

下刚果盆地盐构造变形特征及其形成机理

史帅雨^{1,2}, 余一欣^{1,2}, 殷进垠³, 邬长武³, 刘静静³, 刘延莉³, 王波⁴

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司 中海油实验中心, 天津 300452]

摘要:下刚果盆地阿普特阶厚层盐岩在被动大陆边缘背景下形成了多种类型的盐构造,并对油气聚集成藏产生了重要影响。论文基于地震剖面解释成果,利用平衡复原剖面和物理模拟实验技术,分析典型盐构造变形特征及其形成演化过程,探讨影响盐构造发育的主要因素。结果表明,下刚果盆地具有明显的构造变形分带特征,其中后缘伸展带主要发育盐滚、盐筏和铲式正断层,中部过渡带以不同形态的盐底辟为主,前缘挤压带主要发育盐蓬、逆冲断层和厚层盐岩。盐构造形成演化主要经历了阿尔比期—晚白垩世初始活动期、晚渐新世—上新世末强烈活动期、上新世末—现今微弱活动期3个阶段。重力滑动作用和上覆层差异负载作用是导致下刚果盆地盐构造发生塑性流动变形的主要因素,而基底倾斜程度也对盐构造变形产生了重要影响。

关键词:平衡剖面;物理模拟实验;重力滑动作用;差异负载作用;构造变形;盐构造;下刚果盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Deformation characteristics and formation mechanisms of salt structures in the Lower Congo Basin

Shi Shuaiyu^{1,2}, Yu Yixin^{1,2}, Yin Jinyin³, Wu Changwu³, Liu Jingjing³, Liu Yanli³, Wang Bo⁴

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;
4. Experimental Center of Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin 300452, China]

Abstract: The salt structures of various types formed in the massive Aptian saline rocks of the Lower Congo Basin against a passive continental margin setting are among one of the main factors that affect the accumulation of oil and gas in the basin. Based on seismic section interpretations of the Lower Congo Basin, this study analyzes the deformation characteristics and evolution processes of the typical salt structures, and discusses the factors affecting their development through cross-section balancing and restoration and physical modeling. The results show that the Lower Congo Basin is characterized by zonation under obvious structural deformation, with salt rollers, salt rafts, listric normal faults, and shovel-shaped faults developed in the back extensional zone, different forms of salt diapirs in the central transition zone, and salt canopies, thrust faults and thick-bedded salt rocks in the front compression zone of the basin. The salt structures have undergone three evolutionary stages, namely the initial active stage during the Albian-Late Cretaceous, the strong active stage during the Late Oligocene-Late Pliocene, and the weak active stage during the Late Pleistocene to the present. Gravity sliding and differential loading of overlying strata were the main controlling factors that led to plastic flow of the salt structures. The basement tilting was also involved in the deformation of the salt structures.

Key words: salt structure, balanced section, physical modeling, gravity sliding, differential loading, Lower Congo Basin

含盐盆地是全球油气资源最丰富的一类盆地^[1],含盐盆地中已探明的油、气储量分别占全球已探明油、气储量的89%和80%^[2-3]。近些年来,位于西非被动

大陆边缘的下刚果盆地发现一系列与盐构造相关的大型油气田,使其成为了全球油气勘探的热点地区^[3]。前人已针对下刚果盆地的构造演化和油气聚集成藏特

收稿日期:2020-02-17;修订日期:2020-05-07。

第一作者简介:史帅雨(1994—),男,硕士研究生,地质学。E-mail:shishuaiyu94@163.com。

通讯作者简介:余一欣(1977—),男,副教授,盆地分析和构造地质。E-mail:yuxin0707@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05033-001,2016ZX05026-007-006);国家重点研发计划项目(2017YFC0603105)。

征等进行了研究^[4-14],对盐构造的变形和演化特征也有所讨论^[15-28],同时还完成了一些物理模拟实验研究^[16,30-33]。但目前还缺少对盐构造变形期次及主控因素的详细分析,而且前人的物理模拟实验较少涉及对比模型,从而限制了对盐构造变形影响因素的深入分析。本文主要在前人工作基础上,利用地震剖面解释成果分析下刚果盆地不同区带盐构造变形特征,并通过平衡剖面复原和构造物理模拟实验厘定盐构造变形期次,对比分析重力滑动和沉积差异负载作用对盐构造变形与演化的影响,明确不同基底倾斜程度对盐构造发育的影响,为下刚果盆地盐构造分析以及有利油气勘探区带评价提供借鉴和参考。

1 地质概况

下刚果盆地位于西非被动大陆边缘,北部以 Mayumba 隆起与加蓬盆地相接,南部以 Ambriz 隆起与宽扎盆地相邻,东至出露地表的前寒武系基底,西至非洲大陆坡,面积约为 68 000 km²,其中海上面积约占 90%(图 1)^[4-6]。下刚果盆地的形成演化与西非海岸

其他盆地相似,经历了冈瓦纳大陆分离、裂谷发育和板块漂移等过程,属于典型的被动大陆边缘叠合盆地,可划分为前裂谷期、同裂谷期、过渡期和被动大陆边缘期等 4 个阶段^[7-11]。

下刚果盆地沉积地层主要包括侏罗系—新生界(图 1),纵向上可划分为盐下层序,盐岩层序和盐上层序^[6]。盐下层序不整合覆盖在前寒武系基底之上,以晚侏罗世、早白垩世尼欧克姆和巴雷姆期的河流—湖泊—三角洲沉积体系为主。盐岩层序在早白垩世晚阿普特期沉积,厚几十米到上千米,整体上厚度由南向北变薄。盐上层序是一套裂谷后的被动边缘沉积,主要发育三角洲与深海沉积体系^[12-14]。

