

巴西大坎波斯盆地裂谷体系及其对盐下成藏的控制作用

汪新伟¹, 孟庆强², 邬长武², 陶冶², 郭永强², 张云霞²

(1. 中国石化集团 新星石油有限责任公司, 北京 100083; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:巴西东部海上大坎波斯盆地是中国油公司在巴西的主要投资目标之一。在前人研究的基础上,结合最新的勘探成果,厘定了盆地的构造演化阶段,剖析了盐下裂谷系的构造特征,并简要讨论了其构造差异对盐下成藏的控制作用。大坎波斯盆地的构造演化经历了晚三叠世—侏罗纪的克拉通内拗陷、纽康姆期—巴雷姆期的陆内裂谷、阿普特期的构造过渡期、阿尔布期—三叠世的初始拉张和坎潘期—上新世的大规模裂陷5个阶段。裂谷期的构造体系总体呈现倾向(东西)分带、走向(南北)分段的“斜向棋盘”格局。从倾向角度看,按基底埋深的高低可分为近岸低凹带、中部低凸带、近海低凹带和外部高地带4个构造带;从走向角度看,由于调节断层带的作用,形成了研究区内3个构造分段,即桑托斯、坎波斯与圣埃思皮里图,它们在构造线展布、裂谷形态与沉积厚度等方面存在差异。裂谷体系对盐下成藏的控制作用主要表现在烃源岩的成熟度、油气圈闭的类型及优质储层相带的分布3个方面。大坎波斯盆地的外部高地带与中部低凸带既是盐下油气运移的聚集带,又是优质储层的发育相带,因而是盐下油气勘探的有利区带。

关键词:构造演化;裂谷体系;盐下成藏;有利区带;大坎波斯盆地;巴西

中图分类号:TE121.2 **文献标识码:**A

Rift system and its controlling effects upon pre-salt hydrocarbon accumulation in Great Campos Basin, Brazil

Wang Xinwei¹, Meng Qingqiang², Wu Changwu², Tao Ye², Guo Yongqiang², Zhang Yunxia²

(1. Star Petroleum Co. Ltd., SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Great Campos Basin in offshore eastern Brazil has been one of the major investment attractions for Chinese oil companies. Based on previous studies and the latest exploration achievements in the basin, the article identified its evolution stages, analyzed its structural features, and discussed the controlling effect of structural differences upon the formation of pre-salt accumulations. The basin had experienced five stages of tectonic evolution: intracratonic depression during the Late Triassic-Jurassic, intracontinental rifting in Neocomain-Barremian, rift-depression transition in the Aptian, initial opening in the Albian-Santonian and large-scale rifting in the Campanian-Pliocene. The overall tectonic system during the rifting stage can be likened to a “chessboard” featuring dipping direction (EW) zonation and strike (SN) segmentation. Along the dipping direction, the tectonic system consists of four belts in terms of depth of bedrock: nearshore concave belt, central low-convex belt, offshore concave belt and external high belt. Along the strike, the tectonic system is divided into 3 segments by the accommodating fault belt: Santos, Campos and Espírito Santos. They differ in tectonic line, rift shape and sedimentary thickness. The controlling effect of rift system upon the pre-salt accumulations in the basin is mainly expressed through source rock maturity; trap types and distribution of good reservoir rocks. The external high belt and central low-convex belt in the basin is considered as the most promising targets for pre-salt exploration.

Key words: tectonic evolution, rift system, pre-salt accumulation, play fairway, Great Campos Basin, Brazil

巴西东部海上的桑托斯(Santos)、坎波斯(Campos)和圣埃思皮里图(Espírito Santos)3个盆地,由于地理位置相邻、地质特征相似,合称为大坎波斯(Great Campos)盆地。其主体位于巴西东南海域水深0~3 000 m的范围内,总面积为 $58.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。大坎波斯盆

地是晚三叠世以来随着南大西洋由南向北逐步打开而发育的被动大陆边缘盆地,其南、北两侧以裂谷期形成的地形高地,如佛洛里亚诺波利斯(Florianopolis)高地和阿布罗斯(Abrolhos)高地,与佩洛塔斯(Pelotas)盆地和库穆鲁沙蒂巴(Cumuruxatiba)盆地分开;而内部

收稿日期:2014-03-10;修订日期:2014-12-10。

第一作者简介:汪新伟(1968—),男,博士、高级工程师,海外油气勘探与盆地构造研究。E-mail: wangxinwei_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技项目(P11063)。

