



· 地球科学 ·

利用地震和三维数值模拟研究鄂尔多斯盆地红河油田的走滑断裂活动及应力场演化

梁承春¹, 吴锦伟¹, 王代国¹, 何学文¹, 梁臣¹, 刘小虎¹, 王治磊¹, 黄光明², 雷克辉²

(1. 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司 勘探开发研究院, 河南 郑州 450006;

2. 哈里伯顿[中国]能源服务有限公司, 北京 100020)

摘要 以鄂尔多斯盆地红河油田精细地震构造解释为基础, 结合南缘秦岭和西缘六盘山的构造演化史, 并采用有限差分软件开展两期构造叠加的大应变数值模拟实验, 探讨红河油田的走滑断裂活动及应力场演化。结果表明, 北西走向的玉都断裂带先活动, 受到基底断层控制而发育单断式左行走滑, 应在晚侏罗世—早白垩世活动, 其动力学背景是秦岭北缘不同块体之间往北西方向的差异挤压, 活动之时玉都断裂带附近最大主应力方向为北东东向; 北东东向弥散式断层后活动, 受到六盘山冲断带向东挤压过程中南北差异的影响而发生左行走滑, 在早白垩世晚期或新生代活动, 活动之时最大主应力为北东向($N36^{\circ} \sim 69^{\circ}$), 平均 $N53^{\circ}$ 。研究结果对本地区的断裂预测提供了新的约束, 亦可为鄂尔多斯盆地其他油田的断裂研究提供借鉴。

关键词 鄂尔多斯盆地; 走滑断裂; 数值模拟; 主应力; 构造叠加

中图分类号: P542 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-02-016

Using seismic data and 3D numerical simulation to study strike-slip faulting and stress field evolution in Honghe Oilfield, Ordos Basin

LIANG Chengchun¹, WU Jinwei¹, WANG Daiguo¹, HE Xuewen¹, LIANG Chen¹, LIU Xiaohu¹, WANG Zhilei¹, HUANG Guangming², LEI Kehui²

(1. Research Institute of Exploration and Production, SINOPEC North China Company, Zhengzhou 450006, China;

2. Halliburton Energy Services (China) Limited, Beijing 100020, China)

Abstract This work focuses on the strike-slip faulting activity and stress field evolution in Honghe Oilfield, Ordos Basin. With the finite difference software, a series of 3D numerical models were constructed to investigate the two stages of structural superposition. Constrained by the refined seismic structure interpretation and the tectonic evolution of Qinling Mountain in the south and Liupanshan Mountain in the west, the model results indicate that the NW trending Yudu Fault developed first and was controlled by the sinistral strike-slip of basement fault. The Yudu Fault is supposed to be active in the late Jurassic-early Cretaceous, which is mainly attributed to the northwestward compression among different blocks in the northern margin of the Qinling Mountains. The maximum principal stress near the Yudu Fault Zone was oriented NEE during faulting. Subse-

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研课题(P21026)

第一作者: 梁承春, 男, 教授级研究员, 从事石油勘探开发研究, liangcc.hbsj@sinopec.com。

通信作者: 黄光明, 男, 从事油气勘探构造分析研究, hgm029@163.com。

quently, the NEE trending faults developed and were subjected to distributed sinistral strike-slip faulting during eastward compression of the Liupanshan thrust belt. These faults developed in the late Early Cretaceous or the Cenozoic. The maximum principal stress was oriented in the range of $N36^{\circ} \sim 69^{\circ}$ with an average of $N53^{\circ}$. This study provides a new constraint on the fault prediction in this area, and also sheds new light on faulting dynamics in the other oilfields in the Ordos Basin.

Keywords Ordos Basin; strike-slip fault; numerical modeling; principle stress; structural superposition

鄂尔多斯盆地是一个构造相对稳定的盆地,地层变形微弱,但随着油气勘探的深入,越来越多的断裂被发现^[14]。这些断裂包括断层和裂缝,其中断层的水平走滑量小,错断的地质标志少,使人们对这些断层的活动时间、走滑方式以及主应力来源等方面的认识存在明显分歧。比如,红河油田主要发育 NW—SE 向和 NEE—SWW 向两组断层,潘杰等认为,中晚侏罗世, NW—SE 向右旋压扭作用形成 NW 向右行走滑断层和 NEE 向右行走滑断层,喜山期 NW 向断层反转为左行走滑断层^[5];张园园等认为,晚三叠世,近南北向挤压形成 NW 向断层,晚侏罗世至早白垩世, NW—SE 向挤压形成 NEE 向左行走滑断层,喜山期右旋剪切—拉张产生新的 NEE 向断层^[3];郑和荣等认为,早侏罗世, NE 向压扭形成 NW 向左行走滑断层,早白垩世, NW 向断层在深部继续左行走滑活动,拖曳浅层形成 NEE 向左行走滑断层^[6]。这些有关左行或右行走滑以及相关应力场的研究,多基于整个油田断层三维展布与盆地周缘大地构造应力场背景的宏观关联,而普遍缺乏来自油田内更加详实可靠的证据。

应力场研究还可以基于更小尺度的裂缝分析,如曾联波等通过地表露头、岩心、薄片以及实验等资料分析,认为鄂尔多斯盆地上三叠统延长组主要发育两期裂缝:第一期形成于侏罗纪末期,遭受北西西—南东方向水平构造挤压而形成东西向和北西—南东向共轭剪切裂缝;第二期在白垩纪末期—古近纪,在北北东—南南西向水平构造挤压应力下,形成南北向和北东—南西向共轭剪切裂缝^[7]。

同一时期同一区域产生的断层和裂缝是岩层对同一应力场作出的构造差异响应,断层、裂缝、应力场三者密切相关^[8-9]。因此,对断层和应力场开展深入研究,亦可为裂缝预测提供更多约束,而对于红河油田这种致密性砂岩储层而言,裂缝对油气勘探开发的意义巨大。

目前,对于红河油田乃至整个鄂尔多斯盆地

中生代以来有关断裂活动方式以及应力场演化的认识还远未达到观点统一的程度,这些分歧使人们在分析油气藏富集与断裂的主控关系时感到迷惑。

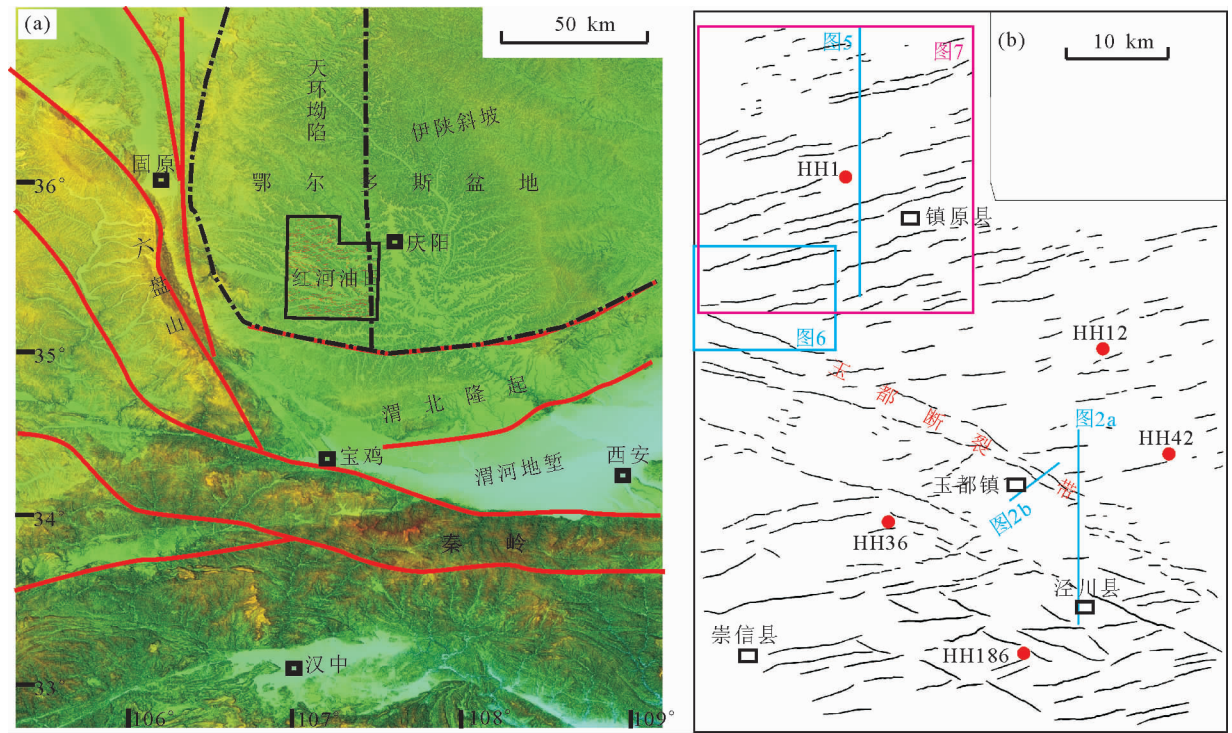
数值模拟分析是应力场研究的有力工具,尤其是大应变数值模拟,将断层的形成过程与应力场演化统一起来。通过不同地层力学参数以及边界条件的组合尝试,探究和油田地质原型最匹配的方案。通过模拟,不仅能得到当前已经构造变形的三维空间内任何位置的应力场、应变场、速度场、位移场等参数,还能获得地层从开始变形到现阶段任一时期的变形参数,而这些参数若基于传统手段则只能获得极其有限的一小部分。目前,国内开展的三维数值模拟分析多以小应变为主,它以现今地质模型为基础,地层和断层均提前设定,然后通过加载边界应力条件,模拟应力的三维空间展布^[10-13];而大应变模拟则从变形之前的地层结构开始,通过加载边界位移条件,模拟地层变形、断裂产生发展以及应力场演化的过程^[14-17]。本研究基于三维地震解释并结合大变形数值模拟分析,重点探讨红河油田两组断层的活动时期、走滑方式以及古应力场演化。

