

# 喜马拉雅造山带晚新生代构造隆升的裂变径迹证据

刘德民, 李德威, 杨巍然, 汪校锋, 张金阳

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 喜马拉雅造山带的隆升, 在地质学研究中是一个非常让人感兴趣的问题, 为了对其进行定量研究, 揭示隆升历史及幅度等相关问题, 运用磷灰石、锆石裂变径迹法对研究区淡色花岗岩进行了分析, 所取样品的裂变径迹年龄位于17.0~5.7 Ma之间, 小于其地层时代或侵入年龄(40~17 Ma), 表明研究区喜马拉雅造山带的强烈隆升开始于晚新生代。用磷灰石裂变径迹年龄来计算可知, 研究区内花岗岩5.7 Ma以来的冷却速率和剥蚀速率分别为18.421 °C/Ma和0.526 mm/a, 5.7~9.2 Ma间的相对抬升与剥蚀速率为0.229 mm/a, 9.2~17.0 Ma间的相对抬升与剥蚀速率为0.032 mm/a。用锆石裂变径迹年龄来计算可知, 研究区内花岗岩16.2 Ma以来的冷却速率和剥蚀速率分别为12.963 °C/Ma和0.370 mm/a, 冷却速率和剥蚀速率均小于用磷灰石计算的结果。因此说喜马拉雅造山带从9.2 Ma到现在隆升和剥蚀的速率是处于加快的状态。

**关键词:** 裂变径迹; 定年; 构造隆升; 晚新生代; 喜马拉雅造山带。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2005)02-0147-06

收稿日期: 2004-07-15

## Evidence from Fission Track Ages for the Tectonic Uplift of the Himalayan Orogen during Late Cenozoic

LIU De-min, LI De-wei, YANG Wei-ran, WANG Xiao-feng, ZHANG Jin-yang

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

**Abstract:** The uplift of the Himalayan orogen is an interesting geological problem. In order to quantitatively discuss the uplift, its history, range and correlative problems, this paper analyzes the leucogranite by dating the apatite and zircon fission track ages. The fission track ages, which range from 17.0 to 5.7 Ma, are less than the strata ages and the intruding ages, which range from 40 to 17 Ma. So the authors infer that the violent uplift of the Himalayan orogen began in the late Cenozoic. According to the fission track age results of apatite, from 5.7 Ma B. P. the cooling and denudation rates were 18.421 °C/Ma and 0.526 mm/a respectively. The relative rate of uplift and denudation during 5.7-9.2 Ma B. P., 0.229 mm/a is correspondingly faster than that during 9.2-17.0 Ma B. P., 0.032 mm/a. According to the fission track age results of zircon, the cooling rate and denudation rate from 16.2 Ma B. P., 12.963 °C/Ma and 0.370 mm/a is less than that calculated with apatite. All the results show that the quick uplift rate and denudation rate of the Himalayan occurred from 9.2 Ma B. P..

**Key words:** fission track; dating; tectonic uplift; late Cenozoic; Himalayan orogen.

喜马拉雅造山带位于青藏高原南部, 是世界上最重要的碰撞造山带之一, 是青藏高原整体抬升的最突出的表现, 也是地球上最为年青的且在继续活动的造山带。喜马拉雅造山带新生代以来的隆升是一重大构造事件, 它为笔者提供了大量最直接、最现实的大陆动力学的信息, 而其构造隆升的年代学研究对于探讨青藏高原的抬升机制及大陆动力学背景

是非常有必要的。裂变径迹测年是重要的低温热年代学方法之一, 运用于造山带隆升的研究是近些年来, 许多学者运用裂变径迹方法在喜马拉雅造山带的诸多部位(王瑜等, 2001; 王彦斌等, 1998)及其他造山中进行过测试研究, 已有许多成功的例子(杨巍然等, 2000; 吴中海和吴珍汉, 2001; 陈正乐等, 2001; 尹功明等, 2001; Reiners *et al.*, 2003)。然而,