2 盐构造样式

根据下刚果盆地盐层及其上覆地层构造变形特征的差异性,从大陆架到深海平原方向可以整体划分为后缘伸展带、中间过渡带和前缘挤压带(图 2)。各构造带盐相关构造样式差异明显,从陆地向海洋方向盐构造发育成熟度依次增大。

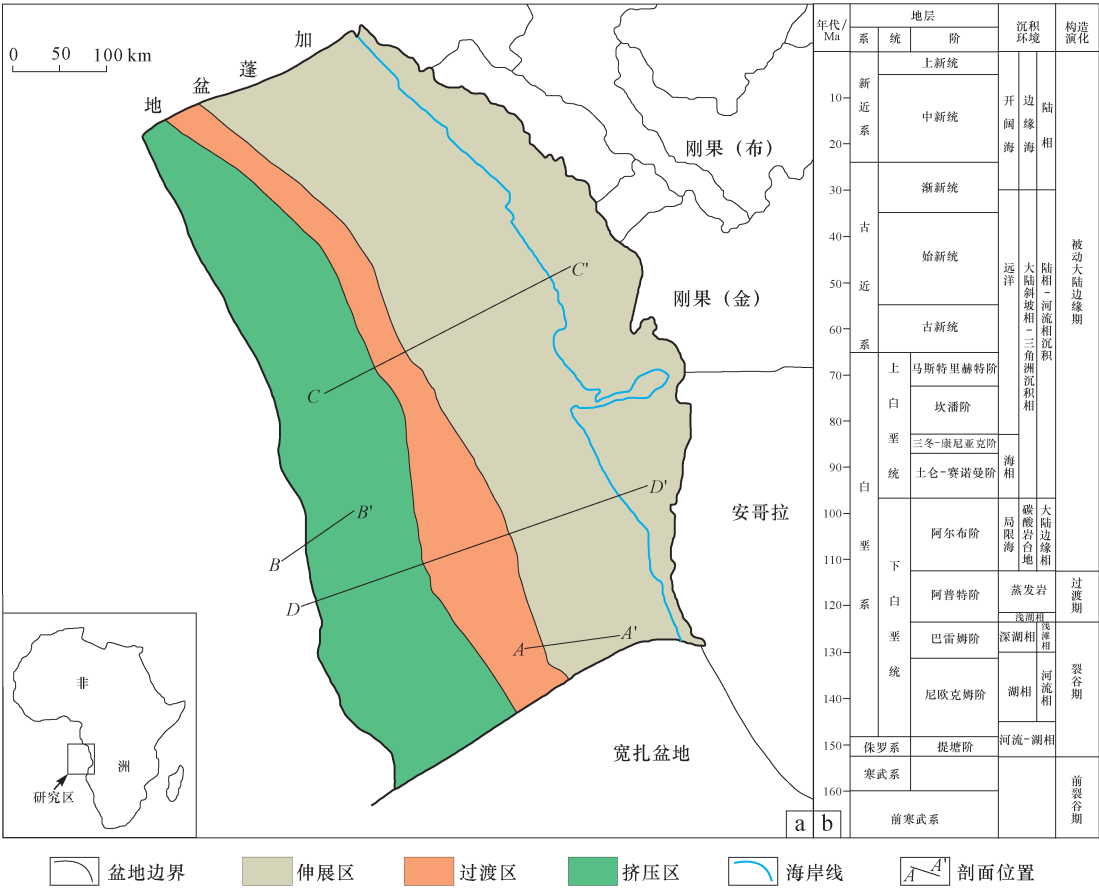


图 1 下刚果盆地地质背景(a)及地层综合柱状图(b)
Fig. 1 Regional geological map and stratigraphic column of the Lower Congo Basin

后缘伸展带位于大陆架及部分上斜坡,主要发育盐滚、筏状构造和铲式正断层等。盐滚和盐筏构造是下刚果盆地典型的构造样式(图 3a)。盐滚构造幅度较低,两翼不对称,缓倾一翼与上覆地层整合接触,陡倾一翼与上覆地层以正断层接触,是伸展应力作用下盐岩向下倾方向滑动的结果^[20-21]。盐岩滑脱早期,盐上地层发育一系列向盆地内倾斜的铲式断层;晚期上盘滑脱速率大于下盘,上盘与下盘完全分离,不再通过断面接触,形成了盐筏构造。根据盐筏构造发育的年代,下刚果盆地的盐筏构造又可细分为白垩系盐筏构造

造和新近系盐筏构造。

中间过渡带位于斜坡区之上,主要发育各类不同形态的盐底辟以及龟背构造和微盆等(图 3a)。该区带受拉张应力和挤压应力的共同作用,盐岩主要以垂向运动为主,呈直立状,断裂相对不发育。向陆一侧盐底辟构造幅度比盐滚构造幅度大,两翼较为对称,与上覆地层呈整合接触;向海一侧发育的盐底辟构造幅度更大,呈直立状刺穿上覆地层。盐底辟的活动对上覆地层有很大的影响,导致上覆地层通常发育龟背构造、披覆背斜和微盆地等构造样式^[22-23]。

