

# 珠江口盆地白云凹陷沉降特征分析

张孟然, 姜正龙

(中国地质大学 海洋学院, 北京 100083)

**摘要:**白云凹陷位于南中国海北部珠江口盆地的深水区域,由多个洼陷组成。以白云西洼、白云主洼和白云东洼三个次级构造单元为研究重点。埋藏史恢复过程中,要进行地层压实回剥、海平面和古水深校正。在白云凹陷中选取有代表性的 2 口钻井和 1 口虚拟井,并对其进行埋藏史恢复,计算各井每个时期的沉降量和沉降速率。结果表明,白云西洼早中新世珠江晚期、白云主洼始新世文昌期、白云东洼渐新世珠海期沉降异常高。结合区域构造运动和沉积相资料,表明白云西洼珠江组上段发育海相陆架斜坡深水扇沉积,白云主洼文昌组发育河湖相三角洲、冲积扇,白云东洼珠海组发育浅水陆架三角洲相、滨岸相。

**关键词:**白云凹陷;埋藏史;回剥;沉降量;沉降速率;沉积相

中图分类号:P67;P56;P548

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2016)01-0030-08

## Analysis of Subsidence Characteristics of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

ZHANG Mengran, JIANG Zhenglong

(School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Baiyun Sag, located in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin in the northern part of South China Sea, consists of several sub-sags. This paper focused on three secondary-level structural units including the west sub-sag, the primary sub-sag and the east sub-sag. In the study of the burial history, the data, such as the compaction backstripping of stratum and the correction of ancient water depth and sea level were necessary. Out of the existing three drilling wells and seven virtual wells in Baiyun Sag, three wells representing each sub-sag were chosen to recover their burial histories and calculate their subsidence amounts and subsidence rates during each period of the structural evolution. The results show that the subsidence of the west sub-sag in the early Miocene late Zhujiang period, the subsidence of the primary sub-sag in the Eocene Wenchang period, and the subsidence of the east sub-sag in the Oligocene Zhuhai period are violent. Combined with regional tectonic movement and sedimentary facies data, the results also shows that the uppersegment of the Zhujiang formation developed marine shelf slope deep-water fans in the west sub-sag; the Wenchang formation developed fluvial lake delta and alluvial fan in the primary sub-sag; and the Zhuhai formation developed shallow shelf delta and shore facies in the east sub-sag.

**Key words:** Baiyun sag; burial history; backstripping; subsidence amount; subsidence rate; sedimentary facies

国际上许多国家和地区(如美国的墨西哥湾沿岸盆地、西非的加蓬盆地、巴西的坎帕斯盆地等)的深水油气勘探已经取得了极大成功,而我国目前海洋石油勘探开发的主要地区仍在渤海湾、珠江口、北部湾、莺歌海

收稿日期:2015-04-10

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05025-003-004-001)

作者简介:张孟然(1992—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事海洋地质、含油气盆地分析等研究。

E-mail:zhangmr@cugb.edu.cn

姜正龙(1969—),男,湖南益阳人,副教授,博士,主要从事盆地综合分析和评价的研究工作,本文通信作者。

E-mail:jiangzl@cugb.edu.cn

和东海等水深不超过 500 m 的浅海地区。20 世纪 80 年代以来,珠江口盆地取得了一系列重要油气发现,2006 年在白云凹陷陆坡深水区发现了目前中国近海最大的荔湾 3-1 整装超千亿立方米大气田,揭示了白云凹陷具有很好的油气勘探潜力。

高红芳等<sup>[1]</sup>认为珠江口盆地构造沉降史具有幕式、多阶段变化特征,第一幕和第二幕沉降形成了盆地主要沉积地层和油气资源,第三幕沉降发育了区域盖层。赵中贤等<sup>[2]</sup>认为白云深水区新生代构造沉降由快到慢共划分为四幕,在裂后存在三期快速沉降和四期慢速沉降。廖杰等<sup>[3]</sup>认为白云凹陷存在裂后异常沉降,快速沉降主要发生在 17.5~13.8 Ma,凹陷中心的异常沉降量最大。朱伟林等<sup>[4]</sup>认为,白云凹陷裂陷期以来表现为持续沉降特征,深水低位扇体反复叠置在近相同的位置,认为与白云凹陷的演化历史密切相关。白云凹陷的勘探尚处于起步阶段,钻井数量较少,鉴于前人都是对白云凹陷整体沉降进行研究,却没有针对次级构造单元的沉降特征进行过研究,可能忽略不同次级单元沉积相的发育情况。本研究通过对白云凹陷三个主要洼陷的沉降特征进行分析,探讨了不同沉降背景下各洼陷发育的主要沉积相,对该区下一步的油气勘探具有一定的参考作用。

