**引用格式：**景葫芦，王伟涛，刘康，等，2026. 东天山晚白垩世—新生代构造隆升与地貌演化[J]. 地质力学学报，32（3）：670−682. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025177

**Citation:** JING H L，WANG W T，LIU K，et al.，2026. Tectonic uplift and geomorphic evolution of the East Tianshan from the Late Cretaceous to the Cenozoic[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：670−682. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025177

# 东天山晚白垩世—新生代构造隆升与地貌演化

景葫芦[1,2]，王伟涛[2]，刘　康[2]，李志刚[2]，张逸鹏[2]，卢乐浚[1,2]，张培震[2]

JING Hulu[1,2]，WANG Weitao[2]，LIU Kang[2]，LI Zhigang[2]，ZHANG Yipeng[2]，LU Lejun[1,2]，ZHANG Peizhen[2]

1. 广东省地震局，广东 广州 510070；
2. 中山大学地球科学与工程学院，广东 珠海 519082

1. *Guangdong Earthquake Agency*, *Guangzhou* 510070, *Guangdong*, *China*;
2. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Sun Yat-Sen University*, *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*

## Tectonic uplift and geomorphic evolution of the East Tianshan from the Late Cretaceous to the Cenozoic

**Abstract:** ［**Objective**］The Tianshan is an intracontinental orogenic belt reactivated in the Cenozoic by far-field effects of the India-Asia collision. Its Cenozoic tectonic evolution is thus key to understanding intracontinental deformation mechanisms. ［**Methods**］Based on stratigraphic sedimentary characteristics and provenance tracing of a section on the northern margin of the Turpan Basin (south of the Bogda Shan), the Late Cretaceous to Cenozoic tectonic and geomorphic evolution of the East Tianshan and its adjacent region has been constrained. ［**Results**］Field investigations reveal that the Paleocene and lower Oligocene strata in this area consist predominantly of red mudstones, indicating a lacustrine environment and stable tectonic conditions. The uppermost Cretaceous and Eocene strata contain relatively thin conglomerate deposits with small clast diameters, suggesting slight tectonic uplift of the Bogda Shan. In contrast, the upper Oligocene to Pliocene strata are composed of extremely thick, coarse conglomerates, reflecting long-term and intense tectonic activity. Detrital zircon U-Pb ages show that, from the Late Cretaceous to the Oligocene, the northern Turpan Basin continuously received detrital material from the West Tianshan, implying low topographic relief of the Bogda Shan during this period. Since the Miocene, however, the Bogda Shan has become the primary sediment source, indicating its rapid tectonic uplift. ［**Conclusions**］In summary, the Bogda Shan remained tectonically stable with low relief during the Late Cretaceous to Oligocene. Since the late Oligocene, it has undergone intense deformation and rapid uplift, becoming the sole provenance area for the northern Turpan Basin. ［**Significance**］This study refines the Cenozoic tectono-geomorphic evolution of the East Tianshan, thereby contributing to a better understanding of the intracontinental deformation processes resulting from the India–Asia collision.

**Keywords:** East Tianshan; Turpan Basin; Cenozoic; zircon U-Pb; tectonic geomorphology

**摘　要：**天山是新生代以来受印度–欧亚板块碰撞远程效应影响而复活的陆内造山带，对天山新生代构造演化的研究，有助于揭示陆内变形的过程与动力学机制。文章基于东天山（博格达山）–吐鲁番盆地北缘的塔尔郎河东侧剖面，通过沉积特征分析和碎屑锆石物源示踪分析，限定了博格达山及其邻区晚白垩世—

**基金项目：**国家自然科学基金项目 (42030301，42302237，42572259)

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42030301, 42302237, and 42572259).

**第一作者：**景葫芦（1998—），男，博士，工程师，主要从事新构造和构造地貌演化研究。Email：jinghlu@alumni.sysu.edu.cn

**通信作者：**刘康（1995—），男，博士，主要从事构造变形和盆地分析研究。Email: liuk269@mail.sysu.edu.cn

**收稿日期：**2025−12−01；**修回日期：**2026−05−06；**录用日期：**2026−05−06；**网络出版日期：**2026−05−07；**责任编辑：**吴芳

Received：2025−12−01；Revised：2026−05−06；Accepted：2026−05−06；Available Online：2026−05−07；Handling Editor：WU Fang

新生代的构造地貌演化过程。研究结果显示，晚白垩世—渐新世期间博格达山整体构造相对稳定，仅发生小幅度隆升，地形起伏相对较低，吐鲁番盆地北缘接受来自西天山的侵蚀物质。晚渐新世以来，博格达山发生强烈变形并快速隆升，成为吐鲁番盆地的北部边界，为吐鲁番盆地北缘上渐新统—第四系地层提供了单一物质来源，代表了印度–欧亚板块碰撞的远程响应。

**关键词**：东天山；吐鲁番盆地；新生代；锆石 U-Pb；构造地貌

**中图分类号**：P313.2; P546　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2026)03−0670−13

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025177

## 0　引言

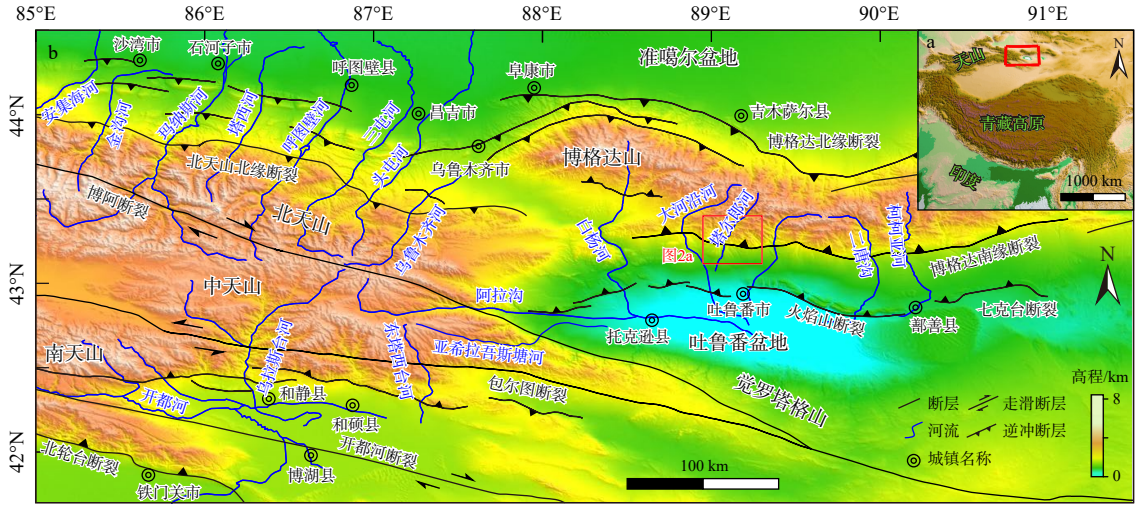
长达 2500 km 的天山是形成于古生代晚期的古老造山带(Xiao et al., 2013)。新生代以来，受印度–欧亚板块碰撞的远程效应影响，天山再次发生构造活化，和青藏高原一起吸收了印度与欧亚板块之间的汇聚变形，总缩短量达 200±50 km(Avouac et al., 1993)，导致现今天山最高海拔超过 7 km，并和两侧盆地之间形成数千米的巨大地形差异，成为中亚最大的陆内造山带之一。因此，天山中生代晚期—新生代的构造地貌演化过程记录了天山响应印度–欧亚板块碰撞的关键信息，是认识陆内变形过程的窗口之一。

