

文章编号: 0253-2697(2012)01-0025-07

# 北部湾盆地始新统湖相富有机质页岩特征及成因机制

黄保家<sup>1</sup> 黄合庭<sup>1</sup> 吴国瑄<sup>2</sup> 游君君<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057; 2. 同济大学 上海 200092)

**摘要:**始新统流沙港组二段发育的中深湖相富有机质页岩是北部湾盆地涠西南凹陷重要的优质烃源岩,这些富有机质页岩呈深灰色或棕褐色,页理发育,富含非海相沟鞭藻、葡萄藻、光面球藻等藻类化石。有机碳含量在 3.07%~10.35%,有机质以偏腐泥的混合型为主;Pr/Ph 为 0.65~2.5,富含五环三萜、三环二萜及四环萜烷,而指征陆源高等植物输入的奥利烷含量甚微;C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 规则甾烷呈“V”型分布,源于低等藻类的 C<sub>30</sub> 4-甲基甾烷十分丰富,表明其有机质来源主要为低等水生生物。丰富的藻类化石,尤其是较多非海相沟鞭藻的出现,和相对高丰度的无定形有机显微组成反映流二段富有机质页岩形成于湿润气候条件下的微咸水且水体分层的中深湖缺氧环境中。流二段顶部富有机质页岩发育于高水位体系域的顶部;流二段底部富有机质页岩分布于水进体系域的底面。该区流沙港组二段沉积时湖水较深,沉积速率较慢,湖盆处于欠补偿状态;由于水体分层结构,在表层藻类等水生生物勃发乃至死亡导致湖水有机质输送量增多,而古湖底层缺氧环境使沉积有机质得到有效保存,从而造就了这套湖相富有机质页岩。

**关键词:**富有机质页岩;地球化学特征;生物标志物;藻类化石;中深湖相;北部湾盆地

中图分类号:TE125.2

文献标识码:A

## Geochemical characteristics and formation mechanism of Eocene lacustrine organic-rich shales in the Beibuwan Basin

HUANG Baojia<sup>1</sup> HUANG Heting<sup>1</sup> WU Guoxuan<sup>2</sup> YOU Junjun<sup>1</sup>

(1. CNOOC China Ltd. Zhanjiang, Zhanjiang 524057, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Mid-deep lacustrine organic-rich shales in Member 2 of the Liushagang Formation (LS2) are the most important high-quality source rock in the Beibuwan Basin. These dark-grey or -brown shales with developed lamellation contain abundant non-marine *dinoflagellate*, *rugosphaera* and *leiosphaeridia* fossils, they are rich in organic matter, with TOC content ranging between 3.07%~10.35%, type III1 and I kerogen and Pr/Ph ratios varying from 0.6 to 2.5. The shales are characterized by a high abundance of 4-methyl steranes that are probably related to certain *dinoflagellates* thriving in lakes, relatively abundant pentacyclic triterpanes, tricyclic diterpanes and tetracyclic terpanes but a very tiny amount of oleanane indicative of terrigenous higher-plant input, and a “V”-shaped distribution of C<sub>27</sub>, C<sub>28</sub> and C<sub>29</sub> regular steranes. All these characteristics indicated that the organic matter in those shales was mainly of algal origin. The data of various algal fossils, especially plenty of non-marine *dinoflagellates* and amorphous organic macerals suggested that they were formed in an anoxic and stratified environment of mid-deep brackish lakes in humid climate, where organic-rich shales of the upper LS2 occurred at the top of a high-stand system tract and those of the lower LS2 were distributed at the bottom of a transgressive system tract. In this area the sedimentation rate for Member 2 of the Liushagang Formation (LS2) was relatively low and the lake remained as a starved basin, meanwhile the bloom and death of algae near surface supplied a great deal of organic matter to lacustrine sediments, and the oxygen-depleted bottom water of palaeo-lakes, due to the water-column stratification, favored the accumulation and preservation of sedimentary organic matter, resulting in the formation of organic-rich shales, a high-quality source rock.

**Key words:** organic-rich shale; geochemical characteristics; biomarker; algal fossil; mid-deep lake facies; Beibuwan Basin

### 1 区域地质背景

北部湾盆地是南海北部的一个新生代沉积盆地(图 1),盆地的沉积演化经历了古近纪湖相和新近

纪—第四纪海相两个主要阶段<sup>[1-2]</sup>。其中,始新世流沙港组沉积时期是湖盆发育的鼎盛时期,相应发育了一套中深湖相烃源岩,同时在流沙港组二段(流二段)顶、底部沉积了两层富有机质页岩(曾称“油页岩”),尤以

