

赣东北晚白垩世橄榄玄粗岩系列火山岩中单斜辉石 矿物化学及其地质意义

王佳玲 巫建华

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 东华理工大学 地球科学学院,
江西 南昌 330013)

摘要: 利用电子探针针对广丰-玉山盆地晚白垩世橄榄玄粗岩中单斜辉石进行了详细的矿物学研究。结果表明, 所有的单斜辉石都属于普通辉石, 表现出低 Al、高 Ti、Na 含量的特征, 具有碱性系列特征; 单斜辉石斑晶的结晶温度为 1151~1202°C, 压力为 0.12~0.58 GPa, 可能是相对原始的岩浆上升到浅部(相当于上地壳位置)发生结晶分异作用形成。单斜辉石指示板内构造环境, 与寄主岩石指示的构造环境一致。单斜辉石的矿物化学特征与碱性橄榄玄武岩中在浅源结晶的单斜辉石斑晶特征一致, 而与碱性橄榄玄武岩中在深源处结晶的单斜辉石斑晶特征存在差异, 且明显区别于拉斑玄武岩中单斜辉石斑晶的特征。

关键词: 橄榄玄粗岩; 晚白垩世; 单斜辉石; 广丰盆地与玉山盆地; 江西

中图分类号: P578.954; P588.14⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0163-11

Mineral chemistry of clinopyroxenes from the Late Cretaceous shoshonitic volcanic rocks in Northern Jiangxi Province and its geological significance

WANG Jia-ling and WU Jian-hua

(State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; School of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, the authors investigated in detail chemical composition of clinopyroxene from the Late Cretaceous shoshonite in Guangfeng and Yushan basins on the basis of electron microprobe analyses. The results show that all clinopyroxenes are composed of augite, which contains relatively low Al₂O₃ (2.34% ~ 4.13%), high TiO₂ (1.19% ~ 2.78%) and Na₂O (0.35% ~ 0.49%), showing a typical alkaline series. The crystallization temperature and pressure of clinopyroxenes from the Late Cretaceous shoshonite in Guangfeng and Yushan basins are estimated by the formula that $p(0.1 \text{ GPa}) = -7.5383 + 83.1692(\text{Al})$, $t(^{\circ}\text{C}) = 1056.8986 + 902.7978(\text{Al})$ from Thompson *et al.* (1974). The results show that the crystallization temperatures and pressures of clinopyroxenes are 1151~1202°C and 0.12~0.58 GPa respectively. The clinopyroxenes resulted probably from fractional crystallization of relatively primitive magma in shallow magma chambers, equivalent to the upper crust. These clinopyroxenes were identical with clinopyroxenes in alkaline olivine basalt in the shallow source in such aspects as mineral chemical characteristics and formation environment but slightly different from clinopyroxene phenocrysts in the alkali olivine basalt in the deep source. They are evidently different from the

收稿日期: 2013-01-29; 修订日期: 2013-07-07

作者简介: 王佳玲(1989-), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: 15879173573@163.com; 通讯作者: 巫建华(1960-), 男, 汉族, 博士, 教授, 主要从事铀矿地质和火山地质研究, E-mail: jhwu@ecit.cn.

网络出版时间: 2013-11-20; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20131120.1626.001.html>

tholeiite in mineral chemical characteristics. In addition, the compositions of the clinopyroxenes are consistent with those in intraplate basalt.

Key words: shonshonite; Late Cretaceous; clinopyroxenes; Guangfeng and Yushan basin; Jiangxi

橄榄玄粗岩系列火山岩是一套与碱性橄榄玄武岩系列、拉斑玄武岩系列、钙碱性系列并列的、独立的火山岩组合(Morrison, 1980; Liegeois, 1998; Peccerillo, 1999, 2001; Sun and Stern, 2001)。从 20 世纪 90 年代开始,在我国东部额尔古纳(孙德有等, 1994)、燕辽(廖群安等, 1993; 鲍亦冈等, 1995)、长江中下游(赵太平等, 1994; 薛怀民等, 1989)等中生代火山岩带就陆续有橄榄玄粗岩的报道,王德滋等(1996)还提出中国东部橄榄玄粗岩省的概念,但徐志刚等(1999)认为其中存在橄榄玄粗岩扩大化的问题。随后对橄榄玄粗岩系列岩石的特征研究、系列厘定和成因探讨成为我国广大地质工作者的研究热点(章邦桐等, 2001, 2008a, 2008b, 2011; 刘洪等, 2002; 张双涛等, 2005; 李毅等, 2006; 谢智等, 2007; 贺振宇等, 2008; 薛怀民等, 2010; 吴俊奇, 2010, 2011; 项媛馨等, 2012)。目前,对橄榄玄粗岩系列的厘定主要是通过岩相学和岩石化学特征来进行的,但由于中基性火山岩常存在方解石或沸石等气孔充填物,或容易受到后期蚀变,获得符合要求的新鲜样品的难度较大,相比之下在中基性火山岩中寻找蚀变程度较弱的矿物较容易,因此,利用矿物化学特征来判别寄主岩石的性质得到广泛应用。一些学者对不同地区的橄榄玄粗岩系列岩石中的镁绿钙闪石、黑云母、长石斑晶进行了研究,并获得了与寄主岩石一致的成因、物质来源及其成岩物理化学条件的信息(章邦桐等, 2008a; 吴俊奇等, 2010; 谭桂丽等, 2010, 2011)。项媛馨等(2012)通过岩相学和岩石化学特征研究,将赣东北地区晚白垩世广丰盆地下部铁镁质火山岩和玉山盆地铁镁质火山岩厘定为橄榄玄粗岩。这套橄榄玄粗岩中存在的单斜辉石斑晶较多且完整(项媛馨等, 2012),为利用单斜辉石判断寄主岩石的性质创造了条件。

单斜辉石作为一种较为常见的造岩矿物,其化学成分记录了岩浆演化及物理化学条件等多方面的信息,同时其化学成分又往往与构造环境密切相关(Nisbet and Pearce, 1977)。近年来,许多学者利用单斜辉石矿物特征对不同岩浆系列中的单斜辉石进行分析,研究表明,不同岩浆系列的单斜辉石具

