

准噶尔盆地西北缘哈山构造带断裂性质与演化

巴素玉¹ 李长圣² 汪伟^{3*} 宋亮¹ 谷今¹ 卢宁¹ 池禹² 张新松²
朱素芹², 张勇³

(1. 中国石化胜利油田分公司 物探研究院, 山东东营 257022;

2. 东华理工大学 地球与行星科学学院, 江西南昌 330013;

3. 中国科学院南京地质古生物研究所 古生物学与油气地层应用全国重点实验室, 江苏南京 210008)

摘要: 准噶尔盆地西北缘哈山构造带的断裂属性仍然存在较大的争议。本文基于哈山构造带最新地震剖面的精细解析建立地质模型, 系统分析其断裂活动性, 并通过平衡剖面恢复定量揭示构造演化过程。研究表明, 哈山构造带是一个经历多期构造演化的复合断裂系统: 其中达尔布特断裂体系是具有花状构造特征的走滑断裂体系, 而乌尔禾-夏子街断裂体系则是走滑变形向盆地方向传播形成的褶皱冲断带。哈山构造带自二叠纪以来主要经历三期构造变形: 二叠纪末期为主变形期, 达尔布特走滑断裂体系于在此期间成型, 三叠纪-侏罗纪是乌尔禾-夏子街断裂体系主要形成时期, 白垩纪-新生代表现为斜向抬升。

关键词: 地震解析; 走滑构造; 断裂活动; 哈山构造带; 准噶尔盆地

中图分类号: P542+.2 收稿日期: 2025-08-20

Fault system and evolution process of the Hashan structural belt in the northwestern Junggar Basin

Ba Suyu¹ Li Changsheng² Wang Wei^{3*} Song Liang¹ Gu Jin¹ Lu Ning¹ Chi Yu² Zhang Xinsong² Zhu Suqin² Zhang Yong³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257022;

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

3. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: The fault property of the Hahan structural belt, located in the southwestern Junggar basin, is still controversial. This paper constructs the structural model of the Hashan structural belt by interpreting the latest seismic profile, and analyzes the fault displacements. The evolution process is investigated using balanced cross-section restoring. The results suggest that the Hashan structural belt is a complex fault system undergoing multiple stage of deformation. The Darabut fault system forms a typical flower structure controlled by the basement-involved strike-slip fault, and the Wuerhe-Xiazijie fault system develops a thrust deformation as the compressional stress propagates toward the Junggar basin. The Hashan structural belt has experienced three deformation stages since the Permian. The Darabut fault system predominantly formed in the Late Permian. The Wuerhe-Xiazijie fault system formed during the deformation from the Triassic to the Jurassic, and the Hashan structural belt kept lifting from the Cretaceous to the Cenozoic.

Key words: Seismic interpretation, strike-slip fault, fault displacement, Hashan structural belt, Junggar basin.

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研项目《准北缘山前带地震勘探关键技术研究》(P24040)、国家自然科学基金项目(42102270, 42462025)和中国科学院南京地质古生物研究所自主部署项目资助(NGBS202422)共同资助。

第一作者简介: 巴素玉(1981-), 女, 高级工程师, 现主要从事地震数据解释、反演等方面的研究工作, E-mail: wanliliuyun@163.com, ORCID: 0009-0001-3931-7801

*通信作者: 汪伟(1992-), 男, 助理研究员, 主要研究方向为构造建模和变形机制模拟, E-mail: wangw@nigpas.ac.cn, ORCID: 0000-0003-2380-5314

引言

准噶尔盆地的油气资源丰富，一直都是油气工业界和学术界关注的重点区域。近年来，随着全油气系统概念模型的提出（贾承造，2017; 宋岩等，2024），准噶尔盆地的油气勘探在多个层系都取得了重大突破（宋永等，2024）。前陆褶皱冲断带的油气勘探实践表明，复杂构造体系对于油气勘探既是机遇也是挑战（徐振平等，2024; 冀冬生等，2025）。构造变形和断裂活动为油气富集提供优良的构造圈闭和运移通道，同时也增加了圈闭识别和钻井作业的难度。因此，复杂褶皱冲断体系的构造特征与变形机制研究是区域油气勘探的重要前提。

哈拉阿拉特山构造带（哈山构造带）位于准噶尔盆地的北缘，北临阿尔泰山，西接哈萨克斯坦山弯构造，南靠天山造山带。该构造带周缘构造变形样式复杂，区内发育多条大型走滑断裂带（图 1）。哈山构造带油气资源丰富，其构造解析与建模一直以来都是该区域油气勘探面临的重要挑战。哈山构造带自北向南可以分为哈拉阿拉特山隆起区、乌尔禾-夏子街断裂带、南部单斜带以及玛湖凹陷弱变形区。由于准噶尔盆地西缘位于中亚造山带西部，经历了多期构造运动，包括碰撞挤压和走滑变形。在这种复杂构造背景下，哈山构造带的形成演化存在多种观点。首先，在断裂属性上存在挤压推覆成因和汇聚性走滑成因两种主要观点。部分学者认为哈山构造带属于前陆褶皱冲断带，冲断带的主体主要受到二叠纪到三叠纪的碰撞造山运动控制，走滑断裂为区域变形的产物。中生代时期主要受到走滑断裂活动的影响并被改造（管树巍等，2008; 孙自明等，2008; 于洪洲，2014; 薛雁等，2015, 2017）。另一种观点认为，哈山构造带是受到二叠纪末期准噶尔地块逆时针旋转控制的走滑断裂体系（邵雨等，2011; 张越迁等，2011; 陈石等，2016; Yu et al., 2016; Zhu et al., 2023）。此外，针对哈山构造带隆起区走滑断裂体系与前缘乌尔禾 - 夏子街断裂体系的相互关系也存在分歧。一类观点认为二者同属一个断裂体系，另一类观点则认为它们是在多期构造背景下分别形成的断裂体系（陈石等，2016; Zhu et al., 2023）。

地震资料品质差和构造建模多解性是造成上述争议的重要原因之一。不同建模结果下，哈山构造带的构造特征与演化过程会具有显著的差异。近年来，随着深部构造成为该区域油气资源勘探的重点，明确断裂特征与演化过程不仅成为该区域构造演化面临的关键问题，也是资源勘探亟待解决的问题。因此，本文在前人研究的基础上，结合最新的地震资料、钻井认识，开展精细解析，建立构造模型，总结变形特征。同时通过与国内外典型褶皱冲断带和走滑构造进行对比分析，进一步增强构造解释的合理性。最后，通过对挤压冲断变形区进行平衡剖面恢复，定量揭示走滑构造变形向盆地方向的传播过程，讨论哈山构造带的形成过程与变形机制，为该区域的油气勘探提供支持。

