

DOI: 10.12401/j.nwg.2023044

## 准噶尔盆地南缘中段山前复杂构造 变形特征及形成演化

郭文建<sup>1</sup>, 姜颜良<sup>2</sup>, 卞保力<sup>1</sup>, 袁波<sup>1</sup>, 张学才<sup>3</sup>, 吴孔友<sup>4</sup>, 孙文洁<sup>4</sup>, 李天然<sup>4</sup>

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石化石油物探技术研究院, 江苏 南京 211103; 3. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000; 4. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 准噶尔盆地南缘中段紧邻北天山山前, 构造变形错综复杂。山前发育的三排构造的形成时间存在许多认识上的分歧, 对演化过程中褶皱和断裂的变形叠加特征缺少系统的对比分析。笔者在前人研究的基础上, 利用地震资料解释、平衡剖面恢复、构造物理模拟等研究手段, 结合断层滑移距、伸展压缩速率定量分析方法, 对研究区的构造变形特征和叠加演化过程进行了系统的分析。研究认为: ①南缘中段三排构造自南向北, 变形强度由强变弱; 第一排背斜受控于基底卷入型断裂体系, 第二、三排背斜受控于顺层滑脱型断裂体系, 构造之间具有形成递进的演化关系, 叠加形成多种复合构造样式。②断层滑移距总体“由深至浅”逐渐变小, 具有继承性发育的特点; 主干断裂滑移距存在明显的拐点, 是多期次活动的有力证据。③基底大型逆冲断裂是先存断裂, 后期继承性发育; 基底卷入型褶皱-冲断带是褶皱作用发生在逆冲断裂之前, 后期表现出边断边褶特征; 滑脱型褶皱-冲断带是冲断和褶皱同时或冲断先于褶皱形成。④第一排背斜形成于侏罗纪末期, 第二排背斜在此时期形成微弱雏形, 并在古近纪末期形成明显轮廓; 第三排背斜形成于新近纪末期; 第四纪至今的强大挤压作用使 3 排背斜被断裂强烈改造。

**关键词:** 构造样式; 变形特征; 断层滑移距; 构造演化; 构造物理模拟; 准噶尔盆地南缘中段

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0062-13

### Complex Tectonic Deformation Characteristics, Formation and Evolution of the Mountain Front in the Middle Part of the Southern Margin of Junggar Basin

GUO Wenjian<sup>1</sup>, JIANG Yanliang<sup>2</sup>, BIAN Baoli<sup>1</sup>, YUAN Bo<sup>1</sup>,  
ZHANG Xuecai<sup>3</sup>, WU Kongyou<sup>4</sup>, SUN Wenjie<sup>4</sup>, LI Tianran<sup>4</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China; 2. Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, Jiangsu, China; 3. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China; 4. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

**Abstract:** The middle part of the southern margin of the Junggar Basin is adjacent to the North Tianshan

收稿日期: 2022-10-22; 修回日期: 2023-01-28; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国科学院先导科技 A 类专项“深层油气形成与分布预测”(XDA14010301), 国家科技重大专项“地层圈闭描述及有效性分析技术研究”(2017ZX05001003-004)联合资助。

作者简介: 郭文建(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事构造地质学及油气成藏研究。E-mail: guowenjian@petrochina.com.cn。

Mountain Front, and the tectonic deformation is intricate and complex. There are many differences in the understanding of the formation time of the three rows of structures developed in the mountain front, and there is a lack of systematic comparative analysis of the deformation superposition characteristics of folds and fractures during the evolution. In this paper, on the basis of previous studies, the research tools such as seismic data interpretation and equilibrium profile recovery are used, combined with the quantitative analysis methods of fault slip distance and extensional compressional rate, to make a systematic analysis of the tectonic deformation characteristics and superposition evolution process in the study area. The study concludes that: ① The three rows of structures in the middle section of the southern margin from south to north, the deformation intensity from strong to weak; the first-row anticlines are controlled by the basement-involved fault system, and the second-row and third-row anticlines are controlled by the bedding-decollement fault system. There is a progressive evolution relationship between the structures, and a variety of composite structural styles are superimposed. ② The fault slip distance gradually decreases from deep to shallow, with the characteristics of inheritance development; there is an obvious inflection point in the slip distance of the main fracture, which is a strong evidence of multi-stage activity. ③ The basement large-scale thrust fault is a pre-existing fault, and later inherited development; the basement-involved fold-thrust belt is characterized by fold while fault in the later period when fold occurs before thrust fault; the detachment fold-thrust belt is formed by thrust and fold at the same time or thrust before fold. ④ The first row of anticlines formed in the late Jurassic, and the second row of anticlines formed a weak prototype in this period, and formed a clear outline in the late Paleogene; the third row of anticlines formed in the late Neogene; the strong extrusion effect since the Quaternary period has made the three-row anticline strongly modified by fracture.

**Keywords:** fracture style; deformation characteristics; fault slip distance; structural evolution; structural physical simulation; middle section of southern margin of Junggar basin

近年来,伴随着油气的大规模勘探开发,位于天山造山带两侧的准噶尔盆地和塔里木盆地在中、新生代地层中相继发现了大量的油气资源,促使天山造山带及两侧盆地的构造演化史的研究成为热点(王凯等, 2019; 付瑜等, 2020; 邹阳等, 2020; 朱明等, 2020; 于景维等, 2021; 梁则亮等, 2022; 何文军等, 2023)。准噶尔盆地南缘中段位于北天山山前,是受古生代以来多期次构造运动改造的大型再生前陆盆地,山前发育近东西向的3排断褶带,油气成藏条件优越。虽然前人对南缘中段进行了相关的研究(张玉兰等, 2003; 汪新伟等, 2005; 况军等, 2006; 漆家福等, 2008; 管树巍等, 2012; 侯蓉等, 2017; 朱明等, 2020; 周妮等 2020; 甄宇等 2020; 梁则亮等, 2022),但该区紧邻山前,构造变形错综复杂,相互叠加,发育多重构造样式。整体上,学者们多针对单个背斜或单个断褶带进行过研究(李本亮等, 2012; 管树巍等, 2012; 侯蓉等, 2017),而缺少对整个南缘中段3排断褶带变形差异性对比分析,对山前带发育的3排构造的形成时间也存在很大争议。张玉兰等

(2003)、程光锁等(2008)认为第一排断褶带形成在燕山运动中晚期,而方世虎等(2004a, 2004b)、郭召杰等(2006, 2011)、张凤奇等(2020)认为第一排断褶带形成在新生代晚期,距今10~6 Ma。张玉兰等(2003)认为第二排断褶带形成于新近纪。程光锁等(2008)将第二排断褶带的形成时间进一步限定为上新世末期,并认为早更新世末至中更新世强烈活动。Sun等(2004)、方世虎等(2007)则认为第二排断褶带的形成时间不早于3 Ma,郭召杰等(2011)、张凤奇等(2020)进一步将第二排断褶带的形成时间限定在了距今2 Ma。程光锁等(2008)认为第三排断褶带形成于早更新世末,中更新世之前,现代仍活动。郭召杰等(2011)、张凤奇等(2020)将第三排断褶带的形成时间限定在了中更新世1 Ma之后; Li等(2010)、季军良等(2010)进一步将其形成时间限定在更新世以来约0.73 Ma。

