

舒梁锋, 代一丁, 朱明, 等. 基于沉积构型半定量恢复古水深: 以珠江口盆地白云凹陷为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 51-59.

SHU Liangfeng, DAI Yiding, ZHU Ming, et al. Semi-quantitative restoration of paleobathymetric of Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin based on depositional architecture[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 51-59.

基于沉积构型半定量恢复古水深: 以珠江口盆地白云凹陷为例

舒梁锋, 代一丁, 朱明, 张丽丽, 雷胜兰, 高中亮, 韩霄, 于飒

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 深圳 518054)

摘要:针对南海北部深水沉积盆地的古水深恢复这一难题,以珠江口盆地白云凹陷为例,根据陆架陆坡沉积特征,通过在三级层序格架内精细地震线描和层拉平恢复结合的沉积构型技术对白云凹陷裂后阶段 5 个关键地质时期(21 Ma、19.1 Ma、13.8 Ma、10 Ma 和 5.33 Ma)古水深进行研究。结果表明,21 Ma、19.1 Ma 时期平均古水深 < 300 m,之后至 13.8 Ma 时期最大水深 900 m。10 Ma 和 5.33 Ma 时期,水深由 1 100 m 扩大至 1 600 m。从 21~5.33 Ma 时期,陆架坡折带沿 NW-SE 向分布在白云北坡,古水深表现为西北陆架区浅,东南陆坡-深海平原区水体深。白云凹陷古水深整体上经历了浅海-半深海-深海的水体持续加深过程,存在 2 期(13.8 Ma 和 5.33 Ma)水深速率相对其他时期变快的时期,古水深变化速率分别为 117 和 103 m/Ma,13.8 Ma 时期水体加深速率最大。古水深的研究成果对白云凹陷热沉降史和沉积古地貌形态恢复具有重要研究意义。

关键词:古水深;半量化;沉积构型;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:P744.4

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.089

0 引言

古水深作为盆地古地貌恢复和构造沉降史分析的重要参数,一直受到地质学家的重视,其恢复也是国际前缘研究的难点。目前古水深恢复有多种方法^[1-5],包括古生物遗迹化石法、浮游生物比例法、岩盐分带法等,这些方法在应用时,依赖于遗迹化石与水深的对应关系,由于古生物环境反映的水深通常为一个区间范围,实际上为一种定性-半定量的方法。此外,近年出现的滨线轨迹计算古水深的方法,其作为研究层序填充过程中可容纳空间与沉积物供给关系的重要参数,能够定量地计算各层序

形成时期内古水深变化,在三角洲发育区适用^[6-8]。还有在台地边缘的盆地区通过地层厚度恢复古水深,仅在沉积补偿点和基准面确定且差异沉积量可以忽略不计的条件下,才能根据地层厚度定量恢复古水深^[9-10]。其他如测井曲线计算古水深方法等则是定量分析古水深。针对陆架-陆坡区的古水深恢复,上述方法在实践中存在原始样品获取难,预测精度低等限制和不足,都有其局限性,因此,有必要探讨古水深恢复更有效的方法。

古水深的恢复是珠江口盆地热沉降史研究的关键因素^[11-12]。由于前人在沉降分析中古水深的取值不同,导致沉降结果差异大,对热沉降史的研究结果不一^[13-15]。热沉降史直接影响珠江口盆地白云凹陷的生烃演化研究,进而影响白云凹陷生烃资源量评价,这对油气勘探的资源潜力评估和勘探决策部署至关重要。

通过在三级层序格架内精细地震线描沉积体和体系域内层拉平的应用,有效识别沉积体和恢复层序模式指导下的沉积体形态,从而能够比较准确

收稿日期: 2021-04-08

资助项目: 中海石油(中国)有限公司“十三五”科技重点项目“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 37 SZ 01 SHENHAI)

作者简介: 舒梁锋(1987-),男,硕士,工程师,主要从事含油气盆地地质综合研究与勘探目标评价工作。E-mail: shulf@cnooc.com.cn

的获得沉积期的古水深。前人在深水区针对古水深恢复问题未用该方法做过分析,本文尝试应用此方法对白云凹陷古水深恢复进行探讨,应用沉积构型技术,在三级层序格架内半定量计算白云凹陷裂后阶段5个关键时期的古水深变化,为沉积古地貌和热沉降史恢复研究和后续本地区油气勘探工作提供基础技术支撑。

