

北部湾盆地迈陈凹陷东部断裂系统成因 演化机制的构造物理模拟

李 伟¹, 刘 超¹, 张江涛², 段佳佳³, 陈 伟⁴, 陈兴鹏¹, 李春锐¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452;
3. 中联煤层气有限责任公司, 山西太原 030000; 4. 中国石化江苏油田地质科学研究院, 江苏扬州 225012)

摘要:受多期次构造应力场叠加转变的影响,迈陈凹陷东部断裂发育具有明显的阶段性,平面上断裂走向在古新统和始新统以 NE 向为主,渐新统转变为 EW 和 NEE 向,剖面上以 T₄ 反射层(涠洲组底)为界可以划分为上下两套断裂系统,上下两套断裂系统继承与改造并存。针对这一问题,在地震、钻井岩心和区域地质背景资料分析解释的基础上,对迈陈凹陷东部断裂系统的发育演化进行构造物理模拟实验正演分析。实验结果表明:迈陈凹陷东部在古新世—始新世主要受控于 NW 向伸展应力场,以 NE 向断裂发育为主;晚始新世在 NW 向拉张的同时叠加了右旋剪切作用,近 EW 向断裂开始发育,部分早期发育的 NE 向断裂继承性活动。

关键词:构造物理模拟; 断裂发育演化; 构造应力场; 古近纪; 迈陈凹陷东部

中图分类号:P 548 **文献标志码:**A

引用格式:李伟,刘超,张江涛,等. 北部湾盆地迈陈凹陷东部断裂系统成因演化机制的构造物理模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):38-46.

LI Wei, LIU Chao, ZHANG Jiangtao, et al. Structure physical modeling experiment of evolutionary mechanism about fault system in eastern area of Maichen sag, Beibu-gulf Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3):38-46.

Structure physical modeling experiment of evolutionary mechanism about fault system in eastern area of Maichen sag, Beibu-gulf Basin

LI Wei¹, LIU Chao¹, ZHANG Jiangtao¹, DUAN Jiajia¹, CHEN Wei², CHEN Xingpeng¹, LI Chunrui¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. China National Offshore Oil Corporation Limited-Tianjin, Tianjin 300452, China;

3. China United Coalbed Methane Corporation Limited, Taiyuan 030000, China;

4. Geological Research Institute of Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Yangzhou 225012, China)

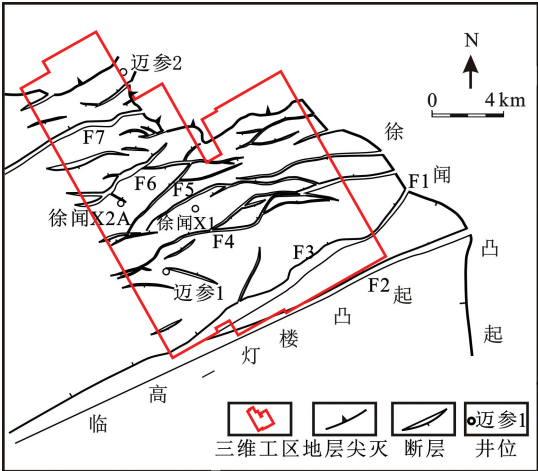
Abstract: Influenced by the superimposition and transformation of multiple phases of tectonic stress field, the development of the eastern fault system displays apparent periodicity in Maichen sag. On the plane view, the fault strike was mainly NE trending in Paleocene and Eocene, and changed to EW and NEE in Oligocene. On the seismic section, taking T₄ reflecting surface (the bottom boundary of Weizhou Formation) as a boundary, the fault system can be divided into the upper system and the lower system, between which inheritance and transformation coexist. Aiming at this problem, based on the analysis of seismic data, drilling cores, and regional geological background, structure physical simulations were performed to model the eastern fault system's evolution in Maichen sag. The results show that the eastern area of Maichen sag was mainly controlled by the NW tensional stress from Paleocene to Middle Eocene, and the fault strike was mainly NE trending. In the late Eocene, dextral shearing was superimposed on the NW tensional stress, which contributed to the development of the EW-tren-

收稿日期:2014-12-15

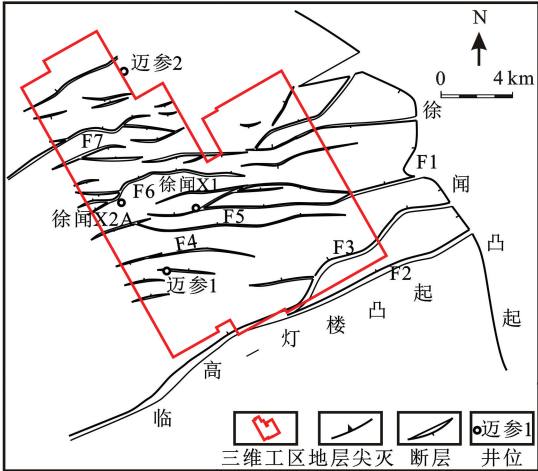
基金项目:中央高校基本科研业务费专项(27R1101053A);教育部高等学校博士学科点新教师基金项目(K0901045A);国家油气重大专项课题(2011ZX05023-006-05)

