

玛东构造带超深层盐相关构造特征及有利区预测

徐世东^{1,2}

1. 中国石化胜利石油管理局博士后科研工作站, 山东东营 257000;
2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257000

摘要: 塔里木盆地玛东构造带是世界上保存最好的早古生代褶皱—冲断带之一, 由于构造的复杂性, 其中寒武统盐相关构造特征和变形机理目前还存在较大的争议, 这在一定程度上制约了该地区超深层盐下油气勘探。本研究基于二维地震资料厘定了盐相关构造样式, 确定了其变形期次和演化序列, 建立了构造演化与板块活动的响应关系, 讨论了盐相关构造变形机理, 预测了盐下油气有利区。玛东构造带中寒武统膏盐岩盐上多发育向腹陆方向冲断的破冲褶皱, 盐下主要为剪切褶皱作用(含压扁褶皱作用)形成的基底卷入型冲起构造。主要变形期是奥陶纪末期和志留纪末期, 受控于阿尔金—祁连地体和柴达木地块与塔里木板块的拼贴碰撞。中寒武统膏盐岩层是该地区反冲断层形成的最关键的驱动因素之一。剪切褶皱作用可以间接导致形成陡倾或直立的裂缝, “盐上破冲褶皱+盐下冲起构造”的组合是超深层盐下最有力的勘探目标。

关键词: 中寒武统; 盐相关构造; 反冲断层; 褶皱机理; 有利区预测
中图分类号: P618.13 收稿日期: 2025-12-29

Structural Characteristics and Favorable Target Prediction of Ultra-deep Salt-related Structures in the Madong Structural Belt

Xu Shidong^{1,2}

1. Postdoctoral Scientific Research Working Station of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China;
2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China

Abstract: The Madong structural belt in the Tarim Basin is considered one of the best-preserved Early Paleozoic fold-thrust belts in the world. Due to its complicate structures, significant controversy persists regarding the characteristics and deformation mechanisms of Middle Cambrian salt-related structures, which has constrained ultra-deep hydrocarbon exploration in the region. This study delineated the styles of salt-related structures based on 2D seismic data, determined their

基金项目: 中国石化胜利石油管理局博士后科研课题《东营凹陷孔店组构造演化及沉积充填特征》; 油气重大专项(2024ZD1400101)。

作者简介: 徐世东(1993-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事油区构造解析方面的研究工作。
ORCID: 0000-0002-5846-011X, E-mail: xushd01.slyt@sinopec.com

deformation phases and evolutionary sequence, established the response relationship between structural evolution and plate activities, discussed the deformation mechanisms, and predicted favorable sub-salt hydrocarbon targets. In the Madong structural belt, the post-salt strata predominantly developed hinterland-vergent break-thrust folds, while the sub-salt strata were dominated by basement-involved pop-up structures formed through shear folding (including flattening folding). The main deformation periods occurred at the end of the Ordovician and the Silurian, controlled by the amalgamation and collision of the Altun-Qilian Terrane and the Qaidam Block with the Tarim Plate. The Middle Cambrian gypsum-salt layer is one of the most critical driving factors for the formation of back-thrust faults in this belt. Shear folding can indirectly lead to the development of steeply dipping or vertical fractures, and the assemblage of “post-salt break-thrust folds and sub-salt pop-up structures” represents the most favorable exploration target for ultra-deep sub-salt strata.

Key words: Middle Cambrian; Salt-related structures; Back-thrust faults; Folding mechanism; Favorable target prediction

0 引言

塔里木盆地是中国最大的陆上含油气叠合盆地，油气资源丰富，发育多套烃源岩和含油气系统，具有“多领域接力增储”特点，被列为世界 49 个陆上超级盆地之一 (Fryklund and Stark, 2020)。随着油气勘探向深层—超深层推进 (张泽等, 2024)，盆地中寒武统越来越受到关注。近几年的勘探成果表明下寒武统发育盆地台盆区最有效的烃源岩和优质白云岩储层 (杨海军等, 2021; Zhang *et al.*, 2022)，中寒武统发育区域性膏盐岩盖层 (徐振平等, 2023; 黄少英等, 2025)，中一下寒武统形成了优越的空间配置条件，是良好的生—储—盖组合。中深 1 井、柯探 1 井和轮探 1 井在中寒武统盐下相继获得突破，展示出该组合广阔的勘探前景。

塔里木盆地玛东构造带是世界上保存最好的早古生代褶皱—冲断带之一 (Li *et al.*, 2016; 王斌等, 2019)，平面呈北东—南西向弧形展布，表现出分段变形特点；在北西—南东方向上，连同塘古凹陷，又具有分带特征。剖面上，变形层主要为南华系—奥陶系，上覆地层变形较弱；中寒武统膏盐岩滑脱层又将该套变形层分隔成盐下和盐上两个变形系统。这种变形的分段、分带和分层性差异早已被众多学者发现和研究，但目前仍存在一些问题尚未解决。其一，关于构造变形样式，有学者认为玛东构造带均为无基底卷入的薄皮构造 (Li *et al.*, 2016; 杨海军等, 2016)；另有学者认为存在盐下基底卷入和盐上盖层滑脱两套逆冲断裂变形系统 (郭颖等, 2016)。有学者认为玛东构造带盐上变形层主要形成断层转折褶皱 (王斌等, 2019)，有的认为形成断层传播褶皱 (何娟等, 2016)，还有的认为形成褶皱相关断层 (Li *et al.*, 2016; 田亚杰等, 2017)。其二，虽然构造动力来自

于东南方向,但玛东构造带普遍发育从西北向东南方向冲断的反冲断层,或称为被动冲断层(杨海军等,2016),关于这些断层的形成机理,目前还存在刚性基底阻挡(李浩武等,2014)和塑性层发育并在构造斜坡上变形(陈书平等,2018)两种观点。其三,中寒武统盐下层褶皱变形机理尚不明确。从现今玛东构造带的变形来看,盐下层低幅度褶皱波长相对较小,而塔里木盆地西南缘地下32 km处存在低速带(岳兰秀等,2003;赵瑞斌等,2008),按此深度计算得到的盐下褶皱波长与实际褶皱波长明显不符。这些存在的问题严重制约了对玛东构造带的构造认识,进而影响了该地区超深层盐下油气勘探。

本研究基于二维地震资料详细解释,充分考虑中寒武统膏盐岩分布和构造动力来源,厘定了玛东构造带盐相关构造样式,确定了其变形期次和演化序列,建立了构造演化与板块活动的响应关系。从岩石组成和动力条件等方面,讨论了盐相关构造变形机理,解释了反冲断层的形成,并通过物理模拟实验进行验证。根据褶皱变形机理,分析了构造改造作用对盐下寒武统的影响,预测了油气有利勘探区。研究结果进一步丰富了玛东构造带盐相关构造理论,对该地区未来超深层油气勘探具有指导意义。

1 研究区地质背景

塔里木盆地位于我国新疆维吾尔自治区南部,归属于古特提斯构造域,面积约 $56\times 10^4\text{ km}^2$,被天山造山带、昆仑造山带和阿尔金走滑断裂带所围限,与伊犁、准噶尔、吐哈、柴达木和费尔干纳等盆地隔山相望(Yang *et al.*, 2018)。根据“三隆四坳”的划分方案,盆地分为塔北隆起、中央隆起、东南隆起、库车坳陷、北部坳陷、西南坳陷和东南坳陷7个一级构造单元以及多个二级构造单元(贾承造, 1997)。玛东构造带属于西南坳陷的一个次级构造单元,北邻塔中凸起、巴楚凸起和麦盖提斜坡,南接叶城凹陷和塘古凹陷(图1a)。平面走向自南向北由NNE逐渐转变为NEE,呈略向NW凸出的帚状,长约220 km,宽90 km,其内发育一系列北东—南西走向的盐相关逆冲断层及构造(郭颖等, 2016; Li *et al.*, 2016)。

玛东构造带经历了多期构造运动,一共发育3个大规模不整合,包括志留系底界(加里东中期 III 幕运动)、上泥盆统底界(晚加里东—早海西期运动)和三叠系底界(晚海西期运动)不整合(图1b)。区内主要沉积古生界、三叠系和新生界,缺失侏罗系和白垩系。寒武系—中奥陶统为海相碳酸盐岩沉积(邬光辉等, 2020),其中,中寒武统发育较厚的膏盐岩,为该地区主要的滑脱层;上奥陶统沉积期发生沉积相变,以碎屑岩为主。志留系—泥盆系沉积海相碎屑岩,仅分布于玛东构造带西北部。石炭系—二叠系全区连续分布,为海陆交互碳酸盐岩和碎屑岩沉积。三叠系为陆相碎屑岩,残存于构造带北端。新生界则主要发育遍布全区的巨厚河湖相沉积。

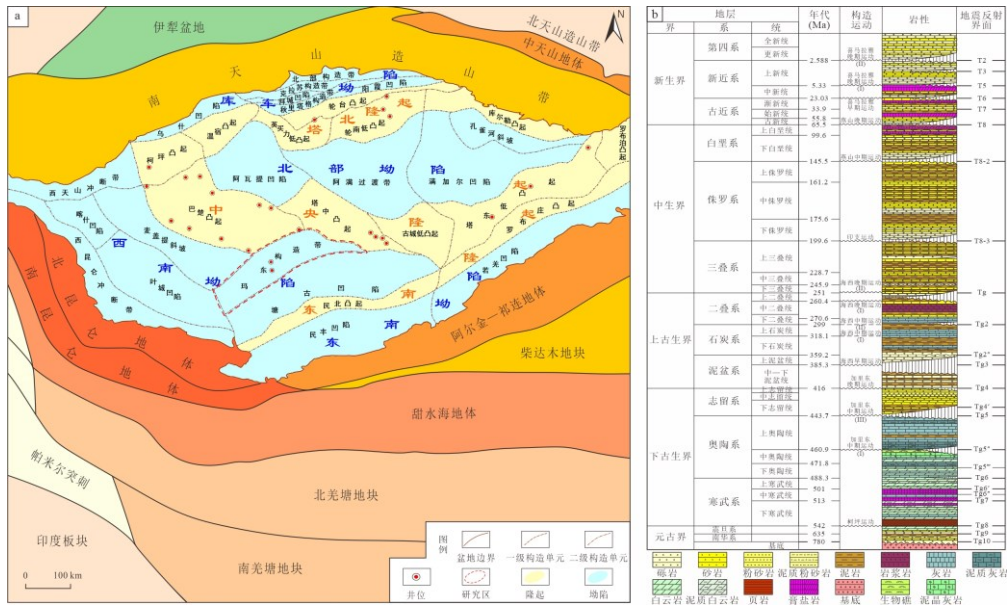


图 1 塔里木盆地构造概述及沉积地层层序

(a) 塔里木盆地周缘板块构造图 (据 Chen *et al.*, 2007 和董云鹏等, 2022 修改) 及构造单元分区; (b) 塔里木盆地沉积地层层序及岩性 (据 Lin *et al.*, 2012 修改)