**基金项目:**国家重大科技专项(2011ZX05025-002)和油气资源与探测国家重点实验室开放课题(KFKT2010-01)资助。

**第一作者及通讯作者:**黄保家,男,1958年5月生,1982年毕业于西南石油大学,2003年获中国科学院广州地球化学研究所博士学位,现为中海石油(中国)有限公司湛江分公司地化与成藏首席工程师,主要从事油气地球化学与成藏综合研究。E-mail:huangbj@cnooc.com.cn

盆地北部的涠西南凹陷出类拔萃。业已证实,迄今为止盆地发现的多个油田油源均为流沙港组烃源岩(包括湖相泥岩和富有机质页岩)<sup>[2-4]</sup>。尽管前人已对该盆地始新统流沙港组烃源岩做了较深入的研究<sup>[5-6]</sup>,但对其类似于油页岩的富有机质页岩的地球化学特征、生

油潜力及其形成机理的研究相对较少。笔者根据大量的地球化学和地质数据,结合生物标志物、浮游藻类化石和有机质显微组分等分析结果,重点对盆内涠西南凹陷流沙港组富有机质页岩的地球化学特征、生源构成进行剖析,进而探讨其成因与形成环境。

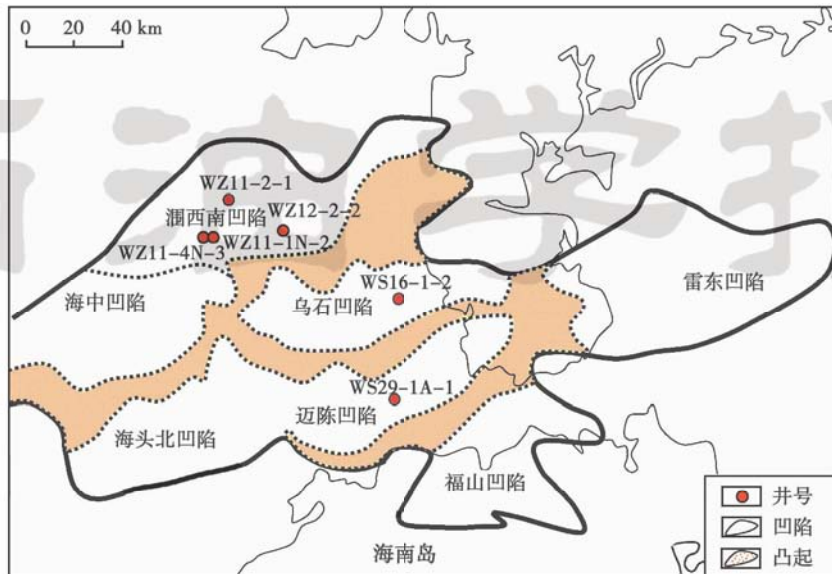


图1 北部湾盆地构造位置

Fig. 1 Tectonic location of the Beibuwan Basin

## 2 流沙港组富有机质页岩展布

涠西南凹陷流沙港组普遍存在富有机质页岩,其中,流二段顶部钻井揭露的富有机质页岩厚度为7~25 m;而流二段底部富有机质页岩则较为发育,厚度在15~98 m,大部分在40 m以上,埋藏较大。从探井揭露的流二段底部富有机质页岩的地球物理响应来看,

具有两个显著特征:① 自然电位、电阻率测井曲线较其相邻泥岩或页岩高,而由声波时差、体积密度和补偿中子测井曲线所显示的富有机质页岩密度较普通泥岩或页岩低得多;② 在地震剖面上,富有机质页岩表现为低频率、连续、强振幅特征,成为一套区域性标志层(图2)。根据上述富有机质页岩识别标志,将钻井揭露的流二段底部富有机质页岩在地震剖面上标

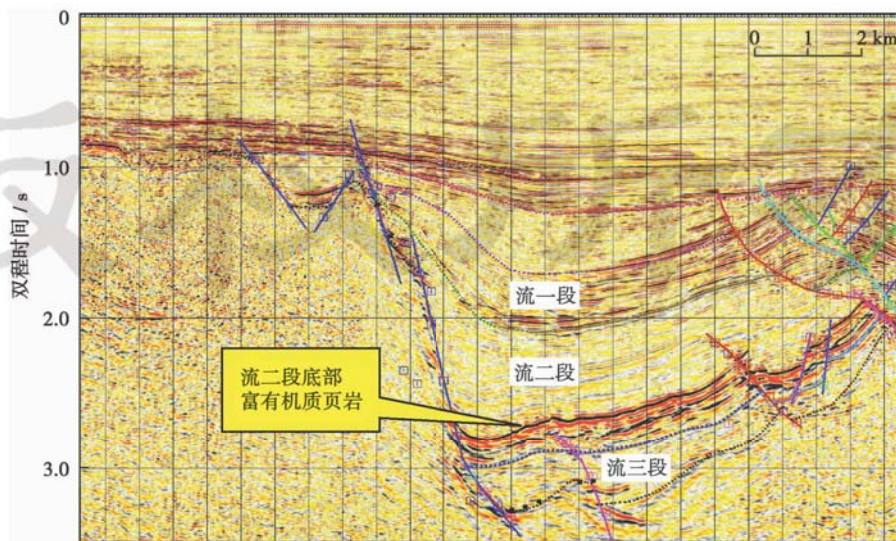


图2 过涠西南凹陷地震剖面中流二段底部富有机质页岩的强振幅

Fig. 2 High amplitude of organic matter-rich shales in the bottom of the second member of the Liushagang Formation from the seismic profile through the Weixinan Sag

