

## 天山及南缘新生代旋扭构造体系特征及应力场演化

赵力彬<sup>1,2,3,4,5</sup>, 陈冬霞<sup>1\*</sup>, 冯建伟<sup>6</sup>, 梁骁<sup>2</sup>, 杨学君<sup>2</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000

3. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000

4. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000

5. 新疆超深油气重点实验室, 新疆库尔勒 841000

6. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116

**摘要:** 天山作为典型的对称型新生代板内复活型造山带, 针对新生代以来构造动力学机制及与南缘前陆冲断带耦合模式的科学难题, 本文基于最新地质地球物理资料和露头调研, 以地质力学理论为指导, 认为天山南缘柯坪-库车地区的新生代断裂系统呈帚状向西撒开, 属旋扭构造体系, 而非简单逆冲-推覆构造。通过建立大变形弹塑性有限元(FEM)模型, 从四维演化的角度模拟了新生代以来, 在印度-欧亚板块碰撞的远程效应下, 塔里木板块发生被动顺时针旋转, 并激发了西天山深部壳幔活动, 进而控制了天山及南缘造山带由西向东的递进形成与旋扭构造的发育。该旋扭运动在盆山边界及大型断裂周缘控制形成了多个油气富集带, 展现出广阔的勘探前景。

**关键词:** 天山南缘; 新生代; 旋扭构造; 四维演化; 油气聚集。

**中图分类号:** P618.31

**收稿日期:** 2024-6-27

### 前言

天山造山带作为世界上最大、最活跃的陆内造山带, 记录了准噶尔、伊犁-哈萨克、塔里木等多个板块在早古生代至晚古生代的拼合增生演化历史(Allen et al., 1999; Gao et al., 2006; 李金等, 2021)(图 1a)。新生代以来, 印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应使天山造山带再次复活, 在天山南北两侧发育了多排冲断构造带, 如南缘的库车坳陷与北缘的四棵树凹陷(图 1b)。其中, 天山南缘逆冲构造带包括库车坳陷和柯坪断隆, 新生代以来发生强烈褶皱变形, 发育了以逆冲断裂、叠瓦构造和推覆构造为主的逆冲构造样式, 形成了多种圈闭, 成为了我国西气东输的重要基地(李金等, 2021)。因此, 分布其南北两侧的塔里木和准噶尔盆地构造变形与天山构造带耦合关联备受地质学家关注。

关于天山再次复活的驱动力和新生代隆升动力学模型, 从地质学、地球物理学等多方面已经进行探索, 明确了天山新生代构造属性和演化历史, 特别是中新世以来印度-欧亚大陆碰撞致天山古造山带复活并向北逆冲, 造就了如今“对称型”地貌和构造格局(图 1c)。然而, 学界对其动力学模型存在差异, 提出了天山下有活跃震颤通道、重力伸展结果、“夹层插入”模型、盆山耦合概念模型、以及地幔软流圈对流上升或地壳缩短增厚等不同模型观点(王清晨等, 2003; Lu et al., 2005; Lei and Zhao, 2007; 陈书平等, 2008)。但基于高分辨率层析成像结果的数值模拟表明, 天山两侧盆山交界处上地幔的小规模对流对构造变形有影响, 但并非新生代隆升的决定性因素(刘玉虎等, 2011)。

新生代以来, 天山作为大型陆内造山带, 其深浅构造变形耦合机制和应力场演化特征仍存诸多争议, 如远离板块边界的大陆内部强烈构造变形原因、构造变形方式和速度、构造应力背景及其与山脉隆升过程的联系等(王清晨等, 2003; Lu et al., 2005; Lei and Zhao, 2007;

---

基金项目: 中石油重大项目(No. 2023ZZ14YJ03)。

第一作者: 赵力彬(1979-), 男, 正高级工程师, 博士研究生, 主要从事油气田开发, E-mail:

zhaolb-tlm@petrochina.com.cn, ORCID: 0009-0002-8409-9281

通讯作者: 陈冬霞, E-mail: lindachen@cup.edu.cn

陈书平等, 2008; 刘玉虎等, 2011; 冀冬生等, 2025)。然而, 特别是对于天山南缘的旋扭构造体系, 现有认识仍较为零散和定性, 未能将其系统整合为统一的构造体系, 缺乏定量的旋转证据与时空演化约束, 进而对其驱动机制及其与区域应力场、深部过程的关联认识不清, 这限制了对上述重大科学问题的深入理解(Lei and Zhao, 2007; 陈书平等, 2008; 刘玉虎等, 2011; 冀冬生等, 2025)。本次研究旨在系统识别新生代天山南缘旋扭构造体系, 通过获取天山和塔里木盆地北缘现今地貌、构造单元和古应力等基础数据, 建立三维构造地质模型, 通过合理设置力学边界条件, 模拟新生代喜马拉雅运动以来塔里木板块顺时针或逆时针旋转过程、天山及南缘构造带变形隆升过程中的应力场变化规律, 为大型旋扭构造体系研究提供依据, 揭示天山地区油气潜力影响机制, 为该区域油气勘探提供理论支持。

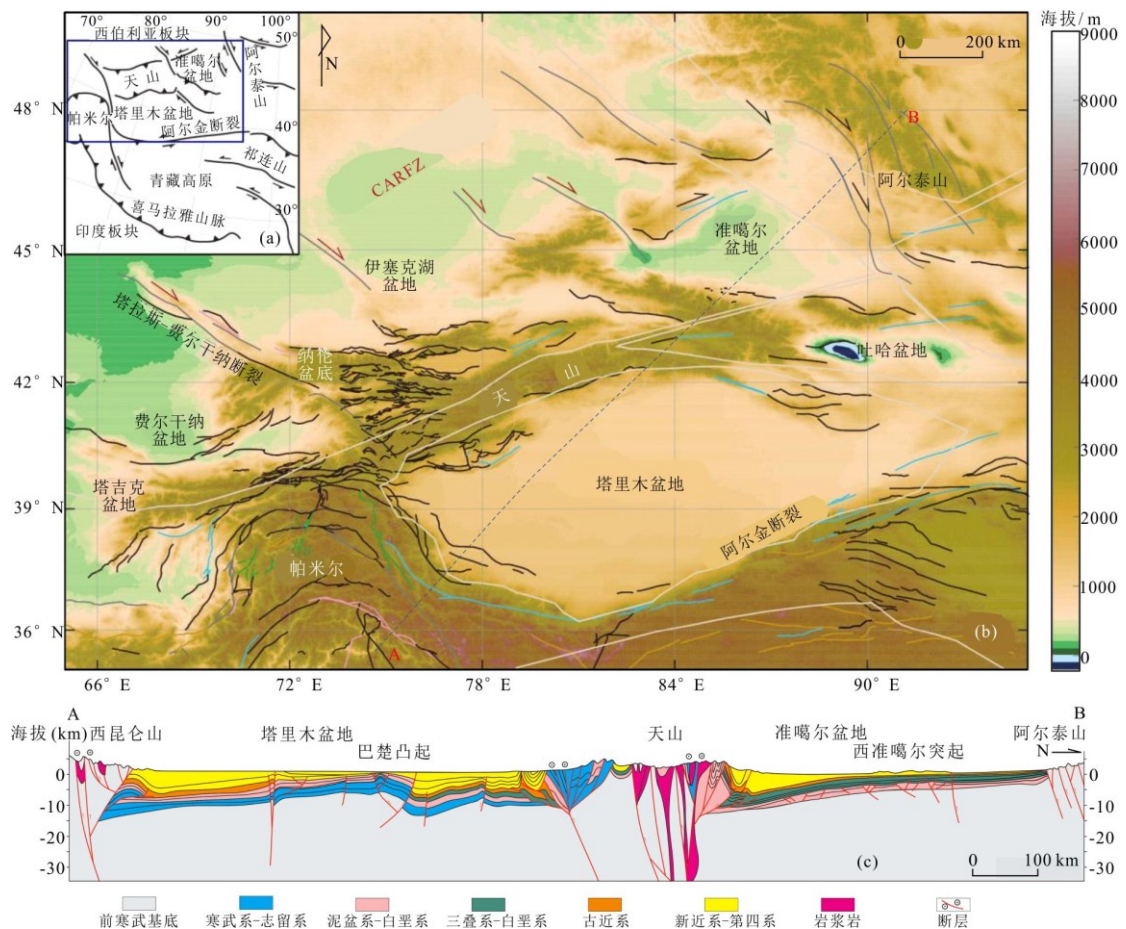


图1 天山及南、北两侧盆地地区构造分布图 (CARFZ: 中亚右行走滑断裂带) (黄玉平等, 2013)  
 (a) 天山山脉的大地构造位置; (b) 天山及南北两侧盆地相对位置图; (c) 跨盆地构造地质剖面  
 Figure.1 Regional structural distribution map of Tianshan Mountains and the southern and northern basins (Huang et al., 2013)

## 1、天山及天山南缘区域构造特征

### 1.1 天山区域构造特征

天山造山带西接哈萨克斯坦板块, 北接西伯利亚板块、南邻塔里木板块, 被南天山、北天山两条近东西向古生代缝合带分为南天山、中天山、北天山三部分(李锦轶等, 2006a)。其中, 中天山西部部分学者称其为伊犁地块, 或以那拉提北缘大断裂为界, 将其分为伊犁板块(北)与那拉提板块(南), 该断裂是早古生代吉尔吉斯斯坦 Terskey 大洋的俯冲消亡带。西天山从北至南划分为北天山、伊犁板块、中天山、南天山(图1a、b)。天山造山带形成于古生代晚期, 由塔里木板块、准噶尔地块、伊犁地块间两条晚古生代边缘增生褶皱带

构成,形成了天山构造带的基本构造搁架(李锦轶等, 2006a; 刘玉虎等, 2011; 冀冬生等, 2025)。地层方面,天山山脉由元古代到新生代以来的各类变质岩、火成岩和海、陆相沉积岩所构成。断裂较为发育,多呈 NEE、近 EW 或 NWW 走向,与造山带走向一致,呈西宽东窄似楔形(图 1c)。

天山南缘逆冲构造带西起乌恰,东至托克逊断裂,全长逾 1600 km,北抵萨阿尔明与哈雷克套复背斜南翼,南括柯坪隆起、库车坳陷及塔北潜伏隆起北侧。该带受南天山自北向南挤压推覆作用控制,发育多排 NE 向构造带,具明显分带性。库车坳陷内发育北部单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带和秋里塔格构造带;柯坪断隆被走滑断裂切分为柯坪主体、温宿凸起和西克尔-八盘水磨三段,主体为多排古生界-新生界构造带,向东西两端收敛(图 2)(李锦轶等, 2006a)。构造特征主要受喜山期构造运动控制,在南天山南北向挤压下,形成一系列北倾逆冲断裂及伴生走滑断裂,总体呈 NEE 向展布,具山前两端收敛、中部撒开的特点。断裂受南天山活动密切相关,发育了逆冲推覆断裂包括乌恰-阿合奇-北布古鲁断裂、阿图什断裂、柯坪塔格-沙井子断裂等,走滑断裂有费尔干纳断裂、皮羌断裂等。不同时代地质体被近东西、北西及北东走向断裂切割,具多期逆冲与走滑活动特征(李锦轶等, 2006b)(图 2)。值得指出的是东经 88° 以西发育的断裂呈向北西撒开、南东收敛的帚状构造,以东则见北东向左行走滑断裂切割东西向断裂。重力异常显示牙哈、西秋、新和、温宿及柯坪共同组成一更大规模撒开型帚状构造体系,控制着中-新生代沉积中心与地层展布。

