

# 巴西圣弗朗西斯科盆地石油地质特征

庞正炼<sup>1</sup>, 樊太亮<sup>2</sup>, 何辉<sup>1</sup>, 王进财<sup>1</sup>, 林琳<sup>2</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

**摘要** 运用盆地资源评价方法对巴西圣弗朗西斯科盆地的地质背景和石油地质特征进行了系统的分析和研究。结果表明, 圣弗朗西斯科盆地形成年代久远, 构造演化史复杂, 先后经历了断陷期、被动大陆边缘沉积期和前陆沉积期 3 个构造演化阶段, 各阶段的盆地特征存在差异, 发育 Espinhaco 群、Macaubas 群以及 Bambui 群 3 套主要的充填序列。盆地中有效烃源岩、有利储层和区域盖层均发育于 Bambui 群和 Macaubas 群, 生储盖配置关系良好。盆内圈闭发育, 包括构造圈闭、地层圈闭及构造-地层复合圈闭等多种类型。通过成藏特征分析, 认为盆地中的区域不整合面和巴西利亚构造运动所形成的断层和裂缝为油气的运移提供了通道, 为油气在不同类型圈闭中的聚集创造了条件。综合各成藏要素, 预测盆地西侧巴西利亚构造带周围是可能的油气富集有利区, 且油气勘探应以天然气为主。

**关键词** 元古代; 石油地质特征; 油气成藏; 勘探远景; 圣弗朗西斯科盆地

**中图分类号** P62

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.10.004

## Petroleum Geologic Characteristics of Sao Francisco Basin, Brazil

PANG Zhenglian<sup>1</sup>, FAN Tailiang<sup>2</sup>, HE Hui<sup>1</sup>, WANG Jincai<sup>1</sup>, LIN Lin<sup>2</sup>

1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China*
2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

**Abstract** Both basic and petroleum geology characteristics of Sao Francisco Basin, Brazil are studied and analyzed systematically with basin resource evaluation. According to the research, the basin possesses a long and complicated tectonic evolution history. It underwent the stages of lift, passive continental margin, and foreland in turn. Each stage left its feature in the basin. Three main sequences are formed in the basin: Espinhaco Group, Macaubas Group and Bambui Group. In the basin, effective source rock, favorable reservoir and regional caprock all develop in the Bambui Group and Macaubas Group. Meanwhile, the source-reservoir-cap assemblage in the basin is favorable, and the effective traps are plentiful, including structural traps, stratigraphic traps, and structural-stratigraphic traps. Through the research of accumulation, regional unconformity and fractures formed during Brasilia Orogeny are defined as the migration pathway, which facilitated the accumulation of hydrocarbon in different traps. Moreover, compared with the same kind of basins in the world, the result shows the Sao Francisco Basin possesses favorable petroleum potential.

**Keywords** proterozoic; petroleum geologic characteristics; hydrocarbon accumulation; exploration potential; Sao Francisco Basin

### 0 引言

巴西国土辽阔, 沉积盆地众多, 油气资源丰富, 海上大陆架、特别是陆上油气勘探潜力很大<sup>[1]</sup>。圣弗朗西斯科盆地是巴西陆上一个元古代盆地, 总面积约为 379357km<sup>2</sup>。对该盆地的

勘探始于 20 世纪 60 年代, 最初仅限于地表测量和勘察。20 世纪 70 年代, 在一口巴西抗旱工程局所钻的水井中发现天然气, 同时在米纳斯吉拉斯(Minas Gerais)地区发现地表气苗。在此背景下, 从 20 世纪 80 年代开始, 巴西石油公司和壳

收稿日期: 2011-02-14; 修回日期: 2012-03-14

基金项目: 全球基础性油气资源战略调查专项(GT-YQ-QQ-2008-5-16); 国家油气重大专项(2011zx05001)

作者简介: 庞正炼, 博士研究生, 研究方向为岩性地层油气藏及沉积, 电子信箱: zhenglian20@126.com; 樊太亮(通信作者), 教授, 研究方向为地震层序地层与油气预测评价, 电子信箱: tlfan@263.net

