SSE 向,二者之间夹一凸起。计算结果表明, F_{d3} 断层主要活动期为晚始新世—晚渐新世,晚始新世—早渐新世断层落差700 m左右,活动速率约100 m/Ma,晚渐新世断层落差超过1000 m,活动速率达150 m/Ma(图6b),早中新世停止活动。该断层与相邻的另一断层组

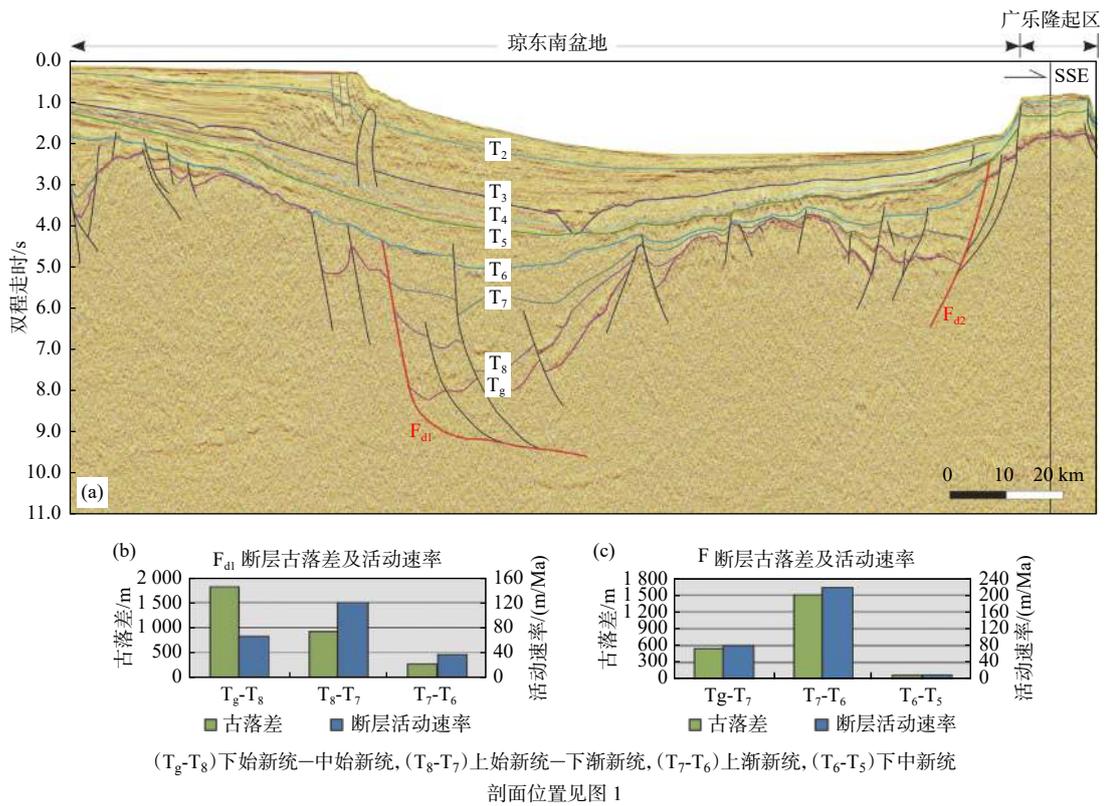


图 5 琼东南盆地典型断层活动特征与活动速率

Fig.5 Activity characteristics and rate of typical faults in Qiongdongnan Basin

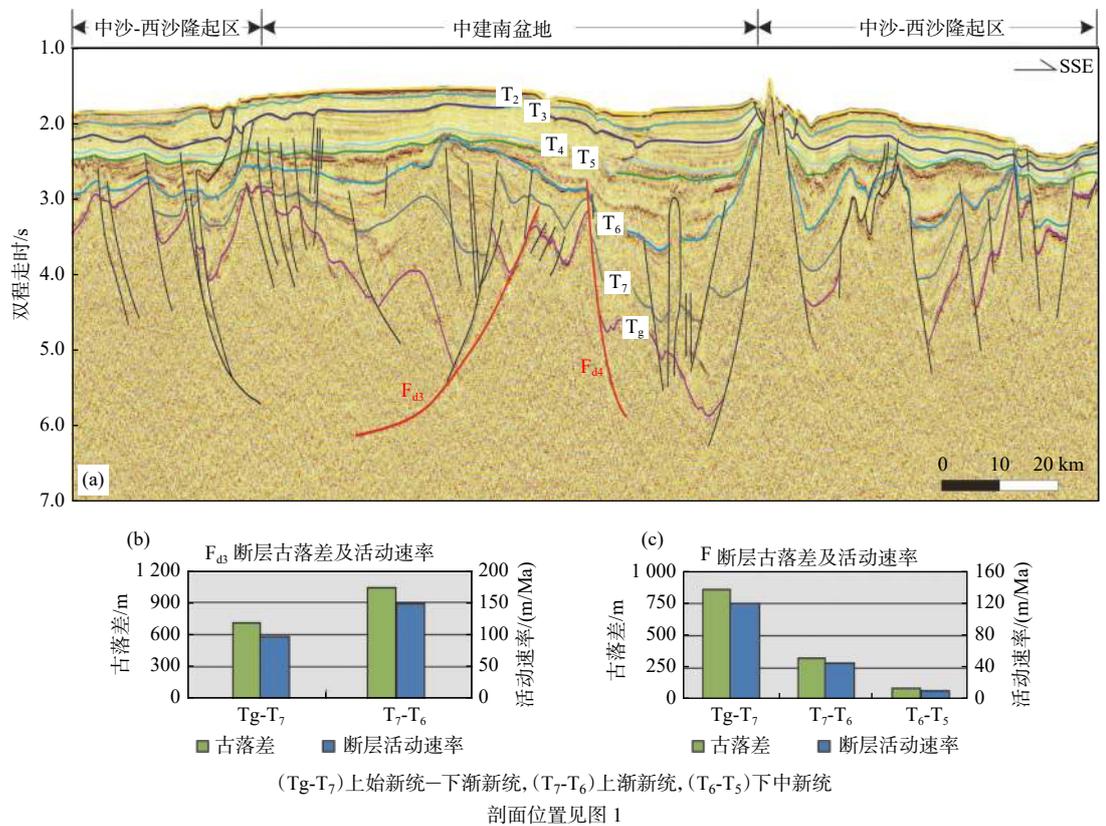


图 6 中建南盆地典型断层活动特征与活动速率

Fig.6 Activity characteristics and rate of typical faults in Zhongjiannan Basin

合形成了复杂的构造活动。 F_{d3} 早期具有断块旋转滑脱的活动特征, 断层下段呈铲状断层展布, 断陷北部的另一条断层的底部截止于该断层面, 造成了晚渐新世更大的断层落差, 暗示该断陷早期复杂的断块活动(图 6a)。 F_{d4} 断层主要活动期为晚始新世—晚渐新世, 晚始新世—早渐新世断层落差达 950 m, 活动速率近 120 m/Ma; 晚渐新世断层活动性开始减弱, 断层落差约 300 m, 活动速率约 50 m/Ma; 早中新世该断层活动进一步减弱, 断层落差约 100 m, 活动速率约 15 m/Ma; 中中新世之后该断层停止活动(图 6c)。

