

大别造山带冷却年龄的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 裂变径迹年龄测定*

陈江峰^① 谢 智^① 刘顺生^② 李学明^① K. A. Foland^③

(^① 中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026; ^② 中国科学院长沙大地构造研究所, 长沙 410013;

^③ Department of Geological Sciences, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA)

摘要 应用同一岩石样品的角闪石、黑云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和磷灰石的裂变径迹定年结果, 讨论了大别造山带岩石的冷却历史. 南大别岩石在约 190 Ma 前, 北大别岩石在约 125 Ma 前冷却到约 540 °C, 冷却速率先快后慢, 在约 110 ~ 120 Ma 前南、北大别岩石都冷却约 100 °C, 表明南、北大别地块间以及与超高压变质岩石间都有相对垂直运动, 直到约 110 ~ 120 Ma 前才结束相对运动.

关键词 大别造山带 冷却历史 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年 裂变径迹定年 封闭温度

大别造山带因超高压变质岩的发现成为国际国内研究的热点. 本文用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹定年方法研究了大别造山带岩石的冷却历史, 从而为大别造山带形成和演化史研究以及超高压变质岩石成因研究提供了制约.

大别造山带内已作了大量的定年工作, 这些数据都应看作一定冷却历史的表现^[1]. 为进一步定量研究冷却历史, 我们对同一岩石标本用几种封闭温度不同的方法同时进行定年.

表 1 若干同位素体系封闭温度

定年方法	矿物	矿物粒径	冷却速率/ °C · Ma ⁻¹	封闭温度/ °C	文献
^{40}Ar - ^{39}Ar	角闪石	80 μm	100	540	[3]
			10	495	
			1	465	
			100	520	
	黑云母	40 μm	10	470	[4]
			1	390	
			100	345	
			10	310	
裂变径迹	磷灰石	140 μm	1	280	[5]
			100	110	
			10	90	
			1	80	

封闭温度是矿物、其扩散特性、冷却速率和粒径等的复杂函数^[2]. 一般认为锆石 U-Pb 或 Pb-Pb, 全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系的封闭温度最高, 约 650 °C 左右. 角闪石和黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 体系和磷灰石裂变径迹年龄的封闭温度见表 1. 白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 体系的封闭温度约比黑云母高 50 °C.

1994-04-13 收稿, 1994-08-19 收修改稿

* 国家自然科学基金和中国科学院岩石圈开放实验室部分资助项目

1 地质背景

本文研究大别造山带的晓天-磨子潭断裂以南地区(图 1)。大别造山带由下元古界大别群、中元古界红安群和宿松群组成。大别群原岩为火山-沉积岩系,受到角闪岩相到麻粒岩相变质作用,并遭受强烈混合岩化。红安群原岩为陆源碎屑岩和碳酸盐岩,上部有火山岩,遭受浅变质,分布在麻城-团风断裂以西的红安-大悟一带,宿松群为一套含磷岩系,在大别造山带东南部零星出露。

