

黄鑫,陈维涛,王文勇,等. 先存断裂体系差异活化控制下的成盆作用研究——以珠江口盆地西江主洼为例[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 11-19.
[HUANG Xin, CHEN Weitao, WANG Wenyong, et al. Study on Basin Formation Controlled by Differential Activation of Pre-existing Fault System—Taking Xijiang Main Sag in Pearl River Mouth Basin as an Example[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 11-19]

先存断裂体系差异活化控制下的成盆作用研究 ——以珠江口盆地西江主洼为例

黄鑫, 陈维涛, 王文勇, 黄鹏亮, 罗伟

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000)

摘要: 先存断裂体系的差异活化对西江主洼的成盆作用影响显著, 进而控制烃源岩的分布。此次研究依托三维地震资料, 在西江主洼地区开展先存断裂体系的识别及划分, 从盆地动力学角度, 分析先存断裂体系在伸展应力场下的差异活化对西江主洼成盆演化的控制作用。在西江主洼地区识别出北东向和北西向两组先存断裂体系, 北东向先存断裂规模较大, 呈北缓南陡分布特征, 早文昌期优先活化并控制洼陷基本格局, 北西向先存断裂晚于北东向先存断裂形成, 规模小, 分布广, 研究区范围呈西密东疏分布特征, 在西江主洼以西构成北西向先存断裂带, 控制洼陷区晚文昌期之后的构造迁移; 建立西江主洼受应力场动态转变控制的迁移型成盆演化模式: 裂陷Ⅱ幕裂陷作用减弱, 继承性发育宽缓半地堑, 明确西江主洼有利烃源岩发育的区域构造背景。

关键词: 西江主洼; 先存断裂; 构造沉降; 成盆演化

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0011-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.02

Study on Basin Formation Controlled by Differential Activation of Pre-existing Fault System—Taking Xijiang Main Sag in Pearl River Mouth Basin as an Example

HUANG Xin, CHEN Weitao, WANG Wenyong, HUANG Pengliang, LUO Wei

(Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The differential activation of the pre-existing fault system has a significant influence on the basin formation of the Xijiang Main Sag, and then controls the distribution of hydrocarbon source rocks. Based on 3D seismic data, this study carried out the identification and division of pre-existing fault system in the Xijiang Main Sag, and analyzed the control effect of differential activation of pre-existing fault system under extensional stress field on the basin-forming evolution of the Xijiang Main Sag from the perspective of basin dynamics. Two groups of

收稿日期: 2022-08-01

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目“陆缘裂谷盆地深层/超深层油气成藏条件与成藏机制研究——珠江口盆地珠一坳陷”(KJGG2022-0403)和有限公司生产性科研项目“珠一坳陷西江地区古近系有效储层预测及甜点刻画”(SCKY-2023-SZ-01)联合资助。

作者简介: 黄鑫(1988-), 男, 硕士, 沉积储层工程师, 主要从事油气勘探及石油地质方面的研究工作。

E-mail: huangxin20@cnooc.com.cn

pre-existing fault systems with NE and NW directions have been identified in the Xijiang Main Sag. The NE trending pre-existing faults are large in scale, characterized by slow distribution in the north and steep distribution in the south. They were preferentially activated in the early Wenchang period and controlled the basic pattern of the sag. The NW trending pre-existing faults were formed later than the NE trending pre-existing faults, with small scale and wide distribution. The study area is characterized by dense distribution in the west and sparse distribution in the east. The NW trending pre-existing fault zone is formed in the west of the Xijiang Main Sag, which controls the tectonic migration of the sag area after the late Wenchang period. A migration-type basin-forming evolution model controlled by the dynamic transformation of the stress field in the Xijiang Main Sag is established: The split half-graben in the first episode of the rift migrated westward from the "narrow-deep type" to the "flexural type", the rifting in the second episode is weakened, and the inheritance of the wide and gentle half graben is developed. The regional tectonic background of favorable hydrocarbon source rock development in Xijiang Main Sag is clarified.

Keywords: Xijiang Main Sag; Pre-existing fracture; Tectonic subsidence; Basin-forming evolution

0 引言

西江主洼位于南海北部珠江口盆地中部西江凹陷,是珠 I 拗陷中最大的单一半地堑,而同处西江凹陷的番禺 4 洼证实为富生烃洼陷,探明储量超过一亿吨^[1-4]。烃源潜力不明,断裂体系复杂、油气成藏规律认识不清等问题严重制约了西江主洼古近系油气勘探进程。考虑西江主洼恩平组发育区域性泥岩盖层^[5-6],同时缺乏继承性油源断裂和低地温梯度的客观地质条件^[7-9],油气更易聚集在临近洼陷的下构造层,上构造层只能通过区域泥岩减薄尖灭或晚期断裂切开盖层的特殊途径汇聚成藏。因此,西江主洼未来勘探突破仍在古近系地层,开展其盆地动力学研究具有积极意义。

