doi:10.3799/dqkx.2025.295

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

赵佳琦[1]，程晓敢[2,3*]，陈维力[1]，张鹏[2,3]，潘杨勇[1]，陈龙[2,3]，肖文[1]，
范坤宇[1]，魏疆宁[1]

1.中国石油塔里木油田分公司，新疆 库尔勒 841000
2.浙江大学地球科学学院，浙江 杭州 310027
3.教育部含油气盆地构造研究中心，浙江 杭州 310027

摘要：逆掩推覆带具有重要的油气勘探价值，为了搞清库车坳陷克拉苏构造带中段盐下逆掩推覆带特征和形成机制，通过对地震剖面的精细解释与离散元数值模拟，揭示克拉苏构造带中段盐下发育博孜25和克深5西两个逆掩推覆带，且其空间发育和古近系盐湖分布、先存盐底辟构造之间存在耦合关系。膏盐岩厚度发生突变的分隔两个盐湖的凸起前端为应力集中区域，利于大规模逆掩构造的优先发育；盐底辟的持续发育为大规模逆掩推覆构造提供了变形空间。逆掩推覆构造下盘是今后克拉苏构造带发现或重新落实巴什基奇克组圈闭的重点区域。

关键词：库车坳陷；克拉苏构造带；逆掩推覆带；盐湖；盐底辟；离散元数值模拟

中图分类号：P542; TE132　　**收稿日期：**2025-09-08

Characteristics and Numerical Simulation Analysis of Subsalt Overthrust Belts in the middle of Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression

Zhao Jiaqi[1]，Cheng Xiaogan[2,3*]，Chen Weili[1]，Zhang Peng[2,3]，Pan Yangyong[1]，Chen Long[2,3]
Xiao Wen[1], Fan Kunyu[1], Wei Jiangning[1]

1.PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China
2.School of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
3.Structure Research Center of Oil & Gas Bearing Basin of Ministry of Education, Hangzhou 310027, China

Abstract: Overthrust belts are of significant importance for hydrocarbon exploration. To elucidate the characteristics and formation mechanisms of the subsalt overthrust belts in the middle Kelasu structural belt, Kuqa Depression, we conducted detailed seismic profile interpretation combined with discrete element numerical modeling. The results reveal the development of two major subsalt overthrust belts, Bozi 25 and Keshen 5 West, in the middle Kelasu structural belt, and demonstrate that their spatial distribution is closely coupled with the Paleogene salt-lake distribution and pre-existing salt diapiric structures. The frontal uplift separating the two salt lakes, where abrupt variations in gypsum-salt layer thickness occur, acts as a stress concentration zone which facilitates the preferential propagation of large-scale overthrust structures. Moreover, the progressive growth of salt diapirs provides additional accommodation space for the development of these large-scale overthrust systems. These findings highlight the footwalls of overthrust structures as key targets for future hydrocarbon exploration and for identifying or re-evaluating Bashijiqike Formation traps within the Kelasu structural belt.

基金项目：国家自然科学基金联合基金项目“环青藏高原盆山体系动力学与天然气富集机理”(U22B6002)。
作者简介：赵佳琦（1995-），男，工程师，主要从事石油地质综合研究及油气勘探工作。Email：13437271853@163.com，ORCID: 0009-0003-5798-1962
通讯作者：程晓敢（1974-），男，博士，教授，博士生导师，主要从事盆地构造研究。Email：chengxg@zju.edu.cn, ORCID: 0000-0002-0295-2158

Key Words: Kuqa Depression; Kelasu structural belt; Overthrust belt; Salt-lake; Salt diapirism; Discrete element method

前陆盆地是世界上油气资源丰富、大油气田发现较多的盆地之一（DeCelles and Giles, 1996; 贾承造等，2005）。前陆冲断带作为前陆盆地的主要构造单元，是前陆盆地最重要的油气富集带（Macqueen and Leckie, 1992; 易士威等，2023）。而正因为上世纪 70 年代北美落基山地区在逆掩推覆体下盘取得重大油气发现，前陆冲断带的油气勘探才逐渐成为国际石油勘探的重要领域（Robbie, 1981; 宋双等, 2009）。随后国外的喀尔巴阡山和扎格罗斯山等山前（Price, 1981；Lafargue, *et al*., 1994; Kordi, 2019），以及国内的酒泉盆地南缘、四川盆地西缘、准噶尔盆地西北缘（贾承造等, 2005; Jia *et al*., 2006; 杨树锋, 2007； Wen *et al*., 2017）等众多逆掩推覆构造带获得油气田的发现。

逆掩推覆构造通常是指断层倾角较小、位移在数公里以上的构造。与前面提到的地表大规模逆掩推覆构造不同，库车坳陷克拉苏构造带发育盐下深层、规模相对较小的逆掩推覆构造，主要表现为地震剖面揭示出古近系库姆格列木群膏盐岩之下的中生界上下叠置，断裂上盘沿着膏盐岩低角度逆掩推覆数公里（杨海军等，2020；龚鑫，2022；谢会文等，2024）。白垩系巴什基奇克组为克拉苏构造带主要勘探层系，但随着勘探工作的不断深入，新发现的圈闭数量有限，且圈闭规模普遍较小，急需寻找新的勘探领域或新的勘探层系。近年来，克拉苏构造带已在逆掩推覆带之下发现博孜 25 等气藏和克深 5 西众多构造圈闭，显示出逆掩推覆构造具有重要的勘探价值。

克拉苏构造带西部阿瓦特段逆掩推覆构造及形成机制前人已经做了深入研究（吴珍云等，2022；刘恣君等，2024；谢会文等，2024），但克拉苏构造带不同区段在构造样式及地应力分布方面存在显著差异（徐振平等，2024），使得西部阿瓦特段的研究认识难以直接外推至构造带中部。同时由于多期构造活动的影响，博孜段-克深段盐下逆掩推覆构造叠加改造明显，现今构造样式难以对应单一构造阶段，导致构造解释具有较强的多解性，逆掩推覆构造的分布规律及其形成机制尚未形成统一、系统的认识。在此背景下，有利构造圈闭的空间展布、几何形态及封闭条件难以准确刻画，有效圈闭位置预测存在较大不确定性，从而制约了该区油气勘探的进一步推进。本文通过对地震剖面的精细解释与离散元数值

模拟，建立克拉苏构造带中部盐下逆掩推覆带的分布特征，探讨其形成机制，从而指导该领域油气勘探。

1 地质概况

库车坳陷位于塔里木盆地北部南天山山前（图 1a），是一个以中-新生界陆相沉积为主的再生前陆盆地（贾承造，1999；何登发等，2005；张荣虎等，2025）。其内部可分为北部构造带、克拉苏构造带、秋里塔格构造带、拜城凹陷、阳霞凹陷和前缘隆起等次级构造带（谢文会等，2012；刘立炜等，2022）。