定,初步厘定涠西南凹陷流二段底部富有机质页岩厚度主要在 40~80 m,并且分布范围广,厚度较为稳定,埋深为 2 200~5 400 m,现今绝大部分处于生油窗范围,具备良好的生烃能力,被认为是涠西南凹陷的优质生油岩<sup>[3-6]</sup>。

### 3 富有机质页岩地球化学特征与生源构成

#### 3.1 有机质丰度和类型

有机地球化学分析结果显示,涠西南凹陷流沙港组的富有机质页岩有机质丰度高、类型好。根据该凹

陷 10 口典型探井钻遇流沙港组富有机质页岩的有机质丰度统计数据,其有机质丰度较暗色泥岩高得多(图 3),有机碳含量分布于 3.07%~10.35%,平均达到 6.23%;氯仿沥青“*A*”为 0.20%~1.65%,平均值 0.6324%;热解生烃潜量( $S_1 + S_2$ )在 16.7~43.3 mg/g,平均达到 28.2 mg/g,表明这套富有机质页岩是优质烃源岩,具有良好的生烃能力。

富有机质页岩干酪根 H/C 原子比为 1.01~1.30, O/C 原子比为 0.08~0.24;热解氢指数( $I_{H1}$ )一般都大于 300 mg/g,最高达 688 mg/g;有机质类型主体为 I—II<sub>1</sub> 型,偶见 II<sub>2</sub> 型;以生油为主。

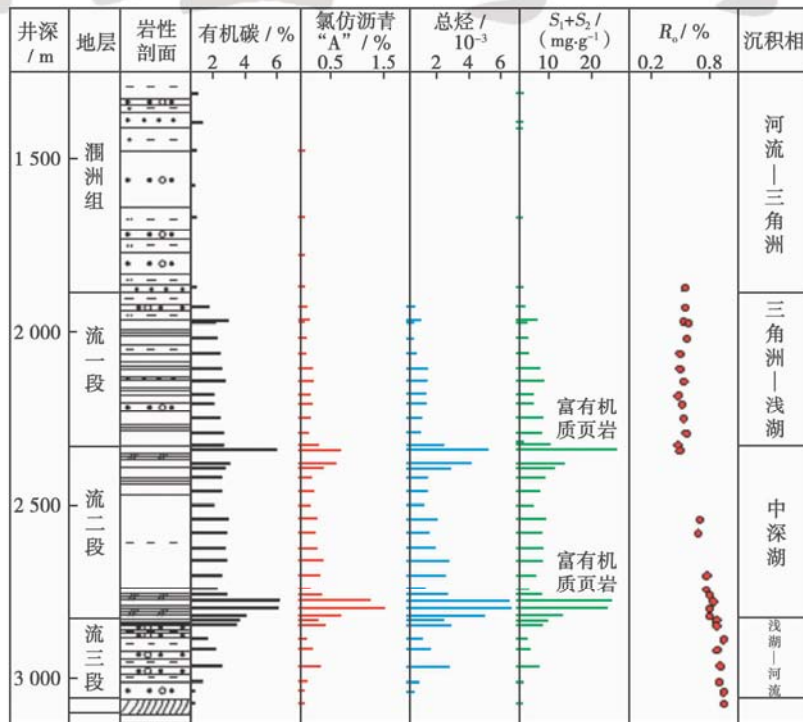


图 3 涠西南凹陷 WZ11-4N-3 井有机地球化学剖面

Fig. 3 The geochemical profile of Well WZ11-4N-3 in the Weixinan Sag

#### 3.2 生物标志化合物特征及其生源构成

涠西南凹陷流沙港组富有机质页岩可溶抽提物饱和和烃气相色谱碳数分布范围较宽,谱图特征以前高后低的双峰居多,Pr/Ph 为 0.6~2.5,暗示其生烃母质沉积于弱还原—还原环境。生物标志化合物分析结果显示,富有机质页岩含有丰富的五环三萜烷(图 4)、三环二萜烷及四环萜烷,而倍半萜烷贫乏,仅在一些样品检测到升补身烷。Aquino Neto 等<sup>[7]</sup>指出三环萜烷几乎分布于所有油中,并认为其先质与微生物或藻类有关,北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组富有机质页岩中三环二萜烷的发育及在其内发现丰富的藻类化石支持了 Aquino Neto 等的认识。在五环三萜烷中,源于陆生高等植物标志物奥利烷含量很低(图 4),奥利烷/ $C_{30}$  藿烷