Fig.1 Overview maps and stratigraphic sequences of the Tarim Basin

(a) Tectonic units of the Tarim Basin and simplified tectonic map of regional plates (modified from Chen *et al.*, 2007 and Dong *et al.*, 2022); (b) Stratigraphic and lithological sequences of the Tarim Basin (modified from Lin *et al.*, 2012)

2 资料与方法

本研究基于二维地震资料详细解释, 分析了玛东构造带盐相关构造样式和平面展布特征。根据不整合、生长地层、断距和断层相关褶皱参数, 如褶皱幅度和溢出面积, 判断逆冲断层的活动时间 (Xu *et al.*, 2024)。在断层没有切过不整合的情况下, 断层活动的时间就是不整合形成的时间, 即在上覆最老地层形成之前, 下伏最新地层形成之后。当断层切过不整合时, 要对比断层切过不整合上下地层的断距, 如果断距相同, 则断层的活动时间是在不整合上覆地层沉积之后; 如果断距不同, 则说明是断层两次活动的结果。对于盲冲断层的活动时间, 则可以根据褶皱溢出面积的变化来判断。具体来说, 针对不同变形机制形成的褶皱, 随褶皱层高度的增加, 膝折褶皱和平行褶皱的溢出面积逐渐增加, 相似褶皱的溢出面积保持不变, 而生长褶皱, 比如生长背斜, 其溢出面积逐渐减小 (图 2)。因此, 一旦溢出面积随褶皱层高度变化的曲线出现“拐点”, 则说明断层发生活动。

对于褶皱机制的分析, 则综合考虑褶皱层厚度、褶皱与断层关系和褶皱的主波长理论。不同褶皱机理形成的褶皱, 其褶皱层厚度不同, 如弯滑褶皱作用和断层相关褶皱均形成等厚褶皱; 纵弯褶皱作用形成的褶皱, 其波长与褶皱层厚度成正比。前陆区褶皱轴面倒向前陆方向, 逆冲断层往往是从腹陆向前陆冲断。

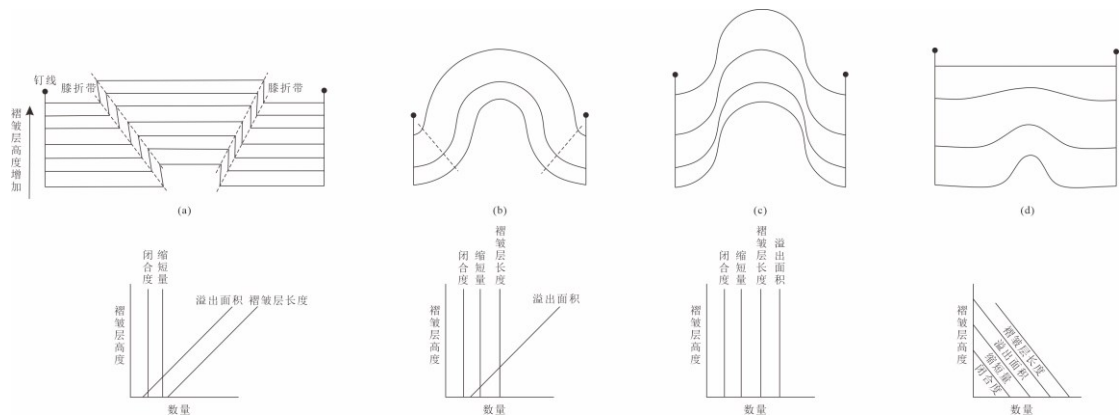


图 2 不同类型褶皱溢出面积随褶皱层高度变化规律

(a) 膝折褶皱；(b) 平行褶皱；(c) 相似褶皱；(d) 生长背斜

Fig.2 Variation patterns of the excess area of different types of folds with respect to fold layer height

(a) Kink folds; (b) Parallel folds; (c) Similar folds; (d) Growth anticlines

3 玛东构造带构造特征

3.1 盐相关构造样式

为更好理解玛东构造带的构造特征，有必要连同其东南侧的塘南褶皱冲断带（塘古凹陷）一起分析。综合考虑构造动力来源和中寒武统膏盐岩分布，从膏盐岩滑脱层上下地层变形耦合程度、断层与褶皱的关系和构造变形组合等方面将玛东—塘南褶皱冲断带盐相关构造划分出多种构造样式（图 3）。不同岩性分区根据单井岩性识别和地震相追踪解释确定（徐振平等, 2023; Xu *et al.*, 2024; 黄少英等, 2025），其中，膏盐岩沉积区指单井标定的膏盐岩沉积段且地震同相轴具有高频或低频、中—强振幅、连续反射特征的区域；含膏岩沉积区指单井标定的含膏和膏质白云岩沉积段且地震同相轴具有中—高频、中—弱振幅、不连续反射特征的区域；无膏盐岩区指无膏盐岩沉积的灰岩沉积区。

在膏盐岩沉积区，盐上构造样式有破冲褶皱（图 3a）和断展褶皱（图 3b）。破冲褶皱是地层发生褶皱在先，后期在褶皱翼部被断层切割或突破，断层两盘岩层产状依然显示完整的背斜褶皱形态（Fischer *et al.*, 1992; 陈书平等, 2007; 漆家福等, 2013）。结合断面倾向与动力来源的关系，破冲褶皱又可以划分出反冲和前冲断层两种样式，且破冲断层在褶皱的前翼和后翼均可发育（图 3a.1-3a.4）。较厚的膏盐岩层塑性流动使地层强烈变形，形成褶皱幅度较大。盐下构造样式主要有冲起构造（图 3e）和多重冲起构造（图 3f），局部还形成多条逆冲断层组成的平行冲断（图 3g）。纵向上，盐上和盐下变形层的组合样式包括同向叠合冲断（图 3j、3k）和反向叠合冲断（图 3l、3m）。根据盐下构造变形差异，这两种样式又均可分为盐上滑脱和盐下冲起（图 3j、3l）以及盐上滑脱和盐下冲断（图 3k、3m）两种组合。

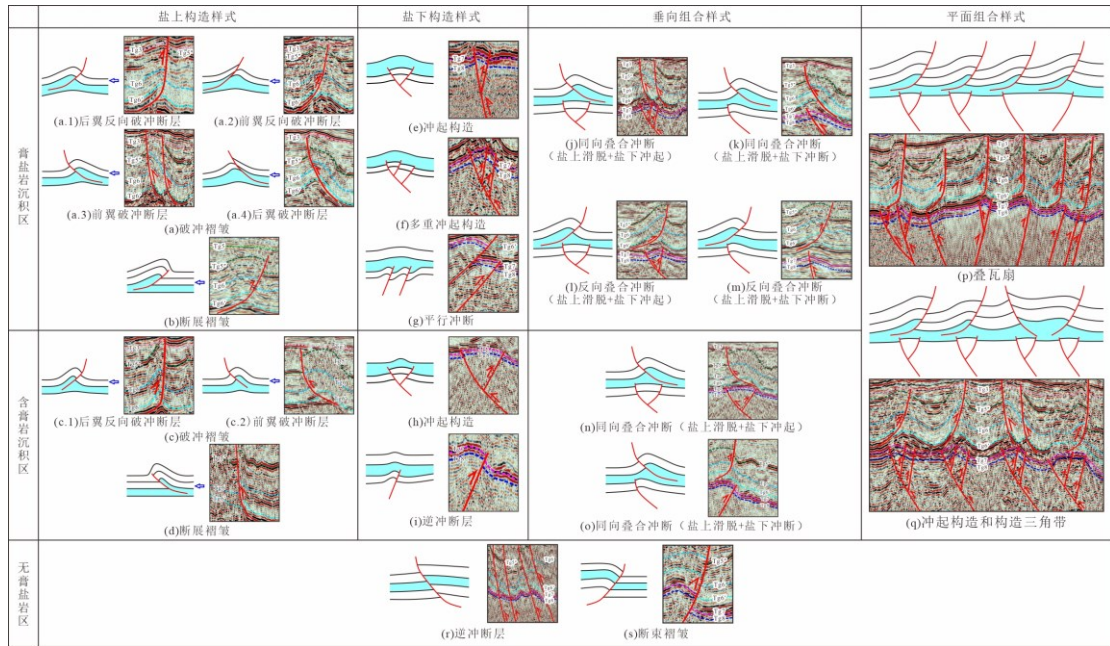


图3 玛东—塘南褶皱冲断带中寒武统盐相关构造样式 (蓝色为中寒武统膏盐岩)

Fig.3 Salt-related structural styles of the Middle Cambrian in the Madong-Tangnan fold-thrust belt (Blue color indicates the Middle Cambrian gypsum-salt layer)

在含膏岩沉积区，盐上变形层同样发育破冲褶皱（图 3c）和断展褶皱（图 3d），但因地层塑性变弱，形成褶皱幅度有所减小。此外，构造样式相对单一，破冲褶皱形成的反向破冲断层仅发育在褶皱后翼（图 3c.1），而前冲断层只出现在前翼（图 3c.2）。盐下变形层发育冲起构造（图 3h）和单条逆冲断层（图 3i）。纵向上的组合样式只有同向叠合冲断，分为盐上滑脱和盐下冲起（图 3n）以及盐上滑脱和盐下冲断（图 3o）两类，不发育反向叠合冲断。剖面尺度上，在膏盐岩分布的范围内，盐上单一构造样式多组合成叠瓦扇（图 3p），冲起构造和构造三角带（图 3q）。

在无膏盐岩沉积区，地层整体被断层切割，形成逆冲断层（图 3r）和断束褶皱（图 3s）两种构造样式，中寒武统上、下地层发生统一协调变形。

总体来说，玛东构造带以中寒武统膏盐岩滑脱层为分隔，发育两套变形系统：盐上为向腹陆方向冲断的破冲褶皱和断展褶皱，盐下为基底卷入型的冲起构造和多重冲起构造。自北西向南东方向，随地层岩性变化，不同岩性区也表现出不同的构造特点：膏盐岩沉积区构造样式最为丰富，含膏岩沉积区构造样式次之，这两个地区盐上、盐下地层均表现为分层变形；而无膏盐岩区构造样式最为单一，地层发生整体错断变形。平面上（图 4），膏盐岩沉积区发育同向叠合和反向叠合冲断，含膏岩沉积区只发育同向叠合冲断，无膏盐岩区则只形成逆冲断层。此外，在膏盐岩沉积区，以地震测线 CC' 为界，其南部主要发育反向叠合冲断，北部发育同向叠合冲断。