### 1 区域地质概况

珠江口盆地(图 1)位于华南大陆以南、南海北部、海南岛以及台湾岛之间的广阔陆架和陆坡区,东经 111°20'~118°17',北纬 18°25'~23°00'。盆地呈北东向展布,长 800 km,宽 300 km,面积  $2 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,是我国南海北部最大的含油气盆地<sup>[4]</sup>。珠江口盆地经历了三个演化阶段:①晚白垩世—早渐新世裂陷阶段;②晚渐新世—早中新世的裂后拗陷阶段;③中新世晚期至今的断块活动阶段<sup>[5-8]</sup>。

白云凹陷处在珠江口盆地珠二拗陷的深水区域,构造位置接近欧亚板块、印度-澳大利亚板块、太平洋板块和菲律宾板块的交界处,近东西走向,处在陆坡带,是南海北部具有代表性的新生代深水陆坡沉积凹陷。白云凹陷由多个洼陷组成,主要有白云西洼、白云主洼和白云东洼。新生代以来,白云凹陷经历了强烈减薄和持续沉降,现今地壳厚度由凹陷北端 23 km 向南阶梯式递减,凹陷中心仅 7 km,基底深度由凹陷北边缘陆架区的 5 km 逐渐下降到凹陷中心的 13 km 以上。凹陷有充足的沉积物供给,凹陷中心沉积地层厚度达 12.5 km<sup>[9-10]</sup>。

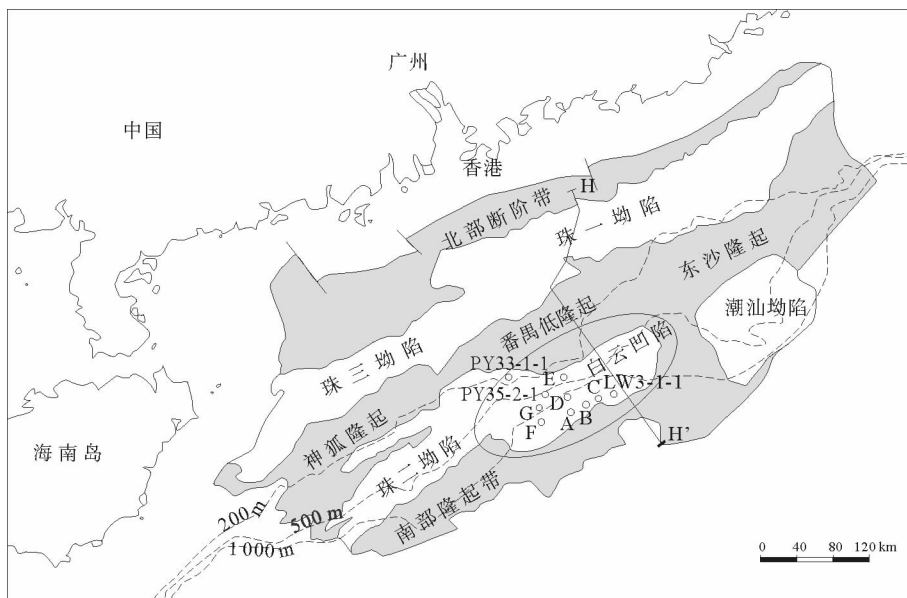


图 1 研究区区域位置图

Fig. 1 Regional map of research area

根据钻孔、测井、古生物、地震相和区域地震资料,可以将白云凹陷地层划分为 7 层:  $T_{100} \sim T_{80}$ ,  $T_{80} \sim$

$T_{70}, T_{70} \sim T_{60}, T_{60} \sim T_{50}, T_{50} \sim T_{40}, T_{40} \sim T_{20}, T_{20} \sim T_{10}$ , 分别对应着始新统文昌组 ( $E_2w$ )、渐新统恩平组 ( $E_3e$ )、珠海组 ( $E_3z$ )、中新统珠江组下段 ( $N_1z^2$ )、珠江组上段 ( $N_1z^1$ )、韩江组 ( $N_1h$ )、粤海组 ( $N_1y$ ) 的沉积地层 (图 2)。

## 2 埋藏史恢复方法

地史分析包括地层埋藏史、基底沉降史和构造演化史三个有机联系的地质历史过程的恢复和重建。

地史模拟是恢复地层古厚度,即地层压实校正的关键。压实校正则是把某一地层单元的现今实测厚度恢复到埋藏中或沉积时某一时刻的厚度,是去压实的过程。地层压实校正主要基于如下假设:①压实过程中地层横向宽度不变,纵向厚度随地层体积的变小而变小;②压实过程中地层骨架体积不变,地层体积变小是由孔隙体积变小引起的;③地层压实具有不可逆性,压实程度由埋深决定<sup>[11]</sup>。