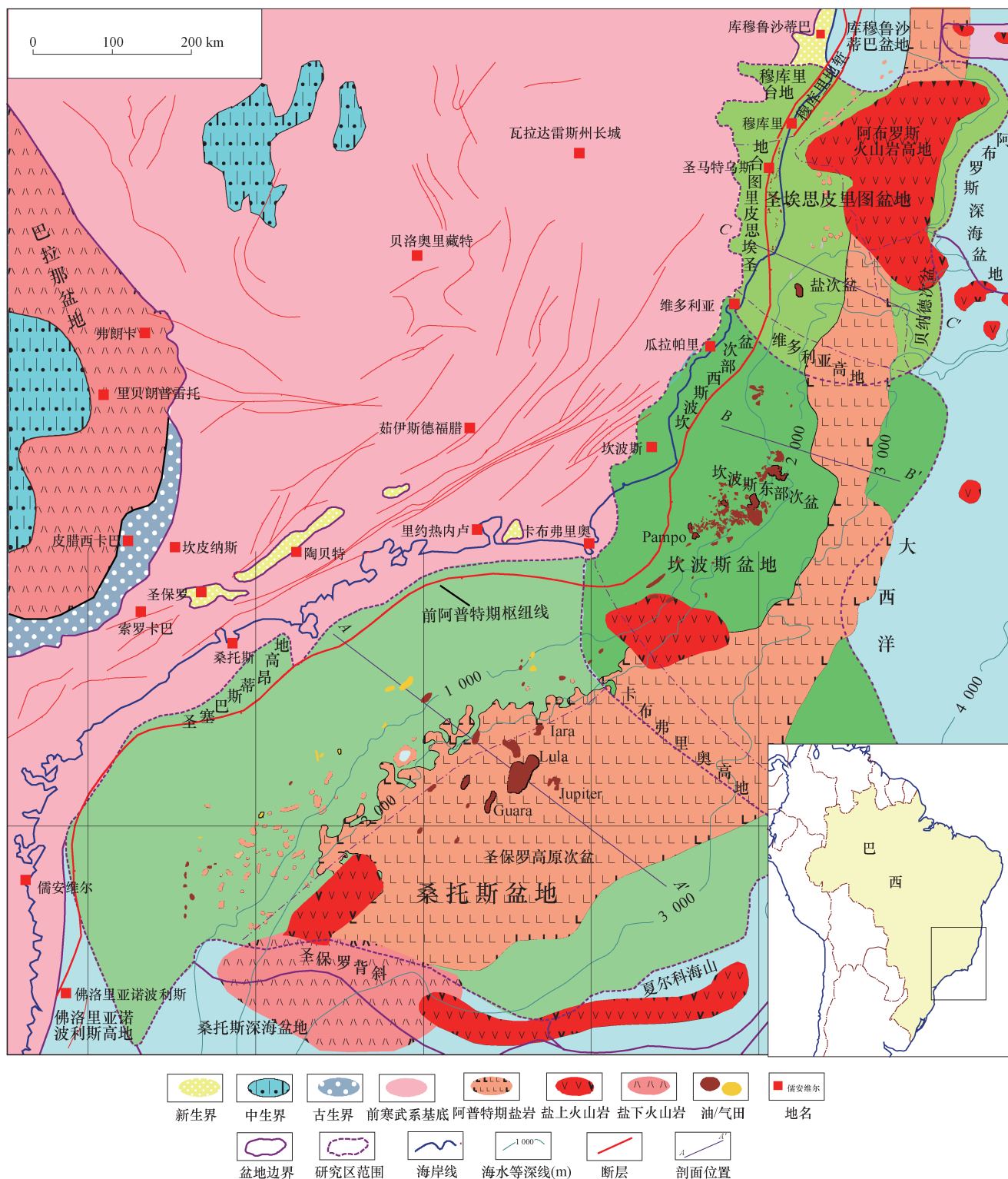


图1 巴西东部大坎波斯盆地地质简图与油气田分布

Fig. 1 Map showing the geology and oil/gas field distribution in Great Campos Basin

则被卡布弗里奥 (Cabo Frio) 高地和维多利亚 (Vitoria) 高地相隔。盆地西部边缘发育一条前阿普特期枢纽线, 控制了早白垩世裂谷盆地的边界^[1-2], 并构成了大坎波斯盆地内二级构造区划的分界。在枢纽线以西, 晚白垩世—新生代的碎屑岩超覆在前寒武系基底之上, 根据沉积厚度的差异, 其二级构造单元在桑托斯、坎波斯和圣埃斯皮里图 3 个盆地分别称为圣塞巴斯蒂昂高地、坎波

斯西部次盆和圣埃斯皮里图台地; 在枢纽线以东, 则发育了包括早白垩世阿普特期盐岩在内的裂谷—被动大陆边缘沉积体系。桑托斯盆地东南端以圣保罗火山穹窿 (Arch) 和夏尔科 (Charcot) 海山为界, 毗邻桑托斯深海盆地^[3], 其火山作用有两期, 即早白垩世组康姆期和始新世, 分别被称为盐下火山岩与盐上火山岩。

大坎波斯盆地是巴西油气最富集的盆地, 但勘探程

度差异较大。坎波斯盆地勘探程度较高,是巴西的产油基地,截止2013年6月产出了巴西85%以上的原油;而桑托斯盆地的勘探程度较低,2007年以来在深水盐下陆续发现了Lula, Iara, Guara, Jupiter等多个亿吨级大型油气田(图1)^[4-5],是全球油气勘探的热点地区之一,亦是中石油公司在巴西的主要投资目标。本文在吸收前人研究成果的基础上^[6-11],结合最新的地震、钻井等勘探资料,详细剖析了大坎波斯盆地的构造演化、盐下裂谷体系展布特征及其对盐下成藏的控制作用。

1 盆地构造演化

大坎波斯盆地的基底岩系主要包括泛非运动^[12-13]之前的前寒武系结晶基底与古生代陆内克拉通盆地沉积岩^[14]。中生代以来受南美与非洲逐步裂离的影响,它进入被动大陆边缘盆地发育阶段^[15-17]。依据巴西东部被动大陆边缘盆地的发育层序^[18-20],把大坎波斯盆地的构造演化划分为裂谷前克拉通内拗陷、陆内裂谷、过渡期、初始拉开期和大规模裂陷期5个阶段(图2,图3)。

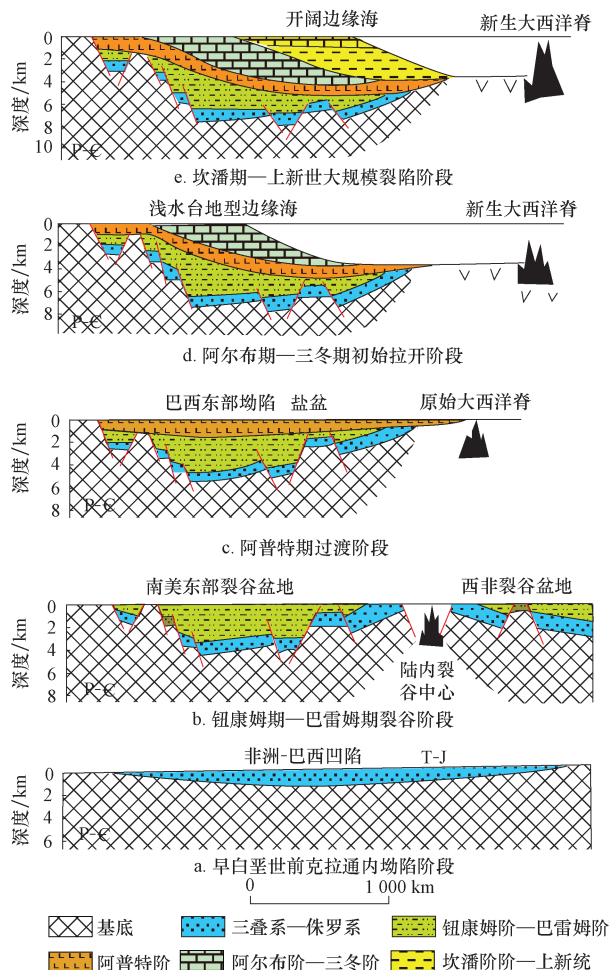


图2 大坎波斯盆地构造演化示意图(据文献[18],修改)

Fig. 2 Tectonic evolution of Great Campos Basin^[18]

1.1 裂谷前克拉通内拗陷阶段

晚三叠世—侏罗纪,受地壳拉张、伸展减薄的影响,研究区发育了一条浅而窄的南北向延伸的凹陷,称为非洲—巴西(Afro-Brizilian)凹陷(图2a)^[19]。其沉积环境属于干旱气候下的混合冲积扇体系。例如,分布于非洲—巴西凹陷北部的雷康卡沃(Reconcavo)盆地发育了晚侏罗世的红色页岩、蒸发岩及砂岩(Alianca组与Sergi组)^[21-22]。桑托斯盆地深水区的地震剖面解释亦表明裂谷前沉积层厚度基本稳定(图4a),不受裂谷期同生断层的控制,推测与雷康卡沃盆地的红色岩系同期。

