

吉林双辽地区橄榄岩包体中熔体-岩石作用特征 及其对地幔交代作用的启示

于宋月^{1,2}, 徐义刚¹, 黄小龙¹, 葛文春³, 马金龙¹

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 吉林双辽地区古近纪玄武岩中一方辉橄榄岩包体记录了上地幔交代作用的信息。原生斜方辉石被交代成因的单斜辉石和橄榄石所围绕, 或形成反应边结构, 或斜方辉石残留在次生单斜辉石中。这些反应结构仅出现在尖晶石的周围。电子探针分析表明次生单斜辉石具有高 $Mg^\#$ 、 $Cr^\#$ 和 CaO/Al_2O_3 比值, 次生橄榄石高 $Mg^\#$ 、 CaO 和 Cr_2O_3 , 被交代的尖晶石边部高 $Cr^\#$ 、 CaO 。由于交代作用并未影响橄榄岩体系的 $Mg^\#$, 而且熔体-岩石反应结构指示 $Opx(\text{斜方辉石}) + Sp(\text{尖晶石}) + \text{熔体(I)} \rightarrow Cpx(\text{单斜辉石}) + Ol(\text{橄榄石}) + \text{熔体(II)}$, 结合实验以及文献资料, 认为双辽地区的岩石圈地幔受到了硅酸盐熔体的交代。这种交代导致橄榄岩中斜方辉石逐渐减少, 单斜辉石和橄榄石逐渐增加, 从而使方辉橄榄岩渐变成易剥橄榄岩。这种交代现象可能发生在软流圈-岩石圈接触带上的熔-岩反应区, 暗示了古近纪双辽地区岩石圈减薄和软流圈上涌导致的软流圈-岩石圈的相互作用仍在继续。

关键词: 橄榄岩包体; 地幔交代作用; 反应结构; 双辽地区; 吉林

中图分类号: P588.12⁺5; P511

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)03-0213-10

Characteristics of melt-rock reaction in Shuangliao peridotite xenoliths and their implications to mantle metasomatism

YU Song-yue^{1,2}, XU Yi-gang¹, HUANG Xiao-long¹, GE Wen-chun³ and MA Jin-long¹

(1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: A harzburgite xenolith sample from Paleogene basalts in Shuangliao area of Jilin Province records the information of upper mantle metasomatism. Primary orthopyroxenes are surrounded by secondary clinopyroxenes and olivines, forming reaction texture or existing as residues in secondary clinopyroxenes. These phenomena appear around spinel only. Electronic probe analyses reveal that secondary clinopyroxenes are characterized by high $Mg^\#$, $Cr^\#$ and CaO/Al_2O_3 , secondary olivines by high $Mg^\#$, CaO and Cr_2O_3 content, and the metasomatized rim of spinels by high $Cr^\#$ and CaO . As metasomatism had no influence on $Mg^\#$ in peridotite, and the melt-rock reaction proceeded in order of $Opx + Sp + \text{melt(I)} \rightarrow Cpx + Ol + \text{melt(II)}$, the authors consider that the lithospheric mantle in Shuangliao area was metasomatized by carbonate melt or silicate melt rich in carbonate. This conclusion is based on experiments and literature. The metasomatism resulted in decreasing content of orthopyroxene, increasing contents of clinopyroxene and olivine in peridotite, and the transformation from harzburgites

收稿日期: 2006-09-28; 修订日期: 2006-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40673038, 49925308); 中国科学院百人计划资助项目

作者简介: 于宋月(1979-), 男, 博士研究生, 地球化学专业, 岩石地球化学方向, E-mail: ysy@gig.ac.cn。

to wehrlites. This metasomatism may occur in the melt-rock reaction zone located in the asthenosphere-lithosphere boundary, suggesting that the asthenosphere-lithosphere interaction resulting from lithosphere thinning and asthenosphere upwelling remained active in Shuangliao area in Early Tertiary.

Key words: peridotite xenoliths; mantle metasomatism; reaction texture; Shuangliao area; Jilin Province

大陆岩石圈地幔的重要特征之一是其高度的化学不均一性(Menzies, 1990)。这种不均一性与不同程度的熔体抽提作用和后来的熔体-岩石相互反应有关(Kelemen *et al.*, 1992; 徐义刚, 1998)。熔体-岩石反应的表现形式有隐性交代和显性交代两种,前者以富集不相容元素而不改变矿物组成为特征;后者则出现明显的交代矿物,如角闪石、云母、磷灰石、碳酸盐等(Menzies and Hawkesworth, 1987)。近年来的研究证实显性交代作用的产物也涉及到长石、橄榄石和辉石(Kelemen, 1995; Ionov *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 1996)。有关构造橄榄岩体和蛇绿岩的研究表明,涉及橄榄石和辉石的熔体-岩石反应在规模上远远超过了富挥发分交代矿物生成反应,成为导致地幔不均一性形成的主要因素之一。例如,古老克拉通下亏损方辉橄榄岩的形成与熔体-岩石反应过程中单斜辉石被斜方辉石所替代,并伴随橄榄石的溶解有关(Kelemen *et al.*, 1998)。另一种反应是斜方辉石被单斜辉石所替代,并伴随橄榄石的沉淀(Xu *et al.*, 1996; Ionov *et al.*, 2005)。虽然这两种机制的重要性已为人们共识,但相关的岩相学证据还不多,另外,对相关的交代介质前人更有不同的看法。本文报道了吉林双辽地区橄榄岩包体中的熔体-岩石反应特征,通过薄片观察和电子探针分析等工作来揭示熔体-岩石反应特点,探讨交代介质性质及交代作用对岩石圈地幔演化的影响。

1 地质背景和样品分析方法

双辽位于松辽盆地的东南缘,双辽地区火山群包括勃勃图山、敖宝山、玻璃山、大哈拉巴山、小哈拉巴山、大吐尔基山、小吐尔基山和石头山等八座盾状火山熔岩锥(图1),喷发年龄主要在40~60 Ma左右,大吐尔基山喷发较早,约86.22 Ma(刘嘉麒, 1987; 余扬, 1987)。火山群位于松辽盆地的东南隆起区,中生代盖层厚度约800~2000 m,远小于中央凹陷区(>6000 m)。遥感解译资料显示本区发育多条基底断裂,这些断裂主要分布在两种不同性质的次一级盆地构造单元的交界处,延伸数十到上百公