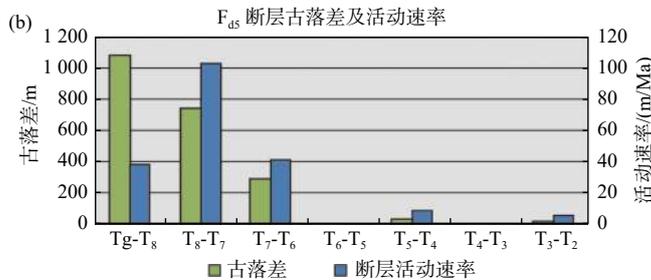
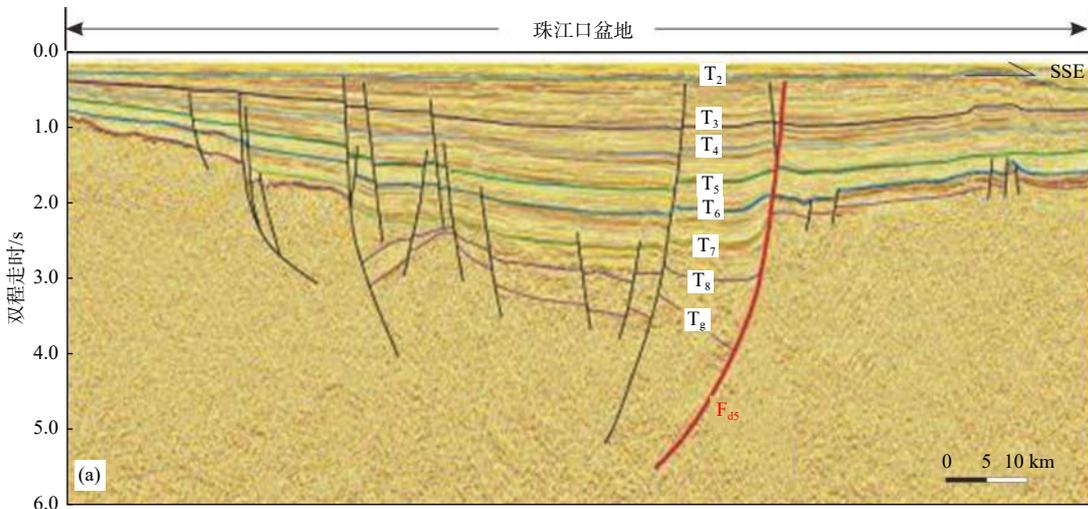
3.2 南海北部陆缘东侧主要控凹断层

发育于南海北部陆缘东侧的典型控凹断层有珠江口盆地北部坳陷南缘的 F_{d5} 断层和南部坳陷南缘的 F_{d6} 断层, 二者的断层面均倾向 NNW 向, 其断层特征与古落差及其活动速率见图 7、8。

珠江口盆地的钻探资料揭示, 该盆地北部坳陷 T_8 界面之下为文昌组(下—中始新统)和局部发育

的神狐组(古新统), 下—中始新统均为该盆地的强裂陷期。因此, F_{d5} 断层的 T_g - T_7 的活动时间应该定义为古新世始^[21-22]。 F_{d5} 断层的活动时间比较长, 从古新世至上新世均有活动(图 7a)。古新世—中始新世的断层落差最大, 达 1 100 m, 活动速率 40 m/Ma; 晚始新世—早渐新世断层落差近 800 m, 活动速率最大, 高达 100 m/Ma; 晚渐新世的断层落差和活动速率都较低, 落差 300 m, 活动速率 40 m/Ma; 此后一直到中新世都有断续而微弱的活动(图 7b)。早期(早—中始新世)该断层具有掀斜断块的活动特征(图 7a)。

