

·专题研究·

花岗岩中原生与次生白云母的鉴别特征及其地质意义

——以赣南富城强过铝质花岗岩体为例

章邦桐 吴俊奇 凌洪飞 陈培荣

(内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093)

摘要:通过显微镜下观察和电子探针成分分析,发现赣南富城强过铝质花岗岩中存在3种类型白云母,即原生白云母、交代型白云母和次生白云母,其平均晶体化学式分别为: $K_{1.62}Na_{0.06}Fe_{0.32}Mg_{0.39}Ti_{0.02}Al_{4.89}Si_{6.54}O_{10}(OH)$ (原生白云母)、 $K_{1.55}Na_{0.07}Fe_{0.43}Mg_{0.24}Ti_{0.03}Al_{4.96}Si_{6.50}O_{10}(OH)$ (交代型白云母)、 $K_{1.51}Na_{0.07}Fe_{0.27}Mg_{0.21}Ti_{0.00}Al_{4.98}Si_{6.65}O_{10}(OH)$ (次生白云母)。根据富城花岗岩主要造岩矿物的结晶顺序(斜长石→钾长石→黑云母→白云母→石英)结合白云母、黑云母稳定曲线及合成花岗岩初融曲线对比分析,富城强过铝质花岗岩中交代型白云母是在花岗岩结晶过程中交代较早晶出的黑云母形成的,其形成温度高于花岗岩熔体的固相线温度(~650℃),故应归属于原生白云母。本文提出根据岩石学宏观特征、岩石化学特征及岩相学微观特征区分花岗岩中原生白云母与次生白云母的综合鉴别方法。

关键词:原生白云母;次生白云母;强过铝质花岗岩;富城岩体

中图分类号: P588.12⁺1; P578.959

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)03-0225-10

Petrological discrimination between primary and secondary muscovites and its geological implications: A case study of Fucheng peraluminous granite pluton in southern Jiangxi

ZHANG Bang-tong, WU Jun-qi, LING Hong-fei and CHEN Pei-rong

(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Fucheng composite pluton is exposed in an area of about 850 km² and intruded into Sinian-Cambrian strata with a distinctive thermometamorphic aureole of hornstone. The first stage major phase granite is coarse-medium-grained porphyritic biotite granite, whose major minerals are quartz, K-feldspars, plagioclase and lesser biotite and muscovite, and whose accessory minerals are zircon, apatite, topaz, tourmaline etc. The second stage additional phase granite is medium-fine-grained two-mica granite in the form of a small stock, whose major rock-forming minerals are quartz, K-feldspars, plagioclase, muscovite and biotite. As for petrochemistry, the indices of alumina saturation [$ACNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$] of Fucheng pluton are higher than 1.0 ($ACNK = 1.22$ on average), indicating that the Fucheng pluton belongs to strongly peraluminous granite. The whole rock Rb-Sr isochron ages of the first main-stage granite are 226~203 Ma, whereas the zircon U-Pb ages are 231~239 Ma, implying that the granite is an intrusive product of late Indosinian magmatic cycle. Based on microscopic observation and electron microprobe analyses, the authors recognized three kinds of muscovites, namely

收稿日期: 2009-09-18; 修订日期: 2009-12-07

基金项目: 中国核工业地质局十一五基础科研项目(YK08); 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室研究项目(2008CI-04); 教育部科学重大资助项目(306007)

作者简介: 章邦桐(1934-), 汉族, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为核能地质及成矿理论, E-mail: Zhangbt@nju.edu.cn

primary, metasomatic and secondary muscovites, in the Fucheng strongly peraluminous granite pluton, and their average crystallochemical formulas are respectively as follows: $K_{1.62}Na_{0.06}Fe_{0.32}Mg_{0.39}Ti_{0.02}Al_{4.89}Si_{6.54}O_{10}(OH)_4$ (primary muscovite), $K_{1.55}Na_{0.07}Fe_{0.43}Mg_{0.24}Ti_{0.03}Al_{4.96}Si_{6.50}O_{10}(OH)_4$ (metasomatic muscovite), $K_{1.51}Na_{0.07}Fe_{0.27}Mg_{0.21}Ti_{0.00}Al_{4.98}Si_{6.65}O_{10}(OH)_4$ (secondary muscovite). According to the crystallizing sequence of main rock-forming minerals (plagioclase \rightarrow K-feldspar \rightarrow biotite \rightarrow muscovite \rightarrow quartz) in combination with an analysis of muscovite and biotite stability curves and syntectic granite solidus, it is considered that the metasomatic muscovite was formed by the replacement of early crystallized biotite in the crystallization process of the granite melt. Moreover, as the crystallization temperature of the muscovite was higher than the solidus temperature of the granite melt (about 650°C), it is concluded that the metasomatic muscovite belongs to primary muscovite. A synthetic method for the discrimination between primary and secondary muscovites based on macroscopic petrological and petrochemical characteristics as well as micro-petrographic features is suggested in this paper.

Key words: primary muscovite; secondary muscovite; strongly peraluminous granite; Fucheng pluton

白云母是强过铝质花岗岩的重要指示矿物之一。按成因,花岗岩中的白云母可分为原生白云母和次生白云母。原生白云母系指直接从花岗岩浆中晶出的白云母,而次生白云母一般是指在岩浆结晶期后及经热液作用交代其他矿物而形成的白云母。因此,不同成因白云母的研究,特别是原生白云母的厘定可为花岗岩类型划分、命名及成因研究提供重要依据和成因信息。自 20 世纪 80 年代以来不少国内外学者对花岗岩中的白云母进行了专门研究,并对原生白云母和次生白云母提出了一系列岩相学和地球化学判别标志。在岩相学标志方面,通常将在薄片呈自形一半自形晶出、端面清晰、不与其他造岩矿物呈交代反应关系等特征作为白云母直接从岩

