

西藏吉隆地区高喜马拉雅新近纪冷却剥露

——来自裂变径迹年龄的证据

李 明^{1,2}, 王 岸^{1,2}, 刘 超³, 王国灿^{1,2}, 李 涛⁴, Garver John I⁵

LI Ming^{1,2}, WANG An^{1,2}, LIU Chao³, WANG Guo-can^{1,2}, LI Tao⁴, Garver John I⁵

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

3. 辽宁省国土资源厅, 辽宁 沈阳 110032;

4. 安徽省地质矿产勘查局 313 地质队, 安徽 六安 237010;

5. Geologic Department, Union College, Schenectady NY 12308, USA

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Department of Land and Resources of Liaoning Province, Shenyang 110032, Liaoning, China;

4. 313 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Liuan 237010, Anhui, China;

5. Geologic Department, Union College, Schenectady NY 12308, USA

摘要: 裂变径迹年代学测试表明, 吉隆地区高喜马拉雅约 30km 的南北剖面上锆石裂变径迹年龄介于 13~2.4Ma 之间, 磷灰石裂变径迹年龄介于 1.9~0.6Ma 之间; 在空间上, 裂变径迹年龄与高程及纬度都具有正相关关系。综合区域热年代学资料, 裂变径迹年代学数据揭示出研究区高喜马拉雅经历了 3 个阶段的冷却剥露过程: ①中新世中期至约 13Ma, 藏南拆离系(STDS)大规模伸展拆离作用引发的高喜马拉雅岩石区域性的构造剥露; ②中新世晚期伴随 STDS 韧性变形的结束, 缓慢冷却剥露阶段; ③上新世前后, 5.8~2.7Ma 以来, 快速并不断加速的冷却剥露作用。综合对比研究区构造地貌特征及热年代学空间格局, 提出上新世以来高喜马拉雅快速并加速的剥露作用, 是由流域以河流切蚀为代表的地表作用过程驱动。

关键词: 喜马拉雅; 裂变径迹; 吉隆; 西藏

中图分类号: P534.61

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)01-0086-07

Li M, Wang A, Liu C, Wang G C, Li Tao, Garver J I. Neogene exhumation of the Greater Himalaya Slab in Gyirong area, Tibet, constrained by fission track geochronology. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1):86-92

Abstract: Constituting the material majority and high topography of the Himalaya, the Greater Himalayan Slab (GHS) occurs as the best scientific media for revealing the deformation, surface uplift and topographic evolution of the Himalayan Orogenic Belt. This paper focuses on the field of the Gyirong area in central Himalaya and relies on fission track (FT) thermochronology in revealing the cooling and exhumation and further related tectonic and topographic information of the GHS. Fission track thermochronology yields zircon FT ages between 13 and 2.4Ma and apatite FT ages between 1.9 and 0.6Ma across a 30km north-south GHS section. Spatially,

收稿日期: 2012-08-13; 修订日期: 2012-01-13

资助项目: 中国地质调查局项目《青藏高原新近纪隆升过程与地质事件群研究》(编号: 1212011121261)、《青藏高原新生代地质过程与第四纪环境演变综合研究》(编号: 1212010733802), 国家自然科学基金项目《中新世以来高喜马拉雅岩石剥露与地表气候-构造响应研究》(批准号: 40902060)和国家创新研究群体科学基金(编号: 40921062)

作者简介: 李明(1985-), 男, 在读硕士, 构造地质学专业。E-mail: 378711913@qq.com

通讯作者: 王岸(1980-), 男, 博士, 副教授, 从事青藏高原新生代构造、热年代学及地貌过程研究。E-mail: anwang@hotmail.com

the FT ages show positive correlation with both elevation and latitude position. In combination with regional thermochronologies, these FT ages suggest three episodes of cooling and exhumation of the GHS. ① Middle Miocene, to ~13Ma, regional syntectonic rock cooling by large scale extension of the Southern Tibet Detachment System (STDS); ② Late Miocene slowed cooling by the ceasing of ductile extension of the STDS; ③ approximately since Pliocene, from ~5.8–2.7Ma, rapid and accelerated cooling. Combined with tectonic landform analysis of the Gyirong drainage, the FT thermochronological spatial pattern suggests that the Pliocene rapid cooling was driven by surface processes dominated by river incision. The regional transition from tectonic to climatic exhumation of the Himalaya may probably imply that the Himalaya had accomplished a significant elevation before Late Miocene, and further drove a significant change in local and even global climate, which in turn established the base for climate exhumation of the Himalaya since Pliocene.

