

东昆仑山小南川岩体裂变径迹年代与 中新世晚期以来的构造地貌演化

王 岸^{1,2}, 王国灿^{1,2}, 谢德凡¹, 刘德民¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 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

摘要: 对昆仑山口地区小南川岩体7件样品进行磷灰石裂变径迹年代学测试, 分析了岩体的冷却过程及岩体的剥露与构造地貌演化的关系。结果表明东昆仑山区中新世晚期视剥蚀速率极为缓慢, 为0.020~0.035 mm/a, 反映的是构造隆升作用微弱、地貌缓和的地质环境, 因而构造隆升速率与低的视剥蚀速率相当。上新世以来小南川岩体突发性快速隆升冷却, 造成超过3 km的物质揭顶, 这不是由单纯的剥蚀过程导致, 而是反映了昆仑山上新世以来的强烈构造隆升驱动下的成山作用过程。岩体上新世的裂变径迹年龄与近东西向的昆仑河—野牛沟谷地断裂断陷、昆仑山口盆地断陷以及后期西大滩谷地断陷的综合构造地貌演化有密切的成因联系。此外裂变径迹年龄的空间分布格局反映了区域性的差异隆升作用, 由南向北、由西向东, 隆升和剥蚀作用逐渐衰减, 这与东昆仑山南北向以及东、西昆仑山之间地貌发育的差异性以及新生代火山作用分布是吻合的。

关键词: 东昆仑山; 青藏高原; 小南川; 磷灰石裂变径迹; 构造地貌; 上新世。

中图分类号: P575.9; P546

文章编号: 1000-2383(2007)01-0051-08

收稿日期: 2006-05-28

Fission Track Geochronology of Xiaonanchuan Pluton and the Morphotectonic Evolution of Eastern Kunlun since Late Miocene

WANG An^{1,2}, WANG Guo-can^{1,2}, XIE De-fan¹, LIU De-min¹

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

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

Abstract: Apatite fission track (AFT) thermochronology of seven samples from the Xiaonanchuan pluton in the Kunlun pass area was carried out to determine the timing of cooling and the relation between the exhumation and the morphotectonic processes. The AFT ages yield low denudation rates of 0.020–0.035 mm/a during the Late Miocene, which correspond to a stable geomorphic and weak tectonic uplifting environment. The low denudation rates can be considered as the approximate tectonic uplifting rates. The AFT geochronology shows paroxysmally rapid cooling since the Pliocene and an apparent material unroofing of more than 3 km in the Xiaonanchuan area. This was not the result of simple denudation. The rapid cooling was coupled with the intensive mountain building processes since the Pliocene, which were driven by tectonic uplifting. The accelerated relief building was accompanied by a series of faulting, which caused the basin and the valley formation and sinking. The space pattern of the AFT ages also shows differential uplifting, which decreases northwardly. This trend is supported by the regional AFT data, which indicate that the exhumation decreases northwardly in eastern Kunlun. This trend also exists in east-west orientation from the western Kunlun range to the eastern. The uplifting trend is also supported by geomorphic characteristics including the elevation and the relief differences as well as the distribution of the Late Cenozoic volcanism.

Key words: eastern Kunlun; Tibet; Xiaonanchuan; apatite fission track; morphotectonic; Pliocene.

0 引言

裂变径迹年代学以其研究载体矿物(锆石、磷灰石等)具有较低的封闭温度而在研究地质晚近时期的隆升剥露历程方面显示出巨大优势。青藏高原是新生代强烈的隆升区,利用裂变径迹年代学方法研究青藏高原不同部位新生代隆升剥露目前已有相当多的资料。钟大赉和丁林(1996)通过裂变径迹年代学详细研究了青藏高原东喜马拉雅构造结,获得了包括上新世在内的多阶段隆升信息。此后,裂变径迹年代学在青藏高原内部及周边地区得到了广泛的运用(Arne *et al.*, 1997;王军,1998;王彦斌等,1998;Jolivet *et al.*, 2001;袁万明等,2001;万景林和王二七,2002;王瑜等,2002;柏道远等,2003;王国灿等,2003;赵志丹等,2003;袁万明等,2004)。裂变径迹年代学研究揭示西昆仑多处地区存在上新世以来的快速隆升(王军,1998;柏道远等,2003),这得到来自沉积、古气候、古地理等方面研究成果的佐证(李吉均等,2001;Wu *et al.*, 2001;陈诗越等,2004)。东昆仑山是昆仑—黄河运动(崔之久等,1998;Wu *et al.*, 2001)表现最显著的地区,第四纪以来构造隆升在昆仑垭口盆地沉积序列演化上有鲜明的反映(Wu *et al.*, 2001),然而对上新世—早更新世阶段

的构造隆升过程及与此伴随的成山造貌过程的揭示还很有限,而岩体低温热演化历史对于理解新生代晚期该区的构造地貌演化极为有效。为此我们选择昆仑垭口一带地形高差大的岩体进行裂变径迹样品采集及年代测试工作,在此基础上对隆升及构造地貌演化问题进行讨论。