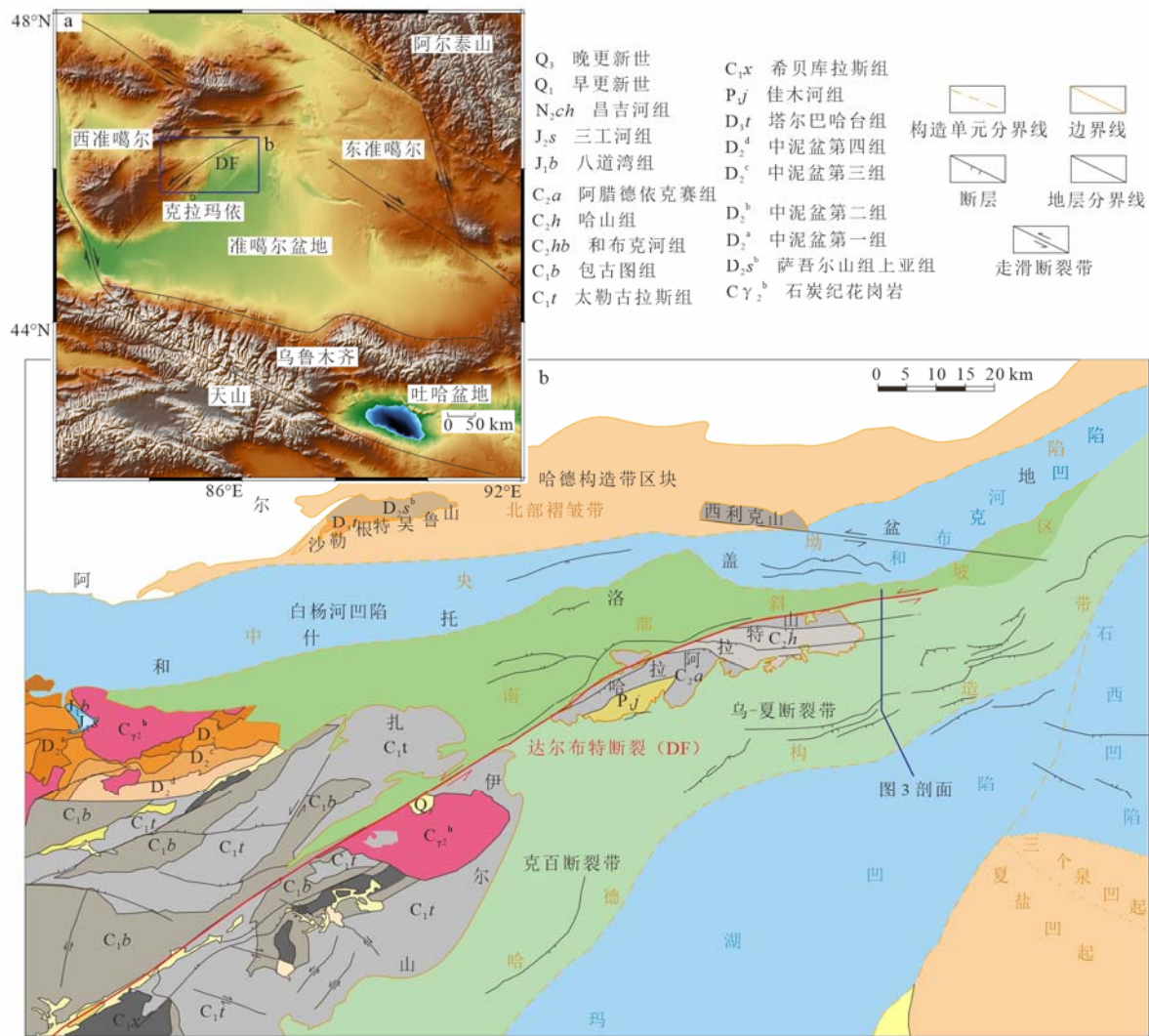


图 1 准噶尔盆地周缘构造简图 (a) 以及哈山构造带区域地质图 (b)。(a) 准噶尔盆地周缘造山带及主干断裂分布, 据 Ding et al. 2020 和 Zhu et al. 2023 修改; (b) 研究区周缘地质图以及主要断裂分布示意图, 据薛雁等, 2017 修改。

Fig.1 Tectonic (a) and geological (b) map of the Hashan-Shentuluogai area, northwestern margin of the Junggar Basin. (a) Orogenic belts around the Junggar Basin and main fault system, modified according to Ding et al. 2020 and Zhu et al. 2023. (b) Geological map of the Hashan structural belt and distribution of main fault system, modified according to Xue et al. 2017.

1. 区域地质概况

哈山构造带位置上属于中亚造山带, 整体呈北东东向展布。范围上包括哈拉阿拉特山及其南缘的多排冲断带, 北部以达尔布特断裂为界并与和什托洛盖盆地相接, 南部直至玛湖凹陷的构造稳定区。自晚石炭世以来, 经历了海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造运动, 形成了复杂的断裂体系。断裂的平面展布主要分为两个区域, 以哈拉阿拉特山隆起区域为主的达尔布特断裂体系及其南缘的乌尔禾-夏子街断裂体系 (图 1)。达尔布特断裂体系变形区地表强烈隆升, 石炭系地层大面积出露, 地表广泛发育走滑构造变形。乌尔禾-夏子街断裂体系主要表现为隐伏的背斜构造, 地表被中生界地层超覆。

哈山构造带所在的准噶尔盆地西北缘周缘构造背景复杂, 其与西侧的哈萨克斯坦山弯构造存在一个西准噶尔地块。这一独特的构造位置, 使准噶尔盆地西北缘经历了多期具有走滑性质的构造运动。在晚古生代, 塔里木板块和西伯利亚板块南北向挤压的大背景下, 伴随着哈萨克斯坦山弯构造的弯曲成型, 西准噶尔地块

被观测到在石炭纪和二叠纪均发生明显的旋转，与准噶尔地块之间则发生相对剪切运动或者斜向的挤压作用，为走滑构造的发育提供了动力学环境（Yi et al., 2015; 陈石等，2016）。中生代时期，准噶尔盆地相对于西伯利亚板块和塔里木板块又发生逆时针旋转，在盆地周缘形成了一系列右行走滑断裂体系（Choulet et al., 2013; Yu et al., 2016; Zhu et al., 2023）。新生代时期，由于印度大陆与欧亚大陆碰撞，在准噶尔盆地南部形成了前陆褶皱冲断体系，但是在西缘的哈山地区，则以走滑构造变形为主（陈石等，2016）。

哈山构造带沉积地层包括古生界、中生界和新生界（图 2）。主要以厚层古生界地层为主体，中、新生界厚度向哈拉阿拉特山方向逐渐减薄尖灭。石炭系地层在哈拉阿拉特山地表广泛出露，包含一套中-酸性火山喷发岩夹碎屑岩（何登发等，2004）。二叠系沉积垂向差别较大，下二叠统佳木河组时期火山活动活跃，以火山岩为主，风城组时期主要发育湖相沉积，以泥岩和砂岩为主，并含有石膏层（李永军等，2016）。上二叠统是以砂岩、泥岩互层为主。中生界和新生界沉积地层都是以碎屑岩为主，主要是砂岩和泥岩互层。目前勘探表明风城组泥岩层是该区域主要的烃源岩地层。储层在该区域不同的层序中均有发育，在石炭系和二叠系的火成岩、中生界和新生界沉积中的砂岩层中均已经发现油气显示。

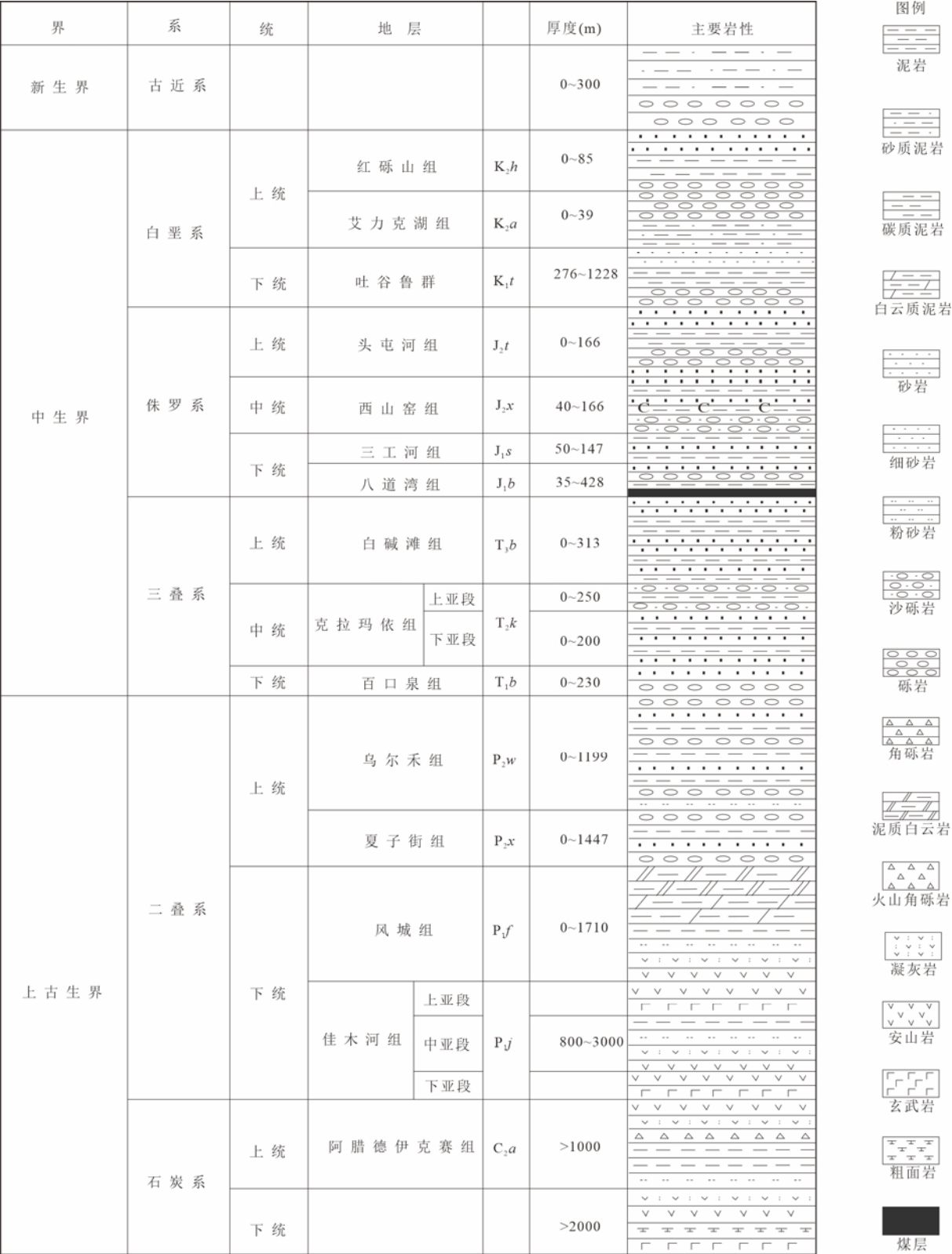


图 2 哈山构造带地层柱状图
Fig.2 Stratigraphic column of the Hashan structural belt

2. 构造特征

我们选取哈山构造带中部最新的地震剖面开展地震资料解析，剖面在达尔布特断裂体系和乌尔禾-夏子街深部构造的成像品质显著提高，其中风城组中部的一套砂岩层与火成岩层表现为强振幅的特征，为断裂解析

提供了重要识别标志（图 3）。此外，通过两口深钻井可以进行地层标定，进一步增强构造解析的准确性。通过南端的井 2 引层可以依次标定白垩系（K）、侏罗系（J）、三叠系（T）、二叠系乌尔禾组（P_{2w}）、夏子街组（P_{2x}）、风城组（P_{1f}）和佳木河组（P_{1j}）的位置，并据此开展乌尔禾-夏子街断裂体系的解释。依据北部井 1 的钻井信息开展北部达尔布特断裂体系的解释。该井钻遇多套二叠系风城组重复地层，通过钻井标定，明确多条断层的组合关系。而哈山构造带的山前带构造变形强烈，地震反射杂乱，对山前带的构造解释主要依据地表的野外观测，并结合走滑断裂体系的断裂特征进行解释，从而建立哈山构造带的典型地质模型（图 3）。

