

滇西临沧岩基源区物质定量模拟

刘昌实 朱金初

(南京大学地球科学系)

主题词: 壳源同碰撞花岗岩; Sr—Nd同位素组成; 源区物质; 混合定量模拟; 部分熔融

提 要: 在中国西南和东南亚领域内存在一条南北延伸的花岗岩岩基带, 滇西的临沧岩体(LG)和平和街岩体(PMG)是这一巨型同碰撞岩基带最北段的二个岩体, 出露面积共约11000平方公里。具壳源(S型)花岗岩许多特征。根据Sr、Nd同位素的上陆壳—下陆壳两端元混合模拟, 这两个岩体的源区岩石相当于由70—80%上陆壳物质加上20—30%的下陆壳物质构成的混合物。根据Rb、Sr、Rb/Sr等微量元素和微量元素对比值在部分熔融中的行为, 计算了这一源区物质约30—35%的部分熔融形成当时的平和街和临沧岩体的初始岩浆。

一、地质背景

在我国西南与东南亚领域内, 在东经100—120°方向上存在一条近于南北延伸的板块碰撞带。李春昱先生^[1]称之为澜沧江碰撞带。该碰撞带全长约2400km。北始自川西, 经云南下关、景洪, 入泰国中部, 再略偏东折向马来西亚中部(图1)。此碰撞带以东的地块称杨子板块, 以西称羌塘—唐古拉—保山微板块。根据已有同碰撞成因花岗岩Sr同位素计时, 显示该碰撞带相撞时间在中国西南一段为275Ma(本文), 在泰国一段为240—210Ma^[2], 在马来西亚一段为220—200Ma, 隶属于海西—印度年龄的大陆与大陆板块之间的碰撞带。王铠元从大地构造演化^[3], 彭兴阶从碰撞变质作用^[4], 李永森从古特提斯海洋的消亡作用^[5], 以及徐夕生、刘昌实从同碰撞花岗岩的成因^[6]等诸方面综合研究, 都证实了澜沧江碰撞带的存在。

沿该碰撞带延伸方向广泛分布着大致与碰撞作用同时形成的巨型的、呈线性分布的花岗岩岩基带, 是全球最闻名的海西—印支期花岗岩带之一。单个岩体出露面积达数千平方公里。在成因和物质来源上这些岩基绝大多数属于壳源岩石。其演化了的晚期晚阶段岩体通常与本区规模可观的Sn矿化在时空上联系密切。

本文论述的临沧复式岩基为这一碰撞带北段的巨型岩基之一。出露面积逾10000km²。主要为黑云母二长花岗岩, 通常具斑状结构, 侵入于晚前寒武系澜沧群的绢云母微晶片岩、绢云母石英片岩和晚古生界忙怀组安山—流纹质火山岩, 其矿物组成与含量为: 石英25%±, 斜长石30%±, 钾长石35%±, 黑云母10%±。具似斑状结构, 巨大钾长石斑晶(1—10cm)有时可占全岩体积的15%。具不均一构造, 常见微细花岗岩类包体, 形态不一, 数量不等。韧性变质现象常见, 石英波状消光、粒化, 黑云母解理揉皱, 斜长石双晶纹的挠曲在镜下屡见不鲜。

据X光粉晶测定, 临沧岩体的钾长石为正长石, Al在 $t_1(o)$ 晶位上占位率接近于0.6, 在

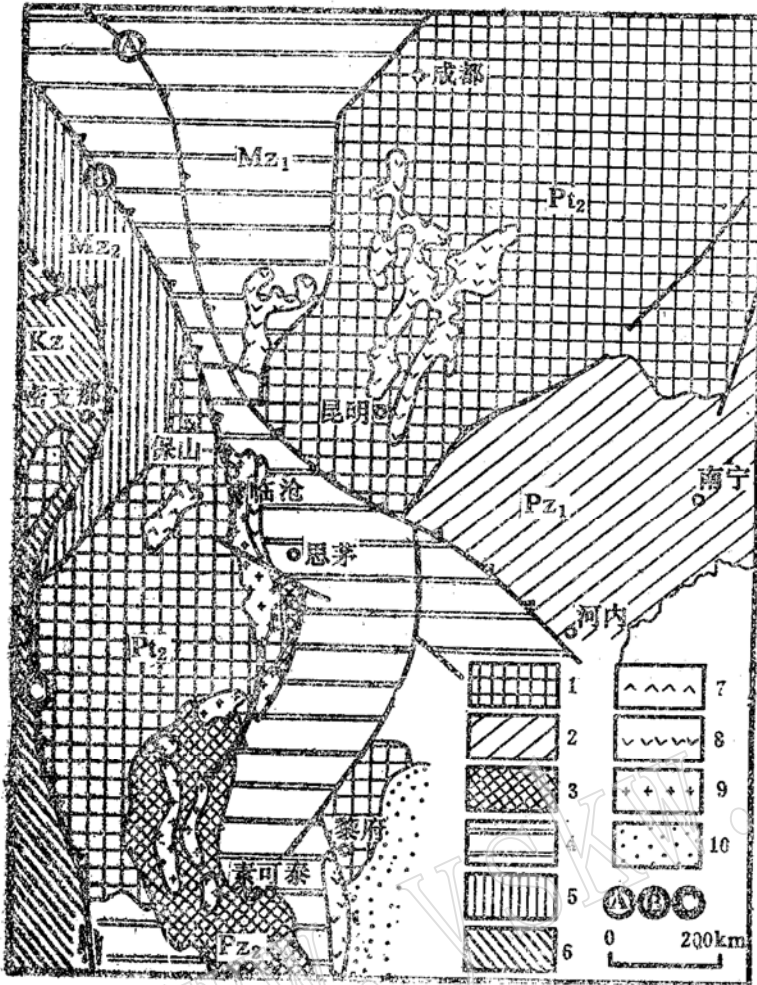


图1 滇西临沧地区地质简图(仿李春昱等, 1982)