浆晶出的首要岩相学标志,而将交代黑云母或其他造岩矿物、或呈黑云母假象、或含有黑云母残留的白云母以及呈细鳞片状晶出的白云母判断为次生白云母 (Miller *et al.*, 1981; Clarke, 1981; Anderson and Rowley, 1981; Borodina and Fershtater, 1988; Villa *et al.*, 1997; 孙涛等, 2002; 于津海等, 2007; 汪湘等, 2007; Klein *et al.*, 2008)。在地球化学判别标志方面,近年来,国内外学者应用电子探针分析对花岗岩体中原生白云母及次生白云母进行了详细研究对比,得出了一系列地球化学判别标志 (Miller *et al.*, 1981; Clarke, 1981; Anderson and Rowley, 1981; Borodina and Fershtater, 1988; 孙涛等, 2002; 汪湘等, 2007)。现将他们的研究成果一并综合列于表 1。

表 1 花岗岩中原生和次生白云母地球化学特征对比

Table 1 Comparison of geochemical features between primary and secondary muscovites in granites

序号	化学成分及参数	原生白云母	次生白云母	文献
1	Ti	富 Ti ($Ti \geq 0.05$)	贫 Ti ($Ti \leq 0.05$)	Miller 等 (1981); 孙涛等 (2002); 汪湘等 (2007); Anderson 和 Rowley (1981)
2	Mg	富 Mg ($Mg \geq 0.1$)	贫 Mg ($Mg \leq 0.1$)	Miller 等 (1981); 孙涛等 (2002)
		贫 Mg ($0.029 \sim 0.108$)	富 Mg ($0.164 \sim 0.184$)	汪湘等 (2007); Anderson 和 Rowley (1981); Borodina 和 Fershtater (1988)
3	Fe	低 Fe ($0.09 \sim 0.13$)	高 Fe ($0.19 \sim 0.45$)	孙涛等 (2002); Anderson 和 Rowley (1981)
		高 Fe ($0.418 \sim 0.827$)	低 Fe ($0.341 \sim 0.358$)	汪湘等 (2007)
4	Na	Na 高 (≥ 0.1)	Na 低 (≤ 0.1)	孙涛等 (2002); Miller 等 (1981)
		Na 低 ($0.054 \sim 0.147$)	Na 高 ($0.143 \sim 0.167$)	汪湘等 (2007)
5	Al	富 Al (≥ 5.2)	贫 Al (≤ 5.2)	孙涛等 (2002); Miller 等 (1981); Anderson 和 Rowley (1981)
		贫 Al ($4.904 \sim 5.333$)	富 Al ($5.447 \sim 5.483$)	汪湘等 (2007)
6	Si	富 Si ($6.158 \sim 6.338$)	贫 Si ($6.061 \sim 6.163$)	汪湘等 (2007); Borodina 和 Fershtater (1988)
		贫 Si	富 Si	Anderson 和 Rowley (1981); Miller 等 (1981)
7	Fe/(Fe+Mg)	< 0.75	> 0.75	孙涛等 (2002); 汪湘等 (2007)

综上所述,笔者认为在前人关于花岗岩不同成因白云母判别标志的研究成果中仍有以下 2 个问题需要进一步探讨:①上述国内外学者将交代黑云母的白云母归属次生白云母的观点需要进一步分析和讨论,特别是认为交代黑云母的白云母是在亚固相线(subsolidus)条件下形成的看法(Clarke *et al.*, 1976; Clarke, 1981)有待商榷;②前人提出的有关原生和次生白云母的地球化学判别标志(表 1)能否有效应用于其他花岗岩体,需做实际检验。为了探讨原生和次生白云母的岩相学和地球化学的判别标志,本文选择了既含有原生白云母、同时也含有交代黑云母而呈其假像的“次生”白云母,还有细鳞片状次生白云母的赣南富城(大富足)花岗岩体作为研究对象,目的在于验证前人提出的上述关于区分原生和次生白云母的岩相学、地球化学标志,探讨白云母形成的物理化学条件,并在此基础上提出根据岩石学宏观特征、岩石化学特征及岩相学微观特征区分花岗岩中原生白云母与次生白云母的综合鉴别方法。

1 富城花岗岩体地质概况

富城复式花岗岩体地表出露面积约 850 km²,与震旦-寒武系围岩呈明显的侵入接触,沿接触带发育热变质角岩(图 1)。主体岩石为中粗粒斑状黑云母花岗岩,长石斑晶粒径较大,一般 ≥ 5 mm,而石英、黑云母粒径一般 ≤ 2 mm。矿物成分主要为石英(20%~32%)、钾长石(28%~40%)和斜长石(26%~35%),其次为黑云母(4%~8%)和白云母(1%~2%)。副矿物有锆石、磷灰石、黄玉、电气石等。石英一般呈他形粒状或聚晶状产出,其内部常可见到黑云母、白云母、磷灰石等矿物的包裹体。钾长石中条纹发育,属显微条纹长石,具卡氏双晶,常呈浅褐色微弱泥化。斜长石属更钠长石,聚片双晶发育,偶见卡钠复合双晶,常被鳞片状白云母(水云母)交代。黑云母呈自形-半自形,具深褐-黄绿色多色性,内部常包含锆石、磷灰石等包裹体。补体岩石为浅肉色中细粒二云母花岗岩,呈小岩株产出,主要造岩矿物为石英、钾长石、斜长石、白云母和黑云母。

富城花岗岩体岩石化学的铝饱和指数均大于 1.10,平均值为 1.22(图 2),表明富城花岗岩体属强过铝质花岗岩。主体中粗粒斑状黑云母花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄为 226~203 Ma(江西省地质矿产调

查大队,1991),锆石 U-Pb 年龄为 231~239 Ma(于津海等,2007),属印支期岩浆活动产物。

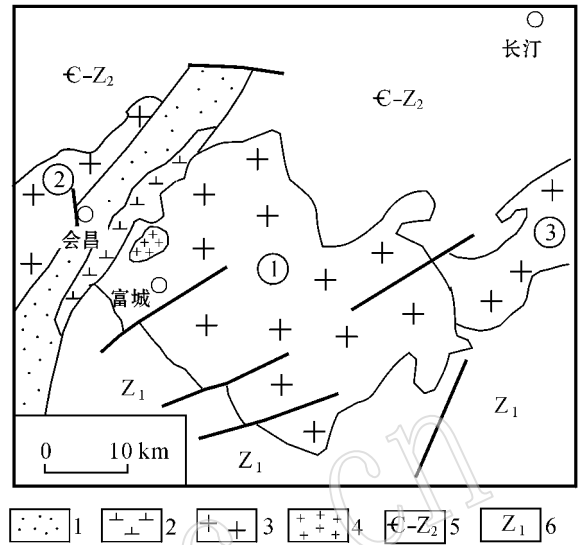


图 1 富城花岗岩体地质略图 [据江西省地质矿产调查大队(1991)修改]