里,它们的活动对双辽火山群活动起到重要控制作用。和东北其他地区新生代玄武岩一样,双辽火山群也产出大量的橄榄岩包体。笔者采集的包体产于勃勃图、敖宝、玻璃3座山,包体数量大,直径4~10 cm,主要类型有尖晶石二辉橄榄岩尖晶石方辉橄榄岩和少量辉石岩。另外,中国东部含包体玄武岩喷发都在新近纪到第四纪,而双辽含包体玄武岩的喷发时代则为古近纪,这个特殊性及其暗示的本区地幔演化意义值得关注。刘嘉麒(1987)做了本区玄武岩的K-Ar年代学研究,余扬(1987)对本区的玄武岩做了较详细的研究,包括年代学、岩石学和地球化学的工作。本文则通过对橄榄岩包体的岩石学和地球化学的研究来探讨本区上地幔的演化过程。

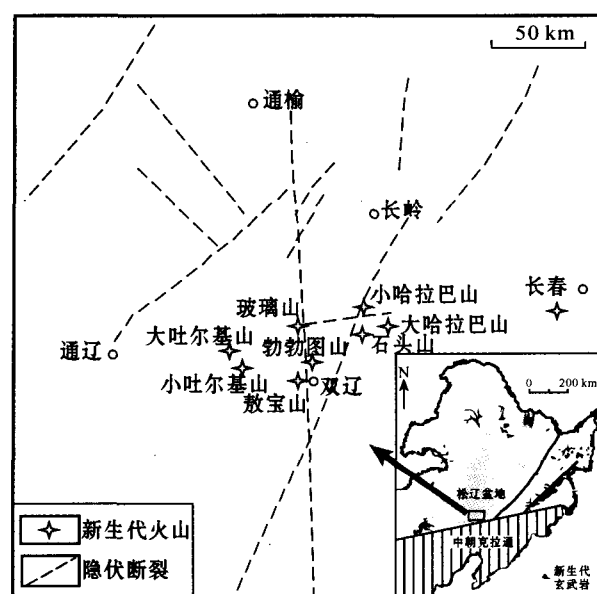


图1 双辽地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Shuangliao area

样品 BLS-2 采自吉林双辽的玻璃山(寄主玄武岩 K-Ar 年龄为 48.4 ± 1.74 Ma; 刘嘉麒, 1987), 椭球体状, 长轴约 5~6 cm, 遭受过地表轻微蚀变。样品处理和分析工作是在中国科学院同位素年代学和地球化学重点实验室完成的。将选好的橄榄岩样品粉碎至粒径小于 200 目, 考虑到样品的蚀变影响, 将粉末用少量 1N 的 HCl 浸泡, 同时进行超声波震荡, 然后用 Milli-Q 水清

洗,烘干。全岩主量元素成分用 X 射线荧光光谱分析(XRF),矿物主量元素成分和背散射图象(BSEI)用日本 JEOL 公司的 JXA-8100 电子探针分析获得,分析条件:加速电压 15 kV,束流 $3.000 \pm 0.002 \text{E-}08 \text{ (A)}$,束斑 $1 \mu\text{m}$ 。采用美国 SPI 公司的标样校正。

2 岩相学特征

2.1 原生矿物组合

BLS-2 样品为尖晶石方辉橄榄岩,原生矿物为橄榄石(Ol,82.9%)、斜方辉石(Opx,13.1%)、单斜辉石(Cpx,2.6%)和尖晶石(Sp,1.2%)。具中-细粒变晶结构(图 2a),矿物颗粒直径 1~2 mm。尖晶石具有定向性,常见三连点结构,暗示可能经历了重结晶过程。

2.2 交代矿物组合

样品的交代矿物组合为次生的单斜辉石和橄榄石,主要分布在尖晶石周围(图 2b~d)。另外,原生单斜辉石受交代影响的部分具有海绵边结构(图 2a)。背散射图像(BSEI)显示斜方辉石具有明显的

反应结构(图 2d),斜方辉石的边缘被侵蚀呈港湾状,并被狭长条带状单斜辉石包围,单斜辉石的外部又被橄榄石所围绕。通常,交代成因的橄榄石与尖晶石相接触(图 2f)。随着交代程度的增强,斜方辉石呈残留颗粒出现在次生单斜辉石内部(2c、2e),后者又被橄榄石所围绕。为了便于描述,本文将包含残留斜方辉石的大片单斜辉石称为 Cpx I;而在大粒斜方辉石周围的细小单斜辉石称为 Cpx II,其中 Cpx I 中含有蠕虫状的玻璃体。有的次生橄榄石(OI I)内部含有残留的单斜辉石(图 2d),受交代影响的尖晶石边部有锯齿状边(图 2e)。

3 分析结果

3.1 原生矿物化学成分特征

全岩和原生矿物化学成分列于表 1。橄榄石具有高 Fo(91.2);斜方辉石占全岩约 13.1%, $\text{Mg}^\#$ 为 92.3;原生单斜辉石 $\text{Mg}^\#$ 为 92.7;尖晶石具有高 Cr_2O_3 (41.65%), $\text{Cr}^\#$ 为 50。双辽地区橄榄岩中单

