

文章编号:1009-3850(2019)03-0092-09

青藏高原东部雀儿山地区新近纪隆升速率探讨 ——来自雀儿山花岗岩体磷灰石裂变径迹证据

曾 强, 徐天德

(四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 四川 成都 610213)

摘要:通过青藏高原东部川西地区雀儿山花岗岩体磷灰石裂变径迹分析,新获得了4个磷灰石裂变径迹年龄值,分别为 4.9 ± 0.3 Ma、 6.2 ± 0.5 Ma、 7.2 ± 0.4 Ma 和 7.3 ± 0.7 Ma。运用径迹年龄-地形高差法计算出雀儿山花岗岩体新近纪的隆升速率,为 $0.15 \sim 2$ mm/a,平均隆升速率为 0.78 mm/a。隆升速率在每个阶段有所不同,但呈现出一种快速隆升→缓慢隆升的过程,为整个青藏高原东缘的隆升过程提供了约束条件。

关键词:青藏高原东缘;雀儿山花岗岩;磷灰石裂变径迹年龄;隆升速率

中图分类号: P546

文献标识码: A

引言

裂变径迹定年法是20世纪60年代兴起的一种地质测年方法。70年代以来,随着 ζ 参数的引入(Hurford A J等,1982; Hurford A J等,1983)、退火模型和退火实验的提出(Laslett G M等,1987; Laslett G M等,1996; Galbraith R F等,1997)使这一技术由单一的测年手段转变成为一种低温约束热史和抬升/剥离作用的关键技术。目前,磷灰石裂变径迹分析技术是一项成熟的技术,早期主要运用于含油气盆地分析的热史模拟^[1-11]、造山带构造演化^[12-15]、沉积物源分析^[2]和油气勘探^[16]等领域,在此基础上,被逐渐拓展到造山带的隆升、剥蚀及再沉积研究之中^[17-20]。

近年来,随着人们对裂变径迹长度研究的加深,裂变径迹技术在造山带构造隆升方面的应用已趋成熟,国内外许多学者运用磷灰石裂变径迹方法

对青藏高原东部隆升的起始时间进行了大量研究^[21-32],结果显示,青藏高原东北缘在8Ma时存在一次广泛的构造活动。青藏高原幅员辽阔,高原演化的复杂性和多样性决定了不同地区的局部特色。雀儿山中酸性复式岩体位于义敦岛弧碰撞造山带以北,经历多期次侵入作用,是研究义敦岛弧碰撞造山带北段乃至青藏高原东缘构造演化的重要地域。对其构造隆升的年代学研究对于探讨青藏高原东缘的抬升机制及大陆动力学背景非常重要。因此,本文以义敦岛弧碰撞造山带北端的雀儿山花岗岩体作为研究对象,通过对雀儿山花岗岩热年代学的研究,探讨雀儿山的隆升过程,为整个青藏高原东缘的隆升过程提供约束条件。

