

滇西临沧花岗岩基冷却的热年代学分析^{*}

施小斌¹ 丘学林¹ 刘海龄¹ 储著银² 夏斌³

SHI XiaoBin¹, QIU XueLin¹, LIU HaiLin¹, CHU ZhuYin² and XIA Bin³

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. CAS Key Laboratory of Marginal Seas, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. CAS Key Laboratory of Marginal Seas, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2005-11-03 收稿, 2006-01-06 改回。

Shi XB, Qiu XL, Liu HL, Chu ZY and Xia B. 2006. Thermochronological analyses on the cooling history of the Lincang Granitoid Batholith, Western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2):465-479

Abstract Multi-system geochronology, including zircon U-Pb dating, biotite Rb-Sr isochron dating, biotite and K-feldspar ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, zircon and apatite fission track data, was used to unravel the cooling histories of 6 granite samples from the Lincang Granitoid Batholith with thermochronology technique. Analyses shows that, the main part of the batholith has undergone a complex thermal history since its intrusion, and short term thermal events were overprinted on the basic cooling history which consists of the early quick cooling stage and the later slow cooling stage. During the Middle and Late Triassic, and the end of the Early Jurassic, the average cooling rate is up to 6°C ~ 13°C/Ma, which was followed by a slow cooling stage of the Middle Jurassic. During the Late Jurassic and the early stage of the Early Cretaceous, there was a quick cooling stage with an average rate of 5°C/Ma, which was followed by a slow cooling stage with a cooling rate of about 0.5°C/Ma, from the late stage of the Early Cretaceous to the beginning of the continent-continent collision of India plate and Asia plate which happens at the Late Eocene. Since the collision, the batholith has undergone two cooling stages, the cooling rate of the early stage is about 5°C ~ 10°C/Ma, while the cooling rate of the later stage is far larger than the early one, especially the rate since 3 Ma is up to 16°C ~ 20°C/Ma; The intrusion, happened in the Early Cretaceous (for example, Sample S57), which cooled quickly immediately after intrusion, cooled slowly together with the main part of the batholith since the Late Cretaceous; The mylonite zone, lying on the eastern side of the batholith, was generated much earlier than its biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar age, 150Ma, and maybe was generated during the thrust and nappe stage due to the collision between the Baoshan Block and the Lanping-Simao Block. Since the Late Cretaceous, the denudation is about 5000m, and 3500m of which is the result of the collision of the India plate and the Asia plate.

Key words Yunnan, Lincang Granitoid Batholith, Closure temperature, Mylonite, Geochronology, Fission track

摘要 为利用热年代学方法重建临沧花岗岩基的冷却历史, 测定了6块花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄、黑云母 Rb-Sr 等时线年龄、黑云母和钾长石的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄以及锆石和磷灰石的裂变径迹数据。分析表明, 自结晶以来, 岩基主体经历了较复杂的热演化, 在两个基本阶段即早期快速冷却阶段和晚期缓慢冷却阶段上叠加了短周期的热扰动, 从中—晚三叠世到早侏罗世末, 冷却速率可以达到 6°C ~ 13°C/Ma, 中侏罗世冷却缓慢, 晚侏罗世到早白垩世早期, 岩基快速冷却, 平均速率达到 5°C/Ma, 早白垩世晚期到喜山运动前, 为缓慢冷却阶段, 平均速率仅为 0.5°C/Ma, 喜山运动后, 受印藏碰撞的影响, 岩基经历了两期冷却事件, 早期冷却速率为 5°C ~ 10°C/Ma, 晚期即 5Ma 以来冷却速率明显增大, 特别是近 3Ma 以来的冷却速率达到 16°C ~ 20°C/Ma; 早白垩世侵入的岩体(如样品 S57), 在侵入后快速冷却, 晚白垩世以后与岩基主体同步冷却; 岩基东侧糜棱

* 中国科学院知识创新工程资助项目(编号:KZCX2-SW-117, KZCX2-209)

第一作者简介: 施小斌, 男, 1970 年生, 研究员, 地热学与构造地质学专业, E-mail: xbshi@scsio.ac.cn

岩带不是形成于150Ma,而可能是早期陆陆碰撞造山时推覆冲断的产物;自晚白垩世以来,岩基地区的总剥蚀厚度可达5000m左右,其中印藏碰撞引起的剥蚀可达3500m左右。

关键词 云南;临沧岩基;热演化;封闭温度;糜棱岩;同位素年龄;裂变径迹

中图分类号 P597.3

临沧花岗岩基总体呈南北向沿澜沧江断裂南段西侧展布(图1),长达350km,东西宽10~48km,出露面积约7400km²(云南省地质矿产局,1990),岩基向南可能与泰国、马来西亚的花岗岩体断续相接,构成醒目的南北向构造岩浆带。一般认为该岩基主体为碰撞型花岗岩,定位深度大约为14km左右,属深成相或中深成相(刘昌实和朱金初,1989;云南省地质矿产局,1990;秦元季,1991^①(以下简称为秦元季(1991)))。这么大的岩基是如何抬升并出露地表的?它的出露与印藏碰撞有何关系?位于其东侧的糜棱岩带的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄是否可以代表其形成时间?临沧岩基的热演化分析将有助于回答这些问题,并且可以为重建滇西的构造演化提供新的制约。前人有关临沧岩基的研究涵盖了地球化学、岩石矿物学、构造变形、同位素定年、构造属性、构造位置等诸多方面,但是仍无法提供系统的岩基热演化信息。自从Dodson MH(1973)提出封闭温度理论以来,利用热年代学方法提取热史信息在国内外得到广泛和有效的应用(丁林等,1995;陈文寄等,1999;万京林等,1997;吴珍汉等,2000;杨进辉等,2004;郑德文等,2004;郑永飞等,1997;Kirby E *et al.*, 2002; Maluski H *et al.*, 1997; Roger F *et al.*, 2000)。本文拟利用热年代学方法,通过分析6块花岗岩样品的锆石U-Pb年龄、黑云母Rb-Sr等时线年龄、黑云母和钾长石的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄以及锆石和磷灰石的裂变径迹数据,并结合前人在邻区盆地充填与构造变形方面的研究成果,试图提取系统的岩基热演化信息。这些放射性体系可以提供低于800℃的热史信息,能有效约束岩基自结晶以来的总体热演化过程。

1 地质背景及样品采集

临沧岩基为多期侵入的复式花岗岩基,以黑云母二长花岗岩为主,其次为花岗闪长岩,这些岩石的同位素年龄分布范围较宽,主要位于258~212Ma之间(云南省地质矿产局,1990)。元素分析、矿物对温压计、包体及锆同位素初始比值等都显示岩基主体为碰撞型花岗岩,属中深成相或深成相,源区位于中地壳,后抬升出露地表并接受剥蚀和沉积,现今岩基局部地区仍沉积不整合上覆中侏罗统或中新统。秦元季(1991)^①通过多条剖面的野外观测发现,临沧岩基现今的边界都为构造边界,东部边界多为花岗岩质糜棱岩带,并以此向围岩过渡,而西部边界或被澜沧群逆冲断裂覆盖,或被中侏罗统红层不整合覆盖。近来研究认为,临沧花岗岩基是位于保山地块和兰坪思茅地块之间的印支期古特提斯昌宁-孟连碰撞接合带的重要组成部分(钟大赉等,1998)。

6块样品主要采自采石场新鲜露头,位置见图1。采样位置及海拔由GARMIN GPS12接收机标定。这6块样品有1块采自岩基的北东段(晓街段),4块位于北中段(临沧岩段),还有1块位于南段勐海段。岩性除S51为正长花岗岩外,均为黑云二长花岗岩。这些岩石主要矿物有斜长石($An < 35$)、钾长石、石英、黑云母;副矿物有锆石、磷灰石、榍石等;次生矿物有绿泥石、绢云母、黝帘石、高岭土、方解石(脉)等,石英都显示波状消光,但矿物的定向偏弱,表明岩石曾遭受应力作用,但变形不强。

样品S42采自太平关水文站,N24.492,E100.295,海拔1034m,为中细粒黑云二长花岗岩,块状构造,主要由斜长石(40%~45%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(10%~15%)等组成,斜长石为自形一半自形板状,部分绢云母化,常见聚片双晶,少见卡钠复合双晶,局部边缘被钾长石交代;钾长石他形粒状,其内常见细小钠质出溶条纹,轻土化,局部可见卡氏双晶;石英半自形-它形粒状,波状消光明显,表明岩石遭受过应力作用;黑云母片杂乱分布,沿其边缘、解理、裂隙被绿泥石等交代。

样品S51采自临沧博尚机场路旁,N23.883,E100.060,海拔1650m,为粗粒正长花岗岩,块状构造,主要由斜长石(10%)、钾长石(65%~70%)、石英(20%~25%)、黑云母(<1%)等组成,斜长石为自形、半自形板状,星散状分布,轻绢云母化,常见聚片双晶及卡钠复合双晶;钾长石半自形-他形粒状,杂乱分布,常见卡氏双晶、格子双晶,钠质出溶条纹,部分钾长石内布较多半自形斜长石、黑云母包体,轻土化;石英他形粒状,常呈填隙状分布,波状消光明显,局部现重结晶,略有定向,表明岩石遭受应力作用,但变形不强;黑云母片零星分布,局部绿泥石化明显。

样品S53采自临沧至勐库公路边,N23.959,E100.032,海拔1981m,为粗中粒黑云二长花岗岩,块状构造,主要由斜长石(30%~35%)、钾长石(30%~35%)、石英(25%)、黑云母(10%)等组成,斜长石为自形、半自形板状,略显环带结构,部分绢云母化强,常见聚片双晶,少见卡钠复合双晶;钾长石半自形、他形粒状,略定向,可见卡氏双晶、格子双晶,钠质出溶条纹,轻土化;石英他形粒状,波状消光较强,略显定向,常呈填隙状分布,显示其生成晚于斜长石、略晚于钾长石;黑云母片略定向,少量沿其边缘、解理、裂隙被绿泥石等交代,内有较多锆石、磷灰石包体。

样品S57采自临沧至勐库公路边,N23.964,E100.099,

^① 秦元季. 1991. 滇西临沧花岗岩基的基本特征和构造侵位机制. 中国科学院地质研究所博士学位论文.