Fig. 1 Geological sketch map of Fucheng granite pluton (after Regional Geological Survey Party of Jiangxi, 1991)
 1—赣州组(K₁); 2—橄榄玄粗岩; 3—花岗岩: ①—富城岩体; ②—珠兰埠岩体; ③—红山岩体; 4—细粒二云母花岗岩; 5—上震旦-寒武系; 6—下震旦系
 1—Ganzhou Formation(K₁); 2—shoshonite; 3—granites: ①—Fucheng pluton; ②—Zhulanbu pluton; ③—Hongshan pluton; 4—fine-grained two-mica granite; 5—Upper Sinian-Cambrian; 6—Lower Sinian

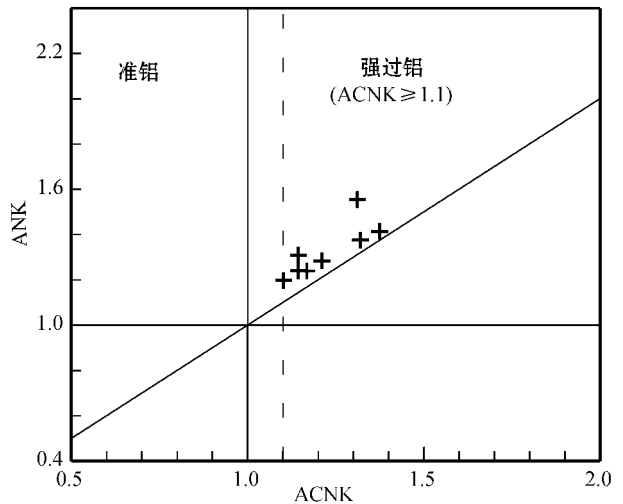


图 2 富城花岗岩体的 ANK - ACNK 图解
 Fig. 2 ANK - ACNK diagram of Fucheng granite pluton

2 白云母岩相学特征

富城强过铝质复式花岗岩体中,无论是在含少量白云母的中粗粒黑云母钾长花岗岩内,还是在

细粒二云母花岗岩花岗岩中,显微镜下普遍见到 3 种白云母。一种为无色透明,呈自形-半自形、粒径较大(0.3~1 mm)、端面清晰,不具环带构造,也不含其他矿物包裹体的白云母(图 3a、3b)。按 Miller 等(1981)提出的有关原生白云母岩相学的判别标

准,它们应属原生白云母。第 2 种则为交代黑云母(图 3d、3e)或常沿解理缝及其内部保存有少量残留黑云母(图 3c)的白云母,以下简称为交代型白云母。第 3 种为呈细鳞片状集合体产出,常交代斜石或呈热液交代蚀变矿物产出的次生白云母(图 3f)。

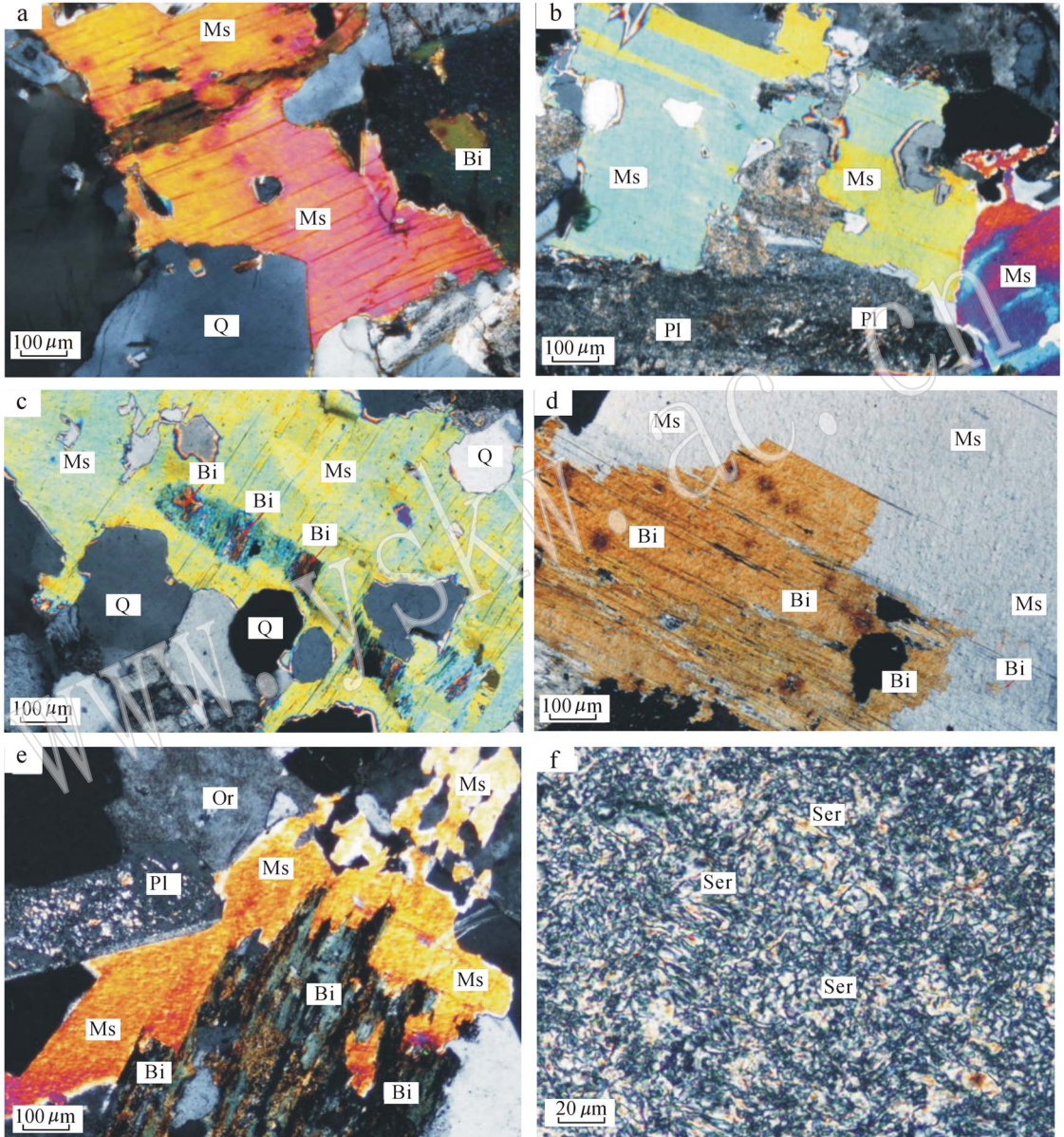


图 3 富城强过铝质花岗岩体中原生白云母、交代型白云母和次生白云母

Fig. 3 Primary, metasomatic and secondary muscovites from Fucheng strongly peraluminous granite