作者简介:李伟(1978-),男,副教授,博士,主要从事构造地质学、油气成藏等方面的教学及科研工作。E-mail:liwei780923@163.com。

率分析发现(图 4,表 1):迈陈凹陷东部涪三段沉积前发育的断裂多为切穿到基底的深层断裂,倾向均为北倾,涪三段沉积后除控制构造带的灯楼角-迈 1、迈 2、迈 3、迈 4、迈 5 等主要断层继承性活动外,发育的断裂大部分为浅层断裂,且大多没有切穿到流二段,断裂的倾向既有北倾也有南倾,表明涪三段沉积期以后研究区的构造应力场发生了叠加改造。



(a)流沙港组断裂系统



(b)涪洲组断裂系统

F1:徐闻断裂 F2:灯楼角断裂 F3:迈1断裂
F4:迈2断裂 F5:迈3断裂 F6:迈4断裂 F7:迈5断裂

图 3 迈陈凹陷东部断裂系统

Fig. 3 Fault system of eastern area of Maichen sag

表 1 A-B 剖面各地质阶段的伸展量和伸展率统计

Table 1 Statistics of extension content and extension rate of section A-B in different periods

地质时期	剖面长度/km	伸展量/km	伸展率/%
长流组沉积前	70.74		
流三段沉积前	74.31	3.56	5.04
流二段沉积前	77.34	3.04	4.09
涪三段沉积前	80.94	3.59	4.65
涪二段沉积前	83.96	3.02	3.73
下洋组沉积前	89.18	5.22	6.21
现今	93.22	4.04	4.53

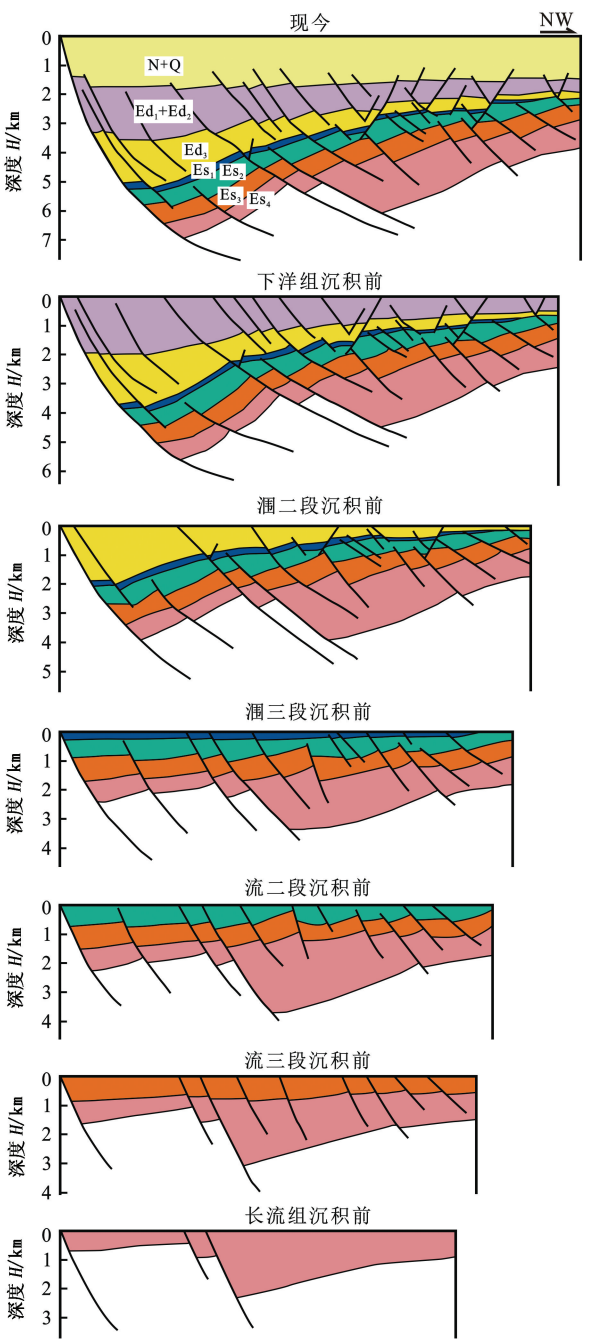


图 4 迈陈凹陷东部构造发育剖面图(A-B 剖面)

Fig. 4 Structure development section of eastern area of Maichen sag (section A-B)

2 实验模型设计与实验材料选择

2.1 实验模型设计

在上述分析的基础上,进一步结合前人对迈陈凹陷东部的相关研究成果^[3,7,18],确定构造物理模拟实验的相似系数,设计实验模型,明确模型的边界和基底条件、实验材料。

