

准噶尔盆地中部永进地区走滑断裂发育特征 及成因物理模拟

张婧琪¹⁾, 于福生^{*1,2)}, 庞福基³⁾, 王千军⁴⁾, 王岳丰¹⁾

1) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249;

2) 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京, 102249;

3) 中国石油集团测井有限公司国际公司, 北京, 100101;

4) 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营, 257000

内容提要:永进地区位于准噶尔盆地中部,最近发现了多个与走滑断层相关的含油气构造,但关于走滑断层的发育特征及成因机制研究程度不够深入。本文通过三维地震资料精细解释,在研究区三叠系—侏罗系内识别出近东西向、北西西向以及北东东向的三组走滑断裂体系,平面上呈“网格状”展布,剖面上具有不同深度几何学形态差异展布特征。在此基础上基于相似性原理设计四组砂箱模拟对比实验,重现研究区构造演化过程。模拟结果表明,这类走滑断裂的形成与基底先存断层的发育位置有关,是受先存构造和地层属性双重控制的广布式走滑断裂系统,从而建立了研究区的断裂系统成因模式。研究成果对具有相似地质背景地区的走滑断裂成因解释具有借鉴意义。

关键词:准噶尔盆地;永进地区;广布式走滑断裂;构造物理模拟;构造演化

准噶尔盆地及周缘长期以来是中外学者的研究热点,前人已经对盆地的沉积演化特征、物源体系以及储层成岩等方面做了大量研究工作(张敏等, 2014;谭程鹏等, 2014;王怡然等, 2016;石好果等, 2017;赵晓宇等, 2017;孙靖等, 2022;张志杰等, 2023)。盆地中部永进地区油气资源丰富,以构造-岩性油藏类型为主,油气主要来源于下侏罗统八道湾组和中侏罗统西山窑组烃源岩,是准噶尔盆地中部首选的有利勘探区(贾庆素等, 2007)。

吴晓智等(2006)通过研究盆地中部车-莫古隆起的形成过程,认为盆地中部地区在中—晚侏罗世曾经历强烈的构造运动。丁文龙等(2011)认为盆地中部地区的多级次断裂是受周缘板块的相互碰撞产生的挤压和走滑构造共同作用的结果。随着近些年永 1~永 3、永 6~永 9 探井完钻,以及盆 1 井西、玛湖凹陷周缘等大量断层被解译出来(程长领, 2018;陈永波等, 2018),准中地区各类断裂展布特征、形成时间以及成因类型等逐渐成为大量学者关注的焦

点。林会喜等(2019)认为准中平面展布的大尺度走滑断裂带是遵循 Mohr-Coulomb 准则的共轭剪切断裂,也是深部压扭变形在中浅层的直接响应。朱文等(2021)通过碎屑锆石年龄(161~153 Ma)的结果进一步明确了研究区主体发育的断裂构造活动时期为晚侏罗世。朱明等(2021)考虑到构造变形时间的一致性,从构造变形的运动学机制分析认为晚二叠世—侏罗纪盆地周缘均发育右旋走滑断裂;王建伟等(2022)认为研究区在燕山 II 幕构造活动期发育 NWW 向左行压扭走滑带和 NE 向左行张扭走滑断裂带,这两类同期断裂带弧形联合控制了变形区域的旋扭形变和剪切破裂。

尽管大量学者在各级构造单元加强了对研究区走滑断层的解释,但缺乏对断裂性质的统一认识,该地区走滑断裂的几何学样式、运动学模型以及成因机制仍不明确。本文通过对准噶尔盆地中部永进地区三维地震资料的精细解释,提出广布式剪切走滑模式,并运用构造物理模拟实验,正演重现了研究区

注:本文为中石化胜利油田科研项目(编号 30200018-20-ZC0613-0116, 30200018-21-ZC0613-0030)资助的成果。

收稿日期:2022-07-03;改回日期:2022-12-26;网络发表日期:2023-12-28;责任编委:刘俊来;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:张婧琪,女,1995 年生。博士研究生,油气构造解析和构造物理模拟研究方向。E-mail: geo_zjq@163.com。

* 通讯作者:于福生,男,1969 年生。博士,教授,博导,主要从事构造地质学教学与科研工作。E-mail: syful234@163.com。

引用本文:张婧琪,于福生,庞福基,王千军,王岳丰. 2024. 准噶尔盆地中部永进地区走滑断裂发育特征及成因物理模拟. 地质学报, 98(2): 397~420. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023151.

Zhang Jingqi, Yu Fusheng, Pang Fujun, Wang Qianjun, Wang Yuefeng. 2024. Development characteristics and analogue modelling of strike-slip faults in the Yongjin area, central Junggar basin. Acta Geologica Sinica, 98(2): 397~420.

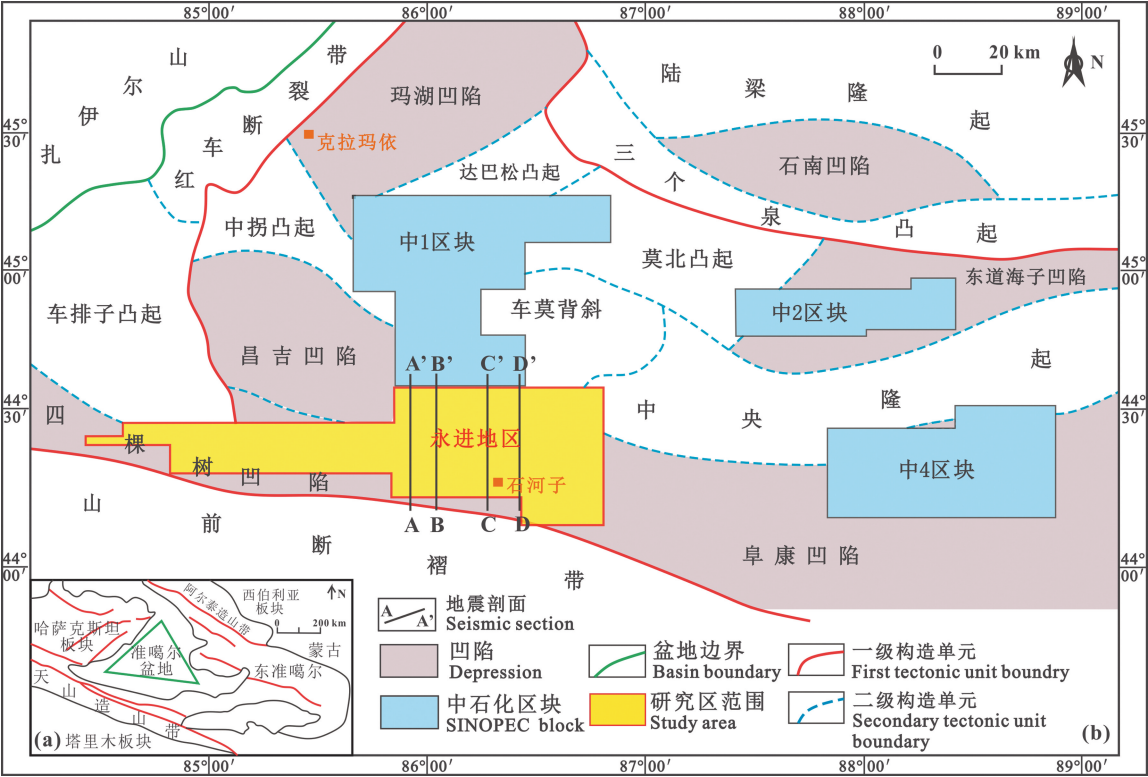


图 1 准噶尔盆地中部永进地区位置图(据尹伟,2005 改)

Fig. 1 Location map of Yongjin area in the central Junggar basin (after Yin Wei, 2005)

(a)—准噶尔盆地大地构造位置图；(b)—研究区位置图
(a)—simplified geotectonic location map of the Junggar basin；(b)—location of the study area

石炭纪以来的构造演化过程,为深度剖析该地区走滑断裂发育特征及其动力学成因机制提供了重要依据。

1 区域地质概况

准噶尔盆地位于中亚造山带中南部,是哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块和塔里木板块的结合部位(图 1a)。现今的准噶尔盆地是由一系列古生代至新生代造山带合围而成的围限盆地,呈不规则的三角形,面积约 $1.36 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。根据基底隆拗构造格局、边界性质、沉积盖层建造演化类型、深浅构造层变形特征以及区域性断裂对地层沉积的控制作用,可将盆地周缘及中部划分出 6 个二级构造单元和 44 个三级构造单元。地层层序自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。

永进地区位于准噶尔盆地中部中石化中 3 区块,地处我国西北部新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州境内。主体处于昌吉凹陷西段,北邻车莫低凸起,南侧与北天山山前逆冲断褶构造带相接,西接车排子凸

起南部和四棵树凹陷西端(图 1b)。勘探面积约 4740 km^2 ,具有地层序列完整、埋藏深、沉积厚度大的特点。

准噶尔盆地经历多期构造应力场非共轴式叠加作用,在其改造下形成多旋回叠合盆地。通过研究区三维地震资料解释、构造不整合面识别以及野外踏勘等工作,程长领(2018)认为准噶尔盆地构造演化主要经历 5 个阶段:石炭纪—早二叠世北北东-南南西向伸展形成断陷盆地,基底构造层发育大量正断层,并使盆地形成隆拗相间的原始构造格局;中—晚二叠世应力性质发生变化进而形成挤压拗陷盆地,盆地中部区域地震剖面上能解释出的最老的中、上二叠统直接覆盖在古陆块结晶基底之上,其他区域则与下伏变形强烈的石炭系呈不整合接触;三叠纪—侏罗纪盆地进入陆内扭压拗陷演化阶段,多个次级构造单元联合在一起(何登发等,2018),逐渐形成统一的盆地雏形。该时期燕山构造运动强烈,由于盆地中部存在多个石炭系继承性古隆起和古凹陷构造,近北北西-南南东向的挤压作用促使永进地区形成具有明显走滑性质的压扭性断层和大量褶皱构

造,在研究区地震水平切片上,同相轴表现出有规律的右旋错动现象(程长领,2018)。基底的非均质性以及北西-南东方向的剪切应力场使该时期成为研究区走滑断裂大量发育的阶段;白垩纪—古近纪,盆地进入剥蚀准平原化阶段,表现为基底沉降均衡,盆地变形特征微弱,地层厚度、岩相相对稳定,各级序断层、褶皱作用不明显;进入新近纪后,随着印度板块向欧亚板块强烈俯冲,北天山强烈隆升,研究区受近南北向的挤压应力使原有的断裂发生反转或叠加活化现象,形成前陆挤压拗陷盆地(于福生等,2009)。

2 断裂发育特征

2.1 断裂平面组合

准噶尔盆地中部永进地区主要发育近东西向、北西西-南东向以及北东东-南西西向三组走滑断裂系统,晚期近南北和南西倾向的走滑断裂延伸长度约 5~8 km,将早期北西西向展布的,长度约 16~20 km 的基底断裂分割成为断块体。现今断裂平面分布图总体呈现出大量断裂构造纵横交错的“网格状”格局(图 2)。石炭系基底主要发育平面延伸约 20 km 的近东西向展布的先存正断层,各断裂之间走向彼此平行,倾向相对,均匀分布于整个研究区(图 2c)。三叠系顶面构造图识别出的走滑断裂走向为近东西向、北北西向以及北东东向。同一走向的断裂近平行展布,且在平面上缺乏主位移带(图 2b)。走滑运动初期主要形成近东西向 R 剪切破裂(如 f_7 、 f_8 、 f_{17} 、 f_{19} 、 f_{27} 等),与典型的里德尔共轭剪破裂模式形成的彼此雁列式排布的 R 剪切破裂体系形态有所区别。后期形成北东东向小型同向低角度走滑斜切破裂 R_L (f_{32} 、 f_{46} 、 f_{47} 、 f_{48} 等)和北西西向反向低角度斜切断裂 R_L' (如 f_{13} 、 f_{15} 、 f_2 等),这些斜切破裂穿插分布在早期形成的 R 破裂之间(如 f_8 和 f_{24} 被 f_{43} 错断),形成了研究区三种走向并存的“网格状”走滑断裂构造格局(图 2a)。在侏罗系不乏北西西向和北东东走向的走滑断裂,主要分布在基底古凸起和凹陷的交接部位,但平面延伸距离超过 10 km、纵向断距明显的单条大断层并不常见。

通过对研究区三维地震构造精细再解释识别出深部和浅部断裂体系在空间上具有良好的配置关系,石炭系基底顶面断裂图显示的主干断裂与中侏罗统顶面发育的小型走滑断裂位置具有叠加性,说明基底主干正断层对浅部走滑断裂具有明显的控制作用。

2.2 断裂剖面构型

研究区断裂从垂向来看,在不同深度几何学形态具有明显的差异展布特征(图 3):深部为石炭纪—二叠纪伸展作用下形成的基底断层 $F_1 \sim F_{15}$,呈多米诺式和堑-垒式的正断层组合样式,局部受后期一晚二叠世挤压发生了轻微的正反转构造。浅部发育多条受车莫古隆起和中央隆起带影响的走滑断层($f_5 \sim f_8$ 、 $f_{21} \sim f_{26}$ 等),以及周缘小型复杂断层($f_{10} \sim f_{12}$ 、 $f_{13} \sim f_{15}$ 、 $f_{16} \sim f_{19}$ 、 $f_{27} \sim f_{30}$ 以及 $f_{37} \sim f_{42}$ 等)。这些走滑断裂断面高陡近直立,切割三叠系—侏罗系。从上二叠统上部开始呈花状散开,断至上侏罗统;向下延伸至下二叠统附近尖灭或与先存基底正断层收敛复合。主干断裂周围发育规模较小的伴生简单走滑断层,由于视位移效果的存在,在剖面上同一走滑构造带不同构造部位表现出正断层或逆断层的形态。总的来说,晚期走滑断裂在基底先存断层所控制的凸起顶部集中发育。

2.3 断裂活动时限

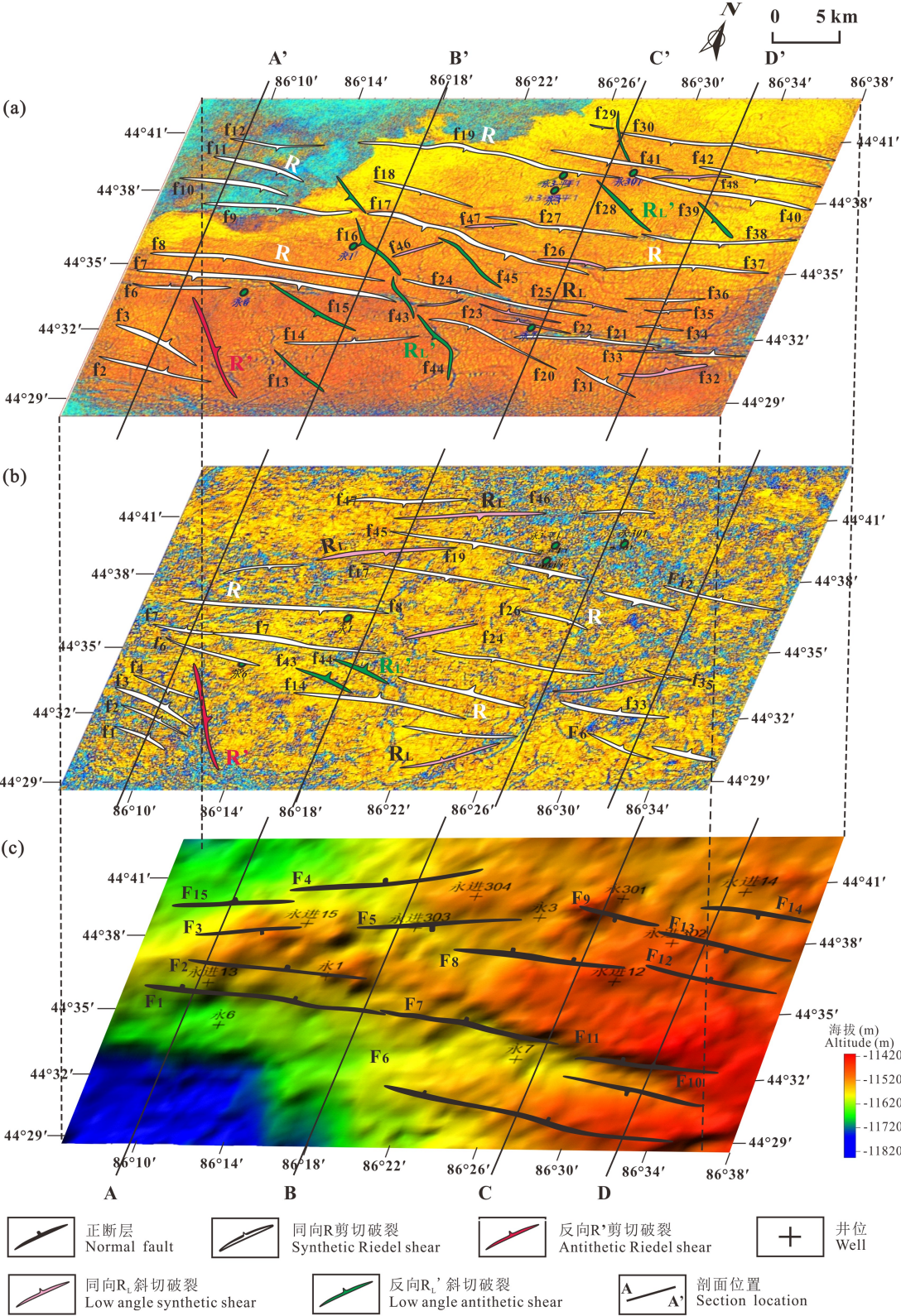
三维地震剖面显示研究区的正断层形成于晚二叠世以前,该时期盆地受北北东-南南西伸展作用力,形成断陷型盆地,盆地内部主要发育北西西向正断层(图 2c,图 3)。三叠纪起,区域造山运动产生的近北北西-南南东向压扭作用使研究区内大量走滑断裂开始形成,高角度的主干走滑断层主要切割至侏罗系顶面(图 3),少量切割至白垩系及以上层位,推断准噶尔盆地中部永进地区的走滑构造主要发生在燕山期。在同一时期,盆地西缘达尔布特断裂带和东部克拉美丽构造带受力发生右行走滑运动(朱明等,2021),形成大量边界走滑断裂。

为了验证准噶尔盆地中部永进地区走滑断裂的发育模式,笔者分别开展两种剪切模式下的构造物理模拟实验,着重重现研究区早期伸展(石炭纪—早二叠世)与晚期走滑(三叠纪—侏罗纪)叠加的构造演化史,分别对比平、剖面实验结果与实际地质现象,以期再现走滑构造形成的三维过程与机制,并建立永进地区走滑构造系统成因模型。

3 里德尔剪切变形模拟实验

3.1 实验模型

砂箱模型规模为 65 cm(长)×50 cm(宽)×15 cm(高)(图 4),中间放置有一块活动板与右侧底板相连,底部为刚性金属板,中部活动挡板与底部水平挡板夹角为 75°,模拟基底高角度断裂。该实验在刚性底板铺砂区事先放置厚度为 1.5 cm 的硅胶(黏



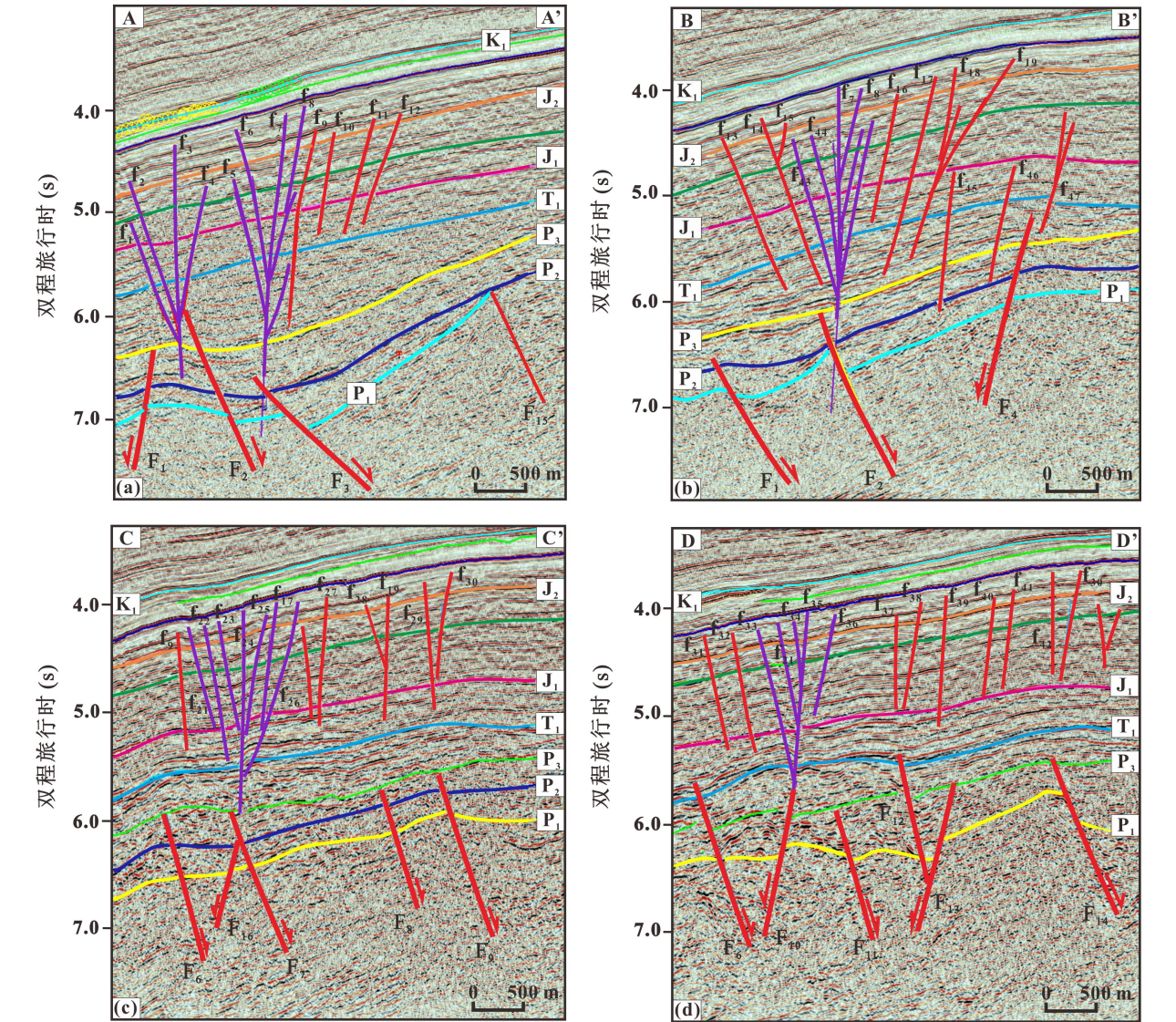


图 3 准噶尔盆地中部永进地区断层剖面组合样式(剖面位置见图 2)

Fig. 3 Interpreted seismic sections showing the structural styles in Yongjin area, central Junggar basin (see section location in Fig. 2)
(a)—地震剖面 A—A'; (b)—地震剖面 B—B'; (c)—地震剖面 C—C'; (d)—地震剖面 D—D'
(a)—seismic section A—A'; (b)—seismic section B—B'; (c)—seismic section C—C'; (d)—seismic section D—D'

度 $1.2\times10^4\text{ Pa}\cdot\text{s}$),模拟研究区中侏罗统煤层,再在其上铺设干燥的石英砂(内摩擦角约 31° ,密度约 2.3 g/cm^3),具体砂层铺设见表 1。

表 1 里德尔剪切实验参数表

Table 1 Parameter table of Riedel shear experiment				
砂层 序号	砂层顶面 高度(cm)	砂层铺设 序列	砂层顶面 标志层颜色	运动学特征
8	7.5	白色石英砂	粉色	右行走滑,位移量 8 cm
7	7.0	白色石英砂	绿色	
6	6.0	灰色石英砂	黄色	
5	5.5	灰色石英砂	红色	
4	5.0	白色石英砂	蓝色	伸展,位移量 2 cm
3	4.0	白色石英砂	粉色	
2	3.0	灰色石英砂	绿色	
1	1.5	透明硅胶	橙色	

砂箱构造物理模拟实验通常使用 Cauchy 运动学公式无量纲化比例缩小自然界模型至实验室模拟模型(Davy et al. ,1991; Grabeleau et al. ,2011),无量纲比例参数不变,即:

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

式中, σ^* 、 ρ^* 、 g^* 、 l^* 四个参数分别对应内聚力、密度、重力、长度的实验室模型与实际地质体对应的比率。

一般情况下,砂箱实验在正常重力下开展,因此 $g^*=1$ 。实验室模型中采用 1 cm 代表自然界 1 km,因此几何学相似性 $l^*=1\times10^{-5}$,实际地层岩石密度约 2.7 g/cm^3 。因此 σ^* 为 $\sim0.85\times10^{-6}$ 。

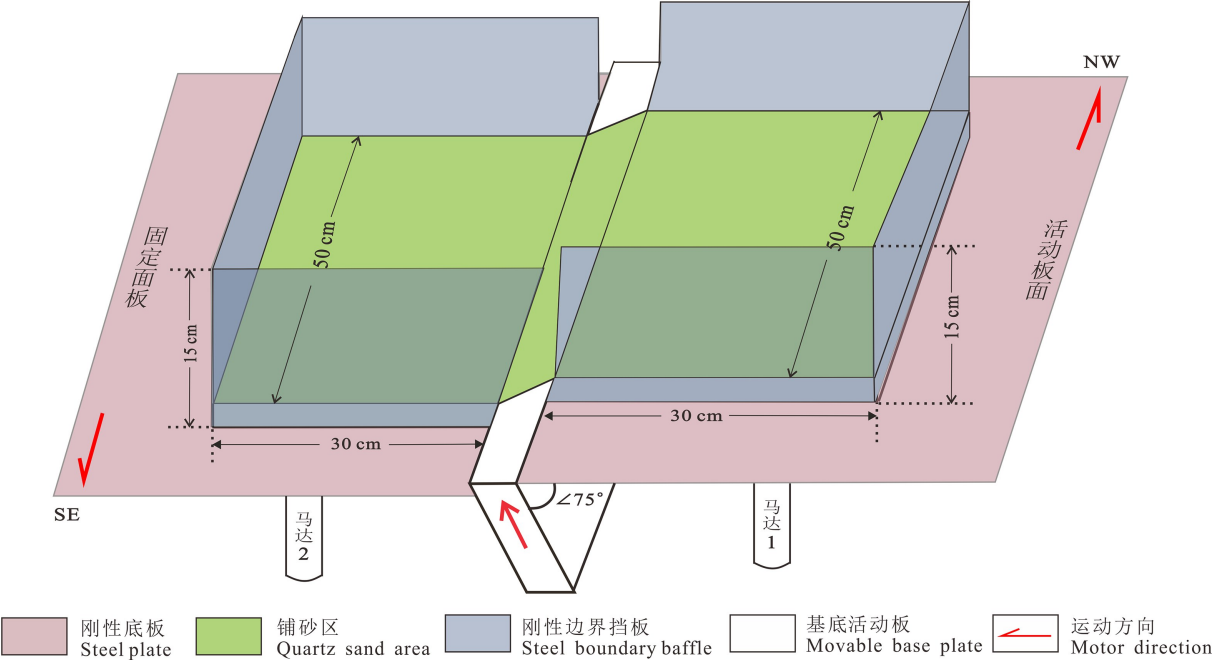


图 4 里德尔剪切实验装置示意图

Fig. 4 Experimental apparatus of Riedel shear

3.2 实验过程

研究区里德尔剪切模拟实验共设计 2 个阶段，为最佳模拟自然界变形速率：早期向南伸展的运动速率为 0.042 mm/s，累计运动时间 480 s，模拟研究区石炭系基底形成的正断层组合；晚期右行剪切运动速率 0.083 mm/s，累计运动时间 960 s，模拟晚期三叠纪—侏罗纪的走滑运动。实验室走滑量 80 mm 大致代表自然界 80~120 km 的走滑量，这也与实际走滑位移距离相似。实验结束后在变形砂层上铺设厚度为 1 cm 的白色石英砂，用水浸润 24 h 后切片。每条剖面切片间距 2 cm 并拍照记录，对典型剖面进行几何学详细解释。

3.3 实验结果

3.3.1 平面模拟结果

(1)伸展阶段。在实验最初的伸展阶段，南侧活动板拉张 0.5 cm，即伸展量达 1.6% 时，活动挡板与固定挡板中部区域砂层表面开始出现细微破裂；当活动板拉张 1 cm，伸展量达 3.1% 时，砂层表面出现明显正断层 F₁ (图 5a)，其走向与活动挡板运动方向垂直，北侧固定板区域上方发育大量细微浅表张破裂；随着伸展量持续增大，活动板拉张 2 cm，伸展量达到 6.3% 时，砂层表面正断层 F₁ 垂直断距增大。固定板上方大量张破裂彼此走向平行，长度 0.8~1.5 cm，共同组成宽度约 2.5 cm 横亘实验装置砂层表面的张破裂带 (图 5b)。

(2)右行走滑阶段。继续铺设厚度为 4.5 cm 的石英砂后进入晚期右行走滑阶段。当右行位移 0.7 cm 时，实验砂层东西边界逐渐开始形成走向为 SEE-NWW 的剪切破裂。当右行位移为 2 cm 时，f_{1~8} 自边界向中央逐渐形成，单条断裂长度约 5 cm，集中发育在实验装置活动板与固定板的连接部位 (图 5c)。在走滑应变椭圆中，它们是最先形成的 R 剪切破裂，是由主位移带运动诱导形成的剪切破裂面；当右行位移为 4 cm 时，早期形成的 R 破裂明显长度增大，中部剪切断裂 f₅ 增至 21 cm，砂体东西两侧 R 破裂之间发育与主位移带呈小夹角的 P 剪切破裂 f₁₀、f₁₁，长度仅 3~4 cm (图 5d)；随着走滑位移距离的进一步增大，砂层表面 R 破裂和 P 破裂的数量都明显增加，当右行位移为 6 cm 时，最长的 R 破裂 f₅ 被错断为 f₅ 和 f_{5'}，P 破裂 f_{10~12}、f₁₄ 逐渐将相邻的早期 R 破裂相连，形成右行走滑主位移带 (图 5e)。砂层表面逐渐形成高低起伏的形态，西南侧受挤压作用表现小型隆起，形成逆断层 f₁₆；当右行位移为 8 cm 时马达停止施力，实验装置中央形成贯穿整个砂体表面的主位移带，其首尾两侧分别形成马尾状雁列同向断层以及由于受阻弯曲形成的逆冲断层组合 (图 5f)。

3.3.2 剖面切片结果

通过对平面实验进行立体切片，解释典型剖面 (图 6)，显示出组合样式大致相同的构造变形样式，

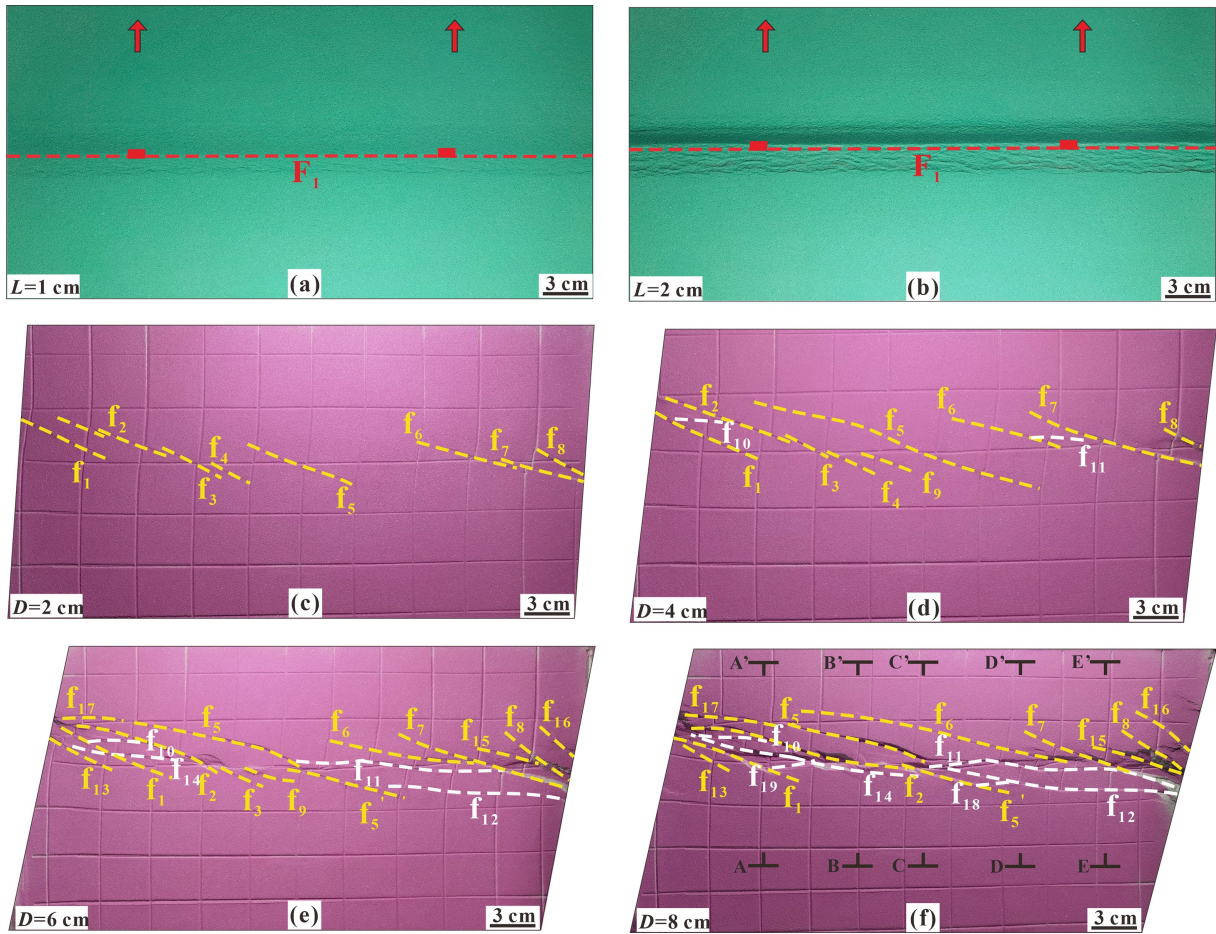


图 5 里德尔剪切实验平面变形演化图

Fig. 5 Plane view (photos and line drawings) of different evolution stages of Riedel shear experiment

(a)、(b)—伸展阶段变形过程；(c~f)—走滑阶段变形过程； L —伸展位移； D —走滑位移
(a), (b)—deformation process of extension stage; (c~f)—deformation process of strike-slip stage; L —extensional displacement; D —strike-slip displacement

所选取的剖面普遍发育高陡正断层、主走滑断层以及小型负花状构造等。

在伸展阶段，基底硅胶层和底层灰色石英砂层中发育早期正断层 F_1 ，并在晚期走滑运动过程中得以保留；在右行剪切阶段形成的主走滑断裂 $f_{10} \sim f_{12}$ 高陡而近直立，在空间上多位于基底断层 F_1 的正上方，与周缘小型走滑断层 f_1 、 f_2 、 f_5 、 f_{14} 向上发散，向下收敛，形成大多具有负断距的花状构造。

3.4 里德尔剪切实验结果与准噶尔盆地中部永进地区地震剖面对比分析

上述模拟硅胶基底的早期伸展叠加晚期走滑产生的断裂样式可以与地震剖面进行对比(图 7)。实验中早期伸展作用形成的基底正断层与地震剖面 Bf_1 产状相似，晚期走滑运动形成的主走滑带对应地震剖面的 Sf_2 ，花状构造的分支走滑断层与 Sf_1 和 Sf_3 相像，指示了准噶尔盆地中部永进地区内发育

的走滑是在先存基底断层基础上经历后期应力方向改变而形成的走滑构造，应力场主要与三叠纪—侏罗纪北北西-南南东向剪切应力场相匹配。

遵循里德尔剪切模式(图 8a~c)发育的走滑断裂系统优先形成由主走滑位移带运动诱导形成的 R 剪切破裂，呈现明显的雁列式排列，各 R 剪切破裂之间走向近平行；随着走滑位移量的增大，逐渐形成第二组剪切位移方向与主位移带一致的 P 剪切破裂，与先期形成的 R 剪切破裂相对于主位移带对称分布。P 剪切破裂与主位移带的夹角相当于岩石内摩擦角的一半，在地表或地壳浅层次通常小于 15° ；当剪切位移进一步增大时，相邻的 R 剪切破裂由 P 剪切破裂逐渐相连，形成具有一定间距的主位移带 PDZ (principal displacement zone)。20 世纪 50 年代后期以来，国内外地质学家们逐渐意识到自然界的走滑剪切变形并不一定局限在某一狭窄构造带

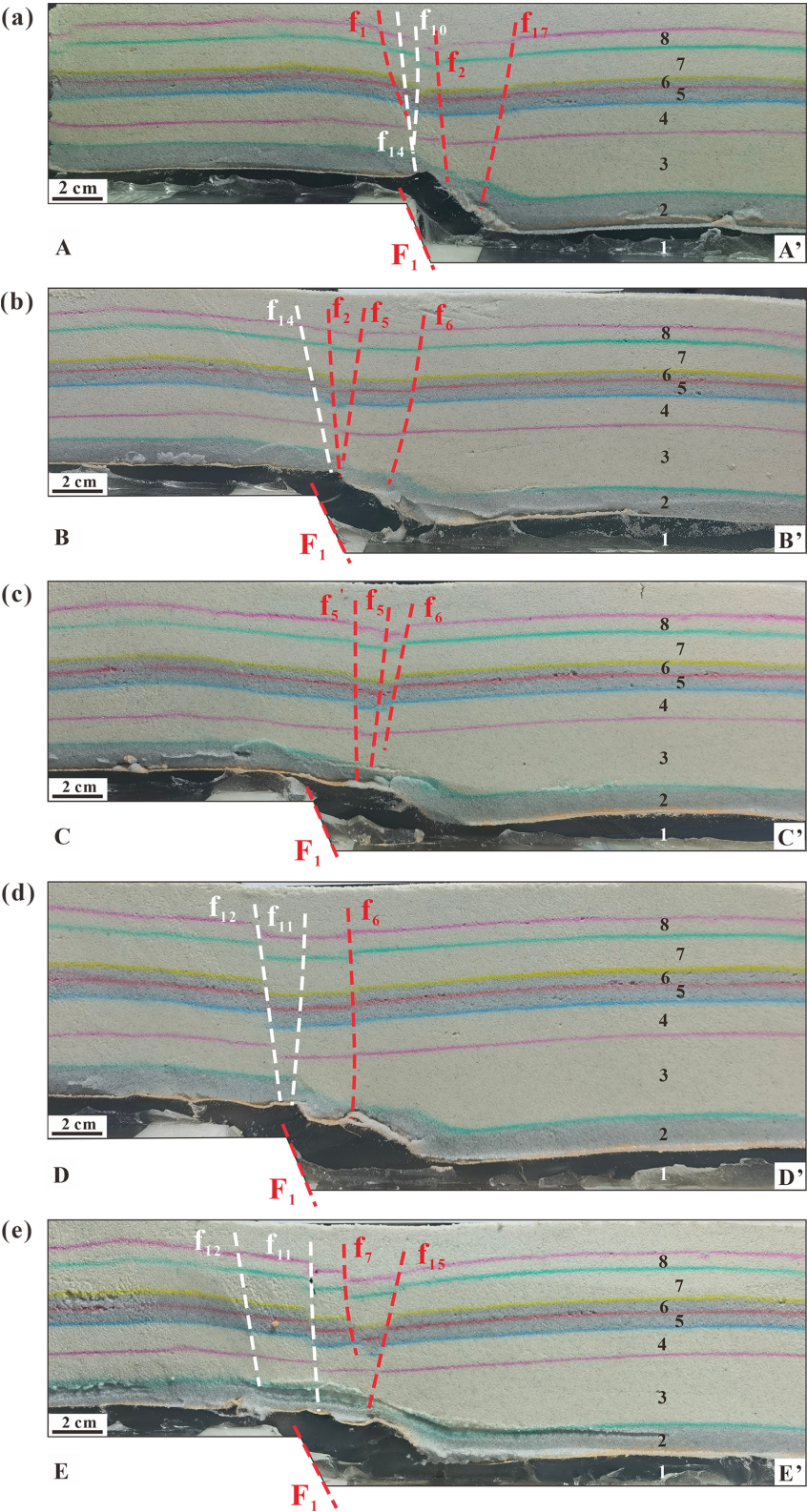


图 6 里德尔剪切变形实验剖面结果(剖面位置见图 5f)

Fig. 6 Profile result of Riedel shear experiment (see profile location in Fig. 5f)

(a)—实验切片剖面 A—A'；(b)—实验切片剖面 B—B'；(c)—实验切片剖面 C—C'；(d)—实验切片剖面 D—D'；(e)—实验切片剖面 E—E'

(a)—experimental profile A—A'；(b)—experimental profile B—B'；(c)—experimental profile C—C'；(d)—experimental profile D—D'；(e)—experimental profile E—E'

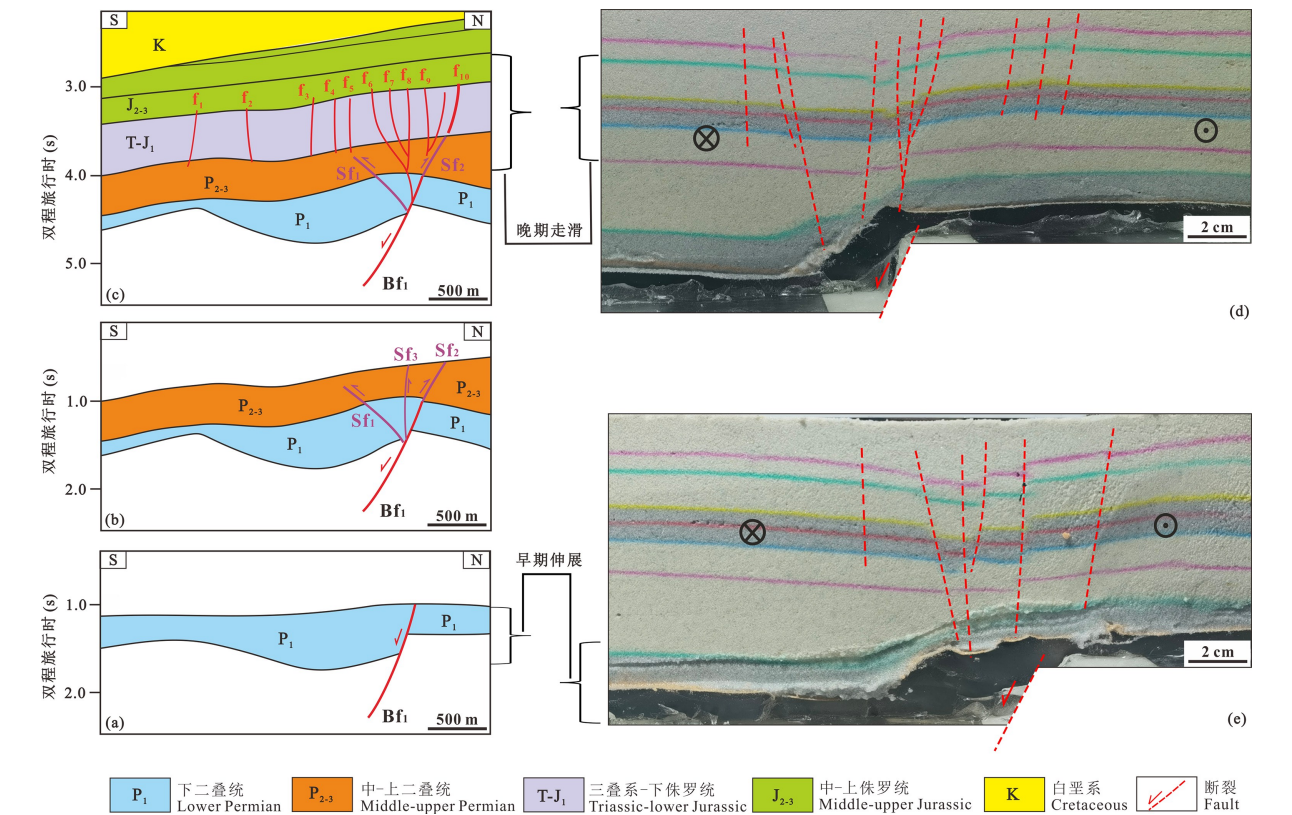


图 7 里德尔剪切变形实验剖面解释(d、e)与地震剖面解释(a~c)对比

Fig. 7 Comparison between profile results of Riedel shear experiment (d, e) and seismic section interpretation (a~c)
(a)—早二叠世伸展阶段演化剖面; (b)—中—晚二叠世压扭阶段演化剖面; (c)—三叠纪—侏罗纪张扭阶段演化剖面; (d)、(e)—典型实验模拟剖面
(a)—extensional stage evolution cross section of early Permian; (b)—transpressional stage evolution cross section of middle-late Permian;
(c)—transtensional stage evolution cross section of Triassic-Jurassic; (d), (e)—typical experimental profiles

内,也有可能分布于数十或数百千米宽的均匀变形构造带内,进而提出了广布式走滑变形带(distributed strike-slip zone)的概念(Naylor et al., 1986)。广布式走滑剪切变形过程具有长演化周期以及早期走滑剪切破裂控制晚期构造变形过程的特点(Gapais et al., 1991; An and Sammis, 1996; Schreurs, 2003)。与传统的里德尔剪切模式最大的不同在于广布式剪切(图 8d~f)是受岩石圈下伏韧性流动所控制的浅表断裂构造变形,通常形成早晚两期类型不同的剪切变形破裂或浅表断裂,一组为早期的共轭 R 剪切和 R' 剪切破裂,另一组为晚期发育在相邻的 R 剪切或 R' 剪切间的由于应力场旋转形成的小角度 R_L 和 R_L' 斜切破裂,相邻或叠置的断块体间常形成典型的区域隆起带。

通过将广布式剪切模式图与研究区断裂平面展布图对比,笔者认为准噶尔盆地中部永进地区的走滑断裂系统应是在广布式剪切走滑剪切变形作用下发育的,其大型、近东西向的走滑断裂对应广布式剪

切模型中先期形成的 R 剪切破裂,小型、延伸距离较小的北东东向和北西西向的低序级断层对应晚期形成的斜切破裂 R_L 和 R_L' ,它们共同构成了现今看到的“网格状”断裂平面展布格局。

前述里德尔剪切实验平面结果显示走滑断层集中于狭窄的变形构造带内,仅由于基底塑性层的存在使走滑断裂具有一定规模的横向延伸,而非形成浅表大面积均匀分布的走滑断裂系统,这与研究区断裂平面组合实际情况仍有所差别。为此笔者改变实验基底属性,开展了另外三组模拟实验。

4 广布式剪切变形影响因素模拟实验

4.1 实验目的

为进一步提供准噶尔盆地中部永进地区构造解析的实际变形证据,以研究区真实地质结构为基础,利用构造物理模拟实验手段进行正演模拟,可以实现短时间内对各构造变形阶段的有效追踪(胡秋媛等, 2020),验证已有地震解释方案的合理性,定性并

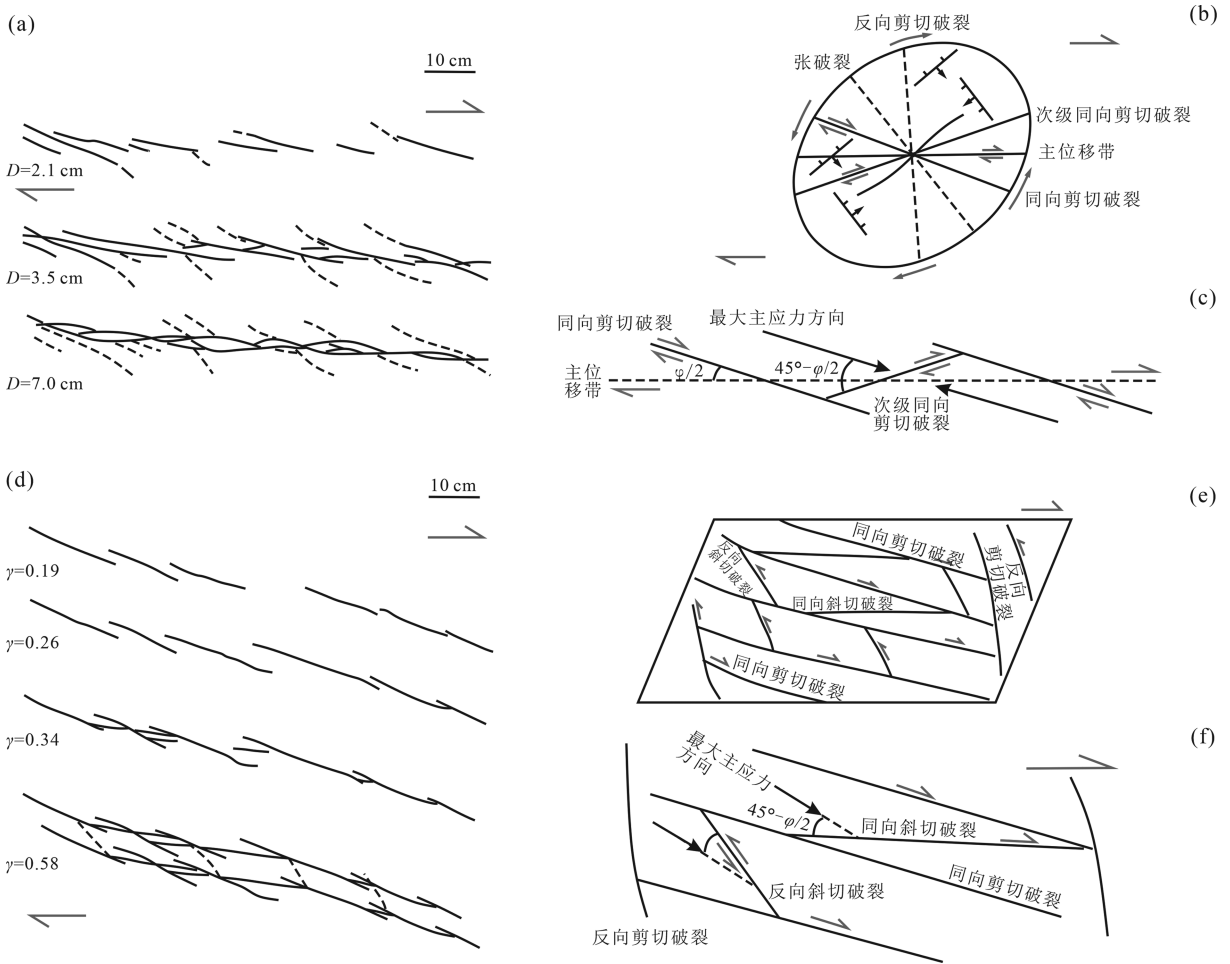


图 8 右行走滑作用下里德尔剪切与广布式剪切模型发育模式图

Fig. 8 Riedel shear mode and distributed shear model of dextral strike-slip system

(a)—里德尔剪切模式变形演化示意图; (b)—右行力偶产生的里德尔走滑应变椭圆; (c)—右行主位移带内构造组合模式图(据 Naylor et al., 1986 修改); (d)—广布式剪切模式变形演化示意图; (e)—右行剪切作用下的广布式应变矩形; (f)—右行广布式断裂构造组合模式图(据 Schereurs, 2003 修改); D —走滑位移; γ —走滑系数; φ —岩石内摩擦角

(a)—deformation evolution schematic diagram of Riedel shear mode; (b)—Riedel dextral strike-slip strain ellipse; (c)—structure combination pattern diagram of Riedel dextral PDZ (modified from Naylor et al., 1986); (d)—deformation evolution schematic diagram of distributed shear mode; (e)—distributed dextral strike-slip strain orthogon; (f)—structure combination pattern diagram of distributed dextral strike-slip system (modified from Schereurs, 2003); D —strike-slip displacement; γ —strike-slip coefficient; φ —angle of internal friction

定量探讨不同因素对广布式剪切构造变形特征的影响, 从而对研究区广布式走滑断裂成因提供新的认识。

4.2 实验材料与模型

根据相似性原则, 设计实验砂箱的尺寸为 100 cm(长)×40 cm(宽)×10 cm(高), 边界由聚苯板切割而成, 模型比例尺约为 1 : 100000, 即实验室 1 cm 疏松石英砂在模型中模拟了自然界 1 km 的沉积物。实验材料选取干燥松散的石英砂模拟真实地层, 在其遵循莫尔-库伦强度准则的前提下, 与上地壳脆性岩层的形变特征相似。实验用的石英砂粒度约 80~100 目, 密度约 2.3 g/cm³, 内摩擦角为 29°

~31°, 摩擦系数约为 0.55。为便于实验过程的观察与记录, 采用彩色石英砂铺设标志层, 染色后的石英砂力学性质保持不变。采用透明硅胶模拟研究区地层中的侏罗系西山窑组煤层, 其黏度为 1.2×10⁴ Pa·s, 密度约 0.926 g/cm³, 在低应变速率下具有非牛顿流体特征(于福生等, 2009, 2010)。

实验装置底部为两块可以独立运动的刚性底板, 底板中部参与剪切变形的高弹性橡胶布尺寸为 60 cm(长)×40 cm(宽)×1 mm(厚), 将橡皮布的两端固定在两侧的模型顶部(图 9a), 再在其上按照不同的实验方案铺设相应厚度的透明硅胶和干燥石英砂。马达驱动一侧刚性底板进行右行水平位移,

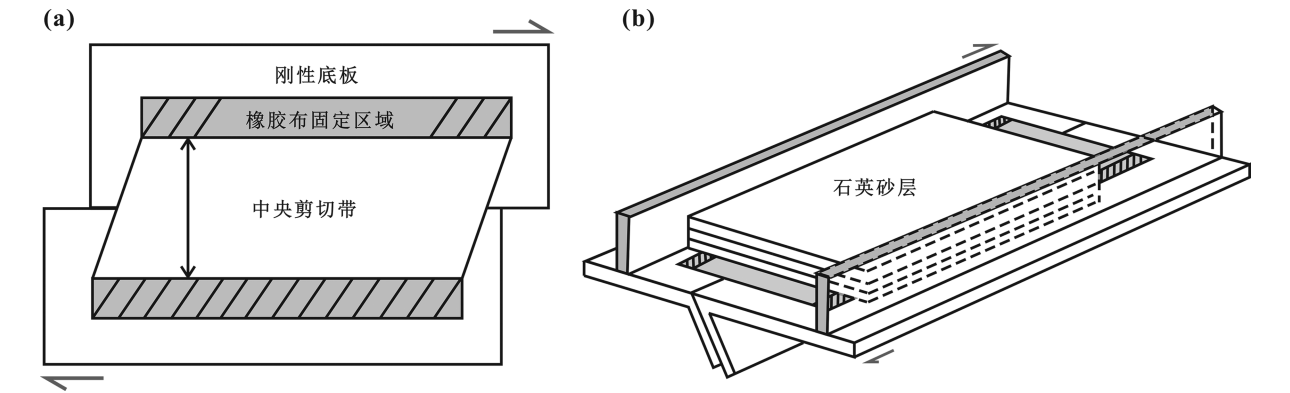


图 9 广布式剪切实验装置示意图

Fig. 9 Experimental apparatus of distributed shear

(a)—实验装置平面图; (b)—实验装置立体图

(a)—plane diagram of distributed shear experimental apparatus; (b)—stereogram of distributed shear experimental apparatus

速率为 0.042 mm/s,基底橡皮在剪切力的作用下发生均匀剪切变形。实验装置横向为开放边界,侧向为刚性金属挡板,其变形作用基本可以忽略不计。

4.3 塑性层基底右行走滑实验 I

前已述及,侏罗系为准噶尔盆地中部永进地区主要的走滑断裂变形区,塑造了研究区构造变形的主体格局。基于此,本次实验首先设计模拟中侏罗统西山窑组煤层形成后的构造演化实验,采用塑性硅胶层作为基底,砂层铺设详情见表 2。实验过程中,用摄像机拍摄平面变形过程,在剪切运动结束后对实验砂体洒水切片,详细记录分析实验模型内部构造的几何学特征。

表 2 塑性层基底右行走滑实验 I 参数表				
Table 2 Silicone basement dextral experiment I parameter table				
砂层序号	砂层顶面高度(cm)	砂层铺设序列	砂层顶面标志层颜色	运动学特征
7	7.5	灰色石英砂	粉色	右行走滑,位移量 14 cm
6	6.5	白色石英砂	绿色	
5	6.0	白色石英砂	红色	
4	5.5	白色石英砂	绿色	
3	5.0	灰色石英砂	粉色	
2	4.0	白色石英砂	黄色	
1	2.0	透明硅胶	蓝色	

4.3.1 平面模拟结果

右行位移达到 4 cm 的时候,模型的中间部位出现同向 R 剪切破裂,总体呈现为左阶式排列,两侧边界部位出现少量小型反向 R' 剪切破裂(图 10a);当右行位移为 7 cm 时,在早期 R 破裂的两侧扩展发育数量更多的同向 R 剪切破裂,同时在边界相邻的 R' 剪切破裂之间形成了小型斜切破裂 R_L' ,彼此

紧密排列,产状相同(图 10b);随着剪切位移的进一步增大,早期剪切破裂的尺度逐渐增大,数量增加,沿其南北两侧持续扩展发育,相邻的 R 剪切破裂之间也逐渐形成斜切破裂 R_L ;当右行位移为 10 cm 时,主要的 R 剪切(或 R' 剪切)出现了合并联合的现象,即首尾相邻的剪切破裂逐渐沿走向传播、叠置并合并演化,砂层表面出现明显的高低起伏,大量的 R_L 和 R_L' 斜切破裂与早期破裂具有较小的夹角(图 10c);当剪切位移为 14 cm 时马达停止施力,此时的砂层表面被大量穿插于早期剪切破裂之间的斜切破裂分割为一个个小型断块体,达到整个变形平面内都发育走滑断裂,并伴有局部应力集中导致的明显隆起(图 10d)。此时实验装置右上角砂层表面形成大量走向彼此平行的 R_L' 斜切破裂,呈现出明显的伸展作用形成的地堑构造并伴有轻微的水平方向扭动现象。说明在实验装置横向向边界不固定条件下进行的广布式剪切变形实验,其主走滑剪切断裂间会发生旋转变形并形成张性堑垒构造。

在这样的广布式剪切变形实验中,存在数条分散的、先彼此独立最终叠置联结的主走滑断裂。这些相邻的主走滑断裂间普遍发育尺度较小的、形成较晚的、走滑变形量较小的、与主走滑断裂剪切属性相反的斜切走滑断裂,并由于斜切断裂间常发生物质旋转变形形成隆起带或凹陷区(谢玉洪,2021)。

4.3.2 剖面切片结果

通过对平面实验进行立体切片,解释典型剖面(图 11),显示出实验砂体不同位置的构造样式有大致相同的形态特征。所选取的 5 张剖面普遍发育高陡直立的走滑断层,大多数切割整个砂层,并错断基底的塑性硅胶层,晚期斜切破裂 R_L 和 R_L' 交错分布

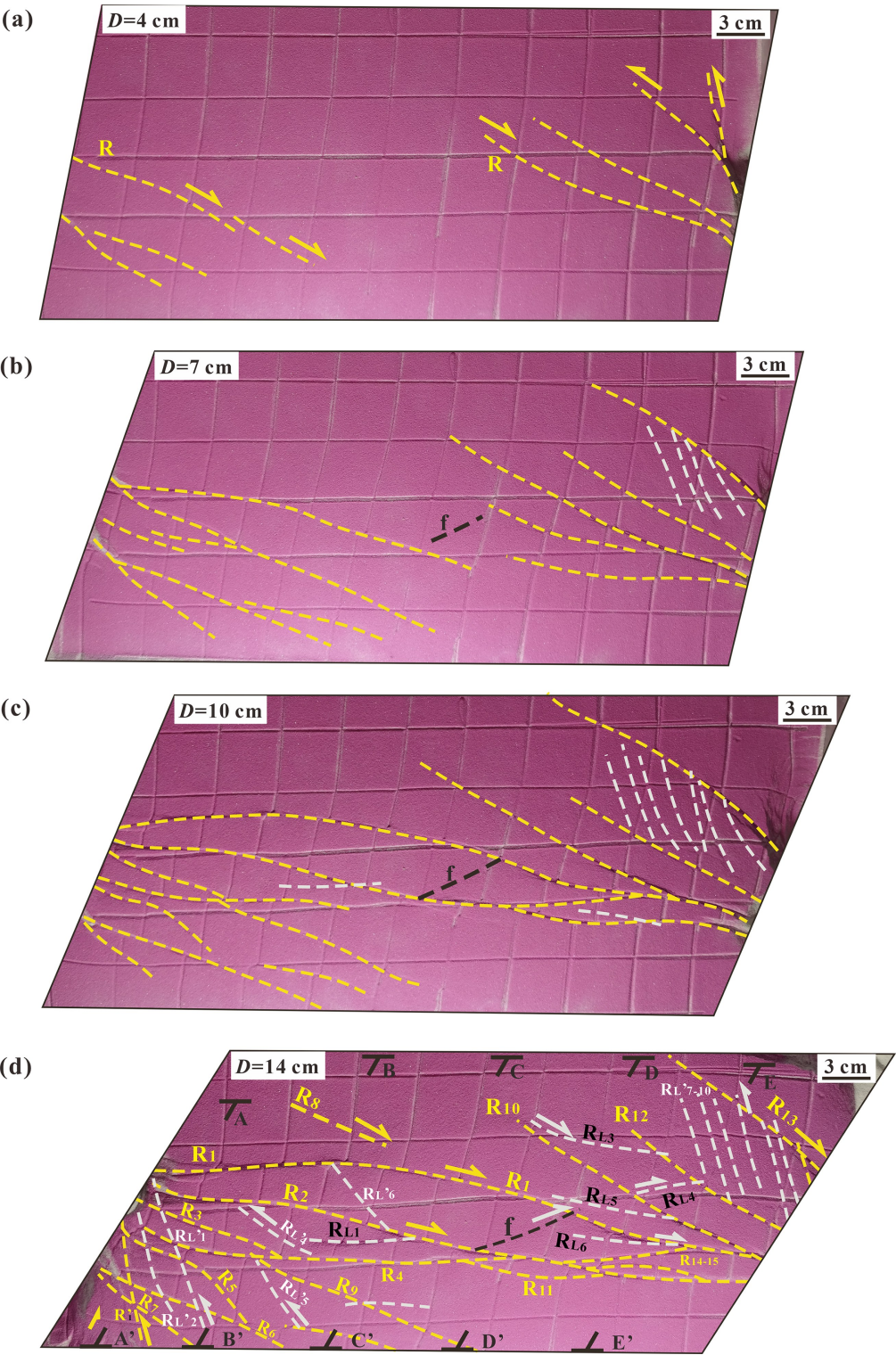


图 10 塑性层基底广布式剪切实验 I 平面变形演化图

Fig. 10 Plane view (photos and line drawings) of different displacements of silicone basement distributed shear experiment I (a)—走滑位移 4 cm 时砂层顶面变形样式; (b)—走滑位移 7 cm 时砂层顶面变形样式; (c)—走滑位移 10 cm 时砂层顶面变形样式; (d)—走滑位移 14 cm 时砂层顶面变形样式; D —走滑位移

(a)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 4 cm; (b)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 7 cm; (c)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 10 cm; (d)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 14 cm; D —strike-slip displacement

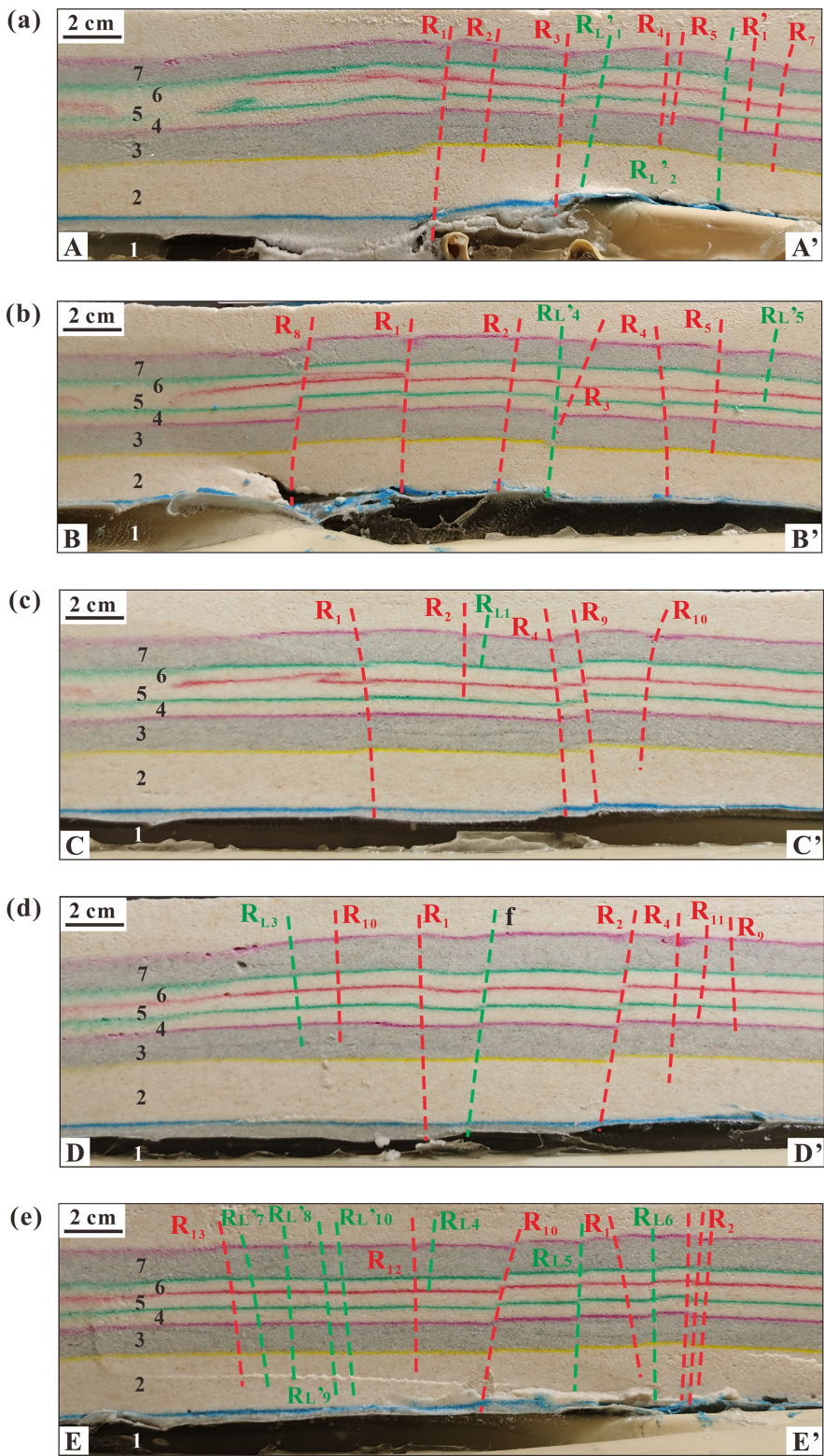


图 11 塑性层基底广布式剪切实验 I 切片图(剖面位置见图 10d)

Fig. 11 Silicone basement distributed shear experiment I profile result (see profile location in Fig. 10d)

(a)—实验切片剖面 A—A'; (b)—实验切片剖面 B—B' 切片剖面; (c)—实验切片剖面 C—C'; (d)—实验切片剖面 D—D'; (e)—实验切片剖面 E—E'

(a)—experimental profile A—A'; (b)—experimental profile B—B'; (c)—experimental profile C—C'; (d)—experimental profile D—D'; (e)—experimental profile E—E'

在相邻的 R 剪切破裂之间。在主干断裂的两侧通常发育小型的延伸较短的分支走滑断裂,倾向与主干断层相向,部分向下收敛于主干断层上。大多数断层具有轻微的逆断距,少量表现为正断层,组成正花状构造样式。

4.4 塑性层夹层右行走滑实验 II

在完成并解译基底为塑性层的实验 I 的基础上,为进一步探究塑性层分布位置对于浅表断裂平面展布样式的影响,我们继续设计将塑性层铺设在中部夹层的广布式剪切变形实验。采用干燥的灰色石英砂模拟底部石炭系—三叠系,透明硅胶模拟中侏罗统西山窑组煤层,白色石英砂模拟晚期同沉积作用。不改变实验装置尺寸,砂层铺设详情见表 3。

表 3 塑性层夹层右行走滑实验 II 参数表
Table 3 Silicone interlayer dextral experiment II parameter table

砂层 序号	砂层顶面 高度 (cm)	砂层铺设 序列	砂层顶面 标志层颜色	运动学特征
9	7.5	白色石英砂	红色	右行走滑,位移量 13 cm
8	7.0	白色石英砂	蓝色	
7	6.5	白色石英砂	粉色	
6	5.5	白色石英砂	绿色	
5	4.5	透明硅胶	红色	
4	3.0	灰色石英砂	蓝色	
3	2.5	灰色石英砂	粉色	
2	2.0	灰色石英砂	绿色	
1	1.0	灰色石英砂	黑色	

4.4.1 平面模拟结果

当右行位移为 2 cm 时,砂层表面开始自边界向中部逐渐形成细微的左阶排列的同向 R 剪切破裂;当右行位移为 3 cm 时,可见明显 6 条 R 剪切破裂和 1 条边界处发育的反向 R'破裂(图 12a),实验物质发生非对称性拉张变形,装置边缘率先形成系列雁列式的斜向拉张正断层系统;随着走滑位移量的增大,早期形成的小型破裂向砂层表面中部扩展,数量明显增加;当右行走滑位移为 10 cm 时,两条大型的 R 剪切破裂彼此相连,形成了宽度约 2~3 cm 的主位移带,并且逐渐有与主位移带有较小交角的斜交破裂 R_L 生成,此时实验装置边界形成具有一定规模的沉积中心,并在剪切运动中后期快速形成(图 12c);当右行位移达到 13 cm 时停止施力,砂层表面由大量走向近平行的 R 剪切破裂分割为不同条带,少量长度约 3 cm 的斜切破裂 R_L , R_L' 在早期 R 和 R'剪切破裂之间发育(图 12d)。

与广布式剪切模拟实验 I 相比,该实验仅发育

极少量的晚期斜切破裂 R_L 和 R_L' ,与早期 R 剪切破裂的链接相对不那么紧密。总体上平面变形特征呈现出两个马尾状构造与张性地堑,由两侧无限制边界向中间扩展发育。考虑到可能是实验装置底部橡皮布的变形影响了表层石英砂的破裂和小范围的隆起,可以在装置底部两块彼此独立的运动板上首先铺设聚二甲硅氧烷层(PDMS),其上铺设石英砂,随后铺设平行排列的 5 mm 宽的有机玻璃条,从而保证上覆石英砂层发生均匀变形,进而减少基底材料参与变形的影响(Dooley and Schreurs, 2012)。

4.4.2 剖面切片结果

选取实验 II 的 5 张切片展示了构造样式相似的剖面形态(图 13):当塑性硅胶层位于地层中部时,仅发育极少量 R_L 和/或 R_L' 剪切破裂。塑性硅胶层下伏的石英砂层几乎没有垂向错动,整体来看中部区域由于底部走滑断层错动地层造成剖面上厚度较两侧边界明显加剧,形成中部的轻微隆起;硅胶上覆石英砂层可见分布均匀的浅表走滑断裂,它们是实验初期形成的大量 R 和 R'剪切破裂,具有明显垂向断距,大多断层具有正断距,产状高陡而直立错断硅胶层上表面。剖面 5 位于实验装置边界部位,明显发育由于区域伸展作用形成的堑-垒构造,推测这是广布式剪切作用晚期 R_L 和/或 R_L' 剪切破裂伴随整体剪切应变增加而形成的具有弱倾向滑动的弯曲变形导致的,这样的表现也与拉张走滑体系下大量弧形弯曲走滑断裂带的特征相一致。

4.5 塑性层基底伸展-右行走滑叠加实验 III

区域地质背景调研和三维地震资料显示,研究区准噶尔盆地中部永进地区主要经历了早期的石炭纪伸展作用,形成大量基底正断层,以及晚二叠世—侏罗纪的右行剪切作用。为了证明两期叠加应力对研究区走滑断裂形成机理的推断,在实验 III 中设计早期伸展与晚期右行走滑叠加的实验。早期伸展环境使实验装置中部区域形成倾角约 65°的基底正断层,代表石炭纪研究区 NE-SW 向拉张作用下形成的构造变形;随后将下降盘用干燥石英砂铺平,模拟二叠系—三叠系沉积;继续铺设透明硅胶和干燥石英砂,模拟侏罗系煤层以及晚期沉积作用,砂层铺设参数详见表 4。

4.5.1 平面模拟结果

在前期伸展作用的基础上,后期右行位移 3 cm 时,砂层表面随即由边界向中部开始发育明显左阶雁列式 R 剪切破裂,并在边界处出现反向 R'剪切破裂(图 14a);当右行位移为 6 cm 时,早期 R 剪切破裂

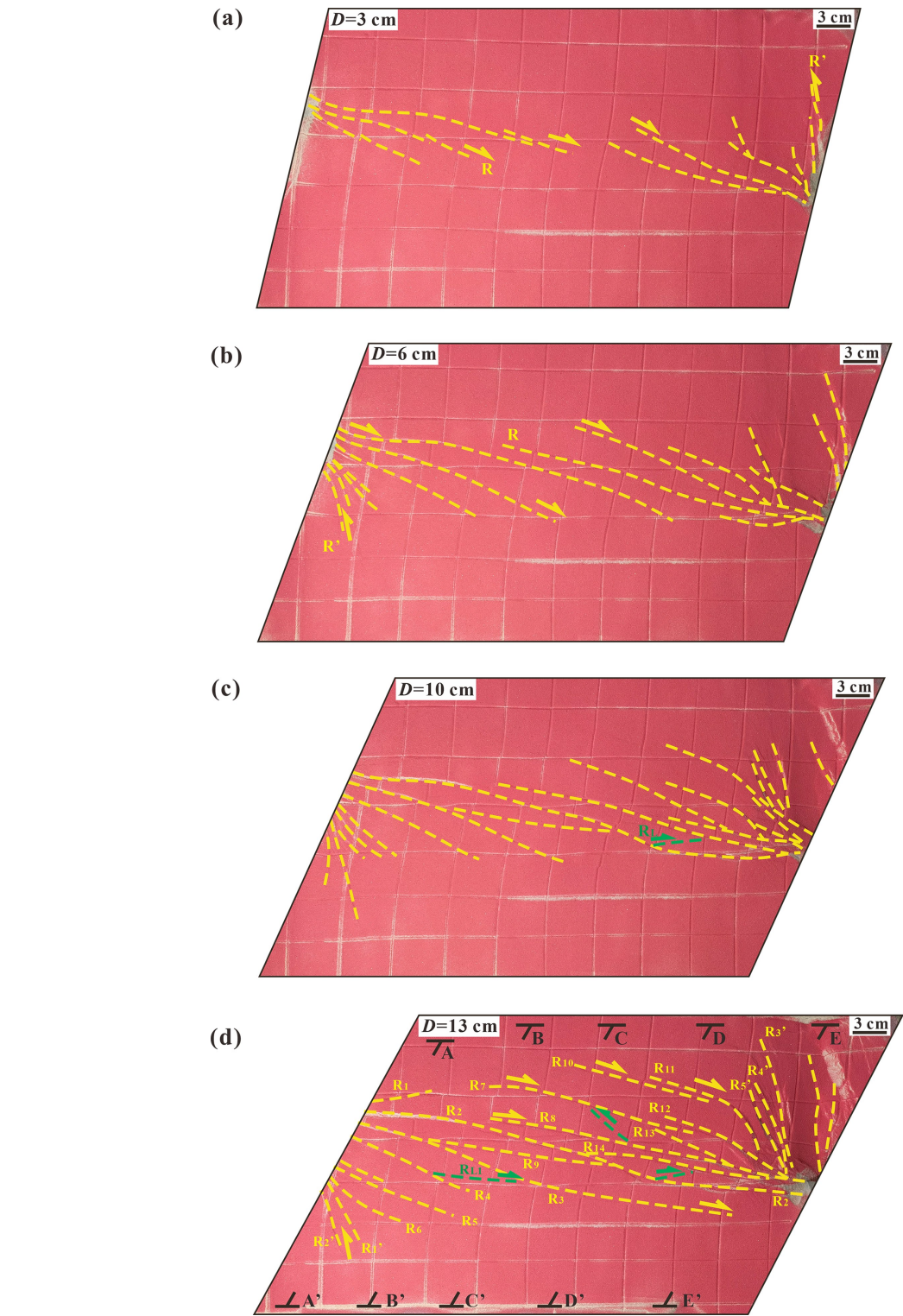


图 12 塑性层夹层广布式剪切实验 II 平面变形演化图

Fig. 12 Plane view (photos and line drawings) of different displacements of silicone interlayer distributed shear experiment II (a)—走滑位移 3 cm 时砂层顶面变形样式; (b)—走滑位移 6 cm 时砂层顶面变形样式; (c)—走滑位移 10 cm 时砂层顶面变形样式; (d)—走滑位移 13 cm 时砂层顶面变形样式; D—走滑位移 (a)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 3 cm; (b)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 6 cm; (c)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 10 cm; (d)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 13 cm; D—strike-slip displacement

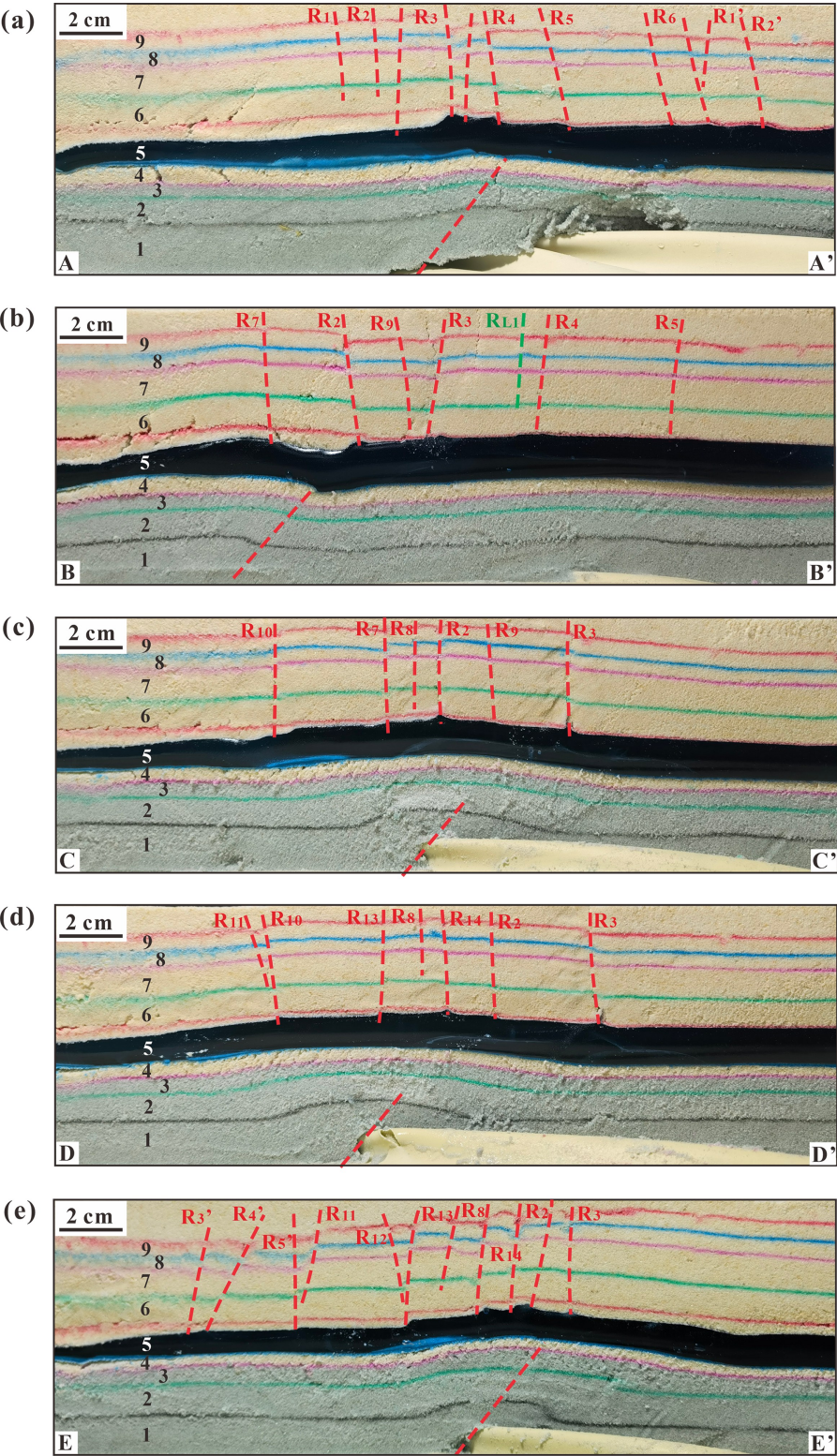


图 13 塑性层夹层广布式剪切实验Ⅱ切片图(剖面位置见图 12d)

Fig. 13 Silicone interlayer distributed shear experimentⅡ profile result (see profile location in Fig. 12d)

(a)—实验切片剖面 A—A′; (b)—实验切片剖面 B—B′ 切片剖面; (c)—实验切片剖面 C—C′; (d)—实验切片剖面 D—D′; (e)—实验切片剖面 E—E′

(a)—experimental profile A—A′; (b)—experimental profile B—B′; (c)—experimental profile C—C′; (d)—experimental profile D—D′; (e)—experimental profile E—E′

表 4 塑性层基底伸展-右行走滑叠加实验Ⅲ参数

Table 4 Silicone basement extension-dextral superimposed experiment Ⅲ parameter

砂层 序号	砂层顶面 高度(cm)	砂层铺设 序列	砂层顶面 标志层颜色	运动学特征
9	7.5	灰色石英砂	绿色	右行走滑,位移量 13 cm
8	7.0	白色石英砂	红色	
7	6.5	灰色石英砂	绿色	
6	6.0	白色石英砂	粉色	
5	5.0	白色石英砂	蓝色	
4	4.0	灰色石英砂	黄色	
3	2.0	白色石英砂	绿色	
2	1.5	透明硅胶	—	
1	—	—	—	伸展,位移量 2 cm

向南北两侧扩展,断裂延伸长度增加,砂层中央部位由一条主要的 R 破裂相连(图 14b);随着右行剪切作用的进一步加深,相邻或叠置的 R 和 R'破裂之间随着晚期应力场旋转逐渐形成大量 R_L 和 R_L' 斜切破裂,相邻断裂间形成与剪切带走向近平行的多个小型条带状隆起带(图 14c);右行位移达到 13 cm 时马达停止施力,此时砂层表面被两期剪切作用形成的多组走向不同的剪切破裂分割成大量近菱形断块体, R_L 和 R_L' 斜切破裂伴随剪切应变量的增加出现轻微的倾向滑动的弯曲变形(图 14d),由于边界发育的旋转构造以及应力集中和应力释放区域的存在,砂层表面多出现低隆起和凹陷相间的构造形态。

4.5.2 剖面切片结果

实验Ⅲ的剖面体现并验证了研究区断裂垂向不同深度几何学形态差异展布特征(图 15),切片 2、3、5 中均可以识别出明显的走滑断层和正花状构造,呈现出轻微的压扭走滑特征。其中规模较大的主干断层垂向切穿整个砂层,并发育在基底正断层的位置之上,但未完全切穿塑性硅胶层;浅部发育的分支断层于砂层中部位置收敛在主干断层上,向上发散,但垂向断距较小。另有周缘小型走滑断裂在整个模型均有分布,它们大多倾向高陡近直立,向下延伸终止于硅胶上部砂层,规模略小于主干走滑断裂。

4.6 广布式实验结果分析

三组广布式剪切对比实验再现了准噶尔盆地中部永进地区走滑断裂的发育演化过程,并反映了不同地层属性和先存基底断裂对晚期构造演化的影响,实验的断裂平面组合以及剖面切片与前述研究区构造样式特征就有极高的吻合度。

当右行剪切量为 3%时,三种不同地层铺设的实验砂层表面随即产生最早期的 R 剪切破裂,呈左阶雁列式排列,并在之后的演化过程中逐渐扩展增

长;当剪切位移量为 10%时,实验Ⅰ即不存在先存基底断层,直接用塑性硅胶层作为基底的对照实验组优先发育彼此平行的斜切破裂 R_L' ,最终形成的大量主位移带最大间距为 8.8 cm,最小间距为 3.8 cm;当剪切位移量为 16.7%时,实验Ⅱ和实验Ⅲ才逐渐形成斜切破裂 R_L 和 R_L' ,其各主位移带最大间距分别为 5.2 cm 和 6.3 cm,最小间距分别为 2.1 cm 和 1.8 cm(图 16)。值得注意的是,随着剪切位移量的均匀增加,先期 R 剪切破裂组成的最大主位移带间距先有明显的持续增大趋势,之后伴随着主位移带间不断生成新的小型断裂,最大主位移带间距出现明显回落,并在晚期运动过程中呈较缓增长趋势。说明在构造演化过程相同的基础下,塑性硅胶层之上的石英砂层厚度越大,广布式走滑变形进展越快,主位移带之间的间距也越大,相邻次级断层之间分隔的间距也随之增大。

从实验的演化过程来看,随着广布式剪切作用的加剧,走滑断裂逐渐从边界向中心扩展,断裂数量增加,延伸长度增长。三组广布式模拟实验分别在右行剪切位移量为 15%、13.3%和 10%时由较为狭窄而独立的剪切带逐渐连接发育为宽泛的中央剪切应变区,并直至整个砂层表面都均匀分布各级序的走滑断裂。这样的演化过程从实验室的尺度揭示了断层侧向斜列叠置和传播生长的分阶段性的发育特征,以及先存基底断层的存在对后期浅表断层发育进展的影响。与自然界真实而复杂的走滑变形特征具有相似性。

5 讨论

广布式走滑模拟实验Ⅰ和实验Ⅱ通过改变塑性层的分布位置探究了真实地层里中侏罗统西山窑组煤层对浅层走滑构造形成和发育的控制作用。经过平面实验结果与实际地震资料构造变形对比,笔者认为塑性层基底实验的断裂平面组合与实际情况更加符合(图 17),晚期形成的大量走向不同的低角度 R_L 和 R_L' 斜切破裂交织分布于早期雁列式共轭剪切破裂之间,分别对应研究区近东西向、北西西以及北东-南西向剪切断裂,一并组成了研究区侏罗系“网格状”断层平面展布格局。实验Ⅰ和实验Ⅲ的平面断裂展布具有高度相似性,在剖面实验结果中也可以看到 R_L 和 R_L' 穿插分布在 R 和 R'剪切破裂之中,而实验Ⅱ则仅发育极少量的晚期斜切破裂,说明基底先存正断层的存在与否不影响晚期剪切作用形成的各类走滑断裂的在平面上的发育位置,仅在垂

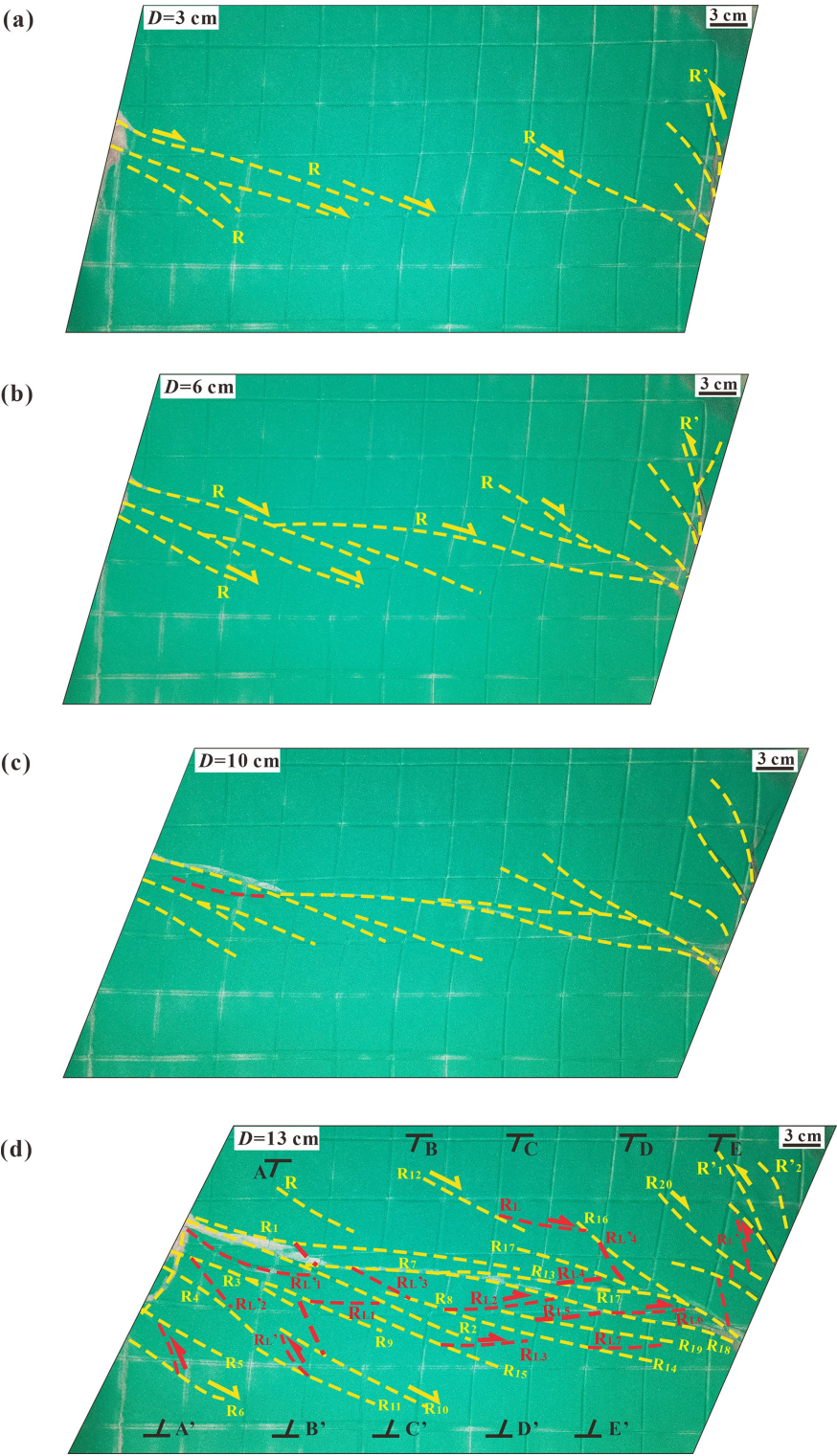


图 14 塑性层基底广布式剪切叠加实验Ⅲ平面变形演化图

Fig. 14 Plane view (photos and line drawings) of different displacements of silicone basement distributed shear superimposed experiment III

(a)—走滑位移 3 cm 时砂层顶面变形样式; (b)—走滑位移 6 cm 时砂层顶面变形样式; (c)—走滑位移 10 cm 时砂层顶面变形样式; (d)—走滑位移 13 cm 时砂层顶面变形样式; D—走滑位移

(a)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 3 cm; (b)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 6 cm; (c)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 10 cm; (d)—deformation style of sand surface when strike-slip displacement is 13 cm; D—strike-slip displacement

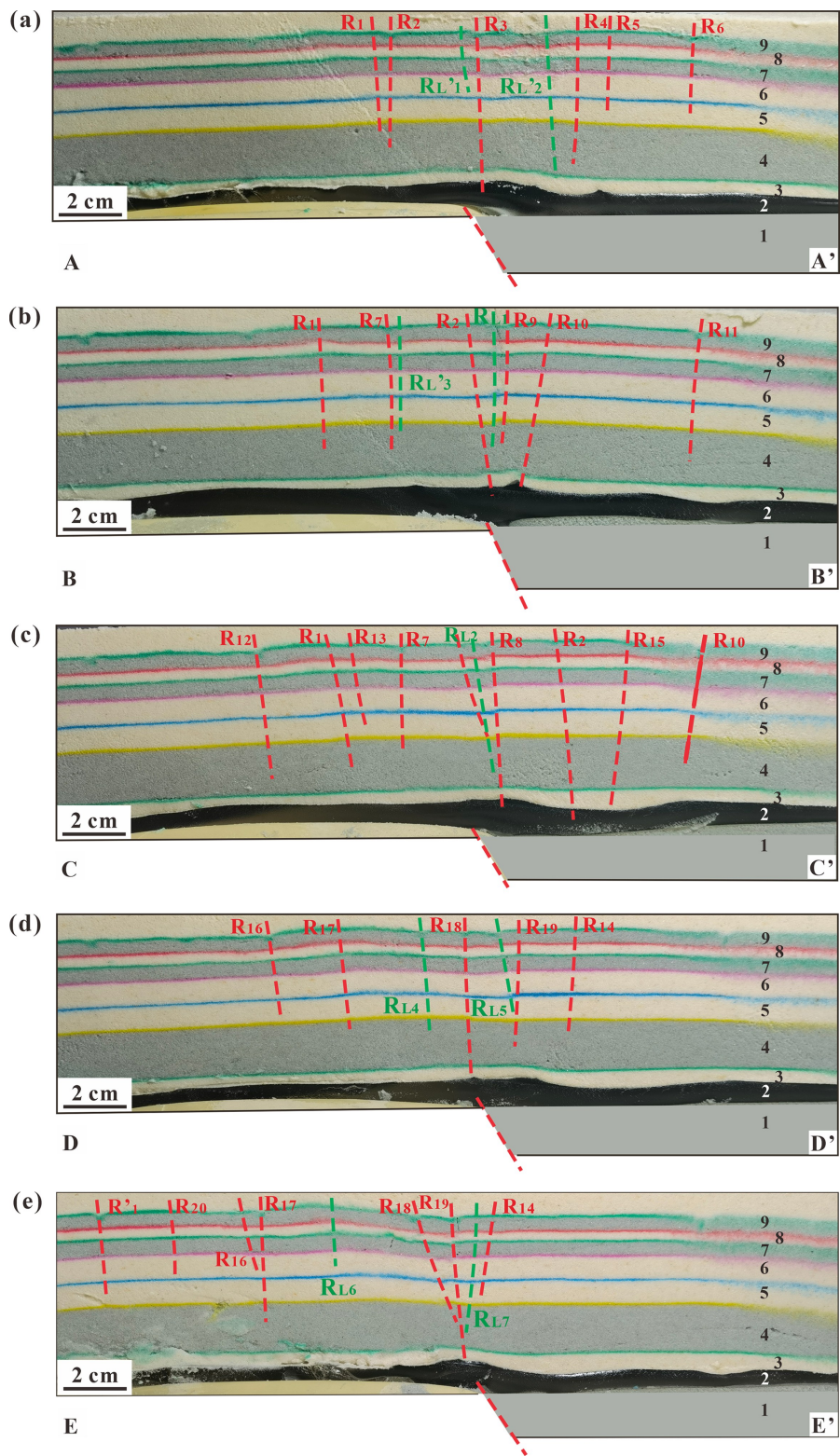


图 15 塑性层基底广布式剪切叠加实验Ⅲ切片图(剖面位置见图 14d)

Fig. 15 Silicone basement distributed shear superimposed experiment Ⅲ profile result (see profile location in Fig. 14d)
(a)—实验切片剖面 A—A'; (b)—实验切片剖面 B—B'; (c)—实验切片剖面 C—C'; (d)—实验切片剖面 D—D'; (e)—实验切片剖面 E—E'
(a)—experimental profile A—A'; (b)—experimental profile B—B'; (c)—experimental profile C—C'; (d)—experimental profile D—D'; (e)—experimental profile E—E'

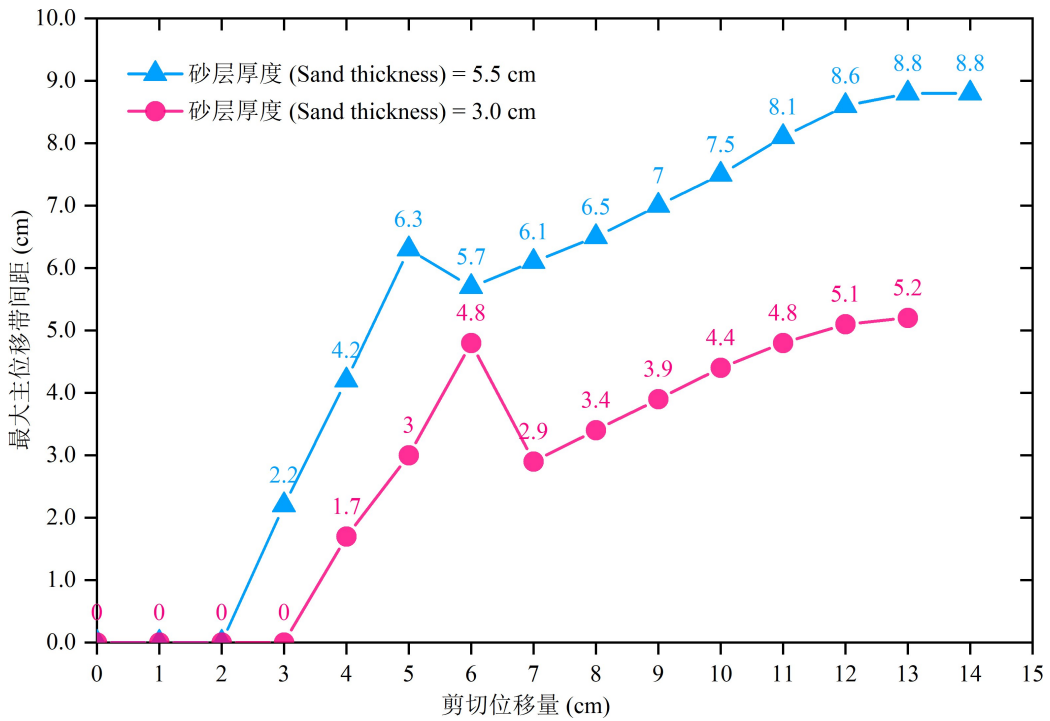


图 16 剪切位移量-主位移带间距关系图

Fig. 16 Relationship between shear displacement and principal displacement zone spacing

向上控制晚期断裂的形成位置。实验Ⅲ的剖面实验结果与研究区实际剖面具有较高的相似性,无论是主干走滑断层与基底先存断层的空间叠置关系,还是周缘小型走滑断层的规模,都能在实际中找到对应的例子。

当我们将广布式剪切模拟实验结果与研究区平面断裂分布图和地震剖面构造解释相匹配时发现:实验平面结果展示的大量小型走滑断块体与准噶尔盆地中部永进地区多组大角度斜交的断裂系统具有一定的相似性,模拟实验中所揭示的大量物质旋转、断层侧向斜列叠置与研究区的断裂体系高度相仿。由于底部塑性硅胶层的存在使剪切作用形成的主位移带不再局限于一条狭窄的构造带内,高弹橡皮布参与剪切运动使走滑断裂大量均匀地分布在砂体各个部位,从而构成了平面“网格状”分布特征;从剖面特征来看,模拟实验得到的走滑断裂在砂体各个切片部位的发育具有一定的相似性,大量的走滑断裂发育在基底正断层的上方,早、晚期断裂具有空间上的叠加性。实验砂层表面均具有明显的隆起与凹陷,虽然每条断层的垂向断距并不大,但广泛分布在整個模型中(图 18),这与现今准噶尔盆地中部永进地区地表呈现隆坳相间的构造格局具有一致性。同时,实验剖面结果与研究区实际地震剖面识别的走滑断裂系统具有构造样式的几何学相似性,说明研

究区发育的走滑断裂是受侏罗系基底煤层控制的广布式剪切走滑变形的产物,早期先存基底对晚期走滑花状构造形成部位有明显的影响。

基底先存断层经过晚期构造运动被活化形成走滑断层的实例在我国中部其他叠合盆地也大量存在。Zhou Zhicheng et al. (2021, 2022)通过二维地震资料和钻井测井资料阐明了内蒙古西部巴彦浩特盆地东部凹陷的断裂活动、构造样式和构造演化过程,其中集中发育在 5 个不同时期的各种性质断层主要由挤压、走滑、伸展和反转作用形成。中晚侏罗世和早白垩世形成基底逆断层和正断层,自中侏罗世晚期正断层持续活动,部分大型正断层在盆地东部边界保留原始的正断距,而盆地中部小到中等规模的基底正断层大部分向上终止于早白垩世岩石的顶部,向下终止与早白垩世岩石的底部,少数向下终止于石炭系—侏罗系甚至下古生界,影响了深部挤压变形。随着晚侏罗世岩浆活动的存在以及巴彦乌拉山受南部鄂尔多斯板块挤压产生左行走滑运动,晚白垩世—渐新世地层局部发育张性构造,表现出张扭构造特征,使早期正断层活化形成并形成负花状构造的走滑断层。这些晚期形成的走滑断层为油气的运移提供了良好的输导通道。在内蒙古中西部河套盆地临河凹陷也存在这样的断层活化现象。早白垩世临河凹陷受北西-南东向伸展作用形成大量

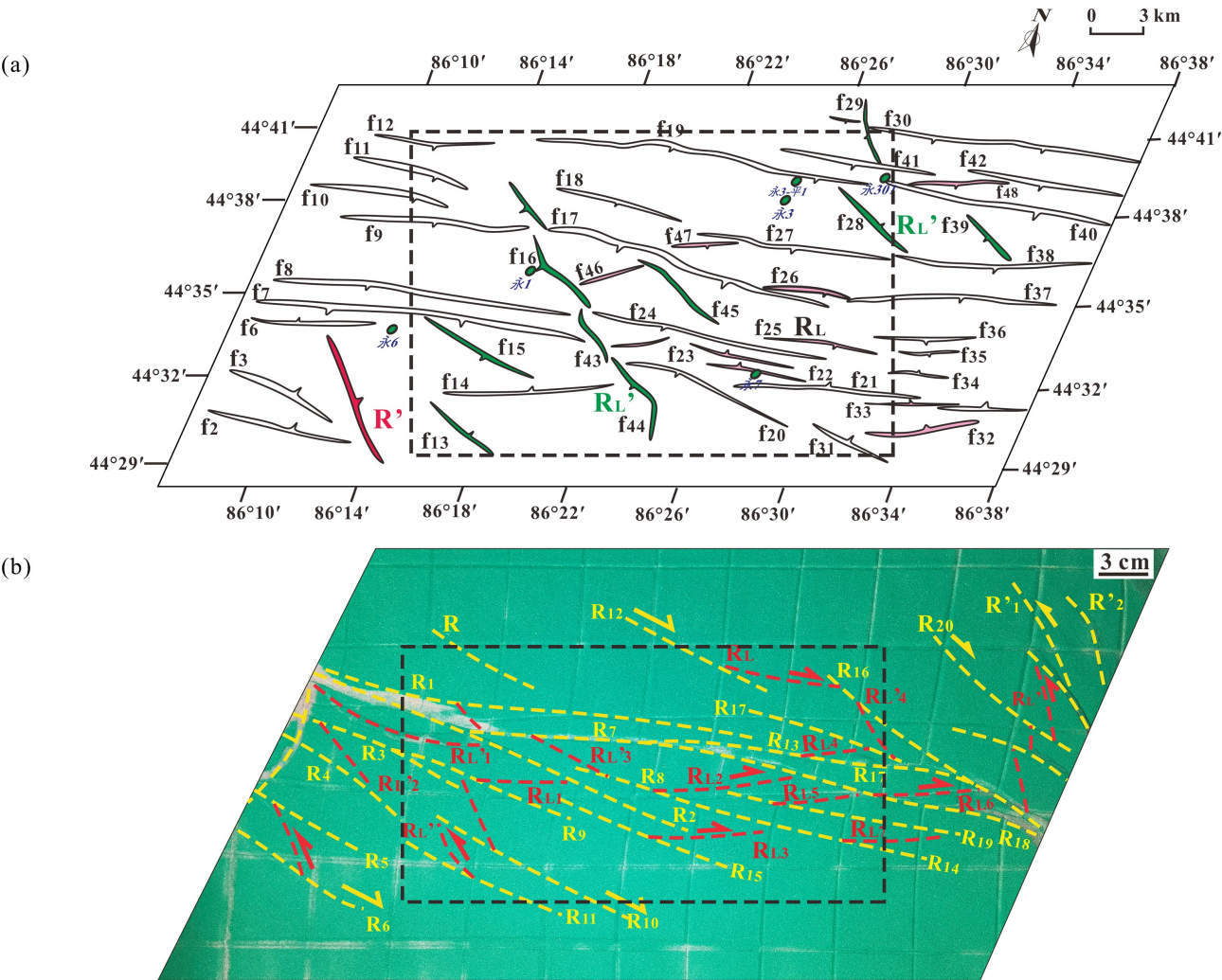


图 17 广布式剪切平面实验结果(b)与研究区断裂平面分布(a)对比

Fig. 17 Comparison between distributed shear experimental plane result (b) and faults plane distribution of study area (a)
(a)—研究区侏罗系顶面断裂分布图;(b)—广布式剪切实验断裂平面结果
(a)—fault distribution map of top Jurassic in study area; (b)—fault plane result of distributed shear experiment

北东向正断层,形成堑垒式构造样式;晚白垩世至早始新世由于应力方向发生改变,挤压作用形成正反转断层和褶皱;中始新世至第四纪分别由于区域应力作用形成北东-北北东右行走滑断层和近东西向左行走滑断层。四期构造作用最终形成坳陷中部地堑-地垒断块带,局部负花状构造带和反转构造调节带,并以倾斜断块为主要构造单元的现今盆地构造格局。

基于以上研究成果,笔者认为准噶尔盆地中部永进地区在石炭系基底形成后,早二叠世的伸展作用导致大量基底正断层的形成;随后发生的正反转构造使部分基底断层活化并反转,并导致了下二叠统的部分缺失;受印支运动和燕山运动影响,研究区北部车莫古隆起逐渐形成,给研究区施加了额外的

挤压应力,并由于基底的不均质性产生了强烈的压扭走滑作用。该时期地层中煤系等塑性层的存在导致大量右行广布式走滑断裂得以发育,并最终在喜山期的逆冲过程中被改造,形成现今的走滑断裂构造格局(图 19)。

6 结论

通过对准噶尔盆地中部永进地区地震资料精细解释和构造物理模拟对比分析得出如下结论:

(1)永进地区主要发育三组走向不同的走滑断裂,晚期北西西向和北东东向小型斜切断裂分割早期近东西向 R 剪切破裂,走滑主干断裂发育在早期基底正断层之上,形成垂向不同深度几何学形态差异展布,平面上“网格状”的断裂构造格局。

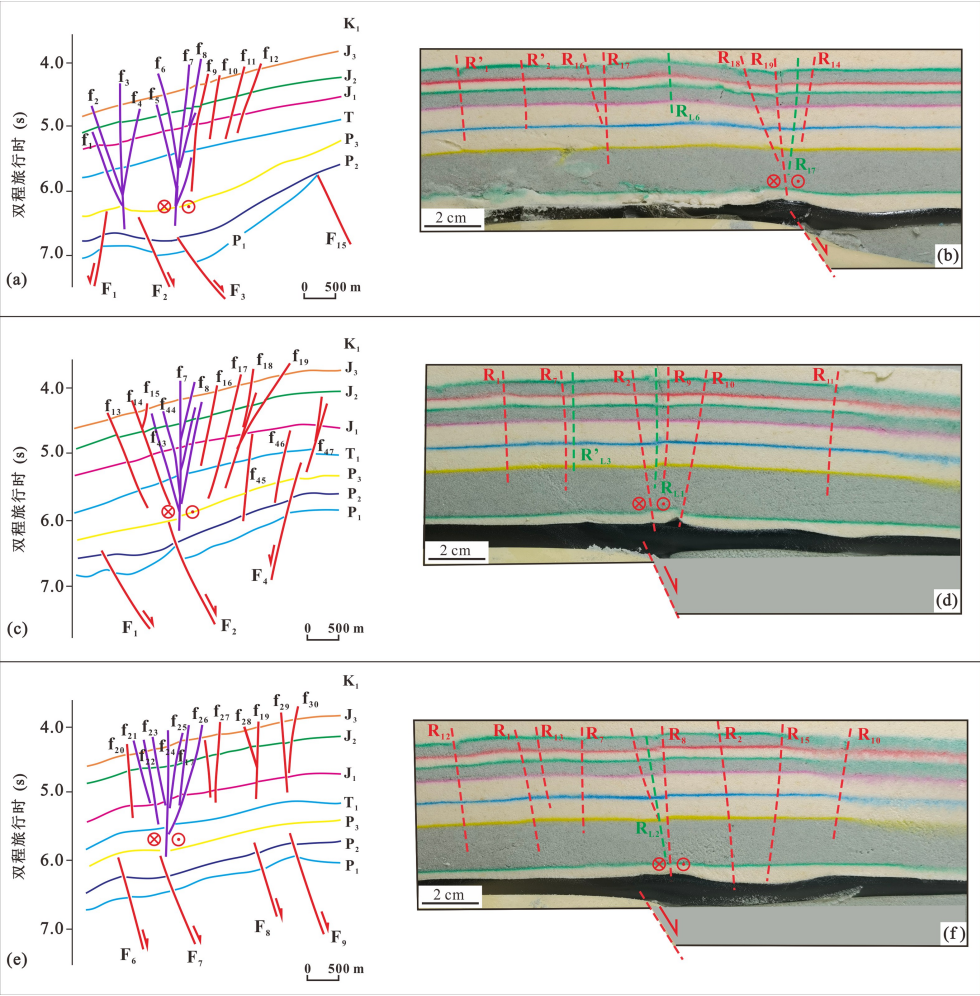


图 18 广布式剪切剖面实验结果(b、d、f)与研究区断裂地震解释(a、c、e)对比

Fig. 18 Comparison between distributed shear experimental profile results (b, d, f) and seismic interpretation of study area (a, c, e)

(a)、(c)、(e)—研究区地震剖面解释；(b)、(d)、(f)—广布式剪切实验断裂剖面结果
(a), (c), (e)—seismic section interpretation; (b), (d), (f)—fault profile result of distributed shear experiment

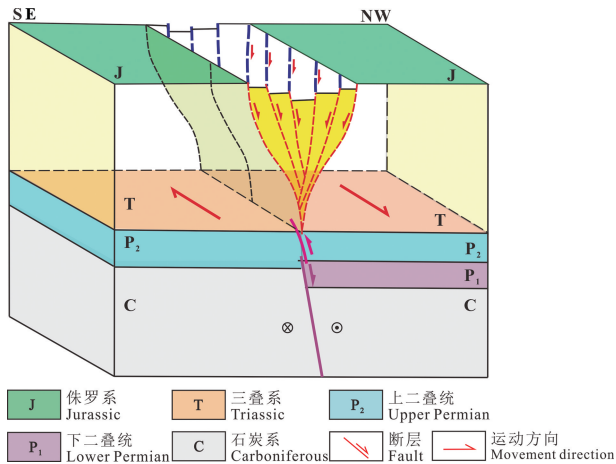


图 19 准噶尔盆地中部永进地区走滑断裂模式图

Fig. 19 Strike-slip fault model in Yongjin area of central Junggar basin

(2)研究区走滑断层的发育特征受中侏罗统煤层和石炭系基底先存正断层双重属性控制,是由广布式剪切作用形成的一类特殊的走滑构造系统。塑性层上覆砂层厚度越大,砂体表面剪切位移带间距越大,各级断裂延伸长度越远。

(3)研究区在形成演化过程中受到陆内多期构造应力场叠加作用,其剪切变形特征更多受基底非均质性、下伏地层属性等多因素影响,从而建立了准噶尔盆地中部永进地区走滑断裂系统的成因模式,对具有相似地质背景的其他地区提供了研究依据。

致谢:感谢中国石化胜利油田研究院的王千军高级专家、薛雁博士和宋健博士对研究区三维地震资料的支持。审稿专家为论文提出了宝贵而具有建设性的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

References

An L J, Sammis C G. 1996. Development of strike-slip faults: Shear experiments in granular materials and clay using a new technique. *Journal of Structural Geology*, 18: 1061~1077.

Chen Yongbo, Cheng Xiaogan, Zhang Han, Li Chunyang, Ma Yongping, Wang Guodong. 2018. Fault characteristics and control on hydrocarbon accumulation of middle-shallow layers in the slope zone of Mahu sag, Junggar basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(6): 985~994 (in Chinese with English abstract).

Cheng Changling. 2018. Strike-slip fault characteristics and petroleum geological significance of Block 4 in central Junggar basin. *Journal of Shengli College China University of Petroleum*, 32(1): 8~10 (in Chinese with English abstract).

Davy P, Cobbold P R. 1991. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. *Tectonophysics*, 188(1-2): 1~25.

Ding Wenlong, Jin Zhijun, Zhang Yijie, Zeng Jianhui, Wang Hongyu. 2011. Experimental simulation of faults controlling oil migration and accumulation in the central part of Junggar basin and its significance for petroleum geology. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 73~82 (in Chinese with English abstract).

Dooley T, Monastero F, Hall B, McClay K R, Whitehouse P. 2004. Scaled sandbox modelling of transtensional pull-apart basins: Applications to the Coso geothermal system. *Geothermal Research Council Transactions*, 28: 637~641.

Dooley T, Schreurs G. 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574: 1~71.

Gapais D, Fiquet G, Cobbold P R. 1991. Slip system domains, 3. New insights in fault kinematics from plane-strain sandbox experiments. *Tectonophysics*, 188(1-2): 143~157.

Graveleau F, Hurtrez J E, Dominguez S, Malavielle J. 2011. A new experimental material for modeling relief dynamics and interactions between tectonics and surface processes. *Tectonophysics*, 513(1-4): 68~87.

He Dengfa, Zhang Lei, Wu Songtao, Li Di, Zhen Yu. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar basin. *Oil and Gas Geology*, 39(5): 845~873 (in Chinese with English abstract).

Hu Qiuyuan, Dong Dawei, Yang Jianlei, Gao Liang, Kong Xue, Yang Guang, Jiao Xiaoqian. 2020. Structural analysis and physical simulation experiment in the 4th block of the central Junggar basin. *Science Technology and Engineering*, 20(10): 3898~3907 (in Chinese with English abstract).

Jia Qingsu, Yin Wei, Chen Fajing, Xiong Zuwei. 2007. The role of Che-Mo palaeohigh in controlling hydrocarbon accumulation in central Junggar basin. *Oil and Gas Geology*, 28(2): 257~265 (in Chinese with English abstract).

Lin Huixi, Wang Jianwei, Cao Jianjun, Ren Xincheng. 2019. Jurassic compression-torsion fault patterns of the central Junggar basin and their controlling role on reseiviors. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3259~3268 (in Chinese with English abstract).

Naylor M A, Mandl G, Sitpestrjin C H K. 1986. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Journal of Structural Geology*, 8(7): 737~752.

Schreurs G. 2003. Fault development and interaction in distributed strike-slip shear zones: An experimental approach. *Geological Society, London, Special Publications*, 210(1): 35~52.

Shi Haoguo. 2017. Jurassic reservoir development in Fukangdeep sag, central Junggar basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(2): 238~246 (in Chinese with English abstract).

Sun Jing, Guo Xuguang, You Xincui, Bian Baoli, Xue Jingjing, Chang Qiusheng. 2022. Characteristics and effective reservoir genesis of deep-ultra deep tight clastic reservoir of Junggar basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2532~2546 (in Chinese with English abstract).

Tan Chengpeng, Yu Xinghe, Li Shengli, Qu Jianhua, Wei Lingyun, Li Xiaolu, Du Yonghui. 2014. The response relationship between base-level cycle and reservoirs of fan delta in Badaowan Formation, Southern Junggar basin. *Geology in China*, 41(1): 197~205 (in Chinese with English abstract).

Wang Jianwei, Bao Jun, Cao Jianjun, Zhao Leqiang, Zeng Zhiping, Gong Yajun, Li Jishou, Li Songtao. 2022. Two types of strike-slip fault zones and their tectonic deformation patterns in the central Junggar basin. *Earth Science*, 47(9): 3389~3400 (in Chinese with English abstract).

Wang Yiran, Wu Tianqi, Tian Lijun, Yang Shuguang, Wang Changjiang, Zhang Guoqing, Wei Bo, Li Le, Fan Qi. 2016. Formation conditions and favorable exploration zones of shale gas on the southern margin of Junggar basin. *Geology in China*, 43(1): 288~297 (in Chinese with English abstract).

Xie Yuhong. 2021. A review on analogue modelling of strike-slip tectonics. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(6): 1127~1145 (in Chinese with English abstract).

Yin Wei, Zheng Herong, Meng Xianlong, You Weifeng. 2005. Geochemical behaviors of crude oils in central Junggar basin. *Oil and Gas Geology*, 26(4): 461~466+472 (in Chinese with English abstract).

Yu Fusheng, Amu Guleng, Yang Guangda, Ma Baojun. 2008. Tectonic evolution and mechanism analysis of Che-Mo Palaeo-uplift in Junggar basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(1): 39~44 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhijie, Zhou Chuanmin, Yuan Xuanjun, Cao Zhenglin, Chen Xingyu, Wan Li, Cheng Dawei. 2023. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in the Junggar basin, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3006~3023 (in Chinese with English abstract).

Zhou Zhicheng, Ding Wenlong, Zhang Ruifeng, Yan Danping, Jiao Baocheng, Wu Chenlin, Liu Tianshun, Du Xiaoyu, Xue Mingwang. 2021. Structural styles and tectonic evolution of Cretaceous to Cenozoic faults in the Linhe Depression of Hetaobasin, China: Implications for petroleum traps. *International Journal of Earth Sciences*, 110(8): 2805~2829.

Zhou Zhicheng, Ding Wenlong, Zhang Ruifeng, Xue Mingwang, Jiao Baocheng, Wu Chenlin, Chen Yuting, Qiu Liang, Du Xiaoyu, Liu Tianshun. 2022. Structural styles and tectonic evolution of Mesozoic-Cenozoic faults in the eastern depression of Bayanhaote basin, China: Implications for petroleum traps. *Geological Magazine*, 159(5): 689~706.

Zhu Ming, Yuan Bo, Liang Zeliang, Yang Disheng, Tang Xueying. 2021. Fault properties and evolution in the periphery of Junggar basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(9): 1163~1173 (in Chinese with English abstract).

Zhu Wen, Wang Ren, Lu Xinchuan, Shi Wanzhong, Ren Mengyi, Liu Kai. 2021. Yanshanian tectonic activities and their sedimentary responses in northwestern Junggar basin. *Earth Science*, 46(5): 1692~1709 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈永波, 程晓敢, 张寒, 李春阳, 马永平, 王国栋. 2018. 玛湖凹陷斜坡区中浅层断裂特征及其控藏作用. *石油勘探与开发*, 45(6): 985~994.

程长领. 2018. 准噶尔盆地中部 4 区块走滑断裂特征及石油地质意义. *中国石油大学胜利学院学报*, 32(1): 8~10.

丁文龙, 金之钧, 张义杰, 曾藏辉, 王洪玉. 2011. 准噶尔盆地腹部断裂控油的物理模拟实验及其成藏意义. *地球科学(中国地质大学学报)*, 36(1): 73~82.

何登发, 张磊, 吴松涛, 李淦, 甄宇. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征. *石油与天然气地质*, 39(5): 845~873.

胡秋媛, 董大伟, 杨建磊, 高亮, 孔雪, 杨光, 焦晓倩. 2020. 准噶尔盆地中 4 区块构造解析及物理模拟实验. *科学技术与工程*, 20(10): 3898~3907.

贾庆素, 尹伟, 陈发景, 熊作为. 2007. 准噶尔盆地中部车-莫古隆起控藏作用分析. 石油与天然气地质, 28(2): 257~265.

李振宏. 2001. 准噶尔盆地腹部地区断裂特征浅析. 新疆石油学院学报, 13(3): 5~8.

李振宏, 汤良杰, 丁文龙, 姚素平, 王英民, 刘豪, 王媛. 2002. 准噶尔盆地腹部地区断裂特征分析. 石油勘探与开发, 29(1): 168~170.

廖峰. 2008. 准噶尔盆地中部 3 区块侏罗系-白垩系油气成藏规律研究. 成都理工大学硕士学位论文.

林会喜, 王建伟, 曹建军, 任新成. 2019. 准噶尔盆地中部地区侏罗系压扭断裂体系样式及其控藏作用研究. 地质学报, 93(12): 3259~3268.

马宝军, 漆家福, 于福生, 张克鑫. 2008. 准噶尔盆地车-莫古隆起构造特征及物理模拟. 大地构造与成矿学, 32(116): 36~41.

石好果. 2017. 准噶尔盆地腹部阜康深凹带侏罗系成藏规律. 石油实验地质, 39(2): 238~246.

孙婧, 郭旭光, 尤新才, 卞保力, 薛晶晶, 常秋生. 2022. 准噶尔盆地深层-超深层致密碎屑岩储层特征及有效储层成因. 地质学报, 96(7): 2532~2546.

谭程鹏, 于兴河, 李胜利, 瞿建华, 魏凌云, 李晓路, 杜永慧. 2014. 准噶尔盆地南缘八道湾组扇三角洲露头基岩面旋回与储层的响应关系. 中国地质, 41(1): 197~205.

王建伟, 鲍军, 曹建军, 赵乐强, 曾治平, 宫亚军, 李守济, 李松涛. 2022. 准噶尔盆地腹部两类走滑断裂带及其构造变形样式. 地球科学, 47(9): 3389~3400.

王怡然, 吴天琦, 田继军, 杨曙光, 王长江, 张国庆, 韦波, 李乐, 樊奇. 2016. 准噶尔盆地南缘页岩气形成条件与有利区预测. 中国地质, 43(1): 288~297.

谢玉洪. 2021. 浅表走滑构造系统砂箱物理模拟研究进展. 大地构造与成矿学, 45(6): 1127~1145.

尹伟, 郑和荣, 孟闲龙, 由伟丰. 2005. 准噶尔盆地中部原油地球化学特征. 石油与天然气地质, 26(4): 461~466+472.

于福生, 阿木古冷, 杨光达, 马保军. 2008. 准噶尔盆地车-莫古隆起的构造演化特征. 地球学报, 29(1): 39~44.

于福生, 李国志, 杨光达, 马宝军, 陈书平. 2009. 准噶尔盆地南缘褶皱-冲断带变形特征及成因机制模拟. 大地构造与成矿学, 33(3): 386~395.

于福生, 张芳峰, 杨长清, 李学良, 冯自成. 2010. 龙门山前缘关口断裂典型构造剖面的物理模拟实验及其变形主控因素研究. 大地构造与成矿学, 34(2): 147~158.

朱峰, 瞿建华, 于宝利, 邓勇, 刘亚会, 宋明星. 2017. 准噶尔盆地腹部石南 21 井油藏再认识. 新疆石油地质, 38(6): 673~677.

张志杰, 周川闽, 袁选俊, 曹正林, 陈星渝, 万力, 成大伟. 2023. 准噶尔盆地二叠系源-汇系统与古地理重建. 地质学报, 97(9): 3006~3023.

朱明, 袁波, 梁则亮, 杨迪生, 唐雪颖. 2021. 准噶尔盆地周缘断裂属性与演化. 石油学报, 42(9): 1163~1173.

朱文, 王任, 鲁新川, 石万忠, 任梦怡, 刘凯. 2021. 准噶尔盆地西北腹部燕山期构造活动与沉积响应. 地球科学, 46(5): 1692~1709.

Development characteristics and analogue modelling of strike-slip faults in the Yongjin area, central Junggar basin

ZHANG Jingqi¹⁾, YU Fusheng^{*1,2)}, PANG Fuji³⁾, WANG Qianjun⁴⁾, WANG Yuefeng¹⁾

1) College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3) International Department, China National Petroleum Corporation Logging, Beijing 100101, China;

4) Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong 257000, China

* Corresponding author: syfu1234@163.com

Abstract

Yongjin area is located in the middle of Junggar basin, northwestern China, where several hydrocarbon-bearing structures associated with strike-slip faults have recently been discovered. However, the development characteristics and genetic mechanism of strike-slip faults are not thoroughly studied. Based on detailed interpretation of three dimensional seismic data, three groups of strike-slip fault systems are identified in the Triassic-Jurassic strata in the study area, which are nearly east-west, north-west-west and north-east-east trends. The distribution characteristics of the strike-slip fault system are longitudinal stratified and planar “grid” pattern structure. Based on the similarity principle, four groups of structural physical sandbox simulation and comparison experiments were designed to reproduce the tectonic evolution process in the study area. The simulation results indicated that the formation of such kind of strike-slip faults is related to the location of pre-existing faults of the basement. This kind of distributed strike-slip fault system in Yongjin area was controlled by both pre-existing structures and stratum properties, thus a genetic model of the study area has been established. The research results have guiding significance for the genesis of strike-slip fault systems in areas with similar geological settings.

Key words: Junggar basin; Yongjin area; distributed strike-slip faults; analogue modelling; tectonic evolution