

# 白云南洼恩平组海相烃源岩 空间展布规律及发育模式

张义娜,张功成,杨海长,杨东升

(中海油研究总院勘探研究院,北京 100027)

**摘要:**通过借助层序地层学理论、构造古地貌分析、古生物资料、沉积速率与可容纳空间关系对比,以及典型地震相识别、地震相与沉积相剖面及平面分析等,结合区域地质资料及前人的研究成果,对白云南洼恩平组烃源岩的叠置关系、影响因素、空间展布规律及发育模式进行了研究,得到如下认识:白云南洼恩平组对应一个完整的二级层序,可细分为 3 个三级层序,自下至上为 SQ1、SQ2、SQ3,海平面总体为上升特征,SQ3 的最大海泛面对应了整个恩平组二级层序的最大海泛面;白云南洼恩平组为局限浅海环境,具备发育较好海相烃源岩的条件,稳定半封闭的古构造背景,有利于烃源岩有机质的富集保存;沉积速率小,且小于可容空间增长速率,沉积物向陆退积,沉积水体深度变大,利于海相烃源岩的发育;恩平组烃源岩为大陆边缘半闭塞—欠补偿—湿润海湾模式,优质烃源岩主要发育在受隆起及断层遮挡形成的海湾区。

**关键词:**海相烃源岩;发育模式;恩平组;白云南洼;珠江口盆地

中图分类号:P736

文献标识码:A

白云南洼位于南海北部珠江口盆地白云凹陷与荔湾凹陷之间,构造单元划分上属于白云凹陷,但又是一个相对独立的洼陷(图 1)。洼陷西北部与西南部分别为云开低凸起与南部隆起,东北部与东沙隆起相接,洼陷面积为 1 800 km<sup>2</sup>,水深 1 200~2 600 m。白云洼陷发育于两凹陷间的断阶带上,整体为一个近 NE—WS 走向的半地堑复合洼陷,洼内有 2 条主控断层,其中 F1 断层走向为 NE—SW 向,倾向 NW 向,水平延伸长度为 53.3 km,最大垂直断距为 2 810 ms(时间域),控制了西次洼南断北超的格局,F2 断层为近 W—E

向,倾向 N 向,水平延伸长度为 33.4 km,最大垂直断距为 1 100 ms,控制东次洼南断的特征。

与白云南洼紧邻的白云凹陷是中国近海外带盆地已证实的富生气凹陷<sup>[1]</sup>,从凹陷东区已获得的荔湾 3-1、流花 34-2、流花 29-1 共 3 个天然气商业发现和流花 16-2 含油构造发现,探明和控制的天然气地质储量超过 1 000 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,石油约 3 000 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。白云凹陷恩平组沉积环境为三角洲—浅海海湾相,北坡为三角洲,东南部通过荔湾凹陷与洋盆相通,为局限海环境<sup>[1,3]</sup>,主要的烃源岩为恩平组的海陆过渡相煤系烃源岩。珠江口盆地深水区以南的深水—超深水区,海相烃源岩将可能成为其主要的烃源岩<sup>[4]</sup>。目前,白云南洼洼陷内部无钻井,在其与白云凹陷交界的部位有 1 口 L1 井,无三维地震,二维地震大面积覆盖,研究程度相对较低。而对这样一个紧挨富烃凹陷的构造单元来说,研究其内部烃源岩的沉积环境、

收稿日期:2014-07-21

基金项目:国家科技重大专项“海洋深水油气勘探关键技术”(2011ZX05025)

作者简介:张义娜(1980—),女,博士,高级工程师,主要从事沉积学及烃源岩研究等方面的工作。E-mail: safecandy2008@yahoo.com.cn

