

地幔流体的交代作用

——来自碱性正长岩及其深源岩石包体的证据

宋祥峰, 刘显凡, 陶 专, 卢秋霞, 龙训荣

(成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:滇西玉龙县小桥头硅化霓辉正长斑岩中, 含有较多镁铁-超镁铁质深源包体岩石。经岩相学和电子探针及扫描电镜分析发现, 伴随交代蚀变, 寄主岩和各类镁铁-超镁铁质包体岩石中, 普遍发育沿粒间和矿物晶体裂隙或解理纹贯入或穿插的黑色不透明物质, 主要由微晶硅酸盐矿物和磁铁矿组成。本文研究认为, 硅酸盐矿物与磁铁矿在背散射电子图像中表现为熔离特征, 这种在透光显微镜下呈黑色不透明的微晶固体, 是引发交代蚀变、具熔浆流体特点和超临界流体性质的地幔流体交代作用的一种微观表现。

关键词:深源包体, 黑色不透明微晶固体, 超临界熔浆流体, 地幔流体交代, 碱性正长岩, 滇西小桥头

中图分类号: P542⁺.5; P588.15

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)04-0310-05

Mantle fluid metasomatism: evidence from alkali syenite and its deep xenoliths

SONG Xiang-feng, LIU Xian-fan, TAO Zhuan, LU Qiu-xia and LONG Xun-rong
(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: There are many deep xenoliths in silicified aegirine syenite porphyry of Xiaoqiaotou area, western Yunnan Province. A petrographic analysis combined with electron microprobe analysis and SEM shows that black opaque matters, whose composition is mostly of microcrystalline silicate and magnetite, are widely found running reticulately through mineral particles, crystals and cleavage cracks in association with metasomatic alteration in the mafic-ultramafic xenoliths and their host rocks. It is concluded that microcrystalline silicate and magnetite show characteristics of liquation in the back-scattered electron image. Such a microcrystalline solid, which assumes black opaque state under transmitted-light microscope and might have resulted in metasomatic alteration, is one of the direct microcosmic manifestations of mantle fluid metasomatism with characteristics of melted and supercritical fluids.

Key words: deep xenoliths; black opaque microcrystalline solid; supercritical and melted fluids; mantle fluid metasomatism; alkali syenite; Xiaoqiaotou area in western Yunnan

云南滇西地区自晚新生代以来, 受印度-亚欧板块碰撞和青藏高原整体快速抬升的影响, 深源岩浆活动发育, 沿哀牢山-金沙江一带产出达 800 km 长的新生代富碱侵入岩带, 构成了位于扬子地台西缘和青藏高原东缘之间非常活跃的新生代陆内变形

区。其中富碱斑岩及与其有关的多金属矿床星罗棋布, 并有多处产出深浅来源不同的各类包体岩石。前人对该区富碱斑岩及其中包体岩石的研究已有相当的基础, 公认富碱斑岩的成岩物质来源与地幔源区有关(邓万明等, 1998; Liu *et al.*, 1999; 毕献武等,

收稿日期: 2006-11-02; 修订日期: 2007-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40473027); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题基金项目(GPMR0509)四川省矿物学、岩石学、矿床学重点学科建设资助项目

作者简介: 宋祥峰(1981-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: song-xiangfeng@163.com。

2005,董方浏等,2005),但对流体交代作用的认识存在差异或争议。本文通过对滇西玉龙县小桥头岩体中深源包体的电子探针和扫描电镜研究,发现寄主岩和各类包体岩石中普遍发育的黑色不透明物质为高温熔浆过冷凝的微晶固体。研究认为,这种熔浆是以地幔流体的形式侵位渗透于小桥头岩体中进行交代浸染的一种表现。