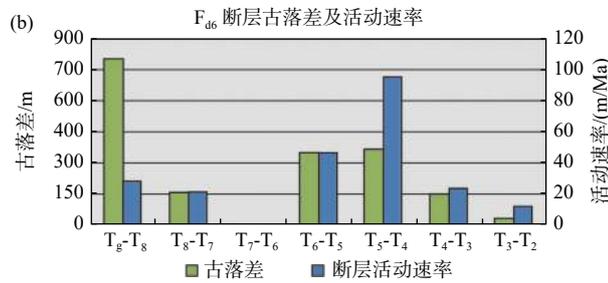
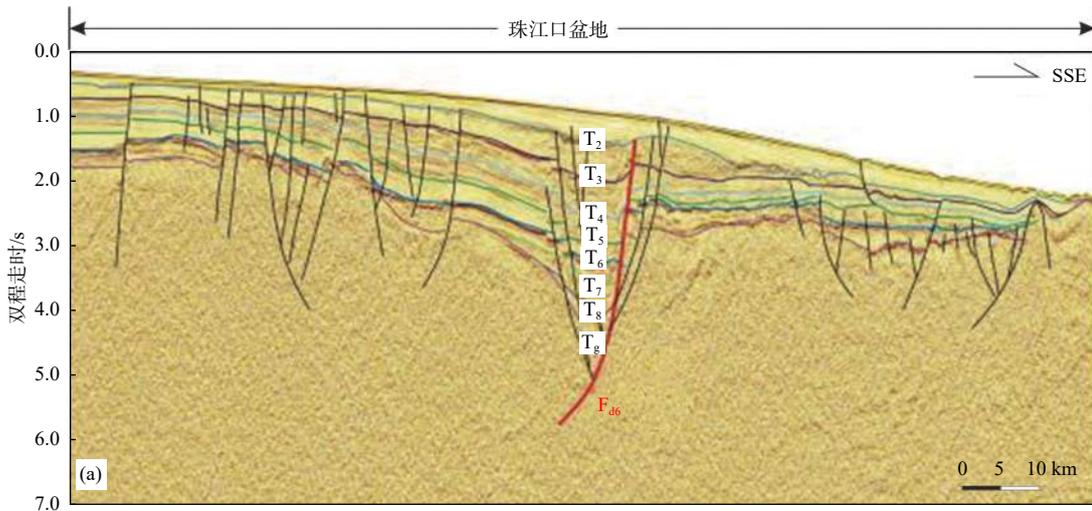
F_{d6} 断层位于水深 750 m 的珠江口盆地南部坳陷的最南缘, 此处的钻探并未发现神狐组, 故而(T_g - T_7)仍定义为下—中始新统。 F_{d6} 断层在早始新世—中始新世断层落差接近 800 m, 活动速率约 30 m/Ma; 晚始新世晚期—早渐新世断层活动速率有所减弱, 断层落差减小到约 160 m, 活动速率约 20 m/Ma; 晚渐新世活动性逐渐减弱并停止活动。与 F_{d5} 断层有所区别的是, F_{d6} 断层于中新世活动加剧, 早中新世



(T_g - T_8)古新统—中始新统, (T_8 - T_7)上始新统—下渐新统, (T_7 - T_6)上渐新统, (T_6 - T_5)下中新统, (T_5 - T_4)中中新统, (T_4 - T_3)上中新统, (T_3 - T_2)上新统
剖面位置见图 1

图 7 珠江口盆地 F_{d5} 断层活动特征与活动速率

Fig.7 Activity characteristics and rate of F_{d5} fault in the Pearl River Mouth Basin



(T_g-T₈)下始新统一始新统、(T₈-T₇)上始新统一渐新统、(T₇-T₆)上渐新统、(T₆-T₅)下中新统、(T₅-T₄)中中新统、(T₄-T₃)上中新统、(T₃-T₂)上新统
剖面位置见图 1

图 8 珠江口盆地 F_{d6} 断层活动特征与活动速率

Fig.8 Activity characteristics and rate of fault F_{d6} in the Pearl River Mouth Basin

恢复活动, 断层落差超过 300 m, 活动速率近 50 m/Ma; 中中新世达到活动最高峰, 断层落差加大至 350 m, 活动速率近 100 m/Ma; 晚中新世断层活动开始减弱, 断层落差约 150 m, 活动速率减弱至 25 m/Ma; 上新世晚期断层停止活动(图 8b)。该断层早期具有铲式断层的活动特征, 但不甚明显(图 8a)。

3.3 南海南部陆缘西侧主要控凹边界正断层

发育于南海南部陆缘郑和盆地的主要控凹边界正断层 F_{d7}、F_{d8} 与北康盆地内的控凹边界正断层 F_{d9} 与 F_{d10} 断层特征与古落差及其活动速率见图 9—11。

