马凌,单玄龙,向绪洪,等.珠江口盆地白云凹陷裂陷期断裂活动特征与动力学机制.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1968-1985. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240237.

Ma Ling, Shan Xuanlong, Xiang Xuhong, et al. Fault Activity and Dynamic Mechanisms During the Rifting Stage in the Baiyun Depression of the Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1968-1985. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240237.

珠江口盆地白云凹陷裂陷期断裂活动特征与动力学机制

马 凌[1],单玄龙[1],向绪洪[2,3],郝国丽[1],张朋霖[1],闫 博[1],衣 健[1]

1.吉林大学地球科学学院,长春 130061
2.中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054
3.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054

摘要:珠江口盆地深水区白云凹陷构造特征复杂,勘探程度低,对凹陷内部断裂构造特征仍需深入研究,其裂陷期断层活动性及区域应力场动态演化亟需厘清。为揭示南海北部陆缘深水区白云凹陷裂陷期断裂活动特征及动力学机制,本文以珠二坳陷白云凹陷为例,基于最新的三维地震资料和地层解释方案,应用相干属性、古落差法等方法对白云凹陷的构造特征进行相关分析。研究表明:白云凹陷主要活动断裂划分为一级控盆断裂、二级控凹断裂、三级控带断裂;依据高精度的三维地震资料,在研究区识别出铲状断裂、阶梯状断裂、Y字形断裂、嵌套V字形断裂、似花状断裂5种断裂类型;平行式断裂、雁列式断裂、斜交式断裂、帚状断裂4种断裂组合样式。结合各时期断裂产状特征,定量统计507条断裂,进而分析区域应力场的动态演化并探讨其动力学机制。研究表明:在早始新世—晚始新世期间,断裂走向呈现NE—NEE—EW向顺时针旋转;结合断裂古落差分析,一级断裂的活动强度在逐渐减弱,同一时期不同断裂活动性及同一断裂在不同位置差异显著;研究区共发育早文昌、晚文昌和恩平组3期断裂活动。基于此,本文探讨了白云凹陷裂陷期动力学成因机制,同前人认为是印度—欧亚板块碰撞、太平洋板块俯冲后撤和古南海持续南移的耦合作用相互印证,形成了研究区典型的伸展拉张背景。

关键词:南海北部陆缘;珠江口盆地;白云凹陷;区域应力;断层活动性;断裂类型;组合样式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240237 **中图分类号**:P542;P618.13 **文献标志码**:A

Fault Activity and Dynamic Mechanisms During the Rifting Stage in the Baiyun Depression of the Pearl River Mouth Basin

Ma Ling[1], Shan Xuanlong[1], Xiang Xuhong[2,3], Hao Guoli[1], Zhang Penglin[1], Yan Bo[1], Yi Jian[1]

收稿日期:2024-08-30

作者简介:马凌(2000—),男,回族,硕士研究生,主要从事石油地质方面的研究,E-mail:maling22@mails.jlu.edu.cn

通信作者:单玄龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事非常规和深层油气地质方面的研究,E-mail:shanxl@jlu.edu.cn

基金项目:中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2021-0100)

Supported by the the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2021-0100)

1. *College of Earth Sciences*, *Jilin University*, *Changchun* 130061, *China*
2. *CNOOC Deepwater Development Limited*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*
3. *CNOOC China Limited*, *Shenzhen Branch*, *Shenzhen* 518054, *Guangdong*, *China*

Abstract: The Baiyun sag in the deepwater area of the Pearl River Mouth basin is characterized by complex tectonic features and low exploration levels. There is still a need for in-depth research on the fault structures within the sag, and the activity of faults during the rifting stage and the dynamic evolution of the regional stress field remains unclear. To reveal the fault activity characteristics and dynamic mechanisms during the rifting stage in the Baiyun sag of the northern margin of the South China Sea, this paper takes the Baiyun sag in the Zhu Ⅱ depression as an example. Based on the latest 3D seismic data and stratigraphic interpretation schemes, methods such as coherence attributes and ancient fault throw analysis are used to analyze the tectonic characteristics of the Baiyun sag. The main active faults in the Baiyun sag are classified into three levels: First-order basin-controlling faults, second-order sag-controlling faults, and third-order zone-controlling faults. Based on high-resolution 3D seismic data, five fault types were identified in the study area: Flower-like faults, imbricate faults, step faults, Y-shaped faults, and nested V-shaped faults. Four fault combination patterns were identified: Parallel faults, en-echelon faults, oblique faults, and broom-like faults. By quantitatively analyzing the characteristics of 507 faults across different periods, the dynamic evolution of the regional stress field and its associated dynamic mechanisms were further explored. The study shows that from the Late Eocene to the Early Oligocene, the fault orientations underwent a clockwise rotation from NE－NEE to EW. Based on the analysis of ancient fault throw, the activity intensity of the first-order faults gradually weakened, and significant differences were observed in the activity of different faults during the same period, as well as in different segments of the same fault. Three phases of fault activity were identified in the study area: The Late Wenchang, Early Wenchang, and Enping Formations. Finally, the paper discusses the dynamic mechanisms during the rifting stage of the Baiyun sag, which corroborates previous views that it was a result of the coupled effects of the collision between the Indian and Eurasian plates, the rollback of the Pacific Plate subduction, and the continuous southward migration of the ancient South China Sea. This formed a typical extensional tectonic background in the study area. By revealing the fault activity characteristics and dynamic mechanisms in the Baiyun sag, this study contributes to Eocene rifting-stage oil and gas exploration in the northern South China Sea and provides important insights for analyzing fault activity in similar basins.

Key words: northern margin of the South China Sea; Pearl River Mouth basin; Baiyun depression; regional stress; fault activity; fault types; combination patterns

0　引言

若盆地的形成经历不同的裂陷阶段，且该阶段被相对静止构造期（时间大于 10 Ma 的裂谷间隙）所分隔，那么这种盆地被称为多期裂陷盆地[1-4]。前人[5-8]已经证实亚丁湾、北大西洋北部及东非大裂谷等为多期应力叠加所形成的。南海北部陆缘亦是如此，前人[9-10]依据重磁、地震等资料证实南海北部存在 NNE－NE 向、NEE－EW 向、NW－NWW 向断裂。多期次裂陷盆地会导致盆地形成不同的断裂体系，识别断裂体系可以反映地壳的应力状况，并对盆地的结构及构造演化起到关键作用[11-12]。珠江口盆地位于南海北部大陆边缘中部，前人[13]研究认为珠江口盆地演化分为断陷期（始新世—渐新世）、坳陷期（早中新世—中中新世）、块段升降期（中中新世—第四纪），盆地主要经历两个主要的构造作用：其一是在古新世—中始新世期间，由于太平洋板块的俯冲作用，产生 NW—SE 的区域应力场，在盆地内形成大量 NE 向断裂；其二是在晚始新世—早渐新世，由于印支半岛的旋转及古南海的俯冲作用，致

使盆地内应力场发生顺时针旋转,使得应力场转变为NE—SE向[14-16],形成珠江口盆地如今“东西分段、南北分带”的构造格局[13,17-20]。

研究区位于珠二坳陷中部的白云凹陷,构造复杂,勘探程度亟待提高。前人对于白云凹陷的研究主要集中在沉积物物源[21-22]、沉积相类型[21,23]、源-汇特征、构造-沉积响应关系[22,24]、拆离体系[24]、沉积环境演化与控烃作用[24-25]等。还有一些学者[26]对白云凹陷断裂构造特征及活动期次进行过研究,但受限于先前地震及钻井资料不足或品质较低,致使白云凹陷内部断裂构造特征研究较为粗糙,对其裂陷期断层活动性的厘定及区域应力场动态演化的研究还有待深入。因此,本文基于最新的高精度三维地震资料,对白云凹陷裂陷期的断裂样式及平面组合进行详细分析,利用古落差法并结合高精细断裂走向统计对研究区主要同沉积断裂活动特征进行统计刻画,进而探讨白云凹陷区域断裂演化的动力学机制。通过揭示白云凹陷断裂活动特征及成因机制,有助于服务南海北部始新世裂陷期油气勘探,也为同类型盆地的断裂活动分析提供重要思路。

1 地质概况

南海北部陆缘盆地位于南海海盆以北、华南地块以南(图1a),构造成因复杂,现今主流观点认为该盆地是在印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞动力学体系及太平洋板块俯冲作用等多重因素下形成,因而该盆地构造特征复杂[9,27-28],形成众多的新生代盆地。

珠江口盆地位于南海北部大陆中部,是中国南海最大的新生代盆地,蕴藏着丰富的资源[20,29-34]。由于其特殊的构造环境,盆地内部断裂广布,结构复杂[35],盆地在众多构造运动(神狐运动、珠琼运动一幕、惠州运动、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动、东沙运动)下形成“三隆两坳”的构造格局,且盆地具有下断上坳、早陆晚海的特点。盆地自北向南依次为北部隆起带、北部坳陷带、中央隆起带、南部隆起带和南部坳陷带(图1b)。其中北部坳陷带包含珠一坳陷和珠三坳陷,南部坳陷带包含珠二坳陷。珠一、珠三坳陷位于陆架浅水区,珠二坳陷位于陆坡深水-超深水区,走向呈NE-NEE,大部分位于大陆坡上,水深超过200 m,处于减薄的陆壳和过渡壳上,从北到南地壳厚度不断减薄。

