

# 巴西盐下远景区

Craig J. Beasley  
Joseph Carl Fiduk  
美国得克萨斯州休斯敦

Emmanuel Bize  
Austin Boyd  
Marcelo Frydman  
Andrea Zerilli  
巴西里约热内卢

John R. Dribus  
美国路易斯安那州新奥尔良

Jobel L.P. Moreira  
Antonio C. Capeleiro Pinto  
巴西国家石油公司  
巴西里约热内卢

《油田新技术》2010年秋季刊：22卷，第3期。  
© 2010 斯伦贝谢版权所有。

在编写本文过程中得到以下人的帮助，谨表谢意：巴西里约热内卢巴西国家石油公司的 Celso C.M. Branco 和 Breno Wolff，休斯敦的 Carolina Castro，以及里约热内卢的 Joao Felix, Antonio P. Ferreira, Patricia Margolla, Attilio Pisoni 和 Ana Zambelli。

1. PA-RJS-628 评估计划覆盖的区域内估计可开采原油总量为 50 – 80 亿桶油当量，该区域包括 Tupi 和 Iracema 两个地区。

Beltrão RLC, Sombra CL, Lage ACVM, Fagundes Netto JR 和 Heriques CCD：“Challenges and New Technologies for the Development of the Pre-Salt Cluster, Santos Basin, Brazil”，OTC 论文 19880，发表在海上技术大会上，休斯敦，2009 年 5 月 4-7 日。

2. Parati 井由巴西国家石油公司、BG 集团以及 Partex 共同开发，其中巴西国家石油公司是作业者。

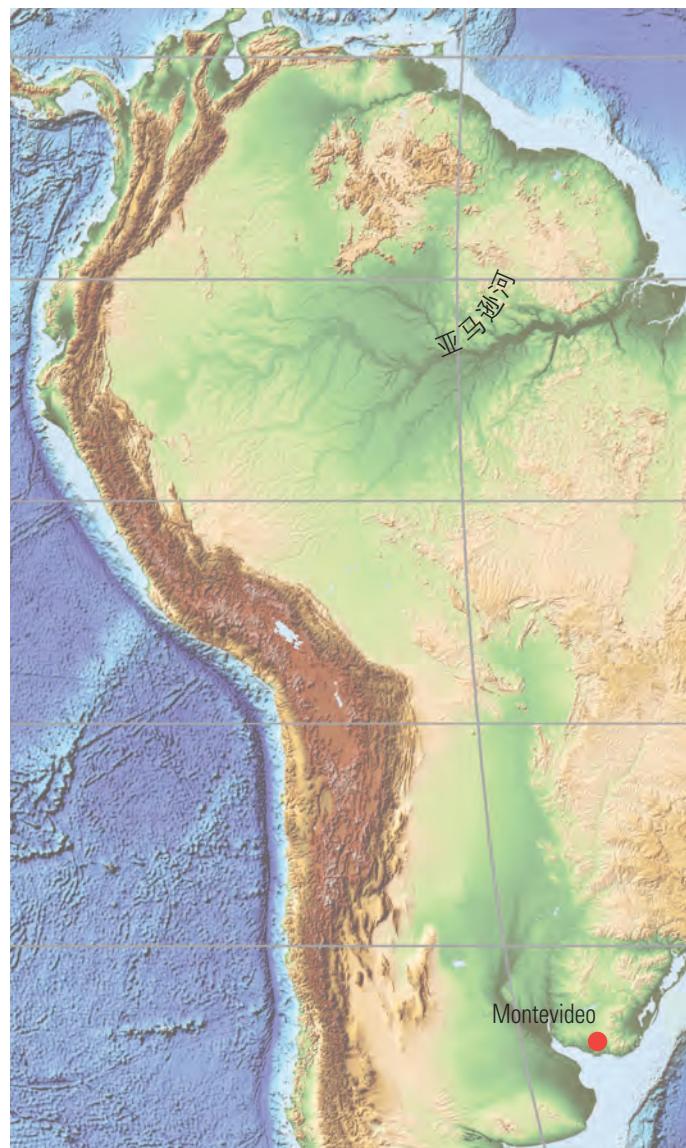
3. Parshall J：“Presalt Propels Brazil into Oil's Front Ranks”，*Journal of Petroleum Technology*, 62 卷，第 4 期（2010 年 4 月）：40-44, <http://www.spe.org/jpt/print/archives/2010/04/13Brazil.pdf> (2010 年 8 月 6 日浏览)。

4. Parshall, 参考文献 3。

5. “BG, Petrobras Announce Discovery of Oil Field in Santos Basin Offshore Brazil”，*Drilling Contractor*, 62 卷, 第 6 期(2006 年 11-12 月): 8.

巴西政府要求实现能源自给自足，促使油气勘探从内陆盆地逐步进入深水海域。现如今，巴西的油气勘探遍布其广袤的国土。曾经用来开发坎普斯盆地深水油田的专业技术经改进后已成功用于桑托斯盆地的油气井生产，其中有些井的开采目的层是厚蒸发岩盖层下面的碳酸盐岩储层。桑托斯盆地盐下远景区的勘探模型又被用于附近盆地的勘探，并获得了重大发现。

纪	世	期	百万年
晚第三纪	上新世	皮亚森兹	2.6
		赞克尔	5.3
	中新世	梅辛	
		托尔通	
		塞拉瓦尔	
		兰哥	
	渐新世	布尔迪加尔	
		阿启坦	23
		夏特	
	早第三纪	鲁陪尔	33.9
		普利亚本	
		巴尔通	
		鲁帝特	
古新世	始新世	伊普利斯	55.8
		坦尼特	
		塞兰特	
	L M E	丹尼	65.5
		马斯特里赫特	
白垩纪	晚	坎潘	
		三冬	
		康尼尼克	
		士仑	
		塞诺曼	99.6
	早	阿尔布	
		阿普特	
		巴雷姆	
		欧特里夫	
		凡兰吟	
		贝利阿斯	145.5



在巴西南部沿海超深水海域发现超大型油气富集区为巴西油气勘探开发开辟了新的前缘阵地。在油气勘探开发队伍不断摸索前进，试图确定油气资源地理边界过程中，桑托斯盆地 Tuti 发现中的盐下远景区也正将技术应用边界逐步向外推进。Tuti 构造蕴含可采储量可能高达 7.95 – 13 亿方（50 – 80 亿桶）油当量，是迄今在厚盐层下面发现的几个大型含油气构造之一<sup>[1]</sup>。