1.2 裂谷阶段

早白垩世纽康姆期—巴雷姆期,随着地壳被进一步拉伸、减薄,开始发育裂谷盆地(图2b)^[23]。最新的钻井与地震资料揭示,裂谷期的沉积层序可进一步分为下裂谷层序、中裂谷层序与上裂谷层序(图4a,b)。下裂谷层序是受同生断层控制明显的火山岩和陆源碎屑岩,中裂谷层序以深湖相泥灰岩、页岩和泥质泥屑灰岩为主,上裂谷层序的岩性为湖相页岩、泥灰岩和介壳灰岩。其中湖相页岩是主力烃源岩层段,而介壳灰岩是一套良好的储层,主要沿构造高地的顶部发育。

1.3 过渡阶段

在经历了阿普特(Aptian)早期的地壳整体抬升、裂解不整合发育(break-up unconformity)后,阿普特—中—晚期基底下沉、海水逐步侵入,在南大西洋开启前的非洲和南美洲之间发育了一个巨型的张性蒸发岩盆地(图2c)^[24-26]。据Lula油田RJS-628井资料,过渡期地层可进一步细分为拗陷层序与蒸发岩层序,拗陷层序以发育碳酸盐岩与生物碎屑灰岩为主,是盐下的一套主力储层。

1.4 初始拉开阶段

阿尔布期—三冬期的初始拉开阶段与威尔逊旋回中的浅水台地型边缘海阶段相对应(图2d)。阿尔布早期,随着伸展、下沉作用的增强,海平面上升,盐盆消亡,发育了阿尔布阶浅海台地相碳酸盐岩与半深海相泥屑灰岩。晚白垩世森诺曼期—三冬期,随着海水深度的增加,沉积了富含有机质的深海相页岩,与该期全球性的缺氧环境相一致,是盆地的另外一套优质烃源岩^[11]。

1.5 大规模裂陷阶段

即威尔逊旋回中的开阔边缘海阶段。晚白垩世坎

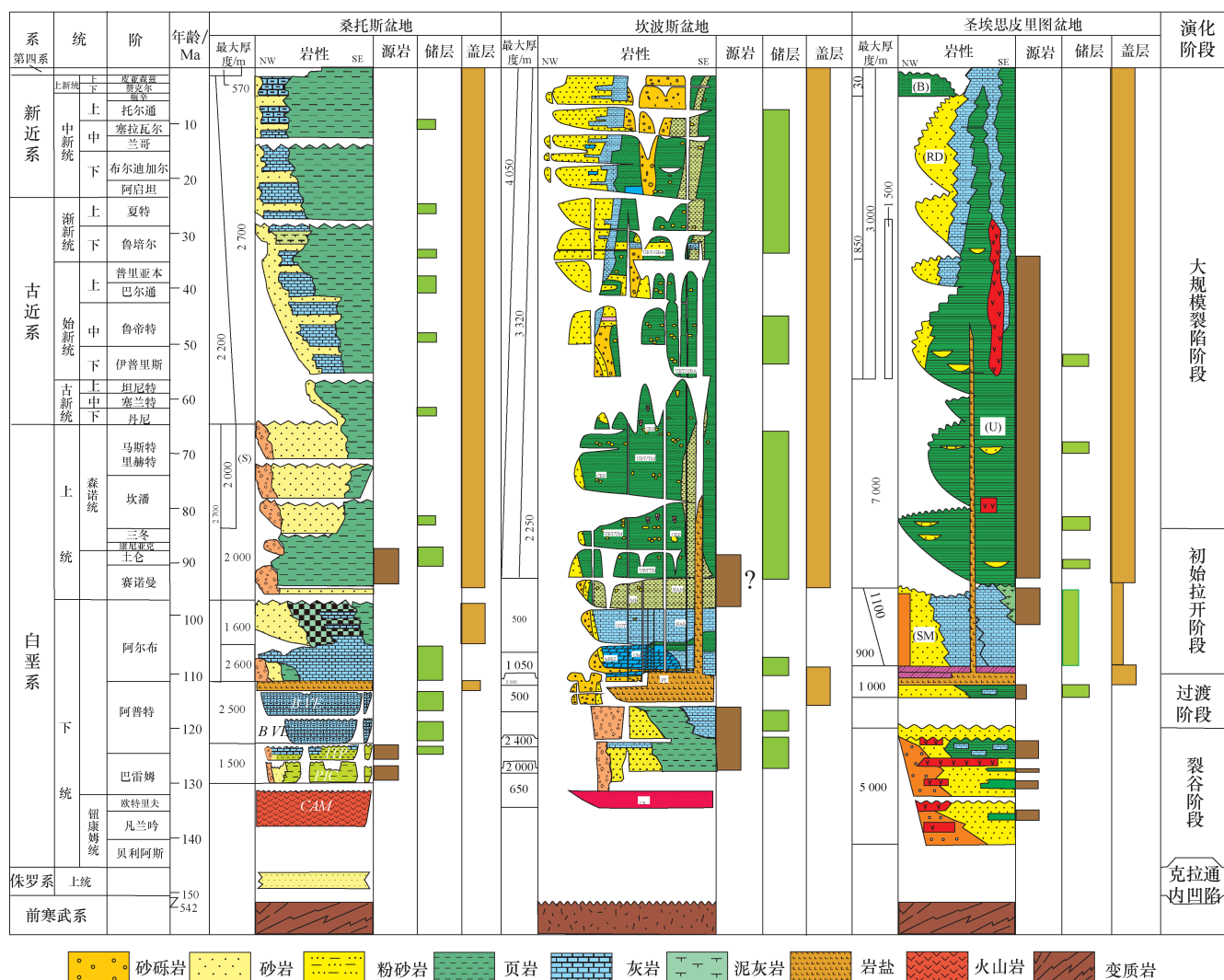


图3 桑托斯、坎波斯与圣埃思皮里图盆地地层对比(据文献[2]编制)

Fig. 3 Stratigraphic correlation of Santos, Campos and Espírito Santos basins^[2]

潘期—上新世,地壳大规模移离,并发生强烈向东倾斜、下沉,导致整个盆地形成向东倾斜的区域斜坡,岸外地区更加明显的下沉,形成开阔边缘海沉积。由下至上发育了坎潘期—马斯特里赫特期斜坡相碎屑浊积岩与古近纪以来的滨岸碎屑岩、浅海碳酸盐岩与深海页岩等台地—大陆坡深水沉积体系。