F_{d7} 断层是郑和地块内部凹陷边缘的控凹断裂(图 9a), 断面倾向 SSE, 控制半地堑裂陷的发育。断层面上陡下缓特征明显, 是控凹边界断层。在该剖面上虽未解释出 T₇ 界面, 但是前人研究结果表明本区断层初始活动大约为始新世晚期, 因此本区 T_g-T₆ 层序确定为晚始新世—渐新世。F_{d7} 断层在晚始新世—渐新世其活动强度大, 造成巨大的断层

落差, 早中新世继续强烈活动, 仅活动强度有所减弱。断层面上陡下缓特征非常明显, 下部地层沿断层面旋转幅度较大, F_{d7} 断层缺失下盘地层。该断层的落差和活动速率参考地层界面另一端的深度进行计算。计算结果表明, 该断层的主要活动期是晚始新世—晚中新世, 之后断层活动停止(图 9b); 晚始新世-渐新世断层落差超过 1 200 m, 活动速率高达 170 m/Ma; 早中新世断层落差近 1 200 m, 活动速率超过 150 m/Ma; 此后断层活动性减弱, 中中新世断层落差 410 m, 活动速率超过 100 m/Ma; 晚中新世断层落差约 200 m, 活动速率仅 30 m/Ma; 此后断层停止活动。

F_{d8} 断层是郑和盆地九章坳陷北侧边缘的控凹断裂, 控制了一个箕状断陷的发育(图 9a), 断面倾向 SSE 向, 控制半地堑裂陷的发育。计算结果表明, 该断层的活动时间较长, 其主要活动期是晚始新世—上新世, 之后断层活动微弱(图 9c); 晚始新世—渐新世断层落差近 500 m 左右, 活动速率达 70 m/Ma 左右; 早中新世断层落差超过 600 m, 活动速率高达

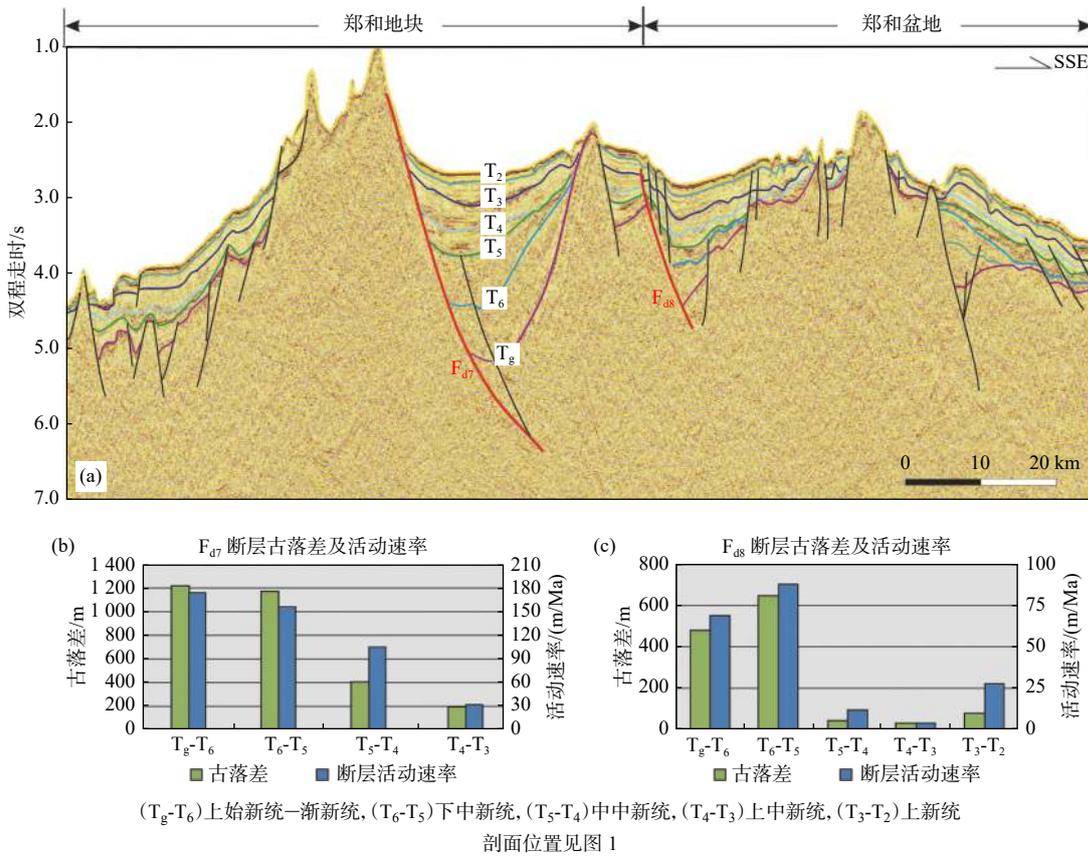


图 9 南海南缘 F_{d7}、F_{d8} 断层活动特征与活动速率

Fig.9 Activity characteristics and rate of fault F_{d7}, F_{d8} in the southern margin of the South China Sea