克拉苏构造带位于库车坳陷北部，自北向南主要发育克北断裂（F_{KB}）、博孜-克拉断裂（F_{BK}）、克拉苏断裂（F_{KLS}）、克深断裂（F_{KS}）和拜城断裂（F_{BC}）5 条一级断裂，自西向东根据构造特征的差异可划分为阿瓦特段、博孜段、大北段、克深段和克拉段（能源等，2012；王清华等，2024）（图 1b）。

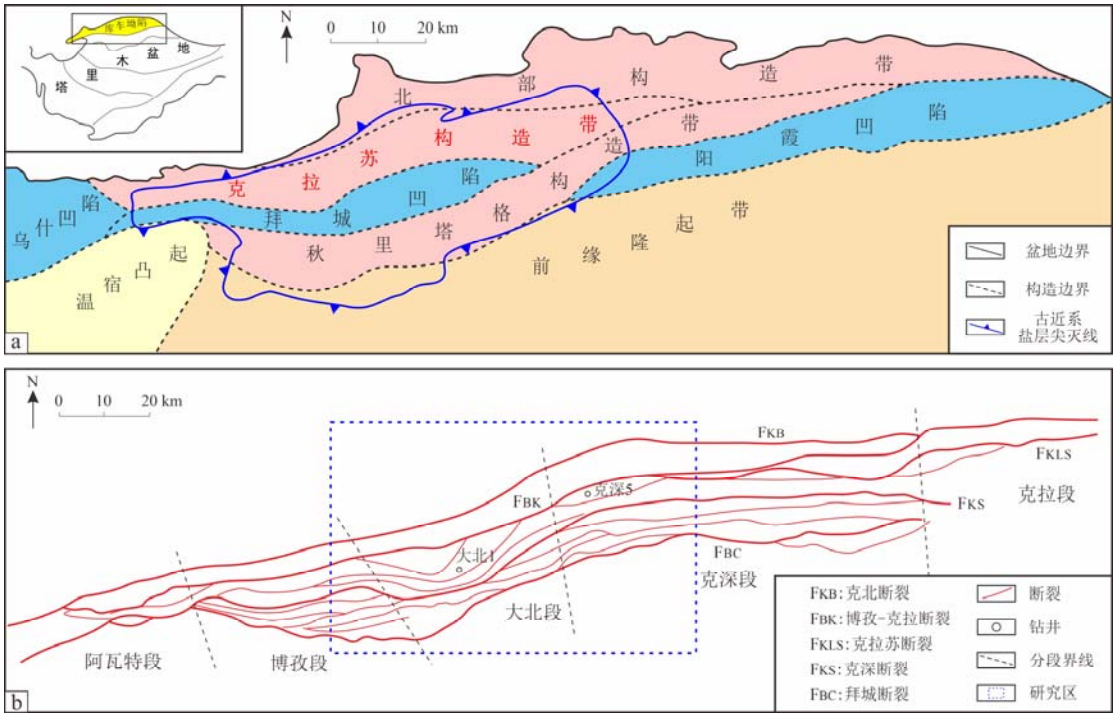

图 1 库车坳陷构造单元分布图（a）和克拉苏构造带断裂平面分布图（b）（据王清华等，2025 修改）

Fig.1 (a) Structural framework of Kuqa Depression, (b) Fault system of Kelasu structural belt

库车坳陷发育古生界、中生界及新生界沉积（图 2），三叠系以扇三角洲-湖泊沉积为主，形成广泛分布的三叠系烃源岩；侏罗系-白垩系进入伸展环境，发育大面积陆相含煤沉积及多套砂岩储层；古近系沉积受干旱气候与半封闭蒸发环

境影响，形成巨厚膏盐岩，为区域性优质盖层；新近系-第四系受南天山挤压抬升影响，形成快速沉降、厚层冲积-河湖相沉积（何登发等，2009）。其中古近系库姆格列木群（$E_{1\text{-}2km}$）膏盐岩根据岩性自下而上划分为：下泥岩段、膏盐岩段、中泥岩段、盐岩段及上泥岩段共五个岩性段。

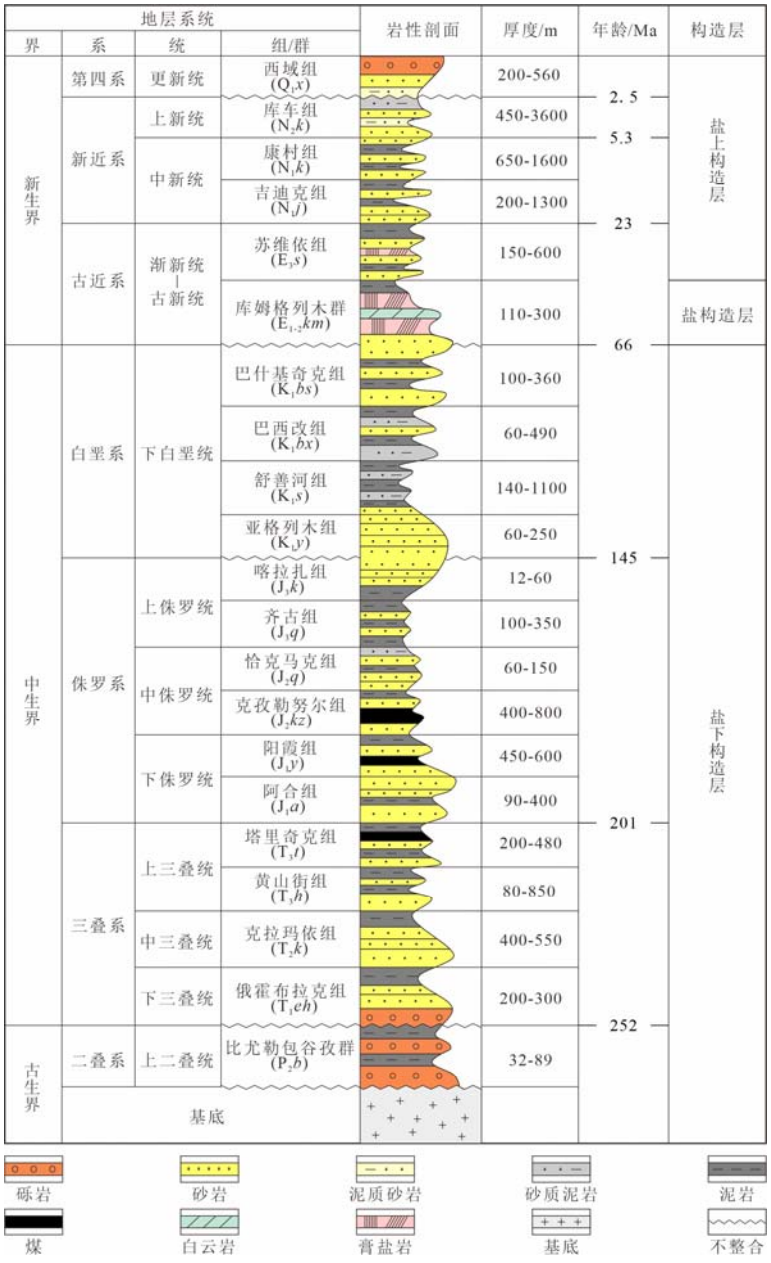

图 2 库车坳陷地层柱状图（据 Guo *et al.*, 2016 修改）

Fig.2 Stratigraphic Column of the Kuqa Depression

以古近系库姆格列木群膏盐岩为界，库车坳陷在纵向上可划分为三个构造层（汪新等，2009；杨克基等，2018；刘立炜等，2022）：盐上构造层（古近系苏

维依组-第四系）、盐构造层（古近系库姆格列木群）和盐下构造层（中生界及以下地层）（图 2）。其中盐下构造层主要发育一系列切穿基底的逆冲断层，以及滑脱于中生界层位内的逆冲叠瓦断层及其相关褶皱（杜金虎等，2012；Wang *et al.*, 2020），形成多个冲断构造带，为深部油气聚集提供了重要的圈闭条件。