1 地质背景

红河油田位于鄂尔多斯盆地西南部,天环坳陷、伊陕斜坡以及渭北隆起的交汇部位。该油田构造相对简单,上三叠统延长组 7 段底面从东南往西北以 $0.3^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ 的坡度缓慢下倾。区内走滑断层大量发育,其中北西向的玉都断裂带规模较大,但该走向的断层数量较少;北东东走向的断层则以弥散式全区分布(见图 1)。两个方向的断层均从古生界向上错断至白垩系。区域内,下古生界寒武系和奥陶系以海相碳酸盐岩为主,志留—泥盆系地层缺失,二叠系至白垩系发育碎屑岩,上白垩统至第三系无沉积,浅层覆盖约 300 m 厚的第四系黄土^[18]。

红河油田和鄂尔多斯盆地主体具有相同的沉积历史。盆地在中晚三叠世秦岭海槽最终关闭之后逐渐发育形成,经历了早期初始沉降,中期加速扩张,至早白垩世晚期萎缩消亡的多个阶段^[19-20]。期间亦经历多次抬升剥蚀,形成三叠系—侏罗系、侏罗系延安组—直罗组、侏罗系—白垩系以及白垩系—第四系等 4 个地层不整合面。其中,晚白垩世以来的抬升剥蚀最剧烈,在红河油

田的剥蚀量达到 980 ~ 1 280 m^[21]。
红河油田南邻渭北隆起,西邻六盘山褶皱冲断带,随后两者在晚侏罗世—早白垩世东亚多向汇聚构造体系背景之下均经历了指向盆地的褶皱冲断变形^[20,22-23]。新生代以来,六盘山继续逆冲活动^[24-27],盆地南缘则进入伸展环境,发育了渭河地堑^[18,28]。



(a) 红河油田周边地质构造简图(断层据文献^[29]修改);(b) 红河油田延长组 7 段底面断层分布图

图 1 红河油田地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Honghe Oilfield

2 断层活动特征

2.1 北西向断层

玉都断裂带是红河油田内规模最大的断裂,走向北西—南东(约 N300°),在油田内延伸 60 km,垂向断距 20 ~ 80 m。断面高陡达 80° 以上,具有走滑断层特征。该断层从深层古生界至浅层白垩系均有错断,其中,在前石炭系地层中可观察到断层南盘厚度大于北盘,说明该断层在古生代已经活动[见图 2(a)]。该断层在三叠系延长组中发育成一个宽约 1 km 的破碎带,长 7 段底界在断裂带处具有小型复式地堑结构[见图 2(b)、3(a)]。此小型地堑结构在长 7 段底至侏罗系底基本保持一致,说明延长组沉积时期断层没有明

显活动。在白垩系底,此地堑规模略微变浅,至下白垩统罗汉洞底则趋于消失,说明这些走滑断层在中生代的活动时间主要发生在侏罗纪—早白垩世[见图 2(b)]。

在研究区西部的长 7 底构造图上,和玉都断裂带平行的西北向断层展示了右阶雁列特征,说明北西向断层经历了左行走滑作用[见图 3(b)]。实验表明,走滑断裂带发育过程中,在主断裂带贯通之前先发育一系列里德尔断层,左行走滑下排列成右阶雁列,右行走滑下排列成左阶雁列^[30]。但是,从 3 018 ms 的水平切片上发现,前古生界的北北东向地堑没有被玉都断裂带明显错断,说明玉都断裂带走滑量很小,推测小于 100 m[见图 3(c,d)]。

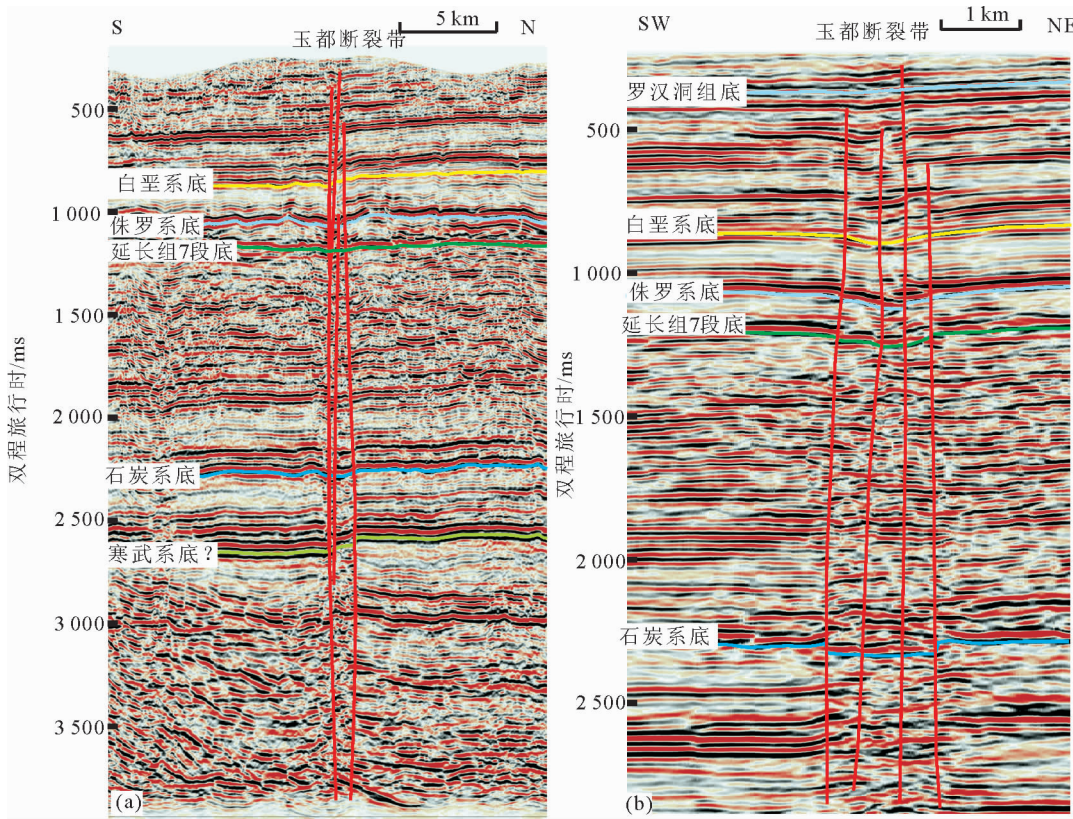
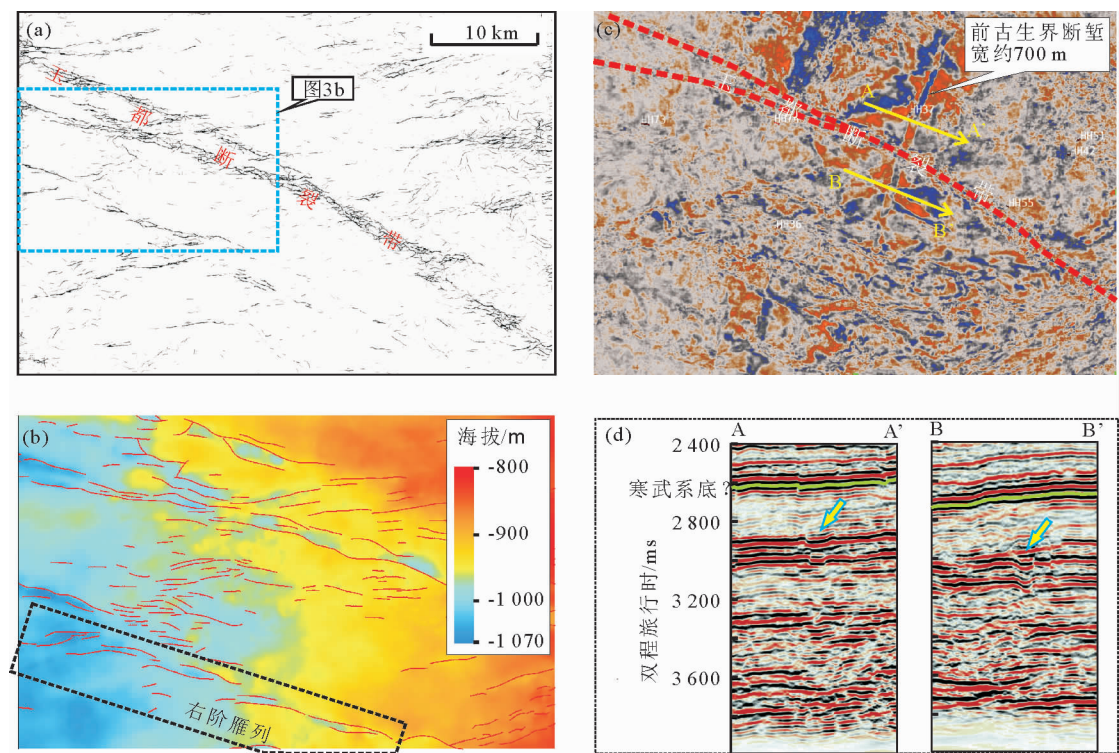