## 1.2 天山南缘旋扭构造特征

在天山南缘的构造解析中,以“旋扭构造体系”补充或替代传统的“逆冲-推覆模式”,是一项重要的认识突破。传统模式虽能解释地壳缩短,却难以涵盖该区广泛发育的走滑断裂、弧形构造与地块旋转等复杂现象。旋扭体系的提出,实现了从“垂向挤压”到“旋转剪切”的动力学范式转换。这一框架能将分散的构造形迹整合为受统一旋转应力场控制的有机系统,不仅为理解压扭性构造组合及深浅部耦合提供了新视角,也能对其特定部位(如收敛端)油气聚集有利区、体系内断裂性质更科学地评估(李锦轶等, 2006a; 冀冬生等, 2025)。天山南缘由一群弧形的褶皱或断裂以及被它们所围绕或半围绕的岩块或地块共同组成的构造即为旋扭构造。旋扭构造体系由两个部分组成:一是旋扭的核心,为筒状或半筒状的岩块或地块称为砥柱;二是围绕着核心的各种弧形褶皱和断裂,称为旋回面,这些弧形的褶皱或断裂常向一方撒开,向相反的一方收敛(图 3a)。如图 3b 所示的帚状构造,由收敛的终点 O 作最外层旋扭面和最内层旋扭面的切线,这两条切线的夹角( $\delta$ ),用来表征帚状构造的撒开程度。旋扭带撒开度不同,往往与旋扭面力学性质有关,组成的旋扭构造型式也不同(陈书平等, 2008; 刘玉虎等, 2011)。例如, $\delta \leq 30^\circ$  时,撒开度小,旋扭面力学性质多数是单剪性质,易构成环状旋扭构造; $\delta > 90^\circ$  时,撒开度大,旋扭面力学性质多属于张剪性,常构成辐射状旋扭构造; $45^\circ \leq \delta_1 \leq 80^\circ$  或撒开度中等时,旋扭面多为一般剪切或压剪性质,常构成帚状或涡轮状构造型式。

整体上,以柯坪塔格断裂带、大尤都斯断裂和亚南轮台断裂为界,靠近天山的柯坪断隆构造带和库车坳陷断裂体系内的断裂切线夹角普遍低于  $30^\circ$ ,属于单剪性质。克拉苏构造带博孜-大北段-5000m 的地震水平切片显示,帚状断层的撒开度位于为  $22^\circ$ - $26^\circ$  区间内(图 3c),其撒开度小,属于典型的单剪(扭)环状旋扭构造体系,而塔北隆起北侧沙西隆起、哈拉哈塘凹陷和阿克库勒凸起地区的断裂体系夹角位于  $45^\circ$ - $80^\circ$  之间,整体呈现为压剪性帚状或涡轮状构造型式。根据含油气盆地构造力学原理,强烈的挤压构造力向盆内传播时,随着应力场强度的衰减,应力状态或类型发生转变,逐渐由推覆挤压向压扭再向单扭与张扭变化。天山造山带构造活动控制塔里木盆地北缘构造变形,但从旋扭构造力学得出的结论来看,两者产生了一定矛盾(李锦轶等, 2006a; 刘玉虎等, 2011; 冀冬生等, 2025)。即天山南缘逆冲断裂带是一个应力场联合作用的关键位置,并非属于单纯的一系列冲断叠瓦构造样式,

而在旋扭构造应力场控制下发育的冲断-走滑构造体系。

克拉苏构造带地震解释(图2)显示,由北向南依次发育山前高角度逆冲推覆、正花状、浅部断展褶皱及深部叠瓦构造,旋转面呈压扭性弧形,外旋向撒开方向扭动。塔北隆起北侧亦具压扭性(夹少量张扭性),外旋扭动方向一致,但单一旋转面弧形更显著,推断其旋转轴位于塔里木盆地中心。天山南缘逆冲断裂带(库尔勒凸起至麦盖提斜坡)呈完整歹字型构造,发育弧形压扭性断裂与褶皱,处于旋转轴头-中部转折部位,受区域性左旋剪切变形。柯坪断隆因温宿古凸起阻挡,帚状构造尾部收敛, NW 向基底调节断层旋向与东段有差异;喜马拉雅晚期南天山强烈挤压下,基底先存断裂继承性走滑,断块绕温宿凸起左旋顺时针转动,以挤压为主。库车坳陷断块绕参考线右旋逆时针转动,以扭动为主,指示喜马拉雅运动强度沿天山南缘由西向东渐弱(李锦轶等, 2006a)。

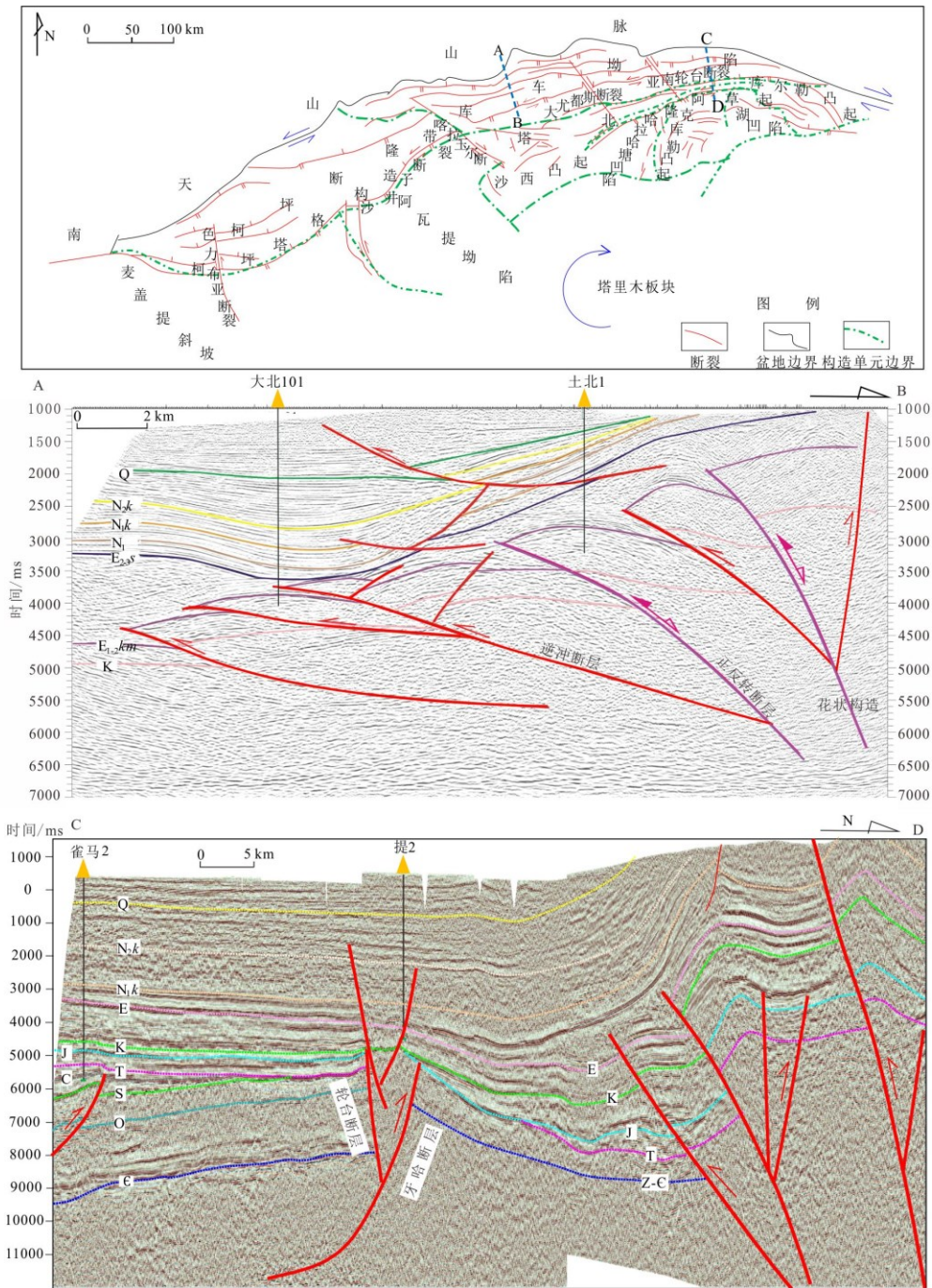


图2 天山南缘新生代构造边界及其构造样式分布

Figure 2 Distribution of Cenozoic tectonic boundaries and structural styles in the southern margin of the Tianshan Mountains

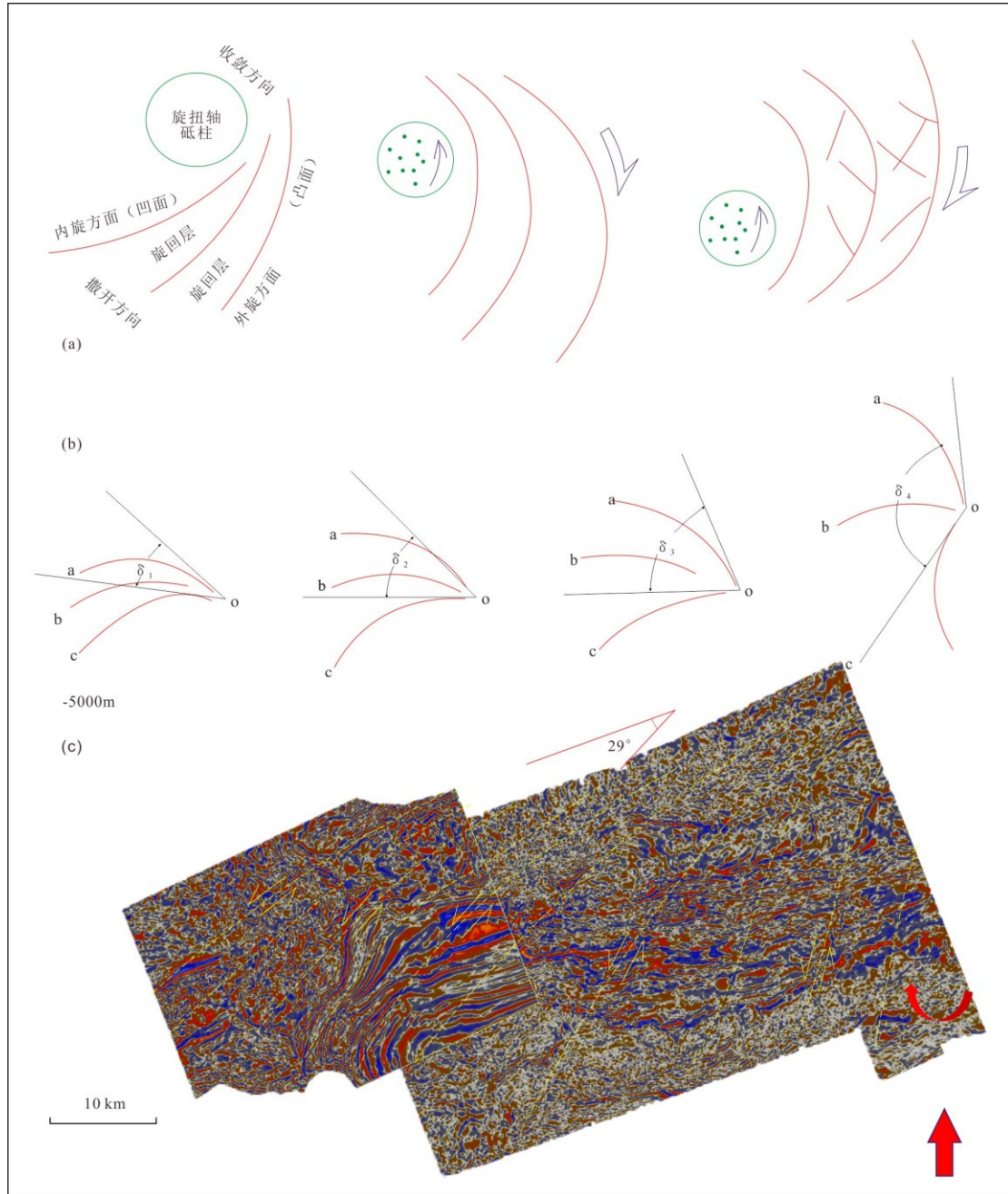


图3 天山南缘旋扭构造体系识别标志及特征

(a) 构造面力学性质及旋转扭动方向关系示意图；(b) 帚状构造撒开度解析示意图；(c) 基于地震水平切片的帚状构造识别，其中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  代表三个旋扭面， $\alpha$ -最外侧旋扭面， $\gamma$ -最内侧旋扭面， $\delta$ -旋扭面之间的夹角， $\delta_1 \approx 30^\circ$ ， $\delta_2 \approx 50^\circ$ ， $\delta_3 \approx 70^\circ$ ， $\delta_4 \approx 140^\circ$