迈陈凹陷东部长和宽约为 46.57 km 和 23.28 km,本文中将实验中模型尺寸设置为 46 cm 和 23

cm(图5),相似系数为 1.01×10^{-5} 。

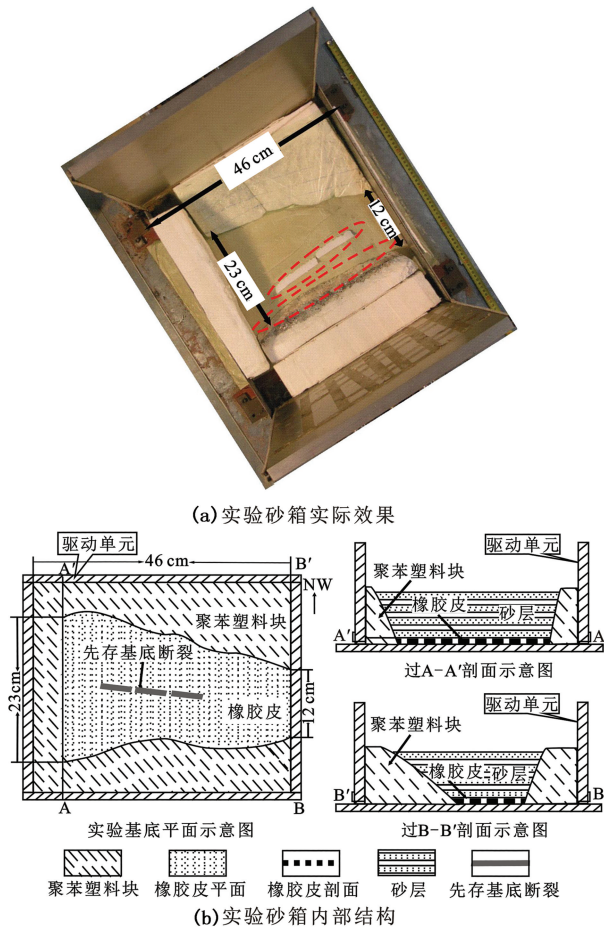


图5 构造物理模拟实验砂箱及其内部结构示意图

Fig.5 Experimental sandbox schematic and its internal structure

实验模型的边界和基底条件充分考虑新生代沉积前中生代的构造特征:在南侧设置聚苯塑料模拟中生代活动的灯楼角-迈1断层及临高灯楼凸起;北侧设置聚苯塑料模拟流沙港低凸起;东侧设置固定铁板模拟徐闻断层及徐闻凸起;西侧设置活动聚苯塑料,提供位移空间,代表迈陈凹陷西部沉积区;模型底部铺设延展性较好的橡胶皮,通过橡胶皮的引张带动下覆砂层实现伸展作用,在实验模型的基底上设置细小聚苯塑料条模拟先存断裂代表迈2断层(图5)。

2.2 实验材料的选择

前人研究表明,松散石英砂的变形符合库仑破坏准则,已被证明是模拟上地壳或脆性材料构造变形的理想材料^[10-12,20],因此选用松散的石英砂作为实验材料来模拟迈陈凹陷东部古近纪的构造演化过程。

迈陈凹陷东部古近系构造层可以划分为长流组(E_1ch)、流三段(E_2l_3)、流二段(E_2l_2)、涠洲组(E_3w)4个亚层,根据各层系的岩性特征,分别选用

不同粒度的石英砂以更接近实际的地层组合规律:长流组(E_1ch)为一套棕红、紫红色泥岩与棕红色砂岩、砂砾岩不等厚互层,实验中选用粒度为 $250 \sim 380 \mu m$ 的松散石英砂作为实验材料;流三段(E_2l_3)为砂泥互层,实验材料选用粒度为 $150 \sim 180 \mu m$ 的松散石英砂;流二段(E_2l_2)为一整套泥岩,实验材料选取粒度大于 $120 \mu m$ 的松散石英砂;涠洲组(E_3w)为砂砾岩与泥岩互层,部分位置有火山岩发育,实验材料选用粒度为 $180 \sim 250 \mu m$ 的松散石英砂。为了使实验现象更加明显,对不同地层的石英砂进行了染色。

此外,为了与实际地质特征更加吻合,根据钻井和地震资料统计的地层实际厚度对砂层的铺设厚度进行设置,长流组区域上大部分厚度约为 $1000 m$,实验中地层厚度设置为 $1.4 cm$;流三段区域上大部分厚度约为 $600 m$,实验中地层厚度设置为 $0.9 cm$;流二段区域上大部分厚度约为 $500 m$,实验中地层厚度设置为 $0.8 cm$;涠洲组区域上大部分厚度约为 $2000 m$,实验中地层厚度设置为 $3 cm$,地层厚度的相似系数为 1.4×10^{-5} 。

