

被动大陆边缘构造演化 对深水区烃源岩形成的控制

冯扬伟^{1,2}, 张功成³

(1 中国地质调查局西安地质调查中心; 2 西安地质矿产研究所; 3 中海油研究总院)

摘要 以世界被动大陆边缘含油气盆地构造演化、油气田资料为基础,采用地质综合分析方法,探讨了不同类型被动大陆边缘盆地不同构造演化阶段深水区烃源岩的形成条件: 开阔海型被动大陆边缘盆地群裂谷阶段发育大型局限湖盆,区域分布的厚层湖相富生油黑色泥页岩为烃源岩;边缘海型被动大陆边缘盆地群裂谷阶段发育受河流—波浪控制的大型三角洲,海陆过渡相富生气炭质泥页岩和煤系为烃源岩;被动大陆边缘阶段盆地群发生持续性海侵,在高水位体系域缺氧环境下的富有机质海相泥页岩为盆地重要的烃源岩。

关键词 被动大陆边缘; 盆地类型; 构造演化; 深水区; 烃源岩

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

1 概况

被动大陆边缘盆地是由大洋岩石圈扩张而形成的拉伸断裂所控制的、处于陆壳向洋壳过渡带上的盆地,它们是目前世界上非常重要的油气资源区。深水区是当今海洋油气勘探的必然发展趋势和油气资源接替的重要战略选区^[1],被动陆缘盆地深水区是目前世界油气的增长亮点区。目前国际上大多将水深大于500 m的区域作为深水区,将水深大于1 500 m的区域称为超深水区^[2];中国南海和巴西东部陆缘把水深大于300 m的海域称为深水区^[3],美国把墨西哥湾水深大于305 m的海域称为深水区^[4]。本文对深水区的界定采用国际上大多认定的500 m水深。

被动大陆边缘主要包括开阔海型被动大陆边缘和边缘海型被动大陆边缘,深水盆地主要分布在环大西洋滨岸带、环印度洋周缘和环北极深水陆架^[5],重要的深水含油气盆地主要分布在北美洲墨西哥湾、南美洲巴西东部陆架、非洲西部海岸、欧洲挪威中部陆架、巴伦支海盆地、非洲东部海岸、亚洲印度东部

陆架、大洋洲澳大利亚西北陆架、以及中国南海北部陆架(图1),其中,墨西哥湾、巴西东部陆缘与非洲西部海岸,被称为深水油气勘探的“金三角”,这里集中了当前世界上大约84%的深水油气钻探活动,全球近10年来的巨型油气发现大多位于上述热门深水区^[2]。据统计,世界主要被动陆缘深水区油气探明总储量约 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[6],其中,巴西东部陆架深水区约为 $68 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7],美国的墨西哥湾深水区为 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^①,墨西哥的墨西哥湾深水区为 $14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^②,西非大陆边缘深水区为 $14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8],澳大利亚西北陆架深水区约为 $47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[9],挪威中部陆架深水区约 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^③,中国南海北部陆架约 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7,10],孟加拉湾深水区约 $14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[11]。

烃源岩在油气成藏方面具有重要意义。胡朝元1982年提出“源控论”^[13],周兴熙1997年概述了“源—盖共控论”^[14],张功成2012年在大量统计和综合分析国内外数百个含油气盆地成藏条件的基础上提出了“源热共控论”^[15],这些均突出了烃源灶的分布控制油气田的分布。国外深水油气勘探取得了许多突破

收稿日期: 2015-01-13; 改回日期: 2016-04-01

本文受中国地质调查局油气基础性公益性地质调查项目“银额盆地及周缘油气基础地质调查”(编号:121201011000150012)和国家自然科学基金“岩浆热侵位对煤变质型石墨富集成矿的控制——以西秦岭凤县隐晶质石墨矿为例”(编号:41502081)联合资助

冯扬伟: 1987年生,博士,助理研究员,研究方向为沉积学与海洋油气勘探。通讯地址: 710054 陕西省西安市碑林区友谊东路438号; E-mail: 2005130009@163.com

① MMS(US Mineral Management Service). Deepwater Gulf of Mexico 2008: America's Offshore Energy Future[R]. OCS Report MMS, 2008.

② MMS (US Mineral Management Service). Gulf of Mexico Oil and Gas Production Forecast: 2009-2018[R]. OCS Report MMS, 2009.

③ EIA. Norway Country Analysis Brief, August[DB/OL]. 2010. <http://www.eia.doe.gov/>

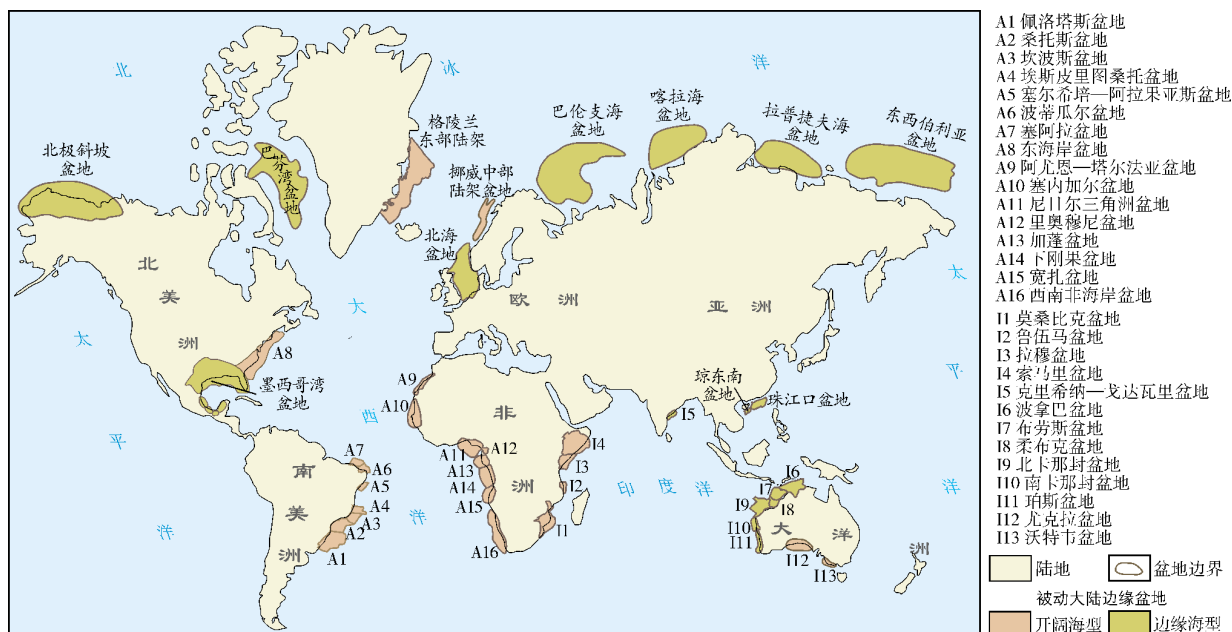


图1 世界被动大陆边缘重点深水盆地群分布(据文献[3,5,6,12]修编)