1 区域地质背景

研究区地处巍峨高峻的青藏高原东部地区,作

收稿日期:2019-05-31; 改回日期:2019-08-02

作者简介:曾强(1984-),男,工程师,硕士研究生。研究方向:基础地质调查。E-mail:462589605@qq.com

资助项目:中国地质调查项目(1212011220387)资助

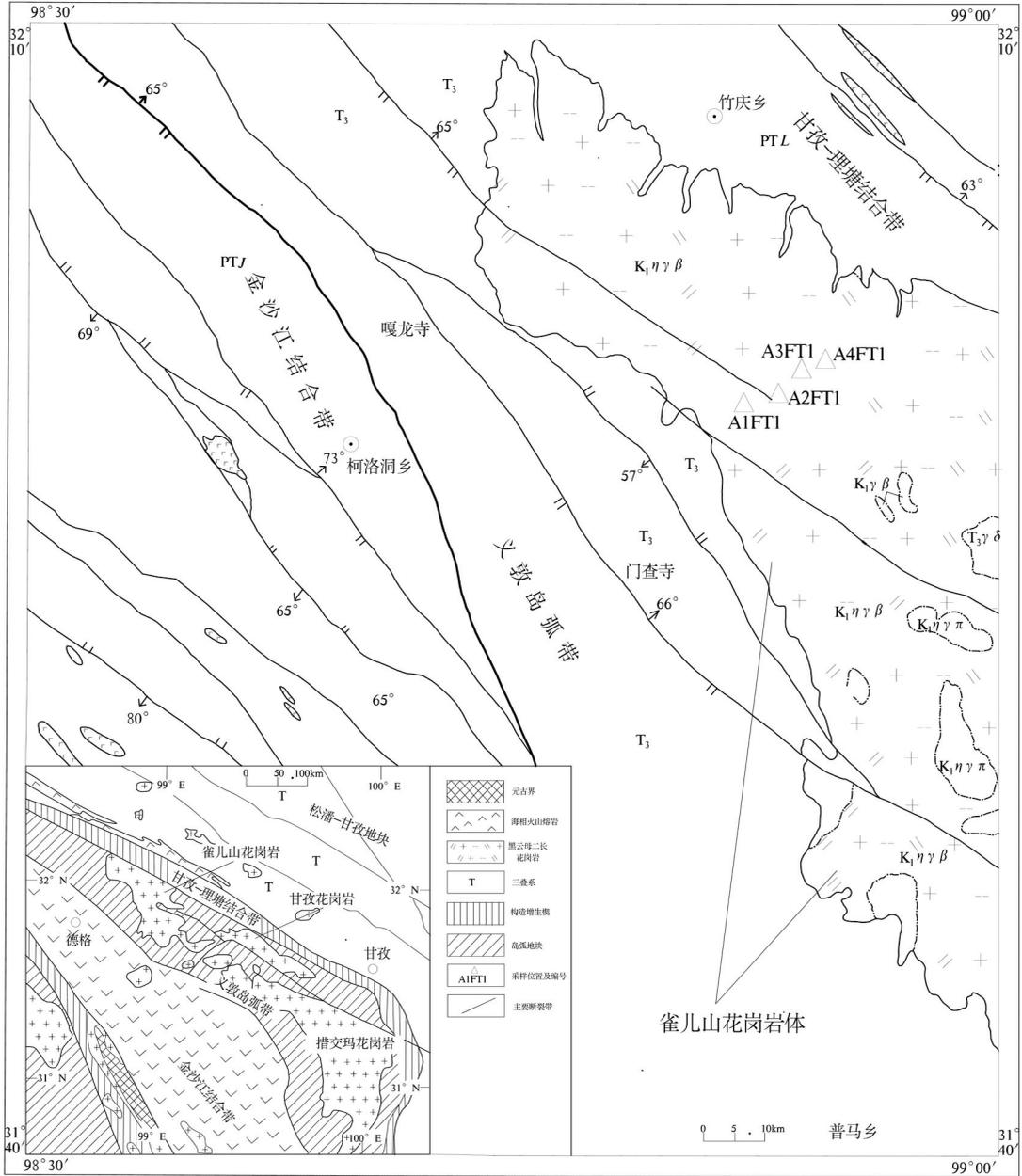


图1 雀儿山花岗岩体大地构造位置及区域地质图
 Fig. 1 Tectonic setting and regional geological map of the Chola Mountains

为东特提斯-喜马拉雅造山系东缘的重要组成部分之一,大地构造位置处于巴颜喀拉前陆盆地褶皱带(松潘-甘孜地块)与德格-中甸陆块、芒康-思茅陆块接合部。雀儿山花岗岩体位于义敦岛弧碰撞造山带北东端,该岛弧带是一个经历了印支期洋壳俯冲碰撞造山作用和燕山晚期-喜马拉雅期走滑转换造山作用形成的复合造山带(Hou, 1993; 侯增谦等, 1995)。义敦岛弧带东以甘孜-理塘结合

带为界,西以金沙江结合带为限,NW向延伸1000余千米,其北段东部和北部主要受甘孜-理塘构造结合带控制,西部受热柯-昌台构造带所限,北部发育了一系列NW向断裂带,与甘孜-理塘结合带NW延伸部分平行。其中在甘孜-理塘构造结合带NW延伸部分南侧,并与之平行的NW向断裂东部截断了甘孜-理塘断裂,切割了义敦岛弧北段最大的花岗岩体—措交玛花岗岩,甘孜来马乡花岗岩体

受其所限。

2 岩体地质特征

2.1 岩石特征

川西雀儿山中酸性复式岩体出露于四川德格县竹庆乡雀儿山一带,呈北西-南东带状展布,北西侧受甘孜-理塘结合带的北西延伸部分控制,北东侧受俄支-竹庆断裂切割,南西侵入晚三叠世喇嘛垭组地层中(图1),发育宽500~1000m不等的角岩化带,面积约260km²。主要岩性有:石英闪长岩、花岗闪长岩、似斑状黑云母二长花岗岩、二长花岗岩、似斑状二长花岗岩、黑云母花岗岩、钾长花岗岩等,岩

性以黑云母二长花岗岩为主体,总体具由外向内岩石粒度由细变粗的变化特征。

花岗闪长岩(图2):呈灰-深灰色,中-细粒花岗结构,块状构造。岩石主要由石英、正长石、蚀变斜长石、黑云母、蚀变角闪石等组成。岩石具中细粒花岗结构,块状构造。矿物成分含量为石英25%、正长石8%、蚀变斜长石50%、黑云母10%、蚀变角闪石5%,副矿物主要为磷灰石、锆石、及金属矿物。岩石主要由粒度一般在3~0.8mm之间的石英、蚀变斜长石、正长石、黑云母、角闪石等矿物呈花岗结构不均匀分布组成。黑云母、角闪石多数析出钛铁物蚀变为绿泥石。

