

# 大别山超高压变质带燕山期花岗岩 地球化学特征及成因探讨

钱存超<sup>1,2</sup> 路玉林<sup>2</sup> 刘丽利<sup>2</sup>

(1.西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2.安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

**摘要:**依据花岗岩类的岩性组合、产出状况、结构、侵位机制和地球化学特征等,将大别山超高压变质带中燕山期花岗岩大致可以划分为两大类:一类为高钾钙碱性系列,以大同岩体和司空山早、主期岩体为代表,岩性为花岗闪长岩—二长花岗岩,表现为  $\text{SiO}_2 > 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  一般  $\geq 14\%$ ,  $\text{MgO} < 3\%$ , 富集 LREE, 低 HREE 和 Y、Yb (如  $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ ), 高 Sr、Ba, 高 La/Yb  $> 39$  和  $\text{Sr}/\text{Y} \geq 30$ , Sr、Eu 异常不明显,与 Adakite 岩相似;另一类属正常钙碱性系列,以英山尖岩体为代表,岩性以二长花岗岩为主,具有高硅、低铝的特点,一般  $\text{SiO}_2 > 70\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 14\%$ , LREE 略显亏损, HREE 略显富集和高 Y、Yb (如  $\text{Y} > 18 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} > 1.9 \times 10^{-6}$ ), 低 Sr 和  $\text{La}/\text{Yb} < 10$ ,  $\text{Sr}/\text{Y} < 10$ , Sr、Eu 负异常明显。高钾钙碱性花岗岩可能为增厚的下地壳部分熔融的产物,正常钙碱性花岗岩可能为正常的地壳重熔形成。

**关键词:**花岗岩; 高钾钙碱性系列; 燕山期; 超高压变质带; 大别山

**中图分类号:** P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2004)02-0147-08

大别造山带是华北与扬子板块之间的碰撞造山带,也是 NW、NE 向构造岩浆岩带的结合部位,燕山期岩浆活动十分强烈,岩石类型较丰富,是研究燕山期花岗岩的有利地区。近年来,许多研究者对大别山燕山期花岗岩进行了研究,徐启东等<sup>[1]</sup>认为大别造山带中生代花岗岩形成于早(137 Ma)、晚(123 Ma)两个阶段,两阶段岩石具有不连续的成分演化关系;马昌前等<sup>[2]</sup>认为大别山燕山期花岗岩是幔源岩浆的分离结晶和地壳混染共同作用的产物。王强等<sup>[3]</sup>对北大别燕山期花岗岩进行了较系统研究,根据重稀土元素(HREE)和 Y 亏损情况划分了强烈亏损和亏损不明显两类花岗岩,前者又进一步划分为富钠的 Adakite 岩和富钾的高 Ba—Sr 花岗岩;潘国强等<sup>[4]</sup>认为北淮阳燕山期花岗岩也具有 Adakite 岩特征;他们主要侧重于北大别和北淮阳地区,对大别山南部超高压变质带中花岗岩研究相对较薄弱。

通过对大别山南部超高压变质带中燕山期 3 个代表性花岗岩体(大同、司空山、英山尖)研究,发现它们在岩性组合、产出状态、结构、侵位机制和地球化学特征等方面具有显著的差异,一类属高钾钙碱性系列,具有独特的地球化学特征,表现为高 Sr、Ba, 高 La/Yb 和 Sr/Y, 低 HREE 和 Y、Yb 等

特点,与 Adakite 岩非常相似<sup>[5]</sup>;另一类属正常钙碱性系列,具有低 Sr、Ba、La/Yb、Sr/Y 和高 Y、Yb 特征。借助于对燕山期花岗岩地球化学特征的研究,来探讨其成因并揭示大别造山带碰撞后的岩石圈特征和演化历史等。

## 1 区域地质背景

大别造山带自北向南划分为华北板块南缘、北淮阳构造带、北大别构造岩带、南大别超高压变质带、宿松构造带、浠水构造带、张八岭构造带、扬子板块北缘等构造单元(图 1)。大别山超高压变质带分布于水吼岭—菖蒲—英山剪切带和太湖—山龙剪切带之间,主要出露超高压变质岩系和中生代花岗岩。超高压变质岩系包括变质表壳岩组合、变质超镁铁质岩石及变质花岗岩类等 3 部分,榴辉岩以大小不等的透镜状、团块状分布在变质表壳岩(大理岩、片麻岩、片岩)及变质超镁铁质岩石之中。变质花岗岩主要为新元古代英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩。中生代花岗岩呈岩基、岩株、岩瘤等产出,侵入超高压变质岩系之中。大多数研究者认为大别造山带是印支期陆—陆碰撞形成的陆内造山带<sup>[6-8]</sup>,于早中侏罗世快速折返至地表并接受剥蚀。

收稿日期:2003-07-08; 改回日期:2003-12-08

基金项目:中国地质调查局国土资源地质大调查项目(20001300002041)资助。

作者简介:钱存超,男,1966 年生,博士生,高级工程师,从事区域地质调查和基础地质研究工作;E-mail: agsxgh@mail.hfah.cn。



2.3 形成时代

根据前人同位素年龄资料,司空山岩体早期花岗闪长岩黑云母 K-Ar 法年龄为 110 Ma、120 Ma<sup>①</sup>和 148 Ma<sup>②</sup>;谢智等<sup>[9]</sup>在司空山二长花岗岩中获取角闪石和黑云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄分别为(129.1±0.5)Ma、(124.6±0.3)Ma。李石等<sup>[10]</sup>在大同岩体黑云母二长花岗岩获 Rb-Sr 等时线年龄为 122 Ma、黑云母 K-Ar 法年龄为 110 Ma;英山尖二长花岗岩黑云母 K-Ar 法年龄为 127.1Ma(1:5 万石头咀幅地质图)。3 个岩体的形成时代与大别山中生代花岗岩时代基本上一致<sup>[11]</sup>,均为早白垩世,属于燕山期,并且 NW 向岩体侵入略早,NE 向岩体稍晚,两者就位时代相差 10~20 Ma。