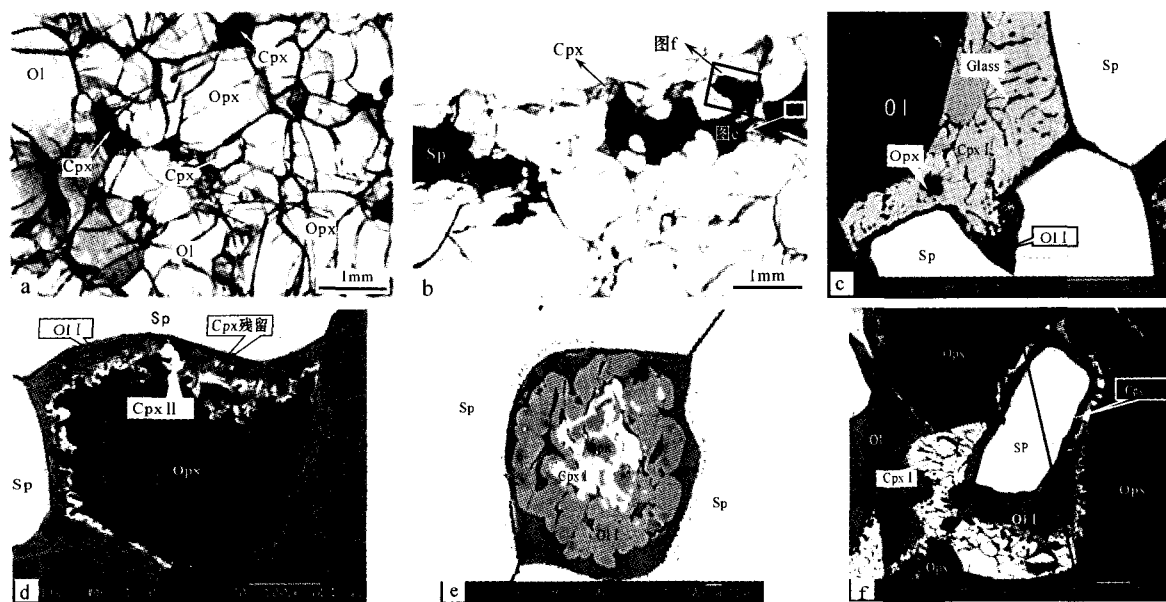


图 2 BLS-2 样品的矿物组成和结构

Fig. 2 Mineral assemblage and texture in sample BLS-2

a—原生矿物组成和结构(单偏光);b—围绕在尖晶石(Sp)周围的次生矿物(单偏光);c—次生的 I 型单斜辉石(Cpx I)和次生的橄榄石(OI I),其中 Cpx I 含有蠕虫状玻璃体(Glass),并有残留的斜方辉石(Opx)(背散射);d—斜方辉石边部围绕的条带状次生橄榄石和单斜辉石,尖晶石边部变成筛孔状(背散射);e—尖晶石内部的斜方辉石捕虏晶也有反应边结构(背散射);f—尖晶石周围的次生橄榄石和单斜辉石,黑色箭头指示的是电子探针打点分析的路线(背散射)

a—primary mineral assemblage and texture (plane polarized); b—secondary minerals surrounding spinels (plane polarized); c—secondary olivine and secondary type I clinopyroxene with vermicular glass inside(BSE); d—zoned secondary olivine and clinopyroxene surrounding primary orthopyroxene (note sieve textured rim of spinel)(BSE); e—reaction texture of orthopyroxene inclusion(BSE); f—secondary olivine and clinopyroxene surrounding spinel, black arrow shows the path of EPMA analysis(BSE)

表 1 BLS-2 样品全岩和各矿物主量元素成分

 $w_B/\%$

Table 1 Major element composition of whole rock and minerals of sample BLS-2

全岩成分		矿物成分				
			Ol	Opx	Cpx	Sp
SiO ₂	42.60	SiO ₂	41.04	56.13	53.27	0.04
TiO ₂	0.01	TiO ₂	0.02	0.03	0.10	0.15
Al ₂ O ₃	0.81	Al ₂ O ₃	0.03	1.93	3.58	27.53
Cr ₂ O ₃	0.49	Cr ₂ O ₃	0.04	0.56	1.59	41.65
Fe ₂ O ₃	9.18	FeO	8.71	5.34	2.27	14.05
MnO	0.12	MnO	0.10	0.14	0.08	0.27
NiO	0.18	NiO	0.14	0.10	0.05	0.19
MgO	46.44	MgO	49.98	35.37	16.03	16.46
CaO	0.65	CaO	0.04	0.67	20.01	0.00
Na ₂ O	—	Na ₂ O	0.01	0.13	1.76	0.02
Total	100.08	总量	100.08	100.39	98.74	100.36
烧失量	0.26	矿物含量	82.9	13.1	2.6	1.2
Mg [#]	91.46	Mg [#]	91.17	92.27	92.71	67.83

$$Mg^{\#} = Mg / (Mg + \sum Fe) \times 100, \text{下同。}$$

斜辉石的 Al₂O₃、TiO₂ 含量随 Mg[#] 的增大而变小, 这种成分变化趋势与部分熔融有关。Mg[#] 越高, TiO₂ 含量越小说明样品经历的部分熔融程度越大。样品 BLS-2 落在双辽地区橄榄岩成分变化范围的高 Mg 一端(图 3a), 说明它经历了较高级度的部分熔融, 与其方辉橄榄岩的岩石类型相吻合。不过, 在 Mg[#]-Na₂O 图解(图 3b)中, 因原生单斜辉石中 Na₂O 含量明显偏高(1.76%)而落在部分熔融趋势外。岩石中不相容元素含量的升高, 可能说明样品经历过一期隐性交代作用(Frey and Prinz, 1978)。值得注意的是, 在通常情况下, Ti 和 Na 是单斜辉石中的不相容元素, 应该具有相同的成分变化特点, 但在 BLS-2 样品中的 Ti 符合部分熔融趋势, 而 Na 可能反映了地幔交代作用的特征。单斜辉石中 Na-Ti

的分异可能暗示引起隐性地幔交代的介质与碳酸盐熔体有关(Ionov *et al.*, 1993)。根据 Brey 和 Kohler 的二辉石温度计计算的样品平衡温度约 979℃, 和其他双辽橄榄岩样品一样具有比较高的平衡温度(作者未发表数据)。

3.2 交代矿物化学成分特征

交代成因的单斜辉石与原生单斜辉石的平均成分存在差异(表 2), 主要表现在前者 Al₂O₃、Na₂O 含量下降, CaO/Al₂O₃ 比值、Mg[#] 和 Cr[#] 显著升高, TiO₂ 含量保持不变, 成分的变化范围较大, 落在双辽地区橄榄岩的成分变化范围之外(图 3)。另外值得注意的是原生单斜辉石中 Na₂O 的异常富集。在单斜辉石的 Wo-En-Fs 的三端员组分图解中(图 3f), 次生单斜辉石的变化范围非常大, 超出了

表 2 两种类型次生单斜辉石成分和原生单斜辉石矿物成分平均值比较

 $w_B/\%$

Table 2 Comparison between mineral compositions of two types of secondary clinopyroxenes and average compositions of primary clinopyroxenes

	I 型 Cpx					II 型 Cpx					原生 Cpx
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	53.44	53.50	53.62	54.55	54.22	53.86	53.99	55.10	55.45	54.82	53.27
TiO ₂	0.14	0.17	0.50	0.10	0.06	0.17	0.17	0.03	0.08	0.14	0.10
Al ₂ O ₃	1.56	1.88	2.53	1.77	2.15	0.86	1.21	0.52	0.76	0.62	3.58
Cr ₂ O ₃	1.82	2.08	1.36	1.42	1.58	1.74	0.76	0.90	1.03	0.77	1.59
FeO	2.21	2.25	2.23	2.2	2.30	2.99	3.24	2.75	2.66	3.04	2.27
MnO	0.13	0.10	0.05	0.10	0.11	0.15	0.11	0.10	0.07	0.11	0.08
NiO	0.01	0.08	0.05	0.05	—	0.04	0.05	0.06	0.05	0.10	0.05
MgO	17.62	17.59	17.59	18.07	17.55	19.29	21.53	19.51	19.32	20.29	16.03
CaO	21.52	21.83	20.51	21.13	21.24	19.12	17.53	20.44	20.26	19.26	20.01
Na ₂ O	0.82	0.81	0.71	0.81	0.87	0.82	0.48	0.51	0.65	0.60	1.76
Total	99.28	100.28	99.13	100.20	100.08	99.03	99.06	99.92	100.32	99.73	98.74
Mg [#]	93.50	93.38	93.43	93.65	93.22	92.07	92.29	92.74	92.89	92.33	92.71
CaO/Al ₂ O ₃	13.80	11.64	8.12	11.93	9.87	22.26	14.50	39.16	26.73	31.07	5.58