a—原生白云母(Ms), 自形, 端面清晰, 薄片号 C02, 正交偏光; b—原生白云母, 半自形, 薄片号 DX09, 正交偏光; c—交代型白云母, 内部有残留黑云母(Bi), 薄片号 DX07, 正交偏光; d—交代型白云母, 被交代黑云母中存在具多色晕圈的副矿物包裹体, 薄片号 C07, 正交偏光; e—交代型白云母, 被交代黑云母已绿泥石化, 薄片号 C07, 正交偏光; f—细鳞片状次生白云母(Ser), 薄片号 He13, 正交偏光; Q—石英; Pl—斜长石; Or—钾长石

a—primary muscovite(Ms), euhedral form, clear terminated grain, sample C02, crossed nicols; b—primary muscovite, subhedral form, sample DX09, crossed nicols; c—metasomatic muscovite, relic biotite(Bi) within muscovite, sample DX07, crossed nicols; d—metasomatic muscovite, accessory minerals with pleochroic halo enclosed in replacing biotite, sample C07, crossed nicols; e—metasomatic muscovite, anhedral, chloritization of biotite, sample He08, crossed nicols; f—secondary muscovite(Ser), fine-scale aggregate of sericite, sample He13, crossed nicols

按 Miller 等(1981)提出的有关次生白云母岩相学的判别标准,富城花岗岩中交代型白云母应判属为次生白云母。为了确切厘定富城花岗岩中交代型白云母的成因类型,并验证上述关于区分原生和次生白云母的地球化学标志(表 1),本文对富城强过铝质花岗岩体中存在的上述 3 种白云母进行了电子探针微区成分分析。

3 分析方法及测试结果

待测样品中白云母的化学成分利用南京大学内

生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的 JEOL JXA-8800M 型电子探针进行测试。定量分析的电子探针工作条件为:加速电压 15 kV,探针电流 10 nA,束斑直径 < 1 μm;定量分析的标样均为美国国家标准局的矿物标样。

富城花岗岩白云母的电子探针分析结果及以 22 个氧原子为基础计算得出白云母晶体化学式中相关元素的原子数和有关参数一并列于表 2。为便于对白云母成因研究讨论,在表 2 中将交代黑云母而呈黑云母假像或含有黑云母包裹体及残留体的白云母暂称为交代(黑云母)型白云母并单独列出。

表 2 富城强过铝质花岗岩中白云母的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of muscovite from Fucheng strongly peraluminous granites

白云母类型	原生型			交代型						次生型		
	自形-半自形、端面清晰			交代黑云母、或呈黑云母假像、或含黑云母残留						细鳞片状		
白云母特征												
样号	C07a	C07b	C02	He08a	He08a	He08a	He11a	He11b	He12	He13a	He13b	Ck02
SiO ₂	45.471	48.55	52.15	52.41	52.54	50.11	47.72	47.26	48.12	52.11	52.36	50.75
TiO ₂	0.393	0.10	0.07	0.14	0.14	0.48	0.52	0.27	0.39	0.04	0.04	0.03
Al ₂ O ₃	35.064	31.12	26.46	31.98	31.16	30.65	35.33	33.40	30.80	32.84	32.72	33.10
FeO*	3.14	2.59	2.91	3.14	3.57	4.26	2.81	4.41	5.35	2.36	2.68	2.45
MnO	0.176	0.04	0.03	0.06	0.01	0.07	0.15	0.25	0.13	-	0.032	0.06
MgO	1.279	1.62	2.91	1.41	1.35	1.37	0.82	1.03	1.49	1.18	1.43	0.73
CaO	0.008	0.03	0.07	0.08	0.11	0.05	0.00	0.04	0.01	0.05	0.05	0.04
Na ₂ O	0.591	0.04	0.04	0.05	0.07	0.06	0.58	0.40	0.39	0.09	0.08	0.05
K ₂ O	9.277	9.62	9.53	9.50	8.81	9.13	9.35	9.25	9.48	8.47	8.72	9.74
F	2.783	1.51	2.39	0.28	0.18	0.32	2.46	1.89	3.21	0.15	0.28	-
总和	98.182	95.20	96.56	99.04	97.94	96.49	99.73	98.19	99.36	97.28	98.35	96.94
以 22 个氧原子为基准的阳离子数												
Si	6.07	6.55	6.99	6.68	6.75	6.61	6.22	6.27	6.44	6.68	6.67	6.59
Al ⁴⁺	1.93	1.45	1.01	1.32	1.25	1.39	1.78	1.73	1.54	1.32	1.33	1.41
Al ⁶⁺	3.6	3.5	3.17	3.49	3.47	3.38	3.64	3.50	3.29	3.64	3.58	3.65
Ti	0.04	0.011	0.007	0.013	0.014	0.048	0.052	0.027	0.039	0.004	0.004	0.003
Fe	0.351	0.292	0.321	0.335	0.383	0.47	0.306	0.489	0.598	0.252	0.285	0.266
Mn	0.02	0.004	0.004	0.006	0.01	0.007	0.016	0.028	0.015	0.001	0.003	0.006
Mg	0.255	0.325	0.58	0.268	0.259	0.269	0.16	0.204	0.296	0.225	0.271	0.14
Ca	0.001	0.005	0.01	0.011	0.015	0.007	0.001	0.006	0.002	0.007	0.007	0.006
Na	0.153	0.009	0.011	0.013	0.017	0.015	0.146	0.104	0.10	0.023	0.021	0.012
K	1.58	1.655	1.63	1.55	1.44	1.54	1.55	1.57	1.62	1.39	1.42	1.61
N/NKC	0.088	0.005 6	0.006 6	0.008	0.012	0.009 4	0.085 8	0.062	0.058 3	0.016 5	0.014 4	0.007 1
FM	0.097 9	0.111	0.177 9	0.111	0.120	0.133	0.078 1	0.116	0.154 1	0.087 7	0.101 7	0.074
Fe/(Fe+Mg)	0.579	0.473	0.36	0.556	0.596	0.636	0.657	0.706	0.669	0.529	0.513	0.654