有不同的特征。江西广丰盆地下部碱性橄榄玄武岩中的单斜辉石(项媛馨等, 2010)和北大巴山滔河口组碱性橄榄玄武岩中的单斜辉石(向忠金等, 2010)表现为高 Ti、Na 含量的特点,辉石种属为透辉石及次透辉石,存在深源高温和浅源低温结晶的两种单斜辉石,在 $TiO_2 - Al_2O_3$ 、 $Ti - Ca + Na$ 图解上都分布在碱性系列范围,只是深源结晶的单斜辉石 Al 含量相对较高,在 Si - Al 关系图解上,深源结晶的单斜辉石位于巨晶和堆晶岩附近,而浅源结晶的单斜辉石落入碱性玄武岩范围;且深源结晶的温压分别为 $1\ 272 \sim 1\ 349^\circ C$ 、 $1.23 \sim 1.93\ GPa$ (项媛馨等, 2010)和 $1\ 246 \sim 1\ 324^\circ C$ 、 $1.13 \sim 2.05\ GPa$ (向忠金等, 2010),浅源低压的温压为 $1\ 186 \sim 1\ 220^\circ C$ 、 $0.44 \sim 0.75\ GPa$ (项媛馨等, 2010)和 $1\ 170 \sim 1\ 183^\circ C$ 、 $0.14 \sim 0.28\ GPa$ (向忠金等, 2010)。滇西剑川地区(寇彩化等, 2011)、新疆北山地区坡山(刘艳荣等, 2012)和云南香格里拉洛吉乡(邹金汐等, 2012)拉斑玄武岩中的单斜辉石表现为高 Si、低 Ti、Na 含量的特点,单斜辉石的种属为透辉石和普通辉石,在 $TiO_2 - Al_2O_3$ 、 $Ti - Ca + Na$ 和 Si - Al 关系图解上都落入拉斑玄武岩范围内,它们形成的温压条件分别为 $1\ 324 \sim 1\ 428^\circ C$ 、 $1.5 \sim 2.9\ GPa$ (寇彩化等, 2011)、 $1\ 141 \sim 1\ 221^\circ C$ 、 $0.12 \sim 0.77\ GPa$ (刘艳荣等, 2012)和 $1\ 051 \sim 1\ 110^\circ C$ 、 $0.186 \sim 0.200\ GPa$ (邹金汐等, 2012)。然而,橄榄玄粗岩系列岩石中的单斜辉石特征如何尚未见报道。本文对赣东北晚白垩世橄榄玄粗岩中的单斜辉石进行系统的研究,旨在揭示其化学特征,探讨岩浆的性质、演化过程及其形成的物理化学条件,并为其岩浆的形成背景提供约束。同时通过与碱性橄榄玄武岩、拉斑玄武岩中单斜辉石特征的对比,试图寻找厘定橄榄玄粗岩系列的单斜辉石证据。

1 盆地特征与寄主岩石类型

燕山晚期,中国东南部发生了强烈的拉张,形成了一系列左旋性质的 NE-SW 向陡倾断裂,控制着 NE-SW 早白垩世晚期—晚白垩世早期的陆相红色沉积岩系的形成,并伴有火山活动(舒良树等,

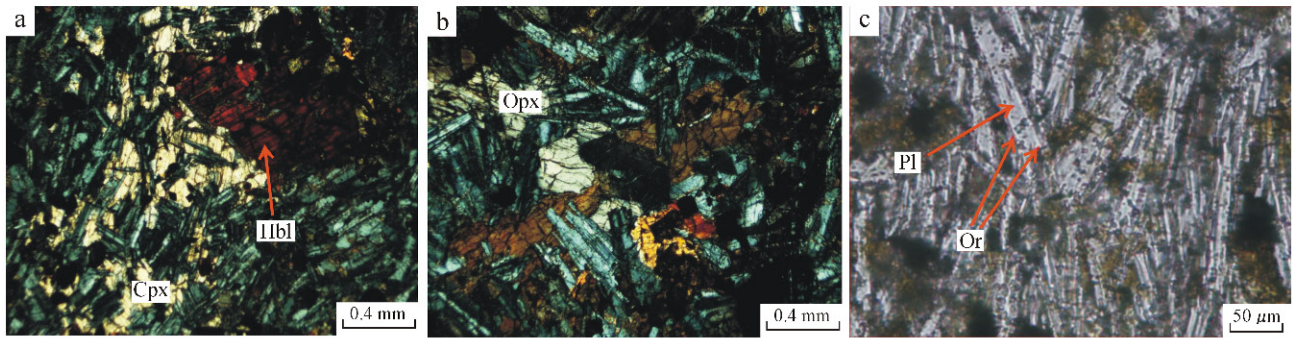


图 2 橄欖玄粗岩鏡下照片(据项媛馨等, 2012)

Fig. 2 Photographs of shoshonitic rocks (after Xiang Yuanxin *et al.*, 2012)

a—角闪石、輝石斑晶; b—斜方輝石(Opx)斑晶; c—具鉀長石鑲邊的環帶斜長石

a—hornblende phenocrysts and clinopyroxene phenocrysts; b—orthopyroxene phenocrysts; c—zonal plagioclase phenocrysts with orthoclase phenocrysts edge

表 1 广丰、玉山盆地橄欖玄粗岩中单斜輝石成分电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of clinopyroxenes from shoshonite in Guangfeng and Yushan basins