1 样品地质背景及测试方法

小南川岩体位于东昆仑山脉中段,与青藏公路相邻,南距昆仑主脊约 25 km,北距柴达木盆地边缘(格尔木市)约 60 km,地处盆山接合部位(图 1),地势险峻,岩体南北分别为东大滩—西大滩、昆仑河—野牛沟断裂谷地。谷地、山岭南北向依次平行出现,构成东昆仑山区典型的谷、岭相间的地貌特征。小南川岩体岩性主体为二长花岗岩,露头新鲜,岩体没有明显的变质现象。岩体与围岩中元古界万保沟群呈侵入接触关系,单颗粒岩浆结晶锆石 U-Pb 年龄为 $(194 \pm 9.1) \text{Ma}$ (青海省地质调查院内部资料,2002),代表岩体的侵入年代;Claire *et al.* (1999)获得的多个原生黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄介于 140~133 Ma,说明新生代以前岩体就已经处于冷却阶段。

小南川岩体北坡相对南坡平缓,北坡高差为

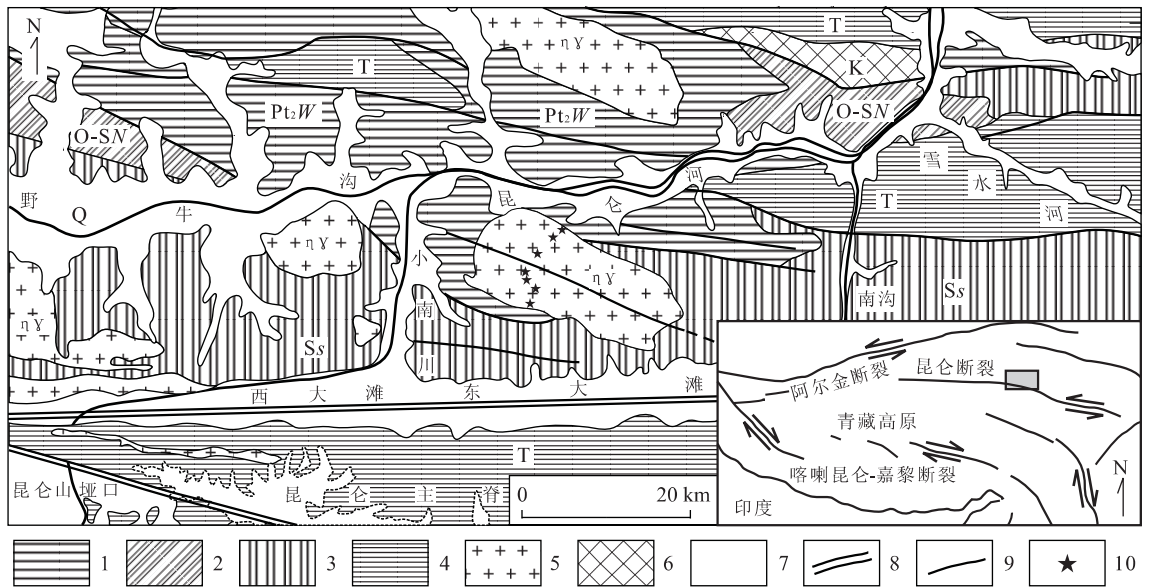


图 1 研究区构造位置及小南川地区地质、地貌简图(据 1:25 万不冻泉幅,1:20 万纳赤台幅地质图修改)

Fig. 1 Geological and geomorphology sketch map of Xiaonanchuan and tectonic position of study area

1. 中元古界万保沟群;2. 下古生界纳赤台群;3. 志留系赛什腾组;4. 三叠系;5. 花岗岩;6. 上白垩统海相碎屑岩;7. 第四系;8. 活动断裂;9. 一般断裂;10. 样品点

表 1 小南川岩体磷灰石裂变径迹年龄测试结果

Table 1 Apatite fission track dating results of Xiaonanchuan pluton

样号	高程 (m)	颗粒数	ρ_1 (10^6 cm^{-2})	ρ_2 (10^5 cm^{-2})	ρ_3 (10^6 cm^{-2})	U (10^{-6})	$P(x^2)$ (%)	R	FT 年龄 ($\text{Ma} \pm 1\sigma$)	L ($\mu\text{m} \pm 1\sigma$)	标准差 (μm)
APY14	4 761	17	1.233(3 082)	0.250(30)	1.359(1 631)	13.6	13.6	0.759	4.0 \pm 0.8	12.93 \pm 0.32(21)	1.47
APY15	4 559	14	1.226(3 065)	0.264(28)	1.430(1 516)	14.3	14.9	0.574	4.0 \pm 0.8	12.74 \pm 0.27(15)	1.05
APY16	4 305	17	1.220(3 049)	0.450(49)	1.028(1 121)	10.4	99.2	0.852	9.4 \pm 1.6	12.92 \pm 0.40(12)	1.40
APY17	4 206	16	1.213(3 032)	0.592(58)	1.153(1 130)	11.7	98.5	0.881	11.0 \pm 1.7	11.68 \pm 0.3(6)	0.75
APY18	3 993	22	1.207(3 016)	0.758(119)	1.474(2 314)	15.0	82.2	0.989	10.9 \pm 1.4	12.90 \pm 0.27(18)	1.14
APY19	3 805	19	1.200(2 999)	0.381(43)	1.439(1 626)	14.7	87.2	0.699	5.6 \pm 1.0	12.47 \pm 0.25(18)	1.10
APY20	3 749	17	1.193(2 983)	0.165(16)	1.220(1 183)	12.6	24.1	0.553	2.8 \pm 0.8	13.07 \pm 0.33(8)	0.94

