

文章编号: 1000- 6524 (2002) 04- 0421- 08

## 河北平山小觉地区阜平岩群浅粒岩 深熔作用的地球化学研究

万渝生<sup>1, 2</sup>, 杨崇辉<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 北京离子探针中心, 北京 100037)

**摘要:** 新太古代阜平岩群浅粒岩遭受深熔作用改造形成一些不同规模和形状的浅色体。与熔融母岩相比, 其稀土元素和高场强元素含量相对较低, 但大多数情况下具有相似的元素分布模式。然而, 深熔作用刚开始时形成的浅色体, 其元素含量、分布模式与熔融母岩完全不同, Nd 同位素组成存在较大差别。随着深熔作用的进行, 两者 Nd 同位素组成的差异越来越小, 最后几乎完全消失。残余相副矿物, 特别是锆石和磷灰石, 对深熔浅色体的元素、Nd 同位素组成的变化起了重要的作用。

**关键词:** 深熔作用; 地球化学; Nd 同位素; 浅粒岩; 阜平岩群; 河北

中图分类号: P588. 34<sup>+</sup> 6

文献标识码: A

## Geochemical study on anatexis of leucopites in Fuping Group of Xiaoju area, Pingshan County, Hebei Province

WAN Yu\_sheng and YANG Chong\_hui

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Beijing SHRIMP Laboratory, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Anatexis resulted in the formation of leucosomes of various shapes and sizes in leucopites of Neoproterozoic Fuping Group. The anatectic derivatives have lower REE content and HFS elements than their melting parent rocks. In most cases, however, they show similar element distribution patterns. The derivatives formed at the early stage of anatexis are different from the parent rocks in concentrations and distribution patterns of elements. With the development of anatexis, the difference between the derivatives and the parent rocks in Nd isotopic composition became smaller and smaller until approaching to disappearance at last. The accessory minerals, especially zircon and apatite, played an important role in the variation of elements and Nd isotopic compositions of the anatectic derivatives.

**Key words:** anatexis; geochemistry; Nd isotope; leucopite; Fuping Group; Hebei

收稿日期: 2002- 06- 10; 修订日期: 2001- 07- 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49872024); 国土资源部地质调查项目(J1. 3. 1)

作者简介: 万渝生(1958- ), 男, 博士, 研究员, 地球化学专业。

近年来,对阜平岩群的研究在岩石学、变质作用、深熔作用、同位素年代学及地球化学等方面取得了重要进展(Cheng *et al.*, 1997; 高吉凤, 1997; 刘树文等, 1997, 1999; 贺义兴等, 1999; 程裕淇等, 2000, 2001; 孙敏等, 2001)。本文重点从熔融母岩和浅色体对比的角度对阜平岩群浅粒岩深熔作用的地球化学进行研究,探讨陆壳物质深熔作用过程中元素和Nd同位素组成的变化规律,以期进一步探讨壳源花岗岩元素及Nd同位素组成与熔融母岩的成因联系。

## 1 地质背景

阜平岩群主要由浅粒岩、黑云变粒岩-片麻岩、角闪质岩石及大理岩和钙硅酸岩等组成(图1),曾遭受高角闪岩相-麻粒岩相变质作用,发生深熔并形成不同类型的区域混合岩,其中绝大多数仅显示初期深熔特征。在一些构造有利部位,有一定规模花岗岩体形成(Cheng *et al.*, 1997)。

浅粒岩在阜平岩群中广泛分布,包括钾长、二长及斜长浅粒岩等,但以钾长浅粒岩为主。矿物组合为钾长石、石英、斜长石,不同矿物的含量有较大的变化,在工作区平山西柏坡、小觉一带,通常含有一定数量的磁铁矿,不含或只含很少的黑云母。由于深熔作用改造,许多地方浅粒岩的原有结构构造遭受破坏,形成规模不等但通常较小的浅色体,以圆形、椭圆形、条带状、不规则状等形态存在于浅粒岩中,其形态变化与熔融母岩原岩结构构造及深熔作用发生时局部应力状态有关。浅色体虽形态各异,

