引用格式：张丽娟，张志亮，任治坤，等，2026. 西昆仑山前新生代晚期沉积物磁性地层定年及其构造意义[J]. 地质力学学报，32（3）：704−720. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025163

Citation: ZHANG L J，ZHANG Z L，REN Z K，et al.，2026. Magnetostratigraphy of the Late Cenozoic sediments of the West Kunlun foreland and its tectonic implications[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：704−720. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025163

西昆仑山前新生代晚期沉积物磁性地层定年及其构造意义

张丽娟[1]，张志亮[1]，任治坤[1]，包国栋[1]，宁雨涛[2]

ZHANG Lijuan[1]，ZHANG Zhiliang[1]，REN Zhikun[1]，BAO Guodong[1]，NING Yutao[2]

1. 中国地震局地质研究所，北京 100029；
2. 昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650093
1. *Institute of Geology*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100029, *China*;
2. *Faculty of Land and Resources Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *Yunnan*, *China*

Magnetostratigraphy of the Late Cenozoic sediments of the West Kunlun foreland and its tectonic implications

Abstract: ［**Objective**］The West Kunlun Orogenic Belt, located on the northwestern margin of the Tibetan Plateau, is a key area for studying the tectonic uplift and expansion of the plateau. However, the Cenozoic uplift of the West Kunlun Orogenic Belt is still controversial.［**Methods**］This study focuses on the well-exposed Late Cenozoic sediments on the Puska Anticline, West Kunlun foreland. High-resolution magnetostratigraphy was applied to constrain the age of the lower boundary of the growth strata, providing insight into the uplift timing of the West Kunlun Orogenic Belt from the perspective of mountain-basin coupling.［**Results**］Magnetic analysis indicates that hematite and magnetite are the dominant remanence carriers. The high-resolution magnetostratigraphy reveals an age range of ～6.8 to 2.4 Ma for the Puska Section, and the base age of the growth strata is ～5.3 Ma, indicating that the deformation of this anticline was initiated at ～5.3 Ma.［**Conclusions**］Integrating previously published results of sedimentation, tectonics, and low-temperature thermochronology in the West Kunlun foreland, this study proposes that the West Kunlun Orogenic Belt has undergone an episode of intensive uplift since ～5.3 Ma. This suggests that the Tibetan Plateau has experienced significant uplift since the beginning of the Pliocene, with tectonic strain beginning to propagate toward the Tarim Basin.［**Significance**］This study provides new perspectives and evidence for understanding the complex relationship between the uplift of the Tibetan Plateau and the sedimentary responses in its periphery, contributing to further unraveling the comprehensive impact of the Tibetan Plateau.

Keywords: southwestern Tarim Basin; West Kunlun Orogenic Belt; magnetostratigraphy; growth strata; sedimentary evolution; mountain–basin coupling

摘　要：西昆仑造山带位于青藏高原西北缘，是研究高原构造隆升和向外扩展的关键区域。目前，对于西昆仑造山带在新生代的构造隆升时间存在较大的争议。文章聚焦于西昆仑山前普斯卡背斜上出露良好的新生代晚期沉积物，利用高分辨率磁性地层学限定生长地层底界年龄，进而从盆山耦合的角度限定西

基金项目：国家自然科学基金项目（42272219）；中国地震局地质研究所中央公益级科研院所基本科研业务专项（IGCEA2414，IGCEA2113）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42272219) and the National Nonprofit Fundamental Research Grant of China, Institute of Geology, China Earthquake Administration (Grant Nos. IGCEA2414 and IGCEA2113).

第一作者：张丽娟（2000—），女，在读硕士，从事古地磁及磁性地层学研究。Email：19862910451@163.com

通信作者：张志亮（1987—），男，博士，副研究员，从事古地磁及磁性地层学研究。Email：zlzhang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期：2025−11−06；**修回日期：**2026−04−29；**录用日期：**2026−04−29；**网络出版日期：**2026−04−30；**责任编辑：**吴芳

Received：2025−11−06；Revised：2026−04−29；Accepted：2026−04−29；Available Online：2026−04−30；Handling Editor：WU Fang

昆仑造山带的构造隆升时间。研究结果表明，普斯卡剖面沉积物中的主要磁性矿物为赤铁矿和磁铁矿；高分辨率磁性地层结果显示该剖面年代约为 6.8～2.4 Ma，生长地层的底界年代约为 5.3 Ma，表明该背斜的构造变形开始于约 5.3 Ma。结合西昆仑山前已发表的有关沉积、构造、低温热年代学等方面的研究成果，认为西昆仑造山带在约 5.3 Ma 发生了一期强烈的构造隆升，暗示青藏高原自上新世初期经历强烈的构造变形，且构造应变开始向塔西南盆地传递。这一研究为理解青藏高原隆升与周缘沉积响应间的复杂关系提供了新的视角和依据，有助于进一步揭示青藏高原隆升对区域地质和构造演变的综合影响。

关键词：塔西南盆地；西昆仑造山带；磁性地层学；生长地层；沉积演化；盆山耦合

中图分类号：P318; P539.3; P548　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2026)03−0704−17

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025163

0　引言

印度板块与欧亚大陆的碰撞是新生代最重要的地质事件之一，它不仅导致了青藏高原的大规模构造隆升，也对亚洲大地构造、地貌格局、沉积与环境均产生了深远影响。此外，板块碰撞的远程效应也使得天山、西昆仑等一系列陆内造山带发生强烈的构造缩短和隆升，形成了规模宏大的板内复活型造山带（邓起东等，2000；张培震，2003）。为何在离板块边界>1000 m 处发生如此强烈的构造变形？板块碰撞所产生的构造应力是如何向北传递的？构造变形是何时开始的？造山带与盆地之间的耦合关系是怎样的？这些问题得到了国际地学界的普遍关注和研究。塔里木盆地周缘一系列造山带（如西昆仑、帕米尔、天山等）也成为探索和回答上述问题的天然实验室。

前陆盆地是造山带前缘与相邻克拉通之间的沉积盆地，具有明显的造山带与山前盆地耦合演化的现象（刘和甫，2000；李勇等，2025）。造山带作为盆地主要物源区，在逆冲推覆作用下直接控制盆地的沉积物类型、粒径组合与供给通量，而盆地沉积作用则受控于造山带的抬升–剥蚀速率与大陆岩石圈挠曲沉降之间的动态平衡（李超等，2023）。前陆盆地内的垂向加积序列记录了相邻造山带的剥蚀–搬运过程，可视为造山演化的时间标尺（李超等，2023）。由于造山带与前陆盆地在空间上相互依存，且时间同步、动力统一，因此，前陆盆地不仅是造山带变形的直接载体，而且较完整地保存了造山带隆升–剥蚀的地质记录。从盆山耦合的角度探讨造山带的构造演化历史，无疑是大陆动力学重要的研究方法之一。

生长地层是指在褶皱、断裂或差异隆升等构造变形持续活动期间同步沉积的一套沉积单元，其外部几何形态与内部构造特征受控于具体的生长构造样式，因而可系统记录构造活动、演化速率与运动学过程（Liu et al., 2018；何鹏宇等，2025；张子亚等，2025）。在构造背景下，生长地层可以分为膝折带迁移和翼部旋转两种端元模式：前者以褶皱翼部倾角保持恒定为特征，翼长随构造缩短量递增，顶部与翼缘抬升速率一致，致使生长地层厚度相对均一，呈现平行状几何特征，且生长地层长度自底向顶递减，构成典型的生长三角（郭卫星和漆家福，2008；史肖飞等，2019）；后者多见于滑脱褶皱或具剪切分量的褶皱系统，翼部绕枢纽发生刚性旋转，倾角随时间变化，抬升速率横向不均，导致生长地层厚度向褶皱翼部逐渐减薄，并出现递进生长不整合，表现为连续沉积的楔状体，其特征为同一生长层底角大于顶角，形成扇形发散样式（郭卫星和漆家福，2008；史肖飞等，2019）。深入剖析同沉积褶皱中生长地层几何形态，协同地层年代学资料，可以揭示沉积作用与构造活动间的耦合关系。生长地层的顶底界线可作为构造运动开始与结束时间的标志，进而确定沉积速率与构造抬升速率的动态关联，划分褶皱活动的期次（郭卫星和漆家福，2008）。前陆盆地内的生长地层等相关构造是造山带构造隆升、变形的直观地质证据，其精确的年代限定是揭示盆山耦合演化过程的关键。

西昆仑造山带位于青藏高原西北缘，北以塔里木克拉通为界，南隔喀喇昆仑断裂与羌塘地体相望，东接阿尔金左旋走滑断裂系，西连帕米尔弧形构造带，总体呈向北凸出的弧形构造（Jin et al., 2003）。在印度—欧亚大陆碰撞远程效应影响下，新生代以来西昆仑地区发生数千米尺度的构造缩短变形，成为青藏高原西北缘隆升–剥蚀历史的关键记录载体。西昆仑造山带作为塔西南盆地新生代

沉积体系的主要物源区，其构造演化直接控制了盆地的沉积充填与构造变形样式。新生代以来，西昆仑造山带多期逆冲推覆与走滑剪切作用驱动盆地的快速沉降，堆积了数千米厚的磨拉石建造，并伴随生长不整合面向盆内迁移，系统记录了构造加载–沉积响应的耦合过程（张世杰等，2021）。尽管近年来多学科交叉研究不断深化对西昆仑–塔里木盆–山耦合关系的认识，但关于西昆仑造山带新生代构造隆升时间仍存有较大争议，如低温热年代学结果揭示始新世以来存在5期快速冷却事件，这些事件表明西昆仑地区曾发生多次构造隆升活动（Sobel and Dumitru, 1997; Wang et al., 2003; Sun and Liu, 2006; 王永等，2006; Sun et al., 2008; Cao et al., 2015）；沉积学研究也表明古新世—中始新世，阿尔塔什组覆盖于白垩系灰岩上，接触层发育薄层古特提斯角砾岩和铁质风化壳，向上过渡为厚层石膏–含砾砂岩，反映了塔西南凹陷整体暴露剥蚀后快速沉降，海退后，区域沉降与造山带复活同时发生（张世杰等，2021），区域沉积速率在约41 Ma开始陡增也表明此时西昆仑造山带逆冲负载增强，隆升加速（Ruddiman and Kutzbach, 1989）；早、中始新世时，西昆仑山前沉积相为海相/海陆过渡相，至早渐新世时突变为河湖相，陆缘碎屑增加，沉积物粒度变粗，沉积速率加快与生长背斜开始发育同步，标志着西昆仑造山带整体开始隆升（Jin et al., 2003; 王永等，2006）；上新世以来，山前沉积的巨厚层磨拉石建造、沉积速率的陡增以及生长地层的发育均指示了西昆仑造山带处于快速剥露期（陈杰等，2001），这可能是由西昆仑造山带在新生代以来的阶段性隆升，或各研究方法的局限性导致的。