Key words: Himalaya; fission track; Gyirong; Tibet

裂变径迹年代学因其所研究的载体矿物(锆石、磷灰石等)具有较低的封闭温度,在揭示晚近地质时期造山带的隆升冷却剥露过程方面显示出巨大优势^[1-8]。喜马拉雅造山带构成了青藏高原南侧的边缘山系,也是地球上最年轻的板块碰撞造山带。造山带的物质剥露演化过程对认识喜马拉雅及整个青藏高原造山及成山作用均具有重要意义。基于常规热年代学方法,国内外学者对喜马拉雅造山带开展了广泛研究,积累了丰富的资料。已有的研究表明,新生代晚期喜马拉雅造山带的冷却剥露具有强烈的时空特征^[2,5-7,9-12]。在宏观上,喜马拉雅冷却年龄格局与造山带构造格架具有良好的一致性,例如高喜马拉雅低温热冷却年龄主要集中在中新世中晚期以来,而特提斯喜马拉雅除局部穹窿构造具有年轻的冷却年龄外,沉积盖层冷却年龄较老,普遍未发生热重置作用^[9]。高喜马拉雅新近纪以来的强烈剥露已经得到越来越多的证据支持和广泛认可,然而最近的研究^[6,11,13]表明,高喜马拉雅本身也具有特殊的冷却年龄时空结构。例如 Thiede 等^[14]在喜马拉雅西北地区的裂变径迹研究表明,该区岩石异常快速冷却主要发生在上新世以来,并且岩石的快速冷却在空间上对应于地表地形强降雨带,而并不与主中央逆冲带(MCT)或藏南拆离系(STDS)相关。强岩石剥露与地表作用过程的相关性进一步在喜马拉雅中段地区得到了印证和支持^[14]。由此可见,新生代晚期地表作用过程对喜马拉雅造山带构造作用及地貌过程具有深远影响。

本文选择喜马拉雅中段吉隆地区为野外研究区域,以裂变径迹年代学为主要研究手段,揭示吉隆地区高喜马拉雅岩石冷却剥露作用的时空过程,探讨高喜马拉雅冷却时空过程的控制因素。

1 地质背景

喜马拉雅造山带是始新世以来印度板块与欧

亚板块之间的碰撞造山带^[15]。在构造上,喜马拉雅造山带发育一系列贯穿整个造山带的大规模断裂构造,由北向南依次为藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲带(MCT)、主边界逆冲带(MBT)等^[10,16],并以此由北向南将喜马拉雅造山带划分为特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅以及低喜马拉雅等主要构造地层单元^[10]。

各主要构造地层单元在物质建造、构造变形等方面都具有各自的特征。特提斯喜马拉雅主体建造为浅变质或未变质的显生宙沉积岩系,构造变形以褶皱变形及各种面理化构造为主;高喜马拉雅则相反,在建造上以深变质的前寒武纪片麻岩系为主,并伴有以中新世淡色花岗岩浆为主体的侵入作用,在构造变形方面以强烈的糜棱岩化、片理化为特征。高喜马拉雅与特提斯喜马拉雅之间在建造与改造方面的强烈差异是与 STDS 中新世以来强烈的伸展拆离作用^[17]是一致的。现有的研究表明,STDS 近东西向贯穿于整个喜马拉雅造山带,以数千米厚的韧性剪切带为边界,将特提斯喜马拉雅以低角度构造叠置于高喜马拉雅之上。

构造变形年代学研究表明,喜马拉雅中段 STDS 的变形主要发生在中新世中期^[6,18-19],并造成了高喜马拉雅岩石大规模的快速冷却剥露,形成同构造的冷却年龄^[9]。喜马拉雅地区 STDS 普遍被南北向断陷构造切穿,表明 STDS 的韧性变形作用的时间不晚于南北向构造。Leloup 等^[18]在 Ama Drime 地区的研究表明,STDS 的活动时间在 13.6~11Ma 之前,随后东西向伸展构造开始发育。Wang 等^[9]依据聂拉木地区高喜马拉雅同构造的冷却年龄,认为该区 STDS 的韧性剪切活动主要形成于 12Ma 之前。

吉隆地区(图 1)位于喜马拉雅造山带中段,该区在构造上近南北向跨越 STDS 及其两侧特提斯喜

马拉雅和高喜马拉雅构造地层单元。野外调查路线从吉隆镇向南直至中尼边境,在高喜马拉雅构造地层单元跨越约 30km。该区高喜马拉雅带大面积出露前寒武系结晶基底岩系,由各种高变质相的片麻岩、片岩夹石英岩、大理岩组成,沿 STDS 的下盘发育大片淡色花岗岩体。