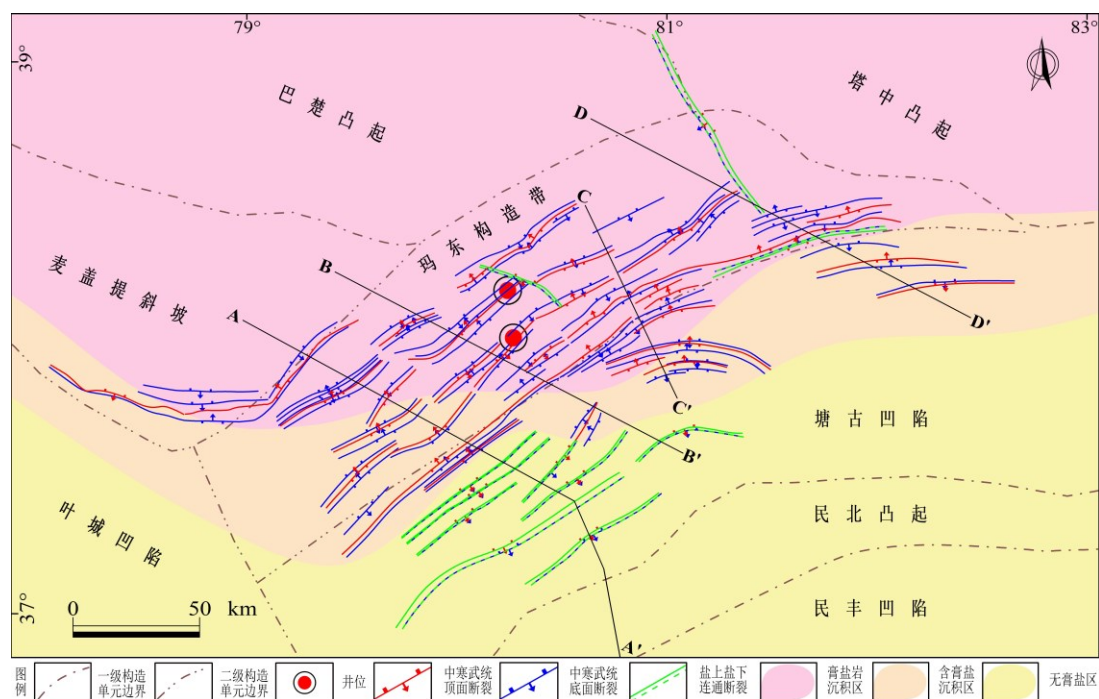


图 4 玛东—塘南褶皱冲断带中寒武统盐顶、盐底断裂分布图

Fig.4 Distribution of faults at the top (Tg6') and bottom (Tg7) of the Middle Cambrian gypsum-salt layer in the Madong-Tangnan fold-thrust belt

3.2 盐相关构造形成与演化

在玛东—塘南褶皱冲断带南部剖面上（图 5、6），膏盐岩沉积区发育反向叠合冲断且盐上反向破冲断层表现为多期活动。含膏岩沉积区发育同向叠合冲断且盐上反冲断层多为早期活动。无膏盐岩区地层协调变形，被逆冲断层切割，断层从早期到晚期发生不同程度的活动。剖面尺度上，中寒武统膏盐岩分布范围内，盐上断层组合成叠瓦扇，冲起构造和构造三角带。从不整合、断层与地层切割关系和溢出面积上看，剖面 AA'和 BB'上，盐相关构造的主要变形期为加里东中期 III 幕，海西中、晚期和喜马拉雅期都有不同程度的复活。

在中部剖面上（图 7），盐上变形系统发育一系列反冲断层传播褶皱，组合成叠瓦状构造，盐下则形成近直立的冲起构造；纵向上，盐上、盐下变形层组合成同向和反向叠合冲断。断层发育处膏盐层显著增厚。从盐上、盐下变形特点看，地层收缩量明显不协调，盐上收缩量大，盐下收缩量小，说明盐下地层存在压扁效应。盐相关构造主要的活动时间为奥陶纪末期和志留纪末期。海西中期—喜马拉雅期构造活动在玛东构造带中部表现不明显。

在北部剖面上（图 8），盐上、盐下地层变形组合成同向叠合冲断。在膏盐岩沉积区，断层在海西中晚期、印支期、燕山期和喜马拉雅期均有所活动；而在含膏岩沉积区，断裂只在奥陶纪末期发生构造活动，形成构造三角带。此外，该地区发育两条深大断裂，一条北西—南东走向，早期形成，晚期多次活动；另一条则只在早期发生构造活动。两条断层均切穿了中寒武统的膏盐岩地层，盐上、

盐下表现为统一协调变形。盐相关构造的主要活动期是加里东中、晚期。海西早期发生的区域构造隆升和剥蚀夷平形成了塔里木盆地内最大规模的上泥盆统底界不整合。

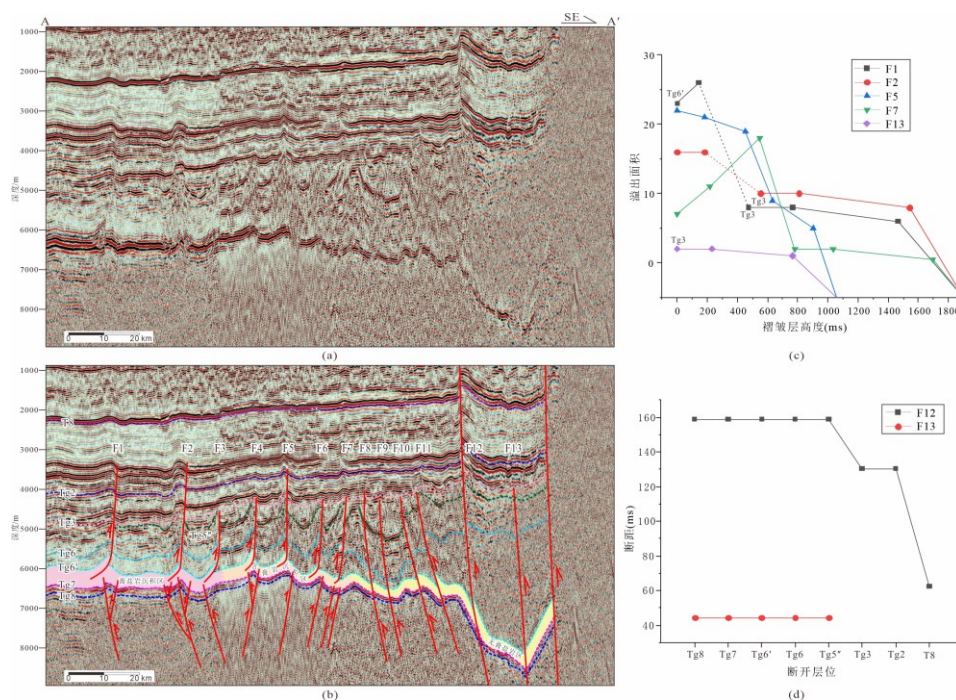


图5 二维地震剖面 AA'解释结果 (a、b) (剖面位置见图3) 及断裂活动时间判别 (c、d)

Fig.5 Interpreted results of 2D seismic profile AA' (a, b) (Profile location is shown in Fig.3) and determination of fault activity (c, d)

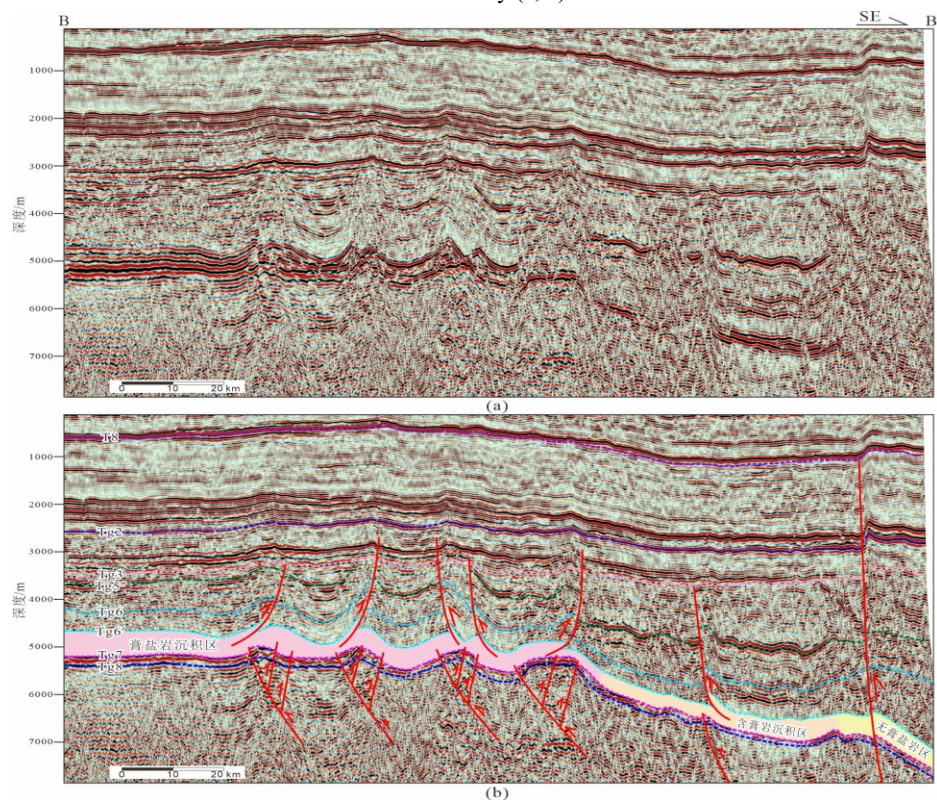


图6 二维地震剖面 BB'解释结果 (剖面位置见图3)

Fig.6 Interpreted results of 2D seismic profile BB' (Profile location is shown in Fig.3)