2 盐下裂谷系

大坎波斯盆地盐下裂谷系变形特征表现为发育高角度正断层以及地垒—地堑型或向西翘倾的半地垒—半地堑型组合,断层作用强度大,盆地枢纽带处主断层的落差在4 000 m之上(图4)^[16,23]。在前人对桑托斯—坎波斯地区残余重力异常解释的基础上^[7],本文结合区域地震剖面(图4)及其层拉平反演结果(图5),重新剖析了盐下裂谷系的构造特征,并识别出一个重要的油气聚集带——中部低凸带(图6)。其主要特征如下。

2.1 结构与形态

裂谷系总体呈倾向(东西)分带、走向(南北)分段的“斜向棋盘”格局(图6)。由于盆地枢纽带的正断层断距较大(落差大于4 000 m),致使断层下盘的莫霍面相对抬升,由此形成了盆地西缘的莫霍面凸起带,它限定了裂谷盆地的西部边界;裂谷盆地东部则直接与后期增生的南大西洋洋壳相接。裂谷盆地形态上南宽北窄,且构造线在中部发生偏转。桑托斯盆地的裂谷宽度约500 km,主体构造线呈北东向;往北坎波斯盆地裂谷宽度为200~300 km,至圣埃思皮里图盆地宽度约为30~100 km,同时构造线亦发生偏转,呈北北东向。

2.2 倾向上的分带性

按基底埋深的差异可分为近岸低凹带、中部低凸带、近海低凹带和外部高地带4个构造带。中部低凸带与外部高地带是由裂谷期地垒或旋转的断块所形成的地貌高地,而近岸低凹带与近海低凹带是裂谷期的地堑

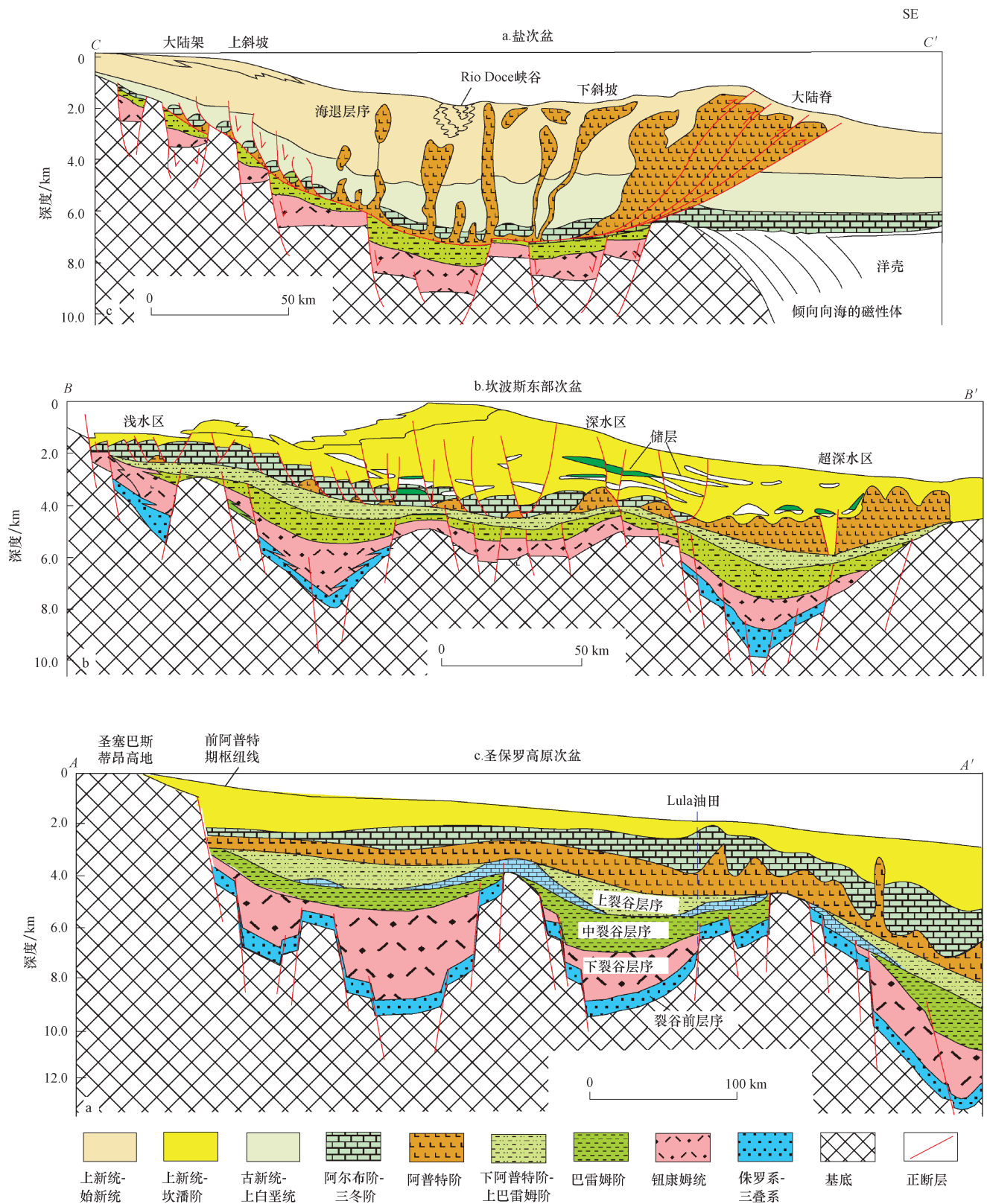


图4 大坎波斯盆地区域地质剖面(据文献[2]编制,剖面位置见图1)

Fig.4 Regional geological profiles of Great Campos Basin^[2]

或半地堑构成的低地。相比较而言,桑托斯盆地中部低凸带较窄、外部高地带较宽;坎波斯盆地中部低凸带较宽、外部高地带较窄;而圣埃思皮里图盆地中部基底凸起特征并不明显(图5)。

