

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.033>



南大西洋中段共轭盐盆盐构造变形期次对比及意义

章雨^{1,2}, 李江海^{1,2*}, 程鹏^{1,2}

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871
2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871

摘要: 南大西洋中段被动陆缘含盐盆地群是全球油气储量快速增长的地区, 阿普特阶盐岩的分布及构造变形对该区油气成藏产生了重要影响。在前人地震及重磁资料基础上, 沿热刺转换断裂带选取圣埃斯皮里图和宽扎这组典型共轭盐盆, 平面上在Gplates软件中叠合布格重力异常数据进行板块构造重建, 剖面上应用Move软件进行平衡恢复, 根据反演结果设计正演模型, 进行物理模拟对比实验。在重力滑脱及重力扩展作用下, 盆地内形成了伸展—过渡—挤压的盐构造分带, 而底板斜坡倾角、基底伸展量、前缘阻挡、盐上沉积载荷及同沉积速率等因素, 造成了共轭盆地间盐构造变形过程的差异性。盐构造变形过程可分为盐构造初期变形阶段(阿普特期—阿尔比早期)和盐构造继承性发育阶段(两期, 阿尔比晚期—古近纪早期和古近纪晚期—现今); (1)阿普特期—阿尔比早期, 圣埃斯皮里图和宽扎盆地初始为统一盐盆, 盐盆东侧强烈伸展, 形成伸展区断裂及盐筏, 同时盐盆逐渐一分为二并形成外部高地带, 盐岩重力变形逐渐减慢。(2)阿尔比晚期—古近纪早期, 圣埃斯皮里图盆地外部高地带继承性隆起, 盐岩垂向上浮迁移; 宽扎盆地厚层盐高原隆起, 盐岩越过外部高地带形成逆冲推覆体。(3)古近纪晚期—现今, 圣埃斯皮里图盆地基底稳定热沉降, 盐构造继承性发育, 整个盆地盐岩呈现垂向迁移特征; 宽扎盆地靠陆端基底一定规模构造抬升, 盐岩向海运输重建, 伸展区盐筏进一步发育成盐滚, 过渡区及挤压区盐底辟持续上拱, 逆冲推覆体继续发育并在盐上层形成大量断裂及褶皱, 整个盆地盐岩不断向坡下聚集且构造分带性明显。

关键词: 形成演化; 物理模拟; 平衡剖面; 盐构造; 共轭盆地; 南大西洋; 构造。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2021)06-2218-12

收稿日期: 2019-05-22

Comparison of Salt Structure Deformation Periods of Conjugated Salt Basins in Central Segment of South Atlantic

Zhang Yu^{1,2}, Li Jianghai^{1,2*}, Cheng Peng^{1,2}

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China
2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The passive-margin salt basins in the central segment of the South Atlantic are areas with rapid growth of petroleum reserves in the world, where the distribution and structural deformation of the Aptian salt rocks have significant impacts on hydrocarbon accumulation. According to the Hotspur transform fault zone, the typical conjugated salt basins of Espírito Santo and Kwanza are selected in this study. Based on the previous seismic profiles and gravity and magnetism data, the Bouguer gravity anomaly data are superimposed on the plane in the Gplates software for reconstruction of the plates, and the Move software is used to restore balanced profile on the section. Then forward models designed according to the inversion results, and the contrast analogue experiments are carried out. According to the studies, under the superposition of gravity sliding and gravity spreading,

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目(Nos.2016ZX05033002, 2016ZX05033001); 中石化科技部项目(No.P18090-2).
作者简介: 章雨(1995—), 男, 硕士, 现主要从事构造及石油地质研究. ORCID:0000-0002-6948-0730. E-mail:2892122872@qq.com

*通讯作者: 李江海, E-mail:jhli@pku.edu.cn

引用格式: 章雨, 李江海, 程鹏, 2021. 南大西洋中段共轭盐盆盐构造变形期次对比及意义. 地球科学, 46(6):2218—2229.

salt tectonic zones of extension-transition-contraction developed in the passive-margin basins, while factors resulted in the salt structure deformation process among the conjugated basins, including slope angle, basement extension, the outer high barrier, salt deposition load and syn-depositional rate.(1) From Aptian to early Albian, the Espirito basin and the Kwanza basin were initially a unified salt basin. The east side of the unified basin was strongly stretched, forming faults and salt rafts in the extensional domain. At the same time, the unified basin was gradually divided, accompanied by the formation of the outer high, and the gravity deformation of salt rocks gradually slowed down. (2) From late Albian to Early Paleogene, the inherited uplift of the outer high in the Espirito Santo basin resulted in the vertical upward migrations of salt rocks; the uplift of the thick salt plateau in the Kwanza basin caused salt rocks to cross the outer high and form the thrust nappe. (3) From Late Paleogene to the present, the basement of the Espirito basin had steady thermal subsidence, and the salt structures were successively developed, then the salt rocks in the whole basin exhibit vertical migration characteristics. In the Kwanza basin, the basement was uplifted on a large scale, and the transport of salt rocks to the sea started again. Salt rafts in the extensional domain were further developed into salt rollovers; salt diapirs in the transitional zone and the contractional domain continued to rise; and the thrust nappe continued to develop, forming a large number of faults and folds in the supra salt layers. Then the salt rocks of the entire basin are continuously accumulating downslope with obvious structural zonation.

Key words: evolution; analogue experiments; physical simulation; balanced profile; salt structure; conjugated basin; South Atlantic; tectonics.

根据区域构造、地球物理解释,南大西洋可划分为4段,每段长约2 000 km,从北向南依次为赤道段、中段、南段及福克兰段(Moulin *et al.*, 2010).南大西洋中段位于罗曼什断裂带以南,从贝努埃裂谷至南端以里奥格兰德断裂带与南段分界(图1).两岸被被动陆缘相关区域发育有系列含盐盆地,具有共轭性(杨永才等,2015;温志新等,2018).盐岩的存在及构造变形是盆地内油气成藏的重要影响因素,近年来在下刚果盆地、大坎波斯盆地、加蓬盆地和宽扎盆地相继获得重要油气勘探突破(张光亚等,2014;陶崇智等,2015;刘静静等,2018).但该区总体上勘探程度较低,勘探分布不均匀.前人运用两岸对比的方法,研究盆地构造演化及盐岩发育、构造变形,提高了勘探效率(Blaich *et al.*, 2011; Marcano *et al.*, 2013; Strozyk *et al.*, 2016; Kukla *et al.*, 2018).但也存在以下问题:(1)盆地及盆内构造演化与地幔热柱活动、地壳变形、洋脊形成及洋—陆壳界线的关系;(2)盆地基底构造活动与盐构造变形过程的对应关系;(3)共轭盐盆间盐构造发育样式的异同点及造成差异的原因.本文在前人勘探取得的地震及重磁资料的基础上,依据热刺转换断裂带选取圣埃斯皮里图盆地(Espirito Santo basin)—宽扎盆地(Kwanza basin)这组典型共轭含盐盆地,平面上结合古地磁、布格重力异常数据对盆地所在的南大西洋中段区域进行构造重建,剖面上对两个盆地同时期、等比例进行平衡恢复,根据得到的反演结果设计正演模型,进行物理模拟对比实验,探讨盆地发育规律、基底构造活动及对盐构造变形的控制作用,

用,以及盐构造变形过程的主要期次,进而指导油气勘探.

