被动陆缘盆地陆隆斜坡对盐构造形成的影响

——来自物理模拟实验的启示



Vol. 96 No. 3

Mar. 2 0 2 2

王殿举1),李一赫2),于法浩3),王志琛4),刘志强5)

1)东北石油大学石油工程学院,黑龙江大庆,163318;2)东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆,163318;
 3)中海石油天津分公司渤海石油研究院,天津,300452;4)北京大学地球与空间科学学院,北京,100871;
 5)中国石化石油勘探开发研究院,北京,100083

内容提要:被动陆缘盆地盐构造形成的影响因素及时空演化分析受到了国内外学者的高度重视。丰富的油气 资源促进了被动陆缘盆地地震资料品质的不断提升,高精度地震数据的解译结果表明,被动陆缘盆地盐层下的地 形往往具有大型的起伏特征,而前人在基底构造形态对盐构造形成影响方面的研究并未取得共识,仍需要深入研 究和探讨。为此,本文基于前人的研究认识,采用物理模拟方法,通过2组模型的平面、剖面结构刻画及对比分析, 开展了陆隆斜坡构造对盐岩变形的控制作用研究。模拟结果表明,相对于平坦的盐下地形,陆隆斜坡的存在能够 提升盐岩的流动能力,促使盐构造在相同时间内形成更多构造样式以及发生更大规模的变形。本文研究成果能够 进一步丰富被动陆缘盆地盐构造变形的理论认识和明确盐构造与油气的时空演化关系。

关键词:被动陆缘盆地;盐构造;陆隆斜坡;构造变形;物理模拟

被动陆缘盆地盐构造是盐岩在重力和浮力的驱动作用下流动形成的,并且影响着盆地结构和地层的演化。含盐盆地的构造变形表现为明显的分段特征,包括近陆端伸展带、深海位置挤压带及两者之间的过渡带。基于丰富的高品质地震资料研究发现,不同盆地各构造区带的盐构造,在形态、规模等方面存在较大区别(Hudec et al., 2007; Brun et al., 2011; Rowan et al., 2012,2017)。南大西洋的地震观测数据表明,相同地质背景下形成的盆地,其盆地内盐构造样式及其分布特征受到基底构造形态的影响,主要表现在深海位置是否存在构造隆起斜坡(Unternehr et al., 2010; Mohriak et al., 2012; Kukla et al., 2017)(图 1)。

盐构造变形过程及其影响因素是复杂多样的,随着研究的不断深入,基底形态特征对盐构造变形的影响引起了人们的关注(Jackson et al., 2005; Goteti et al., 2013; Pichel et al., 2018)。前人通 过物理模拟研究方法,展示了随着演化时间的增加, 具有构造倾角含盐盆地盐岩流动并形成多种盐构造 样式的过程(Wu Zhenyun et al., 2015),在此基础 上刻画了盐构造的几何形态。Adam et al.(2012a) 对南大西洋两岸被动陆缘盆地不同构造区的盐构造 变形特征进行了总结,并记录了不同模拟时间下的 平面结果,展示了大规模的底辟构造发育位置及规 模变化,进而分析其不同时期的平面构造特征。并 结合剖面切片结果进行综合分析,探讨了盐构造的 样式、分布特征的演化过程(Adam et al., 2012a)。 在盐构造变形控制因素分析中,前人基于物理模拟 方法获得的实验结果,分析了差异负载作用下盐底 辟构造的形成过程(Quirk et al., 2012; Warsitzka et al., 2013;景紫岩等,2021)、挤压环境下单个盐 构造及逆冲构造的演化(Dooley et al., 2009)。

基于数值模拟方法,探讨了多种因素对被动陆 缘盆地盐构造形成的影响,主要分析了盐上地层的

引用本文: 王殿举,李一赫,于法浩,王志琛,刘志强. 2022. 被动陆缘盆地陆隆斜坡对盐构造形成的影响——来自物理模拟实验的启示.
 地质学报,96(3): 854~862, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao. 2022105.
 Wang Dianju, Li Yihe, Yu Fahao, Wang Zhichen, Liu Zhiqiang. 2022. Influence of passive terrestrial margin basin's land rise slopes on salt tectonic formation; insights from physical simulation experiments. Acta Geologica Sinica, 96(3): 854~862.

