

巴西桑托斯盆地深水盐下油气成藏地质风险及勘探方向

温志新^{1,2}, 王兆明¹, 李刚³, 贺正军¹, 宋成鹏¹, 陈瑞银¹, 刘小兵¹, 刘祚东¹, 季天愚¹, 耿珂¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069;

3. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034)

摘要:桑托斯盆地是全球油气最为富集的盆地之一, 近年来油气勘探陆续揭示了一系列地质风险, 成为下一步超前选区与勘探部署的关键制约因素。基于三维地震资料解释、盐下已发现油气田解剖以及失利井分析, 识别出储层物性差、盖层缺失和高CO₂充注3类主要地质风险。多期火山活动是地质风险的主要诱因, 具体表现为: 火山活动导致晚期构造发育, 致使构造高部位储层不发育; 火山活动形成盐窗, 破坏盐盖层完整性, 引发油气逸散; 火山活动诱发深大断裂, 形成高CO₂气藏。通过厘定盆地5期火山活动时间、圈闭定型时间以及油气成藏关键时刻的时序关系, 结合已发现油气藏案例的详细解剖和成藏机理分析, 建立了圈闭定型后存在火山活动与无火山活动两种情景下的5类CO₂充注模式。研究成果有效规避了主要地质风险, 指导了超前选区和勘探部署。同时指出, 盆地中央坳陷带的坳中隆起、东部隆起带的小型孤立台地以及东部坳陷带的构造圈闭, 是未来盐下油气勘探的重要领域和方向。

关键词:地质风险; 湖相碳酸盐岩; 火成岩; CO₂气藏; 桑托斯盆地; 巴西

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Geological risks and exploration targets of deep-water pre-salt hydrocarbon reservoirs in the Santos Basin, Brazil

WEN Zhixin^{1,2}, WANG Zhaoming¹, LI Gang³, HE Zhengjun¹, SONG Chengpeng¹, CHEN Ruiyin¹, LIU Xiaobing¹,
LIU Zuodong¹, JI Tianyu¹, GENG Ke¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China)

Abstract: The Santos Basin is one of the most prolific oil and gas basins globally. However, recent hydrocarbon exploration has revealed a series of geological risks within the basin, which emerge as key factors restricting prospect screening and deployment for subsequent exploration. In this study, based on the interpretation of 3D seismic data and an analysis of both discovered pre-salt oil and gas fields and dry exploratory wells, three major types of geological risks are identified: poor reservoir physical properties, absence of cap rocks, and elevated CO₂ concentrations. These risks are primarily induced by multi-stage volcanic activity. First, volcanic activity led to the formation of late-stage structures, resulting in underdeveloped reservoirs in structural highs. Second, volcanic activity gave rise to salt windows, disrupting cap-rock integrity and thereby inducing hydrocarbon dissipation. Third, volcanic activity triggered the activation of deep-seated faults, facilitating the formation of high-CO₂ gas reservoirs. By determining the chronological relationships among the five distinct stages of volcanic activity, timing of trap formation, and critical periods for hydrocarbon accumulation in the Santos Basin, while combining a detailed analysis of discovered hydrocarbon reservoirs and an investigation of hydrocarbon accumulation mechanisms within the basin, we establish five CO₂ charging patterns under two scenarios: the presence and absence of volcanic activity following trap formation. The results of this study help effectively circumvent major geological risks and guide prospect screening and deployment for

收稿日期: 2025-09-25; 修回日期: 2025-11-25。

第一作者简介: 温志新(1968—), 男, 博士、教授级高级工程师, 全球含油气盆地分析与战略选区。E-mail: wenzhixin@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 王兆明(1975—), 男, 博士、高级工程师, 全球油气资源评价与超前选区。E-mail: wangzhaoming@petrochina.com.cn。

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400801, 2025ZD1400802, 2025ZD1400806); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ07)。

subsequent hydrocarbon exploration efforts. Furthermore, the results reveal that significant targets for future pre-salt hydrocarbon exploration in the basin include intra-depression uplifts in the central depression zone, small isolated platforms in the eastern uplift zone, and the structural traps in the eastern depression zone.

Key words: geological risk, lacustrine carbonate rock, igneous rock, CO₂ gas reservoir, Santos Basin, Brazil

引用格式:温志新,王兆明,李刚,等.巴西桑托斯盆地深水盐下油气成藏地质风险及勘探方向[J].石油与天然气地质,2026,47(4):1329-1339. DOI:10.11743/ogg20260417.

WEN Zhixin, WANG Zhaoming, LI Gang, et al. Geological risks and exploration targets of deep-water pre-salt hydrocarbon reservoirs in the Santos Basin, Brazil[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1329-1339. DOI: 10.11743/ogg20260417.

巴西桑托斯盆地油气地质条件优越,特别是盐下油气系统勘探成功率高,单体油气田规模大,一度被视为地质风险极低、勘探潜力巨大的重点区域,业界曾认为“只要能找到盐下构造圈闭,就能发现大油田”。因此,国际石油公司纷纷支付高额签字费竞相进入该盆地^[1-7]。截至目前,该盆地已陆续发现卢拉、里贝拉、布兹奥斯和阿拉姆等13个巨型油田,单井产能可达 3×10^4 bbl/d^[6-8]。然而,自2015年以来,以埃克森美孚为代表的国际石油公司陆续对其高价获取的区块实施了钻探,但勘探过程并非一帆风顺,揭示出高CO₂含量、储层物性差、火成岩发育以及气/油比高等一系列地质风险^[9-11]。据统计,2015年至今,国际石油公司在桑托斯盆地盐下成藏组合的风险勘探商业成功率已低于30%,仅埃克森美孚一家公司就先后进入30个区块,支付权益签字费超过20亿美元,并钻探9口探井,仅发现1个商业油田。因此,在桑托斯盆地这类富油气盆地中,如何有效识别并规避地质风险,已成为当前油气勘探中至关重要且极具现实意义的核心问题。

1 地质背景

桑托斯盆地位于巴西东部海域,总面积约为 33×10^4 km²。平面上由陆向海可划分为西部斜坡带、西部坳陷带、西部隆起带、中央坳陷带、东部隆起带及东部坳陷带等6个一级构造单元(图1)。受裂谷、过渡和漂移3阶段原型盆地演化控制,盆地垂向上呈现断陷、过渡和坳陷3层结构^[1-3]。盐下构造以掀斜断块、地堑和地垒为主。裂谷期早期发育一系列NE-SW向高角度正断层;至裂谷后期,湖盆封闭,在构造抬升或岩浆作用形成的基底古隆起上发育生物礁滩沉积,因此,盐下圈闭主要包括与正断层相关的倾斜断块、地垒和铲状断块,以及与火山作用有关的底辟背斜、断背斜和古潜山等类型;盐上则以各类盐构造圈闭和重力流砂岩储层为主^[12-20]。

桑托斯盆地的形成和演化与中生代以来冈瓦纳大

陆的解体以及大西洋的扩张有关。盆地主要经历了早白垩世初一早阿普特期裂谷、阿普特期—早阿尔布期过渡和晚阿尔布期—现今被动大陆边缘漂移3大构造演化阶段,各阶段依次发育了裂谷期陆相层序、过渡期盐岩层序以及被动陆缘期海相层序^[1,13](图1)。

