

# 白云凹陷断裂特征对构造与沉积的控制作用

邵磊<sup>1</sup>, 孟晓捷<sup>1</sup>, 张功成<sup>2</sup>, 梁建设<sup>2</sup>

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中海石油(中国)有限公司研究总院, 北京 100027)

**摘要:** 南海北部珠江口盆地白云凹陷的地震资料分析显示, 该区域自始新世以来断裂系统十分发育. 断层表现出张性或张扭性特征并具有多期活动的特点. 在平面上, 断裂主要为 NWW、近 EW 和 NE 向. 根据断层平面展布及组合形态, 可将它们分为平行断层系、雁列断层系和树枝状断层系 3 种组合形式. 根据断裂发育时间及规模, 可将断裂的活动期次划分为以下几个阶段: 剧烈活动期(Tg—T8)、较强—中等活动期(T8—T6)、平静稳定期(T6—T2)、再度活化期(T2—T1). 断裂发育的时间及特点对凹陷的构造演化和沉积过程起着重要的控制作用.

**关键词:** 南海; 白云凹陷; 断裂系统; 构造演化; 沉积过程  
**中图分类号:** P548 **文献标志码:** A

## Feature of Faults System and Its Influence on Tectonic and Sedimentary History of Baiyun Sag

SHAO Lei<sup>1</sup>, MENG Xiaojie<sup>1</sup>, ZHANG Gongcheng<sup>2</sup>, LIANG Jianshe<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Analyses of the seismic data from the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin of Northern South China Sea indicate that fault systems developed mainly since the Eocene present tensional or transtensional features during various time intervals. Three fault groups are dominated: NWW, nearly EW and NE. Based on their lateral distribution and form, the faults can be divided into three combinations of parallel, echelon and dendritic types. These faults playing a critical role in the tectonic evolution and deposition process in the Baiyun Sag, four stages of faulting activities can be identified: strongly active period (Tg—T8), reduced active period (T8—T6), stable period (T6—T2), and re-active

period (T2—T1).

**Key words:** South China Sea; Baiyun Sag; fault system; tectonic evolution; deposition process

断裂是沉积盆地内最为常见的构造样式之一, 不仅控制着凹陷的形成和演化, 也影响着沉积和构造带的发育, 并且断裂的发育与分布在很大程度上控制着地层的沉积、烃源岩的分布及圈闭的形成<sup>[1]</sup>. 在沉积盆地研究中, 断裂和盆地是一对相互影响、相互作用的耦合体<sup>[2]</sup>. 在空间上断裂可作为盆地边界来控制其展布. 在盆地发育期内, 断裂又可以控制其内部沉积过程、充填样式及资源分布; 而盆地的演化反过来又可以促进断裂的活化及再发育. 因此, 对断裂系统特征的分析可以用来探讨盆地构造演化的过程, 重塑盆地的发育演化历史.

## 1 区域地质概况

珠江口盆地是南海北部大陆边缘东段的新生代伸展盆地, 面积约  $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ . 目前在该盆地北部浅水陆架区已发现多个油田和含油气构造, 证实盆地具备很好的石油地质条件<sup>[3]</sup>. 白云凹陷位于珠江口盆地南部的深水区(水深 200~2 000 m), 整体展布成 NEE 向, 面积约 20 000  $\text{km}^2$ , 是南海北部最具代表性的新生代深水陆坡沉积区<sup>[4]</sup>. 凹陷北侧为番禺低凸起, 南侧为南部隆起带, 西侧为云开低凸起, 东部为东沙隆起(图 1). 凹陷包括白云主凹、番禺北坡、西坡、东坡和南部隆起.

白云凹陷位于减薄的过渡地壳上<sup>[5]</sup>, 是珠江口盆地沉积和沉降的中心, 作为一个长期稳定的负构造单元, 自下至上依次沉积始新统湖泊相文昌组、下

收稿日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(91128207, 40976023); 国家科技重大专项(2011ZX05025-006); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2007CB819501, 2009CB219400)

第一作者: 邵磊(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为沉积岩石学与地球化学. E-mail: Ishaok@online.sh.cn

通讯作者: 孟晓捷(1986—), 男, 理学硕士, 主要研究方向为盆地分析. E-mail: mengjie0806@gmail.com

渐新统海陆过渡相恩平组、上新统浅海陆架—三角洲相珠海组、下—中中新统的深海陆坡相珠江组 and 上中新统至今沉积的深海相粤海组、万山组及第四系,并先后经历了多期构造运动:神狐运动,珠琼运动一、二幕,南海运动,白云运动和东沙运动,见表1。