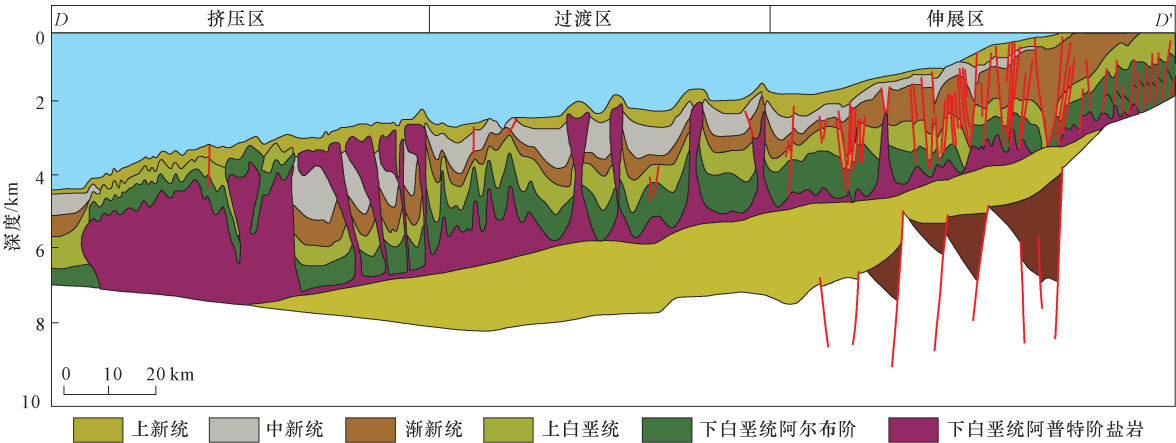


图 2 下刚果盆地区域地质剖面(剖面位置见图 1)^[25]

Fig. 2 Regional geological section of the Lower Congo Basin (see Fig. 1 for the location)^[25]

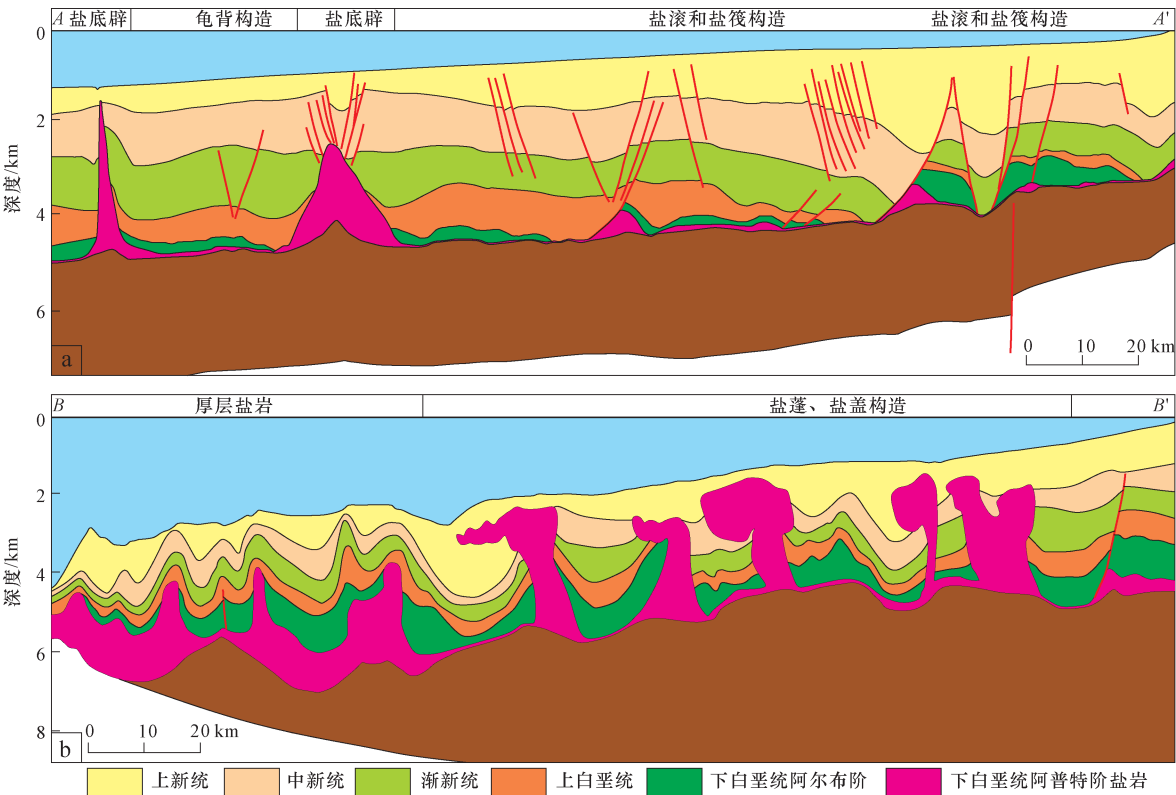


图 3 下刚果盆地盐构造地质剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Geological section of salt structures in the Lower Congo Basin (see Fig. 1 for the location)

前缘挤压带位于坡脚及局部深海平原区,以盐蓬、逆冲断层和厚层盐岩等挤压构造为主要特征(图3b)。盐蓬和盐盖构造位于挤压区向陆一侧,在挤压应力的作用下下层盐岩侵入上覆地层,并向下倾方向挤入、展布,通过补给通道与盐岩层相连,在强烈挤压作用下会伴生一些逆冲推覆构造^[27-28]。