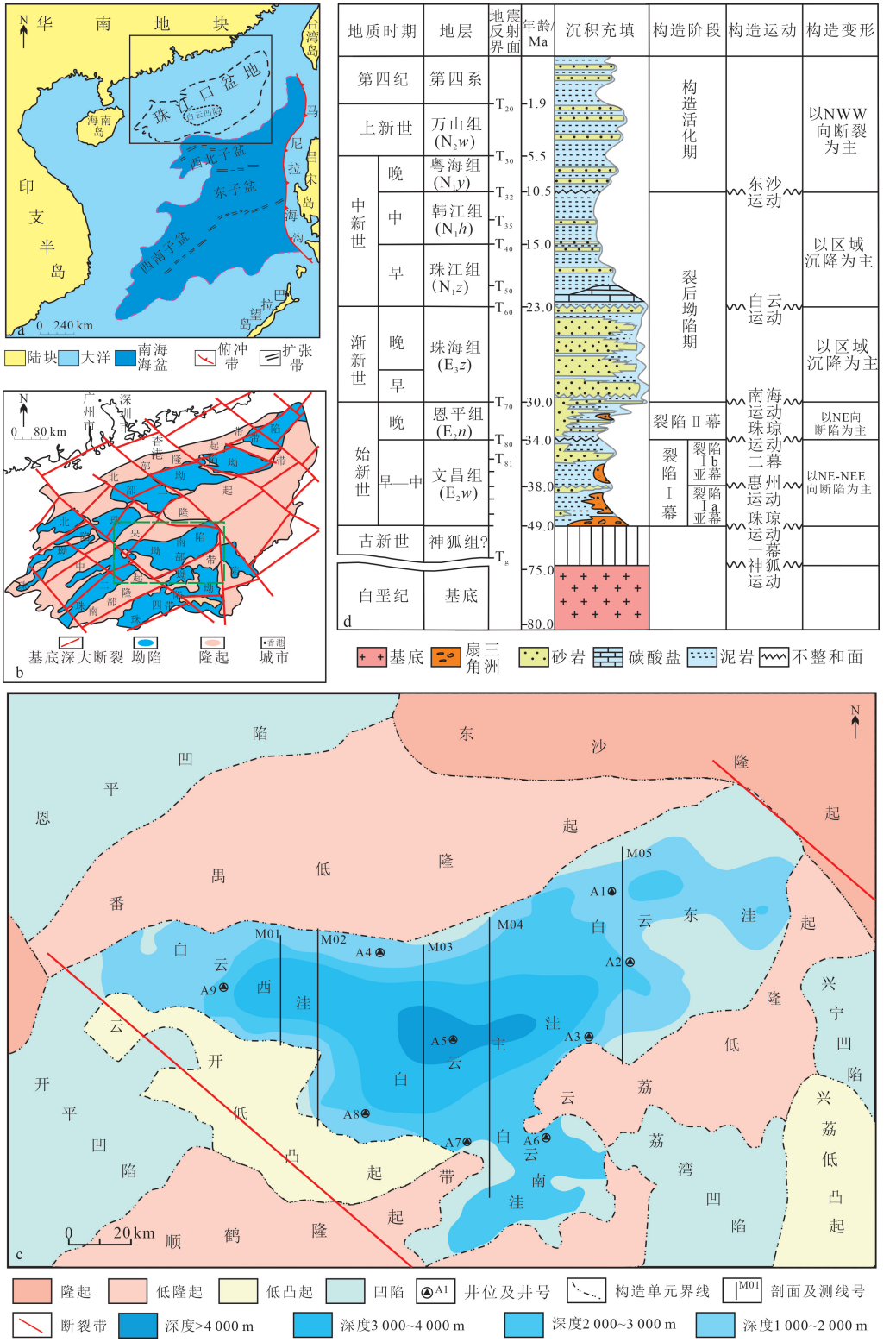
白云凹陷位于珠二坳陷中部,北邻番禺低隆起,西接云开低凸起,东连云荔低隆起,南靠顺鹤隆起带(图1c)。内部可分为4个次洼(主洼、东洼、西洼、南洼),面积约为25 000 km^2,沉积厚度大,探明油气资源丰富。白云凹陷具有“下断上坳”的结构特点,白云凹陷自下而上发育文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系(图1d)[36]。白云凹陷主要经历3个构造阶段:裂陷期(始新世—晚始新世)、裂后坳陷期(早渐新世—中中新世)、构造活化期(晚中新世—现今),裂陷期以T_{80}为界,分为裂陷Ⅰ幕和裂陷Ⅱ幕,对应地层为文昌组和恩平组,同时也是本文研究的主要地层。而裂陷Ⅰ幕又可以进一步划分为裂陷Ⅰa亚幕和裂陷Ⅰb亚幕,界限为T_{83}[15-16]。

2 断裂几何学特征

2.1 断裂分级

断裂活动是一个相对复杂的过程。以往研究尚未精细划分断裂级别,极易对后续研究包括层序划分、结构识别、油气分布等产生一定阻力和混淆[37]。因此,对白云凹陷断裂分级刻不容缓。本文基于最新三维地震资料及地层解释方案,采用文六段(T_{85})、文五段(T_{84})、文四段(T_{83})、文三段(T_{82})、文二段(T_{81})、文一段(T_{80})、恩四段(T_{73})、恩三段(T_{72})、恩一二段(T_{70})等界面的同沉积断裂限定分级规则,并基于断裂的规模、发育程度及对盆地的影响程度将断裂划分为一级控凹断裂、二级控洼断裂、三级控带断裂三个等级(图2)。

1)一级控凹断裂:该类型断裂通常控制盆地的沉积,且延伸距离非常大,断层活动性十分强烈,可从基底活动到浅层,控盆控沉积作用显著。研究区内部共识别出7条一级断裂,在地震剖面上可以看到这些断裂均贯穿了基底(图3),并向上切割整个文昌组、恩平组,且断裂断距相比于同时期断裂,断距也达到了最大,其形成原因可能是由于基底先存断裂复活所导致。盆地内部一级断裂大多呈NE和NEE向展布,主要分布在主洼及南洼,仅F_4、F_7断裂呈EW向分布,分别分布在西洼及东洼。断裂F_4位于研究区西洼,平面延伸超过10 km,控制了西洼的形成与展布;断裂F_2、F_3、F_5位于研究区主洼,平面上延伸距离均超过10 km,其中F_2延伸距离最大,达到了30 km,这3条断裂主要控制了主洼的形成与展布;F_1断裂位于研究区南洼,平面上延伸超过10 km,控制了南洼的形成与展布;断裂F_6、F_7位于



a. 珠江口盆地构造位置图；b. 白云凹陷区域位置图；c. 白云凹陷及邻区构造单元划分图；d. 珠二坳陷地层与构造演化综合柱状图。

图 1　白云凹陷平面位置及地层与构造演化综合柱状图

Fig.1　Planar location, comprehensive columnar diagram of the stratigraphy and tectonic evolution of the Baiyun sag

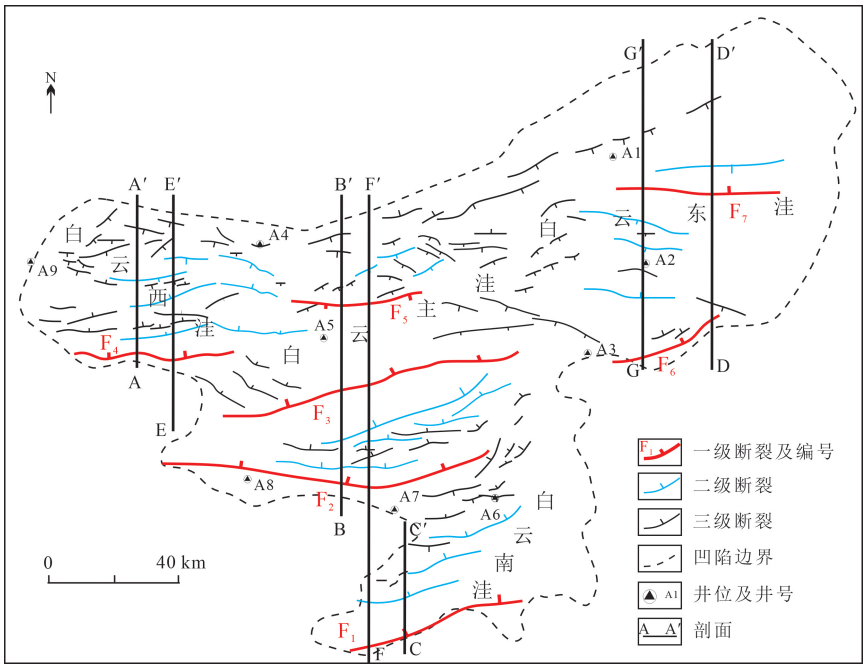


图2 白云凹陷不同级别断裂展布特征

Fig.2 Distribution characteristics of faults at different levels in the Baiyun sag

研究区东洼,平面上延伸介于10～20 km之间,控制了东洼的形成与展布。

2)二级控洼断裂:与一级控凹断裂相比,二级控洼断裂对于盆地沉积的控制作用及延伸距离相对减弱,部分延伸长度大于10 km,但仍贯穿基底,断距较大,依然贯穿整个文昌组、恩平组,控制着构造带的展布。通过平面图(图2)可知,凹陷内部二级断裂在4个次洼均有分布,但在主洼北部分布相对较少,在主洼南部及西洼最为发育,且大多数断裂仍呈NE和NEE向展布,与一级断裂不同,二级断裂在东洼分布少量NW和NWW向断裂。