注:本文为东北石油大学人才引进科研启动经费资助项目(编号 1305021856)和石油与天然气工程学科优秀科研人才培育基金(编号 15041260507)联合资助的成果。

收稿日期:2021-02-14;改回日期:2021-05-26;网络发表日期:2021-12-23;责任编委:刘俊来;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:王殿举,男,1989年生。博士,讲师,主要从事海洋油气及盆地构造方向研究。E-mail:djwang@nepu.edu.cn。通讯作者:李一赫,女,1988年生。博士,讲师,主要从事含油气盆地构造方面的研究。E-mail:liyhearth@126.com。



(a)-Seismic profile; (b)-seismic profile interpretation; (c)-structural interpretation profile

厚度(Schultz-Ela, 2003)、盐上地层的密度、盐上层 和盐层的密度差(Allen et al., 2012: Kholodov, 2013)、底板倾斜角度(Hudec et al., 2007)等因素 的控制作用。Goteti et al. (2013)考虑到地形对盐 构造形成影响的重要性,在其数值模型中将整个盆 地均设置了多个 2 km 高的锯齿状底板形态,模拟 结果显示,此种地形对盐岩的流动结果影响不大,仅 在盐构造的形成初期抑制盐构造形成(Goteti et al., 2013)。而针对盐岩流动和上覆地层平移的分 析结果,认为深海位置的陆隆地形有助于改善盐盆 地边缘的运动学特征。基底形态对盐构造形成控制 作用仍存在一定地争论,为此,笔者基于实际地质观 测(Unternehr et al., 2010),考虑被动陆缘盆地盐 构造影响因素,采用单因素分析方法,通过不同模型 结果对比,进一步阐述陆隆斜坡对盐构造形成的控 制作用。

值得注意的是前人的研究中,较为一致地在模 拟初期将"巨厚"的盐上沉积物加载到具有倾角的物 理模型中,这与实际地质条件中沉积地层厚度的观 测认识不符,且盐上地层厚度的增大和与盐岩的密 度差异,会很大程度上影响盐构造变形特征及其在 模型尺度上的演化时间(Gaullier et al., 2005)。为 此,本文模拟过程中上覆沉积采用全盆地不均衡沉 积的方式,最大程度上与实际地质条件匹配(李一赫 等,2020)。

1 物理模型设计

1.1 主要参数及初始几何模型

相对于实际地质条件,物理模拟实验是动态缩放的,物理模型在几何形状、运动学和力学演化特征,可以与它们的自然原型进行定量比较,通过将物理模型参数与实际地质参数的比例因子应用到物理模拟中,实现模型模拟时间与实际地质时间的等效刻画(Hubbert, 1937; Adam et al., 2012b)。其中,实验的动态比例因子是从长度、质量和时间维度得出的,以此来定义物理模拟的时间尺度(表 1)。通过公式能够建立各比例因子之间的关系(Adam et al., 2012b; Warsitzka et al., 2013):

$$\sigma^* = L^* \rho^* g^* \tag{1}$$

$$\varepsilon^* = \sigma^* / \eta^*$$
 (2)

