DOI:10.3969/j.issn.1672-9854.2016.01.009　　文章编号:1672-9854(2016)-01-0061-12

巴西深水盆地对比及油气成藏规律分析

于 璇[1,2], 侯贵廷[1,2], 代双河[3], 韩宇春[3], 谢结来[3]
(1 教育部造山带与地壳演化重点实验室; 2 北京大学地球与空间科学学院)
(3 中国石油东方地球物理勘探公司地质研究院)

摘　要　对巴西东部被动大陆边缘深水盆地群的构造演化和石油地质特征进行了系统性的对比分析,研究表明,盆地群经历了4个演化阶段:前裂谷阶段、同裂谷阶段、局限海过渡阶段和被动大陆边缘漂移阶段。受区域构造应力场、膏盐层、火山岩等方面的影响,各盆地表现出不同的盆地结构和构造样式,而膏盐层的发育对于油气成藏起着关键作用。这些盆地中,主要发育了三套烃源岩、三套储层和三套区域盖层,并形成了三种油气成藏类型:盐下裂谷地堑内的构造油气藏,膏盐层上下的碳酸盐岩油气藏,以及盐上的浊积岩构造—地层复合油气藏。根据成藏规律分析,并考虑各盆地的勘探现状,按勘探潜力由好到差的顺序将盆地划分为三类,指出Ⅰ、Ⅱ类潜力区应是主要勘探方向,具有广阔的油气资源前景。

关键词　巴西东部; 深水盆地; 油气成藏; 成藏规律; 油气潜力
中图分类号:TE122　　**文献标识码**:A

巴西东部被动大陆边缘和北美墨西哥湾以及西非几内亚湾, 一起被称为深水油气勘探的“黄金三角”[1]。巴西被动大陆边缘盆地群是世界上最大的被动大陆边缘盆地群之一, 并且其深水油气资源量占巴西油气总资源量的70%[2]。进入21世纪以来,巴西东海岸深水盆地群不断有重大发现, 使其逐渐成为了世界油气勘探的热点领域[2-5]。这些大发现使得巴西石油储量有望跃居世界第五, 仅次于沙特、伊朗、伊拉克和科威特等四国,成为名副其实的“新中东”。截至2013年底,巴西石油总储量已达22×10^8 t, 天然气 $6\,500\times10^8$ m^3[6]。

目前虽然在巴西东南部深水区已经取得重大勘探进展, 但对于巴西东部陆缘从南到北的系统性油气地质研究则相对薄弱。本文将在前人研究的基础上, 就巴西东部被动大陆边缘盆地群的构造演化和石油地质特征进行系统性的对比研究, 并总结和评价巴西深水盆地的油气富集规律和勘探潜力。这对促进我国石油企业开展巴西深水油气勘探领域的国际合作和深化了解被动大陆边缘盆地的油气成藏规律具有一定参考意义。

1　区域概况

1.1　盆地分布特征

巴西被动大陆边缘从北纬5°延伸至南纬35°,总长度超过8 000 km, 由北向南可划分出12个含油气沉积盆地(图1),它们分别是:亚马孙河口盆地(Foz do Amazonas)、帕拉—马拉尼昂(Para-Maranhao,以下简称“帕马盆地”)、巴雷里尼亚斯盆地(Barreirinhas)、皮奥伊—塞阿拉盆地(Piaui-Ceara,以下简称“皮塞盆地”)、波蒂瓜尔盆地(Potiguar)、塞尔希培-阿拉戈斯盆地(Sergipe-Alagoas,以下简称“塞阿盆地”)、卡玛姆—奥马达盆地(Camamu-Almada,以下简称“卡奥盆地”)、热基蒂尼奥尼盆地 (Jequitinhonha)、库穆鲁沙蒂巴盆地(Cumuruxatiba)、圣埃斯皮里图桑托盆地(Espirito Santo,以下简称“北桑托盆地”)、坎波斯盆地(Campos)和桑托斯盆地 (Santos) 盆地。这些盆地平行海岸延伸,被背斜隆起和巨大的基底突起隔开。已发现的大型油气田主要位于北桑托盆地、坎波斯盆地和桑托斯盆地,这三大盆地合称大坎波斯盆地(Big Campos),总面积达58.66×10^4 km^2,其中海上面积为 55.97×10^4 km^2。

收稿日期: 2014-05-06; 改回日期: 2015-07-14
本文受中国石油东方地球物理勘探公司“南美东部海域和非洲东部海域的盆地地质与油气地质综合分析”(编号:BGP201203564)资助
于璇: 1990年生, 博士研究生, 构造地质学专业。通讯地址: 100871 北京市海淀区颐和园路5号 北京大学地球与空间科学学院; E-mail: pkuyuxuan@pku.edu.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

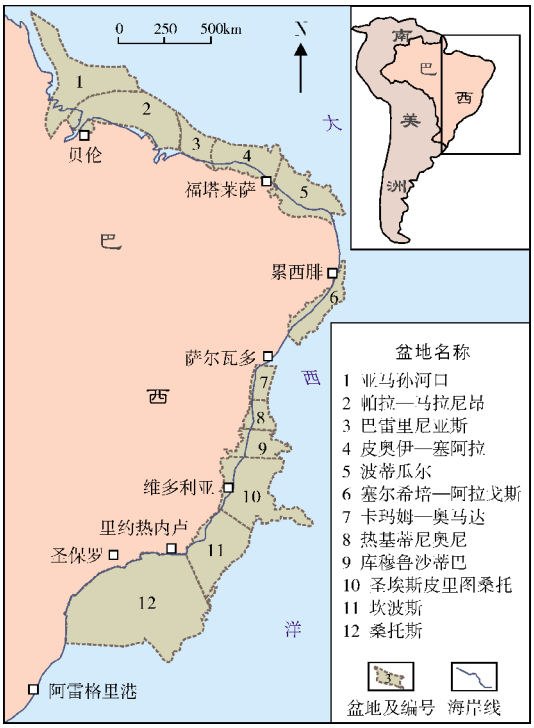

图1 巴西东部被动大陆边缘盆地分布图

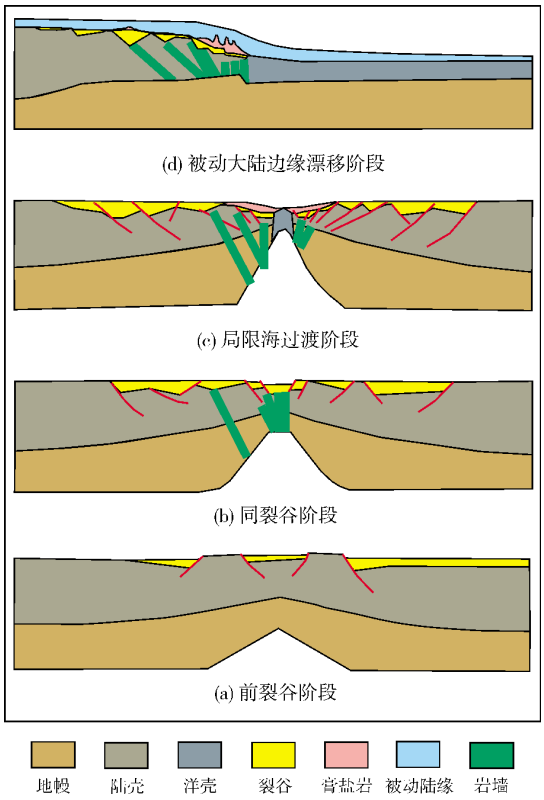

图 2 巴西东部被动大陆边缘演化模式图(据文献[14]修改)

