

李 丹,康洪全,郝立华,等.西南非海岸盆地过渡期海相烃源岩有机相特征及其平面预测[J].海洋地质前沿,2019,35(5):21-30.

西南非海岸盆地过渡期海相烃源岩有机相特征及其平面预测

李 丹,康洪全,郝立华,曹向阳,刘小龙,贾建忠

(中海油研究总院有限责任公司海外评价中心,北京 100028)

摘 要:海相烃源岩是全球油气的主要来源,在全球范围内广泛分布。目前关于海相烃源岩的研究主要偏重其生烃理论,缺乏紧密结合油气勘探生产的海相烃源岩识别、预测和评价方法研究。为了建立一套切实可行的、以有机相分析为手段的海相烃源岩评价关键技术组合,针对西南非海岸盆地过渡期主力海相烃源岩,综合利用沉积相、古生态相、有机地化相以及地震相对其进行“四相合一”综合有机相分析,从而对该套烃源岩进行系统分析。研究认为,该套烃源岩为海陆混源型烃源岩,且从陆向海可依次划分 4 个有机相带:滨海陆源型有机相 A、内浅海混源型有机相 B、外浅海混源型有机相 C 和上坡折带内源型有机相 D。总体来说,研究区平面上呈现“内侧倾气、外侧倾油”的特点。

关键词:海相烃源岩;四相合一;海陆混源型;有机相分析;西南非海岸盆地

中图分类号:P736.2;P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.05003

0 引言

海相烃源岩是全球油气的主要来源,统计表明,全球 90% 以上的油气来自志留系、上泥盆统、上石炭统一二叠统、上侏罗统、中白垩统和渐新统一中新统 6 套地层,而其中 70% 以上的油气储量来自海相烃源岩,特别是世界上已发现的多数巨型或大型油气田均来源于海相烃源岩。海相烃源岩对全球油气发现贡献显著,且广泛分布,是全球油气勘探的重要领域。目前,国内外对湖相烃源岩的评价方法已较为成熟完善,对比而言,海相烃源岩的评价方法研究尚不够系统,且公开的研

究成果主要偏重于海相烃源岩的生烃理论^[1-8],缺乏紧密结合勘探生产的海相烃源岩识别、预测和评价方法研究。因此,十分必要建立一套切实可行的、以有机相分析为手段的海相烃源岩评价关键技术组合。

目前,国内外针对海相烃源岩有机相分析,主要是利用有机岩石学、有机地球化学等方法手段^[9-17],对于少井/无井勘探区,传统的评价方法虽然直观,但存在较大局限性,难以对烃源岩平面展布进行系统评价与预测。针对以上问题,本次研究具体针对西南非海岸盆地过渡期海相主力烃源岩,利用古生态学分析方法进行烃源岩有机质成因类型、生烃潜力研究,并与沉积和有机地化分析手段有机整合、互为约束,建立一套较为完善的海相烃源岩有机相分析技术组合,从而更为准确地对优质海相烃源岩进行预测和评价。在此基础上,总结优质烃源岩对应的地震识别标志,从而实现“由已知推未知”的研究思路,对少井/无井的低勘探区进行

收稿日期:2019-01-24

基金项目:国家“十三五”科技重大专项“西非—南美海域重点区油气地质评价及关键技术研究”(2017ZX05032-001)

作者简介:李 丹(1988—),女,硕士,工程师,主要从事油气地质综合分析研究工作.E-mail: lidan23@cnooc.com.cn

烃源岩预测评价,实现沉积相、生态相、有机相、地震相“四相合一”的海相烃源岩预测评价技术。

1 盆地概况

西南非海岸盆地隶属于西非被动陆缘盆地,处于西非南段,面积 $49.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地由南向北依次划分为奥兰治、鲁得里茨和威尔维斯3个次盆,面积分别为 24.8×10^4 、 9.3×10^4 、 $15.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。除奥兰治次盆为南非和纳米比亚国家共同所有外,鲁得里茨和威尔维斯2个次盆则均属于纳米比亚国家(图1)。

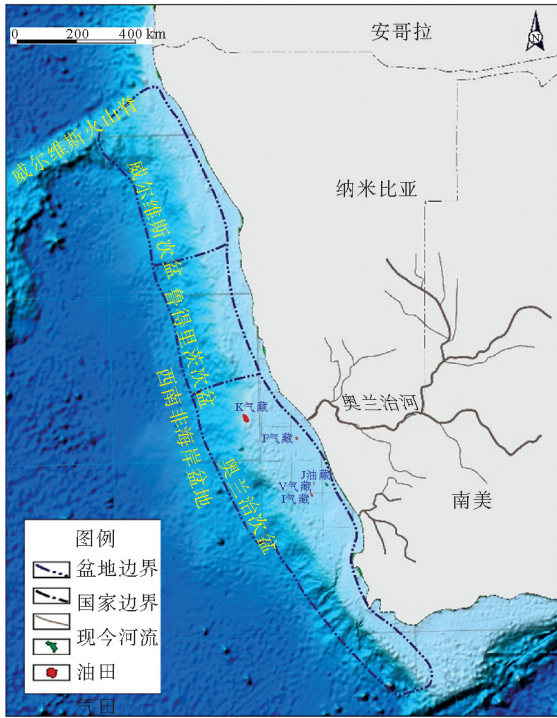


图1 西南非海岸盆地地理位置及已发现油气藏分布

Fig.1 The location of Western South African Coastal Basin and discovered oil/gas fields

