

哀牢山-红河剪切带的热年代学研究 ——多重扩散域模式的应用实例*

陈文寄

T M 哈里森 O M 洛弗拉¹⁾

(国家地震局地质研究所, 北京 100029) (美国加州大学洛杉矶分校地球和空间科学系, CA 90024)

摘要 洛弗拉等人(1989)把 Dodson (1973) 建立的单一扩散域模式扩展成矿物扩散域不连续分布的模式, 即多重扩散域模式, 与之对应具有某一封闭温度范围, 因此利用单个 K-长石矿物样品可以揭示更长时间段上的冷却过程。对云南哀牢山-红河剪切带的K-长石样品 (FA-2-1) 进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素分析, 利用多重扩散域模式, 揭示在距今约 20~19Ma 间该带存在一快速冷却过程, 这与西藏南部曲水地区快速抬升的时间是一致的。

关键词: 哀牢山-红河剪切带 多重扩散域模式 冷却历史

1 前言

红河断裂带是一条巨型的活动断裂带, 位于扬子板块的西南边界。在红河断裂带西南侧沿哀牢山和点苍山分布有哀牢山-红河变质带, 这是一条与印度和亚洲板块碰撞密切相关的大型第三纪左旋走滑韧性剪切带^(1~4), 长约 600km。该带上发育了大量片麻岩、糜棱岩和花岗质扁豆体。由于印度板块与亚洲板块的碰撞, 形成了喜马拉雅山和西藏高原, 并沿大型走滑断裂带产生地壳块体的侧向滑动^(5,6)。根据这一假说, 沿着哀牢山~点苍山的左旋走滑运动不仅导致了南海的拉张(30~17Ma), 而且调节了印度-亚洲板块的碰撞。

为了确定左旋走滑运动的时间, Urs Schearer 等人⁽³⁾利用哀牢山变质带两处的浅色花岗岩样品, 对其副矿物磷钇矿和独居石测得了相同的 U-Pb 同位素年龄 (23.0 ± 0.2 Ma)。这可能是哀牢山变质带左旋韧性剪切作用的结束时间的上限, 对应的温度大约为 700°C。岩石学证据又表明, 当磷钇矿和独居石结晶之后, 该花岗岩进一步变形, 产生了轻微的片理化和左旋剪切作用。显然, 在温度处于 700°C 以下的一段时间里事实上也发生了韧性走滑运动。

本文拟运用多重扩散域理论^(7~9)讨论以下两个问题: (1) 喜马拉雅山和西藏高原的抬升与哀牢山-红河剪切带的运动在时间上是否同步? (2) 哀牢山-红河剪切带左旋韧性走滑运动的活动时间?

2 样品的采集和实验方法

2.1 样品的采集及处理

糜棱岩样品 FA-2-1 采自云南新平县楚墨公路 201km 处, 位于距现今活动断裂带约 50m 的哀牢山剪切带东缘。与 Urs Schearer 等⁽³⁾采集 U-Pb 年龄样品 (YS-9) 的地点相同。就近还采集

