孙旭,孙永河,郑金云,等.珠江口盆地陆丰X洼断裂系统变形机制及其控洼-控源作用.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1986-1997. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240232.
Sun Xu,Sun Yonghe,Zheng Jinyun,et al. Deformation Mechanism and Its Depression Controlling-Source Controlling Effect of Lufeng X Sag Fault System in Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1986-1997. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240232.

珠江口盆地陆丰X洼断裂系统变形机制及其控洼-控源作用

孙 旭[1,2],孙永河[1,2],郑金云[3],蔡 嵩[3],张慧敏[3],李 明[1,2],魏建光[4]
1.重庆科技大学石油与天然气工程学院,重庆 401331
2.复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室,重庆 401331
3.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054
4.东北石油大学非常规油气研究院,黑龙江 大庆 163318

摘要:为明确珠江口盆地珠一坳陷陆丰X洼洼槽迁移特征,掌握烃源岩展布规律,基于三维地震资料,综合运用断裂活动期次的厘定、断距-位移曲线和平衡剖面等技术手段,对珠一坳陷陆丰X洼断裂变形机制及其对油气成藏的控制作用进行了研究。结果表明:陆丰X洼为由NE—NEE—NWW弧形断裂(F_1)控制形成的北断南超半地堑,洼内发育NE、NEE、EW三组走向的次级断裂;根据主干断裂分段特征和断裂组合样式将研究区分为东、西两个次洼;主干断裂多期活动,共经历了裂陷Ⅰ幕、裂陷Ⅱ幕和裂陷Ⅲ幕三期构造变形,在不同的变形特征控制下,盆内形成了早文昌期活动断裂、早文昌—恩平期活动断裂、晚文昌—恩平期活动断裂、恩平期活动断裂和长期活动断裂共五套断裂系统。成因上,陆丰X洼内断裂整体受控于基底NE—NEE—NWW向弧形先存逆冲-变换断裂体系,在成盆期,西次洼沿先存NE-NEE向断裂拉张发生伸展变形,东次洼沿先存NWW向走滑断裂发生张扭变形;变形过程中受断面改造的影响,西次洼形成了反向切割断裂,东次洼形成了"V"字形的特殊构造样式。控陷断裂均具有分段生长特征,控制沉积中心从西北向东南、由盆缘向盆内方向迁移的同时影响文三、文四段烃源岩的展布。

关键词:陆丰X洼;断裂活动强度;断裂系统;变形机制;控洼-控源作用;珠江口盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240232 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Deformation Mechanism and Its Depression Controlling-Source Controlling Effect of Lufeng X Sag Fault System in Pearl River Mouth Basin

Sun Xu[1,2], Sun Yonghe[1,2], Zheng Jinyun[3], Cai Song[3], Zhang Huimin[3], Li Ming[1,2], Wei Jianguang[4]

收稿日期:2024-09-27
作者简介:孙旭(2001—),女,硕士研究生,主要从事含油气盆地断裂控藏作用方面的研究,E-mail:1254432151@qq.com
通信作者:孙永河(1979—),男,教授,博士,主要从事盆地构造解析和油气成藏方面的研究,E-mail:syh79218@163.com
基金项目:国家自然科学基金项目(42472190);重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目(CSTB2022NSCQ-LZX0020);重庆英才创新领军人才项目(教育领域)(0255-19230101042);中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2022-0301)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (42472190), the Key Project of Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund of Chongqing (CSTB2022NSCQ-LZX0020), the Talent Innovation Leading Talent for Education Field of Chongqing (0255-19230101042) and the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2022-0301)

1. *College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing* 401331, *China*
2. *Chongqing Key Laboratory of Complex Oil & Gas Field Exploration and Development, Chongqing* 401331, *China*
3. *CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen* 518054, *Guangdong, China*
4. *Institute of Unconventional Oil & Gas, Northeast Petroleum University, Daqing* 163318, *Heilongjiang, China*

Abstract: Based on 3D seismic data, the mechanism of fault deformation and its control on hydrocarbon accumulation in the Zhu Ⅰ depression of Pearl River Mouth basin are studied by means of the determination of fault activity period, dislocation-distance curve and balanced section, in order to clarify the migration characteristics and distribution law of hydrocarbon source rocks. The results show that the Lufeng X sag is a north-south superhalf graben controlled by the NE－NEE－NWW arc fault (F_1), and the NE, NEE and EW trending secondary faults are developed in the depression. The study is divided into two sub-depressions, east and west, according to the segmentation characteristics of the main fracture and the fracture combination style. The main fault is active in multiple stages, and has undergone three stages of tectonic deformation: Rift－Ⅰ, Rift－Ⅱ and Rift－Ⅲ. Five fault systems, namely, long-term active fault, Early Wenchang-Enping active fault, Early Wenchang-Enping active fault, Late Wenchang-Enping active fault and Enping active fault, have been formed in the basin with different deformation characteristics. In terms of origin, the internal fault of Lufeng X sag is generally controlled by the NE－NEE－NWW-arc-shaped pre-thrust and transformation fault system of the basement. In the basin forming period, the west sub-depression has extensional deformation along the pre-existing NE－NEE trending fault, and the east sub-depression has tension-torsion deformation along the pre-existing NWW-trending strike-slip fault. In the deformation process, the west sub-depression has formed a reverse cutting fault due to the influence of section reconstruction. The east sub-depression forms a special structural pattern of "V" shape. The controlling subsidence faults all have the characteristics of segmented growth, controlling the migration of sedimentary centers from northwest to southeast and from the edge of the basin to the basin, and affecting the distribution of source rocks in the 3rd and 4th member of the Wenchang Formation.

Key words: Lufeng X sag; fault activity intensity; fault system; deformation mechanism; depression controlling-source controlling effect; Pearl River Mouth basin