Fig. 1 Schematic geological map of Lincang Area, West Yunnan

1—Pt₂, 晚元古基底和盖层; 2—Pz₁, 早古生界褶皱带和盖层; 3—Pz₂, 晚古生界褶皱带和盖层; 4—Mz₁, 早中生界褶皱带和盖层; 5—Mz₂, 晚中生界褶皱带和盖层; 6—Kz, 早新生界褶皱带和盖层; 7—石炭纪玄武岩; 8—二叠纪玄武岩; 9—二叠至三叠纪花岗岩; 10—新生代盆地沉积; A—哀牢山俯冲带; B—澜沧江碰撞带; C—怒江深断裂和碰撞带

$t_1(m)$ 晶位上占位率为0.23 ($N=9$, 平均值)。晶格中Al/Si部分有序。计算的单斜有序度 $\delta=0.43$ 。钾长石为异常晶胞, 其应变度 $\Delta a=0.17$ ($N=9$, 平均)。其平均成分为: Or87, Ab13。临沧岩体黑云母主要为铝铁质黑云母^①, 八面体层中含^{VI}Al的离子数达0.39—1.16, 平均为0.89 (24氧)。

平和街岩体位于临沧岩体的西北侧。沿NNW方向延伸, 出露面积达450km², 可分出东部的块状花岗岩 (PMG, 代号, 下同) 和西部的片麻状花岗岩带。前者除为中—细粒斑状结构外, 其矿物组成极类似于临沧岩体 (LG, 代号, 下同)。PMG不同于LG的最主要一点是, 其钾长石为最大微斜长石, 计算的三斜度 $\Delta=0.83-0.91$ 。Al主要分布在 $t_1(o)$ 晶位上, 平均 $t_1(o)=0.95$, $t_1(m)=0.012$, 为正常晶胞, 其应变度 Δa 平均为0.03。由此可见, 平和街岩体成岩温度要低于临沧岩体。前者形成在板块碰撞初期阶段 (Sr年龄为294Ma), 摩擦动能所提供的热要低于处在碰撞高峰阶段形成的临沧岩体 (Sr年龄为275Ma)。

在地球化学特征上, 它们具有如下共性: (1) 略贫硅, SiO₂范围为67%—70%; (2) 过铝质, ANKC=1.106 (LG), ANKC=1.082 (PMG); (3) 富钾质, Na/K (原子比)=0.95 (LG), Na/K=0.88 (PMG); (4) 低的Sm/Nb比, LG=0.20, PMG=0.17; (5) 较高的Rb/Sr比 (LG为2.03, PMG为1.35); (6) 高的Sn丰度 (LG为14.6ppm,

① 刘昌实, 1988, 华南若干I型和S型花岗岩黑云母特征对比, 南京大学学报, 地球科学版, 第二期。

PMG为13.7ppm)等。

二、以锶同位素数据进行源区物质的模拟

PMG和LG的全岩Rb—Sr等时年龄样品测定结果列于表1。对PMG的五个样品计算的年龄 $t = 294 \pm 6\text{Ma}$, $I_{Sr} = 0.7205 \pm 3$, 相关系数 $r = 0.99$ 。LG的4个样品计算的年龄 $t = 275 \pm 59\text{Ma}$, $I_{Sr} = 0.7240 \pm 19$, 相关系数 $r = 0.98$ 。PMG形成年龄早于LG约19Ma。在等时线图解上,这二个岩体的等时线近于重合,允许联合进行处理,据2个岩体9个样品计算,其年龄 $t = 292 \pm 15\text{Ma}$, $I_{Sr} = 0.7216 \pm 7$, 相关系数 $r = 0.99$ 。这有力证明这二个岩体是类似的,其源区岩石具有高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比,具S型花岗岩源区物质的特征。因为这二个岩体同属碰撞时期形成的,所以表明,羌塘—唐古拉—保山微板块和扬子板块碰撞时间大致在二叠纪。

本文推荐 $\epsilon_{Sr}^t \sim T$ 图解(图2)可作为利用Sr同位素数据进行源区岩石模拟的一般方法。图2构成步骤是:首先根据表2提供的上部陆壳、全壳和下部陆壳的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比的当前值

