引用格式：王锦洲，饶刚，邓晓睿，等，2026. 塔西南山前乌依塔格地区构造样式的主控因素研究：来自离散元数值模拟实验的启示[J]. 地质力学学报，32（3）：759−770. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026037

Citation: WANG J Z，RAO G，DENG X R，et al.，2026. The controls on the structural styles in the Wuyitage area, southwestern Tarim Basin: Insights from discrete-element numerical simulations[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：759−770. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026037

塔西南山前乌依塔格地区构造样式的主控因素研究：来自离散元数值模拟实验的启示

王锦洲[1,2,3,4]，饶　刚[5]，邓晓睿[1,2,3,4]，王　彪[5]，方　兵[1,2,3,4]，罗　强[1,2,3,4]，徐仲博[1,2,3,4]，许晨昊[5]

WANG Jinzhou[1,2,3,4]，　RAO Gang[5]，　DENG Xiaorui[1,2,3,4]，　WANG Biao[5]，　FANG Bing[1,2,3,4]，　LUO Qiang[1,2,3,4]，　XU Zhongbo[1,2,3,4]，　XU Chenhao[5]

1. 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；
2. 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；
3. 塔里木油田分公司勘探开发研究院，新疆 库尔勒 841000；
4. 中国石油塔里木油田公司，新疆 库尔勒 841000；
5. 西南石油大学地球科学与技术学院，四川 成都 610500

1. *CNPC R&D Center of Ultra-Deep Complex Oil and Gas Reservoir Exploration and Development*, *Korla* 841000, *Xinjiang*, *China*;
2. *Xinjiang Engineering Research Center of Ultra-deep Complex Oil and Gas Reservoir Exploration and Development*, *Korla* 841000, *Xinjiang*, *China*;
3. *Exploration and Development Research Institute*, *Tarim Oilfield Branch Company*, *Korla* 841000, *Xinjiang*, *China*;
4. *PetroChina Tarim Oilfield Company*, *Korla* 841000, *Xinjiang*, *China*;
5. *School of Geoscience and Technology*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu* 610500, *Sichuan*, *China*

The controls on the structural styles in the Wuyitage area, southwestern Tarim Basin: Insights from discrete-element numerical simulations

Abstract: ［**Objective**］The collision and ongoing convergence between the Indian and the Eurasian plates have driven the uplift and expansion of the Tibetan Plateau and the formation of a mountain–basin system rich in oil and gas resources. Fold-and-thrust belts, as important structural units accommodating compressive shortening, have long been a focal and challenging topic in structural geology research due to their complex structural styles and deformation histories. This study focuses on the Wuyitage area in the foothill belt of the southwestern Tarim Basin, and synthesizes previous investigations on the lateral variations in structural styles, detachment layers, and paleo-uplift distribution. ［**Methods**］Through the application of the discrete-element numerical simulation method, the coupled process between the basin and the mountain under the combined influence of multiple factors is explored. ［**Results**］The thrust belt in the study area exhibits significant

基金项目：新型油气勘探开发国家科技重大专项（2025ZD1400503）；中国石油天然气股份有限公司科技专项（2023ZZ14YJ05）；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科技项目（YF202401）；国家自然科学基金项目（42272271）

This research was financially supported by the National Science and Technology Major Project on New Oil and Gas Exploration and Development (Grant No. 2025ZD1400503), the PetroChina Science and Technology Major Project (Grant No. 2023ZZ14YJ05), the PetroChina Engineering Research Center of Ultra-deep Complex Oil and Gas Reservoir Exploration and Development (Grant No. YF202401), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42272271).

第一作者：王锦洲（1994—），男，工程师，主要从事油气田开发地质与构造精细解释研究。Email：wangjinz-tlm@petrochina.com.cn

通信作者：饶刚（1983—），男，研究员，从事构造变形分析与模拟研究。Email：raogangss@126.com

收稿日期：2026−03−23；**修回日期**：2026−05−24；**录用日期**：2026−05−25；**网络出版日期**：2026−05−29；**责任编辑**：吴芳

Received：2026−03−23；Revised：2026−05−24；Accepted：2026−05−25；Available Online：2026−05−29；Handling Editor：WU Fang

structural segmentation, with its geometry largely governed by regional detachment layers such as the Paleogene gypsum-salt layer. The thickness of the detachment layer directly influences fault slip efficiency and deformation intensity. A thicker detachment layer strengthens the detachment effect, promotes decoupling between the upper and lower strata, and facilitates the propagation of thrust structures toward the hinterland. In contrast, a thinner detachment layer weakens the detachment effect, making faulting more prone to occur along pre-existing basement faults. The presence of Ulagen and other paleo-uplifts have also played a dominant role in the development of thrust faults by reconstructing the regional stress field and the mechanical properties of the strata. [**Significance**] This study reveals the main controlling mechanism of the differential structural deformation styles in the Wuyitage area of the southern Tarim Basin, providing an important basis for better understanding the basin–range coupling and its potential resources and environmental effects in the study area.

Keywords: compressional deformation; numerical models; detachment layers; southwestern Tarim Basin

摘　要：新生代印度−欧亚板块之间的碰撞和持续汇聚导致青藏高原隆升和扩展，并在其周缘形成了富含油气资源的环青藏高原盆山体系。褶皱−冲断带作为吸收挤压缩短量的重要构造单元，因其复杂的构造样式和变形演化历史一直是构造地质学研究的热点与难点。文章聚焦塔西南山前乌依塔格地区，结合已有研究揭示的差异构造样式、滑脱层和古隆起分布特征，运用离散元数值模拟方法，探讨多因素共同作用下的盆山耦合过程。研究结果显示：乌依塔格地区逆冲构造带具有显著的构造分段性，其几何结构受古近系膏盐层等区域性滑脱层控制。滑脱层厚度差异直接影响断层滑移效率与变形强度，当滑脱层厚度增大时，滑脱作用增强，上下地层构造解耦更为显著，更易发育向后陆方向的反向逆冲构造；当滑脱层厚度减小时，滑脱作用变弱，更易于沿先存基底断层发生构造变形。乌拉根等古隆起通过重构区域应力场与地层力学性质，主导了逆冲断层的发育。此次研究揭示了塔西南山前乌依塔格地区差异构造变形样式的主控机理，为深入理解该地区盆地−山脉协同演化及其潜在资源环境效应提供了重要的科学依据。

关键词：挤压变形；数值模拟；滑脱层；塔里木盆地西南部

中图分类号：P313; P554　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0759−12

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2026037

0　引言

新生代印度−欧亚板块之间发生的碰撞和持续汇聚不仅导致了青藏高原的隆升和扩展，还在其周缘形成了巨型、富含油气资源的环青藏高原盆山体系(李本亮等, 2007; 贾承造等, 2013)。其中，褶皱−冲断带作为连接造山带和盆地之间的重要纽带，系统记录了大量与挤压构造作用相关的重要信息，同时控制了前陆盆地中油气资源的富集与运移(Burchfiel et al., 1999; Shaw et al., 2005; Chapman et al., 2017; Butler et al., 2018; Laborde et al., 2019)。由于褶皱−冲断带具有复杂的构造模型与运动学演化历史(李本亮等, 2007; 贾承造等, 2022)，其始终是构造地质学研究的重要焦点。近年来，塔西南山前地区深层油气勘探取得重大突破(王清华等, 2023, 2024; 杨海军等, 2025)，对该地区地下结构样式也有了较为清晰的刻画(伍秀芳等, 2004; 梁瀚等, 2014; 陈汉林等, 2018; Li et al., 2019, 2025; 杨少梅, 2021; 陈槟俊, 2022; 罗强等, 2025)。在南天山与帕米尔构造运动的共同作用下，乌依塔格构造带呈现出差异化的构造样式。