3 岩石地球化学特征

3.1 岩石化学成分特征

从岩石化学成分(表 1)看,司空山复式岩体均属酸性岩,SiO<sub>2</sub>>56%,MgO<3%,早期花岗闪长岩表现为 SiO<sub>2</sub> 较低,在 59%~68%之间变化,铝高,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>15%,富钠,Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 在 1~2 之间;主期花岗岩 SiO<sub>2</sub>>72%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><15%,富钾,Na<sub>2</sub>O<K<sub>2</sub>O,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O<1;晚期二长花岗岩表现为硅高。大同岩体 SiO<sub>2</sub> 介于 60%~67%之间,高铝,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>15%,MgO 变化幅度小,在 1.12%~1.80%之间,Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 总量变化较小,为 7.94%~8.63%,Na<sub>2</sub>O 略大于 K<sub>2</sub>O,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 约等于 1;英山尖岩体硅较高,SiO<sub>2</sub> 在 71%~77%之间,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><15%,Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O>1。

司空山岩体从早到晚,随着岩浆的演化,SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O 含量

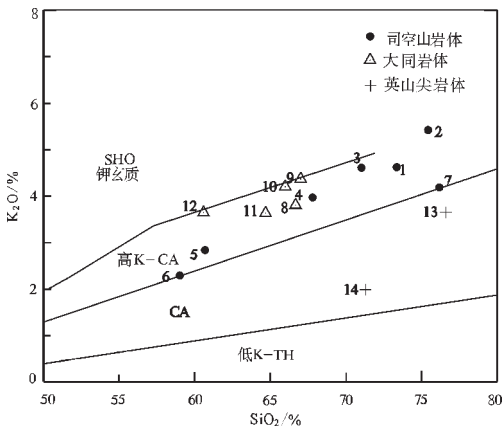


图 3 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(%)图解

SHO—钾玄质系列;K—CA—高钾钙碱性系列;CA—正常钙碱性系列;K—TH—低钾拉斑玄武质系列

Fig. 3 Diagrams of SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (%)

SHO—shoshonitic series; K—CA—high-K calc-alkaline series; CA—normal calc-alkaline series; K—TH—low-K tholeiitic series

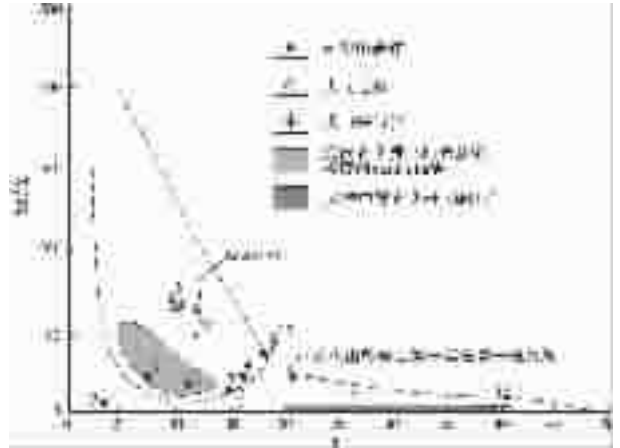


图 4 Sr/Y—Y 图解<sup>[16]</sup>

Fig. 4 Diagrams of Sr/Y—Y<sup>[16]</sup>

逐渐增大,Na<sub>2</sub>O 含量逐渐降低,酸性、碱性程度逐渐增加,向富碱方向演化,显示富钾特征。

在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(图 3)中,英山尖岩体和司空山岩体晚期二长花岗岩样品落入钙碱性区,属正常的钙碱性花岗岩;大同岩体和司空山早、主期岩体花岗岩类都均落在高钾钙碱性系列区,属高钾钙碱性系列。

3.2 微量元素特征

在微量元素方面,司空山岩体早、主期花岗岩类 Sr、Ba 含量较高,Sr 一般>400×10<sup>-6</sup>,均值为 724×10<sup>-6</sup>,最高达 1328×10<sup>-6</sup>,Ba 一般为 1226×10<sup>-6</sup>~2092×10<sup>-6</sup>,均值为 1861×10<sup>-6</sup>。Y 含量低,平均值为 14.6×10<sup>-6</sup>,小于 18×10<sup>-6</sup>;Sr/Y 具有较大的比值,一般在 30~78 之间,Rb/Sr 比值变化大,在 0.03~0.21 之间,高于地幔的相应值(约 0.025),表明岩浆经历了较高分异演化。大同岩体 Sr、Ba 含量高,Sr>1100×10<sup>-6</sup>,最高达 1896×10<sup>-6</sup>,Ba 在 3300×10<sup>-6</sup>~4000×10<sup>-6</sup>之间,最高达 6135×10<sup>-6</sup>,Y 含量低,介于 9.6×10<sup>-6</sup>~19×10<sup>-6</sup>之间,均值为 12.48×10<sup>-6</sup>,小于 18×10<sup>-6</sup>;Sr/Y 比值大,一般大于 100,Rb/Sr 比值变化范围小,在 0.04~0.08 之间,略高于地幔的相应值,表明岩浆经历了较弱的分异演化。英山尖岩体 Sr、Ba 含量低,富 Y,在 25×10<sup>-6</sup>~41×10<sup>-6</sup>之间,大于 18×10<sup>-6</sup>,Sr/Y 比值<10,在 0.6~8.8 之间。司空山岩体晚期花岗岩类 Sr、Ba 含量最低,低 Y,Sr/Y 比值小。

司空山岩体从早期到主期,随 SiO<sub>2</sub> 含量的增高,Ba、Sr 含量降低,但 Ba/Sr、Rb/Sr 比值却增大,这是由于更多的 Ba、Rb 进入钾长石矿物中的原故。

在 Sr/Y—Y 图解(图 4)中,大同岩体和司空山岩体早、晚期花岗岩类多数落在 Adakite 岩区,并且大同岩体靠近上方,司空山岩体接近于下地壳熔融形成的 Adakite 岩区;英山尖

①安徽省区域地质调查队.1:20 万六安、岳西县幅区域地质调查报告,1974.