1 小桥头岩体及其包体的岩石学特征

小桥头岩体位于滇西丽江市玉龙县石头乡小桥头村,岩石类型主体为硅化霓辉正长斑岩,岩石具似斑状结构,斑晶约占45%,由钾长石(20%)、霓辉石(10%)、斜长石(10%)及石英(5%)组成,其他偶见黑云母、白云母和锆石,其中霓辉石化学成分 SiO_2 :49.18%, TiO_2 :1.03%, Al_2O_3 :5.99%, FeO :15.72%, MnO :0.63%, MgO :13.11%, CaO :11.64%, K_2O :0.58%, Na_2O :1.98%;似基质约占55%,呈显微晶粒结构,主要由长石和部分碱性暗色矿物及少量硅质组成;从全岩化学成分看, SiO_2 :68.10%, TiO_2 :0.40%, Al_2O_3 :14.75%, Fe_2O_3 :1.31%, FeO :1.39%, MgO :0.92%, CaO :2.27%, Na_2O :4.85%, K_2O :4.44%, P_2O_5 :0.16%, SO_2 :0.01%, H_2O^+ :0.73%(本文数据)。如图1a所示,霓辉石斑晶中局部发育绿泥石化并伴随硅化,因此,斑晶中的少量石英和似基质中的少量硅质及化学成分中的 SiO_2 偏高应为硅化蚀变所致。此外,值得注意的是,在斑晶和似基质中遍布黑色不透明物质,过去均将其作为碳质、铁质或一般金属矿物浸染而未加重视。本文利用电子探针和电子显微镜对这一透光显微镜下的黑色不透明物质所做的分析,得到了新的发现和认识。

小桥头岩体侵入到第三系红色砂岩中,附近与之相似岩性的斑岩体同位素(Rb-Sr 法和 K-Ar 法)地质年龄值为38~35 Ma,由此可推断小桥头岩体为新生代的火成岩,且属始新世的可能性较大(孙志明等,1999)。

小桥头岩体中含有较多来源深浅不同的包体岩石,其中以深源暗色岩包体居多。包体岩石杂乱且分布不均,大小不一,大者直径数十厘米,小者1~2 cm,外形多呈浑圆状、椭圆状,部分棱角状,与寄主岩接触界面清楚,寄主岩一侧无烘烤冷凝边,而包体岩石一侧发育被烘烤的细粒反应边,因而属捕虏体无

疑。

深源暗色包体岩石类型主要有:蚀变石榴辉石岩、蚀变黑云石榴辉长岩、蚀变角闪岩和脉体为长英质(主要为石英,少量长石),基体为蚀变橄榄辉石岩的条带状混合岩,经显微镜鉴定并配合电子探针分析可见:①蚀变石榴辉石岩中主要原生矿物有富镁单斜辉石、含钙镁的铁铝榴石,主要蚀变矿物有角闪石、绿泥石;②蚀变黑云石榴辉长岩中主要原生矿物有富镁单斜辉石、紫苏辉石、钙铁榴石、拉长石,主要蚀变矿物有黑云母、绿泥石;③蚀变角闪岩的主要原生矿物有富镁单斜辉石、镁铝榴石,主要蚀变矿物有角闪石、褐帘石、绿泥石、黑云母;④条带状混合岩中的主要原生矿物有橄榄石、辉石,主要蚀变矿物有绢云母、绿泥石。在这些深源暗色包体中普遍发育沿粒间和矿物晶体裂隙或解理纹贯入或交代穿插的黑色不透明物质(图1b、c)。

2 深源包体中黑色不透明物质成分分析

表1中列出了穿插于深源包体中主要造岩矿物粒间、裂隙和解理缝中的黑色不透明物质的电子探针成分分析数据,图1d为蚀变角闪岩包体中黑色不透明物质的扫描电镜背散射电子图,图中两测点为能谱分析测点,其数据列于表2。

由图1d、表1和表2可以看出如下特征和规律:

(1)图1d反映的图像特征代表了贯穿于该岩体中寄主岩和各类包体的黑色不透明物质的基本物相特征,即在透光显微镜下呈黑色不透明的物质,在扫描电镜背散射电子图中表现为两部分:白色部分为组成原子量较高的微晶矿物,暗灰色部分为组成原子量较低微晶矿物,经能谱分析表明,前者为由铁和氧组成的微晶金属矿物,后者为似黑云母成分的微晶硅酸盐矿物,两部分物质呈熔离交生关系。由此表明,岩石中普遍发育的黑色不透明物质是以硅酸盐矿物为主,含有金属矿物的微晶固体。

(2)表1显示,黑色不透明物质中的硅酸盐矿物成分是不同的,一般规律为:沿结晶造岩矿物解理缝分布的网状黑色不透明物质中的硅酸盐成分接近所在矿物的成分;而穿插于结晶造岩矿物粒间和裂隙中的网状黑色不透明物质中的硅酸盐成分则与邻近矿物有明显差异;白色微晶金属矿物,经电子探针定量分析,其 FeO 含量达92%,依原子量和质量分数按 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 成分换算,其 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 成分的质

