

文章编号: 1000-0550(2007) 01-0139-08

南海北部深水区白云凹陷古近系烃源岩的早期预测

米立军^{1,2} 刘震¹ 张功成³ 沈怀磊¹ 常迈¹
郭瑞¹ 田继先¹ 谭卓¹

(1 中国石油大学资源与信息学院 北京 昌平 102200; 2 中国海洋石油(中国)有限公司勘探部 北京 100010
3 中国海洋石油(中国)有限公司研究中心 北京 100027)

摘要 烃源岩评价是深水区油气勘探非常关键的问题, 由于深水区没有井钻穿始新统, 所以本研究只能根据相邻浅水区钻井和区域对比的方法, 通过层序地层格架、沉积相、地震相、地震速度岩性等资料与相邻地区对比识别烃源岩, 确定烃源岩的性质和分布。白云凹陷古近系地层沉积中, 沉积密集段具有如下特征: (1) 准层序逐步向岸推进; (2) 陆源碎屑物质供应不足; (3) 水体相对较深的中深湖细粒沉积发育。地震反射特征与有利烃源岩具有良好的对应关系, 白云凹陷恩平组湖扩体系域和文昌组湖扩体系域发育中弱振幅、中低频率和中高连续性地震相, 是有利烃源岩发育区。利用单井资料建立起一个通过孔隙度来预测烃源层有机质成熟度的预测模型, 泥岩孔隙度可以较容易从地震信息中获取, 从而对白云凹陷的烃源层的热演化程度进行初步评价。根据沉积相与有机相的关系, 直接将沉积相转换为有机相, 预测有机相类型。在白云凹陷深水烃源岩预测实践的基础上, 本文总结了一套深水区烃源岩早期评价方法, 包括: (1) 层序格架分析法确定有利烃源岩发育的垂向位置; (2) 地震反射特征分析法确定烃源岩的横向分布范围; (3) 根据泥岩层速度计算烃源岩热成熟度; (4) 沉积相转有机相预测有机相类型。 (5) 对烃源岩进行综合评价优选次注。

关键词 沉积密集段 地震相 沉积相 有机质成熟度

第一作者简介 米立军 男 1965 年出生 高级工程师 石油地质

中图分类号 TE122.1 **文献标识码** A

随着油气整体勘探程度逐渐提高^[1], 海域浅水勘探取得新突破的难度越来越大。向深水区进军成为今后油气勘探发展趋势之一。深水油气田是近十余年来国际石油产量和储量增长的主体。我国海域有广大的深水区^[2], 水深在 500 m 以上的面积占海域总面积的 3/4, 具备良好的油气资源前景^[3]。以南海为例, 其石油地质储量约为 $(23 \sim 30) \times 10^{10}$ t, 占我国油气总资源量的 1/3, 其中 70% 蕴藏于深水区^[4]。2006 年, 南海北部白云凹陷深水天然气勘探取得重大突破, 充分证明了我国深水油气勘探的良好前景。

对于深水烃源岩早期评价来说, 钻井和采样点少, 资料缺乏是一个突出问题。以白云凹陷深水区为例, 区内仅有的几口井都集中在北部地区, 并且多数打在边缘地带或钻井较浅, 造成了对盆地中部的下部地层(主力烃源岩)认识的局限性。珠江口盆地发现 8 个新生代凹陷, 证实或预测存在多套和多类型的良好烃源岩。据邻近浅水区钻探结果和地震相对比解释认为, 白云凹陷中存在三套烃源岩: 始新统中

深湖相烃源岩。尽管没有钻井钻遇这套烃源岩, 但是通过与邻区珠坳陷油田主要烃类来源的文昌组各种资料类比, 认为深水区区内存在始新统中深湖相烃源岩, 且分布规模巨大; 已经为大量浅水区钻井所揭示的渐新统煤系及湖相泥岩烃源岩, 分布面积广, 厚度大, 有机质丰度中等, II_2 型干酪根为主; 中新统半深海相烃源岩, 有机质丰度中一低, 类型较好、部分成熟。在影响勘探的诸多因素中, 最主要的是“油气源”。深水区钻井没有揭示到有效的烃源岩, 但在白云凹陷北坡一番禺低隆起南坡发现了来自白云凹陷渐新统煤系及湖相泥岩烃源岩的天然气, 天然气类型为 II_2 型为主。因此从气源的角度看, 白云凹陷主力烃源岩早期预测评价的问题和其它凹陷所面临的主要矛盾有质的变化, 所存在的主要问题也显著不同。本研究根据相邻浅水区钻井和区域对比的方法, 通过层序地层格架、沉积相、地震相、地震速度岩性等资料与相邻地区对比识别烃源岩, 确定烃源岩的性质和分布。