式中, σ^* 为应力比例因子; L^* 为长度比例因子; ρ^* 为密度比例因子; g^* 为重力加速度比例因子; ϵ^* 是 应变比例因子; η^* 为黏度比例因子。

$$t^* = 1/\varepsilon^* = \eta^* / \sigma^* \tag{3}$$

$$t_o = 0.5 t^*$$
 (4)

$$t_{\rm p} = t_{\rm m}/t_{\rm o} \tag{5}$$

式中, t^* 为陆上含盐盆地时间比例因子; t_o 为水下含盐盆地时间比例因子; t_m 为物理模拟时间(h); t_p 为地质时间(Ma)。

根据模型参数和地质参数,物理模拟时间 t_m =1h时,从应力、黏度和应变比例得出水下含盐盆地地质时间尺度, $t_p \approx 1$ Ma,即物理模型1h相当于地质时间1 Ma。

表 1 模型参数、地质参数及其比例系数(据 Hubbert, 1937; Adam et al., 2012b; Allen et al., 2012; Warsitzka et al., 2013; Macaulay, 2017)

Table 1Model parameters, geological parameters and theirscale coefficients(after Hubbert, 1937; Adam et al., 2012b;Allen et al., 2012; Warsitzka et al., 2013; Macaulay, 2017)

	模型参数	地质参数	比例系数/因子
长度/厚度	1 cm	1 km	$L^* = 10^{-5}$
上覆沉积物密度	$1500 \ { m kg/m^3}$	2400 kg/m^3	$\rho^* = 0.625$
重力加速度	9.8 m/s ²	9.8 m/s ²	$g^{*} = 1$
应力			$\sigma^* = L^* \rho^* g^*$
<u>M.</u> /J			$\sigma^* = 6.25 \times 10^{-6}$
黏度	$1.5 \times 10^4 \mathrm{Pa}$ • s	$1\!\times\!10^{18} \mathrm{Pa}$ • s	$\eta^* = 2 \times 10^{-15}$

本次设定两组模型(模型几何参数详见表 2,图 2),为了对比陆隆斜坡对盐构造形成的影响,模型一 为自由边界,而模型二添加了陆隆斜坡设定,隆起角 度为 10°,两组模型的上覆沉积加载方式采用的均 是分层加载,盐岩层和上覆沉积地层厚度设定参考 南大 西洋 地震观测数据解译结果(李一赫等, 2020)。

1.2 物理模拟结果

针对以上两组物理模型的模拟结果,开展了剖面和平面的对比分析。其中,剖面图为最终结果在 x方向(由陆向海方向)的切片,平面模型为模拟 112 h后的结果(地质年代时间 112 Ma)。

对比两组模型结果,自由边界模型在剖面上的 盐构造样式以坡上伸展和坡下挤压特征为主(图 3),主要发育盐筏、底辟构造和盐焊接,盐上沉积地 堑样式发育,该组模型坡上伸展特征与 Adam et al. (2012)的模拟结果一致。坡下位置以盐席、盐上凹 陷和逆冲型盐构造为主,伴随有逆冲断层发育。陆 降斜坡模型在坡上位置发育的盐构造与自由边界模 型形成的盐构造样式较为一致,主要差异表现为陆 隆斜坡模型发育有高幅株型刺穿底辟和蘑菇状底 辟构造,高幅株状底辟构造刺穿大部分上覆沉积 地层,且形态较为对称(图 4)。坡下位置由于陆隆 斜坡(10°斜坡设定)的存在,形成的逆冲型盐构造向 深海方向远距离延伸,相邻的底辟构造之间形成盐 上凹陷。陆隆斜坡模型形成2个盐上凹陷,其中距 离陆地最远端的盐上凹陷两翼地层呈伸展特征,另 一个盐上凹陷两翼地层呈两侧挤压特征,后者的形



图 2 物理模拟基础模型设置图

Fig. 2 Physical simulation basic model setting diagram

(a)—Model 1: free boundary model; (b)—model 2: land rise slopes model

表 2 物理模拟几何模型设定参数

Table 2 Physical simulation basic model setting parameters

	模型长度/宽度(cm)	陆隆斜坡角度(°)	盆地底板倾角(°)	硅胶厚度(cm)	盐上砂层数量	砂层厚度(cm)	模拟时间(h)
模型一	100/40	0	3	0.5	5	2.0	112
模型二	100/40	10	3	0.5	5	2.0	112

