

# 西昆仑山奇台达坂花岗岩锆石 TIMS U-Pb 测年 及热演化历史分析

黎敦朋<sup>1,2</sup> 赵 越<sup>1</sup> 胡健民<sup>1</sup> 李新林<sup>2</sup> 周小康<sup>2</sup>  
王向利<sup>2</sup> 杜少喜<sup>2</sup> 肖爱芳<sup>2</sup>

(1.中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;2.陕西省地质调查院,陕西 西安 710016)

**摘要:**应用锆石 TIMS U-Pb 测年获得西昆仑山奇台达坂花岗岩年龄为(202.2 ± 3.4)Ma(MSWD=8.65);利用不同海拔高度获得磷灰石裂变径迹测定年龄为 24.8~14.0 Ma。通过裂变径迹热史模拟,并结合前人 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年数据,得出西昆仑山奇台达坂花岗岩就位以来,至少经历了三快二慢的冷却降温(隆升剥蚀)过程:即 202.2~195.6 Ma、26~15 Ma 和 5 Ma 以来 3 个阶段的快速降温(隆升剥蚀),195.6~26 Ma 和 15~5 Ma 2 个阶段的缓慢冷却降温(隆升剥蚀)。西昆仑山山地壳最上部约 3 km 的快速去顶作用主要发生于 26~15 Ma 和 5 Ma 以来,它是印度板块向欧亚板块碰撞的结果。

**关键词:**锆石 TIMS U-Pb 测年;裂变径迹;热演化历史;西昆仑山

**中图分类号:**P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)06-1013-09

奇台达坂花岗岩出露于新藏公路 509 道班以东(图 1)的西昆仑山,出露面积约 210 km<sup>2</sup>,呈不规则长卵圆形分布。20 世纪 80—90 年代昆仑山—喀喇昆仑山科学考察时,张玉泉等<sup>[1]</sup>对该花岗岩体进行过封闭温度较低的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年,获得 195.4~195.8 Ma 年龄值,确定为早侏罗世岩体。

奇台达坂花岗岩位于西昆仑山东段,规模较大,很多学者先后对新藏公路沿线分布的花岗岩进行过侵位时代和地球化学等方面的研究<sup>[1-10]</sup>,确定在西昆仑山南部的康西瓦断裂以南至甜水海地块以北存在一条中晚三叠世—早侏罗世的俯冲—碰撞型花岗岩带,而对该花岗岩带花岗岩的热演化历史的研究尚属空白。笔者通过对西昆仑山晚三叠世—早侏罗世俯冲—碰撞型花岗岩带中规模较大的奇台达坂花岗岩体进行热演化历史研究,以期了解西昆仑山南部花岗岩就位以后的冷却隆升历史,勾绘该花岗岩带花岗岩隆升剥露的时间框架。

## 1 岩体特征

奇台达坂花岗岩侵位于二叠系黄羊岭群中下部粉砂岩、板岩中,与围岩呈侵入接触关系,接触界线明显,接触带见 5~

30 m 的硅化、角岩化等接触蚀变。奇台达坂花岗岩局部被中新统玄武岩覆盖,玄武岩之下的花岗岩具烘烤现象。奇台达坂花岗岩由石英闪长岩和花岗闪长岩两种岩性组成。奇台达坂花岗岩侵位于二叠系黄羊岭群中,黄羊岭群地层总厚度约 13.5 km<sup>①</sup>;黄羊岭群之上为三叠系巴颜喀拉山群,其地层总厚度约为 7.8 km<sup>①</sup>,而三叠系巴颜喀拉山群为该时期最顶部地层。因此,根据奇台达坂花岗岩上覆地层的厚度,可以确定该岩体就位深度为 15~20 km 的高位花岗岩体。

### 1.1 岩石学特征

石英闪长岩呈长条状出露于岩体西北部,与二叠系黄羊岭群呈侵入接触,被花岗闪长岩脉动侵入。岩石为灰色、灰白色,细粒—中粒半自形花岗结构,块状构造。主要矿物:斜长石 50%~60%、石英 15%~20%、角闪石 10%~15%、黑云母 5%~10%,少量磷灰石、锆石、榍石、独居石。其中斜长石呈半自形—自形板柱状,钾长石呈半自形板状及不规则板状,发育卡氏双晶,黑云母呈自形条状,石英呈他形粒状,矿物粒径 0.5~3 mm。岩石次生蚀变较弱,主要有长石高岭土化、角闪石黑云母化、黑云母绿泥石化等。

花岗闪长岩呈长卵圆状出露于岩体东南部,与黄羊岭群

收稿日期:2006-12-22;改回日期:2007-08-12

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010610108 和 200313000003)资助。

作者简介:黎敦朋,男,1967 年生,博士生,高级工程师,主要从事区域地质调查与构造地质研究工作;E-mail:lidunpeng51888@163.com。

① 陕西省地质调查院. 阿克苏依湖幅 1:25 万区域地质调查报告, 2006。

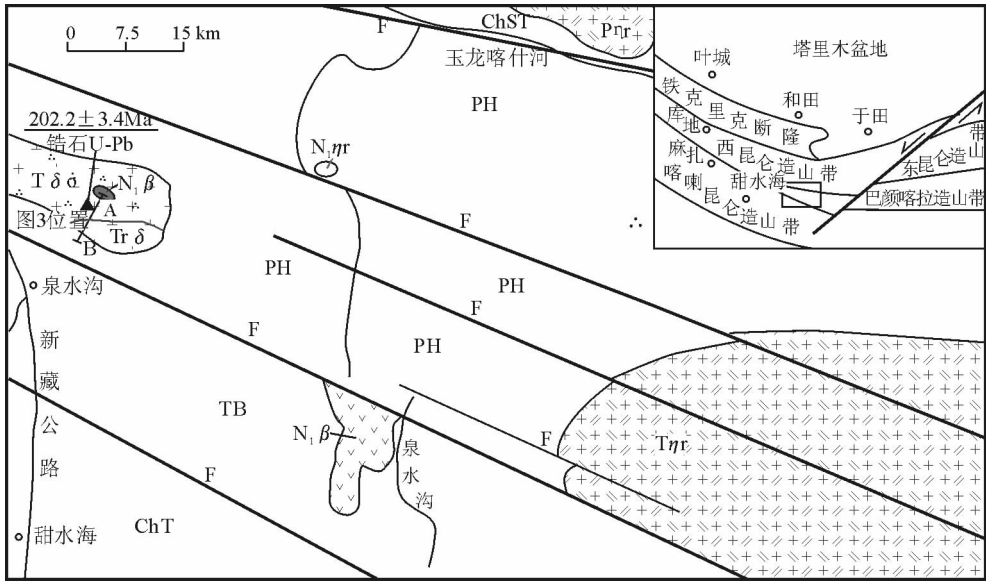


图 1 西昆仑山奇台达坂花岗岩出露位置图

$N_1\beta$ —中新统玄武岩;TB—三叠系巴颜喀拉山群;PH—二叠系黄羊岭群;ChT—长城系甜水海岩群;  
ChST—长城系赛图拉岩群; $N_1\eta$ —中新世二长花岗岩; $Tr\delta$ —三叠纪花岗闪长岩; $T\delta o$ —三叠纪石英闪长岩;  
 $T\eta r$ —三叠纪二长花岗岩; $P\eta r$ —二叠纪花岗闪长岩;F—断层