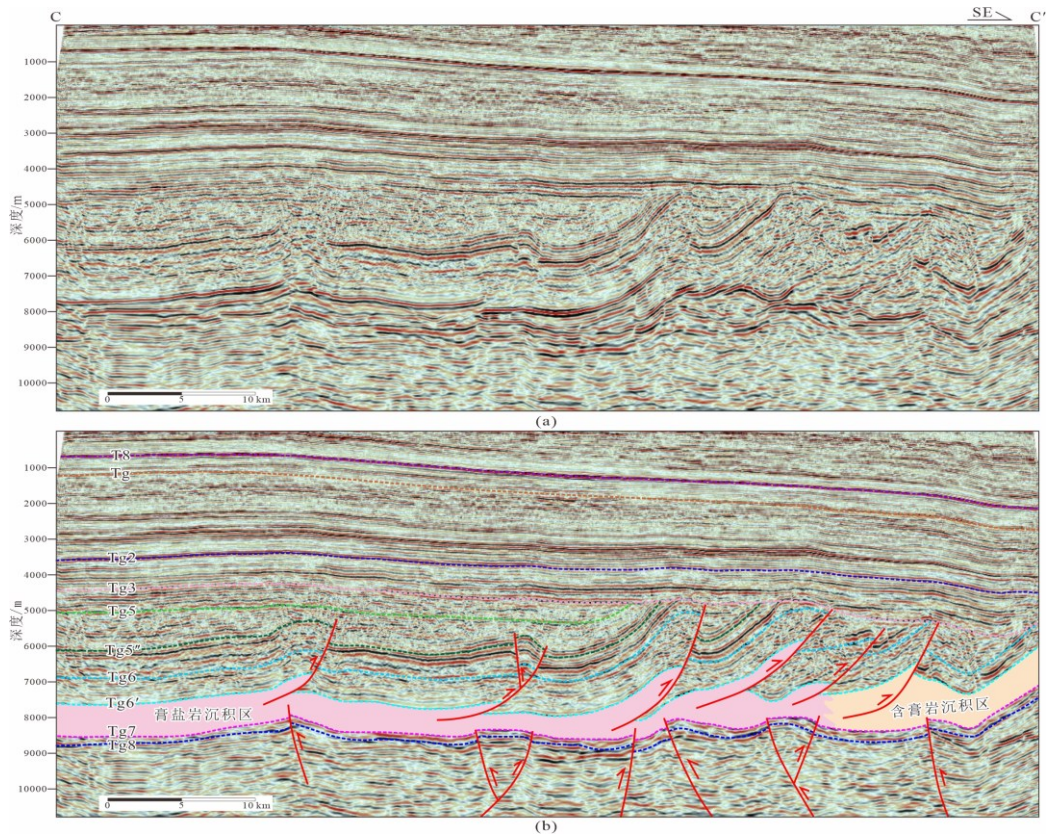


图7 二维地震剖面 CC'解释结果 (剖面位置见图3)

Fig.7 Interpreted results of 2D seismic profile CC' (Profile location is shown in Fig.3)

总体来说，（1）在变形时间方面，玛东构造带的主要变形期为奥陶纪末期和志留纪末期（图9）。不同构造部位变形时间有所不同，中部主要发生早古生代的构造活动，而南部和北部则持续活动。从保留的地层来看，玛东构造带南部奥陶系直接与上泥盆统一石炭系不整合接触；中部奥陶系与志留系、志留系与上泥盆统一石炭系不整合接触；北部奥陶系与志留系、志留系—中泥盆统一石炭系不整合接触。自南西至北东，奥陶系和石炭系之间残留的地层越来越多，反映构造活动逐渐减弱。海西中期以来，各部位虽有不同程度的构造复活，但强度均较弱；（2）在膏盐岩分布与构造样式时空差异方面，膏盐岩沉积区内，破冲褶皱多期活动，后期地层持续发生褶皱变形，翼部产生的破冲断层多切割上古生界；断展褶皱一般在早古生代发生构造活动，断层只切割下古生界；同向叠合和反向叠合冲断中“盐上滑脱+盐下冲起”的垂向组合样式持续活动，而“盐上滑脱+盐下冲断”的组合多在早期活动。含膏岩沉积区破冲褶皱和断展褶皱构造活动集中在古生代，前者产生的破冲断层切割上古生界，后者断层只切割下古生界；无膏盐岩区断层向下断至基底，向上切割新生界，发生多期活动，地层整体错断变形，不形成褶皱。因此，膏盐岩的存在控制着构造变形的多期活动，同时，其塑性流动也吸收和缓冲了部分构造应力，使断层只能向上切割有限的地层，影响着构造变形的方式。

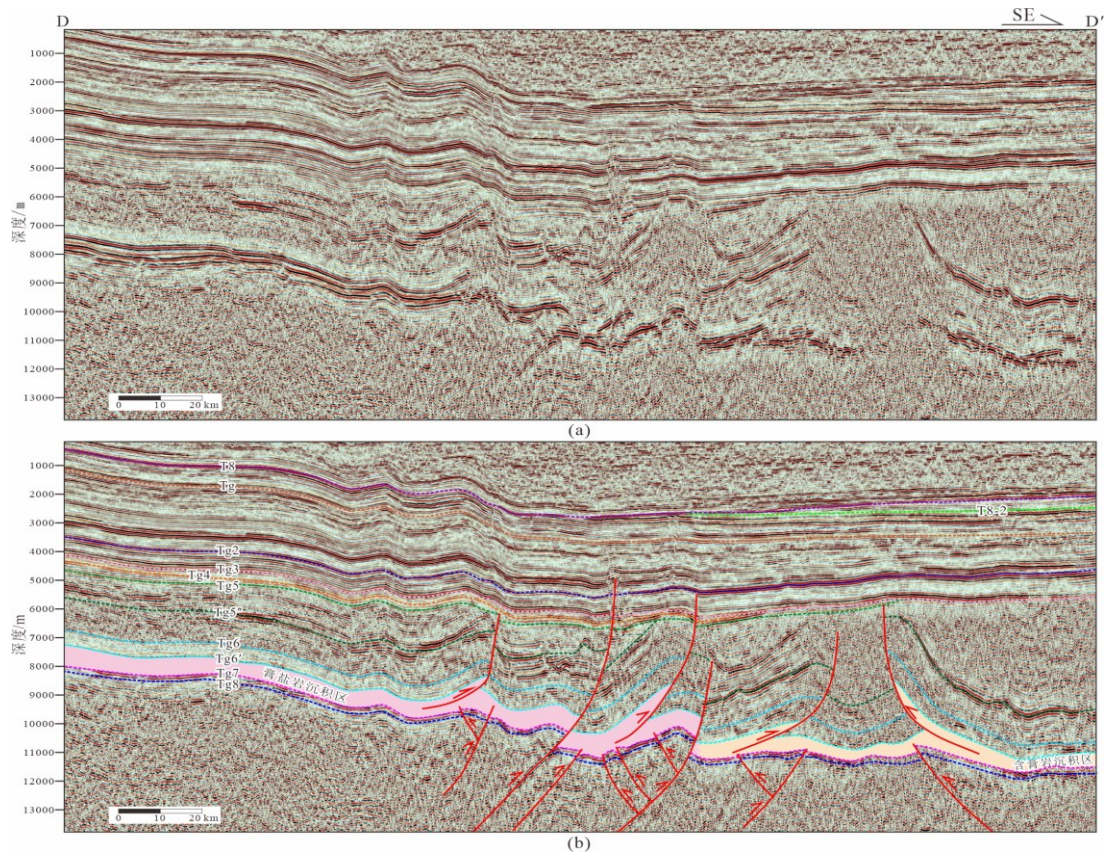


图 8 二维地震剖面 DD'解释结果 (剖面位置见图 3)

Fig.8 Interpreted results of 2D seismic profile DD' (Profile location is shown in Fig.3)

3.3 构造演化与板块活动的响应关系

挤压盆地中的构造变形主要集中在靠近构造动力来源的地区 (Bonini, 2007; Graveleau *et al.*, 2012), 逆冲断层走向垂直于构造挤压应力方向 (Anderson, 1951)。玛东—塘南褶皱冲断带紧邻塔里木盆地东南部的阿尔金造山带, 二者构造走向平行, 反映了其构造演化与阿尔金造山带相关的板块活动具有密切联系。

前寒武纪, 塔里木板块是一个独立的板块, 在冈瓦纳古大陆的北缘, 已经与澳大利亚板块分隔开来。在南华纪, 北昆仑洋 (库地洋) 和南天山洋开始张开, 震旦纪进一步张开, 与此同时, 阿尔金洋也开始张开 (图 10a) (郝江波等, 2025)。随着周缘海洋的不断扩张, 塔里木板块内形成 NW—SE 向大型裂谷。

早—中寒武世, 在前期构造格局的基础上, 塔里木板块形成了大型碳酸盐岩台盆沉积体系。西部发育塔西克拉通内碳酸盐岩台地, 东部形成罗西台地, 中部为满东克拉通内坳陷, 夹持在两个台地之间, 表现为东西差异分化 (邬光辉等, 2020)。在该时期, 北阿尔金洋向南俯冲于阿尔金—祁连地体之下, 导致阿尔金—祁连地体向塔里木板块靠近 (图 10a) (Li *et al.*, 2018)。

晚寒武—中奥陶世, 塔里木盆地继承了中寒武世末期的构造格局并接受了广泛沉积。中奥陶世末期, 在塔里木板块西南部, 南昆仑地体开始拼贴上来 (Zhang *et al.*, 2019), 导致西南坳陷、巴楚凸起和塔中凸起的隆升。此时, 库地洋尚未

完全闭合，玛东构造带整体表现为向北倾的斜坡。

晚奥陶世，塔里木板块与南昆仑地体持续拼贴，导致塔里木整体上由西南向东北倾斜。奥陶纪末期是塔里木盆地的一个关键构造变革期。此时，在盆地东南部，北祁连洋闭合，阿尔金—祁连地体与塔里木板块的拼贴（图 10a）（Li *et al.*, 2018）造成了玛东构造带的强烈变形（图 10b），其上形成一系列北东—北北东向反冲断裂，共同组成了向北西凸出的弧形断裂构造带。