已有研究通过精细构造解析和物理模拟实验认为，古近系膏盐滑脱层的分布、同构造沉积以及古隆起等因素可能对山前构造样式产生了深远影响(Wang et al., 2013, 2016; 陈汉林等, 2018; Li et al., 2019; 杨少梅, 2021)。上述因素究竟是如何共同作用的，仍有待进一步通过模拟实验加以验证。近年来，随着计算机运算能力的显著提升，数值模拟方法已成为测试褶皱−冲断带构造变形过程和演化机理的常用手段(Morgan, 2015; 李长圣等, 2022; Li et al., 2022; 赵一霖等, 2025)。因此，此次研究以乌依塔格地区为研究区，结合地下岩芯描述揭示的古近系膏盐层、泥岩层的差异分布特征(徐斐等, 2020)，运用离散元数值模拟方法，深入讨论滑脱层厚度以及古隆起分布对塔西南山前乌依塔格构造带变形样式的协同控制作用。研究结果为进一步深化理解盆地−山脉协同演化及其资源效应提供了重要范例。

1　区域地质背景

研究区位于塔里木盆地西南坳陷、帕米尔造山

带北缘，在西昆仑山东侧呈弧形展布（图 1）。帕米尔造山带由多个大陆板块在古生代—中生代相继拼贴组成，并与南亚板块缝合（Li et al., 2019; 刘德明等，2024）。新生代时期，印度–欧亚板块碰撞促使帕米尔构造带向北推覆，进而形成弧形褶皱冲断构造带（陈槟俊，2022）。帕米尔北缘断裂由主帕米尔逆冲断裂（MPT）与帕米尔前缘逆冲断裂（PFT）构成，主要表现为正向逆冲活动（图 1）。主帕米尔断裂形成于晚渐新世—早中新世，在第四纪逐渐停止活动。帕米尔前缘逆冲断裂构造活动约始于 6～5 Ma，在区域构造图中呈东南东展布，在西侧由 3～5 条次级逆冲断层组成，向东南侧逐渐与主帕米尔逆冲断裂合并（Li et al., 2019）。受帕米尔北缘断裂系统新生代以来持续向北推覆的影响，研究区内沿着山前延伸方向发育了不同样式的褶皱–冲断构造。

在北部的 A-A′剖面（图 1），断层从基底滑脱面向上延伸，构成基底卷入式叠瓦构造，将地层切割为多个断块（图 2a），呈现出上盘强烈变形，下盘平缓变形的特征。往南，B-B′剖面表现为：深部基底构造总体上呈现叠瓦式展布，断层发育表现出收敛于古近系滑脱层的趋势，滑脱层的解耦作用增强，但仍有部分断层冲破至地表（图 2b）。背驮式盆地内发育巨厚的新生代沉积，与深部地层呈不整合接触。南部 C-C′剖面显示，1 套区域性滑脱层将地层分隔为上下 2 套叠置构造系统（图 2c），发育数条基底卷入断层，这些断层向上延伸并收敛于古近系滑脱层，同时上覆地层出现明显的反冲构造；随着挤压作用增强，断层沿该膏岩层持续滑脱并突破至地表。

塔里木盆地西南缘地层可划分为新生界、中生界、古生界及元古界（图 3），主要发育 2 套滑脱层和 3 套能干层，不同层位变形叠置，共同构成山前

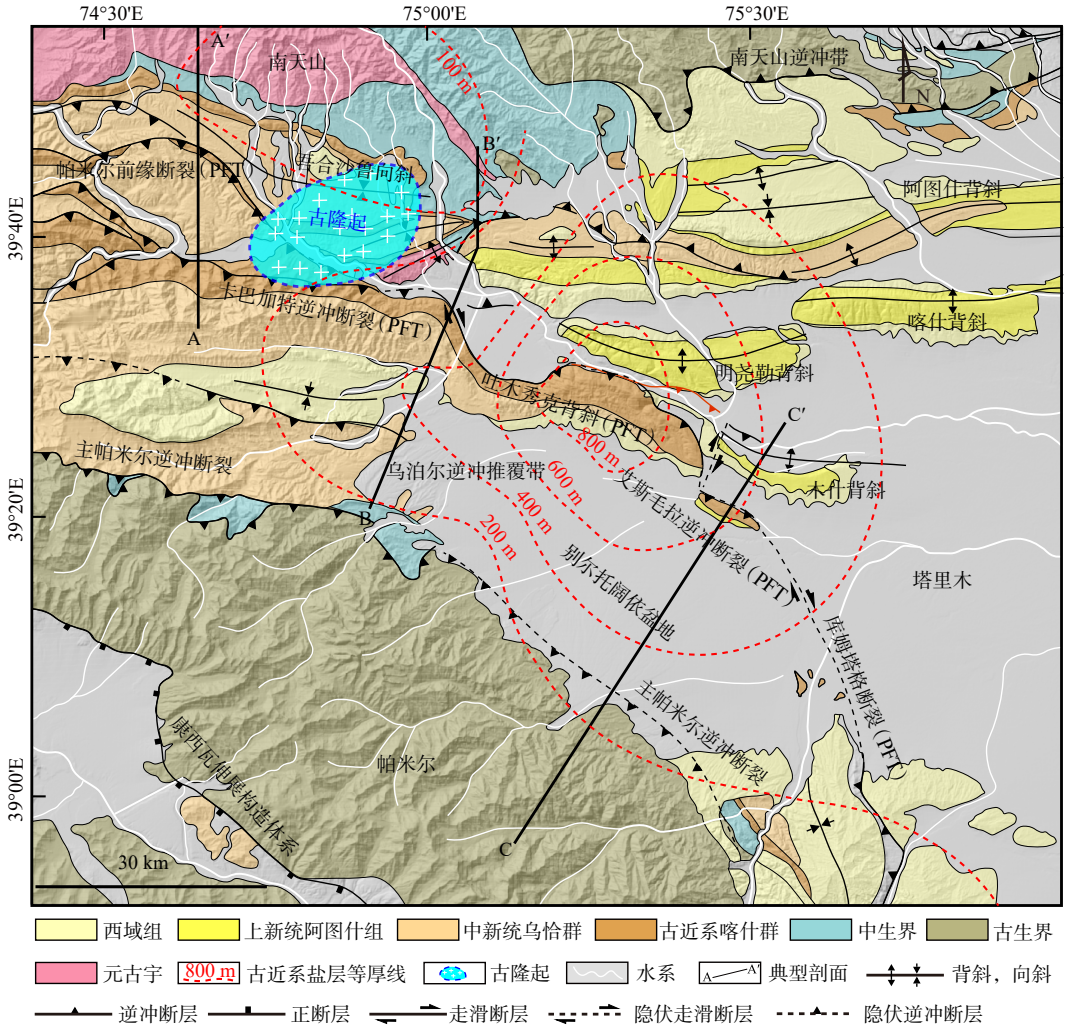
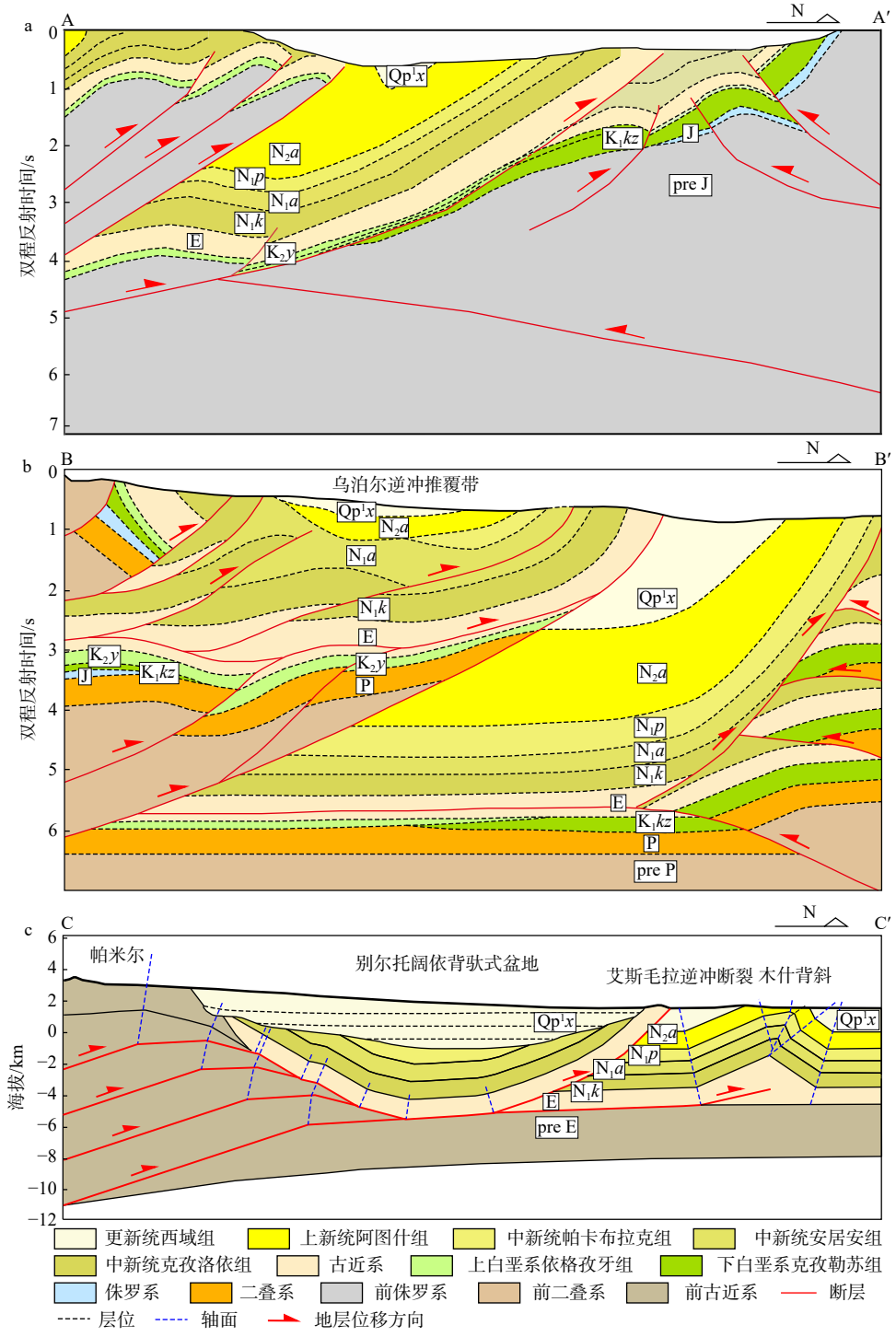