为 0.05~0.20,反映流沙港组湖相有机质来源除了原地生长的水生生物外,还有少量异地搬运的陆源有机质。

涠西南凹陷流沙港组富有机质页岩在总甾烷组成中含有较多的重排甾烷,在正常甾烷中,规则甾烷  $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  呈“V”型分布,表明其有机质来源构成是低等水生生物和陆源植物兼而有之。值得一提的是,富有机质页岩中检测到高丰度的  $C_{30}$  4-甲基甾烷,如此丰富的 4-甲基甾烷实属少见(图 4)。关于 4-甲基甾烷的生源主要有两种观点:一种认为是由甲藻衍生而来<sup>[8-9]</sup>;另一种认为来源于细菌类<sup>[10]</sup>。根据本区流沙港组富有机质页岩的古生物分析结果及 4-甲基甾烷分布对比研究显示,北部湾盆地涠西南凹陷含高丰度  $C_{30}$  4-甲基甾烷页岩样品富集藻类化石,如非海相沟鞭

藻(甲藻类)、盘星藻、葡萄藻和光面球藻等(图5);浮游藻类平均含量占有机壁微体化石总量的9.77%~26.4%,如WZ11-2-1井流沙港组二段的浮游藻类平均含量为42%,富有机质页岩发育段最高可达60.01%。这与傅家谟等<sup>[8]</sup>报道的茂名油页岩4-甲基甾烷与甲藻生物化石含量呈正消长关系的现象颇为相似,由此进一步证实C<sub>30</sub>-4-甲基甾烷与藻类尤其是甲藻

密切的成因联系。朱伟林等认为<sup>[5]</sup>,流二段暗色泥岩夹富有机质页岩形成期间,湖泊富营养,适宜水生低等生物繁殖,生产力很高,在湖盆发育极盛时期的中深湖区形成富藻有机质输入的良好烃源岩,为油气的生成奠定了雄厚的物质基础。油源对比证实,已发现油田的原油与流沙港组二段富有机质页岩和中深湖相泥岩存在密切的成因联系<sup>[6]</sup>。

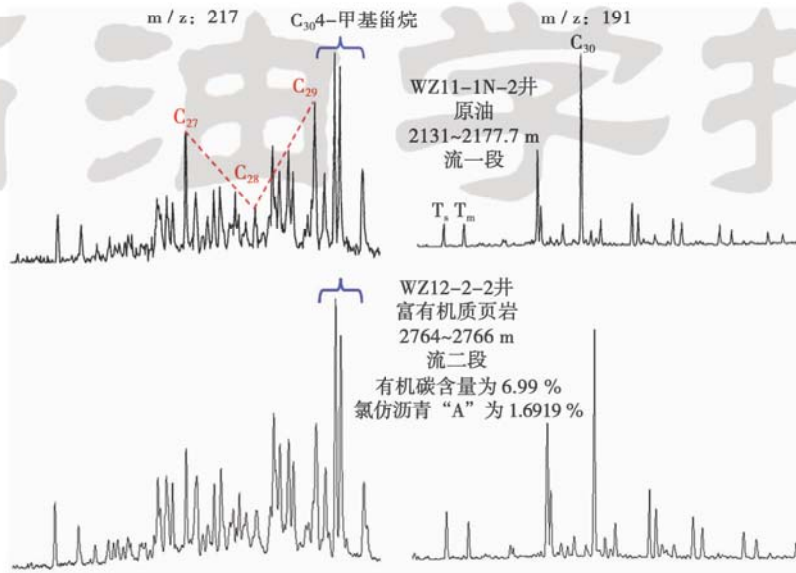


图4 涪西南凹陷流沙港组富有机质页岩和原油的甾萜烷质量色谱

Fig. 4 The comparison between an oil and the Liushagang Formation organic matter-rich shale from the Weixinan Sag