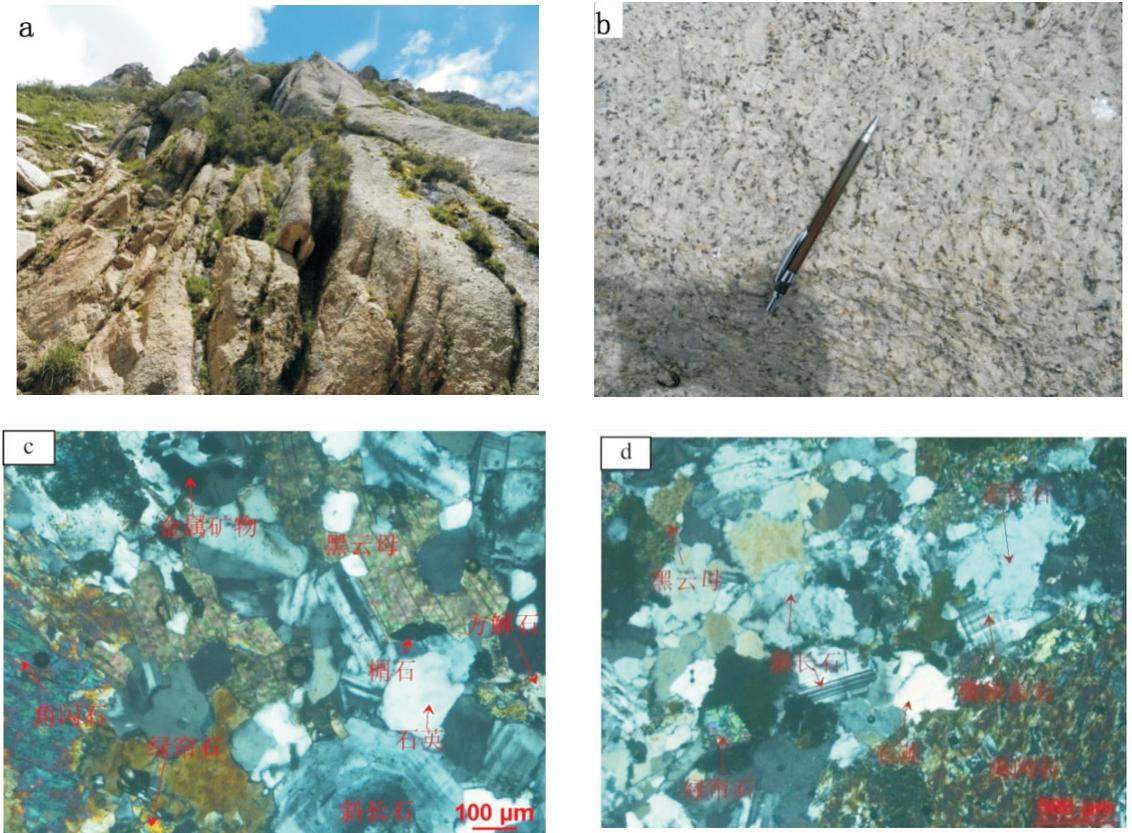


图2 花岗闪长岩野外宏观(a)、微观(b)及镜下照片(c,d)

Fig. 2 Macroscopic (a) and microscopic (b) features and photomicrographs (c and d) of the granodiorites in the Chola Mountains

细粒似斑状黑云母二长花岗岩:岩石呈灰白色,主要由正长石、石英、中更长石、黑云母等组成。具似斑状结构,基质为中粒花岗结构。斑晶为正长石,含量约15%~20%;基质:石英25%~30%、正长石10%~20%、中更长石20%~25%、黑云母2%~3%。副矿物主要为磷灰石、锆石、金属矿物。

斑晶由粒径一般在0.4cm左右的正长石组成,分布一定数量的钠长石条纹,也可作正长条纹长石。基质由粒径在2~0.3mm之间的石英、正长石、中更长石呈花岗结构不均匀分布组成。中更长石略显环带构造,分布少量绢云母,偶见黑云母集合体分布。

中粒似斑状黑云母二长花岗岩:岩石呈灰白

色,主要由正长石、石英、中更长石、黑云母等组成。具似斑状结构,基质为中粒花岗结构。斑晶为正长石,含量约10%~20%;基质:石英28%~32%、正长石15%~20%、中更长石20%~25%、黑云母1%~2%。副矿物主要为磷灰石、锆石、金属矿物。

斑晶由粒径一般在0.7cm左右的正长石组成,分布一定数量的钠长石条纹,也可作正长条纹长石。基质由粒径在4~2mm之间的石英、正长石、中更长石呈花岗结构不均匀分布组成。中更长石略显环带构造,分布少量绢云母,偶见黑云母集合体分布。

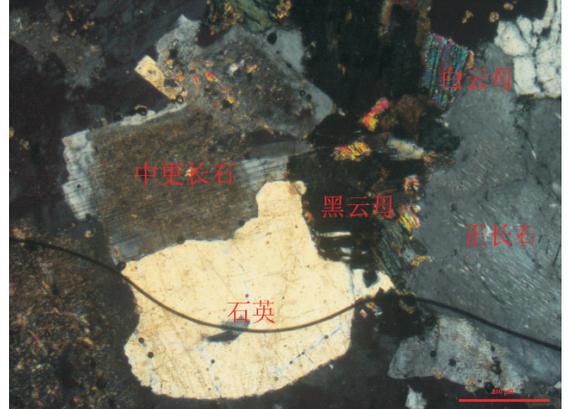


图3 中粒黑云母二长花岗岩野外微观及镜下照片

Fig. 3 Macroscopic features and photomicrograph of the medium-grained biotite monzogranite in the Chola Mountains

钾长花岗岩(图4):岩石主要由石英、正长石、中更长石、黑云母等组成。具中粒花岗结构,块状构造。矿物成分含量为石英25%、正长石50%、中更长石20%、黑云母3%、白云母1%,副矿物主要