牌公司联合在盆地中开展勘探工作。由于相关法规的约束,至 90 年代,巴西石油公司成为唯一一家作业公司。1997 年,该公司最后一口井完钻后,也结束了在盆地的继续作业。截至目前,盆地中二维地震测线总长度 2826km,油气探井 4 口,矿井 17 口<sup>[1]</sup>,总体勘探程度较低。虽然前期勘探效果并不理想,但从盆地中发育的大量地表气苗及探井中获得油气显示情况看,该盆地具备生烃能力。随着全球油气资源的日益短缺,重新对具备油气潜力的圣弗朗西斯科盆地进行分析就具有实际意义。

### 1 区域地质特征

巴西位于南美地台之上,该地台由北自南分布 3 个古老的地盾区:西北部的圭亚那地盾、中部的中巴西地盾和东部的大西洋地盾,均由前寒武纪结晶岩系组成<sup>[2-4]</sup>。研究区圣弗朗西斯科盆地形成于元古代,为巴西陆上地区年代最为久远的克拉通盆地,其与形成于新元古代末的克拉通盆地亚马孙盆地 (Amazonas)、马腊尼昂盆地 (Parnaíba)、巴拉那盆地 (Parana) 和萨利莫斯 (Solimoes) 盆地构成了地盾区的盆地群 (图 1)。圣弗朗西斯科盆地的基底为圣弗朗西斯科克拉通的太古宇花岗岩<sup>[1,4]</sup>(图 2<sup>[1]</sup>)。盆地东南部边界受限于呈弧形展布的 Aracuai 褶皱带;东北部为 Paramirim 构造变形带;北部与马腊尼昂盆地相邻,以 Rio Preto 褶皱带为界;巴西利亚褶皱