N/NKC = Na/(Na + K + Ca); FM = (Fe + Mg)/(Fe + Mg + Ti + Al)

4 讨论

4.1 富城强过铝质花岗岩中白云母的化学成分特征

天然过铝质花岗岩中的白云母一般不是纯白云母,而是一种由白云母分子 $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 、钠云母分子 $NaAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ 和绿磷石分子 $KAl(Fe, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$ 组成的固溶体(Clarke, 1981)。将表 2 中的数据投影到 $(Fe + Mg)/(Fe + Mg + Ti + Al) - Na/(Na + K + Ca)$ 图解中,可清楚看出富成岩体中的白云母是一种由白云母分子及一定数量钠云母分子和绿磷石分子组成的固溶体(图 4)。

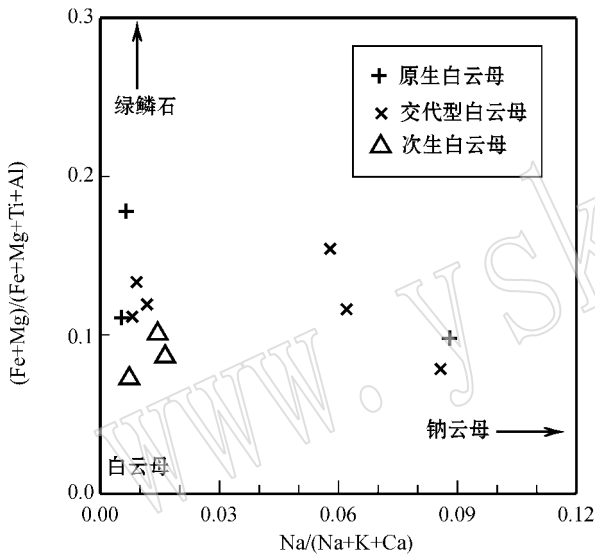


图 4 富城强过铝质花岗岩体中 3 种类型白云母的 $(Fe + Mg)/(Fe + Mg + Ti + Al) - Na/(Na + K + Ca)$ 图解(仿 Clarke, 1981)

Fig. 4 $(Fe + Mg)/(Fe + Mg + Ti + Al) - Na/(Na + K + Ca)$ diagram of three types muscovites in Fucheng strongly peraluminous granite (after Clarke, 1981)

根据表 2 中的数据计算出富成岩体中白云母的平均晶体化学式分别为: $K_{1.62}Na_{0.06}Fe_{0.32}Mg_{0.39}Ti_{0.02}Al_{4.89}Si_{6.54}O_{10}(OH)_4$ (原生白云母)、 $K_{1.55}Na_{0.07}Fe_{0.43}Mg_{0.24}Ti_{0.03}Al_{4.96}Si_{6.50}O_{10}(OH)_4$ (交代型白云母)和 $K_{1.51}Na_{0.07}Fe_{0.27}Mg_{0.21}Ti_{0.00}Al_{4.98}Si_{6.65}O_{10}(OH)_4$ (次生白云母)。

4.2 富城花岗岩中交代型白云母应属原生白云母

富城花岗岩的上述 3 种白云母所属的成因类型中,原生白云母和次生白云母的鉴别特征十分明

确、可信,但交代黑云母的白云母应归属于次生白云母抑或原生白云母则需要进一步讨论。

4.2.1 富城花岗岩主要造岩矿物的结晶顺序

根据薄片主要矿物结晶形态、相互关系及结构特征的镜下观察,确定富城花岗岩中主要造岩矿物结晶的顺序为:斜长石→钾长石→黑云母→白云母→石英。从实验岩石学得知,花岗岩主要造岩矿物的结晶顺序主要取决于岩浆中 H_2O 含量。根据富城花岗岩中存在含水矿物黑云母的特点可以大致确定花岗岩浆含 H_2O 约为 3.5%(Hyndman, 1985)。目前许多合成花岗岩类岩石主要矿物的结晶顺序已由实验岩石学加以确定。上述富城花岗岩主要造岩矿物的结晶顺序与含 6% H_2O 合成花岗岩(71.3% SiO_2)的主要矿物的结晶顺序(Whitney, 1975)一致。花岗岩学研究表明,呈中粗粒全晶质结构、具均匀块状构造等地质特征的花岗岩,其形成(侵位)时的埋深(距古地表深度)较大,约为 6.5~13 km (Buddington, 1959; Hyndman, 1985)。鉴于地壳岩石的热导率很低,一般仅为 $nTCU$ (Buntebarth, 1984; $1TCU = 0.4187 W/mK$),所以,巨大花岗岩基熔体在地壳较深部位冷却-结晶是一个长达数十数百万年的地质过程(Pitcher, 1993; Zhang *et al.*, 2007)。鉴于富城为一巨大花岗岩基(地表出露面积约 850 km^2),笔者认为较早晶出黑云母被晚晶出白云母交代是在富城花岗岩长期冷却-结晶过程中一种常见的矿物交代现象。

4.2.2 富城花岗岩中交代型白云母属原生岩浆成因的物理化学依据

自从 Miller 等(1981)提出过铝质花岗岩中交代黑云母的白云母属次生白云母的意见后,这一观点得到了许多岩石学者的认同(Anderson and Rowley, 1981; Borodina and Fershtater, 1988; Klein *et al.*, 2008; 孙涛等, 2002; 汪湘等, 2007; 于津海等, 2007)。该观点的理论依据是:这种交代黑云母的白云母是在亚固相线(subsolidus)条件下发生的(Clarke *et al.*, 1976; Clarke, 1981)。根据 Glossary of Geology (Bates *et al.*, 1980)中 subsolidus 的确切含义是指固相线以下的条件,换句话说就是这种交代作用是在花岗岩结晶固结后发生的。但我们认为,在显微镜镜下见到的这种交代现象只能说明被交代黑云母结晶时间较白云母为早,至于该交代白云母是否在 subsolidus 条件下形成的,则应结合花岗岩熔体冷却结晶过程及黑云母、白云母形成的物