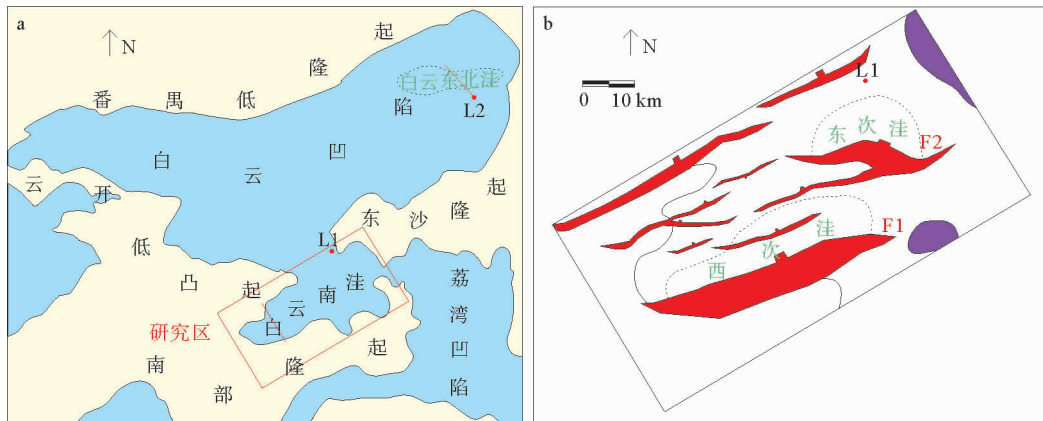


图 1 白云南洼构造位置

Fig. 1 Location map of South Subsag of Baiyun Sag

时空分布特征及有机质富集程度,将具有重要的油气地质理论意义和油气勘探的实际意义。

### 1 白云南洼恩平组层序地层特征

白云南洼属于继承性稳定发育的洼陷,恩平组为断陷期,受边界大断层控制,形成洼陷的雏形,即箕状半地堑;珠海组为断拗转换期,断层控制地层的展布,但整个地层的厚度变化不如恩平组明显;珠江组为拗陷期,地层相对均一沉积,厚度起伏不大;韩江组及以上地层沉积时期为洼陷整体热沉降期,沉积厚度大。洼陷主要沉积了新生代地层,其中,以古近纪地层为主,主体厚度均 >2 000 m,新近纪地层最厚不到 1 600 m,古近纪地层中又以恩平组沉积为主,恩平组最厚处位于西次洼,可达 3 000 m;且恩平组厚度 >1 500 m

的面积达到 1 400 km<sup>2</sup>,珠海组最厚处位于东次洼,可达 1 400 m。

白云南洼主要的烃源岩发育层段为恩平组 (T<sub>70</sub>—T<sub>g</sub>),该套地层形成于南海运动之前,是盆地裂陷二幕形成的沉积地层。在地震剖面上(图 2)可看到下部与古近系基岩之间有明显的反射差异,T<sub>g</sub> 界面之下为杂乱、模糊反射,之上可见扇体的进积与浅海相的连续平行席状反射;T<sub>70</sub> 界面对应南海运动,在整个珠江口盆地为一个清晰的不整合面,在白云南洼,该界面之下表现为在洼陷内部相对整一,在边缘可见削截现象;界面之上为一套明显的上超地层,显示珠海组海平面的快速、大规模上升。整个恩平组的发育过程为:开始强烈拉张,沉积物快速堆积;之后海平面快速上升,边缘相带后退;最后海平面下降,洼陷遭受剥蚀,这对应于一个完整的二级层序(图 2)。

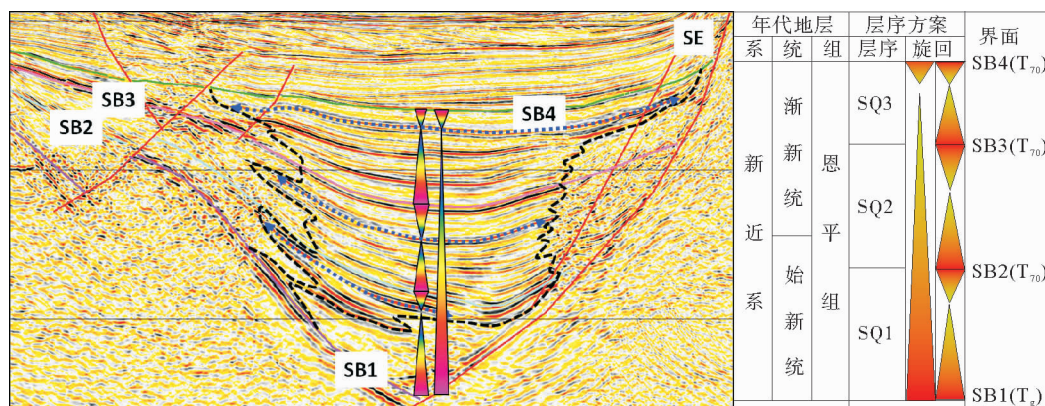


图 2 白云南洼恩平组层序地层格架

Fig. 2 Sequence stratigraphic framework of Enping Formation in South Subsag of Baiyun Sag