②湖北省区域地质调查队.1:20 万罗田幅区域地质调查报告,1974.

表1 大别山超高压变质带燕山期花岗岩地球化学分析

Table 1 Results of geochemical analysis of Yanshanian granites of the Dabie UHP metamorphic belt

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
样品号	D5048	D2080	D5029	P10-2	D5016	D2308	P1-4	D3250	D3252	D2200	D2302	D2202	D6193	D3650
岩体	司空山复式岩体							大同岩体					英山尖岩体	
类型	KCG							KCG					CAG	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>73.26</b>	<b>75.38</b>	<b>72.00</b>	<b>67.69</b>	<b>60.54</b>	<b>58.98</b>	<b>76.17</b>	<b>66.70</b>	<b>67.01</b>	<b>65.99</b>	<b>64.74</b>	<b>60.61</b>	<b>76.59</b>	<b>71.38</b>
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.14	0.29	0.44	0.82	0.85	0.05	0.62	0.56	0.64	0.67	0.80	0.16	0.45
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>13.91</b>	<b>12.97</b>	<b>14.67</b>	<b>15.19</b>	<b>18.10</b>	<b>17.73</b>	<b>13.52</b>	<b>15.75</b>	<b>15.84</b>	<b>16.36</b>	<b>16.79</b>	<b>19.20</b>	<b>12.38</b>	<b>13.77</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.93	0.58	0.75	1.49	2.09	2.09	0.35	1.20	1.23	1.28	1.18	1.66	1.17	1.50
FeO	0.68	0.49	1.12	1.99	3.32	3.47	0.17	1.95	1.83	2.00	2.47	2.72	0.35	1.97
MnO	0.04	0.02	0.04	0.06	0.08	0.09	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.11	0.04
<b>MgO</b>	<b>0.44</b>	<b>0.14</b>	<b>0.62</b>	<b>0.88</b>	<b>1.95</b>	<b>2.30</b>	<b>0.08</b>	<b>1.19</b>	<b>1.12</b>	<b>1.31</b>	<b>1.48</b>	<b>1.80</b>	<b>0.10</b>	<b>1.58</b>
CaO	1.41	1.01	1.61	2.31	3.88	4.91	0.52	2.71	2.36	2.49	2.95	3.53	0.37	2.49
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>3.40</b>	<b>2.98</b>	<b>3.45</b>	<b>4.17</b>	<b>4.57</b>	<b>4.56</b>	<b>3.95</b>	<b>4.25</b>	<b>4.24</b>	<b>4.19</b>	<b>4.30</b>	<b>4.69</b>	<b>4.39</b>	<b>3.84</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>4.63</b>	<b>5.44</b>	<b>4.62</b>	<b>3.98</b>	<b>2.87</b>	<b>2.31</b>	<b>4.32</b>	<b>3.81</b>	<b>4.39</b>	<b>4.22</b>	<b>3.64</b>	<b>3.62</b>	<b>3.67</b>	<b>2.01</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.02	0.11	0.17	0.44	0.43	0.02	0.32	0.27	0.30	0.32	0.37	0.02	0.12
Δ <sup>-</sup>	0.54	0.21	0.30	0.66	0.73	1.79	0.16	0.80	0.44	0.56	0.73	0.76	0.14	0.36
Σ	99.54	99.38	99.58	99.80	99.39	99.51	99.35	99.35	99.33	99.39	99.31	100.1	99.45	99.43
σ	2.24	2.18	2.12	2.82	3.10	2.85	2.06	2.71	3.08	3.05	2.86	3.87	1.93	1.21
ALK	8.03	8.42	8.07	8.15	7.44	6.87	8.27	8.06	8.63	8.41	7.94	8.31	8.05	5.85
<b>Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O</b>	<b>0.73</b>	<b>0.55</b>	<b>0.77</b>	<b>1.05</b>	<b>1.59</b>	<b>1.97</b>	<b>0.93</b>	<b>1.12</b>	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>	<b>1.18</b>	<b>1.30</b>	<b>1.20</b>	<b>1.91</b>
Pb	17.5	28.8	27.8	22.0	10.8	15.6	23.4	28.1	30.8	15.4	20.0	6.0	12.9	4.5
Zn	36.0	24.6	41.0	7.0	91.0	102.0	22.0	76.5	70.5	69.0	79.6	69.0	59.0	--
Li	8.6	4.7	18.9	11.0	11.5	11.9	18.6	12.9	11.6	9.4	14.1	18.3	10.7	14.7
Rb	83.9	74.0	94.1	74.0	76.7	34.1	179.3	65.8	71.8	88.3	56.1	75.7	83.2	76.5
Cs	4.7	3.0	5.8	3.0	6.5	3.8	4.4	3.3	2.8	5.2	2.2	5.5	4.5	--
<b>Ba</b>	<b>1990</b>	<b>1226</b>	<b>1784</b>	<b>2092</b>	<b>2030</b>	<b>2046</b>	<b>12.7</b>	<b>3311</b>	<b>3790</b>	<b>3734</b>	<b>3963</b>	<b>6135</b>	<b>872</b>	<b>249</b>
