

印度扇深水区古—始新统烃源岩特征及发育模式

江凯禧¹ 姚长华¹ 郭清正¹ 胡云亭¹ 赵才顺¹ 李鸿儒¹ 朱泽栋¹
何文祥² 肖飞³ 彭超¹

(1.中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452;

2.长江大学地球环境与水资源学院 武汉 430100;3.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

摘要 充分利用印度扇深水区及浅水陆棚区地震、测井、岩芯、地化等资料,预测了印度扇深水区古—始新统烃源岩特征,并探讨了烃源岩的发育模式。研究表明:印度扇深水区古—始新统地层主要以海进体系域为主,在始新统顶部发育厚度较薄的高位体系域,沉积于外陆棚深水相沉积环境,具备烃源岩发育的有利条件。古—始新统烃源岩空间分布范围广泛,厚度大,最大厚度达900 m以上。烃源岩有机质类型以Ⅱ~Ⅲ型干酪根为主,为混合型生源母质。现今凹陷内大部分烃源岩处于高一过成熟的生干气阶段。综合各地质要素分析,建立了印度扇深水区古—始新统烃源岩发育模式。在古—始新世沉积期,深水凹陷的古地理格局总体变化不大,处于赤道附近的低纬度地带,气候湿热。在有利的有机质保存条件下,古海洋生产力和陆源有机质输入量控制了深水区古—始新统烃源岩的有机质丰度。研究结果将有效指导印度扇深水区的油气勘探工作。

关键词 形成机理 层序地层 烃源岩 深水区 印度扇

第一作者简介 江凯禧 男 1987年出生 硕士 工程师 油气成藏与资源评价 E-mail: jiangkx4@cnooc.com.cn

通讯作者 何文祥 男 教授 E-mail: hwx@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P618.130.1 **文献标识码** A

0 引言

印度扇是世界第二大海底深水扇系统,其深水区(1 500~2 800 m)油气勘探是全球大型油气公司关注和研究的重点^[1]。印度扇深水区处于勘探早期,勘探程度低,钻井稀少,仅有的两口深水探井并没有完整揭露凹陷内的古—始新统地层。因而缺乏分析样品,给烃源岩评价带来困难。

当前,深水区烃源岩发育特征和形成机理研究是油气勘探的难点和重大风险要素。为此,充分利用印度扇深水区及浅水陆棚区各类地质资料,对深水区古—始新统烃源岩开展了层序地层、沉积相及烃源岩厚度特征分析。在此基础上,依据浅水陆棚区古—始新统烃源岩地化特征及相邻盆地烃源岩类比结果,从而预测出深水区烃源岩发育特征。此外,还从古地理、古气候、古海洋生产力及有机质保存条件等方面剖析了深水区烃源岩发育机理,建立了深水区烃源岩发育模式。研究结果将为预测印度扇深水区烃源岩时空分布和客观评价油气勘探潜力提供科学依据。

1 区域地质概况

1.1 构造背景及油气勘探概况

印度扇位于印度板块、阿拉伯板块和欧亚板块三联点,研究区位于上印度扇斜坡上,北以穆雷洋脊为界,南以索拉什特拉背斜为界,面积近 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1a)^[2]。据古近系地层展布特征,上印度扇及相邻地区被划分为5个一级构造单元,从北向南依次为:马克兰凹陷、穆雷洋脊、穆雷凹陷、派肯凹陷和拉客西米洋脊,呈凹陷相间的构造格局。派肯凹陷上覆水深在1 500~2 800 m之间,成为油气勘探的深水区(图1b)。当前深水区仅两口探井,分别是Total公司2004年钻探的P2井和Shell公司2007年钻探的Anne-1井,仅P2井钻遇始新统地层^[3]。此外,在浅水陆棚区有少量井钻遇古—始新统地层(图1c)。

1.2 沉积地层

印度扇主要沉积新生代地层,厚度可达11 000 m,先后经历了裂陷、热沉降和新构造期3个构造演化阶段^[3]。在晚白垩世末期到早古新世裂陷阶段,

印度板块和塞舌尔板块分离,发生大规模岩浆喷发,形成德干火山岩;进入古新世到始新世热沉降阶段,在德干火山岩形成的海山上建造了碳酸盐岩台地和生物礁,并在派肯凹陷沉积了古—始新统地层;渐新世到第四纪新构造期,由于印度板块与欧亚板块碰撞,形成渐新统到现今的印度扇巨层序。在印度扇近端,中新统一全新统地层发育了大规模的水道—堤岸沉积体系,地层厚度从 NE 向 SW 整体呈减薄趋势(图2)。

2 深水区烃源岩发育特征预测

2.1 深水区古—始新统烃源岩层序地层与沉积特征

层序地层学在早期烃源岩评价和预测中具有重要作用,特别是油气勘探程度低,探井少的深水地区^[4]。优质烃源岩多发育于层序的水进体系域(TST)和高位体系域(HST)的早期^[5]。由于水进体系域水体持续加深,沉积速率不断降低,沉积环境有利于有机质聚集和保存,相应地,有机质含量从下向

