

南美奥连特盆地东部斜坡带构造变形物理模拟

余一欣^{1,2}, 尹伟³, 谢寅符⁴, 吴航^{1,2}, 马中振⁴, 黄继新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. 中国石化勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 南美奥连特盆地东部斜坡带发育大量与正断层反转活动有关的断背斜构造, 也是非常有利的油气聚集区。文章主要应用比例化物理模拟实验方法, 以奥连特盆地东部斜坡带为模拟对象, 来分析早期正断层的陡缓程度、倾向组合以及断层间距等因素对正断层复活反转过程中断背斜构造形成的影响。模拟结果表明, 当早期正断层均向挤压端倾斜时, 如果陡倾角正断层更靠近挤压端, 则陡、缓正断层都易发生反转, 并形成断背斜构造。但当缓倾角正断层更靠近挤压端时, 则该断层会吸收绝大部分的挤压量, 而相对远离挤压端的陡倾角正断层不易发生反转。当早期正断层倾向相对时, 距离挤压端更近的陡倾角正断层会吸收一定的挤压量, 从而发生反转并形成背斜构造。而相对远离挤压端的缓倾角正断层是否发生复活反转则主要受断层间距的影响, 距离越小越有利于断层反转。上述认识对在奥连特盆地东部斜坡带寻找与早期正断层反转有关的断背斜圈闭具有一定指导意义。

关键词: 物理模拟; 正断层; 反转; 断背斜; 斜坡带; 奥连特盆地

中图分类号: P618; P542

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2017) 04-0670-07

Physical Modeling on Structural Deformation in the Eastern Slope of the Oriente Basin, Southern America

YU Yixin^{1,2}, YIN Wei³, XIE Yinfu⁴, WU Hang^{1,2}, MA Zhongzhen⁴, HUANG Jixin⁴

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract: Faulted anticlines caused by inversion of early normal faults are commonly developed in the eastern slope zone of the Oriente Basin, southern America. These faulted anticlines are favorable traps for hydrocarbon accumulation. Using scaled physical modeling, this study addresses the influence of dip angles, combinations and distances between early normal faults on the formation of faulted anticlines in the eastern slope zone of the Oriente Basin. Results show that when early normal faults dip toward the compression end and the steep dip angle fault is relatively closer to the compression end, normal faults with steep and gentle dip angles are easy to react and invert, and then faulted anticlines would form in hanging walls. In contrast, if the normal fault with gentle dip angle is closer to the compression end, it would absorb the majority of compression strains, and the steep dip-angle fault which is far away to the compression end is difficult to invert. If early normal faults dip toward each other, the steep dip-angle fault which is closer to the

收稿日期: 2017-04-05; 修回日期: 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(41472117); 国家科技重大专项(2016ZX05033-001; 2016ZX05033-002; 2016ZX05026-007); 中国石油大学(北京) 科研基金(2462015YQ0105) 联合资助

作者简介: 余一欣, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 从事含油气盆地构造分析工作; E-mail: yuxin0707@163.com

compression end would invert and form faulted anticline in hanging wall. Whether the gentle dip fault inverts is affected by the distance between normal faults. The shorter the distance, the fault with gentle dip angle is more likely to invert. These results provide useful data to locate favorable traps resulted from inversion of early normal faults in the study area.

Key words: physical modeling; normal fault; inversion; faulted anticline; slope zone; Oriente Basin