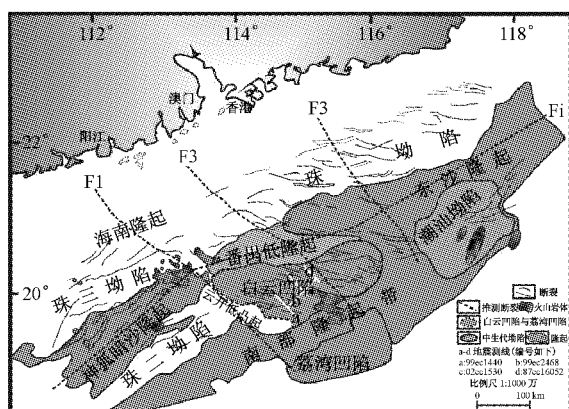


图1 白云凹陷区域位置及结构示意图(据连世勇等<sup>[2]</sup>)

Fig.1 Sketch map of the location of the Baiyun Sag and the structure (according to LIAN Shiyong<sup>[2]</sup>)

表1 珠江口盆地白云凹陷地层与构造事件及断裂活动程度  
Tab.1 The stratigraphy, tectonic events and the development of faults in the Baiyun Sag

界	系	统	组	岩性剖面	沉积环境	年代/Ma	地震反射层	构造运动	断裂活动程度
新近系	新近系	上新统	方山组	海相泥岩	深海相	2.4			弱
			上	粤海组		5.3	T1		
		中新统	中	海相泥砂	深海陆坡相	10.5	T2	东沙运动	中等
			下	珠江组		16.0	T4		
	古近系	渐新统	上	海相砂岩	浅海—三角洲相	21.0	T5		弱
			下	泥岩		23.8	T6	白云运动	
		始新统	上	泥岩	前三角洲相	32.0	T7	南海运动	中等
			中	砂岩和砾		40.0	T8	珠琼运动二幕	较强
		中新统	上	泥岩	湖泊相	50.0	T9	珠琼运动一幕	较烈
			下	砂岩夹泥岩	河流相	65.0		神狐运动	刚刚裂开
	前第三系	上新统	上	砂岩夹泥岩	河流相				
			下	砂岩夹泥岩	河流相				

前人研究表明<sup>[5-13]</sup>,南海北部经历的多幕构造活动对白云凹陷构造演化产生了重大影响,不同学者对白云凹陷构造演化的看法也不同,有的观点认为白云凹陷经历断陷期( $T_x-T_g$ )、韧性伸展期( $T_g-T_7$ )和坳陷三层结构( $T_7$ —海底)<sup>[5]</sup>,有的观点认为其构造演化经历了裂陷( $T_g-T_6$ )、裂后沉降( $T_6$ 以后)和新构造运动三个过程<sup>[6]</sup>;也有学者提出白云凹

陷在新生代构造和沉积充填主要经历了断陷( $T_g-T_8$ )、断坳( $T_8-T_7$ )、过渡( $T_7-T_6$ )和坳陷( $T_6$ —海底)四个阶段<sup>[7]</sup>.不同观点产生原因主要在于所采用的分析资料不同.南海北部白云凹陷位于陆架—陆坡和深水区的过渡地带,处于大陆壳向大洋壳的转换减薄带,对盆地构造演化反应极为灵敏.通过对该地区断裂系统的深入研究,对进一步认识南海的形成演化有着重要的理论和现实意义。

## 2 研究方法

本次地震初始数据由中海石油(中国)有限公司提供,解释工作在中海石油研究总院工作站完成,使用 Geoframe4.5 软件对覆盖白云凹陷全区 400 余条地震剖面的  $T_g$ ,  $T_6$ ,  $T_5$ ,  $T_4$ ,  $T_2$  五个层位及断裂进行详细解释,对  $T_8$ ,  $T_7$  两个层位进行补充完善.在断裂解释过程中,根据构造知识及地震剖面上断裂的各种标志,如反射层错断、波组错断、强相位转换等,再配合断面闭合解释技术,得到恰当合理的断层解释方案.在地层解释的过程中,先选取过井测线,利用井位上各层位标定作为地层解释的出发点,然后选取质量较好,各个层位清晰明了的地震测线与过井测线一起作为本次解释的基干测线.在断裂与地层解释完成之后,对各个时期的反射层做出断裂系统平面分布图(图2),在此基础上对白云凹陷断裂系统特征进行深入研究。