根据前人对珠江口盆地恩平组层序划分的认识<sup>[5-7]</sup>,结合白云南洼恩平组沉积地质背景、海平面变化、地震反射特征等,建立了白云南洼恩平组的层序地层格架,将恩平组划分为 3 个三级层序,自下至上为 SQ1、SQ2、SQ3,层序界面为 SB1、SB2、SB3、SB4,对应的地震反射界面分别为  $T_g$ 、 $T_{72}$ 、 $T_{71}$ 、 $T_{70}$ (图 2)。SQ1 对应珠玑运动二幕之后的强烈拉张、快速堆积,海平面较低,水体较浅,地层厚度受边界断层控制明显,沉积中心紧邻断层,扇体规模大,推进远,中晚期海平面上升,沉积了一套浅海地层,晚期海平面略有下降,洼陷边缘可见局部剥蚀,界面之上见上超反射;SQ2 对应断拗转换阶段,地层厚度开始变得不受边界断层控制,沉积中心略向 NW 向迁移,海平面整体缓慢上升,沉积物表现为加积—退积特征;SQ3 对应断拗转换阶段,沉积中心持续向 NW 方向迁移,海平面持续快速上升,沉积物发生退积,这时对应于恩平组二级层序的最大海泛面,晚期海平面下降,在洼陷边缘见削截特征。

## 2 白云南洼恩平组具备发育海相烃源岩的有利条件

在恩平组沉积时期,白云南洼北部与白云凹陷相通,东部与荔湾凹陷相通(图 3),荔湾凹陷南部与洋盆部分相通,前人通过对白云、荔湾凹陷沉积环境的研究认为,恩平组时期整个白云、荔湾凹陷为海相沉积环境<sup>[1]</sup>,因此可以确定白云南洼恩平组为海相沉积,且为局限海。

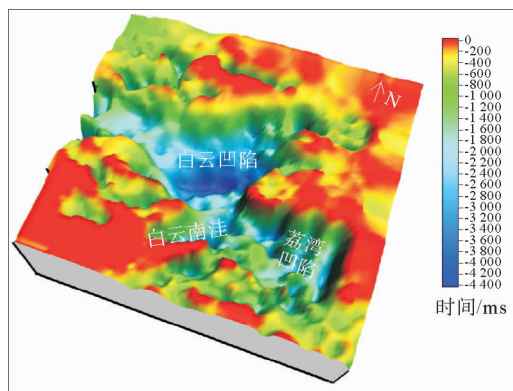


图 3 白云—荔湾凹陷及邻区恩平组古地貌

Fig. 3 Paleogeomorphic map of Enping Formation in Baiyun and Liwan Sags and adjacent areas

控制海相烃源岩有机质丰度高低的因素有很多,可以将前人的观点总结为:有机质的初级生产力、有机质的保存条件、碎屑物质的输入量<sup>[8,9]</sup>。对于三者的关系及重要性,不同专家、学者有不同的观点,陈建平等<sup>[10]</sup>认为高的生物产率与良好的保存环境是决定性因素;Demaison 等<sup>[11]</sup>认为烃源岩形成的主控因素是缺氧的沉积或底水环境,较保存条件而已,有机质生产率并不重要;张水昌等<sup>[12]</sup>认为海域高有机质生产力是根本,缺氧还原是关键,低沉积速率是基础,前者强调的是生烃母质生物的生存、繁衍环境,后两者强调的是生烃母质的保存条件,三者缺一不可。