Figure 3 Identification signs and characteristics of the rotational-shear tectonic system in the southern margin of the Tianshan Mountains

## 2、西昆仑-塔里木-南天山有限元地质模型建立

本次研究拟采用大变形弹塑性有限元方法，模拟并分析天山造山带（尤其南缘）的构造变形和应力场分布，旨在揭示其动力学过程，进而阐述区域新生代构造体系的形成机制。

### 2.1 盆山尺度的地质模型建立

可靠的地质模型是构造应力场模拟与动力学机制分析的关键。为此,收集了昆仑山、天山、塔里木及准噶尔盆地的地质、地球物理与大地测量资料,分析天山造山带及邻区构造格局、岩石力学特征、岩石圈深部结构与地壳运动状态,为概念化地质模型构建、岩石力学参数确定及边界力学条件设定提供依据,同时验证数值模拟合理性。天山南北盆地及周边可划分为7个构造单元,自南向北依次为:羌塘-华南板块(西昆仑山)、塔里木地块(塔里木盆地)、南天山地块(天山南缘逆冲构造带)、中天山地块、北天山地块、准噶尔地块(准噶尔盆地)、西准噶尔地块(李锦轶等,2006a;李锦轶等,2006b)。天山南缘库车坳陷为东西展布的狭长构造带,断层平面呈东向撒开状,新近纪强烈陆内俯冲是现今库车前陆冲断带形成主因,温宿凸起遮挡使坳陷西部岩层沿其东边缘向西南逃逸,导致西段局部断层呈东向帚状撒开,构造变形强度北强南弱。天山北缘四棵树凹陷位于准噶尔盆地南缘西段,北邻车排子凸起,呈构造三角带样式,演化受周缘及凹陷内走滑断裂控制,断裂运动学特征与准噶尔盆地相对天山造山带的旋扭方向一致;天山GPS形变监测数据显示,北西向艾卡断裂带影响北缘现今地壳形变场分布,故将其作为地质模型次级构造单元(李锦轶等,2006b;高俊等,2009)。

天山现今地质构造格局与地壳运动变形同新生代构造活动密切且相近,限定了有限元地质模型整体布局。建立三维模型时,重点考虑研究区地壳南北分块、块体垂向分层及大规模断裂分布特征;因资料限制,块体垂向分层简化,仅考虑地块分界处突变,忽略横向细致变化。依据地震波速度结构,天山、塔里木及准噶尔地块地壳分上、中、下三层,加之上地幔顶部共四层(上地壳含沉积盖层与结晶基底);结合构造地质学理论(板块内部走滑构造力源于深部坚硬基底,带动上覆沉积盖层变形),将模型垂向简化为沉积盖层与地壳两层。考虑到天山地壳厚度大于两侧盆地,且中生代末期东西天山均有隆升记录,天山地壳垂向深浅层平均厚度分别为22km、5km,塔里木与准噶尔地块则为21km、6km。因天山断裂构造繁杂,模型对断裂简化处理:按断裂带总体走向与级次,将重要断裂及次级断裂处理为宽500m的断裂带(图4a);地质与地球物理探测显示多数重要活动断裂深部倾角大或陡倾,故作垂直处理;西东天山山前弧形断裂近相连,西昆仑山与阿尔金山山前断裂呈弧形相接,且新生代(尤其新近纪)走滑方向一致,将作为统一断裂带建模(李锦轶等,2006a;李锦轶等,2006b;高俊等,2009)。

## 2.2 有限元模型的力学边界条件设定

盆地地质模型建立后,需恢复新生代以来西昆仑山和天山地区古构造应力状态,为构造关键变形期动态应力场与动力学机制分析奠定基础。已知新生代(尤其晚新生代)天山构造变形与隆升的构造力主要源于印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应。天山及塔里木盆地新构造运动可划分为由强至弱三阶段:渐新世末-中新世、上新世-早更新世、中晚更新世,大致对应喜马拉雅运动二幕(中新世)与三幕(上新世至第四纪),而喜马拉雅运动一幕发生于始新世晚期至渐新世。近南北向上,喜马拉雅构造运动与新构造运动强度从周缘造山带向盆地边缘衰减,造山带控制的构造痕迹逐渐消失,且从造山带向山前坳陷形成多排断层相关褶皱系统,时空上具继承性。黄玉平等(2013)得出塔里木盆地新构造运动时期不同区块最大主应力方向,即塔北、柯坪断隆及塔东南为NW-NNW向,塔西南为NE-SW向,库车坳陷为近SN向。蒋靖祥等(2012)基于新疆钻孔应力应变观测发现,新疆压应力极强、剪应力较大、张应力较弱,天山主压应力量值西大东小、南强北弱,帕米尔弧与天山交汇区主压应力及剪应力最大,北天山与准噶尔盆地较小,且主压应力为近SN向。天山造山带及塔里木盆地新构造运动具良好继承性,磷灰石裂变径迹分析显示西昆仑造山带隆升分三阶段:15-5Ma极缓慢隆升、5-3Ma较快速隆升、3Ma-现今加速隆升,与天山南缘喜马拉雅运动三幕(构造活动渐强)吻合。孙宝珊(1996)、曾联波(2004)、张明利等(2004)测得库车坳陷喜马拉雅晚期、中期、早期古应力最大主应力有效值分别为81-97MPa、73-87MPa、35-60MPa,并认

为塔西南喜马拉雅期最大主应力有效值为 85-152MPa(孙宝珊等, 1996; 曾联波等, 2004; 张明利等, 2004)。

综合分析表明, 地块边缘边界效应体现盆地边界构造作用, 故以盆地边界作为模型边界更合理, 设外围加框会导致边界条件不明确。模型南部与西南部边缘受印藏板块挤压力(方向垂直盆地边界且随边界变化)(张明利等, 2004; 匡星涛等, 2023), 分别施加 152MPa、85MPa 挤压应力; 北部边缘因准噶尔盆地受阿勒泰地块阻挡, 设为固定边界。虽有学者认为塔里木板块除北移外, 相对哈萨克斯坦板块顺时针旋转(与塔里木东南缘阿尔金左旋走滑相符且相关), 但塔东南地应力研究较少。吕桂林等(1997)基于新疆地震台观测数据, 认为南天山现今剪应力平均值为 10MPa, 然以此为模型南缘、西南缘施加剪应力时, 天山南缘难出现旋扭构造体系; 经反复尝试, 施加 26MPa 剪应力后, 构造最大主应力与应变方向同现今应力方向吻合(图 5a)。此外, 模型垂向仅受上覆岩层与地壳重力作用, 设置重力加速度  $9.8\text{m/s}^2$  后, ANSYS 软件可自动生成重力应力, 同时在模型底部施加垂向位移约束。

新生代冲断构造是天山山前主要构造特征, 构造挤压下, 塔里木地块不仅沿山前深大断裂向天山之下俯冲, 还在缩短变形中形成诸多冲断构造, 表现为新生代地层沿滑脱面与冲断断层向盆地方向逆冲。为模拟接触面变形过程, Goodman(1968)提出接触面单元模拟不连续面力学行为, 后发展为有宽度的接触面单元, 可模拟岩石夹层、节理及断层滑动变形。鉴于断裂带为不连续结构面, 采用 6 节点接触面单元模拟, 其切向接触刚度、初始法向接触刚度分别为  $2.0 \times 10^7 \text{Pa}$ 、 $1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ , 初始宽度 200m。研究区上覆盖层主要岩性为陆相碎屑岩与海相碳酸盐岩, 且塔里木盆地白垩系-古近系多为致密砂岩, 故其岩石密度大于准噶尔盆地与天山地区上覆地层。依据天山及邻区地壳各分层地震波速度, 计算地壳弹性模量与泊松比, 上覆地层岩石力学参数以前人测井解释与岩石力学实验相互校正结果为依据(表 1)。断裂带力学参数设置直接影响数值模拟结果, 是力学建模基础(吕桂林等, 1997; Goodman et al., 1968; 刘敬寿等, 2023); 断层或褶皱形成后, 断裂带整体杨氏模量约为沉积地层的 74-87%, 泊松比则相反, 即断裂带为力学软弱带。在有限元模拟软件 ANSYS 中建立地质力学模型后, 地层采用八节点单元网格划分, 断裂带采用 6 节点接触面单元网格划分, 共划分 34577 个节点、129576 个单元, 垂向局部网格间距达 200m(图 4b)。

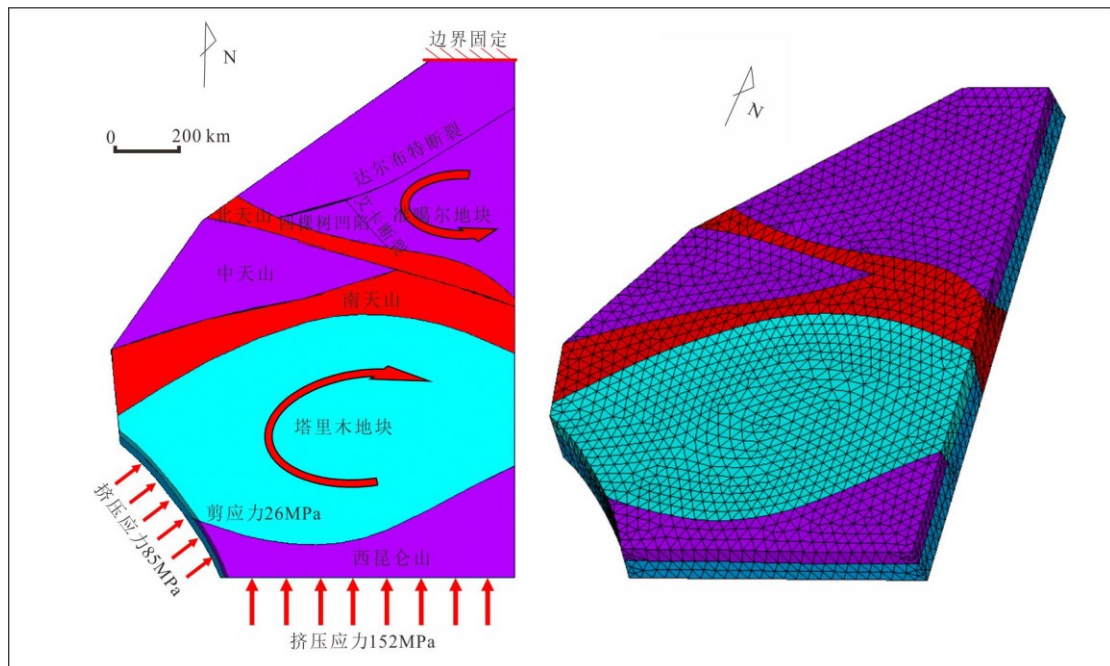


图 4 盆山模型边界条件设置及力学模型

(a) 边界条件设置示意图; (b) 地质力学模型网格划分结果

Figure. 4 Boundary Condition Setting and Mechanical Model of the Basin Mountain Model  
 表 1 盆山模型的岩石力学参数设置(孙宝珊等, 1996; 曾联波等, 2004a; 张明利等, 2004b; 蒋靖祥等, 2012; 黄玉平等, 2013; 匡星涛等, 2023)

