

非常规天然气

青海省木里地区天然气水合物构造成藏机制

——来自物理模拟实验的启示

吴 闯¹, 尹宏伟¹, 于常青², 皮金云², 吴珍云³, 汪 伟¹, 张佳星¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要:青海省木里地区, 2008年钻探岩心中首次钻取天然气水合物实物样品, 从而引起了地质学家们越来越多的关注。以木里地区聚乎更矿区为例, 结合分析该区域的钻井资料以及断裂分布特征, 发现天然气水合物的成藏分布存在一定的规律, 即该区天然气水合物主要集中于一条先存深大断层 F_1 的两侧, 而邻近区域在具有相似物化条件下却并未发现天然气水合物的存在。因此在前人研究基础上, 结合区域地质构造特征, 设计了3组物理模拟沙箱实验, 试图从构造的角度来阐述研究区天然气水合物可能的构造成藏机制及其影响因素。实验模拟结果表明, 先存断层和区域滑脱层对木里地区构造演化具有明显的控制作用。先存断层属于区域性深大断裂, 其在后期应力作用下再活化, 形成切割地层深部的运移通道; 而区域性滑脱层的分布则造成挤压应力作用下区域性薄皮滑脱断层的广泛发育, 这些断裂的根部主要集中到区域性滑脱层之上, 滑脱层之下地层则基本未被断裂切穿。对比分析物理模拟实验结果及研究区构造特征, 结合研究区天然气水合物的分布特征, 提出了木里地区天然气水合物可能的区域性“断裂运移、下生上储”成藏模式, 即深部热解气沿着深大先存断层运移至冻土层下有利位置富集成藏, 并在有利的物化条件下形成天然气水合物, 而在研究区其他区域, 深部运移通道不发育, 则在浅部地层未见天然气水合物的富集成藏。

关键词:天然气水合物; 先存断层; 滑脱层; 木里地区; 物理模拟

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2017)05-0771-14

引用格式: Wu Chuang, Yin Hongwei, Yu Changqing, *et al.* The structural accumulation mechanism of the natural gas hydrates in Muli region of Qinghai Province: Revelation from physical simulation experiment[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 771-784. [吴闯, 尹宏伟, 于常青, 等. 青海省木里地区天然气水合物构造成藏机制——来自物理模拟实验的启示[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 771-784.]

0 引言

天然气水合物(俗称可燃冰)广泛分布于海洋的沉积物和永久冻土区等低温高压的地区, 是一种新型的清洁能源。据保守统计, 天然气水合物的总碳储量是已知煤炭、石油和天然气等常规化石燃料的2倍^[1]。2008年9月, 在祁连山冻土区首次发现并

检测出天然气水合物实物样品, 同时也是全球范围内首次在中低纬度冻土区发现^[2]。在青藏高原发现天然气水合物, 对我国能源的持续性意义非凡, 也为未来经济的可持续发展添加新动力。

前人^[3-8]对这一地区天然气水合物做了大量的研究, 认为天然气水合物的形成主要包括气源、运移、富集成藏3个阶段。通过地球化学的手段, 前

收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2017-03-30.

基金项目: 中国地质调查水合物专项项目(编号: GZHL20110313); 国家自然科学基金项目(编号: 41272227; 41572187)联合资助.

作者简介: 吴闯(1991-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事构造分析及物理模拟研究. E-mail: wuchuang1991@hotmail.com.

通信作者: 尹宏伟(1971-), 男, 江西上饶人, 教授, 博士, 主要从事构造分析及模拟研究. E-mail: hwyin@nju.edu.cn.

人^[2,9-13]对天然气水合物的气源成分有了比较统一的认识,认为该地区的天然气水合物的气源主要来自热解气。富集成藏阶段的研究发现,天然气水合物成藏集中在冻土区下 100~400m 的区域。目前大家广泛认可的观点是,天然气被运移至冻土区富集,在有利的物化条件下成藏。由于该地区构造条件复杂,断裂广泛发育,导致目前对于木里地区天然气水合物富集成藏规律以及运移途径还没有清晰的认识,而天然气水合物富集成藏规律以及运移途径对于天然气水合物勘探具有重要的影响。

通过对研究区 80 多口钻井资料(表 1)以及断裂分布特征进行分析,发现了天然气水合物的成藏位置存在一定的规律,集中出现在研究区域内先存断层 F₁ 的两侧地层,而在其他断裂附近则未见天然气水合物的分布。因此,为探究研究区天然气水合物的构造成藏机制及其影响因素,本文试图采用物理模拟沙箱实验的手段,通过对比分析物理模拟实验结果及研究区构造特征,结合研究区天然气水合物的分布特征,以期提出一个木里地区天然气水合物构造成藏模式,为我国永久冻土区的天然气水合物的勘探提供借鉴。

1 区域地质背景

1.1 区域地层

木里地区地层区划属于祁连地层区中祁连分区。区域性沉积和出露的地层有古元古界、震旦系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、古近系、新近系和第四系(图 1)。研究区——聚乎更矿区,出露的地层主要有第四系、中侏罗统、上侏罗统以及上三叠统。上三叠统广泛出露于聚乎更矿区的南北部以及背斜的轴部,以陆相碎屑岩建造为主,夹有海相石灰岩薄层,与上覆侏罗系地层平行不整合接触;中侏罗统包括江仓组 and 木里组,木里组按岩性又分为上、下 2 段,上段为主含煤层段,下段则是辫状河沉积平原环境,沉积了 1 套中、粗粒碎屑岩,偶有薄煤层或者夹薄层炭质泥岩,底部发育有砾岩;江仓组按照岩性也可分为上、下 2 段,上段为纸片状页岩段,下段为湖泊环境、三角洲的灰色细粒砂岩、中粒砂岩、深灰色泥岩及粉砂岩;第四系遍布全区,为冰川、冰水堆积及现代冲积物^[7,14-16]。

研究区三叠系岩性为泥岩、粉砂岩夹薄煤层,灰绿色细—中粗粒砂岩,部分砂岩中具有大型交错层理,局部层段见有紫红色、灰绿色粉砂岩、砂岩 3 层,含有较丰富的植物、瓣鳃类等化石。三叠系的地层厚

度大于 1 850m,其中含有 2 层比较厚的泥岩(图 1),且泥岩和泥岩之间有砂岩夹层,泥岩和砂岩的接触面可能是一个潜在的滑脱面;再者,二叠系和三叠系之间的角度不整合界面也是良好的区域性滑脱面。

1.2 区域构造

发现天然气水合物的木里煤田聚乎更矿区,大地构造位置位于加里东构造运动期所形成的中祁连陆块西段,盆地区划上属于南祁连盆地的木里坳陷西段,区域构造演化与塔里木—中朝地块的解体与闭合紧密相关,同时又受其特提斯—喜马拉雅构造域和滨太平洋构造域形成和发展的影响。燕山和喜马拉雅 2 次构造运动近南北向的挤压作用,使得早期的地层发生褶皱变形,产生一系列的断裂和逆冲推覆构造,地层被不同程度地切割和剥蚀,逐渐形成了现今的南北分带、东西分段的构造格局^[17,18]。

研究区所在位置,在整个区域上呈现北西西条带状展布(图 2),断裂构造极其发育,构造线方向以北西—南东向为主,构造层次上,中—浅构造层次韧性剪切带和浅—表部构造层次脆性逆冲断层均有发育,宏观上则表现为由不同时期、不同层次断裂分割块体拼贴的格局,脆性逆冲断层分支、复合现象比较明显。北西西向、北北西向等脆性断裂十分发育,尤其是北西西向断裂最为发育^[15,17,19]。据调查的资料分析,研究区的走向断层主要分布在盆地的南北边缘,断层性质以断面北倾的逆断层为主,断层倾角比较陡,多以大于 45° 角度逆冲于新近纪—古近纪木里组煤系或上三叠统延长群之上,断层面弯曲,从断裂形成的次序上看北西西向断裂是研究区早期形成的脆性断层,而且绝大多数断裂具有后期活动的特征^[14,16]。木里地区聚乎更矿区整体构造形态为一复向斜(图 2,图 3),向斜轴向北西 50°~70°。组成聚乎更矿区的复向斜,有 2 个向斜和 1 个背斜组成,分别为北向斜、南向斜、中背斜。

2 实验设计

2.1 模拟材料

在物理模拟构建过程中,经常采用干燥的石英砂和不同黏度的聚酯硅胶来分别模拟上地壳脆性地层和滑脱层^[20-29]。本文中物理模拟实验同样采用这 2 种材料作为实验材料。实验所用干燥石英砂的粒径介于 50~80 目之间,内摩擦角约为 22°,聚合强度约为 200Pa,适合模拟地壳浅沉积地层的脆性变形行为。聚酯硅胶是一种牛顿流体,可以在较小的差异应力下变形,适合作为模拟自然界中滑脱面或者