1.2 构造与沉积演化

巴西东部被动大陆边缘盆地的形成和演化与冈瓦纳大陆的解体和随后的岩石圈伸展有关[7-10]。侏罗纪末期—白垩纪早期，西冈瓦纳大陆发育大陆裂谷系,随后南美洲与非洲分离,伴随着南大西洋扩张而形成两岸被动大陆边缘盆地群[11-12]。盆地演化经历了前裂谷阶段、同裂谷阶段、局限海过渡阶段以及被动大陆边缘漂移阶段[13](图2),发育了相应的沉积层序。

前裂谷阶段对应于盆地基底的形成时期(图2a),前寒武纪结晶基底以花岗岩和片麻岩为主，只有在塞阿盆地存在古生代地台沉积盖层[14-15]。

同裂谷阶段的沉积是随着西冈瓦纳大陆在晚侏罗世—早白垩世期间的裂解开始的[11]。坎波斯和桑托斯盆地的溢流玄武岩标志着南美板块最南端部分的裂谷作用的开始[16],并在巴西陆缘形成了北东—南西向的裂谷系统,而位于赤道附近的帕马盆地,直到晚白垩世才发生裂谷作用(图3)[17]。同裂谷阶段主要发育受正断层控制而形成的半地堑，并充填了河流—三角洲相的陆相巨层序(图2b),火山质和火山碎屑岩常以夹层的形式在这套层序中出现[14](图3),形成了同裂谷沉积层序。

局限海过渡阶段以岩石圈伸展减弱和海水向裂谷地堑的第一次海侵为特征,沉积了一套局限海相的碳酸盐岩或膏盐层,这套局限海过渡层序不整合于同裂谷层序之上,类似于现今的红海(图2c)。该套层系主要沉积在塞阿盆地至桑托斯盆地之间(图1,图3)。

被动大陆边缘漂移阶段是局限海继续扩张成大洋,盆地因热沉降而向海倾斜,从而导致差异压实,诱发了含盐盆地盐体的流动(图2d)。从晚白垩世到新生代早期，被动大陆边缘层序从下至上相继沉积了两套海相层序,下部以碳酸盐岩为主,上部以开阔海相碎屑岩为主[14](图3)。

2 盆地地质特征对比与油气富集规律

2.1 盆地地质特征对比

巴西东部海域各深水盆地具有成因上的一致性,但从现有的油气资源发现来看,各盆地的油气富

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

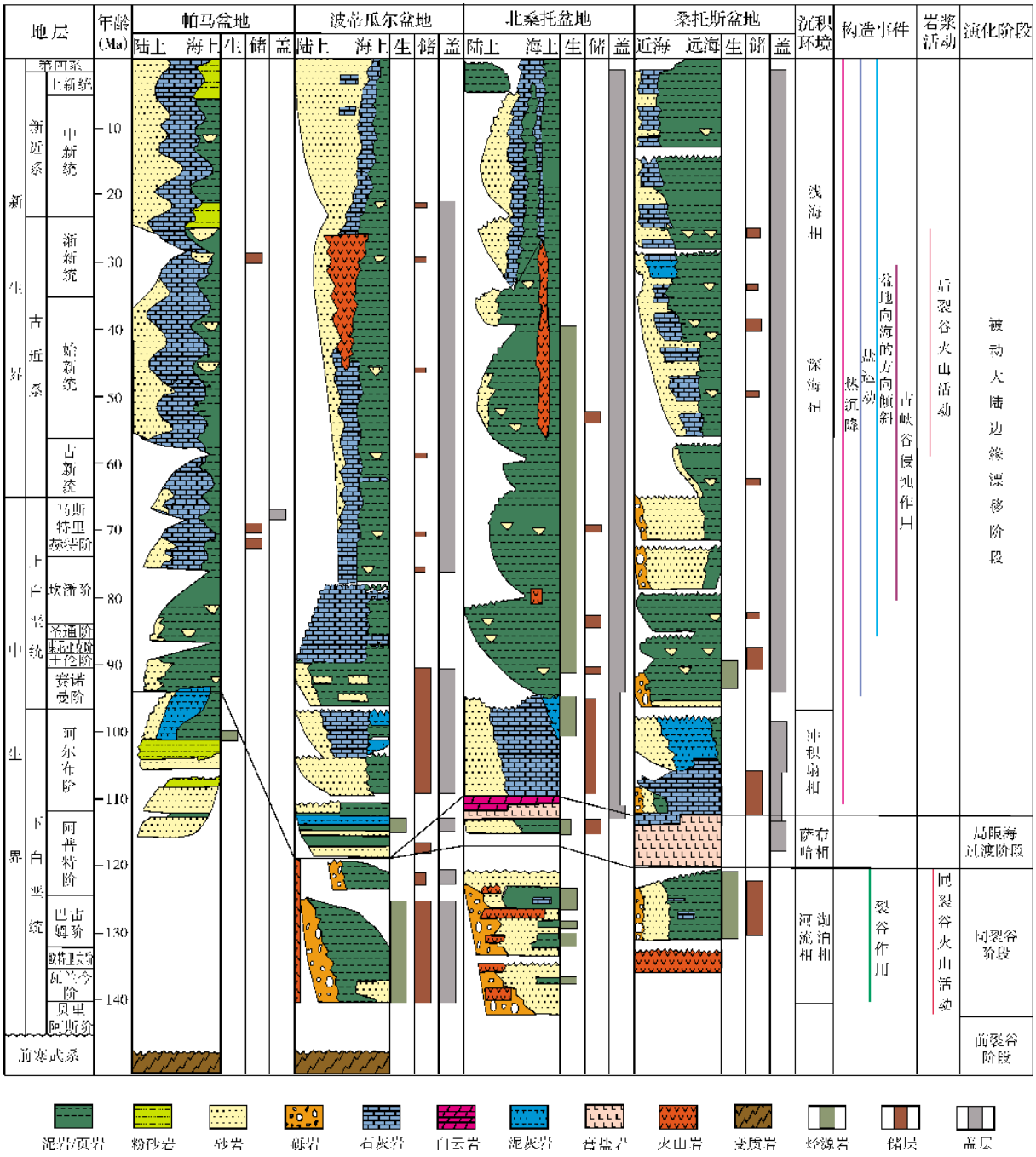

图3 巴西东部被动大陆边缘盆地综合柱状图对比(据文献[18]编绘)

集规律存在着差异。由于受到区域构造应力场、火山岩、膏盐层、局部隆起等方面的影响,从而造成了盆地间局部演化的差异。因此,进行盆地间的地质特征对比有利于摸清盆地油气成藏规律。

2.1.1 构造特征与构造样式

在早白垩世大西洋裂解初期,即同裂谷阶段初始,南美大陆顺时针旋转,而非洲大陆逆时针旋转[19](图4)。130Ma—107Ma以来非洲板块相对于南美板块的运动矢量显示,以贝努埃裂谷为轴,该轴以北为挤压应力,该轴以南为拉张应力,且越向南北两侧,其相对运动矢量越大。这表明在同裂谷阶段的中后期,巴西东部的塞阿盆地至桑托斯盆地和西非各

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

盆地受近东西向拉张作用的控制，非洲板块西北部与巴西东北陆缘之间为挤压状态，而在非洲中部的尼日尔三角洲地区处在伸展与挤压过渡的调节带上，发育着贝努埃裂谷[20-21]。据此，将巴西被动大陆边缘划分为巴西东部—西非伸展区、贝努埃剪切—伸展区以及赤道挤压区（图4）。随着南大西洋的发育，海水由南向北灌入，巴西东部—西非伸展区最先张开，这有利于沉积物的率先充填和厚层烃源岩的发育。贝努埃剪切—伸展区在大陆裂解时受到转换断层的控制，在张裂变形中伴随有较大的走滑剪切分量，因此陆架较窄[22]。而北部赤道挤压区受北东—南西向挤压应力的控制，盆地形成较晚，并且易受到构造破坏，客观上不利于沉积物的充填和油气的聚集保存[23]。