目前该盆地的油气发现主要集中在南部的奥兰治次盆,包括4个气藏(K气田,可采储量为1 081.8亿 m^3 ; I气田,可采储量为232.7亿 m^3 ; F气藏,可采储量为14.2亿 m^3 ; V气藏,可采储量为67.8亿 m^3)和1个油藏(J油藏,可采储量为25万桶)^[18-20],其中4个气藏中的气均来自于过渡期海相烃源岩,而J油藏油源则来自于裂谷期湖相烃源岩(图1)。

2 盆地构造演化

随着南美板块与非洲板块裂解,处于西非南段的西南非海岸盆地率先破裂^[21-24],其构造经历了3期演化阶段^[25-27]:裂谷期(J_3-K_1 , Neocomian)、过渡期(K_1 , Bar.—Apt.)和漂移期(K_1 , Apt.至今)(图2)。

(1) 裂谷期(J_3-K_1 , Neocomian)

该时期冈瓦纳大陆开始破裂,在非洲板块和南美板块之间发生陆内裂谷作用,形成了一系列近S—N向展布的湖相半地堑。但由于该时期火山活动频繁,裂谷作用形成的半地堑主要为SDR(Seaward dipping reflector)火成岩地层充填^[28-30]。

(2) 过渡期(K_1 , Bar.—Apt.)

该时期冈瓦纳大陆破裂作用加剧直至解体,标志着盆地由湖相环境向海相环境的过渡完成,沉积环境以滨岸—滨浅海为主,发育了一套海相沉积地层。

(3) 漂移期(K_1 , Apt.至今)

该时期冈瓦纳大陆解体,西南非海岸盆地陆架—陆坡体系形成。南部古奥兰治河向盆内输入大量碎屑物,形成一定规模的进积滨浅海三角洲及深水扇沉积^[26],沉积中心处最厚可超过8 km。由于沉积物不断的前积作用,在陆架破折带发育滑脱断层,沿着Cenomanian—Turonian阶泥岩滑脱层产生一系列大规模的滑脱构造,向海方向延伸上百千米。

3 烃源岩发育特征

整体上,西南非海岸盆地对应3期构造演化阶段共发育3套烃源岩^[31-32]:裂谷期Neocomian阶湖相烃源岩、过渡期Barremian—Aptian阶海相烃源岩、漂移期Cenomanian—Turonian阶海相烃源岩。

由于裂谷沉积时期,火山活动频繁,非洲板块和南美板块裂解形成的一系列近S—N向展布的半地堑主要被SDR(Seaward Dipping Reflector)火成岩地层充填,仅在靠陆一侧的内裂谷带沉积了湖相地层,且沉积厚度普遍较薄(图2),致使裂谷期湖相烃源岩分布局限,潜力有限。

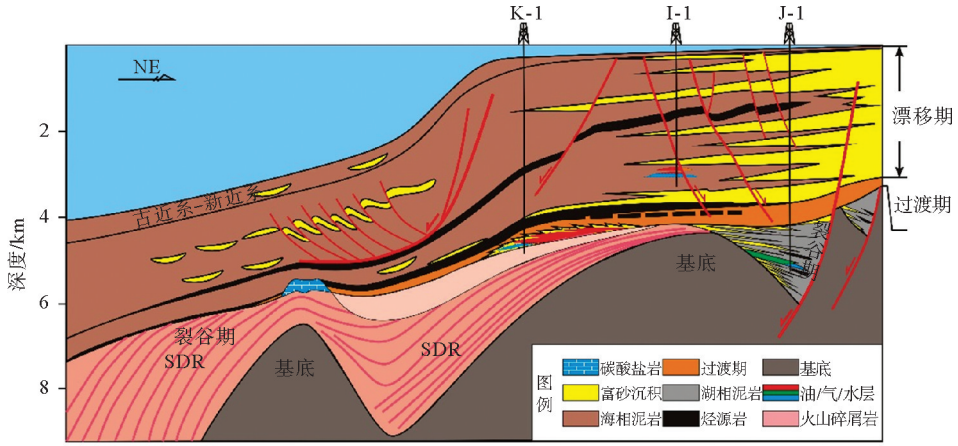


图 2 西南非海岸盆地地区地质剖面

Fig.2 The regional geological profile across the Western South African Coastal Basin

漂移期 Cennomanian—Turonian 阶烃源岩虽分布广泛,但由于沉积时期为广海环境,不利于有机质富集,有机碳含量相对较低($<2.7\%$),已有钻井揭示显示,仅在威尔维斯次盆北部靠近火山脊附近发育相对优质漂移期海相烃源岩,但由于该套烃源岩整体埋藏较浅,多数处于未成熟阶段。

过渡期海相烃源岩为盆地主力烃源岩^[33-36],过渡期沉积时期,盆地处于半封闭海湾环境,同时,在 Aptian—Albian 时期,全球海洋处于缺氧状态,利于有机质保存,从而发育过渡期相对优质的海相烃源岩。

3.1 过渡期烃源岩发育背景

过渡期沉积时期,无陆架坡折,为缓坡背景,西南非海岸盆地总体处于海侵期,冈瓦纳大陆南端处于初始裂解阶段。位于南美板块南端的福克兰群岛对西南非海岸盆地起到明显的障壁作用^[37-38],从而使得盆地处于半封闭海湾环境,该时期,盆地呈现水体动能相对低、海洋微生物繁殖程

度相对高的特点(图 3、4)。此外,在过渡期沉积期,全球海洋发生缺氧事件^[39-42](图 5),亦利于有机质的沉积保存,使得该盆地在过渡期时期具备优质海相烃源岩发育条件。

