



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：塔里木盆地库车前陆区侏罗系-白垩系构造应力分布及其控缝作用

作者：操应长，邹志鹏，刘寅，孙小龙，王健

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026119

投稿时间：2026-08-20

录用时间：2026-09-28

预出版时间：2026-09-29

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

塔里木盆地库车前陆区侏罗系—白垩系构造应力分布及其控缝作用

操应长^{1,2}, 郇志鹏^{1,2,3}, 刘寅^{1,2}, 孙小龙^{1,2}, 王健^{1,2}

CAO Yingchang^{1,2}, HUAN Zhipeng^{1,2,3}, LIU Yin^{1,2}, SUN Xiaolong^{1,2}, WANG Jian^{1,2}

1. 深层油气全国重点实验室, 中国石油大学(华东), 山东青岛, 266580

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580

3. 塔里木油田勘探开发研究院, 中国石油天然气股份公司, 新疆库尔勒, 841000

1. *Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China*

2. *School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China*

3. *Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang China.*

Tectonic Stress Distribution and Its Effects on Fracture Development in the Jurassic-Cretaceous Succession of the Kuqa Foreland Area, Tarim Basin

Abstract: [Objective] The clastic reservoirs in the Kuqa Depression are generally tight, making the development of tectonic fractures crucial for identifying high-quality reservoirs and understanding hydrocarbon enrichment patterns. However, controlled by a complex tectonic stress environment, fracture development exhibits strong heterogeneity. **[Methods]** Targeting the Cretaceous Bashijiqike Formation in the Kelasu structural belt and the Jurassic Ahe Formation in the Dibei area, this study comprehensively utilizes structural analysis, stress field numerical simulation, and quantitative fracture characterization to investigate the distribution of tectonic stress and its controlling effects on fractures. **[Results]** The results indicate that the macroscopic stress field can be divided into three zones: the northern detachment-release zone, the central fault-fold concentration zone, and the southern tectonic confined-compressional zone. The stress heterogeneity within each zone is jointly controlled by fault assemblages, fold deformation, and the detachment of evaporite layers. This stress zonation significantly dictates fracture development:

基金项目: 国家自然科学基金项目(42488101, 42472192); 国家科技重大专项(2025ZD140050203, 2025ZD140050205)

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42488101 and 42472192) and the National Science and Technology Major Project for New-type Oil and Gas Exploration and Development (Grant No. 2025ZD140050203, 2025ZD140050205).

第一作者: 操应长(1969—), 男, 博士, 教授, 从事沉积学、储层地质学、石油地质学研究。Email: caoych@upc.edu.cn

通信作者: 刘寅(1986—), 男, 博士, 副教授, 从事构造地质学、石油地质学研究。Email: liuyin@upc.edu.cn

the northern detachment-release zone is dominated by low-density hinge-orthogonal and oblique fractures; the central fault-fold concentration zone features widely developed fractures with complex attitudes; and the southern tectonic confined-compressional zone is characterized by E-W segmented hinge-parallel fractures. This spatial distribution reflects a genetic transition of fractures from north to south, shifting from strike-slip accommodation and local fault-related origins to fold deformation-related origins. Furthermore, structural styles within a single stress zone play a critical role in regulating local stress differentiation and fracture development. Fractures are most developed with optimal connectivity in back-thrust structures, followed by imbricate structures, while opposed-thrust structures exhibit the least developed fractures with poor effectiveness. **[Conclusions]** This study reveals the vital controlling role of tectonic stress on fracture development and hydrocarbon enrichment. **[Significance]** This can provide theoretical support and practical references for reservoir evaluation and hydrocarbon accumulation in complex stress areas of foreland basins.

Keywords: Tectonic stress field; Structural style; Fracture network; Kuqa Depression; Bashijiqike Formation; Ahe Formation.

摘要: 库车坳陷碎屑岩储层整体较为致密, 构造裂缝的发育对于寻找优质储层及揭示油气富集规律具有重要意义。然而, 受复杂构造应力环境控制, 该区裂缝发育呈现出强烈的非均质性。文章以克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组和迪北地区侏罗系阿合组为研究对象, 综合运用构造解析、应力场数值模拟及裂缝定量表征等方法, 深入探讨了构造应力分布特征及其对裂缝发育的控制作用。研究表明, 该区宏观应力场可划分为3个带: 北部滑脱释放带、中部断褶集中带和南部构造憋压带; 各带内的应力非均质性受断裂组合、褶皱变形与膏盐层滑脱的共同控制。应力分带性显著控制着裂缝的发育特征: 北部滑脱释放带以低密度的枢纽垂直缝和斜交缝为主; 中部断褶集中带裂缝普遍发育且产状复杂; 南部构造憋压带则以东西分段的枢纽平行缝为主。这一规律反映出裂缝成因自北向南由走滑调节与局部断层控制向褶皱变形控制转变。单一应力带内的构造样式对局部应力分异和裂缝发育具有关键的调节作用。其中, 反冲构造内裂缝最为发育且连通性好, 叠瓦构造次之, 对冲构造内裂缝最不发育且有效性差。此次研究揭示了构造应力对裂缝发育及油气富集的关键控制作用, 可为前陆盆地复杂应力区的储层评价与油气成藏研究提供理论支撑和实践参考。

关键词: 构造应力场; 构造样式; 裂缝网络; 库车坳陷; 巴什基奇克组; 阿合组

中图分类号: P313.5; P618 **文献标志码:** A

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026119

0 引言

塔里木盆地库车坳陷地处南天山造山带前缘,为新生代发育起来的陆内前陆盆地。受印度-欧亚板块碰撞远程效应的持续影响,南天山造山带经历多期强烈的逆冲推覆作用,导致库车坳陷长期处于复杂的构造应力环境。克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组和迪北地区侏罗系阿合组是库车坳陷深层-超深层天然气勘探的重点层系,埋深普遍超过 4500 m,局部可达 8000 m 以上(王清华等, 2024, 2025; 杨海军等, 2026)。受强烈构造挤压与深埋作用的双重控制,储层基质整体致密,孔隙度与渗透率普遍偏低。然而,受复杂应力作用影响,储层内部发育了不同程度的构造裂缝。这些裂缝不仅是天然气的重要储集空间,更是流体渗流的核心通道,直接决定了单井产能与气藏的开发效果(杨海军等, 2018)。因此,查明库车坳陷构造应力的分布规律及其对裂缝发育的控制机制,对寻找有利储层以及实现储层有效性评价至关重要。

不少学者针对库车坳陷应力场开展了不同尺度的研究。在区域尺度上,平面上查明了克拉苏构造带不同构造段(如阿瓦特段、博孜-大北段与克深段)之间的构造样式和应力分布差异,指出西部阿瓦特段表现出强挤压特点,东部克深段以冲起构造和叠瓦构造为主,博孜-大北段具有局部应力集中特点(袁航等, 2025);垂向上揭示了区域应力随深度增加由逆冲型转换为走滑型(张辉等, 2024),明确了盐上岩石力学层结构和浅部高陡地层产状控制博孜-大北地区盐下储层地应力强非均质性和各向异性(王珂等, 2013; 徐珂等, 2024)。在局部构造尺度上,构造样式差异、断层端部与叠覆带的应力扰动、背斜核部与翼部的应力分异、褶皱中和面上下的应力环境转换等共同促进储层内部应力状态的强烈非均质性(祖克威等, 2014; 刘春等, 2019; 冯建伟等, 2020)。

在构造应力控储效应方面,已有研究普遍认为构造应力对储层具有明显的双重影响。一方面,强烈的构造挤压加剧储层压实作用,导致颗粒重排、破碎、变形,使储层孔隙度和渗透率快速降低(Zhu et al., 2002; Lai et al., 2017),并建立了有效构造应力与构造压实减孔之间的定量关系(张荣虎等, 2014, 2020, 2021; Du et al., 2025)。另一方面,构造挤压使得岩石发生破裂,形成多尺度裂缝,显著提高储层的渗流能力(Liu et al., 2017; 杨海军等, 2018; Zhang et al., 2024; 周世杰等, 2026),并建立了考虑裂缝影响的储层复杂应力场预测模型(张辉等, 2026),揭示了最大古构造应力与裂缝密度呈指数正相关的规律(王珂等, 2020, 2022)。裂缝是岩石在应力作用下发生脆性破裂的产物,其密度、产状和有效性受应力大小与应力状态的联合控制(Zeng et al., 2023)。在挤压构造背景下,裂缝发育程度主要受控于应力强度以及岩石力学性质等因素,应力集中、应力差大、岩层脆性强、岩层厚度薄等条件有利于岩层破裂。同时,构造活动产生的断层和裂缝还为地质流体的运移提供重要通道(罗晓容等, 2016),改造了储层,增强了其非均质性(张荣虎等, 2014)。

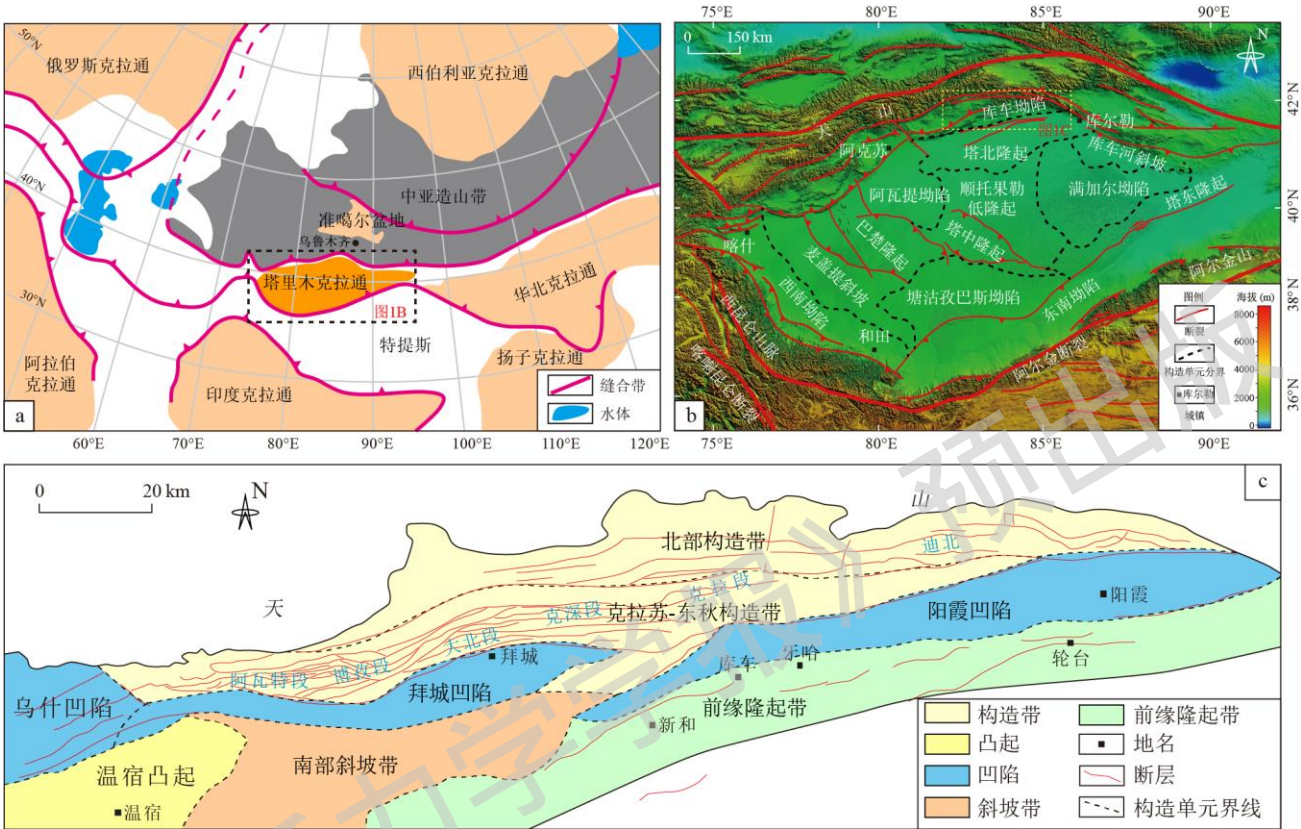
尽管库车坳陷构造应力场的复杂性及其对储层的双重控制作用已得到广泛认同,但不同地区、不同层位、不同构造样式的构造应力特征及储层响应却存在显著差异。尤其是在复杂构造背景下,当前研究仍面临区域应力分带与局部应力扰动如何协同控制裂缝发育、不同构造样式之间的应力差异如何导致裂缝发育分异等关键问题。针对上述问题,文章以库车坳陷克拉苏构造带博孜一大北—克深及迪北地区为研究区、以区内白垩系巴什基奇克组 and 侏罗系阿合组为研究对象,这些层系是库车坳陷深层天然气勘探的核心产层,钻井资料丰富、覆盖范围广,自北向南横跨不同构造带,为开展不同区带的构造、应力、裂缝对比研究提供资料基础。综合运用构造解析、应力场数值模拟及裂缝定量表征等方法,系统开展构造、应力、裂缝的协同研究,以构造变形解析和应力计算和数值模拟为基础,建立重点层位应力场的宏观分带模式,以应力区带为研究单元,开展不同分带内裂缝密度与产状的定量表征,揭示裂缝发育对应力分带的规律性响应,再以相同应力区带内不同构造样式为研究单元,开展局部应力分异与裂缝网络连通性的对比分析,建立构造样式控缝差异及其与产能的关联。

1 地质背景

塔里木盆地在大构造单元上夹持在特提斯构造域及中亚造山带之间(图 1a),其内部可划分为 12 个构造单元,其中,库车坳陷位于盆地北部,北依南天山造山带,南接塔北隆起(图 1b),呈 NEE-SWW 向展布,东西长约 250 km,南北宽 20~60 km,面积约 $3.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。坳陷具有“南北分带、东西分段”的构造格局(图 1c),自北向南依次划分为北部构造带、克拉苏-东秋构造带、拜城凹陷-阳霞凹陷、南部斜坡带和前缘隆起带。库车坳陷主要经历多期构造演化,中生代为伸展坳陷盆地阶段,总体表现为北厚南薄、北剥南超的地质结构,晚白垩世整体抬升,形成区域性不整合(肖建新等, 2005);新生代早期为挠曲盆地阶段,盆地缓慢沉降;新生代晚期为陆内前陆盆地阶段,受南天山强烈逆冲推覆的显著影响,喜马拉雅期构造挤压是控制库车坳陷现今构造格局的关键构造事件(王清华等, 2022)。在构造发育特征上,库车坳陷主要发育近东西向多排逆冲断裂以及盐相关构造,发育叠瓦状构造、断弯褶皱、断展褶皱、滑脱褶皱等多种褶皱-冲断组合样式。此外,在构造转换部位还发育近南北向走滑断裂。