表 1 木里地区聚乎更矿区钻孔信息
Table 1 Juhugeng mine drilling information table, Muli area

编号	钻井编号	钻孔位置	(钻孔深度/m)/(见天然气 水合物的深度/m)	编号	钻井编号	钻孔位置	(钻孔深度/m)/(见天然气 水合物的深度/m)
1	0-51	F ₁ 断层上盘	—/—	42	6-35	F ₁ 断层上盘	—/—
2	0-52	F ₁ 断层上盘	—/—	43	浅 5-2	F ₁ 断层下盘	47.48/—
3	浅 11-4	F ₁ 断层下盘	—/—	44	5-6	F ₁ 断层下盘	292.80/—
4	浅 11-3	F ₁ 断层下盘	—/—	45	5-10	F ₁ 断层下盘	584.33/—
5	DK13-11	F ₁ 断层下盘	—/—	46	5-11	F ₁ 断层下盘	637.84/—
6	浅 12-1	F ₁ 断层下盘	134.85/—	47	X5-28	F ₁ 断层下盘	801.83/—
7	12-42	F ₁ 断层下盘	406.15/—	48	5-7	F ₁ 断层下盘	129.60/—
8	DK-4	F ₁ 断层下盘	466.65/—	49	5-12	F ₁ 断层下盘	366.40/—
9	浅 12-3	F ₁ 断层下盘	94.8/—	50	5-13	F ₁ 断层下盘	506.38/—
10	DK-1	F ₁ 断层下盘	182.25/133.5~135.5 142.9~147.7、165.3~165.5 645.22/144.4~152.0、	51	5-8	F ₁ 断层下盘	643.30/—
11	DK-2	F ₁ 断层下盘	152.3~156.6、235.0~245.0、 275.0~291. 765.01/133.0~156.0、 231.0~240.0、392.0~396.0	52	浅 4-1	F ₁ 断层下盘	—/—
12	DK-3	F ₁ 断层下盘	765.01/133.0~156.0、 231.0~240.0、392.0~396.0	53	4-24	F ₁ 断层下盘	—/—
13	DK-7	F ₁ 断层下盘	—/—	54	4-32	F ₁ 断层下盘	—/—
14	DK-8	F ₁ 断层下盘	401.05	55	4-25	F ₁ 断层下盘	—/—
15	12-45	F ₁ 断层上盘	210	56	浅 4-5	F ₁ 断层下盘	—/—
16	DK12-13	F ₁ 断层上盘	—/—	57	4-26	F ₁ 断层下盘	—/—
17	11-46	F ₁ 断层下盘	—/—	58	浅 3-1	F ₁ 断层下盘	97.10/—
18	11-14	F ₁ 断层下盘	—/—	59	浅 3-2	F ₁ 断层下盘	142.60/—
19	DK-9	F ₁ 断层下盘	—/—	60	浅 3-4	F ₁ 断层下盘	127.80/—
20	DK11-14	F ₁ 断层上盘	—/—	61	DK4-23	F ₁ 断层下盘	—/—
21	DK10-18	F ₁ 断层下盘	—/—	62	3-2	F ₁ 断层下盘	448.80/—
22	10-43	F ₁ 断层下盘	—/—	63	3-3	F ₁ 断层下盘	758.80/—
23	10-39	F ₁ 断层下盘	—/—	64	浅 3-3	F ₁ 断层下盘	91.1/—
24	10-40	F ₁ 断层下盘	—/—	65	浅 3-5	F ₁ 断层下盘	108/—
25	DK10-16	F ₁ 断层上盘	—/—	66	3-4	F ₁ 断层下盘	403.10/—
26	DK10-17	F ₁ 断层上盘	—/—	67	3-5	F ₁ 断层下盘	548.14/—
27	9-38	F ₁ 断层下盘	204.55/—	68	3-23	F ₁ 断层下盘	654.40/—
28	9-13	F ₁ 断层下盘	434.85/—	69	L3-22	F ₁ 断层下盘	741.58/—
29	9-41	F ₁ 断层下盘	353.35/—	70	17	F ₁ 断层下盘	—/—
30	浅 8-1	F ₁ 断层下盘	—/—	71	8-38	F ₁ 断层下盘	—/—
31	8-36	F ₁ 断层下盘	—/—	72	18	F ₁ 断层下盘	—/—
32	8-48	F ₁ 断层下盘	—/—	73	19	F ₁ 断层下盘	—/—
33	8-37	F ₁ 断层下盘	—/—	74	8-59	F ₁ 断层下盘	—/—
34	DK8-19	F ₁ 断层上盘	—/—	75	21	F ₁ 断层下盘	—/—
35	DK-6	F ₁ 断层下盘	—/—	76	4-1	F ₁ 断层下盘	—/—
36	7-11	F ₁ 断层下盘	686.80/—	77	4-31	F ₁ 断层下盘	—/—
37	7-12	F ₁ 断层上盘	325.35/—	78	4-46	F ₁ 断层下盘	—/—
38	6-30	F ₁ 断层下盘	—/—	79	4-16	F ₁ 断层下盘	—/—
39	6-31	F ₁ 断层下盘	—/—	80	8-58	F ₁ 断层下盘	—/—
40	6-33	F ₁ 断层下盘	—/—	81	8-38	F ₁ 断层下盘	—/—
41	6-34	F ₁ 断层下盘	—/—				

注:—为未收集到的数据,表格数据来自青海煤炭地质 105 勘察队

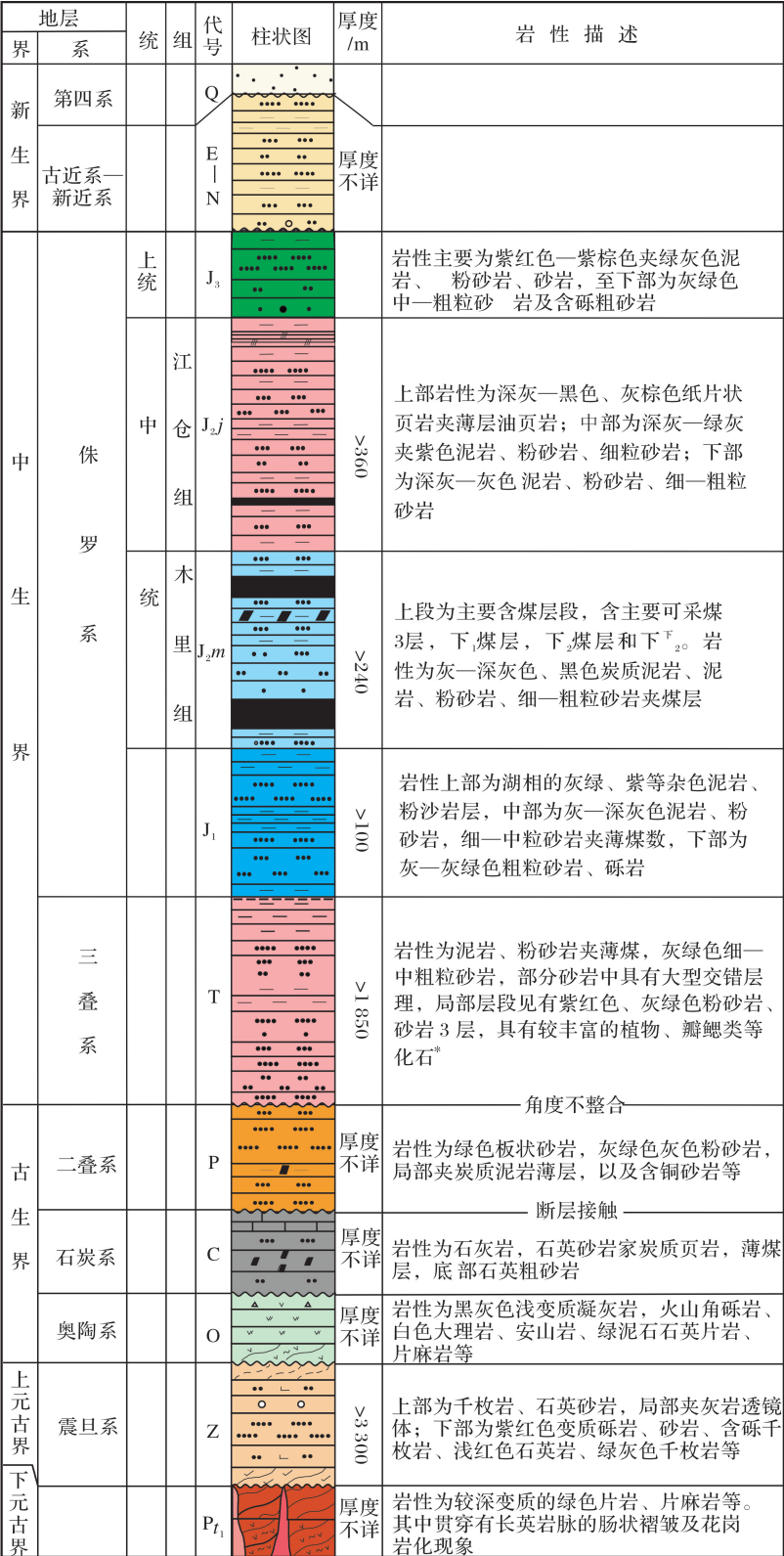


图 1 木里地区聚乎更矿区地层综合柱状图

Fig.1 Composite stratigraphic column of the Juhugeng mining area in Muliregion
* 滑脱层可能的层位:①泥岩和砂岩的接触面;②三叠系和二叠系之间的角度不整合界面