图 1　帕米尔东北缘–南天山对接带区域地质图（据 Li et al.，2025 修改）

Fig. 1　Regional geological map of the junction between the northeastern Pamir and the southern Tian Shan (modified after Li et al., 2025)



a—基底断层将上覆地层切割为多个断块(剖面位置见图 1 A-A′; 据杨少梅, 2021 修改); b—基底断层呈叠瓦式构造, 发育巨厚的新生代沉积(剖面位置见图 1 B-B′; 据杨少梅, 2021 修改); c—数条基底断裂收敛于滑脱层内, 上覆地层向后陆反冲作用强烈(剖面位置见图 1 C-C′; 据 Li et al., 2019 修改)

图 2 地质剖面图

Fig. 2 Geological cross-sections

(a) The strata are dissected into a series of fault blocks by basement faults (the section position is shown in Fig.1, line A–A′; modified after Yang, 2021). (b) Basement faults exhibit an imbricate pattern, accompanied by extremely thick Cenozoic sediments (the section position is shown in Fig.1, line B–B′; modified after Yang, 2021). (c) Several basement faults converge into the décollement layer, and the overlying strata are marked by intense back-thrusting towards the hinterland (the section position is shown in Fig.1, line C–C′; modified after Li et al., 2019)

构造变形带(孙统，2020)。其中，元古界由变质岩及新元古代裂谷期沉积岩构成(Cowgill et al., 2003; Cao et al., 2013; He et al., 2019)；上覆古生界以海陆交互相碎屑岩−碳酸盐岩沉积为主，其中寒武系—奥陶系发育灰岩、白云岩及石膏，下寒武统石膏层为区域性滑脱层(Li et al., 2025)，上古生界则主要由灰岩、泥岩和砂岩组成，其顶部的二叠系发育砾岩(王清华等，2023)。中生界岩性纵向变化显著，三叠系普遍缺失，自下而上呈现由陆相向海相沉积的演变(砾岩、砂岩、泥岩过渡为灰岩)。新生界以海相到陆相的沉积相转换为标志(Li et al., 2021)。此外，古近系喀什群记录了多期海侵−海退旋回，其底部的石膏层构成了塔里木盆地西南缘另一区域性滑脱层。