注:括号中的数值为相应的径迹总数; ρ_1 . 外探测器径迹密度; ρ_2 . 自发径迹密度; ρ_3 . 诱发径迹密度;R. 自发、诱发径迹相关系数;L. 平均封闭径迹长度。

1 700 m. 沿坡面不同高程近南北向共采集 7 件样品, 岩性均为二长花岗岩, 除 APY18 样品略显片理化外, 其他样品手标本均无变质作用迹象. 样品测试在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成, 测试矿物为磷灰石, 采用外探测器法(Gleadow and Duddy, 1981)测试. 实验过程中外探测器采用低铀含量白云母, 蚀刻条件为室温下 40% 氢氟酸溶液, 蚀刻 20 min; 标准玻璃采用美国国家标准局 SRM612 铀标准; 样品送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照; 磷灰石的蚀刻条件为室温下 7% 硝酸溶液, 蚀刻 40 s; 本测试采用国际标样 Durango 磷灰石(31.4 ± 0.5)Ma 标定 Zeta 值为 (352.4 ± 29)Ma; 径迹统计用 OLYMPUS 偏光显微镜, 在放大 1 000 倍浸油条件下完成, 同时还进行了封闭径迹长度统计; 样品的高程采用手持 GPS 测量, 误差范围小于 10 m.

2 测试结果及评价

通过矿物筛选、蚀刻、制片等实验流程, 最终获得了 7 件样品的磷灰石矿物裂变径迹池年龄(Pooled Age)及相应的封闭径迹长度分布. 从野外地质情况看, 岩体没有受到后期变质作用影响, 新生代以来岩体附近也没有火山作用等热源干扰, 因此裂变径迹年龄应该能够代表岩体构造隆升与剥蚀作用的冷却过程. 从表 1 来看, 样品单颗粒年龄分布均为单峰式, 泊松分布检验值 $P(x^2)$ 均显著性表明颗粒年龄属于同一组分, 因此样品野外地质情况与室内测试结果均一致支持裂变径迹年龄代表矿物在没有受到异常热干扰的条件下, 冷却至其封闭温度以来的年龄.

矿物裂变径迹在部分退火带中会发生不同程度的愈合缩短, 即所谓的部分退火作用, 不同的热过程

会产生不同的径迹长度分布型式. 径迹长度分布反映了矿物经历的热冷却过程的具体信息, 而裂变径迹年龄则是热冷却过程的综合参数. 较长的平均径迹长度反映较小的退火率, 从而说明矿物在部分退火带滞留的时间短, 冷却较快; 反之平均径迹长度短则矿物冷却速率慢; 如果矿物经历多次加热, 则可能形成径迹长度双峰式或多峰式分布现象. 既然裂变径迹年龄是地质热过程的综合参数, 因此仅裂变径迹年龄而言, 其地质意义往往是多解的(Gleadow *et al.*, 2002), 这就必须要在裂变径迹长度分布理解的基础上, 来具体分析裂变径迹年龄实际涵义的原因. 表 1 列出了样品封闭径迹长度分布的基本参数, 所有样品的封闭径迹长度分布均为单峰式, 其平均长度为 11.68~13.07 μm , 标准差为 0.75~1.47 μm , 具有平均长度较长、标准差小的特点. 封闭径迹长度的单峰式分布特点说明径迹是在矿物最后一次完全退火以来没有异常热干扰的条件下累积形成的; 而较长的平均封闭径迹长度体现较小的退火率, 代表了径迹在部分退火带中滞留的时间相对较短. 需要说明的是对于年轻的地质样品而言, 磷灰石的自发裂变径迹本来就少, 而要从有限的自发裂变径迹中获取封闭径迹则是难上加难, 因此没有获得足够数量的封闭径迹长度, 不足以模拟岩体的热历史.

综上所述, 磷灰石样品没有受到异常热源干扰, 裂变径迹年龄真实代表了矿物自然冷却至其封闭温度以来的时间, 反映的是岩体隆升剥露过程的信息.