库车坳陷充填巨厚的中-新生界陆相碎屑岩沉积,总厚度 3000~10000 m。中生界自下而上发育三叠系、侏罗系和白垩系(图 2),其中上三叠统黄山街组和塔里奇克组的湖相泥岩与煤系地层、中下侏罗统阳霞组和克孜勒努尔组的煤系地层是库车坳陷的主力烃源岩(王清华等, 2022)。下白垩统自下而上包括亚格列木组、舒善河组、巴西盖组和巴什基奇克组,上白垩统缺失(肖建新等, 2005)。新生界以古近系、新近系和第四系为主,经历多次新生代海侵(李建峰等, 2017),其中古近系库姆格列木群($E_1-2\text{km}$)发育巨厚膏盐岩层,既是区域性优质盖层,也是控制盐上、盐下构造变形的重要滑脱层(莫涛等, 2025)。克拉苏构造带

目的层为白垩系巴什基奇克组 (K_{1bs})，自下而上划分为巴三段 (扇三角洲前缘)、巴二段和巴一段 (辫状河三角洲前缘) (郭泽坤, 2026)，岩性以红褐色中-细砂岩为主 (张惠良等, 2014)。依奇克里克构造带迪北地区目的层为侏罗系阿合组 (J_{1a})，发育辫状河三角洲平原-前缘沉积体系 (张惠良等, 2002)，岩性以灰白色中-粗砂岩为主，不同程度发育砾岩层和泥岩层 (王珂等, 2022)。



a—塔里木盆地大地构造位置 (兰勃特投影示意图, 据 Xu et al., 2015 修改); b—构造单元划分; c—库车坳陷构造图

图 1 库车坳陷区域构造概况图

Fig. 1 Geological units of Tarim Basin and structural map of Kuqa Depression

(a) Tectonic location of Tarim Basin; (b) Tectonic unit division; (c) Structural map of Kuqa Depression

2 应力分带特征及其差异性

2.1 应力参数实验测试与测井计算

2.1.1 岩芯静态岩石力学参数测试

为获取巴什基奇克组和阿合组典型静态岩石力学参数，选择博孜-大北-克深地区及迪北地区 20 口井共 30 块砂岩样品开展了三轴应力测试。采用金刚石取心钻头在全直径岩芯上套取一个直径为 25mm 的圆柱形试样，长度超过 50mm，然后将圆柱形试样的两端打磨平整，使圆柱形岩样的长度和截面直径比值超过 1.5。试验时，对圆柱形岩样横向施加液体围压，然后逐渐增大轴向载荷，测出岩石发生破坏时的轴向应力。测试执行 GB/T 23561.9-2009，采用 RTX-1000 型三轴岩石力学测试系统。

实验结果显示（表 1），巴什基奇克组与阿合组砂岩储层的静态岩石力学参数展现出显著的差异性及非均质特征。具体而言，巴什基奇克组样品的力学性质相对集中，其静态杨氏模量分布在 26.68~32.89 GPa 之间，平均值为 30.26 GPa；泊松比介于 0.16~0.41 之间，平均值为 0.31，整体数据极差较小，反映巴什基奇克组地层岩石的刚度和抗变形能力相对均一。相比之下，阿合组的岩石力学参数表现出较强的数据离散性，其静态杨氏模量跨度较大，介于 11.17~53.00 GPa 之间，平均为 34.48 GPa，存在极高值与极低值并存的现象。阿合组的泊松比分布区间也更宽泛，为 0.12~0.48，平均值为 0.30。

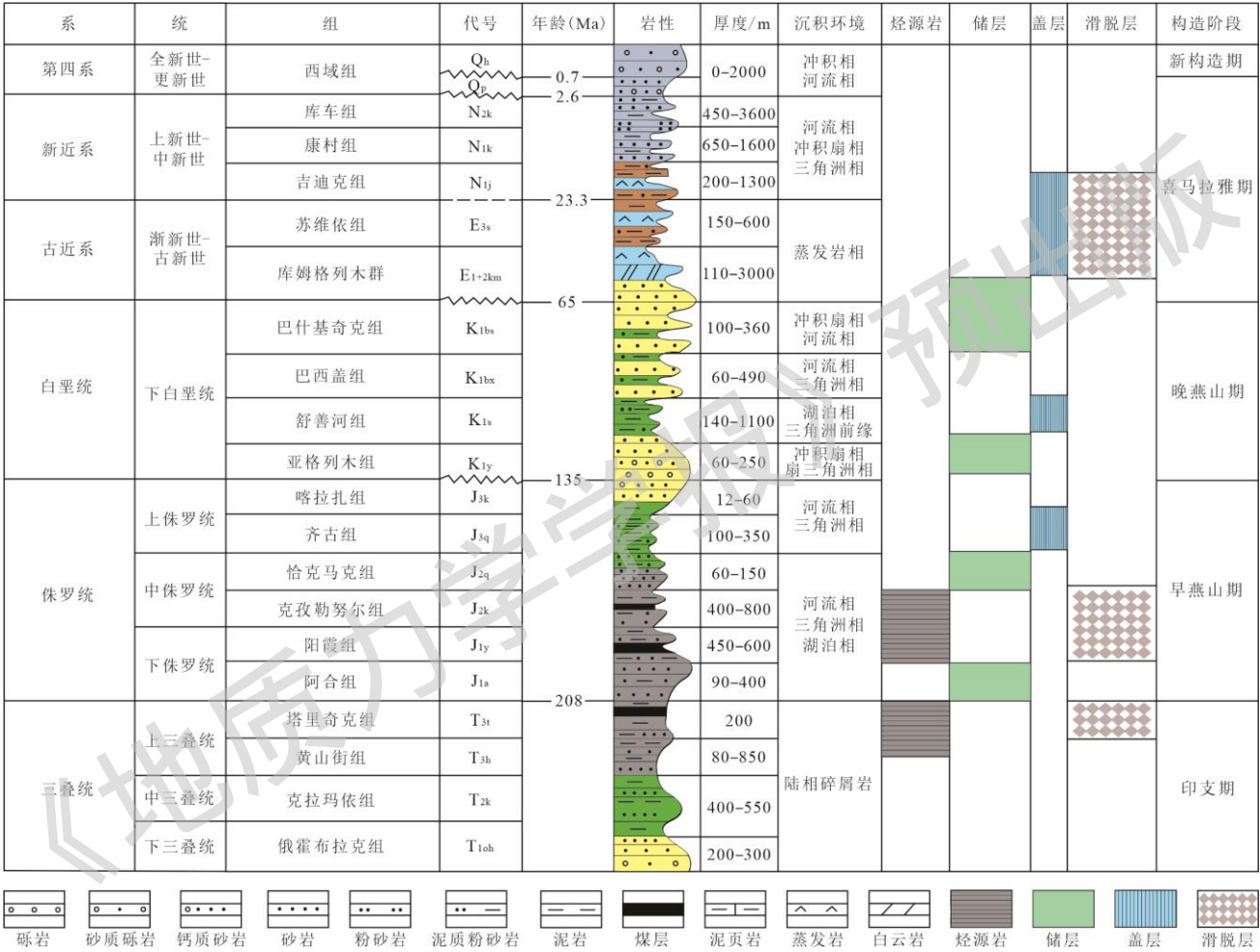


图 2 库车坳陷重点地层综合柱状图（修改自 Zeng et al., 2010）

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of key strata in the Kuqa Depression (modified from Zeng et al., 2010)

表 1 库车坳陷重点层系砂岩岩石力学参数分布范围

Table 1 Range of sandstone mechanical parameters in key stratigraphic systems of the Kuqa Depression

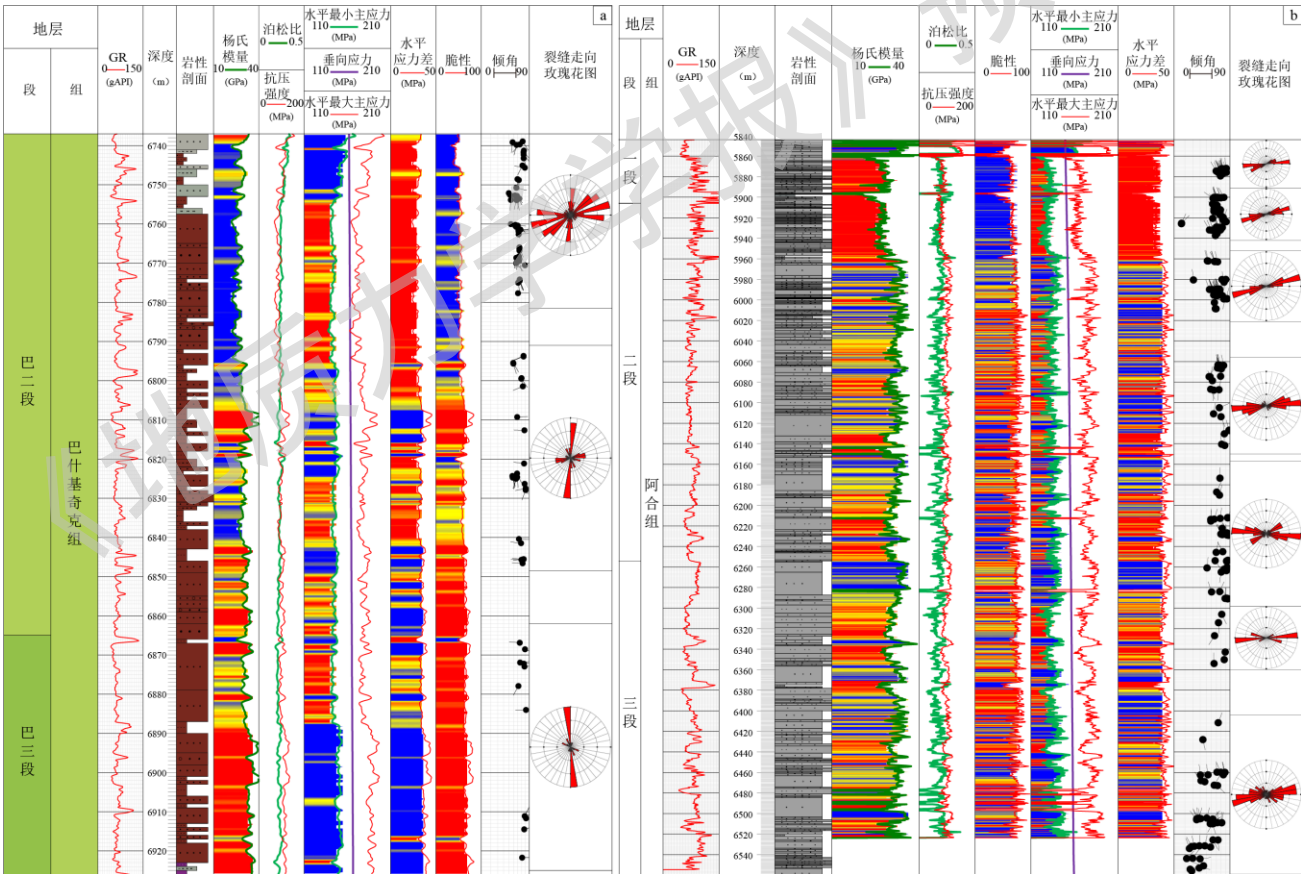
地层	静态岩石力学参数		动态岩石力学参数		S _{Hmax} /MPa	S _v /MPa	S _{Hmin} /MPa
	杨氏模量 /GPa	泊松比	杨氏模量 /GPa	泊松比			
巴什基奇克组	26.68~32.89/3 0.26, n=15	0.16~0.41/0.31, n=15	9.22~36.36/28.58, n=172	0.17~0.37/0.25, n=165	76.71~212.37/166.23, n=173	64~198.07/157.96, n=171	63.13~174.63/135.57, n=173

	11.17~53.00/3	0.12~0.48/0.	17.61~44.05/2	0.18~0.32/0.	123.22~167.96/	111.12~149.34/	97.44~133.28/1
阿合组	4.48, $n=15$	30, $n=15$	8.35, $n=10$	24, $n=10$	143.05, $n=10$	125.21, $n=10$	12.82, $n=10$

