https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.312



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

吴珍云^{1,2},杨秀磊^{1,2},尹宏伟³,董少春³,李长圣^{1,2},汪 伟³,贾 东³

1.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330013

2. 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013

3. 南京大学地球科学与工程学院,江苏南京 210046

摘 要:为厘定库车坳陷西段盐岩沉积边界盐构造演化特征及影响因素,利用野外地质调查、工业地震剖面解析和三维沙箱物理模拟实验对阿瓦特构造带进行了综合分析.结果表明:(1)阿瓦特构造带是库车坳陷西段典型挤压构造转换带,由乌什凹陷至阿瓦特凹陷,形成了由叠瓦逆冲断层向盐相关褶皱过渡的构造转换特征;(2)塔拉克走滑断层发育于乌什凹陷和阿瓦特凹陷交界处,是一条发育于盐上覆层的滑脱形成调节性横断层.受该断层影响,在盐上覆地层中形成塔拉克向斜、塔拉克背斜等拖曳式盐相关构造.越靠近塔拉克走滑断层,褶皱拖曳揉皱作用越强,甚至容易发育褶皱相关断层,促使盐岩出露地表;(3)阿瓦特构造转换带新生代变形主要受区域挤压作用、盐层分布及基底断裂活动共同控制.

中图分类号: P548 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1271-17 **收稿日期:** 2022-06-06

Characteristics and Influencing Factors of Salt Structure Evolution in Awate Transfer Zone, Western Kuqa Depression

Wu Zhenyun^{1,2}, Yang Xiulei^{1,2}, Yin Hongwei³, Dong Shaochun³, Li Changsheng^{1,2}, Wang Wei³, Jia Dong³

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: In order to determine the characteristics and influencing factors of salt structure evolution located at the border of salt basin in western Kuqa depression, a comprehensive analysis of Awate transfer zone was carried out by field geological survey, structural analysis of industrial seismic profiles and 3D sand-box analogue modeling experiment. The results show follows. (1) Awate structural belt is a typical compressional structural transfer zone in western Kuqa depression, where differential structures formed from imbricated thrust faults in the Wushi sag to salt-related folds in the Awate sag. (2) The Talake strike-slip fault occurred at the junction of Wushi sag and Awate sag is an accommodative transverse fault developed in the overburden. Influenced by this fault, Talake syncline, Talake anticline and other drag salt-related structures formed in the overburden. The closer to the

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 41602208, 42072320, 41972219, 41572187);东华理工大学博士启动基金(No. DHBK2019053).

作者简介:吴珍云(1986-),男,博士,副教授,主要从事盐构造,构造解译及实验构造模拟研究. ORCID:0000-0003-2896-4736. E-mail: zhenyun_wu@ecut.edu.cn

引用格式:吴珍云,杨秀磊,尹宏伟,董少春,李长圣,汪伟,贾东,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(4):1271-1287.

Citation: Wu Zhenyun, Yang Xiulei, Yin Hongwei, Dong Shaochun, Li Changsheng, Wang Wei, Jia Dong, 2023. Characteristics and Influencing Factors of Salt Structure Evolution in Awate Transfer Zone, Western Kuqa Depression. *Earth Science*, 48(4):1271-1287.

Talake strike-slip fault, the stronger the drag and wrinkling effect becomes, and even the fold-related faults are easy to develop, prompting the outcrop of salt rock in the core of anticline. (3) The Cenozoic deformation of Awate structural transfer zone is mainly controlled by regional compression, the distribution of salt rock and the activity of basement faults.

Key words: Kuqa depression; Awate structural transfer zone; salt-related fold; Talake strike-slip fault; sand-box analogue modeling; structural geology.

在世界诸多褶皱一冲断带中,如伊朗扎格罗斯 褶皱一冲断带(Cotton and Koyi, 2000; Bahroudi and Koyi, 2003; Li and Mitra, 2017),巴基斯坦波特 瓦尔褶皱一冲断带(Borderie *et al.*, 2018),库车褶 皱一冲断带(Li *et al.*, 2012;李世琴等, 2013; Borderie *et al.*, 2018),由于盐岩层的沉积分布而导 致沿走向上构造变形发生极大差异变形,引发构造 转换带的形成,使区域构造演化复杂化.研究含盐 褶皱一冲断带在盐岩沉积边界的变形特征,意在揭 示其断裂活动、褶皱变形过程,这对于含盐褶皱一 冲断带内的矿产资源和油气勘探具有重要的意义.

南天山阿瓦特构造带位于库车坳陷库木格列 木群膏盐岩沉积最西段(图1a),处于不同构造单元 交汇处,属于挤压构造转换带(郑民等,2007),具有 非常复杂的地形条件,整体勘探程度较低.已有研 究表明,阿瓦特构造带有着良好的油气储藏及运移 条件(吴海等,2016;蔚远江等,2019),其作为克拉 苏构造带西延的一部分,无论是地质结构特征,还 是油气富集规律都与克拉苏构造带典型的双滑脱 模式具有一定的相似性和继承性(林潼等,2015;杨 海军等,2019).但受构造空间及膏盐岩分布差异性 变化的影响,该地区构造变形强烈(克拉苏构造带 自东向西克深段、大北段和博孜段挤压缩短率约 19%~26%,阿瓦特段则达50%以上),构造形态非 常复杂(图1b),逆冲推覆构造和走滑(转换)构造明 显发育(Neng et al., 2018; 帕日地古丽·布苏克等, 2020).同时,阿瓦特区域钻探结果表明区域内分布 1.8~3.0 km 厚度的古一始新统库木格列木群 (E₁₋₂km)膏盐岩(Wu et al., 2014;韩耀祖等, 2016; 王凡等,2022).受巨厚膏盐岩层遮蔽作用以及盐下 地层地震反射成像品质所限,盐下基底构造结构厘 定及圈闭落实一直是研究区油气勘探难点所在(田 军,2019).