## 3 白云凹陷断裂系统特征

白云凹陷断裂主要发育于新生代早期,从白云凹陷  $T_6$  界面断裂平面构造图(图2)可见,凹陷内断裂分布比较密集,主要分布于北坡、西坡和东坡.断裂的形态反映出一定程度的张性或张扭性的特点,主要断裂延伸距离可达几十公里,其他次级断裂延伸距离有数百米至几公里不等.断裂的主要走向有 NWW(包括少量 NW)、近 EW(包括少量 NEE)和 NE 向,其中 NWW、近 EW 向断裂占了绝大部分,均为正断层,未见逆断层发育。

### 3.1 不同时期断裂系统发育特征

(1)  $T_8$  时期断裂强烈发育控制多个沉降中心,白云西坡与东坡存在被断裂所控制的小洼陷.由于快速构造沉降<sup>[13]</sup>导致白云主凹、西北洼、西南洼及东北洼的形成.主凹西南侧 NWW 向大断裂将主凹与

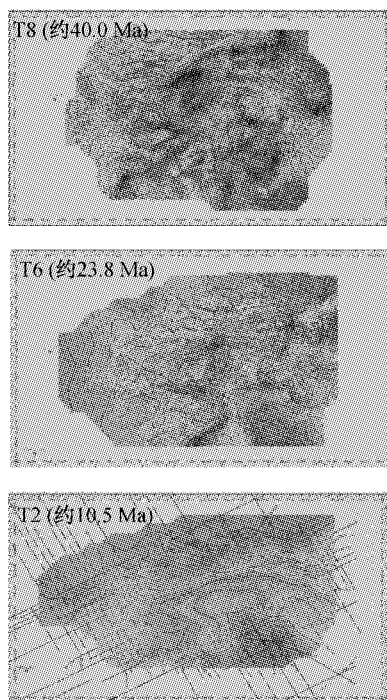


图2 白云凹陷断裂系统平面分布图

Fig.2 The plane distribution of the fault system in Baiyun Sag

西南洼分隔并控制主凹;主凹东侧近 EW 向中等规模断裂控制主凹,东洼旁的一条近 EW 向的大断裂控制东洼.这时期断裂发育数量不多,但活动剧烈,断距巨大,延伸距离较远,断裂方向主要为近 EW 向,另有少量 NE 和 NWW 向.

(2) T6 时期白云主凹继续快速沉降,主凹与南部荔湾凹陷分布范围有所扩大,但中间依然被南部隆起所阻挡. T8 时期可见的西南、西北洼这时已合成西坡的一部分.该时期断裂数量远多于上一时期,除控凹及边界大断裂继承发育外,另有新的小断裂密集发育于大断裂附近,结合地震剖面(图 3)可知新断裂大部分发育于 T8—T6 时期,受之前构造运动中形成的控凹断裂和边界大断裂剧烈活动的影响,发育在这些断裂所控制的区域内并持续向上延伸越过 T6 层位.这时期断裂方向主要为 NWW、近 EW 向和少量的 NE 向.与 T8 时期相比,NWW、近 EW 向断裂都存在着数量上的增加.

(3) T2 时期自北向南地势稳定连续地由浅变深,白云主凹与荔湾凹陷连为一体且处于深海,沉降中心已由白云主凹南移至荔湾凹陷.断裂数量与 T6 相比出现下降,西南处断裂大为减少,西南断裂在早期发育规模大,伴生断裂多,但除了控凹断裂与边界大断裂之外其他伴生断裂活动性一般,很少能持续活动延伸至 T2 界面之上(图 3),该时期断裂方向主

要为 NWW、近 EW 向,NE 向断裂几乎不存在.

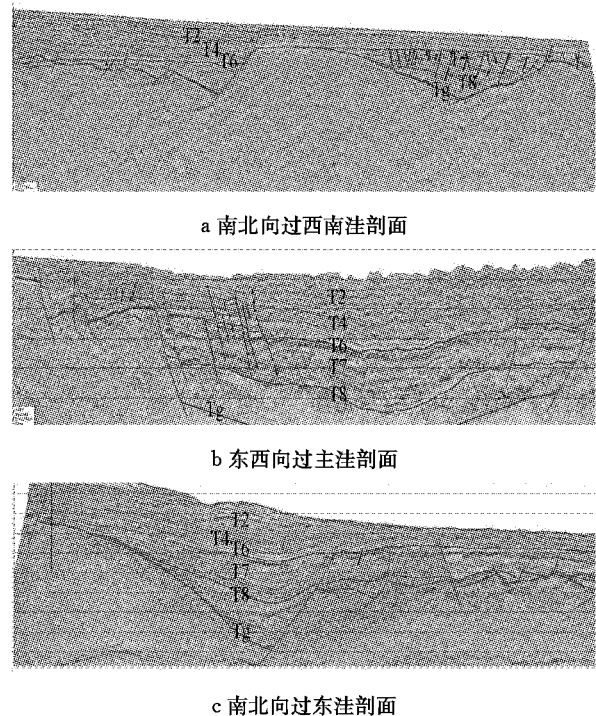


图3 过白云凹陷地震剖面示意图(测线位置见图1)