3)三级控带断裂:一般对于整个凹陷的沉积及构造特征没有影响,仅控制局部构造,且在平面上延伸距离及断距相对于一级、二级断裂大幅度减小。研究区内部三级断裂在4个次洼均有分布,在数量上多于一级、二级断裂,由剖面(图3)可见,三级断裂仅贯穿部分构造面,且都不贯穿基底。在走向上以NE和NEE向断裂居多,少部分呈NW和NWW向展布。

2.2 断裂剖面组合样式

断裂剖面组合样式是指同一地区多条断裂在剖面上组合形成的具有一定规律的构造样式,不同类型的组合样式可以间接体现出不同的形成过程、构造应力背景。白云凹陷属于典型的伸展裂谷盆地,断裂性质均表现为张性或者张扭性特征,凹陷内部断裂发育且及其丰富,基于地震剖面对比解释结果,发现研究区内形成了大量高角度伸展拉张正断层,并带有少部分张扭性断裂。张性断裂包含铲状断裂、阶梯状断裂、Y字形断裂、嵌套V字形断裂,在恩平组发现部分似花状断裂组合样式,显示出张扭性特点(图4)。似花状断裂的出现说明该地区构造受到走滑断裂的影响,推测其主要原因是受NW向阳江—一统暗沙断裂带及北卫滩断裂这两条断裂带影响下,致使白云凹陷在恩平期出现张扭性特征。以下为这5类断裂剖面组合样式在该地区的具体特征:

1)铲状断裂:凹陷内铲式断裂是在早期伸展背景下发育的控洼断裂,靠近洼陷一侧通常含有多条次级断裂与控洼断裂相交,在剖面上形成上陡下缓的铲式构造特点(图4a)。研究区内铲式断裂主要分布在白云主洼南部,底部角度平均在10°～30°之间。

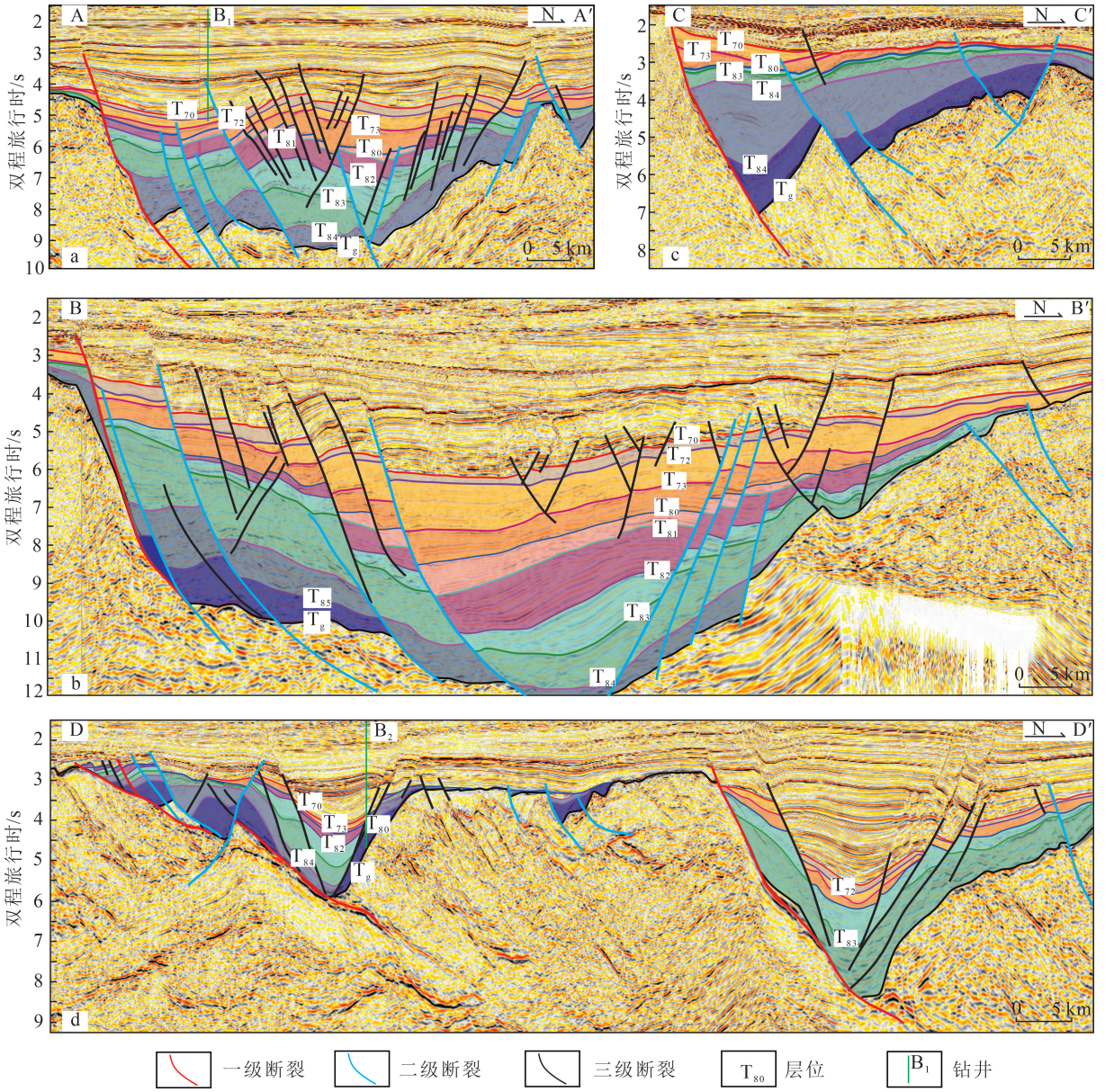
2)阶梯状断裂:研究区内阶梯状断裂广泛分布,通常为同向断阶,在白云西洼、白云主洼北部缓坡带及白云主洼西南部可见大量阶梯状断裂,推测其成因主要是由于盆地在接受沉降时受到抬升作用,导致沉积物发生滑脱故而呈阶梯状(图4b)。

3)Y字形断裂:研究区内Y字形断裂是由一组

主断裂和一支与主断裂倾向相反的次级断裂组合形成(图 4c)。按上文断裂分级，Y 字形断裂中主断裂通常为一级或二级断裂，通常在平面上延伸距离较大，断距亦是如此，研究区内该断裂主断裂通常向下穿过基底，而次级断裂则是由于逆牵引作用下，导致上盘地层发生反向倾斜。研究区内 Y 字形断裂广泛分布于西洼、主洼北部及南洼。

4)嵌套 V 字形断裂：研究区内该类型断裂由多组倾向相反的次级断裂相互叠置，每一组断裂性质相同，且级别类似(图 4d)，该类型成因近似于阶梯状断裂。研究区内该类型断裂主要分布在东洼及主洼北部。

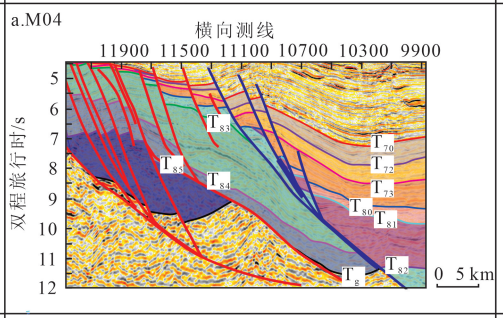
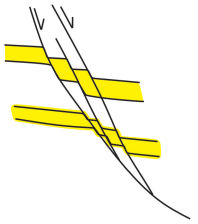
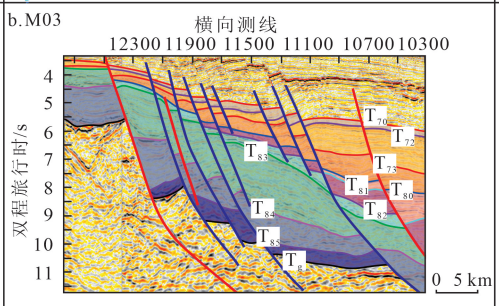
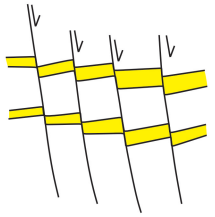
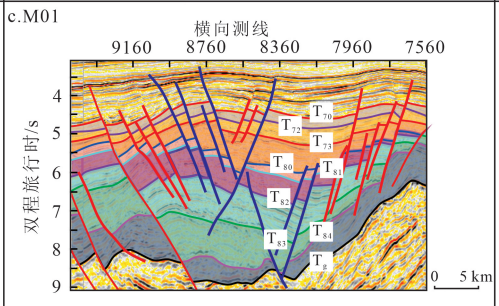
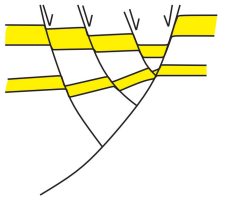
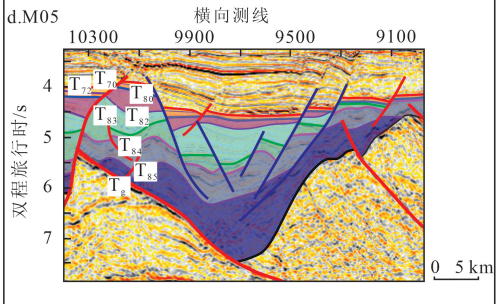
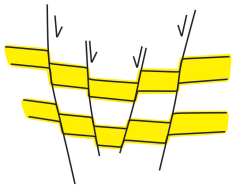
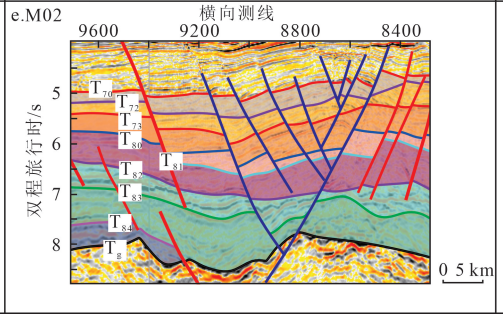
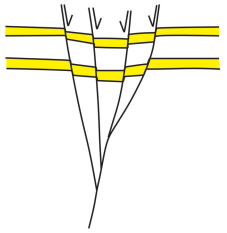
5)似花状断裂：此类型断裂彰显出研究区具有张扭的应力特征，显示出走滑性质，剖面上，主干断裂通常为一条一级或二级断裂，多条次级断裂自上而下汇聚于主干断裂分布，形似花状(图 4e)，次级断裂大多在恩平期活动，说明在该时期区域应力发生改变。研究区内该类型断裂主要发育在西洼及主洼北部。