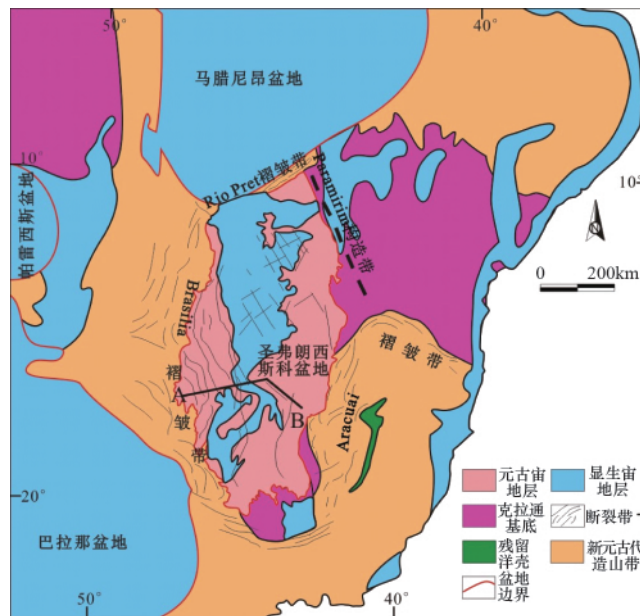


图 1 圣弗朗西斯科盆地区域构造背景  
Fig. 1 Tectonic setting of Sao Francisco Basin

带展布于整个盆地西侧与南部 (图 1)。Aracuai 褶皱带和巴西利亚褶皱带在盆地东西两侧形成了一系列高角度逆掩断层 (图 2)。

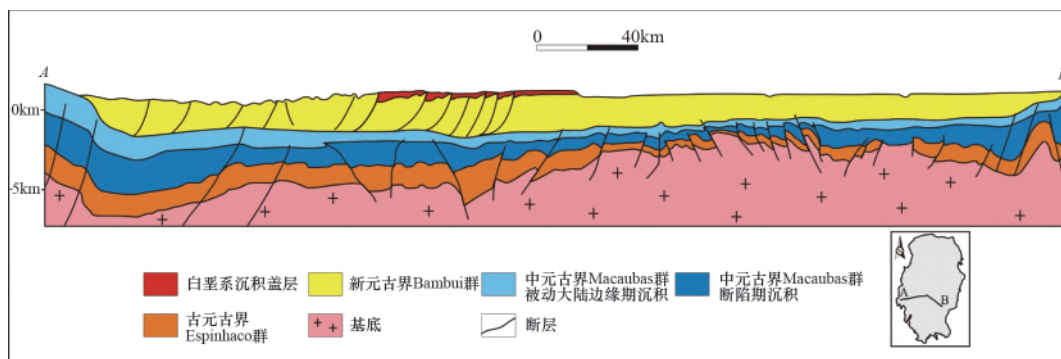


图 2 圣弗朗西斯科盆地剖面图 (参考文献[1],有修改)  
Fig. 2 Cross-section of Sao Francisco Basin (Modified from reference [1])

### 2 沉积充填演化

圣弗朗西斯科盆地经历多个构造阶段,各阶段不同类原形盆地在纵向上依次叠合,这与中国典型叠合盆地类似<sup>[5]</sup>。演化史中各原形盆地在盆地中形成了多套沉积充填序列,这些充填序列的主体包括 Espinhaco 群、Macaúbas 群以及 Bambui 群<sup>[6-7]</sup>(图 3<sup>[1]</sup>)。此外,古生代和中生代在盆地局部地区形成了 2 套较薄的沉积层。

Espinhaco 群形成于古元古代晚期至中元古代早期 (1750—1500Ma) 盆地断陷阶段,包括前裂谷期、同裂谷期、过渡期和挠曲期 4 个个次级地层序列沉积期。盆地接受陆相、过渡相以及海相沉积,且偶有火山活动,分别形成砾岩、砂岩、

泥岩、白云岩以及火山岩<sup>[6-8]</sup>。Macaúbas 群形成于中元古代中期至早元古代早期 (1350—950Ma),其下部为断陷期沉积,上部为被动大陆边缘沉积 (图 2)。在断陷期,盆地先后接受冰川相、河流相和冲积相沉积;在被动大陆边缘阶段,盆地接受海相沉积<sup>[6-7]</sup>。Bambui 群形成于新元古代 (930—570Ma) 前陆盆地时期,随着新元古代亚马孙克拉通和圣弗朗西斯科克拉通板块的聚敛和碰撞,盆地类型由被动大陆边缘盆地向前陆挠曲盆地转变<sup>[6-7,9-11]</sup>。该序列沉积初期形成了一套冰川成因的砂砾岩,随后接受浅海相沉积,在靠近巴西利亚褶皱带的区域发育扇三角洲。Bambui 群沉积后,盆地抬升并处于沉积缺失期,只在古生代晚石炭世—二叠纪 (322.8—245Ma) 和中生代早白