准噶尔盆地南缘山前带经历了长期勘探,也走过许多曲折历程。直到今天,高探1、呼探1井超深层取得重大突破,也不能说完全取得淮南山前带的突破,

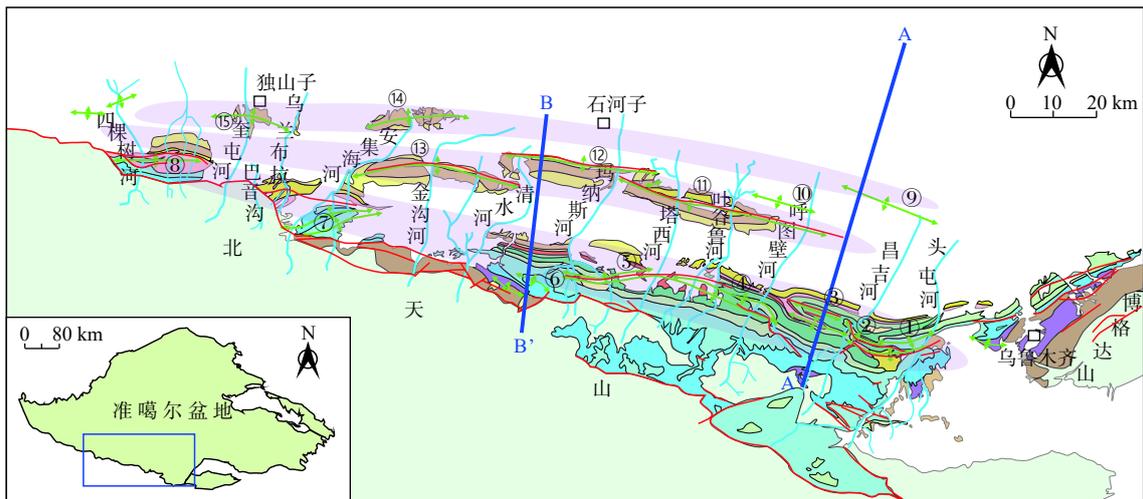
油气勘探还没有探索出一条清晰的、类似库车山前的勘探之路。归根到底归结于构造落实程度差,构造演化没有明确,这一问题已成为困扰准噶尔盆地南缘油气勘探的核心问题。因而,对准噶尔盆地南缘中段山前复杂构造变形特征及形成演化过程有必要开展系统而深入的研究。笔者综合利用地震资料解释、平衡剖面恢复等研究手段,结合前人研究,运用断层相关褶皱理论、断层滑移距和伸展压缩速率定量分析方法,分析了研究区的构造变形特征和褶皱-冲断带相对形成时间,明确了山前复杂构造的叠加特征及形成演化过程,对理解天山造山带的演化历史和指导研究区油气地质勘探具有重要意义。

### 1 地质概况

准噶尔盆地南缘位于准噶尔盆地南部,是指北天山山前狭长地带。现今构造上具有明显的东西分段、南北分带和垂向分层特征,大致以乌鲁木齐(E 88°)为界,准噶尔盆地南缘可以划分为南缘东部和南缘西部2个构造带(张玉兰等, 2003; 张凤奇等, 2020)。南缘西部构造带又包括南缘中段和南缘西段构造带,其中南缘中段构造带位于乌鲁木齐以西,东为阜康断裂带,西为四棵树凹陷,东西长约为 200 km, 宽为 30~50 km,

是本次研究的对象。

石炭纪末期的挤压作用使研究区的古亚洲洋全面消亡,到了早二叠世早期,天山洋盆闭合,彻底结束了天山的古洋盆演化历程,形成了南缘盆地的基底(徐学义等, 2005; 何登发等, 2018; 梁志录等, 2018; 王国灿等, 2019)。二叠纪—第四纪,研究区依次进入了陆内断陷-拗陷-前陆盆地发展阶段,经历了华力西期末、印支、燕山和喜山期的多期构造运动的叠加(徐学义等, 2005; 漆家福等, 2008; 何登发等, 2018; 王国灿等, 2019)。燕山期以来,特别是喜山期在来自天山向北的挤压应力作用下,中生代、新生代地层沿三叠系、侏罗系煤层和白垩系、古近系高塑性泥岩层发生滑脱并弯曲形成褶皱,由于挤压作用的持续进行,共发育了由多个背斜带和一系列逆冲断层组成的3排断褶带(张玉兰等, 2003; 朱明等, 2020)。整体上看,这些断褶带平面上呈向北凸出的弧形,大致等间距平行于北天山山前带(图 1)。地层发育上,石炭系为研究区的直接基底,基底之上依次沉积了二叠系至第四系。地层从古生界到新生界都有出露,以中生界的侏罗系、白垩系及新生界地层较为发育,多呈条带状平行于山前展布。其中,紧邻山前地区主要发育二叠系和侏罗系,远离山前地区主要发育古近系、新近系和第四系。



Q<sub>x</sub> 西域组 N<sub>2d</sub> 独山子组 N<sub>1t</sub> 塔西河组 N<sub>1s</sub> 沙湾组 E<sub>2-3a</sub> 安集海河组 E<sub>1-2z</sub> 紫泥泉子组 K<sub>2d</sub> 东沟组 K<sub>1tg</sub> 吐谷鲁群 J<sub>3</sub> 上侏罗统  
 J<sub>2</sub> 中侏罗统 J<sub>1</sub> 下侏罗统 T 三叠系 P 二叠系 Pz 古生界 断层 向斜 背斜 河流 市、县 断褶带轮廓

- ①.喀拉扎背斜; ②.阿克屯背斜; ③.昌吉背斜; ④.齐古背斜; ⑤.清水河背斜; ⑥.南玛纳斯背斜; ⑦.南安集海背斜; ⑧.托斯台背斜;
- ⑨.呼图壁背斜; ⑩.呼西背斜; ⑪.吐谷鲁背斜; ⑫.玛纳斯背斜; ⑬.霍尔果斯背斜; ⑭.安集海背斜; ⑮.独山子背斜

图 1 准噶尔盆地南缘中段综合地质图

Fig. 1 Comprehensive geological map of middle section of southern margin of Junggar basin

## 2 构造变形特征

由于研究区经历了多期次、多性质的构造运动, 各期构造运动影响的范围、应力作用方式不尽相同, 再加上天山山体阶段性隆升的影响, 在南缘中段不同地区, 不同层位的构造变形样式和活动性各不相同。笔者选取横跨南缘中段山前的 2 条典型地震剖面, 进行构造变形特征的研究。2 条典型地震剖面横切了山前 3 排构造带。其中, AA' 剖面的昌吉背斜和 BB' 剖面的南玛纳斯背斜属于第一排构造, AA' 剖面的呼图壁背斜属于第三排构造, BB' 剖面的玛纳斯背斜属于第二排构造。

### 2.1 褶皱构造变形特征

从褶皱构造的变形特征上看, 属于第一排构造的昌吉背斜两翼地层陡倾, 倾角为  $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ , 整个背斜呈现微弱的南缓北陡特征, 由于背斜被断层强烈的切割改造, 两翼地层相互错开, 改变了背斜高点的原始位置, 受断层的影响, 背斜两翼地层厚度也不一致, 核部地层剥蚀较严重(图 2a)。同属第一排构造的南玛纳斯背斜两翼则明显不对称, 南翼地层平缓, 倾角约为  $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ , 北翼地层陡倾, 并且从老地层依次向新地层倾角逐渐增大, 可达  $60^{\circ}$  以上; 背斜的两翼和核部

地层遭受了严重的剥蚀, 出露了较老的侏罗纪地层。第二排构造的玛纳斯背斜, 隆升幅度较大, 两翼产状不一致, 南翼地层倾角小于北翼, 属于典型的斜歪背斜。背斜在深浅层构造形态上表现的不一, 浅层背斜两翼较陡、深层则较缓; 构造高点也不一致, 构造高点在侏罗系之下都往南部偏移, 顶部层系都向北偏移(图 2b)。第三排构造的呼图壁背斜, 隆升幅度明显变小, 两翼地层产状较为平缓。形态上呼图壁背斜的南北两翼近似对称, 但有细微的差别, 南翼倾角略小于北翼  $4^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。背斜在深浅层的构造形态也不一致, 与第二排背斜表现的现象相同, 但背斜构造高点与第二排背斜有明显的不同, 呼图壁背斜的构造高点在侏罗系之下都往北部偏移, 之上构造高点未发生偏移, 近于直立。

总体上看, 第一排背斜两翼特别是北翼地层较为陡倾, 构造抬升幅度大, 多以断裂相伴生, 受断裂改造明显。褶皱地层抬升遭受剥蚀严重, 核部出露较老的侏罗纪地层。第二排背斜的构造幅度最大, 褶皱变形程度最明显, 但被断层改造的程度低于第一排背斜, 垂向上深浅层构造形态不一致。第三排背斜是三排构造中相对变形最弱的一排, 背斜核部在地表没有断层出露, 两翼产状相对较缓。3 排背斜两翼都具有南缓北陡的不对称式分布特征, 均发育有南倾逆冲断层;