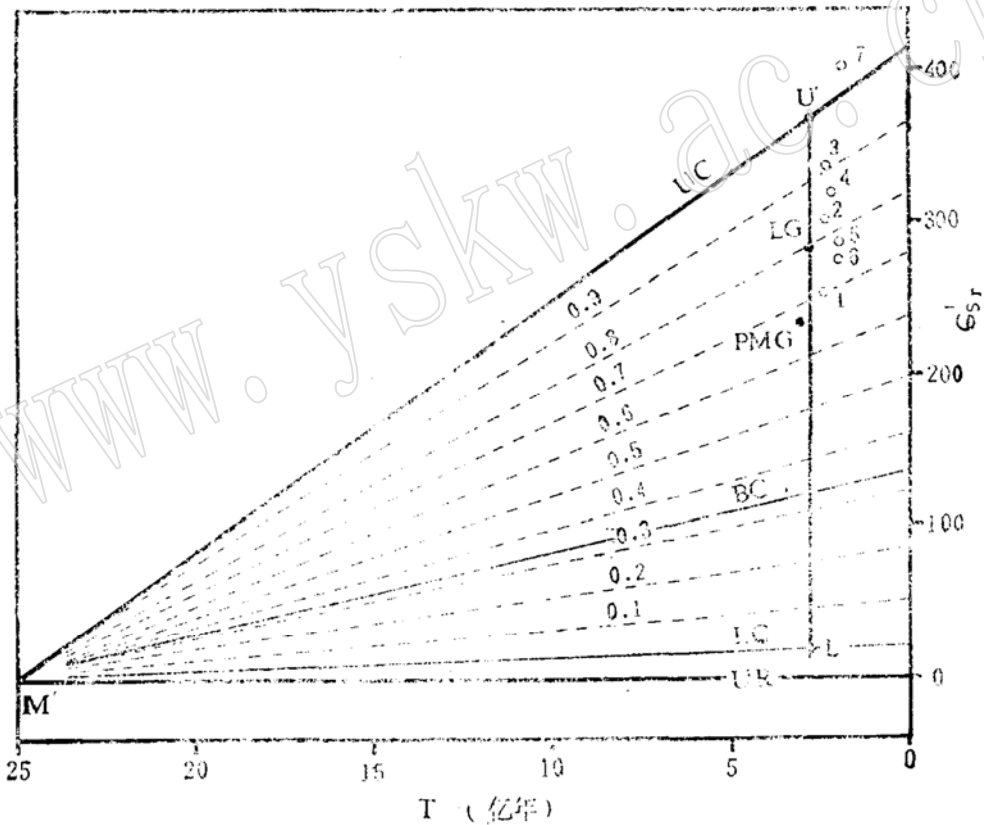


图2 $\epsilon_{Sr}^t \sim T$ 图解

Fig.2 $\epsilon_{Sr}^t \sim T$ diagram

UR—铷同位素储源; UC—上陆壳 ϵ_{Sr} 增长线; BC—全陆壳 ϵ_{Sr} 增长线; LC—下陆壳 ϵ_{Sr} 增长线; LG—临沧岩体源区岩石; PMG—平和街岩体源区岩石; 1—7—见表4说明; 虚线上数字代表上陆壳端员所占的重量分数

($t = 0$), 代入Depoalo⁽⁷⁾所提供的式(A), 计算当 $t = 0$ 时

$$\epsilon_x^t = \frac{I_x^t - I_x^t(UR)}{I_x^t(UR)} \times 10^4 \tag{A}$$

表1 临沧和和平街岩体Rb-Sr全岩等时线测定结果

Table 1 Rb-Sr isochron age dating results for Lincang and Pinghejie granitic bodies

	采样号	岩体	^{87}Rb ($\mu\text{g/g}$)	Rb (ppm)	^{86}Sr ($\mu\text{g/g}$)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	I_{Sr}	ϵ_{Sr}^t
1	Yp03	平和街花岗岩状	0.4083	125.3	0.1325	117.7	3.105	0.73374	0.7208	236
2	Yp05		0.7418	227.6	0.1947	173.0	3.807	0.73671	0.7208	236
3	Yp34		0.8965	275.1	0.08368	74.4	10.713	0.76539	0.7206	233
4	Yp04		0.5344	164.0	0.2026	180.0	2.638	0.73203	0.7209	238
5	Yp31		0.6347	194.8	0.2083	185.1	3.048	0.73235	0.7196	219
12	YL05	临沧花岗岩		230.3		139.8	4.7028	0.741878	0.7235	274
13	YL16			212.7		139.7	4.348	0.742816	0.7258	307
14	YL34			273.5		136.8	5.710	0.746104	0.7238	278
15	YLc18			200.8		172.0	3.385	0.736626	0.7234	273

表2 作为端员组分的上壳、下壳、地幔的Sr、Nd同位素参数

Table 2 Sr, Nd isotope parameters of upper crust, lower crust and mantle taken as endmember components of mixing

	上部地壳	下部地壳	地幔	UR	CHUR	全壳
Nd(ppm)	31 ^{*1}	40 ^{*1}	18 ^{*1}			
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512120 ^{*2}	0.510710 ^{*1}	0.513000 ^{*1}		0.512638 ^{*1}	
Sm	6.2 ^{*1}	3.0 ^{*1}	5.7			
Sm/Nd	0.200	0.075	0.316		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 0.1967	
Sr	350 ^{*1}	425 ^{*1}	380 ^{*1}			
Rb	110 ^{*1}	20 ^{*1}	9.5			
Rb/Sr	0.314	0.047	0.025	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 0.087		
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.7338 ^{*4}	0.7059 ^{*4}	0.7036 ^{*1}	0.7045		

1—摘自Faure, 1986^(); *2—摘自Zarfman, 1984; *3—摘自Taylor, 1985^(*); *4—用Rb/Sr值按Faure^(*)的铷增长方程计算的。

上部陆壳、全壳和下部陆壳的 ϵ_{Sr}^t 值。得 $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{UC}) = 416$, $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{BC}) = 135$ 和 $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{LC}) = 20$ 。将上述三个值在图2中的相应点分别和M'点($t = 2500\text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Sr}}^t = 0$)连接(设地壳物质在25亿年前由地幔物质派生的),便获得分别代表上壳、全壳、下壳的 ϵ_{Sr}^t 增长线,以UC、BC、LC表示之。这样图2就具有对花岗岩类进行成因判别之功能:①若某岩体的投影点落在UR(铷同位素储源)线之下,其 $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{R}) \leq 0$,则为幔源花岗岩,如浙江西裘幔源型石英闪长岩,其 $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{R})$ 平均为-14($t = 852\text{Ma}$)。②若岩体的投影点落在BC线和UR线之间,则视为幔-壳混源型花岗岩,可进一步计算地幔物质对地壳物质的比例。华南I型花岗岩多属这种类型。③岩体投影点落在BC线上方,显然为壳源型花岗岩,华南S型花岗岩多属此类型。按(A)式,当 $t = 275\text{Ma}$ 时,计算的临沧岩体 $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{R}) = 281.76$ 。当 $t = 294\text{Ma}$ 时,计算的平和街岩体 $\epsilon_{\text{Sr}}^t(\text{R}) = 232.39$ 。它们在图2中的投影均位于BC线上方。显然是完全由壳源物质派生的,没有新的地幔物质直接参与。