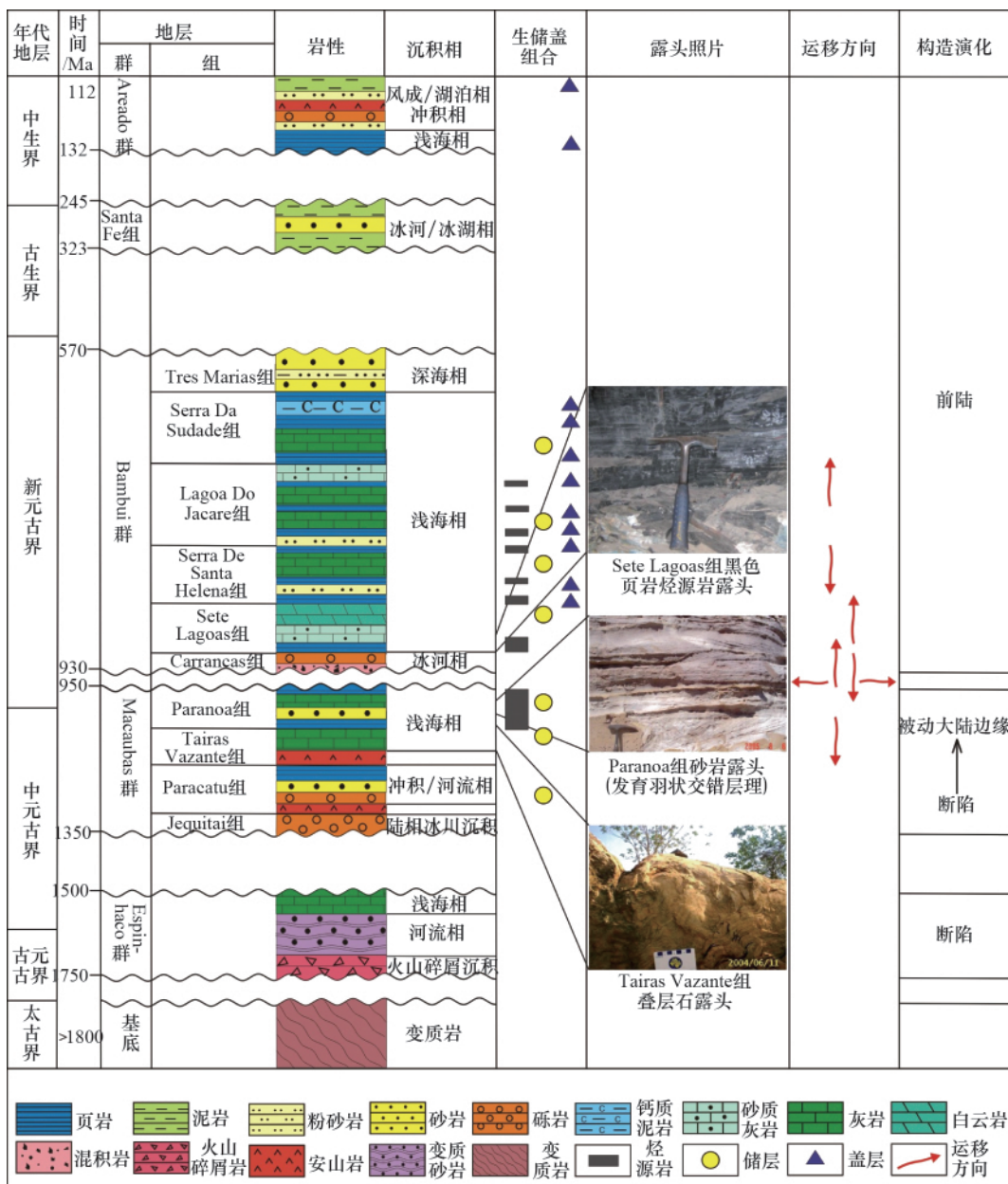


图3 圣弗朗西斯科盆地综合地层柱状图(照片来源:参考文献[1])

Fig. 3 Composite stratigraphic column of Sao Francisco Basin (Pictures from reference [1])

圣世(131.8—112Ma),在盆地中心部位接受小范围沉积,分别形成古生界 Santa Fe 群和中生界下白垩统。

### 3 石油地质特征

圣弗朗西斯科盆地经历了复杂构造演化,地质条件复杂,由于形成年代久远,盆地中烃源岩经历了长期热演化。此外,盆地最终演化为前陆盆地,因此石油地质特征也部分呈现出前陆盆地的特点。

#### 3.1 生烃潜力分析

圣弗朗西斯科盆地主要烃源岩为 Bambui 群和 Macaubas 群中富含有机质的黑色浅海相页岩以及 Macaubas 群中富含

有机质的叠层石碳酸盐岩,这些生烃层位于 Bambui 群和 Macaubas 群顶部<sup>[11-13]</sup>。Macaubas 群和 Bambui 群中的 2 套烃源岩在形成时代上分别属于被动大陆边缘沉积期和前陆拗陷期,2 套烃源岩为典型前陆盆地烃源岩系<sup>[14]</sup>。

Bambui 群和 Macaubas 群中黑色页岩的有机碳含量平均值为 4%—6%,最大值可达 15%,而叠层石碳酸盐岩的有机碳含量也较高<sup>[12]</sup>。Bambui 群沉积过程中,盆地在巴西利亚造山运动作用下处于前陆负载阶段。Macaubas 群和 Bambui 群底部的烃源岩在上覆地层仍接受沉积时即进入生烃门限,而生烃高峰则在巴西利亚构造运动发生期间达到<sup>[1]</sup>。这是因为受前陆挠曲作用的影响,Bambui 群沉积厚度巨大,在该群尚未