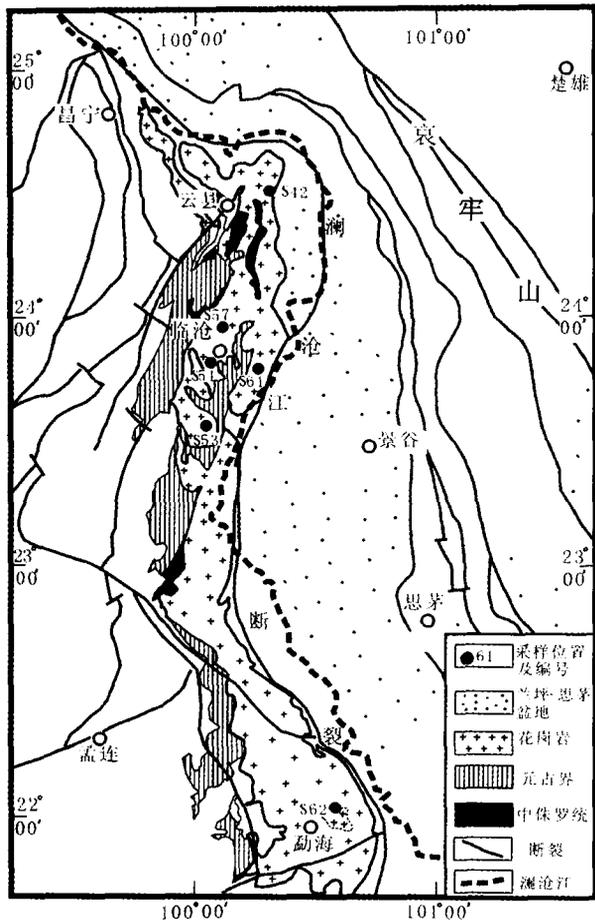


图1 采样位置示意图

Fig. 1 Locations of the samples

海拔 1446m, 为细中粒黑云二长花岗岩, 块状构造, 主要由斜长石 (25% ~ 30%)、钾长石 (40% ~ 45%)、石英 (20% ~ 25%)、黑云母 (10% ~ 15%) 等组成, 斜长石为自形、半自形板状, 大部分绢云母化和黝帘石化强, 少量蚀变弱, 可见聚片双晶和卡钠复合双晶; 钾长石半自形-它形粒状, 略定向, 内可见卡氏双晶、格子双晶, 轻土化; 石英他形粒状, 波状消光强烈, 局部重结晶, 略定向; 黑云母片略显定向, 沿其边缘、

解理、裂隙被绿泥石等交代。

样品 S61 采自临沧到邦东马台公路上 N23. 804, E100. 249, 海拔 1462m, 为中细粒黑云二长花岗岩, 块状构造, 主要由斜长石 (25% ~ 30%)、钾长石 (40% ~ 45%)、石英 (20% ~ 25%)、黑云母 (10% ~ 15%) 等组成, 斜长石为自形、半自形板状, 常见聚片双晶, 少见卡钠复合双晶, 边部常被钾长石交代, 具净边及蠕英等交代结构, 少轻绢云母化; 钾长石他形粒状为主, 常呈填隙状分布, 可见卡氏双晶, 钠质出溶条纹, 常见斜长石、石英、黑云母包体, 轻土化; 石英他形一半自形粒状, 波状消光强烈; 黑云母片杂乱分布, 沿其边缘、解理等轻绿泥石化。

样品 S62 采自勐海至景洪公路北侧, N23. 031, E100. 525, 海拔 1487m, 为细粒黑云二长花岗岩, 块状构造, 主要由斜长石 (40% ~ 45%)、钾长石 (25%)、石英 (20% ~ 25%)、黑云母 (10%) 等组成, 斜长石为自形、半自形板状, 略显环带结构, 部分核绢云母化强, 部分可见聚片双晶, 少见卡钠复合双晶; 钾长石它形粒状为主, 填隙状分布, 其内可见斜长石、黑云母及石英包体, 显示其生成较晚, 其内常见钠质出溶条纹, 轻土化; 石英半自形-它形粒状, 波状消光明显; 黑云母片显定向, 常被绿泥石等交代。

2 测试方法及结果

2.1 锆石 U-Pb 年龄

由中国科学院地质与地球物理研究所许荣华研究员测定, 根据锆石形状、长轴长度、颜色等分成 4 组, 详细实验流程请参见许荣华 (1989)。因测试原因, 只做了 S42、S51、S53 的年龄测定。测试结果见图 2 和表 1。3 块样品的年龄分别为 $216.2 \pm 0.9\text{Ma}$, $225.4 \pm 0.9\text{Ma}$, $237.7 \pm 0.8\text{Ma} (\pm 2\sigma)$ 。前人在选取该同位素体系的封闭温度时存在差别, 如郑永飞等 (1997) 取锆石 U-Pb 同位素体系的封闭温度为 $700 \pm 50^\circ\text{C}$, Roger F *et al.* (2000) 参考 Lee JKW *et al.* (1997) 的结果认为封闭温度不低于 800°C 。本文取 800°C 。由于许多花岗岩浆的温度约为 $750^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ (Lee JKW *et al.*, 1997), 因此该体系年龄可代表岩体的结晶时间。

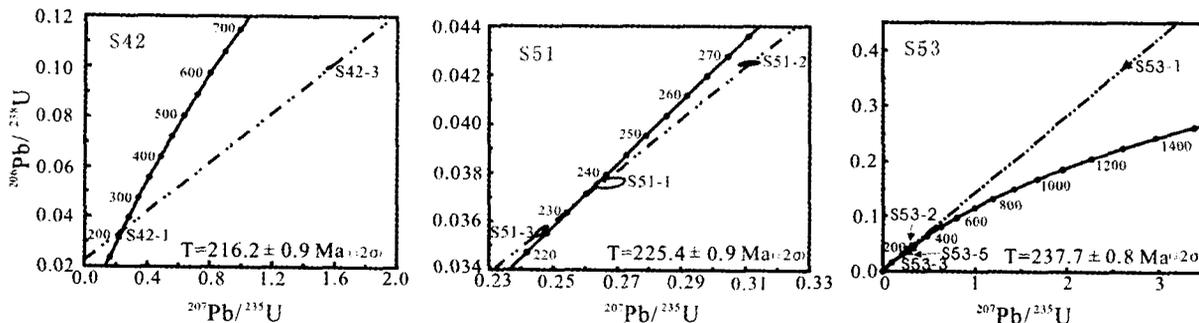


图2 样品的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 2 U-Pb concordia diagrams for zircon

表1 锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 1 U-Pb analytical results for zircon

样号	U (pmol)	Pb (pmol)	同位素比值			表面年龄/Ma				
			$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}^*}$
S42-1	637.1	24.95	0.2390	0.03411	0.05081	217.6	3.5	216.2	0.9	232.4
S42-3	898.1	105.5	1.5641	0.09995	0.1135	956.1	4.6	614.1	2.2	1856
S42-4	1284	58.57	0.3095	0.04015	0.05591	273.8	1.4	253.7	0.9	449.0
S42-5	321.2	19.61	0.3707	0.04912	0.05473	320.2	1.7	309.1	0.6	401.3
S51-1	1423	62.63	0.2676	0.03760	0.05161	240.8	3.0	237.9	1.1	268.4
S51-2	322.1	15.74	0.3112	0.04250	0.05311	275.1	2.2	268.3	0.3	333.7
S51-3	857.1	33.79	0.2464	0.03559	0.05021	223.6	1.2	225.4	0.9	204.5
S51-4	406.6	22.11	0.3430	0.04820	0.05162	299.5	1.8	303.4	0.5	268.7
S53-1	332.8	136.7	2.648	0.3742	0.05133	1314	0.4	2049	0.9	255.9
S53-2	345.1	24.36	0.3170	0.04474	0.05139	279.6	0.8	282.2	0.7	258.3
S53-3	1830	75.97	0.2620	0.03745	0.05074	236.3	0.7	237.0	0.8	228.9
S53-5	952.4	41.50	0.2649	0.03766	0.05102	238.6	0.9	238.3	0.8	241.9

表2 Rb-Sr 同位素测定结果

Table 2 Rb-Sr analytical results for whole rock, K-feldspars, biotites

样号	矿物	Rb($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ	年龄 Ma($\pm 2\sigma$)	($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i
S-42	全岩	133	141	2.75	0.745558	0.000032	179 \pm 23	0.740 \pm 0.021
	钾长石	165	248	1.93	0.746852	0.000017		MSWD = 613
	黑云母	657	3.15	711.1	2.551260	0.000130		
S-51	全岩	157	110	4.16	0.741303	0.000021	152 \pm 21	0.735 \pm 0.036
	钾长石	171	160	3.110	0.744664	0.000020		MSWD = 1334
	黑云母	836	5.31	505.4	1.467410	0.000060		
S-53	全岩	163	109	4.34	0.740980	0.000020	191 \pm 25	0.728 \pm 0.012
	钾长石	451	133	9.87	0.754237	0.000043		MSWD = 27
	黑云母	927	7.39	402.3	1.821730	0.000050		
S-57	全岩	235	158	4.33	0.737222	0.000031	108 \pm 14	0.732 \pm 0.015
	钾长石	253	97.5	7.53	0.744511	0.000031		MSWD = 171
	黑云母	784	3.23	787.6	1.938070	0.000060		
S-61	全岩	251	104	7.01	0.751763	0.000014	153 \pm 20	0.738 \pm 0.013
	钾长石	414	172	7.00	0.753737	0.000030		MSWD = 69
	黑云母	921	2.46	1414	3.80926	0.000080		
S-62	全岩	126	180	2.03	0.720669	0.000020	184 \pm 23	0.714 \pm 0.013
	钾长石	334	270	3.59	0.722746	0.000025		MSWD = 175
	黑云母	736	2.77	957.9	3.220000	0.000100		

