

黄鑫, 陈维涛, 王文勇, 等. 珠江口盆地西江凹陷北部构造转换背景下文昌组层序地层与沉积充填特征[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(5): 43-54.

HUANG Xin, CHEN Weitao, WANG Wenyong, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary filling characteristics of Wenchang Formation under the background of tectonic transformation in the northern Xijiang Depression of the Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 43-54.

# 珠江口盆地西江凹陷北部构造转换背景下 文昌组层序地层与沉积充填特征

黄鑫, 陈维涛, 王文勇, 何叶

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054)

**摘要:**“源-储”配置关系认识不清制约了西江主洼古近系油气勘探。依托地震、钻井、古生物等资料,厘定识别出 5 个层序界面和 4 个三级层序。建立了西江凹陷北部受先存断裂差异活化及应力场转变主控的迁移型层序演化模式: 裂陷初始期(代表层序 WCSQ1), 多中心分段发育; 东部强裂陷期(WCSQ2), 东厚西薄、NE 向“窄条”状展布; 裂陷转换期(WCSQ3), 西厚东薄, NE 向席状展布; 裂陷萎缩期(WCSQ4), 近席状展布。文昌组发育辫状河三角洲、扇三角洲、湖相 3 种沉积体系, 识别出 2 种主要的沉积充填特征: ①WCSQ2 “陡坡型”半地堑, 深湖窄盆, 富泥少砂; ②WCSQ3 “坡坪式”半地堑, 深湖宽盆, 砂泥共存。明确了烃源岩-储层配置关系: 中深湖相优质烃源岩主要位于 WCSQ2 东部和 WCSQ3 西部洼陷中心; 辫状河三角洲储集体主要发育于缓坡带 WCSQ3 和 WCSQ4; 扇三角洲储集体主要发育于陡坡带 WCSQ2 和 WCSQ3。

**关键词:**西江主洼; 先存断裂; 成盆演化; 三级层序; 沉积体系

中图分类号: P736; P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.179

## 0 引言

西江凹陷位于南海北部珠江口盆地珠一坳陷西侧, 南部的番禺 4 洼证实为富生烃洼陷, 探明储量超过 1 亿 t<sup>[1-3]</sup>。随着近年勘探力度的加大, 西江中低凸起 XJPY 构造已取得商业突破, 经证实油气来自于西江凹陷北部西江主洼文昌组中深湖相烃源岩<sup>[4-5]</sup>。油气自西江主洼长距离(>23 km)运移并规模性聚集在 XJPY 构造的事实有力地证明了西江主洼巨大的勘探潜力。西江主洼恩平组发育区域性泥岩盖层, 同时缺乏继承性油源断裂, 和具有低

地温梯度的客观地质条件, 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<sup>[6-9]</sup>。因此, 近洼古近系勘探是西江主洼主要的勘探方向<sup>[8-9]</sup>。

近年来, 前人围绕西江主洼的研究工作主要集中在烃源条件<sup>[10-11]</sup>、油气成藏<sup>[4-9]</sup>、断裂体系演化<sup>[12-15]</sup>几个方面。受限于地震资料品质, 针对古近系文昌组层序地层与沉积充填特征方面的研究鲜有进展, 造成现有认识往往与钻井结果不符, 对优质烃源岩及储层“甜点”的时空展布规律认识不清, 严重制约了古近系的勘探进程。随着新一轮的三维地震资料采集和重处理, 地震资料的成像有了较大的改善, 并覆盖了西江凹陷北部主要洼陷, 因而有必要结合西江凹陷北部重点洼陷开展新的研究。童亨茂等<sup>[16-18]</sup>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, 并结合砂箱实验和库仑-摩尔准则定量化验证了基底先存断裂对裂陷盆地断层形成和演化

收稿日期: 2022-06-13

资助项目: 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)

作者简介: 黄鑫(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质方面的研究工作。E-mail: huangxin20@cnooc.com.cn

的控制作用。程燕君等<sup>[15]</sup>通过物理模拟实验研究斜向拉伸条件下断层的复活过程和复活机制。研究表明,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。受大规模基底先存断裂控制的断层往往先期形成并继承性活动,构成裂陷盆地的构造格架<sup>[16-18]</sup>。本文结合前述研究认识,从盆地动力学演化的角度,考虑西江凹陷北部前新生代先存断裂体系差异活化对洼陷形成的控制作用,重点围绕西江主洼,分析早—中始新世文昌组时期构造-层序动态响应规律,借助地震、钻井等资料,识别并建立文昌组层序地层格架,分析沉积充填结构与沉积中心转换等特征,尝试构建三级层序格架中烃源岩和储层的时空匹配关系,为西江主洼烃源潜力评价和优质储层预测提供理论支撑,推动古近系勘探进程。

### 1 区域地质背景

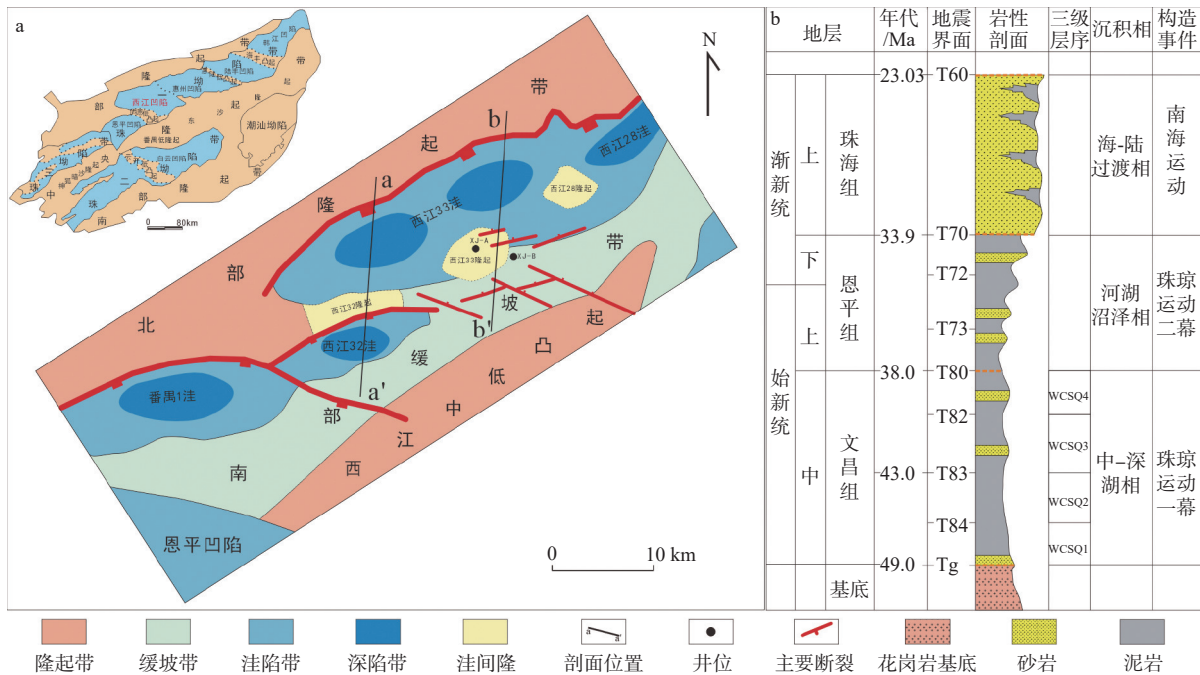
#### 1.1 区域构造演化及地层发育概况

珠江口盆地是南海北部陆缘最大的中生代沉积盆地,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<sup>[19-25]</sup>。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 NE-NEE 及 NW-NWW 向 2 组主要的先存断裂体系<sup>[26-27]</sup>,显著影响了新生代盆地的裂陷位置、走向、形态、分段性、宽窄和裂陷作用的局部化。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、裂陷强烈期和裂陷萎缩期,受太平洋板块俯冲速率及方向变化的影响,南海北部陆缘经历了伸展方向由 NW-SE 向至 SN 向的裂陷活动<sup>[28-34]</sup>。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<sup>[18,35]</sup>。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(图 1)。