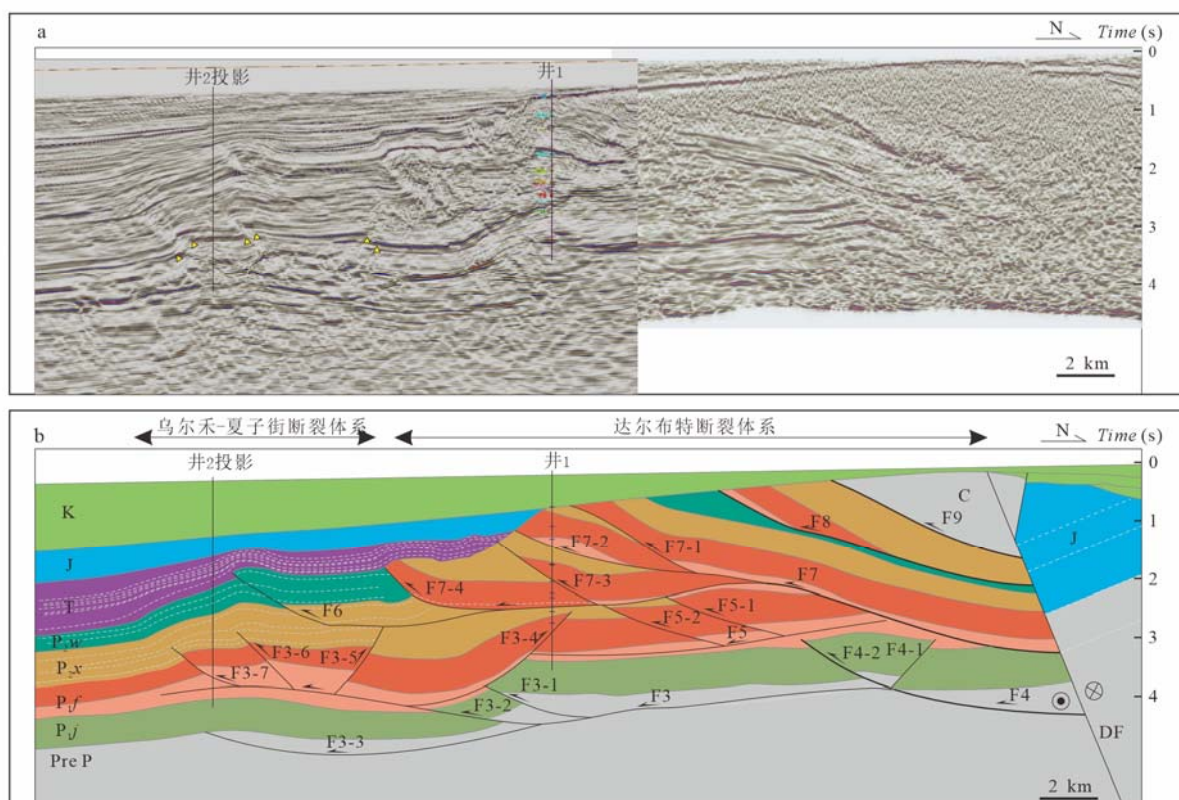


图 3 哈山构造带中部（a）典型地震剖面及（b）解释模型

Fig.3 Seismic (a) and interpreted (b) cross-sections in the Central zone of the Hashan structural belt

哈山构造带可以分为达尔布特断裂体系和乌尔禾-夏子街断裂体系。达尔布特断裂体系主要是指靠近哈拉阿拉特山，并被持续抬升的断裂体系，该区域内石炭-二叠系地层发生强烈变形，白垩系地层直接不整合覆盖在高角度断裂体系之上。乌尔禾-夏子街断裂体系相比达尔布特断裂体系，构造变形较弱。通过地震剖面解析可以识别出三套滑脱层，分别位于佳木河组底部、风城组底部和夏子街组内部。

2.1 达尔布特断裂体系

基于地震剖面的解析，达尔布特断裂体系主要发育有 6 条断裂体系，分别是 F9、F8、F7、F5 和 F4 断裂体系。F9 断裂体系中石炭系火成岩地层推覆到地表之上，由于地震反射模糊，内部断裂体系难以识别，但前人大量的野外调研显示石炭系地层具有走滑构造的变形特征（于洪洲，2014；陈石等，2016；薛雁等，2017）。F8 和 F7 断裂体系也被称为外来系统，F5 断裂体系被称为准原地叠加系统。主要差异在于上二叠统地层是否发生远距离逆冲，钻井 1（图 3）数据显示二叠系风城组地层重复钻遇 3 次。基于地震资料和钻井数

据, 将 F8 解释为一条远距离逆冲断层, 其上盘二叠系地层反射连续, 内部并不发育次级断层。将 F8 断裂下盘多条断裂解释为 F7 断裂体系。以 F7 断裂为界, 其上覆地层和下伏地层产状具有明显差异, 上覆地层向盆地方向地层倾角变化明显, 可以识别出多条次级断层, 下伏地层平缓, 因此 F7 断裂的上盘发育高角度变形, 发育 F7-1、F7-2、F7-3 和 F7-4 多条次级断裂。F7 断裂下盘可以识别出 2 条断距较小的次级断层 F5-1 和 F5-2, 这两条断层向深部归并到风城组底部滑脱层。在风城组下方有一套反射明显并且较为连续的地层, 认为是佳木河组地层, 并且识别出一个冲起构造, 即 F4 断裂体系。F4 断裂前缘向盆地方向地震反射连续, 未形成明显的断层活动。总体上, 达尔布特断裂体系具有浅部构造变形复杂, 深部断裂的数量减少, 并且构造模式趋于简单的特征。当然, 由于地震资料限制, 佳木河组深部的构造难以解析。

2.2 乌尔禾-夏子街断裂体系

乌尔禾-夏子街断裂体系具有多层滑脱的特征。二叠系地层是主要的构造变形层, 并且构造变形在垂向上存在差异。下二叠统地层的变形表现为由 F3 断裂控制的大型断层转折褶皱。F3 断裂在靠近哈山方向主要沿佳木河组下方的深部滑脱层变形, 在井 1 南部向上切穿佳木河组地层, 沿着风城组内部滑脱层变形, 组成了一个完整的断坪-断坡-断坪组合。其中佳木河组底部滑脱层作为下断坪, 风城组底部滑脱层作为上断坪, 中间切穿佳木河组地层的断层作为断坡。在断坡位置, 构造变形强烈, 由两条逆冲断层构成 (F3-1 和 F3-2), 同时由于下断坪强烈抬升, 上方形成了一条反冲断层 (F3-4), 和下方逆冲断层构成了一个构造楔组合。上断坪的背斜核部区域, 形成了冲起构造, 由前缘的逆冲断层和后缘的反冲断层组成。上二叠统地层中则形成了一个由 F6 断层控制的断层传播褶皱, 其与下伏断裂没有直接连接, 而是作为 F7 断裂的延伸。深部的佳木河组地层发育背斜构造, 可能是滑脱背斜或者由小断距断层所控制, 结合地震反射的特征, 将其定义为 F3 断层的延伸。

3. 哈山构造带的断裂属性

哈山构造带的形成与演化过程受到周缘多个板块活动的影响, 因此其构造变形具有多期构造叠加的特征。由于地震资料品质和研究程度的限制, 对哈山构造带断裂体系的断裂属性仍存在争议。本文结合前人研究成果, 进一步开展断裂体系的几何学与运动学定量分析, 从构造特征和断裂活动性定量分析两个方面来探讨哈山构造带的断裂性质。

3.1 哈山构造带与前陆褶皱冲断带的构造样式对比

通过典型地震剖面的精细解析, 本文建立了哈山构造带的典型剖面, 前人大量的研究表明前陆褶皱冲断体系的几何学特征具有相似性 (Davis et al., 1983; Chapman and DeCelles, 2015; He et al., 2023; Feng et al., 2024)。前陆褶皱冲断带的典型特征是造山带向前陆方向构造变形的强度逐渐减弱, 滑脱层位置逐渐变浅, 由基底卷入构造模式逐渐过渡为薄皮滑脱构造模式, 构造变形具有成排成带的特征。本文选取塔里木盆地塔西南山前褶皱冲断带作为类比对象 (图 4), 该构造带主要发育 2 期构造变形叠加, 其在三叠纪经历第一期强烈的挤压冲断变形, 形成多排褶皱冲断带, 然后剥蚀夷平, 在新生代再度受到喜马拉雅造山运动的影响发生收缩变形。塔西南山前带和达尔布特断裂带在构造形态和组合上表现出显著的差异。前陆褶皱冲断带变形中, 由于造山带的持续隆升, 造山带与前陆盆地之前会形成向造山带方向抬升的单斜构造带, 并被多排逆冲断层切割 (图 4a)。库车、淮南等前陆褶皱冲断带的山前带中均发育类似的构造, 而达尔布特断裂体系则表现出完全