3 实验过程与结果

3.1 实验过程

参考断裂发育演化特征,结合控制盆地演化的区域动力学背景^[1,2,9,20],本次实验设计分为两个阶段进行:第一阶段模拟长流组和流沙港组沉积期,施加NW向拉张应力;第二阶段模拟涠洲组沉积期,施加NW向拉张应力和右旋剪切应力。实验装置中通过砂箱两侧铁板的向外移动实现纯拉张力的施加,通过两侧铁板的旋转实现右旋剪切作用。

实验过程中每期应力的加载时间对应于不同演化阶段的地质年限,但由于构造运动大多为幕式运动,因此在实验过程中应对受力时间进行适当的调整,本次实验设计第一阶段受力时间为 $5 min$,第二阶段受力时间为 $10 min$ 。

实验过程中施加应力值通过伸展量、伸展率的计算得到,通过设置驱动单元的位移量反映受力大小,通过对过徐闻X1井的NW向平衡剖面进行分析,确定长流组、流三段、流二段的NW向总伸展量为 $10.19 km$,涠洲组的位移量为 $8.24 km$,依据实验模型确定的相似系数,将第一阶段的位移量设置为 $10.2 cm$,第二阶段的位移量设置为 $8.2 cm$ (表1)。

3.2 实验结果

实验第一阶段(模拟长流组—流沙港组流二段

沉积期)施加 NW 向的拉张力。砂箱受力发生伸展的初始阶段(4 cm),控凹断裂(徐闻断层、灯楼角断层、灯楼角-迈 1 断层)最先活动,控制了凹陷的边界形态;随着伸展作用的继续(8 cm),控凹断裂强烈活动,凹陷内部迈 2 断层开始活动,迈 3 断层也开始发育;伸展作用末期(10.2 cm)各主要断裂持续活动,次级断裂逐渐增多,断裂整体上以 NE 向为主,断裂倾向以 NW 向为主,迈陈凹陷流沙港组沉积期构造格局基本形成(图 6)。

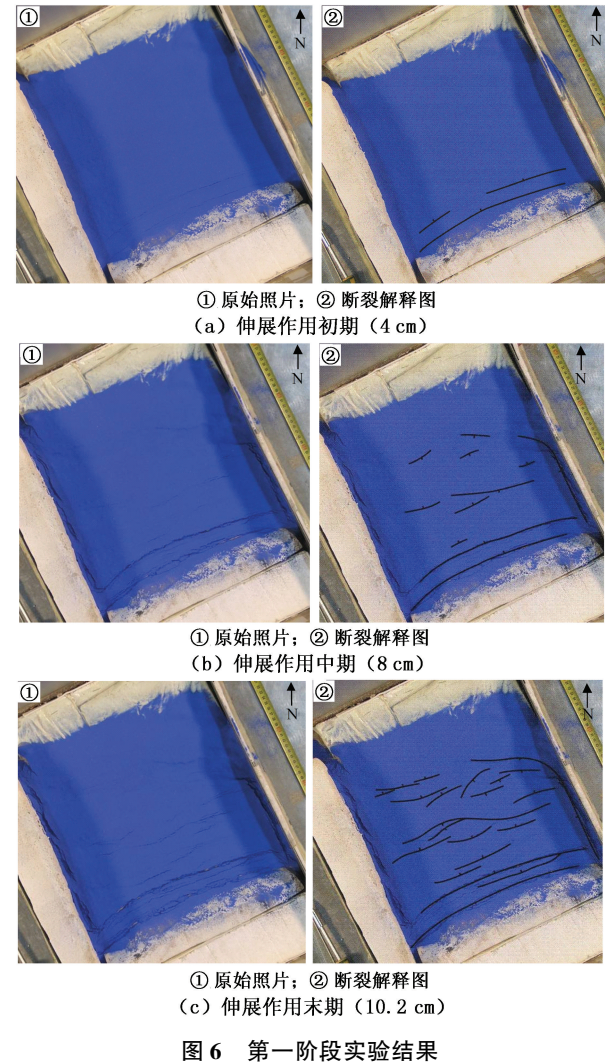
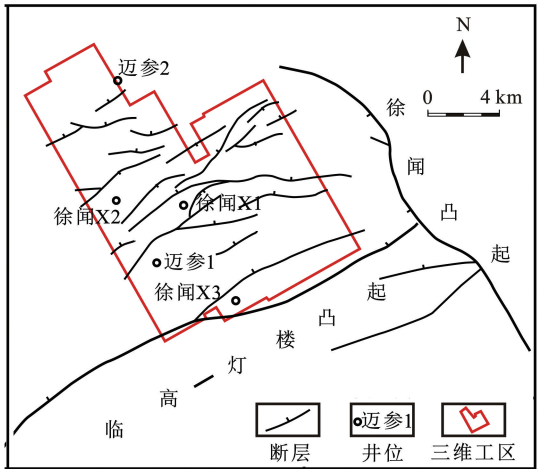