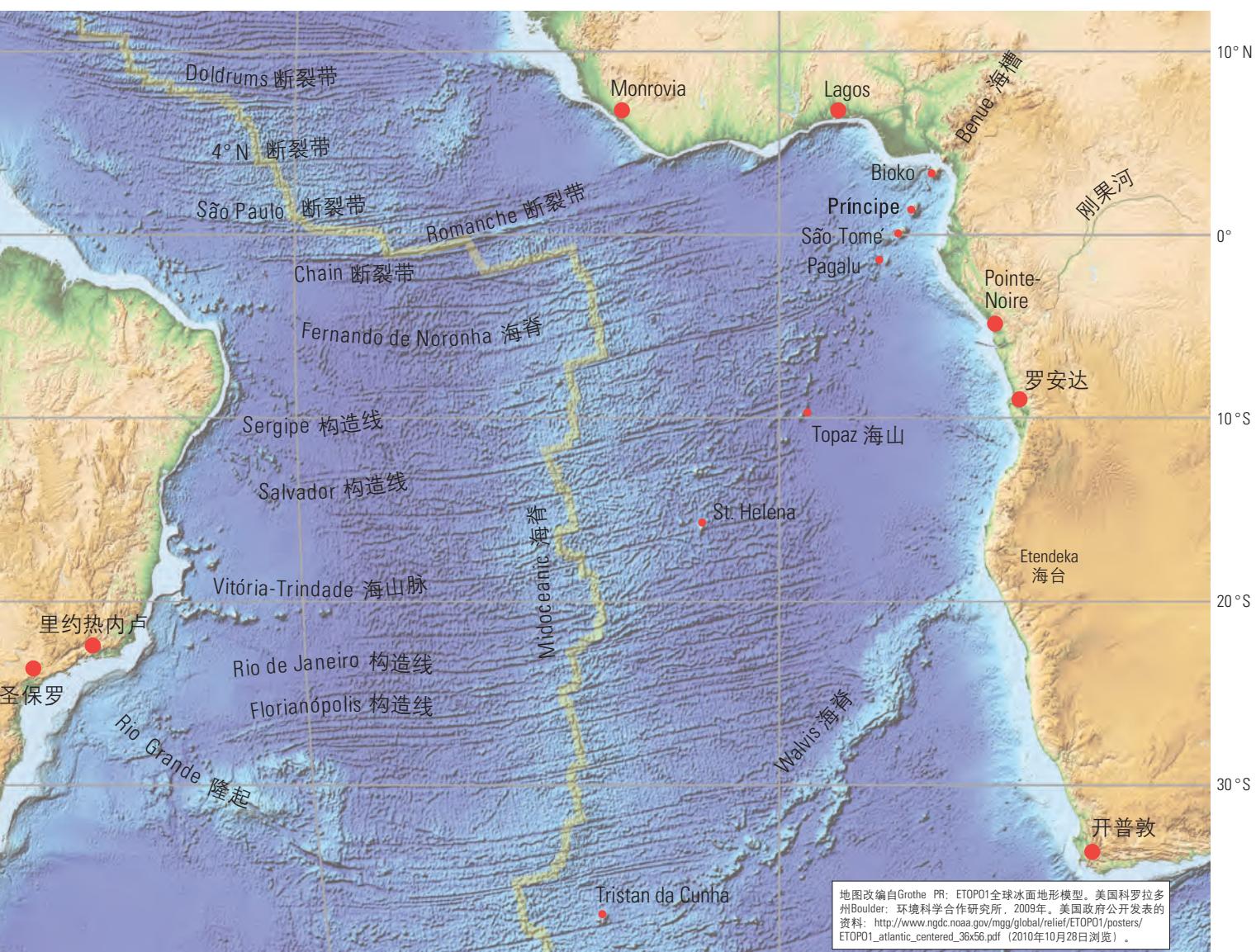
Tuti 井并不是桑托斯盆地钻遇的盐下油气的第一口井。2005 年，巴西国家石油公司在距离 Tuti 约 70 公里（43 英里）的 Parati 远景区钻了一口探井<sup>[2]</sup>。Parati 探井位于桑托斯盆地 BM-

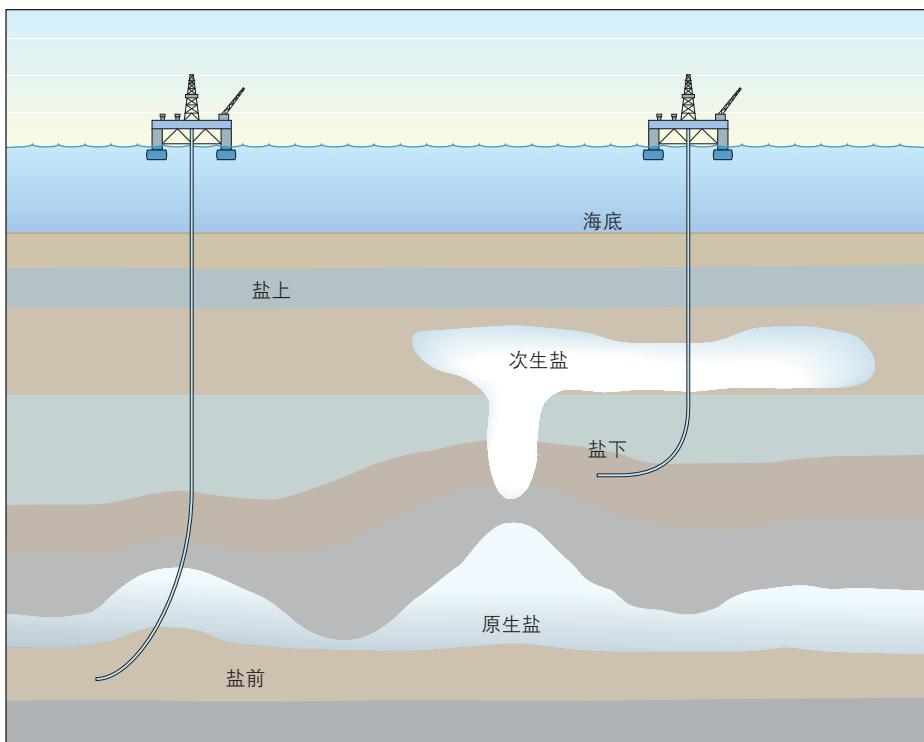
S-10 区块，在盐下地层钻遇了凝析气<sup>[3]</sup>。通过 Parati 井验证了 2006 年 Tuti 发现所用地质模型是正确的。

Tuti 油田位于桑托斯盆地 BM-S-11 区块水深 2126 米（6975 英尺）处，大约在里约热内卢东南 250 公里（155 英里）处。1-RJS-628A 井达到完钻井深（真垂深）4895 米（16060 英尺）时钻遇产层<sup>[4]</sup>。投产后采用  $\frac{5}{8}$  英寸油嘴生产，该井日产油 779 方（4900 桶），日产气 18.7 万方（660 万英尺<sup>3</sup>）<sup>[5]</sup>。第二年又钻了一口探边井，通过该井证实了巴西国家石油公司和其合作伙伴 BG 集团以及 Galp Energia 早期宣布的估算储量，因此引起了全世界对巴西盐下远景区的关注。

从地质角度来看，该远景区是构造运动和沉积过程长期缓慢相互影响相互作用的结果，期间伴随着大陆板块分裂、海底扩张和地层沉降运动。地层抬升发生在冈瓦纳大陆在白垩纪时期分离时南美洲板块和非洲板块分裂过程中。在地层沉积过程中形成了含油气系统必须具备的三大条件：生油岩、储集岩和盖层。

从某种程度上看，开采盐下远景区的技术可行性是作业公司在巴西外海深水和超深水区域通过克服钻井困难获得了宝贵经验的结果。同样重要的是，通过提高地震成像质量，使得地球物理专家能够确定位于厚度可能有 2000 米（6560 英尺）的蒸发岩下面





▲ 不同的盐下层。次生盐移动盖层来自厚的原生盐层。两种盐都能够形成阻止油气运移的圈闭和盖层。盐下井开采目的层是原生盐下面的储层。盐上井的目的层是盐层上面的储层。

的潜在油藏构造。

本文介绍了巴西盐下远景区的地  
质成因和形成史，以及勘探和开发盐  
下碳酸盐岩油气藏面临的各种困难和  
挑战。

## 从盐上到盐下

从勘探开发的角度看，巴西盐下远景区是一个相当新的现象。2005年，多数海上作业公司对巴西东南沿海盆地盐层上面的三角洲河道和深水浊积

岩进行了勘探。在发现了盐下油藏之后，盐层上面的目的层被称为盐上远景区。

巴西盐下趋势带明显不同于在墨西哥湾发现的盐下趋势带<sup>[6]</sup>。巴西盐下井钻到的地层是在原生盐层前沉积的地层（原生盐指的是形成后仍然保留在原生地层的盐）。原生盐沉积在老岩层上面，随后又被新岩层覆盖。而墨西哥湾盐下井钻到的地层是次生盐移动盖层下面的地层（次生盐是来自原生盐层的块状盐，原生盐冲破上覆