⁽a) 一模型一:自由边界模型;(b) 一模型二:陆隆斜坡模型



图 3 自由边界模型物理模拟结果剖面图(a~f)





Fig. 4 Profiles of physical simulation results of land rise slopes model $(a \sim f)$

态特征与自由边界模型形成的较为一致(图 3,图 4)。

两组模型结果在平面特征上均表现为连续的盐 岩块体分布,自由边界模型和陆隆斜坡模型形成的 盐构造数量分别是 10 个(A1~A10)和 8 个(B1~ B8),坡上盐构造数量均为6个。两组模型在坡上 位置变形同样具有很大的相似性,表现为伸展断裂 特征为主,坡下位置由褶皱构造和逆冲断层组成。 其中,陆隆斜坡模型侧缘形成了走滑特征边界,这是 由于盐岩向坡下流动的俯冲作用,造成盐岩通量扰 动所导致的(Dooley et al., 2017)。构造规模上,陆 隆斜坡模型的盐构造及断裂系统在坡上位置具有更 大的平面延伸长度,而坡下位置自由边界模型具有 更大的构造宽度和盐构造数量。在相同的演化时间 内,陆隆斜坡模型坡上位置盐岩之间的块体发生了 更大角度的旋转,其坡上伸展区的平面宽度比自由 边界模型的伸展区宽约 33.4%,这一结果也与前文 所述研究认识较为一致。坡下位置盐岩(B8)发生 了向海方向远距离的运移,陆隆斜坡模型在挤压区 的盐构造 B8 平面上向海推进距离与自由边界模型 中A8~A10 三个盐构造的平面延伸宽度相近,表现 为一个约为16 cm长的挤压构造带(图5)。

表 3 盐岩块体平面旋转角度统计数据

Table 3 Statistical data of plane rotation angle of salt rock block

盐构造 编号	旋转角度(°)					
	1Ľ	部	南部			
	自由边界模型	陆隆斜坡模型	自由边界模型	陆隆斜坡模型		
A1 或 B1	47	65	33	54		
A2 或 B2	46	60	50	53		
A3 或 B3	0	25	44	55		
A4 或 B4	0	64	40	0		
A5 或 B5	0	64	5	45		
A6 或 B6	45	0	0	45		

2 讨论

陆坡的构造形态会影响局部位置的盐通量,通 过传递剪切和相关变形,造成平面上无论是伸展构 造还是收缩构造均会出现盐上块体的"旋转"现象 (Dooley et al., 2017),Dooley et al.(2020)通过简 单的模型结果表明,即使在低角度情况下均匀岩层 厚度模型中,盐岩的流动会形成张扭边界、走滑边界 和转换挤压边界,形成的几种边界控制这盐岩的平 面流动特征,盐岩流动带动盐上块体向海方向移动,





第3期

在坡上和坡下形成平面"旋转"现象(Dooley et al., 2020)。因此,这些几何形状并不是由于模型的"边 界效应"引起的,主要是由于运动过程中的剪切应力 造成的(Dooley et al., 2017),Adam et al.(2012a) 的模拟结果具有同样的认识。然而,通过对复杂形 态陆坡模型的盐岩流动监测发现,陆隆的阻挡作用 会降低下倾位置的盐岩流动速度,而陆隆两侧位置 的盐岩及其上覆地层能够相对更快的移动,以此传 递剪切和相关变形,改变了局部位置的盐通量,造成 在早期形成重大"旋转"的现象(Dooley et al., 2017)。由此可见,陆坡构造形态对盐通量具有较强 控制作用,影响"旋转"现象的发生。