图 6 第一阶段实验结果

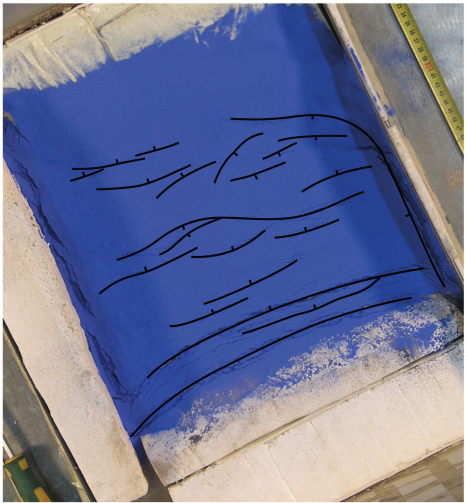
Fig. 6 Testing results of the first stage

将第一阶段实验结果的平面解释图与流沙港组活动断裂系统图对比发现:两者断层发育数量相近,主干断层发育期次、展布和规模相似,断层走向大多都为 NE 向,断面北倾,与实际地质特征相吻合(图 7)。

实验第二阶段(模拟涠洲组沉积期)在原有的基础上铺设实验材料,施加 NW 向拉张和右旋剪切应力。砂箱受力发生走滑拉张的初始阶段(3 cm),控凹断裂(灯楼角断层、徐闻断层、灯楼角-迈 1 断层)继承性活动,同时凹陷内部有部分次级断裂开始发育;随着走滑拉张作用的继续(6 cm),迈 2、迈 3、迈 4、迈 5 断裂走向由 NE 向逐渐转变为 NEE 和近 EW 向;走滑拉张作用末期(8.2 cm)断裂广泛发育,断裂整体上以近 EW 为主,断裂倾向以 SE 向为主,迈陈凹陷涠洲组沉积期构造格局基本形成(图 8)。



(a) 流二段沉积期活动断层



(b) 流二段实验结果平面图

图 7 实验第一阶段实验结果与流二段活动断层对比

Fig. 7 Comparison between testing results of the first experiment stage and active faults in E₂1₂

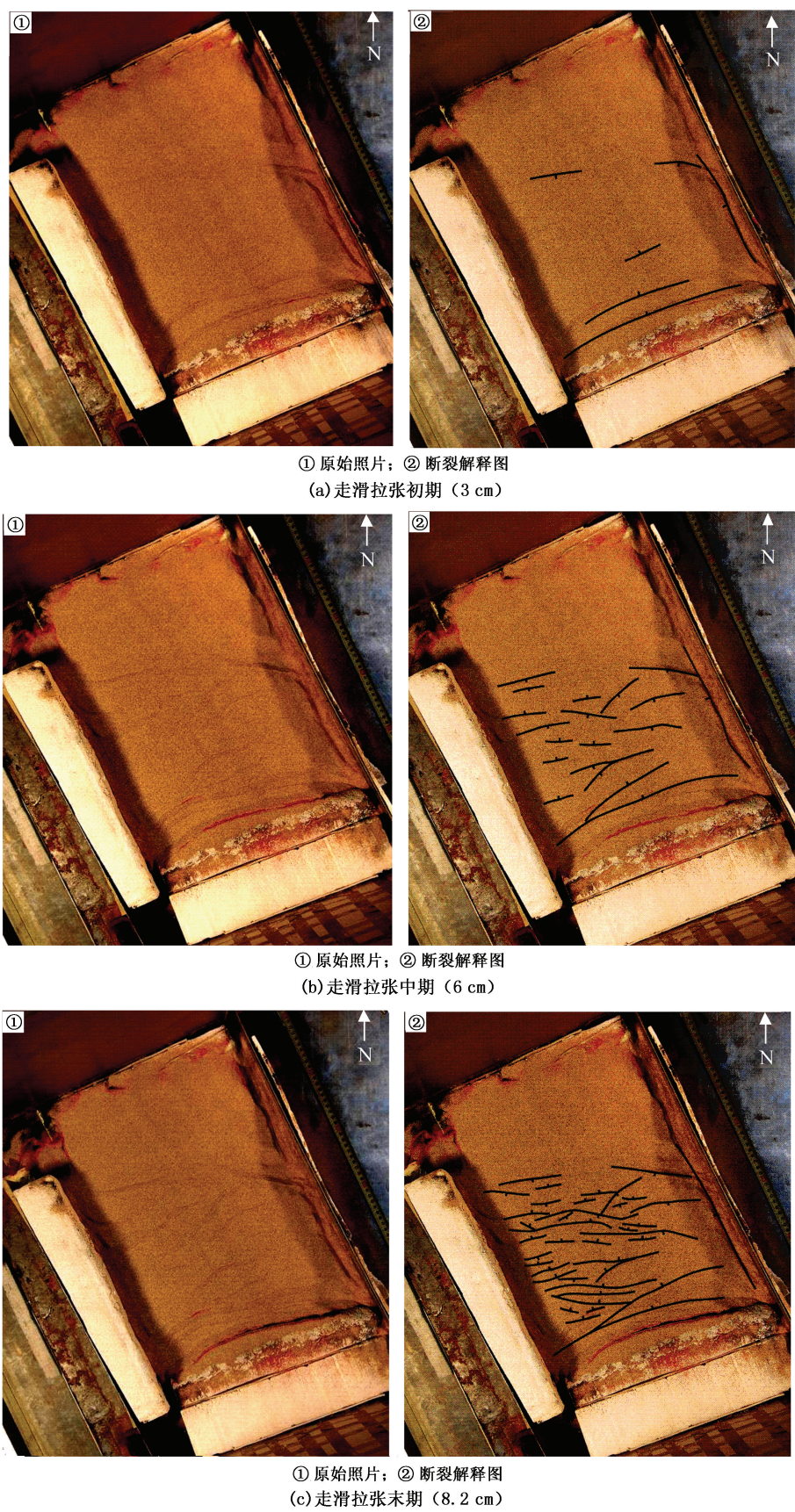
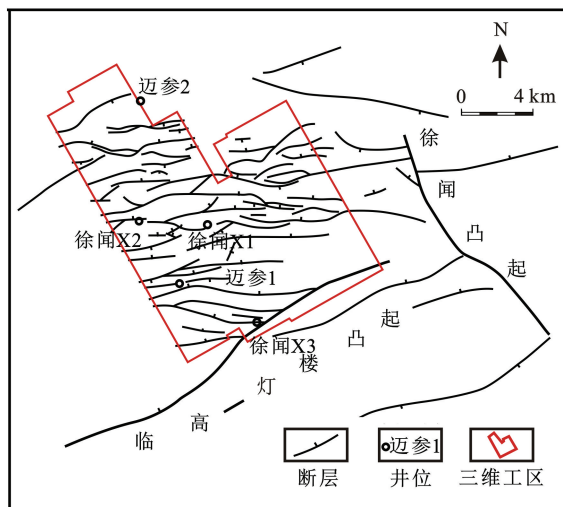


