

青藏东缘马关尖晶石二辉橄榄岩包体中 单斜辉石的成分特征及其意义

魏启荣^{1,2}, 王江海², 解广轰²

(1. 中国地质大学 材料科学与化学工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 青藏东缘马关尖晶石二辉橄榄岩包体的矿物组合为橄榄石(Ol) + 斜方辉石(OpX) + 单斜辉石(Cpx) + 尖晶石(Spl)。单斜辉石主要为透辉石, 少量为顽透辉石, 其成分特征表现为高Ca ($w(\text{CaO})=18.71\%\sim 20.78\%$)、高Al ($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=6.00\%\sim 7.30\%$)、高Mg[#]值(89.84~91.48)和低Cr[#]值(5.18~8.72)。SiO₂、TiO₂、FeO*和Na₂O的质量分数变化范围分别是51.71%~52.50%、0.34%~0.61%、2.50%~3.14%和1.46%~1.80%。单斜辉石的成分特征显示尖晶石二辉橄榄岩包体为A型包体, 属低度熔融后的大陆地幔橄榄岩。透辉石的 $w(\text{Y})$ (18.60~20.90 $\mu\text{g/g}$)、 $w(\text{Yb})$ (1.97~2.18 $\mu\text{g/g}$)模拟计算表明, 马关尖晶石二辉橄榄岩包体是原始地幔经低于3%的部分熔融后的残留地幔岩。

关键词: 青藏东缘; 马关; 尖晶石二辉橄榄岩包体; 单斜辉石; 矿物化学成分

中图分类号: P588.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2003)03-0087-06

青藏高原是全球海拔最高的独特构造单元, 是全球惟一仍在活动中的大陆碰撞区。晚新生代以来的高原大面积整体快速抬升和造山是地球演化史上最重大的事件之一。自55 Ma以来的印度与欧亚板块的碰撞以及其后的陆内变形不仅制约了青藏高原的形成和演化^[1,2], 而且还控制着青藏东缘新生代的构造和岩浆活动^[2,3]。

青藏东缘新生代构造活动可分为3个阶段: (1) 28~40 Ma间大规模的陆内俯冲作用^[4,5]; (2) 16~24 Ma间大规模的转换伸展作用^[6]; (3) 0~16 Ma间区域性的东西向伸展作用^[2,3,7]。

与之对应青藏东缘新生代发育了早晚两期高钾岩浆活动: (1) 早期高钾岩浆活动(28~40 Ma)沿整个金沙江—红河构造带分布^[3]。岩石类型主要为正长岩、粗面岩、粗安岩和钾玄质煌斑岩。该期岩系中的若干地段如云南大理、北衙—六合、剑川及战河高钾岩系群中发育有大量的镁铁质深源包体^[8~10];

(2) 晚期高钾岩浆活动(0~16 Ma)沿红河断裂带南段和印支块体南部分布^[3], 岩性主要为碧玄岩、碱性玄武岩、粗玄岩和粗面岩。马关地幔岩包体即产出在该套岩系的碧玄岩岩管中^[3,11]。

单斜辉石通常是地幔岩的主要矿物相之一, 且地幔岩中的单斜辉石通常含有丰富的深部构造作用的成分信息^[12,13]。因此, 对马关地幔岩包体中的单斜辉石的化学成分进行研究有助于揭示青藏东缘岩石圈地幔的特征和性质。

1 地质背景和岩相学特征

马关地幔岩包体产出在马关八寨—木厂街地区发育的碧玄岩岩管中(图1)。围岩地层时代为寒武纪—奥陶纪。碧玄岩岩管群沿断裂分布。碧玄岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年龄为(11.9±0.3)~(12.4±0.2) Ma^[3], 属古近世。包体呈浑圆状、椭球状, 大小不一, 直径在1~30 cm不等。

马关地幔岩包体的岩石类型包括尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩、尖晶石单辉橄榄岩、尖晶石橄榄二辉岩和辉石岩以及金云母、单斜辉石、石榴石和透长石巨晶。本次所获样品为尖晶石二辉橄榄岩包体。

收稿日期: 2003-06-08; 修订日期: 2003-07-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040807); 国家自然科学基金资助项目(49972026); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-SW-117); 中国博士后科学基金资助项目