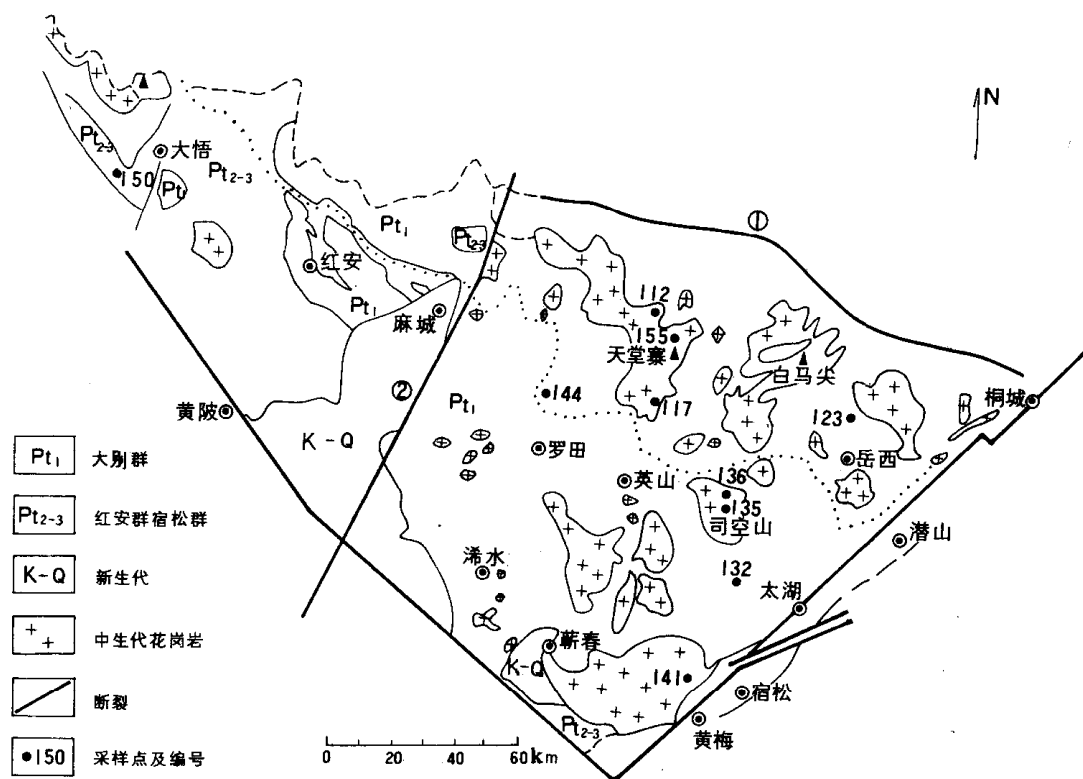


图 1 大别造山带示意图

附有采样点位置及编号,点线为南北大别地块分界线 ①——晓天-磨子潭断裂,②——麻城-团风断裂

最近的工作表明,大别造山带可以分为南、北大别两地块^[6],北大别变质岩系的 Nd 同位素模式年龄范围约 1.9~2.6 Ga,而南大别变质岩的 Nd 模式年龄约 1.7 Ga^[1]。已知超高压变质岩石主要集中在南大别地块。

大别造山带经历了复杂的演化历史。尽管把大别造山带看作为华北地块与扬子地块印支期碰撞产物已渐成共识,但对大别地块是否为一有古老演化史的中间地块、地缝合线的位置以及碰撞对接方式和机理仍有许多争议。含超高压矿物的榴辉岩的发现为大别群的演化历史研究揭开了新的一页,证明了陆壳俯冲的存在。但对榴辉岩成因, p - T - t 轨迹和折返机理等仍有待深入研究。

1) 谢 智. 大别山南北部大别群岩石的 Nd 同位素模式年龄及地质意义. 岩石学报(待发表)

2 实验方法与结果

在大别造山带中 4 个典型地点的变质岩和 3 个中生代花岗岩侵入岩体的 10 个不同出露高程的样品中, 选出角闪石和黑云母进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄测定, 同时选出磷灰石进行了裂变径迹定年.

^{40}Ar - ^{39}Ar 分别在中国科学院地质研究所和美国俄亥俄州州立大学进行, 分析流程见文献[7, 8]. 表 2 给出了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 分析结果, 155 黑云母同时在上述两实验室分析, 结果分别为 $(121.5 \pm 2.3)\text{Ma}$ 和 $(121.2 \pm 0.4)\text{Ma}$, 表明两实验室的结果都可靠, 且无系统误差, 结果可以直接对比.

除了 141 角闪石以外, 所有样品都给出理想的坪, 表明封闭后没有显著的热扰动. 141 角闪石出了中温部分表面年龄高的无明显坪的年龄, 这是由于微细解理面中的绿泥石所致, 此时总气体年龄也许更近似于封闭年龄^[9].

分析结果给出了相当高的精度, 多数情况下, 成对的角闪石-黑云母年龄差显著大于分析误差, 因而使之有可能以相当好的精度计算快速冷却的速率.

