

鄂尔多斯盆地西缘麻黄山西工区走滑断层构造特征与三维离散元数值模拟^{*}

罗良^{1,2} 贾会冲³ 杨明慧^{1,2} 刘雅蓉^{1,2}

黎小伟³ 杨飞³ 刘志娜^{1,2} 白东来^{1,2}

(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. 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司 郑州 450006)

摘 要 麻黄山西工区位于鄂尔多斯盆地西缘冲断带的前端部位,以石炭—二叠系煤系滑脱层为界划分为上、下两套构造变形层,并受燕山期走滑断层作用表现出分段变形特征。深层原地构造系统沙窝子断层以北的正断层构成多米诺组合型式,而沙窝子与圈湾子断层之间的正断层组合成堑垒式。浅层逆冲推覆构造系统以NEE向芦沟子—新泉井断层为界,划分为变形特征差异明显的南、北两段,北段相对南段变形强烈。三维离散元数值模拟实验结果显示,麻黄山西工区上、下构造变形层内发育的走滑断层均为调节差异挤压作用形成的撕裂断层,断层走向与挤压应力方向基本一致。原地构造系统的先存正断层在走滑作用下产生牵引,邻近走滑断层的正断层走向发生明显偏转。逆冲推覆构造系统北段山前强烈冲断作用对盆内产生较为明显影响;而南段山前冲断作用并未对盆内产生明显影响,仅发育少量小规模逆断层。相较于二维模拟,三维模拟能够实现平面与剖面的综合分析,完整认识上、下构造变形层多条走滑断层的变形过程与形成机制,为麻黄山西工区的油气勘探提供基础地质理论指导。

关键词 鄂尔多斯盆地西缘 麻黄山西 三维数值模拟 走滑断层 差异挤压

中图分类号: P542

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2023)04-1210-16

中国中西部克拉通盆地发育在前寒武纪结晶基底之上,盆缘通常被冲断带围限,盆内变形相对较弱,地层平缓,沉积环境稳定(贾承造等, 2007)。近年来,随着油气勘探开发实践的逐步深入,以塔里木盆地典型代表,在盆内识别出广泛分布的走滑断层系统(焦方正, 2017; 吕海涛等, 2017)。这些高陡走滑断层不仅在纵向上沟通多套生储盖组合,对油气运聚和圈闭形成具有重要的控制作用,而且对深埋条件下储层的形成和改造作用显著,已成为油气地质学研究的热点(何发岐等, 2020; 张银涛等, 2020; 贾承造等, 2021; 焦方正等, 2021; 欧阳征健等, 2021; 云露, 2021; 杨庚等, 2023)。

鄂尔多斯盆地是我国中西部典型的克拉通内坳陷盆地,周缘发育逆冲断层系统,内部断层活动相对较弱,以发育规模较小断层为特征(郑和荣等, 2022)。高精度三维地震资料精细解析在盆内识别出多个走滑断层系统,主要包括西南部的NNW向走滑断

^{*} 中国石化科技部项目群课题4(编号: P20062-4)资助。

罗良,男,1982年生,博士,副教授,构造地质学专业。E-mail: luoliang1225@163.com

2022-11-21收稿,2023-05-21改回。

层体系及西缘和北缘的近E-W向走滑断层体系。然而,与塔里木盆地中部相比,鄂尔多斯盆地走滑断控型油气资源潜力还有待进一步落实,尤其是走滑断层的成因机制及其对油气差异聚集控制机理方面的认识仍滞后于勘探实践(贾承造等,2021)。

本文以鄂尔多斯盆地西缘麻黄山西工区为例,利用三维地震构造解析,明确走滑断层的变形特征,采用三维离散元数值模拟方法,从平面和剖面探讨走滑断层发育的控制因素、变形过程及其形成机制,为该区的油气勘探提供基础地质理论指导。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是整体沉降、拗陷迁移的大型多旋回克拉通盆地(何自新等,2003;杜金虎等,2019;冯娟萍等,2020;周进高等,2020),总体呈东翼宽缓、西翼窄陡的不对称大向斜,可划分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环凹陷和西缘冲断带6个二级构造单元(张义楷,2007;刘广林等,2016;杨振等,2020;毛丹凤等,2023)。盆地西缘受秦岭—祁连造山带和阿拉善地块长期活动的影响,地质构造极为复杂(王岚,2005;杨文敬,2006;张满郎等,2009)。基于重力、航磁遥感和地震资料的综合分析,西缘冲断带可进一步划分为北段、中段和南段(图1a)(赵红格等,2006;杨华等,2011;朱昊,2015)。

麻黄山西工区位于鄂尔多斯盆地西缘冲断带的前端部位(罗桂滨,2008;冯一波,2010;彭安钰,2015),处于甜水堡段的中北部,隔中卫—中宁断层与马家滩段相邻(图1a),发育芨芨滩冲断席、西雪梁子构造带及天环向斜3个构造单元,构造主形成期为燕山期。

2 分层、分段变形与走滑断层

麻黄山西工区以石炭—二叠系煤系滑脱层为界,可划分为上、下两套构造变形层,本文将其分别称为原地构造系统和逆冲推覆构造系统。深层原地构造系统表现出“南北分段”的构造变形特征,主要发育加里东期NE/NNE向正断层及燕山期近E-W向走滑断层。浅层逆冲推覆构造系统具有“东西分带、南北分段”差异构造变形特征。

2.1 原地构造系统变形特征

深层原地构造系统的断层大多向上终止于石炭—二叠系煤系滑脱层之下。 T_{10} 反射层相干运算结果显示原地构造系统主要发育近E-W向、NE/NNE向两组断层(图2a)。NE/NNE向断层在剖面上表现为基底卷入正断层,断面相对较陡,断距不大。平面上,近E-W向的沙窝子和圈湾子断层在切片上表现出明显不相干性,根据相干性大小,沙窝子和圈湾子断层呈断续连接,但颜色较浅,反映断层两盘的不相似程度较小,断层活动造成的垂向错位不大(图2a)。断层迹线为近平行或雁列式排列,指示右行走滑性质。剖面上,沙窝子和圈湾子断层切割多个地层,涉及垂向深度大。沙窝子断层与碱沟子南断层向下并入一条北倾的主干断层,组合成负花状构造,而圈湾子断层向下与兔沟断层也组合成负花状构造(图3)。花状构造的主干断层深切基底,断距非常小。沙窝子和圈湾子断层将原地构造系统划分成北、中和南3段(图4)。