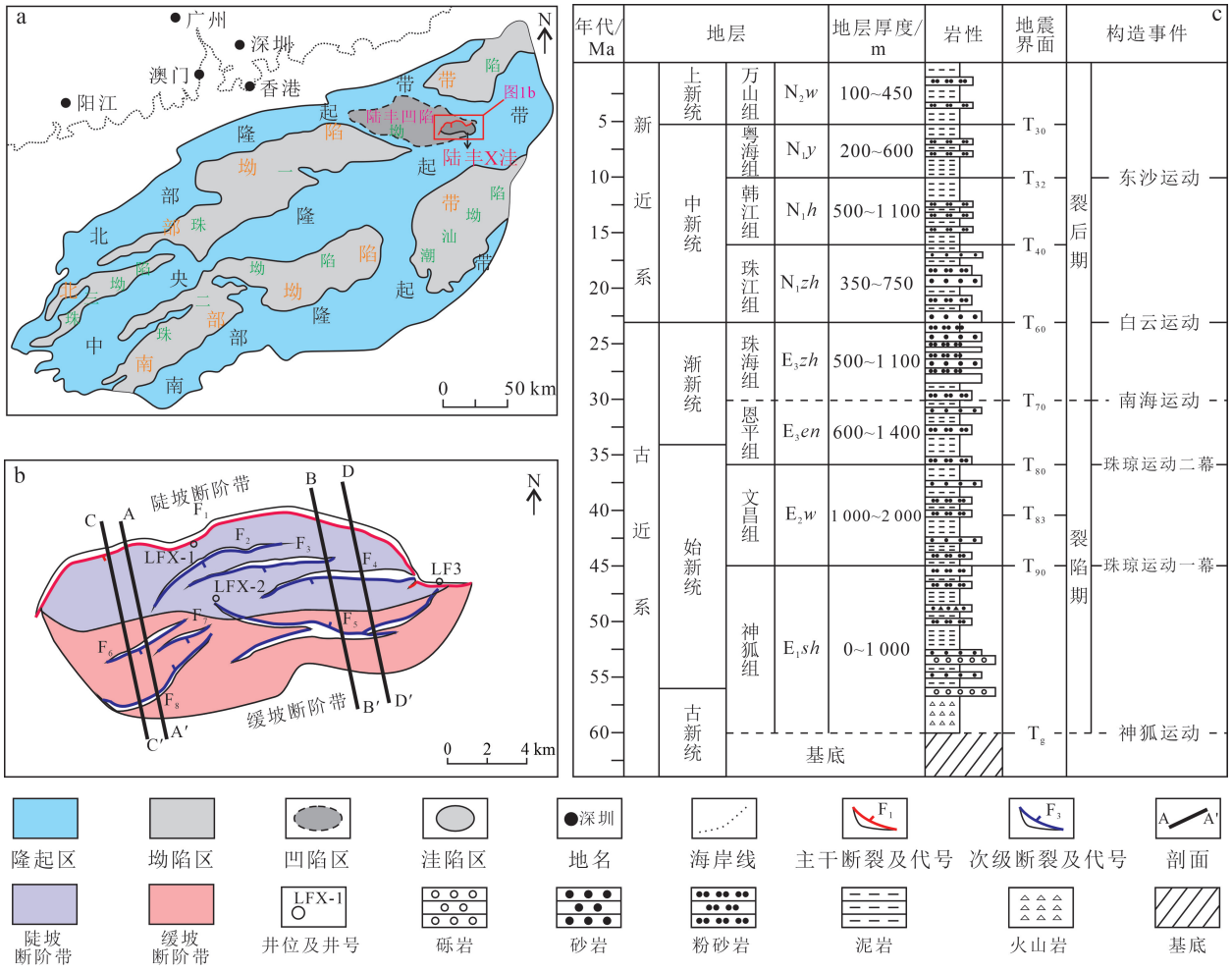
0　引言

珠江口盆地是我国南部地区发育的重要含油气盆地，经历了复杂的构造演化运动，内部断裂构造极其发育[1-2]。前人[3]研究表明，主干控陷断裂的发育具有分段性，表现为在平面上存在走向的差异以及不同走向段断裂的活动性不同等特征，主干断裂的分段特征及其生长过程对盆地内主要构造样式发育、洼槽沉积中心分布与迁移以及油气成藏等都具有重要的控制作用[4]。陆丰 X 洼为珠江口盆地珠Ⅰ坳陷内的低勘探边缘洼陷[5]，是中央隆起上重要的油气勘探领域之一，其断裂十分复杂，勘探程度较低，洼陷结构及演化东、西横向存在显著差异性[6]。

本文以珠江口盆地陆丰 X 洼为研究对象，在地震剖面精细解释的基础上，通过对断裂构造样式进行解剖和对断裂活动期次进行厘定，分析陆丰 X 洼断裂分段变形特征及生长活动性，探索主干断裂分段性对凹陷构造体系以及沉积中心的控制作用；以期揭示珠江口盆地断裂分段构造与油气成藏的内在联系，认识其基础石油地质条件并进一步推动其油气勘探进程。

1　区域地质概况

珠江口盆地是一个位于我国南海北部的伸展盆地[7-8]，主体呈 NE — SW 走向，经历了多期构造演化[9-10]，形成了隆起和坳陷交错排列的构造格局[11]。珠一坳陷位于珠江口盆地的北部，NE 向展布[12-13](图 1a)，自西向东依次发育恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷、韩江凹陷。陆丰凹陷作为珠一坳陷东北部的次级凹陷，富含丰富的油气资源[14]，其内部由多个独立洼陷组成，自西向东依次为惠州A洼、惠州B洼、陆丰C洼、陆丰D洼、陆丰



a 据文献[9]修编;b 据文献[5]修编。

图 1 珠江口盆地纲要图(a)、陆丰 X 洼 T_{83} 界面构造图(b)及综合地层柱状图(c)

Fig.1 Outline map of Pearl River estuary basin (a), structure map of T_{83} interface and comprehensive stratigraphic column map (c) in Lufeng X sag

E 洼和陆丰 X 洼。研究区陆丰 X 洼位于陆丰凹陷东南部,是发育于中央隆起之上的边缘型洼陷[15]。陆丰 X 洼为由弧形断裂(F_1)控制形成的北断南超半地堑[16],内部发育一系列与控洼断裂走向一致或相近、倾向一致或相反的次级断裂,构造上形成了南部的缓坡断阶带和北部的陡坡断阶带[17](图 1b)。

以南海运动发生的时间为界,珠江口盆地共经历了裂陷期和裂后期两大阶段。其中:在裂陷期发生了珠琼一幕和二幕两次构造运动[18],在伸展应力环境下沉积了文昌组和恩平组,文昌期伸展方向为 NNW — SSE 向,恩平期转为 S — N 向[19];在裂后期主要发生了白云和东沙两次构造运动,自下而上沉积了珠海组、珠江组、韩江组、粤海组和万山组(图 1c)[20]。最新钻井资料显示,探井在文昌组发现厚层烃源岩,并在多个层段均见良好的油气显示,展现该区较大的古近系勘探潜力,但目前该区勘探程度低,大大制约了勘探进程。

2 断裂几何学特征

2.1 平面展布特征

陆丰 X 洼经历了多期构造作用,断裂平面组合特征较为复杂,呈现出单条断裂规模较小且多走向的构造样式(图 2a)。文昌期断裂平面分布显示,该期主要发育 NE 向、NEE 向和近 EW 向三组走向断裂(图 2b)。

主干断裂 F_1 最为复杂,在平面上呈现 NE — NEE — NWW 向弧形结构,且过渡较快,规模较大,根据不同走向自西向东可分为 F_{1-1}、F_{1-2} 和 F_{1-3} 段。陆丰 X 洼内部断裂多为 NE — NEE 向,少量为近 EW 向。NE 向断裂在洼内广泛分布,其中西部和

中部 NE — NEE 向断裂呈现大规模、断续状、不均匀分布的特征，而东部呈现规模较小、密集发育、杂乱分布的特征。NEE 向断裂主要在中部发育，延伸长度较长，发育较稀疏，密度较小，F_2、F_3、F_4 断裂在平面上走向为 NEE 向，呈现雁列式排布，单条断裂规模较大、性质相近。近 EW 向断裂主要发育在洼内南部（图 2b）。

2.2　剖面构造样式特征

对典型剖面进行精细解析后发现，陆丰 X 洼整体为典型的箕状半地堑，根据断裂构造样式的差别，可将陆丰 X 洼分为东、西两个次洼。

西次洼表现为典型的伸展断裂组合样式（图 3a），主干控陷断裂 F_1 为坡坪式形态，倾角较小，控制次洼的整体结构。内部发育多条产状相同的板式正断层，其中 F_8 与主干断裂对倾并将其切割，形成错断式形态（图 3a）。地层展布方面，受 F_1 断裂控制，文昌组为箕状半地堑，下文昌组沉积厚度远大于上文昌组；恩平组均匀沉积，整体呈席状分布。

