

大别造山带宿松球颗结构安山岩的地球化学特征^{*}

付永涛^{1,2} 李继亮¹ 吴运高¹

FU YongTao^{1,2}, LI JiLiang¹ and WU YunGao¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

1. Laboratory of Lithosphere Tectonic Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266701, China.

2000-08-22 收稿, 2000-11-20 改回.

FU YT, Li JL and Wu YG. 2001. Geochemical properties of the variolitic andesite from Susong in the Dabie orogenic belt, China. Acta Petrologica Sinica, 17(2):254-262

Abstract The variolitic andesite from the Susong County in the Dabie Mountains implies that it was erupted in water. The mineralogy of the varioles is primarily radiate plagioclase (albite and oligoclase), with little pyroxene, hornblende and quartz (derived from alteration). The pyroxene, hornblende and quartz are in the interstices between plagioclase. The matrix consists of glass, hornblende, chlorite, epidote and zoisite. It is clearly subjected an extensive alteration. The andesite has an uncommon chemical composition. The SiO₂ content is about 56.8%, TiO₂=0.9%, MgO=6.4%, Fe₂O₃(tot)=6.7%~7.6%, 100Mg/(Mg+Fe)=64.1~66.2. Mg²⁺ is significantly high. The andesite has high abundances of large-lithophile trace elements (e. g. K, Ba, Sr, LREE), e. g. La/Nb=5.56~6.07, low abundances of high-strength-field elements (HFSE, e. g. Ta, Nb, P, Ti), particularly Ta and Nb strongly depleted. These are consistent with the characteristics of subduction-related magmas. In the spider diagram of trace elements, from Ce to right hand, the abundances of elements decrease quickly, showing a character of the continental margins. There has a strong enrichment of light-rare-earth elements, with a significant diffraction of REEs (the mean value of (La/Yb)_N is 32.84). No Eu anomaly, but there are anomaly high (La/Yb)_N=28.63~36.74, (La/Y)_N=70.33~82.84. The elements Y and Yb are depleted greatly, Y<20 μg/g, Y_N=2.74~2.84, Yb_N=2.18~2.35. From the La-(La/Sm) diagram, the andesite is derived from partial melting. But the epsilon value of Nd is -18.7~-19.2, so that the material source may be the mantle materials affected by the crustal materials. The Nd model age is 1.9 Ga indicating that the variolitic basaltic andesite was resulted from the mantle wedge of North China block, which had the Nd model age of 2.5Ga, when the Yangze block which had the Nd model age of 1.7Ga subducted beneath it. So the variolitic andesite has characteristics of the island-arc volcanic rocks on a continental basement in the vicinity of the destructive continental margin.

Key words Dabie orogenic belt, Variolitic structure, Andesite, Island-arc, Continental margin

摘要 大别造山带南部宿松球颗结构安山岩的球颗结构指示此安山岩是喷发于水下环境。球颗由放射状斜长石(蚀变为钠长石和更长石)及少量位于斜长石间隙的单斜辉石、普通角闪石和蚀变矿物石英组成,基质由玻璃质、绿泥石、帘帘石、角闪石组成。SiO₂=56.17%~58.31%, Al₂O₃=14.08%~14.67%, TiO₂=0.91%~0.94%, Na₂O=4.19%~4.58%, K₂O=0.93%~1.42%, MgO 含量高达 5.66%~6.98%, 100Mg/(Mg+Fe)=64.1~66.2。球颗结构安山岩和闪长斑岩、英安岩均为亚碱性的钙碱性系列岩石。球颗结构安山岩富集 Sr(1259~1588 μg/g)、Ba(880~1134 μg/g)、Th、Rb 等大离子亲石元素。大离子亲石元素相对高场强元素富集,例如 La/Nb=5.56~6.07。高场强元素的比值具有类似 MORB 特性,例如 Zr/Nb=22.08

^{*} 中国科学院重大项目(KZ951-A1-401-06),国家重点基础研究发展规划(G20000467)资助。

第一作者简介:付永涛,男,1970年11月生,博士,大地构造学专业,现从事海洋地质研究。

~26.14, Hf/Ta=5.62~9.62。亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素, 自 Ce 元素向右, 各元素的含量下降很快, 表现出活动大陆边缘的与俯冲作用有关的火山岩的特征。轻稀土元素强烈富集, 稀土分馏显著 ((La/Yb)_N=32.84), 没有 Eu 异常。具有岛弧安山岩的特征, 但有异常高的 (La/Yb)_N=28.63~26.74, (La/Y)_N=70.33~81.04。并且 Y 和 Yb 元素有显著的亏损, Y<20 μg/g, Y_N=2.74~2.86, Yb_N=2.18~2.35。从 La-(La/Sm) 图解看, 本安山岩为部分熔融作用的产物。La/Nb 的平均值为 5.83, 这在岛弧火山岩是很广泛的特点。Nd 的 ε_{Nd}(0) 为 -18.71~-19.16, 物源是大陆物质或被大陆物质所混染。Nd 模式年龄为 1.9Ga, 可能反映了 Nd 模式年龄为 1.7Ga 的俯冲扬子板块引起 Nd 模式年龄为 2.5Ga 的华北大陆岩石圈地幔楔物质部分熔融, 产生这种玄武质岩浆。因而具有大陆基底的活动大陆边缘的岛弧火山岩的地球化学特征。