### 2.1 地层压实回剥

重建盆地地史的方法主要有:沉积速率法、物质平衡法、骨架纵坐标法和回剥法,以回剥法最优<sup>[11-12]</sup>。回剥技术属“反演法”的范畴,即根据已知盆地现状,把各个时代沉积物逐一剥出,并进行压实、古水深和古今海平面变化等校正,恢复或再现盆地的构造史和沉积史。地层回剥的步骤为孔-深曲线确定、去压实校正,回剥计算时可按相同骨架厚度为同段的原则划分不同时间段,预先计算各段地层最大埋藏深度(地层顶面),再按同一段中骨架不变的原则进行回剥处理<sup>[13-15]</sup>,具体步骤如下。

岩石孔隙度的计算公式为:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-cz} \quad (1)$$

其中,  $\Phi$  是深度为  $z$  (单位:m) 时的岩石孔隙度(%),  $\Phi_0$  是岩石地表孔隙度(%),  $c$  是岩石的压实系数(%)。

白云凹陷新生代沉积厚度大,岩性以泥岩和砂岩为主,根据前人研究成果,在钻井岩性、测井声波时差曲线解释的基础上分别拟合了砂、泥岩各自孔隙度随深度变化的函数关系<sup>[2,16-18]</sup>。式(2)、(3)分别为白云凹陷泥岩孔隙度( $\Phi_m$ )和砂岩孔隙度( $\Phi_s$ )的计算公式:

$$\Phi_m = 0.67e^{-0.000924z}, R^2 = 0.9634, \quad (2)$$

$$\Phi_s = 0.39e^{-0.000303z}, R^2 = 0.7099. \quad (3)$$

其中,  $z$  为深度(单位:m),  $R^2$  为决定系数,泥岩地表孔隙度为 67%,压实系数为 0.0924%,砂岩地表孔隙度为 39%,压实系数为 0.0303%。

假设  $Y_1$  和  $Y_2$  为某一岩层的顶、底面深度(单位:m),当其上覆岩层被剥去一部分后,该岩层对应的顶、底深度变为  $Y_1'$  与  $Y_2'$  (单位:m),地层骨架没有变化,只有地层孔隙发生变化,回剥后该岩层的厚度为<sup>[19]</sup>:

$$Y_2' - Y_1' = Y_2 - Y_1 + \Phi_0(e^{-cY_2} - e^{-cY_1})/c + \Phi_0(e^{-cY_1'} - e^{-cY_2'})/c \quad (4)$$

其中,  $\Phi_0$ 、 $c$  分别是混合岩性的岩石地表孔隙度和压实系数,根据砂岩、泥岩等单一岩性的地表孔隙度已有较成熟的定量,混合岩性  $\Phi_0$ 、 $c$  可按比例通过加权近似求出<sup>[13]</sup>。

根据式(4)采用数值迭代法计算不同地质时期的地层古厚度或古埋深。

### 2.2 海平面变化和古水深

珠江口盆地的相对海平面变化曲线与全球海平面变化曲线不同(图 3)。30 Ma 以来相对海平面变化的三级旋回曲线与全球海平面变化一致;而二级旋回总体呈海侵的趋势,与全球海退的趋势明显不同<sup>[20-23]</sup>。因而,本研究选用珠江口盆地二级海平面变化曲线。

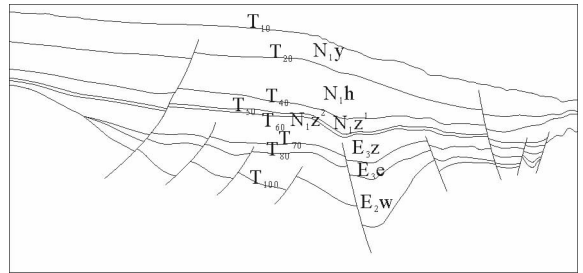


图 2 白云凹陷地质解释剖面图<sup>[4]</sup>(图 1 中 HH' 测线位置)

Fig. 2 Geological interpretation profile of Baiyun Sag (the profile HH' in Fig. 1)

白云凹陷古水深在 23.8 Ma 前后变化较大,原因是白云运动致使陆架坡折的位置从凹陷南缘突然向北迁移至凹陷北缘。本文通过相关井位的有孔虫数据,结合前人认识,认为 30 Ma 以前古水深为 0,23.8 Ma 时水深不超过 50 m,水深突变在 23.8~17.5 Ma 完成<sup>[3,24-25]</sup>,对应南海主要扩张阶段。古水深加上覆沉积物厚度,可以得到地层开始沉积时的深度。