#### 1.2 西江凹陷北部基本地质背景

研究区位于珠江口盆地珠一拗陷中部西江凹陷以北,往西与恩平凹陷相邻,两者之间以恩西低凸起相隔;南部与番禺 4 洼、西江 36 洼相对,之间由西江中低凸起分隔;北部和东部分别为北部隆起带和惠州凹陷。整体近 NE 走向,探区面积约 3 000 km<sup>2</sup>。西江凹陷北部主要包括西江主洼和番禺 1 洼,总体为“北断南超”的箕状半地堑,其中西



据文献 [14] 修改

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 setting of the study area (a) and the composite stratigraphic column (b)

江主洼面积约 1 090 km<sup>2</sup>, 最大埋深 7 600 m, 是珠一坳陷古近系最大的单一半地堑洼陷。根据洼陷结构和断裂展布特征, 将研究区划分为 3 个次级构造单元, 即洼陷带、南部缓坡带、北部隆起带(图 1), 其中, 西江主洼的洼陷带受先存体系及岩浆作用影响, 具有“洼隆相间”的特征, 次级洼陷包含西江 28 洼、西江 33 洼、西江 32 洼, 洼间隆起包括西江 28 隆起、西江 33 隆起、西江 32 隆起。基于西江主洼恩平组发育区域盖层、晚期断裂不发育及具低地温梯度的石油地质条件, 油气主要通过早期断裂调节、输导并汇聚于近洼古近系层系中。本次研究的重点层系文昌组形成于始新世早—中期, 是珠琼运动一幕的产物, 与基底呈角度不整合接触, 是最重要的生烃层。受强烈断陷作用影响, 文昌期湖盆水体较深, 整体处于欠补偿环境, 沉积相主要为中—深湖相、陆源三角洲相、近源扇三角洲及近岸水下扇相<sup>[36-37]</sup>。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 层序地层划分与识别

### 2.1 层序地层划分方案

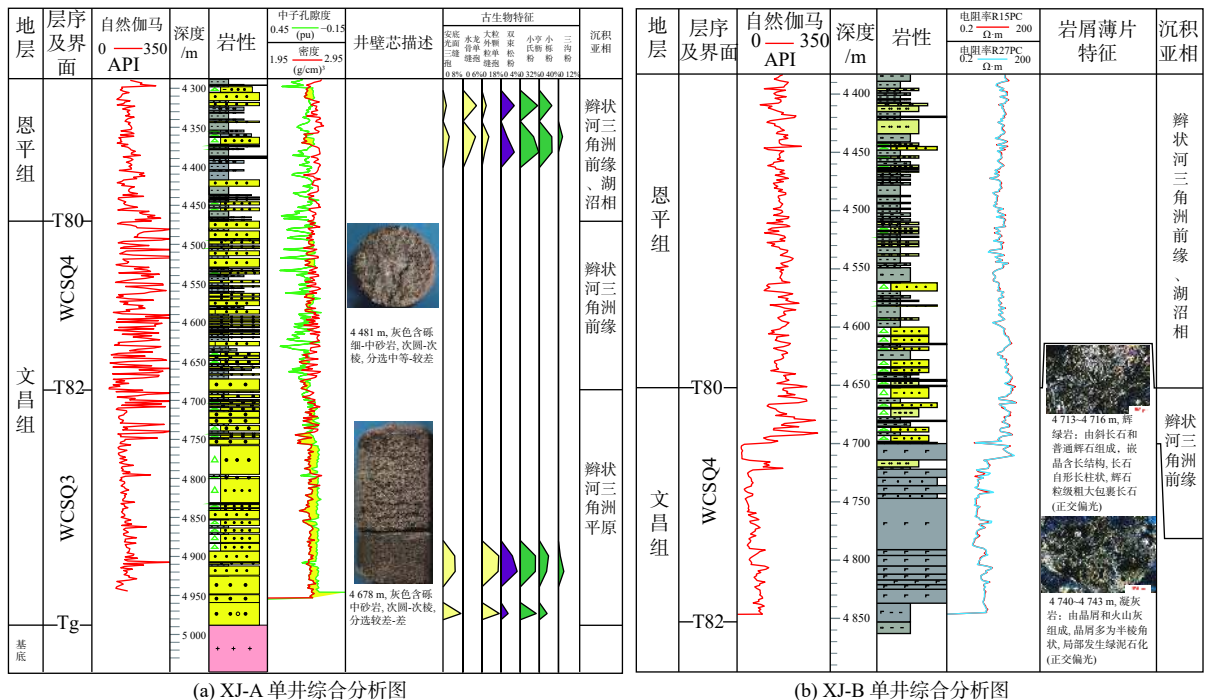
参考珠江口盆地最新区域研究成果<sup>[37]</sup>, 通过详细的井震标定和地震剖面解释追踪, 本次研究在西

江主洼共识别出 4 个三级层序, 分别为 WCSQ1、WCSQ2、WCSQ3、WCSQ4, 对应地震层位界面自下而上为 Tg、T84、T83、T82、T80。其中 Tg 和 T80 分别对应于珠琼运动一幕、珠琼运动二幕, T83 响应于文昌组内部惠州运动, 其运动级别确定为珠琼运动下幕一级<sup>[38]</sup>(图 1b), T84 和 T82 则响应于洼内更次一级的构造运动或明显的湖盆面升降变化。西江主洼主体受 NE 向断裂控制, 层序发育较为完整。根据构造事件规模, 将 Tg 和 T80 定为二级层序界面, T83 定为准二级层序界面, T84、T82 定为三级层序界面。

### 2.2 层序界面特征

#### 2.2.1 二级层序界面

西江主洼文昌组底、顶界面对应地震层位为 Tg 和 T80, 其中 Tg 为古近纪与中生代地层的分界面, 已钻井揭示, Tg 以下岩性主要为岩浆岩, Tg 以上主要为沉积岩(图 2), Tg 界面上下在地震上存在明显角度不整合特征(图 3), 界面之下主要以强振幅连续反射、杂乱-空白反射为特征, 界面之上主要表现为平行席状或亚平行楔状特征, 并上超于 Tg 界面。T80 界面为文昌组顶界面, 与上覆恩平组呈不整合接触。地震剖面显示(图 3), T80 界面之下可见削截特征, 界面之上可见上超或平行特征, T80 界面之上地震反射频率普遍高于界面之下。此外, 受