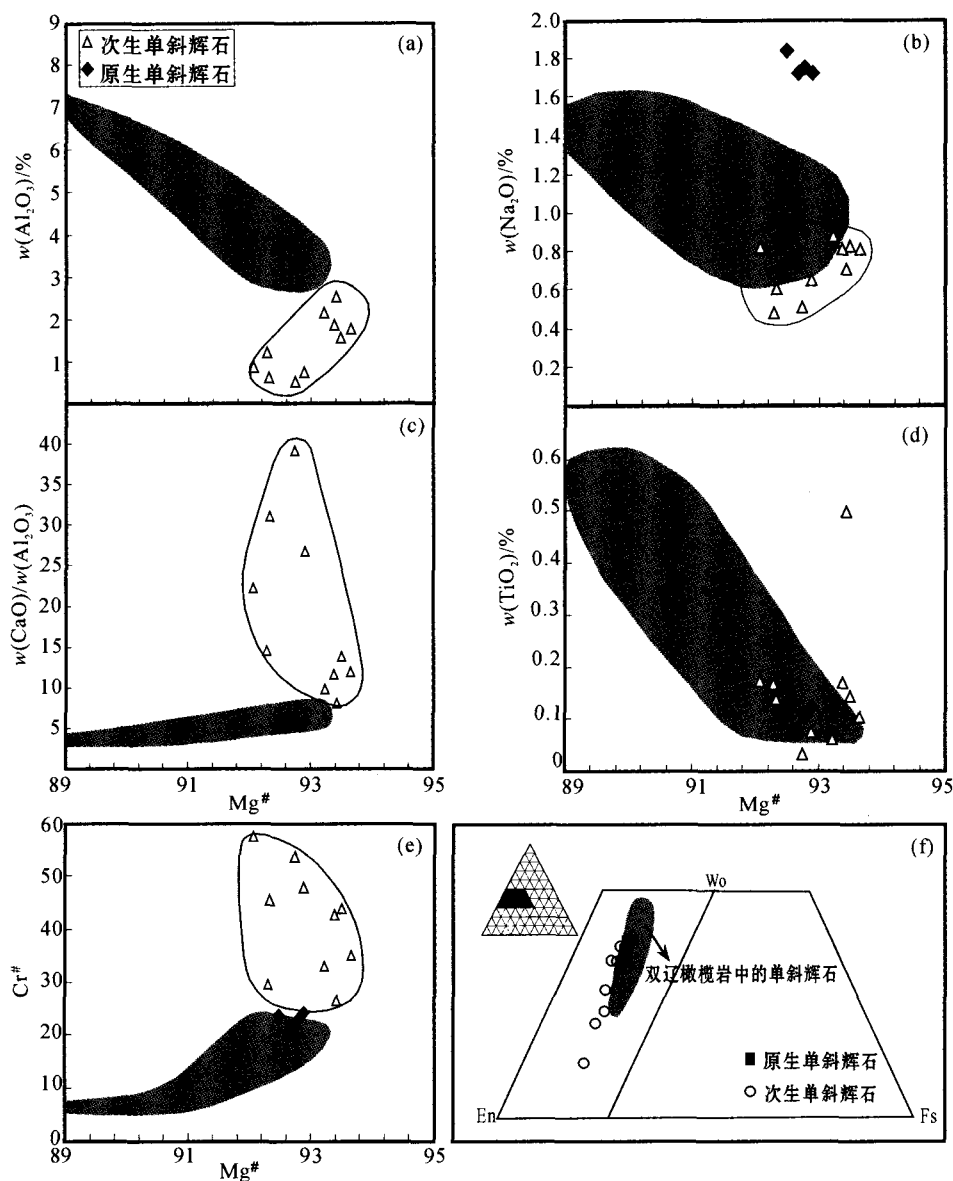


图3 BLS-2样品中次生和原生单斜辉石的化学成分对比

Fig. 3 Componential comparison between secondary and primary clinopyroxenes in the sample BLS-2

a~e—单斜辉石中 Al_2O_3 、 Na_2O 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 TiO_2 、 $\text{Cr}^\#$ 与 $\text{Mg}^\#$ 的相关图解, 灰色区域为双辽地区 16 个橄榄岩样品中单斜辉石的

成分变化范围(作者未发表数据, 下同); f—单斜辉石的三端员分类图解, 次生单斜辉石分散在 Wo 和 En 两端员之间

a~e—plots of Al_2O_3 , Na_2O , $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, TiO_2 , $\text{Cr}^\#$ against $\text{Mg}^\#$ for clinopyroxene from sample BLS-2, the shaded fields represent the compositional range of clinopyroxene for 16 peridotite xenoliths from Shuangliao (unpublished data, the same below); f— Wo - En - Fs triangle plot for clinopyroxene, secondary clinopyroxene shows a wide composition range between Wo and En

双辽橄榄岩的范围, 而且基本只在 Wo 和 En 两个单元之间变化, 说明其成分主要受 Ca 、 Mg 的控制。Cpx I 成分相对均一, Cpx II 的化学成分则很不均一, 而且两者具有不同的化学成分(表 2), Cpx I 中 Na_2O 、 Al_2O_3 含量和 $\text{Mg}^\#$ 比 Cpx II 要高, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值要低。

同原生橄榄石相比, 次生橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 无显著变化, 但其 Al 、 Cr 、 Ca 变化范围较大(表 3), 特别是

CaO 含量(0.54%~1.47%)远高于原生橄榄石 CaO 含量(0.04%); 而如此高的 CaO 在地幔包体中很少见。 Cr_2O_3 含量(0.15%~0.42%)也比原生橄榄石高(0.04%)(图 4)。

参与反应的尖晶石, 从核部到边缘 $\text{Cr}^\#$ 、 CaO 含量升高, $\text{Mg}^\#$ 略有降低(图 5)。玻璃体呈蠕虫状出现在 Cpx I 内部(图 2c), 富 SiO_2 (62.31%~65.59%) 和 K_2O (3.72%~8.53%), 贫 CaO (0.14%

表 3 次生橄榄石矿物成分和原生橄榄石平均成分的比较

$w_B/\%$

Table 3 Comparison between mineral compositions of secondary olivines and average composition of primary olivines