为磷灰石、锆石、金属矿物等。岩石由粒度一般在4~2mm之间的石英、正长石、中更长石等矿物呈花岗结构不均匀分布组成。黑云母及少量白云母析出钛铁物蚀变为绿泥石。

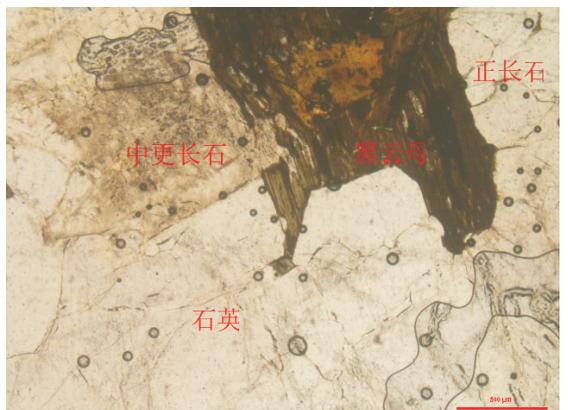


图4 钾长花岗岩野外微观及镜下照片

Fig. 4 Macroscopic features and photomicrograph of the moyite in the Chola Mountains

2.2 形成时代

雀儿山中酸性复式岩体具有两期构造岩浆活动,即印支期和燕山期,以燕山期岩浆活动为主。四川省地矿局区调队完成的1:5万独木岭幅区调中,在印支期花岗闪长岩中新获得了2件LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄值,分别为 $217.2 \pm 3.2\text{Ma}$ 和

$223.6 \pm 3\text{Ma}$,形成时代为晚三叠世。同时在燕山期二长花岗岩中新获得了4件LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄值,分别为 $101.9 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $101.2 \pm 1.8\text{Ma}$ 、 $102.23 \pm 0.91\text{Ma}$ 和 $101 \pm 3\text{Ma}$,形成时代为早白垩世(K_1)。

2.3 构造环境

印支期花岗闪长岩形成的构造环境为同碰撞花岗岩环境,燕山期二长花岗岩形成的构造环境为后碰撞环境。晚三叠世甘孜-理塘结合带向西发生俯冲碰撞作用,导致沙鲁岩火山岩浆弧的下地壳-地幔部分重熔,侵位了研究区内的印支期花岗闪长岩体。自晚三叠世古特提斯裂谷洋盆闭合后,进入侏罗世以来,金沙江结合带和甘孜-理塘结合带的碰撞造山作用持续进行,研究区开始进入了陆-陆碰撞造山阶段。进入白垩纪,陆内造山达到顶峰,而岩浆侵入活动达到了鼎盛时期,形成了面积约500km²的雀儿山中酸性复式岩体。在研究区南

边格聂一带形成了格聂中酸性复式岩体,最终造就了如今的雀儿山-格聂构造岩浆带。

3 样品采集及分析测试方法

3.1 样品采集

本次4件磷灰石裂变径迹样品均采自于雀儿山黑云母二长花岗岩新鲜基岩露头上,每个样品重约3kg,样品采集信息见表1,具体采集位置见图1。岩性主要为中细粒-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩。样品海拔高程采用手持GPS及数据采集器定位坐标和高程,并在1:2.5万地形图上进行高程校正。

表1 样品采集信息

Table 1 Relevant information for the sample collection

样品编号	岩性	时代	纬度	经度	高程(m)
A1FT1	二长花岗岩	早白垩世	31°57'07"	98°53'46"	4300
A2FT1	二长花岗岩	早白垩世	31°56'47"	98°54'35"	4500
A3FT1	二长花岗岩	早白垩世	31°56'25"	98°54'21"	4700
A4FT1	二长花岗岩	早白垩世	31°56'45"	98°55'08"	4900

3.2 分析测试

裂变径迹测年法(fission track dating)缩写为FTD,它是基于对矿物晶体内所含²³⁸U发生重核裂变半衰期函数关系的研究来完成测年的一种经典同位素测年手段。函数关系中子体、母体的获得是透过统计铀原子裂变产物在晶格内高速运动形成的电离损伤,即所谓的径迹数来完成。自然界的²³⁸U衰变速率远比²³⁵U衰变速率大约17倍,并且²³⁵U/²³⁸U为0.7/99.3,故子体量的获得只考虑来源于²³⁸U自发裂变的电离损伤,其它忽略不计,称为自发径迹数;母体量的获得是透过²³⁵U经热中子辐照激发后生成的电离损伤,即诱发径迹数的统计,然后换算而得,测试流程采用外探测器法及Zeta法完成。

本次磷灰石裂变径迹实验在北京市泽康恩科技有限公司完成。采用外部探测器法(Gleadow, 1981)以Zeta(Zeta = 352.4 ± 29)标准化计算的方法获得,Zeta标定选用国际标准样Durango磷灰石(31.4 ± 0.5Ma),国家校准局校准微量元素玻璃SRM612用来作为放射量测定器测定在照射期间的中子流量,本实验中该值为356.6 ± 10。挑选出磷灰石单矿物后,将其和CN5标准铀玻璃(美国国家

