

地球学报

Acta Geoscientica Sinica

ISSN 1006-3021, CN 11-3474/P

《地球学报》网络首发论文

题目：库车坳陷山前冲断楔中秋一迪北构造变换带形成机制——来自砂箱构造模拟实验的启示

作者：孙晶，许安明，杨克基，罗浩渝，吕洺炎，漆家福

收稿日期：2025-01-20

网络首发日期：2025-02-21

引用格式：孙晶，许安明，杨克基，罗浩渝，吕洺炎，漆家福. 库车坳陷山前冲断楔中秋一迪北构造变换带形成机制——来自砂箱构造模拟实验的启示[J/OL]. 地球学报. <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.P.20250221.1402.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

库车坳陷山前冲断楔中秋—迪北构造变换带形成机制 ——来自砂箱构造模拟实验的启示

孙 晶^{1, 2)*}, 许安明^{3, 4, 5)}, 杨克基⁶⁾, 罗浩渝^{3, 4, 5)}, 吕洺炎^{1, 2)}, 漆家福^{1, 2)}

1) 油气资源与工程国家重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249;

2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3) 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000;

4) 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000;

5) 新疆超深油气重点实验室, 新疆库尔勒 841000;

6) 河北地质大学地球科学学院, 河北石家庄 050031

摘 要: 中秋—迪北构造变换带位于库车坳陷中部的拜城凹陷与东部的阳霞凹陷的过渡部位, 是库车坳陷近年来发现的含油气区带。油气勘探实践表明中秋—迪北构造变换带的油气圈闭与卷入走滑冲断-褶皱变形的中生界构造相关。本文基于三维地震资料解释结果分析了中秋—迪北构造变换带的中生界构造变形组合与岩层能干性的关系, 并通过砂箱构造模拟论证了中秋—迪北构造变换带的形成机制。研究表明, 中秋—迪北构造带是库车山前冲断楔中的构造变换带, 中生界塑性层厚度的差异是控制构造带形成的主要因素。中秋—迪北构造变换带西侧的拜城凹陷充填有较厚的中生界, 且含有较厚的煤层、泥岩层等非能干岩层, 在南天山隆升及向南挤压过程中发育分层滑脱的冲断褶皱变形, 在非能干层中滑脱的冲断褶皱变形传播较远, 其前锋达拜城凹陷南部边缘的西秋构造带; 而阳霞凹陷的中生界较薄, 煤层、泥岩层等非能干岩层也较薄, 发育相对协调的冲断褶皱变形, 冲断褶皱变形向南传播相对较近, 其前锋消失在东秋—迪那构造带。中生界的厚度沿着中秋—迪北构造带的变化, 导致库车坳陷山前冲断楔内的逆冲断层发育 NNE 向的侧断坡、斜断坡调节拜城凹陷和阳霞凹陷冲断楔构造变形的差异, 受主断坡、侧断坡或斜断坡控制的逆冲断层、走滑逆冲断层相关背斜构造是中秋—迪北构造变换带的主要构造圈闭样式。

关键词: 冲断褶皱系; 构造变换带; 构造物理模拟, 中秋—迪北构造变换带, 库车坳陷

中图分类号: P54 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2025.022121

Formation Mechanism of the Zhongqiu–Dibei Structural Transformation Belt of the Thrust Wedge in the Kuqa Depression, Tarim Basin: Implications from the Sandbox Structure Simulation Experiment

SUN Jing^{1, 2)*}, XU Anming^{3, 4, 5)}, YANG Keji⁶⁾, LUO Haoyu^{3, 4, 5)}, LÜ Mingyan^{1, 2)}, QI Jiafu^{1, 2)}

1) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249;

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

3) Research and Development Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla, Xinjiang 841000;

4) Engineering Research Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla, Xinjiang 841000;

5) Xinjiang Key Laboratory of Ultra-Deep Oil and Gas, Korla, Xinjiang 841000;

6) College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031

本文由国家自然科学基金(编号: 42072060)资助。

收稿日期: 2025-01-20; 改回日期: 2025-02-07。责任编辑: 马铭株。

第一作者简介: 孙晶, 女, 1987 生。博士, 副教授。主要从事岩石地球化学和盆地构造演化的研究。E-mail: sunjingvv@163.com。

Abstract: There are abundant oil and gas resources in the Mesozoic–Cenozoic continental sedimentary layer of the Kuqa Depression of the Tarim Basin. The NNE-trending Zhongqiu–Dibei structural transformation belt, located in the transition zone between the Baicheng Sag in the middle of the Kuqa Depression and the Yangxia Sag in the east, is an oil-bearing zone discovered in the Kuqa Depression in recent years. Exploration shows that the oil and gas traps in the Zhongqiu–Dibei structural transformation belt are related to Mesozoic structures involved in strike-slip thrust-fold deformation. In this study, the relationship between the Mesozoic structural deformation assemblage and the competency of the strata was analyzed based on the interpretation results of 3D seismic data and the formation mechanism of the Zhongqiu–Dibei structural transformation belt was demonstrated through the simulation of the sandbox structure. The results showed that the Zhongqiu–Dibei structural belt is a structural transfer belt in the thrust wedge of the Kuqa foreland and differences in the thickness and competency of the Mesozoic–Cenozoic strata are the main factors controlling the formation of the structural belt. The Baicheng Sag on the western side of the Zhongqiu–Dibei structural transformation belt is filled with thick Mesozoic strata and contains thick coal seams, mudstone, and other incompetent rocks. During the uplift and southward pressing of the southern Tianshan Mountains, the thrust-fold deformation that developed in the Mesozoic interior spread further by detachment deformation in incompetent strata and its front reached the Xiqiu structural belt on the southern edge of the Baicheng depression. However, in the Yangxia Sag, with thinner Mesozoic strata and a lack of thicker incompetent strata, coordinated thrust fold deformation developed and the thrust-fold deformation spread relatively near and disappeared in the Dongqiu–Dina structural belt. The differences in the thickness and competency of strata combination characteristics in the Mesozoic along the Zhongqiu–Dibei structural belt dominated the development of the NNE-trending lateral and oblique ramps in the thrust wedge of the Kuqa Depression, which transferred the difference in thrust wedge structural deformation between the Baicheng and Yangxia depressions. Thrust faults and strike-slip thrust-related anticlinal structures controlled by the main ramp and lateral or oblique ramps are the main structural trap styles in the Zhongqiu–Dibei structural transformation belt.

