

巴西 Solimoes 盆地构造演化及油气成藏特征

熊利平¹, 李 军¹, 邬长武¹, 李嵩阳²

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要:巴西陆上 Solimoes 盆地属克拉通盆地,其沉积组合和油气成藏非常特殊。文中重点研究盆地的形成演化及构造特征、沉积地层特征、石油地质特征,分析盆地成藏特征及成藏模式,确定成藏主控因素。盆地经历了多期构造运动,古生代经历了多次沉降,中生代抬升,新生代以挠曲沉降为主,构造样式以先正后逆的反转构造为特点。沉积地层以古生界为主,岩性组合复杂,包含了碎屑岩、碳酸盐岩、蒸发岩、冰碛岩及火山岩等多种岩石类型,层系之间均为不整合接触。主要烃源岩为上泥盆统页岩,总有机碳含量高,热演化程度高;主要储层为石炭系 Jurua 组砂岩;主要盖层为石炭系-二叠系蒸发岩,封盖能力强,生储盖配置好。盆地内构造圈闭发育,以背斜、断背斜为主。盆地成藏模式特殊,尽管烃源岩埋深较浅,却在火山岩侵入的烘烤作用下快速成熟并进入高成熟演化阶段——生气阶段;风成砂具有良好的储集性能,储层孔隙由于埋藏深度小而保留,不整合面和复活的基底断裂是油气运移的良好通道。断层相关的构造圈闭控制油气的聚集。

关键词:圈闭;储盖组合;构造演化;油气成藏;Solimoes 盆地;巴西

中图分类号:TE112.3

文献标识码:A

Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in the Solimoes Basin, Brazil

Xiong Liping¹, Li Jun¹, Wu Changwu¹, Li Songyang²

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Onshore Solimoes Basin in Brazil is an intra-cratonic basin, being very special in its depositional succession and its hydrocarbon accumulation mechanisms. This paper focuses on summarization of the formation and evolution of the basin, its structure and depositional characteristics and its key petroleum geologic features, as well as analysis of hydrocarbon accumulation mechanism and the main controlling factor for accumulations. The basin has experienced multiple tectonic movements, including multiple subsidence during the Paleozoic, a shear stress dominated Mesozoic age, and flexure subsidence in Cenozoic. The deformation style features in change from early normal faulting to later inversion and thrusting. The deposits in the basin are mainly of Paleozoic age, and are complicated in lithologic assemblages, consisting of siliciclastics, carbonates, evaporites, glacial deposits, igneous, etc. All the sequences are in unconformable contacts. The major source rock is the Upper Devonian shale, with high TOC value and high degree of thermal maturity. The main reservoir is the Carboniferous Jurua sandstone. The main seal interval is the Carboniferous-Permian evaporites, which is good in sealing capacity. The source rock-reservoir-seal combination is favorable. The basin has well developed structure traps, which are mainly anticlines and faulted anticlines. The petroleum geology of the basin is special in that the shallowly buried source rocks have entered gas window due to igneous intrusion. Eolian sands have good reservoir quality, with well preserved porosity due to its shallow burial depth. The unconformities and reactivated basement-rooted faults serve as the major pathways for hydrocarbon migration. The accumulation of oil and gas is controlled by the fault-related structural traps.

Key words: trap, reservoir-cap combination, structural evolution, hydrocarbon accumulation, Solimoes Basin; Brazil

1 概述

Solimoes 盆地(即上亚马逊盆地)位于巴西的西北

部,马瑙斯市的西部,延伸至秘鲁东部及哥伦比亚东南部,是巴西境内4个内克拉通盆地之一^[1-3]。盆地北邻圭亚那地盾,南靠 Guaporé 地盾,西部以 Iquitos 隆起与次安第斯盆地分界,东以 Purus 隆起与中亚马逊盆

收稿日期:2012-07-20;修订日期:2013-05-10。

第一作者简介:熊利平(1963—),女,博士、教授级高级工程师,石油天然气地质。E-mail: xionglp.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目(970211)。

地为邻,盆地面积 $108 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

盆地总体勘探程度很低,盆地内共完钻各类井 226 口,其中探井 155 口,开发生产井 71 口。盆地勘探成功率高,含非商业性油气发现在内探井成功率高达 56%。盆地内共完成区域重力测量 $6.42 \times 10^4 \text{ km}$,磁力测量 $37.3 \times 10^4 \text{ km}$,2D 地震测线 $6.7 \times 10^4 \text{ km}$,3D 地震 360 km^2 。截止 2012 年 1 月,盆地共有 33 个油气发现,油储量 3.42×10^8 桶,气储量 $1367.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,油气当量 11.47×10^8 桶,油气丰度为 $1\ 056 \text{ 桶/km}^2$ 。