* 地震科学联合基金资助 (89296)。

1) 永久地址: 美国加州理工学院地球和行星科学系, CA 91125。

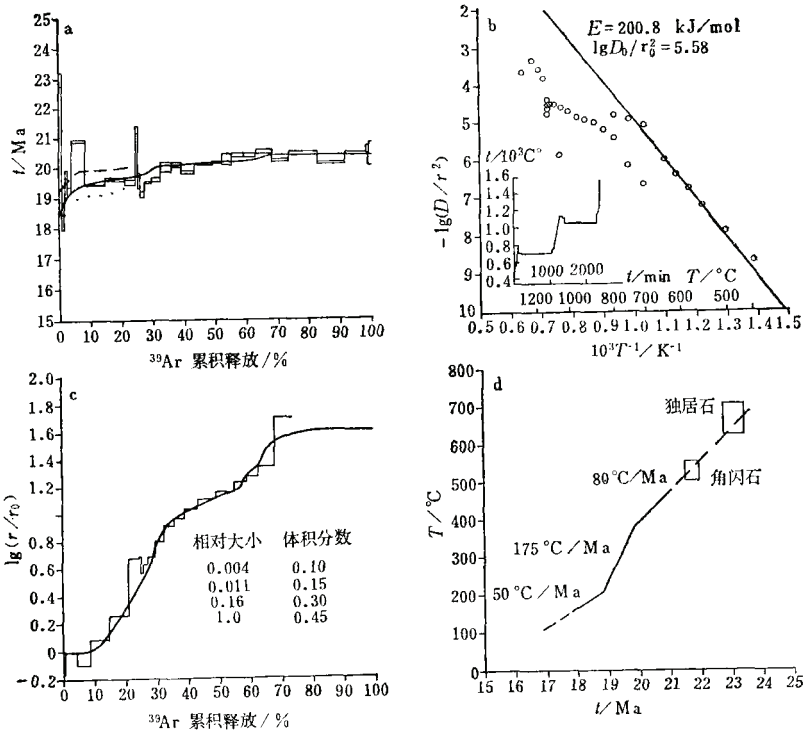


图1 FA-2-1号K-长石样品的实测及理论计算结果

Fig.1 Experimentally and theoretically derived results from FA-2-1 K-feldspar from Ailao Shan/Red River shear zone.

a 年龄谱; b Arrhenius曲线及加热程度(左下角座标图); c $gl(r/r_0)$ 曲线; d 冷却历史

了角闪岩样(品FA-2-3)。经重液和磁选分别选取了粒度为0.15~0.45mm的K-长石和角闪石单矿物做为 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素分析之用。

2.2 实验方法

样品称重后用Sn箔包裹,与标准监测样品FC-3透长石(年龄为27.8Ma)一放入石英管中真空封口,在Ford反应堆H-5位置照射35h,其中子通量为约 $5 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$,快中子与慢中子比值约为0.3。样品照射后利用氩离子激光器(5W)分析石英管中不同位置上标准样的Ar同位素组成,得到J值曲线,进而求得样品FA-2-1所在位置的J值为 2.1612×10^{-3} 。计算中的同位素校正系数为: $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_K = 0.042 (\pm 3\%)$; $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{Ca} = 7.5 \times 10^{-4}$; $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{Ca} = 2.1 \times 10^{-4}$ 。

照射后的样品放入双真空反应器的Ta坩锅中加热,温度控制的稳定性为 $\pm 1^\circ\text{C}$,测温精度优于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。样品加热释放的气体经坩锅壁和SAES Ti-Zr吸气器(10l/s)纯化后利用扩散法把约50%的Ar送入质谱计中进行同位素分析^[10]。MM-1200S质谱计采用高灵敏度(发射电流200 μA 时灵敏度为 10^{-3} A/毛)低质量歧视的GS-98、Baur-Signer离子源。分析中采用的灵敏度为 $1.2 \times 10^{-17} \text{ mol Ar/mV}$ 。采用Steiger和Jager所推荐的同位素丰度和衰变常数进行年龄计算,年龄分析误差(不包括J值误差)通常约0.5%。

采用了常规的阶段加热法对FA-2-3号角闪石样品进行分析。为了揭示尽可能多的热动

力学信息对 FA-2-1 号 K-长石样品采用了洛弗拉等人建议的循环加热法^[7]进行分析。首先自 450°C 至 800°C 单调升温, 降至 700°C 保持一夜, 以使最小扩散域中的气体尽可能完全释放, 然后升温到 1120°C 后再降至 1050°C 保持一夜, 以使 K-长石产生局部熔融前尽可能多地得到最大扩散域的热动力学信息, 最后升温到 1550°C 使样品全熔, FA-2-1 号在该阶段释放的氩(不具有热动力学信息)占氩总析出量的 25% (图 1c)。

