



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

寇彩化 张招崇 廖宝丽 李宏博 侯 通

(中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用电子探针对滇西剑川的二龙和满元两个地区苦橄玢岩和苦橄质堆晶岩中的单斜辉石进行了详细的矿物学研究, 结果表明绝大多数单斜辉石属于普通辉石, 具有贫硅、贫碱、高钙和低氧逸度的特征。在单斜辉石形成过程中, 阳离子间普遍发生类质同像替代。单斜辉石温压计算结果显示, 二龙和满元苦橄玢岩的形成温度(1 324~1 428℃)和压力(1.5~2.9 GPa)明显低于满元苦橄质堆晶岩的温度(1 439~1 462℃)和压力(3.0~3.2 GPa), 二龙和满元苦橄玢岩的形成深度也比满元苦橄质堆晶岩的深度(99~106 km)浅, 整体看来, 剑川苦橄玢岩形成的温度和压力较高, 来源较深, 可能是软流圈沿断裂带上涌导致上地幔部分熔融的结果, 也可能是地幔柱活动所导致。

关键词: 剑川苦橄玢岩, 单斜辉石, 拉斑玄武岩浆, 类质同像替代, 温压计算, 地幔柱

中图分类号: P578.954

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)03-0449-14

Mineralogy of clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite of western Yunnan Province and its geological significance

KOU Cai-hua, ZHANG Zhao-chong, LIAO Bao-li, LI Hong-bo and HOU Tong

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Jianchuan picritic porphyrite consists predominantly of olivine, clinopyroxene and plagioclase. In this paper, the authors determined chemical composition of clinopyroxene from the picritic porphyrite and picritic cumulate from Erlong and Manyuan areas in detail by electron microprobe analysis. The results show that most clinopyroxenes in Jianchuan area are composed of augite, which contains relatively low TiO_2 (0.62% ~ 2.84%), Al_2O_3 (1.86% ~ 5.15%) and Na_2O (0.23% ~ 0.61%). Compared with those in the matrix, clinopyroxenes of phenocrysts from Erlong and Manyuan areas are enriched in more magnesium but have poorer iron. The parental magma of the Jianchuan picritic porphyrite should belong to tholeiitic series, characterized by low alkali content, high CaO content and very low oxygen fugacity. During the formation of the clinopyroxene, cationic isomorphic substitution commonly occurs, and the main equations are $\text{Mg} + \text{Si} = \text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$ and $\text{Mg} + \text{Si} = \text{Al}^{\text{IV}} + \text{Fe}^{3+}$, in which Ti and Na tend to be incorporated into the titanite augite. The crystallization temperature and pressure of clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite were estimated by the clinopyroxene-melt equilibrium. The results show that the crystallization temperature (1 324 ~ 1 428℃) and pressure (1.5 ~ 2.9 GPa) of clinopyroxenes in Erlong and Manyuan picritic porphyrite were predominantly lower than the crystallization temperature (1 439 ~ 1 462℃) and pressure (3.0 ~ 3.2 GPa) of clinopyroxenes in Manyuan picritic cumulate, and the formation depth of clinopyroxene in Manyuan picritic cumulate might have been larger than that in Erlong

收稿日期: 2010-10-18; 修订日期: 2011-02-22

基金项目: 973 资助项目(2009CB421002), 国家自然科学基金资助项目(40925006), 111 计划教育部资助项目(B07011)

作者简介: 寇彩化(1985-), 研究生, 岩石学专业, E-mail: caihuakou@163.com; 通讯作者: 张招崇, E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

and Manyuan picritic porphyrite. Generally, the formation temperature and pressure of the Jianchuan picritic porphyrite were high, suggesting the derivation of materials from a relatively great depth. One possibility is that the rocks were formed by partial melting of lithospheric mantle resulting from upwelling of asthenosphere along the deep faults, whereas the other possibility is the involvement of mantle plume, i. e., the Permian Emeishan mantle plume was reactivated, probably resulting in large-scale magmatic activities. The evidence is as follows: the temperature of the clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite is moderately higher than that of asthenosphere and the clinopyroxene in Lijiang picrite; the $Mg^{\#}$ both in bulk-rock and in clinopyroxene of Jianchuan picritic porphyrite is close to that in Lijiang picrite, suggesting that Jianchuan picritic porphyrite might have shared a common source region with the Lijiang picrite, or the characteristics of their sources were largely inherited from the Permian plume.

Key words: Jianchuan picritic porphyrite; clinopyroxene; tholeiitic magma; isomorphic substitution; mantle plume

西南“三江”成矿带位于特提斯构造域的东段、冈瓦纳大陆和劳亚大陆的结合部位,经历了晚古生代-中生代特提斯(Tethys)构造演化和新生代大陆碰撞造山的叠加转换,构造岩浆活动强烈,特别是新生代岩浆岩分布广泛,从而引起很多学者的关注,并取得了一系列新的进展,但研究的对象主要是钾质火成岩系列,如钾玄岩、高镁富钾火山岩以及超钾质煌斑岩等(Zhang and Xie, 1997; 谢应雯等, 1999; 钱祥贵等, 2000; Li *et al.*, 2002; 李献华等, 2002; 赵欣等, 2003; Guo *et al.*, 2005; Xia and Xu, 2005; 黄小龙等, 2007)。近年来,新的研究表明,该地区也零星分布着一些新生代超基性的次火山岩——苦橄玢岩,然而,直至目前仅有张招崇等(2004)对滇西剑川苦橄玢岩的主要矿物橄榄石和辉石进行了电子探针研究,但其主要目的是与丽江二叠纪苦橄岩中单斜辉石做对比,并没有进行更详细的研究。众所周知,苦橄玢岩是一种超基性岩,其化学成分可以反映深部地幔的物理化学状态和物质组成,因而可为壳幔相互作用、岩浆的起源和演化以及该地区的构造背景提供重要约束。单斜辉石是基性-超基性岩中最为常见的造岩矿物之一,其成分和结构记录了岩浆形成及演化的物理化学条件等重要信息(Streck, 2008),同时其化学成分又往往与构造环境密切相关(Nisbet and Pearce, 1977)。最近,笔者对位于剑川县城以北的满元村和二龙水电站附近的两处苦橄玢岩(图1)进行了研究,在岩相学观察的基础上,针对滇西剑川苦橄玢岩的全岩化学成分以及单斜辉石的矿物学及矿物化学特征进行了分析,旨在探讨其岩浆的性质和起源、演化过程的物理化学条件,为深部物质组成、热状态和地球动力学背景提供一些相关信息。

1 地质背景

“三江”构造带是欧亚板块和印度板块的拼合地带,始新世后,印度板块自南东向北西强烈、持续向欧亚板块下俯冲(沈敢富等, 2000),影响并制约着西南“三江”地区的构造活动。红河-哀牢山右行走滑断裂带北起青藏高原东缘,南经越南进入北部湾,长逾1 000 km,是东亚地质和地形的重要分界,印支半岛沿该剪切带相对华南向东南挤出约600 km,并导致南海的张开(Tapponnier *et al.*, 1982; Chung *et al.*, 1997, 1998)。红河-哀牢山右行走滑断裂带是印度-扬子板块陆-陆碰撞进一步演化的产物,该行走滑断裂带深切上地幔(王建等, 2003)。剑川位于红河-哀牢山-金沙江走滑断裂带的北延与近EW向丽江-木里斯断裂带之交汇部位(图1a)。沿断裂带火山活动频繁,形成分布面积较广的新生代侵入-火山岩。研究区侵入岩主要是喜马拉雅期长英质深成和浅成侵入岩、长英质伟晶岩和紫苏花岗岩以及伴生的碱性火山岩、煌斑岩类(沈敢富等, 2000)、钾玄岩(王建等, 2003)、粗面岩(图1b)和超基性次火山岩-苦橄玢岩(张招崇等, 2004)。研究区零星分布数十个次火山岩相苦橄玢岩岩体,大部分岩体呈浑圆状或者不规则状,出露面积较小,一般只有几百平方米,最大的约0.1 km²。本次研究选择了其中2个代表性岩体,一个位于剑川县二龙水电站附近,是其中最大的一个岩体,其岩相分带不明显,灰黑色,岩石新鲜,侵入于峨眉山玄武岩中,曾作为建材进行开采(图1c)。另一个是位于剑川县县城约5 km的满元山村,该地区的次火岩也侵入峨眉山玄武岩中,但是由于植被覆盖严重,其岩相分带和岩体的实际大小均