前人的模拟过程中大都未考虑剥蚀量<sup>[9-10]</sup>,本文参考地震剖面,认为白云凹陷在早渐新世末期,恩平组地层遭受剥蚀,应用地层趋势法对白云凹陷恩平组剥蚀量进行恢复。因此,基底总沉降应为沉积物厚度  $H$  (由地层回剥得到)、古水深  $W_d$  和海平面变化  $S_L$  之和。其中海平面变化是指古海平面相对现今海平面的升降值,高水位为正,低水位为负。

### 3 埋藏史及沉降特征

研究过程中在白云凹陷选取了 LW3-1-1、PY35-1-2、PY33-1-1 以及 A、B、C、D、E、F、G 等共 10 口模拟井(图 1)。其中,PY33-1-1 位于白云西洼;PY35-1-2 和虚拟井 A、B、D、E、F、G 位于白云主洼;LW3-1-1 和虚拟井 C 位于白云东洼。选取各洼陷中间位置的井作为洼陷代表井,即白云西洼的 PY33-1-1,白云主洼的虚拟井 D,白云东洼的 LW3-1-1,来研究白云凹陷各洼陷的沉降。

应用 Basinmod 软件绘制上述 3 口井的埋藏史图(图 4),根据各洼陷代表井的基底沉降数据,分别绘制其沉降曲线图(图 4)。图 4(a)(b)(c)分别代表白云西洼、白云主洼、白云东洼的埋藏史和基底沉降。49,39,30,23.8,17.5,13.8,10.5 Ma 分别对应文昌组、恩平组、珠海组、珠江组下段、珠江组上段、韩江组、粤海组地层沉积的开始时刻。

根据数据计算各洼陷每个时期的沉降速率绘制沉降速率图(图 5),图 5(a)(b)(c)分别代表白云西洼、白云主洼、白云东洼的沉降速率变化。本文选取白云凹陷新生代文昌期(49~39 Ma)、恩平期(39~30 Ma)、珠海期(30~23.8 Ma)、珠江早期(23.8~17.5 Ma)、珠江晚期(17.5~13.8 Ma)、韩江期(13.8~10.5 Ma)、粤海期(10.5~5.3 Ma)七个时间段研究白云凹陷三个洼陷的沉降特点。

新生代沉降过程中,珠江口盆地白云凹陷经历了一系列构造运动<sup>[20]</sup>。珠琼运动在距今约 49 Ma 时发生,分为一幕和二幕,珠琼运动一幕时盆地发生张裂,面积扩大,可容纳空间大幅增加,形成众多深水湖盆;珠琼运动二幕发生在渐新世,运动后期盆地抬升遭受强烈剥蚀,湖盆面积扩大,水体变浅。南海运动距今约 30 Ma 时发生,地层沉降过程中,珠二坳陷海平面上升,海水从南向北大规模侵入。白云运动始于 23.8 Ma,期间地层继续沉降,之前白云凹陷发育浅海陆架沉积,随着南海扩张脊向南跃迁,陆架坡折带由白云凹陷南侧突变跳跃至凹陷北侧,其沉积环境也由渐新世晚期的浅海陆架环境转为陆坡深水环境<sup>[26]</sup>。东沙运动发生于晚中新世晚期,地层发生持续沉降,约在距今 5.5 Ma 时停止活动,构造上主要表现为断块升降,其中隆起区沉积物遭受剥蚀,造成中新世及部分上新世地层缺失,影响了粤海组地层的沉积<sup>[27]</sup>。

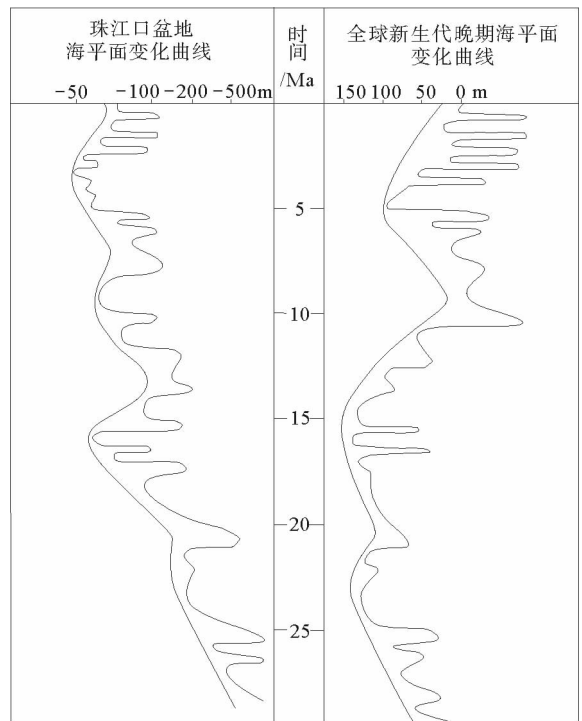


图 3 珠江口盆地海平面变化与全球海平面变化对应关系图<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Correspondence between the sea-level change of the Pearl River Mouth Basin and the global sea-level change