童亨茂等^[10-12]指出先存构造的活动比新形成相同产状的断层要容易的多,借助砂箱实验和库仑-摩尔准则定量验证了基底先存断裂对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用。程燕君^[13]通过物理模拟实验研究分析了斜向拉伸条件下断层的复活过程和复活机制。在其他条件相同的情况下,基底先存断裂的规模越大,其活动性就越强,往往先期形成,继承性活动,并构成裂陷盆地的构造格架^[14]。目前从先存断裂体系在伸展应力动态变化过程中的多重响应角度,分析西江主洼构造-沉积响应的研究较少,尤其是先存断裂体系进入新生代以后对洼陷的形成演化、烃源岩时空展布等方面需要进一步研究。基于此,充分利用三维地震资料,精细识别划分西江主洼先存断裂体系,从盆地动力学演化机制角度,开展前新生代先存断裂体系差异活化及其在伸展应力场下产生的伴生断裂对西江主洼成盆过

程,为西江主洼烃源潜力评价提供理论支撑,明确未来的勘探部署方向。

1 区域地质背景

1.1 区域构造演化及地层发育概况

珠江口盆地是南海北部陆缘最大的中生代沉积盆地,其位于南海北部、华南大陆南缘,受印度板块、欧亚板块的接触、碰撞以及太平洋板块对欧亚板块俯冲的影响,形成了独特的构造格局和复杂的发育史^[15]。新生代南海打开之前,珠江口盆地基底经历了中生代多期构造演化过程,主要形成北东—北东东及北西—北西西两组主要的先存断裂体系^[16],显著影响新生代盆地的裂陷位置、走向、形态、分段性、宽窄、裂陷作用的局部化。新生代珠江口盆地的形成、演化大致可分为3个阶段:早始新世—渐新世时期的裂陷阶段,中新世早—中期的拗陷沉降阶段及晚中新世以后的断块升降阶段。其中,裂陷阶段划分为裂陷初始期,裂陷强烈期,裂陷萎缩期,受太平洋板块俯冲速率及方向的变化,南海北部陆缘经历了伸展方向由北西—南东向至北—南向的裂陷活动^[17]。随着渐新世珠海期规模性海侵,珠江口盆地形成了“先断后拗”的双层结构及“先陆后海”的沉积体系^[18]。盆地总体上呈现“南北分带、东西分块”的构造格局,自北向南依次可划分为北部隆起带、珠一拗陷带、珠三拗陷带、中央隆起带、珠二拗陷带和南部隆起带等构造单元(见图1)。

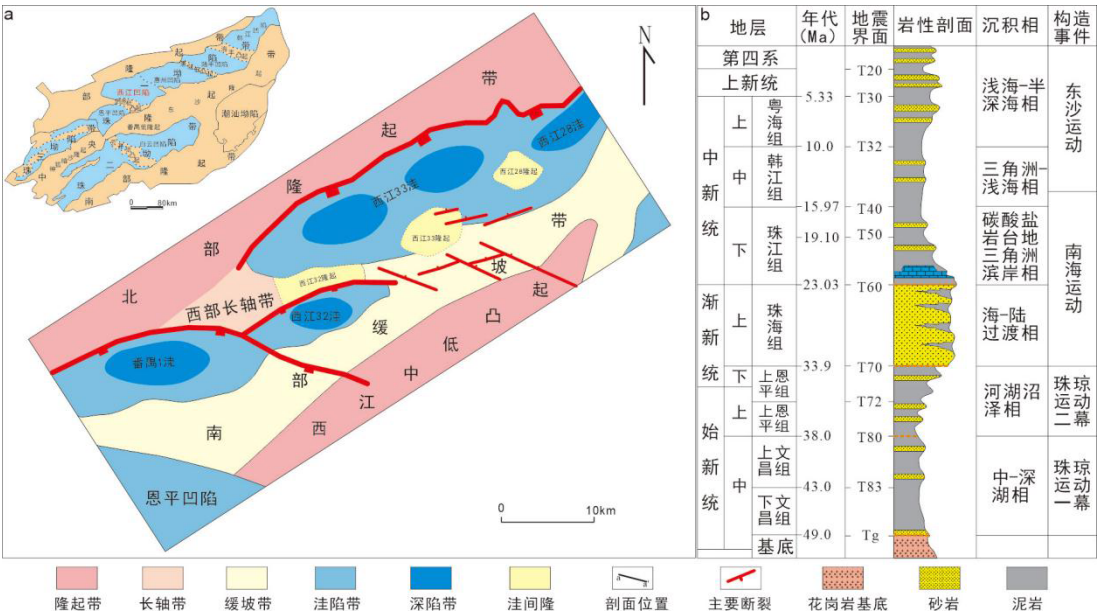


图1 研究区区域构造位置(a)及地层综合柱状图(b)
Fig.1 Regional tectonic location of the study area(a)and the stratigraphic composite column(b)

1.2 西江主洼基本地质背景

研究区西江主洼位于珠江口盆地珠一坳陷中部西江凹陷以北，往西与恩西低凸起之上的番禺1洼相邻，南部与番禺4洼、西江36洼相对，之间由西江中低凸起分隔，北部为北部隆起带，东部则为和惠州凹陷。整体近北东走向，探区面积约2300 km²。西江主洼总体为北断南超的箕状半地堑，洼陷面积约1090 km²，最大埋深7600 m，是珠一坳陷古近系最大的单一半地堑洼陷^[8]。根据洼陷结构和断裂展布特征，将西江主洼周缘划分为4个次级构造单元，即洼陷带、南部缓坡带、北部隆起带和西部长轴带(见图1)，其中西江主洼的洼陷带受先存体系差异活化及岩浆活动影响构成“洼隆相间”的特征，次级洼陷包含西江28洼、西江33洼和西江32洼，洼间隆起带包括西江28隆起、西江33隆起和西江32隆起。研究区主体已被三维地震资料覆盖，满足本次研究的需求。