理化学条件进行合理分析对比。为此,本文引用了黑云母和白云母的稳定曲线并示于图 5。鉴于富城强过铝质花岗岩 CIPW 标准矿物成分为:Ab+Or+Q>90%,An 值<1% 这表明富城花岗岩的化学成分与以 Ab-Or-Q-H₂O 体系为代表的合成花岗岩成分比较接近。因此在图 5 中同时做出以 Ab+Or+Q

+H₂O 体系为代表的合成花岗岩初熔曲线(固相线)(Luth *et al.*, 1964)进行讨论。

通过对图 5 中白云母及黑云母稳定曲线与合成花岗岩初熔曲线的相互关系分析,可以得出以下凡点有关花岗岩中白云母和黑云母形成条件的的结论:

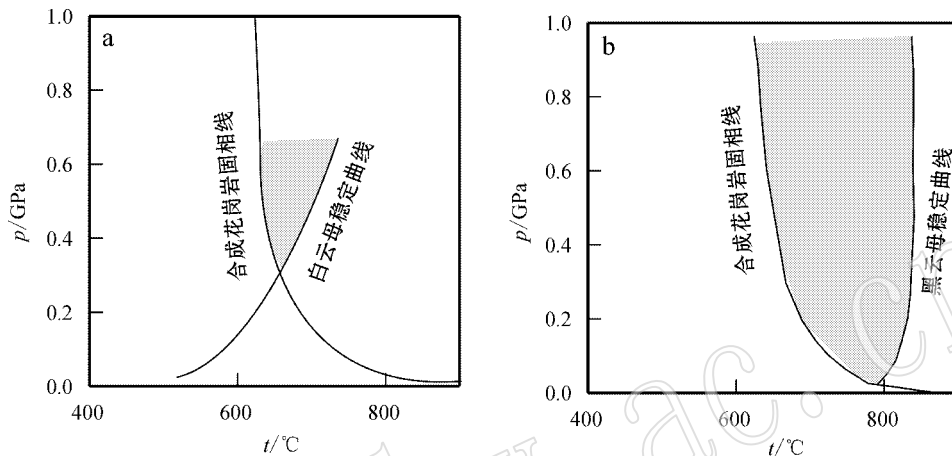


图 5 白云母、黑云母的稳定曲线及其与花岗岩初融曲线关系图解(引自 Clarke, 1981)

Fig. 5 The relationship between muscovite, biotite stability curves and granite solidus (after Clarke, 1981)

a—白云母稳定曲线; b—黑云母稳定曲线; 合成花岗岩(Q+Ab+Or+H₂O)固相线与白云母及黑云母稳定曲线交汇区(阴影区)表示可能存在原生(岩浆)矿物的范围

a—muscovite stability curve; b—biotite stability curve; overlap of the two curves (shaded area) indicates the possible range of a primary (magmatic) mineral

(1) 白云母和黑云母从花岗岩熔体中晶出的最低温度可以分别根据图 5 中白云母和黑云母稳定曲线与花岗岩初融熔融曲线的交点来确定。从图 5a、5b 可见白云母从花岗岩熔体中晶出的温度约为 700℃, 而黑云母形成的温度约为 800℃, 由此可见在花岗岩熔体冷却过程中黑云母结晶时间早于白云母;

(2) 白云母结晶温度(≥700℃)一般不低于花岗岩熔体固相线温度(650℃)结合白云母结晶粒度与黑云母相当及花岗岩熔体冷却结晶是一个长达数百万年的地质过程等特点, 这表明白云母交代黑云母的现象是在花岗岩熔体结晶过程中发生的;

(3) 根据图 5a 中白云母和黑云母稳定曲线与花岗岩熔融曲线固相线的交点确定白云母形成的最小成岩压力≥0.3 GPa, 而黑云母与交点的位置很低, 约为 0.03 GPa 处, 这意味着黑云母的压力稳定范围很大, 可以在深成相到浅成相的各种岩浆岩中广泛出现, 而原生白云母则仅限形成在压力较大的深成

相花岗岩中。

此外, 镜下还见到半自形等粒状石英交代白云母的现象, 这表明交代型白云母的结晶时间早于花岗岩中石英的结晶时间, 而花岗岩中存在的这些石英无疑是属于岩浆成因的。这也为交代型白云母的原生岩浆成因提供了重要佐证。

据此可以认为上述交代型白云母是在花岗岩熔体结晶过程中晶出的, 其形成温度高于花岗岩熔体的固相线温度, 应属原生白云母。

4.3 关于花岗岩中原生和次生白云母地球化学判别标志的讨论

综合分析近年国内外学者研究花岗岩体中原生白云母及次生白云母得出的一系列地球化学判别标志(表 1), 可以得出以下 2 点结论: 原生白云母富 Ti, 而次生白云母则以相对贫 Ti 为特征; 关于 Mg、Fe、Na、Al、Si 等元素则存在不同的判别标志, 如孙涛等(2002)和 Miller 等(1981) 得出判断原生白云母的地球化学标志为低 Fe、Si 和高 Na、Mg、Al, 而汪湘

等(2007)、Borodina 和 Fershtater(1988)则得出原生白云母以富 Fe、Si 和贫 Na、Mg、Al 为特征。

我们注意到,上述有关原生和次生白云母的岩相学和地球化学的判别标志大多是通过不同岩体白云母研究得出的,例如含原生白云母的岩体为高排岩体、司前岩体(孙涛等,2002)、猪蹄石岩体(汪湘等,2007),而含次生白云母的花岗岩体为帽峰岩体、长沙岩体、西华山岩体(孙涛等,2002)、骑田岭岩体(汪湘等,2007)。为了消除不同花岗岩体成分的影响并检验上述原生白云母及次生白云母地球化学判别标志(表1)的可信性,本文将富城强过铝质花岗岩体中原生白云母、细鳞片状次生白云母、交代白云母