性进展,积累了大量的地质资料及成功经验,而我国的深水油气勘探目前尚处于起步阶段,为此,笔者对全球主要被动陆缘深水盆地的构造演化、沉积充填及烃源岩特征开展综合分析,深入剖析烃源岩形成条件与构造演化的关系,以期开展南海油气勘探开发以及到国外从事深水勘探相关工作提供参考。

2 被动大陆边缘构造演化

2.1 全球板块演化

被动大陆边缘的形成与受地幔柱活动控制的泛大陆解体密切相关。地球上的不同板块在晚古生代晚期汇聚在一起形成泛大陆,分布在北半球的部分称为劳亚大陆,分布在南半球的部分称为冈瓦纳大陆^[12,16](图2a)。大规模地幔物质的横向运动引起岩浆喷发,形成地幔柱,持续的作用力使陆内裂谷最终裂开形成洋壳^[17]。

2.1.1 北大西洋的拉开

晚古生代晚期板块拼合形成泛大陆,北美板块—欧亚板块和非洲板块西北部处于挤压应力状态下,发育前陆盆地。地幔柱“卡姆普”(Camp)开始活动时期较早,3亿年前起分离作用的一些断裂已经发育^[18]。晚三叠世末期(201 Ma)发育在北美板块—欧

洲板块和非洲板块西北部之处的地幔柱“卡姆普”强烈活动^[19],在北美板块东部和非洲板块西北部之间发生了熔岩喷发,导致了泛大陆的第一次裂解,即冈瓦纳大陆和劳亚大陆的分离(图2a)。北美—欧洲板块与非洲—南美板块分别向西北及东南方向分离,原始大西洋和墨西哥湾开始形成。北美板块东南部—西非西北部地区处于北西—南东向伸展构造体系,墨西哥湾、西非北段被动大陆边缘和北大西洋被动大陆边缘等区裂谷盆地群开始形成。中侏罗世之后北美板块跟非洲板块与南美板块分离并向西北方向漂移,构造演化进入被动大陆边缘阶段。

2.1.2 印度洋的形成

晚石炭世—早侏罗世,在东、西冈瓦纳大陆结合部位(古缝合线)发育前裂谷期巨型卡鲁(Karoo)陆内裂谷盆地。早侏罗世晚期(183 Ma)地幔柱“卡鲁”强烈活动^[20],东、西冈瓦纳以此为节点陆续开始瓦解,印度洋开始形成,非洲东部大陆边缘、印度西部大陆边缘和南极洲西部大陆边缘开始形成(图2b)。非洲板块东南部、南极洲板块西部、南美洲板块南端之间的结合处首先开始裂开,西冈瓦纳大陆东部的非洲板块东部边缘和东冈瓦纳板块之间以右行走滑裂谷作用为主,南印度洋开始打开(图2b),海侵从南往北逐步扩大。

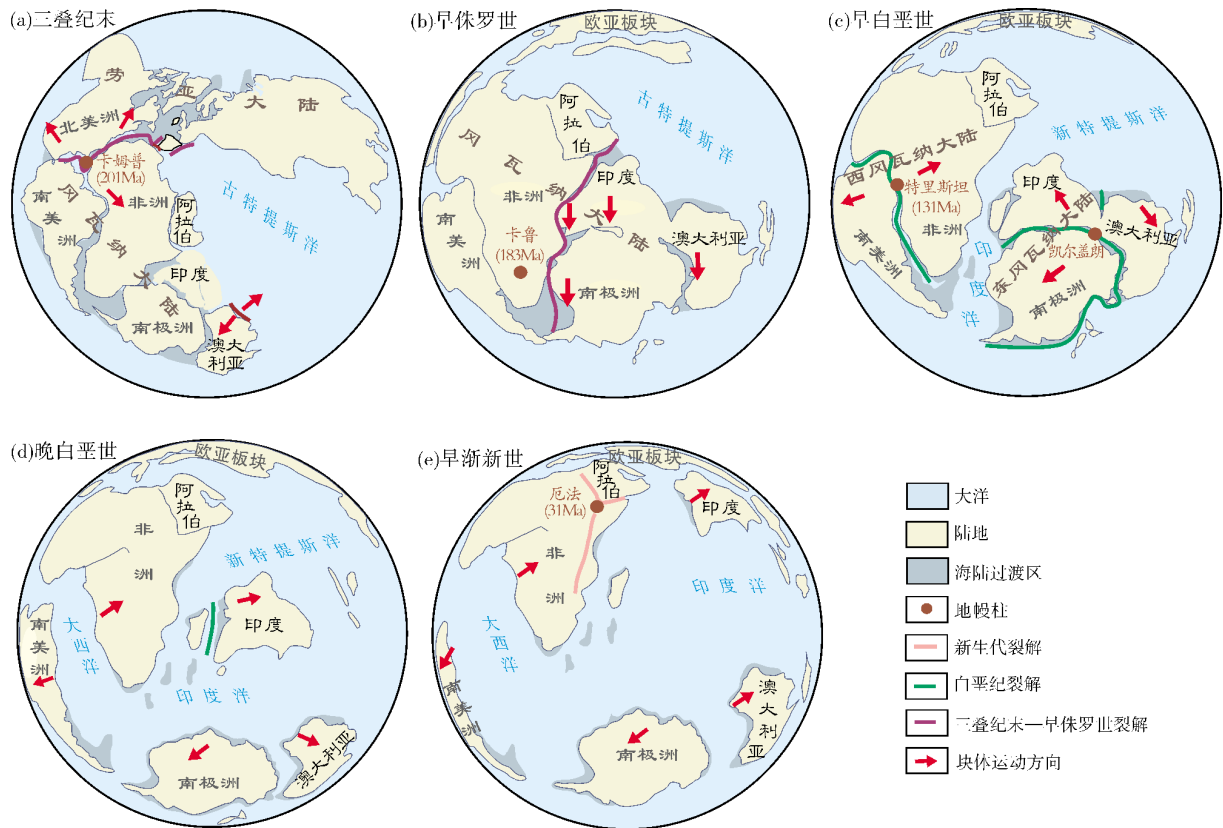


图2 全球三叠纪以来板块重建与构造演化(据文献[12,18-25]修编)

晚侏罗世早期(161 Ma)之后,东冈瓦纳板块开始沿着非洲板块东部大陆边缘和西冈瓦纳大陆分离开来,东冈瓦纳板块开始向东南—近南方向漂移,北部印度洋也相继打开,并逐渐从北往南海侵^[21]。晚侏罗世末期—早白垩世早期,南极洲板块和印度板块以斜向裂谷作用方式继续向东南方向分离,南、北印度洋开始贯通。