Fig.1 Location map of outcrops of the Qitaidaban granite in the western segment of the Bayan Har Mountains  
 $N_1\beta$ —Miocene basalt;TB—Triassic Bayan Har Group;PH—Permian Huangyangling Group;ChT—Mesoproterozoic Changchengian Tianshuihai Group-complex;ChST—Mesoproterozoic Changchengian Saitula Group-complex; $N_1\eta$ —Miocene monzogranite;  
 $Tr\delta$ —Triassic granodiorite; $T\delta o$ —Triassic quartz diorite; $T\eta r$ —Triassic monzogranite; $P\eta r$ —Permian granodiorite;F—fault

呈侵入接触。岩石为灰白色,中—细粒半自形粒状花岗结构、似斑状结构、块状构造。斑晶为钾长石和斜长石,含量 15%~20%,粒径 3~5 mm,呈自形板状,具环带状结构。基质含量斜长石为 40%~48%、钾长石 15%~20%、石英 20%~25%、黑云母 10%~15%、角闪石 5%左右,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、独居石等,矿物粒径 0.5~2 mm;斜长石呈半自形板状、角闪石呈自形柱状、黑云母呈自形条状、石英呈他形粒状结构。岩石次生蚀变以长石绢云母化与高岭土化、角闪石次闪石化、黑云母绿泥石化为主。

1.2 地球化学特征

奇台达坂花岗岩中石英闪长岩化学分析 (1 件样品):  
 $SiO_2$  含量为 63.54%、 $Fe_2O_3$  为 0.12%、 $FeO$  为 3.58%、 $K_2O$  为 3.4%、 $A/CNK=0.97$ 、 $Na_2O/K_2O=1.21$ 、 $(CaO+Na_2O+K_2O)_n > (Al_2O_3)_n > (Na_2O+K_2O)_n$  为铝正常型,分异指数(DI)为 65.27、特曼指数( $\sigma$ )为 1.82;石英闪长岩以高硅、富钠、低钛、低钾为特征。奇台达坂花岗岩中花岗闪长岩(3 件样品)化学分析: $SiO_2$  含量为 66.43%~67.99%、 $Fe_2O_3$  为 0.39%~1.14%、 $FeO$  为 2.86%~3.02%、 $K_2O$  为 3.87%~4.08%、 $(Na_2O)_n/(K_2O)_n=1$  左右、 $A/CNK$  为 1~1.03,为铝饱和型,分异指数(DI)在 72.45~74.28,里特曼指数( $\sigma$ )为 1.85~1.94;花岗闪长岩以高硅、高钛、高钾、低钠为特征。

奇台达坂花岗岩 REE 含量为  $94.83 \times 10^{-6} \sim 113.22 \times 10^{-6}$ 、 $LREE/HREE = 3.69 \sim 7.93$ 、 $(La/Lu)_n = 3.9 \sim 12.5$ 、 $\delta Eu = 0.63 \sim 0.79$ ,呈现富集轻稀土元素、亏损重稀土元素、Eu 负异常特征。

奇台达坂花岗岩富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Zr、Th 等高场强元素; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$  初始值为  $0.70731 \pm 0.00008$ ,反映其为地幔和地壳混熔或下地壳岩石部分熔融的产物。

上述地球化学特征表明奇台达坂花岗岩具有俯冲—碰撞型花岗岩地球化学特征。

2 锆石 TIMS U-Pb 测年

2.1 测定方法

锆石 TIMS U-Pb 测年样品采自岩体东部(图 1),采样点海拔 5437 m,样品重量 5 kg,粉碎至 80~120 目,通过磁选、电磁选,剩下非磁性部分,经淘洗获得锆石,然后在双目镜下进行挑选用于定年的锆石。所选锆石无包裹体、无裂纹、无熔蚀、晶体呈浅黄色、半透明、中长柱状、晶体完整、自形程度高,为典型的岩浆锆石。

锆石的精选、化学处理和同位素测年分析在天津地质矿产研究所同位素测试实验室完成,测试方法为锆石 TIMS 法。锆石的溶解及 U、Pb 的分离在 Krogh 程序的基础上做相

表 1 花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄分析结果

Table 1 Zircon U-Pb age analysis of granite

点号	质量分数		普通铅含量 (ng)	同位素原子比率					表面年龄/Ma		
	U (μg/g)	Pb (μg/g)		<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
1	1360	59	0.430	169	0.1259	0.03153<16>	0.2200<124>	0.05061<271>	200.1	201.9	223.0
2	1190	52	0.360	155	0.1132	0.03169<7>	0.2203<46>	0.05042<102>	201.1	202.2	214.5
3	1709	62	0.220	395	0.1048	0.03202<17>	0.2221<134>	0.05030<297>	203.2	203.7	208.9
4	533	22	0.110	280	0.1237	0.03235<48>	0.2123<580>	0.04759<1233>	205.3	195.5	78.85

备注: 同位素原子比率 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 已对实验空白 (Pb=0.050ng, U=0.002ng) 及稀释剂作了校正。其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素, 括号内的数字为 (2σ) 绝对误差, 例如: 0.03235 < 48 > 表示 0.03235 ± 0.00048 (2σ)

测定结果: 1-4 号数据点 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄统计权重平均值: 202.2 ± 3.4 Ma, MSWD=8.65