塔西南盆地位于塔里木盆地西南缘，是一个典型的新生代再生前陆盆地。其构造位置极为关键，北接柯坪断隆，南邻西昆仑造山带，西抵帕米尔构造结，处于欧亚板块与印度板块碰撞远程效应的最前缘，是揭示青藏高原向北扩展的重要窗口（李本亮等，2007; 杨庚等，2023）。新生代以来，随着印度–欧亚板块发生碰撞并持续向北楔入，其远程效应导致塔西南盆地南侧的西昆仑造山带和帕米尔地块发生强烈隆升，并向塔里木地块之下发生强烈的陆内俯冲，在塔西南地区形成了典型的新生代再生前陆盆地（Sobel and Dumitru 1997; 艾孜买提·米尔亥力木等，2025）。在此构造背景下，塔西南盆地发育了巨厚的新生代沉积序列。由于受到近南北向的构造挤压，前陆盆地内的新生代沉积物发生了强烈的构造变形，在山前形成多排褶皱冲断带（陈汉林等，2018）。这些沉积物不仅保存了中亚地区古气候变化的信息，同时也记录了造山带的构造演化历史，为限定西昆仑造山带新生代隆升期次和区域构造–沉积响应提供了基础（Laborde et al., 2019）。

为更好地限定西昆仑造山带在新生代，尤其是中新世晚期以来的构造演化历史和青藏高原向北的扩展，文章以西昆仑造山带前陆盆地为研究区，对出露良好的新生代晚期地层进行了系统的古地磁样品采集，旨在通过磁性地层学方法，建立研究区内可靠的新生代晚期地层年代学框架。在此基础上，通过野外精细测量地层产状，识别出生长地层，限定生长地层底界年龄，约束构造变形开始的时间，进而从盆山耦合的角度限定西昆仑造山带晚中新世以来的构造演化历史，从而更好地理解青藏高原北向生长过程。

1 研究区概况

1.1 构造特征

西昆仑造山带为长期演化的复杂增生造山带，北邻塔里木克拉通，南以喀喇昆仑断裂为界与羌塘地块相接，总体呈向北凸出的弧形构造（图1），其构造历史可以分为4个阶段：①新元古代晚期的裂解阶段，原特提斯洋张开，西昆仑古陆与塔里木之间出现有限洋盆；②寒武纪以来的洋壳俯冲，该洋盆向北俯冲于塔里木板块之下，至二叠纪晚期洋壳消减结束，原特提斯洋闭合；③古生代晚期末期至中生代早期的碰撞造山：古特提斯洋盆沿早期缝合带拉张并向北俯冲，甜水海地体与南昆仑地体碰撞，西昆仑造山带进入全面碰撞造山阶段；④新生代以来的陆内演化阶段，受印度–欧亚板块的远程效应的影响，西昆仑造山带发生了强烈的陆内变形与构造隆升，前陆盆地沉积了巨厚磨拉石建造，并持续发生逆冲推覆与走滑活动，成为青藏高原西北缘的活动构造边界（张世杰等，2021; 杜德道等，2023; 鲁浩等，2023）。

研究区位于塔里木盆地西南缘盆–山转换带（图2），是西昆仑造山带逆冲走滑体系向北扩展的最前缘的生长褶皱。区域构造位置属塔西南前陆盆地东段，自新近纪以来，发育典型磨拉石充填，并呈现自南西向北东分带分排的前陆褶皱–冲断构造

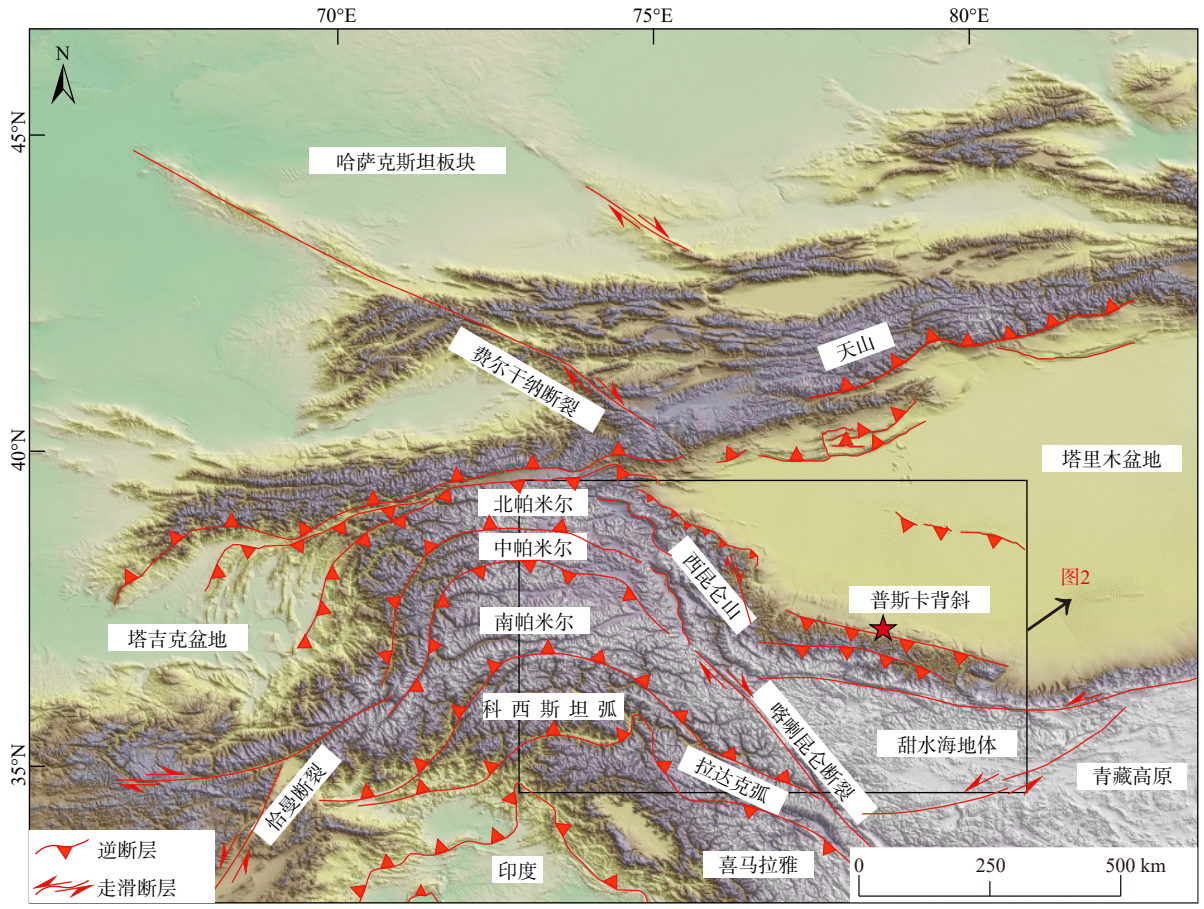


图 1　帕米尔–西昆仑地体数字高程模型（DEM）图（据 Zhang et al.，2023 修改）

Fig. 1　Digital elevation model (DEM) of the Pamir–West Kunlun system (modified after Zhang et al., 2023)

格局（王永等，2006；洪晨等，2022；王清华等，2023）。盆地内部可识别 5 排褶皱–冲断带。①塔里木南缘基底隆起带：由太古宙和元古宙变质岩基底组成，前寒武纪、古生代岩系向北逆掩推覆在第一排构造南翼不同时代的新生界之上；②杜瓦–桑株–玉力群–克里阳–甫沙–帕米尔前缘推覆构造带下盘隐伏构造带：由逆冲或斜冲的新生代、中生代、古生代岩系组成的推覆倒转构造带，被视为山前第一排构造；③合什塔克–乌鲁克–柯克亚背斜–棋盘鼻状构造带：该带被称为山前第二排构造带；④固满背斜–棋北鼻状构造–齐姆根主弧–达尔鼻状构造–依格孜牙背斜带：北杜瓦背斜–固满背斜冲断构造发育程度弱，棋北鼻状构造与固满背斜相连并倾伏于齐姆根主弧形构造段下，变形程度增大，总体上该带构成了山前第三排构造；⑤泽普–英吉沙背斜带：连续性差，由泽普背斜向英吉沙背斜变形强度逐渐增强，可视为山前第四排构造带，其中泽普–英吉沙背斜形成时代最新、变形程度最弱，指示前陆变形向克拉通内部年轻化的总体迁移模式（王永等，2006）。

1.2　地层发育情况

西昆仑造山带山前发育大型叠瓦状冲断–褶皱带，前中生界普遍逆掩于新生界之上，形成典型的薄皮–三角带构造组合（王永等，2006）。研究区新生代地层分布较为广泛，古近纪地层普遍为浅海–海陆过渡环境，至渐新世末，沉积环境变化，沉积物相变快，厚度较大；新近系厚度巨大，广布于山前，总体为陆源碎屑的砂岩、泥岩及砾岩互层，沉积环境以湖泊–河流相为主（廖林，2010）。新近纪地层可划分为中新统乌恰群（自下而上为克孜洛依组、安居安组、帕卡布拉克组）和上新统阿图什组（廖林，2010）。克孜洛依组为一套褐色厚层块状中—粗粒岩屑砂岩与中细粒岩屑砂岩互层，局部夹灰绿、灰褐色块状中砾岩，反映近源扇三角洲沉积；中新统安居安组以褐红–绿灰色中细粒岩屑砂岩与粉砂岩、粉砂质泥岩韵律互层，夹灰绿色砾岩，指示三角洲前缘–滨浅湖环境；中新统帕卡布拉克组为一套褐灰、灰绿色块状砾岩、含砾粗砂岩与中细粒岩屑