(a) XJ-A 单井综合分析图

(b) XJ-B 单井综合分析图

图 2 XJ-A 和 XJ-B 井古近系综合柱状图

Fig.2 Comprehensive histogram of the Paleogene of wells XJ-A and XJ-B



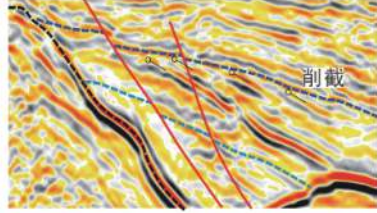
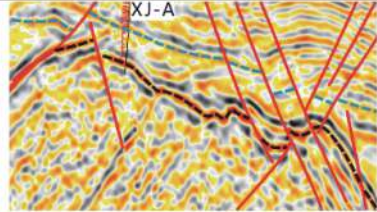
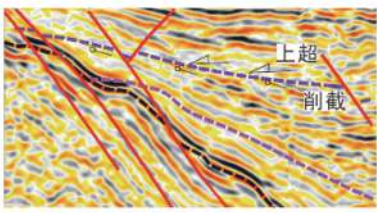
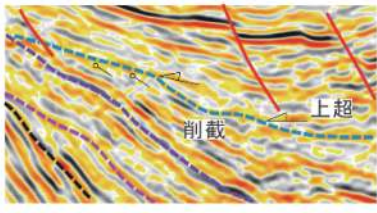
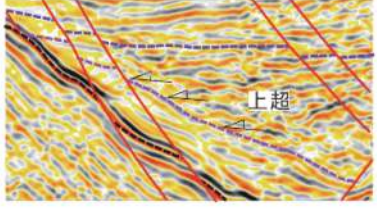
层序界面		典型地震剖面	识别标志	发育位置
二级层序界面	T80		底部见明显削截特征, 界面上中高频-中连续-中强反射, 界面之下中低频-连续-强反射	南部缓坡带、西江 33 洼西部洼缘、西江 33 隆起北缘
	Tg		界面呈连续强反射特征, 界面上下明显角度不整合特征, 界面之下强振幅连续反射、杂乱-空白反射	区域性发育
准二级层序界面	T83		界面上可见上超特征, 界面之下见削截特征	西江 33 洼西部、西江 33 隆起北缘、西江 28 隆起
三级层序界面	T82		界面上可见上超特征, 界面之下见削截特征	西江 33 洼西部、西江 32 隆起北缘
	T84		界面上下的地震同相轴振幅、连续性明显不同界面之下地层平行接触融, 界面上可见上超特征	南部缓坡带近洼区

图3 各级层序界面地震反射特征及发育位置

Fig.3 Seismic reflection characteristics and development positions of various sequence interfaces

岩浆作用影响, T80 界面附近局部可见弱连续-强振幅特征。已钻井方面, T80 界面之上含砂率明显低于界面之下, 岩性以粉-细砂岩为主, 且常见薄煤层, 泥岩伽马基线存在明显差异, T80 界面之下岩性以中-粗砂岩为主, 偶见火山岩(图 2b)。在古生物特征方面, T80 界面之上孢粉组合以小型三沟类、三孔沟类的花粉占绝对优势; 蕨类植物孢子中大粒外颗粒单缝孢、安底光面三缝孢、水龙骨孢较为常见; 裸子植物花粉中较常见的是双束松粉, T80 界面之下孢粉组合中被子植物花粉的含量占优势, 其中以三沟粉(小亨氏栎粉、小栎粉)占绝对优势; 裸子植物的平均含量不足 3%; 蕨类植物孢子中可见小桫欏孢、水龙骨孢(图 2a)。

### 2.2.2 准二级层序界面

T83 为上、下文昌组分界面, 对应构造事件为惠州运动<sup>[38]</sup>, 受应力场方向的转变、断裂活动、构造沉降及岩浆活动等作用发生明显变化, 进而引发层序的迁移, 使界面上下的展布特征明显不同, 如缓坡带西江 33 隆起受岩浆底侵作用发生构造抬升, 使 WCSQ2 顶部发生一定程度的抬升剥蚀作用, T83 界面之下在西江主洼西部及西江 33 隆起东北侧可见削截特征, T83 界面之上在洼陷缓坡带及西江 33 隆起带可见上超特征(图 3), 目前没有钻井钻遇该界面。

### 2.2.3 三级层序界面

三级层序界面主要受到局部构造运动及湖平

面变化影响。其中 T84 为 WCSQ1 顶界面, 界面上、下地震同相轴的振幅及连续性明显不同, 界面之下地层平行接触, 界面之上可见上超特征(图 3), 目前没有钻井钻遇该界面; T82 为 WCSQ3 顶界面, 在西江主洼西部, T82 界面之下可见削截特征, T82 界面之上可见上超特征, 已钻井方面 T82 界面之上呈现砂泥互层的正旋回特征, 砂岩岩性为细-粗砂岩, T82 界面之下则为垂向加积近反旋回的富砂地层, 砂岩岩性为中-粗砂岩及砂砾岩, T82 界面上、下沉积亚相明显不同(图 3)。

### 3 西江主洼成盆演化特征

中生代主动陆缘背景使南海北部新生代陆缘断陷结构复杂化、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<sup>[19-25]</sup>。受岩石圈的张裂减薄以及欧亚板块、印度洋板块、太平洋板块的相互作用等多种应力机制影响, 相较于其他被动大陆边缘, 珠江口盆地新生代时期的裂陷作用更为复杂<sup>[38]</sup>。基于此, 学者们对珠江口盆地构造转换主控因素及成因机制做了大量研究, 朱筱敏等<sup>[1]</sup>、代一丁<sup>[3]</sup>研究发现, 西江凹陷南部始新世

文昌组三级层序存在自东向西迁移的特征, 同时控制了中深湖相烃源岩的展布规律; 葛家旺等<sup>[39]</sup>和 ZHU 等<sup>[40]</sup>研究发现, 惠州凹陷和陆丰凹陷裂陷期沉降中心具有由南向北迁移的特征, 并进一步指出构造迁移主要受控于先存断裂的重新激活次序和区域构造应力方向的转变。施和生等<sup>[38]</sup>指出发生于珠江口盆地中-始新世早、晚文昌期(距今 43 Ma)的惠州运动表现为裂陷作用的南北转变和沿断裂走向的迁移、基底隆升、岩浆底辟以及地层剥蚀等。

通过三维地震资料解释, 在西江凹陷北部前新生代地层主要识别出 NE 向和 NW 向 2 组先存断裂体系, 西江主洼地区的 NE 向断裂明显被 NW 向断裂错断, 西江主洼以西恩西低凸起构造带则发育大量 NW 向先存断裂, 构成 NW 向先存断裂带(图 4)。由于西江主洼 NE 向控洼断裂东段较少被 NW 向先存断裂错断, 单条 NE 向断裂长度明显大于西段, 因此, 文昌组早期在 NW-SE 向应力场控制下, 东段断裂活动性更强, 使西江 33 东洼优先成为主要沉降中心, 之后在惠州运动影响下<sup>[38]</sup>, 主应力场方向发生顺时针旋转, 在 NW 向先存断裂及 NW 向隐伏断裂带的逐渐活化, 以及岩浆底侵作用造成的局部隆升等一系列构造响应下, 沉降中心逐渐向西迁移至西江 33 西洼, 并向在西江主洼以西形成番禺 1 洼(图 5、6)。各时期演化特征如下:

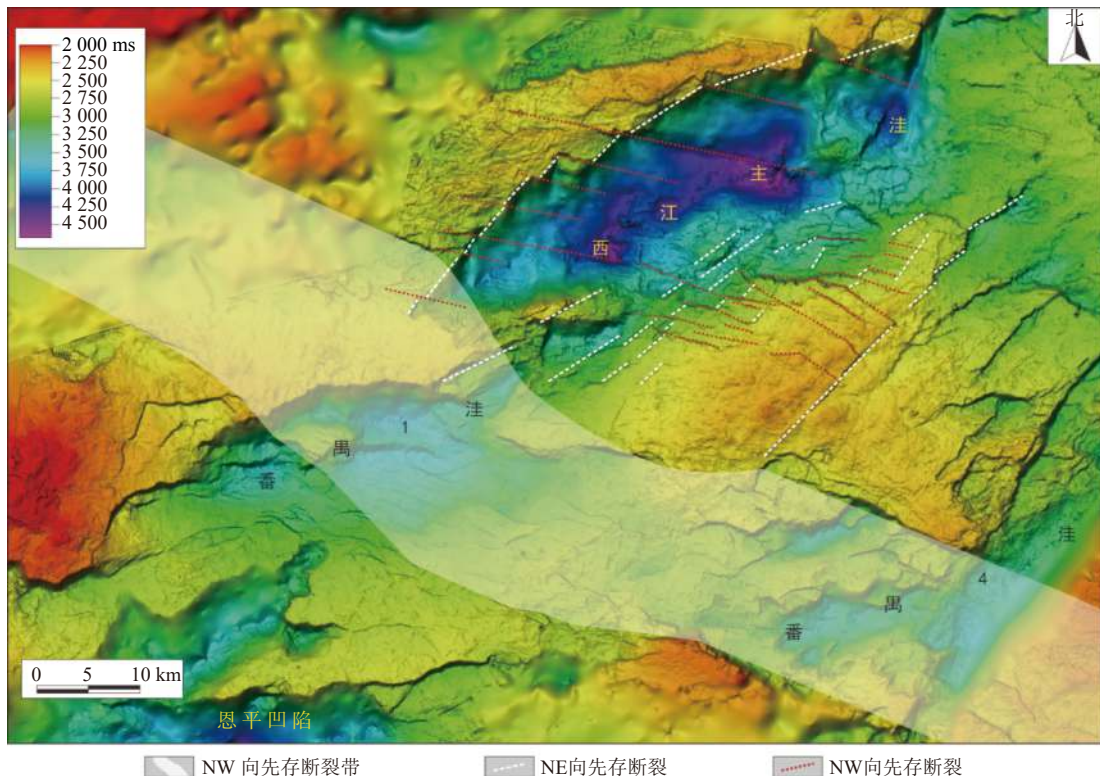


图 4 西江凹陷北部先存断裂体系分布

Fig.4 Distribution of pre-existing fault system in the northern Xijiang Depression



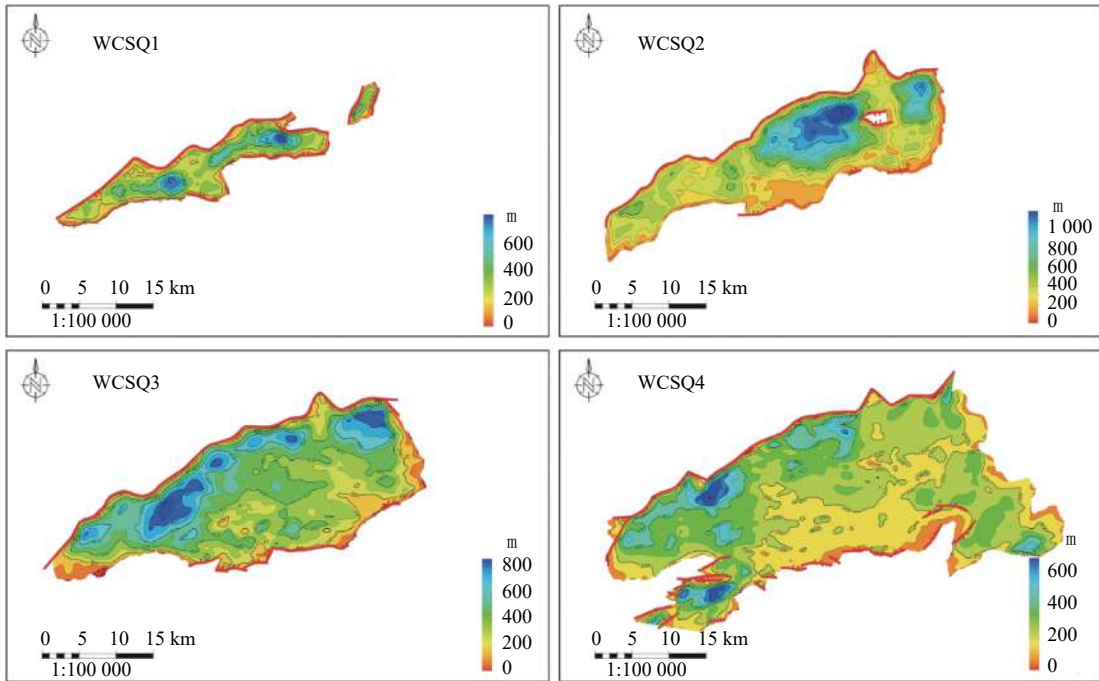


图5 西江主洼文昌组各三级层序厚度叠合断裂

Fig.5 Thickness of each third-order sequence of Wenchang Formation of Xijiang Main Sag and faults distribution

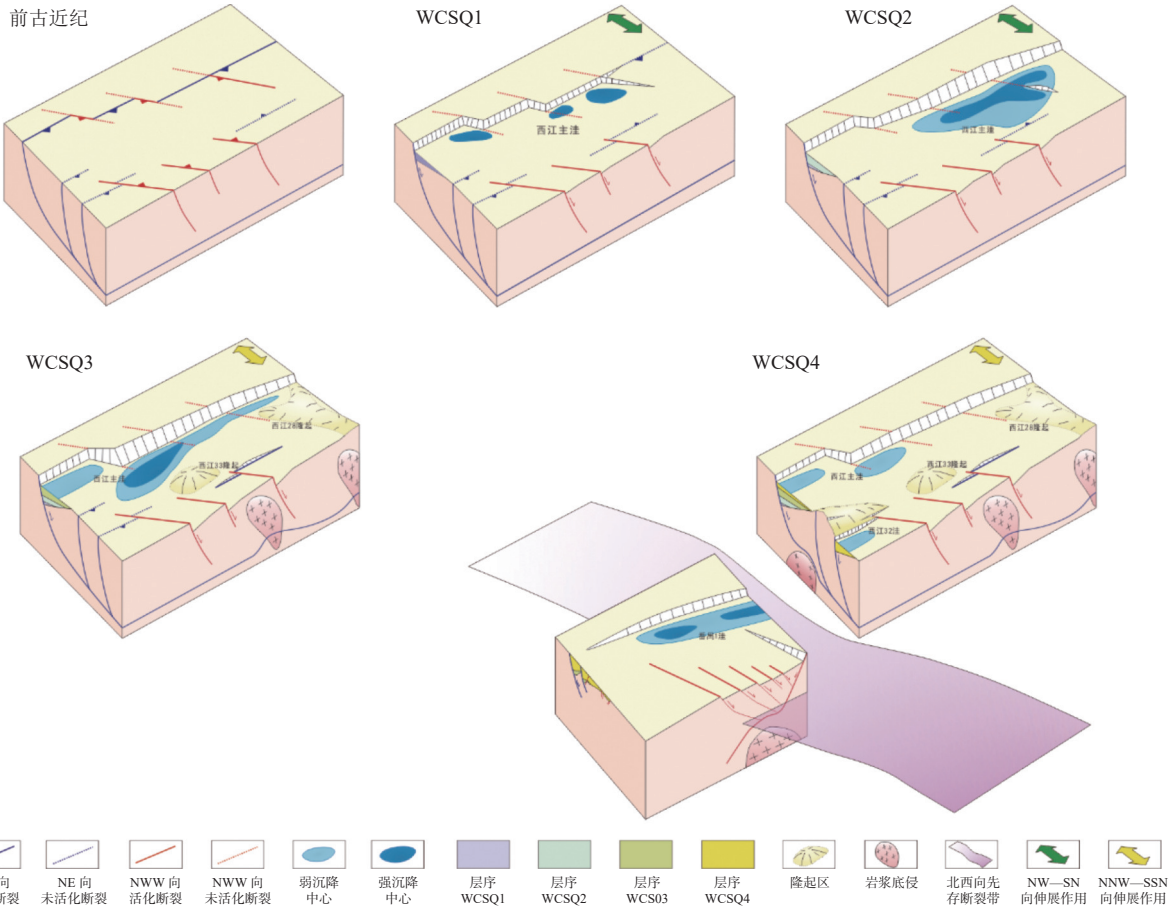


图6 西江主洼文昌期成盆演化模式

Fig.6 Basin formation and evolution model of Wenchang Formation in Xijiang Main Sag