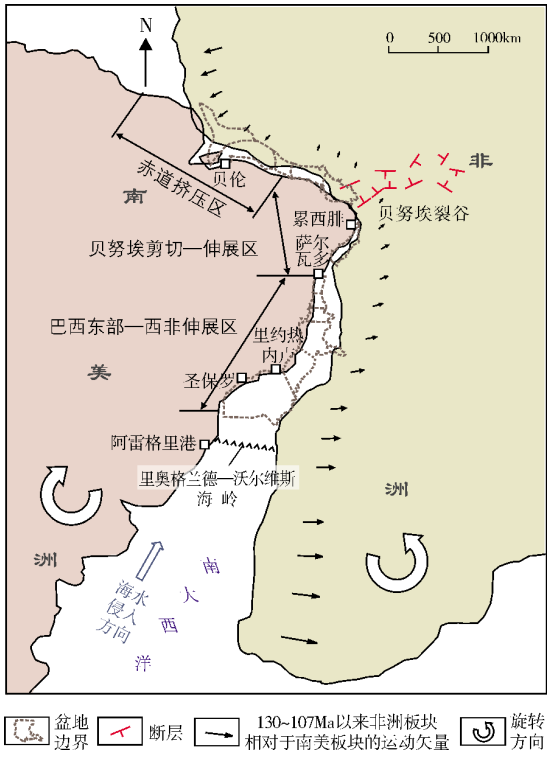

图4 巴西东部早白垩世(107Ma)区域应力状态示意图(据文献[21,24]编绘)

南大西洋扩张的差异性导致在巴西陆缘发育宽窄不一的陆架(图5)。位于伸展环境下的卡奥盆地以南的大陆边缘裂谷较宽，坡度较缓，基底正断层垂直断距一般为0.5~2 km，陆架宽度最大的可达600 km(如桑托斯盆地)[25]。处于剪切—伸展环境下的东北部则发育狭窄大陆边缘，裂谷较窄，坡度较陡，从海岸线到3000 m水深处不超过50 km（如塞阿盆地)[25]。宽窄陆架之间通常以大型转换断裂带作为调节，如皮塞盆地东部的Romanche断裂带和北桑托盆地东部的Vitoria-Trindade断裂带(图5)。

大陆边缘的构造特征直接影响了盆地的结构和构造样式。巴西东部海域所有盆地的区域剖面都显示了同裂谷层序和被动大陆边缘层序，但在塞阿盆地以南的各盆地还发育包括膏盐层在内的过渡层序(图5)，总体表现为“下伏裂谷盆地+上覆被动大陆边缘盆地”的模式。各盆地在同裂谷阶段的构造以简单的阶梯状正断层、地堑、半地堑和掀斜断块构造等伸展构造样式为主(见图5中的①—⑧剖面)。被动大陆边缘阶段的构造样式表现为受差异压实和重力滑塌而形成的生长断层和滚动背斜等挤压构造样式，主要发育在膏盐岩或泥页岩发生滑动的深水地区，称为深水褶皱带，多数位于盆地的深水区，例如：亚马孙河口盆地、巴雷里尼亚斯盆地、坎波斯盆地、桑托斯盆地的深水区[26](见图5中的①、②、⑦、⑧剖面)；在塞阿盆地以南的各盆地还常发育底劈构造等与盐相关的构造，主要表现为初期的盐枕和充分发育的盐丘(见图5中的④—⑧剖面)。

2.1.2 膏盐岩发育特征

巴西陆缘含盐盆地共有七个，呈南北向展布，因这些含盐盆地中的盐发育在116~110 Ma的局限海过渡阶段，地质时期主要为阿普特期，故这些含盐盆地又称为“阿普特盐盆”(Aptian Salt Basins)(图5)。盐盆中盐的发育时间总体具有先北后南的规律，分布范围具有南宽北窄的特点[17](图5，表1)，发育厚度整体上表现为从北向南增厚的规律，桑托斯盆地的膏盐层厚度可达2 500 m。各含盐盆地内的隆凹构造格局导致了膏盐层厚度和分布呈不规则状，膏盐岩主要聚集于盆地的凹陷内，而且在盐盆内自西而东，膏盐岩的厚度也是增大的[17]。

膏盐岩的发育程度和分布特征对于油气的生成、运移、成藏和保存起着至关重要的作用。首先，在膏盐岩形成的初期，下伏的暗色泥岩与氧气隔绝，防止了早期沉积物的氧化分解，有利于有机物的保存，并且厚度大的膏盐层可以形成热流屏蔽，使其下伏的热流值偏高，有利于有机质的排烃转化[27]。其次，膏盐层为塑性的软弱层，在差异压实的情况下易形成盐相关构造，油气可沿着膏盐岩蠕变形成的塑性

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

断层运移并聚集成藏。Adam等[28]通过对热基蒂尼奥尼盆地盐构造的物理模拟得出:该盆地的演化和盐构造主要与被动大陆边缘层序的重力滑塌作用有关,盐体流动在深海地区形成的深水褶皱带有利于形成良好的油气藏圈闭;并且,膏盐层岩性致密,稳定的膏盐层对盐下的油气具有极强的封盖能力。

