

新疆天山造山带新生代多期次剥露作用过程*

吕红华^{①②} 王玮^② 常远^② 周祖翼^②

(^①华东师范大学资源与环境科学学院,上海 200241; ^②同济大学海洋与地球科学学院海洋地质国家重点实验室,上海 200092)

摘要 天山造山带新生代剥露过程一直受到普遍关注。对沿横穿天山的乌鲁木齐-库尔勒公路胜利达坂以南段采集的基岩样品进行了详细的磷灰石裂变径迹分析。热史模拟结果显示,该段天山的新生代剥露历史分为两个阶段,即古近纪期间的缓慢剥露阶段和中新世以来的快速剥露阶段,其剥露速率分别为 $<30\text{m/Ma}$ 和 $70\sim 160\text{m/Ma}$ 。综合分析前人在东天山、北天山以及南天山等天山不同区域取得的低温热年代学数据,我们认为,新生代天山造山带可能经历了4次快速剥露过程,分别开始于新生代早期($67\sim 65\text{Ma}$)、始新世中期(约 $40\pm 5\text{Ma}$)、渐新世末-中新世中期(约 $20\pm 5\text{Ma}$)以及中新世中晚期(约 $10\pm 2\text{Ma}$)。这4次快速剥露过程分别发生于造山带的某一或某些区域,表明新生代天山地区的剥露过程存在明显的空间差异性。从整个天山造山带来看,渐新世末-中新世中期开始的快速剥露影响范围可能最广,是新生代天山地区一次重要的剥露作用过程。

关键词 磷灰石裂变径迹 剥露速率 时空分异 新生代 天山

中图分类号 P542.2, P597^{*}.3 **文献标识码** A

天山山脉绵延耸立于中亚地区,它东西长约2500km,南北宽度达250~350km,是亚洲最主要的、规模巨大的山系之一。通常认为,新生代天山的复活再造山受控于亚洲大陆的构造演化背景^[1,2]。弄清天山新生代的构造活动历史与剥露过程,是理解亚洲大陆内部造山带的构造变形过程与机理的重要途径之一^[2]。

着眼于天山地区中生代,特别是新生代以来的构造活动与剥露历史,前人在北天山及其前陆^[3-15]、东天山的博格达山与哈尔里克山^[16-20]、中天山^[9,21-23]、南天山及其前陆以及西南天山前陆^[4,9,10,24-28]等不同地区开展了沉积学、地貌学、磁性地层与低温热年代学等方面的研究。这些研究在很大程度上促进了我们对天山地区中生代、新生代地质构造演化和剥露历史的认识和理解。需要注意的是,天山造山带被大型走滑断裂或逆断裂分割为若干地块^[29,30],不同地块的构造活动历史与剥露作用过程可能因此存在差异。更多的研究与数据积累有助于进一步揭示天山造山带构造隆升与剥露过程的阶段性以及区域差异性。基于此,本文对沿乌鲁木齐-库尔勒公路胜利达坂(也称冰达坂)以南段采集的基岩样品开展了磷灰石裂变径迹低温热年代学

分析,进一步结合前人的研究成果,尝试探讨天山造山带新生代剥露过程的特征。

1 区域地貌特征与地质构造背景

天山山脉总体上近东西走向,西宽东窄;东、西段均形成南北分支,吐鲁番-哈密盆地和伊犁盆地分别位于其间;组成天山山脉的山系在空间展布上呈现不同特征。我国境内的天山山脉一般以东经 88° 线(即乌鲁木齐附近)被划分为东天山和西天山^[1,31]。东天山北支包括博格达山、巴里坤山和哈尔里克山,其南侧为吐鲁番-哈密盆地;库鲁克塔格和觉罗塔格属于东天山南支,地貌上表现为低山丘陵与戈壁(图1)。我国境内的西天山自北向南又被划分为北天山、伊犁-中天山、南天山和西南天山^[31]。北天山呈北西西走向,主要包括博罗科努山和依连哈比尔尕山,其中北西西走向的依连哈比尔尕山与其东部的博格达山相连;中天山主要包括察汗乌苏山、塔斯巴山以及伊犁盆地等;南天山由北东东走向的哈尔克山、那拉提山及北西西走向的霍拉山等组成(图1)。

天山不同地块被一系列重要的近东西走向的走滑或逆冲断裂带分割(图1)。其中,北天山断裂带

第一作者简介:吕红华 男 34岁 副教授 新构造与构造地貌学专业 E-mail: hhlv@geo.ecnu.edu.cn

* 国家自然科学基金项目(批准号:41001002)和中国博士后科学基金特别资助项目(批准号:201003277)共同资助
2012-11-29 收稿,2013-03-08 收修改稿

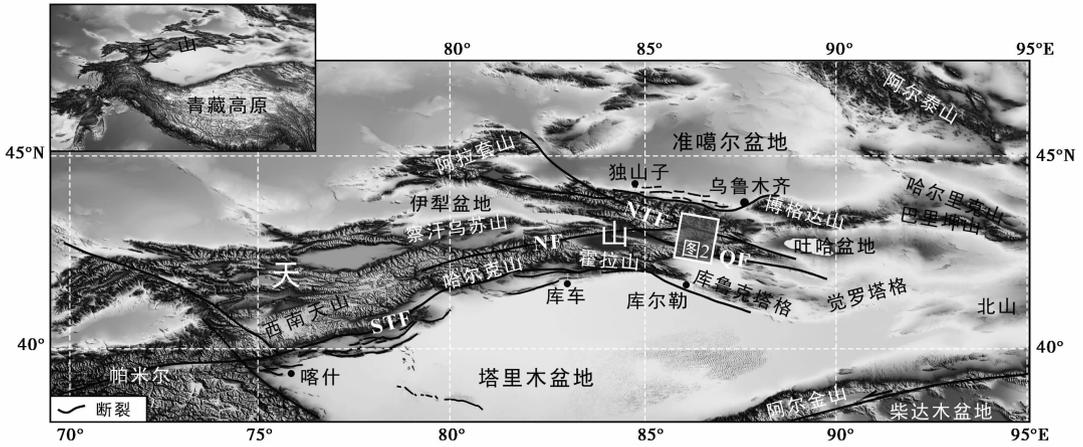


图1 中亚天山地区 DEM 地貌特征与主要的断裂带位置
断裂带位置据参考文献[9,32,33]

图中方框标示本文采样区域,见图2; NTF=北天山断裂带,STF=南天山断裂带,NF=那拉提断裂,QF=青布拉克断裂

Fig. 1 Map showing geomorphology and tectonics of the Tian Shan and its surrounding areas in the Central Asia. Tectonic style is after the references[9,32,33]. The white rectangle shows the sampled area in this study.