大致沿乌鲁木齐—库尔勒一带(～88°E)，中国境内天山可划分为西天山和东天山。不少学者综合多种方法揭示，西天山在晚渐新世—早中新世开始隆升，并于中新世以来向两侧盆地扩展，形成一系列褶皱逆冲带(Hendrix et al., 1994; Lu et al., 2019; Wang et al., 2023; Yin et al., 2023; Jiang et al., 2024; Yu et al., 2025)。锆石物源示踪进一步表明，西天山在新生代早期隆升有限，继承了中生代晚期的低地貌格局，直至中新世南、北天山快速生长，阻断了从天山中部流向塔里木和准噶尔盆地的南北向河流(Yang et al., 2013; Xiang et al., 2019, 2024; Jia et al., 2020)。相比之下，东天山的新生代构造地貌演化仍存争议。早期的地貌学分析和热年代学研究认为区域的准平原化持续到新生代早期(Cunningham et al., 2003; Morin et al., 2019)，东天山的广泛隆升发生于 30～20 Ma(Wang et al., 2008)。但是，近年来围绕东天山新发表的磷灰石裂变径迹年龄指示东天山的快速剥露发生于中生代，尽管东天山在新生代构造再次复活，但剥露量有限(<2 km; Gillespie et al., 2017; Chen et al., 2020; He et al., 2022, 2023; 宋世达等, 2025)。碎屑锆石数据同样显示，博格达山在侏罗纪—白垩纪经历多阶段持续隆升，在晚白垩世和新生代一直保持为正地形地貌特征，吐鲁番盆地持续接受来自中天山的碎屑物质，南侧的觉罗塔格山则始终保持为准平原的地貌格局，因此东天山的现今整体地貌格局在中生代已经奠定(Ji et al., 2018; Fang et al., 2019; Shen et al., 2020)。造成上述差异认识的主要原因之一在于针对东天山中生代晚期—新生代构造地貌演化的数据相对有限，不足以展开充分的讨论。

在河流流域内，从附近山脉侵蚀并由河流搬运到盆地的沉积物可以基于物源示踪，准确记录山脉的剥露历史信息，从而为区域的地貌演化过程做出有效指示。对沉积物中保存的碎屑锆石进行单颗粒 U-Pb 测年，可以识别与其特征性的锆石年代群所对应的源区，是目前普遍应用的有效追溯物源的方法之一。博格达山是东天山西部的主要地貌构成单元，此次研究选择博格达山南侧、吐鲁番盆地北缘的塔尔郎河流域为研究区，通过分析上白垩统—中新统地层的锆石 U-Pb 年龄特征，结合沉积特征与潜在源区对比，揭示了东天山晚白垩世—新生代的构造地貌演化过程。

## 1　地质背景

天山位于中亚地区，呈近东西向展布，西起帕米尔高原以北，向东可延伸至甘肃与北山相接，南北两侧分别与塔里木盆地和准噶尔盆地相邻。天山最初由古生代时期分散在古亚洲洋的多个块体碰撞拼贴而成，并在此过程中广泛发育同碰撞阶段(约 490～370 Ma)和碰撞后阶段(约 320～250 Ma)的岩浆岩(Han et al., 2011; Zhang et al., 2016; 陈华勇等, 2025; 郭玉红等, 2026; 张岚峰等, 2026)。根据区域缝合带的位置分布，中国天山可划分为北天山、中天山–伊犁地体和南天山(图 1; Han et al., 2011; Xiao et al., 2013)。中生代期间，天山陆续经历多期构造




a—青藏高原及其周缘地形地貌图(红色矩形显示了图 1b 的位置); b—东、西天山地形地貌与构造–水系分布图(红色矩形内为研究区域)

图 1 区域地形地貌与构造分布图

Fig. 1 Regional topographic and geomorphic map with tectonic distribution.

(a) Topographic and geomorphic map of the Tibetan Plateau and its surrounding region (the red box shows the location of panel b); (b) Topographic and tectonic-drainage distribution map of the East and West Tianshan (the red rectangle delineates the study area)

演化后进入准平原化阶段,形成广泛分布的夷平面(Jolivet et al., 2010; Yang et al., 2013; Morin et al., 2019)。新生代以来,印度–欧亚板块碰撞的远程效应导致天山再次构造复活并强烈隆升,形成现今的构造地貌格局(图 1a; Hendrix et al., 1994; Ding et al., 2024; Zhao et al., 2025)。

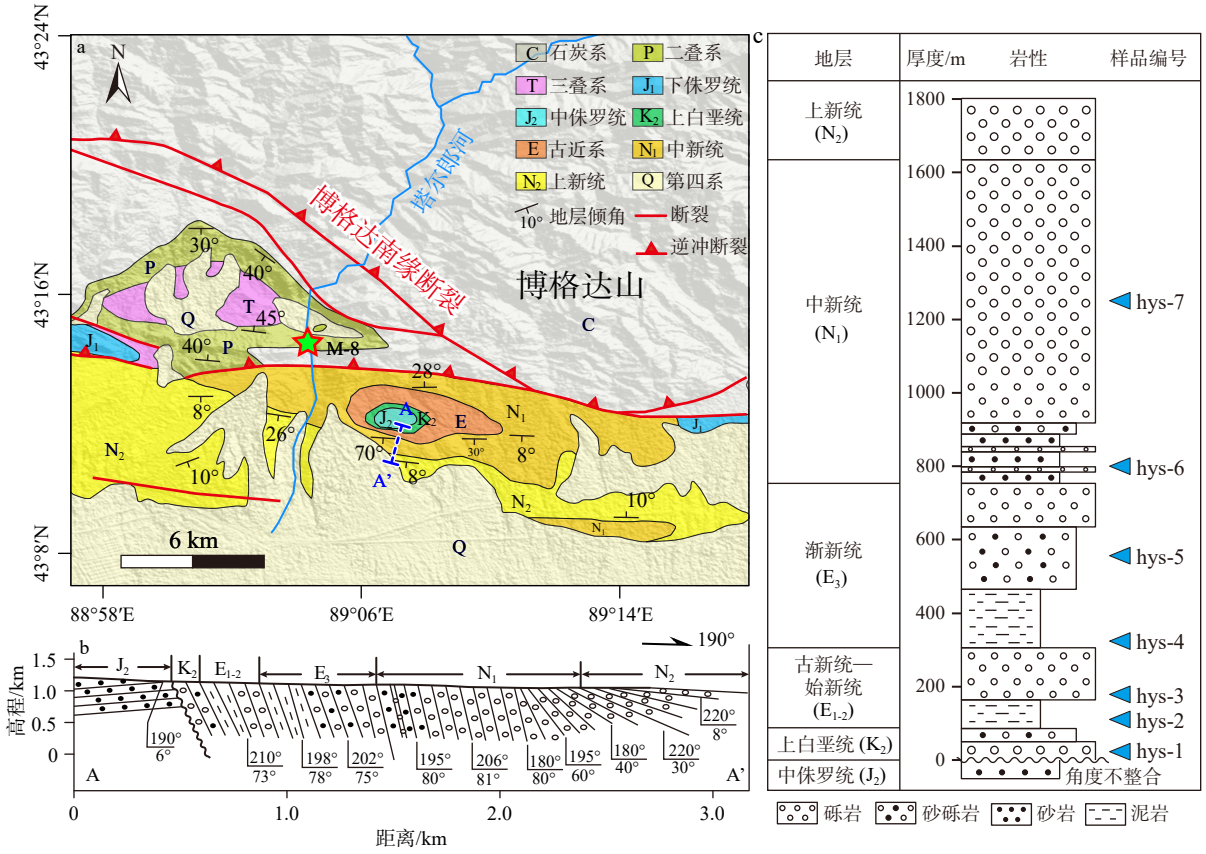
东天山是北天山的一部分,由南北两部分条带状山体组成,北部自西向东分别为高耸的博格达山和巴里坤–哈里克山,南部为觉罗塔格山,表现为低起伏的剥蚀夷平状态(图 1b)。吐鲁番盆地是分布在博格达山和觉罗塔格山之间的大型山间盆地,充填了超 3 km 厚的中生代和新生代陆相沉积物(Yang et al., 2021, 2023)。中二叠纪后,博格达山和吐鲁番盆地统一从裂谷环境进入陆内演化阶段,吐鲁番盆地开始接受陆相沉积并转换为坳陷盆地(Wang et al., 2018; 甄宇等, 2024)。中侏罗世—早白垩世,博格达山经历多期构造隆升,成为分隔东准噶尔盆地与吐鲁番盆地的地貌边界(Ji et al., 2018; Fang et al., 2019; Shen et al., 2020; Qin et al., 2022),之后吐鲁番盆地转入山间盆地沉积阶段(李文厚等, 1997; 柳益群等, 2001)。晚白垩世—新生代早期,博格达山的构造活动相对稳定(Cunningham et al., 2003),直至新生代印度–欧亚板块碰撞以来,博格达山再次强烈隆升(Wang et al., 2008; Song et al., 2023; Zhen et al., 2024a),并向吐鲁番盆地发生显著构造扩展(Zhen et al., 2024b; Jing et al., 2025)。