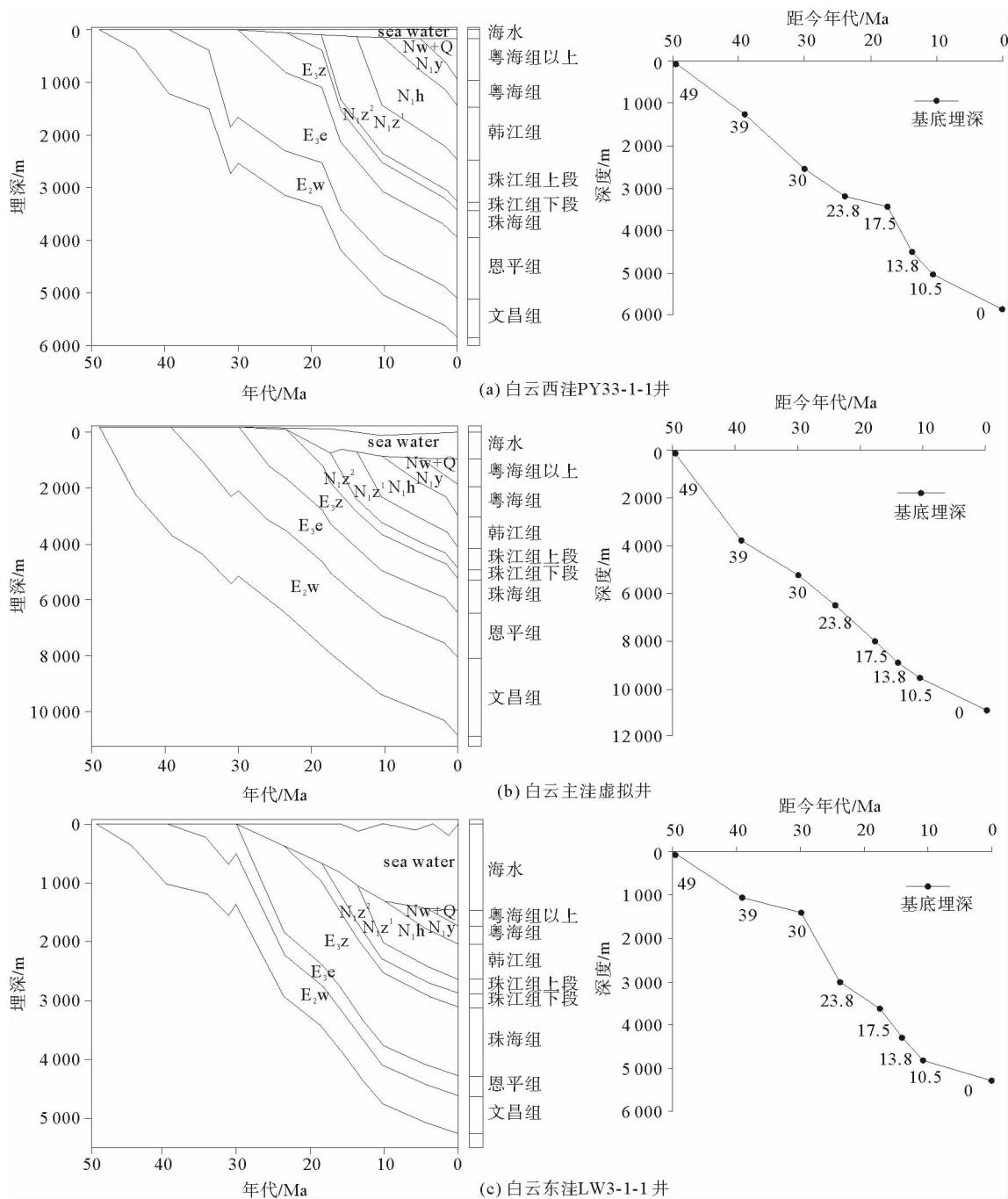


图 4 白云凹陷各井埋藏史和基底沉降变化图

Fig. 4 Burial history and basement subsidence chart of each drilling well in Baiyun Sag

白云西洼始新世文昌期和渐新世恩平期沉降量均较多,总沉降速率分别为 125,142 m/Ma,构造沉降速率分别为 75,80 m/Ma,说明受珠琼运动一幕的影响较大,受珠琼运动二幕后盆地抬升的影响较小;珠海期沉降量明显减少,沉降速率减慢,说明受南海运动的影响较小;中新世珠江早期沉降量明显减少,总沉降速率降为最慢 38 m/Ma,构造沉降速率也降为最慢 18 m/Ma,白云运动对西洼的影响很小;珠江晚期沉降量显著增加,总沉降速率暴增为 297 m/Ma,构造沉降速率 141 m/Ma,此时白云运动尚未结束,对西洼开始产生较大影响;韩江期沉降量减少,沉降速率减慢,此时白云运动进入了尾期,对西洼的影响开始变小;粤海期沉降量和韩江期相近,总沉降速率减至 80 m/Ma,构造沉降速率减至 30 m/Ma,说明该期发生的东沙运动对西

