

文章编号 1001-8166(2004)05-0722-10

青藏东缘六合一香多镁铁质深源包体的 平衡 P-T 条件及其指示意义

魏启荣^{1,2}, 王江海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: 依据青藏东缘六合一香多镁铁质深源包体中石榴石、辉石、角闪石和斜长石的矿物电子探针成分, 采用 Grt-Cpx 温度计 (T_{Gr79} 、 T_{P85} 、 T_{K88} 和 T_{R2000})、Grt-Hbl 温度计 (T_{Gr84} 和 T_{Rv2000}) 和 Hbl-Pl 温度计 (T_{H90}) 以及角闪石 Al 压力计 ($P_{\text{Al-in-Hbl}}$) 估算了包体的平衡温压条件。结果表明, 石榴透辉岩、石榴斜长角闪岩、石榴角闪岩、斜长角闪岩和角闪岩包体的平衡温压分别是 770 ~920 和 0.83 ~1.50 GPa (相当于 27 ~50 km 深)、730 ~950 和 0.85 ~1.04 GPa (相当于 28 ~34 km 深)、720 ~900 和 0.74 ~1.32 GPa (相当于 24 ~44 km 深)、512 ~753 和 0.71 ~0.98 GPa (相当于 23 ~32 km 深) 以及 0.60 ~0.84 GPa (相当于 20 ~28 km 深)。前 3 类包体主要来自下地壳, 平衡温压较高 (720 ~950 、0.74 ~1.50 GPa) 后 2 类包体主要来自中地壳, 平衡温压较低 (510 ~735 、0.60 ~0.98 GPa)。包体的平衡温压条件还暗示了高钾岩浆起源的最小深度在 50 km 以上。

关键词: 青藏东缘, 六合一香多, 镁铁质深源包体, 平衡温压

中图分类号 P58 P59 文献标识码 A

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]。青藏东缘新生代构造活动可分为 3 个阶段: 40 ~28 Ma 的大规模的陆内俯冲作用^[3-5]; 24 ~16 Ma 间大规模的转换伸展作用^[6]; 16 ~0 Ma 间区域性的东西向伸展作用^[2,5,7]。与之对应, 青藏东缘新生代发育了早、晚两期高钾岩浆活动: 晚期高钾岩浆活动 (16 ~0 Ma) 沿红河断裂带南段和印支块体南部分布^[5], 岩性主要为碧玄岩、碱性玄武岩、粗玄岩和粗面岩, 在马关地区的碧玄岩岩管中产出有地幔岩包体^[8,9]; 早期高钾岩浆活动 (40 ~28 Ma) 沿整个金沙江—红河构造带分布^[5], 岩石类型主要为正长岩、粗面岩、粗安岩和钾玄质煌斑

岩。六合一香多镁铁质深源包体即产出在该期高钾岩系中。

20 世纪 90 年代以来, 已有众多研究人员从不同角度对六合一香多镁铁质深源包体进行了研究。但目前对六合一香多镁铁质深源包体的认识仍存在严重分歧, 主要有以下 4 种认识: 包体为原始地幔部分熔融的结晶产物^[10]; 包体为下地壳变质岩^[11,12]; 包体代表的是富集地幔顶部二辉橄榄岩部分熔融形成的碱性超基性—基性岩、钙碱性岩片和楔形体^[13]; 包体为中、下地壳变质岩^[5,14]。

基于上述分歧, 本文拟依据新获得的六合一香多镁铁质深源包体的矿物电子探针成分, 采用现有的温压计来估算其平衡温压条件, 以期从包体的热状态和热历史方面来探讨包体的性质和可能成因。

收稿日期 2003-06-05, 修回日期 2003-10-17.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“大陆碰撞过程中壳幔物质能量交换及冈底斯带成矿背景评估”(编号: G1998040807), 中国博士后科学基金项目“三江中段扬子与冈瓦纳陆块间地球化学边界的研究”资助.

作者简介: 魏启荣(1964-) 男, 湖北蒲圻人, 副教授, 主要从事火山岩岩石学、地球化学和无机材料研究.

E-mail: weiqi1030@cug.edu.cn

1 地质背景和岩石学特征

六合一香多镁铁质深源包体及其寄主的高钾岩浆岩出露于与红河—哀牢山大型左旋走滑剪切带伴生的早第三纪小型拉分盆地中,分属大理—剑川地区剑川、战河、北衙—六合及大理4个岩群中的北衙—六合岩群和剑川岩群(图1)。寄主岩岩性为透辉正长斑岩、二长斑岩、透辉正长岩和石英二长斑岩。寄主岩的 $K-Ar$ 法年龄为 $26.3 \sim 36.7 \text{ Ma}^{[15]}$, $^{40}Ar/^{39}Ar$ 法年龄为 $28 \sim 40 \text{ Ma}^{[5]}$ 。镁铁质深源包体在寄主岩中杂乱分布,大小不一,大者 $6 \sim 8 \text{ cm}$,小者 $1 \sim 2 \text{ cm}$,平均 $3 \sim 4 \text{ cm}$ 。形状变化大,主要呈浑圆状和次棱角状。包体与寄主岩之接触界面清晰,个别包体可见约 2 mm 的冷凝边。

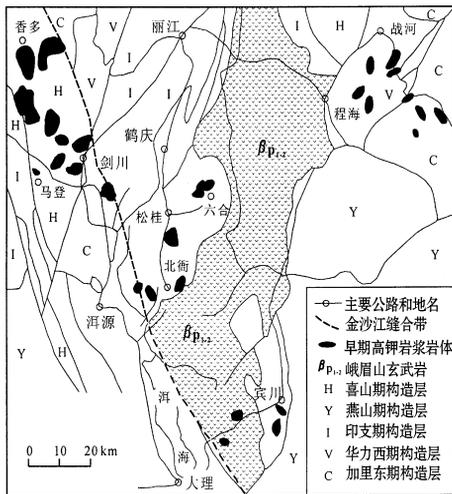


图1 青藏东缘六合一香多地区地质略图
(根据邓万明等^[12]修编)