但与熔融母岩相比其内部形变通常较弱,矿物粒度增大,磁铁矿含量降低。从产状看,一些浅色体形成过程中在空间上有一定运移,但仅限于浅粒岩本身岩石系统内。有的地方磁铁矿在浅色体边部富集,表明这些浅色体基本上形成于原地。由于深熔作用强度的差异,不同地方的浅色体单独出露面积从只有数平方厘米到数平方米不等,所占比例从不到10%到50%以上。按岩石组成和结构构造,可把残余体划分为两种类型:一类为熔融母岩,原有组成特征和层状构造仍然保留,一般见于深熔作用不强的情况;另一类为熔融残余物,其颜色更暗,原岩结构构造已无保留,组成上也发生了较大变化,为浅色体被不同程度提取后的残余产物,出现在深熔作用较强的露头上。两类残余体之间可存在过渡关系。在一些露头上,岩石发生强

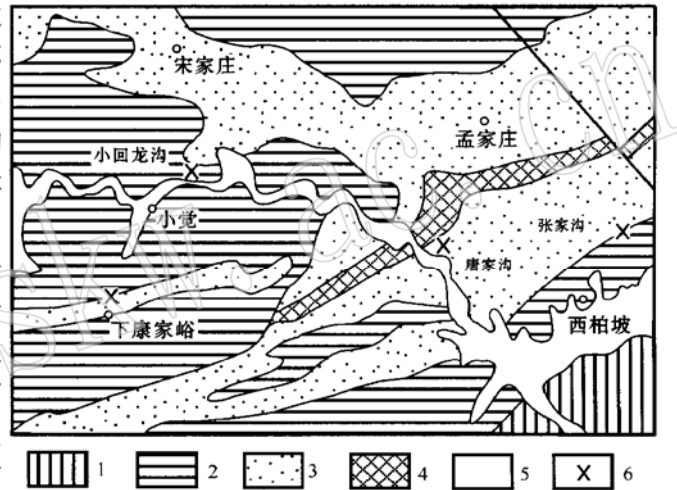


图1 河北平山西小觉地区阜平群地质图(引自程裕淇等, 2000)  
Fig. 1 Geological map of Fuping Group in Xiaojue area, Pingshan County, Hebei Province

1—团泊口组, 主要由大理岩、钾长浅粒岩-片麻岩及黑云角闪片麻岩组成; 2—南营组, 主要由黑云斜长片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩和大理岩组成; 3—宋家口组, 主要由浅粒岩、黑云斜长片麻岩和大理岩组成; 4—文都河组, 主要由浅粒岩和大理岩组成; 5—第四系; 6—样品位置, 但板桥口已出图, 位于小觉之西北

烈深熔, 原有层状构造遭受完全破坏, 但浅色体和残余体未明显分离, 由二者组成的“岩浆粥”与熔融母岩组成上并无明显区别。

为了对比研究深熔作用过程中元素和 Nd 同位素组成变化规律, 在几个不同露头成对采集了相邻位置的残余体和浅色体岩石样品(图 1)。残余体大多接近熔融母岩, 浅粒岩的结构构造仍有保留, 但不排除有少量浅色体被提取的可能。

## 2 地球化学特征

### 2.1 浅粒岩地球化学特征

研究区阜平岩群浅粒岩和深熔产物的元素及 Sm、Nd 同位素分析结果列于表 1 和表 2。熔融母岩含磁铁矿钾长浅粒岩高硅、高钾、高铁、低镁、低钠且低钙, 高铁低镁特征与含不同数量磁铁矿而黑云母含量很低的矿物组合相吻合。岩石稀土元素含量高( $442.8 \times 10^{-6} \sim 571.9 \times 10^{-6}$ ), 配分形式图上, 重稀土元素部分近于平坦, 轻重稀土元素分异相对较弱,  $(La/Yb)_n = 9.3 \sim 20.4$ , 具较明显负铈异常(0.43~0.60)(图 2a 和 c)。在岩石/MORB-元素图解上, 除 Nb、P、Ti 相对亏损外, 大多具有较强的负钡异常(0.41~0.56)(图 2b 和 d)。5 个样品分析结果显示,  $^{147}Sm/^{144}Nd$  和  $^{143}Nd/^{144}Nd$  分别为 0.109 0~0.118 5 和 0.511 196~0.511 420,  $t_{DM}$  和  $\epsilon_{Nd}(2.7 Ga)$  分别为 2.56~2.77 Ga 和 3.27~6.08。