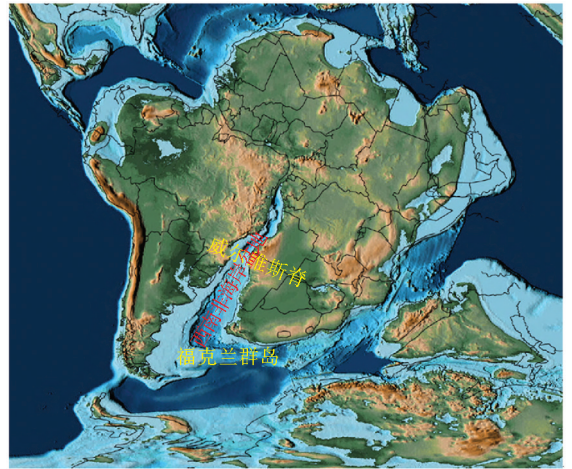


图 3 冈瓦纳大陆 Aptian 期裂解示意图(据文献[37])

Fig.3 Schematic diagram showing break-up of Gandwana Land during the Aptian period(from reference [37])

Land during the Aptian period(from reference [37])

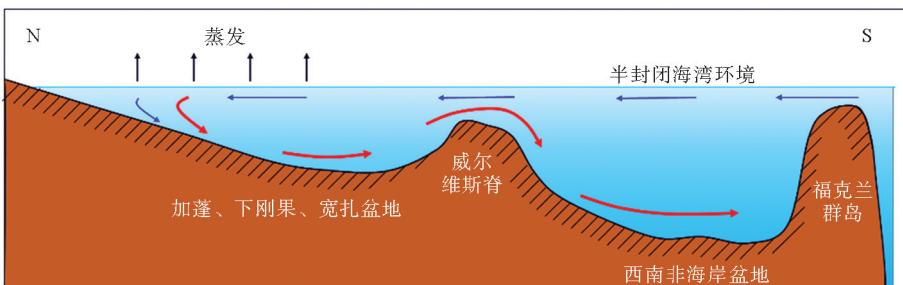


图 4 Aptian 时期南大西洋古洋流重建(据文献[38]修改)

Fig.4 Reconstruction of the South Atlantic Ocean current during the Aptian period(modified from reference [38])

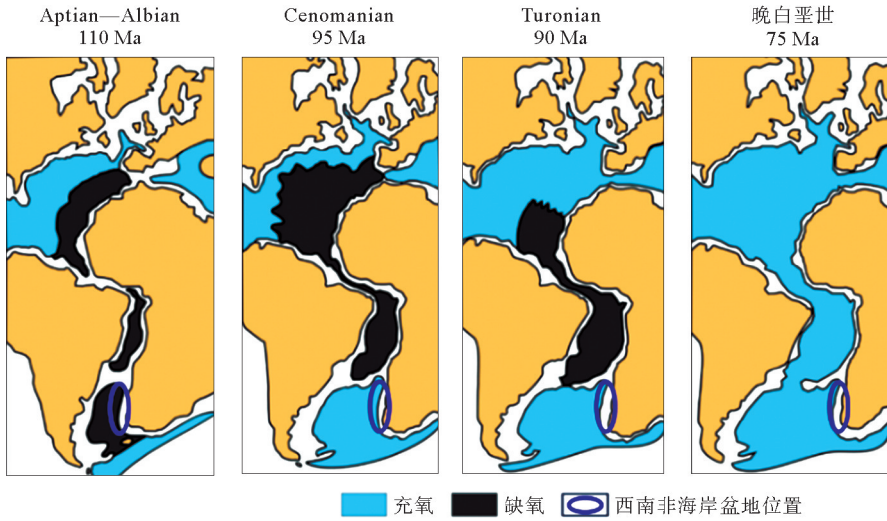


图5 南大西洋白垩纪时期缺氧区分布图(据文献[40]修改)

Fig.5 The ocean anoxic area in South Atlantic Ocean during Cretaceous(modified from reference [40])

3.2 过渡期烃源岩有机相分析

目前已有钻井资料中有 17 口钻井揭示过渡期烃源岩,其中有 13 口井位于南部的奥兰治次盆,仅有 4 口钻井位于北部威尔维斯次盆(图 6)。

由于目前揭示烃源岩钻井分布不均,传统的烃源岩预测评价方法多以有机地化、有机岩石学为主要手段,虽然井点评价结果可靠性较强,但对钻井资料依赖性程度较高,对于少井/无井的低勘探程度盆地而言具有一定的局限性,难以反映烃源岩平面上变化规律及发育特征。因此,基于现有资料特点,从烃源岩有机相分析入手,通过查清过渡期主力烃源岩有机质来源及类型,从而系统而全面地对该盆地过渡期海相烃源岩进行了评价和预测。