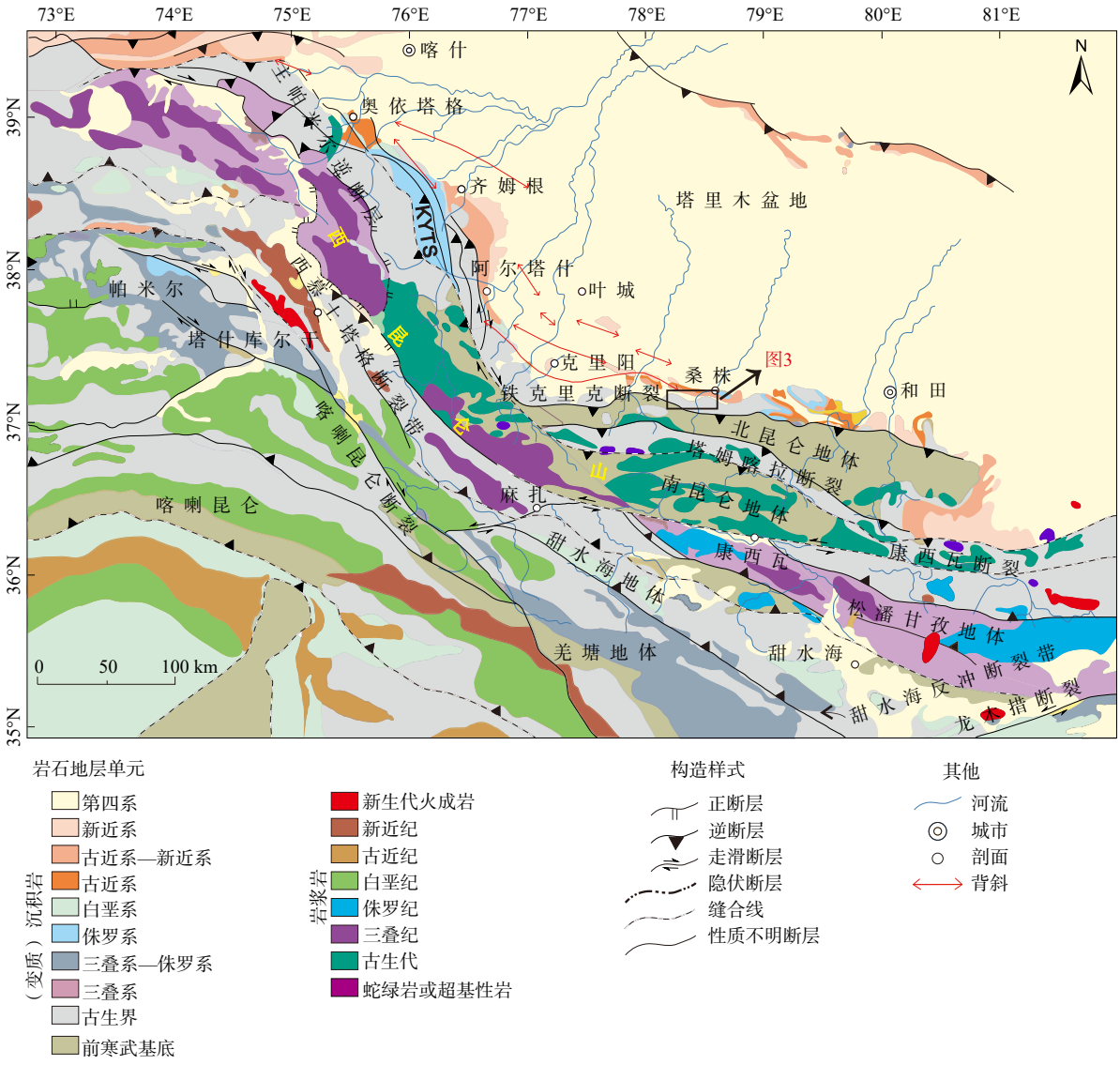


图 2 帕米尔–西昆仑山系统、塔里木盆地及邻区地质图（据 Zhang et al.，2023 修改）

Fig. 2 Geological sketch map of the Pamir–West Kunlun system, SW Tarim Basin, and adjacent areas (modified after Zhang et al., 2023)

KYTS—Kashgar–Yecheng Transfer System

砂岩互层，含丰富孢粉化石，为辫状河–湖泊交替体系；上新统阿图什组总体以褐灰色砾岩为主，夹土黄色砂质泥岩与泥质砂岩，可将其细分为阿图什组上段和下段，下段为褐色—浅棕色砂岩夹砾岩、泥岩，反映三角洲平原沉积，上段为灰色厚层砾岩夹灰黄色砂岩，指示山前冲积扇–辫状河沉积。第四系依据岩性、岩相及阶地高差，可划分为西域组、中更新统乌苏群及上更新统—全新统冲洪积物（廖林，2010）。西域组（西域砾岩）为一套暗灰色—灰黑色巨厚层块状砾岩夹土黄色砂岩、粉砂质泥岩，砾石成分复杂，分选差，多呈次棱角—次圆状磨圆产出，向上砾石粒径增大、砂岩减薄，为典型近源磨拉石。这些地层完整地记录了新生代以来西昆仑造山带的构造隆升历史，以及构造–沉积响应过程（刘胜等，2004；王永等，2006；黎敦朋，2008）。

此次采样剖面位于西昆仑山前的皮山县桑株镇普斯卡村附近（剖面位置 37.152°—37.173°N，78.619°—78.620°E；图 3），隶属于山前第一排背斜。由于背斜中部被沉积物覆盖，出露较差，此次仅对其背斜北翼出露良好的新生代晚期地层进行采样工作。为限定剖面最大沉积年龄，采集了 6 个碎屑锆石测年样品。根据野外调查结果，该剖面出露可地层大致分为 3 套（图 4）：①底部为乌恰群棕红色砂岩与砾岩互层，局部夹薄层粉砂岩、泥岩，地层高角度北倾，底部地层近乎直立；②中部为阿图什组（N_2a）灰色厚层砾岩、中薄层砂岩与细砂岩互层，砾石粒径

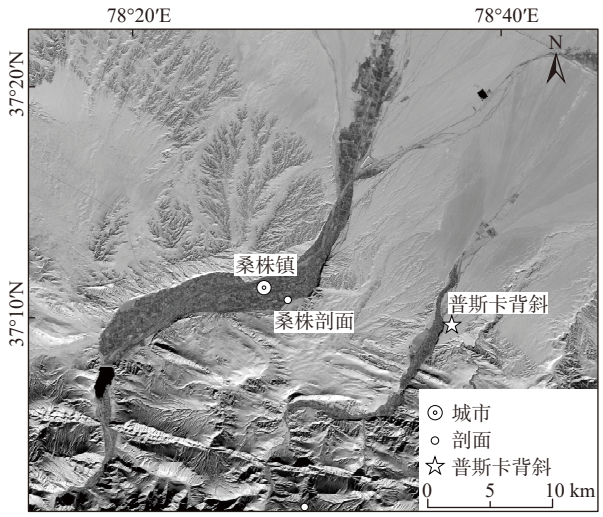


图 3　普斯卡背斜地理位置图

Fig. 3　Geographic-position map of the Puska Anticline

多在 2～4 cm 之间，向上逐渐增大，灰黄色砂岩层发育斜层理，层厚由下而上逐渐变薄，地层产状向上逐渐变缓，呈现出典型的生长地层特征（图 5）；③上部为西域组砾岩，主体为一套巨厚深灰色砾岩，局部夹棕褐色砂岩透镜体，地层倾角较小。

2　样品采集与测试

野外用便携式汽油钻机钻取定向岩芯样品，采用古地磁样品定向器与磁罗盘完成样品定向。此次采样共采集定向岩芯标本 118 块。在室内用无磁双刀切割机将所有样品加工成直径 2.5 cm、高 2.2 cm 的标准古地磁样，以备后续逐步热退磁与剩磁测量。

选取 13 块样品分别进行 κ-T 曲线（磁化率随温度变化曲线）和磁滞回线测试。κ-T 曲线测试在中国地质科学院地质力学研究所自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室完成，使用仪器为捷克 Agico 公司生产的 KLY-4 卡帕桥多频磁化率仪。为避免氧化–还原干扰，测试过程在氩气环境中进行。磁滞回线和逐步热退磁实验在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室完成。磁滞回线测试使用美国 Princeton Measurements Corporation 生产

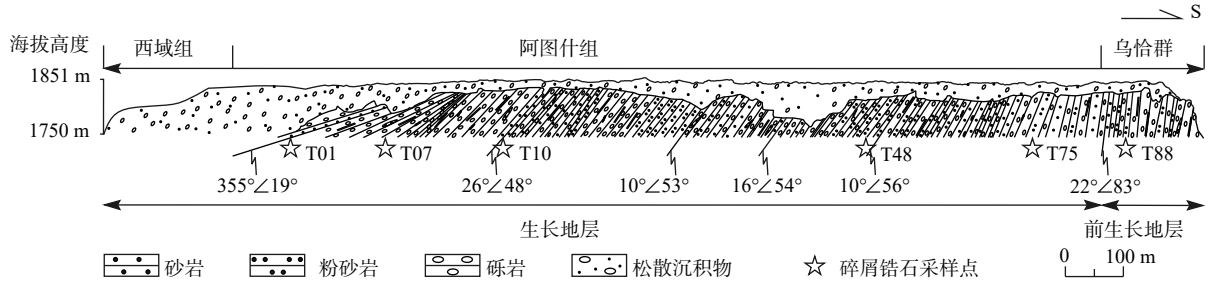


图 4　普斯卡背斜地层剖面图

Fig. 4　Cross section of the Puska Anticline

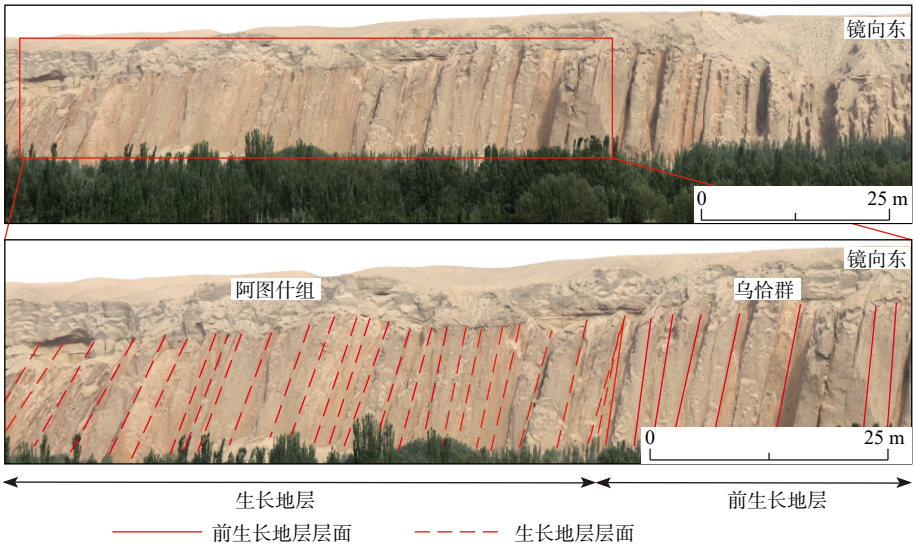


图 5　普斯卡背斜剖面生长地层照片

Fig. 5　Photographs of the growth strata in the Puska Anticline

的 MicroMagTM 3900 型振动样品磁力仪(VSM)。

样品经预处理后在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针与扫描电镜实验室使用法国 CAMECA SXFiveFE 高分辨场发射电子探针进行锆石 CL 图像的拍摄。碎屑锆石 U-Pb 定年样品测试在中国地质科学院地质研究所热年代与稀有气体实验室进行。采用激光烧蚀–电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)进行测试,每个样品选取 150 个锆石点,实验分析用直径为 30 μm 的激光分析光束,能量密度为 3.8 J.cm^{-2}, 频率为 6 Hz, 剥蚀时间为 45 s, 锆石 U-Pb 年龄分析使用 91500 为一级标样, Plesovice 和清湖锆石作为监测标样,以高纯度氦气为剥蚀物质的载气,将剥蚀组分气溶胶态送入质谱仪进行测试,氩气作为调节灵敏度的补偿气体。另外,在激光剥蚀过程中,随着剥蚀深度的增加会产生井下分馏现象,气溶胶中 U、Pb 等同位素的组成比例会随剥蚀深度发生系统的非线性变化,直接影响定年结果的准确性。在分析过程中,仪器灵敏度随时间也会发生变化从而产生信号漂移的现象。因此,在实际测试过程中,还将美国国家标准与技术研究所(NIST)的标准玻璃NIST610 和 NIST612 作为外标。通过标样–未知样品交替分析的方式,即每 10 个样品点分析 2 个一级标样、2 个监测标样以及 1 个 NIST610 和 1 个 NIST612, 校正激光剥蚀导致的井下分馏和仪器信号漂移。