空间上与含磁铁矿钾长浅粒岩互层的含磁铁矿二长浅粒岩(F9809-1), 除钠含量较高

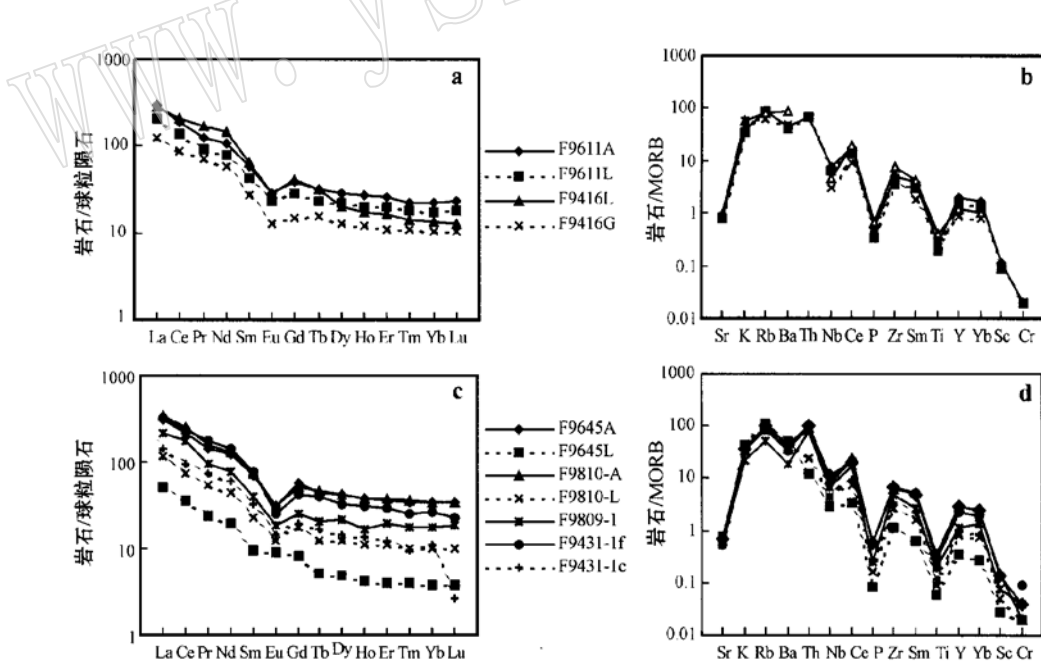


图 2 阜平群浅粒岩及深熔产物的稀土元素配分模式和岩石/MORB-元素图解

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns and rock/MORB element diagram of leucoleptites and their anatectic derivatives from Fuping Group

部分样品 Cr、Th 元素的含量低于检出线, 以检出线含量作图

表1 河北平山小觉地区阜平岩群浅粒岩及深熔产物的常量元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )组成

Table 1 Major elements and minor elements in leucoleptites and their anatectic derivatives from Fuping Group in Xiaojue area, Pingshan County, Hebei Province