2.3 走向上的分段性

在佛洛里亚诺波利斯、卡布弗里奥与维多利亚北侧等地区发育3个一级调节断层带,分别形成了大坎波斯

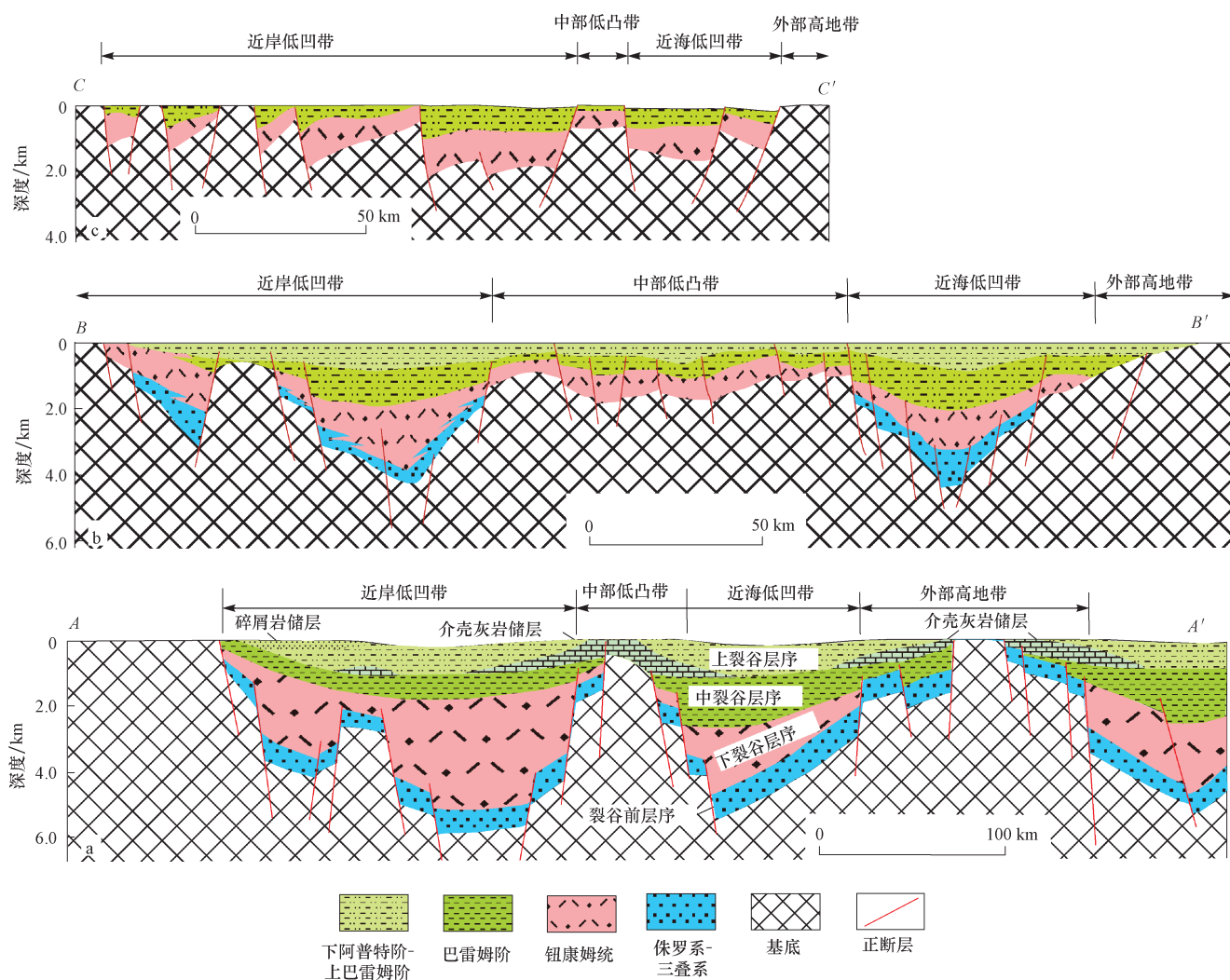


图5 大坎波斯盆地盐下地层层拉平剖面(示盐下裂谷系构造分带)

Fig.5 Flattened sections of pre-salt strata in Great Campos Basin

盆地南端的特里斯坦-达库尼亚(Tristan da Cunha)横向火山岩脊^[7]和盆地内的卡布弗里奥横向低凸带和维多利亚高地。同时,在盆地内还发育了较多二级调节断层带,分别变换了各小段内伸展变形位移量的差异^[27-29]。

2.4 沉积充填的差异性

首先,构造分带造就了裂谷系两拗两隆的沉积格局,形成了近岸低凹带与近海低凹带2条生烃中心带,以及中部低凸带与外部高地带2条油气聚集带。其次,构造分段亦使大坎波斯盆地的沉积充填存在巨大差异。大坎波斯盆地盐下层拉平剖面(图5)揭示出桑托斯盆地裂谷期沉积厚度为5 000~6 000 m,坎波斯盆地最厚达4 000 m,而圣埃思皮里图盆地则仅为2 000 m左右。

3 裂谷系成藏主要控制关系

裂谷期湖相烃源岩是大坎波斯盆地的主力烃源

岩,贡献了该区90%以上的油气。裂谷期介壳灰岩是一套良好的储层,而“网状”分布的正断层系统有利于油气垂向运移。故裂谷系的结构对盐下油气成藏有着重要影响。

3.1 基底埋深差异导致主力烃源岩成熟度差异

桑托斯盆地热演化程度最高,近岸低凹带内主体已进入生湿气-干气阶段,外部高地带受基底较浅与巨厚盐岩(2 000 m左右)高热导率的双重影响处于主生油带内(图7)^[30-34];坎波斯盆地热演化程度最低,因基底埋深适中,正处于生油的高峰期;圣埃思皮里图盆地因盐上沉积较厚,烃源岩在沉积中心已达生湿气阶段,但厚度较薄而生烃量有限。