## 2 研究方法与采样

博格达山南侧山前(图 2a)发育中侏罗统及覆盖于其上的完整且连续的上白垩统—新生界地层剖面(塔东剖面; 图 2b),中侏罗统和上白垩统地层之间呈角度不整合接触(图 2c)。

其中,上白垩统地层由钙质胶结的砾岩和砂砾岩组成(图 3a); 古新统地层以红色泥岩为主(图 3b),夹薄层灰绿色粉砂岩; 始新统地层主要为砾径略小、分选磨圆差的砾岩(图 3c); 渐新统地层底部为紫红色泥岩夹灰绿色粉砂岩(图 3d),向上转变为砂砾岩和砾岩(图 3e); 中新统地层底部由砂岩夹砾岩组成,向上转变为一套砾径迅速增大的砾岩,分选磨圆极差(图 3f); 上新统地层和中新统地层顶部岩性保持一致(图 2c)。基于上述不同时代的岩性差异,此次研究从上白垩统—中新统地层中采集了共计 7 件样品(hys-1 至 hys-7)开展物源示踪(图 2c)。此外,为了与潜在物源区域进行充分有效对比,还采集了 1 件塔尔郎河的现代河砂样品(M-8; 图 2a)来确定博格达山的锆石 U-Pb 年龄特征,同时统计了北天山和中天山已发表的锆石 U-Pb 年龄特征。

自塔东剖面采集每件重约 5 kg 的原始样品。所有样品进行粉碎清洗处理后,通过磁选和密度法




a—博格达山南侧山前地质图（五角星和蓝色线段分别显示了塔尔郎河现代河砂 M-8 和塔东剖面 AA'的位置）；b—塔东剖面地层剖面图；c—塔东剖面地层柱状图及样品采集位置

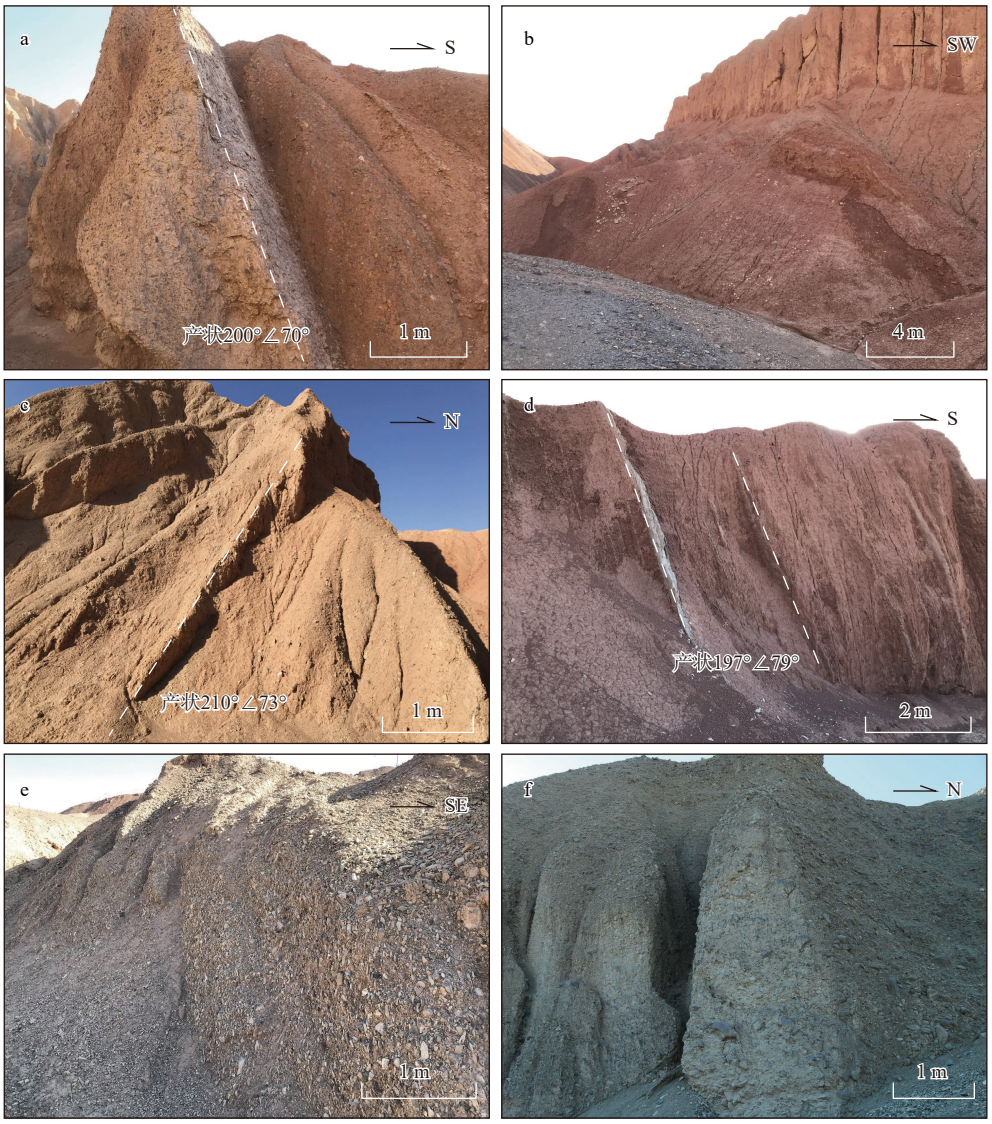
图 2　塔东剖面晚白垩世—新生代沉积特征及采样层位

Fig. 2　Sedimentary characteristics of the Late Cretaceous to Cenozoic strata in the Tadong Section and sampled horizons

(a) Geological map of the southern piedmont of the Bogda Shan (The five-pointed star and blue dashed line show the specific locations of the modern river sands M-8 from the Taerlang River and the Tadong Section A–A'); (b) Stratigraphic profile of the Tadong Section; (c) Stratigraphic column of the Tadong Section and sampled locations

分选出锆石颗粒。随后，将获取的每件样品的锆石颗粒放置于环氧树脂内进行抛光清洗，使得锆石表面完整露出从而完成制靶。在北京中科矿研检测技术有限公司对每件样品的锆石靶样进行了阴极发光（CL）图像（图 4）和透射光图像的拍摄以了解锆石颗粒的内部结构，帮助在 U-Pb 年龄测定过程中确定合适的激光剥蚀点位。

所有样品的锆石 U-Pb 年龄测定在南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）完成，实验利用由多接收电感耦合等离子体质谱仪（Neptune XT MC-ICP-MS）与 257 nm 激光剥蚀系统（NWRFemto$^{UC}$）联用构成的飞秒激光剥蚀–多接收电感耦合等离子体质谱仪（FSLA-MC-ICP-MS）开展了高空间分辨率定年分析。实验中采用 5 μm 的激光直径、3 Hz 的重复频率以及约 3.0 J/cm$^2$ 的能量密度。实验数据过程为，先进行 15 s 的背景信号采集，随后发射激光 30 s，最后进行信号的“清洗”监测。年龄分析以标准锆石 91500 作为主要校正物质，参考锆石 Plěsovice 作为质量控制物质。具体分析序列为：每完成 15 个未知样品分析，即进行一次 91500 标准锆石和一次 Plěsovice 参考锆石分析。其他具体测试步骤的详细信息可参见 Wu et al.（2020）。文中采用 Iolite 4 软件计算同位素比值和元素浓度以获取锆石的 U-Pb 年龄结果，对 1000 Ma 以上和以下的锆石颗粒分别采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 和 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄，且只采用和谐度（>1000 Ma 的锆石，指 $^{207}Pb/^{206}$ Pb 年龄与 $^{206}$ Pb/$^{238}U$ 年龄的比值；<1000 Ma 的锆石，指 $^{206}$ Pb/$^{238}U$ 年龄与 $^{207}Pb/^{235}U$ 年龄的比值）在 90%～110% 之间的锆石年龄。最后，利用 Isoplot R 程序（Vermeesch, 2018）绘制了所有样品的锆石 U-Pb 年龄直方图和相对概率密




a—上白垩统砾岩; b—古新统泥岩; c—始新统砾岩; d—渐新统泥岩; e—渐新统砾岩; f—中新统砾岩

图 3 塔东剖面不同时期地层主要沉积特征的野外照片

Fig. 3 Field photos of the main sedimentary characteristics of strata from different periods in the Tadong Section