图2 玉都断裂带典型地震剖面(剖面位置见图1)
Fig.2 Typical seismic profiles of Yudu Fault Zone

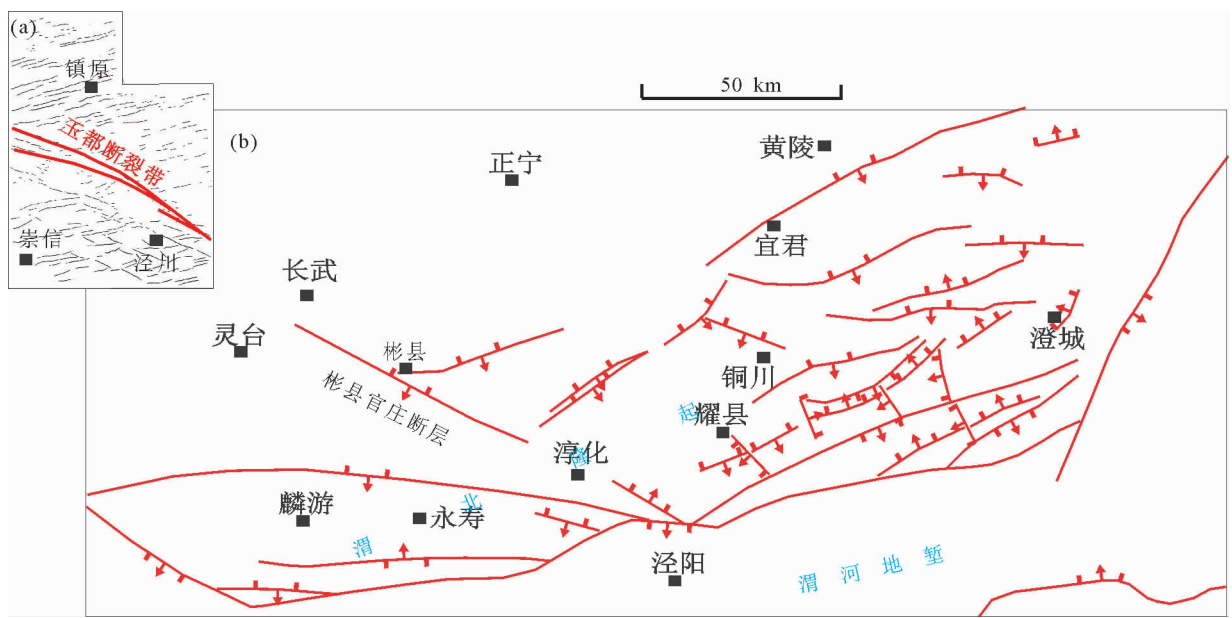


(a)长7段底相干属性图;(b)长7段底构造图;(c)3 018 ms(位于前古生界)时间切片振幅图;(d)过前古生界断堑的地震剖面

图3 北西向断层的平面和剖面特征
Fig.3 Plane and profile characteristics of NW trending faults

玉都断裂带和其东南侧的彬县官庄断层在延伸方向上基本重合,推断它们是同一条断层(见图 4)。彬县官庄断层亦呈北西—南东走向,断续分布于淳化县南北两侧,在剩余重力异常中有明显响应^[31-32]。而根据区域构造背景,晚侏罗世—早白垩世时期是秦岭南北缘褶皱冲断强烈发育时期,南部的扬子板块和北部的华北板块同时向秦岭陆内俯冲,造成大巴山以及渭北隆起各自指向

盆地的褶皱冲断变形^[18,20,28,33]。晚白垩世,渭北隆起以隆升为主,新生代南部处于伸展环境,发育了渭河地堑^[22]。对比这几个阶段的应力背景,玉都断裂带应是在晚侏罗世—早白垩世时期,作为复活老断层调节了渭北隆起在彬县官庄断层两侧的挤压缩短差异,此活动时期和通过地震剖面识别的活动时期保持一致。



(a) 长 7 段底面地震解释断层; (b) 发育于中晚侏罗世—早白垩世的地表出露断层^[31]; (a) 和 (b) 具有统一比例尺以及真实的相对位置

图 4 红河油田玉都断裂带与东南缘彬县官庄断层的关系

Fig. 4 Relationship between Yudu Fault Zone and Guanzhuang-Binxian Fault in the southeast

2.2 北东东向断层

北东东向断层在红河油田极其发育,数量多,规模小,平面延伸长度大部分小于 10 km,垂向断距一般小于 30 m,具有弥散式分布特征,走向稳定在北东东 $N75^\circ$ 左右(见图 1、图 5)。在研究区西北 750 ms 相干属性图上,可观察到一条断裂带不同段的右阶雁列特征,表明该断层经历了左行走滑活动(见图 6)。北东东向断层从古生界往上切割至白垩系,在古生界地层中并没有观察到断距明显增大的特征,甚至延长组 7 段底至白垩系底的断距变化亦不明显,说明此组断层的主要活动时间应该发生在早白垩世晚期或以后(见图 5、图 7)。

根据北东东向断层走向以及左行走滑的特

征,结合走滑条件下应力与应变的理论模型,可以分析得到研究区的边界加载条件以及应力场分布[见图 8(a)]。在走滑剪切中,可产生里德尔断裂(R)、共轭里德尔断裂(R')、断裂(P)、拉张断裂(T)和整体剪切方向平行的主位移断裂(Y)。其中,里德尔断裂较常见且较早发育,此组断裂和整体剪切方向夹角为 $\phi/2$,和最大主应力夹角为 $45^\circ - \phi/2$,最大主应力和整体剪切方向则成 45° 夹角^[34]。其中 ϕ 为材料的内摩擦角,一般固结地层的内摩擦角在 $30^\circ \pm 10^\circ$ ^[35-36]。红河油田北东东向断层走向稳定在 $N75^\circ$ 左右[见图 8(b)],以地层内摩擦角平均值 30° 计算,推算产生北东东向断层的边界条件为近东西方向的左行剪切,最大主应力方向为 $N45^\circ$ 左右。

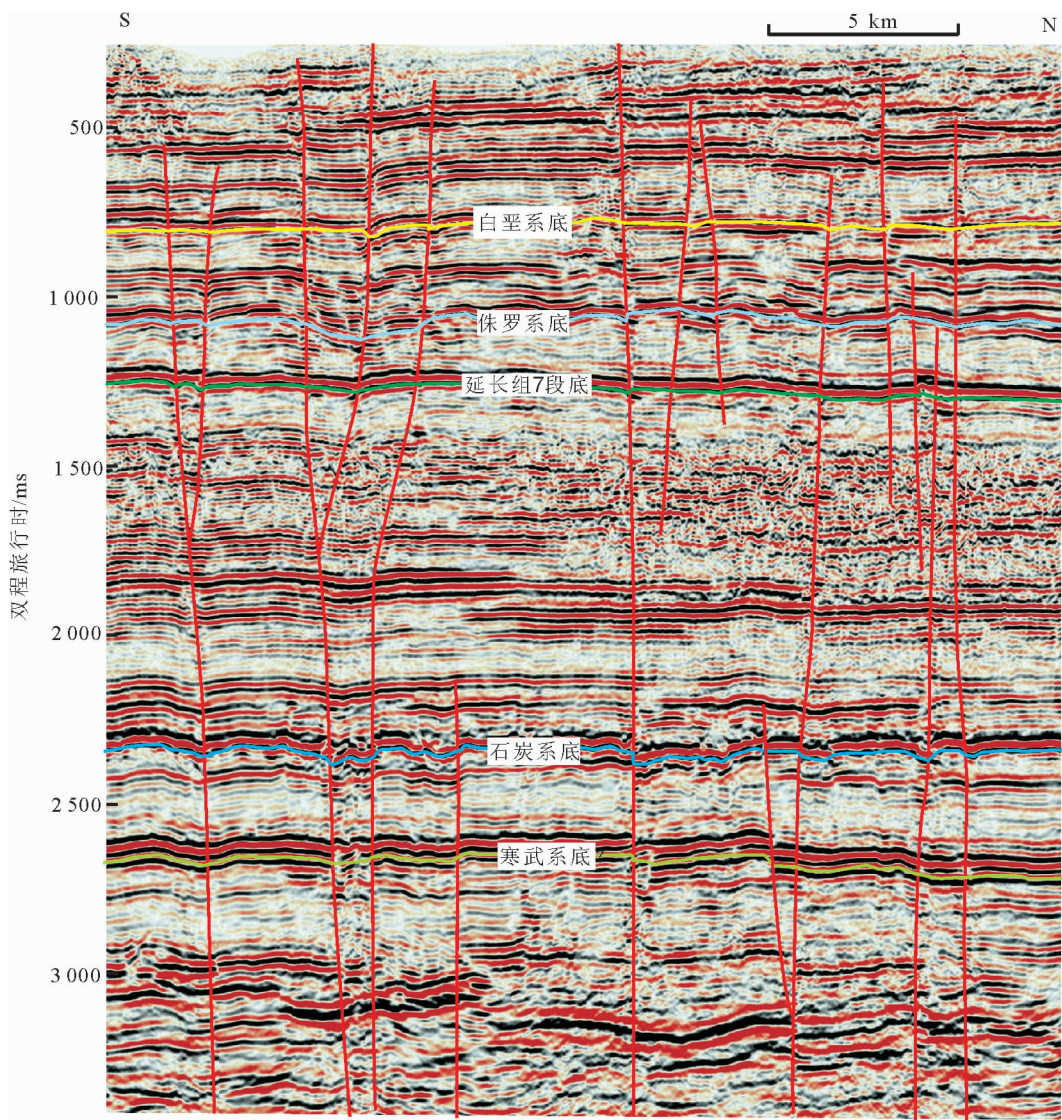


图 5 过北东东向断层典型地震剖面(剖面位置见图 1)
Fig. 5 Typical seismic profile through NEE-strike faults