Corresponding author: YU Yixin, Associate Professor; E-mail: yuxin0707@163.com

奥连特盆地位于南美安第斯山前厄瓜多尔东部亚马逊平原区, 面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是一个典型的中、新生代弧后前陆盆地 (谢寅符等, 2012)。奥连特盆地是南美洲主要的含油气盆地之一, 东部斜坡带发育大量与断层相伴生的背斜构造, 具有隆起幅度低、圈闭规模小、数量多的特点, 也是有利的油气聚集区, 已经发现了多个大中型油气田 (Shanmugam et al., 2000; 马中振等, 2014)。前人已经对奥连特盆地东部斜坡带与断层相关的褶皱发育特征及其主控因素进行过一定研究 (Hugo et al., 2003; 谢寅符等, 2010; 丁增勇等, 2010; Baby et al., 2013), 笔者也曾针对该地区低幅度背斜构造的形成过程进行过简单的物理模拟, 认为后期挤压、正断层反转和走滑作用是影响此类构造发育的主要因素 (吴航等, 2015)。本文主要是在前期相关工作基础之上, 应用比例化构造物理模拟实验方法, 对奥连特盆地东部斜坡带断层和褶皱发育的相互关系进行更为深入的物理模拟实验分析, 明确早期正断层的陡缓程度、倾向组合以及断层间距等因素对正断层反转过程中断背斜形成的影响。模拟结果不仅对在奥连特盆地东部斜坡带寻找与早期正断层反转有关的断背斜圈闭具有一定指导作用, 对于南美安第斯山前前陆盆地相似地质区的构造分析也有借鉴和参考意义。

1 地质概况

奥连特盆地位于南美活跃的安第斯造山带和稳定的圭亚那地盾之间, 北部与哥伦比亚的 Vaupes-Macarena 隆起相邻, 南部和马拉农盆地以 Shionayacu 剪切带为界 (图 1)。奥连特盆地的形成演化主要受纳兹卡板块向南美洲板块的俯冲作用影响, 主要经历了晚古生代克拉通边缘盆地、晚三叠世—早白垩世裂谷盆地和晚白垩世—现今前陆盆地等演化阶段 (谢寅符等, 2012)。奥连特盆地轴向呈近南北向, 白垩纪裂后拗陷层系和古近纪—新近纪前陆盆地系厚度超过达 5000 m, 其

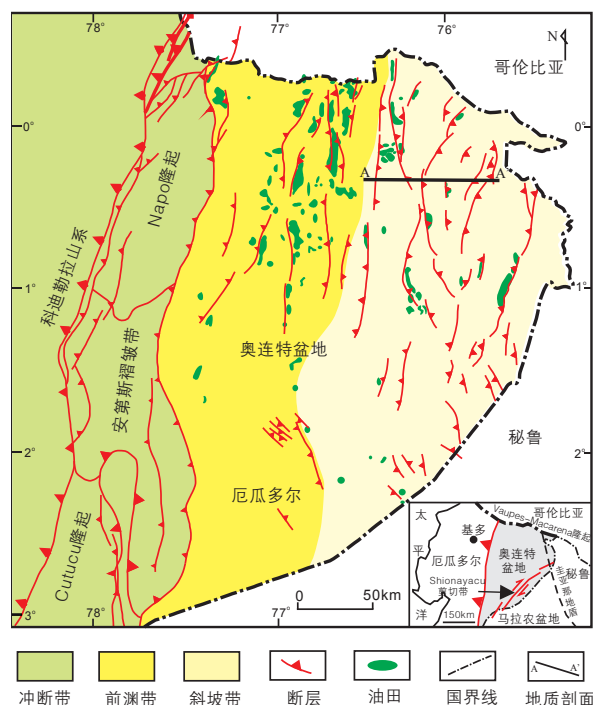


图1 南美奥连特盆地构造特征和主要油气田分布图

Fig. 1 Main structural elements and distribution of oil and gas fields in the Oriente Basin

中白垩系 Napo 组砂岩和 Hollin 组砂岩是主力储层 (White et al., 1995; 陈诗望等, 2012; 阳孝法等, 2016)。奥连特盆地沉积地层整体呈西陡东缓的不对称向斜形态, 西部地层倾角达 $5^\circ \sim 10^\circ$, 而东部地层倾角不到 2° (图 2)。

受板块俯冲和圭亚那地盾阻挡作用的影响, 奥连特盆地的整体构造变形特征在东西方向上表现出明显的分带性, 自西向东可分为冲断带、前渊带和斜坡带 (图 1)。前白垩纪, 受 NW—SE 向伸展作用影响, 奥连特盆地东部斜坡带主要发育 NNE 和 NNW 向正断层, 上盘多发育小型的箕状半地堑。后期板块碰撞引起的挤压作用不仅在盆内形成大量逆断层, 而且还使早期正断层发育复活和反转 (Hugo et al., 2003)。另外, 由于后期挤压应力的方向与早期正断层走向呈斜交关系, 部分

