正、副角闪岩判别标志的新认识 - 赣中前寒武纪正、副角闪岩的矿物岩石 地球化学特征对比研究

章邦桐1,凌洪飞1,陈培荣1,胡恭任2,姜耀辉1,于津海1 (1. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室及地球科学系,南京210093; 2. 华侨大学 环境科学与工程系, 福建 泉州 362011)

摘 要: 通过对赣中相山地区前寒武纪正、副角闪岩矿物学、岩石-地球化学特征系统对比研究, 得出角闪岩成因判别标志的几点新认识: 提出了识别正、副角闪岩的角闪石矿物学标志: 阐明 了区分正、副角闪岩的稀土元素地球化学特征: 对角闪岩 微量元素地球化学特征 提出采用模糊 聚类分析与蛛网图相结合进行成因判别的有效方法; 提出综合应用 15 种元素对的比值(Ti/V, Ce/Yb, La/Yb, Th/Yb, La/Sm, La/Nb, Ce/Y, Rb/Sr, Nb/Y, Sm/Nd, Sr/Y, Sr/Ba, Zr/Y, Ti/Zr, Ti/Y)作为判别角闪岩成因的标志。

关键词: 判别标志;正角闪岩;副角闪岩;前寒武纪;赣中

中图分类号: P588.37 文献标识码: A 文章编号:100-1412(2005)040223-10

1 引言

角闪岩是中深变质地区常见的一种变质岩类. 它具有不同的成因,既可以由镁铁质火成岩(玄武 岩、辉绿岩、辉长岩等)变质生成(正角闪岩),也可由 泥质页岩、钙质页岩或沉积凝灰岩等变质形成(副角 闪岩)。需要指出的是,原岩为镁铁质火成岩的正角 闪岩具有重要的科学研究意义: 由于镁铁质火成 岩的形成温度一般高于角闪岩变质相温度,因而用 Sm-Nd. Rb-Sr 或 U-Pb 等同位素定年方法测得的 年龄值有可能代表其原岩的形成年龄; 它可以提 供有关该镁铁质火成岩形成地质时期的地幔组成及 演化方面的宝贵信息。因此,长期以来国内外地质 学家十分关注角闪岩的原岩恢复、正、副角闪岩识别 标志的研究、对判别变质原岩提出了一系列岩相学、 岩石化学和微量元素的判别方法和图解[16],并得到 广泛应用。需要指出的是,一方面由于中深变质岩 系岩石的变质程度比较高(达角闪岩相),各种残余 及变余结构一般很难保存,因而仅根据野外产状和 1.石榴黑云母片岩 2.斜长角闪岩 3.石英角闪片岩 4.取样点

岩相学研究来恢复原岩性质十分困难,从而需要借 助于变质岩的岩石化学和微量元素特征来进行原岩 性质恢复和成因判别。

笔者在详细研究赣中前寒武纪变质岩带中的斜 长角闪岩的野外地质剖面(乐安县贯下村)时发现了 少量保存着变余层理构造的角闪片岩夹层(图1)。 这样一种正、副角闪岩共同存在于一个地质剖面中 的地质现象是十分罕见的,有重要的科学研究意义。



图 1 牛栏(贯下)变质岩地质剖面图

Fig. 1 Niulan (Guanxia) Geological sketch section of metamorphic rocks

收稿日期: 2004-12-23

基金项目: 为国家自然科学基金委创新群体基金项目(批准号: 40221301)及国家自然科学基金项目(批准号: 40372036)联合资助。 作者简介:章邦桐(1934),男,江苏江阴人,教授,长期从事核能地质、地球化学及成矿理论研究。

为此, 笔者对这两种不同成因的角闪岩分别采样, 进行了较全面的矿物学(角闪石)、岩相学、岩石化学及稀土、微量元素地球化学特征的对比研究, 目的在于: 一方面对前人提出的各种岩石化学判别标志及图解进行验证; 另一方面拟在采用现代测试方法(EPMA, ICP, XFS等)的基础上, 尝试对判别角闪岩成因提出 一些新的地球化学判别标志, 以供人们在判别正、副 角闪岩成因的工作中进一步验证和应用。

2 相山正、副角闪岩产出的地质背景 及岩相学特征

2.1 地质背景

本文所研究的角闪岩产于赣中乐安县相山东北 部贯下、马口一带的中-细粒石榴黑云母片岩中。经 研究,该地区石榴黑云母片岩十字石片岩的 Rb-Sr 等时线年龄值为 719Ma,斜长角闪岩的 Rb-Sr 等时 线年龄值为 726.6Ma,从而确认该变质岩带属新元 古期变质岩带^[7]。根据片岩中石榴石和黑云母的化 学成分,采用石榴石-黑云母矿物对及角闪石-斜长石 矿物对温压计的方法,分别计算得出黑云母片岩形 成的温度范围为 440~565℃,压力范围为 400~520 MPa^[7],斜长角闪岩形成的温度范围为 518~562℃, 压力范围为 0.6~0.8 GPa^[8]。这表明它们属中压 角闪岩变质相系列。

2.2 岩相学特征

2.2.1 斜长角闪岩(正角闪岩)