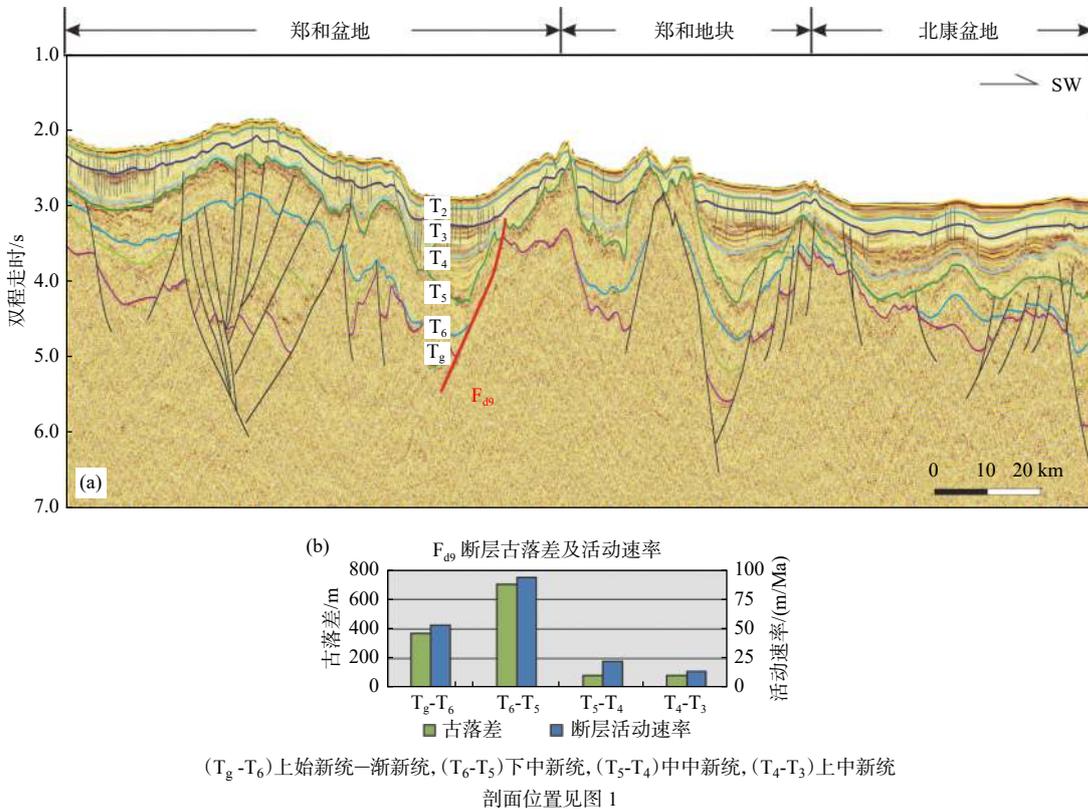


图 10 郑和盆地 F_{d9} 断层活动特征与活动速率

Fig.10 Activity characteristics and rate of fault F_{d9} in Zhenghe Basin

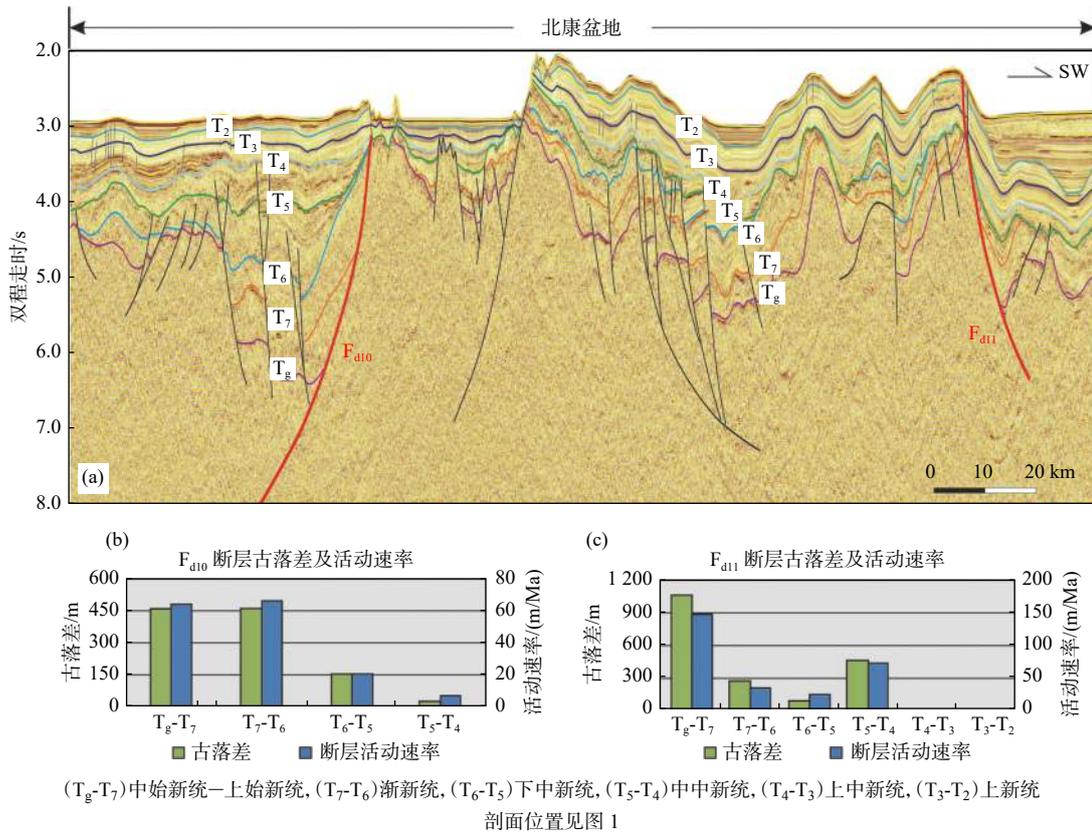


图 11 北康盆地典型断层活动特征与活动速率

Fig. 11 Activity characteristics and rate of typical faults in Beikang Basin

80 m/Ma; 此后断层活动性减弱, 从中中新世一直到上新世虽然都有活动, 但是活动速率最大仅 25 m/Ma, 落差最大不超过 30 m。

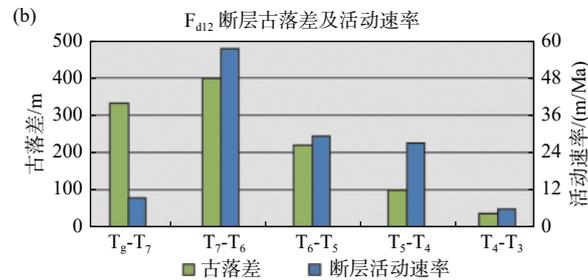
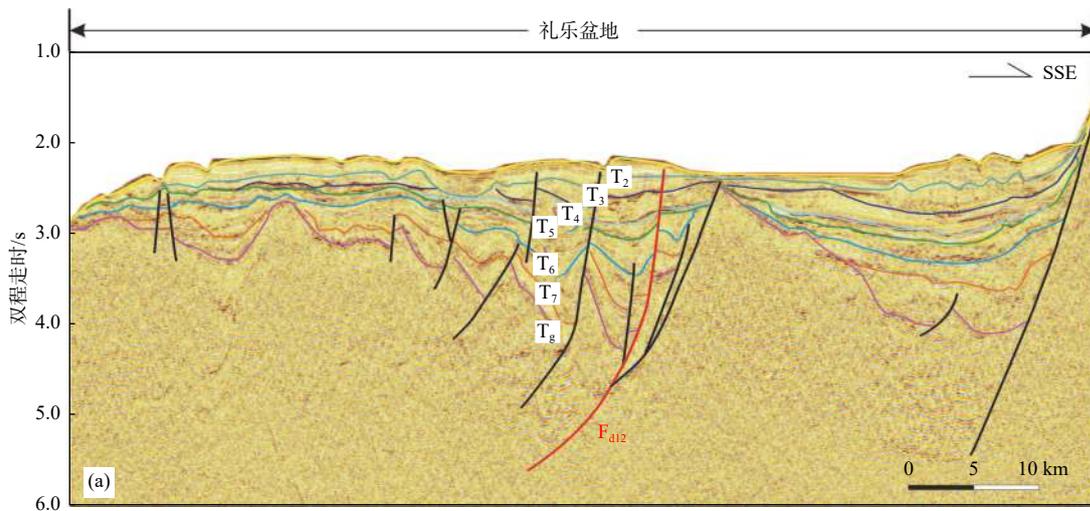
F_{d9} 为郑和盆地的一个控凹边界断层(图 10a), 断层面倾向 NE, 断层的主要活动时间为晚始新世—早中新世, 后期断层活动性明显减弱。晚始新世—渐新世断层落差达 400 m, 活动速率 50 m/Ma 左右; 早中新世断层活动性加强, 落差增大至 700 m 左右, 活动速率近 100 m/Ma; 中中新世开始该断层活动性减弱, 晚中新世仅微弱活动, 活动速率不超过 25 m/Ma(图 10b); 中新世之后, 断层停止活动。