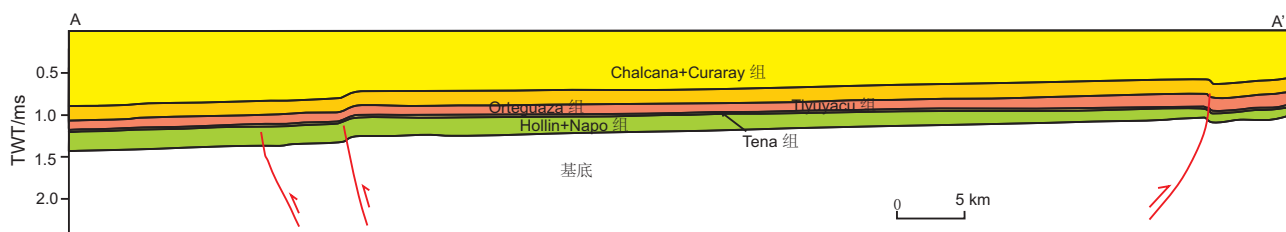


图2 南美奥连特盆地东部地质剖面 (据 Hugo et al., 2003 修改, 剖面位置见图1)

Fig. 2 Geological section across the eastern Oriente Basin

正断层在复活过程中还发生了左行或右行走滑活动。在这些不同性质的断层上盘, 白垩系发生轻微隆起, 形成了幅度较低的断背斜圈闭, 并成为油气聚集的有利场所。

2 实验装置与方法

构造物理模拟实验是对实际地质状况的一种简化, 它能再现在自然界中无法观察到的构造变形过程, 有利于更好地分析各类构造样式的形成过程及其影响因素 (Koyi, 1997)。比例化构造物理模拟实验主要强调地质原型和实验模型在大小、材料性质及边界条件等方面的相似性, 选择恰当的模拟材料和相应的模拟方法对建立成功、具有实用价值的实验模型起着至关重要的作用 (戈红星等, 2004)。

根据比例化模拟实验的相似性原则, 并参照奥连特盆地自晚白垩世以来的剖面缩短率和挤压速率 (吴航等, 2015), 本次模拟实验按照横向 1:500 000 的比例, 设置剖面模型尺寸为 68 cm×20 cm, 总挤压量为 10 cm, 挤压速率为 1 mm/min, 模型左侧为挤压活动端, 右侧为固定端。根据奥连特盆地东部斜坡带地层厚度及岩性特征, 使用不同粒度的石英砂和玻璃微珠模拟相应的地层, 其厚度与实际地层厚度比例为 1:100 000 (表1)。为了更有利于观察构造变形特征, 对石英砂和玻璃微珠进行了染色, 并使用厚约 0.3 mm 的光滑薄片模拟先存正断层。另外, 为了反映先存正断层在深部的滑脱以及便于挤压应力的传递, 在模型底部铺设了约 0.5 cm 厚的硅胶层。在各组实验的模拟过程中, 均先对初始模型挤压 4 cm, 然后加砂, 接着再挤压 4 cm, 之后再次加砂, 最后再挤压 2 cm。

3 模拟过程与结果

在 first 组模拟实验 1 和 2 中, 两条先存正断层

均向挤压端倾斜, 但两条断层的倾角并不一致。实验 1 中靠近挤压端的断层倾角为 60°, 靠近固定端的断层倾角为 35°, 两条断层的间隔约为 12 cm。实验 2 (对比模型) 则互换两条断层的位置, 但其间隔基本保持不变。两次实验均在两条正断层上盘预设了小型的箕状半地堑 (图 3a, 4a)。

在实验 1 过程中, 初始时的变形基本全都集中于左侧的挤压端, 砂层中发育箱状背斜。随着挤压作用的持续进行, 构造变形开始向固定端传递, 两条先存的陡、缓正断层几乎同时开始发生反转, 上盘砂层轻微隆起, 形成幅度很低的断背斜构造 (图 3b)。当实验结束时, 靠近挤压端的砂层内发育多条逆冲断层, 形成隆起幅度较大的冲起构造, 两条先存正断层的反转量进一步增大, 断层上盘的背斜构造也有一定隆升幅度 (图 3c)。该模拟结果也证实, 构造变形主要集中在靠近挤压端的砂层以及邻近断层上盘的砂层内, 而其余部位砂层的变形都及其微弱 (图 3c)。