1 南大西洋中段区域构造重建

利用古地磁数据在Gplates软件中建立非洲—南美古板块运动模型及地幔热柱运动轨迹(Torsvik *et al.*, 2009; Whittaker *et al.*, 2013; Matthews *et al.*, 2016; Müller *et al.*, 2018),并结合洋底磁异常条带将布格重力异常与古板块模型叠合(Balmino *et al.*, 2012; Bonvalot *et al.*, 2012),一方面展现各阶段地幔热柱、新生洋脊与盆地的相对位置变化关系,另一方面有效排除后期沉积物的影响并直观反映基底的变化过程.晚侏罗世时期,南美和非洲大陆均属西冈瓦纳大陆,为一个整体.南大西洋由南向北张开,中段的形成可概括为3个阶段:裂谷期、过渡期和漂移期(图2),具体如下.

(1)裂谷期(早白垩世凡兰吟期—巴雷姆期).此阶段以陆内裂谷作用为主.中段南部特里斯坦地幔热柱开始活动,并伴随有巴拉那—埃藤德卡岩浆活动,在非洲—南美古板块边缘形成大火成岩省,且非洲一侧岩浆活动较强(图2a),形成盆地初期基底隆起带.

(2)过渡期(阿普特期—阿尔比早期).阿普特期,新生洋脊尚由南段向北发育至桑托斯—纳米比亚盆地南端,中段以陆间裂谷作用为主,主要处于亚热带—热带地区(10° ~ 27° S).由于特里斯坦地幔热柱持续活动,并形成鲸鱼海岭和里奥格兰德海隆

的雏形,中段处于局限沉积环境,形成蒸发盐盆.以特里斯坦地幔热柱为参照点,此阶段非洲板块扩张速率较快,推测盐盆东侧基底伸展作用更强(图 2b).阿普特晚期—阿尔比早期,新生洋脊不断向北发育,统一盐盆一分为二,分裂边界为洋—陆壳界线,由南向北主要形成南美东岸的桑托斯盆地、坎波斯盆地和圣埃斯皮里图盆地,以及非洲西岸的宽扎盆地、下刚果盆地和加蓬盆地.

(3)漂移期(阿尔比晚期—现今).约 104 Ma 非洲和南美洲大陆岩石圈完全分离,约 100 Ma 新生洋脊穿过科特迪瓦—加纳转换脊,中、南大西洋相互连通(Heine *et al.*, 2013).中段处于广海环境,两岸盆地进一步伸展、加深.值得注意的是,在阿尔比晚期—晚白垩世,根据地幔热柱与古板块相对位置变化以及布格重力异常显示的高值区可知(图 1、图 2b 和图 2c),南美东岸盆地先后受到特里斯坦、圣海伦、特林达迪地幔热柱影响,岩浆活动较非洲西岸

盆地强,基底隆升范围更大并逐渐形成现今隆坳相间的格局.

2 共轭盐盆回剥分析

南大西洋中段两岸含盐盆地的形成演化既有相似性又有差异性.相似性是指盆地构造演化阶段相同,盆地内盐岩的发育均为裂谷作用下的板块离散背景;差异性主要表现在盆地基底的局部构造活动,导致盐构造变形期次不同.由热刺断裂带连接中段两岸的典型共轭盐盆(宽扎盆地和圣埃斯皮里图盆地),结合前人勘探成果(图 3)及地层层位、盐构造的解释(Marton *et al.*, 2000; Blaich *et al.*, 2011; Strozyk *et al.*, 2016; Kukla *et al.*, 2018),统一比例尺绘制与构造走向垂直的跨中段两岸构造长剖面(图 4a).应用英国 Midland Valley 勘探有限公司 Move 软件,基于物质守恒基本原理,按照面积不变或者长度不变的几何学平衡原则(Hudec and Jackson,

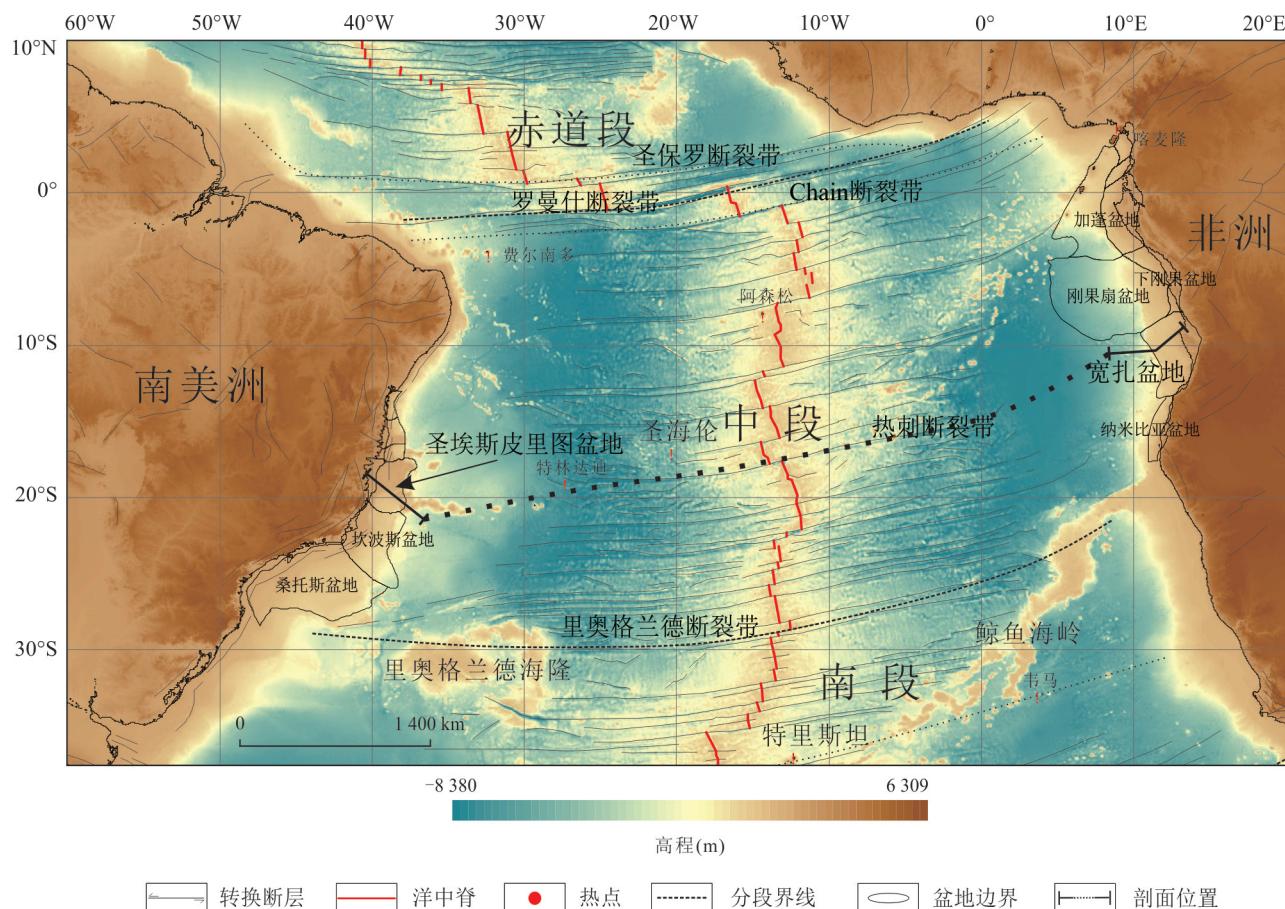


图 1 南大西洋中段含盐盆地分布及剖面位置示意

Fig.1 The sketch map of the distribution of salt basins in the central segment of the South Atlantic and the profile location of the study area