F_{d10} 和 F_{d11} 断层均为北康盆地内的控凹边界断层(图 11)。F_{d10} 断层朝 NE 倾斜, 早期具有铲式断层的活动特征(图 11a), 活动时间从中始新世开始一直持续到中中新世。中新世之前断层一直保持着较强的活动性, 中始新世—晚始新世与渐新世的断层落差都达到 450 m, 活动速率也在 60 m/Ma 之上; 从早中新世开始断层活动减弱, 早中新世断层落差仅 150 m, 活动速率约 20 m/Ma(图 11b); 中中新世断层的活动更弱, 其后逐渐停止活动(图 9a、b)。F_{d11} 断层面倾向 SW(图 11a), 早期活动强烈, 中始新世—晚始新世落差最大, 达到 1 000 m 左右,

活动速率接近 150 m/Ma; 随后逐渐减弱, 渐新世活动速率不足 50 m/Ma, 断层落差不足 300 m; 早中新世断层活动更弱, 活动速率仅 25 m/Ma, 断层落差为 100 m 左右; 中中新世断层活动速率增大到 75 m/Ma, 断层落差接近 450 m(图 11c), 之后停止活动。这 2 条断层古近纪时期都具有铲式断层的活动特征(图 11a)。

3.4 南海南部陆缘东侧主要控凹边界断层

发育于南海南部陆缘东侧礼乐盆地的主要控凹边界断层 F_{d12}, 与另外几条断层共同构成礼乐盆地西北拗陷边缘的控凹断裂系, 断面倾向 NNW 向。F_{d12} 断层是其中最大的断层, 控制半地堑裂陷的发育(图 12a)。计算结果表明, 该断层的主要活动期是晚始新世—中中新世(图 12b), 晚渐新世达到活动高峰, 其后活动强度逐渐减弱。晚始新世—早渐新世断层落差约 330 m, 活动速率约 10 m/Ma; 晚渐新世断层落差约 400 m, 活动速率达 57 m/Ma; 早中新世断层落差超过 200 m, 活动速率近 30 m/Ma; 中中新世层落差约 100 m, 活动速率约 26 m/Ma; 此后断层活动性减弱, 晚中新世以后断层活动停止。