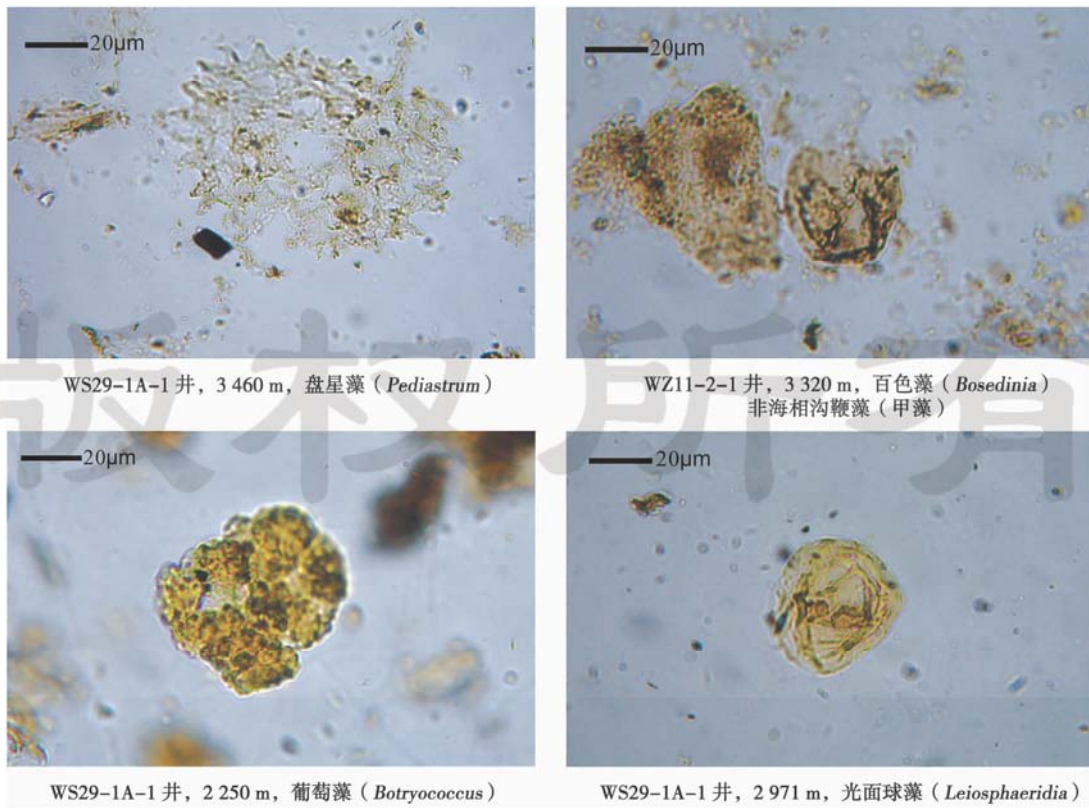


图5 北部湾盆地流沙港组富有机质页岩样品浮游藻类

Fig. 5 Algal fossil of organic matter-rich shale samples from Liushagang Formation in the Beibuwan Basin

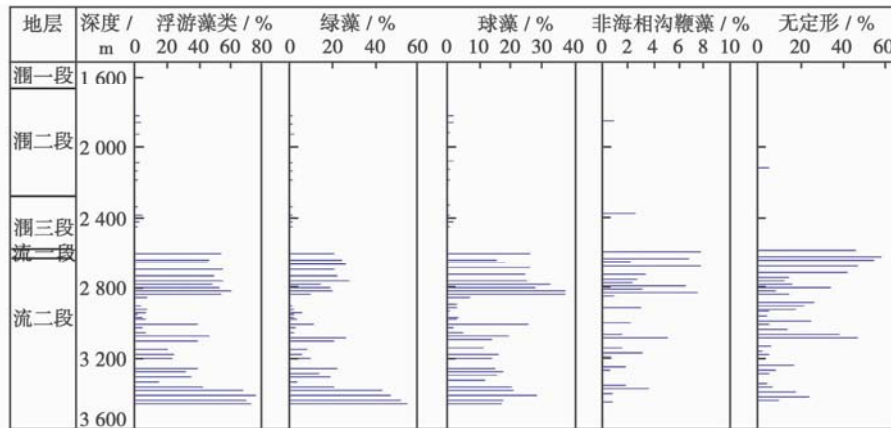
## 4 富有机质页岩形成环境和成因

### 4.1 富有机质页岩形成环境

涠西南凹陷流二段沉积于湖盆发育的全盛时期, 主要以大套深灰、褐灰、灰黑色页岩与泥岩为主, 夹灰白色细砂岩、粉砂岩。该段岩性较单一, 泥岩色深质纯, 连续厚度大, 分布较稳定; 砂岩粒级细, 含泥多, 陆源重矿物含量低, 表明这时期湖水较深, 水体宁静。在该套地层中自生黄铁矿特别发育, 多呈分散的微晶集合体出现, 呈球粒状、鱼子状(莓状)和生物假象的也较为常见, 这是局限流通还原环境的特征。菱铁矿在地层中也较富集, 泥岩中尤其普遍, 含量一般为 2%~10%, 少数可达 30%, 这也是较强还原环境的标志。生物标志物 Pr/Ph 值是反映沉积环境的重要参数, 根据梅博文等<sup>[11]</sup>对中国不同沉积环境下形成的原油进行的统计, 盐湖相、咸水深湖相形成的原油 Pr/Ph 为 0.2~0.8, 具有明显的植烷优势; 淡水—微咸水深湖相原油的 Pr/Ph 一般在 0.8~2.8; 淡水湖相氧化—弱还原环境下形成的原油 Pr/Ph 为 2.8~4.0,