对于喜马拉雅造山带中段定结县及其邻区的年代学证据却鲜有人报道,而这些是获得喜马拉雅地区隆升以及整个青藏高原隆升到现今高度的重要研究部位. 本文对研究区内淡色花岗岩岩体中的磷灰石裂变径迹测年进行仔细分析,研究喜马拉雅造山带晚新生代的隆升速率和幅度,既有助于探讨喜马拉雅造山带南北自然环境巨大差异的形成过程,又可以揭示欧亚板块与印度板块在碰撞后的相互作用,如:青藏高原整体隆升后边缘的重力失稳垮塌、均衡作用以及伸展作用的相互联系等同造山作用过程(杨巍然等,2000;吴中海和吴珍汉,2001;陈正乐等,2001;尹功明等,2001;Reiners *et al.*,2003;王国灿等,2003).

### 1 地质背景

研究区位于喜马拉雅造山带中段北坡,北接雅

鲁藏布江超深大断裂,南邻主边缘逆冲断裂(MBT). 藏南拆离系通过研究区中部,定日—岗巴逆冲断层与藏南拆离系将研究区分为两隆起一坳陷共 3 部分:拉轨岗日隆起带、北喜马拉雅坳陷带、高喜马拉雅隆起带(图 1). 因而研究区地势为南北高、中间低,平均海拔在 4 500 m 以上.

研究区地层发育比较齐全,从早古生界到新生代均有出露,总体属喜马拉雅地层分区,只是在北部萨迦逆冲断层带北侧少量地层属雅鲁藏布地层分区. 研究区南部马卡鲁杂岩是由片岩、石英岩、大理岩、(超)镁铁质岩以及花岗质片麻岩等组成的杂岩体,该杂岩体内发育一系列北北东向的韧性剪切带,两期淡色花岗岩构成了高喜马拉雅隆起的核部;研究区中部及东南部是由一系列冰水沉积物、湖积物、洪(冲)积物组成的砂砾粘土层. 研究区北部拉轨岗日隆起带又名藏南分水岭,有线状排列的多个变质核杂岩体组成的藏南非常著名的变质核杂岩带的主