	次生 Ol									原生 Ol
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	40.30	40.79	41.08	41.79	41.22	41.00	40.93	41.75	40.67	41.04
TiO ₂	—	—	0.01	0.02	0.02	0.02	—	—	0.05	0.02
Al ₂ O ₃	0.83	—	0.19	0.17	0.01	0.01	0.01	—	0.10	0.03
Cr ₂ O ₃	0.92	0.28	0.20	0.08	0.25	0.10	0.16	0.69	1.20	0.04
FeO	8.37	8.71	8.88	8.46	8.50	8.63	8.59	9.00	8.86	8.71
MnO	0.16	0.13	0.10	0.15	0.13	0.11	0.15	0.15	0.17	0.1
NiO	0.13	0.10	0.13	0.46	0.12	0.12	0.13	0.10	0.12	0.14
MgO	51.82	49.30	48.88	48.35	49.70	49.45	49.05	50.30	48.70	49.98
CaO	1.47	0.54	0.66	1.05	0.59	0.75	0.68	0.57	0.67	0.04
Na ₂ O	—	—	—	0.05	—	—	—	—	—	0.01
Total	103.99	99.84	100.13	100.55	100.55	100.20	99.69	102.56	100.54	100.08
Mg [#]	91.77	91.06	90.83	91.14	91.32	91.16	91.13	90.96	90.82	91.17

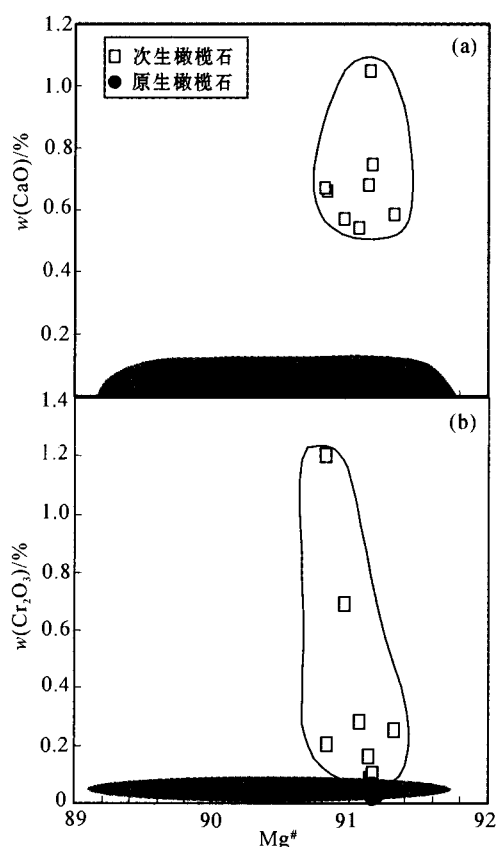


图 4 BLS-2 样品中次生橄榄石和原生橄榄石化学成分对比

Fig. 4 Chemical componential comparison between secondary olivines and primary ones for sample BLS-2

~0.36%) (表 4), 在 Ca-Na-K 三角图中, 落在 Na-K 端员一侧 (图 6)。

为了完整地揭示反应区域矿物成分的变化, 对反应边结构进行了详细的电子探针分析 (图 2f)。结

果显示, 参与反应的斜方辉石从核部向外, MgO、FeO、Al₂O₃ 含量显著降低, CaO 含量显著升高 (图 7)。尖晶石从核部到边缘, CaO、Cr[#] 和 Mg[#] 逐渐升高, 次生橄榄石在靠近次生单斜辉石的一侧 CaO 含量高, 而远离它则含量降低。这些特点均说明各矿物在成分上存在着渐变过渡关系, 暗示它们之间存在着物质的交换。值得注意的是 Mg[#] 在交代矿物中变化很小, 而 Al、Ca 和 Cr[#] 变化显著, 说明交代过程中存在 Al、Ca 成分的进入和交换, 而 Mg[#] 的变化不大可能说明并没有大量 Fe 的进入。

4 讨论

BLS-2 样品中的原生单斜辉石中 Na 的富集和 Na-Ti 分异以及斜方辉石周围的反应结构显然与地幔交代作用有关。前者属于隐性交代, 后者属于显性交代。从 Cpx II 中玻璃体富 K 的特点看, 该熔体不可能是封闭系统中由原生矿物的不一致熔融形成的, 而是外来交代流体-熔体的残余。为了探讨其交代作用机制和交代流体-熔体的性质, 我们首先通过文献调研对不同类型的地幔交代作用的主要特征进行了归纳总结 (表 5), 然后用于判断 BLS-2 样品所经历的交代作用性质。

地幔交代介质通常涉及碳酸盐熔体、H₂O-CO₂ 流体、玄武质熔体和富硅熔体几种类型。其中 H₂O-CO₂ 流体交代作用的主要特征是会形成含水交代矿物, 如云母、角闪石, 交代成因的单斜辉石具有低 Ti 高 Al 的成分, 被交代的斜方辉石具有低 Al、

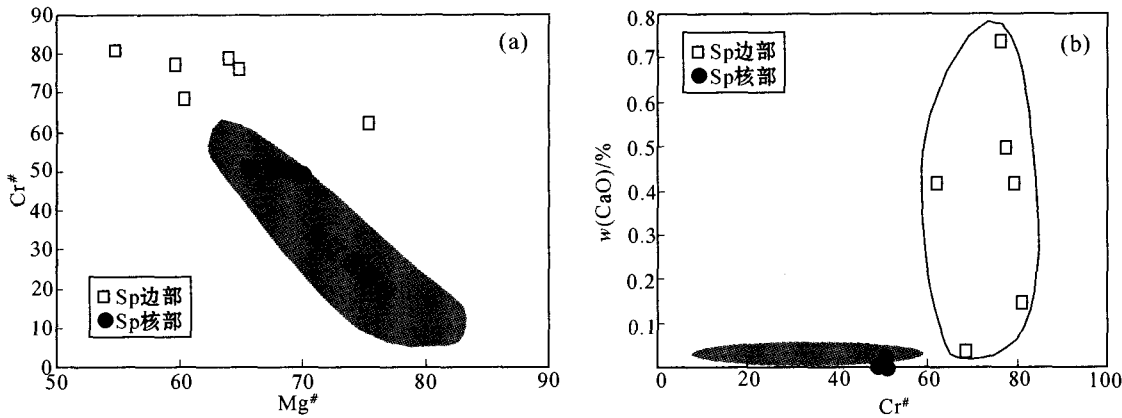


图 5 BLS-2 样品中受交代的尖晶石边部和核部成分对比
Fig. 5 Compositional comparison between core and rim of spinels in BLS-2