3 小南川岩体裂变径迹年龄的地质意义

小南川岩体所有样品磷灰石裂变径迹年龄均位

于 11.0~2.8 Ma 之间,即中新世晚期至上新世。从年龄—高程关系来看,岩体北侧 APY18~APY20 三件连续样品的年龄与高程为正相关关系,体现了高程样品首先通过封闭温度等温面的客观事实;而南侧 APY14~APY17 四件连续样品年龄与高程呈负相关,这 4 件样品位于岩体南侧,与其他 3 件样品之间有断层分隔,该断层在岩体的遥感影像上线性特征十分明显(图 2),岩体南侧内部也有断层发育的迹象(图 2 中箭头所示),此外岩体南侧与东西大滩断裂相邻,因此我们认为是后期的断层作用改造了岩体南侧 4 件样品的原始空间位置,而裂变径迹年龄格局则反映了与断层作用相关的成山作用过程的信息。

3.1 中新世晚期—上新世岩体冷却历史与构造地貌演化

取磷灰石裂变径迹封闭温度为 110 °C (Naeser and Dodge, 1969),该区地表年均气温接近 0 °C (李炳元, 1996),假设地温梯度为 35 °C/km,那么小南川岩体 600 m 高程处样品磷灰石裂变径迹年龄为 0 Ma,据此可以得到岩体北侧 3 件原位样品的磷灰石裂变径迹年龄—高程曲线(图 3),再根据样品高差与年龄差可以获得不同阶段的视剥蚀速率(表 2)。

5.6~2.8 Ma 之间为 2.8 Ma 的时间,冷却幅度只有 56 m,处于非常缓慢的冷却阶段,视剥蚀速率为 0.020 mm/a,地貌学研究(李炳元等, 2002; 潘保田等, 2002)认为这个阶段处于主夷平面发育的最后时期,地势相对缓和,构造隆升微弱;诚然低冷却速率和视剥蚀速率不是夷平面存在的充要条件,但确

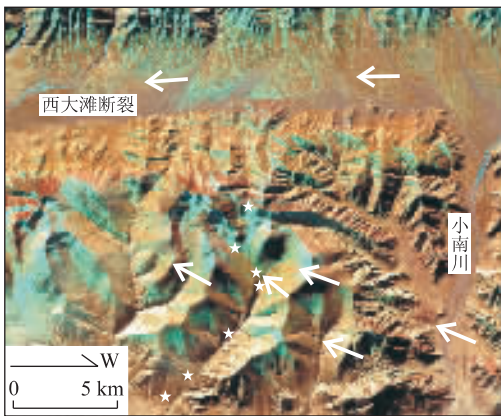


图 2 小南川岩体遥感影像及样品点分布

Fig. 2 Sample positions in Xiaonanchuan pluton in the remote image

星号代表样品点位;箭头指示线性影像走向及位置

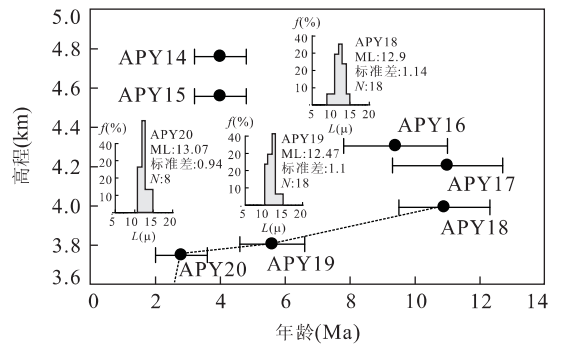


图 3 小南川岩体年龄高程分布及封闭径迹长度分布
Fig. 3 AFT age-elevation plot and fission track length distribution of Xiaonanchuan pluton

表 2 小南川岩体中新世晚期以来阶段性视剥蚀速率
Table 2 Apparent denudation rates of the Xiaonanchuan pluton at different stages since Late Miocene

样品	高程(m)	FT 年龄 (Ma)	视剥蚀量 (km)	视剥蚀速率 (mm/a)
APY18	3 993	10.9	0.19	0.035
APY19	3 805	5.6	0.06	0.020
APY20	3 749	2.8	3.14	1.122

实证明中新世晚期构造环境相当稳定,这个阶段高原面高程的变化应该十分有限,因此低的视剥蚀速率反映了该阶段低的构造隆升速率. 10.9~5.6 Ma 之间的视剥蚀速率略有增大,为 0.035 mm/a,这个阶段也主要处于构造稳定时期,但是近年来的研究(陈正乐等, 2002; 万景林和王二七, 2002)表明中新世中期阶段高原不同地区均存在快速隆升的证据,西昆仑山区的裂变径迹研究(万景林和王二七, 2002)表明 13~8 Ma 前后存在快速隆升,阿尔金断裂在这个阶段具有强烈的走滑作用(陈正乐等, 2002),小南川岩体 10.9~5.6 Ma 部分跨越了这个阶段,因而相对 5.6~2.8 Ma 阶段略有升高的视剥蚀速率,可能反映了东昆仑山区此阶段的构造隆升响应。

3.2 上新世以来岩体冷却历史与构造地貌演化

表 2 中数据表明 2.8 Ma 以来小南川岩体大约有 3.14 km 的物质揭顶,视剥蚀速率高达 1.122 mm/a,而实际上强烈隆升的青藏高原地区花岗岩剥蚀速率一般情况下小于 0.1 mm/a,高值也不超过 0.3 mm/a (Lai *et al.*, 2004),因此单纯的剥蚀作用是不大可能在短短约 2.8 Ma 的时间内使得 3 km 深的岩体剥露至地表的,那么具体的地质过程又是什么呢?