标准局SRM612)固定在一起,并制成光薄片。自发裂变径迹的蚀刻方法为在20℃下用5.5N的HNO₃浸泡20秒,外探测器采用低铀含量白云母,在中国原子能科学研究院492反应堆进行辐射,诱发裂变径迹的蚀刻方法为室温下用40% HF浸泡40分钟,径迹统计和长度统计用OLYMPUS偏光显微镜,在放大1000倍浸油条件下完成。

4 测试结果

本次工作采集的4件磷灰石裂变径迹样品分析成果见表2。单颗粒年龄直方图、径迹长度直方图、放射图见图5。

从表中及图中可以看出,所测4个样品的磷灰石裂变径迹平均长度为12.35μm,标准偏差为2.15μm,各样品所测的磷灰石裂变径迹长度均小于原始磷灰石径迹长度。所有磷灰石裂变径迹的年龄值为4.9 ± 0.3Ma ~ 7.3 ± 0.7Ma,处于中新世阶段,皆远低于雀儿山中酸性复式岩体的形成年龄(平均为101.5 ± 1.6Ma),这表明岩体曾经历过退火冷却过程,并在低温封闭的磷灰石晶格中保存了由²³⁸U放射母体衰变辐射而成的裂变径迹记录,同时也表明川西雀儿山地区至少自中新世(7.3 ± 0.7

表 2 裂变径迹实验数据

Table 2 Fission track age determinations for the apatite samples collected from the biotite monzogranite in the Chola Mountains

样品编号	N_c	$\rho_d(N_d)$ ($\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$)	$\rho_s(N_s)$ ($\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$)	$\rho_i(N_i)$ ($\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$)	$P(\chi^2)\%$	Fission track age (Ma $\pm 1\sigma$)	Mean track length ($\mu\text{m} \pm 1\sigma$) (N_j)
A1FT1	34	16.527 (7978)	0.956 (465)	66.1 (32157)	30.1	4.9 \pm 0.3	11.6 \pm 2.3 (100)
A2FT1	35	17.711 (7978)	0.765 (225)	44.794 (13170)	15.5	6.2 \pm 0.5	13.1 \pm 2.0 (97)
A3FT1	35	17.001 (7978)	1.309 (604)	63.395 (29258)	67.1	7.2 \pm 0.4	12.8 \pm 1.9 (54)
A4FT1	31	18.421 (7978)	0.686 (156)	35.706 (8115)	77.9	7.3 \pm 0.7	11.9 \pm 2.4 (40)

注: N_c -测试颗粒总数; ρ_d -铀标准玻璃的诱发径迹密度; N_d -铀标准玻璃的诱发径迹总数; ρ_s -磷灰石的自发径迹密度; N_s -磷灰石全部测试颗粒的自发径迹总数; ρ_i -低铀含量白云母外探测器的上诱发径迹密度; N_i -低铀含量白云母全部测试颗粒的诱发径迹总数; $P(\chi^2)$ -($n-1$)自由度 χ^2 值的机率; Fission track age (Ma $\pm 1\sigma$)-裂变径迹年龄; Mean track length ($\mu\text{m} \pm 1\sigma$)-平均径迹长度; N_j -被测径迹长度标准高差。