多年来,尽管针对库车坳陷西段新生代盐构造 开展了诸多的研究,并取得了重要的进展,诸如分 析了盐构造分段、分层差异变形特征(余一欣等, 2007;李世琴等,2013;漆家福等,2013;Wang et al., 2020);完善了盐上构造层变形样式的精细研究,建 立了比较精细的盐上构造模型(汤良杰等,2003; Chen et al., 2004; 汪新等, 2010; Li et al., 2012; Wu et al., 2014; Yu et al., 2014; 唐鹏程等, 2015; Zhao and Wang., 2016),形成了适合于盐下楔体构 造的构造分析技术,并建立了精细化盐下构造模型 (林川等,2017; Wang et al., 2017,2018), 而对于库 车坳陷西段盐岩沉积边界的构造变形演化及影响 因素,Wu et al. (2014)曾依据物理模拟实验提出了 库车坳陷西段盐岩沉积尖灭地区可能发育走滑构 造的认识,但针对阿瓦特构造带作为一个构造转换 带,并没有进行系统的研究,如阿瓦特构造带是否 发育边界走滑断层?构造带内褶皱构造密集分布, 其形成演化是否与边界发育的走滑断层有关?如发 育边界走滑断层,该断层究竟是仅切穿于盐上覆地 层的薄皮走滑构造还是贯穿基底的厚皮走滑构造? 针对上述疑问,值得开展进一步的探讨和研究,为 阿瓦特地区油气勘探提供更多的基础参考资料.

本文结合野外地质考察、地震剖面构造解析, 对库车坳陷西段阿瓦特构造带盐相关构造进行了 重点分析,并结合三维物理模拟实验手段对构造带 内的构造转换特征做了探讨,分析了盐盆边界走滑 断层形成演化对盐盆内部构造的控制和影响.

1 区域地质背景

阿瓦特构造转换带位于库车坳陷西段,处于乌 什凹陷与克拉苏构造带的过渡部位,平面上呈东西 走向,是库木格列木群(E₁₋₂km)膏盐岩沉积的西边 界(图 1a).该构造带北起北部单斜带,向南推覆至 温宿凸起之上,东临沉积了7km新生界地层的拜城 凹陷,西接无库木格列木群膏盐层沉积的乌什凹陷. 阿瓦特地区沉积的地层以膏盐岩层为界分为3层 (Chen et al., 2004; Wu et al., 2014):(1)以中生界 和古生界组成的基底,推测为寒武系结晶基底一侏 罗系煤系地层;(2)古一渐新统库姆格列木群 (E₁₋₂km)沉积的膏盐岩层,主要岩性为石膏、膏质盐 岩、盐岩及盐质泥岩,具有较强可塑性及流变能力; (3)渐新统一第四系组成的盐上覆地层,地层由老



Fig.1 Tectonic location map of Awate area in western Kuqa depression (a) and geologic map of this study area (b)

到新依次为:苏维依组(E₂₋₃s),吉迪克组(N₁j),康村 组(N₁k),库车组(N₂k)和西域组(Q₁x),主要岩性为 砂砾岩、含砾粗砂岩、砂岩及砂泥岩.而乌什凹陷沉 积地层可分为两套,分别是中生界及之前地层组成 的基底和新生代地层组成的上覆层.其中,新生代 地层由老到新为吉迪克组(N₁j),康村组(N₁k),库车 组(N₂k),西域组(Q₁x)和中一上更新统沉积(Q₂-Q₃₋₄),期间未沉积盐岩层,主要岩性为砂砾岩、含砾 粗砂岩、砂岩及砂泥岩.阿瓦特地区的盐上地层厚 度与东边的拜城凹陷和西边的乌什凹陷差异很大, 根据吉迪克组(N₁j)地层厚度差异推断,阿瓦特地区 中新世早期开始抬升,上新世早期抬升速率加快, 并沉积薄层库车组(N₂k),与其东部拜城凹陷巨厚 库车组(N₂k)沉积层形成鲜明对比.

2 区域构造特征

2.1 阿瓦特段

综合区域地质图(图1b)、野外地质调查(图2,



图 2 阿瓦特断层野外考察照片(照片位置见图 1b) Fig.2 Field photos of Awate fault (see Fig.1b for locations) a. 阿瓦特西段,阿瓦特断层逆冲至第四系地层之上;b. 阿瓦特东段, 阿瓦特前缘褶皱带沿着阿瓦特断层分布

图 3) 及区域地震剖面解析(图 4, 图 5), 可知阿瓦特 构造带北起北部构造带, 向南推覆到温宿凸起之 上, 形成阿瓦特盐岩推覆体, 其变形前缘为阿瓦特 断层, N_i j 地层逆冲在第四系之上, 可见盐岩出露地 表(图 1b 和图 2). 沿着阿瓦特构造带, 由于盐岩层的 沉积分布, 构造带变形具有"垂向叠置、分层变形" 的构造特征(图 4 和图 5), 其中盐下地层发育北倾叠



图 3 阿瓦特构造转换带新生代褶皱地层出露野外考察照片(照片位置见图 1b)

Fig.3 Field investigation photos of Cenozoic folds and strata exposed in Awate structural transfer zone (see Fig.1b for locations) a,b.塔拉克向斜核部及两翼照片;c.塔拉克背斜核部及北翼照片;d,e.塔拉克向斜东边界库木格列木群盐岩及其周缘地层接触关系





瓦逆冲断层,靠近山前中生界地层出露地表,而盐 上覆沉积地层则沿着走向在其东侧和西侧呈现明 显差异性构造变形特征.

在阿瓦特构造带东侧,发育宽缓的背驮向斜, 由 E₃-Q的地层构成,向斜中心厚度在 2.5 km 左 右,向斜南翼沿阿瓦特断层逆冲到温宿凸起之上, 并沿阿瓦特断层发育边缘褶皱(图 1b、图 2b 和图 4). 而在阿瓦特构造带西侧(与乌什凹陷交界处的塔拉 克地区)则发育有呈雁列式分布特征的塔拉克背 斜、塔拉克向斜和南塔拉克背斜.这些褶皱群轴迹 线往阿瓦特凹陷内部不断延伸,最后与东侧阿瓦特 边缘褶皱带融为一体(图 1b).