通过对比两组模型结果,陆隆斜坡模型表现出 更大的"旋转"角度,也反映了其盐岩及上覆地层相 对较强的流动性。因此,在陆隆斜坡模型挤压区,其 盐岩更容易沿着陆降斜坡向模型远端流动,模型在 挤压区位置盐岩褶皱发育,并伴有规模较大的平面 弧形延伸带,在此过程中,盐岩经历了强度较高的挤 压作用,刺穿上覆沉积形成逆断层及盐席构造 (B8)。而相邻挤压型盐构造(B7)逆冲构造表现为 向陆特征,在此阶段之初,盐流上涌至斜坡上,此时 盐通量的不匹配导致局部收缩,随着坡上盐层的逐 渐增厚,盐层自身的流动能力逐渐增强,导致增厚盐 层的进一步伸展及坍塌,形成"V"形域的盐上凹陷 构造,这种盐构造变形特征与 Pichel et al. (2019a) 的模拟结果认识相同,其分析结果认为"V"形域的 形成是盐岩块体受到盐岩及其上覆沉积层向盆地方 向继续平移造成的(Pichel et al., 2019a)。而盐岩 在陆隆斜坡的上倾边缘逐渐增厚和变宽,导致了平 面上两个主要背斜构造的膨胀。在此之后,随着盐 岩流动能力减弱,不断上升的静岩压力开始驱动背 斜及盐构造的变形。同时,盐岩在陆隆斜坡上的远 距离搬运,需要更多的盐岩供给,提升了构造(底板) 倾斜位置盐岩的流动速度,以此造成伸展区块体的 平面"旋转",这种"旋转"作用,能够有效的促进盐墙 的形成(Dooley et al., 2020)。因此,在陆隆斜坡模 型近过渡区位置形成高幅株型刺穿底辟(图4)。

相对来说,自由边界模型初始流动能力较强,有 利于在初期即形成规模较大的盐构造,但随着上覆 沉积的厚度增大,盐岩自身流动能力降低,深海位置 的盐构造(A10)很难进行远距离运移。随着演化时 间的增加,盐构造及上覆沉积整体的向海方向平移, 驱动了 A10 构造的大幅度变形。因此,盐构造 A8 和 A9 构造在平面上发生了长距离平移,而盐构造 A10 在平面上移动量很少。其中,需要注意的是陆 隆斜坡模型的底辟构造(B7)顶部为向陆方向延展, Thigpen et al. (2019)的数值模拟结果记录了这种 特征形成的整个过程,并结合应力演化分析认为在 挤压区锥形底辟刺穿盐上地层后静岩压力迅速释 放,提升了盐岩垂向上的流动能力,但由于失去了源 盐的供给,导致侧翼发生坍塌和顺时针旋转,底辟构 造随之发生变形(Thigpen et al., 2019)。

虽然前人的模型中考虑到深海位置地形的变化 (Albertz et al., 2010; Allen et al., 2012),但盐上 沉积为厚层进积特征,意味着部分盐岩层在一定时 间内以无盐上沉积的条件下流动,并且隆起边界位 置设置刚性块体的阻挡作用,改变了盐构造的初始 垂向变形。盐构造变形后期,盐岩流动能力较弱,不 断进积的盐上沉积或围岩能够对盐岩形成强烈的张 性或者挤压性应力场,促使盐岩初始流动或者后期 变形(Thigpen et al., 2019)。可以想象的是如此的 初始沉积特征,极大地改变了盆地内各构造位置不 同时期的盐通量,而盐通量的变化同样控制着盐构 造的变形(Pichel et al., 2019b)。

笔者的实验证实了这样的一个假设,即陆隆斜 坡通过改变了盐岩与上覆沉积的空间接触关系促进 了盐岩的流动,进而改变了盐构造的演化及形变 (Dooley et al., 2017; Pichel et al., 2018; Ge Zhiyuan et al., 2020)。这一结果认识与被动陆缘 盆地盐岩及上覆沉积流动变形的运动学特征也是一 致的,盐岩在坡下位置展现了平行底部地形向海流 动,而其上覆沉积保持了一定角度倾斜向上的运动 特征,会进一步促进盐岩的后期变形(王殿举等, 2019)。