样号 产地 点号	YSB004					YSB005			YSD005
	玉山盆地					玉山盆地			玉山盆地
	1	2	3	4	5	1	2	3	1
SiO ₂	49.7	48.8	50.2	49.3	50.3	50.9	50.7	50.7	50.7
TiO ₂	1.79	2.03	1.49	1.58	1.40	1.32	1.34	1.19	1.65
Al ₂ O ₃	2.94	3.26	2.54	3.26	3.37	2.36	2.42	2.55	2.78
Cr ₂ O ₃	0.01	0.04	0.06	0.30	0.03	0.04	0.05	0.19	0.03
TFeO	9.98	10.1	9.74	9.13	9.49	9.28	9.21	8.74	9.96
MnO	0.25	0.31	0.28	0.27	0.28	0.31	0.26	0.27	0.29
MgO	14.1	13.6	14.2	13.9	14.4	14.8	14.6	14.8	14.1
CaO	20.3	19.7	20.1	20.0	20.1	20.7	20.1	20.4	20.0
Na ₂ O	0.35	0.47	0.42	0.47	0.39	0.39	0.39	0.36	0.46
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
总量	99.5	98.4	99.0	98.3	99.7	100	99.1	99.2	99.9
Si	1.874 7	1.864 0	1.898 2	1.877 5	1.884 6	1.902 4	1.909 4	1.903 0	1.897 5
Al ^{IV}	0.125 3	0.136 1	0.101 9	0.122 5	0.115 4	0.097 6	0.090 6	0.097 0	0.102 5
Al ^{VI}	0.005 5	0.010 7	0.011 4	0.023 8	0.033 2	0.006 3	0.016 7	0.015 7	0.020 4
Ti	0.050 7	0.058 4	0.042 4	0.045 2	0.039 3	0.037 1	0.038 0	0.033 6	0.046 4
Cr	0.000 3	0.001 1	0.001 9	0.009 2	0.000 9	0.001 0	0.001 3	0.005 5	0.001 0
Fe ³⁺	0.065 7	0.064 1	0.051 0	0.052 0	0.046 7	0.067 1	0.037 8	0.052 0	0.032 4
Fe ²⁺	0.247 4	0.256 7	0.255 8	0.237 3	0.249 5	0.221 1	0.251 2	0.221 4	0.278 9
Mn	0.008 1	0.009 9	0.008 9	0.008 6	0.008 8	0.009 9	0.008 3	0.008 5	0.009 3
Mg	0.795 0	0.775 7	0.800 7	0.788 0	0.802 4	0.822 2	0.817 2	0.831 1	0.785 2
Ca	0.822 0	0.807 7	0.813 1	0.816 5	0.805 1	0.827 2	0.812 3	0.822 2	0.803 2
Na	0.025 7	0.034 4	0.030 5	0.034 6	0.028 0	0.028 5	0.028 6	0.026 0	0.033 3
K	0.000 1	0.001 0	0.000 0	0.001 1	0.000 5	0.000 5	0.000 2	0.000 2	0.000 0
W _o	41.9	41.5	41.5	42.2	41.5	41.9	41.5	41.9	41.4
En	40.5	39.8	40.9	40.7	41.4	41.6	41.8	42.4	40.4
Fs	16.4	17.0	16.1	15.4	15.7	15.1	15.2	14.4	16.5
Mg [#]	76.7	75.9	77.3	78.0	78.0	78.8	78.7	79.8	76.8
t/°C	1175	1189	1159	1189	1191	1151	1154	1159	1168
p/GPa	0.33	0.47	0.19	0.46	0.48	0.11	0.14	0.19	0.27

续表 1

Continued Table 1

样号 产地 点号	YSD006		GF003			GF004	GF005			GF006
	玉山盆地		广丰盆地			广丰盆地	广丰盆地			广丰盆地
	1	2	1	2	3	1	1	2	3	1
SiO ₂	49.7	49.3	49.3	50.5	48.7	49.1	49.5	49.1	49.0	50.3
TiO ₂	1.72	1.68	1.90	1.30	2.13	2.78	2.13	2.40	2.63	1.66
Al ₂ O ₃	2.85	3.06	3.61	2.34	4.13	3.27	3.33	3.27	3.51	2.72
Cr ₂ O ₃	0.11	0.05	0.04	0.05	0.10	0.00	0.07	0.04	0.03	0.03
TFeO	10.1	12.5	9.06	8.75	9.45	11.8	11.0	11.4	11.5	9.71
MnO	0.32	0.30	0.21	0.21	0.18	0.33	0.37	0.34	0.33	0.26
MgO	13.8	14.2	14.0	14.6	13.6	12.1	12.8	12.1	12.4	14.1
CaO	20.0	18.5	20.8	20.3	20.4	20.3	20.2	20.9	20.2	20.2
Na ₂ O	0.42	0.39	0.39	0.38	0.49	0.46	0.40	0.45	0.39	0.37
K ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01	0.00	0.03	0.00
总量	99.0	99.9	99.3	98.5	99.2	100	99.8	100	100	99.4
Si	1.885 0	1.864 9	1.858 6	1.909 8	1.841 8	1.856 9	1.869 1	1.861 7	1.853 3	1.893 0
Aliv	0.115 0	0.135 1	0.141 4	0.090 2	0.158 2	0.143 1	0.130 9	0.138 3	0.146 7	0.107 0
Alvi	0.012 3	0.001 3	0.019 1	0.014 3	0.025 6	0.002 7	0.017 4	0.007 7	0.010 0	0.013 7
Ti	0.049 0	0.048 0	0.053 9	0.037 1	0.060 5	0.079 3	0.060 5	0.068 6	0.074 8	0.047 1
Cr	0.003 2	0.001 6	0.001 3	0.001 6	0.003 0	0.000 0	0.002 0	0.001 2	0.001 0	0.001 0
Fe ³⁺	0.050 6	0.096 7	0.062 0	0.042 0	0.067 5	0.026 7	0.029 7	0.038 2	0.024 4	0.038 1
Fe ²⁺	0.268 1	0.294 3	0.222 4	0.233 9	0.229 6	0.346 0	0.318 3	0.321 6	0.338 1	0.266 7
Mn	0.010 2	0.009 6	0.006 6	0.006 9	0.005 7	0.010 7	0.011 9	0.010 9	0.010 7	0.008 4
Mg	0.777 7	0.798 4	0.785 2	0.825 4	0.768 0	0.684 3	0.721 0	0.681 4	0.701 3	0.794 1
Ca	0.812 2	0.751 0	0.840 6	0.824 1	0.824 4	0.822 6	0.819 0	0.848 9	0.816 8	0.815 4
Na	0.031 2	0.028 6	0.028 3	0.027 6	0.035 8	0.034 1	0.029 0	0.033 2	0.028 8	0.027 3
K	0.001 1	0.000 0	0.000 0	0.000 3	0.000 9	0.001 8	0.000 3	0.000 0	0.001 5	0.000 0
Wo	41.7	38.0	43.2	42.1	42.7	42.8	42.5	43.9	42.5	41.8
En	39.9	40.4	40.4	42.1	39.8	35.6	37.4	35.2	36.5	40.7
Fs	16.9	20.2	15.0	14.4	15.7	19.9	18.7	19.2	19.4	16.1
Mg [#]	76.1	72.6	78.3	79.6	77.1	70.5	73.1	71.2	71.6	77.2
t/°C	1 172	1 180	1 202	1 151	1 223	1 189	1 191	1 189	1 198	1 166
p/GPa	0.31	0.38	0.58	0.12	0.78	0.46	0.48	0.46	0.55	0.25

注：Mg[#] = 100 × Mg / [Mg + Fe²⁺]

从表 1 可以看出, 广丰-玉山盆地晚白垩世橄榄玄粗岩中单斜辉石 SiO₂ 含量为 48.7% ~ 50.9%, Al₂O₃ 含量为 2.34% ~ 4.13%, TiO₂ 含量为 1.19% ~ 2.78%, MgO 含量为 12.1% ~ 14.8%, CaO 含量为 18.5% ~ 20.9%, Na₂O 含量为 0.35% ~ 0.49%, TFeO 含量为 8.74% ~ 12.5%, Mg[#] 为 70.5 ~ 79.8, 表现出低 Al, 高 Ti, Na 含量的特点, 具有碱性系列的特征。广丰-玉山盆地橄榄玄粗岩中单斜辉石斑晶在 Al₂O₃ - TiO₂ 图解(图 3)上落入碱性玄武岩系列范围, 在 Ti - (Ca + Na) 图解(图 4)中也全部落入碱性玄武岩范围, 与江西广丰盆地下部碱性橄榄玄武岩和北大巴山滔河口组碱性玄武岩中单斜辉石斑晶特征一致。广丰-玉山盆地单斜辉石斑晶 Wo = 38%

