

大别山北麓四面山含榴混合花岗岩地球 化学特征及地质意义

李肖龙^{1,2}, 李山坡², 申硕果³, 冯一凡⁴, 张莹歌⁴, 程国安²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 河南省地质调查院 河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 河南省岩石矿物测试中心, 河南 郑州 450012; 4. 河南省地质科学研究所, 河南 郑州 450001)

摘要: 四面山含榴混合花岗岩位于大别山北麓, 主要为二长花岗质混合脉体。本文研究了该岩体的岩石学、地球化学特征并分析了岩石成因。结果表明, 四面山含榴混合花岗岩具有高硅富碱的特征, 整体属于准铝质到弱过铝质的高钾钙碱性花岗岩, 但局部可能混合岩化不均匀; 岩石富集 Ba、Th、K 而亏损 Nb、Sr、P、Ti 等元素; 稀土总量(ΣREE)为 $115.05 \times 10^{-6} \sim 430.85 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素相对富集, 铕负异常整体不明显。初步研究表明, 四面山含榴混合花岗岩是超高压地体折返到中下地壳, 在拆沉、底侵等因素影响下经部分熔融形成的。

关键词: 含榴混合花岗岩; 地球化学; 岩石成因; 大别; 四面山

中图分类号: P588.12⁺1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0655-13

Geochemical characteristics of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite at the northern foot of the Dabie Mountain and its geological significance

LI Xiao-long^{1,2}, LI Shan-po², SHEN Shuo-guo³, FENG Yi-fan⁴, ZHANG Ying-ge⁴ and CHENG Guo-an²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Henan Institute of Geological Survey/Henan Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resource Utilization, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Rock & Mineral Testing Center, Zhengzhou 450012, China; 4. Henan Institute of Geological Sciences, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Simianshan garnet-bearing migmatitic granite, which is located at the northern foot of the Dabie Mountain, is mainly composed of monzonitic granitoids. In this paper, the petrological and geochemical characteristics of the granitoid were studied to constrain the petrogenesis. The result shows that these granites are rich in silica, with high content of alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$). Overall, they are metaluminous to peraluminous granites and belong to the high-K calc-alkaline series, with locally inhomogeneous migmatization. The granitoids are characterized by enrichment of Ba, Th, K and depletion of Nb, Sr, P, Ti. The abundance of ΣREE varies in the range of $115.05 \times 10^{-6} \sim 430.85 \times 10^{-6}$. Their LREE is enriched compared with HREE and the δEu values fail to show obvious abnormal phenomena. The preliminary results of this study show that the granitic magma was derived from the partial melting of mid-lower crust, which was triggered by delamination or underplating.

收稿日期: 2016-11-21; 接受日期: 2017-07-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011220507)

作者简介: 李肖龙(1987-), 男, 博士生, 主要从事矿产勘查及矿床学研究, E-mail: lancermysself@126.com; 通讯作者: 李山坡(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查及矿床学研究, E-mail: lsp533@163.com。

Key words: garnet-bearing migmatitic granite; geochemistry; petrogenesis; Dabie; Simianshan

Fund support: Project of China Geological Survey (1212011220507)

大别-苏鲁造山带中出露很多含榴混合花岗岩体,这些花岗岩体随着大别-苏鲁超高压地质研究的进行而成为热点(杨启军等,2004;杨坤光等,2009)。目前对含榴混合花岗岩的成因认识还存在分歧,主要分歧点就在于它们是否经历了超高压变质作用。一种观点认为,含榴混合花岗岩的原岩为晋宁期花岗岩,在区域变质岩中侵位结晶并在大陆俯冲过程中与榴辉岩一起经历了超高压变质作用(刘景波等,1997; Carswell *et al.*, 2000; 孙海婷等, 2002; 刘福来等, 2004); 另一种观点认为,含榴混合花岗岩的原岩为区域杂岩中的长英质岩石,这些长英质岩石在超高压变质岩折返至中下地壳时卷入或者重熔,在空间上发生重置而形成含榴混合花岗岩,因此含榴混合花岗岩并没有经历超高压变质作用(刘晓春等,2001;徐树桐等,2002);还有一种观点也认为含

榴混合花岗岩没有经历超高压变质作用,它们是榴辉岩折返过程中发生退变质和部分熔融形成的,后期发生构造变形(Zhong *et al.*, 2001)。以上分歧在一定程度上制约了人们对造山带及其构造演化的深入认识。本文以大别山北麓四面山含榴混合花岗岩为研究对象,通过详细研究地质、地球化学特征,揭示其岩石成因,从而更好解析该类岩石的区域演化意义。

1 区域地质背景

大别山北麓四面山含榴混合花岗岩区域上位于大别造山带东段,大别地块(超高压变质折返带)的核部(图1),该区域是一个经受多次聚合后拼贴并焊接为一体的复杂构造带,侵入岩和火山活动强烈,变

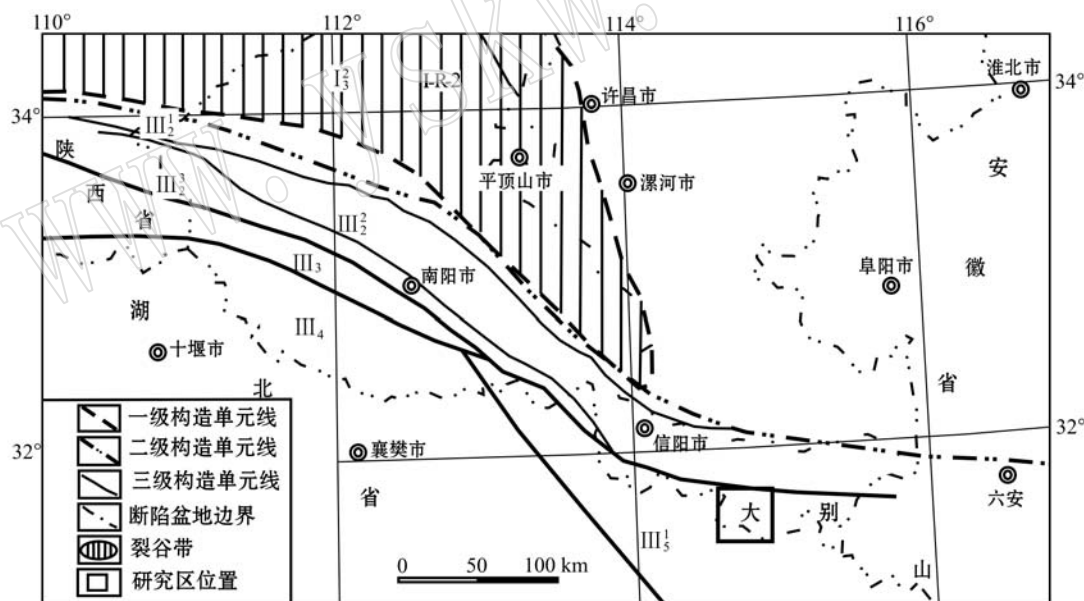


图1 大别山北麓地区大地构造位置图(底图据河南省地质调查院,2015)^①

Fig. 1 Geotectonic map of the northern margin of the Dabie Mountain (after Henan Institute of Geological Survey, 2015)^①

I₃²—太华-登封新太古代岩浆弧; I-R-2—熊耳中元古代裂谷; III₂¹—宽坪弧后盆地(P_{Z1}); III₂²—二郎坪岛弧带(P_{Z1}); III₃²—北秦岭基底杂岩(岩浆弧)(P_{Z1}); III₃³—中秦岭陆棚-陆坡(P_{Z1}); III₄¹—南秦岭被动陆缘(Z-C); III₅¹—大别高压-超高压变质杂岩带(P_{Z1}); III₅²—the late Archean Taihua-Dengfeng magmatic arc; I-R-2—the Mesoproterozoic Xiong'er rift; III₂¹—the Kuanping back-arc basin (P_{Z1}); III₂²—the Erlangping island arc belt (P_{Z1}); III₃²—the North Qinling basement complex (P_{Z1}); III₃³—the North Qinling continental shelf-slope (P_{Z1}); III₄¹—the South Qinling passive continental margin (Z-C); III₅¹—Dabie UHP metamorphic complex belt

① 河南省地质调查院. 2015. 河南省新县南部地区矿产地质调查报告.