注: 样品由天津地质矿产研究所李怀坤测试。

应的改进, 锆石在 0.25 ml 容积的氟塑料容器内溶解, 并使用 <sup>208</sup>Pb-<sup>235</sup>U 混合稀释剂, 将 U、Pb 用硅胶-磷酸溶液加在同一单铯灯丝上, 在 VG354 型质谱仪上用高灵敏度的 Daly 检测器进行 U、Pb 同位素测定, 所有 U、Pb 同位素数据均对质量歧视效应进行校正。实验全流程 Pb 空白为 0.030~0.050 ng, U 空白为 0.002~0.004 ng。

2.2 测定结果

从测定的 4 颗锆石表面年龄(表 1)来看基本一致, 获得 4 个同位素数据点均落在谐和曲线(图 2), 测得锆石表面年龄为 200.1~205.3 Ma, 表面年龄相对偏差较小, 1~4 号数据点的表面年龄加权平均值为 (202.2±3.4)Ma (MSWD=8.65), 代表花岗闪长岩的结晶年龄。

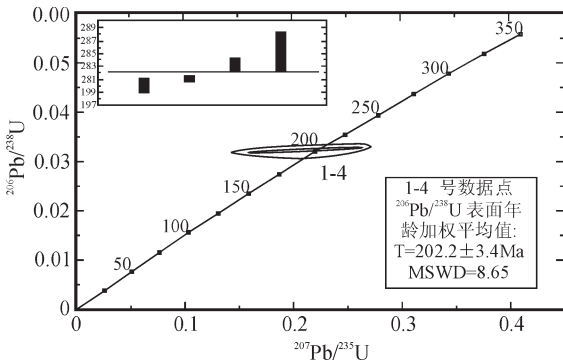


图 2 花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig.2 Zircon U-Pb concordia diagram of granite

3 磷灰石裂变径迹测年

3.1 样品采集

磷灰石裂变径迹测年样品采样位置见图 1 和图 3, 样品的高程使用美国产 GARMIN-GPS12XLC 型手持式 GPS 直接测定。样品采自岩体东南部的花岗闪长岩, 从海拔 4710~5607 m 采集 6 件磷灰石裂变径迹样品, 其中最顶部的

D5630-FT1 样品位于中新统玄武岩下 10 m 经烘烤的花岗闪长岩中。

3.2 测试方法和实验条件

野外按高程采集 2 kg 新鲜的岩石样品, 在室内破碎后采用磁悬浮和重液等常规方法分离出磷灰石, 在双目镜下挑选纯净的磷灰石单矿物, 用环氧树脂将磷灰石制成样品, 抛光为光薄片, 并将低铀白云母贴在光薄片上, 与 SRM612 铀标准玻璃组成定年组件。样品送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照; 实验采用外探测器法, 用 OLYMPUS 偏光显微镜在放大 1000 倍浸油条件下进行裂变径迹测量, 应用 Zeta 常数校准法计算裂变径迹年龄(Hurford, 1983)。

磷灰石裂变径迹蚀刻条件为 7% HNO<sub>3</sub>, 室温, 40 s; 外探测器采用低铀含量白云母, 蚀刻条件为 40% HF, 室温, 20 min; Zeta 标定选用国际标准样 Durango 磷灰石及美国国家标准局 SRM612 铀标准玻璃[Apatite—Zeta SRM612=352.4±29(J. L. Wan)]。

3.3 测试结果与热历史模拟

样品由中国地震局地质研究所地质重力学国家重点实验室万景林测试。实验程序根据 Gleadow et al.<sup>[20, 21]</sup>, 美国国家标准局 SRM612 铀标准玻璃和 Zeta 常数校准法计算裂变径迹年龄, 计算公式中的有关参数见参考文献[22]。测试结果见表 2 和图 4。样品的磷灰石裂变径迹年龄为 (24.8 ± 4.9)~(14.0 ± 1.8)Ma, 所有视年龄都远远小于花岗岩的就位年龄 (202±3.4 Ma), 说明磷灰石单颗粒的裂变径迹年龄是岩石结晶后热退火作用造成的<sup>[23-25]</sup>。

同时, 对样品进行了裂变径迹长度的测量, 每件样品测量了 57~95 条径迹的封闭长度, 样品平均径迹长度为 12.20~12.62 μm, 径迹长度的标准方差 0.14~0.18 μm, 标准方差小, 径迹长度分布较稳定。表 2 中给出了各样品经校正后的平均径迹长度和标准方差, 按 1μm 的间隔, 对各样品在长度段出现的径迹数量进行统计, 得到了样品径迹长度分布图(图 4), D5630-FT4 和 D5630-FT5 这 2 件样品显示经历了部分退火过程<sup>[26-33]</sup>; 其余样品径迹长度均呈正态分布, 属较典型的冷却型径迹长度分布特征, 表明裂变径迹是岩石结晶后热退火

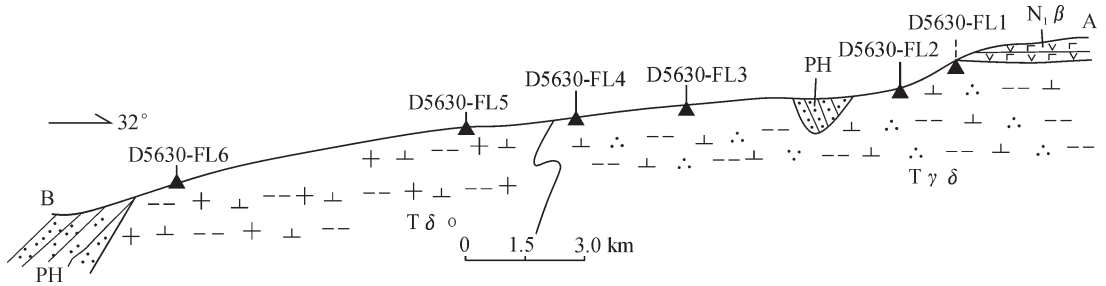


图3 奇台达坂花岗岩磷灰石裂变径迹采样剖面图

$N_1\beta$ —中新统玄武岩; PH—二叠系黄羊岭群;  $Tr\delta$ —花岗闪长岩;  $T\delta o$ —石英闪长岩;  
D5630-FL1—磷灰石裂变径迹样品编号与位置

Fig.3 Section of sampling sites for apatite fission track analysis of the Qitaidaban granite  
 $N_1\beta$ —Miocene basalt; PH—Permian Huangyangling Group;  $Tr\delta$ —Triassic granodiorite;  $T\delta o$ —Triassic quartz diorite;  
D5630-FL1—apatite fission track sample No. and its site