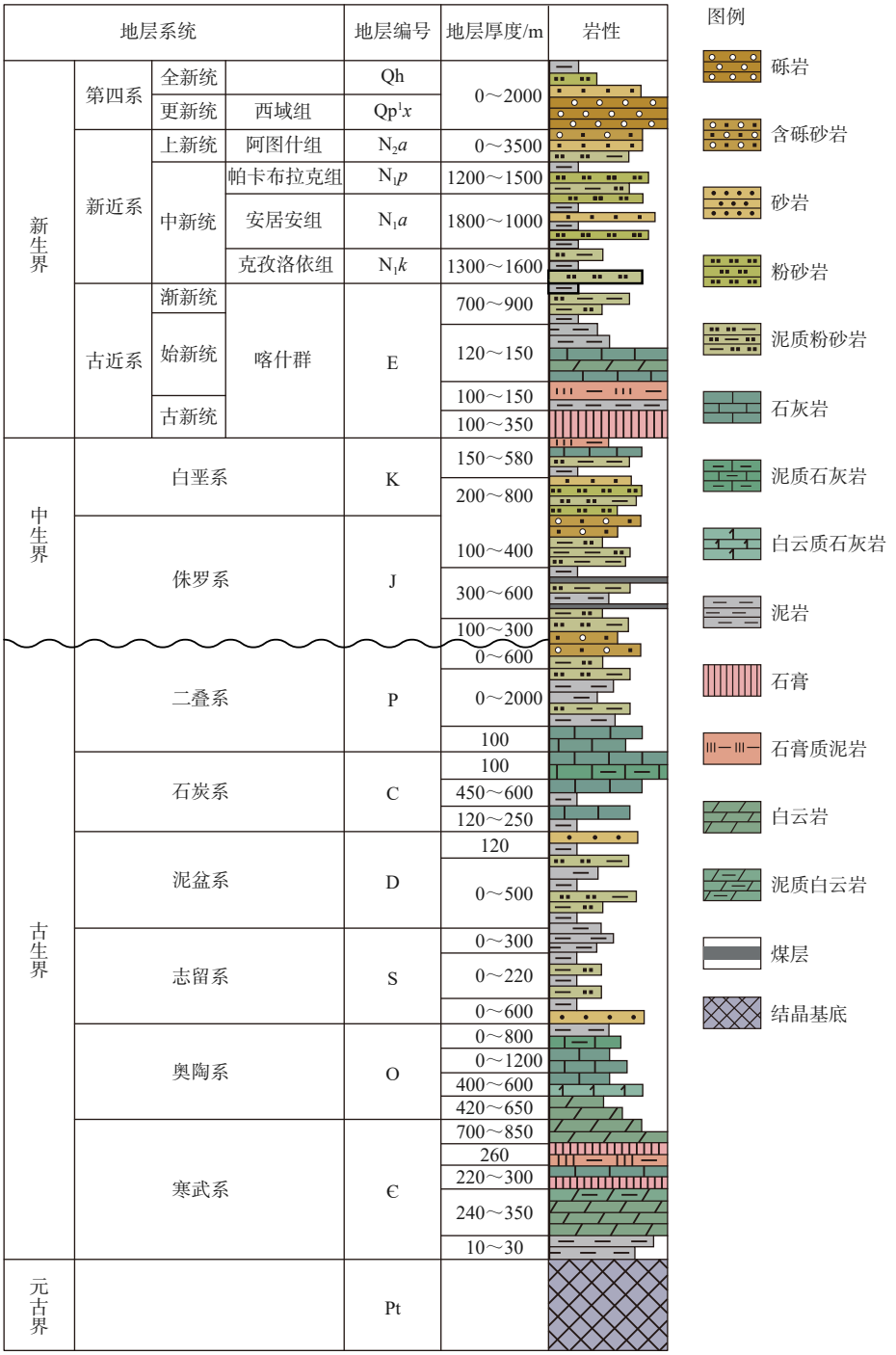


图 3　区域地层柱状图（据 Li et al.，2025 修改）

Fig. 3　Stratigraphic column of the study area (modified after Li et al., 2025)

2 实验方法与模型设置

2.1 离散元数值模拟实验

离散元法(Discrete Element Method, DEM)是由Cundal land Strack提出的一种用于颗粒介质力学的数值模拟方法(Cundall and Strack, 1979)。其核心原理在于将岩土介质离散为能够相互作用的颗粒单元,通过追踪单元之间的接触力学行为,实现对断层、褶皱等强变形地质过程的精细化模拟。在具体的计算流程方面,首先需要检索颗粒间的接触关系;接着采用Hertz-Mindlin接触模型(Morgan, 2015)来计算颗粒间的接触力;之后通过求解牛顿运动方程,更新颗粒在下一个时间步的空间位置;上述步骤循环迭代,直至完成预先设定的计算任务。近年来,众多学者运用离散元数值模拟方法,针对具有复杂演化历史的褶皱−冲断带,开展了关于其构造发育过程、地表过程及变形成因机制的研究,这为揭示该类构造的动态演化规律提供了重要支撑(李长圣等, 2022; Zhou et al., 2024; Liu et al., 2025; Ma and Wang, 2025; Yang et al., 2025)。

2.2 模型设置

此次研究依托李长圣(2019)研发的ZDEM(https://geovbox.com/en)离散元仿真平台,对乌依塔格地区构造变形特征和演化机制展开模拟。参考已有双轴实验结果,确定了实验模型的微观参数和宏观参数(Morgan, 2015; 李长圣, 2019)。通过控制颗粒间的黏结特性和摩擦系数,对脆性层和滑脱层(表1)的力学特性进行调控。初始模型由均质离散颗粒构成,这些颗粒的半径为60 m和80 m。参照实际地质剖面大小,将模型设置为总长度75.0 km、高9.0 km(图4),泊松比为0.2,局部阻尼系数为0.4。下部灰白色地层厚度为4 km,用于模拟中生界及以下地层,其强度设定为T2。依据地震剖面所呈现的断层数量和产状情况,于该地层中设置3条先存断层(红色),其摩擦系数为0.0,倾角为20°,间距为5 km。此外,参考已有野外地质调查和物理模拟实验的结果(Wang et al., 2016),在滑脱层下方设置了一个固定的椭圆形古隆起(黑色)。中间绿色地层为滑脱层,参考研究区实际地质情况,将其厚度分别设置为600 m、400 m和200 m。上部蓝灰色地层用于模拟古近系、新近系能干层,强度设定为T1。模型存在由固定颗粒组成的2个垂直侧壁和1个底壁。通过左侧墙以2 m/s的速率向右侧进行挤压产生形变,时间步长50 ms,重力加速度为9.8 m/s^2,该设置能够有效地模拟地质变形的准静态过程(李长圣, 2019)。挤压过程中设置同构造剥蚀,具体流程为:模型挤压2 km后开始剥蚀,之后每挤压1 km进行一次剥蚀,剥蚀通过删除距离顶部500 m的颗粒来实现。同沉积是在实验最后阶段通过沉积、剥蚀使地表填平的过程。模型总共挤压16 km。为了便于观察变形特征,模型中还设置了一系列不同颜色、具有相同黏结性能的标记层。

表1 离散元实验模型的参数设置

Table 1 Parameter settings for the discrete-element experimental models

模拟地层	密度/kg/m^3	摩擦系数	杨氏模量/Pa	剪切模量/Pa	抗拉强度/Pa	剪切强度/Pa
能干层T1	2500	0.3	2.0×10^8	2.0×10^8	1.0×10^7	2.0×10^7
能干层T2					2.0×10^7	4.0×10^7
塑性层	2200	0.0	—	—	—	—