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样品号	F9611A	F9611L	F9416L	F9416G	F9645A	F9645L	F9810_A	F9810_L	F9809_1	F9431_1f	F9431_1c
岩性	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B
位置	小回龙沟	小回龙沟	板桥口	板桥口	唐家沟	唐家沟	张家沟	张家沟	张家沟	下康家峪	下康家峪
SiO <sub>2</sub>	72.43	72.57	69.21	68.23	72.40	72.12	73.30	72.99	75.75	73.83	72.82
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.28	0.59	0.40	0.45	0.09	0.52	0.14	0.28	0.41	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.76	12.99	12.63	14.86	11.93	14.33	11.75	14.03	12.24	11.23	13.54
TFeO	3.77	2.68	4.49	3.31	4.03	1.22	3.84	1.57	2.59	3.75	1.48
MnO	0.10	0.11	0.04	0.03	0.13	0.05	0.10	0.07	0.06	0.12	0.06
MgO	0.09	0.02	0.24	0.11	0.14	0.01	0.19	0.01	0.20	0.16	0.24
CaO	1.09	1.00	0.12	0.17	1.47	0.63	1.21	0.70	0.82	0.97	0.95
Na <sub>2</sub> O	3.37	3.41	1.50	2.03	2.82	3.98	2.89	3.25	4.05	3.09	4.00
K <sub>2</sub> O	5.53	5.25	8.63	8.87	5.75	6.66	4.89	6.26	3.37	5.46	6.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.04	0.08	0.06	0.07	0.01	0.07	0.02	0.03	0.00	0.03
H <sub>2</sub> O	0.12	0.54			0.34	0.18	0.18	0.24	0.12	0.20	0.14
CO <sub>2</sub>	0.48	0.71			0.18	0.44	0.27	0.35	0.44	0.16	0.18
Total	100.2	99.6	97.5	98.1	99.7	99.7	99.2	99.6	100.0	99.4	99.8
Cr	< 5	< 5			10	< 5	< 5	< 5	10	23	22
Sc	5	4			5	1	6	2	3		
Rb	170	169	163	126	205	216	174	211	101	174	200
Ba	864	843	1 719	1 010	841	1 071	747	954	387	677	769
Sr	94	94	116	101	84	91	73	79	65	62	63
Nb	26.0	23.0	16.0	11.0	38.0	10.0	33.0	16.0	23.0	27.0	15.0
Zr	434	323	675	404	591	104	561	232	432	624	309
Y	62	48	37	26	87	10	87	25	35	66	31
Th	14	14			20	< 5	19	< 5	16		
La	110.00	79.57	104.60	46.27	118.30	19.92	130.10	43.71	80.93	121.60	52.97
Ce	183.40	137.90	200.70	87.27	211.80	34.47	247.90	72.16	174.20	230.80	93.22
Pr	17.23	12.77	22.54	9.47	19.91	3.27	21.50	7.44	12.95	24.12	10.23
Nd	75.47	56.22	102.10	42.60	88.43	14.07	94.05	30.87	56.17	102.10	42.87
Sm	13.05	10.03	14.48	6.20	16.26	2.17	16.93	5.32	9.11	17.69	7.38
Eu	2.44	1.97	2.43	1.11	2.69	0.79	2.70	1.04	1.62	2.22	1.26
Gd	11.76	9.10	12.82	4.68	17.63	2.50	15.68	5.44	7.63	12.93	5.93
Tb	1.90	1.37	1.89	0.90	2.60	0.30	2.68	0.73	1.22	2.31	0.98
Dy	11.18	8.47	7.96	4.90	16.11	1.86	16.07	4.69	8.23	12.96	5.54
Ho	2.37	1.80	1.53	1.07	3.41	0.38	3.41	1.00	1.46	2.69	1.22
Er	6.67	5.08	4.10	2.84	9.31	1.02	9.69	2.86	4.88	7.51	3.21
Tm	0.86	0.69	0.55	0.42	1.29	0.15	1.39	0.39	0.68	0.98	0.37
Yb	5.60	4.32	3.38	2.60	8.35	0.96	8.47	2.50	4.48	6.46	2.78
Lu	0.89	0.70	0.49	0.41	1.33	0.15	1.31	0.38	0.70	0.88	0.10
ΣREE	442.8	330.0	479.6	210.7	517.4	82.0	571.9	178.5	364.3	545.3	228.1
(La/Yb) <sub>n</sub>	12.9	12.1	20.4	11.7	9.3	13.7	10.1	11.5	11.9	12.4	12.6
Eu/Eu*	0.60	0.62	0.54	0.61	0.49	1.04	0.50	0.59	0.58	0.43	0.57
Ba/Ba*	0.56	0.55			0.42	> 0.81	0.41	> 0.73	0.30		
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.64	1.54	5.75	4.37	2.04	1.67	1.69	1.93	0.83	1.77	1.54

注: A—含磁铁矿钾长浅粒岩; B—含磁铁矿钾长浅粒岩中的浅色体; C—含磁铁矿二长浅粒岩; 样品3~4和10~11的稀土元素数据引自高吉凤(1997); 常量和微量元素用X荧光光谱法测定, 稀土元素用等离子光谱法测定, 由国家地质实验测试中心完成; 样品具体位置请参见程裕洪等(1999, 2000)和高吉凤(1997)。