1 地质背景

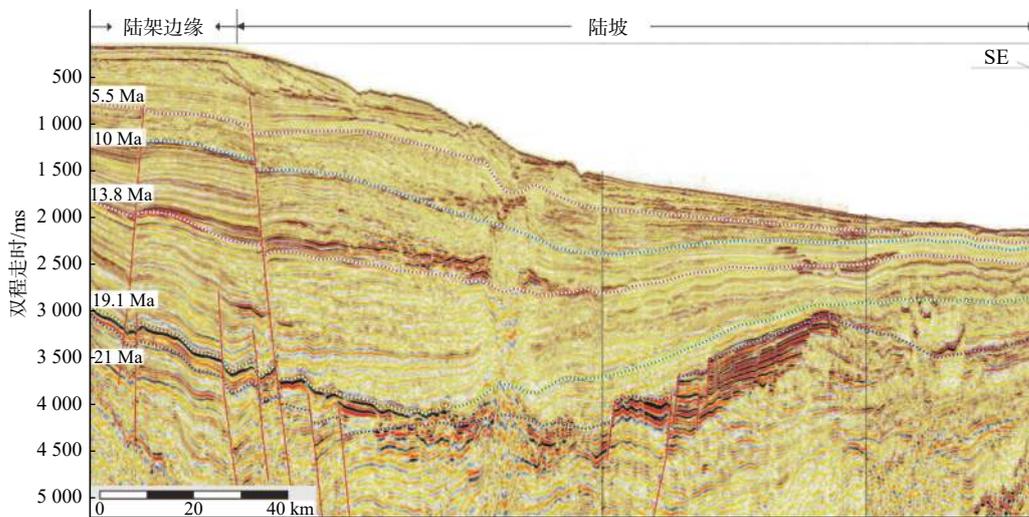
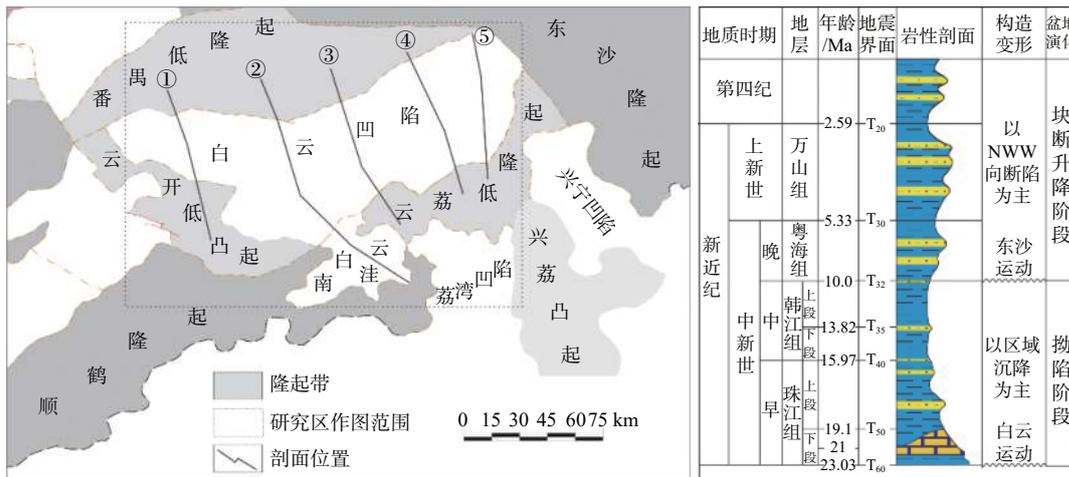
白云凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷,北接番禺低隆起,南部为顺鹤隆起所包围,西连云开低凸起,东邻东沙隆起,主体为陆架边缘至陆坡深水环境(图1)。该地区已发现大量的油气^[16-19],为珠江口盆地深水油气勘探的主战场。

白云凹陷自新生代以来经历了神狐运动、珠琼

运动、南海运动、白云运动和东沙运动等多次大的区域性构造运动,由此将盆地演化分为古新世—始新世断陷、渐新世—中新世早期拗陷热沉降和中新世晚期以来断块升降3个阶段^[16,19-20]。该凹陷新生代地层在珠江口盆地中发育最完整,最大沉积地层超过10 000 m,自下而上发育古近系文昌组、恩平组断陷期陆相地层,珠海组断拗转换期海陆过渡相地层,新近系珠江组、韩江组、粤海组和万山组(图1)等拗陷期海相地层^[21-23],整体历经了从断陷盆地到被动大陆边缘的演化历程。

2 古水深恢复方法

本次研究古水深恢复的关键问题为沉积体的有效识别和沉积形态恢复,其采用的沉积构型包括地震线描分析技术和地震层拉平技术,其是在三级



地震剖面为剖面②

图1 研究区位置图和珠江口盆地新近纪综合柱状图

Fig.1 Location of the study area and Neogene comprehensive column of Pearl River Mouth Basin

层序格架内由地震线描沉积体和体系域内关键基准面层拉平相结合, 通过在体系域内有效沉积体划分和层序模式指导下的沉积体形态恢复比较精确地获得沉积时期的古水深。

2.1 地震线描分析技术

通过对地震剖面上反射波同相轴空间排列组合方式的刻画, 针对复杂构造内部地层结构或层序地层单元内地层结构的剖析, 揭示其构造样式、层序地层沉积序次及叠加方式^[24-25]。由于不同环境下水动力条件不同, 砂体展布特征有差异, 反映在地震相及沉积结构有差异。根据同相轴的连续性、强弱、频率、叠置关系等特点解释刻画地震剖面, 进行沉积原型恢复。

2.2 地震层拉平技术

该方法一般以沉积基准面或最大海泛面作为参考基准面, 将研究层序内目的层基准面作为顶面

拉平, 即代表原始沉积时期的海(湖)平面, 底面的形态即为该层序地层沉积期的相对古地貌^[26-27]。层拉平法的重点在于基准面的选取, 在深水欠补偿盆地中, 选取等时基准面作为虚拟的古海平面拉平。一般陆架区地层原始产状表现为水平或近似水平, 可沿着目的层同向轴追踪, 陆坡形态恢复则需要先确定陆架坡折带位置, 然后通过目的层层序格架内深水沉积体系的地震线描, 下伏地层产状、地貌形态特征等反复迭代确定。关键地质时期各层序内古地貌可逐一恢复。最终经过去压实校正后, 可计算出该时期古水深深度^[28](图 2)。本方法适用于后期构造变形不强烈地区, 通过基准面来恢复相对古地貌形态特征。

本次研究利用时间域三维地震数据体, 其地震数据处理面元为 12.5 m×12.5 m, 记录长度为 8 s, 采样间隔为 1 ms。频谱分析表明, 目的层段有效频宽为 8~40 Hz, 主频近 20 Hz, 地震品质较好, 满足半量化沉积构型分析需求。