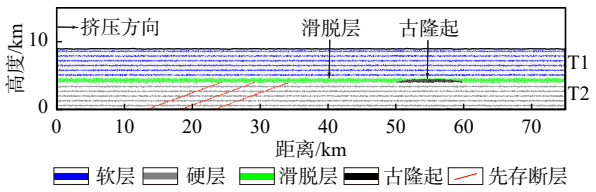


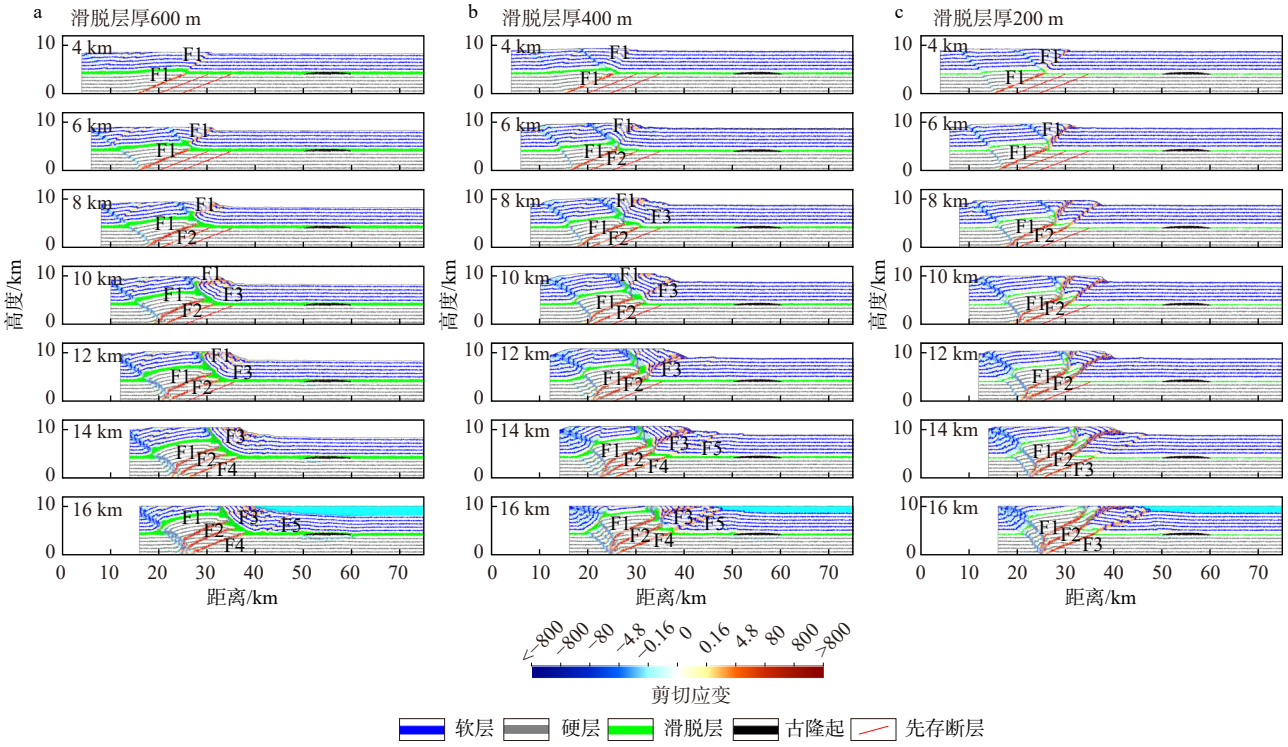
图4 模型设置

Fig. 4 Model setups

文章在综合分析地震剖面构造样式与运动学演化特征(图2)的基础上,围绕滑脱层厚度、古隆起两大变量开展数值模拟实验。实验设置三组不同的滑脱层厚度(实验1、实验2和实验3的滑脱层厚度分别为600 m、400 m、200 m),并通过实验4对比有无古隆起差异,重点分析古近系滑脱层厚度对上覆新近系、第四系构造变形样式的影响。此外,为便于有效地对比分析,还展示了数值模拟结果的变形应变云图。模型设计依据地震剖面中识别的构造特征及区域地层展布规律(图2),以确保与乌依塔格地区实际构造背景具有可比性。

3 实验结果

在实验1中,滑脱层的厚度为600 m(图5a)。为了便于描述,依据断层活动先后顺序,将其依次命名为F1—Fn。实验结果如下,缩短0~4.0 km时,先存断层活化形成F1,并向上突破至新生界。当缩



a—实验 1: 古近系滑脱层厚 600 m, 上覆地层向后陆发生明显反冲变形; b—实验 2: 古近系滑脱层厚 400 m, 上覆层不仅发育反冲构造, 而且基底先存断层突破至地表; c—实验 3: 古近系滑脱层厚 200 m, 模型上下地层呈现出明显的整体变形特征

图 5　不同滑脱层厚度的模拟实验结果图

Fig. 5　Simulation results of the models with different décollement layer thicknesses

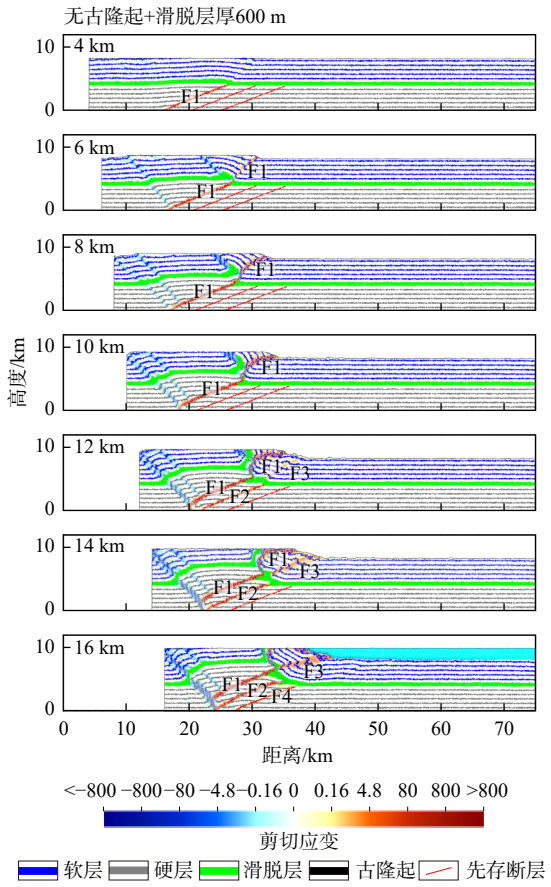
(a) Experiment 1: A 600-m-thick Paleogene décollement layer, with the overlying strata exhibiting prominent back-thrusting toward the hinterland; (b) Experiment 2: A 400-m-thick Paleogene décollement layer, with the overlying strata characterized by back-thrust structures, and with pre-existing basement faults breaking through to the surface; (c) Experiment 3: A 200-m-thick Paleogene décollement layer, with the upper and lower strata showing consistent deformation characteristics

短 4.0～6.0 km 时, 在滑脱层的解耦作用下, F1 断裂被反冲断层切断, 上覆地层同步发生抬升与剥蚀。当缩短量进一步增加至 8.0 km 时, 反冲作用更为强烈, 地层剥蚀量也随之增大。当缩短量为 8.0 km 时, 先存断层开始活化形成 F2, 并持续吸收缩短量。当缩短量达到 10.0 km 时, 上部新生代地层中形成 F3 断层, 该断层断距较小, 发育较为分散。当缩短量在 10.0～14.0 km 时, 先存断层活化形成 F4, 与此同时, F3 断层发育进一步集中。当缩短量为 16 km 时, 由于古隆起的阻挡作用, 上覆新生代地层中出现断层 F5, 同时发生同构造沉积和剥蚀。

在实验 2 中(图 5b), 将滑脱层的厚度设定为 400 m。当缩短量为 0～8.0 km 时, 其现象与实验 1 相似。当缩短量达到 10.0～12.0 km 时, 因为滑脱层厚度减薄, 先存断层 F2 向上延伸至新生代地层。与此同时, 在滑脱层的作用下, 促使反冲断层发育并错断 F2, 将位于上覆地层中的断层段命名为 F3。当缩短量达到 14.0～16.0 km时, 先存断层活化形成 F4, 并向上突破至地表, 滑脱层未出现明显的解耦作用, 这与实验 1 有所不同。

在实验 3 中, 将滑脱层厚度设定为 200 m。在前 6.0 km 的缩短过程中, 与实验 1 和实验 2 相似, 断层 F1 活动并向上突破(图 5c)。当缩短量达到 8.0～12.0 km 时, 先存断层 F2 开始活动并向上突破。当缩短量为 14.0～16.0 km 时断层 F3 开始活动并向上突破至地表。

在实验 4 中, 同样将滑脱层厚度设置为 600 m, 但并未设置古隆起, 以此来探究古隆起对褶皱–冲断带构造变形特征的影响(图 6)。当缩短量为 0～10.0 km 时, 断层发育与实验 1 类似, 都发育 F1。不同之处在于, 实验 1 的反冲作用更为强烈, 而实验 4 中则出现盐焊接现象(即滑脱层的上、下层直接接触)。当缩短量为 12.0～14.0 km 时, 先存断层活化形成 F2, 并向上传递至新生代地层中, 这与实



无古隆起时，模型发育指向后陆方向的反冲构造，但并未出现实验1中的前冲断层F5

图6 实验4模拟实验结果图

Fig. 6 Simulation results of Model 4

In the absence of a paleo-uplift, the model develops a backthrust structure oriented towards the hinterland, yet the F5 forethrust fault observed in Experiment 1 does not emerge.