表2 磷灰石裂变径迹数据  
Table 2 Apatite fission track data

样号	海拔 (m)	颗粒数	自发径迹密度 ( $\times 10^6\text{cm}^{-2}$ ) (条数)	诱发径迹密度 ( $\times 10^6\text{cm}^{-2}$ ) (条数)	中了注量 ( $\times 10^6\text{cm}^{-2}$ ) (条数)	U含量 ( $\times 10^6$ )	检验概率%	相关系数	裂变径迹年龄 ( $\text{Ma} \pm 1\sigma$ )	平均径迹长度 ( $\mu\text{m} \pm 1\sigma$ )	平均误差 ( $\mu\text{m}$ )
D5630-FT1	5622	22	1.123(2807)	0.536(118)	1.341(2951)	14.7	99.7	0.863	$7.9 \pm 1.0$	$12.20 \pm 0.14(84)$	1.31
D5630-FT2	5607	22	1.117(2792)	0.651(142)	0.631(1376)	7.0	95.9	0.929	$20.3 \pm 2.5$	$12.49 \pm 0.18(57)$	1.41
D5630-FT3	5437	22	1.111(2777)	0.764(168)	0.965(2122)	10.7	96.1	0.967	$15.5 \pm 1.8$	$12.49 \pm 0.17(87)$	1.60
D5630-FT4	5372	22	1.105(2762)	0.941(207)	0.889(1956)	9.9	77.9	0.882	$20.6 \pm 2.3$	$12.23 \pm 0.18(95)$	1.79
D5630-FT5	5349	20	1.099(2747)	1.525(305)	1.100(2201)	12.3	0.0	0.274	$24.8 \pm 4.9$	$12.62 \pm 0.15(85)$	1.39
D5630-FT6	4710	22	1.093(2732)	0.568(125)	0.779(1714)	8.8	100.0	0.931	$14.0 \pm 1.8$	$12.58 \pm 0.14(91)$	1.41

注:样品由中国地震局地质研究所地震重力学国家重点实验室万景林测试。

作用造成的,它们未经历部分退火过程<sup>[26-33]</sup>。

从表2的测试结果看:奇台达坂花岗岩6件样品中,最上部的D5630-FT1样品 ( $7.9 \pm 1.0$ ) Ma 径迹年龄代表中新世晚期玄武岩烘烤花岗闪长岩的后期热事件年龄,D5630-FT4和D5630-FT5这2件样品分别保留有 ( $60.3 \pm 19.1$ ) Ma 和 ( $171.4 \pm 29.2$ ) Ma 残留的年龄,其年龄属混合年龄。剔除火山事件裂变径迹年龄外,奇台达坂花岗岩剖面上的裂变径迹年龄为 ( $24.8 \pm 4.9$ ) Ma~ ( $14.0 \pm 1.8$ ) Ma, 裂变径迹年龄从高海拔到低海拔具跳跃现象,不具随海拔升高年龄增大的规律。

为了更好地了解该花岗岩体的热演化历史,以 Ketchum et al<sup>[34]</sup> multi-kinetic 退火模式为模型,用该花岗岩黑云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄 195.4~195.8 Ma<sup>[1]</sup>为约束条件,选用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 逼近法,将实测的径迹长度值和单颗粒年龄值代入 AFT Solve 程序<sup>[35]</sup>,对样品(除 D5630-FT1 外)的热演化史进行了模拟,每件样品均模拟 10000 次得到最佳拟合曲线(图5),样品模拟相关参数见表3。

由表3可以看出,样品 K-S 检验值和年龄拟合度值均大于 0.50,表明模拟结果是高质量的。从图5可得出如下认识:奇台达坂花岗岩约 30 Ma 开始从 180°C 开始冷却剥露,在 26~17 Ma 依次通过 110°C 磷灰石退火线开始快速隆升剥露,

从 23~15 Ma 先后到达 80°C 左右的部分退火带,在 80°C 左右的部分退火带稳定地停留了在 15~10 Ma,在~5 Ma 再次开始快速隆升剥露,3~2 Ma 通过 60°C 部分退火带。因此,裂变径迹热历史模拟结果显示:奇台达坂花岗岩在 26~15 Ma 和~5 Ma 以来经历了2个阶段的快速隆升剥露,而其间的 15~5 Ma 隆升剥露速率很小,热历史模拟曲线呈水平状。

### 4 岩体热演化历史分析

对西昆仑山奇台达坂花岗岩进行锆石 TIMS U-Pb 测年和磷灰石裂变径迹测年热历史模拟结果如表1和图5;张玉泉等<sup>[1]</sup>测定该岩体海拔 4820 m 的黑云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为 ( $195.4 \pm 0.3$ ) Ma, 海拔 4920 m 的黑云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄为 ( $195.8 \pm 0.8$ ) Ma。根据 Wagner<sup>[36,37]</sup> 研究,锆石 U-Pb 年龄封闭温度为  $750 \pm 50^\circ\text{C}$ , 磷灰石裂变径迹年龄封闭温度为  $100 \pm 25^\circ\text{C}$ ; 而 Harrison<sup>[38]</sup> 研究黑云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄封闭温度为  $300 \pm 50^\circ\text{C}$ 。如果古地温梯度与现在地温梯度一致,取古地温梯度平均值  $30^\circ\text{C}/\text{km}$ ,将不同方法的测年数据和封闭温度联系起来,综合考虑该岩体侵位深度,分析西昆仑山奇台达坂花岗岩的热演化历史,揭示山脉隆升的过程。