所有 118 块标本均采用 ASC TD-48 热退磁炉进行了 15～18 步的系统热退磁,350℃ 以下温度间隔为 100℃, 350～500℃ 间隔为 50℃, 530℃ 以上加密为 20℃, 在 550～580℃ 和 660～680℃ 之间,为了使退磁变化更为明显,将退磁温度间隔进一步加密为 10℃。剩磁测试采用 2G-760 U-Channel 岩石超导磁力仪进行,所有样品的加热、冷却和剩磁测试均在环境磁场小于 300 nT 的磁屏蔽室中进行。

3 测试结果分析

3.1 岩石磁学结果

3.1.1 κ-T 曲线

典型样品的 κ-T 曲线测试结果如图 6 所示,所有样品在加热—冷却过程中磁化率表现出明显的不可逆性,而且升温阶段的磁化率远远高于降温阶段的磁化率,表明样品加热过程中发生了相变,形成了新的磁性矿物。所有样品的加热曲线表现出 2 次明显的下降,分别出现在 580℃ 和 700℃ 附近。对应于磁铁矿和赤铁矿的解阻温度(O'reilly, 1984),表明沉积物中的载磁矿物主要为磁铁矿和赤铁矿。由于磁铁矿的磁化率远远高于赤铁矿的磁化率,在实验过程中磁铁矿的磁化率变化特征可能会掩盖赤铁矿的磁化率变化特征。

3.1.2 磁滞回线

代表性样品的磁滞回线测试结果如图 7 所示。所有样品在 −1T～1T 外场强度范围内呈现典型的蜂腰形磁滞回线特征(Roberts et al., 1995),表明样品中亚铁磁性矿物占主导且存在显著的矫顽力谱展宽,即低矫顽力相与高矫顽力相共存。该特征可能归因于低矫顽力矿物(如磁铁矿、磁赤铁矿)与高矫顽力矿物(如赤铁矿、针铁矿)的混合,或者单相碎屑磁铁矿具宽粒度分布导致的矫顽力叠加(Roberts et al., 1995)。在 300 mT 已获取样品 90% 以上的饱和剩磁强度,表明沉积物的剩磁载体主要是低矫顽力的磁性矿物,部分样品的磁滞回线在 500 mT 仍未闭合,表明样品中含有高矫顽力矿物,例如赤铁矿、针铁矿以及经历了低温氧化的碎屑磁铁矿(董良等, 2024)。因此,磁滞回线结果表明该剖面沉积物中既存在低矫顽力的磁性矿物,也存在高矫顽力的磁性矿物。

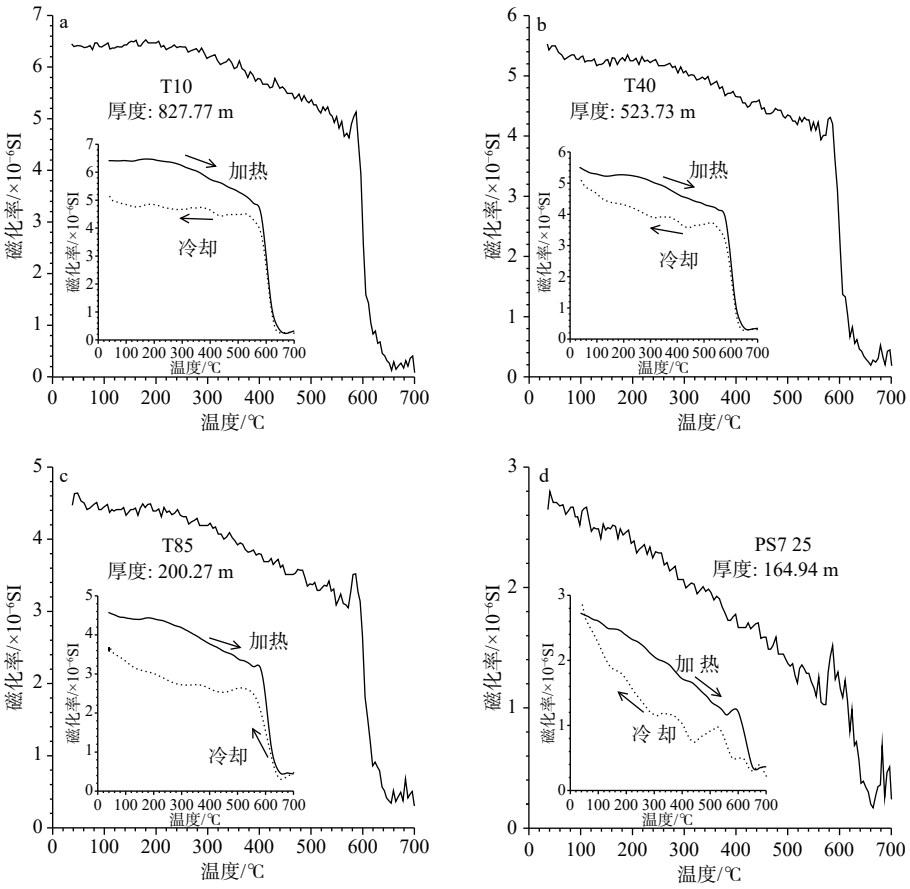
结合代表性 κ-T 曲线测试结果,进一步证实了沉积物中的磁性矿物主要为磁铁矿和赤铁矿。

3.2 碎屑锆石 U-Pb 定年结果

剖面碎屑锆石样品的阴极发光图像(CL)特征不一(图 8)。大部分锆石颗粒的形态主要为棱角状–次圆状,锆石 Th/U 比值较高(> 0.1),颗粒锆石内部显示了较为清晰的震荡环带结构,指示其为岩浆成因,但锆石颗粒完整性一般,可能是经历较长搬运距离导致(李程昊等, 2025)。通过锆石颗粒年龄 $^{206}Pb/^{238}U$- $^{207}Pb/^{235}U$ 谐和关系排除了不谐和的年龄颗粒,剔除掉不谐和度超过 10%(< 90% 或> 110%)以及 Th/U 比值小于 0.1 的锆石颗粒年龄,获得有效的单颗粒锆石年龄(图 9)。剖面碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明,最年轻的锆石年龄在样品 T88(对应深度 202.7 m)处获得,其年龄为 7.7±0.4 Ma, 表明该段地层最老年龄不晚于 7.7 Ma。

3.3 剩磁特征分析

对 118 块古地磁样品进行了逐步热退磁和剩磁测试,其中 111 块样品可分离出稳定的高温特征剩磁。采用主成分分析方法对剩磁分量进行拟合。



a—样品编号 T10; b—样品编号 T40; c—样品编号 T85; d—样品编号 PS725

图 6　代表性样品的磁化率随温度变化曲线

Fig. 6　Susceptibility versus temperature (κ–T) curves of the studied representative samples

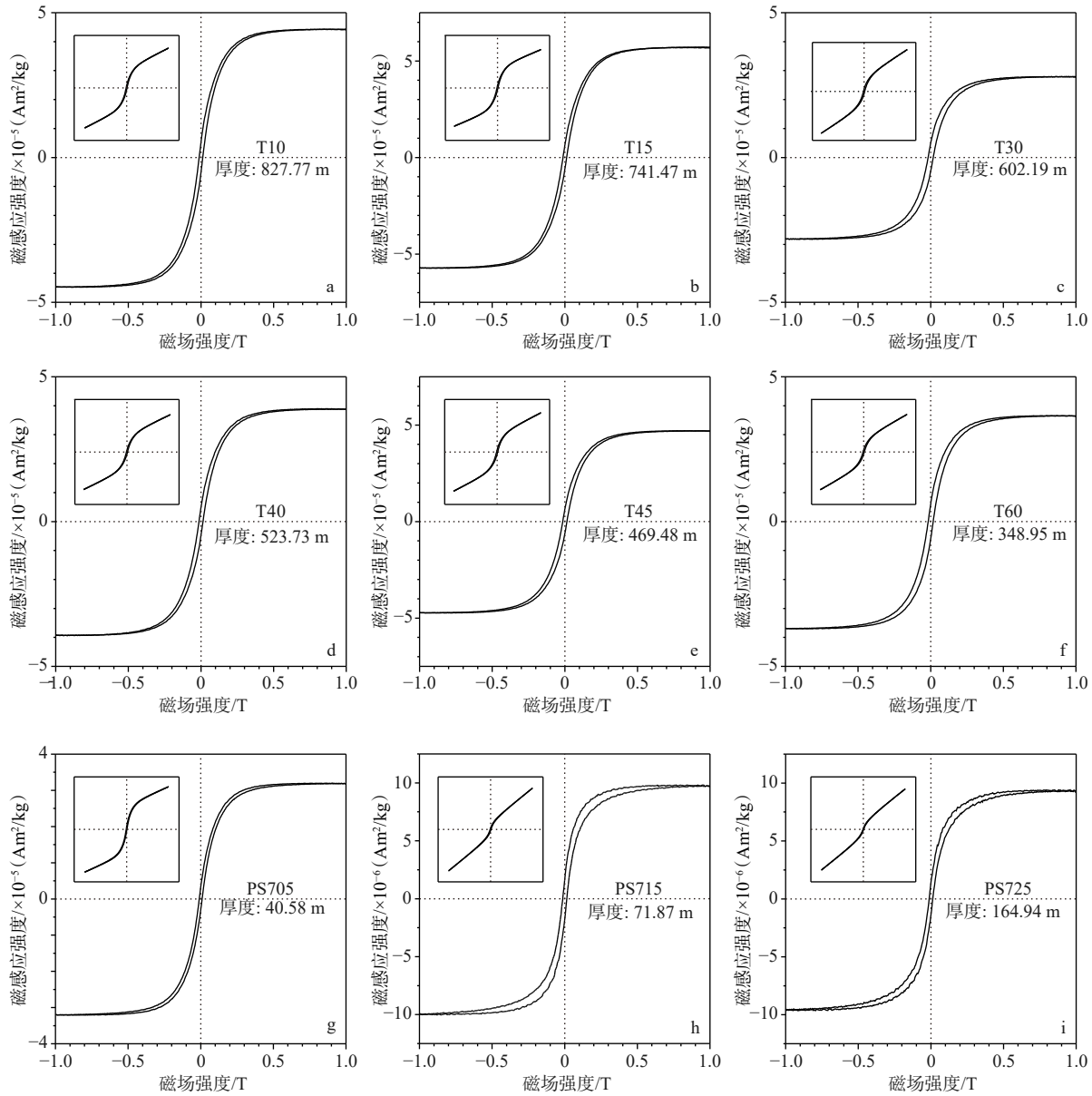
(a) Sample number T10; (b) Sample number T40; (c) Sample number T85; (d) Sample number PS725