3 年龄结果及多重扩散域模式处理

3.1 年龄结果

FA-2-1 号 K-长石的年龄分析结果示于表 1 和图 1。

3.2 多重扩散域模式处理

3.2.1 多重扩散域理论——Dodson 理论的扩展

大多数缓慢冷却的碱性长石的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱, 与用 Dodson 的假设样品只含单一(或者说均匀的)扩散域所计算出的模式年龄有明显的差别, 而且利用阶段加热测得的 ³⁹Ar 所计算出的 Arrhenius 曲线也存在着明显的线性偏离, 这种偏离与 Dodson 模式的假设是不一致的。自 1989 年以来, 洛弗拉等人对美国缅因西北部 Chain of Ponds Pluton (简称 CPP) 的 3 个碱性长石进行了实验分析和研究, 认为: (1) 利用 CPP 中共生矿物和 3 个碱长石分别绘制的冷却曲线不同; (2) 实测年龄谱与 Dodson 理论年龄谱不一致(图 2), 实测年龄谱不仅年龄变化大, 而且形态也复杂得多; (3) 根据 3 个碱长石释放出的 ³⁹Ar 计算出的 Arrhenius 曲线无一例外地存在线性偏离(图 3); (4) 虽然 Dodson 模式曾假设冷却历史是一个 1/T 随时间的线性上升过程, 但是对于不同的冷却过程(图 4), 真实的冷却历史(图中的线)与用 Dodson 方程计算出的 T_c 和年龄相关点(图中的点)一致, 说明 Dodson 模式对于冷却历史所做假设并不都是必要的, 也不是产生上述矛盾的原因; (5) 颗粒的形状虽然对 lg(r/r₀) 曲线有一定影响, 但它们的冷却曲线却十分相似, 可见颗粒形状在热历史研究中也并非特别重要。

根据以上事实, 洛弗拉等人^[7]经过数学计算, 将 Dodson 模式扩展成多重扩散域模式, 即对于扩散过程来说, 样品按“颗粒”(扩散域)的大小呈现某一分布。并且假设这种“颗粒”具有相同的扩散参数(E 和 D₀), 颗粒之间没有相互作用。这种不同颗粒混合样品的标准化年龄谱(Δt_m/τ) 将取决于颗粒大小 ρ_i 和它们各自的体积份数 φ_i。利用这个新模式对 CPP 样品的检验证明它比 Dodson 模式要优越得多(图 2 下边的黑实线; 图 3 中的黑实线)。本工作是利用这种新模式进行研究的实例。

3.2.2 FA-2-1 号 K-长石样品的多重扩散域模式处理

目前虽然还不能直接确定扩散域的大小, 但可以确定最小的扩散域对应的是 Arrhenius 曲线的低温线性部分。利用其斜率(图 1b) 计算出 FA-2-1 号 K-长石样品的活化能为 E=200.8 kJ/mol 和 lgD₀/r₀²=5.58/s (利用加热阶段 2~7)。由于不同加热阶段求得的活化能接近, 因而采用相同活化能的多重扩散域模式。利用 E 和 lgD₀/r₀² 值分别计算各加热阶段的 lg(r/r₀) 值, 绘出 lg(r/r₀)-³⁹Ar 累积释放百分比(%) 的相关曲线图(图 1c 中折线) 并假设不同扩散域的分布(不同的 ρ_i 和 φ_i 值), 利用计算机进行叠代拟合运算, 直至得到的理论值与实测值达到理想的拟合(图 1c 曲线)。FA-2-1 号 K-长石样品的扩散域分布是 ρ_i (相对颗粒大小) 分别

表1 FA-2-1号K-长石Ar同位素分析结果($J = 2.1612 \times 10^{-3}$ $W = 0.01229g$)