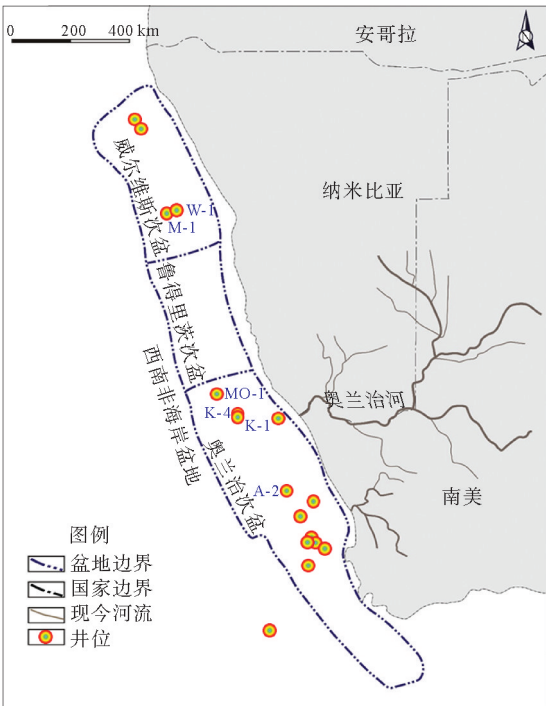


图6 西南非海岸盆地过渡期烃源岩揭示井位置

Fig.6 The location of drilling wells in Western South African Coastal Basin

3.2.1 有机相划分标志

有机相是指生物来源、有机质类型、分子组成、生物标志物、沉积和氧化-还原环境、产烃能力大致的岩石^[9]。因此,在划分有机相时,既要考虑有机质类型差异,同时还需综合考虑有机质来源、沉积环境以及生烃能力等多方面因素。基于盆地现有资料基础特点,从有机质生源繁育环境及保存条件、有机质生源及干酪根类型等因素分析入手,以沉积相、古生态相、地化相及地震相为划分标志,对盆地过渡期烃源岩有机相划分进行了系统分析。

沉积相是有机相划分的基础和重要指标,由于不同沉积环境水体深度、有机质保存条件、海洋微生物组合类型、繁殖程度均存在较大差异,通过沉积相分析,可大致反推同沉积期古水体环境特征,分析有机质生源特征以及有机质保存的氧化-

还原条件,进而将不同沉积环境发育的烃源岩大体区分开来。

古生态相反映了有机质的原始生产者——成烃生物的丰度和组合面貌等特征,与有机质丰度与类型之间有直接的对应关系,且不受烃源岩有机质成熟度的影响。根据成烃生物类型、生源构成及制约烃源岩有机质沉积的地质营力,可将海相烃源岩有机质分为 4 类:海相内源型、以海相生源为主的混源型、以陆相生源为主的混源型以及海相陆源型^[43]。海相内源型有机质以海洋环境中的低等水生浮游生物成因组为主,生物组合主要包括浮游菌藻类、微体浮游动物(浮游有孔虫、放射虫、钙质超微、硅藻、

苔藓虫和海绵骨针等),有机显微组分中腐泥组含量>80%,包括藻类体、藻屑及腐泥矿物沥青基质和无定形等。以海相生源为主的混源型有机质的成烃生物以宏观藻类、浮游藻类为主,并有少量陆源高等植物的输入,显微组分组成介于海相内源型和海相陆源型之间,腐泥组含量为 50%~80%。以陆相生源为主的混源型有机质其生源主要为陆源高等植物和浅水宏观藻类(红藻、褐藻等),并伴有少量海相浮游生物,腐泥组含量为 20%~50%。海相陆源型有机质以陆生高等植物成因组分(镜质组、惰质组和壳质组)为主,显微组分包括木本组、炭屑、孢粉体等,海相浮游生物组分极少或不发育(表 1)。

表 1 过渡期海相烃源岩有机相划分方案及依据

Table 1 The classification of organic facies of transitional marine source rocks

相带特征		有机相划分			
		滨海陆源型 有机相 A	内浅海混源型 有机相 B	外浅海混源型 有机相 C	上坡折带内源型 有机相 D
沉积相	沉积相/有机质保存条件	滨海/差	内浅海/一般—中等	外浅海/好	上坡折带/中等
生态相	有机质生源	陆源有机质; 陆生高等植物组 分(木本、炭屑、孢 粉等)>80%	海陆混源,陆源居 多;陆生高等植物组 分(木本、炭屑、孢粉 等)占 50%~80%	海陆混源,海相居多; 海相生物(菌藻类、浮游 动物等)占 50%~80%	海相有机质; 海相生物(菌藻 类、浮游动物等) >80%
地化相	干酪根类型	Ⅲ	Ⅲ—Ⅱ ₂	Ⅱ ₂ —Ⅱ ₁	Ⅱ ₁
地震相	地震相特征	低频、强振幅、连 续	低频、中强振幅、中 等连续	中低频、中强振幅、连续	高频、弱振幅、连 续

有机地化相是评价烃源岩有机质的定量指标。可直观地反映单点烃源岩品质和类型,但由于其较易受到烃源岩成熟度影响,且在评价烃源岩平面发育特征时存在“以点概面”的不足,需结合古生态相、沉积相等进行综合分析。

本次研究中,有机相划分方案主要依据沉积环境(有机质保存条件)、古生态环境(有机质生源)和有机地化指标(有机质类型)等标志,而有机相带平面展布研究却须重点依靠地震相。对于烃源岩反射特征而言,不同沉积环境下的烃源岩岩性组合存在较大差异。在浅海相带,由于受到陆源碎屑物影响或三角洲沉积作用,多形成砂岩储层与烃源岩互层的岩性组合特点,由此对应中强振幅、低频、连续或杂乱的反射特征;而在深海相带,由于粗质碎屑物干扰较少,多以海相泥岩稳定

沉积为主,因此,该相带下烃源岩多对应于弱振幅、高频、连续反射特征,可基于地震相差异来实现有机相带平面划分。

综合以上划分依据,可将过渡期烃源岩划分为 4 个有机相带:滨海陆源型有机相 A、内浅海混源型有机相 B、外浅海混源型有机相 C 和上坡折带内源型有机相 D(表 1,图 7)。

3.2.2 过渡期烃源岩有机相特征

(1) 滨海陆源型有机相 A

该有机相带主要分布在滨海沉积相内。主要位于浪基面之上、最大高潮线以下的浅水及地表区,水深范围大概为 0~20 m,水体较为动荡,受陆源碎屑供应影响程度高,多发育滨岸砂坝或砂滩,呈强氧化条件特征,有机质保存条件差,不利于烃源岩发育(图 7)。