NTF:North Tianshan Fault;STF;South Tianshan Fault; NF:Nalati Fault; QF:Qingbulake Fault

(NTF)为天山北部的一个重要断裂^[34],构造上分割北天山与中天山。天山中部的重要断裂沿通常所称的尼古拉耶夫构造线展布,在西部称为那拉提断裂(NF),在东部则为青布拉克断裂(QF),被认为是中天山和南天山的分界^[9,29]。南天山断裂(STF)分割天山造山带与其南部的塔里木盆地^[9](图1)。

天山复杂的盆山地貌格局与构造体系反映其地壳结构和地质演化历史具有相当程度的复杂性^[31]。经过大量研究,目前已趋于认为古天山由多个地块先后经过晚泥盆世-早石炭世、晚石炭世-早二叠世等多个阶段的碰撞、增生融合而逐步形成^[25,29,35]。天山地区在经历了中生代早期(三叠纪-晚侏罗世)的准平原化状态之后,在晚侏罗世-早白垩世进入构造活跃阶段,随后在中生代末期(晚白垩世)与新生代早期再次进入相对的构造平静期、剥蚀夷平状态^[36-38]。也有观点^[39]认为天山在整个中生代期间作为正地形而分割其南北的塔里木盆地与准噶尔盆地。响应于第三纪早期的印度-欧亚板块强烈挤压碰撞^[40],分割天山各地块的断裂带在新生代重新活动,天山地区再度经历挤压褶皱、隆升造山等陆内变形作用^[41],并向南北两侧前陆盆地扩展,从而在天山山前的乌鲁木齐凹陷、库车凹陷、喀什凹陷等凹陷区发育多排褶皱冲断带^[1,25,35](图1)。

本文采样路线乌鲁木齐-库尔勒公路(以下简称乌库公路)横穿北天山、中天山、南天山三大构造单元(图1),其中北天山与中天山的构造界线位于

胜利达坂以北的望峰一带,中天山与南天山的界线位于和静县巴仑台地区的乌瓦门一带^[23]。本研究中磷灰石裂变径迹基岩样品采集区主要属于中天山构造带(图1和图2),该采样区主要出露元古界中天山群片岩、下古生界志留系片岩和片麻岩以及灰岩、泥盆系灰岩与火山碎屑岩、石炭系凝灰岩、中生界砂岩与砾岩以及华力西期侵入岩等(图2)。前人^[9,23]沿乌库公路乌拉斯台至巴仑台段开展的磷灰石裂变径迹研究表明,该地区侵入岩体的热演化历史较为单一。

2 样品采集与测试分析方法

本文中磷灰石裂变径迹分析样品沿乌鲁木齐-库尔勒公路胜利达坂以南段采集(图1和图2)。样品均采自新鲜基岩露头,用布袋包装,重约3~4kg,每个采样点用便携式GPS进行定位、标高。详细采样信息见表1。利用磁选和重液分选技术,每个样品挑选大约500个磷灰石颗粒。进一步挑选的磷灰石颗粒用于随后的裂变径迹(FT)分析。

磷灰石裂变径迹分析(AFT)采用外探测器法(ED法),选择标准玻璃IRMM-540^[42,43]作为辐照通量的监视器,使用Fish Canyon Tuff(FCT)磷灰石($27.8 \pm 0.7\text{Ma}$)^[44]作为标准样。AFT测试分析流程概括为:将待测样品与标准样纯化、薄片制备与金刚砂(依次为 $6\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$)抛光后蚀刻,蚀刻条件为 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 的恒温条件下(恒温水槽控制温度)在

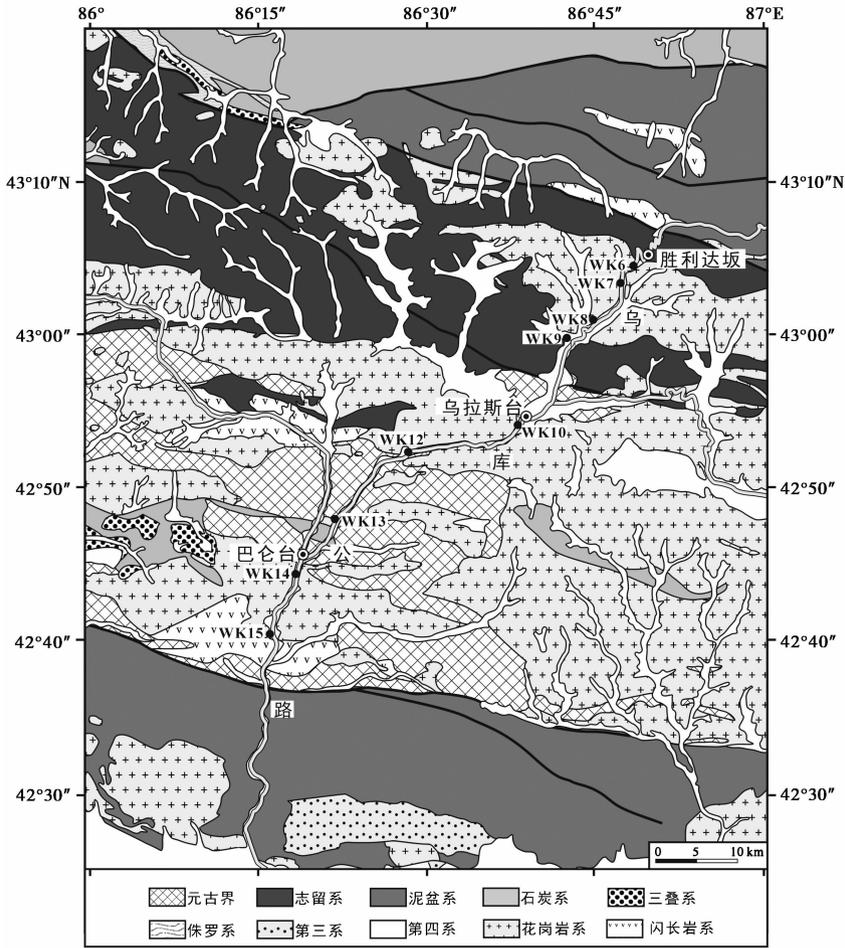


图2 乌鲁木齐-库勒勒公路(乌库公路)沿线地质简图(基于1:200000地质图巴仑台幅和焉耆幅绘制)

实心圆点标示磷灰石裂变径迹样品采样点位,图中仅标示完成全部裂变径迹分析步骤的样品(具体见表1)

Fig. 2 Geological map (based on 1:200000 Baluntai and Yanqi geological maps) along the Ürümqi-Korla Road across the Tian Shan. Solid dots along the Road show samples which were performed for all the analytical procedures of apatite fission track

表1 乌库公路沿线基岩样品采样信息*

Table 1 Information on apatite fission-track samples from the Ürümqi-Korla road

样号	高程 /m	采样点位		采样岩性 (根据1:20万地质图巴仑台幅)
		北纬(N)	东经(E)	
WK6	3621	43°4'38.5"	86°48'15.6"	华力西早期黑云母花岗岩(γ_4^{1C})
WK7	3369	43°3'21"	86°47'22.1"	华力西早期黑云母花岗岩(γ_4^{1C})
WK8	3210	43°0'55.5"	86°44'50.4"	华力西早期黑云母花岗岩(γ_4^{1C})
WK9	2878	42°59'37.4"	86°42'33.7"	华力西早期黑云母花岗岩(γ_4^{1C})
WK10	2514	42°54'9.4"	86°38'15.6"	华力西早期黑云母花岗岩(γ_4^{1C})
WK12	2117	42°51'59.5"	86°27'57.9"	华力西晚期红色花岗岩(γ_4^{3C})
WK13	1879	42°47'58.7"	86°21'55"	华力西晚期红色花岗岩(γ_4^{3C})
WK14	1735	42°44'24.2"	86°18'28.2"	华力西晚期红色花岗岩(γ_4^{3C})
WK15	1624	42°40'27"	86°16'32.8"	华力西早期黑云母花岗岩(γ_4^{1C})

* 仅列出完成全部裂变径迹分析步骤的样品

5.5 mol/L 的 HNO_3 溶液中蚀刻 $20 \pm 1\text{s}$ ^[45]; 将白云母片分别与标准玻璃、蚀刻后的待测样品叠合, 再将磷灰石标样与 Co 和 Au 片叠合以监测中子通量, 之后送至意大利帕维亚大学应用原子能实验室进行辐照; 辐照后剥离、蚀刻白云母探测器(室温条件下使用 40% HF 蚀刻 40 分钟^[43]), 并完成中子通量标定; 最后用 AUTOSCAN 进行径迹统计。AFT 分析过程中的制样、抛光、蚀刻与径迹统计等步骤均在同济大学裂变径迹实验室完成。样品的裂变径迹年龄计算采用 Zeta (ζ) 常数法^[46], 本次研究获得的 ζ 值为 236.7 ± 14.8 。