实验 2 的初始变形特征与实验 1 比较相似, 但箱状背斜的隆起幅度更小些。由于更靠近挤压端一侧的断层倾角较缓, 随着挤压量的增大, 该断层发生明显反转, 而远离挤压端的陡倾角断层并没有发生明显的反转活动 (图 4b)。随着实验的继续进行, 挤压量主要被靠近活动端的缓倾角断层吸收, 上盘形成隆起非常明显的断背斜构造, 同时还发育反冲断层, 而远离挤压端的陡倾角断层上盘仅发生了非常微弱的反转, 砂层几乎未发生变形 (图 4c)。

在第二组模拟实验 (实验 3 和 4) 中, 两条先存正断层的倾向相对, 其中右侧靠近固定端的断层向挤压端倾斜。保持靠近固定端一侧断层的倾向、倾角 (约 35°) 和相对位置不变, 改变靠近挤压端一侧断层的位置, 使两条断层的间距加大, 但其倾向和倾角 (约 60°) 不变 (图 5a, 6a), 以分析断层倾向组合及其间距变化对断层上盘断背

表 1 物理模拟实验相关参数
Table 1 Parameters of physical modeling experiments

地 层	实际厚度/m	实验厚度/cm	材料/粒度/目	颜色	
新近系	红层	1500	1.5	石英砂/60~80	白
古近系	泥岩、砂砾岩	700	0.7	石英砂/40~60	红
白垩系	Tena组,泥岩	400	0.4	微玻璃珠	灰
	Napo组,M1砂岩	500	0.5	石英砂/20~40	白
	隔层	100	0.1	石英砂/60~80	黑
	Napo组,U砂岩	400	0.4	石英砂/40~60	白
	隔层	100	0.1	石英砂/60~80	黑
	Napo组,T砂岩	400	0.4	石英砂/40~60	白
	隔层	100	0.1	石英砂/60~80	黑
	Hollin组,砂岩	400	0.4	石英砂/40~60	白
基底	岩浆岩、变质岩	2000	2.0	石英砂/60~80	蓝

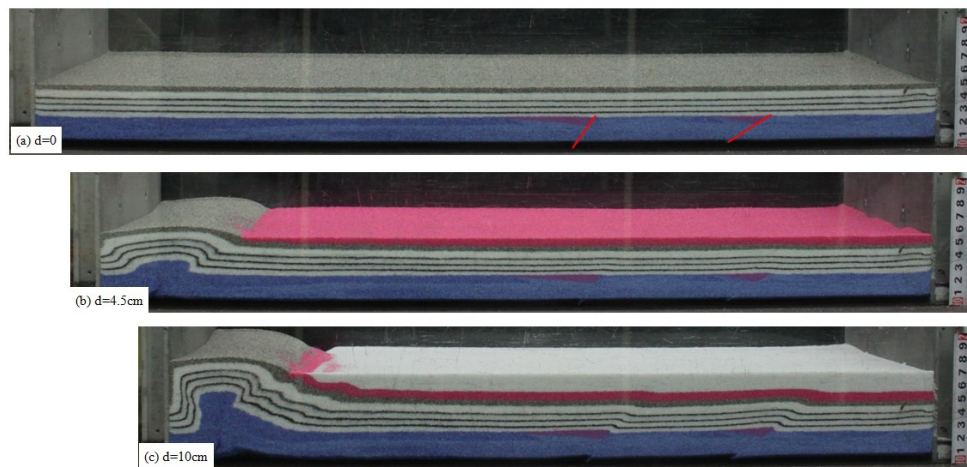


图 3 实验 1 模拟过程和结果 (d 为挤压量, 下同)

Fig. 3 Simulation processes and results of the model-1 in physical modeling experiment