Fig. 1 The geological sketch map in Liuhe-Xiangduo area, eastern Tibet

根据主要矿物组合,六合一香多镁铁质深源包体可分为5种类型,即石榴透辉岩、石榴斜长角闪岩、石榴角闪岩、斜长角闪岩和角闪石岩。

(1) 石榴透辉岩:主要由石榴石(Gr_t)和透辉石(Di)组成,含少量角闪石(Hbl)、斜长石(Pl)和金云母(Phl)。石榴石呈红褐色、球形聚晶,含量达 $20\% \sim 30\%$ 。石榴石发育后成合晶($Symplectite$)结构。透辉石遭受强烈的交代退变作用,钠长石或富钠斜长石充填其间。角闪石发育环带,内带呈绿色,外带为褐色,绿色角闪石包裹有透辉石和钠长石。副矿

物主要为金红石(Rt)和钛铁矿(Ilm)及少量的楣石(Ttn)。代表性样品为LH01-10-1和XD01-3。

(2) 石榴斜长角闪岩:主要矿物为石榴石、斜长石和角闪石,含较多绿帘石(Ep)、透辉石和金云母含量很少。石榴石为红褐色、呈球形聚晶($2 \sim 5 \text{ mm}$),含量变化大,最高可达 30% ,最低仅为 5% 。石榴石含大量的石英(Qtz)、透辉石、角闪石和碱性长石等包裹物,并发育后成合晶结构(图2A)。角闪石为绿色,有大、小两种角闪石,属两个世代的产物。斜长石分两类,一为石榴石包裹物,一为基质中斜长石,但均为富钠斜长石或钠长石。绿帘石呈淡绿色,粒状,其形态(图2B)类似于斜方辉石,可能由斜方辉石退变而来。副矿物为金红石、钛铁矿和楣石。金红石发育钛铁矿和楣石退变边(图2C)。代表性样品有LH01-1、LH01-9和LH01-12。

(3) 石榴角闪岩:这类包体在六合一香多地区占大多数。石榴石多呈单晶形式存在,少量呈球形聚晶出现,含量为 $15\% \sim 30\%$ 。主要矿物为石榴石和角闪石,次要矿物为透辉石、斜长石和金云母。大颗粒石榴石保存有完好的生长环带(图2D),其核部含大量的石英和斜长石包裹物,边部无包裹物。石榴石发育角闪石冠状体(图2E)和后成合晶结构(图2F)。角闪石为绿色,有大、小两种,是两个世代的产物,且早期角闪石包裹有石英。透辉石被次生角闪石交代并成筛网状,其间充填有富钠斜长石,部分被高钙斜长石充填。副矿物为金红石和钛铁矿。金红石有钛铁矿出溶(图2G)。代表性样品为SG2-3、SG2-3-1、Lh01-5、LH01-8、LH01-15和XD01-1。

(4) 斜长角闪岩:主要矿物为角闪石和斜长石,含少量透辉石和金云母。角闪石为绿色,含量大于 50% 。斜长石为高钙斜长石。副矿物为磁铁矿。代表性样品有LH01-10-2、LH01-11和XD01-5。

(5) 角闪石岩:主要矿物为角闪石。角闪石环带发育(图2H),含量大于 90% 。含少量黑云母(Bi)和斜长石。黑云母多已转变为绿泥石。斜长石蚀变强烈。副矿物为磁铁矿。代表性样品为LH01-7和XD01-2。

2 测试分析

六合一香多镁铁质深源包体中的石榴石、辉石、角闪石和斜长石矿物的电子探针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Cam ebax-SX51型电子探针测定。分析条件为:加速电压 15 kV ,电流 20 nA ;分析长石和云母时的束斑

直径为 $10\ \mu\text{m}$, 分析其它矿物时的束斑直径为 $5\ \mu\text{m}$ 。分析时所用标样为: 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。矿物电子探针分析结果列于表 1~4。

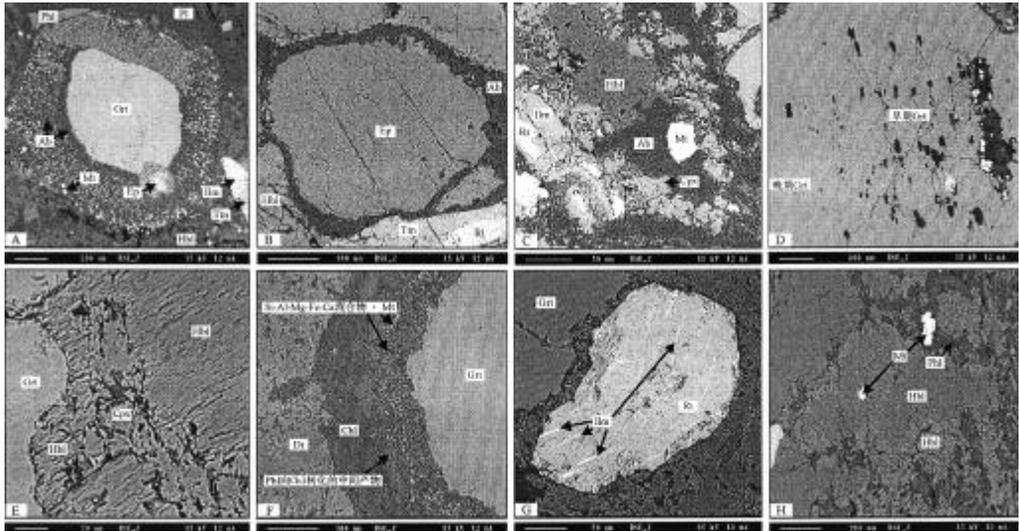


图 2 六合—香多镁铁质深源包体的背散射电子图像

Fig. 2 Back scattered electronic image of mafic deep-derived enclaves in Liuhe-Xiangduo area