图 8 第二阶段实验结果

Fig. 8 Testing results of the second stage

将第二阶段实验结果的断层平面解释图与涪洲组活动断裂系统图对比可知,二者吻合程度高,断层发育数量、规模接近,各主干断裂继承性发育,断层

走向以 NEE 和 EW 向为主,与研究区中的主干断裂展布以及活动规律接近,与该时期实际地质特征相吻合(图9)。



(a) 涪洲组沉积期活动断层



(b) 涪洲组实验结果平面图

图9 第二阶段实验结果与涪洲组活动断层对比

Fig.9 Comparison between testing results of the second experiment stage and active faults in E_{3w}

4 迈陈凹陷东部构造的形成演化机制

迈陈凹陷东部所在的北部湾盆地位于欧亚板块的东南缘,紧邻印度-澳大利亚板块及太平洋板块,在地质发展历史中,受中国大陆边缘、太平洋板块、菲律宾海板块及南海壳形成演化的影响,形成于多动力源背景的控制之下,本文中采用构造物理模拟实验方法动态地正演迈陈凹陷长流组一流沙港组沉积期和涪洲组沉积期断裂系统的发育演化过程,达到了模拟结果与实际地质特征的高度吻合,进一步证实不同演化阶段的应力场存在差异和叠加转型。

实验第一阶段施加 NW 向的拉张力,模拟结果与实际构造特征相吻合,表明古近纪古新世一中始新世构造应力场应以 NW 向伸展为主。结合周边大洋板块的运动方式,太平洋板块自晚白垩世开始以相对欧亚板块 130 mm/a 的速度 NNW 向俯冲于欧亚板块之下,至古新世降到 78 mm/a,到始新世再降到 38 mm/a^[21-22],洋壳俯冲角度增大以及俯冲速度减小导致太平洋板块后退^[20],同时印度板块约在距今 70 Ma 开始与欧亚板块 SN 向发生碰撞^[23],随后在早一中始新世(距今约 55~50 Ma)印度和欧亚板块进入主碰撞期,并且保持极高的碰撞速率,古新世一中始新世印度板块的高速碰撞与太平洋板块的低速俯冲汇聚于东亚陆缘,这种不对称的板块运动

引发地幔流的不均一侧向蠕动^[24],导致整个南海北缘处在 NE 向左行剪切和 NW-SE 引张作用之下,引发区域性裂陷作用和大规模的岩浆活动,以 NE 向断裂发育为主。