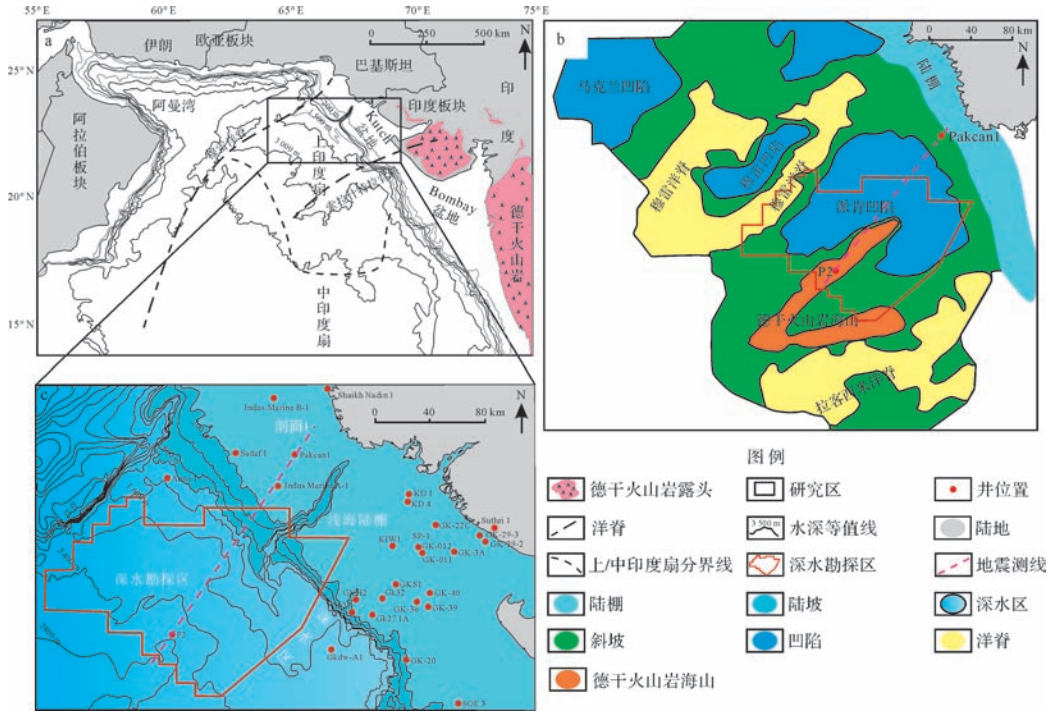


图1 印度扇地理位置及构造单元划分

a.印度扇地理位置;b.印度扇古近系构造纲要图;c.深水勘探区块位置及已钻井情况

Fig.1 Geographical position and tectonic units of the Indus Fan

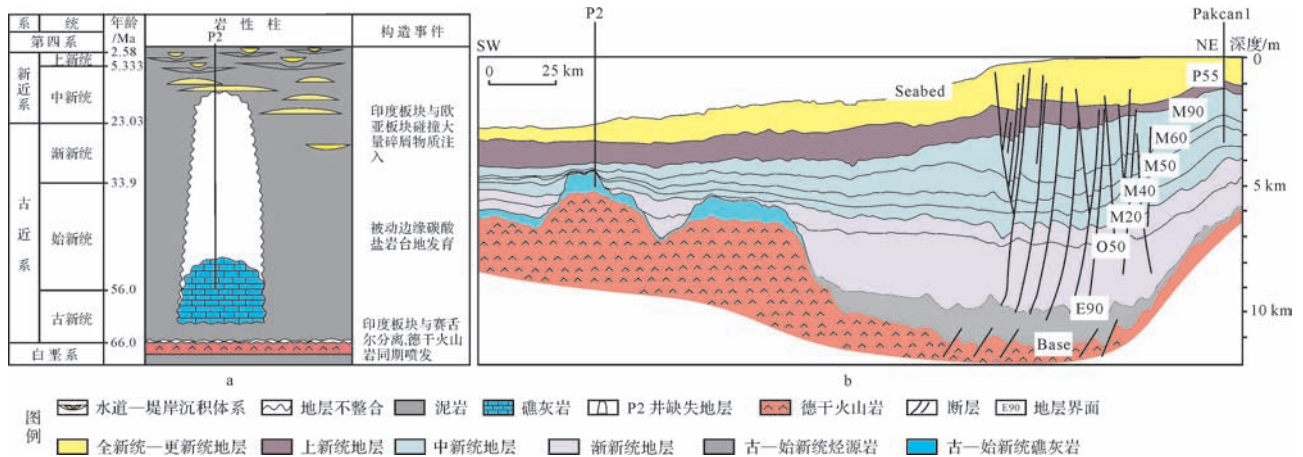


图2 印度扇沉积地层及深水区地层剖面图(剖面位置见图1)

a.印度扇沉积地层;b.深水区地层剖面

Fig.2 Sedimentary strata of the Indus Fan and strata section of deepwater area in the study area (section location see Fig.1)

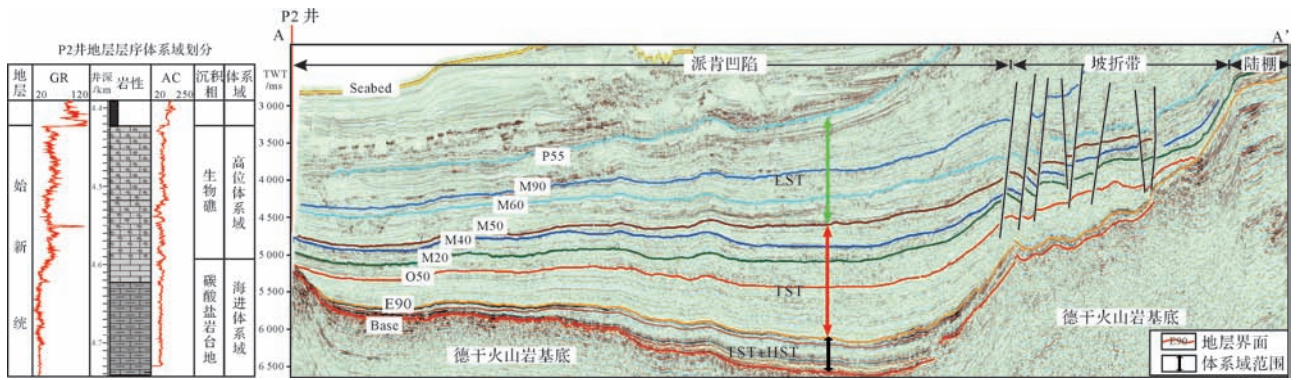


图3 印度扇深水区P2井体系域分析及新生界层序地层分布特征(剖面位置见图4)