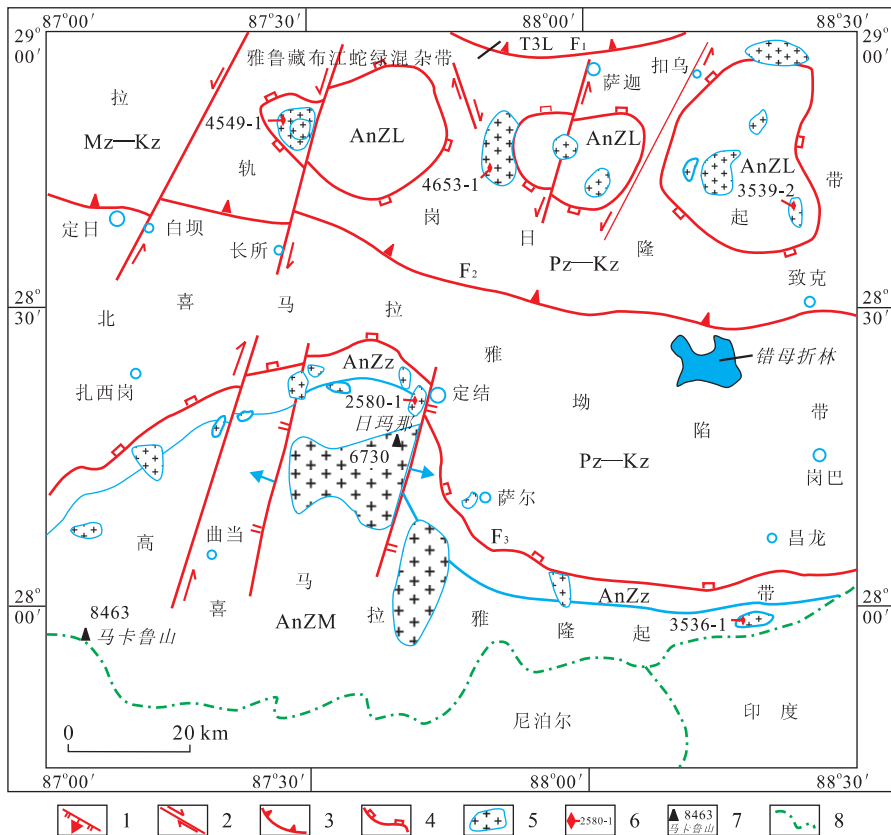


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1. 正断层; 2. 平移断层; 3. 逆冲断层; 4. 拆离断层; 5. 花岗岩体; 6. 取样地点及样号; 7. 山峰及高程(m); 8. 国界线; F<sub>1</sub>. 萨迦逆冲断层; F<sub>2</sub>. 定日—岗巴逆冲断层; F<sub>3</sub>. 藏南拆离系主干断层; AnZL. 拉轨岗日杂岩; AnZM. 马卡鲁杂岩; AnZz. 扎西惹嘎岩组; Pz—Kz. 古生界—新生代; Mz—Kz. 中生界—新生代

体部分. 变质核杂岩的核部由中下地壳的拉轨岗日变质杂岩以及两期淡色花岗岩组成, 盖层由弱变质和未变质的上古界和中生界地层组成, 盖层和核部由顺层发育的拆离断层及与之平行发育的韧性剪切带组成中间过渡滑脱层. 喜山期花岗岩在研究区分布较广(图 1), 并且这些花岗岩只有壳内熔融形成的淡色花岗岩, 没有发现中酸性火山岩(李德威, 2003), 岩体的分布明显受构造带的控制, 集中分布在高喜马拉雅隆升带和拉轨岗日隆升带. 岩体规模较小, 一般成小型岩株、岩滴、岩脉产出, 少数可形成大型岩株规模的岩体. 岩体的形态和内部组构特征与其产出的构造位置有关, 沿拆离断层带产出的岩体, 形态一般不规则, 成脉状、椭圆状或扁豆状, 长轴方向与拆离断层的走向基本一致(刘德民等, 2003), 用于裂变径迹研究的磷灰石来自于高喜马拉雅及拉轨岗日隆起带中的淡色花岗岩, 主要有两种类型, 即二云母花岗岩和白云母花岗岩, 两者均为灰白—白色、块状构造、细粒—粗粒结构, 矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石、黑云母、白云母, 在二云母花岗岩中黑、白云母的含量相当, 均在 5% 左右, 而在白云母花岗岩中, 黑云母含量极少, 同时常见有少量电气石.

## 2 实验原理、条件与方法

由于磷灰石的裂变径迹保留的较低的封闭温度 ( $110 \pm 10$ ) °C (Green *et al.*, 1986; Green *et al.*, 1989), 因而被广泛用于挽近地质时期山脉的冷却隆升和剥露历史. 利用磷灰石裂变径迹计算隆升速率主要有 3 种方法: (1) 年龄高程法, 主要是根据同一个岩体的径迹年龄一般是随高度的增加而增加, 这是因为当岩体抬升和侵蚀的过程中, 岩体的不同部位会先后通过封闭温度, 在冷却速度不变的情况下, 早期抬升即现今高程大的部分的径迹年龄较大; (2) 矿物对法, 即利用磷灰石裂变径迹年龄与其他具更高封闭温度矿物(如锆石)年龄组成矿物对, 结合古地温梯度、古地表温度和不同同位素体系测年(如 K—Ar 法)计算隆升速率; (3) 径迹长度特征法, 虽然径迹的长度初始是一致的, 但自发裂变径迹生成的时间不同, 经历不同的热历史阶段, 高温阶段消失, 中温阶段因退火缩短、密度降低, 低温阶段保持较完整长度等特征, 都反映了不同的热侵位隆升历史, 主要是通过磷灰石裂变径迹长度的分布特征, 如: 裂变径迹平均长度、长度偏差, 径迹长度集中分

布区等, 并结合径迹年龄、温度来更精确地制约隆升和剥蚀冷却历史, 恢复隆升和剥蚀量, 从而可以计算隆升与剥蚀速率(Wagner and Heil, 1991; 王军, 1997; 王国灿和杨巍然, 1998; 吴中海和吴珍汉, 1999; 杨巍然等, 2000).