3.2 裂谷期断裂作用方式与组合形式决定盐下油藏圈闭类型

该区盐下圈闭类型本质上是构造成因的,受控于裂谷期的地垒与旋转断块所形成的高地。本文根据已

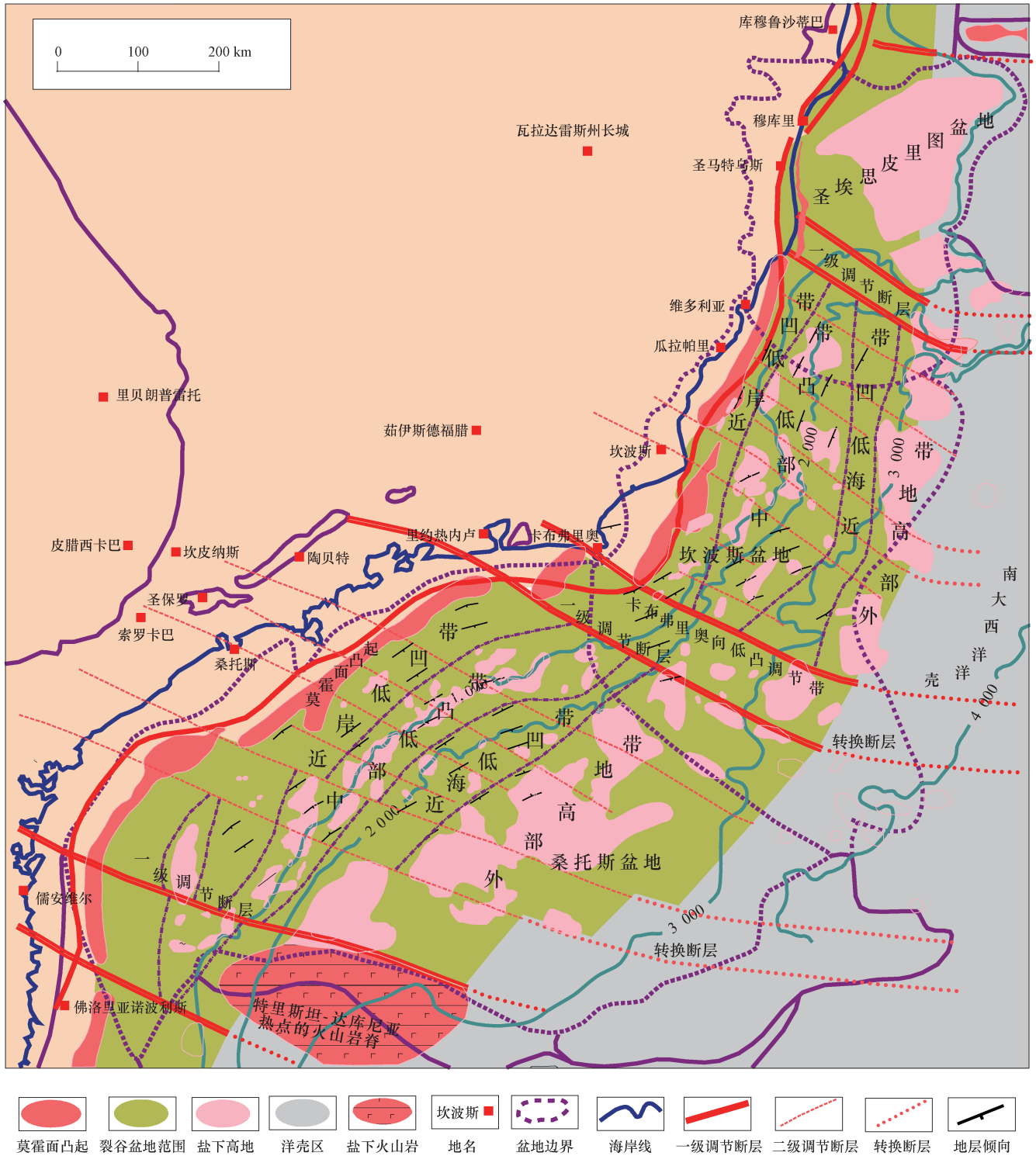


图6 大坎波斯盆地盐下裂谷体系(据文献[7],修改)

Fig. 6 Distribution of pre-salt rift system in Great Campos Basin^[7]

有的勘探成果总结出4类圈闭(图8)。

1) 地垒侧翼的地层尖灭型圈闭。地垒在裂谷阶段和过渡阶段早期处于地形高部位,裂谷期的介壳灰岩与过渡阶段早期的生物灰岩等储层均沿地垒侧翼的有利相带发育,并逐步向地形高地尖灭,上覆盐岩为优质盖层,组成地层尖灭型圈闭。如桑托斯盆地外部高地带 Tupi 高地西坡的 Lula 油田(图8a)。

2) 断块之上的披覆背斜圈闭。同向旋转的断块

形成半地堑结构,构成局部掀斜高地,沉积物的厚度顶薄翼厚,受后期差异压实作用的影响形成披覆构造,如 Carioca 油田(图8b)。

3) 断背斜圈闭。其背斜成因与披覆背斜类似,受控于断块形成的掀斜高地及其两侧的差异压实作用,但因主控断层的多期活动,断层切割了背斜,在正断层下盘形成断背斜圈闭,如 Guara 油田(图8c)。

4) 火山岩储层圈闭。其储层类型为裂隙型的玄

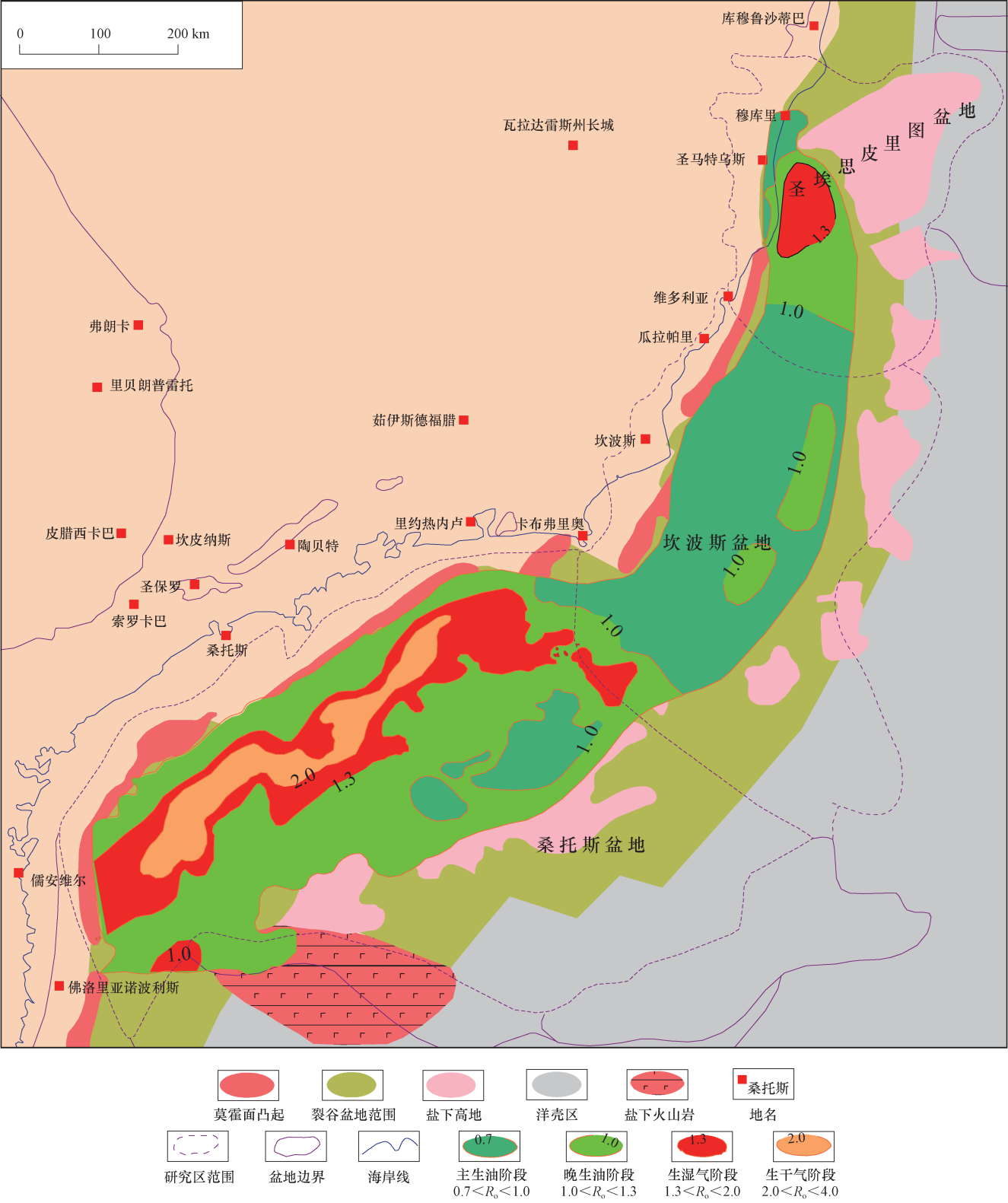


图 7 大坎波斯盆地湖相烃源岩热演化程度(据文献[7],修改)