~ 43.9%, En = 35.2% ~ 42.4%, Fs = 14.4% ~ 20.2%, 在 Wo - En - Fs 图解(图 5)上全部落入普通辉石范围, 结合 TiO₂ 含量可命名为含钛普通辉石; 在单斜辉石 Al - Si 关系图(图 6)上全部落入碱性玄武岩斑晶区域。

3 单斜辉石与寄主岩石的关系

根据化学成分和结构特征以及实验数据, Wass (1979) 将单斜辉石分为 4 类: 第 1 类是 Cr-透辉石, 代表偶然捕获的地幔矿物捕虏晶; 第 2 类是偶然捕获的 Al-普通辉石和次透辉石, 是玄武质岩浆在地幔和壳幔过渡带中结晶出的晶体, 并由后期寄主玄武

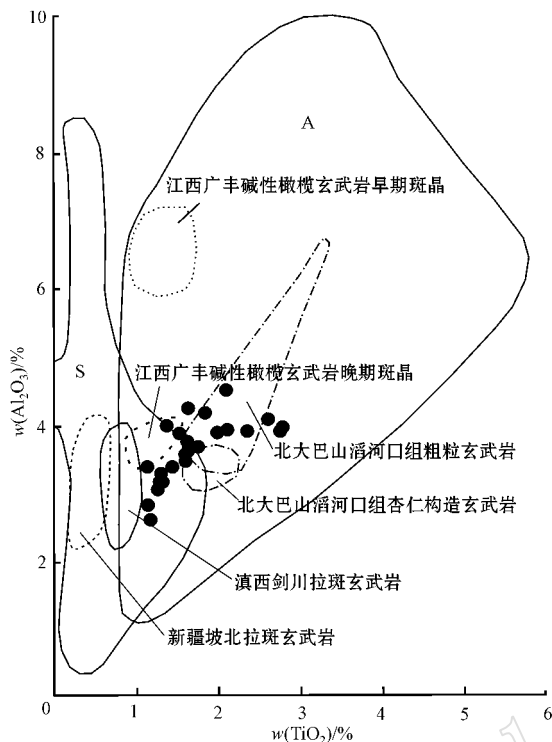


图 3 单斜辉石的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ 图解(底图据邱家穰等, 1987)

Fig. 2 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ diagram of clinopyroxenes (after Qiu Jiaxiang *et al.*, 1987)
 A—碱性玄武岩系列; S—拉斑玄武岩系列; 数据来源: 新疆坡北(刘艳荣等, 2012); 滇西剑川(寇彩化等, 2011); 江西广丰(项媛馨等, 2010); 北大巴山(向忠金等, 2010)
 A—alkaline basalt series; S—tholeiite series; Datas source: Liu Yanrong *et al.*, 2012; Kou Caihua *et al.*, 2011; Xiang Yuanxin *et al.*, 2010; Xiang Zhongjin *et al.*, 2010

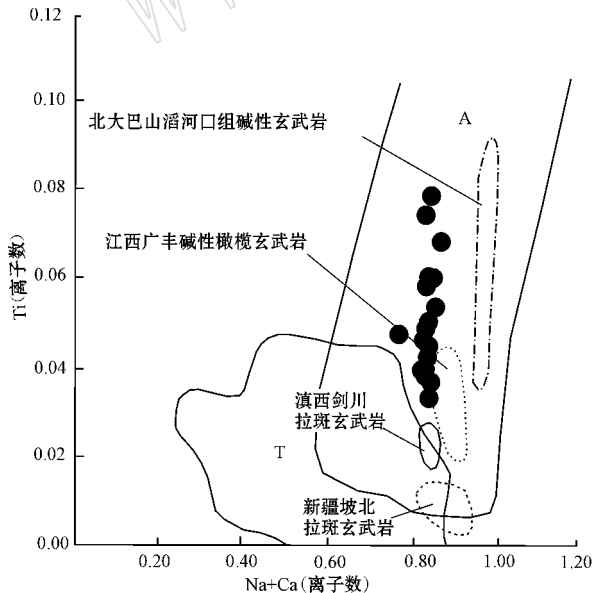


图 4 单斜辉石的 $\text{Ti} - (\text{Ca} + \text{Na})$ 图解(底图据 Leterrier 等, 1982)

Fig. 4 Ti versus $(\text{Ca} + \text{Na})$ diagram of clinopyroxenes phenocryst (after Leterrier *et al.*, 1982)
 A—碱性玄武岩; T—拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩
 A—alkaline basalt; T—tholeiite and calc-alkaline basalt

质岩浆携带到地表, 这些 Al-普通辉石由于在固相线下颗粒边缘与熔体不同程度的反应而具有多种结构, 如出熔、重结晶及变质结构; 第 3 类是原始碱性玄武质岩浆在高压下结晶出的 Al-普通辉石和次透辉石, 围绕浑圆状或棱角状 Al-普通辉石碎块普遍发育有灰白色反应边, 它们与寄主岩同源; 第 4 类是由玄武质岩浆在低压下结晶的单斜辉石斑晶, 这类单斜辉石与其他 3 类辉石很容易区分, 它们颗粒小、呈自形晶, 矿物颗粒边缘缺乏反应现象及生长边, 且 Al 含量比较低。广丰-玉山盆地晚白垩世橄榄玄武岩中的单斜辉石斑晶具有较低的 Al 含量, Al_2O_3 含量分别是 2.11% ~ 4.13% (平均为 3.01%), 属 Wass (1979) 分类的第 4 类单斜辉石, 即它们是由玄武质岩浆在低压下结晶的单斜辉石。