2 盆地构造与沉积演化

盆地构造演化特征控制了盆地的沉积特征,盆地沉积特征控制其生储盖组合特征,生储盖组合特征控制了盆地的油气成藏特征。Solimoes 盆地属南美板块 4 个内克拉通盆地之一,盆地发育演化过程整体相对稳定,但其构造演化非常特殊,自古生代以来,几乎每一期构造运动均对盆地构造和沉积特征产生不同程度的影响,形成了盆地多期的沉积间断,盆地整体沉积厚度仅 $3\ 000 \sim 4\ 000 \text{ m}$,由 6 套层序组成,不同时代地层之间均以不整合接触为主,并不同程度遭受剥蚀,形成了特殊的沉积组合特征和油气成藏特征。

2.1 盆地形成演化

Solimoes 盆地形成、发育演化历史是由其所在的冈瓦纳大陆的形成演化过程所决定的^[4-8],可划分为以下几个独立阶段。

2.1.1 前寒武纪晚期——裂谷阶段

盆地所在的南美板块是冈瓦纳古陆的一部分,在元古宙一直处于稳定的地块之中。在前寒武纪末期的一次北西—南东向伸展构造事件导致北东—南西向地堑形成,Purus 组在其中沉积下来。

2.1.2 古生代——沉降阶段

南美板块古生代奥陶纪前后(约 470 Ma)由南部

的多个地块及活动地体拼接形成,构成了冈瓦纳超级大陆的西翼和西南翼。Solimoes 盆地沿着早期的伸展方向发展,开始形成北东东向沉降盆地。早泥盆世时期,在南美板块的西部受洋壳俯冲的影响,造成地壳增厚,挤压带的东部形成前陆挠曲盆地,受其影响 Solimoes 盆地的 Carauari 和 Purus 隆起形成(图 1,图 2)。晚泥盆世—早石炭世冈瓦纳大陆统一,局部发生裂陷,盆地整体处于沉降阶段,形成了广泛分布碎屑岩、浅海硅质岩沉积、冰川沉积。晚石炭世—二叠纪,安第斯早期造山带东部有间歇性的伸展与挤压事件发生,Solimoes 盆地处于局限海环境,形成广泛分布的碎屑岩、碳酸盐岩及海—陆交互相的蒸发岩地层。

2.1.3 三叠纪—侏罗纪——盆地反转、隆升剥蚀阶段

晚二叠世—早三叠世,沿南美洲板块西部边缘的泛大陆(Pangaea)断裂开始活动,安第斯造山带开始形成。三叠纪末期,南美板块以前奥陶纪基底为基础发展成含多个克拉通盆地的大陆。在此期间,Solimoes

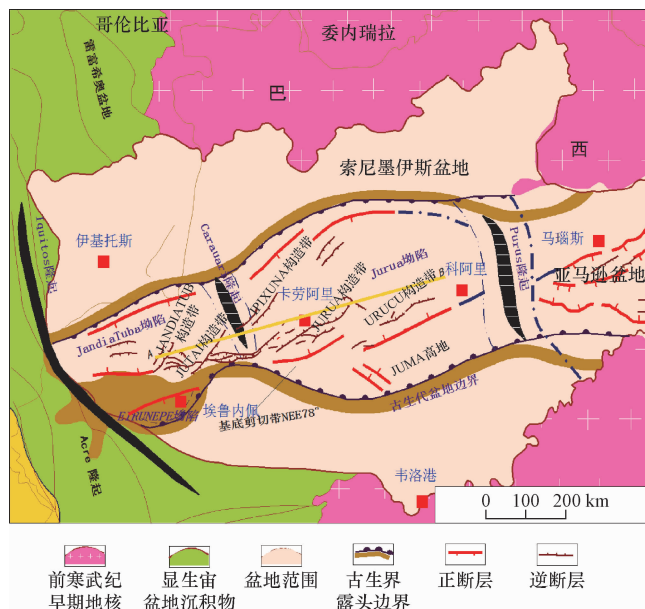


图 1 Solimoes 盆地构造区划(据 IHS,2011 修改)

Fig. 1 Structure division of the Solimoes Basin
(modified from IHS,2011)

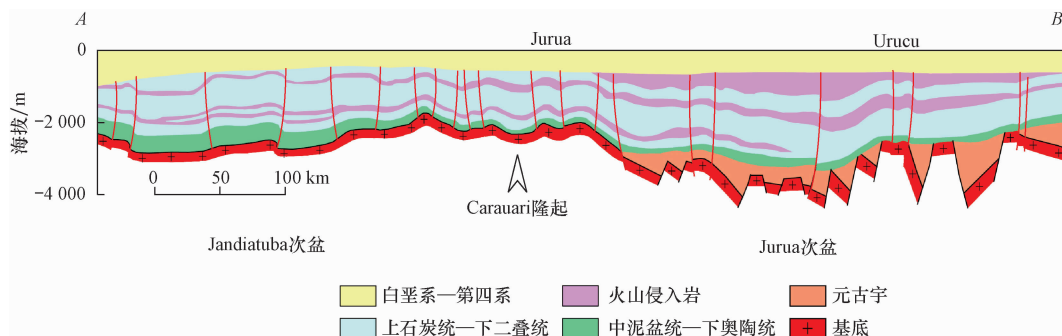


图 2 Solimoes 盆地地质剖面示意图(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Schematic geologic profile of the Solimoes Basin (see Fig. 1 for profile location)