关键词 大别山造山带; 球颗结构; 安山岩; 岛弧; 大陆边缘

中图法分类号 P588.144; P542.2

大别山造山带以超高压变质作用而闻名于世(Okay *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 1989; Xu *et al.*, 1992; 从柏林等, 1999), 但其大地构造格局, 存在许多不同的认识(Xu *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 1992; Okay *et al.*, 1993; Maruyama *et al.*, 1994; Cong *et al.*, 1994; Wang and Cong, 1995; Hacker *et al.*, 1996; Li *et al.*, 1996; Liou *et al.*, 1996; Wang and Cong, 1996; 李继亮, 1999)。王清晨和从柏林(1998)、从柏林和王清晨(1999)曾对此做了回顾。其中关键的因素是, 缺乏明确的与俯冲陆壳相对应的岛弧岩石或蛇绿岩证据, 虽然有学者认为北大别杂岩或其中的某些岩块具有岛弧的地球化学特征(如 Zhai *et al.*, 1994; Zhai *et al.*, 1995; 王强等, 2000)。作者在大别山南部首次发现了球颗结构的玄武质安山岩(付永涛等, 2000; Fu *et al.*, 2000), 其本身的球颗结构和岩石的钠长石化指示其喷发于水下环境。在地球化学上, 其表现为活动大陆边缘的与俯冲作用有关的岛弧火山岩特征。

1 球颗结构安山岩的地质产状和矿物组成

球颗结构安山岩就位于晚元古代宿松群片麻岩中, 位于宿松高压混杂带和南大别超高压混杂带交界南侧(图 1), 紧邻大别山榴辉岩地体的南界断裂(太湖-马庙断裂带)。Wang *et al.* (1998)、王清晨等(1999)指出: 此断裂带是在榴辉岩地体折返到中地壳时形成的。断裂两侧的变质镁铁质岩所经历的峰期压力有显著的差别。北侧榴辉岩的峰期压力高达 2.5 GPa, 而南侧角闪岩的峰期压力低于 0.8 GPa。它们达到各自峰期变质压力时处于不同的古地温场中, 换言之, 处于不同的构造环境。

球颗结构安山岩呈两条带状, 各宽 50cm 左右, 中间被一 80cm 宽的闪长斑岩脉分隔, 两侧为对称的酸性岩脉(图 1)。球颗玄武质安山岩具特征的麻点(即球颗)状外貌(Le Maitre *et al.*, 1991)。球颗直径 1~4mm, 由斜长石、辉石(已蚀变)、角闪石和石英(蚀变矿物)组成。斜长石呈放射状, 双晶不发育(图 2)。由探针分析得到斜长石为钠长石和更长石(表 1), 可能是钠长石化的结果。辉石已蚀变为绿帘石, 但保持辉石柱状、短柱状晶形。角闪石为菱形、四边形, 两组完全解理发育。石英为微粒它形, 应为初始的中长石或拉长石蚀

变为钠长石、更长石的产物。辉石、角闪石和石英发育于斜长石间隙中。基质由玻璃质和绿帘石、绿帘石、黝帘石等微晶质组成, 蚀变较强烈, 有碳酸盐蚀变矿物方解石。在手标本和显微镜下, 球颗与基质边界清晰, 球颗颜色较浅。球颗内部蚀变相对较弱。矿物成分见表 1。

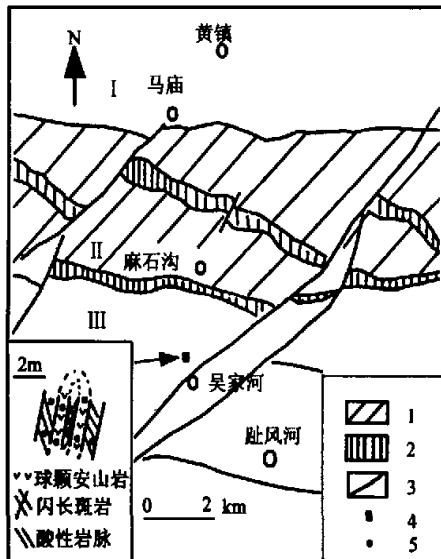


图 1 大别山宿松球颗结构安山岩的地质简图(据 Wang *et al.* (1998)修改)。

1. 南大别超高压变质带, I. 太湖-马庙断裂, II. 宿松超高压变质带; 1. 糜棱岩+片麻岩, 2. 花岗岩片麻岩, 3. 断裂, 4. 露头位置, 5. 采样点

Fig. 1 The geological sketch map of the variolitic andesite in Shusong, Dabie Mountains. I. South Dabie ultrahigh-pressure metamorphic belt, II. Taihu-Mamiao fault, III. Susong high-pressure metamorphic belt; 1. mylonite + gneiss; 2. granitic gneiss; 3. fault; 4. outcrop; 5. sample's spot

这种球颗结构的安山岩发生强烈的钠长石化, 与张八岭群细碧岩的关系如何, 是需要解决的问题。并且出现绿帘石,

表1 大别山宿松球状结构安山岩矿物成分电子探针分析结果(样品号:99613L14)

Table 1 Microprobe analysis results of minerals of the variolitic andesite from Susong, Dabie Mountains.