Table. 1 Rock mechanics parameter settings of basin mountain model (Sun et al., 1996; Zeng et al., 2004a; Zhang et al., 2004b; Jiang et al., 2012; Huang et al., 2013; Kuang et al., 2023)

构造单元		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量 (10 <sup>4</sup> MPa)	泊松比
塔里木地块	盖层	2.65	2.87	0.23
	地壳	2.92	3.35	0.19
天山地块	盖层	2.55	2.82	0.27
	地壳	2.88	3.22	0.23
准噶尔地块	盖层	2.62	2.85	0.25
	地壳	2.94	3.21	0.22
断裂带	贯穿	2.45	2.44	0.31

### 2.3 非线性弹塑性有限元数值模拟原理

应力场模拟常用有限元法、有限差分法、离散元法等, 其中有限元法因发展成熟、适用范围广且数学基础扎实, 成为数值模拟首选。本研究通过有限元法编制程序, 求解三维弹塑性接触问题, 以应对地质构造长期运动下的缓慢变形—此类变形中地壳上层以脆性破裂、塑性变形为主, 还涉及断层不连续运动, 程序核心是用数值方法解决这类问题并实现地层受力大变形功能(孙明志等, 2022; 刘敬寿等, 2023)。当岩体受力时, 弹性阶段应力与应变遵循广义胡克定律; 进入塑性状态后, 需建立应力增量与应变增量关系, 常规做法是采用线性塑性本构关系, 将外载拆分为增量, 对每级荷载增量下的弹塑性方程线性化, 即增量理论, 本质是用线性问题拟合非线性问题, 基本步骤和算法如下:

①计算弹塑性矩阵 $[D_{ep}]$ , 依据本增量步初始应力矩阵求解, 当Drucker公式成立时, 采用相关联流动法则,  $[D_{ep}]$ 为对称矩阵, 当采用非关联流动法则时, 弹塑性刚度矩阵为非对称; ②构建刚度矩阵与算荷载增量, 先计算各单元切线模量并形成整体切线刚度矩阵, 再求荷载增量, 其中应变软化材料在软化段切线模量为负, 易致刚度矩阵非正定; ③求高斯积分点应变矩阵, 由荷载增量计算各高斯积分点应变矩阵; ④计算应力增量并判塑性状态, 结合本构方程 $\{\Delta \sigma\}=[D_{ep}]\{\Delta \varepsilon\}$ 与屈服条件 $F(\{\sigma\}, \varepsilon_i, \kappa)=0$ 计算应力增量, 在高斯积分点验算应力应变以判断塑性状态, 同时明确弹塑性应变占比, 调整应力应变至满足条件; ⑤计算试探应力矩阵, 暂忽略塑性, 用 $\{\sigma^e\}=\{\sigma\}_n+[D_{ep}]\{\Delta \varepsilon\}_{n+1}$ 计算试探应力, 代入屈服条件, 满足则为弹性, 否则进入塑性状态; ⑥计算单位体积内的塑性功和塑性应变增量; ⑦修正应力向量, 因前期近似, 需沿屈服曲面法线方向算 $\{\delta \sigma\}$ 修正应力, 公式为 $\{\delta \sigma\}=\{\{\partial F/\partial \sigma\} F_3\}/\{\{\partial F/\partial \sigma\}^T/\{\partial F/\partial \sigma\}\}$ ,  $\{\sigma\}_{n+1}=\{\sigma_n\}+\{\sigma^e\}-\Delta\{\sigma^e\}-\{\sigma\}_n+\{\delta \sigma\}$ ; ⑧计算本步末失衡力 $\{\phi\}$ 并将其合并到下步的载荷增量 $\Delta\{P_{n+1}\}$ 中去。

屈服曲面函数 $F$ 需实验确定参数, 实际常用简化模型, 包括含一个可变模量 $E(t)$ 、两个可变模量 $K(t)$ 与 $G(t)$ 的各向同性模型, 及正交异性和等效单轴应变模型。岩体应力达破坏强度后, 需关注向剩余强度变化: 应变软化材料逐步下降, 脆性材料骤降; 岩石剩余抗拉强度 $R'_t$ 通常取0, 剪切破坏条件为 $F=|\tau|+\sigma \tan \phi-c=0$ , 破坏后为 $F=|\tau|+\sigma \tan \phi'-c'=0$ (式中 $c'$ 为剩余内聚力,  $\phi'$ 为剩余内摩擦力)。本研究采用ANSYS软件, 分50个时间间隔, 对西昆仑-塔里木-南天山地区新生代中新世至现今(重点为新构造运动或喜马拉雅二

-三幕构造运动期)的三维构造应力场开展弹塑性模拟(刘敬寿等, 2023)。需说明的是, 虽地质模型与实际基本吻合, 但因运动幕次多、持续久, 难用 50 分钟精准模拟各幕次, 故下文模拟阶段与时期均为相对概念。

### 3、西昆仑-塔里木-南天山新生代构造应力场分布及验证

#### 3.1 新生代构造应力场分布特征

图 5、图 6 和图 7 显示了冲断-走滑构造模型的最大主应力、 $xy$  方向剪应力、 $xz$  方向剪应力和  $z$  向等效塑性应变随地块旋扭变形发展的演化过程。在 ANSYS 应力场模拟结果中, 规定最大主应力负值代表挤压环境, 正值代表伸展环境。根据模拟的不同时间间隔的地壳最大主应力等值线图(图 5a)可以看出, 中新世以来喜马拉雅运动在塔里木盆地和天山地区的最大主应力场分布及演化具有明显的区域差异性和旋回性。本次弹塑性数值模拟运行时间为 50 分钟, 从时间上看, 随着构造力的加载和应力在板块内部的传递, 最大主应力的变化有着显著的旋回性, 从开始至 20 分钟(早期)塔里木盆地内的挤压应力逐渐增大, 甚至超过了 200MPa, 这与中新世(约 23 Ma)早期近南北向挤压为主的构造背景相吻合(张明利等, 2004; Lu et al., 2005)。从 20 分钟至 40 分钟(中期)挤压应力逐渐减小, 之后又开始出现增大的特征, 应力强度的变化具有一定的旋回性。以天山造山带为中心轴对称分布的准噶尔盆地内挤压应力也有着先增大后减小再增大的趋势特征。然而, 天山造山带内, 挤压应力分布又有着明显的东西分段性, 即西天山地区先增加后减小, 东天山则呈现出与两侧盆地同样的变化规律, 即先增大后减小再增大, 且总体上, 早中期东天山挤压应力明显高于西天山, 晚期西天山高于东天山。张应力分布区主要位于浅层地层内, 即深部以挤压应力为主, 浅部以挤压应力和张应力交叉分布为主。时间上, 大片的张应力区主要出现在构造运动的中晚期, 而且在天山的西段明显比东部发育, 这也为张扭构造体系的发育提供了条件(Goodman et al., 1968; 吕桂林等, 1997; 张明利等, 2004; 孙明志等, 2022; 刘敬寿等, 2023)。

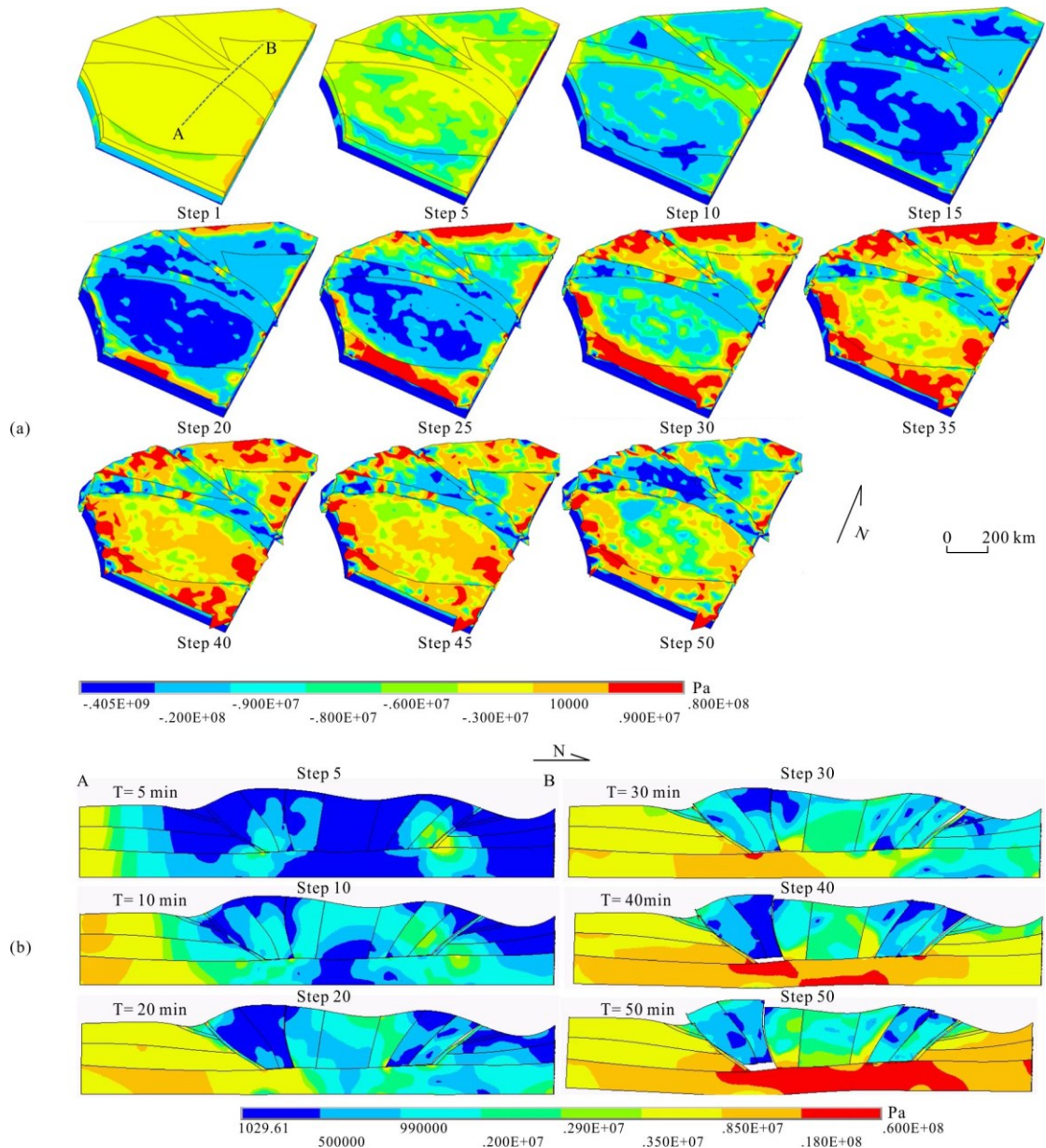


图5 不同时间段的现今应力场最大主应力 (a) 平面演化和应力强度 (b) 剖面演化特征

Figure. 5 Evolution characteristics of maximum principal stress (a) and stress intensity (b) in the current tectonic stress field at different time periods