对完全壳源花岗岩本文按Faure^(*)的二元铷混合模型,把这类花岗岩铷同位素组成看

成是由上部地壳(A端员)和下部地壳(B端员)的锶同位素成分按不同比例构成的混合物。用表2提供的参数,代入福尔的二元锶混合方程(B)式,可算出 $t=0$ 时A端员占不同重量分数情况下,

$$\epsilon_{\text{Sr}(R)}^t = \frac{\epsilon_{\text{Sr}(A)}^t \cdot X_{(A)} \cdot f_{(A)} + \epsilon_{\text{Sr}(B)}^t \cdot X_{(B)} \cdot (1 - f_{(A)})}{X_{(A)} \cdot f_{(A)} + X_{(B)} \cdot (1 - f_{(A)})} \quad (\text{B})$$

一套混合物的 $\epsilon_{\text{Sr}}^0(R)$ 值并列于表3。式(B)中X代表各端员中Sr丰度(表2)。将表3中

表3 上壳(A)和下壳(B)端员组成混合物的 $\epsilon_{\text{Sr}}^0(R)$ 值

Table 3 $\epsilon_{\text{Sr}}^0(R)$ values of a series of mixtures consisting of upper crust(A) and lower crust(B) endmembers

f_A	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ϵ_{Sr}^0	53	87	123	160	198	238	280	323	368

$\epsilon_{\text{Sr}}^0(R)$ 在图2的相应点与M'相连,构成不同 f_A 值的等值线。这样在图2上就可以估算由二元混合所形成的源区岩石中上壳锶和下壳锶所占的比例。如临沧岩体的源区岩石(LG点)约为由80%的上壳锶和20%的下壳锶所组成的混合物。而平和街岩体(PMG)的源区岩石约为由66%的上壳锶和34%下壳锶所组成的混合物。澜沧江碰撞带泰国境内的里县(Li)、斑洪(Ban Hong)、罗勇邦拉蒙(Rayong-Bang, Lamung)、达府(Tak)、坤丹(Khuntan)、胡布加本(Hub Kapong)、沙蒙(Samoeng)等岩体^[2],在成因上都属于这一碰撞带上的同碰撞型花岗岩,它们的源区岩石都具有极为相似的锶同位素组成(表4)。在图2中的投影点亦落在BC线上方,大致由70—100%的上壳锶和0—30%下壳锶所组成的混合物,与本文的临沧和平和街岩体极为相似。

表4 澜沧江碰撞带主要花岗岩岩基源区物质的组成

Table 4 Components of magma source materials for granitic batholiths in Lancangjiang River continental-collision zone

岩体名称	I_{Sr}^t	t	$\epsilon_{\text{Sr}(R)}^t$	源区物质		图2中点号	文献
				f_A	f_B		
中国西南临沧岩体	0.7240	275	281	0.78	0.22	LG	本文
中国西南平和街岩体	0.7205	294	232	0.66	0.34	PMG	本文
泰国里县岩体	0.7220	244	252	0.70	0.30	1	[2]
泰国斑洪岩体	0.7253	242	299	0.82	0.18	2	[2]
泰国Fang-Mai Suai	0.7280	240	337	0.91	0.09	3	[2]
泰国罗勇邦拉蒙岩体	0.7265	220	316	0.85	0.15	4	[2]
泰国坤丹岩体	0.7244	212	286	0.77	0.23	5	[2]
泰国胡布加本岩体	0.7237	210	276	0.75	0.25	6	[2]
泰国沙蒙岩体	0.7328	204	405	1.05	0.00	7	[2]

在数值上要精确计算 f_A 值,须用由(B)式经移项、整理后获得的(C)式。现以临沧岩体为

$$f_{(A)} = \frac{\epsilon_{x(B)}^t \cdot X_{(B)} - \epsilon_{x(B)}^i \cdot X_{(B)}}{\epsilon_{x(R)}^i \cdot X_{(A)} - \epsilon_{x(R)}^i \cdot X_{(B)} + \epsilon_{x(B)}^i \cdot X_{(B)} - \epsilon_{x(A)}^i \cdot X_{(A)}} \quad (C)$$

例说明计算步骤如下：首先计算 $t=275\text{Ma}$ 时刻UR的 I_{Sr} 值（0.7041）。用表2给出的上壳、下壳端员的 I_{Sr}^i 值，以公式（D）计算在 t 时刻的 I_{Sr}^t 值

$$I_{\text{Sr}}^t = I_{\text{Sr}}^i - (\text{Rb/Sr}) \cdot 2.8936 \cdot (e^{1.42 \cdot 10^{-8} \cdot 275} - 1) \quad (D)$$