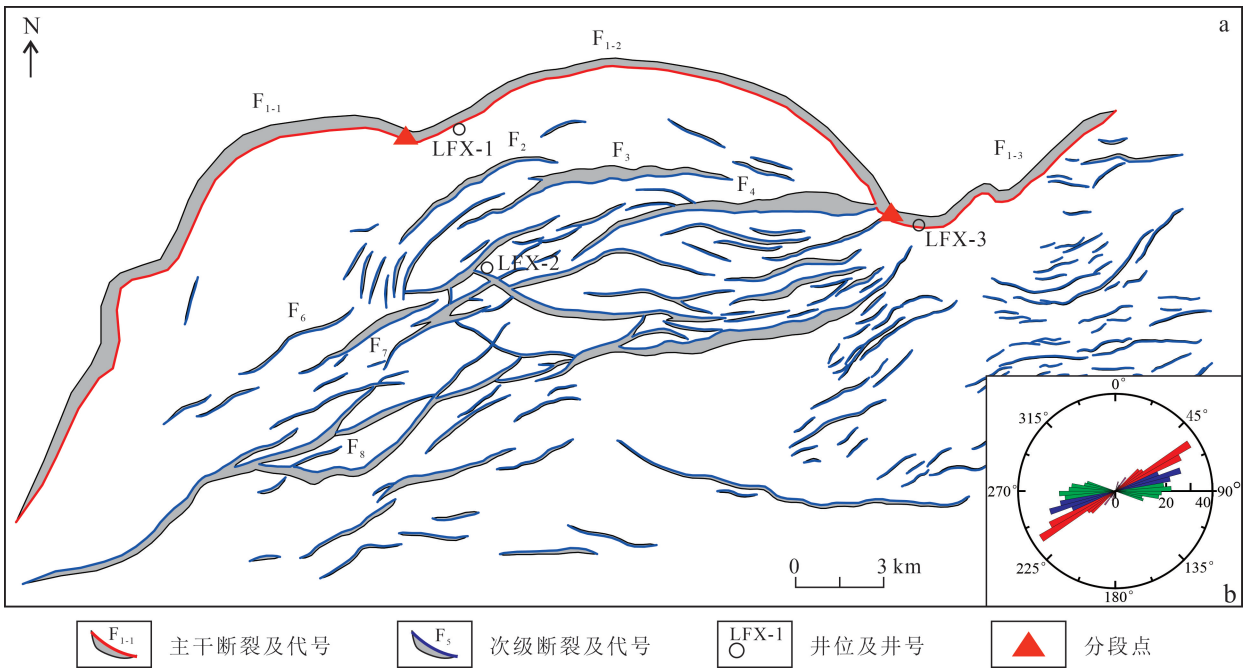
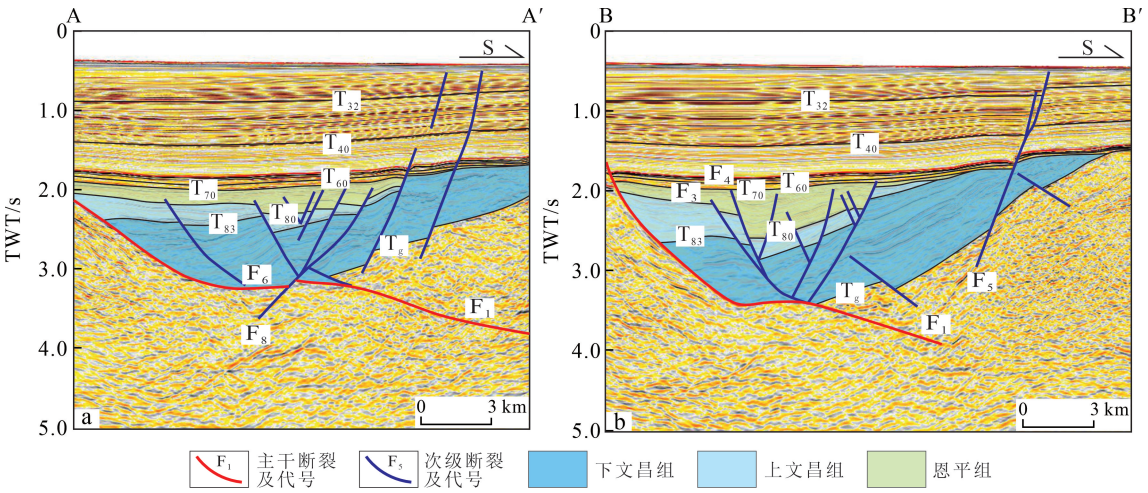


图 2　陆丰 X 洼 T_{80} 界面断裂平面分布图（a）和断裂走向玫瑰花图（b）

Fig.2　Fault plane distribution diagram of T_{80} interface (a) and fault trend rose diagram (b) in Lufeng X sag



剖面位置见图 1。TWT. 双程旅行时。

图 3　陆丰 X 洼西次洼（a）和东次洼（b）典型剖面图

Fig.3　Typical profile of Western subdepression (a) and Eastern subdepression (b) in Lufeng X sag

东次洼内(图3b)主干断裂F_1断穿多个层位且断距较大,形态仍为坡坪式形态,并与相邻同倾次级断裂构成铲式扇组合。洼陷内部发育次级断裂数量较多,且对倾形成独特"V"字形结构(图3b)。文昌组展布特征与西次洼相似,仍为半地堑,但受对倾的"V"字形组合的次级断裂控制;恩平组局部展现为地堑结构。

3 断裂活动特征及形成演化历史

3.1 主干断裂活动特征

断裂作为伸展断陷盆地内的构造要素之一,其活动规律的研究对油气勘探具有重要的现实意义,本文利用活动速率和断距-埋深曲线对研究区的主干断裂开展活动性定量研究[21]。

活动速率结果(图4)表明,研究区主干断裂F_1为断陷期强烈活动断裂。平面上,文昌期F_{1-2}段断裂活动速率大于F_{1-1}和F_{1-3}段;而在恩平期,F_{1-3}段活动速率明显大于F_{1-1}和F_{1-2}段,并且F_{1-3}段恩平期活动速率大于文昌期。整体来看,垂向上F_1活动速率呈现由强变弱的特征,即在下文昌组活动速率最大,达到峰值,上文昌组次之,到恩平组活动速率有所回落。

断距-埋深曲线(图5)表明,F_1断裂断距由浅至深逐渐增大,在不同地质时期活动强度存在显著差异。下文昌组断裂活动强度最大,断距最大值发育于T_g界面,其中:F_{1-1}和F_{1-2}段仅仅断穿至恩平组,