厚层盐岩(图3b)位于挤压区向海一侧,是上坡原始沉积的盐岩在重力和沉积载荷作用下向下坡滑动并充注、聚集的结果,厚度可能达到2~3 km。盆地向海前缘的区域盐岩厚度都较大,且分布均匀,形成现今仍在活动的陡坡构造。上覆地层沉积厚度较薄,以逆冲断层和挤压褶皱等构造为主。

3 盐构造演化及形成机理

下刚果盆地盐岩的塑性流动和变形影响了上覆地层的沉积和变形,反过来,上覆地层的沉积厚度变化和变形特征也可以反映盐构造的变形过程。本文主要利用分层复原法^[29,34]编制下刚果盆地盐构造平衡演化剖面,进而分析盐构造形成演化期次。结果表明,下刚果盆地盐构造形成演化主要经历了阿尔比期—晚白垩纪初始活动、晚渐新世—上新世末强烈活动和上新世末—现今微弱活动3个阶段(图4)。

阿尔布早期地层沉积之后,在重力和上覆层差异载荷的作用下,盐岩开始发生早期的滑脱变形。阿尔布期末碳酸盐岩沉积后,热沉降作用导致陆缘向海掀斜,后缘伸展区在拉张作用下形成了一系列规模较小的断层,伴生一些沿滑脱面分布的孤立断块及同沉积地层;中部过渡区和前缘挤压区发生局部增厚和减薄,形成一系列小规模盐枕,导致上覆地层变形形成小型凹陷和突起。在晚渐新世—上新世末,由于非洲板块构造掀斜导致大量陆缘沉积物供给,盐构造变形剧烈,伸展区盐岩向海方向发生大规模滑脱,形成盐滚和盐焊接;过渡区早期形成的盐枕构造进一步演化成为小型底辟构造,盐底辟顶部地堑开始发育;挤压区盐岩发生强烈刺穿,发育刺穿型底辟。由于伸展区盐岩大规模滑脱,导致大陆斜坡位置形成滑脱较为严重的铲式断层及反向调节断层。上新世末—现今,盐岩变形相对较弱,没有新的盐构造发育,早期形成的盐底辟缓慢、持续发育,挤压区的盐底辟在重力扩展作用下有向海方向挤入的趋势。

从下刚果盆地的构造演化特征及其平衡复原剖面来看,控制盐构造发育的动力学机制主要是重力滑动作用和上覆地层的差异负载作用。而在不同构造带

内,重力滑动作用和重力扩展作用所起的程度是不一样的。在下刚果盆地伸展区和过渡区,由于大陆斜坡坡度较大,重力滑动作用占主导地位,而在挤压区重力扩展作用完全被挤压作用吸收,所以只有重力滑动作用起作用。同时由于上覆沉积物厚度向海方向减薄,在差异负载作用下,盐岩在重力滑脱变形过程中一方面向海流动,聚集在挤压变形区,同时在不同构造区内形成多种类型的盐构造。

4 物理模拟实验

本文在分析下刚果盆地主要盐构造变形特征和形成演化的基础上,设计了比例化物理模拟实验,通过再现下刚果盆地盐岩塑性流动及其变形过程,探讨重力滑动作用、上覆层差异负载作用和不同基底倾斜角度对盐构造发育的影响。

4.1 实验材料和模型设计

同前人对盐构造开展的盐构造物理模拟实验类似,本次模拟实验用硅胶来模拟具有牛顿流体特征的塑性盐层,硅胶的密度约为 987 kg/m^3 ,粘度系数约为 $5 \times 10^4\text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[30,31]。用干燥松散的石英砂来模拟沉积岩,石英砂的密度约为 $1\,500\text{ kg/m}^3$,粘结力约 200 Pa 。在自然重力场条件下,石英砂的形变遵循莫尔—库仑破坏准则,破裂内摩擦角为 $25^\circ \sim 30^\circ$,非常接近地壳浅部($< 10 \sim 15\text{ km}$)沉积岩层的脆性形变行为^[32,33]。

本次物理模拟实验的模型尺寸和实验材料都满足相似性原则,表1列出了下刚果盆地模拟实验模型的参数。实验中的长度比例为 1×10^{-5} ,即模型中的1 cm代表自然界中的1 km,实验材料的密度约为地质原型岩石密度的一半,硅胶与盐岩的粘度比约为 5×10^{-13} ,由此可以得出时间比为 1×10^{-8} ,即实验中模拟1 h相当于自然界中 $11.4 \times 10^3\text{ a}$ 。

以下刚果盆地实际地震剖面(图3a)为模拟对象,同时考虑到下刚果盆地所处大陆边缘的初始倾斜程度^[17],设计了基底斜坡倾角为 3° 的模型1(图5a)。模型尺寸为 $80\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,模型两侧为固定端,在靠近模型右侧固定端处使用光滑的PVC板设置一个长度为80 cm的基底斜坡,其坡度为 3° 。硅胶的流动变形完全依靠上覆沉积物差异负载作用以及重力滑动作用来实现。在斜坡上方铺厚约2 cm的硅胶,静置约10 h,以等待硅胶自然流动使其表面水平,并排出气泡。然后开始实验,以类似大陆边缘砂体进积的形式向模型左侧铺砂。实验结束后加砂、浇水,将模型固定,最后