*（数据范围）/平均值， n =样品或井数量

2.1.2 测井动态岩石力学参数计算

基于组合弹簧模型开展单井岩石力学参数计算（徐珂等，2022； Xu et al., 2022； 王清华等，2022）（图 3），计算结果显示，巴什基奇克组和阿合组岩石力学参数与岩性组合关系密切，均处于高应力背景，受岩性组合变化及分层性影响，岩石力学参数具有显著的纵向非均质性及分层性。巴什基奇克组以大套砂岩夹薄层泥为主要岩性组合，岩性相对稳定，杨氏模量、泊松比、抗压强度、脆性等力学参数波动较平缓（图 3a）。巴什基奇克组杨氏模量主体分布在 9.22~36.36 GPa 之间，平均为 28.58 GPa；泊松比主要为 0.17~0.37，平均为 0.25。阿合组主要为灰白色粗砂岩与中细砂岩互层，夹薄层泥，力学参数表现为宽幅锯齿状震荡（图 3b）。阿合组杨氏模量峰值可达 17.61~44.05 GPa，平均为 28.35；泊松比主要分布于 0.18~0.32，平均为 0.24，整体表现为高杨氏模量、高抗压强度、高脆性的特点，脆性相对巴什基奇克组明显加强。



a—博孜 102 井巴什基奇克组；b—迪北 501 井阿合组

图 3 库车坳陷典型钻井岩石力学参数和现今应力特征

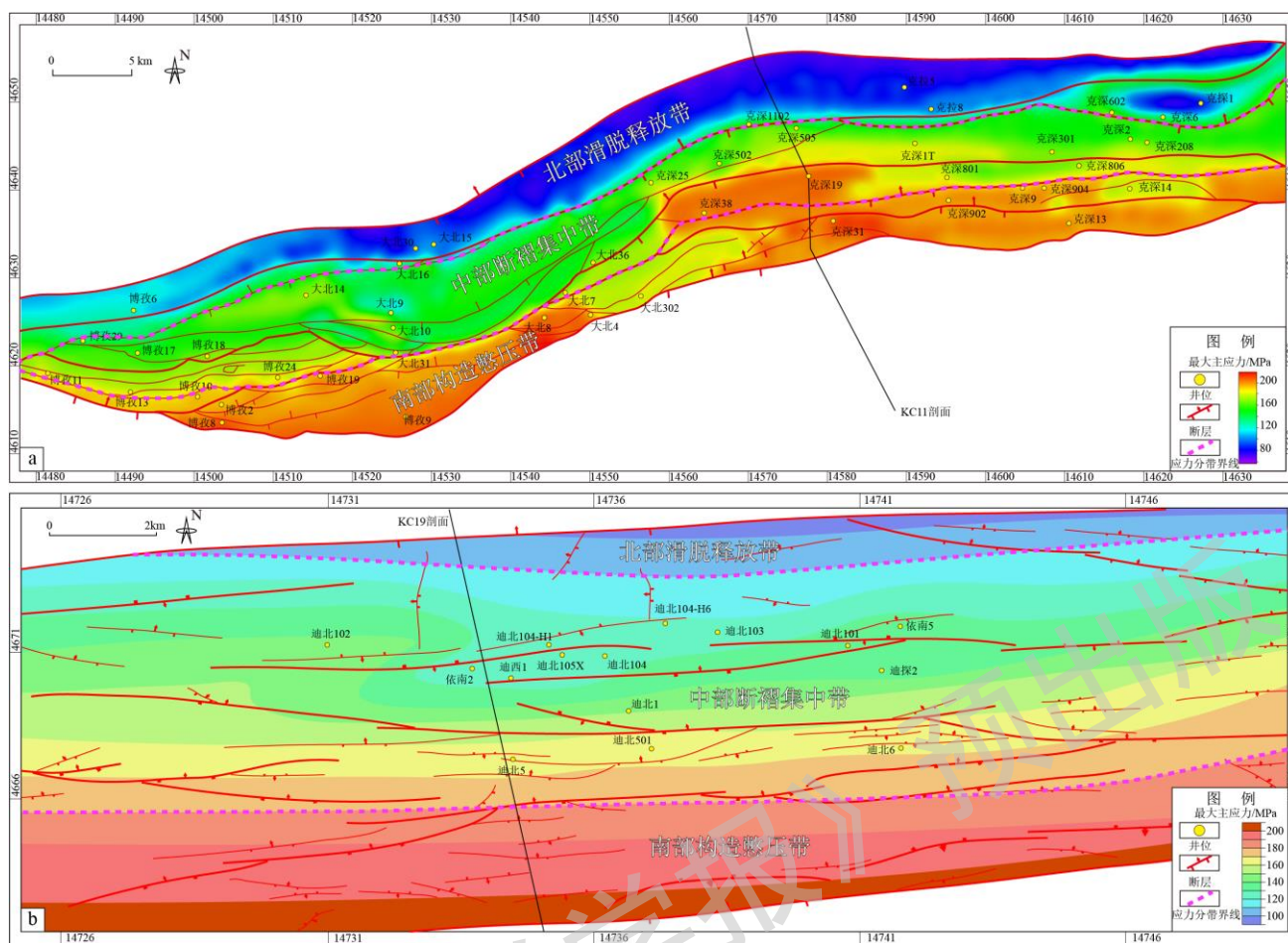
Fig. 3 Typical Rock Mechanical Parameters and Stress Characteristics of Wells in the Kuqa Depression

(a) The Bashijiqike Formation of Bozi 102 well; (b) The Ahe Formation of Dibe 501 well

应力计算结果表明,巴什基奇克组和阿合组均处于高现今地应力环境,三向主应力值呈最大水平主应力(S_{Hmax})>垂向主应力(S_v)>最小水平主应力(S_{Hmin})的规律,受控于典型的走滑型地应力机制,但在具体的应力分布上两者具有显著差异。受埋深增加及大套均质岩性影响,巴什基奇克组整体应力较大,应力变化较弱, S_{Hmax} 在 76.71~212.37 MPa,平均为 166.23MPa; S_v 为 64~198.07 MPa,平均为 157.96 MPa; S_{Hmin} 在 63.13~174.63 MPa,平均为 135.57 MPa,水平应力差相对稳定。阿合组因频繁的岩性互层,地应力互层效应显著,应力在高脆性段高度集中, S_{Hmax} 在 123.22~167.96 MPa 之间,平均为 143.05 MPa; S_v 约为 111.12~149.34 MPa,平均为 125.21 MPa; S_{Hmin} 在 97.44~133.28 MPa,平均为 122.82 MPa。

2.2 应力分带发育特征及差异性

根据实测岩石力学参数及 180 余口钻井的计算的应力值,采用有限元数值模拟方法,构建了库车前陆区巴什基奇克组和阿合组地质模型,并开展了现今地应力分布特征研究。受库车坳陷中新代以来强烈构造作用影响,构造特征复杂。博孜-大北-克深地区所处的克拉苏构造带和迪北地区所处的依奇克里克构造带受天山强烈隆升影响,在整体形成多排近东西向逆冲断裂体系,与造山带展布方向基本一致,在局部区域断裂走向具有轻微变化,由博孜-大北地区北北东向逐渐转变为近东西向,再向东部到迪北地区为持续东西走向。受北部天山造山带持续向南逆冲推覆、南部塔里木克拉通边缘稳定基底阻挡,以及古近系膏盐层滑脱调节等多重因素共同控制,白垩系巴什基奇克组和侏罗系阿合组在应力分布上具有典型的分带特征,自北向南可以分为北部滑脱释放带、中部断褶集中带、南部构造憋压带(图 4)。



a—白垩系巴什基奇克组；b—侏罗系阿合组

图4 库车坳陷博孜-大北-克深地区和迪北地区构造纲要及最大主应力平面分布图

Fig. 4 Tectonic outline and distribution map of the maximum principal stress in the plane in the main areas of the Kuqa Depression

(a) The Bashijiqike Formation of Cretaceous in the Bozi-Dabei-Keshen area; (b) The Ahe Formation of Jurassic in the Dibe area

2.2.1 北部滑脱释放带应力发育特征

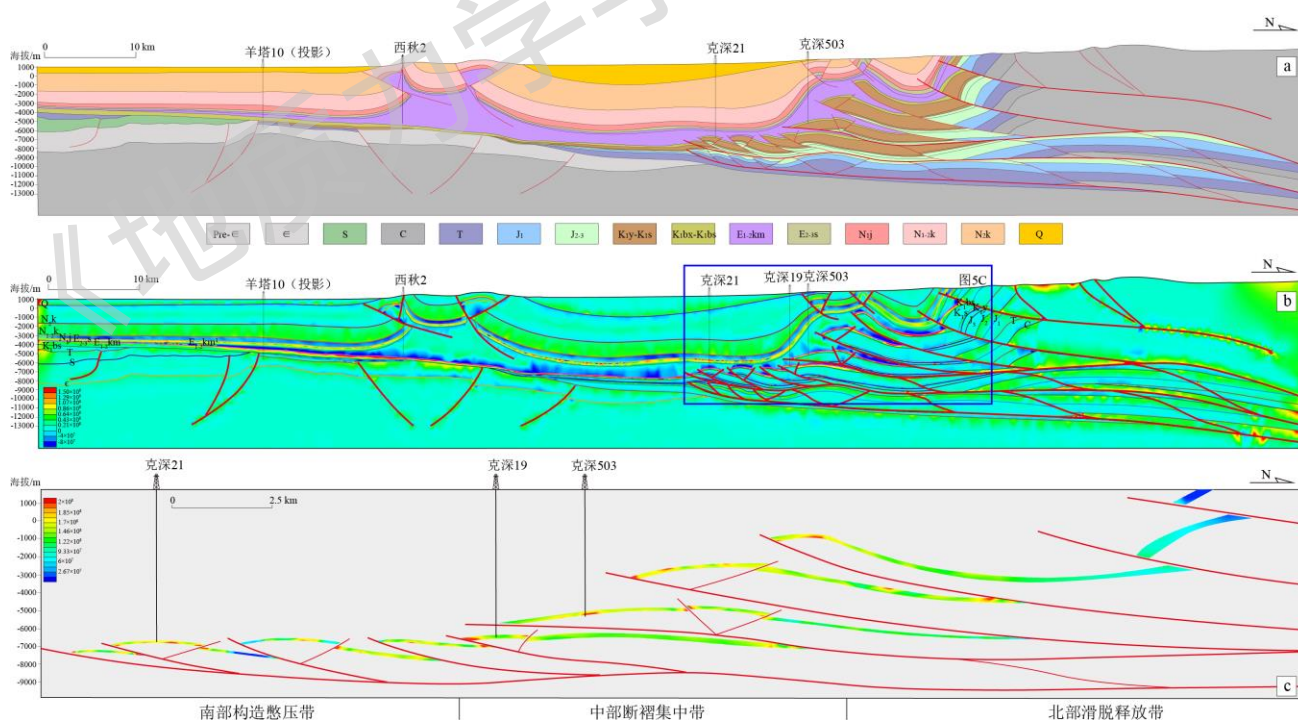
北部滑脱释放带紧邻天山造山带前缘，是研究区构造抬升、断层滑动和剥蚀卸载作用最为显著的区域。平面上，该带沿山前大型逆冲断裂呈近东西向连续展布，最大主应力整体处于区域低值范围。巴什基奇克组最大主应力主体为 80~140 MPa，明显低于中部和南部地区（图 4a）。阿合组现今最大主应力整体较巴什基奇克组低，其北部同样表现为区域相对低值，向南逐渐过渡为中-高值，应力分布总体沿构造走向呈条带状（图 4b）。

从博孜-大北-克深地区剖面来看，北部地层强烈卷入褶皱冲断构造系统，多条主干逆冲断裂及其次级分支断裂组合形成叠瓦状构造、断弯褶皱等构造样式，构造强烈抬升至地表或近地表（图 5a）。受断层滑脱卸

压、地层抬升以及长期剥蚀卸载共同影响，靠近造山带一侧形成了范围较大的低应力区（图 5b）。古近系库姆格列木群膏盐层及其邻近软弱层能够通过塑性流动和顺层滑移吸收部分水平缩短量，盐上与盐下构造变形及应力传递发生解耦。盐上层系主要形成宽缓、被动的褶皱，内部应力相对较低且横向连续；盐下刚性层系虽然被多条逆冲断裂切割，但在靠近山前、构造抬升强烈的断裂上盘和背斜高部位，应力已得到明显释放。巴什基奇克组目的层应力提取剖面进一步显示（图 5c），最大主应力受到断层上下盘位置及褶皱变形的控制，由中部构造带向北部滑脱释放带过渡时，巴什基奇克组应力总体降低，在主干逆冲断裂上盘、冲断背斜核部及构造高点附近，应力的降低尤其明显。

迪北剖面北部也表现出相似的应力释放特征。该区地层随大型高角度逆冲断裂被大幅抬升，部分老地层接近地表或直接出露（图 6a、6b），长期构造隆升和剥蚀卸载使地层内部应力得到充分释放，在全剖面应力云图中形成大面积低值背景（图 4b）。阿合组目的层提取结果表明（图 6c），北部阿合组已由南部深埋状态逐渐过渡至浅埋状态，其最大主应力沿层明显下降，整体位于区域低值范围。在断裂上盘以及浅部背斜核部，阿合组顶、底界面附近还可出现局部低应力条带，部分位置发生应力反转，表明北部滑脱释放带与逆冲断层滑移卸压、背斜外弧拉伸和地表剥蚀卸载等过程密切相关。

总体来看，白垩系巴什基奇克组和迪北阿合组均表现为进入北部带后以连续低值为主要特征，断层附近可出现短距离的应力突变，反映该带是在低应力背景上叠加局部断裂扰动。



a—过克深地区地质结构（据塔里木油田）；b—剖面最大主应力分布（MPa）；b—巴什基奇克组最大主应力分布（MPa）

图 5 库车坳陷克深地区地质结构及最大主应力分布剖面

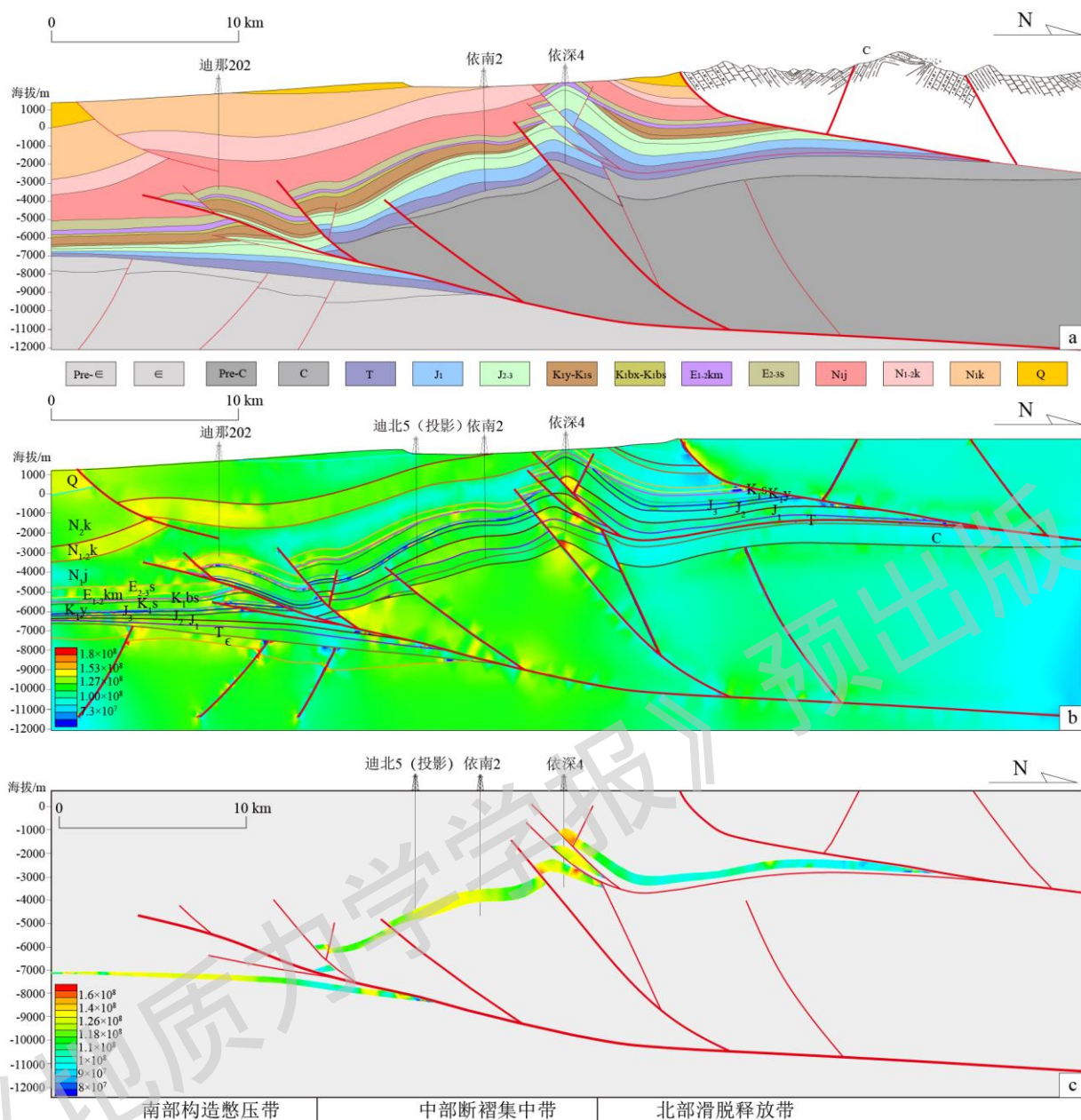
Fig. 5 Geological structure and the distribution of the maximum principal stress in the Keshen area of the Kuqa Depression