Fig.3 Seismic transect across the Baiyun Sag, the location of the sections in Fig.1

结合构造应力背景分析,T8 时期白云凹陷 NE 向断裂相对较多,与当时南海北部经历的神弧运动和珠江运动一幕中 NE 向拉张裂陷作用相对应.之后印度板块向北运动与欧亚板块硬碰硬并挤入导致欧亚板块东南向滑移<sup>[14]</sup>,再加上太平洋板块运动方向由 NNW 向转为 NWW 向<sup>[15]</sup>,右行张扭的构造格局加剧,NE 向断裂顺时针旋转为 EW 和 NWW 向,导致大量该方向中、小规模断裂在珠江运动二幕间发育.在 T7 时期南海的扩张轴为近 EW 向,因此新产生了不少近 EW 向断裂.所以 T6 与 T8 相比,NWW、近 EW 向断裂都存在着数量上的显著增加. T6 之后南海扩张轴向南跳跃,远离白云凹陷区域,加上凹陷进入稳定拗陷期,所以南海二次扩张的构造应力场对白云凹陷断裂的影响不大.

### 3.2 断裂系统平面组合特征

根据断层不同走向以及其在平面上展布特点及组合形态,可以将全区的断层分为平行断层系、雁列断层系和树枝状断层系三种组合形式(图 4).这三种断层系展现了某种程度上张性和张扭性特征.

(1) 平行断层系在平面构造图上是常见的断层组合形式,在全区均可见到(图 2),其中绝大部分断层为 NWW、近 EW 向,沿着 NE 或近 NW 向排列.平行断层系中包括大、中、小型各种断层.

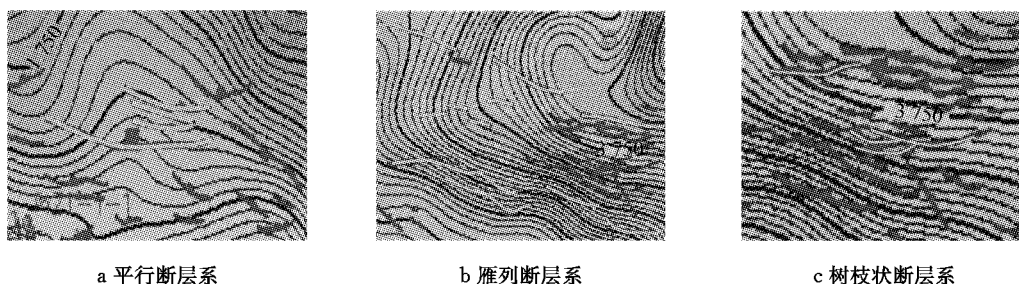


图 4 白云凹陷断裂平面组合样式图

Fig. 4 The plane combination of the faults in the Baiyun Sag

(2) 雁列断层系在平面构造图上常与平行断层系相伴,彼此间距近,在平面上斜列分布,主要分布于西南坡、东北坡和北坡(图 2)。大部分断层为 NWW、近 EW 向,沿着 NWW 和近 EW 向斜列分布。雁列断层系主要包括中、小型断层,反映了局部扭动的应力控制作用<sup>[16]</sup>。

(3) 树枝状断层系主要分布于北坡、西南坡及东北坡等地区(图 2),大部分断层为近 EW 向,沿着 NWW 向排列。在平面上表现为一条大断层和一条或多条小断层斜交,反映了某种程度的局部应力扭动。

#### 4 白云凹陷断裂对构造与沉积的控制作用

在进入新生代后,白云凹陷构造运动与珠江口盆地甚至整个南海北部陆缘所经历的多幕伸展裂陷密切相关<sup>[16]</sup>。若一个区域经历了多幕伸展作用,第一构造幕产生的断裂会控制后期断裂发育,表现为后期断裂发育在早期断裂控制的沉降区内<sup>[17-19]</sup>,或者原有断裂受到构造活动影响继续发育,使原有断裂规模增加。笔者通过分析白云凹陷断裂发育对构造和沉积的控制作用,来探讨白云凹陷构造、沉积演化史。