库车坳陷的收缩构造变形主要受塔里木克拉通与南天山水平挤压作用的影响（杨海军等，2020）。晚古生代，由于南天山洋关闭，库车坳陷及其南缘形成多处古隆起（李勇，2018）；中生代，库车坳陷持续沉降，地层总体向南超覆沉积，晚白垩世开始整体挤压抬升并伴随先存基底断裂复活（王珂等，2020；杨克基等，2022）；古近纪南天山复活隆升（郭超等，2022）引发山前加积和差异沉积负载，诱发盐底辟等构造的形成（汪新等，2009；王凡等，2022）；新近纪吉迪克组—康村组沉积期，山前断裂继承性活动和持续挤压促使盐底辟和盐背斜不断演化，上覆地层发生旋转与超覆；库车组沉积期至更新世，挤压变形持续向前传递，克深、拜城等断裂沿软弱层滑脱活动，最终发展为逆冲—叠瓦构造体系，导致山前强烈抬升和生长地层的形成（王清华等，2025）。

2 盐下逆掩推覆构造与膏岩层分布的耦合关系

本文结合地表露头和钻井资料，对克拉苏高品质三维连片叠前深度偏移地震资料进行了精细解释，刻画了研究区古近系库姆格列木群的膏盐岩和盐下逆掩推覆构造的分布特征。

库车坳陷中西部最显著的特征是发育一套巨厚的古近系库姆格列木群膏盐岩（图 1a），本文通过识别并追踪古近系库姆格列木群膏盐岩顶、膏盐岩底界面（同时也是白垩系顶界面），并计算其深度差，从而刻画出研究区膏盐岩现今厚度分布（图 3a）。由于这套膏盐岩层的存在及其空间分布的不均一，是导致该地区构造变形十分复杂的重要原因之一。

由于晚白垩世的区域构造事件，库车坳陷整体缺失上白垩统，下白垩统巴什基奇克组乃至巴西改组在不同区域也遭受了不同程度的抬升剥蚀。因此，古近系下部的库姆格列木群膏盐岩层现今残余厚度分布不均，主要受两个因素影响：一是膏盐岩沉积受晚白垩世形成的古地貌影响；二是受后期构造挤压发生了流动（张粲，2020）。

克拉苏构造带中段库姆格列木群膏盐岩现今厚度以大北 1-大北 6 北东东向一线为界，大体分成南北两个厚度中心（图 3a）。其中大北 1 井及周

围库姆格列木群仅发育较薄的上泥岩段，缺失下部几个岩性段，而且白垩系巴什基奇克组顶部剥蚀强烈，表明库姆格列木群的沉积受晚白垩世形成的古地貌控制（张粲，2020）。前人根据钻井、测井和地震等资料，研究表明库姆格列木群膏盐岩具有多盐湖沉积特征，且盐湖沉积中心分布和现今厚度中心具有高度一致性（杨屹铭，2016；张粲，2020；王云超，2022）。因此，推测研究区库姆格列木群原始沉积就以大北 1-大北 6 一线古地貌为界，发育南北两个盐湖，其中西侧南部盐湖沉积厚度大于北部，而东侧北部盐湖厚度大于南部（图 3a）。

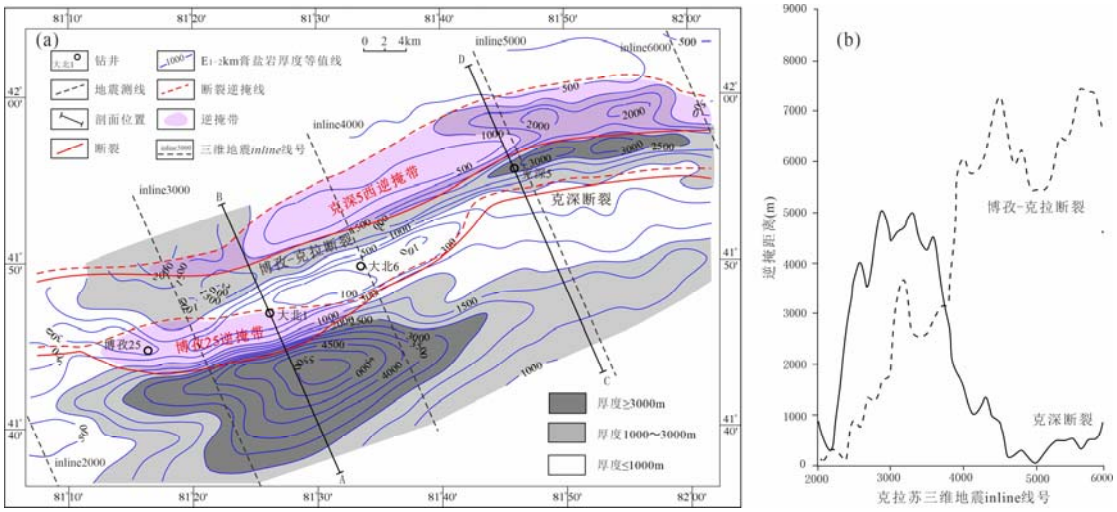

图 3 研究区库姆格列木群膏盐岩现今厚度图（a）和博孜-克拉断裂及克深断裂逆掩距离与三维地震 inline 线号关系图（b）

Fig.3 (a) Thickness of Kumugeliemu Formation Gypsum-Salt Rocks, (b) Thrust displacement of the Bozi–Kela Fault and the Keshen Fault versus 3D seismic inline number

研究区西侧的深度地震剖面 AB 经过了大北 1 井和南北两个膏盐岩厚值区（图 3a、4），大北 1 井附近膏盐层厚度仅 100～200m，表现为盐焊接现象。剖面上，盐上和盐变形相对较为简单，南部为大宛齐盐枕，北部为吐孜玛扎盐底辟（图 4）（汪新等，2009；程海艳，2014）。盐下为沿着侏罗系煤系地层和三叠系泥岩多层系滑脱的复杂冲断体系，其中较为显著的特点是克深断裂（F_{KS}）和博孜-克拉断裂（F_{BK}）均表现为较大规模的逆掩推覆。以盐底白垩系顶（T_{E1-2km}）为界，克深断裂水平逆掩距离近 4km，其逆冲至