作者简介: 魏启荣(1964—), 男, 博士, 副教授, 从事火山岩岩石学、地球化学和无机材料研究。E-mail: weiqr1030@cug.edu.cn

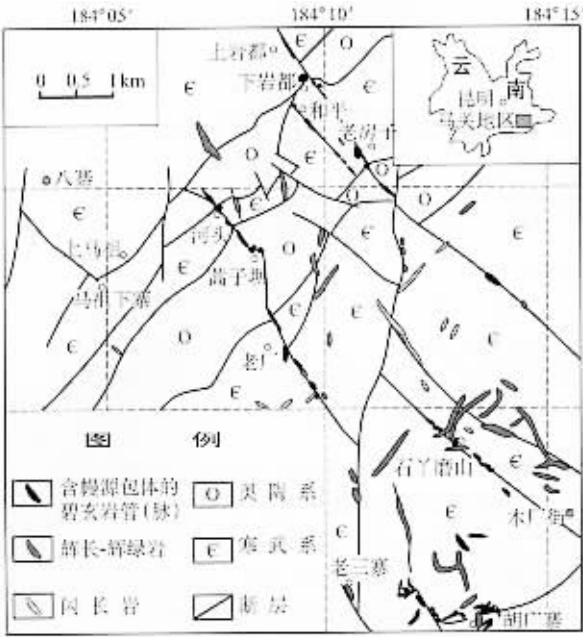


图1 青藏东缘马关八寨—木厂街地区地质略图
(根据云南地矿局第一地质大队,1976 修编)

Fig. 1 The geological sketch map in Bazhai-Muchangjie area, Maguan, eastern Tibet

尖晶石二辉橄榄岩:手标本呈墨绿色,块状构造。主要为变晶结构,尤以镶嵌结构(图 2A)为主,三连点发育。矿物组合为橄榄石(Ol) + 斜方辉石(Opx) + 单斜辉石(Cpx) + 尖晶石(Spl)及其粒间组分,偶尔出现金云母和角闪石。橄榄石呈粒状,晶形不完整,发育扭折带(图 2B),粒径大多为 0.5 ~ 1.5 mm,在岩石中的体积分数为 60%~70%。斜

方辉石呈板状、短柱状,晶面大多已因遭受熔蚀而被破坏,淡褐色—浅棕色,解理缝细而疏,大多呈平行消光,颗粒大小为 0.25 mm×0.5 mm~0.75 mm×1.5 mm,最大颗粒可达 3 mm×6 mm,体积分数约为 15%。单斜辉石(图 2C)多表现为不规则板状,浅绿色,解理发育,解理缝粗而多,颗粒大小多为 0.25 mm×0.25 mm~0.5 mm×0.75 mm,体积分数 6%~10%。尖晶石呈棕色—棕褐色,形状十分不规则,多呈冬青树叶状,粒径一般为 0.25 ~ 0.75 mm,含量约为 4%。此外,岩石中还含极少量的棕色—棕红色长条状金云母(Phl)(图 2D)。因此,岩相学特征表明,马关尖晶石二辉橄榄岩包体已遭受了明显的塑性变形,并经历了较强的重结晶作用和流体交代作用。

2 测试分析

单斜辉石的电子探针成分分析在中国科学院地质与地球物理研究所用法国 CAMECA 公司的 Camebax-SX51 型电子探针测定。分析条件:加速电压 15 kV,电流 20 nA;分析束斑直径为 5 μm。分析时所用标样:Na 用钠长石,K 用钾长石,Mg 用橄榄石,Si 用透辉石,Ca 用硅灰石,Mn 用蔷薇辉石,其余元素均用相应的氧化物。马关地区 8 个尖晶石二辉橄榄岩包体中 22 个点的单斜辉石电子探针分析结果列于表 1。