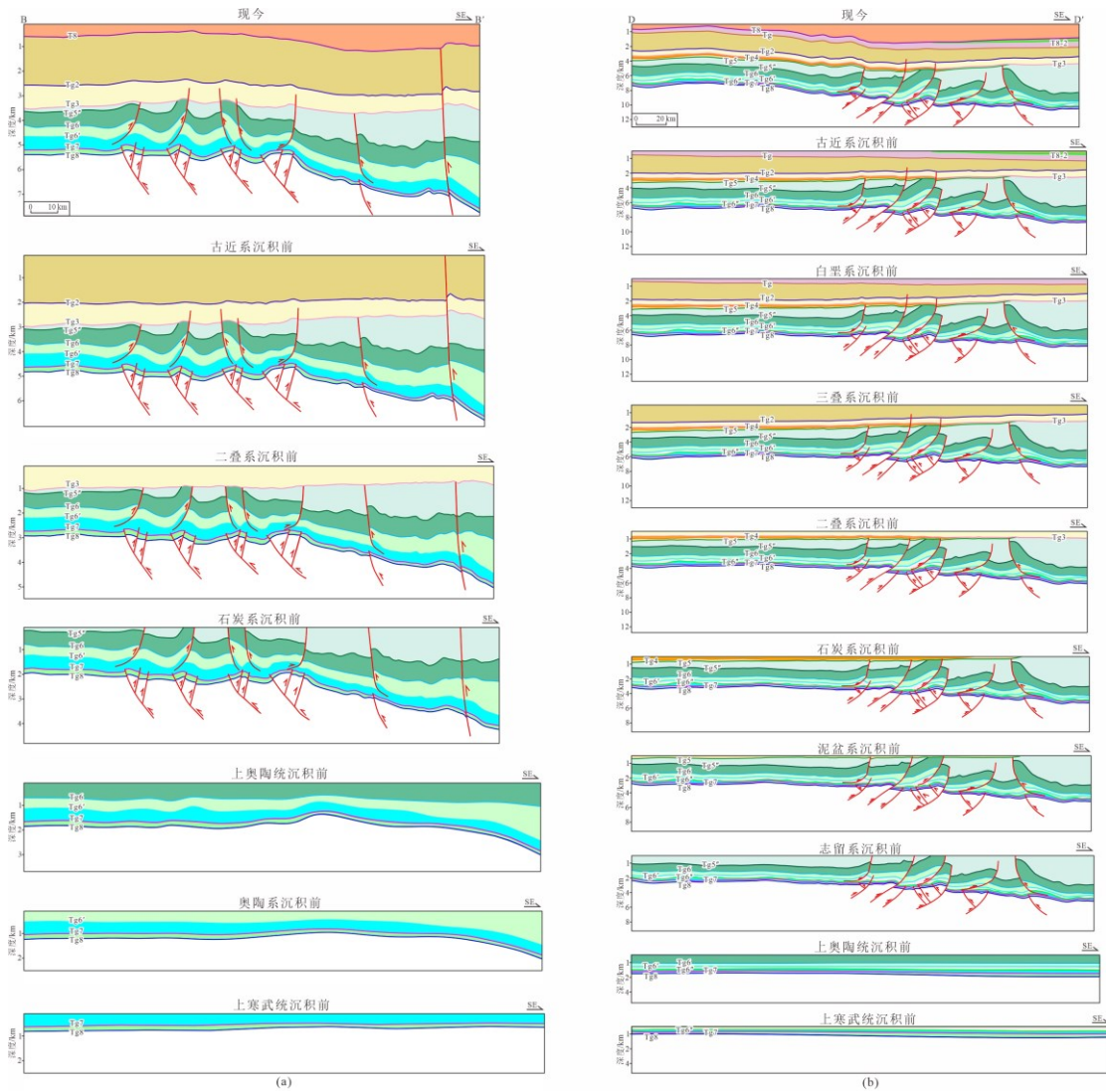


图 9 玛东构造带南 (a)、北 (b) 部构造演化历史 (剖面位置见图 3)

Fig.9 Structural evolution history of the southern (a) and the northern (b) Madong structural belt (Profile locations are shown in Fig.3)

志留纪，在塔里木板块东南部，阿尔金—祁连地体的持续碰撞，伴随着柴达木地块向塔里木板块的不断靠近（Wu *et al.*, 2019），造成了东南部地区的持续隆升。志留纪末期，南祁连洋闭合，柴达木地块与塔里木板块拼贴（图 10a）（Yu *et al.*, 2021），导致玛东构造带进一步变形，其中部和北部断裂继承性活动（图 10c）。晚奥陶世末期和志留纪末期共同构成了玛东构造带的主要变形期。

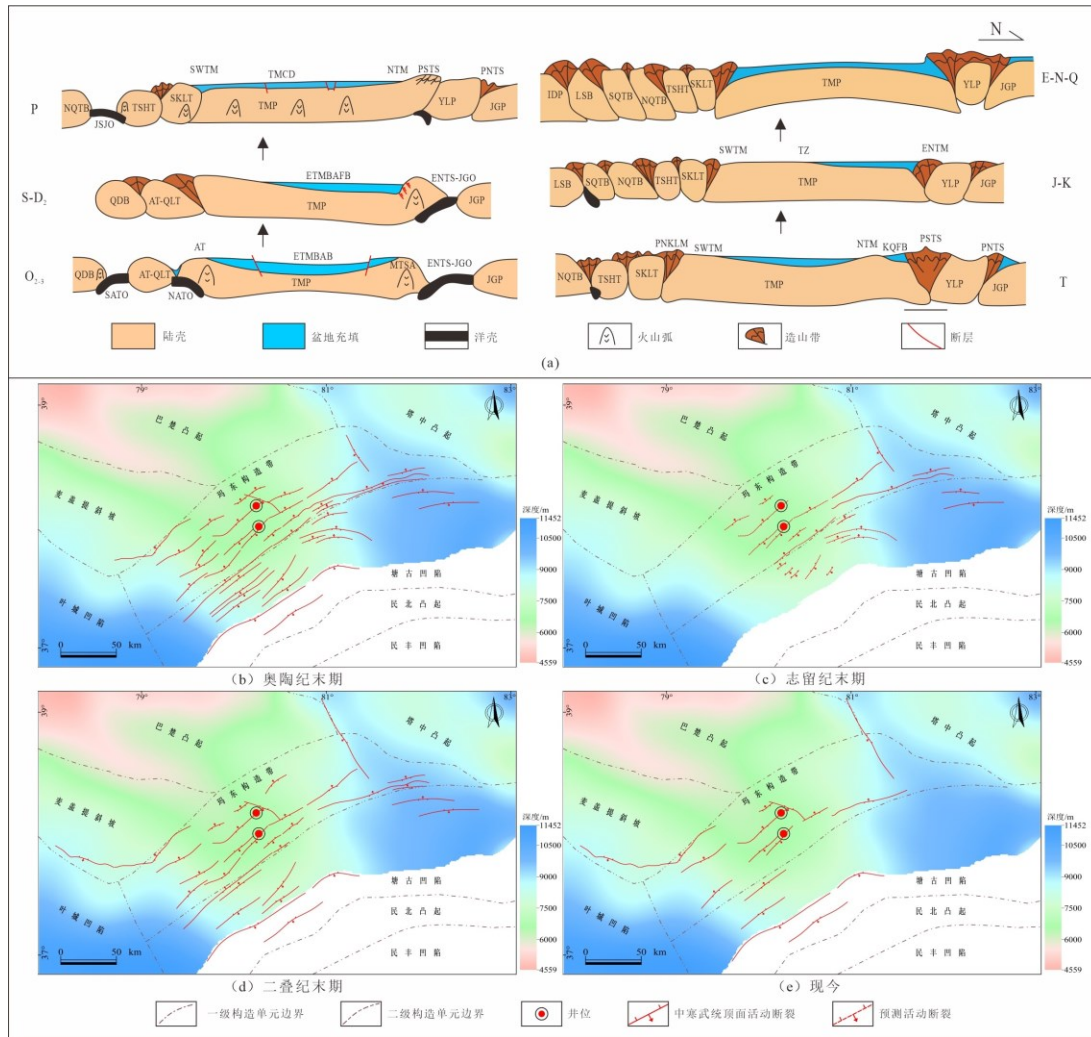


图 10 玛东构造带构造演化与板块活动的响应关系

(a) 塔里木板块东部及其周缘地区构造演化过程 (据 Chen *et al.*, 2007 修改); (b-e) 玛东构造带中寒武统顶面活动断裂分布 (底图为中寒武统顶面在不同时期古地貌形态) 注: ATR: 阿尔金裂谷, ATU: 阿尔金隆起; AT: 阿尔金, AT-QLT: 阿尔金—祁连山地体, ENTS-JGR: 东北天山—准噶尔裂谷, ETMCMB: 塔里木东部大陆边缘盆地, ENTS-JGO: 东北天山—准噶尔洋, ETMBAB: 塔里木东部弧后盆地, ETMBAFB: 塔里木东部弧后前陆盆地, ENTM: 东北塔里木, IDP: 印度板块, JGP: 准噶尔板块, JSJO: 金沙江洋, KQFB: 库车前陆盆地, KL-QMP: 昆仑—柴达木板块, KMR: 库满裂谷, LSB: 拉萨地块, MTSA: 中天山岛弧, NATO: 北阿尔金洋, NTM: 北塔里木, NTSO: 北天山洋, NQTB: 北羌塘地块, PSTS: 古南天山, PNTS: 古北天山, PNKLM: 古北昆仑山, QDB: 柴达木地块, SATO: 南阿尔金洋, STSO: 南天山洋, SKLT: 南昆仑地体, SQTB: 南羌塘地块, TMCD: 塔里木克拉通内坳陷, TZ: 塔中, TMP: 塔里木板块, WTMCD: 塔里木西部克拉通内坳陷, YLP: 伊犁板块

Fig.10 Response relationship between structural evolution of the Madong structural belt and plate activities (a) Tectonic evolution of the eastern Tarim Plate and its peripheral regions (modified from Chen *et al.*, 2007); (b-e) Distribution of active faults at the top of the Middle Cambrian gypsum-salt layer in the Madong structural belt (the base map illustrates the paleogeomorphic morphology of the Middle Cambrian top surface at different periods)

从泥盆纪开始, 板块构造活动主要发生在塔里木盆地的北部和西南部 (图 10a)。二叠纪末期是盆地的另一个关键构造变革期。北部南天山造山带强烈的造山隆升导致整个塔北地区大幅度隆起; 西南部, 南昆仑洋闭合, 甜水海地体与

塔里木板块的完全拼贴,使后者与外海分隔,转变为陆内盆地,发育克拉通内坳陷(Li *et al.*, 2020)。该碰撞作用与北部的造山运动使玛东构造带大部分断裂发生活动,但变形强度较微弱(图 10d)。

新生代以来,印度板块和欧亚板块强烈碰撞的远程效应使亚洲大陆发生陆内挤压和侧向构造逃逸作用,南天山造山带和西昆仑造山带在此过程中重新活动(图 10a)。盆地大部分地区发生不同程度的挠曲沉降,只有巴楚凸起冲起抬升。玛东构造带上活动断裂主要集中在南部,构造变形强度甚微(图 10e)。