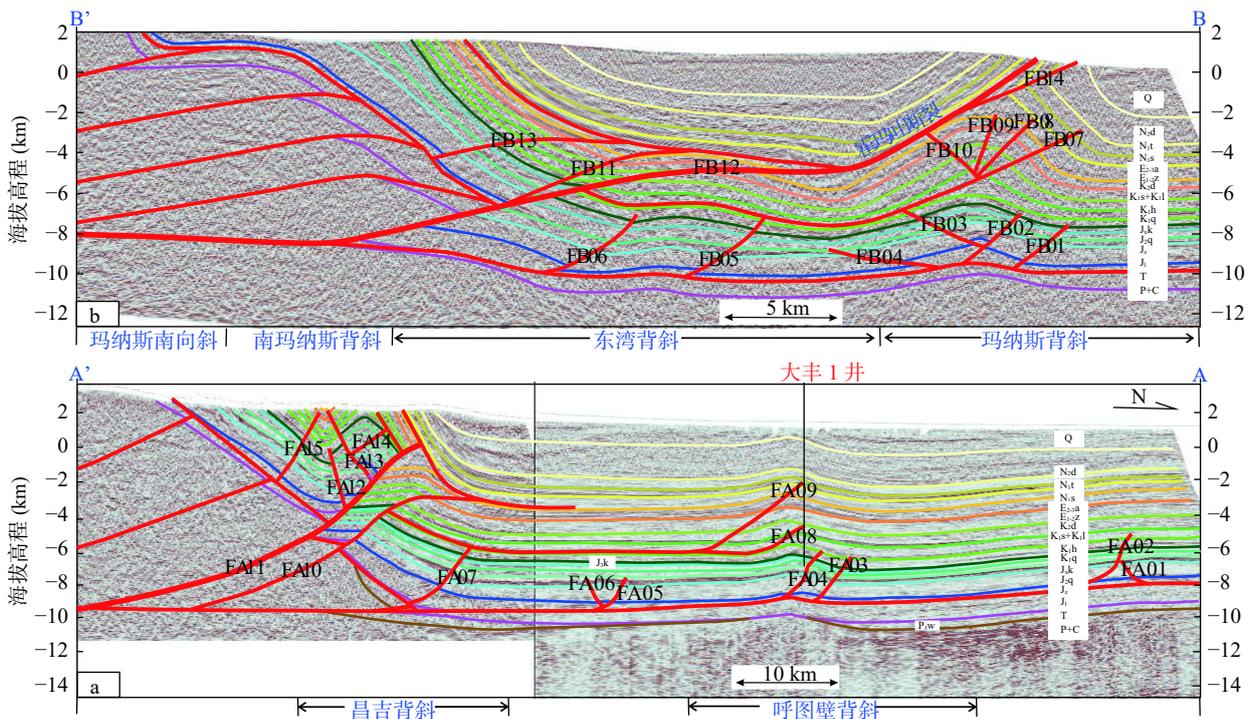


图 2 南缘中段两条典型地震剖面解译图(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Interpretation map of two typical seismic profiles in middle section of south margin

之间的向斜呈平坦开阔状,背斜与向斜相间分布呈现出隔档式褶皱的组合特征。

## 2.2 复合叠加构造变形特征

从复合叠加构造变形特征上看,属于第一排构造的昌吉背斜南侧受天山隆升产生的向北的强大挤压应力作用的影响,发育多条高角度逆冲断层,剖面上形成逆冲叠瓦状构造。在向北推覆过程中,由于受到前方地层的阻挡,为了调节应力的释放,在反方向上诱发了众多反冲断层(褶皱调节断层),向下与主逆冲断层相交,形成大型的基底卷入型构造楔(图2a)。反冲断层与正向逆冲断层组合形成突发构造,由于发育多级反冲断层,因而也形成了多级突发构造。正向高角度逆冲断层呈现坡坪式断层的形态,在前缘与古近系滑脱断层相交,形成新的小型构造楔,之间所夹的逆冲岩片长度与断层位移大致相当,断夹块呈复杂不规则的多边形向上隆升,构成了昌吉背斜的整体,是典型的背形堆垛式双重构造。昌吉背斜处叠加的复合构造类型涵盖了堆垛式双重构造、构造楔和突发构造,并且叠加的复合构造之间也相互叠置,错综复杂,至少存在3个断层转折褶皱的叠加,构成基底卷入型断裂体系。昌吉背斜底部的基底拆离断层向前逆冲传递的过程中,在前缘发育典型的冲起构造,在呼图壁背斜处发育一组平行的断层倾角大于 $60^\circ$ 的高角度逆冲断层,再向北可见主逆冲断层和反冲断层交汇形成的逆冲三角构造。除了古近系和三叠系发育滑脱断层外,白垩系也见顺层滑脱断层,其前缘向上高角度逆冲,但未冲出地表。

BB'剖面中(图2b),南玛纳斯-玛纳斯背斜之间也发育有多条大型的正向逆冲断层,紧邻山前的大型正向逆冲断层相互叠置,构成叠瓦状构造,在前缘与大型反冲断层相交,之间所夹的复杂不规则多边形断夹块呈向上隆升状态,形成背形堆垛式双重构造,构成了南玛纳斯背斜的整体。隐伏的东湾背斜处也发育多条相对小型的正向逆冲断层,形成小型逆冲叠瓦状构造,交于中层和底层两套滑脱断层之间,组合形成了正常双重构造样式。堆垛式双重构造构成了山前基底卷入式大型构造楔;前方的正常双重构造形成了相对小型的构造楔,楔入到玛纳斯背斜南翼。从基底逆冲到玛纳斯背斜顶部冲出地表的霍玛吐断层,同样作为逆冲叠瓦状构造的一部分,在前方与顶部古近系滑脱断层相交,并发育多条分支断层和反冲断层,在中-浅部层系形成了小型构造楔和“鳄鱼嘴状”构造三角楔,此处的断层位移超过逆冲岩片长度,断夹

块整体向前(前陆)倾,倾向与整体逆冲方向相同,构成前倾双重构造(图2b)。白垩系也发育滑脱断层,其作为霍玛吐断裂的分支断裂,在前缘继续发育分支断层,与霍玛吐断裂又组合成了相对小型的构造楔,该构造楔楔入到玛纳斯背斜南翼的中-上层系,其延伸的长度比下部的构造楔长,这种现象很好的解释了玛纳斯背斜深部和浅部背斜构造高点不一致的现象。在玛纳斯背斜处发育垂向上明显的3层逆冲断层构造。霍玛吐断层冲出地表,发育分支断层,形成了同向“y”字型逆冲断层组合;中部发育“扇形”多级冲起构造,改造着玛纳斯背斜的中部形态;受大型基底拆离断层的滑脱影响,在玛纳斯背斜底部层系也形成了多条正向逆冲断层和反冲断层的组合,改造着背斜的底部形态。另外3个大型顺层滑脱断层,在垂向上变形的程度也不同,自下而上弧度明显增强,最顶部的顺层滑脱断层呈“碗”状,平行于玛纳斯向斜地层。

整体上看,准噶尔盆地南缘中段以挤压构造样式为主,基底拆离断层、反冲断层、逆冲叠瓦状构造等错综复杂,相互叠置,形成了双重构造、突发构造、构造楔等复合构造样式,改造着3排背斜构造,形成了复杂的空间断褶体系。受滑脱断层向前滑脱的影响,玛纳斯背斜和呼图壁背斜在远离山前地区发育,形成了典型的背斜紧闭、向斜开阔的构造发育特征。滑脱断层的存在也使昌吉背斜-呼图壁背斜、东湾背斜-玛纳斯背斜垂向上展现出明显的分层特征。

综合构造变形特征分析,认为南缘中段山前发育的三排构造的变形程度具有明显的差异性。第一排构造属于基底卷入型褶皱-冲断带;构造主要受基底卷入型断裂体系控制,各种类型的复合构造相互叠加,导致垂向分层不明显;背斜抬升幅度较大,被断层切割改造明显,核部和两翼地层剥蚀严重,属于典型的断弯褶皱。第二和第三排构造属于滑脱型褶皱-冲断带,主要受顺层滑脱型断裂体系控制,其中第二排背斜构造形态最明显,第三排背斜构造变形程度最低。不同层系的滑脱断层在前缘发育各个方向的分支断层,切割改造着背斜的形态,使二、三排背斜垂向上具有明显的分层特征。第三排背斜在中-深层系表现出微弱的断弯褶皱的特征,中-浅层系表现出断展褶皱的特征。整体上看第一排断褶带分层不明显,第二排断褶带垂向上分为3层,第三排断褶带垂向上分为2层。垂向分层特征也表现在背斜构造高点在顶、底部层系不一致。自南向北,3排构造变形强度整体表现为由强变弱。