A. 石榴斜长角闪岩中由钛铁矿 + 磁铁矿 + 钠长石组成的石榴石的后成合晶结构; B. 石榴斜长角闪岩中绿帘石和绿帘石退变边, 金红石的榭石退变边; C. 石榴斜长角闪岩中金红石的榭石退变边; D. 石榴角闪岩中石榴石的生长环带, 早期石榴石(内带)包裹大量的石英和斜长石, 晚期石榴石(外带)无包裹物; E. 石榴角闪岩中石榴石的角闪石冠状边; F. 石榴角闪岩中由类角闪石 + 钠长石 + 磁铁矿组成的石榴石的后成合晶结构, 后成合晶结构外为金云母带, 金云母带外为绿泥石带, 绿泥石带外为基质透辉石; G. 石榴角闪岩中金红石的钛铁矿出溶现象; H. 角闪石岩中的角闪石环带; Ab. 钠长石, Chl. 绿泥石, Cpx. 单斜辉石, Di. 透辉石, Ep. 绿帘石, Grt. 石榴石, Hbl. 角闪石, Ilm. 钛铁矿, Mt. 磁铁矿, Phl. 金云母, Pl. 斜长石, Rt. 金红石, Tn. 榭石, Si-Al-Mg-Fe-Ca 混合物, 类角闪石

3 镁铁质深源包体的平衡 P-T 条件及其指示意义

3.1 地质温压计

岩相学研究表明, 六合—香多镁铁质深源包体发育 2 个世代的矿物组合, 而用不同世代的矿物对成分估算的平衡温压具有完全不同的地质意义, 只有用早期矿物对估算出的平衡温压才能代表包体被寄主岩浆捕获前所处的热状态。六合—香多 5 类包体的矿物组合各不相同, 故在估算包体的温压条件时, 要依据不同的矿物组合来选择合适的温压计。

石榴透辉岩包体的早期矿物组合为 Grt + Di + Hbl, 故可选择 T_{MH72} (Mysen 等, 1972)、 T_{MG78} (Mori 等, 1978)、 T_{EG79} [16]、 T_{P85} [17]、 T_{K88} [18]、 T_{PN89} (Pattison 等, 1989) 和 T_{R2000} [19] Grt-Cpx 温度计, T_{GP84} [20]、 T_{PR85} (Perchuk 等, 1985) 和 T_{RV2000} [21] Grt-Hbl 温度计来估

算其平衡温度, 石榴斜长角闪岩包体的矿物组合为 Grt + Pl + Hbl + Di, 故可选用上述温度计估算平衡温度外, 还可选用 T_{BH90} [22] Hbl-Pl 温度计; 石榴角闪岩包体的矿物组合为 Grt + Hbl + Di + Pl, 故可选用与石榴斜长角闪岩相同的温度计; 斜长角闪岩包体的矿物组合为 Pl + Hbl + Di, 故仅采用 T_{BH90} 估算其平衡温度; 角闪石岩包体的矿物组合为 Hbl + Pl, 故也只能用 T_{BH90} 估算其平衡温度。

Grt-Cpx 温度计是基于平衡共生的 Grt-Cpx 间 Fe^{2+} -Mg 分配建立的, 其中 T_{MH72} 、 T_{MG78} 和 T_{R2000} 温度计没有压力校正项, T_{PN89} 温度计估算的温度往往偏低; Grt-Hbl 温度计是基于平衡共生的 Grt-Hbl 间 Fe^{2+} -Mg 分配建立的, 所有的 Grt-Hbl 温度计无压力校正项, T_{PR85} 温度计估算的温度通常偏低 100 以上; Hbl-Pl 温度计是基于与斜长石平衡共生的钙角闪石中 Al^{IV} 含量建立的, 它随斜长石中钠长石组分

表1 六合—香多镁铁质深源包体中石榴石的电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of garnets from mafic deep-derived enclaves in Liuhe-Xiangduo area, eastern Tibet