应力强度作为构造应力场的一个重要属性参数,其高低值直接反映着地层受力后的不稳定性或应力集中程度(Goodman et al., 1968; 吕桂林等, 1997; 孙明志等, 2022; 刘敬寿等, 2023)。从跨天山的南北向剖面来看(图5b),在初始阶段,应力会在塔里木板块内和南、北天山山前集中,而且北侧应力集中程度高于南侧;随着时间的增长和构造应力的传递,应力集中位置逐渐转移到中天山和深部地层内,而南、北天山山前呈现为应力强度低值;随着进入挤压运动中期,南、北天山似乎对应力的集中有着隔绝作用,应力强度高值区一方面容易集中在南天山深部地层内,另一方面集中在北天山前缘断裂带内,从而使得前期断裂向准噶尔盆地内继续扩展延伸,南天山也继续抬升;进入挤压中后期,明显地大部分应力集中区转移到了中天山和南天山的深部地层内,此时尽管南天山构造带内应力强度偏低,但受深层地层的顶托作用南天山继续斜向隆升并向塔里木盆地内推覆;进入现今阶段,应力集中区已大部分集中于深部地层内和中天山盆地内,整个天山以大规模隆升为主,尤其南天山的隆

升幅度最大，这些应力场的转变和集中现象与构造挤压力的传递机制密不可分。最大主应力的分布可以反映出构造力的传播规律，总体上，来自西昆仑山或帕米尔的构造挤压力在纵向上，先向北再向西再向北传递，在横向上由西向东逐渐传递，从天山造山带来看，挤压力先在中天山集中，然后在南天山集中，最终转移到北天山。这可能与我们在模拟计算时将断裂带视为相对软弱介质有关，造成了应力集中效应的削弱，这与一些学者关于南天山形成早于北天山造山带的研究结果非常吻合(孙明志等, 2022; Tian et al., 2016)。由图 7 可见，塔里木板块和天山造山带之间的运动速率在时间上和平面上都有较大的差异，在帕米尔高原以北喀什地区的缩短速度均在 20mm/a 以上，而拜城-库车地区的缩短速度比天山西南部的缩短速度明显慢，普遍在 5mm/a 以下。可以认为，来自帕米尔高原的陆内挤压应力从西向东逐渐减小，从中新世晚期(6.5Ma)到现在，由于印度-亚洲碰撞引起的陆内变形持续增大，缩短率也不断在增大。

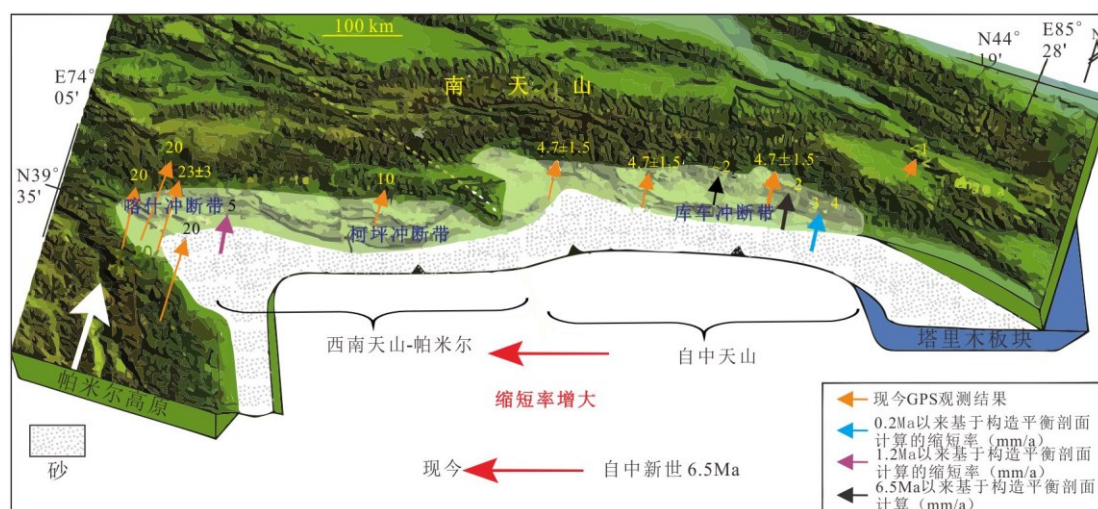


图 6 塔里木板块和天山造山带之间的运动速率差异分布图(Avouac et al., 1993; 邓云山等, 1999)

Figure.6 3D map illustrating the rates of movement between the Tarim plate and the Tianshan orogenic belt(Avouac et al., 1993; Deng et al., 1999)

基于有限元模拟的剪应力通常可分为平面剪应力 ( $xy$ ) 和垂向剪应力 ( $yz$ 、 $xz$ ) 两种，其中平面剪应力是旋扭断裂体系形成的主要因素，剪应力的旋向决定了逆时针或右旋、顺时针或左旋的力学环境。由图 6 可以看出，在时间上，从早期至晚期平面剪应力分布趋势变化不大，尤其塔里木盆地的剪应力分布较天山和准噶尔盆地更为稳定，这与塔里木盆地的刚性基底关系密切。剪应力的强度在平面上有着明显的区域差异性，相对地，左旋和右旋剪切环境在天山地区和准噶尔盆地内呈现的差异更大，如南天山造山带在形成的早中期以顺时针或左旋为主，而到了后期则以逆时针或右旋为主，由此可以推断出东天山山前断裂在形成早期也是左旋的，只是后期在  $xz$  垂向剪应力场的影响下逐渐转变为右旋为主。而且，受印藏板块碰撞的远程效应影响，帕米尔弧顶、阿尔金断裂带和天山南缘断裂带整体上表现出左旋剪切特征，这就使得塔里木地块发生了被动的顺时针旋转运动，并由此在库车坳陷、柯坪断隆地区以及塔北隆起北部控制形成了一系列压扭性弧形断裂体系，弧形构造的外旋方面向撒开方向扭动(图 7a)(孙明志等, 2022; Tian et al., 2016)。随着应力的传递和应力状态的转换，南天山造山带内表现出了强烈的逆时针或右旋特征，而向南北两侧仍为顺时针或左旋特征，北天山造山带也表现为强烈的逆时针或右旋特征，这种喜马拉雅期挤压和旋扭联合应力场是南北天山复杂断裂体系形成的根本原因。在喜马拉雅期的旋扭应力场下，造成了西准噶尔地区北西向右旋走滑断裂的继承性活动，这与前人研究结果吻合好。 $xz$  向剪应力的分布在研究区表现出明显的南北分带、东西分区特征，尤其是沿着塔里木盆地内满加尔凹陷西

侧出现了剪应力环境的分区，西侧塔中隆起区为垂向左旋特征，东侧为垂向右旋特征，这种垂向上的变化也导致了拗隆相间格局的进一步发育，同时使得西天山和东天山山前断裂旋向的差异性(图 7b)，这与前人对于塔里木盆地中生代以来走滑断裂的研究结果基本一致(任建业等, 2011) (图 2、图 7c)。

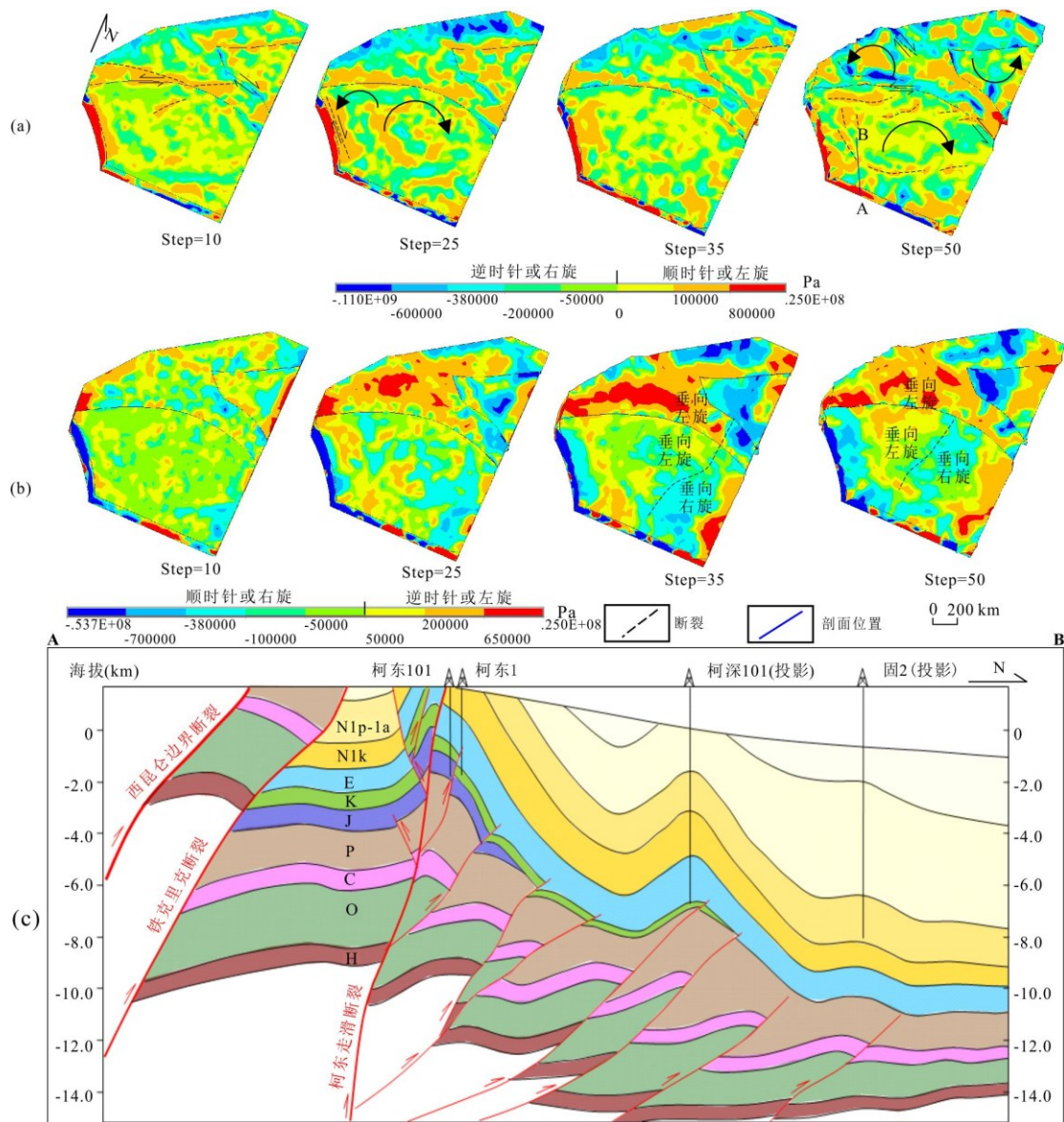


图 7 不同时间段的古应力场剪应力演化特征及验证(斜向俯视图)

(a) xy 向平面剪应力场; (b) xz 向剖面剪应力场; (c) 西昆仑山前缘冲断带地质结构剖面

Figure. 7 Evolution characteristics and verification of shear stress of paleostress field in different time periods