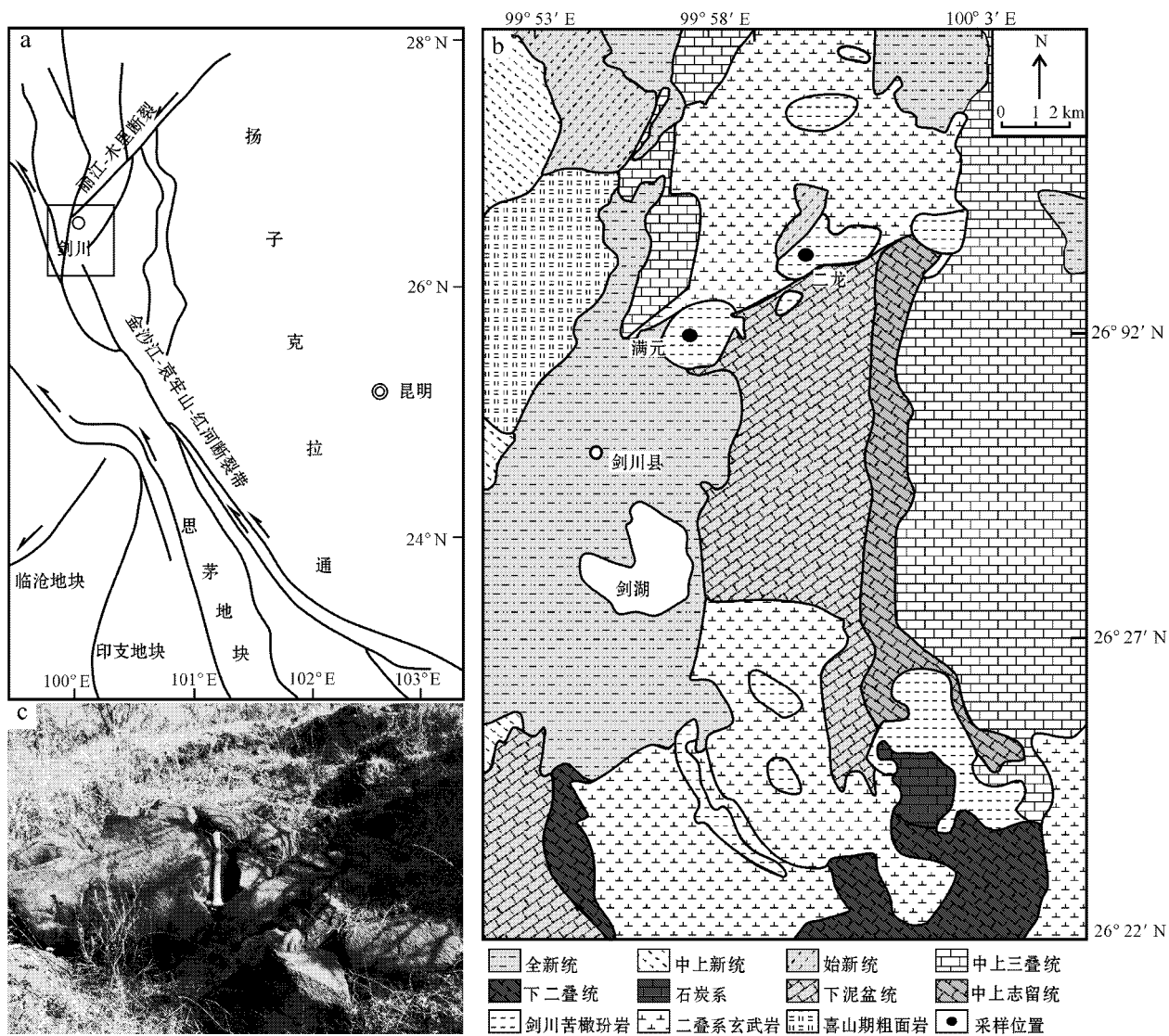


图 1 “三江”区域地质简图 [a 据黄小龙等 (2007) 修改]、剑川地质图 (b) 和采样点野外实拍图 (c)

Fig. 1 Sketch regional geological map of the Sanjiang region (a, modified after Huang Xiaolong *et al.*, 2007), geological map of the Jianchuan area (b) and field photograph of sampling spots (c)

无法确定。根据观察推测,其分布面积大约在 2 000 ~ 5 000 m²。该次火山岩岩体已识别出两种岩性:一为灰黑色斑状结构的苦橄玢岩,其外貌和二龙水电站附近的苦橄玢岩及其相似;另一种是表面为暗红色中粒等粒结构的苦橄质岩石,其侵位深度可能较前者深,但是没有观察到两者的接触关系。目前尚缺乏确切的苦橄玢岩年代学数据,根据区域地层接触关系(部分侵入于三叠纪地层)、区域岩浆活动特点(二叠纪后的主要岩浆活动为新生代)以及岩石蚀变很弱并明显较所有的二叠纪苦橄岩新鲜(超基

性岩容易蚀变),推测剑川苦橄玢岩的年代可能为新生代。区域地层主要有中上志留统(S_{2,3})、下泥盆统(D₁)、石炭系(C)、下二叠统(P₁)、中上三叠统(T_{2,3})、始新统(E₂)、中上新统(N_{2,3});上覆地层主要是第四系沉积物(图 1b)。

2 岩石学特征

滇西剑川苦橄玢岩主要有两种:其一为二龙苦橄玢岩和满元苦橄玢岩,其二为满元苦橄质堆晶岩。

① 云南省地质局第一区域地质测量大队, 1975, 1:20 万剑川幅和鹤庆幅地质报告。

其主要岩石学特征如下：

二龙苦橄玢岩：岩石新鲜面呈黑色，斑状结构，发育杏仁构造。斑晶主要是橄榄石和单斜辉石。斑晶含量约25%，其中橄榄石约占20%，辉石含量较少，仅5%左右。橄榄石颗粒粒径0.2~3.7 mm，平均约为1.6 mm，蚀变严重，大部分已蛇纹石化，仅保留假像，呈自形-半自形粒状，少数新鲜橄榄石中可观察到熔融包裹体和尖晶石包裹体，镜下未观察到扭折带，指示橄榄石斑晶是岩浆成因的，而非地幔捕虏晶。辉石斑晶颗粒粒径0.2~2.1 mm，平均约为1.2 mm，多呈自形-半自形的两角尖的六边形、八边形(图2a)和板柱状，辉石偶见双晶(图2c)，多见裂理，未发生明显蚀变，环带不发育。基质为拉斑玄武结构，主要矿物是斜长石、辉石和橄榄石等。斜长石呈自形板状，不规则分布，约占基质总体积的50%，

部分已发生钠长石化。辉石和橄榄石呈微晶粒状分布在斜长石粒间空隙中，辉石约占基质总体积的35%，橄榄石约占基质总体积的10%。基质中还可可见少量的钛铁氧化物。满元苦橄玢岩与二龙苦橄玢岩特征极为相似，在此不再赘述。

满元苦橄质堆晶岩：粒状结构，主要矿物是橄榄石、单斜辉石和斜长石，其中橄榄石约占65%，单斜辉石约占20%，长石约10%。橄榄石颗粒粒径约0.2~2.5 mm，平均约为0.9 mm，呈自形或半自形粒状，裂理发育，并已强烈蛇纹石化，辉石颗粒粒径约0.1~3.1 mm，平均约0.9 mm，呈半自形-他形粒状，两角尖的六边形(图2b)和板柱状(图2d)；长石多呈板状，具明显的聚片双晶，单偏光镜下表面由于高岭土化显得浑浊，有熔蚀现象，颗粒粒径最长可达0.3 mm，平均长约0.16 mm，宽平均约0.1 mm。

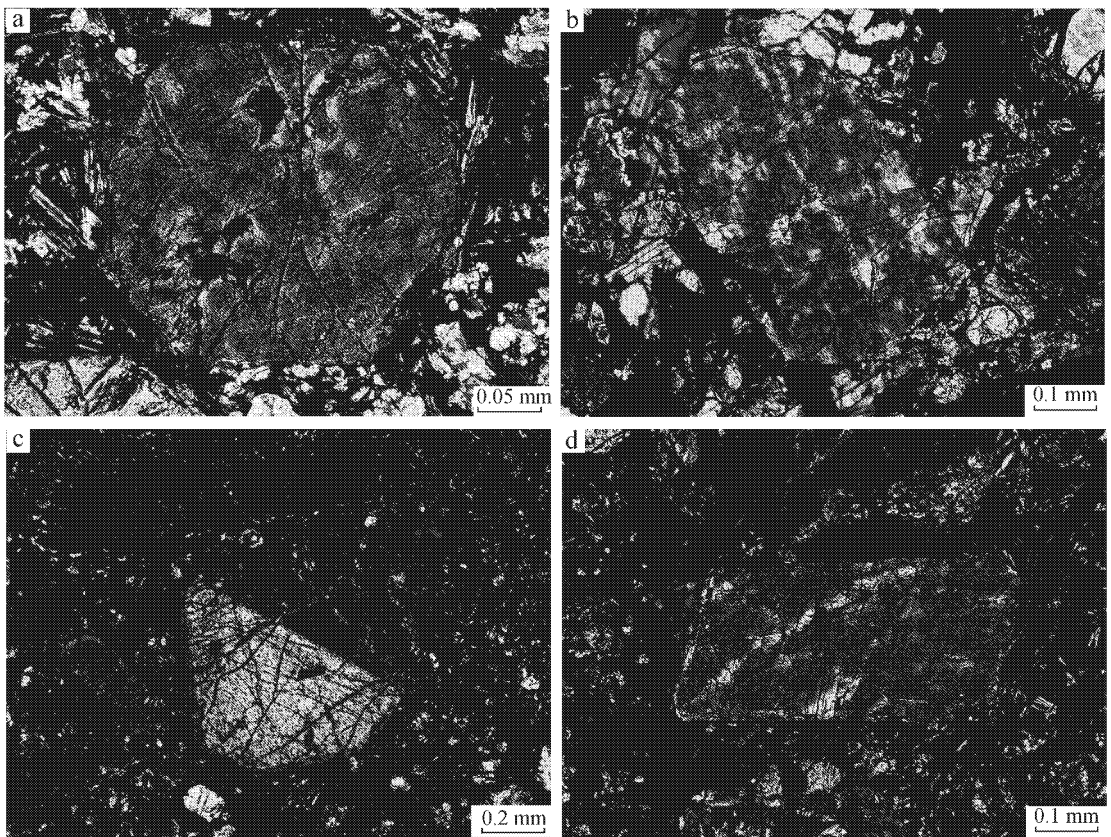


图2 剑川苦橄玢岩斑晶单斜辉石镜下特征(正交偏光)