表 1 马关尖晶石二辉橄榄岩中单斜辉石的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area

样 号	分析 点数	w _B /%														
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MgO	CaO	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al
MG01-3	4	52.49	0.53	6.44	0.75	2.58	15.12	20.47	0.09	0.07	1.57	0.00	100.11	1.892	0.014	0.273
MG01-6	2	52.12	0.54	6.20	0.87	2.59	15.26	20.47	0.05	0.11	1.55	0.01	99.77	1.887	0.015	0.265
MG01-7	2	52.50	0.34	6.00	0.60	2.67	15.30	20.76	0.07	0.06	1.52	0.02	99.84	1.898	0.009	0.256
MG01-10	2	52.24	0.53	6.70	0.79	2.65	15.20	19.97	0.09	0.09	1.62	0.00	99.88	1.887	0.015	0.285
MG01-11	4	52.41	0.57	6.89	0.98	2.54	14.77	19.99	0.12	0.07	1.80	0.00	100.14	1.889	0.016	0.293
MG01-18	2	52.46	0.51	6.44	0.71	2.50	15.22	20.78	0.12	0.01	1.57	0.00	100.32	1.888	0.014	0.273
MG01-13	3	51.71	0.40	7.30	0.94	3.14	15.74	18.71	0.13	0.03	1.46	0.00	99.56	1.872	0.011	0.312
MG01-19	3	51.98	0.61	7.30	0.59	2.81	14.99	19.60	0.07	0.05	1.76	0.00	99.76	1.878	0.017	0.311

样 号	分析 点数	阳离子数 n(以 6 个氧原子为基础)										Mg [#] 值	Cr [#] 值	端员组分		
		Cr	Fe ³⁺	Mg	Ca	Mn	Fe ²⁺	Ni	Na	K	Total			Wo	En	Fs
MG01-3	4	0.021	0.010	0.812	0.791	0.003	0.068	0.002	0.110	0.000	3.997	91.24	7.14	47.25	48.54	4.22
MG01-6	2	0.025	0.017	0.823	0.794	0.002	0.062	0.003	0.109	0.000	4.000	91.24	8.62	47.25	49.00	3.75
MG01-7	2	0.017	0.020	0.824	0.804	0.002	0.061	0.002	0.106	0.001	4.000	91.05	6.23	47.55	48.73	3.73
MG01-10	2	0.023	0.002	0.818	0.773	0.003	0.079	0.003	0.113	0.000	4.000	90.99	7.47	46.22	48.92	4.86
MG01-11	4	0.028	0.001	0.793	0.772	0.004	0.075	0.002	0.126	0.000	3.998	91.25	8.72	46.95	48.25	4.81
MG01-18	2	0.020	0.014	0.816	0.801	0.004	0.062	0.000	0.109	0.000	4.000	91.48	6.83	47.62	48.51	3.88
MG01-13	3	0.027	0.001	0.849	0.726	0.004	0.095	0.001	0.103	0.000	3.999	89.84	7.96	43.35	50.75	5.88
MG01-19	3	0.017	0.008	0.807	0.759	0.002	0.077	0.002	0.123	0.000	4.000	90.47	5.18	46.15	49.08	4.77