##### 4.1 神狐运动—珠琼运动一幕(Tg)

神狐运动后,南海北部陆缘褶皱基底形成一系列 NE 向小断陷,珠江口盆地三隆两坳的构造格局形成雏形,白云凹陷存在着某种程度的断裂但不明显。始新世早期,珠琼运动一幕(Tg)后,白云凹陷西南洼的断裂在原有节理基础上开始强烈活动,一系列断裂南断北超,垂向上断距巨大,在巨大的可容沉积空间内沉积文昌组(图 3a)。

前人通过对白云凹陷断层活动速率研究得知该时期西南坡断裂活动速率接近  $60 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ <sup>[16]</sup>,断裂强烈活动将西南坡和主凹分隔开来并形成了一系

列不对称半地堑。这时期在半地堑内有少量新断裂形成,但对西南洼的构造没有明显控制作用。

白云主凹(图 3b, 3c)被多条断层控制形成宽地堑的构造格局。东、西两侧控凹断裂持续剧烈活动,控制了白云凹陷构造沉降。

在白云凹陷东坡(图 3d)同样可见到与西南洼类似的情况,只是断裂的活动性、构造沉降程度、沉积厚度不如西南洼。综上可知:该时期控凹断裂及西南洼、东洼地区的边界大断裂活动最为剧烈,控制了其内部地质单元构造格局,凹陷被多组 NWW 向、近 EW 向断裂分割形成西部多个半地堑、中部宽地堑及东北部多个半地堑的构造格局。在彼此分隔的区域内也有新断层的生成,但对构造的影响十分有限。

裂陷期内活动强烈的断裂不仅能影响构造古地貌,还能制约盆地内可容空间的变化,从而对沉积速率、沉积物源和沉积体系产生深刻的影响<sup>[20-21]</sup>。白云凹陷文昌组主要沉积在上述各地区半地堑中,强断裂活动创造了巨大的沉积可容空间,沉积和沉降中心沿着断裂根部不断下沉,沉积巨厚地层。远离断裂处受断裂活动影响逐渐减小,沉积厚度逐渐减薄并覆盖在隆起之上。从横向上分析地震相可知(图 5),靠近断裂根部地震相表现为中等振幅、杂乱、不连续的反射特征,远离断裂处沉积逐渐变薄,地震相表现为中等振幅、较平行、较连续的反射特征,逐层超覆在隆起之上。推测当时沉积过程分两个阶段:在文昌组早期,沉积物沿断裂向下冲积,在根部快速沉积,分选性差,逐渐填满半地堑深处的可容空间,形成河流相冲积扇。之后水体不断加深,沉积开始具有一定的层次和分选性并向隆起延伸,形成湖泊相沉积。

##### 4.2 珠琼运动二幕(T8)

在晚期张裂幕(珠琼二幕),白云凹陷仍处于张裂背景下。控凹断裂和东西两侧的边界断裂持续活动,依然控制着构造格局与沉积过程。但从过西坡和主凹剖面(图 3a, 3b)可见,这时期白云凹陷的西坡、北坡及控凹断裂附近都有大量密集的新断裂群发

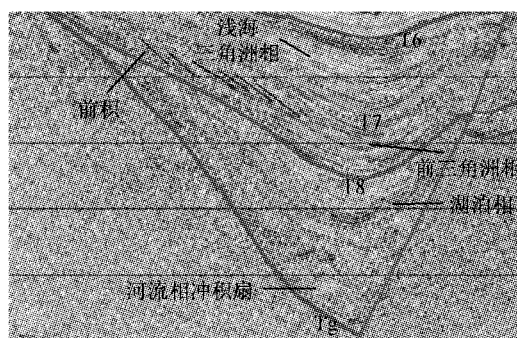


图5 白云凹陷主凹内文昌、恩平与珠海组地震相示意图

Fig.5 The seismic facies of the Wenchang, Enping and Zhuhai Formation

育,虽然这些断裂活动持续性也比较强,大部分向上延伸并贯穿 T4 反射界面,但由于它们大部分都发育在半地堑内和北坡,而不是凹陷内各构造单元的边界控制处,所以对整体构造格局的影响不大。东洼这段时期新形成断裂不多。

前人通过对白云凹陷断层活动速率进行研究得出:该时期断裂活动速率与文昌组相比有所减弱<sup>[16]</sup>。从图 3a 中可见,恩平组沉积不再只被限制在半地堑内,而是通过一系列的断裂群后在半地堑之外与其他地方相连。这样就形成以主凹为中心与周边数个半地堑连接的构造格局。这段时期地层下降幅度、整体沉积厚度已不如文昌组,沉降和沉积中心已不再靠近断裂附近,而是转移至凹陷中心部位,中间厚两侧薄,整体呈现出既断又拗的构造特征(图 3c)。