<b>Sr</b>	<b>431</b>	<b>351</b>	<b>449</b>	<b>805</b>	<b>981</b>	<b>1328</b>	<b>4.8</b>	<b>1334</b>	<b>1353</b>	<b>1129</b>	<b>1578</b>	<b>1896</b>	<b>24</b>	<b>222</b>
Th	4.4	8.2	5.5	4.3	4.5	11.3	12.2	8.4	5.5	2.4	11.4	11.2	3.2	4.0
<b>Nb</b>	<b>10.3</b>	<b>8.9</b>	<b>7.0</b>	<b>10.6</b>	<b>13.5</b>	<b>17.4</b>	<b>11.9</b>	<b>14.4</b>	<b>12.3</b>	<b>13.0</b>	<b>14.2</b>	<b>11.9</b>	<b>13.4</b>	<b>7.4</b>
Zr	123.5	116.1	130.0	227.4	310.6	294.2	37.6	237.0	221.3	282.1	297.3	386.8	258	97
<b>Y</b>	<b>14.5</b>	<b>7.5</b>	<b>11.3</b>	<b>16.4</b>	<b>20.8</b>	<b>17.1</b>	<b>3.62</b>	<b>9.87</b>	<b>9.58</b>	<b>11.91</b>	<b>11.98</b>	<b>19.04</b>	<b>40.7</b>	<b>25.3</b>
Sc	1.2	1.3	2.0	3.31	6.9	8.7	0.85	5.43	4.78	2.97	4.61	5.34	2.0	14.5
Ga	13.6	15.4	15.8	--	25.6	21.5	15.5	15.5	21.5	20.7	19.8	43.6	12.6	--
<b>Sr/Y</b>	<b>29.7</b>	<b>46.8</b>	<b>39.7</b>	<b>49.2</b>	<b>47.2</b>	<b>77.7</b>	<b>1.3</b>	<b>135.2</b>	<b>141.2</b>	<b>99.8</b>	<b>131.7</b>	<b>99.6</b>	<b>0.6</b>	<b>8.8</b>
Ba/Nb	193.2	137.8	254.9	197.4	150.4	117.6	1.1	229.9	308.1	287.2	279.1	515.5	65.1	33.6
La/Nb	4.0	4.9	7.6	5.9	5.1	4.8	0.7	5.0	4.9	5.5	6.4	9.8	2.6	1.3
Rb/Sr	0.19	0.21	0.21	0.09	0.08	0.03	37.35	0.05	0.05	0.08	0.04	0.04	3.47	0.34
Ba/Sr	4.62	3.49	3.97	2.60	2.17	1.54	2.64	2.48	2.80	3.36	2.59	3.24	36.3	1.12
La	41.3	43.2	53.0	62.65	69.4	83.05	8.1	72.1	70.2	71.5	90.2	116.2	34.8	9.56
Ce	74.3	67.3	87.0	109.4	117.5	138.0	16.0	121.2	115.4	128.2	150.9	187.0	79.5	20.14
Pr	7.86	6.53	8.38	9.91	14.39	14.15	1.62	13.68	12.86	14.22	16.08	21.67	9.81	3.25
Nd	21.57	24.88	22.07	45.1	43.23	56.23	4.04	49.1	47.75	43.71	61.22	63.11	33.58	11.37
Sm	4.11	3.67	3.38	8.53	8.10	9.77	0.47	9.26	8.69	7.69	10.2	11.2	6.33	2.62
Eu	0.98	0.66	0.87	1.83	2.15	2.20	0.12	2.06	1.93	2.10	2.34	3.00	1.04	0.69
Gd	3.28	1.84	2.76	5.36	6.32	6.34	0.62	4.53	4.26	5.50	5.29	8.12	6.69	2.97
Tb	0.42	0.33	0.37	0.68	0.80	0.82	0.12	0.60	0.54	0.69	0.69	0.93	1.05	0.55
Dy	2.08	1.43	1.88	3.55	3.64	3.95	0.71	2.48	2.36	2.46	2.79	4.10	6.61	4.08
Ho	0.45	0.29	0.39	0.68	0.69	0.78	0.2	0.50	0.43	0.48	0.59	0.82	1.49	0.88
Er	1.21	0.77	1.12	1.46	1.82	1.87	0.61	0.93	0.87	1.19	1.25	1.99	4.95	2.55
Tm	0.19	0.20	0.18	0.24	0.26	0.31	0.11	0.19	0.20	0.18	0.22	0.32	0.76	0.43
<b>Yb</b>	<b>1.06</b>	<b>0.88</b>	<b>1.05</b>	<b>1.56</b>	<b>1.50</b>	<b>1.56</b>	<b>0.88</b>	<b>0.76</b>	<b>0.74</b>	<b>0.99</b>	<b>1.06</b>	<b>1.50</b>	<b>5.01</b>	<b>2.79</b>
Lu	0.18	0.20	0.19	0.22	0.24	0.32	0.17	0.18	0.19	0.15	0.21	0.24	0.92	0.44
Σ	150.1	146.2	174.7	237.4	254.8	303.4	30.4	267.4	256.8	267.4	330.9	402.2	165.1	47.63
ΣI/ΣH	16.9	24.6	16.4	17.3	16.7	19.0	8.9	26.3	26.8	23.0	27.4	22.3	5.9	6.0
<b>La/Yb</b>	<b>39.0</b>	<b>49.1</b>	<b>50.5</b>	<b>40.2</b>	<b>46.3</b>	<b>53.2</b>	<b>9.2</b>	<b>94.9</b>	<b>94.9</b>	<b>72.2</b>	<b>85.1</b>	<b>77.5</b>	<b>6.9</b>	<b>3.4</b>
(La/Yb) <sub>N</sub>	26.3	33.1	34.0	27.1	31.2	35.9	6.2	63.9	64.0	48.7	57.4	52.2	4.9	2.3
(La/Sm) <sub>N</sub>	6.3	7.4	9.9	4.6	5.4	5.3	10.8	4.9	5.1	5.8	5.6	6.5	3.5	2.3
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	2.5	1.7	2.1	2.8	3.4	3.3	0.6	4.8	4.6	4.5	4.0	4.4	1.1	0.9
<b>δEu</b>	<b>0.79</b>	<b>0.69</b>	<b>0.85</b>	<b>0.77</b>	<b>0.89</b>	<b>0.80</b>	<b>0.68</b>	<b>0.86</b>	<b>0.86</b>	<b>0.94</b>	<b>0.88</b>	<b>0.92</b>	<b>0.49</b>	<b>0.75</b>