注:FeO* 为全铁,Mg[#] = 100×x(Mg)/x(Mg+Fe),Cr[#] = 100×x(Cr)/x(Cr+Al)。

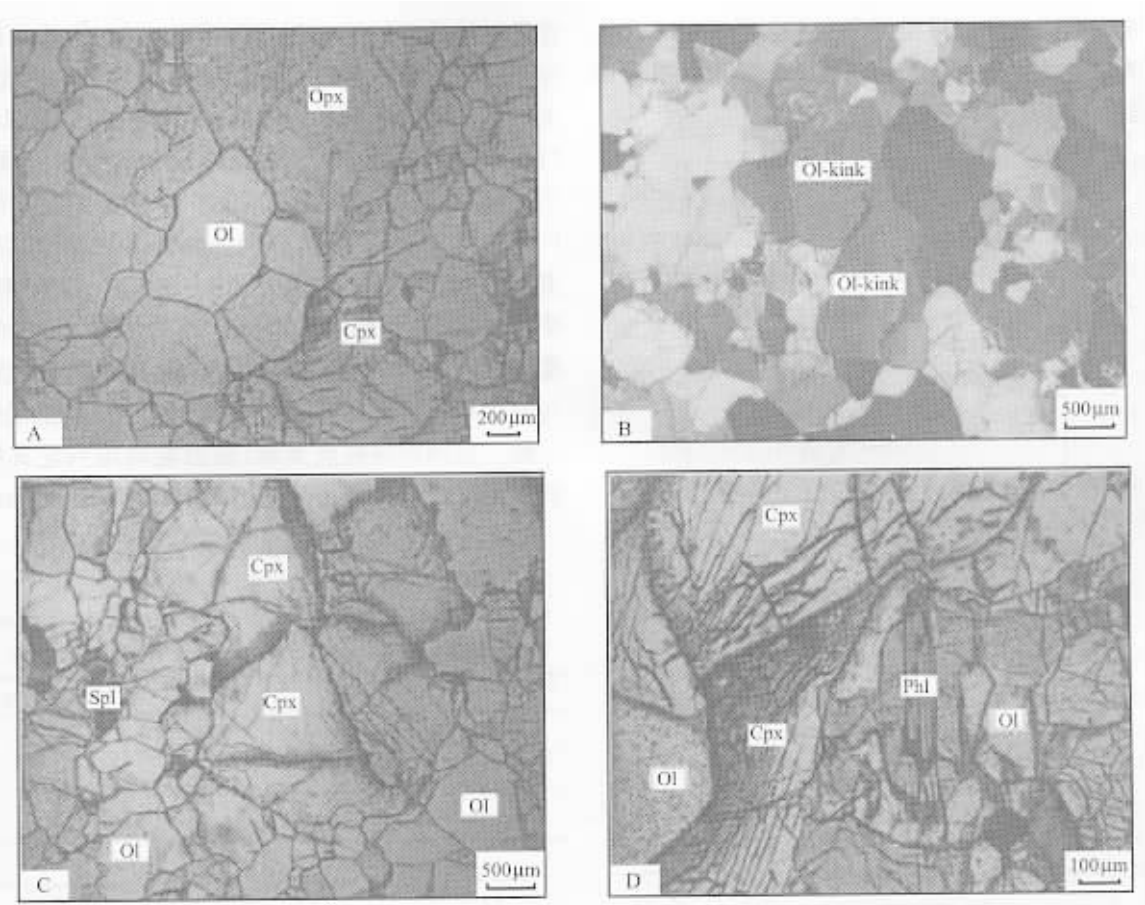


图 2 马关尖晶石二辉橄榄岩包体的显微结构照片

Fig. 2 Microstructural photographs of spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area

A—尖晶石二辉橄榄岩的镶嵌结构和橄榄石(Ol)形态(单偏光);B—尖晶石二辉橄榄岩中橄榄石(Ol)膝折(kink)(正交偏光);C—尖晶石二辉橄榄岩中具细密解理缝的单斜辉石(Cpx)(单偏光);D—尖晶石二辉橄榄岩中的金云母(Phl)(单偏光)

3 单斜辉石的成分特征及其指示意义

图 3 显示,马关尖晶石二辉橄榄岩包体中的单斜辉石主要为透辉石,少量为顽透辉石。单斜辉石中的 SiO₂ 质量分数在 51.71 %~52.50 %之间变化(表 1)。w(Al₂O₃) (6.00 %~7.30 %)与 SiO₂ 呈明显的消长关系。单斜辉石中含较高的 Al₂O₃, 暗示了该地幔橄榄岩受熔融抽提的程度很低^[12]。单斜辉石的 TiO₂、FeO*、CaO 和 Na₂O 的质量分数变化范围分别是 0.34%~0.61%, 2.50%~3.14%, 18.71%~20.78%和 1.46%~1.80%, 表现出单斜辉石明显具高 Al、高 Ca 的成分特征。

Mg[#] 值和 Cr[#] 值计算表明,单斜辉石的 Mg[#] 值和 Cr[#] 值分别在 89.84~91.48 和 5.18~8.72 之间变化(表 1),其 Mg[#] 值与中国东部新生代玄武岩中地幔岩包体的单斜辉石的 Mg[#] 值相当,而 Cr[#] 值则明显偏低^[15,16]。马关地幔岩包体中的单斜辉石高