地形数据来源 Weatherall *et al.*(2015); 投影方式: 等距圆柱投影; 参考坐标系: GCS_WGS_1984

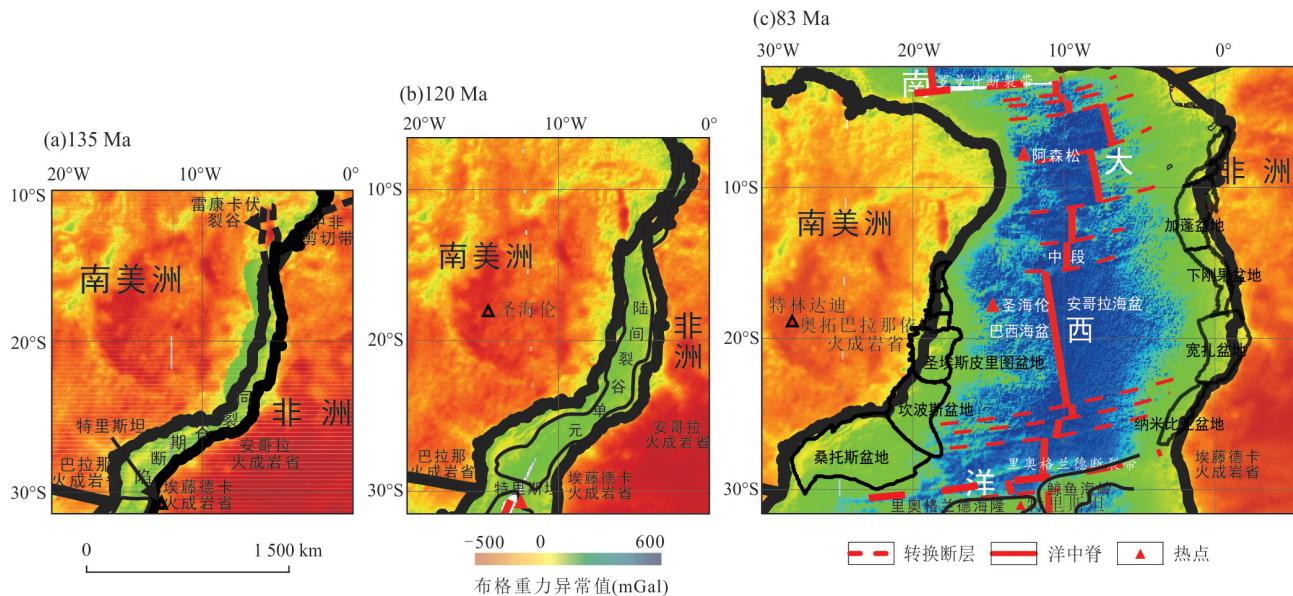


图2 南大西洋中段古板块再造与布格重力异常叠合图

Fig.2 Plate reconstruction and Bouguer gravity anomaly in the central segment of the South Atlantic

a. 裂谷期; b. 过渡期; c. 漂移期; 布格重力异常数据来源 Balmino *et al.*(2012); Bonvalot *et al.*(2012); 投影方式: 等距圆柱投影; 参考坐标系: GCS_WGS_1984

2004; 李朋等, 2018), 通过弯滑机制去断距、厚度趋势法剥蚀补偿、去压实矫正等步骤, 恢复构造演化历程, 分析研究各时期构造应力强弱、构造复合叠加、盐岩发育及相关构造变形(图4).

2.1 宽扎盆地

宽扎盆地现今盐岩层分布范围大, 盐岩最大厚度约为4 km, 盐构造从陆向海主要分为3个单元: 伸展区、过渡区、挤压区。伸展区盐上层发育大量铲状断层, 线状和点状盐构造均有发育, 可见盐枕、盐筏、盐滚和盐焊接; 过渡区是盐岩受力平衡区, 盐岩受力向上运动, 发育点状盐株构造, 相邻盐株之间形成迷你盆地; 挤压区处于局部挤压环境, 发育盐篷、盐墙等线状盐构造类型(图4a)。回剥分析表明如下。

阿普特期—阿尔比早期: 盐岩沉积及初期强伸变形。阿普特期前, 盆地所处的非洲边缘由于较强的岩浆活动而形成早期基底隆起, 影响盐岩初始发育形态(图4f)。阿普特期, 随着南大西洋张开的进程, 盆地继续扩张且基底伸展作用强, 盐岩沉积范围大, 主要积聚在两个次盆中, 厚度可达2 km, 被弗拉明戈高地分隔开(图4e)。阿尔比早期, 在南大西洋持续扩张过程中, 由于岩浆不断侵入, 宽扎盆地与圣埃斯皮里图盆地最终分离, 并在盆地外围形成外部高地带, 凸起约2 km(图4d)。由于差异热沉降, 盆地向海倾斜程度加大, 盐岩及盐上层以向海迁移为主。

阿尔比晚期—古近纪早期: 盐构造缓慢变形。由于外部高地带的阻挡以及上覆沉积负载加大, 盐

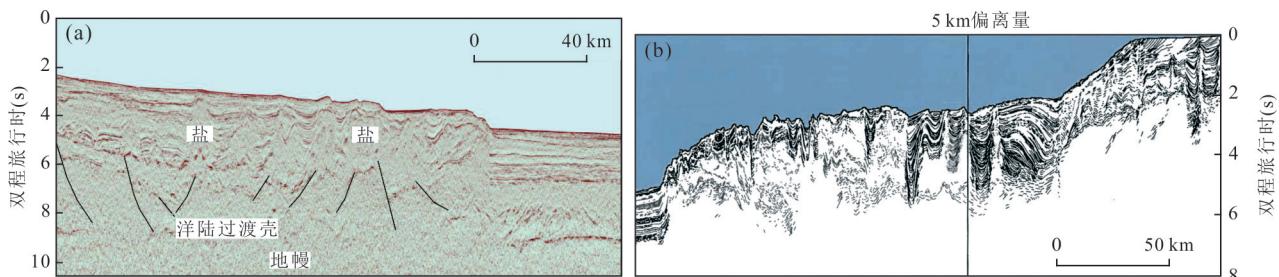


图3 圣埃斯皮里图盆地(a)和宽扎盆地(b)原始地震剖面

Fig.3 Seismic profiles of the Espírito Santo basin (a) and the Kwanza basin(b)

a. 圣埃斯皮里图盆地, 据 Blaich *et al.*(2011)修改; b. 宽扎盆地, 据 Marton *et al.*(2000)修改; 剖面位置见图1