早白垩世中期东冈瓦纳大陆和西冈瓦纳大陆完全分离,进入被动大陆边缘演化阶段(图2c)。晚白垩世末开始,印度板块相对于非洲板块向东北方向斜向分离、漂移(图2d),逐渐形成东非被动大陆边缘盆地群,发育的时间北早(E₁)南晚(N₁)^[22]。

从早渐新世(31 Ma)起,随着地幔柱“厄法”(Afar)的喷发与东非裂谷系的形成(图2e),广泛而比较强烈的火山作用发生。早渐新世在红海地区形成初始裂谷,致使阿拉伯板块与非洲板块开始分离;晚渐新世—中新世主裂谷期,在早期红海初始裂谷的基础上形成一个巨型大陆裂谷,地堑和地垒强烈发育;上新世开始,阿拉伯板块与非洲板块差不多完全分离,红

海裂谷盆地内发育北西向洋中脊,洋壳逐渐扩张,这一时期,以地幔柱“厄法”为轴,与红海共轭的东非裂谷和亚丁湾裂谷形成,裂谷系内构造活动强烈^[19]。

晚石炭世到二叠纪甚至三叠纪,澳大利亚西北陆架区域上处于拉张环境,经历着克拉通坳陷盆地阶段。三叠纪末期至侏罗纪早期(约213~196 Ma),澳大利亚西北陆架开始了大陆裂解活动^[23]。白垩纪早期地幔柱“凯尔盖朗”(Kerguelen)开始活跃,导致印度板块开始从东冈瓦纳大陆分离(图2c),澳大利亚西北陆架拉开了被动陆缘演化的序幕^[24];其后澳大利亚板块又跟南极洲板块发生裂解作用,至古近纪时进入被动陆缘演化阶段(图2c, 2d)。澳大利亚板块和南极洲板块之间存在一个近东西向的大洋中脊(图2c),在洋中脊的扩张驱动下澳大利亚板块不断向东北方向移动,印度板块、南极洲板块和澳大利亚板块之间的海域不断扩大,从而形成了印度洋的雏形^[25]。

2.1.3 南大西洋的形成

北大西洋的扩张是间歇性长期存在的,比如挪

威半岛和格陵兰岛之间。北大西洋的裂开和海底扩张始于中侏罗世,中侏罗世—白垩纪早期裂谷大规模发育;晚白垩世—古近纪出现了大规模的岩浆喷发,最终在始新世(53.4 Ma)挪威和格陵兰之间开始出现洋壳,挪威中部陆架和格陵兰东部陆架进入了大陆漂移阶段,最终形成东北大西洋^[26]。

南大西洋的开裂比北大西洋则要晚一些,晚侏罗世非洲大陆南端的威德尔海(Weddell)开始形成,随后在非洲大陆最南端最先发生裂谷作用。早白垩世中期(131 Ma)位于西冈瓦纳大陆南部的地幔柱“特里斯坦”(Tristan)开始活动,组成西冈瓦纳大陆的南美板块与非洲板块开始裂解分离(图2c),南大西洋的裂开、海底扩张和非洲与南美洲的分离南早北晚,裂谷作用逐渐向北扩展(图2d),南美板块东部陆缘与非洲板块西部陆缘裂谷盆地群在南大西洋由南向北发展。

2.2 被动陆缘盆地构造演化阶段

被动陆缘盆地的构造演化可以分为前裂谷期、裂谷期和被动大陆边缘期三大阶段(图3),其中,裂谷期按时间早晚分为裂谷初期和裂谷晚期(又称为过渡期),被动大陆边缘期又称为漂移期,包括被动大陆边缘早期和晚期。

前裂谷期多被某种类型的盆地占据,例如前陆盆地、克拉通盆地、克拉通拗陷盆地或前陆内裂谷盆地,在这些盆地内,通常河流、湖泊、冰川或者陆缘海相沉积物堆积在结晶基底之上。

裂谷初期,上升的地幔柱常常导致碱性玄武质火山熔岩上升、扩张和火山爆发,地堑式裂谷盆地发育,并以地堑边缘形成的冲积扇和地堑轴向的河流—湖泊相沉积为特征。开阔海型被动大陆边缘,在裂谷底部湖盆滞留缺氧的环境中沉积了厚层的富含有机质的泥页岩,形成了区域上重要的优质富生油烃源岩。

裂谷晚期,板块的持续拉张导致盆地不断沉降,逐渐发生初次海侵,盆地被淹,随着时间的推移,海侵次数和规模越来越大、越来越常见,并且持续的时间也逐渐变长。在局限环境中会发生周期性的海侵和蒸发晒干作用(干燥气候条件下),形成厚度可达上千米的蒸发岩。这些盐岩地层多为上覆地层提供了一个活动的底层,并且在后来的埋藏过程中发生塑性变形,盐岩层不仅影响着盆地地层的发育和圈闭的形成,也影响到海底的地貌结构,并进一步影响到沉积物的分布模式。边缘海型被动大陆边缘,裂谷期

处于跟外海沟通良好的开阔环境中,经受海侵作用显著,在陆源河流和波浪的联合控制下发育河控—浪控三角洲砂岩和泥岩、炭质泥页岩和煤系地层,形成区域上重要的优质富生油烃源岩。

从裂谷期到被动大陆边缘期的标志是,沉积环境由浅海碳酸盐沉积相逐渐变化到完全开放的广海相,并伴随有硅质碎屑沉积物从盆地边缘崩落及向盆地方向移动。被动大陆边缘阶段,裂谷盆地接受多次持续性海侵作用,堆积了厚层的从浅海相到深海相的沉积层序。被动大陆边缘阶段层序的发育,从洋壳新生开始,标志着海底扩张与大陆漂移的开始。

随着沉积楔从海岸向外不断建造,下伏地层(盐岩或泥岩)活动的差异产生了薄皮重力构造,并导致了沉积充填物沿着铲式断层和再次活动的裂谷构造向盆地方向运动。差异载荷也可能导致盐岩向盆地方向运动,并可能伴随有上覆沉积层顺斜坡向下成排移动。泥岩活动类似于盐岩,也可发生塑性变形并且触发薄皮拉张构造。盐岩或泥岩底劈的持续活动,影响了整个被动大陆边缘阶段的构造发育和沉积模式。