2.2 Rb-Sr 内部等时线年龄

由中国科学院地质与地球物理研究所张任祐、乔广生、储著银、裘冀测定。测试所用质谱仪为 VG354 型, 实验标样为 NBS987 及 NBS607。实验全流程 Rb、Sr 的空白本底为 0.2 ~ 0.5 ng。年龄计算采用 ISOPLOT 程序。每块样品进行全

岩、钾长石及黑云母的 Rb-Sr 同位素分析, 回归分析得到等时线年龄及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始比值见表 2 及图 3, 年龄误差以 $\pm 2\sigma$ 表示。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始比值普遍高于 0.715, 表明岩主要来自高度分异的陆壳熔融而成, 与前人结果一致。遗憾的是, 测点少以及钾长石和全岩的同位素比值接近使得年龄的偏差较大。

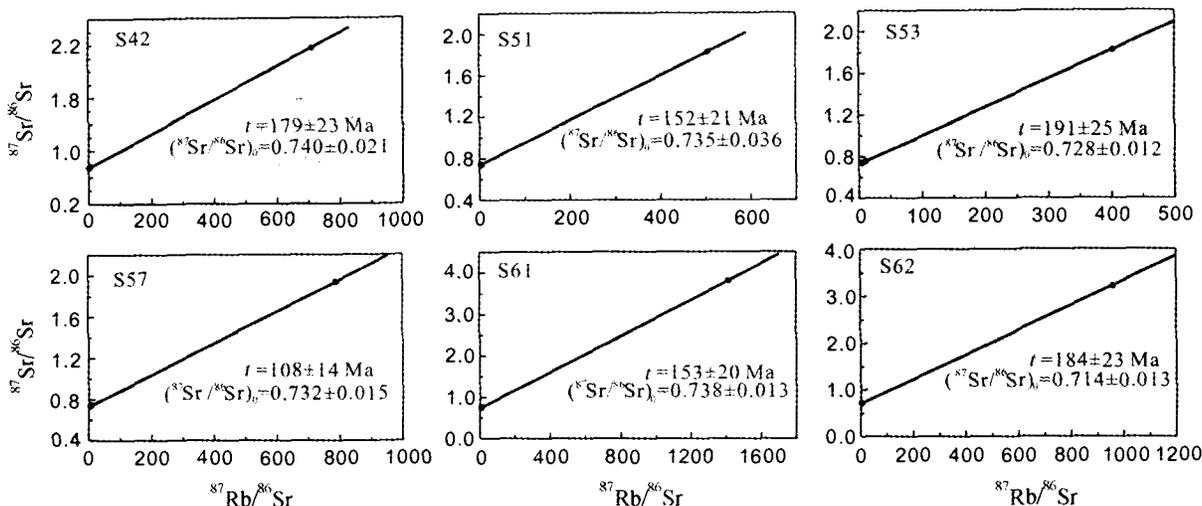


图3 Rb/Sr等时线图

Fig.3 Rb-Sr isochron diagrams for whole rock, K-feldspar and biotites

2.3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄

样品在中国科学院原子能研究所 49-2 反应堆 H8 孔道进行快中子照射,照射时间为 62h,积分子通量为 $1 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 。用于中子通量监测的标准样品为:中国标准样 ZBJ 角闪石和 ZBH-25 黑云母,法国标准样 B600 黑云母,澳大利亚标准样 77600 角闪石,国际标准样 BSP-1 角闪石,其年龄分别为: $132.8 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 和 $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$, 322 Ma , $414.5 \pm 3.7 \text{ Ma}$, $2060 \pm 8 \text{ Ma}$ 。

照射过的样品在中国科学院地质与地球物理研究所氩一氩实验室由桑海清和王英菊利用 RGA-10 质谱计进行 Ar-Ar 阶段加热实验,原始数据做了时间零点,质量歧视,分馏效应,空白本底和 K、Ca、Cl 干扰同位素及 ^{37}Ar 放射性衰变校正。实验室测定的校正因子为 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) = 294.1$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.64 \times 10^{-4}$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 3.05 \times 10^{-2}$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 6.87 \times 10^{-4}$, $(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.01$, $(^{37}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 3.81 \times 10^{-5}$, $(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) = 0.1869$, 时间的函数为 $(^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_{\text{Cl}}$, 实验采用值为 4.35×10^{-4} , ^{37}Ar 半衰期取 35.1d, ^{40}K 衰变常数为 $5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ 。详细的实验流程见桑海清等(1996)。除 S51 和 S61 因选矿原因没有做钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年外,其他样品都做了黑云母和钾长石的快中子活化 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素分析,测定结果见表 3、图 4 和图 5,表中 $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ 比值和年龄误差以 1σ 计,图中年龄以 2σ 计。

图 4 可以看出黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的坪年龄、等时线年龄基本一致,所有 6 个全岩样品中间释放区域 ^{39}Ar 析出量都高于 80%,表明样品后期没有受到明显的热扰动,也无明显的 Ar 过剩或丢失,所得坪年龄是有效的。坪年龄变化范围 107 ~ 155Ma,属于晚侏罗世—早白垩世。年龄谱在初始阶段存在或高或低的视年龄可能与 ^{39}Ar 核反冲丢失有关,也可能是矿

物颗粒表面吸附了微量空气 ^{40}Ar ,最后阶段视年龄增大说明黑云母晶格能高的位置可能残留了少量早期形成的 ^{40}Ar (桑海清等,1996),也可能是高温下系统本底成分贡献较大导致视年龄偏大,该年龄不具地质意义。等时线法得到的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值除样品 S57 外,变化范围为 293 ~ 304,与大气值 295.5 ± 5 相近,表明封闭时未捕获空气 ^{40}Ar 。样品 S57 的等时线年龄略低于坪年龄,根据其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 327.9 ± 29.28 ,高于大气值,表明坪年龄受过剩氩的影响,可能暗示该样品与其它样品非同期侵入体,其等时线年龄可以校正过剩氩的影响,因此 104Ma 代表了该样品黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的冷却年龄。

图 5 可以看出 4 块样品的钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄变化范围为 96 ~ 124Ma,与各自的等时线年龄一致,而且 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值变化范围为 293 ~ 297,与大气值相近,表明封闭时未捕获空气 ^{40}Ar 。与黑云母类似,虽然年龄谱在初始和最后阶段存在有或高或低的视年龄,但是中间释放区域 ^{39}Ar 的析出量高于 85%,表明所得坪年龄是有效的。

2.4 锆石和磷灰石裂变径迹数据

由国家地震局地质研究所万景林测定,详细的实验条件和测试结果见施小斌等(2006)及表 4。锆石径迹年龄分布范围为 51 ~ 73Ma,属于晚白垩世—古新世,该年龄远低于封闭温度相当或更低的钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,两者出现矛盾。Roger F *et al.* (2000) 在越南北部研究 Song Chay 变质穹隆体时也发现锆石的裂变径迹年龄对应的封闭温度远高于由钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱预测的温度,他们认为这种明显的不一致性可能是过剩氩对钾长石年龄谱的影响或钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、锆石裂变径迹的封闭温度的不确定性引起的。考虑到锆石裂变径迹的定年方法还不是很成熟,而且 6 块样品的锆石裂变径迹的单颗粒年龄与所有颗粒的平均年龄

表3 矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测定结果Table 3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of minerals from the Lincang Granitoid Batholith

加热阶段	加热温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$\left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{46}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{37}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{48}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$^{39}\text{Ar}_K$ ($\times 10^{-12}\text{mol}$)	$^{46}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_K$ (%)	视年龄 ($t \pm 1\sigma\text{Ma}$)
S42, 黑云母, $W=0.1022\text{g}$, $J=0.012354$									
1	400	16.616	0.0176	.35659	0.0693	7.862	11.41 ± 0.010	2.39	238.01 ± 3.53
2	500	9.4727	0.0136	.21229	0.0561	13.63	5.461 ± 0.005	4.15	117.80 ± 1.50
3	600	10.879	0.0152	.24621	0.0707	12.13	6.375 ± 0.007	3.69	136.77 ± 1.84
4	700	10.274	0.0109	.13861	0.0428	21.10	7.026 ± 0.004	6.42	150.17 ± 1.85
5	800	8.5256	0.0051	0.0867	0.0262	36.18	6.995 ± 0.002	11.0	149.54 ± 1.77
6	900	7.9347	0.0032	0.0764	0.0205	42.68	6.952 ± 0.002	12.9	148.65 ± 1.74
7	1000	7.9255	0.0031	0.0782	0.0204	43.61	6.963 ± 0.002	13.2	148.89 ± 1.74
8	1100	8.0412	0.0030	0.0792	0.0187	45.00	7.108 ± 0.002	13.6	151.85 ± 1.78
9	1220	7.6548	0.0022	0.0686	0.0174	52.42	6.979 ± 0.001	15.9	149.22 ± 1.74
10	1350	7.9432	0.0035	0.0978	0.0251	32.70	6.879 ± 0.002	9.95	147.15 ± 1.73
11	1450	8.6338	0.0054	.10195	0.0234	21.22	7.005 ± 0.002	6.45	149.75 ± 1.77
S42, 钾长石, $W=0.1011\text{g}$, $J=0.012354$									
1	400	21.213	0.0231	.35663	0.0644	8.025	14.41 ± 0.014	1.90	295.72 ± 5.16
2	500	11.923	0.0104	.31490	0.0499	13.33	8.853 ± 0.005	3.16	187.26 ± 2.38
3	600	11.552	0.0149	.34922	0.0538	13.98	7.164 ± 0.006	3.32	153.00 ± 1.97
4	700	7.8400	0.0080	.18777	0.0275	28.99	5.473 ± 0.002	6.89	118.03 ± 1.40
5	780	6.7346	.00408	.18134	0.0203	45.46	5.519 ± 0.001	10.8	119.00 ± 1.40
6	860	6.0174	0.0017	.15206	0.0138	79.79	5.486 ± 0.001	18.9	118.32 ± 1.38
7	940	6.4503	0.0030	.14180	0.0156	60.77	5.533 ± 0.001	14.4	119.30 ± 1.39
8	1020	6.1155	0.0019	.16565	0.0153	58.22	5.513 ± 0.001	13.8	118.87 ± 1.39
9	1100	6.5277	0.0027	.15834	0.0173	50.10	5.693 ± 0.001	11.9	122.64 ± 1.43
10	1220	6.8181	0.0045	.21846	0.0238	30.61	5.469 ± 0.001	7.27	117.96 ± 1.39
11	1340	7.2352	0.0058	.22617	.02284	23.66	5.493 ± 0.002	5.62	118.47 ± 1.40
12	1450	14.356	0.0179	.38150	0.0437	7.746	9.076 ± 0.007	1.84	191.73 ± 2.54
S51, 黑云母, $W=0.1016\text{g}$, $J=0.012363$									
1	400	19.283	0.0279	.27777	.12342	6.633	11.05 ± 0.016	1.62	231.19 ± 4.37
2	520	11.614	0.0251	.21916	0.0931	9.209	4.199 ± 0.009	2.24	91.32 ± 1.36
3	640	8.0851	0.0085	0.0979	0.0414	21.80	5.562 ± 0.003	5.32	119.98 ± 1.46
4	740	6.7117	0.0036	0.0482	0.0216	51.50	5.626 ± 0.001	12.5	121.31 ± 1.42
5	820	6.5771	0.0033	0.0410	0.0187	69.13	5.563 ± 0.001	16.8	120.01 ± 1.41
6	900	6.4506	0.0025	0.0325	0.0174	91.63	5.678 ± 0.001	22.3	122.41 ± 1.43
7	980	6.5601	0.0030	0.0431	0.0195	61.71	5.649 ± 0.001	15.0	121.80 ± 1.43
8	1100	7.0329	0.0043	0.0602	0.0258	42.22	5.715 ± 0.002	10.3	123.18 ± 1.45
9	1220	7.4809	0.0061	0.0789	0.0312	30.39	5.662 ± 0.002	7.42	122.07 ± 1.45
10	1340	8.9189	.01081	.12951	0.0513	17.16	5.722 ± 0.004	4.19	123.33 ± 1.54
11	1450	14.302	0.0232	.20894	0.0901	7.979	7.455 ± 0.010	1.94	159.06 ± 2.41
S53, 黑云母, $W=0.1021\text{g}$, $J=0.012363$									
1	400	16.980	0.0231	.47351	0.0973	7.027	$10.20 \pm .0124$	2.07	214.30 ± 3.50
2	520	9.5655	0.01362	.22711	0.0587	13.61	5.549 ± 0.005	4.02	119.71 ± 1.54
3	650	9.8463	0.01117	.17378	0.0544	16.60	6.547 ± 0.005	4.91	140.43 ± 1.78
4	760	8.5784	0.0049	0.0603	0.0213	47.32	7.111 ± 0.002	13.9	152.03 ± 1.79