笔者在高喜马拉雅和拉轨岗日系统采集了裂变径迹年龄样品, 样品基本上都是过铝质的淡色花岗岩. 挑选出磷灰石和锆石后, 样品送到中国地震局地质研究所裂变径迹实验室进行裂变径迹实验. 磷灰石裂变径迹年龄用外部探测器法, 以 *Zeta* ( $Zeta = 352.4 \pm 29$ ) 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 Ma). 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. 磷灰石中自发裂变径迹在 20 °C 的条件下用 7% 的硝酸蚀刻 35 s. 在照射期间, 低 U 白云母外部探测器盖住磷灰石样品和玻璃放射量测定器, 诱发裂变径迹后, 温度为 20 °C 的条件下, 用 40% 的硝酸蚀刻 20 min. 裂变径迹和径迹长度测量在放大 1 000 倍、油浸的条件下在 OLYMPUS 显微镜下进行.

## 3 实验与计算结果

通过以上实验结果(表 1)所得参数, 可以计算得出裂变径迹年龄, 将年龄、高程及径迹长度特征绘制如图 2. 取地表温度为 10 °C, 喜马拉雅造山带地温梯度为 35 °C/km, 锆石和磷灰石的封闭温度分别为 220 °C 和 115 °C, 再根据以上所得样品 3536 的磷灰石和锆石的裂变径迹年龄以及取样高程, 笔者得

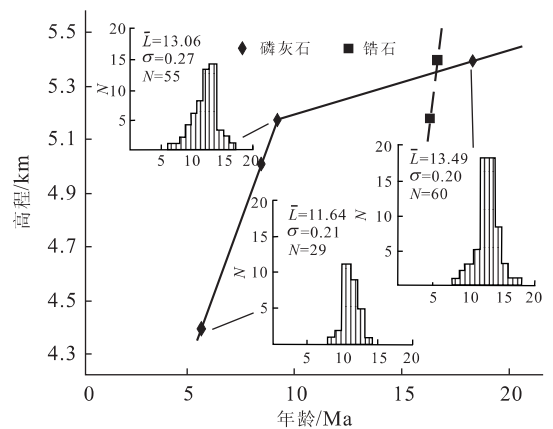


图 2 裂变径迹年龄、高程及径迹长度关系

Fig. 2 Relationship of fission track date, elevation and length of fission track

表 1 裂变径迹实验结果  
Table 1 Results of fission track

试样号	颗粒数	$\rho_d(N_d)/(10^6 \text{ cm}^{-2})$	$\rho_s(N_s)/(10^5 \text{ cm}^{-2})$	$\rho_i(N_i)/(10^6 \text{ cm}^{-2})$	$P(x^2)/\%$	$r$	(平均径迹长度 $\pm\sigma)/\mu\text{m}$	$N_j$
Ap3536-1	21	0.658(1 644)	1.481(7.199)	1.902(3994)	0.787	0.460	13.06 $\pm$ 0.27	55
Zr3536-1	18	0.641(1 592)	7.199(1 015)	50.26(7 087)	48.8	0.966		
Zr3519-2	18	0.781(1 953)	14.00(798)	12.71(7 243)	0.000	0.774		
Ap2580-1	18	1.279(3 789)	0.419(18)	1.156(497)	71.5	0.906		
Ap4549-1	21	1.286(3 207)	1.286(270)	1.709(3 588)	90.9	0.900	13.49 $\pm$ 0.20	60
Ap4653-1	8	1.290(3 216)	0.136(9)	0.539(356)	55.8	0.670	11.64 $\pm$ 0.21	29

注： $\rho_d$  为铀标准玻璃对应外探测器的径迹密度； $N_d$  为径迹数； $\rho_s$  为自发径迹密度； $N_s$  为自发径迹数； $\rho_i$  为诱发径迹密度； $N_i$  为诱发径迹数； $P(x^2)$  为自由度  $(n-1)$   $x^2$  值的几率； $P$  为检验参数； $n$  为所测样品颗粒数； $r$  为单个颗粒径迹之间的相关系数； $N_j$  为测量的径迹条数；有些样品由于封闭径迹较少，故未统计其径迹长度。