并列于表5第1行内。以 I_{Sr}^t 、 $I_{\text{Sr}}^i(\text{UR})$ 值代入（A）式，计算上壳、下壳端员在 t 时刻的 ϵ_{Sr}^t 值（见表5第3行），最后用端员的 ϵ_{Sr}^t 和临沧岩体源区岩石的 $\epsilon_{\text{Sr}}^i(\text{R})$ 值以及表2的端员Sr丰度分别代入（C）式的相应位置上，求得临沧岩体源区岩石中上壳端员所占重量分数 $f_A = 0.7821$ ，则 $f_B = 0.2179$ 。

表5 上壳、下壳、地幔和临沧岩体源区岩石Sr、Nd同位素组成($t=275\text{Ma}$)

Table 5 Sr and Nd isotopic compositions of upper crust, lower crust, mantle and magma source rocks for Lincang granitic body ($t=275\text{Ma}$)

	UR或CHUR	地 幔 M	上 壳 UC	下 壳 LC	临沧岩体源区 (R)
I_{Sr}^t	0.7041	0.7033	0.7303	0.7053	0.7240
I_{Nd}^t	0.512284	0.512646	0.511896	0.510626	0.511636
ϵ_{Sr}^t	0	-11.68	371.19	17.37	281.75
ϵ_{Nd}^t	0	7.06	-7.56	-32.36	-12.36

三、以钆同位素数据进行源区物质的模拟

对临沧花岗岩YL07样品作了Nd同位素组成测定，结果是： $\text{Sm} = 8.03\text{ppm}$ ， $\text{Nd} = 39.37\text{ppm}$ ， $\text{Sm/Nd} = 0.20$ ， $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.12343$ ， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511859$ 。用 $t=275\text{Ma}$ 计算的 $I_{\text{Nd}}(\text{R}) = 0.511637$ ， $\epsilon_{\text{Nd}}^i(\text{R}) = -12.60$ 。根据表2给的参数，按式（E）计算上壳、下壳、地幔各个端员

$$I_{\text{Nd}}^t = I_{\text{Nd}}^i - (\text{Sm/Nd}) \cdot K \cdot (e^{6.54 \cdot 10^{-8} \cdot 275} - 1) \quad (E)$$

的 I_{Nd}^t 值列于表5第2行。式（E）中 K 为转换系数，等于0.6215。因为 $I_{\text{Nd}}^i(\text{CHUR}) = 0.512284$ ，故将表5各端员的 I_{Nd}^i 值和 $I_{\text{Nd}}^i(\text{CHUR})$ 值分别代入（A）式，计算各端员在 t 时刻的 ϵ_{Nd}^t 值，列于表5第4行内。为了以上壳和下壳钆组成作为端员组分，取表5第4行中上壳、下壳的 ϵ_{Nd}^t 值和表2中上壳、下壳的Nd丰度代入（C）式，计算源区岩石中上壳钆所占的重量分数 f_A 为0.8341。该值与用Sr同位素据计算的 f_A 值（0.7821）极为接近，相差仅0.05重量分数。Nd，Sr同位素数据模拟的临沧岩体源区岩石的特征是十分吻合的。两者都具有相同的可信度。故下文源区岩石化学成分定量模拟时，我们取平均 $f_A = 0.8081$ 进行计算。

$\epsilon_{\text{Nd}}^t \sim \epsilon_{\text{Sr}}^t$ 相关图解是将Sr、Nd同位素联合起来进行研究的一个极好的方法（图3）。图3中我们取三个端员组分（M为地幔；UC为上壳；LC为下壳）。它们的Sr、Nd同位素参数见表2。计算出 $t (=275\text{Ma})$ 时刻三个端员组分的 I_{Sr}^t 、 I_{Nd}^t 、 ϵ_{Sr}^t 、 ϵ_{Nd}^t 值见表5，选择表5中合适的值和表2中Nd或Sr的丰度代入（B）式分别计算地幔—上壳混合，地幔—