绝大多数样品都可分离出两组磁成分(图 10)，一组低温剩磁组分在 200～350℃ 被退去，可能为现代地磁场的黏滞剩磁。高温组分多在 650～680℃ 获得，表明主要载磁矿物为赤铁矿。高温组分拟合时，为确保特征剩磁方向的准确性和可靠性，选取至少连续 4 个退磁点进行拟合，最终选取最大角度偏差(MAD)不大于 15º的样品用于后续计算和分析。在地理坐标下高温剩磁组分较为离散，倾斜校正后可明显分离为正负 2 个极性，经 Fisher 统计分析，正极性样品的平均方向为 D=182.0º, I=41.6º, K=6.9, a95=7.6, N=49，负极性样品的平均方向为 D=6.9º, I=42.5º, K=6.4, a95=8.3, N=62，对趾良好。正负极性平均方向间的夹角为 6.3º，小于 7.62º的临界值，符合 B 级倒转检验标准(McFadden and McElhinny, 1990)。由于采样剖面为单斜地层，无法对所获得的古地磁结果进行褶皱检验。但倾斜校正后的特征剩磁远离轴向地心偶极子场及现代地磁场方向(图 11)，且所获得的古地磁方向具有正反 2 种极性。因此，认为剖面的高温特征剩磁代表了岩石形成时的原生剩磁方向(孙知明等, 2013)。

4　磁性地层构建与分析

利用倾斜校正后的特征剩磁方向结合采样点地理坐标，可计算得到所有样品的虚地磁极纬度，再结合磁偏角、磁倾角数据可以建立起实测剖面的磁极性变化序列(图 12)，每个极性均由 2 个及以上样品限定。在实测极性变化序列中共可识别出 9 个正极性带(N1～N9)和 10 个负极性带(R1～R10)，将其与国际标准地磁极性年表(Geomagnetic Polarity Time Scale, GTS 2020)(Ogg, 2020)进行对比。

普斯卡背斜与桑株背斜处于同一构造带，研究区内新生代晚期地层主要沿东西走向延伸，且未受明显的构造错动，因此，可以将普斯卡剖面与其西



a—样品编号 T10; b—样品编号 T15; c—样品编号 T30; d—样品编号 T40; e—样品编号 T45; f—样品编号 T60; g—样品编号 PS705; h—样品编号 PS715; i—样品编号 PS725

图 7 代表性样品的磁滞回线

Fig. 7 Hysteresis loops of representative samples

(a) Sample number T10; (b) Sample number T15; (c) Sample number T30; (d) Sample number T40; (e) Sample number T45; (f) Sample number T60; (g) Sample number PS705; (h) Sample number PS715; (i) Sample number PS725

部 5 km 处的桑株背斜进行对比。剖面上部 880～970 m 为一较长的正极性(N1),其下部 600～880 m 以负极性为主(R2～R4),中间夹 2 个持续时间较短的正极性(N2 和 N3),该组合特征整体可以与国际标准极性柱 GTS 2020 上的 C2An.1n～C2Ar 相对应(星形代表最年轻碎屑锆石采样点)。剖面中部 300～600 m 整体为 4 个正极性(N4～N7)和 3 个负极性(R5～R7)交替出现,可对应于国际标准极性柱上的 C3n.1n～C3n.4n。其下部较长的负极性(R8)可与 C3r 相对应。剖面下部 0～170 m 整体以 2 个较长的正极性(N8～N9),中间夹一较短负极性(R10),该组合特征可与国际标准极性柱上 C3An.1n～C3An.2n 相对应(图 12)。因此,基于锆石定年数据与区域对比结果,认为普斯卡背斜剖面底部年龄约为 6.8 Ma,顶部年龄约为 2.4 Ma。

西域组砾岩底界位于剖面厚度 970 m 处,即负

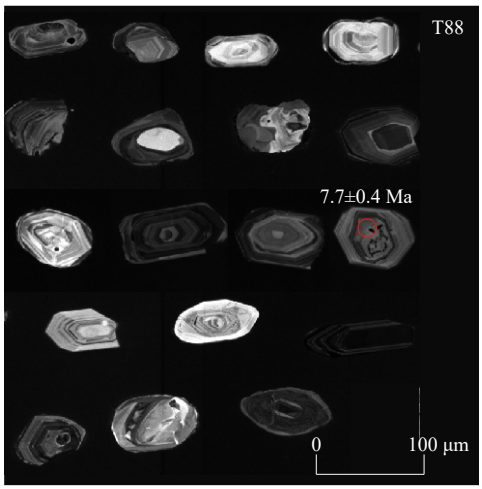


图 8　锆石阴极发光图

Fig. 8　Cathodoluminescence images of zircon

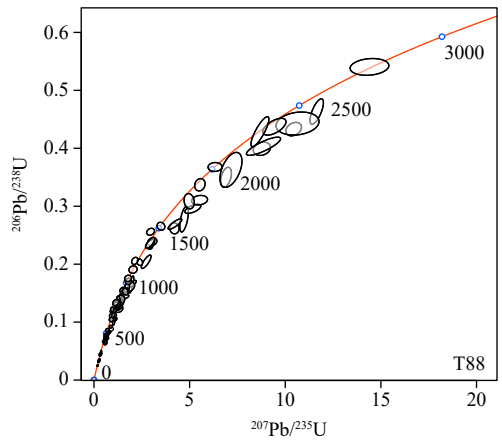


图 9　代表性样品谐和图

Fig. 9　Concordia diagram of representative samples

极性 R1 底部，因此，R1 则对应西域组的起始层位。野外地质调查结果表明，西域组砾岩与下伏阿图什组之间呈明显的过渡状态，为渐进不整合接触关系，不存在沉积间断。因此，参考研究区新生代晚期地层研究成果及上述对应关系，将西域组的底界年龄限定为 2.58 Ma，与 Sun and Liu（2006）的年龄结果相吻合。野外产状测量结果表明，普斯卡背斜剖面生长地层底界大致位于阿图什组与下伏乌恰群界线附近，即剖面约 300 m 处，对应年代约为 5.3 Ma。西域组砾岩也被卷入到生长地层之中，因此，普斯卡背斜变形时间开始于上新世早期，并至少持续至早更新世。

根据实测磁极性柱与 GTS 2020 的对比结果，建立了深度与年龄的对应关系，即普斯卡背斜新生代晚期沉积速率变化图（图 13）。结果表明，研究区内沉积速率平均值为 219.9 mm/ka，但新生代晚期地层的沉积速率并不是恒定不变的，拟合结果表明乌恰群（6.8～5.3 Ma）的沉积速率为 181.76 mm/ka，随后在约 5.3 Ma 增加至 258.05 mm/ka，沉积速率快速增加并形成了巨厚的阿图什组地层和西域组砾岩。沉积速率的明显增加与该剖面生长地层的底界年龄，以及野外所观察到的剖面上沉积物粒度的变化是一致的。

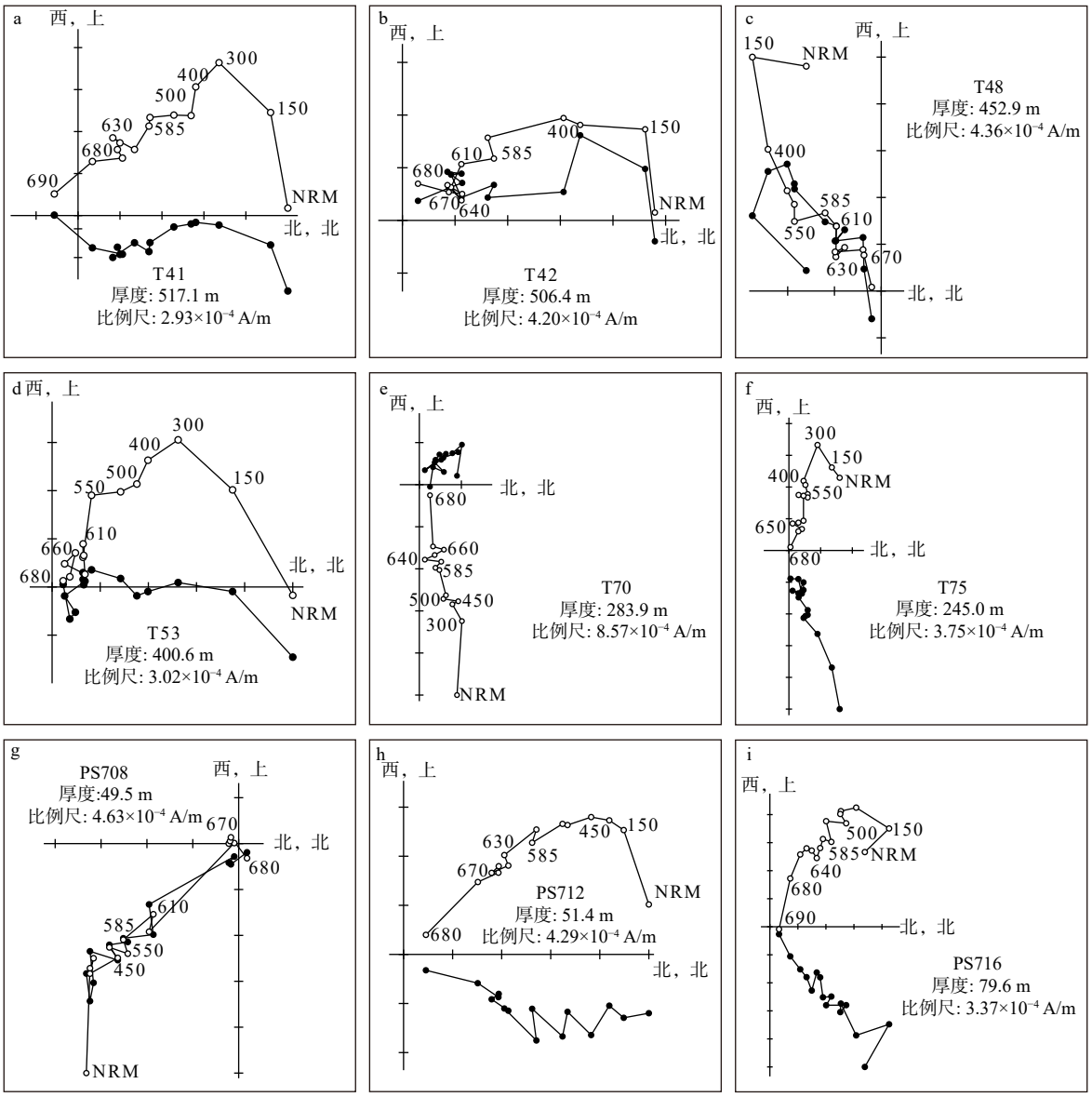
5　讨论

5.1　普斯卡构造变形时间

生长地层作为记录构造变形的标志，保存了构造变形事件的起始时间、持续过程和变形速率等关键信息。生长地层的形成标志着一期构造事件的开始，反映了该时期构造活动的显著增强，周围山系的隆升速率与幅度均显著提升（王永等，2006）。全球范围内的研究表明，生长地层分析已成为揭示造山带与前陆盆地耦合关系的重要手段，同时，为理解板块汇聚过程中的应变分配、地形演化和构造–气候相互作用提供了独特的窗口。