为分析不同成分磷灰石颗粒的退火动力学特征, 在裂变径迹统计过程中实测了磷灰石颗粒的围限径迹长度、 D_{par} 值^[47]、C 轴夹角等数据。利用这些数据, 借助于 HeFTy 热史模拟软件^[48] 进行裂变径迹

时间-温度史模拟,模拟条件为:退火模型选用 Ketcham 等^[49] 2007 年的多元动力学退火模型;热动力学参数用 D_{par} 值;初始径迹长度估计值根据 D_{par} 值按式 $L_0 = 0.283 + 15.63 \times D_{\text{par}}$ ^[50] 确定;长度拟合最优方程选用 Kolmogorov-Smirnov Test^[48];模拟方法选择 Monte Carlo^[48];拟合曲线数为 10000。模拟过程中依据区域构造背景等预设时间-温度变化的范围。磷灰石裂变径迹封闭温度约为 110℃,部分退火带温度范围约为 60 ~ 110℃^[51]。函数 GOF (Goodness of Fitting) 用于评价模拟结果与观测结果之间的拟合程度。“年龄 GOF”与“径迹长度 GOF”分别代表径迹年龄与长度的模拟值和实测值的吻合程度,若“年龄 GOF”和“径迹长度 GOF”都大于 5% 时,表明模拟结果“可以接受”;当它们超过 50%,则模拟结果是高质量的。

3 结果

3.1 裂变径迹数据初步分析

本次研究野外共采集基岩样品 16 个 (WK1 ~ WK16),但由于 7 个样品 (WK1 ~ WK5, WK11 和 WK16) 挑选到的磷灰石颗粒太少而不能制样,或者在裂变径迹统计时未能找到适合统计的磷灰石颗粒,因此,最终完成所有磷灰石裂变径迹统计工作的样品数为 9 个 (WK6 ~ WK10 和 WK12 ~ WK15) (表 1),主要分布在乌库公路胜利达坂以南至巴仑

台段(图 2)。具体的裂变径迹统计信息、年龄计算参数选择与计算结果见表 2。样品的围限径迹长度范围为 12.8 ~ 14.1 μm ,径迹长度标准偏差范围为 1.41 ~ 1.75 μm (表 2), D_{par} 值在 1.57 ~ 2.03 μm 之间(表 2)。

本次研究中,除了样品 WK6 的 AFT 年龄偏大外(约 158Ma),其他样品的 AFT 年龄范围在 50 ~ 90Ma 之间(表 2)。这些样品的 AFT 年龄与高程间的关系显示(图 3),沿乌库公路自 SW 往 NE 方向,磷灰石裂变径迹年龄随着样品海拔高度的增加而增大,即样品 AFT 年龄与其高程存在较好的正相关关系。郭召杰等^[8] 在乌库公路后峡至胜利达坂段取得的磷灰石裂变径迹年龄数据(见参考文献[8]中

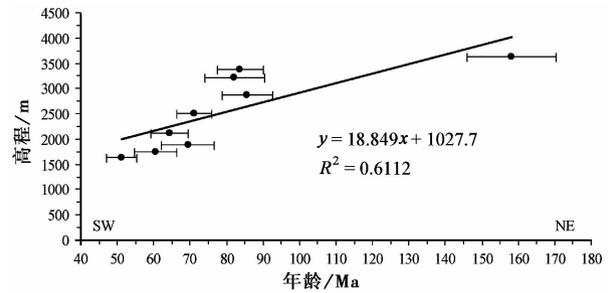


图 3 乌库公路胜利达坂至巴仑台段基岩样品 AFT 年龄与高程关系

样品年龄自 SW (WK15) 向 NE (WK6),依次随着样品海拔的升高而变大;样品高程来自表 1,年龄来自表 2

Fig. 3 Relationship between age and elevation data of AFT rock samples from the Ürümqi-Korla Road

表 2 乌库公路沿线基岩样品磷灰石裂变径迹分析数据*

Table 2 Apatite fission-track data of samples from a transect along the Ürümqi-Korla road across the Tian Shan

样号	N_c	自发径迹		诱发径迹		标准玻璃		$P(\chi^2)$ /%	年龄 $T \pm 1\sigma / \text{Ma}$	自发围限径迹长度			D_{par} / μm
		ρ_s / $\times 10^6$ 径迹· cm^{-2}	N_s	ρ_i / $\times 10^6$ 径迹· cm^{-2}	N_i	ρ_d / $\times 10^5$ 径迹· cm^{-2}	N_d			N_1	$L_s \pm 1\sigma / \mu\text{m}$	SD / μm	
WK6	20	3.306	2970	0.721	648	2.95114	5902	<0.1	158.1 ± 12.2	—	—	—	—
WK7	40	1.464	2264	0.605	936	2.94674	5893	8.3	83.8 ± 6.3	36	13.25 ± 0.97	1.52	1.69
WK8	16	1.005	549	0.423	231	2.94252	5885	20.2	82.2 ± 8.3	—	—	—	—
WK9	36	1.239	1516	0.499	611	2.93907	5878	<0.1	85.7 ± 6.8	28	13.66 ± 0.83	1.41	1.59
WK10	35	2.724	4155	1.324	2019	2.93504	5870	<0.1	71.1 ± 4.9	98	14.14 ± 0.96	1.48	2.03
WK12	15	2.358	1163	1.261	622	2.9312	5862	20.2	64.5 ± 5.2	77	13.59 ± 1.03	1.49	1.96
WK13	16	0.948	469	0.471	233	2.92814	5856	1.7	69.4 ± 7.1	66	13.44 ± 1.16	1.67	1.69
WK14	9	2.433	572	1.382	325	2.9243	5848	16.6	60.6 ± 5.7	103	13.60 ± 1.10	1.56	1.71
WK15	33	0.902	1008	0.606	677	2.92008	5840	1.3	51.3 ± 4.1	42	12.83 ± 1.21	1.75	1.57

* N_c —单个样品统计的磷灰石颗粒数; ρ_s —自发径迹密度, N_s —自发径迹条数; ρ_i —诱发径迹密度, N_i —诱发径迹条数; ρ_d —轴标准玻璃对应外探测器的诱发径迹密度, N_d —轴标准玻璃的诱发径迹数; $P(\chi^2)$ —自由度为 $(N_c - 1)$ 的 χ^2 概率; N_1 —围限径迹条数, L_s —围限径迹长度, SD—围限径迹长度标准差; D_{par} 为每个样品所统计的 D_{par} 值的平均值; 标准玻璃选用 IRMM-540 ($U = 13.9 \pm 0.5 \text{ mg/kg}$, $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.007277$)^[42]; FCT 磷灰石标准样年龄为 $27.8 \pm 0.7 \text{ Ma}$ ^[44]; 年龄 T 计算公式: $T = \lambda \alpha^{-1} \ln[1 + \lambda \alpha (\rho_s / \rho_i) \rho_d G \zeta]$, 其中, $\lambda_a = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, $G = 0.5$, $\zeta = 236.7 \pm 14.8$

的表2)也表明,该段天山裂变径迹年龄与高程大致存在相似的相关关系。因此,从造山带尺度来看,沿乌库公路的磷灰石裂变径迹年龄在天山核部高海拔处偏大,向南北随着海拔的降低而减小。这可能表明天山造山带核部剥露较慢,而南北两侧山体剥露较快,导致地表基岩热年龄较小。