而呈其假像的交代型白云母的相关数据(表2)分别投影到 Mg、Na 对 $Fe/(Fe+Mg)$ 图解(图6)和 Ti-Mg-Na 图解(图7)中。从图中可以看出,富城岩体交代型白云母的投影范围与原生白云母的投影范围基本一致,孙涛(2002)及 Miller 等(1981)研究得出的区分原生或次生白云母的标记范围均不能区分出富城岩体的原生白云母和次生白云母。

综合表1所列的白云母成因判别标志及上述富城花岗岩中三种白云母成分分析结果,本文得出的结论是,应用白云母的 Ti、Mg、Al、Na、Fe、Si、 $Fe/(Fe+Mg)$ 等的地球化学特征来判别花岗岩中白云母的成因类型不具有普遍的实际意义。

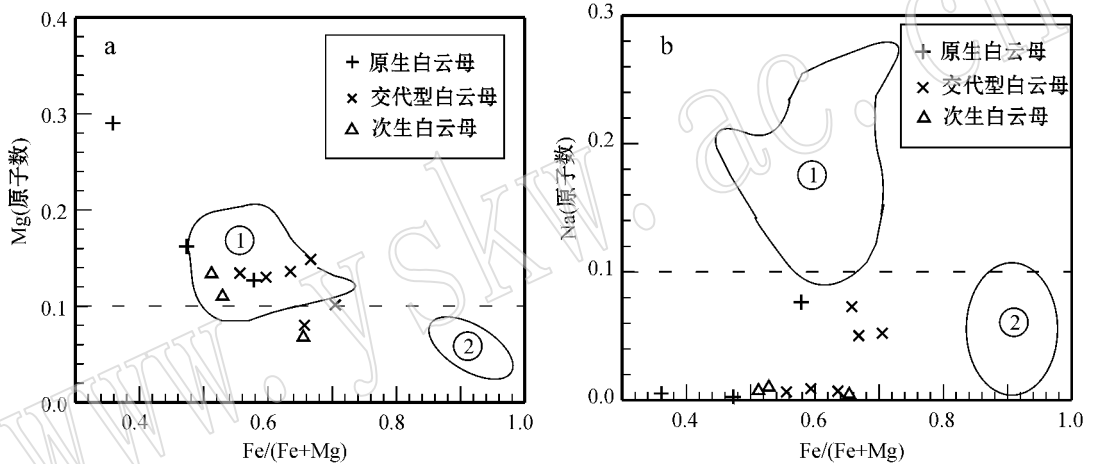


图6 富城强过铝质花岗岩体中3种类型白云母的 Mg- $Fe/(Fe+Mg)$ 图解(a)和 Na- $Fe/(Fe+Mg)$ 图解(b)

Fig. 6 Mg- $Fe/(Fe+Mg)$ diagram (a) and Na- $Fe/(Fe+Mg)$ diagram (b) of three types muscovites in Fucheng strongly peraluminous granite

①—原生白云母成分投影区(孙涛等,2002);②—次生白云母成分投影区(孙涛等,2002)

①—the range of primary muscovite plotted by Sun Tao *et al.* (2002); ②—the range of secondary muscovite plotted by Sun Tao *et al.* (2002)

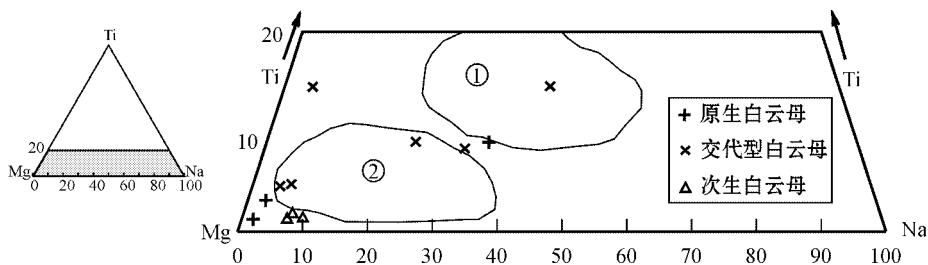


图7 富城强过铝质花岗岩体中3种类型白云母的 Ti-Mg-Na 图解(仿 Miller 等,1981)

Fig. 7 Ti-Mg-Na diagram of three types muscovites in Fucheng strongly peraluminous granite (after Miller *et al.*, 1981)

①—原生白云母成分投影区(Miller 等,1981);②—次生白云母成分投影区(孙涛等,2002)

①—the range of primary muscovite plotted by Mitler *et al.* (1981); ②—the range of secondary muscovite plotted by Sun Tao *et al.* (2002)

4.4 花岗岩中生与次生白云母的鉴别特征及其地质意义

关于花岗岩中生与次生白云母的鉴别,本文提出从岩石学宏观特征、岩石化学特征、岩相学微观特征三方面综合判断的鉴定方法。

(1) 岩石学宏观特征

在未蚀变花岗岩块状手标本新鲜面上能识别出呈均匀状分布的较大片状白云母矿物一般为原生白云母,若呈脉状或呈不规则囊状与粗粒石英共生则属次生白云母。在二云母花岗岩中,白云母、石英的抗风化能力较黑云母、长石强,因此在地表风化产物中常保存较多的、易识别的片状原生白云母。中低温热液蚀变形成的细鳞片状次生白云母在宏观上一般呈浅绿色隐晶质集合体,或呈脉状及网脉状分布。

(2) 岩石化学特征

岩石的铝饱和指数(ASI) ≥ 1.1 ,表明花岗岩属强过铝质花岗岩,以存在原生白云母、富铝黑云母等高铝造岩矿物组合为重要特征。白云母是强过铝质花岗岩的重要指示矿物之一。

(3) 岩相学微观特征

原生白云母在薄片呈自形-半自形晶出,端面清晰,有时交代黑云母或呈黑云母假像,或含有黑云母残留。呈细鳞片状晶出的白云母(又称绢云母,伊利水云母)则为次生白云母。

确切厘定花岗岩中白云母的成因类型对花岗岩的定名有着重要的实际意义。这是因为次生白云母不参与花岗岩定名的,例如皖南过铝花岗闪长岩虽含有较多数量的、由黑青石交代蚀变形成的次生白云母,但这种次生白云母不参与花岗闪长岩定名(周新民等,1988)。又如富城花岗岩体中的中细粒二云母花岗岩(图1),长期以来有关地质队曾根据镜下普遍存在白云母交代黑云母的现象而确认为次生白云母,从而将其定名为中细粒黑云母花岗岩。此外,原生白云母的厘定对于花岗岩类型的划分及其形成的大地构造背景的研究也具有重要地质意义(Miller *et al.*, 1981; Villa *et al.*, 1997; 孙涛等, 2002)。