续表 3

Continued Table 3

加热阶段	加热温度 (°C)	$\left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{46}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{37}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{48}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$^{39}\text{Ar}_k$ ($\times 10^{-12}\text{mol}$)	$^{46}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_k$ (%)	视年龄 ($t \pm 1\sigma\text{Ma}$)
5	850	8.1349	0.0031	0.0478	.01896	58.46	7.175 \pm 0.002	17.2	153.33 \pm 1.79
6	940	8.1498	0.0030	0.0384	0.0156	75.86	7.223 \pm 0.002	22.4	154.32 \pm 1.80
7	1020	8.2208	0.0036	0.0732	0.0271	37.81	7.115 \pm 0.002	11.1	152.10 \pm 1.79
8	1100	8.3783	0.0040	0.0746	0.0260	34.33	7.163 \pm 0.002	10.1	153.08 \pm 1.80
9	1220	8.8518	0.0055	0.0905	0.0319	25.05	7.196 \pm 0.003	7.40	153.77 \pm 1.83
10	1350	9.9547	0.0090	.12256	0.0444	15.38	7.275 \pm 0.004	4.54	155.38 \pm 1.92
11	1450	16.890	0.0274	.24870	0.0807	6.750	8.799 \pm .0112	1.99	186.31 \pm 2.91
S53, 钾长石, $W=0.1003\text{g}, J=0.012376$									
1	400	18.215	.02572	.22736	0.0498	7.214	10.64 \pm 0.010	1.56	223.18 \pm 3.38
2	500	12.090	0.0160	.17202	0.0467	11.55	7.351 \pm 0.005	2.50	157.10 \pm 2.00
3	620	10.742	0.0148	.13537	0.0441	15.61	6.355 \pm 0.004	3.38	136.60 \pm 1.71
4	740	7.4609	0.0062	0.0786	0.0339	29.69	5.600 \pm 0.002	6.43	120.90 \pm 1.45
5	820	7.0873	0.0048	0.0567	0.0191	47.79	5.634 \pm 0.001	10.3	121.61 \pm 1.43
6	900	6.2603	0.0022	0.0369	0.0192	83.74	5.581 \pm 0.001	18.1	120.51 \pm 1.41
7	980	6.3247	0.0021	0.0305	0.0165	108.5	5.668 \pm 0.001	23.5	122.33 \pm 1.43
8	1060	6.4224	0.0025	0.0562	0.0205	53.82	5.636 \pm 0.001	11.6	121.66 \pm 1.42
9	1150	6.6019	0.0029	0.0574	0.0186	47.79	5.720 \pm 0.001	10.3	123.40 \pm 1.44
10	1250	6.9565	0.0043	.07685	0.0242	32.01	5.654 \pm 0.002	6.93	122.03 \pm 1.44
11	1350	9.9436	0.0112	.14364	0.0412	16.47	6.613 \pm 0.004	3.56	141.93 \pm 1.74
12	1450	15.687	.02500	.26770	0.0671	7.422	8.330 \pm 0.009	1.60	177.02 \pm 2.57
S57, 黑云母, $W=0.1014\text{g}, J=0.012363$									
1	400	15.000	0.0186	.36640	0.0981	7.445	9.5104 \pm 0.011	1.88	200.55 \pm 3.13
2	520	11.415	0.0161	.22681	.07600	11.50	6.665 \pm 0.007	2.90	142.85 \pm 1.97
3	630	7.1404	0.0112	.11778	0.0498	20.64	3.8174 \pm 0.004	5.21	83.21 \pm 1.04
4	750	6.4893	0.0042	0.0632	0.0273	43.61	5.213 \pm 0.002	11.0	112.70 \pm 1.33
5	860	5.8870	0.0032	.04897	0.0207	57.53	4.912 \pm 0.001	14.5	106.37 \pm 1.25
6	960	5.4922	0.0020	0.0364	0.0173	89.54	4.8554 \pm 0.001	22.6	105.17 \pm 1.23
7	1050	5.7638	0.0027	0.0457	0.0184	66.81	4.920 \pm 0.001	16.8	106.54 \pm 1.25
8	1130	5.9740	0.0034	0.0536	0.0203	53.59	4.930 \pm 0.001	13.5	106.74 \pm 1.25
9	1230	6.3888	0.0047	0.0933	0.0255	29.23	4.9664 \pm 0.002	7.38	107.51 \pm 1.27
10	1350	8.8022	0.0133	.23011	0.0611	10.43	4.8734 \pm 0.005	2.63	105.54 \pm 1.36
11	1450	14.680	0.0255	.36992	0.0753	5.450	7.1764 \pm 0.009	1.37	153.354 \pm 2.23
S57, 钾长石, $W=0.1015\text{g}, J=0.012363$									
1	400	14.883	0.0174	.32861	0.0610	7.978	9.754 \pm 0.008	1.63	205.42 \pm 2.85
2	520	12.521	0.0170	.19651	0.0500	10.90	7.503 \pm 0.006	2.22	160.04 \pm 2.07
3	640	10.135	.01356	.14028	0.0373	17.09	6.127 \pm 0.004	3.49	131.74 \pm 1.61
4	760	5.8974	0.0051	0.0600	.01769	45.23	4.363 \pm 0.001	9.24	94.80 \pm 1.11
5	880	5.2985	0.0029	0.0550	0.0154	62.17	4.394 \pm 0.001	12.7	95.45 \pm 1.12
6	960	5.0117	0.0018	.04378	0.0111	98.59	4.431 \pm 0.000	20.1	96.22 \pm 1.13
7	1040	5.0410	0.0021	0.0415	0.0123	84.67	4.369 \pm 0.000	17.3	94.91 \pm 1.11
8	1120	5.4285	0.0032	0.0607	0.0169	56.83	4.443 \pm 0.001	11.6	96.47 \pm 1.13
9	1200	4.8581	0.0014	0.0474	.01507	65.42	4.414 \pm 0.000	13.3	95.87 \pm 1.12
10	1330	6.2132	0.0058	0.0871	0.0216	31.55	4.460 \pm 0.001	6.44	96.84 \pm 1.14