3.2 裂变径迹长度分布与时间-温度史模拟

裂变径迹测年建立在给定矿物颗粒中自发径迹会随时间逐渐积累这一事实基础之上。一个磷灰石样品在其热历史演化过程中,新径迹不断产生,其标准径迹长度为 $16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$ ^[52]。随着温度的升高、退火,径迹长度逐渐变短。不同的径迹长度组份经历了整个热历史的不同阶段,代表着该径迹组份所经历的最高古地温及退火持续的时间^[53,54]。影响裂变径迹退火的因素除了温度,还包括矿物化学成分^[55]、径迹与结晶C轴夹角^[56]以及 D_{par} 值^[47,57]等。 D_{par} 可以间接反映矿物化学成分;一般而言, D_{par} 越小,径迹退火速率越快。本次测试样品的围限径迹长度分布均表现为单峰式(图4a),说明采样岩体均经历了单一的热演化历史,属于无扰动基岩冷却类型^[47],而长径迹的峰值(13~15 μm)可能反映了

造山后期快速的剥露冷却作用。

为揭示具不同化学成分的磷灰石颗粒所经历的低温段热史(时间-温度),利用围限径迹长度、自发与诱发径迹条数、 D_{par} 值等数据重建了样品的时间-温度史(图4)。从图4可以看出,典型样品热史模拟的年龄 GOF 值与径迹长度 GOF 值多大于 0.80,说明这些热模拟结果是高质量的。模拟结果显示(图4b),所有样品均在中生代、新生代经历了相似的冷却历史,剥露冷却过程大致可以分为3个阶段,即:1)晚中生代的快速冷却剥露阶段;2)缓慢冷却剥露阶段,大概为中生代末期至古近纪期间;3)快速冷却剥露阶段,大致开始于中新世中期。

3.3 剥露速率分析

目前,利用低温热年代学数据约束岩体剥露速率的基本方法包括热史模拟法、年龄-封闭温度法、矿物对法以及年龄-高程法等^[58,59]。本研究中由于采样剖面水平距离过大,采样地形对等温面形态有着显著影响^[60],因此,我们不用年龄-高程法对所取得的年龄、高程数据进行线性拟合以确定区域平均剥露速率,而分别运用热史模拟法和年龄-封闭温度法计算基岩剥露速率。热史模拟法利用假定的古

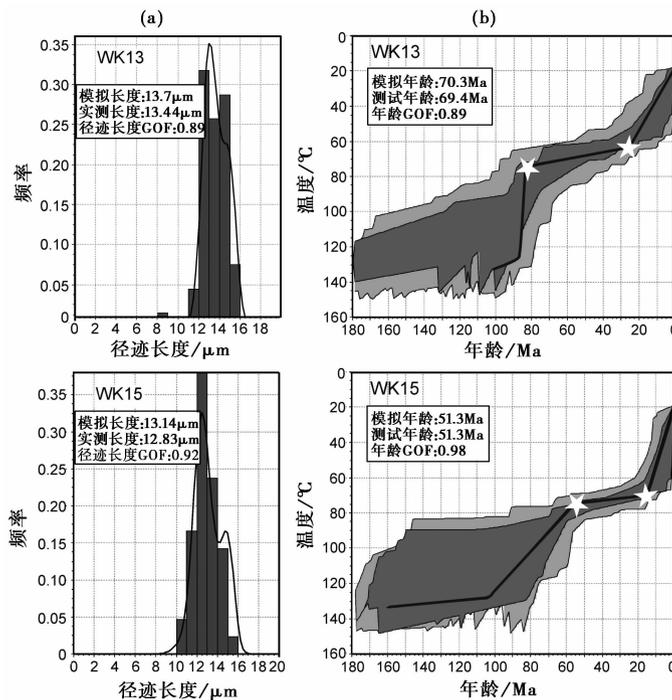


图4 乌库公路沿线典型样品磷灰石裂变径迹长度分布(a)与时间-温度史模拟(b)

浅灰色模拟区域代表可以接受的模拟结果(拟合度 $>5\%$),深灰色模拟区域代表良好的模拟结果(拟合度 $>50\%$),粗实线代表最优拟合结果;五角星号代表在对应的时间冷却速率发生明显变化

地温梯度参数,基于样品的冷却历史(冷却时限与冷却温度)计算样品各冷却阶段的剥露速率^[58,59]。年龄-封闭温度法则基于样品热年龄值及所用测年体系的封闭温度,利用假定的区域古地温梯度来计算岩石的平均剥露速率^[58,59]。计算时,AFT 的封闭温度取 110℃^[51],地温梯度取 22℃/km^[3]。计算结果见表 3。由年龄-封闭温度法计算得到的剥露速率大多集中在大约 50~100m/Ma(表 3),而由热史模拟结果限定的缓慢剥露阶段的剥露速率约为 10~30m/Ma,明显小于随后快速剥露阶段的剥露速率(约 70~160m/Ma)(表 3)。由于年龄-封闭温度法计算得到的剥露速率反映的是样品自通过封闭温度以来的时间(冷却年龄)内剥露速率的平均值,因此在理论上应该是热史模拟揭示的缓慢剥露阶段与快速剥露阶段的综合反映,相应地,剥露速率的大小就大致处于这两个剥露阶段的剥露速率值之间(表 3)。

表 3 由热史模拟与年龄-封闭温度法限定的天山新生代剥露速率(m/Ma)*

Table 3 Cenozoic exhumation rates(m/Ma) of the Tian Shan constrained by thermal modeling and age-closure temperature methods

样号	热史模拟法		年龄-封闭温度法	
	缓慢阶段的剥露速率 (时间区间)	快速阶段的剥露速率 (时间区间)	年龄 /Ma	剥露速率
WK6	—	—	158.1	28.8
WK7	9.1(90~15Ma)	121.2(15Ma 以来)	83.8	54.2
WK8	—	—	82.2	55.3
WK9	9.7(90~20Ma)	79.6(20Ma 以来)	85.7	53.0
WK10	20.7(70~15Ma)	75.8(15Ma 以来)	71.1	63.9
WK12	16.5(65~10Ma)	136.4(10Ma 以来)	64.5	70.5
WK13	12.6(85~20Ma)	90.9(20Ma 以来)	69.4	65.5
WK14	22.7(60~10Ma)	159.1(10Ma 以来)	60.6	75.0
WK15	10.1(60~15Ma)	151.2(15Ma 以来)	51.3	88.6

* 热史模拟法确定的剥露速率为冷却历史不同阶段的平均剥露速率;年龄-封闭温度法确定的剥露速率为样品冷却年龄至今的平均剥露速率

4 讨论

4.1 天山造山带新生代剥露过程的阶段性和空间差异性

上述磷灰石裂变径迹热年代学数据表明,采样区存在中新世以来的快速剥露冷却过程。为揭示天山造山带新生代剥露冷却历史,前人^[3,4,7-11,16-24,26,36,61,62]已在天山造山带的不同区域开展了一些低温热年代学研究(图 5),这为我们