Fig. 2 Characteristics of clinopyroxene phenocryst(crossed nicols)

a—剑川苦橄玢岩中八边形单斜辉石；b—剑川苦橄玢岩中六边形单斜辉石；c—剑川苦橄玢岩中单斜辉石的双晶；

d—剑川苦橄玢岩中长板柱状单斜辉石

a—octagonal clinopyroxene of Jianchuan picritic porphyrite；b—hexagonal clinopyroxene of Jianchuan picritic porphyrite；c—crystal twin of clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite；d—long slabby clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite

3 全岩主量元素特征

全岩主量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,测试仪器是 X 射线荧光光谱仪(XRF),工作条件为:激发电流为 50 mA,激发电压为 50 kV,仪器分析灵敏度为 0.001%,并用湿化学方法区分了二价铁和三价铁。样品的全岩主量元素组成见表 1。

实验结果表明,剑川苦橄玢岩具有低 SiO₂ (43.08%~50.51%)、高 Mg[#](12.39%~29.51%) 的特征。Mg[#](71.5~86.1)高,与丽江苦橄岩 Mg[#]相当(72~83)(张招崇等,2005),比一般玄武质岩石的 Mg[#]高(一般<60)(丛柏林,1988;Zhang and Wang,2002),也比钾质火山岩的 Mg[#]高(0.66~0.78)(Guo *et al.*,2005)。此外,剑川苦橄玢岩的 CaO/Al₂O₃ 值较高(0.87~1.32),反映其形成压力可能较高(Hirose and Kushiro,1993;Baker and Stolper,1994;张招崇等,2005)。剑川苦橄玢岩全碱含量低且变化范围不大(Na₂O+K₂O=0.16%~2.28%)在全岩主量元素(Na₂O+K₂O)-SiO₂图(TAS)(图 3)上,剑川苦橄玢岩均落入亚碱性岩石系列内,明显比区域上的钾质火山岩低。

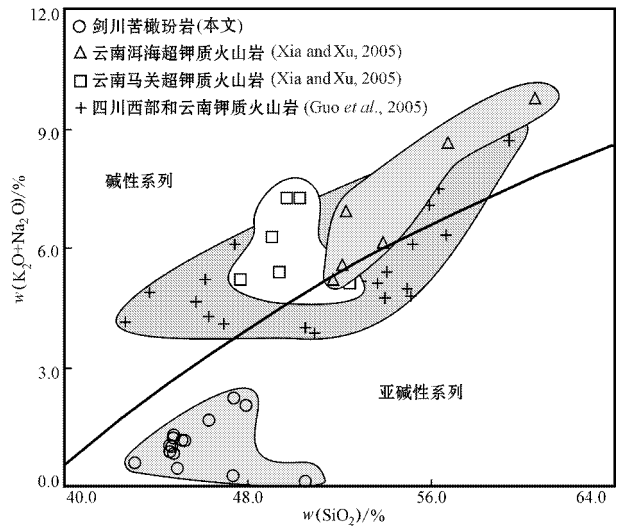


图 3 剑川苦橄玢岩的 TAS 图解(底图自 Le Bas 等,1986)

Fig. 3 TAS diagram of Jianchuan picritic porphyrite (base diagram after Le Bas *et al.*,1986)

4 单斜辉石的化学成分

单斜辉石电子探针分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成,测试仪器为 JXA-8100 型电子探

表 1 二龙苦橄玢岩、满元苦橄玢岩和满元苦橄质堆晶岩主量元素数据

w_B/%

Table 1 Bulk-rock chemical composition of Erlong and Manyuan picritic porphyrite and Manyuan picritic cumulate

样品名称	二龙苦橄玢岩					满元苦橄玢岩				满元苦橄质堆晶岩				
	El-01	El-02	El-05	El-07	El-09	My-08	My-09	My-11	My-02	My-04	My-05	My-07-04	My-07-05	My-07-06
SiO ₂	44.90	44.62	45.28	44.77	45.17	47.93	47.42	46.32	50.51	47.37	43.08	44.81	44.73	44.61
TiO ₂	1.60	2.41	2.43	2.15	2.47	2.06	2.15	1.44	1.44	1.50	1.42	1.86	1.86	1.76
Al ₂ O ₃	7.48	9.82	10.33	9.32	10.15	12.72	12.52	9.44	2.81	2.86	4.68	7.32	7.32	7.02
Fe ₂ O ₃	4.20	3.84	3.65	4.05	4.13	3.64	3.08	3.14	7.83	5.91	5.32	4.85	5.50	5.01
FeO	9.18	9.46	9.27	9.34	8.86	7.11	8.05	8.80	7.41	9.86	10.30	8.47	7.67	8.38
MnO	0.16	0.19	0.19	0.18	0.19	0.16	0.17	0.16	0.13	0.15	0.17	0.16	0.17	0.17
MgO	23.51	18.99	17.75	20.02	17.67	12.39	13.17	19.81	26.16	28.26	29.51	23.53	23.59	24.47
CaO	8.32	9.55	9.73	9.10	9.98	11.69	10.92	9.02	3.54	3.78	4.77	7.61	7.72	7.37
Na ₂ O	0.31	0.60	0.81	0.57	0.80	1.42	1.63	1.13	0.02	0.06	0.31	0.75	0.84	0.60
K ₂ O	0.17	0.29	0.33	0.29	0.34	0.63	0.65	0.56	0.14	0.22	0.29	0.45	0.44	0.43
P ₂ O ₅	0.15	0.24	0.24	0.21	0.23	0.24	0.24	0.17	0.01	0.01	0.15	0.18	0.17	0.17
LOI	4.98	4.81	3.83	4.83	4.64	1.72	1.86	1.99	7.34	5.04	3.85	4.07	3.91	3.91
Total	99.66	99.72	99.73	99.71	99.74	99.74	99.78	99.69	99.56	99.56	99.64	99.68	99.68	99.66
Alk	0.48	0.89	1.14	0.86	1.14	2.05	2.28	1.69	0.16	0.28	0.60	1.20	1.28	1.03
Mg [#]	79.3	75.3	74.5	76.4	74.8	71.8	71.5	77.7	86.1	80.3	80.7	79.9	80.7	80.6
CaO/Al ₂ O ₃	1.11	0.97	0.94	0.98	0.98	0.92	0.87	0.96	1.26	1.32	1.02	1.04	1.05	1.05

注: Mg[#] = 100 × Mg / (Mg + Fe²⁺)

针仪 加速电压 15 kV, 电流 10 nA, 束斑 3 μm, 测试误差 < 1.5%。单斜辉石主量元素分析结果和以 6 个氧原子为单位计算单斜辉石的阳离子数见表 2、3 和 4, 其中 $Mg^{\#} = 100 \times Mg / [Mg + Fe^{2+}]$

由表中数据可以看出, 整体上看, 剑川苦橄玢岩的单斜辉石均相对富镁贫铁, 只有二龙苦橄玢岩和满元苦橄玢岩个别样品(El-02 和 My-09)基质中的单斜辉石相对富铁, 铁辉石(Fs)含量分别高达 22.4% 和 17.01%。根据 Morimoto 等(1988)提出的辉石分类命名方案, 剑川苦橄玢岩单斜辉石均属 Ca-Mg-Fe 辉石族(图 4a), 在 Wo-En-Fs 三角图上(图 4b)单斜辉石绝大部分落入普通辉石区。单斜辉石中除个别 $Mg^{\#}$ 不高外, 绝大多数的 $Mg^{\#}$ 较高, 二龙苦橄玢岩(68.4 ~ 87.1) 满元苦橄玢岩(72.9 ~ 89.2)和满元苦橄质堆晶岩(81.8 ~ 89.8)与丽江苦橄岩中单斜辉石的 $Mg^{\#}$ (72.1 ~ 87.0) 张招崇等, 2006)相当, 此外, 其中满元苦橄玢岩斑晶单斜辉石的 $Mg^{\#}$ (86.2 ~ 89.2) 明显比基质单斜辉石的 $Mg^{\#}$ (72.9 ~ 85.4) 高。剑川苦橄玢岩单斜辉石 $Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 很高, 在 0.7 ~ 1.0 之间, 平均值为 0.9, 指示其岩体低氧逸度的特点, 剑川苦橄玢岩单斜辉石的 $Ca / (Ca + Mg + Fe) \times Fe = Mn + Fe^{2+} + Fe^{3+}$ 也较高(0.5 ~ 0.8, 平均为 0.7), 暗示剑川苦橄玢岩具有高钙的特征。