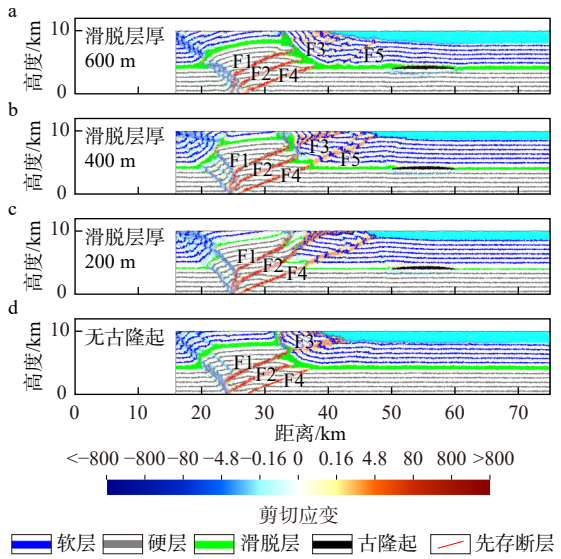
验1有所不同。与此同时，指向后陆方向的反冲作用也更为强烈，反冲断层随之切穿F2，将其上覆地层中的断层段命名为F3。当缩短量达到16.0 km时，先存断层活化形成F4。受缩短量持续增加与上覆地层抬升共同影响，F3与F1在空间上看似相连，但二者并未实际贯通。值得注意的是，在模型的变形前缘并未发育实验1中出现前冲断层F5。

4 讨论

褶皱–冲断带是大陆碰撞与造山过程中地壳缩短的核心构造单元。滑脱层发育以及古隆起的存在是调控褶皱–冲断带构造变形样式及动力学过程的关键地质要素。在乌泊尔地区，古近系阿尔塔什组膏盐层被普遍认定为区域主滑脱层，帕米尔前缘逆冲断裂体系主要沿该套膏盐层发生滑脱变形(陈汉林等，2010；Cheng et al., 2016; Wang et al., 2016)。此外，已有研究依据大量钻井及野外露头资料，重建了塔里木盆地西南缘古近系沉积格局，结果显示研究区主体发育海相及海陆过渡相沉积；其中，阿尔塔什组归属于潟湖相局限潟湖亚相，岩性以膏岩为主，夹有薄层碳酸盐岩(高华华等，2017；任泓宇等，2017；岳勇等，2017；徐斐等，2020)。而膏盐层的空间展布的差异，直接使得造山带沿走向呈现显著的构造变形分异特征(图2)。

文章通过不同滑脱层厚度与有无古隆起数值模拟实验表明：滑脱层厚度越大，滑脱解耦效应越显著，上覆地层更容易发育指向造山带后陆的反冲构造(图7a)。基底构造活动致使上覆地层遭受剧烈抬升与剥蚀，在卸载荷作用的影响下，断层更易于发生垂向位移。受强烈反冲作用的控制，背驮式盆地内乌恰群与阿图什组中的断层并未形成典型叠瓦式构造，而是在反冲作用影响下，分散分布于上覆地层之中(图7a中F3)；同时，发育数条基底卷入断层，这些断层向上发育并终止在古近系滑脱层内。值得关注的是，实验结果还显示出一条沿着古近系滑脱层往前传递、最终突破地表的前冲断层F5(图7a)，该断层将在后续详细讨论。此实验中的变形特征与C–C′剖面构造F3解释模式高度相符(图2c)。随滑脱层厚度减薄，古近系滑脱层的解耦作用明显减弱(图7b)，发育叠瓦式基底卷入式构造，呈现向上突破的变形特征。不过，滑脱层仍保留一定解耦效应，发育指向造山带后陆的反冲构造，这与B–B′剖面解释模式具有较强的一致性(图2b)。当滑脱层厚度仅为200 m时(图7c)，褶皱–冲断带发育多条基底卷入型断层，形成一系列叠瓦式逆冲构造，最终突破至地表，将整个地层切割为多个断块。该实验结果与A–A′剖面解释模式具有良好的对应关系(图2a)。已有研究表明，滑脱层厚度对褶皱–冲断带的变形样式起着重要的控制作用(Stewart, 1996；唐鹏程等，2018；刘恣君等，2024；Zhu et al., 2025)。此次研究结果表明，古近系滑脱层的厚度变化直接控制了乌依塔格逆冲构造带变形样式的分段差异性。较厚的膏盐层促进指向后陆方向的反冲断层发育，而厚度减小时则更易于沿着先存基底断层发生贯穿式变形。

已有研究表明，前冲断层的发育模式受多种因素的影响。例如，同构造沉积的尖灭会控制前冲断



a—滑脱层厚 600 m，上覆盖层变形明显受到反冲构造控制，存在前冲断层 F5；b—滑脱层厚 400 m，上覆层发育后陆方向反冲构造，基底先存断层部分突破至地表；c—滑脱层厚 200 m，基底断裂均突破至地表；d—无古隆起，滑脱层厚 600 m，总体构造样式与图 7a 类似，但未形成前冲断裂 F5

图 7　滑脱层厚度与古隆起模拟实验典型时刻对比图

Fig. 7　Comparison of detachment thickness and paleo-uplift at typical modelling time steps

(a) When the décollement layer thickness is 600 m, the deformation in the overlying strata is mainly characterized by back-thrust structures, and the frontal-thrust F5 develops; (b) When the décollement layer thickness is 400 m, the overlying strata develop back-thrust structures towards the hinterland, and pre-existing basement faults also penetrate to the surface; (c) When the décollement layer thickness is 200 m, all basement faults penetrate the surface; (d) When there is no paleo-uplift and the décollement layer thickness is 600 m, the overall structural style resembles that in Fig.7a, but the frontal thrust F5 is absent

层的位置，并且在前冲断层后续的演化阶段，其位置会固定下来（Wang et al., 2013）。当滑脱层呈非均一分布时，也出现了类似情况（Nilforoushan et al., 2012; 杨庚等, 2025），即前冲断层的位置受滑脱层尖灭点控制。当褶皱−冲断带内存在古隆起，且滑脱层覆盖在该先存古地貌格局之上时，会为上覆沉积物提供非均一的力学边界条件。在此情况下，断层优先沿着上覆滑脱层扩展延伸（Wang et al., 2016），并在古隆起上方突破形成前冲断层（图 7a 中 F5），该前冲断层与研究区内的艾斯毛拉逆冲断裂能很好地对应。当区域内没有古隆起发育时（图 7d），此类前冲断层不会发育，而且不利于指向造山带后陆方向的反冲构造形成，基底断裂更易向上突破至地表。如图 7d 所示，F3 断层的发育规模显著，而 F4 断层由于吸收的缩短量有限，发育程度相对较弱。研究结果显示，乌拉根古隆起的存在促使了滑脱层尖灭点的形成（图 7a），并最终对变形前缘带的艾斯毛拉逆冲断裂的发育起到了控制作用（图 1）。

研究区地处帕米尔造山带与南天山造山带的交汇之处，其构造变形样式受南北两侧构造作用的共同影响。文章着重聚焦于帕米尔山前的挤压变形样式，未对来自北侧南天山挤压作用的影响展开深入探究，这使得模拟结果右侧区域特征（图 7a、7b）与实测地质剖面（图 2a、2b）存在差异。模拟结果（图 7c）显示，在变形前缘并未发育类似木什背斜的构造（图 2c），推测其形成与来自北侧的挤压作用有关。

随着塔西南山前古生界油气勘探接连取得重大突破，此次研究揭示了研究区沿构造走向的差异变形规律与主控机制，对深入剖析油气成藏条件与资源分布规律具有重要指示意义。同时，文章揭示的区域滑脱层属性差异，也为解析挤压逆冲断层垂向分层、横向分带、纵向分段的变形特征，并评估区域未来强震风险提供了重要理论支撑（郑文俊等, 2025）。

5　结论

文章通过对区域构造样式的对比分析与离散元数值模拟研究，得到以下主要结论：

（1）数值模拟实验所呈现的变形特征与区域构造样式具有较高的吻合度，该结果表明滑脱层的厚度差异以及古隆起共同控制了塔西南乌依塔格地区截然不同的构造变形样式。

（2）滑脱层厚度与解耦效应正相关，直接控制着构造样式：当滑脱层厚度较大时，越容易发育指向后陆的反冲构造，以及较为分散的断层变形，基底断层终止于滑脱层；当厚度减小时，解耦效应减弱，构造样式过渡为基底卷入型构造与反冲构造共存；当厚度极小时，以基底卷入叠瓦式逆冲为主，断裂直接出露地表。

（3）古隆起通过改变上覆地层分布条件来控制变形：古隆起的存在为上覆沉积物营造了非均一的分布环境。若在上覆滑脱层形成尖灭点，便会直接控制变形前缘前冲断层的形成，同时也有助于指向

后陆的反冲构造的发育。

作者贡献声明： 王锦洲、饶刚负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；王彪、许晨昊共同参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；邓晓睿、方兵、罗强、徐仲博共同参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: WANG Jinzhou and RAO Gang conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; WANG Biao and XU Chenhao participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; DENG Xiaorui, FANG Bing, LUO Qiang, and XU Zhongbo were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BURCHFIEL B C, BROWN E T, DENG Q D, et al., 1999. Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China[J]. International Geology Review, 41(8): 665-700.