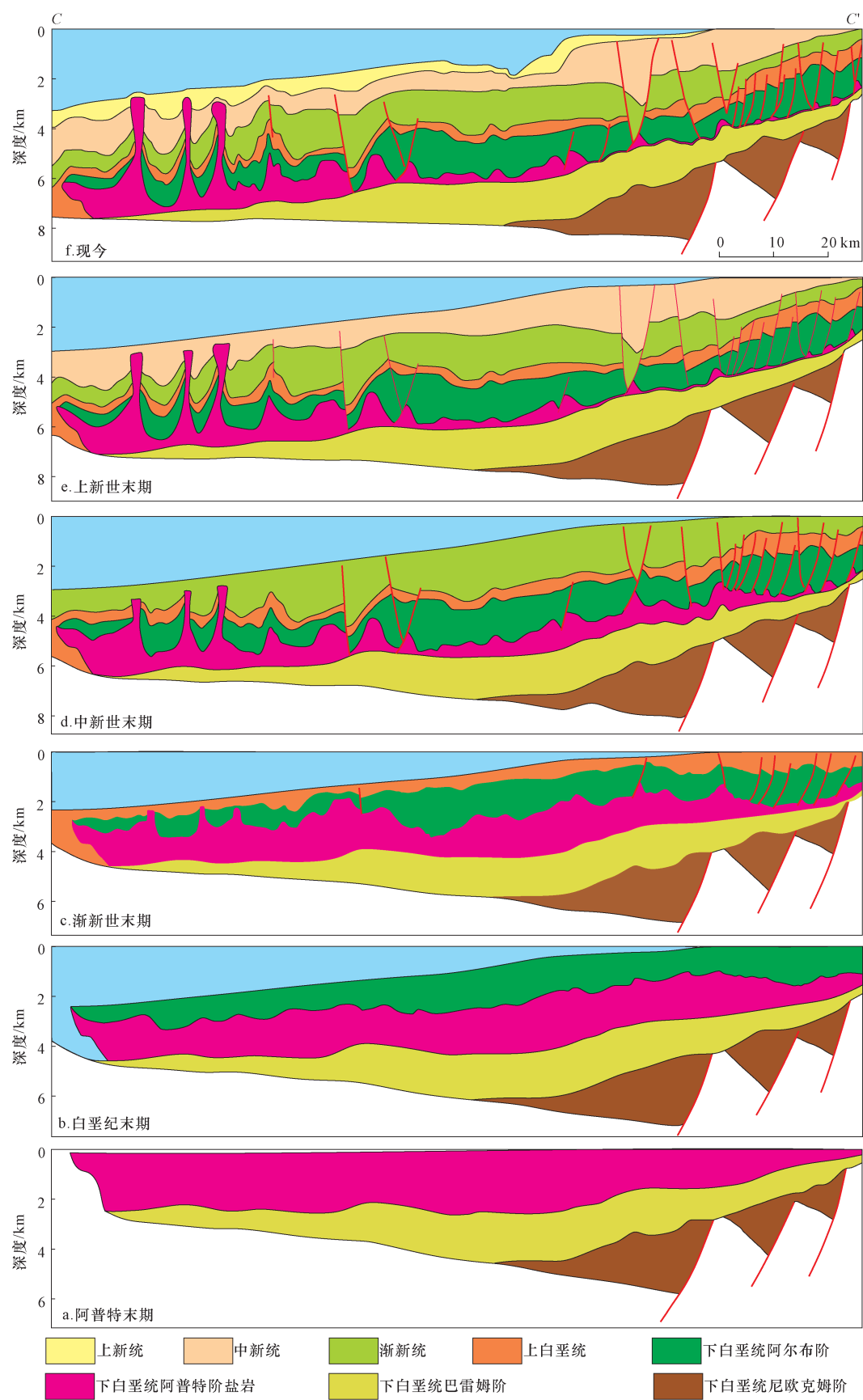


图4 下刚果盆地平衡复原剖面(剖面位置见图1)

Fig.4 Cross-section restoration of the Lower Congo Basin (see Fig.1 for the location)

表 1 下刚果盆地物理模拟实验参数

Table 1 Scaling parameters of physical modeling of the Lower Congo Basin

物理参数	原型值	模型值	相似系数
重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	9.8	9.8	1
长度 l/m	1 000	0.01	1×10^{-5}
石英砂密度 $\rho_b/(kg \cdot m^{-3})$	2 700	1 500	0.55
硅胶密度 $\rho_d/(kg \cdot m^{-3})$	2 200	987	0.45
粘度 $\eta/(Pa \cdot s)$	1×10^{17}	5×10^4	5×10^{-13}
应力 σ/Pa	$\rho_N g_N l_N$	$\rho_M g_M l_M$	5×10^{-6}
时间 t/s	$t_N = t_M (\rho_M g_M l_M / \rho_N g_N l_N) (\eta_N / \eta_M)$	t_M	1×10^{-8}

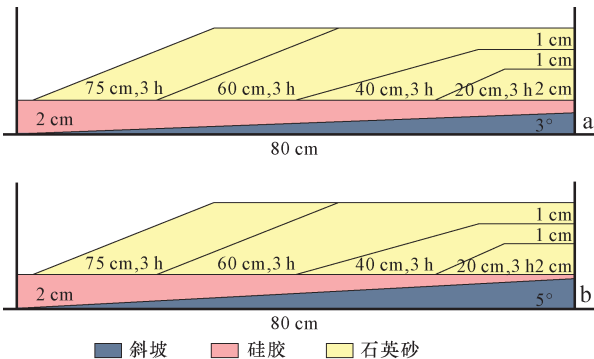


图 5 实验模型 1(a)和实验模型 2(b)