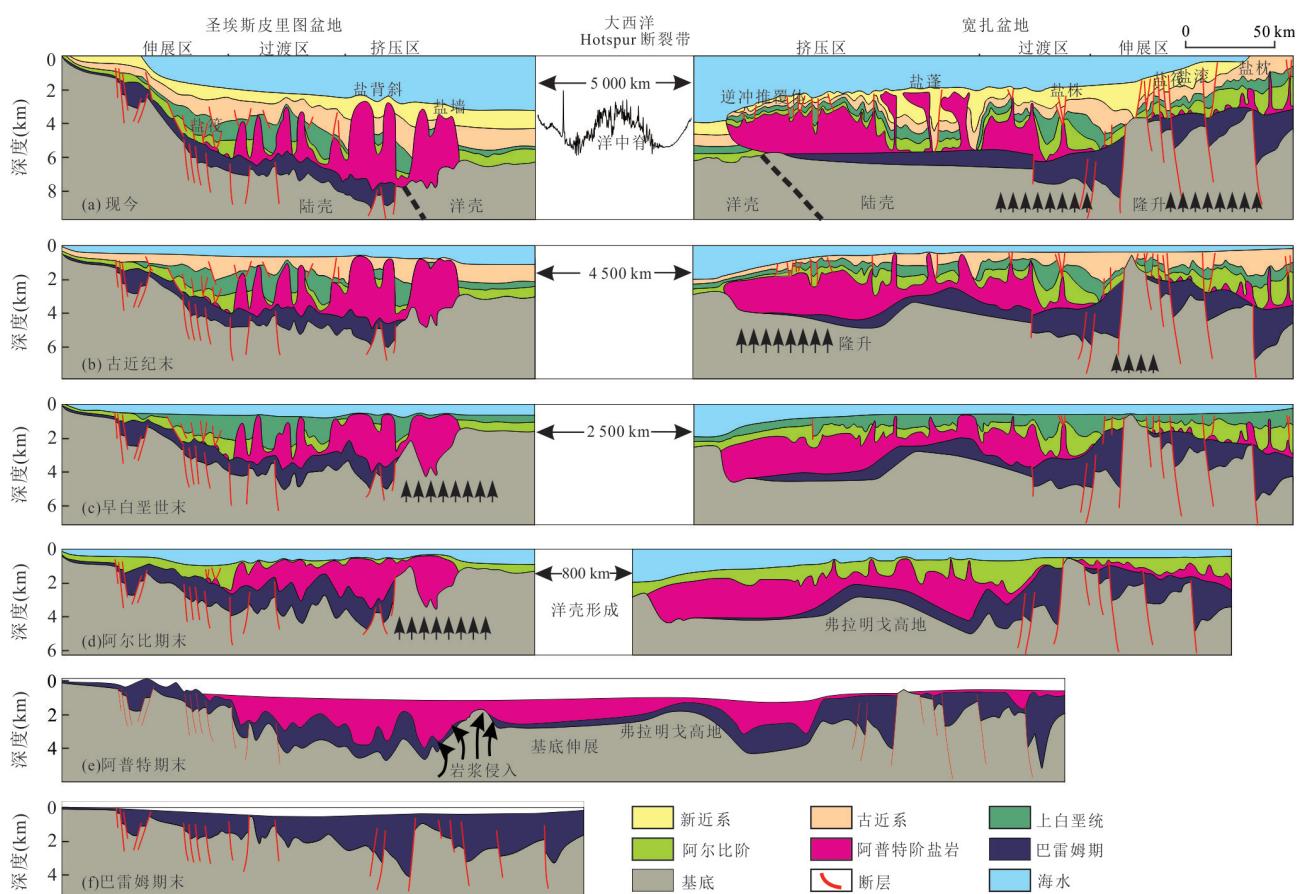


图 4 南大西洋中段共轭盐盆平衡剖面恢复图

Fig.4 Restoration of balanced profile of conjugated salt basins in the central segment of the South Atlantic

现今剖面 a 解释自图 3; 参考文献 Marton *et al.*(2000); Blaich *et al.*(2011)

构造变形减弱, 同时由于盆地向海一侧继续沉陷, 盐构造存在缓慢变形(图 4c). 值得注意的是, 坎潘期(75 Ma)盆地靠海端厚层盐高原隆起(Hudec and Jackson, 2004), 盐岩突破了外部高地带的限制, 形成了喷出的安哥拉逆冲推覆体.

古近纪晚期—现今: 盐构造再变形. 盆地向海一侧持续沉陷, 基底倾斜程度缓慢增加. 同时, 以中新世为代表, 盆地向陆边界发生一定规模的构造隆起事件, 不同隆起块之间的边界激活了基底裂谷期正断层. 伸展区, 盐上层断裂进一步生长, 部分盐筏发育成盐滚; 过渡区, 早期形成的盐底辟进一步上拱; 挤压区, 盐底辟进一步形成盐蓬、盐墙, 盐岩向海运输的重建加速了安哥拉逆冲推覆体的发育(图 4b).

2.2 圣埃斯皮里图盆地

圣埃斯皮里图盆地规模较小, 东西仅宽 100~200 km, 盐构造从陆向海同样可分为 3 个单元: 伸展区、过渡区、挤压区. 伸展区断裂发育程度较宽

且盆地弱, 可见盐枕及盐焊接; 过渡区及挤压区盐岩层以垂向上浮迁移为主, 由陆向海上浮迁移的距离逐渐加大, 形成盐背斜及盐墙, 上拱甚至刺穿上方地层, 部分逆冲盐席出露海底(Blaich *et al.*, 2011). 盐岩层分布面积虽小于宽扎盆地, 但其上浮迁移程度更强, 部分区域厚度可达 5 km 以上(图 4a).

剥削分析表明(图 4), 阿普特期—阿尔比早期, 同宽扎盆地一样, 盆地内盐岩沉积(厚可达 3 km), 基底热沉降, 盆地外围由于岩浆侵入形成外部高地带的雏形; 不同的是, 伸展作用较宽扎盆地弱, 盐岩横向迁移程度较低. 阿尔比晚期—古近纪早期, 盆地与西非边缘差异主要在, 先后受到圣海伦、特林达迪地幔热柱影响(图 1、图 2), 基底横向上升运动的现象加剧, 且外部高地带发生继承性隆起, 凸起达 2 km 以上, 导致盐岩重力滑脱作用受阻并逐渐垂向上浮迁移, 在过渡区及挤压区形成盐背斜及盐墙; 古近纪晚期—现今, 盆地基底稳定热

沉降,盐构造继承性发育,发生趾状流动和溢出.

3 物理模拟对比实验

3.1 模型设计

研究区盐构造变形过程需要考虑:(1)盆地初期构造格局;(2)基底构造活动;(3)盐岩初始发育形态、盐上层同沉积过程.其中,基底构造活动(包括差异热沉降、岩浆活动)体现在倾角、伸缩量和隆坳格局变化,是划分盐构造变形期次的重要依据.根据区域构造重建和盆地回剥分析,两个盆地初期共轭,随后发生热沉降及外部高地带隆升,盐岩初始发育形态相似(由陆向海逐渐增厚),盐上层沉积厚度相近.不同的是,宽扎盆地初期经历较强的伸展作用,后期靠陆端基底发生一定规模构造抬升;圣埃斯皮里图盆地初期外部高地带持续隆升形成封闭环境,后期基底稳定热沉降,且倾斜角度较大.因此,设计如下两组物理模拟模型(图5和图6),以进行对比实验.

实验材料采用硅胶模拟盐岩、干石英砂代替碳酸盐岩、砂岩.硅胶室温下黏度系数约为 $1 \times 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度约为 1000 kg/m^3 ,在低应变速率条件下具有牛顿流体性质;干石英砂密度为 1300 kg/m^3 ,内聚力极小,破裂内摩擦角约为 31° ,形变遵循库伦-莫尔准则(解国爱等,2013;李法浩等,

2018;).模型材料相似条件与前人关于被动陆缘盆地重力背景下盐构造模拟实验相符(Fort *et al.*, 2004; Rowan *et al.*, 2012; Dooley and Hudec, 2017; Dooley *et al.*, 2017).物理模型与地质原型之间主要的缩放比例如下:

$g^*=1$ (模型和地质原型的形变都在自然重力场中进行);

$\rho^*\approx 0.5$ (模型材料的密度约为地质原型岩石密度的一半);

$\mu^*\approx 1\times 10^{-15}$ (硅胶的黏度系数远小于自然界中盐岩的黏度系数).

根据 $t^*=\mu^*/(\rho^*\cdot g^*\cdot l^*)$ 可知,模拟1 h相当于地质时间0.6 Ma,实验过程中底板抬升及同沉积沙层铺设时间间隔依此换算关系而定(解国爱等,2013).

模型一:对圣埃斯皮里图盆地盐构造进行模拟.如图5a,盐岩初始非均匀沉积,由陆向海逐渐增厚,近陆端尖灭,靠海端厚为0.9 cm;基底靠海端设置外部高地,并与盐岩接触;盐上铺设第一期沉积层,总厚为0.5 cm.如图5b,抬升底板(模拟基底热沉降),基底倾斜角度设置为 5° ;随着坡上断裂发育,铺设第二期同沉积层,总厚为0.5 cm;实验体系稳定后,铺设第三期沉积盖层,总厚为0.5 cm.每期沙层均内设标志层.