2 西江主洼洼陷结构特征

西江主洼为铲式正断层控制的复合半地堑，总体为北断南超近北东向展布(图2)，洼陷的结构主要受到北东走向的边界断裂控制，近东西向断裂使洼陷结构进一步复杂化，西江主洼在形成过程中主要受伸展作用控制，在构造斜坡以及斜坡

上发育共轭断层系或反向断层组，裂隙作用主要发生在文昌-恩平期。洼陷演化过程中抬升剥蚀作用不强，地层保存较完整，受断裂作用时空差异影响，在西江主洼北部控洼断裂被晚期断裂错断，同时随着埋深及伸展量的增大，控洼断层倾角逐渐变小，构成铲式特征，具拆离特征的断面向基底延伸距离超过8 km，构成西江主洼基底卷入式伸展构造，其中断面在前古近系地层内对部分受晚期岩浆活动发生的底侵作用可见一定的挠曲变形，往往对应于基底隆起带，西江主洼缓坡带则发育多组以北掉为主的调节断层，断层规模较小，受控西江主洼裂陷期对多幕构造运动影响，洼内呈现洼-隆相间的特征，其中西江33洼构成了西江主洼最主要的洼陷区，其东侧的西江28洼和西侧的西江32洼两个次洼裂陷作用较弱，洼陷面积、埋深显著小于西江33洼。在洼陷区上文昌组至恩平组发育大量断层，断面倾角45°~55°，剖面上构成花状构造，对洼陷结构存在一定对改造作用，恩平组以后西江主洼总体进入稳定沉降阶段，断裂体系不发育。

3 西江主洼成盆演化规律

3.1 先存断裂体系发育特征

中生代主动陆缘背景使南海北部新生代陆缘

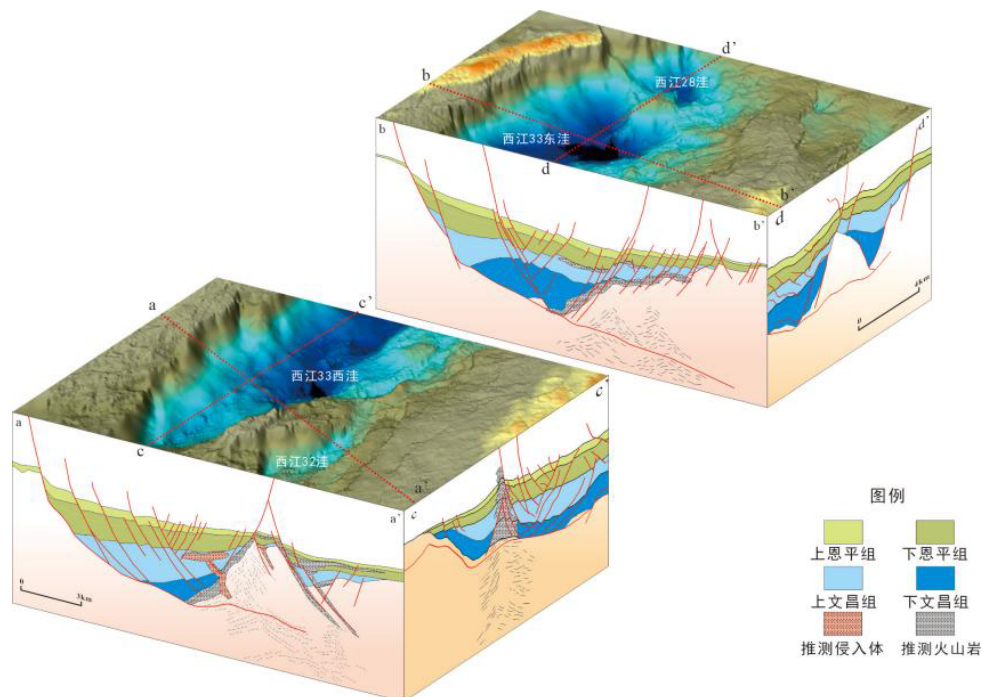


图2 西江主洼洼陷结构立体图

Fig.2 Three-dimensional structure of Xijiang Main Sag

断陷结构复杂化、多样化,先存构造和岩浆作用破坏了地壳结构强度的一致性,对珠江口盆地各洼陷结构具有强烈的控制和影响,导致了各洼陷进入新生代裂陷期具有明显的特殊性和多样化^[15]。中生代印支期印支板块与华南板块发生碰撞,残留的特提斯洋逐渐消亡,两板块拼接并在华南板块西南缘形成北西向褶皱逆冲构造^[13],构成了珠江口盆地中生代早期的隐伏大断裂;中生代燕山伊泽奈岐板块在中国东部的俯冲消亡,及太平洋板块的正向俯冲在华南东南部地区形成了大量近北东向褶皱逆冲构造,同时伴随多期岩浆活动;之后受太平洋板块俯冲后撤及挠曲回弹效应^[19],导致华南地区发生区域性抬升剥蚀作用,同时伴生大量北西向左行走滑断裂^[20],因此,新生代盆地形成之前,珠江口盆地已经存在了近北东和北西向两组先存断裂,复杂的先存体系和基底岩性奠定了基本构造格局。