斜构造发育的影响。

在实验 3 的初始阶段, 变形都主要集中于靠近挤压端的砂层内, 而远离挤压端的两条先存正断层均未发生明显活动 (图 5b)。随着挤压作用的持续进行, 靠近挤压端的砂层构造变形更为强烈, 形成褶皱-冲断构造, 远离挤压端的两条先存正断层也都发生复活反转, 其上盘地层发生轻微隆起, 形成了幅度较低的断背斜构造。但相比较而言, 远离挤压端的右侧缓倾角断层上盘形成的背斜构造更为明显一些 (图 5c)。

在两条断层间距加大的实验 4 中, 早期挤压时的变形依然主要是集中在靠近挤压端的砂层中。随着挤压量的增大, 更靠近挤压端的陡倾正断层也开始发生复活反转, 而更靠近固定端的缓倾正

断层几乎未发生活动 (图 6b)。在随后的挤压过程中, 陡倾正断层上盘砂层的变形越来越强烈, 而且还形成了反冲断层, 但远离挤压端的缓倾正断层上盘砂层依然几乎未发生变形 (图 6c)。

4 讨论

两组模拟实验的结果表明, 先存正断层的陡缓程度、间距及其组合关系等对断层反转以及反转过程中断层上盘断背斜构造的发育都有一定影响, 但影响程度存在明显区别。

通过对比实验 1 和 2, 可以发现当陡倾角断层更靠近挤压端时 (实验 1), 两条断层均发生了较明显的反转, 而且开始发生反转的时间基本一致, 断层上盘断背斜的隆起幅度和隆升速率也比

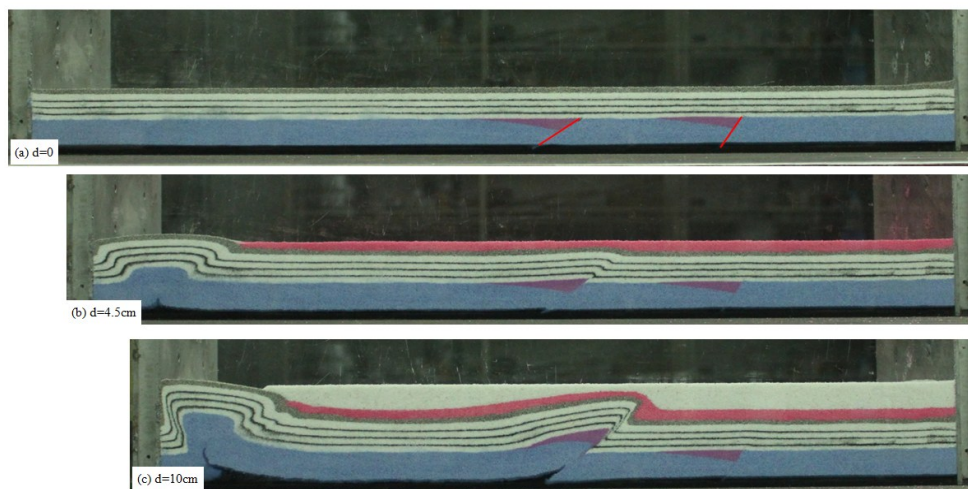


图4 实验2模拟过程和结果

Fig. 4 Simulation processes and results of the model-2 in physical modeling experiment



图5 实验3模拟过程和结果

Fig. 5 Simulation processes and results of the model-3 in physical modeling experiment

较接近 (图7a)。当缓倾角断层更靠近挤压端时 (实验2), 在挤压作用下缓倾角断层更易发生反转, 并吸收了绝大部分挤压力, 其上盘断背斜构造的隆起幅度也更大 (图7a)。只有当模型挤压缩短量达到一定程度 (2.6 cm) 时, 远离挤压端的陡倾角正断层才开始发生反转, 但上盘形成的断背斜的隆起幅度非常微弱, 仅约为0.1 cm (图7a)。

对比实验证实, 如果早期缓倾角正断层倾向挤压端, 即使距离挤压端较远, 其在后期挤压过程中也更容易吸收挤压力而发生反转, 其上盘形成的断背斜构造规模也较大。这也表明, 在奥连特盆地东部斜坡带内, 如果陡倾角断层更靠近西侧, 那在其东侧的断层上盘也有可能发育断背