分析主凹内恩平组地震相(图 5)可知:主凹中心地震相主要为中等振幅、较平行、较连续,前积反射自北向南沿着斜坡向主凹中心过渡,表现出某种程度的湖泊三角洲前积特征。沉积中心距离断裂较远,受其控制减弱,形成层次分明的湖泊相沉积。前积方向一般指示沉积物搬运方向,但在靠近断裂处存在部分杂乱地震相,在杂乱地震相与平行地震相交汇处地震频率较高,暗示岩性变化较大。推测当时沉积物从多个方向向主凹搬运,由北侧搬运来的沉积物沿着斜坡进入凹陷水体中,细粒物质沉积较远至断裂附近,分选性较好;由南侧搬运来的沉积物沿着断裂滑落向凹陷冲积,分选性较差,所以交汇之处表现为北连续平行南杂乱的地震相特征,形成恩平组前三角洲相沉积。

综上所述,在该时期持续拉张背景下,控凹断裂和生长断裂持续活动但控制性下降,在新形成大量断裂同时又有明显的韧性变形沉降。这一时期,白云凹陷接受多个方向物源沉积成为珠江口盆地的沉积和沉降中心。

### 4.3 南海运动(T7)

根据前人对南海的磁异常条带研究<sup>[22]</sup>,南海海盆从 32Ma 时开始扩张,南海北部构造运动进入裂后期,之前拉张背景已不复存在。这时由于南海扩张,珠江口盆地大部分地区被抬升、剥蚀、夷平,形成广泛的不整合面 T7。

这时期白云凹陷少有新断裂形成,西南洼和东洼的边界断裂仍在持续活动(图 3a,3d),上下盘厚度依然有着较大差别,但从沉积地层的形态可以看出半地堑特征不大明显,中间厚两侧薄,依然体现出沉降特征。控凹断裂及边界断裂在该时期依然控制着构造格局与沉积过程,但已远远不如之前两个时期。

珠海组沉积与恩平组沉积情况相似,在逐渐进入主凹的陆坡区也存在着前积反射,但控凹断裂附近杂乱地震相已不存在,整个主凹内统一表现为中振、较平行、较连续的特征(图 5)。反映了主凹内水体逐步增高,沉积物从北部搬运而来,稳定连续地沉积在主凹中心,形成三角洲相沉积。

### 4.4 白云运动(T6)

前人通过对南海北部的磁异常条带<sup>[22]</sup>的分析及 ODP1148 孔 23.8 Ma 的沉积速率、岩石地化分析、孢粉含量曲线、有机质含量等的研究<sup>[23-27]</sup>,发现在 23.8 Ma(T6)时期发生了重大的地质事件——白云运动。该运动使珠江口盆地由断陷彻底转为拗陷,使白云凹陷从浅水陆架环境演变为深水陆坡环境,并沉积珠江组。

从过白云凹陷地震剖面可见,除控凹断裂和边界断裂之外,部分断裂活动至 T6 时期或稍晚就停止(图 3a,3b,3c),另外 T6—T4 之间极少有新的断裂形成。推测由于白云凹陷整体拉张的构造背景已在上一阶段结束,变为稳定的塑性拉伸和热沉降,已没有足够动力去产生新的次生断裂。该时期的断裂基本上不再控制沉积,主凹内沉积厚度从两侧至中间逐渐变厚,呈现出整体稳定沉降的特征。但长期活动的控凹断裂为主凹创造了一个相对封闭的沉积环境,通过控制沉积物的运移路径和沉积地点,将沉积物搬运、围堰在主凹内,对内部形成巨厚的深水扇起到一定作用。T6 之后沉积连续平整的跨越全区并覆盖在南部隆起之上,与外海相连通,沉积深海相。

### 4.5 东沙运动(T2)

在中中新世时期(T2)南海北部经历了一次较强的构造运动——东沙运动,表现为盆地发生断块升降、局部挤压褶皱隆起和频繁的岩浆活动<sup>[8]</sup>。该运动对白云凹陷影响较小,地震剖面上未见到断块大的

抬升和剥蚀,但该时期凹陷东部断裂活动的特殊性表现在以下两方面:一是断层在原有基础上重新活化,断裂继续向上延伸(图3d);二是形成新断层(图6)。另外可从白云凹陷断裂系统平面图中看出该时期东部断裂数量多于西部(图2),可证实东沙运动对白云凹陷东部影响大于西部。在此之后,断裂活动基本停止。