洼产生的影响比较小。

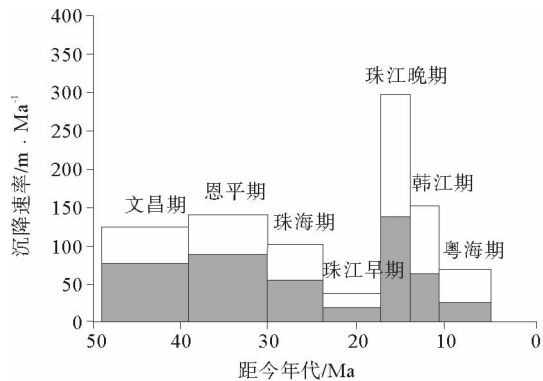
白云主洼在始新世文昌期沉降量最多,总沉降速率和构造沉降速率最快,分别为 377,229 m/Ma,说明受珠江运动一幕的影响最大;渐新世恩平期沉降量开始减少,总沉降速率和构造沉降速率迅速减至 163,99 m/Ma,主洼受珠江运动二幕后期盆地抬升的影响较大;珠海期沉降量和恩平期相近,总沉降速率和构造沉降速率均有一定增加,达 204,103 m/Ma,表明主洼受到南海运动的影响,沉降开始加快;中新世珠江早期沉降量和珠海期相近,总沉降速率和构造沉降速率分别升至 238,108 m/Ma,说明受白云运动的影响很大;珠江晚期沉降量明显减少,沉降速率减少,白云运动对主洼的影响开始减小;韩江期的沉降量和沉降速率相比珠江晚期,有小幅度下降,白云运动对主洼的影响继续减小;粤海期沉降量和韩江期相近,总沉降速率和构造沉降速率分别减慢至 103,40 m/Ma,说明此期的东沙运动对西洼产生的影响较小。

白云东洼在始新世文昌期沉降量较大,总沉降速率和构造沉降速率分别为 105,58 m/Ma,说明受珠江运动一幕的影响比较大;渐新世恩平期沉降量迅速减少,总沉降速率和构造沉降速率分别减至 39,26 m/Ma,东洼受珠江运动二幕后期盆地抬升的影响非常大;珠海期沉降量最多,总沉降速率和构造沉降速率均达到峰值 258,149 m/Ma,说明东洼受到南海运动的影响非常大;中新世珠江早期沉降量明显减少,总沉降速率和构造沉降速率迅速减至 97,48 m/Ma,说明东洼受白云运动的影响较小;珠江晚期沉降量略增,总沉降速率和构造沉降速率分别加至 186,90 m/Ma,表明白云运动开始对东洼产生较大影响;韩江期沉降速率减慢,白云运动对东洼的影响减弱;粤海期沉降量和韩江期相近,总沉降速率和构造沉降速率分别减至 50,19 m/Ma,说明此期的东沙运动对西洼的影响较小。

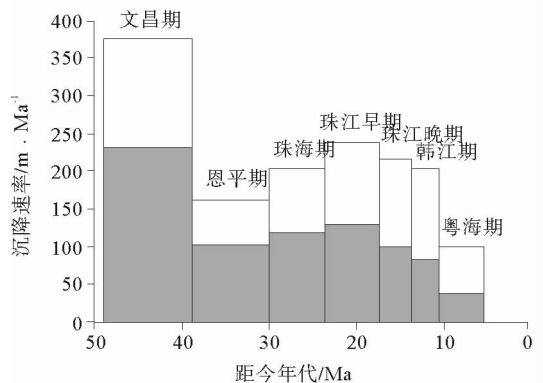
#### 4 沉降对沉积相的影响

康永晓等<sup>[28]</sup>结合地震资料,认为白云凹陷的基底由岩浆岩构成,经历了新生代的断陷、断拗、拗陷等几个构造演化阶段,相应发育了陆相断陷湖盆沉积、大型断拗湖盆沉积、海陆过渡相浅海三角洲沉积以及陆架斜坡海相深水沉积等四套沉积组合,形成白云凹陷独特的三层结构,在时间和空间上形成了良好的生储盖组合。朱伟林等<sup>[4]</sup>认为白云凹陷深水区发育三类有利储盖组合:①23.8 Ma 以上的珠江组—韩江组海相陆架斜坡深水扇沉积组合;②珠海组浅水陆架三角洲—滨岸砂泥岩沉积组合;③断拗期恩平组河湖相三角洲体系砂泥岩沉积组合。