盆地隆升,同时伴随有拉斑玄武岩岩浆活动,后又接受陆相沉积。在此阶段最重要的构造事件是“Jurua 构造运动”,早期为伸展构造,顺时针旋转,然后逆时针旋转,形成了新的陡逆断层,受其影响该区剥蚀时间长达 170 Ma。

2.1.4 白垩纪—新近纪——挠曲沉降阶段

白垩纪,冈瓦纳大陆解体完成,克拉通盆地发生了大规模的海侵,南美西部大部分地区被海水淹没,形成陆表海。白垩纪末至新近纪,太平洋板块向南美大陆俯冲,科迪勒拉山脉迅速隆升,产生一系列俯冲边缘型盆地,形成现今的沟、弧、盆体系, Solimoes 盆地发生了区域性的沉降^[9]。

2.2 构造特征

盆地构造主要受位于盆地南端北东东向的 solimoes 剪切带的影响,在剪切带以北发育北东东向逆断层,以南发育北西向正断层。盆地以 Carauari 隆起为界可划分为东部 Jurua 次盆和西部 Jandiatuba 次盆(图

1),具有两凹一隆的构造格局。在剖面上,断层较发育,具有继承性特征。从基底断至白垩系不整合面,断层倾角大,有的近乎直立。由于中生代的构造反转,有的断层呈现上正下逆的特征^[10](图 2)。

2.3 沉积演化

盆地沉积盖层厚度 3 000 ~ 4 000 m,以古生界为主,岩性组合复杂,岩石类型多样(图 3),奥陶系以浅海碎屑岩为主,上志留统一下泥盆统由碎屑岩和浅海碳酸盐岩组成,上泥盆统一下石炭统为碎屑岩、浅海硅质岩、冰川沉积,石炭系—二叠系由碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩及海—陆交互相的蒸发岩组成,三叠系—侏罗系以火山侵入岩为主。盆地总体经历了陆相—海相—海陆过渡相—局限海相—陆相的复杂沉积演化过程。盆地充填主要由 3 个主要的古生代海侵—海退沉积旋回组成,沉积中心为 Jandiatuba 和 Jurua 次盆。