下壳混合,上壳一下壳混合时,当令 $f_A = 0.1, 0.2 \dots, 0.9$ 时,混合物的 $\epsilon^t(R)$ 值列于表6

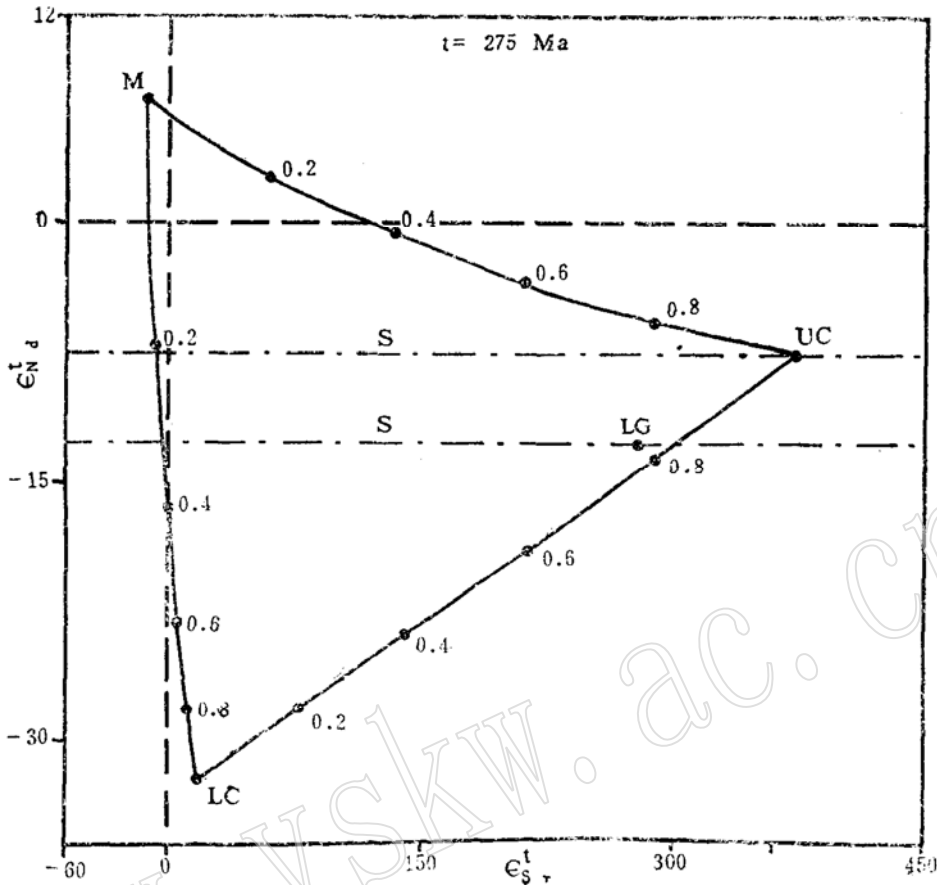


图 3 $\epsilon_{Sr}^t - \epsilon_{Nd}^t$ 图解

Fig. 3 $\epsilon_{Sr}^t - \epsilon_{Nd}^t$ Diagram

M—地幔端员; UC—上壳端员; LC—下壳端员; MUC—地幔和上壳混合曲线; MLC—地幔和下壳混合曲线;

LCUC—上壳和下壳混合曲线; LG—临沧岩体源区岩石; S, S'—华南前寒武纪沉积变质岩的 ϵ_{Nd}^t 值范围

表 6 地幔-上壳、地幔-下壳、上壳-下壳端员混合时, A 端员占不同重量分数下的 ϵ^t 值

Table 6 ϵ^t values of mixtures for binary mixing of mantle-upper crust, mantle-lower crust and upper crust-lower crust

f_A	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
地幔(B) -上壳 (A)混合	ϵ_{Sr}^t	-11.68	23.86	59.98	96.68	133.98	171.89	210.43	249.61	289.46	329.98	371.20
	ϵ_{Nd}^t	7.06	4.71	2.66	0.85	-0.76	-2.19	-3.48	-4.65	-5.71	-6.68	-7.57
地幔(B) -下壳 (A)混合	ϵ_{Sr}^t	-11.68	-8.47	-5.33	-2.27	0.73	3.66	6.52	9.32	12.06	14.75	17.37
	ϵ_{Nd}^t	7.06	-0.74	-7.02	-12.17	-16.47	-20.13	-23.36	-25.99	-28.37	-30.48	-32.36
下壳(B) -上壳 (A)混合	ϵ_{Sr}^t	17.37	47.03	77.78	109.67	142.78	177.16	212.91	250.09	288.80	329.13	371.20
	ϵ_{Nd}^t	-32.36	-30.40	-28.34	-26.18	-23.92	-21.54	-19.03	-16.40	-13.62	-11.68	-7.57

并标绘于图3中。至此,我们可获得MUC曲线(代表地幔和上壳物质混合);MLC曲线(代表地幔和下壳物质混合);LCUC曲线(代表上壳和下壳的混合)。临沧岩体源区岩石 $\epsilon_{Sr}^t = 281$, $\epsilon_{Nd}^t = -12.60$,其投影点落在LCUC曲线附近,在 $f_{uc} = 0.8$, $f_{lc} = 0.2$ 位置上,远离MUC和MLC曲线。表明临沧岩体源区岩石不可能有大量新地幔物质的加入。它只能是由上壳(约80%)和下壳(约20%)物质组成的混合物。另一方面,在Nd同位素参数特征上临沧岩体源区岩石与已有的但为数有限的华南前寒武纪沉积变质岩极为接近。如当 $t = 275\text{Ma}$ 时,浙江陈蔡群 $\epsilon_{Nd}^t = -5.01$ ①,广西板溪群 $\epsilon_{Nd}^t = -8.13$ ②,广西四堡群 $\epsilon_{Nd}^t = 12.59$ ③。这进一步表明临沧岩体源区岩石主要是沉积变质岩。这与其具有S型花岗岩地球化学特征相吻合。

四、源区岩石成分和源区岩石部分熔融的模拟

根据混合原理⁽⁹⁾,在由上壳(A)和下壳(B)端员以某一比例组成的混合物中,任意一个元素在这种混合物中浓度可以(F)式表示。式(F)中 f_A 即为上述由Sr、Nd同位素数据模拟获得的值($f_A = 0.8081$)。用Taylor⁽⁹⁾给出的上壳、下壳化

$$X_R = X_A f_A + X_B (1 - f_A) \quad (F)$$

学成分平均值分别逐次代入式(F)中的 X_A 、 X_B ,取得的临沧岩体源区岩石平均化学成分列于表7。把临沧岩体平均化学成分看作是在 t 时刻由这一源区岩石部分熔融形成的初始岩浆列于表7。两者对比后发现,它们的差别是很大的。特别在Rb、Sr、Rb/Sr、K/Rb比方面。如临沧岩体初始岩浆的 $Sr = 147\text{ppm}$, $Rb = 299$, $Rb/Sr = 2.034$,而源区岩石的 $Sr =$

表7 模拟的临沧岩体源区岩石和临沧岩体初始岩浆平均化学成分和参数

Table 7 Chemical compositions and geochemical parameters of magma source materials and of initial magma for Lincang granitic body

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
临沧岩体源区岩石	63.70	0.66	16.58	2.20	3.16	0.00	2.65	4.65	3.72
临沧岩体初始岩浆	68.15	0.66	14.18	0.43	3.83	0.06	1.94	2.51	2.44