表2 河北平山小觉地区阜平岩群浅粒岩及深熔产物的 Sm、Nd 同位素组成  $w_B/10^{-6}$   
 Table 2 Sm and Nd isotopic compositions of leucopelites and their anatexic derivatives from Fuping Group in Xiaojue area, Pingshan County, Hebei Province

序号	样品号	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$t_{\text{DM}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(2.7)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(2.0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$
1	F9611A	15.57	86.43	0.109 0	0.511 293	7	- 0.45	2.69	4.38	- 3.80	- 26.24
2	F9611L	12.35	66.34	0.112 6	0.511 327	7	- 0.43	2.73	3.77	- 4.07	- 25.57
3	F9416L	16.67	96.98	0.103 9	0.511 196	7	- 0.47	2.70	4.26	- 4.40	- 28.13
4	F9416G	9.06	53.63	0.102 2	0.511 191	6	- 0.48	2.66	4.77	- 4.05	- 28.23
5	F9645A	20.29	103.60	0.118 5	0.511 407	7	- 0.40	2.77	3.27	- 4.02	- 24.01
6	F9645L	2.942	16.56	0.107 4	0.511 326	8	- 0.45	2.60	5.62	- 2.72	- 25.59
7	F9810_A	19.58	103.70	0.114 2	0.511 356	7	- 0.42	2.73	3.78	- 3.91	- 25.01
8	F9810_L	6.59	36.30	0.109 8	0.511 296	7	- 0.44	2.70	4.15	- 3.95	- 26.18
9	F9809_1	11.13	60.83	0.110 7	0.511 267	8	- 0.44	2.77	3.25	- 4.77	- 26.74
10	F9431_1f	16.98	92.18	0.111 4	0.511 420	8	- 0.4	2.56	6.08	- 1.90	- 23.76
11	F9431_1c	7.29	40.73	0.108 2	0.511 319	8	- 0.45	2.63	5.19	- 3.07	25.73

注: 样品名称和采样位置见表1; F9431\_1f和F9431\_1c测定在中国地质科学院地质研究所 MAT261上完成, 其余样品测定在中国科学院地质研究所 VG354上完成; 模式年龄和  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值计算的年龄单位为 Ga; 亏损地幔模式年龄计算:  $t_{\text{DM}} = (1/\lambda) \ln\{[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - 0.51315]/[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}) - 0.2137] + 1\}$ 。

外, 其他元素组成和 Nd 同位素组成与之并无明显区别。

## 2.2 浅色体的地球化学特征

与相邻熔融母岩相比, 浅色体的常量元素组成主要表现为 TFeO 含量较低, 显然与磁铁矿分离有关; 岩石  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值普遍降低, 浅色体组成向低共熔点方向演化。通常, 浅色体与熔融母岩具有类似的稀土元素配分模式, 仅稀土元素总量有一定程度的降低(表1, 图2a)。在岩石/MORB-元素图解上, 浅色体与熔融母岩也有类似的元素分布形式, 仅高场强元素含量有不同程度的降低(图2b)。但是, 如深熔程度很低时, 不但浅色体的稀土元素总量明显降低, 稀土元素模式也发生很大变化, 包括负钕异常的消失(对比图2c中的F9645A和F9645L)。其他许多微量元素, 特别是 Th 的含量也明显降低, 负钡异常完全消失(图2d)。5个浅色体样品分析结果显示,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  分别为 0.102 2~ 0.112 6 和 0.511 191~ 0.511 327,  $t_{\text{DM}}$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(2.7 \text{ Ga})$  分别为 2.60~ 2.73 Ga 和 3.77~ 5.62。与稀土元素和高场强微量元素一样, 深熔程度较高时, 浅色体与熔融母岩的 Nd 同位素组成差异变小, 而低程度深熔形成的浅色体与熔融母岩的 Nd 同位素组成则有较大的差异。对比 F9645A 和 F9645L, 两者  $t_{\text{DM}}$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(2.7 \text{ Ga})$  差异分别高达 0.17 Ga 和 2.35(表2)。