剖面位置见图 2。

图 3　白云凹陷各洼陷断裂典型剖面特征

Fig.3　Typical cross-section characteristics of faults in each sub-sag of the Baiyun sag

组合类型	断裂样式剖面	构造样式示意图	分布区域
铲状断裂			白云主洼南部
阶梯状断裂			白云西洼 白云主洼西南 白云主洼北部缓坡带
Y字形断裂			白云西洼 白云主洼北部 白云南洼
嵌套V字形断裂			白云东洼 白云主洼北部
似花状断裂			白云西洼 白云主洼北部

剖面位置见图1c。

图4 白云凹陷裂陷期构造剖面组合样式

Fig.4 Tectonic cross-section combination patterns during the rifting stage of the Baiyun sag

2.3　断裂平面分布特征及组合类型

白云凹陷裂陷期先后经历了珠琼运动一幕、惠州运动、珠琼运动二幕 3 期构造活动，不同构造期次所对应的构造应力场不同，因而导致在平面上形成了不同的断裂体系。由于多期次构造活动的叠加，使得断裂在平面上具有了一定的分带性。从断裂平面分布图（图 5）也可以看出，研究区内断裂具有其特殊的组合样式。本文通过用断裂相干属性技术，精细刻画了研究区内断裂于平面上的组合特点。依据对三维地震资料的精细解释结果分析，该地区主要以平行式断裂、雁列式断裂、斜交式断裂及帚状断裂组合等样式为主（图 6）。

1）平行式断裂：该类型断裂在研究区内广泛分布，主要集中在白云主洼南部及白云西洼部分区域（图 6a），走向多呈 NEE—SWW 或近 EW 向展布，体现出在凹陷形成初期洼陷内部强烈的拉张作用。

2）雁列式断裂：主要分布于白云主洼北坡、白云主洼西南部、白云西洼及白云东洼部分区域（图 6b），受渐新世右旋张扭应力影响，多为右旋雁列，在平面上呈 NWW—SEE 向展布。

3）斜交式断裂：研究区内该类型断裂主要集中于白云东洼地区（图 6c），相较于前两种该类型分布较少，其形成原因推测主要是由于在凹陷裂陷期太平洋板块持续的俯冲作用，致使该地区应力场发生持续顺时针旋转，从而导致多期次断裂相互叠加，与早期断裂相交形成斜交式断裂。

4）帚状断裂：该类型断裂在研究区由一条主干断裂和多条次级断裂组合形成，次级断裂通过不断收敛于主干断裂的末端，而另一端则呈现敞开状态，形成类似帚状的断裂组合样式，一般由主干断裂控制区域内次级断裂走向，通常该类型断裂与走滑作用相伴生（图 6d）[38]。研究区内该类型断裂主要存在于白云主洼北坡，表明晚始新世区域应力发生顺时针旋钮，致使断裂走向呈 NWW—SEE 向。

3　断裂运动学规律

3.1　断裂走向变化特征

为合理分析白云凹陷裂陷期应力场变化特征，对研究区裂陷期三级层序地裂界面（T_{85}—T_{70}）内断裂走向进行定量统计，推断不同时期断裂走向与数量的关系（图 7），图中各地层段玫瑰花图对应关系为下文昌段（T_{90}—T_{83}）、上文昌段（T_{83}—T_{80}）、恩平组（T_{80}—T_{70}）。

据统计结果可知，在裂陷初期，活动断裂数量相对较少，且断裂走向主要以 NE 向断裂为主，仅有少部分 NWW 向活动断裂；在惠州运动（即晚文昌期）以后，NE 向断裂发育开始逐渐减弱，断裂走向由早文昌期的 NE 向逐渐向 NEE 向发生偏转，在该时期 NWW 向断裂发育较少，基本不发育 NWW 向断裂；至裂陷晚期（恩平期），该时期不同于文昌期，NE、NEE 向断裂大量减少，EW 向断裂占据主导地位，且 NWW 向断裂开始大量发育。综上，白云凹陷裂陷期断裂走向在纵向上呈现 NE 向至 NEE 向再转为 EW 向的顺时针旋转规律。

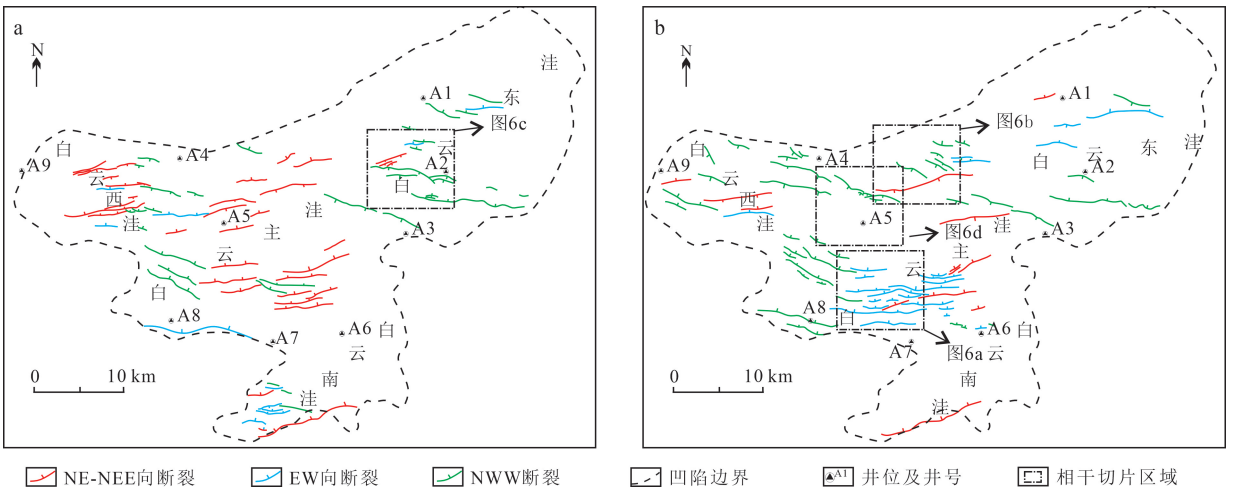
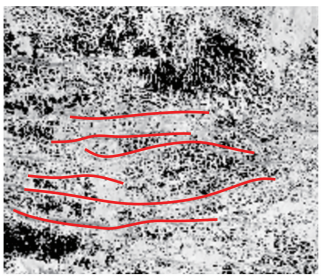
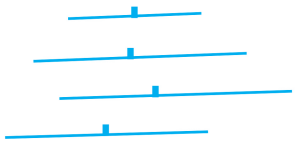
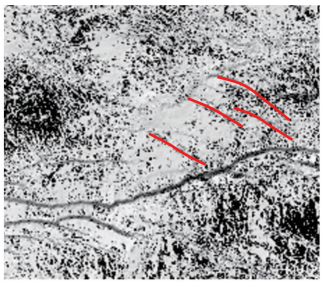
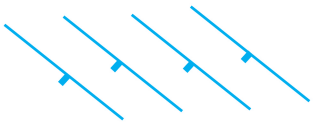
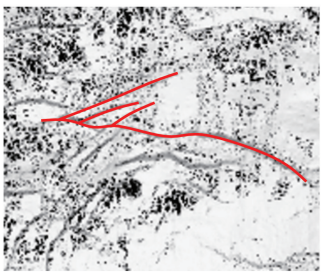
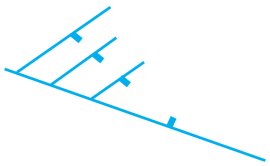
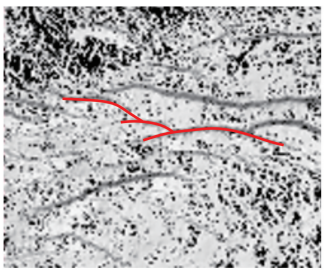


图 5　T_{80}（a）、T_{70}（b）面同沉积断裂平面分布图

Fig.5　Planar distribution of synsedimentary faults on the T_{80} (a) and T_{70} (b) surfaces