对白云南洼而言,稳定半封闭的古构造背景与沉积速率小于可容纳空间的增长速率是控制白云南洼优质海相烃源岩的两大主要因素。

### 2.1 稳定半封闭的古构造背景

白云南洼恩平组沉积时期为半封闭浅海海湾环境,其南部受珠江口盆地南部隆起遮挡,西部受云开低凸起阻隔,东北部有东沙隆起,只在西北部与东部有通道与白云、荔湾凹陷相通(图 1),水体活动受限。梁狄刚等<sup>[13]</sup>认为,海湾体系靠陆,营养丰富,海洋初级生产力高;与大洋连通,易受上升流的影响;容易闭塞,形成还原环境。因此,“海湾体系”是海相烃源岩发育的摇篮。在地震剖面上,强振幅中低频好连续性的反射特征便是半封闭环境、水体相对稳定的条件下形成的(图 2)。

白云南洼具有与白云东北洼相类似的结构与构造特征,这种半封闭安静水体下形成的沉积物亦可与白云东北洼揭示的恩平组沉积物相类比。位于白云东北洼的 L2 井恩平组为大段灰色泥岩,局部夹粉砂质泥岩,反映相对稳定、安静的沉积环境,对应于地震剖面上,为中—强振幅、中频率、较连续反射。在过 L2 井与白云东北洼的地震剖面上(图 4),地震反射具有向洼陷中央振幅强度变大、反射连续性明显变好的趋势,说明洼陷中央具有更稳定与安静的沉积环境。古生物化石鉴定中见到了较丰富的海相沟鞭藻 *Cleistosphaeridium*、*Cordosphaeridium*、*Homotryblium*、*Hystrichokolpoma*、*Hystrichosphaeridium*、*Polysphaeridium* 等有 38 种,占整个海相沟鞭藻

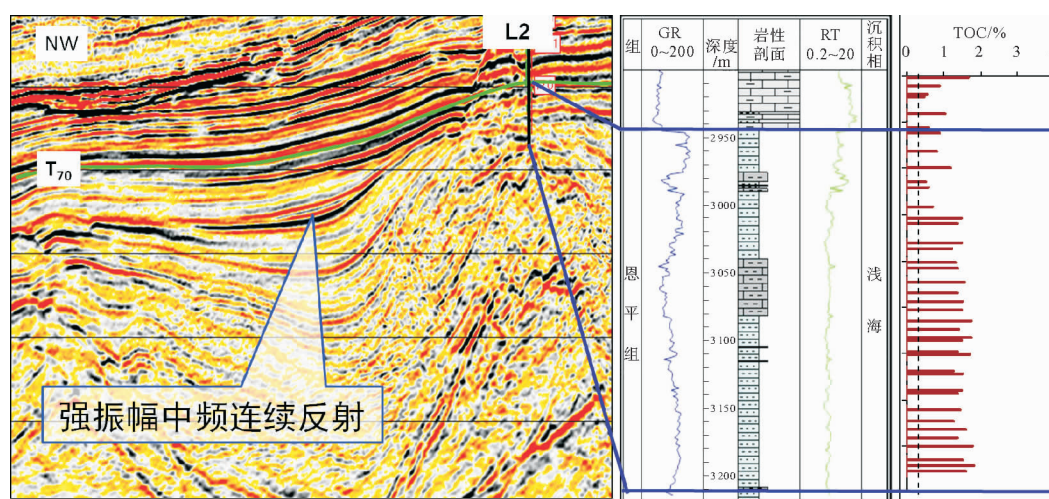


图4 L2井浅海相井地震对比及地化指标

Fig. 4 Correlation of well and seismic data and geochemical index of a neritic facies in Well L2

比例的70%，而且此时浮游有孔虫占较高比例，也说明该井恩平组时期为稳定的浅海相沉积。

构造分析也表明，L2井井点处地震反射的相对不连续是由后期局部挤压、构造抬升造成的。该井揭示恩平组为一套较好的海相烃源岩，有机质丰度为1.0%~1.5%（图4），平均为1.3%左右，有机质来自水生藻类和部分陆生高等植物。前人通过油—岩生物标志化合物对比和原油轻烃组成特征研究认为，已获得商业发现的LH29-1、LH16-2构造油藏所产原油主要来自白云东北洼恩平组烃源岩<sup>[2]</sup>。