分析天山造山带新生代剥露过程的时空分异特征创造了条件。在东天山,博格达山新生代剥露开始于约 65Ma^[17,18],在始新世中期(约 40±5Ma)剥露速率加快^[16-19],之后为约 25Ma^[7,8,17]和约 10±2Ma^[16,18,19]以来的快速剥露阶段。东部的巴里坤山同样存在约 25Ma 以来的快速剥露^[20]。这些冷却剥露事件被普遍认为是印度-欧亚板块碰撞的远程效应^[18]。在北天山山前的多个剖面,如玛纳斯河剖面^[3,9]和头屯河剖面^[9]等,磷灰石裂变径迹年代学研究揭示天山向准噶尔盆地的逆冲扩展开始于大约 25Ma,最近一次剥露事件则发生在大约 10Ma^[11],这表明新生代天山山体在隆升的同时继续向其前陆盆地“增生”扩展。显然,晚新生代天山向其前陆盆地的逆冲扩展直接导致了山前褶皱冲断带的发育^[1]。新生代北天山剥露冷却主要开始于始新世中期(约 40±5Ma),这次剥露事件不仅在依连哈比尔尕山被揭示^[17],也发生在博罗科努山的乔尔玛地区^[9]。北天山另一普遍存在的快速剥露过程开始于约 25Ma^[7,9,17]。中天山巴音布鲁克剖面磷灰石裂变径迹分析显示,在约 46Ma 存在一次快速剥露,可能是印度-欧亚板块碰撞的早期影响^[9]。而在察汗乌苏山和科古琴山,磷灰石裂变径迹热史模拟均揭示在约 24Ma 存在一次快速剥露作用过程,这表明此时该地区盆山构造演化呈现差异性,山地抬升与盆地沉降同时发育^[21,22]。在南天山,始新世中期(约 45±5Ma)的构造隆升使得天山盆山呈差异性隆升,盆地内出现快速近源碎屑堆积,可能是印度-欧亚板块碰撞的早期影响^[4,9,10]。而在天山南麓与西南天山山前,低温热年代学研究则主要揭示了渐新世末-中新世中期(约 20±5Ma)的快速剥露^[4,10,24,26,61]。与天山北麓相似,此时天山向南侧的生长扩展同为逆断裂作用的结果^[1]。

分析现有这些低温热年代学数据后发现,天山不同地块新生代剥露冷却历史存在时空差异性(图 5)。如在东天山的博格达山-哈尔里克山,几个快速剥露事件分别开始于约 67~65Ma,40±5Ma,25Ma 和 10±2Ma。北天山则主要为约 25Ma 和 10Ma 两次快速剥露过程。在南天山山前的库车-阿克苏一带,两次主要的剥露过程开始于约 45±5Ma 和 20±5Ma。而在喀什地区,新生代快速剥露主要开始于渐新世末至中新世中期。西天山的察汗乌苏山则存在开始于约 24Ma 的快速剥露过程。在吉尔吉斯 Chu 盆地南侧,裂变径迹年龄和(U-Th)/He 年龄与高程的关系、构造逆冲速率均表

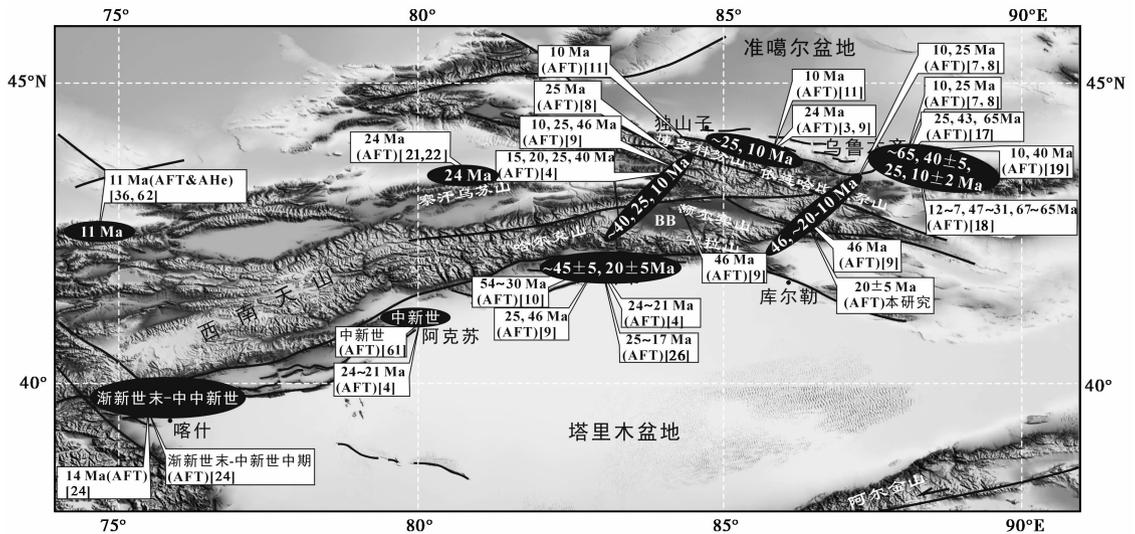


图5 低温热年代学研究揭示的新生代天山地区多期次剥露过程

断裂带位置据参考文献[9,32,33]

椭圆形框中的年代标示某区域快速剥露阶段(基于该区域的研究成果综合),矩形框中的年代标示某一研究区快速剥露时间,中括号内为参考文献,圆括号内的英文缩写代表研究方法:AFT=磷灰石裂变径迹年代学,AHe=磷灰石(U-Th)/He年代学

Fig. 5 Cenozoic episodic exhumation history of the Tian Shan, Northwestern China constrained by low-temperature thermochronological studies

明毗邻的吉尔吉斯天山在约 11Ma 发生了快速的构造隆升与剥露过程^[36,62](图 5)。在综合分析天山不同地区的低温热年代学数据后认为,新生代天山快速剥露过程可能集中于 4 个时期(图 5),分别开始于新生代早期(约 65Ma)、始新世中期(约 40 ± 5 Ma)、渐新世末-中新世中期(约 20 ± 5 Ma)以及中新世中晚期(约 10 ± 2 Ma)。这些快速隆升剥露阶段并不是在整个天山造山带均有发育,其可能只存在于天山造山带的某个或某些区域(图 5)。从整个天山造山带来看,渐新世末-中新世中期的快速剥露事件影响范围最广,可能是新生代时期天山地区一次重要的剥露过程(图 5)。

天山不同地块新生代剥露过程存在空间差异性的原因可能主要在于其特有的地质与地球物理背景。新生代天山复活再造山被地学界广泛认为是对印度-欧亚板块碰撞的响应,但天山复杂的盆山地貌格局与构造体系(图 1)表明天山造山带新生代构造变形具有复杂的动力学机制^[31]。横跨天山的多条地球物理剖面也揭示天山在不同的构造部位具有不同的岩石圈结构特征^[63]以及较强的非均匀流变特性,整个天山造山带因此呈现分块特征^[30,64]。不同地块的构造演化机制可能并不一致^[17],这也可能因此导致整个天山造山带不同地块新生代剥露过程表现出时空差异特征(图 5)。比如北天山的依连哈

比尔尕山和东天山的博格达山,前者壳内发育高导层和低速层,构造变形活跃,而后者地壳并不发育高导层^[17]。这也因此导致博格达山和依连哈比尔尕山具有不一样的构造变形机制^[17],不同的主导因素控制着各自的构造隆升历史,从而使得两者的剥露过程具有时空分异特征(图 5)。对于天山造山带新生代剥露过程时空分异机制的理解还有待获取更多的地质与地球物理等方面的资料。

4.2 天山新生代多期次快速剥露过程的沉积记录

天山山间和前陆盆地的一些沉积记录是上述快速剥露阶段的佐证。在乌鲁木齐附近,渐新世地层底界发育角度不整合,并且沉积速率与沉积系统在此之后均发生了明显变化^[29],这可能是始新世中晚期天山构造隆升剥露作用在准噶尔盆地的沉积响应。天山南麓库车河剖面沉积岩相的转变表明,天山生长扩展及由此导致的山前冲断带的变形可能开始于 24~21Ma^[25],这与该地区磷灰石裂变径迹分析得到的渐新世末-中新世中期快速剥露事件基本同期^[4,9]。Métivier 和 Gaudemer^[65]通过对准噶尔盆地陆源沉积序列进行分析后发现,沉积速率在约 16Ma 发生了明显增速,他们认为这可能反映了天山此时的构造隆升,即对应于渐新世末-中新世中期(约 20 ± 5 Ma)的快速构造隆升剥露阶段。相似的结