南部的大宛齐盐枕内部；博孜-克拉断裂水平逆掩距离近 2km，其逆冲至北部的膏盐岩内部，顶部为吐孜玛扎盐底辟（图 4）。

研究区东侧的深度地震剖面 CD 经过了克深 5 井和南北两个膏盐岩厚值区（图 3a、5），北部发育吐孜玛扎盐底辟。盐下同样发育多层系滑脱的复杂冲断体系，不同的是：博孜-克拉断裂（F_{BK}）表现为大规模的逆掩推覆，以盐底白垩系顶（$T_{E1\text{-}2km}$）为界，水平逆掩距离超过 7km，其顶部为吐孜玛扎盐底辟；而克深断裂（F_{KS}）水平逆掩距离小于 1km（图 5）。

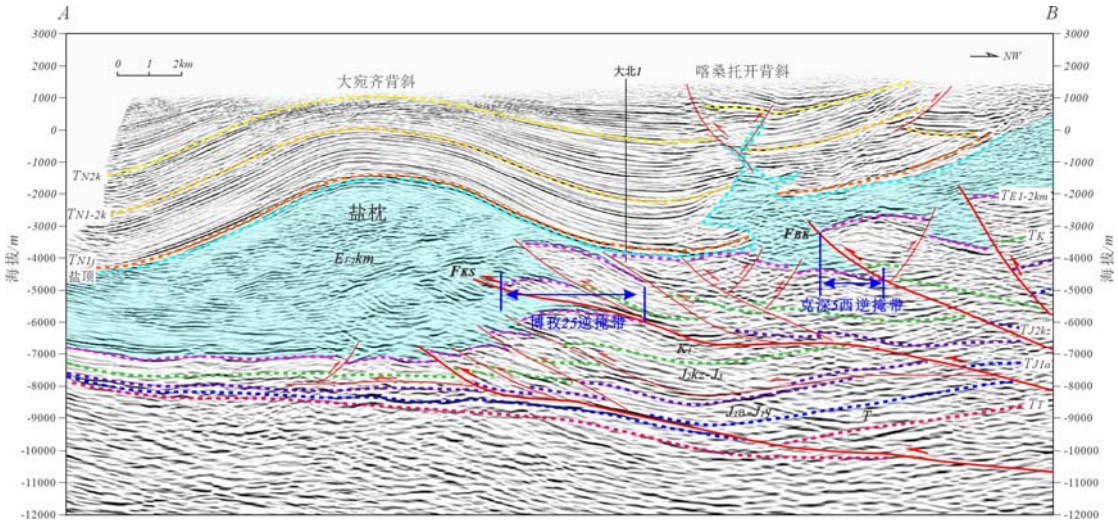

图 4 研究区西侧过大北 1 井地震剖面 AB（剖面位置见图 3）

Fig.4 Seismic profile AB crossing Dabei-1 well in the Western part of the study area (location shown in Figure 3)

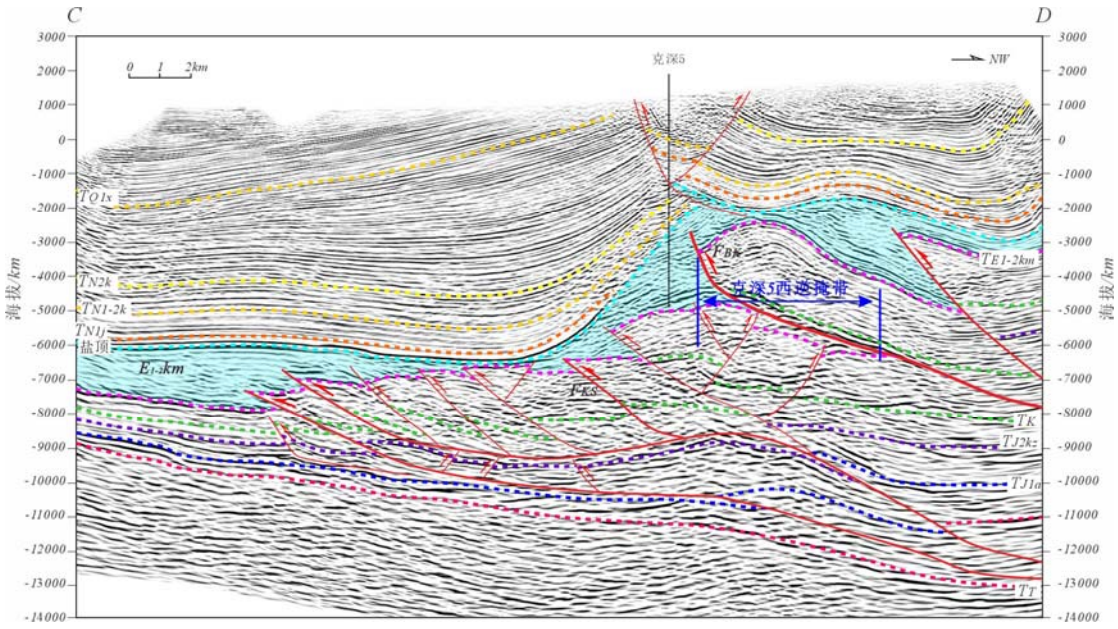

图 5 研究区东侧过克深 5 井地震剖面 CD（剖面位置见图 3）

Fig.5 Seismic profile CD crossing Keshen-5 well in the Eastern part of the study area (location shown in Figure 3)

分别统计研究区范围内克拉苏三维地震主测线（inline）揭示的克深断裂和博孜-克拉断裂逆掩推覆距离，自西向东绘制了 inline 线号和逆掩距离关系图（图 3b）。统计结果显示，研究区克深断裂和博孜-克拉断裂上盘发育两个逆掩推覆带，分别命名为博孜 25 逆掩带和克深 5 西逆掩带。其中克深断裂上盘的博孜 25 逆掩带发育在研究区西侧，最大逆掩距离达 5km±，大北 6 以东逆掩距离减少到 1km 以内；博孜-克拉断裂上盘的克深 5 西逆掩带则逆掩距离自西向东增加，最大逆掩距离达 7～8km（图 3）。

通过地震剖面的精细解释和上述统计分析发现，大规模逆掩带与盐湖沉积中心（也是现今膏盐岩聚集区）和盐底辟具有高度的耦合关系，即：博孜 25 逆掩带发育在南部盐湖中心北侧；而克深 5 西逆掩带发育在北部盐湖中心北侧，并和吐孜玛扎盐底辟位置重叠（图 3、4、5）。