具有明显的姥鲛烷优势。前已述及, 涠西南凹陷流沙港组富有机质页岩 Pr/Ph 比值相对较低(0.6~2.5), 同样反映出其形成于弱还原—还原的淡水—微咸水沉积环境中。

在浮游藻类中, 能较好反映水体盐度的指标是绿藻、非海相沟鞭藻和球藻的含量<sup>[12]</sup>。孢粉相分析是针对沉积物中的有机壁微体植物化石、植物碎屑和无定形有机质, 统称为沉积有机屑。浮游藻类包括海相沟鞭藻类、非海相沟鞭藻类、淡水绿藻类和属于疑源类的球藻。本次研究对 145 块样品进行了透射光显微镜下的沉积有机屑定量统计, 结果显示: 非海相沟鞭藻(甲藻类)较多分布在流二段; 绿藻(包括盘星藻及葡萄藻)和球藻(如光面球藻)则在各地层层段都有分布, 但绿藻往往在非海相沟鞭藻贫乏或较少的层段较多; 球藻则是含量较为稳定的类型(图 6)。由此可见, 北部湾盆地古近纪湖泊一度为较高矿化度的半咸水湖。当始新世流二段沉积时湖水盐度较高, 属于微咸水湖, 非海相沟鞭藻含量较多; 而到渐新世涠洲组沉积时期湖水变淡, 这与由 Pr/Ph 得出的认识相一致。



(a) WS29-1A-1 井



(b) WZ11-2-1 井

注: 浮游藻类含量指占孢藻总量, 而各种藻类含量指占藻总量; 无定形含量指占有有机屑总量。

图 6 北部湾盆地两口探井古近系样品浮游藻类和无定形含量随深度变化剖面

Fig. 6 The relative abundance of fossil microphytoplankton (alga) and amorphous with depth in two wells of the Beibuwan Basin

#### 4.2 富有机质页岩成因机制

沉积记录中的浮游藻类化石丰度较高是水体富营养、高生产力和浮游植物繁盛的重要标志<sup>[12]</sup>。根据北部湾盆地古近系样品分析结果,在 WS29-1A-1 井中,浮游藻类在流二段一流一段下部较多,而从流一段上部起,浮游藻类减少,涠洲组中浮游藻类往往贫乏或含量很低;在 WZ11-2-1 井中浮游藻类较多的层段从流二段一直可以往上延伸至涠二段(图 6)。据此认为,在 WS29-1A-1 井区,流二段形成时期生产力较高的古湖泊从流一段时期起相继开始萎缩、衰亡;而在 WZ11-2-1 井地区,较高生产力的古湖泊持续时间最长,至涠二段形成时仍有较高生产力古湖泊存在,但自流一段沉积开始,水体开始变浅,沉积物供给量增加,不利于有机质高度富集和富有机质页岩的形成。

浮游藻类含量主要与水体生产力有关,而无定形有机质含量受制于水体生产力和贫氧的水底环境。所谓无定形有机质是指无一定形态结构的沉积有机质,镜下多是不规则的微粒、渐变的模糊边缘,形成凝块或絮团。大多数无定形有机质是浮游植物成因,这类植物不具备耐分解的支撑组织,因此,地层中这种无定形显微有机质组分的大量存在,不但反映其沉积时古水体生产力,而且指示水体底部因水体分层而造成的贫氧环境。而水体中的缺氧或充氧条件很大程度上取决于水循环和分层,湖水的温度分层与水深有关。底部水体中氧的补充一般在具有明显气候反差的湖水季节性交换的地区较充足,在温暖的热带气候条件下氧补充较差,因为湖水微小的气温变化不足以造成季节性回水。现代大型湖泊水深一般超过 20~30 m 时就有明显的分层现象,例如位于云南高原的现代断陷湖泊——抚仙湖,水体垂向上表现出明显的三层结构:湖上层、温跃层和湖下层,温跃层平均深度为 22.4 m<sup>[5]</sup>。北部湾盆地古近纪湖泊地处热带—亚热带地区,湖水缺少季节性回水,因而在水较深的湖底容易产生水体分层。

从 WZ11-2-1 井无定形有机质沉积层的发育特征可以看出(图 6),流沙港组二段无定形有机质最高,达 60%~80%,形成厚逾 300 m 的富无定形有机质沉积层。值得注意的是,流二段发育的富无定形有机质沉积层并未在靠近流一段与流二段分界处消失,在流一段下部仍较发育,直至流一段与涠三段分界处富无定形有机质沉积层才骤减。无定形有机质的这一含量变化应是古湖湖面(湖水深度)变化的反映:流二段沉积时期,随着古湖扩张,湖水变深,湖底有利于无定形有机质较多堆积保存的贫氧环境逐渐形成,最终导致富无定形有机质沉积层形成;从流二段到流一段显现的富无定形有机质沉积层发育从好到差的变化趋势,指示了