在裂谷阶段,陆内裂谷作用发育形成大量与基底活动相关的垒-堑相间构造,断裂系统广泛发育。基底之上先是被地幔上涌形成的大量喷发岩充填,之后沉积了一套河流相-湖泊相沉积地层。裂谷末期发生海侵,其中PIC组和ITP组的湖相页岩构成盆地盐下最主要的烃源岩^[21];裂谷晚期在远离盆地物源区的ITP组和BVE组内发育湖相生物灰岩,成为盐下最重要的储集层^[22-26]。裂谷阶段主要发生了3期以喷发岩为主的火成岩事件,火山作用对构造形成、储层性质和烃源岩演化均具有重要影响^[9,28-30]。

在陆间裂谷发育的过渡阶段,盆地处于稳定的构造环境,热沉降作用导致陆壳拉伸减薄,形成“碟状”坳陷构造。伴随南大西洋的张开与海水侵入,沉积环境逐步向海相过渡。受南部沃尔维斯海脊的遮挡,海水流动不畅,盆地呈现局限海环境,阿普特阶主要沉积了一套厚层蒸发岩(Ariri组盐岩),构成盆地盐下含油气系统中优质的区域性盖层^[30-31]。该套盐岩分布在盆地东部深水区,横向展布连续,厚度大于100 m,最厚可达2 500 m。往盆地西部浅水区盐岩层厚度变化剧烈,从上百米到几米直至尖灭,并伴随“盐窗”发育。随着大西洋持续扩张,盆地进入被动陆缘阶段,沉积环境变为开阔海,沉积充填了一套巨厚的海相地层(阿尔布阶—第四系),主要发育近岸碳酸盐岩、深海页岩以及深海浊积岩。在过渡和漂移阶段,受地壳减薄和深大断裂活动影响,也发育3期火山活动,对油气成藏过程产生重要影响。

根据盆地构造-沉积演化特征,以阿普特阶盐岩盖层为界,纵向发育3套叠置的沉积层系,形成“下湖、上海”2套含油气系统及“盐上、盐下”2套成藏组合。其中,盐下成藏组合最为富集油气^[1-2,15-17](图1)。盐

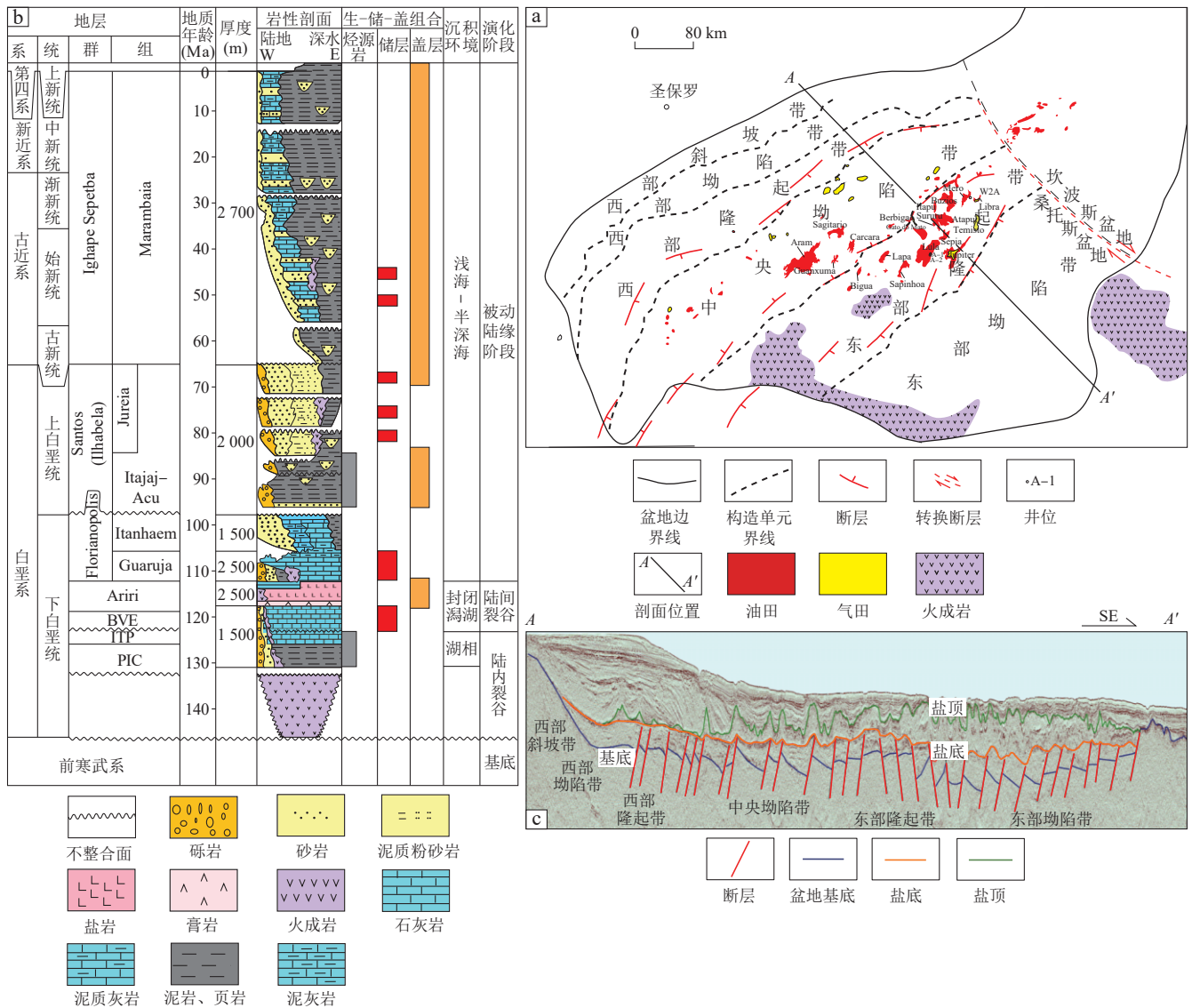


图1 桑托斯盆地油气地质条件

Fig. 1 Composite diagrams showing the petroleum geology of the Santos Basin, Brazil

a. 桑托斯盆地盐底构造单元划分; b. 桑托斯盆地地层综合柱状图; c. 桑托斯盆地NW-SE向二维地震剖面(剖面位置见图1a)

下裂谷大型断陷湖盆发育的优质烃源岩,为油气提供了充足的物质基础^[21-22],盆地内发育坳间隆起型、坳中断隆型及热液石灰华塔丘型3种类型的碳酸盐岩台地,相应形成了3类盐下湖相碳酸盐岩优质储层^[18-20],储层之上直接覆盖着连续分布的巨厚蒸发岩,构成盆地最优的封盖条件。这些优越的生-储-盖配置关系,共同控制了盆地大油气田的形成与富集^[1-7]。