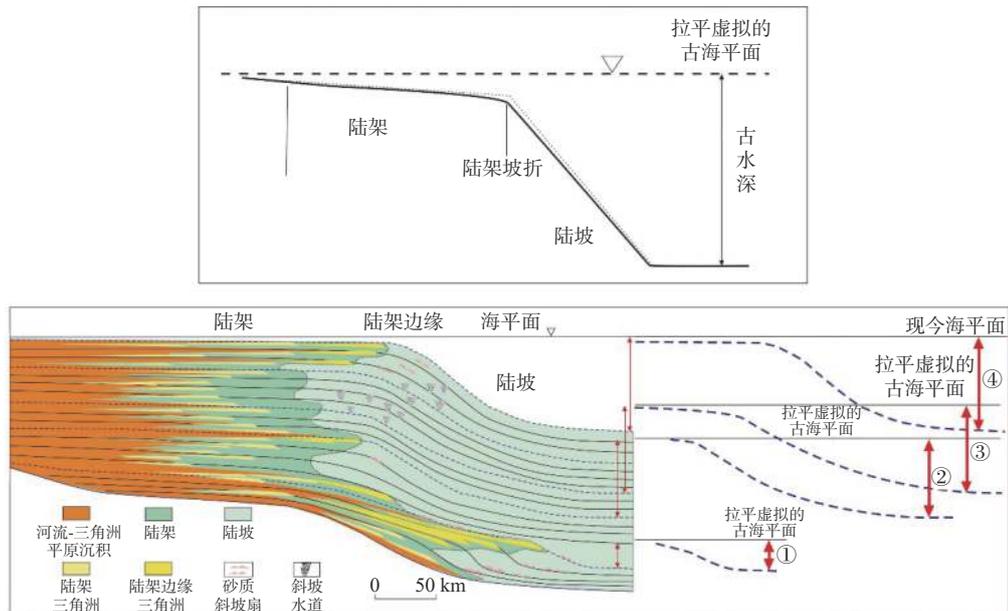


图 2 白云凹陷古水深恢复示意图

Fig.2 Schematic diagram of paleobathymetric restoration in Baiyun Sag

3 白云凹陷古水深

白云凹陷裂后期经历了白云运动和东沙运动, 中新世沉积期以区域沉降为主, 早中新世的珠江组下部广泛分布有河流三角洲、陆架边缘三角洲和滨浅海沉积, 中、上部主要由厚层的浅海陆架至陆架斜坡泥岩等组成。中中新统韩江组主要由厚层的

泥岩、泥质粉砂岩组成, 中、下部夹砂岩、砂质泥层, 主要由外陆架斜坡的细粒沉积, 中、下部发育有三角洲-滨岸砂质沉积。上中新统粤海组、上新统万山组主要由厚层的半深海或斜坡及三角洲沉积等泥岩、砂质泥岩组成^[29], 前人对珠江口盆地进行了大量的层序地层学研究, 将中新世地层按年代划分为多个三级层序, 其中关键层序界面以年代命名分别有 SB23.8、SB21、SB17.5、SB16.5、SB15.97、

SB13.8、SB12.5、SB10 和 SB5.33^[30-32]。

本次研究根据层拉平可操作性和区域构造沉积演化相结合的原则,确定了5个关键地质时期,分别对应珠江组下部(SB23.03-SB 21 Ma 和 SB21-SB19.1 Ma)、韩江组上段(SB15.97-SB 13.82 Ma)和下段(SB13.82-SB10.0 Ma)、粤海组(SB10.0-SB5.33 Ma)沉积期。通过对这5个关键时期的沉积构型分析,研究古水深在垂向和平面的特征。

3.1 古水深垂向演化特征

从中新世至今,陆架坡折带从白云凹陷南部迁移至珠江组时期白云凹陷北部,此后一直稳定在白云凹陷北坡,未发生明显迁移。而这一时期沉积物主要集中在陆架和上陆坡区,水体逐渐加深,到现今达到最大。

在珠江组早期(21 Ma),陆架坡折带位于白云凹陷南部,白云北坡地区为海岸平原及滨岸相带,白云凹陷主体为陆架沉积区(图3)。在白云北坡发

育规模较小的滨岸三角洲沉积,在白云凹陷南部陆架边缘附近发育大型陆架边缘三角洲。该三角洲结构特征由早期前积逐渐变为晚期加积,三角洲前缘斜坡即为陆坡,前人研究已证实陆坡水道存在,揭示深水重力流沉积物发育^[33-35]。整体沉积特征表现为从海岸平原-滨岸到浅水区陆架,再到陆架边缘三角洲-前三角洲陆坡深水沉积。

在19.1 Ma时期,陆架坡折带已迁移至白云凹陷北部,形态特征容易识别,白云凹陷主体变为陆坡沉积区,仅在白云北坡地区为滨岸及陆架区^[30,36](图4)。在白云北坡发育有陆架边缘三角洲,从三角洲朵体的分布面积、厚度和长度等对比来看,都比珠江组时期的陆架边缘三角洲小很多,该三角洲前积坡度较缓,陆架边缘三角洲沉积晚期明显可见上超反射特征,反映水体变深的过程。在19.1 Ma时期,整体沉积特征表现为早期形成陆坡内凹陷,后期被沉积物填平补齐,末期随着海侵范围扩大,淹没至白云北坡陆架坡折带。