地层，然后横向展开形成次生盐（左图）。能够肯定的是，盐底辟是巴西外海盆地中的主要地质动力，而盐上井开发的主要目的层仍然是盐层运动形成的构造圈闭。本文重点介绍最新发现的盐下目标构造。

虽然巴西盐下勘探活动主要集中在桑托斯盆地、坎普斯盆地和 Espírito Santo 盆地，但在巴西沿海其他盆地也发现了盐层，包括 Cumurusatiba 盆地、Jequitinhonha 盆地、Camamu-Almada 盆地和 Sergipe-Alagoas 盆地<sup>[7]</sup>。不同盆地中蒸发岩沉积厚度变化很大。在桑托斯盆地，盐层最宽延伸达 400 公里（250 英里）左右，向北逐渐变窄，到达 Sergipe-Alagoas 盆地后宽度不足 100 公里（62 英里）<sup>[8]</sup>。

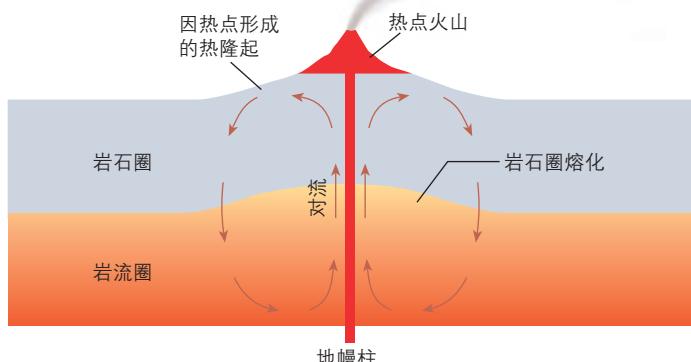
## 构造基础

盐下远景区的地质成因与导致冈瓦纳超级大陆板块分裂的构造运动密切相关。冈瓦纳大陆的分裂驱动力是来自地心的地热。这次大陆板块分裂导致地层受热隆起，与周围构造分离，最终造成海底扩张，直到今天还在继续。上述过程形成一个地质构造框架，可追溯到 1.5 亿年前，其中的快速事件发生时间可能持续 200 – 300 万年，局部发生的事件可能蔓延 1000 公里（620 英里）以上甚至更远，因此要求从大背景下进行考察分析。

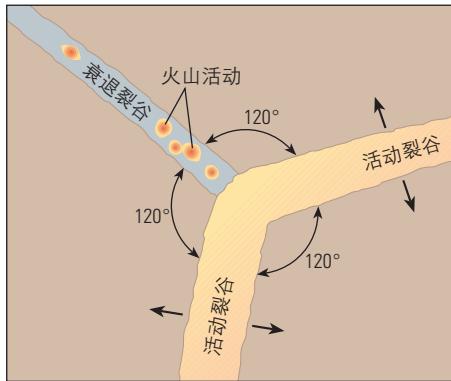
岩石圈板块骑在局部熔化的地幔上面，岩石圈板块上面是大陆块。熔化的地幔沿对流槽慢慢流动，通过对流槽热量从地心转移到地表。板块移动过程中，某些板块漂离岩流圈内上涌的岩浆。这种岩浆是从向上传热过程中形成局部热点的地幔柱深处上涌的（左图）<sup>[9]</sup>。直到现在还可以用火山、海山和玄武岩流跟踪板块在某个热点上运移的古路径。

当地幔柱从大陆板块下面隆起时，也可能造成上覆地壳膨胀。热隆起，或大陆地壳和上地幔造拱都是随着地壳拉伸、变薄弱形成断层后发生的。在隆起顶部出现裂谷，大约以 120° 角度间隔呈放射状向外发展。

裂谷相遇形成一个板块三节点；



▲ 地幔柱。对流过程中地幔物质从岩流圈向上涌出，突破地壳以火山形式喷出，有的驻留在岩石圈下面，熔化上覆基底，使其铺开并向上升，形成热点，具体取决于上覆岩石圈的厚度和强度。当岩石圈板块在固定地幔柱上面漂移时，可能留下火山和海山脉的痕迹，反映出板块漂移的方向。



▲ 板块三节点示意图。地幔柱上的隆起发展成脊裂谷，三条裂谷大约呈120°的角度相交。其中两条活动裂谷从板块主体部分向外扩张，而第三条衰退裂谷成为典型的火山活动地点。

通常，两条活动裂谷形成一个增生边界，从那里板块开始分裂，而第三条裂谷变成不活动的断裂滑块或衰退裂谷（上图）。断裂滑块往往成为火山现象或其他岩浆活动的发生地<sup>[10]</sup>。某些断裂滑块成为洪流玄武岩的发生现场，而发生洪流玄武岩时通常出现地幔柱对岩石圈板块的冲击。随着板块继续离散，岩浆上升，充填张开的裂谷<sup>[11]</sup>。

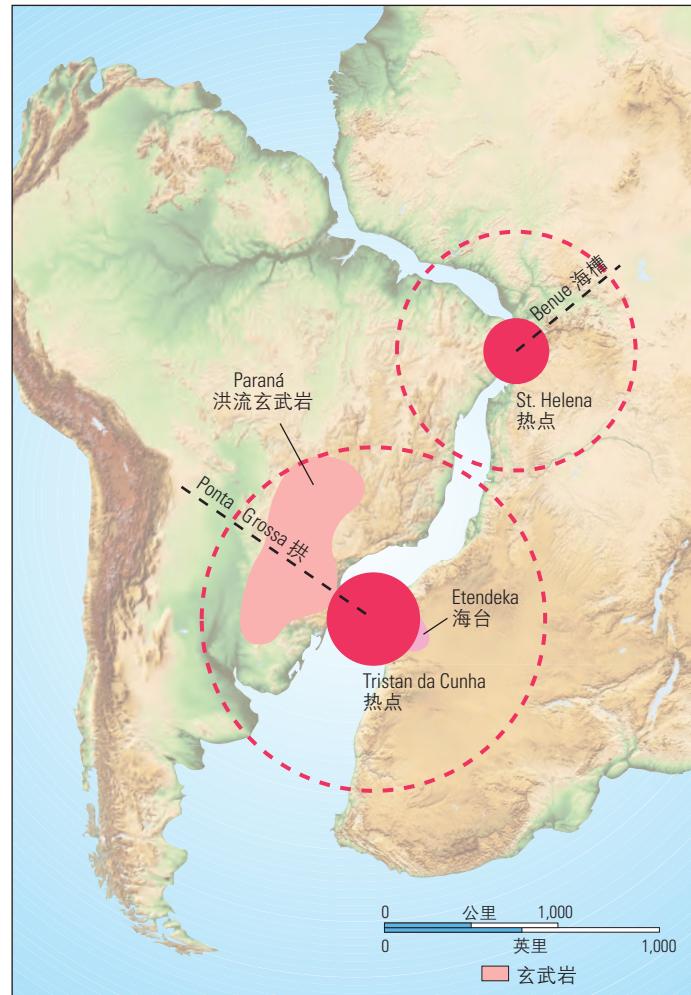
一旦板块漂离热点，热量就慢慢衰退，被拉伸的地壳因冷却收缩，变得致密而开始下陷<sup>[12]</sup>。形成的盆地随后逐渐充填生油岩、储集岩和蒸发岩。此类下陷盆地通常是南大西洋两侧进行盐下勘探活动的主要场所。

## 盐下地质

巴西盐下发现和其大部分盐上油田蕴藏的油气物质都来自湖泊相生油岩。这些富含有机物的湖泊沉积物通过西冈瓦纳大陆分裂过程中发生的一系列地质事件形成。西冈瓦纳大陆分裂发生在早白垩纪，每年顺时针移动2–3厘米（0.8–2英寸/年），从早凡兰吟期到晚阿尔布期，历经近4000万年，逐渐离开非洲板块形成了今日的南美洲板块<sup>[13]</sup>。