BUTLER R W H, BOND C E, COOPER M A, et al., 2018. Interpreting structural geometry in fold-thrust belts: why style matters[J]. Journal of Structural Geology, 114: 251-273.

CAO K, WANG G C, VAN DER BEEK P, et al., 2013. Cenozoic thermo-tectonic evolution of the northeastern Pamir revealed by zircon and apatite fission-track thermochronology[J]. Tectonophysics, 589: 17-32.

CHAPMAN J B, CARRAPA B, BALLATO P, et al., 2017. Intracontinental subduction beneath the Pamir Mountains: constraints from thermokinematic modeling of shortening in the Tajik fold-and-thrust belt[J]. GSA Bulletin, 129(11-12): 1450-1471.

CHEN H L, LI K, LI Y, et al., 2018. The segmentation deformation of the thrust belt in front of western Kunlun, western China, and its controlling factors[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(7): 1933-1942. (in Chinese with English abstract)

CHEN H L, ZHANG F F, CHENG X G, et al., 2010. The deformation features and basin-range coupling structure in the northeastern Pamir tectonic belt[J]. Chinese Journal of Geology, 45(1): 102-112. (in Chinese with English abstract)

CHEN J J, 2022. Cenozoic thrust deformation and genetic mechanism of the Southwestern Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

CHENG X G, CHEN H L, LIN X B, et al., 2016. Deformation geometry and timing of the Wupoer thrust belt in the NE Pamir and its tectonic implications[J]. Frontiers of Earth Science, 10(4): 751-760.

COWGILL E, YIN A, HARRISON T M, et al., 2003. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U - Pb geochronology: role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B7): 2346.

CUNDALL P A, STRACK O D L, 1979. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 29(1): 47-65.

GAO H H, HE D F, TONG X G, et al., 2017. Tectonic-depositional environment and proto-type basin evolution of the Cambrian in the Tarim Basin[J]. Geoscience, 31(1): 102-118. (in Chinese with English abstract)

HE B Z, JIAO C L, HUANG T Z, et al., 2019. Structural architecture of Neoproterozoic rifting depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics[J]. Science China Earth Sciences, 62(3): 529-549.

JIA C Z, CHEN Z X, LEI Y L, et al., 2022. Deformation mechanisms and structural models of the fold-thrust belts of central and western China[J]. Earth Science Frontiers, 29(6): 156-174. (in Chinese with English abstract)

JIA C Z, LI B L, LEI Y L, et al., 2013. The structure of Circum-Tibetan Plateau Basin-Range System and the large gas provinces[J]. Science China Earth Sciences, 56(11): 1853-1863.

LABORDE A, BARRIER L, SIMOES M, et al., 2019. Cenozoic deformation of the Tarim Basin and surrounding ranges (Xinjiang, China): a regional overview[J]. Earth-Science Reviews, 197: 102891.

LI B L, JIA C Z, PANG X Q, et al., 2007. The spatial distribution of the foreland thrust tectonic deformation in the Circum-Tibetan Plateau Basin and Range System[J]. Acta Geologica Sinica, 81(9): 1200-1207. (in Chinese with English abstract)

LI C S, 2019. Quantitative analysis and simulation of structural deformation in the fold and thrust belt based on Discrete Element Method[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)

LI C S, YIN H W, XU W Q, et al., 2022. Quantitative analysis and simulation of compressive tectonics based on discrete element method[J]. Geotectonica et Metallogenia, 46(4): 645-661. (in Chinese with English abstract)

LI C Y, CHEN H L, ZHANG F Q, et al., 2021. Cenozoic basin-filling evolution of the SW Tarim Basin and its implications for the uplift of western Kunlun: insights from (seismo)stratigraphy[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 562: 110149.

LI T, CHEN Z X, CHEN J, et al., 2019. Along - strike and downdip segmentation of the Pamir frontal thrust and its association with the 1985 M_W 6.9 Wuqia earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(9): 9890-9919.

LI Y, HUANG J L, QIU B, et al., 2025. Structural analyses of the Qimugen fold-and-thrust belt along the southwestern Tarim Basin (China): implications for tectonics of eastern Pamir and hydrocarbon exploration planning[J]. Journal of the Geological Society, 182(4): jgs2025-002.

LIANG H, WANG X, CHEN W, et al., 2014. Cenozoic deformation sequence of Hetian-Kekeya structural belt in the piedmont of West Kunlun

Mountains[J]. Geotectonica et Metallogenia, 38(1): 27-37. (in Chinese with English abstract)

LIU D M, WANG J, JIANG H, et al., 2024. Evolutionary geodynamics and remote effects of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 31(1): 154-169. (in Chinese with English abstract)

LIU J W, RAO G, BAI S, et al., 2025. Structural analysis and numerical modeling of multi-stage tectonic deformation in the Ziliujing anticline, SW Sichuan Basin, China: implications for deformation propagation in salt-bearing fold-and-thrust belts[J]. Tectonophysics, 908: 230760.

LIU Z J, FAN K Y, TU G Y, et al., 2024. Deformation characteristics of salt tectonics in the western part of the Kelasu structural belt in the Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 35(6): 988-999. (in Chinese with English abstract)

LUO Q, ZHAO Z W, LIU C, et al., 2025. Numerical simulation analysis of stacking structure deformation and stress in the Wuqia structural belt of the western South Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Geology, 60(5): 1259-1270. (in Chinese with English abstract)

MA H R, WANG M M, 2025. Structural control of induced seismicity in the Weiyuan anticline, southwestern Sichuan foreland thrust Belt, China[J]. Tectonics, 44(4): e2024TC008617.

MORGAN J K, 2015. Effects of cohesion on the structural and mechanical evolution of fold and thrust belts and contractional wedges: discrete element simulations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(5): 3870-3896.

NILFOUROUSHAN F, PYSKLYWEC R, CRUDEN A, 2012. Sensitivity analysis of numerical scaled models of fold-and-thrust belts to granular material cohesion variation and comparison with analog experiments[J]. Tectonophysics, 526-529: 196-206.

REN H Y, FU H, JI J, et al., 2017. Correlation of Cretaceous-Palaeogene sedimentary evolution in southwestern Tarim Basin and adjacent central Asia basins[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(3): 103-112. (in Chinese with English abstract)

SHAW J H, CONNORS C, SUPPE J, 2005. Seismic interpretation of contractional fault-related folds: an AAPG seismic atlas[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.

STEWART S A, 1996. Influence of detachment layer thickness on style of thin-skinned shortening[J]. Journal of Structural Geology, 18(10): 1271-1274.

SUN T, 2020. Structural analysis of the piedmont fault zone in southwestern depression of Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese with English abstract)

TANG P C, RAO G, LI S Q, et al., 2018. The effect of salt thickness on fold lateral linkage: a case study of the anticlines in the leading edge of the western Kuqa Fold and Thrust Belt, South Tianshan[J]. Acta Geologica Sinica, 92(3): 437-448. (in Chinese with English abstract)

WANG C Y, CHEN H L, CHENG X G, et al., 2013. Evaluating the role of syn-thrusting sedimentation and interaction with frictional detachment in the structural evolution of the SW Tarim basin, NW China: insights from analogue modeling[J]. Tectonophysics, 608: 642-652.