先存破裂面的材料^[30,31]。本文实验过程中滑脱层及预设的先存断层,均是采用聚酯硅胶来模拟。

2.2 模型的设计与操作

综合前人研究,木里地区聚乎更矿区的 F₁ 断层

为早期发育的断层,切割深度比较大且有后期再活化继续发育的迹象^[32]。结合区域地层信息,推测该地区三叠系中的泥岩与砂岩接触面以及二叠系与三叠系之间的角度不整合面可能是潜在的滑脱层。设计了物理模拟实验 3 组。根据考虑的影响因素不

同,每次实验模型考虑改变一个变量因素,以便于验证单一变量因素对实验的影响,保证实验结果的可信度。

3组实验模型均是在水平放置的沙箱中完成,每组实验中均涉及到聚酯硅胶模拟泥岩滑脱层。模

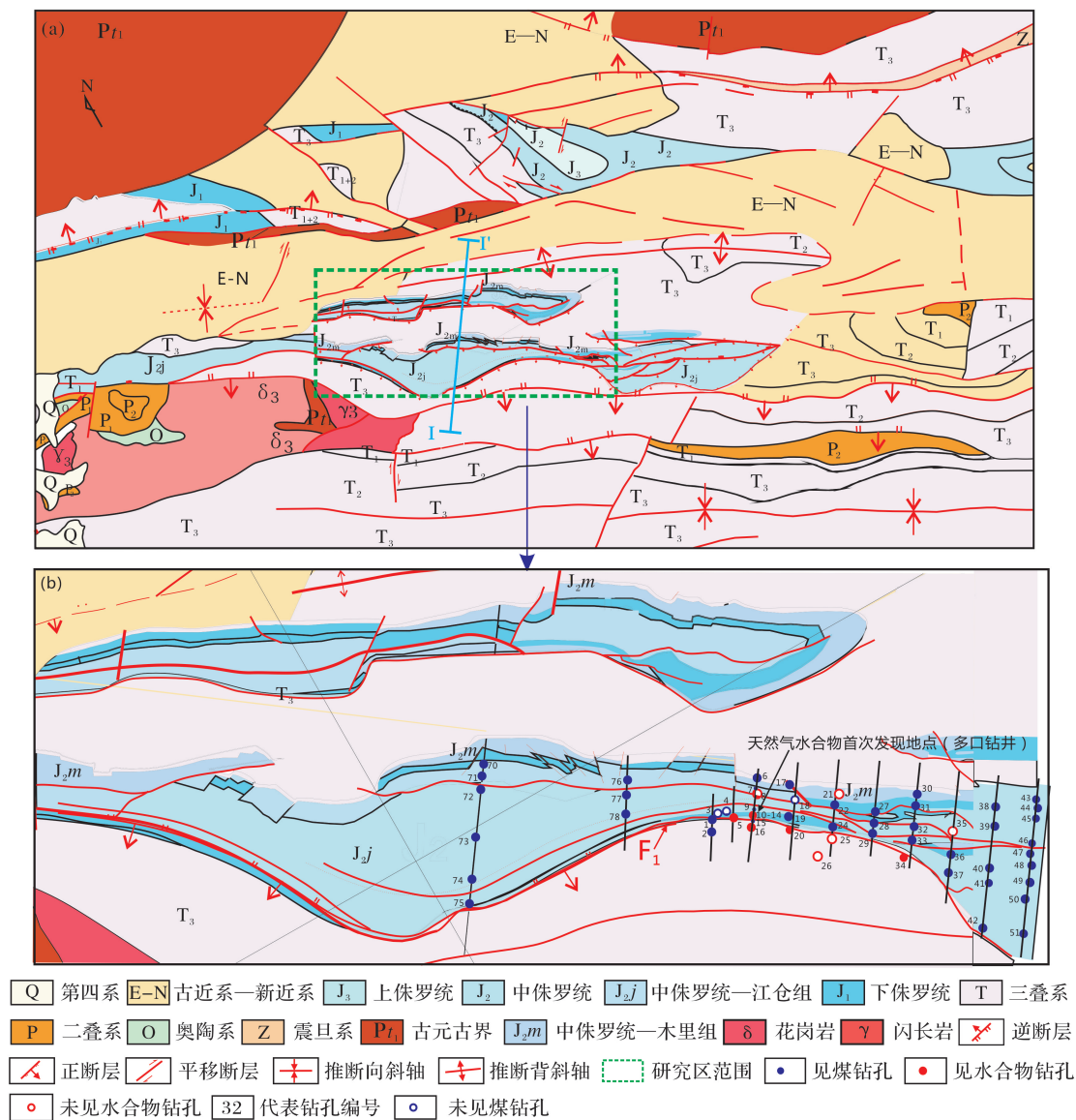


Fig.2 Regional geological map (a) and drill distribution map (b) of Juhugeng mining area

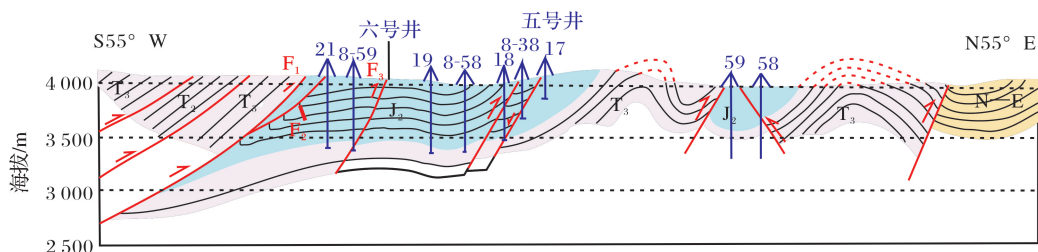


Fig.3 Geological section map of Juhugeng mining area

型Ⅰ的挤压缩短量为100mm,模型Ⅱ和Ⅲ的挤压缩短量为170mm,聚酯硅胶的厚度一致均为2mm,初始断层倾角设置均为45°。3组实验设置情况如图4和表2所示。

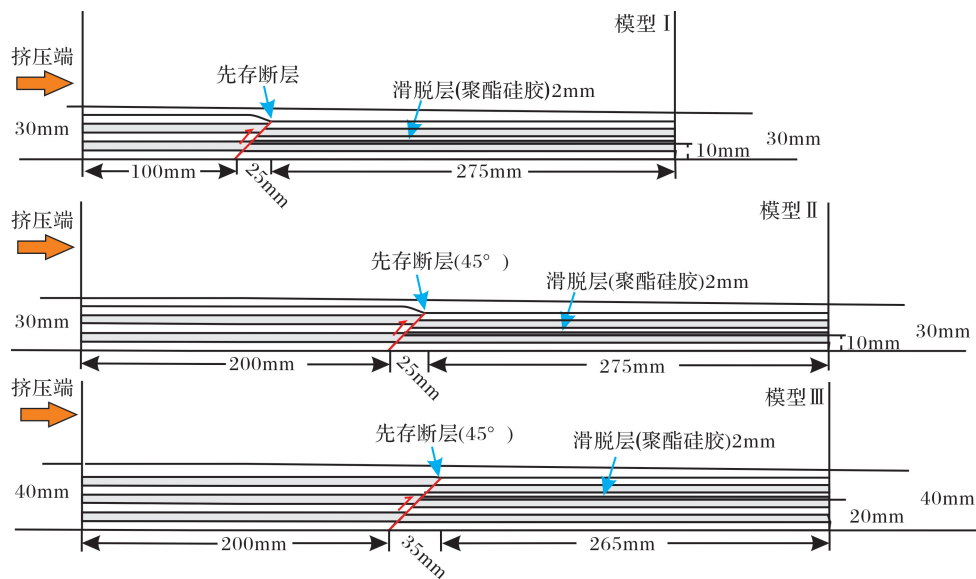


图4 模型Ⅰ—Ⅲ的设计
Fig.4 Design drawing of model I - Ⅲ

表2 模型设计参数
Table 2 Model design parameters

模型 编号	模型尺寸 (长×宽×高)/mm	滑脱层厚度 /mm	挤压缩短量 /mm	先存断层 /设置	滑脱层 位置
模型Ⅰ	400×310×30	2	100	45°/水平距离 25mm	先存断层前缘,距离底板 10mm
模型Ⅱ	500×310×30	2	170	45°/水平距离 25mm	先存断层前缘,距离底板 10mm
模型Ⅲ	500×310×40	2	170	45°/水平距离 35mm	先存断层前缘,距离底板 20mm