由此可推断，白云南洼恩平组在稳定、安静的半封闭环境下形成的海相烃源岩有机质保存条件好，应该具有较高的丰度和较好的生烃能力，能作为一套有效的烃源岩，在凹陷周缘凸起聚集形成大量的油气。

## 2.2 沉积速率低于可容纳空间的增长速率

海相烃源岩有机质是海洋和陆相2种生源输入的综合结果，沉积物的供给量与供给速率是控制海相沉积物有机质丰度的重要因素，有机质丰度的高低也与沉积时的地层沉积速率密切相关。在局限海环境下，陆源有机质输入比例较高、快速堆积的地层有机质容易被稀释，同时伴随的是淡水注入量多，水动力条件强，水中含氧量相对多，结果氧化程度高，有机质丰度低；沉积速率太低的层段，有机质被消耗，使得沉积岩中的有机质含量

降低，也不利于有机质的富集，而沉积速率在20~80 m/Ma之间，烃源岩的有机质丰度相对最高<sup>[14,15]</sup>，这个沉积速率相对较低的低含氧量带，为海相富有机质沉积<sup>[16,17]</sup>。白云南洼恩平组各层序均有一定的陆源输入，但输入量相对不充足（图5）。按照杜小弟等<sup>[18]</sup>关于泥质岩沉积速率的计算公式，得到白云南洼整个恩平组的平均沉积速率约为47 m/Ma，这种沉积速率对于处于半封闭局限环境小洼陷的烃源岩有机质来说，是非常有利的条件。

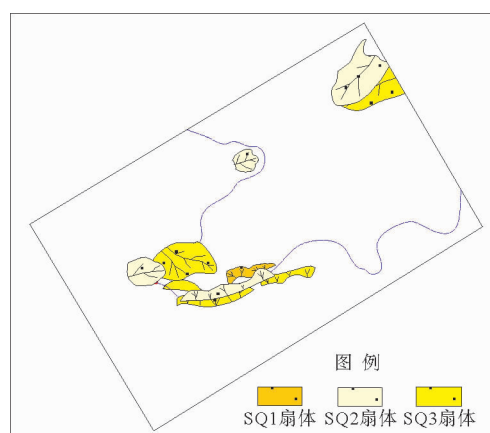


图5 白云南洼恩平组各层序扇体分布叠合图

Fig. 5 Superimposition of the fans of the three sequences of Enping Formation in South Subsag of Baiyun Sag

沉积速率与可容空间增长速率之间的相对关系控制着沉积水体深度和准层序组的叠置方式，

当沉积物的沉积速率小于可容空间的增长速率时,沉积物向陆退积,沉积水体深度变大,利于海相烃源岩的发育。

白云南洼典型地震剖面(图 2)显示,恩平组下部 SQ1 呈退积序列,SQ2 呈加积到退积序列,SQ3 亦呈明显的退积叠置样式,整个恩平组从下至上持续在发生海侵,沉积物总体具有向陆退积的特点,水体深度在逐渐加大,沉积物的沉积速率小于可容纳空间的增长速率,这对白云南洼海相烃源岩有机质的富集与保存起到有利的作用,使得该套烃源岩的有效性明显增加。

### 3 白云南洼恩平组海相烃源岩发育特征

白云南洼恩平组为半封闭的浅海海湾环境,与白云东北洼具有可类比性,具备发育优质海相烃源岩的条件。在这种无井、无三维资料的区域,只能通过地震相的类比,结合厚度图来圈定各层序沉积相的展布及烃源岩的范围,进一步明确海相烃源岩的发育特征。

#### 3.1 白云南洼恩平组烃源岩分布特征

白云南洼恩平组共发育 6 种地震相,对应 4

类沉积相类型(图 6),分别为弱振幅中高频率斜交前积反射、强振幅中频率 S—斜交前积楔状反射的三角洲沉积;中振幅高频率杂乱楔状反射的扇三角洲沉积;变振幅中差连续高频率亚平行楔状反射的滨海沉积;强振幅好连续性中低频率平行席状反射、中弱振幅中连续性中低频率亚平行席状反射的浅海沉积。