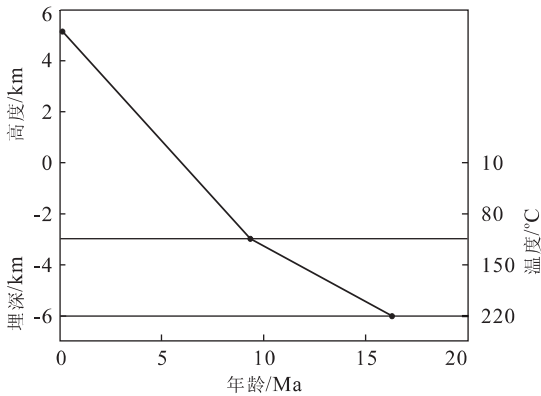


图 3 磷灰石、锆石裂变径迹年龄得出的花岗岩体的冷却路径

Fig. 3 Granite body's cooling track obtained from the fission track dates of apatite and zircon

表 2 磷灰石裂变径迹年龄和隆升、剥蚀速率

Table 2 Rate of uplifting and exhuming counted from fission track ages of apatite and zircon

样品号	岩性	高程/m	矿物类型	年龄/Ma	隆升与剥蚀速率/( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )
4549-1	二云母花岗岩	5 407	磷灰石	17.0 $\pm$ 1.8	0.495
3519-2	二云母花岗岩	5 390	锆石	16.7 $\pm$ 2.0	0.682
3536-1	二云母花岗岩	5 180	磷灰石	9.2 $\pm$ 1.1	0.889
3536-1	二云母花岗岩	5 180	锆石	16.2 $\pm$ 1.5	0.690
2580-1	白云母花岗岩	5 040	磷灰石	8.2 $\pm$ 2.1	0.981
4653-1	白云母花岗岩	4 389	磷灰石	5.7 $\pm$ 2.0	1.296

出花岗岩体的冷却路径图 3, 通过计算冷却路径斜率获得隆升与剥蚀速率如表 2。

### 4 结论与讨论

由图 2 及表 2 可知海拔高的样品具有较大的年龄值, 这与理想的先通过封闭温度即先隆升的矿物

具有较老的年龄是一致的。所有样品的裂变径迹年龄位于 17.0~5.7 Ma 之间, 裂变径迹年龄是对构造抬升的响应, 表明研究区喜马拉雅造山带的隆升开始于中新世。而且, 所有样品的裂变径迹年龄皆小于其地层时代或侵入年龄 (40~17 Ma), 说明这些样品形成之后均遭受热事件影响而退火。

据磷灰石裂变径迹退火特征研究表明, 具有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, 且分布型式宽缓而不对称; 经过再次热干扰的磷灰石裂变径迹长度为双峰式分布型式 (Ventura and Lisker, 2003)。由图 2 可见, 研究区的磷灰岩裂变径迹长度配分形态均为单峰型, 说明磷灰岩裂变径迹年龄为简单冷却积累。图中磷灰石的年龄—高程线出现转折现象, 并且在径迹长度上也有明显的反映, 即在转折之上, 平均长度较长 (13  $\mu\text{m}$  以上), 中间长度长, 分布宽; 而在转折之下, 平均长度较短 (11  $\mu\text{m}$  左右), 中间长度也短, 分布窄。

由表 2 知: 二云母花岗岩所代表的隆升与剥蚀速率 (0.495~0.889 mm/a) 比白云母淡色花岗岩所代表的隆升与剥蚀速率 (0.981~1.296 mm/a) 要低。而且白云母花岗岩比二云母花岗岩年轻, 这就更充分证明了喜马拉雅造山带的隆升与剥蚀进程是先慢后快的。

岩体冷却路径 (图 3) 明显体现了岩体的上升路径, 路径斜率代表了喜马拉雅山脉的隆升和剥蚀综合速率。从图上可以发现, 喜马拉雅山体的隆升是不均匀的, 从 16.2 Ma 到 9.2 Ma 的一段时间里, 隆升与剥蚀路径斜率 (0.428 mm/a) 要比 9.2 Ma 到现在这段时间隆升与剥蚀路径的斜率 (0.889 mm/a) 低, 这至少说明, 喜马拉雅造山带从 9.2 Ma 到现在隆