剑川苦橄玢岩中单斜辉石 Na_2O 较低(0.23% ~ 0.61%), 比青藏高原东部富碱侵入岩中的霓辉石 Na_2O (最高可达 12.68%) 低的多, 而且比其中出现

的透辉石 Na_2O (0.41% ~ 1.53%, 平均值是 0.84%) (谢应雯等, 1998) 也低, 比滇西卓潘-六合碱性岩的辉石的 Na_2O (平均值是 0.82%) 也低(韦栋梁等, 2005), TiO_2 含量(0.59% ~ 2.85% 之间, 平均为 1.12%) 和 Al_2O_3 含量(1.81% ~ 5.48% 之间, 平均为 3.24%) 较低, Cr_2O_3 (0 ~ 1.46% 之间, 平均值为 0.77%) 较高且变化范围广。

在剑川苦橄玢岩单斜辉石主要氧化物相关图解(图 5)上, MgO 与 TiO_2 、 Al_2O_3 和 FeO 呈较好的负相关性, 与 SiO_2 呈较好的正相关, 其中二龙苦橄玢岩基质单斜辉石以相对高 TiO_2 、 Al_2O_3 和 FeO 而较低 SiO_2 与斑晶单斜辉石相区别, 满元苦橄玢岩基质单斜辉石较斑晶单斜辉石也相对富 FeO , 绝大多数基质中单斜辉石较斑晶中单斜辉石富 TiO_2 , 且基质中单斜辉石的 TiO_2 、 Al_2O_3 和 SiO_2 变化范围较大, 满元苦橄质堆晶岩中氧化物变化范围均较广; MgO 与其他氧化物, 如 CaO 相关性不明显。

5 讨论

5.1 岩浆系列

研究表明, 单斜辉石的成分可以很好地反映其母岩浆的成分特征(Le Bas, 1962; Leterrier *et al.*, 1982; Sun and Bertrand, 1991; Selyer and Bonatti, 1994; 邱家骧等, 1996)。在单斜辉石 $SiO_2 - Al_2O_3$ 图解上(图 6a), 二龙苦橄玢岩斑晶单斜辉石属于亚碱性系列而绝大多数基质单斜辉石落在碱性系列

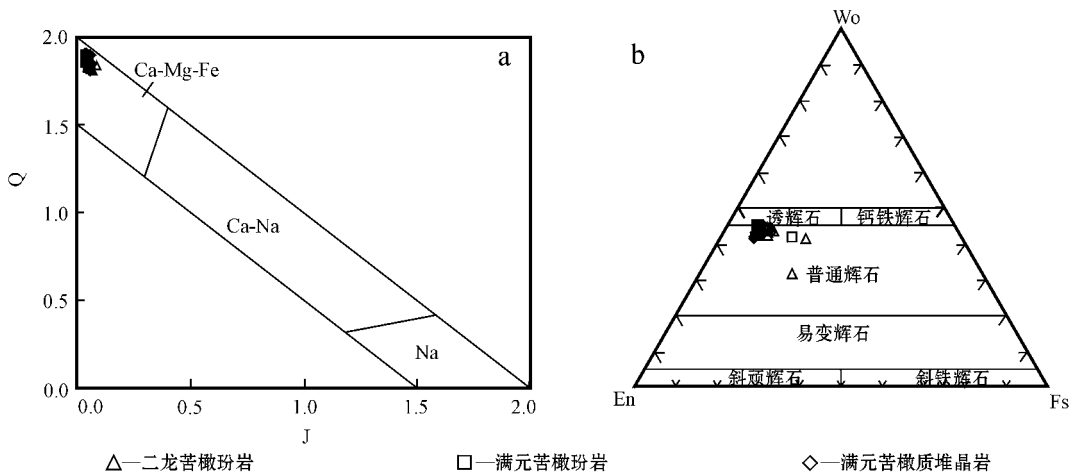


图 4 单斜辉石系列 Q-J (Q = Ca + Mg + Fe²⁺, J = 2Na) 图解和单斜辉石分类图解(据 Morimoto 等, 1988)

Fig. 4 Diagram of Q-J series for clinopyroxenes (a) and diagram of classification for clinopyroxenes (b)

(after Morimoto *et al.*, 1988)

表2 二龙苦橄玢岩单斜辉石成分电子探针成分分析结果

Table 2 EPMA analytical results of clinopyroxene in Erlong picritic porphyrite

样品名称	斑晶												基质				w _B /%				
	EL-02-4		EL-02-10		EL-02-11		EL-02-12		EL-07-9		EL-07-10		EL-05-6		EL-02			EL-07		EL-05	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		1	2	1	2
SiO ₂	52.24	51.73	53.41	52.20	51.49	51.51	52.73	52.37	51.65	52.30	49.88	51.91	51.19	51.07	49.74	50.21	51.15	49.31	49.08	48.34	46.75
TiO ₂	0.87	1.14	0.80	0.73	0.93	1.04	0.69	0.71	0.94	0.87	1.10	0.92	0.86	0.99	1.33	1.44	1.67	1.42	1.37	1.73	2.85
Al ₂ O ₃	2.84	2.93	2.35	2.66	3.27	3.43	2.15	2.59	2.38	2.63	3.81	3.30	2.39	3.35	4.39	4.48	5.00	4.56	4.75	5.15	4.20
FeO	4.81	6.98	5.11	5.20	5.97	5.93	5.26	5.39	6.11	5.98	5.86	5.73	5.72	6.32	6.46	6.33	13.50	6.40	6.45	6.79	11.88
Cr ₂ O ₃	1.09	0.12	0.57	0.84	0.16	0.26	0.71	0.79	0.35	0.24	1.04	0.41	0.72	0.15	0.88	1.02	0.00	0.72	0.97	0.73	0.00
MnO	0.13	0.14	0.10	0.12	0.12	0.09	0.12	0.15	0.15	0.12	0.12	0.11	0.13	0.13	0.06	0.13	0.34	0.13	0.12	0.15	0.19
MgO	16.19	15.63	16.84	15.99	15.65	15.51	16.74	16.17	16.21	15.93	15.84	15.86	16.54	15.93	15.47	15.28	15.87	15.15	15.51	14.69	12.44
CaO	21.28	21.12	21.16	21.08	21.10	21.25	20.92	20.93	20.43	20.80	20.53	21.54	20.56	20.89	20.72	20.56	15.36	20.88	19.65	20.07	19.05
Na ₂ O	0.27	0.30	0.34	0.28	0.29	0.36	0.28	0.25	0.61	0.27	0.23	0.30	0.28	0.31	0.32	0.32	0.27	0.30	0.38	0.30	0.44
K ₂ O	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.08	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Si	1.92	1.91	1.94	1.93	1.91	1.90	1.94	1.94	1.91	1.94	1.86	1.90	1.91	1.89	1.84	1.86	1.92	1.84	1.84	1.82	1.80
Ti	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.08
Al ^{IV}	0.08	0.10	0.06	0.07	0.09	0.10	0.06	0.07	0.09	0.06	0.14	0.10	0.09	0.11	0.16	0.15	0.08	0.16	0.16	0.18	0.19
Al ^{VI}	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.02	0.05	0.03	0.05	0.01	0.04	0.03	0.05	0.00	0.04	0.05	0.05	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.03	0.01	0.03	0.03	0.05	0.01	0.01	0.05	0.04	0.03	0.08
Fe ²⁺	0.15	0.20	0.16	0.16	0.19	0.18	0.16	0.17	0.13	0.19	0.15	0.17	0.15	0.16	0.15	0.19	0.41	0.15	0.16	0.19	0.31
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Mg	0.08	0.11	0.06	0.07	0.09	0.10	0.06	0.07	0.14	0.06	0.17	0.10	0.13	0.14	0.20	0.15	0.09	0.21	0.20	0.21	0.27
Ca	0.84	0.83	0.82	0.84	0.84	0.84	0.82	0.83	0.81	0.83	0.82	0.85	0.82	0.83	0.82	0.81	0.62	0.83	0.79	0.81	0.79
Na	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg [#]	85.7	81.3	85.5	84.6	82.3	82.5	85.1	84.2	87.1	82.6	85.5	83.8	86.4	84.4	84.7	81.7	68.4	84.5	84.1	81.7	69.9
Wo	44.65	43.61	43.49	44.40	44.30	44.71	43.21	43.83	42.68	43.58	43.46	44.72	42.71	43.44	43.87	43.77	31.84	44.37	42.39	43.70	41.61
En	47.26	44.91	48.15	46.86	45.72	45.40	48.11	47.11	47.11	46.44	46.66	45.82	47.80	46.09	45.47	45.37	45.77	44.80	46.55	44.50	37.81
Fs	8.09	11.48	8.36	8.75	9.98	9.89	8.68	9.06	10.21	9.98	9.88	9.47	9.49	10.47	10.75	10.76	22.40	10.83	11.06	11.80	20.58