近年来，利用生长地层确定构造形成时间与变形速率在塔西南盆地得到了较好的应用，较典型的生长地层与生长褶皱有叶城甫沙背斜、桑株背斜等，这些生长地层的年代开始于早上新世（5.3 Ma；黎敦朋，2008）。黎敦朋（2008）、Sun et al.（Sun and Liu，2006；Sun et al.，2008）对桑株背斜生长地层进行研究，结合磁性地层确定阿图什组的底界年龄为 5.3 Ma，认为桑株背斜北翼的生长地层从上新世早期开始发育（黎敦朋，2008）。陈杰等（2001）根据生长地层的底界年龄推断西昆仑山前新生代晚期磨拉石建造褶皱变形的起始时间约为 3.6 Ma；刘胜等（2004）认为柯克亚背斜、固满背斜在晚上新世—早更新世（距今 2.14～1.80 Ma）开始变形。也有研究表明，塔里木盆地西南缘自上新统阿图什组开始发育生长地层（Sun et al.，2008），指示西昆仑造山带北缘自上新世起发生了强烈的逆冲运动；此外，自上新统阿图什组开始，碎屑物质的粒度和沉积速率均显著增加，这表明西昆仑造山带的快速隆升导致了剥蚀速率的显著增大。

普斯卡背斜生长地层高分辨率磁性地层学研究结果表明，该背斜构造变形开始于约 5.3 Ma，并至少持续至早更新世。该结果与桑株背斜、甫沙背斜构造变形时间相一致，且与西昆仑前陆盆地内近源



实心圆与空心圆分别代表投影在水平面和垂直面上的矢量；比例尺表示的是剩磁强度；NRM 为天然剩磁

a—样品编号 T41；b—样品编号 T42；c—样品编号 T48；d—样品编号 T53；e—样品编号 T70；f—样品编号 T75；g—样品编号 PS708；h—样品编号 PS712；i—样品编号 PS716

图 10 代表性样品的剩磁矢量正交投影图

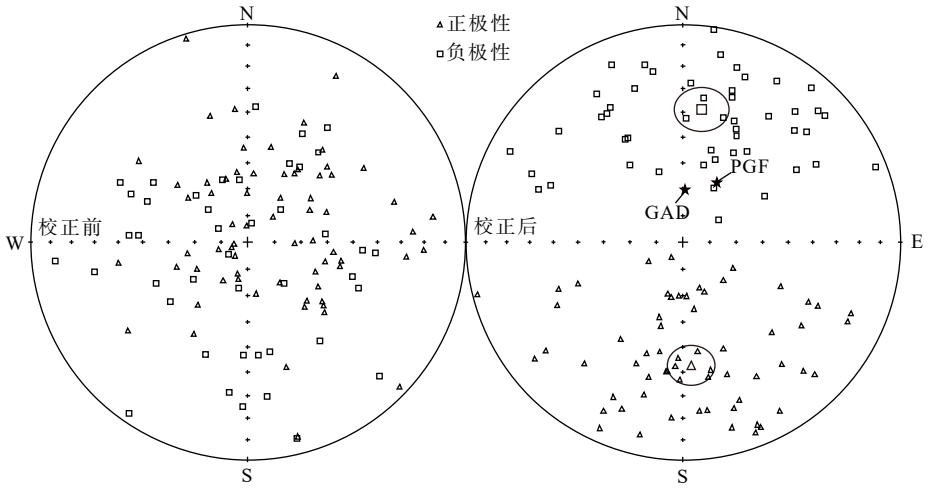
Fig. 10 Orthogonal vector diagrams of representative samples

(a) Sample number T41; (b) Sample number T42; (c) Sample number T48; (d) Sample number T53; (e) Sample number T70; (f) Sample number T75; (g) Sample number PS708; (h) Sample number PS712; (i) Sample number PS716

Solid and open circles represent vectors projected on horizontal and vertical planes, respectively.

碎屑物质大量沉积的时间接近。这些研究成果共同表明西昆仑造山带前陆盆地在上新世早期经历了一次区域性的构造强化事件。这一构造事件的同步性可能响应了西昆仑造山带阶段性的隆升事件。西昆仑造山带前陆盆地内新生代晚期沉积物物源分析结果表明，自上新世以来，沉积物中的变质岩屑成分明显增多（Zhang et al., 2023），暗示西昆仑造山带在上新世以来开始强烈隆升，其变质岩基底遭受剥蚀。同时，最新的低温热年代学结果表明，西昆仑造山带在约 7～6 Ma 经历了一次显著的剥露事件（Xiang et al., 2026），导致山前沉积速率的明显增大。

生长地层所代表的构造变形持续时限表明，西昆仑山前的构造活动并非短暂的脉冲式事件，而是



空心方块与实心三角分别表示向下与向上的磁化方向。大比例的方块与三角分别代表正向与反向的 fisher 平均值，椭圆代表 95% 置信区间。星形分别指示地心轴向偶极子场（GAD）及现代地磁场（PGF）方向

图 11　等面积投影显示下半球倾斜校正前与校正后的特征剩磁方向

Fig. 11　Equal-area projection (lower hemisphere) of the ChRM directions before (left) and after (right) tilt-correction

The open squares and solid triangles indicate downward and upward directions. The larger square and triangle represent the Fisher-mean values of the normal and reversed directions, respectively, with ellipses indicating the 95% confidence interval. The black stars represent the geocentric axial dipole (GAD) and the present geomagnetic field (PGF) directions, respectively.

一个持续数百万年的动态过程。此次研究所揭示的构造变形持续时间，记录了印度–欧亚板块持续汇聚背景下，构造应力在西昆仑前陆地区的长期积累和释放过程。值得注意的是，普斯卡背斜与其他背斜在变形起始时间上的系统性差异，可能揭示了构造变形前展式传播的时空规律。

5.2　西昆仑造山带的构造隆升

西昆仑造山带作为青藏高原的北部边界，其新生代的构造隆升历史是揭示青藏高原生长机制、大陆内部变形过程及构造–气候–地貌相互作用的核心。已有研究结果表明，西昆仑造山带新生代以来的构造隆升历史是一个复杂、多阶段的动态过程。Sobel（1995）和 Zhang et al.（2018）的盆地沉降分析表明，塔西南盆地在 66～62 Ma 就已经开始构造沉降，这直接揭示了西昆仑山体的负载作用与初始隆升。随后，Bosboom et al.（2014）和 Sun et al.（2016）提出，副特提斯海受到构造影响于约 40 Ma 从塔西南退出，转为陆相沉积环境，标志着远源前陆盆地正式开始发育，这与 Yin et al.（2002）提出的该区域在约 37 Ma 发生显著沉降，以及 Zhang et al.（2023）认为的前陆盆地物源在约 40 Ma 发生显著变化的结论相吻合。Li et al.（2019）利用低温热年代学的研究结果揭示出南昆仑地块在古新世—始新世（约 58～51 Ma）发生了多期隆升剥露事件，该发现得到了西昆仑山前沉积碎屑记录（Yin et al., 2002; Cao et al., 2015）的佐证。同时，Yin et al.（2002）通过构造–沉积分析认为塔西南盆地在约 46 Ma 前已发生地壳增厚，Cowgill（2001）指出帕米尔东缘的喀什–叶城转换系统在约 37 Ma 已经开始活动，表明区域构造格局早已定型。

渐新世—早中新世以来，西昆仑山前褶皱冲断带开始变形，并不断向塔里木盆地内部扩展（Suppe et al., 2015; Cheng et al., 2017; Liu et al., 2021; Huang et al., 2023）。大量低温热年代学研究也支持这一观点，认为北昆仑地块在末渐新世—早中新世开始剥露，如 Sobel and Dumitru（1997）通过对阿尔塔什剖面磷灰石裂变径迹的分析认为西昆仑造山带在 25～20 Ma 经历了一次强烈的构造隆升；Cowgill（2001）和 Jiang et al.（2024）认为西昆仑造山带的强烈抬升剥露发生于早中新世；Wang et al.（2003）通过对西昆仑造山带多个构造位置的花岗岩岩体、花岗糜棱岩进行了裂变径迹分析，认为北昆仑地块在 19.1 Ma 开始隆升剥露，南昆仑地块在 8.8 Ma 开始隆升剥露；Cao et al.（2015）通过对西昆仑山前新生代沉积地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄和裂变径迹双定年分析认为西昆仑造山带的整体隆升开始于晚渐新世—早中新世，至 15 Ma 左右西昆仑造山带开始加速剥露抬升。