据锆石 TIMS U-Pb 测年成果,三叠纪末期古特提斯洋

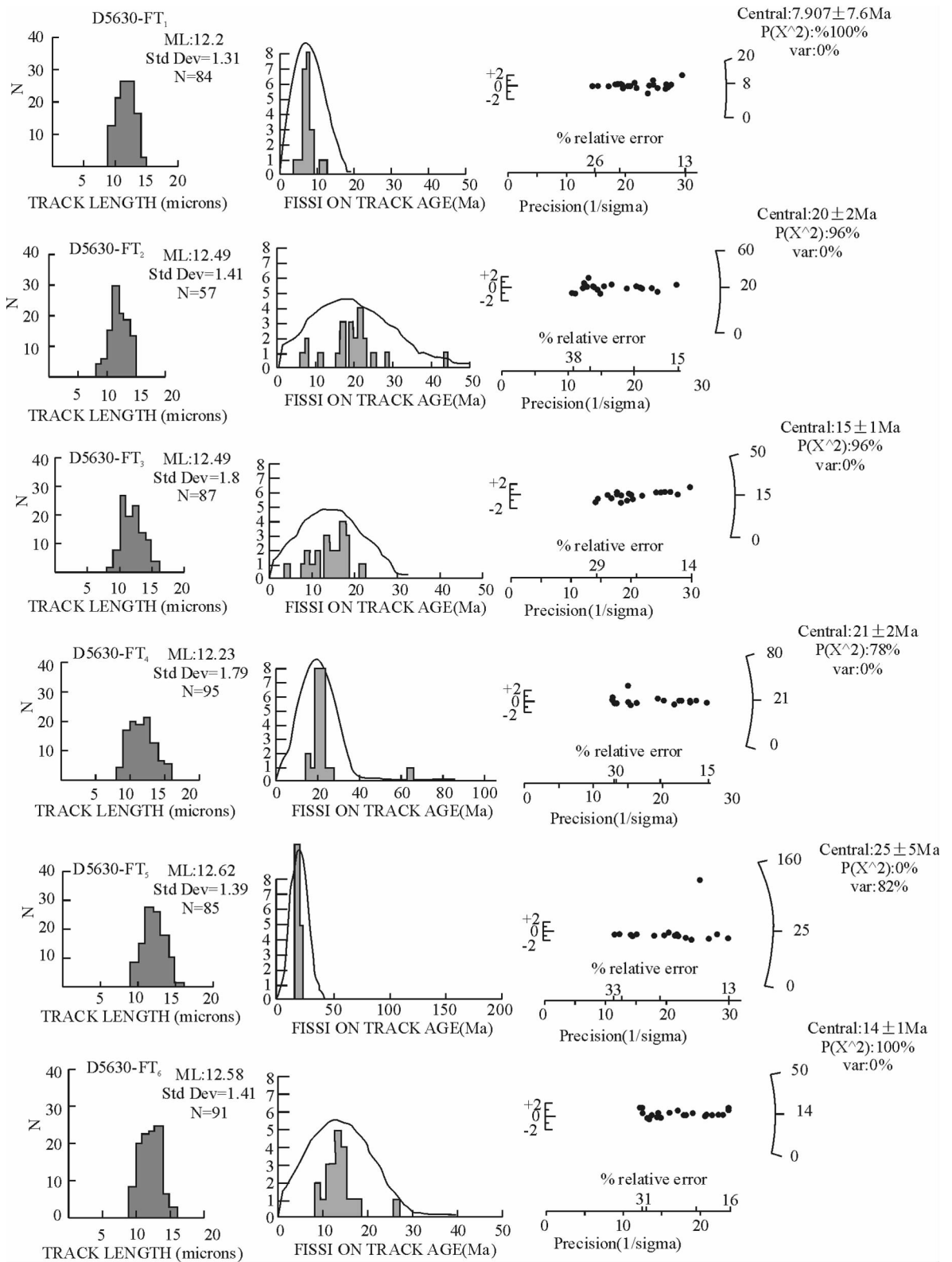


图 4 磷灰石裂变径迹分析数据图  
Fig.4 Data of apatite fission track analysis

表3 磷灰石裂变径迹热历史模拟参数

Table 3 Parameters of apatite fission track thermal history modeling

样号	模拟长度±1σ (μm)	测试长度±1σ (μm)	模拟年龄 (Ma)	测试年龄±1σ (Ma)	K-S 检验	年龄拟合度
D5630-FT2	12.5±0.7	12.49±0.18	20.3	20.3±2.6	0.94	1.00
D5630-FT3	12.5±0.8	12.49±0.17	15.8	15.5±1.8	0.66	0.85
D5630-FT4	12.3±1.0	12.23±0.18	20.5	20.6±2.3	0.70	0.97
D5630-FT5	12.5±0.8	12.62±0.15	20.8	26.8±2.8	0.65	0.72
D5630-FT6	12.5±0.7	12.58±0.14	14.4	14.0±1.8	0.97	0.84

注:模拟长度是指由程序预测的径迹平均长度;测试长度是指实测的平均围限径迹长度;模拟年龄是指由程序预测的样品年龄;测试年龄是指实测的样品池年龄;K-S 检验是指 Kolmogorov-Smirnov 数理统计检验值,表示模拟径迹长度与实测长度之间的拟合程度;年龄拟合度是指模拟年龄与测试年龄之间的拟合程度。当 K-S test 检验值和年龄拟合度值大于 0.05 时,表明模拟结果“可以接受”;当它们≥0.50 时,模拟结果则是高质量的。

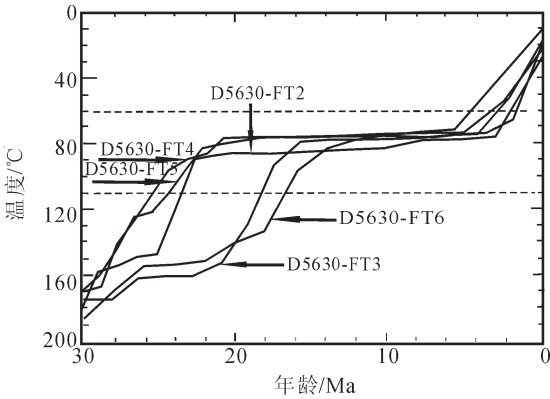


图5 样品热历史模拟曲线图

Fig.5 Curves of thermal history modeling of samples.

202.2 Ma,代表该岩体的就位年龄;据奇台达坂花岗岩上覆地层的厚度,可以确定该岩体就位深度为 15~20 km 的高位岩体。根据奇台达坂花岗岩 202.2 Ma 就位年龄(锆石 TIMS U-Pb 年龄)和黑云母 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法 195.6 Ma 冷却年龄(由于 4920 m 和 4820 m 的黑云母 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄在误差范围非常接近,取其平均年龄 195.6 Ma 作为该岩体的黑云母 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄),因此,岩体温度自 750°C 降低到 300°C,应用矿物对法计算得出 202.2~195.6 Ma 的平均降温速率约为 68.18°C/Ma,根据该岩体就位深度 15~20 km 和黑云母 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄封闭温度 300°C 换算的深度 10 km 计算的平均隆升剥蚀速率为 0.76~1.52 mm/a。

岩体温度自黑云母 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄封闭温度 300°C 降低到磷灰石裂变径迹年龄约 110°C 的年龄是 195.6~26 Ma,该阶段平均降温速率为 1.12°C/Ma,计算的平均隆升剥蚀速率为 0.04 mm/a。