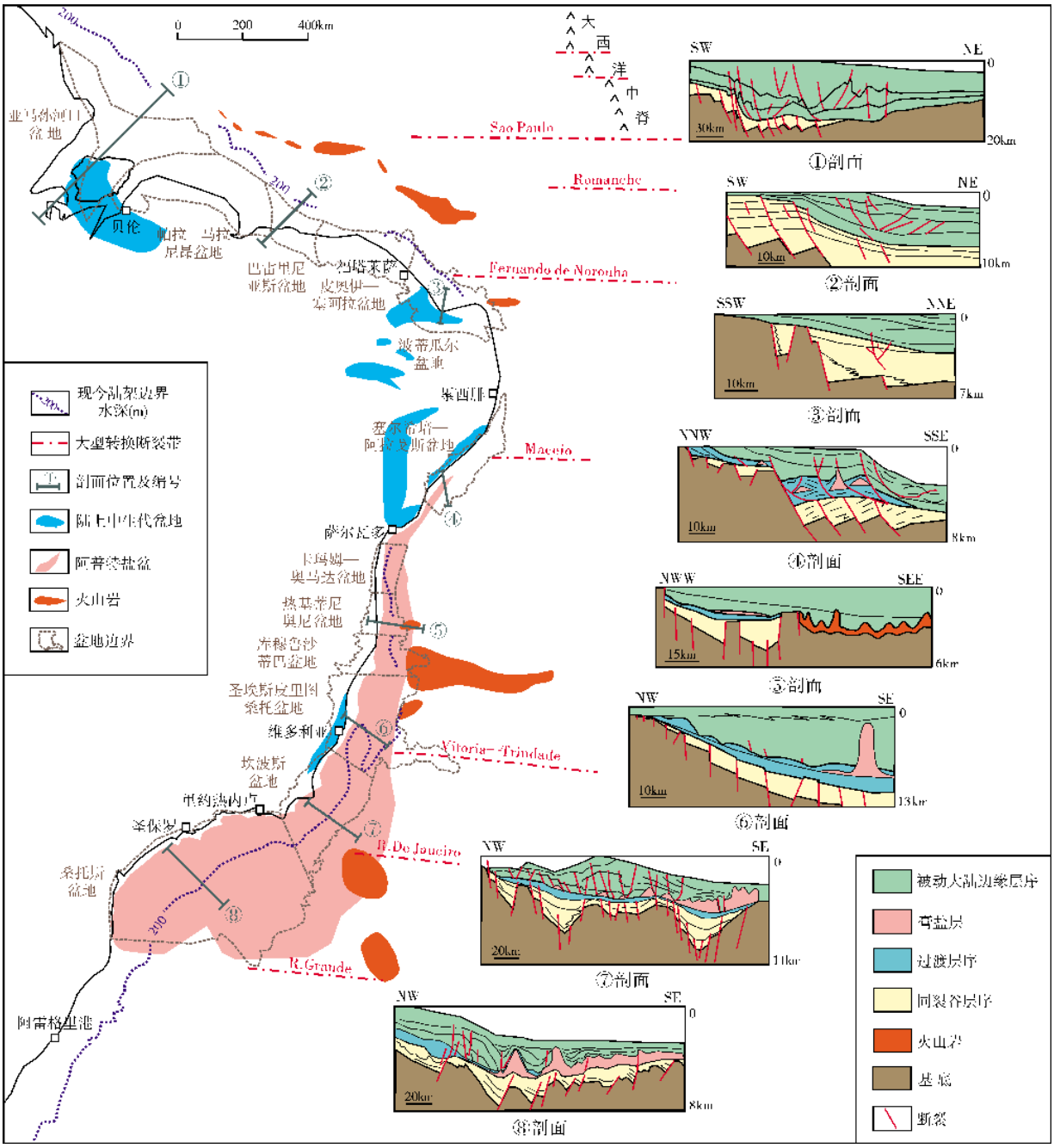

图5 巴西东部被动大陆边缘构造纲要及盆地结构(据文献[7,13,25]编绘)

2.1.3 火山岩分布特征

巴西被动大陆边缘在性质上属于典型的火山型被动大陆边缘,在这种大陆边缘发育过程中常伴随有强烈的岩浆活动[29]。巴西东部陆缘主要发育有两期火山活动:一期是在早白垩世的同裂谷阶段,与冈瓦纳大陆裂解有关;另一期是在新生代的被动大陆

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

边缘阶段,与南美板块和非洲板块的漂移有关[13]。在各盆地被动大陆边缘层序中,含有新生代火山岩地层的盆地有6个,分别是巴雷里尼亚斯、皮塞盆地、波蒂瓜尔盆地、热基蒂尼奥尼盆地、库穆鲁沙蒂巴盆地和北桑托盆地。火山岩发育在古新世到中新世(大致60~10 Ma),整体上具有从南向北变年轻的趋势(表1)。

表 1 巴西东部海域盆地地质特征对比表(据文献[18]总结)

盆地名称	同裂谷起始时刻(Ma)	裂谷主要构造性质	盐发育时期	漂移阶段起始时刻(Ma)	同裂谷反转构造	火山岩发育时代(Ma)
亚马孙河口	128	伸展—走滑	—	102	有	—
帕拉—马拉尼昂	118	伸展—走滑	—	90.4	有	—
巴雷里尼亚斯	112	伸展—走滑	—	90.4	有	46~38
皮奥伊—塞阿拉	124.5	伸展—走滑	—	107	有	30~10
波蒂瓜尔	145.6	伸展—走滑	—	120	有	46~26
塞尔希培—阿拉戈斯	135	伸展—走滑	阿普特期	112	无	—
卡玛姆—奥马达	142.5	伸 展	阿普特期	112	无	—
热基蒂尼奥尼	145.6	伸 展	阿普特期	112	无	60.5~35
库穆鲁沙蒂巴	145.6	伸 展	阿普特期	110	无	65~23
圣埃斯皮里图桑托	140.7	伸 展	阿普特期	110	无	60.5~35
坎波斯	135	伸 展	阿普特期	107	无	—
桑托斯	135	伸 展	阿普特期	112	无	—

这两期火山岩的发育对于油气的形成、储集和成藏起到了积极的作用。在烃源岩成熟阶段,与火山岩相邻的暗色泥岩会产生大量的有机酸性水,沿层间断裂、裂缝渗入火山岩,发生溶蚀作用,产生溶蚀孔、缝,从而改善了火山岩的储集性能,例如:坎波斯盆地的下白垩统瓦兰今阶 Cabinunas 组玄武岩储集层。此外,火山岩的异常热效应提高了盆地的地温梯度,加速了有机质热演化,可促使有机质早熟排烃。在古新世至中新世期间发生的岩浆活动事件可以促进盆地的新生代变形,以库穆鲁沙蒂巴盆地为例,古新世至始新世期间发生的 Abrolhos 火山岩以整合的形式(岩床)出现在同构造沉积物中,火山岩的发育引发的局部差异载荷可以诱发盐构造的形成[30],从而在盆地深水区形成与逆冲断层相关的滚动背斜,有利于圈闭的形成。

2.2 成藏条件对比分析

2.2.1 烃源岩对比

大西洋两侧各含油气盆地的储层均十分发育,各盆地油气富集程度的差异主要取决于烃源岩发育的厚度和烃源岩类型的差异,即“源控”,例如:坎波斯盆地、桑托斯盆地和西非的宽扎盆地、尼日尔三角洲盆地是厚层优质烃源岩发育区,因此成为南大西洋两侧最富集的含油气盆地。南大西洋两侧盆地的烃源岩具有近源性[31],例如:在坎波斯盆地和安哥拉的宽扎盆地同为一套以重碳同位素组分为特征的湖相 A 型烃源岩;在卡奥盆地、加蓬南部和安哥拉北部陆缘同为一套以低硫组分、中等到轻碳同位素组分为特征的湖相 B 型烃源岩;而塞阿盆地与加蓬盆地的烃源岩均属于过渡相,可见两岸盆地烃源岩可以类比(图 6)。

巴西陆缘东部海域的各盆地主力烃源岩总有机碳含量 TOC 一般均大于 1%(表 2),主要发育有三套。第一套烃源岩为发育在同裂谷期的湖相泥页岩,主要分布在桑托斯盆地、坎波斯盆地和北桑托盆地的下白垩统 Lagoa Feia 组。该套湖相烃源岩干酪根类型为 I 型或 II 型,平均总有机碳含量一般在1%~5%,镜质组反射率一般在 0.5%~1.5%,主要处于成熟阶段 (表 2)。巴西海岸各盆地发现的原油中有95%来自于该套湖相烃源岩,而该套烃源岩的原油可采储量有 61.35×10^8 t,是巴西深水盆地最重要的烃源岩[18,32]。

第二套烃源岩是在局限海过渡阶段—被动大陆边缘漂移阶段早期(阿普特期—晚白垩世晚期)河流三角洲、滨岸沼泽、浅海及半封闭环境中沉积的页岩和泥灰岩等,其干酪根类型为 I 型或 II 型,如:帕马盆地的下白垩统 Caju 群以及巴雷里尼亚斯盆地的下白垩统 Arpoador 组(图 6,表 2)。该套过渡环境下沉积的烃源岩质量也很高,以塞阿盆地为例,其下白