西冈瓦纳大陆是从现在南美洲的最南端开始分裂的。两个主要的地幔柱 - 北部的St. Helena地幔柱和南部的Tristan da Cunha地幔柱是大陆岩石圈变薄弱的主要因素（右上图）<sup>[14]</sup>。

热隆起和大陆地壳变薄导致张性裂缝的形成，之后岩浆沿着这些裂缝



▲ 南大西洋内的热点。目前位于Tristan da Cunha岛和St. Helena岛附近的大型地幔柱在南美洲和非洲板块分离初期是使地壳变薄弱的主要力量。Tristan地幔柱是形成Paraná盆地洪流玄武岩的主要因素。St. Helena地幔柱出现的晚一些，尼日利亚Benue海槽不活动裂谷的形成与之有一定关系（改编自Wilson，参考文献14）。

6. 关于墨西哥湾盐下趋势带更多的信息，请参见：Dribus JR, Jackson MPA, Kapoor J 和 Smith MF：“盐下油气藏勘探”，《油田新技术》，20卷，第3期（2008年秋季刊）：4-17。
7. Karner GD 和 Gambôa LAP：“Timing and Origin of the South Atlantic Pre-Salt Sag Basins and Their Capping Evaporites”，Schreiber BC, Lugli S 和 Bbel M（编辑）：Evaporites Through Space and Time。伦敦：地质协会特刊285（2007年）：15-35。
8. Szatmari P：“Habitat of Petroleum Along the South Atlantic Margins”，Mello MR 和 Katz BJ（编辑）：Petroleum Systems of South Atlantic Margins。图尔萨：美国石油地质家协会，AAPG Memoir 73（2000年）：69-75。
9. 普遍认为脆性岩石圈（由地壳和上层地幔组成）覆盖在深层高柔性软流圈（由下层地幔组成）上面。下层地幔包围着地心。
10. Burke K 和 Dewey JF：“Plume-Generated Triple Junctions：Key Indicators in Applying Plate Tectonics to Old Rocks”，Journal of Geology, 81卷，第4期（1973年）：406-433。
11. 关于板块运动如何影响现代世界的详细信息，请参见：Bunting T, Chapman C, Christie P, Singh SC 和 Sledzik J：“海啸科学研究”，《油田新技术》，19卷，第3期（2007年秋季刊）：4-19。
- Coates R, Haldorsen JBU, Miller D, Malin P, Shalev E, Taylor ST, Stoltz C 和 Verliac M：“油田技术在地震科学中的应用”，《油田新技术》18卷，第2期（2006年夏季刊）：24-33。
12. Quinlan GM：“Models of Subsidence Mechanisms in Intracratonic Basins, and Their Applicability to North American Examples”，Beaumont C 和 Tankard AJ（编辑）：Sedimentary Basins and Basin-Forming Mechanisms。卡尔加里：加拿大石油地质家协会，Memoir 12（1987年）：463-481。
13. Szatmari, 参考文献8。
14. Wilson M：“Magmatism and Continental Rifting During the Opening of the South Atlantic Ocean：A Consequence of Lower Cretaceous Super-Plume Activity？”，Storey BC, Alabaster T 和 Pankhurst RJ（编辑）：Magmatism and the Causes of Continental Break-Up。伦敦：地质协会特刊68（1992年）：241-255。

上涌，形成火成岩堤<sup>[15]</sup>。数以百计的此类岩堤切过现在的巴西东南海岸线，根据这些岩堤的走向绘出重要的板块三节点（右图）。沿海堤群标志着随地幔柱产生的、以巴西 Paraná 州海岸为中心的板块三节点系统的北部和南部的裂谷。这些裂谷形成了今天的海岸线，而第三条裂谷，即 Ponta Grossa 拱，发生了断裂，成为玄武岩活动的场地<sup>[16]</sup>。

大量洪流玄武岩涌进随后形成的陆上 Paraná 盆地，从巴西南部一直延伸到巴拉圭、乌拉圭和阿根廷北部，覆盖面积达 120 万公里<sup>2</sup>（463320 英里<sup>2</sup>）（下一页图）。而不同类型的岩浆重叠一起，说明岩浆活动的主要地点随时间不断向北推移，因此一些研究者认为 Paraná 洪流玄武岩的产生与南大西洋裂谷向北延伸有关联<sup>[17]</sup>。

随着大陆地壳沿裂谷发生分裂，相邻裂谷就连在一起，形成一条山脊

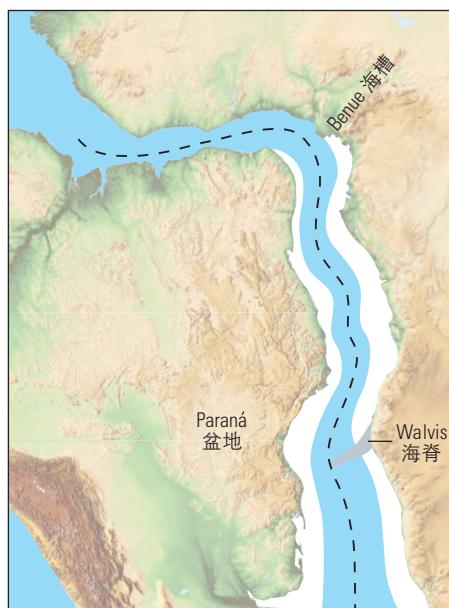


▲ Paraná板块三节点。基于巴西境内和安哥拉以及纳米比亚境内的沿海堤群之间的关联关系绘制出Paraná板块三节点。在纳米比亚海岸Etendeka附近发现了与Ponta Grossa拱洪流玄武岩成分相似的玄武岩。（改编自Coutinho, 参考文献16）。

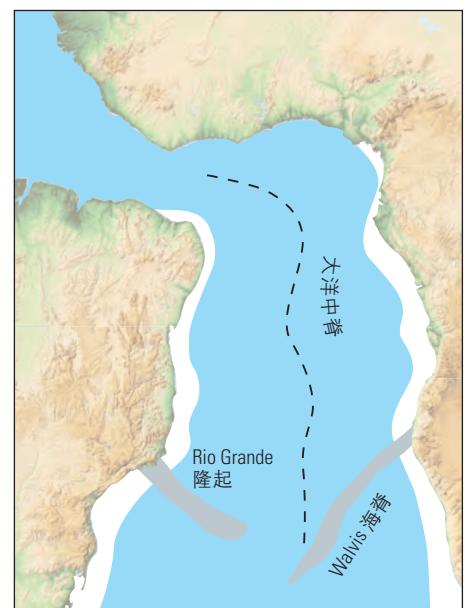
1.5–1.2亿年前



1.2–1.1亿年前



1.1亿年前



▲ 从隆起到漂移。随着南美洲板块和西非板块之间的隆起逐渐达到全面漂移，盐盆地也渐渐发展形成。大约在1.5亿年前，冈瓦纳超级大陆张性断裂和沉降变得活跃。在早白垩纪大陆地壳进一步拉伸扩张，沿后来的西非和巴西东部边缘出现大规模裂谷（左）。到了阿普特时期，盆地继续沉降，而全球海平面的上升造成海水入侵盆地（中）。起初这个过程断断续续发生，交替出现海水入侵、蒸发，因此盆地内形成了厚厚的蒸发岩沉积层。随着冈瓦纳大陆从南美洲板块分裂，漂移离去，这一地区完全位于海平面以下。尽管这一地区的盆地以前都和一个大陆板块连结一起，但当洋中脊上形成新的大洋地壳使大西洋打开出口，海洋不断扩张，这些盆地随之分开（右）。海相沉积占据绝对地位，包括厚层石灰岩、砂岩和页岩。（改编自Platt等人，参考文献24）。