样号	LH01-10		XD01-3		LH01-1		LH01-9		LH01-12		SG2-3		SG2-3-1		LH01-5		LH01-8		LH01-15		XD01-1		
岩石类型	石榴透辉岩		石榴透辉岩		石榴斜长角闪岩六合		石榴斜长角闪岩六合		石榴斜长角闪岩六合		石榴角闪岩六合		石榴角闪岩六合		石榴角闪岩六合		石榴角闪岩六合		石榴角闪岩六合		石榴角闪岩香多		
产地	六合		香多		六合		六合		六合		六合		六合		六合		六合		六合		香多		
测试部位	核部(2) 边部(2)		核部 边部		核部(2) 边部(2)		核部(2) 边部(2)		核部 边部		核部(3) 边部(3)		核部(2) 边部(2)		核部 边部		内环带 外环带		核部(2)		核部 边部		
氧化物百分含量(/ %)																							
SiO ₂	38.83	38.65	39.54	39.27	38.05	37.80	37.87	38.09	37.55	38.89	38.84	38.94	39.22	39.53	39.43	37.25	37.33	37.78	39.11	38.52			
TiO ₂	0.06	0.05	0.23	0.16	0.15	0.28	0.07	0.00	0.12	0.08	0.08	0.00	0.11	0.00	0.00	0.19	0.12	0.03	0.11	0.20			
Al ₂ O ₃	21.89	22.00	22.88	22.57	21.65	21.61	21.46	21.67	21.57	22.30	22.28	21.87	22.22	22.45	23.03	21.51	21.74	22.06	22.51	22.50			
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.19	0.13	0.03	0.06	0.08	0.02	0.00	0.12	0.10	0.06	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.11	0.00	0.01			
FeO*	22.30	22.33	16.47	16.51	24.34	22.88	22.89	22.36	22.77	20.24	20.08	20.12	20.12	22.69	20.60	25.30	29.62	20.79	20.61	20.04			
MnO	1.45	1.30	0.28	0.30	0.42	0.32	1.36	1.82	1.29	0.99	0.65	1.37	1.06	0.88	0.41	4.28	0.53	1.77	0.69	0.56			
MgO	0.07	0.02	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00			
Na ₂ O	4.00	3.87	7.41	7.96	4.88	5.48	2.74	3.11	3.34	8.11	9.00	6.98	7.17	10.73	11.50	1.22	2.48	3.35	6.58	6.51			
CaO	12.18	12.34	13.60	13.29	10.83	11.43	14.07	13.79	13.54	9.77	9.29	10.85	10.93	4.75	5.81	9.48	8.71	13.65	11.20	11.35			
Na ₂ O	0.02	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.01	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.05	0.04	0.02	0.00	0.01	0.05			
Total	100.84	100.64	100.65	100.22	100.48	99.94	100.58	100.96	100.24	100.54	100.37	100.28	100.90	101.08	100.85	99.30	100.55	99.55	100.81	99.74			
阳离子数 n (以 12 个氧原子为基础)																							
Si	2.999	2.988	2.970	2.955	2.945	2.925	2.949	2.949	2.924	2.944	2.932	2.973	2.970	2.962	2.932	2.993	2.948	2.952	2.970	2.953			
Ti	0.004	0.003	0.013	0.009	0.009	0.017	0.004	0.000	0.007	0.005	0.004	0.000	0.007	0.000	0.000	0.012	0.007	0.002	0.006	0.011			
Al ^{IV}	0.004	0.012	0.030	0.045	0.056	0.076	0.051	0.051	0.076	0.056	0.068	0.027	0.030	0.038	0.068	0.007	0.052	0.048	0.030	0.047			
Al ^{VI}	1.988	1.992	1.993	1.956	1.917	1.893	1.917	1.924	1.903	1.931	1.912	1.940	1.952	1.942	1.948	2.028	1.970	1.983	1.983	1.984			
Cr	0.001	0.001	0.012	0.007	0.002	0.004	0.005	0.001	0.000	0.007	0.006	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.007	0.000	0.001			
Fe ³⁺	0.009	0.014	0.000	0.062	0.120	0.146	0.116	0.126	0.159	0.106	0.139	0.080	0.060	0.089	0.120	0.000	0.066	0.051	0.029	0.040			
Fe ²⁺	1.432	1.430	1.035	0.977	1.456	1.334	1.376	1.322	1.324	1.176	1.129	1.205	1.214	1.332	1.161	1.700	1.890	1.309	1.280	1.244			
Mn	0.095	0.085	0.018	0.019	0.028	0.021	0.090	0.119	0.085	0.064	0.041	0.089	0.068	0.056	0.026	0.292	0.035	0.117	0.044	0.037			
Mg	0.461	0.446	0.830	0.893	0.563	0.633	0.319	0.359	0.387	0.915	1.013	0.795	0.809	1.198	1.275	0.146	0.292	0.390	0.745	0.744			
Ca	1.008	1.023	1.094	1.072	0.898	0.948	1.174	1.143	1.130	0.793	0.751	0.887	0.887	0.382	0.463	0.816	0.737	1.143	0.911	0.932			
Na	0.003	0.007	0.006	0.005	0.008	0.006	0.001	0.006	0.006	0.004	0.003	0.002	0.003	0.000	0.007	0.006	0.004	0.001	0.001	0.007			
Sum	8.001	8.000	8.001	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.001	8.000	7.999	8.000	7.999	8.000	8.001	8.000	8.001	8.001	7.999	8.000			

FeO* 为全铁, 括号中数字为探针分析点数 (下同)

表3 六合—香多镁铁质深源包体中角闪石的电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of amphiboles from mafic deep-derived enclaves in Luhe-Xiangduo area, eastern Tibet