如上所述,小南川岩体所处的东昆仑山区具有

典型的谷、岭相间的地貌特征,岩体南北两侧分别为东西向的东、西大滩和昆仑河—野牛沟断裂谷地,形成断块山、断陷谷相间的地貌格局,山岭及谷地高程向北依次降落,谷岭地势高差为 1 700~2 500 m。那么小南川地区强烈的地势差异是何时形成?强烈地势差异的形成与岩体的热冷却历史的关系如何?昆仑垭口湖盆的研究(Wu *et al.*, 2001)表明盆地充填序列的下部(惊仙谷组)为一套砾石层,代表盆地断陷形成的一套相关沉积,多种测年方法表明其沉积年代约为 3.4~2.5 Ma;最近我们对昆仑河详细调查后,在河谷底部新发现了一套山间磨拉石相砾岩,根据砾岩的固结程度及与垭口盆地沉积对比,初步推断其形成年代为上新世,这套砾岩应该代表谷地断陷形成初期的相关沉积。因而昆仑河—野牛沟断陷谷地与昆仑垭口盆地的断陷均在上新世前后,二者与青藏运动(李吉均等,2001)的时代相吻合。上新世昆仑垭口盆地、昆仑河—野牛沟谷地的断陷与其间山体的差异隆升造就了古昆仑山(垭口盆地与昆仑河谷地之间的山体)的形成,因此形成现代剧烈反差地势的造貌运动开始于上新世阶段。上新世青藏运动开始之后,至 2.5 Ma 前,昆仑山区的地势差异已经比较显著,这可以从惊仙谷组沉积上部发育有坠石构造(中国地质调查局 1:25 万不冻泉幅区域地质调查报告,2006),说明昆仑山发育有一定规模的冰川得到证明。但是仅仅依靠冰川气候来推测当时的高度并不准确,第四纪以来的全球气候变化是剧烈的,很难甄别全球气候变化与隆升彼此对局部地区气候变化的贡献,因此本文不对古高程进行定量的限定。隆升作用和地壳表层地势的迅速加剧必然导致地壳浅部相应等温面的下降,导致岩体相应高程部分抬升到磷灰石裂变径迹封闭温度等温面上。第四纪以来昆仑山脉持续隆升,在早更新世末期,东、西大滩谷地发生突发性断陷,这是又一次重要的构造运动,称为昆仑—黄河运动(崔之久等,1998),经历这次构造运动东昆仑山地区的现代谷—岭地貌格架才基本建立。岩体的快速冷却正是与这种剧烈的成山作用过程相耦合。

综上所述,上新世以来隆升与断陷作用的地貌效应对岩体的冷却起到了关键作用,换言之,小南川岩体 2.8 Ma 的磷灰石裂变径迹年龄主要是小南川地区上新世以来特殊的构造地貌演化的结果,超过 3 km 的视剥蚀量主要是构造隆升、谷地断陷、剥蚀综合作用的产物,并不代表区域性的物质剥蚀幅度,考虑研

究区现代地势差异,上新世以来昆仑垭口地区平均剥蚀幅度大约为 1 400 m 左右,其余应属构造剥蚀。

3.3 差异性隆升作用的裂变径迹年代信息

岩体南侧 4 件样品年龄—高程分布格局在小尺度上反映了差异隆升作用信息,样品平面位置(图 2)越向南,高程越高,裂变径迹年龄则越小,而裂变径迹单颗粒年龄以及封闭径迹长度分布等又显示矿物没有受到后期热扰动,因此裂变径迹年龄代表矿物自然冷却至其封闭温度以来的年龄,因此南侧 4 件样品所显示的高程越高裂变径迹年龄则越小的年龄—高程分布格局反映了后期的断层效应,即越向南抬升幅度越大。北侧 3 件原位样品建立了岩体的年龄—高程曲线,将南侧样品的年龄投影到曲线上可以获得相应样品的原始高程,从而可以计算断层的垂直错动量。4 件样品 APY14~APY17 的断层垂直效应分别为(987±25)m,(785±25)m,(365±50)m,(216±52)m,从北向南依次增加,这暗示着断层南盘在差异抬升的同时,断层向南迁移,从而断层效应向南累积递增。