采样点沿研究区吉隆藏布河沿岸布设(采样位置见图 1、图 2)。样品分布总体近南北向,覆盖高喜马拉雅北带约 30km,样品之间高差控制在 300m 以内,水平间距 3~7km,样品之间的总高差达 1710m。样品基本信息列于表 1 中。T101-1~T101-7 均分布于高喜马拉雅构造带,其中 T101-1、T101-2、T101-3 为前震旦系斜长片麻岩;T101-4、T101-5 为前震旦系花岗岩,T101-7 为新近纪淡色花岗岩,T101-8 位于 STDS 断层带内,岩性为变质砂岩。

2 实验方法与测试结果

(1)实验方法

裂变径迹年龄测定采用传统外探测器法^[20]。锆

石样品蚀刻以氢氧化钾与氢氧化钠以等摩尔比在 228℃熔融条件下,蚀刻约 26h。磷灰石样品蚀刻以 5 mol/L HNO₃,室温条件下蚀刻 18s。外探测器均采用低铀含量白云母,蚀刻条件为 40%的氢氟酸(HF)室温蚀刻 18min。本次锆石样品 Zeta 值标定以 Fish Cannon Tuff 国际标样,CN1 铀标准玻璃标定为 120.23±1.23 a cm²;磷灰石样品 Zeta 标定以 Durango 国际标样,CN1 铀标准玻璃标定为 106.30±5.92 a cm²。样品热中子辐射在中国原子能科学研究院开展,测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,径迹统计在 Autoscan 裂变径迹测试平台上,放大 1000 倍条件下完成。

(2)测试结果

最终测试获得 5 件锆石裂变径迹年龄,6 件磷灰石裂变径迹年龄,测试结果列于表 1(T101-4、T101-7 的锆石样品和 T101-8 磷灰石样品未分离出足够的待测矿物)。裂变径迹测试结果显示磷灰石年龄介于(1.9±0.5)~(0.6±0.5)Ma 之间,锆石裂变径迹年龄介于(13.1±2.2)~(2.4±0.5)Ma。所有样品单颗粒年龄组分的卡方检验值 P(x²)均显著大于 5%,