王春修, 等. 珠江口盆地凹陷发育及湖相烃源岩的沉积. 1994

收稿日期: 2006-09-07 收修改稿日期: 2006-09-22

1 相对湖平面变化与有机质含量的关系——根据层序及体系域特征确定有利烃源岩发育层段

油气藏的形成首先以丰富的生油物质为基础^[5]。生油条件取决于沉积盆地的类型和沉积相,生油量取决于保持长期稳定持续沉降的较深水环境和有机质的类型与丰度。有机质含量主要受控于沉积物/水体缺氧界面处的沉积速率,一旦缺氧条件具备,主要的控制因素即为沉积速率。沉积速率低,有机碳总量就高,随着沉积物向盆内进积作用的发生,局部沉积速率增大,有机碳总量减小。在一定地史时期,沉积物中有机质含量取决于沉积物可容纳空间和陆源碎屑输入量的变化。如果可容纳空间很大,陆源碎屑向盆地方向的输入量减小,则这些沉积物中的总有机质含量提高;反之,有机质含量降低。

沉积密集段,又称缓慢沉积段或者饥饿沉积段,是一套由准层序向陆推进和陆源沉积物补给不足时所沉积的薄层半远洋或远洋沉积物所组成的岩相^[6]。在白云凹陷古近系陆相沉积中,沉积密集段具有以下几个特征:准层序逐步向岸推进;陆源碎屑物质供应不足;水体相对较深的中深湖、深湖细粒沉积发育(图1)。

在陆相地层中,沉积密集段一般位于湖扩体系域的顶部,即最大湖泛面之下^[7,8],但是在白云凹陷,沉

积密集段与在海相地层层序中的位置并不一致(图2),恩平组湖扩体系域沉积密集段位于最大湖泛面的下部,而文昌组湖扩体系域沉积密集段位于初次湖泛面的上部,原因是陆相湖盆同海盆不同,湖盆面积较小,多物源,湖平面变化的控制因素复杂。

在白云凹陷古近系陆相地层沉积的垂向剖面中,有机质含量的分布具有明显的规律性,凝缩段的沉积速率最低,有机质含量最高,由密集段向上或向下,有机质含量逐渐降低。

2 根据地震反射特征识别烃源岩方法分析

利用地震反射特征来识别有利烃源岩主要是通过以下几个方面来判别。首先要在区域沉积相研究的基础上,分析古地质环境,恢复其当时沉积时的古地貌,优选、标定那些有利于有机质的保存的洼陷及范围,即封闭、半封闭的古地形洼地。其次是凹陷的沉积厚度,识别地层与凹陷边缘的接触关系^[9]。沉积速率越大,基本说明当时的水体较深,而深水上超(图3)表示出有利于有机质保存的还原环境。最后就是次凹内的地震相特征,包括振幅、频率、连续性等。实践证明在白云凹陷恩平组湖扩体系域和文昌组湖扩体系域内,弱振幅低频率且连续性好的地震反射为较好烃源岩的标志(图3)。