(a) geological profile that across the Keshen area (according to Tarim Oilfield); (b) Maximum principal stress of profile; (c) The maximum principal stress of the Bashijiqike Formation

2.2.2 中部断褶集中带应力发育特征

中部断褶集中带位于山前强烈变形区与盆地内部相对稳定区之间,是区域构造应力传递、调整和重新分配的关键部位。平面上,该带沿山前构造走向呈近东西向条带状展布,巴什基奇克组最大主应力主体为 130~190 MPa,处于由北部 80~140 MPa 低值区向南部 180~210 MPa 高值区过渡的位置(图 4a)。与区域平缓递变背景相比,断裂附近的应力具有明显的异常,表明大型逆冲断裂不仅控制了不同分带的边界,而且在其端部、转折部位和叠覆部位造成了显著的局部应力集中。

博孜-大北-克深剖面中部是盐下冲断构造最为发育的区段,古近系库姆格列木群膏盐层将盐上宽缓褶皱与盐下复杂冲断构造分隔开来,形成明显的垂向应力解耦(图 5a、5b)。盐上新生界地层以宽缓弯曲和被动褶皱为主,应力一般较低、连续性较好;盐下地层则被多条逆冲断裂切割,形成叠瓦状、反冲和对冲等多种构造组合,构造样式类型丰富,应力呈现明显的块状、条带状和透镜状分布。在深部向斜核部以及主干逆冲断层下盘,上覆地层厚度较大,垂向载荷与造山带侧向推挤共同作用,使巴什基奇克组形成与地层产状近于平行的高应力集中带。相反,在断层上盘、背斜核部及构造高点,应力因抬升卸载和外弧拉伸而明显降低,形成高、低应力单元短距离相间的格局。由于该套地层穿越多条逆冲断层,应力在断层两侧发生阶跃式变化,断层下盘及埋深较大的向斜翼部一般表现为中-高应力,断层上盘和背斜高部位则转变为低值。局部高应力带沿巴什基奇克组顶、底界面延伸,表明应力集中不仅受埋深控制,还受刚性砂岩层与邻近泥岩、膏盐层之间力学性质差异的影响。目的层在断层下盘受阻挡压缩时,应力容易沿刚性层内部传递;断层发生滑动后,上盘应力则可快速释放。因此,巴什基奇克组所显示的应力分段式分布与复杂断层组合样式、褶皱弯曲和盐层滑脱等多因素密切相关。



a—过迪北地区地质结构（据塔里木油田）；b—剖面最大主应力分布（MPa）；b—阿合组最大主应力分布（MPa）

图6 库车坳陷迪北地区地质结构及最大主应力分布剖面

Fig. 6 Geological structure and the distribution of the maximum principal stress in the Dibe area of the Kuqa Depression

(a) geological profile that across the Dibe area (according to Tarim Oilfield); (b) Maximum principal stress of profile; (c) The maximum principal stress of the Ahe Formation

阿合组平面应力场同样具有北低南高的总体趋势，中部断褶集中带最大主应力主体为 110~180 MPa，但较巴什基奇克组表现出更明显的区域平缓应力递变与局部构造扰动的叠加特征（图 6）。迪北地区断层延伸距离相对较短，次级派生断裂数量较多，断层走向和倾向变化频繁，不同级别断裂相互交切、叠覆和分叉，形成较为复杂的构造系统。在依南 2、迪西 1 等井区附近，断裂端部、断层叠覆带及构造转换带对应力传递路径具有明显改变作用，断层端部因位移逐渐消失而容易积聚弹性应变，叠覆带内相邻断层相互作用可使

局部应力叠加。因此,该带虽然区域平均应力低于南部构造憋压带,但局部高值可以接近甚至达到南部高应力区的水平。迪北剖面中部以依南 2 井附近的高角度逆冲断裂和断弯褶皱为代表(图 6a、b)。阿合组在该区强烈卷入逆冲构造,其埋深和产状在较短距离内发生明显变化。在埋深较大的背斜翼部、断层下盘及向斜转折端,阿合组表现为中等应力背景;在局部断层端部或下盘受阻位置,应力可进一步升高。与之相对,在浅部背斜核部和断层上盘,由于构造抬升卸载及背斜外弧拉伸,阿合组内部与顶、底界面附近形成顺层低应力异常,局部出现应力反转。

图 6C 显示,在中部断褶集中带,阿合组应力在依南 2 等构造附近出现多次升高和降低。目的层由深部向斜或断层下盘向浅部背斜高点抬升时,应力由中-高值迅速转为低值;越过背斜顶部并重新进入埋深较大的翼部后,应力又有所回升。与巴什基奇克组相比,阿合组受高角度断裂、短距离次级断裂及断弯褶皱控制更加明显,应力异常的横向尺度相对较小、变化频率更高;而巴什基奇克组则更多表现为盐下大型叠瓦冲断系统控制的分块性和顺层延伸性。

整体上,中部断褶集中带是研究区应力非均质性最强的区域,高、低应力异常在断层上下盘、褶皱翼部和核部之间交替分布。

2.2.3 南部构造憋压带应力发育特征

南部构造憋压带位于盆地斜坡下部及相对稳定的克拉通边缘,是北部构造挤压应力向南传递后的主要汇聚区。平面上,该带表现为范围较大、连续性较好的高应力区,最大主应力总体平行于区域构造走向展布。巴什基奇克组最大主应力普遍为 180~210 MPa,明显高于北部滑脱释放带和中部断褶集中带(图 4a)。阿合组最大主应力总体为 100~200 MPa,其南部区域主要位于该区间的高值段,平面上表现为由北部低值背景向南部高值背景逐渐过渡(图 4b)。与中部地区相比,南部应力分布相对平缓、连续,区域性高应力背景影响显著,而断层造成的局部扰动相对较弱。

博孜-大北-克深剖面上,南部憋压带的构造特征表现为中部强烈断褶变形向南逐渐收敛和终止,以膏岩层为分隔,膏岩层之上的浅一中部地层总体较为平缓,表现为宽缓的单斜或低幅度变形;膏岩层之下地层埋深大,发育多条密集的低角度逆冲断层和次级分支断裂,这些断层向深部归并于区域性滑脱面,向上则逐渐尖灭,构成叠瓦状-反冲构造的冲断组合。从应力分布来看,该带现今应力具有显著的垂向分层和横向分块特征。浅一中部构造相对平缓的层系以较连续的中等应力背景为主,应力分布基本平行于地层展布;进入深部叠瓦冲断系统后,应力场明显复杂化,在巴什基奇克组、断层下盘以及相邻逆冲断层所夹持的构造片内形成多条顺层展布的中-高应力带。特别是在逆冲断层端部、断坡转换部位、叠瓦断层相互叠覆区及下盘受阻部位,应力出现显著异常。相反,在断层面附近、局部上盘及滑脱变形较强的层段,应力因断层滑移和层间

错动得到一定释放，形成窄幅低应力条带。整体构成了高、低应力单元沿目的层和断层交替出现的非均质分布的格局。

巴什基奇克组在该带内整体埋藏较深，沿层应力总体高于南侧构造平缓区，但其分布并不均一。目的层穿越多条深部叠瓦逆冲断层时，应力在断层两侧发生阶跃式变化：断层下盘、构造片前缘及局部向斜低部位通常表现为较高应力，而断层上盘和滑移卸压较强的部位则相对较低。局部高值沿巴什基奇克组顶、底界面延伸，表明刚性砂岩层与邻近泥岩或软弱层之间的力学性质差异，也促进了应力沿层传递和集中。因此，巴什基奇克组在南部憋压带以中-高应力背景为基础，叠加断层控制的局部强应力集中。

迪北剖面南部以迪那 202 井区及其以南深部斜坡为代表。阿合组在此快速俯冲并深埋至 5000 m 以下，上覆地层厚度明显增加，垂向重力载荷与区域水平挤压共同控制其现今应力状态（图 6a、b）。该区虽然仍发育多条次级断裂，但相较中部依南 2 构造带，目的层整体处于深埋、受限的力学环境中，断层滑动难以完全释放区域应变能。在叠瓦断层下盘、深部向斜核部及向斜转折端，阿合组内部发育与地层产状基本一致的高应力集中带，整体转变为连片的中-高应力环境。

阿合组目的层提取剖面显示（图 6c），由北部滑脱释放带向南部迪那 202 井区过渡时，应力总体随目的层埋深增加而升高，南部深埋段以高值为主，明显高于北部浅埋段的低值（图 6c）。在迪那 202 井区附近，阿合组沿层高应力带具有较好的横向连续性，但在次级断层两侧仍可观察到局部突变；其中，断层下盘和向斜低部位应力相对较高，上盘或局部抬升部位应力相对降低。与中部断褶集中带相比，南部这些局部变化叠加在整体高应力背景之上，并未改变其连片高值特征。

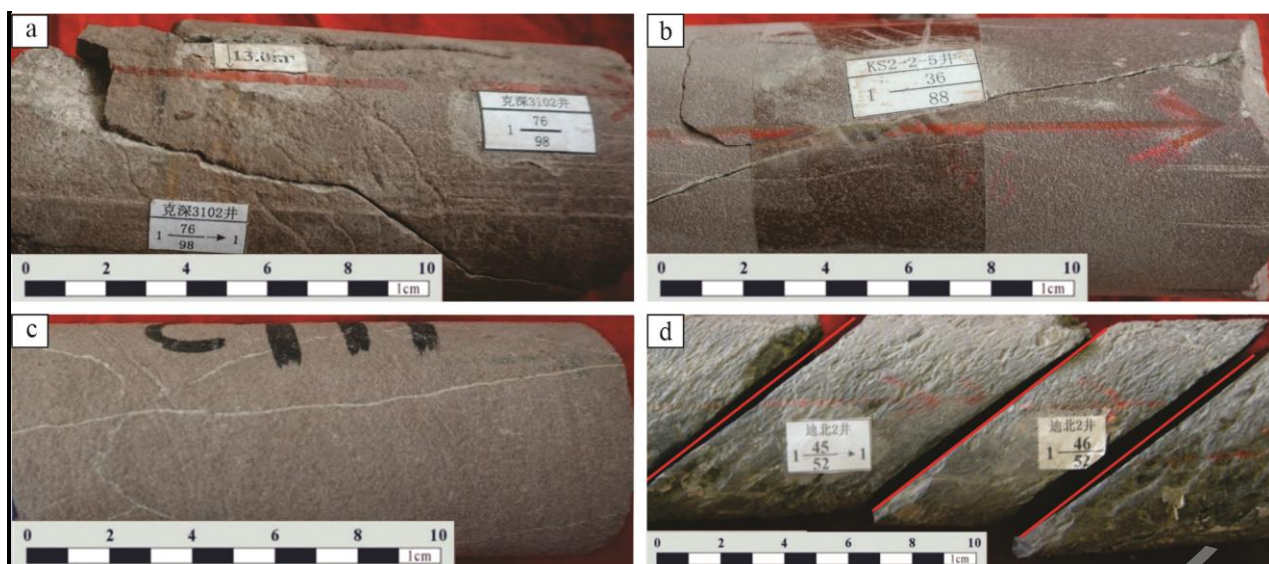
南部构造憋压带的巴什基奇克组和阿合组均具有应力非均质分布的特点，但在具体分布上存在一定的差异。博孜-大北-克深地区巴什基奇克组受膏盐层滑脱和盐下冲断系统影响，应力分层效应更加突出；迪北地区阿合组则主要受高角度逆冲断裂、深部斜坡埋藏和断层下盘憋压共同控制。

3 应力分带对裂缝发育的控制作用

3.1 裂缝基础特征分析与数值模拟

3.1.1 裂缝基础特征单井分析

裂缝表征主要利用成像测井解释，同时结合岩芯观察。成像测井解释能够定量提取裂缝深度、倾角及走向等信息，依据成像特征划分开启缝、半开启缝和闭合缝，计算单井裂缝密度以及开启-半开启有效裂缝密度；岩芯观察重点记录裂缝产状、开度及充填程度与充填物类型（图 7），判断裂缝张性和剪性成因。上述多手段裂缝表征结果共同支撑裂缝发育主控因素分析和裂缝数值模拟的定量约束与验证数据基础。



a—未充填张裂缝，克深 3102 井，8123 m，巴什基奇克组；b—未充填剪裂缝，克深 2-2-5 井，6770 m，巴什基奇克组；c—方解石充填张裂缝，克深 207 井，6876 m，巴什基奇克组；d—未充填剪裂缝，迪北 5 井，5842 m，阿合组