盆地最古老的沉积物为前寒武纪晚期的 Purus 组河流相红层,在圭亚那地盾的前寒武纪结晶基底形成的地堑中沉积。

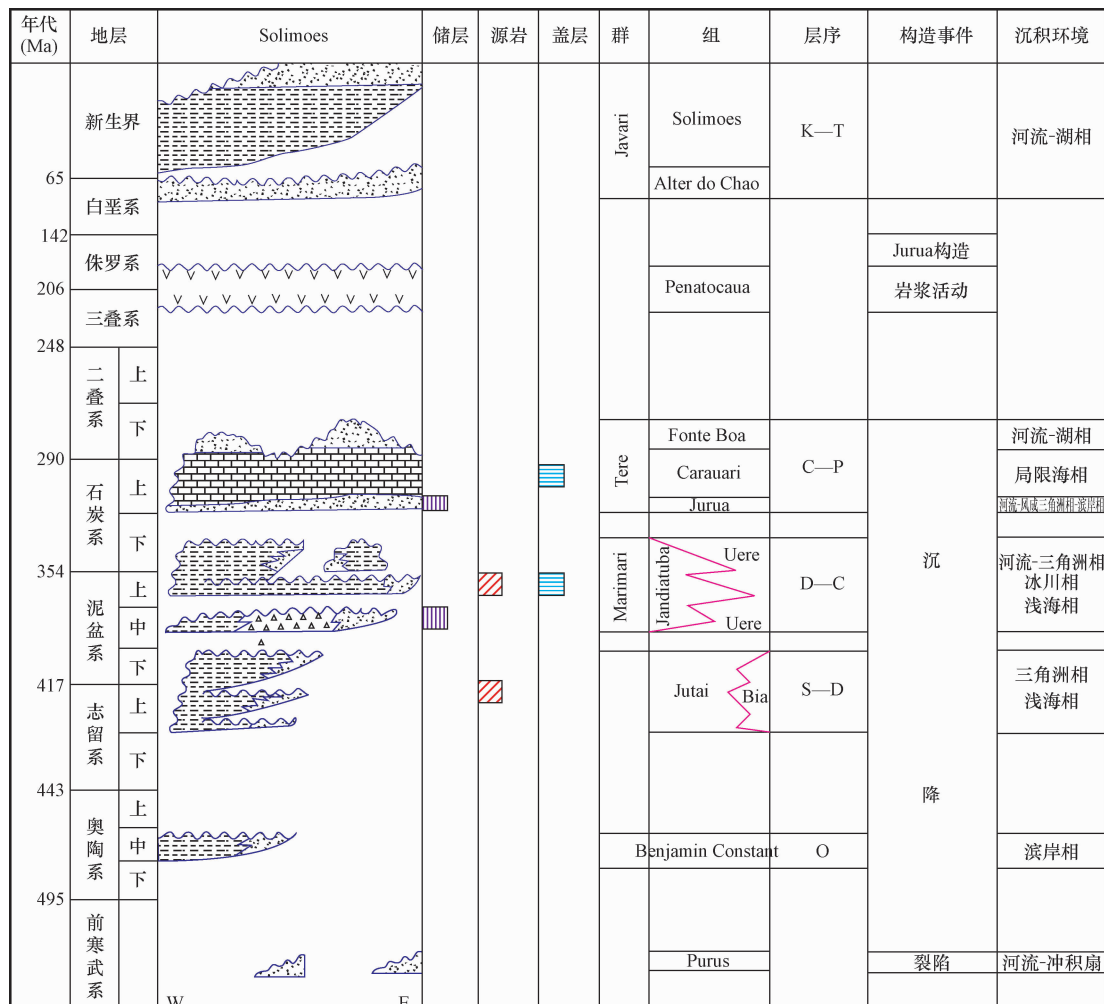


图3 Solimoes 盆地地层柱状图

Fig. 3 Stratigraphic column of the Solimoes Basin

2.3.1 奥陶系—泥盆系

早奥陶世由于弧后盆地向西扩展,小型裂隙发育。盆地西部发育下奥陶统薄层海相沉积物,细粒砂岩覆黑色泥岩,厚度在700 m左右。志留系—下泥盆统由碎屑岩和浅海碳酸盐岩组成,为反旋回沉积。

2.3.2 泥盆系—石炭系

泥盆系沉积旋回以平均厚度为50 m的Uere组三角洲及潮坪沉积开始,上覆的Jandiatuba组在全盆均有分布,厚度在350 m左右,由3部分组成,黑色炭质泥岩,是盆地主力烃源岩,向上为晚泥盆世的冰川沉积物,过渡为砂岩、粉砂岩。

2.3.3 石炭系—二叠系

石炭系—二叠系沉积旋回为局限海相层序,总体厚度超过1 000 m,地层在西部的厚度大于东部的厚度。层序下部为Jurua组砂岩,平均厚度为60 m,是盆地主力储层,上为厚1 000 m的蒸发岩和碳酸盐岩,与泥岩、火山岩互层,中间夹砂岩储层,平均厚度30 m。旋回以Fonte Boa组的海退地层结束。

2.3.4 中、新生界

中生界及新生界主要为河流—湖泊相沉积,厚度1 000 m左右。三叠系和侏罗系为岩浆活动形成的火成岩,此期间,3次大规模的岩床侵入石炭系—二叠系地层,火成岩厚度可达800 m。

3 盆地油气成藏特征

特殊的盆地演化过程造就了盆地独特的成藏特征,火山岩侵入使得埋深不大的烃源岩达成熟—过成熟阶段,多次构造运动发育不整合面,成为油气运移的主要通道,储层埋藏浅物性较好,而局限海相环境的蒸发岩构成了良好的盖层,此外多期构造运动形成了一大批的构造圈闭。

3.1 烃源岩

盆地主要烃源岩为上泥盆统Jandiatuba页岩。该源岩在二叠纪开始成熟和运移,在二叠纪末开始大量生成油气,与盆地内岩浆侵入年代一致,烃源岩演化与埋深的线性关系则并不明显,烃源岩与岩浆侵入岩垂向距离近,则烃源岩演化程度高,表明岩浆侵入是烃源岩迅速成熟演化的主要原因。在西部Jandiatuba次盆,该套烃源岩厚度平均为50 m,最厚可达100 m(图

4a,b),总有机碳含量(TOC)平均2.5%,以生气为主,凝析油API度为47;在东部Jurua次盆,TOC平均为2%,烃源岩生烃母质较好,演化程度较高,镜质体反射率(R_o)在1.1%以上,目前的发现以气、凝析油(60~70 API)和轻质油(42 API)为主。