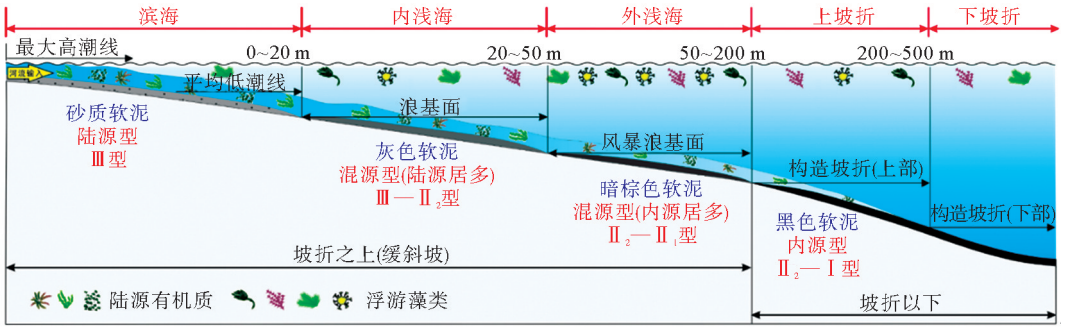


图7 西南非海岸盆地过渡期烃源岩发育模式

Fig.7 Depositional model of source rocks in Western South African Coastal Basin

通过古生物资料分析发现,该相带内代表陆源高等植物的黑色炭屑、木本有机组分构成其有机质主要来源,有机组分比例>80%,而菌藻类、钙质超微、有孔虫等海洋微体生物占据比例甚微^[25],为海相陆源型有机质类型。钻井揭示该有机相带烃源岩 TOC 含量为 2%~4%, S_2 为 1~2.5 mg/g, HI<150 mg/g。由于该有机相带处于现今陆架-陆坡转换带部位,地层埋深较大,代表性钻井的地化样品大多处于过成熟阶段,难以判断烃源岩干酪根类型(图 8)。

范围大致为 20~50 m,波浪、潮汐作用明显,水体动能较滨海有所减弱,但整体仍属动荡环境,呈弱氧化-还原条件,受陆源碎屑影响程度仍然较高,通常三角洲在该相带部位较为发育(图 7)。

该有机相带主要以陆源高等植物和浅水宏观藻类(红藻、褐藻等)为主,陆生孢粉含量占据 50%~80%,另外含少量代表海洋有机质的超微化石组分^[25],反映了海陆混合生源特征。在地化方面,TOC 含量为 1.5%~2.1%, S_2 平均为 1.26 mg/g, HI 平均为 220 mg/g,干酪根类型以 III-II₂ 型为主,烃源岩品质一般(图 9)。

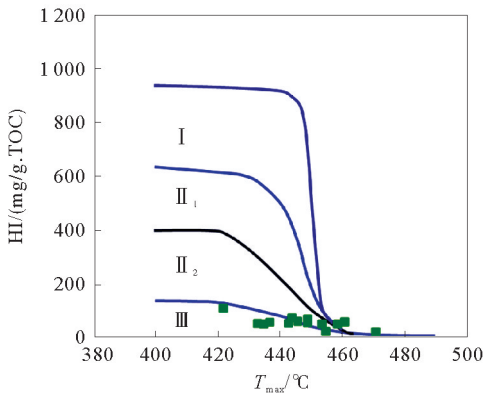


图8 滨海陆源型有机相 A 干酪根类型特征

Fig.8 The kerogen type of coastal terrestrial organic facies A

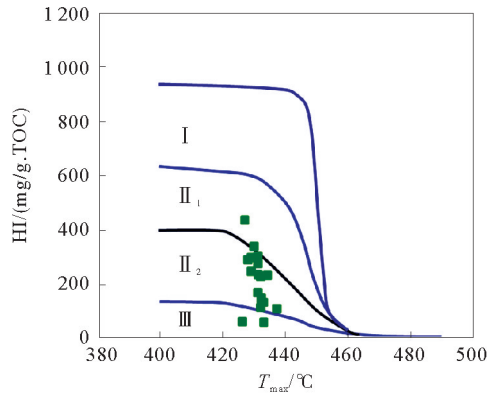


图9 内浅海混源型有机相 B 干酪根类型特征

Fig.9 The kerogen type of inner shallow sea mixed organic facies B

但通过古生物资料判断有机质生源主要为陆源高等植物,推测该有机相带烃源岩以发育 III 型为主,部分 II₂ 型。在地震上,该有机相带下发育的烃源岩集中在过渡期地层顶部的凝缩段,呈现低频、连续、强振幅反射特征。

(2)内浅海混源型有机相 B

该有机相带主要在内浅海环境下发育,主要位于浪基面之下、风暴浪基面以上的浅水区,水深

在地震相方面,与内浅海陆源型有机相 A 相似,烃源岩集中在过渡期地层顶部的凝缩段,呈低频、连续、强振幅反射特征。

(3)外浅海混源型有机相 C

该有机相带主要以外浅海环境为主,主要位于风暴浪基面之下的浅水区,水深范围大致为 50~200 m,水体环境相对低能,为还原条件,受陆

源碎屑影响程度小,属静水环境,利于有机质保存和优质烃源岩发育(图 7)。该有机相同样具有海陆混合生源特征,相比于内浅海带,其主要以宏观藻类、浮游藻类为主,占据 50%~80%,而陆源木本有机组分占据比例较小^[25]。