以上研究结果表明陆隆斜坡能够促进盐岩流动,形成更加丰富的盐构造样式,即形成"蘑菇状"底 辟和高幅株型刺穿底辟构造(Koyi, 1991),进一步 明确了被动陆缘盆地陆隆斜坡对盐构造形成演化的 控制作用。同时,在平面上改变了盐构造的延展特 征及分布情况。基于前人及本文研究成果进一步细 化被动陆缘盆地盐构造分布模式(图 6)。

3 结论

(1)通过对比自由边界和陆隆斜坡两组模型的 模拟结果,笔者认为深海位置陆隆斜坡的存在有利 于盐岩和上覆沉积地层的流动,陆隆斜坡模型的盐 岩及其上覆沉积具有更大伸展量,并能够形成更多 类型的盐构造。



图 6 深海位置陆隆斜坡盆地盐构造分布模式图

Fig. 6 Distribution pattern of salt structure in basement uplift basin in deep sea

(2)深海位置陆隆斜坡地形能够形成与被动陆 缘盆地相反的构造倾角,这种构造形态与坡下位置 盐岩及其上覆沉积地层运动方向较为一致。而较为 平缓的地形,容易在盐岩边界位置形成比盐岩刚性 更强的沉积地层,阻碍了盐岩在该位置向海流动,构 造变形更多地需要依赖盐岩与围岩的空间组合 关系。

(3)本文选择被动陆缘含盐盆地一种观测数据 结果建立实验模型,补充和扩展了基底形态对盐岩 流动影响的认识,而其他基底形态组合影响盐构造 的演化变形机理,仍需要更多地研究成果综合论证。

References

- Adam J, Ge Z, Sanchez M. 2012a. Post-rift salt tectonic evolution and key control factors of the Jequitinhonha deepwater fold belt, central Brazil passive margin: insights from scaled physical experiments. Marine and Petroleum Geology, 37(1): 70~100.
- Adam J, Krezsek C. 2012b. Basin-scale salt tectonic processes of the Laurentian Basin, eastern Canada: insights from integrated regional 2D seismic interpretation and 4D physical experiments. Geological Society, London, Special Publications, 363(1): 331 ~360.
- Albertz M, Beaumont C, Shimeld J W, Ings S J, Gradmann S. 2010. An investigation of salt tectonic structural styles in the Scotian Basin, offshore Atlantic Canada: 1. comparison of observations with geometrically simple numerical models. Tectonics, 29(4): 1~29.
- Allen J, Beaumont C. 2012. Impact of inconsistent density scaling on physical analogue models of continental margin scale salt tectonics. Journal of Geophysical Research, 117: B8103.
- Brun J P, Fort X. 2011. Salt tectonics at passive margins: geology

versus models. Marine and Petroleum Geology, 28(6): $1123{\sim}1145.$

- Davison I. 2007. Geology and tectonics of the South Atlantic Brazilian salt basins. Geological Society London Special Publications, 272(1): 345~359.
- Dean S L, Morgan J K. 2015. Influence of mobile shale on thrust faults: insights from discrete element simulations. AAPG Bulletin, 99(3): 403~432.
- Dooley T P, Jackson M P A, Hudec M R. 2009. Inflation and deflation of deeply buried salt stocks during lateral shortening. Journal of Structural Geology, 31(6): 582~600.
- 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): 25~38.
- Dooley T P, Hudec M R, Pichel L M, Jackson M P A. 2020. The impact of base-salt relief on salt flow and suprasalt deformation patterns at the autochthonous, paraautochthonous and allochthonous level: insights from physical models. Geological Society, London, Special Publications, 476(1): 287~315.
- Gaullier V, Vendeville B C. 2005. Salt tectonics driven by sediment progradation: part II-radial spreading of sedimentary lobes prograding above salt. AAPG Bulletin, 89(8): 1081~1089.
- Ge Zhiyuan, Gawthorpe R L, Zijerveld L, Oluboyo A P. 2020. Spatial and temporal variations in minibasin geometry and evolution in salt tectonic provinces: lower Congo Basin, offshore Angola. Basin Research, 33(1): 594~611.
- Giles K A, Lawton T F. 2002. Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote diapir, northeastern Mexico. AAPG Bulletin, 86(5): 823~840.
- Goteti R, Beaumont C, Steven J, Ings S. 2013. Factors controlling early stage salt tectonics at rifted continental margins and their thermal consequences. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(6): 3190~3220.
- Hubbert M K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geological Society of America Bulletin, 48(10): 1459~1519.
- Hudec M R, Jackson M P A. 2007. Terra infirma: understanding salt tectonics. Earth-Science Reviews, 82(1-2): 1~28.