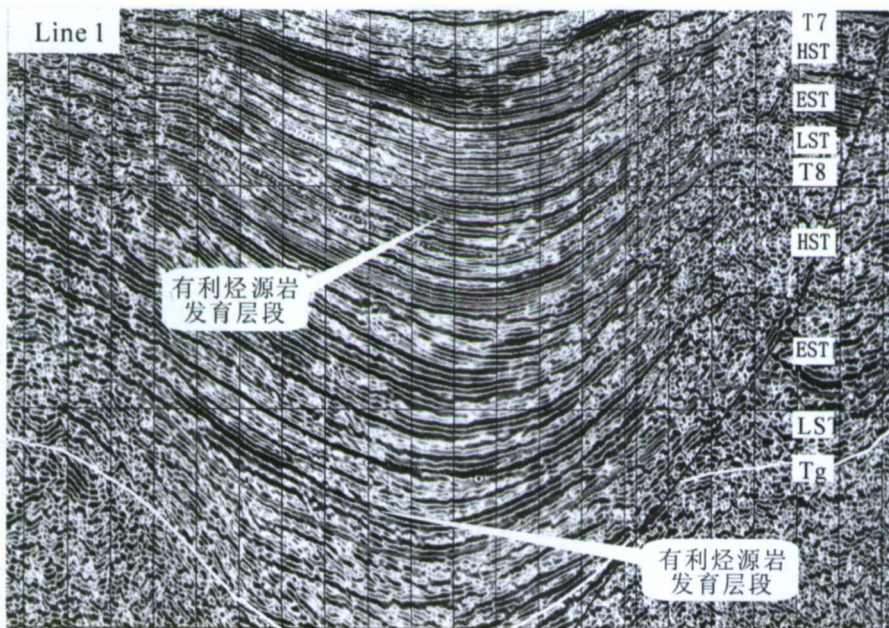


图1 白云主凹古近系陆相地层湖扩体系域沉积特征

Fig. 1. EST sedimentary character of Paleogene terrestrial formation in Baiyun major sag

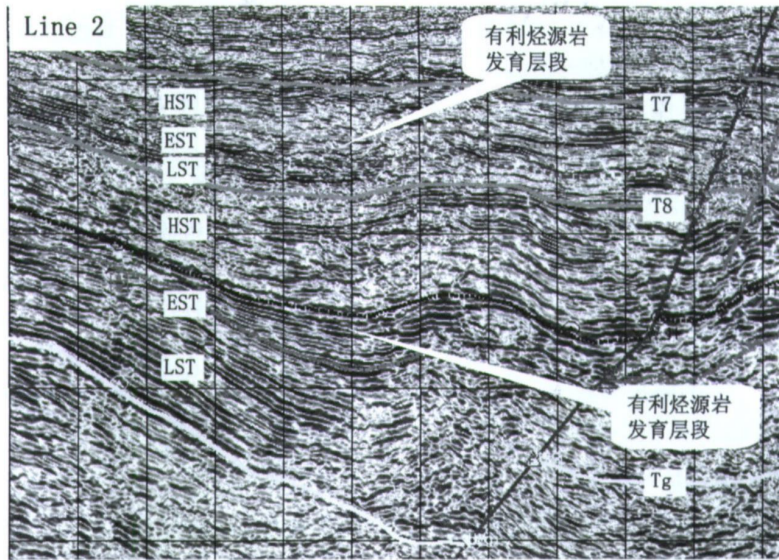


图 2 白云凹陷古近系陆相地层沉积密集段在地层层序中的位置

Fig 2 Sedimentary Condensed section's Position of paleogene terrestrial formation in stratigraphic sequence

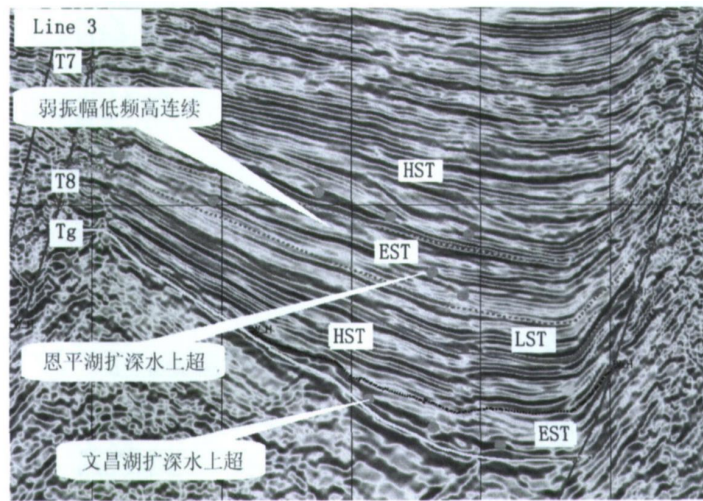


图 3 白云凹陷恩平组和文昌组烃源岩的地震反射标志

Fig 3 Source rock's seismic reflection Character of Enping Formation and Wenchang Formation in Baiyun Depression

3 主力烃源岩成熟度预测方法分析

在钻井稀少或者热成熟度实测资料很少的地区, 可以用孔隙度的幂函数关系^[10]定量估算烃源岩的热演化程度^[11], 从而对低勘探程度地区的烃源岩的成熟度进行初步评价。对于白云凹陷, 受地震垂向分辨率的影响, 在反射地震剖面上拾取泥岩层段的速度值并非一件易事。这是因为地震剖面在中等深度(2000~3000 m)的垂向分辨率一般在15~25 m左右, 只有当厚度大于分辨率的泥岩才可能单独在地震剖面上识别出来; 但常规地震剖面只反映地下速度差, 并无层速度的概念, 要获取层速度值, 还须要用到