图 7 库车坳陷巴什基奇克组和阿合组典型裂缝类型岩芯特征

Fig. 7 Core photographs showing typical fracture types in the Bashijiqike and Ahe formations, Kuqa Depression

(a) Unfilled tensile fracture, Well Keshen 3102, 8123 m, Bashijiqike Formation; (b) Unfilled shear fracture, Well Keshen 2-2-5, 6770 m, Bashijiqike Formation; (c) Calcite-filled tensile fracture, Well Keshen 207, 6876 m, Bashijiqike Formation; (d) Unfilled shear fracture, Well Dibe 5, 5842 m, Ahe Formation

巴什基奇克组裂缝以高角度构造缝为主，倾角多集中于 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ，其中高角度缝 ($>60^{\circ}$) 占比超过 70%。裂缝走向复杂多样，近东西向褶皱枢纽平行缝、北东向与北西向褶皱枢纽斜交缝以及近南北向褶皱枢纽垂直缝均有发育，反映多期构造应力场叠加的复杂破裂历史。裂缝类型以剪裂缝、张剪裂缝和张裂缝为主（图 7a、7b），张裂缝占比约 40%。裂缝线密度变化范围大，单井平均裂缝线密度主要介于 0.1~1.2 条/m 之间，局部密集段可达数条每米。裂缝充填程度差异明显，全充填、半充填和未充填裂缝分别占比 39%、29%和 32%。早期裂缝多见方解石、白云石、石英等胶结物半充填至全充填（图 7c），晚期裂缝多呈开启状态。巴什基奇克组裂缝发育特征呈现显著的南北分带、东西分段规律。

与巴什基奇克组裂缝特征相比，阿合组裂缝总体也以高角度构造缝为主，倾角主要介于 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，高角度缝 ($>60^{\circ}$) 占比超 75%。裂缝走向以近东西向枢纽平行缝与近南北向枢纽垂直缝为主，枢纽斜交缝次之。裂缝类型以剪裂缝和张剪裂缝为主（图 7d），张裂缝发育程度低于巴什基奇克组，仅约为 15%，这主要归因于迪北地区阿合组整体处于宏观单斜构造背景，褶皱形态不如克拉苏构造带巴什基奇克组显著，背斜弯顶外弧的张性应变及其相关的张裂缝相对有限。与巴什基奇克组相似，阿合组单井裂缝密度变化显著，主要介于 0.1~1.1 条/m 之间，局部密集段可达数条每米。裂缝充填程度高于巴什基奇克组，全充填、半充填和未充填裂缝分别占比 56%、12%和 32%，以方解石、铁方解石和少量石英胶结为主。阿合组裂缝发育同样

呈现南北分带特征，但是受钻井部署的限制，钻井主要集中在中部断块调整过渡带，裂缝整体较为发育，不同构造样式内裂缝发育程度差异明显。

3.1.2 裂缝剖面分布数值模拟

应力的分布和特征对裂缝发育起到重要的控制作用，在岩石力学参数测试、应力场数值模拟的基础上，基于莫尔-库仑剪切破坏准则与最大拉应力准则（Jaeger et al., 2007; Zoback, 2009），构建了裂缝因子 I 计算方法，得到典型剖面的 I 分布模型，综合判断裂缝发育情况，主要公式如下：

$$\text{张破裂系数: } I_t = \frac{-\sigma_3}{T_0} = \frac{-\sigma_3 + |\sigma_3|}{2T_0} \quad (\sigma_3 < 0)$$

$$\text{剪切破裂系数: } I_f = \frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2C \cos \varphi}$$

$$\text{张剪破裂综合系数: } I = \frac{(I_f + I_t) + |I_f - I_t|}{2} = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2C \cos \varphi} + \frac{-\sigma_3 + |\sigma_3|}{2T_0} + \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2C \cos \varphi} - \frac{-\sigma_3 + |\sigma_3|}{2T_0} \right|}{2}$$

其中， σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； T_0 为单轴抗拉强度； C 为内聚力； φ 为内摩擦角。

当 $I > 1$ 时，岩石发生破裂，且 I 值越大，破裂程度越强烈；当 $I < 1$ 时，岩石处于稳定状态。 $I_f \geq I_t$ 时以剪切破裂为主导，反之则以张性破裂为主导。

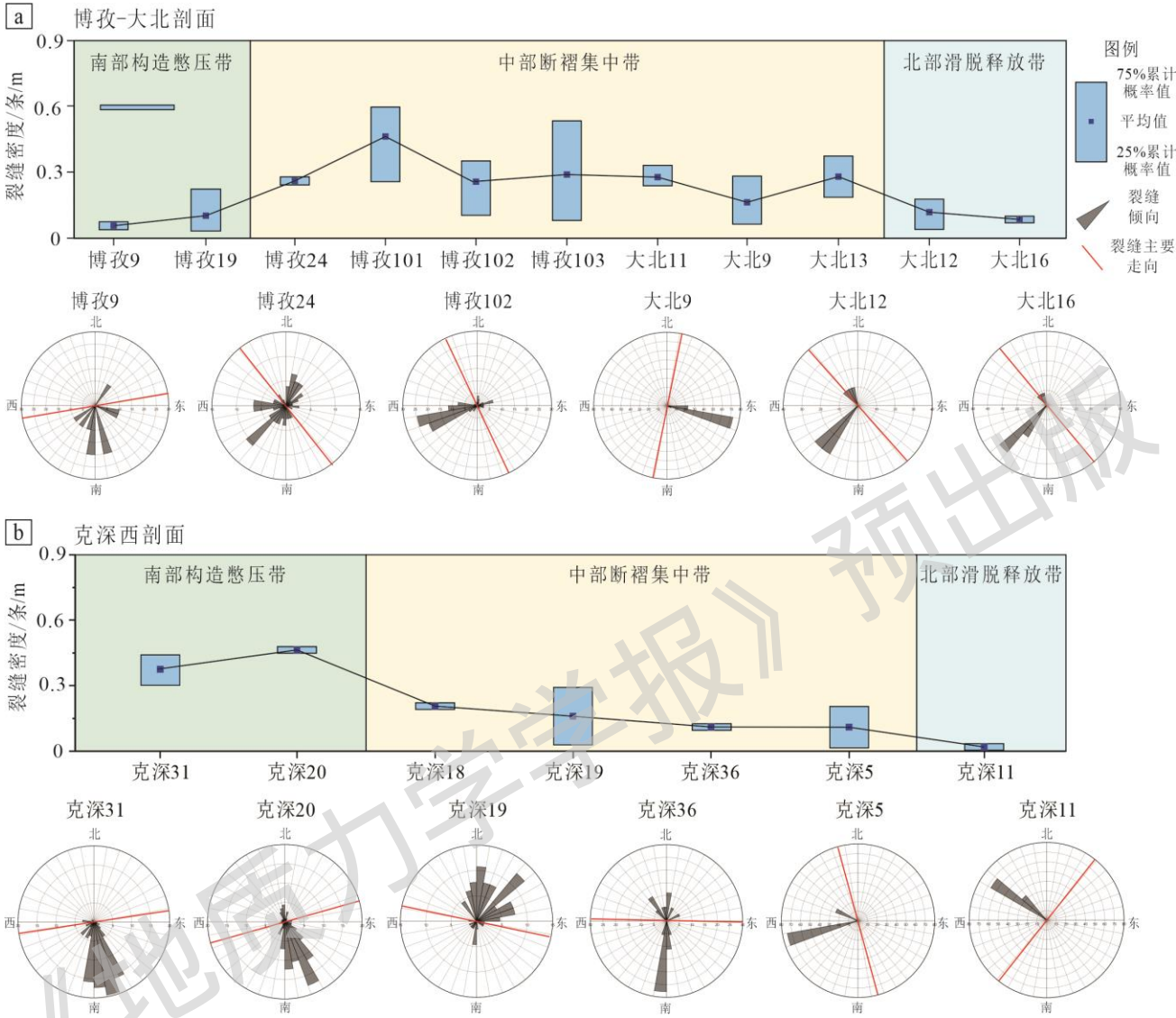
3.2 裂缝分带发育特征及差异性

3.2.1 北部滑脱释放带裂缝发育规律

博孜-大北-克深地区北部滑脱释放带巴什基奇克组裂缝发育程度较低（图 8a），以低密度的枢纽垂直缝和斜交缝为主，裂缝主要受控于走滑调节带和局部断层发育的影响。以博孜-大北地区大北 16 和大北 12 以及克深地区克深 6 和克深 11 等井区为例，单井裂缝密度介于 0.05~0.33 条/m，平均 0.19 条/m，有效裂缝密度 0.02~0.09 条/m，平均 0.06 条/m。该构造应力带以高角度构造裂缝为主，裂缝倾角多介于 $50^\circ \sim 75^\circ$ ，裂缝走向以近南北向褶皱枢纽垂直缝以及北西-南东向或北东-南西向枢纽斜交缝为主，近东西向枢纽平行缝较为少见。裂缝充填程度中等至较高，方解石半充填至全充填普遍。迪北地区北部滑脱释放带位于依奇克里克构造带附近，该构造应力带钻井资料较少，成像测井裂缝资料主要为依南 4 井，单井裂缝密度和有效裂缝密度分别仅为 0.02 和 0.01 条/m（图 9）。单井仅识别出 7 条裂缝，均为高角度构造裂缝，裂缝走向复杂，枢纽垂直缝、斜交缝、平行缝均有发育，无优势走向。同时，无充填缝和方解石充填缝也均可见。

裂缝因子数值模拟表明，该带巴什基奇克组随冲断构造向浅部抬升，现今应力总体降低，裂缝沿目的层呈连续或半连续条带状分布（图 10a）。宽缓翼部和远离断层的层段裂缝发育程度相对较低，而断层交切处、陡倾翼及构造高点附近可见局部高值。该带阿合组埋深减小，目的层形态相对平缓，裂缝以连续的低-中值为主，局部断层交切处和褶皱转折部位有所增强。该带现今应力已因构造抬升、断层滑动和剥蚀卸载

而明显释放。与巴什基奇克组相比，阿合组裂缝高值的分布范围较小，集中在高角度逆冲断裂和断弯褶皱附近，其局部构造控制作用更为显著（图 10b）。



a—博孜—大北剖面；b—克深西剖面

图 8 库车坳陷博孜—大北—克深地区白垩系巴什基奇克组裂缝密度和产状分布特征

Fig. 8 Characteristics of fracture density and orientation distribution in the Cretaceous Bashijiqi Formation in the Bozi-Dabei-Keshen area, Kuqa Depression

(a) Bozig-Dabei section; (b) Western Keshen section

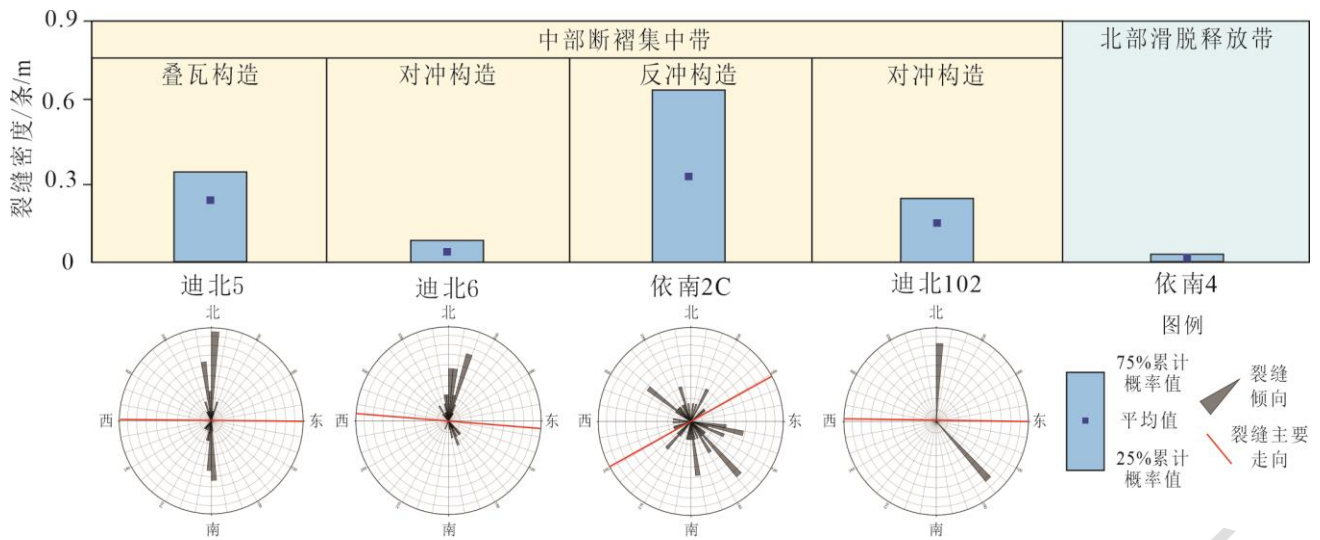
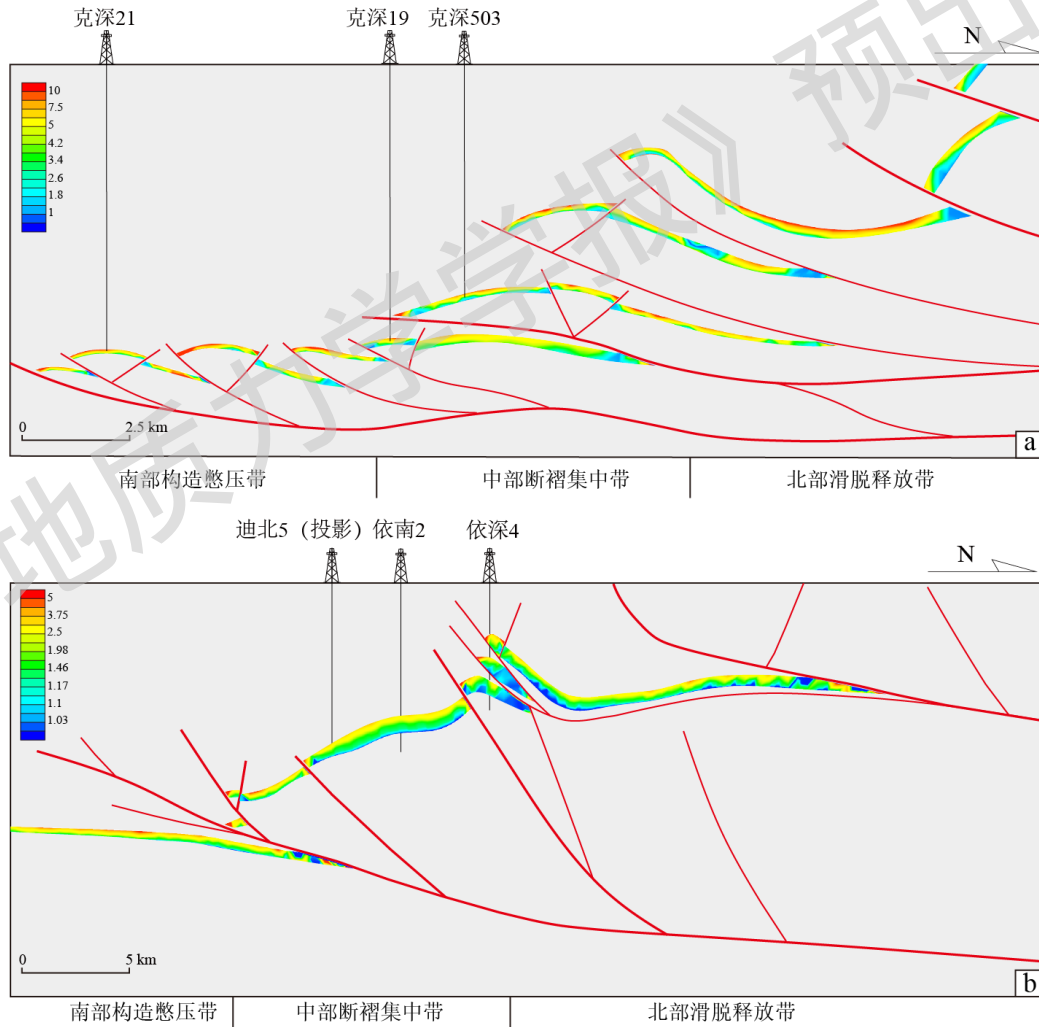