由图3可知,西江凹陷北部西江主洼地区主要发育北西向和北东向两组先存体系,北东向断裂体系总体上为北西向断裂体系所错断,同时在西江主洼以西发育由北西向断裂为主体的北西向先存断裂带,从三维地震剖面上可以清晰的识别出前新生代地层中多条强振幅、中等连续的反射,这些反射与切割新生代地层的断面反射特征接近,为一系列前新生代先存断裂(图4)。两组断裂体系

特征如下:

(1)北东向先存断裂。主要分布在西江主洼洼陷区南北两侧,规模较大(长度约20~50 km),倾角较小(5° ~ 30°),平面上为北西向先存断裂所错断,从改造后的北东向先存断裂规模来看,西江主洼东部(长度8~10 km)较西部(3~5 km)更大。以西江主洼北部控洼断裂为例,由图4(剖面11'、22'、44')可发现,北东向断裂成铲式特征,断层上部倾角明显大于下部,向南形成多条调节断层,北东向断裂为北西向断裂错开多段,断面两侧地震同相轴反射特征明显不同,同时在断面以下的凸起区可见明显的同相轴抬升弯曲变形等特征,推测该断裂在晚期受到多期岩浆底侵作用改造,在洼陷区、隆起区及断阶带等地区均可见局部断面倾角减小甚至发生回倾。北东向先存断裂的后期活化总体控制了西江主洼的洼陷展布方向、洼间隆起分布(西江33隆起、西江28隆起)等基本构造格局。

(2)北西向先存断裂。该断裂体系在西江主洼地区广泛发育,其分布表现出自北东向南西逐渐增多的特征,相较于北东向先存断裂,数量更多,断面倾角更大,但个体规模普遍较小。以西江主洼西侧为界,北西向断裂的分布情况和剖面上的组合关系存在一定差异。在西江主洼以西(图3),北西向断裂密集发育,区域上构成了北西向先存

断裂带，由图4(剖面22'、33')可发现剖面上可见由多条北西向断裂构成的花状构造，呈现出一定的走滑性质，受晚期多幕构造运动影响，“花心”处受改造明显，花状构造以下受晚期岩浆活动影响，地震同相轴多可见明显上拱翘倾等特征；在西江主洼主体至向东一侧的隆起区(图4，剖面

33'、44')，北西向断裂的断面倾向基本一直，断层倾角较恩西低凸起北西向先存断裂带更高，断裂向下延伸长度较浅，受晚期岩浆活动改造弱，在西江主洼主体至向东一侧的洼陷区(图4，剖面11'、44')，多组北西向高角度断裂切割凹陷中心，同时错断北东西断层。

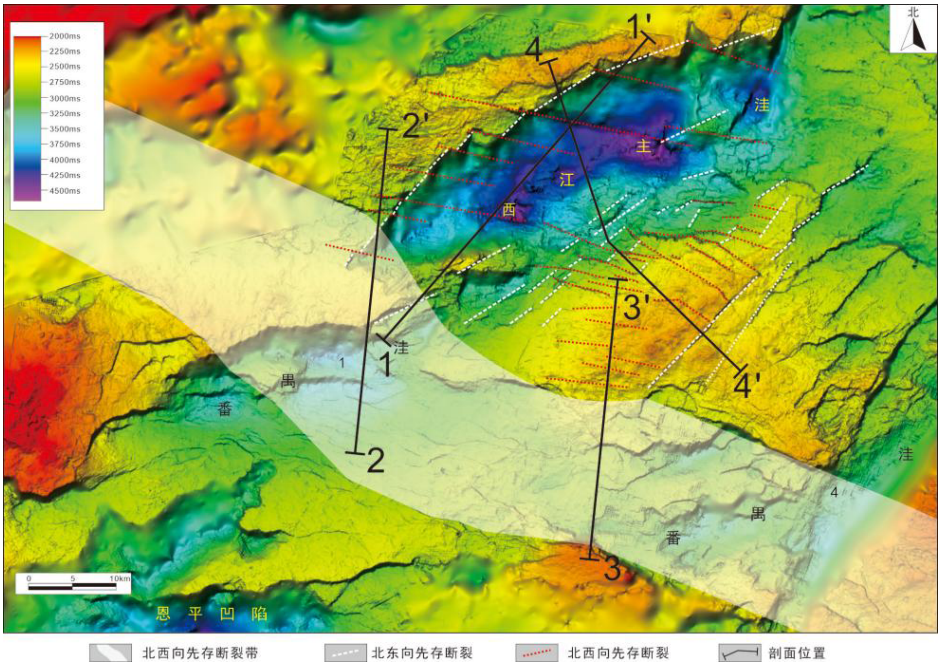


图3 西江凹陷北部先存断裂体系分布图

Fig.3 Distribution map of pre-existing fault system in northern Xijiang depression