状变形边界，从此开始了南美洲与非洲板块的分离进程。

这些原始大陆从南部开始逐渐分离，并不断向北移动，历经漫长岁月后，最

终形成了原始南大西洋的一个出口<sup>[18]</sup>。从南部盆地中出现的厚盐层可反映出这一拉链状出口的存在。

在热量驱动隆起、分裂和漂移过

程中，也创造了盐下盆地的形成条件。热收缩导致地壳穹窿坍塌、下沉，形成平缓凹陷。这些凹陷盆地中的碳酸盐岩和碎屑岩中蕴藏了丰富的石油。



▲ 巴西Fortaleza峡谷的悬崖。从Paraná圈闭流出的大量岩浆铺展成厚玄武岩、英安岩和流纹岩地层，形成独具特色的断崖。在 Rio Grande do Sul 州 Serra Geral 国家公园岩浆流出物厚度在地表厚达700米（2300英尺）。（图片由Marcelo Frydman提供）。

三个裂谷形成事件都发生在早白垩纪贝利阿斯时期到早阿普特时期([前一页](#), [下图](#))。每个事件都导致一系列盆地形成，并平行分布于今天的海岸线附近。起初形成的盆地都在海平面以上，后来蓄入淡水后就变成了湖泊地。这些盆地中还填充了火山沉积物和大陆沉积物，是生油岩的主要成分。

随着湖泊盆地变宽、沉降，海水逐渐入侵，有些湖因为盐度增加变成了咸水湖。湖内的条件导致有机物生产达到高水平，有利于有机物保存<sup>[19]</sup>。这个时期形成的湖泊沉积物成为巴西大部分地区的主要生油岩。

裂谷 - 湖泊系统的地质条件同样有利于储集岩的沉积。随着海水的不断入侵，大陆地块继续分离。海水不断进入湖泊，淹没了逐渐张开的峡谷低洼地带。这些条件创造了一个有利于蓝藻群生长的低能量、高盐度环境。

单细胞藻类和其他微生物产生的聚合物成为生物薄膜<sup>[20]</sup>。该薄膜把沉

淀物颗粒圈闭起来，并固结成加积层，形成微生物岩垫。岩垫上部的微生物需要阳光进行光合作用，并向上生长，形成层状穹窿，称为叠层。碳酸盐产生的微生物分布情况受环境因素，如阳光、水温和混浊度，以及生物体掠食的影响<sup>[21]</sup>。随着时间的推移，生长出的微生物逐渐岩性化，后来演化成盐下远景区的储集岩。

随着大陆板块持续张开，边缘盆地不断下陷。沿南美洲构造板块上的Florianópolis 构造轮廓和非洲板块上的

Walvis 海脊的地壳裂缝发生的地幔柱火山活动造成了沿海堤坝，阻止了洋流在不断扩展的南大西洋内自由流动<sup>[22]</sup>。

在早白垩纪，海水溅过海堤，并被圈到不断下沉的盆地中。在阿普特期干旱气候条件下，被圈闭的水开始蒸发，最后在南美洲和非洲边缘盆地中留下了厚盐层<sup>[23]</sup>。蒸发岩沉积覆盖在前述裂谷层序的沉积层上，形成有效阻止那些最终要运移到微生物储集岩中油气的盖层。阿普特盐矿床标志着大陆边缘进化的过渡蒸发阶段，该

- 15. Herz N : “Timing of Spreading in the South Atlantic : Information from Brazilian Alkalic Rocks”, *Geological Society of America Bulletin* 88 (1977年1月) : 101-112.
- 16. Coutinho JMV : “Dyke Swarms of the Paraná Triple Junction, Southern Brazil (Enxame de Diques da Junção Tríplice do Paraná , Brasil Meridional)”, *Geologia USP, Série Científica*, 8 卷, 第 2 期 (2008 年 10 月) : 29-52.
- 17. Hawkesworth CJ, Gallagher K, Kelley S, Mantovani M, Peate DW, Regelous M 和 Rogers NW : “Paraná Magmatism and the Opening of the South Atlantic”, Storey BC, Alabaster T 和 Pankhurst RJ (编辑) : *Magmatism and the Causes of Continental Break-Up*. 伦敦：地质协会特刊 68 (1992 年) : 221-240.
- 18. Mohriak WU 和 Rosendahl BR : “Transform Zones in the South Atlantic Rifted Continental Margins”, Storti F, Holdsworth RE 和 Salvini F (编辑) : *Intraplate Strike-Slip Deformation Belts*. 伦敦：地质协会特刊 210 (2003 年) : 211-228.
- 19. Katz BJ 和 Mello MR : “Petroleum Systems of South Atlantic Marginal Basins – An Overview”, Mello MR 和 Katz BJ (编辑) : *Petroleum Systems of South Atlantic Margins*. 图尔萨：美国石油地质家协会, AAPG Memoir 73 (2000 年) : 1-13.



▲ 油气开发新战场。自二十世纪七十年代以来，巴西大部分油气都产自坎普斯盆地。盐下远景区的出现引起了油公司对桑托斯盆地的兴趣，尽管坎普斯和Espírito Santo盆地也是盐下油藏的主要远景区。

阶段发生在盆地内漂移阶段之前。

到了白垩纪中晚时期，断裂运动结束，而且当新的大洋地壳在洋中脊附近出现后，非洲和南美洲大陆板块离得更远<sup>[24]</sup>。在阿尔布时期沿巴西边界形成开放海相碳酸盐岩平台，并发展到了对面加蓬和安哥拉之间的边界区<sup>[25]</sup>。随着盆地不断下陷，碳酸盐岩平台被海水淹没，最终在晚白垩纪和第三纪覆盖了厚的碎屑岩。

## 不断拓展勘探范围

巴西的勘探范围逐步扩大，从陆上到海上，从浅水到深水，再到超深水，不断寻求新的远景区<sup>[26]</sup>。每个远景区的开发都促使作业公司采用新的思路对局部区域地质情况进行分析评估，制定新措施解决钻井和开发中遇到的困难和挑战。

和很多国家一样，巴西也是因为发现露出的油苗而进行早期勘探。在第一批井中，其中一口十九世纪九十年代在圣保罗 Bofete 地区油苗附近钻的井总深度为 488 米（1601 英尺）<sup>[27]</sup>。这口井只产出了两桶油，预示了随后 40 年的勘探活动结果并不乐观。到上世纪

三十年代末，政府机构和私营公司共钻了 80 多口井，但结果都令人失望。

1937 年，巴西矿业部 (DNPM) 开始在 Bahia 州东北部不活动裂谷的 Recôncavo 盆地进行勘探。1939 年，在 Lobato 油田 DNPM 163 井中发现了油气，标志着巴西国家石油工业从此诞生。尽管该井没有达到商业产量，但促使巴西矿业部对该盆地进行详探。1941 年在 Candeias 附近完钻了第一口商业发现井。迄今在 Recôncavo 盆地已发现了 80 多个油气田。

巴西国家石油公司沿裂谷趋势带展开勘探活动，逐步进入了 Sergipe 盆地。1963 年巴西国家石油公司在该盆地的 Carmópolis 地区发现了巴西第一个大油田，从而掀起了详细勘察其他陆上海岸盆地的热潮，随后在陆上多个盆地发现了大量远景区。每个盆地都展开了大规模勘探活动，加上不断提高的地震勘探技术，帮助地学家逐步了解该区域陆上和海上的地质形成史。

二十世纪六十年代在巴西大陆架浅海地区也进行了勘探活动。1967 年完成了一项重力和地震采集项目后，

巴西国家石油公司开始在 Espírito Santo 州近海对三角洲层序进行钻探<sup>[28]</sup>。该公司钻的第一口井是干井。随后巴西国家石油公司将钻井目标向北转移到 Sergipe-Alagoas 盆地，并于 1968 年在 Guaricema 油田 São Francisco 河三角洲完成了第一口海上油气发现井。该井位于 Sergipe 州外海水深 30 米（98 英尺）处，证实了大陆架下油气的存在。