斜长角闪岩呈似层状、不规则凸镜状,出露于相 山火山盆地东北部贯下、马口一带的石榴黑云母片 岩中,墨绿色至灰绿色(风化面),致密块状构造及片 状构造(角闪石呈定向排列)。矿物组成为角闪石 (60%~80%)、斜长石(10%~20%)、石英(5%~ 10%)、磁铁矿(3%±),含有少量磷灰石、钛铁矿等 副矿物。角闪石具柱状变晶结构,常呈定向排列,多 色性显著,横断面呈菱形,粒径为0.46~0.96 mm。 斜长石为中长石 An= 26,呈半自形板状,粒度均匀, 粒径0.05~0.3 mm,具聚片双晶,常分布于柱状角 闪石空隙中。石英呈他形粒状,大多分布在角闪石 粒间,少量被角闪石包裹。

2.2.2 石英角闪片岩(副角闪岩)

石英角闪片岩在斜长角闪岩中呈薄夹层或不规则团块状产出。在贯下村的剖面上,浅灰绿色的石

英角闪片岩呈薄夹层状产出在墨绿色、致密块状的 斜长角闪岩中,具变余粉砂状结构、变余层理构造, 走向为 42°(图 1)。在野外根据上述地质特征,初步 判断其为沉积成因的副角闪岩,并在该剖面上专门 采取了斜长角闪岩(样号 XS56-5)及石英角闪片岩 (样号 XS566)的样品,以供进行较全面的矿物学 (角闪石)、岩相学、岩石化学及稀土、微量元素地球 化学特征的对比研究。

石英角闪片岩矿物组成主要由石英(50%~ 60%)、角闪石(20%~30%)、少量黑云母(<5%)及 铁质矿物组成,具变余微层结构。镜下变余碎屑结 构清晰,碎屑多为单晶石英,一般粒径为0.06~0.03 mm。角闪石呈不规则长柱状,半自形,具定向性排 列,常含较多石英包体矿物而具筛状变晶结构。少 量浅棕色、细小片状黑云母充填在石英颗粒的间隙 中。根据以上镜下鉴定特征,进一步确认其为沉积 成因的副角闪岩类岩石。

2.3 相山正、副角闪岩的岩石化学特征及成因判别

在相山贯下-马口地区及牛栏剖面上分别选采 3 个石英角闪片岩样品和 4 个斜长角闪岩样品进行了 岩石化学分析,其分析结果及尼格里参数、温克勒参 数、周世泰参数列于表 1。

从表 1 可见, 斜长角闪岩的岩石化学成分以低 SiO₂(< 53%), 高 TiO₂(> 1.2%), 高 Al₂O₃(> 13%)而明显区别于石英角闪片岩, 但二者相似的岩 石化学特征在于: Na₂O> K₂O, CaO> MgO, FeO> Fe₂O₃。

所研究的角闪岩样品中的矿物(角闪石、斜长石等)十分新鲜,无热液蚀变现象,因而可以利用角闪岩的岩石化学成分来判明其成因。在西蒙南的[(al+fm)-(c+alk)]-si图解上,斜长角闪岩成分点投于火山(成)岩区,而石英角闪片岩则投在砂质沉积岩区(图 2)。在温克勒AFC图解上,斜长角闪岩样品的投影点落于玄武质岩区内,而石英角闪片岩则落于杂砂岩区(图 3)。在周世泰的 KZAZ 图解上,斜长角闪岩及石英角闪片岩的成分点都投于火成岩区(图 4)。

此外,为了判别所研究角闪岩的成因,本文还采 用了 Shwa D. M. 提出的划分正、副角闪岩的判别函 数 DF1^[9]:

DF1= 7.07log T iO₂+ 1.91log A \ge O₃- 3.29log Fe₂O₃ + 8.48log FeO + 2.97log MnO + 4.81log MgO+ 7.80log CaO + 3.92log P₂O₅ + 0.15log CO₂ - 15.08

225

表1 相山正、副角闪岩化学成分及岩石化学参数

Table 1 Chemical composition and petrochemical parameters of ortho and paraamphibolites from Xiangshan

																w _B / %
序号	岩类	岩性	样号	${ m SiO_2}$	TiO_{2}	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K_2O	$P_{2}O_{5}$	LOI	Total
1		石英	XS56-6	76.07	0. 57	9.85	1.57	2.66	0.14	1.22	2.34	2.66	0.64	0.08	1.74	99. 74
2	副角 闪岩	角闪	XSG4	72.02	0.42	9.22	0.84	4.66	0. 128	4.94	4.00	1.31	0.78	0.14	1.53	99.99
3		片岩	XSG41	70.45	0.42	9. 54	1.77	4.14	0.14	4.72	4.43	1.35	0.70	0.10	1.57	98.02
4			X S56-5	52.87	1.25	13.07	2.68	10. 54	0. 29	6.37	8.20	1.82	0.44	0.10	1.11	99. 92
5	正角	斜长	X 855	51.37	1.42	13. 17	3.50	10. 81	0. 24	6.23	8.36	2.24	0.30	0.06	2.16	99. 76
6	闪岩	岩	X S39	50.63	1.36	13.43	2.30	11.42	0.23	6.78	8.77	2.34	0.33	0.08	2.12	99. 79
7			X S59	49.72	1.23	14.06	3.38	9.02	0.20	7.01	10.3	2.61	0.30	0.08	1.53	99.41
	-			尼格里德	参数				2	昷克勒参		周世泰参数 判			判别函数	
157	5 —	al	fm	с		al k	si		A	F	С		ΚZ	KA		DF1
1		34.88	32.11	15.0)7	17.95	457.	1 50	6.72	69.27	41.	. 73	19.39	63.	59 -	- 16.03
2		23.13	51.1	18.2	25	7.52	306. 0	5 6	6. 27	189.2	71.	. 33	37.32	60.	22	+ 1.34
3		23.35	49.6	19.7	2	7.29	292.7	7 7:	5.44	176.7	78.	. 99	34.15	59.	55	- 2.53
4		19.7	52.61	22.4	17	5.23	135.2	2 1	10.9	308.8	140	6.2	19.47	55.	55	+ 20.8
5		19.28	52.59	22.2	26	5.87	127. 0	5 00	00.8	308.4	149	9.1	11.81	54.	72	+ 18.5
6		10 13	52 17	22.7	71	5 99	122.4	4 10	04.9	330.4	15	6.4	12.36	54.	0	+ 21.8
0		19.15	52.17	22. 1		0.77										