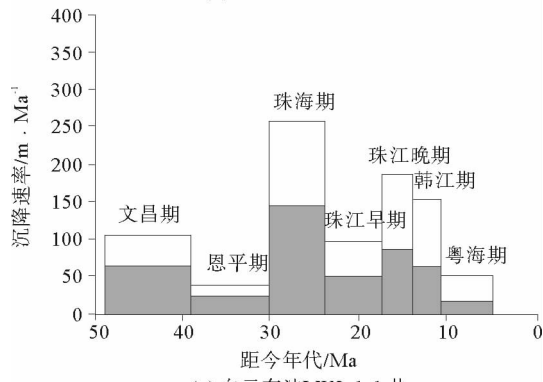
结合区域构造运动与沉积相分析认为:①早中新世珠江晚期,白云西洼受白云运动的影响较大,沉降量



(a) 白云西洼PY33-1-1井



(b) 白云主洼虚拟井



(c) 白云东洼LW3-1-1井

□ 总沉降速率    ■ 构造沉降速率

图5 白云凹陷各井沉降速率图

Fig. 5 Subsidence rates of each drilling well in Baiyun Sag

增加较多,沉降最快,可容纳空间大,为陆坡深水环境,珠江口盆地的主要物源来自白云凹陷的西北方向<sup>[9]</sup>,距离西洼较近,西洼物源供给充足,发育海相陆架斜坡深水扇;白云主洼和白云东洼此期受白云运动影响不大,沉降不明显,接受物源沉积较少。②始新世文昌期,白云主洼受珠琼运动一幕的影响较大,沉降量最多,沉降最快,为陆相深水湖盆环境,三角洲体系砂泥岩、河湖相冲积扇发育;白云西洼和白云东洼在此期间,沉降不如主洼明显。③早渐新世珠海期,白云东洼受南海运动的影响较大,沉降量最多,沉降最快,说明距今30~23.8 Ma时东洼为浅海陆架环境,发育浅水陆架三角洲-滨岸砂泥岩。

## 5 结论

通过地层压实回剥技术,分别选取研究区各洼陷具有代表性的井进行地层压实回剥,然后经过古水深和海平面校正,获得各井的埋藏史和沉降数据,结合区域构造运动与沉积相资料,进一步分析各洼陷沉降特征,得出如下认识:

1)白云西洼在新生代受白云运动的影响最大,珠江晚期沉降量显著增加,沉降速率最快;白云主洼受珠琼运动一幕的影响最大,文昌期沉降量最多,沉降速率最快;白云东洼受南海运动影响最大,珠海期沉降量最多,沉降速率最快。

2)白云西洼珠江组上段发育海相陆架斜坡深水扇沉积,白云主洼文昌组地层发育河湖相三角洲、冲积扇沉积,白云东洼珠海组地层发育浅水陆架三角洲相、滨岸相沉积,为重点勘探层位。

### 参考文献:

- [1]高红芳,杜德莉,钟广见.珠江口盆地沉降史定量模拟和分析[J].南海地质研究,2006(1):11-20.  
GAO Hongfang, DU Deli, ZHONG Guangjian. Quantitative simulation of subsidence history and analysis of Pearl River Mouth Basin in South China Sea[J]. Geological Research of South China Sea, 2006(1):11-20.
- [2]赵中贤,孙珍,谢辉,等.白云深水区新生代沉降及岩石圈伸展变形[J].地球物理学报,2011,54(12):3336-3343.  
ZHAO Zhongxian, SUN Zhen, XIE Hui, et al. Baiyun deepwater cenozoic subsidence and lithospheric stretching deformation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12):3336-3343.
- [3]廖杰,周蒂,赵中贤,等.珠江口盆地白云凹陷裂后异常沉降的数值模拟[J].中国科学(地球科学),2011,41(4):504-517.  
LIAO Jie, ZHOU Di, ZHAO Zhongxian, et al. Numerical modeling of the anomalous post-rift subsidence in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Science China(Earth Sciences), 2011, 41(4):504-517.
- [4]朱伟林.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,2007:60-67.
- [5]赵淑娟,吴时国,施和生,等.南海北部东沙运动的构造特征及动力学机制探讨[J].地球物理学进展,2012,27(3):1008-1019.  
ZHAO Shujuan, WU Shiguo, SHI Hesheng, et al. Structures and dynamic mechanism related to the Dongsha movement at the northern margin of South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3):1008-1019.
- [6]PIN Y, DI Z, ZHAO S L. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2001, 338(1):1-21.
- [7]BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P. 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 Atmospheres, 1993, 98(B4):6299-6328.
- [8]SHI X, BUROV E, LEROY S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2005, 407(1):117-134.
- [9]庞雄.南海珠江深水扇系统及油气[M].北京:科学出版社,2007:230-236.
- [10]付洁,黎明碧,唐勇,等.珠江口盆地白云凹陷裂后异常沉降研究及成因分析[J].海洋学研究,2013,31(1):1-15.  
FU Jie, LI Mingbi, TANG Yong, et al. Post-rift subsidence anomaly and its mechanism in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(1):1-15.
- [11]叶加仁,陆明德.盆地地史模拟述评[J].地质科技情报,1995,14(2):45-51.  
YE Jiaren, LU Mingde. Review of basin geohistory modeling[J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(2):45-51.