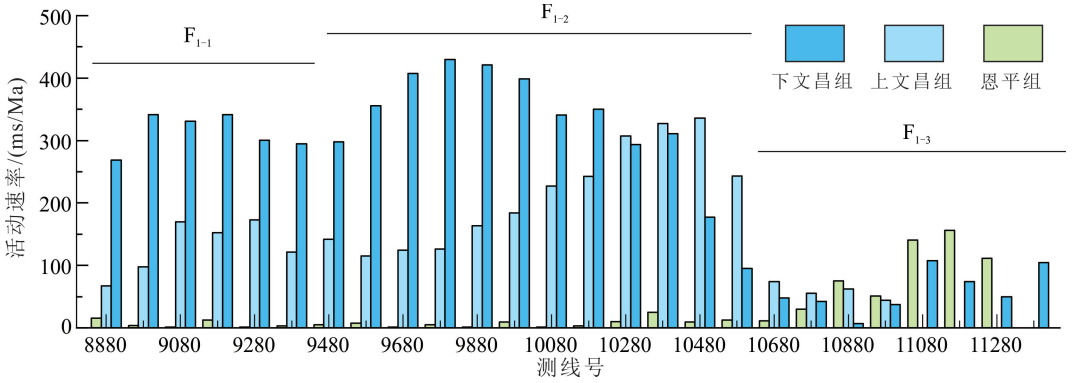


图4 陆丰X洼F_1断裂活动速率图

Fig.4 F_1 fault activity rate of Lufeng X sag

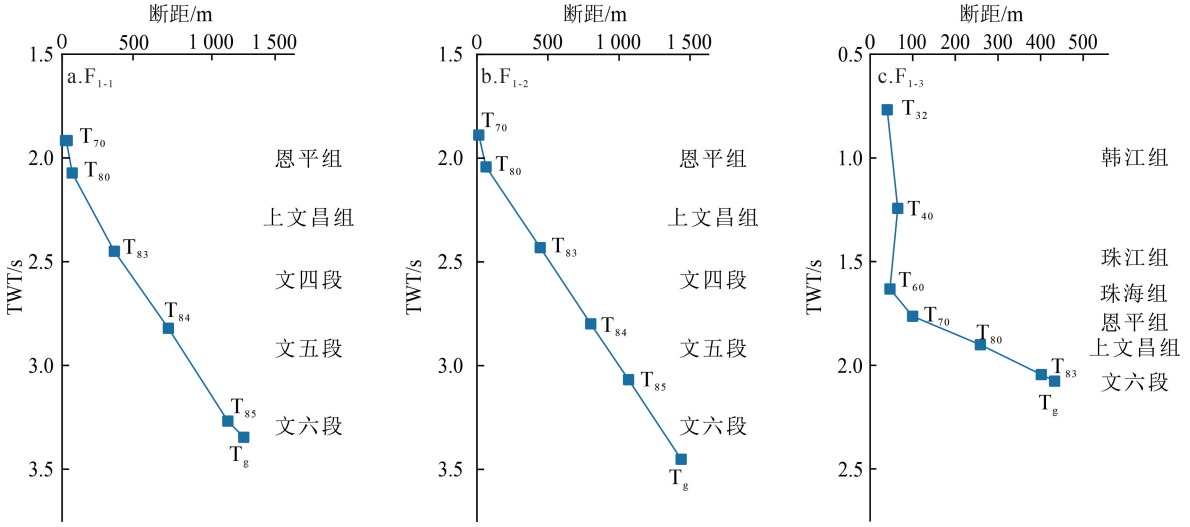


图5 陆丰X洼F_1断裂断距-埋深(双程旅行时)曲线图

Fig.5 Offset distance and burial depth (TWT) of F_1 fault in Lufeng X sag

恩平组向上基本不活动，在 T_{70} 界面断距几乎为 0；F_{1-3} 段垂向上贯穿所有层位，由 T_{60} 界面将断裂分成上下两部分，上部断距最大值出现在 T_{40} 界面，对应韩江组，下部断距最大值出现在 T_g 界面，但明显小于 F_{1-1} 和 F_{1-2} 段。整体来看，F_{1-1} 和 F_{1-2} 段仅在断陷期活动，但断穿深度深，活动规模大；F_{1-3} 段垂向上两期活动，活动时间长，但活动规模小。

3.2　断裂演化历史

陆丰 X 洼地区古近系的发育大致经历了 2 个阶段，即文昌组和恩平组沉积时期的快速沉降期和珠海组沉积时期的整体缓慢沉降期[22]。陆丰 X 洼整体的构造演化过程与陆丰凹陷一致，共经历了神狐运动、珠琼一幕、珠琼二幕、南海运动、白云运动和东沙运动六次大型构造运动[23]。神狐运动为陆丰凹陷地层沉积提供基础，之后进入珠琼运动；陆丰 X 洼经历了裂陷Ⅰ幕（下文昌组沉积时期）、裂陷Ⅱ幕（上文昌组沉积时期）和裂陷Ⅲ幕（恩平组沉积时期）三幕构造运动[24]，伸展强度为“强—弱—强”的模式，对应的断裂活动强度也存在旋回性强弱的变化，陆丰 X 洼主干断裂由东至西也有一定的差异性。

陆丰 X 西次洼（图 6a）在裂陷Ⅰ幕（文六段—文四段沉积期）开始进入断陷发育阶段。文六段初始时期主干断裂伸展生长形成铲式断裂形态，沉积地层厚度大；在文五段沉积后，断面发生了轻微弯曲，与主干断裂对倾的次级断裂开始发育，形成“V”字形结构；文四段沉积后，反向次级断裂开始伸展变长，主干断裂被反向次级断裂切割，地层发生旋转；在上文昌组沉积后（裂陷Ⅱ幕），地层旋转更加明显，地层沉积厚度薄，主要集中在主干断裂下降盘；在恩平组沉积后（裂陷Ⅲ幕），主干断裂控制恩平组均匀沉积的同时发育一系列次级断裂，控制沉积了恩平组，导致沉积中心向南部转移；珠江期之后，地层沉积均匀厚度变化不大，少数部位出现新生断裂。

陆丰 X 东次洼（图 6b）在裂陷Ⅰ幕（文六段—文四段沉积期）进入断陷发育阶段。文六段沉积时期主干断裂呈现板式形态，控制着地层沉积，与此同时洼内发育一系列板式正断层；文五段沉积后，主干断裂发生轻微形变呈铲式，地层沉积中心向洼内迁移；文四段沉积后，主干断裂发生强烈变形，呈坡坪式形态，地层沉积厚度薄，洼内发育与主干断裂对倾的次级断裂，形成“V”字形结构；上文昌组沉积后（裂陷Ⅱ幕），主干断裂控制上文昌组呈楔状展布，受地层旋转的影响，沉积范围变窄，洼缘次级断裂活动强度变弱；进入恩平组沉积后（裂陷Ⅲ幕），“V”字形结构断裂持续活动，形成次级断裂的同时控制恩平组沉积，此时主干断裂控陷作用变弱，但整个洼陷仍为北断南超的半地堑结构；珠江期之后，东次洼与西次洼演化过程相似，接受地层均匀厚度的席状地层沉积，断裂几乎不活动。

4　断裂系统划分及变形机制

4.1　断裂系统划分

依据断裂发育时期及形成演化过程，可将陆丰 X 洼内断裂划分为五套断裂系统：早文昌期活动断裂、早文昌—恩平期活动断裂、晚文昌—恩平期活动断裂、恩平期活动断裂和长期活动断裂（图 7）。不同类型断裂系统在剖面组合样式、平面分布等方面存在较明显差异。陆丰 X 洼断裂系统分布见图 8。