此外,野外地质调查及地震剖面解析结果表明 塔拉克向斜比较宽缓,其向斜核部往北偏移(图3a~ 3b,图5);塔拉克背斜整体则比较紧凑(图3c,图 5),沿着其轴迹线甚至可以发现其下伏盐岩向南逆 冲到塔拉克向斜地表之上(图3d~3e,图5).

2.2 乌什段

切过乌什凹陷(无盐区域)的地震剖面(图6)显示,与其东段阿瓦特地区不同,由于没有盐层作为 滑脱层,乌什凹陷主要靠褶皱和断层吸收缩短量, 自北向南形成典型厚皮褶皱一冲断构造,其中山前 断层直接由基底突破到了地表,而吉迪克组(N_i)地 层之上的新生界卷入挤压构造,沿着古木别孜断层 向温宿突起逆冲推覆,导致新生界地层直接不整合 在中生界之上,形成了巨厚的向斜,中心厚度约6~ 7 km.

2.3 塔拉克断层

综合上述研究,通过对比分析阿瓦特段和乌什 段之间的构造特征,可以发现在南天山前沿主构造





阿瓦特凹陷被北部盐下基底断裂系统抬升,盐岩层厚度大于5km.整个凹陷受西边界塔拉克走滑断层影响,在挤压过程中被断层切穿而形成由北往南向斜一背斜一向斜形态.E_{2.3}s-N₁k为前构造沉积地层,N₂k-Q为同构造沉积地层

走向由西向东的乌什凹陷(无盐沉积区域)至阿瓦 特构造带(含盐沉积区域),无论是平面构造特征 (图1b)还是剖面构造特征(图4~6)均具有明显差 异性特征.结合区域构造特征和地震剖面解析,推 断在阿瓦特构造带塔拉克地区(库木格列木群膏盐 岩沉积西边界)发育有一条近北西一南东走向的、 与区域挤压应力方向斜交的右旋走滑断层,称其为 塔拉克断层(图1b和图7).受塔拉克右旋走滑断层 的影响,阿瓦特构造带东、西侧构造变形样式明显 不一致(图1b,图4,图5).越靠近西边界走滑断层, 凹陷内地层褶皱越强烈,甚至在塔拉克背斜核部盐 岩被挤压出露地表(图5,图7).此外,地震剖面构造 解析表明塔拉克走滑断层和南塔拉克背斜、塔拉克 向斜、塔拉克背斜均为盐上覆地层发育的盖层盐相 关构造,其下伏是巨厚盐岩层(图5,图7).

3 实验模型

3.1 模型设计

为了研究库车坳陷西段阿瓦特构造转换带盐 构造变形演化特征,本文在已有研究基础上(Wu et al., 2014),设计了1组三维物理模拟实验(图8), 具体模型参数及实验材料相似比参数分别见表1和 表2.模型实验采用干燥石英砂和聚酯硅胶(PDMS, Wu et al., 2014;章雨等,2021)来分别模拟上地壳 脆性地层和盐岩层,实验均在水平放置的沙箱中完



图 6 乌什凹陷地震反射剖面(a)及其剖面构造解析(b)(剖面位置见图 1b) Fig.6 Uninterpreted (a) and interpreted (b) seismic sections (see Fig.1b for location) showing thrust structures in the Wushi sag

成.整个实验过程中考虑同构造沉积作用,因为已 有研究均表明了同构造沉积作用对于库车坳陷构 造形成演化具有重要的控制作用(尹宏伟等, 2011; Li *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2014).

实验挤压过程中模型右端固定挡板不动,左端 活动挡板则在步进马达的推动下以恒定的速度向 右移动.实验运行过程中共添加两次同构造沉积, 且在无硅胶区域和含硅胶区域设置不同的同构造 沉积速率(表1),以模拟研究区不同区域差异化沉 积特征.整个实验过程中,每隔8min对模型顶面和 侧面拍摄照片,记录实验模型在顶面上和侧面上的 构造演化过程.实验结束后先在模型的顶面撒上保 护砂层,然后对模型喷水将其浸湿,最后每隔1cm 沿着与实验模型挤压方向平行的一侧进行切割剖 面,并采用相机拍照记录,观察其内部构造特征.

3.2 实验分析

为更好地呈现实验平面构造演化和内部剖面 构造特征,本文除了应用传统的顶/侧拍照外,还利 用三维建模技术对模型进行三维重建及立体分析, 完成模拟过程和结果从二维到三维的转变,使地质构造演化过程研究从一个维度的分析向多个维度转变,实现从多维的角度去分析实验的变形过程和动力学特征(谢会文等,2012;陈莹莹等,2022).此外,为呈现模型在构造变形过程中的速度场和应变场等特征(Fan et al., 2020),以及观察模型表面断裂、褶皱等构造分布和反映模型地表高程起伏变化(Mao et al.,2021),本文还综合利用粒子成像测速技术(PIV)及模型表面三维扫描技术对构造物理模拟实验进行精细化分析,在一定程度上为明确研究区复杂断裂、褶皱等构造的成因及演化过程提供技术支撑,使分析和解译更加准确.

4 实验结果

4.1 演化过程

伴随给模型施加水平挤压量,通过模型顶面上 布设的网格线可以观察到构造变形演化.当模型挤 压量达到10mm时,我们可以观察到在区域I(脆



图7 阿瓦特西段切过塔拉克走滑断层地震剖面(a)及其剖面构造解析(b)(剖面位置见图1b)

Fig.7 Uninterpreted (a) and interpreted (b) seismic sections cutting across the Talake strike-slip fault in the western Awate area (see Fig.1b for location)

基底断层控制了东部的阿瓦特和西部的乌什凹陷之间的地层沉积厚度的差异.盐边界的走滑断层拖曳作用形成而塔拉克背斜与塔拉克向斜.图中塔拉克背斜和塔拉克向斜之间的盐岩在断层作用下逆冲到了N₁k康村组之上