(T_g-T₇)上始新统一下渐新统, (T₇-T₆)上渐新统, (T₆-T₅)下中新统, (T₅-T₄)中中新统, (T₄-T₃)上中新统
剖面位置见图 1

图 12 礼乐盆地 F_{d12} 断层活动特征与活动速率

Fig.12 Activity characteristics and rate of fault F_{d12} in Liyue Basin

4 讨论

南海陆缘盆地新生代早期发育的地堑或半地堑裂陷沉积均受大型控凹断层的活动所控制,南海北部陆缘主要控凹边界正断层 F_{d1}、F_{d2}、F_{d3}、F_{d4}、F_{d5}、F_{d6} 和南部陆缘主要控凹边界正断层 F_{d7}、F_{d8}、F_{d9}、F_{d10}、F_{d11}、F_{d12} 多数于南海裂谷期(T_g-T₈、T₈-T₇、T_g-T₇)开始发育并强烈活动(表 1),但也有部分断层于南海漂移期(T₇-T₆ 或 T_g-T₆ 以及 T₆-T₅)继续活动或开始活动,少数断层于中中新世(T₅-T₄)重新活动。可见这些典型控凹断层具有幕式活动的特征,同时暗示地壳的伸展作用也具有幕式活动的特点。南海北部陆缘 F_{d1}、F_{d3}、F_{d5}、F_{d6} 断层和南海南部陆缘 F_{d9}、F_{d10}、F_{d11} 和 F_{d12} 断层早期的活动以铲式断层活动为主,断层面上陡下滑,上覆沉积沿断层面发生明显的旋转活动,揭示古近纪时期南海陆缘地壳明显的拉伸作用。

南海陆缘不同区域控凹边界断裂的活动时间也大不相同。北部陆缘西侧 F_{d1}、F_{d2}、F_{d3}、F_{d4} 断层和东侧 F_{d5}、F_{d6} 这 6 条典型断层的活动时间主要集

中在始新世—渐新世,断层活动高峰时间主要集中在晚始新世—早渐新世。而且东、西部断层的初始活动时间有所差异。东侧珠江口盆地的 F_{d5} 和 F_{d6} 断层的初始活动期为古新世—早始新世,西侧琼东南盆地、中建南盆地的 F_{d1}、F_{d2}、F_{d3} 和 F_{d4} 断层初始活动期多为晚始新世,仅 F_{d1} 断层的活动时间稍早。显然南海北部陆缘裂陷初始活动时间具有“东早西晚”的特点(表 1)。

南海南部陆缘 F_{d7}、F_{d8}、F_{d9}、F_{d10}、F_{d11} 和 F_{d12} 断层的活动期主要集中在中、晚始新世—中中新世,断层的活动高峰时间主要集中在渐新世—早中新世。断层的活动对断陷沉积的控制作用明显,后期的活动对盆地的沉积作用起了很大作用,其初始活动时间一般开始于中、晚始新世甚至渐新世,略晚于南海北部,具有“北早南晚”的特点(表 1)。

可见南海陆缘发育的主要控凹边界断层的活动时间具有“东早西晚、北早南晚”的特点,而其断层活动高峰期分布与初始活动时间相似,也表现出“东早西晚、北早南晚”的特点(表 1)。

结合上述,分析南海北部陆缘断层活动性可知,南海陆缘初始活动时间具有明显的迁移性^[23],表现

表 1 南海陆缘主要控凹断层活动时间表

Table 1 Time of activity of the main depression-controlling boundary faults in the continental margin of the South China Sea

断层所在位置	断层编号	断层初始活动时间	断层活动高峰	断层活动基本停止时间	
南海北部陆缘	西侧	F _{d1}	早始新世	晚始新世-早渐新世	早中新世
		F _{d2}	晚始新世	晚渐新世	早中新世
		F _{d3}	晚始新世	晚渐新世	早中新世
		F _{d4}	晚始新世	晚始新世—早渐新世	中中新世
	东侧	F _{d5}	古新世	晚始新世—早渐新世	早中新世
		F _{d6}	早始新世	早始新世—中始新世(首次活动高峰)	晚渐新世(首次停止)
南海南部陆缘	西侧	F _{d7}	晚始新世	晚始新世—渐新世	晚中新世
		F _{d8}	晚始新世	早中新世	晚中新世
		F _{d9}	晚始新世	早中新世	晚中新世
		F _{d10}	中始新世	渐新世	中中新世
		F _{d11}	中始新世	中始新世—晚始新世	晚中新世
		F _{d12}	晚始新世	晚渐新世	晚中新世

为“东早西晚、北早南晚”的特点。南海南、北大陆边缘构造活动的差异性比较明显。

5 结论

本文基于贯穿南海南、北陆缘 2 条长地震剖面的资料解释, 认为南海海域主要控凹边界断层的活动及其新生代地壳初始张裂具有以下特征:

(1) 南海南、北部陆缘多数控凹边界断层早期的活动以上覆沉积层沿断层面旋转滑脱、形成铲状断层拆离活动为特征, 揭示古近纪时期地壳的拉伸作用。这些断层大部分于南海裂谷期开始发育并强烈活动, 但也有部分断层于南海的漂移期继续活动或开始活动, 少数断层于中中新世重新活动。表明这些控凹断层和地壳的伸展作用均具有幕式活动的特征。

(2) 南海陆缘主要控凹边界断层的活动早期控制了地堑或半地堑裂陷的形成, 后期控制了断陷盆地的沉积作用。通过对南海南、北陆缘主要控凹边界断层活动时间的对比发现, 断层的初始活动时间、活动高峰时段、活动停止时间表现出相似的变化规律: 南海陆缘主要控凹边界断层活动时间表现为北部早于南部, 东侧早于西侧。由此可见南海海域地壳新生代初始张裂活动时间具有“东早西晚、北早南晚”的特点。

参考文献:

[1] 朱晨曦, 唐武, 尹永康, 等. 南海南部及陆缘区的区域断裂体系特征及其形成机制[J]. 世界地质, 2019, 38(3): 708-720.
[2] 卢丽娟, 蔡周荣, 黄强太, 等. 南海及邻区新构造运动表现特征

及其主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(1): 206-217.

[3] HAYES D E, NISSEN S S, BUHL P, et al. Throughgoing crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B11): 22435-22446.
[4] 邱燕, 曾维军, 李唐根. 南海中、南部断裂体系及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(2): 166-175.
[5] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海区域断裂特征及其基底构造格局[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1544-1553.
[6] 徐子英, 汪俊, 高红芳, 等. 南海海盆中南—礼乐断裂带研究进展[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(2): 86-94.
[7] 杜文波, 邱燕, 黄文凯, 等. 南海西缘曾母西断裂构造特征及其对盆地沉积发育的控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(2): 100-108.
[8] 刘雨晴, 吴智平, 程燕君, 等. 南海北缘古近纪裂陷结构时空差异及控制因素: 以珠江口盆地为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 367-376.
[9] 张远泽, 漆家福, 吴景富. 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素[J]. 地球科学, 2019, 44(2): 603-625.
[10] 徐子英, 汪俊, 高红芳, 等. 中沙地块南部断裂发育特征及其成因机制[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1438-1446.
[11] 杜文波, 黄文凯, 朱红涛, 等. 台湾海峡西部海域沉积体系、地层架构与油气勘探前景[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1542-1553.
[12] 聂鑫, 邱燕, PUBELLIER M, 等. 南海西南次海盆构造特征及其沉积响应[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1463-1473.
[13] 杜文波, 蔡观强, 黄文凯, 等. 西沙海区新近纪碳酸盐岩台地地震响应特征和控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(1): 20-30.
[14] 邱燕, 王立飞, 黄文凯, 等. 中国海域中新世沉积盆地[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
[15] 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎. 南海及邻域地质-地球物理系列图(1:2 000 000)[M]. 广州: 中国航海图书出版社, 2013.
[16] 姚伯初. 南海海盆在新生代的构造演化[J]. 南海地质研究, 1991(3): 9-23.

- [17] 刘琴琴, 黄传炎, 金思丁, 等. 福山凹陷美台断层活动特征及其对沉积的控制[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 51-59.
- [18] 张伟忠, 查明, 韩宏伟, 等. 东营凹陷边界断层活动性与沉积演化耦合关系的量化表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 18-26.
- [19] 王观宏, 甘华军, 赵忠新, 等. 南堡凹陷高柳断层活动特征及其对沉积的控制[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(2): 51-61.
- [20] 占华旺, 蔡国富, 张志伟, 等. 南海北缘古近纪断裂活动规律及控盆特征: 以阳江东凹为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(1): 20-39.
- [21] 龚再升. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [22] 朱伟林. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [23] 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 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[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 77-87.

Activity characteristics of main sag-controlling faults and Cenozoic initial crustal rifting in the South China Sea

JU Dong^{1,2}, QIU Yan^{1,2*}, HUANG Wenkai^{1,2}, DU Wenbo^{1,2}

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China;

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on the data interpretation on two long seismic transections across the southern and northern continental margins of the South China Sea, we analyzed the activity characteristics of the main sag-controlling faults in the South China Sea and the initial tensile fracture characteristics of the Cenozoic crust. Most of the faults began to develop and move strongly during the Cenozoic period of tensile fracture. The sag-controlling faults are usually developed at the sag boundary, also known as the sag-controlling boundary faults. In the early stage, the most sag-controlling faults are characteristic of rotation and detachment of fault blocks and the formation of listric faults. Most of the main sag-controlling faults in the northern continental margin are episodic faults in characteristics, and the initial activity time is mainly from the Early Eocene to Late Oligocene. In particular, the initial activity time of faults in the eastern part is the Early Eocene or earlier, and that in the western part is the Middle Eocene or later. In the southern continental margin of the South China Sea, the initial activity time of sag-controlling faults is later than that in the northern continental margin, mainly concentrated in the Eocene or Late Eocene. It can be seen that the initial activity time of the Cenozoic crustal tension in the South China Sea presents the characteristics of "early in the east and late in the west, and early in the north and late in the south". In addition, some of the sag-controlling faults continued or began to move during the drifting period of the South China Sea, and a few faults reactivated in the Miocene.

Key words: sag-controlling fault; fault activity characteristics; marginal zone; Cenozoic initial crustal rifting; South China Sea