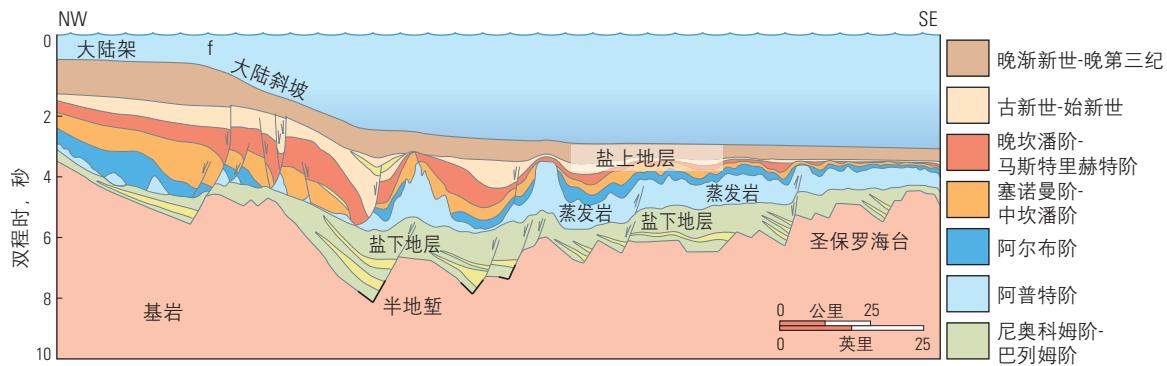
1971 年，巴西国家石油公司开始勘探巴西东南近海的坎普斯盆地（左图）。在钻遇了一系列干井后，终于在 1974 年获得了第一个发现。这口井是巴西国家石油公司钻的第 9 口探井，位于水深 120 米（394 英尺）处，产层是阿尔布碳酸盐岩。这次发现拉开了对坎普斯盆地进行详细勘探的序幕。虽然最初的勘探目标主要局限于外围大陆架的阿尔布碳酸盐岩，但后来在水深超过 500 米（1640 英尺）海域的第三纪砂岩储层中获得了更大发现<sup>[29]</sup>。

第二年在 166 米（545 英尺）水深海域获得了重大发现。储量高达 3970 万方（2.5 亿桶）的 Namorado 油田是在坎普斯盆地发现的几个大型碎屑浊积岩油藏中的一个。通过在该地区不断积累作业经验，巴西国家石油公司建立了精细的大陆边缘构造沉积模型和地层模型，到二十世纪八十年代中期，巴西国家石油公司把钻探目标转向前三角洲深水海相硅质碎屑浊积岩油藏<sup>[30]</sup>。后来陆续在深水区发现了四个巨型到超巨型浊积岩油田<sup>[31]</sup>。详细情况如下：

- 1984 年发现了 Albacora 油田，水深 293 米（961 英尺）
- 1985 年发现了 Marlim 油田，水深 853 米（2799 英尺）
- 1989 年发现了 Barracuda 油田，水深 980 米（3215 英尺）
- 1996 年发现了 Roncador 油田，水深 1853 米（6079 英尺）

截止到 2007 年，在坎普斯盆地共打了 1100 多口井，发现了 50 多个油气田。而在南部邻近盆地即桑托斯盆地，到 2007 年初才钻了 115 口井，二者形成了鲜明对比。

根据钻井结果，目前已确认了一



▲ 桑托斯盆地地质概况。埋藏在厚蒸发岩下的盐下生油岩和上覆碳酸盐岩储层是主要的开发目的层。  
(改编自 Modica 和 Brush, 参考文献 35)。

批油田，包括重大发现。1970 年巴西国家石油公司在桑托斯盆地钻了第一口探井，但最后发现是干井。1984 年，壳牌石油公司巴西子公司 Pecten 在桑托斯盆地浅水区钻遇了天然气，成为在该盆地发现气田的第一家公司。但随后钻的两口井都是干井，后来在 Merluza 油田发现了浊积岩储层，水深 131 米 (430 英尺)。1988 年，巴西国家石油公司在水深 143 米 (470 英尺) 的 Tubarão 油田钻遇了油气层。第三个油田 (Estrela do Mar 油田) 于 1990 年被发现<sup>[32]</sup>。之后又发现了 Coral 油田和 Caravela 油田，这两个油田的产层都是沉积在盐层上的阿尔布颗粒灰岩<sup>[33]</sup>。

2000 年，巴西国家石油公司将桑托斯盆地的勘探重点转移到深水和超

深水区，发现了巴西最大的天然气气田 (Mexilhão 气田)。其他在 Tambaú 和 Pirapitanga 的气田以及在 Carapíá 和 Tambuatá 的油田的产层都是晚白垩纪浊积岩层。另外在 Tambuatá 油田和壳牌经营的 Atlanta 油田还发现了始新世浊积岩稠油油藏<sup>[34]</sup>。Uraguá 油田浊积岩产出的原油 API 重度为中等。

在此期间，巴西国家石油公司采集并处理了 3D 地震资料，帮助地球物理师进一步了解桑托斯盆地深层地质构造和地层层序 (上图)<sup>[35]</sup>。在确定地震相之后，巴西国家石油公司将桑托斯盆地中的圣保罗高原盐下地层做为钻探目标<sup>[36]</sup>。

2006 年，巴西国家石油公司及其合资伙伴 BG 集团和 Galp Energia 在 Tupi 发现了巨型盐下油藏，储层平均

埋深为洋面之下 5485 米 (18000 英尺)。在盐下储层发现了 API 重度为 28° 的油，比巴西大部分盐上储层主要蕴含的重油轻，且含硫量低。

2007 年 8 月，巴西国家石油公司宣布了盐下远景区的最新勘探范围。根据 15 口盐下井的评价结果，盐下远景区覆盖面积为 800 x 200 公里 (497 x 124 英里)，跨越 Espírito Santo 盆地、坎普斯盆地和桑托斯盆地<sup>[37]</sup>。继 Tupi 发现之后，在桑托斯盆地又发现了很多盐下油田，包括 Caramba、Carioca、Iara 和 Guará<sup>[38]</sup>。

2009 年，巴西国家石油公司还宣布了分三个阶段开发 Tupi、Iara 和 Guará 油田的计划：首先是探边测试，然后启动试验项目，最后通过浮式生产、储存和泄油设施 (FPSO) 开始

- 技术大会上，休斯敦，2009 年 5 月 4-7 日。
- 31. 巨型油田指的是储量超过 10 亿桶的油田；储量超过 50 亿桶的油田称为超巨型油田。
- 32. “Petrobras Role in Brazil’s Economy Disputed”，*Oil & Gas Journal*, 89 卷, 第 2 期 (1991 年 1 月 14 日), [http://www.ogj.com/index/article-tools-template/\\_saveArticle/articles/oil-gas-journal/volume-89/issue-2/in-this-issue/general-interest/petrobras-role-in-brazil39s-economy-disputed.html](http://www.ogj.com/index/article-tools-template/_saveArticle/articles/oil-gas-journal/volume-89/issue-2/in-this-issue/general-interest/petrobras-role-in-brazil39s-economy-disputed.html) (2010 年 7 月 16 日浏览)。
- 33. Carminatti 等人，参考文献 30。
- 34. Carminatti 等人，参考文献 30。
- 35. 关于桑托斯盆地地层的详细内容，请参见：Modica CJ 和 Brush ER：“Postrift Sequence Stratigraphy, Paleogeography, and Fill History of the Deep-Water Santos Basin, Offshore Southeast Brazil”，*AAPG Bulletin*, 88 卷, 第 7 期 (2004 年 7 月)：923-945。
- 36. Carminatti 等人，参考文献 30。
- 37. Petrobras News Agency：“Petrobras Discovers Brazil’s Biggest Oil-Bearing Area”，(2007 年 8 月 11 日), [http://www.agenciapetrobrasdenoticias.com.br/en\\_materia.asp?id\\_editoria=8&id\\_noticia=4042](http://www.agenciapetrobrasdenoticias.com.br/en_materia.asp?id_editoria=8&id_noticia=4042) (2010 年 9 月 27 日浏览)。