相反的特征。在达尔布特断裂体系中，隆升区的 F7 和 F8 断裂的上盘地层反射清晰，地层表现为向造山带埋深逐渐增大的特征（图 4b）。走滑断裂体系的变形受到基底块体水平错动的控制，构造变形区在平面上表现为中间宽两侧窄的特征。基底走滑断层的水平错动，导致中间宽的地块水平错动到窄变形区域内，形成逆冲变形，由于没有深部地块向上运动，走滑变形体系中间区域地层抬升不明显（图 4c）。而乌尔禾-夏子街断裂体系则表现出显著的水平缩短变形特征，断裂体系在深部更加复杂，形成内部发育多条逆冲和反冲的断层转折褶皱（F3）。浅部构造样式简单，发育断层传播褶皱（F6），断层断距小，变形范围也小于深部构造。因此基于构造样式对比，本文认为达尔布特断裂体系属于走滑断裂体系，而乌尔禾-夏子街断裂体系则是挤压应力向盆地方向传播而形成的挤压型冲断带。

值得注意的是，前人关于走滑构造的解析和模拟实验中（Racero-Baena and Drake, 1996; McClay and Bonora, 2001; Le Guerroué and Cobbold, 2006; Dooley and Schreurs, 2012; Tian et al., 2022），尚未见到达尔布特断裂体系中强烈构造叠置的特征。我们认为主要有 2 个原因，一是走滑断裂体系中构造变形强烈，内部断裂发育，断裂的几何形态刻画面临巨大的挑战；另一方面，达尔布特具有多期活动的特征，多期断裂活动的叠加和沉积-构造的耦合形成了大规模叠置构造。

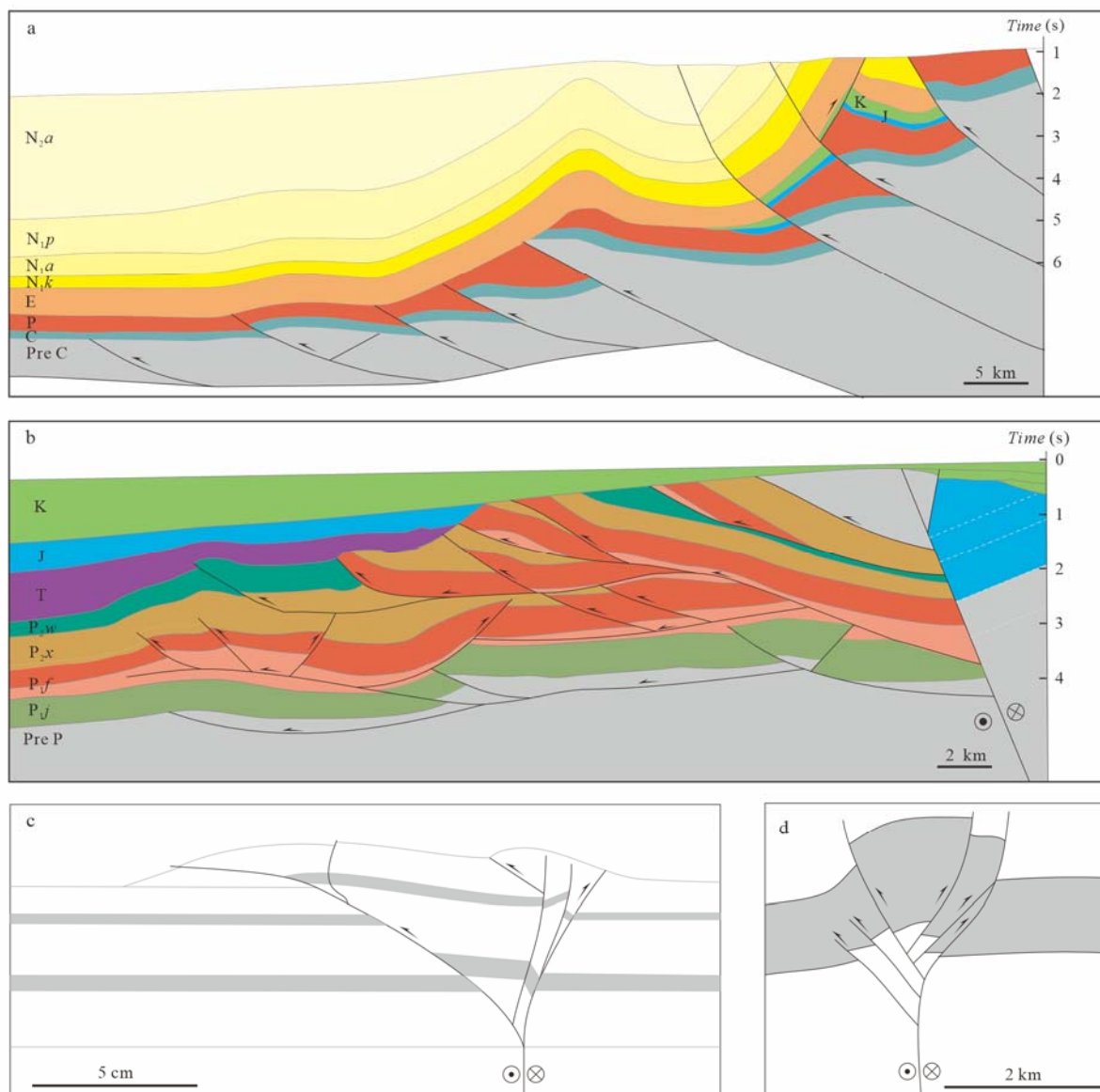


图4 哈山构造带地质剖面与前陆褶皱冲断带和走滑断裂对比图。(a)塔西南褶皱冲断带的地质剖面, N_{1k} : 克孜洛依组, N_{1a} : 安居安组, N_{1p} : 帕卡布拉克组, N_{2a} : 阿图什组; (b) 哈山构造带的典型地质剖面, 地层名称见图3; (c) 汇聚型走滑断裂体系的物理模拟剖面图, 据 McClay and Bonora, 2001; (d) 荷兰盆地西部花状构造地质剖面, 据 Racero-Baena and Drake, 1996。

Fig.4 Comparison between the Hashan structural belt, foreland fold-and-thrust belts, and strike-slip faults. (a) Cross section of the Southwest Tarim basin, N_{1k} : Keziluoyi formation, N_{1a} : Anjuan formation, N_{1p} : Pakabulake formation, N_{2a} : Atushi formation; (b) cross section of the Hashan structural belt, see Fig. 3 for stratigraphy information; (c) cross section of the analog model for Restraining Strike-Slip Faults, according to McClay and Bonora, 2001; (d) Flower structure of the West Netherlands basin, according to Racero-Baena and Drake, 1996.

其次, 前陆褶皱冲断带的形成是俯冲碰撞带的产物。虽然存在不同的俯冲碰撞体系, 例如洋-陆碰撞、陆-陆碰撞。板块碰撞会形成造山带, 典型特征是造山带区域由于地层堆积增厚下沉, 并且在造山带两侧形成挤压背景的褶皱冲断带 (DeCelles and Giles, 1996; 郑永飞等, 2022)。哈山构造带到阿尔加提山的区域大剖面显示, 在达尔布特断裂北部的什托洛盖盆地中沉积有厚层的中-新生界沉积, 主要是以侏罗系沉积为主, 地层厚度最大可达 5500 m (图 5) (胡杨等, 2012)。长剖面构造特征显示该区域不符合前陆褶皱冲断带的典型

特征, 反而十分符合汇聚性走滑断裂体系的变形模式 (图 4c 和 4d)。两条走滑断裂的交汇区域会形成冲起构造, 走滑断裂外侧变形微弱。

图5 准噶尔盆地西北缘哈山构造带-谢米斯台山长剖面, 据孙自明等, 2015。

3.2 哈山构造带与前陆褶皱冲断带的断裂活动性对比

2001; Dooley and Schreurs, 2012)。因此，基于断裂活动性的定量分析显示，哈山构造带达尔布特断裂体系属于走滑断裂体系。其深部断裂数量和组合相对简单，向浅部断裂系统逐渐发散，形成复杂的花状构造。