图9 库车坳陷迪北地区侏罗系阿合组裂缝密度和产状分布特征

Fig. 9 Characteristics of fracture density and orientation distribution in the Jurassic Ahe Formation in the Dibe area, Kuqa Depression



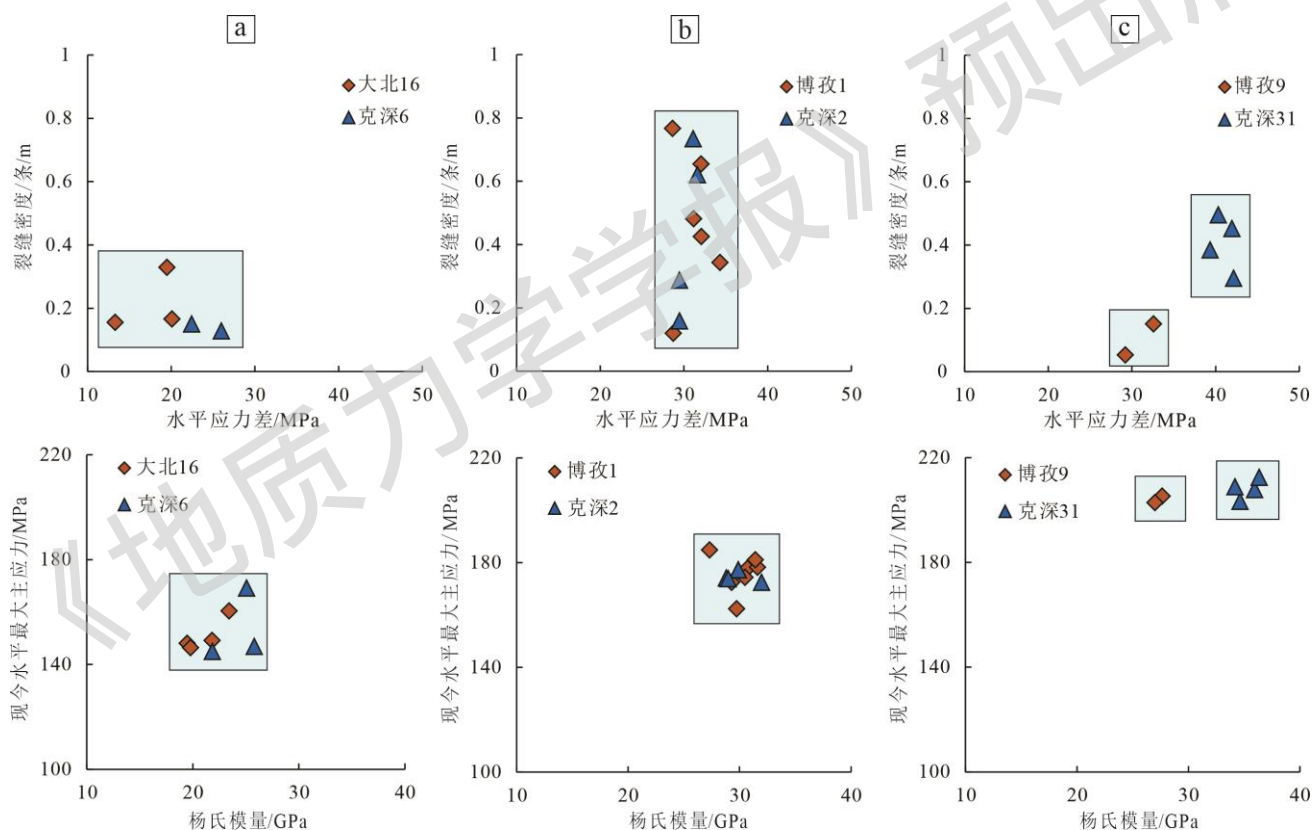
a—克深地区巴什基奇组；b—迪北地区阿合组

图10 库车坳陷不同地区裂缝因子分布剖面

Fig. 10 Fracture distribution profiles in different areas of the Kuqa Depression

(a) The Bashijiqi Formation of Keshen area; (b) The Ahe Formation of Dibe area

北部滑脱释放带裂缝发育程度较低的根本原因在于其特殊的应力演化背景。该带紧邻造山带前缘, 经历多期构造抬升与剥蚀卸载, 早期褶皱冲断阶段累积的构造应力得以充分释放。以巴什基奇克组为例, 水平最大主应力普遍低于 160 MPa, 水平应力差多小于 28 MPa, 较小的水平应力差难以满足岩石大规模脆性破裂所需的力学条件 (图 11a)。在此背景下, 裂缝的发育主要受局部构造因素控制, 而非区域褶皱变形主导。具体而言, 该带缺少背斜穹顶外弧张性应变相关的枢纽平行缝, 裂缝走向以近南北向枢纽垂直缝及各类枢纽斜交缝为主, 反映裂缝主要与近南北向走滑调节带以及斜交枢纽断层的局部应力集中有关, 而非褶皱枢纽平行方向的主应力释放。该带持续的应力释放与裂缝不发育的特征, 与其以原生孔隙保存为主的储层类型高度吻合。低现今应力水平与低杨氏模量共同指示弱古应力累积效应, 既抑制了裂缝的规模性发育, 又减弱了构造压实对储层孔隙的破坏。



a—北部滑脱释放带; b—中部断褶集中带; c—南部构造憋压带

图 11 库车坳陷博孜-大北-克深地区白垩系巴什基奇克组储层裂缝与应力组合类型

Fig. 11 Reservoir fracture and stress assemblage types of the Cretaceous Bashijiqi Formation in the Bozi - Dabei - Keshen area, Kuqa Depression

(a) Northern detachment-release zone; (b) Central fold-thrust concentrated zone; (c) Southern stress accumulation zone

3.2.2 中部断褶集中带裂缝发育规律

博孜-大北-克深地区中部断褶集中带处于应力由北向南的转换区，裂缝普遍较为发育（图 8b），具有裂缝密度较高、产状复杂的总体特征，裂缝兼具走滑调节-局部断层成因和褶皱变形成因。以博孜 1 和克深 2 等井区为例，裂缝密度变化较大，单井裂缝密度主要介于 0.1~1 条/m，平均 0.48 条/m，有效裂缝密度主要介于 0.05~0.6 条/m，平均 0.29 条/m。与北部滑脱释放带相比，相同之处在于中部断褶集中带裂缝也以高角度构造裂缝为主，裂缝倾角多介于 50°~80°。不同之处在于裂缝走向的复杂化，褶皱枢纽垂直缝、斜交缝和平行缝均有发育。博孜-大北剖面整体以枢纽垂直缝和斜交缝为主，克深西剖面偏北部的克深 5 井区以枢纽垂直缝为主，偏中南部的克深 36、克深 19 和克深 18 井区以枢纽斜交缝和平行缝为主。裂缝充填程度中等，包括方解石、白云石和石英充填。迪北地区主力钻井主要分布在中部断褶集中带，裂缝发育程度普遍强于北部滑脱释放带（图 9），但非均质性显著，单井裂缝密度和有效裂缝密度分别介于 0.08~0.61 条/米和 0.06~0.57 条/米。偏北部的依南 2C 井和迪北 102 井裂缝走向略复杂，尤其是依南 2C 井枢纽垂直缝、斜交缝和平行缝均有发育。偏南部的迪北 5 井和迪北 6 井裂缝走向集中，以枢纽平行缝为主。裂缝充填类型与巴什基奇克组相似，包括方解石、白云石和石英充填。

裂缝因子数值模拟表明，该带巴什基奇克组断层密集、褶皱曲率增大，裂缝横向变化最为显著（图 10a）。克深 19-克深 503 井区附近的裂缝高值主要分布于逆冲断层两侧、断层叠覆区以及背斜核部和翼部转折端，反映构造部位及局部应变集中共同控制了裂缝的发育。中部断褶集中带是阿合组裂缝最为发育、沿层变化最剧烈的区段（图 10b）。发育多条高角度逆冲断层和断弯褶皱，裂缝高值集中于断层交切与叠覆部位、背斜核部及翼部转折端，高、低值在短距离内交替出现，表明断层分割与褶皱差异变形的共同影响。

中部断褶集中带裂缝普遍发育的根本原因在于其处于应力由北向南传递的转换区，是区域应力场由北部释放向南部积聚过渡的关键构造位置。以巴什基奇克组为例，相比与北部滑脱释放带，该带应力显著增强，最大主应力主要介于 160~190 MPa，水平应力差普遍大于 30 MPa，差应力集中程度显著增高，为岩石大规模脆性破裂提供充分的力学条件（图 11b）。多期构造应力叠加导致裂缝走向趋于复杂化，博孜-大北剖面整体以枢纽垂直缝和斜交缝为主，反映走滑调节带和局部断层的影响仍然显著。克深西剖面自北向南由枢纽垂直缝为主逐渐过渡为枢纽斜交缝和平行缝为主，反映随着远离造山带，走滑调节带和局部断层的影响逐渐减弱，褶皱变形对裂缝走向的控制作用逐渐增强。迪北地区由北向南裂缝走向逐渐变为枢纽平行缝为主，同样反映褶皱变形对裂缝走向的控制作用随远离造山带而增强的趋势。中部断褶集中带较高现今应力水平、高水平应力差与高杨氏模量共同指示强古应力累积效应，虽然加剧了构造压实对储层孔隙的破坏，但是驱动了有效裂缝的规模性发育，形成裂缝发育但基质孔隙减少的孔隙-裂缝型储层。

3.2.3 南部构造憋压带裂缝发育规律

博孜-大北-克深地区南部构造憋压带位于克拉苏构造带南缘，处于构造应力由中部过渡带向南积聚的终端聚集区，该带裂缝发育程度呈现显著的东西分段性（图 8c），具有裂缝密度整体低、局部高以及裂缝产状以枢纽平行为主的总体特征，裂缝主要受控于褶皱变形成因模式。博孜-大北段和克深东段裂缝发育程度低，以博孜 8、博孜 9、克深 13 等井区为代表，单井裂缝密度均小于 0.2 条/m，平均为 0.01 条/m，有效裂缝密度均小于 0.08 条/m，平均为 0.04 条/m。克深西段裂缝发育程度高，以克深 20 和克深 31 井区为代表，单井裂缝密度主要介于 0.4~0.7 条/m，平均 0.49 条/m，有效裂缝密度主要介于 0.3~0.5 条/m，平均 0.37 条/m。裂缝以高角度构造缝为主，裂缝倾角多介于 45°~80°。相比于中部断褶集中带，南部构造憋压带裂缝走向稳定，以近东西向枢纽平行缝为主，伴随少量枢纽斜交缝，几乎不发育近南北向枢纽垂直缝。裂缝充填程度中等，包括以白云石充填为主，石膏、方解石和石英充填次之。对于迪北地区，南部构造憋压带钻井资料较少（图 9），裂缝因子数值表明，阿合组向盆地深部倾伏，裂缝整体以低-中值为主，仅在断层端部、断层下盘及构造坡折处局部增强（图 10b）。该带虽然现今应力较高，但较大的埋深和围压抑制了裂缝的大范围发育。

巴什基奇克组南部构造憋压带裂缝发育的东西分段性受控于该带特殊的应力演化背景。该带是区域应力由北向南传递的终端聚集区，水平最大主应力普遍大于 190 MPa，但差应力集中程度存在显著的东西分段差异，博孜-大北段和克深东段水平应力差主要在 30 MPa 左右，克深西段水平应力差普遍大于 40 MPa，导致后者裂缝发育程度显著强于前者（图 11c）。裂缝走向以近东西向枢纽平行缝为主，反映南部带远离造山带，走滑调节带和局部断层影响已基本消失，裂缝发育主要受褶皱变形控制。南部构造憋压带具有两类显著不同的应力-裂缝-孔隙组合类型，博孜-大北段和克深东段具有高现今应力水平、中等水平应力差和杨氏模量，表明现今的高应力状态形成时间较晚，尚未对储层产生充分的构造改造，因而未能驱动大规模裂缝发育和构造压实减孔，形成原生孔隙保存型储层。克深西段具有高现今应力水平、极高水平应力差和杨氏模量，表明现今的高应力状态形成时间较早，使得储层构造压实减孔严重，同时促进大量裂缝和微裂缝发育，形成裂缝性储层为主。