根据磷灰石裂变径迹测年热历史模拟结果(图5),在 26~15 Ma 期间,该岩体从 110°C 降温至 80°C,耗时 2~3 Ma,因此,可以计算其平均降温速率为 10~15°C/Ma、平均隆升剥蚀速率为 0.33~0.50 mm/a;而在 15~5 Ma 期间,该岩体一直处于约 80°C 等温线上,暗示基本没有遭受隆升剥蚀作用,平均降温速率和平均隆升剥蚀速率均接近 0;~5 Ma 以来,该岩体由 80°C 等温线再次快速降温,遭受强烈隆升剥蚀而抬升出露地表,假如地表平均温度为 10°C,估算该阶段平均降温速率为 14°C/Ma,计算的平均隆升剥蚀速率为 0.47 mm/a。

根据上述分析绘制的西昆仑山奇台达坂花岗岩冷却路径图(图6),显示该岩体自 202.2 Ma 就位以来,经历了三快二慢的冷却降温过程,其中 202.2~195.6 Ma 的快速冷却降温过程与西昆仑山受印支造山作用发生的早期快速冷却事件和强烈构造隆升作用有关。195.6~26 Ma,平均降温速率为 1.12°C/Ma,属早期缓慢冷却降温过程,计算的平均隆升剥蚀速率为 0.04 mm/a,对应早期缓慢隆升剥蚀阶段。26~15 Ma 期间,受印度板块向欧亚板块俯冲碰撞远程效应作用,岩体

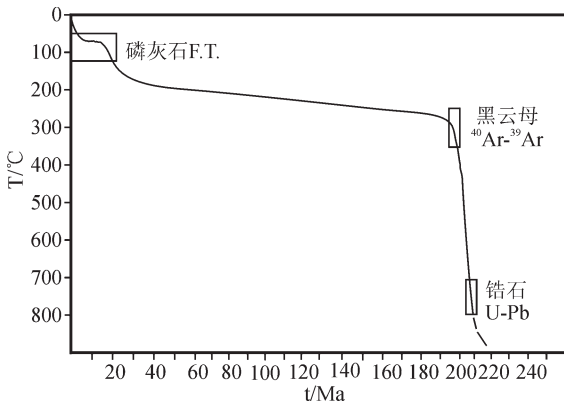


图6 奇台达坂花岗岩冷却路径图

Fig.6 Cooling path of the Qitaidaban granite

向古欧亚板块俯冲、碰撞,导致岩浆侵入,在西昆仑山形成奇台达坂花岗岩。奇台达坂花岗岩的锆石 TIMS U-Pb 年龄为

温度由 110°C 降至 80°C 耗时约 3 Ma, 平均降温速率~10°C/Ma、平均隆升剥蚀速率~0.33 mm/a, 属中期快速冷却降温过程, 对应中期快速隆升剥蚀阶段。15~5 Ma, 该岩体一直处于约 80°C 等温线上, 暗示平均降温速率和平均隆升剥蚀速率均接近 0 mm/a; 5 Ma 以来, 该岩体平均降温速率~14°C/Ma、平均隆升剥蚀速率~0.47 mm/a, 属晚期快速冷却降温过程, 对应晚期快速隆升剥蚀阶段。

因此, 西昆仑山奇台达坂花岗岩经历了三快二慢冷却降温过程, 其对应 3 次快速隆升剥蚀和 2 次缓慢隆升剥蚀作用。

西昆仑山奇台达坂花岗岩热演化历史与东昆仑山南部西大滩盆北花岗岩热演化历史极为相似<sup>[9]</sup>; 东昆仑山南部西大滩盆北花岗岩获得 204.1~134.47 Ma、57.67~26.0 Ma 和 26 Ma 以来 3 期构造热事件, 黑云母 K-Ar 和 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年龄为 134.47~145.3 Ma, 指示晚期韧性剪切变形时代<sup>[9]</sup>, 其早期冷却启动时间 204.1 Ma 与奇台达坂花岗岩早期冷却启动时间 202.2 Ma 极为一致, 而奇台达坂花岗岩早期冷却时间的上限因西大滩盆北花岗岩受晚期韧性剪切变形改造, 同位素年龄时钟重新启动而变新, 因此, 西昆仑山奇台达坂花岗岩 202~195 Ma 早期强烈构造隆升和快速冷却时限, 在区域上可能更具有代表性, 这也与形成中国基本构造格架的三叠纪末期强烈造山事件相吻合。上述快速冷却时限同时还获得了更多 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素测年数据的支持: 张玉泉<sup>[4]</sup>在西昆仑三十里营房岩体海拔 3900 m 和 4100 m 分别获得 186.9 Ma、188.5 Ma <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年龄, 在西昆仑塔西土路克岩体海拔 3690 m 和 3890 m 分别获得 183.9 Ma、186.3 Ma <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年龄, 根据各自高程和隆升速率, 换算到奇台达坂花岗岩海拔 4820 m 的年龄分别是 194.26 Ma 和 197.46 Ma, 在误差范围内与奇台达坂花岗岩早期快速冷却时间是一致的; 西大滩盆北花岗岩 26 Ma 以来的构造热事件与奇台达坂花岗岩 26~15 Ma 和 5 Ma 以来的隆升事件基本可以对比, 本文的裂变径迹热史模拟更详细地刻划了该岩体的热演化史; 而西大滩盆北花岗岩 57.67~26.0 Ma 构造热事件, 在研究区未进行 300~200°C (钾长石 Ar-Ar 或锆石裂变径迹测试) 封闭温度区间的测年而无法对比。

## 5 结论

(1) 根据锆石 TIMS U-Pb 测年, 西昆仑山奇台达坂花岗岩就位于 (202.1±3.4) Ma, 是受古特提斯洋向古欧亚板块俯冲、碰撞过程中侵位形成的花岗岩体。

(2) 磷灰石裂变径迹测年成果表明, 西昆仑山地壳最上部约 3 km 的快速去顶作用发生于 26~15 Ma 和 5 Ma 以来, 是印度板块向欧亚板块俯冲碰撞远程效应的结果。

(3) 西昆仑山奇台达坂花岗岩就位以来, 经历了三快二慢的冷却降温过程: 即 202.2~195.6 Ma、26~15 Ma 和 5 Ma 以来 3 个阶段的快速降温 (隆升剥蚀), 195.6~26 Ma 和 15~5 Ma 2 个阶段的缓慢冷却降温 (隆升剥蚀)。