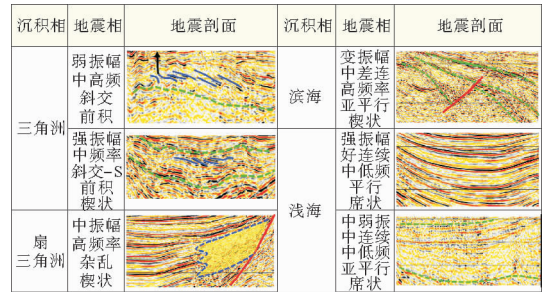


图 6 白云南洼恩平组典型地震相—沉积相剖面  
Fig. 6 A typical seismic and sedimentary facies section of Enping Formation in South Subsag of Baiyun Sag

这 6 种地震相的平面分布特征(图 7)为 S 型、斜交型,杂乱前积反射在洼陷边缘零星分布,面积不大;强振幅好连续性平行反射在洼陷中央发育,自下至上其面积分别为 165 km<sup>2</sup>、181 km<sup>2</sup>、355 km<sup>2</sup>;中弱或中强振幅中连续亚平行反射与变振幅中差连续楔状反射在白云南洼广泛分布。

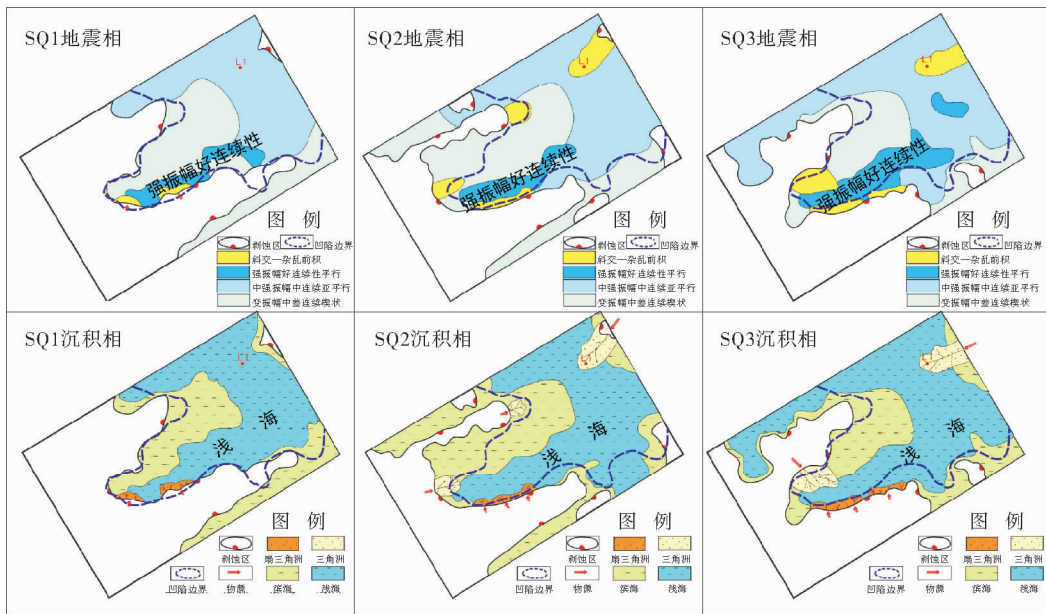


图 7 白云南洼恩平组各层序地震相—沉积相

Fig. 7 The seismic and sedimentary facies map of Enping Formation in South Subsag of Baiyun Sag

依据典型地震相与沉积相类型、地震相平面图,结合恩平组(各层序)厚度图等,得到了白云南洼恩平组 SQ1、SQ2、SQ3 的沉积相平面图(图7)。总体特点是:主体为浅海、滨海呈环带,局部有扇体。早期仅发育扇三角洲,而晚期不仅见扇三角洲,洼陷不同部位还发育了小规模三角洲,浅海面积早期偏小,随着沉积水体加深面积也变广。

以 SQ<sub>2</sub> 沉积特征为例,洼陷中央大面积浅海分布,并且向西北、向东浅海分别与白云凹陷、荔湾凹陷相通;滨海环绕浅海,在洼陷边缘呈带状展布;陆源输入规模较小,南部靠近主控洼陷部位发育一系列小规模扇三角洲,是来自南部隆起的局部物源,来自南部隆起与云开低凸起的物源形成了规模不大的三角洲,在 L1 井区,有来自东沙隆起的物源形成的三角洲。