表 4 BLS-2 样品中玻璃体成分 w_B/%

Table 4 Composition of glass in sample BLS-2

	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	63.27	65.59	62.31	62.91	64.24	64.29	65.5
TiO ₂	0.15	0.18	0.04	0.21	0.21	0.16	0.18
Al ₂ O ₃	19.91	17.98	19.55	19.55	19.51	19.02	19.97
Cr ₂ O ₃	—	0.17	—	—	0.05	0.43	0.05
FeO	0.73	0.50	0.83	0.73	0.90	0.45	0.75
P ₂ O ₅	0.07	—	0.09	0.12	—	—	—
MnO	—	—	—	—	—	0.01	0.02
NiO	—	0.01	—	—	0.03	—	0.04
MgO	0.25	0.95	0.28	0.24	0.88	0.35	0.31
CaO	0.22	0.14	0.36	0.19	0.36	0.16	0.24
Na ₂ O	3.58	1.41	3.07	3.29	1.23	1.44	1.49
K ₂ O	8.53	4.24	8.17	7.81	4.18	4.10	3.72
Total	96.70	91.16	94.69	95.05	91.57	90.4	92.26
Mg [#]	38.11	77.41	37.39	37.53	63.82	58.18	42.41

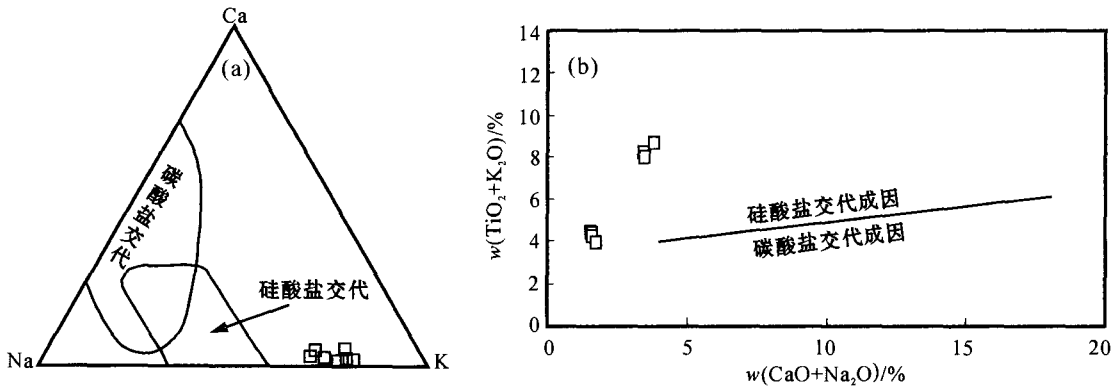


图 6 BLS-2 样品中玻璃体化学成分特征
Fig. 6 Compositional characteristics of glasses in BLS-2

不同交代类型的范围引自 Dautria 等 (1991)、Neumann 和 Wulff-Pedersen (1997)、Coltorti 等 (2000)
different types of metasomatism defined after Dautria *et al.* (1991), Neumann and Wulff-Pedersen (1997) and Coltorti *et al.* (2000)

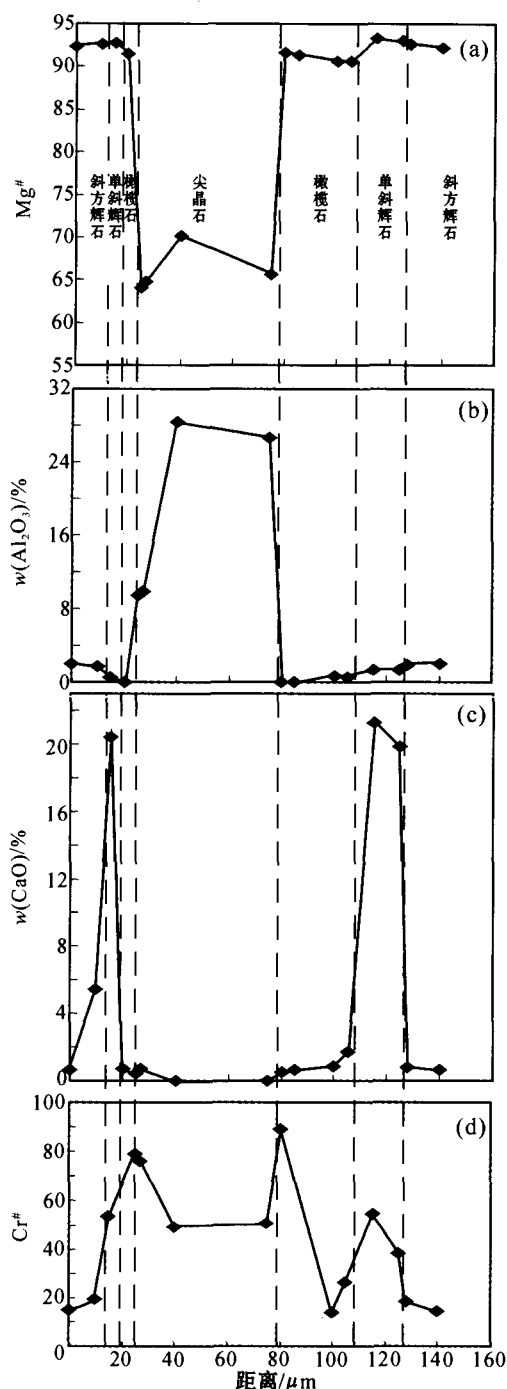


图7 反应边结构中各矿物成分的变化(探针分析沿图2f中箭头所指路线)

Fig. 7 Compositional profile across the reaction zone surrounding spinel (EPMA analysis is along the way shown in Fig. 2f)

Ca的成分特征,目前尚无 H_2O-CO_2 交代导致原生斜方辉石被新生单斜辉石替代的报道。由于BLS-2样品中交代成因的单斜辉石 Al_2O_3 含量降低,也没有发现含水交代矿物,因此认为 H_2O-CO_2 交代作用