注1、样品的岩石化学数据由南京大学地球科学系分析中心用湿化学法测定,其中序号为4,5,6,7样品数据引自胡恭任等[8]。

 $2_{x}A = (Al_{2}O_{3} + Fe_{2}O_{3}) - (Na_{2}O + K_{2}O)(分子数);$ F = FeO + MnO + MgO(分子数); C = CaO(分子数);

 $KZ = K_2 O/(Na_2 O + K_2 O) \times 100;$ AZ = Al₂O₃/(Al₂O₃+ CaO + Na₂O + K₂O) (分子数);

3、判别函数 DF1 的计算公式及说明见正文。







图 3 相山正、副角闪岩 ACF 图解 (仿 Winkler, 1970) Fig. 3 ACF diagram of the ortho and paraamphibolites from Xiangshan





paraamphibolites from Xiangshan

式中氧化物含量为质量分数,计算结果如为正 值表明其为正角闪岩,负值则为副角闪岩。所研究 的斜长角闪岩及石英角闪片岩的计算结果列于表 1。 从该表可见,相山斜长角闪岩的 DF1 皆为正值(DF1 = + 18.5~ + 21.8),但3 个石英角闪片岩样品中的 DF1 值中出现一个正值,。这表明 Shaw 判别函数 存在一定的误判几率。

以上对比研究表明, [(al+fm)-(c+alk)]-si 图解和温克勒AFC 图解能准确判明相山地区角闪 岩的成因, 而周世泰图解和判别函数 DF1 则对副角 闪岩的判别存在较大的误判几率。

3 角闪石特征对比

角闪石是相山角闪岩中的最主要的造岩矿物, 是在变质作用过程中形成的,它记录保存了有关角 闪岩形成温度、压力、物质来源及成因方面的重要信 息。因此,本文对相山的斜长角闪岩和石英角闪片 岩中的角闪石成分进行了详细的电子探针分析研 究。鉴于电子探针分析结果中不能确定 Fe³⁺和 Fe²⁺的配比,为了确定角闪石结构化学式和角闪石 的准确定名,笔者采用以 23 个氧原子为基准的计算 方法^{[1011}]对相山正、副角闪岩中角闪石的阳离子数 及Fe³⁺,Fe²⁺ 的配比值进行计算,其分析与计算结 果列于表 2。从该表可以看出以下特征: 相山正、 副角闪岩中角闪石化学成分的共同特征是富钙 (CaO> 10%)、富镁(MgO> 8%)、贫钛(TiO²< 1%) 和贫钾(K²O< 0.5%),但石英角闪片岩中的角闪石 以贫铝(AbO³< 5%)、富硅(SiO²> 52%)而明显区 别于斜长角闪岩中的角闪石; 相山正、副角闪岩中 角闪石阳离子的特征为: Cab> 1.6; (Na+ K)A< 0.3。按国际矿物学协会角闪石专业委员会提出的 命名原则^[12],它们属于钙角闪石类(Cab \geq 1.50)。 按钙角闪石的分类,石英角闪片岩中的角闪石种属 为阳起石,而斜长角闪岩的角闪石种属为镁角闪石 镁钙闪石(图 5)。



图 5 相山钙角闪石的分类 Fig.5 Classification of the calcic amphiboles from Xiangshan 图象参数: Ca_B> 1.5; (Na+ K)_A< 0.5; Ca_B≥1.50

角闪石的阳离子系数 A (Al/Si) 和 M (Mg/ (Fe³⁺ + Fe²⁺ + A1)具有重要的成因意义。不同成 因角闪石的 A 值和 M 值有很大的差异;中基性岩 浆成因角闪石(即正变质成因的角闪石)的 A 值较 高,主要介于 0.67~0.1之间,而区域副变质成因的 值很低,一般介于 0.09~0.01之间;中基性岩浆成 因角闪石的 M 值也较高,主要介于 1.50~2.04之 间,而区域副变质成因的 M 值很低,一般介于0.08 ~ 1.70之间^[13]。因此,可根据 A 值和 M 值来区分 不同成因角闪岩的角闪石。相山石英角闪片岩中的 角闪石的 A 值为 0.059~0.109, M 值为 1.55~ 2.00,明显区别于斜长角闪岩的 A 值(0.320~ 0.447)和 M 值(0.621~0.903)。