4 讨论

玛东构造带是世界上保存最好的古老褶皱—冲断带之一,经历了加里东中、晚期的强烈变形,海西早期的区域剥蚀和后续的深埋过程,以及海西中、晚期和喜马拉雅期较弱的构造活动,形成了塔里木盆地内独有的构造变形特征。中寒武统膏盐岩滑脱层将其分隔成盐上和盐下两个变形系统,二者变形机理互不相同。膏盐岩层的存在也是该区反冲断层形成和各部位构造差异的主要原因。

4.1 玛东构造带构造变形机理

玛东构造带经历了多期的构造演化,其盐上变形系统主要发育向腹陆方向冲断的破冲褶皱,盐下主要为基底卷入型的冲起构造和多重冲起构造。在区域伸展作用下,该地区南华系—下寒武统主要沉积碎屑岩和白云岩,中寒武统发育巨厚膏盐岩夹灰岩和泥岩(图 11a),上寒武—中奥陶统主要为白云岩。从中奥陶世末期开始,塔里木盆地由东西伸展转变为南北挤压,上奥陶统沉积了一套灰岩夹泥岩。奥陶纪末期,在强烈的北西—南东方向挤压下,玛东褶皱冲断带形成。在变形初期,盐上、盐下地层均发生变形,构造高点垂向对应(图 11b)。盐上变形系统发生弯滑褶皱作用,盐下变形系统为剪切褶皱作用和压扁褶皱作用。主要判断依据有两点,其一,盐上变形层具有等厚褶皱或顶厚褶皱的特征,而盐下具有顶薄褶皱的特征;其二,关于塔里木盆地地壳结构相关的研究表明,盆地内上、下地壳之间,大约在 30~36 km 处(岳兰秀等, 2003; 赵瑞斌等, 2008)存在低速层,而其他位置未见有低速层。软弱层上部强硬层纵弯褶皱作用形成的褶皱主波长计算公式是(Biot, 1961)

$$W_d = 2\pi T \sqrt[3]{\frac{\eta_1}{6\eta_2}} \quad (1)$$

式(1)中, η_1 为强硬层粘度, η_2 为软弱层粘度, T 为强硬层厚度。在认为强硬层和软弱层粘度近似相同的情况下,以塔里木盆地东南坳陷内上地壳顶部和低速层顶部之间的厚度 28 km(邵学钟等, 1997)进行计算,得到的褶皱主波长(最小主波长)为 97 km。而玛东构造带盐下变形层实际发育的褶皱波长在 11~19 km 之间,明显小于计算得到的褶皱主波长。因此,推断玛东构造带盐下褶皱

变形机理为剪切褶皱作用（含压扁褶皱作用）（Yamada and McClay, 2003），而不是弯滑褶皱作用。

在递进变形过程中，盐上褶皱被反冲断层切割并发生滑脱（图 11c），盐上、盐下变形层表面上显示出协调的缩短量，盐上缩短量大，盐下小。而实际上，盐下变形层发生的剪切褶皱作用（含压扁褶皱作用）吸收了一部分缩短量（Yamada and McClay, 2003）。经过区域剥蚀夷平和埋藏作用之后（图 11d、11e），当再次受到挤压应力时，先存断裂复活并影响了上覆地层的变形（图 11f）。剪切褶皱作用改变了盐下地层的产状和应力状态，使其变成一个力学薄弱带或应力集中区，在后期构造抬升与叠加过程中，可以间接地导致盐下变形层发育陡倾和垂向的节理或劈理。

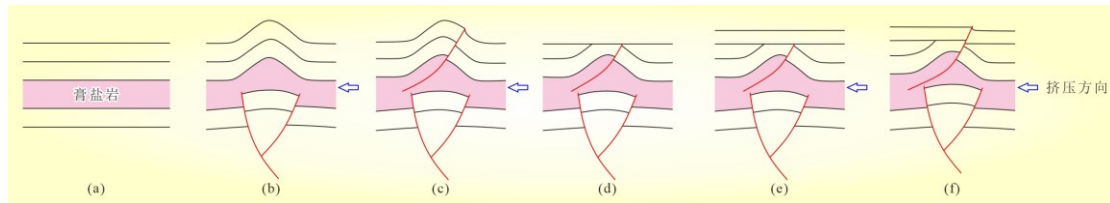


图 11 玛东构造带盐相关构造演化序列

Fig.11 Evolutionary sequence of salt-related structures in the Madong structural belt

4.2 反冲断层的形成

前人研究证明，不存在塑性层或塑性层较薄时，只发育向前陆方向冲断的断层（图 12a）；当存在塑性层时，则容易形成向腹陆方向冲断的断层（图 12b）（Mackay, 1995）。这是由于在整体水平挤压背景下，盐上变形层局部最大主应力轴发生倾斜的结果（陈书平等, 2022）。玛东构造带是一个反冲断裂带，其构造动力来自于阿尔金—祁连地体和柴达木地块与塔里木板块东南缘的拼贴碰撞。为证实膏盐岩塑形层与反冲断层形成的关系，本研究设定了不同条件的物理模拟实验模型进行验证。

在模型 1 中，铺设干沙层，总厚度为 5cm，长 50cm，干砂粒径为 100 目。在挤压初期，靠近挤压端出现前冲断层。递进变形过程中，逆冲断层前展式发展，未出现反冲断层（图 13a）。在模型 2 中，最底部铺设一层干砂，厚度为 2cm。其上铺设一层硅胶，厚度为 1cm。硅胶层之上为粗干砂（80 目）和细干砂（120 目）间互各 3 层，其中粗干砂层厚度为 0.75cm，细干砂层厚度为 0.2cm，顶部再铺设一层厚 0.3cm 的粗干砂。模型总长度为 60cm，宽度为 6.15cm，左侧施加单向挤压应力。变形初期形成前冲断层，变形中期形成反冲断层，变形总体结果是反冲、前冲断层交替出现，且以反冲断层为主，形成三角带和冲起构造（图 13b），剖面整体构造样式组合与玛东构造带类似。从模拟实验结果可以看出，膏盐岩的低摩擦系数和塑性流动特性，为挤压应力环境下反冲断层的产生提供了理想的力学条件。膏盐层作为一个高效的滑脱层，可将其上、下地层的构造变形解耦。当

区域挤压应力沿膏盐层向远处传递时，这种解耦作用使得应力可以在盐上层内重新分配，盐上层由于底部“润滑”，更容易发生独立的、复杂的变形。因此，中寒武统膏盐岩层是玛东构造带反冲断层形成的最关键的驱动因素之一。

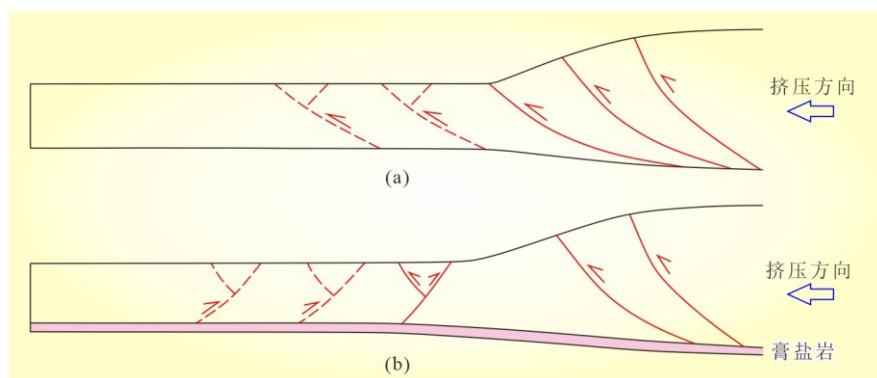


图 12 膏盐岩滑脱层对变形楔构造样式的影响 (a) 无膏盐岩滑脱面; (b) 有膏盐岩滑脱面

Fig.12 Influence of gypsum-salt detachment layer on structural styles of the deformation wedge

(a) Without gypsum-salt detachment layer; (b) With gypsum-salt detachment layer

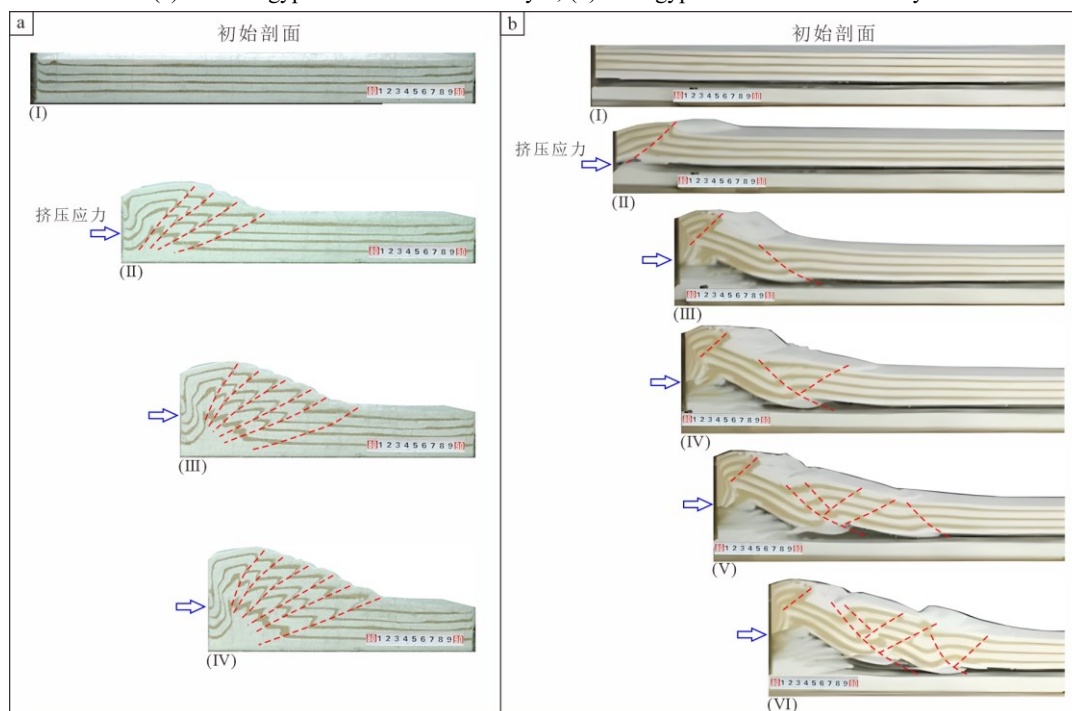


图 13 无塑性层 (a) 和有塑性层 (b) 构造物理模拟实验结果

Fig.13 Tectonophysical simulation experiment results without (a) and with (b) the plastic detachment layer