表3 满元苦橄玢岩单斜辉石成分电子探针成分分析结果

 $w_B/\%$

Table 3 EPMA analytical results of clinopyroxene in Manyuan picritic porphyrite

样品名称 样品号 点号	斑晶						基质							
	My-09-10		My-11-3		My-11-5		My-08	My-09			My-11			
	1	2	1	2	1	2	1	1	2	3	1	2	3	4
SiO ₂	50.98	50.49	50.22	51.82	52.39	50.90	50.07	48.28	50.61	52.39	49.44	52.57	52.20	51.28
TiO ₂	0.76	0.79	0.90	0.67	0.62	0.59	1.15	2.84	0.95	0.74	1.29	0.77	0.77	1.01
Al ₂ O ₃	3.99	3.76	4.04	3.18	2.52	3.35	4.44	4.63	3.92	2.14	4.65	2.22	2.21	3.29
FeO	4.71	4.82	4.77	4.26	4.77	4.30	5.74	9.99	5.20	5.14	5.61	5.87	5.66	5.88
Cr ₂ O ₃	1.35	1.28	1.46	1.17	0.80	1.46	0.82	0.02	1.35	0.68	1.07	0.52	0.49	0.70
MnO	0.11	0.09	0.10	0.09	0.14	0.10	0.13	0.17	0.13	0.16	0.12	0.14	0.14	0.14
MgO	15.92	16.08	16.12	16.27	16.69	16.05	15.44	13.71	15.70	15.00	15.34	16.06	15.83	15.50
CaO	21.27	20.86	20.67	21.50	20.55	21.49	20.51	19.62	20.85	20.42	20.52	20.79	21.32	20.87
Na ₂ O	0.31	0.25	0.32	0.31	0.25	0.37	0.32	0.30	0.28	0.29	0.32	0.31	0.24	0.27
K ₂ O	0.02	0.00	0.01	0.06	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01
Si	.88	1.88	1.87	1.91	1.94	1.89	1.87	1.81	1.88	1.94	1.85	1.95	1.94	1.91
Ti	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.08	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03
Al ^{IV}	0.12	0.12	0.14	0.09	0.06	0.11	0.14	0.19	0.12	0.06	0.15	0.05	0.06	0.09
Al ^{VI}	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.06	0.02	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.13	0.14	0.13	0.13	0.15	0.11	0.17	0.29	0.16	0.16	0.15	0.18	0.18	0.18
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.14	0.13	0.16	0.09	0.06	0.14	0.15	0.22	0.13	0.06	0.18	0.05	0.06	0.09
Ca	0.84	0.83	0.82	0.85	0.82	0.85	0.82	0.79	0.83	0.81	0.82	0.83	0.85	0.83
Na	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg [#]	86.9	86.7	87.7	87.2	86.2	89.2	83.5	72.9	84.4	85.4	84.8	83.0	83.3	82.5
Wo	45.08	44.32	44.07	45.23	43.17	45.48	44.04	42.08	44.50	42.47	44.28	43.47	44.53	44.28
En	46.95	47.54	47.82	47.62	48.78	47.26	46.13	40.91	46.62	48.93	46.06	46.72	46.01	45.75
Fs	7.98	8.15	8.11	7.15	8.05	7.27	9.84	17.01	8.88	8.61	9.66	9.81	9.46	9.97

表4 满元苦橄质堆晶岩单斜辉石成分电子探针成分分析结果

 $w_B/\%$

Table 4 EPMA analytical results of clinopyroxene in Manyuan picritic cumulate

样品号 点号	My-07-05-1		My-07-05-3		My-07-05-7		My-07-05-9		My-03			My-04	My-05	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	3	1	1	2
	SiO ₂	51.23	50.56	51.88	51.52	51.05	51.62	50.94	51.95	52.11	48.12	51.43	50.36	50.73
TiO ₂	1.08	1.58	0.76	0.90	1.16	0.85	1.17	0.69	0.75	2.25	0.93	1.11	1.62	0.78
Al ₂ O ₃	2.93	2.94	1.91	1.97	3.06	2.37	3.49	1.88	1.86	5.48	3.19	3.42	3.57	1.88
FeO	5.31	6.72	4.81	4.75	4.71	4.70	5.38	4.67	4.87	6.27	4.75	4.90	6.14	4.93
Cr ₂ O ₃	0.99	0.91	0.84	0.88	1.27	1.08	0.97	0.83	0.84	0.41	1.10	1.32	1.72	0.85
MnO	0.11	0.18	0.13	0.12	0.09	0.10	0.13	0.10	0.14	0.14	0.10	0.11	0.12	0.12
MgO	16.26	15.40	17.65	16.64	16.09	17.03	15.53	16.92	17.50	14.92	16.01	15.65	15.40	17.13
CaO	20.71	20.33	0.53	21.08	20.94	20.61	20.87	20.71	20.15	20.29	21.13	20.95	20.77	20.46
Na ₂ O	0.27	0.45	0.25	0.28	0.36	0.37	0.31	0.33	0.24	0.40	0.35	0.28	0.32	0.24
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
Si	1.90	1.88	1.92	1.92	1.90	1.91	1.90	1.93	1.93	1.80	1.90	1.89	1.88	1.95
Ti	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.05	0.02
Al ^{IV}	0.10	0.12	0.08	0.08	0.11	0.09	0.10	0.07	0.07	0.20	0.10	0.11	0.12	0.05
Al ^{VI}	0.03	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Fe ³⁺	0.00	0.02	0.04	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.17	0.19	0.11	0.13	0.15	0.12	0.17	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15	0.19	0.15
Mn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.10	0.14	0.12	0.09	0.11	0.12	0.10	0.08	0.08	0.24	0.10	0.11	0.12	0.05
Ca	0.82	0.81	0.81	0.84	0.83	0.82	0.83	0.83	0.80	0.81	0.84	0.84	0.83	0.81
Na	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg [#]	84.5	82.0	89.8	87.4	85.9	88.7	83.8	87.5	87.0	84.5	85.7	85.0	81.8	86.1
Wo	43.54	43.12	41.95	43.88	44.48	42.89	44.61	43.17	41.62	44.06	44.77	44.92	44.11	42.42
En	47.56	45.45	50.18	48.20	47.56	49.31	46.19	49.07	50.30	45.08	47.20	46.69	45.51	49.41
Fs	8.90	11.43	7.88	7.92	7.96	7.80	9.20	7.76	8.08	10.87	8.02	8.39	10.38	8.17