在整个实验过程中,侧面采取间隔5min拍摄照片,记录地层在模型的侧面的构造演化过程。实验结束后在模型顶面加1层足够厚度的石英砂做保护层,然后喷水将整个模型浸湿,最后每隔一定的距离对模型进行切割,观察其内部的构造形态。

2.3 模型比例化

本研究中模拟实验的设计符合比例化模型的相似性原理。模型和原型之间在几何学、运动学以及动力学3个方面对应成比例(表3)。物理模拟实验中,模型和原型的动力学相似表示为:

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^*$$

式中: σ^* 表示模型和原型之间应力的相似因子; ρ^* 表示密度的相似因子; g^* 和 l^* 分别表示重力加速度和长度(厚度)的相似因子。实验在正常重力场中进行,所以重力加速度的相似因子 g^* 为1。实验材料与实际岩石的密度相似因子 ρ^* 约为0.54,模型中1cm代表自然界1km,故长度相似因子 l^* 为 1×10^{-5} ,所以

模型与原型的应力相似因子 σ^* 为 5.4×10^{-6} 。

实验中3个模型的相似比参数完全一致。模型1的推覆距离为 $d_M = 100\text{mm}$,缩短率为25%,模型2和模型3的推覆距离为 $d_M = 170\text{mm}$,缩短率为34%。根据前人^[33]的研究成果,祁连山地区挤压量约有60~70km,主要构造变形时间在38~17Ma之间^[34-36],因此可推测研究区所在区域平均挤压速率约为 $2.85 \sim 3.33\text{mm/a}$ [约 $(0.9 \sim 1.05) \times 10^{-7}\text{mm/s}$]。在本文中,我们取研究区的挤压速率为 $1 \times 10^{-7}\text{mm/s}$,根据相似性原则^[37],依据表3中的相似关系,因此可得本文模型中推移速度 v_M 为 $4.5 \times 10^{-3}\text{mm/s}$ 。在我们的物理模拟实验过程中,由于马达的推移速率可设置到小数点后3位,因此,本文中所有的推移速率均统一设置为 0.004mm/s 。

3 实验结果

3.1 模型Ⅰ

整个实验阶段可以分为2个阶段,挤压端地层

褶皱隆升阶段以及先存断层 F₁ 活化再发育阶段。在先存断层 F₁ 活化再发育阶段,挤压量为 2.4mm 时,顶面开始出现第一条断层,造山带(挤压端)地层发生褶皱隆升,且沿着断层 F₁ 向上发育,F₁ 前缘地层变形很小[图 5(b)];挤压量为 40mm 时,F₁ 前缘

发育第一条断层 F₂,挤压端进一步抬升[图 5(c)];挤压量为 68mm 时,出现第二条断层 F₃,此时 F₂ 断距为 1.2cm,挤压端也在进一步发育隆升[图 5(d)];挤压量为 78mm 时,发育第三条断层 F₄,F₂ 的断距为 1.2cm,F₃ 的断距为 0.4cm,挤压端继续抬升;挤压

表 3 实验参数及模型相似比

物理参量	原型	模型	尺度相似比
重力加速度(g)/(m/s ²)	9.81	9.81	1
长度(l)/m	1 000	0.01	1×10^{-5}
石英砂(砂岩)密度(ρ)/(kg/m ³)	2 400	1 297	0.54
硅胶黏度(μ)/(Pa·s)	1×10^{19}	1.2×10^4	1.2×10^{-15}
应力(σ)/(Pa)	$\rho_N g_N l_N$	$\rho_M g_M l_M$	5.4×10^{-6}
应变(ϵ)/s ⁻¹	$(\rho_N g_N l_N)/\mu_N$	$(\rho_M g_M l_M)/\mu_M$	4.5×10^9
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	2.2×10^{-10}
挤压速率(v)/(mm/s)	$(\rho_N g_N (l_N)^2)/\mu_N$	$(\rho_M g_M (l_M)^2)/\mu_M$	4.5×10^4

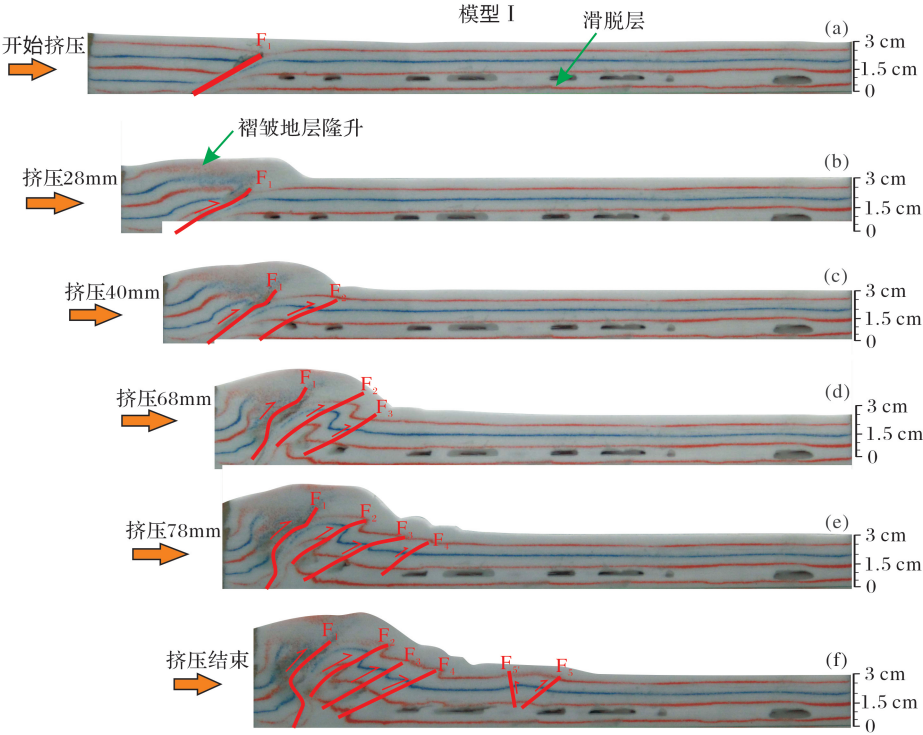


图 5 模型 I 侧面演化过程
Fig.5 Side evolution procedure chart of model I

结束时,挤压最前端又形成 2 条断层,F₅和反冲断层 F'₅,F₂—F'₅ 断距依次为 1.1cm、0.5cm、0.4cm、0.2cm及 0.4cm[图 5(f)]。挤压端地层褶皱隆升则是伴随着实验始终,在先存断层前缘和滑脱层上层产生一系列的断层 F₂—F'₅,整个实验过程中先存断层 F₁ 的形态发生了明显的变化,最终的形态为底部和顶部倾角比较大,断层中部角度小于两端。

在出现第一条断层 F₂ 之后,F₁ 断层前缘的地层受到来自挤压端的应力挤压,滑脱层上下均出现变形,产生一系列断层。本次实验的结果显示先存断层后期再活化过程中,结合泥岩滑脱层的作用确实可以在距离先存断层 F₁ 前缘附近滑脱层之上形成这么一系列的逆冲断层。
实验最终获得平行挤压方向的剖面(图 6)。

沙箱实验边界效应的存在,导致实际剖面面和侧面可能并不完全吻合。剖面结果表明,剖面面和侧面的断层总数一致,剖面面形成两组反冲断层;先存断层的变形也有差别,在剖面面中,先存断层 F_1 的倾角有减小的趋势,底部到顶部倾角逐渐减小;近先存断层的位置,滑脱层下部也发育多处小的断层,从实际的剖面面看,滑脱层下的断层并没有刺穿滑脱层向上继续发育。