质作用普遍。

该区出露地层主要为变质表壳岩、汴湾组及第四系。其中变质表壳岩一般呈残留包体,包体大小不等,形态各异,聚集分布在大别片麻杂岩的南北两侧,主要由黑云斜长片麻岩、含榴白云斜长片(麻)岩、斜长角闪(片)岩、钾长(或二长)变粒岩、白云石英片岩(构造片岩)及大理岩等组成,与榴辉岩之间多呈渐变过渡的退变质特征;汴湾岩组为一构造岩石单位,由高压变质岩块(HPB)和中压变质岩块(MPB)两部分组成,高压变质岩块指榴辉(闪)岩及其退变质产物,中压变质岩块为一套经历角闪岩相变质的白云(二云)二长片麻岩、含榴白云斜长片麻岩、眼球状白云(二云)二长(钾长)片麻岩(构造片麻岩)、斜长角闪片岩、白云二长片岩、白云(磁铁)石英片岩、夹绿帘斜长角闪片岩、白云石英片岩(构造片岩)、方解石大理岩透镜体。高压岩块与中压岩块之间多为构造接触,局部由于后期变质重结晶作用改造而界线不清。

该区在其漫长的构造演化中,经历了多期次的伸展裂解、会聚拼贴,直到印支期陆内俯冲作用的全面造山,形成了结构复杂的复合型造山带。其基本构造格架表现为近东西向展布的强变形带和由它们分隔或被它们夹持的、变形程度相对较弱的弱变形域相间分布,强变形带及弱变形域中均表现出规模不等的网结状构造轮廓。区内没有大的边界型韧性剪切带,统称大别核杂岩变形带。脆性构造发育,主要表现为各种性质、多种方向的脆性断裂,控制着燕山期岩浆岩体的空间分布。其中大别核杂岩变形带主要由高压变质的田铺序列花岗质片麻岩系及其中的大别岩群包体、中压变质的汴湾岩组以及混入其中的高压超高压变质岩块等不同的构造岩石地层单位组成;脆性断裂主要由北东-北北东向、北西向、近东西向等3组。

区内岩浆活动极为频繁,除四面山含榴花岗岩外,还有新元古代大别片麻杂岩、中生代侵入岩等。其中新元古代大别片麻杂岩为一套中酸性的、经强烈变形变质多次融熔改造的岩浆杂岩体,由多期复合成分的元古代变形侵入体——花岗质片麻岩体($\xi\gamma\text{Pt}_3$)、二长花岗质片麻岩体($\eta\gamma\text{Pt}_3$)、花岗闪长质片麻岩体($\gamma\delta\text{Pt}_3$)、片麻状花岗岩体(γPt_3)4部分组成。虽然它们经历了后期中深层次构造及多期熔融

事件改造,形成各种形态的新成体,但基体的构造尚清晰可辨,且新成体所占比例远较基体含量少;中生代侵入岩侵位于花岗质片麻岩中,主要岩性为细粒二长花岗岩、中粒二长花岗岩、(中)粗粒二长花岗岩等,具S型花岗岩的特征,其形成时代为晚侏罗世—早白垩世(河南省地质调查院,2005)^①。

该区主要为变质岩区,除中生代花岗岩外,大部分岩石以中深变质为主。变质岩包括区域变质岩(高压超高压变质岩)、动力变质岩、混合岩和热液蚀变岩等。

2 岩体地质及岩相学

四面山含榴花岗岩平面上呈脉状或不规则状分布于黄家洼-云台山、莲花台、翁儿洞、打油尖、柳道人寺、帽云山、四面山、孟良山及打鼓寨、下湾、林家山一带,出露面积约86 km²。围岩为大别片麻杂岩(图2)。在岩体的边部常见有围岩包体或包晶。岩体与围岩一般呈谐合接触关系,局部侵入接触。四面山含榴花岗岩为一套混合岩化作用较为彻底的全熔合岩,其新成体在95%以上,主要为二长花岗质混合脉体。基体为1~100 mm不等的榴辉岩残留包体,或石榴石、磁铁矿混合残晶。个别地方由于混合岩化作用程度相对较低而形成斑点状-角砾状混合岩。脉体岩石呈灰白-淡红色,细(中)粒粒状变晶结构,片麻状构造(图3),主要由斜长石(30%±)、钾长石(30%~40%)、石英(20%~30%)及黑云母(3%±)、磁铁矿(2%~5%)、石榴石(1%~5%)等组成,副矿物有锆石、磷灰石、榍石等。其中斜长石呈半自形柱状、粒状,0.4~3.0 mm,个别晶体内有石英包晶,平行分布;钾长石呈半自形-它形粒状,粒径0.2~3.6 mm,格子双晶发育,平行分布;石英呈它形粒状,粒径大小不等,一般粒径在0.4~2.8 mm,与长石相间分布;黑云母呈片状,片体长为0.2~0.8 mm,集合体呈断续细条带状分布在长石、石英颗粒间;磁铁矿呈半自形-它形粒状、柱状,少数呈正方形,磁铁矿或者与石榴石呈条带状、囊状分布,或者零星分布,前者是同化混染后的捕虏晶,为石榴石退变质作用的产物,后者为岩浆结晶的产物;石榴石呈粒状,粒径1~5 mm不等,呈残晶状与角闪石、黑云母、石英呈集合体残余包体。副矿物有锆石、磷灰

① 河南省地质调查院. 2005. 河南省县南部地区矿产地质调查报告.

表 1 四面山含榴混合花岗岩全岩主量元素($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析
Table 1 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of the Simianshan granite