致谢: 李怀坤、万景林、张智勇分别完成了锆石 TIMS

U-Pb 测年、磷灰石裂变径迹测年和裂变径迹热历史模拟, 审稿人对稿件修改提供了建设性意见, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献 (References):

- [1] 张玉泉, 朱炳泉, 谢应雯, 等. 青藏高原西部的抬升速率: 叶城—狮泉河花岗岩 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄的地质解释 [J]. 岩石学报, 1998, 14(1): 11-21.  
Zhang Yuquan, Zhu Bingquan, Xie Yingwen, et al. The uplifting rates for the Western Qinghai-Tibet Plateau: interpretation of <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating for the granites in the area of Yecheng to Shiquanhe [J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14 (1): 11-22 (in Chinese with English Abstract).
- [2] 邓万明. 喀喇昆仑—西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义 [J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 98-101.  
Deng Wanming. Geology and tectonic significance of the ophiolites in Karakum and Western Kunlun Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11 (Supp.): 98-101 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王志洪, 李继亮, 侯泉林. 西昆仑库地蛇绿岩地质、地球化学及其成因研究 [J]. 地质科学, 1999, 35(2): 151-160.  
Wang Zhihong, Li Jiliang, Hou Quanlin. Study on the geological and geochemical characteristics and its formation of Küda ophiolite in West Kunlun [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(2): 151-160 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨树锋, 陈汉林, 董传万. 西昆仑库地蛇绿岩的特征及其构造意义 [J]. 地质科学, 1999, 34(4): 281-288.  
Yang Shufeng, Chen Hanlin, Dong Chuanwan. Characteristics of the Küda ophiolites and its tectonic significances [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34 (4): 281-288 (in Chinese with English abstract).
- [5] 潘裕生. 喀喇昆仑山—昆仑山地区地质演化 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 324-509.  
Pan Yusheng. Geological Evolution of the Karakum-Kunlun Mountains [M]. Beijing: Science Press, 2000: 324-509 (in Chinese).
- [6] 姜春发, 杨经绥, 冯贵秉, 等. 昆仑开合构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 10-50.  
Jiang Chunfa, Yang Jinsui, Fen Binggui, et al. Opening-Closing Tectonics of Kunlun [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 10-50 (in Chinese).
- [7] 潘裕生, 王毅. 青藏高原叶城—狮泉河路线地质特征及区域构造演化 [J]. 地质学报, 1994, 68(4): 295-307.  
Pan Yusheng, Wang Yi. Tectonic evolution along the geotraverse from Yecheng to Shiquanhe [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(4): 295-307 (in Chinese with English abstract).
- [8] 许荣华, 张玉泉, 谢应雯, 等. 西昆仑山北部早古生代构造—岩浆带的发现 [J]. 地质科学, 1994, 29(4): 313-328.  
Xu Ronghua, Zhang Yuquan, Xie Yingwen. Discovery of the Paleozoic tectonic-magmatic belt in north of Western Kunlun [J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29 (4): 313-327 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王元龙, 张旗, 成守德, 等. 新藏公路 128 公里岩体地球化学特征

- 及其地质意义[J]. 新疆地质, 2003, 21(4):387-392.
- Wang Yuanlong, Zhang Qi, Cheng Shoude, et al. Geochemical characteristics and implications of intrusion at the 128 km sign of Xinjiang-Tibet Highway[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(4):387-392(in Chinese with English Abstract).
- [10] 丁道桂, 土道轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京:地质出版社, 1996:36-71.
- Ding Daogui, Wang Daoxuan, Liu Weixin, et al. The Western Kunlun Orogenic Belt and Basin [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996:13-20(in Chinese).
- [11] 袁超, 孙敏, 李继亮. 西昆仑中带两个花岗岩体的年龄和可能的源区[J]. 科学通报, 1999, 44(5):534-538.
- Yuan Chao, Sunm Ming, Li Jiliang. Ages and possible source of the two granite plutons in middle of Western Kunlun [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(5):534-538(in Chinese).
- [12] 姜耀辉, 芮行键, 贺菊瑞, 等. 西昆仑山加里东期花岗岩类构造类型及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(1):105-115.
- Jiang Yaohui, Rui Xingjian, He Jurui. Tectonic type Caledonian granitoids and tectonic significance in the Western Kunlun Mts[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15 (1):105-115 (in Chinese with English abstract).
- [13] 汪玉珍, 方锡廉. 西昆仑山、喀喇昆仑山花岗岩类时空分布规律的初步探讨[J]. 新疆地质, 1987, 5(1):10-24.
- Wang Yuzheng, Fang Xilian. Primary study on granites distribution of time and space in the Karalcorum-Western Mts[J]. Xinjiang Geology, 1987, 5 (1):10-24 (in Chinese with English abstract).
- [14] Jiang Yaohui, Rui Xingjian, Guo kunyi, et al. Rock series and petrogenesis types of the granites in West Kunlun [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2001, 75(1):19-26.
- [15] 张传林, 于海峰, 王爱国, 等. 西昆仑山西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义[J]. 地质学报, 2005, 79(5):645-652.
- Zhang Chuanlin, Yu Haifeng, Wang Aiguo, et al. Dating of Triassic granites in the Western Kunlun Mountains and its tectonic significane [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79 (5):645-652(in Chinese with English Abstract).
- [16] 新疆地质矿产局. 新疆维吾尔自治区岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999:143-170.
- Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Stratigraphy of Xinjieng Uygur Autonomous Region [M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1999:143-171 (in Chinese with English abstract).
- [17] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993:6-44.
- Burean of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional Geology of Xinjing Uygur Autonomous Region [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993:6-44(in Chinese).
- [18] 姜春发, 王宗起, 李锦轶, 等. 中央造山带开合构造[M]. 北京:地质出版社, 2000:55-72.
- Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi, et al. Opening-Closing Tectonics of Central Orogenic Belt [M]. Beijing:Geological Publishing House,2000:55-72(in Chinese).
- [19] 张传林, 沈加林, 赵宇. 西昆仑北带新元古代片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及其构造意义[J]. 地质论评, 2003, 49(3):239-244.
- Zhang Chuanlin, Shen Jialin, Zhao Yu. Zircon SHRIMP age of the Neo-Proterozoic gneissoid granite in Western Kunlun and its significance [J]. Geological Review, 2003, 49 (3):239-244 (in Chinese with English abstract).
- [20] Gleadow A J W, Duddy I R. A natural long-term annealing experiment for apatite [J]. Nuclear Tracks and Radiation Measurements,1981, 5:169-174.
- [21] Galbraith R F. On statistical models for fission track counts [J]. Mathematical Geology, 1981,(13):471-478.
- [22] Hurford A J, Green P F. The zeta age calibration of fission-track dating[J]. Isot Geosci,1983,(1):285-317.
- [23] 陈寄文, 计凤枯, 王非. 年轻地质体系的年代测定(续)—新方法、新进展[M]. 北京:地震出版社, 1999:77-100.
- Chen Jiwen, Ji Fengku, Wang Fei. Dating of Young Geological Bodies (continued)-New Methods and Progresses [M]. Beijing: Seismological Press, 1999:77-100(in Chinese).
- [24] 丁林. 裂变径迹定年方法的进展及应用 [J]. 第四纪研究, 1997, (3):272-279.
- Ding Lin. Progress and application of the fission track dating [J]. Quaternary Sciences, 1997(3):272-279(in Chinese).
- [25] 丁林, 钟大裘, 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.
- Ding Lin, Zhong Dalai, Pan Yusheng, et al. Fission track evidence for rapid uplift of the eastern Himalayan syntaxis since Pliocene[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(16):1497-1500(in Chinese).
- [26] 王军. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升 [J]. 地质论评, 1998, 44(4):435-442.
- Wang Jun. Uplift of the Karihusheng and Kuzigan granite in the west Kunlun mountains-evidence from apatite fission track analysis [J].Geological Review, 1998, 44(4):435-442(in Chinese).
- [27] 万景林, 王二七. 西昆仑北部山前褶皱地区山体抬升的裂变径迹研究[J]. 核技术, 2002, 25(7):565-567.
- Wan Jinglin, Wang Erqi. FT evidence of west Kunlun uplift in Pulu [J]. Nuclear Techniques, 2002, 25 (7):565-567 (in Chinese with English abstract).
- [28] 万景林, 王喻, 李齐, 等. 阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4):222-224.
- Wan Jinglin, Wang Yu, Li Qi, et al. FT evidence of northern Altyn uplift in late Cenozoic [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20:222-224(in ChInese).
- [29] 王喻, 万景林, 李齐, 等. 阿尔金山北段阿克寨—当金山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据 [J]. 地质学报, 2002, 76(2):191-198.
- Wang Yu, Wan jinglin, Li Qi, et al. Fission-track evidence for the Cenozoic uplift and erosion of the northern Sebmeng of the