裂变径迹定年在中国科学院长沙大地构造研究所进行样品制备^[9], 在中国原子能研究院辐照, 在中国科学技术大学完成径迹计数. 采用外探测器法, 以白云母片作外探测器, 用磷灰石年龄测定国际标准样 FC 作参照, 根据中国科学院长沙大地构造研究所测定, 取其年龄值为 27.9 Ma. 样品年龄测定结果见表 3, 表中所给出的误差为计数误差, 在多数情况下, 磷灰石裂变径迹年龄与黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄有显著差别, 因而可以计算冷却速率.

表 2 大别造山带变质岩和花岗岩的 Ar-Ar 同位素数据^{a)}

样号	采样点	岩性	高程/m	矿物名称	全熔年龄/Ma	总气体年龄/Ma	阶段数	坪年龄/Ma	阶段数	坪气体/%	分析者
123	岳西石关	黑云角闪	690	角闪石		128.1	6	126.8±0.3	3	92.6	中国科学院地质研究所
		斜长片麻岩		黑云母		125.5	6	124.7±0.2	4	96.8	
144	罗田方家冲	斜长角闪岩	175	角闪石		128.3	6	127.9±0.3	4	99.4	
				黑云母		124.9	6	125.9±1.4	4	96.7	
132	太湖李杜	石榴二云		角闪石		194.9	6	192.7±0.3	3	96.7	
		钾长片麻岩	180	云母		191.0	6	191.1±1.8	5	99.9	
150	大悟阳平	白云钾长片麻岩	50	白云母		179.9	6	179.8±3.0	5	99.5	美国俄亥俄州立大学
		花岗岩岩体名称									
136	司空山	花岗岩	1 227	黑云母		125.7	6	125.8±1.9	4	96.9	
155	天堂寨	花岗岩	1 729	黑云母		122.2	6	121.5±2.3	4	97.8	
155				黑云母	120.8	120.4	23	121.2±0.4	15	93.0	
117		花岗岩	230	黑云母	123.1	122.4	18	122.0±0.4	12	93.0	
135	司空山	花岗闪长岩	250	角闪石	128.8	129.3	19	129.1±0.5	9	84.0	美国俄亥俄州立大学
				黑云母	123.9	124.1	15	124.6±0.3	9	89.0	
141	梅川	花岗岩	250	角闪石		126.3	17				
				黑云母	117.6	116.0	19	115.8±0.4	10	94.0	

a) 原始数据可向第一作者索取

表 3 磷灰石裂变径迹年龄(外探测器法)数据

样品号	采样点	岩 性	高程/m	颗粒数	自发径迹数	诱发径迹数	年龄/Ma
123	岳西石关	斜长片麻岩	690	8	345	694	122.2 ± 4.0
144	罗田方家冲	斜长角闪岩	175	5	251	573	109.4 ± 7.4
132	太湖李杜	钾长片麻岩	180	6	183	395	114.5 ± 5.8
150	大悟阳平	钾长片麻岩	50	5	34	75	111.3 ± 3.4
	花岗岩体						
155	天堂寨岩体	花岗岩	1729	6	1275	2693	118.9 ± 4.1
112		钾长花岗岩	730	4	275	587	116.2 ± 1.6
117		花岗岩	230	3	377	816	114.4 ± 5.2
136	司空山岩体	花岗岩	1227	7	53	102	126.4 ± 11.9
135		花岗闪长岩	250	14	189	389	120.0 ± 7.3
141	梅川岩体	花岗岩	250	7	423	882	118.4 ± 2.1

3 讨论

3.1 大别造山带变质岩的不均匀冷却史

采自岳西石关的 123 样品可作为北大别地块东部(安徽部分)的代表样品。在约 127 Ma 前冷却到约 540 °C (见表 1, 下同), 然后以约 90 °C/Ma 的快速速率于约 125 Ma 前冷却到约 345 °C, 并继续以相似的速率于约 122 Ma 前冷却到约 110 °C, 然后以平均 0.8 °C/Ma 的速率冷却到现在。