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

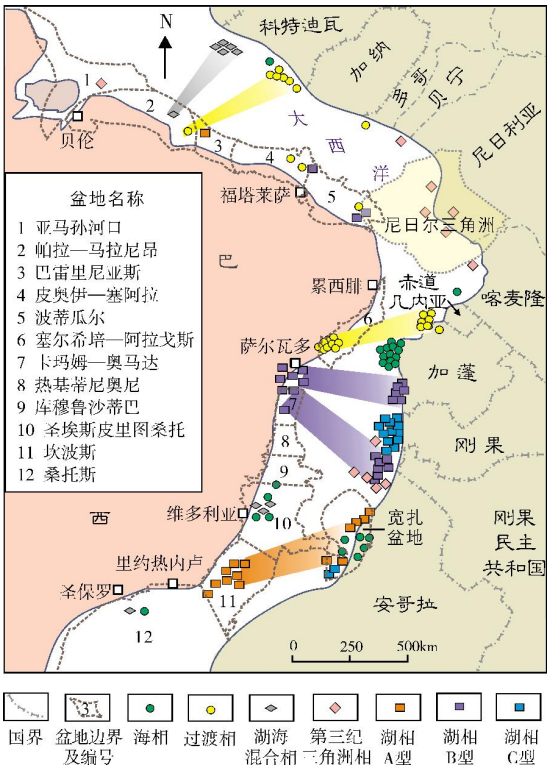

图 6 巴西东部烃源岩类型分布特征及其与非洲西海岸烃源岩类型对比图(据文献[31]修改)

湖湘烃源岩主要由藻类干酪根组成,其中,湖湘 A 型烃源岩以重碳同位素组分为特征,湖湘 B 型烃源岩以低硫、中等到轻碳同位素为特征,湖湘 C 型烃源岩以中等碳同位素组分为特征

亚统阿普特阶Ibura段黑色页岩平均厚度达到200 m,总有机碳含量平均为3.5%,最高可达12%[33]。

第三套烃源岩为被动大陆边缘漂移阶段晚期(晚白垩世晚期—渐新世)的海相页岩,该套烃源岩在各深水盆地均有广泛的分布,其总有机碳含量TOC一般小于1%,干酪根为Ⅲ型,但是由于埋深不足,一般均未成熟,只有在埋深较大处的烃源岩才可能有生气潜力[33]。

2.2.2 储集层对比

从巴西陆缘的东北部向南,大陆架的宽度逐渐增宽,沉积物的体量也随之增大。到坎波斯盆地,陆架宽度超过了300 km,沉积盖层厚度可达6~7 km,巨大的沉积体量也为油气提供了丰富的物质基础和广阔的储集空间。总的来看,巴西东部被动大陆边缘深水盆地发育了三套主力储层(表2):

第一套为同裂谷阶段发育的河流—湖泊相砂砾岩储层。如卡奥盆地下白垩统Morro do Barro 组湖相砂岩,平均孔隙度为26%,平均渗透率达到2 400×10^{-3} μm^2(表2)。

第二套为局限海过渡阶段和被动大陆边缘漂移阶段早期的台地相或浅海相碳酸盐岩储层。该套储层主要分布在亚马孙河口盆地、帕马盆地、坎波斯盆地、桑托斯盆地(表2)。以坎波斯盆地为例,阿尔布阶—赛诺曼阶Macae群碳酸盐岩是一套浅水陆架碳酸盐岩储集层,沉积于高能环境的颗粒灰岩的孔隙度为12%~15%,渗透率平均为120×10^{-3} μm^2[34]。在桑托斯盆地,近年来的重大油气发现都是以盐下碳酸盐岩为储集层,这套储集层内的油气储量占盆地油气总储量的76.6%[18]。

第三套为被动大陆边缘漂移阶段晚期的三角洲相砂岩或海相浊积砂岩储层。该套储层在巴西东部各盆地海域中广泛分布,以北桑托盆地为例,上白垩统—始新统Urucutuca组浊积砂岩是其主要的油气产层,该套主力储集层的油气储量占盆地油气总储量的93.4%。储层孔隙度一般为15%~27%,渗透率介于(60~500)×10^{-3} μm^2之间(表2)。

从已发现的油气田来看,油气产层主要集中在阿尔布阶—赛诺曼阶Macae群或Guaruja组碳酸盐岩和盐上被动陆缘漂移阶段的上白垩统—始新统海相浊积砂岩中[35-37]。

2.2.3 盖层分布及生储盖组合

同裂谷层序的下白垩统 Lagoa Feia 组的湖相页岩、局限海过渡层序的阿普特阶膏盐岩以及被动大陆边缘层序的上白垩统—始新统 Ubarana 组(或 Carapebus 组、或 Ubatuba 组)海相页岩是巴西东部深水盆地三套稳定的区域性盖层,它们对于油气的保存起到了至关重要的作用。

同裂谷层序内的下白垩统Lagoa Feia组湖相页岩既可以作为烃源岩,也可以作为盖层。在坎波斯盆地,由于裂谷内发育下白垩统欧特里夫阶Cabiunas组玄武岩中的裂缝型储层,故形成了新生古储的生储盖组合。

局限海过渡层序内的碳酸盐岩和膏盐岩形成了连续的生储盖组合,广泛分布的高致密性的膏盐岩直接覆盖在碳酸盐岩之上,在不发育盐窗的地区就可以形成高效封堵。这一类的生储盖组合在桑托斯盆地最为常见,因为该盆地膏盐层较厚,最厚可达2 500 m,可以有效封盖盐下储集层[36]。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表2　巴西东部盆地海域石油地质特征对比表(据文献[18]总结)

盆地名称	主力烃源岩					主力储层				盖　层	
	地层时代	沉积相	干酪根类型	*TOC* (%)	R_o (%)	地层时代	沉积相	平均孔隙度 (%)	渗透率 ($\times10^{-3}\mu m^2$)	地层时代	沉积相
亚马孙河口	K_2 Limociro组	海相页岩	Ⅱ型	1~5	—	E_1—N_1 Amapa组	浅海相碳酸盐岩	6	—	N_1—Q_4 Pirarucu组	三角洲相页岩
帕拉—马拉尼昂	K_1 Gaju群	过渡相页岩	Ⅰ和Ⅱ型	0.5~1	—	K_1 Travosas组 Ilha de Santana组	台地相碳酸盐岩	—	—	K_1 Travosas组 K_2 Ilha de Santana组	局限海页岩 浅海致密碳酸盐岩
巴雷里尼亚斯	K_1 Arpoador组	过渡相页岩	—	—	—	K_1 Bom Gosto组	河流相— 三角洲相砂岩	20~28	—	K_1 Tutoia组页岩 K_2 Preguicas组	海相页岩
皮奥伊—塞阿拉	K_1 Paracuru组	湖相页岩	Ⅱ型	1.0~4.1	—	K_1 Paracuru组	三角洲相砂岩	21~23	150~600	K_1 Paracuru组 K_2 Ubarana组	湖相页岩 海相页岩
波蒂瓜尔	K_1 Pendencia组	湖相页岩	Ⅰ型和Ⅱ型	5	0.5~1.0	K_1 Pendencia组	河流相— 三角洲相砂砾岩	18~24	50~500	K_1 Pendencia组 K_1 Alagamar组	湖相页岩 过渡相页岩
塞尔希培—阿拉戈斯	K_1 Ibura段	过渡相页岩	Ⅰ型和Ⅱ型	3.5	0.7~1.2	K_1 Carmopolis段	河流相砂砾岩、 三角洲相砂岩	15	1~1000	E_2—Q_4 Calumbi组	海相页岩
卡玛姆—奥马达	K_1 Morro do Barro组	湖相页岩	—	2~10	<0.6%	K_1 Morro do Barro 组	河道砂岩、 湖相浊积砂岩	26	2400	K_1 Rio de Contas K_1 Taipus-Mirim组	湖相页岩 膏盐岩
热基蒂尼奥尼	K_1 Cricare组	湖相页岩	Ⅰ型和Ⅱ型	1	0.6~1.4	K_1 Mucuri段	浅海相—陆相 砂岩	13	158	K_1 Mariricu组 K_2—Q_4 Urucutuca组	膏盐岩 海相页岩
库穆鲁沙蒂巴	K_1 Cricare组	湖相页岩	Ⅱ型	1	0.6~1.4	K_2—E_3 Urucutuca组	海相浊积砂岩、 海相碳酸盐岩	20~27	60~500	K_1 Mariricu组 K_2—Q_4Urucutuca组	膏盐岩 海相页岩
圣埃斯皮里图桑托	K_1 Cricare组	湖相页岩	Ⅰ型和Ⅱ型	4	0.6~1.4	K_2—E_3 Urucutuca组 K_1 Macae群	海相浊积砂岩、 台地相碳酸盐岩	15~27	60~500	K_1 Mariricu组 K_2—Q_4 Urucutuca组	膏盐岩 海相页岩
坎波斯	K_1 Lagao Feia组	湖相页岩	Ⅰ型	2~6	0.7~1.2	K_2—E_3 Carapebus组 K_1 Macae群	海相浊积砂岩、 台地相碳酸盐岩	20~30	700~1 000	K_1 Lagao Feia组 K_1 Mariricu组 K_2—Q_4 Carapebus组	湖相页岩 膏盐岩 海相页岩
桑托斯	K_1 Guaratiba组	湖相页岩	Ⅰ型	0.4~1.8	0.5~2	K_1 Guaratiba组 K_1 Guaruja组	河流相砂砾岩、 台地相碳酸盐岩	5~15	1~1300	K_1 Lagao Feia组 K_1 Mariricu组 K_2—Q_4 Urucutuca组	湖相页岩 膏盐岩 海相页岩