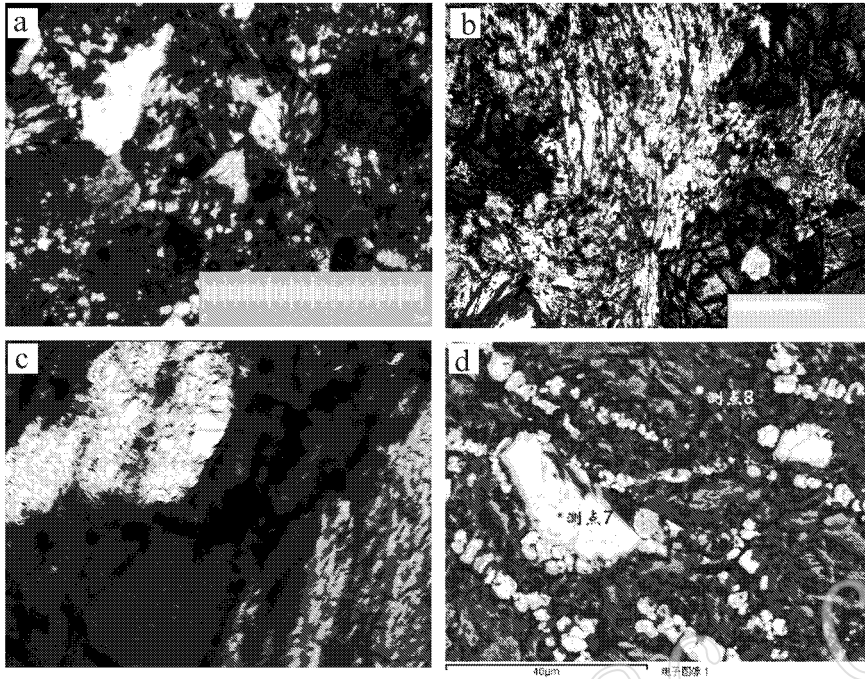


图1 黑色不透明物质在透光显微镜及扫描电镜下的照片

Fig. 1 The pictures of black opaque matters in transmitted-light microscope and SEM

a—硅化霓辉正长斑岩(XQT02-1)(含包体岩石的寄主岩)显微照片,霓辉石斑晶局部发育绿泥石化并伴随硅化,斑晶和似基质中遍布黑色不透明物质(+);b—蚀变角闪岩(XQT04-1)包体显微照片,角闪石被帘石和绿泥石或纤闪石交代,同时,黑色不透明物质呈网状或星点状分布(-);c—蚀变黑云石榴辉长岩(XQT03-1)包体显微照片,紫苏辉石(暗色)与拉长石(白色)共生,两矿物中贯穿网状黑色不透明物质(-, 10×25);d—蚀变角闪岩(XQT04-1)包体中黑色不透明物质的扫描电镜背散射电子图,图中标注的测点即对应表2数据

a—micrograph of silicified aegirine-syenite-porphry(XQT02-1)(host rock),aegirine-augite phenocrysts with partly developed chloritization and silicization, black opaque matters are found all over the phenocrysts and quasi-matrix(+);b—micrograph of altered amphibolite(XQT04-1) xenolith, hornblende is replaced by epidote and chlorite or uralite, black opaque matters are of reticulate or star-spot distribution(-);c—micrograph of altered biotite-garnet-gabbro(XQT03-1) xenolith, hypersthene(dark) and labradorite(white) assume intergrowth, and black opaque matters show reticulate transfixion state in the two mineral(-, 10×25);d—back scattered electrons graph of SEM of black opaque matters in altered amphibolite(XQT04-1) xenolith, the labeled points in the figure correspond to data in Table 2

量分数接近100%,由此推断该微晶矿物应为磁铁矿。

(3)表2数据尽管具半定量性质,但它反映的成分种类和数据特征与电子探针定量分析数据基本一致。因此,通过能谱分析测定,证明了电子探针定量成分分析中明显不足100%的数据中,没有重要成分丢失,只是因测不出H原子而缺失水的质量分数。

(4)由于黑色不透明物质同时贯穿寄主岩和包体,而且,经电子探针测定,在寄主岩(硅化霓辉正长斑岩)中的黑色不透明物质的白色微晶矿物仍为磁铁矿,其微观形貌和成分特征均与包体中测得的微晶金属矿物基本一致,这不仅表明寄主岩和包体中黑色不透明物质成分的同性和贯入的同时性,更说明黑色不透明物质的贯入发生于富碱岩浆捕虏包体并固结成岩的同时或其后。