3 开阔海型被动陆缘盆地裂谷阶段的富生油湖相烃源岩

开阔海型被动大陆边缘盆地裂谷阶段常发育局限湖盆,厚层泥页岩是主力烃源岩(图3,南大西洋两岸盆地群)。裂谷初期,上升的地幔柱常常导致碱性玄武质火山熔岩上升、扩张和火山爆发,张性断层活跃导致封闭式、地堑式裂谷盆地发育;此阶段陆源碎屑供给充足,在局限环境下的裂谷盆地内发育河流—湖泊相沉积,在缺氧滞留的环境下往往沉积富含有机质的泥页岩,它们构成了重要的区域性烃源岩。

该类含油气盆地富油(图3),主要分布在南大西洋两岸被动大陆边缘盆地群深水区。南美洲巴西东部大陆边缘盆地群(图1,盆地编号A1—A7),代表盆地为桑托斯盆地和坎波斯盆地。西非大陆边缘盆地群(图1,盆地编号A9—A16),从北向南分为三段,北段主要包括阿尤恩—塔尔法亚盆地与塞内加尔盆地,中南段主要包括加蓬盆地、下刚果盆地、宽扎盆地以及西南非海岸盆地。由图3可见,裂谷初期的湖相泥页岩,往往发育在区域性膏盐岩层之下且埋藏较深。近年获得了跟这套烃源岩相关的若干重大油气发现,例如,2006年在巴西桑托斯盆地深水区“盐下深层”发现了图皮(Tupi)巨型油田,2008年又发现

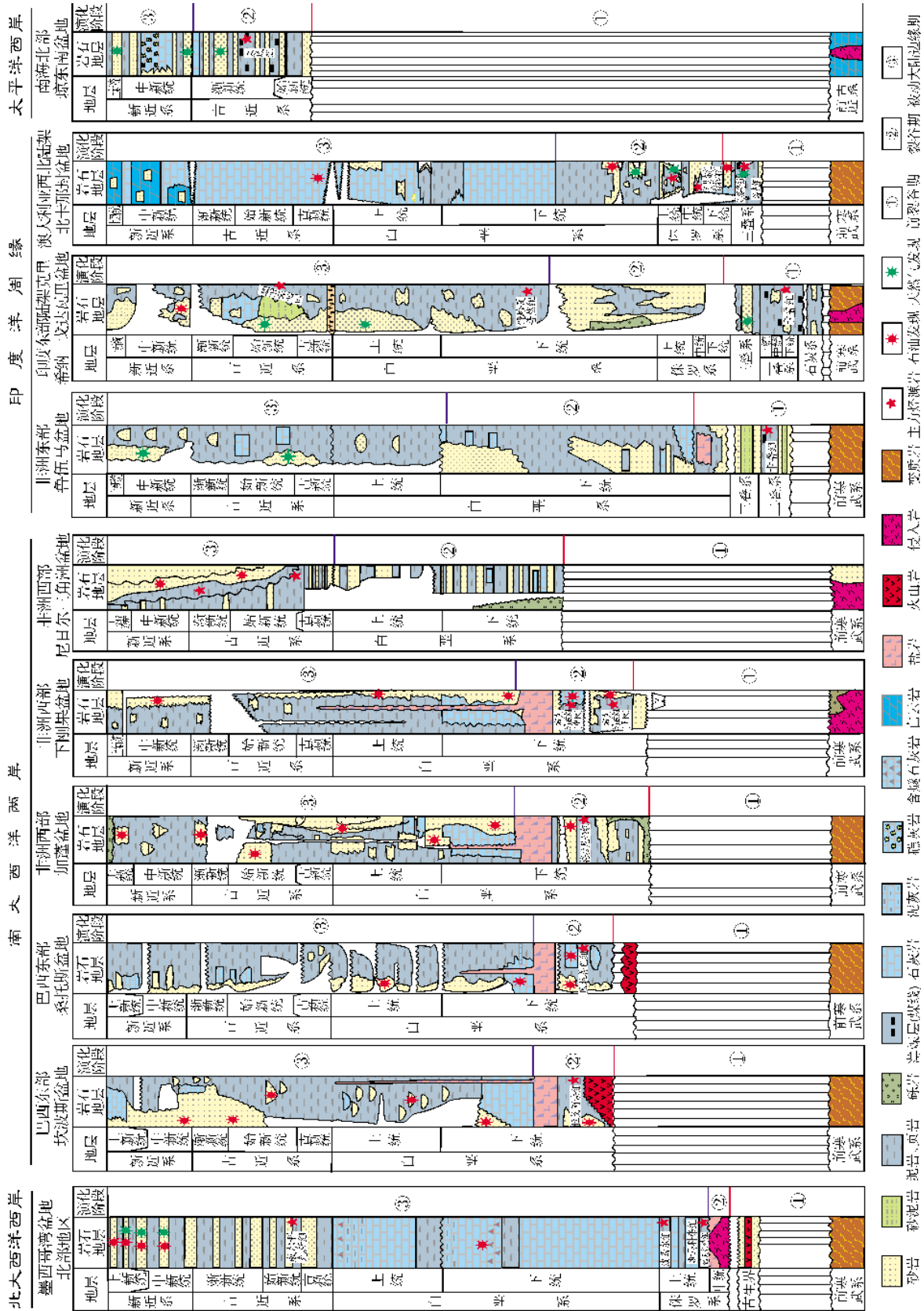


图3 世界被动大陆边缘重点盆地构造演化和烃源岩分布综合柱状图(据文献[3-5,21,23,27-28]修编)

了亚拉(Iara)油田,估计石油储量为25.03亿桶,油层位于海平面6 000 m以下,水深2 200 m^[14],深水区“盐下深层”成为近年油气勘探的重要新领域之一。

3.1 烃源特征

在西非被动大陆边缘深水区,油源对比分析

表明,下白垩统湖相泥页岩是下刚果盆地、加蓬盆地盐下油气发现的主力烃源岩^[5]。例如,加蓬盆地下白垩统梅拉尼娅组(Melania Fm.)湖相页岩,总有机碳含量(TOC)平均为6.1%,干酪根类型为I型、II₁型^[29-30],形成于咸水—超咸水湖盆环境(图3,表1)。

表1 南大西洋大陆边缘早白垩世裂谷盆地群湖相烃源岩特征(据文献[5,29-34]数据汇编)

盆地名称	岩性	TOC (%)			干酪根类型	氢指数(mg/g)	生烃潜力评价
		范围值	平均值	样品数			
加蓬盆地	泥岩	0.3-20	6.1	56	I、II ₁	150-600	生油
下刚果盆地	泥岩	2-30	20	75	I、II	100-630	生油
里奥穆尼盆地	泥岩	2-4	2.8	*	II、III	200-500	生气
西南非海岸盆地	页岩	1.61-2.6	*	*	II	180-800	生油
坎波斯盆地	页岩	0.5-9	*	*	I	300-900	生油
桑托斯盆地	泥页岩	2-20	5.0	95	I、II ₁	251-785	生油