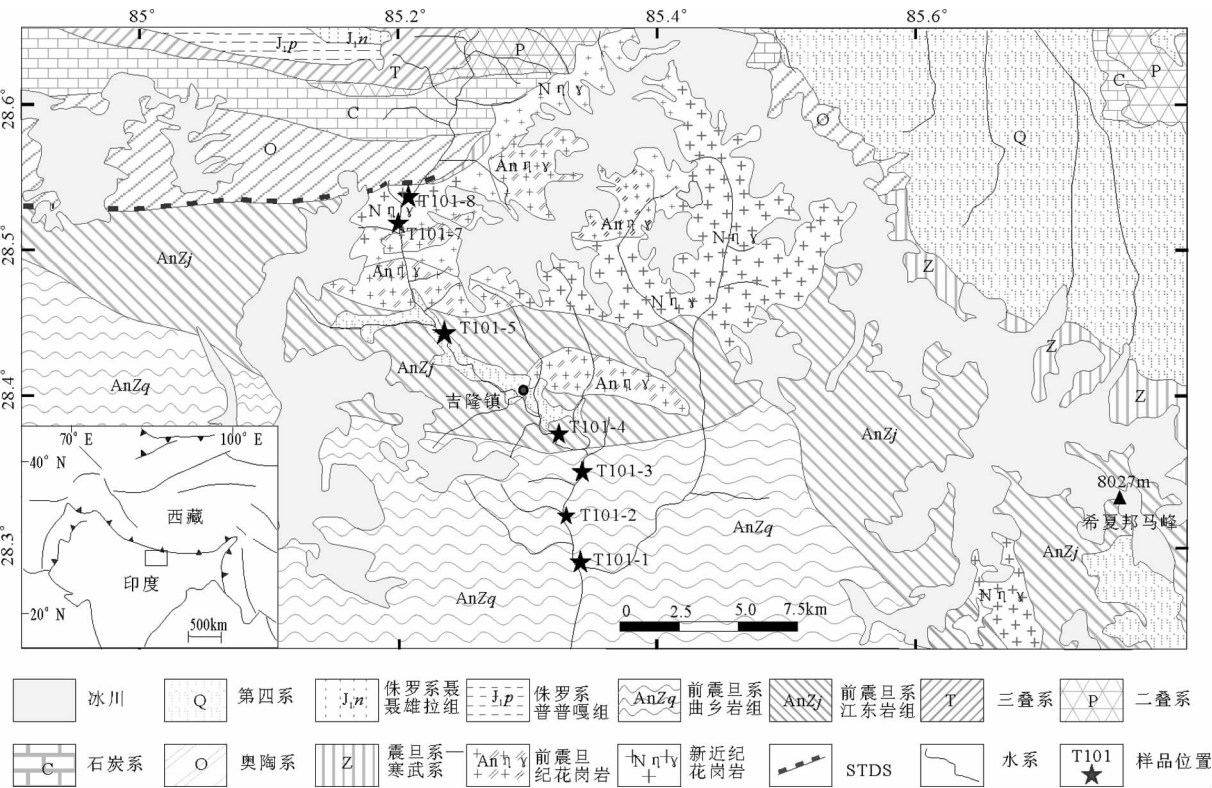


图 1 研究区地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the study area

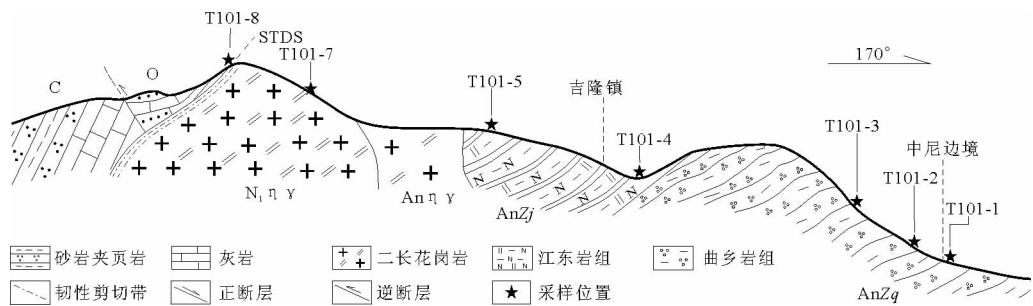


图 2 构造路线剖面及其样品分布

Fig. 2 Structural route profile showing distribution of samples

说明样品单颗粒年龄分布结构为单一年龄组分,因此表 1 中引用池年龄作为最终的测试结果。

3 讨 论

裂变径迹颗粒年龄分布特征一致性表明颗粒年龄具有单一的组分,说明高喜马拉雅从深部构造就位至地表的过程中彻底重置了早期锆石和磷灰石裂变径迹的年龄信息,因此裂变径迹年龄记录了高喜马拉雅中新世构造就位后约 13Ma 以来的剥露冷却过程信息。

3.1 中新世中期的构造剥露作用

从样品的年龄-高程分布(图 3-A)来看,无论是锆石还是磷灰石,其裂变径迹年龄与高程之间都

具有较好的线性正相关,即随高程升高,年龄线性增加。然而在吉隆镇以东约 40km 的希夏邦马峰地区, Searle 等^[21]的磷灰石裂变径迹研究表明,整个希夏邦马峰基岩金字塔在 8000~5800m 高度之间冷却年龄都介于 14.8~12.3Ma 之间,年龄几乎不随高程变化。Wang 等^[6]在东邻聂拉木地区约 30km 的高喜马拉雅剖面上获得的锆石裂变径迹年龄介于 16.1~12.6Ma 之间,并且年龄同样几乎不随高程变化。STDS 下盘高喜马拉雅带获得的大量中新世中期的冷却年龄实际上记录了 STDS 大规模伸展作用^[6, 19, 21~23]过程的同构造冷却信息。从裂变径迹年龄的空间布局来看,研究区 STDS 断层带上的样品(T101-8, 3539m)锆石裂变径迹年龄为 13.1Ma±2.2Ma, 该年龄可能记录了