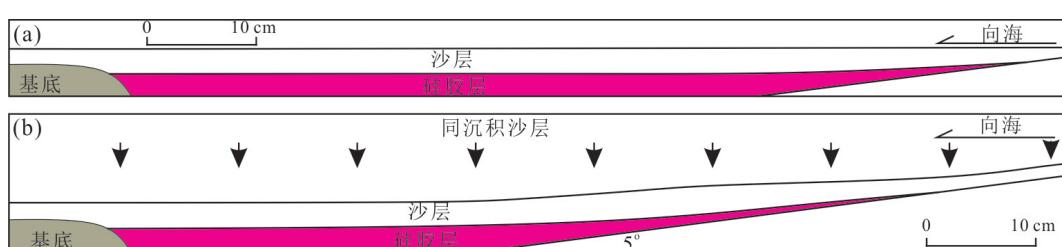


图5 圣埃斯皮里图盆地盐构造物理模拟模型图(纵向比例尺夸大2倍)

Fig.5 The simulation model of salt structures in the Espírito Santo basin

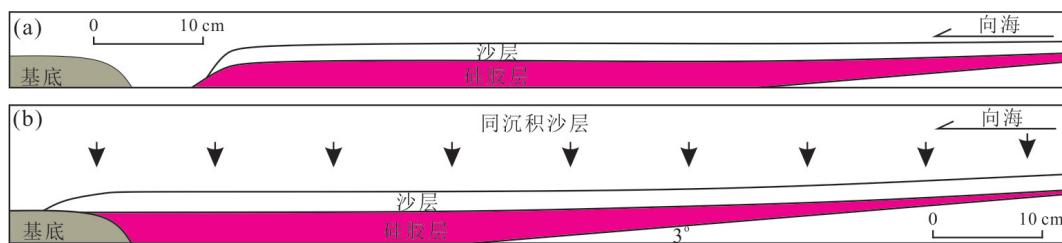


图6 宽扎盆地盐构造物理模拟模型图(纵向比例尺夸大2倍)

Fig.6 The simulation model of salt structures in the Kwanza basin

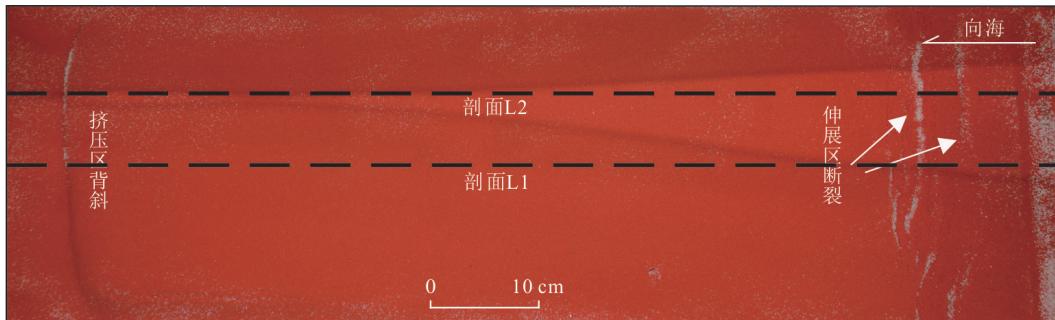


图 7 模型一模拟过程平面

Fig.7 The top view of model-1 in the simulation process

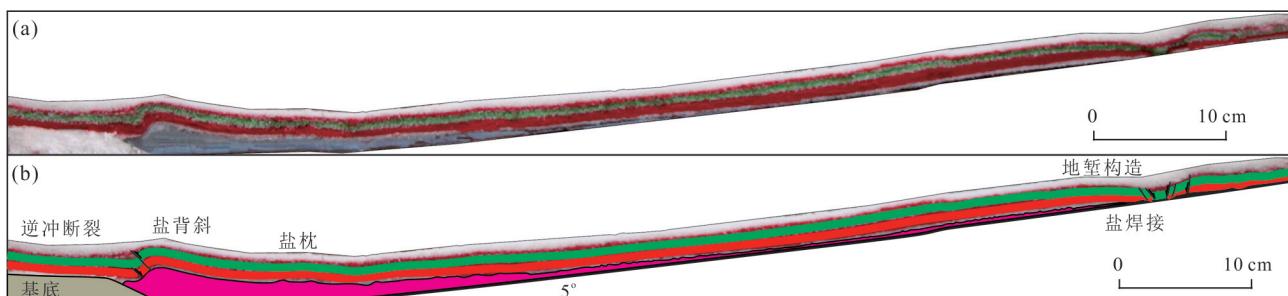


图 8 模型一模拟结果 L1 剖面图

Fig.8 The L1 cross-sectional view of the model-1 results

a. 原始剖面; b. 解释剖面(纵向比例尺夸大2倍)

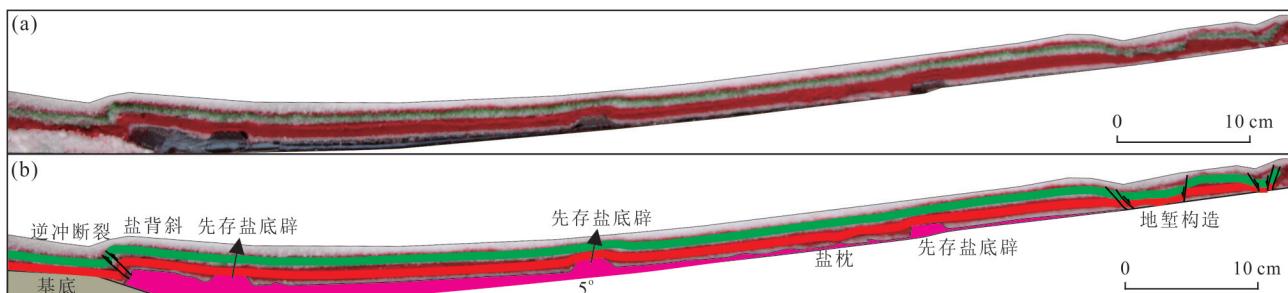


图 9 模型一模拟结果 L2 剖面图

Fig.9 The L2 cross-sectional view of the model-1 results

a. 原始剖面; b. 解释剖面(纵向比例尺夸大2倍)

模型二:对宽扎盆地盐构造进行模拟.如图 6a, 盐岩初始非均匀沉积,由陆向海逐渐增厚,近陆端厚为0.2 cm,靠海端厚为0.9 cm;盐岩与基底外部高地不接触,模拟盆地初期强烈的伸展过程(盐岩有充足的流动空间,一方面盐岩自由流动的范围对应于基底伸展,另一方面盐岩流动至外部高地带与实点对应);盐上随着断裂发育铺设第一期同沉积层,总厚为0.6 cm.如图 6b,抬升底板(模拟基底构造抬升),基底倾斜角度设置为3°;坡上断裂继续发育,铺设第二期同沉积层,总厚为1.0 cm;实验体系稳定后,铺设第三期沉积盖层,总厚为0.5 cm.每期沙层

均内设标志层.