* 相关文献中未见具体数据

在巴西东部大陆边缘深水区,坎波斯盆地主力烃源岩为下白垩统拉戈阿法组(Lagoa Feia Fm.)湖相黑色页岩,厚达100-300 m,TOC一般为2%-6%,最高达9%,氢指数最高达900 mg/g,干酪根类型为I型,该套烃源岩于始新世进入生油窗,至今仍处于生油窗之内;桑托斯盆地主力烃源岩为下白垩统瓜拉蒂巴组(Guaratiba Fm.)湖相黑色泥页岩,TOC约为5%,干酪根类型I、II型,主要为II型,具有一定生油潜力^[31-32](图3,表1)。

3.2 烃源成因

南大西洋被动陆缘盆地群构造—沉积演化经历了前裂谷期、裂谷期和被动陆缘期三大阶段^[27]。前裂谷期在前寒武系结晶基底之上发育克拉通内盆地。裂谷作用开始于早白垩世早期,伴随碱性玄武质火山熔岩上升、扩张和火山爆发,该时期南大西洋发育三大断裂系统:北部的阿森松(Ascension)断裂系统(编号F₁),中部的里约格兰德(Rio Grande)断裂系统(编号F₂),南部的厄加勒斯—福克兰(Agulhas-Falkland)断裂系统(编号F₃)(图4)。随着南大西洋继续加宽、加深,北非与欧洲大陆之间的东地中海则表现为逐渐闭合,这种“闭合”造成大西洋温水流体系与印度洋—太平洋冷水流体系的隔离。这一时期,非洲和南美洲板块之间发育一个巨型古湖泊,南部鲸海岭(Walvis Ridge)和里约格兰德脊(Rio Grande Ridge)

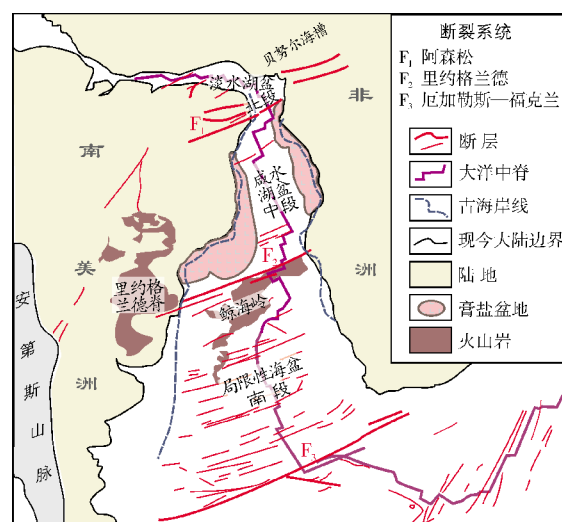


图4 南大西洋早白垩世古地理重建(据文献[5]修改)

火山岩成为一个火山岛弧,隔断了中北段的巨型湖盆与南段的局限性海盆(图4),使古湖泊形成了相对闭塞的湖相环境^[5]。由于鲸海岭和里约格兰德脊不稳定地开合,海水间歇性入侵,为中段闭塞湖盆提供了高盐度海水,加上地处热带,蒸发量大,在阿普特期沉积了对油气勘探极为重要的巨厚且区域性分布的蒸发岩层序^[27]。在南美与西非,早期裂谷形成了3种类型的沉积环境:南段,鲸海岭和里约格兰德脊火山岩带以南,为局限海环境;中段,为受海水入侵形成的高盐度湖相环境;北段,为未受海水

影响的淡水湖泊沉积环境^[33](图4)。受白垩纪全球缺氧事件的影响,巨型古湖盆内发育冲积扇、河流—湖泊相和深湖相沉积,深湖相泥岩富含有机质且分布广泛,成为南大西洋被动陆缘深水盆地内盐下最主要的一套优质烃源岩(黑色页岩)。中、南段盆地在被动大陆边缘阶段发育较稳定的海相碳酸盐岩沉积。渐新世,随着断裂作用的不断增强,一系列铲状断层和盐构造发育,中新世沉积了一套海相的碎屑岩和浊积岩^[34](图3)。

4 边缘海型被动大陆边缘盆地裂谷阶段的富生气海陆过渡相烃源岩

边缘海型被动大陆边缘盆地裂谷阶段形成地堑

式裂谷盆地,同时开始遭受海侵的影响而处于半封闭—开放状态,盆地内发育一系列多期次叠加的三角洲,形成砂岩、泥页岩、炭质泥岩和煤系沉积建造,其中海陆过渡相炭质泥页岩、煤系及海相泥岩为主要烃源岩,天然气的分布主要受控于海陆过渡相泥页岩和煤系。澳大利亚西北陆架和中国南海北部大陆边缘是重要代表。

澳大利亚西北陆架区域上包括四个盆地,总面积约 $120 \times 10^4 \text{ km}^2$,自西南到东北依次为北卡那封盆地、柔布克盆地、布劳斯基盆地和波拿巴盆地(图5)。该区裂谷阶段三角洲沉积建造中有一系列重大油气发现,例如,2000年在北卡那封盆地发现简斯(Jansz)气田,水深1321m,天然气地质储量 $5\,663.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

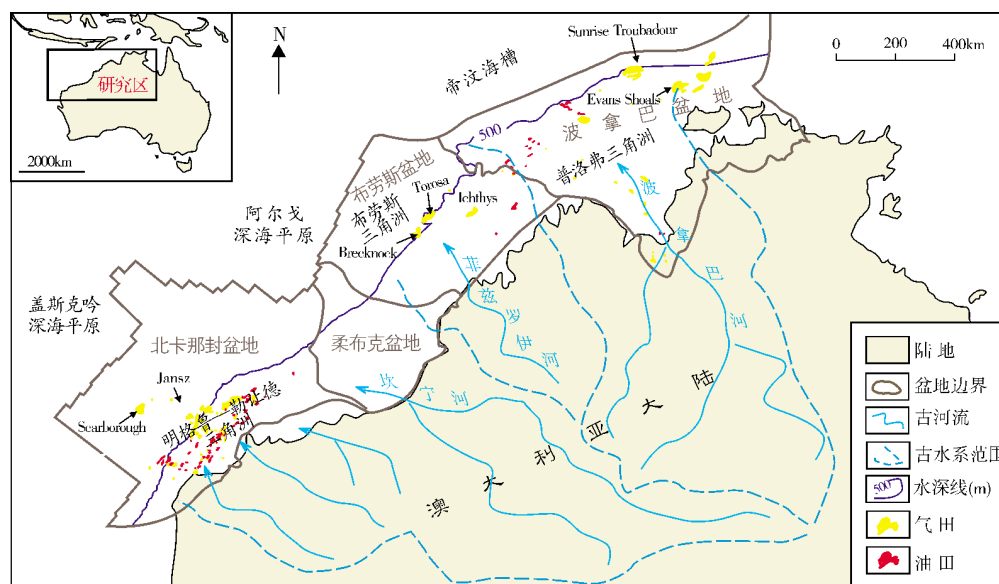


图5 澳大利亚西北陆架三叠纪—中侏罗世三角洲体系及主要油气田分布(据文献[24]、④修编)