实验第二阶段在 NW 向拉张的同时叠加了右旋剪切作用,断裂发生了继承改造。地震剖面特征反映迈陈凹陷东部流沙港组顶部流一段地层缺失,流二段顶部存在着明显的地层削截,表明晚始新世存在着构造转型,上下两套断裂系统应形成于不同构造应力场控制之下。前人研究认为,晚始新世(43 Ma)太平洋板块相对欧亚板块的俯冲方向由 NNW 向转变为 NWW 向^[25],且俯冲速度有所增强(80 mm/a),同时印度板块与欧亚板块碰撞方向由 SN 向顺时针旋转为 NE 向,造成地幔柱上涌向东南方向蠕动及中南半岛向东南方向逃逸^[25-29],在太平洋板块和印度板块的共同作用下,东亚陆缘的应力场由左行压扭变为右行张扭,这种区域应力场的转变首先造成了上始新统流一段的地层剥蚀,进而导致近 EW 向新生断裂的发育和部分早期活动断层的消亡;同时在区域伸展背景之下,早期发育的 NE 向主要断裂持续活动,从而构成了迈陈凹陷东部现今古近系上下差异显著、继承与改造并存的断裂格局。

5 结论

(1)地质模型的建立是构造物理模拟实验的重

要基础和保障,必须在充分考虑不同构造演化阶段主要构造特征、地层发育组合、边界几何形态、基底先存断裂和区域应力背景的基础上进行确定;进行模拟实验时必须考虑到构造演化是相对连续的地质事件,早期构造活动会对晚期的构造活动产生影响,因此在物理模拟的过程中也要做到实验的连续性,即尽量不要单独就某个时期的断裂特征进行模拟,这样做出的结果不能全面地反映实际的地质特征。

(2)构造物理模拟实验正演迈陈凹陷东部断裂的发育演化过程,进一步证实不同演化阶段的应力场存在差异和叠加转型。古新世—中始新世主要受控于NW向伸展应力场,以NE向断裂发育为主;晚始新世在NW向拉张的同时叠加了右旋剪切作用,区域应力场的转变首先造成了上始新统流一段的地层剥蚀,导致近EW向新生断裂的发育和部分早期活动断层的消亡,早期发育的NE向主要断裂持续活动,从而构成了迈陈凹陷东部现今古近系上下差异显著、继承与改造并存的断裂格局。

参考文献:

- [1] 闫义,夏斌,林舸,等. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 53-61.
YAN Yi, XIA Bin, LIN Ge, et al. The sedimentary and tectonic evolution of the basins in the north margin of the South China Sea and geodynamic setting[J]. Margin Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 53-61.
- [2] 姚伯初. 南海北部陆缘新生代构造运动初探[J]. 南海地质研究, 1993(5): 1-12.
YAO Bochu. Probing into Cenozoic tectonic movements of the continental margin in Northern South China Sea[J]. Geological Research of South China Sea, 1993(5): 1-12.
- [3] 陈伟,刘宏宇,吴峰,等. 迈陈凹陷东部构造演化及其对构造样式的影响[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(4): 402-404.
CHEN Wei, LIU Hongyu, WU Feng, et al. Structural evolution of eastern Maichen sag in Junggar Basin and influence on its structural styles[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(4): 402-404.
- [4] 刘恩涛,王华,李媛,等. 北部湾盆地福山凹陷构造转换带对层序及沉积体系的控制[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2013, 37(3): 17-22, 29.
LIU Entao, WANG Hua, LI Yuan, et al. Control of transfer zone over sequences and depositional system in Fushan sag, Beibuwan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(3): 17-22, 29.
- [5] 苏永进,唐跃刚,石胜群,等. 北部湾盆地迈陈凹陷东部地区油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 210-214.
SU Yongjin, TANG Yuegang, SHI Shengqun, et al. Characteristics of hydrocarbon pooling in the east of the Maichen sag of the Beibu Gulf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 210-214.
- [6] 钱浩,陈伟,卢黎霞,等. 迈陈凹陷东部构造特征对沉积、生烃的影响[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(1): 9-12.
QIAN Hao, CHEN Wei, LU Lixia, et al. Effect of tectonic characteristics of eastern part in Maichen sag on deposition and hydrocarbon generation[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7(1): 9-12.
- [7] 陈伟,刘宏宇,侯峰,等. 迈陈凹陷东部构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(1): 17-21.
CHEN Wei, LIU Hongyu, HOU Feng, et al. Tectonic characteristics and their impacts on hydrocarbon accumulation in Eastern Maichen Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(1): 17-21.
- [8] 姚伯初,万玲,刘振湖,等. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(5): 543-549.
YAO Bochu, WAN Ling, LIU Zhenhu, et al. Tectonic dynamics of Cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China Sea[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 543-549.
- [9] 何家雄,陈胜红,马文宏,等. 南海东北部珠江口盆地形成演化与油气运聚成藏规律[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 106-118.
HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, MA Wenhong, et al. The evolution, migration and accumulation regularity of oil and gas in Zhujiangkou Basin, northeastern South China Sea[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 106-118.
- [10] MCCLAY K R, ELLIS P G. Geometries of extensional faults systems developed in model experiments[J]. Geology, 1987, 15(4): 341-344.
- [11] MCCLAY K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies[J]. Marine and Petroleum Geology, 1990, 7(3): 206-233.
- [12] 刘重庆,周建勋,张博. 柴达木盆地西北部新生代褶皱—冲断带形成机制的物理模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2013, 37(4): 15-22, 29.
LIU Chongqing, ZHOU Jianxun, ZHANG Bo. Physical modeling of Cenozoic fold-thrust belts formation mechanism in northwestern Qaidam Basin[J]. Journal of Chi-