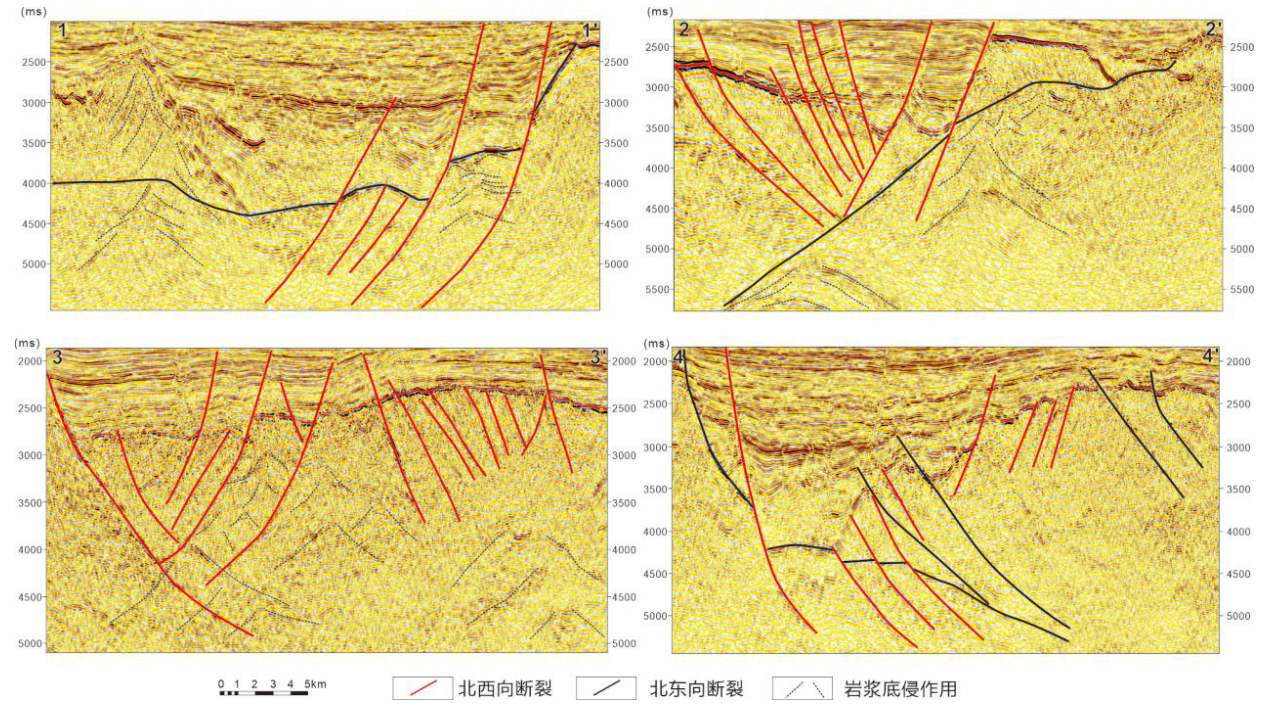


图4 先存断裂发育特征剖面图

Fig.4 Profile of development characteristics of pre-existing faults

3.2 先存断裂体系差异活化对洼陷形成的控制

珠江口盆地经过喜山早期印度板块的碰撞、太平洋板块俯冲方向的变化、古南海的消亡、新南海的产生等一系列构造运动导致了区域伸展方向由北西—南东向顺时针转变为北—南^[17]。先存断裂作为力学上的薄弱面，在新生代统一应力场作用下，西江凹陷北部先存断裂发生差异活化^[21]，因此在裂陷初期强烈北西—南东向伸展作用下，形成了西江主洼北断南超，北东—南西走向的基本构造格局，随着区域应力场逐渐转变，西江主洼次一级的北西向先存断裂也开始活化，同时在特定的区域应力场下派生出具有走滑性质的断裂。

珠江口盆地裂陷期主要发育两期构造幕，其中在第一幕裂陷期内存在一个可在珠 I 拗陷全区追踪对比的次以及界面，反映在裂陷一幕时期应力场发生转变，并伴随着构造升降，岩浆活动等剧烈的构造运动，即惠州运动^[22]，基于前人研究认识，结合西江主洼的构造演化特征，本次研究将西江主洼裂陷期演化划分成两幕，并将裂陷 I 幕进一步划分为强裂陷期，裂陷转换期。在裂陷期以后西江主洼地区进入稳定沉降阶段，断裂活动微弱，洼陷区断裂不发育，仅在洼陷南北边缘形成小型雁行式断裂。裂陷期断裂体系及洼陷层序演化特征如下：