Fig.3 System tract division of Well P2 and sequence stratigraphic features of Cenozoic Formation in the Indus Fan deepwater area (section location see Fig.4)

上逐渐增加。在一个层序的垂向剖面上,有机质含量通常在最大海泛面处最高——TST 和 HST 的体系域界面,由最大海泛面向上到高位体系域的底部有机质含量逐渐降低。

图3为深水区P2井的体系域划分图与过派肯凹陷EEN—WWS向地震剖面。P2井位于凹陷边缘德干火山岩形成的海山上,根据钻井岩心和测井资料,始新统划分为高位体系域和海进体系域,高位体系域发育生物礁相,海进体系域发育泥质碳酸盐岩台地相。派肯凹陷深水层序的分析结果表明,古—始新统(Base—E90)低位体系域不发育,主要以海进体系域为主,在始新统顶部发育高位体系域,海进体系域厚度占整个古—始新统地层厚度的一半以上,高位体系域厚度较薄。渐新统一下中新统(E90—M50)以海进体系域为主,发育深水环境下的海底扇沉积。中中新统一上新统(M50—P55)以低位体系域为主,发育有大规模河道—扇沉积系统。据朱红涛的层序构型分类^[5],派肯凹陷古—始新统的层序构型为T型层序构型,为富泥层序,是烃源岩最为发育的一种层序构型。因此,根据层序地层学分析,表明派肯凹陷古—始新统地层具备烃源岩发育的有利条件。

利用少数井的井震标定结果及地震相平面分布特征,绘制出了派肯凹陷古—始新统沉积相平面分布特征。如图4所示,古—始新世沉积时期,浅水陆棚发育碳酸盐岩沉积,派肯凹陷处于外陆棚深水沉积环境下,在凹陷边缘的海山上建造了碳酸盐岩台地和生物礁。根据生物礁与派肯凹陷古近系地层底部的高差,推测该时期深水凹陷最大水体深度可达2 000 m以上。因此,凹陷内沉积水体深,可容空间大,沉积物粒度较细。同时,受凹陷周缘海山的阻挡作用,凹陷

内水体能量较弱,还原环境发育,有利于有机质的保存。通过对派肯凹陷层序地层和沉积特征进行分析,有力证明了深水区古—始新统地层具备烃源岩发育的有利条件。

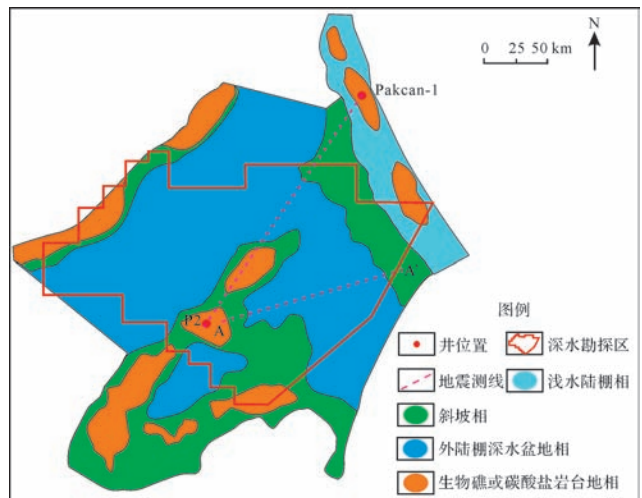


图4 印度扇深水区派肯凹陷古—始新统沉积相平面分布图
Fig.4 Sedimentary facies distribution of Paleocene and Eocene in Pakcan sag in the Indus Fan deepwater area

2.2 深水区烃源岩厚度特征

烃源岩厚度是低勘探程度区烃源岩早期评价的重要指标之一。根据地震速度—岩性分析方法,预测出派肯凹陷古—始新统泥岩厚度。派肯凹陷深水相泥岩厚度整体较大,大部分超过100 m,凹陷深处最高可达900 m以上(图5)。凹陷具有两个沉积中心,东部泥岩厚度较大,西部泥岩厚度略薄一些,这种厚度的差异主要与古地貌和物源供给丰度有关。整体上,派肯凹陷古—始新统泥岩全凹陷分布,厚度较大,为油气生成奠定了重要的物质基础。

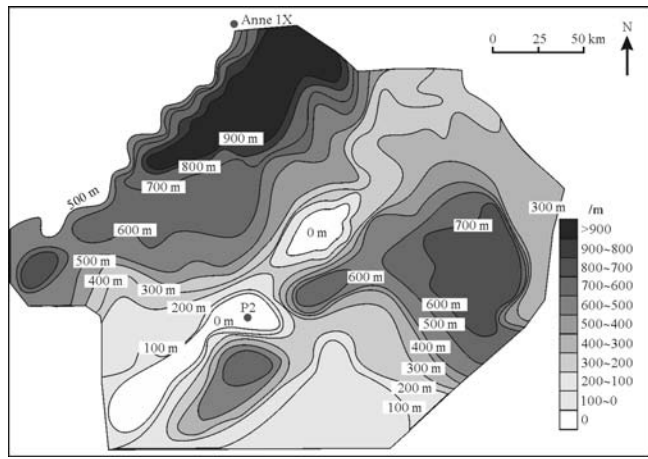


图5 印度扇深水区派肯凹陷古—始新统泥岩厚度平面分布图

Fig.5 Shale isopach map of Paleocene and Eocene in Packer Sag in the Indus Fan deepwater area