(1)WCSQ1 裂隙初始期,受NW-SE向弱伸展作用影响,西江主洼北部NE向先存断裂和与之相交的NW向先存断裂发生活化作用,形成多组“Z”字型和“V”字型断裂,并产生多个小型的平行

控洼断裂走向的沉降中心。

(2)WCSQ2 强裂陷期,受 NW—SE 向强伸展作用影响,西江主洼 NE 向控洼断裂强烈活动,受东西段差异影响,总体表现出东强西弱特征,西江 33 东洼发生更大规模构造沉降,构造沉降作用明显大于西江 33 西洼,NW 向断裂由于与主应力方向小角度相交,伸展作用有限,对洼内的控沉积作用较弱,南部缓坡带的 NW 向断裂体系受强伸展作用影响发生活化,但断裂规模较小。

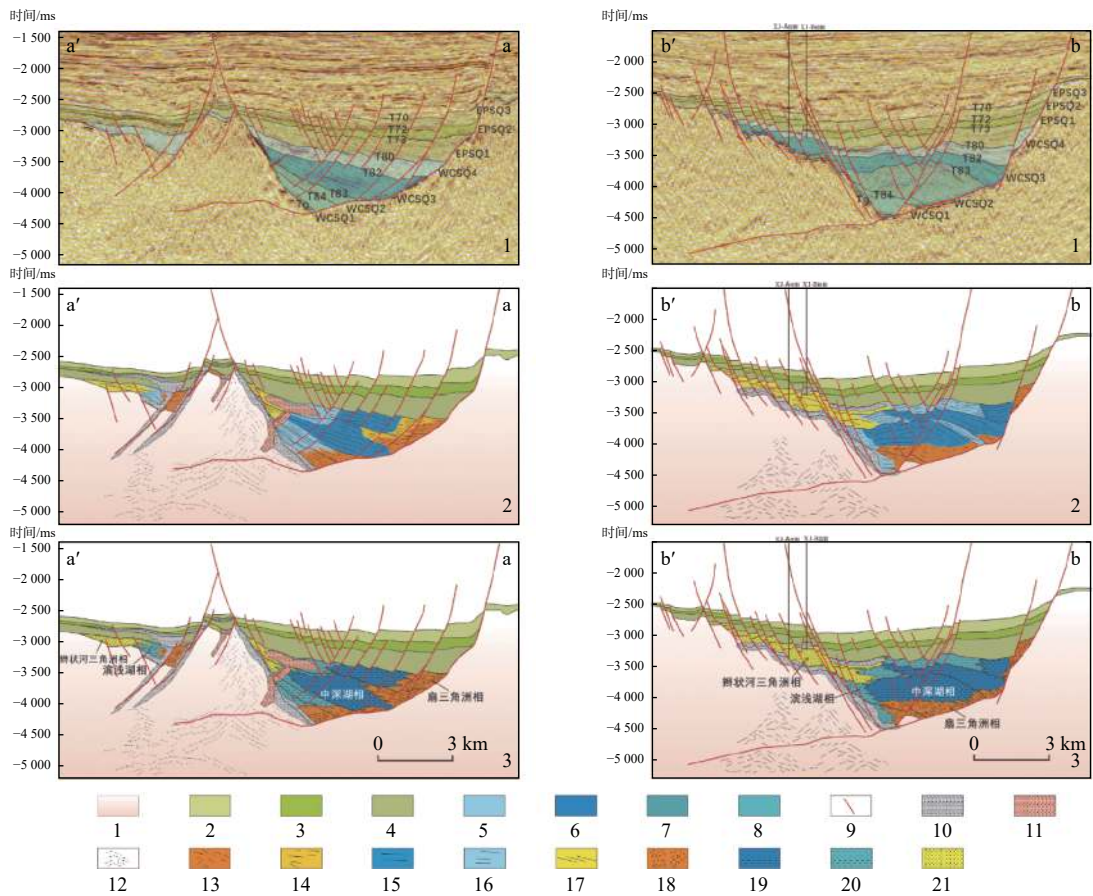
(3)WCSQ3 构造转换期,受惠州运动影响,印度-欧亚大陆开始硬碰撞、太平洋板块俯冲方向开始由 NNW 向变为 NWW 向<sup>[35]</sup>,造成主应力方向发生顺时针旋转,由 NW—SE 向变为 NNW—SSE 向,西江主洼 NE 向控洼断裂总体活动强烈。珠江口盆地多口钻井已经揭示,该时期(距今 43~41 Ma)发生多期岩浆活动<sup>[41]</sup>,基底断面可见明显波状上凸反射,显示出岩浆强烈侵入。在西江主洼东部及中部,

受岩浆底侵作用影响,发生了一定程度的构造隆升,并形成了西江 28 隆起和西江 33 隆起,造成西江 33 东洼沉降中心发育较为局限,紧靠控洼断裂呈长条状,该时期西江 33 西洼则以大范围构造沉降为主,成为西江主洼新的沉降中心(图 7)。南部缓坡带 NW 向断裂随主应力方向 NW—SE 向变为 NNW—SSE 向,断裂作用增强,并形成雁列式断层转换带。

(4)WCSQ4 裂陷晚期,受 NNW—SSE 向伸展作用的持续影响,西江主洼以西的 NW 向先存断裂带发生活化,并发生显著的构造沉降及隆升作用。具体表现为在西江主洼西部形成西江 32 洼、番禺 1 洼等一系列小型洼陷,并在西江主洼内西江 33 西洼和西江 32 洼之间形成西江 32 隆起。

### 4 层序响应特征

基于西江主洼成盆演化分析,西江主洼东部



1-基底; 2-EPSQ3; 3-EPSQ2; 4-EPSQ1; 5-WCSQ4; 6-WCSQ3; 7-WCSQ2; 8-WCSQ1; 9-断层; 10-推测火山岩; 11-推测侵入体; 12-隐伏底辟体; 13-空白-杂乱反射; 14-杂乱-弱连续反射; 15-席状低频连续强反射; 16-席状中低频中弱连续中等反射; 17-中弱连续前积反射; 18-扇三角洲相; 19-中深湖相; 20-滨浅湖相; 21-辫状河三角洲相

剖面位置见图 1

图 7 西江主洼地震相及沉积充填特征

Fig.7 Seismic facies and sedimentary filling characteristics of Xijiang Main Sag

在 WCSQ1 和 WCSQ2 时期优先强烈沉降, 随着区域应力场的变化, 至 WCSQ3 和 WCSQ4 时期, 构造沉降作用向西增强, 西江主洼西部成为新的洼陷中心。由于西江主洼钻井对文昌组地层揭示信息较为有限, 本次研究主要借助三维地震资料, 依据地震相及界面反射特征, 建立西江主洼文昌组“迁移型”三级层序格架, 结合区域动力学演化研究认识, 识别文昌组各三级层序的响应特征(图 8)如下:

(1)WCSQ1 裂陷作用较弱, 受 NE 向和 NW 向先存断裂不同程度的活化影响, 总体呈现多中心分段发育的特征(图 5、6), 沉积中心受控于多条断层, 地震上 WCSQ1 总体呈低频-弱连续-中强反射, 其内部同相轴产状与上下地层存在明显不同。

(2)WCSQ2 NE 向断裂活动强烈, 总体控制洼陷展布, 西江 33 东洼 NE 向断裂规模明显大于西江 33 西洼, 而西江 33 西洼 NE 向先存断裂受到多条 NW 向先存断裂错断, 呈分段特征(图 4), 因此, 在 NW-SE 向区域应力场作用下, NE 向控洼断裂东段优先裂开并形成沉降中心, 总体呈现出东厚西