陈廷愚等^[10]在安徽岳西主簿源-晓天之间的姚岭得到角闪斜长片麻岩中角闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 130.8 Ma, 此数值比石关样品高 4 Ma, 此值与我们的结果相比也许会有系统偏差, 但也可能确比我们的测定结果老, 表明此样品与石关相比或隆升较早, 或上覆岩层比石关薄。

北大别西部(湖北)罗田方家冲样品于约 128 Ma 冷却到约 540 °C, 与石关的 123 样品一样以约 100 °C/Ma 的快速冷却速率冷却到约 126 Ma 前, 然后冷却速率变慢, 以约 15 °C/Ma 的速率于约 109 Ma 前降温到约 90 °C, 然后以更慢的速率(约 0.7 °C/Ma)冷却到现在。

由此可见北大别地块在约 128~125 Ma 前发生快速抬升, 但相对而言湖北部分发生得略早一些, 相差约 1.2 Ma。相应于 100 °C/Ma 的冷却速率而言, 当时两采样点有约 100 °C 的温度。按造山带典型的地热增温率计算(4 °C/100 m), 当时两样品点有约 2 500 m 高差, 湖北部分高安徽部分低, 与现今两样品出露高程正好相反, 表明安徽部分的近期隆起速率稍快或湖北部分的近期剥蚀较快。对于较年青造山带来说, 这样的高差是可以存在的。

南大别和大悟一带红安群岩石的冷却史与北大别岩石略有不同。采自安徽太湖李杜的样品(132)在约 193 Ma 前冷却到约 540 °C, 继而快速地冷却到 345 °C, 然后冷却速率变慢, 以约 3.5 °C/Ma 的缓慢冷却速率冷却到约 115 Ma 前(85 °C), 继而以更慢的速率(约 0.6 °C/Ma)冷却至今。大悟阳平采集的红安群岩石(150 号样品)于约 180 Ma 前冷却到 345 °C 左右, 接着缓慢冷却, 以约 4 °C/Ma 的速率冷却到约 111 Ma 前(80 °C), 并更缓慢地以约 0.6 °C/Ma 的速率冷却至今。我们的结果与鄂北蓝片岩带中镁钠闪石和青铝闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄约 (178 ± 1) Ma 和 (185 ± 1) Ma 可比^[11]。