4.3 中寒武统盐下油气有利勘探区预测

玛东构造带已发现玉北 1 油气田，后续钻井不同程度的油气显示表明其奥陶系碳酸盐岩具有良好的成藏条件。随着油气勘探不断向深层—超深层探索，已有的两口钻穿寒武系的钻井勘探效果不佳，但这并不代表其中寒武统盐下领域缺乏油气有利富集区。目前的勘探失利可能是由于盐下烃源岩和储层分布不确定所导致。在烃源岩方面，玛东构造带是否存在下寒武统有效烃源岩仍存在争议。最近在塔里木盆地东南缘阿尔金地区发现，前寒武系存在优质烃源岩（李王鹏等，2022），这预示着玛东构造带盐下地层可能会聚集来自东南方向的油气。此外，

西南坳陷山前地区发育厚层的下寒武统优质烃源岩（韩剑发等, 2020），由古地貌分析可知（Xu *et al.*, 2024），其产生的油气也可以向玛东构造带运移。在储层方面，因中寒武统膏盐层能量屏蔽的影响（杨海军等, 2021），导致盐下地震资料品质较差，储层分布范围难以精确刻画。

本研究结果表明，玛东构造带盐下变形机理为剪切褶皱作用，该作用可以间接地导致形成陡倾或垂直的裂缝，而这些裂缝可作为储集空间，有效地改善盐下白云岩地层物性。类似地，在克拉通含盐盆地的油气勘探中，澳大利亚阿马迪厄斯盆地深层新元古界苦泉组 Gillen 段发育膏盐岩盖层和烃源岩，盐下约 8 亿年的 Heavitree 石英砂岩作为有效储层，其最主要的储集空间就是陡倾的裂缝。该生储盖组合预计总储量可达 600 亿 ft^3 （Young and Ambrose, 2007）。由前文分析可知，盐下发生剪切褶皱作用对应盐上形成破冲褶皱（图 11），垂向上组合成“盐上破冲褶皱+盐下冲起构造”的同向和反向叠合冲断（图 3）。因此，对于玛东构造带超深层油气勘探应聚焦于这类构造样式，在中寒武统膏盐岩盖层平面分布的基础上，结合根据岩石类型、埋藏深度和构造变形强度分级评价盖层封堵性的结果（徐振平等, 2023），预测了两类油气有利勘探目标（图 14），其中，I 类油气有利区是在封堵性好的盖层条件下可能的油气有利聚集部位，II 类则是在封堵性中等的盖层条件下可能的有利区。

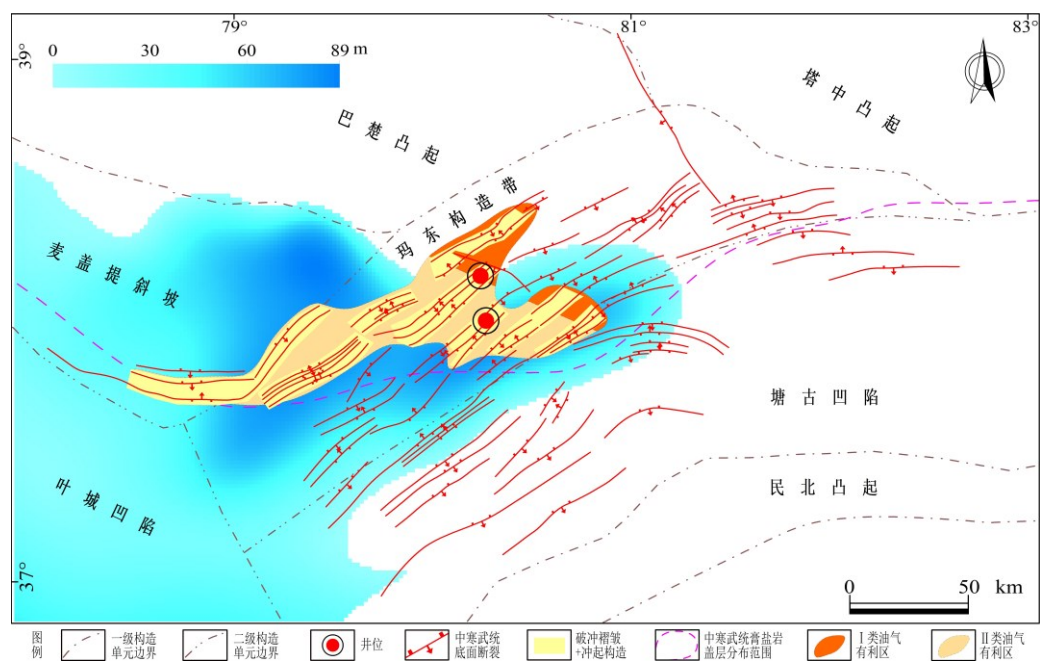


图 14 玛东构造带超深层中寒武统盐下油气有利勘探目标预测（底图为下寒武统烃源岩平面分布）

Fig.14 Prediction of favorable hydrocarbon exploration targets in the ultra-deep Middle Cambrian sub-salt strata of the Madong structural belt (the base map shows distribution of the Lower Cambrian source rock)

5 结论

(1) 以中寒武统膏盐岩滑脱层为界，玛东构造带分为盐上和盐下两个变形系统：盐上变形系统主要发育向腹陆方向冲断的破冲褶皱，盐下变形系统主要为

剪切褶皱作用（含压扁褶皱作用）形成的基底卷入型的冲起构造。膏盐岩沉积区构造样式最为丰富，盐上、盐下变形层组合成同向和反向叠合冲断；含膏岩沉积区构造样式次之，纵向上只发育同向叠合冲断；无膏盐岩区构造样式最为单一，中寒武统上、下地层统一协调变形。平面上，盐上单一构造样式多组合成叠瓦扇，冲起构造和构造三角带。

（2）玛东构造带的主要变形期是奥陶纪末期和志留纪末期，受阿尔金—祁连地体和柴达木地块与塔里木板块拼贴碰撞的影响。中部主要发生早古生代的构造活动，而南部和北部则持续活动。膏盐岩沉积区破冲褶皱持续活动，断展褶皱只在早古生代活动；含膏岩沉积区破冲褶皱和断展褶皱构造活动集中在古生代；无膏盐岩区断层多期活动，地层整体错断变形。

（3）中寒武统膏盐岩层在玛东构造带的变形中起到了至关重要的作用，其一膏盐岩层决定了反冲断层的形成；其二膏盐岩层不仅调节了盐上、盐下不同的变形样式，还造成了有膏盐区和无膏盐区的构造差异；其三膏盐岩层控制了构造变形的多期活动，也影响着构造变形的方式。

（4）剪切褶皱作用对玛东构造带中寒武统盐下地层的物性改善具有重要意义，可以间接导致形成陡倾或直立的裂缝，成为良好的储集空间。在中寒武统盖层分布范围内，“盐上破冲褶皱+盐下冲起构造”的组合是玛东构造带超深层盐下油气勘探的最有利目标。

References

- Anderson, E. M., 1951. *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Biot, M. A., 1961. Theory of Folding of Stratified Viscoelastic Media and its Implications in Tectonics and Orogenesis. *Geological Society of America Bulletin*, 72: 1595-1620. doi: 10.1130/0016-7606(1961)72
- Bonini, M., 2007. Deformation Patterns and Structural Vergence in Brittle-Ductile Thrust Wedges: An Additional Analogue Modelling Perspective. *Journal of Structural Geology*, 29(1): 141-158. doi: 10.1016/j.jsg.2006.06.012
- Chen, S. P., Jin, Z. J., Wang, Y., 2007. Controls of Tectonics on both Sedimentary Sequences and Petroleum Systems in Tarim Basin, Northwest China. *Petroleum Science*, 4(2): 1-9. doi: 10.1007/bf03187435
- Chen, S. P., Qi, J. F., Yu, F. S., et al., 2007. Deformation Characteristics in the Southern Margin of the Junggar Basin and their Controlling Factors. *Acta Geologica Sinica*, (2): 151-157 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. P., Yun, J. B., Liu, Z. N., et al., 2018. The Thrust Fault in the Northwestern Tangguzibasi Sag in the Tarim Basin and its Formation Mechanism. *Science and Technology Innovation Herald*, 15(3): 127-131 (in Chinese with English abstract). doi: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.03.127
- Chen, S. P., Wang, H. C., Yuan, H. W., et al., 2022. Deformation Asymmetry in Foreland Thrust Belts and the Kinematic Direction of the Related Thrust Faults. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 182-190 (in Chinese with English abstract).

- English abstract). doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021080
- Dong, Y. P., Hui, B., Sun, S. S., et al., 2022. Multiple Orogeny and Geodynamics from Proto-Tethys to Paleo-Tethys of the Central China Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3426-3448 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2022.10.010
- Fischer, M. P., Woodward, N. B., Mitchell, M. M., 1992. The Kinematics of Break-Thrust Folds. *Journal of Structural Geology*, 14(4): 451-460. doi: 10.1016/0191-8141(92)90105-6
- Fryklund, B., Stark, P., 2020. Super Basins: New Paradigm for Oil and Gas Supply. *AAPG Bulletin*, 104(12): 2507-2519. doi: 10.1306/09182017314
- Graveleau, F., Malavieille, J., Dominguez, S., 2012. Experimental Modelling of Orogenic Wedges: A Review. *Tectonophysics*, 538-540: 1-66. doi: 10.1016/j.tecto.2012.01.027
- Guo, Y., Tang, L., J., Yu, T. X., et al., 2016. Fault Features and Formation Mechanism of Madong Structural Belt in Tanggubasi Depression, Tarim Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 643-653 (in Chinese with English abstract). doi: 10.16539/j.ddgzyckx.2016.04.002
- He, J., Wang, Y., Liu, S. L., et al., 2016. Characteristics of Fault Structure and its Control on Hydrocarbon Accumulation in the Eastern Part of Southwestern Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(3): 326-332 (in Chinese with English abstract). doi: 10.11781/sysydz201603326
- Han, J. F., Wu, G. H., Xiao, Z. Y., et al., 2020. Recognition of the Distribution of Cambrian Source Rocks and its Significance for Exploration in Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 55(1): 17-29 (in Chinese with English abstract). doi: 10.12017/dzcx.2020.002
- Huang, S. Y., Chen, S. P., Xu, Z. P., et al., 2025. Middle Cambrian Paleo-Highlands and their Controls on the Gypsum-Salt Rock Distribution in Tarim Basin. *Geological Bulletin of China*, 44(11): 2200-2219 (in Chinese with English abstract). doi: 10.12097/gbc.2023.02.061
- Hao, J. B., Li, Y. K., Wang, C., et al., 2025. Structural Deformation Characteristics and Its Implications of Meso-to Neoproterozoic Sedimentary Strata in the Altyn Tagh Orogenic Belt. *Earth Science*, 50(9): 3679-3690 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2025.158
- Lin, C. S., Yang, H. J., Liu, J. Y., et al., 2012. Distribution and Erosion of the Paleozoic Tectonic Unconformities in the Tarim Basin, Northwest China: Significance for the Evolution of Paleouplifts and Tectonic Geography during Deformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 46: 1-19. doi: 10.1016/j.jseaes.2011.10.004
- Li, H. W., Wang, J. J., Wu, G. H., et al., 2014. Features and Formation Mechanism of Middle Caledonian Faults in West of Tangguzibasi Depression, Tarim Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 45(12): 4331-4341 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Wen, L., Li, H. L., et al., 2016. The Madong Early Paleozoic Fold-Thrust Belt in Southern Tarim Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 247-256. doi: 10.1016/j.jseaes.2015.10.007
- Li, S. Z., Zhao, S. J., Liu, X., et al., 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic Amalgamation of Microcontinental Blocks in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 186: 37-75. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.01.011
- Li, Y. P., Robinson, A. C., Gadoev, M., et al., 2022. Was the Pamir Salient Built Along a Late Paleozoic