表 2 相山正、副角闪岩中角闪石化学成分及晶体化学式计算结果

Table 2 Chemical composition and crystallochemical formula of the ortho and paraamphibolites from Xiangshan

	岩	类		副角闪岩				正角	闪岩								
	岩	性	ž	5英角闪片岩				斜长角	角闪岩								
	序	号	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
	样	号	X S56-6a	XS 56-6b	XS 56-6c	XS56-7a	X S56-4a	XS 56-4b	XS 56-6a	X S56-5	XS39-1						
		SiO ₂	52.14	52.22	52.74	42.89	46.07	43.66	44.06	47.12	46.06						
		$T \mathrm{iO}_2$	0.14	0.12	0.08	0.41	0.33	0.40	0.40 0.34		0.14						
化	ŕ	Al_2O_3	4.84	4.55	2.66	12.46	15.59	13.73	13.35	13.42	12.52						
学	<u>5</u>	Fe_2O_{3}	未测	未测	未测	未测	未测	未测	未测	3.31	3.37						
,		FeO*	13.36	13.75	13.35	15.90	16.95	15.92	15.39	12.11	13.21						
成	Ĵ	MnO	0.07	0.06	0.14	0.37	0.48	0.45	0.41	0.45	0.30						
		MgO	14.27	14.27	15.53	10.20	8.72	10.6	11.1	8.68	8.68						
分	ì	CaO	12.25	12.05	12.32	11.33	10.81	11.16	11.20	10.84	10. 94						
(<i>w</i> в/	%)	Na ₂ O	1.10	1.07	0.26	1.21	1.46	0.38	1.23	1.60	1.79						
(to b.	(W B/ %)	K_2O	0.04	0.09	0.04	0.21	0.10	0.05	0.23	0.43	0.31						
		Total	98.35	98.18	9.65	94.95	95.53	96.35	97.31	98.52	97.32						
	- Т	Si	7.438	7.475	7.649	6.444	6.157	6.457	6.427	6.798	6. 784						
	1	Al	0.562	0. 525	0.351	1.556	1.843	1.543	1.573	1.202	1.216						
		Al	0. 252	0.242	0.104	0.650	0.912	0.851	0.722	1.08	0.957						
		Ti	0.015	0.013	0.009	0.047	0.038	0.045	0.038	0.061	0.016						
RD		Мg	3.064	3.045	3.328	2.285	1.948	2.299	2.414	1.867	1.906						
РП	С	$\mathrm{F}\mathrm{e}^{3+}$	0.357	0.344	0.172	0.720	0.776	0.434	0.706	0.359	0.373						
		$\mathrm{F}\mathrm{e}^{2+}$	1.312	1.356	1.386	1.298	1.325	1.372	1.12	1.461	1.627						
离		Mn	0	0	0	0	0	0	0	0.055	0.037						
		Ca	0	0	0	0	0	0	0	0.117	0.084						
z		Fe^{2+}	0.013	0.021	0.061	0.093	0.123	0.164	0.124	0	0						
J	D	Mn	0.009	0.007	0.017	0.048	0.062	0.057	0.051	0	0						
	Б	Ca	1.789	1.775	1.914	1.734	1.666	1.768	1.691	1.675	1.726						
		Na	0. 189	0.197	0.008	0.126	0.149	0.011	0.134	0. 325	0.274						
		Na	0.118	0.102	0.001	0. 232	0. 283	0.099	0.219	0. 123	0. 237						
	A	К	0.003	0.009	0.002	0.022	0.010	0.005	0.001	0.079	0.058						
ß	旧离子	数总和	15. 121	15.111	15.003	15.254	15. 293	15.104	15.220	15.202	15.295						

注1、样品由南京大学地球科学系电子探针室分析; T,C,B,A 分别为阳离子在晶胞中的占位。

2、序号 4~7 样品的化学成分数据引自胡恭任等^[8]。

在(Al/Si)-[Mg/(Fe³⁺ + Fe²⁺ + Al)]图解上 清晰表明,相山斜长角闪岩和石英角闪片岩的角闪 石集中投影在不同的区域,其中斜长角闪岩的角闪 石均落于基性火成岩区,而石英角闪片岩角闪石则 分布在副变质岩一侧(图6)。这也验证了角闪石的 晶体化学结构和阳离子系数对判别其成因具有重要 的地质意义。

4 稀土元素地球化学特征对比

相山地区石英角闪片岩及斜长角闪岩的稀土元 素含量及地球化学参数列于表 3, 其球粒陨石标准化 曲线示于图 7。

表 3 相山正、副角闪岩稀土元素组成及参数

Table 3 REE Composition and parameters of the ortho and paraamphibolites from Xiangshan $w_{\rm E'}/10^{-6}$