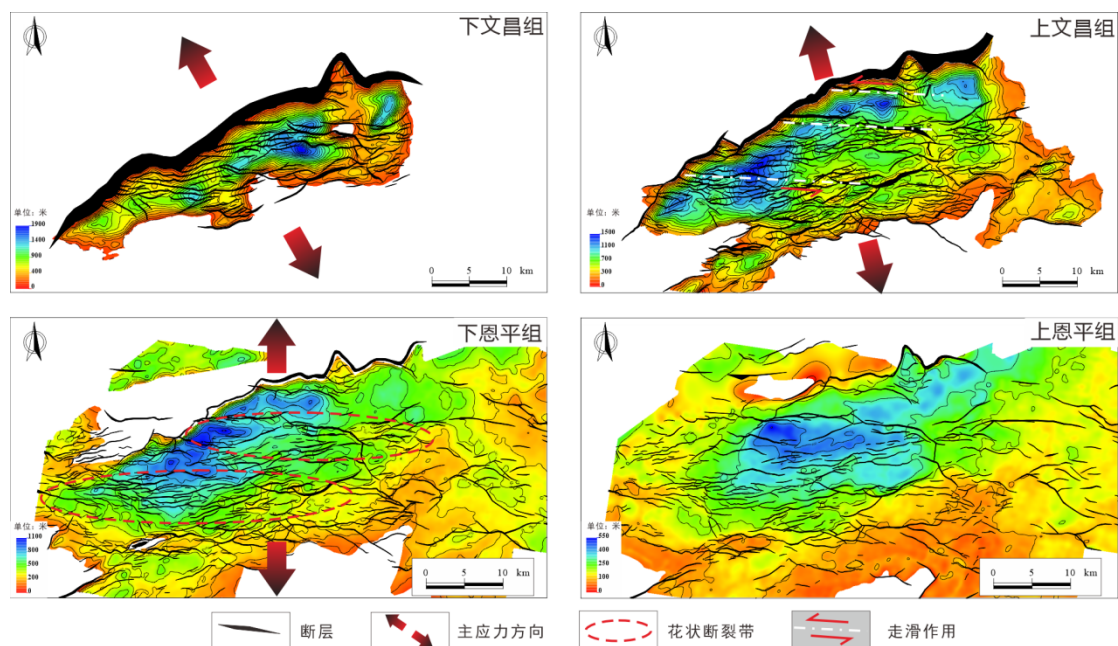


图5 西江主洼古近系厚度叠合断裂图

Fig.5 Thickness superimposed fault map of Paleogene in Xijiang Main Sag

3.2.1 裂陷 I 幕(珠琼运动 I 幕)

强裂陷期：对应西江主洼下文昌组地层，该时期太平洋板块沿北北西向俯冲、挤压欧亚板块的速率骤降、俯冲带后撤，造成中国东部大陆边缘由挤压式的安第斯山型大陆边缘转变为现今西太平洋型沟弧盆地发育的大陆边缘，岩石圈在长期挤压的状态下发生回弹，使华南板块东部软流圈地幔上涌，岩浆活动频发，并在珠江口盆地形成了北西—南东向伸展应力场^[17]。受北西—南东向伸展作用影响，西江主洼北东走向先存断裂优先活化，并在西江主洼北部形成大型南掉控洼断裂，

在南部形成北掉调节断裂，洼陷长轴方向与主应力场方向接近垂直，北东向先存断裂的优先活化控制了西江主洼的构造格局。强裂陷期，北部被一系列北西向先存断裂错断的北东向断层，受初始规模的差异先后开始活化并随着裂陷作用的增强构成了西江主洼北部控洼断裂，断层活动速率在 150~350 m/Ma 之间，受东西段北东向先存断裂规模差异控制(图2)，裂陷作用呈现东强西弱的特征，优先在西江33东洼形成主要沉降中心，最大地层厚度可达 2000 m，强烈的伸展裂陷作用，构成西江主洼陡缓坡均较陡，呈北东—南西向展布

的“窄深型”半地堑(图5)。

裂陷转换期:对应西江主洼上文昌组地层,中始新世开始板块运动发生重大变化,距今43 Ma前后,印度板块与欧亚板块开始发生硬碰撞,由于汇聚速率骤减,印支和华南陆块被挤出;同时,太平洋板块俯冲方向由北北西转变为北西西,珠江口盆地珠Ⅰ拗陷发生惠州运动^[22]。受惠州运动影响,区域应力场由北西—南东顺时针转变为北北西—南南东向,西江主洼地区北西向先存断裂开始活化,并在洼陷内形成一系列北东东—南西西及近东西走向带有左行左阶走滑性质的断裂,剖面上呈负花状构造特征,自西江主洼陡坡带向东切割洼陷中心延伸至缓坡带,同时在西江主洼内西江33隆起、西江28隆起及南部隆起区受岩浆活动影响,使西江主洼东侧发生一定程度的构造抬升,沉降作用变弱,此时西江33西洼北西向先存断裂和北东向先存断裂交汇区断裂持续活化,构造沉降作用较强,断裂活动速率180~250 m/Ma,西江33西洼最大地层厚度可达1500 m,总体上西江主洼西部北东东—南西西向新生断裂的数量明显多于东部(图3),综合响应造成西江主洼构造沉降中心向西迁移,裂陷转换期西江主洼隆起区北西向断裂转换带的形成增强了晚文昌期陆源碎屑的输入能力,控制了物源自东南向西北的输入方向,大量物源自隆起区向西江主洼西侧搬运,西江主洼西侧北西向先存断裂带的逐渐活化使整个西江凹陷北部地区构造沉降作用增强,造成西江主洼缓坡带沉积范围较强裂陷期扩大,岩浆活动等作用使坡度变缓并发生挠曲变形作用,形成北东东—南西西向展布的“挠曲型”半地堑(图5)。

3.2.2 裂陷Ⅱ幕(珠琼运动Ⅱ幕)