论来自于 Avouac 等^[35]对平衡剖面的分析,他们认为天山主要的构造变形发生于 15Ma。至于中新世中晚期的隆升剥露事件,在天山南北两侧的前陆盆地都已发现对应的沉积记录如沉积速率增大^[5,66,67]、岩相变化^[68~70]、生长地层^[13,68~71]以及岩石磁学等证据^[6]。

5 结论

新疆乌鲁木齐-库尔勒公路胜利达坂以南段的磷灰石裂变径迹低温热年代学分析表明,该段天山新生代的剥露历史分为两个阶段,即古近纪期间的缓慢剥露阶段和中新世以来的快速剥露冷却阶段。缓慢剥露阶段的剥露速率为约 10~30m/Ma,快速剥露阶段的剥露速率为约 70~160m/Ma。结合前人在东天山、西天山、北天山以及南天山等天山不同区域取得的低温热年代学数据,我们认为:天山造山带新生代的隆升剥露过程可能分为 4 个阶段,并初步认为这 4 个快速剥露阶段分别开始于新生代早期(约 65Ma)、始新世中期(40±5Ma)、渐新世末-中新世中期(约 20±5Ma)以及中新世中晚期(约 10±2Ma);从整个天山造山带来看,渐新世末-中新世中期的快速剥露事件影响范围最广、剥露量可能也最大,是新生代时期天山地区一次重要的剥露冷却过程。天山南北两侧的前陆盆地沉积记录着这些阶段性快速剥露过程的信息。

致谢 评审专家和杨美芳编辑提出了诸多宝贵意见和建议;实验室工作在许长海教授的指导下完成,并得到王绪诚、焦若鸿和王超等的帮助,在此一并表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- 1 邓起东,冯先岳,张培震等. 天山活动构造. 北京:地震出版社, 2000. 339
Deng Qidong, Feng Xianyue, Zhang Peizhen *et al.* Active Tectonics of the Tianshan Mountains. Beijing: Seismology Press, 2000. 339
- 2 张培震. 天山及其前陆盆地的晚新生代构造变形. 科学通报, 2003, **48**(24): 2499~2500
Zhang Peizhen. Late Cenozoic tectonic deformation in the Tianshan Mountain and its foreland basins. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(24): 2499~2500
- 3 Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. Late Oligocene-Early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 1994, **22**(6): 487~490
- 4 Dumitru T A, Zhou D, Chang E Z *et al.* Uplift, exhumation, and deformation in the Chinese Tian Shan. In: Hendrix M S, Davis G A eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central and Eastern

- Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. *Geological Society of America Memoir*, 2001, **194**: 71~99
- 5 孙继敏,朱日祥. 天山北麓晚新生代沉积及其新构造与古环境指示意义. 第四纪研究, 2006, **26**(1): 14~19
Sun Jimin, Zhu Rixiang. Cenozoic deposits in the northern Tianshan Mountains and its implications for neotectonics and environmental changes. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(1): 14~19
 - 6 Charreau J, Chen Y, Gilder S *et al.* Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (North West China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan Mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **230**(1~2): 177~192
 - 7 郭召杰,吴朝东,张志诚等. 乌鲁木齐后峡地区侏罗系沉积特征、剥露过程及中生代盆地关系讨论. 高校地质学报, 2005, **11**(4): 558~567
Guo Zhaojie, Wu Chaodong, Zhang Zhicheng *et al.* Mesozoic-Cenozoic relationships between Tianshan Mountain and peripheral basins: Evidences from sedimentology and exhumation of Jurassic in Houxia area, Ürümqi. *Geological Journal of China Universities*, 2005, **11**(4): 558~567
 - 8 郭召杰,张志诚,吴朝东等. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔-阿尔泰山比较研究. 地质学报, 2006, **80**(1): 1~15
Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong *et al.* The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(1): 1~15
 - 9 杜治利,王清晨. 中新世天山地区隆升历史的裂变径迹证据. 地质学报, 2007, **81**(8): 1081~1101
Du Zhili, Wang Qingchen. Mesozoic and Cenozoic uplift history of the Tianshan region: Insight from apatite fission track. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(8): 1081~1101
 - 10 杜治利,王清晨,周学慧. 新生代库车-南天山盆山系统隆升历史的裂变径迹证据. 岩石矿物学杂志, 2007, **26**(5): 399~408
Du Zhili, Wang Qingchen, Zhou Xuehui. Mesozoic and Cenozoic uplift history of the range-basin system at Kuche from fission track analysis. *Petrologica et Mineralogica*, 2007, **26**(5): 399~408
 - 11 张志诚,郭召杰,吴朝东等. 天山北缘侏罗系地层热历史演化及其地质意义: 磷灰石裂变径迹和镜质体反射率证据. 岩石学报, 2007, **23**(7): 1683~1695
Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie, Wu Chaodong *et al.* Thermal history of the Jurassic strata in the northern Tianshan and its geological significance, revealed by apatite fission-track and vitrinite-reflectance analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, **23**(7): 1683~1695
 - 12 Ji J L, Luo P, White P *et al.* Episodic uplift of the Tianshan Mountains since the Late Oligocene constrained by magnetostratigraphy of the Jingou River section, in the southern margin of the Junggar Basin, China. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**, B05102, doi: 10.1029/2007JB005064
 - 13 Lu H H, Burbank D W, Li Y L *et al.* Late Cenozoic structural and stratigraphic evolution of the northern Chinese Tian Shan foreland. *Basin Research*, 2010, **22**: 249~269
 - 14 吕红华,李有利. 天山北麓活动背斜带的变形特征. 第四纪研究, 2010, **30**(5): 1003~1011
Lü Honghua, Li Youli. Tectonic deformation of active fault-related fold belts in the north piedmont of the central Tianshan Mountains,