续表 3

Continued Table 3

加热阶段	加热温度 (°C)	$\left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{46}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{37}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{48}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$^{39}\text{Ar}_k$ ($\times 10^{-12}$ mol)	$^{46}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$ ($\pm 1\sigma$)	$^{39}\text{Ar}_k$ (%)	视年龄 ($t \pm 1\sigma$ Ma)
11	1450	15.126	0.0210	.26482	0.0673	8.814	8.930 \pm 0.009	1.80	188.93 \pm 2.70
S61, 黑云母, $W=0.1007\text{g}$, $J=0.012363$									
1	400	16.379	0.0163	.38777	.10245	8.488	11.56 \pm 0.012	2.99	241.17 \pm 3.91
2	520	9.2776	.01284	.23531	0.0585	14.45	5.493 \pm 0.005	5.10	118.55 \pm 1.52
3	640	10.932	0.0121	.18068	0.0482	19.02	7.333 \pm 0.005	6.71	156.57 \pm 1.97
4	760	9.4761	0.0076	.14407	.04133	24.35	7.219 \pm 0.004	8.60	154.23 \pm 1.88
5	1000	8.1673	0.0031	.07145	0.0237	58.22	7.206 \pm 0.002	20.5	153.97 \pm 1.21
6	1000	8.1673	0.0031	.07145	0.0237	58.22	7.206 \pm 0.002	20.5	153.97 \pm 1.81
7	1100	8.3055	0.0037	0.0758	.02527	50.10	7.193 \pm 0.002	17.6	153.70 \pm 1.81
8	1210	9.6428	.00816	.14800	0.0441	22.73	7.226 \pm 0.004	8.02	154.38 \pm 1.90
9	1320	10.764	0.0117	.18577	0.0576	15.77	7.293 \pm 0.006	5.56	155.75 \pm 2.00
10	1430	11.960	0.0156	.22323	0.0617	11.83	7.339 \pm 0.006	4.17	156.69 \pm 2.07
S62, 黑云母, $W=0.1016\text{g}$, $J=0.012354$									
1	400	20.173	0.0317	.32590	.10549	8.025	10.82 \pm 0.015	2.79	226.49 \pm 4.20
2	500	13.511	0.0172	.18495	0.0679	13.47	8.438 \pm 0.008	4.70	178.90 \pm 2.47
3	600	12.298	0.0172	.13418	0.0591	20.18	7.212 \pm 0.006	7.04	153.98 \pm 2.04
4	700	10.425	0.0106	.13125	0.0569	21.80	7.280 \pm 0.005	7.60	155.39 \pm 1.99
5	800	8.7765	0.0053	0.0740	0.0308	43.61	7.189 \pm 0.003	15.2	153.52 \pm 1.83
6	900	9.0140	0.0056	0.0868	0.0383	32.94	7.336 \pm 0.003	11.4	156.52 \pm 1.89
7	1000	8.3962	0.0037	0.0600	0.0183	49.18	7.261 \pm 0.002	17.1	154.99 \pm 1.81
8	1100	8.7195	0.0048	0.0719	0.0204	38.04	7.260 \pm 0.002	13.2	154.98 \pm 1.82
9	1230	9.0697	0.0062	0.0853	0.0234	29.92	7.223 \pm 0.002	10.4	154.21 \pm 1.82
10	1350	9.9330	0.0089	.11400	0.0329	20.78	7.287 \pm 0.003	7.25	155.52 \pm 1.87
11	1450	14.075	0.0160	.22051	.06541	8.652	.9.336 \pm 0.008	3.01	196.94 \pm 2.72
S62, 钾长石, $W=0.1017\text{g}$, $J=0.012367$									
1	400	22.796	0.0309	.34549	0.0760	8.999	13.70 \pm 0.017	2.60	282.444 \pm 5.44
2	500	13.869	0.0176	.23684	0.0572	13.12	8.665 \pm 0.007	3.79	183.66 \pm 2.48
3	600	12.439	0.0186	.61750	0.0655	12.45	6.987 \pm 0.007	3.60	149.52 \pm 2.02
4	700	8.1250	.00781	.29213	.02929	29.69	5.821 \pm 0.002	8.59	125.43 \pm 1.49
5	780	6.7293	0.0037	.22810	0.0327	61.70	5.613 \pm 0.002	17.8	121.09 \pm 1.44
6	860	6.6216	0.0027	.22882	0.0331	68.66	5.817 \pm 0.002	19.8	125.33 \pm 1.49
7	940	6.9696	0.0040	.26368	0.0393	45.92	5.775 \pm 0.003	13.2	124.46 \pm 1.50
8	1020	7.5609	0.0060	.33986	0.0411	38.03	5.767 \pm 0.003	11.0	124.30 \pm 1.51
9	1100	7.6190	0.0063	.36396	0.0299	29.22	5.752 \pm 0.002	8.45	123.98 \pm 1.47
10	1230	8.5581	0.0093	.51684	0.0438	19.94	5.836 \pm 0.004	5.77	125.74 \pm 1.54
11	1350	12.045	0.0159	.64861	0.0587	12.36	7.381 \pm 0.006	3.57	157.60 \pm 2.07
12	1450	18.474	0.0338	.96861	.11991	5.471	8.563 \pm 0.015	1.58	181.61 \pm 3.35

注:下角 m 的值为测量值。W 为重量, J 为照射参数。

符合的几率量度 $P\chi^2$ 皆为 0 (表 4), 因此, 在分析样品的冷却路径时锆石裂变径迹年龄仅作为参考。

磷灰石的裂变径迹数据可以提供更为丰富的低温 (低于 120°C) 信息。利用获得的磷灰石裂变径迹年龄和径迹的长度分布, 施小斌等 (2006) 对其中 5 块样品做了热史的非线性

反演。考虑到样品 53 的长度分布是基于 13 条径迹的统计结果 (其他样品都超过 50 条), 其长度分布可能并不代表真实的分布, 因此没有对其做热史的反演。反演结果揭示自喜山运动以来, 样品经历了两期冷却阶段, 图 6 给出了样品 S42 和 S62 的反演结果, 其他样品的热史形态相似。理论模型的

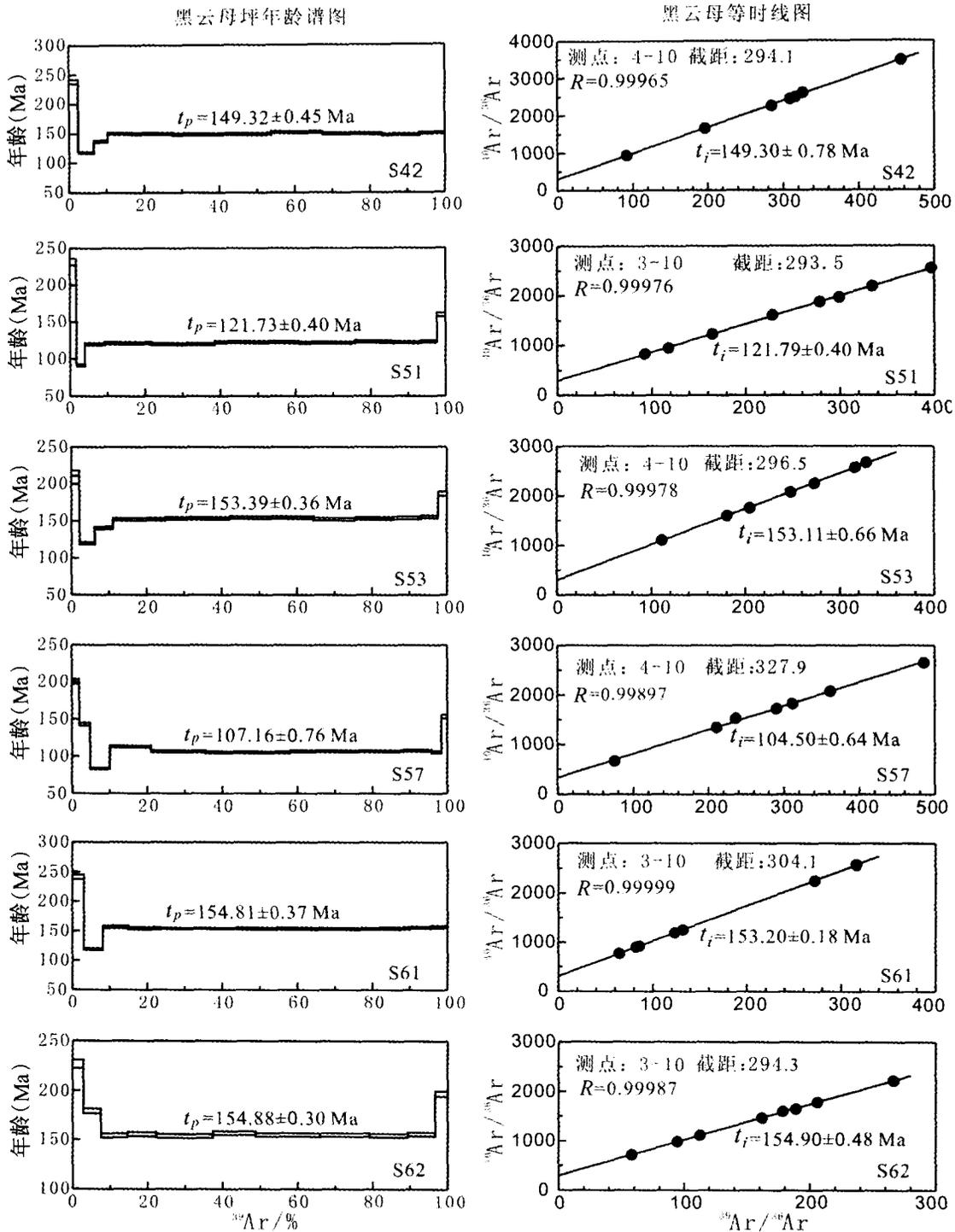


图4 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄及等时线年龄

Fig. 4 ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau and isochron ages for biotites of the samples

计算表明,温度曲线的会聚点(如图6中A和B点),代表一个可信的温度值,并暗示其后样品所处温度均低于该时刻的温度,而温度曲线出现离散则表明样品在之后的某时刻或某时间段所处温度将高过该段的温度(施小斌等,2000)。图6中C点代表该时刻的平均温度与B点相同。表5是根据反

演结果分析的结果(施小斌等,2006)。反演结果揭示样品近期经历了两期冷却速率不同的事件,晚期(B时刻以来)冷却速率更高。位于岩基南段的S62自36Ma就开始进入部分退火带,而中北段样品在26.5~21Ma才进入部分退火带(图6,表5),表明南段岩基比北段岩基更早地被抬升冷却,