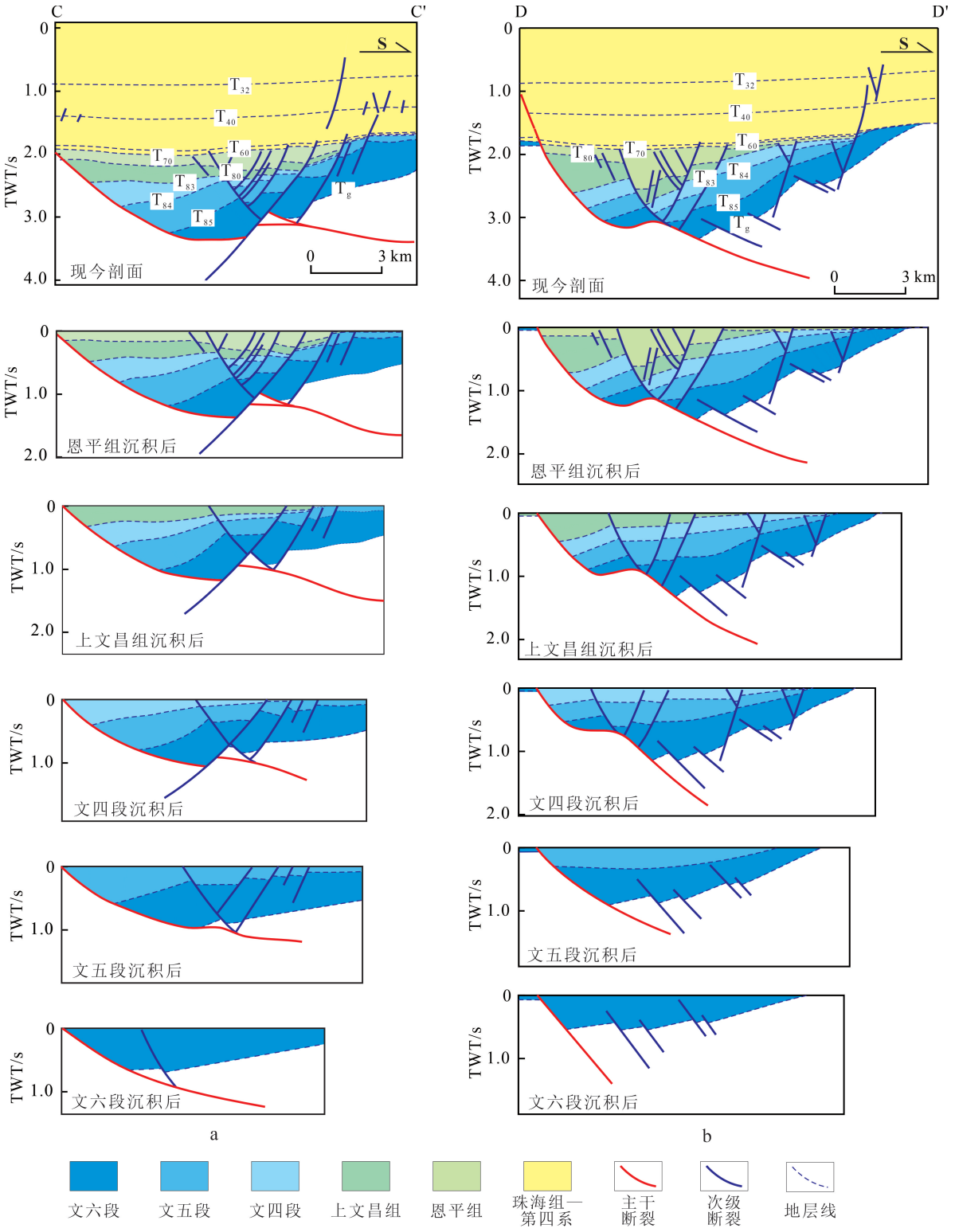
早文昌期活动断裂主要发育在陆丰 X 洼南部缓坡带上（图 8a），剖面上呈板式排列（图 7），对地层沉积控制作用不明显，主要起调节作用。

早文昌—恩平期活动断裂从早文昌期开始启动，活动至恩平期，平面上可以看出在整个裂陷期活动（图 8）。该断裂主要发育在西次洼和东次洼东部区域，走向多为 NE 向，在西次洼地区断裂规模较大，分布范围广泛，延伸长度较长，在东部地区断裂规模小，分布密度大。

晚文昌—恩平期活动断裂在晚文昌期开始启动，活动至恩平期（图 8b），分布在陆丰 X 洼中部，走向为 NEE — EW 向，平面上呈右阶雁列式排布，断层规模大，剖面上对恩平组沉积控制作用明显（图 7）。

恩平期活动断裂形成于恩平组沉积时期，主要分布在陆丰 X 洼中部和东部（图 8b、c），在陆丰 X 洼中心断层规模稍大，在洼槽边缘断层规模小，密度大，主要走向为 NEE —近 EW 向。

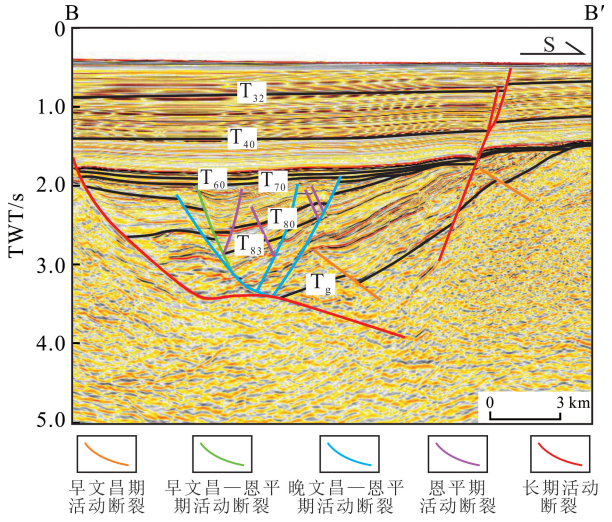
长期活动断裂主要为分布在陆丰 X 洼北部边界的主干断裂（图 8），剖面上断层面呈低角度铲状向深部逐渐延伸，规模大，持续活动性强，断穿至恩平组，控制着整个洼陷的发育。其余长期活动断裂分布在南部缓坡带上（图 8d），平面延伸范围广，走向为 NEE 向，剖面上穿层性强，可以断穿至裂后期，对地层沉积作用控制较弱，多与主干边界断裂对倾，断面呈板式形态（图 7）。



剖面位置见图1。

图6 陆丰X洼西次洼(a)和东次洼(b)典型剖面构造发育史

Fig.6 Development history of typical profiles of Western subdepression (a) and Eastern subdepression (b) in Lufeng X sag



剖面位置见图 1。

图 7　陆丰 X 洼剖面断裂系统划分

Fig.7　Profile fault system division in Lufeng X sag

4.2　断裂变形机制

平面上主干断裂 F_1 为 NE — NEE — NWW 向的弧形结构，剖面上具有低角度的特征，结合前新生代区域构造背景，推断其为先存逆冲-变换体系，在后续伸展应力环境下发生再活化控制整个洼陷的形成与演化。文昌期在 NNW — SSE 向的伸展应力下，西次洼内形成了一系列与主干断裂走向一致的 NE、NEE 向正交伸展断裂，并对地层沉积具有一定控制作用，作为次级控陷断裂在南部发育。值得注意的是，与主干断裂对倾的断裂在控制地层沉积的同时，还能反向切割主干断裂，形成特殊的错断型构造（图 9）。由于东次洼主干断裂走向为 NWW 向，在相同伸展应力场下发生了张扭变形，控制形成了一系列近 EW 走向呈右阶雁列排布的 R 破裂和 NE 走向的 T 破裂断裂，且伴生了与 R 破裂和 T 破裂配套的反向调节断裂。

综上所述，成盆期陆丰 X 洼不同走向的主干断裂在统一伸展应力场对应发生伸展、斜向伸展和张扭变形，导致西次洼为 NE — NEE 走向的伸展变形区，东次洼为 NEE — NWW 张扭断裂变形区；在演化过程中受主干断裂变形的影响，与次级断裂配合形成了特殊的“V”字形和错断型构造。