地震速度谱, 而地震速度谱上能量团的垂向分辨率不小于100 m, 相当于150 m左右的厚度。因此, 从反射地震剖面上只能对较厚层(约150 m以上)的泥岩提取速度信息, 而在合成声波测井类剖面上, 提取层速度的最小厚度有可能达到15~25 m。在白云凹陷反射地震剖面上厚层泥岩段的反射特征一般为空白相, 或弱振幅相。空白相顶底界面所对应的速度谱能量团提供的叠加速度, 经过倾角校正得到相应的均方根速度, 然后通过Dix公式转换, 获得空白相的层速度值。

空白地震相可能存在多解性, 空白相中不一定全都是泥岩层。可以根据空白相层速度这种隐含信息

来进一步圈定:参考砂泥岩压实模型,在层速度平面图上将空白相范围内层速度值过分偏离泥岩压实曲线的点扣除,剩余的空白相基本上代表较纯的泥岩区。

双相介质的孔隙度与层速度之间遵循怀利公式,即

$$\frac{1}{V_{int}} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_{ma}} \quad (1)$$

其中, V_{int} 为层速度, ϕ 为孔隙度, V_f 为流体速度, V_{ma} 为骨架颗粒速度。一般情况下 V_f 和 V_{ma} 的变化远远小于 V_{int} 的变化,故可将它们视为常数。对于白云凹陷,我们取 V_f 为 1500m/s, V_{ma} 取值为 5500 m/s。当泥岩孔隙度求出后,可用 (1) 式直接求出镜质组反射率 R_o 。

刘震 (1997) 指出,泥岩压实程度与热成熟度之间存在密切关系,泥岩孔隙度和泥岩镜质体反射率实际上都是埋藏历史对时间的积分^[9]。泥岩孔隙度与泥岩热成熟度之间很可能是幂函数形式的经验关系:

$$R_o = a\phi^b \quad (2)$$

其中 R_o 为镜质体反射率, ϕ 为孔隙度, a , b 均为常数。

这样,就可以建立起一个通过孔隙度来预测烃源层有机质成熟度的预测模型 (图 4), 这个预测模型的有机质热成熟度 R_o 为本区、相邻区和北部浅水区的钻井实测数据。当已知某一点任意深度的孔隙度时,即可获得该深度附近的泥岩的有机质热成熟度。对于白云凹陷有机质热成熟度的测试一般是比较少的,而泥岩孔隙度的值我们却可以较容易从地震信息中获取,从而对该区的烃源层的热演化程度进行初步评价 (图 5)。

文昌湖扩沉积期,由于湖平面上升较快,北部番禺低隆起物源供给减少,为主凹深湖盆中深湖相烃源岩发育创造了有利条件。文昌湖扩沉积期白云主凹形成的烃源岩成熟度大于 1.6 已经过成熟。番禺低隆起西北部相对其它地区成熟度较高,并且沿主测线方向向盆地内部越来越高,说明沉积水体越来越深 (图 5a)。恩平组湖扩沉积期,白云主凹沉积的烃源岩成熟度大于 1.0 烃源岩现今仍处在成熟阶段。工区西南部和东南部地层烃源岩成熟度较低, R_o 普遍在 0.4% 以下;番禺低隆起处和南部隆起带成熟度相对也较低,但是都已经成熟 (图 5b)。