4 讨论

4.1 岩浆系列判别

广丰-玉山盆地橄榄玄武岩中的单斜辉石表现为高 Ti、高 Na 的特征, 在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ 图解(图 3)与 $\text{Ti} - (\text{Ca} + \text{Na})$ 图解(图 4)上, 全部落入碱性系列范围, 显示为碱性系列特征。这一点与碱性橄榄玄武岩中的单斜辉石特征一致, 只是后者在深源高压条件下形成的单斜辉石斑晶 Al 含量相对较高, 而与落入拉斑玄武岩系列范围的拉斑玄武岩系列岩浆中的单斜辉石明显不同; 在 $\text{Wo} - \text{En} - \text{Fs}$ 图解(图 5)上, 广丰-玉山盆地橄榄玄武岩中的单斜辉石斑晶全部都落入普通辉石范围, 与碱性橄榄玄武岩的透辉石、次透辉石和拉斑玄武岩系的透辉石、普通辉石的特征都不同。在单斜辉石 Al-Si 关系图(图 6)中, 广丰-玉山盆地橄榄玄武岩单斜辉石落入碱性玄武岩斑晶的范围, 属碱性玄武质岩浆在低压下的浅位岩浆房晶出的产物, 与碱性橄榄玄武岩系列中浅源低温条件下形成的单斜辉石斑晶特征一致, 而与落入堆晶岩和巨晶附近的碱性橄榄玄武岩系列中深源高温条件下形成的单斜辉石斑晶不同, 也与落入在拉斑玄武岩的范围的拉斑玄武岩系列单斜辉石斑晶不同。

4.2 单斜辉石的结晶温度和压力

确定单斜辉石与寄主岩石是否达到平衡, 可由平衡常数 $K_{d_{\text{cpx}}}[(\text{FeO}/\text{MgO})_{\text{cpx}}/(\text{FeO}/\text{MgO})_{\text{liq}}]$ 来判断。Thompson (1974) 根据实验结果认为单斜辉石与玄武质熔体平衡时的 $K_{d_{\text{cpx}}}(\text{Fe}-\text{Mg})$ 值为 0.29。Irving 和 Frey (1984), Liotard 等 (1988) 通过实验结果

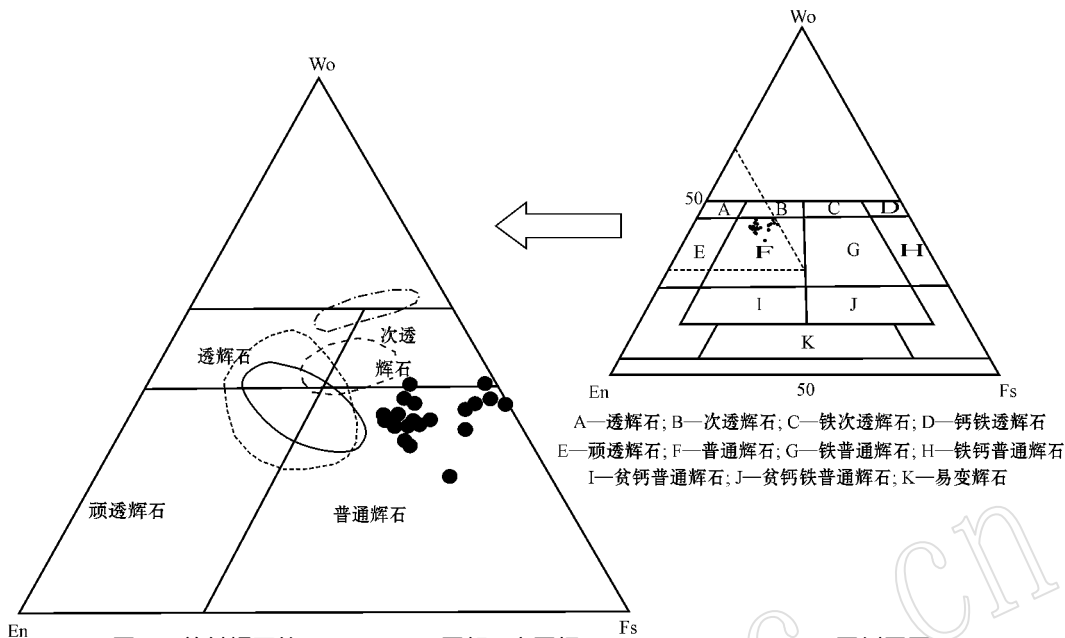


图 5 单斜辉石的 Wo-En-Fs 图解(底图据 Morimoto *et al.*, 1988; 图例同图 2)
 Fig. 5 Wo-En-Fs diagram of clinopyroxenes (after Morimoto *et al.*, 1988; legends as for Fig. 2)

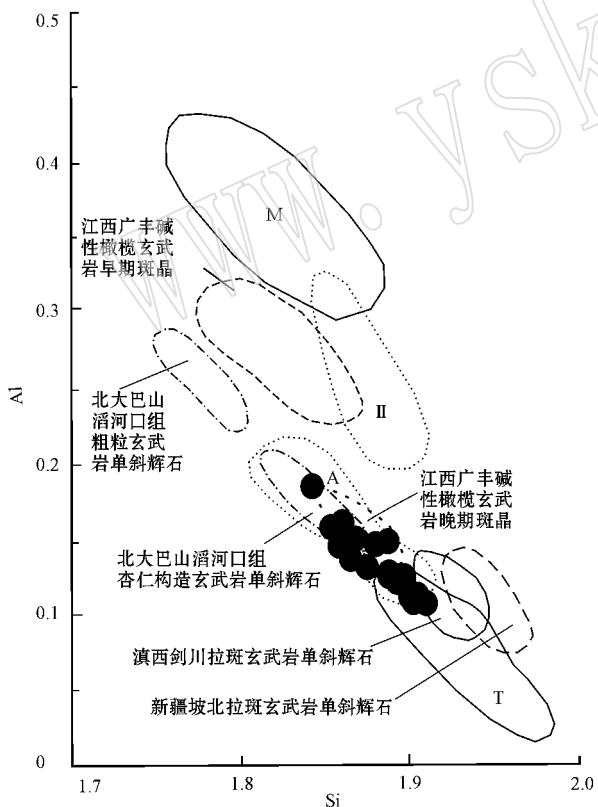


图 6 单斜辉石的 Al-Si 关系图(底图据 Kushiro, 1960)
 Fig. 6 Al-Si diagram of clinopyroxenes (base map after Kushiro, 1960)

A—碱性玄武岩中的斑晶; T—拉斑玄武岩中的斑晶; M—巨晶单斜辉石; II—堆积岩中的单斜辉石
 A—clinopyroxene phenocrysts in alkaline basalt; T—clinopyroxene phenocrysts in tholeiite basalt; M—large clinopyroxene phenocrysts; II—clinopyroxene phenocrysts in cumulates