4.1 烃源特征

澳大利亚西北陆架深水区主力烃源岩为中生界海陆过渡相炭质泥页岩、煤系及海相泥岩,Ⅱ₂、Ⅲ型干酪根,以生气为主^[23]。

三叠系烃源岩发育于从北卡那封盆地到布劳斯基盆地的广大区域,北卡那封盆地洛克组(Locker Fm.)海相页岩—明格鲁组(Mungaroo Fm.)三角洲相泥岩(图3),主要分布在盆地的西部和南部,厚度大于10km,Ⅱ₂、Ⅲ型干酪根,TOC含量为0.5%~1.5%。

HI约30~303 mg/g, S₁+S₂为3~10 mg/g,具有倾向于生气的潜力,从北卡那封盆地到布劳斯基盆地,其生气能力渐弱。

中—下侏罗统烃源岩主要发育在波拿巴盆地和布劳斯基盆地,为海陆过渡相炭质泥岩、煤系以及海相泥岩,Ⅲ型干酪根,TOC含量为1.0%~3.5%,HI约30~350 mg/g, S₁+S₂为1~8 mg/g,以生气为主。在不同盆地生烃潜力有差异:北卡那封盆地阿瑟尔组(Athol Fm.)和穆拉特组(Murat Fm.)以生气为主;布劳斯基地普洛弗组(Plover Fm.)主要分布于盆地中部,以生

④ Norvick M S. Palaeogeographic Maps of the Northern Margins of the Australian Plate: Final Report[R]. Perth: Geoscience Australia, 2002: 1-8

气和凝析油为主;波拿巴盆地普洛弗组在深水区广泛分布,具有生油潜力^[23]。

4.2 烃源成因

澳大利亚西北陆架中生代发育多期、多个大型浪控三角洲,北卡那封盆地的沉积建造受控于晚三叠世明格鲁(Mungaroo)三角洲—早-中侏罗世勒让德(Legendre)三角洲体系,布劳盆地和波拿巴盆地的沉积建造分别受控于早-中侏罗世布劳(Browse)三角洲和普洛弗(Plover)三角洲^[35](图5)。

受到持续性海侵、海退的影响,海陆过渡相炭质泥页岩与煤系发育,形成盆地重要的富生气源岩。三角洲前缘富集有机质,三角洲顶部由于频繁海侵导致煤层的存在,从而大幅增强了生油潜力,烃源岩的富集具有局部性和层序的叠加重复性^[24]。三角洲体系形成了本区重要的烃源岩和储集层^[36],它们为富生气的盆地奠定了物质基础;在波拿巴盆地,普洛弗大型三角洲控制着盆地约70%的油气储量,有大东方(Sunrise Troubadour)巨型气田等多个重大发现;在布劳盆地,布劳大型三角洲控制着盆地绝大部分的天然气,约占盆地油气总储量的60%,巨型气田有托罗萨(Torosa)气田与布雷克诺克(Brecknock)气田等;在北卡那封盆地,明格鲁—勒让德三角洲控制盆地100%的油气储量,巨型油气田如简斯气田、斯卡伯勒(Scarborough)气田等(图5)。

5 被动大陆边缘阶段的海相烃源岩

被动大陆边缘盆地群,无论是边缘海型(如墨西哥湾盆地)还是开阔海型(如尼日尔三角洲盆地),在被动大陆边缘阶段均发生持续性海侵,在高水位体系域缺氧环境下发育的富有机质海相泥页岩成为盆地重要的烃源岩。

5.1 墨西哥湾盆地

5.1.1 烃源特征

近年的研究显示,墨西哥湾含油气盆地发育三套烃源岩:(1)中—上侏罗统的波西尔组(Bossier Fm.)海相泥灰岩、斯马科弗组(Smackover Fm.)海相碳酸盐岩、诺夫利特组(Norphlet Fm.)海相泥灰岩^[37],TOC含量1%~2%,干酪根类型为I、II型,它们为墨西哥湾盆地北部提供了58%的储量,为盆地南部提

供了超过80%的储量;(2)白垩系海相页岩,TOC含量大于1%,I、II型干酪根^[38];(3)古近系威尔科克斯组(Wilcox Fm.)海相三角洲细粒碎屑岩,TOC含量为1.5%~2.7%,干酪根类型为II、III型^[3,39-41]。

5.1.2 烃源成因

中侏罗世,墨西哥湾与古特提斯洋之间的对流被限制,墨西哥湾处于半封闭海状态,沉积了厚逾数千米的芦安(Louann)盐层^[3]。墨西哥湾深部的磁异常证实海底扩张开始于晚侏罗世(150~152 Ma),结束于早白垩世(140 Ma)。晚侏罗世,被动大陆边缘发育的早期,佛罗里达—尤卡坦小地块发生旋转,海水进入墨西哥湾北部地区,但与大西洋之间沟通有限,处于局限海环境^{①[38]};墨西哥湾南部地区,拉张作用导致其与大西洋之间有水域相通,并一直延续到早白垩世,该阶段沉积了厚层的从浅海相到深海相的沉积层序。晚侏罗世墨西哥湾盆地的沉积相受控于海侵,碳酸盐岩斜坡被淹没,之后沉积了波西尔组(Bossier Fm.)海相页岩,晚期沉积了海相黑色页岩,在路易斯安那州北部和密西西比州西南部厚达1200 m^[38]。

5.2 尼日尔三角洲盆地

5.2.1 烃源特征

尼日尔三角洲盆地总面积为 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中陆地面积约为 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$,海域面积为 $22 \times 10^4 \text{ km}^2$,是西非深水区勘探的重点区域^[42]。古近系阿卡塔组(Akata Fm.)海相页岩和阿格巴达组(Agbada Fm.)底部海相页岩是盆地主要的烃源岩^[43],TOC含量为0.1%~50%(煤),平均为1.68%;原油生物标志化合物研究表明,油气主要来自底部的海相腐泥型烃源岩^[44]。

5.2.2 烃源成因

尼日尔三角洲盆地被动大陆边缘期(始于早白垩世末期)开始海侵,发育多期海相三角洲,尼日尔三角洲主体形成于始新世,海退则导致尼日尔三角洲向南进积^[42]。尼日尔三角洲盆地主体为一套海退式碎屑沉积层序,为由三个不同时期的单元组成的向上变粗的海退层序。三角洲体系内沉积了厚层且分布广泛的海相泥页岩,这为油气富集奠定了雄厚的物质基础。