## 3 讨论

浅色体与相邻熔融母岩在常量、稀土、微量元素特征上的差异可用深熔作用过程中副矿物行为进行解释。本区浅粒岩中的副矿物主要为锆石、榍石、磷灰石和少量的褐帘石。长英质岩石的稀土元素及 Th、Zr、Ti、P、Nb 等微量元素主要存在于这些副矿物中, 它们与存在于造岩矿物中的其他微量元素在深熔作用过程中具有完全不同的地球化学行为(Bea, 1996a, 1996 b)。图3给出了浅粒岩中锆石(混有很少量的褐帘石)的稀土元素模式, 其重稀土元素相对富集, 与喜马拉雅变泥砂质岩石中的锆石(Ayres *et al.*, 1997a)十分类似; 轻稀土元素

部分也明显地富集,其原因在于锆石分析样品中有少量轻稀土元素十分富集的褐帘石混入。类似现象在其他地方也存在(Hinton *et al.*, 1991)。深熔作用过程中副矿物由于难熔而残余,是浅色体稀土元素及微量元素含量降低的主要原因。深熔程度不同,副矿物进入熔体的比例不同。深熔程度很低时,副矿物很少进入熔体,主要受副矿物控制的稀土元素及微量元素在熔体中的含量就低。由于构造作用影响,熔融程度很低的浅色体被快速带离原有位置,就会出现稀土元素及微量元素含量低的现象(Watt *et al.*, 1996)。随着深熔程度增高,副矿物逐渐进入熔体中,稀土元素及微量元素在浅色体中的含量随之增大,其稀土元素模式及其他微量元素的分布形式与熔融母岩就较为相似。由于磁铁矿比全岩的稀土元素含量要低,两者又具有类似的稀土元素模式,磁铁矿分离对浅色体稀土元素组成不会造成太大的影响。此外,与熔融母岩钾长浅粒岩中的磁铁矿相比,浅色体中的磁铁矿稀土元素总量明显降低(图3),与全岩稀土元素组成的变化一致,表明深熔作用过程中磁铁矿与全岩之间已接近平衡。

值得注意的是,深熔作用过程中岩石 Ba 异常的变化(Wan, 1999)。与相邻熔融母岩相比,由于 Th 含量明显降低,熔融程度相对较低的浅色体(F9645L 和 F9810\_L)负 Ba 异常已不存在,虽然 Ba 相对于 Rb 仍为亏损。其原因显然与深熔作用过程中不同性质元素的行为差异有关。与 Th 主要存在于副矿物中不同,作为大离子亲石元素, Ba 和 Rb 主要存在于长石、云母等造岩矿物中,深熔作用过程中它们大致同步变化,在浅色体与熔融母岩之间的含量比值差异不大。在熔融母岩浅粒岩中,只有褐帘石的稀土元素和 Th 含量都很高(图3),锆石中也含有一定量的 Th,浅色体 Th 和稀土元素明显同步降低,表明褐帘石和锆石为残余相,未进入或很少进入熔体之中。在所分析的样品中浅色体 F9645L 的稀土元素含量最低,最接近造岩矿物平均的稀土元素组成。

影响深熔作用过程中 Sm、Nd 同位素组成变化的主要因素有两个,一是浅色体与熔融母岩之间轻重稀土元素分离程度的差异,再就是不平衡熔融引起的浅色体与熔融母岩之间 Nd 同位素组成的变化。与熔融母岩浅粒岩相比,浅色体的  $f_{Sm/Nd}$  普遍减小,即轻重稀土元素分离程度有所增大,可能主要与重稀土元素相对富集的锆石作为残余相有关。这在一定程度上影响了岩石有关 Nd 同位素参数的计算,使  $t_{DM}$  减小,而  $\epsilon_{Nd}(t_0)$  增大(万渝生等, 1999)。但是,钾长浅粒岩在 2.0Ga 发生深熔时(程裕淇等, 2000),浅色体和相应熔融母岩的  $\epsilon_{Nd}(2.0Ga)$  值仍有差异,其中 3 个浅色体样品相对于熔融母岩  $\epsilon_{Nd}(2.0Ga)$  有所增大,表明深熔作用过程中浅色体与熔融母岩的 Nd 同位素组成并未完全达到平衡。这可能反映了深熔作用时间较短、深熔温度较低(Ayres *et al.*, 1997a, 1997b)。