Q_4 全新统；N_1 中新统；E_3 渐新统；E_1 古新统；K_2 上白垩统；K_1 下白垩统

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

被动大陆边缘层序内的海相深水浊积砂体本身就具有“泥包砂”的特征,砂岩储层内的油气被多套海相页岩所封存[38],从而形成了以上白垩统—始新统Carapebus组浊积砂岩为储集层、以层间的海相页岩层为盖层的下生上储连续的生储盖组合。此外,同裂谷层序或局限海过渡层序中烃源岩形成的油气也可以沿着断层或不整合面向上运移到第三系浊积砂体内,并被海相页岩封盖,从而形成下生上储不连续的生储盖组合[39],该生储盖组合在巴西东北部不含盐盆地或含盐盆地中盐构造发育的地区较为常见,平面上主要分布在大陆架外围的深水地区。

2.2.4 圈闭类型与成藏模式

巴西东部被动大陆边缘盆地发现的油气藏圈闭类型丰富,包括构造圈闭、构造—地层复合圈闭和地层圈闭,所占比例分别为42%、38%和16%[40]。其中构造—地层复合圈闭是最重要的圈闭类型,近年来发现的巨型油气田多为构造—地层复合圈闭油气藏。巴西深水盆地主要发育3种油气成藏类型:盐下同裂谷油气藏、过渡层序碳酸盐岩油气藏以及被动大陆边缘浊积岩油气藏。

同裂谷层序内的圈闭类型主要为构造圈闭,包括断块圈闭、基底披覆背斜圈闭和断层遮挡圈闭,局部还可以形成玄武岩裂缝型油气藏[41](如图 7 中的圈闭类型①—④)。过渡层序内的油气藏圈闭类型以碳酸盐岩岩性圈闭为主(图 7b 中的圈闭类型⑤),例如坎波斯盆地的 Macae 群碳酸盐岩油气藏。被动大陆边缘层序内的油气藏圈闭类型较为多样:对于巴西东北部不含盐盆地,圈闭类型主要以构造—地层复合圈闭为主,地层圈闭为辅,常发育砂岩透镜体圈闭、滚动背斜圈闭和深水区与逆冲断层相关的断层圈闭等[42](图 7a 中的圈闭类型⑨—⑩);对于巴西东部含盐盆地,盐构造形成的铲形断层构成了油气垂向运移通道,从而表现为“断层+盐刺穿”式的盐上浊积岩油气运移成藏模式[43],主要发育断层遮挡型和盐丘遮挡型盐构造圈闭(图 7b 中的圈闭类型⑥—⑦)。此外,膏盐层的厚度也直接影响了油气成藏的位置。桑托斯盆地的油气发现主要位于盐下(巨厚的膏盐层阻止油气向上运移),而北桑托盆地的大油气田主要分布于盐上,原因在于膏盐层较薄地区更容易发育盐构造,其形成的盐构造窗可以有效沟通盐下裂谷期的烃源岩,使得油气顺断层向上运移,在盐上保存条件好的深水浊积砂体中富集成藏[44]。在深

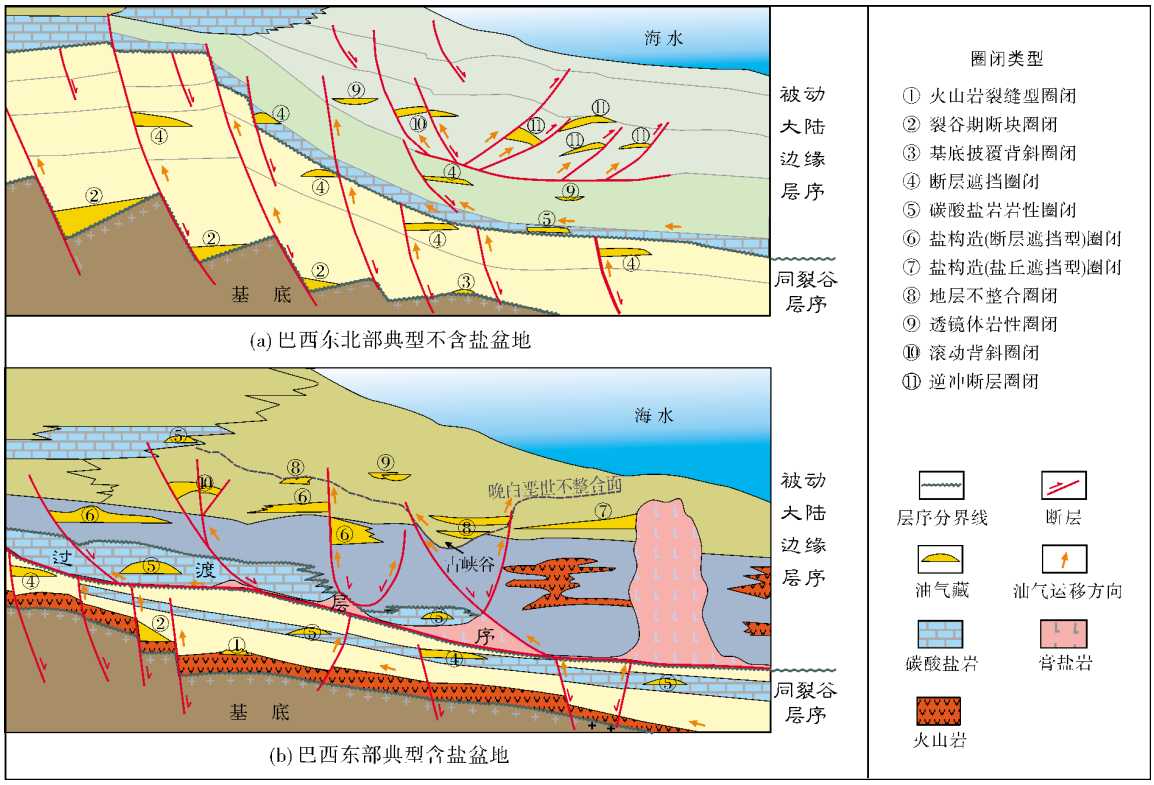

图7 巴西东部深水盆地圈闭类型及油气成藏模式对比图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

水地区,由于同裂谷层序和过渡层序的减薄和消失,圈闭类型主要转为被动大陆边缘层序内与深水沉积相关的浊积岩、古水道、远端扇等地层岩性圈闭[45],主要发育地层不整合圈闭、透镜体岩性圈闭以及滚动背斜圈闭等(图7b中的圈闭类型⑧—⑩)。由上述分析,建立了巴西东北部典型不含盐盆地成藏模式(图7a)和巴西东部典型含盐盆地成藏模式(图7b),从图中可以看出,膏盐岩的发育对于油气成藏起到了关键性的作用。