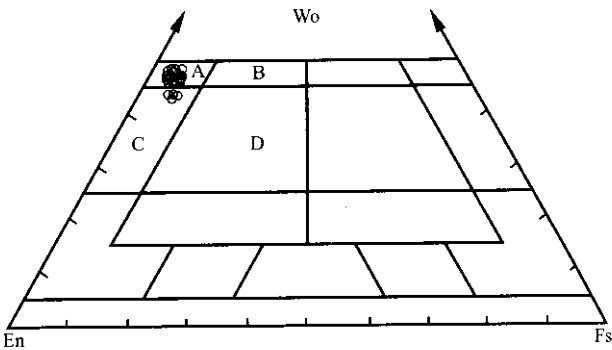


图 3 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的 Wo-En-Fs 分类图

(据 Morimoto^[14])

Fig. 3 The Wo-En-Fs classify diagram of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area

Mg[#] 值和低 Cr[#] 值也反映出地幔岩受熔融抽提的程度很低^[16]。在 Ti+Al^{IV}-Si 图(图 4)上,透辉石的成分指示马关尖晶石二辉橄榄岩包体属 A 型包体。Selyer 和 Bonatti^[12] 据单斜辉石中 Al^{VI} 和 Al^{IV} 对温

压响应的不同来判别橄榄岩是来自大洋还是来自大陆环境。据此标准判定, 马关尖晶石二辉橄榄岩属大陆地幔橄榄岩(图 5)。

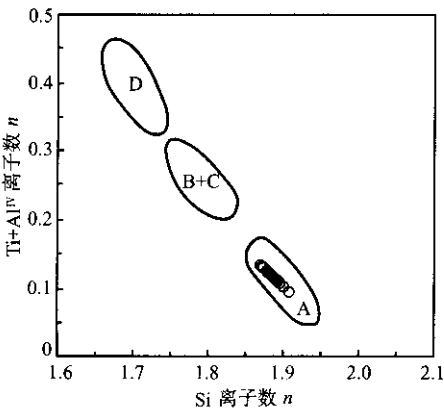


图 4 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的 Ti+Al^{IV}-Si 相关图 (据 Wass^[17])

Fig. 4 Ti+Al^{IV}-Si correlogram of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area
A—A 型包体中铬透辉石; B+C—B 型包体中单斜辉石、高压巨晶单斜辉石和玄武岩中低压相单斜辉石; D—B 型包体中的单斜辉石和富铁巨晶辉石

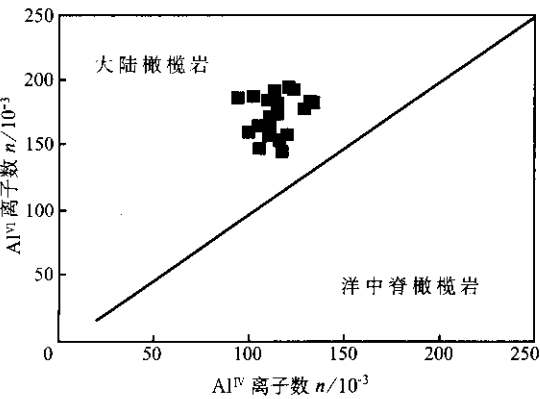


图 5 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的 Al^{VI}-Al^{IV} 相关图 (据 Seyler 和 Bonatti^[12])

Fig. 5 Al^{VI}-Al^{IV} correlogram of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area
直线的左上方代表大陆型橄榄岩; 右下方代表洋中脊型橄榄岩

4 地幔岩熔融程度的讨论

单斜辉石的矿物化学成分特征表明, 马关尖晶石二辉橄榄岩包体是一种经很低程度熔融后的残留地幔岩。那么, 马关尖晶石二辉橄榄岩包体到底是经过了多少熔融程度后的地幔残留产物呢? Norman^[18] 曾依据地幔岩中单斜辉石的微量元素 Y、Yb

含量对地幔岩的熔融程度和熔融机制(批式熔融和分离熔融)进行过成功的模拟估算。为此, 笔者对马关地区 4 个尖晶石二辉橄榄岩包体中的单斜辉石进行了单矿物分选, 并对单斜辉石中的微量元素 Y、Yb 含量进行了分析测试, 分析单位为中国科学院广州地球化学研究所, 分析手段为 ICP-MS, 其分析方法见刘颖等^[19]。分析结果列于表 2。数值模拟表明, 马关尖晶石橄榄岩包体是原始地幔经约 3% 的部分熔融(图 6)后的残留相。这一很低的熔融程度与前述单斜辉石的矿物化学成分所指示的结果完全一致。但因熔融程度太低, 故目前尚难判定其熔融机制是批式熔融还是分离熔融。