20. 微生物和细菌在很宽泛的环境下繁殖，不但造就了储集岩，还会带来生产问题。关于详细资料，请参见：Bass C 和 Lappin-Scott H：“石油微生物中的益菌和无益菌”，《油田新技术》，9 卷，第 1 期 (1997 年春季刊)：17-25。

21. 如果不出现有利于放牧生物或掘穴生物繁殖的条件，叠层岩保存就不会遭到破坏，可能在高盐湖、海洋泻湖，甚至淡水湖中发现现代叠层岩，如西澳大利亚的鲨鱼湾和里约热内卢的 Lagoa Salgada。在土耳其的 Sada 湖和加拿大不列颠哥伦比亚省的 Pavilion 湖都发现了淡水叠层岩。

22. Asmus HE 和 Baisch PR：“Geological Evolution of the Brazilian Continental Margin”，*Episodes*, 第 4 期 (1983 年) 3-9, <http://www.episodes.org/backissues/64/ARTICLES-3.pdf> (2010 年 9 月 27 日浏览)。

23. 蒸发和循环受限是形成盐矿的主要因素。这一点可由高盐度水体证明，如死海和大盐湖，这两个咸水湖都没有出口。因为没有海水流入，湖水盐度的提高就是蒸发的结果，通过蒸发，提高了那些从淡水支流中带进来的盐浓度。当水达到超饱和后，盐就沉淀下来。

24. 有关板块分裂的更多信息，请参见：Platt N, Philip P 和 Walter S：“Going for the Play : Structural Interpretation in Offshore Congo”，*Oilfield Review*, 5 卷, 第 1 期 (1993 年 1 月)：14-27。

25. Liro LM 和 Dawson WC：“Reservoir Systems of Selected Basins of the South Atlantic”，Mello MR 和 Katz BJ (编辑)：*Petroleum Systems of South Atlantic Margins*。图尔萨：美国石油地质家协会，AAPG Memoir 73 (2000 年)：77-92。

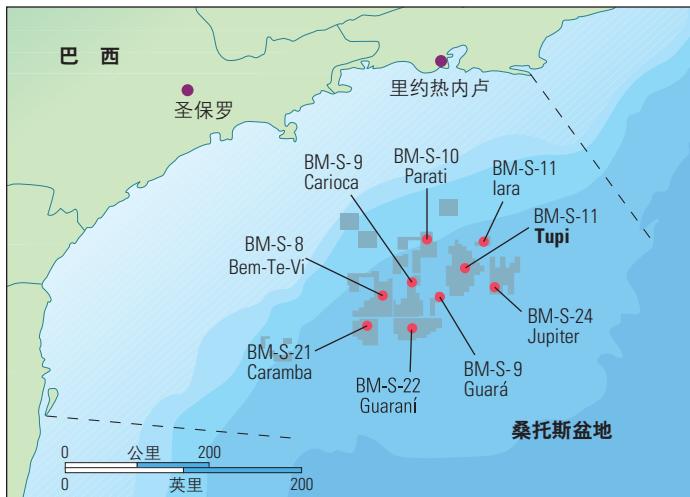
26. 深水概念经过了多年的演变。起初定义 200 米 (656 英尺) 为深水，但这个标准后来被钻井趋势超越，目前深水标准是 1000 英尺 (305 米)。水深超过 5000 英尺 (1524 米) 定义为超深水。

27. de Luca JC：“Brazilian Petroleum Exploration and Production : From Monopoly to Free Market”，论文 OTC 15051，发表在海上技术大会上，休斯敦，2003 年 5 月 5-8 日。

28. de Luca，参考文献 27。

29. Katz 和 Mello，参考文献 19。

30. Carminatti M, Dias JL 和 Wolff B：“From Turbidites to Carbonates : Breaking Paradigms in Deep Waters”，论文 OTC 20124，发表在海上



▲ 桑托斯盆地盐下油气藏。Tupi RJS-628A井标志着第一个盐下油气藏群重大油气发现，继该井发现油气后，在Tupi油气藏群租赁区块内至少又发现了七个油气藏。

大规模生产开发<sup>[39]</sup>。对桑托斯盆地盐下模型进行改进并用于其它油田勘探开发，先后在坎普斯盆地的Caxaréu、Pirambu、Baleia Franca、Baleia Azul、Jubarte和Cachalote油田获得了重大发现。Espírito Santo盆地的盐下构造也被列为勘探目标。

## 面临的挑战

桑托斯盆地是巴西最近盐下油气发现的首个区域，在超深水地区开发深埋在厚盐层下的碳酸盐岩油藏将会面临诸多勘探开发方面的挑战<sup>[40]</sup>。勘探重点位于水深在1900–2400米(6200–7870英尺)海域（上图）。因为距离海岸约300公里(185英里)，要想成功开展盐下勘探活动，必须进行周密的后勤组织，保证需要时设备和人员能够及时到位<sup>[41]</sup>。距海岸较远引发的问题还可能因为海洋气候变得更加严重，海洋条件可能一般困难，也可能非常严酷：桑托斯盆地的海浪可能比在北部的坎普斯盆地经历的海浪高得多—可能高出40%<sup>[42]</sup>。这使每个海上项目的后勤工作大相径庭—从队伍组成到钻机供应，从锚固定到管道铺设。随着管线、平台、FPSO和辅助基础设施的安装以充分保障生产活动，后勤任务将变得更加重要。

在深水区进行油气勘探开发活动主要依靠地球物理资料发现有利地质

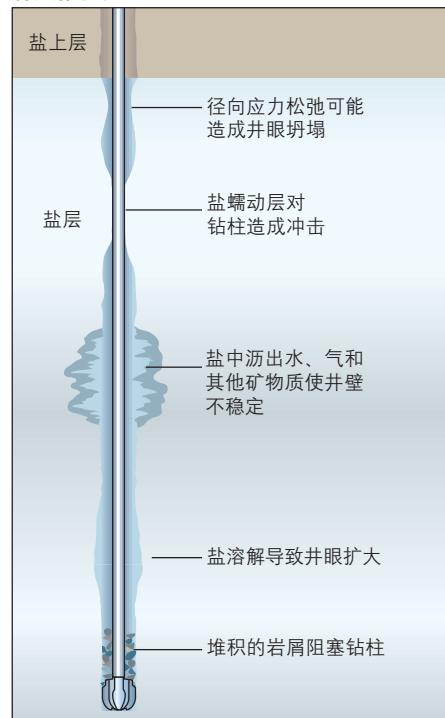
构造，并帮助进行后续油藏描述。但是，对盐下构造进行精确成像可能面临很多问题。为得到成功成像盐下构造所需的偏移距，油公司须使用复杂的采集方案，采用宽方位、富方位和多方位等技术进行资料采集<sup>[43]</sup>。

资料处理也可能很复杂。盐层和沉积层的地震层速度差别较大导致常规时间偏移方法失效，因此需要进行深度偏移。成像算法要求建立精确的层内、盐上和盐下速度模型。在根据深水环境对电磁技术(EM)进行适当改进后，勘探队将电磁资料和地震资料结合起来进行应用<sup>[44]</sup>。将电磁资料和地震资料结合起来进行反演处理，提高了构造分辨率，并准确确定了油气层，而用其他技术是无法做到这些的。