- Jackson M P A, Hudec M R. 2005. Stratigraphic record of translation down ramps in a passive-margin salt detachment. Journal of Structural Geology, 27(5): 889~911.
- Jing Ziyan, Li Guobin, Zhang Yajun, Wang Ronghua, Xie Tianfeng, Cui Jian, Liu Wenqiang, Dai Hansong. 2021. Salt structures characteristic and deformation mechanism in the eastern margin of Pre-Caspian basin: the implication of physical simulation. Acta Geologica Sinica, 95(5): 1459 ~ 1468 (in Chinese with English abstract).
- Kholodov V N. 2013. Elisional processes and salt tectonics: communication 2. formation mechanism of salt diapirs. Lithology and Mineral Resources, 48(4): 285~304.
- Koyi H. 1991. Mushroom diapirs penetrating overburdens with high effective viscosities. Geology, 19(12): 1229~1232.
- Kukla P A, Strozyk F, Mohriak W U. 2017. South Atlantic salt basins — witnesses of complex passive margin evolution. Gondwana Research, 53: 41~57.
- Li Yihe, Wang Dianju, Yu Fahao, Liu Zhiqiang. 2020. Formation and evolution of cretaceous salt structures in Lower Congo Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50 (6): 1628~1638 (in Chinese with English abstract).
- Macaulay E A. 2017. A new approach to backstripping and sequential restoration in subsalt sediments. AAPG Bulletin, 101(9): 1385~1394.
- Mohriak W U, Szatmari P, Anjos S. 2012. Salt: geology and tectonics of selected Brazilian basins in their global context. Geological Society, London, Special Publications, 363(1): 131 ~ 158 .
- Pichel L M, Finch E, Gawthorpe R L. 2019a. The impact of presalt rift topography on salt tectonics: a discrete-element modeling approach. Tectonics, 38: 1466~1488.
- Pichel L M, Jackson C A L, Peel F, Dooley T P. 2019b. Base-salt relief controls salt-tectonic structural style, São Paulo Plateau, Santos Basin, Brazil. Basin Research, 32(3): 453~484.
- Pichel L M, Peel F, Jackson C A L, Huuse M. 2018. Geometry and kinematics of salt-detached ramp syncline basins. Journal of Structural Geology, 115: 208~230.
- Quirk D, Pilcher R. 2012. Flip-flop salt tectonics. Geological Society, London, Special Publications, 363(1): 245~264.
- Rowan M G, Lawton T F, Giles K A, Ratliff R A. 2003. Near-salt deformation in La Popa basin, Mexico, and the northern Gulf of Mexico: a general model for passive diapirism. AAPG Bulletin 87(5): 733~756.
- Rowan M G, Peel F J, Vendeville B C, Gaullier V. 2012. Salt tectonics at passive margins: geology versus models-discussion.

Marine and Petroleum Geology, 37(1): 184~194.