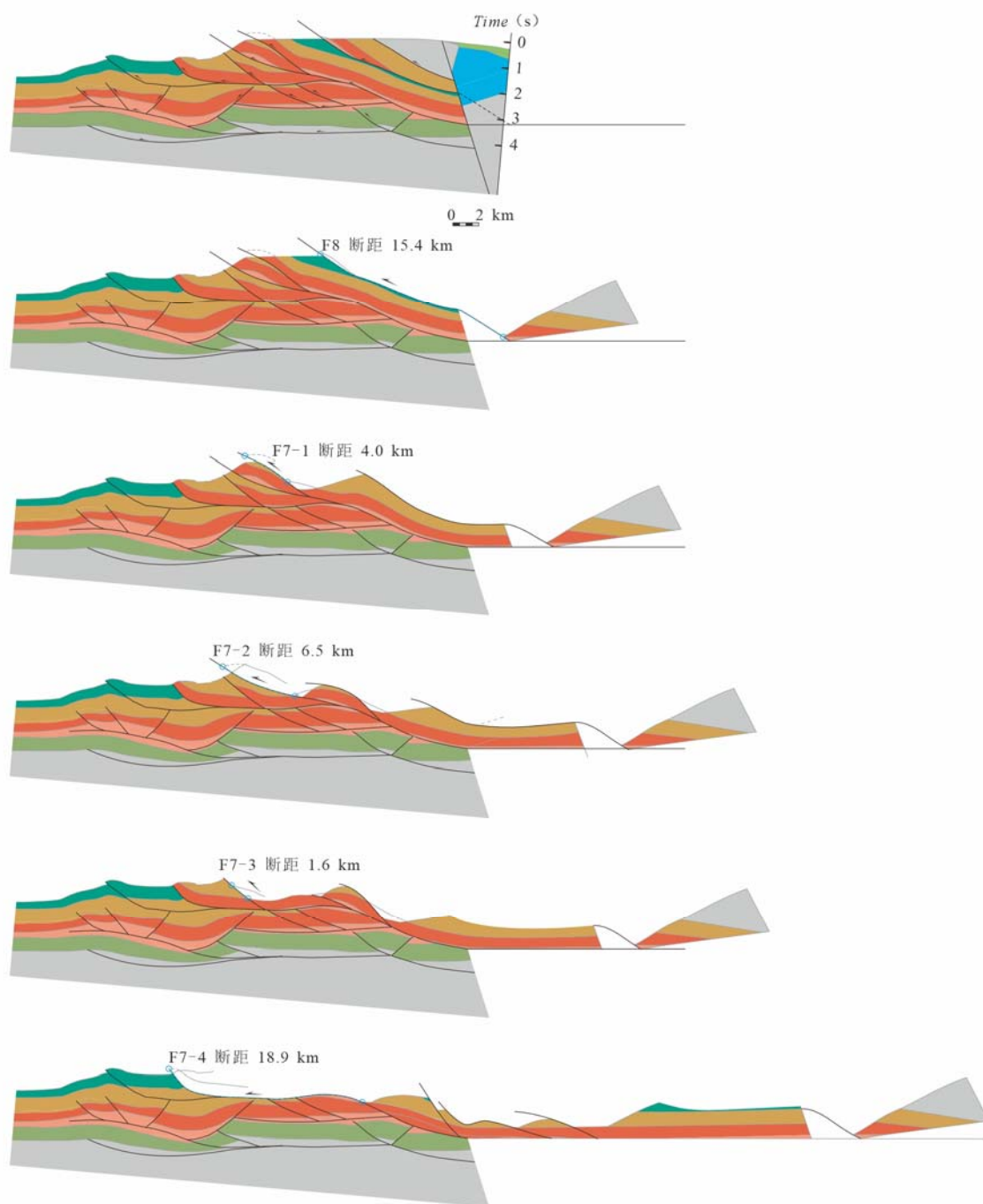


图6 哈山构造带达尔布特断裂体系逆冲叠瓦构造模型的前展示平衡恢复图。按照前展示变形模式，针对每条断裂进行去断层的恢复，获得断裂运动学模型和断距。

Fig.6 Forward balance restoration for the imbricated thrust system of the Darabut fault system in the Hashan structural belt. The restoration is achieved by unfauling of each fault according to the forward propagation deformation, showing the kinematic model and displacements.

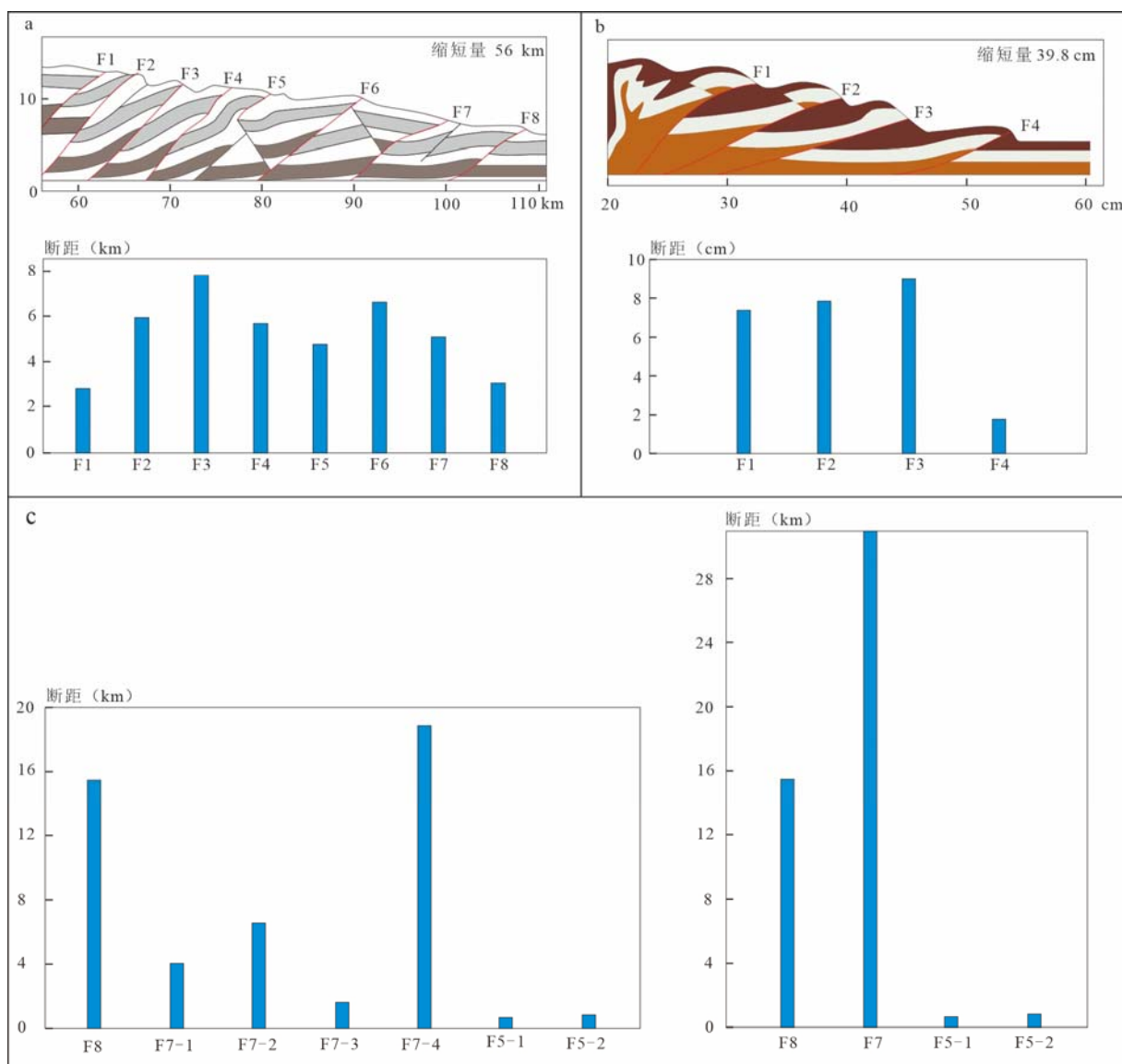


图 7 典型前陆冲断带断裂活动与达尔布特断裂体系活动性对比图。图 (a) 根据 Morgan and Bangs, 2017 中数值模拟实验结果绘制, 图 (b) 根据文献 Sun et al., 2016 中物理模拟实验绘制。

Fig.7 Comparison of the fault displacement between the foreland fold-and-thrust belt and the Darabut fault system. (a) is according to the numerical model in Morgan and Bangs, 2017; (b) is according to the analog model in Sun et al., 2016.

4. 哈山构造带演化过程定量分析

前人针对准噶尔盆地西缘的构造演化开展了大量的研究, 认为准噶尔盆地西缘在晚古生代、中生代和新生代均经历了走滑构造变形 (Zhu et al., 2013; Chen et al., 2014; Yi et al., 2015; 陈石等, 2016; Yu et al., 2016; Ding et al., 2020; Zhu et al., 2023)。晚古生代的走滑构造变形主要受到新疆北部洋盆的俯冲碰撞控制, 发育左行走滑构造; 中生代的走滑构造变形受到准噶尔盆地逆时针旋转的影响, 在盆地边缘形成右行走滑断裂体系; 新生代的走滑构造变形受到印度-欧亚板块碰撞远程效应的影响, 形成左行走滑断裂体系。

但是, 在上述复杂的构造背景下, 断裂体系的形成演化过程仍不明确, 特别是构造变形从达尔布特断裂体系向盆地方向的乌尔禾-夏子街断裂的传播过程缺乏定量的研究。因此, 本文在前人构造背景研究的基础上, 结合最新的地震剖面解析和钻井数据, 通过平衡剖面的恢复分析进一步探究哈山构造带的多期构造演化过程

(图 8)。上述断裂活动性分析显示哈山构造带的达尔布特断裂体系和乌尔禾-夏子街断裂体系的性质存在差异。其中, 达尔布特断裂体系属于走滑断裂体系, 乌尔禾-夏子街断裂体系属于受到走滑体系应力向外扩展形成的逆冲构造。在走滑断裂体系中, 二维剖面上的面积是不守恒的, 二维剖面上花状构造的形成是由于沿走向上的缩短所导致, 在剖面上缩短量并不会变化。因此, 我们针对乌尔禾-夏子街逆冲断裂体系按照面积守恒的原理的开展去断层和去褶皱的恢复, 针对达尔布特走滑断裂体系, 则不开展去断层的恢复, 而是依据缺失地层的厚度来推算其相对于乌尔禾-夏子街断裂发育区域的抬升量。虽然大量研究表明研究区在石炭纪经历了一期走滑构造变形, 但是这一期变形在地震剖面上无法识别。因此, 本文依据平衡恢复分析的结果, 重点讨论二叠纪以来哈山构造带断裂体系的形成演化特征, 并将其自二叠纪以来的变形主要分为三期。同时, 结合前人关于构造背景的研究认识, 将哈山构造带的区域断裂系统的演化和区域构造背景结合, 讨论控制断裂演化的动力学机制(图 9)。