(a) Upper Cretaceous conglomerate; (b) Paleocene mudstone; (c) Eocene conglomerate; (d) Oligocene mudstone; (e) Oligocene conglomerate; (f) Miocene conglomerate

度曲线。

## 3 结果

对采自塔东剖面上白垩统—中新统 7 个层位(图 2c)的碎屑砂岩样品,每件均选取 100 余颗锆石进行 U-Pb 定年,共获得 722 个有效年龄,其年龄分布如图 5 所示(图 5)。

样品 hys-1 采自上白垩统地层砾岩中的砂岩夹层,共获得 115 个有效谐和年龄。其中最年轻锆石为 250 Ma,最老锆石为 1542 Ma,概率密度曲线表现出 366～250 Ma 和 493～374 Ma 2 个年龄群,各分别占总定年颗粒的 64% 和 33%,对应峰值年龄分别为 310 Ma 和 420 Ma。

样品 hys-2、hys-3 采自古新统—始新统地层泥岩、砾岩中的砂岩夹层。其中,hys-2 获得 108 个有效谐和年龄,最年轻锆石为 207 Ma,最老锆石为 1101 Ma,概率密度曲线表现出 363～252 Ma 和 519～388 Ma 2 个年龄群,各分别占总定年颗粒的 73% 和 19%,对应峰值年龄分别为 320 Ma 和 440 Ma。hys-3 获得 109 个有效谐和年龄,最年轻锆石为 238 Ma,最老锆石为 2343 Ma,概率密度曲线表现出 385～238 Ma




黄色点及旁边的数字分别代表激光剥蚀位置和编号，白色数字表示锆石 U-Pb 年龄

图 4　样品的代表性锆石阴极发光（CL）图像

Fig. 4　Representative cathodoluminescence (CL) images of zircon for each sample

The yellow dots and the adjacent numbers respectively represent the laser ablation positions and their identification numbers, while the white numbers indicate the U-Pb ages of the zircons.

和 485～402 Ma 2 个年龄群，各分别占总定年颗粒的 81% 和 15%，对应峰值年龄分别为 300 Ma 和 400 Ma。

样品 hys-4、hys-5 采自渐新统砂岩地层。其中，hys-4 获得 106 个有效谐和年龄，最年轻的 3 个锆石为 40～38 Ma，表明地层沉积时代的上限，最老锆石为 2162 Ma，概率密度曲线表现出 367～265 Ma 和 502～399 Ma 2 个年龄群，各分别占总定年颗粒的 47% 和 27%，对应峰值年龄分别为 310 Ma 和 430 Ma。hys-5 获得 52 个有效谐和年龄。其中，最年轻锆石为 253 Ma，最老锆石为 2455 Ma，概率密度曲线表现出 329～253 Ma 和 499～350 Ma 2 个年龄群，各分别占总定年颗粒的 40% 和 27%，对应峰值年龄分别为 300 Ma 和 450 Ma。

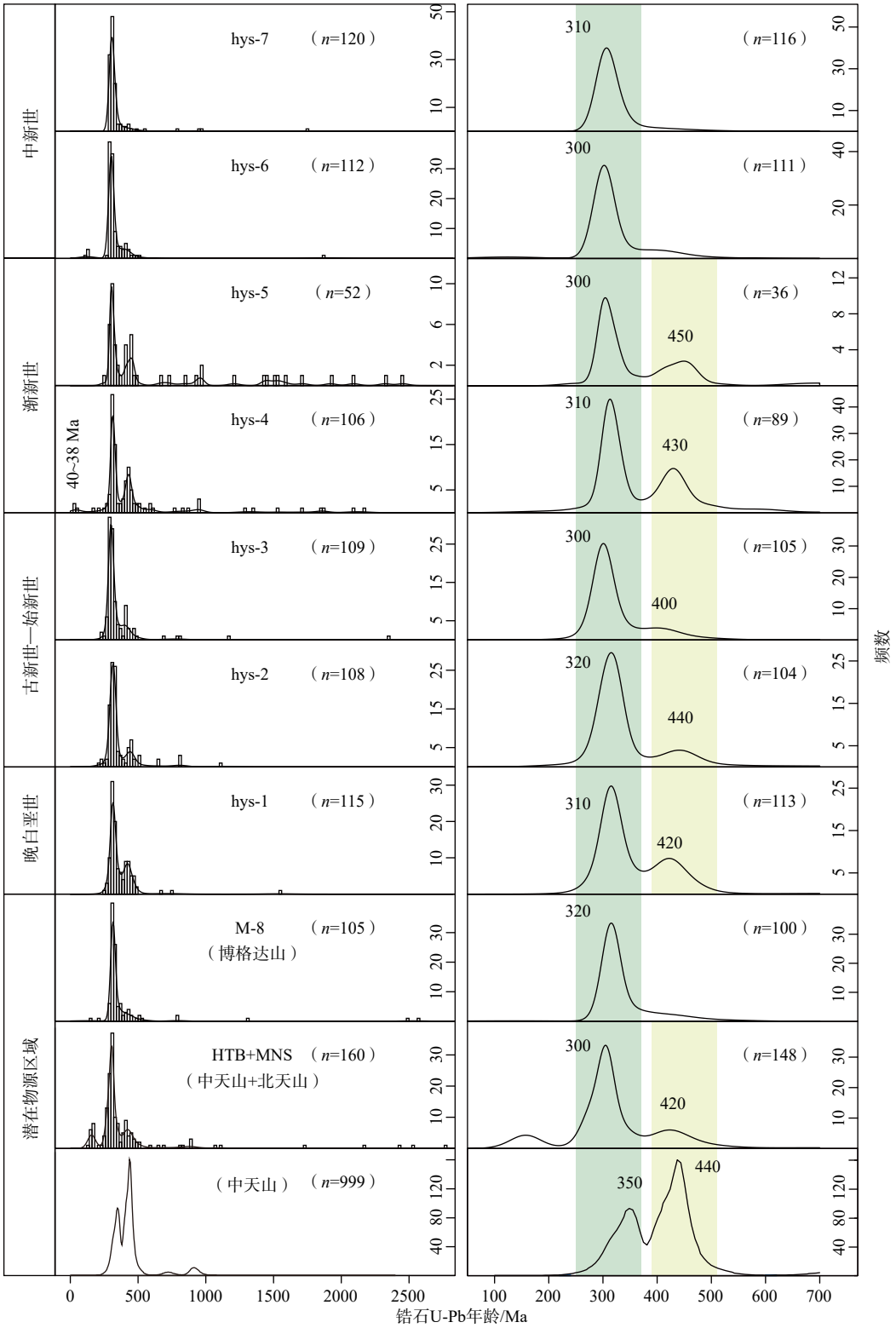
样品 hys-6、hys-7 采自中新统地层砾岩中的砂岩夹层。其中，hys-6 获得 112 个有效谐和年龄，最年轻锆石为 119 Ma，最老锆石为 1877 Ma，概率密度曲线表现出 347～277 Ma 的单个年龄群，占总定年颗粒的 79%，对应峰值年龄为 300 Ma。hys-7 获得 120 个有效谐和年龄，最年轻锆石为 285 Ma，最老锆石为 1754 Ma，概率密度曲线表现出 339～285 Ma 的单个年龄群，占总定年颗粒的 83%，对应峰值年龄为 310 Ma。

除上述来自地层的沉积岩样品外，样品 M-8 采集自从博格达山南侧流出的塔尔郎河现代河砂（图 2a），获得 105 个有效谐和年龄。其中最年轻锆石为 141 Ma，最老锆石为 2573 Ma，概率密度曲线表现为 368～289 Ma 的单个年龄群，占总定年颗粒的 77%，对应峰值年龄为 320 Ma。