为了证实这种耦合关系，本文开展了离散元数值模拟实验，来明确克拉苏构造带中段盐下逆掩推覆构造的形成机制。

3 数值模拟实验

3.1 实验方法与参数设置

本研究采用离散元方法（Discrete Element Method，DEM）开展构造演化模拟。该方法由 Cundall 和 Strack (1979) 提出，其基本思想是将自然界中的岩土体视为由大量离散颗粒组成的集合体，通过模拟颗粒之间的接触力和运动，来研究岩土体的变形和破裂行为（李长圣，2022）。

在 DEM 中，颗粒之间的力学相互作用可通过接触力学模型来描述，常用模型包括 Hertz-Mindlin 接触力学模型和粘结接触力学模型(Mindlin, 1949; Potyondy and Cundall, 2004)。模拟过程中，通过迭代求解颗粒所受力和加速度，结合牛顿运动定律不断更新颗粒的位置与速度，实现构造演化全过程的动态模拟。若颗粒间粘结力超出临界强度，将自动断裂，从而真实再现断层、裂缝等地质构造的自然发育过程（Morgan, 2015; 李长圣，2022）。

目前 DEM 已广泛应用于地质构造研究领域，在模拟断层演化、褶皱形成、盐构造变形等方面发挥了重要作用（Yin *et al.*, 2009; Carmona *et al.*, 2010;

Li *et al.*, 2021; Hughes, *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2022）。本文选用李长圣博士开发的 ZDEM 离散元数值模拟软件（https://geovbox.com）进行模拟。

本文参照研究区西侧 AB 地震剖面和东侧 CD 地震剖面解释成果（图 4、5），设置了 4 组数值模拟对照实验，用于探讨盐湖发育情况和先存盐底辟构造对盐下逆掩推覆构造的影响（图 6、7）。

第一组和第二组数值模拟实验用于探讨盐湖发育情况对盐下逆掩推覆构造的影响。两组均设置了南北两个盐湖，第一组实验南部盐湖较大，北部盐湖较小（图 6a），第二组实验南部盐湖较小，北部盐湖较大（图 6b）。第三组和第四组数值模拟实验用于探讨先存盐底辟构造对盐下逆掩推覆构造的影响。第三组和第一组实验初始模型设置相同，但添加了同构造沉积（图 7a），第四组实验在第三组实验的基础上，于北侧盐湖中部添加了先存盐底辟构造（图 7b）。

四组实验初始长度均为 70 km，设置有三套滑脱层：上滑脱层代表了古近纪库姆格列木群膏盐层，中滑脱层代表侏罗系煤系地层，下滑脱层代表三叠系泥岩层。本研究中没有探究膏盐层、煤系地层、泥岩层滑脱性能的差异，统一简化为非能干层进行模拟。

根据前人实验结果（李长圣，2019；谢会文等，2024），本文离散元数值模拟参数设置如下：重力加速度为 9.8 m/s^2；基底和能干层密度 2500 kg/m^3，摩擦系数 0.3，剪切模量 2.9 GPa，泊松比 0.2，局部阻尼常数 0.4；滑脱层密度为 2200 kg/m^3，摩擦系数为 0，剪切模量为 2.9 GPa，泊松比为 0.2，颗粒间不设置粘结；先存断层的摩擦系数为 0.0。

根据 AB 和 CD 两条剖面缩短量估算结果，4 组实验右侧挡板都向前推挤了 20km。

3.2 实验结果

（1）实验一：南大北小双盐湖组合

实验一模拟了南大北小双盐湖组合下的构造变形（图 6a），实验结果显示：北侧挤压端 F_1 呈现为高角度断裂（相当于博孜-克拉断裂）；南侧沿着中滑脱层和下滑脱层发生了显著的分层变形，其中沿着中滑脱层发育大规模的逆掩 F_2（相当于克深断裂），逆掩断裂发育部位在分隔两个盐湖的凸起前端。

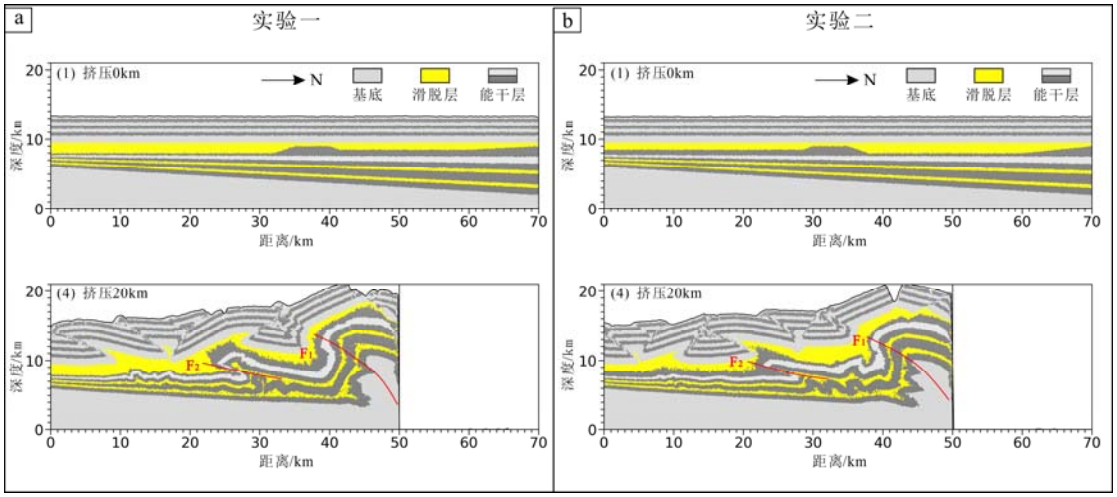

图 6 实验一模拟结果与构造解释（a）和实验二模拟结果与构造解释（b）

Fig.6 (a) Simulation results and structural interpretation of Experiment 1, (b) Simulation results and structural interpretation of Experiment 2

（2）实验二：北大南小双盐湖组合

实验二模拟了南小北大双盐湖组合下的构造变形（图 6b），实验结果显示：北侧挤压端 F1 呈现为高角度断裂（相当于博孜-克拉断裂），虽然其逆掩距离和实验一没有明显区别，但其下盘发育更强烈变形，表明盐层较厚时有更大的总体缩短量;南侧同样沿着中滑脱层和下滑脱层发生了显著的分层变形，其中沿着中滑脱层发育大规模的逆掩 F_2（相当于克深断裂），逆掩断裂发育部位同样在分隔两个盐湖的凸起前端，但相较于实验一逆掩断裂的幅度和距离有所减小。

（3）实验三：双盐湖+同沉积组合

实验三在实验一基础上引入了同构造沉积（图 7a）。实验结果显示：北侧挤压端 F_1 呈现为高角度断裂（相当于博孜-克拉断裂）；南侧沿着中滑脱层和下滑脱层发生了显著的分层变形，其中沿着中滑脱层发育大规模的逆掩 F_2（相当于克深断裂）和反冲断层，逆掩断裂发育部位在分隔两个盐湖的凸起前端，但变形继续向南传递较为有限。