表 1 裂变径迹样品信息及测试结果

Table 1 Fission track sample information and dating results

样品编号	样品岩性	高程/m	N	$\rho_d \times 10^6 \text{ cm}^2 / N_d$	$\rho_s \times 10^5 \text{ cm}^2 / N_s$	$\rho_i \times 10^6 \text{ cm}^2 / N_i$	$P(\chi^2) / \%$	Pooled Age/Ma	U / %	测试矿物
T101-1	斜长片麻岩	1829	15	2.739/5854	0.0485/3	1.23/764	66.5	0.6±0.5	18	磷灰石
			15	0.359/1618	4.93/100	4.34/881	99.8	2.4±0.5	482	锆石
T101-2	斜长片麻岩	2000	15	2.722/5821	0.127/8	1.63/1027	89.2	1.1±0.7	24	磷灰石
			15	0.361/1653	7.54/147	6.03/1175	96.6	2.7±0.4	665	锆石
T101-3	斜长片麻岩	2500	10	2.704/5788	0.145/6	1.61/668	68.6	1.3±0.9	24	磷灰石
			14	0.528/2707	0.132/169	7.281/932	91.3	5.8±1.0	549	锆石
T101-4	斜长片麻岩	2802	18	2.686/5754	0.282/15	2.67/1423	91.3	1.5±0.7	40	磷灰石
			17	2.669/5721	0.696/61	5.15/4511	96.6	1.9±0.5	77	磷灰石
T101-5	变斑状二长花岗岩	3100	18	0.363/1653	23.2/746	5.82/1874	86.6	8.7±0.8	638	锆石
			15	2.633/5654	0.302/15	2.82/1401	96.1	1.5±0.7	43	磷灰石
T101-8	变杂砂岩	3539	15	0.369/1705	32.5/185	5.49/313	99.9	13.1±2.2	592	锆石

注: N 为测试颗粒个数; ρ_d 为标准玻璃诱发径迹密度, N_d 为标准玻璃诱发径迹条数; ρ_s 为矿物自发径迹密度, N_s 为矿物自发径迹条数; ρ_i 为矿物诱发径迹密度, N_i 为矿物诱发径迹条数; $P(\chi^2)$ 表示卡方检验值。本次测试锆石和磷灰石样品的 Zeta 值分别为 120.23±1.23 a cm², 106.30±5.92 a cm²

STDS 中新世中期大规模伸展作用导致的断层下盘高喜马拉雅岩石同构造冷却作用的深部空间边界,这意味着 STDS 韧性变形活动大致在 13Ma 之后停止。

3.2 上新世以来的气候剥露作用

在跨越高喜马拉雅南北 30km 的剖面上, 锆石裂变径迹的年龄介于 13~2.4Ma 之间。如前所述, 裂变径迹年龄与高程及纬向距离均为正相关(图 3-A、B), 如果暂不考虑样品的平面分布对年龄高程分析垂向剥露作用的影响, 0.16km/Ma 的斜率则代表了同期岩石的视剥蚀速率。总体而言, 锆石裂变径迹年龄体现 13~2.4Ma 之间的视剥蚀速率较低, 明显低于 STDS 主期伸展活动阶段的同构造冷却作用。上述表明, 中新世晚期, 13~5.8Ma, 高喜马拉雅处于缓慢的剥蚀状态。而所有磷灰石裂变径迹年龄介于约 2Ma 以来, 尽管年龄与高程及纬向距离都体现出正相关关系, 但无论是年龄-高程的拟合斜率 1.19km/Ma 体现出的明显强视剥蚀速率, 还是年龄-封闭温度体现出的大于 60℃/Ma 的视冷却速率(以 120℃磷灰石裂变径迹封闭温度计算), 都体现出研究区高喜马拉雅 5.8~2Ma 以来经历了快速的岩石冷却剥露作用。

考虑到锆石裂变径迹的封闭温度(240℃)大约为磷灰石封闭温度(120℃)的 2 倍, 而锆石裂变径迹的年龄普遍大于磷灰石裂变径迹 2 倍年龄, 说明研究区高喜马拉雅冷却至锆石裂变径迹年龄以来是处于加速的冷却过程。例如对于最南侧的样品(T101-1), 其锆石和磷灰石裂变径迹年龄显示出 2.4~0.6Ma 之

间的冷却速率约为 67℃/Ma, 而 0.6Ma 以来冷却速率约为 200℃/Ma。另一方面, 锆石裂变径迹年龄的空间上向北迅速增大, 而磷灰石裂变径迹年龄线性斜率较低。锆石和磷灰石裂变径迹年龄差值向北迅速增加, 意味着研究区样品从锆石的封闭温度冷却到磷灰石的封闭温度所需的时间向北逐渐增加(图 4), 反映了上新世以来的快速冷却作用在空间上具有由南向北的迁移发展过程。