在这种局限浅海背景下,平面上,优质烃源岩主要发育于洼陷中央,特别是与强振幅连续性地震反射对应的浅海带将具有较好的生烃潜力;垂向上,SQ<sub>3</sub> 时期海侵作用最强,水体最深,优质烃源岩分布面积最广。

### 3.2 白云南洼海相烃源岩发育模式

前面已经论述,白云南洼恩平组为半封闭海相环境,与白云东北洼具有类似的恩平组海相烃源岩,且洼陷中央地震反射振幅强、连续性好,代表了良好的保存条件,利于有机质的富集。对海相烃源岩,前人根据研究区的特征,已经总结的沉积模式有:上升流模式、全球海平面上升和海洋缺氧事件模式、黑海滞留盆地模式、深水陆棚—底栖藻席模式、干热气候—咸化静海、湿润气候—滞留静海等<sup>[13,19]</sup>。

对比与这些海相烃源岩发育地区的沉积特征的差异认为,黑海滞留盆地模式与湿润气候—滞留静海模式较适用于研究区。这2种模式的主要特点是:① 水体分层,表层水温暖清澈、含氧量高,底层水缺氧、强还原;② 生物主要为浮游藻类,缺少底栖生物,自广海漂浮而来以后,使生烃母质生物得到富集,死亡后保存在海底;③ 高有机质丰度源岩发育在海湾腹部的欠补偿沉积中。

孢粉、藻类资料分析表明,南海北部恩平组时期处于湿润的亚热带常绿落叶阔叶林区<sup>[1]</sup>,而统计数据显示,世界上所发现的产油气层位中2/3

以上都发育在古纬度 45° 以下的低纬地区,反映温暖、湿润的气候条件对烃源岩发育的控制作用<sup>[19]</sup>,因此,白云南洼恩平组时期所处的气候环境非常利于烃源岩的发育和有机质的富集、保存。

据此,将白云南洼恩平组时期烃源岩的发育模式总结为大陆边缘半闭塞—欠补偿—湿润海湾模式(图8)。这种情况下,以湿热气候与高海面(海侵)为背景,因地形起伏而导致海水的循环连通受阻,优质烃源岩主要发育在受隆起及断层遮挡形成的海湾区,且在欠补偿沉积中,水体安静、稳定,低的无机陆源输入、低的沉积速率,使得原地水生的藻类死亡后降落至还原环境,有机质便于保存,在缺氧环境下容易形成高丰度的烃源岩,源岩的厚度和有机质的丰度较均一,TOC 一般介于 0.56%~2.87% 之间<sup>[20]</sup>。而在白云南洼与白云凹陷、荔湾凹陷相通的部位,水体相对比较动荡,不利于海相优质烃源岩的形成与保存,可能形成以煤系为主的烃源岩。

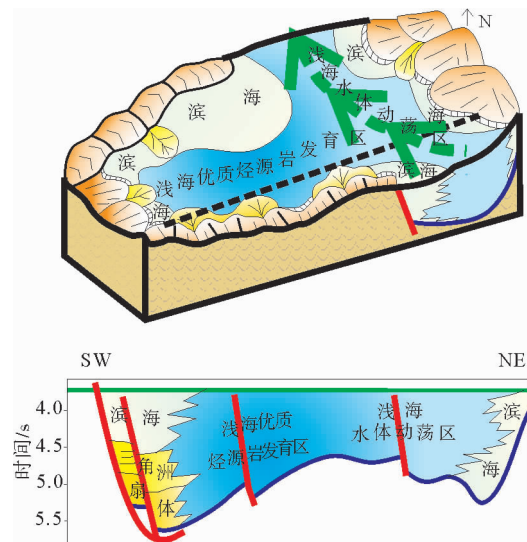


图8 白云南洼恩平组海相烃源岩分布模式

Fig. 8 Distribution of marine source rocks of Enping Formation in South Subbasin of Baiyun Sag