序号	岩类	岩性	样号	La	Ce	Pr	Nd	\mathbf{Sm}	Eu	Gd	T b	Dy	Нo	Er
1	副角	石英角	XS56-6	31.7	64.3	7.40	29.7	6.7	1.3	5.6	0.94	5.8	1.10	3.0
2	闪岩	闪片岩	XSG4	38.7	80.8	10.1	36.8	7.8	1.48	7.16	1.29	6.40	1.36	3.91
3			XS56-5*	5.35	13.24	2.92	10.8	3.48	1.11	4.02	0.77	4.94	1.02	2.93
4	正角 闪岩	斜长 角闪岩	X S55*	4.73	13.24	2.67	9.60	3.08	1.07	4.01	0.68	5.07	1.00	2.90
5		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	XS59*	3.80	10.95	2.23	7.49	2.67	0.85	2.95	0.64	3.81	0.81	2.30
序号	岩类	岩性	样号	Τm	Yb	Lu	LREE	H REE	SREE	L/H	δ(Eu)	δ(Ce)	La/Yb	La/Sm
 序号 1	岩类 副角	岩性 石英角	样号 XS56-6	T m 0. 43	Yb 2.60	Lu 0. 40	LREE 141	H REE 20	SR EE 161	L/ H 7. 1	δ(Eu) 0. 69	δ(Ce) 0. 96	La/Yb 12.2	La/Sm 4.73
序号 1 2	岩类 副角 闪岩	岩性 石英角 闪片岩	样号 XS56-6 XSG4	T m 0. 43 0. 59	Yb 2.60 3.78	Lu 0. 40 0. 58	LREE 141 176	H REE 20 25	SREE 161 201	L/ H 7. 1 7. 01	δ(Eu) 0. 69 0. 65	δ(Ce) 0. 96 0. 94	La/Yb 12.2 10.2	La/Sm 4.73 4.96
序号 1 2 3	岩类 副角 闪岩	岩性 石英角 闪片岩	样号 XS566 XSG4 XS565*	T m 0. 43 0. 59 0. 44	Yb 2. 60 3. 78 2. 76	Lu 0. 40 0. 58 0. 43	LREE 141 176 36.9	H REE 20 25 17.3	SREE 161 201 54.0	L/H 7.1 7.01 2.13	δ(Eu) 0. 69 0. 65 0. 90	δ(Ce) 0. 96 0. 94 0. 77	La/Yb 12.2 10.2 1.9	La/Sm 4.73 4.96 1.54
序号 1 2 3 4	岩 副 闪 正 闪	岩性 石英角 闪片岩 斜长 角闪岩	样号 XS56-6 XSC4 XS56-5* XS55*	T m 0. 43 0. 59 0. 44 0. 43	Yb 2.60 3.78 2.76 2.69	Lu 0. 40 0. 58 0. 43 0. 41	LREE 141 176 36.9 34.4	H REE 20 25 17.3 17.2	SREE 161 201 54.0 15.6	L/H 7.1 7.01 2.13 2.0	δ(Eu) 0. 69 0. 65 0. 90 0. 93	δ(Ce) 0.96 0.94 0.77 0.85	La/Yb 1222 102 1.9 1.8	La/ S m 4. 73 4. 96 1. 54 1. 54

注1、有*标志样品的稀土元素数据引自胡恭任等^[8]。

2、由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析测定。





从表 3 及图 7 可知,相山地区的石英角闪片岩 与斜长角闪岩的稀土元素地球化学特征具有明显的 差别: 石英角闪片岩的稀土总量高(REE = 161 × 10^{-6} ~201×10⁻⁶),而斜长角闪岩的稀土总量很低 (REE = 41.3×10⁻⁶~54.2×10⁻⁶); 石英角闪片 岩具有明显的铕亏损(δ (Eu) = 0.65~0.69),而斜长





角闪岩的铕亏损轻微(δ(Eu) = 0.90~0.93); 反映 地球化学演化特征的 La /Yb, La/Sm 比值的差别 十分明显,石英角闪片岩的 La/Yb, La/Sm 比值高, 分别为 10.2~12.2 和 4.73~4.96,而斜长角闪岩的 La/Yb, La/Sm 比值低.分别为 1.8~1.9(La/Yb) 和 1.42~1.54(La/Sm); 在稀土元素分布模式图 上,石英角闪片岩的稀土分布型式呈右倾的轻稀土 富集型,而斜长角闪岩则呈平坦的近水平型(图 7)。 由此可见,不同原岩变质形成的正、副角闪岩具有不同的稀土元素组成特征。

5 微量元素地球化学特征对比

5.1 微量元素地球化学特征

岩石的微量元素地球化学特征往往很好地保存 了有关成岩物质来源的信息,成为一种独特的地球 化学"指纹"。相山地区石英角闪片岩和斜长角闪岩 的微量元素的测定结果列于表 4,其主要特征是: 亲石元素 Rb, Ba, Th, U 在相山地区以石英角闪片 岩为代表的副角闪岩中明显较以斜长角闪岩为代表 的正角闪岩为富集,其中石英角闪片岩中的 U,Th 含量(U=2.4×10⁻⁶~3.0×10⁻⁶,Th=10.4×10⁻⁶ ~14.5×10⁻⁶)比斜长角闪岩高一个数量级左右,但 Sr 含量则明显低于斜长角闪岩; 铁族元素(Co, Ni, V)在斜长角闪岩中明显富集,其中 V 在斜长角 闪岩中的质量分数(418×10⁻⁶~556×10⁻⁶)比石英 角闪片岩高一个数量级左右; 高场强元素变化较 大,其中 Zr, Nb 在石英角闪片岩中较为富集,其含 量为斜长角闪岩的数倍,而 Sc 则在斜长角闪岩中较 为富集。