表 2 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的 Y、Yb 含量 (μg/g)
Table 2 Y and Yb contents of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area (μg/g)

样 号	w(Y)/(μg · g ⁻¹)	w(Yb)/(μg · g ⁻¹)
MG01-7	18.6	1.97
MG01-10	18.9	2.00
MG01-18	20.0	2.10
MG01-19	20.9	2.18

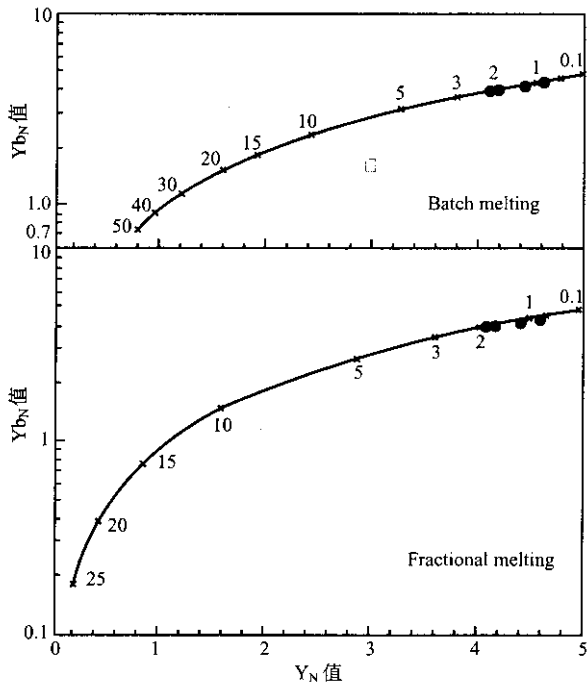


图 6 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的 Y_N-Yb_N 图 (据 Norman^[18])

Fig. 6 Y_N-Yb_N diagram of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area
Batch melting—批式熔融; Fractional melting—分离熔融; Y_N 和 Yb_N 分别为单斜辉石中 Y 和 Yb 元素含量的原始地幔标准化值(标准化值为 3×CI, CI 据文献^[20])

5 结论

通过以上分析, 本文得出如下结论:

(1) 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中的单斜辉石主要为透辉石, 少量为顽透辉石。

(2) 马关尖晶石二辉橄榄岩包体属大陆地幔橄榄岩中的 A 型包体。

(3) 马关尖晶石二辉橄榄岩包体是原始地幔经低于 3% 的部分熔融后的残留相。

References[参考文献]:

- [1] PAN Guitang, WANG Peisheng, XU Yaorong. *Cenozoic Tectonic Evolution of Qinghai-Xizang Plateau* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 32-70 (in Chinese). [潘桂棠, 王培生, 徐耀荣. 青藏高原新生代构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1990. 32-70.]
- [2] YIN A. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105 (B9): 21745-21759.
- [3] WANG J H, YIN A, HARRISON T M, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188: 123-133.
- [4] WANG E, BURCHFIEL B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis [J]. *Int Geol Rev*, 1997, 39: 191-219.
- [5] MEYER B, TAPPONNIER P, BOURJOT L, et al. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet Plateau[J]. *Geophys J Int*, 1998, 135: 1-47.
- [6] HARRISON T M, LELOUP P H, RYERSON F J, et al. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone, Yunnan and Vietnam[A]. YIN A, HARRISON T M. *The Tectonic Evolution of Asia* [M]. New York: Cambridge University Press, 1996. 208-226.
- [7] MASEK J G, ISACKS B L, FIELDING E J, et al. Rift flank uplift in Tibet: Evidence for a viscous lower crust[J]. *Tectonics*, 1994, 13: 659-667.
- [8] CAI Xinping. Discovery of deep-derived xenoliths in Cenozoic alkali-rich porphyries along the margin of the Yangtze platform and its significance[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, 27(2): 183-189(in Chinese). [蔡新平. 扬子地台西缘新生代富碱斑岩中的深源包体及其意义[J]. 地质科学, 1992, 27(2): 183-189.]
- [9] LIU Xianfan, ZHAN Xinzhi, GAO Zhenmin, et al. Deep