## 4　讨论

### 4.1　沉积特征揭示的博格达山构造隆升

在塔东剖面，中侏罗统砂岩和上白垩统砾岩之间呈现明显的角度不整合接触（图 2c），区域上，柴




HTB—呼图壁河；MNS—玛纳斯河；*n*—锆石颗粒总数量

图 5 塔东剖面及其潜在物源区域的碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱图（中天山和北天山的数据引自 Ren et al.，2017；Xiang et al.，2019）

Fig. 5 Probability density plots of detrital zircon U-Pb ages for the Tadong Section and its potential provenance regions (Primary sources of data for the Central Tianshan and North Tianshan are Ren et al., 2017 and Xiang et al., 2019)

HTB—Hutubi River; MNS—Manas River; *n*—total number of zircon grains

窝铺盆地和博格达山北侧山前的侏罗系地层和新生界地层同样表现为角度不整合接触(方世虎等, 2007), 表明博格达山在该沉积间断期间经历了强烈的构造运动。博格达山北缘和吐鲁番盆地的古水流分析和物源示踪结果均表明, 博格达山在早侏罗世便具有正地形, 随后在中侏罗世以来经历了多阶段的显著隆升, 分隔了东准噶尔盆地和吐鲁番盆地并成为 2 个盆地的主要物源区域(Ji et al., 2018; Fang et al., 2019; Shen et al., 2020), 博格达山北麓的低温热年代学数据也支持了博格达山在晚侏罗世—早白垩世的快速隆升剥露过程(He et al., 2023)。晚白垩世以来, 塔东剖面沉积了一套钙质胶结的砾岩(图 2, 图 3), 这一特征沉积在吐鲁番盆地内部、西天山南北两侧的塔里木盆地和准噶尔盆地均有分布, Jolivet 等(2018)就这套钙质砾岩的成因及对区域构造地貌演化过程的指示意义做了详细介绍和分析。上白垩统地层呈砾岩性质表明在胶结成岩之前区域存在遭受明显侵蚀的结构化地形, 这与上述角度不整合代表的中侏罗世以来的博格达山多期次构造隆升相对应, 低温热年代学数据同样记录了东天山东部哈里克山晚白垩世的局部构造隆升过程(Gillespie et al., 2017)。而显著的钙质胶结则表明, 在晚白垩世后期, 区域已经处于季节性干旱环境且缺乏显著的侵蚀或沉积作用, 构造稳定, 且这一过程持续长达数百万年(Jolivet et al., 2018)。新生代早期以来, 以厚层钙质胶结砾岩为标志的沉积浓缩作用停止, 塔东剖面在古新世开始沉积一套湖相泥岩(图 2, 图 3), 与吐鲁番盆地内部火焰山的沉积相一致, 表明该时期吐鲁番盆地开始沉降并可能存在一大型湖泊, 其相邻的博格达山开始初步隆升。在始新世, 塔东剖面转向一套分选、磨圆较差的砾岩沉积, 反映博格达山隆升有所加剧, 然而, 该时期的山前砾岩沉积厚度较薄, 且吐鲁番盆地内部仍然以湖相泥岩沉积为主, 指示来自博格达山的粗碎屑物质的通量和搬运距离有限, 博格达山隆升幅度较弱, 吐鲁番盆地的湖泊系统仅在盆地北缘发生小规模萎缩。渐新世以来, 塔东剖面再次转向与吐鲁番盆地内火焰山的沉积相一致的近 200 m 厚的湖相泥岩沉积, 表明当时水动力作用与周边区域的构造活动性显著减弱, 吐鲁番盆地的湖泊范围再次扩展至博格达山前。晚渐新世—上新世, 塔东剖面彻底转向一套厚层砾岩沉积的磨拉石建造, 厚度超过 1 km, 尤其在中中新世以来, 塔东剖面的砾岩砾径显著增大, 分选磨圆极差, 并且上中新统至上新统地层的产状迅速减小, 表现为同构造沉积的生长地层(图 2, 图 3; Jing et al., 2025), 揭示博格达山发生强烈隆升且构造向山前扩展, 引起吐鲁番盆地北缘的变形和剥露, 吐鲁番盆地的湖泊快速向盆地内部萎缩, 并伴随盆地内火焰山地区葡萄沟组砾岩的出现, 湖泊范围已经由盆地中央继续向南迁移至现今的艾丁湖区域。

### 4.2　吐鲁番盆地北缘晚白垩世—新生代物源变化

现今地貌格局显示吐鲁番盆地主要被博格达山、西天山和觉罗塔格山所围限, 考虑到觉罗塔格山在中生代晚期以来无显著隆升并一直处于准平原状态(Ji et al., 2018; Sun et al., 2021), 此次研究排除其在晚白垩世—新生代作为吐鲁番盆地的主要物源区的可能性。此次研究测年结果清晰显示塔东剖面上白垩统—中新统地层的锆石 U-Pb 年龄主要以 380～270 Ma 和 500～390 Ma 2 个集群为特征(图 5), 与北天山和中天山内部基岩所记录的岩浆活动时代(470～260 Ma; Han and Zhao, 2018)以及博格达山内分布的双峰式火山岩活动时代(340～280 Ma; Wang et al., 2018)相对应, 表明西天山和博格达山是晚白垩世以来吐鲁番盆地北缘的潜在物源区。在上述定性分析的基础上, 为进一步量化和揭示西天山的锆石年龄组成, 文中对北天山山前玛纳斯河与呼图壁河的现代河砂以及中天山的新生代沉积物的锆石 U-Pb 年龄数据统计分析, 结果表明西天山的锆石 U-Pb 年龄主要以峰值年龄分别为 160 Ma、350～300 Ma 和 440～420 Ma 的三峰式年龄集群为特征(Ren et al., 2017; Xiang et al., 2019)。其中, 约 160 Ma 的年龄群对应于北天山的中生代岩浆活动, 而前寒武纪锆石则主要来源于中天山。而在塔尔郎河采集的现代河砂样品表明, 博格达山的锆石 U-Pb 年龄组成以 300～280 Ma 的单峰式集群为特征, 与西天山差异明显。因此, 通过锆石年龄组成特征可有效将西天山与东天山(博格达山)从吐鲁番盆地的潜在物源中区分(图 5)。晚白垩世—渐新世, 塔东剖面沉积物(hys-1 和 hys-5)的锆石整体显示以 320～300 Ma 和 450～400 Ma 为主并与西天山一致的双峰式年龄特征, 表明该时期除博格达山外, 西天山(尤其是中天山)一直为吐鲁番盆地北缘提供碎屑沉积, 博格达山整体构造稳定, 且地势低缓。值得注意的是, 始新统地层(hys-3)中 485～402 Ma 的锆石 U-Pb 年龄群百分比含量明显相对较低, 反映

博格达山在此期间发生了较小幅度的构造隆升，与该时期的砾岩沉积性质相对应。中新世以来，塔东剖面沉积物（hys-6 和 hys-7）锆石 U-Pb 年龄只表现为峰值年龄在 310～300 Ma 的年龄群，反映博格达山已经快速隆升成为吐鲁番盆地北缘的单一物源区。