平面组合样式	相干切片	断裂组合形态	分布区域
平行式			白云主洼南部 白云西洼
雁列式			白云主洼北坡 白云主洼西南部 白云西洼
斜交式			白云东洼
帚状			白云主洼北坡

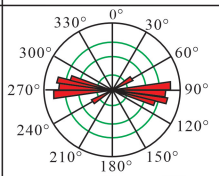
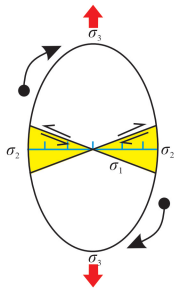
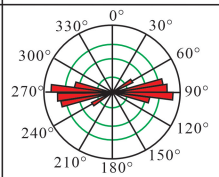
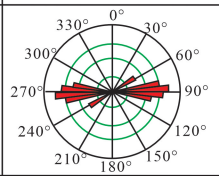
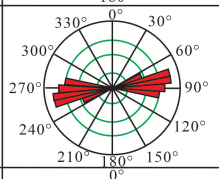
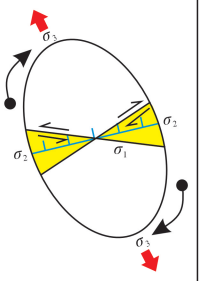
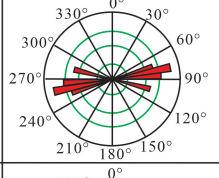
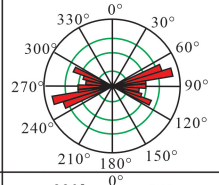
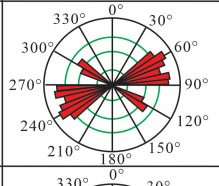
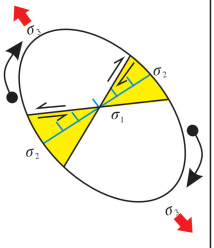
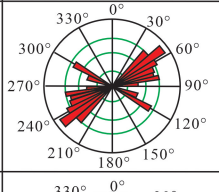
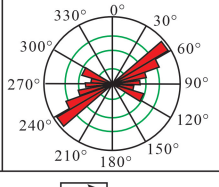
位置见图5。

图6 研究区相干切片及断裂平面组合分布

Fig.6 Coherence slice and planar fault combination distribution in the study area

3.2 断层活动性分析

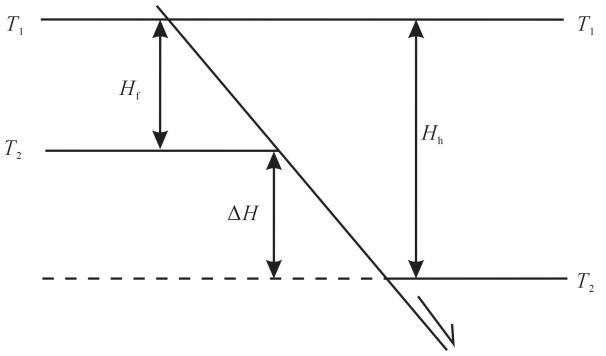
断层活动性常用评价方法有3种:生长指数法[39],古落差法[40],活动速率法[41](图8)。生长指数法是利用断层上盘厚度比下盘厚度,但通常会由于盆地剥蚀作用导致断层下盘缺失,从而无法计算生长指数;活动速率法指断层的古落差与沉积时间的比值,但地层沉积的精确时间难以确定,导致该方法误差较大[42]。综合对比后,本文采用古落差法

构造期	地质时期	地层	地层反射界面	统计条数	断裂走向玫瑰花图	地质应力方向	裂陷期次	
断坳转换期	恩平组	恩二段 E_2e^2	T_{70}	75			裂陷Ⅱ幕	
		恩三段 E_2e^3	T_{72}	73				
		恩四段 E_2e^4	T_{73}	58				
断陷期	上文昌段	文一段 E_2w^1	T_{80}	82			裂陷Ⅰ幕	晚文昌期
		文二段 E_2w^2	T_{81}	27				
		文三段 E_2w^3	T_{82}	48				
	下文昌段	文四段 E_2w^4	T_{83}	89				早文昌期
		文五段 E_2w^5	T_{84}	35				
		文六段 E_2w^6	T_{85}	20				

断层　　应力方向　　剪切方向　　区域拉张方向

图 7　白云凹陷裂陷期断裂走向演化

Fig.7　Evolution of fault orientation during the rifting stage of the Baiyun sag



据文献[14]修改。T_1.地层上界面;T_2.地层下界面。

图8 古落差法断裂活动速率分析

Fig.8 Analysis of fault activity rates using ancient throw method

来进行断层活动性的研究,其原理为上盘厚度减去下盘厚度,若断层下盘被剥蚀,那么上盘的厚度即代表断层落差。即:

$$\Delta H = H_h - H_f。 \quad (1)$$

式中:ΔH 为落差,m;H_h 为上盘厚度,m;H_f 为下盘厚度,m。

本文采用上述方法分别计算了白云凹陷一级断裂中的 F_1—F_7 7条断裂文昌期至恩平期的断距,通过统计断层落差结果显示:在同一沉积时间内,不同断裂的活动强度存在明显差异,在同一条断裂内部,沿着其走向方向不同位置断层活动性也存在差异。

3.2.1 同一时期不同断裂

F_1、F_2 断裂在早文昌期活动十分强烈,平均落差可达1 000 m,但在晚文昌期几乎未活动,直到恩平期开始,F_1、F_2 稍有活化,活动落差平均在100 m左右(图9)。通过数据表明这两条断裂属于早期活动,然后迅速消亡,直到断裂活动晚期,又发生活化。F_3 断裂在裂陷早文昌期未活动,直至惠州运动之后,在晚文昌期才开始活动,且活动强度为先增强后减弱,活动期间平均断距可达500 m,相较于 F_1、F_2 在早文昌期的活动性虽有减弱,但活动强度仍然较大(图9)。

其余断裂 F_4、F_5、F_6、F_7 则是在整个裂陷期均有活动,但其活动强度仍存在部分差异,各断裂在早文昌期平均落差分别为800 m、550 m、800 m、400 m左右,在晚文昌期平均落差分别为350 m、250 m、400 m、250 m左右,在恩平期平均落差分别为210 m、150 m、150 m、100 m左右。其断裂活动强度随时间推移处于一个逐渐下降的状态(图9)。

综上。虽然各断裂在活动期间存在差异性,但仍存在共性,裂陷初期,由于强烈的伸展裂陷作用,使得各断裂活动强度最强,所形成的断距也最大;在裂陷中期,随着拉张应力的减弱及区域应力的顺时针旋转,致使断层落差较裂陷初期大幅度衰减,但仍具有一定强度;到裂陷后期,凹陷构造活动减弱,断裂活动速率显著降低,且速度逐渐趋于一致。整体

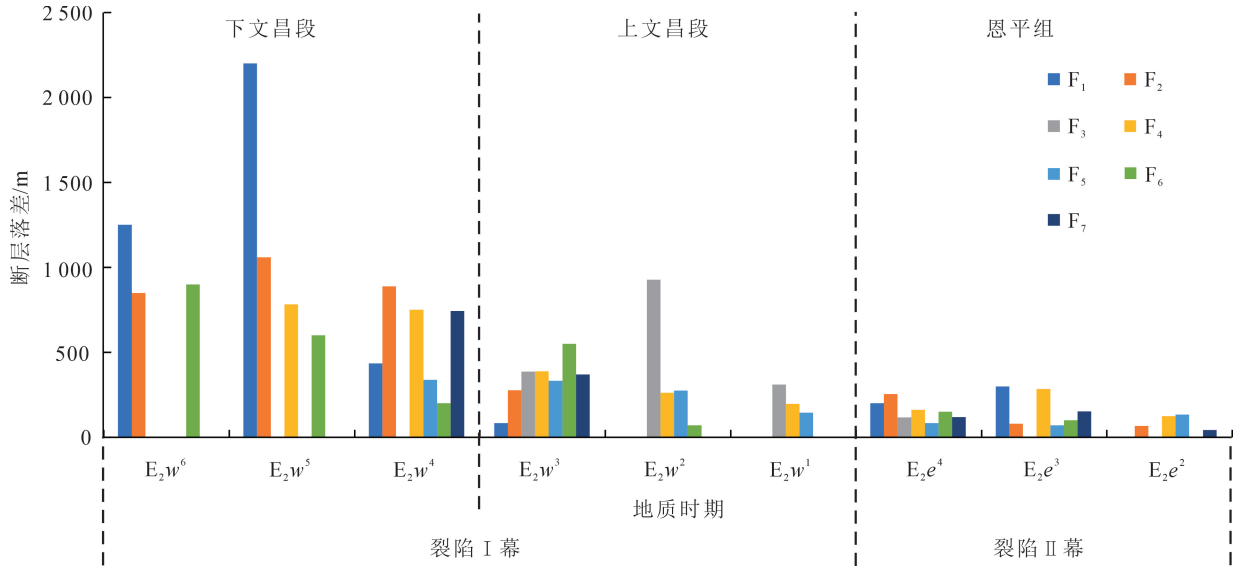


图9 白云凹陷不同断裂活动速率

Fig.9 Activity rates of different faults in the Baiyun sag

来看白云凹陷南部断裂活动强于北部。

3.2.2　同一断裂不同位置

为方便比对同一断裂不同位置活动强度，本次研究选用等间距截取剖面，测量其落差，制作成柱状图（图 10）来分析其规律性。

其中主洼区域共测量 F_2、F_3、F_5 3 条断裂（图 10c、d、f），F_2 断裂较为特殊，在文一段、文二段沉积时期并未活动，在其余时期均有活动，F_3、F_5 活动情