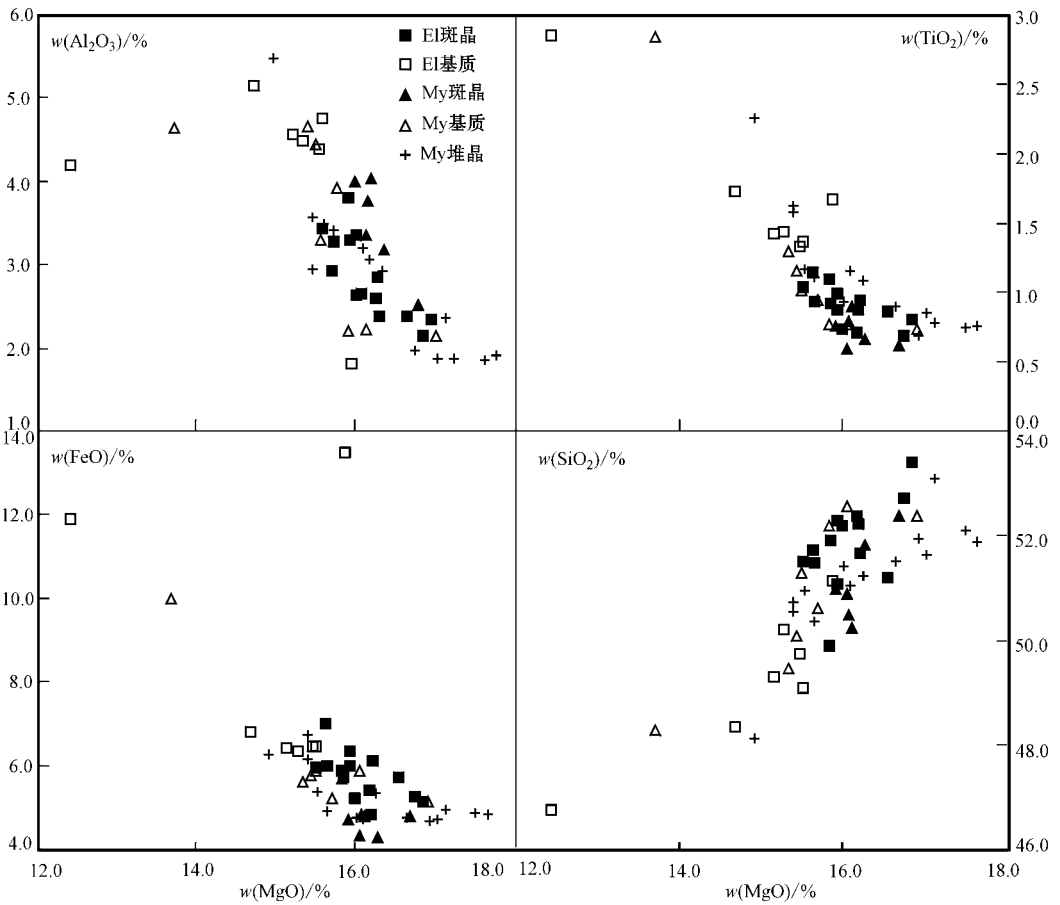


图 5 单斜辉石主要氧化物相关性图解

Fig. 5 Correlation between major oxides and MgO in clinopyroxenes

内, 满元苦橄玢岩除一个斑晶单斜辉石和极少数基质单斜辉石落入碱性系列外, 其余均落入亚碱性系列中, 满元苦橄质堆晶岩中单斜辉石均落入亚碱性系列内, 暗示研究区的母岩浆是亚碱性系列, 也有可能存在一种演化关系, 即从亚碱性系列向碱性系列演化, 在 Litterier 等(1982)提出的 $Ti - (Ca + Na)$ 图解上(图 6b), 除极个别点落入碱性系列外, 其余均属于拉斑玄武系列, 这两类判别图解得出相对一致的结论: 研究区苦橄玢岩的母岩浆应该是亚碱性系列, 随着时间的推移可能向碱性系列演化。如前所述, 研究区单斜辉石具有较低的 TiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O [斑晶尤其具低的 TiO_2 和 Al_2O_3], 这是拉斑玄武系列岩浆的演化趋势(Carmichael *et al.*, 1974), 且二龙和满元苦橄玢岩从斑晶单斜辉石到基质单斜辉石是由富镁到富铁演化, 这也是拉斑玄武系列岩浆的演化趋势, 即在低氧逸度条件下岩浆首先结晶出相对富镁的硅酸盐矿物, 导致残留岩浆相对富铁和钛

(Irvine and Baragar, 1971)。微量元素研究表明, 其岩石系列是拉斑玄武岩系列。综上所述, 剑川苦橄玢岩的母岩浆很可能属于拉斑玄武岩系列, 并且可能由于氧逸度的升高以及压力的降低, 逐步向碱性系列演化。

5.2 单斜辉石中元素类质同像置换关系

辉石中阳离子间的类质同像置换现象十分广泛且复杂, 通过分析辉石的类质同像置换过程, 对深入理解辉石化学组分之间的关系和辉石的成因有着重要的意义。Campell 等(1974)以及 Hode 等(1988)的研究表明, 辉石中阳离子的置换主要是由电价平衡控制的, 少量的阳离子置换受温度和阳离子半径的控制。

在 Al-Si 相关图解上(图 7a), Al 与 Si 呈很好的负相关, 指示 Al 充填单斜辉石四面体位置中由 Si 不足而引起的空缺, 主要是通过 Al^{IV} 进入四面体位置来充填的, 但是由 Al^{IV} 充填单斜辉石四面体位置由 Si

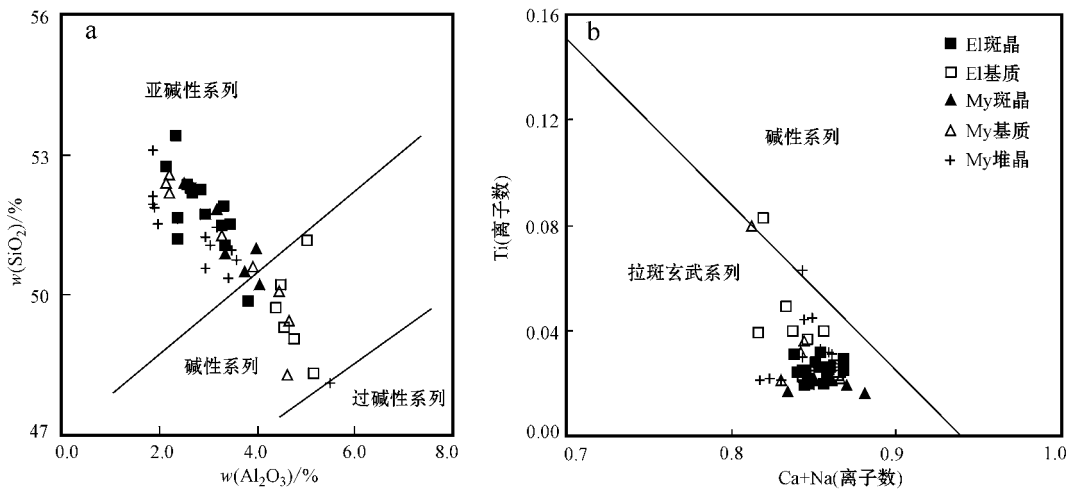


图6 单斜辉石 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(a)和 $\text{Ti} - (\text{Ca} + \text{Na})$ 图解(b)(据 Leterrier 等, 1982)

Fig. 6 Plot of $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ of clinopyroxenes (a) and $\text{Ti} - (\text{Ca} + \text{Na})$ diagrams (b) of clinopyroxenes (after Leterrier *et al.*, 1982)

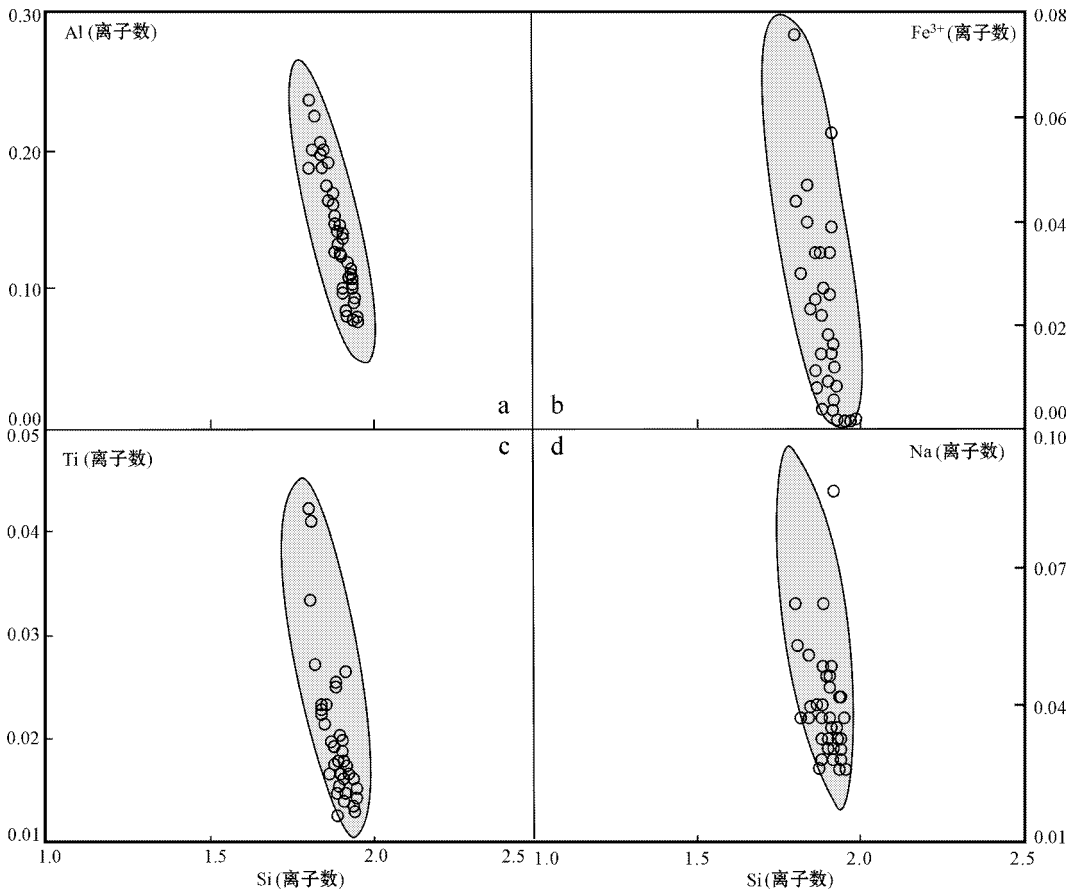


图7 单斜辉石 $\text{Al} - \text{Si}$ (a), $\text{Fe}^{3+} - \text{Si}$ (b), $\text{Ti} - \text{Si}$ (c) 和 $\text{Na} - \text{Si}$ (d) 相关性图解

Fig. 7 Correlations of $\text{Al} - \text{Si}$ (a), $\text{Fe}^{3+} - \text{Si}$ (b), $\text{Ti} - \text{Si}$ (c) and $\text{Na} - \text{Si}$ (d) in clinopyroxenes