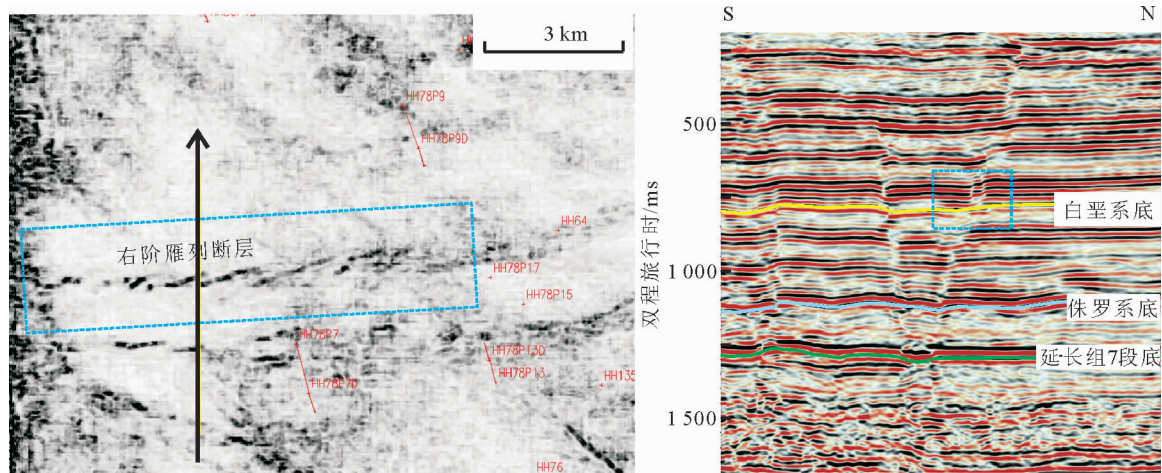
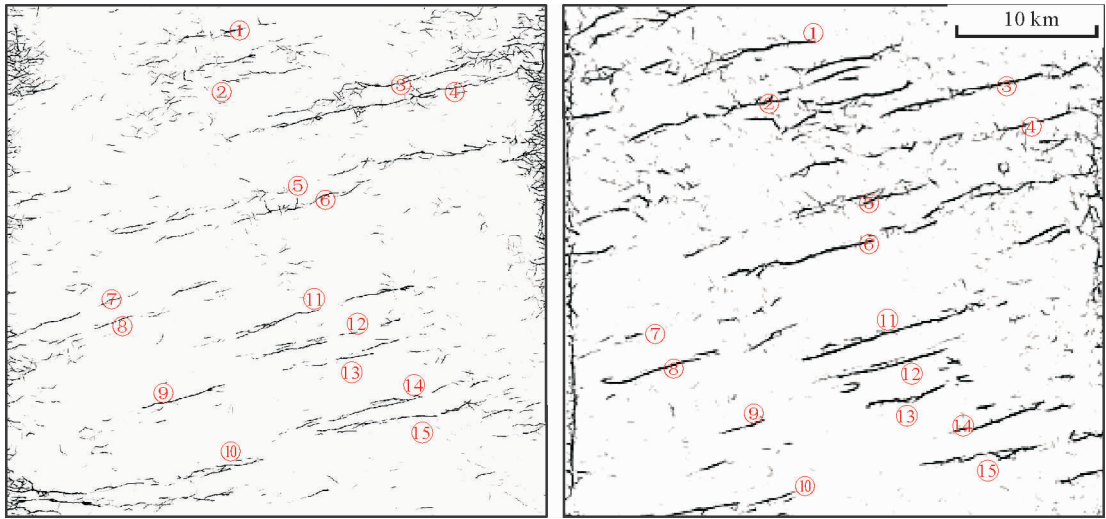


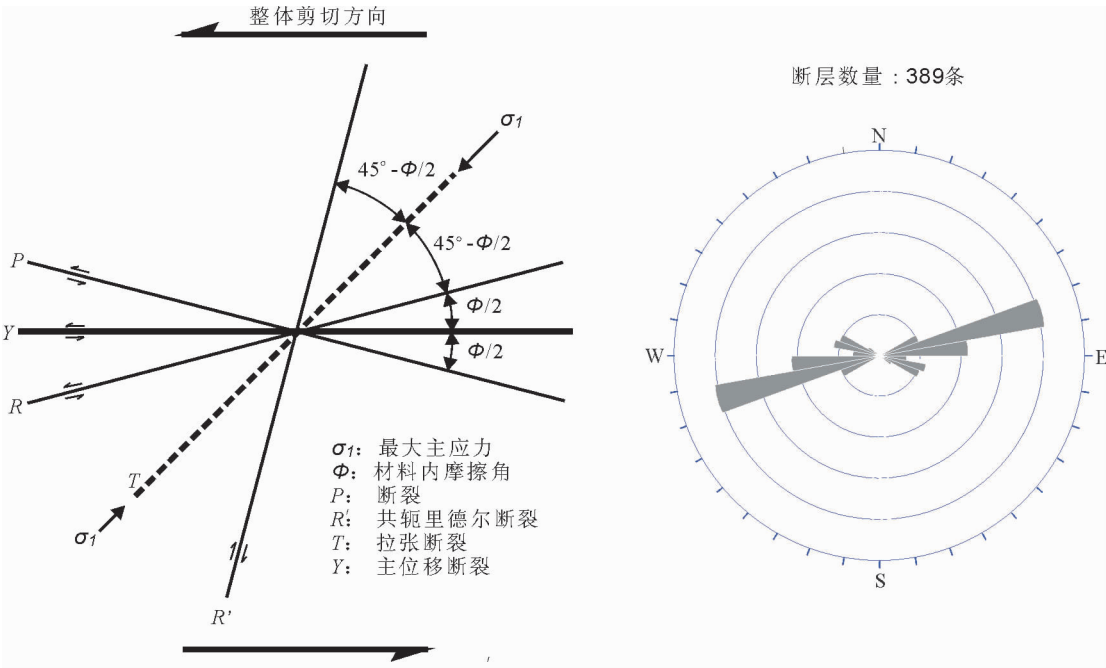
图 6 750 ms(白垩系)相干属性图及地震剖面(属性图位置见图 1)
Fig. 6 750 ms (Cretaceous) coherent attribute map and seismic profile



(a)长7段底面相干属性图 (b)650 ms(白垩系)水平切片的相干属性图

图7 北东东向断层的平面分布(位置见图1)

Fig.7 Plane distribution of NEE trending faults



(a)左行走滑条件下主应力与断裂关系(改自文献[34]) (b)红河油田延长组7段底面断层走向玫瑰花图

图8 走滑断裂的理论应力模型及红河油田的断层分布统计

Fig.8 Theoretical stress model of strike-slip fractures and statistics of fault distribution in Honghe Oilfield

由上述分析可知,北东东向断层的产生受控于近东西向的左行剪切作用。由于西部邻近六盘山褶皱冲断带,东部远离盆地边界,因此剪切应力更有可能来自西部。这组断层弥散式分布,说明边界加载条件亦是弥散式剪切加载^[30],也即六盘山由西向东逆冲的过程中,往盆地传递的位移由北向南逐渐增大。这种方式和玉都断裂带由基底断层控制的单断式剪切加载明显不同。六盘山在晚侏罗世开始强烈逆冲^[22],该期活动在红河油田

没有产生明显断裂。六盘山在早白垩世晚期继续逆冲,晚白垩世以区域隆升为主,新生代褶皱冲断再次复活^[24,26]。由于红河油田缺乏新生代的沉积地层,第四系黄土直接披覆在下白垩统地层之上,因此没办法通过地层记录来分析北东东向断层活动于早白垩世或者新生代。曾联波等根据裂缝研究认为,北东东向裂缝发育于早第三世,而且该组裂缝比北西向裂缝晚发育^[7]。此外,鄂尔多斯盆地在新生代经历了逆时针旋转^[37],亦和盆地

西南缘的弥散式左行走滑边界条件一致。现今西南缘的左行走滑断层仍然活跃,比如祁山—马召断裂^[38]。红河油田西北部,根据井壁崩落法测定,现今最大主应力方向在 N60°左右,和通过北东东向断层分析得到的主应力方向接近(见图 9)。综合这些来看,北东东向断层要么在新生代活动,要么在早白垩世晚期发育,新生代继承了早期的剪切方向继续活动。

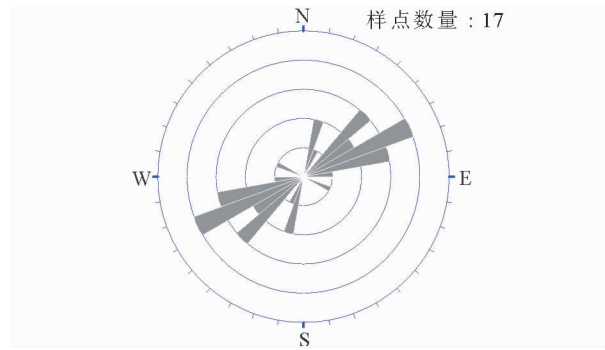


图 9 HH1 井壁崩落指示的现今水平最大主应力方向 (井位置见图 1)

Fig. 9 Current horizontal maximum principal stress direction indicated by wall collapse of Honghe 1

3 数值模拟实验及应力场特征

3.1 数值模拟的特点

为了进一步探讨红河油田断层活动与应力场的关系,并检验产生这些断层的边界应力机制(单断式或弥散式剪切、左行或右行等),开展了大构造变形数值模拟分析。数值模拟是一种地质正演实验,和砂箱实验相似,通过设置不同的地层参数组合,加载不同的边界位移条件,选择合适的本构模型,通过数值计算,获取变形结果。模拟结果的正确与否需要地质原型的约束,显然,对地质原型了解得越多(如断层几何分布、左行或右行走滑方式、活动时间、地层特征、盆地边界的构造活动历史等等),对模拟结果的约束就越充分,结果越可靠。此外,根据相同的地质现象经常会得到不同的成因解释,到底哪种解释更合理,数值模拟实验亦可提供更好的约束。

3.2 本构模型

本研究利用有限差分软件开展数值模拟分析,选择莫尔-库伦弹塑性本构模型,其应变 ε_{ij} 分解为弹性 ε_{ij}^e 和塑性 ε_{ij}^p 两部分,即

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \tag{1}$$

其中,弹性变形采用广义胡克定律来描述,应力 σ_{ij} 和应变 ε_{kk}^e 存在如下关系:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij}^e + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\delta_{ij}\varepsilon_{kk}^e \tag{2}$$