- na University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(4): 15-22, 29.
- [13] 周建勋, 徐凤银, 朱战军. 柴达木盆地北缘新生代构造变形的物理模拟[J]. 地球学报, 2003, 24(4): 299-304.
- ZHOU Jianxun, XU Fengyin, ZHU Zhanjun. Physical modeling of the Cenozoic deformation in northern Chaidamu Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(4): 299-304.
- [14] 童亨茂. 渤海湾盆地张巨河复杂断块区平面砂箱模拟实验及其启示[J]. 地质论评, 2003, 49(3): 305-310.
- TONG Hengmao. Plane sandbox modeling of the complicated Zhangjuhe faulted block and its implication, the Bohai Bay Basin[J]. Geological Review, 2003, 49(3): 305-310.
- [15] 朱战军, 周建勋. 基底收缩对斜向挤压盆地构造格局影响的实验研究[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4): 390-394.
- ZHU Zhanjun, ZHOU Jianxun. Experimental study on influence of substrate contraction on structural patterns of oblique compressional basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4): 390-394.
- [16] 单家增, 张占文, 孙红军, 等. 营口—佟二堡断裂带成因机制的构造物理模拟实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 15-17.
- SHAN Jiazeng, ZHANG Zhanwen, SUN Hongjun, et al. Modeling experiments of generation mechanism of Yingkou-Tongerbao fracture zone in the Liaohe Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 15-17.
- [17] 孟令箭, 童亨茂, 蔡东升, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂系统成因的砂箱实验研究及启示[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 246-255.
- MENG Lingjian, TONG Hengmao, CAI Dongsheng, et al. Sandbox modelling on genetic mechanism of fault system in Weixinan Depression of the Beibuwan-Gulf Basin and its inspiration[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(2): 246-255.
- [18] 王鹏, 赵志刚, 柳永杰, 等. 迈陈凹陷构造特征与油气勘探方向分析[J]. 海洋石油, 2011, 31(2): 13-19.
- WANG Peng, ZHAO Zhigang, LIU Yongjie, et al. Structural characteristics and petroleum exploration direction analysis in Maichen Sag[J]. Offshore Oil, 2011, 31(2): 13-19.
- [19] ELLIS P G, MCCLAY K R. Listric extensional fault system—results of analogue model experiments[J]. Journal of Basin Research, 1988, 1(1): 55-70.
- [20] 林长松, 初凤友, 高金耀, 等. 论南海新生代的构造运动[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 87-96.
- LIN Changsong, CHU Fengyou, GAO Jinyao, et al. On tectonic movement in the South China Sea during the Cenozoic[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(4): 87-96.
- [21] NORTHRUP C J, ROYDEN L H, BURCHFIELD B C, et al. Motion of the Pacific plate relation to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. Geology, 1995, 23(8): 719-722.
- [22] ENGBRESON D C, COX A, GORDON R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin[J]. Geol Soc Am SpecPap, 1985, 55(10): 291-330.
- [23] COPLEY Alex, JEAN-PHILIPPE Avouac, JEAN-YVES Royer, et al. India-Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate: implications for the forces driving plate motions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115(B3): 181-192.
- [24] 任建业, 李思田. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 203-213.
- REN Jianye, LI Sitian. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the Western Pacific[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 203-213.
- [25] JACKSON E D, SHAW H R, BAGGAR K E. Calculated geochronology and stress field orientation along the Hawaiian chain[J]. Earth and Planet Sci Lett, 1975, 26: 145-155.
- [26] MORLEY C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. Tectonophysics, 2002, 347: 189-215.
- [27] BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONINE P. Updated interpretation of magnetic anomalies and sea floor spreading stages in the South China Sea: implication for the Tertiary tectonics of southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [28] FLOWER M F J, TAMAKI K, HOANG N. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and dupal-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific [M]//FLOWER M F J, CHUN S L, LO C H, et al. Mantle dynamics and Plate Interactions in East Asia. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1998: 67-88.
- [29] TAYLOR B. Backarc Basins: tectonics and magmatism [M]//TAMAKI K. Opening tectonics of the Japan Sea. New York: Plenum Press, 1995: 407-419.