薄、NE 向“窄条”状展布特征(图 5、8)。

(3)WCSQ3 WCSQ3 时期受区域主应力方向顺时针旋转, 西江主洼内 NW 向先存断裂以及西江主洼以西的 NW 向先存断裂带开始活化, 造成西江主洼西部构造沉降作用增强, 地层厚度增大, 同时西江主洼东部及中部发生隆起抬升作用, 地层厚度总体减薄。在区域构造活动的综合响应下, 洼陷沉降中心总体向西迁移使 WCSQ3 呈现出西厚东薄, NE 向席状展布的特征(图 5、8)。

(4)WCSQ4 WCSQ4 时期受 NW 向先存断裂带进一步活化影响, 裂陷作用向西增强特征明显, 西江 33 西洼以西的 32 洼及番禺 1 洼发生较强的裂陷作用, 形成以 WCSQ4 为层序主体、席状展布的晚期洼陷(图 5、6)。

西江凹陷北部构造差异活化作用使文昌组洼陷中心呈现向西迁移的特征, 这一特征与西江凹陷南部番禺 4 洼和西江 36 洼的层序特征一致<sup>[1,42]</sup>。受构造转换及层序迁移的影响, 西江主洼的沉积充填条件也呈现出动态变化的特征, 进而使烃源岩与储层的配置关系存在明显的时空差异。

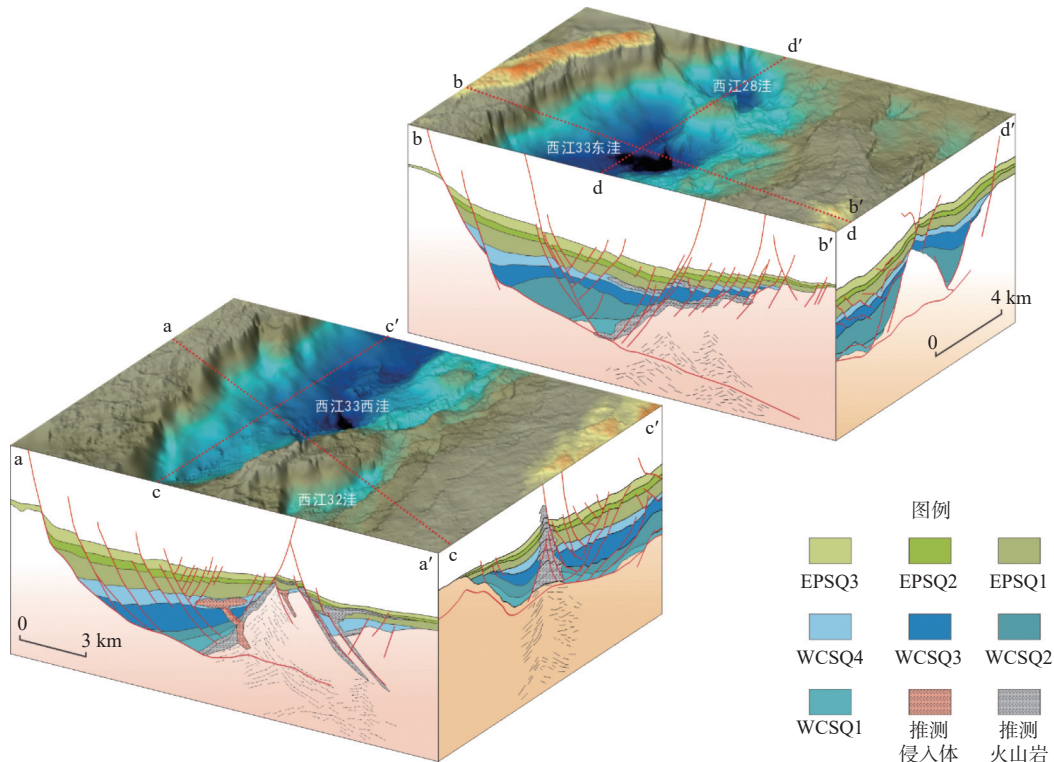


图 8 西江主洼洼陷结构及古近系层序地层格架

Fig.8 Sag structure and the Paleogene sequence stratigraphic framework of Xijiang Main Sag

## 5 西江主洼沉积充填特征

西江主洼的沉积物源主要自于缓坡带南部西

江中低凸起、两侧长轴带以及北部隆起带的中生代花岗岩。其中缓坡带以南西江中低凸起是西江主洼最重要的物源区, 沉积体系以长距离搬运的辫状河三角洲为代表, 北部隆起带受控洼断裂影响, 主



要发育近源沉积的扇三角洲体系, 两侧长轴带发育一定规模的辫状河三角洲体系, 洼陷中心主要发育湖相沉积。受西江主洼勘探程度所限, 目前钻遇文昌组地层的钻井主要集中在南部缓坡带, 主要揭示了 WCSQ3 和 WCSQ4 层序辫状河三角洲前缘亚相 (图 2), 而扇三角洲及湖相沉积体系尚未有钻井揭示, 本次研究通过类比同处西江凹陷、勘探研究程度较高的番禺 4 洼<sup>[1,42]</sup>, 进行地震相划分。各三级层序的沉积充填特征 (图 7、9) 如下:

(1)WCSQ1 西江主洼形成多个小型洼陷中心, 由于裂隙作用较弱, 沉积体系规模较小。扇三角洲主要发育在陡坡带, 以杂乱-空白相地震反射为主; 辫状河三角洲主要发育在各小型洼陷的缓坡及长轴带, 地震上以中频-中连续-中强反射、平行-亚平行, 席状为主, 由于物源输入作用有限, 缺乏前积特征; 洼陷中心则发育滨浅湖相, 以中频率-连续-中强反射地震相为特征。

(2)WCSQ2 受差异断裂作用影响, 西江 33 东洼构造沉降作用强烈, 可容纳空间迅速增大, 同时西江中低凸起以东地势较低, NW 向物源搬运通道

尚不发育, 使沉积物供应十分有限, 使西江 33 东洼呈现出“深湖窄盆、富泥少砂的”陡坡型”半地堑结构特征, 总体处于欠补偿还原环境。其中, 陡坡带裂隙作用强, 物源供应充足, 发育较大规模的扇三角洲相, 以杂乱-空白相地震反射为主。西江 33 西洼长轴带及南部缓坡带以西发育一定规模的辫状河三角洲, 地震上以中频-中连续-中弱反射, 可见小型前积特征。其中, 缓坡带以东地势较低, 物源供给有限, 沉积物以 NE 向断阶带向洼内搬运, 搬运量和搬运距离有限, 辫状河三角洲规模较小甚至不发育, 造成洼陷区以东主要发育中深湖相, 地震相表现出低频-(中)连续-中强反射特征。由于受晚期张扭作用影响, 东次洼中心发育明显的“负花状”构造, 形成丰富的断裂及微断裂, 因此, 推测烃源相的连续性受到一定程度的影响。洼陷区以西沉降作用较弱, 主要发育滨浅湖相, 地震相以中频率-中弱连续-中弱反射为特征。