式中: G 为剪切弹性模量(Pa); K 为体积弹性模量(Pa); δ 为克罗内克符号。对于塑性变形,根据莫尔-库伦破裂准则,其剪应力屈服函数为^[39]

$$F = \tau^* - \sigma^* \tan \phi - C \tag{3}$$

式中: F 为屈服函数; τ^* 、 σ^* 分别为潜在破裂面上的剪应力(Pa) 和正应力(Pa); C 、 ϕ 分别为材料的内聚力(Pa) 和内摩擦角(°)。当 $F < 0$,材料处于弹性阶段,按照胡克定律变形;当 $F = 0$,材料进入塑性阶段,将遵守塑性流动法则进行变形,应变率 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 和应力 σ_{ij} 存在如下关系:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \tag{4}$$

式中: $\dot{\lambda}$ 为非负的塑性因子; g 为塑性流动势函数。

3.3 模型设置

模型长宽高(对应 X 、 Y 、 Z 方向)分别设为 20 km $\times$ 30 km $\times$ 0.7 km,相应使用网格 400 $\times$ 600 $\times$ 11 个。垂向上部 500 m 设定为盖层,占用网格 10 层,下部 200 m 设为基底,占用一层网格,因此盖层每个网格边长代表 50 m。基底分成南北两部分,分隔界面走向 N300°,用来模拟玉都断裂带的基底断裂。基底的地层属性和盖层中的能干层相同,基底不参与力学变形,仅对盖层起到支撑以及走滑时的摩擦牵引作用。盖层分成底部 50 m 的滑脱层和上部 450 m 的能干层,分别赋以不同的力学属性(见图 10)。盖层与基底之间的接触面设置法向刚度、切向刚度、内摩擦角和内聚力等参数,用以控制两者之间的弹塑性应变(见表 1)。这些地层力学参数是基于前人广泛的实验研究^[35-36,40-41],同时在合理范围内通过不同参数组合尝试并最终选定的。

盖层的能干层深度位于 -2 500 ~ -2 950 m,大致相当于延长组在早白垩世晚期的埋深。基底相当于前古生界地层,但由于计算的限制,不能设置足够厚的地层来模拟从基底到三叠系延长组的正常地层序列,因此基底和盖层能干层之间设置一套足够弱的滑脱层来分隔。这套滑脱层的设置有利于产生弥散式走滑断层^[30]。从红河油田走滑断层向下错断至下古生界的特征看,控制这些断层的关键滑脱层推测发育在比古生界更深的地层中。

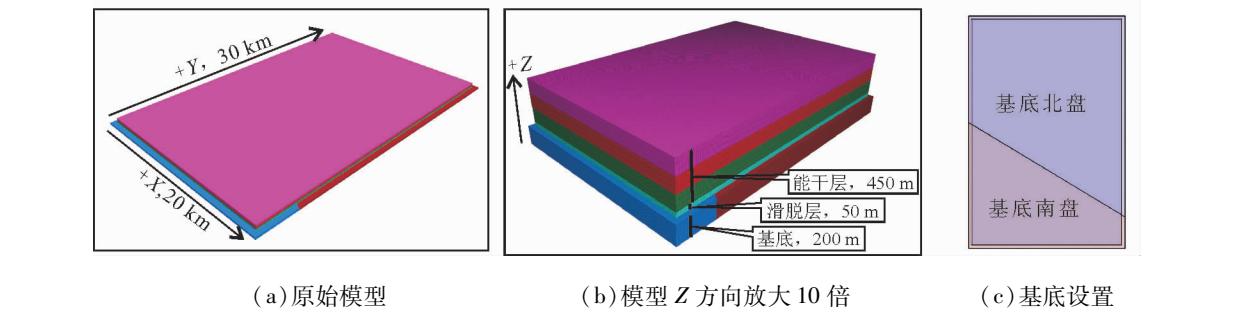


图 10 模型几何设置

Fig. 10 Model geometry setting

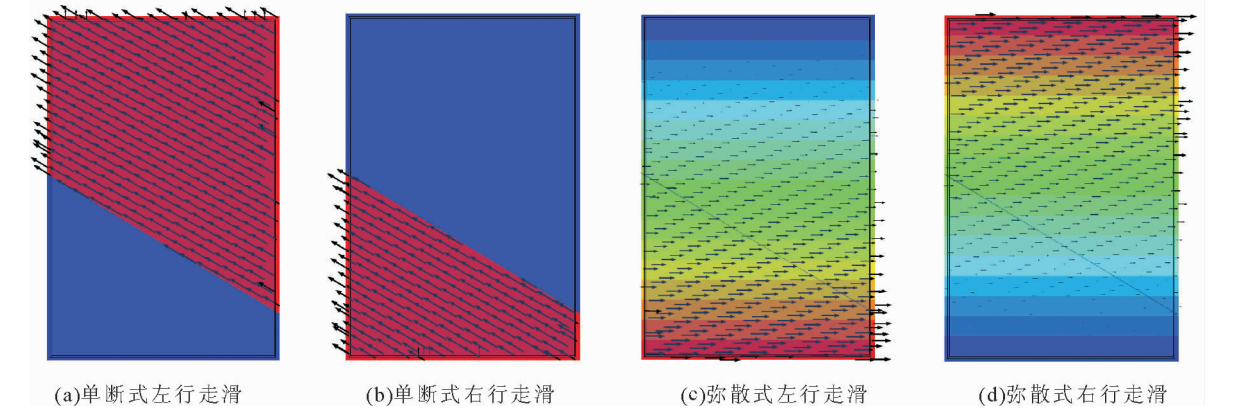
表 1 地层力学属性设置

Tab. 1 Mechanical property settings of formations

地层	杨氏模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 /($^{\circ}$)	内聚力 /MPa	抗张强度 /MPa	切向刚度 /($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	法向刚度 /($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)
盖层能干层	20	0. 25	2 500	40	20	10	—	—
盖层滑脱层	20	0. 25	2 500	1	2	10	—	—
基底和盖层之间接触面	—	—	—	1	2	10	1×10^8	1×10^8
基底	20	0. 25	2 500	40	20	10		

将模型置于 $-2\,500 \sim -3\,200\text{ m}$ 深的地层中,模型上表面加载 62.5 MPa 的垂直向下应力,模拟上覆 $2\,500\text{ m}$ 地层在重力加速度 9.8 m/s^2 下产生的重力荷载。基底 Z 方向固定,水平方向加载速度分 4 种类型:北西向单断式左行走滑、北西向单断式右行走滑、东西向弥散式左行走滑、东西向弥散式右行走滑。其中,北西向单断式左行走滑在基底的北盘加载速度,南盘固定;在盖层东西边界的基底断层以北部分加载速度,南半部分 X 方向固定;盖层南边界 Y 方向固定,北边界加载 Y

方向速度。加载的 X 方向和 Y 方向速度分别是 -0.004 m/步 和 $0.002\,4\text{ m/步}$,速度矢量和基底断层的走向平行。北西向单断式右行走滑则和上述相反,北盘固定,南盘加载北西向速度。东西向弥散式左行走滑在整个基底和盖层的东西边界加载由北向南逐渐增大的 X 方向速度,由北向南从 0 增大到 0.004 m/步 ;南北边界 Y 方向固定。东西向弥散式右行走滑则加载由南向北逐渐增大的 X 方向速度(见图 11)。



注:箭头为速度矢量,背景色中红色代表速度高,蓝色代表速度低。

图 11 边界加载方式

Fig. 11 Boundary loading mode

本研究共开展 4 组模拟实验(见表 2)。模型在速度加载之前,在重力作用下先运行 $3\,000$ 步

以达到应力平衡状态。然后开始加载第一期速度,以北西向单断式走滑的方式运行 $10\,000$ 步,

左行或右行走滑 47 m。第一阶段结束时撤销边界速度再运行 10 000 步,让模型重新应力平衡,然后加载第二期速度,以东西向弥散式走滑的方式运行 60 000 步,左行或右行 240 m。研究区内走滑断层的具体走滑量缺乏约束,但根据河道砂

体基本连续分布的情况,以及两个方向断层在交汇处观察不到明显被水平错断的特征,可以推测其走滑量极小。本系列实验所加载的边界位移量是根据模拟结果而判定的,当模拟结果出现和红河油田的断层分布特征接近时,模拟计算停止。

表 2 数值模拟实验系列设置
Tab.2 Numerical simulation experiment settings

数值模拟系列	第一期速度加载方式	第二期速度加载方式
模型 1	北西向单断式左行走滑 47 m	东西向弥散式左行走滑 240 m
模型 2	北西向单断式左行走滑 47 m	东西向弥散式右行走滑 240 m
模型 3	北西向单断式右行走滑 47 m	东西向弥散式左行走滑 240 m
模型 4	北西向单断式右行走滑 47 m	东西向弥散式右行走滑 240 m