（4）实验四：双盐湖+同沉积+先存盐底辟组合

实验四在实验三基础上，于北侧盐湖上方设置了先存盐底辟构造（图 7b）。实验结果显示：北侧挤压端 F_1（相当于博孜-克拉断裂）在上部呈现为低角度冲断，断距较实验三明显增大；南侧沿着中滑脱层和下滑脱层发生

了显著的分层变形，但沿着中滑脱层发育的 F_2（相当于克深断裂）断距较实验三明显减小。

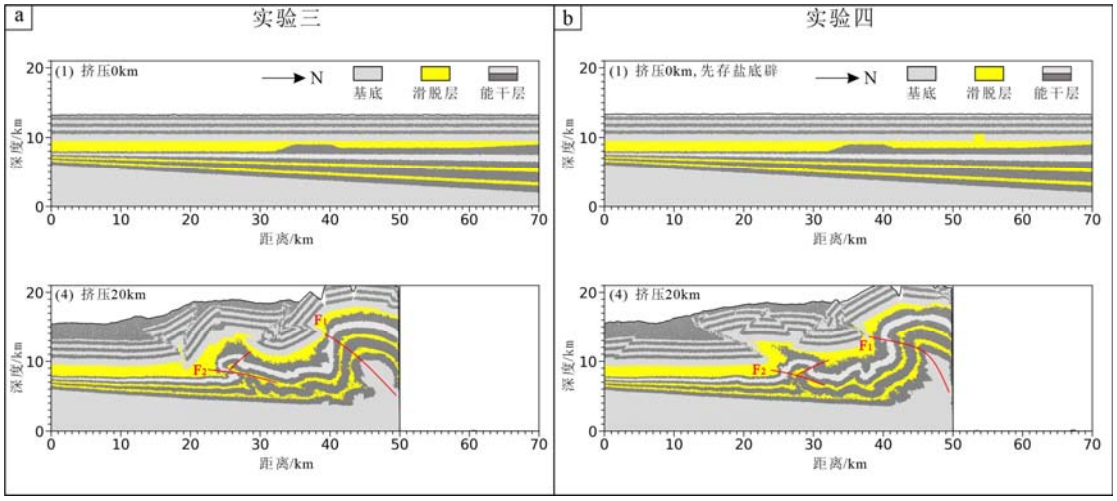

图 7 实验三模拟结果与构造解释（a）和实验四模拟结果与构造解释（b）

Fig.7 (a) Simulation results and structural interpretation of Experiment 3, (b) Simulation results and structural interpretation of Experiment 4

对比实验一和实验二结果表明，盐湖大小变化对整体变形模式影响并不显著，仅表现为大盐湖下伏断层幅度和断距略有增大。但在两组实验中，分隔两盐湖的凸起前端（膏盐岩厚度突变）为应力集中区域，利于大规模逆掩构造的优先发育；此外，凸起之上盐岩由于受挤压发生流动从而进一步减薄，盐上盐下地层常发生盐焊接现象。

对比实验一和实验三结果表明，当前陆区域发生同构造沉积（实验三）时，地形坡度降低，根据临界角库伦楔模型（Davis et al.，1983; Dahlen，1984），此时地形无法达到临界楔角状态，变形被限制在挤压侧，变形前缘向前传递的能力降低。

对比实验三和实验四结果表明，当存在先存盐底辟构造时，其下为大规模逆掩构造的优先发育区域，更多的变形被容纳在其下伏区域而减少向前陆方向的传递。

4 油气地质意义

克拉苏构造带发育完整的生储盖组合，为规模性油气藏的形成奠定了良好基础。三叠系-侏罗系烃源岩生成的天然气通过断裂系统向上运移，在白垩系储层中聚集成藏，古近系膏盐岩提供区域性封盖。随着勘探开发的不断深入，克拉苏

构造带主力勘探层系-白垩系顶部的巴什基奇克组构造圈闭越打越少、越打越小，虽然近年来也在白垩系底部亚格列木组获得克探 1 等井的油气重大突破（王清华等，2023），但巴什基奇克组仍然是目前的主力勘探层系。

逆掩推覆构造的发育特征，对油气成藏具有直接控制作用。其在空间上与古近系盐湖沉积中心及盐底辟构造高度耦合，逆掩构造多位于双盐湖分隔凸起前端及盐底辟下伏部位。数值模拟结果进一步证实，这些部位由于膏盐岩厚度突变，易形成区域性应力集中区，在挤压背景下优先发育大规模逆掩推覆构造，为盐下构造圈闭的形成提供了有利的构造条件。这说明盐下逆掩推覆带并非随机发育，而是受盐岩原始沉积格局和后期演化共同控制，其空间分布具有较强的可预测性。

大规模逆掩推覆构造为在其下盘掩盖区寻找更多巴什基奇克组圈闭提供了构造基础。目前已经揭示有阿瓦特、博孜 25 和克深 5 西三个逆掩推覆带，逆掩带之下构造发育，周边已发现多个气藏，成藏条件优越，如克深 5 西虽然已经新发现或重新落实了部分圈闭，但仍有较多圈闭待进一步进行评价或落实。此外，最近完钻的北探 1 井（距现今盆地边界仅 8～9km）在 6664m 之下钻遇重复的古近系库姆格列木群和白垩系巴什基奇克组，表明存在地层的逆掩叠置，推测该区可能存在比本文前述更大的逆掩推覆距离，此项认识目前还在论证中。

下一步应继续加强地震攻关处理，在克拉苏构造带北侧膏盐岩减薄区和盐底辟发育区之下寻找逆掩推覆带及其下盘构造圈闭。

5 结论

本研究结合地震剖面解释与离散元数值模拟，系统分析了库车坳陷克拉苏构造带中段盐下逆掩推覆构造的空间分布特征及其形成机制，主要得出以下认识：

（1）克拉苏构造带中段盐下发育博孜 25 和克深 5 西两个逆掩推覆带。其中博孜 25 逆掩带发育在研究区西侧，最大逆掩距离达 5km±；克深 5 西逆掩带则逆掩距离自西向东增加，最大逆掩距离达 7～8km。

（2）盐下逆掩推覆构造的发育受古近系库姆格列木群膏盐岩厚度的控制。分隔两个盐湖的凸起前端（膏盐岩厚度突变）为应力集中区域，利于大规模逆掩构造的优先发育。

（3）先存盐底辟构造对逆掩推覆带的形成与演化具有明显的控制作用。盐底辟的持续发育，为其下伏冲断变形提供了更多空间，是大规模逆掩推覆

构造的优先发育区域，更多的变形被容纳在其下伏区域而减少向前陆方向的传递。

（4）逆掩推覆构造下盘是今后克拉苏构造带发现或重新落实巴什基奇克组圈闭的重点区域。

References

Carmona, A., Clavera-Gispert, R., Gratacós, O., et al., 2010. Modelling syntectonic sedimentation: combining a discrete element model of tectonic deformation and a process-based sedimentary model in 3D. *Mathematical Geosciences*, 42(5): 519-534.