从甾烷分布图(图6)看,绿色区域为烃源岩样品的 C_{29} 甾烷相对含量大于50%的样品区,基本以陆源

有机质为主,代表了沉积期最靠近三角洲水系的地区;蓝色区域烃源岩样品的 C_{29} 甾烷相对含量小于或等于40%,表明该区烃源岩受陆源有机质的影响很小,主要代表受海洋影响较大的区域性优质烃源岩

的分布区^[44]。据统计,主要的巨型、大型油田以及75%的储量分布在海洋源烃源岩分布的区域内,这表明优质海相烃源岩的展布是控制油气富集的重要因素,本区的主力烃源岩为海洋源烃源岩。

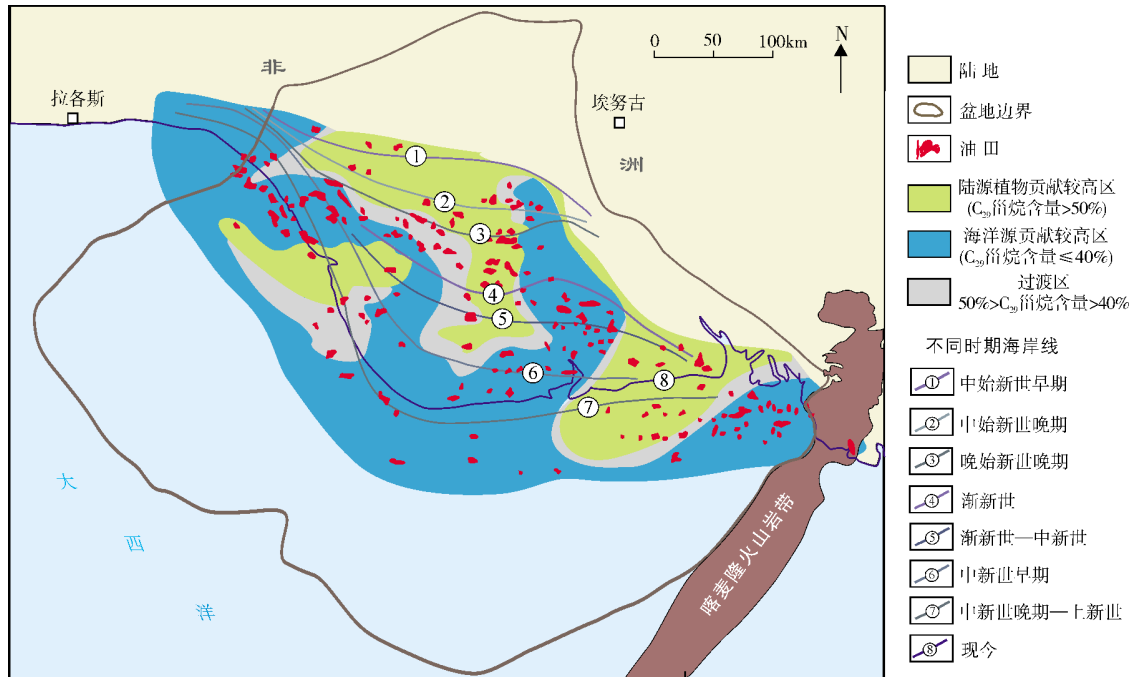


图6 尼日尔三角洲盆地不同时期古海岸线位置和烃源岩 C_{29} 甾烷相对丰度及油气田分布(据文献^[44]修编)

6 结语

开阔海型被动大陆边缘盆地裂谷期形成地堑式古湖泊,在缺氧闭塞环境下发育的湖相泥页岩是重要的烃源岩。边缘海型被动大陆边缘盆地裂谷期形成垒堑相间的断陷,沉积受到多期海侵的影响,在河流—波浪的双重控制下发育的海陆过渡相炭质泥页岩和煤系为区域性主力烃源岩。在盆地的被动大陆边缘期,海侵的影响进一步扩大,在高水位体系域缺氧环境下发育的富有机质海相泥页岩为区域性主力烃源岩。

理想状态下,被动大陆边缘盆地从下往上依次发育裂谷早期湖相泥页岩、裂谷晚期海陆过渡相炭质泥页岩与煤系、以及被动大陆边缘期海相泥页岩这三大套空间上叠置的有效主力源岩,但由于各个盆地的构造演化又受到其他因素的影响,盆地中往往只发育上述三大套主力烃源岩中的一套或两套,或者随着盆地的构造演化,上述主力烃源岩可能发育在盆地的不同位置。

参考文献

- [1] 金庆焕. 深水油气是当今海洋油气勘探的主要热点[J]. 科学中国人, 2006, (11): 18-20.
- [2] 吕福亮, 贺训云, 武金云, 等. 全球深水油气勘探简论[J]. 海相油气地质, 2006, 11(4): 22-28.
- [3] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 1-6.
- [4] 朱伟林. 南海北部深水油气地质特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 521-527.
- [5] Moulin M, Aslanian D, Unternehr P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean[J]. Earth Science Reviews, 2010, 98(1/2): 1-37.
- [6] 冯杨伟. 琼东南盆地深水梅山组沉积相与丘状反射体地质解释[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [7] 瞿辉, 郑民, 李建忠, 等. 国外被动陆缘深水油气勘探进展及启示[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 193-200.
- [8] Khain V E, Polyakova I D. Hydrocarbon potential in continental margin deepwater-ultra deepwater area[J]. Geological Acta, 2005, 3(3): 272-294.
- [9] Geoscience Australia, ABARE (Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics). Australian energy resource