3.4 实验结果

1)模型 1 变形特征。模型 1 第一阶段沿着基底以前存在的北西向断层发生单断式左行走滑,第二阶段东西方向弥散式左行走滑。单断式左行走滑 23.5 m 时,沿着基底断层在盖层中形成一个较强的剪切应变带,也即断裂带。断层东西边界附近的应变最强,往断层中部逐渐减弱。这些应变带分段分布,为里德尔断层,具有右阶雁列特征,和里德尔左行走滑理论预测结果一致。断裂带东南和西北两侧的应变更大,其最大主应力为水平状态[图 12(a)中的绿色],近东西走向。断裂带中部平面最大主应力方向为北东东向,它们实际上为三轴主应力的中间应力[图 12(a)中的红色],该区域的最大主应力垂直向下,这和走滑机制下最大和最小主应力水平、中间主应力垂直向下的理论认识相矛盾。实际上,这是因为该地区剪切应变还比较弱,而图 12(a)上的样点为抽稀显示,当从模型中观察所有样点的主应力分布时则可以看到在断裂带附近,最大主应力呈水平状态。断裂带之外的区域受到的变形较弱,最大主应力垂直向下,平面两个方向应力大小基本相等[见图 12(a)]。左行走滑至 47 m 时,断裂带剪切应变继续加强,右阶雁列特征更加明显;断裂带东南和西北两侧贯通发育成主位移断裂(Y 断裂);断裂带核部最大主应力方向为近东西向,断裂带两侧平面最大主应力为北东东向[见图 12(b)]。第二阶段弥散式左行走滑 80 m 时,先形成的断层继续向前破裂延伸,但延伸方向发生偏转;主应力方向也发生偏转,断裂带附近的最大主应力为北东东向,断裂带之外区域平面最大主应力为北东向[见图 12(c)]。弥散式左行走滑至

160 m 时,早期断层两端继续延伸,同时北东东向断层开始大量发育(里德尔断层),北盘西侧北北东向断层也开始出现(共轭里德尔断层)。共轭里德尔断层发育于模型边部,可能与边界效应亦有关系,前人在弥散式走滑砂箱实验中也观察到相类似的断层分布^[42];其平面最大主应力方向为北东向[见图 12(d)]。弥散式左行走滑至 240 m 时,模型中南部近东西向断层应变进一步加强,北部发育了更多的北东东向断层,走向约 N78°,北部西侧北北东向断层走向约 N6°;其最大主应力方向分布于 N36°~69°,平均 N53°,其中,西南区域、东北区域以及早期的北西向断裂带附近主应力方向更偏东一些[见图 12(e)]。理论上讲,东西向左行走滑剪切产生的最大主应力方向为 N45°,模拟结果比理论偏大一些,可能是因为在第二期应力加载时已经存在第一期北东东方向的主应力及相应的应变,影响了第二期的应力分布。McKinnon 等模拟剪切裂缝以及应力场分布时,也获得过相类似的结果^[34]。此外,走滑断层和主应力的角度实际上也是分布在某个范围之内,和材料内摩擦角以及剪胀角均有关系^[43]。

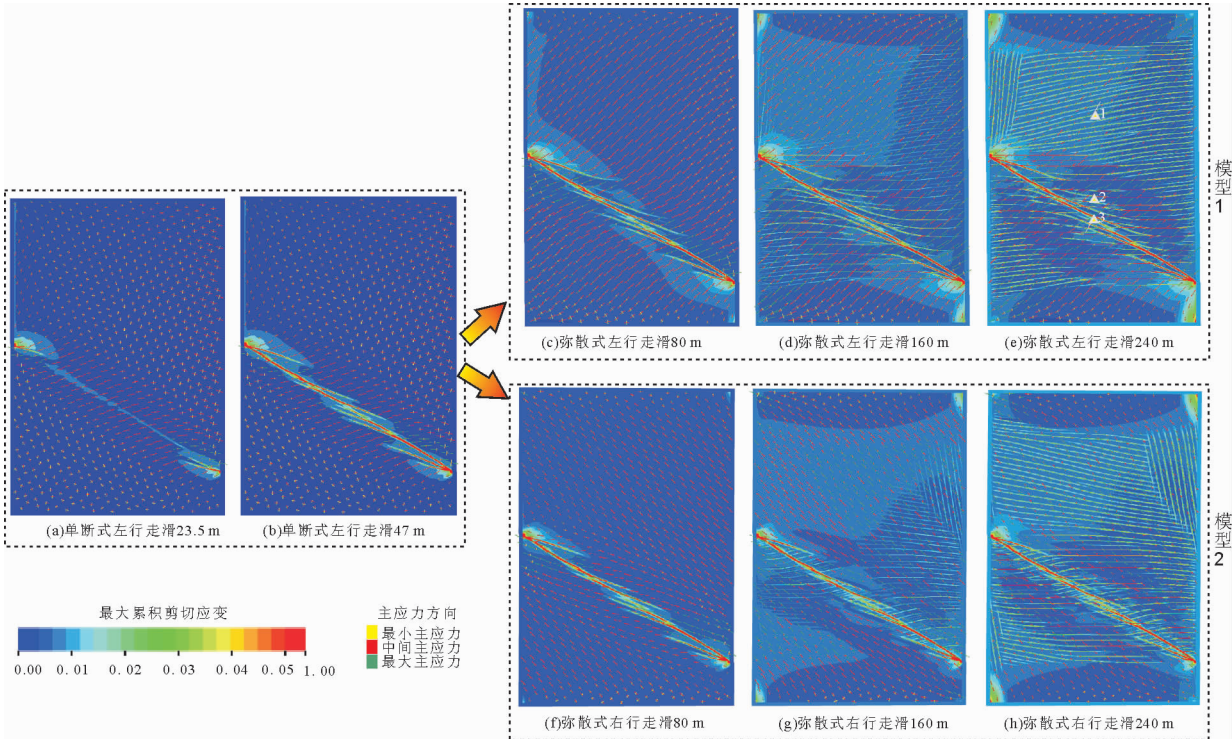
2)模型 2 变形特征。模型 2 的第一期构造变形和模型 1 相同,第二期改成东西向弥散式右行走滑。早期产生的北西向断层在第二期加载时没有往两端延展,而是在早期断裂带附近新产生近东西走向的断层,和早期断层斜交。北部没有受到早期断层的影响,发育南东东向里德尔断层和南南东向共轭里德尔断层。全区最大主应力方向为 N110°~143°,平均 N126°[见图 12(f, g, h)]。

3)模型 3 变形特征。模型 3 第一阶段沿着北

西向基底断层先加载单断式右行走滑,第二阶段东西向弥散式左行走滑。第一阶段产生北西向左阶雁列式断层,断裂带近平面最大主应力为北北西—南南东走向〔见图 13(a,b)〕。第二阶段东西向弥散式左行走滑,在早期断裂带附近发育近南北向断层,北部发育北东东向和北北东向断层;其最大主应力方向为 $N24^{\circ} \sim 53^{\circ}$,平均 $N36^{\circ}$ 〔见图 13(c,d,e)〕。

4)模型 4 变形特征。模型 4 第一阶段加载和

模型 3 相同,第二阶段改成东西向弥散式右行走滑。模型南部在早期北西向断层之上叠加第二期产生的近南北向断层,这些近南北向断层北端向西偏转,南端向东偏转,平面组成“Z”型,这种特征的断层在前人的砂箱模型中也出现过^[42]。模型北部发育南东东向断层和南南东向断层;其最大主应力方向为 $N126^{\circ} \sim 162^{\circ}$,平均 $N144^{\circ}$ 〔见图 13(f,g,h)〕。



注:模型 1 包括(a)~(e);模型 2 包括(a)~(b)、(f)~(h);展示结果为最大累积剪切应变叠合主应力方向。

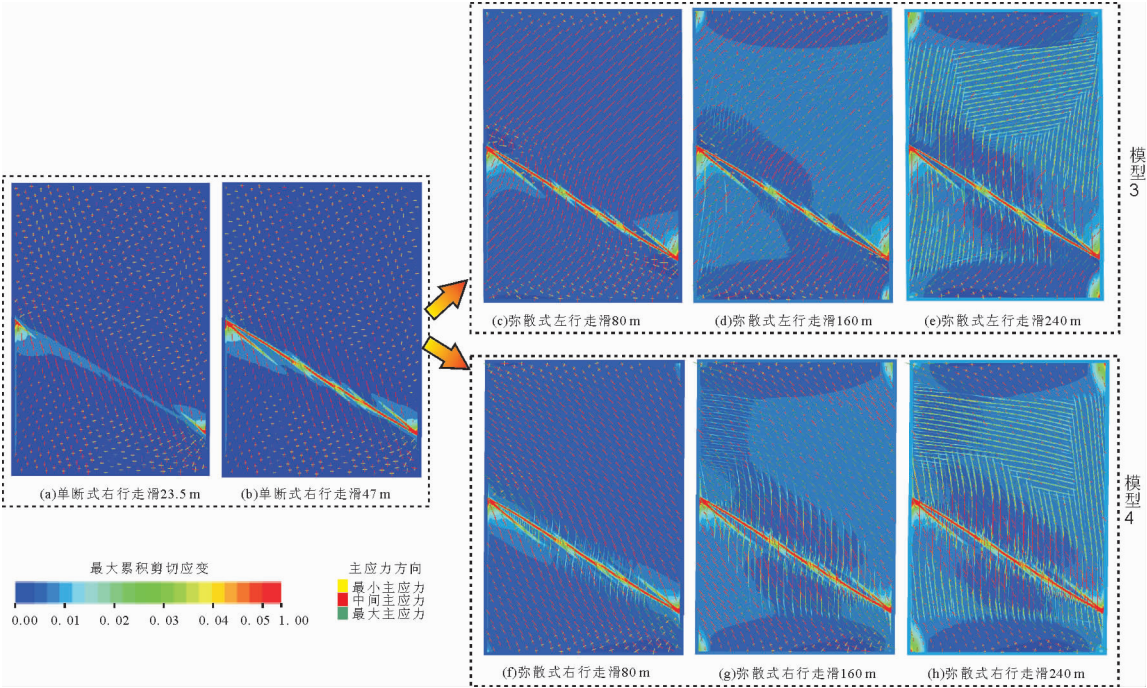
图 12 模型 1 和模型 2 演化过程对比

Fig. 12 Evolution comparison of model 1 and model 2

将 4 个模型的结果和红河油田的断层、应力分布进行对比可知,模型 1 最相似(见图 14,15)。首先,模型 3 和模型 4 在北西向断裂带附近发育大量近南北向断层,而红河油田在北西走向的玉都断裂带附近只发育北东东向断层,因此模型 3 和模型 4 的条件被排除。其次,模型 1 和模型 2 在早期北西向断层基础上均发育晚期近东西向断层,其中模型 1 北部断层稳定分布于北东东向 $N75^{\circ}$ 左右,模型 2 则以南东东向为主,前者 and 红河油田更接近。最后,在应力场分布方面,HH1 井现今最大主应力为 $N60^{\circ}$,落在模型 1 的最大主应力范围之内($N36^{\circ} \sim 69^{\circ}$),而和模型 2 相去甚远($N110^{\circ} \sim 143^{\circ}$)。模型 1 在阶段 2 的最大主应