性层)沿着挤压方向发育了一条逆冲断层F1(图 9a1),但通过平面粒子成像测速(PIV)可以观察到 区域II(含塑性层)硅胶上覆地层同样向前发生移 动,且传播距离(变形前缘与活动挡板距离)大于区 域I(图 10a),但相比较区域I内逆冲断层发育明 显,区域II内硅胶上覆地层还没有明显的断裂发育 (图 9a1).随后随着挤压量增大,区域II内断层F2开 始发育,并向区域I延伸,与断层F1连接起来(图 9b1),但两区域之间挤压传播速率存在明显差异 (图 9b2,图 9b3),导致在F2断层和F1断层之间沿 着区域I和区域II边界发育右旋走滑断层SF,以调 节两区域内断层之间的差异传播(图 9b1).伴随着 边界走滑断层SF持续发育,区域I内断层F3和区 域II内断层F4相继发育.当挤压量达到 50 mm时, 走滑断层SF滑移量已达到 20 mm(图 10b).沿着走 滑断层 SF,在区域 Ⅱ 内开始发育向斜一背斜相间排 列的大致平行的硅胶相关褶皱(C1、A1和 A2),而 在区域 Ⅰ 内则发育了前展式叠瓦逆冲断层(F1、F3 和 F5)(图 9c1,图 11a).在此阶段,通过 PIV 平面速 度场及云图可知(图 9c2,图 9c3),模型挤压位移量 主要集中在区域 Ⅱ 逆冲前缘带,促使区域内的硅胶 相关褶皱发育.

在模型达到5 cm 挤压量后,施加第1次同构造 沉积,使得模型表面构造被石英砂覆盖.随后继续 增加挤压量,区域 I 和区域 II 延续了之前的构造发 育模式,区域 I 内叠瓦逆冲断层继续发育,区域 II 内硅胶相关褶皱及褶皱相关断层持续发育.当挤压 量增致7 cm 时(图9d),区域 I 和区域 II 挤压应力差 异性传播进一步增大,走滑活动持续加强,导致两 区域内的变形前缘位置(F6和F5)被进一步拉大



图 8 实验模型设计图 Fig.8 Schematic illustrations of the analog model in this paper

表1 阿瓦特构造转换带实验模型设计参数

Table 1 The initial configuration of analog model in the Awate structural transfer zone

模型大小(cm) (长×宽×高)	盐盆地宽度 (cm)	同构造沉积平均速率(mm/h)		挤压量	挤压速率
		无硅胶区域	硅胶区域	(mm)	(mm/s)
$38 \times 30 \times 30$	20	0.65	0.4	125	0.002

表 2 实验模型材料参数和比例化

Table 2 Material properties and scaling parameters between model and nature

参数	自然界 (n)	模型(m)	比率 (m/n)
重力加速度 $g(m/s^2)$	9.81	9.81	1.00
长度 <i>l</i> (m)	2 000.00	0.01	5.00×10^{-6}
速度 v(m/s)	$1.38 imes 10^{-10}$	2.00×10^{-6}	1.45×10^{4}
密度 ρ_{o} (上覆层)(kg/m ³)	2 400.00	1 297.00	0.54
密度 ρ_s (盐岩)(kg/m ³)	2 200.00	987.00	0.45
上覆层摩擦系数	0.60	0.40	0.67
粘度 η _s (盐岩)(Pa·s)	$1.0 imes 10^{19}$	0.6×10^{4}	0.6×10^{-15}
应力 o(Pa)	$4.3 \times 10^7 \sim 4.7 \times 10^7$	90~127	2.5×10^{-6}
应变 $\epsilon(s^{-1})$	$4.3\!\times\!10^{-12}\!\!\sim\!\!4.7\!\times\!10^{-12}$	0.015~0.021	4.2×10^{9}

(图 10a中的 D1和 D2).当模型达到9 cm 挤压量后, 伴随着区域 I 内第4条逆冲断层 F7 的发育,两区域 内的变形前缘位置(F6和 F7)开始逐步缩小(图 9e, 图 10a),但两者之间走滑断层仍然继续活动(图 10b),并促使硅胶相关褶皱和褶皱相关断层进一步 发育.模型挤压到 11 cm 时,区域 I 发育了第5条前 展式逆冲断层 F9,且与区域 II 新发育的逆冲前缘带 断层 F8 基本可以连成一条线,且伴随断层 F8 产生 了新的断层相关褶皱A3(图9f1).此时,在逆冲断层 F6和反冲断层TF1之间,发育了背斜A2.A2和A3 两个背斜形成了区域Ⅱ内的前缘褶皱带(图11b), 并吸收了大量的挤压应力(图9f2,图9f3).在反冲断 层TF1和TF2之间则发育C1和C2两个向斜构造 (在两者之间,先存背斜A1),总体形成一个大型凹 陷形态(图11b).受持续的差异变形影响,沿区域Ⅱ 和区域Ⅱ边界拖曳构造发育明显,形成边界拖曳褶



Fig.9 Model structural evolution and particle imaging velocimetry (PIV) analysis in the plane view

皱带(图11b),此时走滑断层总滑移量达63 mm(图 10a).区域Ⅱ内的断层、褶皱平面形态总体呈向挤压 前进方向凸起的特征.这一构造特征一直持续到模 型挤压结束(挤压量125 mm,总体走滑断层滑移量 达75 mm,图10b)(图11c).

值得注意的是,在第2次同构造沉积加载后,区 域Ⅱ逆冲前缘位置(断层F8及其相关褶皱A3)基本 没有发生改变,而区域Ⅱ逆冲前缘位置(断层F9)则 继续向前扩展,导致两者之间的位置距离发生进一 步减小(图10a).出现这样现象的原因,笔者推测可 能是在区域Ⅱ逆冲前缘带内主要发生断层相关褶 皱的垂向发育.