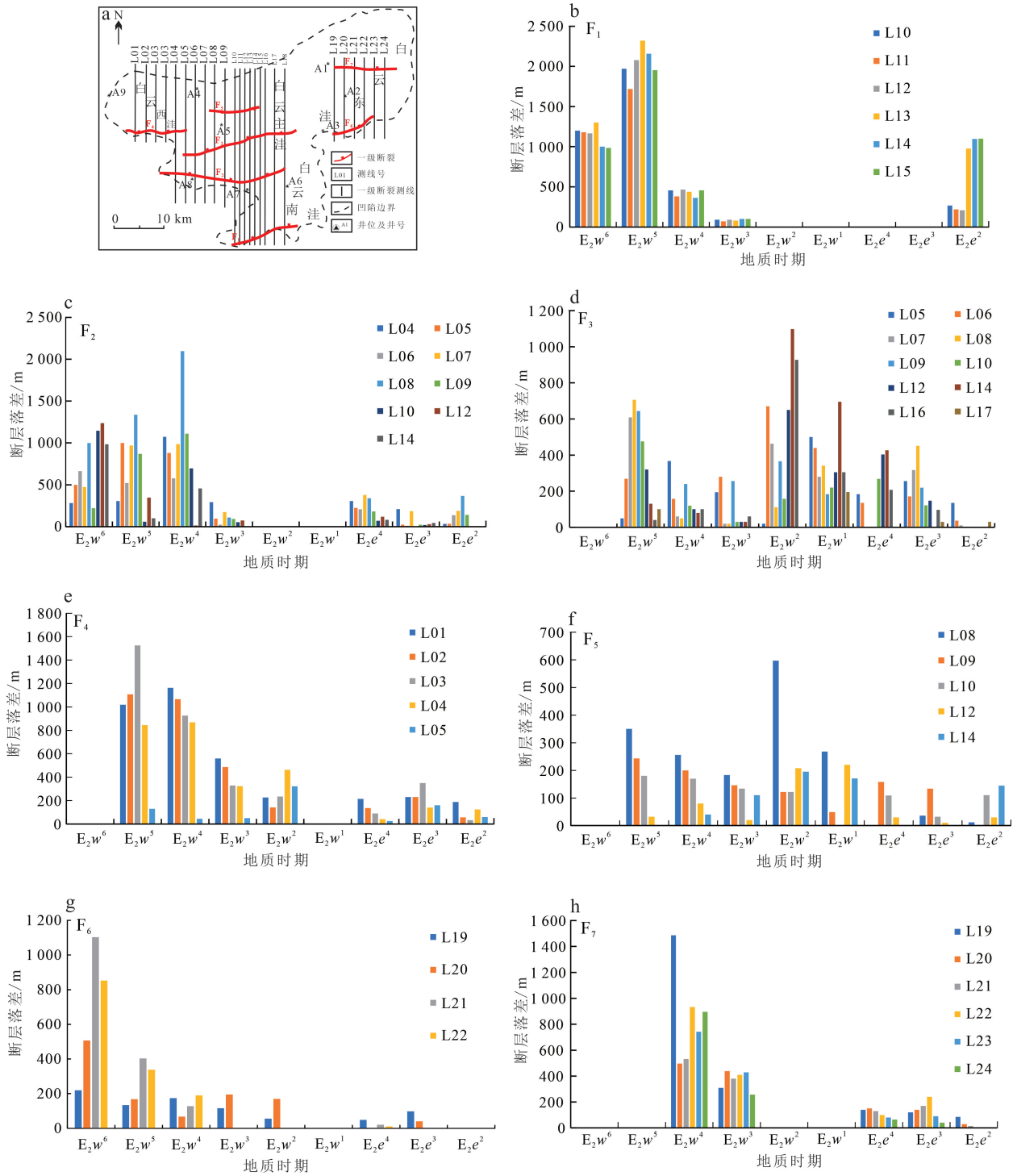


图 10　白云凹陷主干断裂裂陷期活动速率

Fig.10　Activity rates of main faults during the rifting stage in the Baiyun sag

况相似,在初始断陷期(文六段)并未活动,在文五段开始活动,至恩平期活动速率逐渐减弱。F_2断裂在早文昌期断层活动强度整体上自西向东逐渐增强、而F_3、F_5则与其相反;晚文昌期F_2在文三段与早文昌期出现差异,断裂活动自西向东逐渐降低,而F_3、F_5则继续延续其在早文昌期的活动特征;在恩平期,F_2断裂东西向差异较小,F_3、F_5自西向东逐渐呈下降趋势。

南洼仅一条断裂,即F_1断裂,其在文六段、文五段、文四段、文三段及恩一二段有所活动,在文六段、文五段活动时期,整体上西段活动性强烈,往东先减弱而后增强再减弱,文四段及文三段整体活动性比较稳定,自西向东活动性差异不大,在恩二段时期,断裂活动强度呈现西弱东强(图10b)。

西洼仅一条断裂,即F_4断裂,该断裂除文六段与文一段未活动外,在其他裂陷期均有活动,文五段活动时期,断层活动性从西部向中部逐渐增强,往东部逐渐衰减,文四段、文三段活动时期表现为西强东弱,文二段活动时期西部向中部逐渐减弱,中东部逐渐增强,恩四段沉积时期表现为西强东弱,恩三段活动性较为均一,恩二段整体活动性不强,表现为中部弱,两端强(图10e)。

东洼共计F_6、F_7两条断裂,在早文昌期,两条断裂均呈现自西向东逐渐增强的趋势;晚文昌期断裂活动强度整体下降,且东西向差异不强;在恩平期,其断层活动性大幅度降低,F_6平均活动强度不到100 m,其活动强度东西向差异较小,F_7平均活动强度在100～200 m之间,整体活动强度表现为西强东弱(图10g、h)。

综上,断裂活动特征整体表现为:1)裂陷期断裂主要活动期为文昌期,恩平期虽有活动,但整体活动强度不高;2)断裂活动整体在平面上表现为南部强于北部;3)一级控凹断裂沿其走向演化特征较为复杂,在同一时期各断裂活动强度不一致,同一条断裂在其不同位置活动强度也不同,整体来看,从文昌组至恩平组,断裂活动表现为西强东弱。