力方向代表了北东东向断层形成时期的应力状态,而 HH1 井最大主应力方向代表现今应力状态,两者接近,说明北东东向断层自形成至今,区域应力场没有发生大的改变,近东西向左行剪切的边界条件也保持不变。

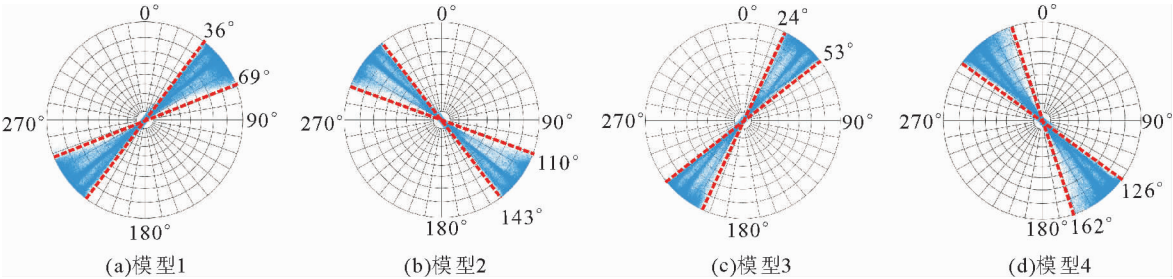
综合上述对比分析,以及油田内地震相干属性呈现出的右阶雁列特征,均指向本地区在延长组沉积以后经历了早期北西向单断式左行走滑以及晚期东西向弥散式左行走滑的构造叠加过程。其中,北东东向断层整体处于拉张应力状态,而早期产生的北西向断层受到前者应力的影响,总体处于挤压应力状态〔见图 15(b)、图 16〕。



注:模型 3 包括(a) ~ (e);模型 4 包括(a) ~ (b)、(f) ~ (h);展示结果为最大累积剪切应变叠合主应力方向。

图 13 模型 3 和模型 4 演化过程对比

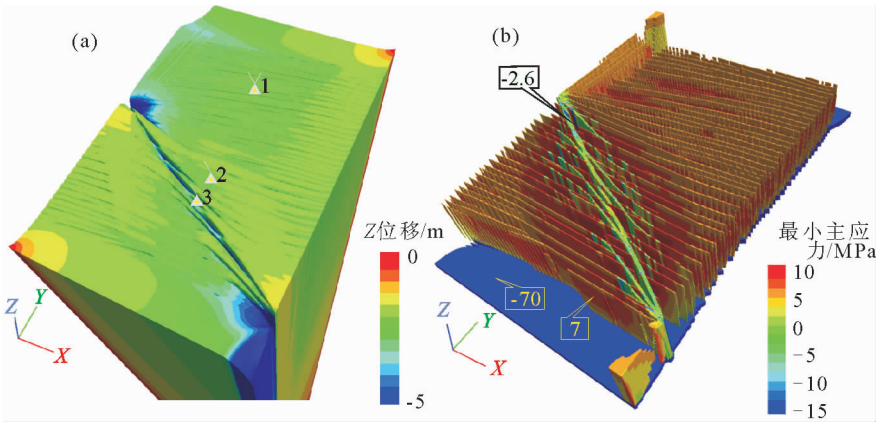
Fig. 13 Evolution comparison of model 3 and model 4



注:模拟最终阶段,样点范围 Z 为 $-2\,580 \sim -2\,500\text{ m}$, Y 为 $3\,000 \sim 2\,7000\text{ m}$ 。

图 14 4 个模型最大主应力方位图

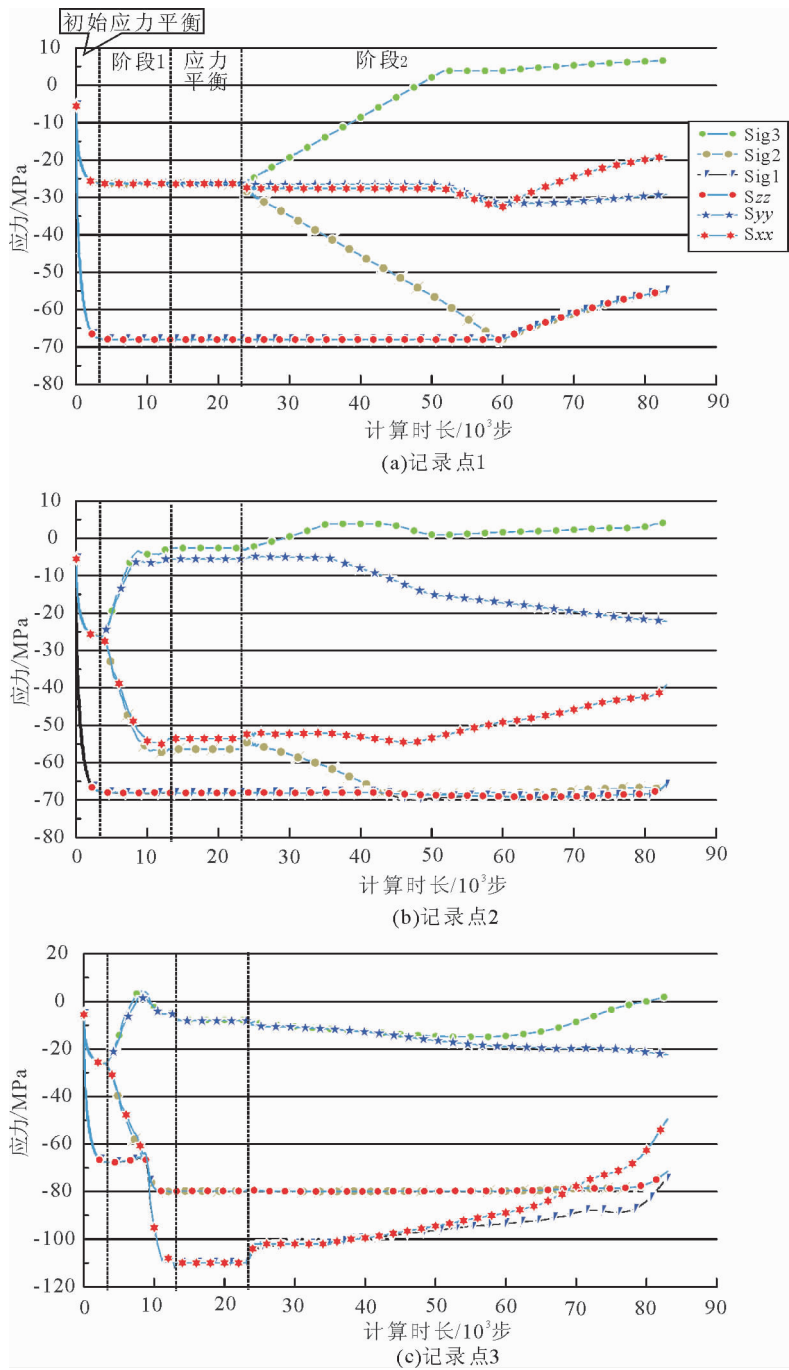
Fig. 14 Orientation diagrams of maximum principal stress of four models



(a) Z 方向放大 500 倍的几何立体图 (b) Z 方向放大 10 倍的断层透视图
注:最小主应力负值表示挤压,正值表示拉张;早期北西向断层整体处于挤压状态,晚期北东东向断层整体处于拉张状态;色标数值做了截止显示。

图 15 模型 1 最终模拟结果

Fig. 15 Final simulation results of Model 1



注: S_{xx} 为 X 方向正应力, S_{yy} 为 Y 方向正应力, S_{zz} 为 Z 方向正应力, $Sig1$ 为最大主应力, $Sig2$ 为中间主应力, $Sig3$ 为最小主应力; 应力负值表示挤压, 正值表示拉张; 记录点位置见图 12a 和图 15a。

图 16 模型 1 的 3 个记录点位置的应力演化曲线
Fig. 16 Stress evolution curves at three record points of Model 1

4 结论

1) 北西走向的玉都断裂带在古生代已经存在, 在晚侏罗世—早白垩世晚期东亚多板块汇聚背景之下, 秦岭北缘往鄂尔多斯盆地发生差异逆

冲, 玉都断裂带复活发生左行走滑, 活动之时玉都断裂带附近最大主应力为北东东向。
2) 北东东向断层较玉都断裂带晚活动, 六盘山向东挤压过程中往盆内传递的缩短应变存在南北差异而导致红河油田发生弥散式左行走滑, 活动之时最大主应力方向为 $N36^{\circ} \sim 69^{\circ}$, 平均