5　断裂生长活动性及控洼-控源作用

5.1　断裂活动速率

断距-位移曲线是明确断裂生长连接过程的有效手段[25-26]。在陆丰 X 洼全区选取典型断裂编制其断距-位移曲线，分析陆丰X洼断裂的生长方式

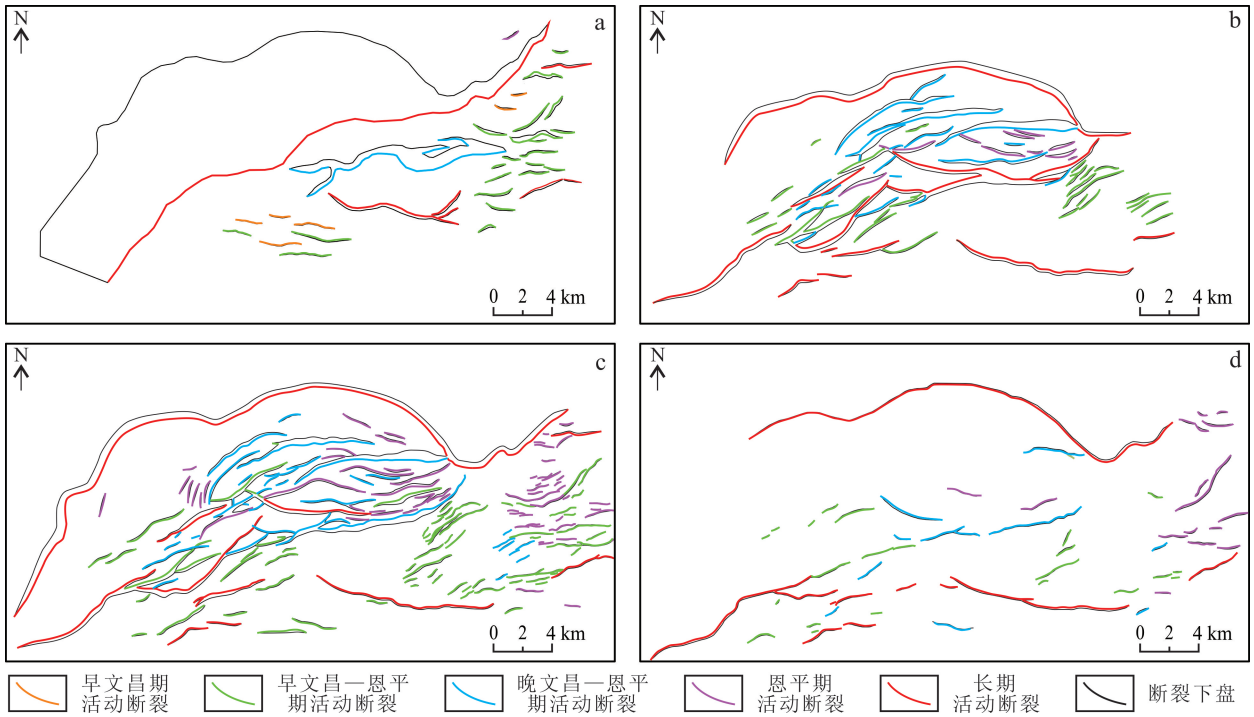


图 8　陆丰 X 洼 T_g(a)、T_{83}(b)、T_{80}(c)、T_{70}(d)断裂系统分布图

Fig.8　Fault system distribution of T_g(a), T_{83}(b), T_{80}(c) and T_{70}(d) in Lufeng X sag

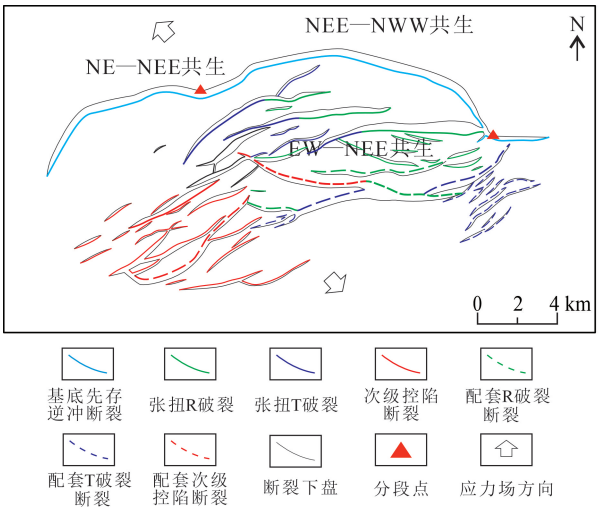


图9 陆丰X洼不同断裂体系分布图

Fig.9 Distribution map of different fault systems in Lufeng X sag

和活动强度。F_1为陆丰X洼主干断裂(图2),断距-位移曲线显示,F_1断裂通过分段生长连接而成。在文昌期,断距存在明显的低值点,即分段点[27],其将断裂分割成三段,与走向变化一致。其中F_{1-1}和F_{1-2}活动强度远大于F_{1-3}。在恩平期,F_1断裂可分成两段:F_{1-1}和F_{1-2}连接后作为一个整体,活动性明显降低,断距近似于0;F_{1-3}在恩平期持续活动,T_{80}界面断距大于T_{70}界面断距(图10a)。

平面上,断裂F_2、F_3、F_4呈右阶雁列排布(图2),断距-位移曲线显示单条断裂的曲线形状为"C"形,表明三条断裂为孤立生长断裂,其中F_4的活动强度明显高于F_2和F_3。F_2、F_3、F_4联合的断距-位移曲线中断距极小值代表三条断裂平面相互叠覆位置,断距最大值出现在T_{80}界面(图10b),即断裂在晚文昌期启动形成,活动时期晚于主干断裂。恩平期断裂继承性活动,但强度略微减弱。

综合上述分析,陆丰X洼边界断裂具有分段生长的特征,以及沿走向自西向东段活动的时间逐渐变晚、活动强度逐渐变小的特征。其分段活动与陆丰X洼内次级断裂的活动共同控制着陆丰X洼的差异变形。

5.2 断裂控洼-控源作用

断裂分段生长过程控制洼槽的形成及烃源岩的展布。由于断裂生长是一个动态的过程,因此陆丰X洼不同时期的次洼分布和烃源岩展布具有明显差异。

在早文昌期(图11a),受主干断裂分段生长的影响,陆丰X洼存在东、西两个次洼。其中F_{1-1}和F_{1-2}段断裂活动强烈,控制NE向西次洼和NEE向东次洼,此时沉积中心紧靠主干断裂分布。到了晚文昌期(图11b),陆丰X洼主干断裂活动强度变弱,西次洼内F_6、F_8断裂活动强度变大,西次洼沉积中心转由上述两条对倾断裂控制,向两条断裂中间迁移;东次洼内形成了NEE—EW向雁列式排布的次级断裂,且活动强度大,导致沉积中心由主干断裂控制转为F_3、F_4控制,沉积中心走向变为NEE—近EW向。恩平期(图11c),东、西次洼沉积中心继承晚文昌期发育,继续向洼内迁移,西次洼沉积中心仍呈NE向展布,东次洼沉积中心走向变为近EW向。总的来说,裂陷期陆丰X洼沉积中心形成从北向南由盆缘向盆内独特的迁移模式。