- assessment[M]. Perth WA, 2010: 41-130.
- [10] 陶维祥,赵志刚,何仕斌,等.南海北部深水西区石油地质特征及勘探前景[J].地球学报,2005,26(4):359-364.
- [11] 邹才能,张光亚,陶士振,等.全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J].石油勘探与开发,2010,37(2):129-145.
- [12] Scotese C R, Boucot A J, Mckerrow W S. Gondwanan palaeogeography and palaeoclimatology[J]. *Journal of African Earth Sciences*. 1998, 28(1): 99-114.
- [13] 胡朝元.生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J].石油学报,1982,3(2):9-13.
- [14] 周兴熙.源—盖共控论述要[J].石油勘探与开发,1997,24(6):4-7.
- [15] 张功成.源热共控论[J].石油学报,2012,33(5):723-738.
- [16] Dalziel W, Lawver L A, Murphy J B. Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 178(1/2): 1-11.
- [17] 张功成,屈红军,冯杨伟.深水油气地质学概论[M].北京:科学出版社,2015.
- [18] Grand S P, Hilst R D, Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the earth [J]. *GSA Today*, 1997, (7): 1-7.
- [19] 许志刚,韩文明,孙玉梅.东非大陆边缘构造演化过程与油气勘探潜力[J].中国地质,2014,41(3):961-969.
- [20] Burke K, Macgregor D S, Cameron N R. Africa's petroleum systems: Four tectonic "aces" in the past 600 million years[M] // *Petroleum Geology of Africa: New Themes and Developing Technologies*, Special Publications. London: Geological Society, 2003, 207: 21-60.
- [21] 马君,刘剑平,潘校华,等.东非大陆边缘地质特征及油气勘探前景[J].世界地质,2008,27(4):400-405.
- [22] Lin S C, Kuo B Y, Chiao L Y, et al. Thermal plume models and melt generation in East Africa: A dynamic modeling approach[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 175-192.
- [23] 冯杨伟,屈红军,杨晨艺.澳大利亚西北陆架油气成藏主控因素与勘探方向[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(6):2259-2268.
- [24] Longley I M, Buessenschuett C, Clydsdale L, et al. The north west shelf of Australia—A Woodside perspective[C]//Keep M, Moss S J. *The Sedimentary Basins of Western Australia: Proceedings of the Petroleum Exploration Society of Australia Symposium*. Perth WA, 2002: 27-88.
- [25] Doré A G, Stewart I C. Similarities and differences in the tectonics of two passive margins: The northeast Atlantic margin and the Australian north west shelf[C]//Keep M, Moss S J. *The Sedimentary Basins of Western Australia: Proceedings of Petroleum Exploration Society of Australia Symposium*. Perth WA, 2002: 89-117.
- [26] Faleide J I, Tsikalas F, Breivik A J, et al. Structure and evolution of the continental margin off Norway and the Barents Sea[J]. *Episodes*, 2008, 31(1): 82-91.
- [27] 熊利平.西非构造演化及其对油气成藏的控制作用[J].石油与天然气地质,2005,25(6):25-29.
- [28] 冯杨伟,屈红军,张瑾爱,等.印度东部大陆边缘克里希纳—戈达瓦里盆地油气分布规律[J].西北大学学报:自然科学版,2016,46(3):408-414.
- [29] Katz B J, Dawson W C, Lira L M, et al. Petroleum systems of the Goose Delta, offshore Gabon[M]//Mello M R, Katz B J. *Petroleum systems of South Atlantic margins*. AAPG Memoir 73, 2000: 247-256.
- [30] Harris N B, Freeman K H, Pancost R D, et al. The character and origin of lacustrine source rocks in the Lower Cretaceous synrift section, Congo Basin, West Africa[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(8): 1163-1184.
- [31] Guardado L R, Spadini A R, Brandão J S L, et al. Petroleum system of the Campos Basin[M]//Mello M R, Katz B J. *Petroleum systems of South Atlantic margins*. AAPG Memoir 73, 2000: 317-324.
- [32] Contreras J, Zuhke R, Bowman S, et al. Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin (Campos, Santos and Pelotas basins)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 1952-1980.
- [33] Liu Jianping, Pan Xiaohua, Ma Jun, et al. Petroleum geology and resources in West Africa: An overview[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 5(3): 378-384.
- [34] 冯杨伟,屈红军,张功成,等.西非被动大陆边缘构造-沉积演化及其对生储盖的控制作用[J].海相油气地质,2010,15(3):45-51.
- [35] Walker T R. Deepwater and frontier exploration in Australia—Historical perspectives, present environment and likely future trends[J]. *The APPEA Journal*, 2007, 47(1): 15-38.
- [36] 张建球,钱桂华,郭念发.澳大利亚大型沉积盆地与油气成藏[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [37] Montgomery S L, Petty A J, Post P J. James Limestone, northeastern Gulf of Mexico: Refound opportunity in a Lower Cretaceous trend[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(3): 381-397.
- [38] Iturralde-Vinent M A. The conflicting paleontologic versus stratigraphic record of the formation of the Caribbean Seaway[M]//Bartolini C, Buffler R T, Blickwede J. *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, 2003: 75-88.
- [39] Magoon L B, Hudson T L, Cook H E. Pimienta-Tamabra(!)—A giant supercharged petroleum system in the southern Gulf of Mexico, onshore and offshore Mexico[M]//Bartolini C,

- Buffler R T, Cantu-Chapa A. The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins and petroleum systems. AAPG Memoir 75, 2001: 83-125.
- [40] Hood K C, Wenger L M, Gross O P, et al. Hydrocarbon systems analysis of the northern Gulf of Mexico: Delineation of hydrocarbon migration pathways using seeps and seismic imaging[M]// Schumacher D, LeSchack L A. Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetism, and remote sensing. AAPG Studies in Geology No.48 and SEG Geophysical References Series No.11, 2002: 25-40.
- [41] Guzman-Vega M A, Castro Ortiz L, Roman-Ramos J R, et al. Classification and origin of petroleum in the Mexican Gulf Coast Basin: An overview[M]// Bartolini C, Buffler R T, Cantu-Chapa A. The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins and petroleum systems. AAPG Memoir 75, 2001: 127-142.
- [42] Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(6): 753-780.
- [43] Evamy B D, Haremboure J, Kamerling P, et al. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger Delta[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62: 1-39.
- [44] Weber K J, Daukoru E. Petroleum geology of the Niger Delta [C]//Proceedings of the 9th World Petroleum Congress. London, 1979: 209-221.

编辑:董庸

Tectonic Evolution and Controls on Source Rock Development in Global Deep-water Area at Passive Continental Margin

Feng Yangwei, Zhang Gongcheng

Abstract: Deep-water hydrocarbon in passive continental margins is one of the hot and bright spots of global petroleum exploration. There are two types of passive continental margins, i.e. open sea, and marginal sea. The tectonic evolution of passive continental margin had experienced pre-rift stage, syn-rift stage and passive continental margin stage. Based on the current situation of exploration and exploitation, and the latest oil and gas fields database of petroliferous basins in global deep-water area at passive continental margin, the genetic models of source rocks in two types of passive continental margins, and the different tectonic evolution stages were summarized. At open passive continental margin, large scale restricted lakes developed in deep-water area during syn-rift stage, oil-productive lacustrine black argillite deposited regionally, being the major source rocks. At passive continental margins of marginal sea, larger scale river/wave dominated deltas developed in deep-water area during syn-rift stage, the major source rocks were transitional facies of argillite and coal strata, controlling the gas distribution. During passive continental margin stage, continuous transgression happened in basins at passive continental margins, organic-rich marine argillite deposited in anaerobic environment under high-water level system, forming major source rocks.

Key words: Passive continental margin; Basin type; Tectonic evolution; Deep-water area; Source rock

Feng Yangwei; DSc., Research Assistant. Add: Xi'an Center of Geological Survey, CGS, 438 Youyi Dong Rd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China