Cheng, H.Y., 2014. Salt Diapirs and Its Mechanism in the West of Kuqa Fold Thrust Belt, Northwest China. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(04): 1134-1141(in Chinese with English abstract).

Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1): 47-65.

Dahlen, F.A., Suppe, J., Davis, D.M., 1984. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: Cohesive Coulomb theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B12): 10087-10101.

Davis, D.M., Suppe, J., Dahlen, F.A., 1983. Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B2): 1153 -1172.

DeCelles, P.G., Giles, K.A., 1996. Foreland basin systems. *Basin research*, 8(2): 105-123.

Du, J.H., Wang, Z.M., Hu, S.Y., et al., 2012. Formation and geological characteristics of deep giant gas provinces in the Kuqa foreland thrust belt,Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(04): 385-393(in Chinese with English abstract).

Gong, X., 2022. Study on the tectonic characteristics of the Bozi-Dabei section of the Kucha depression Kelasu tectonic belt (Master's Thesis). *Xi'an: Xi'an Shiyou University*(in Chinese with English abstract).

Guo, X., Liu, K., Jia, C., et al., 2016. Effects of early petroleum charge and overpressure on reservoir porosity preservation in the giant Kela-2 gas field, Kuqa depression, Tarim Basin, northwest China. *AAPG Bulletin*, 100(2): 191-212.

He, D.F., Jia C.Z., Li D.S., et al., 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(01): 64-77(in Chinese with English abstract).

He, D.F., Zhou, X.Y., Yang, H.J., 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. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(01): 19-32(in Chinese with English abstract).

Hughes, A.N., Benesh, N.P., Shaw, J.H., 2014. Factors that control the development of fault-bend versus fault-propagation folds: Insights from mechanical models based on the discrete element method (DEM). *Journal of Structural Geology*, 68: 121-141.

Jia, C.Z., 1999. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(03): 177-183(in Chinese with English abstract).

Jia, C.Z., Song, Y., Wei, G.Q., et al., 2005. Geological features and petroleum accumulation in the foreland basins in central and western China. *Earth Science Frontiers,* 12(03): 3-13(in Chinese with English abstract).

Jia, D., Wei, G., Chen, Z., et al., 2006. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration. *AAPG Bulletin*, 90(9): 1425-1447.

Kordi, M., 2019. Sedimentary basin analysis of the Neo-Tethys and its hydrocarbon systems in the Southern Zagros fold-thrust belt and foreland basin. *Earth-Science Reviews*, 191: 1-11.

Lafargue, E., Ellouz, N., Roure, F., 1994. Thrust-controlled exploration plays in the outer Carpathians and their foreland (Poland, Ukraine and Romania). *First Break*, 12(2): 69-79.

Li, C., Yin, H., Wu, Z., et al., 2021. Effects of salt thickness on the structural deformation of foreland fold-and-thrust belt in the Kuqa Depression, Tarim Basin: Insights from discrete element models. *Frontiers in Earth Science*, 9: 655173.

Li, C.S., 2019. Quantitative analysis and simulation of structural deformation in the fold and thrust belt based on Discrete Element Method (PhD Thesis). *Nanjing: Nanjing University*(in Chinese with English abstract).

Li, C.S., Yin H.W., Xu W.Q., et al., 2022. Quantitative analysis and simulation of compressive tectonics based on discrete element method. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(04): 645-661(in Chinese with English abstract).

Liu, L.W., Zhou, H., Zhang, C.Z., et al., 2022. Synergistic deformation mechanisms and basin-mountain coupling of Kelasu structural belt in Kuqa Depression. *Chinese Journal of Geology*, 57(01): 61-72(in Chinese with English abstract).

Liu, Z.J., Fan, K.Y., Tu, G.Y., et al., 2024. Deformation characteristics of salt tectonics in the western part of the Kelasu structural belt in the Kuqa Depression. *Natural Gas Geoscience*， 35(06): 988-999(in Chinese with English abstract).

Macqueen, R.W., Leckie, D.A., 1992. Foreland basins and fold belts. *American Association of Petroleum Geologists*, *Tulsa*, 55: 400-512.

Mindlin, R.D., 1949. Compliance of elastic bodies in contact. *Journal of Applied Mechanics*, 16(3): 259–268.

Morgan, J.K., 2015. Effects of cohesion on the structural and mechanical evolution of fold and thrust belts and contractional wedges: Discrete element simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 3870-3896.

Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8): 1329-1364.

Price, R.A., 1981. The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains. In McClay, K.J., and Price, N.J., eds., Thrust and nappe tectonics. *Geological Society of London*, *London*, 427-448.

Robbie, G., 1981. Oil and Gas Prospecting Beneath Precambrian in Rocky Mountains. *AAPG Bulletin*, 65(6): 1180-1180.

Song, S., Wu, X.Y., Yang, Y.K., 2009. Characteristic analysis and initial understanding of hydrocarbon distribution of foreland basins in the world. *Progress in Geophysics*, 24(1): 205-210(in Chinese with English abstract).

Wang, M., Wang, M., Feng, W., et al., 2022. Influence of surface processes on strain localization and seismic activity in the Longmen Shan Fold-and-Thrust Belt: Insights from discrete-element modeling. *Tectonics*, 41(11): e2022TC007515.

Wang, Q.H., Cheng, X.G., Xie, H.W., et al., 2025. Multiple Décollement Model and Its Petroleum Geological Significance in Kelasu Subsalt Structural Belt, Kuqa Depression. *Earth Science*, 50(1):97-109(in Chinese with English abstract).

Wang, Q.H., Yang, H.J., Xu, Z.P., et al., 2023. Major Breakthrough and Exploration Significance of Well Ketan 1 in Kuqa Depression, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(02):1-10(in Chinese with English abstract).

Wang, W., Yin, H., Jia, D., et al., 2020. Along-strike structural variation in a salt-influenced fold and thrust belt: Analysis of the Kuqa depression. *Tectonophysics*, 786: 228456.

Wang, X., Tang, P.C., Xie, H.W., et al., 2009. Cenozoic salt structures and evolution in the western Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(01):57-65(in Chinese with English abstract).

Wang, Y.C., 2022. Study on Lithological Distribution Characteristics of Paleogene Kumglemu Group Gypsum Rock in Western Kelasu (Master's Thesis). *Xi'an: Xi'an Shiyou University*(in Chinese with English abstract).

Wen, L., Li, Y.J., Zhang, G.Y., et al., 2017. Evolution of fold-thrust belts and Cenozoic uplifting of the South Tianshan Mountain range in the Kuqa region, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135: 327-337.

Wu, Z.Y., Yang, X.L., Yin, H.W., et al., 2023. Characteristics and influencing factors of salt structure evolution in Awate transfer zone, western Kuqa Depression. Earth Science, 48(4): 1271-1287(in Chinese with English abstract).