这种南北向的差异隆升与昆仑山地区的现代地貌特征显著相关,小南川岩体南侧为现代昆仑山主脉,是研究区最高峰,而向北谷、岭地貌高程则依次降落,隆升强度也逐渐减弱;1979、2002 年的 2 期水准测量资料(王庆良等,2004)也表明东、西大滩以南的昆仑主脊、以北的中昆仑山以及昆仑河以北三者隆升强度的依次递减。Wang *et al.* (2004)在南山口西侧获得的磷灰石裂变径迹年龄为(15.8±1.1)Ma,老于小南川岩体磷灰石裂变径迹年龄,也从侧面证明这一点。从研究区构造地貌演化的过程来看,小南川岩体南侧特殊的年龄—高程格局主要与昆黄运动以来的东、西大滩断裂作用相关。

此外昆仑山地区的差异性隆升还表现在东西方向。综合目前东昆仑山区的裂变径迹年代资料,小南川岩体的裂变径迹年龄是目前获得的最年轻的年龄。王国灿等(2003)在东昆仑东段哈图一带获得的磷灰石裂变径迹年龄为白垩纪;袁万明等(2004)在都兰至布青山一线,无论是昆北、昆中,还是昆南构造单元,磷灰石裂变径迹年龄均在中新世以前。小南川岩体接近谷地高程处的上新世磷灰石裂变径迹年龄,反映了昆仑垭口地区上新世以来的隆升剥蚀幅度大于东昆仑山东段;西昆仑山地区多处获得上新世以来的磷灰石裂变径迹年龄(王军,1998;柏道远等,2003),说明西昆仑山的隆升剥蚀幅度总体又强

于东昆仑山。由此可见,上新世以来青藏高原北部造山带的隆升剥露幅度在东西方向上也存在明显的空间差异性,这种差异性与新生代晚期以来火山活动强度以及现代地貌具有显著的相关性(王国灿等, 2005)。深刻认识这种差异性及其控制这种差异性的动力因素对于认识高原隆升机制具有重要意义。

4 结论

(1)小南川岩体磷灰石裂变径迹年代学测试分析表明,东昆仑山垭口地区中新世晚期—上新世(磷灰石裂变径迹年龄为 $[(10.9 \pm 1.4) \sim (2.8 \pm 0.8)]\text{Ma}$,冷却速率异常缓慢,具有非常低的视剥蚀速率,为 $0.020 \sim 0.035 \text{ mm/a}$ 。综合区域资料,该阶段处于地貌缓和、构造隆升作用微弱的构造地貌环境,因而缓慢的隆升速率与剥蚀速率相当。

(2)小南川岩体 $(2.8 \pm 0.8)\text{Ma}$ 的裂变径迹年代反映上新世以来,存在 3.14 km 的物质揭顶,视剥蚀速率高达 1.122 mm/a ,这不是单纯的剥蚀作用结果,而是构造隆升驱动的一系列盆地、谷地断陷的成山作用过程的产物。上新世以来昆仑山地区发生突发性的隆升与断陷作用,昆仑垭口盆地、昆仑河—野牛沟谷地形成,小南川岩体快速冷却剥露,经历早中更新世之交的昆黄运动,最终形成现代构造地貌景观。岩体超过 3 km 的物质揭顶是隆升、断陷、剥蚀综合作用的结果,实际的剥蚀量约为 1400 m 左右,其余应属于构造剥蚀。

(3)小南川岩体裂变径迹年代空间分布格局反映了与现代地貌相匹配的差异隆升作用,在南北向,昆仑垭口地区为东昆仑山地区的现代隆升中心,向北隆升剥蚀强度递减;东西向,昆仑垭口地区的隆升剥露强度强于东段而弱于西昆仑山。

致谢:样品测试在中国地震局国家重点实验室完成;参加野外工作的还有李德威、魏启荣、袁晏明、蔡雄飞等;关于裂变径迹测年技术及年代学意义与 John I. Garver 教授进行了富有启发性的探讨,同时匿名审稿专家为本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

References

Arne, D., Worley, B., Wilson, C., et al., 1997. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 280

(3-4): 239-256.

Bai, D. Y., Meng, D. B., Liu, Y. R., et al., 2003. Apatite fission-track records of the tectonic uplift of the central segment of the Kunlun Mountains on the north margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Geology in China*, 30(3): 240-246 (in Chinese with English abstract).

Chen, S. Y., Wang, S. M., Jin, Z. D., et al., 2004. Lake sedimentary records of environmental evolution in the last 2.8 Ma from the Co Ngoin basin, central Qinghai-Xizang Plateau. *Geochimica*, 33(2): 159-164 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. L., Wan, J. L., Wang, X. F., et al., 2002. Rapid strike-slip of the Altyn Tagh fault at 8 Ma and its geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(4): 295-300 (in Chinese with English abstract).

Claire, M., Nicolas, O. A., Jean-Marie, C., 1999. An early unroofing in northeastern Tibet? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on granitoids from the eastern Kunlun range (Qinghai, NW China). *Earth and Planetary Science Letters*, 171(1): 107-122.