Fig. 7 Thermal evolution degree of lacustrine source rocks in Great Campos Basin^[7]

武岩和火山碎屑岩,伸展断层的垂向位移使它们穿插在裂谷期的页岩和泥灰岩之间,并形成侧向封堵,上覆的蒸发岩为区域盖层,如 Pampo 油田(图 8d)。

3.3 盐下高地控制优质储层发育相带

裂谷期的储层主要发育于上裂谷层序,具同时异

相沉积。在近岸低凹带与近海低凹带的沉积中心,沉积了富含有机质的泥质烃源岩;在中部低凸带与外部高地带,因水体较浅发育介壳灰岩储层,而离物源区较近的区带发育碎屑岩储层(图 5a)。介壳灰岩生物发育、孔隙度高(25%),储层物性极佳。同时,中部低凸带与外部高地带因构造部位高,亦是盐下低凹带成熟

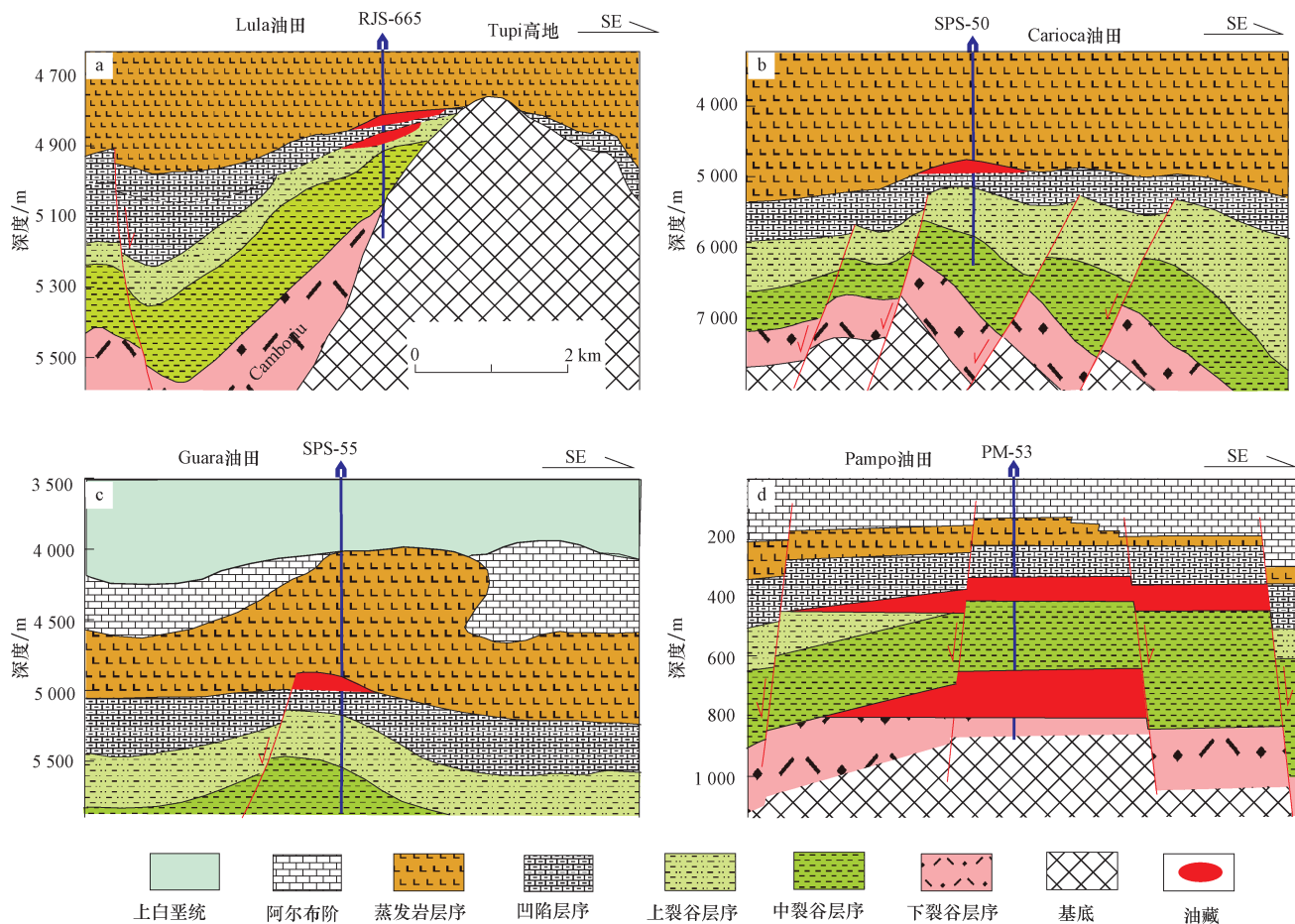


图8 大坎波斯盆地盐下圈闭类型

Fig. 8 Pre-salt trap types in Great Campos Basin

a. 地层尖灭型圈闭; b. 披覆背斜型圈闭; c. 断背斜型圈闭; d. 火山岩型圈闭

油气运移的指向区,因而是盐下勘探的最有利区带。

4 结论

1) 大坎波斯盆地构造演化经历了晚三叠世—侏罗纪的克拉通内拗陷、纽康姆期—巴雷姆期的大陆内裂谷、阿普特期的构造过渡、阿尔布期—三冬期的初始拉张和坎潘期—上新世的大规模裂陷5个阶段。

2) 大坎波斯盆地盐下裂谷系总体呈东西(倾向)分带、南北(走向)分段的“斜向棋盘”结构。倾向上按基底的埋深分为近岸低凹带、中部低凸带、近海低凹带和外部高地带4个构造分带;走向上一级调节断层带的构造调节作用形成了3个构造分段区在构造线展布、裂谷形态与沉积充填等方面的差异。

3) 裂谷系对盐下成藏的控制作用主要表现为烃源岩的成熟度、圈闭类型及优质储层的发育相带3个方面。大坎波斯盆地的外部高地带与中部低凸带既是盐下油气运移的聚集带,又是优质储层的发育相带,因而是盐下勘探的最有利区带。