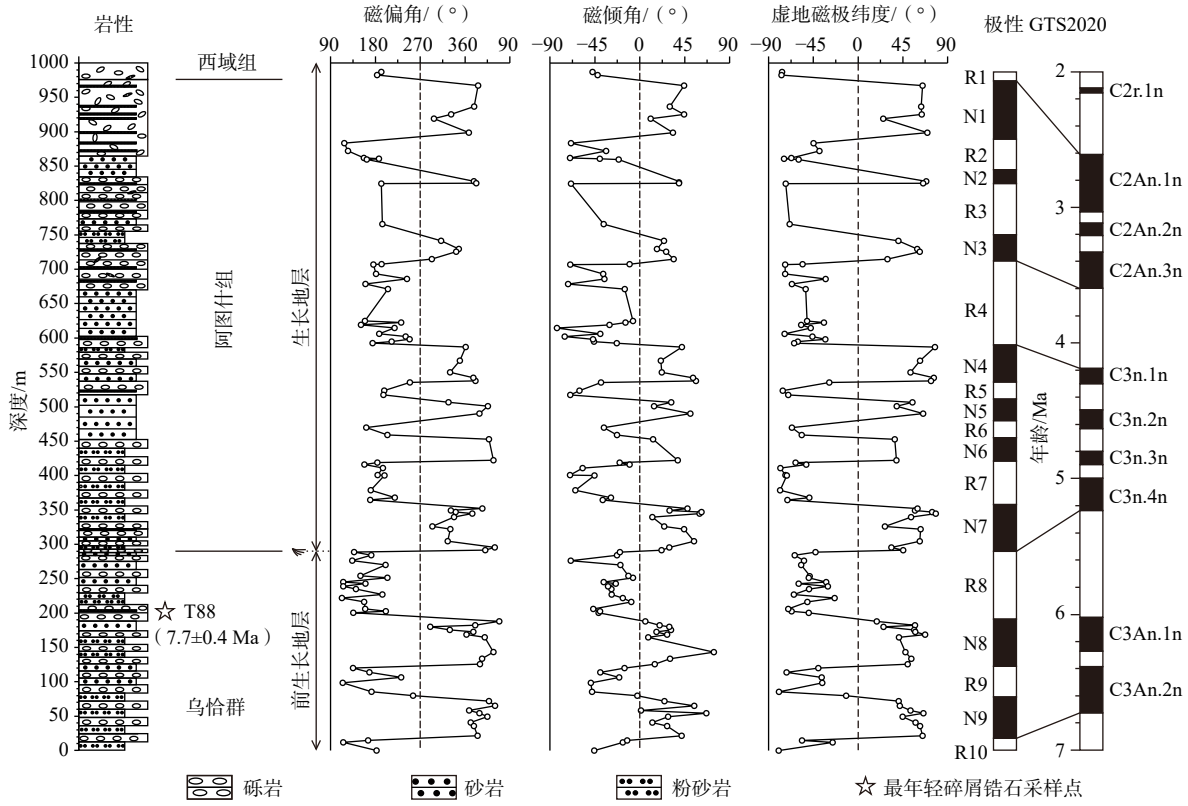


图 12 普斯卡背斜岩性变化、厚度及磁性地层与国际地磁极性年表的对比

Fig. 12 Variations of lithology versus the thickness and the magnetostratigraphic results of the northern limb of the Puska Anticline (The polarity sequence is constructed using the declinations, inclinations, and the VGP latitudes.)

The star represents the sampling site of the youngest detrital zircon.

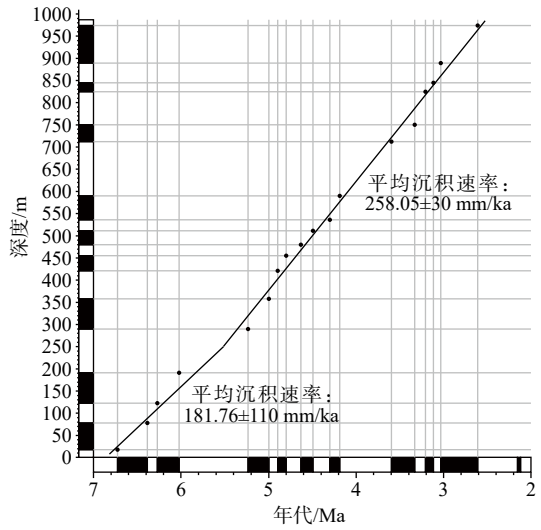


图 13 基于磁性地层年代与地层厚度计算的沉积速率变化曲线

Fig. 13 Sedimentation rates calculated from magnetostratigraphic ages versus stratigraphic thickness

已有对塔西南盆地进行的大量沉积学、磁性地层学、孢粉学、热年代学、构造变形等方面的研究表明，西昆仑造山带在晚中新世—早上新世经历了一期快速隆升事件（Jin et al., 2003; 刘胜等, 2004; Sun and Liu, 2006; Sun et al., 2008; 黎敦朋等, 2010; Zhang et al., 2023; Xiang et al., 2026）。Zheng et al.（2000）通过对柯克亚剖面开展详细的沉积学和磁性地层学研究，认为西昆仑造山带在 4.5～3.6 Ma 开始快速隆升；Jin et al.（2003）通过对西昆仑山前多条新生代剖面沉积学分析认为，山前中新世晚期以来的磨拉石沉积是西昆仑造山带快速隆升的表现；Sun et al.（2008）利用磁性地层学对桑株背斜上发育的生长地层底界进行了限定，认为构造变形开始于约 5.3 Ma；黎敦朋等（2010）则认为青藏高原西北缘新生代晚期以来多期强烈的岩浆活动可能预示着这一阶段构造活动显著增强；刘函等（2010）认为西昆仑造山带及邻区在约 4.7 Ma 以来经历了最后一次大规模构造抬升；最新的低温热年代学结果表明，西昆仑造山带晚中新世以来经历了 2 次快速隆升事件，一次发生在约 11～10 Ma，可能与印度岩石圈地幔与塔里木岩石圈地幔的直接碰撞有关，另外一次发生于约 7～6 Ma，可能与印度岩石圈向西昆仑造山带下插导致的北西—南东向撕裂作用有关（Xiang et al., 2026）。

基于普斯卡背斜生长地层的高精度磁性地层学结果，此次研究获得了约 5.3 Ma 的构造变形起始年龄。这一关键时间的限定，为深入理解西昆仑造山带新生代晚期构造隆升过程提供了新的年代学约束。该背斜构造变形时间与桑株背斜、甫沙背斜等邻近构造的变形时间基本一致，共同指示了西昆仑造山带前陆盆地在约 5.3 Ma 前后经历了一次区域性的构造变形事件，表明西昆仑造山带在此时发生了一次强烈的构造隆升。结合区域构造资料，认为这一时期标志着西昆仑造山带的构造隆升进入了新的活跃阶段。同时，这一时期也是青藏高原西北缘构造格局重组的重要时期，反映了高原生长过程中的一次构造强化。

6　结论

文章在已有研究的基础上，结合岩石磁学与磁性地层学对普斯卡背斜进行分析，得出以下结论：

（1）岩石磁学及热磁分析结果共同表明，普斯卡剖面主要的载磁矿物为赤铁矿和磁铁矿。

（2）高分辨率磁性地层学结果表明，普斯卡剖面地层形成年代约为 6.8～2.4 Ma，生长地层的底界位于乌恰群与阿图什组地层界线附近，对应的年代为约 5.3 Ma，暗示该背斜的构造变形开始于约 5.3 Ma，从盆山耦合的角度证明西昆仑造山带在早上新世经历了一次强烈的构造隆升。

（3）结合塔西南盆地沉积、构造、低温热年代学等多方面的研究成果，认为青藏高原西北缘自约 5.3 Ma 以来发生了一期强烈的构造隆升，构造应力开始向盆地方向传递。

致谢：文章在实验过程中得到中国地质科学院地质力学研究所叶小舟老师、中国科学院地质与地球物理研究所沈中山博士后的大力支持，并同中国科学院地质与地球物理研究所刘越硕士在古地磁计算上进行了有益讨论，在此一并诚挚谢忱。

作者贡献声明：张丽娟、张志亮负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；任治坤、包国栋、宁雨涛参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；张丽娟、张志亮参与数据分析、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: ZHANG Lijuan and ZHANG Zhiliang conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; REN Zhikun, BAO Guodong and NING Yutao participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; ZHANG Lijuan and ZHANG Zhiliang 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

AZMAT M, JIA D, ZHONG C, et al., 2025. Analogue modeling of the formation mechanism of ultra-long distance overthrust: a case study of the Karakash River profile in southwestern Tarim Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 31(6): 720-732. (in Chinese with English abstract)

BOSBOOM R, DUPONT-NIVET G, GROTHE A, et al., 2014. Timing, cause and impact of the late Eocene stepwise sea retreat from the Tarim Basin (west China)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 403: 101-118.

CAO K, WANG G C, BERNET M, et al., 2015. Exhumation history of the West Kunlun Mountains, northwestern Tibet: evidence for a long-lived, rejuvenated orogen[J]. Earth and Planetary Science Letters, 432: 391-403.

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 J, LU Y C, DING G Y, et al., 2001. Records of late Cenozoic mountain building in Western Tarim basin: molasses, growth strata and growth unconformity[J]. Quaternary Sciences, 21(6): 528-539. (in Chinese with English abstract)

CHENG X G, CHEN H L, LIN X B, et al., 2017. Geometry and kinematic evolution of the Hotan-Tiklik segment of the western Kunlun thrust belt: Constrained by structural analyses and apatite fission track thermochronology[J]. The Journal of Geology, 125(1): 65-82.

COWGILL E S, 2001. Tectonic evolution of the Altyn Tagh-Western Kunlun fault system, northwestern China[D]. Los Angeles: University of California.

DENG Q D, FENG X Y, ZHANG P Z, et al. , 2000. Active tectonics of the Chinese Tianshan mountain[M]. Beijing: Seismological Press: 373-375. (in Chinese)

DONG L, SHEN Z S, DENG C L, 2024. Mineral magnetism of the Jingbian loess-paleosol sequence and its paleoclimatic significance[J]. Chinese

Journal of Geophysics, 67(8): 3060-3074. (in Chinese with English abstract)

DU D D, LI H H, YAN L, et al., 2023. Deformation migration and three major geological events in Tarim Basin and their geological significance[J]. Chinese Journal of Geology, 58(2): 379-397. (in Chinese with English abstract)

GUO W X, QI J F, 2008. Relationship of sedimentation and tectonism in growth strata developed by growth folding[J]. Geoscience, 22(4): 520-524. (in Chinese with English abstract)

HE P Y, LI T, CHEN Z X, et al., 2025. Growing history and geomorphic response of the eastern termination of Kashi anticline, southwestern Tian Shan: an integrated analysis of geology, geomorphology, seismic reflection profile and magnetostratigraphy[J]. Seismology and Geology, 47(2): 369-383. (in Chinese with English abstract)

HONG C, ZHANG L, LIN X B, et al., 2022. Analogue modeling of the deformation in the southwest Tarim Basin: implications for the influence of denudation and syn-tectonic sedimentation on the deformation of fold-and-thrust belts[J]. Quaternary Sciences, 42(3): 692-703. (in Chinese with English abstract)

HUANG H, LIN X B, AN K X, et al., 2023. Surface processes driving intracontinental basin subsidence in the context of India-Eurasia collision: evidence from flexural subsidence modeling of the cenozoic southern Tarim Basin along the West Kunlun Foreland, NW Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 97(6): 1778-1786.

JIANG L, DONG H K, LI Y, et al., 2024. Deformation characteristics and exploration potential of the West Kunlun foreland fold-and-thrust belt[J]. Advances in Geo-Energy Research, 11(3): 181-193.

JIN X C, WANG J, CHEN B W, et al., 2003. Cenozoic depositional sequences in the piedmont of the west Kunlun and their paleogeographic and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 21(7): 755-765.