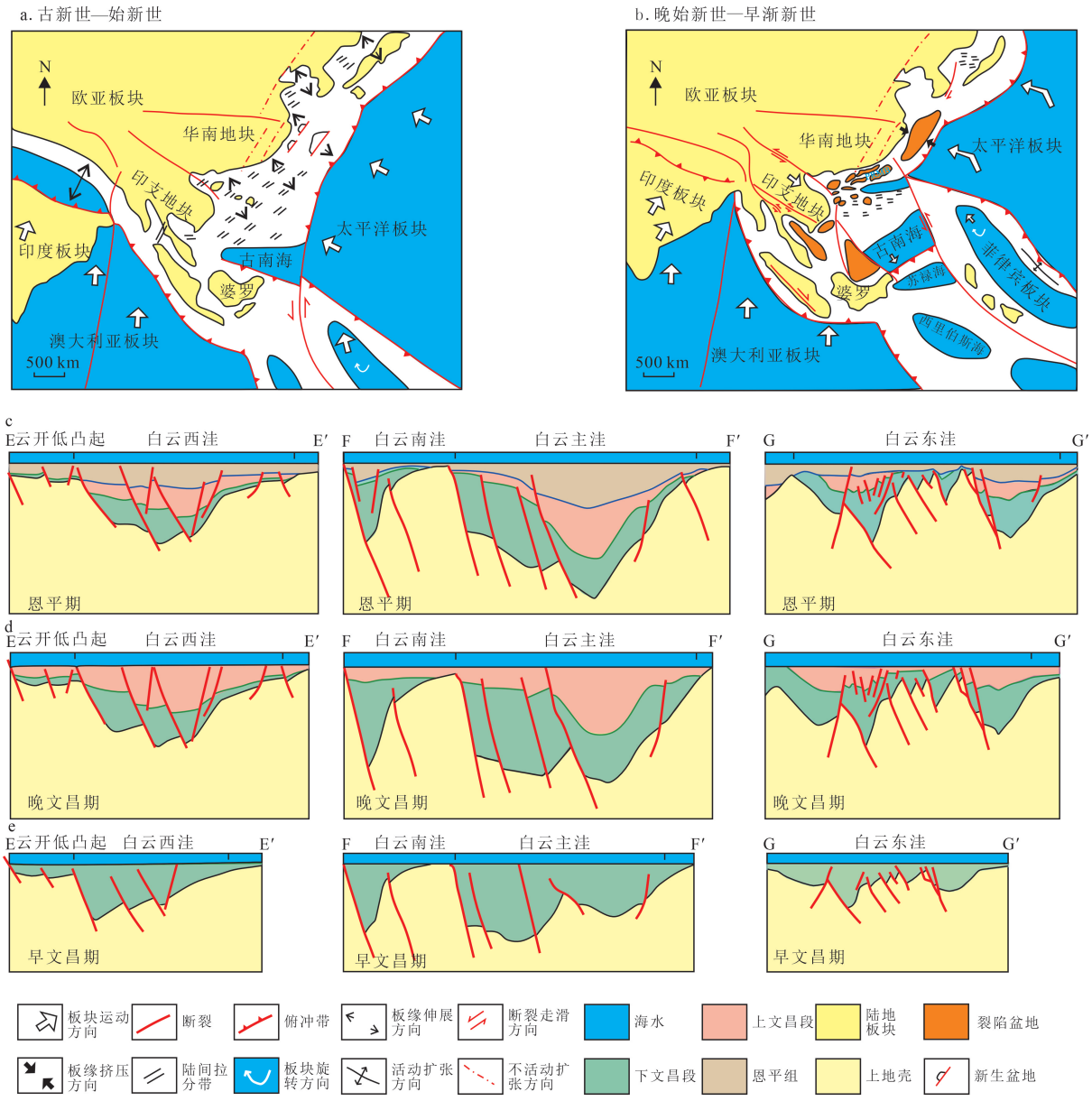
4 断裂成因动力学机制探讨

研究区位于南海板块区域内,构造特征复杂,盆地以北属于华南陆缘地块,盆地以西属于印度—澳大利亚板块,东部则属于太平洋板块。由于其东部构造板块对欧亚板块的挤压、西部太平洋板块对欧亚大陆的俯冲、北部华南陆缘的向外延伸及古南海的俯冲消亡,在各种应力背景下,造就了白云凹陷的复杂地质样貌[9,43-44],这其中以太平洋板块的俯冲作用占据主导(图11)。白云凹陷裂陷期经历了多期伸展作用,根据其构造背景可分为以下3个阶段:

古新世—早始新世,珠琼一幕开始,由于太平洋板块沿NW-W方向向欧亚板块进行俯冲,外加印度板块对欧亚板块持续碰撞等众多因素下[45](图11a),板块下部软流圈上涌,剧烈的岩浆作用导致地壳抬升,剥蚀作用加强,整个岩石圈受到NW—SE的拉张应力[46]。自此,白云凹陷进入初始裂陷阶段,由于NW—SE方向地质应力影响,NE向断裂开始活动,在地表形成一系列规模小、分散不连续的断陷盆地。由于南洼主控断裂F_1、主洼主控断裂F_2活动较早,且更靠近最先活化的先存断裂,所以形成的断距也相对最大,而东洼及西洼相对于主洼、南洼则次之,活动相对较弱(图11e)。

早始新世—中始新世,惠州运动开始,太平洋板块向欧亚板块的俯冲方向持续偏转,使得凹陷内部应力方向再次发生偏转,构造应力逐渐转变为NNW—SSE,在东亚陆缘产生一定的右旋走滑分量,使得凹陷内部发育大量NEE—SWW向次级断裂,且在东洼形成部分NW和NWW向断裂。在这一时期,主洼及南洼初期活动的断裂F_1、F_2发育近乎停止,构造应力向内部传递,处于主洼中间的断裂F_3活动强度达到最强,东洼及西洼的断裂仍有活动,相对珠琼运动一幕活动强度大幅度减弱,东洼活动强度略低于西洼(图11d)。

晚始新世以来,太平洋板块沿NWW向继续俯冲(图11b),白云凹陷南部大陆破碎,南海逐渐形成,断裂活动速率降低。由于印度板块向亚欧板块的持续碰撞,使得印支地块向南东方向挤出,基于此构造背景,白云凹陷内部发生珠琼运动二幕,研究区内构造应力由NNW—SSE逐渐顺时针旋转为S—N向,凹陷内部形成数量较多的EW向断裂。主洼北部、西南部形成部分雁列式展布的断裂,走向呈NWW—SEE。该时期,凹陷内拉张作用减弱,各洼陷逐渐处于稳定的沉积状态,主洼、南洼、西洼、东洼活动强度也几近相似(图11c)。



据文献[45]修改。剖面测线见图 2。

图 11　南海北缘盆地演化模式及主要位置剖面特征

Fig.11　Evolutionary models of the northern South China Sea basin and main profile characteristics

5　结论

1）本文首次将白云凹陷同沉积断裂分为一级控凹断裂、二级控洼断裂、三级控带断裂三个级次。共识别出铲状断裂、阶梯状断裂、Y 字形断裂、嵌套 V 字形断裂、似花状断裂等 5 种典型断裂样式，以及平行式断裂、雁列式断裂、斜交式断裂及帚状断裂等 4 种平面组合样式。

2）白云凹陷裂陷期断裂走向自文昌期到恩平期呈现顺时针旋转的特征。断裂活动强度在早文昌期达到最强，平均落差可达 900 m，晚文昌期次之，平均落差可达 350 m，恩平期断裂活动强度最低，平均落差仅 150 m。同一时期不同断层活动性，同一断裂在不同位置差异显著。裂陷期断裂活动表现为“南强北弱、西强东弱”的特征。

3）多板块区域应力围限下，证实白云凹陷区域应力与断裂走向规律一致，自文昌期至恩平期呈现顺时针旋转的特征。同时，与前人相互印证珠江口盆地典型的伸展拉张构造格局及动力学机制是印度—欧亚板块碰撞、太平洋板块俯冲后撤和古南海持

续南移的综合作用。

参考文献(References):

[1] 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. Structural-Sedimentary Responses of Multi-Phase Rift Basins and Case Study of the Lufeng Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 77-89.

[2] 梁慧社,刘和甫,李晓清,等. 中国东部中新生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 477-486.
Liang Huishe, Liu Hefu, Li Xiaoqing, et al. Coupling Mechanism of Mesozoic-Cenozoic Rift Basins and Extensional Uplands in Eastern China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 477-486.

[3] 茹克. 裂陷盆地的半地堑分析[J]. 中国海上油气, 1990, 4(6): 1-10.
Ru Ke. Analysis of Half-Grabens in Rift Basins[J]. Offshore Oil & Gas of China, 1990, 4(6): 1-10.

[4] 蒙启安,朱德丰,陈均亮,等. 陆内裂陷盆地的复式断陷结构类型及其油气地质意义:以海-塔盆地早白垩世盆地为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 76-85.
Meng Qi'an, Zhu Defeng, Chen Junliang, et al. Styles of Complex Faulted Sags in Rifting Basin and Its Significance for Petroleumgeology: An Example from Hailar-Tamsag Early Cretaceous Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 76-85.

[5] Bellahsen N, Fournier M, Acremont E D, et al. Fault Reactivation and Rift Localization: Northeastern Gulf of Aden Margin[J]. Tectonics, 2006, 25(1): 1-14.

[6] Nottvedt A, Johannessen E P, Surlyk F. The Mesozoic of Western Scandinavia and East Greenland[J]. Episodes, 2008, 31(1): 59-65.

[7] Ma D. History of the Development of the East African Rift System: A Series of Interpreted Maps Through Time[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 101: 232-252.

[8] Rotevatn A, Kristensen T B, Ksienzyk A K, et al. Structural Inheritance and Rapid Rift-Length Establishment in a Multiphase Rift: The East Greenland Rift System and Its Caledonian Orogenic Ancestry[J]. Tectonics, 2018, 37(6): 1858-1875.

[9] 程世秀,李三忠,索艳慧,等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 79-93.
Cheng Shixiu, Li Sanzhong, Suo Yanhui, et al. Tectonic Characteristics and Genesis of Cenozoic Basin Groups in Northern South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 79-93.

[10] 王霄飞,余珊,龚跃华,等. 华南北东向断裂在南海北部陆架的延伸[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 557-570.
Wang Xiaofei, Yu Shan, Gong Yuehua, et al. Extension of the North-South East-Trending Fault on the Northern Shelf of the South China Sea [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(3): 557-570.

[11] 李才,张迎朝,尤丽,等. 珠江口盆地文昌C凹陷成藏条件及勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 346-351,358.
Li Cai, Zhang Yingchao, You Li, et al. Reservoir Formation Conditions and Exploration Potential of the Wenchang C Depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 346-351,358.

[12] 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 Structures in the Northern Pearl River Mouth Basin and Their Geological Significance [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2364-2369.

[13] 钟志洪,施和生,朱明,等. 珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 20-29.
Zhong Zhihong, Shi Hesheng, Zhu Ming, et al. Tectono-Stratigraphic Framework and Genesis Mechanism of the Pearl River Mouth Basin [J]. Offshore Oil & Gas of China, 2014, 26(5): 20-29.

[14] 沈梦蓉,单玄龙,郝国丽,等. 珠江口盆地阳江东凹早新生代洼陷结构差异及其控制机制分析[J/OL]. 地球科学.[2024-09-30]. Doi: https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220414.1133.022.html.
Shen Mengrong, Shan Xuanlong, Hao Guoli, et al. Analysis of Structural Differences and Control Mechanisms in the YJ-E Depression of the Pearl River Mouth Basin During the Early Cenozoic[J/OL]. Earth Science.[2024-09-30]. Doi: https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220414.1133.022.html.

[15] 吴培康. 南海北部多幕裂陷作用与含油气系统[J]. 石油学报，1998，19(3)：23－27.
Wu Peikang. Multi-Act Rifting and Hydrocarbon System in the Northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica，1998，19(3)：23－27.

[16] 施和生，于水明，梅廉夫，等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪幕式裂陷特征[J]. 天然气工业，2009，29(1)：35－37，40，133.
Shi Hesheng，Yu Shuiming，Mei Lianfu，et al. Episodic Rift Characteristics in the Paleogene of the Huizhou Depression in the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry，2009，29(1)：35－37，40，133.