目前,已有钻井资料中有 2 口井揭示该有机相带烃源岩,且均位于北部威尔维斯次盆,其中 M-1 井揭示的过渡期烃源岩 TOC 为 0.6%~3.3%,平均 TOC 为 1.6%, S_2 为 2.6~22.6 mg/g,平均 S_2 为 11.5 mg/g,HI 为 290~770 mg/g,平均为 600 mg/g(图 10);W-1 井揭示的过渡期烃源岩 TOC 为 0.6%~1.8%,平均为 1.1%, S_2 为 2.2~4.4 mg/g,平均为 3.3 mg/g,HI 为 223~474 mg/g,平均为 317 mg/g(图 11)。其中 W-1 井在过渡期烃源岩段的砂岩夹层中 MDT 取到油样,原油密度 API 为 38°~42°,通过原油分析,发现轻烃甲苯和苯含量低,甲基环己烷丰度高,与典型偏腐植型烃源岩原油轻烃组成差异明显,指示其为以菌藻类为主的混合有机质源岩特征,干酪根类型为 II 偏 II₁ 型。

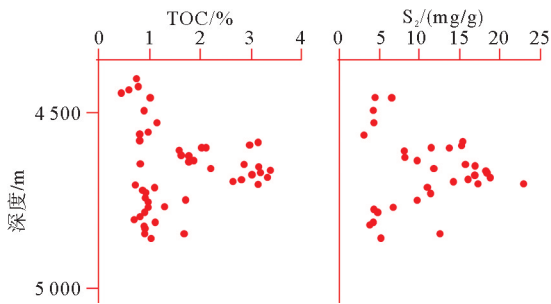


图 10 M-1 井外浅海混源型有机相 C 有机质丰度及生烃潜力特征

Fig.10 The TOC and S_2 features of well M-1 in outer shallow sea mixed organic facies C

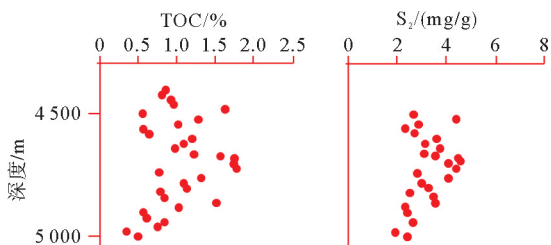


图 11 W-1 井外浅海混源型有机相 C 有机质丰度及生烃潜力特征

Fig.11 The TOC and S_2 of the outer shallow sea mixed organic facies C from well W-1

由于半深海部位陆源碎屑供应程度减弱,主要发育厚层海相泥岩与远端低密度浊流夹层为主,钻井标定其地震相为低频、连续、中强振幅的地震反射特征。

(4) 上坡折带内源型有机相 D

该有机相带主要分布在靠海一侧的上坡折带。过渡期西南非海岸盆地尚未形成陆架-陆坡体系,上坡折带位于盆地构造坡折之下的深水缓斜坡区,水深在 200 m 以深,水体环境低能,在无重力流干扰的条件下呈强还原环境,利于有机质保存(图 7)。

该有机相带内有机质主要以海洋环境中的低等水生浮游生物成因组分为主,生物组合主要包括浮游菌藻类、微体浮游动物(浮游有孔虫、放射虫、钙质超微、硅藻、苔藓虫和海绵骨针等),有机显微组分中腐泥组含量 >80%,具体为藻类体、藻屑及腐泥矿物沥青基质或无定形^[25]。目前,盆地内钻遇海相内源型烃源岩的钻井较少,比较典型的有 D-1 井,在该井的泥岩段中发育数层腐泥组占绝对优势的倾油型海相内源型烃源岩。主要为丰富的腐泥组和无定形有机质,并发育丰度极高的无刺疑源类 *Pterospermella Eisenack*。

目前有 2 口钻井揭示该有机相烃源岩,其中 MO-1 井揭示 TOC 为 1.2~5.4 mg/g,平均 3.4%, S_2 为 5.3~28 mg/g,平均 18.7 mg/g,HI 为 366~974 mg/g,平均 564 mg/g,II₁ 型干酪根,为一套优质海相烃源岩(图 12)。由于该相带以发育成层性好的海相泥岩为主,地震相呈高频、连续、弱振幅反射特征。

从上述有机相特征可知,有机相 A、B 以陆源有机质为主,干酪根类型主要为 III—II₂ 型,从而

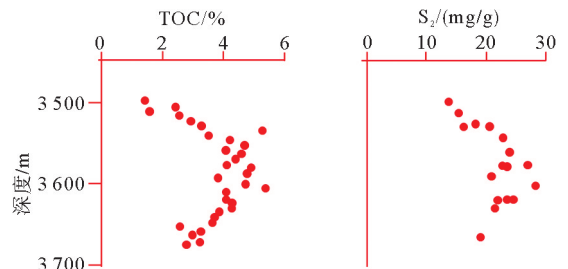


图 12 MO-1 井外浅海混源型有机相 D 有机质丰度及生烃潜力特征

Fig.12 The TOC and S_2 of the upper slope inner shallow sea organic facies D from well MO-1

以生气为主;而有机相 C、D 以海洋内源有机质为主,干酪根主要为 II 型偏 II₁ 型,具有一定的生油潜力。

在有机相划分基础,利用不同有机相带下不同类型烃源岩对应的地震反射特征,并以此为有机相平面划分依据,在沉积相带划分的基础上,可有效预测盆地少井/无井区烃源岩有机相带的平面展布(图 13)。4 个有机相带从陆向海依次展布,从而呈现“内侧倾气、外侧倾油”的特点,其中南部奥兰治次盆由于受到古奥兰治河供给影响,有机相 A、B 条带较宽,而北部威尔维斯次盆陆源碎屑供给较少,主要以有机相 C、D 为主。目前与该套烃源岩相关的气藏发现均位于奥兰治次盆内侧倾气带,推测外侧倾油带烃源岩成熟区具备一定的找油潜力。