- NW China. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(5):1003 ~ 1011
- 15 李有利, 司苏沛, 吕胜华等. 构造运动和气候变化对天山北麓奎屯河阶地发育的影响作用. *第四纪研究*, 2012, **32**(5):880 ~ 890
Li Youli, Si Supei, Lü Shenghua *et al.* Tectonic and climatic controls on the development of the Kuitun River terraces in the northern piedmont of Tianshan Mountains. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(5):880 ~ 890
- 16 沈传波, 梅廉夫, 刘麟等. 新疆博格达山中新世隆升-热历史的裂变径迹记录. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, **26**(3):87 ~ 92
Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Liu Lin *et al.* Evidence from apatite and zircon fission track analysis for Mesozoic-Cenozoic uplift thermal history of Bogeda Mountain of Xinjiang, North West China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(3):87 ~ 92
- 17 沈传波, 梅廉夫, 张士万等. 依连哈比尔尕山和博格达山中新世隆升的时空分异: 裂变径迹热年代学的证据. *矿物岩石*, 2008, **28**(2):63 ~ 70
Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Zhang Shiwan *et al.* Fission-track dating evidence on space-time difference of Mesozoic-Cenozoic uplift of the Yilianhabierga Mountain and Bogeda Mountain. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, **28**(2):63 ~ 70
- 18 朱文斌, 舒良树, 万景林等. 新疆博格达-哈尔里克山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据. *地质学报*, 2006, **80**(1):16 ~ 22
Zhu Wenbin, Shu Liangshu, Wan Jinglin *et al.* Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang since the Cretaceous. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(1):16 ~ 22
- 19 汪新伟, 汪新文, 马永生. 新疆博格达山晚中生代以来的差异剥露史. *地质学报*, 2007, **81**(11):1507 ~ 1517
Wang Xinwei, Wang Xinwen, Ma Yongsheng. Differential exhumation history of Bogda Mountain, Xinjiang, North Western China since Late Mesozoic. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(11):1507 ~ 1517
- 20 李丽, 陈正乐, 祁万修等. 准噶尔盆地周缘山脉抬升-剥露过程的 FT 证据. *岩石学报*, 2008, **24**(5):1011 ~ 1020
Li Li, Chen Zhengle, Qi Wanxiu *et al.* Apatite fission track evidence for uplifting-exhumation processes of mountains surrounding the Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, **24**(5):1011 ~ 1020
- 21 陈正乐, 万景林, 刘健等. 西天山山脉多期次隆升-剥露的裂变径迹证据. *地球学报*, 2006, **80**(1):16 ~ 22
Chen Zhengle, Wan Jinglin, Liu Jian *et al.* Multi-stage uplift and exhumation of the west Tianshan Mountain: Evidence from the apatite fission-track dating. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, **80**(1):16 ~ 22
- 22 陈正乐, 李丽, 刘健等. 西天山隆升-剥露过程初步研究. *岩石学报*, 2008, **24**(4):625 ~ 636
Chen Zhengle, Li Li, Liu Jian *et al.* Preliminary study on the uplifting-exhumation process of the western Tianshan range, North Western China. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, **24**(4):625 ~ 636
- 23 马前, 舒良树, 朱文斌. 天山乌-库公路剖面中新生代理藏、隆升及剥露史研究. *新疆地质*, 2006, **24**(2):99 ~ 104
Ma Qian, Shu Liangshu, Zhu Wenbin. Mesozoic-Cenozoic burial, uplift and exhumation: A profile along the Ürümqi-Korla highway in the Tianshan Mountains. *Xinjiang Geology*, 2006, **24**(2):99 ~ 104
- 24 Sobel E R, Dumitru T A. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(B3):5043 ~ 5063
- 25 Yin A, Nie S, Craig P *et al.* Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 1998, **17**(1):1 ~ 27
- 26 杨树锋, 陈汉林, 程晓敢等. 南天山新生代隆升和去顶作用过程. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, **39**(1):1 ~ 8
Yang Shufeng, Chen Hanlin, Chen Xiaogan *et al.* Cenozoic uplifting and unroofing of southern Tien Shan, China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2003, **39**(1):1 ~ 8
- 27 陈杰, Heermance R V, Burbank D W *et al.* 中国西南天山西域砾岩的磁性地层年代与地质意义. *第四纪研究*, 2007, **27**(4):576 ~ 578
Chen Jie, Heermance, R. Burbank D. W. *et al.* Magnetochronology and its implications of the Xiyu conglomerate in the south western Chinese Tian Shan foreland. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(4):576 ~ 578
- 28 杨海军, 李曰俊, 师骏等. 南天山晚新生代褶皱冲断带构造特征. *第四纪研究*, 2010, **30**(5):1030 ~ 1043
Yang Haijun, Li Yuejun, Shi Jun *et al.* Tectonic characteristics of the Late Cenozoic south Tianshan fold-thrust belt. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(5):1030 ~ 1043
- 29 Windley B F, Allen M B, Zhang C *et al.* Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan Range, Central Asia. *Geology*, 1990, **18**(2):128 ~ 131
- 30 Zhao J M, Liu G D, Lu Z X *et al.* Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar Basin. *Tectonophysics*, 2003, **376**(3 ~ 4):199 ~ 239
- 31 李锦铭, 王克卓, 李亚萍等. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. *地质通报*, 2006, **25**(8):895 ~ 909
Li Jinyi, Wang Kezhao, Li Yaping *et al.* Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2006, **25**(8):895 ~ 909
- 32 高俊, 钱青, 龙灵利等. 西天山的增生造山过程. *地质通报*, 2009, **28**(12):1804 ~ 1816
Gao Jun, Qian Qing, Long Lingli *et al.* Accretionary orogenic process of western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, **28**(12):1804 ~ 1816
- 33 Fu B H, Ninomiya Y, Guo J M. Slip partitioning in the north east Pamir-Tian Shan convergence zone. *Tectonophysics*, 2010, **483**(3 ~ 4):344 ~ 364
- 34 Zhou D, Graham S A, Chang E Z *et al.* Paleozoic tectonics amalgamation of the Chinese Tianshan; Evidence from a transect along the Dushanzi-Kuqa highway. In: Hendrix M S, Davis G A eds. *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Geological Society of America Memoirs*, 2001, **194**:23 ~ 46
- 35 Avouac J-P, Tapponnier P, Bai M *et al.* Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(B4):6755 ~ 6804
- 36 Bullen M E, Burbank D W, Garver J. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal, structural, and topographic constraints. *Journal of Geology*, 2003, **111**(2):149 ~ 165
- 37 Allen M B, Windley B F, Zhang C *et al.* Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan Range, NW China. *Journal of the Geological Society (London)*, 1991, **148**(2):369 ~ 378
- 38 张良臣, 吴乃元. 天山地质构造及演化历史. *新疆地质*, 1985, **3**