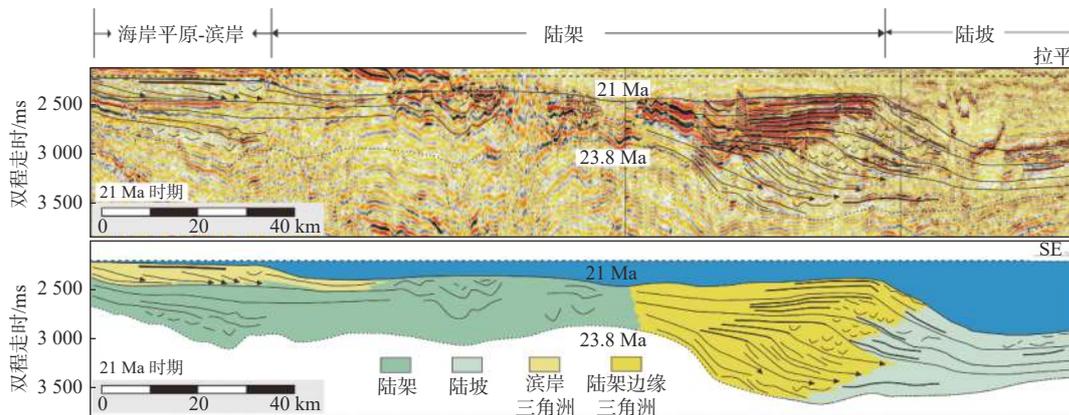


图3 21 Ma 时期白云凹陷古水深恢复剖面形态特征

Fig.3 Morphological characteristics of paleobathymetric restoration profile in Baiyun Sag during 21 Ma

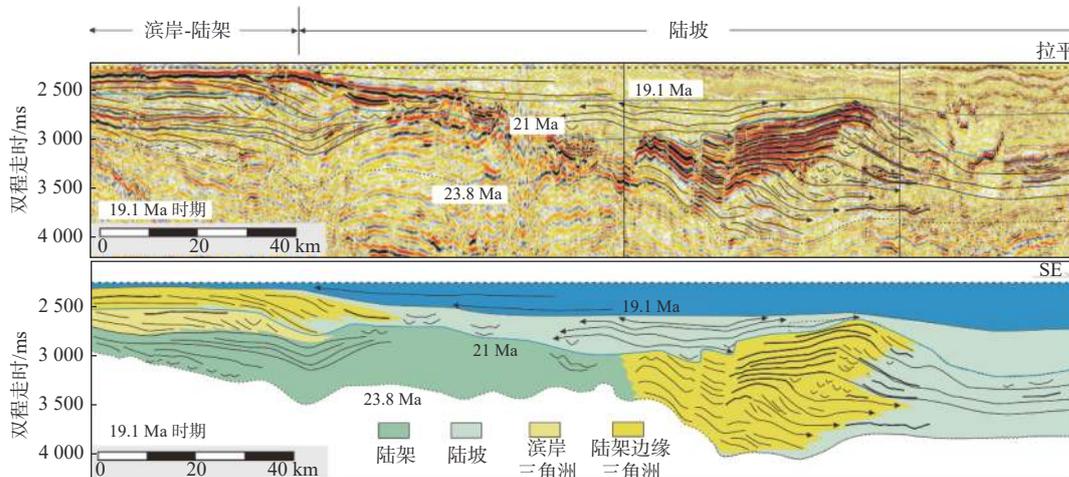


图4 19.1 Ma 时期白云凹陷古水深恢复剖面形态特征

Fig.4 Morphological characteristics of paleobathymetric restoration profile in Baiyun Sag during 19.1 Ma

在 13.8 Ma 时期, 白云凹陷主体变为陆坡-深海平原沉积区, 白云凹陷北部地区为陆架边缘(图 5)。陆架坡折带在 21 Ma 之后变得平缓, 不容易识别陆架坡折点, 但在 13.8 Ma 时期由于在白云北坡发育小型陆架边缘三角洲, 坡折点变得易于识别。该时期陆架边缘三角洲体发育规模比珠江组时期更小, 前积距离短、坡度陡、沉积分布范围有限。该三角洲为韩江组下降体系域阶段形成, 水体有短暂下降, 地震剖面能明显切线斜交型前积发射特征, 后期沉积反射层有上超, 反映水体变深。在 13.8 Ma 之前, 陆坡沉积物较厚, 发育有三角洲-陆坡水道-盆底扇体系^[37-41], 随后白云主洼进一步沉降, 水体加大变深。整体沉积特征表现为该时期陆架坡折带形态明显, 发育有陆坡峡谷水道和盆底扇沉积体系, 陆坡角度较缓、水体深。

在 10 Ma 时期, 陆架坡折带仍位于白云凹陷北部, 坡折点难以识别, 坡折带变得宽缓, 三角洲不发育, 沉积物早期以加积为主, 晚期表现为退积(图 6)。

陆坡在 10 Ma 之前沉积厚度大, 主要在陆架和上陆坡堆积, 陆坡水道和盆底扇不发育, 陆坡角度变陡, 白云凹陷水深变大。整体沉积特征表现为上陆坡加积, 陆坡范围变长。

在 5.33 Ma 时期, 陆架边缘发育水道, 三角洲不发育, 但陆坡水道大规模持续发育, 从早期至晚期侧向迁移明显^[29, 42](图 7)。沉积物以上陆坡水道堆积为主, 沉积厚度明显增加, 下陆坡沉积物变少。白云凹陷水体继续变深, 整体沉积特征表现为多水道发育, 下陆坡地层减薄。

3.2 古水深平面分布特征

通过对白云凹陷内控制性骨干剖面各时期古水深计算统计, 可得到各时期古水深平面展布图。本次研究通过 5 条控制性骨干剖面(剖面位置见图 1), 每条剖面 5 个采样点, 共计 125 个采样点来编制各时期古水深平面展布图(图 8)。