- c Embayment on the Southern Asian Margin?. *Earth and Planetary Science Letters*, 550: 1-13. doi: 10.1016/j.epsl.2020.116554
- Li, W. P., Wang, Y., Qian, Y. X., et al., 2022. The First Discovery of the Ancient Hydrocarbon Source Rocks in the Altun Area, Southeast Margin of the Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(4): 533-547 (in Chinese with English abstract). doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.11.003
- MacKay, M. E., 1995. Structural Variation and Landward Vergence at the Toe of the Oregon Accretionary Prism. *Tectonics*, 14(6): 1309-1320. doi: 10.1029/95TC02320
- 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 abstract).
- Shao, X. Z., Xu, S. B., Zhou, D. Y., 1997. Structural Feature of Earth Crust in Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 24(2): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y. J., Tang, L. J., Yu, T. X., et al., 2017. Structural Style and Evolution of Fault-Related Folds in Yudong-Madong Structural Belt, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 52(1): 15-33 (in Chinese with English abstract). doi: 10.12017/dzdx.2017.001
- Wu, C. L., Wu, D., Mattinson, C., et al., 2019. Petrogenesis of Granitoids in the Wulan Area: Magmatic Activity and Tectonic Evolution in the North Qaidam, NW China. *Gondwana Research*, 67: 147-171. doi: 10.1016/j.gr.2018.09.010
- Wang, B., Wang, W., Zhu, L. C., et al., 2019. Fault-Related Fold and its Application to Madong Fold and Thrust Belt. *Geological Journal of China Universities*, 25(2): 268-275 (in Chinese with English abstract). doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2018075
- Wu, G. H., Deng, W., Huang, S. Y., et al., 2020. Tectonic-Paleogeographic Evolution in the Tarim Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 55(2): 305-321 (in Chinese with English abstract). doi: 10.12017/dzdx.2020.020
- Xu, Z. P., Chen, S. P., Luo, C. M., et al., 2023. Distribution and Sealing Capacity Evaluation of Gypsum-Salt Rocks in the Middle Cambrian in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(5): 54-67 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.05.005
- Xu, S. D., Chen, S. P., Zhao, H. B., et al., 2024. Basin-Range Coupling Relationship and Prediction of Favorable Targets for Ultra-Deep Subsalt Exploration in the Tarim Basin, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 260: 105955. doi: 10.1016/j.jseaes.2023.105955
- Yamada, Y., McClay, K., 2003. Application of Geometric Models to Inverted Listric Fault Systems in Sandbox Experiments. Paper 1: 2D Hanging Wall Deformation and Section Restoration. *Journal of Structural Geology*, 25(9): 1551-1560. doi: 10.1016/s0191-8141(02)00181-5
- Yue, L. X., Xie, H. S., Liu, C. Q., et al., 2003. Origin of low-velocity layer in the lower crust of Southwest Tarim: Limits of velocity and attenuation for plagioclase amphibolite. *Geology-Geochemistry*, (3): 13-19 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-9250.2003.03.003
- Young, I. F., Ambrose, G. J., 2007. Petroleum Geology of the Southeastern Amadeus Basin: The Search for Sub-Salt

- Hydrocarbons. In: Proceedings of the Central Australian Basins Symposium, Alice Springs, 183-204.
- Yang, H. J., Li, Y. J., Li, Y., et al., 2016. Madong Early Paleozoic Fold-Thrust Belt in the Southern Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 815-824 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. J., Wu, G. H., Kusky, T. M., et al., 2018. Paleoproterozoic Assembly of the North and South Tarim Terranes: New Insights from Deep Seismic Profiles and Precambrian Granite Cores. *Precambrian Research*, 305: 151-165. doi: 10.1016/j.precamres.2017.11.015
- Yang, H. J., Chen, Y. Q., Pan, W. Q., et al., 2021. Study on Tectonic and Sedimentary Evolution during the Nanhua-Middle Cambrian and its Significance for Subsalt Exploration, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 84-98 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.04.007
- Zhao, R. B., Lu, J. F., Yang, Z. E., et al., 2008. Deep-Shallow Structures in Tianshan Mountain and Basin-Mountain Coupling Relationship. *Xinjiang Petroleum Geology*, (3): 278-282 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., Pan, W. Q., Zhu, B., et al., 2022. Recrystallization of Dolostones in the Cambrian Xiaerbrak Formation, Tarim Basin and Possible Link to Reservoir Development. *Marine and Petroleum Geology*, 136: 105452. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105452
- Zhang, Z., Yang, X. Z., Hao, F., et al., 2024. Fluid Inclusion Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Process in Lungu Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 49(7): 2407-2419 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2022.494

中文参考文献

- 陈书平, 漆家福, 于福生, 等, 2007. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其主控因素. *地质学报*, (2): 151-157.
- 陈书平, 云金表, 刘志娜, 等, 2018. 塔里木盆地塘西北反冲断层及其形成机制. *科技创新导报*, 15(3): 127-131. doi: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.03.127
- 陈书平, 万华川, 袁浩伟, 等, 2022. 前陆冲断带非对称性变形与逆冲断层运动学指向. *地质力学学报*, 28(2): 182-190. doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021080
- 董云鹏, 惠博, 孙圣思, 等, 2022. 中国中央造山系原—古特提斯多阶段复合造山过程. *地质学报*, 96(10): 3426-3448. doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2022.10.010
- 郭颖, 汤良杰, 余腾孝, 等, 2016. 塔里木盆地塘古巴斯坳陷玛东构造带断裂特征及成因探讨. *大地构造与成矿学*, 40(4): 643-653. doi: 10.16539/j.ddgzyckx.2016.04.002
- 何娟, 王毅, 刘士林, 等, 2016. 塔里木盆地西南坳陷东部构造特征及对油气成藏的控制. *石油实验地质*, 38(3): 326-332. doi: 10.11781/syzydz201603326
- 韩剑发, 邬光辉, 肖中尧, 等, 2020. 塔里木盆地寒武系烃源岩分布的重新认识及其意义. *地质科学*, 55(1): 17-29. doi: 10.12017/dzlx.2020.002
- 黄少英, 陈书平, 徐振平, 等, 2025. 塔里木盆地中寒武统古高地及对膏盐岩分布的控制. *地质通报*, 44(11): 2200-2219. doi: 10.12097/gbc.2023.02.061
- 郝江波, 李宇科, 王超, 等, 2025. 阿尔金造山带中-新元古代沉积地层构造变形特征及其指示意义. *地球科学*, 50(9): 3679-3690. doi: 10.3799/dqkx.2025.158

- 李浩武, 王建君, 邬光辉, 等, 2014. 塔里木盆地塘古孜巴斯坳陷西部中加里东期断裂特征及形成机制. 中南大学学报(自然科学版), 45(12): 4331-4341.
- 李王鹏, 王毅, 钱一雄, 等, 2022. 塔里木盆地东南缘阿尔金地区首次发现古老烃源岩. 天然气地球科学, 33(4): 533-547. doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.11.003
- 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.
- 邵学钟, 徐树宝, 周东延, 1997. 塔里木盆地地壳结构特征. 石油勘探与开发, 24(2): 1-5.
- 田亚杰, 汤良杰, 余腾孝, 等, 2017. 塔里木盆地玉东—玛东构造带断层相关褶皱样式及演化. 地质科学, 52(1): 15-33. doi: 10.12017/dzcx.2017.001
- 王斌, 汪伟, 朱礼春, 等, 2019. 断层相关褶皱在塔里木盆地玛东地区的应用. 高校地质学报, 25(2): 268-275. doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2018075
- 邬光辉, 邓卫, 黄少英, 等, 2020. 塔里木盆地构造—古地理演化. 地质科学, 55(2): 305-321. doi: 10.12017/dzcx.2020.020
- 徐振平, 陈书平, 罗彩明, 等, 2023. 塔里木盆地中寒武统膏盐岩分布及封闭性评价. 中国石油勘探, 28(5): 54-67. doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.05.005
- 岳兰秀, 谢鸿森, 刘丛强, 等, 2003. 塔里木西南缘下地壳低速层的成因:斜长角闪岩的纵波速度和衰减的限制. 地质地球化学, (3): 13-19. doi: 10.3969/j.issn.1672-9250.2003.03.003
- 杨海军, 李曰俊, 李勇, 等, 2016. 塔里木盆地南部玛东早古生代褶皱—冲断带. 岩石学报, 32(3): 815-824.
- 杨海军, 陈永权, 潘文庆, 等, 2021. 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造沉积演化及其盐下勘探选区意义. 中国石油勘探, 26(4): 84-98. doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.04.007
- 赵瑞斌, 卢静芳, 杨主恩, 等, 2008. 天山深浅构造特征及盆山耦合关系. 新疆石油地质, (3): 278-282.
- 张泽, 杨宪彰, 郝芳, 等, 2024. 塔里木盆地轮古地区流体包裹体特征与油气成藏过程. 地球科学, 49(7): 2407-2419. doi: 10.3799/dqkx.2022.494