完全形成时下伏烃源岩已具有足够的埋深。由于烃源岩进入生烃门限的年代很早,因此必然经历长时期的热演化。盆地中烃源岩的镜质体反射率约为 2%,说明盆内烃源岩的成熟度已非常高,基本上处于深部高温生气阶段<sup>[4]</sup>。

### 3.2 储盖特征

圣弗朗西斯科盆地中主要的储层有 2 套: Bambui 群的碳酸盐岩和 Macaubas 群粗粒的硅质碎屑岩<sup>[5]</sup>。Bambui 群储层形成于浅海相沉积环境,可分为 2 类:一类为白云石化碳酸盐岩,原生鲕粒灰岩和内碎屑被白云石化,形成中粒结晶白云石;另一类为破碎的碳酸盐岩,发育近水平的裂缝,部分裂缝被溶蚀成溶蚀孔洞。Macaubas 群的粗碎屑岩储层受构造运动的影响发生破碎,形成大量裂缝,储集物性得到极大提高。

研究区发育 2 套盖层:一套为 Bambui 群厚层浅海相页岩和致密碳酸盐岩,另一套为盆地顶部的白垩系盖层的泥岩。此外,一些层内的页岩夹层亦可提供一定的封堵作用。

### 3.3 生储盖组合

盆地中可划分出 Bambui 和 Macaubas 两套生储盖组合。Bambui 群下部发育黑色浅海相页岩烃源岩,破碎碳酸盐岩和白云石化碳酸盐岩则为有利储层,上覆于储层的页岩及致密碳酸盐岩构成了封堵层(图 3)。因此,在该群可构成“自生自储自盖”组合特征。在 Macaubas 群中还发育有一套烃源岩和储层(图 3),该群烃源岩和 Bambui 群储层可构成“古生新储、下生上储”的源储组合类型,该群内部储层则形成“自生自储”的组合类型。

### 3.4 圈闭特征

盆地中圈闭类型多样,包括构造圈闭、地层圈闭以及地层-构造复合型圈闭。由于圣弗朗西斯科盆地最终为前陆盆

地,因此盆内由构造冲断作用控制的背斜圈闭和各种断层相关褶皱是盆地内最普遍也最重要的一类圈闭,在这些圈闭中,蛇头构造最为有利<sup>[5]</sup>。

除蛇头构造外,Bambui 群和 Macaubas 群还均具备形成地层圈闭的条件。Bambui 群 Sete Lagoa 组生物礁(如叠层石)发育良好,呈条带状展布,向盆地西南部逐渐变薄,形成一些透镜体,这些透镜体在盆地西北部的 Minas Gerais 连接成片,且生物礁多被白云石化,形成中粗晶白云岩<sup>[11]</sup>。这些呈条带状展布的白云石化生物礁亦可形成有利的生物礁圈闭。

### 3.5 油气成藏特征

圣弗朗西斯科盆地烃源岩在新元古代 Bambui 群沉积时期进入生烃门限,具有较高的成熟度,镜质体反射率可达 2.0%<sup>[5]</sup>。虽然确切的主生烃期无法确定,但目前普遍认为在巴西利亚构造运动挤压作用最强烈时盆内烃源岩进入生烃高峰。烃源岩生成的烃类在构造挤压应力的辅助下,发生初次运移,排出烃源岩。此外,构造运动的强烈挤压还使烃源岩在生烃的同时遭受强烈的挤压破碎作用,形成大量断裂,这些裂缝为烃类在烃源岩内的初次运移提供了更多的运移通道,进一步促进烃类的初次运移,从而极大地提高了盆内烃源岩的排烃效率。

在圣弗朗西斯科盆地中,不同情况下存在不同优势运移通道(图 4)。当储层与烃源岩同属于一套地层且直接上覆于烃源岩层时,烃类排出后可直接向与其接触的储层运移;此外,烃源岩内部还发育储层夹层,烃源岩生成的烃类直接向夹层储集体充注。当储层离烃源岩较远时,烃类可通过 Macaubas 群和 Bambui 群中渗透性碳酸盐岩和砂岩等疏导层,以及 Macaubas 群和 Bambui 群之间的区域不整合面或盆