4.1 晚二叠纪-早三叠纪强烈走滑变形阶段

基于平衡恢复结果, 在三叠系沉积前, 该区域的构造变形主要发生在达尔布特断裂区域, 而乌尔禾-夏子街断裂体系尚未发生变形(图 8)。地震剖面上, 乌尔禾-夏子街断裂区域二叠系地层整体表现向造山带方向加厚的特征, 并且有没有观察到向造山带方向减薄的生长地层的特征。基于后碰撞花岗岩和中基性岩墙群为标志, 西准噶尔地区在二叠纪处于伸展背景。基于古地磁和地质年代学的研究, 准噶尔地块相对于成吉斯弧发生了大幅度的逆时针旋转, 这为二叠系时期达尔布特断裂体系发育大规模的走滑变形提供了动力背景。大量的物理模拟实验和地质实例表明, 走滑断裂角度突然的变化会形成大规模的压扭构造变形(Racero-Baena and Drake, 1996; McClay and Bonora, 2001; Le Guerroué and Cobbold, 2006; Dooley and Schreurs, 2012; Tian et al., 2022)。现今达尔布特走滑断裂延伸显示, 其在哈山区域的走向向东偏转了 18° 。并且, 哈山构造带位于达尔布特断裂和西准噶尔地块、东准噶尔地块的交界区域, 位于其北东向的东准噶尔地块发育多条右行走滑断裂体系(图 1 和图 9)。我们认为达尔布特断裂在哈山区域受到东准噶尔地块的阻挡, 形成了大规模的压扭走滑断裂体系。

地震剖面解析显示中生界地层是逐渐超覆在古生界的变形地层之上, 表明二叠纪晚期的走滑构造变形非常强烈, 哈山构造带的达尔布特走滑断裂体系在这一变形时期已经成型。这一认识也与前人通过遥感方法分析走滑构造的多期变形结果相吻合(Ding et al., 2020)。同时, 平衡恢复结果显示, 在三叠系沉积前, 达尔布特断裂体系的构造变形呈倒三角形态, 且盆地方向的构造变形区域边界整体呈线性展布, 符合走滑断裂花状构造的展布特征。

4.2 三叠纪-侏罗纪的走滑-逆冲变形阶段

本文根据平衡恢复的结果, 认为三叠纪和侏罗纪时期的变形具有一定的相似性, 因此将其合并为一期变形(图 8)。基于地震剖面的精细解析和恢复, 三叠纪-侏罗纪时期是乌尔禾-夏子街断裂体系形成的主要时期, 并且其形成具有幕式变形的特征。在三叠系沉积地层, 可以识别出一套厚度约为 0.5 km 的等厚沉积地层, 在这一套沉积地层的上方和下方均可以识别出同构造沉积地层。并且, 构造变形的位罝也存在变化。沉积记录显示在三叠系下段沉积时期乌尔禾-夏子街断裂体系开始形成, 变形主要发生在 F6 断裂, 向上形成了断层传播褶皱。而后经历了一段构造平静期(T(2)), 在三叠系上段沉积期间(T(3)), F6 断裂和 F7-4 断裂均活化, 这一期变形主要以褶皱为主, 形成两个背斜构造。在侏罗系沉积时期, 构造变形主要集中在 F6 断

裂，并且活动逐渐减弱直到停止。值得注意的是，在三叠系和侏罗系沉积时期，虽然水平挤压控制的构造活动存在变化，达尔布特断裂体系的抬升一直未停止，在三叠纪和侏罗纪的抬升分别为 1.7 km 和 1.1 km。因此，该区域构造变形在侏罗纪时期水平收缩活动逐渐停止，但是垂向抬升一直在持续。

4.3 白垩纪-新生代斜向抬升阶段

地震剖面解析显示哈山构造带水平挤压在侏罗纪晚期基本停止，在哈山构造带分布的白垩系沉积以及盆地内部厚层的新生界沉积整体表现为单斜构造，地层厚度保持不表，未见到向高点厚度减薄的沉积特征（图 3）。白垩系地层厚度对比结果显示，达尔布特断裂体系在白垩纪时期的抬升达到 2.3 km，显著大于三叠纪和侏罗纪的抬升规模。这一现象表明，达尔布特走滑断裂体系的活动性在新生代并未减弱，而是其构造变形机制发生明显转换，即自三叠纪以来由走滑抬升引发的向盆地方向扩展的水平挤压变形趋于消失，构造活动重心转为垂向抬升作用（图 8）。中生界地层的沉积速度逐渐大于达尔布特断裂带的抬升速度，沉积记录表现为向隆升方向的持续上超。我们推测水平收缩变形逐渐消失的原因可能是由于随着中生界沉积厚度的不断增大，推动水平收缩所需要的应力也逐渐增大，因此水平收缩变形逐渐停止，转而以垂向抬升为主。

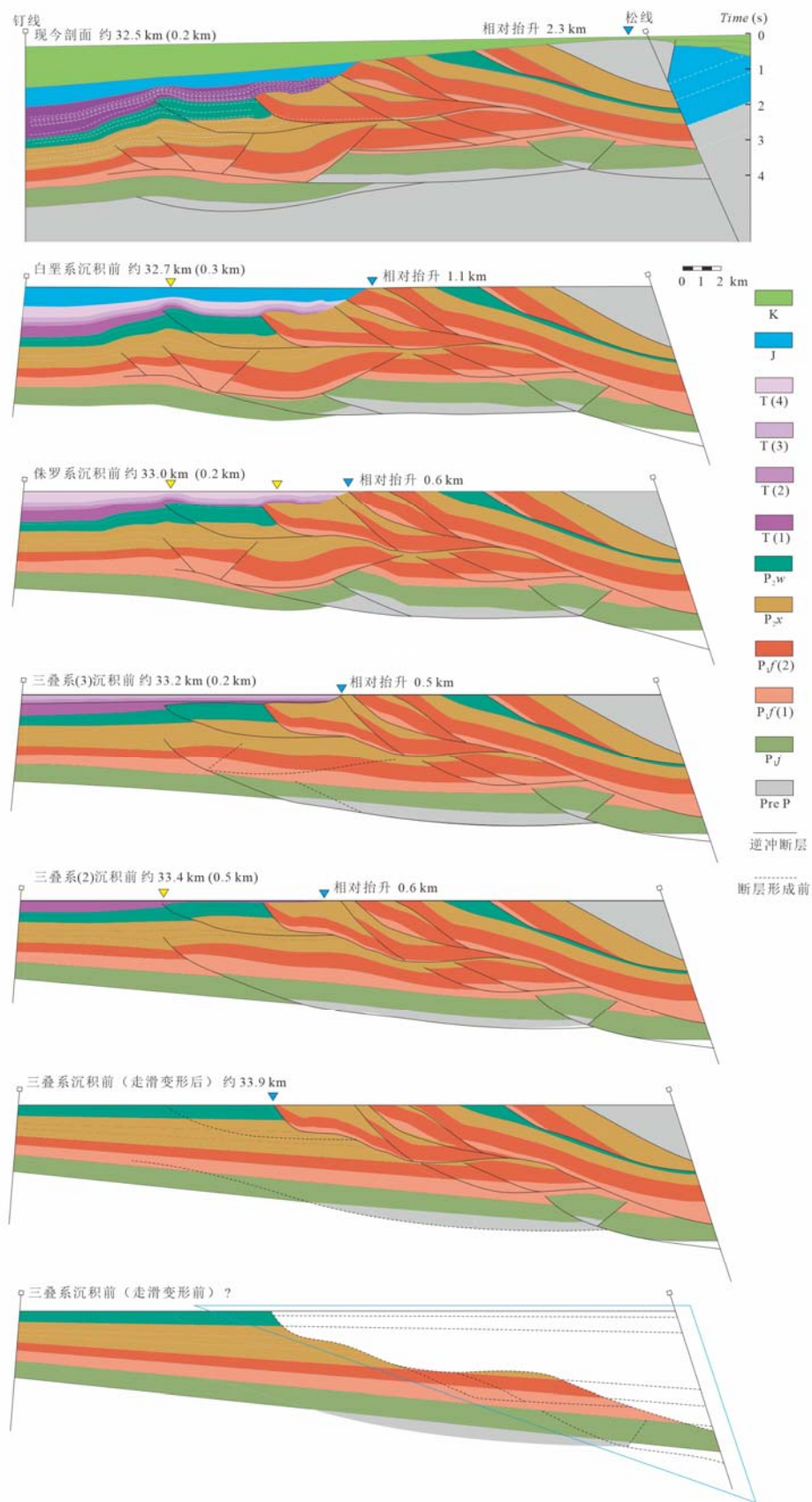


图 8 哈山构造带典型剖面平衡恢复图。达尔布特断裂体系按照走滑变形模式进行恢复，乌尔禾-夏子街断裂体系按照逆冲断裂进行恢复。

Fig.8 Balance restoration of the Hashan structural belt considering the strike-slip deformation of the Darabut fault system and thrust deformation of the Wuerhe-Xiazijie fault system.