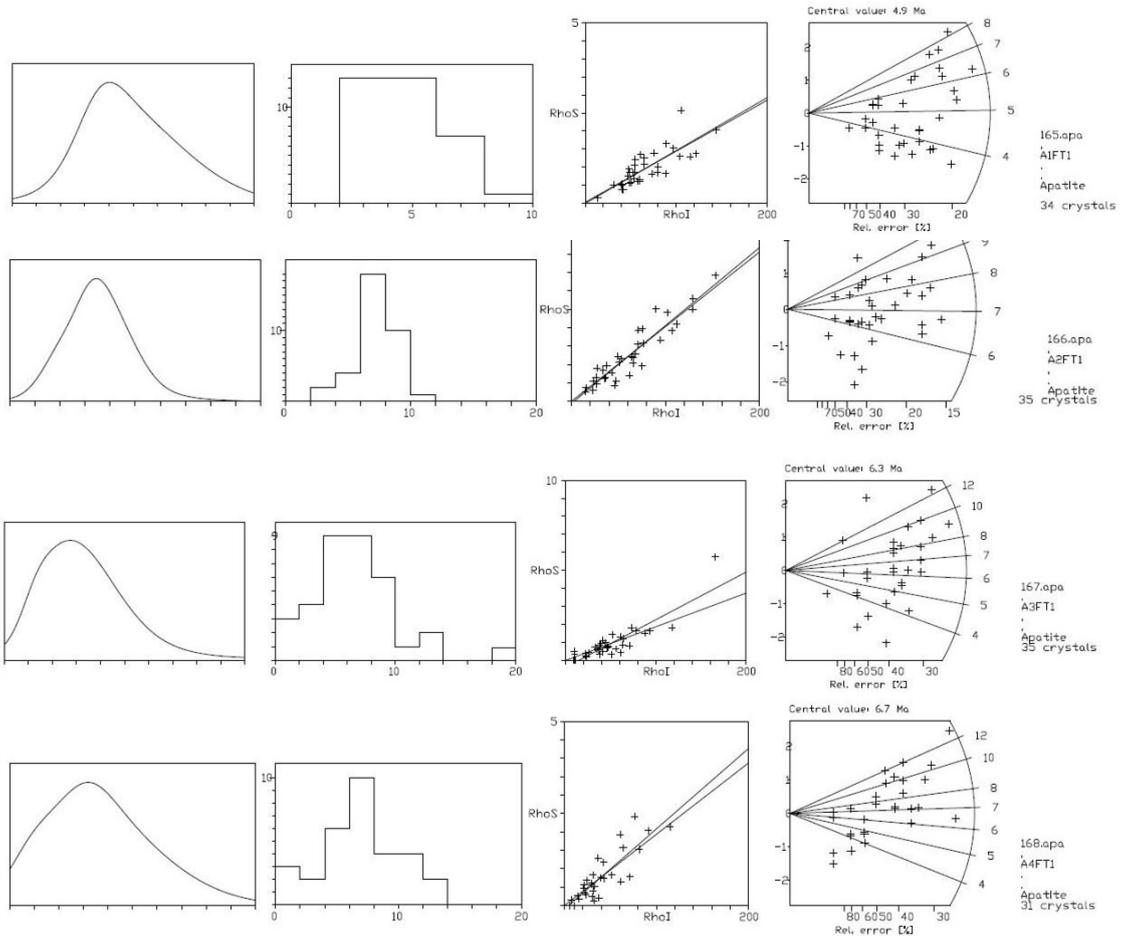


图 5 磷灰石裂变径迹样品年龄直方图、径迹长度直方图及放射图

Fig. 5 Age histogram, track length histogram and radian diagram of the apatite samples collected from the biotite monzogranite in the Chola Mountains

Ma)以来一直处于持续隆升冷却的过程。单颗粒径迹年龄反应其所经历最高古地温的时段在 100Ma 左右,亦低于其形成时的年龄。所有样品磷灰石裂变径迹分析中单颗粒磷灰石年龄的 $P(x2)$ 检验值均大于 5%,表明本次分析样品的单颗粒年龄差异属于统计误差,并且样品中的磷灰石裂变径迹年龄为单一的年龄,没有多组年龄现象。

Gleadow A. J. W (1986) 认为裂变径迹的理想长度为 20 μm ,但由于后期退火作用影响,实际地质体内标准径迹长度为 16.3 μm 。雀儿山黑云母二长花岗岩磷灰石裂变径迹的平均封闭径迹长度在 11.6~13.1 μm 之间,平均长度为 12.35 μm ,标准偏差在 1.9~2.4 μm 之间,平均偏差为 2.15 μm ,都低于新鲜径迹长度 (16 \pm 1) μm ,属于相对较长径迹,长度偏差较小,变化幅度不大,说明后期受到构造热事件的影响很小,处于退火带温度(通常为 60~120 $^{\circ}\text{C}$)时间段所致。

磷灰石裂变径迹退火特征研究结果表明,快速冷却的岩石其磷灰石裂变径迹一般保持较长的径迹长度,且具有窄而对称的正态分布,而缓慢冷却的岩石样品,其磷灰石裂变径迹长度缩短,分布型式呈宽缓而不对称的正态分布。经过再次热干扰的岩石,其磷灰石裂变径迹长度为双峰式分布型式。本次所采集的 4 件样品磷灰石裂变径迹长度在直方图上呈单峰式分布,总体上表现为无扰动基岩型,说明雀儿山中酸性复式岩体在早白垩世以来基本处于一个单调降温退火的过程,并在低温封闭的磷灰石晶格中保存了由²³⁸U 放射母体衰变辐射而成的裂变径迹记录。因此,可以推断裂变径迹年龄受隆升冷却作用控制明显,在岩体隆升和冷却到磷灰石封闭温度(\approx 100 $^{\circ}\text{C}$)以来,由母体放射性同位素衰变而成的裂变径迹保存较好,未遭受明显的热扰动。因而,已测定样品的磷灰石裂变径迹年龄值具有较高的可信度。

5 磷灰石裂变径迹揭示的隆升速率

磷灰石裂变径迹退火带温度通常为 60 ~

120 $^{\circ}\text{C}$,高于 120 $^{\circ}\text{C}$ (退火带下部)时裂变径迹将发生全退火,年龄归零;低于 60 $^{\circ}\text{C}$ (退火带上部)则没有退火作用发生,裂变径迹不断形成和累积,从而年龄逐渐变大。在退火带内既有径迹退火又有新径迹生成,年龄具有混合特性。随着隆升与冷却作用的进行,位于相对上部的样品较早地抬高到脱离退火带的部位,故较早地开始计时,以致年龄较大;而位于下部的样品则相对较晚地抬升到脱离退火带的地段,开始计时时间较晚,故年龄较小。