升和剥蚀的速率是处于加快的状态,这与年龄—高程法(图 2)所获结果是一致的。

依据地温梯度为  $35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,用磷灰石来计算,可以估算从  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$  的古地温冷却到  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的现今平均地表温度,研究区内花岗岩冷却了约  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这个冷却量意味着约  $3\text{ km}$  的剥蚀量, $5.7\text{ Ma}$  以来的冷却速率和剥蚀速率分别为  $18.421\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  和  $0.526\text{ mm}/\text{a}$ 。由图 3 可知,由  $5.7\sim 9.2\text{ Ma}$  间的高程差为  $800\text{ m}$ ,相对抬升与剥蚀速率为  $0.229\text{ mm}/\text{a}$ ,从  $9.2\sim 17.0\text{ Ma}$  间的高程差为  $220\text{ m}$ ,相对抬升与剥蚀速率为  $0.032\text{ mm}/\text{a}$ 。用锆石来计算,可以估算从  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  的古地温冷却到  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的现今平均地表温度,研究区内花岗岩冷却了约  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这个冷却量意味着约  $6\text{ km}$  的剥蚀量, $16.2\text{ Ma}$  以来的冷却速率和剥蚀速率分别为  $12.963\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  和  $0.370\text{ mm}/\text{a}$ ,冷却速率和剥蚀速率均小于用磷灰石计算的结果。

Zeitler(1982,1985)对喜马拉雅西北部及南迦帕尔巴特峰地区的研究表明,喜马拉雅西北部近  $60\text{ Ma}$  以来的抬升速率为  $0.05\sim 0.83\text{ mm}/\text{a}$ ,约  $40\sim 17\text{ Ma}$  期间,抬升速率为  $0.14\sim 0.33\text{ mm}/\text{a}$ ;丁林等(1997)通过测定东喜马拉雅不同海拔高度花岗岩中磷灰石的裂变径迹年龄,给出东喜马拉雅构造结上新世以来快速隆升的证据,得出  $25\sim 18\text{ Ma}$ ,  $13\sim 7\text{ Ma}$  和  $3\text{ Ma}$  至今 3 个隆升期,各时期的抬升—剥蚀速率依次为: $0.06$ 、 $0.18$ 、 $6.53\text{ mm}/\text{a}$ 。对比研究可知,喜马拉雅造山带在整体隆升的过程中,存在分区、分阶段隆升表现,即东、西以及中喜马拉雅各地区的抬升时间、幅度及速率存在一定的差异,但总体表现为从  $40\text{ Ma}$  以来,抬升速度是越来越快。

致谢:参加野外工作的还有廖群安副教授、张雄华副教授、易顺华副教授、曹树钊副教授、袁晏明副教授、谢德凡副教授、张宏飞教授、杨宝忠讲师等,在此一并致以衷心感谢!

## References

Chen,Z. L., Zhang, Y. Q., Wang, X. F., et al., 2001. Fission track dating of apatite constrains on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh mountain. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5):413—418 (in Chinese with English abstract).

Ding, L., Zhong, D. L., Pan, Y. S., et al., 1997. Fission track dating evidence on fast uplifting since Pliocene of the eastern Himalayan syntaxis. *Chinese Science Bulletin*, 44(16):1497—1500 (in Chinese).

Green, P. F., Duddy, I. R., Gleadow, A. J. W., et al., 1986.

Thermal annealing of fission tracks in apatite. 1, A quantitative description. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 59:237—253.

Green, P. F., Duddy, I. R., Laslett, G. M., et al., 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite. 4, Quantitative modeling techniques and extension to geological time scales. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 79:155—182.

Li, D. W., 2003. A new model for uplifting mechanism of Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6):593—600 (in Chinese with English abstract).

Liu, D. M., Li, D. W., Xie, D. F., et al., 2003. Primary study on tectonic landforms in northern part of middle Himalayan orogen. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6):639—644 (in Chinese with English abstract).