续表

	K ₂ O	P ₂ O ₅	Rb	Sr	Rb/Sr	Sm	Nd	Sm/Nd	K/Rb
临沧岩体源区岩石	2.78		92	364	0.254	5.58	32.72	0.170	248
临沧岩体初始岩浆	3.92	0.21	299	147	2.034	8.03	39.37	0.204	108

364ppm, $Rb = 147$, $Rb/Sr = 0.254$ 。Rb/Sr之间两者相差几乎达一个数量级。所以不可能是模拟的源区岩石完全熔融产生临沧岩体初始岩浆。其间必须经历一次选择性熔融,导致出

①②③ 徐克勤、朱金初、刘昌实、沈渭洲、徐士进, 1988, 华南花岗岩类成因系列和物质来源, 待刊。

溶岩浆中Sr丰度降低, Rb丰度增高。下面以Rb、Sr、K、Rb/Sr、K/Rb为例, 进行部分熔融百分数(F)的计算。

据Hanson^[10]给出的部分熔融方程经移项、整理后得方程(G)和(H)。(G)式适用于单元素,

$$F_{(x)} = \frac{(C_{O(x)}/C_{L(x)}) - D_{(x)}}{1 - P_{(x)}} \quad (G)$$

$$F_{(x/y)} = \frac{C_{L(x/y)} \cdot D_{(x)} - C_{O(x/y)} \cdot D_{(y)}}{C_{L(x/y)} \cdot D_{(x)} - C_{L(x/y)} \cdot D_{(y)} - C_{O(x/y)} \cdot D_{(y)} + C_{O(x/y)}} \quad (H)$$

(H)式适用于元素对之比值。其中X为分子元素, Y为分母元素。两式中D为源区岩石某元素的总分配系数, $D = \sum_i^n X^i Kd^i$, 其中 x^i 为某矿物所占的重量分数, n为矿物相数目, Kd为元素的分配系数, 由表8给出; (G)式中P为出熔熔体中某元素总分配系数, $P = \sum_i^n P^i Kd^i$, 其中 P^i 为由溶体化学成分进行标准矿物计算而获得潜在矿物的重量分数; F为熔体重量分数。

表 8 中酸性岩石主要造岩矿物元素的Kd值(Hanson, 1978)

Table 8 The Kd values for common rock-forming minerals from acidic-intermediate rocks (Hanson, 1978)

元素 \ 矿物	紫苏辉石 Hy	单斜辉石 Di	角闪石 Hb	黑云母 Bi	钾长石 Kf	斜长石 Pl
K	0.0023	0.037	0.081	5.63	1.46	0.10
Rb	0.0027	0.032	0.014	3.26	0.659	0.041
Sr	0.0085	0.516	0.22	0.12	3.87	4.4

用表7数据, 以CIPW标准矿物计算方法, 获得的源区岩石的矿物组合为 $Hy_{0.0841} Di_{0.0224} Kf_{0.1644} Pl_{0.5180} Q_{0.1677}$ (相当于石英闪长岩成分)。初始岩浆潜在矿物组合为 $Hb_{0.1052} Kf_{0.2316} Pl_{0.3173} Q_{0.2809}$ (成分上相当于二长花岗岩)。至此, 可利用表8中Kd值, 对Rb、Sr、K、Rb/Sr、K/Rb等计算其P、D和F值, 列于表9中, 表9中F(Rb)、F(Sr)、F(Rb/Sr)的值十分接近, 表明源区岩石的30—34%的部分熔融形成临沧岩体初始岩浆(图4)。但对K、K/Rb的模拟, 取得的F(K)值偏大(0.6702), 而F(K/Rb)值偏小(0.0830)。这

表 9 临沧岩体源区岩石(D)和初始岩浆(P)元素分配系数和熔体重量分数

Table 9 Element distribution coefficients of magma source rocks(D) and initial magma(P) for Lincang granitic body, and weight fractions of melts(F)

元素	P	D	C _o	C _L	F
Rb	0.1671	0.1305	92	299	0.3208
Sr	2.3153	2.9275	364	147	0.3430
K	0.3853	0.2977	2.31%	3.25%	0.6720
Rb/Sr	D_x 0.1305	D_y 2.9275	0.254	2.034	0.2935
K/Rb	0.2977	0.1305	248	108	0.0830

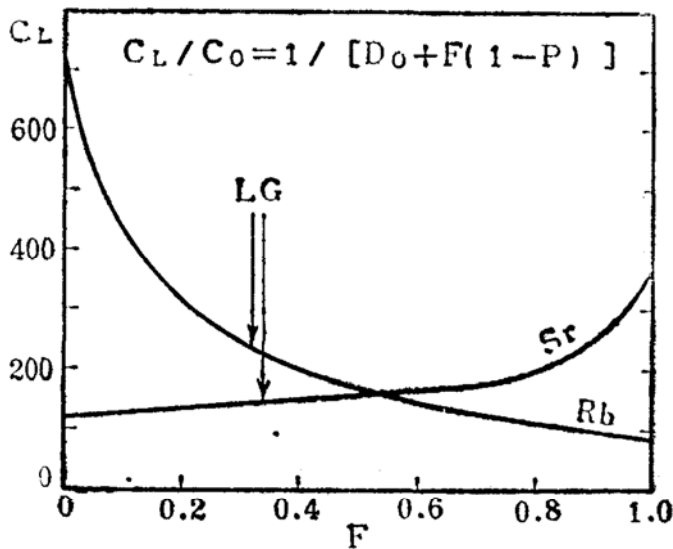


图4 临沧岩体源区岩石熔融时熔体的Rb、Sr浓度

Fig. 4 Rb, Sr abundances in melts during partial melting of magma source rocks for Lincang granitic body