4.2 三维重建及目标层分析

实验模型的三维重建既便于观察模型的内部 结构变化,又可以通过模型重建后的图像分割实现 目标构造层的分析,这对于研究含盐沉积盆地边界 构造转换带的内部构造特征可以提供便利.利用已 完成的模型二维切片照片(本实验获得的模型切片 共30张,切片间距10 mm,部分典型切片见图12), 通过计算机三维可视化技术重新采样合成了物理 模拟实验三维重建模型(图13a).然后利用计算机 切片技术,对重建模型开展垂直挤压方向的横向切 片,以便观察模型中脆塑性地层过渡区域构造转换 带的构造特征(图13b~13f). 根据模型平面构造演化特征和纵切剖面,可知 在挤压应力作用下,在脆性地层(无硅胶区)中主要 发育前展式叠瓦逆冲断层,该类断层直接贯穿基底 层(前构造沉积层)和同构造沉积层,并出露地表 (图 12a,图 12b),而在塑性地层分布区(硅胶沉积 区)分层构造变形明显,塑性层下的基底地层中构 造变形与脆性地层中基本一致,发育前展式叠瓦逆 冲断层,但该类断层逆冲消失在塑性层中,而在塑 性层及其上覆地层中则主要发育褶皱构造及褶皱 相关断层(图 12c~12g).而基于横切剖面可知,在脆 塑性地层边界(硅胶沉积边界)发育的走滑断层是 浅层走滑构造,向下并没有延伸到塑性层下的基底 地层中并导致基底地层产生相应的走滑变形 (图 13).

5 讨论

5.1 阿瓦特构造转换带平面特征

三维物理模拟实验结果表明,在区域挤压应力 作用下,围绕着塑性沉积层范围其上覆地层发生了 明显的差异性构造变形(图9),形成构造转化带(图 14).在构造转换带内,其塑性地层沉积前缘直接发 育前缘逆冲断层(图9,图14),并限定了构造转换带 沿挤压方向的范围.而在沿模型走向上,受塑性层









图 11 模型平面三维扫描图 Fig.11 3D scanning of analog model in plane view

沉积尖灭的影响, 脆塑性地层边界发育走滑断层 (走滑断层沿挤压方向延伸至前缘逆冲断层), 沿着 边界走滑断层, 在塑性地层盆地内上覆地层中发育 了具有拖曳性质的褶皱及褶皱相关断层构造(图9, 图 14). 本文实验结果与前人针对含盐褶皱冲断带 的研究(Cotton and Koyi, 2000; Bahroudi and Koyi, 2003; Wu *et al.*, 2014; Li and Mitra, 2017; Borderie *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2020)均表明滑脱层流 变特性的侧向变化(如盐岩尖灭时导致的低摩擦系数的塑性盐岩地层向高摩擦系数的脆性岩层过渡)





Fig.12 The typical sections cutting from the 3D analogue model along the shortening direction 图中①(黄色虚线段)表示硅胶下伏基底变形前缘位置,②(红色虚线段)表示硅胶上覆地层变形前缘位置



图 13 模型垂直挤压方向典型横切剖面特征 Fig.13 The typical sections cutting from the 3D reconstruction model cross the shortening direction

会导致两者上覆盖层变形前缘的传播范围存在差 异(盐岩作为良好的层间塑性滑动层,相比脆性地 层,可以将挤压应力向前传播得更远,如图9中速度 场所示),从而在盖层中促发走滑断层的发育以调 节两者之间的差异变形,同时在盐盆地内部发育走 滑构造相关褶皱.

阿瓦特地区区域地质特征(图1b,图4,图5, 图7)与本文实验模拟结果主要构造特征较为相似



图 14 含盐褶皱一冲断带盐岩沉积边界构造转换带平面 解析



(图 11,图 12,图 13),表明阿瓦特构造转换带可能 是在这样的地质背景下形成的,在阿瓦特构造转换 带,阿瓦特断层是含盐区域前缘逆冲断层,限定了 转换带南缘的分布范围(图1b).在阿瓦特西段,伴 随盐盆地边界右旋走滑断层(横断层,王伟锋等, 2018)的发育,一对轴线与走滑断层斜交的雁列褶 皱相应而生,并且伴随着走滑断层滑移距不断增 大, 雁列褶皱逐渐向盐盆地内部延伸(图9,图13). 走滑断层不仅促使雁列褶皱的发育,在挤压过程中 也控制褶皱内部形态的变化,越靠近边界走滑断 层,褶皱拖曳揉皱作用越强,甚至容易发育褶皱相 关断层(图12),促使盐岩出露地表(图3,图5,图 7),同时褶皱翼部甚至发生地层倒转(图5,图12). 在该转换带内的塔拉克向斜、塔拉克背斜和南塔拉 克背斜等便是盐边界的走滑断层拖曳作用形成,其 轴线方向与挤压方向不垂直,而是有一定的夹角 (图 1b, 图 14). 总体而言, 由乌什凹陷脆性层区域至 阿瓦特含盐沉积层区域,形成了由叠瓦逆冲断层向 盐盆地内的拖曳褶皱过渡的构造转换特征(图1b, 图 14).