样号	LH01-10	XD01-3	LH01-1	LH01-9	LH01-12	SG2-3	SG2-3-1	LH01-5	LH01-8	LH01-15	XD01-1	LH01-11	XD01-4	XD01-5	LH01-7	XD01-2						
岩类	石榴	石榴透辉岩	石榴	石榴	石榴斜长	石榴角闪岩	石榴	石榴	石榴	石榴	石榴	斜长	斜长角闪岩	斜长	角闪	角闪石岩						
透辉岩		香多	斜长角闪岩	斜长角闪岩	角闪岩	六合	角闪岩	角闪岩	角闪岩	角闪岩	角闪岩	角闪岩	香多	角闪岩	石岩	香多						
六合			六合	六合	六合		六合	六合	六合	六合	六合	六合	香多	六合	六合							
产地	基质 ⁽⁴⁾		绿色 ⁽²⁾	褐色 ⁽²⁾	基质 ⁽⁴⁾	冠状体	石英包裹物	石榴石包裹物	基质 ⁽³⁾	基质 ⁽²⁾	冠状体 ⁽³⁾	基质 ⁽²⁾	基质 ⁽³⁾	基质	基质 ⁽²⁾	基质 ⁽³⁾	内带 ⁽²⁾	外带				
产状																						
氧化物百分含量(%)																						
SiO ₂	42.85	39.49	37.10	40.97	37.70	41.32	41.79	44.70	40.09	44.40	41.86	41.60	42.53	41.98	40.03	43.09	45.36	52.20	49.20	45.00	44.88	42.76
TiO ₂	1.40	0.39	0.46	1.40	0.10	1.23	1.26	1.22	0.57	1.22	1.53	0.55	1.60	1.18	1.50	1.15	0.93	0.44	1.09	0.84	1.06	0.75
Al ₂ O ₃	13.80	15.04	18.21	15.02	14.83	13.43	13.58	9.64	16.81	13.77	13.76	16.39	12.28	15.84	15.91	14.22	12.43	5.44	6.55	11.37	13.36	13.20
Cr ₂ O ₃	0.06	0.24	0.01	0.02	0.06	0.10	0.03	0.03	0.09	0.05	0.01	0.08	0.01	0.12	0.02	0.09	0.14	0.28	0.03	0.12	0.04	0.04
FeO	13.71	14.81	17.73	14.67	23.66	16.29	15.73	14.57	12.94	9.29	9.71	11.04	19.73	11.90	10.50	12.64	9.23	9.57	12.00	12.79	11.24	11.96
MnO	0.10	0.30	0.31	0.07	0.61	0.15	0.06	0.23	0.17	0.09	0.03	0.16	0.04	0.08	0.18	0.18	0.10	0.27	0.23	0.22	0.13	0.25
MgO	11.35	9.28	7.92	9.99	5.82	9.62	9.95	12.16	11.28	13.54	13.78	12.08	8.32	11.36	12.56	11.28	14.74	17.14	15.13	13.31	12.93	11.63
CaO	10.88	14.49	11.70	11.04	10.92	10.83	10.64	11.50	11.12	10.22	11.85	11.06	9.78	11.18	12.08	11.18	11.21	11.25	11.67	10.65	10.72	12.81
Na ₂ O	2.27	1.36	1.49	2.21	1.42	2.09	2.37	1.98	1.85	2.95	2.04	2.34	2.62	1.99	1.61	2.32	1.86	0.87	1.44	2.80	2.66	1.78
K ₂ O	1.30	1.92	3.03	1.31	2.87	1.69	1.51	1.27	1.87	1.13	2.21	1.85	1.00	2.10	2.72	1.12	0.80	0.25	0.41	0.55	0.86	2.22
H ₂ O	2.03	1.97	1.95	1.99	1.90	1.97	1.98	2.01	2.00	2.06	2.02	2.03	1.98	2.04	2.01	2.03	2.06	2.11	2.07	2.04	2.07	2.01
Total	99.75	99.27	99.91	98.70	99.88	98.72	98.91	99.29	98.79	98.72	98.79	99.20	99.90	99.76	99.14	99.31	98.86	99.82	99.82	99.70	99.95	99.40
阳离子数 n(以 23 个氧原子为基础)																						
Si	6.280	6.107	5.622	6.124	5.816	6.229	6.260	6.639	5.911	6.441	6.191	6.087	6.345	6.162	5.942	6.342	6.510	7.301	7.051	6.511	6.467	6.430
Ti	0.155	0.045	0.053	0.158	0.011	0.139	0.142	0.137	0.063	0.133	0.170	0.060	0.179	0.130	0.168	0.127	0.100	0.046	0.120	0.091	0.115	0.085
Al ^{IV}	1.720	1.893	2.379	1.876	2.184	1.771	1.741	1.361	2.090	1.559	1.809	1.913	1.655	1.839	2.058	1.658	1.490	0.700	0.942	1.489	1.534	1.570
Al ^{VI}	0.662	0.836	0.871	0.769	0.510	0.614	0.655	0.327	0.831	0.793	0.588	0.919	0.502	0.900	0.723	0.808	0.610	0.199	0.185	0.450	0.733	0.767
Cr	0.007	0.029	0.001	0.002	0.007	0.012	0.004	0.004	0.011	0.006	0.001	0.010	0.001	0.014	0.002	0.011	0.016	0.031	0.003	0.014	0.005	0.005
Fe ²⁺	0.434	0.260	0.579	0.363	1.044	0.434	0.407	0.283	0.728	0.280	0.122	0.374	0.717	0.190	0.175	0.187	0.553	0.725	0.454	0.651	0.356	0.000
Fe ³⁺	1.250	1.650	1.669	1.472	2.010	1.620	1.564	1.529	0.869	0.847	1.079	0.988	1.744	1.272	1.129	1.369	0.555	0.395	0.992	0.896	0.999	1.504
Mn	2.481	2.143	1.789	2.228	1.339	2.162	2.222	2.691	2.479	2.929	3.037	2.629	1.851	2.486	2.780	2.475	3.154	3.574	3.220	2.870	2.777	2.608
Mg	0.013	0.039	0.040	0.009	0.079	0.019	0.008	0.029	0.022	0.012	0.003	0.020	0.005	0.010	0.023	0.023	0.012	0.032	0.028	0.027	0.016	0.031
Ca	1.709	1.946	1.900	1.768	1.806	1.749	1.707	1.830	1.757	1.588	1.878	1.740	1.564	1.758	1.922	1.763	1.724	1.686	1.793	1.652	1.655	2.000
Na	0.645	0.406	0.438	0.638	0.424	0.610	0.689	0.570	0.529	0.829	0.586	0.662	0.758	0.567	0.463	0.662	0.518	0.236	0.407	0.785	0.743	0.518
K	0.245	0.376	0.586	0.253	0.565	0.326	0.288	0.241	0.353	0.209	0.417	0.348	0.191	0.393	0.516	0.211	0.146	0.046	0.076	0.102	0.158	0.425
Sum	15.600	15.727	15.924	15.658	15.795	15.685	15.642	15.639	15.626	15.881	15.749	15.512	15.718	15.901	15.636	15.388	14.968	15.268	15.539	15.554	15.943	