不足引起的空缺所导致的电荷不平衡需要 Al^{VI} 进入八面体才能得到平衡,即通过替代反应 $Mg + Si = Al^{VI} + Al^{IV}$ 形成契尔马克分子 $CaMgAl^{VI}Al^{IV}Si_2O_6$, 进入到八面体的 Al^{VI} 占有所有 Al 的 0~46%, 平均为 26%。

在 $Fe^{3+} - Si$ (图 7b) 和 $Ti - Si$ (图 7c) 相关图解上, Fe^{3+} 、Ti 与 Si 也呈较好的负相关, 指示 Al^{VI} 没有完全平衡 Al^{IV} 充填单斜辉石四面体位置由 Si 不足引起的空缺而导致的电荷不平衡, 还需要 Fe^{3+} 和 Ti 进一步平衡, 也就是说四面体位置 Al 对 Si 的替代引起的电荷不平衡还需要 Fe^{3+} 和 Ti 进入八面体位置才能达到平衡。研究表明, Fe^{3+} 比 Ti 优先进入到八面体, 且八面体的 Ti 只有少量用来补偿 Al 对 Si 替代所引起的多余负电荷, 大部分都以替代反应 $Ca + Mg = Na + Mg_{0.5}Ti_{0.5}$ 的形式进入到辉石, 形成钛辉石, 即 $NaMg_{0.5}Ti_{0.5}Si_2O_6$ (Morimoto *et al.*, 1988; 牛晓露等, 2009), 在此, 作者认为只有 Fe^{3+} 进入八面体, 相应的替代反应式是 $Mg + Si = Fe^{3+} + Al^{IV}$ 形成钙铁铝辉石, 即 $CaFe^{3+}AlSiO_6$ 。由钛辉石组分 $NaMg_{0.5}Ti_{0.5}Si_2O_6$ 可知, Ti 和 Na 主要进入钛辉石中, 但是在 $Na - Si$ (图 7d) 相关图解上, Na 与 Si 相关性较好, 暗示着在单斜辉石形成的后期可能有很少量的 Na 与 Fe^{3+} 发生 $Ca + Mg = Na + Fe^{3+}$ 替代反应形成霓辉石 $NaFe^{3+}Si_2O_6$ 。

综上所述, 剑川苦橄质岩浆中 Si 强烈不饱和, 造成单斜辉石在结晶时, 四面体位置的 Si 不足, 而由 Al^{IV} 来补充, 即 Al^{IV} 进入四面体是充填 Si 不足引起的空缺, 而由四面体位置 Al^{IV} 对 Si 的替代所导致的电荷不平衡, 则应由八面体位置上的 Al^{VI} 、 Fe^{3+} 和 Ti^{4+} 。随着单斜辉石的结晶岩浆体系中 Si 的浓度越来越低, 这时, 单斜辉石四面体中由 Si 不足所引起的空缺越来越大, 所以结晶的单斜辉石的 Al 逐渐增加, 这与单斜辉石主量元素 $SiO_2 - MgO$ 和 $Al_2O_3 - MgO$ 相关性图解结论一致 (图 5), 由于剑川苦橄玢岩的氧逸度很低 [$Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 在 0.7~1.0 之间, 平均值为 0.9], 所以 Fe^{3+} 的主要作用不是平衡电荷, 进入单斜辉石的 Ti 只有极少量用来补偿由 Al^{IV} 对 Si 替代所引起的电荷不平衡, 大部分的 Ti 与平衡电荷无关, 而是与 Na 和 Mg 等结合, 以 $NaMg_{0.5}Ti_{0.5}Si_2O_6$ 的形式存在, 因此主要是 Al^{VI} 起到平衡电荷的作用。岩浆演化后期, 可能仅有极少量 Na 与 Fe^{3+} 结合形成霓辉石, 因此, 单斜辉石中的 Ti^{4+} 和 Fe^{3+} 含量共同决定了单斜辉石中的 Na 含量。

5.3 单斜辉石形成的物理化学条件

由表 1 可知, 剑川苦橄玢岩烧失量均较高 (1.72%~7.32%), 这可能使计算得到的温压因受岩石蚀变的影响而升高。作者依据 Putirka 等 (2003) 提出的辉石-熔体温压计计算了剑川苦橄玢岩单斜辉石的温压, 结果见表 5。

表 5 剑川苦橄玢岩单斜辉石-熔体平衡温度、压力
Table 5 Clinopyroxene-melt equilibrium temperatures and pressures of clinopyroxene in Jianchuan picritic porphyrite

岩性	样号	$t/^\circ C$	p/GPa	D/km
二龙苦橄玢岩	El-02	1 414	2.7	89
	El-05	1 389	2.4	79
	El-07	1 428	2.9	96
满元苦橄玢岩	My-09	1 324	1.5	50
	My-11	1 406	2.5	83
满元苦橄质堆晶岩	My-07-05	1 439	3.0	99
	My-07-06	1 462	3.2	106

注: 假定 1 GPa 约为 33 km。

剑川苦橄玢岩单斜辉石的形成温压均较高, 深度较深, 明显看出堆晶成因的岩石温压及深度 (1 439~1 462 $^\circ C$ 、3.0~5.1 GPa、99~106 km) 比苦橄玢岩温压 (1 324~1 428 $^\circ C$ 、1.5~2.9 GPa、50~96 km) 高, 由主量元素可知, CaO/Al_2O_3 值较高 (0.87~1.32, 平均是 1.03), 反映其形成压力较高, 这与计算得到的高压结论相吻合, 而且深度均超过滇西红河-哀牢山地区地壳深度 (43 km) (沈敢富等, 2000), 基本处于岩石圈地幔的深度, 但是岩石圈地幔的温度较低, 难以形成苦橄质岩浆, 因此本区应属于异常的地热区, 这可能与研究区地处滇西“三江”构造活动带有关。“三江”地区红河-哀牢山断裂是超壳断裂, 深切上地幔 (沈敢富等, 2000), 在燕山期至喜山期又一次活动形成由东往西的推覆构造带及右行走滑断裂带, 致使软流圈上涌, 形成异常地热梯度, 致使上地幔发生部分熔融, 另一方面, 由于计算的剑川苦橄玢岩的单斜辉石-熔体的温度代表了岩浆房的温度, 所以熔融时的地幔温度应该比此温度高, 因为即使绝热底劈上升也会散失少量热量。即使如此, 计算的绝大多数温度也略高于软流圈的温度 (1 280~1 350 $^\circ C$) (McKenzie and Bickle, 1988), 也比丽江苦橄岩单斜辉石温度 (1 350 $^\circ C$) 和压力 (1.8 GPa) (张招崇等, 2006), 且剑川苦橄玢岩的 $Mg^{\#}$ 值与丽江苦橄岩 $Mg^{\#}$ 值相当, 剑川苦橄玢岩中单斜辉石的 $Mg^{\#}$ 值与丽江苦橄岩的 $Mg^{\#}$ 值也相当, 所以, 剑川苦橄玢

岩也可能是地幔柱成因,与丽江苦橄岩的源区存在相似性(可能有继承关系),其空间上的共生也可能暗示着其相似的形成机制。然而要进一步论证剑川苦橄玢岩的成因,还需要更多的年代学和地球化学相关证据。

6 结论

(1) 剑川苦橄玢岩具有相对贫硅、贫碱、高钙、低氧逸度的特点,随着单斜辉石的结晶,熔浆中的 SiO_2 逐渐降低。

(2) 剑川苦橄玢岩单斜辉石总体上表现出低 TiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 的特征,且二龙和满元苦橄玢岩斑晶单斜辉石到基质单斜辉石由富镁向富铁演化,这指示了剑川苦橄玢岩的母岩浆是拉斑玄武岩系列,并随着岩浆的演化,有向碱性系列演化的趋势。

(3) 单斜辉石中 Al^{IV} 的含量取决于岩浆中硅的饱和度,岩浆中硅越不饱和, Al^{IV} 的含量越高,剑川苦橄玢岩的Si强烈不饱和。单斜辉石阳离子主要的置换方式是 $\text{Mg} + \text{Si} = \text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$ 和 $\text{Mg} + \text{Si} = \text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{IV}}$,即,充填四面体位置Si不足引起的空缺所导致的电荷不平衡主要是通过 Al^{VI} 进入八面体来平衡的,其次是 Fe^{3+} 和Ti,Ti和Na主要是进入钛辉石中。

(4) 根据辉石-熔体温压计计算得到的单斜辉石形成的温度高温高压,堆晶成因的苦橄玢岩最高温度可达 1462°C ,压力最高可达 3.2 GPa ,斑状苦橄玢岩最高温度可达 1428°C ,最高压力可达 2.9 GPa ,异常的地热梯度可能是由于软流圈上涌造成,并且导致上地幔发生部分熔融形成的,剑川苦橄玢岩也可能是地幔柱成因,即二叠纪峨眉山地幔柱在新生代的再次活化。

致谢 感谢野外采样时云南地矿局杨夕辉的热情帮助,感谢中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室的毛骞老师和马玉光老师和北京大学地壳演化重点实验室的杨斌老师指导和帮助,感谢牛晓露、侯静和康健丽同学对论文的修改提出了宝贵意见!