(3)WCSQ3 受惠州运动影响, 西江主洼东部及中部的抬升剥蚀作用, 及西江 33 西洼的持续裂陷, 使洼陷中心总体向西迁移, 在 NNW-SSE 向应

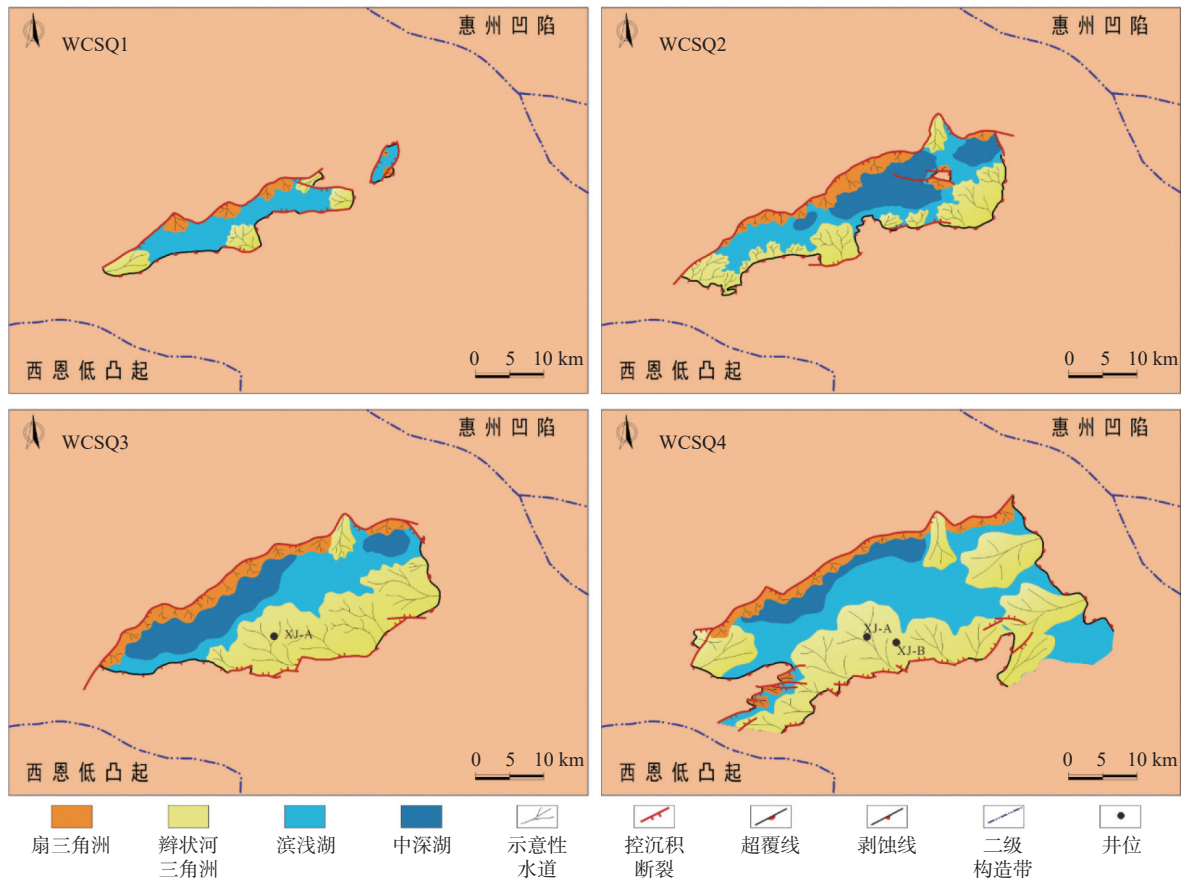


图 9 西江凹陷北部西江主洼文昌组各三级层序沉积相

Fig.9 Sedimentary facies of each third-order sequence of Wenchang Formation of Xijiang Main Sag in the northern Xijiang Depression

力场下,缓坡带 NW 向断裂持续活动形成的雁列式断层转换带可作为有利的输砂通道,来自西江中低凸起的大量物源碎屑顺转换带搬运至洼缘缓坡区,在构造-沉积共同控制下形成的深湖宽盆、砂泥共存的“坡坪式”半地堑特征。陡坡带受断裂作用影响发育较大规模的扇三角洲相,以杂乱-空白相地震反射为主,南部缓坡带发育大规模辫状河三角洲,地震上以低频-中弱连续-中弱反射为特征。顺物源方向可见大型前积结构,已钻井 XJ-A 井揭示为辫状河三角洲平原分流河道相,测井相呈低齿化箱状,总体富砂,沉积旋回以加积为主,厚度超过 150 m,岩性以中-粗粒长石-石英砂岩为主(图 2),西部长轴带由于晚期构造抬升,导致辫状河三角洲地层发生一定剥蚀,洼陷区以西近控洼断裂发育中深湖相,地震上为低频-连续-强反射特征,整体呈长条状 NE 向展布,洼陷区以东主要发育滨浅湖相,地震相以中频-中连续-中反射为主。

(4)WCSQ4 构造沉降作用减弱,受湖盆扩张影响,WCSQ4 整体呈现席状展布特征。陡坡带扇三角洲规模较 WCSQ2 和 WCSQ3 更小,地震相以杂乱-空白相地震反射为主,辫状河三角洲主要发育在西部长轴带和南部缓坡带,由于湖盆扩张,物源区范围明显减小,物源供给能力较 WCSQ3 明显变弱,总体表现主长距离推进、含砂率适中的特点,地震上以(中)低频-中连续-中弱反射为特征,顺物源方向可见楔形或弱前积反射结构,已钻井 XJ-A 井揭示为辫状河三角洲前缘水下分流河道-河口坝相,测井相有钟形、漏斗形及指状,砂泥互层,岩性以中-细粒长石-石英砂岩为主,受水动力改造作用影响,成熟度整体较 WCSQ3 更高(图 2),洼陷区陡坡带构造沉降作用仍然较强,推测发育中深湖相,地震相可类比 WCSQ2 和 WCSQ4,呈低频-连续-强反射特征,整体呈长条状 NEE 向展布,洼陷区主体发育滨浅湖相,地震相以中频-中连续-中反射为主。此外受岩浆活动影响,WCSQ4 在地震上局部可见强振幅响应特征,已钻井 XJ-B 井证实为岩浆岩(图 2b)。

综上所述可知,西江主洼文昌组各三级层序的沉积充填作用显著受控于构造活动,烃源岩和储集层的分布存在明显差异。洼陷区在 WCSQ2 和 WCSQ3 发育大范围中深湖相,总体处于欠补偿环境,是西江主洼最主要的 2 套烃源层。其中,西江主洼东部以 WCSQ2 中深湖相烃源岩为主,中深湖相面积积达 110 km<sup>2</sup>,最大厚度 1 500 m,平均厚度 787 m;西部以 WCSQ3 中深湖相烃源岩为主,中深湖相面

积达 130 km<sup>2</sup>,最大厚度 1 000 m,平均厚度 599 m。陡坡带发育扇三角洲储集体,受裂隙强度控制,在 WCSQ2 和 WCSQ3 最为发育,而缓坡带发育辫状河三角洲储集体,受物源区范围和沟谷体系发育条件控制,在 WCSQ3 和 WCSQ4 最为发育(图 9)。

## 6 结论与建议

(1)识别出 5 个层序界面、4 个三级层序。建立了西江凹陷北部受先存断裂差异活化及应力场转变主控的迁移型层序演化模式: WCSQ1 裂陷初期,多中心分段发育; WCSQ2 东部强裂陷期,东厚西薄、NE 向“窄条”状展布; WCSQ3 裂陷转换期,西厚东薄、NE 向席状展布, WCSQ4 裂陷萎缩期,近席状展布。

(2)西江主洼主要发育辫状河三角洲、扇三角洲、湖相 3 种沉积体系,各沉积体系展布明显受控于构造运动,建立重点三级层序 WCSQ2 深湖窄盆,富泥少砂,强裂陷“陡坡型”半地堑型和 WCSQ3 深湖宽盆,砂泥共存,“坡坪式”半地堑型的沉积充填模式。

(3)明确西江主洼古近系文昌组烃源-储层时空配置关系,中深湖相烃源岩主要发育于洼内 WCSQ2 和 WCSQ3,其中, WCSQ2 中深湖相烃源岩主要分布在东部, WCSQ3 中深湖相烃源岩主要发育在西部,辫状河三角洲储集体主要发育于缓坡带 WCSQ3 和 WCSQ4,扇三角洲储集体主要发育于陡坡带 WCSQ2 和 WCSQ3。

(4)建议将以 WCSQ3 烃源岩为主要贡献的 WCSQ3 和 WCSQ4 南部缓坡带以西的辫状河三角洲储集体,和 WCSQ2 烃源岩为主要贡献的 WCSQ2 和 WCSQ3 北部陡坡带大型扇三角洲储集体作为后续勘探工作的重点。

### 参考文献:

- [1] 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(4): 1-8.
- [2] 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(4): 12-23.
- [3] 代一丁.珠江口盆地西江南洼古近系构造演化与沉积特征[J].中国海上油气,2013,25(3): 1-7.
- [4] 丁亮,郭刚,郝建荣,等.珠一坳陷西江主洼古近系文昌组烃源岩特征及生烃潜力[J].中国海上油气,2015,27(5): 21-26.
- [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(6): 14-20.