对应西江主洼恩平组地层,太平洋板块的俯冲方向由北北西向变为北西西向,印度板块向北楔入欧亚板块,中国东部地区地幔岩石圈物质大量向东、向南迁移,印支地块向东南方向挤出和顺时针旋转,位于华南陆缘南侧的古南海以“剪刀式”向东南婆罗洲地区加速俯冲消亡^[23]。太平洋板块俯冲方向的变化、印欧板块碰撞引起的地幔侧向流动以及古南海的板后拖曳力共同作用使得珠江口盆地的应力场顺时针转变为近南北向^[21-22]。在南北向拉张应力场作用下,晚文昌期洼陷内的负花状断裂带持续发育并在恩平组晚期进入构造定形期,平面上呈近东西向展布,至恩

平组末期裂陷作用逐渐减弱,相较于裂陷Ⅰ幕,该时期裂陷作用较弱,裂陷作用具有一定的继承性,裂陷中心处于西江33洼西侧,控洼断裂活动速率普遍小于100 m/Ma。最终在西江主洼形成西部缓坡带以西—西部长轴带,东部陡坡带—西江28隆起共两组花状断裂带,断裂普遍切割洼陷中心的文昌组地层。裂陷Ⅱ幕受西江主洼西侧北西向先存断裂带持续活化影响,使包括西江主洼在内的西江凹陷北部沉降范围明显扩大,洼陷呈现近东西向展布的宽缓半地堑特征(图5)。

3.3 西江主洼成盆演化模式

借助三维地震资料,对西江主洼地区断裂体系精细解释,考虑前新生代先存断裂体系自形成开始,到新生代受应力场顺时针旋转的动态响应,建立西江主洼地区迁移型成盆演化模式(图6)。

3.3.1 前新生代两组先存体系的形成

自中生代依赖经历了印支期印支地块的拼接,与华北板块的俯冲碰撞,燕山期伊泽奈岐板块的俯冲消亡,太平洋板块的形成及俯冲后撤,导致珠江口盆地西江主洼形成北东和北西向两组先存断裂体系,从断裂交切关系看,北西向先存断裂的形成晚于北东向先存断裂(图2)。

3.3.2 裂陷Ⅰ幕

(1)强裂陷期:受两组先存断裂的交切影响,文昌组早期受北西—南东向应力场控制下,东段断裂活动性更强,优先沉降并使西江33东洼成为西江主要沉降中心,强烈的沉降作用使西江33东洼局部深陷,呈现“窄深型”半地堑特征(图6)。

(2)裂陷转换期:在惠州运动影响下^[40],主应力场方向发生顺时针旋转,北西向先存断裂及逐渐活化,同时伴随岩浆底侵作用造成西江33东洼局部隆升,西江33西洼受两组先存断裂共同影响持续发生裂陷作用,综合响应下,沉降中心逐渐向西迁移至西江33西洼,形成“挠曲型”半地堑的特征(图6)。

3.3.3 裂陷Ⅱ幕

伴随多板块运动及古南海的消亡,使得区域应力场转变近南北向,新生断裂体系呈近东西向,随着北西向先存断裂带的进一步活化,西江主洼及以西的番禺Ⅰ洼发生区域性构造沉降,沉降作用强度显著弱于裂陷Ⅰ幕,西江凹陷北部构成宽缓半地堑特征(图6)。