3.2 模型一模拟结果

图 7 所示为模拟过程中模型平面图,此时伸展区同生长断裂不断向海方向发育,挤压区背斜逐渐上隆.待盐构造变形速率减慢,实验体系逐渐稳定后,铺上沉积盖层并切剖面观察.该实验用时共8 d.图 8 为模型中部剖面,伸展区可见地堑构造,盐焊接发育;过渡区盐层局部有小幅凸起;挤压区发育逆冲断裂,盐层呈上拱运动趋势,并形成盐枕、盐背斜.总体来说,由陆向海,盐层厚度变化较为均匀,盐构造以底辟上拱为主.说明在实验设定下,外部高地

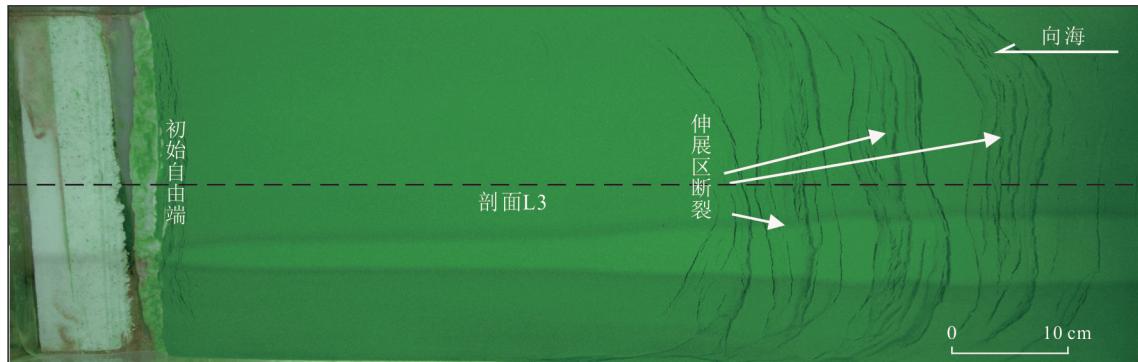


图10 模型二模拟过程平面图

Fig.10 The top view of model-2 in the simulation process

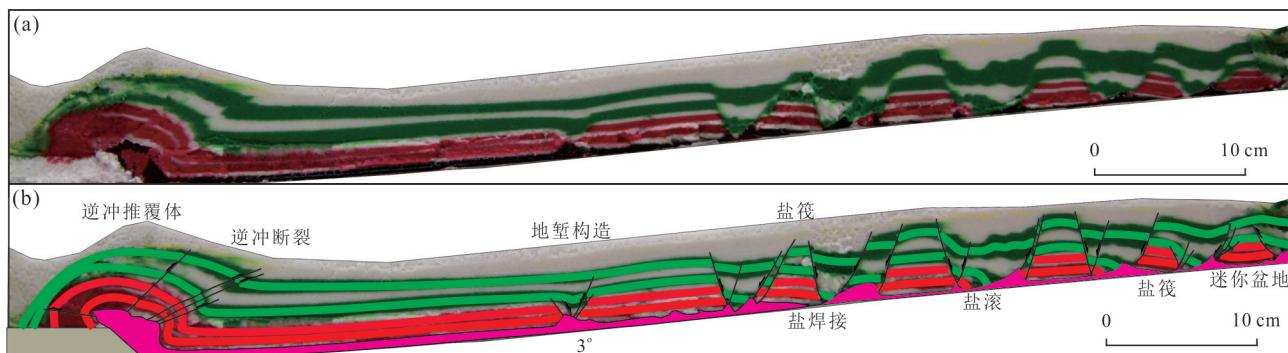


图11 模型二模拟结果L3剖面图

Fig.11 The L3 cross-sectional view of the model-2 results

a. 原始剖面; b. 解释剖面(纵向比例尺夸大2倍)

带持续隆升形成的封闭环境,是上浮式底辟形成的关键,盐岩在稳定变形过程中,随着上覆沉积负载加大,易在局部聚集并上浮式迁移。

另外,盐上层差异负载也可能影响盐体底辟作用。因此,在模型两侧设有先存盐底辟,图9为模拟结果剖面。剖面中伸展区、过渡区和挤压区先存盐底辟实验效果均不明显,仅对周围地层有小幅扰动,认为在实验条件下差异负载只是次要因素。

3.3 模型二模拟结果

图10所示为模拟过程中模型平面图,此时伸展区出现大量断裂。实验进行3 d后,为提高实验效率,后期在模型靠海端施加侧向挤压力,模拟挤压区局部挤压环境以及基底抬升后盐体相对快速的逆冲推覆过程。待实验体系逐渐稳定后,铺上沉积盖层并在模型中部切剖面观察。如图11,伸展区发育大量正断层,可见地堑构造、迷你盆地,盐筏、盐滚、盐焊接发育;过渡区发育小型盐底辟;挤压区可见逆冲断裂和大型逆冲推覆体。总体来说,由陆向海,盐层厚度变化不均匀,除了坡上盐筏、盐滚处遗

留下的盐体,其余则主要聚集在坡下及逆冲推覆体中。说明在实验设定下,早期基底强烈的伸展,盐岩变形较剧烈,伸展区发育了大量断裂,且大量盐岩顺斜坡滑脱并聚集于坡下,与外部高地带高差逐渐减小而发生逆冲。

4 讨论

前人在南大西洋周缘(Fort *et al.*, 2004; Adam *et al.*, 2008; 郭栋, 2016)、墨西哥湾(Rowan *et al.*, 2012)、红海盆地(吴珍云, 2014)、滨里海盆地(杨泰等, 2015)和塔里木盆地(余一欣, 2006; 汪新等, 2010; 唐鹏程, 2011)等均开展过相关盐构造物理模拟实验,物理模拟具有的实际地质意义已得到检验。本文两组模型的物理模拟结果与盆地现今剖面相比(Marton *et al.*, 2000; Blaich *et al.*, 2011; Strozyk *et al.*, 2016; Kukla *et al.*, 2018),整个盆地盐构造单元的划分均相同,每个单元内盐构造类型大体一致,说明模型设计具有合理性,并验证了盆地回剥分析结果。被动陆缘盆地斜坡上的重力作用,包括重力

滑脱作用及重力扩展作用,可以形成伸展—过渡—挤压的盐构造分带,而底板斜坡倾角、基底伸展量、前缘阻挡、盐上沉积载荷及同沉积速率等因素,造成了共轭盆地间盐构造变形过程的差异性。

圣埃斯皮里图盆地与宽扎盆地在阿尔比早期前为统一盐盆,统一盐盆盐岩沉积具有对称性,总体上两侧薄中间厚。局部而言,由于裂谷期特里斯坦热点活动,非洲一侧较强的岩浆活动而形成盆地初期基底隆起带,统一盐盆两侧盐岩初始发育形态会存在差异。随着南大西洋扩张过程持续进行,盐盆范围扩大,基底被拉伸减薄,同时发生热沉降。该阶段非洲板块扩张速率较快,盐盆东侧基底伸展作用更强,西侧较弱,也符合 Lentini *et al.*(2010)提出的盆地扩张的简单剪切模型。基底的伸展作用,为盐岩提供了流动空间,在重力作用(重力扩展和重力滑脱混合作用)下盐岩快速顺层变形,形成了盐盆初期伸展区的大量断裂。与此同时,盐盆扩张中心岩浆不断侵入,形成外部高地带的雏形。盐盆西侧基底伸展空间有限,盐岩很快便受到外部高地带的前缘阻挡作用,变形速度减慢;盐盆东侧盐岩流动空间充足,伸展区断裂进一步发育,形成的盐构造以盐筏为主。阿尔比早期,新生洋脊形成(Kukla *et al.*, 2018),洋壳出现,统一盐盆一分为二,盐盆西侧即圣埃斯皮里图盆地,东侧为宽扎盆地。