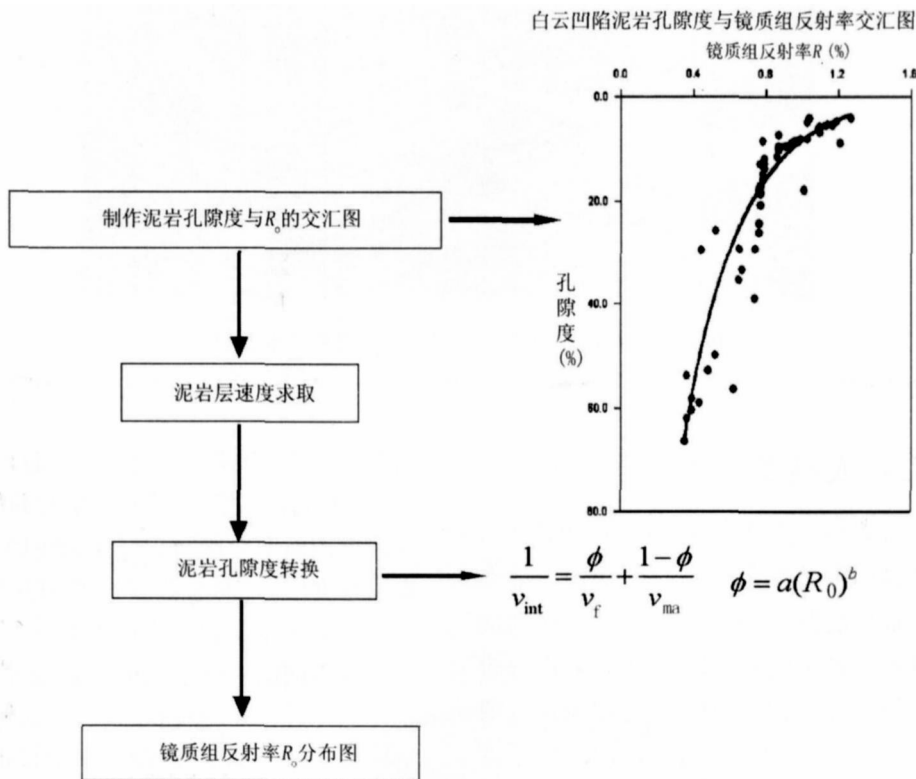


图 4 白云凹陷主力烃源岩有机质成熟度的地震预测模型

Fig 4 Seismic prediction model of main source rock's R_o in Baiyun Depression

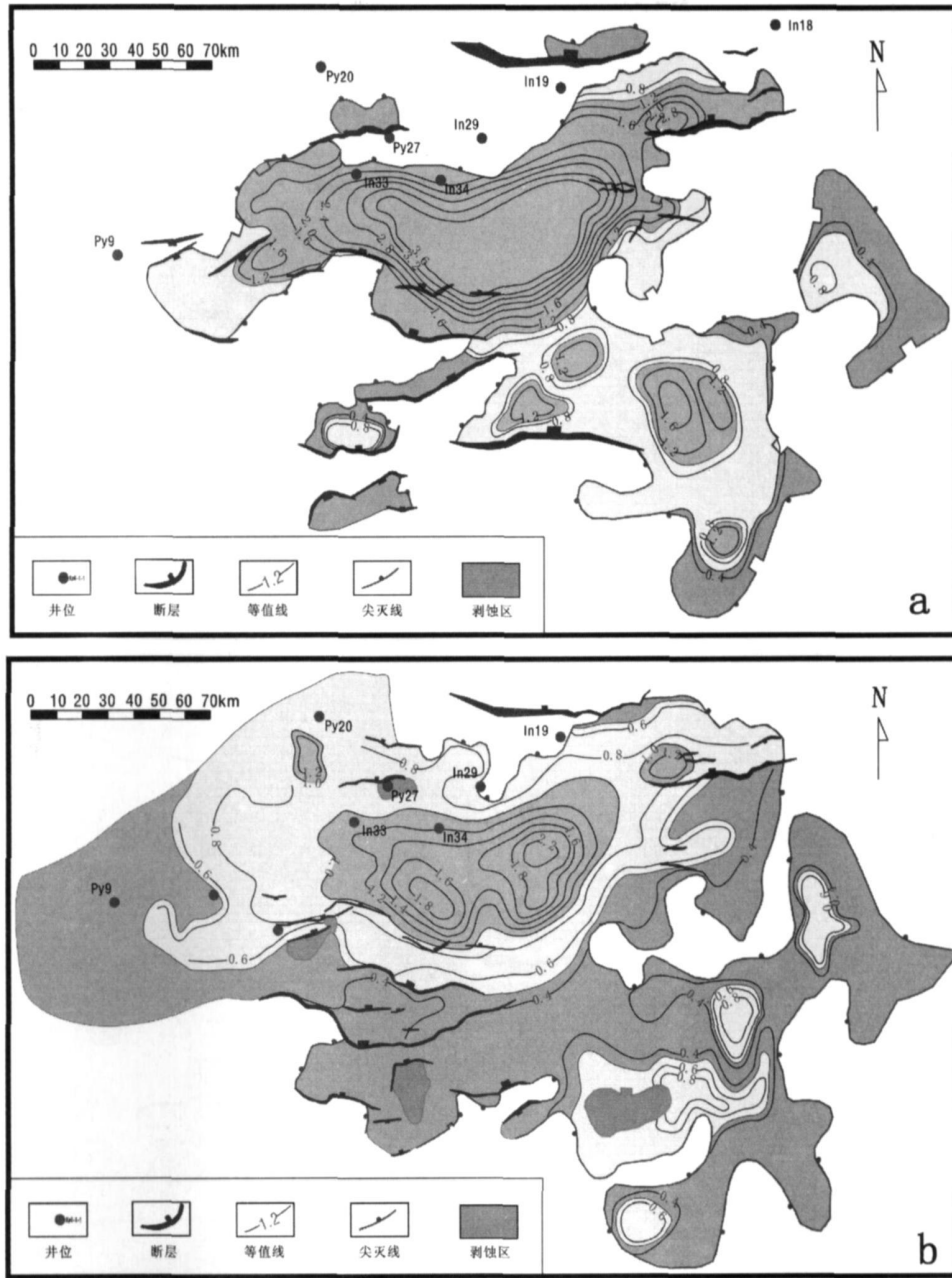


图 5 白云凹陷深水主力烃源岩有机质热成熟度预测结果

a 文昌层序; b 恩平层序

Fig 5 Seismic prediction result of main source rock's R_o in Baiyun Depression

a Sequence of Wenchang

b Sequence of Enping

4 沉积相转有机相方法

如何在样品较少的情况下有效的预测油气源岩是石油地质学家普遍关心的问题。有机相的概念和研究方法的产生为解决上述问题提供了一种选择。有机相是近十余年来在海洋学、沉积学、微生物学、有机地球化学和有机岩石学等学科的基础上发展起来

的有机地层学概念^[12]。由其概念不难看出,多种学科的研究成果都可以成为有机相研究的基础资料。这就使得有机相研究对资料条件具备了很强的适应性,在资料较少的情况下也可以进行有机相研究。因此,有机相研究在低勘探领域的烃源岩评价中是比较适用的。