- Altyn Tagh fault zone at the Aksav -Dangjin pass [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76 (2):191-198 (in Chinese with English abstract).
- [30] 柏道远, 孟德保, 刘耀荣, 等. 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[J]. *中国地质*, 2003, 30(3):240-246.
- Bai Daopuan, Meng Debao, Liu Yaorong, et al. Apatite fission-track records of the tectonic uplift of the central segment of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geology in China*, 2003, 30(3):240-246(in Chinese with English abstract).
- [31] 陈正乐, 张岳桥, 王小凤, 等. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据[J]. *地球学报*, 2001, 22(5):413-418.
- Chen Zhengle, Zhang Yueqiao, Wang Xiaofeng, et al. Fission track dating of apatite constrains on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh mountain[J]. *Acta Geological Sinica*, 2001, 22(5):413-418(in Chinese with English abstract).
- [32] Erchie Wang, Jinglin Wan, Jiaqi Liu, et al. 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*, 2003, 108, B8:2401-2413.
- [33] 陈正乐, 宫红良, 李丽, 等. 阿尔金山脉新生代隆升—剥露过程[J]. *地学前缘*, 2006,13(4):91-102.
- Chen Zhengle, Gong Hongliang, Li Li, et al. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13 (4):91-102 (in Chinese with English abstract).
- [34] 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, 84:1235-1255.
- [35] Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. AFTSolve: A program for multi-kinetics modeling of apatite fission-track data. *Geological Materials Research*, 2000, 2(1):1-32.
- [36] Wagner G A. *Fission Track Dating* [M]. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers, 1992:145-158.
- [37] Wagner G A. *Age Determination of Young Rocks and Artifacts* [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1998:219-294.
- [38] Harrison T M, Armstrong B L, Naeser C W. Geochronology and thermal history of the coast plutonic complex near Prince Rupert, British Columbia[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1979,16:400-410.
- [39] 吴珍汉, 胡道功, 宋彪, 等. 昆仑山南部西大滩盆北花岗岩的年龄与热历史[J]. *地质学报*, 2005, 79(5):628-636.
- Wu Zhenghan, Hu Daogong, Song Biao, et al. Ages and thermo-chronological evolution of the North Xidatan granite in the South Kunlun Mts. [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79 (5):628-636(in Chinese with English abstract).

## Zircon TIMS U-Pb dating of the Qitaidaban granite in the West Kunlun Mountains and its thermal evolution history

LI Dun-peng<sup>1,2</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, HU Jian-min<sup>1</sup>, LI Xin-lin<sup>2</sup>, ZHOU Xiao-kang<sup>2</sup>,  
WANG Xiang-li<sup>2</sup>, DU Shao-xi<sup>2</sup>, XIAO Ai-fang<sup>2</sup>

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*  
2. *Shanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710016, Shaanxi, China*)

**Abstract:** TIMS U-Pb dating of zircons from the Qitaidaban granite in the West Kunlun Mountains yielded an age of  $202.2 \pm 3.4$  Ma (MSWD=8.65), and the apatite fission-track dating of samples taken at different altitudes yielded ages of 24.8-14.0 Ma. Fission-track thermal history modeling, combined with the previous data of  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating, shows that the Qitaidaban granite underwent three rapid cooling stages (uplift and erosion) and two slow cooling stage (uplift and erosion) at least, i.e.: rapid cooling at 202.2-195.4 Ma, 26-15 Ma and since 5 Ma, and slow cooling at 195.4-26 Ma and 26-15 Ma. The rapid deroofting of the ~3 m thick topmost part of the crust below the West Kunlun Mountains took place at 26-15 Ma and since 5 Ma, which was the result of Eurasia-India collision.

**Key words:** zircon TIMS U-Pb dating; fission track; thermal evolution history; West Kunlun Mountains

**About the author:** LI Dun-peng, male, born in 1967, Ph.D candidate and senior engineer, mainly engages in regional geological survey and research on structural geology; E-mail: lidunpeng51888@163.com.