4 典型构造样式应力分布与裂缝发育特征

4.1 典型构造样式类型及其应力和裂缝特征

自天山内部向盆地发育了多条逆冲叠瓦状断裂，近山位置主要为前石炭系基底地层卷入的厚皮构造。向盆地方向，博孜-大北-克深地区主要发育远距离滑脱的三层逆冲构造体系（图 5），盆地深部以盖层内发育的薄皮构造为主，由深至浅为发育在三叠系-下侏罗统的逆冲叠瓦状构造及反冲构造组合，中侏罗统一白

垩统逆冲叠瓦状构造及反冲和对冲构造组合，以及始新统一第四系的反冲构造，三层构造体系整体呈现由山向盆的前展式发育。受库姆格列木群巨厚膏盐层影响，盐上、盐下呈现分层变形特征，且变形模式有所差异。在克深地区，膏盐层分隔盐上层发育反冲构造，而盐下层为两层叠瓦状构造及反冲和对冲构造组合，主要勘探目的层下白垩统巴什基奇克组与膏盐对接，位于盐下逆冲构造体系顶部；向盆地前部（西秋 2—羊塔 10）展现为盐上反冲构造及盐下基底断裂形成的高角度逆冲断裂的组合样式。在迪北地区（图 6），构造发育特征与博孜-大北-克深地区存在显著差异，自造山带向盆地发育多条基底卷入的高角度逆冲断裂，向深部并入到大型低角度逆冲断裂之上，构造样式以弱发育的叠瓦状构造及反冲构造为主。库姆格列木群膏盐层较薄，对构造发育的分隔作用较弱，而吉迪克组厚度稍大，具有膏盐层发育，具有一定的构造分层作用，主要体现在向盆地一侧（迪那 202）盐上层为逆冲断裂及断弯褶皱，盐下层为弱叠瓦状构造。

剖面构造与应力分布特征的研究表明，库车前陆区近造山带的白垩系巴什基奇克组、侏罗系阿合组处于强烈构造变形区，应力变化显著，主要构造样式为叠瓦状构造、反冲构造及对冲构造。在这种强应力背景下，构造作用对储层发育具有明显的控制作用，因此，探讨不同构造样式、不同位置的应力分布特点对于理解储层发育规律具有重要意义。通过构建无上覆岩层的数值模拟理论模型表明，对于不同构造样式下，应力的分布可具有显著差异（图 12）。

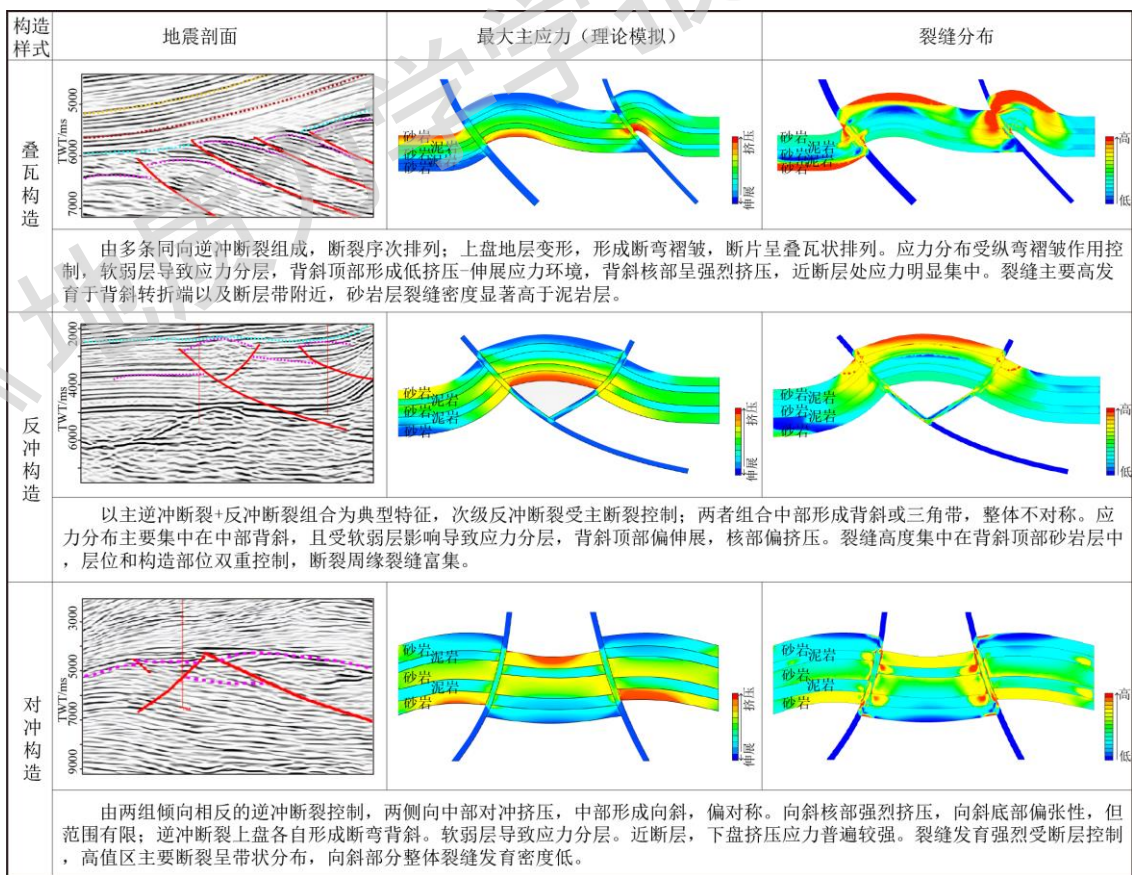


图 12 库车前陆区典型构造样式及应力和裂缝分布理论模型

Fig. 12 Theoretical Model of Typical Structural Styles and Stress and Fracture Distribution in the Kuqa Depression

对于叠瓦状构造,在构造发育特征上主要由多条序次排列的逆冲断裂组成,产状具有相似性,断裂上盘地层强烈弯曲变形,形成断弯褶皱,断片叠瓦状排列。在应力分布上,整体受到纵弯褶皱作用控制,背斜顶部形成低挤压或伸展应力环境,背斜核部呈强烈挤压,近断层处应力集中明显。软弱层的存在导致应力分布具有明显分层性。由于叠瓦状构造所产生的背斜多具有不对称性,向陡翼一侧可出现更强烈的应力集中。裂缝发育相应具有明显的构造分带性和岩性分层性,主要集中于背斜顶部、翼部转折端及逆冲断层邻近部位,并沿断层呈带状分布;陡翼一侧因应力集中更强,裂缝通常较缓翼一侧更为发育。不同岩性层段的裂缝发育程度存在差异,砂岩层中的裂缝密度总体高于泥岩等软弱层,软弱层对裂缝的垂向扩展具有一定阻隔作用。

反冲构造是由主干逆冲断裂和次级派生逆冲断裂组成的,两者中部形成断弯背斜或三角带,整体较对称。应力主要在背斜部位集中,背斜顶部偏伸展,核部偏挤压,软弱层的存在可以导致应力不均匀分布而呈现与地层产状相似的条带状特点。裂缝主要密集发育于背斜顶部、两侧翼部转折端以及主干逆冲断裂和反冲断裂周缘,表现出受构造部位和层位共同控制的特征。背斜顶部的低挤压-伸展应力环境有利于张裂缝的形成,而核部强挤压环境中裂缝以剪切破裂为主;软弱层则使裂缝在纵向上呈现分层、分带发育。

对于对冲构造,由两组倾向相反的逆冲断裂控制而形成,两者共用下盘,受强烈侧向挤压影响,下盘应力出现显著集中,整体应力偏大,中部向斜核部强烈挤压,底部偏张性,但范围有限。裂缝发育受两组逆冲断裂的控制最为明显,高密度裂缝主要沿断层及其邻近地层呈带状分布,在断层上盘弯曲变形和应力集中部位尤为发育。中部向斜核部虽然挤压应力较强,但整体裂缝密度通常低于两侧断裂带;向斜底部局部偏张性区域可形成一定数量的张裂缝,但其发育范围相对有限。

4.2 构造样式控缝及其对油气产能的影响

构造样式控缝在迪北地区尤为显著(图9、图13),反冲构造裂缝最为发育,例如迪北104井、依南2C井和迪西1井裂缝密度为0.33~0.61条/m,开启和半开启裂缝占比高,有效裂缝密度为0.21~0.57条/m,裂缝密集段的局部有效裂缝密度可达1~2条/m。裂缝产状复杂,走向以近东西向枢纽平行缝为主,同时发育北东向枢纽斜交缝和少量近南北向枢纽垂直缝。叠瓦构造裂缝中等发育,如迪北5井裂缝线密度为0.25条/m,有效裂缝密度为0.12,以近东西向枢纽平行缝为主。对冲构造裂缝发育程度最低,如迪北102井和迪北6井裂缝密度均低于0.2条/m,有效裂缝密度分别为0.01条/m和0.07条/m。对冲构造受强烈侧向挤压影响,下盘应力集中导致岩石整体致密化,裂缝开度小、延伸短,裂缝有效性较差。

迪北地区阿合组储层基质物性普遍较低,有效储层以裂缝-孔隙型为主,构造裂缝作为油气运移通道和储集空间,其发育特征和分布规律是控制油气开发效果的重要因素。图13c表明裂缝密度与油气产量的显

著正相关关系。反冲构造发育区，裂缝密度高、有效性好，多组裂缝相互切割形成连通的裂缝网络，显著提升储层的渗流能力，测试产气量高或获得工业气流。叠瓦构造发育区，裂缝中等发育，裂缝网络连通性一般，储层渗透性有所改善，单井测试产气量中等。对冲构造发育区，缝密度低、开度小、延伸短，主要依靠基质孔隙作为渗流通道，测试产气量低或无工业产能。结果表明，裂缝网络的连通性和有效性是决定迪北地区阿合组致密砂岩气藏产能的重要要素，裂缝发育程度越高、连通性越好，储层渗流能力越强，产能越高。因此，构造样式的识别与裂缝发育区的预测是迪北地区天然气甜点评价和井位部署的关键依据。

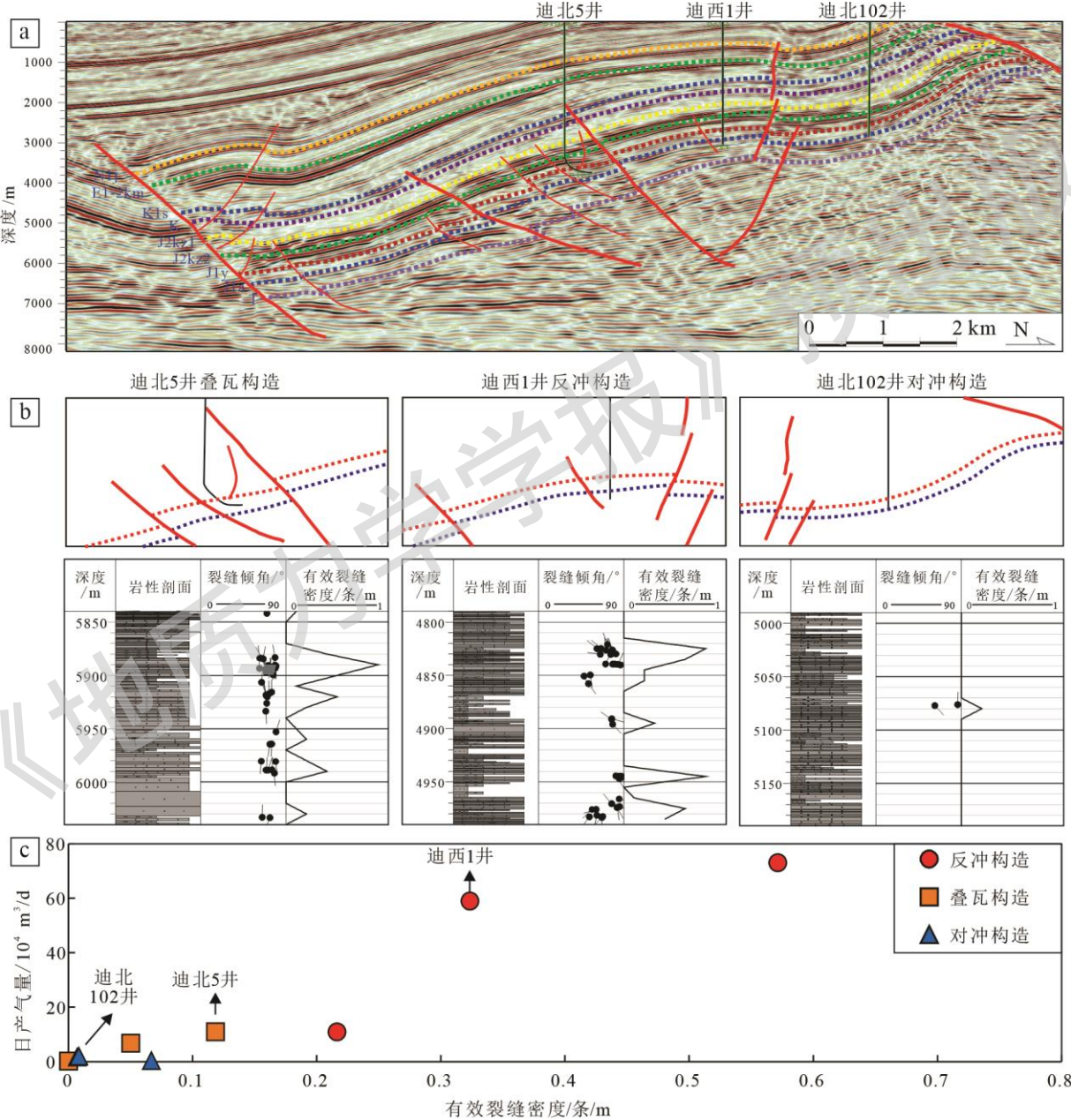


图 13 库车凹陷迪北地区阿合组典型构造样式与裂缝特征及其与产能的关系

a—构造剖面与典型构造样式；b—裂缝产状特征；c—有效裂缝密度与单井产能关系

Fig. 13 Typical structural styles, fracture characteristics and their relationship with productivity of the Ahe Formation in the Dibe area,