(5)通过对各类蚀变深源包体显微镜下系统鉴定显示,其矿物组合总体上表现为暗色矿物的退变系列组合,即辉石(单斜辉石为主,少量斜方辉石)→

角闪石→黑云母→水黑云母→斜绿泥石,这种退变普遍伴随黑色不透明物质的贯入,并同时导致硅化蚀变。因此,寄主岩和包体中发生的暗色矿物退变和硅化蚀变均源自黑色不透明物质对寄主岩和包体的交代作用。

3 关于黑色不透明物质性质的讨论

3.1 晶质、隐晶质、微晶质或非晶质固体?

寄主岩和各类深源包体中普遍发育沿粒间、矿物裂隙或解理纹贯入或穿插的物质,在透光显微镜下呈黑色不透明状,过去均把其作为碳质、铁质或金属矿物浸染而未加以注意。然而,本次研究发现事实并非如此。

众所周知,在透光显微镜下呈黑色不透明物质可能有3种情况:黑色玻璃质、金属矿物或透明矿物晶体粒径小于 0.01mm ($10\mu\text{m}$)。经扫描电镜观察

表 1 小桥头深源包体中黑色不透明物质电子探针分析数据

 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of black opaque matters in deep xenoliths from Xiaoqiaotou area

测点	编号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Total	鉴定结果
1	XQT04-1-6	蚀变角闪岩	33.81	0.20	21.59	14.29	0.39	14.30	0.03	0.16	9.78	0.03	94.59	似黑云母
2	XQT04-1-7	蚀变角闪岩	33.15	0.24	20.83	14.2	0.38	14.22	0.23	0.17	9.55	-	92.96	似水黑云母
3	XQT01-4	蚀变辉石岩	47.37	0.51	8.90	10.59	0.31	14.70	11.37	1.12	0.31	0.17	95.34	似单斜辉石
4	XQT05-1-2	条带状混合岩	63.19	0.02	20.59	0.37	0.02	0.09	4.29	9.20	0.64	0.02	98.43	似钠长石
5	XQT03-1-5	蚀变黑云石榴辉长岩	55.26	0.04	26.88	0.90	0.02	0.02	9.63	5.95	0.26	0.01	98.96	似拉长石
6	XQT03-1-8	蚀变黑云石榴辉长岩	50.21	0.07	3.05	23.59	0.44	22.66	0.32	0.06	-	0.29	100.68	似紫苏辉石

由中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针室郑曙分析,仪器型号:JXA-8100;测试电压:15kV;测试电流:20nA;电子探针束斑直径:1 $\mu\text{m}\pm$ 。

表 2 蚀变角闪岩包体(XQT04-1)中黑色不透明物质的能谱分析数据

Table 2 Energy spectrum analyses of black opaque matters in altered amphibolite xenolith(XQT04-1)

元素		O	Fe	Mg	Al	Si	K	总量	鉴定结果
测点 7	$w_B/\%$	34.91	65.09					100	成分为铁和氧的微晶金属矿物
	$x_B/\%$	65.18	34.82					100	
测点 8	$w_B/\%$	49.23	9.05	7.85	10.55	16.52	6.80	100	似黑云母成分的微晶硅酸盐矿物
	$x_B/\%$	65.26	3.44	6.85	8.29	12.48	3.69	100	

由国土资源部成都地质矿产研究所分析测试中心电镜能谱实验室徐金莎分析,数据测点位置对应图 1d 所示;扫描电镜型号:日立 S-4800 型(冷场发射电子显微镜);配套能谱仪型号:牛津能谱 250 型;能谱射线束斑直径:4 $\mu\text{m}\pm$ 。

和能谱测定,在背散射电子图(图 1d)中,透光显微镜下呈黑色不透明的物质,成分以硅酸盐矿物为主,部分为磁铁矿,其粒径普遍小于 10 μm ,一般在 5 μm 左右,可见晶体形态,结合物质成分测定,以硅酸盐矿物为主,部分为以 FeO 为主的金属矿物。因此,本次研究的黑色不透明物质在透光显微镜下呈隐晶质,在电子显微镜下呈微晶(晶质)固体,可排除黑色玻璃质固体性质。

3.2 熔浆流体或热液流体?