2.3 浅水陆棚区烃源岩有机质丰度及类型特征

浅水陆棚区古—始新统烃源岩热解参数分析表明,烃源岩有机碳含量(TOC)在0.5%~2.0%之间,个别样品可达7%。氢指数(HI)大部分小于200 mg/g,其中多数古新统样品的HI值小于100 mg/g。岩石热解最高峰温度(T_{max})大部分大于430℃,其中古新统样品 T_{max} 值大部分大于445℃。产率指数 $S_1/(S_1+S_2)$ 值在0.06~0.50之间(图6)。 T_{max} 和 $S_1/(S_1+S_2)$ 值分布特征表明,浅水陆棚区古—始新统烃源岩已进入生油窗,等效镜质体反射率 R_o 介于0.5%~1.5%^[6]。HI和 T_{max} 值分布特征表明,古—始新统烃源岩有机质类型主要以Ⅲ型干酪根为主,并混有Ⅱ₂型干酪根^[7]。按照陆相湖泊泥质烃源岩的评价标准,古—始新统烃源岩为中等和好的烃源岩,表明钻井揭示的浅海陆棚相烃源岩具较好生烃潜力。

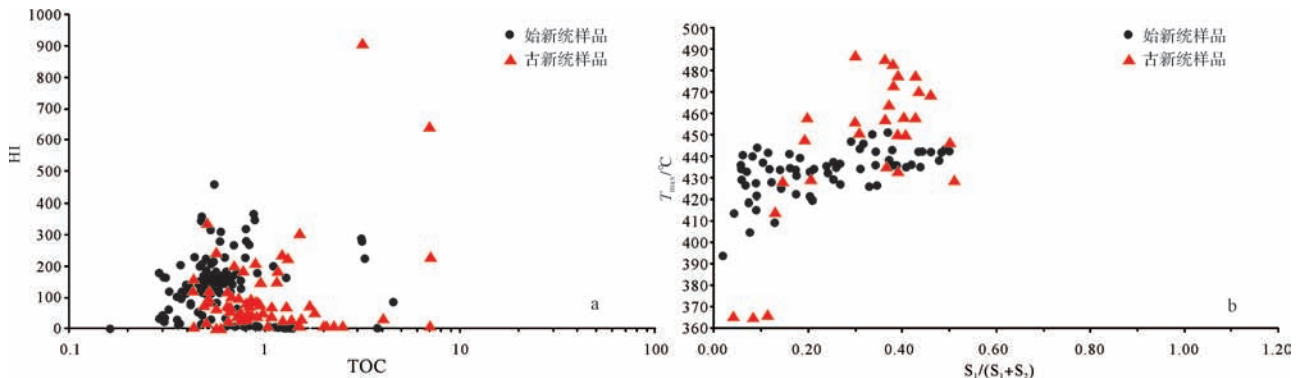


图6 浅水陆棚区古—始新统烃源岩岩石热解参数分析

Fig.6 Analysis of pyrolysis parameters of the Paleocene and Eocene source rocks in shallow shelf

另外,在浅海陆棚区钻探的KD-1井发现了源自古—始新统烃源岩的原油。原油色谱—质谱分析同时检测出了代表陆源高等植物输入的奥利烷和代表海相有机质输入的28,30二降藿烷,全油色谱图呈双峰型特征(图7),Pr/Ph值为3,表明生源母质类型为混合型生源母质,具有陆相和海相有机质的贡献,并且沉积于氧化环境^[8]。从而进一步佐证了浅海陆棚区古—始新统烃源岩具有良好的生烃潜力,推测外陆棚派肯凹陷深水相烃源岩亦具有陆相和海相混合有机质输入的特征。

2.4 深水区烃源岩有机质丰度及类型预测

印度扇深水油气勘探区周缘的Badin台地、Cambay盆地、Bombay盆地及Kutch盆地都有重要油气发现^[9-10]。有些甚至是重要产油气区,如Bombay盆地的Bombay High油田。基于地质类比原理,将深水油气勘探区与相邻盆地的沉积环境及烃源岩特征进行叠合成图。

如图8所示,古—始新世时期发育的烃源岩为整个区域的主力烃源岩层系。近陆源区的沉积盆地有机质类型以Ⅲ型干酪根为主,如Karachi近岸古新统烃源岩。位于陆棚区的烃源岩有机质类型主要以Ⅱ~Ⅲ型为主,为混合型生源母质,如Kutch盆地和Bombay盆地古—始新统烃源岩。另外从Kutch盆地和Bombay盆地烃源岩数据可以看出,烃源岩有机碳含量在0.5%~5%之间,岩性以泥页岩为主(表1)。据此推测深水油气勘探区由于离陆源区较远,陆相有机质输入会受到稀释作用。因此,深水区烃源岩有机质含量要达到此丰度,古海洋生产力的贡献是关键。

综合前述各项分析,认为印度扇深水区派肯凹陷古—始新统地层具备烃源岩发育的有利条件,外陆棚深水相沉积环境有利于有机质的保存。古—始新统

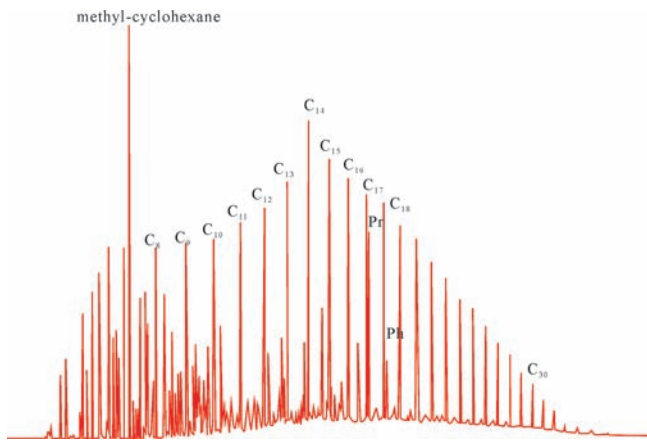


图7 KD-1 井全油气相色谱图

Fig.7 Gas chromatography of condensate gas from Pakcan-1 Well and oil from KD-1 Well