在 21 Ma 之前, 陆架坡折在白云凹陷南部形成,

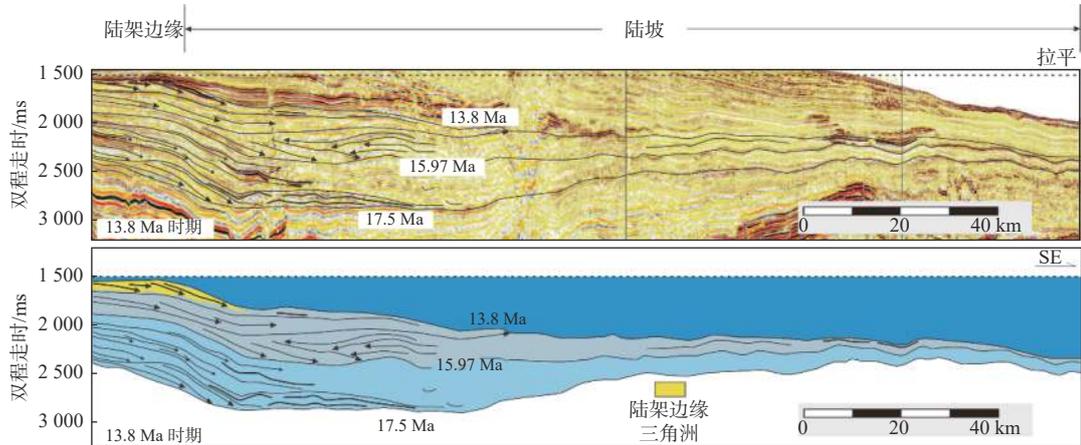


图 5 13.8 Ma 时期白云凹陷古水深恢复剖面形态特征

Fig.5 Morphological characteristics of paleobathymetric restoration profile in Baiyun Sag during 13.8 Ma

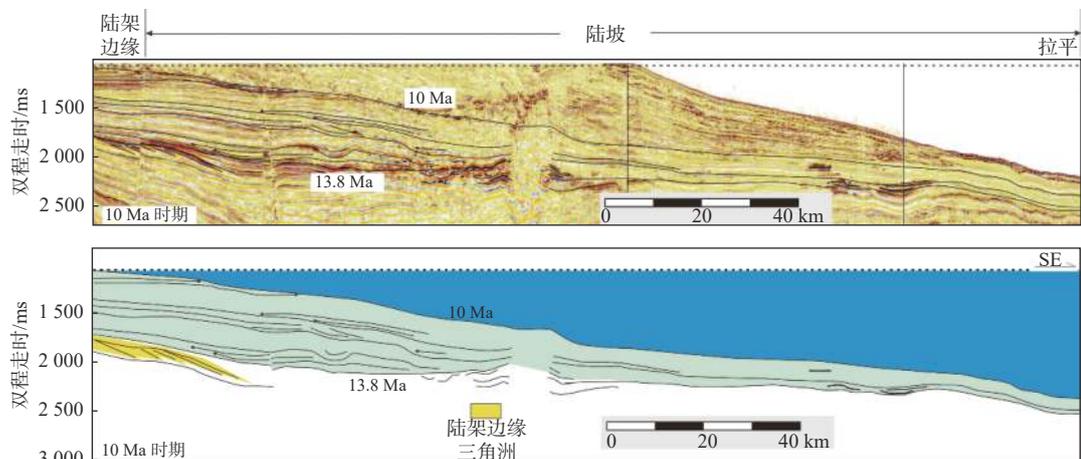


图 6 10 Ma 时期白云凹陷古水深恢复剖面形态特征

Fig.6 Morphological characteristics of paleobathymetric restoration profile in Baiyun Sag during 10 Ma

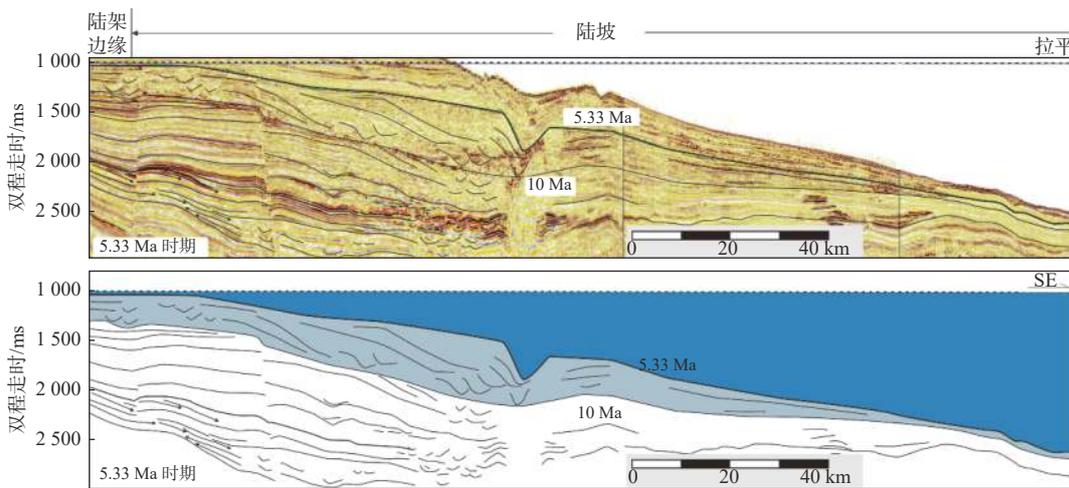


图7 5.33 Ma 时期白云凹陷古水深恢复剖面形态特征

Fig.7 Morphological characteristics of paleobathymetric restoration profile in Baiyun Sag during 5.33 Ma