Reiners, P. W., Zhou, Z. Y., Ehlers, T. A., et al., 2003. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, eastern China, from (U-Th)/He and fission-track thermochronology. *American Journal of Science*, 303(6):489—518.

Ventura, B., Lisker, F., 2003. Long-term landscape evolution of the northeastern margin of the Bohemian massif, apatite fission-track data from the Erzgebirge (Germany). *International Journal of Earth Sciences*, 92(5):691—700.

Wagner, G. A., Heil, E., 1991. Apatite fission-track age-spectrum based on projected track length analysis. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 87:1—9.

Wang, G. C., Wu, Y. L., Xiang, S. Y., et al., 2003. Mountain building process and geomorphic migration of Eastern Kunlun Mountains during Quaternary. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6):583—592 (in Chinese with English abstract).

Wang, G. C., Yang, W. R., 1998. Some progresses of research methods on the uplift and exhumation of Cenozoic. *Earth Science Frontiers*, 5(1—2):151—156 (in Chinese with English abstract).

Wang, J., 1996. Some existing problems in uplift rate calculated by apatite fission track analysis. *Geological Science and Technology Information*, 16(1):97—102 (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).

Wang, Y., Wan, J. L., Li, D. M., et al., 2001. Thermochro-

- nological evidence of tectonic uplift in Nyalam, south Tibetan detachment system. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 292—294 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Wu, Z. H., 1999. Use of fission track dating in studying the uplift history of orogenic belt. *Geological Science and Technology Information*, 18(4): 28—32 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Wu, Z. H., 2001. Ordos and Qinshui basin history of uplift denudation. *Geological Science and Technology Information*, 20(3): 16—20 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. R., Wang, G. C., Jian, P., 2000. Study on the tectono-chronology of the Dabie orogenic belt. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—17 (in Chinese).
- Yin, G. M., Lu, Y. C., Zhao, H., et al., 2001. Cenozoic tectonic uplifting of Hua mountain. *Chinese Science Bulletin*, 46(13): 1121—1123 (in Chinese).
- Zeitler, P. K., 1985. Cooling history of the NW Himalaya, Pakistan. *Tectonics*, 10: 729—741.
- Zeitler, P. K., Johnson, N. M., Naeser, C. W., et al., 1982. Fission-track evidence for Quaternary uplift of the Nanga Parbat region, Pakistan. *Nature*, 298: 255—257.
- 来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 44(16): 1497—1500.
- 李德威, 2003. 青藏高原隆升机制新模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 593—600.
- 刘德民, 李德威, 谢德凡, 等, 2003. 喜马拉雅造山带中段北坡构造地貌初步研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 639—644.
- 王国灿, 吴燕玲, 向树元, 等, 2003. 东昆仑东段第四纪成山作用过程与地貌变迁. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(6): 583—592.
- 王国灿, 杨巍然, 1998. 地质晚近时期山脉地区隆升及剥露作用研究. *地学前缘*, 5(1—2): 151—156.
- 王军, 1997. 利用磷灰石裂变径迹计算隆升速率的一些问题. *地质科技情报*, 16(1): 97—102.
- 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.
- 王瑜, 万景林, 李大明, 等, 2001. 藏南伸展拆离系聂拉木一带构造抬升的热年代学证据. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 292—294.
- 吴中海, 吴珍汉, 1999. 裂变径迹法在研究造山带隆升过程中的应用介绍. *地质科技情报*, 18(4): 28—32.
- 吴中海, 吴珍汉, 2001. 鄂尔多斯、沁水盆地晚新生代隆升—剥蚀历史. *地质科技情报*, 20(3): 16—20.
- 杨巍然, 王国灿, 简平, 2000. 大别造山带构造年代学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1—17.
- 尹功明, 卢演涛, 赵华, 等, 2001. 华山新生代构造抬升. *科学通报*, 46(13): 1121—1123.

#### 附中文参考文献

- 陈正乐, 张乐桥, 王小凤, 等, 2001. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据. *地球学报*, 22(5): 413—418.
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等, 1997. 东喜马拉雅构造结上新世以