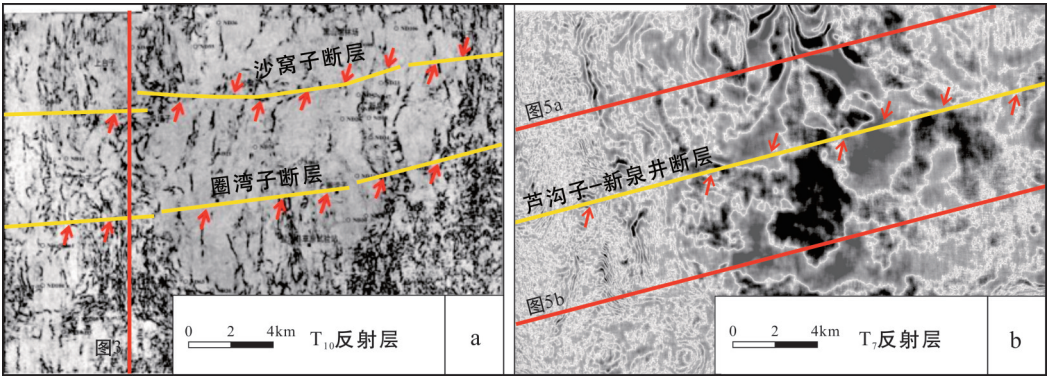


图 2 麻黄山西工区 T_{10} 反射层(a)与 T_7 反射层(b)相干解释图

Fig. 2 Interpretation of coherence slice of T_{10} reflector (a) and T_7 reflector (b) in the western Mahuangshan work area

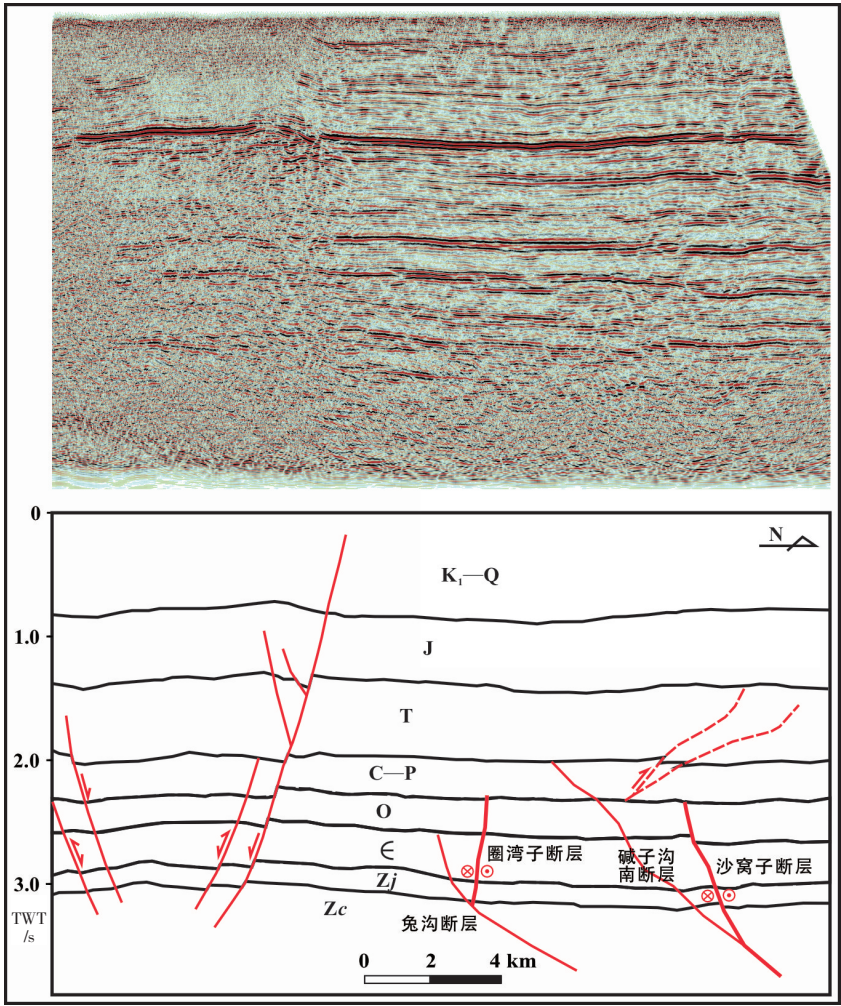


图 3 麻黄山西工区南北向典型地震剖面解释图

Fig. 3 Interpretation of typical S-N direction seismic profile in the western Mahuangshan work area

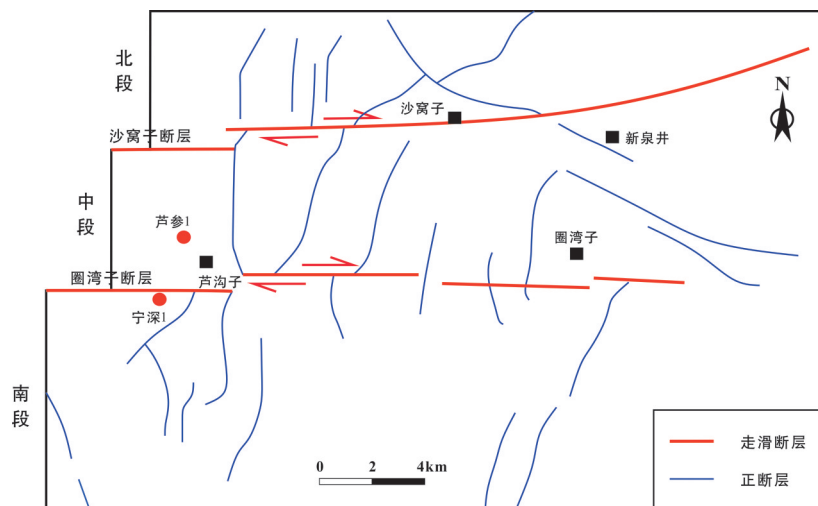


图 4 麻黄山西工区下构造变形层断裂系统图

Fig. 4 Fault system map of the lower structural deformation layer in the western Mahuangshan work area

2.2 逆冲推覆构造系统变形特征

T_7 反射层相干运算结果显示浅层逆冲推覆构造系统以 NEE 向芦沟子—新泉井断层为界,划分为变形特征差异明显的南、北两段(图 2b)。

逆冲推覆构造系统北段 NEE 向典型地震解释剖面以 F2 断层为界分为前缘带和前缘外带(图 5a)。前缘带构造变形复杂, F1、F2 断层和石炭—二叠系滑脱层分隔并控制了上部地层的差异冲断和褶皱变形。滑脱层之下构造相对简单,发育奥陶系低幅度背斜;其上以石炭—二叠系滑脱层为底板断层,发育一系列低角度逆断层,在前端与沿刘家沟组泥岩滑脱形成的反冲断层共同构成被动顶板双重构造。前缘外带与前缘带构造变形差异明显,位移沿石炭—二叠系煤层、刘家沟组泥岩、延长组泥岩、延安组煤层及直罗组泥岩向东传播,由不同滑脱层及分支断层构成不同类型的断层相关褶皱。总体而言,北段冲断褶皱变形较强。

逆冲推覆构造系统南段 NEE 向典型地震解释剖面以 F3 反冲断层为界分为前缘带和前缘外带(图 5b)。前缘带由 F1 断层和石炭—二叠系滑脱层分隔并控制其上部地层的差异冲断和褶皱变形。F1 断层之上发育多条上陡下缓的逆断层构成叠瓦构造。冲断席前端被高角度反冲断层(F3)截断,形成构造楔,上盘发育断展褶皱。前缘外带构造变形相对较弱,在石炭—二叠系、三叠系、中-下侏罗统和下白垩统中形成楔状体及低幅度滑脱褶皱。总体而言,南段冲断褶皱变形较弱。