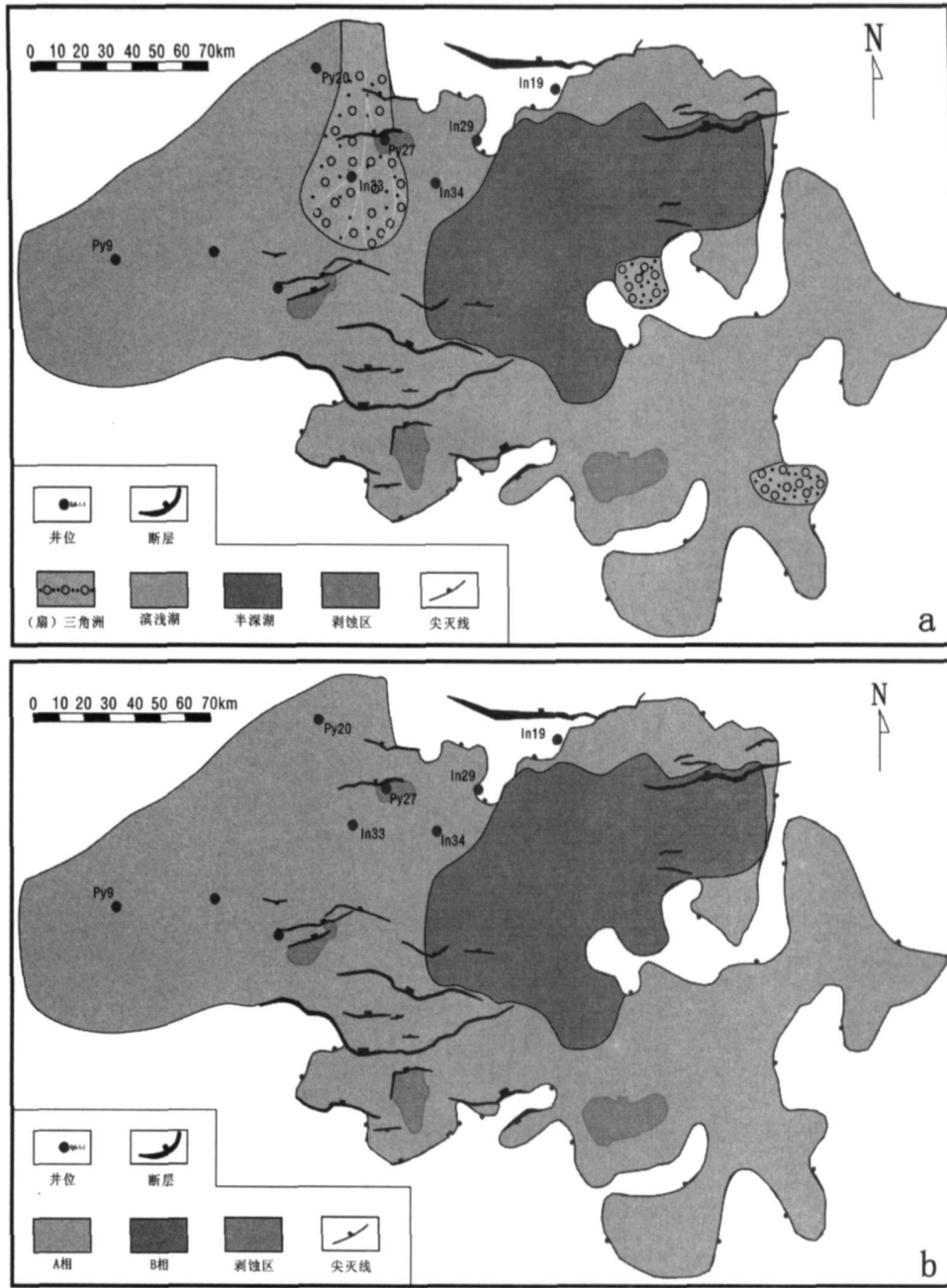


图 6 白云凹陷深水恩平层序湖扩体系域有机相预测

a 恩平层序湖扩体系域沉积相平面分布图; b 恩平层序湖扩体系域有机相平面分布图

Fig 6 Organic facies prediction of Enping sequence's ESF in Baiyun Depression

a Sedimentary facies of Enping sequence's ESF; b Organic facies of Enping sequence's ESF

前已述及,白云凹陷深水层序及体系域的分析结果表明,有利烃源岩发育层段位于湖扩体系域。因此,对湖扩体系域有机相进行了重点分析,白云凹陷浅水区的研究结果表明,半深湖—深湖相与有利烃源岩的发育部位有较好的对应关系。本文以上述关系为依据,根据本区沉积体系的实际展布特征。把恩平

层序湖扩体系域有机相分为 A 相和 B 相, A 相的烃类性质不利于大量生烃, B 相烃类性质有利于大规模生烃。从恩平层序湖扩体系域有机相 (图 6b) 可以看出: 由于供源流域小, 物源供给不充分, 主洼深湖盆中深湖相烃源岩有机相为 B 相, 而其余地区为 A 相, 生烃潜力不大。

5 结论

白云凹陷的烃源岩质量与分布主要受埋藏深度, 层序地层格架和沉积体系展布三种因素控制。埋藏深度较深的文昌组烃源岩已达过成熟阶段, 而其上的恩平组烃源岩仍处于生烃高峰。白云凹陷烃源岩最有利的发育层段是湖扩体系域。优质烃源岩的分布与半深湖—深湖相有较好的对应关系。

勘探程度高的地区, 积累了研究有效烃源岩的大量地质地球化学资料, 烃源岩预测评价主要靠钻井资料获得。对于本区来说相对较困难, 原因是本区钻井多集中在北部地区, 仅有的几口钻井多数打在边缘地带或钻井较浅。由于断陷湖盆构造活动的差异性、浊流沉积的事件性和气候的多变性, 缺氧环境不时被打破, 因而烃源岩具有强烈的非均质性, 优质烃源岩分布具有层次性与区域性。针对白云凹陷烃源岩成因特征, 提出了以体系域为单元评价烃源岩的方法, 客观地反映了烃源岩的沉积和地震反射特征, 揭示了有效烃源岩的时空分布规律。