注:常量元素含量单位为10<sup>-2</sup>;微量元素和稀土元素含量单位为10<sup>-6</sup>;1~3—主期含斑二长花岗岩;4~6—早期少斑花岗岩闪长岩;

7—晚期含斑二长花岗岩;8~10、13—中粒似斑二长花岗岩;11~12、14—细粒似斑花岗岩;KCG—高钾钙碱性花岗岩类;

KCG—钙碱性花岗岩类;CAG—钙碱性花岗岩。



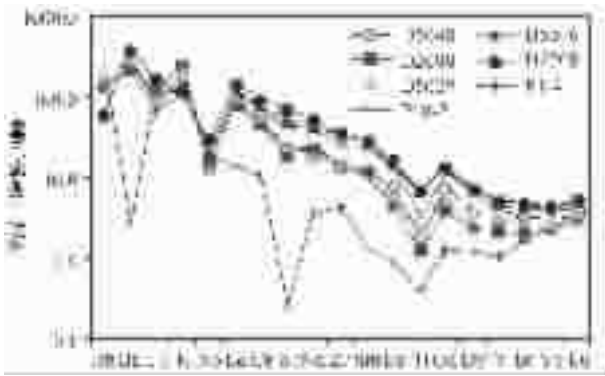


图 5 司空山岩体微量元素分布图

Fig. 5 Trace element distribution patterns of the Sikongshan granites

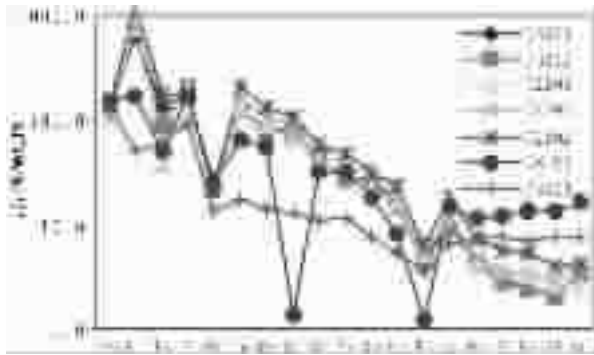


图 6 大同、英山尖岩体微量元素分布图

Fig. 6 Trace element distribution patterns of the Datong and Yingshanjian granites

岩体落在正常的火山弧安山岩、英安岩、流纹岩区。

微量元素对原始地幔分布图中(图 5~6),大同岩体和司空山岩体早、主期花岗岩类曲线呈右倾式,Nb、Ti 具有显著的负异常,Sr 异常不明显,重稀土元素 Gd、Dy、Y、Er、Yb、Lu 等具明显的亏损,Rb、Ba、Th、Pb 等大离子亲石元素明显富集,其含量相当于原始地幔的数十至数百倍,较之大陆地壳的平均值<sup>[13]</sup>也显著偏高。英山尖岩体和司空山晚期花岗岩类同样具有显著的 Sr、Nb、Ti、Th 等亏损,Sr 负异常极明显,并且重稀土元素略富集,曲线上翘,与大陆地壳十分相似。

### 3.3 稀土元素特征

在稀土元素含量方面,大同岩体稀土元素 REE 含量最高,一般在  $256 \times 10^{-6} \sim 402 \times 10^{-6}$  之间,平均为  $304.9 \times 10^{-6}$ ,Yb 在  $0.74 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$  之间变化,均小于  $1.9 \times 10^{-6}$ ,岩石的轻、重稀土分馏显著,La/Yb 比值大,为 72~95,(La/Yb)<sub>N</sub>=48~64,(La/Sm)<sub>N</sub>=4.9~6.5,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=4.0~4.8, $\delta\text{Eu}=0.86 \sim 0.94$ ;司空山岩体早、主期花岗岩类稀土元素 REE 含量一般在  $146 \times 10^{-6} \sim 303 \times 10^{-6}$  之间,平均为  $211.1 \times 10^{-6}$ ,Yb 在  $0.88 \times 10^{-6} \sim 1.56 \times 10^{-6}$  之

间,也小于  $1.9 \times 10^{-6}$ 。岩石的轻、重稀土分馏明显,La/Yb=39~53,(La/Yb)<sub>N</sub>=26~36,表明岩浆源区中有较多的富重稀土矿物(如石榴石)残留,(La/Sm)<sub>N</sub>=4.6~10,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=1.7~3.3;司空山岩体中晚期花岗岩 REE 含量最低,低 Yb,La/Yb=9.2,(La/Yb)<sub>N</sub>=6.2,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=0.6, $\delta\text{Eu}=0.68$ ;英山尖岩体稀土元素 REE 含量低,一般在  $47 \times 10^{-6} \sim 165 \times 10^{-6}$  之间,富 Yb,介于  $2.79 \times 10^{-6} \sim 5.1 \times 10^{-6}$  之间,均大于  $1.9 \times 10^{-6}$ ,La/Yb=3.4~6.9,(La/Yb)<sub>N</sub>=2.3~4.9,(La/Sm)<sub>N</sub>=2.3~3.5,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=0.9~1.1。