样品号	XWG3	XWG4	XWG5	I-98-YQ34	I-98-YQ14	I-98-YQ15	I-98-YQ5	I-98-YQ9	I-98-YQ12	I-97-YQ24	I-97-YQ76	I-99-YQ5	I-0-YQ6
SiO ₂	75.41	75.27	75.45	74.36	75.96	76.9%	74.00	76.08	73.44	75.32	75.74	75.10	73.40
TiO ₂	0.09	0.08	0.15	0.25	0.25	0.20	0.35	0.20	0.35	0.20	0.28	0.34	0.34
Al ₂ O ₃	12.90	13.30	12.59	13.70	12.47	12.18	13.66	10.69	13.66	11.54	11.88	11.38	14.16
Fe ₂ O ₃	0.94	1.01	0.74	1.29	1.03	0.59	0.47	2.38	0.36	2.25	1.48	1.17	1.35
FeO	0.50	0.28	0.40	0.38	0.50	0.73	1.58	0.90	1.50	1.40	1.43	2.28	1.22
MgO	0.07	0.08	0.21	0.08	0.04	0.06	0.14	0.13	0.11	0.08	0.06	0.13	0.07
MnO	0.08	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CaO	0.20	0.11	0.67	0.68	0.70	0.70	1.25	0.70	1.25	0.17	0.40	0.81	0.92
Na ₂ O	4.55	4.80	4.27	4.88	4.00	4.12	3.92	4.12	5.46	3.64	3.76	4.10	3.54
K ₂ O	4.67	4.38	4.71	2.56	4.00	3.90	2.84	3.90	1.94	4.20	3.90	3.74	2.86
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.04	0.06	0.04	0.02	0.05	0.00	0.07	0.03	0.03	0.03	0.06
H ₂ O ⁺	0.36	0.45	0.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO ₂	0.08	0.06	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lost	0.38	0.49	0.52	0.65	0.71	0.25	1.04	0.31	0.78	0.49	0.78	0.66	1.34
Total	100.24	100.38	100.36	98.89	99.70	99.71	99.30	99.41	98.92	99.32	99.74	99.74	99.26
K ₂ O+Na ₂ O	9.22	9.18	8.98	7.44	8.00	8.02	6.76	8.02	7.40	7.84	7.66	7.84	6.40
K ₂ O/Na ₂ O	1.03	0.91	1.10	0.52	1.00	0.95	0.72	0.95	0.36	1.15	1.04	0.91	0.81
A/CNK	1.00	1.04	0.94	1.14	1.02	0.99	1.16	0.87	1.02	1.06	1.07	0.93	1.34
A/NK	1.03	1.05	1.04	1.27	1.14	1.11	1.43	0.97	1.23	1.10	1.14	1.05	1.59
Mg [#]	19.97	33.74	48.34	27.29	12.48	12.78	13.64	20.48	11.56	9.24	6.96	9.23	9.28
Sc	2.92	2.14	2.27	9.20	4.20	6.20	5.00	4.80	11.00	5.80	9.50	6.30	5.30
Li	1.66	1.21	7.30	6.00	2.00	3.00	4.00	2.00	7.00	7.00	5.00	5.30	9.50
Co	0.31	0.37	0.97	1.60	2.50	1.70	2.00	2.90	2.00	2.30	1.80	2.30	3.60
Rb	86.36	82.23	92.19	56.00	90.00	83.00	84.00	70.00	53.00	77.00	37.00	75.20	70.80
Zr	182.10	173.70	113.90	270.00	140.00	120.00	620.00	560.00	450.00	620.00	270.00	672.00	242.00
Nb	17.43	16.71	14.90	15.00	12.00	16.00	25.00	18.00	15.00	22.00	8.30	23.50	17.10
Cs	1.21	1.24	0.78	1.20	1.40	1.10	1.60	1.30	1.20	1.20	1.20	0.60	0.80
Hf	7.54	6.24	4.41	8.10	4.40	3.10	11.00	11.00	10.00	12.00	8.00	17.30	6.80
Ta	1.46	1.16	1.32	1.50	0.93	1.30	1.80	1.30	1.10	1.20	1.10	—	—
Th	10.68	11.88	13.58	7.80	8.20	7.20	9.50	6.10	6.60	7.30	5.00	11.30	11.10
U	1.09	1.27	1.54	0.80	1.40	1.00	0.70	0.80	0.80	0.60	0.70	1.30	2.70
Ba	265.04	162.08	526.41	970.00	1815.00	970.00	930.00	670.00	1330.00	500.00	640.00	601.00	1090.00
Cr	2.81	3.07	2.90	32.00	22.00	102.00	168.00	79.00	122.00	176.00	82.00	12.00	137.00

续表 1
Continued Table 1

样品号	XWG3	XWG4	XWG5	I -98-YQ34	I -98-YQ14	I -98-YQ15	I -98-YQ5	I -98-YQ9	I -98-YQ12	I -97-YQ24	I -97-YQ76	I -99-YQ5	I 0-YQ6
Ni	1.92	2.20	1.59	6.00	5.00	6.00	5.00	6.00	6.00	5.00	6.00	5.10	5.20
Sr	11.22	14.13	63.15	45.00	45.00	21.00	13.00	28.00	200.00	7.20	240.00	33.00	392.00
V	0.27	0.45	4.67	2.50	5.40	3.00	5.80	5.10	14.00	4.40	13.00	10.00	27.00
Sn	1.81	2.49	1.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	1.17	0.66	0.71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mo	0.34	0.34	0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Be	2.20	2.23	2.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rb/Sr	7.70	5.82	1.46	1.24	2.00	3.95	6.46	2.50	0.27	10.69	0.15	2.28	0.18
Nb/Ta	11.95	14.38	11.26	10.00	12.90	12.31	13.89	13.85	13.64	18.33	7.55	-	-
Zr/Hf	24.14	27.86	25.81	33.33	31.82	38.71	56.36	50.91	45.00	51.67	33.75	38.84	35.59
Nd/Th	3.60	1.04	2.25	6.95	3.70	4.42	5.53	16.56	8.36	10.08	7.12	6.46	3.07
La	48.61	11.43	45.89	62.00	43.30	36.40	61.90	105.00	61.20	85.30	34.60	67.92	49.58
Ce	94.46	66.27	84.00	82.00	80.70	76.40	195.00	54.40	133.00	189.00	78.80	185.40	108.70
Pr	10.97	3.41	9.45	13.20	7.01	8.03	13.70	26.90	14.40	19.70	7.85	19.39	10.62
Nd	38.47	12.36	30.58	54.20	30.30	31.80	52.50	101.00	55.20	73.60	35.60	73.04	34.10
Sm	7.13	2.88	5.67	9.53	5.54	7.19	13.30	15.30	11.70	16.20	7.88	13.29	5.62
Eu	0.39	0.17	0.43	1.95	0.97	1.24	1.86	3.31	2.92	2.04	2.02	3.10	1.20
Gd	5.92	3.07	4.76	6.80	3.66	5.97	10.90	16.40	9.45	12.30	6.36	14.65	5.44
Tb	1.08	0.66	0.88	1.24	0.57	1.00	1.70	2.13	1.76	2.04	1.05	2.11	0.78
Dy	6.58	4.88	5.37	8.19	3.87	6.51	10.90	13.30	10.20	12.30	6.99	13.19	4.37
Ho	1.41	1.09	1.09	1.79	0.86	1.49	2.31	2.63	2.23	2.71	1.43	2.82	0.89
Er	4.21	3.50	3.29	5.01	1.99	3.91	6.74	7.22	5.94	6.61	4.03	7.48	2.49
Tm	0.70	0.61	0.57	0.77	0.31	0.60	0.97	1.03	0.93	1.03	0.63	1.23	0.41
Yb	4.62	4.06	3.80	4.61	1.94	3.73	5.71	6.10	5.82	7.01	3.93	9.11	2.93
Lu	0.75	0.66	0.61	0.72	0.29	0.58	0.82	0.90	0.91	1.01	0.61	1.56	0.48
Y	37.47	28.51	31.83	36.60	21.00	31.40	50.00	57.30	47.40	56.90	33.60	82.20	26.22
ΣREE	225.29	115.05	196.40	252.01	181.31	184.85	378.31	355.62	315.66	430.85	191.78	414.29	227.61
LREE/HREE	7.92	5.21	8.64	7.65	12.44	6.77	8.45	6.15	7.48	8.57	6.66	6.94	11.79
(La/Yb) _N	7.09	1.90	8.13	9.07	15.05	6.58	7.31	11.60	7.09	8.20	5.94	5.03	11.41
δEu	0.18	0.18	0.26	0.74	0.66	0.58	0.47	0.64	0.85	0.44	0.87	0.68	0.66
Eu/Sm	0.05	0.06	0.08	0.20	0.18	0.17	0.14	0.22	0.25	0.13	0.26	0.23	0.21
Sm/Nd	0.19	0.23	0.19	0.18	0.18	0.23	0.25	0.15	0.21	0.22	0.22	0.18	0.16
La/Nb	2.79	0.68	3.08	4.13	3.61	2.28	2.48	5.83	4.08	3.88	4.17	2.89	2.90