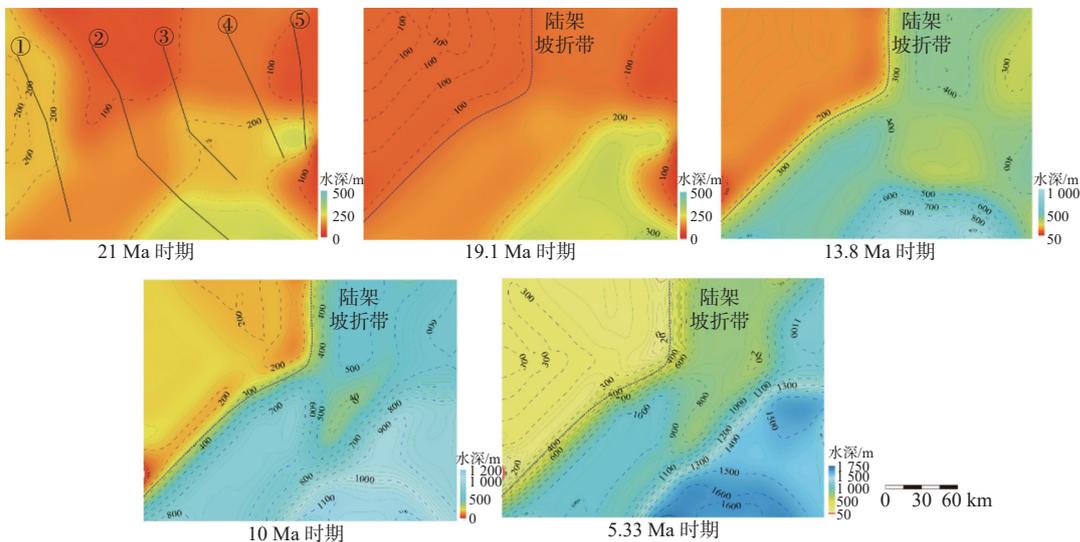


图8 白云凹陷各时期古水深平面展布

Fig.8 Distribution of paleobathymetric depth in various periods in Baiyun Sag

白云北坡整体陆架水深 <100 m, 陆坡水深在白云凹陷南部不超过 300 m。在 21~19.1 Ma 之前, 水深整体较浅, 受控于白云凹陷南部珠海组陆架边缘三角洲的展布, 其古水深在南部一侧较深, 走向呈 NE 向条带状展布, 整体陆架水深 <100 m, 陆坡水深在 200~300 m。在 13.8 Ma 时期, 陆架坡折带位于白云凹陷北坡, 展布方向与珠江组早期 21~19.1 Ma 时期一致, 陆架坡折之上陆架区水体浅, 坡折之下陆坡区加深, 白云南部更深, 水深在 800~900 m。在 10 Ma 时期, 陆架陆坡展布格局不变, 随着海侵加大, 整体水深继续变深, 白云凹陷南部地区最大水深超过 1 100 m。在 5.33 Ma 时期, 白云凹陷整体变深, 陆坡区以下东北部相对其他地区变深明显, 白云凹陷南部地区最深水深超过 1 600 m。总体来看, 21~5.33 Ma 时期, 陆架坡折带沿 NE-SW 北坡,

整体古地貌特征稳定, 古水深表现为西北浅、东南深, 水体逐渐加深。

3.3 古水深时空演化特征

在地震深度剖面上利用沉积构型技术可半定量计算各时期的水深变化速率(图 9), 由关键剖面 and 观测点计算水深可得到当时平均古水深。21 Ma、19.1 Ma 时期平均古水深 <300 m, 古水深变化速率范围在 29~32 m/Ma; 之后至 13.8 Ma 时期, 呈相对加速变深趋势, 水深超过 900 m, 由古水深变化速率可知, 在 13.8 Ma 达到最大; 10 Ma 和 5.33 Ma 时期, 随着沉积物堆积在陆架边缘和上陆坡区域, 古水深变化速率从平均 42 m/Ma 增至平均 103 m/Ma; 水深也由 1 100 m 增至 1 600 m, 现今水深可达 1 900 m。

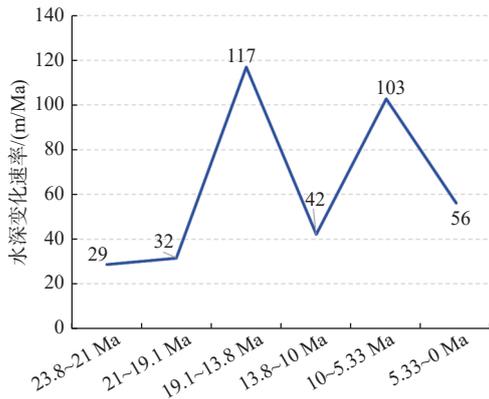


图 9 白云凹陷古水深变化速率曲线
Fig.9 The change rate curve of paleobathymetric depth in Baiyun Sag

由上述各时期剖面分析和平面分析, 古水体持续加深贯穿整个阶段(图 10)。从 21 Ma 时期陆架坡折带由白云凹陷南部迁移至北部, 白云凹陷由陆架浅水变为陆坡深水, 平面上表现为西北陆架区古水深浅, 东南陆坡区深, 之后一直是一个大海侵的过程, 但在部分时期存在短暂的海退。21 Ma、19.1 Ma 和 13.8 Ma 存在着相对海平面下降时期, 分别发育不同规模的陆架边缘三角洲, 规模依次逐渐变小。白云凹陷在 13.8 Ma 时期水体加深速率达到最大, 在 10 Ma 和 5.33 Ma 时期在相对海平面上升时期, 水体加深明显, 沉积物难以推进到陆架坡折, 陆架边缘三角洲不发育。整体而言, 白云凹陷裂后期古水深经历了由浅海-半深海-深海的过程。