### 3 断层滑移距定量分析

为了进一步分析研究区构造变形特征,笔者对上述 2 条地震剖面解释出来的断层进行了断层滑移距定量分析。主要断层的编号见图 2,断层的滑移距统计结果如图 3 所示。

AA'剖面显示的不同断层的滑移距相差较大,绝大部分断层的滑移距表现出了“由深至浅”逐渐变小的发育特征。局部大断裂如 FA11 号断裂(对应霍玛吐断裂),存在较明显的拐点特征(深蓝色虚线和紫红色虚线具有不同的斜率),其最大滑移距出现在三叠纪(T),可达 6 000 m 以上,在白垩纪清水河组(K<sub>1q</sub>)时期出现较明显的拐点特征,推断该类断裂具有多期活动的特点,具有继承性发育的特征。与 AA'剖面类似, BB'剖面绝大部分断层的滑移距也同样表现出了

“由深至浅”逐渐变小的发育特征。局部大断裂如的 FB12 号断裂(对应霍玛吐断裂)和 FB11 号断裂,也存在较明显的拐点特征。FB12 号断裂(霍玛吐断裂)滑移距拐点两侧落差较大,可能是在顶部层系的古近系安集海河组滑脱层中。霍玛吐断裂近于水平顺层滑动,又发育了多条分支断层和反向逆冲断层进行调节,从而使顶部层系的滑移距表现的较小;也指示了多期次的构造活动强度不一致。

通过对 2 个剖面断层滑移距的定量分析,可以发现,南缘中段地区断裂的滑移距总体是渐变的,“由深至浅”逐渐变小,具有继承性发育的特点,很明显这种滑移距特点受深浅层滑脱层分布的影响。部分主干断裂滑移距存在一定的拐点,是断裂多次活动有力的证据。对比 2 条剖面中相同的霍玛吐断裂滑移距发现, AA'剖面处的霍玛吐断裂滑移距整体比 BB'剖面大很多,表明同一断层滑动的位移量自东向西逐

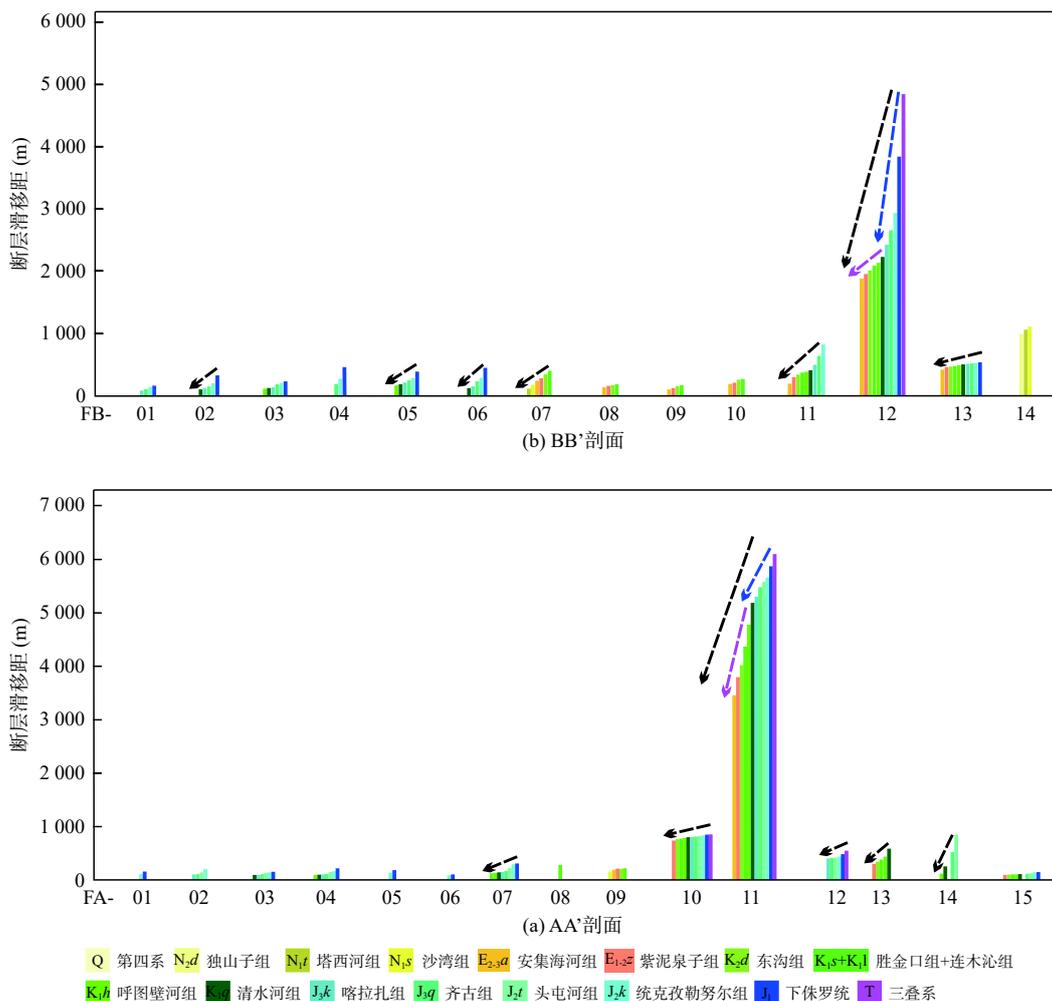


图 3 南缘中段断层滑移距定量统计图

Fig. 3 Quantitative statistical map of fault slip distance in middle section of south margin

渐减小,反映了准噶尔盆地南缘构造变形的东强西弱的特征。汪新伟等(2005)认为这一现象可能与逆冲推覆构造在推覆过程中主应力面在平面上并非水平而是向东倾斜有关。由于AA'剖面靠近东部的博格达山,笔者认为这种差异也可能与东部的博格达山隆升产生的北西向的挤压分量作用有关。

由断层滑移距定量分析认为部分大断裂(如霍玛吐断裂)具有多期活动性,而这些大断裂正是形成南缘中段断层相关褶皱的主干断裂。进一步分析认为,南缘中段发育的不同类型的断层相关褶皱之间应该具有形成递进的演化关系,断滑褶皱是最开始的样式,随着挤压位移的进一步积累,逐渐演化成断展褶皱;当压缩量进一步增大,断层突破褶皱继续向前滑动形成断弯褶皱。现今看到的距离盆山交界处较远的断弯褶皱和断展褶皱很可能是先前形成的断滑褶皱随着挤压的进行,逐渐演化形成的,如玛纳斯背斜、呼图壁背斜。紧邻山前的第一排背斜,由于研究区受快速强大的挤压推挤作用,可能没有经历上述的递进的演化过程,而是直接形成了断弯褶皱,或者是这种递进的演化过程比较迅速,如昌吉背斜、南玛纳斯背斜等。

#### 4 褶皱-冲断带相对形成时间分析

根据褶皱构造幅度、断层相关褶皱的发育及断层滑移距的定量分析,总结3排断褶带的褶皱和断层冲断的相对时间,以指导接下来的构造演化。

由于第一排断褶带中的昌吉背斜和南玛纳斯背斜都表现出了很强褶皱变形,翼部地层陡倾,抬升幅度很大。通过断层滑移距分析,发现第一排断褶带周围的大部分断裂的滑移距深部层系都比较大,而浅部层系比较小,推断第一排断褶带的昌吉背斜和南玛纳斯背斜早期很可能是先褶后断。基底大型高角度逆冲断层也是继承性发育,喜山期的强大挤压作用,促使其向上逆冲与滑脱断层相交后,构成坡坪式逆冲断层,这个过程作为昌吉背斜和南玛纳斯背斜的一翼才表现出边断边褶的特征。大部分断裂的滑移距均表现出“由深至浅”逐渐变小的发育特征可以证明之后发生的边断边褶。局部大断裂如FA11号断裂,断层滑移距存在明显的拐点特征,是多次活动、边断边褶的有力证据。昌吉背斜核部发育断距相对较小的褶皱调节断层,也证实了后期边断边褶的特征。

第二、第三排断褶带属于盖层滑脱型褶皱-冲断带,褶皱变形程度和抬升幅度都比第一排小,第二排断褶带中的玛纳斯背斜具有明显的断弯和断展褶皱特征,周围的断层滑移距均表现出“由深至浅”逐渐变小的发育特征,可以证明之后发生的边断边褶。局部大断裂如霍玛吐断裂,在第二排背斜顶部冲出地表,表现出了断展褶皱的特征,断层滑移距存在较明显的拐点特征,也是多次活动、边断边褶的有力证据。属于第三排断褶带的呼图壁背斜在底部层系具有滑脱褶皱特征,褶皱幅度很低,受滑脱断层影响,可能最初的时候表现为断层先于褶皱的形成特征;中-浅部层系为断展褶皱,具有边断边褶的特征。