5.2 塔拉克走滑断层特征

王伟锋等(2018)分析认为在褶皱一冲断带中 容易出现与主构造走向线直交或大角度斜交的伴 生横断层,这类断层通常发育于由于基底断裂或者 是由于不同强度的岩层配置而引起的构造薄弱区. Wu et al. (2014)和龙毅等(2020)通过物理模拟实验 均验证了库车褶皱一冲断带浅部滑脱层(脆、韧\塑 性滑脱地层)沿走向的厚度与性质差异对褶皱冲断 带的构造变形具有重要的控制作用,是造成构造样 式差异的主要控制因素,在南天山库车前陆褶皱一 冲断带的北部构造带、克拉苏构造带和秋里塔格构 造带便发育着诸多伴生横断层(李世琴等,2013;王 伟锋等,2018),在形成机制上主要包括后期变化应 力场条件下基底卷入断层和滑脱形成断层(王燮培 和严俊君,1995;吴晓智等,2010).基于区域地质资 料、野外地质调查、切过塔拉克走滑断层的地震反 射剖面解析以及构造模拟实验结果综合分析(图1, 图 3, 图 7, 图 12, 图 13), 笔者推断塔拉克断层是一 条发育于含盐沉积盆地边缘的滑脱形成横断层(盖 层型撕裂走滑断层),塔拉克断层根部垂向上消失于 盐岩层内部,没有向盐下基底地层延伸并造成盐下 基底地层参与走滑构造变形(图7).如前所述,该走 滑断层属于盐盆边界调节性走滑构造,是由于沿主 构造走向线存在不同强度的岩层(脆性地层和盐岩 塑性地层)配置而引起的,主要影响盐上覆地层的 构造变形,对盐盆地内褶皱的发育及演化具有重要 的控制作用,尤其影响阿瓦特西段内褶皱的形成演 化及分布特征(图1b,图7,图9,图11).此外,在分 析实验模型内部构造形态时,笔者发现在靠近走滑 断层含盐区域所发育的拖曳褶皱带内,其盐上褶皱 构造变形与盐下基底逆冲推覆(图12c,图12d中黄 色虚线所示位置)具有很好的垂向空间对应关系, 而继续向含盐区内部延伸则发现盐层上下构造变 形耦合规律逐渐变得不明显(图 12e~12g).这一现 象表明在含盐褶皱一冲断带形成演化过程中,盐上 覆地层构造形变可能受到了盐下基底地层构造演 化的影响,基底断层逆冲推覆控制了盐上覆层褶皱 的发育位置,但随着盐层厚度的增加,该影响因盐 岩的塑性流变增强而逐渐失去规律.因此,虽然塔 拉克走滑断层属于发育于含盐沉积盆地边界的薄 皮构造,但其形成动力机制与基底断裂逆冲推覆活 动息息相关.

分析和厘定库车坳陷阿瓦特构造带塔拉克走 滑断层性质,对于研究区油气勘探具有重要的参考 价值和指导意义.在含盐沉积盆地中,盐岩层的分 布对沉积盆地内油气的生成、运移和圈闭成藏等具 有重要的影响,尤其是针对盐下基底层油气形成和 成藏(王莉等,2021).作为挤压型含盐沉积盆地,库 车坳陷盐下基底断裂构造发育丰富,是理想的油气 成藏区域(Yu et al., 2014).在区域挤压应力作用 下,盆地内发育的走滑断裂对其深部已有油气圈闭 可能会造成严重的破坏.研究结果表明阿瓦特构造 转换带内塔拉克走滑断层是发育于盐上覆层的调 节性走滑构造,对阿瓦特构造带盐下基底地层构造 变形没有影响,说明其活动演化对盐下油气圈闭没 有影响.

6 结论

(1)阿瓦特构造带是库车坳陷西段典型挤压构 造转换带,由乌什凹陷向东至阿瓦特凹陷,形成了 由叠瓦逆冲断层向含盐盆地内的拖曳盐相关褶皱 过渡的构造转换特征.受盐岩尖灭的影响,塔拉克 右旋走滑断层发育于乌什凹陷和阿瓦特凹陷交界 处.沿着塔拉克走滑断层发育塔拉克向斜、塔拉克 背斜和南塔拉克背斜等拖曳构造,它们的轴线与挤 压方向斜交,为典型的盐相关雁列褶皱.两褶皱不 断向阿瓦特凹陷内部延伸,影响阿瓦特凹陷整体构 造形态.地震剖面解译和物理模拟实验均表明越靠 近塔拉克走滑断层,褶皱拖曳揉皱作用越强,甚至 容易发育褶皱相关断层,促使盐岩出露地表.

(2)塔拉克断层是一条发育于含盐沉积盆地边缘的滑脱形成走滑构造.该走滑断层属于盐盆边界调节性构造,主要影响盐上覆地层的构造变形,其根部垂向上消失于盐岩层内部,没有向盐下基底地层延伸并造成盐下基底地层的走滑构造变形.

(3)阿瓦特构造转换带新生代变形主要受区域 挤压作用、盐层分布及基底断裂活动共同控制.

致谢:本文物理模拟实验在中国石油勘探开发 研究院西北分院完成,衷心感谢西北分院王宏斌、马 德龙和崔键等领导及工程师对模拟实验的支持.在 本文地表三维扫描数据处理得到南京大学博士研究 生杨双提供的帮助,中国石油塔里木油田分公司提 供了宝贵的基础地质资料,同时两位审稿专家和编 辑提出了宝贵修改意见,在此一并致以深切谢意.

References

Bahroudi, A., Koyi, H., 2003. Effect of Spatial Distribution of Hormuz Salt on Deformation Style in the Zagros Fold and Thrust Belt: An Analogue Modelling Approach. *Journal of the Geological Society*, 160(5): 719-733. https://doi.org/10.1144/0016-764902-135

- Borderie, S., Graveleau, F., Witt, C., et al., 2018. Impact of an Interbedded Viscous Décollement on the Structural and Kinematic Coupling in Fold-and-Thrust Belts: Insights from Analogue Modeling. *Tectonophysics*, 722: 118-137. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.019
- Chen, S. P., Tang, L. J., Jin, Z. J., et al., 2004. Thrust and Fold Tectonics and the Role of Evaporites in Deformation in the Western Kuqa Foreland of Tarim Basin, Northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 21 (8): 1027-1042. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2004.01.008
- Chen, Y.Y., Li, Y.Q., Wei, D.T., et al., 2022. Quantitative Relationship between Tectonic Deformation and Topography in Bogda Piedmont of Eastern Tianshan Mountains: Based on 3D Structural Modeling and Geomorphic Analysis. *Earth Science*, 47(2): 418-436 (in Chinese with English abstract).
- Cotton, J. T., Koyi, H. A., 2000. Modeling of Thrust Fronts above Ductile and Frictional Detachments: Application to Structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 351-363. https://doi.org/10.1130/0016-7606 (2000)112351: motfad>2.0.co;2
- Fan, X. G., Jia, D., Yin, H. W., et al., 2020. Analogue Modeling of the Northern Longmen Shan Thrust Belt (Eastern Margin of the Tibetan Plateau) and Strain Analysis Based on Particle Image Velocimetry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 198: 104238. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2020.104238
- Gao, L., Rao, G., Tang, P. C., et al., 2020. Structural Development at the Leading Edge of the Salt-Bearing Kuqa Fold-and-Thrust Belt, Southern Tian Shan, NW China. Journal of Structural Geology, 140: 104184. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104184
- Han, Y.Z., Gu, Y.X., Liu, J., et al., 2016. Tectonic Origin and the Prospect of Oil Gas in West Kelasu Structural Belt: A Case Study of Awat Segment. *Natural Gas Geoscience*, 27(12): 2160-2168 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. J., Mitra, S., 2017. Geometry and Evolution of Fold– Thrust Structures at the Boundaries between Frictional and Ductile Detachments. *Marine and Petroleum Geolo*gy, 85: 16-34. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2017.04.011
- Li, S. Q., Wang, X., Suppe, J., 2012. Compressional Salt