判定认为当该值在 0.2~0.4 时即可视为达到平衡。Kinzel (1997) 和 Hunter (1997) 的实验结果进一步证实了 Liotard 等结果的正确性。本文除样品 GF004-1 的 $K_{d_{cpx}}$ 值大于 0.4 外, 其他都介于 0.2~0.4 之间, 指示单斜辉石与熔体达到平衡。利用 Thompson (1974) 提出的 $\rho(0.1 \text{ GPa}) = -7.5383 + 83.1692(\text{Al})$, $t(^{\circ}\text{C}) = 1056.8986 + 902.7978(\text{Al})$ 的关系式来估算, 得到广丰-玉山盆地橄榄玄粗岩中的单斜辉石斑晶形成时的温压条件为 1151~1202 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.11~0.58 GPa (表 1), 大约深度相当于 3.63~19.1 km (假定 1 GPa \approx 33 km, Putirka *et al.*, 2003)。广丰-玉山盆地橄榄玄粗岩中的单斜辉石斑晶的形成温度明显低于软流圈地幔的温度 (1280~1349 $^{\circ}\text{C}$, McKenzie and Bickel, 1988), 结晶深度也比较浅, 可能代表了岩浆房的温度, 是相对原始的岩浆上升到浅部发生结晶分异作用形成的。如图 7 所示, 广丰-玉山盆地橄榄玄粗岩中的单斜辉石与碱性橄榄玄武岩中浅源低温条件下形成的单斜辉石斑晶形成的温度、压力是一致的, 而与碱性橄榄玄武岩中深源高温条件下形成的单斜辉石斑晶形成的温度、压力不一致, 也有别于拉斑玄武岩单斜辉石斑晶形成的温度、压力。

4.3 寄主橄榄玄粗岩形成的构造环境判别

研究表明, 单斜辉石可以对玄武岩进行构造环境的判别, 特别是含量较低的 Ti、Al、Na 及 Mn 的成

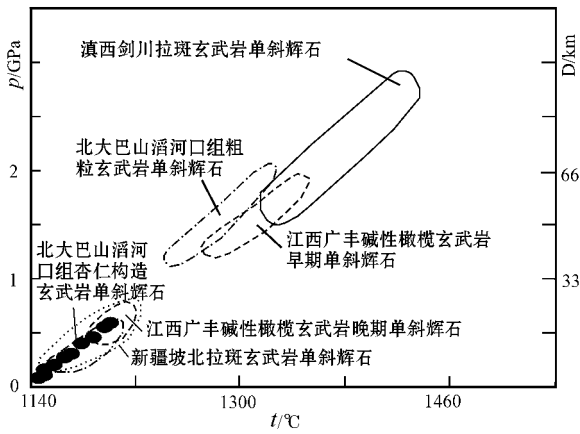


图 7 单斜辉石形成的温度和压力

Fig. 7 Crystallization temperature and pressure for clinopyroxenes

分对构造环境有良好的指示作用。Nisbet 和 Pearce (1977) 构建的单斜辉石 $TiO_2 - MnO - Na_2O$ 三角判别图解和 Leterrier 等 (1982) 建立了 $Ti - (Ca + Na)$ 判别图解被广泛地用于判别玄武岩的构造环境。广丰-玉山盆地橄榄玄武岩中的单斜辉石在 $TiO_2 - MnO - Na_2O$ 图解 (图 8) 和 $Ti - (Ca + Na)$ 图解 (图 4) 上落入板内碱性玄武岩, 与寄主岩石全岩碱性判别方法所得出的结论一致。可见, 赣东北晚白垩世橄榄玄武岩表现为板内构造环境, 属于板内碱性玄武岩, 与该区野外地质现象和岩石地球化学特征分析结果相吻合。

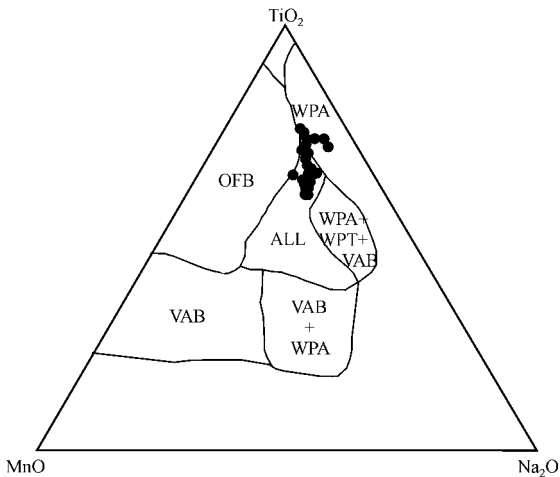


图 8 单斜辉石 $TiO_2 - MnO - Na_2O$ 图解

(底图据 Nisbet and Pearce, 1977)

Fig. 8 Diagram of $TiO_2 - MnO - Na_2O$ in clinopyroxene (base diagram after Nisbet and Pearce, 1977)

5 结论

(1) 广丰-玉山盆地晚白垩世橄榄玄武岩中单斜辉石特征为低 Al, 高 Ti、Na, 辉石种属为普通辉石, 显示为碱性系列特征, 与寄主岩石全岩的判别结果一致, 斑晶结晶温度为 $1151 \sim 1202^\circ C$, 压力为 $0.11 \sim 0.58$ GPa, 为浅源低温结晶产物。赣东北晚白垩世橄榄玄武岩表现为板内构造环境。

(2) 广丰-玉山盆地晚白垩世橄榄玄武岩系列中的单斜辉石高 Ti、Na 的特征, 与碱性橄榄玄武岩在浅源结晶的单斜辉石斑晶特征一致, 并以低 Al 含量和浅源低温条件下形成的特征区别于碱性橄榄玄武岩在深源结晶的单斜辉石斑晶, 且明显区别于拉斑玄武岩中单斜辉石斑晶的特征。广丰-玉山盆地晚白垩世橄榄玄武岩中的单斜辉石种属全部为普通辉石, 与碱性橄榄玄武岩的透辉石、次透辉石和拉斑玄武岩的透辉石、普通辉石的种属不同。

致谢 审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 参加部分野外工作的还有项媛馨博士、刘帅副教授, 郭国林副教授对电子探针测试给予了指导和帮助, 参加电子探针测试的还有项媛馨博士, 在此一并致谢。

References

- Bao Yigang, Bai Zhiming, Ge Shiwei, et al. 1995. Yanshanian Volcano Geology and Volcano Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- He Zhenyu, Xu Xisheng, Wang Xiaolei, et al. 2008. Geochronology and geochemistry of shoshonitic volcanics in southern Jiangxi province [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2524~2536 (in Chinese with English abstract).
- Hunter A G. 1997. Intrarustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso Volcano, SW Japan [J]. Journal of Petrology, 39(12): 1255~1284.
- Iddings J P. 1985. Absarokite-shoshonite-bankite series [J]. Journal of Geophysics, 3: 935~957.
- Irving A J and Frey F A. 1984. Trace element abundances in megacrysts and in their host basalts: Constraints on partition Coefficients and megacryst genesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 771~787.
- Kinzier R J. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching

- the spinel to garnet transition: Application to midocean ridge basalt petrogenesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 102(B1): 853~874.
- Kou Caihua, Zhang Zhaochong, Liao Baoli, *et al.* 2011. Mineralogy of clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite of western Yunnan Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 449~462 in Chinese with English abstract).
- Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks[J]. *American Journal of Science*, 258 : 548~554.
- Leterrier J, Maury R C, Thonon P, *et al.* 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59 : 139~154.
- Li Yi, Wu Tairan, Luo Hongling, *et al.* 2006. Geochemistry and tectonic setting of the early Cretaceous shoshonite of sizi-wangqi area Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2 791~2 800 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qun'an and Qiu Jiaxiang. 1993. Distinguish shoshonite series with high K calcalkaline series and Genesis of Mesozoic volcanic rocks from Beijing area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (Suppl.): 14~23 in Chinese with English abstract).
- Liegeois J P, Navez J, Hertogen J, *et al.* 1998. Contrasting origin of postcollisional high-K calcalkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoid[J]. *Lithos*, 45 : 1~28.
- Liotard J M, Briot D and Boivin P. 1988. Petrological and geochemical relationships between Pyroxene megacrysts and associated alkali basalts from Massif Central(France) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98 : 81~90.
- Liu Yanrong, Lü Xinbiao, Mei Wei, *et al.* 2012. Mineralogy of clinopyroxene from Pobei maficultramafic complex in Beishan area, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2) 212~224 in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luo Qinghua, *et al.* 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Lu-zong basin, Anhui Province: Geochemical constraints[J]. *Geochimica*, 31(2): 129~140(in Chinese with English abstract).
- Morimoto N, Fabries A K, Ginzburg I V, *et al.* 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 52 : 535~550.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the Shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13 : 97~108.
- Mckenzie D P and Bickel M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 29 : 625~679.
- Nisbet E G and Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 63 : 149~160.
- Peccerillo A. 1999. Multiple mantle metasomatism in central-southern Italy. Geochemical effects, timing and geodynamic implication[J]. *Geology*, 27(4): 315~318.
- Peccerillo A. 2001. Geochemistry and petrogenesis of Quaternary magmatism in Central-southern Italy[J]. *Geochemistry International*, 39(6): 521~535.
- Putirka K D, Mikaelian H, Ryerson F, *et al.* 2003. New clinopyroxene liquid thermobarometer for mafic, evolved, and volatile-bearing lava composition, with applications to lavas from Tibet and Snake River Plain, Idaho[J]. *American Mineralogist*, 88 : 1 542~1 554.
- Qiu Jiaxiang and Zeng Guangce. 1987. The main characteristics and petrological significance of low pressure clinopyroxenes in the Cenozoic basalts from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4 : 1~9 (in Chinese).
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic Tectonism of southeast China[J]. *Geological Review*, 48(3): 249~260 in Chinese with English abstract).
- Sun C H and Stern R J. 2001. Genesis of Mariana shoshonite: contribution of the subduction component[J]. *Journal of Geophysical Research*, 106 : 589~608.
- Sun Deyou and Xu Wenliang. 1994. Tectonic Settings of Mesozoic Volcanic Rocks and Genetic Relationship between Volcanic Rocks and Intrusive Rocks in Da Hinggan Ling Mountains: From Manzhouli-Suifenghe Geoscience Transect Magmatism[M]. Beijing: Geological Publishing House, 43~60(in Chinese).
- Tan Guili, Wu Junli, Ling Hongfei, *et al.* 2010. Chemical composition of biotite of shoshonite volcanic rock series from Shengyuan basin and its adjacent area[J]. *Resources survey & environment*, 31(01): 19~24(in Chinese with English abstract).
- Tan Guili, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2011. Characteristics of feldspars and their petrogenetic information of shoshonite series volcanic rocks from Shengyuan basin, Jiangxi province[J]. *Resources survey & Environment*, 32(3): 169~176(in Chinese with English abstract).
- Thompson R N. 1974. Some high-pressure pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 39 : 768~787.
- Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, *et al.* 1996. Characteristics of volcanic rocks in the Shoshonite Province, Eastern China, and the metallogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 23~24(in Chinese with English abstract).
- Wass S Y. 1979. Multiple origin of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks[J]. *Lithos*, 12 : 115~132.
- Wu Junqi, Tan Guili, Zhang Bangtong, *et al.* 2010. Identification and genesis of the Early Cretaceous shoshonitic volcanic rock series in central Jiangxi Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(4): 479~491(in Chinese with English abstract).
- Wu Junqi, Zhang Bangtong, Zhang Wenlan, *et al.* 2010. Radioactive environmental impact assessment for a production project of titanium