综合分析认为研究区山前发育的基底大型逆冲断裂是先存断裂,发育在早期,之后才随构造运动的进行继承性发育。基底卷入型褶皱-冲断带(第一排断褶带)是褶皱作用发生在逆冲断裂之前,后期才表现出边断边褶的发育。滑脱型褶皱-冲断带(第二和第三排断褶带)是冲断作用和褶皱同时或冲断作用先于褶皱形成,即褶皱的形成和发育过程都受到相应逆冲断裂的控制。

#### 5 构造演化史分析

前寒武纪以来,研究区经历了漫长而复杂的构造运动,晚古生代石炭纪是该区最重要的板块拼贴碰撞和陆内造山运动时期(方世虎等,2004a,2004b;徐学义等,2005)。侏罗纪早期,准平原化的天山地区处于板内伸展作用阶段(舒良树等,2004)。高精度地震资料和岩浆活动分析结果也显示了早侏罗世该地区处于弱伸展环境(陈发景等,2005;何登发等,2018)。中侏罗世-晚侏罗世,受周缘板块调整影响,盆地转入挤压应力背景,造成腹部发生构造反转(何登发等,2018),使得侏罗纪经历了伸展-挤压的转换旋回。陈正乐等(2006)通过隆升剥蚀和磷灰石裂变径迹测年发现天山造山带在晚中生代发生了显著的构造-热事件作用,存在明显地快速隆升现象,也证实了晚侏罗世,盆地转入挤压构造背景。白垩纪,研究区的构造运动甚微,为构造稳定发展阶段(郭召杰等,2006;姜颜良等,2021)。古近纪,准噶尔盆地在地壳均衡挠曲作用下继续发展(漆家福等,2008)。渐新世晚期,南缘挤压构造活动开始加强(侯蓉等,2017)。新近纪,受印度板块和欧亚大陆板块远程碰撞作用的影响,北

天山开始快速隆升,使南缘地区处于较强的挤压应力背景(贾承造等,2003;漆家福等,2008;侯蓉等,2017)。第四纪,喜山运动晚期的强烈造山作用,使盆地周边处于剧烈的挤压应力背景下(贾承造等,2003;漆家福等,2008;侯蓉等,2017)。

在前人研究的基础上,对横跨南缘中段的 2 条典型地震解释剖面(AA'和 BB'剖面)进行平衡剖面恢复(图 4、图 5)。从平衡演化剖面中可以看出,古生代石炭系为研究区直接基底,沉积基底稳定,升降运动比较缓慢,AA'剖面基底处存在先存的古隆起构造,导致之后沉积的二叠系、三叠系顺势披覆在先前形成的石炭系古隆起之上。早侏罗世,研究区处于伸展应力背景,在伸展环境下发育了小型的高角度正断层,控制

着侏罗系的沉积。中侏罗世—晚侏罗世,研究区经历了较强烈的挤压作用,使靠近山前的地层发生褶皱变形,昌吉背斜和南玛纳斯背斜(第一排背斜)形成,伴随着地壳快速抬升,地层遭受风化剥蚀严重,致使背斜顶部的喀拉扎组(J<sub>3k</sub>)剥蚀殆尽露出中侏罗统(J<sub>2</sub>)。基底先存断裂在此次挤压作用下,发生逆冲复活,切穿侏罗系,在三叠系中顺层滑脱,BB'剖面中的三叠系滑脱断层在前缘形成微弱的滑脱褶皱,形成玛纳斯背斜(第二排背斜)的雏形。早侏罗世,伸展作用形成的小型高角度正断层也在挤压应力作用下发生构造反转,并延伸至逆冲断裂之上。该时期发育的基底卷入式逆冲断层剖面上构成逆冲叠瓦状构造。石炭系,基底作为大型基底卷入型构造楔由南向北楔入,使南缘

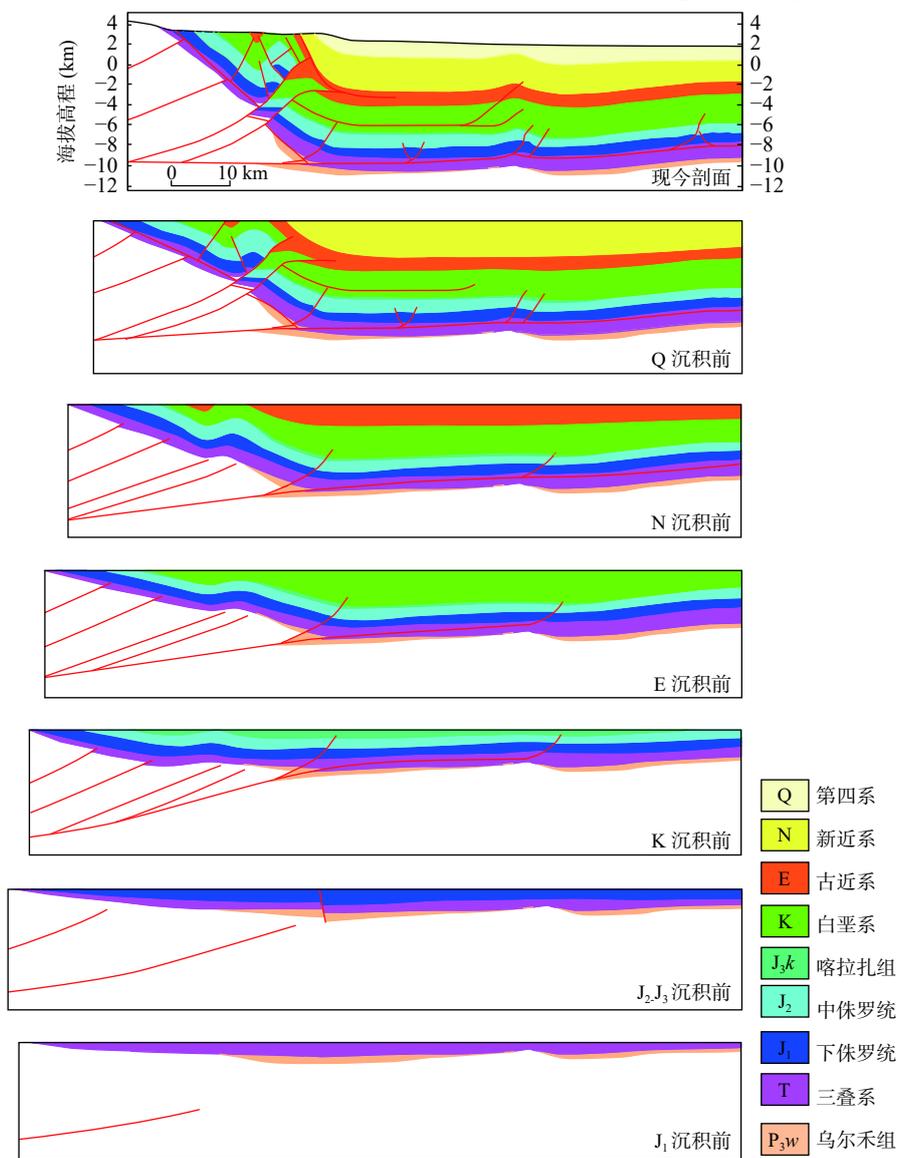


图 4 昌吉背斜-呼图壁背斜平衡演化剖面(剖面位置见图 1 中的 AA')

Fig. 4 Equilibrium evolution profile of Changji anticline–Hutubi anticline (Profile position is shown as AA' in Fig. 1)