Cui, Z. J., Wu, Y. Q., Liu, G. N., et al., 1998. On Kunlun-Yellow River tectonic movement. *Science in China (Series D)*, 28(1): 53-59 (in Chinese).

Gleadow, A. J. W., Belton, D. X., Kohn, B. P., et al., 2002. Fission track dating of phosphate minerals and the thermochronology of apatite. In: Hughes, J., Kohn, M., Rakovan, J., eds., *Phosphates-reviews in mineralogy and geochemistry*. Mineralogical Society of America and Geochemical Society, Washington, DC, United States, 48: 579-643.

Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., 1981. A natural long-term annealing experiment for apatite. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 5(1-2): 169-174.

Jolivet, M., Brunel, M., Seward, D., et al., 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: Fission-track constraints. *Tectonophysics*, 343(1-2): 111-134.

Lai, D., Harris, N. B. W., Sharma, K. K., et al., 2004. Erosion history of the Tibetan Plateau since the last interglacial: Constraints from the first studies of cosmogenic ^{10}Be from Tibetan bedrock. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1-2): 33-42.

Li, B. Y., 1996. Natural environment of Hohxil region in Qinghai. Science Press, Beijing, 24-28 (in Chinese).

Li, B. Y., Pan, B. T., Gao, H. S., 2002. A planation surface and ages of volcanic rocks in eastern Hohxil, Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 22(5): 397-405

(in Chinese with English abstract).

- Li, J. J., Fang, X. M., Pan, B. T., et al., 2001. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 21(5): 381—391 (in Chinese with English abstract).
- Naeser, C. W., Dodge, F. C. W., 1969. Fission track ages of accessory minerals from granitic rocks of the central Sierra Nevada Batholith, California. *Geological Society of America Bulletin*, 80(11): 2201—2211.
- Pan, B. T., Gao, H. S., Li, J. J., 2002. On problems of planation surface—A discussion on the planation surface in Qinghai-Xizang Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 22(5): 520—526 (in Chinese with English abstract).
- Wan, J. L., Wang, E. Q., 2002. FT evidence of West Kunlun uplift in Pulu. *Nuclear Techniques*, 25(7): 565—567 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Lo, C. H., Li, Q., et al., 2004. Onset timing of significant unroofing around Qaidam basin, northern Tibet, China: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and FT thermochronology on granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(1): 59—69.
- Wang, G. C., Xiang, S. Y., Garver, J. I., et al., 2003. Uplift and exhumation during Mesozoic in Halaguole-Hatu area, east segment of eastern Kunlun Mountains: Evidence from zircon and apatite fission-track ages. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6): 645—652 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Yang, W. R., Ma, H. D., et al., 2005. Comparing of the tectonic uplift since Late Cenozoic between the East and West Kunlun Mountains. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 157—166 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., 1998. Uplift of the Karibasheng and Kuzigan grainte in the west Kunlun Mountains—Evidence from apatite fission track analysis. *Geological Review*, 44(4): 435—442 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. L., Wang, J. H., Zhu, G. Z., et al., 2004. Vertical deformations of the eastern Kunlun fault zone and west of Kunlun Mountain pass M_8 . 1 earthquake. *Seismology and Geology*, 26(2): 273—280 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Wan, J. L., Li, Q., et al., 2002. Fission-track evidence for the Cenozoic uplift and erosion of the northern segment of the Altyn Tagh fault zone at the Aksay-Dangjin Pass. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 191—198 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Wang, J., Wang, S. C., 1998. Fission track evidence for rapid uplift of the Nyalam, Higher Himalaya, Tibet, China. *Geological Review*, 44(4): 430—434 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. Q., Cui, Z. J., Liu, G. N., et al., 2001. Quaternary geomorphological evolution of the Kunlun Pass area and uplift of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Geomorphology*, 36(3—4): 203—216.
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Li, S. R., et al., 2001. The fission track evidence of conformation activity in Gangdise belt, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 46(20): 1739—1742 (in Chinese).
- Yuan, W. M., Zhang, X. T., Dong, J. Q., et al., 2004. Apatite fission track evidence on the uplifting of eastern Kunlun Mountains. *Atomic Energy Science and Technology*, 38(2): 166—168 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. D., Mo, X. X., Guo, T. Y., et al., 2003. Fission track ages of pluton in South Tibet and plateau uplift. *Advance in Natural Sciences*, 13(8): 877—880 (in Chinese).
- Zhong, D. L., Ding, L., 1996. A discussion on uplift procession and its dynamics of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *Science in China (Series D)*, 26(4): 290—295 (in Chinese).