吉隆河流域地形剖面(图 4)显示, 从 STDS 向南约 50km 的剖面对应于吉隆河高河流梯度带, 而吉隆河在 STDS 以北及下游, 河流梯度则系统性降低(图 4)。河流梯度通常作为河流切蚀作用强度的代用指标, 表明流域地表强切蚀作用集中在 STDS 向南至 50km 的空间上。流域最高地形剖面显示 STDS 以南约 30km, 地形剖面稳定维持在 6km 以上, 而 30~60km 最高地形急剧衰减, 直至 60km 以南, 大致维持在 2km 高度; 流域地势剖面体现出 STDS 以南约 60km 为高地势带, 地势最低在 2.5km 以上, 其中主体河段达到 4km 以上。上述地形剖面特征表明, 以河流为代表的切蚀作用是研究区流域地表地貌的主要塑造动力。

上述分析表明, 研究区高喜马拉雅裂变径迹年龄的空间格局与地表流域地貌之间具有良好的耦合对应关系, 说明以河流为主体的地表外动力是驱动研究区高喜马拉雅岩石冷却剥露的最主要动力, 尽管构造作用在上新世以来仍然十分活跃。Wang 等^[6]在喜马拉雅中段聂拉木地区的研究表明, 高喜马拉雅

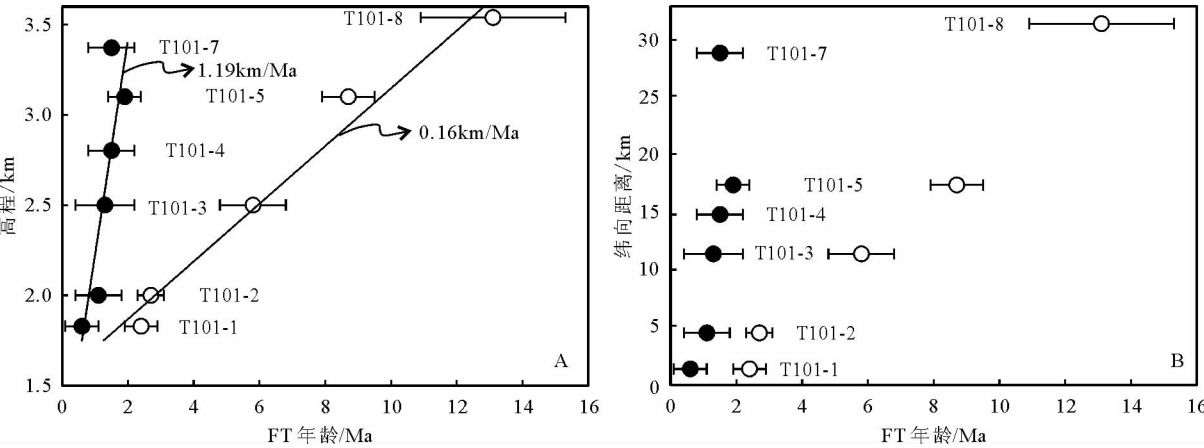


图 3 裂变径迹年龄-高程分布(A)与年龄-纬向距离分布(B)

Fig. 3 Fission track age-elevation distribution (A) and age-latitudinal distance distribution (B)