F—熔体的重量分数

是可以预料的。因为在花岗质岩石中K可组成二种不同矿物（黑云母和钾长石），所以在标准矿物计算时选取含钾长石抑或选取含黑云母的矿物组合，对 $F(K)$ 和 $F(K/Rb)$ 的计算影响极大。本文是采用含钾长石组合计算的。众所周知，相同源区岩石化学成分，在不同P、T、和变质强度下可以有不尽相同的矿物组合。因此寻找一种数学模式，反演源区岩石矿物组合，使这种矿物组合对所有主元素、微量元素F值都平稳在某一数值区间内，这是定量模拟领域内尚待解决的一个重要问题。

有意义的是对平和街块状花岗岩进行定量模拟，所获得结果非常类似于临沧岩体。模拟的源区岩石组成相当于66%上壳加上34%下壳物质构成的混合物。这一源区岩石对于Rb元素来说是35%部分熔融，对于Sr元素来说是30%部分熔融形成平和街块状花岗岩的初始岩浆。平和街岩体与临沧岩体模拟的数据如此相似，表明它们确系具有近于相同的源区的岩石，是在相似的地质事件、地质作用下形成的。

五、小 结

1. 滇西平和街块状花岗岩和临沧花岗岩呈线状分布，隶属于海西—印支期大陆—大陆之间碰撞的同碰撞型花岗岩。
2. 同碰撞型花岗岩类在矿物特征、岩石化学、地球化学、Sr、Nd同位素特征上为典型的壳源花岗岩（或S型花岗岩）。
3. Sr、Nd同位素定量模拟计算的临沧和平和街岩体源区岩石组成相当于由70—80%的上壳物质和20—30%的下壳物质构成的混合物。没有显著新的地幔物质直接加入。
4. 这种源区岩石中约30—35%的部分熔融形成临沧和平和街岩体的初始岩浆。
5. 定量模拟计算对探讨花岗质岩浆源区物质的组成及其相应的矿物组合，认识岩浆形成时的地质作用都具有某种实际意义，使恢复过去地质历史中发生的地质事件成为可能。

参 考 文 献

- [1] 李春昱、王荃、刘雪亚、汤耀庆，1982，亚洲大地构造图（1/8000000）说明书，地图出版社，11—15。
- [2] Beckinsale, R. D., 1979, Granite magmatism in the tin belt of southeast Asia, in: M. P. Atherton and

J. Tarney (editors), *Origin of granite batholiths*, Shiva Publication Limited, 34—44.

〔3〕 王铠元、孙克祥、卢瑞甫, 1983, 滇西地区大地构造演化, 青藏高原地质文集, 第12集, 地质出版社, 187—197。

〔4〕 彭兴阶、罗万林, 1983, 澜沧江南段双变质带的初步确定, 青藏高原地质文集, 第15集, 地质出版社, 21—30。

〔5〕 李永森, 1984, 中国西南三江特提斯洋的演化和成矿作用, 青藏高原地质文集, 第15集, 地质出版社, 173—181。

〔6〕 徐夕生、蔡德坤、李金初、刘昌实, 1987, 滇西澜沧江碰撞带海西—印支期花岗岩类的特征和成因, 大地构造与成矿学, 11卷, 3期, 247—258。

〔7〕 Depaolo, D. J. and Wasserburg, G. J., 1976, Nd isotopic variation and petrogenetic models, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 3, 249—252.

〔8〕 Faure, G., 1986, *Principles of isotope geology*, John Willey and Sons, 141—249.

〔9〕 Taylor, S. T. and McLennan, S. M., 1985, *The continental crust: its composition and evolution*, Blackwell Scientific Publications, 57—95.

〔10〕 Hanson, G. N., 1978, The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 38, 28—43.

Quantitative Modelling Source Rocks of Lincang Granite Batholith, West Yunnan

Liu Changshi and Zhu Jinchu

(Department of Earth Sciences, Nanjing University)

Key words: continental crust-derived syncollision granite; Sr-Nd isotope composition; source materials; quantitative modelling of mixing; partial melting

Abstract

In the territory of SW China and SE Asia, between 100–120° east longitude, there is a NS trending syncollision type granite belt. At the northern end this granite belt begins with Lincang granite body (LG) and Pinghejie granite body (PG), W Yunnan. It runs southwards to join the medial granite zone of Thailand and the western granite zone of Malaysia. These two granite bodies with total exposure of 11000 km² have typical features of continental crust-derived origin. The main characteristics are: (1) Peraluminous, with ANKC values greater than 1.00 (1.082 for PG and 1.106 for LG); (2) Rich in potash relative to sodium, with Na/K ratios less than 1.00 (0.88 for PG and 0.95 for LG); (3) Relatively lower in Sm/Nd ratios (0.17 for PG and 0.20 for LG); (4) Relatively higher in Rb/Sr ratios (1.35 for PG and 2.03 for LG); (5) Enriched in Sn (13.7 ppm for PG and 14.6 ppm for LG); (6) Higher in initial Sr ratios (0.7205 for PG

and 0.7340 for LG); (7) Negative ϵ_{Nd}^t values (-12.6 for LG) etc.

The source materials for these two granite bodies are considered to be a mixture of about 70-80% upper continental crust and 20-30% lower continental crust materials by modelling using mixing two different Sr and Nd isotope isotope compositions proposed by Faure (1986). The magma for LG and PG was generated from 30-35% partial melting of this source material based on the partial melting equation of Rb, Sr, Rb/Sr proposed by Shaw.

www.yskw.ac.cn