(Sample: 99613L14)

	Va-Pl	Va-Pl	Va-Pl	Va-amp	Va-cpx	Ma-amp	Ma-amp	M-blue-amp	Ma-zo	Ma-zo	Ma-chl
SiO ₂	66.82	65.11	67.56	42.54	52.33	42.51	42.58	39.71	37.21	37.22	31.90
TiO ₂	0.04	0.06	0.05	1.39	0.55	3.17	2.93	2.38	0.15	0.09	0.06
Al ₂ O ₃	20.62	21.82	20.30	12.33	2.09	11.53	11.27	12.57	20.40	21.26	16.98
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.04	0.74	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.03
MgO	0.82	0.12	0.13	13.51	16.62	14.64	15.38	9.70	0.04	0.08	25.72
CaO	0.81	2.59	0.74	11.54	20.74	11.29	11.28	11.38	21.73	22.09	0.05
MnO	0.00	0.00	0.00	0.19	0.15	0.08	0.10	0.30	0.15	0.16	0.19
FeO	0.79	0.16	0.13	12.93	5.60	11.44	10.81	16.77	14.72	13.90	12.84
NiO	0.00	0.00	0.06	0.01	0.06	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.04
Na ₂ O	10.31	9.60	11.03	2.33	0.45	2.42	2.39	2.13	0.02	0.00	0.03
K ₂ O	0.32	0.35	0.18	0.78	0.00	0.92	0.94	0.76	0.00	0.02	0.59
总量	100.53	99.85	100.19	97.60	99.40	98.02	97.72	95.76	94.48	94.83	88.43
Si	2.92	2.87	2.95	6.30	1.93	6.24	6.25	6.14	6.35	6.30	6.22
Ti	0.00	0.00	0.00	0.15	0.02	0.35	0.32	0.28	0.02	0.01	0.01
Al	1.06	1.13	1.05	2.15	0.09	1.99	1.95	2.29	4.10	4.24	3.90
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ⁺³					0.03						
Mg	0.05	0.01	0.01	2.98	0.91	3.20	3.37	2.24	0.01	0.02	7.47
Ca	0.04	0.12	0.03	1.83	0.82	1.78	1.78	1.89	3.97	4.01	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.03
Fe ⁺²	0.03	0.01	0.01	1.60	0.14	1.40	1.33	2.17	2.10	1.97	2.09
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Na	0.87	0.82	0.93	0.67	0.03	0.69	0.68	0.64	0.01	0.00	0.01
K	0.02	0.02	0.01	0.15	0.00	0.17	0.18	0.15	0.00	0.00	0.15
总量	4.99	4.98	5.00	15.87	4.00	15.84	15.87	15.83	16.58	16.58	19.90
Ab	94.00	85.28	95.44								
Or	1.90	2.04	1.03								
An	4.10	12.69	3.53								

分析者:中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放实验室徐平,仪器型号: SX-51. Va- 指示球状, Ma- 指示基质. Pl 是斜长石, Amp 是角闪石, Cpx 是单斜辉石, Zo 是黝帘石, Chl 是绿泥石。

其变质程度如何也是令人感兴趣的问题。另外,基质的绿泥石、绿帘石、黝帘石矿物变质、变形问题,都需要进一步的工作来完成。然而,宿松杂岩的变质作用(魏春景和单振刚, 1997)与本文的球状结构安山岩的矿物组合并不相同。

球状结构是迅速冷却和淬火结晶的产物,常见于海底喷

发(即水下环境)的快速冷却的球状玄武岩(Le Maitre *et al.*, 1991)。当球状玄武岩发育于枕状熔岩边缘时,可做为深海环境的标志(Furnes *et al.*, 1973)。另外,安山岩发生了强烈的钠长石化,因而,本文的球状结构安山岩暗示其喷发于水下环境。

表2 大别山宿松球状结构安山岩、闪长斑岩和酸性岩脉的主量元素及部分微量元素

Table 2 Major elements and some trace elements of the variolitic basaltic-andesites and mid-acid veins from Susong in the Dabie Mountains

	613Z7	613Z10	613L14	613L16	613L13	613L17	613L15'	613Z4
SiO ₂ (%)	56.52	56.29	56.17	58.31	55.72	65.47	69.34	68.93
TiO ₂ (%)	0.91	0.94	0.93	0.91	1.01	0.54	0.34	0.34
Al ₂ O ₃ (%)	14.35	14.62	14.67	14.08	14.84	16.66	15.27	14.97
TFe ₂ O ₃ (%)	7.34	7.63	7.47	6.67	7.02	3.23	2.18	2.22
MnO(%)	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.04	0.02	0.02
MgO(%)	6.14	6.98	6.72	5.66	6.12	0.89	0.86	0.89
CaO(%)	5.75	5.61	5.63	4.43	4.80	1.55	0.40	0.68
Na ₂ O(%)	4.58	4.19	4.19	4.49	3.95	4.73	3.96	4.48
K ₂ O(%)	1.18	1.00	0.93	1.42	2.88	4.84	5.14	3.89
P ₂ O ₅ (%)	0.41	0.42	0.42	0.40	0.43	0.17	0.11	0.11
Total(%)	97.27	97.78	97.23	96.47	96.87	98.12	97.62	96.53
Ba(μg/g)	1054	1184	1127	1421	1657	1725	1624	1487
Co(μg/g)	31.73	32.71	29.45	29.34	47.89	36.78	65.00	78.21
Cr(μg/g)	347	355	350	319	273	10	36	33
Cu(μg/g)	41.23	57.29	47.96	60.54	18.40	—	3.30	2.95
Ga(μg/g)	19.04	21.19	22.26	16.74	20.11	24.04	21.62	21.03
Nb(μg/g)	9.03	10.11	9.14	9.42	9.51	12.38	8.90	7.65
Ni(μg/g)	126.18	136.66	130.92	114.35	81.76	4.49	10.09	10.02
Pb(μg/g)	13.84	14.88	13.81	12.00	18.72	22.55	36.45	20.38
Rb(μg/g)	21.21	17.71	26.33	33.38	81.33	120.11	172.02	151.62
Sr(μg/g)	1391	1589	1553	1259	912	596	581	446
Th(μg/g)	7.94	—	11.58	9.71	23.31	28.78	38.31	57.38
V(μg/g)	101.92	114.27	114.90	96.51	147.64	27.08	36.34	27.16
Y(μg/g)	19.00	20.93	18.58	20.59	23.85	18.14	14.13	12.06
Zn(μg/g)	67.23	72.62	69.90	64.29	67.05	38.63	42.81	34.37
Zr(μg/g)	206.72	218.00	211.87	210.82	199.87	207.86	161.81	153.25
100Mg [#]	64.1	66.2	65.8	64.4	62.9			
K ₂ O/TiO ₂	1.30	1.06	1.00	1.56	2.87			