表4 六合—香多镁铁质深源包体中斜长石的电子探针分析结果

Table 4 Electron microprobe analyses of plagioclases from mafic deep-derived enclaves in Liuhe-Xiangduo area, eastern Tibet

样号	LH01-10	XD01-3	LH01-1	LH01-9	LH01-12	SG2-3-1	LH01-5	LH01-1	XD01-11	LH01-4	XD01-5	XD01-2						
岩类	石榴 透辉岩 六合	石榴 透辉岩 香多	石榴 斜长角 闪岩六合	石榴 斜长角 闪岩六合	石榴斜长 角闪岩 六合	石榴 角闪岩 六合	石榴 角闪岩 六合	石榴 角闪岩 六合	石榴 角闪岩 六合	斜长 角闪岩 六合	斜长 角闪岩 六合	斜长 角闪岩 香多	角闪 石岩 香多					
产地	石榴石	绿色角 闪石包 裹物(2)	基质	石榴石 包裹物	基质	石榴石 包裹物	石榴石 后成 合晶	基质	石榴石 后成 合晶	石榴石 后成 合金	辉石包 裹物(3)	基质(4)	基质	基质	基质(2)	基质(2)	角闪石 包裹物	
产状	石榴石 包裹物(3)	闪石包 裹物(2)	基质	石榴石 包裹物	基质	石榴石 包裹物	石榴石 后成 合晶	基质	石榴石 后成 合晶	石榴石 后成 合金	辉石包 裹物(3)	基质(4)	基质	基质	基质(2)	基质(2)	角闪石 包裹物	
氧化物百分含量(/ %)																		
SiO ₂	60.33	66.80	68.05	66.58	66.95	66.71	62.90	67.92	68.05	64.44	64.76	54.46	61.98	66.71	60.41	50.20	47.05	68.49
TiO ₂	0.04	0.10	0.00	0.09	0.00	0.02	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	24.31	19.45	19.75	19.36	20.00	20.15	23.38	20.80	19.51	20.36	19.79	26.92	23.52	20.15	24.18	31.46	33.69	19.60
FeO*	0.71	0.58	0.23	0.36	0.21	0.23	0.05	0.08	0.04	1.33	2.96	0.66	0.28	0.23	0.02	0.20	0.11	0.15
MnO	0.04	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.08	0.12	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
MgO	0.17	0.29	0.00	0.04	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00	0.35	2.48	0.77	0.15	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00
CaO	6.70	1.27	0.54	0.46	0.50	0.79	4.75	1.23	0.20	2.02	0.52	11.79	4.96	0.79	6.31	14.87	17.03	0.21
Na ₂ O	7.59	10.92	10.99	10.87	10.55	9.99	8.25	10.78	11.30	10.11	5.50	4.88	8.30	9.99	7.68	3.14	1.90	11.53
K ₂ O	0.33	0.11	0.03	0.10	0.40	1.12	0.73	0.08	0.06	0.20	0.31	0.28	0.50	1.12	0.41	0.10	0.05	0.05
阳离子数 n(以6个氧原子为基础)																		
Total	100.20	99.57	99.58	97.87	98.65	99.02	100.11	100.96	99.20	98.90	96.45	99.77	99.74	99.02	99.01	100.03	99.84	100.04
Si	2.692	2.951	2.984	2.976	2.967	2.956	2.783	2.943	2.993	2.885	2.929	2.479	2.758	2.956	2.714	2.291	2.165	2.991
Ti	0.001	0.003	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Al	1.277	1.012	1.020	1.019	1.044	1.052	1.218	1.061	1.010	1.074	1.054	1.443	1.233	1.052	1.279	1.691	1.825	1.008
Fe ²⁺	0.027	0.022	0.008	0.013	0.008	0.008	0.002	0.003	0.002	0.050	0.112	0.025	0.011	0.008	0.001	0.008	0.005	0.006
Mn	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Mg	0.011	0.019	0.000	0.003	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.023	0.167	0.052	0.010	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000
Ca	0.320	0.060	0.025	0.022	0.024	0.037	0.225	0.057	0.009	0.097	0.025	0.575	0.237	0.037	0.304	0.727	0.840	0.010
Na	0.656	0.935	0.934	0.942	0.907	0.858	0.708	0.905	0.964	0.877	0.482	0.431	0.716	0.858	0.669	0.278	0.170	0.976
K	0.018	0.007	0.001	0.006	0.023	0.063	0.041	0.005	0.003	0.011	0.018	0.016	0.028	0.063	0.024	0.006	0.003	0.003
Sum	5.00	5.01	4.97	4.99	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	5.02	4.79	5.02	4.99	4.98	4.99	5.00	5.01	4.99

$X_{Ab} > 0.5$ 或 < 0.5 , 参数 γ 发生相应的变化^[22]。

故用上述温度计估算包体的平衡温度时, 以 T_{EG79} 、 T_{P85} 、 T_{K88} 和 T_{R2000} Grt-Cpx 温度计, T_{GP84} 和 T_{RV2000} Grt-Hbl 温度计, 及 T_{HH90} Hbl-P1 温度计来估算包体的平衡温度。

六合—香多 5 类包体的矿物组合均有 Hbl, 故可采用 $P_{H286}^{[23]}$ 、 $P_{H87}^{[24]}$ 和 $P_{RH89}^{[25]}$ 角闪石 Al 压力计 ($P_{Al-in-Hbl}$) 估算包体的平衡压力。角闪石 Al 压力计是基于角闪石中 Al^{IV} 含量与压力 (P) 之间的经验公式建立的, P_{H286} 较粗造, P_{RH89} 估算的压力通常偏低, 故用 P_{H87} 压力计来估算包体的平衡压力, 同时参考 P_{H286} 和 P_{RH89} 的估算结果。