3.2 模型 II

模型 II 是在模型 I 的基础上改进的,将先存断层距离挤压端的距离增加到 20cm,挤压的距离也随之增加到 170mm。模型 II 的整个实验过程可以分为 2 个阶段,挤压端褶皱隆升和后期挤压改造滑脱层上覆地层(图 7)。在挤压端地层褶皱隆升的阶段中,主要的形变发生在挤压端和先存断层 F_1 之间,

在挤压过程中,先存断层 F_1 只发生很小的形变,近挤压端地层形成箱状褶皱隆升;后期挤压改造滑脱层上覆地层的过程中,当挤压量为 120mm 时,在先存断层的前缘出现了一组断层,正向的 F_2 断层和反冲的 F'_2 断层,断层 F_1 的倾角变小,向上活化发育,断距增加,挤压端隆升减缓[图 7(c)]。挤压继续进行,当挤压量为 146mm 时,出现了一条新的断层 F_3 ,断层 F_2 和 F'_2 的断距增加,分别为 0.6cm 和 0.7cm,先存断层 F_1 继续发育,断距增加,挤压端隆升不明显[图 7(d)]。挤压结束时,在挤压方向最前缘出现断层 F_4 ,断层 F_3 、 F_2 和 F'_2 的断距分别为 0.5cm、0.6cm 和 1.2cm,断层 F_1 的倾角变小,断距增大[图 7(e)]。

模型 II 的剖面面图(图 8)显示挤压端附近发生强烈的隆升,而先存断层 F_1 倾角相较于初始状态变

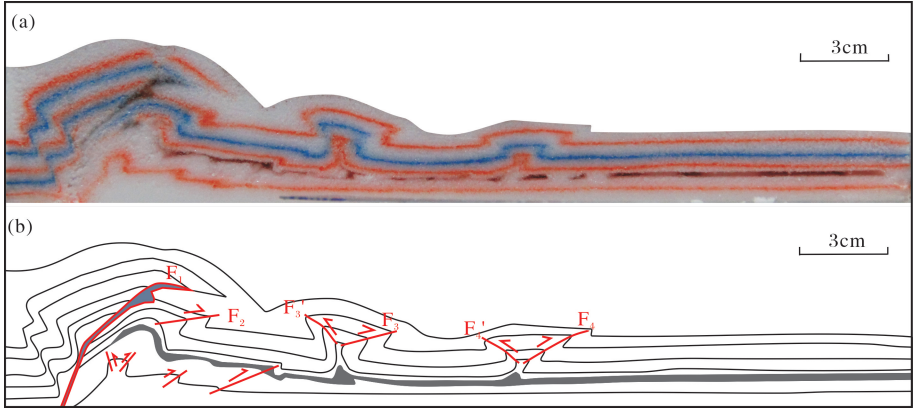


图 6 模型 I 实验典型剖面(a)及其构造解析(b)(剖面距离外侧挡板 21cm)
Fig.6 Experimental typical cutting profile (a) and its structural analytic graph (b) of model I

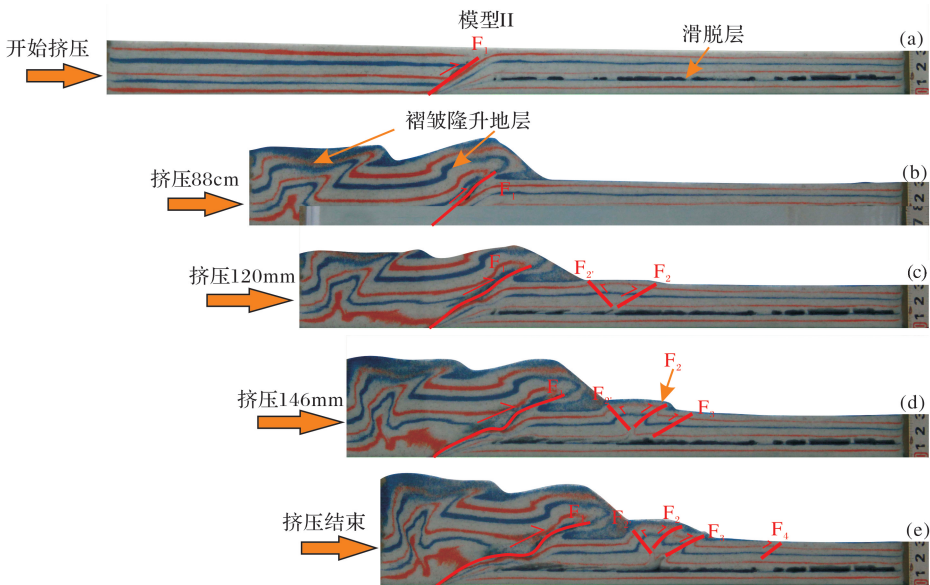


图 7 模型 II 侧面演化过程
Fig.7 Side evolution procedure chart of model II

小,断距增加。在 F_1 的前缘形成了一系列的断层,相较于侧面的过程演化图,剖面还多了一条反冲断层 F'_4 ,这一系列的断层的发育都是在滑脱层之

上,所有断层都没有刺穿滑脱层。滑脱层的下伏地层几乎不发生形变,挤压导致的变形绝大多数发生在近挤压端和滑脱层上覆地层。

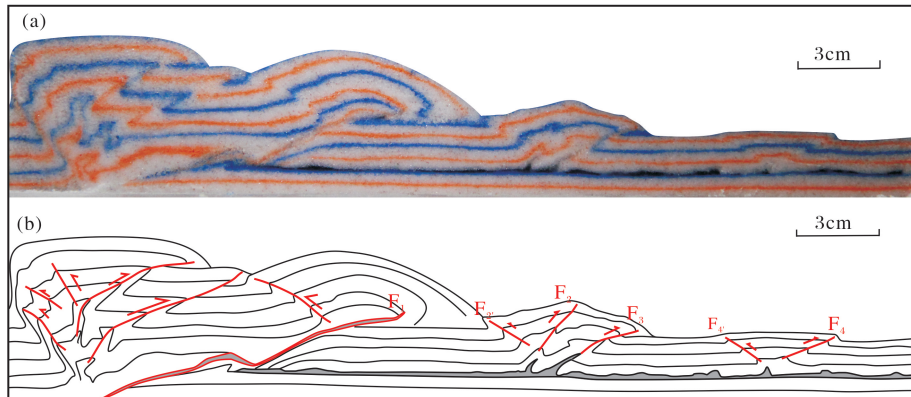


图8 模型Ⅱ实验典型剖面(a)及其构造解释(b)

Fig.8 Experimental typical cutting profile (a) and its structural analytic graph (b) of model II

3.3 模型Ⅲ

模型Ⅲ在设计长度上与模型Ⅱ保持一致,区别在于滑脱层下伏地层的厚度发生变化,厚度由 1cm 增加到 2cm (图 9)。实验过程也是主要分为 2 个阶段,挤压端地层隆升和滑脱层上覆地层发生构造变形。挤压端地层隆升阶段,主要的变形发生在近挤压端,这个阶段先存断层 F_1 再活化发育,断距有所增加,倾角变化不大,滑脱层上覆和下伏地层几乎不发生形变;滑脱层上覆地层构造变形阶段,当挤压量

为 105mm 时,此时先存断层 F_1 前缘产生一条正向断层 F_2 ,挤压端还在继续隆升, F_1 继续发育,断距增加,倾角变化很小。挤压量为 164mm 时,出现新的断层 F_3 和反向断层 F'_3 ,断层 F_2 的断距 1.1cm。此时 F_1 的倾角变小,断距增加,近挤压端地层也在进一步抬升。挤压结束时,并未再发育有新的断层,断层 F_2 、 F_3 、 F'_3 的断距分别为 1.2cm、0.5cm 及 0.4cm。先存断层 F_1 的倾角小于初始状态,断距增加,挤压端几乎没有继续抬升。