- Rowan M G, Lindsø S. 2017. Salt Tectonics of the Norwegian Barents Sea and Northeast Greenland Shelf. Amsterdam: Elsevier, 265~286.
- Schultz-Ela D D. 2003. Origin of drag folds bordering salt diapirs. AAPG Bulletin, 87(5): 757~780.
- Thigpen J R, Roberts D, Snow J K, Walker C D, Bere A. 2019. Integrating kinematic restoration and forward finite element simulations to constrain the evolution of salt diapirism and overburden deformation in evaporite basins. Journal of Structural Geology, 118: 68~86.
- Unternehr P, Péronpinvidic G, Manatschal G, Sutra E. 2010. Hyper-extended crust in the South Atlantic: in search of a model. Petroleum Geoscience, 16(3): 207~215.
- Valle P J, Gjelberg J G, Helland H W. 2001. Tectonostratigraphic development in the eastern Lower Congo Basin, offshore Angola, West Africa. Marine and Petroleum Geology, 18: 909 \sim 927.
- Wang Dianju, Li Jianghai, Cheng Peng, Liu Zhiqiang, Yu Fahao. 2019. Salt structure formation modeling controlled by structure inclination angle: take the Lower Congo Basin as an example. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 55(2): 277~288 (in Chinese with English abstract).
- Warsitzka M, Kley J, Kukowski N. 2013. Salt diapirism driven by differential loading — some insights from analogue modelling. Tectonophysics, 591: 83~97.
- Wu Zhenyun, Yin Hongwei, Wang Xin, Zhao Bo, Zheng Junzhang, Wang Xingyuan, Wang Wei. 2015. The structural styles and formation mechanism of salt structures in the Southern Precaspian Basin: insights from seismic data and analog modeling. Marine and Petroleum Geology, 62: 58~76.

参考文献

- 景紫岩,李国斌,张亚军,王荣华,谢天峰,崔键,刘文强,代寒松. 2021. 滨里海盆地东缘盐构造及变形机制:物理模拟的启示. 地质学报,95(5):1459~1468.
- 李一赫,王殿举,于法浩,刘志强. 2020. 下刚果盆地白垩系盐构造 的形成演化. 吉林大学学报(地球科学版), 50(6): 1628 ~1638.
- 王殿举,李江海,程鹏,刘志强,于法浩.2019.构造倾斜角度对盐 构造形成的控制模式:以下刚果盆地为例.北京大学学报(自 然科学版),55(2):277~288.

Influence of passive terrestrial margin basin's land rise slopes on salt tectonic formation: insights from physical simulation experiments

WANG Dianju¹⁾, LI Yihe^{*2)}, YU Fahao³⁾, WANG Zhichen⁴⁾, LIU Zhiqiang⁵⁾

1) College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2) College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

3) Bohai Oilfield Research Institute of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China;

4) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

5) Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China

* Corresponding author: liyhearth@126.com

Abstract

The analysis of influencing factors and time-space evolution of salt tectonics in passive continental margin basins is highly regarded by the scientific community. Due to the abundant oil and gas resources in passive continental margin basins, the quality of seismic data has continuously improved. The interpretation results of high-precision seismic data show that the topography under the salt layer of passive continental margin basins often has large undulation characteristics. However, previous studies on the influence of basement tectonic morphology on the formation of salt tectonics has not reached a consensus, and in-depth research and discussion are still needed. Therefore, based on the previous research, this paper adopts the physical simulation method. Through the description and comparative analysis of the plane and section tectonic of the two groups of models, the research on the control effect of the continental rise slope on the salt rock deformation was carried out. The simulation results show that compared with the flat subsalt terrain, the existence of continental rise slope can enhance the flow capacity of salt rock, and promote the formation of more structural styles and larger-scale deformation of salt tectonics at the same time. The research in this paper can further enrich the theoretical understanding of salt tectonic deformation in passive continental margin basins and clarify the temporal and spatial evolution of salt tectonics and oil-gas.

Key words: passive continental margin basins; salt tectonic; land rise slopes; tectonic deformation; physical simulation