次要烃源岩为志留系Jutai组页岩,厚度30 m左右,最厚可达50 m,TOC在1%左右,为过成熟源岩,分布局限在凹陷的中心(图4c,d)。

3.2 储盖条件

3.2.1 储集层

盆地经过多期构造运动,储层经短期的压实作用后又被抬升接受风化作用,从而改善了储集条件,与不整合面相邻的砂岩成为良好的储层。因此,主要储层为石炭系Jurua砂岩^[11],埋深约2 500~3 000 m,厚度为0~120 m(图5),上段为风成砂岩,孔隙度15.0%~22.5%,渗透率 $100 \times 10^{-3} \sim 320 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;下段为河流—三角洲相砂岩,孔隙度9%~11%,渗透率 $1 \times 10^{-3} \sim 350 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。次要储层为泥盆纪的Uere砂岩,埋深3 000~3 500 m,物性一般,孔隙度11.8%~14.3%,储层厚度平均为12~20 m。Uere砂岩由于埋深大于石炭系砂岩,物性不及石炭系砂岩。

3.2.2 盖层

主要盖层为石炭系Carauari组的蒸发岩和泥岩,厚度约40 m,封盖能力强,此外,二叠系内的火山侵入岩和泥盆系Jandiatuba组的层内泥岩也具有较好的封盖能力。

3.3 圈闭条件及特征

盆地的多期断裂活动形成了众多的构造圈闭(图6),多为与断层相关的背斜、断背斜、断鼻,主要分布在断裂带的周边。圈闭面积在13.2~75.2 km²范围内,平均38.6 km²。幅度在20~160 m之间,平均55 m。目的层海拔在1 410~2 830 m之间,平均2 000 m。这些圈闭均为较可靠未钻圈闭。从圈闭的形成过程分析,安第斯早期的挤压运动和中生代中期的构造反转对其发育有巨大影响^[12]。但盆地内多期构造运动形成的不整合可能形成少量以不整合圈闭为主的复合圈闭^[13]。