表 4 相山正、副角闪岩微量元素组成

T able 4 T race element composition of the ortho and paraamphibolites from Xiangshan $w_{\rm B}/10^{-6}$

岩类	岩性	样号	Rb	Ba	Sr	T h	U	Nb	Sc	Zr	Ηf	Y	Pb	Со	Ni	V
副角	石英角	X S56-6	39	175	95	10.4	3.0	12	6.6	210		25.3	118	6.0	18	61
闪岩	闪片岩	XSG4	76	77	69	14.5	2.4	10.7	6.6	147		28.9	13	17.6	24	57
一十五		XS56 5*	19	28	155	0.7	0.6	4.8	43.7	91	2.61	28	21.4	41	64	515
止用	科长 角闪岩	XS55*	13	60	150	0.6	0.8	6.1	42.8	77	2.8	29	8.4	54	82	556
內石	лид	XS59*	7	32	163	0.8	0.8	5.2	40.2	66	2.7	22	8.9	48	109	418

注:由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析测定;有*标志样品的稀土元素数据引自胡恭任等[8]

5.2 蛛网图特征及多体系微量元素模糊聚类分析 对比

本文对上述两种岩石 5件样品,作出原始地幔 标准化的蛛网图进行对比。从该蛛网图可以看出, 它们具有较为相似的原始地幔标准化配分曲线(图 8), 难以从图上直接识别出有关石英角闪片岩和斜 长角闪岩在微量元素特征上存在的明显差异,这是 因为蛛网图上的纵座标轴采用了对数座标而产生的 畸变(相对于线性座标系统),从而缩小了不同样品 之间微量元素的差别,使原本不相同的曲线变为相 似,容易让人们产生它们具有相似地球化学特征的 错觉[14],只有将岩石的多个微量元素值作为一个整 体进行对比,才能得出比较客观科学的结论。因此, 从多元统计分析角度,可以将各角闪岩样品中多个 微量元素地球化学参数整体综合地看作是一种模糊 的度量,因而采用模糊 0 型聚类分析方法可以较客 观全面地比较各角闪岩样品之间的相似程度,从而 阐明所研究角闪岩的成因归属。根据正角闪岩的岩 石地球化学特征十分近似于基性火成岩,而副角闪 岩的岩石地球化学特征则较类似于地壳岩石的特点.



图 8 相山正、副角闪岩微量元素的 原始地幔标准化蛛网图

Fig. 8 Spider diagram of trace element concentrations of the ortho and paraamphibolites from Xiangshan normalized to the primordial mantle

为了进一步判明相山地区 5 个角闪岩样品的成因归属, 我们将它们及平均玄武岩^[15]、平均地壳^[16] 的 14 种微量元素值采用模糊聚类分析方法, 建立等价矩 阵, 计算出 7 种岩石样品间的模糊相似系数(R) 并作 出模糊聚类谱系图(图 9)。根据模糊相似系数(R) 可以判断样品之间的相似程度, 两类岩石的相似系 数越贴近 1, 则其相似程度越高, 关系越密切, 也可能 有相似的成岩物质来源。



图 9 相山正、副角闪岩微量元素的模糊聚类 分析谱系图(说明见正文)

Fig. 9 Lineage diagram of trace element fuzzy cluster analysis for the ortho and paraamphibolites from Xiangshan

通过分析,可获得以下有关岩石对比的信息:

(1)取相似距离系数(R)0.90为阈值(图9),则 7件岩石明显分为4个群组,即XS565,XS55, XS59等3个样品为一组,XS566及XSG4为另一 组,而平均玄武岩、平均地壳均为独立的组元。这与 前3个样品均为斜长角闪岩,后两个样品同为石英 角闪片岩,而平均玄武岩、平均地壳则为独立组元的 地质实际情况一致。

(2) 取相似距离系数(R) 0.83 为阈值(图),则7 种岩石明显分为2个群组,即斜长角闪岩与平均玄 武岩为一组,而石英角闪片岩与平均地壳为另一组。 这为相山地区的斜长角闪岩归属于正角闪岩,而石 英角闪片岩属副角闪岩提供了微量元素地球化学佐 证,而且表明,采用Q型模糊聚类分析与蛛网作图相 结合的对比方法可以清晰地根据角闪岩的微量元素 特征判明其所属正、副角闪岩的类别。 正、副角闪岩相关元素对比值的识别判据:

根据岩石变质作用过程的等化学原理,中、浅变 质岩石一般能保存原岩中常量元素及微量地球化学 的特征。鉴于同一类别岩石中单个元素的绝对含量 变化较大,而一些地球化学性质相关元素对的比值 变化却很小的特点:如大洋拉斑玄武岩 Rb 的变化范 围为 0.5×10⁻⁶~50×10⁻⁶, Sr 的变化范围为 70× 10⁻⁶~ 150×10⁻⁶,其最大值和最小值相差 1~ 2个 数量级,但该岩石的 Rb/Sr 比值范围变化仅为0.029 ~ 0.034^[17]:又如各种岩浆岩中 Th. U 含量变化可 达 2 个数量级, 但岩浆岩的 Th/U 比值却稳定地保 持在 3~4 之间[15]。因此,相关元素对的比值可以成 为识别不同成因角闪岩的判别依据,能更清晰地区 分不同成因的变质岩。本文对相山地区正、副角闪 岩选择 15 个能较全面反映原岩岩石地球化学特征 的元素对比值(Ti/V, Ce/Yb, La/Yb, Th/Yb, La/Sm, La/Nb, Ce/Y, Rb/Sr, Nb/Y, Sm/Nd, Sr/Y, Sr/Ba, Zr/Y, Ti/Zr, Ti/Y), 列于表 5, 并作 出相应的元素对比值曲线示于图 10 进行对比。从 图 10 可以清楚地看出,相山地区以石英闪长片岩为 代表的副角闪岩和以斜长角闪岩为代表的正角闪岩 的 15 个相关元素对的比值有明显的差别(图 10)。 此外,通过对相山地区两种角闪岩的 15 个相关元素 对比值(表5)的仔细对比,归纳出正、副角闪岩相关





元素对比值的判别标志并列于表 6。从表 6 中可以 看出:当所研究角闪岩的相关元素对比值为 Ti/V< 30, Ce/Yb< 10, La/Yb< 5, Th/Yb< 1, La/Sm< 2, La/Nb< 2, Ce/Y< 1, Rb/Sr< 0.5, Nb/Y< 0.3, Sm/Nd> 0.3, Sr/Y> 4, Sr/Ba> 1, Zr/Y> 10, Ti/Zr> 50和Ti/Y> 200,可判明它是由基性岩 浆岩形成的正角闪岩;如果它们呈相反的比例关系 则归属于副角闪岩。

表 5 相山正、副角闪岩相关元素对的比值

Table 5 Ratio of correlative element couple of the ortho and paraamphibolites from Xiangshan

岩类	岩性	样号	Ti∕V	Ce/Yb	La/Yb	Th/Yb	La/ Sm	La/ Nb	Ce/Y	Rb/Sr	Nb/ Y	Sm/Nd	Sr/Y	Sr/ Ba	Zr/Y	Ti∕Zr	T i/Y
副角	石英角	XS56-6	41.3	24.7	12.2	5.2	4.73	2.64	2.54	0.41	0.474	0. 226	3. 76	0. 543	8.3	12	135
闪岩	闪片岩	XSG4	60	21.4	10.2	3. 84	4.96	3. 62	2.80	1.10	0. 37	0. 212	2.39	0. 896	5. 09	23.3	87.2
工会	소노	XS56-5*	14.6	4.80	1.94	0. 424	1.54	1. 11	0.473	0. 123	0.171	0. 322	5. 54	5.54	18.96	82.4	268
止用	料衣	XS55*	15.3	4. 79	1.76	0. 223	1.53	0.775	0.457	0.087	0.210	0. 321	5. 17	2.5	12.62	93.6	294
內石	用内石	XS59*	17.7	5. 21	1.81	0. 381	1.42	0. 731	0.498	0. 043	0.236	0.356	7.4	5.09	12.69	111.8	3 35

表 6 正、副角闪岩相关元素对比值的判别标志

Table 6 Recognition guide of correlative element couple for the ortho and paraamphibolites from Xiangshan

岩性	T i/V	Ce/Y b	La/Yb	Th/Yb	La/ Sm	La/ Nb	Ce/Y	Rb/Sr	Nb/Y	$\mathrm{Sm}/\mathrm{N}\mathrm{d}$	Sr/Y	Sr/ Ba	Zr/Y	Ti∕Zr	Ti/ Y
副角闪岩	> 30	> 10	> 5	> 1	> 2	> 2	> 1	> 0.5	> 0.3	< 0.3	< 4	< 1	< 10	< 50	< 200
正角闪岩	< 30	< 10	< 5	< 1	< 2	< 2	< 1	< 0.5	< 0.3	> 0.3	> 4	> 1	> 10	> 50	> 200

7 对判别角闪岩成因标志的几点新认识。

通过对相山地区石英角闪片岩和斜长角闪岩的 对比研究,得出以下几点认识:

(1) 在目前人们根据岩石化学特征参数经常用 来判明角闪岩成因及恢复变质原岩的图解和判别公 式中, 西蒙南的[(al+fm)-(c+alk)]-Si 图解及温 克勒的 AFC 图解能较准确地判明相山两种角闪岩 的成因, 而周世泰的 AZ-KZ 图解及肖的 F1 判别公 式则对副角闪岩存在一定的错判几率。