- [6] 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(2): 149-156.
- [7] 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(1): 52-64.
- [8] 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(4): 75-84.
- [9] 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, 20(5): 287-292.
- [10] 曹爱武.西江主洼生油潜力分析[J].*中国海上油气(地质)*, 1999, 13(3): 54-57.
- [11] 赵鹏,彭光荣,吴静,等.珠一坳陷小型洼陷文昌组烃源岩发育模式与主控因素[J].*沉积学报*, 2022, 40(4): 1109-1121.
- [12] 黄峰,彭光荣,刘浩.珠江口盆地西江主洼主干断层活动强度及构造演化特征分析[J].*科学技术与工程*, 2017, 17(4): 168-174.
- [13] 陈玮常,张洪宇,全志臻,等.珠江口盆地西江主洼古近纪断裂构造与油气成藏[J].*东北石油大学学报*, 2020, 44(3): 57-69, 8-9.
- [14] 邓棚,梅廉夫,杜家元,等.珠江口盆地西江主洼低角度边界正断层特征及成因演化[J].*石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 606-616.
- [15] 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(6): 2199-2209.
- [16] 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(4): 97-104.
- [17] 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(6): 759-774.
- [18] 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(2): 158-168.
- [19] GILDER S A, LELOUP P H, COURTILOT 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:Biogeosciences*, 1999, 104(7): 15365-15390.
- [20] FAURE M, LEPVRIER C, NGUYEN V V, et al. The South China Block-Indochina collision: where, when, and how?[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79(A): 260-274.
- [21] LI J, YUEN D A. Mid-mantle heterogeneities associated with Izanagi Plate: implications for regional mantle viscosity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014(385): 137-144.
- [22] SINGSOUPHO S, BHONGSUWAN T, ELMING S A. Tectonic evaluation of the Indochina Block during Jurassic-Cretaceous from palaeomagnetic results of Mesozoic redbeds in central and southern Lao PDR[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92(10): 18-35.
- [23] MIYAZAKI T, KIMURA J I, SENDA R, et al. Missing western half of the Pacific Plate: geochemical nature of the Izanagi-Pacific Ridge interaction with a stationary boundary between the Indian and Pacific mantles[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(9): 3309-3332.
- [24] 崔宇驰,曹立成,乔培军,等.南海北部古近纪沉积物碎屑锆石U-Pb年龄及物源演化[J].*地球科学*, 2018, 43(11): 4169-4179.
- [25] 李付成,孙珍,张江阳.大洋板块运动方向反转控制活动陆缘岩石圈张裂过程数值模拟[J].*地球科学*, 2018, 43(10): 3762-3777.
- [26] 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.
- [27] 吕彩丽,张功成,杨东升.珠江口盆地珠一坳陷文昌组构造差异性动力学成因机制[J].*地学前缘*, 2017, 24(6): 333-341.
- [28] 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.
- [29] HALL R, HATTUM M V, SPAKMAN C W. Impact of India-Asia collision on SE Asia: the record in Borneo[J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1/4): 366-389.
- [30] ZHOU H M, LONG X, DONG Y X, et al. Geochemical and geochronological study of the Sanshui Basin bimodal volcanic rock suite, China: implications for basin dynamics in southeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(2): 178-189.
- [31] 包汉勇,郭战峰,张罗磊,等.太平洋板块形成以来的中国东部构造动力学背景[J].*地球科学进展*, 2013, 28(3): 337-338, 340-346.
- [32] YAN Q S, SHI X F, CASTILLO P R. The late Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea: a petrologic perspective[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 85(5): 178-201.
- [33] 任建业.中国近海海域新生代成盆动力学机制分析[J].*地球科学*, 2018, 43(10): 3337-3361.
- [34] CULLEN A, REEMST P, HENSTRA G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives[J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16(3): 273-282.
- [35] 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(3): 498-507.
- [36] 米立军,张向涛,陈维涛,等.珠江口盆地珠一坳陷古近系油气富集规律及下一步勘探策略[J].*中国海上油气*, 2018, 30(6): 1-13.
- [37] 施和生,舒誉,杜家元,等.珠江口盆地古近系石油地质[M].北京:地质出版社,2017: 50-103.
- [38] 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(3): 447-461.
- [39] 葛家旺,朱筱敏,雷永昌,等.多幕裂陷盆地构造-沉积响应及陆丰凹陷实例分析[J].*地学前缘*, 2021, 28(1): 77-89.
- [40] ZHU H T, LI S, SHU Y, et al. Applying seismic geomorphology to delineate switched sequence stratigraphic architecture in lacustrine rift basins: an example from the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum*



- Geology*, 2016, 78(4): 785-796.
- [41] 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, 48(4): 1-11.
- [42] 吴宇翔, 柳保军, 丁琳, 等. 珠江口盆地西江凹陷南部文昌组层序地层及沉积体系研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 146-158.

## Sequence stratigraphy and sedimentary filling characteristics of Wenchang Formation under the background of tectonic transformation in the northern Xijiang Depression of the Pearl River Mouth Basin

HUANG Xin, CHEN Weitao, WANG Wenyong, HE Ye

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** The unclear understanding of the relationship between source rock and reservoir in the Xijiang Main Sag restricts the local Paleogene oil and gas exploration. Based on seismic, drilling, paleontological and other data, five sequence boundaries and four third-order sequences were determined and identified. The migration sequence evolution model featured with differential activation of preexisting faults and transformation of regional stress direction was established. In the initial stage of rifting (represented by Sequence WCSQ1), multiple centers distributed. In the strong rifting period (WCSQ2), it was thick in the eastern part of sag but thin in the western, with a “narrow strip” in the northeast direction. In the rifting transition period (WCSQ3), it was thick in the western part but thin in the eastern and in sheet-shaped distribution in the northeast. In the stage of collapse and shrinking (WCSQ4), it shows sheet-like distribution. Three depositional systems of braided river delta, fan delta, and lacustrine facies were identified in the Wenchang Formation. Two major depositional filling styles were recognized. The first is “steep slope” half-graben with deep-lake narrow basin in the WCSQ2, being rich in mud and poor in sand; and the second is “slope flat” half-graben with deep-lake wide basin in the WCSQ3, in sand-mud coexistence. Meanwhile, the relationship between source rock and reservoir was clarified: the middle-deep lacustrine high-quality source rock was mainly located in the eastern part of the WCSQ2 and the western depression center of the WCSQ3; braided river delta reservoir is mainly developed in the gentle slope zones of the WCSQ3 and WCSQ4; and fan delta reservoir is mainly developed in the steep slope zones of WCSQ2 and WCSQ3.

**Key words:** Xijiang Main Sag; preexisting fault; basin forming evolution; third order sequence; sedimentary system