不适用于BLS-2样品。其他几种交代介质与橄榄岩的反应特征具有很大的相似性,下面将对其做进一步的讨论。

(1)发生在上地幔的碳酸盐交代被证实是一种普遍存在的、重要的地幔过程(Green *et al.*, 1988; Yaxley *et al.*, 1991; Dautria *et al.*, 1991; Hauri *et al.*, 1993; Ionov *et al.*, 1996)。Dalton等(1993)实验模拟了地幔温压条件下碳酸盐交代过程,发现碳酸盐交代使得被交代橄榄岩在矿物相和化学成分上都发生很大的变化。在矿物相方面,伴随着斜方辉石的消失和单斜辉石、橄榄石的生成,地幔二辉橄榄岩逐渐变成方辉橄榄岩甚至易剥橄榄岩(Green *et al.*, 1988)。在化学成分方面,新生的橄榄石富含Ca、Mg,全岩具有很高的 CaO/Al_2O_3 和 Na_2O/Al_2O_3 比值,富集轻稀土(LREE)和大离子亲石元素LILE(Yaxley *et al.*, 1991)。Yaxley等(1991)认为碳酸盐交代不会产生橄榄岩全岩 $Mg^\#$ 的显著变化,理由是橄榄岩和碳酸盐岩有着类似的 $Mg^\#$,其研究的橄榄岩包体全岩 $Mg^\#$ (87.2~91.4)被认为是正常的变化范围。Ionov等(1996)发现碳酸盐交代成因的橄榄岩包体,其单斜辉石富含Al、Cr、Ti,但Rudnick等(1993)和Hauri等(1993)则发现碳酸盐交代成因的单斜辉石具有高 $Mg^\#$ 和低 Al_2O_3 含量的特点,并认为单斜辉石是原生斜方辉石和碳酸盐熔体反应的产物,如反应式: $CaMg(CO_3)_2$ (白云岩)+ $4MgSiO_3$ (斜方辉石) \rightarrow $CaMgSi_2O_6$ (单斜辉石)+ $2Mg_2SiO_4$ (橄榄石)+ $2CO_2$ (流体)。该反应伴随着斜方辉石的消失,最终矿物组合为单斜辉石、橄榄石、碳酸盐及流体。这和本文观察到的矿物相组合相同。在结构方面,碳酸盐熔体交代斜方辉石也形成了类似图2e中的反应边结构,以残余的斜方辉石为核心,外面被新生的单斜辉石和微晶尖晶石包围(Hauri *et al.*, 1993)。因此无论结构还是地球化学特征都显示本区的交代与碳酸盐熔体交代有很大的相似性,但是存在于Cpx II中的玻璃体却明显表现出了富硅、富碱的特点,而且并未发现具有碳酸盐交代特征的方解石等交代矿物,因此很难确定交代是否和碳酸盐熔体有关。

(2)硅酸盐熔体和橄榄岩围岩交代反应在世界许多地区发现(Wulff-Pedersen *et al.*, 1996; Klugel, 1998; Cliff *et al.*, 2006)。这种反应可能发生在包体未被寄主玄武岩带出之前,软流圈来源的玄武质熔体与地幔橄榄岩的反应,也可能发生

表 5 各种地幔交代作用特征对比
Table 5 Main characteristics of different types of mantle metasomatism

交代类型	碳酸盐熔体交代	硅酸盐熔体交代	H ₂ O-CO ₂ 流体交代
交代矿物特征	次生橄榄石 Fo 略有升高, 高 CaO	次生橄榄石 Fo 略降低, 高 CaO	被交代的斜方辉石低 Ca、Al, 高 Mn/Fe, 单斜辉石低 Ti、Al, 高 Fe、Mn
	次生单斜辉石 Mg [#] 略有升高	次生单斜辉石 Mg [#] 略有升高, Na、Al 降低	形成含水矿物如云母、透闪石、磷灰石、绿泥石等
玻璃成分	玻璃体富 Ca、Na, 贫 K, 低 Ti、SiO ₂ 和 TiO ₂ /Al ₂ O ₃ 比值	玻璃体富 Na、K, SiO ₂ 升高	—
微量元素特征	单斜辉石富集 LILE、P 和 LREE, 亏损 HFSE	单斜辉石富集高不相容元素, Ti 弱负异常或无异常	全岩富集 LILE、LREE 和 HFSE
交代类型	显性交代	显性交代	显性交代
可能的反应式	熔体 + Opx = Cpx + Ol ± Sp	熔体 + Opx = Cpx ± Ol	流体 + Py + Sp = Am ± Mi ± Ap
全岩特征	具高 Ca、Na 的特点, 由方辉橄榄岩和纯橄岩渐变为易剥橄榄岩	由方辉橄榄岩和纯橄岩渐变为易剥橄榄岩	无
参考文献	Green <i>et al.</i> , 1988; Yaxley <i>et al.</i> , 1991; Rudnick <i>et al.</i> , 1993; Ionov <i>et al.</i> , 1996	Wulff-Pedersen <i>et al.</i> , 1996; Xu <i>et al.</i> , 1996; Neumann <i>et al.</i> , 1997; Cliff <i>et al.</i> , 1999	O'Reilly <i>et al.</i> , 1988; Smith, 1994

Py、Am、Mi、Ap 分别表示辉石、角闪石、云母、磷灰石。

在包体与寄主玄武岩之间的反应。Cliff 等 (1999) 模拟了地幔条件下玄武质熔体与橄榄岩中斜方辉石反应的过程, 发现在熔体与橄榄岩直接接触反应的区域 (reaction zone) 生成橄榄石、单斜辉石和富硅熔体, 在矿物成分上, 由于熔体中的 Fe、Ti、Ca 等玄武质组分进入到次生矿物中, 使得新生橄榄石和单斜辉石的 Mg[#] 降低, Ti、Ca 含量逐渐升高。残余的斜方辉石从核部到边部 Mg[#]、Al₂O₃ 逐渐降低。但远离熔-岩接触反应带的橄榄岩内部, 渗入的熔体已经变的富 Si、低 Ca、Ti、Fe 等玄武质组分, 当它与斜方辉石反应生成的单斜辉石 Mg[#] 略有升高, 橄榄石的 Fo 则没有明显变化, 并形成富 Si、K、Na 组分的玻璃体, 形成的反应结构很类似于本文观察到的现象 (Cliff *et al.*, 2006)。

由上述分析可知, BLS-2 样品中的反应边结构, 次生矿物 Mg[#] 变化不大的特点, 以及玻璃体富 Si、K、Na 组分的特征更类似于硅酸盐交代的特点, 但这种硅酸盐熔体并不是玄武质熔浆, 而可能是由玄武质熔体演化而来的硅酸盐熔体, 虽然我们没有观察到包体和寄主玄武岩接触带的特征, 但由于寄主玄武岩携带包体到地表只要很短时间, 很难形成本文观察到的反应结构, 因此笔者认为这种交代反应发生在地幔深度, 很可能是软流圈渗透进入岩石圈的小体积熔体与橄榄岩围岩反应形成的。此外, 原生单斜辉石具有异常高的 Na, 其他元素含量在正常范围, 这种富 Na 特征暗示了另一期隐性交代的存在, 但这期交代发生的时间以及交代介质的性质根据现