前已述及,呈脉状、网脉状或呈点、团状分布于寄主岩和深源包体中的黑色不透明微晶固体,其产状特征本身即表明是一种成岩后的流体作用结果。然而,这种流体作用显然不同于一般的热液流体作用,可有以下几点分析讨论:

(1)从成分上看,为硅酸盐和磁铁矿,不是一般的所谓的热卤水。

(2)热液流体作用于晶质矿物,表现为在原矿物基础上通过固-固转化的方式直接交代生成新的晶质矿物,不出现隐晶或非晶质固相。

(3)隐晶或非晶质固相一般出现在熔浆流体快速过冷凝条件下。

(4)图 1d 中显示磁铁矿与硅酸盐矿物间呈熔离交生关系,这种现象类似于 Bea 等(2001)研究认为的碱性熔浆在冷却过程中发生的熔离。

因此,小桥头岩体中贯穿的网脉状黑色不透明物质应为熔浆流体在交代寄主岩和包体的过程中过

冷凝形成的隐晶-非晶质固体。Coltoti 等(2004)认为这种玻璃质是一种交代媒介,为钠碱性硅酸盐熔浆。在解理缝和矿物裂隙中的黑色不透明物质成分多与所在矿物近似,这表明该熔浆流体对先成矿物具有一定程度的熔融交代性质。

3.3 地幔流体或岩浆流体?

一般所说的岩浆流体应是岩浆和岩浆期后热液的总称。岩浆具有自身结晶成岩的功能,岩浆期后热液则是来自岩浆结晶成岩过程分泌的热液流体。显然,本文所定义的熔浆流体,既不具有自身结晶成岩的功能,也不具备热液流体引发固-固交代转化的性质,而比较接近或符合地幔流体的基本特性。

目前对地幔流体有几种不同的认识:①杜乐天(1988)认为地幔流体就是产生于地幔的氢、卤素、碱、碳、氧、氮、硫间的化合物热流体,其中不包括硅酸盐;② Shmulovich 等(1995)定义的地幔流体富含地球内部原始成分,同时包含地壳再循环物质的超临界挥发分系统;③曹荣龙等(1995)认为地幔流体是由富含地球内部原始的气体元素(如³He、³⁶Ar等)和挥发分(如地幔 CO₂、陨石 S、深源 H₂O等)组成的气体、溶液和挥发分饱和的富碱(K、Na、Li等)硅酸盐熔体;④孙丰月等(1995)和刘丛强等(2001)认为幔源 C-H-O 流体是一种高温高密度的超临界流体,其中的挥发分主要是 H₂O 和 CO₂,含有 Cl、F、S、P 及惰性气体等组分,可溶解大量的常量及微量元素;⑤ Schrauder 等(1994)通过实验研究表明,地幔流体介质具有多样性,既可以是

熔体(如碳酸岩熔浆),也可以是富水的流体。地幔流体交代作用往往与地幔岩浆作用有着密切的关系,富碱岩浆即被认为源自被地幔流体交代富集的地幔源区(喻学惠,1995;喻学惠等,2006),而地幔流体也可进一步伴随富碱岩浆上侵运移捕虏包体,并在结晶成岩过程中交代浸染寄主岩和岩石包体。

4 结论

小桥头岩体和各类深源包体中普遍发育沿粒间、矿物晶体裂隙或解理纹贯入或穿插的黑色不透明物质和蚀变特征。岩相学结合电子探针和扫描电镜分析表明,蚀变深源包体中普遍发育暗色矿物的退变顺序为辉石(单斜辉石为主,少量斜方辉石)→角闪石→黑云母→水黑云母→斜绿泥石,并普遍伴随硅化和透光显微镜下呈黑色不透明的微晶固体。其矿物成分以微晶硅酸盐为主,部分微晶磁铁矿,这样的物质组成,决定这种物质活动不是一般的地壳热卤水所为。结合熔体与热液、地幔流体与岩浆流体行为特征差异分析,认为这种由硅酸盐和磁铁矿熔离组成的,在透光显微镜下呈黑色不透明的微晶固体,是一种具熔浆流体特点和超临界流体性质的地幔流体交代作用的一种微观表现。这一地幔流体交代作用微观踪迹的揭示,对于分析和论证滇西地区多金属成矿的深部地质作用规律具有重要的现实意义。

致谢 本文研究工作中得到中国地质大学电子探针实验室郑曙高级工程师和成都地质矿产研究所电镜能谱实验室徐金沙高级工程师的热情支持、帮助和指导,在此表示衷心感谢!