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, CHEN G H, HE Z Y, et al., 2023. Migration processes of the cenozoic intracontinental foreland basins in Western China and their tectonics implications[J]. Advances in Earth Science, 38(7): 729-744. (in Chinese with English abstract)

LI C H, CHEN Z L, HUO H L, et al., 2025. Late Paleozoic tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt: constraints and insights from detrital zircon U-Pb geochronology in the Western Qinling[J]. Journal of Geomechanics, 31(4): 617-637. (in Chinese with English abstract)

LI D P, 2008. Tectonic deformation on northwestern margin of Tibetan Plateau during Pliocene-Pleistocene and uplift of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

LI D P, ZHAO Y, LIU J, et al., 2010. Late Cenozoic tectonic deformation on the northwestern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 84(3): 293-310. (in Chinese with English abstract)

LI G W, SANDIFORD M, FANG A M, et al., 2019. Multi-stage exhumation history of the West Kunlun orogen and the amalgamation of the Tibetan Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 528: 115833.

LI Y, ZHAO S Z, LI P Y, et al. , 2025. Research progress and future perspectives of the foreland basin dynamics[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(0):1-35. (in Chinese with English abstract)

LIAO L, 2010. Cenozoic tectonic events and their sedimentary records in the West Kunlun[D]. Hangzhou: Zhejiang University. (in Chinese with English abstract)

LIU H, WANG G C, CAO K, et al., 2010. The detrital zircon fission-track ages constraint to tectonic processes in west Kunlun and adjacent regions[J]. Earth Science Frontiers, 17(3): 64-78. (in Chinese with English abstract)

LIU H F, 2000. Types of basin-mountain coupling[J]. Earth Science Frontiers, 7(4): 469. (in Chinese)

LIU S, WANG X, WU X F, et al., 2004. Growth strata and the deformation time of the late Cenozoic along front belts of Pamir-western Kunlun-southwest Tianshan in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 25(5): 24-28. (in Chinese with English abstract)

LIU S F, LIN C F, LIU X B, et al., 2018. Syn-tectonic sedimentation and its linkage to fold-thrusting in the region of Zhangjiakou, North Hebei, China[J]. Science China Earth Sciences, 61(6): 681-710.

LIU W H, KRZYWIE P, MAZUR S, et al., 2021. The Cenozoic structural evolution of the southwestern Tarim Basin, China[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. New York: EGU: EGU21-3721.

LU H, LIU H, HU F, et al., 2023. Record of Mesozoic collision orogeny on the eastern section of the West Kunlun Orogen: evidence from geochronology and geochemistry of the Triassic Wenquan-Shenglidaban granitic intrusions, Xinjiang[J]. Geoscience, 37(3): 573-585. (in Chinese with English abstract)

MCFADDEN P L, MCELHINNY M W, 1990. Classification of the reversal test in palaeomagnetism[J]. Geophysical Journal International, 103(3): 725-729.

O'REILLY W, 1984. Rock and mineral magnetism[M]. Boston, MA: China Springer: 194-212.

OGG J G, 2020. Geologic Time Scale 2020[M]. Elsevier: 159-192.

ROBERTS A P, CUI Y L, VEROSUB K L, 1995. Wasp-waisted hysteresis loops: mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B9): 17909-17924.

RUDDIMAN W F, KUTZBACH J E, 1989. Forcing of late Cenozoic northern hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American West[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 94(D15): 18409-18427.

SHI X F, LIU S F, LIN C F, 2019. Growth structures and growth strata of the Qianjiadian Basin in the western Yanshan fold and thrust belt, North China[J]. Science China Earth Sciences, 62(7): 1092-1109.

SOBEL E R, 1995. Basin analysis and apatite fission-track thermochronology of the Jurassic-Paleogene southwest Tarim Basin, NW China[D]. California: Stanford University.

SOBEL E R, DUMITRU T A, 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B3): 5043-5063.

SUN J M, LIU T, 2006. The age of the Taklimakan desert[J]. Science, 312(5780): 1621-1621.

SUN J M, ZHANG L Y, DENG C L, et al., 2008. Evidence for enhanced aridity in the Tarim Basin of China since 5.3 Ma[J]. Quaternary Science Reviews, 27(9-10): 1012-1023.

SUN J M, WINDLEY B F, ZHANG Z L, et al., 2016. Diachronous seawater retreat from the southwestern margin of the Tarim Basin in the late Eocene[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 116: 222-231.

SUN Z M, LI H B, PEI J L, et al., 2013. Paleomagnetic study of Cenozoic sediments from western Kunlun-Pamir and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(9): 3183-3191. (in Chinese with English abstract)

SUPPE J, WANG X, HE D, et al., 2015. Large-scale thrusting along the northern margin of the Tibetan Plateau and the southwest Tarim basin: 230 km long active Hotian thrust sheet[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. New York: AGU: T21A-2790.

WANG E, WAN J, LIU J Q, 2003. Late Cenozoic geological evolution of the foreland basin bordering the West Kunlun range in Pulu area: constraints on timing of uplift of northern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B8): 2401.

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 Y, LI D G, XIAO X C, et al., 2006. Late Cenozoic tectonic movement in the front of the West Kunlun Mountains and uplift of the northwestern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 33(1): 41-47. (in Chinese with English abstract)

XIANG D F, MAO Q G, CHEW D, et al., 2026. Late Miocene rapid exhumation in the West Kunlun range: Insights into Tibetan Plateau growth and India-Asia lithospheric collision[J]. Geology,54(1): 24-29.

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)

YIN A, RUMELHART P E, BUTLER R, et al., 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation[J]. Geological Society of America Bulletin, 114(10): 1257-1295.

ZHANG P Z, 2004. Late Cenozoic tectonic deformation in the Tianshan Mountain and its foreland basins[J]. Chinese Science Bulletin, 49(4): 311-313.

ZHANG S J, HU X M, HAN Z, et al., 2018. Climatic and tectonic controls on Cretaceous-Palaeogene sea-level changes recorded in the Tarim epicontinental sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 501: 92-110.

ZHANG S J, HU X M, GAO Z Q, et al., 2021. Palaeogene uplift and deformation in West Kunlun Mountains: timing, evidence and controversy[J]. Geological Review, 67(4): 1057-1076. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z L, SUN J M, ZHANG B, et al., 2023. Cenozoic source-to-sink relations between the West Kunlun Mountains and SW Tarim Basin: evidence from an integrated provenance analysis[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 632: 111858.

ZHANG Z Y, GUO Z J, SONG Y, et al., 2025. Identification and application of growth strata associated with strike-slip faults: example from the Piqiang fault in the northwestern margin of the Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 58(3): 196-205. (in Chinese with English abstract)

ZHENG H B, POWELL C M, AN Z S, et al., 2000. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau[J]. Geology, 28(8): 715-718.

附中文参考文献

艾孜买提·米尔亥力木，贾东，钟城，等，2025. 超长距离逆冲推覆体形成机制的物理模拟：以塔西南喀拉喀什河剖面为例[J]. 高校地质学报，31(6)：720-732.

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.

陈杰，卢演俦，丁国瑜，等，2001. 塔里木西缘晚新生代造山过程的记录：磨拉石建造及生长地层和生长不整合[J]. 第四纪研究，21(6)：528-539.

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：373-375.

董良，沈中山，邓成龙，2024. 黄土高原靖边剖面岩石磁学性质及其古环境意义[J]. 地球物理学报，67(8)：3060-3074.

杜德道，李洪辉，闫磊，等，2023. 塔里木盆地构造变形迁移与三大地质事件的关系及其地质意义[J]. 地质科学，58(2)：379-397.

郭卫星，漆家福，2008. 同沉积褶皱生长地层中沉积与构造关系[J]. 现代地质，22(4)：520-524.

何鹏宇，李涛，陈竹新，等，2025. 西南天山喀什背斜东倾伏端的生长演化和地貌响应：基于地质地貌、地震反射剖面和磁性地层数据的综合分析[J]. 地震地质，47(2)：369-383.

洪晨，张亮，林秀斌，等，2022. 塔里木西南地区变形的构造物理模拟研究：对剥蚀与同沉积影响褶皱冲断带变形的启示[J]. 第四纪研究，42(3)：692-703.

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.

李超，陈国辉，何智远，等，2023. 中国西部新生代陆内前陆盆地迁移过程及其构造指示意义[J]. 地球科学进展，38(7)：729-744.

李程昊，陈正乐，霍海龙，等，2025. 晚古生代秦岭造山带构造演化：西秦岭碎屑锆石 U-Pb 年代学的制约与启示[J]. 地质力学学报，31(4)：617-637.

黎敦朋，2008. 青藏高原西北缘上新世—早更新世构造变形与高原隆升[D]. 北京：中国地质科学院.

黎敦朋，赵越，刘健，等，2010. 青藏高原西北缘晚新生代构造变形研究[J]. 地质学报，84(3)：293-310.

李勇，赵少泽，李芃宇，等，2025. 前陆盆地动力学的研究进展与未来发展方向[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，53(0)：1—35.

廖林，2010. 西昆仑新生代构造事件及其沉积响应[D]. 杭州：浙江大学.

刘函，王国灿，曹凯，等，2010. 西昆仑及邻区区域构造演化的碎屑

锆石裂变径迹年龄记录[J]. 地学前缘, 17(3): 64-78.

刘和甫, 2000. 盆山耦合类型[J]. 地学前缘, 7(4): 469.

刘胜, 汪新, 伍秀芳, 等, 2004. 塔西南山前晚新生代构造生长地层与变形时代[J]. 石油学报, 25(5): 24-28.

鲁浩, 刘欢, 胡峰, 等, 2023. 西昆仑造山带东段中生代碰撞造山事件的记录: 来自新疆温泉—胜利达坂一带三叠纪侵入岩年代学、地球化学的证据[J]. 现代地质, 37(3): 573-585.

史肖飞, 刘少峰, 林成发, 2019. 燕山构造带西段千家店盆地生长构造与生长地层[J]. 中国科学: 地球科学, 49(7): 1116-1133.

孙知明, 李海兵, 裴军令, 等, 2013. 帕米尔-西昆仑地区新生代古地磁结果及其构造意义[J]. 岩石学报, 29(9): 3183-3191.

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.

王永, 李德贵, 肖序常, 等, 2006. 西昆仑山前晚新生代构造活动与青藏高原西北缘的隆升[J]. 中国地质, 33(1): 41-47.

杨庚, 陈竹新, 2023. 塔西南齐姆根楔形构造与走滑构造叠加两阶段演化模式[J]. 地质科学, 58(2): 347-378.

张培震, 2003. 天山及其前陆盆地的晚新生代构造变形[J]. 科学通报, 48(24): 2499-2500.

张世杰, 胡修棉, 郜周全, 等, 2021. 西昆仑山古近纪隆升变形: 时间、证据和争论[J]. 地质论评, 67(4): 1057-1076.

张子亚, 郭召杰, 宋岩, 等, 2025. 走滑断裂的生长地层识别与应用: 以塔里木盆地西北缘皮羌断裂为例[J]. 西北地质, 58(3): 196-205.