(2)角闪石的矿物学特征(角闪石准确定名及 (Al/Si)-[Mg/(Fe³⁺ + Fe²⁺ + A1)]图解) 是区别 正、副角闪岩的重要判别依据之一。

(3) 角闪岩稀土元素的一些地球化学参数
 (LREE/HREE, δ(Eu), La/Yb, Sm/Nd等)可作
 为正、副角闪岩的识别标志。

(4)采用Q型模糊聚类分析与蛛网作图相结合的对比方法可以清晰地根据角闪岩的微量元素特征判明其所属正、副角闪岩类。

(5)根据相山地区正、副角闪岩 15 个相关元素 对比值(Ti/V, Ce/Yb, La/Yb, Th/Yb, La/Sm, La/Nb, Ce/Y, Rb/Sr, Nb/Y, Sm/Nd, Sr/Y, Sr/ Ba, Zr/Y, Ti/Zr, Ti/Y) 归纳出的规律可以作为判 别角闪岩成因的地球化学标志之一。

总之,野外地质现象是判别角闪岩成因的最有 力的证据。但对于未留存下可以判明角闪岩原岩性 质的角闪岩来说,只要能全面地研究对比其矿物岩 石地球化学特征,是可以准确判明其成因的。本文 所提出的若干关于判别正、副角闪岩的矿物地球化 学标志,还有待人们根据新的资料,特别是补充具有 确凿地质证据的副角闪岩资料予以进一步验证、充 实和完善。

致谢:作者在野外工作期间得到核工业 261 地质大队蒋兴泉总工程师及范洪海工程师的热情帮助和指导,谨此一并致谢。

参考文献:

- H yndm an D W, Petrology of ign eous and metamorphic rocks (2 nd. ed) [M]. New York: McGraw-Hill, 1985. 225-242.
- [2] Winkler H G F. Petrogenesis of metamorphic rocks (4th ed)
 [M]. Heioleberg: Spring verlag, 1976. 31-54.
- [3] Simonen A. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic Early Archean supracrustal rocks in Southwestern Finland. .
 Bull. Comm. Geol. Finland. 1953, 160: 1-64.

- [4] 王仁民, 贺品高, 陈珍珍, 等. 变质原岩图解判别法[M]. 北京:
 地质出版社, 1987. ⊢52.
- [5] 周世泰.恢复变质原岩的一种岩石化学方法——图解法[J].辽 宁地质学报,1981,(1):178-187.
- [6] 游振东,王方正.变质岩岩石学教程[M].武汉:中国地质大学 出版社,1988.177-222.
- [7] 章邦桐, 胡恭任, 王湘云, 等. 相山地区 变质基底新认识及其原 岩归属的对比研究[J]. 铀矿地质, 1997, 13(1): +7.
- [8] 胡恭任,章邦桐,王湘云.赣中相山元古宙斜长角闪岩的矿物
 学、岩石学特征及同位素地球化学研究[J].地球化学,1998, 27(3):217-229.
- [9] Shaw D M, Kudo A M. A test of the discriminant function in the amphibolite problem [J]. Mineral. M ag. 1965, 34: 423-435.
- [10] Droop G T. A general equation for estimation Fe²⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichimetric criteria [J]. Mineralogical Maga-

zine. 1987, 51: 431-435.

- [11] 殷俊,周国庆.闪石电子探针数据中 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ 的配比[J].
 南京大学学报(地球科学), 1994, 6(2): 173-183.
- [12] IMA-CNMMN角闪石专业委员会全体成员(王立本译).角闪石命名法 ——国际矿物学协会新矿物及矿物命名专业委员会的报告[J].岩石矿物学杂志,2001,20(1):84100.
- [13] 薛治君,白学让,陈武.成因矿物学[M].武汉:武汉地质学院 出版社,1986,114-122.
- [14] 章邦桐,凌洪飞,陈培荣.多体系微量元素地球化学对比中存
 在的问题及解决途径[J].地质地球化学,2003,31(4):102-106.
- [15] Krauskopf K B. Introduction to geochemistry (2nd ed)[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1979. 548-554.
- [16] Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985. 67-96.
- [17] 李昌年.火成岩微量元素岩石学[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.94-125.

NEW RECOGNITION CRITERIA FOR ORTHO AND PARAAMPHIBOLITES: THE COMPARATIVE STUDY ON MINERAL PETROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE PRECAMBRIAN ORTHO PARAAMPHIBOLITES FROM XIANGSHAN, CENTRAL JIANGXI PROVINCE

ZHANG Bang-tong¹, LING Hong-fei¹, CHEN Pei-rong¹, HU Gong-ren², JIANG Yao-hui¹, YU Jin-hai¹

(1. State Key Laboratory f or Mineral Deposits Research and Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2 Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362011, China)

Abstract: Comprehensive study on petrology, mineralogy and geochemistry of REEand trace elements for the Xiangshan Precambrian ortho-paraamphibolites led to genetic recognition criteria for genesis of amphibolites as follows: The mineralogical features of amphibole for discrimination between ortho and paraamphibolites; Explaination of the different REE geochemical characteristics of ortho, paraamphibolites; A useful method of fuzzy cluster analysis on trace elements amphibolites in combination with spidergram to discriminate ortho and paraamphibolites; The comprehensive application of 15 correlative element couple (Ti/V, Ce/Yb, La/Yb, Th/Yb, La/Sm, La/Nb, Ce/Y, Rb/Sr, Nb/Y, Sm/Nd, Sr/Y, Sr/Ba, Zr/Y, Ti/Zr, Ti/Y) to discriminate ortho and paraamphibolites is confirmed.

Key words: recognition criteria; orthoamphibolite; paraamphibolite; Precambrian; Central Jiangxi province