上述样品的冷却曲线见图 2。需要指出, 上述描述给出总体的快速冷却, 继之以缓慢冷却

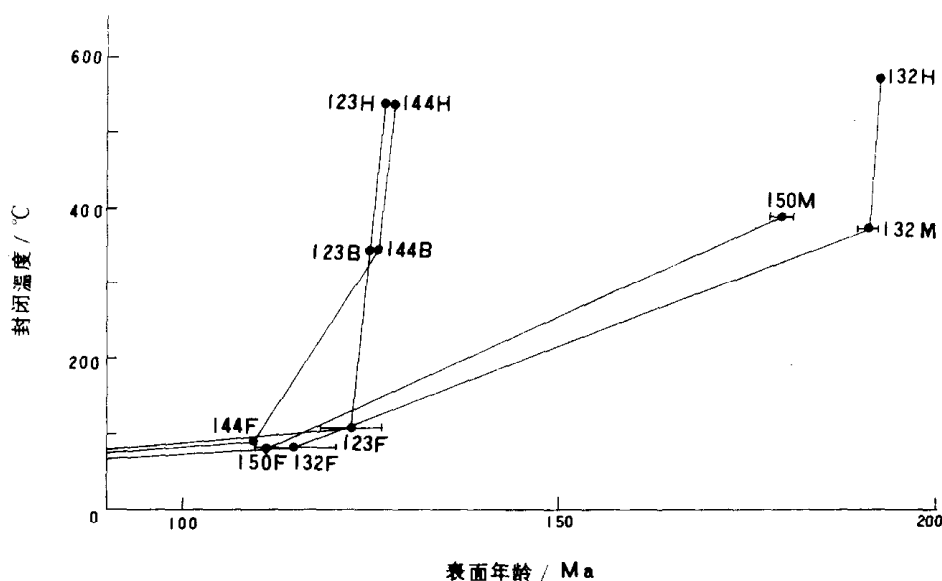


图 2 大别群和红安群变质岩的冷却曲线

的图景以及冷却的大约时段。由于相对较古老年龄和实验精度所限,冷却速率值只具有定性的意义。

3.2 花岗岩的冷却

花岗岩的冷却同时受岩浆冷却和地块抬升的影响。司空山和梅川岩体的角闪石年龄远小于围岩年龄,所以角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄可近似看作其形成年龄,即岩体于约 129 和 126 Ma 前冷却到约 540 °C,此时周围围岩温度已冷却到小于 150 °C。由此可估计岩体侵位深度不大于 4 km。

天堂寨岩体的两个黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄在误差范围内一致,低于北大别两个片麻岩的黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄约 2.9~4.1 Ma,但天堂寨花岗岩的 U-Pb 一致曲线下交点年龄为 $124.7^{+2.2}_{-3.7}$ Ma^[12],与本文所得黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄在误差范围内一致,表明这些年龄代表其形成年龄。我们的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 结果比陈廷愚等^[10]的结果(124.2 Ma)小约 2 Ma,不能判别这是不同实验室间的系统误差,还是实际存在的差别。由 117 样品黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和裂变径迹年龄得到平均冷却速率 32 °C/Ma,介于北大别两样品在该阶段的冷却速率之间。由该岩体出露标高不同的 3 个样品的裂变径迹年龄可求得隆升速率为 350 m/Ma,取冷却速率为 32 °C/Ma,则古地温梯度为约 9 °C/100 m。但事实上升到 100 °C 等温面附近时,冷却速率已相当慢了,所以 32 °C/Ma 的估计远偏高。如取方家冲第二阶段冷却速率,则地温梯度为 4.3 °C/100 m 也许较恰当。

3.3 冷却和隆起史

综上所述,大别造山带的变质岩经历了快速冷却和随后的缓慢冷却过程。但北大别地区与南大别和红安群岩石的早期快速冷却发生的时间不同,前者在约 125~128 Ma 前,后者却在约 180~193 Ma 前。但在约 110~120 Ma 前,大别群和红安群岩石都大体运动到 100 °C 等温面以上。如果在早期快速隆升时整个大别地块已拼焊成一个整体,所述年龄差可以看作样品在地壳剖面中的位置不同,即南大别岩石在上,北大别岩石在下。这既符合传统的红安

群位于大别群之上的观点, 也与两者 Nd 同位素模式年龄显示的年龄关系一致。如果这种关系成立, 且一直保持高冷却速率 (约 $\approx 100^\circ\text{C}/\text{Ma}$), 那么意味着两组岩石之间的温差将高得不可思议, 因而是不可可能的。

如果冷却和隆升是跳跃式, 即于约 180~190 Ma 前发生快速上升, 恰好使上部大别群 (南大别) 和红安群岩石经过 345°C 等温面, 而大别群下部 (北大别) 岩石仍停留在 540°C 等温面下, 即两者之间至少有 5 km 的高度差 (以地热增温率 $4^\circ\text{C}/100\text{m}$ 计), 然后经过 50~60 Ma 的稳定又发生第二次快速隆升和地块掀转, 使北大别岩石出露地表, 这种脉动式快速隆升不能排除。

如果南 (包括红安群)、北大别在中生代时发生过相对位移和分别独立的隆升, 更为合理的模型是, 南大别先在约 190~180 Ma 前隆起上升到约 350°C 等温面以上隆起速率减慢, 北大别约在 130~120 Ma 时发生快速隆起, 并通过 350°C 等温面, 此后南、北两块逐渐焊接, 共同缓慢冷却至今。

南、北大别两地块之间存在差异运动, 因此它们不能看作为一个整体。南大别很可能属于扬子北缘, 而北大别则是华北地块南缘, 其间的镁铁-超镁铁质岩体群及伴生的大型韧性剪切带则是其间的界线, 与董树文等^[13]提出的模型一致。