在稀土元素配分模式图(图 7~8),大同岩体和司空山早、晚期岩体,曲线均呈右倾型,轻稀土相对富集,重稀土明显亏损,铕异常不明显, $\delta\text{Eu}$  一般在 0.75 以上,说明成岩过程中斜长石的分离结晶作用不强,二者曲线相似,说明它们的源区组成及成岩方式相似,大同岩体轻稀土含量更高的特点指示其源区富集程度更强;英山尖岩体和司空山晚期岩体,曲线呈“海鸥型”,轻稀土略显亏损,重稀土略显富集,铕异常明显, $\delta\text{Eu}$  一般在 0.75 以下,说明在成岩过程中斜长石具有较强的分离结晶作用。

综上所述:(1)依据花岗岩类的岩性组合、产状、结构构造、侵位机制和地球化学特征等,将大别山超高压变质带中燕山期花岗岩大致划分两类:一类为高钾钙碱性系列花岗岩,以大同岩体和司空山早、主期岩体为代表,岩性为花岗闪长岩—二长花岗岩;另一类为正常钙碱性系列花岗岩,以英山尖岩体为代表,岩性以二长花岗岩为主。(2)高钾钙碱性系列具有高  $\text{SiO}_2 > 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 14\%$ ,低  $\text{MgO} < 3\%$ ,高 Sr、Ba,高 La/Yb  $\geq 39$  和  $\text{Sr}/\text{Y} \geq 30$ ,LREE 富集,低 HREE 和 Y、Yb (如  $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ ),Sr、Eu 异常不明显,与 Adakite 岩相似<sup>[8]</sup>,也与华北板块北缘燕山期高 Ba—Sr 花岗岩类相似<sup>[13]</sup>。(3)正常钙碱性系列具有高  $\text{SiO}_2 > 70\%$ ,低  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 14\%$ ,LREE 略显亏损,HREE 略显富集和高 Y、Yb ( $\text{Y} > 18 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} > 1.9 \times 10^{-6}$ ),低 Sr、Ba 和 La/Yb  $< 10$ , $\text{Sr}/\text{Y} < 10$ ,Sr、Eu 负异常明显, $\delta\text{Eu}$  一般  $< 0.75$ 。

## 4 成因讨论

利用花岗岩的岩石组合、地球化学特征,结合区域构造背景来探讨两类花岗岩的成因。

第一类与 Adakite 岩相似的高钾钙碱性花岗岩具有独特的地球化学特征,表明其可能是由增厚的下地壳物质发生熔融后结晶分异而形成的。

(1)大别山超高压变质带高钾钙碱性花岗岩的岩石组合为花岗闪长岩—二长花岗岩,普遍缺乏基性岩,但在大别山北部发育大量北西展布与花岗岩类形成时代近于一致的基性—超基性岩带,它们具有低的  $\delta\text{Nd}$  和高的  $\delta\text{Sr}$  值<sup>[14]</sup>,表明岩浆具有壳幔混合的特点,主要来源于上地幔与下地壳的部分熔融。

(2)高钾钙碱性花岗岩与 Adakite 岩相似,具有高 Sr、Ba,高 Sr/Y、La/Yb,亏损重稀土元素和 Y、Yb 等特征,说明其岩浆形成深度较大。

(3)司空山、大同岩体中随  $\text{SiO}_2$  的增加, $\text{K}_2\text{O}$  明显增加,

Na<sub>2</sub>O、MgO 等降低, Sr、Eu 随 SiO<sub>2</sub> 的增加而持续降低, 说明岩浆经历了一定程度的结晶分异作用。δEu 无明显异常, 也说明岩浆未与斜长石处于相平衡, 岩浆来源于加厚的地壳。

(4) Nb 负异常通常被认为是俯冲带火山岩或典型陆壳岩石的标志<sup>[15]</sup>, 但也很可能与岩石圈地幔的交代作用有关<sup>[16]</sup>。而本区花岗岩形成于后造山的构造环境, 显然与俯冲带火山岩无关。大同、司空山高钾钙碱性花岗岩类 La/Nb 比值在 4.0~9.8 之间变化, Ba/Nb 比值变化范围介于 110~310 (表 1), 其 La/Nb、Ba/Nb 比值较之洋脊玄武岩、洋岛玄武岩及原始地幔均显著偏高, 在 La/Nb-Ba/Nb 关系图上, 样品点都投影在岛弧火山岩、碎屑沉积物及大陆地壳的分布区较接近, 因此, Nb 的负异常最可能为陆壳物质参与成岩过程所致。

(5) 大别山特殊的地质背景为与 Adakite 岩相似的高钾钙碱性花岗岩形成提供了有利条件, 印支期陆壳岩石俯冲到 90 km 以下形成超高压变质带, 俯冲作用导致地壳的显著增厚, 到早中侏罗世, 超高压变质岩已折返至地表, 但在燕山早期大别造山带仍存在一个加厚的地壳<sup>[17-18]</sup>, 可能由地壳的收缩增厚(构造作用)引起或者由于上地幔的高温镁铁质-超镁铁质岩浆底侵作用(岩浆作用)形成, 更有可能是两者的共同作用, 加厚的地壳导致温度升高、压力增大, 底侵的基性岩浆作用, 引起下地壳物质的部分熔融, 形成高钾钙碱性熔浆, 最