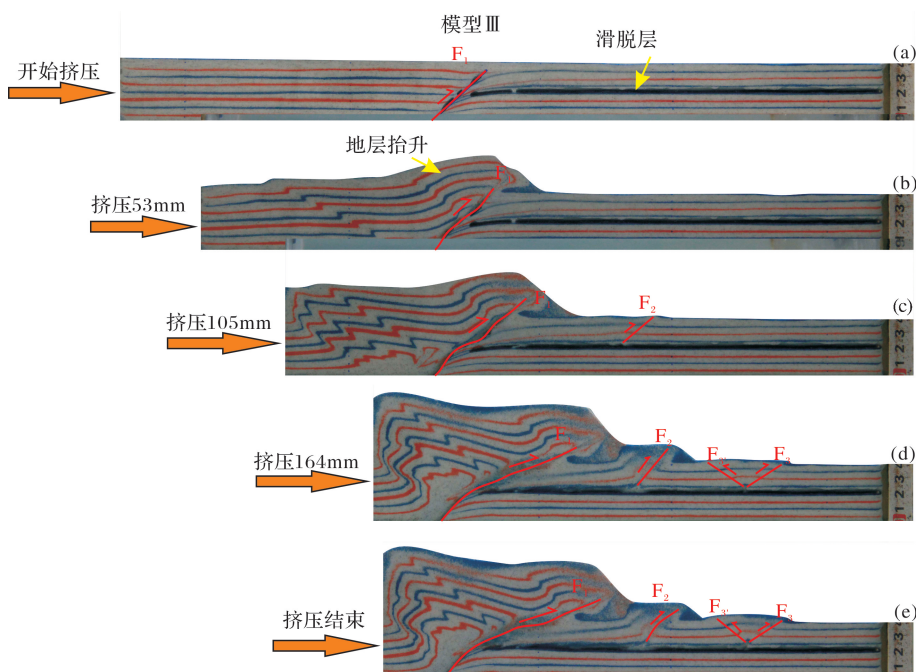


图9 模型Ⅲ侧面演化

Fig.9 Side evolution procedure chart of model III

模型Ⅲ的剖面(图 10)显示挤压端附近发生强烈的隆升,而先存断层 F_1 倾角相较于初始设置的 45° 变小了,断距增大。在 F_1 的前缘形成了一系列的断层,对比与模型Ⅰ和模型Ⅱ,模型Ⅲ中发育在滑脱层之上的逆冲断层数量有所减少。所有产生的逆冲断层均发育在滑脱层之上,滑脱层下伏地层基本未发生变形,挤压引起的变形主要是近挤压端地层隆升, F_1 活化再发育以及滑脱层之上的一系列新的

逆冲断层。

4 实验结果讨论

4.1 先存断层和滑脱层对区域构造演化的影响

在挤压作用下,先存断层的存在使得断层上盘地层沿断面向上发育,吸收了较大的区域应力,同时减少了先存断层前缘滑脱层下伏地层的变形程度(图11)。在近挤压端的位置,3组实验均发生地层

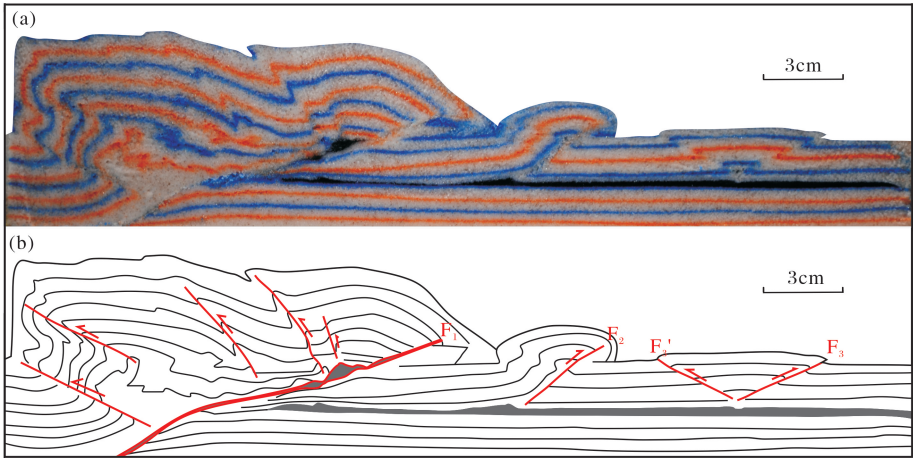


图 10 模型Ⅲ实验典型剖面(a)及其构造解析(b)

Fig.10 Experimental typical cutting profile (a) and its structural analytic graph (b) of model Ⅲ

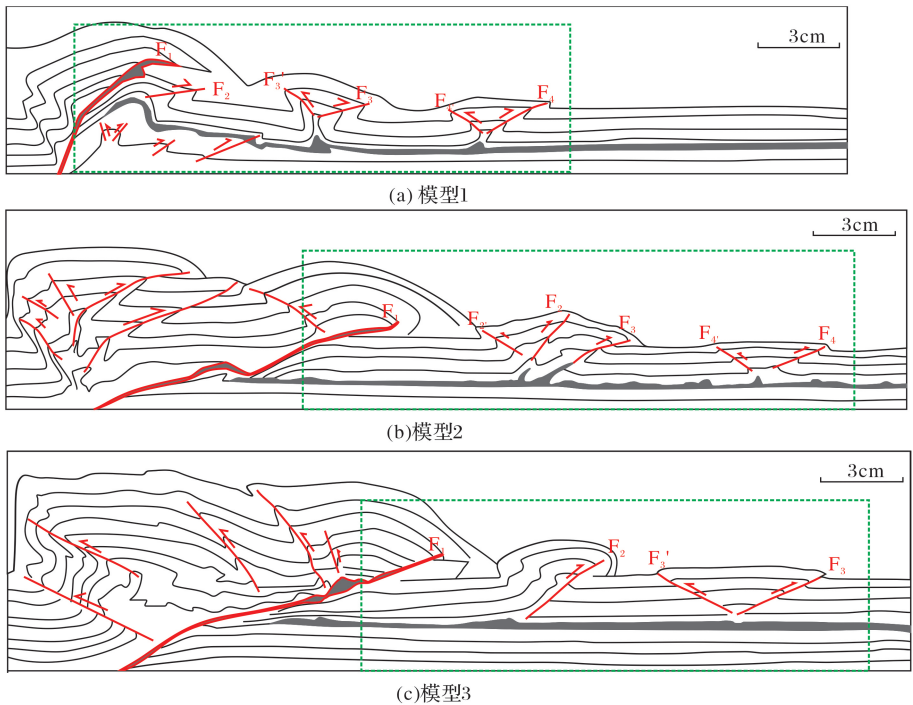


图 11 模型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ典型剖面对比

Fig.11 Typical cutting profile comparison diagram of model I , II and III

的箱状褶皱隆升,断层的断距明显增加,断层倾角由底部向近地表位置有减小的趋势。3 组先存断层和滑脱层组合的实验剖面均产生了复向斜构造样式的滑脱构造,区域滑脱层之上发育一系列的薄皮滑脱断层,这与研究区实际的地质剖面图相似。

对比模型Ⅰ和模型Ⅱ,模型Ⅰ先存断层距离挤

压端近,挤压完成后,靠近先存断层 F_1 的位置,滑脱层下伏地层发育逆冲叠瓦构造,距离先存断层较远的滑脱层下伏地层较为稳定,变形较小;而模型Ⅱ先存断层距挤压端较远,靠近挤压端发育高角度逆冲断层, F_1 断层发育断层转折褶皱,滑脱层上覆地层变形传播较远。模拟实验结果与研究区现今的构造形态具有一致性,说明提出的早期先存断层再活化与滑脱层构造模式是合理的。模型Ⅱ和模型Ⅲ的结果表明,滑脱层下伏地层在挤压过程中并不发生变形或者变形微弱,由于滑脱层的存在,上覆地层和下伏地层构造发生解耦现象,上覆地层传播较远,下伏地层变形主要集中在近挤压端。滑脱层使得地层在构造上发生解耦分层变形普遍存在于实际的滑脱构造中。据前人的研究,在三叠纪晚期木里煤田处于继承性断裂发育阶段,该地区断裂活动后期再活化^[32]。对比3组模型实验结果显示,先存断层和滑脱层的组合模式在挤压应力场中构造的发育具有明显的控制作用。根据实验结果和前人研究,我们提

出了先存断层和滑脱层组合模式,用于对木里地区天然气水合物构造成藏模式的探讨研究。

4.2 研究区天然气水合物可能的构造成藏机制

前人研究发现, F_1 断层附近发现的天然气水合物的气源主要是来自热解气^[2,9-13]。通过对研究区80多口钻井资料分析发现,在平面图上看天然气水合物只存在于 F_1 断层附近(表1,图2),相近地区断裂也十分发育,物理化学条件也满足天然气水合物形成的条件,但实际钻井岩心信息尚未发现有天然气水合物的存在(表1)。对比实际地质剖面,结合模拟实验的结果,我们认为影响聚乎更矿区天然气水合物保存与分布的关键因素是该地区断层性质与变形特征。研究区大部分断层是薄皮滑脱断层,这些断层的底部均归一到滑脱层之上,未向下切穿深部地层,不能成为深部热解气的运移通道,而先存断层 F_1 作为研究区的深大断层,接触到深部的烃源岩,可能是研究区气源向上运移的主要通道。据此我们提出木里地区天然气水合物可能的成藏模式(图12)。