在邻近我们的 132 样品的太湖石马地区, 文献^[14]得到了一条榴辉岩的 p - T - t 轨迹, 认为榴辉岩形成于约 (221 ± 5) Ma 前 ($646 \sim 725^\circ\text{C}$), 于约 134 Ma 前冷却到约 400°C ^[14]。我们的工作表明围岩片麻岩在 134 Ma 前早已冷却到约 130°C (图 2), 即当时榴辉岩比围岩的温度高, 埋藏比围岩深。而它们目前大体出露在同一水平, 所以可以肯定, 榴辉岩和它的围岩之间也有相对差异垂直运动, 这与榴辉岩产出于剪切带的产状是一致的。

Eide 等认为北大别地块在约 130~120 Ma 时经历了广泛的热事件, 表现为广泛的岩浆侵入, 导致大范围围岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 体系重置^[15]。固然这种可能性并不能排除, 但这种大面积热事件本身尚缺乏证据。而在高压-超高压变质地块中, 如阿尔卑斯, 也观察到不同岩片在早期开始冷却时间不同而到约 100°C 时 (裂变径迹定年) 归拼为一致冷却曲线^[16]。

致谢 在研究过程中, 多次与董树文、刘德良进行讨论, 得益良多; 同时还得到周泰禧、张翼的许多帮助; 另外在进行裂变径迹定年工作中, 得到李晓明、郝新才的帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 陈江峰, 董树文, 邓衍尧等. 大别造山带钾、氩年龄的解释——差异上升的地块. 地质论评, 1993, 39: 17~22
- 2 Dodson M H. Theory of cooling age. In: Jager E, Hanziker J C eds. Lectures in Isotope Geology. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 194~202
- 3 Harrison T M, Dancan I, McDougall I. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: temperature, pressure and compositional effects. Geochim Cosmochim Acta, 1981, 49: 2461~2468
- 4 Harrison T M. Diffusion of ^{40}Ar in hornblende. Contrib Mineral Petrol, 1981, 78: 324~331
- 5 Faure G. Principle of Isotope Geology, 2nd. ed. Now York: John Wiley & Sons, 1986. 341~362
- 6 Wang Xiaoming, Liou J G, Maruyama S. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains, Central China: Petrogenesis, P-T paths, and implications for regional tectonics. J Geol, 1992, 100: 231~250
- 7 王松山, 桑海清, 胡世玲等. 应用 49-2 反应堆进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及迁安曹庄群斜长角闪岩年龄谱的地质意义. 岩石学报, 1985, (1): 37~44

- 8 陈江峰, Foland K A, 刘义茂. 苏州复式花岗岩体的精确 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年. 岩石学报, 1993, 9: 77~85
- 9 刘顺生, 张 峰, 胡瑞英等. 裂变径迹年龄测定. 北京: 地质出版社, 1984
- 10 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚等. 大别山腹地燕山期岩浆作用和变质作用同位素年代学研究及其地质意义. 地质学报, 1991, 4: 329~336
- 11 牛宝贵, 富云莲, 刘志刚等. 鄂北蓝片岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义. 科学通报, 1993, 38(14): 1309~1313
- 12 张德全, 孙桂英. 大别山地区天堂寨花岗岩的侵位时代及地质意义. 岩石矿物学杂志, 1990, 6: 31~35
- 13 董树文, 孙先如, 张 勇等. 大别山碰撞造山带基本结构. 科学通报, 1993, 38(6): 542~545
- 14 Li Suguang, Xiao Yiling, Liu Deliang *et al.* Collision of the north China-Yangtze block and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89~112
- 15 Eide E A, McWilliams M O, Liou J G. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and exhumation of high-pressure to ultrahigh-pressure metamorphic rocks in east-central China. *Geology*, 1994, 22: 601~604
- 16 Venturini G, Cosca M A, Sharp Z D *et al.* Stable isotope and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constrains on prealpine reconstructions and *P-T-t* paths within the central Sesia-Lanzo zone, western Alps, northern Italy, Abstract of the eighth International Conference on Geochronology. *Cosmochronology and Isotope Geology*, Berkeley California USA, Jun 5-11, 1994, 339