2 油气成藏主要地质风险

桑托斯盆地尽管具备油气富集的优越条件,但近年勘探实践揭示其仍存在多种地质风险。通过对盐下全部已发现油田和所有失利井的系统分析,识别出盆

地主要存在储层、盖层和高CO₂充注3类地质风险。

2.1 储层风险

盆地盐下大油气田的储层主要为发育于古构造高点的湖相碳酸盐岩,因此古构造高点对储层形成与油气聚集具有关键控制作用。虽然通过对盐底构造层的解释成图可较容易识别现今构造的高低,但现今构造高部位未必是储层沉积时的古构造高点,需要结合沉积地层厚度等特征综合判断。部分现今构造高的区域,受晚期岩浆活动引发的差异隆升和构造反转影响,形成“新构造”。在BVE组储层沉积期,这些区域处于构造低部位,未发育藻礁灰岩储层,而是沉积了深水泥岩或泥灰岩,导致储层缺乏。盐底层拉平是识别构造

新老的重要手段之一。如图2所示,Carcara,Bem-Te-Vi和Bigua3个油藏的连井深度域地震剖面显示,Bigua油藏处于构造最高部位,但钻探结果显示其BVE组储层缺失;现今构造较低的Bem-Te-Vi油藏BVE组储层厚度为45 m,而现今构造最低的Carcara油藏储层厚度达378 m。通过盐底构造层层拉平分析可见,在BVE组(盐底)沉积期,Carcara油藏实为构造最高的部位,属真正的古隆起,因此礁灰岩生物建造最为发育;而Bigua油藏在当时处于相对低部位,储层不发育(图2)。

2.2 盖层风险

桑托斯盆地过渡期Ariri组盐岩具有分布范围广、厚度大、封盖能力强的特征。平面上,盐岩呈NE-SW向展布,南北长约650 km,东西宽约380 km。其中,厚层盐岩主要分布于盆地东部区域,横向展布稳定,无“盐窗”发育,直接覆盖在碳酸盐岩之上,构成高效的区域盖层,使油气得以有效封存并聚集成藏于盐下圈闭内。目前盐下已发现的所有大油气田均位于此类厚层蒸发盐岩覆盖区。盆地西部为盐岩过渡区,盐层厚度

变化剧烈,从上百米到几米直至尖灭^[30-31]。受盐岩沉积后晚期火山喷发活动影响,火山喷发岩刺穿盐岩盖层,形成天窗,导致盖层缺失,油气通过盐窗和盐相关断层向上运移至盐上层系成藏(图3)。例如,Parti构造圈闭落实,盐下发育300 m厚的玄武岩夹薄层灰岩储层,孔隙度达9.7%,却为水层,主要原因是盐窗发育致使盖层缺失。

2.3 CO₂充注风险

根据前人研究及火成岩定年数据分析,桑托斯盆地主要发育5期火成岩^[9,28-29](图1b;表1),火山活动与圈闭定型、油气成藏和CO₂充注时间的关系较为复杂^[10-11]。盆地圈闭定型于阿普特末期(约113 Ma),油气主成藏期为晚古新世—早中新世(约60~20 Ma),在早—中阿普特期先后发生3期火山活动,以喷发岩为主,该时期主要的构造圈闭尚未形成,火山作用伴生的CO₂难以聚集,多呈散失状态。第4期火山作用发生在圣通期—坎潘期(约80 Ma),喷发岩与侵入岩并存,火山岩发育通常伴生CO₂充注。晚期的火山作用总体来

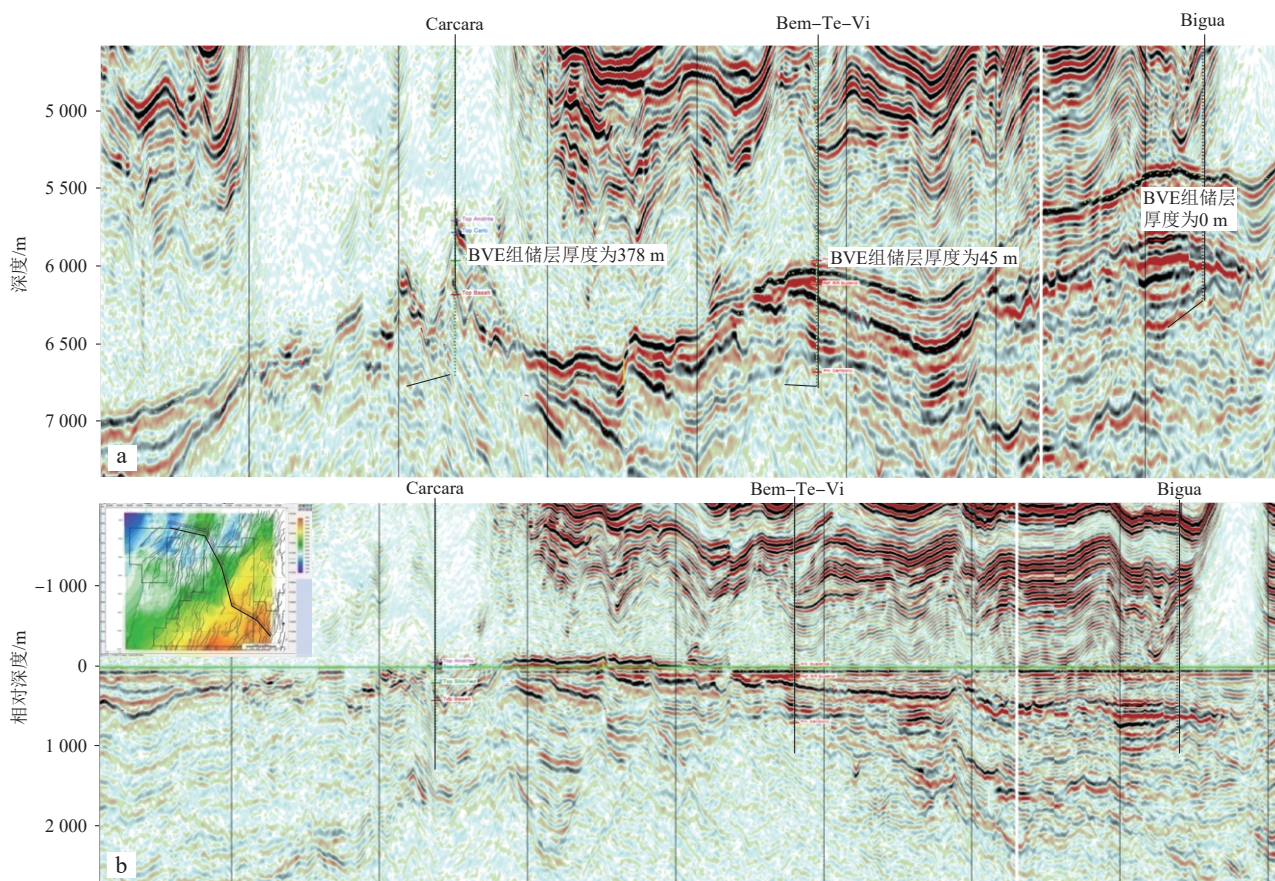


图2 桑托斯盆地 Carcara,Bem-Te-Vi 和 Bigua 油藏原始地震剖面及层拉平地震剖面对比

Fig. 2 Comparison of original and horizon flattening-derived seismic sections for the Carcara, Bem-Te-Vi, and Bigua Reservoirs in the Santos Basin