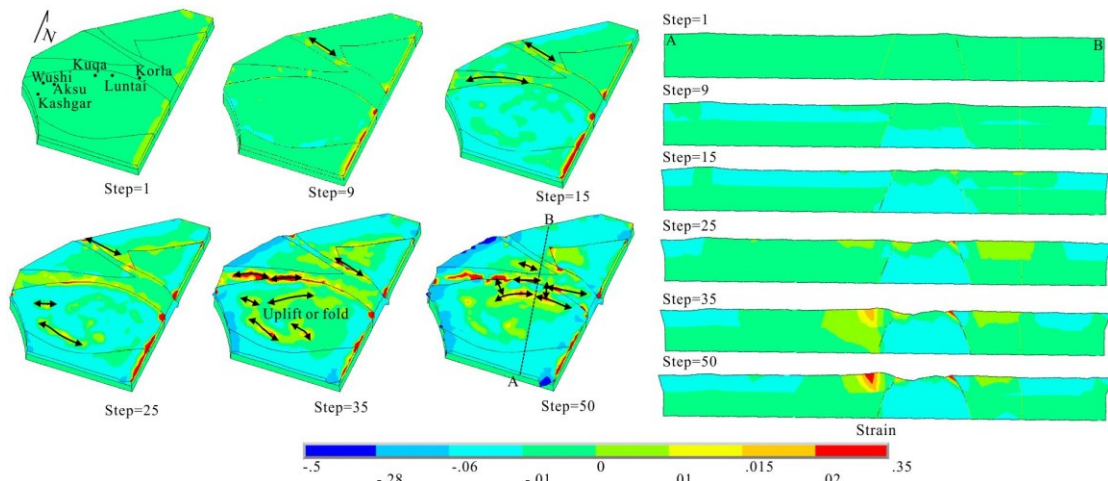


图 8 不同时间段的古应力场 z 向等效塑性应变演化特征

Figure. 8 Evolution characteristics of equivalent plastic strain in the z-direction of paleostress field at different time periods

由于地质构造运动的缓慢作用过程和上覆地层的弹塑性力学特征,在印度板块南北向挤压和西昆仑山楔入走滑的联合应力场下,在形成大量逆冲断裂和旋扭构造体系的同时,也控制形成了一系列褶皱,这可以从数值模拟的 z 向应变值得到体现。在新生代新构造运动发生期间,垂向地壳变形量由西向东逐渐增大,由南向中部再向南北逐渐增大。在相对 15 分钟时期,高应变值首先在西天山的南天山造山带和北天山造山带内出现,至 25 分钟时,应变值进一步增大,说明南北天山进一步隆升,并逐渐向两侧盆地继续转移,如西昆仑山前地区和准噶尔盆地西北缘地区(图 8)。35 分钟至 50 分钟期间,随着西天山南缘隆升幅度的进一步增大,东天山和西昆仑山前地区的隆升量也开始增加,而且这些隆升呈北东向延伸的多个弧形褶皱连接在一起,形成大型褶皱带(图 8)。李忠等(2013)、高志勇等(2016)通过对天山南北沉积充填、古气候变化、物源属性以及磷灰石裂变径迹测年等数据认为,侏罗纪以来天山地区的隆升顺序为由南向北、由南西向东北、由西向东,中新世以来喜马拉雅构造运动造成的天山隆升范围主要位于天山中段、东天山和库车坳陷,而且隆起范围呈向西的撒开式,在南天山和库车坳陷内表现的尤为明显。众多学者的研究结果也表明,北天山山前的逆断裂-褶皱带的构造活动由南向北迁移,南天山山前的构造活动则是由北向南迁移,整个天山的现代活动是一种扇形的向南和向北双向逆冲缩短作用,这一趋势与数值模拟的结果基本吻合(Sun et al., 2022; Tian et al., 2016; 任建业等, 2011; 李忠等, 2013; 高志勇等, 2016)。

### 3.2 旋扭构造应力场模拟的可靠性验证

对于天山及两侧盆地,第四纪以来的构造应力环境和应力方向基本上继承了喜马拉雅运动晚期的特征,因此重点对 50 分钟时期的最大主应力方向进行了分析和验证。研究区喜马拉雅运动晚期古应力场的近地表最大主压应力方向总体呈近 SN 向和 NW 向,在不同地区有所偏转,靠近地块边缘和天山西部应力方向偏转较大(Sun et al., 2022; Tian et al., 2016)。如由于印度板块与欧亚大陆的碰撞,使得挤压构造力沿着刚性基底的塔里木地块向北传递,在天山南缘和北缘发生了广泛的汇聚作用,然而由于西部中天山地块的宽度远大于东天山,压性的最大主应力在此分道扬镳,西部向 NW 方向偏转,而天山主体地带仍为近 SN 和 NNE 向(图 9a)。而且南天山和北天山造山带内应力方向变化较大,这种情况在准噶尔地块内的四棵树凹陷和达尔布特断裂带以北地区也发生了明显的 NW 向偏转。由此可见,板块边界和构造断层带对其周围地区的应力分布会产生一些影响,甚至会改变局部应力场的主体方向。数值模拟所得的最大主压应力方向与前人通过擦痕、褶皱轴面、共扼节理和 GPS 观测等

要素得到的方向基本一致，只有南天山造山带内的方向有较大误差（图 9b），这与地质模型的精细程度密切相关。图 9a 中应力方向的长短反映了压应力强度或地壳缩短速率，大量 GPS 观测结果也表明现今天山地壳缩短速率具有由西向东递减的特征（孙明志等，2022）。关于天山现今地壳缩短率与平均缩短率的关系，Sobel 等（2006）认为当前缩短率并不能反映山脉自隆升开始后的平均缩短率，同时指出天山经历了一段复杂的晚新生代缩短历史，而且缩短率一定随时间脉冲式变化，这在以上数值模拟的结果中也得到了很好的体现，因此，采用现今 GPS 观测结果分析的构造运动特征与数值模拟得到的结果进行对比是可靠的。

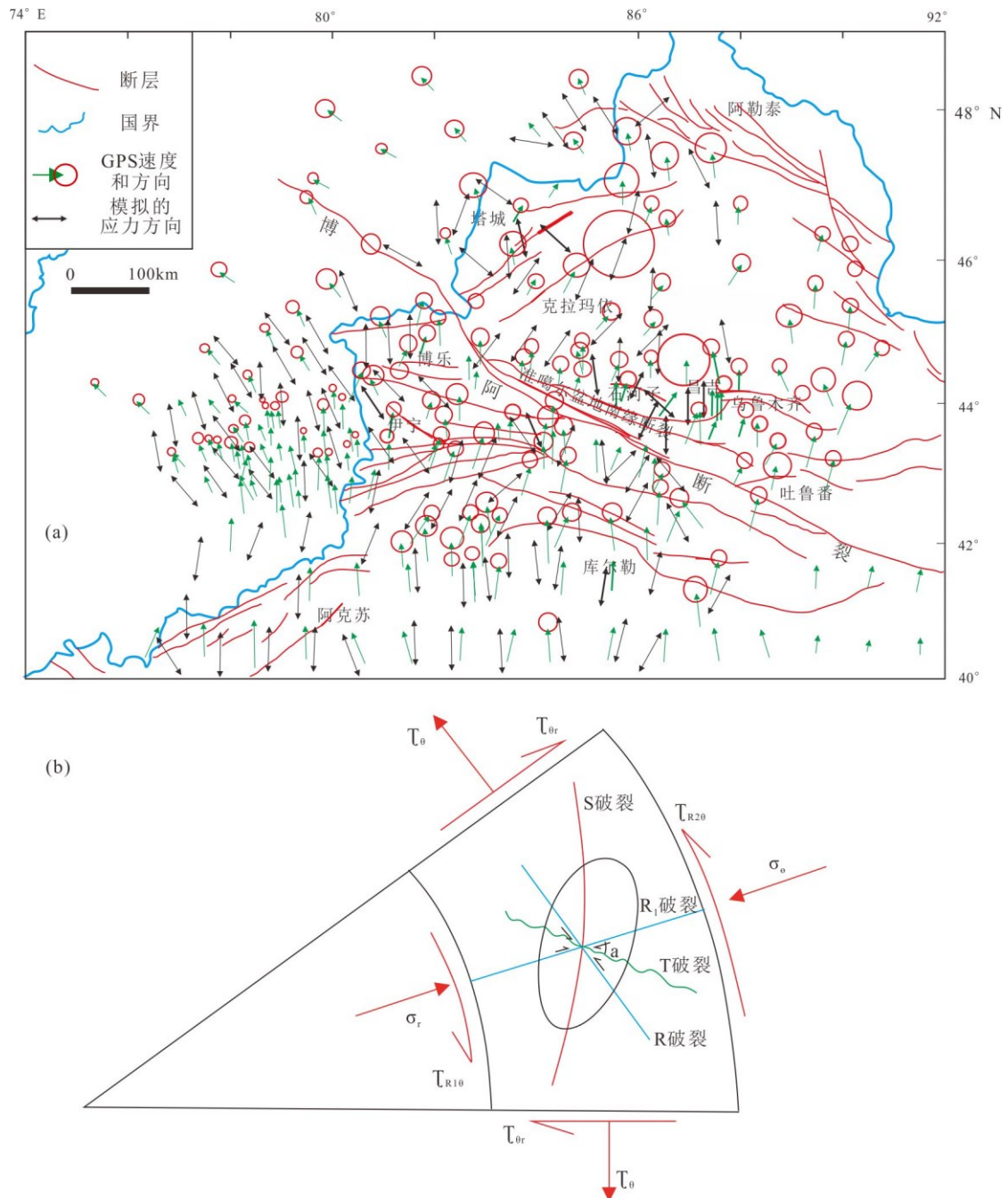


图 9 喜马拉雅晚期古应力场最大主应力方向分布及 GPS 观测结果验证

(a) 天山及其邻区 GPS 点位速度场与模拟最大主应力方向对比图； (b) 压扭性旋扭构造应力场下次级构造发育模式

Figure.9 Distribution of maximum principal stress direction in the late Himalayan paleostress

### field and verification of GPS observation results

总体上, 天山及两侧盆地在新生代以来的构造变形得益于印藏板块碰撞的远程挤压效应和由此产生的塔里木地块、准噶尔地块被动发生旋转的联合作用。Thomas et al. (1993) 根据 Issykul 盆地和 Naryn 盆地古地磁研究结果, 认为费尔干纳断层以北的哈萨克斯坦板块第三纪没有发生旋转, 相对固定。因而可以认为只有塔里木板块发生顺时针旋转才能造成塔里木盆地西北缘柯坪隆起构造缩短量大于库车盆地构造缩短量。Tian et al. (2016) 推算从北天山安集海河到库车坳陷北缘缩短量达 150–175 km, 从喀什南北方向天山造山带构造缩短量达 330~360 km。根据局部艾里均衡模式, Avouac et al. (1993) 估计天山造山带南北有  $125 \pm 30$  km 缩短, 喀什方向(经度)为  $203 \pm 50$  km, 这个值小于古地磁计算结果。根据笔者对库车盆地冲断带平衡剖面计算中生代地层缩短 50 km, 加上在天山北缘估算的 55 km 冲断量, 天山南北方向缩短有 100 km 以上。邓云山(1999)根据古地磁资料也揭示出塔里木西南阿尔塔什地区在白垩纪期间及以后相对于库车地区发生近  $25^\circ$  旋转, 即使到现在这种顺时针旋转作用仍在继续进行。根据图面结构分析, 这是应变不均匀作用造成的, 在印度与欧亚板块碰撞造山带的西带, 塔里木板块作为很大变形刚性块体, 未发生明显变形, 此处天山向西变宽可与塔里木盆地东侧变窄的青藏高原相对比。印度次大陆尖角几乎通过很窄的西昆仑和帕米尔与塔里木板块西南尖角相接, 汇聚分量大部分通过塔里木板块东南缘阿尔金走滑断层和昆仑冲断层消失。西部比东部更强烈的推挤作用造成塔里木板块发生顺时针旋转, 旋转的结果造成库车盆地西端和柯坪断隆带构造挤压强烈, 向东减小, 形成南天山造山带帚状或撒开状冲断-走滑构造的空间展布形态(图 9b)。