Table 1 Ar isotope analytical results for FA-2 1 K-feldspar

T (°C)	$^{40}Ar/^{39}Ar$	$^{37}Ar/^{39}Ar$	$^{36}Ar/^{39}Ar$ ($\times 10^{-3}$)	^{38}Ar ($\times 10^{-15}mol$)	^{39}Ar (%)	$^{40}Ar^*$ (%)	$^{40}Ar^*/^{39}Ar_K$	$t \pm 1\sigma$ (Ma)
450	1653	0.2900	5707	0.311	0.130	0.00	0.0000	0.0 ± 0.0
500	145.4	0.0802	471.2	0.492	0.337	4.19	6.121	23.7 ± 36.2
550	16.34	0.0601	35.16	1.43	0.935	35.9	5.927	23.0 ± 0.2
580	6.517	0.0630	6.067	2.34	1.92	70.7	4.698	18.2 ± 0.3
610	7.714	0.0657	8.731	1.87	2.70	65.1	5.108	19.8 ± 0.1
640	6.219	0.0701	4.167	3.05	3.98	79.0	4.962	19.2 ± 0.1
700	7.500	0.0652	7.056	10.6	8.44	71.7	5.390	20.9 ± 0.0
750	5.535	0.0499	1.696	15.2	14.8	90.1	5.007	19.4 ± 0.0
800	5.771	0.0431	2.333	14.8	21.0	87.2	5.054	19.6 ± 0.0
700	5.675	0.0340	2.088	8.34	24.5	78.7	5.030	19.5 ± 0.1
750	6.138	0.0335	2.117	1.60	25.2	82.3	5.485	21.3 ± 0.1
800	6.879	0.0449	6.121	1.45	25.8	71.2	5.043	19.6 ± 0.3
840	6.852	0.0456	6.417	3.54	27.3	70.7	4.929	19.1 ± 0.1
880	6.243	0.0454	4.014	5.63	29.6	79.2	5.030	19.5 ± 0.0
920	5.952	0.0428	2.950	6.94	32.5	83.4	5.053	19.6 ± 0.1
960	5.709	0.0350	1.782	7.91	35.9	88.8	5.155	20.0 ± 0.2
1000	5.798	0.0359	2.011	7.93	39.2	87.9	5.177	20.1 ± 0.1
1040	5.914	0.0439	2.624	9.86	43.3	84.9	5.112	19.8 ± 0.1
1080	6.072	0.0501	2.936	14.1	49.2	84.1	5.178	20.1 ± 0.0
1100	6.216	0.0527	3.379	7.41	52.3	81.6	5.191	20.1 ± 0.0
1120	6.222	0.0498	3.312	7.09	55.3	82.6	5.217	20.2 ± 0.2
1120	6.125	0.0413	2.864	9.33	59.2	84.1	5.251	20.4 ± 0.1
1120	6.002	0.0356	2.456	9.21	63.1	85.0	5.248	20.3 ± 0.1
1120	6.100	0.0320	2.691	12.6	68.4	83.1	5.277	20.5 ± 0.1
1050	4.669	0.0377	0.000	12.7	73.7	68.4	5.201	20.2 ± 0.0
1150	5.767	0.0180	1.599	21.8	82.8	90.4	5.266	20.4 ± 0.0
1180	5.638	0.0117	1.465	21.0	91.6	90.8	5.176	20.1 ± 0.0
1220	5.694	0.0113	1.363	15.6	98.2	90.6	5.262	20.4 ± 0.0
1300	6.511	0.0438	4.028	2.23	99.1	70.5	5.293	20.5 ± 0.1
1550	24.71	0.0612	65.75	2.09	100	11.0	5.254	20.4 ± 0.4

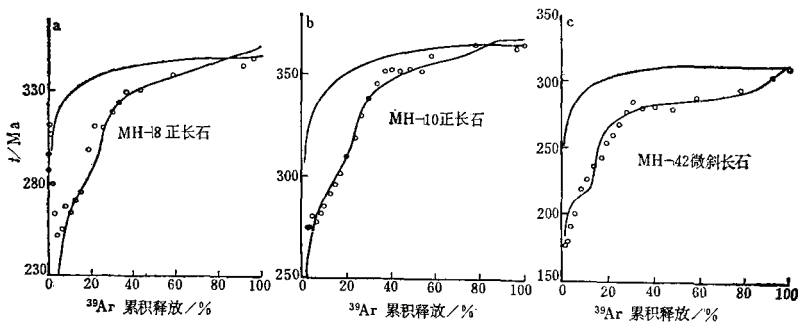


图2 CPP 3个碱长石的年龄谱^[7]

Fig.2 Age spectra for the three alkali feldspars from CPP.

空心圆为实测年龄；上线为Dodson模式理论年龄谱；下线为多重扩散域模式理论年龄谱

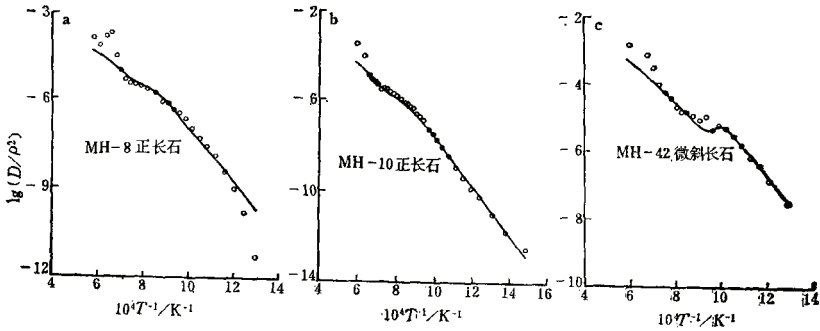
图3 CPP 3个碱长石的Arrhenius曲线⁽⁷⁾

Fig.3 Arrhenius plots for the three alkali feldspars from CPP.