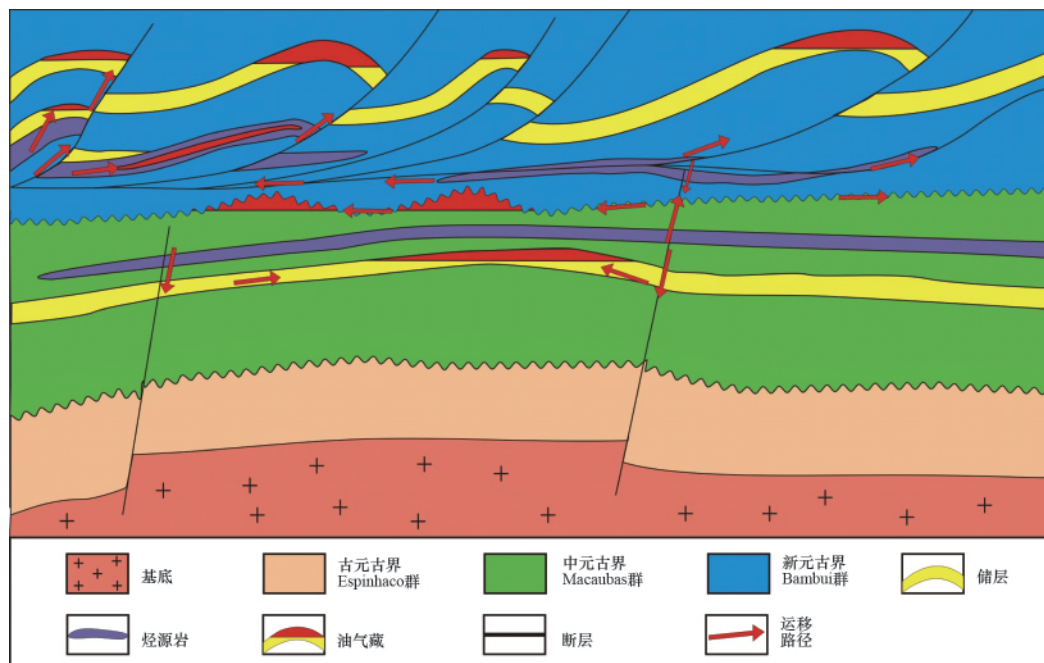


图 4 圣弗朗西斯科盆地油气成藏模式

Fig. 4 Hydrocarbon accumulation model of Sao Francisco Basin

地中的断层进行运移。烃类沿区域不整合面作远距离的横向运移,沿高角度逆断层进行垂向运移。Bambui 群中构成薄皮构造的高角度逆断层和 Macaubas 群中发育的基底卷入逆断层,这 2 类逆断层构成了盆内主要的垂向运移通道(图 4)。在 Bambui 群中,烃类通过薄皮构造中的逆断层向上下 2 个方向垂向运移;在 Macaubas 群中,上部烃源岩排出的烃类可在构造应力作用下形成异常高压,使烃类流体通过基底卷入逆断层向下部储层中运移。

#### 4 勘探远景分析

从地表发现气苗推断,圣弗朗西斯科盆地中烃源岩具备生烃能力。盆地中的储集条件优越,物性好的有利储层并不缺乏,圈闭发育较好,不但形成了大量以蛇头构造为代表的构造圈闭,还形成了地层圈闭和地层-构造复合型圈闭。其中,蛇头构造和不整合面附近的地层圈闭是烃类聚集的最有利场所。由于蛇头构造往往在前陆挠曲带较为发育,因此推测盆地西侧的巴西利亚构造带周围是可能的油气富集有利区。就烃类成分而言,由于盆地年代久远,盆地中的烃源岩和已生成的烃类长时期受热,盆内液态石油储量可能不高,寻找天然气的潜力更大。