WANG C Y, CHENG X G, CHEN H L, et al., 2016. The effect of foreland palaeo-uplift on deformation mechanism in the Wupoer fold-and-thrust belt, NE Pamir: constraints from analogue modelling[J]. Journal of Geodynamics, 100: 115-129.

WANG Q H, YANG H J, LI Y, et al., 2023. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in Well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 28(4): 34-45. (in Chinese with English abstract)

WANG Q H, YANG H J, LI Y, et al., 2024. Major oil and gas discovery and significance of Well Yetan 1 in the peripheral Kekeya area in the piedmont of the southwestern Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 29(4): 1-16. (in Chinese with English abstract)

WU X F, LIU S, WANG X, et al., 2004. Analysis on structural sections in the Cenozoic Pamir-western Kunlun foreland fold-and-thrust belt[J]. Chinese Journal of Geology, 39(2): 260-271. (in Chinese with English abstract)

XU F, LU T Q, MA Q, 2020. Analysis and Study on Sedimentary Facies of Piedmont Paleogene in Southwest Tarim Basin[J]. Chemical Engineering Design Communications, 46(12): 195-196. (in Chinese with English abstract)

YANG G, CHEN Z X, 2023. A two-stage evolution model of the wedged-shaped structures superposed with strike-slip faulting for the Qimugen oroclines of the Southwest Tarim Basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 58(2): 347-378. (in Chinese with English abstract)

YANG G, CHEN Z X, LU X S, et al., 2025. Mechanics and analog modeling of the Huo-Ma-Tu thrust sheet in the southern Junggar Basin fold and thrust belt[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 8-23. (in Chinese with English abstract)

YANG H J, SUN D, QIU B, et al., 2025. Breakthrough and significance of Permian oil and gas exploration in Well Duwa1 of Kedong structural belt in the southwestern piedmont of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 46(11): 2013-2033. (in Chinese with English abstract)

YANG S M, 2021. Cenozoic convergence between the northeastern Pamir and the South Tianshan: insights from structural features and sedimentary records[D]. Hangzhou: Zhejiang University. (in Chinese with English abstract)

YANG W X, RAO G, TANG P C, et al., 2025. Discrete-element numerical simulations of thrust-related folding: insights into back-limb deformation[J]. Journal of Structural Geology, 197: 105442.

YUE Y, XU Q Q, FU H, et al., 2017. Reservoir-cap rock assemblage and sedimentary characteristics of Cretaceous-Paleogene in southwestern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 39(3): 318-326. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y L, SUN Y J, HOU G T, et al., 2025. The outward growth of the arcuate tectonic belt in the northeastern Tibetan Plateau: Insights from three-dimensional finite element numerical simulations[J]. Journal of Geomechanics, 31(3): 361-385. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, SUN X, YUAN D Y, et al., 2025. Active faults, seismic activity, and seismotectonic environments in the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. Journal of Geomechanics, 31(5): 1006-1029. (in Chinese with English abstract)

ZHOU C, HE J K, SU H, et al., 2024. Discrete element modeling of distal deformation propagation in thrust wedge and implications for early deformation on northern Tibetan and Iranian Plateaus[J]. Journal of Structural Geology, 184: 105150.

ZHU Y Z, LI C X, JIANG X Y, et al., 2025. Differential salt-related structur-

al deformation in the eastern segment of the Qiulitage fold and thrust belt, Kuqa Foreland Basin: evidences from seismic interpretation and numerical simulation analysis[J]. Journal of Structural Geology, 194: 105372.

附中文参考文献

陈汉林, 李康, 李勇, 等, 2018. 西昆仑山前冲断带的分段变形特征及控制因素[J]. 岩石学报, 34(7): 1933-1942.

陈汉林, 张芬芬, 程晓敢, 等, 2010. 帕米尔东北缘地区构造变形特征与盆山结构[J]. 地质科学, 45(1): 102-112.

陈橼俊, 2022. 塔西南新生代冲断构造变形及成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

高华华, 何登发, 童晓光, 等, 2017. 塔里木盆地寒武纪构造-沉积环境与原型盆地演化[J]. 现代地质, 31(1): 102-118.

贾承造, 陈竹新, 雷永良, 等, 2022. 中国中西部褶皱冲断带构造变形机制与结构模型[J]. 地学前缘, 29(6): 156-174.

贾承造, 李本亮, 雷永良, 等, 2013. 环青藏高原盆山体系构造与中国中西部天然气大气区[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1621-1631.

李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 等, 2007. 环青藏高原盆山体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律[J]. 地质学报, 81(9): 1200-1207.

李长圣, 2019. 基于离散元的褶皱冲断带构造变形定量分析与模拟[D]. 南京: 南京大学.

李长圣, 尹宏伟, 徐雯峤, 等, 2022. 基于离散元的挤压构造定量分析与模拟[J]. 大地构造与成矿学, 46(4): 645-661.

梁瀚, 汪新, 陈伟, 等, 2014. 西昆仑山前和田-柯克亚挤压构造带新生代变形时序及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 38(1): 27-37.

刘德民, 王杰, 姜淮, 等, 2024. 青藏高原形成演化动力机制及其远程效应[J]. 地学前缘, 31(1): 154-169.

刘恣君, 范坤宇, 涂国煜, 等, 2024. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带西部盐相关构造变形[J]. 天然气地球科学, 35(6): 988-999.

罗强, 赵振伟, 刘畅, 等, 2025. 南天山西段乌恰构造带堆垛构造变形及应力数值模拟分析[J]. 地质科学, 60(5): 1259-1270.

任泓宇, 傅恒, 纪佳, 等, 2017. 塔里木盆地西南地区与相邻中亚盆地白垩系-古近系沉积演化对比[J]. 沉积与特提斯地质, 37(3): 103-112.

孙统, 2020. 塔里木盆地塔西南坳陷山前断裂带构造解析[D]. 北京: 中国石油大学(北京).

唐鹏程, 饶刚, 李世琴, 等, 2018. 盐层厚度对褶皱拼接样式的影响: 以库车褶皱-冲断带西段前缘背斜带为例[J]. 地质学报, 92(3): 437-448.

王清华, 杨海军, 李勇, 等, 2023. 塔西南山前地区恰探1井石炭系-二叠系重大突破与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 28(4): 34-45.

王清华, 杨海军, 李勇, 等, 2024. 塔西南山前地区柯克亚周缘叶探1井油气勘探重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 29(4): 1-16.

伍秀芳, 刘胜, 汪新, 等, 2004. 帕米尔—西昆仑北麓新生代前陆褶皱冲断带构造剖面分析[J]. 地质科学, 39(2): 260-271.

徐斐, 陆廷清, 马青, 2020. 塔西南山前古近系沉积相分析与研究[J]. 化工设计通讯, 46(12): 195-196.

杨庚, 陈竹新, 鲁雪松, 等, 2025. 准南逆冲褶皱带霍-玛-吐逆冲岩席发育力学机制与模拟实验[J]. 地质力学学报, 31(1): 8-23.

杨海军, 孙迪, 邱斌, 等, 2025. 塔西南山前地区柯东构造带杜瓦1井二叠系油气勘探突破及意义[J]. 石油学报, 46(11): 2013-2033.

杨少梅, 2021. 帕米尔东北缘与南天山新生代对接过程: 基于构造特征与沉积记录[D]. 杭州: 浙江大学.

岳勇, 徐勤琪, 傅恒, 等, 2017. 塔里木盆地西南部白垩系—古近系沉积特征与储盖组合[J]. 石油实验地质, 39(3): 318-326.

赵一霖, 孙玉军, 侯贵廷, 等, 2025. 青藏高原东北缘弧形构造生长: 来自三维有限元数值模拟的启示[J]. 地质力学学报, 31(3): 361-385.

郑文俊, 孙鑫, 袁道阳, 等, 2025. 青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境[J]. 地质力学学报, 31(5): 1006-1029.