- dioxide by chlorination process [J]. *Uranium Geology*, 26(3): 145 ~ 186 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Yuanxin, Yu Dagan, Wu Jianhua, *et al.* 2010. Mineral chemistry and its geological significance of clinopyroxenes from the Early Cretaceous alkali olivine basalt on the Guangfeng, Jiangxi [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 33(2): 120 ~ 130 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Yuanxin, Wu Jianhua, Yu Dagan, *et al.* 2012. Shoshonite series volcanic rocks in northern Jiangxi province [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 35(1): 43 ~ 53 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2010. Magma source and tectonic setting of the porphyritic alkaline basalts in the Silurian Taohekou Formation, North Daba Mountain: Constraints from the geochemical features of pyroxene phenocrysts and whole rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1116 ~ 1132 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zhi, Li Qunzhong, Chen Jiangfeng, *et al.* 2007. Geochemical characteristics of the Early Cretaceous volcanic rocks in LuZong region and their source significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 235 ~ 249 (in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Mao Jianren, *et al.* 2002. Characteristics of Early Jurassic igneous rocks on the continental margin of South eastern China and their tectonic significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 384 ~ 391 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Sheng Jifu, Sun Shanping, *et al.* 1999. A discussion on characteristics of shoshonite rock series (association) and some problems [J]. *Geological Review*, 45(Suppl.): 43 ~ 62 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Ma Fang. 2010. Geochemistry of shoshonitic volcanic rocks in the Luzong Basin, Anhui Province (Eastern China): Constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the lower Yangtze region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(5): 665 ~ 681 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin and Tao Kuiyuan. 1989. New view on the mesozoic volcanic sequences in Ning-Wu [J]. *Jiangsu Geology*, 11(4): 9 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Chen Peirong, Yang Dongsheng, *et al.* 2001. Geological evidence for determination of Mesozoic shoshonite rock series from southern Jiangxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 231 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2008a. Geochemical evidence of element and Sr-O-Nd-Pb isotopes for petrogenesis of the Huichang Early Cretaceous shoshonite, southern Jiangxi province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 986 ~ 997 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2008b. Determination of magnesio hastingsite from the Mesozoic Shoshonite in southern Jiangxi and its genetic implication [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(1): 1 ~ 5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2011. Elemental geochemical evidence for genesis of intraplate shoshonite and mantle-derived fluid metasomatism: Shoshonite from Huichang, Southern Jiangxi Province as an example [J]. *Geochemica*, 40(9): 443 ~ 453 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuangtao, Wu Tairan, Xu Xuan, *et al.* 2005. The significance of discovery of Early Cretaceous shoshonite in central Inner Mongolia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 41(2): 212 ~ 218 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhou Jincheng, Chen Kerong, *et al.* 1994. Distinguish Series and Genesis for the Volcano rocks in Lishui, Jiangsu Province [J]. *Journal of Nanjing University*, 63(3): 252 ~ 258 (in Chinese with English abstract).
- Zou Jinxi, Liu Xianfan, Deng Jianghong, *et al.* 2012. Mineralogical composition characteristics and geological significance of the clinopyroxene from ultrabasic-basic rocks at Luoji Village, Shangri-La County, Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 701 ~ 711 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍亦冈, 白志民, 葛世炜, 等. 1995. 燕山期火山地质及火山岩 [M]. 北京: 地质出版社.
- 贺振宇, 徐夕生, 王孝磊, 等. 2008. 赣南橄榄玄粗质火山岩的年代学与地球化学 [J]. *岩石学报*, 24(11): 2524 ~ 2536.
- 寇彩化, 张招崇, 廖宝丽, 等. 2011. 滇西剑川苦橄玢岩中单斜辉石的矿物学特征及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 449 ~ 462.
- 李毅, 吴泰然, 罗红玲, 等. 2006. 内蒙古四子王旗早白垩世钾玄岩的地球化学特征及其形成构造环境 [J]. *岩石学报*, 22(11): 2791 ~ 2800.
- 廖群安, 邱家骥. 1993. 北京地区中生代钾玄岩系列—高钾钙碱性系列火山岩的识别和成因分析 [J]. *岩石学报*, (增刊): 14 ~ 23.
- 刘艳荣, 吕新彪, 梅微, 等. 2012. 新疆北山地区坡北镁铁—超镁铁岩体单斜辉石的矿物学特征及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 31(2): 212 ~ 224.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约 [J]. *地球化学*, 31(2): 129 ~ 140.
- 邱家骥, 曾广策. 1987. 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石的矿物化学及其岩石学意义 [J]. *岩石学报*, 4: 1 ~ 9.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚古中生代构造作用 [J]. *地质论评*, 48(3): 249 ~ 260.
- 孙德有, 许文良. 1994. 大兴安岭中生代火山岩形成的构造背景及与

- 侵入岩的成因关系[A]. 许文良, 孙德有, 周燕. 满洲里-绥芬河地学断面岩浆作用和地壳结构[C]. 北京: 地质出版社, 43-60.
- 谭桂丽, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2010. 赣中盛源盆地及邻区橄榄玄粗岩系列火山岩中黑云母化学成分特征[J]. 资源调查与环境, 31(01): 19-24.
- 谭桂丽, 吴俊奇, 凌洪飞. 2011. 江西盛源盆地橄榄玄粗岩系列火山岩长石矿物特征及成因信息[J]. 资源调查与环境, 32(3): 169-176.
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用[J]. 地质学报, 70(1): 23-24.
- 吴俊奇, 谭桂丽, 章邦桐. 2011. 赣中早白垩世橄榄玄粗岩(Shoshonite)系列火山岩的厘定及成因研究[J]. 高校地质学报, 17(4): 479-491.
- 吴俊奇, 章邦桐, 张文兰. 2010. 赣南会昌橄榄玄粗岩矿物组合特征及成因研究[J]. 铀矿地质, 26(3): 145-151.
- 项媛馨, 余达淦, 巫建华, 等. 2010. 江西广丰早白垩世碱性橄榄玄武岩中单斜辉石矿物化学及其地质意义[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 33(2): 120-130.
- 项媛馨, 巫建华, 余达淦, 等. 2012. 赣东北晚白垩世橄榄玄粗岩(Shoshonite)系列火山岩厘定的地质证据[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 35(1): 43-53.
- 向忠金, 闫全人, 闫臻, 等. 2010. 北大巴山志留系滔河口组碱质斑状玄武岩的岩浆源区及形成环境——来自全岩和辉石斑晶的地球化学约束[J]. 岩石学报, 02(04): 1116-1132.
- 谢智, 李全忠, 陈江峰, 等. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义[J]. 高校地质学报, 13(2): 235-249.
- 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 等. 2002. 东南大陆边缘早侏罗世火成岩特征及其构造意义[J]. 地质通报, 21(7): 384-391.
- 徐志刚, 盛继福, 孙善平. 1999. 关于橄榄玄粗岩系列(组合)特征及某些问题的讨论[J]. 地质论评, 45(增刊): 43-62.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010. 安徽庐枞火山岩盆地橄榄玄粗岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. 地质学报, 84(5): 665-681.
- 薛怀民, 陶奎元. 1989. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义[J]. 江苏地质, (4): 9-14.
- 章邦桐, 陈培荣, 杨东生, 等. 2001. 赣南中生代橄榄玄粗岩系列厘定的地质证据[J]. 地质学报, 75(2): 231-220.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2008a. 会昌早白垩世橄榄玄粗岩(shoshonite)成因的元素及Sr-O-Nd-Pb同位素地球化学证据[J]. 地质学报, 82(7): 986-997.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2008b. 赣南中生代橄榄玄粗岩中镁绿钙闪石的厘定与成因意义[J]. 矿物学报, 28(1): 1-5.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2011. 板内橄榄玄粗岩(shoshonite)地幔流体交代作用及成因的元素地球化学证据: 以赣南会昌橄榄玄粗岩为例[J]. 地球化学, 40(9): 443-453.
- 张双涛, 吴泰然, 许绚, 等. 2005. 内蒙古中部早白垩世钾玄岩的发现及其意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 41(2): 212-218.
- 赵太平, 周金城, 陈克荣, 等. 1994. 江苏溧水中生代火山岩杂岩系列划分及成因讨论[J]. 南京大学学报(地球科学), (3): 252-258.
- 邹金汐, 刘显凡, 邓江红, 等. 2012. 云南香格里拉洛吉乡基性-超基性岩中单斜辉石矿物成分特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 701-711.