a. 桑托斯盆地过3个油藏地震剖面;b. 桑托斯盆地过3个油藏盐底层拉平后地震剖面

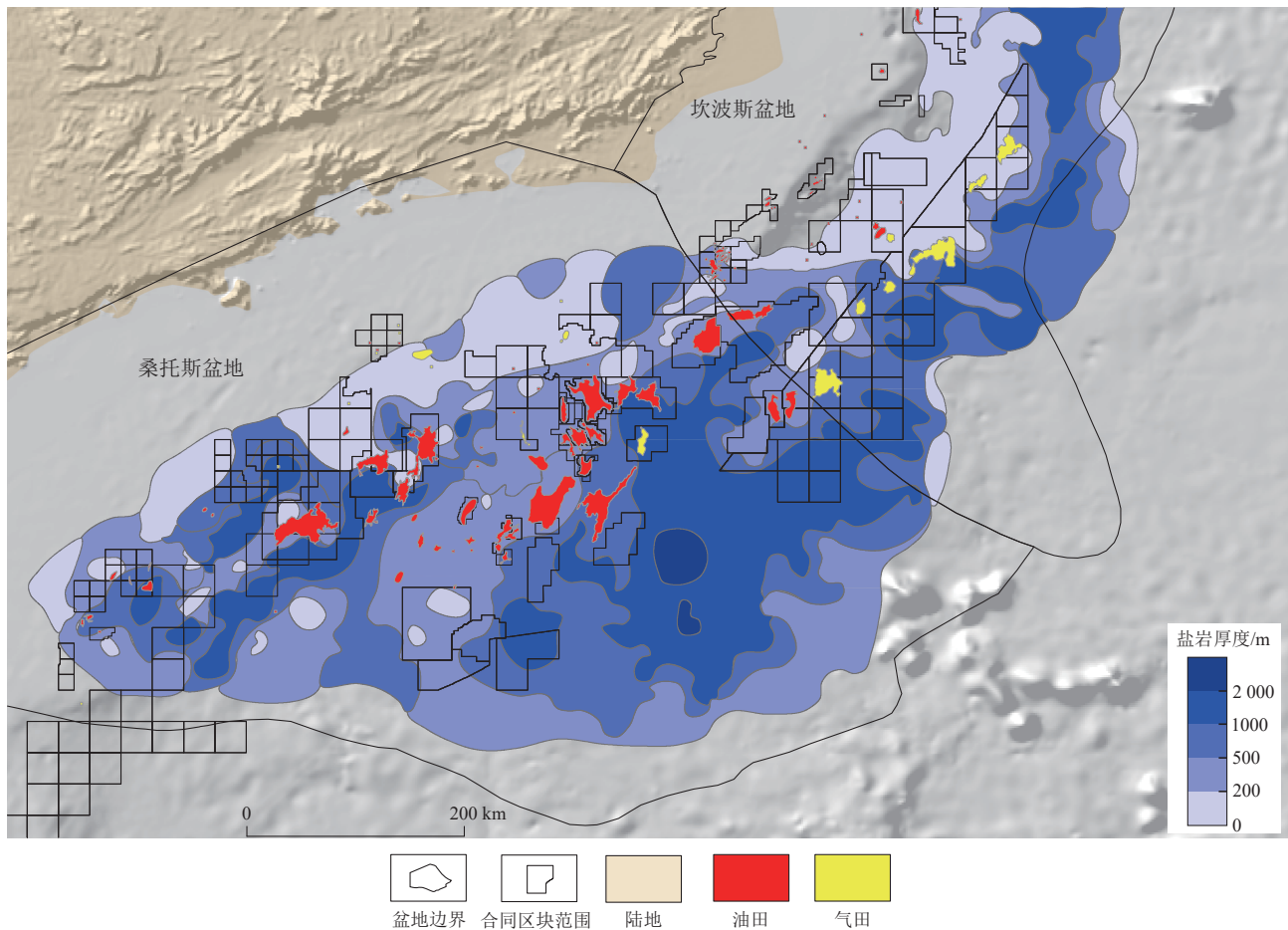


图3 桑托斯盆地盐岩厚度等值线

Fig. 3 Isopach map of salt rocks in the Santos Basin

表 1 桑托斯盆地关键地质事件统计

Table 1 Statistics of key geological events in the Santos Basin

地质年代	地质年龄/Ma	火山岩类型	地质事件	
中中新世以来	约 20	—	火山休眠期	基于断裂 CO ₂ 幕式充注期
晚古新世—早中新世	60 ~ 20	—	主成藏期	
圣通期—坎潘期	约 80	喷发岩、侵入岩	火成岩发育, 伴生 CO ₂ 充注	
阿普特末期	约 113	—	圈闭定型期	
中阿普特期	117 ~ 115	喷发岩	火成岩发育, 伴生 CO ₂ 散失	
	130 ~ 121	喷发岩		
早阿普特期	约 130	喷发岩		

注:“—”表示无火山活动。

说对油气成藏具有破坏性;此时构造圈闭已经形成,火山喷发产生的CO₂可在适当条件下聚集于构造高部位,形成高CO₂气藏;同时,盐上层系中的晚期火山喷发可能形成火山岩天窗,导致盖层遭受破坏。

气体样品地球化学分析表明,桑托斯盆地盐下CO₂主要为深部幔源成因^[10-11,32-34]。已发现油气田中的CO₂含量总体呈现“西低东高”的分布格局,主要受地壳厚度和深大断裂控制:地壳厚度西厚、东薄,越向东(向海方向),陆壳越薄,深大断裂越容易与深部

幔源沟通(图4)。基于对大量地震剖面的解析和已发现油气藏的解剖,结合圈闭定型时间、成藏关键时刻及火山活动发育时间的先后,提出圈闭定型后存在火山活动和无火山活动两种情景下5类CO₂充注模式。