空心圆为实测计算值; 实线为理论计算值

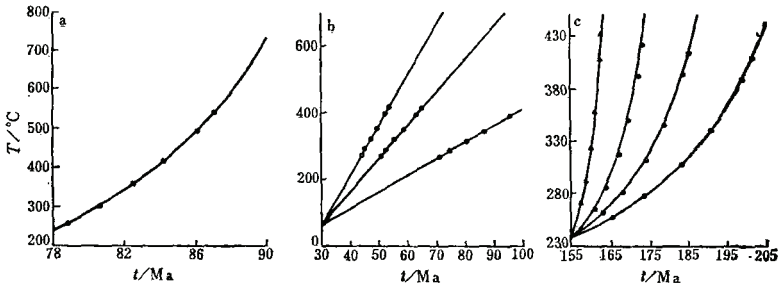
图4 不同颗粒样品的年龄-封闭温度相关图⁽⁷⁾

Fig.4 Correlation between age and closure temperature for the samples of different grains.

a $1/T \propto t$; b $T \propto t$; c $1/\sqrt{T} \propto t$

为0.004、0.011、0.16和1.0; 相应的体积份数 ϕ ,分别为0.10, 0.15, 0.30和0.45。最后, 利用扩散域的分布模式假定不同的冷却历史, 进行年龄谱的叠代拟合计算, 直至得到理想的理论年龄谱(图1a黑实线)。值得提及的是, 当采用的冷却速度为150°C/Ma或200°C/Ma时, 不能得到理想拟合的年龄谱(图1a中点线和虚线), 从而说明这种模式拟合是灵敏的。将临近的角闪石样品FA-2-3的年龄结果(21.8 ± 0.2 Ma)和同一地点YS-9号独居石的U-Pb年龄(23.1 ± 0.3 Ma)绘制在图1-d中, 也得到了与冷却曲线高温段一致的结果。

综上所述, 我们得到的FA-2-1号K-长石的冷却历史表明, 从高温至大约400°C时, 冷却速度为80°C/Ma; 当年龄为19~20Ma之间时冷却速度明显增快至175°C/Ma。尽管在计算活化能和 $\lg D_0/r_0^2$ 时均可能有误差, 但是计算表明即使扩散域的活化能从200.8kJ/mol增至213.4kJ/mol, 由此引出的冷却速度变化也只有20°C/Ma。因此可以认为在大约20Ma时冷却速度确实发生了明显的变化。

4 哀牢山-红河剪切带冷却历史的初步研究

FA-2-1样品所记录的热历史是从大约24Ma, 以80~100°C/Ma的速度冷却开始的, 在约20Ma时冷却速度快速上升至140~180°C/Ma, 并维持了大约1Ma, 然后在19Ma时下降至大约50°C/Ma。由于在样品中还发现了轻微的片理和左旋剪切证据, 因此可以认为, 在23Ma到20±0.3Ma之间, 高温的左旋剪切运动是连续进行的。在20±0.3Ma时, 由于温度降至

350℃以下, 石英的塑性变形停止, 随后在20~19Ma之间, 该地区发生了导致快速冷却的事件。诚然, 许多因素可能导致超高的冷却速度, 但是就本工作而言, 除去构造剥蚀以外, 很难用其它理由解释。至于这一快速冷却过程在哀牢山-红河剪切带是否普遍存在, 它是否意味着断层活动形式的改变, 这些都还有待于进一步的研究。