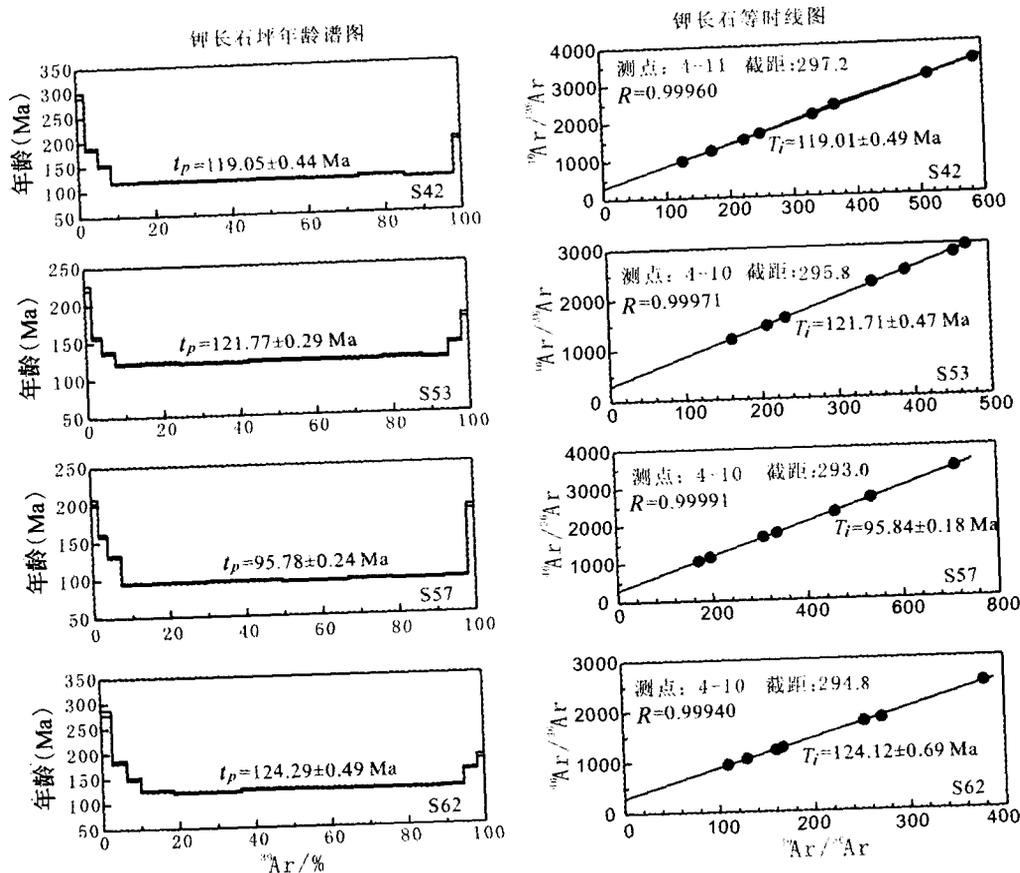


图5 钾长石 Ar-Ar 坪年龄及等时线年龄

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau and isochron ages for K-feldspars of the samples

表4 裂变径迹年龄测量结果

Table 4 Observed results of fission track ages

样号	矿物	N_c	$\rho_d(N_d)$	$\rho_s(N_s)$	$\rho_i(N_i)$	U	$P(\chi^2)$	r	径迹年龄 ($t \pm 1\sigma$ Ma)
S42	磷	30	1.108(2762)	3.433(721)	4.336(9106)	48.1	22.3	0.862	15.4 ± 1.1
S51	灰	30	1.132(2829)	1.404(205)	1.901(2776)	20.7	100	0.887	14.7 ± 1.4
S53	石	11	1.114(2781)	0.790(45)	0.993(566)	11.0	90.8	0.922	15.6 ± 2.6
S57		30	1.112(2775)	0.669(164)	0.847(2076)	9.4	100	0.965	15.5 ± 1.5
S61		30	1.123(2807)	3.839(1121)	3.591(10485)	39.3	3.3	0.963	19.9 ± 1.4
S62		30	1.127(2817)	8.029(2208)	6.151(16916)	67.1	35.9	0.958	25.9 ± 1.6
S42	锆	10	0.167(408)	94.20(4710)	5.272(2636)	387.4	0.00	0.864	51.6 ± 6.2
S51	石	10	0.166(402)	142.1(8312)	6.832(3997)	507.5	0.00	0.917	59.4 ± 7.8
S53		10	0.169(412)	155.2(8922)	7.449(4283)	543.4	0.00	0.928	62.2 ± 7.2
S57		10	0.167(406)	97.53(5169)	5.209(2761)	384.1	0.00	0.658	55.0 ± 7.0
S61		10	0.170(416)	93.74(3656)	3.569(1392)	258.5	0.00	0.841	72.7 ± 10.4
S62		10	0.169(414)	121.4(6314)	5.304(2758)	385.6	0.00	0.990	63.0 ± 7.5

注: N_c -颗粒数; ρ_d -标准诱发裂变径迹密度($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$); N_d -标准铀玻璃的诱发裂变径迹数; ρ_s -自发裂变径迹密度($\times 10^5 \text{cm}^{-2}$); N_s -自发裂变径迹总数; ρ_i -诱发裂变径迹密度($\times 10^6 \text{cm}^{-2}$); N_i -诱发裂变径迹数; 计算年龄所用的 $Zeta_{\text{SRM612}} = 352.4 \pm 29$; $P(\chi^2)$ 为 χ^2 统计, 是单颗粒年龄与所有颗粒的平均年龄符合的几率量度(%); r- N_s 与 N_i 的相关系数; U-铀浓度($\times 10^{-6}$)。

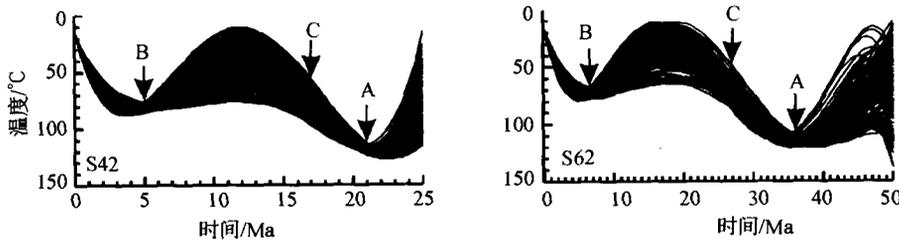


图6 样品 S42 和 S62 的磷灰石裂变径迹的反演结果。每块样品的热史分别由 200 条曲线组成。A、B、C 代表的意义见文中说明

Fig. 6 Temperature-time paths of Samples S42 and S62 inversed from apatite fission track data. Each temperature-time paths consists of 200 curves, and A, B, C are defined in the text

表5 反演结果列表,其中 A、B、C 所代表的意义见文中说明,剥蚀厚度按地温梯度为 30°C/km 计算

Table 5 Inversed results of the 5 samples, where A, B, C are defined in the text, and the erosion thickness was estimated assuming the thermal gradient is 30°C/km

样品号	S42	S51	S57	S61	S62
A 时刻 (Ma)	21	21	23.5	26	36
A 时刻温度 (°C)	120 ± 5	115 ± 5	120 ± 5	121 ± 1	115 ± 5
B 时刻 (Ma)	5	5	5.5	5	6.5
B 时刻温度 (°C)	80 ± 5	75 ± 5	80 ± 5	68 ± 2	72 ± 5
C 时刻 (Ma)	17	16	18.5	20.5	27
A—C 时段冷却速率 (°C/Ma)	10	8	8	10	5
B 以后冷却速率 (°C/Ma)	13	12	12	11	11
3Ma 以来冷却速率 (°C/Ma)	20	18	18	17	16
A 时刻以来的剥蚀厚度 (m)	3500	3300	3500	3500	3300
B 时刻以来的剥蚀厚度 (m)	2160	2000	2160	1760	1900

但是在随后的 A—C 时间段,南段岩基冷却速率明显低于中北段岩基。晚期岩基不仅冷却开始时间基本相同,都是从中新世末—上新世初开始,而且样品自 5Ma 特别是 3Ma 以来都表现为快速冷却,冷却速率虽然从南往北有轻微增加,但是基本一致,约为 16°C ~ 20°C/Ma,意味着晚期冷却是整体抬升、剥蚀的结果。

3 岩基热演化史及其构造意义

根据上述热年代学定年结果,结合表 6 所列的封闭温度以及前人在区域构造变形和盆地充填方面的研究成果,重建了各样品的热演化史(图 7a, b, c, d, e, f)。可以看出,各样品经历的热史相似,基本可以分为早期快速冷却阶段和晚期缓慢冷却阶段,这与郑永飞等(1997)对大龙山岩体的观测结果相似,不同的是,临沧岩基热演化还叠加了因构造活动引起的短周期热扰动。3 个样品的锆石 U-Pb 年龄表明它们的成岩时间为中晚三叠世,这与前人的认识一致。考虑到样品 S61 和 S62 的 Rb-Sr 和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄与这 3 个样品相仿,推测它们的成岩年龄也为中晚三叠世。后面的分析表明样品 S57 为燕山期侵入体,属于大蛇腰岩体(图 1)。由于前述原

表6 各种定年方法的封闭温度

Table 6 Closure temperatures of different dating methods

方法	封闭温度 (°C)	参考文献
锆石 U-Pb 法	~800	Roger F <i>et al.</i> (2000), Lee JKW <i>et al.</i> (1997)
黑云母 Rb-Sr 法	300 ~ 350	Roger F <i>et al.</i> (2000)
黑云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 法	320 ± 40	Donson MH (1973)
钾长石 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 法	150 ~ 200	McDougall I <i>et al.</i> (1999)
锆石裂变径迹	250 ± 50	Roger F <i>et al.</i> (2000)
磷灰石裂变径迹	0 ~ 120	施小斌等(2005)

因,锆石裂变径迹年龄在热史分析中仅做为参考。

黑云母 Rb-Sr 内部等时线年龄标准偏差较大,无法有效约束热演化史,但与其封闭温度相当的黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄与 Rb-Sr 年龄接近(如样品 S42, S51, S53, S62)或一致(如 S57, S61),表明 Rb-Sr 年龄是可靠的。中晚三叠世保山地块与坪坝-思茅地块的陆陆碰撞引起的推覆冲断作用,三叠世后期可能的拆层垮塌及因应力松弛产生的伸展裂陷作用以及三叠世末期—早侏罗世的挤压抬升(钟大赉等,1996;何科昭等,1996)等构造运动使得岩体快速抬升冷却。前人研究表明中侏罗世滇西地区处于拉张环境,发育半地堑盆地,