[17] 冯志强，曾维军. 珠江口盆地的构造演化与南海之形成[J]. 地质学报，1982，56(3)：212－222.
Feng Zhiqiang，Zeng Weijun. Tectonic Evolution of the Pearl River Estuary Basin and the Formation of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica，1982，56(3)：212－222.

[18] 米立军，张功成，傅宁，等. 珠江口盆地白云凹陷北坡-番禺低隆起油气来源及成藏分析[J]. 中国海上油气，2006，18(3)：161－168.
Mi Lijun，Zhang Gongcheng，Fu Ning，et al. Oil and Gas Source and Accumulation Analysis of the Northern Slope-Panyu Low Uplift in Baiyun Sag in the Pearl River Estuary Basin[J]. China Offshore Oil and Gas，2006，18(3)：161－168.

[19] 雷超，任建业，裴健翔，等. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J]. 地球科学：中国地质大学学报，2011，36(1)：151－162.
Lei Chao，Ren Jianye，Pei Jianxiang，et al. Structural Patterns and Episodic Evolution of the Deep-Water Area in the Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science：Journal of China University of Geosciences，2011，36(1)：151－162.

[20] 雷超，任建业，李绪深，等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发，2011，38(5)：560－569.
Lei Chao，Ren Jianye，Li Xushen，et al. Structural Characteristics and Petroleum Exploration Potential of the Deep-Water Area in the Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development，2011，38(5)：560－569.

[21] 侯元立，邵磊，乔培军，等. 珠江口盆地白云凹陷始新世—中新世沉积物物源研究[J]. 海洋地质与第四纪地质，2020，40(2)：19－28.
Hou Yuanli，Shao Lei，Qiao Peijun，et al. Provenance Study of Eocene-Miocene Sediments in the Baiyun Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology，2020，40(2)：19－28.

[22] 郭伟，徐国强，柳保军，等. 珠江口盆地白云凹陷文昌组构造-沉积响应关系[J]. 地球科学，2022，47(7)：2433－2453.
Guo Wei，Xu Guoqiang，Liu Baojun，et al. Relationship Between Tectonic-Sedimentary Responses of the Wenchang Formation in the Baiyun Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science，2022，47(7)：2433－2453.

[23] 田兵，郑有伟，赵俊梅. 南海白云凹陷渐新统珠海组沉积相及其演化[J]. 断块油气田，2022，29(6)：800－806，836.
Tian Bing，Zheng Youwei，Zhao Junmei. Sedimentary Facies and Evolution of the Zhuhai Formation in the Oligocene of the Baiyun Depression，South China Sea[J]. Fault-Block Oil & Gas Field，2022，29(6)：800－806，836.

[24] 柳保军，庞雄，谢世文，等. 珠江口盆地白云凹陷壳幔拆离断裂活动对深层大型三角洲沉积体系的控制作用[J]. 地球科学，2022，47(7)：2354－2373.
Liu Baojun，Pang Xiong，Xie Shiwen，et al. The Control of Crust-Mantle Detachment Fault Activity on the Deepwater Large Delta Sedimentary System in the Baiyun Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science，2022，47(7)：2354－2373.

[25] 谢世文，柳保军，庞雄，等. 珠江口盆地白云凹陷裂陷期沉积环境演化与控烃作用[J]. 天然气地球科学，2023，34(2)：296－311.
Xie Shiwen，Liu Baojun，Pang Xiong，et al. Evolution of Sedimentary Environment and Hydrocarbon Control During the Rifting Period of the Baiyun Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience，2023，34(2)：296－311.

[26] 孙龙涛，周蒂，陈长民，等. 珠江口盆地白云凹陷断裂构造特征及其活动期次[J]. 热带海洋学报，2008，27(2)：25－31.
Sun Longtao，Zhou Di，Chen Changmin，et al. Characteristics and Phases of Fault Activity in the Baiyun Depression，Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Tropical Oceanography，2008，27(2)：25－31.

[27] Robert Hall，Wim Spakman. Mantle Structure and Tectonic History of SE Asia[J]. Tectonophysics，2015，658：14－45.

[28] Robert H, Christopher K M, Ian M. Introduction to the Special Issue "Geology, Evolution and Resources of SE Asia" to Commemorate the Life and Work of Professor Charles Hutchison[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76(Sup.1): 97-98.

[29] 朱俊章,施和生,庞雄,等. 白云深水区东部油气成因来源与成藏特征[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(4): 20-28.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Pang Xiong, et al. Hydrocarbon Genesis Source and Reservoir Characteristics in the Eastern Deepwater Area of Baiyun Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(4): 20-28.

[30] 李友川,米立军,张功成,等. 南海北部深水区烃源岩形成和分布研究[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 970-979.
Li Youchuan, Mi Lijun, Zhang Gongcheng, et al. Hydrocarbon Source Rock Formation and Distribution in the Northern Deepwater Area of the South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 970-979.

[31] 朱俊章,施和生,何敏,等. 珠江口盆地白云凹陷深水区LW3-1-1井天然气地球化学特征及成因探讨[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 229-233.
Zhu Junzhang, Shi Hesheng, He Min, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of Natural Gas from Well LW3-1-1 in the Deepwater Area of the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008,19(2): 229-233.

[32] 张浩,邵磊,张功成,等. 南海始新世海相地层分布及油气地质意义[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2015, 40(4): 660-670.
Zhang Hao, Shao Lei, Zhang Gongcheng, et al. Marine Eocene Strata Distribution and Hydrocarbon Geological Significance in the South China Sea[J]. Earth Science : Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 660-670.

[33] 庞雄,何敏,朱俊章,等. 珠二坳陷湖相烃源岩形成条件分析[J]. 中国海上油气, 2009, 21(2): 86-90,94.
Pang Xiong, He Min, Zhu Junzhang, et al. Formation Conditions of Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in the Zhu II Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Offshore Oil & Gas of China, 2009, 21(2): 86-90,94.

[34] 曾麟,张振英. 珠江口盆地第三系[J]. 石油学报, 1992, 13(2): 178-183.
Zeng Lin, Zhang Zhenying. The Tertiary System of the Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992,13(2): 178-183.

[35] 李康,单玄龙,郝国丽,等. 珠江口盆地西江凹陷裂陷期构造转换及其对沉积的意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024,54(4):1095-1109.
Li Kang, Shan Xuanlong, Hao Guoli, et al. Structural Transition and Its Significance for Sedimentation During the Rifting Period in the Xijiang Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024,54(4):1095-1109.

[36] 张向涛,彭光荣,谢世文,等. 珠江口盆地白云凹陷西南部珠海组储层成岩特征及其对储层物性的影响[J]. 天然气地球科学, 2024,35(3):379-392.
Zhang Xiangtao, Peng Guangrong, Xie Shiwen, et al. Diagenetic Characteristics and Their Impact on Reservoir Properties of the Zhuhai Formation in the Southwestern Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience,2024,35(3):379-392.

[37] 张向涛,彭光荣,王光增,等. 珠江口盆地惠州运动的断裂响应研究:以阳江东凹为例[J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 161-175.
Zhang Xiangtao, Peng Guangrong, Wang Guangzeng, et al. Fault Responses to the Huizhou Movement in the Pearl River Mouth Basin: A Case Study of the YJ-E Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 161-175.

[38] 张豪,栾锡武,冉伟民,等. 珠江口盆地西部文昌A凹陷断裂特征与成因探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(4): 96-106.
Zhang Hao, Luan Xiwu, Ran Weimin, et al. Fault Characteristics and Genesis of the Wenchang A Depression in the Western Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(4): 96-106.

[39] Thorsen C E. Age of Growth Faulting in Southeast Louisiana Transactions[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies, 1963, 13(2) : 103-110.

[40] 戴俊生,赵勇. 应用落差分析研究生长断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13-15.
Dai Junsheng, Zhao Yong. Study of Growth Faults Using Throw Analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(3): 13-15.

[41] 罗凤芝, 李勤英, 苗翠芝. 断层活动速率研究方法及应用探讨[J]. 断块油气田, 2000, 7(2): 15-17.
Luo Fengzhi, Li Qinying, Miao Cuizhi. Methods and

Applications of Fault Activity Rate Studies[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2000,7(2): 15 - 17.

[42] 李坤，黄镜嘉，江涛，等. 莱州湾凹陷同沉积断层活动性综合评价[J]. 石油地质与工程，2023，37(2)：13 - 20.
Li Kun, Huang Jingjia, Jiang Tao, et al. Comprehensive Evaluation of Synsedimentary Fault Activity in the Laizhou Bay Depression[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(2): 13 - 20.

[43] 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 Groups and Basin Dynamics of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 55 - 78.

[44] 栾锡武，王嘉，刘鸿，等. 关于南海北部特提斯的讨论[J]. 地球科学，2021，46(3)：866 - 884.
Luan Xiwu, Wang Jia, Liu Hong, et al. Discussion on the Tethys of the Northern South China Sea[J]. Earth Science, 2021, 46(3): 866 - 884.

[45] 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 Deformation Zones and Basin Formation Processes in the South China Sea [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(4): 744 - 762.

[46] 杨悦，彭光荣，朱定伟，等. 珠江口盆地阳江东凹裂陷期沉积环境及其构造控制[J]. 大地构造与成矿学，2021，45(1)：79 - 89.
Yang Yue, Peng Guangrong, Zhu Dingwei, et al. Sedimentary Environment and Tectonic Control During the Rifting Period in the YJ - E Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(1): 79 - 89.