2.3.1 圈闭定型后,无火山活动,存在2种模式

1) Lula模式:低CO₂含量油藏

在阿普特末期(约113 Ma)构造圈闭定型后,如果后

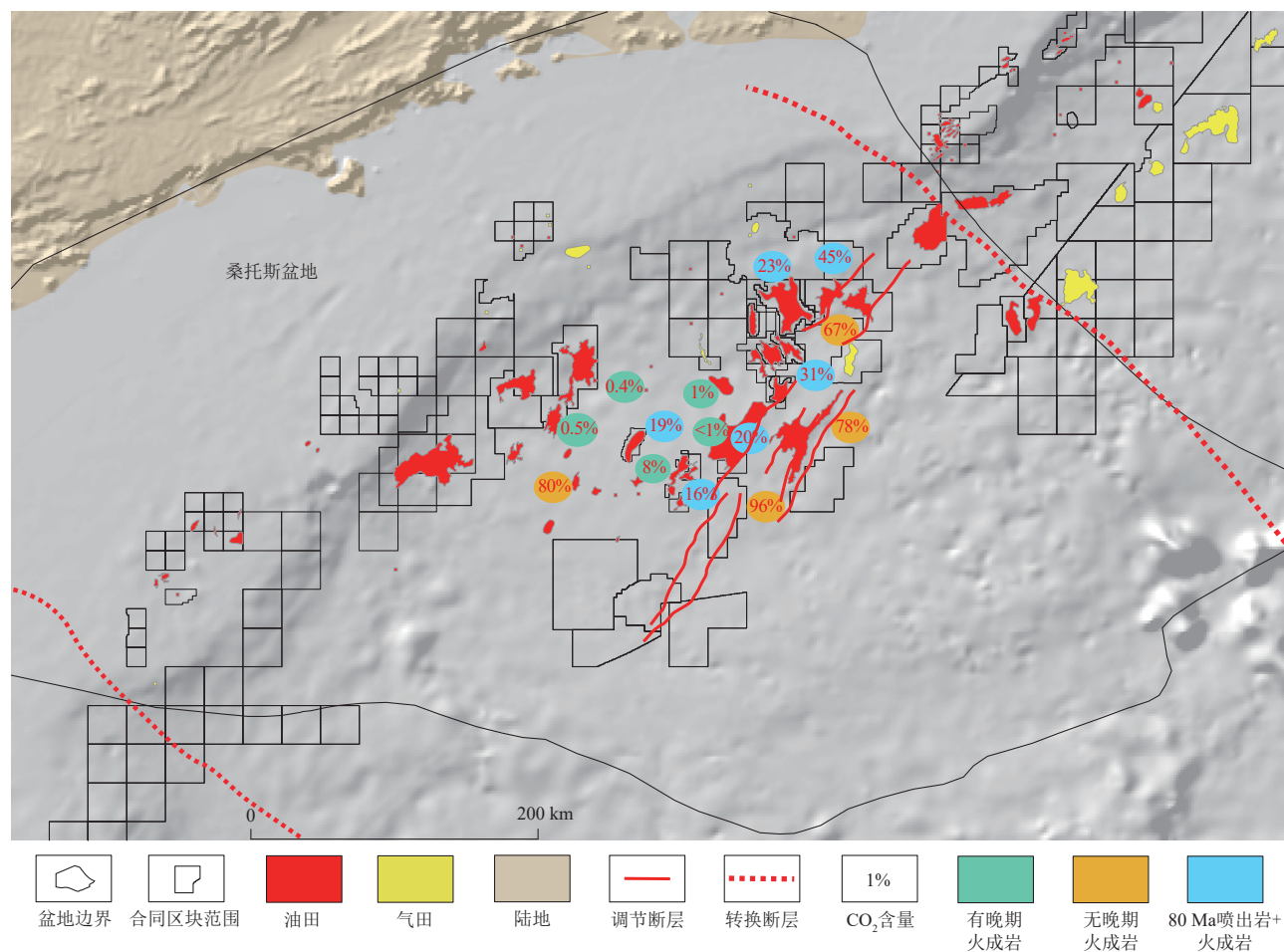


图4 桑托斯盆地已发现油气田CO₂含量分布

Fig. 4 Map showing the distribution of CO₂ content in oil and gas fields discovered in the Santos Basin

期没有发生火山活动,油气于60~20 Ma期间大规模生-排烃,并运移至构造高部位聚集成藏,在油气大规模成藏后,由于深大断裂的沟通,深部幔源的CO₂可沿深大断裂向上运移。当构造宽缓且闭合幅度较低、单侧发育断裂时,其CO₂的充注强度一般不大。进入油藏的CO₂被原油溶解稀释,因此整体CO₂含量不高。例如Lula油田:圈闭面积1 050 km²,幅度450 m,为单断型构造。靠近主断裂处,油藏溶解气中CO₂含量可达20%;远离主断裂CO₂含量则降至1%,油藏内未形成CO₂气顶(图5)。

2) Jupiter模式:带油环高CO₂含量气藏

在构造圈闭定型后,若油气大规模成藏,且背斜构造两侧均发育深大断裂、闭合幅度大,背斜相对窄而陡,CO₂可沿深大断裂双源供给,充注强度大,进入圈闭内的CO₂数量多且分布集中,易于在构造最高部位形成纯CO₂气顶。例如Jupiter油气藏:圈闭面积417 km²,闭合幅度1 200 m,为双断型构造,CO₂含量高达76%~79%,形成带油环的CO₂气藏。另外如Peroba气藏:圈闭面积356 km²,闭合幅度985 m,同为

双断型构造,钻探证实CO₂含量高达96%,推测亦带有油环(图5)。

2.3.2 圈闭定型后,有火山活动,可能存在3种模式

1) Libra西区模式:较高CO₂含量油藏

在阿普特末期(约113 Ma)构造圈闭定型后,至约80 Ma发生了火山活动,在构造高部位形成火成岩侵入,一种情境是晚期的火山活动突破盐岩盖层,导致盐上发育侵入体,伴随的CO₂也部分逸散,致使圈闭未能形成纯CO₂气藏。油气于60~20 Ma期间大规模生-排烃,向构造高部位聚集成藏,在油气大规模成藏后,深部幔源的CO₂沿单侧深大断裂向上运移,充注强度较弱。由于原已形成的油藏规模较大,进入油藏内的CO₂被原油溶解稀释,无法形成独立气顶,整个油藏的CO₂含量中等。如Libara西油藏:圈闭面积300 km²,闭合幅度650 m,为单断型宽缓背斜,钻探显示CO₂含量约45%,无CO₂气顶形成(图6)。