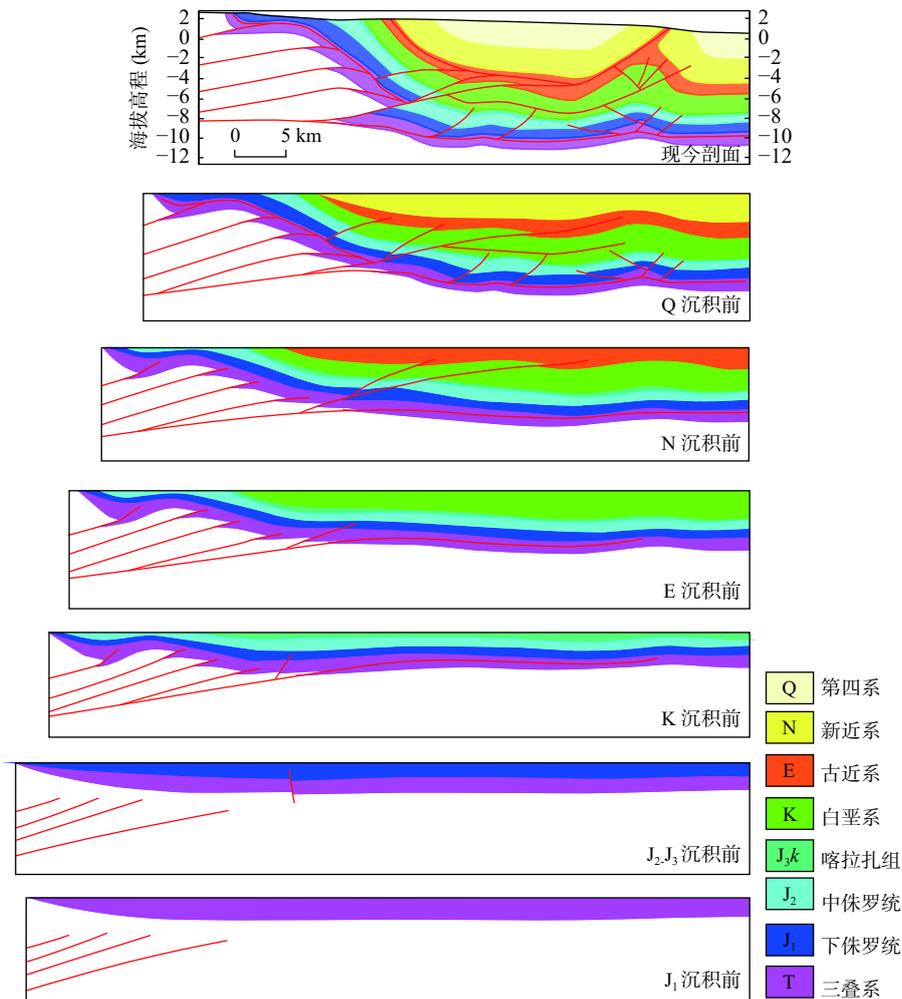


图5 南玛纳斯背斜-玛纳斯背斜平衡演化剖面(剖面位置见图1中的BB')

Fig. 5 Equilibrium evolution profile of south Manas anticline–Manas anticline (Profile position is shown as BB' in Fig. 1)

沉积的地层发生明显的掀斜,超覆在石炭系基底之上。白垩纪,研究区构造运动相对稳定,继承了晚侏罗世的构造面貌。

古近纪,由于印度板块与欧亚大陆板块的远程碰撞作用,导致天山再次隆升,南缘地区靠近山前的昌吉背斜和南玛纳斯背斜(第一排背斜)隆升幅度进一步增加,构造更加紧闭,核部地层抬升剥蚀严重。BB'剖面中的玛纳斯背斜(第二排背斜)形成明显的轮廓。随着挤压的进行基底逆冲推覆断层倾角逐渐变缓,大型基底卷入型构造楔的楔入使地层发生的掀斜超覆更加明显。

新近系沉积时期,上新世是淮南前陆盆地构造运动最活跃的时期,受喜山运动的影响,北天山开始大幅度隆升并向盆地内部逆冲推覆,促使基底卷入型构造楔继续向前推进,第一和第二排背斜的构造隆升幅度和褶皱变形进一步增强。为了调节挤压过程中遇

到的反冲阻力,反向逆冲调节断层在褶皱内部大量发育,吸收了大量的挤压活动量,第一排背斜顶部的表皮构造的完整性被破坏,第二排背斜底部层系的核部地层被切割改造。此时期深部的基底卷入式断裂突破侏罗系,在白垩系吐谷鲁群中发生滑脱冲断,基底逆冲推覆断层不断向前传播,AA'剖面中的呼图壁背斜(第三排背斜)的雏形也逐渐形成。

第四纪处于喜山运动晚期,再生前陆盆地发育剧烈,天山隆升剧烈,受巨大的挤压应力作用,南缘地区的第一排背斜变形强烈,地层缩短幅度明显增大,两翼地层变的更加陡倾,反冲断层和小型构造楔大量发育,改造着背斜的形态。AA'剖面白垩系滑脱层中发育的滑脱冲断层继续向前滑动,在前方向上逆冲,使呼图壁背斜(第三排背斜)形成明显的轮廓;BB'剖面白垩系和古近系中的滑脱断层在前方冲出地表,也发育了众多反冲断层改造着玛纳斯背斜的形态。

笔者对 AA'、BB' 剖面的地层伸展压缩量和伸展压缩率进行了统计(图 6), 对比发现 AA' 剖面的各个时期的地层缩短量和地层总缩短量都大于 BB' 剖面(图 6a), 即 AA' 剖面所在位置遭受的来自南部天山隆升的挤压程度更大, 表现出从西向东逐渐增大的变化趋势。与之前的断层滑移距所表现出的构造变形东强西弱的特征一致。从各个时期伸展压缩量和伸展压缩率可知喜山期是研究区构造挤压最为强烈的时期, 特别是第四纪至今的构造挤压, 2 个剖面的地层压缩量都在 5 km 以上, 压缩速率都在 2.5 km/Ma 以上; 侏罗纪末期的构造挤压也较为明显, 显示了燕山晚期的较强运动。

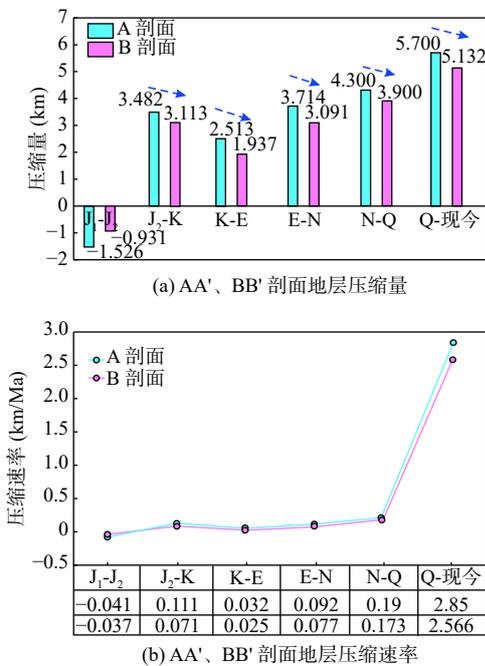


图 6 AA' 与 BB' 剖面地层压缩量和压缩速率图

Fig. 6 Stratigraphic compression and compression rate maps of AA' and BB' sections

## 6 构造物理模拟实验

构造物理模拟是一种能够在实验室条件下再现地质构造变形过程, 定量-半定量分析变形结果和地质构造成因机制的实验技术(陈竹新等, 2018)。通过构造物理模拟实验可以直观分析不同应力背景下形成的各类构造的形成演化过程, 也可以预测实际地质中可能出现的构造; 推测地震资料品质较差的构造变形特征, 为地震资料解释提供实验上的解译模板, 还可作为验证平衡剖面恢复合理性的手段。为了探究

南缘中段山前带构造的变形机制, 本节以图 2 中 AA' 地震剖面构造解释方案为地质模型, 进行相应的构造物理模拟实验, 以期很好的再现研究区山前断褶带的形成演化过程。

依据实际地质情况, 按照相似性原理, 本次实验采用力学性质完全一致, 不同颜色的干燥石英砂(粒径为 0.2~0.6 mm)(内部摩擦力小、流动性中等)模拟山前带的沉积岩层, 使用硅胶(内部摩擦力极小、流动性极强)模拟煤层及膏盐岩滑脱层。实验沙箱规格为 75 cm(长)×25 cm(宽)×30 cm(高), 铺设三层硅胶模拟研究区发育的 3 套滑脱层, 地层总厚度设置为 5 cm, 相似比为  $5 \times 10^{-6}$ 。实验过程采用单侧挤压, 移动端(左端)以特定的速率向右推进, 模拟自然界中的构造挤压, 采用中等的挤压速率(0.002 5 mm/s), 整个过程不考虑沉积与剥蚀。