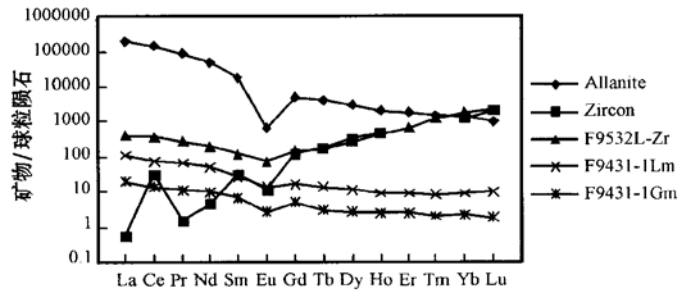


图 3 副矿物稀土元素模式图解

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern of accessory minerals  
Allanite—褐帘石平均值,数据引自 Bea(1996); Zircon—锆石平均值,数据引自 Ayres *et al.*(1997); F9532L\_Zr—钾长浅粒岩(F9532L)中的锆石,轻稀土元素含量偏高,与少量褐帘石混入有关; F9431\_1Lm 和 F9431\_1Gm 分别为钾长浅粒岩和浅色体中的磁铁矿,数据引自高吉凤(1997)

与稀土元素及微量元素在深熔作用过程中的演化行为类似,深熔作用初期阶段,浅色体与熔融母岩 Nd 同位素组成差异更大, Nd 同位素组成偏离平衡更远。随着深熔作用的进行,浅色体和熔融母岩 Nd 同位素组成差异逐渐减小,最终几乎完全消失(表 2), 高度的深熔作用通常不会引起 Nd 同位素组成发生明显变化。这表明,尽管深熔作用过程中同位素通常难以完全达到平衡(Davies *et al.*, 2000),但对于一般壳源成因的 S 型花岗岩,如果形成于较高级度的部分熔融,岩石具较正常的稀土元素组成特征(包括稀土元素总量不是太低),它们与熔融母岩的 Nd 同位素模式年龄和有关参数并不存在很大差异。这对壳源成因花岗岩 Nd 同位素组成意义的认识十分重要。

## 4 结论

钾长浅粒岩深熔作用过程中,浅色体的元素和 Nd 同位素组成存在有规律的变化。深熔程度很低时,浅色体与相邻熔融母岩相比,稀土元素含量降低很多,稀土元素模式存在很大变化,负钡异常消失。随着深熔程度增高,浅色体与熔融母岩之间稀土元素及微量元素的组成差异逐渐减小,两者稀土元素模式变得十分相似,仅浅色体稀土元素曲线平行下移。与稀土元素及微量元素一样,深熔程度较高时,浅色体与熔融母岩的 Nd 同位素组成差异一般较小,而低程度深熔形成的浅色体 Nd 同位素组成与熔融母岩则有较大的差异。稀土元素含量高的副矿物发生分离是发生以上变化的主要原因。由于熔融母岩副矿物种类不同及其他因素的影响,深熔作用过程中稀土元素及微量元素和 Nd 同位素组成的变化也可有所不同。

研究过程中得到程裕淇先生的指导,在此深表谢意。今年值良师沈其韩先生 80 华诞及从事地质工作 60 周年,仅以此文表示祝贺。

## Reference

- Ayres M, Harris N. 1997a. REE fractionation and Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: constraints from Himalayan leucogranites [J]. *Chemical Geology*, 139: 249~ 269.
- Ayres M, Harris N, Vance D. 1997b. Possible constraints on anatectic melt residence times from accessory mineral dissolution rates: an example from Himalayan leucogranites [J]. *Mineralogical Magazine*, 61: 29~ 36.
- Bea K. 1996a. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: implications for the chemistry of crustal melts [J]. *Journal of Petrology*, 37(3): 521~ 552.
- Bea K. 1996b. Controls on the trace element composition of crustal melts [J]. *Earth Sciences*, 87: 33~ 41.
- Cheng Yuqi, Gao Jifeng and Wan Yusheng. 1997. Notes on the anatexis of some metamorphic rock types of the late Archaean Fuping Group of northwestern Pingshan, Hebei Province, China [A]. *Proceeding of 30th International Geological Congress*, pt. II[C]. 137~ 185.
- Cheng Yuqi, Wan Yusheng and Gao Jifeng. 2000. Preliminary study on the isotopic age of metamorphism and anatexis of the Fuping Group of the Environs of Xiaojue, Pingshan County, Hebei Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(1): 30~ 38 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuqi, Wan Yusheng, Gao Jifeng, *et al.* 2001. Petrographic characteristics of three anatectically transformed metamorphic rock types of the Fuping Group Complex of the Xiaojue region, Pingshan, Hebei [J]. *Geological Review*, 47(1): 1~ 8 (in Chinese with English abstract).
- Davies G R and Tommasini S. 2000. Isotopic disequilibrium during rapid crustal anatexis: implications for petrogenetic studies