注: 中国科学院地质与地球物理研究所中国矿产资源探查研究中心, (XRF 荧光法), 导津 XRF-1500 型荧光分析仪, 杨玉华, 牛晶晶。主量元素最大偏差 < 1%, 微量元素 1%~9%, Ba 38.44%, Rb 13.48%, 标样为 GSR-3 玄武岩。XRF=X-ray fluorescence spectrometry。613Z7, 613Z10, 613L14, 613L16 为球状结构玄武质安山岩; 613L13 为闪长斑岩; 613L17, 613L15', 613Z4 为酸性岩脉。

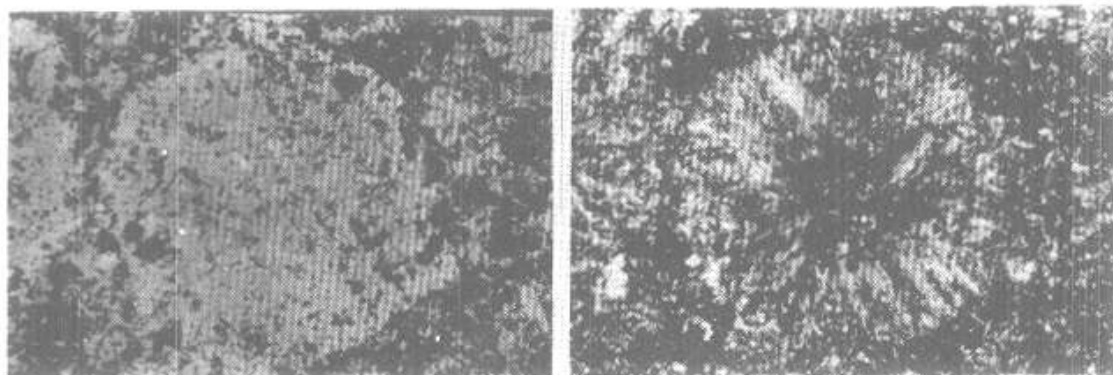


图2 大别山宿松球状结构安山岩的球状结构

(a) 单偏光 (2.5×3.3), (b) 正交镜下 (2.5×3.3)

Fig. 2 The microscope pictures of the variolitic structure from the variolitic andesite in the Dabie Mountains. (a) single polar (2.5×3.3), (b) crossed polars (2.5×3.3)

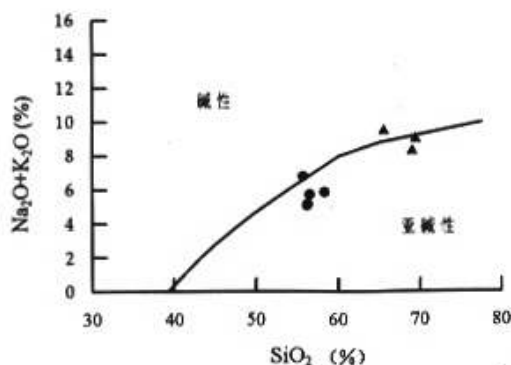


图3 大别山球状结构安山岩的 SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解

●为球状结构安山岩和闪长斑岩; ▲为酸性岩脉

Fig. 3 The SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ diagram of the variolitic andesite from Dabie Mountains. Circles are the variolitic andesites and porphyritic diorite. Triangles are dacites

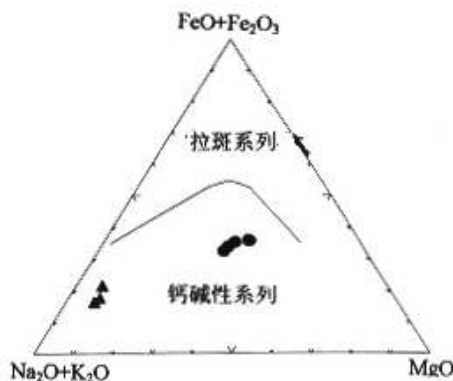


图4 大别山球状结构安山岩的 FeO - $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ - MgO 图解

●为球状结构玄武质安山岩和闪长斑岩; ▲为酸性岩脉

Fig. 4 The FeO - $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ - MgO diagram of the variolitic andesite from Dabie Mountains. Circles are the variolitic andesites and porphyritic diorite. Triangles are dacites

2 球状结构安山岩、闪长斑岩和酸性岩脉的主量元素

从化学分析结果(表2),可见四个球状结构岩石(613Z7, 613Z10, 613L14, 613L16)的 SiO_2 平均值为 56.82%, 应为玄武质安山岩。宿松玄武质安山岩的 Al_2O_3 含量偏低, 平均值为 14.43%; MgO 含量高(平均值为 6.38%); Na_2O 含量高(平均值为 4.36%); K_2O 含量低(平均值为 1.13%); TiO_2 平均值为 0.92%。100Mg/(Mg+Fe)为 64.1~66.2。

闪长斑岩(613L13)的 SiO_2 为 55.72%, MgO 为 6.12%,

Na_2O 为 3.95%, K_2O 为 2.88%, TiO_2 为 1.01%。100Mg/(Mg+Fe)为 62.9。从主量元素和 Cr、Ni、V、Zr 等微量元素特征看, 此闪长斑岩与球状结构玄武质安山岩具有亲源性。它们的 Mg/(Mg+Fe)均在 0.62 以上, 表现出富镁的特征。