上述结果与Tapponnier等⁽¹¹⁾提出的模式是一致的。他们认为中国南海的拉张过程是中国东南部和沿红河断裂带大型走滑运动的结果。根据他们的研究, 在海底形成过程中(30~17Ma), 伸展速度与印度板块和亚洲板块汇合的速度大体相近。Copeland 等人在西藏曲水河谷海拔3.6~4.6km之间采集了5个样品(平均高程差为250m)以研究西藏的抬升历史⁽¹²⁾。结果表明, 在20Ma以前抬升速度约为0.07mm/a, 而且几乎是匀速的, 在20~17Ma之间, 抬升速度达到大约4.4mm/a(图5)。另一个采自曲水深成岩的碱性长石的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄和多重扩散域模式研究⁽¹³⁾表明, 在35~18Ma之间曲水地区的冷却速度缓慢并呈下降趋势, 而在约18Ma时则发生了非常快速的冷却。上述两结果均与本文的结果一致。由此看来, 哀牢山-红河剪切带的运动与西藏南部地区的抬升紧密相关, 在20Ma左右(或大约20~17Ma)这两地区的构造运动形式可能发生了显著变化。

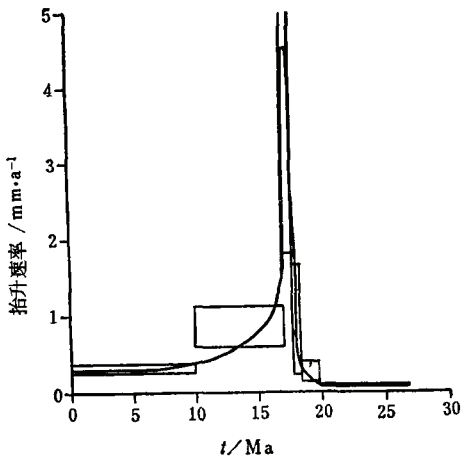


图5 30Ma来西藏曲水深成岩的抬升历史(引自P. Copeland等人, 1987)

Fig.5 Uplift history of the Quxu, Tibet, pluton for the last 30Ma.

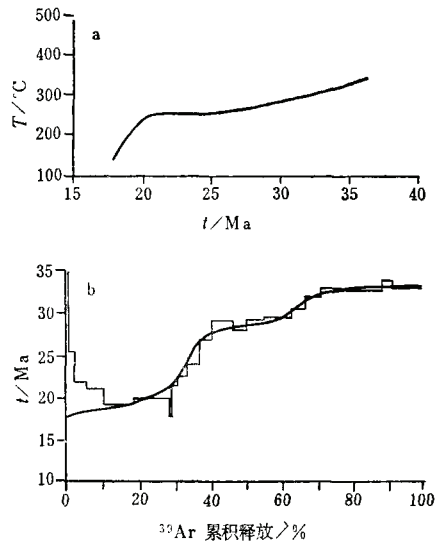


图6 西藏曲水深成岩中K-长石的冷却历史(引自F. M. Richter等人, 1991)

Fig.6 Experimentally and theoretically derived age spectra and cooling history (a) from PC-88-32 K-feldspar (b) from the Quxu, Tibet, pluton.

5 小结

利用多重扩散域模式对FA-2-1号K-长石样品的研究表明:

(1) 由于多重扩散域模式意味着这些扩散域含有一个封闭温度范围, 因此可以从单一K-长石样品中反演出温度约150~500℃之间的冷却历史。

(2) 在20~19Ma之间, 哀牢山-红河剪切带(至少是在FA-2-1号采样点地区)出现了短

暂($<1\text{Ma}$)和快速($>150^\circ\text{C}/\text{Ma}$)的冷却过程, 在此之前($23\sim 20\text{Ma}$)则主要呈连续的左旋韧性走滑运动。

(3) FA-2地区快速冷却($20\sim 19\text{Ma}$)可能显示了该地区构造活动形式的一种转变, 它与西藏南部曲水地区快速抬升($20\sim 17\text{Ma}$)的时间一致, 说明印度-亚洲板块的碰撞不仅造成了西藏南部地区(可能包括喜马拉雅山)的快速抬升, 而且沿着红河断裂带产生了大型的左旋韧性走滑运动, 这一运动的直接结果是造成了中国南海的拉张。