盐盆分裂后,由于外部高地带的阻挡以及上覆沉积负载加大,两个盆地盐构造变形过程逐渐稳定。阿尔比晚期—古近纪早期,圣埃斯皮里图盆地先后受到圣海伦、特林达迪地幔热柱影响,基底隆坳起伏的现象加剧,外部高地带发生继承性隆起,盐岩在底辟区及挤压区逐渐垂向上浮迁移形成盐背斜及盐墙;而宽扎盆地则在坎潘期发生靠海端厚层盐高原隆起(Hudec and Jackson, 2004),外部高地带相对高度减小,同时盐岩亦不断滑脱并在坡下积聚,随时间推进,盐岩逆冲到外部高地带之上,形成安哥拉逆冲推覆体。其中,圣埃斯皮里图盆地地幔热柱的影响也可从 Fodor and Hanan(2000)对其邻区火成岩省及洋底高原的研究中得到证明,两个盆地盐构造发育亦可分别与 Jackson *et al.*(2015)和 Dooley *et al.*(2015)对桑托斯盆地盐墙的研究以及 Chen *et al.*(2013)对加蓬盆地盐底辟及逆冲盐席的研究进行有效类比。古近纪晚期—现今,圣埃斯皮里图盆地基底稳定热沉降,盐构造在已形成的盐背斜及盐墙处继承性发育,发生趾状流动和溢出;宽

扎盆地由于靠陆端基底发生一定规模构造隆起,盐岩向海运输重建(以重力滑脱作用),伸展区部分盐筏进一步发育成盐滚,过渡区早期形成的盐底辟进一步上拱,挤压区出现盐蓬、盐墙,安哥拉逆冲推覆体继续发育并在盐上层形成大量断裂及褶皱,整个盆地盐构造单元区分更为明显。

5 结论

南大西洋中段被动陆缘盆地斜坡上的重力作用,包括重力滑脱及重力扩展,形成了伸展—过渡—挤压的盐构造分带,而底板斜坡倾角、基底伸展量、前缘阻挡、盐上沉积载荷及同沉积速率等因素,造成了共轭盆地间盐构造变形过程的差异性。盐构造变形过程可分为,盐构造初期变形阶段(阿普特期—阿尔比早期)和盐构造继承性发育阶段(两期,阿尔比晚期—古近纪早期、古近纪晚期—现今),具体如下。

(1) 圣埃斯皮里图及宽扎盆地在裂谷期和过渡期为统一盆地。阿普特期,统一盆地处于亚热带—热带地区局限沉积环境,形成盐盆,盐岩沉积具有对称性。统一盐盆继续扩张,基底被拉伸减薄,为盐岩提供流动空间,形成盐构造初期伸展区断裂。同时,扩张中心地幔岩浆不断侵入并形成外部高地带雏形。阿尔比早期,盐盆最终一分为二。

(2) 圣埃斯皮里图盆地过渡期基底伸展空间有限,盐岩很快便受到外部高地带的前缘阻挡作用,滑脱速度减慢。阿尔比晚期—古近纪早期,盆地先后受到圣海伦、特林达迪热点地幔热柱影响,盆地内部基底呈现隆坳相间的格局,外部高地带发生继承性隆起,盐岩在底辟区及挤压区逐渐垂向上浮迁移形成盐背斜及盐墙。古近纪晚期—现今,盆地基底稳定热沉降,盐构造在已形成的盐背斜及盐墙处继承性发育,发生趾状流动和溢出。整个盆地盐岩主要呈现垂向迁移特征。

(3) 宽扎盆地过渡期基底强烈伸展,盐岩快速顺层滑脱,伸展区发育断裂及盐筏。阿尔比晚期,由于外部高地带的阻挡以及上覆沉积负载加大,盐构造变形过程逐渐稳定。坎潘期,靠海端厚层盐高原隆起,盐岩逆冲到外部高地带之上,形成安哥拉逆冲推覆体。古近纪晚期—现今,靠陆端基底发生一定规模构造隆起,盐岩向海运输重建,伸展区部分盐筏进一步发育成盐滚,过渡区

及挤压区盐底辟进一步上拱,安哥拉逆冲推覆体继续发育并在盐上层形成大量断裂及褶皱。整个盆地盐岩主要向坡下聚集且构造分带性明显。

致谢:感谢中石化石油勘探开发研究院提供的海外地震资料及平衡剖面制作的指导,感谢成都理工大学自然资源部构造成矿成藏重点实验室提供物理模拟实验设备及材料,同时感谢匿名审稿人给出的意见和建议。

References

- Adam, J., Campbell, C., Cribb, J., et al., 2008. 4D Physical Simulation of Basin-Scale Salt Tectonic Processes and Coupled Depositional Systems from the Rift Basin to Modern Continental Margin. *Exploration & Production Oil & Gas Review*, 6(11):94—97.
- Balmino, G., Vales, N., Bonvalot, S., et al., 2012. Spherical Harmonic Modelling to Ultra-High Degree of Bouguer and Isostatic Anomalies. *Journal of Geodesy*, 86(7):499—520. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0533-4>
- Blaich, O. A., Inge, F. J., Filippou, T., 2011. Crustal Breakup and Continent-Ocean Transition at South Atlantic Conjugate Margins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B1): B01402. <https://doi.org/10.1029/2010jb007686>
- Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., et al., 2012. World Gravity Map: A Set of Global Complete Spherical Bouguer and Isostatic Anomaly Maps and Grids. EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria.
- Chen, A.Q., Jin, C., Lou, Z.H., et al., 2013. Salt Tectonics and Basin Evolution in the Gabon Coastal Basin, West Africa. *Journal of Earth Science*, 24(6):903—917. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0383-5>
- Dooley, T.P., Hudec, M.R., 2017. The Effects of Base-Salt Relief on Salt Flow and Suprasalt Deformation Patterns: Part 2: Application to the Eastern Gulf of Mexico. *Interpretation*, 5(1): SD25—SD38. <https://doi.org/10.1190/int-2016-0088.1>
- Dooley, T.P., Hudec, M.R., Carruthers, D., et al., 2017. The Effects of Base-Salt Relief on Salt Flow and Suprasalt Deformation Patterns: Part 1: Flow across Simple Steps in the Base of Salt. *Interpretation*, 5(1): SD1—SD23. <https://doi.org/10.1190/int-2016-0087.1>
- Dooley, T.P., Jackson, M.P.A., Jackson, C.A.L., et al., 2015. Enigmatic Structures within Salt Walls of the Santos Basin: Part 2: Mechanical Explanation from Physical Modelling. *Journal of Structural Geology*, 75:163—187. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.009>
- Fodor, R. V., Hanan, B. B., 2000. Geochemical Evidence for the Trindade Hotspot Trace: Columbia Seamount Anakaramite. *Lithos*, 51(4): 293—304. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00002-5)
- Fort, X., Brun, J.P., Chauvel, F., 2004. Salt Tectonics on the Angolan Margin, Synsedimentary Deformation Processes. *AAPG Bulletin*, 88(11):1523—1544. <https://doi.org/10.1306/06010403012>
- Guo, D., 2016. Petroleum System Analysis and Exploration Potential for the Pre-Salt Sequences in the Campos Basin, Brazil (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Heine, C., Zoethout, J., Müller, R.D., 2013. Kinematics of the South Atlantic Rift. *Physics*, 4(2): 215—253. <https://doi.org/10.5194/se-4-215-2013>
- Hudec, M. R., Jackson, M. P. A., 2004. Regional Restoration across the Kwanza Basin, Angola: Salt Tectonics Triggered by Repeated Uplift of a Metastable Passive Margin. *AAPG Bulletin*, 88(7): 971—990. <https://doi.org/10.1306/02050403061>
- Jackson, C.A.L., Jackson, M.P.A., Hudec, M.R., et al., 2015. Enigmatic Structures within Salt Walls of the Santos Basin: Part 1: Geometry and Kinematics from 3D Seismic Reflection and Well Data. *Journal of Structural Geology*, 75:135—162. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.010>
- Kukla, P.A., Strozyk, F., Mohriak, W.U., 2018. South Atlantic Salt Basins—Witnesses of Complex Passive Margin Evolution. *Gondwana Research*, 53: 41—57. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.03.012>
- Lentini, M.R., Fraser, S.I., Sumner, H.S., et al., 2010. Geodynamics of the Central South Atlantic Conjugate Margins: Implications for Hydrocarbon Potential. *Petroleum Geoscience*, 16(3): 217—229. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-909>
- Li, F.H., Xie G.A., Tian R.S., et al., 2018. Physical Modeling of Xu-Huai Thrust-Fold Belt on the Southeastern Margin of North China Block. *Geological Bulletin of China*, 37(6):1087—1100(in Chinese with English abstract).
- Li, P., Hu, Z.X., He, R.L., et al., 2018. The Tectonic Evolution of the Central Anticline in Western Hubei of China during Mesozoic: Evidences from Apatite Fission Track. *Earth Science*, 43(7): 2518—2526(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.J., Wu, C.W., Ding, F., 2018. Basin Types and Hydrocarbon Distribution in Salt Basins in the South Atlantic. *Petroleum Geology and Experiment*, 40(3): 372—380(in Chinese with English abstract).
- Marcano, G., Anka, Z., Primio, R.D., 2013. Major Controlling