参 考 文 献

- [1] Cainelli C, Mohriak W U. Geology of Atlantic eastern Brazilian basins [C]//1998 American Association of Petroleum Geologists International Conference and Exhibitions, Rio de Janeiro, 1998: 1-67.
- [2] IHS Energy Group. Basin Monitor, Santos Basin-Brazil, South Atlantic Ocean Region. Englewood, Colorado: IHS Energy Group, 2012.
- [3] Mohriak W, Macedo J, Castellani R, et al. Salt tectonics and structural styles in the deep-water province of the Cabo Frio region, Rio de Janeiro, Brazil [M] // Jackson M P A, Roberts D G, Snelson S, et al AAPG Memoir 65. Tulsa: AAPG, 1995: 273-304.
- [4] Peter Howard Wertheim. Pre-salt discoveries continue in Brazil-Potential for super-giant fields remains to be confirmed in ultra deepwater [J]. Offshore, 2008, 68(7): 36-41.
- [5] 刘深艳, 胡孝林, 李进波. 巴西桑托斯盆地盐下大发现及其勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2011, 4: 74-81.
Liu Shenyang, Hu Xiaolin, Li Jinbo. Great discovery and its significance for exploration in subsalt reservoir in Santos Basin, Brazil [J]. China Petroleum Exploration, 2011, 4: 74-81.
- [6] 何娟, 何登发, 李顺利, 等. 南大西洋被动大陆边缘盆地大油气田形成条件与分布规律—以巴西桑托斯盆地为例 [J]. 中国石油勘探, 2011, 3: 57-67.
He Juan, He Dengfa, Li Shunli, et al. Formation and distribution of giant oil and gas fields in passive continental margin of South Atlantic

- ocean—a case study of Santos basin in Brazil[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 3: 57–67.
- [7] Meisling K E, Cobbold P R, Mount V S. Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 1903–1924.
- [8] Modica C J, Brush E R. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 923–945.
- [9] Williams B G, Hubbard R J. Seismic stratigraphic framework and depositional sequences in the Santos Basin, Brazil[J]. Marine and Petroleum Geology, 1984, 1: 90–104.
- [10] Pereira M J, Feijó F J. Bacia de Santos[J]. Boletim de Geociências da Petrobrás, 1994, 8: 219–234.
- [11] 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): 369–378.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Qu Hongjun, et al. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 369–378.
- [12] Asmus H E, Baisch P R. Geological evolution of the Brazilian continental margin[J]. Episodes, 1983, 4: 3–9.
- [13] Unrug R. The assembly of Gondwanaland[J]. Episode, 1996, 19(1–2): 11–20.
- [14] Zalán P V, Wolff S, Astolfi M A M, et al. The Parana basin, Brazil [M]//Leighton M W, Kolata D R, Oltz D F, et al. Interior cratonic basins, AAPG Memoir 51. Tulsa: AAPG, 1990: 681–708.
- [15] Zalán P V, Wolff S, Conceição J C J, et al. Tectonics and sedimentation of the Paranã basin: Proceedings, Gondwana VII[J]. Universidade de São Paulo, 1991: 83–117.
- [16] Ojeda H A. Structural framework, stratigraphy and evolution of Brazilian marginal basins[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66: 732–749.
- [17] Szatmari P, Milani E, Lana M, et al. How South Atlantic rifting affects Brazilian oil reserves[J]. Oil & Gas Journal, 1985, 83(2): 107–113.
- [18] Campos C W, Miura K, Reis L A N. The East Brazilian continental margin and petroleum prospects[C]//Proceedings 9th World Petroleum Congress(Actes et Documents – 9eme Congres Mondial du Petrole). Chichester: John Wiley & Sons, 1975, 9(2): 71–81.
- [19] Ponte F C, Reiss J D. Eastern Brazil continental margin[J]. AAPG Bulletin, 1977, 61(9): 1321–1350.
- [20] Chang H K, Kowsmann R O, Figueiredo A M F, et al. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system[J]. Tectonophysics, 1992, 213(1–2): 97–138.
- [21] Figueiredo A M F, Braga J A E, Zabalaga H M C, et al. Recôncavo basin, Brazil: a prolific intracontinental rift basin[C]//Landon S M. Interior rift basins. AAPG Memoir 59. Tulsa: AAPG, 1995: 157–203.
- [22] Salem A M, Morad S, Mato L F, et al. Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Recôncavo Basin, Northeastern Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(7): 1015–1040.
- [23] Williams B G, Hubbard R J. Seismic stratigraphic framework and depositional sequences in the Santos Basin, Brazil[J]. Marine and Petroleum Geology, 1984, 1: 90–104.
- [24] Guardado L R, Gamboa L A P, Lucchesi C F. Petroleum geology of the Campos Basin, a model for a producing Atlantic-type basin[C]//Edwards J D, Santogrossi P A. Divergent/passive margin basins, AAPG Memoir 48. Tulsa: AAPG, 1990: 3–79.
- [25] Mohriak W, Hobbs R, Dewey J. Basin-forming processes and the deep structure of the Campos Basin, offshore Brazil[J]. Marine and Petroleum Geology, 1990, 7(2): 94–112.
- [26] 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]. Geophys. , 2009, 177: 1315–1333.
- [27] Nürnberg D, Müller R D. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present[J]. Tectonophysics, 1991, 191: 27–53.
- [28] Dickson W G, et al. Constraints for plate reconstruction using gravity data—implications for source and reservoir distribution in Brazilian and West African margin basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 309–323.
- [29] Gibson S A, Thompson R N, Leonards O H, et al. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil[J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 189–229.
- [30] Chang H K, Assine M L, Correa F S, et al. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulacao de hidrocarbonetos na Bacia de Santos[J]. Revista Brasileira de Geociências, 2008, 38(2): 29–46.
- [31] Yu Z, Lerche I, Lowrie A. Thermal impact of salt: simulation of thermal anomalies in the Gulf of Mexico[J]. Pageogh, 1992, 138(2): 181–192.
- [32] 汪新伟, 邬长武, 郭永强, 等. 巴西桑托斯盆地卢拉油田成藏特征及对盐下勘探的启迪[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(3): 61–69.
Wang Xinwei, Wu Changwu, Guo Yongqiang, et al. Accumulation feature of Lula oilfield and its exploratory implication for subsalt reservoirs in Santos basin, Brazil[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(3): 61–69.
- [33] 白国平, 曹斌凤. 全球深层油气藏及其分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 19–25.
Bai guoping, Cao binfeng. Characteristics and distribution patterns of deep petroleum accumulations in the world[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 1925.
- [34] 熊利平, 邬长武, 郭永强, 等. 巴西海上坎波斯与桑托斯盆地油气成藏特征对比研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 419425.
Xiong Liping, Wu Changwu, Guo Yongqiang, et al. Petroleum characteristics in Campos and Santos Basin, offshore Brazil[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 419–425.

(编辑 董立)