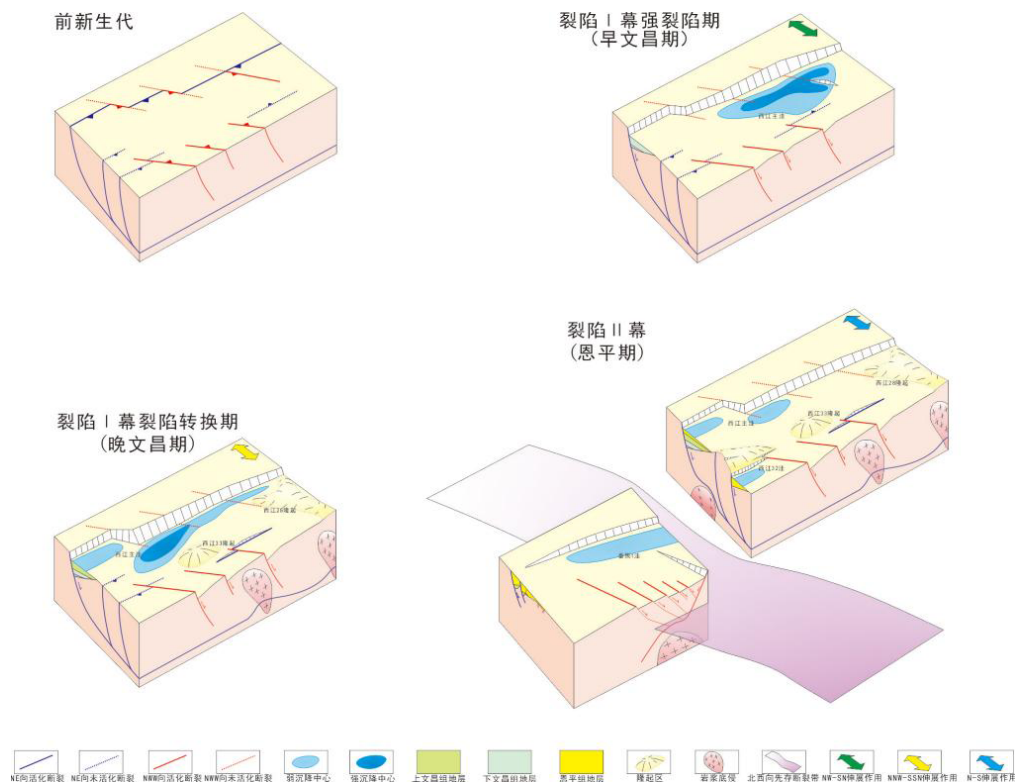


图6 西江主洼裂陷期成盆演化模式图

Fig.6 Basin-forming evolution model of Xijiang Main Sag during rifting period

4 结论

(1)依托三维地震资料,在西江主洼地区识别出北东向和北西向两组先存断裂体系,北东向先存断裂规模较大,呈现北缓南陡的分布特征,早文昌期强烈活化并控制西江主洼的基本格局,北西向先存断裂形成于北东向先存断裂之后,规模较小,广泛发育,研究区范围呈现西密东疏的分布特征,向西构成北西向先存断裂带,晚文昌期之后逐渐活化,与洼陷区的隆升改造和向西迁移密切相关;

(2)裂陷 I 幕强裂陷期主要沉降中心位于西江 33 东洼,构成西江主洼陡缓坡均较陡,呈北东—南西向展布的“窄深型”半地堑,裂陷 I 幕裂陷转换期主要沉降中心向西迁移至西江 33 西洼,同时在岩浆活动等综合响应下,形成北东东—南西向展布的“挠曲型”半地堑,裂陷 II 幕构造沉降作用范围向西扩大,沉降强度减弱,西江凹陷北部构成宽缓半地堑特征;

(3)指出两组先存断裂体系在不同应力场下的动态响应规律及对西江主洼的形成及演化的控制作用,建立西江主洼迁移型成盆演化模式,明确西江主洼有利烃源岩发育的区域构造背景。

参考文献

- [1] 高阳东,林鹤鸣,汪旭东,等. 幕式裂陷控注背景下的烃源岩分布及岩浆改造——以珠—坳陷番禺 4 洼为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41 (03): 151-160.
- [2] 吴宇翔,舒誉,丁琳,等. 珠江口盆地番禺 4 洼文昌组基于层序地层格架约束下的优质烃源岩预测[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37 (03): 41-49.
- [3] 朱筱敏,黄捍东,代一丁,等. 珠江口盆地番禺 4 洼文昌组层序格架与沉积体系研究[J]. 岩性油气藏, 2014, 26 (04): 1-8.
- [4] 张向涛,朱俊章,熊万林,等. 番禺 4 洼文昌组烃源岩生物标志化合物特征与油源判识[J]. 中国海上油气, 2020, 32 (04): 12-23.
- [5] 朱文奇,梁建设,郭刚,等. 珠江口盆地西江主洼油气运聚主控因素及运聚模式[J]. 中国海上油气, 2014, 26 (06): 14-20.
- [6] 刘培,张向涛,林鹤鸣,等. 珠江口盆地西江主洼油气差异分布机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51 (01): 52-64.
- [7] 何敏,雷永昌,于水明,等. 南海北部浅水区低地温断陷成藏特征及勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2016, 21 (04): 75-84.
- [8] 杜家元,施和生,朱明,等. 西江主洼相对低地温条件下油气成藏特征和勘探潜力分析[J]. 中国海上油气, 2008, (05): 287-292.

- [9] 刘培,张向涛,杜家元,等. 低地温断陷构造-热演化过程及其石油地质意义:以珠江口盆地西江主洼为例[J]. 地质科技情报,2018,37(02):149-156.
- [10] 童亨茂,聂金英,孟令箭,等. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J]. 地学前缘,2009,16(04):97-104.
- [11] 童亨茂,孟令箭,蔡东升,等. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识[J]. 地质学报,2009,83(06):759-774.
- [12] 童亨茂,蔡东升,吴永平,等. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(02):158-168.
- [13] 程燕君,吴智平,张杰,等. 西江凹陷早新生代断裂演化及其对南海北缘应力场顺时针旋转的响应[J]. 地球科学,2020,45(06):2199-2209.
- [14] 庞雄,郑金云,梅廉夫,等. 先存俯冲陆缘背景下珠江口盆地断陷结构的多样性[J]. 石油勘探与开发,2021(04):1-11.
- [15] Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, et al. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang(Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1999, 104(B7): 15365-15390.
- [16] 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(06):55-78.
- [17] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(4): 353-431.
- [18] 刘蓓蓓,于兴河,吴景富,等. 南海北部陆缘盆地半地堑类型及沉积充填模式[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(03):498-507.
- [19] 高阳东,张向涛,张丽丽,等. 珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景[J]. 地球科学,2022,47(07): 2317-2327.
- [20] Hall R, Hattum M W A, Spakman W, et al. Impact of India-Asia collision on SE Asia: The record in Borneo[J]. Tectonophysics, 2008, 451(1-4): 366-389.
- [21] 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(02):367-376.
- [22] 施和生,杜家元,梅廉夫,等. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. 石油勘探与开发,2020,47(03):447-461.
- [23] Cullen A, Reemst P, Henstra G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives[J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(3): 273-282.