3 勘探潜力分析及方向

巴西深水盆地的油气资源十分丰富,但油气富集程度差异巨大。截至2013年底,12个盆地的石油和天然气累积剩余可采储量合计达到55 542.4 MMBOE(MMBOE:百万桶油当量),其中石油44 102.2 MMBOE,天然气 11 440.2 MMBOE,油气比为 3.9:1[6]。而塞阿盆地及其以南的 7 个含盐盆地的油气剩余可采储量 54 720.8 MMBOE,占总剩余可采储量的 98.5%[38],可见膏盐层的发育对盆地油气成藏具有十分重要的影响。结合上文对于巴西被动大陆边缘各盆地构造沉积演化差异性的对比和石油地质特征的认识,以及对盆地成藏规律的总结,并考虑各盆地的勘探现状,现按勘探潜力由好到差将盆地划分为三个类别(图 8):

Ⅰ类潜力区　坎波斯盆地、桑托斯盆地、北桑托盆地(图 8)。这三个盆地的大陆架最宽,石油地质条件最为优越,盐上和盐下都具备油气成藏的有利条件。考虑到该地区湖相烃源岩质量很高,膏盐层很厚,同裂谷层序体量较大,油气保存条件非常好,故建议优先勘探盐下储层。其中,北桑托盆地由于盐构造发育,建议重点勘探其深水区盐构造之上的上白垩统—渐新统浊积砂岩储层。2002~2012 年,仅坎波斯盆地就新发现 15 个油气田,可采储量超过 7×10^8t(约 51 亿桶)[37],表明这类盆地仍然是未来优先勘探的重点区域。

Ⅱ类潜力区　塞阿盆地、卡奥盆地、热基蒂尼奥尼盆地、库穆鲁沙蒂巴盆地、波蒂瓜尔盆地以及皮塞盆地(图 8)。前 4 个盆地都是含盐盆地,盐层厚度较薄,目前虽然只有少量的发现,但盆地具有多套含油气系统,特别是同裂谷层序内的油气藏,生储盖配置较好,具有一定的勘探前景。建议重点关注位于掀斜断块中的构造油气藏、可能发育在砂岩和碳酸盐岩储层中的白垩系油藏、以及可能发育在河流—三角洲河床砂以及礁灰岩中的第三系油气藏。波蒂瓜尔

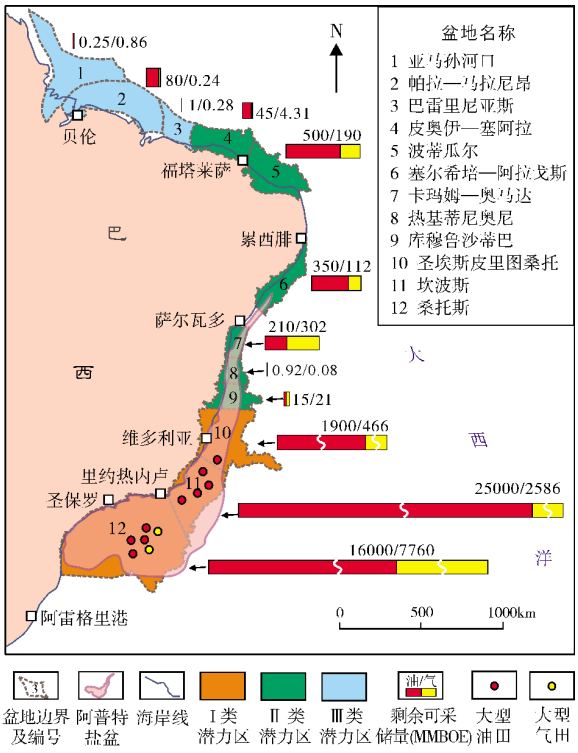

图 8　巴西深水盆地油气潜力综合评价图

盆地的陆上部分是巴西最主要的产油区之一,但是海上部分勘探水平相对较低,潜在的靶区是海上上白垩统—第三系 Ubarana 组浊积岩。皮塞盆地烃源岩质量高,盆地在湖相页岩初始生油之后形成了众多的构造圈闭;2012 年 12 月,在塞阿盆地距离海岸 85 km、水深 2 583 m 的深水区钻遇了 67 m 厚的油柱,显示了其广阔的勘探前景。

Ⅲ类潜力区　亚马孙河口盆地、帕马盆地、巴雷里尼亚斯盆地(图 8)。这三个盆地处于构造挤压区,不利于烃源岩的发育。目前缺乏烃源岩的相关信息,已知的砂岩储层物性较差,并且圈闭被分割破坏,这些都使得该类盆地具有极高的勘探风险。但勘探程度低并不表示该类盆地潜力小,在法属圭亚那发现众多石油资源后,与之相邻的亚马孙河口盆地的油气资源潜力已得到了国际石油公司的重视。目前巴西陆缘赤道挤压区(图 4)只有六口深水井[46],因此加强深水勘探投入以建立近岸和深水地区的年代地层框架是提高对巴西东北部陆缘盆地石油地质特征认识和降低勘探风险的关键。

致谢:在此感谢北京大学地球与空间科学学院鞠玮博士在成文过程中的有益讨论。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

参 考 文 献

[1] 林闻,周金应. 世界深水油气勘探新进展与南海北部深水油气勘探[J]. 石油物探,2009,48(6):601-605.

[2] 朱伟林,白国平,胡根成,等. 南美洲含油气盆地[M]. 北京:科学出版社,2012.

[3] 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.

[4] Bradley D C. Passive margins through earth history[J]. Earth-Science Reviews, 2008, 91(1):1-26.

[5] Levell B, Argent J, Dore A G, et al. Passive margins: overview [C]//Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers—Proceeding of the 7th Petroleum Geology Conference, London: Geological Society, 2010.

[6] BP. Statistical review of world energy [M]. London: BP, 2014.

[7] Blaich O A, Faleide J I, Tsikalas F. Crustal breakup and continent-ocean transition at South Atlantic conjugate margins[J]. Journal of Geophysical Research,2011,116(B1):1-38.

[8] Chaboureau A C, Guillocheau F, Robin C, et al. Paleogeographic evolution of the central segment of the South Atlantic during Early Cretaceous times: Paleotopographic and geodynamic implications [J]. Tectonophysics, 2013, 604(5):191-223.

[9] 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.

[10] Nurnberg D, Muller R D. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present[J]. Tectonophysics, 1991,191(1):27-53.

[11] Aslanian D, Moulin M, Olivet J L, et al. Brazilian and African passive margins of the Central Segment of the South Atlantic Ocean: Kinematic constraints[J]. Tectonophysics,2009,468 (1/4):98-112.

[12] Bley de Brito Neves B. Main stages of the development of the sedimentary basins of South America and their relationship with the tectonics of supercontinents[J]. Gondwana Research, 2002,5(1):175-196.

[13] Ojeda H A O. Structural framework,stratigraphy,and evolution of Brazilian marginal basins[J]. AAPG Bulletin,1982,66(6): 732-749.

[14] Cainelli C, Mohriak W U. Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the Eastern Brazilian continental margin[J]. Episodes,1999,22(3):206-216.