4.1 主量元素

四面山含榴混合花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 73.40\% \sim 76.96\%$, 平均为 75.11%)富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.40\% \sim 9.22\%$, 平均为 7.90%)的特征。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 $0.36 \sim 1.15$, 平均为 0.88 。而 Al_2O_3 ($10.69\% \sim 14.16\%$, 平均为 12.62%)、 MgO ($0.04\% \sim 0.21\%$, 平均为 0.10%)、 P_2O_5 ($0 \sim 0.07\%$, 平均为 0.04%)含量偏低。 $\text{Mg}^\#$ 为 $6.96 \sim 48.34$, 平均为 18.08 , 除去 4 个较低值外平均为 22.25 。在分类上属于花岗岩范围(图 5)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上 4 个样品落在钙碱性系列, 其余样品落在高钾钙碱性系列(图 6), 可能代表了花岗岩体整体属于高钾钙碱性系列, 但局部混合岩化不均匀。铝饱和指数(A/CNK)为 $0.87 \sim 1.34$, 平均为 1.05 。在 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解上, 多数样品落在准铝质与过铝质的分界线附近(图 7), 反映了整体准铝质到弱过铝质的特征。

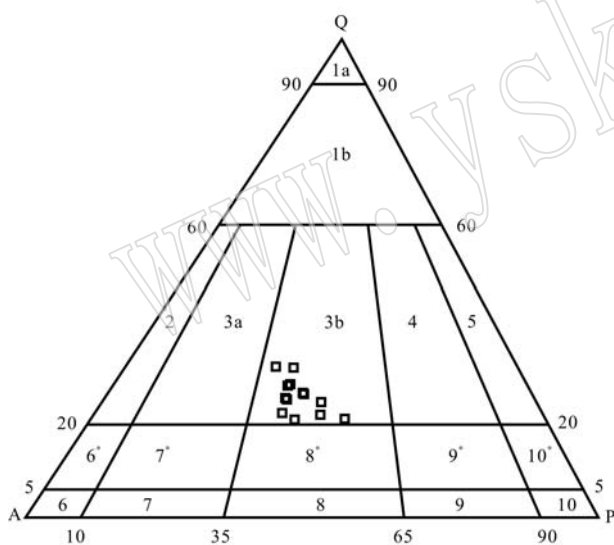


图 4 四面山含榴混合花岗岩 QAP 图解(Le Maitre, 1989)
Fig. 4 QAP diagram of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite (after Le Maitre, 1989)

4.2 微量元素

四面山含榴混合花岗岩的大离子亲石元素(LILE)Rb($37.00 \times 10^{-6} \sim 92.19 \times 10^{-6}$, 平均为 73.60×10^{-6})、Sr($7.20 \times 10^{-6} \sim 392.00 \times 10^{-6}$, 平均为 85.59×10^{-6} , 除去 3 个含量较高样品外平均为 28.07×10^{-6})含量较低, 而 Ba($162.10 \times 10^{-6} \sim 1\,815.00 \times 10^{-6}$, 平均为 805.30×10^{-6})含量较高。Rb/Sr 为 $0.15 \sim 10.69$, 平均为 3.44, 明显高于全球上地壳的平均值(0.32, Taylor and McLennan, 1985)。

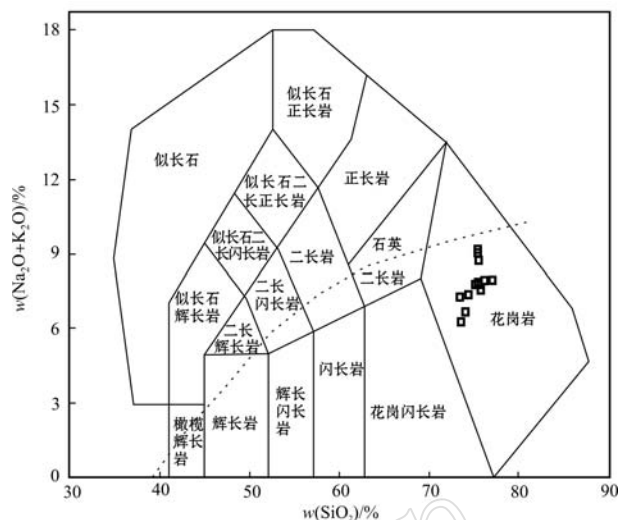


图 5 四面山含榴混合花岗岩 TAS 图解(Cox *et al.*, 1979; Middlemost, 1994)

Fig. 5 TAS diagram of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite (after Cox *et al.*, 1979; Middlemost, 1994)

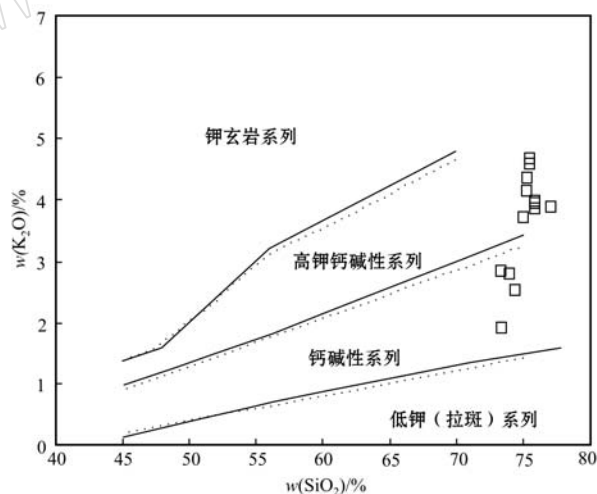


图 6 四面山含榴混合花岗岩 K_2O-SiO_2 图解
(Morrison, 1980; Rickwood, 1989; Rollison, 1993)
Fig. 6 K_2O-SiO_2 diagram of the Simianshan garnet
bearing migmatitic granite (after Morrison, 1980;
Rickwood, 1989; Rollison, 1993)

高场强元素(HFSE)Nb($8.30 \times 10^{-6} \sim 25.00 \times 10^{-6}$, 平均为 17.00×10^{-6})、Ta($0.93 \times 10^{-6} \sim 1.80 \times 10^{-6}$, 平均为 1.29×10^{-6})、Hf($3.10 \times 10^{-6} \sim 17.30 \times 10^{-6}$, 平均为 8.45×10^{-6})的含量较低, 而Zr($113.90 \times 10^{-6} \sim 672.00 \times 10^{-6}$, 平均为 341.10×10^{-6})的含量较高。Nb/Ta 为 $7.55 \sim 18.33$, 平均为