综上所述,若后期盆地的勘探程度和井震资料能继续丰富,在圣弗朗西斯科盆地西侧取得工业气流的可能性较大。

#### 5 结论

(1) 圣弗朗西斯科盆地先后经历断陷阶段、被动大陆边缘阶段和前陆阶段,并形成了 Espinhaco 群、Macaubas 群和 Bambui 群 3 套主体充填序列。

(2) 盆地中发育 Bambui 群和 Macaubas 群两套有利生储盖组合。

(3) 明确了盆地中最有利的勘探目标为前陆挠曲带的蛇头构造及其周边圈闭,有利探区位于盆地西侧巴西利亚构造带周围,以天然气勘探为主。

#### 参考文献 (References)

- [1] Duarte K S. Tenth round, Sao Francisco Basin[OL]. Rio de Janeiro: ANP, 2008. [2012-03-14]. [http://www.anp.gov.br/brnd/round10/arquivos/seminarios/STA\\_6-Bacia\\_do\\_Sao\\_Francisco\\_ingles.pdf](http://www.anp.gov.br/brnd/round10/arquivos/seminarios/STA_6-Bacia_do_Sao_Francisco_ingles.pdf).
- [2] 李国玉,金之均.新编世界含油气盆地图集[M].北京:石油工业出版

社,2005.

Li Guoyu, Jin Zhijun. World atlas of oil and gas basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.

- [3] Zeil W. The Andes, a geological review[M]. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1979.
- [4] Zeil W. Südamerika[M]. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag(Stuttgart), 1986.
- [5] 徐思煌,袁彩萍,梅廉夫,等.叠合盆地成藏流体源类型、演化及控藏意义——以中国南方中、古生界海相地层为例[J].地质科技情报,2007,26(2):59-64.
- Xu Sihuang, Yuan Caiping, Mei Lianfu, et al. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(2): 59-64.
- [6] Alkmim F F, Martins -Neto M A. A bacia intracratonica do Sao Francisco: Arcabouco estrutural e cenarios evolutivos [J]. *Bacia do São Francisco Geologia e Recursos Naturais*, 2001, 349: 9-30.
- [7] Martins -Neto M A, Pedrosa Soares A C, Lima S A A. Tectono - sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Later Neoproterozoic in the Sao Francisco craton and Aracuai fold belt, eastern Brazil[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 142: 343-370.
- [8] Pedreira A J, Waele B De. Contemporaneous evolution of the Palaeoproterozoic -Mesoproterozoic sedimentary basins of the Sao Francisco-Congo Craton[J]. *Geological Society*, 2008, 294: 33-48.
- [9] Unrug R. The assembly of Gondwanaland, scientific results of IGCP project 288: Gondwanaland sutures and mobile belts [J]. *Episodes*, 1996, 19(1-2): 11-20.
- [10] Castro P T A, Dardenne M A. O conglomerado Sambura (Grupo Bambui, Neoproterozoico) e rochas sedimentares associadas no flanco leste da Serra da Pimenta, southwest de Minas Gerais: Um sistema de fandelta [J]. *Geonomos*, 1996, 3(2): 35-41.
- [11] Braun O P G, Mello U, Della Piazza H. Origem e evolucao de bacias sedimentares[M]. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1990.
- [12] Babinski N A, Change H K, Santos R C R. Ocorrencias, origem e classificacao dos gases naturais na bacia Proterozoica do Sao Francisco [J]. *Asociacion Latinoamericana de Geoquímica Organica*, 1987, 2: 369-377.
- [13] Chang C H, Mirandad F P, de Della Piazza, et al. Bacia do Sao Francisco: Pre-Cambriano Brasileiro com hidrocarbonetos[J]. *Boletim de Geociencias da Petrobras*, 1987, 1(2): 235-240.
- [14] 张厚福,方朝亮,张枝焕,等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.
- Zhang Houfu, Fang Chaoliang, Zhang Zhihuan, et al. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [15] Clark J. Brazil round4, Sao Francisco Basin [OL]. Rio de Janeiro: ANP, 2002. [2012-03-14]. [http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round4/round4/workshop/restrito/ingles/SaoFrancisco\\_ing.pdf](http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round4/round4/workshop/restrito/ingles/SaoFrancisco_ing.pdf).

(责任编辑 马宇红,代丽)

#### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。