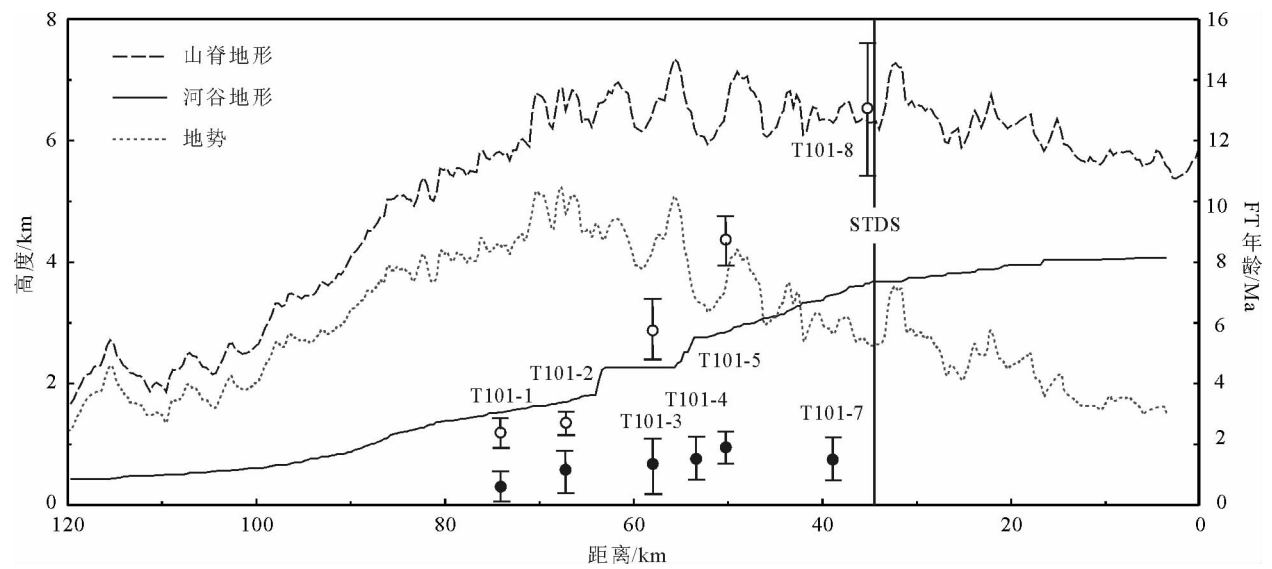


图 4 裂变径迹年龄空间分布与流域地形剖面
Fig. 4 Spatial distribution of fission track ages with
drainage swath topographic profile

雅岩石冷却年龄具有类似的空间格局,表明上新世—第四纪以来的岩石冷却是由气候因素主导的剥蚀驱动。Wobus 等^[23]基于对尼泊尔中部热年代学的研究甚至认为,强烈地形降雨引起的剥蚀作用驱动了喜马拉雅造山带的隆升。Beaumont 等^[24]认为地表的强烈剥蚀作用驱动了喜马拉雅造山带深部管流作用与地壳浅层构造的耦合。尽管气候因素与活动造山带构造互动过程的研究还存在争议,但上新世以来的气候因素对喜马拉雅造山带的强烈剥露作用已经得到了研究的广泛印证和支持^[25-29]。高喜马拉雅经历了中新世中期的强烈构造剥露,在中新世晚期逐渐向气候剥露转变,并在上新世以来迅速增强,暗示经历了中新世中期的强烈构造作用,喜马拉雅造山带在地貌上已经达到了显著的高度,并对局部乃至全球气候产生影响,而正是高原隆起产生的气候效应驱动了喜马拉雅造山带在中新世晚期—上新世从构造剥露向气候剥露作用的重大转变。

4 结 论

(1)喜马拉雅中段吉隆地区高喜马拉雅裂变径迹年代学研究表明,高喜马拉雅记录了中新世中期约 13 Ma 以来的冷却剥露作用。综合分析高喜马拉雅裂变径迹年龄的时空结构,研究区高喜马拉雅经

历了 3 阶段剥露过程:中新世中期至约 13 Ma,以藏南拆离系(STDS)大规模伸展拆离作用驱动的构造剥露;中新世晚期缓慢的剥露环境;上新世以来的强烈并具有加速特征的气候剥露作用。

(2)上新世,5.8~2.4 Ma 以来,研究区高喜马拉雅地表剥蚀作用迅速增强,在空间上强烈的地表剥蚀作用集中在剖面南侧并具有向北迁移的特征。岩石冷却年龄格局与流域河流侵蚀地貌之间的耦合关系表明,喜马拉雅南坡河流切蚀作用是上新世以来高喜马拉雅岩石冷却剥露和地貌塑造的主要驱动力。

(3)喜马拉雅造山带从中新世中期构造剥露作用向上新世以来的气候剥露作用的重大转变,暗示喜马拉雅造山带在中新世晚期之前已经达到了显著高程,并对局部甚至全球气候产生影响,进而驱动喜马拉雅造山带剥露动力的重大转变。

致谢:本研究裂变径迹测试工作在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成;野外工作得到张克信、向树元、王鹏、孟艳宁等的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1]刘顺生,张峰. 西藏南部地区的裂变径迹年龄和上升速度的研究[J]. 中国科学, 1987, (9): 1000-1010.
[2]钟大赉,丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学,