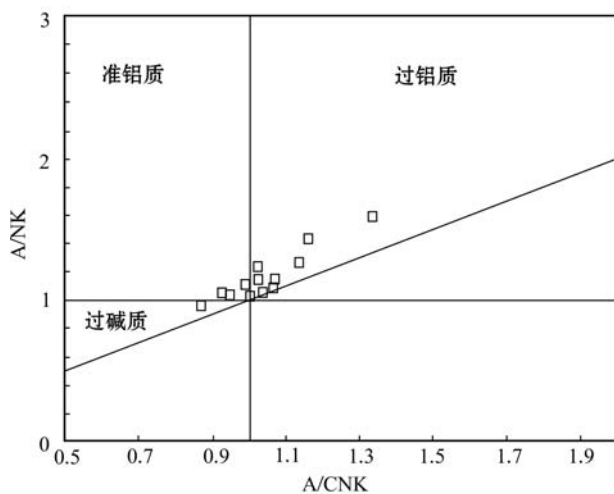


图 7 四面山含榴混合花岗岩 A/NK - A/CNK 图解

(Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 7 A/NK - A/CNK diagram of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite (after Maniar and Piccoli, 1989)

12.73, 与地壳平均值 (12.22) 相当 (Rudnick and Fountain, 1995)。Zr/Hf 为 24.14 ~ 56.36, 平均为 37.98。在微量元素原始地幔标准化图解 (图 8a) 上, 四面山花岗岩呈现富集 Ba、Th、K 而亏损 Nb、Sr、P、Ti 等的特征。需要注意的是, 有 2 个样品 (XWG3 和 XWG4) 相对亏损 Ba, 而 Ba 随着演化程度的增加而贫化, 这也说明了该岩体演化程度并不均匀, 这和岩体局部由于混合岩化作用程度相对较低而出现斑点状-角砾状混合岩的现象是一致的。

4.3 稀土元素

四面山含榴混合花岗岩的稀土总量 (ΣREE) 为 $115.05 \times 10^{-6} \sim 430.85 \times 10^{-6}$, 平均为 266.85×10^{-6} 。轻、重稀土含量比 (LREE/HREE) 为 5.21 ~ 12.44, 平均为 8.05。(La/Yb)_N 为 1.90 ~ 15.05, 平均为 8.03, 表明轻稀土元素相对富集。在稀土元素球粒陨石标准化图解 (图 8b) 上呈现右倾型特征, 铕负异常整体不明显, δEu 为 0.18 ~ 0.87, 平均为 0.55。

5 讨论

5.1 岩石成因

混合花岗岩具有部分熔融、变质分异、花岗质岩浆注入、交代作用等多种成因模式 (刘大为等, 2011)。在 Na - K - Ca 图解上四面山花岗岩样品均投到交代花岗岩区 (图 9a), 说明其不是岩浆成因。

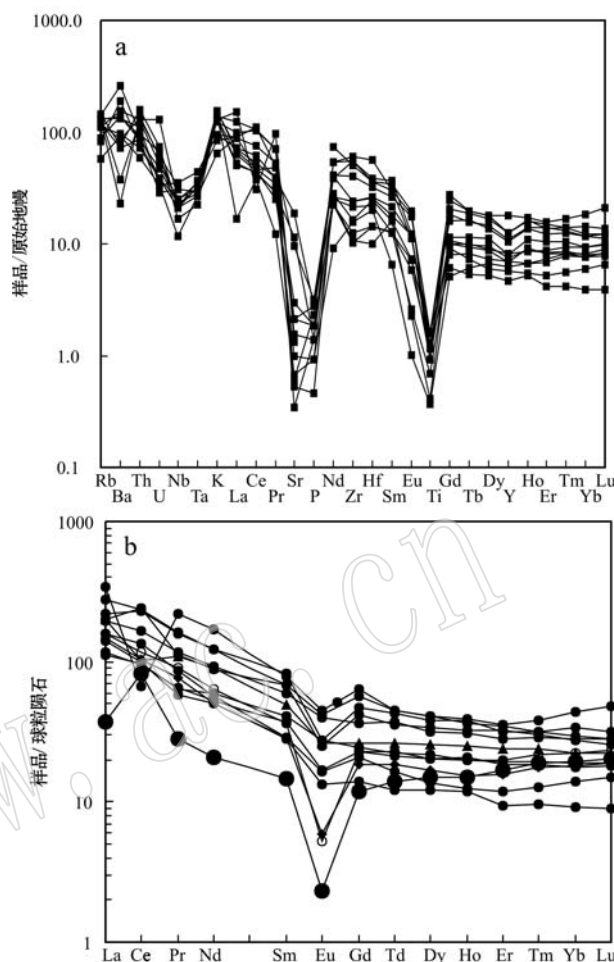


图 8 四面山含榴混合花岗岩原始地幔标准化图解 (a, 标准值据 Sun and McDonough, 1989)、球粒陨石标准化分布型式图 (b, 标准值据 Boynton, 1984)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements (a) (normalization values after Sun and McDonough, 1989) and chondrite-normalized REE distribution (b) (normalization values after Boynton, 1984) patterns of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite

四面山花岗岩围岩为大别片麻杂岩, 围岩的片麻理常常延伸进入岩体, 并与岩体片麻理大体一致。另外岩体与围岩岩性有时呈渐变过渡, 二者之间无明显界线。这些特征亦说明其不是岩浆成因。交代成因和变质分异成因模式的可能性也不大, 因为主要由交代作用形成的混合岩往往具有广泛的交代结构, 长石和石英具缝合线结构、蠕英石结构、交代条纹和反条纹结构、交代棋盘结构、净边结构、交代斑晶等; 而变质分异作用形成的混合岩具有成分层。四面山花岗岩不具有上述特征, 故可以排除交代成因和变质分异成因。本文认为其为部分熔融成因,

因为四面山花岗岩稀土元素总量较高,轻稀土元素分馏程度相对较高、具有中等铕负异常,这与重熔花岗岩的稀土元素特征相似(刘大为等,2011)。在 A/MF - C/MF 图解上样品投在变质泥岩部分熔融和

变质砂岩部分熔融区域(图 9b),代表了四面山花岗岩是由成熟度较高的地壳物质部分熔融形成的。根据河南省区测队(1981)^①,副矿物锆石呈不规则状,具有熔蚀凹面,也反映了部分熔融成因。

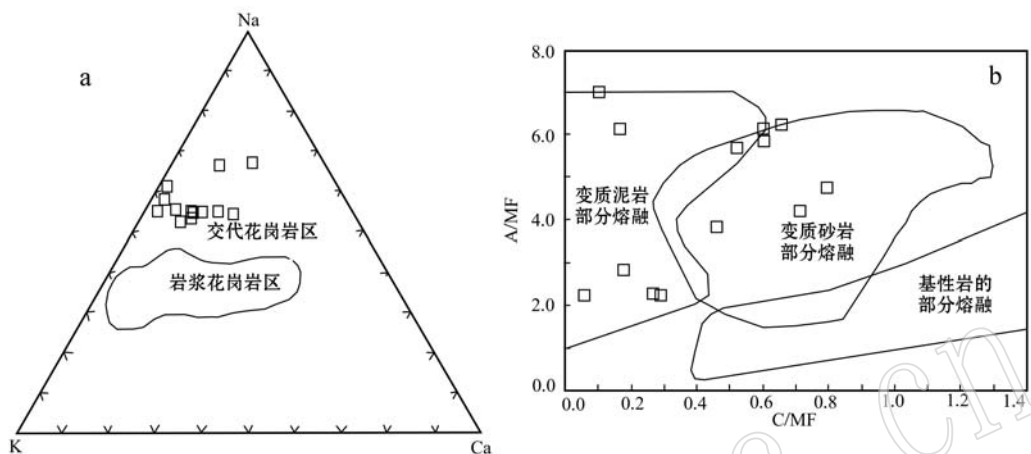


图 9 四面山含榴混合花岗岩 Na-K-Ca (a)、A/MF - C/MF (b) 图解(王仁民等,1987)