3.4 成藏特征

盆地油气成藏模式为:泥盆系烃源岩生成的油气沿着断层以及泥盆与石炭之间的不整合面运移到石炭系优质储层中,再通过储层侧向运移在背斜构造中聚集藏。

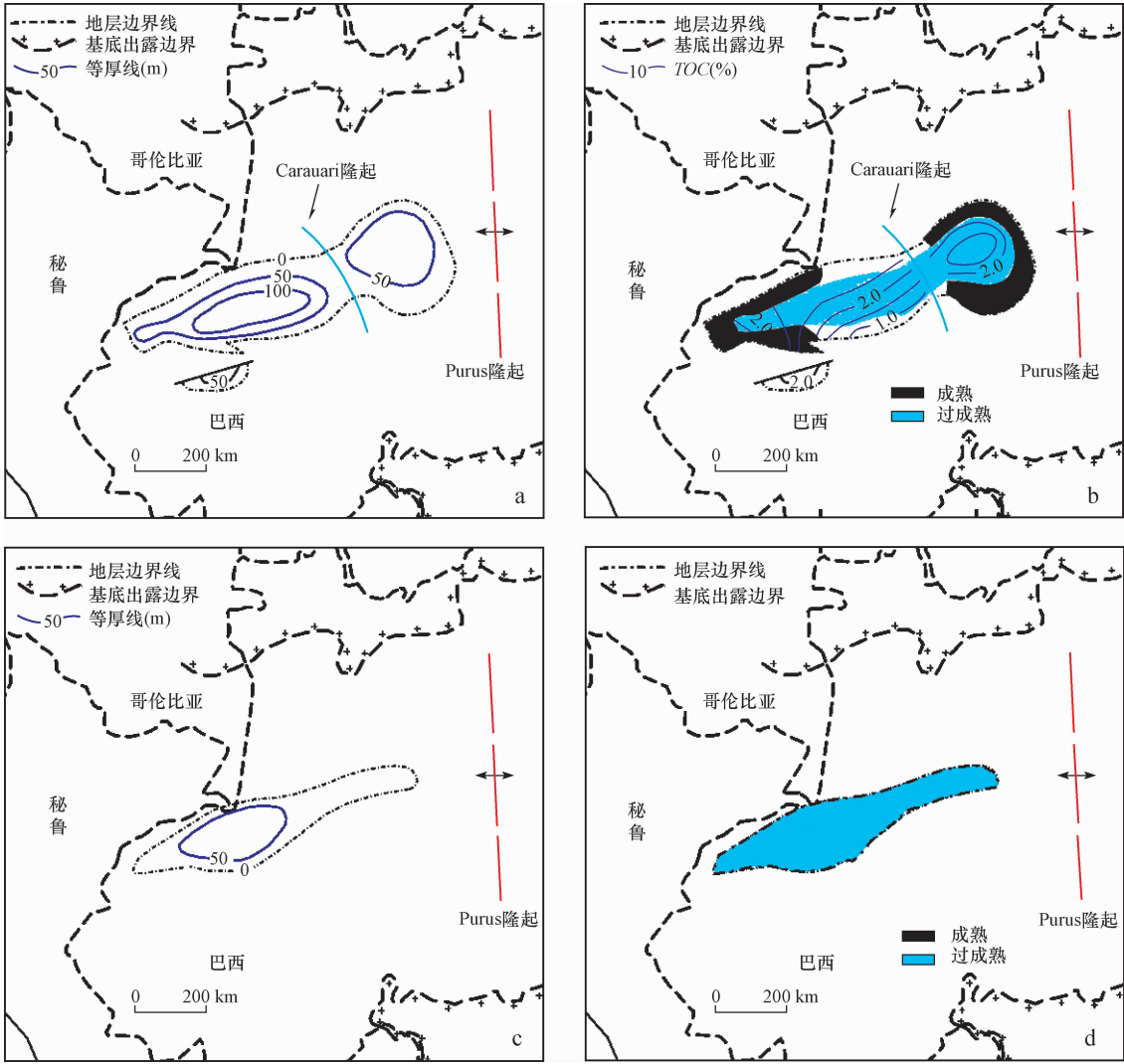


图 4 Solimoes 盆地烃源岩分布及特征

Fig. 4 Distribution and features of source rocks in the Solimoes Basin

a. Jandiutuba 页岩厚度(m); b. Jandiutuba 页岩 TOC(%); c. Jutai 页岩厚度(m); d. Jutai 页岩 TOC(%)

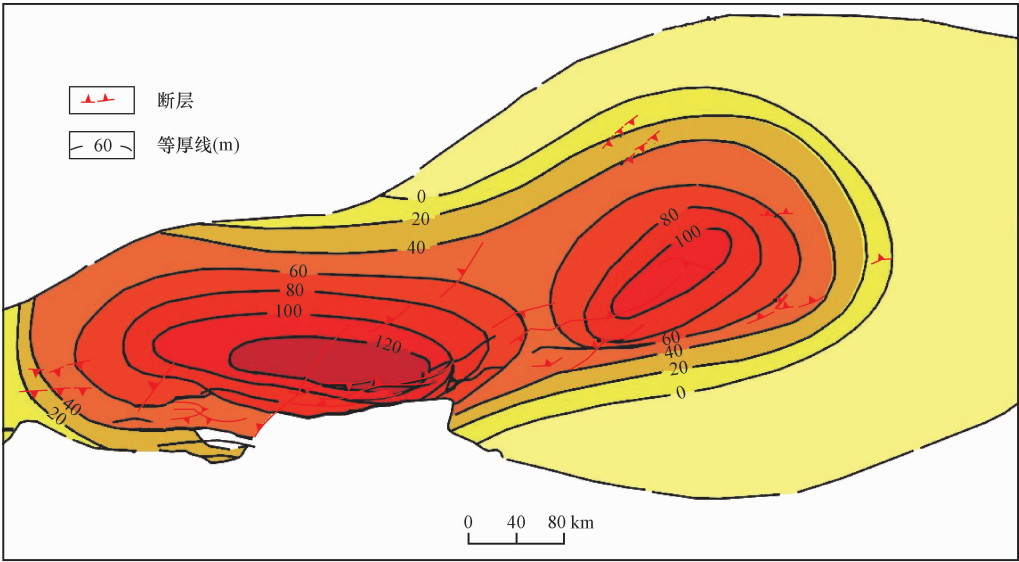


图 5 Solimoes 盆地石炭系 Jutua 组砂岩分布

Fig. 5 Distribution of the Carboniferous Jutua sandstone in the Solimoes Basin

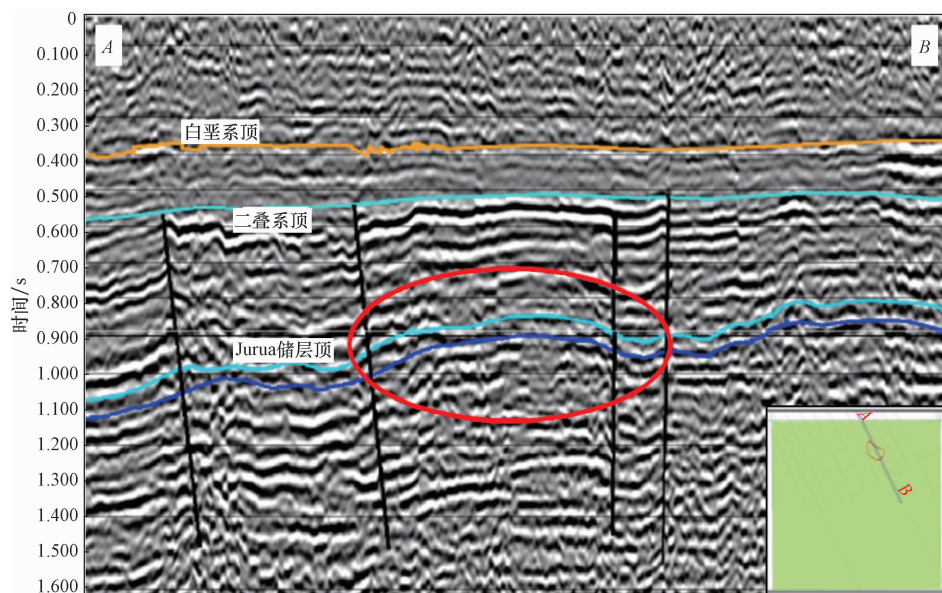


图6 Solimoies 盆地过圈闭地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 6 Seismic profile across the undrilled traps in the Solimoies Basin (see Fig. 1 for profile location)