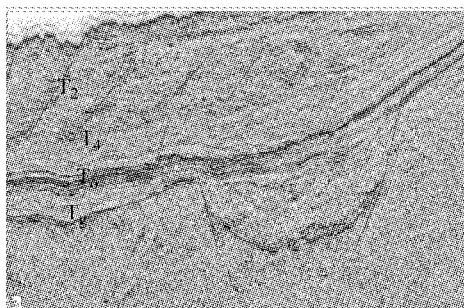


图6 过白云凹陷东部剖面 T2 时期断裂示意图

Fig.6 Seismic transect across the east Baiyun Sag with the faults developed in Middle Miocene

## 5 断裂活动期次划分

通过对白云凹陷断裂活动对构造和沉积的影响,可将断裂活动划分为以下几个期次:

(1) 剧烈活动期(Tg—T8,约 50.0—40.0 Ma),这段时期控凹断裂和东西两坡的边界断裂强烈发育,将白云凹陷分隔为东西多个半地堑和中部宽地堑,形成断陷分隔的构造格局。

(2) 较强—中等活动期(T8—T6,约 40.0—23.8 Ma),这段时期断裂活动减弱,对凹陷的控制性开始下降,表现出“既断又拗”的构造特征。

(3) 平静稳定期(T6—T2,约 23.8—10.5 Ma),控凹断裂和边界断裂基本上不再控制构造格局,断裂附近沉积厚度也基本相当。整个凹陷已完全进入拗陷期,主凹内沉积中间厚两遍薄,整体持续稳定的沉降。

(4) 再度活化期(T2—T1,约 10.5—5.0 Ma),在东沙运动影响下,白云凹陷东部地区的断裂继续发育或又形成新的断裂。

## 6 结论

(1) 白云凹陷内断裂系统十分发育并表现出张性或张扭性特征,具有多期活动的特点。在平面上断裂主要走向为 NWW、近 EW 和 NE 向,其中主凹东

西两侧的 NWW 向断裂为主要控凹断裂。根据断层平面展布及组合形态,可将它们分为平行断层系、雁列断层系和树枝状断层系 3 种组合形式。断裂构造以正断层为主,未见逆断层。

(2) 根据白云凹陷断裂对构造和沉积的影响,可将断裂的活动期次划分为以下几个阶段:剧烈活动期(Tg—T8,约 50.0—40.0 Ma)、较强—中等活动期(T8—T6,约 40.0—23.8 Ma)、平静稳定期(T6—T2,约 23.8—10.5 Ma)、再度活化期(T2—T1,约 10.5—5.0 Ma)。

**致谢:**本研究得到了中海油研究总院沈怀磊工程师等人的悉心指导和帮助,在此表示衷心的感谢!另外中国石油大学(北京)的崔鑫、武青和周约儒同学一起合作完成地震解释工作和平面构造图的制作,在此一并致谢!

## 参考文献:

- [1] 张厚福,方朝亮,高先志,等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.  
ZHANG Houfu, FANG Chaoliang, GAO Xianzhi, et al. Petroleum geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [2] 连世勇,何敏,施和生,等.深水区白云凹陷始新世坡陷结构新认识[J].石油学报,2007,28(3):13.  
LIAN Shiyong, HE Min, SHI Hesheng, et al. Research on Eocene structure of Baiyun Sag in deep-water area of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 13.
- [3] 陈长民,施和生,许仕策,等.珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M].北京:科学出版社,2003.  
CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shice, et al. The conditions of hydrocarbon accumulation of the tertiary petroleum system in the Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] 刘震,张功成,吕睿,等.南海北部深水区白云凹陷渐新世晚期多物源充填特征[J].现代地质,2010,24(5):902.  
LIU Zhen, ZHANG Gongcheng, LÜ Rui, et al. Feature of multi sediment-source filling during the late oligocene at Baiyun Depression in the deep-water region, the Northern South China Sea[J]. Geoscience, 2010, 24(5):902.
- [5] 孙珍,庞雄,钟志洪,等.珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J].地学前缘,2005,12(4):489.  
SUN Zhen, PANG Xiong, ZHONG Zhihong, et al. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4):489.
- [6] 施和生,柳宝军,颜承志,等.珠江口盆地白云荔湾深水区油气成藏条件与勘探潜力[J].中国海上油气,2010,22(6):369.  
SHI Hesheng, LIU Baojun, YAN Chengzhi, et al. Hydrocarbon