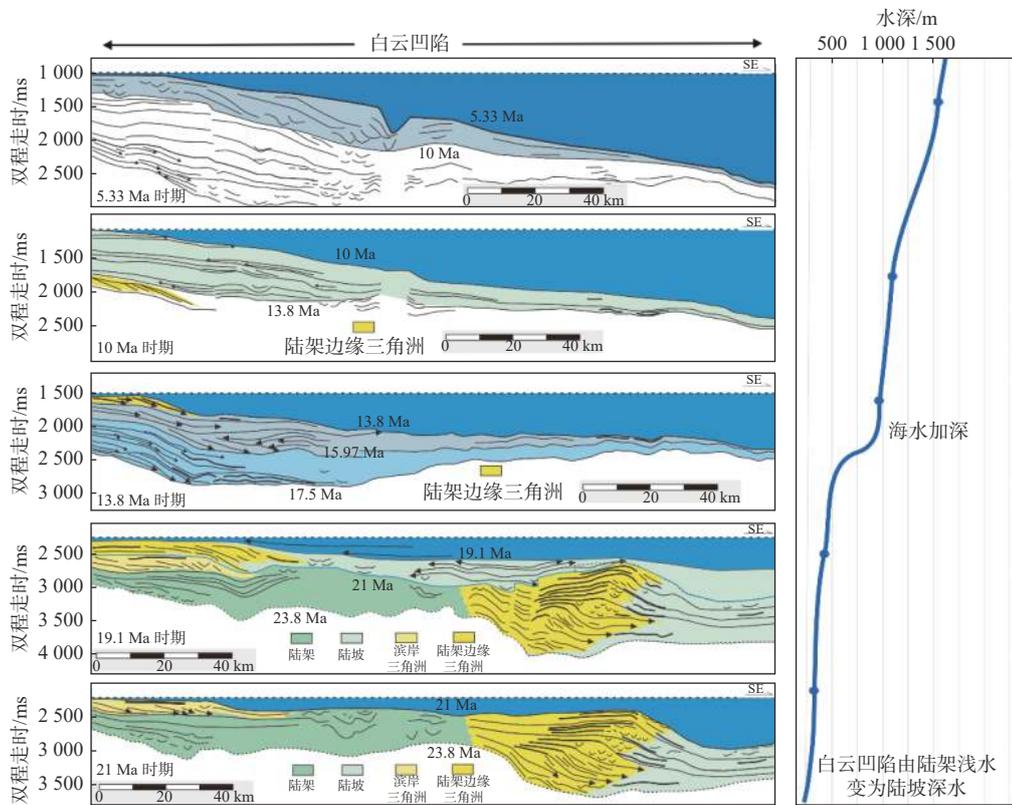


图 10 白云凹陷各时期古水深变化趋势
Fig.10 Variation trend of paleobathymetric depth in various periods in Baiyun Sag

4 结论

(1) 利用三级层序格架内精细地震线描和层拉平恢复结合的沉积构型技术对白云凹陷裂后时期进行古水深恢复是可行的, 能够进行有效的半量化研究。

(2) 自新近纪珠江组至今, 古水深的水体持续加深贯穿整个裂后阶段, 经历了浅海-半深海-深

海的过程。对其中 5 个关键地质时期(21、19.1、13.8、10 和 5.33 Ma)古水深恢复表明, 21~5.33 Ma 时期, 陆架坡折带沿 NW-SE 向分布在白云北坡, 古水深表现为西北陆架区浅, 东南陆坡-深海平原区水体深。

(3) 整体上, 古水深的变化为一个渐变过程, 白云凹陷在 13.8 Ma 和 5.33 Ma 水深速率相对其他时期变大, 古水深变化速率分别为 117 和 103 m/Ma, 反映 13.8 Ma 时期水体加深最大。古水深的研究成

果对白云凹陷热沉降史和沉积古地貌形态恢复具有重要意义。

参考文献:

- [1] AZMY K, VEIZER J, JIN J, et al. Paleobathymetry of a Silurian shelf based on brachiopod assemblages: an oxygen isotope test[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2006, 43(3): 281-293.
- [2] CLIFTON H E. Sedimentologic approaches to paleobathymetry, with applications to the Merced Formation of Central California[J]. *Palaos*, 1988, 3(5): 507-522.
- [3] PLINT A G, TYAGI A, HAY M J, et al. Clinofolds, paleobathymetry, and mud dispersal across the Western Canada Cretaceous foreland basin: evidence from the Cenomanian Dunvegan Formation and contiguous strata[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(3): 144-161.
- [4] TAYLOR P D, KUKLINSKI P, GORDON D P. Branch diameter and depositional depth in cyclostome bryozoans: Testing a potential paleobathymetric tool[J]. *Palaos*, 2007, 22(2): 220-224.
- [5] VAN HINSBERGEN D J J, KOUWENHOVEN T J, VAN DER ZWAAN G J. Paleobathymetry in the backstripping procedure: Correction for oxygenation effects on depth estimates[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 221(3/4): 245-265.
- [6] MUTO T, STEEL R J. Role of autoretreat and A/S changes in the understanding of deltaic shoreline trajectory: a semi-quantitative approach[J]. *Basin Research*, 2002, 14(3): 303-318.
- [7] HELLAND-HANSEN W, MARTINSEN O J. Shoreline trajectories and sequences: description of variable depositional-dip scenarios[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(4): 670-688.
- [8] HENRIKSEN S, HAMPSON G J, HELLAND-HANSEN W, et al. Shelf edge and shoreline trajectories, a dynamic approach to stratigraphic analysis[J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 445-453.
- [9] 杨桥, 漆家福, 程秀申, 等. 河南东濮凹陷古近系各组段的原始地层厚度分布及其构造古地理意义[J]. *古地理学报*, 2006, 8(3): 407-413.
- [10] 董刚, 何幼斌. 根据地层厚度恢复古水深度的研究[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2010, 7(3): 484-486.
- [11] 龙祖烈, 黄玉平, 朱俊章, 等. 南海珠江口盆地白云凹陷现今地温场与新生代构造-热演化特征[J]. *地质科学*, 2020, 55(4): 1266-1276.
- [12] 胡杰, 龙祖烈, 黄玉平, 等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造-热演化模拟[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(5): 1654-1665.
- [13] HE L J, WANG K L, XIONG L P, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3/4): 211-220.
- [14] 袁玉松, 郑和荣, 张功成, 等. 南海北部深水区新生代热演化史[J]. *地质科学*, 2009, 44(3): 911-921.
- [15] 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊): 178-187.
- [16] 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.
- [17] 吴时国, 袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(6): 693-699.
- [18] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [19] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水区油气成藏与勘探[J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1833-1841.
- [20] 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.
- [21] 张功成, 杨海长, 陈莹, 等. 白云凹陷——珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 19-33.
- [22] 米立军, 柳保军, 何敏, 等. 南海北部陆缘白云深水区油气地质特征与勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 14-26.
- [23] 龚再升. 中国近海盆地晚期断裂活动和油气成藏[J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(2): 20-27.
- [24] 郭伟. 珠江口盆地白云凹陷东北部珠海组SQ5沉积体系分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [25] 徐少华. 南海北部白云凹陷SB23.8层序沉积体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [26] 郭雯, 刘永涛, 赵俊峰, 等. 层拉平技术在地震解释中的深化应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(5): 1110-1120.
- [27] 刘永涛, 刘池洋, 周义军, 等. 双界面地震层拉平的古地貌恢复技术及应用: 以鄂尔多斯盆地天环坳陷为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(3): 656-666.
- [28] LIN C S, JIANG J, SHI H S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: responses to tectonic processes and changes in sea level. *Basin Research*, 2018, 30(1): 568-595.
- [29] 林畅松, 施和生, 李浩, 等. 南海北部珠江口盆地陆架边缘斜坡带层序结构和沉积演化及控制作用[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3407-3422.
- [30] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区渐新一中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 234-242.
- [31] 王家豪, 刘丽华, 陈胜红, 等. 珠江口盆地恩平凹陷珠琼运动二幕的构造-沉积响应及区域构造意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 588-595.
- [32] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统的层序地层学研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 220-229.
- [33] 李磊, 王英民, 徐强, 等. 南海北部白云凹陷21Ma深水重力流沉积体系[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 798-806.
- [34] 李冬, 徐强, 王永凤, 等. 南海珠江21Ma深水扇特征及控制因素[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(4): 7-12.
- [35] 徐少华, 王英民, 何敏, 等. 珠江口盆地陆坡类型及其对深水储层的控制[J]. 2016, 45(5): 982-992.
- [36] 朱俊杰, 张尚锋, 朱锐, 等. 珠江口盆地番禺低隆起A井区珠海组沉积研究[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(2): 20-22.
- [37] 周家伟, 王英民, 何敏, 等. 基于轨迹分析和数值模拟的陆架边缘沉积研究: 以珠江口盆地13.8Ma陆架边缘三角洲为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(3): 603-614.
- [38] 柳保军, 袁立忠, 申俊, 等. 南海北部陆坡古地貌特征与

- 13.8Ma以来珠江深水扇[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 476-482.
- [39] 祝彦贺, 朱伟林, 徐强, 等. 珠江口盆地13.8Ma陆架边缘三角洲与陆坡深水扇的“源-汇”关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(12): 3827-3834.
- [40] 易雪斐, 张昌民, 李少华, 等. 珠江口盆地21Ma和13.8Ma陆架边缘三角洲对比[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 670-678.
- [41] 杨璐, 王英民, 何敏, 等. 珠江口盆地白云凹陷13.8Ma前后深水扇差异沉积过程及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 791-800.
- [42] 姜静, 张忠涛, 李浩, 等. 珠江口盆地东北陆架边缘斜坡带晚中新世-第四纪层序模式与单向迁移水道[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 864-874.

Semi-quantitative restoration of paleobathymetric of Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin based on depositional architecture

SHU Liangfeng, DAI Yiding, ZHU Ming, ZHANG Lili, LEI Shenglan, GAO Zhongliang, HAN Xiao, YU Sa

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

Abstract: Aiming at reconstruction of paleobathymetric depth in the deep-water sedimentary basins in the northern South China Sea, this paper takes the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin as an example. According to the sedimentary characteristics of the continental shelf and slope, this study is based on depositional architecture by characterization of seismic profile and bedding flattening in third-order sequence in five critical geological stages (21, 19.1, 13.8, 10 and 5.33 Ma) of post-rift stage in Baiyun Sag. The results show that the average paleobathymetric depth in the 21 Ma and 19.1 Ma stages is less than 300 m, from then to 13.8 Ma, the maximum paleobathymetric depth is 900 m. During the 10 Ma and 5.33 Ma stages, the paleobathymetric depth expanded from 1100 m to 1600 m. From 21 Ma to 5.33 Ma, the shelf break belt had spreaded along the northwest-southeast direction on the northern slope of Baiyun Sag. The paleobathymetric depth of northwest shelf area is shallow, and the southeast continental slope and deep sea plain area is deep on the plane. The paleobathymetric depth of the Baiyun Sag had undergone a continuous deepening process of shallow sea to semi-deep sea and finally deep sea, and there were two stages (13.8 Ma and 5.33 Ma) much faster paleobathymetric depth rate than other stage in Baiyun Sag, the paleo-water depth change rate is 117 m/Ma and 103 m/Ma respectively, and the deepening rate of the paleobathymetric depth was the largest in the 13.8 Ma stage. The result of paleobathymetric has important research and guiding significance for the determination of the key parameters of paleobathymetric for thermal depression history research and the restoration of sedimentary paleomorphology.

Key words: paleobathymetric; semi-quantitative; sedimentary architecture; Baiyun Sag; Pearl River Mouth Basin