国家地震局地质研究所李齐和云南省地质科学研究所薛啸峰等参加了野外工作。国家地震局地质研究所刘若新、马宗晋和中国科学院地质研究所李继亮对本工作给予了关心, M T Heizler和 P H Leloup在实验和构造地质方面也给予了指导和帮助, 在此表示衷心的感谢。

(1990年9月收稿)

参 考 文 献

- 1 Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. In *Collision Tectonics* (eds., Coward M P, Ries A C), Geol Soc Spec Publ, 1986. 115~157.
- 2 Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 1990, 343: 431~437.
- 3 Schaerer U, Tapponnier P, Lacassin R, et al. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for Tertiary Large-scale movement along the Ailao Shan-Red River shear belt, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 97: 65~77.
- 4 Leloup P H. Cinématique des déformations "Himalayennes" dans la zone de cisaillement cru Molnar P and Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189: 419~426.
- 5 Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189: 419~426.
- 6 Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 1976, 264: 319~324.
- 7 Lovera O M, Richter F M, Harrison T M. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry for slowly cooled samples having a distribution of diffusion domain sizes. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(17): 917~935.
- 8 Lovera O M, Richter F M, Harrison T M. Diffusion domains determined by ^{39}Ar release during step-heating. *Jour Geophys Res.*, 1991, 96: 2057~2069.
- 9 Lovera O M, Heizler M T, Harrison T M. Argon diffusion domains in K-feldspar II: Kinetic properties of MH-10. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, in press.
- 10 McDougall I, Harrison T M. *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method*, 212pp. New York: Oxford University Press, 1988.
- 11 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain, A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with palsticine. *Geology*, 1982, 10: 611~616.
- 12 Copeland P, Harrison T M, Kidd W S F, et al. Rapid early Miocene acceleration of uplift in the Gangdese Belt, Xizang (southern Tibet), and its bearing on accommodation mechanisms of the India-Asia Collision. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 86: 240~252.
- 13 Richter F M, Lovera O M, Harrison T M, et al. Tibetan tectonics from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of a single K-feldspar sample. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 105: 266~278.
- 14 Harrison T M, Lovera O M, Heizler M T. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results for alkali feldspars containing diffusion domains with differing activation energy. *Geochim Cosmochim acta*, 1991, 55: 1435~1448.
- 15 Heizler M T, Lux D R, Decher E R. The age and cooling history of the Chian of Ponds and Big Island Pond Plutons and the Spider Lake granite, west-central Maine and Quebec. *Am J Sci*, 1988, 288: 925~952.
- 16 Wijbrans J R, McDougall I. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of white micas from an Alpine highpressure metamorphic belt on Naxos (Greece): The resetting of the argon isotopic system. *Contrib Mineral Petrol* 1986, 93: 187~194.
- 17 Whitchell P. the compensation law for diffusion in silicates, *High Temp Sci*, 1969, 1: 200~215.
- 18 Zeitler P K. Argon diffusion in partially outgassed alkali feldspars: Insights from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. *Chem Gel*, 1988, 65: 167~181.

THERMOCHRONOLOGY OF THE AILOSHAN-RED RIVER SHEAR ZONE — A CASE STUDY OF MULTIPLE DIFFUSION DOMAIN MODEL

Chen Wenji

(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing 100029)

T M Harrison O M Lovera¹⁾

(Dept. of Earth & Space Sci., UCLA, Los Angeles, CA 90024, U.S.A.)

Abstract

Recently, the single-diffusion-domain closure model of Dodson (1973) has been extended to apply to minerals with a discrete distribution of domain size, multi-diffusion-domain closure model (Lovera et al., 1989). Because these domains contain a range of closure temperatures, Lovera et al. (1989) found that a single K-feldspar samples may reveal a broad segment of a cooling history, rather than the single datum usually expected. A study of K-feldspar (FA-2-1) from the Ailao Shan/Red River shear zone, Yunnan, reveals extremely rapid cooling in the interval 20 to 19 Ma using the new model. In consistent with the earlier published analysis involving many biotite samples and a K-feldspar sample collected from Quxu area, southern Tibet. We believe that the two results are related. These two studies underscore the value of using the domain distribution hypothesis in tectonic studies and presage a revolution in "tectonic geochronology".

Key words: Multi-diffusion-domain model, Thermochronology, Ailoshan-Red River shear zone

1) Residence address: Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, U.S.A.