有的观察还很难判断。

5 结论及意义

通过对地幔交代类型的归纳总结及其与样品 BLS-2 中观察到的现象的对比, 笔者认为双辽地区的岩石圈地幔受到了硅酸盐熔体的交代, 交代反应式可能为: Opx + Sp + melt → Cpx + Ol + glass。这种交代在本区并非普遍存在说明参与反应的熔体量很少, 交代范围局限。典型的反应边结构和矿物成分的不平衡, 以及玻璃体的存在都说明了交代反应发生的时间应该是橄榄岩被寄主玄武岩捕获之前的短时间内。这种交代可以使矿物相发生变化, 随着交代反应的不断进行, 斜方辉石逐渐减少甚至消失, 单斜辉石和橄榄石逐渐增加, 从原来的方辉橄榄岩渐变成易剥橄榄岩, 从而使岩石变的更加亏损。另外, 这种硅酸盐熔体很可能是软流圈渗透进入岩石圈的小体积熔体与橄榄岩围岩反应形成的, 笔者认为双辽地区 BLS-2 样品可能与辉南方辉橄榄岩一样, 都来自于软流圈-岩石圈接触带上的熔-岩反应区 (Xu *et al.*, 2003), 考虑到产于古近纪玄武岩中的双辽橄榄岩具有异常高的平衡温度 (多在 850~1100℃ 范围内, 未发表数据), 而产于第四纪玄武岩中的其他地区包体的平衡温度相对较低 (多在 700~900℃ 范围内), 这种异常高的平衡温度很可能暗示了在古近纪双辽地区地幔的地温梯度相对较高, 还处于较“热”的状态。这时期由于岩石圈减薄和软流圈上涌

导致的软流圈-岩石圈的相互作用仍在继续,而BLS-2样品可能记录了这一过程。此外,除了BLS-2样品外,其他样品都没有观察到交代反应结构,这可能是因为其他样品不在熔-岩反应区,没有受到软流圈熔体的影响。

致谢 在实验室工作中得到了刘颖工程师和林丽工程师的辛勤指导和大力支持,谨致谢忱。

References

- Cliff S J and Shaw F H. 1999. Dissolution of orthopyroxene in basanitic magma between 0.4 and 2 GPa: further implications for the origin of Si-rich alkaline glass inclusions in mantle xenoliths[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 135: 114~132.
- Cliff S J, Shaw H and Donald B D. 2006. The origin of reaction textures in mantle peridotite xenoliths from Sal Island, Cape Verde: the case for "metasomatism" by the host lava[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151: 681~697.
- Coltorti M, Beccaluva L, Bonadiman C, *et al.* 2000. Glasses in mantle xenoliths as geochemical indicators of metasomatic agents[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 183: 303~320.
- Dautria J M, Dupuy C, Takherist D, *et al.* 1991. Carbonate metasomatism in the lithospheric mantle: peridotitic xenoliths from a melilitic district of the Sahara basin[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 111: 37~52.
- Dalton J A and Wood B J. 1993. The compositions of primary Carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 119: 511~525.
- Frey F A and Prinz M. 1978. Untramafic inclusions from San Carlos, Arizona: Petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 38: 129~176.
- Green D H and Wallace M E. 1988. Mantle metasomatism by ephemeral carbonatite melts[J]. *Nature*, 336: 459~462.
- Hauri E H, Shimizu N, Dieu J J, *et al.* 1993. Evidence for hotspot-related carbonatite metasomatism in the oceanic upper mantle[J]. *Nature*, 365: 221~227.
- Ionov D A, Chaneffo I and Bodinier J L. 2005. Origin of Fe-rich lherzolites and wehrlites from Tok, SE Siberia by reactive melt percolation in refractory mantle peridotites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 150: 335~353.
- Ionov D A, Dupuy C, O'Reilly S Y, *et al.* 1993. Carbonated peridotite xenoliths from Spitsbergen: implications for trace element signature of mantle carbonate metasomatism[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 119: 283~297.
- Ionov D A, O'Reilly S Y and Ashchepkov I V. 1995. Feldspar-bearing lherzolite xenoliths in alkali basalts from Hamar-Daban, southern Baikal region, Russia[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 122: 174~190.
- Ionov D A, O'Reilly S Y, Genshaft Y S, *et al.* 1996. Carbonate-bearing mantle peridotite xenoliths from Spitsbergen: phase relationships, mineral compositions and trace-element residence[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 125: 375~392.
- Kelemen P B. 1995. Genesis of high $Mg^{\#}$ andesites and the continental crust[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120: 1~19.
- Kelemen P B, Dick H J B and Quick J E. 1992. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle[J]. *Nature*, 358: 635~641.
- Kelemen P B, Hart S R and Bernstein S. 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt-rock reaction[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 164: 387~406.
- Klugel A. 1998. Reactions between mantle xenoliths and host magma beneath La Palma (Canary Islands): constraints on magma ascent rates and crustal reservoirs[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 131: 237~257.
- Liu Jiaqi. 1987. Chronology of Cenozoic volcanic rocks in northeastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4: 21~31 (in Chinese with English abstract).
- Menzies M A. 1990. Archean, Proterozoic, and phanerozoic lithospheres[A]. Menzies M A. *Continental Mantle*[C]. Oxford, New York, 67~86.
- Menzies M A and Hawkesworth C J. 1987. Upper mantle processes and composition[A]. Nixon P H. *Mantle Xenoliths*[C]. New York: John Wiley, 725~738.
- Neumann E R and Wulff-Pedersen E. 1997. The origin of highly silicic glass in mantle xenoliths from the canary islands[J]. *Journal of Petrology*, 38: 1513~1539.
- O'Reilly S Y and Griffin W L. 1988. Mantle metasomatism beneath western Victoria, Australia: I. metasomatic processes in Cr-diopside lherzolites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 52: 433~447.
- Rudnick R L, McDonough W F and Chappell B W. 1993. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: petrographic and geochemical characteristics[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 114: 463~475.
- Smith D. 1995. Chlorite-rich ultramafic reaction zones in Colorado Plateau xenoliths: recorders of sub-Moho hydration[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 121: 185~200.
- Wulff-Pedersen E, Neumann E R and Jensen B B. 1996. The upper mantle under La Palma, Canary Islands: Formation of Si-K-Na-rich melt and its importance as a metasomatic agent[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 125: 113~139.
- Xu Yigang. 1998. Melt-rock reaction in upper mantle and continental mantle evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 5: 76~85 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Mercier J C, Menzies M A, *et al.* 1996. K-rich glass-bearing wehrlite xenoliths from Yitong, Northeastern China: Petrological and chemical evidence for mantle metasomatism[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 125: 406~420.
- Xu Y G, Menzies M A, Thirlwall M F, *et al.* 2003. "Reactive" harzburgites from Huinan, NE China: Products of the lithosphere-ashtenosphere interaction during lithospheric thinning[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 487~505.
- Yaxley G M, Crawford A J and Green D H. 1991. Evidence for carbonatite metasomatism in spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 107: 305~317.
- Yu Yang. 1987. Cenozoic basalt from Qixingshan, Shuangliao, Jilin Province: Its characteristic and origin study[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3: 55~62 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 刘嘉麒. 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学[J]. *岩石学报*, 4: 21~31.
- 徐义刚. 1998. 上地幔熔体-岩石相互作用与大陆地幔演化[J]. *地学前缘*, 5: 76~85.
- 余扬. 1987. 吉林双辽七星山新生代玄武岩的特点及其成因探讨[J]. *岩石学报*, 3: 55~62.