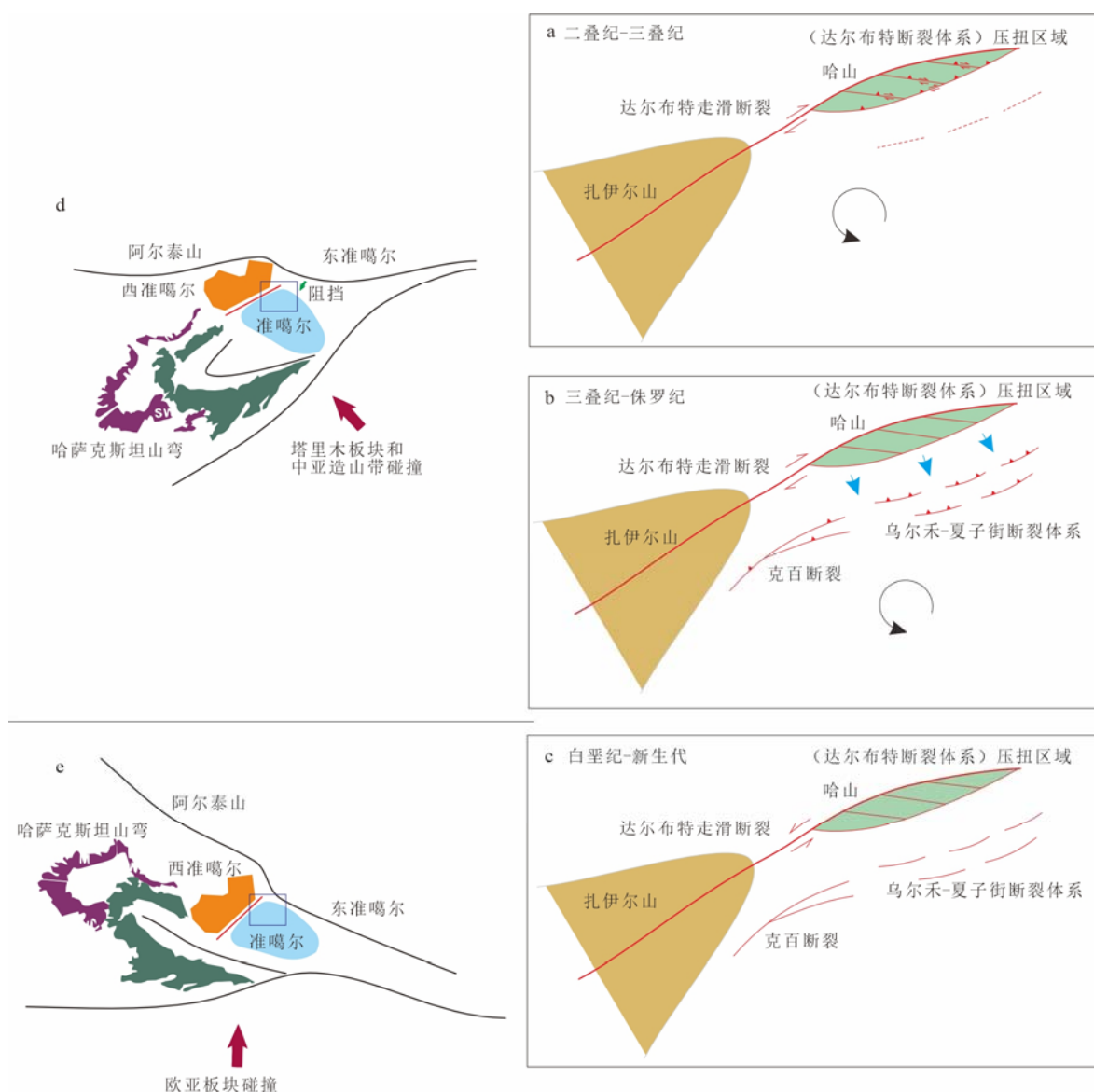


图9 哈山构造带平面演化与动力学背景示意图。(a) 晚二叠世准噶尔盆地与周缘板块关系简图(据 Yi et al., 2015 绘制); (b) 现今噶尔盆地与周缘板块关系简图(据 Yi et al., 2015 绘制); (c) 哈山构造带二叠纪到三叠纪平面演化示意图, 主要断裂活动集中在达尔布特断裂体系; (d) 哈山构造带三叠纪到侏罗纪平面演化示意图, 受到东准噶尔块体的阻挡, 压扭应力向盆地方向传播, 形成乌尔禾-夏子街断裂体系; (e) 哈山构造带白垩纪-新生代平面演化示意图。受到欧亚板块碰撞远程效应的影响, 达尔布特断裂转为左行走滑断裂, 以整体抬升为主, 断裂活动不发育。

Fig.9 Simplified tectonic map of the Junggar basin and relevant evolution process of the Hashan structural belt in plain view. (a) Simplified tectonic map of the Junggar basin at late Permian, according to Yi et al., 2015. (b) Simplified tectonic map of the Junggar basin at present, according to Yi et al., 2015. (c) Fault system of the Hashan structural belt from late Permian to Triassic. The deformation main occurs in the Darabut fault system. (d) Fault system of the Hashan structural belt from Triassic to Jurassic. The deformation propagates toward basin to form Wuerhe-Xiazijie fault system. (e) Fault system of the Hashan structural belt from Cretaceous to Cenozoic. The sinistral strike-slip occurs along the Darabut fault due to the far effects of the Indian-Eurasian collision. The Hashan structural belt was uplifted without obvious fault displacement.

5. 结论

本文在前人研究的基础上, 基于哈山构造带最新的地震剖面, 开展精细解析, 定量分析断裂体系的断距分布、几何学特征、断裂组合, 主要取得以下认识:

(1) 哈山构造带是一个经历多期构造演化的复合断裂系统。其中达尔布特断裂体系和乌尔禾-夏子街断裂体系均属于这一变形体系, 但是断裂的性质和形成期次存在差异。达尔布特断裂体系是典型具有花状构造特征的走滑断裂体系, 构造变形特征表现为深部构造简单, 向浅部构造复杂化的特征。乌尔禾-夏子街断裂体系属于走滑变形应力向盆地方向传播形成的挤压型冲断带, 典型的特征是断裂断距显著减小, 构造变形的传播距离增大, 构造变形深部复杂, 浅部简单。

(2) 哈山构造带的断裂体系自二叠纪以来主要经历了三期构造变形。其中第一期构造变形是二叠纪末期, 三叠系地层与二叠系地层的不整合接触表明达尔布特走滑断裂体系在二叠纪晚期已经成型, 然后接受剥蚀被夷平。第二期变形在三叠纪-侏罗纪, 达尔布特断裂体系仍然表现为走滑变形特征, 持续的垂向抬升形成向盆地方向传播的水平挤压应力, 控制乌尔禾-夏子街断裂体系的形成。第三期构造变形是白垩纪-新生代, 由于沉积地层的不断增厚, 垂向抬升形成的水平挤压应力不足以继续推动乌尔禾-夏子街断裂继续活动, 构造变形逐渐回到以达尔布特断裂垂向抬升为主, 同时中生界地层的沉积速度大于达尔布特断裂带的抬升速度, 沉积记录表现为向隆升方向的持续上超。

References

- Chen, S., Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., et al., 2014. Ophiolitic Mélanges in Crustal-scale Fault Zones: Implications for the Late Palaeozoic Tectonic Evolution in West Junggar, China. *Tectonics*, 33 (12): 2419-2443. <https://doi.org/10.1002/2013tc003488>
- Chen S., Guo Z. J., Qi J. F., et al., 2016. Three-stage Strike-slip Fault Systems at Northwestern Margin of Junggar Basin and Their Implications for Hydrocarbon Exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(03): 322-331 (in Chinese with English abstract).
- Choulet, F., Chen, Y., Cogné, J.-P., et al., 2013. First Triassic Palaeomagnetic Constraints from Junggar (NW China) and Their Implications for the Mesozoic Tectonics in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 371-394. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.01.023>
- Chapman, J.B., DeCelles, P.G., 2015. Foreland Basin Stratigraphic Control on Thrust Belt Evolution. *Geology*, 43 (7): 579-582. <https://doi.org/10.1130/g36597.1>
- DeCelles, P.G., Giles, K.A., 1996. Foreland Basin Systems. *Basin research*, 8 (2): 105-123. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2117.1996.01491.X>
- Ding, W. C., Li, T. D., Chen, X. H., et al., 2020. Intra-continental Deformation and Tectonic Evolution of the West Junggar Orogenic Belt, Central Asia: Evidence from Remote Sensing and Structural Geological Analyses. *Geoscience Frontiers*, 11 (2): 651-663. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.08.001>
- Davis, D., Suppe, J., Dahlen, F.A., 1983. Mechanics of Fold-and-Thrust Belts and Accretionary Wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88 (B2). <https://doi.org/10.1029/JB088iB02p01153>
- Dooley, T.P., Schreurs, G., 2012. Analogue Modelling of Intraplate Strike-slip Tectonics: A Review and New Experimental Results. *Tectonophysics*, 574-575: 1-71. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.030>
- Feng, G., Chen, S., Adam, J., et al., 2024. Effect of Mechanical Stratigraphy on the Structure and Kinematics of Salt-bearing Fold-and-Thrust Belts: Insights from Scaled Analogue Experiments with Optical Strain Monitoring (Digital Image Correlation). *Journal of Structural Geology*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105135>
- Guan, S. W., Li, B. L., Hou, L. H., et al., 2008. New Hydrocarbon Exploration Areas in Footwall Covered Structures in Northwestern Margin of Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(01): 17-22 (in Chinese)

with English abstract).