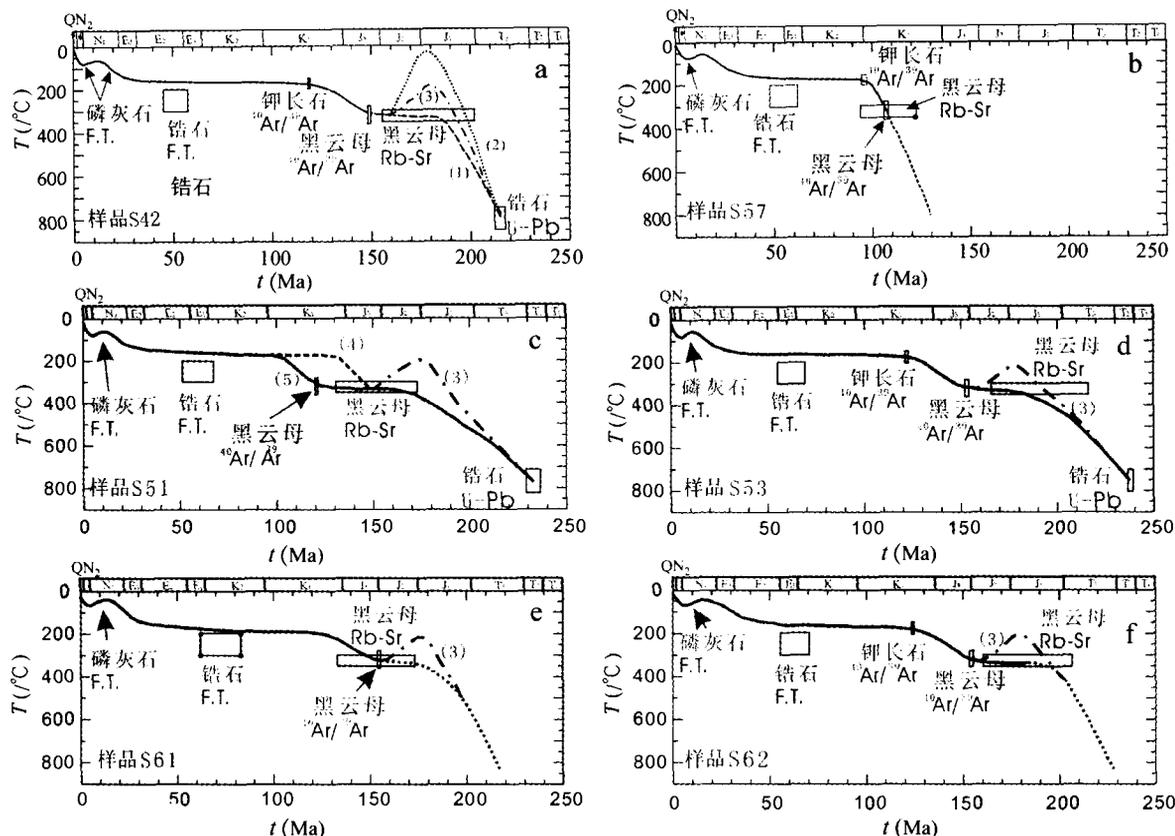


图7 样品的热史路径图中(1)、(2)、(3)和(4)代表了解冷却路径;框为代表各种测试的年龄值。

Fig. 7 Cooling histories from multi-system geochronology for the samples

中侏罗统广布于怒江以东(吴根耀,1991、2003;何科昭等,1996;陶晓凤等,2002)。在保山、临沧及兰坪-思茅盆地西部靠近澜沧江的地带,中侏罗统常直接覆于下伏各地层之上,底砾岩厚达数十米。沿澜沧江断裂东侧以近源花岗质的粗碎屑岩为主,下部厚达2000m,底部砂砾岩、砾岩达700m,上部仍以粗碎屑为主,景洪、勐海等地最厚可达3600m(何科昭等,1996)。临沧岩基的局部区域现在还上覆中侏罗统残留地层(云南省地质矿产局,1990)。有理由推测中侏罗世前后,岩基的前锋已出露地表,在拉张背景下发育了多个以岩基为基底的断陷,断陷内沉积了中侏罗统,地垒或裂谷肩则均衡挠曲抬升,遭受剥蚀成为邻近洼陷的物源区。由于岩基的前锋已出露地表,因此样品可能沿路径(1)冷却,也可能沿路径(2)冷却,或介于两者之间(如路径(3))。如果按路径(2)冷却,在中侏罗世前后抬升接近出露地表,根据黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar和Rb-Sr年龄,在晚侏罗世早期(如样品S42、S53、S61和S62),需要增温回到320℃,即黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar的封闭温度,这要求岩基区沉积巨厚的中侏罗统和上侏罗统。即使考虑到裂隙阶段的高热背景,取地温梯度为40℃/km,沉积层厚度需达到7.5km左右以满足加温的效果。介于路径(1)和路径(2)之间的热史如路径(3),要求的沉积厚度要小些。虽然我们没有办法排除这一可能性,但是黑云母

⁴⁰Ar/³⁹Ar的年龄谱图显示样品经历的是快速冷却,而不象经历过抬升、再下埋加热,而后再抬升的过程,因此我们认为路径(1)更合理些。我们承认路径(3)也是可能的冷却路径,鉴于此,图7中我们仍用点虚线给出路径(3),但需注意的是其抬升幅度是任意假定的。如果按路径(1),从有U-Pb年龄的3个样品来看,中侏罗世前的冷却速率为6℃~13℃/Ma,如果按路径(3),冷却速率将更大,但随后因为沉积埋深,温度又有所增加。

如果按路径(1),那么中侏罗世—晚侏罗世早期,样品的冷却速率得到很大的压制。裂谷阶段的高热背景以及沉积加温等提高了环境温度,从而降低了岩体的冷却速率。除样品S51和S57外,其它样品的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为149~155Ma之间。陈福坤(1990)^①、秦元季(1991)获得思茅—澜沧公路126km处糜棱岩的黑云母Rb-Sr内部等时线年龄为179Ma和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄为150Ma,他们据此推测该糜棱岩带形成于中—晚侏罗世(钟大赉等,1996),杨振德(1996)据此推测中—晚侏罗世临沧岩基经历了一期大规模的推覆运动。样品S42、S53、S61、S62位于岩体内部,并非糜

① 陈福坤. 1990. 云南滇西地区临沧花岗岩基同位素年代学研究. 中国科学院地质研究所硕士学位论文.

棱岩,却拥有相同的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,而且黑云母 Rb-Sr 年龄也与上述糜棱岩相当,表明中晚侏罗世并非是糜棱岩的形成时间。糜棱岩带可能是早期陆陆碰撞时推覆冲断形成的,当时岩体温度高于黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、黑云母 Rb-Sr 体系的封闭温度,而后抬升冷却后,岩体和糜棱岩拥有了相当的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、黑云母 Rb-Sr 年龄。

多重扩散域是钾长石的一种固有特性,封闭温度最大可以达到 350°C ,最小可以为 150°C 。这里取桑海清建议的 $150\sim 200^\circ\text{C}$ (私人通信)(McDougall I and Harrison T, 1999)。样品 S42、S53、S62 都显示从晚侏罗世(150Ma 左右)到早白垩世早期(120Ma 左右)为快速冷却阶段,平均冷却速率可以达到 $5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 。样品 S61 没有钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,但是根据黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄与上述 3 个样品相近,推测也存在这期冷却事件。这一阶段,滇西地区盆地沉积范围明显缩小,兰坪-思茅盆地晚侏罗世海水后撤,西部水体变小,部分地区露出水面,早白垩世早期,盆地大部分地区抬升为陆,广泛发育河流和冲积平原(何科昭等,1996)。临沧岩基也在这种挤压背景下抬升并遭受剥蚀,并且前期张裂阶段高热背景的散失及热松弛效应,产生了这期快速冷却事件。兰坪-思茅盆地上侏罗统坝注路组仅分布于澜沧江断裂以东,盆地边缘粒度变粗,甚至夹砾(云南省地质矿产局,1990),表明物源区位于盆地西部,很可能就是临沧岩基上覆的中侏罗统遭受剥蚀。

与其它 4 块样品不同,样品 S51 和 S57 的黑云母 Rb-Sr 年龄、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄相对较小。图 7b 显示, S57 在早白垩世晚期有一期冷却速率高达 $18^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 的快速冷却事件。遗憾的是该样品没有锆石 U-Pb 年龄。但是根据其位于大蛇腰岩体南缘(图 1),以及前人获得的大蛇腰岩体 K-Ar 年龄为 96Ma(云南省地质矿产局,1990),与样品 S57 的黑云母 Rb-Sr 年龄、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄相仿,推测样品 S57 属燕山期的大蛇腰岩体。如果确实是大蛇腰岩体,那么大蛇腰岩体的侵入时期应该更早,可能是早白垩世早期。图 7b 记录到的快速冷却事件是其本身上升侵位冷却的结果,因为除 S51 样品外,其它样品在这段时间段都表现为缓慢冷却。样品 S51 的黑云母 Rb-Sr 年龄、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄比样品 S42、S53、S61、S62 小,在 150Ma ~ 120Ma 期间没有如图 7c 路径(4)那样出现明显的冷却,可能是局部热事件影响的结果,具体原因还有待研究。考虑到该样品距离 S57 不远,很可能是受到与大蛇腰岩体同期的侵入事件的改造,因此我们推测 S51 和 S57 一样,如图 7c 路径(5)所示,在早侏罗晚期有快速冷却事件发生。

图 7a、d、e、f 表明岩基自早白垩世晚期到喜山运动之前,为缓慢冷却阶段,平均冷却速率仅为 $0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 。燕山期岩体(图 7b)自早白垩世侵入后,晚白垩世开始与岩基主体同步缓慢冷却。晚白垩世开始,局部热事件的影响已消除,样品 S51 与岩基主体同步冷却(图 7c)。这段时期,兰坪-思茅盆地的构造运动亦较为平静,扭张运动产生了一些小型的凹陷(何科昭等,1996),岩基地区可能已接近夷平,抬升冷却的