Fig. 5 Physical Model 1 (a) and Model 2 (b)

沿长轴方向切开模型,以观察模型内部的硅胶和石英砂层的变形特征。

为了对比分析基底倾斜程度对盐构造发育的影响,设计了对比模型 2(图 5b)。与模型 1 相比,仅是将基底斜坡坡角改为 5°,其他实验条件均不改变。

4.2 实验过程及结果

在模型 1 中,当实验进行约 3 h 后(图 6b),在上覆砂层差异负载作用和重力滑动作用下,硅胶拖拽上覆层沿斜坡向下流动,砂层开始下陷和伸展,上覆砂层中也仅仅发育了两条向下倾方向伸展的断层。随着上覆砂层向下坡方向逐渐进积,硅胶的流动更为明显,同时断层持续发育,规模变大,数量也开始增多。7 h 后(图 6c),盐岩滑脱较为严重,斜坡上倾方向上的硅胶发生了明显的局部增厚和减薄现象,早期发育的断层被砂岩覆盖后,逐渐停止活动。至实验结束时,已发育较明显的盐滚和盐筏构造(图 6d)。

在模型 2 中,随着上覆地层的沉积,当实验进行 3 h 后(图 7b),硅胶整体流动不明显,出现局部增厚和减薄现象,上覆砂层中发育了两条向下倾方向伸展的正断层。7 h 后(图 7c),硅胶的流动更为明显,同时上覆砂层发育了几条规模较大的断层。至实验结束时

(图 7d),已发育较为明显的盐滚和盐底辟构造。与模型 1 相比,硅胶整体流动特征比较相似,但上覆砂层中的断层数量明显减少。

4.3 实验结果讨论

对比模型 1 和模型 2 的内部变形特征,可以发现,在模型 1 中,盐岩在重力滑动作用和上覆地层差异负载作用下,形成了一系列盐滚和盐筏构造,向斜坡下倾方向,筏状构造的发育成为逐渐变新。上覆地层形成一系列向下倾方向伸展的断层,后期伴生一些反向调节断层(图 8)。而在模型 2 中,整体变形特征与模型 1 比较相似,上坡方向在正断层下盘发育的盐滚数量较少,上覆砂层中形成了比较明显的筏状构造,而且在斜坡下倾方向发育规模较大、隆起幅度较高的盐底辟构造。两个底辟中间形成明显的龟背构造(图 9)。两个

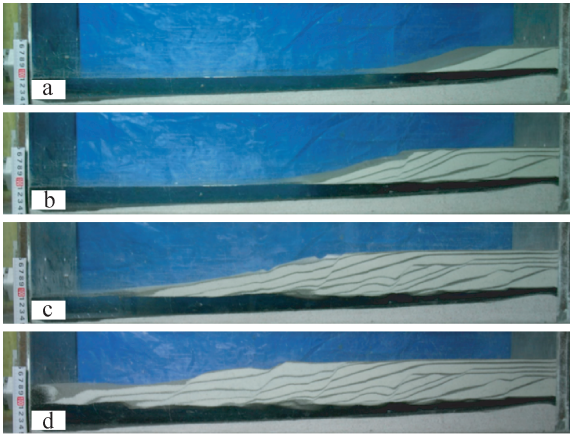


图 6 模型 1 模拟过程及结果

Fig. 6 Simulation process and results of Model 1

a. 初始沉积;b. 硅胶开始流动,上覆地层形成两条断层;c. 断层持续发育,规模变大;d. 硅胶发生明显增厚和减薄,形成盐滚、盐筏构造

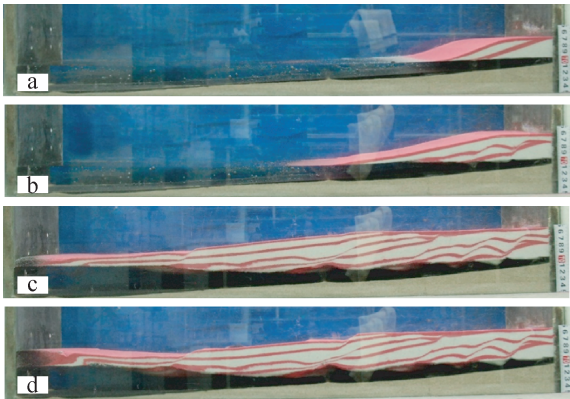


图 7 模型 2 模拟过程及结果

Fig. 7 Simulation process and results of Model 2

a. 初始沉积;b. 硅胶开始流动,上覆砂层形成两条断层;c. 硅胶在斜坡中下部发生明显增厚;d. 形成盐滚、盐筏和盐底辟构造

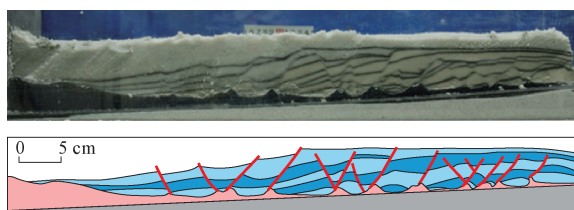


图8 模型1内部变形特征

Fig. 8 Internal deformation characteristics of Model 1

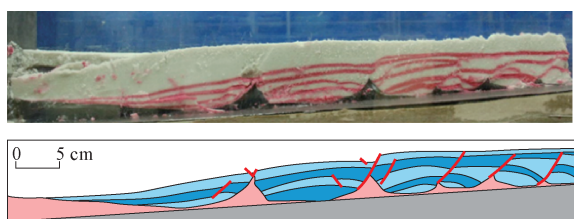


图9 模型2内部变形特征

Fig. 9 Internal deformation characteristics of Model 2

模型有比较明显差异的是,模型1形成的盐滚和盐底辟的数量要比模型2多,但其规模明显要小一些。

该组模拟实验结果表明,较大的基底坡度有利于重力滑动作用使盐体向海洋方向发生快速流动,从而导致盐底辟快速发育,其规模较大,但数量较少,盐构造之间的单个盐焊接面积也更大,构造分带特征更为明显。而较小的基底坡度有利于盐体缓慢流动,盐滚构造充分发育,其规模较小,但数量较多,上覆层中同时发育大量断层。