- Hu, Y., Xia, B., Guo, F., et al., 2012. Tectonic Evolution and Its Influence on Hydrocarbon Accumulation of Heshituoluogai Basin in Northwest Xinjiang. *Geology and Resources*, 21(04): 380-385 (in Chinese with English abstract).
- He, D. F., Yin, C., Du, S. K., et al., 2004. Characteristics of Structural Segmentation of Foreland Thrust Belts—A Case Study of the Fault Belts in the Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(03): 91-101 (in Chinese with English abstract).
- He, W., Yu, Y., Luo, Y., et al., 2023. Effects of Friction Properties and Rheological Structures on the Deformation Patterns and Evolution of Fold-and-Thrust Belts—New Insights from Analogue Modelling. *Journal of Structural Geology*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.104904>
- Jia, C. Z. 2017. Breakthrough and Significance of Unconventional Oil and Gas to Classical Petroleum Geological Theory. *Petroleum Exploration and Development*, 44(01): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- Ji, D.S., Pang Z.C., Li, J., et al., 2025. Mesozoic Structure and Its Impact on Cenozoic Deformation in the Northern Piedmont of Tianshan Mountain. *Earth Science* (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Xu, Q., Liu, J., et al., 2016. Redefinition and Geological Significance of Jiamuhe Formation in Hala'ate Mountain of West Junggar, Xinjiang. *Earth Science*, 41(09): 1479-1488 (in Chinese with English abstract).
- Le Guerroué, E., Cobbold, P.R., 2006. Influence of Erosion and Sedimentation on Strike-slip Fault Systems: Insights from Analogue Models. *Journal of Structural Geology*, 28 (3): 421-430. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.11.007>
- Lv T. L., Wang, S. Z., 2015. Coupling Relationship between Tectonic Evolution and Hydrocarbon Charging in Hashan Area[J]. *Science Technology and Engineering*, 15(34): 150-156 (in Chinese with English abstract).
- McClay, K., Bonora, M., 2001. Analog Models of Restraining Stepovers in Strike-slip Fault Systems. *AAPG bulletin*, 85 (2): 233-260. <https://doi.org/10.1306/8626C7AD-173B-11D7-8645000102C1865D>
- Morgan, J.K., Bangs, N.L., 2017. Recognizing Seamount-forearc Collisions at Accretionary Margins: Insights from Discrete Numerical Simulations. *Geology*, 45 (7): 635-638. <https://doi.org/10.1130/g38923.1>
- Racero-Baena, A., Drake, S.J., 1996. Structural Style and Reservoir Development in the West Netherlands Oil Province, Geology of Gas and Oil under the Netherlands: Selection of Papers Presented at the 1983 International Conference of the American Association of Petroleum Geologists, held in The Hague. Springer, pp. 211-227. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0121-6_18
- Song, Y., Jia, C. Z., Jiang L., et al. 2024. Connotation and Research Strategy of the Whole Petroleum System. *Petroleum Exploration and Development*, 51(06): 1199-1210+1226 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y., Tang, Y., He, W. J., et al. 2024. New Fields, New Types and Exploration Potentials of Oil-gas Exploration in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 45(01): 52-68 (in Chinese with English abstract).
- Sun, C., Jia, D., Yin, H., et al., 2016. Sandbox Modeling of Evolving Thrust Wedges with Different Preexisting Topographic Relief: Implications for the Longmen Shan Thrust Belt, Eastern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (6): 4591-4614. <https://doi.org/10.1002/2016jb013013>
- Sun, Z. M., Hong, T. Y., Zhang, T., 2008. Strike-slip-thrust Composite Structures and Its Relationships to Hydrocarbon in Hala'ate Mountains, Northern Xinjiang. *Chinese journal of geology*, 43(2): 309-320 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Y., Wang, R. F., Zhang, Y. Q., 2011. Strike-slip Structures and Oil-gas Exploration in the NW Margin of the Junggar Basin, China. *Acta Petrolei Sinica*, 32(06): 976-984 (in Chinese with English abstract).
- Tian, F., He, D., Chen, j., et al., 2022. Vertical Differential Structural Deformation of the Main Strike - slip Fault Zones in the Shunbei Area, Central Tarim Basin: Structural Characteristics, Deformation Mechanisms, and Hydrocarbon Accumulation Significance. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 96 (4): 1415-1431. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14973>
- Xue, Y., Lin, H. X., Zhang, K. H., et al., 2017. Tectonic Characteristics and Genetic Simulation of Hala'ate Mountain Area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(05): 843-852 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y., Zhang, K. H., Wang, Y. H., et al., 2015. Tectonic Evolution of Hala'ate Mountain Area and Implications in Petroleum Geology[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(06): 687-692 (in Chinese with English abstract).

- Xu Z. P., Yang G. X., Luo H. Y., et al., 2024. The Influence Lithologic Differences at Different Depths on the Segmentation between the Eastern and the Western zones of Kuqa Depression. *Earth Science*, 49(8): 3029-3042 (in Chinese with English abstract).
- Yi, Z., Huang, B., Xiao, W., et al., 2015. Paleomagnetic Study of Late Paleozoic Rocks in the Tacheng Basin of West Junggar (NW China): Implications for the Tectonic Evolution of the Western Altaids. *Gondwana Research*, 27 (2): 862-877. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.11.006>
- Yu, Y., Wang, X., Rao, G., et al., 2016. Mesozoic Reactivated Transpressional Structures and Multi-stage Tectonic Deformation along the Hong-Che Fault Zone in the Northwestern Junggar Basin, NW China. *Tectonophysics*, 679: 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.039>
- Yu, H. Z., 2014. Complicated Structure Modeling in Front-zone of Hala'ate Mountain of Northwestern Margin, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 25(S1): 91-97 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M., Liang, Z., Wang, X., et al., 2023. Mesozoic Strike-slip Fault System at the Margin of the Junggar Basin, NW China. *Journal of Structural Geology*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2023.104950>
- Zhu, Y., Chen, B., Xu, X., et al., 2013. A New Geological Map of the Western Junggar, North Xinjiang (NW China): Implications for Paleoenvironmental Reconstruction. *Episodes*, 36 (3): 205-220. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2013/v36i3/002>
- Zhang, Y. Q., Wang, X., Liu, J. S., et al., 2011. Wuerhe-Xiazijie Strike-Slip Structure and Petroleum Exploration Significance in Northwestern Margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(05): 447-450 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, Y. Y., Chen, R. X., et al., 2022. Tectonic Evolution of Convergent Plate Margins and Its Geological Effects. *Science China Earth Sciences*, 65(7): 1247-1276. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9947-6>

中文参考文献

- 陈石, 郭召杰, 漆家福, 等, 2016. 准噶尔盆地西北缘三期走滑构造及其油气意义. *石油与天然气地质*, 37(03): 322-331.
- 贾承造, 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义. *石油勘探与开发*, 44(01): 1-11.
- 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等, 2008. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域. *石油勘探与开发*, 35(01): 17-22.
- 胡杨, 夏斌, 郭峰, 等, 2012. 新疆和什托洛盖盆地构造演化特征及其对油气成藏的影响. *地质与资源*, 21(04): 380-385.
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 等, 2004. 前陆冲断带构造分段特征——以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例. *地学前缘*, 11(03): 91-101.
- 冀冬生, 甘仁忠, 庞志超, 李静, 王心强, 李全皓. 天山北麓中生代构造特征及其对新生代变形的意义 [J/OL]. *地球科学*.
- 李永军, 徐倩, 刘佳, 等, 2016. 新疆西准噶尔哈山地区佳木河组的重新厘定及地质意义. *地球科学*, 41(09): 1479-1488.
- 吕铁良, 王圣柱, 2015. 哈山地区构造演化与油气充注耦合关系研究. *科学技术与工程*, 15(34): 150-156.
- 宋岩, 贾承造, 姜林, 等, 2024. 全油气系统内涵与研究思路. *石油勘探与开发*, 51(06): 1199-1210+1226.
- 宋永, 唐勇, 何文军, 等, 2024. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力. *石油学报*, 45(01): 52-68.
- 孙自明, 洪太元, 张涛, 2008. 新疆北部哈拉阿拉特山走滑—冲断复合构造特征与油气勘探方向. *地质科学*, 43(2): 309-320.
- 邵雨, 汪仁富, 张越迁, 等, 2011. 准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探. *石油学报*, 32(06): 976-984.
- 薛雁, 林会喜, 张奎华, 等, 2017. 哈拉阿拉特山地区构造特征及成因机制模拟. *大地构造与成矿学*, 41(05): 843-852.
- 薛雁, 张奎华, 王艺豪, 等, 2015. 哈拉阿拉特山地区构造演化及其石油地质意义. *新疆石油地质*, 36(06): 687-

692.

徐振平, 杨庚兄, 罗浩渝, 尹宏伟, 吴少军, 汪伟, 赵凤全, 徐雯峤, 2024. 不同深度岩性差异对库车坳陷构造分段特征的影响. 地球科学, 49(8): 3029-3042.

于洪洲, 2014. 准噶尔盆地西北缘哈拉阿拉特山前复杂构造带建模技术. 天然气地球科学, 25(S1): 91-97.

张越迁, 汪新, 刘继山, 等, 2011. 准噶尔盆地西北缘乌夏走滑构造及油气勘探意义. 新疆石油地质, 32(05): 447-450.

郑永飞, 陈伊翔, 陈仁旭, 等, 2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应. 中国科学:地球科学, 52(07): 1213-1242.