酸性岩脉(613L15', 613L17, 613Z4)的 SiO_2 在 65.47%~69.34%, MgO 为 0.86%~0.89%, Na_2O 为 3.96%~4.73%, K_2O 为 3.89%~5.84%, TiO_2 为 0.34%~0.54%。从主量元素和 Cr、Ni、V、Zr 等微量元素特征看, 酸性岩脉与球状结构玄武质安山岩和闪长斑岩的化学特征差别较大。从 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(图3)和 AFM 图解(图4)可见, 球状结构安山岩为亚碱性的钙碱性系列的岩石。

表3 大别山宿松球状结构安山岩的微量及稀土元素($\mu\text{g/g}$)

Table 3 Trace elements and rare earth elements of the variolitic basaltic-andesites from Susong in the Dabie Mountains

	99613Z7	99613Z10	99613L14	99613L16
Co	26.40	28.13	29.00	25.92
Ni	146.39	157.02	150.31	136.91
Cu	57.62	71.32	65.38	76.84
Zn	59.09	64.52	64.65	60.00
Rb	28.79	25.02	22.26	31.08
Y	12.86	13.41	12.99	12.85
Zr	213.74	222.14	217.49	214.89
Nb	8.89	9.47	9.85	8.22
Sn	1.37	1.40	1.41	1.47
Cs	1.62	3.06	2.54	1.51
Ba	879.94	972.50	934.83	1133.50
La	53.94	56.68	54.62	47.13
Ce	100.55	106.64	103.34	94.48
Pr	10.99	11.63	11.19	10.31
Nd	40.27	41.94	40.87	39.01
Sm	6.71	6.88	6.63	6.73
Eu	2.02	2.20	2.24	1.90
Gd	6.03	5.89	6.07	5.54
Tb	0.68	0.71	0.71	0.68
Dy	2.94	2.95	2.90	2.91
Ho	0.49	0.55	0.53	0.52
Er	1.38	1.68	1.44	1.32
Tm	0.18	0.18	0.19	0.17
Yb	1.09	1.04	1.12	1.11
Lu	0.16	0.16	0.19	0.17
Hf	4.98	5.14	5.11	4.81
Ta	0.68	0.83	0.91	0.50
Pb	14.16	17.63	17.47	13.82
Bi	0.06	0.08	0.10	0.07
Th	8.64	8.81	8.75	8.73
U	1.44	1.61	1.52	1.46
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	33.36	36.74	32.88	28.63
$(\text{Yb}/\text{Th})_N$	0.0241	0.0225	0.0244	0.0243
$(\text{Yb}/\text{Tb})_N$	0.38	0.35	0.37	0.39
La/Nb	6.07	5.99	5.56	5.73
$(\text{La}/\text{Zr})_N$	5.26	5.32	5.24	4.57

注: 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化开放实验室 ICP-MS, 仪器型号: PQ 1 Turbo ICP-MS。最大偏差(GSR-3)1%~7%, U < 12.11%。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 Boynton 球粒陨石标准化, ICP-MS = inductively coupled plasma-mass spectrometry。

3 球状结构安山岩、闪长斑岩和酸性岩脉的微量元素

微量元素含量见表2和表3。从表2和表3, XRF 荧光法和 ICP-MS 法测试的 Ba、Rb、Co、Ni、Cu、Pb、Zn、Th、Zr、Nb 等元素含量比较接近。但 Y 元素的平均值分别为 $19.77\mu\text{g/g}$ 和 $13.03\mu\text{g/g}$, 相差很大, 其差值对二者分别为 34% 和 52% 的误差。从总体上, 说明测试结果是可靠的。

从微量元素的蛛状图(图5)可见, 球状结构安山岩富集 Sr、Ba、Th、Rb 等大离子亲石元素。Sr 元素和 Ba 元素的含量很高, 分别为 $1259.27\sim 1588.73\mu\text{g/g}$ 和 $879.94\sim 1133.50\mu\text{g/g}$ 。因此相对于 MORB, 大别安山岩的 K/Ta ($8464\sim 23656$) 和 Ba/Ta ($1027\sim 2267$) 比值高。相对而言, 大离子亲石元素相对高场强元素富集, 例如 $\text{La}/\text{Nb}=5.56\sim 6.07$ 。高场强元素的比值具有类似 MORB 特性, 例如 $\text{Zr}/\text{Nb}=22.08\sim 26.14$, $\text{Hf}/\text{Ta}=5.62\sim 9.62$ 。亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素, 这是与俯冲作用有关的火山岩的特征 (Pearce, 1982; Sun and McDonough, 1989)。自 Ce 元素向右, 各元素的含量下降很快, 表现出活动大陆边缘的特征 (Pearce, 1982)。

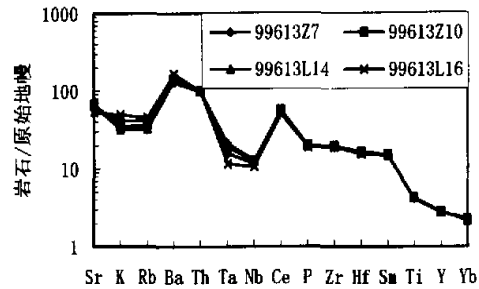


图5 大别山宿松球状结构安山岩的微量元素蛛状图(据 Pearce, 1982)

Fig. 5 The spider diagram of trace elements from the variolitic andesite from Dabie Mts. (after Pearce, 1982).