烃源岩厚度大、分布范围广。根据浅水陆棚区古—始新统烃源岩特征及类比深水区周边盆地烃源岩发育特征,预测深水区古—始新统烃源岩有机质类型以 II ~ III 型干酪根为主,为混合型生源母质,烃源岩有机质丰度受沉积期古海洋生产力的影响大。

表1 Bombay 盆地与 Kutch 盆地古—始新统烃源岩特征

Table 1 Characteristics of the source rocks from the Bombay Basin and the Kutch Basin

盆地	烃源岩	岩性	沉积环境	w(TOC)/%	干酪根类型	母质类型
Bombay 盆地	古—始新统	碳质页岩	前三角洲、泻湖	2%~5%	II~III	腐殖—混合型
Kutch 盆地	古—始新统	灰质泥岩、页岩	三角洲、浅海陆棚	0.5%~2%	II~III	腐殖—混合型

2.5 深水区烃源岩有机质热演化特征

印度扇地层温度实测数据统计表明,受基底地壳类型影响,不同区带地温梯度存在不同程度差异^[3]。印度扇地层具三种类型地温梯度,分别是陆壳型地温梯度 4~5 °C/100m,过渡带型地温梯度 3~4 °C/

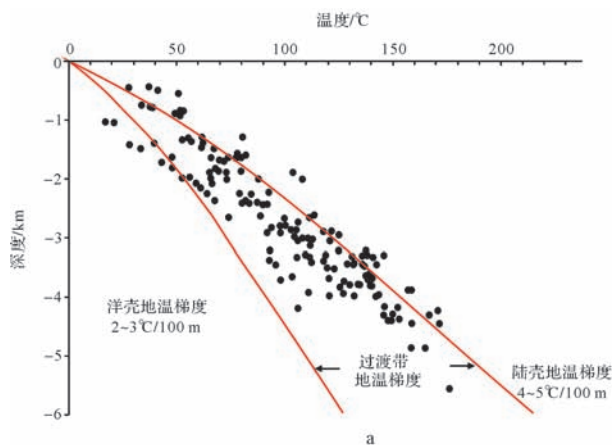


图9 印度扇地温梯度特征及深水区地层埋藏与热演化史数值模拟

Fig.9 Geothermal gradient in Indus fan and the burial and thermal history of the deepwater area

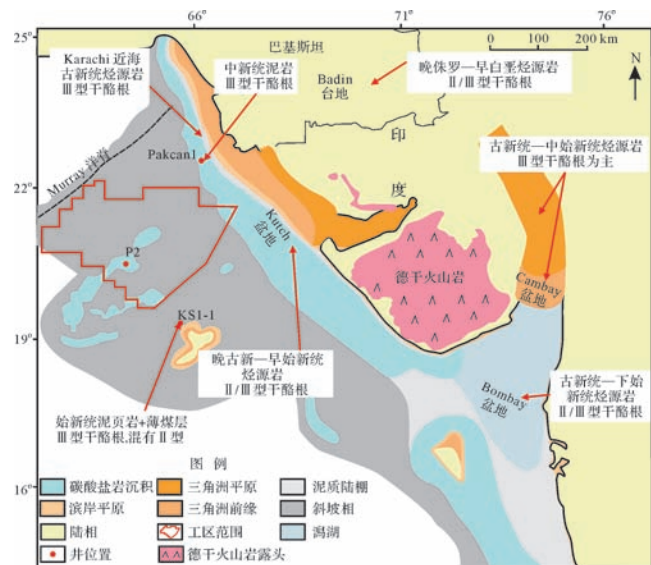
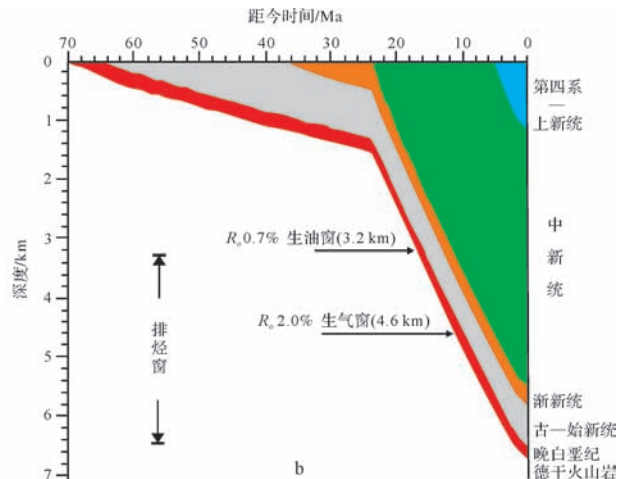


图8 印度扇深水区及相邻盆地古新统烃源岩沉积环境简单示意图

Fig.8 Sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the deepwater area and the adjacent Basins during the Paleocene epoch

100m,洋壳型地温梯度 2~3 °C/100m(图 9a)。研究区为相对较高的陆壳型地温梯度,受此影响,烃源岩后期生烃演化相对早。埋藏和热演化史数值模拟分析表明(图 9b),研究区自早中新世(约 23 Ma)以来快速埋藏,使古—始新统烃源岩快速进入生排烃窗。



在早中新世晚期(约 17 Ma),凹陷内大部分区域开始进入生油窗($R_o > 0.7\%$);在晚中新世早期(约 9 Ma),凹陷内靠近陆棚一侧埋藏最深,率先开始进入生气窗($R_o > 2.0\%$),现今凹陷内大部分处于高一过成熟的生干气阶段,但在凹陷西南端由于过渡带型地温梯度和埋藏相对较浅,目前可能还处于成熟阶段。