古近纪深水湖泊从鼎盛到萎缩的变化过程。在流二段湖盆发育鼎盛时期,具分层特征的深水湖泊表层富氧,有利于浮游生物的繁殖和生长;而在底层水中,有机质生产能力较低,特别是在流二段沉积早和晚期外来沉积物质供给不足导致沉积速率十分缓慢,而由于环境中缺氧使表层丰富的藻类等浮游生物死亡后在沉积物中得以有效保存,因此,形成了富有机质页岩沉积层。

北部湾盆地涠西南凹陷富有机质页岩主要分布于流沙港组二段底部和顶部。流二段顶部富有机质页岩发育于高水位体系域的顶部,沉积时湖水较深,以加积和进积叠加方式为特征;流二段底部富有机质页岩以中深湖相沉积为主,部分地区为浅湖,主要分布于水进体系域的底部(图 7),以退积叠加方式为特征。结合各种藻类化石含量变化,自生黄铁矿含量、Pr/Ph 与无定形有机质特征,推测北部湾盆地流沙港组二段富有机质页岩形成于湿润气候条件下的半咸水—微咸水的中深湖缺氧环境中,沉积时可容纳空间的生长速率大于碎屑物质的供给量,沉积速率较慢,湖盆处于欠补偿状态,水体分层结构使沉积有机质得到有效保存;同时,藻类等水生生物勃发乃至死亡则导致湖水有机质输送通量增多,使沉积物中有机质保存量增大,从而使这套富有机质页岩层的形成(图 7)。

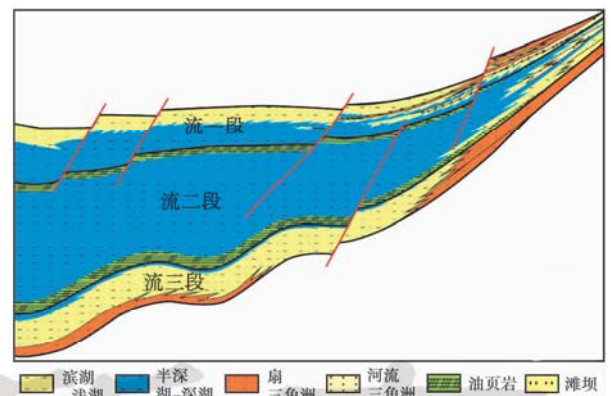


图 7 涠西南凹陷始新统湖相油页岩发育地质模式

Fig. 7 Depositional model of Eocene lacustrine organic matter-rich shales in the Weixinan Sag

#### 4.3 石油地质意义

涠西南凹陷流沙港组二段顶部和底部富有机质页岩分布广、厚度适中,同时,有机质含量高、富含无定形,并且大多已进入生油门限,即埋深超过 2 400 m(图 8),因此,具有较大的生油潜力;而在凹陷中部广大地区,流二段底部富有机质页岩成熟度更高,现今  $R_o$  在 1.2%~2.0%,进入生气窗,可能存在比较丰富的页岩气资源和良好的勘探前景。值得一提的是,位于流二段底部富有机质页岩下伏的流三段和直接覆盖流二段

顶部富含有机质页岩之上的流一段储层比较发育,可高效捕获相邻富含有机质页岩生成的油气,无疑将是下步隐蔽油气藏勘探的重要领域。

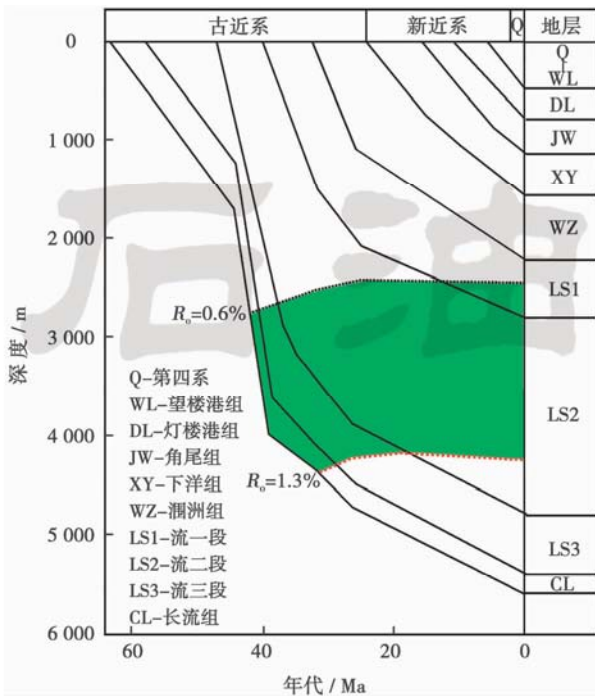


图 8 涠西南凹陷沉积中心地层埋藏曲线

Fig. 8 Burial history curves at the depositional center of the Weixinan Sag

## 5 结 论

(1) 北部湾盆地涠西南凹陷始新统流沙港组二段富含有机质页岩藻类化石(绿藻、球藻和非海相沟鞭藻等)丰富,有机碳含量高,有机质以偏腐泥的混合型为主,具有很好的生油能力,是该区重要的优质烃源岩。