Tectonics and Synkinematic Strata of the Western Kuqa Foreland Basin, Southern Tian Shan, China. *Basin Research*, 24(4): 475-497. https://doi. org/10.1111/ j.1365-2117.2011.00531.x

- Li, S.Q., Tang, P.C., Rao, G., 2013. Cenozoic Deformation Characteristics and Controlling Factors of Kalayuergun Structural Belt, Kuqa Fold and Thrust Belt, Southern Tianshan. *Earth Science*, 38(4): 859-869 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C., Yin, H.W., Wang, W., et al., 2017. Application of the Critical Taper Model in the Subsalt Structural Wedges—Example from Kelasu Structure Belt of Kuqa Depression. *Geological Journal of China Universities*, 23(3): 491-498 (in Chinese with English abstract).
- Lin, T., Ran, Q.G., Zeng, X., et al., 2015. Petroleum"Orderly Accumulation" Regularity and Exploration Significance in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(3): 270-276 (in Chinese with English abstract).
- Long, Y., Chen, H.L., Cheng, X.G., et al., 2020. Analogue Modeling on Thickness and Property Differences of Shallow Décollement along the Strike: Insights into the Wushi and Kuqa Fold and Thrust Belts. Acta Geologica Sinica, 94(6): 1763-1779 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Y. Q., Li, Y. Q., Yan, B., et al., 2021. Response of Surface Erosion to Crustal Shortening and Its Influence on Tectonic Evolution in Fold-and-Thrust Belts: Implications from Sandbox Modeling on Tectonic Geomorphology. *Tectonics*, 40(5):e2020TC006515. https://doi. org/10.1029/2020tc006515
- Neng, Y., Xie, H. W., Yin, H. W., et al., 2018. Effect of Basement Structure and Salt Tectonics on Deformation Styles along Strike: An Example from the Kuqa Fold-Thrust Belt, West China. *Tectonophysics*, 730: 114-131. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.02.006
- Paridiguli, B., Xie, H.W., Cheng, X.G., et al., 2020. Deformation Features and Tectonic Transfer of the Gumubiezi Fault in the Northwestern Margin of Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 703-712 (in Chinese with English abstract).
- Qi, J.F., Li, Y., Wu, C., et al., 2013. The Interpretation Models and Discussion on the Contractive Structure Deformation of Kuqa Depression, Tarim Basin. *Geology in China*, 40(1): 106-120 (in Chinese with English ab-

stract).

- Tang, L.J., Jia, C.Z., Pi, X.J., et al., 2003. Salt–Related Structural Styles in the Kuqa Foreland Fold Belt. Science in China (Ser. D), 33(1): 38–46 (in Chinese).
- Tang, P.C., Rao, G., Li, S.Q., et al., 2015. The Impact of Salt Layer Thickness on the Structural Characteristics and Evolution of Detachment Folds in the Leading Edge of Kuqa Fold and Thrust Belt. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 312-327 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., 2019. Petroleum Exploration Achievements and Future Targets of Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geolo*gy, 40(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Deng, X. L., Zheng, M. P., et al., 2022. Sedimentary-Geochemical Characteristics and Potash-Prospecting Potential of Gypsum-Salt Layer in Western Kuqa Depression. *Earth Science*, 47(1): 56-71(in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Wu, Z.Y., Yin, H.W., et al., 2021. Compressional Salt Structures of Salt-Bearing Sedimentary Basins and Its Significance to Hydrocarbon Accumulation. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(5): 136-150 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Yin, H. W., Jia, D., et al., 2017. A Sub-Salt Structural Model of the Kelasu Structure in the Kuqa Foreland Basin, Northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 115-126. https://doi.org/10.1016/ j.marpetgeo.2017.08.008
- Wang, W., Yin, H. W., Jia, D., et al., 2018. Calculating Detachment Depth and Dip Angle in Sedimentary Wedges Using the Area-Depth Graph. Journal of Structural Geology, 107: 1-11. https://doi. org/10.1016/j. jsg.2017.11.014
- Wang, W., Yin, H. W., 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. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228456
- Wang, W.F., Wang, Q., Shan, X.J., 2018. Development Characteristics and Formation Mechanism of Transverse Faults along the Kuqa Thrust Belt. *Geology in China*, 45(3): 493-510 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Wang, Z.M., Xie, H.W., et al., 2010. Cenozoic Salt Structure Analysis and Deformation Simulation in Kuqa Depression, Tarim Basin. Scientia Sinica (Terrae), 40(12): 1655-1668 (in Chinese).
- Wang, X.P., Yan, J.J., 1995. Structural Framework of Ma-

jor Faults in Northern Tarim Basin, Xinjiang. *Earth Sci*ence, 20(3): 237–242 (in Chinese with English abstract).