因此, 在考虑白云凹陷复杂的陆相油气藏的油源及其成因问题时, 要强调进行多学科的综合分析及多方而证据的相互印证支持, 才能得到较为合理的及符合各种地质现象的结论。笔者主要根据上述多方面非有机地化油源对比的间接依据, 从湖平面变化及沉积相分析、地震反射特征、速度、岩性等资料与相临地区对比识别烃源岩, 确定烃源岩的分布。

参考文献 (References)

1 赵政璋, 何海清. 中国石油近几年新区油气勘探成果及下步工作面临的挑战和措施. 沉积学报. 2004(22), 增刊: 1~7 [Zhao Zhengzhang He Haiqing Recent oil and gas exploration harvests in the new area of Petrochina and future challenges and measures. Acta Sedimentologica Sinica 2004 22(suppl): 1~7]

2 陈建文. 深水盆地油气勘探新领域. 海洋地质动态. 2003 19(8): 38~41 [Chen Jianwen. New exploration domain for oil and gas in deep water basins. Marine Geology Letters 2003 19(8): 38~41]

3 金春爽, 乔德武, 姜春燕. 国内外深水油气勘探新进展. 海洋地质动态. 2003, 19(10): 20~23 [Jin Chunshuang Qiao Dewu Jiang Chunyan Advances of oil and gas explorations in worldwide deepwater. Marine Geology Letters 2003 19(10): 20~23]