2) Libra中区模式:带油环高CO₂含量气藏

该模式与前述情境类似,区别在于晚期火山活动

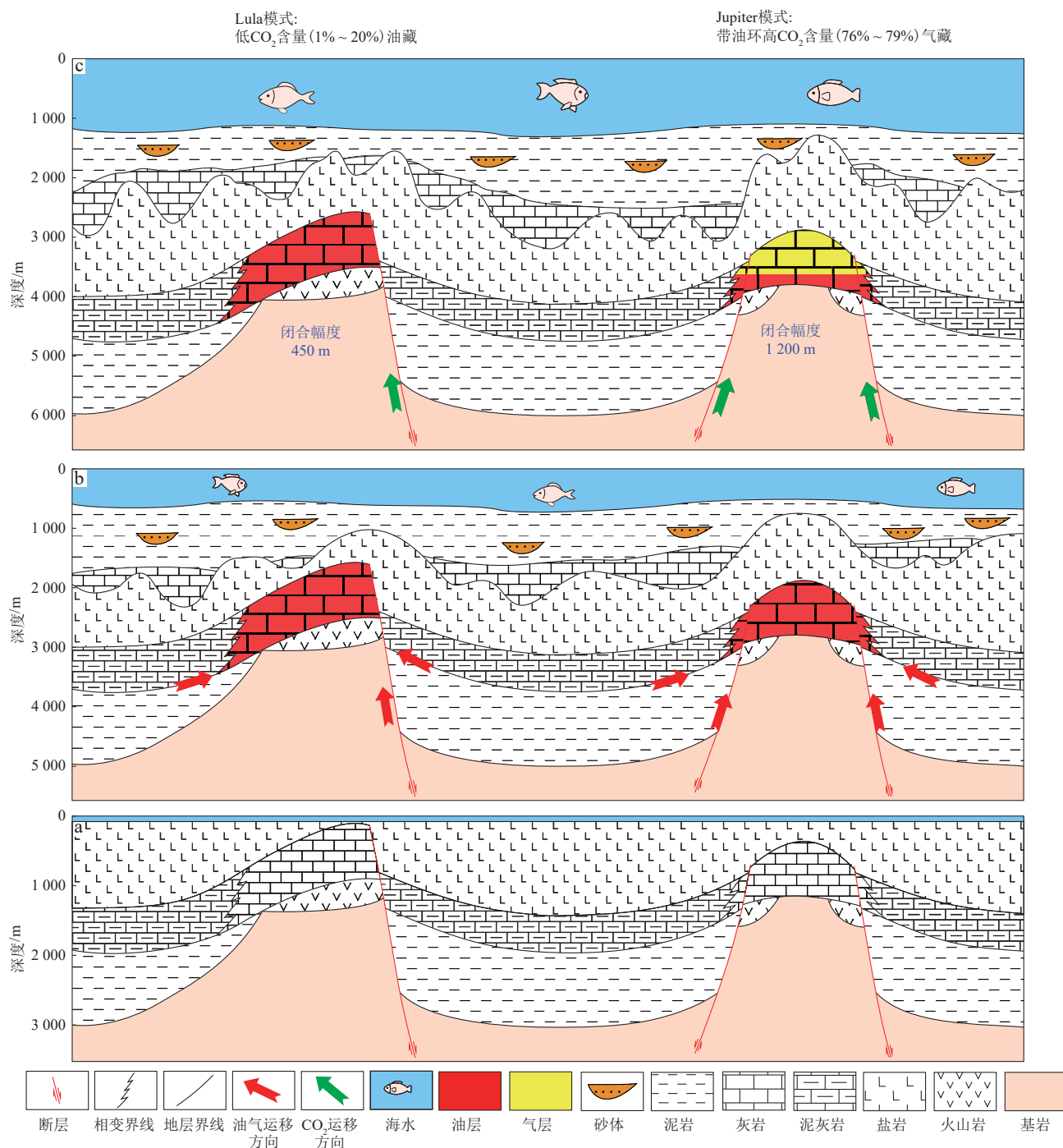


图5 桑托斯盆地圈闭定型后无火山活动情景下两种CO₂充注模式示意图(Lula模式和Jupiter模式)

Fig. 5 Two CO₂ charging patterns in the absence of volcanic activity following trap formation (the Lula and Jupiter patterns)

a. 盐下圈闭定型期(113 Ma); b. 主要成藏期(60~20 Ma); c. CO₂充注期(20 Ma以来)

未突破盐岩盖层,伴随的CO₂亦未突破盐盖层释放,但也未形成纯CO₂含量气藏。随后在约60~20 Ma期间,油气在背斜高部位聚集成藏。此后,CO₂持续沿着深大断裂不断充注,在闭合幅度大的紧闭背斜内形成带油环高CO₂气藏。例如Libra中区:圈闭面积214 km²,闭合幅度900 m,为单断型紧闭背斜,钻探证实CO₂含量达67%,发育CO₂气顶并伴有油环(图6)。

3) 待证实模式:高CO₂含量气藏

该模式尚未实际钻遇,目前仅为理论推测。也即在圈闭定型后,晚期火山活动直接在构造高部位形成CO₂气藏,占据构造高部位,导致后期油气成藏时无法有效充注至圈闭内,从而形成高含CO₂气藏。此模式有待今后勘探实践进一步验证,目前尚无具体实例(图6)。

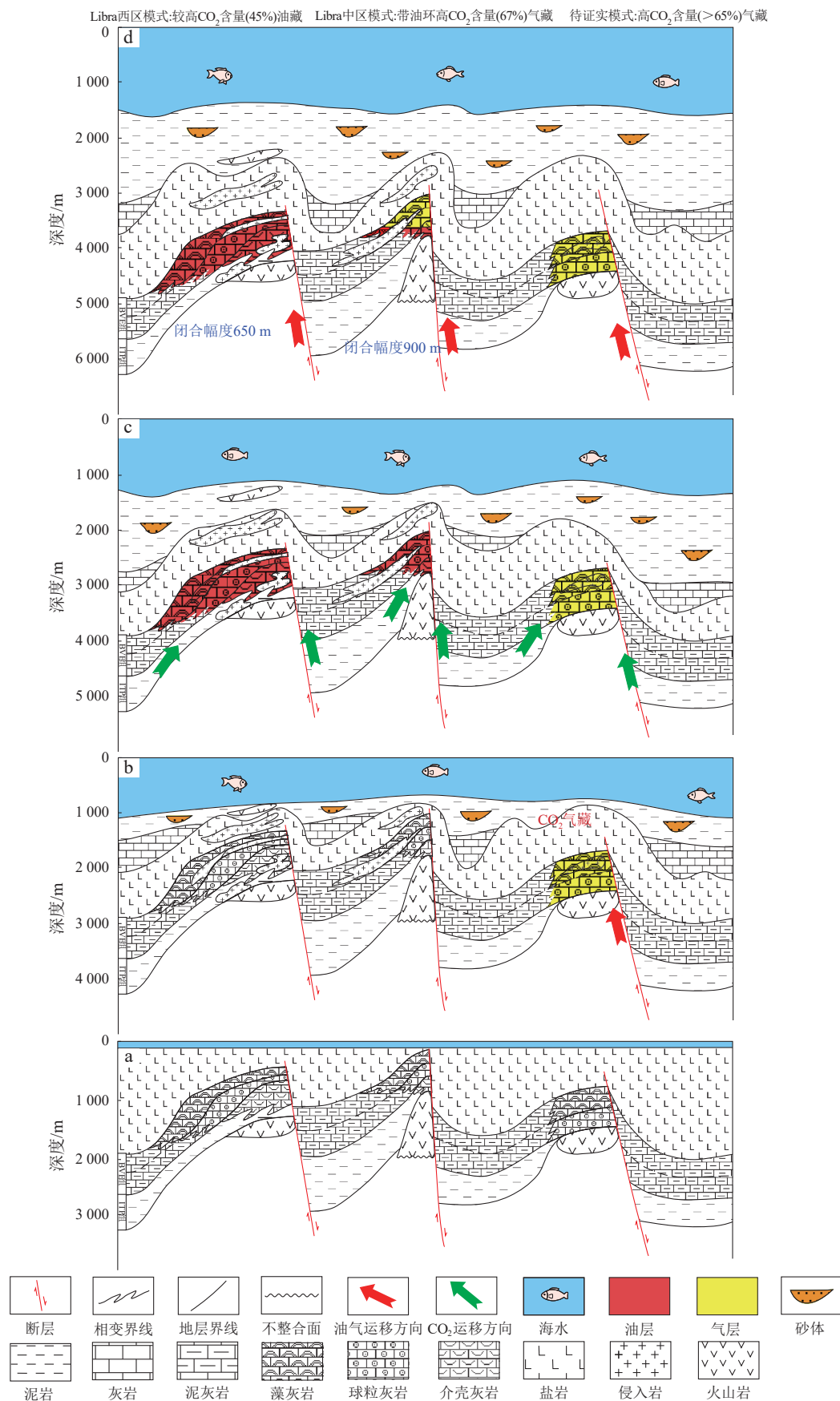


图6 桑托斯盆地圈闭定型后有火山活动情景下可能存在的3种CO₂充注模式示意图

Fig. 6 Three potential CO₂ charging patterns in the presence of volcanic activity following trap formation

a. 盐下圈闭定型期(约113 Ma); b. 火山活动期(约80 Ma); c. 主要成藏期(60 ~ 20 Ma); d. CO₂充注期(20 Ma以来)