References

Bea F, Arzamastsev A, Montero P, *et al.* 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5): 554~566.

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 113~124 (in Chinese with English abstract).

Cao Ronglong and Zhu Shouhua. 1995. The mantle fluid and metallogenesis[J]. *Advence in Earth Sciences*, 10(4): 324~329 (in Chinese with English abstract).

Coltorti M, Beccaluva L, Bonadiman C, *et al.* 2004. Amphibole genesis via metasomatic reaction with clinopyroxene in mantle xenoliths from Victoria Land, Antarctica[J]. *Lithos*, 75(1~2): 115~139.

Deng Wanning, Huang Xuan and Zhong Dalai. 1998. The alkali-rich porphyries of the northern of Jin Shajiang River in Western Yunnan and its relationship with intraplate deformation[J]. *Science in China (D)*, 28(2): 111~117 (in Chinese).

Dong Fangliu, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ of Himalayan alkaline rocks in Lanping basin, Yunnan Province, and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2): 103~109 (in Chinese with English abstract).

Du Letian. 1988. H-A-C-O-N-S mantle icho[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 12(1): 87~94 (in Chinese with English abstract).

Liu Congqiang, Huang Zhilong, Li Heping, *et al.* 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 231~243 (in Chinese with English abstract).

Liu Xianfan, Zhan Xinzhi, Gao Zhenmin, *et al.* 1999. Deep xenoliths in alkalic porphyry, Liuhe, Yunnan, and implications to petrogenesis of porphyry and associated mineralizations[J]. *Science in China (Series D)*, 42(6): 627~635.

Schrauder M and Navon O. 1994. Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng Botswana[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(2): 761~771.

Shmulovich K I, Yardley W D and Conchar G. G. 1995. Fluids in The Crust[M]. Moscow: Chapman and Hall Press.

Sun Fengyue and Shi Zhunli. 1995. On the mantle-derived C-H-O fluid system and its significance to some geologic processes within continental plate[J]. *Earth Science Frontiers*, 2(1~2): 167~174 (in Chinese with English abstract).

Sun Zhiming, Li Xingzhen, Jiang Xinsheng, *et al.* 1999. The discovery and significance of the deep-seated enclaves from the Xiaoqiaotou rock body in Shigu, Western Yunnan[J]. *Tethyan Geology*, (23): 81~87 (in Chinese with English abstract).

Yu Xuehui. 1995. Mantle metasomatism: progresses, problems and countermeasures[J]. *Advence in Earth Sciences*, 10(4): 330~335 (in Chinese with English abstract).

Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Zeng Pusheng, *et al.* 2006. A study on the mantle xenoliths in the Cenozoic volcanic rocks from Maguan Area, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 621~630 (in Chinese with English abstract).

附中中文参考文献

毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 21(1): 113~124.

曹荣龙, 朱寿华. 1995. 地幔流体与成矿作用[J]. *地球科学进展*, 10(4): 324~329.

邓万明, 黄萱, 钟大赉. 1998. 滇西金沙江带北段的富碱斑岩及其与板内变形的关系[J]. *中国科学(D)*, 28(2): 111~117.

董方浏, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2005. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 103~109.

杜乐天. 1988. 幔汁 H-A-C-O-N-S 流体[J]. *大地构造与成矿学*, 12(1): 87~94.

刘丛强, 黄智龙, 李和平, 等. 2001. 地幔流体及其成矿作用[J]. *地学前缘*, 8(4): 231~243.

孙丰月, 石准立. 1995. 试论幔源 C-H-O 流体与大陆板内某些地质作用[J]. *地学前缘*, 2(1~2): 167~174.

孙志明, 李兴振, 江新胜, 等. 1999. 滇西小桥头岩体深源包体的发现及其意义[J]. *特提斯地质*, (23): 81~87.

喻学惠. 1995. 地幔交代作用: 研究进展、问题及对策[J]. *地球科学进展*, 10(4): 330~335.

喻学惠, 莫宣学, 曾普胜, 等. 2006. 云南马关地区新生代碧玄岩中地幔包体研究[J]. *岩石学报*, 22(3): 621~630.