Fig. 9 Na-K-Ca (a), A/MF - C/MF (b) diagrams of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite (after Wang Renmin *et al.*, 1987)

由于缺乏详细的 Sr-Nd 或 Hf 同位素数据,故对准确限制四面山含榴混合花岗岩的源岩和成因模式有一定的影响。但该花岗岩的 Nb/Ta 值(7.55~18.33,平均为 12.73)与地壳平均值(12.22)相当,可能反映了其壳源成因;La/Nb 为 0.68~5.83,平均为 3.29,远大于 1(不同于地幔来源的岩浆)(DePaolo and Daley, 2000);Nd/Th 值为 1.04~16.56,平均为 6.09,略高于壳源岩石(约为 3)而明显不同于幔源岩石(大于 15)(Bea *et al.*, 2001);Eu/Sm 值为 0.05~0.26,平均为 0.17,与地壳(0.16)及地壳来源花岗岩(0.16)、沉积岩(0.20)的 Eu/Sm 值接近,而与其他各种深源岩石的 Eu/Sm 值大为不同,为混合花岗岩的特征(王中刚等,1989;刘大为等,2011);Sm/Nd 值为 0.15~0.25,平均为 0.20,亦与源于壳层的花岗岩及各类沉积岩(一般小于 0.3)一致(刘大为等,2011);Zr/Hf 值为 24.14~56.36,平均为 37.97,与大陆地壳花岗岩相似(解洪晶等,2009); δEu 为 0.18~0.87,平均为 0.55,与壳型花岗岩(0.46)相近而不同于壳幔型花岗岩(0.84)(王中刚等,1989)。在 Rb/Y - Nb/Y 图解(Pearce *et al.*, 1990)上,四面山花岗岩投于下地壳附近,并显示板内富集的趋势(图 10a);在 Th/Y - Nb/Y 图解(Durmus *et al.*, 2007)

上投于上地壳附近(Th/Nb 为 0.1~1)(图 10b);在 Th/Yb - Ta/Yb 图解(John *et al.*, 1999)上投于俯冲带附近,并显示分离结晶的趋势(图 10c);在 Nb/Ta - Nb 图解(Taylor and McLennan, 1985)上投于上地壳附近(图 10d)。综合微量及稀土元素特征,认为四面山含榴花岗岩源区为地壳物质。同时注意到,在(La/Yb)_N - δEu 图解(陈佑纬等,2009)上除 9 个样品投于壳型外,另有 3 个样品投于壳幔型、1 个样品投于二者分界线附近(图 10e),考虑到该花岗岩的微量元素比值及铕负异常变化较大(如 Nb/Ta = 7.55~18.33、Zr/Hf = 24.14~56.36),且 $\text{Mg}^\#$ 较小(反映了岩体的熔体可能与橄榄岩有轻微的接触)(Martin *et al.*, 2005),故可能代表了有少量地幔物质的加入。正如上面所述,四面山花岗岩既有变质泥岩的部分熔融又有变质砂岩的部分熔融,表明其源区成分的复杂性。

5.2 构造环境

有关含榴花岗岩形成环境的认识主要有两种:①形成于前碰撞阶段,而且经历了超高压变质作用(Carswell *et al.*, 1996; 刘景波等,1997);②形成于后碰撞造山阶段,经超高压地体减压退变和部分熔融形成(Zhong *et al.*, 2001)。大别-苏鲁造山带

① 河南省区测队. 1981. 新县(大悟)幅 1:20 万区域地质调查报告.

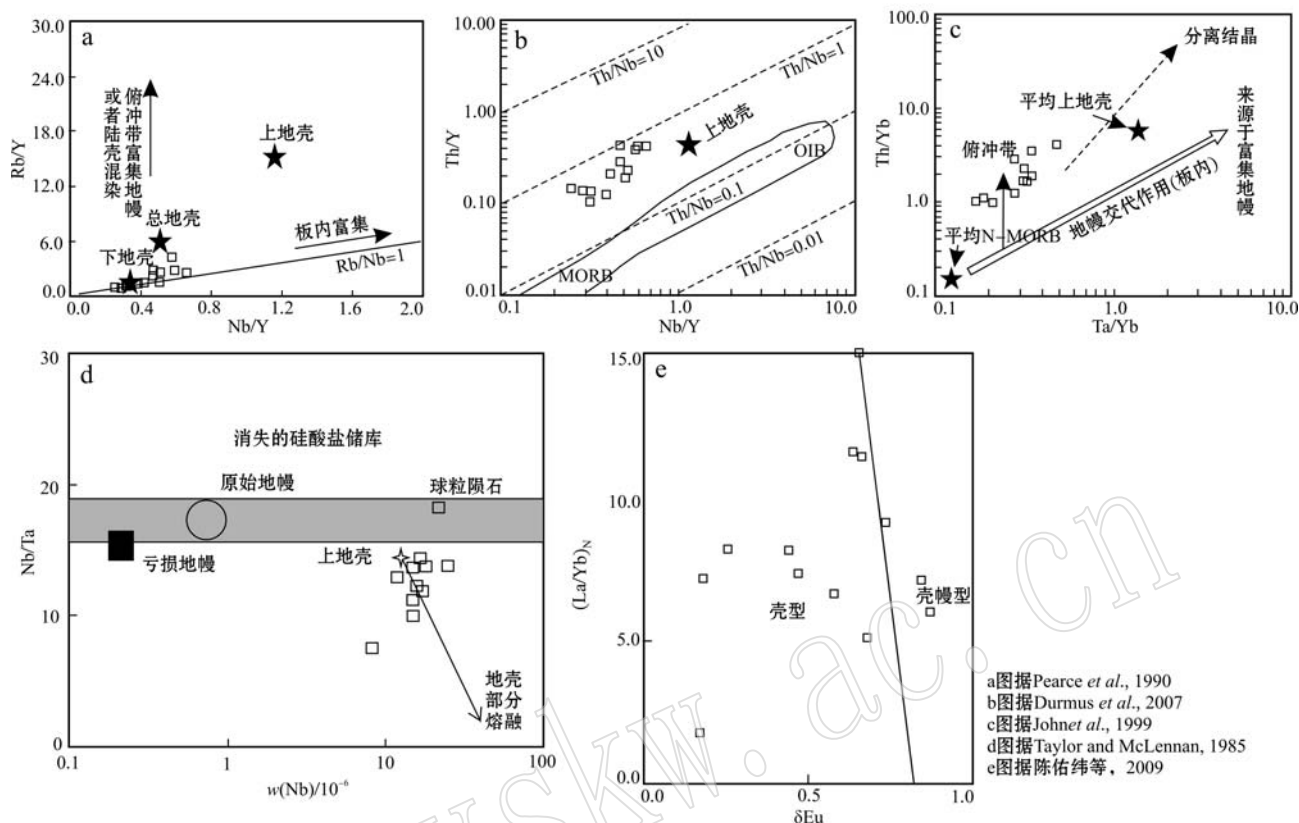


图 10 四面山含榴混合花岗岩 Rb/Y-Nb/Y(a)、Th/Y-Nb/Y(b)、Th/Yb-Ta/Yb(c)、Nb/Ta-Nb(d)、 $(La/Yb)_N-\delta Eu$ (e) 图解