终就位形成高钾钙碱性花岗岩。

第二类钙碱性花岗岩明显受 NE、NNE 向断裂构造控制, 可能与第一类高钾钙碱性花岗岩有不同的来源, 由正常的地壳重熔形成, 这是由于①岩石中贫 Sr, 具明显的负钕异常, 说明岩浆形成的温压条件是与斜长石相平衡的, 而斜长石稳定的压力 ( $P < 1.2 \text{ GPa}$ ) 要低于石榴石。因此, 此类花岗岩形成的深度较浅; ②在 La/Nb-Ba/Nb 关系图上, 英山尖岩体两个样品落在碎屑沉积物及大陆地壳的分布区, 揭示陆源物质参与了成岩过程; ③此类岩石受西濒环太平洋构造体系域控制, 燕山晚期构造加厚形成的山根已经拆沉, 岩石圈厚度已减薄至正常, 重熔的热源主要来自于深部的剪切热和沿断裂上涌的岩浆热液。

大别山高钾钙碱性花岗岩与典型 Adakite 岩<sup>[9]</sup>在地球化学特征上, 总体上是非常相似的, 但前者比后者明显高钾, 产生这种差别的主要原因是:

①构造环境不同, 典型 Adakite 岩形成于年轻的 ( $\leq 25 \text{ Ma}$ ) 火山弧环境; 大别山高钾钙碱性花岗岩形成陆内造山带碰撞后的板内环境。

②岩浆源区不同, 典型 Adakite 岩是由大洋板片深俯冲到 75~80 km 发生熔融形成的, 而大别山高钾钙碱性花岗岩是在印支期陆壳岩石经过深俯冲作用的基础上形成的, 陆壳岩石含有相对较高的钾, 最有可能起源于陆壳较富钾的岩石有关<sup>[19]</sup>或含有变质沉积物的下地壳源区, 但也不能排除是由含石榴石的富集地幔或由镁铁质岩浆形成的 Adakite 母岩浆, 形成过程中遭受了同化混染和结晶分异作用的改造<sup>[20]</sup>。

## 5 构造岩浆动力学意义

大别山超高压变质带中燕山期花岗岩具有两类独特的地球化学特征, 恰好反映当时的构造动力学背景。到目前为止, 大别山还没有确切可靠的蛇绿岩套, 存在洋壳的可能性极小, 印支期为陆-陆俯冲形成的超高压变质带, 引起地壳的显著加厚、构造应力局部集中和地壳热流值失稳等, 为高钾钙碱性花岗岩的形成提供了有利构造位置。燕山早期继承了印支期及其以前的构造形迹, 呈 NW-NNW 向展布。从印支期到燕山早期, 大别造山带都发生了强烈的俯冲、逆掩-叠覆作用, 形成碰撞造山带和逆掩断层、叠瓦构造带, 标志着扬子板块、华北板块之间的大陆岩石圈进一步缩短, 导致了造山带地区地壳的加厚和热流值增加, 地幔玄武质岩浆上涌, 诱使加厚的下地壳发生熔融, 最终形成与 Adakite 岩相似的高钾钙碱性花岗岩; 燕山晚期, 大别造山带已转换为受西濒环太平洋构造体系域的控制<sup>[21]</sup>, 构造形迹和岩浆岩呈 NNE-NE 向延伸, 构造、岩浆作用形成的加厚地壳已经拆沉, 岩石圈厚度已减薄至正常, 地壳伸展, 郟庐断裂带进一步发展<sup>[22]</sup>, 诱发热流上升, 岩浆上涌, 使正常地壳发生重熔, 形成 Eu 负异常明显的钙碱性岩浆, 熔浆沿断裂就位, 形成第二类花岗岩。大别山燕山期两组方向的火成岩发育可能与上述构造动