经过多次实验, 选择模拟效果较好的一组进行说明(图 7)。在挤压距离为 2 cm 时, 第一排背斜形成, 并在背斜的右侧形成高角度逆冲断层。当挤压距离达到 4 cm 时, 发育多条逆冲断层, 剖面上形成逆冲叠瓦状构造, 底部滑脱断层也在发育, 第一排背斜的构造幅度增大。挤压距离为 6 cm 时, 高角度正向逆冲断层发育反冲断层, 第一排背斜的构造幅度进一步增大。当挤压距离为 9 cm 时, 顶部层系发育顺层滑脱断层, 部分逆冲断层被顶部滑脱层阻挡, 未向上传播; 滑脱断层向前滑脱形成第二排背斜; 第一和第二排背斜存在明显的前翼陡后翼缓的特征。继续挤压, 当挤压距离达到 14 cm 时, 第一排背斜构造形态更加紧闭, 第二排背斜构造幅度增大, 前缘的正向逆冲断层向前逆冲, 沿滑脱层传播至地表形成第三排背斜的雏形。当挤压距离为 16 cm 时, 第三排背斜轮廓更加明显, 构造幅度也进一步增大, 逆冲断层和滑脱断层相交叠加形成构造三角楔; 背斜之间的向斜呈明显的开阔状, 背斜则相对紧闭, 剖面上形成隔槽式褶皱组合样式, 断层平面上呈近乎平行的发育特征。

根据以上对南缘中段典型地质剖面进行的构造物理模拟发现, 地层在单向挤压应力作用下, 形成了 3 排近乎平行的构造带, 其中第一排及第二排的褶皱主要为后翼缓、前翼陡, 并伴有地层倒转的断层相关褶皱特征, 第三排褶皱初步形成, 还未发生地层倒转。这与实际地质现象中南缘中段地区的三排构造带有很好的对应性。断层在滑脱层中向前传播并冲出地表现象也和霍玛吐断层具有较强的相似性, 同时滑

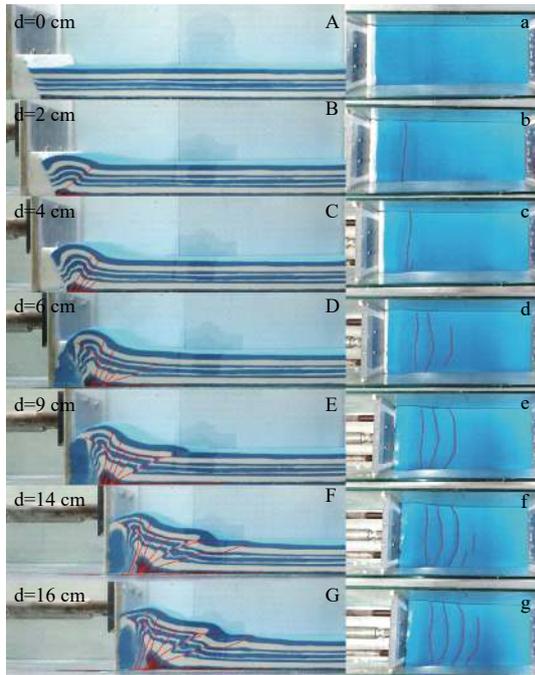


图7 挤压变形构造物理模拟实验结果

Fig. 7 Physical Simulation Experiment Results of Compression Deformation Structure

脱层上下的构造差异性也通过构造物理模拟进行了还原。整体上看,该组构造物理模拟实验与实际地质现象有较高的相似性,很好再现了研究区山前断褶带的形成演化过程。

## 7 结论

(1)南缘中段山前褶皱的发育受断层的控制,第一排背斜受控于基底卷入型断裂体系,第二、三排背斜受控于顺层滑脱型断裂体系,构造具有形成递进的演化关系,相互叠加形成多种类型的复合构造样式。3排构造的变化幅度相差较大,自南向北,变形强度整体表现为由强变弱;形态上整体呈南缓北陡的不对称状,垂向上具有明显分层特征。

(2)断层滑移距定量分析认为,研究区断层滑移距总体是渐变的,“由深至浅”逐渐变小,具有继承性发育的特点。部分大断裂滑移距存在明显拐点,是断裂多期次活动的有力证据。主干断裂滑动位移量及地层缩短量自东向西逐渐减小,也反映了南缘中段构造变形东强西弱的特征。

(3)研究区山前带基底大型逆冲断裂是先存断裂,后期继承性发育;基底卷入型褶皱-冲断带是褶皱作

用发生在逆冲断裂之前,后期才表现出边断边褶特征;滑脱型褶皱-冲断带是冲断作用和褶皱同时或冲断作用先于褶皱形成。

(4)侏罗纪末期的较强烈的挤压运动,使南缘第一排背斜形成,第二排背斜初具雏形;古近纪末期,受印度板块与欧亚大陆板块碰撞作用的影响,第一排背斜隆升幅度增大,第二排背斜形成明显的轮廓;新近纪末期,天山快速隆升,第一、二排背斜被断层改造明显,第三排背斜形成;第四纪-今,强大的挤压作用使3排背斜被断裂强烈改造。

## 参考文献(References):

- 陈发景,汪新文,汪新伟.准噶尔盆地的原型和构造演化[J].*地学前缘*,2005,(3):77-89.
- CHEN Fajing, WANG Xinwen, WANG Xinwei. Prototype and tectonic evolution of Junggar Basin[J]. *Frontiers of Geosciences*, 2005, (3): 77-89.
- 陈正乐,万景林,刘健,等.西天山山脉多期次隆升-剥露的裂变径迹证据[J].*地球学报*,2006,(2):97-106.
- CHEN Zhengle, WAN Jinglin, LIU Jian, et al. Evidence of multi-stage uplift-exfoliation fission track in the western Tianshan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, (2): 97-106.
- 陈竹新,雷永良,贾东,等.构造变形物理模拟与构造建模技术及应用[M].北京:科学出版社,2018.
- CHEN Zhuxin, LEI Yongliang, JIA Dong, et al. Physical simulation of tectonic deformation and modeling technology and its application [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- 程光锁.准噶尔盆地南缘中段构造的平衡剖面研究[J].*地球学报*,2008,(05):563-570.
- CHEN Guangsu. Study on the Balanced Section of the Middle Structure in the Southern Margin of Junggar Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, (05): 563-570.
- 方世虎,郭召杰,张志诚,等.天山北缘前陆冲断带形成时间的地层学证据[J].*新疆地质*,2004a,(1):24-28.
- FANG Shihu, GUO Zhaojie, ZHANG Zhicheng, et al. Stratigraphic evidence of the formation time of foreland thrust belt in the northern margin of Tianshan Mountains[J]. *Xinjiang Geology*, 2004a, (1): 24-28.
- 方世虎,郭召杰,张志诚,等.中生代天山及其两侧盆地性质与演化[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2004b,(6):886-897.
- FANG Shihu, GUO Zhaojie, ZHANG Zhicheng, et al. The nature and evolution of the Meso-cenozoic Tianshan and its adjacent basins[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2004b, (6): 886-897.