(a) Structural section and typical structural styles; (b) Fracture orientation characteristics; (c) Relationship between effective fracture density and single-well productivity

5 结论

(1) 库车坳陷克拉苏构造带巴什基奇克组与迪北地区阿合组应力场呈现由北向南的宏观三分带规律，自北向南依次为北部滑脱释放带、中部断褶集中带和南部构造憋压带，各带应力非均质性受断裂叠加、褶皱变形与膏盐层滑脱共同控制。

(2) 裂缝密度与产状随应力分带呈规律性变化，北部滑脱释放带裂缝密度低、以枢纽垂直缝和斜交缝为主，中部断褶集中带裂缝普遍发育、产状复杂，南部构造憋压带呈东西分段性、以枢纽平行缝为主；裂缝产状自北向南由垂直缝和斜交缝为主渐变为平行缝为主，反映由走滑调节和局部断层成因向褶皱变形成因的转变。

(3) 构造样式对局部应力分异和裂缝网络具有关键调节作用，反冲构造裂缝最发育且连通性好，叠瓦构造次之，对冲构造裂缝最不发育且有效性差；裂缝发育程度与单井产能呈正相关关系，有效裂缝网络是致密储层渗流能力的关键控制因素，构造样式识别与裂缝发育区预测是甜点评价和井位部署的重要依据。

作者贡献声明：操应长、刘寅、王健、孙小龙负责论文构思、数据分析、研究方法和论文初稿撰写；刘寅、王健、孙小龙负责数据整理分析、绘图；郇志鹏负责论文修改审核、数据整理；王健、刘寅、孙小龙负责研究方法和论文修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: CAO Yingchang, LIU Yin, WANG Jian, and SUN Xiaolong contributed to conceptualization, data analysis, methodology, and the initial drafting of the manuscript. LIU Yin, WANG Jian, and SUN Xiaolong were responsible for data curation, formal analysis, and visualization (figure preparation). HUAN Zhipeng participated in manuscript revision, critical review and data curation. WANG Jian, LIU Yin, and SUN Xiaolong contributed to methodology refinement and subsequent manuscript revisions. All authors have read and approved the final manuscript and agree to its submission and publication.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

- DU H, MA B Y, WANG C C, et al., 2025. Pore-fracture fusion modeling method for ultra-deep clastic reservoirs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 173: 107307.
- FENG J W, SUN J F, ZHANG Y J, et al., 2020. Control of fault-related folds on fracture development in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 41(3): 543-557. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z K, GAO Z Y, FENG X L, et al., 2026. Analysis of heavy mineral assemblages and clastic components in sandstones and their implications for provenance transport pathways: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen area, Kuqa Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 28(4): 1461-1477. (in Chinese with English abstract)
- JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R, 2007. *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th Edition [M]. Wiley-Blackwell, 1-488.
- LAI J, WANG G W, CHAI Y, et al., 2017. Deep burial diagenesis and reservoir quality evolution of high-temperature, high-pressure sandstones: Examples from Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen area, Kuqa depression, Tarim basin of China[J]. *AAPG Bulletin*, 101(6): 829-862.
- LI J F, ZHAO Y, PEI J L, et al., 2017. Cenozoic marine sedimentation problem of the Tarim Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(1): 141-149. (in Chinese with English abstract)
- LIU C, ZHANG R H, ZHANG H L, et al., 2017. Genesis and reservoir significance of multi-scale natural fractures in Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(3): 495-504.
- LIU C, ZHAO J L, ZHANG X Q, et al., 2019. Effect of stress vertical zoning on reservoirs: An example from Kuqa foreland thrust belt [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 42(3): 21-31. (in Chinese with English abstract)
- LUO X R, YANG H J, WANG Z L, et al., 2023. Heterogeneity characteristics of clastic reservoirs and hydrocarbon accumulation mode in deep-ultradeep basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2802-2819. (in Chinese with English abstract)
- MO T, GUO H B, LIU Z J, et al., 2025. Deformation Characteristics of Detachment in Gypsum Salt Series: A Case Study of the Kuqa Foreland Based on Sandbox Modeling [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 49(3): 507-519. (in Chinese with English abstract)

- WANG K, DAI J S, FENG Z D, et al., 2013. Calculation model of equivalent rock mechanical parameters of sand-mud interbeds and its application[J]. *Journal of Geomechanics*, 19(2): 143-151. (in Chinese with English abstract)
- WANG K, ZHANG R H, WANG J P, et al., 2022. Comparison of reservoir characteristics between Jurassic Ahe Formation and Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression of Tarim Basin and implications for exploration and development[J]. *Natural Gas Geoscience*, 33(4): 556-571. (in Chinese with English abstract)
- WANG K, ZHANG R H, YU C F, et al., 2020. Characteristics and controlling factors of Jurassic Ahe reservoir of the northern tectonic belt, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(5): 623-635. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q H, XU Z P, ZHANG R H, et al., 2024. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 15-32. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q H, YANG H J, YANG W, 2025. New progress and future exploration targets in petroleum geological research of ultra-deep clastic rocks in Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 70-83. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q H, ZHANG R H, YANG X Z, et al., 2022. Major breakthrough and geological significance of tight sandstone gas exploration in Jurassic Ahe Formation in Dibei area, eastern Kuqa depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(8): 1049-1064. (in Chinese with English abstract)
- XIAO J X, LIN C S, LIU J Y, 2005. Depositional Palaeogeography of Cretaceous of Kuqa Depression in Northern Tarim Basin [J]. *Geoscience*, 19(2): 253-260. (in Chinese with English abstract)
- XU K, LIU J S, ZHANG H, et al., 2024. Geological and engineering applications of full-stratum geomechanical modeling in complex structural areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 31(5): 195-208. (in Chinese with English abstract)
- XU K, YANG H, ZHANG H, et al., 2022. Fracture effectiveness evaluation in ultra-deep reservoirs based on geomechanical method, Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 215: 110604.
- YANG H J, XU Z P, YANG X Z, et al., 2026. Progress in oil and gas exploration during the 14th Five-Year Plan period and future exploration orientation in Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 31(1): 80-

99. (in Chinese with English abstract)

- YANG H J, ZHANG R H, YANG X Z, et al., 2018. Characteristics and reservoir improvement effect of structural fracture in ultra-deep tight sandstone reservoir:A case study of Keshen Gasfield, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 29(7): 942-950. (in Chinese with English abstract)
- YUAN H, JU W, ZHANG H, et al., 2025. Differential structural styles and their influence on in-situ stress distribution in Kelasu tectonic belt, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 47(6): 1255-1267. (in Chinese with English abstract)
- ZENG L, WANG H, GONG L, et al., 2010. Impacts of the tectonic stress field on natural gas migration and accumulation: A case study of the Kuqa Depression in the Tarim Basin, China[J]. *Marine Petroleum Geology*, 27: 1616–1627.
- ZHANG G J, LIU J S, XU K, et al., 2024. Characteristics and effectiveness of deep and ultradeep tight sandstone fractures; insights from geologic and geophysical data analysis[J]. *Geophysics*, 89(5): B383-B399.
- ZHANG H L, SHOU J F, CHEN Z L, et al., 2002. Sedimentary characteristics and sandstone body distribution of the lower Jurassic in Kuqa Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 4(3): 47-58. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H L, ZHANG R H, YANG H J, et al., 2014. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: A case study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(2): 158-167. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, PEI C Y, WANG Z M, et al., 2026. A calculation method of the reservoir Biot coefficient based on the Griffith criterion and the equivalent inclusion theory [J]. *Journal of Geomechanics*, 32(2): 481-490. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, ZHANG G J, XU K, et al., 2024. Characteristics of stress state transition and its geological and mechanical responses in Kuqa Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(5): 177-194. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG R H, WEI G Q, WANG K, et al., 2021. Tectonic thrust nappe activity and sandstone rock response characteristics in foreland thrust belt:A case study of Middle and Lower Jurassic,Kuqa Depression,Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2256-2270. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG R H, YANG H J, WANG J P, et al., 2014. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low-porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 35(6): 1057-1069. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG R H, ZENG Q L, WANG K, et al., 2020. New progress in the theory and technology of tectonic diagenesis on reservoir and the geological significance of ultra-deep oil and gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 41(10): 1278-1292. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J Q, CHENG X G, CHEN W L, et al., 2026. Characteristics and Numerical Simulation Analysis of Subsalt Overthrust Belts in Middle Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression [J]. *Earth Science*, 51(1): 317-328. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU S J, ZHANG R H, YU C F, et al., 2026. Main controlling factors of Jurassic Ahe Formation tight sandstone reservoirs in the Dibei Area, Kuqa Depression [J/OL]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 1-14 [2026-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1328.P.20260526.1759.006>. (in Chinese with English abstract)
- ZHU W, MONTÉSI L G J, WONG T F, 2002. Effects of stress on the anisotropic development of permeability during mechanical compaction of porous sandstones[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 200: 119-136.
- ZOBACK M D, 2009. *Reservoir Geomechanics* [M]. Cambridge University Press, 1-452.
- ZU K W, ZENG L B, ZHAO X Y, et al., 2014. Discussion on development models of the shearing fractures in fault bend folds[J]. *Journal of Geomechanics*, 20(1): 16-24. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 冯建伟, 孙建芳, 张亚军, 等, 2020. 塔里木盆地库车坳陷断层相关褶皱对裂缝发育的控制[J]. *石油与天然气地质*, 41(3): 543-557.
- 郭泽坤, 高志勇, 冯信苹, 等, 2026. 砂岩重矿物组合与碎屑组分特征分析及对物源通道的指示: 以库车坳陷克深地区白垩系巴什基奇克组为例[J]. *古地理学报*, 28(4): 1461-1477.
- 李建锋, 赵越, 裴军令, 等, 2017. 塔里木盆地新生代海相沉积问题[J]. *地质力学学报*, 23(1): 141-149.
- 刘春, 赵继龙, 章学歧, 等, 2019. 应力垂向分带对储层的控制作用——以库车前陆冲断带为例[J]. *天然气勘探与开发*, 42(3): 21-31.
- 罗晓容, 杨海军, 王震亮, 等, 2023. 深层—超深层碎屑岩储层非均质性特征与油气成藏模式[J]. *地质学*

报, 97(9): 2802-2819.

莫涛, 郭虹兵, 刘恣君, 等, 2025. 软弱膏盐层系滑脱构造变形特征: 以库车前陆盆地砂箱物理模拟为例 [J]. 大地构造与成矿学, 49(3): 507-519.

王珂, 戴俊生, 冯阵东, 等, 2013. 砂泥岩间互地层等效岩石力学参数计算模型及其应用 [J]. 地质力学学报, 19(2): 143-151.

王珂, 张荣虎, 王俊鹏, 等, 2022. 塔里木盆地库车坳陷侏罗系阿合组与白垩系巴什基奇克组储层特征对比与勘探开发启示[J]. 天然气地球科学, 33(4): 556-571.

王珂, 张荣虎, 余朝丰, 等, 2020. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带侏罗系阿合组储层特征及控制因素 [J]. 天然气地球科学, 31(5): 623-635.

王清华, 张荣虎, 杨宪彰, 等, 2022. 库车坳陷东部迪北地区侏罗系阿合组致密砂岩气勘探重大突破及地质意义[J]. 石油学报, 43(8): 1049-1064.

王清华, 徐振平, 张荣虎, 等, 2024. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力 [J]. 石油学报, 45(1): 15-32.

王清华, 杨海军, 杨威, 2025. 库车坳陷超深层碎屑岩油气地质研究新进展和下步勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 52(1): 70-83.

肖建新, 林畅松, 刘景彦, 2005. 塔里木盆地北部库车坳陷白垩系沉积古地理[J]. 现代地质, 19(2): 253-260.

徐珂, 刘敬寿, 张辉, 等, 2024. 复杂构造区全层系地质力学建模及其地质与工程应用[J]. 地学前缘, 31(5): 195-208.

杨海军, 张荣虎, 杨宪彰, 等, 2018. 超深层致密砂岩构造裂缝特征及其对储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田白垩系为例[J]. 天然气地球科学, 29(7): 942-950.

杨海军, 徐振平, 杨宪章, 等, 2026. 塔里木盆地“十四五”油气勘探进展及未来勘探方向 [J]. 中国石油勘探, 31(1): 80-99.

袁航, 鞠玮, 张辉, 等, 2025. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带差异构造样式及其对地应力分布的影响[J]. 石油实验地质, 47(6): 1255-1267.

赵佳琦, 程晓敢, 陈维力, 等, 2026. 库车坳陷克拉苏构造带中段盐下逆掩推覆带特征与数值模拟[J]. 地球科学, 51(1): 317-328.

张辉, 张冠杰, 徐珂, 等, 2024. 库车坳陷应力状态转换特征及其地质与力学响应[J]. 地学前缘, 31(5):

177-194.

张辉, 裴晨阳, 王志民, 等, 2026. 基于格里菲斯准则及等效夹杂理论的储层 Biot 系数计算方法[J]. 地质力学学报, 32(2): 481-490.

张惠良, 寿建峰, 陈子料, 等, 2002. 库车坳陷下侏罗统沉积特征及砂体展布[J]. 古地理学报, 4(3): 47-58.

张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等, 2014. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价——以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油勘探与开发, 41(2): 158-167.

张荣虎, 曾庆鲁, 王珂, 等, 2020. 储层构造动力成岩作用理论技术新进展与超深层油气勘探地质意义[J]. 石油学报, 41(10): 1278-1292.

张荣虎, 魏国齐, 王珂, 等, 2021. 前陆冲断带构造逆冲推覆作用与岩石响应特征——以库车坳陷东部中一下侏罗统为例[J]. 岩石学报, 37(7): 2256-2270.

张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 等, 2014. 库车坳陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义[J]. 石油学报, 35(6): 1057-1069.

周世杰, 张荣虎, 余朝峰, 等, 2026. 库车坳陷迪北地区侏罗系阿合组致密砂岩储层主控因素[J/OL]. 海相油气地质, 1-14 [2026-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1328.P.20260526.1759.006>.

祖克威, 曾联波, 赵向原, 等, 2014. 断层转折褶皱剪切裂缝发育模式探讨 [J]. 地质力学学报, 20(1): 16-24.