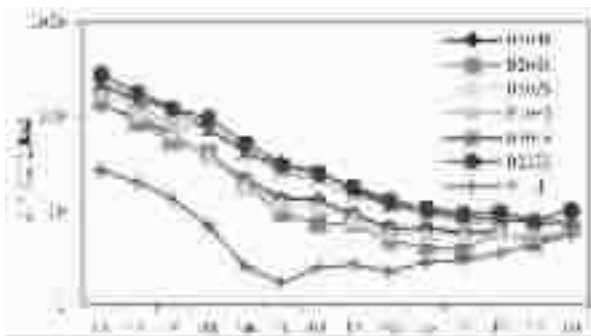


图 7 司空山岩体稀土元素分布图

Fig. 7 REE distribution patterns of the Sikongshan granite

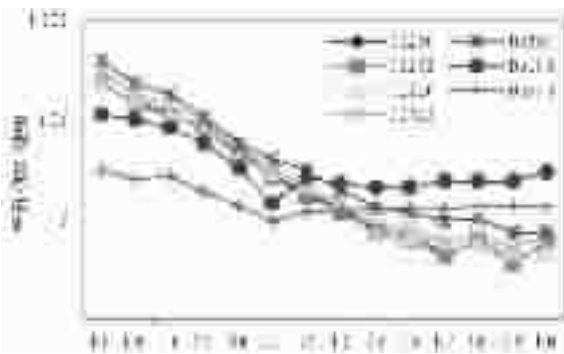


图 8 大同、英山尖岩体稀土元素分布图

Fig. 8 REE distribution patterns of the Datong and Yingshanjian granites

力体制转换有密切的关系。

### 参考文献 (References):

- [1] 徐启东,张本仁,单光祥,等. 大别造山带中生代花岗岩岩类成分的时空分布与造山带演化的关系[J].地球科学,1997,22(6):595~598.  
Xu Qidong, Zhang Benren, Shan Guangxiang, et al. Relationship between space-time distribution of Mesozoic granitoid rocks and evolution of Dabie orogen[J]. Earth Science, 1997, 22(6): 595~598 (in Chinese with English abstract).
- [2] 马昌前,杨坤光,许长海. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理[J].岩石学报,1999,15(4):379~395.  
Ma Changqian, Yang Kunguang, Xu Changhai. Mesozoic potassic magmatism in the Dabie Mountains: implication for exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic terranes[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(4):379~395 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王强,许继锋,赵振华,等. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J].岩石学报, 2001,17(4):551~564.  
Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan Period in the Dabie Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4):551~564 (in Chinese with English abstract).
- [4] 潘国强,陆现彩,于航波. 北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论[J].岩石学报, 2001,17(4):541~550.  
Pan Guoqiang, Lu Xiancai, Yu Hangbo. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from Northern Huaiyang and discussion on its genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 541~550 (in Chinese with English abstract).
- [5] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662~665.
- [6] Li S, Jagoutz E, Zheng Z, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J].Chemical Geology, 1993,109: 89~111.
- [7] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 161: 215~236.
- [8] Cong Bailin. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region of China[M]. Beijing: Science Press and Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] 谢智,陈江峰,周泰禧,等. 大别山造山带变质岩和花岗岩的钕同位素组成及其地质意义[J].岩石学报,1996,12(3):401~408.  
Xie Zhi, Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, et al. Nd isotopic compositions of metamorphic and granitic rocks from Dabie orogen and their geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica,1996, 12 (3): 401~408 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李石,王彤. 桐柏—大别山花岗岩类地球化学[M].武汉:中国地质大学出版社, 1991.  
Li Shi, Wang Tong. Geochemistry of granitoid from Tongbai—Dabie mountain [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1991 (in Chinese with English abstract).
- [11] 管运财,高天山,吴海权. 大别山地区(安徽)中生代花岗岩岩类岩体特征与形成机制[J].安徽地质,1995,5(3):10~16.  
Guan Yuncai, Gao Tianshan, Wu Haiquan. The characteristics and genesis of Mesozoic granite in Dabie area [J]. Geology of Anhui, 1995, 5(3):10~16 (in Chinese with English abstract).
- [12] Hofmann A W. Chemical differentiation of the earth:the relationship between mantle,continental crust,and oceanic crust,earth and Planet [J].Sci.Lett.,1988 ,90:297~314.
- [13] 刘红涛,孙世华,刘建民,等.华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类:地球化学与源区性质[J].岩石学报, 2002,18(3):257~274.  
Liu Hongtao, Sun Shihua, Liu Jianming, et al. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Carton: Geochemistry and source region [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002,18(3):257~274 (in Chinese with English abstract).
- [14] Li Shuguang, Nie Yonghong, Hart S R. Interaction between subducted continental crust and upper mantle II Sr and Nd isotopic geochemistry of the syncollision mafic-ultramafic rocks[J]. Science in China (Series D), 1997, 27: 488~493 (in Chinese).
- [17] 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙[M].北京:地质出版社, 1996.  
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Roots—plume tectonics of China—Key to the Continental dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [18] 戴圣潜,邓晋福,吴宗絮,等.大别造山带燕山期造山作用的岩浆岩石学证据[J].中国地质,2003,30(2):159~165.  
Dai Shengqian, Deng Jinfu, Wu Zongxu, et al. Evidence of magmatic petrology for the Yanshanian orogeny in the Dabie orogen[J].Geology in China, 2003, 30 (2): 159~165 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张旗,王焰,钱青,等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其成矿意义[J].岩石学报, 2001,17(2):236~244.  
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significance of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (2):236~244 (in Chinese with English abstract).
- [20] Robert P R, Xiao Long, Nobu. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002,18(3):293~302.
- [21] 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M].北京:科学出版社, 1990.  
Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, et al. Lithospheric tectonic evolution and mineralization in eastern China and adjacent areas [M]. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese with English abstract).
- [22] 朱光,王道轩,刘国生,等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J].地质科学, 2001,36(3):269~278.  
Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, et al. Extensional activities along the Tan-lu fault zone and its geodynamic setting[J]. Scientia Geologica Sinica. 2001, 36 (3): 269~278 (in Chinese with English abstract).

## Geochemical characteristics and genesis of Yanshanian granite in the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt

QIAN Cun-*chan*<sup>1,2</sup>, LU Yu-*lin*<sup>2</sup>, LIU Li-*li*<sup>2</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Anhui Institute of Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China)

**Abstract:** According to the rock composition, occurrence, textures, emplacement mechanism and geochemical characteristics, the Yanshanian granitoids in the Dabie UHP metamorphic belt may be classified into two major types: the high-K calc-alkaline series and the normal calc-alkaline series. The high-K calc-alkaline series is represented by the Datong rock body and the early-stage and main-stage Sikongshan rock bodies and composed lithologically of granodiorite-monzogranite. The chemical composition is characterized by  $\text{SiO}_2 > 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 14\%$ ,  $\text{MgO} < 3\%$ , high Sr and Ba contents, enrichment in LREE, strong depletion in HREE, high Sr/Y and La/Yb ratios ( $\geq 30$  and  $\geq 39$ , respectively), low Y ( $< 18 \times 10^{-6}$ ) and Yb ( $< 1.9 \times 10^{-6}$ ) contents, and indistinct Eu and Sr negative anomalies. These characteristics are similar to those of adakite. The normal calc-alkaline series is represented by the Yingshanjian rock body, consisting dominantly of monzogranite. It is characterized by high  $\text{SiO}_2 (> 70\%)$ , low  $\text{Al}_2\text{O}_3 (< 14\%)$ , low Sr and Ba contents, low Sr/Y ( $< 10$ ) and La/Yb ( $< 10$ ) ratios, high Y ( $> 18 \times 10^{-6}$ ) and Yb ( $> 1.9 \times 10^{-6}$ ) contents, depletion in LREE, enrichment in HREE, and pronounced negative Sr and Eu anomalies. The high-K calc-alkaline granites might be derived by partial melting of the thickened lower crust, while the normal calc-alkalis granites probably originated by anatexis of the normal crust.

**Key words:** granites; high-K calc-alkali series; Yanshanian; ultrahigh-pressure metamorphic belt; Dabie Mountains