根据区域应力场分析,燕山期,鄂尔多斯盆地西缘遭受 NWW-SEE 向挤压应力作用(徐黎明等, 2006; 杨圣彬等, 2008; 刘亢等, 2014; 王天宇, 2020)。受此影响,深层少量先存正断层发生反转,并引起近 E-W 向的沙窝子和圈湾子断层的右行走滑作用(图 3),同时,浅层形成逆冲推覆构造(图 5)。逆冲推覆构造系统北段变形强、南段变形的构造格局,与原地构造系统的构造格局基本一致。

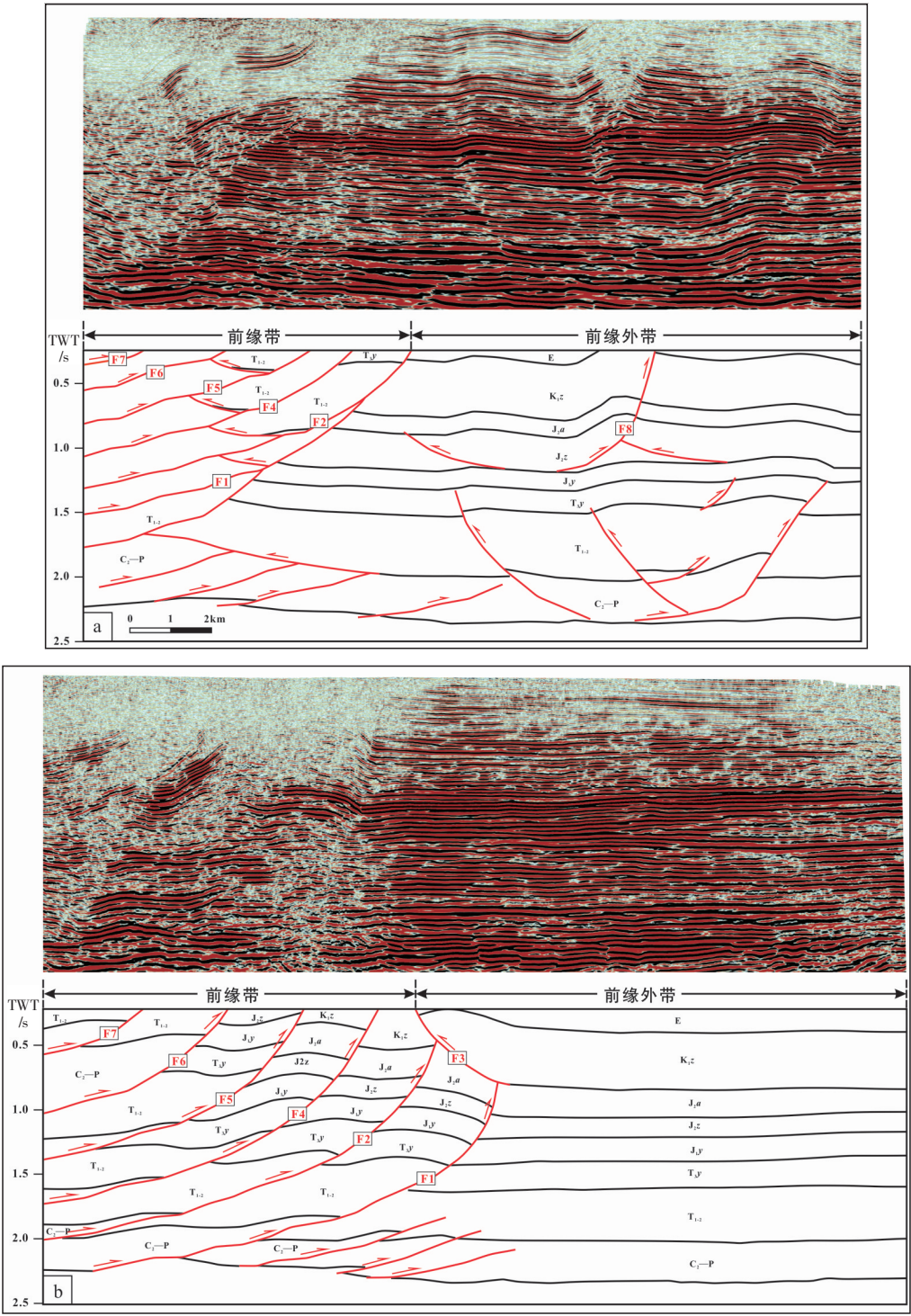


图 5 麻黄山西工区上构造变形层北段(a)与南段(b)典型地震解释剖面图

Fig. 5 Interpretation of typical seismic profiles across the northern (a) and southern (b) segments of the upper structural deformation layer in the western Mahuangshan work area

3 研究方法

3.1 离散元数值模拟方法

离散元数值模拟方法通过时间一位移有限差分方法计算在牛顿定律下离散颗粒在空间内的位移和形变，构建精确的颗粒集几何形态，能够有效模拟颗粒间弹塑性变形过程(Dean et al., 2013)。该方法广泛应用于模拟断裂变形过程(李维波等, 2017; 段云江等, 2021, 2022)，主要集中在倾滑断层，且以二维模拟为主，针对走滑断层的三维模拟鲜有开展。本文对麻黄山西工区上、下构造变形层发育的3条走滑断层开展三维离散元数值模拟，据此建立走滑断层的形成机制与变形过程。

3.2 实验参数

参数选取对数值模拟实验至关重要，前人研究结果及相关资料显示，由于离散元原理及PFC软件的特性，用于离散元模拟的颗粒参数与宏观材料特性不同，是由颗粒微观特征控制，如颗粒的弹性模量小于宏观弹性模量、颗粒间的摩擦系数大于宏观摩擦系数，而正向与切向粘结强度则一定程度上反映模型的抗张强度与抗剪强度(Egholm et al., 2007; Liu et al., 2013; 孙婧等, 2016)。根据麻黄山西工区主要地层的岩性特征及地震解释结果，研究区主要发育石炭一二叠系滑脱层(图 1b)，分隔上、下两套构造变形层，表现出显著的差异构造变形特征。参考鄂尔多斯盆地西缘及类似盆地各种岩性的实测岩石力学参数(李江海等, 2020; Chen et al., 2022; 刘敬寿等, 2022)，结合物理砂箱实验材料硅胶、石英砂等材料的力学属性，在一定范围内按一定间隔对弹性模量、摩擦系数、粘结强度等做连续取值实验并观察模型变形状况。经过多次实验，模型地层的岩石力学参数设置如表 1 所示，所有层颗粒均服从高斯分布。模型内所有墙体摩擦系数为 2，切向刚度为 1×10^9 N/m，法向刚度为 3×10^9 N/m。

表 1 麻黄山西工区三维离散元数值模拟实验参数表										
Table 1 Experimental parameters of 3D discrete element numerical simulation in the western Mahuangshan work area										
地层	岩性	厚度 /m	颗粒粒径 /m	摩擦系数	密度 /(kg/m^3)	杨氏模量 / $\times10^4$ MPa	法向刚度 /(N/m)	剪切刚度 /(N/m)	抗张强度 /MPa	抗剪强度 /MPa
K—Cz	粉砂岩、页岩、砂岩、含砾粗砂岩	1.68	0.16 ~ 0.24	2	2600	3.4	4×10^9	1×10^9	6	9
J	粉砂岩、泥页岩、砂岩互层，夹煤层	1.68	0.16 ~ 0.24	2	2500	3.2	5.5×10^6	2×10^6	7	10
T	砂岩	1.68	0.16 ~ 0.24	2	2800	4	6.5×10^9	3×10^9	11	15
C—P (滑脱层)	中-细粒砂岩、泥岩与煤层互层	1.68	0.16 ~ 0.24	0.1	2100	3.3	6×10^6	2×10^6	5	7
pre-C	灰岩、白云岩、石英砂岩	1.92	0.16 ~ 0.24	2	2600	3.4	6×10^9	2×10^9	14	19

3.3 模型设计

离散元数值模拟实验模型与实际地质体尺寸按1:500比例设置,在长50 m(x 轴)、宽60 m(y 轴)、高20 m(z 轴)的空间范围内,按照颗粒半径为0.16~0.24 m随机生成422 257个颗粒,使其在重力作用下自然压实并达到自然平衡,然后逐步删除顶部颗粒,仅保留50 m×60 m×8.64 m范围内的颗粒,获得离散元数值模拟的初始模型(图6),之后对颗粒进行属性赋值。

根据麻黄山西工区的构造变形特征,数值模拟实验初始模型划分双构造变形层,用以模拟实际地层变形(图6)。球心 z 轴坐标范围为0~1.92 m的颗粒设置为深部脆性层(石炭系以下地层),并设置多条先存正断层(法向刚度为 3×10^9 N/m,剪切刚度为 1×10^9 N/m,抗张强度和抗剪强度均为0),称为下构造变形层,对应原地构造系统;范围在1.92~3.6 m的颗粒设置为软弱层(石炭一二叠系),范围在3.6~8.64 m的颗粒设置为浅部脆性层(三叠系及其以上地层),浅部脆性层分为3小层,分别为范围在3.6~5.28 m,5.28~6.96 m,6.96~8.64 m的颗粒,浅部脆性层与软弱层合称为上构造变形层,对应逆冲推覆构造系统。各层设置不同颜色以便区分。

以初始模型为基础,固定右端墙体及底板,左端作为施力端,左侧刚性墙体以不同的速率向 x 轴方向挤压(图6)。对于上构造变形层,北段挤压速率设定为0.2 m/s,直至缩短率达到25%,记录变形过程,分别选取缩短率为5%、10%、15%、20%、25%的变形结果进行对比分析;南段挤压速率设定为0.1 m/s,直至缩短率达到12.5%,记录变形过程,分别选取缩短率为2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%的变形结果进行对比分析。对于下构造变形层,北、中和南段挤压速率分别设定为0.08 m/s、0.06 m/s、0.04 m/s。离散元模型时步(timestep)固定为 5×10^{-5} ,以最小挤压速率(0.04 m/s)挤压,每挤压0.025 m记录一次,每记录一次运行12 500步,整个挤压变形经过1 250 000步,模型最

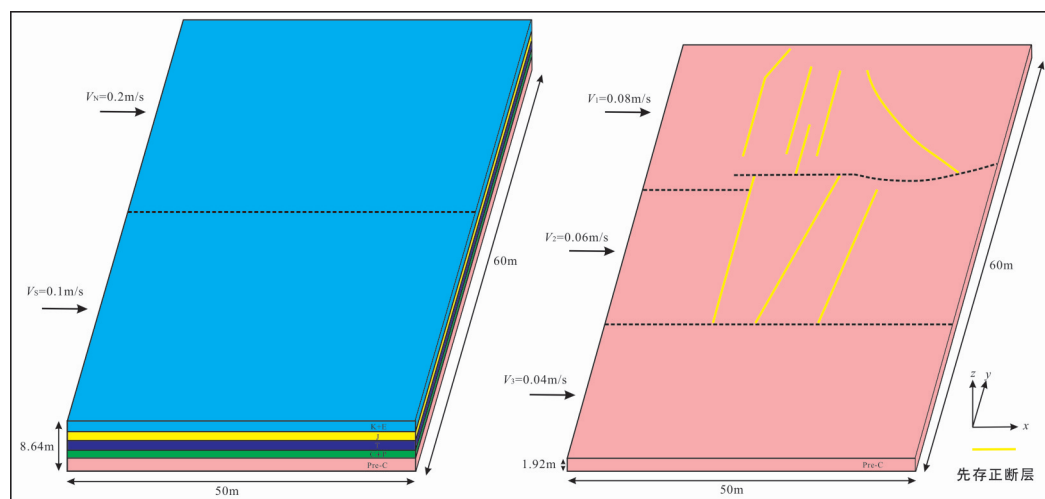


图6 麻黄山西工区三维离散元模型图

Fig. 6 The model of three-dimensional discrete element numerical simulation of the western Mahuangshan work area

大挤压 12.5 m，最大缩短率为 25%，接近实际地层的缩短率。

4 离散元数值模拟实验结果分析

4.1 下构造变形层

从下构造变形层顶部俯视图可以看出，北段、中段和南段差异挤压作用导致撕裂断层的形成和发育(图 7)。当北段缩短率达到 2% 时，沙窝子断层和圈湾子断层西段开始发育，表现为右行走滑性质，断层两侧的先存正断层并未发生明显的牵引作用。当北段缩短率达到 4% 时，沙窝子断层中段和圈湾子断层东段开始活动，断层两侧的先存正断层发生牵引作用，尤其是沙窝子断层西段和中段的叠接部位。随着缩短率进一步增大，差异挤压作用愈发明显，走滑断层位移量逐渐增大，紧邻走滑断层的先存正断层受牵引作用影响发生变形，走向逐渐偏转。最终，北段缩短率达到 10% 的模拟结果与现今下构造变形层的平面构造样式具有很高的相似性。

4.2 上构造变形层

上构造变形层发育的断层，尤其是远离挤压端的断层，普遍断距较小，仅通过颗粒错动较难识别，因此我们将颗粒运动和位移量相结合识别断层并解释各缩短率下的北段和南段的典型剖面。

从主应力方向的北段典型剖面(过点(0, 45, 0)，法向量为(0, 1, 0))(图 8)中可以看出，模型的变形主要集中在挤压端，绝大部分断层发育于石炭—二叠系滑脱层。

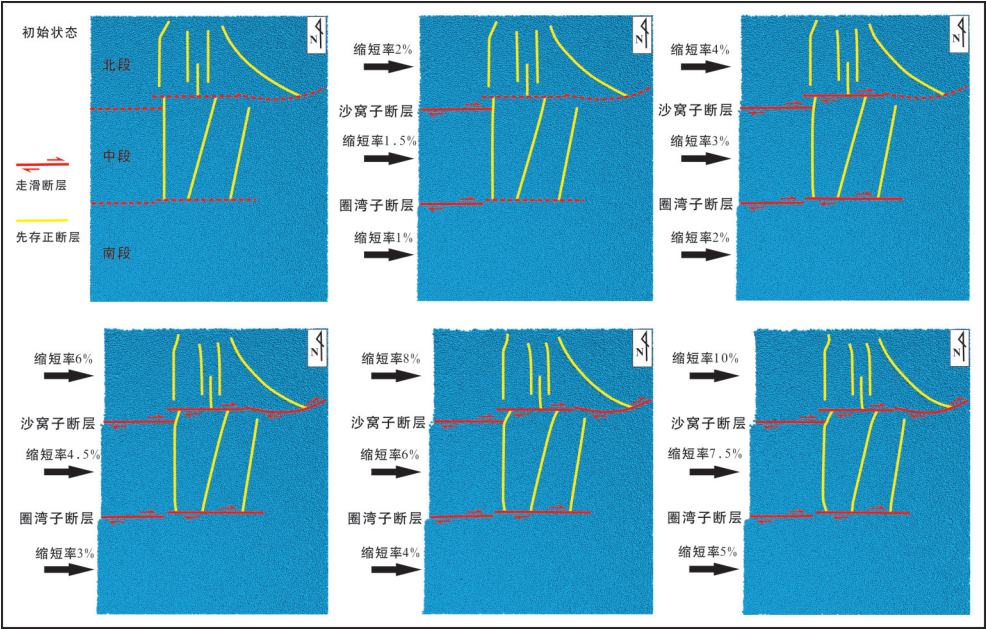


图 7 麻黄山西工区下构造变形层走滑断层演化图

Fig. 7 Strike-slip fault evolution map of the lower structural deformation layer in the western Mahuangshan work area

当缩短率为5%时,大部分断层已形成,挤压端后缘断层上盘发育反冲断层,与主断层构成冲起背斜。绝大部分断层倒向盆内,组合形成叠瓦构造。随着模型缩短量进一步增加,断距逐渐增加。当缩短率达到20%,远离挤压端发育一条反冲断层,与前缘断层一起在盆内组合成宽缓背斜。缩短率达到25%的模拟剖面与现今剖面具有很高的相似性。

从主应力方向的南段典型剖面(过点(0, 15, 0),法向量为(0, 1, 0))(图9)中可以看出,模型的变形同样主要集中在挤压端,绝大部分断层发育于石炭—二叠系滑脱层。挤压端发育叠瓦构造,后缘前冲断层与反冲断层组合成冲起背斜。当缩短率达到12.5%,远离挤压端,白垩系与古近系内发育一条反冲断层,与前缘断层一起在盆内组合形成小型冲起背斜,此时的模拟剖面与现今剖面具有很高的相似性。

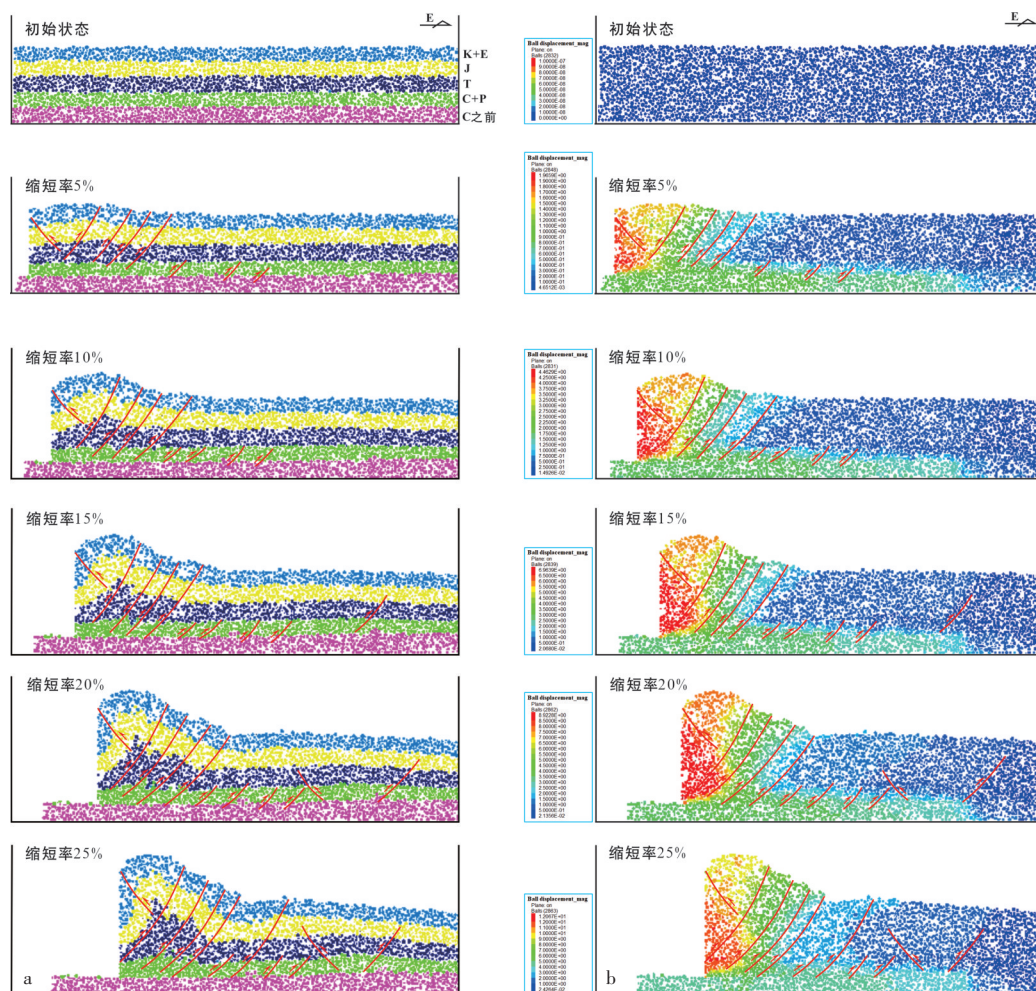


图8 麻黄山西工区上构造变形层北段演化剖面图

a. 颗粒运动图; b. 位移量图

Fig. 8 Evolution profile of the northern segment of upper structural deformation layer in the western Mahuangshan work area

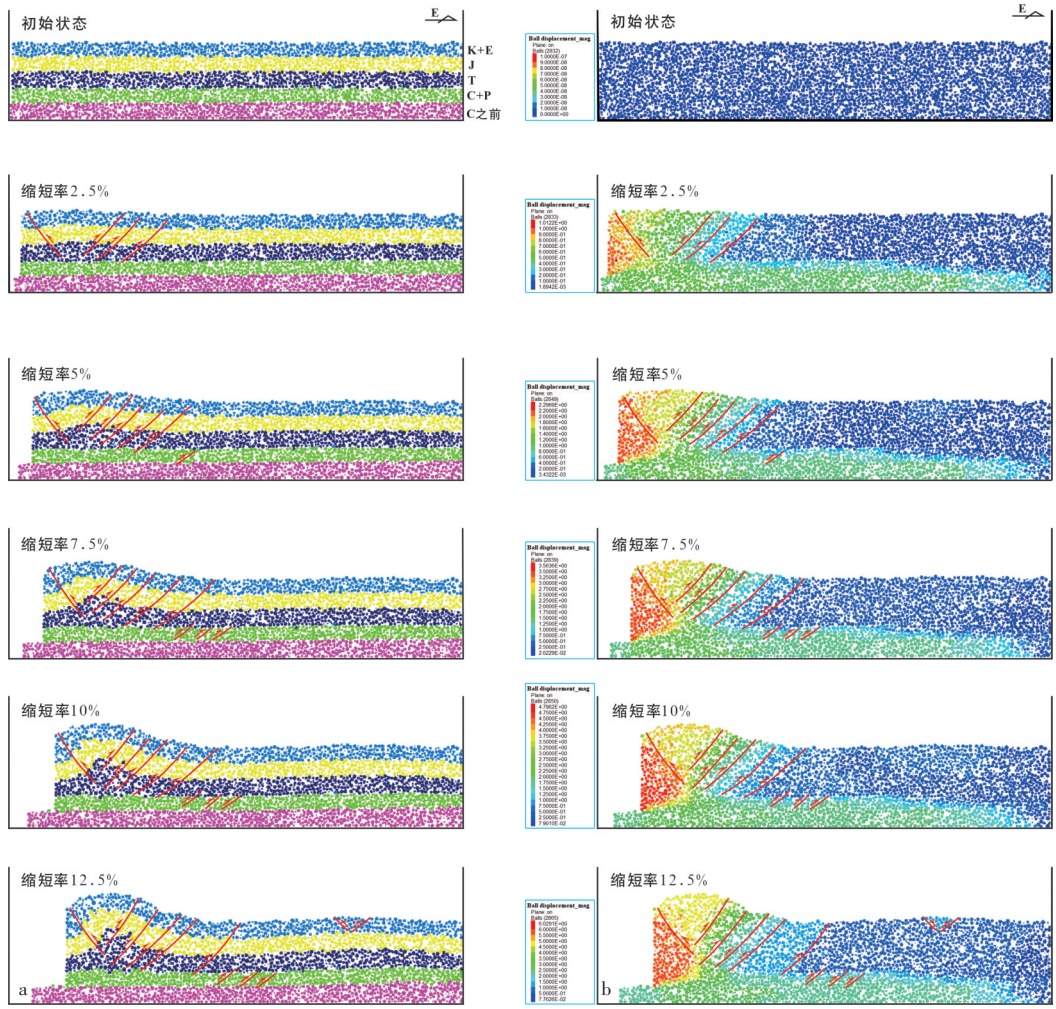


图 9 麻黄山西工区上构造变形层南段演化剖面图
a. 颗粒运动图；b. 位移量图

Fig. 9 Evolution profile of the southern segment of upper structural deformation layer in the western Mahuangshan work area

5 讨论与结论

三维离散元数值模拟过程较为复杂，计算量与二维离散元数值模拟相比呈指数增长，对特定研究区的定量模拟难度较大(Guo and Morgan, 2004; Morgan and McGovern, 2005; Naylor et al., 2005; Dean et al., 2013; 李江海等, 2020)。然而，与二维模拟相比，三维模拟可以更好地对主应力方向剖面及平面模拟结果进行综合分析，探讨构造变形的主控因素与发育过程。鄂尔多斯盆地西缘麻黄山西工区构造演化过程与构造变形样式十分复杂，因此，本文主要采用定性模拟，结合部分定量模拟的方法，根据地震解释结果得到的变形特征，设定模型的边界条件，探讨走滑断层形成的主控因素、

形成机制与演化过程。

麻黄山西工区构造具有显著的分层变形特征。上构造变形层以芦沟子—新泉井走滑断层为界,划分为南北两段,北段构造变形强烈,而南段相对较弱。数值模拟实验结果显示,南北两段的变形均主要集中在挤压端,绝大多数断层发育于石炭—二叠系滑脱层,组合构成叠瓦构造,同时,挤压端发育反冲断层。随着缩短率增加,过渡带发育芦沟子—新泉井断层,为右行走滑断层,调节南北两段的差异挤压作用。总体来看,北段山前强烈的冲断作用对盆内产生了较为明显的影响,盆内发育多条逆断层,部分断层的规模较大;而南段山前冲断作用并未对盆内产生明显的影响,仅有少量小规模逆断层发育。

地震资料解释表明,下构造变形层以沙窝子和圈湾子走滑断层为界,划分为北、中和南3段,晚期挤压作用较弱,先存正断层仅有少量发生了正反转。数值模拟实验结果显示,由北往南依次减弱的差异挤压作用是形成沙窝子和圈湾子右行走滑断层的主控因素。先存正断层在走滑作用下产生牵引,邻近走滑断层的正断层走向发生明显偏转。

总体而言,麻黄山西工区上、下构造变形层内发育的走滑断层均为调节差异挤压作用形成的撕裂断层,断层走向与挤压应力方向基本一致。

致 谢 感谢中国石油化工股份有限公司华北油气分公司刘林松等专家在地震资料解释工作上给予的指导与帮助!

参 考 文 献

- 杜金虎,李相博,包洪平等. 2019. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域. 石油勘探与开发, 46(5): 820-835.
- Du Jinhu, Li Xiangbo, Bao Hongping et al. 2019. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5): 820-835.
- 段云江, 罗浩渝, 谢会文等. 2021. 塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带中秋—东秋段盐相关构造特征及变形机理. 天然气地球科学, 32(7): 993-1008.
- Duan Yunjiang, Luo Haoyu, Xie Huiwen et al. 2021. Salt-related structural characteristics and deformation mechanism of the Zhongqiu-Dongqiu section of the Qiulitag structural belt, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(7): 993-1008.
- 段云江, 黄少英, 罗彩明等. 2022. 塔里木盆地震旦纪地层—构造特征. 地质科学, 57(2): 341-355.
- Duan Yunjiang, Huang Shaoying, Luo Caiming et al. 2022. Stratigraphic and structural characteristics of Tarim Basin in the Sinian Period. *Chinese Journal of Geology*, 57(2): 341-355.
- 冯娟萍, 李文厚, 欧阳征健. 2020. 鄂尔多斯地区中新元古代构造沉积演化研究. 西北大学学报(自然科学版), 50(4): 634-643.
- Feng Juanping, Li Wenhou and Ouyang Zhengjian. 2020. Tectonic and depositional evolution of Meso-Neo Proterozoic in Ordos area. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 50(4): 634-643.
- 冯一波. 2010. 麻黄山西区块北部延安组沉积微相及储层评价研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学. 1-101.
- Feng Yibo. 2010. The Study of Sedimentary Microfacies and Reservoir Evaluation of Yan'an Formation about the Northern Part of West Block in Mahuangshan Area (Master's Thesis). Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-101.

- 何发岐, 梁承春, 陆 骋等. 2020. 鄂尔多斯盆地南缘过渡带致密—低渗油藏断缝体的识别与描述. 石油与天然气地质, 41(4): 710-718.
- He Faqi, Liang Chengchun, Lu Cheng et al. 2020. Identification and description of fault-fracture bodies in tight and low permeability reservoirs in transitional zone at the south margin of Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 710-718.
- 何自新, 付金华, 席胜利等. 2003. 苏里格大气田成藏地质特征. 石油学报, 24(2): 6-12.
- He Zixin, Fu Jinhua, Xi Shengli et al. 2003. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field. *Acta Petroli Sinica*, 24(2): 6-12.
- 贾承造, 李本亮, 张兴阳等. 2007. 中国海相盆地的形成与演化. 科学通报, 52(增刊1): 1-8.
- Jia Chengzao, Li Benliang, Zhang Xingyang et al. 2007. Formation and evolution of marine basins in China. *Chinese Science Bulletin*, 52(suppl. 1): 1-8.
- 贾承造, 马德波, 袁敬一等. 2021. 塔里木盆地走滑断裂构造特征、形成演化与成因机制. 天然气工业, 41(8): 81-91.
- Jia Chengzao, Ma Debo, Yuan Jingyi et al. 2021. Structural characteristics, formation & evolution and genetic mechanisms of strike-slip faults in the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(8): 81-91.
- 焦方正. 2017. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义. 石油与天然气地质, 38(5): 831-839.
- Jiao Fangzheng. 2017. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 831-839.
- 焦方正, 杨 雨, 冉 崎等. 2021. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探. 天然气工业, 41(8): 92-101.
- Jiao Fangzheng, Yang Yu, Ran Qi et al. 2021. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 41(8): 92-101.
- 李江海, 章 雨, 王洪浩等. 2020. 库车前陆冲断带西部古近系盐构造三维离散元数值模拟. 石油勘探与开发, 47(1): 65-76.
- Li Jianghai, Zhang Yu, Wang Honghao et al. 2020. Three-dimensional discrete element numerical simulation of Paleogene salt structures in the western Kuqa foreland thrust belt. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1): 65-76.
- 李维波, 李江海, 王洪浩等. 2017. 库车前陆冲断带克拉苏构造带变形影响因素分析——基于离散元数值模拟研究. 大地构造与成矿学, 41(6): 1001-1010.
- Li Weibo, Li Jianghai, Wang Honghao et al. 2017. Deformation mechanisms of Kelasu tectonic belt in Kuqa foreland thrust belt: Insight from discrete element numerical simulation. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1001-1010.
- 刘广林, 马 爽, 邵晓州等. 2016. 鄂尔多斯盆地天环凹陷北段长8储层致密成因. 东北石油大学学报, 40(5): 38-45.
- Liu Guanglin, Ma Shuang, Shao Xiaozhou et al. 2016. Tight origin of Chang 8 reservoir in the northern part of Tianhuan Depression, Ordos Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 40(5): 38-45.
- 刘敬寿, 丁文龙, 杨海盟等. 2022. 鄂尔多斯盆地华庆地区天然裂缝与岩石力学层演化——基于数值模拟的定量分析. 地球科学, 1-19. 网络首发.
- Liu Jingshou, Ding Wenlong, Lin Haimeng et al. 2022. Natural fractures and rock mechanical stratigraphy evaluation in the Huaqing area, Ordos Basin: A quantitative analysis based on numerical simulation. *Earth Science*, 1-19. Publish Online.
- 刘 亢, 曹代勇, 徐 浩等. 2014. 鄂尔多斯煤盆地西缘古构造应力场演化分析. 中国煤炭地质, 26(8): 87-90.
- Liu Kang, Cao Daiyong, Xu Hao et al. 2014. Paleotectonic stress field evolutionary analysis in west margin of Ordos coal basin. *Coal Geology of China*, 26(8): 87-90.
- 吕海涛, 张峭楠, 马庆佑. 2017. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨. 石油实验地质, 39(4): 444-452.
- Lü Haitao, Zhang Shaonan and Ma Qingyou. 2017. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(4): 444-452.
- 罗桂滨. 2008. 鄂尔多斯西部麻黄山延长组储层裂缝评价(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学. 1-88.
- Luo Guibin. 2008. Evaluation of Fracture Reservoir for Yanchang Formation in Mahuang Mountain of the West Ordos Basin

- (Master's Thesis). Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-88.
- 毛丹凤, 何登发. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部中深层波组特征及地质意义. 地质科学, 58(1): 165-179.
- Mao Danfeng and He Dengfa. 2023. The characteristics of seismic waves and its geological significance of mid-depth layers in mid-eastern Ordos Basin. *Chinese Journal of Geology*, 58(1): 165-179.
- 欧阳征健, 冯娟萍, 龚慧山等. 2021. 鄂尔多斯盆地西缘横山堡地区构造特征与油气勘探目标优选. 地质科学, 56(1): 19-27.
- Ouyang Zhengjian, Feng Juanping, Gong Huishan et al. 2021. Structural characteristics and oil and gas exploration target optimization of Hengshanbu area in the north of western margin of Ordos Basin. *Chinese Journal of Geology*, 56(1): 19-27.
- 彭安钰. 2015. 麻黄山西区块长6、长8油组油藏储层特征研究(硕士学位论文). 湖北荆州: 长江大学. 1-73.
- Peng Anyu. 2015. The Reservoir Characteristics of Chang 6 and Chang 8 Oil Group in Western Block of Mahuangshan (Master's Thesis). Jingzhou, Hubei: Yangtze University. 1-73.
- 孙 婧, 何佩珊, 齐梦菊. 2016. 关于颗粒流软件PFC的离散元数值模拟参数标定. 山东工业技术, (10): 42-42.
- Sun Jing, He Peishan and Qi Mengju. 2016. Parameter calibration of discrete element numerical simulation of particle flow software PFC. *Journal of Shandong Industrial Technology*, (10): 42-42.
- 王 岚. 2005. 鄂尔多斯西缘地区二叠系太原组、山西组沉积体系研究(硕士学位论文). 西安: 西北大学. 1-51.
- Wang Lan. 2005. Research on Sedimentary System of Permian Taiyuan and Shanxi Formation in Western Area of Ordos Basin (Master's Thesis). Xi'an: Northwest University. 1-51.
- 王天宇. 2020. 鄂尔多斯地块西北缘晚中生代陆内变形(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京). 1-42.
- Wang Tianyu. 2020. Late Mesozoic Intra-Continental Deformation in the Northwestern Margin of Ordos Block (Master's Thesis). Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-42.
- 徐黎明, 周立发, 张义楷等. 2006. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景. 大地构造与成矿学, 30(4): 455-462.
- Xu Liming, Zhou Lifa, Zhang Yikai et al. 2006. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(4): 455-462.
- 杨 庚, 陈竹新. 2023. 塔西南齐姆根楔形构造与走滑构造叠加两阶段演化模式. 地质科学, 58(2): 347-378.
- Yang Geng and Chen Zhuxin. 2023. A two-stage evolution model of the wedged-shaped structures superposed with strike-slip faulting for the Qimugen oroclines of the Southwest Tarim Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Geology*, 58(2): 347-378.
- 杨 华, 陶家庆, 欧阳征健等. 2011. 鄂尔多斯盆地西缘构造特征及其成因机制. 西北大学学报(自然科学版), 41(5): 863-868.
- Yang Hua, Tao Jiaqing, Ouyang Zhengjian et al. 2011. Structural characteristics and forming mechanism in the western margin of the Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 41(5): 863-868.
- 杨圣彬, 耿新霞, 郭庆银等. 2008. 鄂尔多斯盆地西缘北段中生代构造演化. 地质论评, 54(3): 307-315.
- Yang Shengbin, Geng Xinxia, Guo Qingyin et al. 2008. Mesozoic tectonic evolution in the northern section of the western margin of the Ordos Basin. *Geological Review*, 54(3): 307-315.
- 杨文敬. 2006. 鄂尔多斯西缘奥陶纪沉积演化及其控制下的油气地质条件(硕士学位论文). 西安: 西北大学. 1-77.
- Yang Wenjing. 2006. Ordovician Sedimentary Evolution in the Western Margin of Ordos and Its Controlled Hydrocarbon Geological Conditions (Master's Thesis). Xi'an: Northwest University. 1-77.
- 杨 振, 朱世发, 贾 业等. 2020. 鄂尔多斯盆地天环拗陷北部山1-盒8段地层水地球化学特征及成因. 科学技术与工程, 20(7): 2634-2642.
- Yang Zhen, Zhu Shifa, Jia Ye et al. 2020. Geochemical characteristics and genesis of formation water in Shan 1st to He 8th member in northern Tianhuan Depression Ordos Basin. *Science Technology and Engineering*, 20(7): 2634-2642.
- 云 露. 2021. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义. 中国石油勘探, 26(3): 41-52.
- Yun Lu. 2021. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(3): 41-52.

- 张满郎, 李熙喆, 谷江锐等. 2009. 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层划分及演化. 沉积学报, 27(2): 289-298.
- Zhang Manlang, Li Xizhe, Gu Jiangrui et al. 2009. Sequence division and evolution of Upper Paleozoic in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(2): 289-298.
- 张义楷. 2007. 鄂尔多斯西缘中生代构造体制转换与油气聚集(博士学位论文). 西安: 西北大学. 1-178.
- Zhang Yikai. 2007. Transition of the Mesozoic-Cenozoic Tectonic Regimes and Hydrocarbon Accumulation in Western Ordos Region (PhD Thesis). Xi'an: Northwest University. 1-178.
- 张银涛, 邓兴梁, 邬光辉等. 2020. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂带油气分布与油藏模式. 地质科学, 55(2): 382-391.
- Zhang Yintao, Deng Xingliang, Wu Guanghui et al. 2020. The oil distribution and accumulation model along the strike slip fault zones in Halahatang area, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 55(2): 382-391.
- 赵红格, 刘池洋, 王 峰等. 2006. 鄂尔多斯盆地西缘构造分区及其特征. 石油与天然气地质, 27(2): 173-179.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Feng et al. 2006. Structural division and characteristics in western edge of Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 173-179.
- 郑和荣, 胡宗全, 云 露等. 2022. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用. 地学前缘, 29(6): 224-238.
- Zheng Herong, Hu Zongquan, Yun Lu et al. 2022. Strike-slip faults in marine cratonic basins in China: Development characteristics and controls on hydrocarbon accumulation. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 224-238.
- 周进高, 席胜利, 邓红婴等. 2020. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征. 天然气工业, 40(2): 41-53.
- Zhou Jingao, Xi Shengli, Deng Hongying et al. 2020. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 40(2): 41-53.
- 朱 昊. 2015. 鄂尔多斯盆地西缘中南段地质结构及其形成演化(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京). 1-125.
- Zhu Hao. 2015. Geologic Structure and Evolution of the South-Central Segments of West Ordos Basin (Master's Thesis). Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-125.
- Chen J J, He D F, Tian F L et al. 2022. Control of mechanical stratigraphy on the stratified style of strike-slip faults in the central Tarim Craton, NW China. *Tectonophysics*, 830: 229307. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229307.
- Dean S L, Morgan J K and Fournier T. 2013. Geometries of frontal fold and thrust belts: Insights from discrete element simulations. *Journal of Structural Geology*, 53: 43-53. DOI: 10.1016/j.jsg.2013.05.008.
- Egholm D L, Sandiford M, Clausen O R et al. 2007. A new strategy for discrete element numerical models: 2. Sandbox applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B5): B05204. DOI: 10.1029/2006JB004558.
- Guo Y G and Morgan J K. 2004. Influence of normal stress and grain shape on granular friction: Results of discrete element simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B12): B12305. DOI: 10.1029/2004JB003044.
- Liu Z N and Koyi H A. 2013. The impact of a weak horizon on kinematics and internal deformation of a failure mass using discrete element method. *Tectonophysics*, 586: 95-111. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.11.009.
- Morgan J K and McGovern P J. 2005. Discrete element simulations of gravitational volcanic deformation: 1. Deformation structures and geometries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B5): B05402. DOI: 10.1029/2004JB003252.
- Naylor M, Sinclair H D, Willett S et al. 2005. A discrete element model for orogenesis and accretionary wedge growth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B12): B12403. DOI: 10.1029/2003JB002940.

Structural characteristics and three-dimensional discrete element numerical simulation of strike-slip faults in the western Mahuangshan work area, western margin of the Ordos Basin

Luo Liang^{1,2} Jia Huichong³ Yang Minghui^{1,2} Liu Yarong^{1,2}

Li Xiaowei³ Yang Fei³ Liu Zhina^{1,2} Bai Donglai^{1,2}

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

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 3. North China Company,

SINOPEC, Zhengzhou 450006)

Abstract

The western Mahuangshan work area, located in the front of thrust belt in the western margin of the Ordos Basin, is divided into the upper and lower structural deformation layers by taking the Carboniferous-Permian coal detachment layer. It is also characterized by segmentation deformation due to the Yanshanian strike-slip faulting. The normal faults north of the Shawozi fault in the deep in-situ structural system formed domino type, while the normal faults between the Shawozi fault and the Quanwanzi fault formed graben-horst type. The shallow thrust-nappe structural system, bounded by the NEE trending Lugouzi-Xinquanjing fault, can be divided into the southern and northern sections with obvious different deformation characteristics. The deformation in the northern section is stronger than that in the southern section. Three-dimensional discrete element simulation results show that the strike-slip faults developed in the upper and lower structural deformation layers in the western Mahuangshan work area are tear faults formed by regulating differential compression, and the fault strikes are mainly consistent with the direction of maximum compressional stress. The pre-existing normal faults in the deep in-situ structural system were dragged by the strike-slip faulting, and strikes of the normal faults adjacent to the strike-slip faults were obviously deflected. The strong piedmont thrusting in the northern section of the thrust-nappe structural system had obvious impact on the basin. However, the piedmont thrusting in the southern section had no obvious impact on the basin, and only a few small-scale reverse faults were developed. Compared with 2D simulation, 3D simulation can analyze the strike-slip faults in the plane and section, give us a full view of the deformation process and formation mechanism of the strike-slip faults within the upper and lower structural deformation layers, and provide basic geological guidance for the oil and gas exploration.

Keywords Western margin of the Ordos Basin, Western Mahuangshan, 3D numerical simulation, Strike-slip fault, Differential compression