- accumulation conditions and exploration potential in Baiyun-Liwan deepwater area, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(6):369.
- [7] 朱伟林, 庞雄, 施和生, 等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- ZHU Weilin, PANG Xiong, SHI Hesheng, et al. Continental margin basin and the hydrocarbon geology of the northern of South China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [8] 黄春菊, 周蒂, 陈长民, 等. 深反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构[J]. *科学通报*, 2005, 50(10):1024.
- HUANG Chunju, ZHOU Di, CHEN Changmin, et al. Deep crustal structure of Baiyun Sag, the northern of South China Sea as interpreted from deep seismic reflection profile[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11):1131.
- [9] 李平鲁, 王维平, 贺亚纯, 等. 珠江口盆地构造结构及演化[J]. *中国海上油气(地质)*, 1989, 3(1):11.
- LI Pinglu, WANG Weiping, HE Yachun, et al. The structure and the evolution of the Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil And Gas*, 1989, 3(1):11.
- [10] 李平鲁. 珠江口盆地构造特征与油气聚集[J]. *广东地质*, 1994, 9(4):21.
- LI Pinglu. Feature of the Pearl River Mouth Basin and the gas accumulation[J]. *Guangdong Geology*, 1994, 9(4):21.
- [11] 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等. 珠江口盆地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.
- CHEN Hanzong, WU Xiangjie, ZHOU Di, et al. Meso-Cenozoic faults in the Pearl River Mouth Basin and their geodynamic background[J]. *Journal Of Tropical Oceanography*, 2005, 24(2):52.
- [12] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. *石油学报*, 2010, 31(4):528.
- ZHANG Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. *Acta Petrole Sinica*, 2010, 31(4):528.
- [13] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- GONG Zaisheng, LI Sitian, XIE Taijun, et al. Continental Margin Basin analysis and hydrocarbon accumulation of the Northern of South China Sea[M]. Science Press, Beijing, China, 1997.
- [14] Tapponnier P G, Peltzer Y, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Collision Tectonics*, 1986, 19:115.
- [15] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. *Geology*, 1995, 23(8):719.
- [16] 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.
- SUN Longtao, ZHOU Di, CHEN Changmin, et al. Fault structure and evolution of Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(2):25.
- [17] 陈俊. 珠江口盆地白云凹陷断裂系统特征研究[D]. 成都: 成都理工大学能源学院, 2008.
- CHEN Jun. Research of characteristics of the faults in the Baiyun depression of the Pearl river mouth basin [D]. Chengdu: College of Power Engineering of University of Technology, 2008.
- [18] Bonini M, Souriot T, Boccaletti M, et al. Successive orthogonal and oblique extension episodes in a rift zone: Laboratory experiments with application to the Ethiopian Rift[J]. *Tectonics*, 1997, 16(2):347.
- [19] Keep M, McClay K R. Analogue modelling of multiphase rift systems[J]. *Tectonophysics*, 1997, 273(3/4): 239.
- [20] Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics eustasy and sedimentology—an overview [C]//Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1991: 617-659.
- [21] 林畅松, 郑和荣, 任建业, 等. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制[J]. *中国科学: D 辑*, 2003, 33(11):1025.
- LIN Changsong, ZHENG Herong, REN Jianye, et al. The controlling of the synsedimentary fault during the early Tertiary period in the Dongyin and Zhanhua Sag of the Bohai Gulf Basin[J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(11):1025.
- [22] Briaire A, Patria P, Tapponnier P G, et al. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea implications for the tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B4):6299.
- [23] 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4):539.
- SHAO Lei, LI Xianhua, WANG Pinxian, et al. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the oligocene—Evidence from deep sea sediments of ODP Site 1148 [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(4):539.
- [24] 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(9): 1177.
- SHAO Lei, LEI Yongchang, PANG Xiong, et al. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2005, 33(9):1177.
- [25] 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2):179.
- SHAO Lei, PANG Xiong, QIAO Peijun, et al. Sedimentary filling of the Pearl River Mouth Basin and its response to the evolution of the Pearl River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2):179.
- [26] 邵磊, 庞雄, 张功成, 等. 南海北部渐新世末的构造事件[J]. *中国地质大学学报: 地球科学*, 2009, 34(5):717.
- SHAO Lei, PANG Xiong, ZHANG Gongcheng, et al. Late oligocene tectonic event in the northern of South China Sea and its implications [J]. *Journal of China University of Geosciences: Earth Science*, 2009, 34(5):717.
- [27] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新—中新统一中新重大地质事件及其意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(2):145.
- PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun movement, a great tectonic event on the oligocene—miocene boundary in the northern of South China Sea and its implications[J]. *Geological Review*, 2007, 53(2):145.