- 方世虎, 贾承造, 宋岩, 等. 淮南地区前陆冲断带晚新生代构造变形特征与油气成藏[J]. *石油学报*, 2007, (06): 1-5.
- FANG Shihu, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Late Cenozoic structural deformation characteristics and hydrocarbon accumulation of foreland thrust belt in southern Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, (06): 1-5.
- 付瑜, 柳益群, 蒋宜勤, 等. 准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩储层孔隙结构及渗流特征[J]. *西北地质*, 2020, 53(2): 223-234.
- FU Yu, LIU Yiqun, JIANG Yiqin, et al. Pore structures and Seepage Characteristics of Sand-conglomerate Reservoirs of Baikouquan Formation in Triassic Mahu Sag, Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 223-234.
- 管树巍, 陈竹新, 方世虎. 准噶尔盆地南缘油气勘探的3个潜在领域——来自构造模型的论证[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(01): 37-44.
- GUAN Shuwei, CHEN Zhuxin, FANG Shihu. Three potential areas of oil and gas exploration in the southern margin of Junggar Basin: argumentation from structural model[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(01): 37-44.
- 郭召杰, 方世虎, 张锐, 等. 生长地层及其在判断天山北缘前陆冲断褶皱带形成时间上的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2006, (4): 475-481.
- GUO Zhaojie, FANG Shihu, ZHANG Rui, et al. Growth strata and its application in determining the formation time of foreland thrust fold belt in the northern margin of Tianshan Mountains[J]. *Oil and Gas Geology*, 2006, (4): 475-481.
- 郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 等. 准噶尔盆地南缘构造控藏作用及大型油气藏勘探方向浅析[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(02): 185-195.
- GUO Zhaojie, WU Chaodong, ZHANG Zhicheng, et al. Structural reservoir control and exploration direction of large reservoirs in southern Junggar Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(02): 185-195.
- 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 845-861.
- HE Dengfa, ZHANG Lei, WU Songtao, et al. Structural evolution stage and characteristics of Junggar Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2018, 39(5): 845-861.
- 何文军, 吴和源, 杨森, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油储层岩相划分与类型评价[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 217-231.
- HE Wenjun, WU Heyuan, YANG Sen, et al. Lithofacies Division and Type Evaluation of Shale Oil Reservoir in Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 217-231.
- 侯蓉, 魏凌云, 王振奇. 准噶尔盆地南缘霍玛吐背斜带构造演化分析[J]. *中国锰业*, 2017, 35(4): 5-8.
- HOU Rong, WEI Lingyun, WANG Zhenqi. Structural evolution analysis of Huomatu anticline belt in the southern margin of Junggar Basin[J]. *China Manganese Industry*, 2017, 35(4): 5-8.
- 季军良, 朱敏, 王旭, 等. 准噶尔盆地南缘新生代地层时代研究[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(1): 43-50.
- JI Junliang, ZHU Min, WANG Xu, et al. Study on Cenozoic Strata Age in Southern Margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(1): 43-50.
- 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 等. 中国中西部两期前陆盆地的形成及其控气作用[J]. *石油学报*, 2003, (2): 13-17.
- JIA Chengzao, WEI Guoqi, LI Benliang, et al. Formation and gas control of two foreland basins in central and western China[J]. *Petroleum Journal*, 2003, (2): 13-17.
- 姜颜良, 吴孔友, 李天然, 等. 克拉美丽断裂带构造变形特征及其成因演化[J]. *断块油气田*, 2021, 28(6): 792-799.
- JIANG Yanliang, WU Kongyou, LI Tianran, et al. Structural deformation characteristics and genetic evolution of Kelameili fault zone[J]. *Fault Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(6): 792-799.
- 况军, 齐雪峰. 准噶尔前陆盆地构造特征与油气勘探方向[J]. *新疆石油地质*, 2006, (1): 5-9.
- KUANG Jun, QI Xuefeng. Structural characteristics and petroleum exploration direction of Junggar foreland basin[J]. *Petroleum Geology of Xinjiang*, 2006, (1): 5-9.
- 李本亮, 管树巍, 陈竹新, 等. 楔形构造在山前冲断构造位移动量消减中的作用——以准噶尔盆地南缘为例[J]. *地质学报*, 2012, 86(06): 890-897.
- LI Benliang, GUAN Shuwei, CHEN Zhuxin, et al. Effect of wedge structure on displacement reduction of piedmont thrust structure: A case study of southern Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(06): 890-897.
- 梁则亮, 姜颜良, 冀冬生, 等. 北天山后峡盆地地质特征及形成演化[J]. *古地理学报*, 2022, 24(03): 512-523.
- LIANG Zeliang, JIANG Yanliang, JI Dongsheng, et al. Geological characteristics and genetic evolution of Houxia Basin in North Tianshan Mountains[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(03): 512-523.
- 梁志录, 张振亮, 冯选洁. 新疆东天山中生代金属成矿动力学背景研究[J]. *西北地质*, 2018, 51(1): 218-227.
- LIANG Zhilu, ZHANG Zhenliang, FENG Xuanjie. Study on the dynamic background of Mesozoic metal mineralization in eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(1): 218-227.
- 漆家福, 陈书平, 杨桥, 等. 准噶尔-北天山盆地过渡带构造基本特征[J]. *石油与天然气地质*, 2008(2): 252-260+282.
- QI Jiafu, CHEN Shuping, YANG Qiao, et al. Basic Structural Features of Junggar-North Tianshan Basin-Mountain Transition Belt [J]. *Oil and Gas Geology*, 2008(2): 252-260+282.
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 等. 天山地区碰撞后构造与盆山演

- 化[J]. 高校地质学报, 2004, (3): 393-404.
- SHU Liangshu, GUO Zhaojie, ZHU Wenbin, et al. Post-collisional structure and basin-mountain evolution in Tianshan area[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, (3): 393-404.
- 汪新伟, 汪新文, 刘剑平, 等. 准噶尔盆地南缘褶皱-逆冲断层带分析[J]. 地学前缘, 2005, 32(04): 411-421.
- WANG Xinwei, WANG Xinwen, LIU Jianping, et al. Analysis of Fold - thrust Fault Belt in Southern Margin of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 32(04): 411-421.
- 王国灿, 张孟, 冯家龙, 等. 东天山新元古代—古生代大地构造格架与演化新认识[J]. 地质力学学报, 2019, 25(05): 798-819.
- WANG Guocan, ZANG Meng, FENG Jialong, et al. A New Understanding of Tectonic Framework and Evolution of Neoproterozoic-Paleozoic East Tianshan Mountains[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(05): 798-819.
- 王凯, 计文化, 孟勇, 等. 天山造山带东段构造变形对增生造山末期的响应[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(05): 894-910.
- WANG Kai, JI Wenhua, MENG Yong, et al. Response of tectonic deformation in eastern Tianshan orogenic belt to late accretionary orogeny[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(05): 894-910.
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 等. 天山石炭—二叠纪后碰撞花岗岩的Nd、Sr、Pb同位素源区示踪[J]. 西北地质, 2005, 38(2): 1-18.
- XU Xueyi, MA Zhongping, XIA Zuchun, et al. Nd, Sr, Pb isotopic source tracing of Carboniferous-Permian post-collision granites in Tianshan[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(2): 1-18.
- 于景维, 季汉成, 史燕青, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡区三叠系韭菜园子组成岩作用特征及其对储层物性影响[J]. 西北地质, 2021, 54(2): 99-110.
- YU Jingwei, JI Hancheng, SHI Yanqing, et al. Diagenesis and Its Effects on the Reservoir Property of the Triassic Jiucaiyuanzi Formation of Fudong Slope, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 99-110.
- 张凤奇, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因机制及演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(05): 1004-1016.
- ZHANG Fengqi, LU Xuesong, ZHUO Qingong, et al. Genesis mechanism and evolution characteristics of abnormal high pressure in lower composite reservoirs in southern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(05): 1004-1016.
- 张玉兰, 王伟锋, 马宗晋. 准噶尔盆地南缘构造物理模拟实验[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 37(03): 1-5+9.
- ZHANG Yulan, WANG Weifeng, MA Zongji. Structural physical simulation experiment in southern Junggar Basin[J]. Journal of Petroleum University (Natural Science Edition), 2003, 37(03): 1-5+9.
- 甄宇, 何登发, 李涤, 等. 准噶尔盆地南缘山前带阿什里背斜精细构造建模[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1235-1252.
- ZHEN Yu, HE Dengfa, LI Di, et al. Fine structural modeling of the Ashili anticline in the piedmont zone of the southern margin of the Junggar Basin[J]. Lithology, 2020, 36(4): 1235-1252.
- 周妮, 李际, 刘翠敏, 等. 准噶尔盆地南缘油气苗有机地球化学特征及成因[J]. 石油实验地质, 2020, 42(6): 957-964.
- ZHOU Ni, LI Ji, LIU Cuimin, et al. Organic geochemical characteristics and genesis of oil and gas seepages in the southern margin of Junggar Basin[J]. Petroleum Experimental Geology, 2020, 42(6): 957-964.
- 朱明, 汪新, 肖立新. 准噶尔盆地南缘构造特征与演化[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 9-17.
- ZHU Ming, WANG Xin, XIAO Lixin. Structural Characteristics and Evolution of the Southern Margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1): 9-17.
- 邹阳, 韦盼云, 朱涛, 等. 准噶尔盆地石西油田石南4井区侏罗系头屯河组储层特征及有利区展望[J]. 西北地质, 2020, 53(2): 235-243.
- ZOU Yang, WEI Panyun, ZHU Tao, et al. The Reservoir Characteristics and Favorable Zone Prospect of the Jurassic Toutunhe formation in WellBlock Shinan-4, Shixi Oilfield, Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 235-243.
- LI Chuangxin, GUO Zhaojie, GUILLAUME Dupont-Nivet. Late Cenozoic tectonic deformation across the northern foreland of the Chinese Tian Shan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 243(34): 1066-1073.
- SUN Jimin, ZHU Rixiang, JAMES Bowler. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasse deposits[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219(23): 239-253.