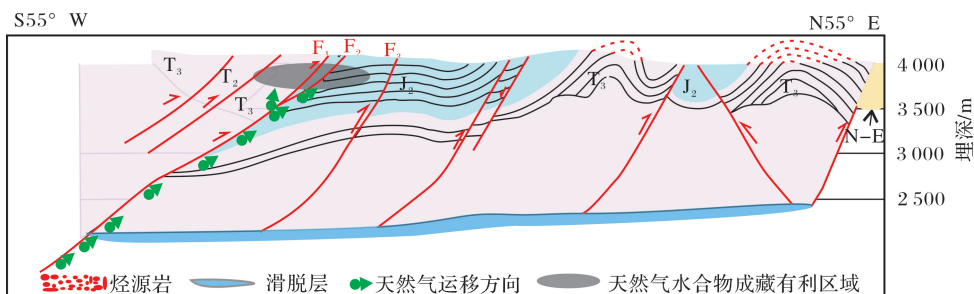


图12 木里地区聚乎更矿区天然气水合物成藏模式示意

Fig.12 Natural gas hydrate accumulation model of Juhugeng mining areain Muli region

先存断层 F_1 为区域深大断裂,切过深部的烃源岩, F_1 再活化过程中在其周围形成的破碎带是深部气源运移至近地表的有利通道,深部的热解气沿着断层及其破碎带向上运移,在冻土层下近地表有利位置富集,最终形成天然气水合物。

结合实际剖面和物理模拟实验结果,提出了木里地区天然气水合物可能的区域性“断裂运移、下生上储”成藏模式,即深部热解气沿着深大先存断层运移至冻土层下有利位置富集成藏,并在有利的物化条件下形成天然气水合物,而在研究区其他区域,深部运移通道不发育,则在浅部地层未见天然气水合物的富集成藏。滑脱层上下地层发生解耦合现象,下伏地层基本不发生形变,上覆地层中发育的一系列断层均发育在滑脱层之上,基本没有向下切穿滑脱层接触到深部烃源岩,也就不太可能成为气源的运移通道。滑脱

层所在区域地层主要为泥岩或者泥岩与砂岩互层,本身不具备良好运移通道的条件,所以热解气主要沿着先存断层的破碎带继续向上运移至近地表位置,在先存断层及其附近破碎带的位置富集,冻土层加以封盖,进而在适宜的条件下形成天然气水合物。这也能很好地解释为何在研究区的钻井资料中,只有在 F_1 断层附近的区域发现有天然气水合物,相邻区域物化条件接近,断层也十分发育却并未发现天然气水合物的存在。

5 结论

(1)物理模拟实验表明,先存断层和滑脱层的组合对研究区的构造发育具有明显的控制作用。先存断层的存在,使得断层上盘地层沿着断层面整体优先向上发育,先存断层再活化发育成一条深大断层,倾

角自下而上有明显减小的趋势;滑脱层的存在,使得先存断层逆冲前缘的变形主要集中在滑脱层上覆地层中,形成一系列断层底部归一至滑脱层的薄皮滑脱断层,而滑脱层下伏地层,除靠近先存断层处外,则几乎不发生地层变形。

(2)结合区域地质资料和物理模拟实验结果可推测,在先存断层再活化和滑脱层的共同作用下,研究区内的大量逆冲断层只是一系列切割深度小,且断层底部均归一到滑脱层之上的薄皮滑脱断层,未切穿滑脱层而接触到其下伏深部烃源岩,不能很好地成为天然气水合物的气源运移通道;而先存断层再活化形成的深大断层则成为研究区深部气源的运移通道,来自烃源岩的热解气沿着先存断层及其破碎带向上运移至近地表处的冻土以下合适的物化条件位置,属于比较典型的“断裂运移、下生上储”模式,形成天然气水合物。

参考文献(References)

- [1] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates: A potential energy source for the 21st Century[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(1-3): 14-31.
- [2] Huang Xia, Zhu Youhai, Wang Pingkan, *et al.* Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian Mountain permafrost[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1851-1856. [黄霞, 祝有海, 王平康, 等. 祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组分的特征和成因[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1851-1856.]
- [3] Zhang Jinhua, Wei Wei, Wei Xinghua, *et al.* Discussion about natural gas Hydrate Formation conditions and accumulation pattern in China's major permafrost regions[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(5): 74-78. [张金华, 魏伟, 魏兴华, 等. 我国主要冻土区天然气水合物形成条件及成藏模式探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(5): 74-78.]
- [4] Bu Qingtao, Hu Gaowei, Ye Yuguang, *et al.* Research progress in natural gas hydrate accumulation system[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, 3(6): 435-443. [卜庆涛, 胡高伟, 业渝光, 等. 天然气水合物成藏体系研究进展[J]. 新能源进展, 2015, 3(6): 435-443.]
- [5] Li Yonghong, Ji Congwei, Shao Longyi, *et al.* Characteristics and accumulating model of gas hydrates in the Muli Coalfield of Qinghai Province[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(2): 223-227. [李永红, 吉丛伟, 邵龙义, 等. 青海木里煤田天然气水合物特征及成藏模式[J]. 新疆地质, 2013, 31(2): 223-227.]
- [6] Zhai Gangyi, Lu Zhenquan, Lu Hailong, *et al.* Gas hydrate geological system in the Qilian Mountain permafrost[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(4): 79-92. [翟刚毅, 卢振权, 卢海龙, 等. 祁连山冻土区天然气水合物成矿系统[J]. 矿物岩石, 2014, 34(4): 79-92.]
- [7] Li Jing, Cao Daiyong, Dou Xuqian, *et al.* Accumulation model of natural gas hydrate in Muli area[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2012, 31(4): 484-488. [李靖, 曹代勇, 豆旭谦, 等. 木里地区天然气水合物成藏模式[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2012, 31(4): 484-488.]
- [8] Xiao Hongping, Wu Qingbai, Lin Changsong, *et al.* Preliminary discussion on the spacetime coupling of natural gas hydrate accumulation elements: A case study from Kunlun Pass permafrost regions, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(10): 1913-1923. [肖红平, 吴青柏, 林畅松, 等. 天然气水合物成藏要素及其时空耦合初探——以青藏高原昆仑山口多年冻土区为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(10): 1913-1923.]
- [9] Yang Zhibin, Sun Zhongjun, Li Guangzhi, *et al.* Near-surface soil geochemistry of Muli natural gas hydrate area, Tianjun County, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1883-1890. [杨志斌, 孙忠军, 李广之, 等. 青海省天峻县木里地区天然气水合物发现区浅表地球化学特征[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1883-1890.]
- [10] Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, *et al.* Study on genesis of gases from gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai[J]. Geoscience, 2010, 24(3): 581-588. [卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物的气体成因研究[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 581-588.]
- [11] Xing Xuewen, Liu Song, Zhou Hongying, *et al.* Geochemical behaviors of shallow soil in Muli permafrost and their significance as gas hydrate indicators[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 159-166. [邢学文, 刘松, 周红英, 等. 木里冻土带天然气水合物赋存区浅层土壤地球化学特征及指示意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 159-166.]
- [12] Gong Jianming, Zhang Jian, Chen Xiaohui, *et al.* Hydrate accumulation conditions in Qilian Mountain and Wuli permafrost region, Tibet Plateau[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(2): 1-6. [龚建明, 张剑, 陈小慧, 等. 青藏高原祁连山与乌丽冻土区水合物成藏条件研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(2): 1-6.]
- [13] Cheng Qingsong, Gong Jianming, Zhang Min, *et al.* Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Qilian Mountain permafrost and gas sources for gas hydrate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(5): 139-147. [程青松, 龚建明, 张敏, 等. 祁连山冻土区烃源岩地球化学特征及天然气水合物气源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 139-147.]
- [14] Wen Huaijun, Shao Longyi, Li Yonghong, *et al.* Structure and stratigraphy of the Juhugeng coal district at Muli, Tianjun County, Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1823-1828. [文怀军, 邵龙义, 李永红, 等. 青海省天峻县木里煤田聚乎更矿区构造轮廓和地层格架[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1823-1828.]
- [15] Xu Mingcai, Liu Jianxun, Chai Mingtao, *et al.* An experimental study of natural gas hydrates in the Muli region, Qinghai Province