轻稀土元素强烈富集, 稀土分馏显著 ($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值为 32.84), 并且没有 Eu 异常(图6)。具有岛弧安山岩的特征, 但有异常高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 28.63\sim 26.74$, $(\text{La}/\text{Y})_N = 70.33\sim 81.04$ 。并且 Y 和 Yb 元素有显著的亏损, $Y < 20\mu\text{g/g}$, $Y_N = 2.74\sim 2.86$, $Yb_N = 2.18\sim 2.35$ 。

另外, La/Nb 的平均值为 5.83。由于 N 型 MORB 的 La/Nb 比值在 0.6~2.2, 洋岛玄武岩的比值通常小于 MORB 的比值, 而这种高的 La/Nb 比值在岛弧火山岩是很广泛的特点 (Salters and Hart, 1991)。因此, 球状结构安山岩类似于岛弧安山岩的特征。从 $\text{La}-(\text{La}/\text{Sm})$ 图解(图7)看, 本安山岩为部分熔融作用的产物(据 Allegre and Minster, 1978)。

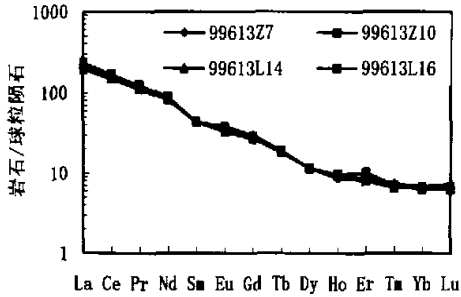


图6 大别山宿松球粒结构安山岩的稀土元素配分型式
Fig. 6 Rare-earth elements distribution patterns of the variolitic andesite from Dabie Mountains

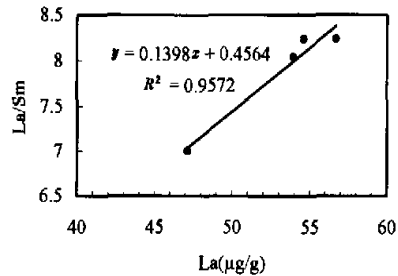


图7 大别山宿松球粒结构安山岩的 La-(La/Sm)图解
Fig. 7 The La-(La/Sm) diagram of the variolitic andesite from Susong in the Dabie Mountains.

表4 大别山宿松球粒结构玄武质安山岩的 Sm-Nd 同位素值

Table 4 The Sm-Nd isotopic values of the variolitic andesite in Dabie Mountains

样品	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$
99613Z10	7.60	48.44	0.09491	0.511656 \pm 7	-19.16	1.91
99613Z7	7.17	45.41	0.09552	0.511659 \pm 6	-19.10	1.92
99613L14	7.89	50.09	0.09522	0.511679 \pm 12	-18.71	1.89
99613L16	7.14	44.71	0.09659	0.511659 \pm 11	-19.10	1.93

测试: 中国科学院地质与地球物理研究所中国矿产资源探查研究中心同位素实验室。

$\epsilon_{\text{Nd}}(0) = 0.512638$ 。采用下面的公式 (Jahn *et al.*, 1988; Jahn *et al.*, 1998) 计算球粒结构玄武质安山岩的 Nd 模式年龄:

$$T_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] \}$$

其中 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}}$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}}$ 为样品测量值, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}$ 为亏损地幔值, 分别为 0.51315 和 0.2137, $\lambda(^{147}\text{Sm}) = 6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$ 。

4 球粒结构安山岩的 Sm-Nd 同位素特征

对本区的球粒结构安山岩进行了 Sm-Nd 同位素分析, 结果见表 4。质谱测定用 MAT-261 固体同位素质谱计。

Faure (1986) 指出: 正的 ϵ 值指示岩石是源于岩浆早期分离后岩浆库中残余的固相。这样的残余库岩浆被认为是亏损大离子亲石元素的, 这些大离子亲石元素在早期的部分熔融时分异进入液相; 负的 ϵ 值说明岩石是来源于比球粒陨石的 Sm/Nd 比值低的源区, 这意味着这种岩石来源于古老陆壳或被其混染。这种陆壳的从 CHUR 分异出来的初始 Sm/Nd 比值就被降低了。

球粒结构安山岩的 Nd 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 -18.71 ~ -19.16。由于野外样品分布在很小范围内, 无法获得 Sm-Nd 同位素年龄, 不能校正到古生代甚至元古代的某个时间 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 。但假设其为 400Ma 喷发的, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值仍在 -10 左右, 因此, 球粒结构玄武质安山岩的物源很可能是大陆物质或被大陆物

质混染。

Jahn *et al.* (1998) 对大别山北部的镁铁质-超镁铁质岩体进行了不同的同位素研究, 同位素表明这些岩体是早白垩纪构造后就位的。强烈的富集轻稀土元素和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-15 ~ -20) 指示, 它们是源于富集地幔源。Nb 的负异常也指示了在成因上地壳物质的重要性。Jahn *et al.* (1998) 认为碰撞后壳幔的相互作用引起这些地球化学参数的变化。

经计算的 Nd 模式年龄为 1.9Ga (表 4)。而扬子板块的 Nd 模式年龄为 1.7Ga 左右 (Chen and Jahn, 1998), 华北板块的 Nd 模式年龄通常在 2.5Ga 左右。由此可说明 Nd 模式年龄为 1.9Ga 的球粒结构玄武质安山岩是扬子俯冲板块与华北板块地幔楔物质发生壳幔物质相互作用的反映。

5 讨论

由于球粒结构安山岩中球粒中含有它形细粒石英矿物, 所以存在快速淬火结晶时将外界的石英包含在球粒中的可

能性,但另一个合理的解释是岩石青山岩化(钠长石化)时,斜长石由拉长石或中长石蚀变为钠长石、更长石时产生的石英。由于安山岩具有常见于水下喷发环境下快速冷却的球状结构(Le Maitre *et al.*, 1991),同时又具有强烈钠长石化,因此,大别山宿松球状结构安山岩可能是在水下环境喷发的。