Key words: thrust fold system; structural transformation belt; structural physics simulation; Zhongqiu–Dibei structural transformation belt; Kuqa Depression

位于塔里木盆地的库车坳陷是我国重要的油气勘探区域。新生代喜马拉雅造山时期受印度板块和欧亚板块碰撞的远程效应的影响(Molnar et al., 1975; Yin et al., 1998), 南天山发生脉动式隆升, 并对塔里木盆地造成侧向挤压导致山前发生收缩变形(Yin et al., 1998), 形成了一系列的褶皱冲断构造和丰富的油气资源, 也使得该区域成为构造变形研究和油气勘探结合的热点区域。前人的研究发现, 库车坳陷在不同的构造带受基底古隆起、基底断裂、盐湖分布情况、盐层厚度等差异的影响, 形成了“南北分带、东西分段、上下分层”的构造变形特征(汤良杰等, 2006; 李曰俊等, 2008; 漆家福等, 2009; Neng et al., 2018; Qi et al., 2023)。沿着构造带走向, 库车坳陷的构造样式也具有显著的差异(汤良杰等, 2006; Neng et al., 2018; 吴超等, 2024): 库车坳陷西段的阿瓦特地区构造挤压强烈, 构造平衡复原显示其收缩量达到 50%以上, 盐下层发育向北倾斜的断阶式逆冲构造, 盐层增厚和底辟刺穿十分强烈; 库车坳陷中段的克拉苏和秋里塔格构造带, 盐下层分别发育逆冲叠瓦扇式构造和对冲(背冲)断块, 盐层的底辟规模和形态也与西段的阿瓦特差异很大, 表现为隐刺穿盐枕和刺穿型盐丘、顶蓬构造等; 库车坳陷东段的盐层塑性和厚度均弱于西段和中段, 其

盐下层发育大型宽缓背斜, 盐上层发育滑脱逆冲构造, 形成单斜或断背斜构造。中秋—迪北构造变换带位于库车坳陷中部的拜城凹陷与东部的阳霞凹陷的过渡部位, 是库车坳陷近年来发现的含油气区带。油气勘探实践表明中秋—迪北构造变换带的油气圈闭与卷入走滑冲断-褶皱变形的中生界构造相关。中生界时期该构造带煤层/泥岩层相对发育, 在中生界内部可以形成多层次滑脱, 煤层、泥岩层对北部构造带局部圈闭的形成起重要作用。然而, 对于中秋—迪北构造变换带形成的主要因素以及煤层、泥岩层等非能干层在构造带形成中的作用目前仍未知晓, 这严重阻碍了对于库车坳陷的油气勘探。

世界范围内含盐盆地的构造变形研究表明, 导致构造样式沿走向变化的因素有很多, 主要包括滑脱层的性质、沉积相差异、同构造沉积和剥蚀等(Cotton et al., 2000; Reiter et al., 2011; Wang et al., 2016)。库车坳陷盐构造差异变形的成因机制复杂, 现有研究认为基底古隆起、坡折带、基底断裂、盐湖分布、早期被动盐底辟等因素均可造成盐构造变形的差异。前人对库车坳陷进行野外地质调查、精细的地震资料构造解析、构造物理模拟和数值模拟等方法主要集中在先存盐构造、膏盐层性质的差异

等方面的影响(汤良杰等, 2006; 余一欣等, 2007; 漆家福等, 2009; Li et al., 2012; 李艳友等, 2013; 滕学清等, 2017; 杨克基, 2017; 杨克基等, 2018), 对于盐下构造层的中生界厚度差异这一因素研究鲜有涉及。本文主要聚焦于深部非能干层的空间展布的不均一性这一因素, 通过地震资料分析和物理模拟实验来探究其在库车坳陷构造分段差异变形中的控制作用。

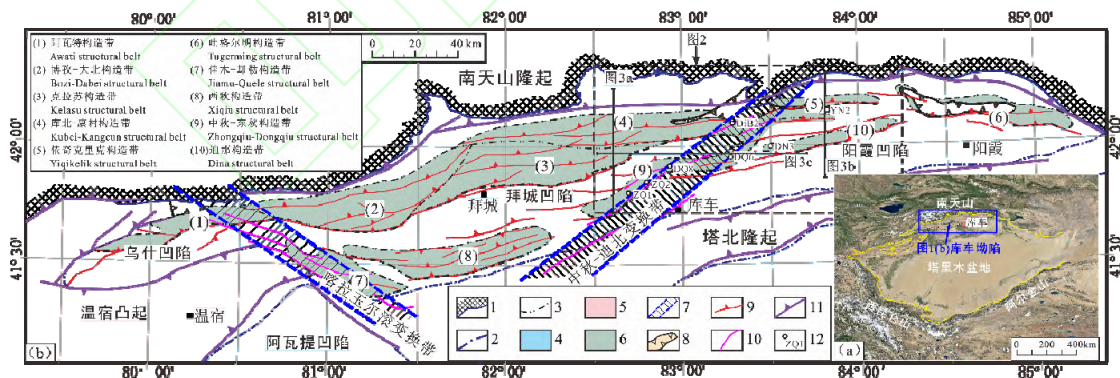
1 地质背景

库车坳陷又称库车前陆冲断带(荆显辉等, 2011; 卢华复等, 2001), 位于塔里木盆地北缘的南天山造山带与塔北隆起之间, 总体上呈 NEE 向展布(汪新等, 2002)。受南天山中—新生代隆升诱发的斜向挤压的影响, 库车坳陷充填的中—新生代地层发生了强烈的收缩变形, 形成了“五带三凹一凸起”的构造格局(刘志宏等, 1999, 2000; 张仲培等, 2003; 漆家福等, 2013; 李本亮等, 2013; 周延钊等, 2016; Neng et al., 2018)。自北向南依次为北部单斜带、克拉苏构造带、依奇克里构造带、秋里塔格构造带和南部斜坡带; 自西向东依次为乌什凹陷、温宿凸起、拜城凹陷和阳霞凹陷。库车坳陷中—新生代变形构造整体上可以分为三个构造系统: 拜城冲断褶皱系统、阳霞冲断褶皱系统和中秋—东秋构造变换带(汪新等, 2002; 汤良杰等, 2006; 唐鹏程等, 2015)。中秋—东秋构造变换带总体上为 NE-NNE 向, 东接牙哈、迪那构造带, 西接西秋构造带, 是发育在拜城冲断系统西部边缘斜断坡上盘的断背斜构造, 也是

拜城冲断褶皱系统与阳霞冲断褶皱系统之间的构造变换带(图 1)。库车坳陷内广泛发育侏罗系煤层和古—始新统膏盐岩, 成为不同构造带分层收缩构造变形的重要滑脱层(何登发等, 2009)。双滑脱层导致了库车坳陷中生代地层逆冲双重构造, 在局部滑脱形成断背斜圈闭, 也是深层天然气勘探的有利目标。

2 中秋—迪北构造变换带发育特征

中秋—迪北构造变换带位于库车坳陷中部的拜城凹陷与东部的阳霞凹陷的过渡部位(Li et al., 2012; 滕学清等, 2017; 杨克基等, 2018; 徐雯婧等, 2020)。这一构造部位的三维地震解释出的中生界断裂多表现为由近 EW(东西)向-NEE(北东东)向-NE(东北)向-NEE(北东东)向的“S”形转折或断续延伸, 部分 NEE-NE 向断裂沿中秋—迪北构造变换带呈右阶斜列(图 2)。西部拜城凹陷与东部阳霞凹陷的中生界中的断裂分布、残留地层厚度和岩性等方面都表现出明显的差异性和不连续性: NEE 向的主干断裂, 如东秋断裂、克拉苏断裂等沿走向在中秋—迪北构造变换带被错断, 拜城凹陷冲断系的断层-褶皱(构造带)密度较大、褶皱宽度更小, 拜城凹陷中生界分布范围也明显较阳霞凹陷宽很多; 拜城凹陷和阳霞凹陷的沉积轴线也有明显错断, 前者沉积中心的轴线沿着主干断裂整体呈 NEE 向, 后者的沉积中心轴线与之相同; 在两者过渡带的中秋—迪北地区, 发育一系列 NE 向的撕裂断层, 组成中秋—迪北构造变换带。地震资料解释出的拜城凹陷深层三叠系和侏罗系的厚度明显大于阳霞凹陷相当岩层, 而且煤



1—库车坳陷北部边缘界线; 2—库车坳陷与塔北隆起边缘界线; 3—构造带大致范围; 4—凹陷区; 5—隆起区; 6—构造带; 7—库车坳陷分区构造变换带位置(凹陷间过渡带); 8—白垩系剥蚀尖灭线, 空三角指向剥蚀区; 9—铲式或坡坪式逆冲断层(带), 三角指向断层倾向; 10—近直立走滑或逆冲走滑断层; 11—高角度基底卷入逆冲断层; 12—钻井号及井名。虚线框为中秋—东秋—迪那三维地震工区(图 2)范围, 虚线框内的黑色线条为地震剖面(图 3a, b, c)位置。

1—boundary of the northern margin of the Kuqa depression; 2—boundary of the margin of the Kuqa depression and the Tabei uplift; 3—approximate extent of the tectonic zone; 4—depression zone; 5—uplift zone; 6—tectonic zone; 7—location of the transformation zone of the Kuqa depression zoning (transition zone between depressions); 8—Cretaceous denudation cusp extinction line, with empty triangles pointing to the denudation zone; 9—shovel-type or sloping-type reverse-slip faults (zones), with triangles pointing to the fault tendency; 10—nearly vertical strike-slip or reverse-strike strike-slip faults; 11—high-angle basement-involved reverse-strike faults; 12—drill number and well name. The dashed box shows the extent of the Zhongqiu—Dongqiu—Dina 3D seismic working area (Fig. 2) and the three back lines show the locations of the seismic profiles (Fig. 3a, b, and c).

图 1 库车坳陷在塔里木盆地中的位置图(a)和库车坳陷主要构造带分布图(b)

Fig. 1 Location of the Kuqa depression in the Tarim Basin (a) and distribution of major tectonic zones in the Kuqa depression (b)

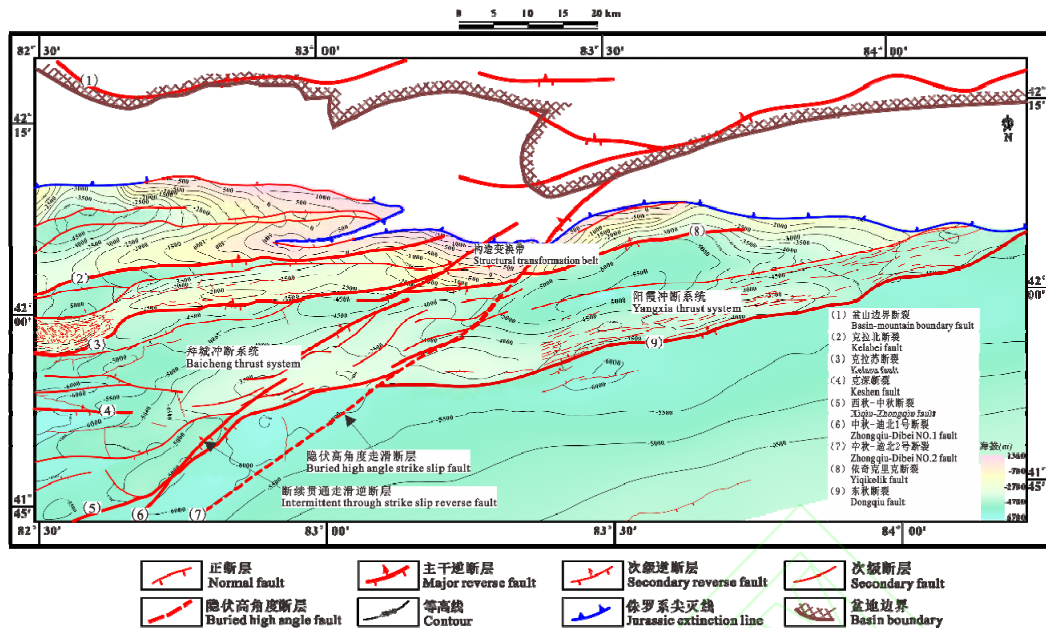


图2 库车坳陷中秋—东秋—迪那三维地震区块白垩系顶面构造图

Fig. 2 Tectonic map of the Cretaceous top surface of the Zhongqiu-Dongqiu-Dina 3D seismic block in the Kuqa depression

层、泥岩层夹层厚度也更大(吴超等, 2024)。种种迹象表明, 拜城凹陷与阳霞凹陷在中生代就是两个相对独立而又相互联通的陆相湖盆(吴超等, 2024)。这暗示中秋—迪北构造变换带具有前中生界盆地基底构造背景, 不仅对中生代的沉降-沉积作用有影响, 对中新—新生代构造变形也有影响。

过拜城冲断系统和阳霞冲断系统的地震剖面(图 3)也显示, 两者深部煤系滑脱层的厚度和分布范围有明显差异。在拜城凹陷, 地震剖面上可解释出的煤层有两套, 累计厚度最高可超过 2 000 m。而在阳霞凹陷, 煤层厚度明显减薄, 大部分区域煤层厚度不足 500 m。在含煤盆地宽度上, 拜城凹陷也明显大于阳霞凹陷。煤层厚度的差异, 导致两个地区构造变形样式有明显不同。虽然两者均表现出分层收缩特征, 但是拜城冲断系呈现三层收缩特征: 基底断层向上未能切穿煤层, 大多滑脱于含煤层内部; 在煤层和膏岩层之间, 发育多个向上滑脱于盐层、向下滑脱于煤层的叠瓦式逆冲断片; 盐上构造层发育向下滑脱于盐层内部的逆冲断层及相关褶皱(图 3a)。阳霞冲断系统则表现为双层收缩特征: 基底断裂向上可切穿煤层, 最终尖灭于盐层内部。在变形强烈的依奇克里克构造带, 断裂甚至可贯穿煤层和盐层, 不同构造层发育协调变形(图 3b)。在横穿中秋—东秋构造变换带的地震剖面上(图 3c), 可解释出侏罗系、三叠系的煤层夹层自西(拜城凹陷)向东(阳霞凹陷)明显减薄或尖灭。拜城凹陷、阳霞凹陷的冲断构造带在垂向上分层收缩变形特征, 很可能是中生界煤层和古—始新世盐层厚度的差异导致的。软弱层系越厚, 其“解耦”构造变形的能

力也越强, 分层收缩变形也越明显。此外, 地震剖面也显示在变形传播距离方面, 中秋地区和东秋地区也有较大差异, 前者传播较远, 其前锋达拜城凹陷南部边缘的西秋构造带; 后者向南传播相对较近, 其前锋消失在东秋—迪那构造变换带。

3 构造物理模拟实验

3.1 构造物理模拟实验初始模型

构造物理(沙箱)模拟实验是研究和模拟自然界地质构造的形成演化过程的重要手段(Marco B. 2007; Costa et al., 2002; Schofisch et al., 2021; Wu et al., 2014; 赵仕俊等, 2005), 能够将自然界构造原型按一定比例缩放到实验室条件下, 再现这一构造在长时间地质作用下的形成演化过程, 在国内外得到了广泛的应用(徐振平等, 2024)。库车坳陷冲断构造变形主要是受新近纪喜马拉雅构造运动影响南天山的隆升及向南推挤而形成的。拜城凹陷和阳霞凹陷深部煤系软弱层系的厚度和展布范围发生了明显变化, 这可能是导致拜城凹陷和阳霞凹陷冲断-褶皱构造变形样式差异并发育中秋—迪北构造变换带的重要因素。而南天山“脉动式隆升”及其向南推挤速率的差异也可能是影响构造变形样式的重要因素。为了验证“中秋—迪北构造变换带”的变形机制与塑性层之间的关系, 本研究设计了两种不同岩性组合在同样的挤压体制下的构造变形响应的一系列构造物理模拟实验。初始的构造物理模型如图 4 所示, 在 40 cm 宽、60 cm 长的实验砂箱内一侧只铺设干燥石英砂来模拟相对脆性岩层(能干岩层), 而另一层在干燥石英砂层中含有硅胶层夹层, 后者来

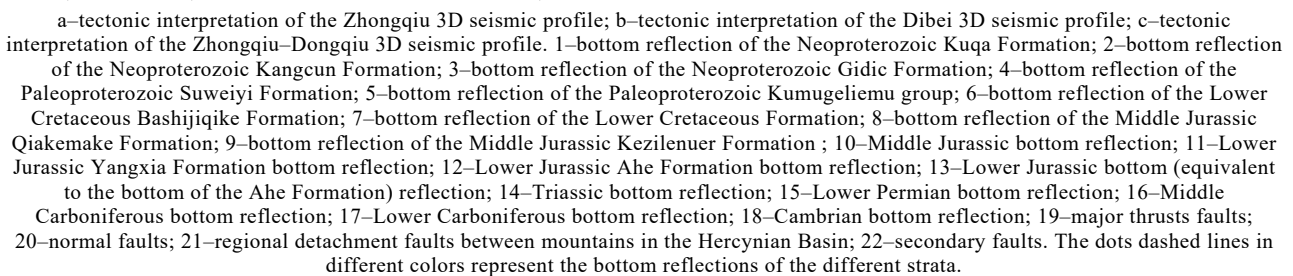


图 3 过中秋—迪北构造变换带的三维地震资料解释剖面

Fig. 3 Interpretation section of 3D seismic data over the Zhongqiu-Dibei transform tectonic zone

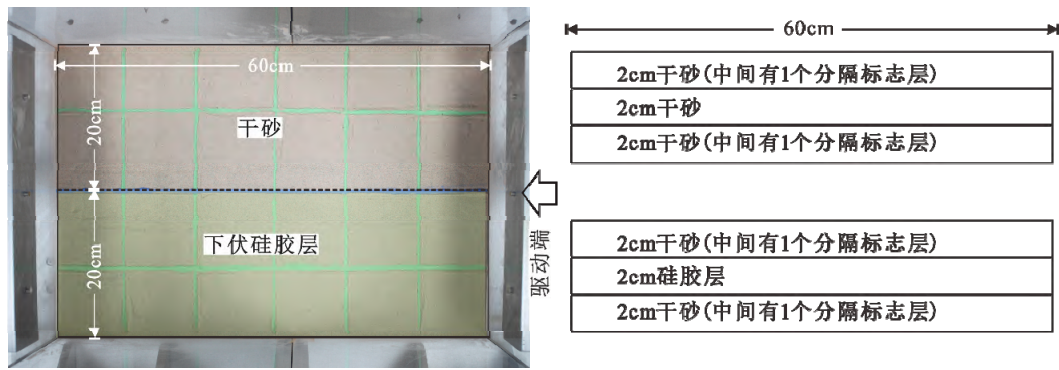


图4 库车坳陷构造物理模拟设计俯视图

Fig. 4 Tectonic physical simulation design of the Kucha depression (top view)

模拟相对韧性岩层(非能干层)。松散石英砂粒径在200~400 μm , 其抗张强度接近为零, 变形特性遵循摩尔-库伦破裂准则, 破裂内摩擦角约 20° , 聚合强度约 200 Pa 左右, 非常接近地壳浅部脆性沉积地层的变形行为; 而聚酯硅胶近似于牛顿流体, 可以在较小的差异应力下发生流动变形, 适合作为模拟自然界中塑性岩层(非能干岩层)的材料。本文所有的物理模拟实验均在中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室完成。

为了模拟塑性岩层的差异分布对构造变形样式的影响, 本文设计了两个系列的平面构造变形实验。系列实验一的初始模型设计的砂箱长宽高分别为 40 cm×60 cm×6 cm, 砂箱推挤方向的左半部分(图4中的下部)从下至上分别铺设了 2 cm 的干砂, 2 cm 的硅胶和 2 cm 的干砂; 左半部分(图4中的上部)则只铺设干砂 6 cm 的干砂(图4)。沙箱的左右两部分的顶部和底部的干砂中间均铺设了薄薄的一层用于分隔标志的彩色砂层(厚度可以忽略不计)。以右侧为驱动端, 向左推挤位移使砂箱砂体模型发生收缩构造变形。在实验中, 同样的初始模型至少重复一次, 同时通过改变挤压速率来分析推挤位移速率对构造变形样式的影响(图5)。实验二是为了模拟塑性层展布范围的变化对平面构造变形的影响。系列实验二的初始模型则是针对地震资料解释的中秋—东秋—迪那中生界构造的差异性(图2, 3)设计了斜向分布的岩性差异变化带, 将硅胶铺设成不规则的形状(图6a)。

3.2 系列实验一模拟结果分析

为了对比分析推挤位移速率对冲断变形构造样式的影响, 系列实验一设计了推挤速率(v)分别为 0.1 mm/s(图5a)、0.05 mm/s(图5b)和 0.01 mm/s(图5c), 最终的收缩量(d)为 20 cm。分别在干砂一侧和硅胶一侧的宽度中间截取一个纵切面, 通过对比实验探究挤压速率对转换带的发育的影响, 并分析不同推挤位移速率的3个构造物理模拟实验最终构造

样式的差异。

从实验结果上来看, 有软弱层(硅胶层)一侧更易发生分层变形, 软弱层分隔的能干层更易发育反冲断层, 形成冲气构造; 而无软弱层一侧更易发育叠瓦构造, 且顶面坡角明显大于有软弱层分隔能干层的一侧; 在二者之间形成了一条构造变换带, 构造变换带内部有块体旋转。以挤压速度是 0.05 mm/s 为例(图5b), 当缩短量为 5 cm 时, 可以发现在距离近活动端, 石英砂层一侧比硅胶层一侧在距离活动端大概 15 cm 处先出现断层, 而硅胶层一侧在距离活动端尖灭的位置发育一个小型褶皱, 褶皱底部被断层错断。当缩短量为 10 cm 时, 可以发现石英砂层一侧和硅胶层一侧都在靠近 30 cm 处发生了明显的构造变形; 硅胶层一侧煤系软弱地层上层发育多个褶皱, 煤系软弱地层下层早期形成的断裂逆冲位移增大, 此阶段整体变形适中, 主要集中在近活动端。随着挤压作用持续不断, 当缩短量由 15 cm 增大到 20 cm 时, 硅胶层一侧煤系软弱地层上层主要形成一系列连续的小型褶皱, 煤系软弱地层下层只有在靠近活动端附近产生几条小型断层, 没有随着缩短量增加而增多; 同时石英砂层一侧除了靠近活动端产生的几条逆冲断裂之外, 随着缩短量不断增大, 形成一系列连续而密集的产状相似的大型断层。当缩短量达到 20 cm 时, 硅胶层一侧相对平缓, 石英砂层一侧相对陡倾(图5b, b1, b2)。当挤压速度增加到 0.1 mm/s 时, 其构造变形与挤压速度是 0.05 mm/s 时并没有明显的差别(图5a1, a2, b1, b2)。当挤压速度降低到 0.01 mm/s 时, 其构造变形与快速挤压时无论在石英砂层一侧还是在硅胶层一侧的煤系软弱地层上层和下层都有明显差异(图5c1, c2)。随着缩短量不断增加, 石英砂层一侧断层的变化范围和硅胶层一侧褶皱的变化范围相对一致, 而且靠近中间位置相比两侧位置的断层向前传递更远。相比于快速挤压, 石英砂层一侧断层比硅胶层一侧的褶皱更早出现。当缩短量增大到 15 cm 时, 石英砂层

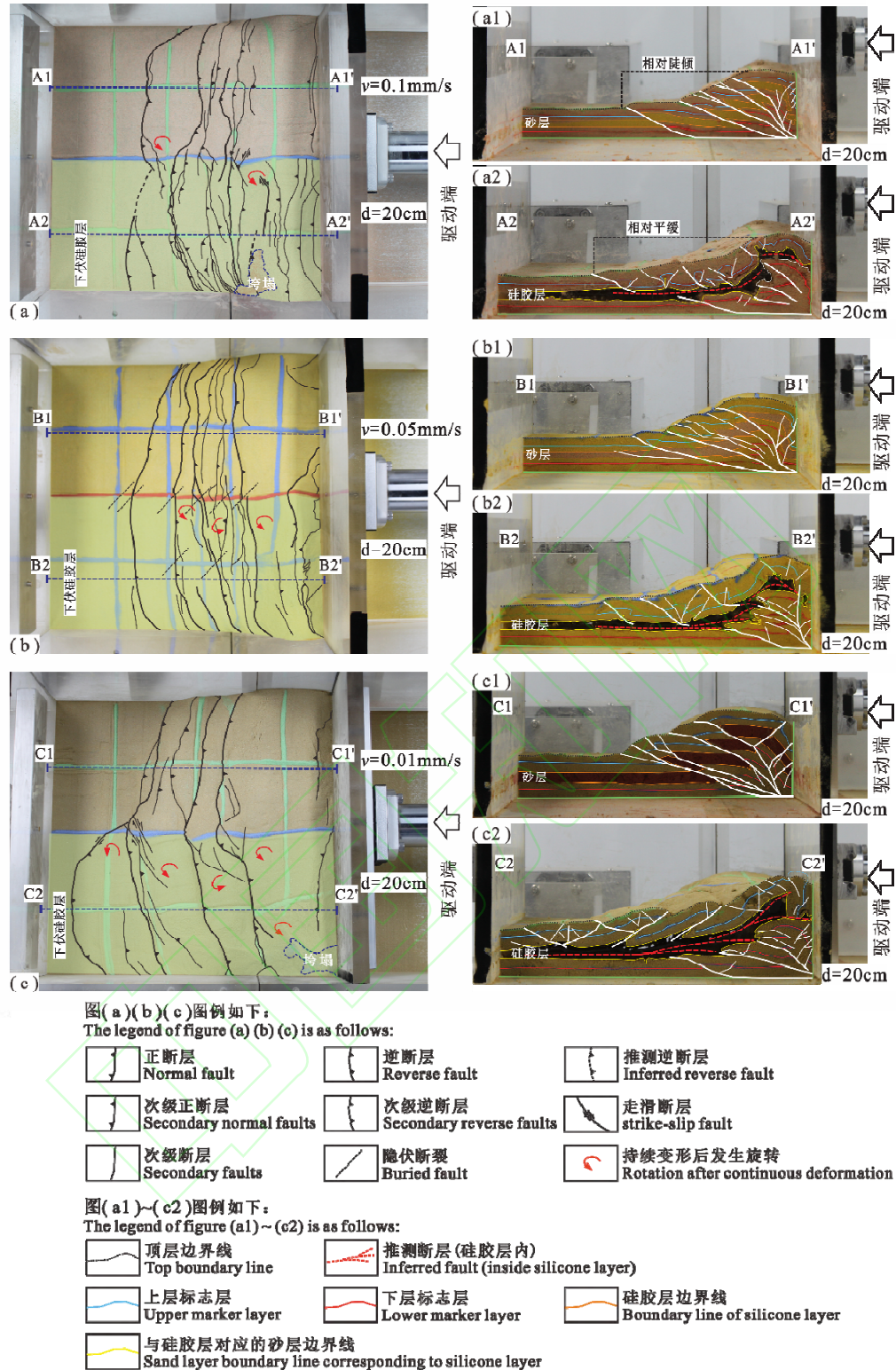


图5 实验一不同推挤速度的构造物理模拟演化过程, 图(a1)~(c2)中白色的线代表断层
Fig. 5 Experiment 1-Tectonophysical simulation evolution with different pushing speeds, white lines in figure (a1)~(c2) represent faults

一侧与快速挤压相似, 在靠近活动端附近发育多条逆冲断层。随着缩短量增大, 断层也不再向前传递, 形成多条产状相似的大断层; 而硅胶层一侧煤系软弱地层上层褶皱的传播距离明显增大, 整个煤系软弱地层上层具有明显的褶皱变形, 在远离活动端的煤系软弱地层上层尖灭的位置也有很强烈的褶皱

作用发生。而煤系软弱地层下层断层发育与快速挤压基本相同, 其变形范围仍然集中在靠近活动端附近。因此, 挤压速率越慢越易于发生构造分段, 有软弱层一侧的冲断构造传播更远。除此之外, 随着推挤速率减小, 耦合层收缩变形楔顶面倾斜角度增大。随着推挤速率减小, 韧性滑脱增强, 滑脱层上

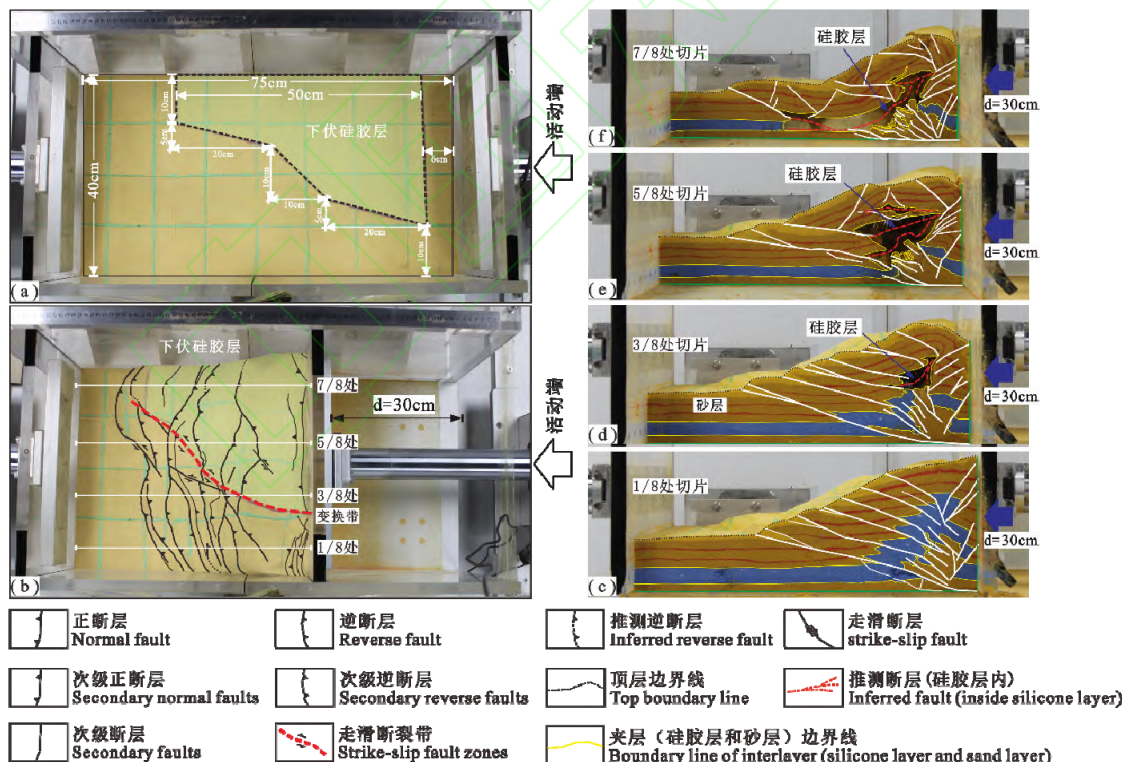
覆层收缩变形的对成型增强,反向断层更发育,冲断褶皱带相对前移距离增大;滑脱层相对耦合层的旋转更明显,边界的走滑变形更明显。

3.3 系列实验二模拟结果分析

如图 2 所示,库车坳陷拜城凹陷中生界发育的一系列近 EW 向冲断褶皱带向东延伸并没有直接与阳霞凹陷的近 EW 向冲断褶皱带相联。前者更密集,近 EW 向冲断层数量更多。两者间由 NNE 向的中秋—迪北构造变换带相联。系列实验二的砂箱实验按照中秋—迪北构造变换带及两侧中生界地层结构、构造形态的差异设计了砂箱实验的概念模型,模拟了中秋—迪北构造变换带形成机制。初始模型中参照中秋—迪北构造变换带的几何形态将硅胶铺设成不规则的形状(图 6a),并以 0.1 mm/s、0.05 mm/s 和 0.01 mm/s 的推挤位移速率观测构造变换带的形成演化过程。其中,在平面构造展布上,以 0.01 mm/s 为推挤速度、收缩量为 30 cm 的实验最为接近预期结果(图 6b),对结果模型的切片也与地震资料解释的构造样式相似。图 6 展示了在结果模型 1/8(图 6c)、3/8(图 6d)、5/8(图 6e)、7/8(图 6f)处的切片剖面。

实验结果平面图中显示的有硅胶和无硅胶两

个区域(图 6a)在同样的边界推挤位移下发生的逆冲断层数量、单条逆冲地层位移速度等都有明显差异,有硅胶夹层和无硅胶层两区域边界发育走滑逆冲断层或走滑断层来调节两者之间的差异变形。平面图(图 6b)显示铺设了硅胶的区域,变形前缘扩展较远,随着硅胶层的消失,变形前锋的传播距离越来越小,说明煤系软弱地层的横向变化会影响上覆盖层变形前缘的传播范围。在无硅胶一侧更容易发育叠瓦构造,顶面坡角明显较大;有硅胶一侧更易分层变形,硅胶分割的能干层更易于发育反冲断层,形成冲起构造。沿着硅胶发育和不发育边界形成了一条构造变换带,其内部有块体左行的旋转体。实验结果揭示硅胶的不均一分布限制了构造变换带沿挤压方向的范围。无硅胶层区各砂层间协调变形,表现为“耦合”的冲断楔;硅胶层区上、下砂层间滑脱,表现为“解耦”的冲断楔,滑脱层上覆冲断褶皱顶部平缓,反冲断层更发育,形成“冲起构造”;硅胶层区下伏冲断楔与无硅胶层冲断楔变形样式类似,以前展式逆冲断层组为主;硅胶层区上覆冲断楔与无硅胶层冲断楔变形样式差异明显,前者以冲起构造为主,且冲断楔前缘向“前陆”延伸更远。



a—模拟构造变换带的初始模型(俯视平面图); b—收缩量 d 为 30 cm 的结果模型构造解释图(俯视平面图), 推挤速度为 0.01 mm/s; (c)、(d)、(e)、(f)分别为实验结果模型在 1/8、3/8、5/8、7/8 处(俯视平面图, 自下而上)的纵截面构造解释剖面。图(c)~(f)中白色的线代表断层。

a—initial model simulating the structural transformation zone (top view); b—tectonic interpretation map of the resultant model with a contraction d of 30 cm (top view) and a push-out velocity of 0.01 mm/s; (c), (d), (e), and (f) represent the longitudinal tectonic interpretation profiles of the experimental resultant model at 1/8, 3/8, 5/8, and 7/8 (bottom up from the top view), respectively. The white lines in figure (c)~(f) represent the faults.

图 6 实验二—中秋—迪那构造变换带形成机制砂箱实验模拟图示

Fig. 6 Experiment 2—Illustration of the experimental simulation of the formation of a mechanized sand box in the Zhongqiu-Dina structural transformation zone

5 结论

(1)库车坳陷中生界发育一系列近EW向的逆冲断层构成山前冲断楔,其中拜城凹陷的冲断系与阳霞凹陷的冲断系被NNE向的中秋—迪北构造变换带阻断分隔,两者之间构造变形差异明显:拜城冲断系表现为前中生界、中生界和新生界等三层分层收缩构造变形,且在中生界内部发生明显的滑脱冲断褶皱变形;阳霞冲断系表现为前古近系(前中生界—中生界—古近系)和新近系—第四系双层分层收缩变形特征。中秋—迪北构造变换带属于两者之间的构造变换带。

(2)物理模拟实验表明,在挤压过程中非能干层夹层的厚度、变形速率等对收缩构造变形样式由显著影响。含有非能干层夹层的区域,挤压收缩变形过程中非能干层可以构成区域性或局部的滑脱层,使冲断褶皱变形由驱动端向更远的前方传播,不含非能干层夹层的区域的冲断变形传播较近。变形速率越低,含有非能干岩层夹层与不含非能干岩层夹层变形传播距离的差异月明显。剖面上,含由非能干层夹层的区域表现为分层收缩变形,而不含非能干层夹层的区域表现为协调的收缩构造变形,两者之间的过渡区形成构造变换带,局部可发育含有侧断坡、斜断坡的走滑逆冲断层或走滑断层。

(3)拜城凹陷充填的中生界厚度较大,且含有较厚的煤层、泥岩层等非能干岩层,而阳霞凹陷中生界煤层、泥岩层等非能干岩层较薄。针对中秋—迪北构造变换带形成机制的物理模拟实验表明,在统一的挤压作用下,较厚、岩层能干性差异更明显的沉积岩层更易于发育分层收缩构造变形,软弱层系的厚度及与相间岩层的能干性差异是决定收缩构造变形过程中分层“解耦”能力的作用因素,也是冲断体系垂向上差异变形的重要原因。拜城凹陷发育的三叠系、侏罗系煤系地层和古近系底部膏盐岩层导致冲断系表现为三层式分层收缩变形;阳霞凹陷中生界煤系地层较薄,古近系底部不发育膏盐岩层,而新近系底部发育膏盐岩层,因而表现为两层分层收缩变形。中生界厚度的差异、岩性差异是库车坳陷山前冲断楔平面上构造分段的重要原因。受其影响,中秋—迪北构造变换带内的逆冲断层发育NNE向的侧断坡、斜断坡调节拜城凹陷和阳霞凹陷冲断楔构造变形的差异。

Acknowledgements

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42072060).

参考文献:

- 何登发,周新源,杨海军,等,2009.库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J].大地构造与成矿学,33(1): 19-32.
- 荆显辉,沈忠悦,汪新,等,2011.塔北阿瓦特剖面磁性地层的构建:天山的脉动式隆升[J].地球物理学报,54(06): 1575-1583.
- 李本亮,陈竹新,谢会文,等,2013.冲断构造带深层变形的空间分布规律-以库车坳陷克拉苏构造带为例[J].地质科学,48(01): 167-175.
- 李艳友,漆家福,2013.库车坳陷克拉苏构造带大北-克深区段差异变形特征及其成因分析[J].地质科学,48(4): 1177-1186.
- 李曰俊,吴根耀,雷刚林,等,2008.新疆库车新生代前陆褶皱冲断带的变形特征、时代和机制[J].地质科学,43(3): 488-506.
- 刘志宏,卢华复,贾承造,等,1999.库车前陆盆地克拉苏构造带的构造特征与油气[J].长春科技大学学报,29(3): 215-221.
- 刘志宏,卢华复,李西建,等,2000.库车再生前陆盆地的构造演化[J].地质科学,35(4): 482-492.
- 卢华复,贾承造,贾东,等,2001.库车再生前陆盆地冲断构造楔特征[J].高校地质学报,7(3): 257-271.
- 漆家福,雷刚林,李明刚,等,2009.库车坳陷科拉苏构造带的结构模型及其形成机制[J].大地构造与成矿学,33(1): 51-58.
- 漆家福,李勇,吴超,等,2013.塔里木盆地库车坳陷收缩构造变形模型若干问题的讨论[J].中国地质,40(1): 106-119.
- 汤良杰,李京昌,余一欣,等,2006.库车前陆褶皱-冲断带盐构造差异变形和分段性特征探讨.地质学报,(3): 313-320.
- 唐鹏程,饶刚,李世琴,等,2015.库车褶皱-冲断带前缘盐层厚度对滑脱褶皱构造特征及演化的影响[J].地学前缘,22(1): 312-327.
- 滕学清,李勇,杨沛,等,2017.库车坳陷东段差异构造变形特征及控制因素[J].油气地质与采收率,24(2): 15-21.
- 汪新,贾承造,杨树锋,等,2002.南天山库车冲断褶皱带构造变形时间——以库车河地区为例[J].地质学报,(1): 55-63.
- 吴超,孙晶,章国威,等,2024.塔里木盆地库车坳陷中生代原型盆地性状及其石油地质意义[J].地质学报,Doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024361.
- 徐雯峤,汪伟,尹宏伟,等,2020.库车坳陷东西段盐下构造变形差异演化数值模拟分析[J].地质学报,94(6): 1740-1751.
- 徐振平,杨庚兄,罗浩渝,等,2024.不同深度岩性差异对库车坳陷构造分段特征的影响.地球科学,49(8): 3029-3042.
- 杨克基,2017.库车坳陷中段盐构造差异变形及其控制因素研究(博士学位论文)[D].北京:中国石油大学(北京).
- 杨克基,漆家福,马宝军,等,2018.库车坳陷克拉苏构造带盐上和盐下构造变形差异及其控制因素分析[J].大地构造与成矿学,42(2): 211-224.
- 余一欣,汤良杰,杨文静,等,2007.库车前陆褶皱-冲断带前缘盐构造分段差异变形特征[J].地质学报,166-173.

张仲培, 林伟, 王清晨, 2003. 库车坳陷克拉苏-依奇克里克构造带的构造演化[J]. 大地构造与成矿学, 27(4): 327-336.

赵仕俊, 赵锡奎, 杨少春, 2005. 地质构造物理模拟实验模型的相似分析[J]. 西北地质, (4): 14-18.

周延钊, 鲁雪松, 刘华, 等, 2016. 库车前陆乌什凹陷东部构造-岩性油气藏储层物性及含油性主控因素[J]. 天然气地球科学, 27(6): 994-1002.

References:

- COSTA E, VENDEVILLE B C, 2002. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement[J]. *Journal of Structural Geology*, 24(11): 1729-1739. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00169-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00169-9)
- COTTON J T, KOYI H A, 2000. Modeling of Thrust Fronts above Ductile and Frictional Detachments: Application to Structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 351-363. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<351:motfad>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<351:motfad>2.0.co;2)
- HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al., 2009. Geological Structure and Its Controls on Giant Oil and Gas Fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: A Clue from New Shot Seismic Data[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 19-32 (in Chinese with English abstract).
- JIANG Xianhui, SHEN Zhongyue, WANG Xin, et al., 2011. Magnetostratigraphic construct of Awate section in the north Tarim Basin: The impulse uplift of Tianshan Range[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(6): 1575-1583 (in Chinese with English abstract).
- LI Benliang, CHEN Zhuxin, XIE Huiwen, et al., 2013. Spatial distribution behavior of deep structures in fold-thrust belt: An example from the middle segment of Kelasu belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(1): 167-175 (in Chinese with English abstract).
- LI S Q, WANG X, SUPPE J, 2012. Compressional Salt Tectonics and Synkinematic Strata of the Western Kuqa Foreland Basin, Southern TianShan, China[J]. *Basin Research*, 24(4): 475-497. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00531.x>
- LI Yanyou, QI Jiafu, 2013. Structural Segmentation and Mechanism in Dabei-Keshen area of Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 48(4): 1177-1186 (in Chinese with English abstract).
- LI Yuejun, WU Genyao, LEI Ganglin, et al., 2008. Deformational features, ages and mechanism of the Cenozoic Kuqa foreland fold-and-thrust belt in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 43(3): 488-506 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zhihong, LU Huaifu, JIA Chengzao, et al., 1999. Structural characteristics and its relation with hydrocarbon of Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin[J]. *Journal of Changchun university of Science and Technology*, 29(3): 215-221 (in Chinese with English abstract).
- LIU Zhihong, LU Huaifu, LI Xijian, et al., 2000. Tectonic evolution of Kuqa rejuvenated foreland basin[J]. *Scientia Geological Sinica*, 35(4): 482-492 (in Chinese with English abstract).
- LU Huaifu, JIA Chengzao, JIANG Dong, et al., 2001. Features of the Thrust Wedge of Deformation Belt in Kuqa Rejuvenation Foreland Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 257-271 (in Chinese with English abstract).
- MARCO B, 2007. Deformation patterns and structural vergence in brittle-ductile thrust wedges: An additional analogue modelling perspective[J]. *Journal of Structural Geology*, 29(1): 141-158. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.012>
- MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of Recent Continental Tectonics in Asia can be Interpreted as Results of the India-Eurasia Collision[J]. *Science*, 189(4201): 419-426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
- NENG Y, XIE H W, YIN H W, et al., 2018. Effect of Basement Structure and Salt Tectonics on Deformation Styles along Strike: An Example from the Kuqa Foldthrust Belt, West China[J]. *Tectonophysics*, 730(5): 114-131. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.02.006>
- QI J F, Li Y, Xu Z P, et al., 2023. A structural interpretation model and restoration of Mesozoic proto-basin the Kuqa depression, Tarim basin[J]. *Acta Geological Sinica (English Edition)*, 97(1): 207-225.
- QI Jiafu, LEI Ganglin, LI Minggang, et al., 2009. Analysis of Structure Model and Formation Mechanism of Kelasu Structure Zone, Kuqa Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- QI Jiafu, LI Yong, WU Chao, et al., 2013. The interpretation models and discussion on the contractive structure deformation of Kuqa depression, Tarim basin[J]. *Geology in China*, 40(1): 106-119 (in Chinese with English abstract).
- REITER K, KUKOWSKI N, RATSCHBACHER L, 2011. The Interaction of Two Indenters in Analogue Experiments and Implications for Curved Fold-and-Thrust Belts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1/2): 132-146. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.002>
- SCHOFISCH T, KOYI H, ALMQVIST B, 2021. Influence of décollement friction on anisotropy of magnetic susceptibility in a fold-and-thrust belt model[J]. *Journal of Structural Geology*, 144: 104274. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104274>
- TANG Liangjie, LI Jingchang, YU Yixin, et al., 2006. Differential Salt Tectonic Deformation and Segmentation of the Kuqa Foreland Fold - Thrust Belt, Tarim Basin, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 313-320 (in Chinese with English abstract).
- TANG Pengcheng, RAO Gang, LI Shiqin, et al., 2015. The Impact of Salt Layer Thickness on the Structural Characteristics and Evolution of Detachment Folds in the Leading Edge of Kuqa Fold and Thrust Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1), 312-327 (in Chinese with English abstract).
- TENG Xueqing, LI Yong, YANG Pei, et al., 2017. Differential

- Structural Deformation and Its Control Factors in the Eastern Segment of Kuqa Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 24(2): 15-21(in Chinese with English abstract).
- Wang C Y, Cheng X G, Chen H L, et al., 2016. The Effect of Foreland Palaeo-Uplift on Deformation Mechanism in the Wupuer Fold - and - Thrust Belt, NE Pamir: Constraints from Analogue Modelling[J]. *Journal of Geo-dynamics*, 100(2): 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.001>
- WANG Xin, JIA Chengzao, YANG Shufeng, et al., 2002. The Deformation Time of Kuqa Fold-and-Thrust Belt in the Southern Tianshan[J]. *Acta Geologica Sinica*, (1): 55-63(in Chinese with English abstract).
- WU Chao, SUN Jing, ZHANG Guowei, et al., 2024. Characteristics of Mesozoic prototype basin in Kuqa depression of Tarim basin and its petroleum geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese with English abstract), Doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024361.
- WU Z Y, YIN H W, WANG X, et al., 2014. Characteristics and deformation mechanism of salt-related structures in the western Kuqa depression, Tarim basin: Insights from scaled sandbox modeling. *Tectonophysics*, 612-613:81-96. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.040>.
- XU Wenqiao, WANG Wei, YIN Hongwei, et al., 2020. Numerical Simulation of Different Subsalt Structural Features and Their Evolution in the Eastern and Western Segments of the Kuqa Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(6): 1740-1751(in Chinese with English abstract).
- XU Zhenping, YANG Gengxiong, LUO Haoyu, et al., 2024. The Influence Lithologic Differences at Different Depths on the Segmentation between the Eastern and the Western zones of Kuqa Depression[J]. *Earth Science*, 49(8): 3029-3042(in Chinese with English abstract).
- YANG Keji, 2017. Differential Structural Deformations and Controlling Factors of Salt Tectonic in the Middle Segment of the Kuqa Depression [D]. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- YANG Keji, QI Jiafu, MA Baojun, et al., 2018. Differential Tectonic Deformation of Subsalt and Suprasalt Strata in Kuqa Depression and Their Controlling Factors[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(2): 211-224(in Chinese with English abstract).
- YIN A, Nie S, Craig P, et al., 1998. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Southern Chinese Tian Shan[J]. *Tectonics*, 17(1): 1-27. <https://doi.org/10.1029/97tc03140>
- YU Yixin, TANG Liangjie, YANG Wenjing, et al., 2007. Structural Segmentation of Salt Structures in the Frontal Ranges of the Kuqa Foreland Fold and Thrust Belt, Northern Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 166-173(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhongping, LIN Wei, WANG Qingchen, 2003. Progressive structural evolution of Kelasu-Yiqikelike Structural belt in Kuqa depression. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(4): 327-336(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Shijun, ZHAO Xikui, YANG Shaochun, 2005. Similar Analysis of Geological Structure Physical Model[J]. *Northwestern Geology*, 295(1): 1-20(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yanzhao, LU Xuesong, LIU Hua, et al., 2016. The main controlling factors of reservoir physical property and oiliness in the structural-lithologic reservoirs in the east of Wushi Sag, Kuqa foreland basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27(6): 994-1002 (in Chinese with English abstract).