N53°。断裂时间或者发生在新生代,或者发生在早白垩世晚期,新生代基本继承了早期的应力场特征。

3) 北东东向断层整体处于拉张应力状态,而早期产生的北西向断层受到前者应力的影响总体处于挤压应力状态。

参考文献

- [1] 刘震,姚星,胡晓丹,等. 鄂尔多斯盆地中生界断层的发现及其对成藏的意义[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 56-66.
LIU Z, YAO X, HU X D, et al. Discovery of the Mesozoic fault and its implication on the hydrocarbon accumulation in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(2): 56-65.
- [2] 黄雷,刘池洋,何发岐,等. 克拉通盆地内断裂走滑变形特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 930-942.
HUANG L, LIU C Y, HE F Q, et al. Strike-slip deformation characteristics of fault in Craton Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(6): 930-942.
- [3] 张园园,任战利,何发岐,等. 克拉通盆地构造转折区中—新生界构造特征及其控藏意义:以鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区延长组为例[J]. 岩石学报, 2020, 36(11): 3537-3549.
ZHANG Y Y, REN Z L, HE F Q, et al. Meso-Cenozoic structural characteristics and their reservoir controls of structural transition area in China Craton: A case study of Yanchang Formation in Zhenjing area of southwestern Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(11): 3537-3549.
- [4] YANG G L, REN Z L, ZHANG Y Y, et al. Prediction and research of fracture distribution characteristics of the Chang 8 reservoir in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. Interpretation, 2022, 10(4): 25-35.
- [5] 潘杰,刘忠群,蒲仁海,等. 鄂尔多斯盆地镇原—泾川地区断层特征及控油意义[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(2): 360-370.
PAN J, LIU Z Q, PU R H, et al. Fault characteristics and oil-controlling effects in Zhenyuan-Jingchuan district, Southwestern Ordos Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(2): 360-370.
- [6] 郑和荣,胡宗全,云露,等. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 224-238.
ZHENG H R, HU Z Q, YUN L, et al. Strike-slip faults in marine cratonic basins in China: Development characteristics and controls on hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 224-238.
- [7] 曾联波,李忠兴,史成恩,等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
ZENG L B, LI Z X, SHI C E, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-180.
- [8] FINKBEINER T, BARTON C A, ZOBACK M D. Relationships among in-situ stress, fractures and faults, and fluid flow: Monterey formation, Santa Maria Basin, California[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(12): 1975-1999.
- [9] BECKER S, HILGERS C, KUKLA P A, et al. Crack-seal microstructure evolution in bi-mineralic quartz-chlorite veins in shales and siltstones from the RWTH-1 well, Aachen, Germany [J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(4): 676-689.
- [10] 鞠玮,侯贵廷,冯胜斌,等. 鄂尔多斯盆地庆城—合水地区延长组长6₃ 储层构造裂缝定量预测[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 310-320.
JU W, HOU G T, FENG S B, et al. Quantitative prediction of the Yanchang formation Chang 6₃ reservoir tectonic fracture in the Qingcheng-Heshui Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 310-320.
- [11] 王翠丽,周文,李红波,等. 镇泾地区延长组多期次裂缝发育特征及分布[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 596-603.
WANG C L, ZHOU W, LI H B, et al. Characteristics and distribution of multiphase fractures in Yanchang Formation of Zhenjing block in Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2014, 41(5): 596-603.
- [12] LIU J H, YANG H M, WU X F, et al. The insitu stress field and microscale controlling factors in the Ordos Basin, central China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 135: 104482.
- [13] 刘敬寿,丁文龙,肖子亢,等. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2283-2300.
LIU J S, DING W L, XIAO Z K, et al. Advances in

- comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2283-2300.
- [14] CHEMENDA A I, CAVALIÉ O, VERGNOLLE M, et al. Numerical model of formation of a 3D strike-slip fault system [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2016, 348(1): 61-69.
- [15] KIM B H, LARSON M K. Development of a fault-rupture environment in 3D: A numerical tool for examining the mechanical impact of a fault on underground excavations [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(1): 105-111.
- [16] EREMIN M. Finite-difference numerical analysis of faulting and accompanying seismicity near the Chuya and Kurai depressions, Gorny Altai, Russia [J]. *Tectonophysics*, 2021, 803: 228703.
- [17] SHEN Z, YU F, WANG Q, et al. Discrete element method simulation of the fold-and-thrust belts along strike various compression in the southern margin of the Junggar Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 145: 105849.
- [18] 祁凯,任战利,张梦婷,等.渭河地区及周缘晚古生代—中生代碎屑锆石年代学、地球化学及构造—沉积意义[J]. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1897-1912.
- QI K, REN Z L, ZHANG M T, et al. Characteristics of geochronology, geochemistry of Late Paleozoic and Mesozoic in Weihe region and its tectonic-sedimentary significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1897-1912.
- [19] 刘池洋,赵红格,桂小军,等.鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.
- LIU C Y, ZHAO H G, GUI X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. *Acta Geological Sinica*, 2006, 80(5): 617-638.
- [20] 何登发,包洪平,开百泽,等.鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. *石油学报*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- HE D F, BAO H P, KAI B Z, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [21] 李超,张立强,张立宽,等.鄂尔多斯盆地镇泾地区中生代地层剥蚀厚度估算及古构造恢复[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(2): 72-79.
- LI C, ZHANG L Q, ZHANG L K, et al. Estimation of denudation thickness of Mesozoic strata and paleostructure restoration in Zhenjing Area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(2): 72-79.
- [22] 刘池洋,赵红格,王锋,等.鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 737-747.
- LIU C Y, ZHAO H G, WANG F, et al. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 737-747.
- [23] 董树文,张岳桥,陈宣华,等.晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. *地球学报*, 2008, 29(3): 306-317.
- DONG S W, ZHANG Y Q, CHEN X H, et al. The formation and deformational characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 306-317.
- [24] 陈刚,孙建博,周立发,等.鄂尔多斯盆地西南缘中生代构造事件的裂变径迹年龄记录[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(增刊1): 110-118.
- CHEN G, SUN J B, ZHOU L F, et al. Tectonic events in southwestern margin of Ordos Basin in Mesozoic using fission track dating [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(S1): 110-118.
- [25] YANG X Y, DONG Y P. Mesozoic and Cenozoic multiple deformations in the Helanshan tectonic belt, northern China [J]. *Gondwana Research*, 2018, 60: 34-53.
- [26] 马静辉,何登发.贺兰山构造带及邻区中—新生代构造事件:来自不整合面和裂变径迹的约束[J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1121-1142.
- MA J H, HE D F. Meso-Cenozoic tectonic events in the Helanshan tectonic belt and its adjacent areas: Constraints from unconformity and fission track data [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1121-1142.
- [27] 彭恒,刘显阳,刘池洋,等.鄂尔多斯盆地西南缘中生代中晚期构造体制转化过程及其动力学背景[J]. *地质学报*, 2022, 96(2): 387-402.
- PENG H, LIU X Y, LIU C Y, et al. Spatial-temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid-Late Mesozoic tectonic regimes of the southwest Ordos Basin margin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 387-402.
- [28] ZHANG S H, LIU C Y, YANG M H, et al. Latest Triassic to early Jurassic thrusting and exhumation in the southern Ordos Basin, north China: Evidence from LA-ICP-MS-based apatite fission track thermochronology

- gy [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2018, 92(4): 1334-1348.
- [29] 李锦轶, 张进, 刘建峰, 等. 中国大陆主要变形系统[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3): 226-245.
- LI J Y, ZHANG J, LIU J F, et al. Major deformation systems in the mainland of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3): 226-245.
- [30] DOOLEY T P, SCHREURS G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results [J]. *Tectonophysics*, 2012, 574: 1-71.
- [31] 王建强, 刘池洋, 闫建萍, 等. 鄂尔多斯盆地南部渭北隆起发育时限及其演化[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(4): 22-29.
- WANG J Q, LIU C Y, YAN J P, et al. Development time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south of Ordos Basin [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 46(4): 22-29.
- [32] 许文强, 袁炳强, 张春灌, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起带重磁场特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(6): 114-120.
- XU W Q, YUAN B Q, ZHANG C G, et al. Characteristics of gravity and magnetic field in Weibei uplift of Ordos Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(6): 114-120.
- [33] DONG Y P, YANG Z, LIU X M, et al. Mesozoic intracontinental orogeny in the Qinling Mountains, central China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 30: 144-158.
- [34] McKINNON S D, DE LA BARRA I G. Fracture initiation, growth and effect on stress field: A numerical investigation [J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(12): 1673-1689.
- [35] BYERLEE J. Friction of rocks [J]. *Rock friction and earthquake prediction*, 1978, 116: 615-626.
- [36] LOHRMANN J, KUKOWSKI N, ADAM J, et al. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(10): 1691-1711.
- [37] 李延兴, 张静华, 郭良迁, 等. 鄂尔多斯的逆时针旋转与动力学[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(3): 50-56.
- LI Y X, ZHANG J H, GUO L Q, et al. Counterclockwise rotation and geodynamics of Ordos Block [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(3): 50-56.
- [38] 郑文俊, 王庆良, 陈九辉, 等. 鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展[J]. *地震科学进展*, 2020, 50(4): 1-21.
- ZHENG W J, WANG Q L, CHEN J H, et al. Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos Active Block [J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2020, 50(4): 1-21.
- [39] VERMEER P A, DE BORST R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock [J]. *Heron*, 1984, 29(3): 1-64.
- [40] CROOK A, OWEN D, WILLSON S, et al. Benchmarks for the evolution of shear localisation with large relative sliding in frictional materials [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195(37/40): 4991-5010.
- [41] 黄光明, 王岳军, 赵勇刚, 等. 大巴山前陆冲断带构造样式和演化过程的数值模拟[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 653-668.
- HUANG G M, WANG Y J, ZHAO Y G, et al. Numerical simulation of structural styles and evolution of the Daba Shan foreland thrust belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(4): 653-668.
- [42] SCHREURS G. Fault development and interaction in distributed strike-slip shear zones: An experimental approach [C] // STORTI F, HOLDSWORTH R E, SALVINI F. *Intraplate Strike-slip Deformation Belts*. London: Special Publications, 2003.
- [43] VERMEER P A. The orientation of shear bands in biaxial tests [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(2): 223-236.

(编辑 雷雁林)