斜构造。而如果是缓倾角断层更靠近西侧, 那在其东侧的断层上盘就可能不易发育断背斜构造。

对比实验3和实验4的模拟结果, 可以发现当断层间距较小时 (实验3), 不论断层陡缓程度如何, 两条早期正断层在反转过程中均发生了大致相似的构造变形, 形成了隆起幅度较小的断背斜构造。但相比较而言, 右侧缓倾角正断层更早开始发生反转, 断背斜隆升幅度也较左侧陡倾角断层大些 (图7b)。当断层间距较大时 (实验4), 距离挤压端较近的断层更易吸收挤压力, 并在其上盘形成了隆起幅度比较明显的断背斜构造 (图7b)。此时即使远离挤压端的断层倾角更小, 其上盘地层也仅是发生了非常微弱的变形 (图6c)。这

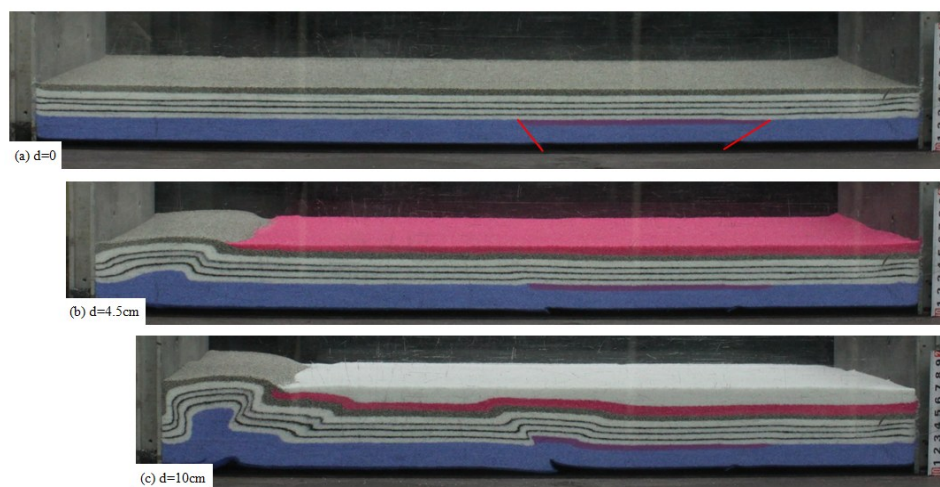


图6 实验4模拟过程和结果

Fig. 6 Simulation processes and results of the model-4 in physical modeling experiment

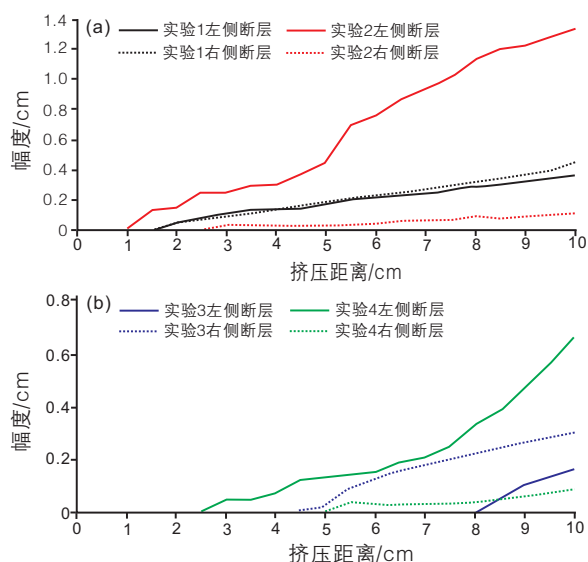


图7 各组模拟实验形成断背斜的隆起幅度对比

Fig. 7 Comparison of uplifting amplitudes of faulted anticlines in different models of physical modeling

也表明,当断层倾向相对时,距离挤压端更近的陡倾角断层会吸收一定的挤压量,从而发生反转并形成背斜构造。而相对远离挤压端的缓倾角断层是否发生复活反转则主要受断层间距的影响,距离越小越有利于断层发生复活反转,这与图2所表现出来的实际地质特征也是非常相似的。