References

Baker M B and Stolper E M. 1994. Determining the composition of high-pressure mantle melts using diamond aggregates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 2811~2827.

- Campbell I H and Borley G D. 1974. The geochemistry of pyroxenes from the lower layered series of the Jimberlana intrusion, Western Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 47: 281~297.
- Carmichael I S E, Turner F J and Verhoogen J. 1974. *Igneous Petrology*[M]. McGraw-Hill, 34.
- Chung Sunlin, Lee Tunygi, Lo Chinghua, et al. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone[J]. *Geology*, 25(4): 311~314.
- Chung Sunlin, Lo Chinghua, Lee Tunygi, et al. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago[J]. *Nature*, 394: 723~725.
- Cong Bailin. 1998. Formation and Development of the Panxi Ancient Rift[M]. Beijing: Sci. Pub. House, 424(in Chinese).
- Guo Zhengfu, Hertogen J, Liu Jiaqi, et al. 2005. Potassic magmatism in Western Sichuan and Yunnan Provinces, SE Tibet, China: petrological and geochemical constraints on petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 46(1): 33~78.
- Hirose K and Kushiro I. 1993. Partial melting of dry peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 114: 477~489.
- Hode V J, Halenius U, Whitehouse M J, et al. 1988. Compositional variations(major and trace elements) of clinopyroxene and Ti-andradite from pyroxenite, ijolite and nepheline syenite, Alno Island, Sweden[J]. *Lithos*, 81: 55~77.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Yang Qijun, et al. 2007. Geochemistry of late Eocene high-Mg ultrapotassic lavas from western Yunnan, China: constraints on petrogenesis[J]. *Geochimica*, 36(2): 120~138(in Chinese with English abstract).
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal Earth Science*, 8: 523~548.
- Le Bas M J. 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage[J]. *American Journal of Science*, 260: 267~288.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 27: 745~750.
- 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 Xianhua, Zhou Hanwen, Chung Sunlin, et al. 2002. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of late Paleogene ultrapotassic magmatism in southeastern Tibet[J]. *International Geology Review*, 44: 559~574.

- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Wei Gangjian, *et al.* 2002. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of Cenozoic ultrapotassic lamprophyres in western Yunnan: Constraints on the composition of sub-continental lithospheric mantle [J]. *Geochimica*, 31(1): 26~34 (in Chinese with English abstract).
- Mckenzie D and Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere [J]. *Journal of Petrology*, 29: 625~679.
- Morimoto N, Fabries J, Ferguson K, *et al.* 1988. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(1): 55~76.
- Nisbet E G and Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149~160.
- Niu Xiaolu, Chen Bin and Ma Xu. 2009. Clinopyroxenes from the Fanshan pluton, Hebei [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 359~373 (in Chinese with English abstract).
- Peltzer G and Tapponnier P. 1997. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 2447~2483.
- 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: 1542~1554.
- Qian Xianggui and Lü Boxi. 2000. The petrographic features and genesis of Cenozoic alkali volcanic rock in the Three-River area, west Yunnan [J]. *Yunnan Institute of Geological Sciences*, 19: 152~170 (in Chinese with English abstract).
- Qiú Jiāxiāng and Liào Qūn 'ān. 1996. Petrogenesis and Cpx mineral chemistry of Cenozoic basalts from Zhejiang and Fujian of eastern China [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 17: 16~23 (in Chinese with English abstract).
- Seyler M and Bonatti E. 1994. Na, Al(IV) and Al(VI) in clinopyroxenes of subcontinental and suboceanic ridge peridotites: a clue to different melting processes in the mantle? [J]. *Earth Planet Science Letter*, 122: 281~289.
- Shen Ganfu and Lü Boxi. 2002. The Petrogenesis and Mineralization of the Cenozoic Intrusive Rocks in the Nujiang-Lancangjiang-Jinshanjia Area, Southwestern China [M]. Beijing: Geological press, 3~8.
- Streck M J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69: 595~622.
- Sun C M and Bertrand J. 1991. Geochemistry of clinopyroxenes in plutonic and volcanic sequences from the Yanbian Proterozoic ophiolites (Sichuan Province, China): Petrogenetic and geotectonic implications [J]. *Schweiz Mineralogische Petrologische Mitteilungen*, 71: 243~259.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R, *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 10: 611~616.
- Wang Jian, Li Jianping and Wang Jianghai. 2003. Shoshonitic magmatism in Dali-Jianchuan area, western Yunnan: a geochemical study of arc magmatism in a post-collisional strike-slip extensional setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 61~70 (in Chinese with English abstract).
- Wei Dongliang, Xia Bin, Zhang Yuquan, *et al.* 2005. The pyroxenes composition and petrochemical characteristics of Zhuopan-Liuhe alkali rock bodies in western Yunnan province, China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2): 15~19 (in Chinese with English abstract).
- Xia Ping and Xu Yigang. 2005. Domains and enrichment mechanism of the lithospheric mantle in western Yunnan: a comparative study on two types of Cenozoic ultrapotassic rocks [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(3): 326~337.
- Xie Yingwen and Zhang Yuquan. 1998. Amphiboles and pyroxenes in alkali-rich intrusions in eastern Qinghai-Xizang plateau and its adjacent areas [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(1): 90~96 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yingwen, Zhang Yuquan, Zhong Sunlin, *et al.* 1999. Trace element characteristics of the Cenozoic high-K alkaline magmatic rock series in the eastern Erhai, Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 75~83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuquan and Xie Yingwen. 1997. Geochronology of Ailao-Jinshanjia alkali-rich intrusive rocks and their Sr and Nd isotopic characteristics [J]. *Science in China (Series D)*, 40(5): 524~529.
- Zhang Zhaochong, John J Mahoney, Wang Fusheng, *et al.* 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the Emeishan flood basalt province, China: evidence for a plume-head origin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1538~1552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2002. Geochemistry of the two types of basalts of Emeishan basaltic province: Evidence for mantle plume-lithosphere interaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76: 229~238.
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng and Hao Yanli. 2005. Picrites from the Emeishan Large Igneous province: Evidence for the Mantle Plume Activity [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(1): 17~23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, *et al.* 2004. Geochemistry of picrites and associated basalts from the Emeishan Large Igneous Basalt Province and constraints on their source region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 171~180 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xin, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2003. Mineralogical characteristics and petrogenesis of deep-derived xenoliths in Cenozoic syen-

ite-porphyry in Liuhe, western Yunan provinced[J]. Earth Science Frontier, 10(3):93~104.

附中文参考文献

- 丛柏林. 1988. 攀西古裂谷的形成与演化[M]. 北京:科学出版社, 424.
- 黄小龙, 徐义刚, 杨启军, 等. 2007. 滇西晚始新世高镁富钾火山岩的地球化学特征及其岩石成因机制探讨[J]. 地球化学, 36(2): 120~138.
- 李献华, 周汉文, 韦刚健, 等. 2002. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约[J]. 地球化学, 31(1):26~34.
- 牛晓露, 陈斌, 马旭. 2009. 河北矾山杂岩体单斜辉石的研究[J]. 岩石学报, 25(2):359~373.
- 钱祥贵, 吕伯西. 2000. 滇西三江地区新生代碱性火山岩岩石学特征及成因[J]. 云南地质, 19:152~170.
- 邱家骥, 廖群安. 1996. 浙闽新生代玄武岩的岩石成因学与 Cpx 矿物化学[J]. 火山地质与矿产, 17:16~25.
- 沈敢富, 吕伯西. 2000. 西南三江地区新生代侵入岩的成岩与成矿[M]. 北京:地质出版社, 3~8.
- 王建, 李建平, 王江海. 2003. 滇西大理-剑川地区钾玄质岩浆作用:后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究[J]. 岩石学报, 19(1):61~70.
- 韦栋梁, 夏斌, 张玉泉, 等. 2005. 滇西卓潘-六合碱性岩的辉石成分及其岩石化学特征[J]. 矿物岩石, 25(2):15~19.
- 谢应雯, 张玉泉. 1998. 青藏高原东部邻区富碱侵入岩中的角闪石和辉石[J]. 矿物学报, 18(1):90~96.
- 谢应雯, 张玉泉, 钟孙霖, 等. 1999. 云南洱海东部新生代高钾碱性岩浆岩痕量元素特征[J]. 岩石学报, 15(1):75~82.
- 张招崇, John J Mahoney, 王福生, 等. 2006. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学地幔柱头部熔融的证据[J]. 岩石学报, 22(6):1538~1552.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽. 2005. 峨眉山大火成岩省中的苦橄岩-地幔柱活动的证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(1):17~22.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 78(2):171~180.
- 赵欣, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2003. 滇西六合地区新生代正长斑岩中深源包体的矿物学特征与成因意义[J]. 地学前缘, 10(3):93~104.