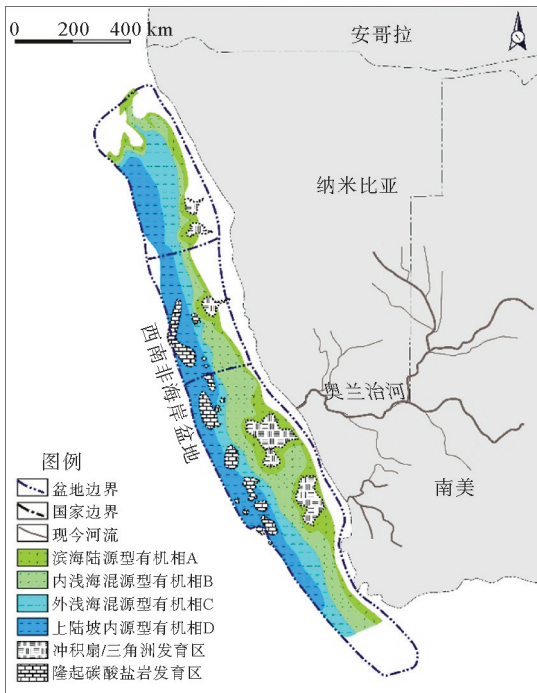


图 13 西南非海岸盆地过渡期烃源岩有机相平面分布

Fig.13 The distributional pattern of source rocks organic facies in Western South African Coastal Basin

4 结论

西南非海岸盆地对应盆地 3 期构造演化阶段,发育了 3 套烃源岩:裂谷期湖相烃源岩、过渡期 Barremian-Aptian 海相烃源岩以及漂移期

Cenomanian-Turonian 海相烃源岩。由于裂谷期主要为 SDR 充填,分布比较局限,而漂移期 Cenomanian-Turonian 烃源岩发育时期,整体为开阔海背景,仅在靠近北部威尔维斯火山脊附近发育相对优质的烃源岩,致使该盆地主要以广泛分布的过渡期海相泥岩为主。

过渡期沉积时期,无陆架坡折,为缓坡背景,由于南部岛屿对外部洋流的遮挡作用,盆地整体处于半封闭海湾环境,频繁火山活动利于生物繁盛,缺氧的地质背景为有机质保存提供了有利条件,整体上具备优质海相烃源岩发育条件。

由于揭示过渡期主力烃源岩钻井不均,本次研究主要利用沉积相、古生态相、有机地化相及地震相对过渡期海相烃源岩进行综合有机相分析,从而将过渡期海相烃源岩划分为 4 个有机相带:滨海陆源型有机相 A、内浅海混源型有机相 B、外浅海混源型有机相 C 和上坡折带内源型有机相 D,且其平面上呈现“内侧倾气、外侧倾油”的特点。

参考文献:

- [1] 蔡勋育,韦宝东,赵培荣.南方海相烃源岩特征分析[J].天然气工业,2005,25(3):20-22.
- [2] 秦建中.中国烃源岩[M].北京:科学出版社,2005.
- [3] 腾格尔.中国海相烃源岩研究进展及面临的挑战[J].天然气工业,2011,31(1):20-25.
- [4] 张水昌,张宝民,边立曾,等.中国海相烃源岩发育控制因素[J].地质前缘,2005,12(3):39-48.
- [5] 陈建平,梁狄刚,张水昌,等.中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J].地质学报,2012,86(7):1132-1142.
- [6] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一)南方四套区域性海相烃源岩的分布[J].海相油气地质,2008,13(2):1-16.
- [7] 刘光鼎,杨长春,王清晨.有利于海相烃源岩形成的物理作用[J].地质科学,2011,46(1):1-4.
- [8] 许化政,王传刚.海相烃源岩发育环境与岩石的沉积序列——以鄂尔多斯盆地为例[J].石油学报,2010,31(1):25-30.
- [9] 郝芳,陈建渝,孙永传,等.有机相研究及其在盆地分析中的应用[J].沉积学报,1994,12(4):77-86.
- [10] 郝黎明,邵龙义.基于层序地层格架的有机相研究进展[J].地质科技情报,2000,19(4):60-64.
- [11] 彭立才,杨慧珠,刘兰桂,等.柴达木盆地北缘侏罗系烃源岩沉积有机相划分及评价[J].石油与天然气地质,2001,22(2):178-181.
- [12] 李君文,陈洪德,田景春,等.沉积有机相的研究现状及其应用[J].沉积与特提斯地质,2004,24(2):96-100.