Fig. 10 Rb/Y-Nb/Y (a), Th/Y-Nb/Y (b), Th/Yb-Ta/Yb (c), Nb/Ta-Nb (d), $(La/Yb)_N-\delta Eu$ (e) diagrams of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite

的超高压/高压变质作用峰期年龄在 240 Ma 左右(李曙光等, 1996; Hacker *et al.*, 1998)。根据河南地矿厅第三地质调查队(1991)^①, 四面山含榴混合花岗岩的锆石 U-Pb 等时线下交点年龄为 211 ± 11 Ma, 考虑到该岩体侵入于大别片麻杂岩中, 又在柳林河西被中侏罗世油榨河岩体(164 Ma)侵入(马昌前等, 1995), 其形成时代应该为海西晚期一印支期。因此四面山含榴混合花岗岩的年代学支持第 2 种观点, 即形成于后碰撞造山阶段, 经超高压地体减压退变和部分熔融形成。这同样得到了以地球化学为基础的构造环境判别图解的支持: 在 $Al_2O_3-SiO_2$ 图解上, 四面山含榴混合花岗岩多数样品投在 POG 区域(图 11a), 在 R_2-R_1 图解上样品多投在造山后区域(图 11b), 可能代表了其形成于碰撞后阶段的拉伸环境。根据英云闪长岩的部分熔融实验, 岩石中

Al_2O_3 含量随着压力的降低而显著下降(Patino and McCarthy, 1998), 故四面山花岗岩的形成环境可能是其低铝的原因。结合区内地质背景及超高压变质作用研究, 笔者认为四面山含榴混合花岗岩可能是超高压地体折返到中下地壳, 在拆沉、底侵等因素影响下经部分熔融形成的, 但是否有其他成因, 还需要进一步研究。

Suo 等(2001)、Zhong 等(2001)研究表明, 大别造山带目前的构造格局是在高压超高压变质作用之后的折返过程中形成的, 碰撞期后伸展构造格架控制了超高压单元、高压单元、绿帘蓝片岩单元等的分布格局。超高压榴辉岩及英云闪长质、奥长花岗质、花岗闪长质片麻岩构成了大别中西部超高压变质带的主要岩石组合, 同时还伴有花岗质片麻岩和面理化含榴花岗岩。研究表明, 大别-苏鲁超高压地体中

① 河南地矿厅第三地质调查队. 1991. 周党镇幅、宣化店镇北半幅 1:5 万地质图说明书.

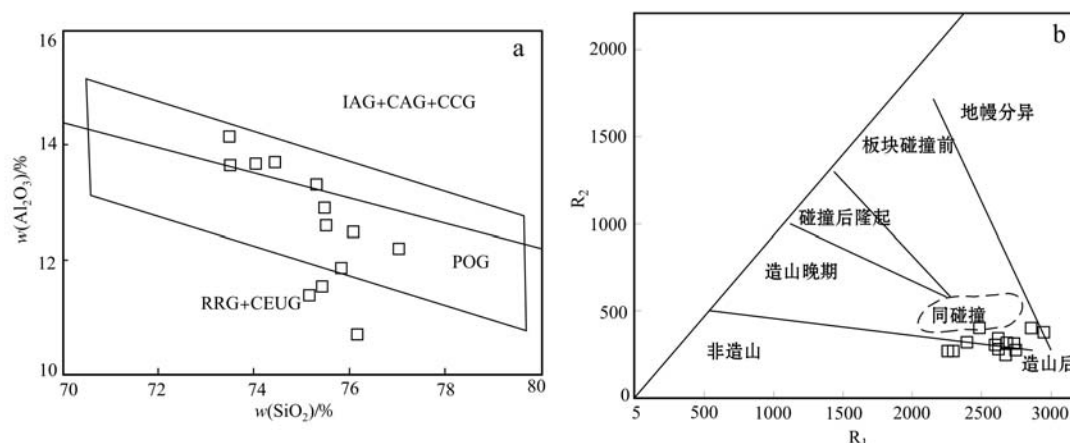


图 11 四面山含榴混合花岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (a) (Maniar and Piccoli, 1989)、 $R_2 - R_1$ (b) (Batchelor and Bowen, 1985) 图解

Fig. 11 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (a) (after Maniar and Piccoli, 1989), $R_2 - R_1$ (b) (after Batchelor and Bowen, 1985)

diagrams of the Simianshan garnet-bearing migmatitic granite

IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类;

CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

IAG— island arc granitoids; CAG— continental arc granitoids; CCG— continental collision granitoids; POG— postorogenic granitoids;

RRG— rift-related granitoids; CEUG— continental epeirogenic uplift granitoids

的含榴花岗岩形成于伸展环境(张宏飞等, 2001; 杨启军等, 2004; 张利等, 2004), 四面山及其这些岩体证实, 超高压地体在折返过程中发生减压退变和部分熔融作用在本区广泛存在。然而超高压地体在折返过程中仅仅依赖地壳本身是很难提供地壳岩石重熔所需热量的, 推测陆陆碰撞所造成的岩石圈增厚及岩石圈的拆沉作用和岩浆底侵作用提供了支撑(钟增球等, 1999)。

6 结论

(1) 四面山含榴花岗岩为一套混合岩化作用较为彻底的全熔合岩, 其新成体在 95% 以上, 主要为二长花岗质混合脉体。

(2) 四面山含榴混合花岗岩具有高硅富碱的特征, 整体属于准铝质到弱过铝质的高钾钙碱性花岗岩, 但局部可能混合岩化不均匀; 岩石富集 Ba、Th、K 而亏损 Nb、Sr、P、Ti 等; 稀土总量(ΣREE)为 $115.05 \times 10^{-6} \sim 430.85 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素相对富集, 铈负异常整体不明显。

(3) 四面山含榴混合花岗岩可能是超高压地体折返到中下地壳, 在拆沉、底侵等因素影响下经部分熔融形成的。

致谢 在野外工作期间, 得到了河南省地质调

查院的丁见广等的大力帮助; 在数据测试期间, 国土资源部武汉矿产资源监督检测中心相关领导、老师给予了很多帮助指导; 河南省地质调查院实验室李敏在岩矿鉴定方面的帮助指导让人受益匪浅; 审稿专家提出了非常中肯的修改意见; 在此一并表示深深的感谢!