- [12]石广仁,李惠芬.一维盆地模拟系统 BAS1[J].石油勘探与开发,1989,16(6):1-11.  
SHI Guangren,LI Huifen. 1-D basin modeling system BAS1[J]. Petroleum Exploration and Development,1989,16(6):1-11.
- [13]丛晓荣,于兴河,苏明,等.南海北部陆坡区晚中新世以来沉降特征[J].热带海洋学报,2013,32(6):42-49.  
CONG Xiaorong,YU Xinghe,SU Ming,et al. Tectonic subsidence characteristics on the northern continental margin of the South China Sea since Late miocene[J]. Journal of Tropical Oceanography,2013,32(6):42-49.
- [14]MATSCHULLAT J. Basin analysis principles and applications[J]. Journal of Soils and Sediments,2005,5(3):191.
- [15]ATHY L F. Density,porosity,and compaction of sedimentary rocks[J]. AAPG Bulletin,1930,14(1):1-24.
- [16]CLIFT P,LIN J,BARCKHAUSEN U. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology,2002,19(8):951-970.
- [17]MCKENZIE D. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters,1978,40(1):25-32.
- [18]STAM B,GRADSTEIN F M,LLOYD P,et al. Algorithms for porosity and subsidence history[J]. Computers & Geosciences,1987,13(4):317-349.
- [19]姜正龙,邓宏文,林会喜,等.古地貌恢复方法及应用:以济阳拗陷桩西地区沙二段为例[J].现代地质,2009,23(5):865-871.  
JIANG Zhenglong,DENG Hongwen,LIN Huixi,et al. Methods and application of paleo-geomorphologies rebuilding: An example of the second member of Shahejie formation,Zhuangxi area,Jiyang depression[J]. Geoscience,2009,23(5):865-871.
- [20]DONG D D,WU S G,ZHANG G C,et al. Rifting process and formation mechanisms of syn-rift stage prolongation in the deepwater basin,northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin,2008,53(23):3715-3725.
- [21]庞雄,陈长民,吴梦霜,等.珠江深水扇系统沉积和周边重要地质事件[J].地球科学进展,2006,21(8):793-799.  
PANG Xiong,CHEN Changmin,WU Mengshuang,et al. The Pearl River deep-water fan systems and significant geological events[J]. Advances in Earth Science,2006,21(8):793-799.
- [22]秦国权.珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J].中国海上油气(地质),2002,16(1):1-10.  
QIN Guoquan. Late Cenozoic sequence stratigraphy and sea-level changes in Pearl River Mouth Basin,South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology),2002,16(1):1-10.
- [23]庞雄,陈长民,施和生,等.相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J].地学前缘,2006,12(3):167-177.  
PANG Xiong,CHEN Changmin,SHI Hesheng,et al. Response between relative sea-level change and the Pearl River deep-water fan system in the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers,2006,12(3):167-177.
- [24]ROBERTS A M,KUSZNIR N J,YIELDING G,et al. 2D flexural backstripping of extensional basins:The need for a sideways glance[J]. Petroleum Geoscience,1998,4(4):327-338.
- [25]HUANG C,ZHOU D,SUN Z,et al. Deep crustal structure of Baiyun Sag,northern South China Sea revealed from deep seismic reflection profile[J]. Chinese Science Bulletin,2005,50(11):1131-1138.
- [26]董冬冬,王大伟,张功成,等.珠江口盆地深水区新生代构造沉积演化[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(5):17-22.  
DONG Dongdong,WANG Dawei,ZHANG Gongcheng,et al. Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of deepwater area,Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2009,33(5):17-22.
- [27]王莹.珠江口盆地白云凹陷荔湾井区珠海组混合沉积成因模式及其油气勘探前景[D].北京:中国科学院研究生院,2012:15-20.
- [28]康永晓,张国军,冯于恬,等.珠江口盆地白云凹陷沉积充填演化研究[J].化学工程与装备,2011(9):48-50.  
KANG Yongxiao,ZHANG Guojun,FENG Yutian,et al. An analysis of depositional evolution in Baiyun sag,Pearl River Mouth Basin[J]. Chemical Engineering & Equipment,2011(9):48-50.