与下刚果盆地实际地质剖面(图3a)对比,发现基底斜坡倾角更大的模型2与其有更好的相似性。这可能也表明西非被动大陆边缘盐岩初始沉积在较缓的基底斜坡背景下,而后受渐新世非洲板块隆升作用影响,下刚果盆地盐下基底斜坡逐渐变陡,盐岩则发生强烈的塑性流动变形,从而形成了一系列不同类型的盐构造样式,如图9反映的在较陡基底斜坡条件下的盐构造变形特征。后缘伸展区盐岩较薄,形成小规模盐滚和盐筏构造,上覆层中铲式正断层较为发育。中部过渡区发育规模较大的三角形盐底辟,盐底辟之间盐岩几乎流失殆尽,形成盐焊接,上覆地层形成龟背构造。前缘挤压带的盐岩发生了大规模聚集,形成厚度较大的盐岩聚集区。

5 结论

1) 下刚果盆地从大陆架到深海平原下刚果盆地可划分为后缘伸展带、中间过渡带和前缘挤压带。伸展带以盐滚、盐筏、铲式断层为主要特征,过渡带以不

同形态的盐底辟、龟背构造为主要特征,挤压带以厚层盐岩、盐蓬和逆冲推覆构造为主要特征。

2) 下刚果盆地盐构造的形成演化主要经历了阿尔比期—晚白垩世初始活动、晚渐新世—上新世末强烈活动和上新世—现今微弱活动3个阶段。

3) 比例化物理模拟实验证实,重力滑动作用和上覆地层差异负载作用是导致下刚果盆地盐岩发生塑性流动的主要因素,而基底倾斜程度也对盐构造的变形有重要影响。当基底斜坡较大时,有利于盐体快速流动,引起盐构造快速发育,形成的规模大而数量少,上覆地层断层数量较少;当基底斜坡较小时,有利于盐体缓慢流动,形成盐构造数量多而规模小,上覆地层发育一系列断层。西非板块的隆升作用导致下刚果盆地基底斜坡较陡,进而影响了盐构造变形。

参考文献

- [1] 刘静静, 邬长武, 丁峰. 南大西洋两岸含盐盆地类型与油气分布规律[J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 372-380.
Liu Jingjing, Wu Changwu, Ding Feng. Basin types and hydrocarbon distribution in salt basins in the South Atlantic[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(3): 372-380.
- [2] 张勇刚, 吕福亮, 范国章, 等. 盐相关盆地油气地质特征及其勘探认识: 以红海盆地为例[J]. 盐湖研究, 2012, 20(1): 9-15.
Zhang Yonggang, Lv Fuliang, Fan Guozhang, et al. Petroleum geology of salt basin and its exploration-related knowledge: The Red Sea Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2012, 20(1): 9-15.
- [3] 贾承造, 赵文智, 魏国齐, 等. 盐构造与油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 17-19.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Wei Guoqi, et al. Salt structure and petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 17-19.
- [4] 张树林, 邓运华. 下刚果盆地油气勘探策略[J]. 海洋地质动态, 2009, 9(25): 24-29.
Zhang Shuhua, Deng Yunhua. Petroleum exploration strategies in the Lower Congo Basin[J]. Marine Geology Letters, 2009, 9(25): 24-29.
- [5] 邬长武, 熊利平, 陈焕杰, 等. 下刚果—刚果盆地油气藏分析及有利区评价[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(7): 17-21.
Wu Changwu, Xiong Liping, Chen Huanjie, et al. Hydrocarbon accumulation analysis and favorable area evaluation in Lower Congo-Congo Fan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 17-21.
- [6] 杨晓娟, 李军, 于炳松. 下刚果盆地构造特征及油气勘探潜力[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2583-2593.
Yang Xiaojuan, Li Jun, Yu Bingsong. Structural feature and exploratory potential of the Lower Congo Basin[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2583-2593.
- [7] 刘亚雷, 刘迎斌, 李雷, 等. 西非下刚果盆地、加蓬盆地裂陷期构造特征对比研究[J]. 世界地质, 2019, 38(2): 390-396.
Liu Yalei, Liu Yingbin, Li Lei, et al. Comparison of structural characters in rifting stage between Lower Congo Basin and Gabon Basin in West Africa[J]. Global Geology, 2019, 38(2): 390-396.