3 深水区烃源岩形成机理

3.1 古地理及其演化

在晚白垩世末期,印度板块西北缘发生强烈的岩浆活动,在白垩系—古近系界线附近形成德干暗色溢流玄武岩,形成火山岩台地内派肯深水凹陷;在古—始新世沉积早期,沿被动大陆边缘发育泥质陆棚和碳酸盐岩陆棚,派肯凹陷边缘的海下潜山发育了孤立的浅水碳酸盐岩台地和生物礁。同时在深水凹陷内沉积了古—始新统烃源岩层;在始新世末,海下潜山的生物礁完全被淹没;在中始新世(约 40 Ma),印度板块与欧亚板块开始碰撞,受此影响,渐新世—早中新世时期大量的碎屑沉积物注入,形成印度扇并持续至今(图 10)^[11]。在古—始新世烃源岩发育关键期内,研究区古地理构造格局总体变化不大,处于赤道附近的低纬度区,气候湿热,为开放洋流体系^[12-13]。研究区以东陆块为主要物源区,陆源碎屑和有机质输入对研究区烃源岩形成有重要影响。

3.2 古气候特征

古—始新世时期,研究区位于印度板块西北缘,处于赤道的低纬度内,气候湿热。此气候特征对陆地植物、湖泊和潟湖的藻类发育和繁茂具有显著促进作用,

Cambay 盆地和 Bombay 盆地古新统富陆相有机质烃源岩佐证了这点。该时期温暖的气候和低纬度地带性使得海水的温度较高,提升了海洋浮游生物的生长速度,但同时也增加海洋有机质被降解转化成 CO_2 的速率,故而海底埋藏的有机碳量十分有限仅能达到海洋初级生产力的 0.1%^[14]。因此,派肯凹陷深水是否发育上升流使浮游生物有机质数量远远大于被降解量是其中的关键。

3.3 古海洋生产力

高海洋生产力能促使有机质埋藏量的增加,是海相有机质丰度沉积的重要条件之一。

从图 11 可看出,阿拉伯海春季 4 月份植物色素浓度和海洋初级生产力最低,夏季 8 月份最高^[15]。夏季 8 月份,由于西北阿拉伯海发育阿曼上升流,故海洋生产力高。毗邻研究区的 Kutch 盆地和 Bombay 盆地则无论在春季和夏季植物色素浓度均处于高值,表明其海洋生产力高且持续稳定。分析认为 Kutch 盆地和 Bombay 盆地紧临陆源区,沉积环境有利于海水中输入大量陆源营养盐,海洋浮游植物繁盛。研究区现今所处地理位置,虽无上升流发育并且距海岸线的距离相比 Kutch 盆地和 Bombay 盆地远,但仍具有较高的浮游植物色素浓度,表明其具有较高的海洋生产力。依将今论古的思想,古—始新世沉积期,研究区为深水相沉积凹陷,凹陷内水体流动受周缘海山阻挡,尽管上升流较难形成。但由于其靠近大陆边缘的相对局限的水体环境,可以接受大量陆源营养盐,有利于藻类等水生生物的繁盛,加上陆源有机质输入的贡献,因而凹陷内古—始新统烃源岩具备形成高有机

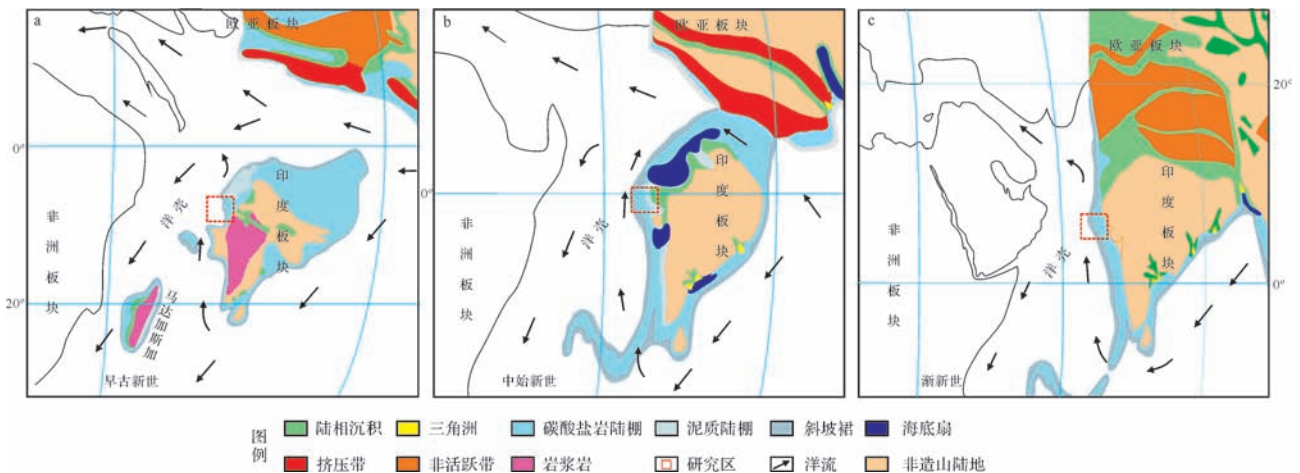


图 10 古新世—渐新世印度板块及其以北欧亚板块部分区域古地理简图(据文献[12-13])

a. 早古新世研究区古地理特征; b. 中始新世研究区古地理特征; c. 渐新世研究区古地理特征

Fig.10 Sketch map of paleogeography of India plate and part of Eurasian plate during the Paleocene-Oligocene(modified from references[12-13])