### 4.3 晚白垩世—新生代区域构造地貌演化

综合塔东剖面的沉积特征变化和锆石 U-Pb 年龄揭示的物源变化，并结合已有的研究基础，文章讨论了博格达山、吐鲁番盆地及周边区域的构造地貌演化过程（图 6）。

中侏罗世—晚白垩世，博格达山发生了多期次隆升（Ji et al., 2018; Fang et al., 2019），变形强烈，以博格达山南北两侧的角度不整合为标志（图 2）（张传恒等, 2005）。晚白垩世—渐新世，博格达山和西天山开始进入强烈侵蚀后的构造稳定期，且处于半干旱—干旱化气候（Jolivet et al., 2018），以区域范围内的上白垩统钙质胶结砾岩沉积为标志，吐鲁番盆地内部和北缘的古近系地层均以泥岩沉积为主，表现为一大型湖泊体系，湖泊范围可一直延伸至博格达山南侧山前。该时期吐鲁番盆地北缘地层的锆石组成一直以古生代晚期年龄为主、前寒武纪年龄次之，表明吐鲁番盆地北缘地势较低，西天山为吐鲁番盆地北缘提供碎屑沉积，尤其前寒武纪年龄峰的存在表明中天山一直是吐鲁番盆地北缘的主要物源区之一。准噶尔盆地南缘在新生代早期整体表现为坳陷盆地特征，具有相对统一的沉积中心且以灰绿色湖相沉积为主，反映北天山在古近纪无显著构造活动（Zhou et al., 2020），此外，盆地南缘上白垩统—渐新统地层中来自中天山的前寒武纪锆石含量明显增加，而来自北天山的中生代锆石年龄组分减少并在新生代已经消失，进一步揭示北天山在晚白垩世以来已经表现为显著侵蚀、地势低矮、水系格局宽阔的地貌特征，并没有形成中天山与周围盆地之间的绝对地形屏障（Yang et al., 2013; Xiang et al., 2019; Jia et al., 2020）。在吐鲁番盆地内部，连木沁剖面的上白垩统地层同样以古生代晚期和前寒武纪锆石为主，但仍然存在少量比例的中生代锆石，反映存在由中天山流经低矮的北天山并汇入吐鲁番盆地的古水系（Fang et al., 2019）。因此，此次研究认为在新生代早期，博格达山和西部的北天山地貌低缓，中天山可通过宽阔水系与准噶尔盆地南缘和吐鲁番盆地的湖泊相连接。需要注意的是，博格达山在始新世发生了小幅度的构造隆升，导致吐鲁番盆地北缘沉积表现为由泥岩转向砾岩的反向沉积序列，且前寒武纪锆石的含量明显减少，即来自博格达山的碎屑物质相对增加，吐鲁番盆地的湖泊发生一定萎缩，退出塔东剖面所在的北部区域，该阶段地貌演化与低温热年代学数据的反演结果所揭示的博格达山新生代初期（>40 Ma）隆升阶段相对应（沈传波等, 2006; Wang et al., 2008; Jiao et al., 2021）。

晚渐新世—中新世，博格达山发生了强烈且持续的构造隆升并引起吐鲁番盆地北缘的剥露和地势升高，吐鲁番盆地北缘彻底转变为砾岩堆积的磨拉石建造并几乎只接受来自博格达山的单一碎屑物质供给，表现为以古生代晚期年龄为主的单峰式锆石年龄分布特征，前寒武纪锆石几乎消失。同时湖泊范围向吐鲁番盆地内部迅速缩小并向火焰山南侧迁移，以吐鲁番盆地内部最终过渡为砾岩主导

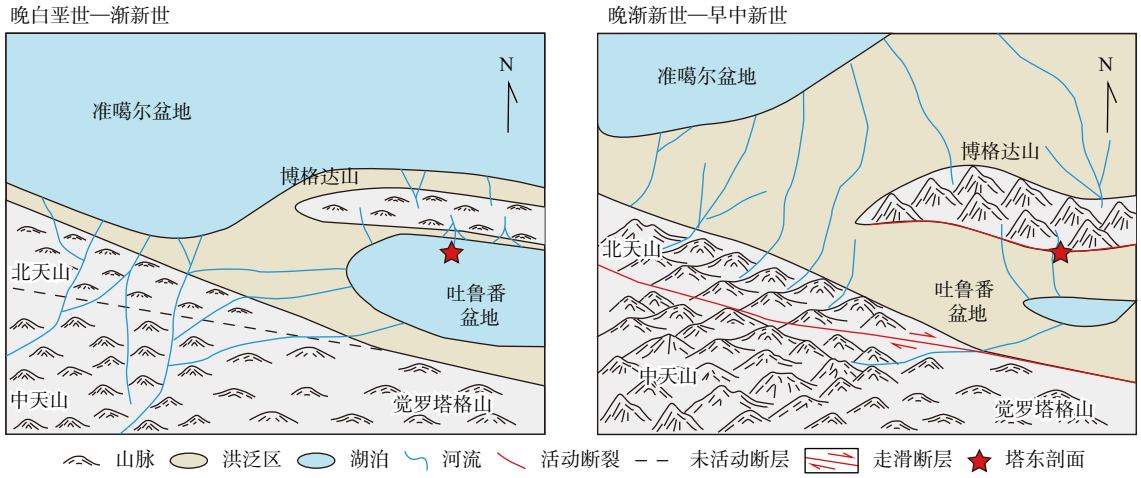



图 6 吐鲁番盆地及其周缘区域晚白垩世—新生代构造地貌演化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the Late Cretaceous to Cenozoic tectonic landform evolution in the Turpan Basin and its surrounding regions

的河流相沉积为标志(邓起东等, 2000)。在准噶尔盆地南缘, 上渐新统—第四系地层的碎屑锆石年龄特征揭示北天山在该沉积时期已经开始隆升形成中天山和准噶尔盆地之间的地形屏障, 该时期沉积到盆地内的中生代和前寒武纪锆石主要是北天山山前中生代地层被抬升剥露而导致的碎屑物质再循环沉积的结果(Yang et al., 2013; Xiang et al., 2019; Jia et al., 2020; Zhao et al., 2020), 这与低温热年代学数据和生长地层分析所揭示的北天山的快速剥露及山前褶皱逆冲带的发育过程一致(Hendrix et al., 1994; Lu et al., 2019; Yu et al., 2022)。在吐鲁番盆地内部, 已发表的 2 个中新统地层样品的锆石年龄组成以前寒武纪年龄为主, 古生代年龄次之, 且不存在中生代年龄(Fang et al., 2019), 这一特征表明: 第一, 北天山山前被剥露的中生界地层的碎屑物质并没有被输送到吐鲁番盆地, 即从北天山北部汇入吐鲁番盆地内的水系已经关闭, 准噶尔盆地南缘在晚渐新世以来的沉积中心向西迁移也不支持北天山山前东流水系的存在(Zhou et al., 2020); 第二, 吐鲁番盆地内部的大部分沉积物直接来自中天山, 且更可能通过类似现今的阿拉沟等水系, 经托克逊地区输送至吐鲁番盆地内部(图 1), 但是难以到达吐鲁番盆地北缘, 进一步指示吐鲁番盆地北缘已经发生变形和剥露, 地势相对较高, 吐鲁番盆地的沉积中心向盆地中部收拢。区域的低温热年代学结果进一步支持了上述地貌演化过程: 基于大量磷灰石裂变径迹数据的热历史模拟揭示博格达山在 30～20 Ma 发生了最为显著的整体隆升(Wang et al., 2008), 磷灰石(U-Th)/He 数据及同构造沉积的生长地层(图 2)共同揭示博格达山南侧山前构造在早中新世(～20 Ma)已经扩展到吐鲁番盆地北缘, 导致石炭系及以上地层被快速剥露至地表形成山前第一排构造带, 随后, 山前构造在晚中新世(～10 Ma)进一步向南显著扩展, 引起吐鲁番盆地北部和内部侏罗系及以上地层的快速剥露, 从而形成山前包括塔东剖面在内的第二排构造带和吐鲁番盆地中央的火焰山构造带(Jing et al., 2025)。博格达山向吐鲁番盆地的三阶段构造扩展及剥露过程与此次研究揭示的博格达山在晚渐新世以来持续隆升、吐鲁番盆地北缘地势抬高、湖泊沉积范围向吐鲁番盆地中部快速收缩且最终南移至艾丁湖区域的地貌演化一致。总体而言, 此次研究认为东天山(博格达山)及其周缘地区在新生代以来经历了显著的构造地貌演化过程, 现今的地貌格局从晚渐新世—早中新世开始初步发展, 并伴随晚中新世塔东剖面所在的博格达山前第二排构造带及吐鲁番盆地中部火焰山构造带的隆升剥露而基本形成。同时, 此次研究结果不支持东天山在新生代剥露十分有限的假说(Gillespie et al., 2017; He et al., 2023), 而是充分表明了其在晚渐新世—早中新世以来发生强烈的构造活动与地壳缩短, 这与西天山获得的普遍认识一致, 代表了对印度–欧亚板块碰撞的远程响应。

## 5　结论

通过对博格达山南侧、吐鲁番盆地北缘塔东剖面上白垩统—新生界地层开展沉积特征分析与碎屑锆石物源示踪研究, 主要获得以下结论:

(1)吐鲁番盆地北缘上白垩统—渐新统为湖相泥岩与冲积相砾岩交替沉积, 反映博格达山整体构造稳定, 仅始新世发生小幅度隆升; 晚渐新世以来发育>1 km 厚的粗砾岩磨拉石建造, 指示博格达山发生强烈构造隆升。