数值模拟揭示的旋扭应力场分区特征, 在现今地震活动与地壳形变中得到了直接印证。模拟结果显示, 塔里木北缘与天山构造带存在显著的左旋与右旋剪应力差异(图 6、图 7), 这为理解地震类型的空间分布提供了力学背景: 例如, 2021 年拜城 M5.3 左旋走滑地震的发生, 即与模拟中塔里木盆地北缘的左旋剪切环境相吻合(Yao et al., 2022); 而 2024 年乌什 M7.1 地震所展现的逆冲兼走滑机制, 则反映了南天山边界断裂在旋扭应力场下的复杂破裂特征。此外, GPS 观测揭示的区域性斜向汇聚与走滑运动, 从运动学上证实了旋转扭动的持续存在(Gu et al., 2024)。因此, 现今地震的空间丛集、机制类型及地壳变形模式, 均可视为新生代旋扭构造体系在现今地质时期的继承性与活动性表现, 表明该旋扭应力场至今仍主导着区域的构造变形与地震孕育过程(孙明志等, 2022)。

## 4、旋扭构造运动对油气成藏的影响

在油气地质研究中, 目前已经发现几乎所有的石油和天然气的聚集均与旋扭构造有关, 如辽河盆地兴隆台旋卷构造、渤海湾盆地冀鲁大型帚状构造体系, 大庆油田反“S”型构造等, 就连最稳定地块上的鄂尔多斯盆地, 甚至有人认为那里连构造裂隙都不会发育, 但其西缘含油气的马家滩褶皱带也具有明显的扭动构造特征。塔里木盆地是我国最大的内陆含油气叠合盆地, 油气资源勘探潜力巨大。塔里木盆地介于天山、昆仑两大山系之间, 周边被库鲁克塔格、柯坪、铁克里克、阿尔金等次一级山系所环绕, 经历了多期构造旋回。而且, 塔里木盆地含油气系统受多期构造运动影响, 以及多期油气充注成藏和油气藏调整改造的差异性, 油气成藏特征极其复杂(张光亚等, 2007)。塔里木盆地主要发育寒武系-奥套系、石炭系-下二叠统、三叠系、侏罗系等多套烃源岩, 其分布具有多源复合叠加的特征, 有多类储集层和多套储盖组合, 多期生烃、多期成藏及油气藏的多期调整导致塔里木盆地含油气分布特征复杂。由于不同时期盆地构造沉积格局的差异, 上述几套烃源岩空间分布位置不尽相同, 在塔里木盆地形成了多个不同的供烃中心, 在塔里木盆地形成了诸多含油气系统(图 10)。同时, 即使同一套烃源岩, 由于不同沉积位置及不同时期成熟, 有效生烃位置也在不断发生变化(张光亚等, 2007; 曹厚臻等, 2019)。

新生代旋扭构造运动时期, 库车坳陷前陆区的新近系沉积地层快速沉降, 三叠系、侏罗

系烃源岩进入生烃高峰期,与此同时构造变形和圈闭发育,在此时间段内,良好的匹配关系为油气成藏提供了巨大的优势条件。由于盆山过渡带构造活动剧烈,构造应力得到释放,导致应力梯度由盆地中心向盆地周缘递减,加之印藏板块碰撞的远程效应,使盆地内部应力梯度向北的衰减特征尤为显著。在此种应力场环境下,油气沿输导体系由盆地中心向盆地边缘运移,特别是趋向于向盆地北缘运移,使库车坳陷成为塔里木盆地油气资源最丰富地区(图11)。对塔北、哈拉哈塘地区周缘的烃源岩而言,新生代其寒武系烃源岩进入成熟高峰期,成为高效烃源灶。同时,在塔中、塔北隆起上分别形成两个局部的中-上奥陶统烃源灶,表明这两个古隆起及其周缘地区具有长期油气聚集的有利条件(张光亚等, 2019; 易士威等, 2012)。在新生代塔里木板块旋扭构造运动的影响下,在盆山边界及大型断裂体系的周缘形成了一系列油气富集带,使其具有了巨大的油气勘探开发潜力(Cao et al., 2019; 张光亚等, 2019; 易士威等, 2012; Zhang et al., 2024)。

新生代旋扭构造运动影响下的构造演化及先存断裂的活动,导致塔里木盆地含油气系统输导体系受到改造,盆地边缘及大型断裂的疏导性能得到的提升。塔里木盆地多套烃源岩新生代时期进入生、排烃高峰期。与此同时,塔里木盆地发生旋扭构造运动,构造作用主要发正在克拉通的边缘地带,既盆山过渡带区域,板块旋扭导致的挤压应力导致山前发育一系列新生褶皱、隆起。同时,山前冲断带及现存断裂发生走滑改造作用,断裂代被改造并沿断裂带走向发育一系列次级新生构造单元。这种构造运动对塔里木盆地构造格局的改造作用与烃源岩的生、排烃高峰期在时空上具有很好的耦合特征,使得含油气系统的生、储之间构成了较好的匹配关系,有利于油气藏的形成,并调整了油气成藏的关键位置。

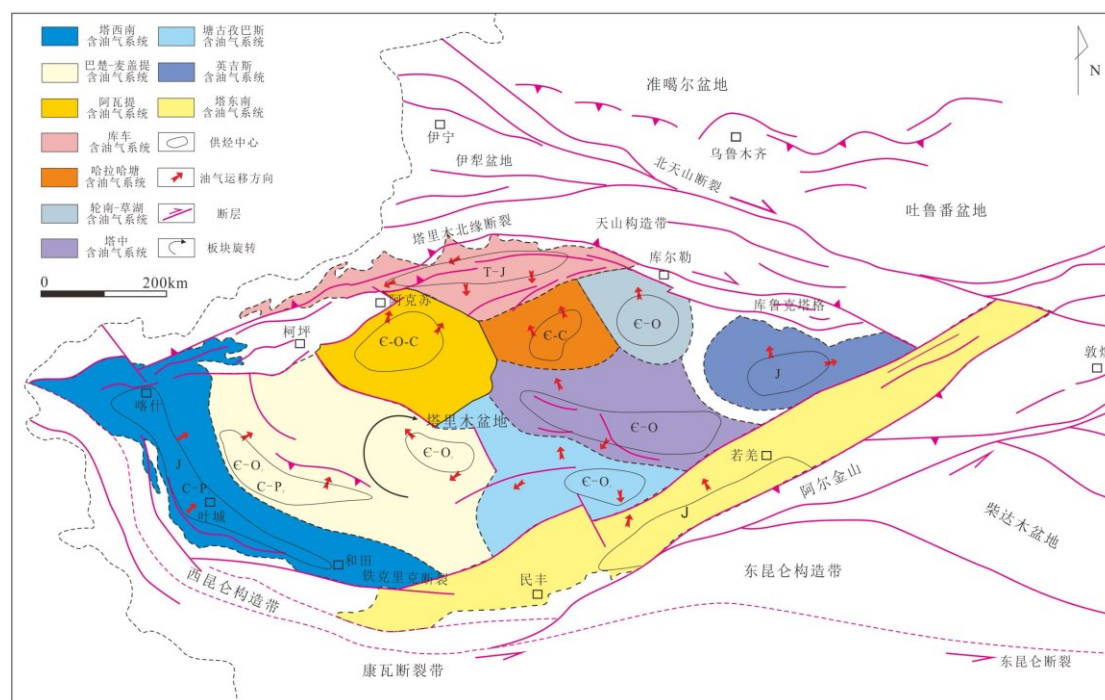


图 10 塔里木盆地油气成藏事件及含油气系统划分 (张光亚等, 2007)

Figure.10 Petroleum system division in the Tarim Basin

## 5、结论

(1) 天山作为典型的新生代板内复活型造山带,其构造动力学机制及与南缘前陆冲断带的耦合模式一直是众多学者争论的焦点,在系统总结前人成果资料的基础上,结合最新地震资料和露头调查结果发现,天山南缘柯坪隆起、库车坳陷的新生代断裂系统呈帚状由东向西依次撒开,属于典型的旋扭构造体系,而不是单纯的逆冲-推覆构造模式。

(2) 通过获取天山和塔里木盆地北缘的现今地貌、构造单元和古应力等基础数据,采

用大变形弹塑性有限元法 (FEM) 建立天山及周边地区构造地质力学模型, 从四维演化的角度, 模拟了来自于昆仑山构造应力场的传递过程和分布特征。结果表明, 新生代喜马拉雅运动以来, 在印度-欧亚碰撞的远程效应下, 塔里木板块被动发生了顺时针旋转, 并可能引发了西天山深部壳幔活动, 共同控制了天山及南缘造山带的由西向东依次形成和旋扭构造体系的发育。应力场模拟结果与当前 GPS 实际测得的地壳位移方向非常吻合。

(3) 新生代旋扭构造运动使得盆山过渡带的构造格局受到改造, 先存断裂活化走滑, 盆地边缘及大型断裂的疏导性能得到的提升。并随之发育的一系列次级新生构造单元使良好的油气储集空间, 几乎同时塔里木盆地多套烃源岩新生代时期进入生、排烃高峰期, 使得含油气系统的生、储之间构成了较好的匹配关系, 使塔里木盆地具有了巨大的油气勘探开发潜力。

## References

- Allen, M. B., Vincent, S. J., Wheeler, P. J., 1999. Late Cenozoic tectonics of the Kepingtage thrust zone: Interactions of the Tien Shan and Tarim Basin, northwest China. *Tectonics*, 18(4): 639-654. <https://doi.org/10.1029/1999TC900019>
- Avouac, J. P., Tapponnier, P., Bai, M., et al., 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 98(B4): 6755-6804. <https://doi.org/10.1029/92JB01963>
- Cao, H. Z., He, L. J., Zhang, L. Y., 2019. Background thermal history of the Tarim Craton since its formation. *Chinese Journal of Geophysics*, 62 (1):236-247 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. P., Tang, L. J., Yu, Y. X., 2008. Cenozoic deformation of foreland basins in the southern and northern Tianshan and wave coupling of the Tianshan orogenic belt. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, S1: 55-62 (in Chinese).
- Deng, Y. S., Meng, Z. F., Zheng, Y. P., 1999. New achievements in paleomagnetic research of Tarim Basin. *Advances in Earth Science*, 6: 624-625 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Long, L. L., Qian, Q., et al., 2006. South Tianshan: a Late Paleozoic or a Triassic orogen? *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1049-1061 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Qian, Q., Long, L. L., et al., 2009. Accretionary orogenic process of the Western Tianshan. *Geological Bulletin of China*, 28 (12): 1804-1816 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Z. Y., Zhou, C. M., Feng, J. R., et al., 2016. Mesozoic-Cenozoic uplift of Tianshan and the differentiation and sedimentary environment evolution of its northern and southern basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34 (3): 415-435 (in Chinese with English abstract).
- Goodman, R. E., Taylor, R. L., Brekke, T. L., 1968. A model for the mechanics of jointed rock. *ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, 99(5): 637-659. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0008003>
- Gu, C., Zhao, B., Sheng, T., et al., 2024. The present-day kinematics of the Tianshan orogenic belt constrained by GPS velocities. *Geodesy and Geodynamics*, 15(6): 543-553. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2024.04.004>
- Huang, Y. P., Jiang, Z. L., Li, J. R., et al., 2013. Tectonic stress direction of Neotectonic movement in Tarim Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 20(3):5-9+17+111