- of magmatic processes [J]. *Chemical Geology*, 162: 169~ 191.
- Gao Jifeng. 1997. Preliminary study on the REE geochemistry of some metamorphic rock types of the Late Archaean Fuping Group and their anatectic derivatives in the Pingshang area, Hebei Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(3): 418~ 426 (in Chinese with English abstract).
- He Yixing, Song Shulin. 1999. Phase transition and composition change of minerals from melting experiment of two kinds of metamorphic rocks in Fuping Group, Hebei Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 313~ 320 (in Chinese with English abstract).
- Hinton R W, Upton G J. 1991. The chemistry of zircon: variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 3 287~ 3 302.
- Liu Shuwen, Liang Haihua. 1997. Metamorphism of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-rich gneisses in Taihang Mountain Archean metamorphic complex [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 303~ 312 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Liang Haihua, Hua Yonggang. 1999. The geology, geochemistry and petrogenesis of granites with Sill- Qz balls, Taihangshan region [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(3): 390~ 396 (in Chinese with English abstract).
- Sun Min, Guan Hong. 2001. Zircon U - Pb ages of the Fuping Complex and their implications: some comments on the geochronological study of the Precambrian high-grade metamorphic terranes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 145~ 156 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Song Biao, Wu Jiashan, *et al.* 1999. Geological and Nd and Sr isotopic compositions of 3.8 Ga trondhjemitic rocks from the Anshan area and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 23~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng. 1999. Ba anomaly and its geochemical significance [J]. *Continental Dynamics*, 4(1): 84~ 87.
- Watt G R, Burns L M, Graham G A. 1996. Chemical characteristics of migmatites: accessory phase distribution and evidence for fast melt segregation rates [J]. *Contrib. to Mineral Petrol.*, 125: 100~ 111.

#### 附中文参考文献

- 程裕淇, 万渝生, 高吉凤. 2000. 河北平山小觉地区阜平岩群变质作用和深熔作用年代研究的初步报导 [J]. *地质学报*, 74(1): 30~ 38.
- 程裕淇, 万渝生, 高吉凤, 等. 2001. 河北平山小觉地区阜平岩群中三种岩类深熔现象的岩相学特征 [J]. *地质论评*, 47(1): 1~ 8.
- 高吉凤. 1997. 河北平山晚太古代阜平岩群中主要变质岩类及其深熔产物的稀土地球化学初步研究 [J]. *岩石学报*, 3(3): 418~ 426.
- 贺义兴, 宋书林. 1999. 河北平山阜平岩群两种岩石熔融过程中的矿物相变及成分变化 [J]. *地质学报*, 73(4): 313~ 320.
- 刘树文, 梁海华. 1997. 太行山太古宙变质杂岩中富铝片麻岩的变质作用 [J]. *岩石学报*, 13(3): 303~ 312.
- 刘树文, 梁海华, 华永刚. 1999. 太行山含夕线石英球花岗岩的地质学、地球化学和岩石成因 [J]. *地质科学*, 34(3): 390~ 396.
- 孙敏, 关鸿. 2001. 阜平杂岩年龄及其地质意义: 兼论前寒武高级变质地体的定年问题 [J]. *岩石学报*, 17(1): 145~ 156.
- 万渝生, 宋彪, 伍家善, 等. 1999. 鞍山 3.8 Ga 奥长花岗质岩石的地球化学和 Nd Sr 同位素组成及其意义 [J]. *地质学报*, 73(1): 23~ 36.