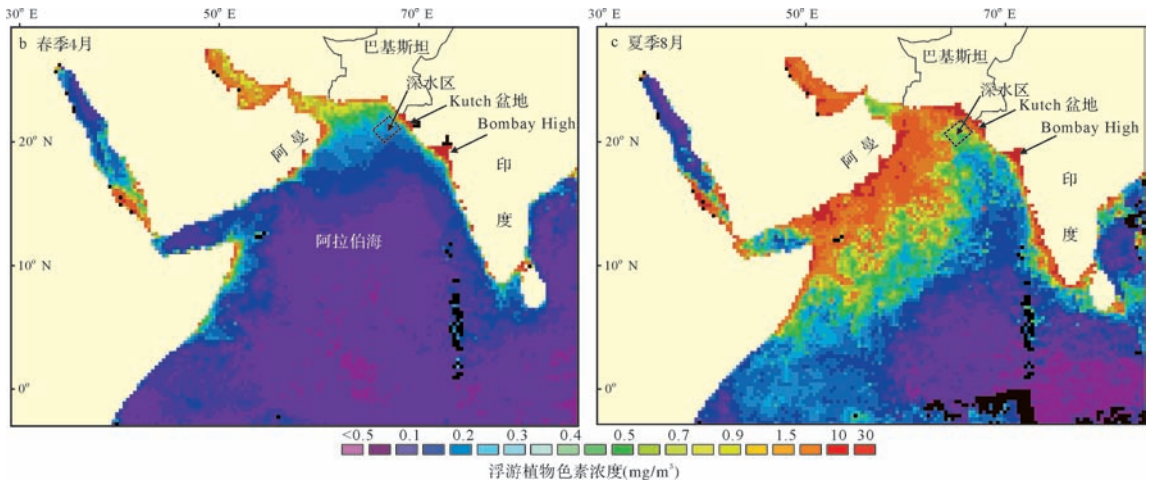


图 11 阿拉伯海春夏两季海洋浮游植物色素浓度分布(据文献[15])

Fig.11 Seasonal changes in phytoplankton concentrations in Arabian Sea (spring and summer) Arabian Sea (modified from reference[15])

质丰度源岩的有利条件。

3.4 有机质保存条件

通过对原始沉积古地貌的恢复,派肯深水凹陷最大水体深度可达 2 000 m,受周缘水下海山的阻挡,水体循环不畅,海水具分层结构,在水体底部形成缺氧环境。利用地震解释的古—始新统地层厚度,计算凹陷内最大沉积速率约为 2.80 cm/ka,沉积速度慢,沉积物粒度较细。沉积物黏土矿物类型偏向于富蒙脱石,有利于有机质的吸附保存^[16]。另外,在古新世晚期存在一期全球大洋缺氧事件,导致生物大灭绝及水体缺氧,对深水凹陷有机质的聚集和保存具有一定的意义^[17]。

4 烃源岩发育模式

综上所述,印度扇深水区派肯凹陷发育了一套古—始新统深水相烃源岩。烃源岩的展布严格受古

地理条件的限制。

晚白垩世时期,德干岩浆岩喷发事件形成了面积巨大的火山岩台地,其中火山岩台地内派肯深水凹陷的出现为烃源岩有机质的富集造就了先决古地理条件。同时,深水凹陷周缘岩浆喷发形成的海山,不仅建造了生物礁,而且使得台盆内水体循环受到限制,加之水体深度大(最深可达 2 000 m)且盆地隔绝性强,促使水体含氧量下降,不同深度水体含氧量显著差异,在水体底部形成了有利于有机质保存的贫氧或还原环境。同时,周缘海山发育的构造格局造成凹陷内受上升流影响弱,或上升流难以形成,但靠近大陆边缘的相对局限的水体有利于藻类等水生生物的繁盛,加上陆源有机质的贡献,具备了烃源岩发育的有利条件(图 12)。因此,在古—始新世烃源岩发育关键期,在良好的有机质保存条件下,古海洋生产力和陆源有机质输入量控制了派肯凹陷古—始新统烃源

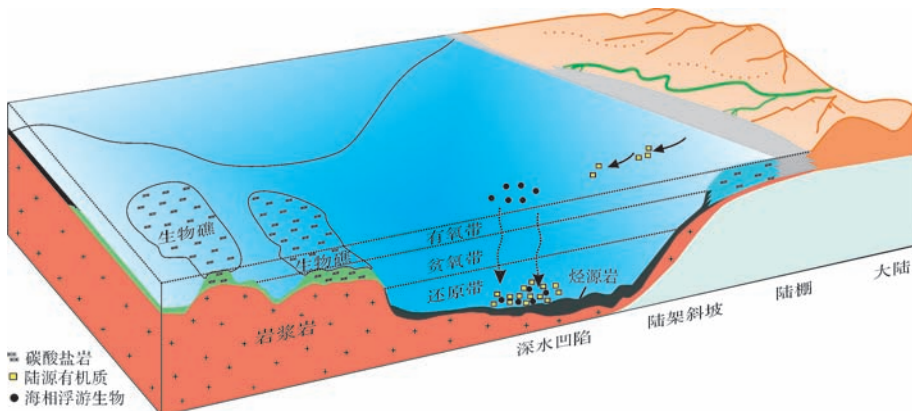


图 12 印度扇深水区古—始新统烃源岩沉积环境与有机质富集机理示意图

Fig.12 Sketch diagram showing the depositional environment and organic enrichment in the Paleocene and Eocene source rocks

岩有机碳含量, 烃源岩有机质类型以 II ~ III 型干酪根为主, 为混合型生源母质。

5 结论

(1) 印度扇深水区古—始新统地层主要以海进体系域为主, 在始新统顶部发育厚度较薄的高位体系域, 为 T 型层序构型, 并沉积于外陆棚深水相沉积环境, 具备烃源岩发育的有利条件。古—始新统烃源岩空间分布范围广, 厚度大, 最大厚度达 900 m 以上, 为油气生成奠定重要物质基础。综合各项分析, 预测深水区古—始新统烃源岩有机质类型以 II ~ III 型干酪根为主, 为混合型生源母质。现今凹陷内大部分烃源岩处于高一过成熟的生干气阶段, 在凹陷西南端少部分还可能处于成熟阶段。

(2) 建立了印度扇深水区古—始新统烃源岩发育模式。在古—始新世沉积期, 深水凹陷古地理构造格局总体变化不大, 处于赤道附近的低纬度区, 气候湿热。在有利的有机质保存条件下, 古海洋生产力和陆源有机质输入量决定了该套烃源岩的有机质丰度。