从两组模拟实验的结果来看,当先存正断层均倾向挤压端时,在后期挤压过程中断层更易发生反转,上盘断背斜的隆起幅度也要明显大于先存断层倾向相对时形成的断背斜(图7)。

5 结论

(1) 比例化物理模拟实验证实,奥连特盆地东部斜坡带早期正断层的陡缓程度、倾向组合以及断层间距等对正断层后期反转过程中断背斜构造的形成有重要影响。

(2) 当早期正断层均向挤压端倾斜时,如果陡倾角正断层更靠近挤压端,则陡、缓正断层都易发生反转,并形成断背斜构造。当缓倾角正断层更靠近挤压端时,则会吸收绝大部分的挤压量,而相对远离挤压端的陡倾角正断层不易发生反转。

(3) 当早期正断层倾向相对时,距离挤压端更近的陡倾角正断层会吸收一定的挤压量,从而发生反转并形成断背斜构造。相对远离挤压端的缓倾角正断层是否发生反转则受断层间距的影响,距离越小越有利于断层发生反转。

致谢: 作者在完成物理模拟实验过程中得到了中国石油大学(北京)周建勋教授和中国石油勘探开发研究院张志伟、刘亚明、阳孝法等人的大力帮助,在此表示衷心感谢!同时,感谢本刊编辑和审稿专家对本文提出的中肯意见。

参考文献(References):

- 陈诗望,姜在兴,滕彬彬,等. 2012. 厄瓜多尔奥连特盆地白垩系 M1 油藏沉积储层新认识[J]. 地学前缘, 19(1): 182-187.
- 丁增勇,陈文学,熊丽萍,等. 2010. 厄瓜多尔奥连特盆地构造演化特征[J]. 新疆石油地质, 31(2): 211-215.
- 戈红星, Vendeville B C, Jackson M P A. 2004. 前陆褶皱冲断带厚皮缩短

- 盐构造运动的物理模拟[J]. 高校地质学报, 10(1): 39-49.
- 马中振, 谢寅符, 张志伟, 等. 2014. 丛式平台控制圈闭群勘探评价方法——以厄瓜多尔奥连特盆地X区块为例[J]. 石油勘探与开发, 41(2): 182-189.
- 吴航, 余一欣, 谢寅符, 等. 2015. 南美奥连特前陆盆地斜坡带低幅度构造形成物理模拟[J]. 世界地质, 34(1): 178-186.
- 谢寅符, 季汉成, 苏永地, 等. 2010. Oriente-Maranon盆地石油地质特征及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 37(1): 51-56.
- 谢寅符, 刘亚明, 马中振, 等. 2012. 南美洲前陆盆地油气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社: 146-174.
- 阳孝法, 谢寅符, 张志伟, 等. 2016. 南美Oriente盆地北部海绿石砂岩油藏特征及成藏规律[J]. 地质科学, 51(1): 189-203.
- Baby P, Rivadeneira M, Barragan R, et al. 2013. Thick-skinned tectonics in the Oriente foreland basin of Ecuador [C]// Nemcok M, Mora A, Cosgrove J W. Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion. London: Geological Society, 59-76.
- Hugo B, Silvestro J, Conforto G, et al. 2003. Recognition of tectonic events in the conformation of structural traps in the eastern Oriente Basin, Ecuador [DB/OL]. AAPG Search and Discovery Article #30019. <http://www.searchanddiscovery.com/documents/2003/hugo/index.htm>.
- Koyi H. 1997. Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique—a historical outline [J]. Journal of Petroleum Geology, 20(2): 223-238.
- Shanmugam G, Poffenberger M and Alava J T. 2000. Tide-dominated estuarine facies in the Hollin and Napo (“T” and “U”) formations (Cretaceous), Sacha field, Oriente basin, Ecuador [J]. AAPG Bulletin, 84(5): 652-682.
- White H J, Skopec R A, Ramirez F A, et al. 1995. Reservoir characteristics of the Hollin and Napo formations, western Oriente basin, Ecuador [C]// Tankard A J, Suárez Soruco R, Welsink H J. Petroleum basins of South America. Oklahoma: AAPG, 573-596.