- by the seismic reflection method[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(6): 1180-1187. [徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海木里地区天然气水合物反射地震试验研究[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(6): 1180-1187.]
- [16] Tie Zhanyuan, Li Yuankui, Teng Xianqing, *et al.* Advice for arrangement of gas hydrate and oil & gas exploration[J]. *Qinghai Petroleum*, 2014, 32(2): 1-7. [铁占元, 李元奎, 滕贤清, 等. 木里地区天然气水合物及油气勘探部署建议[J]. *青海石油*, 2014, 32(2): 1-7.]
- [17] Sun Junfei, Sun Hongbo, Zhang Fade, *et al.* Structural zonality and coal hosting pattern in Muri Coalfield, Qinghai[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(8): 9-11. [孙军飞, 孙红波, 张发德, 等. 青海木里煤田构造分带性特点及赋煤规律[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(8): 9-11.]
- [18] Feng Yimin, *et al.* Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: History, presence and prospect[J]. *Advance in Earth Science*, 1997, 12(4): 5-12. [冯益民. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 5-12.]
- [19] Sun Hongbo, Sun Junfei, Zhang Fade, *et al.* Structural framework and coal basin tectonic evolution in Muri Coalfield, Qinghai[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(12): 34-37. [孙红波, 孙军飞, 张发德, 等. 青海木里煤田构造格局与煤盆地构造演化[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(12): 34-37.]
- [20] Wu Zhenyun, Yin Hongwei, Wang Xin, *et al.* The structural features and formation mechanism of exposed salt diapirs in the front of fold-thrust belt, western Kuqa Depression[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2015, 51(3): 612-625. [吴珍云, 尹宏伟, 汪新, 等. 库车坳陷西段褶皱-冲断带前缘盐底辟构造特征及形成机制[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2015, 51(3): 612-625.]
- [21] Wu Zhenyun, Yin Hongwei, Wang Xin, *et al.* Simulation of salt structure formation and evaluation of its geological significance to soil-gas accumulation: A case study of the Sudanese Red Sea rift basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(5): 879-889. [吴珍云, 尹宏伟, 汪新, 等. 裂谷盆地盐构造形成演化及油气成藏地质意义——以苏丹红海裂谷盆地为例[J]. *石油学报*, 2014, 35(5): 879-889.]
- [22] Duerto L, McClay K. The role of syntectonic sedimentation in the evolution of doubly vergent thrust wedges and foreland folds[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1051-1069.
- [23] Dooley T P, Jackson M P A, Hudec M R. Initiation and growth of salt-based thrust belts on passive margins: Results from physical models[J]. *Basin Research*, 2007, 19(1): 165-177.
- [24] Bonini M. Deformation patterns and structural vergence in brittle-ductile thrust wedges: An additional analogue modelling perspective[J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(1): 141-158.
- [25] Fort X, Brun J, Chauvel F. Salt tectonics on the Angolan margin, synsedimentary deformation processes[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(11): 1523-1544.
- [26] Costa E, Vendeville B C. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(11): 1729-1739.
- [27] Cotton J T, Koyi H A. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments: Application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 351-363.
- [28] Ge H, Jackson M P A, Vendeville B C. Kinematics and Dynamics of Salt Tectonics Driven by Progradation[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(3): 398-423.
- [29] Jackson M P A, Vendeville B C, Schultz Ela D D. Salt-related structures in the gulf of Mexico: A field guide for geophysicists[J]. *Leading Edge*, 1994, 13(8): 837-842.
- [30] Yin Hongwei, Wang Zhe, Wang Xin, *et al.* Characteristics and mechanics of cenozoic salt-related structures in Kuqa foreland basins: Insights from physical modeling and discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2): 308-317. [尹宏伟, 王哲, 汪新, 等. 库车前陆盆地新生代盐构造特征及形成机制: 物理模拟和讨论[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(2): 308-317.]
- [31] Marques F O, Nogueira C R. Normal fault inversion by orthogonal compression: Sandbox experiments with weak faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(6): 761-766.
- [32] Chen Jianzhou, Xu Weicheng, Xie Hailin, *et al.* Muli Coalfield coal accumulation[J]. *Journal of Qinghai University: Nature Science*, 2010, 28(5): 42-48. [陈建洲, 徐维成, 谢海林, 等. 木里煤田煤层聚积规律[J]. *青海大学学报: 自然科学版*, 2010, 28(5): 42-48.]
- [33] Duan Zhiming. Cenozoic Geological Evolution of Tanggula Mountain in the Hinterland of Qinghai-Tibetan Plateau and It Respond in Collision Effect of India-Asia Plate[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005: 68-70. [段志明. 青藏高原腹地唐古拉山新生代地质事件及其对印—亚板块碰撞作用的响应[D]. 成都: 成都理工大学, 2005: 68-70.]
- [34] Xie Huiwen, Wang Chunyang, Wang Zhibin, *et al.* The effect of spatial distribution of basement detachment on deformation in a fold and thrust belt: An analogue modeling approach an example of west Kunlun fold-and-thrust belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(4): 701-710. [谢会文, 王春阳, 王智斌, 等. 基底滑脱层分布对褶皱冲断带变形影响的物理模拟研究——以塔西南西昆仑山前褶皱冲断带为例[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(4): 701-710.]
- [35] Li Fenqi, Wang Chengshan, Zhu Lidong, *et al.* The basin-range coupling under the regional compressional regimes: Examples from the Hexi Corridor Basin and North Qilian Mountains[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2002, 22(4): 17-25. [李奋其, 王成善, 朱利东, 等. 区域挤压体制下盆—山耦合关系探讨——以河西走廊和北祁连山为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 2002, 22(4): 17-25.]
- [36] Wang Chengshan, Zhu Lidong, Liu Zhifei, *et al.* Tectonic and sedimentary evolution of basins in the north of Qinghai-Tibet plateau and northward growing process of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Ad-*

vance in Earth Sciences,2004,19(3):373-381.[王成善,朱利东,刘志飞.青藏高原北部盆地构造沉积演化与高原向北生长过程[J].地球科学进展,2004,19(3):373-381.]

[37] Hubbert M K.Theory of scale models as applied to the study of geologic structures[J].Geological Society of America Bulletin,1937,48(10):1459-1520.

**The structural accumulation mechanism of the natural gas hydrates
in Muli region of Qinghai Province:Revelation from physical simulation experiment**

Wu Chuang¹, Yin Hong-wei¹, Yu Chang-qing², Pi Jing-yun², Wu Zhen-yun³, Wang Wei¹, Zhang Jia-xing¹
(1.School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2.Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China;
3.Jiangsu Earthquake Administration, Nanjing 210014, China)

Abstract: The Muli region of Qinghai Province, where natural gas hydrates were drilled and discovered in 2008, has attracted more and more attention. Taking the Juhugeng mining area as an example, drilling data and fracture distribution characteristics of the Muli region show that the distribution of natural gas hydrates accumulation has certain regularity. Natural gas hydrates are mostly distributed near a pre-existing major regional fault F₁. While in the adjacent areas, no natural gas hydrates formed although these areas have similar physical and chemical condition. Based on the previous studies, combining with regional geologic and structural characteristics, we designed and ran three groups of physical sandbox experiments. We try to illustrate a possible structural mechanism and influencing factors of the accumulation pattern of natural gas hydrates in our research region. Modeling results show that the combination of pre-existing fault and detachment layer has a controlling role on structural deformation of the Muli region. Pre-existing fault is a major regional fault, which reactivates under the later regional shortening, and forms a migration channel by cutting strata from the deep strata to the shallow strata. The distribution of the regional detachment layer causes the wide development of the thin-skinned faults under the later regional shortening. These fault roots mainly located at the regional detachment layer, and nearly no faults cut through the strata under the detachment layer. By analyzing physical experimental results and the structural patterns, and the distribution characteristics of the natural gas hydrates in the research area together, we propose a possible structural accumulation pattern of natural gas hydrates in the Muli region. In this area, the natural pyrolysis gas, migrating along the fractures caused by the major regional pre-existing fault, generated in the deep strata and accumulated in the shallow strata where the favorable physical and chemical conditions can be provided. While in the other places far away from the major regional fault in the research area, no natural gas hydrates can be accumulated in the shallow strata, because the deep migration channel developed unconditionally due to the lack of major regional fault rooting to the gas source region in the deep strata.

Key words: Natural gas hydrate; Pre-existing fault; Detachment layer; Muli area; Physical simulation