应用磷灰石的裂变径迹年龄及有效封闭温度计算造山带的抬升速率有以下 3 种方法^[16]:(1)径迹年龄-地形高差法:通过磷灰石裂变径迹年龄相对采样点的海拔高度给出相应年龄段的视抬升速率;(2)径迹年龄外推法:把一定海拔高度磷灰石裂变径迹年龄外推到其年龄为 0 时的深度,假定或通过其它方法给出一个地温梯度,用采样点的海拔高度和年龄为 0 时的深度之差除以裂变径迹年龄就可以得到岩石抬升的速率;(3)矿物对封闭温度年龄法:用同一同位素体系(如裂变径迹)不同封闭温度的矿物(磷灰石、锆石或榍石)或不同同位素体系矿物的封闭温度的不同来计算冷却速率,除以地热梯度就可以得出抬升速率。本次利用磷灰石径迹年龄计算隆升速率采用“径迹年龄-地形高差法”,即两个样品之间的高程差除以两个样品裂变径迹年龄差作为相应时间段内的隆升速率。计算结果见表 3。4 件样品的磷灰石裂变径迹年龄值与样点海拔高程之间表现出显著线性正相关性(图 6),从图中可以看出,4 个样品的裂变径迹年龄随着样品采集高程的增加而增加,说明海拔高的样品较海拔低的样品隆升冷却的年龄更早,这主要与样品脱离退火带的时间有关,即不同的采样点之间没有大的相对隆升差异,没有经历热扰动。

从表 3 和图 6 中可以看出:

(1)在 7.3 \pm 0.7~7.2 \pm 0.4Ma 期间,雀儿山岩体经历了一次快速隆升冷却的过程,隆升速率 = 200m/0.1Ma = 2mm/a。在海拔高度为 4900~4700m

表 3 径迹年龄-高差法计算出的隆升速率

Table 3 Uplift rates based on the track age-elevation method

序号	年龄区间 (Ma)	年龄差 (Ma)	高程区间 (m)	高程差 (m)	隆升速率 (mm/a)
1	4.9 \pm 0.3~6.2 \pm 0.5	1.3	4300~4500	200	0.15
2	6.2 \pm 0.5~7.2 \pm 0.4	1.0	4500~4700	200	0.2
3	7.2 \pm 0.4~7.3 \pm 0.7	0.9	4700~4900	200	2

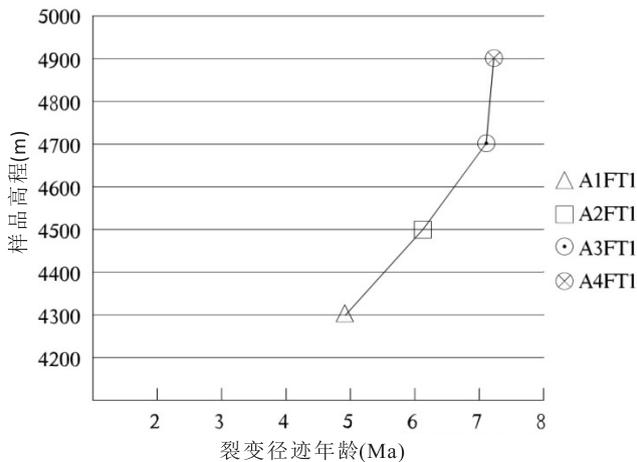


图6 裂变径迹年龄和海拔高程关系图

Fig. 6 Relationship between the fission track ages and elevations in the Chola Mountains

中,黑云母二长花岗岩从粗粒似斑状逐渐变为中-细粒似斑状。从岩石粒度上来看,岩浆的冷却过程较快,从而佐证了雀儿山岩体在这期间快速隆升的推断。

(2)在 $7.2 \pm 0.4\text{Ma} \sim 6.2 \pm 0.5\text{Ma}$ 期间,雀儿山岩体的隆升速率有所下降,隆升速率 = $200\text{m}/1\text{Ma} = 0.2\text{mm/a}$ 。在海拔高度为 $4700 \sim 4500\text{m}$ 中,岩性主要为中粒似斑状二长花岗岩,粒度较高海拔细。

(3)在 $6.2 \pm 0.5\text{Ma} \sim 4.9 \pm 0.3\text{Ma}$ 期间,雀儿山岩体的隆升速率较前两次更加缓慢,隆升速率 = $200\text{m}/1.3\text{Ma} = 0.15\text{mm/a}$ 。在海拔高度为 $4500 \sim 4300\text{m}$ 中,岩性主要为中粒-细粒似斑状二长花岗岩,粒度较高海拔细。

综上所述,雀儿山岩体新近纪的平均隆升速率为 0.78mm/a 。隆升过程中隆升速率在每个阶段均有所不同,但呈现出一种快速隆升→缓慢隆升的趋势。岩性上也呈现出粗-中粒花岗闪长岩→中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩→中细粒正长花岗岩的正常岩浆演化序列之规律。

6 结论

(1)通过磷灰石裂变径迹成果的研究,获得了雀儿山中酸性复式岩体4个裂变径迹年龄值,分别为 $4.9 \pm 0.3\text{Ma}$ 、 $6.2 \pm 0.5\text{Ma}$ 、 $7.2 \pm 0.4\text{Ma}$ 和 $7.3 \pm 0.7\text{Ma}$ 。雀儿山岩体在距今约 7.3Ma 开始隆升,隆升过程中隆升速率在每个阶段均有所不同,但呈现出一种快速隆升→缓慢隆升的过程。

(2)通过“径迹年龄-地形高差法”计算出川西雀儿山花岗岩体在中新世以来的隆升速率为 $0.15 \sim 2\text{mm/a}$,平均隆升速率为 0.78mm/a 。

参考文献:

- [1] Nasser N D. Fission track annealing in apatite and sphere [J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(2): 705-710.
- [2] Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite: 1. A qualitative description [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1986, 59: 237-253.
- [3] Ketchum R A, Domelike R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics III: Extrapolations geological time scales [J]. American Mineralogist, 1999, 9: 1235-1255.
- [4] Hearty K A, Foland S, Cook A C, et al. Direct measurement of timing: underpinning a reliable petroleum system model for the mid-continent rift system [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(7): 959-979.
- [5] 赵孟为, 磷灰石裂变径迹分析在恢复盆地沉降抬升史中的应用—以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(1): 238-348.
- [6] 周礼成, 冯石, 王世成, 等. 用裂变径迹长度分布模拟地层剥蚀量和热史 [J]. 石油学报, 1994, 15(3): 26-34.
- [7] 薛爱民. 利用磷灰石裂变径迹资料反演热演化史的综合分析法 [J]. 地球物理学报, 1994, 27(3): 338-344.
- [8] 郭随平, 王良书, 施央申, 等. 应用磷灰石裂变径迹研究沉积盆地的热史 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1995, 31(3): 469-475.
- [9] 周祖翼, 廖宗廷, 杨凤丽等. 裂变径迹分析及其在沉积盆地研究中的应用 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 332-337.
- [10] 赵俊青, 纪友亮, 王金友, 等. 应用磷灰石裂变径迹求取地层剥蚀量 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(6): 579-581.
- [11] 李善鹏, 邱楠生. 应用磷灰石裂变径迹分析 (AFTA) 方法研究沉积盆地古地温 [J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(2): 13-18.
- [12] 刘顺生, Wagner GA, 谭凯旋, 等. 阿尔泰哈巴河岩体的裂变径迹年龄及热历史 [J]. 核技术, 2002, 25(7): 525-530.
- [13] 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(6): 1479-1500.
- [14] 袁万明, 王世成, 杨志强, 等. 北喜马拉雅带构造活动的裂变径迹定年证据 [J]. 核技术, 2002, 25(6): 451-454.
- [15] 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): 877-880.
- [16] 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 [J]. Contrib. Mineral Petrol., 1986, 94(4): 405-415.
- [17] Garver J I, Brandon M, Trodden-Tice M, et al. Exhumation history of organic highlands determined by detrital fission track thermo

- chronology [A]. Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow and Erosion [C]. London: Geological Society of London Special Publication, 1999. 154; 283-304.
- [18] 来庆洲, 丁林, 王宏伟, 等. 青藏高原东部边界扩展过程的磷灰石裂变径迹历史制约[J]. 中国科学, 2006, 36(9): 785-796.
- [19] Clark M K, House M A, Royden L H, et al. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet [J]. *Geology*, 2005, 33: 525-528.
- [20] 张毅, 李勇, 周荣军, 等. 晚新生代以来青藏高原东缘的剥蚀过程: 来自裂变径迹的证据[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(1): 97-102.
- [21] 王伟涛. 宁夏南部新生代盆地沉积演化及其对青藏高原东北角构造变形的响应[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2008.
- [22] Zheng DW, Zhang PZ, Wan JL, et al. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology; Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 48: 198-208.
- [23] 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[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 584-590.
- [24] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 30-36.
- [25] 王国灿, 曹凯, 等. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时空格局[J]. 中国科学, 2011, 41(3): 332-349.
- [26] 四川省地质调查院. 四川省地矿局川西北地质队[R]. 成都: 四川 1:25 万阿坝县幅区域地质调查报告, 2004.
- [27] Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling; Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin [J]? *GSA Bulletin*, 2006, 118(5/6): 651-671.
- [28] Galbraith R F. On statistical estimation in fission track dating [J]. *Math. Geol.*, 1984, 16: 653-669.
- [29] Gleadow A. J. W, Duddy I R, Green P F, et al. Fission track analysis; a new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential [J]. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 1983, 23: 93-102.
- [30] Gleadow A. J. W. Geochronology and thermal history of the coast plutonic complex near Prince Rupert, British Columbia [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1986, 11: 320-327.
- [31] Wagner G A. Apatite fission-track geochronometer to 60°C; Projected length studies [J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 1988, 72: 145-153.
- [32] Wanger G A. Fission tracks dating of apatites [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1980, 14: 411.

An approach to the Neogene uplift rates for the eastern Qinghai-Xizang Plateau: Evidence from the fission track ages of the apatite from the Chola granites in western Sichuan

ZENG Qiang, XU Tiande

(Regional Geological Survey Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: The fission-track analysis is made for the apatite from the Chola granites in western Sichuan in the eastern part of the Qinghai-Xizang Plateau, and gives four fission track ages: 4.9 ± 0.3 Ma, 6.2 ± 0.5 Ma, 7.2 ± 0.4 Ma and 7.3 ± 0.7 Ma, which have disclosed that the Chola Mountains began to uplift at ca. 7.3 Ma BP. With the aid of fission-track analysis-elevation method, the uplift rates of the Chola Mountains are calculated as 0.15-2 mm/a, with an average of 0.78 mm/a since the Miocene. On the whole, the uplifting of the Chola Mountains displays the evolutionary processes from the rapid uplift to the slow uplift. The results of research in this study may be helpful to the study of the uplift of the eastern Qinghai-Xizang Plateau.

Key words: eastern Qinghai-Xizang Plateau; Chola granite; apatite fission track age; uplift rate