5 结论

(1) 电子探针微区分析表明,富城强过铝质花岗岩体中3种白云母的化学成分较纯白云母富Si、Fe、Mg、Na、Ti,略贫Al,是含有一定数量绿磷石分子和钠云母分子的混合白云母,其平均晶体化学结

构式为: $K_{1.62}Na_{0.06}Fe_{0.32}Mg_{0.39}Ti_{0.02}Al_{4.89}Si_{6.54}O_{10}(OH)_4$ (原生白云母), $K_{1.55}Na_{0.07}Fe_{0.43}Mg_{0.24}Ti_{0.03}Al_{4.96}Si_{6.50}O_{10}(OH)_4$ (交代型白云母), $K_{1.51}Na_{0.07}Fe_{0.27}Mg_{0.21}Ti_{0.00}Al_{4.98}Si_{6.65}O_{10}(OH)_4$ (次生白云母)。

(2) 对白云母、黑云母稳定场温压相图及合成花岗岩初融曲线分析对比表明,富城强过铝质花岗岩中交代型白云母是在花岗岩结晶过程中交代较早晶出的黑云母形成的,应归属于原生白云母。

(3) 文献中提出的关于判断原生和次生白云母的7项地球化学标志,因相互间存在较多矛盾,而且也未能区分出富城花岗岩中的原生白云母和次生白云母,故不能成为判断花岗岩中白云母成因类型的有效准则。

(4) 本文提出根据岩石学宏观特征、岩石化学特征及岩相学微观特征区分花岗岩中生与次生白云母的综合鉴别方法。

References

- Anderson J L and Rowley M C. 1981. Synkinematic intrusion of peraluminous and associated metaluminous granitic magmas, Whipple Mountains, California [J]. *Can. Mineral.*, 19: 83~101.
- Bates R L and Jackson J A. 1980. *Glossary of Geology* (Second Edition) [M]. Virginia: Falls Church, American Geological Institute.
- Borodina N S and Fershtater G B. 1988. Composition and nature of muscovite in granites [J]. *International Geology Review*, 30(4): 375~381.
- Buddington A F. 1959. Granite emplacement with special reference to North America [J]. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 70: 671~747.
- Buntebarth G. 1984. *Geothermics: An Introduction* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 26~42.
- Clarke D B, McKenzie C B and Muecke G K. 1976. Magmatic andalusite from the South Mountain Batholith, Nova Scotia [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 56: 279~287.
- Clarke D B. 1981. The mineralogy of peraluminous granite: A review [J]. *Can. Mineral.*, 19: 3~17.
- Hyndman D W. 1985. *Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks* [M]. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill.
- Klein T, Kiehm S, Sieel W, *et al.* 2008. Age and emplacement of Late-Variscan granites of the western Bohemian Massif with main focus on the Hauzenberg granitoids (European Variscides, Germany) [J]. *Lithos*, 103(3-4): 478~507.
- Luth W C, Jahns R H and Tuttle O F. 1964. The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars [J]. *Jour. Geophys. Research*, 69: 759~773.
- Miller C F, Stoddard E F, Bradfish L J, *et al.* 1981. Composition of

- plutonic muscovite: Genetic implications [J]. *Can. Mineral.*, 19: 25~34.
- Pitcher W S. 1993. *The Nature and Origin of Granite* [M]. Glasgow and London: Blackie Academic, 182~190.
- Regional Geological Survey Party of Jiangxi Province. 1991. *Geological Map of Huichang Area (1:50 000)* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Sun T, Chen Peirong, Zhou Xinmin, *et al.* 2002. Strongly peraluminous granites in Eastern Nanling Mountains, China: Study on muscovite [J]. *Geological Review*, 48(5): 518~525 (in Chinese with English abstract).
- Villa I M, Ruggieri G and Puxeddu M. 1997. Petrological and geochronological discrimination of two white-mica generations in a granite cored from the Larderello-Travale geothermal field (Italy) [J]. *Eu. J. Mineral.*, 9: 563~568.
- Wang Xiang, Wang Zhicheng and Wang Chuansheng. 2007. Some subordinate granites—their zirconology and petrogenesis [A]. Zhou Xinmin. *Lithospheric Geodynamics and Petrogenesis of Late Mesozoic Granitic Rocks in the Nanling Region* [C]. Beijing: Science Press, 658~691 (in Chinese).
- Whitney J A. 1975. The effects of pressure, temperature and X_{H_2O} on phase assemblage in four synthetic rock compositions [J]. *J. Geol.*, 83: 1~31.
- Yu Jinghai and Zao Lei. 2007. Hongshan-Fucheng pluton [A]. Zhou Xinmin. *Lithospheric Geodynamics and Petrogenesis of Late Mesozoic Granitic Rocks in the Nanling Region* [J]. Beijing: Science Press, 658~691 (in Chinese).
- Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2007. Estimate of influence of U-Th-K radiogenic heat on cooling process of granitic melt and its geological implication [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(5): 672~677.
- Zhou Xinmin and Wang Dezi. 1988. The peraluminous granodiorites with low initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio and their genesis in southern Anhui province, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 37~44 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 江西省地质矿产调查大队. 1991. 江西会昌地质图 1:50 000 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 孙涛, 陈培荣, 周新民, 等. 2002. 南岭东段强过铝质花岗岩中白云母研究 [J]. *地质论评*, 48(5): 518~525.
- 汪湘, 王志成, 汪传胜. 2007. 若干补体花岗岩——锆石学特征及其成岩模式探讨 [A]. 周新民. *南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化* [C]. 北京: 科学出版社, 658~691.
- 于津海, 赵蕾. 2007. 红山-富城岩体 [A]. 周新民. *南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化* [C]. 北京: 科学出版社, 595~627.
- 周新民, 王德兹. 1988. 皖南低 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比的过铝花岗闪长岩及其成因 [J]. *岩石学报*, (3): 37~44.