钻井揭示烃源岩主要发育在文三、文四段,用半深湖相范围代表烃源岩主力分布范围,从早、晚文昌期沉积中心与半深湖相叠合平面图(图11)可以看

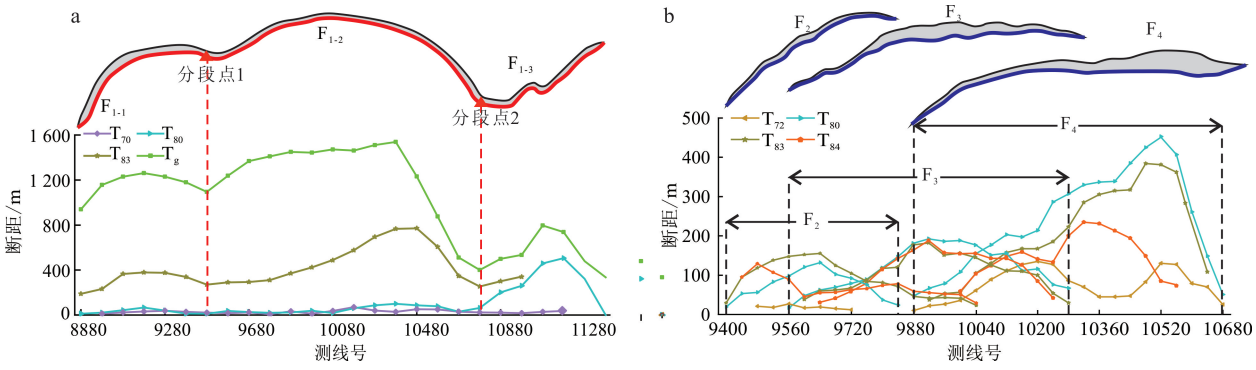
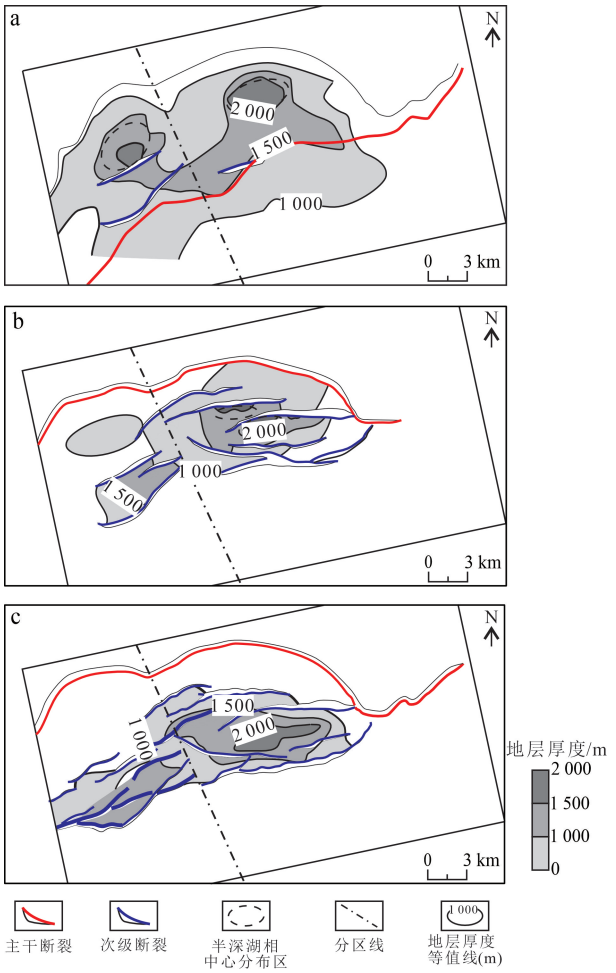


图10 陆丰X洼F_1断裂(a)和F_2、F_3、F_4断裂(b)断距-位移曲线图

Fig.10 Throw vs. distance curves of faults F_1 (a) and F_2, F_3, F_4 (b) in Lufeng X sag

出，厚度中心主要分布在洼槽内，展布方向与洼槽长轴具有良好的对应关系；说明断裂分段生长控制着洼槽沉积中心的迁移，也控制着烃源岩分布范围。



a. 早文昌期；b. 晚文昌期；c. 恩平期。

图 11　陆丰 X 洼洼槽沉积中心分布图

Fig. 11　Distribution map of trough depositional center in Lufeng X sag

6　结论

1）陆丰 X 洼是一个由弧形边界断裂控制形成的北断南超型半地堑，内部发育 NE 向、NEE 向和近 EW 向三组走向断裂。根据主干断裂分段性和洼内构造样式的差别，可将陆丰 X 洼分为东、西两个次洼。西次洼主干断裂呈铲式，并有反向断裂将其切割；东次洼主干断裂为板式，断裂上盘发育“V”字形构造。

2）断裂活动性分析和形成演化历史恢复结果表明，主干断裂在裂陷期强烈活动并具有分段性，整体上陆丰 X 洼在裂陷期共经历裂陷Ⅰ幕、裂陷Ⅱ幕和裂陷Ⅲ幕三个阶段，裂陷Ⅰ幕 NE — NEE 向断裂活动性强，控制快速沉积厚层箕状下文昌组；裂陷Ⅱ幕断裂持续活动，但活动性变弱，控制上文昌组较薄；裂陷Ⅲ幕，受应力场发生偏转，沉积中心向 EW 向断裂段附近迁移。

3）陆丰 X 洼内共发育五套断裂系统，受控于基底 NE — NEE — NWW 向弧形先存逆冲-变换断裂，成盆期先存断裂拉张形成 NE — NEE 伸展断裂变形区（西区）和 NEE — NWW 张扭断裂变形区（东区），伸展-斜向伸展过程中边界断裂发生形变导致形成了隆起顶部“V”字形构造和隆起侧翼反向切割构造。

4）陆丰 X 洼内控陷断裂具有分段生长的特征，控洼断裂的分段差异活动不仅控制了沉积中心从 NW 向 SE、由盆缘向盆内方向迁移，还进一步影响了烃源岩的展布。

参考文献（References）：

[1] 朱洁琼，李廷辉，廖飞燕，等.断裂分段特征对凹陷构造-沉积分异的控制作用：以北部湾盆地福山凹陷临高断裂为例[J].成都理工大学学报（自然科学版），2023，50(5)：637－646.
Zhu Jieqiong，Li Tinghui，Liao Feiyan，et al. The Controlling Effect of Fault Segmentation Characteristics on Tectonic-Sedimentary Differentiation in Depressions：A Case Study of Lingao Fault in Fushan Sag，Beibuwan Gulf Basin，China[J]. Journal of Chengdu University of Technology（Natural Science Edition），2023，50(5)：637－646.

[2] 王国强，张新涛，吕振宇，等.渤中凹陷石南一号断层分段和演化特征及其油气成藏控制作用[J].中国海上油气，2022，34(3)：38－48.
Wang Guoqiang，Zhang Xintao，Lü Zhenyu，et al. Segmentation and Evolution Characteristics of Shinan No. 1 Fault in Bozhong Sag and Its Controlling on Hydrocarbon Accumulation[J]. China Offshore Oil and Gas，2022，34(3)：38－48.

[3] Robsona A G，Holford S P，King R C，et al. Structuralevolution of Horst and Half-Graben Structures Proximal to a Transtensional Fault System Determined Using 3D Seismic Data from the Shipwreck Trough，Offshore Otway Basin，Australia[J]. Marineand Petroleum Geology，2018，89：615－634.

[4] Yu Y X, Zhang T L, Zhang Z T, et al. Structural Characteristics and Its Significances on Hydrocarbon Accumulation in the Yunkai Low Uplift, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(1): 21-29.

[5] 李晖.陆丰凹陷南北构造差异与裂缝发育特征[D].北京:中国石油大学(北京), 2022.
Li Hui. North-South Tectonic Differences and Fracture Development Characteristics in Lufeng Sag [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.

[6] 代一丁,牛子铖,汪旭东,等.珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J].石油学报,2019,40(增刊1):41-52.
Dai Yiding, Niu Zicheng, Wang Xudong, et al. Difference of Hydrocarbon Enrichment Regularities and Their Main Controlling Factors Between Paleogene and Neogene in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40 (Sup.1):41-52.

[7] 钟锴,肖张波,朱伟林,等.珠江口盆地陆丰凹陷西北洼原型盆地及迁移演化特征[J].海洋地质与第四纪地质,2024,45(1):1-10.
Zhong Kai, Xiao Zhangbo, Zhu Weilin, et al. Tectnonic Migration of Prototype Basins in Northwest Sub-Sag of Lufeng Sag, the Pearl River Mouth Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 45 (1):1-10.