- 1996, 26(4): 289–295.
- [3] Arne D, Worley B, Wilson C, et al. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 1997, 280(3/4): 239–256.
- [4] 赵志丹, 莫宣学, 郭铁鹰, 等. 西藏南部岩体裂变径迹年龄与高原隆升[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(8): 95–98.
- [5] 王彦斌, 王军, 王世成. 高喜马拉雅地区聂拉木花岗岩快速抬升的裂变径迹证据[J]. *地质论评*. 1998, 44(4): 430–434.
- [6] Wang An, Garver J I, Wang Guocan, et al. Episodic exhumation of the Greater Himalayan Sequence since the Miocene constrained by fission track thermochronology in Nyalam, central Himalaya [J]. *Tectonophysics*, 2010, 495(3/4): 315–323.
- [7] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. *科学通报*. 1995, 40(16): 1497–1500.
- [8] 雷永良, 钟大赉, 贾承造, 等. 青藏高原东南缘察隅地区晚新生代岩体差异抬升——剥露和高原扩展的裂变径迹证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 384–394.
- [9] 刘超, 王国灿, 王岸, 等. 喜马拉雅山脉新生代差异隆升的裂变径迹热年代学证据[J]. *地学前缘*, 2007, 14(6): 273–281.
- [10] 尹安. 喜马拉雅造山带新生代构造演化: 沿走向变化的构造几何形态、剥露历史和前陆沉积的约束[J]. *地学前缘*, 2006, 13(5): 416–515.
- [11] Thiede R C, Arrowsmith J R, Bookhagen B, et al. From tectonically to erosionally controlled development of the Himalayan orogen [J]. *Geology*, 2005, 33(8): 689–692.
- [12] Huntington K W, Blythe A E, Hodges K V. Climate change and Late Pliocene acceleration of erosion in the Himalaya[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 252(1/2): 107–118.
- [13] Whipp Jr D M, Ehlers T A, Blythe A E, et al. Plio–Quaternary exhumation history of the central Nepalese Himalaya: 2. Thermokinematic and thermochronometer age prediction model[J]. *Tectonics*, 2007, 26(3): C3003.
- [14] Burbank D W, Blythe A E, Putkonen J, et al. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas[J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 652–655.
- [15] Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, et al. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia [J]. *Nature*, 1995, 373(6509): 55–58.
- [16] 中国地质调查局成都矿产研究所. 青藏高原地质图[M]. 成都: 成都地图出版社, 2003.
- [17] 许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 等. 印度/亚洲碰撞——南北向和东西向拆离构造与现代喜马拉雅造山机制再讨论[J]. *地质通报*, 2006, 25(1): 1–14.
- [18] Leloup P H, Mahéo G, Arnaud N, et al. The South Tibet detachment shear zone in the Dinggye area: Time constraints on extrusion models of the Himalayas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 292(1/2): 1–16.
- [19] Searle M P, Godin L. The south Tibetan detachment and the Manaslu Leucogranite: A structural reinterpretation and restoration of the Annapurna - Manaslu Himalaya, Nepal [J]. *The Journal of geology*, 2003, 111(5): 505–523.
- [20] Gleadow A, Duddy I R. A natural long-term track annealing experiment for apatite [J]. *Nuclear Tracks*, 1981, 5(1/2): 169–174.
- [21] Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, et al. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement [J]. *The Journal of Geology*, 1997, 105(3): 295–318.
- [22] Wang Yu, Li Qi, Qu Guosheng. 40Ar/39Ar thermochronological constraints on the cooling and exhumation history of the South Tibetan Detachment System, Nyalam area, southern Tibet [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2006, 268(1): 327–354.
- [23] Wobus C W, Hodges K V, Whipple K X. Has focused denudation sustained active thrusting at the Himalayan topographic front ? [J]. *Geology*, 2003, 31(10): 861–864.
- [24] Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation [J]. *Nature*, 2001, 414(6865): 738–742.
- [25] 于祥江, 季建清, 龚俊峰, 等. 雅鲁藏布大峡谷气候因素引起地壳剥蚀冷却的证据[J]. *科学通报*, 2011, 56(10): 756–764.
- [26] 孙东霞, 季建清, 张志诚, 等. 雅鲁藏布江中下游流域地貌差异演化的岩屑磷灰石裂变径迹证据[J]. *科学通报*, 2009, 54(23): 3738–3747.
- [27] 龚俊峰, 季建清, 周晶, 等. 东喜马拉雅构造结气候构造作用下热史演化的 40Ar/39Ar 年代学记录[J]. *岩石学报*, 2009, 25(3): 621–635.
- [28] Thiede R C, Bookhagen B, Arrowsmith J R, et al. Climatic control on rapid exhumation along the Southern Himalayan Front [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3/4): 791–806.
- [29] Xu Y D, Zhang K X, Wang G C, Jiang S S, Chen F N, Xiang S Y, Dupont-Nivet, Guillaume, Hoorn, Carina. Extended stratigraphy, palynology and depositional environments record the initiation of the Himalayan Gyirong Basin (Neogene China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 44: 77–93.