参考文献 (References)

- Clift P, Gaedicke C, Edwards R, et al. The stratigraphic evolution of the Indus fan and the history of sedimentation in the Arabian Sea[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002, 23(3): 223-245.
- Gaedicke C, Schlüter H U, Roeser H A, et al. Origin of the northern Indus fan and Murray ridge, northern Arabian Sea: interpretation from seismic and magnetic imaging[J]. *Tectonophysics*, 2002, 35(1/2/3/4): 127-143.
- Carmichael S M, Akhter S, Bennett J K, et al. Geology and hydrocarbon potential of the offshore Indus basin, Pakistan[J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15(2): 107-116.
- 刘震, 常迈, 赵阳, 等. 低勘探程度盆地烃源岩早期预测方法研究[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 159-167. [Liu Zhen, Chang Mai, Zhao Yang, et al. Method of early prediction on source rocks in basins with low exploration activity[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 159-167.]
- 朱红涛, Liu Keyu, 杨香华, 等. 陆相湖盆层序构型及其岩性预测意义: 以珠江口盆地惠州凹陷为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 32-39. [Zhu Hongtao, Liu Keyu, Yang Xianghua, et al. The sequence stratigraphic architecture of continental lake basin and its significance on lithofacies prediction: taking Huizhou sag in Zhujiangkou Basin as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 32-39.]
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Volume 1: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History [M]*. 2nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005.
- 曾花森, 霍秋立, 张晓畅, 等. 应用岩石热解数据 S2-TOC 相关图进行烃源岩评价[J]. *地球化学*, 2010, 39(6): 574-579. [Zeng Huasen, Huo Qiuli, Zhang Xiaochang, et al. Source rock evaluation using the S2-TOC plot from Rock-Eval pyrolysis[J]. *Geochimica*, 2010, 39(6): 574-579.]
- 尚慧芸, 姜乃煌. 陆相原油及生油岩中的奥利烷及其地质意义[J]. *石油学报*, 1984, 5(4): 37-42. [Shang Huiyun, Jiang Naihuang. Oleanane in crude oil and source rock of terrestrial facies and its geological significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1984, 5(4): 37-42.]
- Basu D N, Banerjee A, Tamhane D M. Facies distribution and petroleum geology of the Bombay offshore basin, India[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1982, 5(1): 51-75.
- Banerjee A, Pahari S, Jha M, et al. The effective source rocks in the Cambay Basin, India[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(3): 433-456.
- Bastia R, Radhakrishna M. Sedimentation history and development of fan system along the continental margins of India[J]. *Developments in Petroleum Science*, 2012, 59: 127-160.
- Scotese C R, Gahagan L M, Larson R L. Plate tectonic reconstructions of the Cretaceous and Cenozoic ocean basins[J]. *Tectonophysics*, 1988, 155(1/2/3/4): 27-48.
- Chatterjee S, Goswami A, Scotese C R. The longest voyage: tectonic, magmatic, and paleoclimatic evolution of the Indian plate during its northward flight from Gondwana to Asia[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 238-267.
- 焦念志, 张传伦, 李超, 等. 海洋微生物碳泵储碳机制及气候效应[J]. *中国科学: 地球科学 (D 辑)*, 2013, 43(1): 1-18. [Jiao Nianzhi, Zhang Chuanlun, Li Chao, et al. Controlling mechanisms and climate effects of microbial carbon pump in the ocean[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2013, 43(1): 1-18.]
- Wiggert J D, Murtugudde R G, McClain C R. Processes controlling interannual variations in wintertime (Northeast Monsoon) primary productivity in the central Arabian Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(12): 2319-2343.
- Phillips S C, Johnson J E, Underwood M B, et al. Long-timescale Variation in bulk and clay mineral composition of Indian continental margin sediments in the Bay of Bengal, Arabian Sea, and Andaman Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58(Part A): 117-138.
- Renne P R, Deino A L, Hilgen F J, et al. Time scales of critical events around the Cretaceous-paleogene boundary[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 684-687.

Characteristics and Depositional Model of Paleocene and Eocene Source Rocks in Deepwater Area of Indus Fan

JIANG KaiXi¹ YAO ChangHua¹ GUO QingZheng¹ HU YunTing¹ ZHAO CaiShun¹
LI HongRu¹ ZHU ZeDong¹ HE WenXiang² XIAO Fei³ PENG Chao¹

(1. CNOOC Ener Tech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China;

2. School of Earth Environment and Water Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

3. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249)

Abstract: Based upon the data on seismic, well logging, core and geochemistry in Indus fan deepwater area and shallow shelf, we predict the development characteristics of Paleocene and Eocene source rocks of the Indus fan deepwater area, and discuss the depositional models of source rocks. The results show that Paleocene and Eocene source rocks has the most favorable conditions for development of high-quality hydrocarbon source rocks as it mainly developed transgressive system tracts and thinner thickness highstand system tract in Upper Eocene, deposited in a deepwater outerslope environment. Paleocene and Eocene source rocks are characterized by extensive distribution, large thickness with the maximum thickness of 900 m. The organic material forms of source rocks are type II-III, which are mixed organic matter. By the comprehensive analysis of various geological features, the distribution and model of source rocks has been reconstructed in the Indus Fan deepwater area. During the sedimentary period of the Paleocene and Eocene, the paleogeographic characteristics show narrow variation, which located in the low latitude belt near the equator, indicating warm and moist climate. As a good organic preservation condition was provided, the abundance of organic matter of Paleocene and Eocene source rocks is mainly controlled by the paleo-productivity and the organic matter flux to the sag. The research results will offer convenient service for oil and gas exploration in Indus Fan deepwater area.

Key words: formation mechanism; sequence stratigraphy; source rocks; deepwater area; Indus Fan