[8] 朱伟林,张功成,高乐.南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J].石油学报,2008,29(1):1-9.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geolgical Characteristics and Exploration Objective of Hydrocarbons in the Northern Continental Margin Basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29 (1):1-9.

[9] 柳广弟,牛子铖,陈哲龙,等.珠江口盆地陆丰凹陷在洼陷迁移控制下的油气成藏规律 [J].石油学报,2019,40(增刊1):26-40,216.
Liu Guangdi, Niu Zicheng, Chen Zhelong, et al. Hydrocarbon Accumulation Patterns Controlled by the Migrated Subsags in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(Sup.1):26-40, 216.

[10] 施和生,何敏,张丽丽,等.珠江口盆地(东部)油气地质特征、成藏规律及下一步勘探策略 [J].中国海上油气,2014,26(3):11-22.
Shi Hesheng, He Min, Zhang Lili, et al. Hydrocarbon Geology Accumulation Pattern and the Next Exploration Strategy in the Eastern Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(3):11-22.

[11] 陈汉宗,吴湘杰,周蒂,等.珠江口盆地中新生代主要断裂特征和动力背景分析[J].热带海洋学报,2005,24(2):52-61.
Chen Hanzong, Wu Xiangjie, Zhou Di, et al. Meso-Cenozoic Fault in Zhujiang River Mouth Basin and Their Geodynamic Background [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(2):52-61.

[12] 刘强虎,朱红涛,舒誉,等.珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J].石油学报,2015,36(3):286-299.
Liu Qianghu, Zhu Hongtao, Shu Yu, et al. Provenance System and Their Control on the Peleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (3):286-299.

[13] 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.
Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Lei Yongchang, et al. Tectono-Sedimentary Development of Multiphase Rift Basins: An Example of the Lufeng Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1):77-89.

[14] 吴琼玲,彭光荣,肖张波,等.岩浆底辟改造型洼陷复杂结构特征及演化规律:以珠江口盆地陆丰22洼为例[J].吉林大学学报(地球科学版), 2023,53(4): 1048-1065.
Wu Qiongling, Peng Guangrong, Xiao Zhangbo, et al. Complex Structural Characteristics and Evolution of Magmatic Diapirism Reformed Subsag: A Case of Lufeng 22 Subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4):1048-1065.

[15] 张素芳,肖张波,邱欣卫,等.珠江口盆地东部陆丰22洼走滑断裂特征与成藏潜力分析[C]//2022年中国石油物探学术年会论文集:中册.海口:中国石油学会石油物探专业委员会,2022:36-39.
Zhang Sufang, Xiao Zhangbo, Qiu Xinwei, et al. Analysis of Strike-Slip Fault Characteristics and Reservoir Formation Potential of Lufeng 22 Sag in the Eastern Pearl River Estuary Basin [C]//Proceedings of the 2022 China Petroleum Geophysical Exploration Annual Conference: Volume Ⅱ. Haikou:SPG, 2022: 36-39.

[16] 葛家旺,朱筱敏,张向涛,等.珠江口盆地陆丰凹陷文

昌组构造-沉积演化模式[J]中国矿业大学学报，2018，47(2)：308－322.
Ge Jiawang，Zhu Xiaomin，Zhang Xiangtao，et al. Tectono-Sedimentary Model of the Eocene Wenchang Formation in the Lufeng Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2018，47(2)：308－322.

[17] 吴婷婷，张丽丽，吴哲，等.珠江口盆地前新生代先存断裂特征及动力背景：以惠州凹陷和番禺 4 洼为例[J].海洋地质前沿，2022，38(6)：54－62.
Wu Tingting，Zhang Lili，Wu Zhe，et al. Characteristics and Dynamic Background of Pre-Existing Fractures in Pre-Cenozoic of Pearl River Mouth Basin：Cases of Huizhou Sag and Panyu 4 Depression[J]. Marine Geology Frontiers，2022，38(6)：54－62.

[18] 汪成，陈冬霞，李洪博，等.珠江口盆地陆丰凹陷深部储层原生孔隙特征及发育机制[J].吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(1)：44－59.
Wang Cheng，Chen Dongxia，Li Hongbo，et al. Characteristics and Development Mechanism of Primary Pores in Deep Burial Reservoirs in Lufeng Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2023，53(1)：44－59.

[19] 纪凯，邓超，李博，等.珠江口盆地新生代裂陷形成和演化的时空差异性及其成因机制探讨[J/OL].地质科技通报.[2024－09－12]. https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240054.
Ji Kai，Deng Chao，Li Bo，et al. Spatial and Temporal Differences in the Formation and Evolution of Cenozoic Rifts in the Pearl River Estuary Basin and Their Genetic Mechanisms[J/OL]. Geological Science and Technology Bulletin.[2024－09－12]. https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240054.

[20] 汪晓鸾，马志超，张明振，等.歧口凹陷滨海地区断裂特征及其对油气成藏的控制作用[J].录井工程，2023，34(3)：139－146.
Wang Xiaoluan，Ma Zhichao，Zhang Mingzhen，et al. Fault Characteristics in the Coastal Area of Qikou Sag and Its Control on Hydrocarbon Accumulation[J]. Logging Engineering，2023，34(3)：139－146.

[21] 罗东红，梁卫，李熙盛，等.珠江口盆地陆丰 13－1 油田古近系恩平组突破及其重要意义[J].中国海上油气，2011，23(2)：71－75.
Luo Donghong，Liang Wei，Li Xisheng，et al. A Breakthrough of Paleogene Enping Formation and Its Important Significance in Lufeng 13－1 Oilfield，Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2011，23(2)：71－75.

[22] 吴琼玲，肖张波，雷永昌，等.珠江口盆地陆丰 22 洼岩浆活动地震响应及发育模式[J].华南地震，2023，43(2)：20－34.
Wu Qiongling，Xiao Zhangbo，Lei Yongchang，et al. Seismic Response and Development Model of Magmatic Activity in Lufeng 22 Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. South China Seismology，2023，43(2)：20－34.

[23] 张功成，米立军，吴时国，等.深水区：南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J].石油学报，2007，28(2)：15－21.
Zhang Gongcheng，Mi Lijun，Wu Shiguo，et al. Deepwater Area：The New Prospecting Targerts of Northern Continental Margin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica，2007，28(2)：15－21.

[24] 金凤鸣，张飞鹏，韩国猛，等.黄骅坳陷断裂发育特征及其对新生古储型潜山成藏控制作用[J].地学前缘，2023，30(1)：55－68.
Jin Fengming，Zhang Feipeng，Han Guomeng，et al. Fault Characteristics and Fault Control of Hydrocarbon Accumulation in "New Source，Old Reservoir" Type Buried Hills of the Huanghua Depression[J]. Earth Science Frontiers，2023，30(1)：55－68.

[25] 蔺鹏.陆坡逆冲-变换构造对重力流水道的控制作用：某区中新统深水沉积体系为例[J].海相油气地质，2023，28(1)：22－32.
Lin Peng. Control of Thrust-Transfer Structures on Gravity Flow Channels in Continental Slope：A Case Study of Miocene Deep-Water Depositional Systems in a Continental Slope，West Africa[J]. Marine Petroleum Geology，2023，28(1)：22－32.

[26] 刘露，孙永河，陈昌，等.南堡凹陷 4 号构造带断裂活化及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油勘探与开发，2022，49(4)：716－727.
Liu Lu，Sun Yonghe，Chen Chang，et al. Fault Activation of No.4 Structural Zone and Its Control on Oil and Gas Accumulation in Nanpu Sag，Bohai Bay Basin，China[J]. Petroleum Exploration and Development，2002，49(4)：716－727.