3 未来勘探方向

在桑托斯盆地,规避地质风险的关键可概括为“构造要老、火山岩要早和少、断层要小”。得益于桑托斯盆地优越的地质条件,只要有效避开上述地质风险,其余符合构造条件的圈闭均为有利钻探目标,具备发现大型油气田的良好潜力^[1-3,35]。

3.1 中央坳陷带的坳中隆

盆地内的火成岩活动是引发其它地质风险的主要因素,整体表现出由陆向海火成岩及CO₂发育程度逐渐减弱的特征,中央坳陷带由于陆壳相对较厚,深大断裂沟通幔源并伴生火成岩和CO₂的概率较低。加之其位于主力生烃坳陷内,因此油气充注强度大。近年来,随着阿拉姆(Aram)大型构造圈闭的成功钻探,证实了西部坳陷带的油藏普遍具有CO₂含量低、气/油比低和地层压力略偏高的特点。该区域可继续围绕西部坳陷带寻找盐下低幅度构造圈闭。此外,应特别重视热液石灰华塔丘型孤立碳酸盐岩台地的勘探潜力。这类台地通常位于构造高部位,呈典型的帐篷状构造形态,圈闭面积一般不大,但连续储层的厚度会比较大,整体储量规模也较为可观。

3.2 东部隆起带的小型孤立台地

东部隆起带勘探程度较高,是盆地内已发现大型油气田最为集中的区域,油气主要富集于中、北段的大型坳间断隆型孤立台地,该类圈闭规模大、油气丰度高。下一步勘探除继续向南段断隆型台地拓展外,还需重点关注中、北段已发现油气田周缘的中小型孤立台地。此类台地储层仍以盐下生物灰岩为主,尽管构造圈闭规模较小,但因盐下碳酸盐岩储层厚度大、初始产量高,且进入成本与政府利润油分成比例较低,整体仍具备良好的经济效益。需要注意的是,在部署过程中应规避从Jupiter到里贝拉东部构造呈NE-SW向的高CO₂含量气藏发育带。

3.3 东部坳陷带的构造圈闭

东部坳陷带因水深较大,勘探程度目前相对较低。近年来,多家国际石油公司围绕该领域陆续获取多个区块并开展钻探,地质成功率相对较高。但该区主要面临烃源岩热演化程度偏高的问题,已发现的油气田普遍具有高气/油比特征。受当前巴西天然气价格制约,这些资源尚不具备商业开发条件。然而,随

着“双碳”目标的持续推进,全球对天然气资源的需求将日益增长,该区域未来仍是非常值得重视的勘探领域。

4 结论

1) 巴西桑托斯盆地以优越的油气地质条件和巨大资源潜力著称,但近年勘探陆续揭示了储层物性差、火成岩发育及CO₂含量高等地质风险,已成为选区评价和勘探突破的主要瓶颈。基于对桑托斯盆地高精度三维地震资料的解释、盐下已发现油气田的解剖、多年新项目评价与勘探实践,以及对所有失利井的系统分析,识别出储层物性差、盖层缺失和强CO₂充注3类主要地质风险。盆地内不同阶段发育的5期火山活动是导致优质储层缺失、盐岩盖层破坏及CO₂含量偏高的主要诱因。具体表现为:火山活动形成的晚期构造往往造成构造高部位储层不发育;火山活动可形成盐窗,破坏盐盖层封闭性,引起油气泄漏;火山活动还诱发深大断裂活化,形成高CO₂含量气藏。这些因素是导致勘探失利的关键。

2) 通过厘定盆地5期火山活动的具体时间、主要构造圈闭定型时间以及油气成藏关键时刻的先后时序关系,分别提出了圈闭定型后存在火山活动与无火山活动两种情景下的5类CO₂充注模式,并通过已发现油藏实例进行对应分析,合理解释了不同区域CO₂含量的差异和成因模式。该研究成果为有效规避这3类地质风险提供了依据,指导了勘探超前选区、新项目获取和具体部署。同时指出,盆地中央坳陷带的坳中隆构造、东部隆起带的小型孤立台地和东部坳陷带的构造圈闭,是未来盐下油气勘探的重要潜力区与方向。

参 考 文 献

- [1] 窦立荣,温志新,王兆明,等. 桑托斯盆地盐下孤立碳酸盐台地沉积建造与深水大油田[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 829-840.
DOU Lirong, WEN Zhixin, WANG Zhaoming, et al. Sedimentary build-ups of pre-salt isolated carbonate platforms and formation of deep-water giant oil fields in Santos Basin, Brazil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 829-840.
- [2] 温志新,徐洪,王兆明,等. 被动大陆边缘盆地分类及其油气分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 678-688.
WEN Zhixin, XU Hong, WANG Zhaoming, et al. Classification and hydrocarbon distribution of passive continental margin basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 678-688.
- [3] 温志新,吴亚东,边海光,等. 南大西洋两岸被动陆缘盆地