[15] Забанабарк А. 巴西大陆边缘含油气盆地特征[J]. 朱佛宏,译. 海洋石油,2002,(4):74-79.

[16] O'Connor J M, Duncan R A. Evolution of the Walvis Ridge-Rio Grande Rise hot spot system: Implications for African and South American Plate motions over plumes[J]. Journal of Geophysical Research,1990,95(B11):17475-17502.

[17] Torsvik T H, Rousse S, Labails C, et al. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin[J]. Geophysical Journal International, 2009,177(3):1315-1333.

[18] IHS Energy Group. International petroleum exploration and production database[DB]. IHS Energy Group,2012.

[19] Katz B J, Mello M R. Petroleum Systems of South Atlantic Marginal Basins—An Overview[G]// Mello M R, Katz B J. Petroleum System of South Atlantic Margins. AAPG Memoir 73,2000:1-13.

[20] Franke D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins[J]. Marine and Petroleum Geology,2013,43:63-87.

[21] Castro J R. Structural evolution of the Sergipe-Alagoas Basin, Brazil[D]. Houston: Rice University,1989.

[22] 张光亚,温志新,梁英波,等. 全球被动陆缘盆地构造沉积与油气成藏:以南大西洋周缘盆地为例[J]. 地学前缘,2014,21 (3):18-25.

[23] Filho A T, Cesero P D, Mizusaki A M, et al. Hot spot volcanic tracks and their implications for south American plate motion,Campos basin,Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences,2005,18(3/4):383-389.

[24] Rabinowitz P D, Labrecque J. The Mesozoic South Atlantic Ocean and evolution of its continental margins[J]. Journal of Geophysical Research,1979,84(B11):5973-6001.

[25] Davison I. Wide and narrow margins of the Brazilian South Atlantic[J]. Journal of the Geological Society,1997,154(3): 471-476.

[26] Morley C K, King R, Hillis R, et al. Deepwater fold and thrust belt classification,tectonics,structure and hydrocarbon prospectivity: A review[J]. Earth-Science Reviews,2011,104 (1/3):41-91.

[27] 郭建宇,郝洪文,李晓萍. 南美洲被动大陆边缘盆地的油气地质特征[J]. 现代地质,2009,23(5):916-922.

[28] Adam J, Ge Zhiyuan, Sanchez M. Post-rift salt tectonic evolution and key control factors of the Jequitinhonha deepwater fold belt,central Brazil passive margin: Insights from scaled physical experiments[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,37(1):70-100.

[29] Boillot G, Froitzheim N. Non-volcanic rifted margins, continental break-up and the onset of sea-floor spreading: some outstanding questions[J]. Geological Society,London,Special Publications,2001,187(1):9-30.

[30] Ferreira T S, Araujo M N, Silva F A. The Abrolhos magmatism as a trigger for Cenozoic deformation in Cumuruxatiba Basin,Brazil[C]//AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach. 2012.

[31] Schiefelbein C, Zumberge J, Cameron N, et al. Geochemical comparison of crude oil along the south Atlantic margins[G] //Mello M R, Katz B J. Petroleum System of South Atlantic Margins. AAPG Memoir 73,2000:15-26.

[32] 汪新伟,孟庆强,邬长武,等. 巴西大坎波斯盆地裂谷体系及其对盐下成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2015,36

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

(2): 193-202.

[33] Mello M R, Telnaes N, Maxwell J R. The hydrocarbon source potential in the Brazilian marginal basins: A geochemical and paleoenvironmental assessment[C]//Huc A Y. Paleogeography, Paleoclimate and Source Rocks. AAPG Studies in Geology 40, 1995: 233-272.

[34] 刘子玉,张树林,吕明. 南大西洋盆地深水区盐下地质特征差异性对比[J]. 中国石油勘探,2014,19(6):66-73.

[35] 梁英波,张光亚,刘祚冬,等. 巴西坎波斯—桑托斯盆地油气差异富集规律[J]. 海洋地质前沿,2011,27(12): 55-62.

[36] 马中振. 典型大西洋型深水盆地油气地质特征及勘探潜力:以巴西桑托斯盆地为例[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(3):1108-1115.

[37] 张申,张达景,刘深艳. 巴西坎普斯盆地盐下层系油气发现及其勘探潜力[J]. 中国石油勘探,2013,18(2):59-66.

[38] 马中振,谢寅符,张志伟,等. 南美东缘盐岩发育特征及其与油气聚集的关系[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2013,43(2):360-370.

[39] 张金伟,胡俊峰,杜笑梅,等. 巴西桑托斯盆地油气成藏模式及勘探方向[J]. 长江大学学报:自然科学版,2015,12(17):8-13.

[40] 汪伟光,喻莲,聂明龙. 南大西洋两岸被动大陆边缘盆地油气地质特征对比[J]. 新疆石油地质,2012,33(2):250-255.

[41] 谢寅符,马中振,刘亚明,等. 以成藏组合为核心的油气资源评价方法及应用: 以巴西坎波斯(Campos)盆地为例[J]. 地质科技情报,2012,31(2):45-49.

[42] 崔敏,康洪全,李少鹏,等. 巴西东北部帕拉—马拉尼郝盆地的构造特征与成藏规律[J]. 现代地质,2014,28(3):585-591.

[43] 谢寅符,马中振,刘亚明,等. 南美洲油气地质特征及资源评价[J]. 地质科技情报,2012,31(4):61-66.

[44] 温志新,童晓光,张光亚,等. 巴西被动大陆边缘盆地群大油气田形成条件[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(5):1-9.

[45] 袁圣强,吴时国,马玉波,等. 南大西洋深水盆地的构造沉积演化及含油气系统[J]. 天然气地球科学,2008,19(2):216-221.

[46] Figueiredo J P, Soares E F, Trosdtorf J R, et al. Graphic correlation of biostratigraphic data as a powerful tool for oil exploration in frontier deepwater areas: A case study in the Brazilian equatorial margin[C]// AAPG International Conference and Exhibition, Cape Town, South Africa. 2009.

编辑:黄革萍

Comparison of Petroleum Geology Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Regularity of Deep Water Basins in Eastern Part of Brazil

Yu Xuan, Hou Guiting, Dai Shuanghe, Han Yuchun, Xie Jielai

Abstract: Based on systematic analysis of tectonic evolution and petroleum geology characteristics of deep water basins in the eastern part of Brazil, it is shown that these basins developed in passive continental margin mainly have gone through four evolution stages, i.e., the pre-rifting, the syn-rifting, the restricted-sea transitional and the post-rifting stages. Due to influences of regional tectonic stress fields, salt beds and volcanism, different one in the basin group plays its own basinal structures and tectonic style, and the salt beds play a pivotal role in hydrocarbon accumulation. Three sets of source rocks, three sets of reservoir and three sets of regional cap rocks develop respectively in all of marginal basins and thus three types of hydrocarbon reservoirs are comprised: (1) pre-salt rifting structural reservoirs, (2) post-salt or pre-salt carbonate reservoirs and (3) post-salt turbidite structural-stratigraphic reservoirs. On the basis of the analysis of hydrocarbon accumulation regularity and taking account of exploration practice in every basin, these deep water marginal basins can be divided into three grades of exploration potential, the good (Grade Ⅰ), the common (Grade Ⅱ) and the poor (Grade Ⅲ) one. It is suggested that the Grades Ⅰ and Ⅱ of potential areas should be prospective.

Key words: Deep water basin; Hydrocarbon accumulation; Hydrocarbon potential; Brazil

Yu Xuan: DSc. degree in progress at Peking University. Add: Earth and Space Science College of Peking University, 5 Yiheyuan Rd., Beijing, 100871, China

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn