

doi: 10.12097/gbc.2022.03.043

喜马拉雅多期运动下库车坳陷构造变形响应特征

钟宇¹, 鞠玮^{1,2*}, 张辉³, 徐珂³, 黄沛铭¹, 徐浩然⁴, 王胜宇¹
ZHONG Yu¹, JU Wei^{1,2*}, ZHANG Hui³, XU Ke³, HUANG Peiming¹,
XU Haoran⁴, WANG Shengyu¹

1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008;

3. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000;

4. 山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁 272100

1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China;

4. The Second Exploration Team of Shandong Provincial Bureau of Coal Geology, Jining 272100, Shandong, China

摘要: 喜马拉雅期构造运动对中国西部地质地貌具有决定性影响, 库车坳陷内的构造变形特征对其多期运动存在何种响应尚待解决。在库车坳陷克拉苏构造带地震剖面解译的基础上, 采用离散元数值模拟、构造物理模拟等手段, 探讨挤压背景下, 喜马拉雅期构造活动造成的多期运动、垂向抬升、同构造沉积等因素对库车坳陷克拉苏构造带的构造变形响应特征与变形演化过程。克拉苏构造带对喜马拉雅多期运动的响应主要体现在, 控制盐上层滑脱褶皱向前陆方向传播, 挤压端褶皱隆升强度变弱; 盐下层挤压端前展式叠瓦状逆冲断裂系统的倾角呈规律性变化, 靠近挤压端的断裂倾角较大, 远离挤压端断裂的倾角较小, 但其逆冲的位移量大; 同时, 同构造沉积控制盐上层滑脱褶皱变形范围, 垂向抬升主要控制盐下层叠瓦状逆冲断裂向前陆方向传播范围。构造变形过程研究显示, 喜马拉雅多期运动导致克拉苏构造带构造分层的差异变形, 盐上层滑脱褶皱变形范围更广, 褶皱相关断层更发育, 盐下层在发育前展式叠瓦状逆冲断层后会加强反冲构造的形成。研究结果揭示了喜马拉雅多期运动对克拉苏构造带动力学演化过程的影响, 深化了对库车坳陷克拉苏构造带构造变形机理和演化过程的认识。

关键词: 喜马拉雅运动; 库车坳陷; 克拉苏构造带; 盐构造; 离散元数值模拟; 构造物理模拟

中图分类号: P54; P62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)10-1775-13

Zhong Y, Ju W, Zhang H, Xu K, Huang P M, Xu H R, Wang S Y. Characteristics of structural deformation under Himalayan multi-periods movements in the Kuqa Depression. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(10): 1775–1787

Abstract: The Himalayan movement has a decisive impact on the geology and geomorphology of western China. The response of the structural deformation characteristics in Kuqa Depression to its multi-periods movement remains unsolved. Based on the interpretation of the seismic section of Kelasu structural belt in Kuqa Depression, by means of discrete element numerical simulation and structural physical simulation, this paper discusses the response characteristics and deformation evolution process of the structural deformation of Kelasu structural belt caused by multi-periods movements, vertical uplift and syntectonic sedimentation caused by Himalayan multi-periods movement under the background of compressive stress. The results show that the response of Kelasu structural belt to

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-11-21

资助项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)面上项目《超深层致密砂岩孔隙结构温敏性及力学特性响应机理》(编号: BK20201349)、
中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司项目(编号: 041020060026)

作者简介: 钟宇(1998-), 男, 在读硕士生, 从事构造解析、非常规油气储层地质力学研究。E-mail: ts20010063a31@cumt.edu.cn

* 通信作者: 鞠玮(1988-), 男, 博士, 副教授, 从事油气储层地质力学领域的教学与研究。E-mail: wju@cumt.edu.cn

multi-periods movements is mainly reflected in controlling the propagation of detachment folds in the upper salt layer in the foreland direction, and the uplift intensity of folds at the compression end becomes weaker; The dip angle of the pre-spreading imbricate thrust fault system at the extrusion end of the lower salt layer changes regularly. The dip angle of the fault near the extrusion end is large, and the dip angle away from the extrusion end is small, but its thrust displacement is large. At the same time, syntectonic sedimentation controls the deformation range of detachment fold in the upper salt layer, and vertical uplift mainly controls the forward land propagation range of laminated tile thrust fault under salt. The study of tectonic deformation process shows that the multi-periods movement of Himalaya leads to the differential deformation of structural stratification in Kelasu structural belt. The deformation range of detachment folds in the upper salt layer is wider, and fold related faults are more developed. After the development of forward spreading imbricate thrust faults in the lower salt layer, the formation of recoil structures will be strengthened. The results reveal the influence of Himalayan multi-periods movement on the dynamic evolution process of Kelasu structural belt, and deepen the understanding of structural deformation mechanism and evolution process of Kelasu structural belt in the Kuqa Depression.

Key words: Himalayan movements; Kuqa Depression; Kelasu structural belt; salt structure; discrete element numerical simulation; physical simulation

库车坳陷位于塔里木盆地北部,受南天山快速隆升影响,晚新生代以来库车坳陷构造活动强烈,属于前陆盆地或再生前陆盆地(卢华复等,1999;卢华复等,2000;卢华复等,2001),是塔里木盆地重要的油气勘探开发区(何登发等,2013;鞠玮等,2013,2014;徐珂等,2022)。漆家福等(2009)研究发现,库车坳陷具有“分层变形、垂向叠置”的变形特征。以古新统一始新统库姆格列木群盐岩层为界,盐上层主要发育滑脱褶皱、褶皱相关断层、破冲断层等构造(邹光辉等,2007),盐下层发育基底卷入的高角度逆冲叠瓦状构造和突发构造(余一欣等,2007;能源等,2012)。前人研究探讨了库车坳陷构造变形受盐岩分布、基底构造(余一欣等,2006,2007;汤良杰等,2007;能源等,2012)、南天山差异推覆作用(张传恒等,2002;李曰俊等,2009;漆家福等,2009)的影响,具有较强的分带分段特征(黄少英等,2009;汪新等,2010;余一欣等,2011)。

刘洪涛等(2004)利用岩石声发射实验探讨了喜马拉雅运动对库车坳陷构造变形的控制作用。喜马拉雅运动指新生代以来的造山运动,根据对喜马拉雅造山带的研究,喜马拉雅运动从始新世末—渐新世初期一直持续到现今,包括早中晚3个主要时期;中期开始塔里木盆地有强烈褶皱、断裂,晚期主要表现为高原的急剧隆起,盆地大幅沉降及老断裂的继续活动(刘洪涛等,2004;尹宏伟等,2011)。从喜马拉雅早期到晚期,南天山前陆盆地缩短速率呈线性增加(曹自成等,2023),喜马拉雅中晚期是主要构造变形时期(刘洪涛等,2004),也是库车坳陷构造变形及油气运移、成藏的关键期,因此库车坳陷喜马拉雅

时期的构造变形特征、成因演化等已成为近年众多专家学者研究的热点,而对于喜马拉雅多期运动期间盆地缩短速率变化对库车坳陷构造变形特征影响的研究相对薄弱(Tian et al., 2016)。因此,本文以库车前陆冲断带克拉苏构造带为例,在克拉苏构造带过BZ9(剖面位置见图1)井三维地震解释剖面的基础上,设计多组构造物理模拟、数值模拟实验,探究喜马拉雅多期运动对库车坳陷构造形态及演化的影响,分析喜马拉雅多期运动下库车坳陷构造变形的响应特征。

1 地质背景

库车坳陷位于南天山过渡带与塔里木盆地北缘,其构造变形整体上具有“南北分带、东西分段、上下分层”的特征,即从西到东以乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷为主体分为3段;自北而南划分为北部单斜带、克拉苏构造带、秋里塔格构造带、南部斜坡带4个构造变形带(漆家福等,2009;能源等,2012;贾承造等,2022)(图1、图2)。

克拉苏构造带地表主要发育逆冲断层和开阔背斜,垂向上可分为第四系西域组—渐新统苏维依组盐上构造层、库姆格列木群盐构造层和三叠系—白垩系盐下构造层(图3)。其中,盐上层滑脱构造发育,地层变形相对较弱,以盐相关褶皱为主;岩性以泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主(汪新等,2010)。库姆格列木群($E_{1-2}km$)以盐岩和膏岩层为主,夹杂一些泥岩、白云岩等能干性较强的地层。盐岩层作为塑性滑脱层,在挤压变形和差异负载等作用下形成盐枕、盐刺穿、盐断片等多种盐构造(余一欣等,2011)。盐

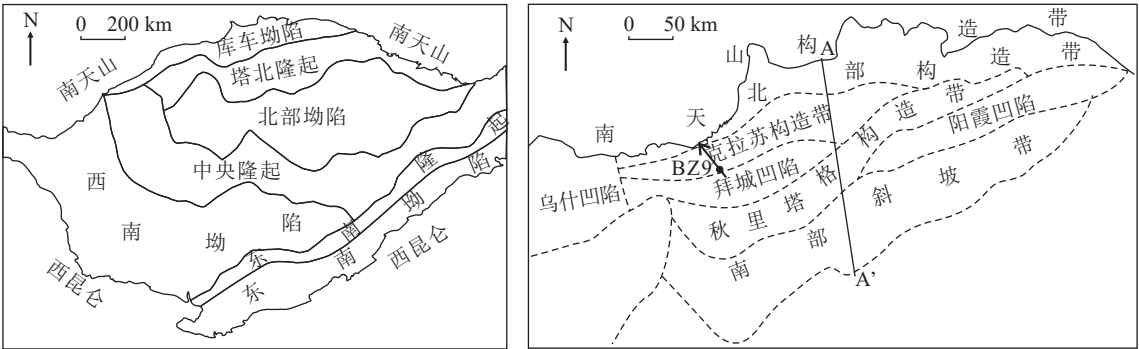


图 1 库车坳陷构造单元划分图 and 对应地震剖面位置(据贾承造等, 2022 修改)

Fig. 1 Tectonic unit division and corresponding seismic section location of Kuqa Depression

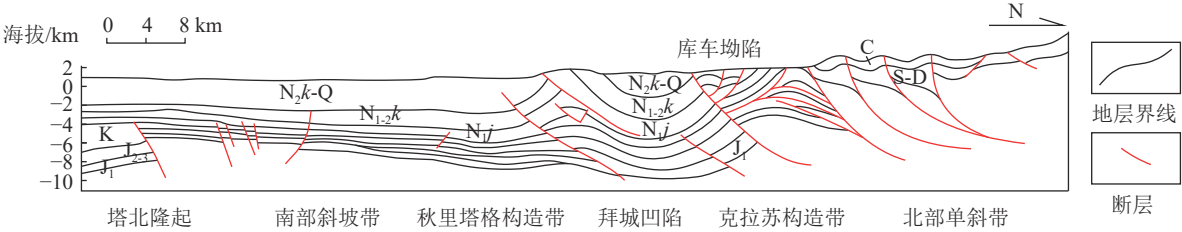


图 2 库车坳陷南北向结构剖面图(剖面位置见图 1 A-A')

Fig. 2 North-South structural section of the Kuqa Depression

N_2k-Q —上新统库车组-第四系; $N_{1,2}k$ —中新统康村组; N_j —中新统吉迪克组; K —白垩系; J_1 —下侏罗统; $J_{2,3}$ —中上侏罗统; T —三叠系; C —石炭系; $S-D$ —志留系-泥盆系

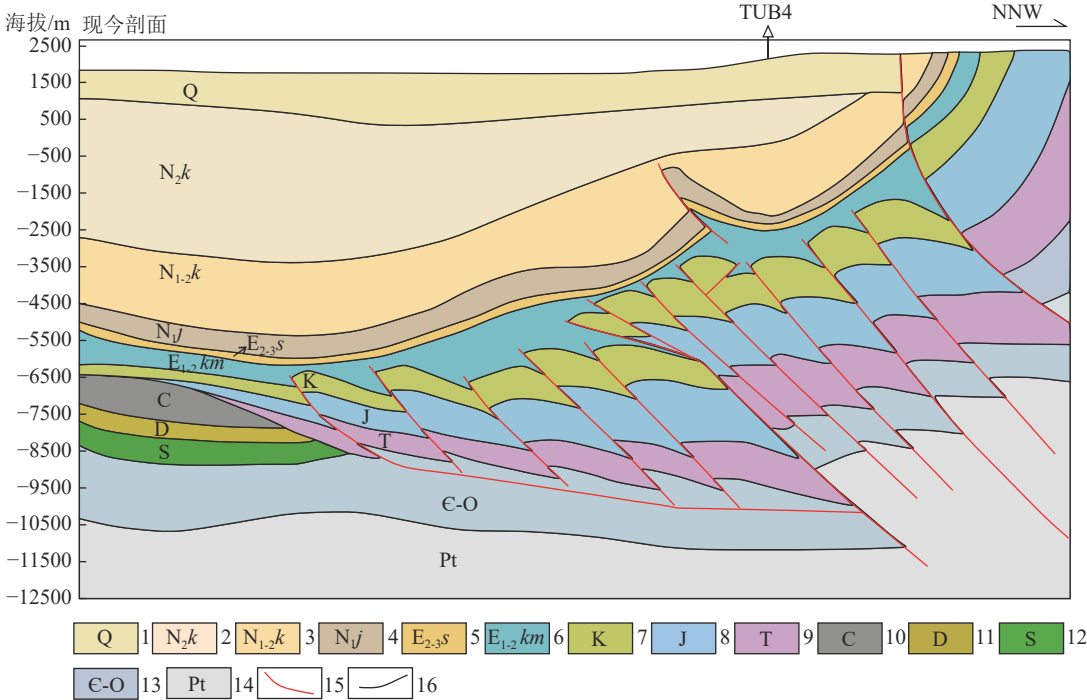


图 3 克拉苏构造带过 BZ9 井主干剖面地震解释剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Seismic interpretation section of Kelasu structural belt across Well BZ9

1—第四系; 2—上新统库车组; 3—中新统康村组; 4—中新统吉迪克组; 5—始新统-渐新统苏维依组; 6—古新统-始新统库姆格列木群; 7—白垩系; 8—侏罗系; 9—三叠系; 10—石炭系; 11—泥盆系; 12—志留系; 13—寒武系-奥陶系; 14—元古宇; 15—断层; 16—地层界线

下层以高角度基底卷入变形为特征,受克拉苏断层控制,中生界向北部强烈抬升,在克拉苏背斜带形成大规模的冲起构造,发育一系列叠瓦状冲断组合,冲断带前缘最大断距可达 4000 m(雷刚林等,2007;漆家福等,2009;唐鹏程,2011;王招明,2013)。

2 基于构造物理模拟的构造变形分析

构造物理模拟是运用比例化模型在实验室内短时间重现自然界中发生过的长时间地质作用的一种研究方法,有助于正确认识构造变形中各构造要素间的内在联系,更好地理解构造演化过程,同时,利用相似性原则,在实验室内构建与自然界中实际构造几何及运动学相似的地质模型,从而达到动力学相似(Hubbert, 1937)。本文利用构造物理模拟探究喜马拉雅多期运动影响下库车坳陷克拉苏构造带的构造演化过程,分析喜马拉雅多期运动对克拉苏构造带变形的影响。

2.1 实验材料

克拉苏构造带地层由于膏盐岩的存在,垂向上分为 3 层,分别是盐上层、膏盐层、盐下层。物理模拟是根据相似原理,用物理材料构建实体模型进行模拟。松散石英砂的变形符合库伦破坏准则,已被证明是模拟上地壳或脆性材料构造变形的理想材料,因此选用其作为实验材料来模拟盐上层、盐下层破裂变形。膏盐岩由于塑性较强,选用有同样性质的硅胶进行模拟(唐鹏程, 2011),其属性参数如表 1 所示。

根据以上属性参数,可以验证本文物理模拟实验模型设计的动力学、运动学和几何学相似性,过程如下。

由于本文实验模型设计按照自然界的边界条件进行,故已满足几何学相似;此外,本文实验模型采用松散石英砂和硅胶进行物理模拟,故可使用材料

的流变学特性表征其模型与自然界之间的动力学相似特征,下文使用应变速率比值来证明本文实验模型设计的模拟材料和自然界中对应地层具有相似的流变学特征。应变速率比值是一个无量纲的参数。通过表 1 可以看到,实验模型与自然界的应力比值 $\sigma_{s/n}$ 为 2.5×10^{-6} ,由下式:

$$\varepsilon_{s/n} = \sigma_{s/n} / \eta_{s/n} \tag{1}$$

可得 $\varepsilon_{s/n} = 2.5 \times 10^{-6} / 8.8 \times 10^{-16} = 3.1 \times 10^9$, $\eta_{s/n}$ 是硅胶粘度相似系数。

库车坳陷西段的缩短距离为 6.3 km,其平均缩短速率约为 4.6 mm/a(余一欣等,2011)。实验模型设计中挤压速率分别为 0.004 mm/s 和 0.008 mm/s,可根据以下公式:

$$\varepsilon_{s/n} = v_{s/n} / l_{s/n} \tag{2}$$

可得另一个应变速率比值为 $2.9 \times 10^9 \sim 5.8 \times 10^9$, $v_{s/n}$ 为速度相似系数, $l_{s/n}$ 为长度相似系数。对比通过公式(1)与公式(2)计算得到的 2 个应变速率比值,可知它们处于同一数量级,即本文实验模型设计满足实验材料的流变学特性相似,故满足动力学相似,同时实验模型挤压方向与自然界中库车坳陷西段相关地层运动方向一致,也满足运动学相似。

2.2 模型设计

前人研究对南天山新生代构造隆升时间的认识基本一致,认为 25~20 Ma 以来,南天山开始隆升(Yin et al., 1998)。研究认为,喜马拉雅运动期间南天山—库车地区存在构造加速事件(能源等, 2012; Tian et al., 2016),克拉苏剖面从 6 Ma 开始的平均缩短速率为 2 mm/a,结合最近的 GPS 数据,目前天山中南部地区的缩短速率增加到了 4.7 ± 1.5 mm/a(尹宏伟等,2011)。此外,通过超额面积算法计算的横截面缩短估计,克拉苏的总缩短量为 6.3 km,滑脱层的

表 1 库车坳陷克拉苏构造带物理模拟模型参数

Table 1 Physical simulation model parameters of Kelasu structural belt in the Kuqa Depression

模型参数	单位	自然界(n)	模型(s)	相似系数(s / n)
重力加速度(g)	m/s ²	9.80	9.80	1
长度(l)	m	40000	40×10^{-2}	1×10^{-5}
速度(v)	m/s	1.38×10^{-10}	$4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^4 \sim 5.8 \times 10^4$
石英砂密度(ρ_b)	kg/m ³	2400	1400	0.58
硅胶密度(ρ_d)	kg/m ³	2200	950	0.43
粘度(η)	Pa·s	1×10^{19}	8.8×10^3	8.8×10^{-16}
应力(σ)	Pa	$4.3 \times 10^7 \sim 4.7 \times 10^7$	93.1~137.2	2.5×10^{-6}
应变(ε)	s ⁻¹	4.5×10^{-12}	1.4×10^{-2}	3.1×10^9

深度为 2.3 km。克拉苏构造带总缩短量为 30%, 从喜马拉雅早期的缩短量占新生代以来缩短量的 10%, 而喜马拉雅中晚期的缩短量占新生代以来缩短量的 90%, 挤压变形强烈(Allen et al., 1991a, b; Allen et al., 1992; Hendrix et al., 2000; Finch et al., 2005), 其中, 库车坳陷末期的缩短量占各时期总缩短量的 77%~83%(刘洪涛等, 2004)。

根据上述前人研究, 设计实验模型。研究采用的物理模拟方法为砂箱实验, 如图 4 所示。砂箱 4 个边界围成矩形, 包含一组互相平行的固定边界, 另一组边界平行且一个边界固定, 另一个边界可移动并可加载速度, 对应喜马拉雅运动期间的缩短速率。为使实验现象更加明显, 采用厚度较薄且不同颜色的石英砂作为标志层, 用以观察实验模型剖面的变形情况(图 5)。根据长度相似比系数, 设定实验砂层模型高度(H)为 2.5 cm, 对应自然界 2500 m, 模型长宽受限于实验平台, 设置为长 40 cm、宽 30 cm, 盐上层、盐下层为相同厚度 1 cm 的石英砂, 中间膏盐岩为 0.5 cm 的硅胶(图 4)。在构造物理模拟实验过程中, 根据喜马拉雅运动不同时期的缩短速率改变物理模拟时的挤压缩短速率和缩短量, 即物理模拟中喜马拉雅前期缩短速率为 0.001 mm/s, 缩短量为 12 mm, 喜马拉雅中期缩短速率为 0.004 mm/s, 缩短量为 12 mm, 喜马拉雅晚期缩短速率为 0.008 mm/s, 缩短量为 96 mm。根据上述实验设置, 通过改变挤压缩短速率大小模拟喜马拉雅运动不同时期的运动状态, 采用单因素分析的方法探讨喜马拉雅多期运动缩短速率变化对克拉苏构造带变形的构造响应。

2.3 实验结果与分析

2.3.1 变速挤压实验模型

根据前人对喜马拉雅多期运动的研究(黄少英等, 2009), 设计实验模型 1, 将整个模型运动划分为 3 个阶段: ①向实验平台中加入预设的石英砂与硅胶, 启动挤压装置, 以 0.001 mm/s 的速率自左向右推进, 挤压 12 mm 后停止; ②将速率调为 0.004 mm/s, 向右推进, 挤压 12 mm 后停止; ③将速率调为 0.008 mm/s, 仍为向右推进, 挤压 96 mm。该过程总挤压距离为 120 mm, 是剖面总长度的 30%, 符合克拉苏构造带的构造挤压规律。

实验结果显示(图 5-a): 总体变形较复杂, 盐上层发育连续而密集的小型褶曲, 变形范围较广, 且被倾向与挤压方向相反的逆冲断层分隔, 越靠近挤压

端, 断层发育越强烈, 逆冲位移也越大, 分割也越明显; 盐下层则发育多个逆冲断层, 主要集中在近挤压端, 同时越靠近挤压端, 断层逆冲角度越大。

2.3.2 匀速挤压实验模型

为了对比分析多期运动对克拉苏构造带变形的影响, 本文设计实验模型 2 为匀速挤压模型, 挤压速率为 0.004 mm/s, 其他设置与模型 1 相同。

结果表明(图 5-b), 实验模型 2 的构造变形剖面显示其盐上层和盐下层的构造变形均与实验模型 1 有明显差异, 盐上层主要发育一系列连续的褶皱, 断层发育较弱, 盐岩层在远离近挤压端褶皱核部发育向挤压方向发育的盐底辟构造, 且发育程度相差不大; 盐下层发育叠瓦状逆冲断层构造, 且逆冲断层倾角较小。

2.3.3 同沉积-变速挤压实验模型

研究过程中还考虑了同沉积的影响, 设计实验模型 3 为同沉积-变速挤压模型, 增加了同沉积过程。在实验过程中, 按照 0.5 mm/h 的速率加入同构造沉积层。

结果表明(图 5-c): 盐上层发育宽缓褶皱, 断层发育较弱, 模型末端发育小型背斜, 且翼部发育小型逆冲断层; 盐下层及挤压端发育反冲构造和叠瓦状逆冲断层构造组合。

2.3.4 实验结果对比分析

实验模型 1 与实验模型 2 的结果对比表明, 缩短速率对断层褶皱区和早期底辟的变形演化有显著影响。具体来说, 较高的缩短速率会使断层褶皱区近挤压端基底层发育的前展式叠瓦状逆冲断层系统倾角变大, 远离挤压端, 基底层发育的前展式叠瓦状逆冲断层系统倾角变小, 从而使其变形范围增大; 同时, 在高速缩短情况下, 盐岩层的盐底辟也会快速发育形成逆冲推覆断层, 这不仅会使推覆体变形变快, 推覆距离增加, 也会使断层褶皱区不再隆升。

实验模型 1 与实验模型 3 的对比结果表明: 在无同构造沉积条件时, 缩短状态下, 盐下层由于受到挤压作用使岩层变厚, 形成向前陆方向发育的逆冲断层, 受膏盐岩的影响, 断层发育受阻, 同时伴随挤压收缩, 盐上层发生挠曲, 形成断层相关褶皱, 当褶皱发育成熟, 岩石物性增强, 使褶皱继续向挤压端后方生长; 在同构造沉积条件时, 缩短状态下, 前期断层和褶皱发育与无同构造沉积下类似, 但由于同构造沉积, 挤压端后方凹陷处沉积, 上覆压力增加, 使

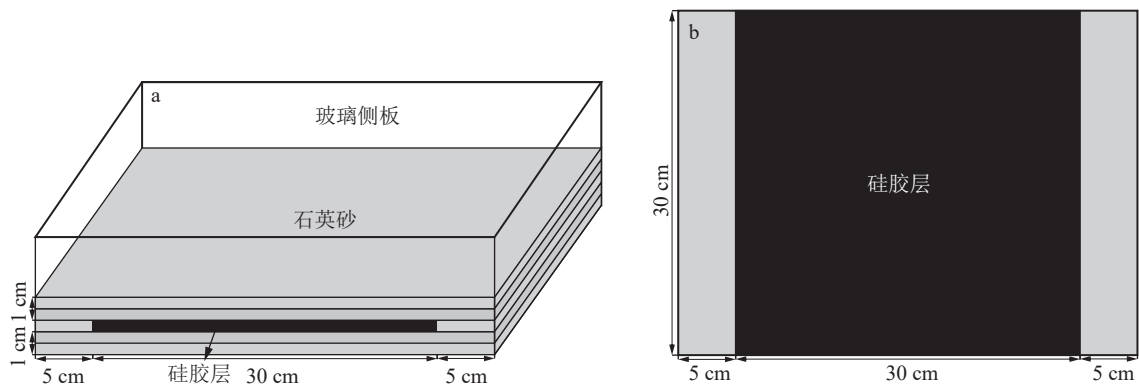


图 4 物理模拟实验模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of physical simulation experiment model

a—模型立体图; b—模型中间层俯视图

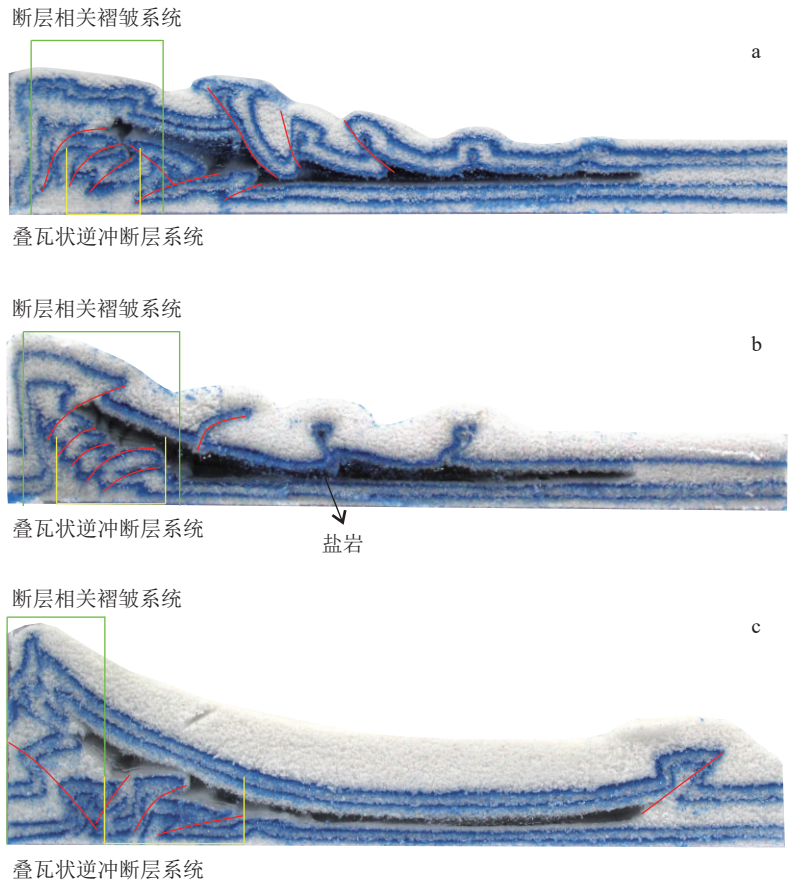


图 5 实验模型切面图

Fig. 5 Sections of experimental models

a—变速率模型; b—匀速模型; c—同沉积变速率模型

挤压端褶皱被限制在挤压前端,同时断层发育受阻,形成反冲构造。总体来说,同沉积对盐上层褶皱传播范围有显著影响。同沉积会使盐上层褶皱发育较平缓,传播范围增大,但褶皱变形复杂强度及数量减小。对比实验模型结果可以得出,喜马拉雅多期运

动对库车坳陷褶皱冲断带变形的影响主要为:盆地缩短期间,缩短速率逐渐变快,使原本在低速率形成并慢慢随挤压发育的低角度前展式叠瓦状断层及断层相关褶皱快速应力集中,导致原本的应力分布状态被迅速打破,形成高角度的前展式叠瓦状断层及

反冲构造; 盐岩层也会由于应力变大导致盐底辟快速发育。地震剖面解释图(图 3)显示, 叠瓦状断层中存在多个反冲构造, 在造山带前端发育大型褶皱相关断层, 与同构造沉积下的变速率模型相似度高。

3 基于数值模拟的构造变形分析

与构造物理模拟相比, 数值模拟可重复性高, 边界条件设置更容易, 且研究单一变量的影响更方便; 同时, 由于物理模拟实验条件设计有限, 垂向抬升条件的实验模拟难以实现。因此, 本文利用数值模拟, 采用物理模拟相同的变量因素, 分析多期运动影响下克拉苏构造带的变形过程。

3.1 数值模拟方法和实验模型设计

离散元方法基本原理是将材料内部微观尺度的单个离散颗粒视为一个离散单元, 利用一系列离散元单元的本构模型接触关系模拟材料的力学行为(Tian et al., 2016)。主要应用于连续介质破裂问题、大变形等构造地质问题研究中(张洁等, 2008; Morgan et al., 2015; 李长圣, 2019)。离散元的求解实际上是根据不同的接触力学模型(即力-位移法则, 或者称本构模型)迭代计算离散颗粒单元的位移和受力, 计算过程中重复执行牛顿第二定律, 更新离散元颗粒位置, 直到计算结束(Cundall et al., 1979)。本文采用线性接触力学模型, 使用数值模拟软件 PFC 完成实验, 基于实验结果探讨喜马拉雅多期运动对库车坳陷构造变形的响应特征。

参考研究区地质单元尺度、地震剖面和沉积序列, 剖面实际长约 50 km, 垂向深度约 10 km, 将离散元数值模型尺寸按 1 : 200 比例设置为 250 m、高为 50 m 的初始模型。实验共建立盐上层、盐岩层和盐下层 3 层离散颗粒沉积模型。其中, 基底固定且摩擦系数较小, 用以模拟库车坳陷底部滑脱层。盐下层 20 m, 盐上层 25 m, 并都设置标记层便于观察, 设置盐岩层厚度为 5 m(图 6)。

以初始模型为基础, 固定模型的左端墙体及底板, 从右端(施力端)施加压力。通过调试, 将右端墙体设定向左的运行速率, 直至缩短率达到 30%, 记录变形过程, 分别选取缩短率在 3%、6%、10%、20% 和 30% 的变形状态进行对比分析。通过设定应变速率大小和垂向抬升模拟喜马拉雅多期运动因素, 采用单因素分析的方法探讨喜马拉雅多期运动对克拉苏构造带构造变形的影响。

3.2 模型参数

离散元模拟中微观参数会控制颗粒材料的宏观响应, 合适的参数设置才能获得较可靠的模拟结果, 参考前人取值(李维波等, 2017), 本次研究的参数设定见表 2。

3.3 数值模拟结果与分析

3.3.1 匀速挤压模型

设置匀速挤压模型(模型 1), 其条件为: 水平挤压及模型右侧施加 0.0004 m/s 缩短速率, 缩短总长度的 30%, 记录和分析缩短率在 3%、6%、10%、20% 和 30% 的变形结果(图 7-A~E)。

缩短率为 10% 时, 盐上层发育褶曲, 并在褶皱左翼发育高角度逆冲断层, 盐下层变形相对较弱, 仅发育小型褶皱。挤压缩短率为 20% 时, 盐上断裂进一步发育, 形成大型背斜构造, 盐岩在垂向上被断层分隔成阶梯状, 形成盐焊接构造, 盐下层近挤压端发育一系列前展式叠瓦状逆冲推覆断裂、反冲构造等冲断构造组合。缩短率为 30% 时, 挤压端盐上层形成大型背斜构造, 盐下层逆冲断层系统进一步发育, 断层倾角减小, 逆冲推覆距离增加。

3.3.2 变速率挤压模型

为了对比匀速模型的影响, 设置了变速率挤压模型(模型 2), 分阶段改变缩短速率, 运行过程分为 3 个阶段, 与构造物理模拟变速率模型的 3 个阶段对应, 仅将各阶段速率变为 0.0001 m/s、0.0004 m/s、0.0008 m/s。各阶段的挤压量与物理模拟挤压总长度百分比对应, 在此不再赘述, 其他条件与模型 1 相同, 记录和分析对应挤压缩短率在 3%、6%、10%、20% 和 30% 的变形结果(图 7-a~e)。

当缩短率为 6% 时, 即第一、第二阶段挤压, 此时挤压量较小, 盐上层首先发生变形, 出现褶曲, 盐下层和盐层变形相对较弱。缩短率为 10% 时, 盐上层发育连续的小型褶皱, 盐下层发育高角度逆冲断层。挤压 20% 时, 盐上褶皱进一步发育, 形成大型背斜构造, 盐下层逆冲断层进一步发育, 形成反冲构造。当挤压缩短率为 30% 时, 挤压端形成大型背斜构造, 固定端褶皱进一步发育, 形成大型断背斜构造, 盐下层逆冲断裂进一步发育, 断层倾角变小, 逆冲推覆距离增加, 盐岩层也发生垂向流动, 发育盐枕构造。

对比模型 1 与模型 2 挤压结果可以看出, 挤压速率对断层褶皱区的影响与物理模拟得出的结果类似。即较高的挤压速率会使断层褶皱区近挤压端基

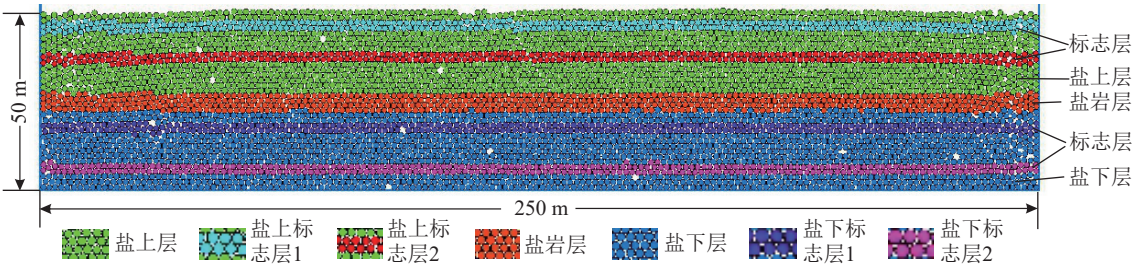


图 6 克拉苏构造带离散元数值模拟初始模型

Fig. 6 The initial model of discrete element numerical simulation of Kelasu structural belt

表 2 克拉苏构造带各层离散元 (PFC2D) 岩石微观物理学参数 (据李维波等, 2017)

Table 2 Rock microphysical parameters of discrete element (PFC2D) in each layer of Kelasu structural belt

参数	盐上层	盐下层	盐岩层
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2400	2600	2200
颗粒强度/Pa	1×10^8	1×10^8	1×10^7
粘结强度/Pa	1×10^6	1×10^6	1×10^6
粒间摩擦因素	0.7	0.7	0.1
重力加速度 $(\text{g})/(\text{m}\cdot\text{s}^{-3})$	9.81	9.81	9.81
移动边界摩擦因素	/	0.7	/
底边界摩擦因素	/	0.2	/

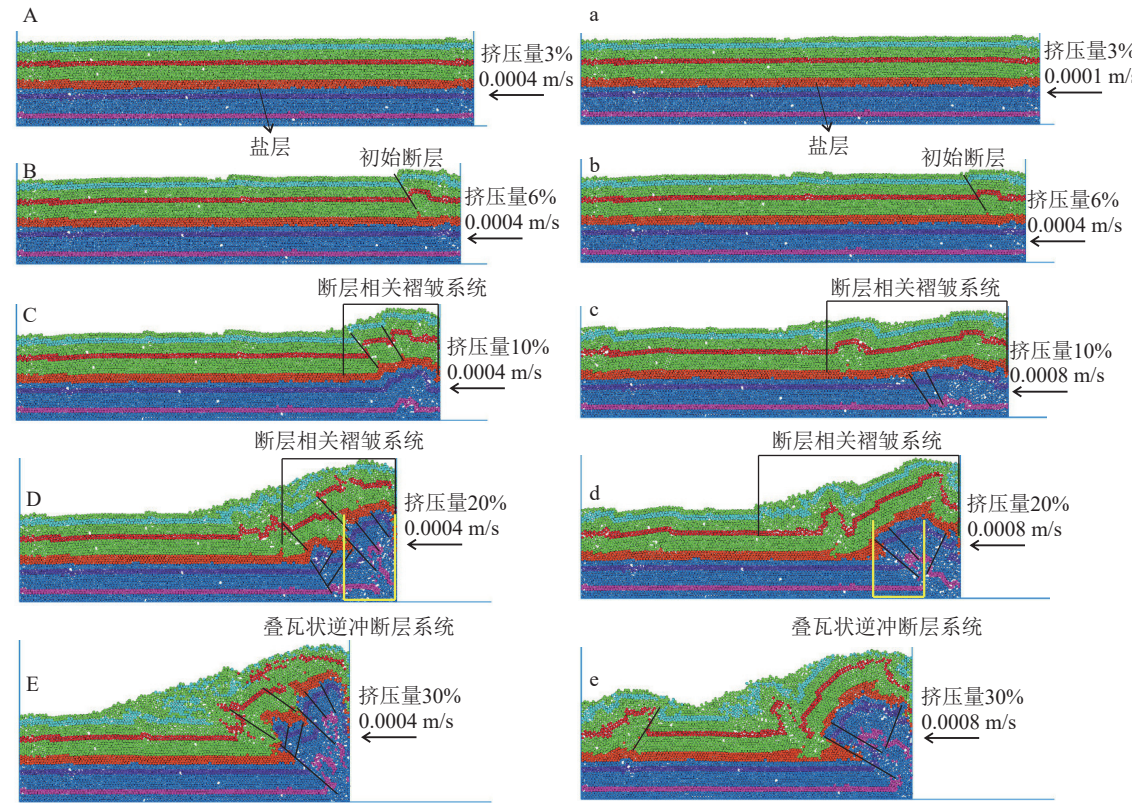


图 7 匀速、变速数值模拟过程对比图
(黑色直线表示断层,其他花纹图例同图 6)

Fig. 7 Numerical simulation process comparison between constant speed and variable speed

A—匀速挤压挤压量 3% 阶段; B—匀速挤压挤压量 6% 阶段; C—匀速挤压挤压量 10% 阶段; D—匀速挤压挤压量 20% 阶段; E—匀速挤压挤压量 30% 阶段; a—变速挤压挤压量 3% 阶段; b—变速挤压挤压量 6% 阶段; c—变速挤压挤压量 10% 阶段; d—变速挤压挤压量 20% 阶段; e—变速挤压挤压量 30% 阶段

底层发育的前展式叠瓦状逆冲断层系统倾角变大, 远离挤压端基底层发育的展式叠瓦状逆冲断层系统倾角变小, 从而使其变形范围增大; 同时盐下断裂系统发育范围也会因断层系统倾角变小而缩减。

对比模型 1 与模型 2 挤压过程可以看出, 变速率挤压对盐上褶皱区和盐下断层褶皱区位置及发育范围有显著影响。具体来说, 缩短速率变化会使近挤压端褶皱区应变硬化, 从而使近挤压端褶皱区应力向前传播, 褶皱发育范围变大。

3.3.3 过 BZ9 井主干地震剖面构造变形数值模拟

BZ9 井位于博孜段, 从地震剖面可以看出, 北部

单斜带由南天山构造楔向南冲断, 造成地层总体上向盆内掀斜, 南天山发生迅速隆升作用的同时, 库车坳陷不仅受到自北向南强烈的水平挤压作用, 还叠加了垂直剪切作用(杨海军等, 2020)。但此前物理模拟数值模拟在单挤压状态下挤压端并没有出现明显的地层抬升, 因此在变速率模型的基础上设计垂向抬升, 模拟过 BZ9 井主干地震剖面受喜马拉雅多期运动影响下的构造变形, 记录和分析对应缩短率在 3%、6%、10%、20% 和 30% 的变形结果(图 8)。

缩短率为 10% 时, 盐下层发育高角度逆冲断层, 盐上层构造主要发育背斜构造。挤压 20% 时, 盐下

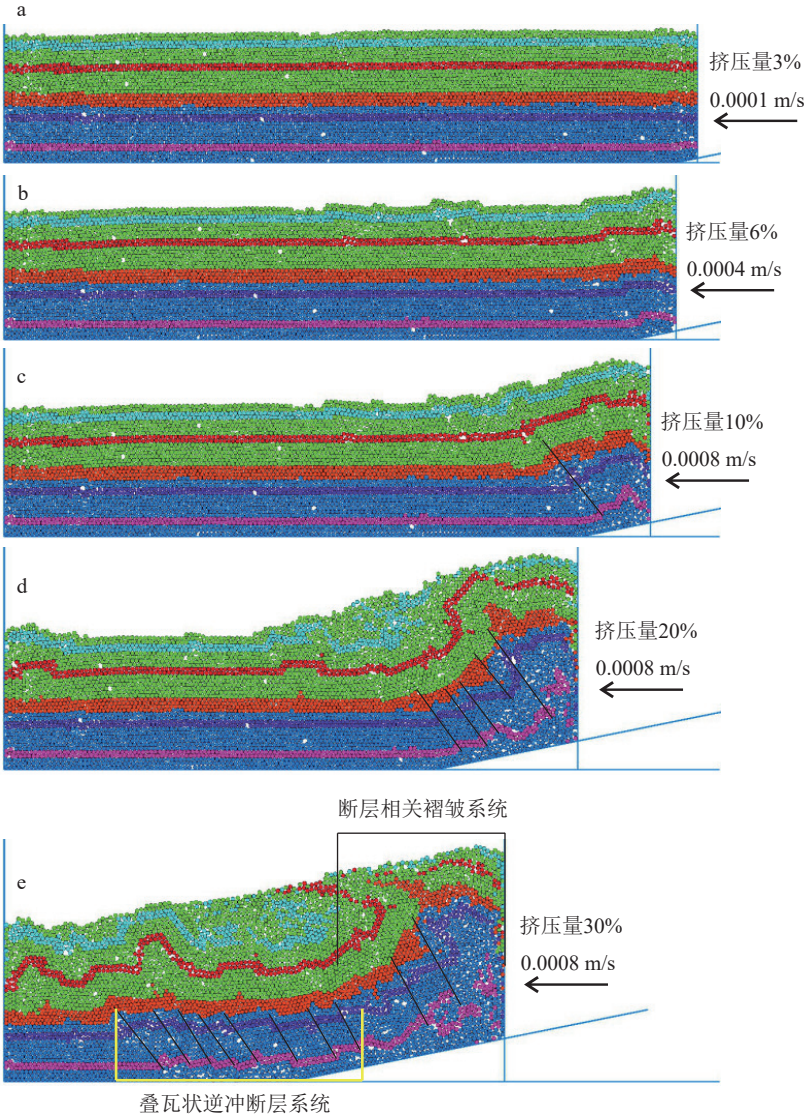


图 8 过 BZ9 井主干地震剖面及盐构造挤压变形数值模拟(剖面位置见图 1, 黑色直线表示断层, 其他花纹图例同图 6)

Fig. 8 The main seismic section through well BZ9 and numerical simulation of salt structure compression deformation
a—过 BZ9 井数值模拟挤压量 3% 阶段; b—过 BZ9 井数值模拟挤压量 6% 阶段; c—过 BZ9 井数值模拟挤压量 10% 阶段;
d—过 BZ9 井数值模拟挤压量 20% 阶段; e—过 BZ9 井数值模拟挤压量 30% 阶段

层发育阶梯状逆冲断层系统,形成规则排列的叠瓦状断层并向前传播,盐上层背斜向前传播延伸并在模型中部形成小型背斜;挤压缩短率为 30% 时,盐上层背斜进一步向前传播,并发育为背向交替的构造格局,盐下层构造随着挤压及垂向抬升的作用,形成一系列的叠瓦状断层。

4 讨 论

本文利用构造物理模型及离散元数值模型模拟喜马拉雅运动作用下的库车坳陷构造变形响应特征,当设定喜马拉雅多期运动对应的运动期次强度为速度,以及挤压端垂向抬升时,模型模拟结果与过 BZ9 井主干地震解释剖面吻合度高,模型的动态变形过程显示,克拉苏构造带受喜马拉雅多期运动的影响在于,盐上层滑脱褶皱变形范围更广,褶皱相关断层更发育,盐下层在发育前展式叠瓦状逆冲断层后会加强冲起构造的形成。

喜马拉雅多期运动导致横向构造协调变形,纵向构造不协调变形(图 9)。克拉苏构造带垂向上表现出典型的 3 层结构,即盐上层、盐岩层和盐下层,构成“两硬夹一软”的地层叠置结构。挤压端的挤压速率影响不同结构层的应力传导,由于盐岩的阻隔使盐上层及盐下层构造变形相互联系较弱;当在匀速挤压时,盐上层、盐下层变形速率平稳,随着挤压

幅度增加,逐渐发育背斜,褶皱相关断层,断层随着挤压进一步发育为刺穿断层,并限制盐下层、盐岩层变形范围,盐上层继续发育宽缓褶皱,使得盐上层、盐下层纵向协调变形,横向不协调变形。当变速挤压,且速度逐渐增大时,原本弱变形区域会因为应力的突然增加而发育褶皱或断层,因为盐岩层的阻隔作用,盐上层与盐下层之间的联系变小,盐上层因为较小的上覆压力及岩石强度,使上覆岩层变形相较于上覆压力及岩石强度较大的盐下层更发育且应力传播更远;当存在同构造沉积时,盐上层弱岩石强度特性的影响将变弱,使盐上层变形主要为发育宽缓褶皱,盐下层则由于挤压褶皱前缘上覆压力增加,导致应力向后释放,形成反冲构造、背冲构造等构造组合,形成克拉苏构造带的构造特征。

5 结 论

在区域地质解析基础上,将喜马拉雅多期运动拆分为多期运动、垂向抬升和同构造沉积 3 个影响因素,综合利用构造物理模拟和数值模拟方法,开展喜马拉雅多期运动影响克拉苏构造变形的研究,结果表明,库车坳陷克拉苏构造带的岩层变形与构造特征对喜马拉雅多期运动具有明显的响应。研究形成如下结论。

(1)克拉苏构造带对多期运动、垂向抬升和同构

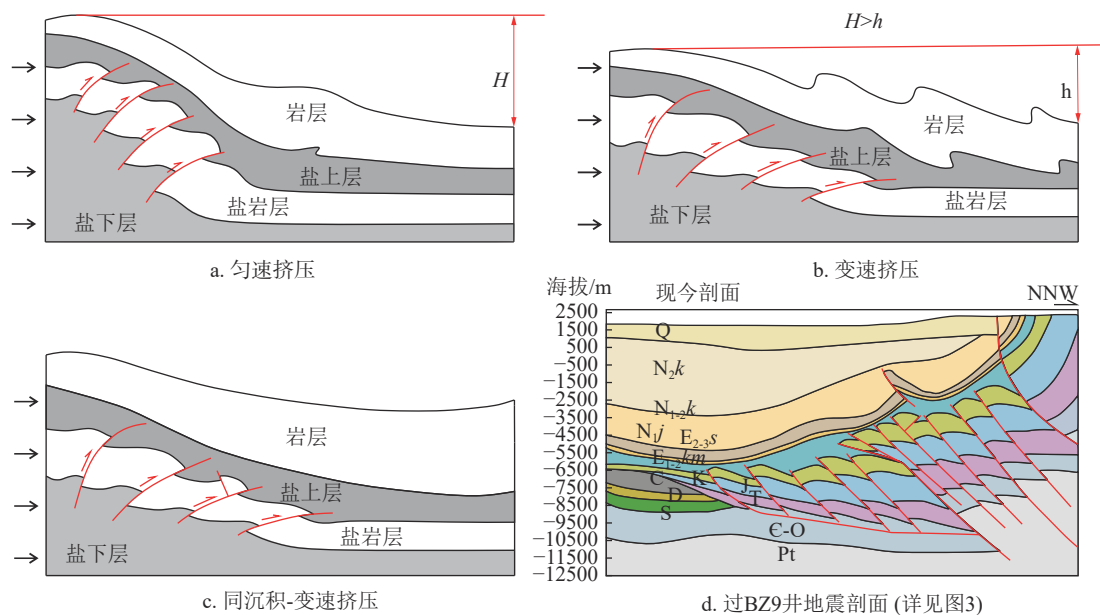


图 9 喜马拉雅多期运动条件下构造变形模式图

(d 图地层代号、花纹图例同图 3)

Fig. 9 Tectonic deformation pattern under multi-periods Himalayan movements

造沉积的响应主要体现在: 多期运动导致盐上层滑脱褶皱向前陆方向传播, 挤压端褶皱隆升强度变弱; 盐岩层盐底辟快速发育, 形成逆冲推覆构造; 盐下层挤压端前展式叠瓦状逆冲断裂系统倾角根据距挤压端位置有规律变化, 靠近挤压端断裂的倾角较大, 远离挤压端断裂倾角较小, 但其逆冲位移量较大。同构造沉积控制盐上层滑脱褶皱变形范围。垂向抬升主要控制盐下层叠瓦状逆冲断裂向前陆方向的传播范围。

(2) 物理模拟及数值模拟结果表明, 喜马拉雅多期运动导致克拉苏构造带构造分层的差异变形, 盐上层滑脱褶皱变形范围更广, 褶皱相关断层更发育, 盐下层在挤压缩短后发育前展式叠瓦状逆冲断层, 同时在多期运动的影响下加强反冲构造的形成, 此外, 当挤压缩短率达到了 30% 时, 模拟结果与实际地震解释剖面具有较高的吻合度。

References

- Allen M B, Windley B F, Zhang C, et al. 1991a. Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan range, NW China[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 148(2): 369–378.
- Allen P A, Crampton S L, Sinclair H D. 1991b. The inception and early evolution of the North Alpine foreland basin, Switzerland[J]. *Basin Research*, 3: 143–163.
- Allen M B, Windley B F, Zhang C. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220: 89–115.
- Cao Z C, Tang D Q, Jiang Zhongzheng, et al. 2023. Evolution and characteristics of Mesozoic–Cenozoic faults in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(1): 226–238 (in Chinese with English abstract).
- Cundall P A, Strack O D L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 29(1): 47–65.
- Finch Emma. 2005. Discrete element modelling of detachment folding[J]. *Basin Research*, 17(4): 507–520.
- He D f, Li D S, He J Y, et al. 2013. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and Southwest depression in Tarim Basin and its exploration significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34(2): 201–218(in Chinese with English abstract).
- Hendrix M S. 2000. Evolution of Mesozoic sandstone compositions, southern Junggar, northern Tarim, and western Turpan basins, northwest China: a detrital record of the ancestral Tian Shan[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3): 520–532.
- Huang S Y, Wang Y R, Wei H X, et al. 2009. Characteristics of salt structures and its evolution in Kuga Depression, Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 117–123(in Chinese with English abstract).
- Hubbert M K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 48(9/12): 1459–1519.
- Jia C Z, Chen Z X, Lei Y L, et al. 2022. Deformation mechanisms and structural models of the fold thrust belts of central and western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 156–174 (in Chinese with English abstract).
- Ju W, Hou G T, Huang S Y, et al. 2014. Constraints and controls of fault related folds on the development of tectonic fractures in sandstones[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(1): 105–113(in Chinese with English abstract).
- Ju W, Hou G T, Huang S Y, et al. 2014. Structural fracture distribution and prediction of the Lower Jurassic Ahe Formation sandstone in the Yinan–Tuzi area, Kuga Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 592–602(in Chinese with English abstract).
- Lei G L, Xie H W, Zhang J Z, et al. 2007. Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt, Kuga Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 28(6): 816–820, 835(in Chinese with English abstract).
- Li C S. 2019. Quantitative analysis and simulation of structural deformation in the fold and thrust belt based on discrete element method[D]. Nanjing University Ph. D. Academic Dissertation (in Chinese with English abstract).
- Li W B, Li J H, Wang H H, et al. 2017. Deformation mechanisms of Kelasu tectonic belt in Kuga foreland thrust belt: Insight from discrete element numerical simulation[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1001–1010.
- Li Y J, Yang H J, Z Y, et al. 2017. Tectonic framework and evolution of South Tianshan, NW China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 94–104(in Chinese with English abstract).
- Liu Z H, Wang G Q, Lu H F, et al. 1999. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 215–221(in Chinese with English abstract).
- Lu F H, Chen C M, Liu Z H, et al. 2000. The structural features and origin of the Kuqa rejuvenation foreland thrust belt[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 21(3): 18–24(in Chinese with English abstract).
- Lu H F, J C Z, Jia D, et al. 2001. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuga rejuvenation foreland basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 257–271(in Chinese with English abstract).
- Lu H T, Zeng L B. 2004. Expression of the Himalayan orogeny in the Kuqa depression, Tarim basin —evidence from the rock acoustic emission experiment[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(7): 676–679(in Chinese with English abstract).
- Morgan J K. 2015. Effects of cohesion on the structural and mechanical evolution of fold and thrust belts and contractional wedges: Discrete element simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 3870–3896.

- Neng Y, Qi J F, Xie H W, et al. 2009. Structural characteristics of northern margin of Kuga depression, Tarim basin[J]. Geological Bulletin of China, 31(9): 1510–1519(in Chinese with English abstract).
- Qi J F, Lei G L, Li M G, et al. 2009. A model of contractional structure for transition belt between Kuche depression and southern Tianshan Uplift[J]. Earth Science Frontiers, 16(3): 120–128(in Chinese with English abstract).
- Tang L J, Yu Y X, Yang W J. 2007. Paleo-uplifts and salt structures and their influence on hydrocarbon accumulations in the Kuga depression[J]. Acta Geologica Sinica, 81(2): 143–150(in Chinese with English abstract).
- Tang P C. 2011. Cenozoic salt structures in the western Kuqa depression, Southern Tianshan: Structural analysis and physical modeling[D]. Zhejiang University Ph. D. Academic Dissertation (in Chinese with English abstract).
- Tian Z H, Sun J M, Brinan F, et al. 2016. Cenozoic detachment folding in the southern Tianshan foreland, NW China: Shortening distances and rates[J]. Journal of Structural Geology, 84(1): 142–161.
- Wang X, Wang Z M, Xie W H, et al. 2010. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuga depression of Tarim Basin, China[J]. Sci. Sin. Terrae., 40: 1655–1668(in Chinese with English abstract).
- Wang Z M. 2013. Discussion of ceiling effect in foreland thrust belt of Kuga Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 24(4): 671–677(in Chinese with English abstract).
- Wu G H, Luo C S, Hu T P, et al. 2007. Fold-related faulting: An example from the Cenozoic salt overlying beds in the Kuqa depression[J]. Chinese Journal of Geology, 42(3): 496–505(in Chinese with English abstract).
- Xu K, Tian J, Yang H J, et al. 2022. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultra deep layers of Kuga depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 33(1): 13–23(in Chinese with English abstract).
- Yang H J, Sun X W, Pan Y Y, et al. 2020. Structural deformation laws and oil & gas exploration direction in the western Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin[J]. Natural Geoscience Gas, 40(1): 31–37(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.
- Yin H W, Wang Z, Wang X, et al. 2011. Characteristics and mechanics of Cenozoic salt-related structures in Kuqa foreland basins: Insights from physical modeling and discussion[J]. Geological Journal of China Universities, 17(2): 308–317(in Chinese with English abstract).
- Yu Y X, Tang L J, Li J C, et al. 2006. Influence of basement faults on the development of salt structures in the Kuqa foreland fold and thrust belt in the northern Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(3): 330–336(in Chinese with English abstract).
- Yu Y X, Tang L J, Yang W J, et al. 2007. Structural segmentation of salt structures in the frontal ranges of the Kuga foreland fold and thrust belt, northern Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 81(2): 166–173(in Chinese with English abstract).
- Yu Y X, Zhou X H, Peng W X, et al. 2011. An overview on salt structures[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(2): 169–182(in Chinese with English abstract).
- Zhang C H, Zhou H R, Liu B P, et al. 2002. New progress in the tectonostratigraphic study of the Paleozoic in the central sector of the South Tianshan Orogenic Belt[J]. Geological Review, 48(1): 9–14(in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Yin H W, Xu S J, et al. 2008. Influence of rock strength on fault patterns above active salt domes: Insights from 2D discrete element simulations[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 44(6): 642–652(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹自成, 唐大卿, 骆满嵩, 等. 2023. 塔里木盆地顺北地区中新生界断裂构造特征及演化[J]. 地质科技通报, 42(1): 226–238.
- 何登发, 李德生, 何金有, 等. 2013. 塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. 石油学报, 34(2): 201–218.
- 黄少英, 王月然, 魏红兴. 2009. 塔里木盆地库车坳陷盐构造特征及形成演化[J]. 大地构造与成矿学, 33(1): 117–123.
- 贾承造, 陈竹新, 雷永良, 等. 2022. 中国中西部褶皱冲断带构造变形机制与结构模型[J]. 地学前缘, 29(6): 156–174.
- 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 2014. 断层相关褶皱对砂岩构造裂缝发育的控制约束[J]. 高校地质学报, 20(1): 105–113.
- 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 2013. 库车坳陷依南-吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 592–602.
- 雷刚林, 谢会文, 张敬洲, 等. 2007. 库车坳陷克拉苏构造带构造特征及天然气勘探[J]. 石油与天然气地质, 28(6): 816–820–835.
- 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[J]. 大地构造与成矿学, 41(6): 1001–1010.
- 李曰俊, 杨海军, 赵岩, 等. 2009. 南天山区域大地构造与演化[J]. 大地构造与成矿学, 33(1): 94–104.
- 李长圣. 2019. 基于离散元的褶皱冲断带构造变形定量分析与模拟[D]. 南京大学博士学位论文.
- 刘洪涛, 曾联波. 2004. 喜马拉雅运动在塔里木盆地库车坳陷的表现——来自岩石声发射实验的证据[J]. 地质通报, 23(7): 676–679.
- 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 等. 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因[J]. 石油学报, 21(3): 18–24.
- 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.
- 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 1999. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. 地学前缘, 6(4): 215–221.
- 能源, 漆家福, 谢会文, 等. 2012. 塔里木盆地库车坳陷北部边缘构造特征[J]. 地质通报, 31(9): 1510–1519.
- 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 等. 2009. 库车坳陷-南天山盆地过渡带的收缩构造变形模式[J]. 地学前缘, 16(3): 120–128.
- 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 等. 2007. 库车坳陷古隆起与盐构造特征及控

- 油气作用[J]. 地质学报, 81(2): 143–150.
- 唐鹏程. 2011. 南天山库车坳陷西段新生代盐构造: 构造分析和物理模拟[D]. 浙江大学博士学位论文.
- 汪新, 王招明, 谢会文, 等. 2010. 塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1655–1668.
- 王招明. 2013. 试论库车前陆冲断带构造顶蓬效应[J]. 天然气地球科学, 24(4): 671–677.
- 邬光辉, 罗春树, 胡太平, 等. 2007. 褶皱相关断层——以库车坳陷新生代盐上构造层为例[J]. 地质科学, 42(3): 496–505.
- 徐珂, 田军, 杨海军, 等. 2022. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用[J]. 天然气地球科学, 33(1): 13–23.
- 杨海军, 孙雄伟, 潘杨勇, 等. 2020. 塔里木盆地克拉苏构造带西部构造变形规律与油气勘探方向[J]. 天然气工业, 40(1): 31–37.
- 尹宏伟, 王哲, 汪新, 等. 2011. 库车前陆盆地新生代盐构造特征及形成机制: 物理模拟和讨论[J]. 高校地质学报, 17(2): 308–317.
- 余一欣, 汤良杰, 李京昌, 等. 2006. 库车前陆褶皱-冲断带基底断裂对盐构造形成的影响[J]. 地质学报, 80(3): 330–336.
- 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, 81(2): 166–173.
- 余一欣, 周心杯, 彭文绪, 等. 2011. 盐构造研究进展述评[J]. 大地构造与成矿学, 35(2): 169–182.
- 张传恒, 周洪瑞, 刘本培, 等. 2002. 南天山造山带中段古生界构造地层研究新进展[J]. 地质论评, 48(1): 9–14.
- 张洁, 尹宏伟, 徐士进. 2008. 用离散元方法讨论岩石强度对主动底辟盐构造断层分布模式的影响[J]. 南京大学学报(自然科学版), 44(6): 642–652.