(2) 这套富含有机质页岩陆生高等植物标志物——奥利烷含量很低,而源于低等藻类的  $C_{30}$  4-甲基甾烷十分丰富,  $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  规则甾烷呈“V”型分布,表明低等水生生物占有重要的贡献; Pr/Ph 介于 0.6~2.5, 指示弱还原—还原沉积环境。

(3) 流沙港组二段沉积时期,主要为中深湖、水体微咸的沉积环境,早期和晚期沉积速率较慢,处于欠补偿状态;由于水体分层结构,在表层藻类等水生生物高生产率产生了大量的有机质,而古湖底层缺氧环境使这些沉积有机质得到有效保存,从而导致了这套富含有机质页岩的形成,奠定了北部湾盆地涠西南富烃凹陷丰厚的烃源基础。

### 参 考 文 献

[1] 李明兴. 南海北部大陆架油气区古新统一始新统生物地层研究[J]. 石油学报, 1992, 13(2): 165-169.  
Li Mingxing. A biostratigraphy study of the Palaeocene-early Eo-

cene in the petroliferous area on north shelf, South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13 (2): 165-169.

- [2] 刘明全. 北部湾盆地天然气成藏系统构想[J]. 中国海上油气, 2004, 16(2): 93-97.  
Liu Mingquan. The assumed gas accumulation systems in Beibuwan basin[J]. China Offshore Oil & Gas, 2004, 16(2): 93-97.
- [3] 朱伟林, 江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏[J]. 石油学报, 1998, 19 (3): 18-22.  
Zhu Weilin, Jiang Wenrong. Relations between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 18-22.
- [4] 邓运华. 试论中国近海两个坳陷带油气地质差异性[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 1-8.  
Deng Yunhua. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 1-8.
- [5] 朱伟林. 中国近海新生代含油气盆地古湖泊学与烃源条件[M]. 北京:地质出版社, 2009: 297.  
Zhu Weilin. Paleolimnology and source rock studies of Cenozoic hydrocarbon-bearing, offshore basins in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 297.
- [6] Huang B J, Xiao X M, Cai D S, et al. Oil families and their source rocks in the Weixinan Sub-basin, Beibuwan Basin, South China Sea[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(1): 134-145.
- [7] Aquino Neto F R, Trendel J M, Restle A, et al. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum[G]// Bjoroy M, Hall P B, Loberg R, et al. Advance in organic geochemistry. London: Wiley and Sons, 1981: 659-667.
- [8] 傅家谟, 徐芬芳, 陈德玉, 等. 茂名油页岩中生物输入的标志化合物[J]. 地球化学, 1985, 15(2): 99-114.  
Fu Jiemo, Xu Fengfang, Chen Deyu, et al. Biomarker compounds of biological inputs in Maoming oil shales[J]. Geochimica, 1985, 15(2): 99-114.
- [9] Brassell S C, Sheng G, Fu J, et al. Biological markers in lacustrine Chinese oil shales[M]// Fleet A J, Kelts K, Talbot M R. Lacustrine petroleum source rocks. Blackwell, 1988: 299-308.
- [10] 黄第藩, 张大江, 李晋超. 论 4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(3): 8-15.  
Huang Difan, Zhang Dajiang, Li Jinchao. On origin of 4-methylsteranes and pregnanes[J]. Petroleum Exploration and Development, 1989, 16(3): 8-15.
- [11] 梅博文, 刘希江. 我国原油中异戊间二烯烷烃的分布及其与地质环境的关系[J]. 石油与天然气地质, 1980, 1(2): 99-115.  
Mei Bowen, Liu Xijiang. The distribution of isoprenoid alkanes in China's crude oil and its relation with the geologic environment [J]. Oil & Gas Geology, 1980, 1(2): 99-115.
- [12] 吴国瑄, 朱伟林, 黄正吉, 等. 湖相沉积浮游藻类及有机质类型与烃源研究[J]. 同济大学学报, 1998, 26(2): 176-179.  
Wu Guoxuan, Zhu Weilin, Huang Zhengji, et al. Research on phytoplankton and organic matter in the lacustrine sediments and hydrocarbon source conditions[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(2): 176-179.

(收稿日期 2011-05-30 改回日期 2011-09-19 责任编辑 熊 英)