值得指出的是,安山岩和闪长斑岩的 $Mg/(Mg+Fe)$ 异乎寻常的高,达 0.6 以上(在 $SiO_2=56\%$ 时)。Sr 和 Ba 的含量很高。因此,相似于俯冲洋壳部分熔融的产物—镁质安山岩(Rogers *et al.*, 1985; Rogers and Saunders, 1989)。这种镁质安山岩直接指示洋壳的俯冲位置(Kay, 1978; Puig *et al.*, 1984; Saunders *et al.*, 1987; Rogers *et al.*, 1985; Crawford *et al.*, 1989; Rogers and Saunders, 1989)。并且球状结构安山岩的微量元素和稀土元素的特征,是典型的与俯冲消减作用有关的火山岩特征,但球状结构安山岩的 Rb、Th 等关键的指示元素远大于镁质安山岩的含量,Zr、Ni 等高场强元素也大于镁质安山岩的范畴。因而本文不认为其属于镁质安山岩。

宿松球状结构安山岩的大离子亲石元素相对高场强元素富集,例如 $La/Nb=5.56\sim 6.07$ 。高场强元素的比值具有类似 MORB 特性,例如 $Zr/Nb=22.08\sim 26.14$, $Hf/Ta=5.62\sim 9.62$ 。亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素,自 Ce 元素向右,各元素的含量下降很快,表现出活动大陆边缘的与俯冲作用有关的火山岩的特征(Pearce, 1982)。轻稀土元素强烈富集,稀土分馏显著($(La/Yb)_N=32.84$),没有 Eu 异常。具有岛弧安山岩的特征,但有异常高的 $(La/Yb)_N=28.63\sim 26.74$, $(La/Y)_N=70.33\sim 81.04$ 。并且 Y 和 Yb 元素有显著的亏损, $Y<20\ \mu g/g$, $Y_N=2.74\sim 2.86$, $Yb_N=2.18\sim 2.35$ 。从 $La-(La/Sm)$ 图解看,本安山岩为部分熔融作用的产物(Allegre and Minster, 1978)。 La/Nb 的平均值为 5.83,这在岛弧火山岩是很广泛的特点(Salters and Hart, 1991)。

从 Nd 的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 为 $-18.71\sim -19.16$ 来看,球状结构玄武质安山岩的物源是地幔物质被地壳物质所影响。从 Nd 模式年龄为 1.9Ga 看,这种地幔-地壳的相互作用可能是大别山俯冲的扬子板块(Nd 模式年龄为 1.7Ga(Chen and Jahn, 1998))在华北大陆岩石圈(Nd 模式年龄为 2.5Ga(Chen and Jahn, 1998))地幔附近引起地幔楔物质部分熔融,这个作用类似于 Jahn *et al.* (1998)提出的壳幔相互作用的模式。张旗等(1995)在对大别山挠拔寨等超镁铁质岩体的研究中,提出过相似的观点。然而,目前还没有球状结构安山岩的同位素年龄数据来证实这一假想。

但不管怎样,大别山球状结构安山岩具有与俯冲消减作用有关的地球化学特征,以及其地表水下喷发的结构特征,因而作者推测是岛弧安山岩,指示弧增生造山作用。但其确定的大地构造意义,需要精确的同位素测年数据来制约。

另外,宿松球状结构安山岩的变质程度和变形的研究有待于进一步的工作。

致谢: 感谢张旗研究员、邓万明研究员的指导。感谢韩庆军博士、邓希光博士的帮助。感谢郑永飞教授、金成伟研究员对本文初稿的审阅,他们的建议提高了本文的水平。感谢秦蕴珊院士、李安春研究员对作者的支持。

References

- Allegre CJ, Minster JF. 1978. Quantitative models of trace elements in igneous petrology. *EPSL*, 38: 1-25
- Chen JF, Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101-133
- Cong B, Wang Q, Zhai M *et al.* 1994. Ultra-high pressure metamorphic rocks in the Dabie-Su-Lu region, China: their formation and exhumation. *The Island Arc*, 1994, 3: 135-150
- Cong B, Wang Q. 1999. The Dabie-Sulu UHP rocks belt: review and prospect. *Chinese Science Bulletin*, 44 (12): 1074-1086
- Crawford AJ, Falloon TJ, Green DH. 1989. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites. In: *Andesites, orogenic andesites and related rocks*. Ed. Thrope R S. New York, John Wiley and Sons. 1-49
- Faure G. 1986. *Principles of isotopic geology*. (second edition). New York, John Wiley & Sons. 200-216
- Fu Yongtao, Li Jiliang, Wu Yungao, Liu Xiaohan, Wu Jun. 2000. The report on variolitic basaltic andesite in the Dabieshan collisional orogenic belt. *Scientia Geologica Sinica*, 35(1): 105-106 (in Chinese with English abstract)
- Furnes H. 1973. Variolitic structure in Ordovician pillow lava and its possible significance as an environmental indicator. *Geology*, 1 (1): 27-30
- Hacker BR, Wang X, Eide EA and Ratchbacher L. 1996. The Qinling-Dabie ultrahigh-pressure collisional orogene. In Harrison, M T and Yin A (eds), *Rubey Volume VIII, Tectonic Development of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press. 345-370
- Jahn BM, Auvray B, Shen QH *et al.* 1988. Archean crustal evolution in China: the Tianshan complex, and evidence for Juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. *Precamb. Res.*, 38: 381-403
- Jahn BM, Wu F, Lo CH, Tsai CH. 1998. Crustal-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119-146
- Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesites; melts from subducted Pacific ocean crust. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4: 117-132
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A *et al.* 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell Scientific Publications
- Li J. 1999. Tectonic map of China. In: *Compilation Committee of National Atlas. Natural atlas of the People's Republic of China*. Beijing: Chinese Atlas Press. 21, 235
- Li S, Jagouzi E, Zhang Z. *et al.* 1996. Structure of high pressure metamorphic belt in the Dabie mountains and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 40(Supplement): 138~