- xeoliths in alkalic porphyry, Liuhe, Yunnan, and implications to petrogenesis of alkalic porphyry and associated mineralizations[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(5): 413-420(in Chinese). [刘显凡, 战新志, 高振敏, 等. 云南六合深源包体与富碱斑岩成岩成矿的关系[J]. 中国科学(D), 1999, 29(5): 413-420.]
- [10] WANG Jian, LI Jianping, WANG Jianghai, et al. Geological implications for the mafic deep-derived enclaves from Cenozoic shoshonitic rocks in Jianchuan-Dali area, western Yunnan[J]. *Journal of Minerals*, 2002, 22(2): 113-125(in Chinese). [王建, 李建平, 王江海, 等. 滇西剑川—大理地区新生代钾玄岩系中深源包体的地质意义[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 113-125.]
- [11] SHU Xiaoxin. The genesis of Cpx-peridotitic xenoliths in basanite of Maguan, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1995, 14(1): 47-51(in Chinese). [舒小辛. 云南马关地区碧玄岩中单辉橄榄岩包体的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(1): 47-51.]
- [12] SEYLER M, BONATTI E. 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 Sci Lett*, 1994, 122: 281-289.
- [13] RIVALENTI G, VANNUCCI R, RAMPONE E, et al. Peridotite clinopyroxene chemistry reflects mantle processes rather than continental versus oceanic settings[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 139: 423-437.
- [14] MORIMOTO N. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 1988, 52: 535-550.
- [15] CHI Jishang. *The study of Cenozoic Basalts and Upper Mantle Beneath Eastern China (Attachment Kimberlites)* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988. 1-218(in Chinese). [池际尚. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 1-218.]
- [16] ZHENG Jianping. *Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the Eastern China* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. 13-68 (in Chinese). [郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 13-68.]
- [17] WASS S Y. Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks[J]. *Lithos*, 1979, 12: 115-132.
- [18] NORMAN M D. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: Laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 130: 240-255.
- [19] LIU Ying, LIU Haichen, LI Xianhua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 552-558 (in Chinese). [刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6):

552-558.]

Meteoritic and solar[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989,

[20] ANDERS B, GREVESSE N. Abundances of the elements;

53; 197-214.

THE CHEMICAL COMPOSITION CHARACTERISTICS OF CLINOPYROXENES FROM SPINEL-LHERZOLITE XENOLITHS IN MAGUAN AREA, EASTERN TIBET AND ITS SIGNIFICANCE

WEI Qi-rong^{1,2}, WANG Jiang-hai², XIE Guang-hong²(1. *Faculty of Material Science & Chemistry Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;*2. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: The mineral assemblages of spinel-lherzolite xenoliths in Maguan Area, Eastern Tibet are Ol + Opx + Cpx + Spl. The Cpxs belong to diopside, characterized by high Ca ($w(\text{CaO}) = 18.71\% \sim 20.78\%$), Al ($w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 6.00\% \sim 7.30\%$), and $\text{Mg}^\#$ value ($89.84 \sim 91.48$), while low $\text{Cr}^\#$ value ($5.18 \sim 8.72$). The contents of SiO_2 , TiO_2 , FeO^* and Na_2O range from 51.71% to 52.50% , 0.34% to 0.61% , 2.50% to 3.14% , and 1.46% to 1.80% , respectively. The chemical composition characteristics of Cpxs indicate that the spinel-lherzolite xenoliths belong to the type-A peridotite enclaves and the lower melted continental mantle. The analog computation of Y ($18.60 \sim 20.90 \mu\text{g/g}$) and Yb ($1.97 \sim 2.18 \mu\text{g/g}$) values from diopside revealed that the spinel-lherzolite xenoliths were derived from the remnant of a primary mantle after 3% partial melting.

Key words: Eastern Tibet; Maguan Area; spinel-lherzolite xenoliths; clinopyroxene; mineral chemical composition