- [13] 袁东山,张枝焕,曾艳涛,等. 昌潍拗陷潍北凹陷深层孔二段烃源岩有机相[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 229-231.
- [14] 李华东,王荣福. 有机相在油气源岩与油气评价中的作用——以下扬子区二叠系为例[J]. 石油实验地质, 1993, 15(2): 201-212.
- [15] Tribouillard N, Bialkowski A, Tyson R V, et al. Organic facies variation in the late Kimmeridgian of the Boulonnais area (northernmost France) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 18(3): 371-389.
- [16] Habib D, Miller J A. Dinoflagellate species and organic facies evidence of marine transgression and regression in the atlantic coastal plain [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1989, 74(1): 23-47.
- [17] Requejo A G, Wielchowsky C C, Klosterman M J, et al. Geochemical characterization of lithofacies and organic facies in Cretaceous organic-rich rocks from Trinidad, East Venezuela Basin [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(3/5): 441-459.
- [18] Richard B, Steven L, Roger S. Source rock, maturity data indicate potential off Namibia [J]. *Oil and Gas Journal*, 1998, 96(32): 84-89.
- [19] 邓荣敬,邓运华,于 水. 西非海岸盆地群油气勘探成果及勘探潜力分析 [J]. *海洋石油*, 2008, 3(28): 11-19.
- [20] 郑应钊. 西非海岸盆地带油气地质特征与勘探潜力分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [21] Nuernberg D, Mueller R D. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present [J]. *Tectonophysics*, 1991, 191(191): 27-53.
- [22] Thomas R J, Veh M W V, Mccourt S. The tectonic evolution of southern Africa; an overview [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1993, 16(1/2): 5-24.
- [23] Granado P, De Vera J, Mcclay K R. Tectonostratigraphic evolution of the Orange Basin, SW Africa [J]. *Trabajos de Geología*, 2009, 29: 321-328.
- [24] Hirsch K K, Scheck-Wenderoth M, Wees J D V, et al. Tectonic subsidence history and thermal evolution of the Orange Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(3): 565-584.
- [25] Sandersen A. A Palynological Investigation of the Offshore Cretaceous Sequence on the South-West Coast of South Africa [D]. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2006.
- [26] Vera J D, Granado P, Mcclay K. Structural evolution of the Orange Basin gravity-driven system, offshore Namibia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 223-237.
- [27] Rouby D, Bonnet S, Guillocheau F, et al. Sediment supply to the Orange sedimentary system over the last 150 My: an evaluation from sedimentation/denudation balance [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 782-794.
- [28] Franke D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 11(3): 63-87.
- [29] Klemperer S. Characteristics of volcanic rifted margins [J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2002, 362: 1-14.
- [30] Jackson M P A, Cramez C, Fonck J M. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implications for salt tectonics and source rocks [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2000, 17(4): 477-498.
- [31] Douglas A P, David V D S, Rolando di P, et al. Tectonically induced adjustment of passive-margin accommodation space: influence on the hydrocarbon potential of the Orange Basin, South Africa [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 92(5): 589-609.
- [32] Stow D A V. South Atlantic organic-rich sediments: facies, processes and environments of deposition [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1987, 26(1): 287-299.
- [33] Akinlua A, Adekola S A, Swakamisa O, et al. Trace element characterisation of Cretaceous Orange Basin hydrocarbon source rocks [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(10): 1587-1595.
- [34] Spuy V D D. Aptian source rocks in some South African Cretaceous basins [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2013, 207(1): 185-202.
- [35] Richard B, Steve L, Roger S. Source rock, maturity data indicate potential off Namibia [J]. *Oil and Gas Journal*, 1998, 96(32): 1-10.
- [36] Zimmerman H B, Boersma A, Mccoy F W. Carbonaceous sediments and palaeoenvironment of the Cretaceous South Atlantic Ocean [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1987, 26(1): 271-286.
- [37] Scotese C R. *Atlas of Earth History* [M]. Arlington: University of Texas, 2001.
- [38] McCoy F W, Zimmerman M B. A History of Sediment Lithofacies in the South Atlantic Ocean [C] // *Init. Repts. DSDP 39*. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1977: 1047-1079.
- [39] Jacquin T, De Graciansky P C. Cyclic fluctuations of anoxia during Cretaceous time in the South Atlantic Ocean [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, 5(4): 359-369.
- [40] Tissot B, Demaison G, Masson P, et al. Palaeoenvironment and petroleum potential of middle Cretaceous black shales in Atlantic basins [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1980, 64(12): 2051-2063.
- [41] 黄永建,王成善,顾 健. 白垩纪大洋缺氧事件: 研究进展

与未来展望[J].地质学报,2008,82(1):21-30.

- [42] 辛建荣.缺氧事件及其地质意义[J].地质科技情报,1986,5(4):35-41.

- [43] Dingle R V. Walvis Ridge barrier: its influence on palaeo-

environments and source rock generation deduced from ostracod distributions in the early South Atlantic Ocean [J]. Geological Society, 1999, 153(1):293-302.

ORGANIC FACIES AND SPATIAL DISTRIBUTION OF TRANSITIONAL MARINE SOURCE ROCKS IN WESTERN SOUTH AFRICAN COASTAL BASIN

LI Dan, KANG Hongquan, HAO Lihua, CAO Xiangyang, LIU Xiaolong, JIA Jianzhong
(Overseas Evaluation Center, CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Marine source rocks contribute a lot to oil and gas generation in the world and are widely distributed on the earth. So far, the research on marine source rocks mainly focuses on its hydrocarbon generation mechanism, but lacks the research on its identification, prediction and evaluation technology in particular in the exploration and production stage of an oil field. In order to establish a set of feasible technical methods for marine source rock evaluation by organic facies analysis, this paper selected the Western South African Coastal Basin as a case. Comprehensive organic facies analysis of the main marine source rocks has been carried out by integrated analysis of sedimentary facies, paleoecological facies, organic geochemical facies and seismic facies, or so called “four facies integration”, and then the main marine source rock in this basin is systematically evaluated. The marine source rock consists of mixed terrestrial and marine organic matters. It can be further subdivided into four organic facies zones from the land to the sea, i.e. the coastal terrestrial organic facies A, the inner shallow sea mixed organic facies B, the outer shallow sea mixed organic facies C, and the upper slope autochthonous organic facies D. In a plane view, the distribution of hydrocarbon is characterized by a pattern of “inner part gas-prone and outer part oil-prone” in the basin.

Key words: marine source rock; the four faces integration; terrestrial-marine mixed source; organic facies analysis; Western South African Coastal Basin