References

- Batchelor R A and Bowen P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicaticonic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48: 43~55.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, *et al.* 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 554~566.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 63~114.
- Carswell D A, Wilson R N and Zhai M. 1996. Ultra-high pressure aluminous titanites in carbonate-bearing eclogites at Shuanghe in the Dabieshan[J]. *Mineralogical Magazine*, 60: 781~798.
- Carswell D A, Wilson R N and Zhai M. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermo-barometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China

- [J]. *Lithos*, 52: 121~155.
- Chen Youwei, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, *et al.* 2009. Comparison of geochemical characteristic of Uranium-and non-Uranium-bearing indosinian granites in Guidong composite pluton[J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 29(3): 106~114(in Chinese with English abstract).
- Cox C G, Bell J D and Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*[M]. London: George, Allen and Unwin.
- DePaolo D J and Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension[J]. *Chemical Geology*, 169: 157~185.
- Durmus Boztug, Yehudit Harlavan, Arehart G B, *et al.* 2007. K-Ar age, whole-rock and isotope geochemistry of A-type granitoids in the Divrii-Sivas Region, eastern-central Anatolia, Turkey[J]. *Lithos*, 97(1~2): 193~218.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China[J]. *Earth Planet Science Letters*, 161(1~4): 215~230.
- John B M, Wu F, Lo C H, *et al.* 1999. Crust-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[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Le Maitre R W. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Oxford: Blackwell, 1~193.
- Li Shuguang, Jagoutz E, Xiao Yilin, *et al.* 1996. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane I: Sm-Nd isotope system[J]. *Science in China(Series D)*, 26(3): 249~257(in Chinese).
- Liu Dawei, Liu Suqiao, Hong Xuekuan, *et al.* 2011. Geochemical characteristics of migmatitic granite in Gongchangling iron deposit of Liaoning with discussion on their genesis[J]. *Global Geology*, 30(4): 544~553(in Chinese with English abstract).
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.* 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9~26(in Chinese with English abstract).
- Liu Jingbo, Wu Ying and Guo Lianjie. 1997. The relationship between ecioite and gneiss: Studies from inclusions in minerals of gneiss[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(23): 2 531~2 534(in Chinese).
- Liu Xiaochun, Dong Shuwen, Qian Cunchao, *et al.* 2001. Gneissic granite did not experience ultrahigh-pressure metamorphism from Bixiling, the Dabie Mountain[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(1): 21~25(in Chinese with English abstract).
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, *et al.* 1995. Formation and differential rock uplift-exhumation of high-pressure metamorphic terrane in Dabie Mountain, central China: evidence from igneous rocks[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 20(5): 515~520(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79: 1~24.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rocks system[J]. *Earth Science Review*, 37: 215~224.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic settings of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13(1): 97~108.
- Patino D A E and McCarthy T C. 1998. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction[A]. Hacker B R and Liou J G. *When Continents Collide: Geodynamics of Ultrahigh Pressure Rocks* [C]. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 27~55.
- Pearce J A, Bender J F, DeLong S E, *et al.* 1990. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44: 189~229.
- Qu X M, Hou Z Q and Li Y G. 2004. Melt components devived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 74: 131~148.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of minor elements[J]. *Lithos*, 22: 247~263.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[M]. Longman Scientific & Technical Limited, 1~352.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Review of Geophysics*, 33: 267~309.
- Sun Haiting, Wang Rucheng, Xu Shijin, *et al.* 2002. Mineral chemistry and geochemical characteristics of metagranitoids from the ultrahigh pressure metamorphic belt, East Dabie Mountains and their geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(1): 25~39(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic basalt: Implication for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society, Special Publication, 42: 313~345.
- Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhengdong, *et al.* 2001. Post-coli-

- sional ductile extensional tectonic framework in the UHP and HP metamorphic belts in the Dabie-Sulu region, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 151~160.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 312.
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, *et al.* 1987. *Graphic Methods of Reconstruction of Metamorphic Rock's Protolith*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~280(in Chinese).
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, *et al.* 1989. *Geochemistry of REE*[M]. Beijing: Science Press, 212~246(in Chinese).
- Xie Hongjing, Zhang Qian, Zhu Chaohui, *et al.* 2009. Petrology and REE-trace element geochemistry of Bozhushan granite pluton in southeastern Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(4): 481~490(in Chinese with English abstract).
- Xu Shutong, Liu Yican, Jiang Laili, *et al.* 2002. *Structural Geometry and Kinematics of the Dabie Orogenic Belt*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1~133(in Chinese).
- Yang Kunguang, Xie Jianlei, Liu Qiang, *et al.* 2009. Deformation characteristics and zircon SHRIMP ages of granet-bearing granites [J]. *Science in China(Series D): Earth Science*, 39(4): 464~473 (in Chinese).
- Yang Qijun and Zhong Zengqiu. 2004. Genesis of granet-bearing granites in UHP terrane of Dabie-Sulu orogenic belt, central China[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 169~176(in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Zhong Zengqiu, Zhang Benren, *et al.* 2004. Geochemistry and petrogenesis of foliated garnet-bearing granites in the high pressure metamorphic unit of the Tongbai-Dabie orogenic belt [J]. *Geochimica*, 33(3): 232~242(in Chinese with English abstract).
- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, You Zhengdong, *et al.* 2001. Major Constituents of the Dabie Collisional Orogenic Belt and Partial Melting in the Ultrahigh-Pressure Unit[M]. *International Geological Review*, 43(3): 226~236.
- Zhong Zengqiu, Zhang Hongfei, Suo Shutian, *et al.* 1999. Partial melting in exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks, Dabieshan Mountains, China[J]. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences*, 24(4): 393~399(in Chinese with English abstract).
- 产铀花岗岩地球化学特征对比研究[J]. *矿物岩石*, 29(3): 106~114.
- 李曙光, Jagoutz E, 肖益林, 等. 1996. 大别山-苏鲁地体超高压变质年代学——I. Sm-Nd 同位素体系[J]. *中国科学(D 辑)*, 26(3): 249~257.
- 刘大为, 刘素巧, 洪学宽, 等. 2011. 辽宁弓长岭矿区混合花岗岩地球化学特征及成因[J]. *世界地质*, 30(4): 544~553.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. *岩石学报*, 20(1): 9~26.
- 刘景波, 吴颖, 国连杰. 1997. 榴辉岩和围岩片麻岩之间的关系: 来自片麻岩副矿物包裹体的研究[J]. *科学通报*, 42(23): 2 531~2 534.
- 刘晓春, 董树文, 钱存超, 等. 2001. 大别山碧溪岭未经超高压变质的片麻状花岗岩[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(1): 21~25.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 1995. 华中大别山高压变质地体的形成和差异岩石隆升-剥露: 来自火成岩的证据[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(5): 515~520.
- 孙海婷, 王汝成, 徐士进, 等. 2002. 大别山东段超高压变质带中变质花岗岩的矿物化学和地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 8(1): 25~39.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 1987. *变质岩原岩图解辨别法*[M]. 北京: 地质出版社, 1~280.
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. *稀土元素地球化学*[M]. 北京: 科学出版社, 212~246.
- 解洪晶, 张乾, 祝朝辉, 等. 2009. 滇东南薄竹山花岗岩岩石学及其稀土-微量元素地球化学[J]. *矿物学报*, 29(4): 481~490.
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 2002. 大别山造山带的构造几何学和运动学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1~133.
- 杨坤光, 谢建磊, 刘强, 等. 2009. 西大别许湾面理化含榴花岗岩变形特征与锆石 SHRIMP 定年[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(4): 464~473.
- 杨启军, 钟增球. 2004. 大别-苏鲁超高压地体中面理化含榴花岗岩的成因研究[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 169~176.
- 张宏飞, 钟增球, 高山, 等. 2001. 大别山西部面理化含榴花岗岩锆石 U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 46(10): 843~846.
- 张利, 钟增球, 张本仁, 等. 2004. 桐柏-大别造山带高压变质单元面理化(含榴)花岗岩地球化学及其对岩石成因的限制[J]. *地球化学*, 33(3): 232~242.
- 钟增球, 张宏飞, 索书田, 等. 1999. 大别超高压变质岩折返过程中的部分熔融作用[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(4): 393~399.

附中文参考文献

陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 2009. 贵东复式岩体印支期产铀和非