3.2 镁铁质深源包体的平衡 P-T 条件及其指示意义

笔者采用 Grt-Cpx 和 Hbl-P1 温度计分别在 $P = 0.8$ GPa 和 $P = 1.2$ GPa 的压力条件下估算了包体的平衡温度。结果表明, Grt-Cpx 温度计在 $P = 1.2$ GPa 条件下所估算的平衡温度比 $P = 0.8$ GPa 条件

下所估算的平衡温度略高, 但不超过 20 。Hbl-P1 温度计在 $P = 1.2$ GPa 比 $P = 0.8$ GPa 所估算的平衡温度略低约 50 ~ 60 。显然, 压力对 Hbl-P1 温度计的影响比 Grt-Cpx 温度计大。为此, 考虑压力对这两种温度计的不同影响, 在用这两种温度计估算包体的平衡温度时, 假定 $P = 0.8$ GPa。

在估算包体平衡温度的过程中, 发现矿物对的边缘温度往往比矿物对的中心温度高约 100 ~ 130 以上, 这一现象说明快速上升的高温高钾岩浆对所捕获的包体中矿物边缘有强烈的热影响。

故在讨论包体的平衡温压条件时, 以矿物对的中心成分所估算的温压值作为包体被寄主岩岩浆捕获前所处的温压状态。据上述原则, 六合—香多镁铁质深源包体的平衡温压估算结果列于表 5。

从表 5 中看出, 石榴透辉岩包体用 Grt-Cpx 温度计估算的平衡温度为 787 ~ 912 ; Grt-Hbl 温度计估算的温度不稳定, Hbl-P1 温度计估算的温度为

表 5 六合—香多深源包体的平衡温压 (P-T) 估算结果 (GPa)
Table 5 Equilibrium temperature () and pressure (GPa) of mafic deep-derived enclaves in Liuhe-Xiangduo area, eastern Tibet

样号 包体类型	LH01-10 石榴透辉岩	XD01-3 石榴透辉岩	LH01-1 石榴 斜长角闪岩	LH01-9 石榴 斜长角闪岩	LH01-12 石榴 斜长角闪岩	SG2-3 石榴角闪岩	SG2-3-1 石榴角闪岩	LH01-5 石榴角闪岩
Grt-Cpx 温度计								
T_{EG79}	871 _888	859 _912	800	972 _1002		817 _825	845 _894	656 _816
T_{P85}	858 _877	846 _901	785	966 _996		800 _809	831 _882	663 _797
T_{K88}	855 _876	834 _894	775	957 _985		792 _799	827 _883	559 _729
T_{R2000}	818 _840	787 _835	699	924 _947		696 _704	779 _817	553 _712
Grt-Hbl 温度计								
T_{GP84}	646 _693	1074 _1287	833	709 _739	731 _734	690 _762	700 _744	756
T_{RV2000}	631		773	621 _642	660 _665	799 _801	693 _714	903 _963
Hbl-P1 温度计								
T_{HH90}	772 _817	808 _859	751	710 _719	664 _731		708 _722	807 _941
Hbl 铝压力计								
P_{H286}	0.78 _0.81	1.11 _1.37	0.90 _0.96	0.79 _0.83	0.79	0.80 _1.21	0.76 _0.81	0.85 _1.19
P_{H87}	0.83 _0.87	1.21 _1.50	0.97 _1.04	0.85 _0.90	0.85	0.86 _1.32	0.81 _0.88	0.91 _1.29
P_{RH89}	0.69 _0.72	0.92 _1.14	0.74 _0.79	0.65 _0.68	0.65	0.66 _1.00	0.62 _0.67	0.70 _0.98
样号	LH01-8	LH01-15	XD01-1	LH01-11	XD01-4	XD01-5	LH01-7	XD01-2
包体类型	石榴角闪岩	石榴角闪岩	石榴角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	角闪石岩	角闪石岩
Grt-Cpx 温度计								
T_{EG79}		761 _844	816					
T_{P85}		746 _832	801					
T_{K88}		720 _812	794					
T_{R2000}		683 _781	712					
Grt-Hbl 温度计								
T_{GP84}	539 _576	682 _686	731					
T_{RV2000}	414 _471	586 _592	687					
Hbl-P1 温度计								
T_{HH90}			876	753	631 _632	512 _515		
Hbl 铝压力计								
P_{H286}	0.69	0.96 _1.01	1.01	0.85 _0.91	0.66		0.57 _0.60	0.74 _0.78
P_{H87}	0.74	1.04 _1.10	1.09	0.91 _0.98	0.71		0.60 _0.64	0.79 _0.84
P_{RH89}	0.57	0.79 _0.83	0.83	0.70 _0.75	0.54		0.46 _0.49	0.60 _0.64

772 ~859 ,与 Grt-Cpx 温度计估算的结果相当。故石榴透辉岩包体的平衡温度为 770 ~920 。用 P_{Hbl} 压力计估算的平衡压力为 0.83 ~1.50 GPa,若以 1 GPa 3 km,则石榴透辉岩包体的平衡压力反映的深度为 27 ~50 km。

石榴斜长角闪岩包体用 Grt-Cpx 温度计估算的温度为 699 ~1 002 ,Grt-Hbl 温度计估算的温度为 621 ~833 ;Hbl-P1 温度计估算的温度为 664 ~751 。故石榴斜长角闪岩的平衡温度范围较宽,为 620 ~1 000 ,且主要集中在 730 ~950 。平衡压力为 0.85 ~1.04 GPa 反映的深度为 28 ~34 km。