Xie, H.W., Chen, L., Wu C., et al., 2024. Structural deformation differences and numerical simulation analysis of Awate-Bozi area in the western Kuqa Depression. *Chinese Journal of Geology*, 59(04): 1082-1097(in Chinese with English abstract).

Xie, H.W., Li, Y., Qi, J.F., et al., 2012. Differential structural deformation and tectonic evolution in the middle part of Kuqa depression, Tarim Basin. *Geoscience*, 26(04): 682-690(in Chinese with English abstract).

Yang, H.J., Song, 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. *Natural Gas Industry*, 40(01): 31-37(in Chinese with English abstract).

Yang, K.J., Qi, J.F., Ma, B.J., et al., 2018. Differential Tectonic Deformation of Subsalt and Suprasalt Strata in Kuqa Depression and Their Controlling Factors. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(02):211-224(in Chinese with English abstract).

Yang, S.F., 2007. Tectonic Characteristics and Hydrocarbon Potential of the Thrust Belt along the Northern Qilian Mountains. *Beijing: Science Press*(in Chinese).

Yang, Y.M., 2016. Sedimentary Facies Analysis of the Central and Western Paleogene Kumugeliemu Formation in the Kuqa Depression, Tarim Basin (Master's Thesis). *Chengdu: Southwest Petroleum University*(in Chinese with English abstract).

Yi, S.W., Guo, X.J., Zhu, M., et al., 2023. Interlayer Thrust-Imbricate Structure: Large Gas Accumulation Modes of Foreland Thrust Belt. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 38(05): 1-11(in Chinese with English abstract).

Yin, H., Zhang, J., Meng, L., et al., 2009. Discrete element modeling of the faulting in the sedimentary cover above an active salt diapir. *Journal of Structural Geology*, 31(9): 989-995.

Zhang, C., 2020. Characteristics and Genesis of Paleogene Gypsum-Rocks in the Central Kuqa Depression (Master's Thesis). *Beijing: China university of petroleum (Beijing)*(in Chinese with English abstract).

Zhang, R.H., Jin, W.D., Zeng, Q.L., et al., 2025. Analysis of key conditions for gas accumulation and favorable replacement fields in 10000-meter deep formations in Kuqa Depression, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 30(03): 51-64(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

程海艳. 2014. 库车褶皱冲断带西段盐底辟成因机制. 吉林大学学报(地球科学版), 44(04): 1134-1141.

杜金虎, 王招明, 胡素云, 等. 2012. 库车前陆冲断带深层大气区形成条件与地质特征. 石油勘探与开发, 39(04): 385-393.

龚鑫. 2022. 库车坳陷克拉苏构造带博孜-大北段构造特征研究(硕士学位论文). 西安: 西安石油大学.

郭超, 张志勇, 吴林, 等. 2022. 中新生代天山剥蚀与塔里木盆地北缘沉积耦合过程: 新疆库车河剖面的低温热年代学证据. 地球科学, 47(09): 3417-3430.

何登发, 贾承造, 李德生, 等. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化. 石油与天然气地质, 26(01): 64-77.

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. 大地构造与成矿学, 33(01): 19-32.

贾承造, 宋岩, 魏国齐, 等. 2005. 中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集. 地学前缘, 12(03): 3-13.

贾承造. 1999. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律. 新疆石油地质, 20(03): 177-183.

李勇. 2018. 塔里木温宿-轮台晚古生代古隆起及对大型天然气聚集的控制(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.

李长圣, 尹宏伟, 徐雯峤, 等. 2022. 基于离散元的挤压构造定量分析与模拟. 大地构造与成矿学, 46(04): 645-661.

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(博士学位论文). 南京: 南京大学.

刘立炜, 周慧, 张承泽, 等. 2022. 库车坳陷克拉苏构造带协同变形机制及盆山耦合关系. 地质科学, 57(01): 61-72.

刘恣君, 范坤宇, 涂国煜, 等. 2024. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带西部盐相关构造变形. 天然气地球科学, 35(06): 988-999.

宋双, 吴小羊, 杨云坤. 2009. 国内外前陆盆地油气藏特征分析与初步认识. 地球物理学进展, 24(1): 205-210.

汪新, 唐鹏程, 谢会文, 等. 2009. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化. 大地构造与成矿学, 33(01): 57-65.

王凡, 邓小林, 郑绵平, 等. 2022. 新疆库车坳陷西段膏盐层沉积、地球化学特征及找钾方向. 地球科学, 47(01): 56-71.

王珂, 曹婷, 魏红兴, 等. 2020. 库车坳陷东部晚白垩世古隆起及构造应力场恢复. 地质学报, 94(06): 1716-1726.

王清华, 程晓敢, 谢会文, 等. 2025. 库车坳陷克拉苏构造带盐下深层多滑脱构造模式及油气地质意义. 地球科学, 50(01): 97-109.

王清华, 杨海军, 徐振平, 等, 2023. 塔里木盆地库车坳陷克探 1 井重大突破与勘探意义. 中国石油勘探, 28(02):1-10.

王云超. 2022. 克拉苏西部古近系库姆格列木群膏盐段岩性分布特征研究(硕士学位论文). 西安: 西安石油大学.

吴珍云, 杨秀磊, 尹宏伟, 等. 2023. 库车坳陷西段阿瓦特构造转换带盐构造演化特征及影响因素. 地球科学, 48(04): 1271-1287.

谢会文, 陈龙, 吴超, 等. 2024. 库车坳陷西部阿瓦特—博孜地区构造变形差异及数值模拟分析. 地质科学, 59(04): 1082-1097.

谢会文, 李勇, 漆家福, 等. 2012. 库车坳陷中部构造分层差异变形特征和构造演化. 现代地质, 26(04): 682-690.

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[J]. 地球科学, 49(08): 3029-3042.

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. 天然气工业, 40(01): 31-37.

杨克基, 漆家福, 刘傲然, 等. 2022. 库车坳陷中段基底断裂特征及其对盐构造变形的影响. 地质科学, 57(04): 991-1008.

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. 大地构造与成矿学, 42(02): 211-224.

杨树锋. 2007. 祁连山北缘冲断带构造特征及含油气远景. 北京: 科学出版社.

杨屹铭. 2016. 塔里木盆地库车坳陷古近系中西部库姆格列木群沉积相研究(硕士学位论文). 成都: 西南石油大学.

易士威, 郭绪杰, 朱明, 等. 2023. 层间逆冲叠瓦构造—前陆冲断带大气区控藏模式. 西安石油大学学报(自然科学版), 38(05): 1-11.

张粲. 2020. 库车坳陷中部古近系膏盐岩特征及成因分析(硕士学位论文). 北京: 中国石油大学（北京）.

张荣虎, 金武弟, 曾庆鲁, 等. 2025. 塔里木盆地库车坳陷万米领域天然气成藏关键条件分析与接替领域优选. 中国石油勘探, 30(03): 51-64.