附中文参考文献

- 柏道远, 孟德保, 刘耀荣, 等, 2003. 青藏高原北缘昆仑山中段构造隆升的磷灰石裂变径迹记录. *中国地质*, 30(3): 240—246.
- 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等, 2004. 湖泊沉积物记录的藏中地区 2.8 Ma 以来的环境演变历史. *地球化学*, 33(2): 159—164.
- 陈正乐, 万景林, 王小凤, 等, 2002. 阿尔金断裂带 8 Ma 左右的快速走滑及其地质意义. *地球学报*, 23(4): 295—300.
- 崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等, 1998. 关于“昆仑—黄河运动”. *中国科学(D辑)*, 28(1): 53—59.
- 李炳元, 1996. 青海可可西里地区自然环境. 北京: 科学出版社, 24—28.
- 李炳元, 潘保田, 高红山, 2002. 可可西里东部地区的夷平面与火山年代. *第四纪研究*, 22(5): 397—405.
- 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等, 2001. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 21(5): 381—391.
- 潘保田, 高红山, 李吉均, 2002. 关于夷平面的科学问题——兼论青藏高原夷平面. *地理科学*, 22(5): 520—526.

- 万景林,王二七,2002. 西昆仑北部山前普鲁地区山体抬升的裂变径迹研究. *核技术*,25(7): 565—567.
- 王国灿,向树元,GARVER,J. I.,等,2003. 东昆仑东段哈拉郭勒—哈图一带中生代的岩石隆升剥露——锆石和磷灰石裂变径迹年代学证据. *地球科学——中国地质大学学报*,28(6): 645—652.
- 王国灿,杨巍然,马华东,等,2005. 东、西昆仑山晚新生代以来构造隆升作用对比. *地质前缘*,12(3): 157—166.
- 王军,1998. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升——来自磷灰石裂变径迹分析的证据. *地质论评*,44(4): 435—442.
- 王庆良,王建华,朱桂芝,等,2004. 东昆仑山断裂带及昆仑山口西 8.1 级地震垂直形变研究. *地震地质*,26(2): 273—280.
- 王瑜,万景林,李奇,等,2002. 阿尔金山北段阿克塞—当金山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据. *地质学报*,76(2): 191—198.
- 王彦斌,王军,王世成,1998. 高喜马拉雅地区聂拉木花岗岩快速抬升的裂变径迹证据. *地质论评*,44(4): 430—434.
- 袁万明,王世成,李胜荣,等,2001. 西藏冈底斯带构造活动的裂变径迹证据. *科学通报*,46(20): 1739—1742.
- 袁万明,张雪亭,董金泉,等,2004. 东昆仑隆升作用的裂变径迹研究. *原子能科学技术*,38(2): 166—168.
- 赵志丹,莫宣学,郭铁鹰,等,2003. 西藏南部岩体裂变径迹年龄与高原隆升. *自然科学进展*,13(8): 877—880.
- 钟大赉,丁林,1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑)*,26(4): 290—295.

* * * * *

(上接 50 页)

- Yin, H. F., Zhang, K. X., 1998. Evolution of central orogenic belt and its characteristics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 437—441 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., Feng, Q. L., 2004. The archipelagic ocean system of eastern Eurasian Tethys. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 230—236.
- Zhang, K. X., Huang, J. C., Yin, H. F., et al., 2000. Application of radiolarians and other fossils in non-Smithstrata: Exemplified by the Animaqing mélangé belt in eastern Kunlun Mountains. *Science in China (Series D)*, 43(4): 364—374.
- Zhang, K. X., Lin, Q. X., Zhu, Y. H., et al., 2004. New paleontological evidence on time determination of the east part of the eastern Kunlun mélangé and its tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 47(10): 865—873.
- Zhang, K. X., Zhu, Y. H., Yin, H. F., et al., 2004. Application of tectonic facies in geological mapping in East Kunlun orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 661—666 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Yin, H. F., Wang, B. Z., et al., 2004. Presence and evidence of Kuhai-Saishitang branching ocean in copulae between Kunlun-Qinling Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 691—696 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. H., Zhang, K. X., Pan, Y. M., et al., 1999. Determination of different ophiolitic belts in East Kunlun orogenic zone and their tectonic significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 134—138 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 从柏林,张儒瑗,1983. 华北断块新生代玄武岩系及其形成的大地构造环境. *地质论评*,29(1): 40—49.
- 殷鸿福,张克信,1997. 东昆仑造山带的一些特点. *地球科学——中国地质大学学报*,22(4): 339—342.
- 殷鸿福,张克信,1998. 中央造山带的演化及其特点. *地球科学——中国地质大学学报*,23(5): 437—441.
- 张克信,朱云海,殷鸿福,等,2004. 大地构造相在东昆仑造山带地质填图中的应用. *地球科学——中国地质大学学报*,29(6): 661—666.
- 张智勇,殷鸿福,王炳璋,等,2004. 昆秦结合部海西期苦海—赛什塘分支洋的存在及其证据. *地球科学——中国地质大学学报*,29(6): 691—696.
- 朱云海,张克信,Pan, Y. M.,等,1999. 东昆仑造山带不同蛇绿岩带的厘定及其构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*,24(2): 134—138.