## 4 结论

(1)白云南洼恩平组为主要的烃源岩发育层段,该地层形成于南海运动之前,是盆地裂陷二幕形成的沉积地层。对应于一个完整的二级层序,

并可细分为3个三级层序,自下至上分别为SQ1、SQ2、SQ3,其中,SQ1为强烈拉张、快速堆积期,SQ2、SQ3为断拗转换期。海平面为总体上升特征,SQ3的最大海泛面对应了整个恩平组二级层序的最大海泛面。

(2)白云南洼恩平组为局限浅海环境,具备发育较好的海相烃源岩的条件,即具有稳定、安静的半封闭环境,烃源岩有机质便于富集保存;整个白云南洼恩平组的平均沉积速率约为47 m/Ma,对处于半封闭局限环境小洼陷的烃源岩有机质来说,条件非常有利,且沉积物沉积速率小于可容空间增长速率,沉积物向陆退积,沉积水体深度变大,利于海相烃源岩的发育。

(3)在白云南洼恩平组时期,烃源岩的发育模式为大陆边缘半闭塞—欠补偿—湿润海湾模式。在这种情况下,以湿热气候与高海面(海侵)为背景,因地形起伏而导致海水的循环连通受阻,优质烃源岩主要发育在受隆起及断层遮挡形成的海湾区,在陆源输入不充分及欠补偿的条件下,海相烃源岩有机质丰度会较高。

#### 参考文献:

- [1] 张功成,苗顺德,陈莹,等.“源热共控”中国近海天然气富集区分布[J].天然气工业,2013,33(4):1-17.
- [2] 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(4):20-28.
- [3] 傅宁,邓运华,张功成,等.南海北部叠合断陷盆地海陆过渡相烃源岩及成藏贡献——以珠二坳陷白云凹陷为例[J].石油学报,2010,31(4):559-565.
- [4] 朱伟林,钟锴,李友川,等.南海北部深水油气成藏与勘探[J].科学通报,2012,57(20):1 833-1 841.
- [5] 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.
- [6] 朱俊章,施和生,邓宏文,等.珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩层序地层学和地球化学[J].天然气地球科学,2007,18(5):709-714.
- [7] 米立军,张功成,沈怀磊,等.珠江口盆地深水白云凹陷始新统一下渐新统沉积特征[J].石油学报,2008,29(1):29-34.
- [8] 张水昌,张宝民,边立曾,等.中国海相烃源岩发育控制因素[J].地学前缘,2005,12(3):39-48.
- [9] 倪春华,周小进,王果寿,等.海相烃源岩有机质丰度的影响因素[J].海相油气地质,2009,14(2):20-23.
- [10] 陈建平,梁狄刚,张水昌,等.泥岩/页岩:中国元古宙—古生代海相沉积盆地主要烃源岩[J].地质学报,2013,87(7):905-919.
- [11] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bull, 1980, 64(8): 1 179-1 209.
- [12] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等.塔里木盆地海相油气生成[M].北京:石油工业出版社,2004:19-160.
- [13] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等.南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J].海相油气地质,2009,14(2):1-19.
- [14] 秦建中,腾格尔,付小东.海相优质烃源层评价与形成条件研究[J].石油实验地质,2009,31(4):366-372.
- [15] Ibach L E J. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66: 170-188
- [16] Rullkotter J Z. Organic matter: the driving force for early diagenesis[M]//Schulz H D, Zabel M. Marine Geochemistry. Heidelberg: Springer Verlag, 1999: 129-172.
- [17] Schulte S, Mangelsdorf K, Rullkotter J Z. Organic matter preservation on the Pakistan continental margin as revealed by biomarker geochemistry[J]. Org Geochem, 2000, 31: 1 005-1 022.
- [18] 杜小弟,王璞珺.沉积速率的定量计算[J].长春地质学院学报,1992,22(1):67-70.
- [19] 刘占红,李思田,辛仁臣,等.地层记录中的古气候信息及其与烃源岩发育的相关性——以渤海黄河口凹陷古近系为例[J].地质通报,2007,26(7):830-840.
- [20] 张宝民,张水昌,边立曾,等.浅析中国新元古—下古生界海相烃源岩发育模式[J].科学通报,2007,52(S1):58-68.