- Factors on Hydrocarbon Generation and Leakage in South Atlantic Conjugate Margins:A Comparative Study of Colorado, Orange, Campos and Lower Congo Basins. *Tectonophysics*, 604(5): 172—190. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.02.004>
- Marton, L. G., Tari, G. B. C., Lehmann, C. T., 2000. Evolution of the Angolan Passive Margin, West Africa, with Emphasis on Post-Salt Structural Styles. *Geophysical Monograph - American Geophysical Union*, 115: 129—150. <https://doi.org/10.1029/gm115p0129>
- Matthews, K. J., Maloney, K. T., Zahirovic, S., et al., 2016. Global Plate Boundary Evolution and Kinematics since the Late Paleozoic. *Global and Planetary Change*, 146: 226—250. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.002>
- Moulin, M., Aslanian, D., Unternehr, P., 2010. A New Starting Point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Reviews*, 98(1—2):1—37. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.08.001>
- Müller, R. D., Cannon, J., Qin, X. D., et al., 2018. GPlates: Building a Virtual Earth through Deep Time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7): 2243—2261. <https://doi.org/10.1029/2018gc007584>
- Rowan, M. G., Peel, F. J., Vendeville, B. C., et al., 2012. Salt Tectonics at Passive Margins:Geology versus Models—Discussion. *Marine and Petroleum Geology*, 37(1):184—194. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.04.007>
- Strozyk, F., Back, S., Kukla, P. A., 2016. Comparison of the Rift and Post-Rift Architecture of Conjugated Salt and Salt-Free Basins Offshore Brazil and Angola/Namibia, South Atlantic. *Tectonophysics*, 716: 204—224. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.12.012>
- Tang, P. C., 2011. Cenozoic Salt Structures in the Western Kuqa Depression, Southern Tianshan: Structural Analysis and Physical Modeling (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou(in Chinese with English abstract).
- Tao, C. Z., Yin, J. Y., Lu, H. M., et al., 2015. Impact of Salt on Hydrocarbon Accumulation in South Atlantic Passive Margin Basins. *Petroleum Geology and Experiment*, 37 (5):614—618(in Chinese with English abstract).
- Torsvik, T. H., Rousse, S., Labails, C., et al., 2009. A New Scheme for the Opening of the South Atlantic Ocean and the Dissection of an Aptian Salt Basin. *Geophysical Journal International*, 177(3): 1315—1333. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2009.04137.x>
- Wang, X., Wang, Z. M., Xie, H. W., et al, 2010. Cenozoic Salt Tectonics and Physical Models in the Kuqa Depression of Tarim Basin, China. *Scientia Sinica Terra*, 40:1655—1668(in Chinese).
- Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., et al., 2015. A New Digital Bathymetric Model of the World's Oceans. *Earth & Space Science*, 2(8):331—345. <https://doi.org/10.1002/2015ea000107>
- Wen, Z. X., Wu, Y. D., Bian, H. G., et al., 2018. Variations in Basin Architecture and Accumulation of Giant Oil and Gas Fields along the Passive Continent Margins of the South Atlantic. *Earth Science Frontiers*, 25(4):132—141 (in Chinese with English abstract).
- Whittaker, J. M., Williams, S., Masterton, S. M., et al., 2013. Interactions among Plumes, Mantle Circulation and Mid-Ocean Ridges. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, U.S.A..
- Wu, Z. Y., 2014. Structural Analysis and Analogue Modeling of Salt Structures in the Salt-Bearing Sedimentary Basin (Dissertation). Nanjing University, Nanjing(in Chinese with English abstract).
- Xie, G. A., Jia, D., Zhang, Q. L., et al., 2013. Physical Modeling of the Jura-Type Folds in Eastern Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 773—788(in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Tang, L. J., Yu, Y. X., et al., 2015. Characteristics of Reservoirs Related to Salt Structure and Its Experimental Simulation in the Southern Margin of Precaspian Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(2):246—251, 258(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. C., Sun, Y. M., Li, Y. C., et al., 2015. 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. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(2): 157—167(in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. X., 2006. The Salt-Related Structures and Their Formation Mechanisms in the Qiulitag Structural Belt, Kuqa Depression (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Y., Wen, Z. X., Liang, Y. B., et al., 2014. Tectonic-Sedimentary Features and Petroleum Accumulation in the Passive Continental Margin Basins of South Atlantic Peripheries. *Earth Science Frontiers*, 21(3): 18—25(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭栋, 2016. 坎波斯盆地盐下含油气系统分析与资源评价(硕士学位论文). 北京:中国石油大学.
- 李法浩, 解国爱, 田荣松, 等, 2018. 华北板块东南缘徐淮推覆一褶皱带的物理模拟. *地质通报*, 37(6):1087—1100.

- 李朋,胡正祥,何仁亮,等,2018.鄂西中央背斜带中生代构造演化过程:来自磷灰石裂变径迹的证据.地球科学,43(7):2518—2526.
- 刘静静,邬长武,丁峰,2018.南大西洋两岸含盐盆地类型与油气分布规律.石油实验地质,40(3):372—380.
- 唐鹏程,2011.南天山库车坳陷西段新生代盐构造:构造分析和物理模拟(博士学位论文).杭州:浙江大学.
- 陶崇智,殷进垠,陆红梅,等,2015.南大西洋被动陆缘盆地盐岩对油气成藏的影响.石油实验地质,37(5):614—618.
- 汪新,王招明,谢会文,等,2010.塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟.中国科学:地球科学,40(12):1655—1668.
- 温志新,吴亚东,边海光,等,2018.南大西洋两岸被动陆缘盆地结构差异与大油气田分布.地学前缘,25(4):132—141.
- 吴珍云,2014.含盐沉积盆地盐构造分析和物理模拟(博士学位论文).南京:南京大学.
- 解国爱,贾东,张庆龙,等,2013.川东侏罗山式褶皱构造带的物理模拟研究.地质学报,87(6):773—788.
- 杨泰,汤良杰,余一欣,等,2015.滨里海盆地南缘盐构造相关油气成藏特征及其物理模拟.石油实验地质,37(2):246—251.
- 杨永才,孙玉梅,李友川,等,2015.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.海洋地质与第四纪地质,35(2):157—167.
- 余一欣,2006.库车坳陷秋里塔格构造带盐相关构造及其形成机理(博士学位论文).北京:中国石油大学.
- 张光亚,温志新,梁英波,等,2014.全球被动陆缘盆地构造沉积与油气成藏:以南大西洋周缘盆地为例.地学前缘,21(3):18—25.