- (in Chinese with English abstract).
- Ji, D. S., Gan, R. Z., Pang, Z. C., et al., 2015. Mesozoic tectonic characteristics of the northern Tianshan piedmont and their significance for Cenozoic deformation. *Earth Science*, 50(12): 4685–4696 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, J. X., Yin, G. H., Wu, G. D., 2012. Study on relative stress field in Xinjiang based on continuous measured data of borehole stress and strain. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(1): 154–163 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, X. T., Ning, F. X., Xiao, M. C., et al., 2023. Magnetic basement depth and tectonic attribute of the northeastern Tarim Basin. *Earth Science*, 48(4): 1351–1365 (in Chinese with English abstract).
- Lei, J. S., Zhao, D. P., 2007. Teleseismic P-wave tomography and the upper mantle structure of the central Tien Shan orogenic belt. *Phys. Earth Plan. Int.*, 162: 165–185. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.04.010>
- Li, J., Gao, Y., Wang, Q., 2021. Seismic anisotropy zoning characteristics of upper crust in Tianshan tectonic belt. *Science China Earth Sciences*, 51(4): 582–597 (in Chinese).
- Li, J. Y., Wang, K. Z., Li, Y. P., et al., 2006a. Geomorphic features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 8: 895–909 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Wang, K. Z., Sun, G. H., et al., 2006b. Paleozoic active continental margin fragments on the southern margin of the Tuha Basin, eastern Tianshan: geological records of subduction of the Paleo-Asian Ocean plate in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 5: 1087–1102 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Xu, J. Q., Gao, J., 2013. Sedimentology of basin-range system—with study cases in North China and Tarim regions. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5): 757–772 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. S., Ding, W. L., Yang, H. M., et al., 2023. Natural fractures and rock mechanical layer evolution in Huaqing area, Ordos Basin: quantitative analysis based on numerical simulation. *Earth Science*, 48(7): 2572–2588 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. H., Liu, X. W., Zheng, J. J., et al., 2011. Tectonic evolution of the Tianshan north-south blocks and coupling dynamic mechanism of mantle convection. *Progress in Geophysics*, 26(5):1544–1556 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. H., Wang, S. L., Jia, D., et al., 2005. The Late Cenozoic Basin/Mountain Coupling Mechanics of the Tarim Basin and the Tianshan Mountains. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 493–503. <https://doi.org/10.16108/j.issn1006-7493.2005.04.004>
- Lü, G. L., Han, J., Chen, P. S., 1997. Characteristics of environmental stress field in South Tianshan, Xinjiang. *Inland Earthquake*, 3: 212–217 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Zhang, J. X., Yang, H. Z., et al., 2011. Analysis of fault system in the central uplift belt of Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 219–230 (in Chinese with English abstract).
- Sun, B. S., Ding, Y. C., Shao, Z. G., et al., 1996. Application of measuring ancient and modern in-situ stress by acoustic emission method in oilfield. *Journal of Geomechanics*, 2: 11–17 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M. Z., Tan, K., Lu, X. F., et al., 2022. Three-dimensional numerical simulation of present-day crustal deformation and tectonic stress in Tianshan area. *Journal of*

- Seismological Research, 45(4): 535-542 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M. Z., Tan, K., Lu, X. F., et al., 2022. Three-dimensional numerical simulation of present-day crustal deformation and tectonic stress in Tianshan area. *Journal of Seismological Research*, 45(4): 535-542 (in Chinese with English abstract).
- Thomas, J. C., Perroud, H., Cobbold, P. R., et al., 1993. A paleomagnetic study of Tertiary formation of the Kirghiz Tien-Shan and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 98: 9571-9589. <https://doi.org/10.1029/92JB02912>
- Tian, Z., Sun, J., Windley, B. F., et al., 2016. Cenozoic detachment folding in the southern Tianshan foreland, NW China: Shortening distances and rates. *Journal of Structural Geology*, 84: 142-161. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.01.007>
- Wang, Q. C., Zhang, Z. P., Lin, W., 2003. Late Tertiary fault activity and stress state of the Kuqa Basin-Tianshan boundary. *Chinese Science Bulletin*, 24: 2553-2559 (in Chinese).
- Yao, Y., Wen, S., Yang, L., et al., 2022. A Shallow and left-lateral rupture event of the 2021 Mw 5.3 Baicheng earthquake: Implications for the diffuse deformation of Southern Tianshan. *Earth and Space Science*, 9: e2021EA001995. <https://doi.org/10.1029/2021EA001995>
- Yi, S. W., Du, J. H., Yang, H. J., et al., 2012. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation and exploration thinking of Lower Paleozoic in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 17 (3): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. B., Tan, C. X., Zhang, M. L., 2004. Mesozoic-Cenozoic tectonic stress field and its hydrocarbon migration and accumulation effect in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Science in China (Series D:Earth Sciences)*, S1: 98-106 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Y., Tong, X. G., Xin, R. C., et al., 2019. Global lithoface paleogeographic evolution and hydrocarbon distribution (II). *Petroleum Exploration and Development*, 46 (5): 848-868 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Y., Zhao, W. Z., Wang, H. J., et al., 2007. Polycyclic tectonic evolution and composite petroleum system of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 5: 653-663 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. L., Tan, C. X., Tang, L. J., et al., 2004. Analysis of Mesozoic-Cenozoic tectonic stress field in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 6: 615-619 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Yang, X. Z., Hao, F., et al., 2024. Characteristics of fluid inclusions and hydrocarbon accumulation process in Lungu area, Tarim Basin. *Earth Science*, 49(7): 2407-2419 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 曹厚臻, 何丽娟, 张林友, 2019. 塔里木克拉通形成以来的背景热史研究. *地球物理学报*, 62(1): 236-247.
- 曾联波, 谭成轩, 张明利, 2004. 塔里木盆地库车坳陷中新世代构造应力场及其油气运聚效应. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, S1: 98-106.
- 陈书平, 汤良杰, 余一欣, 2008. 天山南北前陆盆地新生代变形与天山造山带的波动耦合 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, S1: 55-62.
- 邓云山, 孟自芳, 郑彦鹏, 1999. 塔里木盆地古地磁研究新成果. *地球科学进展*, 6: 624-625.

- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等, 2009. 西天山的增生造山过程. 地质通报, 28 (12): 1804-1816.
- 高志勇, 周川闽, 冯佳睿, 等, 2016. 中生代天山隆升及其南北盆地分异与沉积环境演化. 沉积学报, 34 (3): 415-435.
- 黄玉平, 姜正龙, 李景瑞, 等, 2013. 塔里木盆地新构造运动时期构造应力方向. 油气地质与采收率, 20(3): 5-9+17+111.
- 冀冬生, 甘仁忠, 庞志超, 等, 2025. 天山北麓中生代构造特征及其对新生代变形的意义. 地球科学, 50(12): 4685-4696.
- 蒋靖祥, 尹光华, 吴国栋, 2012. 基于钻孔应力、应变连续实测资料研究新疆相对应力场. 岩石力学与工程学报, 31(1): 154-163.
- 匡星涛, 宁方馨, 肖梦楚, 等, 2023. 塔里木盆地东北部磁性基底深度及构造属性. 地球科学, 48(4): 1351-1365.
- 李金, 高原, 王琼, 2021. 天山构造带上地壳介质各向异性分区特征. 中国科学: 地球科学, 51(4): 582-597.
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等, 2006a. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. 地质通报, 8: 895-909.
- 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 等, 2006b. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录. 岩石学报, 5: 1087-1102.
- 李忠, 徐建强, 高剑, 2013. 盆山系统沉积学—兼论华北和塔里木地区研究实例. 沉积学报, 31(5): 757-772.
- 刘敬寿, 丁文龙, 杨海盟, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地华庆地区天然裂缝与岩石力学层演化: 基于数值模拟的定量分析. 地球科学, 48(7): 2572-2588.
- 刘玉虎, 刘兴旺, 郑建京, 等, 2011. 天山南北地块构造演化与地幔对流耦合动力机制. 地球物理学进展, 26(5): 1544-1556.
- 吕桂林, 韩京, 陈培善, 1997. 新疆南天山环境应力场特征. 内陆地震, 3: 212-217.
- 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等, 2011. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析. 岩石学报, 27(1): 219-230.
- 孙宝珊, 丁原辰, 邵兆刚, 等, 1996. 声发射法测量古今应力在油田的应用. 地质力学学报, 2: 11-17.
- 孙明志, 谭凯, 鲁小飞, 等, 2022. 天山地区现今地壳形变及构造应力的三维数值模拟. 地震研究, 45(4): 535-542.
- 孙明志, 谭凯, 鲁小飞, 等, 2022. 天山地区现今地壳形变及构造应力的三维数值模拟. 地震研究, 45(4): 535-542.
- 王清晨, 张仲培, 林伟, 2003. 库车盆地 - 天山边界的晚第三纪断层活动性质与应力状态. 科学通报, 24: 2553-2559.
- 易士威, 杜金虎, 杨海军, 等, 2012. 塔里木盆地地下古生界成藏控制因素及勘探思路. 中国石油勘探, 17(3): 1-8.
- 张光亚, 童晓光, 辛仁臣, 等, 2019. 全球岩相古地理演化与油气分布(二). 石油勘探与开发, 46(5): 848-868.
- 张光亚, 赵文智, 王红军, 等, 2007. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统. 石油与天然气地质, 5: 653-663.
- 张明利, 谭成轩, 汤良杰, 等, 2004. 塔里木盆地库车坳陷中生代构造应力场分析. 地球学报, 6: 615-619.
- 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.

# Characteristics and stress field evolution of the Cenozoic rotational shear tectonic system in the Tianshan Mountains and its southern margin

Zhao Libin<sup>1,2, 3, 4,5</sup>, Chen Dongxia<sup>1\*</sup>, Feng Jianwei<sup>6</sup>, Liang Xiao<sup>2</sup>, Yang Xuejun<sup>2</sup>

1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102449, China

2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

3. R&D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla 841000, China

4. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla 841000, China

5. Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Korla 841000, China

6. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract:** As a typical symmetrical Cenozoic intraplate rejuvenated orogenic belt, the Tianshan Mountains present key scientific challenges regarding the Cenozoic tectonic dynamic mechanisms and their coupling patterns with the foreland thrust belt on the southern margin. Based on the latest geological and geophysical data as well as field outcrop investigations, and guided by geomechanical theory, this study proposes that the Cenozoic fault system in the Keping-Kuqa area on the southern margin of the Tianshan Mountains exhibits a broom-like westward divergence, belonging to a rotational shear structural system rather than a simple thrust-nappe structure. By establishing a large-deformation elasto-plastic finite element model (FEM), the four-dimensional evolution of the region since the Cenozoic has been simulated. The results indicate that under the far-field effects of the India-Eurasia collision, the Tarim Block underwent passive clockwise rotation, which activated deep crust-mantle activities in the western Tianshan and further controlled the progressive eastward formation of the orogenic belt and the development of rotational shear structures along the southern margin of the Tianshan. This rotational shear motion has controlled the formation of multiple hydrocarbon enrichment zones along the basin-mountain boundary and around major faults, demonstrating broad exploration prospects.

**Key words:** Southern Tianshan Margin; Cenozoic; Rotational Shear Structure; Four-dimensional evolution; Oil and Gas Accumulation