- Wei, Y.J., Yang, T., Guo, B.C., et al., 2019. Oil and Gas Resources Potentials, Exploration Fields and Favorable Zones in Foreland Thrust Belts. *China Petroleum Exploration*, 24(1):46-59 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H., Zhao, M.J., Li, W.Q., et al., 2016. Dynamic Hydrocarbon Accumulation Process in Awate District of Kuqa Depression. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 23(3): 294-299 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X.Z., Li, B.H., Lü, X.X., et al., 2010. Strike-Slip Fault System in Kuqa Foreland Basin and Its Control on Hydrocarbon. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(2): 118-121 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. Y., Yin, H. W., Wang, X., et al., 2014. Characteristics and Deformation Mechanism of Salt-Related Structures in the Western Kuqa Depression, Tarim Basin: Insights from Scaled Sandbox Modeling. *Tectonophysics*, 612/613: 81-96. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2013.11.040
- Xie, H.W., Lei, Y.L., Neng, Y., et al., 2012. 3D Physical Analog Modeling of Salt Movements under Compressive Tectonic Setting. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 47(3): 824-835 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H.J., Li, Y., Tang, Y.G., et al., 2019. Discovery of Kelasu Subsalt Deep Large Gas Field, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(1): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 308-317 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. X., Tang, L. J., Yang, W. J., et al., 2014. Salt Structures and Hydrocarbon Accumulations in the Tarim Basin, Northwest China. AAPG Bulletin, 98(1): 135– 159. https://doi.org/10.1306/05301311156
- Yu, Y.X., Tang, L.J., Yang, W.J., et al., 2007. Structural Segmentation of Salt Structures in the Frontal Ranges of the Kuqa Foreland Fold and Thrust Belt, Northern Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 81(2): 166-173 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Li, J.H., Cheng, P., 2021. Comparison of Salt

Structure Deformation Periods of Conjugated Salt Basins in Central Segment of South Atlantic. *Earth Science*, 46(6): 2218-2229 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, B., Wang, X., 2016. Evidence of Early Passive Diapirism and Tectonic Evolution of Salt Structures in the Western Kuqa Depression (Quele Area), Southern Tianshan (NW China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 125: 138-151. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.021
- Zheng, M., Lei, G.L., Huang, S.Y., et al., 2007. Features of Fault Structure in Southern Margin of West Segment of the South Tianshan, and Its Control to Evolution of the Wushi Sag. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 42(4): 639-655 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈莹莹, 李一泉, 魏东涛, 等, 2022. 东天山博格达山前构造 变形与地形定量关系: 基于三维建模与地貌分析. 地球 科学, 47(2): 418-436.
- 韩耀祖,谷永兴,刘军,等,2016. 塔里木盆地克拉苏构造带 西段构造成因及油气远景展望: 以阿瓦特地区为例.天 然气地球科学,27(12):2160-2168.
- 李世琴, 唐鹏程, 饶刚, 2013. 南天山库车褶皱一冲断带喀 拉玉尔滚构造带新生代变形特征及其控制因素. 地球 科学, 38(4): 859-869.
- 林川, 尹宏伟, 汪伟, 等, 2017. 临界角库伦楔在盐下楔状体 的应用: 以库车坳陷克拉苏构造带为例. 高校地质学 报, 23(3): 491-498.
- 林潼, 冉启贵, 曾旭, 等, 2015. 库车坳陷油气有序聚集规律 及其勘探意义. 新疆石油地质, 36(3): 270-276.
- 龙毅, 陈汉林, 程晓敢, 等, 2020. 浅部滑脱层沿走向的厚度 与性质差异对变形影响的物理模拟研究: 对乌什和库 车褶皱冲断带的启示. 地质学报, 94(6): 1763-1779.
- 帕日地古丽·布苏克,谢会文,程晓敢,等,2020.塔里木盆 地西北缘古木别孜断裂变形特征和构造转换.石油勘 探与开发,47(4):703-712.
- 漆家福,李勇,吴超,等,2013. 塔里木盆地库车坳陷收缩构 造变形模型若干问题的讨论.中国地质,40(1): 106-120.
- 汤良杰, 贾承造, 皮学军, 等, 2003. 库车前陆褶皱带盐相关 构造样式. 中国科学(D辑), 33(1): 38-46.
- 唐鹏程, 饶刚, 李世琴, 等, 2015. 库车褶皱一冲断带前缘盐 层厚度对滑脱褶皱构造特征及演化的影响. 地学前缘, 22(1): 312-327.
- 田军, 2019. 塔里木盆地油气勘探成果与勘探方向. 新疆石

油地质,40(1):1-11.

- 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(1): 56-71.
- 王莉,吴珍云,尹宏伟,等,2021.含盐沉积盆地挤压盐构造
 及其对油气成藏的意义.地质科技通报,40(5):
 136-150.
- 王伟锋,王乾,单新建,2018. 库车前陆冲断带横断层发育 特征及其形成机制.中国地质,45(3):493-510.
- 王燮培, 严俊君, 1995. 塔里木盆地北部断裂格架分析. 地 球科学, 20(3): 237-242.
- 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. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1655-1668.
- 蔚远江,杨涛,郭彬程,等,2019.前陆冲断带油气资源潜力、勘探领域分析与有利区带优选.中国石油勘探,24 (1):46-59.
- 吴海,赵孟军,李伟强,等,2016.库车坳陷阿瓦特地区油气 动态演化过程.断块油气田,23(3):294-299.

- 吴晓智,李佰华,吕修祥,等,2010. 库车前陆盆地走滑断裂 形成机理及其对油气的控制. 新疆石油地质,31(2): 118-121.
- 谢会文, 雷永良, 能源, 等, 2012. 挤压作用下盐岩流动的三 维物理模拟分析. 地质科学, 47(3): 824-835.
- 杨海军,李勇,唐雁刚,等,2019.塔里木盆地克拉苏盐下深 层大气田的发现.新疆石油地质,40(1):12-20.
- 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. 高校地质学报,17 (2):308-317.
- 余一欣,汤良杰,杨文静,等,2007. 库车前陆褶皱一冲断带前缘盐构造分段差异变形特征.地质学报,81(2): 166-173.
- 章雨,李江海,程鹏,2021.南大西洋中段共轭盐盆盐构造 变形期次对比及意义.地球科学,46(6):2218-2229.
- 郑民, 雷刚林, 黄少英, 等, 2007. 南天山西段南缘断裂构造 特征及对乌什凹陷发育的控制. 地质科学, 42(4): 639-655.