- 结构差异与大油气田分布[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 132-141.
- WEN Zhixin, WU Yadong, BIAN Haiguang, et al. Variations in basin architecture and accumulation of giant oil and gas fields along the passive continent margins of the South Atlantic [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(4): 132-141.
- [4] ESTRELLA G. Breaking paradigms: Giant and super-giant discoveries in Brazil [R]. Denver: AAPG 2009 Annual Convention & Exhibition, 2009.
- [5] 张金虎, 金春爽, 祁昭林, 等. 巴西深水含油气盆地石油地质特征及勘探方向[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(6): 23-31.
- ZHANG Jinhu, JIN Chunshuang, QI Zhaolin, et al. Petroleum geology and future exploration in deep-water basin of Brazil [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(6): 23-31.
- [6] 范国章, 史卜庆, 杨柳, 等. 巴西桑托斯盆地盐下油气分布特征与富集规律[J]. 海相油气地质, 2022, 27(4): 337-347.
- FAN Guozhang, SHI Buqing, YANG Liu, et al. Distribution and accumulation characteristics of pre-salt oil-gas fields in Santos Basin, Brazil [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2022, 27(4): 337-347.
- [7] 何文渊, 史卜庆, 范国章, 等. 巴西桑托斯盆地深水大油田勘探实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 227-237.
- HE Wenyuan, SHI Buqing, FAN Guozhang, et al. Theoretical and technical progress in exploration practice of the deep-water large oil fields, Santos Basin, Brazil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 227-237.
- [8] 窦立荣. 埃克森美孚公司大举进入巴西深水领域[J]. 世界石油工业, 2019, 26(3): 71-73.
- DOU Lirong. ExxonMobil enters deep water in Brazil [J]. World Petroleum Industry, 2019, 26(3): 71-73.
- [9] 赵健, 张洁, 赵俊峰, 等. 巴西桑托斯盆地C区块火成岩发育特征及对油气成藏的影响[J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 60-68.
- ZHAO Jian, ZHANG Jie, ZHAO Junfeng, et al. Characteristics of igneous rocks and their significance in hydrocarbon accumulation in Block C of Santos Basin, SE Brazil [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 60-68.
- [10] 赵健, 赵俊峰, 任康绪, 等. 巴西桑托斯盆地CO₂区域分布及主控因素[J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3217-3229.
- ZHAO Jian, ZHAO Junfeng, REN Kangxu, et al. Distribution and main controlling factors of CO₂ in Santos Basin, Brazil [J]. Earth Science, 2021, 46(9): 3217-3229.
- [11] GAMBOA L, FERRAZ A, BAPTISTA R, et al. Geotectonic controls on CO₂ formation and distribution processes in the Brazilian pre-salt basins [J]. Geosciences, 2019, 9(6): 252.
- [12] COBBOLD P R, MEISLING K E, MOUNT V S. Reactivation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos Basins, southeastern Brazil [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 1925-1944.
- [13] HUNG K C, KOWSMANN R O, FIGUEIREDO A M F, et al. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: An overview [J]. Tectonophysics, 1992, 213(1/2): 97-138.
- [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] KATZ B J, MELLO M R. Petroleum systems of south Atlantic marginal basins—An overview [M]//MELLO M R, KATZ B J. Petroleum Systems of South Atlantic Margins. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2000: 1-13.
- [16] RIBEIRO DA SILVA S F C, PEREIRA E. Tectono-stratigraphic evolution of Lapa field pre-salt section, Santos Basin (SE Brazilian continental margin) [J]. Journal of Sedimentary Environments, 2017, 2(2): 133-148.
- [17] MELLO M R, KOUTSOUKOS E A M, MOHRIAK W U, et al. Selected petroleum systems in Brazil [M]//MAGOON L B, DOW W G. The Petroleum System—from Source to Trap. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994: 499-512.
- [18] SALOMÃO M C, MARÇON D R, ROSA M B, et al. Broad strategy to face with complex reservoirs: Expressive results of production in pre-salt area, offshore Brasil [C]//Offshore Technology Conference, Houston, 2015. Red Hook, NY: Curran Associates, Inc., 2015: OTC-25712-MS.
- [19] 康洪全, 程涛, 李明刚, 等. 巴西桑托斯盆地油气成藏特征及主控因素分析[J]. 中国海上油气, 2016, 28(4): 1-8.
- KANG Hongquan, CHENG Tao, LI Minggang, et al. Characteristics and main control factors of hydrocarbon accumulation in Santos basin, Brazil [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(4): 1-8.
- [20] 贾怀存, 康洪全, 梁建设, 等. 桑托斯盆地湖相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 1-9.
- JIA Huaicun, KANG Hongquan, LIANG Jianshe, et al. Characteristic and developmental controlled factors of pre-salt lacustrine carbonate, Santos Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(2): 1-9.
- [21] 杨永才, 孙玉梅, 李友川, 等. 南大西洋被动陆缘共轭盆地烃源岩分布与油气富集规律——以巴西桑托斯盆地和西非纳米贝盆地为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(2): 157-167.
- YANG Yongcai, SUN Yumei, LI Youchuan, et al. Distribution of the source rocks and mechanisms for petroleum enrichment in the conjugate basins on the south Atlantic passive margins: Cases studies from the Santos and Namibe basins [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(2): 157-167.
- [22] 王颖, 王晓州, 廖计华, 等. 巴西桑托斯盆地白垩系湖相藻叠层石礁特征及主控因素分析[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 819-829.
- WANG Ying, WANG Xiaozhou, LIAO Jihua, et al. Cretaceous

- lacustrine algal stromatolite reef characteristics and controlling factors, Santos Basin, Brazil [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 819–829.
- [23] GOMES J P, BUNEVICH R B, TEDESCHI L R, et al. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 104176.
- [24] LIECHOSCKI DE PAULA FARIA D, TADEU DOS REIS A, GOMES DE SOUZA O Jr. Three-dimensional stratigraphic-sedimentological forward modeling of an Aptian carbonate reservoir deposited during the sag stage in the Santos basin, Brazil [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 676–695.
- [25] DOROBK S L. Tectonic and depositional controls on syn-rift carbonate platform sedimentation [M]//LUKASIK J, SIMO J A (TONI). Controls on Carbonate Platform and Reef Development. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2008: 57–81.
- [26] 何赛, 李国蓉, 吴昌荣, 等. 巴西桑托斯盆地湖相微生物碳酸盐岩层序沉积特征及控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 683–692.
- HE Sai, LI Guorong, WU Changrong, et al. Sedimentary filling characteristics and controlling factors of lacustrine microbial carbonates sequence in the Santos Basin, Brazil [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(4): 683–692.
- [27] WRIGHT V P. Lacustrine carbonates in rift settings: The interaction of volcanic and microbial processes on carbonate deposition[J]. *Geological Society*, 2012, 370(1): 39–47.
- [28] 程涛, 康洪全, 梁建设, 等. 巴西桑托斯盆地岩浆岩成因类型划分与活动期次分析[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(4): 55–66.
- CHENG Tao, KANG Hongquan, LIANG Jianshe, et al. Genetic classification and activity periods analysis of magmatic rocks in Santos Basin, Brazil [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(4): 55–66.
- [29] 刘亚明, 王丹丹, 田作基, 等. 巴西桑托斯盆地复杂碳酸盐岩油田火成岩发育特征及预测方法[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(6): 127–137.
- LIU Yaming, WANG Dandan, TIAN Zuoji, et al. Characteristics and prediction methods of igneous rocks in complex carbonate oilfields in Santos Basin, Brazil [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(6): 127–137.
- [30] DE MELO GARCIA S F, LETOUZEY J, RUDKIEWICZ J L, et al. Structural modeling based on sequential restoration of gravitational salt deformation in the Santos Basin (Brazil) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 337–353.
- [31] ROWAN M G, PEEL F J, VENDEVILLE B C, et al. Salt tectonics at passive margins: Geology versus models-Discussion [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 37(1): 184–194.
- [32] SANTOS NETO E V, CERQUEIRA J R, PRINZHOFER A. Origin of CO₂ in Brazilian basins [C]//AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California, April 22–25, 2012. Tulsa: AAPG, 2012: 40969.
- [33] 赵健, 赵俊峰, 任康绪, 等. 巴西桑托斯盆地高含CO₂油气藏类型、特征及成因模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1654–1664.
- ZHAO Jian, ZHAO Junfeng, REN Kangxu, et al. Main types, characteristics and genetic model of oil & gas reservoirs with high CO₂ content in Santos Basin, Brazil [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1654–1664.
- [34] 马安来, 孙红军, 郑磊, 等. 桑托斯盆地Jupiter油气田富含CO₂油气藏形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 371–378.
- MA Anlai, SUN Hongjun, ZHENG Lei, et al. A study on forming mechanisms of CO₂-rich reservoirs in Jupiter Oilfield, Santos Basin, Brazil [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 371–378.
- [35] 温志新, 童晓光, 王兆明, 等. 被动大陆边缘盆地油气地质特征[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- WEN Zhixin, Tong Xiaoguang, Wang Zhaoming, et al. Oil and gas geological characteristics of passive continental margin basins [M]. Beijing: Science Press, 2019.

(编辑 刘格云)