油气成藏的主控因素是:火山岩侵入控制油气成藏;不整合面及优质储层控制油气侧向运移;断层相关的构造圈闭控制油气聚集。

1) 火山岩侵入控制盆地油气分布具有“西气东油”的特点,在西部次盆,最深的火山侵入靠近二叠系底部,与烃源岩和储层的垂向距离较近,烘烤作用较强,烃源岩以生气为主;而在东部次盆最深的火山侵入远离二叠系底部,对烃源岩和储层的烘烤作用相对较弱,既有气也有油发现。

2) 不整合面及优质储层控制油气侧向运移,油气主要富集在储层物性较好的石炭系砂岩中。泥盆与石炭之间的不整合面为区域性的界面,泥盆系烃源岩生

成的油气沿着断层以及不整合面运移到石炭系储层,在构造圈闭中聚集成藏。石炭系和泥盆系之间的不整合是油气横向运移的主要通道,油气主要富集在储层物性较好的石炭系砂岩中,而储集性能较差的泥盆系砂岩中油气富集程度较低。

3) 断层相关的构造圈闭控制油气聚集, Solimoies 盆地的油气发现集中于断裂附近的长轴背斜圈闭中(图7),背斜圈闭走向北东-南西向,背斜圈闭位于走滑断裂的上升盘,而断裂主要受中生代晚期南大西洋张开产生的斜向挤压应力的影响^[14]。这些走滑断裂的历史可追溯至元古宙深大断裂,这些深断裂控制基底古构造的分布。因此区块最有利的构造类型为基底

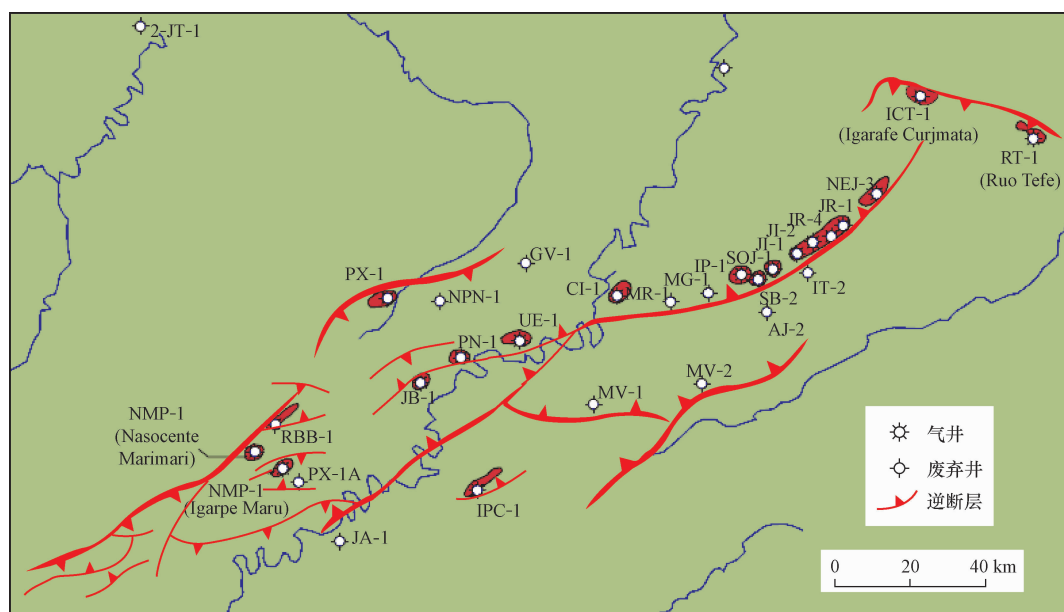


图7 Solimoies 盆地油气发现与断层分布(据 IHS,2011 修改)

Fig. 7 Map showing the distribution of the discoveries and faults in the Solimoies Basin(modified from HIS,2011)

断垒之上的背斜构造,基底断层在后期重新活动,形成良好的油气垂向运移通道,油气主要沿着在侏罗纪形成的逆断层运移。

4) 由于构造在侏罗纪最终定形,而油气生成的高峰期发生于二叠纪,在此期间可能有大量的烃类散失。在中生代早期由于埋深加大和辉绿岩侵入的热效应,存在二次生烃高峰,但这也早于侏罗纪反转构造事件。从目前的油气保存结果分析,可能存在过渡储层或二次运移。