速率均很小。

印藏陆陆碰撞以来,磷灰石裂变径迹的热史反演结果显示岩基经历了两期冷却(图 6)(施小斌等,2006)。中始新世末—渐新世的喜马拉雅构造运动 1 期导致岩基大规模抬升和冷却,并最终再次出露地表。这期碰撞事件在滇西的影响巨大,导致兰坪-思茅盆地早期地层褶皱封闭,反转成山,充填了始新世宝相寺和渐新世金丝厂组磨拉石砾岩(何科昭等,1996)。临沧岩基也卷入这期逆冲推覆运动而大幅抬升冷却。位于岩基南段的 S62 先期进入磷灰石裂变径迹的部分退火带,记录了部分该阶段的抬升冷却信息(图 6),其它样品直到晚渐新世才进入部分退火带。这表明岩基南段受该期碰撞事件的影响更早,在始新世末就已抬升进入退火带,而当时中北段岩基还处于温度更高的完全退火环境。中新世期间,虽然滇西地区的构造运动总体较为平静,但是造山带的剥蚀夷平和准平原化及均衡调整使得岩基持续冷却,中新世晚期,滇西主要断裂的张性走滑导致岩基内发育内陆湖沼相含煤断陷盆地,可能是晚期岩基温度轻微增加的原因(图 6、7)。第二期冷却主要是滇西整体抬升的结果,表现为约 5Ma 以来,特别是 3Ma 以来,岩基冷却速率明显加大。

如果地温梯度不随时间变化,为 $30^\circ\text{C}/\text{km}$,自晚白垩世以来,岩基地区的总剥蚀厚度可达 5000m 左右,其中印藏碰撞引起的剥蚀就有 3500m 左右,值得提及的是剥蚀掉的物质不完全来自岩基,还包括上覆的中侏罗世沉积物质。值得提出的是,由于上述冷却史反映的岩基或样品温度变化是构造演化过程中来自深部的热流变化以及剥露隆起或沉积埋深等因素的综合结果,因此由冷却史估算剥蚀量还需要慎重,上述剥蚀量的估计只是一级近似,还需其他方法进行约束和检验。

4 结论

(1) 自结晶以来,岩基经历了较复杂的热演化,在两个基本阶段即早期快速冷却阶段和晚期缓慢冷却阶段上叠加了短周期热扰动的影 响。形成于中—晚三叠世的岩基主体,中侏罗世前以 $6^\circ\text{C}\sim 13^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 的速率快速冷却;主体前锋在中侏罗世已出露地表接受剥蚀,中侏罗世岩基内部发育多个凹陷,张裂活动及沉积的增温效应明显减缓了岩基的冷却速率;晚侏罗世—早白垩世早期,岩基主体继续以 $5^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 的速率快速冷却;早白垩世晚期到喜山运动前,为缓慢冷却阶段,平均速率仅为 $0.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$;随着晚始新世以来的印藏碰撞,岩基经历了两期冷却事件,早期冷却速率为 $5^\circ\text{C}\sim 10^\circ\text{C}/\text{Ma}$,5Ma 以来冷却速率明显增大,特别是近 3Ma 以来的冷却速率可以达到 $16\sim 20^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 。

(2) 位于岩基东侧的糜棱岩带的形成时间早于 150Ma,可能是早期陆陆碰撞造山时推覆冲断的产物。

(3) 早白垩世侵入的岩体(样品 S57),侵入后快速冷却,

晚白垩世开始与岩基主体同步冷却,局部热事件可以改变邻近岩体(如样品 S51)的冷却路径。

(4) 自晚白垩世以来,岩基地区的总剥蚀厚度可达 5000m 左右,其中印藏碰撞引起的剥蚀就有 3500m 左右。

(5) 印藏陆陆碰撞可能先影响南部岩体,使得南部样品先抬升冷却,随后这种影响才传播到岩基的中北段。

致谢 U/Pb 年龄、Rb-Sr 年龄、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别由中国科学院地质与地球物理研究所许荣华、张任祐、乔广生、储著银、裘冀、桑海清和王英菊测定,裂变径迹数据由中国地震局地质研究所万景林测定,野外工作得到周勇博士的帮助,成文过程还得到周勇博士、季建清博士的有益指导。两位审稿人提出了宝贵意见。特此致谢。

References

- Bureau of geology and mineral resources of Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Chen WJ, Li Q, Hao J, *et al.* 1999. The thermal history of Gangdisi magmatism belt and its significance. *Science in China (D)*, 29(1): 9-15 (In Chinese)
- Ding L, Zhong DL, Pan YS, *et al.* 1995. Fission-track evidences for the Neocene rapid uplift of the eastern Himalayan systaxis. *Chinese Science Bulletin*, 40(16): 1497-1500 (in Chinese)
- Dodson M H. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 40: 259-274
- He KZ, Zhao CH, He HS, *et al.* 1996. Intracontinental rift and orogeny in western Yunnan. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract)
- Kirby E, Reiners PW, Krol MA, *et al.* 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 21(1): 10. 1029/2000TC001246
- Lee JKW, Williams IS and Ellis DJ. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 390: 159-161
- Liu CS and Zhu JC. 1989. Quantitative modeling source rocks of Lincang Granite Batholith, West Yunnan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 8(1): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Maluski H, Lepvrier C, Joliver L, *et al.* 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 233-248
- McDougall I and Harrison T. 1999. *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method*. 2nd, New York, Oxford: Oxford University Press, 1-269
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M, *et al.* 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321: 449-466
- Sang HQ, Wang SS and Qiu J. 1996. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Pyroxene, Hornblende and Plagioclase in Taipingzhai Granulites in Qianxi County, Hebei Province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 390-400 (in Chinese with English abstract)
- Shi XB, Wang JY, Luo XR. 2000. Discussion on the abilities of thermal indicators in reconstructing thermal history of sedimentary basin. *Chinese J. Geophys.*, 43(3): 386-392 (in Chinese with English abstract)
- Shi XB, Qiu XR, Liu HL, *et al.* 2006. The Cenozoic cooling histories of Lincang Granitoid Batholith, Western Yunnan: evidences from fission track data. *Chinese J. Geophys.*, 49(1): 135-142 (in Chinese with English abstract)
- Tao XF, Zhu LD, Lu DZ, *et al.* 2002. The formation and evolution of the Lanping Basin in Western Yunnan. *Journal of Chendu University of Technology*, 29(5): 521-525 (in Chinese with English abstract)
- Wan JL, Li Q and Chen WJ. 1997. Fission track evidence of diachronic uplift along the Ailao Shan-Red River left lateral strike slip shear zone. *Seismology and Geology*, 19(1): 87-90 (in Chinese with English abstract)
- Wu GY. 1991. Development of Jurassic-Quaternary basins in western Yunnan, China, and Thailand: a comparative study. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 359-368 (in Chinese with English abstract)
- Wu GY. 2003. An approach to orogen-paleogeography. *Journal of Stratigraphy*, 27(2): 81-115 (in Chinese with English abstract)
- Wu ZH, Cui SQ, Wu GG, *et al.* 2000. Thermochronological analysis on the uplift process of the Yanshan Mountains. *Geological Review*, 46(1): 49-57 (in Chinese with English abstract)
- Xu RH. 1989. The single zircon U-Pb dating method. *Acta Petrologica Sinica*, 2: 88-94 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Luo CH, *et al.* 2004. Deformation age of Jurassic granites in the Dandong area, eastern China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1205-1214 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZD. 1996. Thrust-imbriate structure and nappe of Lincang granite. *Scientia Geologica Sinica*, 31(2): 130-139 (in Chinese with English abstract)
- Zheng DW, Zhang PZ, Wan JL, *et al.* 2004. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ fission track evidence of Mesozoic tectonic in northern margin of west Qinling mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 697-706 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Wei CS, Wang ZG, *et al.* 1997. An isotope study on the cooling history of the dalongshan granitic massif and its bearing on mineralizing process. *Scientia Geologica Sinica*, 32(4): 465-477 (in Chinese with English abstract)
- Zhong DL, *et al.* 1998. *Paleotethysides in West Yunnan and Sichuan, China*. Beijing: Science Press (In Chinese)

附中文参考文献

- 陈文奇, 李齐, 郝杰等. 1999. 冈底斯岩带结晶后的热演化史及其构造意义. *中国科学(D)*, 29(1): 9-15
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生等. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 40(16): 1497-1500
- 何科昭, 赵崇贺, 何浩生等. 1996. 滇西陆内裂谷与造山作用. 武汉: 中国地质大学出版社
- 刘昌实, 朱金初. 1989. 滇西临沧岩基源区物质定量模拟. *岩石矿物学杂志*, 8(1): 1-12
- 桑海清, 王松石, 裘冀. 1996. 冀东太平寨麻粒岩中的辉石、角闪石、斜长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 12(3): 390-400
- 施小斌, 汪集锡, 罗晓容. 2000. 古温标重建沉积盆地热史水平探讨. *地球物理学报*, 43(3): 386-392
- 施小斌, 丘学林, 刘海龄等. 2006. 滇西临沧花岗岩基新生代冷却的裂变径迹证据. *地球物理学报*, 49(1): 135-142
- 陶晓风, 朱利东, 刘登忠等. 2000. 滇西兰坪盆地的形成及演化. *成都理工学院学报*, 29(5): 521-525

- 万京林,李齐,陈文寄. 1997. 哀牢山-红河左旋走滑剪切带构造抬升时间序列的裂变径迹证据. 地震地质,19(1): 87-90
- 吴根耀. 1991. 中国滇西-泰国地区侏罗纪-第四纪盆地发育及其对比研究. 地质科学,4:359-368
- 吴根耀. 2003. 初论造山带古地理学. 地层学杂志,27(2):81-115
- 吴珍汉,崔盛芹,吴淦国等. 2000. 燕山山脉隆升过程的热年代学分析. 地质论评,46(1):49-57
- 许荣华. 1989. 微量及颗粒锆石 U-Pb 定年方法. 岩石学报,(2):88-94
- 杨进辉,吴福元,罗清华等. 2004. 辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约. 岩石学报,1205-1214
- 杨振德. 1996. 云南临沧花岗岩的冲断叠瓦构造与推覆构造. 地质科学,31(2):130-139
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京:地质出版社
- 郑德文,张培震,万景林等. 2004. 西秦岭北缘中生代构造活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, FT 热年代学证据. 岩石学报,20(3):697-702
- 郑永飞,魏春生,王峥嵘等. 1997. 大龙山岩体冷却史及其成矿关系的同位素研究. 地质科学,32(4):465-477
- 钟大赉等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京:科学出版社