(2)锆石 U-Pb 年龄特征显示, 吐鲁番盆地北缘晚白垩世—渐新世以西天山(中天山和北天山)为主要物源, 中新世以来转为博格达山单一物源, 晚渐新世—早中新世是物源彻底转换的关键时期。

(3)博格达山晚渐新世—早中新世的强烈隆升是印度–欧亚板块碰撞应力向中亚陆内传递的远程响应, 东天山现今的构造地貌格局自此开始发展并在晚中新世基本定型。

(4)研究表明东天山晚渐新世以来发生了显著的构造隆升与地壳缩短, 并非仅经历“有限的新生代剥露”, 为天山陆内造山带的构造演化提供了新的沉积学证据。

**作者贡献声明：** 景葫芦、刘康负责总体构思、数据管理和审阅编辑; 景葫芦同时负责初稿写作; 王伟涛、刘康负责方法论; 王伟涛、张培震负责获取资助; 景葫芦、刘康、李志刚、张逸鹏、卢乐浚参与调查研究; 景葫芦、王伟涛、刘康、李志刚、张培震参与审阅编辑。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

**Author's Contributions:** JING Hulu and LIU Kang conceived the study and performed data curation; JING Hulu also drafted the manuscript; WANG Weitao and LIU

Kang designed the research methodology; WANG Weitao and ZHANG Peizhen acquired funding; JING Hulu, LIU Kang, LI Zhigang, ZHANG Yipeng, and LU Lejun conducted the investigations; JING Hulu, WANG Weitao, LIU Kang, LI Zhigang, and ZHANG Peizhen reviewed and edited the manuscript. 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


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[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B4): 6755-6804.

CHEN H Y, XIAO B, MA H D, et al., 2025. The Paleozoic episodic mineralization model in the eastern Tianshan Region, Central Asian Orogenic Belt[J]. Science China Earth Sciences, 68(8): 2511-2526.

CHEN Y, WANG G C, KAPP P, et al., 2020. Episodic exhumation and related tectonic controlling during Mesozoic in the eastern Tian Shan, Xinjiang, northwestern China[J]. Tectonophysics, 796: 228647.

CUNNINGHAM D, OWEN L A, SNEE L W, et al., 2003. Structural framework of a major intracontinental orogenic termination zone: the easternmost Tien Shan, China[J]. Journal of the Geological Society, 160(4): 575-590.

DENG Q D, FENG X Y, ZHANG P Z, et al. , 2000. Active tectonics of the Tianshan[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

DING Y, SHEN T Y, WANG G C, et al., 2024. Sedimentary and heavy mineral records for the Oligocene-Miocene exhumation of the easternmost Tianshan[J]. Journal of Earth Science, 35(2): 449-461.

FANG S H, SONG Y, JIA C Z, et al., 2007. The Mesozoic-Cenozoic clastic composition of Bogda area, Xinjiang: implications on the evolution of Basin-range pattern[J]. Acta Geologica Sinica, 81(9): 1229-1237. (in Chinese with English abstract)

FANG Y N, WU C D, WANG Y Z, et al., 2019. Topographic evolution of the Tianshan Mountains and their relation to the Junggar and Turpan Basins, Central Asia, from the Permian to the Neogene[J]. Gondwana Research, 75: 47-67.

GILLESPIE J, GLORIE S, JEPSON G, et al., 2017. Differential exhumation and crustal tilting in the easternmost Tianshan (Xinjiang, China), revealed by low-temperature Thermochronology[J]. Tectonics, 36(10): 2142-2158.

GUO Y H, YANG H, TAN Z, et al., 2026. The collage process of the western end of the Carboniferous-Permian Bogda intra-oceanic arc in North Tianshan and the Yili-Central Tianshan island Arc[J]. Xinjiang Geology, 44(1): 24-37. (in Chinese with English abstract)

HAN B F, HE G Q, WANG X C, et al., 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan–Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the northern Xinjiang, western China[J]. Earth-Science Reviews, 109(3-4): 74-93.

HAN Y G, ZHAO G C, 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. Earth-Science Reviews, 186: 129-152.

HE Z Y, WANG B, GLORIE S, et al., 2022. Mesozoic building of the eastern Tianshan and East Junggar (NW China) revealed by low-temperature thermochronology[J]. Gondwana Research, 103: 37-53.

HE Z Y, GLORIE S, WANG F J, et al., 2023. A re-evaluation of the Meso-Cenozoic thermo-tectonic evolution of Bogda Shan (Tian Shan, NW China) based on new basement and detrital apatite fission track thermochronology[J]. International Geology Review, 65(12): 2093-2112.

HENDRIX M S, DUMITRU T A, GRAHAM S A, 1994. Late Oligocene-Early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: an Early effect of the India-Asia collision[J]. Geology, 22(6): 487-490.

JI H J, TAO H F, WANG Q, et al., 2018. Early to Middle Jurassic tectonic evolution of the Bogda Mountains, northwest China: evidence from sedimentology and detrital zircon geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 153: 57-74.

JIA Y Y, SUN J M, LÜ L X, 2020. Late Cenozoic tectono-geomorphologic evolution of the northern Tian Shan mountain range: Insight from U-Pb ages of detrital zircon grains from the Upper Oligocene-Quaternary sediments of the southern Junggar Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 194: 104286.

JIANG Y T, LU H H, YANG R, et al., 2024. Two-stage exhumation, uplift, and basinward propagation of the Tian Shan during the Late Cenozoic[J]. Earth-Science Reviews, 256: 104868.

JIAO R H, YUAN X P, BRAUN J, et al., 2021. Thermo-kinematic modeling of the Cenozoic uplift of the Bogda Shan, northwest China[J]. Tectonophysics, 816: 229031.

JING H L, WANG W T, ZHANG P Z, et al., 2025. Multi-stage uplift and propagation of the Chinese East Tianshan during the Cenozoic[J]. Tectonics, 44(2): e2024TC008666.

JOLIVET M, DOMINGUEZ S, CHARREAU J, et al., 2010. Mesozoic and Cenozoic tectonic history of the central Chinese Tian Shan: reactivated tectonic structures and active deformation[J]. Tectonics, 29(6): TC6019.

JOLIVET M, BARRIER L, DAUTEUIL O, et al., 2018. Late Cretaceous-Palaeogene topography of the Chinese Tian Shan: new insights from geomorphology and sedimentology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 499: 95-106.

LI W H, ZHOU L F, LIU Y Q, et al., 1997. Evolution of sedimentary framework and environment of Turpan-Hami Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 18(2): 135-141. (in Chinese with English abstract)

LIU Y Q, YUAN M S, ZHOU D W, et al., 2001. New progresses on geothermal history of Turpan-Hami Basin, Xinjiang, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 44(2): 166-176.

LU H H, LI B J, WU D Y, et al., 2019. Spatiotemporal patterns of the Late

Quaternary deformation across the northern Chinese Tian Shan foreland[J]. Earth-Science Reviews, 194: 19-37.

MORIN J, JOLIVET M, BARRIER L, et al., 2019. Planation surfaces of the Tian Shan Range (Central Asia): Insight on several 100 million years of topographic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 177: 52-65.

QIN Y, LIU C, YANG L, et al., 2022. Detrital-Zircon Geochronology of Jurassic-Cretaceous strata in the Turpan-Hami Basin: implication for the Late Mesozoic Tectonic evolution of eastern Tien Shan[J]. Minerals, 12(8): 926.

REN R, GUAN S W, HAN B F, et al., 2017. Chronological constraints on the tectonic evolution of the Chinese Tianshan Orogen through detrital zircons from modern and palaeo-river sands[J]. International Geology Review, 59(13): 1657-1676.

SHEN C B, MEI L F, LIU L, et al., 2006. Evidence from apatite and zircon fission track analysis for Mesozoic-Cenozoic uplift thermal history of Bogeda Mountain of Xinjiang, northwest China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 26(3): 87-92. (in Chinese with English abstract)

SHEN T Y, CHEN Y, WANG G C, et al., 2020. Detrital zircon geochronology analysis of the Late Mesozoic deposition in the Turpan-Hami Basin: implications for the uplift history of the eastern Tian Shan, north-western China[J]. Terra Nova, 32(2): 166-178.