更大的挑战在于建井作业。目的层上面是2000米厚的蒸发岩。而蒸发岩层成分变化可能使钻井作业更加困难。这个层段主要由岩盐(NaCl)和硬石膏(CaSO<sub>4</sub>)组成，也含有光卤石(KMgCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)和溢晶石(CaMg<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>·12H<sub>2</sub>O)层。每一层的蠕变速度都不同，不同类型的盐层之间蠕变速度可能相差两个数量级。蠕变可能导致井眼受限、卡钻和套管挤扁（右上图）<sup>[45]</sup>。

另外，盐下油藏由非均质层状碳酸盐岩组成，特别影响钻井进度。在超深水地区钻井，钻井效率一直是作

## 潜在钻井问题



▲ 潜在钻井问题。钻穿盐层需要使用特别配置的钻井液。盐层钻井过程中可能造成井眼扩大和井壁不稳定等问题。如果钻井液比重低，盐岩蠕动可能冲击钻柱。被地层盐污染过的钻井液可能影响钻井液的流变性能，降低泥浆携带钻屑的能力，导致钻头上面的钻柱被卡。（根据Perez等人的资料修改，参考文献45）。

业公司最关心的问题，因为深水区钻机的日费很高。钻井效率能否提高将影响到未来为了开发这些油藏可能需要进行的大位移钻井项目<sup>[46]</sup>。

地质力学分析在未来开发计划中将起到重要作用。通过地质力学研究，帮助预测井眼周围岩石坍塌或盐层变形的可能性，还可以帮助选择钻头和钻井液。这些研究也用来指导泥浆配方设计、下套管程序和固井方案，以延长井眼在恶劣环境下的使用寿命。

油气开发的关键最终还在于对盐下碳酸盐岩储层进行岩石物理特征的精细描述。虽然盐下发现已经使油公司开始注意湖相碳酸盐岩储层，但对于湖相碳酸盐岩储层的沉积环境，以及后来的成岩过程方面的认识仍然不够深入。湖相沉积层的原始孔隙度变化很大。世界范围内，微生物造岩总是要求增强造孔作用，或造岩作用，以确保形成良好的储层。研究人员认为湖相储层中的断层和裂缝网络充当

了输送促进成岩过程的流体通道，特别是溶解液，能够连通溶洞孔隙网络，提高储层质量<sup>[47]</sup>。通过打探井和评价井，取岩心并进行岩心资料分析，记录各种测井资料，对各种参数进行评估，如岩石润湿性、水力连通性、孔隙结构和渗透率等。

须进行精细油藏描述，以确定最佳井眼轨迹和完井方案。多数盐下井中都发现了厚油柱和非均质油藏，需要进行选择性完井。周密计划酸化措施也能够均匀扩大产层开采范围。

开采或注水可能造成油田内地层压力和流体组成发生变化。有效压力的变化也可能影响将来进行的 4D 地震勘探中观察到的地震响应。因为碳酸盐岩的 4D 地震响应可能很微弱，难以检测，所以要求使用高度精确、非常敏感的地震测量方法。一旦精确监测到上述变化，就可以建立地质力学模型，辅助预测这些变化如何影响地震响应和未来储层动态。

为迎接上述及其他挑战，要求服务公司和学术界必须具备一定的技术知识和研究能力，以成功开展盐下油气藏勘探。2009 年 9 月，斯伦贝谢和里约热内卢联邦大学签订了一份合作协议，计划在联邦大学校园内成立国际研究中心（右上图）。斯伦贝谢巴西



▲ 巴西研究与地学工程中心规划图。即将落户里约热内卢联邦大学科技园的研究中心将重点开展与深水盐下环境有关的科研项目。

研究与地学工程中心 (BRGC) 作为较大的斯伦贝谢全球研究及开发网络中的一个研究机构，其主要研究领域将涵盖以下四个方面：碳酸盐岩储层描述、4D 地球物理成像，建井和地质力学研究以及油藏工程等。BRGC 编制为 350 多名员工，将建立最先进的 3D 可视化、地震资料处理、软件开发和技术培训设施。另外还要建立三座专门设计的完全一体化的实验室，提供经验模型输入和油藏模拟数据，帮助作业公司进行完善的油藏描述：

- 油井服务区域研究试验室：进行固

井和增产作业设备的研究，以期实现盐下油气藏增产；

- 油藏岩心试验室：进行流体和岩心分析，并与地球物理、岩石物理以及地质力学研究相结合；
- 油藏流体试验室：在典型井下条件下进行综合流体取样和分析，降低复杂开发项目中资料的不确定性。

研究中心取得的经验可推广用于世界其他盆地的研究中。研究人员已经认识到南美东南海岸的盆地漂移前的地质和构造情况与非洲西海岸的盆地情况在很多方面都很相似，都有沉降盆地，蕴藏富有机质生油岩，盖层都是厚盐层。

虽然大西洋两岸的盆地存在重大差别，但在一边取得的经验可为另一边的勘探活动提供重要参考。一些作业公司在大西洋两岸均开展作业。在巴西近海开展的勘探活动进展顺利，Tupi Sul 井进行探边试井获得了良好效果。在过去一年半内，该井平均日产油量为 2544 方 (16000 桶)，充分证明巴西盐下远景区具有长远的开发潜力。

- MV

- 
38. 美国能源情报署国家分析简报：“Brazil Energy Data, Statistics and Analysis”，(2009 年 9 月)，<http://www.eia.doe.gov/cabs/Brazil/Oil.html> (2010 年 7 月 23 日浏览)。
39. 美国能源情报署，参考文献 38。
40. Beltrão 等人，参考文献 1。
41. Formigli Filho JM, Pinto ACC 和 de Almeida AS：“Santos Basin’s Pre-Salt Reservoirs Development – The Way Ahead”，论文 OTC 19953，发表在海上技术大会上，休斯敦，2009 年 5 月 4-7 日。
42. Beltrão 等人，参考文献 1。
43. 关于此类采集技术的详细内容，请参见：Buia M, Flores PE, Hill D, Palmer E, Rose R, Walker R, Houbiers M, Thompson M, Laura S, Menlikli C, Moldoveanu N 和 Snyder E：“环形激发地震勘探方法”，《油田新技术》，20 卷，第 3 期 (2008 年秋季刊)：18-31。
44. 关于 EM 技术的详细内容，请参见：Brady J, Campbell T, Fenwick A, Ganz M, Sandberg SK, Buonora MPP, Rodrigues LP, Campbell C, Combee L, Ferster A, Umbach KE, Labruzzo T, Zerilli A, Nichols EA, Patmore S 和 Stilling J：“电磁法油
- 气勘探”，《油田新技术》，21 卷，第 1 期 (2009 年春季刊)：4-19。
45. 有关盐层钻井的详细内容，请参见：Perez MA, Clyde R, D’Ambrosio P, Israel R, Leavitt T, Nutt L, Johnson C 和 Williamson D：“应对盐下油气藏钻井的挑战”，《油田新技术》，20 卷，第 3 期 (2008 年秋季刊)：32-45。
46. Alves I, Aragão A, Bastos B, Falcão J 和 Fartes E：“Pre-Salt Santos Basin – Well Construction Learning Curve Acceleration”，论文 OTC 20177，发表在海上技术大会上，休斯敦，2009 年 5 月 4-7 日。
- 关于成岩作用的详细内容，请参见：Ali SA, Clark WJ, Moore WR 和 Dribus JR：“成岩作用及其对油藏质量的影响”，《油田新技术》，22 卷，第 2 期 (2010 年夏季刊)：14-27。
47. Guidry SA, Trainor D, Helsing CE 和 Ritter AL：“Diagenetic Facies in Lacustrine Carbonates : Implications for Brazilian Pre-Salt Reservoirs”，(摘要) 发表在 AAPG 国际会议暨展览会上，里约热内卢，2009 年 11 月 15-18 日，<http://www.searchanddiscovery.net/abstracts/html/2009/intl/abstracts/guidry.htm> (2010 年 9 月 27 日浏览)。