4 结语

1) 盆地经历了多期构造运动,从前寒武纪至新近纪经历了陆相—海相—海陆过渡相—局限海相—陆相的复杂沉积演化过程,经历了多次沉积间断,以古生代为主,岩性组合复杂,岩石类型多样,包括碎屑岩、碳酸盐岩、蒸发岩、冰碛岩及火山岩等。

2) 该盆地良好的生储盖组合条件,烃源岩有机碳丰度高,火山侵入有利于烃源岩成熟,尽管盆地沉积盖层厚度只有 3 000 ~ 4 000 m,但烃源岩热演化程度高,已进入生气阶段,其他石油地质条件发育,因此盆地整体具备较好的油气富集条件。

3) 盆地勘探程度低,三维地震资料缺乏,大部分地区只有二维地震覆盖。盆地仍有很大的勘探潜力,需要深入研究盆地构造演化过程,开展精细三维地震勘探,识别出更多的中生代中期盆地反转形成的更为复杂的构造和圈闭,找到其他类型的构造圈闭和地层圈闭。

4) 该盆地油气成藏特征的研究将对南美类似的低勘探程度盆地油气资源潜力的评价提供重要的参考。

致谢:文章中部分基础数据和图件来自 IHS 数据库,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 谢方克,蔡忠贤. 克拉通盆地基底结构特征及油气差异聚集浅析[J]. 地球科学进展,2003,18(4):561-568.
Xie Fangke, Cai Zhongxian. The primary study of basement structure and difference of hydrocarbon reservoir in cratonic basin[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 561-568.
- [2] Morris W L, Dennis R K, Donald F O, 等. 内克拉通盆地[M]. 刘里斌,于福华,杨时榜,等译. 北京:石油工业出版社,2000.
Morris W L, Dennis R K, Donald F O, et al. Interior Cratonic Basin [M]. Liu Libing, Yu Fuhua, Yang Shibang, et al, translate. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [3] 朱红涛,李敏, Liu Keyu, 等. 陆内克拉通盆地层序地层构型及其控制因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(6): 1035-1040.
Zhu Hongtao, Li Min, Liu Keyu, et al. Sequence stratigraphic architectures of intra-cratonic basin and its controlling factors[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(6): 1035-1040.
- [4] 金双根,朱文耀. 南美板块的运动和活动形变[J]. 武汉大学学报, 2002, 27(4): 358-362.
Jin Shuanggen, Zhu Wenyao. Motion and active deformation of south America plate[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 358-362.
- [5] 文琴,张雄华,梁宇,等. 南美西部典型含油气盆地构造演化及石油地质特征[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(3): 27-33.
Wen Qin, Zhang Xionghua, Liang Yu, et al. Geotectonic evolution and oil geologic feature of typical petroliferous basins in western South America[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(3): 27-33.
- [6] 据亮,张光亚,温志新. 南美西部次安第斯弧后前陆盆地分段特征[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(4): 431-436.
Ju Liang, Zhang Guangya, Wen Zhixin. Segmentation of the Sub-Andean Retro-arc Foreland Basin in Western South America[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(4): 431-436.
- [7] Bartolini A, Larson R L. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic[J]. Geology, 2001, 29: 735-738.
- [8] 钱维宏. 试论冈瓦纳古陆的形成和裂解[J]. 地质力学学报, 1997, 3(1): 21-29.
Qian Weihong. On the formation and splitting of Gondwana land[J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3(1): 21-29.
- [9] Gonzaga F G. Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil modeling of hydrocarbon generation and migration[J]. AAPG Memoir, 1989, 73(4): 159-174.
- [10] Caputo M V. Stratigraphy, tectonics, palaeoclimatology and palaeogeography of northern basin of Brazil[D]. California University, 1984.
- [11] 何辉,樊太亮,林琳,等. 巴西亚马逊盆地石油地质特征及勘探前景分析[J]. 西南石油大学学报, 2010, 32(3): 61-67.
He Hui, Fan Taiyang, Lin Lin, et al. Petroleum geologic property and exploration potential of Amazon basin in Brazil[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2010, 32(3): 61-67.
- [12] John C V, David E J, Marcelo A. Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces[J]. Nature, 1995, 378: 25-31.
- [13] 罗小龙,汤良杰,谢大庆,等. 塔里木盆地雅克拉断凸中生界底界不整合及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 30-36.
Luo Xiaolong, Tang Liangjie, Xie Daqing, et al. Mesozoic bottom boundary unconformity and its significance for hydrocarbon exploration in the Yakela faulted uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 30-36.
- [14] 程小岛,李江海,高危言. 南美板块北部边界作用对其含油气盆地的影响[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 112-119.
Cheng Xiaodao, Li Jianghai, Gao Weiyan. Impact of the northern South America Plate boundary evolution upon petroliferous basins [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 112-119.