SONG S D, LI J G, LIU X Y, et al., 2023. Mesozoic-Cenozoic exhumation history of the Bogda Range, eastern Tianshan: insights from apatite fission track Thermochronology[J]. Minerals, 13(1): 71.

SONG S D, HE Z Y, LIANG Y, et al. , 2025. Revaluation of the Meso-Cenozoic tectono-thermal evolution of the eastern Tianshan: a Low-temperature Thermochronology Perspective[J/OL]. Geotectonica et Metallogenia,1-25[2026-06-07]. https://link.cnki.net/urlid/44.1595.P.20250801.1658.004.（in Chinese with English abstract）

SUN J B, CHEN W, QIN K Z, et al., 2021. Mesozoic exhumation of the Jueluotage area, eastern Tianshan, NW China: constraints from (U–Th)/He and fission-track thermochronology[J]. Geological Magazine, 158(11): 1960-1976.

VERMEESCH P, 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. Geoscience Frontiers, 9(5): 1479-1493.

WANG J, CAO Y C, WANG X T, et al., 2018. Sedimentological constraints on the initial uplift of the West Bogda Mountains in Mid-Permian[J]. Scientific Reports, 8(1): 1453.

WANG Y N, ZHANG J, HUANG X, et al., 2023. Cenozoic exhumation of the Tianshan as constrained by regional low-temperature thermochronology[J]. Earth-Science Reviews, 237: 104325.

WANG Z X, LI T, ZHANG J, et al., 2008. The uplifting process of the Bogda Mountain during the Cenozoic and its tectonic implication[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(4): 579-593.

WU S T, YANG M, YANG Y H, et al., 2020. Improved *in situ* zircon U-Pb dating at high spatial resolution (5-16 μm) by laser ablation-single collector-sector field-ICP-MS using Jet sample and X skimmer cones[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 456: 116394.

XIANG D F, ZHANG Z Y, XIAO W J, et al., 2019. Episodic Meso-Cenozoic denudation of Chinese Tianshan: evidence from detrital apatite fission track and zircon U–Pb data, southern Junggar Basin margin, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 175: 199-212.

XIANG D F, ZHANG Z Y, CHEW D, et al., 2024. Cenozoic pulsed rise and growth of the Chinese South Tianshan revealed by zircon and apatite provenance analyses: implications for stepwise Aridification in the Tarim Basin[J]. Tectonics, 43(8): e2023TC008211.

XIAO W J, WINDLEY B F, ALLEN M B, et al., 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. Gondwana Research, 23(4): 1316-1341.

YANG W, JOLIVET M, DUPONT-NIVET G, et al., 2013. Source to sink relations between the Tian Shan and Junggar Basin (northwest China) from Late Palaeozoic to Quaternary: evidence from detrital U-Pb zircon geochronology[J]. Basin Research, 25(2): 219-240.

YANG X, WU C Y, LI Z G, et al., 2021. Late Quaternary kinematics and deformation rate of the Huoyanshan structure derived from deformed river terraces in the South piedmont of the eastern Chinese Tian Shan[J]. Frontiers in Earth Science, 9: 649011.

YANG X, LI Z G, WANG W T, et al., 2023. Quaternary crustal shortening of the Houyanshan structure in the eastern Chinese Tian Shan: constrained from geological and geomorphological analyses[J]. Remote Sensing, 15(6): 1603.

YIN J Y, WANG Y N, HODGES K V, et al., 2023. Episodic long-term exhumation of the Tianshan orogenic belt: new insights from multiple low-temperature Thermochronometers[J]. Tectonics, 42(4): e2022TC007469.

YU J X, ZHENG D W, ZHANG H P, et al., 2022. Initial Cenozoic exhumation of the northern Chinese Tian Shan deduced from apatite (U-Th)/He Thermochronological data[J]. Lithosphere, 2022(1): 8099539.

YU S, TONG Y, DANIŠÍK M, et al., 2025. Coupled evolution between the South Tianshan and Kuqa Basin: insights from multisystem Thermochronometers[J]. Basin Research, 37(4): e70054.

ZHANG C H, LIU D B, ZHANG C L, et al., 2005. Stratigraphic constraints on the initial uplift age of Bogda Shan, Xinjiang, north-west China[J]. Earth Science Frontiers, 12(1): 294-302. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L F, DU G H, GONG X P, et al., 2026. The subduction-collision transition of the Early Devonian southern Tianshan Ocean: evidences from intrusive rocks in the Burandaban-Baluntai area[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 45(1): 215-231. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X R, ZHAO G C, SUN M, et al., 2016. Tectonic evolution from subduction to arc-continent collision of the Junggar ocean: Constraints from U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the North Tianshan belt, NW China[J]. GSA Bulletin, 128(3-4): 644-660.

ZHAO X D, ZHANG H P, LV H H, et al., 2020. Signatures of tectonic-climatic interaction during the Late Cenozoic orogenesis along the northern Chinese Tian Shan[J]. Basin Research, 33(1): 291-311.

ZHAO Z H, SHEN T Y, WANG G C, et al., 2025. Relict landscape evolution and fault reactivation in the eastern Tian Shan: insights from the Harlik Mountains[J]. Solid Earth, 16(6): 503-530.

ZHEN Y, CHEN X, JIAO L X, et al., 2024. Carboniferous-Permian tectono-palaeogeography and prototype Basin evolution in eastern Xinjiang, NW China[J]. Journal of Palaeogeography, 26(1): 78-99. (in Chinese with English abstract)

ZHEN Y, HE D F, CHEN X, et al., 2024a. Unraveling deformation mechan-

ism of the Fukang fold-and-thrust belt: Insight into intracontinental orogenesis of the Bogda Mountain, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 167: 107005.

ZHEN Y, HE D F, LI D, et al., 2024b. Episodic evolution of intracontinental orogenic deformation: Insight from the southern Bogda fold-and-thrust belt of the Tianshan Mountains, NW China[J]. Tectonophysics, 876: 230266.

ZHOU Y X, WU C D, YUAN B, et al., 2020. Cenozoic tectonic patterns and their controls on growth strata in the northern Tianshan fold and thrust belt, northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 198: 104237.

## 附中文参考文献

陈华勇, 肖兵, 马华东, 等, 2025. 中亚造山带东天山古生代幕式成矿过程与机理[J]. 中国科学: 地球科学, 55(8): 2621-2637.

邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 2000. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社.

方世虎, 宋岩, 贾承造, 等, 2007. 新疆博格达地区中-新生代碎屑成分特征与盆山分异过程[J]. 地质学报, 81(9): 1229-1237.

郭玉红, 杨贺, 谭舟, 等, 2026. 北天山博格达石炭—二叠纪洋内弧西端与伊犁-中天山岛弧的拼贴过程[J]. 新疆地质, 44(1): 24-37.

李文厚, 周立发, 柳益群, 等, 1997. 吐哈盆地沉积格局与沉积环境的演变[J]. 新疆石油地质, 18(2): 135-141.

柳益群, 袁明生, 周鼎武, 等, 2001. 新疆吐鲁番-哈密盆地地质热历史研究新进展[J]. 中国科学(D辑), 31(3): 257-264.

沈传波, 梅廉夫, 刘麟, 等, 2006. 新疆博格达山中新生代隆升—热历史的裂变径迹记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(3): 87-92.

宋世达, 何智远, 梁勇, 等, 2025. 天山东段中–新生代构造–热演化再评估: 基于低温热年代学的视角[J/OL]. 大地构造与成矿学, 1-25[2026-06-07]. https://link.cnki.net/urlid/44.1595.P.20250801.1658.004.

张传恒, 刘典波, 张传林, 等, 2005. 新疆博格达山初始隆升时间的地层学标定[J]. 地学前缘, 12(1): 294-302.

张岚峰, 杜光辉, 弓小平, 等, 2026. 早泥盆世南天山洋俯冲-碰撞转换: 来自布然达坂–巴伦台侵入岩的证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 45(1): 215-231.

甄宇, 陈旋, 焦立新, 等, 2024. 东疆地区石炭纪-二叠纪构造古地理与原型盆地演化[J]. 古地理学报, 26(1): 78-99.