140

- Liou J C, Zhang RY, Wang X *et al.* 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In Harrison MT and Yin A (eds.). Rubey Volume VIII. Tectonic Development of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 300~344
- Maruyama S, Liou JG and Zhang R. 1994. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure and high-pressure metamorphic belts from central China. *Island Arc*, 3: 112~121
- Okay AI, Xu S and Sengor AMC. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *Eur. Jour. Mineral.*, (1): 595~598
- Okay AI, Sengor AMC and Sant M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: the Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China. *Tectonics*, 12: 1320~1334
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: *Andesites; orogenic andesites and related rocks*. Ed. Thrope R S. New York: John Wiley and Sons, 525~548
- Puig A, Herve M, Suarez M, Saunders AD. 1984. Calc alkaline and alkaline Miocene and calc alkaline Recent volcanism in the southernmost Patagonian Cordillera, Chile. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 21: 149~163
- Rogers G, Saunders AD, Terrell DJ *et al.* 1985. Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico. *Nature*, 315: 389~392
- Rogers G, Saunders AD. 1989. Magnesian andesites from Mexico, Chile and the Aleutian Islands: implications for magmatism associated with ridge-trench collision. In: *Boninites E, Crawford AJ*(eds.). London: Unwin Hyman Inc., 416~445
- Salter VJM, Hart SR. 1991. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs; the Hf isotope connection. *EPSL*, 104: 364~380
- Saunders AD, Rogers G, Marriner GF, Terrell DJ, Verma SP. 1987. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: implications for the petrogenesis of post-subduction magmas. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 32: 223~254
- Sun SS, McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Saunders AD, Norry MJ* (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spe. Pub.*, 42: 313~345
- Wang Q and Cong B. 1995. Deformation sequence of UHP rocks from the Dabie mountains, China. *Chinese Science Bulletin*, 40 (Supp.): 154~155
- Wang Q, Cong B. 1996. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains, Sci. China (Ser D), 39: 311~318
- Wang Qingchen, Cong Bolin, Massonne HJ. 1998. Metamorphism and geodynamics at the south boundary of the Dabie eclogite terrain, China. *Scientia Geologica Sinica (oversea edition)*, 7 (4): 471~480
- Wang Qingchen, Cong Bolin, Massonne HJ. 1999. Temperature-increase metamorphism along the south boundary of the Dabie eclogite terrain, China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 338~349
- Wang Qingchen and Cong Bolin. 1998. Tectonic framework of the ultrahigh-pressure metamorphic zone from Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 481~492 (in Chinese with English abstract)
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Wang Jianxin *et al.* 2000. The identification of adakitic gray-gneiss in the north Dabie Mountains; its relationship with the ultra-high pressure metamorphism. *Chinese Sciences Bulletin*, 45(12): 1017~1024. (in Chinese)
- Wang X, Liou JG and Mao HK. 1989. Coesite-bearing eclogite from the Dabie mountains in central China. *Geology*, 17: 1085~1088
- Wang X, Liou JG and Maruyama S. 1992. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains, Central China. *Petrology and P-T path*. *Journal of Geology*, 100: 231~250
- Wei C, Shan Z. 1997. Metamorphism of the Susong Complex from the Southern Dabie Mountains, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 356~368 (in Chinese with English abstract)
- Xu ST, Okay AI, Ji S *et al.* 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80~82
- Zhai MG, Cong BL, Zhang Q *et al.* 1994. The northern Dabieshan terrane; a possible Andean-type Arc. *Inter. Geol. Rev.* 36: 867~883
- Zhai M, Cong B, Zhao Z, Wang Q, Wang G and Jiang L. 1995. Petrological tectonic units in the coesite-bearing metamorphic terrain of the Dabie Mountains, central China and their geotectonic implications. *J. SE Asian Earth Sci.* 11: 1~13
- Zhang Q, Mao B, Liu R *et al.* 1995. A relic slice of continental lithosphere mantle. *Science in China, Ser B*, 25(8): 868~873 (in Chinese)

附中文参考文献

- 从柏林, 王清晨. 1999. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. *科学通报*, 44(11): 1127~1141
- 付水涛, 李继亮, 吴运高, 刘小汉, 王义天, 吴峻. 2000. 大别山造山带中球粒结构玄武质安山岩的报道. *地质科学*, 25(1): 105~106
- 火成岩分类及术语词典. 1991. Le Maitre RW *et al.* 主编. 北京: 地质出版社. 210
- 李继亮. 1999. 中国板块构造图. 见: 国家地图编纂委员会. 中华人民共和国国家自然地图集. 北京: 中国地图出版社. 21, 235
- 王强, 许继锋, 王建新等. 2000. 北大别山 adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系. *科学通报*, 45(10): 1017~1024
- 王清晨, 从柏林. 1998. 大别山超高压变质带的大地构造框架. *岩石学报*, 14(4): 481~492
- 王清晨, 从柏林, Massonne HJ. 1999. 大别山太潮-马庙断裂带两侧变质地体的增温变质作用. *岩石学报*, 15(3): 338~349
- 魏春景, 单振刚. 1997. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究. *岩石学报*, 13(3): 356~368
- 张旗, 马宝林, 刘若新. 1995. 一个消减带之上的大陆岩石圈地幔残片——安徽饶拔寨超镁铁岩的地球化学特征. *中国科学(B辑)*, 25(8): 868~873