- (3):1~13
- Zhang Liangchen, Wu Naiyuan. Geological structure and evolution of the Tianshan Mountains. *Xinjiang Geology*, 1985, **3**(3):1~13
- 39 Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R *et al.* Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan; Evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar, and Turpan basins, North West China. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, **104**(1):53~79
- 40 Najman Y, Pringle M, Godin L *et al.* Dating of the oldest continental sediments from the Himalayan foreland basin. *Nature*, 2001, **410**:194~197
- 41 Shu L S, Wang B, Yang F *et al.* Polyphase tectonic events and Mesozoic-Cenozoic basin-range coupling in the Chinese Tianshan belt. *Acta Geologica Sinica*, 2003, **77**(4):457~467
- 42 De Corte F, Bellemans F, Van Den Haute P *et al.* A new U doped glass certified by the European commission for the calibration of fission-track dating. In: Van Den Haute P, De Corte F eds. *Advances in Fission-track Geochronology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1998. 67~78
- 43 许长海, 周祖翼, Van Den Haute P 等. 大别造山带磷灰石裂变径迹(AFT)年代学研究. *中国科学(D辑)*, 2004, **34**(7):622~634
- Xu Changhai, Zhou Zuyi, Van Den Haute P *et al.* Apatite fission track(AFT)thermochronological study of the Dabie orogene. *Science in China (Series D)*, 2004, **34**(7):622~634
- 44 Hurford A J, Hammerschmidt K. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dating of the Bishop and Fish Canyon Tuffs; Calibration ages for fission-track dating standards. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 1985, **58**(1~2):23~32
- 45 Donelick R A. A method of fission track analysis utilizing bulk chemical etching of apatite. *United States Patent*, 1993-11-30, 267, 274. Number 5
- 46 Hurford A J, Green P F. The Zeta age calibration of fission-track dating. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 1983, **41**(1~4):285~317
- 47 Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. Variability of apatite fission track annealing Kinetics III: Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 1999, **84**(9):1235~1255
- 48 Ketcham R A. HeFTy version 1.6.7. Austin: University of Texas. 2009
- 49 Ketcham R A, Carter A, Donelick R A *et al.* Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *American Mineralogist*, 2007, **92**(5~6):799~810
- 50 Carlson W D, Donelick R A, Ketcham R A. Variability of apatite fission-track annealing kinetics I: Experimental results. *American Mineralogist*, 1999, **84**(9):1213~1223
- 51 Donelick R A, O'Sullivan P B, Ketcham R A. Apatite fission-track analysis. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2005, **58**(1):49~94
- 52 Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F *et al.* Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, **94**(4):405~415
- 53 张志诚, 郭召杰, 李建锋等. 阿尔金断裂带中段中生代隆升历史分析: 裂变径迹年龄制约. *第四纪研究*, 2012, **32**(3):499~509
- Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie, Li Jianfeng *et al.* Mesozoic and Cenozoic uplift-denudation along the Altyn Tagh fault, North Western China: Constraints from apatite fission track data. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(3):499~509
- 54 雷永良, 钟大赉, 季建清等. 东喜马拉雅构造结更新世两期抬升-剥露事件的裂变径迹证据. *第四纪研究*, 2008, **28**(4):584~590
- Lei Yongliang, Zhong Dalai, Ji Jianqing *et al.* Fission track evidence for two Pleistocene uplift-exhumation events in the eastern Himalayan syntaxis. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(4):584~590
- 55 Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W *et al.* Fission track annealing in apatite; Track length measurements and the form of the Arrhenius plot. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 1985, **10**(3):323~328
- 56 Donelick R A, Miller D S. Enhanced TINT fission track densities in low spontaneous track density apatites using ^{252}Cf -derived fission fragment tracks; A model and experimental observations. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 1991, **18**(3):301~307
- 57 Donelick R A, Ketcham R A, Carlson W D. Variability of apatite fission track annealing kinetics II: Crystallographic orientation effects. *American Mineralogist*, 1999, **84**(9):1224~1234
- 58 丁汝鑫, 周祖翼, 王玮. 利用低温热年代学数据计算造山带剥露速率. *地球科学进展*, 2007, **22**(5):447~455
- Ding Ruxin, Zhou Zuyi, Wang Wei. Modeling exhumation rates of orogenic belts with low-temperature thermochronological data. *Advances in Earth Sciences*, 2007, **22**(5):447~455
- 59 常远, 周祖翼. 利用低温热年代学数据计算剥露速率的基本方法. *科技导报*, 2010, **28**(21):86~94
- Chang Yuan, Zhou Zuyi. Basic methods to inverse exhumation rates using low-temperature thermochronological data. *Science & Technology Reviews*, 2010, **28**(21):86~94
- 60 常远, 王玮, 周祖翼. 采样地形对年龄-高程法应用的限制. *地球物理学报*, 2010, **53**(8):1868~1874
- Chang Yuan, Wang Wei, Zhou Zuyi. Age-elevation relationship method limited by the topographic relief over the sampling transect. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, **53**(8):1868~1874
- 61 Zhang Z, Zhu W, Shu L *et al.* Apatite fission track thermochronology of the Precambrian Aksu blueschist, NW China: Implications for thermo-tectonic evolution of the north Tarim basement. *Gondwana Research*, 2009, **16**(2):182~188
- 62 Bullen M E, Burbank D W, Garver J I *et al.* Late Cenozoic tectonic evolution of the north western Tien Shan; New age estimates for the initiation of mountain building. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, **113**(12):1544~1559
- 63 叶正仁, 王建. 中国大陆现今地壳运动的动力学机制. *地球物理学报*, 2004, **47**(3):456~461
- Ye Zhengren, Wang Jian. Dynamics of present-day crustal movement in the China mainland. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(3):456~461
- 64 马宗晋, 赵俊猛. 天山与阴山-燕山造山带的深部结构与地震. *地学前缘*, 1999, **6**(3):95~102
- Ma Zongjin, Zhao Junmeng. Contrast research on Tianshan orogenic belt and Yinshan-Yanshan orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 1999, **6**(3):95~102
- 65 Métivier F, Gaudemer Y. Mass transfer between eastern Tien Shan and adjacent basins (Central Asia): Constraints on regional tectonics. *Geophysical Journal International*, 1997, **128**(1):1~17

- 66 Huang B C, Piper J D A, Peng S T *et al.* Magnetostratigraphic study of the Kuche depression, Tarim Basin, and Cenozoic uplift of the Tian Shan Range, Western China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **251**(3~4):346~364
- 67 Charreau J, Gilder S, Chen Y *et al.* Magnetostratigraphy of the Yaha section, Tarim Basin (China): 11Ma acceleration in erosion and uplift of the Tian Shan Mountains. *Geology*, 2006, **34**(3):181~184
- 68 Chen J, Burbank D W, Schärer K M *et al.* Magnetostratigraphy of the Upper Cenozoic strata in the southern Chinese Tian Shan: Rates of Pleistocene folding and thrusting. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **195**(1~2):113~130
- 69 Heermance R V, Chen J, Burbank D W *et al.* Chronology and tectonic controls of Late Tertiary deposition in the south western Tian Shan foreland, NW China. *Basin Research*, 2007, **19**(4):599~632
- 70 Heermance R V, Chen J, Burbank D W *et al.* Temporal constraints and pulsed Late Cenozoic deformation during the structural disruption of the active Kashi foreland, North West China. *Tectonics*, 2008, **27**, TC6012, doi:10.1029/2007TC002226
- 71 Sun J M, Li Y, Zhang Z Q *et al.* Magnetostratigraphic data on Neogene growth folding in the foreland basin of the southern Tianshan Mountains. *Geology*, 2009, **37**(11):1051~1054

CENOZOIC EPISODIC EXHUMATION OF THE TIAN SHAN RANGE, NW CHINA

Lü Honghua^{①②} Wang Wei^② Chang Yuan^② Zhou Zuyi^②

(^①School of Resource and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241;

^②State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract

In response to the India-Asia collision during Cenozoic times, the Tian Shan range has been tectonically reactivated and intensely uplifted. Many previous studies have focused on the history of uplift and exhumation of the Tian Shan during the Cenozoic based on low-temperature thermochronology, magnetostratigraphy and syntectonic deposits, sedimentology, and rock magnetism. However, the divergent opinions still exist. Here we also employ apatite fission-track analysis on rock samples from a transect along the Ürümqi-Korla road crossing the eastern part of the Tian Shan in order to better understand the spatial difference in the exhumation history of the Tian Shan range. In the field, we selected sixteen rock samples (WK1 ~ WK16) along the Road. The samples WK6 ~ WK10 and WK12 ~ WK15 were performed for all the analytical procedures of apatite fission track, which were mainly from the segment of the Road south of Shenglidaban. The other samples (WK1 ~ WK5, WK11, and WK16) were not further analyzed due to the following reasons: (1) there are not enough apatite grains for sample preparation, or (2) there is any suitable apatite grains for fission track statistics. In the lab, we obtained the AFT data such as confined track length, D_{par} (diameter of etched spontaneous fission tracks measured parallel to the crystallographic C-axis), track angle to the crystallographic C-axis. Our fission-track data show that confined track length ranges from 12.8 ~ 14.1 μm with standard deviation of 1.41 ~ 1.75 μm , and that D_{par} is 1.57 μm to 2.03 μm . AFT ages span 90 ~ 50Ma except for sample WK6 with the age of ca. 158Ma. The positive correlation exists between these AFT age data and the corresponding elevations. The thermal modeling results show that the sampled part of the Tian Shan range has experienced two stages of exhumation during Cenozoic times, *i. e.*, slow exhumation before ca. 20 \pm 5Ma followed by subsequent rapid exhumation, with the exhumation rates of ca. 10 ~ 30m/Ma and ca. 70 ~ 160m/Ma, respectively. Together with the previous low-temperature thermochronological data, it appears that the exhumation process within the whole range during Cenozoic times is spatially different, and that the exhumation history within the Tian Shan range during the Cenozoic can be roughly divided into four stages, these occurring approximately in the Earliest Cenozoic (ca. 65Ma), the Middle Oligocene (ca. 40 \pm 5Ma), the Late Eocene to the Middle Miocene (ca. 20 \pm 5Ma), and the Middle to Late Miocene (ca. 10 \pm 2Ma), respectively. The rapid exhumation stage occurring in the Late Eocene to the Middle Miocene is regarded as one important exhumation process within the Tian Shan range during Cenozoic times.

Key words apatite fission track, exhumation rate, spatio-temporal differentiation, Cenozoic, Tian Shan