- [8] 冯国良,徐志诚,靳久强,等. 西非海岸盆地群形成演化及深水油气田发育特征[J]. 海相油气地质,2012,17(1):23-38.
Feng Guoliang, Xu Zhicheng, Jin Jiuqiang, et al. Formation and evolution of West African coastal basin groups and development characteristics of deepwater oil and gas fields[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(1): 23-28.
- [9] Jackson M P A, Hudec M R, Jennette DC, et al. Evolution of the Cretaceous Astrid thrust belt in the ultradeep water Lower Congo Basin, Gabon[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(4): 487-511.
- [10] Dickson W G, Fryklund R E, Odegard M E, et al. Constraints for plate reconstruction using gravity data implications for source and reservoir distribution in Brazilian and West African margin basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(3-4): 309-322.
- [11] Nuernberg D, Mueller R D. The tectonic evolution of the south Atlantic from Late Jurassic to present[J]. Tectonophysics, 1991, 191(1-2): 27-53.
- [12] 熊利平,王骏,殷进垠,等. 西非构造演化及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):641-646.
Xiong Liping, Wang Jun, Yin Jinyin, et al. Tectonic evolution and its control on hydrocarbon accumulation in West Africa[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 641-646.
- [13] 刘亚雷. 下刚果盆地盐下构造特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 现代地质,2016,30(6):1311-1317.
Liu Yalei. Pre-salt structure characteristics and its control on hydrocarbon accumulation in the Lower Congo Basin[J]. Geoscience, 2016, 30(6): 1311-1317.
- [14] Costa J L D, Schirmer T W, Laws B R. Lower Congo Basin, deep-water exploration province, offshore west Africa[M]//Downey M W, Threet J C, Morgan W A. Petroleum provinces of the Twenty-first Century[C]. Oklahoma: AAPG, 2001, 74: 517-530.
- [15] 于水,胡望水,李涛,等. 下刚果盆地重力滑脱伸展构造生长发育特征[J]. 石油天然气学报,2012,34(3):28-33.
Yu Shui, Hu Wangshui, Li Tao, et al. Features of gravitational decollement and extension structural development in Lower Congo Basin[J]. Journal of Oil Gas Technology, 2012, 34(3): 28-33.
- [16] Fort X, Burn J P, et al. Salt tectonics on the Angolan margin, synsedimentary deformation processes[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(11): 1523-1544.
- [17] 张彪,于水,李红,等. 下刚果盆地碳酸盐岩盐筏体沉积规律[J]. 石油学报,2016,37(3):360-370.
Zhang Biao, Yu Shui, Li Hong, et al. Sedimentary laws of carbonate salt raft in Lower Congo Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 360-370.
- [18] Hudec M R, Jackson M P A. Regional restoration across the Kwanza Basin, Angola: Salt tectonics triggered by repeated uplift of a metastable passive margin[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 971-990.
- [19] Fetter M. The role of basement tectonic reactivation on the structural evolution of Campos Basin, offshore Brazil: Evidence from 3D seismic analysis and section restoration[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 873-886.
- [20] 赵鹏,王英民,周瑾,等. 下刚果盆地南部盐上地层重力滑脱变形演化特征[J]. 东北石油大学学报,2014,38(3):57-65.
Zhao Peng, Wang Yingmin, Zhou Jin, et al. Gravity slippage deformation evolution characteristics of the upper salt formation in the southern Lower Congo Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(3): 57-65.
- [21] Mauduit T, Guerin G, Brun J P, et al. Raft tectonics: the effects of basal slope value and sedimentation rate on progressive extension[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(9): 1219-1230.
- [22] 刘祚冬,李江海. 西非被动大陆边缘盆地盐构造对油气的控制作用[J]. 石油勘探与开发,2011,38(2):196-202.
Liu Zuodong, Li Jianghai. Control of salt structures on hydrocarbons in the passive continental margin of West Africa[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 196-202.
- [23] Demercian S, Szatmari P, Cobbold P R. Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned gravitational gliding, Campos and Santos basins, offshore Brazil[J]. Tectonophysics, 1993, 228(3-4): 393-433.
- [24] Duval B, Cramez C, Jackson M P A. Raft tectonics in the Kwanza Basin, Angola[J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9(4): 389-404.
- [25] Huang Y. Sedimentary characteristics of turbidite fan and its implication for hydrocarbon exploration in Lower Congo Basin[J]. Petroleum Research, 2018, 3(2): 189-196.
- [26] Paul J Valle, Gjølberg J G, Helland-Hansen W. Tectonostratigraphic development in the eastern Lower Congo Basin, offshore Angola, West Africa[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(8): 909-927.
- [27] Hudec M R, Jackson M P A. Terra infirma: Understanding salt tectonics[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 82(1): 1-28.
- [28] Jackson M P A, Hudec M R, Jennette D C, et al. Evolution of the Cretaceous Astrid thrust belt in the ultradeep-water Lower Congo Basin, Gabon[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(4): 487-511.
- [29] 余一欣,周心怀,彭文绪,等. 盐构造进展述评[J]. 大地构造与成矿学,2011,35(2):169-182.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Peng Wenxu, et al. Review of progress in salt structure[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 169-182.
- [30] Vendeville B C, Jackson M P A. The fall of diapirs during thin-skinned extension[J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9(4): 354-371.
- [31] Weijermars R, Jackson M P A, Vendeville B C. Rheological and tectonic modeling of salt provinces[J]. Tectonophysics, 1993, 217(1-2): 143-174.
- [32] Krantz R W. Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures[J]. Tectonophysics, 1991, 188(1): 203-207.
- [33] Schellart W P. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling[J]. Tectonophysics, 2000, 324(1): 1-16.
- [34] Rowan M G. A systematic technique for the sequential restoration of salt structures[J]. Tectonophysics, 1993, 228(3-4): 331-348.

(编辑 董立)