4 孙清, 连珺. 中国深水海域油气及相关资源勘探开发进展及关键技术. 中国海洋大学学报(自然科学版) 2005 35(6): 1049~1052. [Sun Qing Lian Jun. Key technologies with development of exploration and exploitation of the deep-water oil and gas and gas hydrates in South China Sea. Journal of Ocean University of China 2005, 35(6): 1049~1052]

5 张厚福, 张万选, 等. 石油地质学. 北京: 石油工业出版社, 2000 [Zhang Houfu Zhang Wanxuan et al. Petroleum Geology. Beijing: Petroleum Industry Press 2000]

6 Schmoker JW. Sand porosity as a function of the thermal maturity. Geology. 1988, 16(11): 1007~1010

7 朱敏敏. 层序地层学. 山东东营: 石油大学出版社, 2000 [Zhu Minmin. Sequence Stratigraphy. Dongying Shandong: Press of University of Petroleum, 2000]

8 刘震, 吴因业. 层序地层框架与油气勘探. 北京: 石油工业出版社, 1999 [Liu Zhen, Wu Yingye. Sequence Stratigraphy Frame and Exploration Activity. Beijing: Petroleum Industry Press 1999]

9 刘震. 储层地震地层学. 北京: 地质出版社, 1997 [Liu Zhen. Reservoir Seismic Stratigraphy. Beijing: Geological Publishing House 1997]

10 卢书铨. 有关烃类迁移的模拟研究. 全国油气运移学术讨论会, 1987. 11 [Lu Shu'qian. Simulation study of hydrocarbon migration. National Oil Migration Workshop. 1987. 11]

11 刘震, 孙强, 武耀辉. 洪浩尔舒特凹陷下白垩统热成熟度地震预测. 石油实验地质, 1997, 19(4): 372~376 [Liu Zhen Sun Qiang Wu Yaohui. Thermal maturity seismic prediction of lower Cretaceous in Hunshoutou depression. Petroleum Geology & Experiment 1997, 19(4): 372~376]

12 朱光有, 金强. 烃源岩的非均质性研究——以东营凹陷牛 38 井为例. 石油学报, 2002 23(5): 34~39 [Zhu Guangyou Jin Qiang. Study on source rock heterogeneity: a case of Niur-38 well in Dongying Depression. Acta Petrolei Sinica 2002 23(5): 34~39]

Early Forecast and Evaluation Study on Chief Source Rock in Baiyun Depression

MIL Jun^{1,2} LU Zhen¹ ZHANG Gong-cheng³ SHEN Hua-lei¹
CHANG Mai¹ GUO Rui¹ TIAN Ji-xian¹ TAN Zhuo¹

(1 The School of Resource and Information, University of Petroleum, Beijing 102200;

2 Exploration Department of CNOOC Ltd(China), Beijing 100010; 3 Beijing Research Center, CNOOC Ltd(China), Beijing 100027)

Abstract Source rock is very important for deepwater. Because there is no well piercing the Eocene strata, regional correlation method is applied to identify the source rock and define its distribution in Baiyun Depression, including the correlation of subsidence rate, sedimentary facies, seismic facies and seismic velocity lithology with the adjacent areas. The condensed section in the Paleogene strata of Baiyun Depression has three features: parasequences moved forward the shore, the supply of terrigenous detrital material was not enough, semideep lacustrine fine sediment developed well. The seismic reflection characters are well corresponding to the favored source rock. The seismic facies of medium-weak amplitude, medium-low frequency and medium-high continuity of lake progressive system tracts of Enping and Wenchang Formation in Baiyun Depression is the area of favored source rock. A forecast model is built up for the degree of organic maturity of source beds with single well and the mudstone porosity which can be got easily from the seismic information. This model is then applied to evaluate the thermal evolution degree of the source beds in Baiyun depression preliminarily. Based on the research of Baiyun depression, this paper represents a methodology of evaluation on source rocks of deep water. This methodology includes five aspects: (1) analysis of sequence stratigraphy to determine the main formation of source rocks; (2) analysis of seismic reflectance signature to determine the occurring position of source rocks; (3) prediction of vitrinite reflectance based on mudstone velocity to determine the maturation of source rocks; (4) prediction of types of organic facies based on the conversion from sedimentary facies to organic facies; (5) comprehensive evaluation to select optimum hydrocarbon-generating sag.

Key words condensed section, seismic facies, sedimentary facies, organic maturity