石榴角闪岩包体用 Grt-Cpx 温度计估算的温度为 553 ~894 ,Grt-Hbl 温度计估算的温度非常不稳定,Hbl-P1 温度计估算的温度为 708 ~941 。故石榴角闪岩的平衡温度范围为 641 ~941 ,主要集中在 720 ~900 。用 P_{Hbl} 压力计所估算的平衡压力为 0.74 ~1.32 GPa 所反映的深度为 24 ~44 km。

斜长角闪岩包体的平衡温度为 512 ~753 。平衡压力为 0.71 ~0.98 GPa 反映的深度为 23 ~32 km。

角闪岩包体的平衡压力为 0.60 ~0.84 GPa,反映的深度为 20 ~28 km。

故六合—香多镁铁质深源包体中前 3 类包体的平衡温度较高(720 ~950)、压力较大(0.74 ~1.50 GPa),后 2 类包体平衡温度较低(510 ~735)、压力较小(0.60 ~0.98 GPa)。若以该区地壳厚度为 40 km^[26],那么上述包体均来自中下地壳,且前 3 类包体以下地壳为主,部分来自壳—幔过渡带,后 2 类包体以中地壳为主。此外,包体的平衡温压条件还暗示其寄主岩浆的起源深度至少在 50 km 以上。

4 结 论

通过以上分析,本文得出如下结论:

(1) 六合—香多镁铁质深源包体有 5 种岩石类型,即石榴透辉岩、石榴斜长角闪岩、石榴角闪岩、斜长角闪岩和角闪岩,其主要矿物组合分别为 Grt + Di + Hbl, Grt + P1 + Hbl + Di, Grt + Hbl + P1, P1 + Hbl 和 Hbl + Bt。

(2) 六合—香多镁铁质深源包体中石榴透辉岩、石榴斜长角闪岩、石榴角闪岩、斜长角闪岩和角闪岩包体的平衡温压分别是 770 ~920 和 0.83 ~1.50 GPa(相当于 27 ~50 km 深)、730 ~950 和 0.85 ~1.04 GPa(28 ~34 km)、720 ~900 和 0.74 ~1.32 GPa(24 ~44 km)、512 ~753 和 0.71 ~

0.98 GPa(23 ~32 km) 以及 0.60 ~0.84 GPa(20 ~28 km)。

(3) 六合—香多镁铁质深源包体中前 3 类包体主要来自下地壳,其平衡温压较高(720 ~950 、0.74 ~1.50 GPa);后 2 类包体主要来自中地壳,其平衡温压较低(510 ~735 、0.60 ~0.98 GPa)。且其寄主岩浆的起源深度至少在 50 km 以上。

参考文献(References):

- [1] Pan Guizang(潘桂棠), Wang Peisheng(王培生), Xu Yaorong(徐耀荣). Cenozoic Tectonic Evolution of Qinghai-Xizang Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 32-70 (in Chinese).
- [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]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (B9): 21 745-21 759.
- [3] 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]. International Geology Review, 1997, 39: 191-219.
- [4] Meyer B, Tappanier P, Bourjot L, et al. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, Lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet Plateau[J]. Geophysical Journal International, 1998, 135: 1-47.
- [5] Wang JH, Yin A, Harrison TM, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 188: 123-133.
- [6] Harrison TM, Leloup P H, Ryerson F J, et al. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red river shear zone, Yunnan and Vietnam[A]. In: Yin A, Harrison TM, eds. The Tectonic Evolution of Asia[C]. New York: Cambridge University Press, 1996. 208-226.
- [7] Maske JG, 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] Mei Houjun(梅厚钧). Olivine basalt and camptonite with peridotite xenoliths from Maguan, Yunnan[J]. Scientia Geologica Sinica(地质科学), 1966, 1: 50-63 (in Chinese).
- [9] Shu Xiaoxin(舒小辛). The genesis of Cpx-peridotitic xenoliths in basaltite of Maguan, Yunnan province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica(岩石矿物学杂志), 1995, 14(1): 47-51 (in Chinese).
- [10] Liu Xianfan(刘显凡), Zhan Xinzhi(战新志), Gao Zhenmin(高振敏), et al. Deep xenoliths in alkalic porphyry, Liuhe, Yunnan, and implications to petrogenesis of alkalic porphyry and associated mineralizations[J]. Science in China(D)(中国科学 D 辑), 1999, 29(5): 413-420 (in Chinese).
- [11] Cai Xinping(蔡新平). Discovery of deep-derived xenoliths in Cenozoic alkali-rich porphyries along the margin of the Yangtze platform and its significance[J]. Scientia Geologica Sinica(地质科学), 1992, 27(2): 183-189 (in Chinese).
- [12] Deng Wanming(邓万明), Huang Xuan(黄萱), Zhong Dalai(钟大赉). Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyry in west Yunnan, China[J]. Scientia Geol-

- ica Sinica (地质科学), 1998, 33(4): 412-425 (in Chinese).
- [13] Lü Boxi (吕伯西), Qian Xianggu (钱祥贵). Petrology study on deep-derived enclaves from Cenozoic alkalic volcanic rocks and alkali-rich porphyries in western Yunnan [J]. Yunnan Geology (云南地质), 1999, 18(2): 127-143 (in Chinese).
- [14] Wang Jian (王建), Li Jianping (李建平), Wang Jianghai (王江海), et al. Geological implications for the mafic deep-derived enclaves from Cenozoic shoshonitic rocks in Jianchuan-Dali area, western Yunnan [J]. Journal of Mineralogy (矿物学报), 2002, 22(2): 113-125 (in Chinese).
- [15] Zhang Yuquan (张玉泉), Xie Yingwen (谢应雯). Geochronology of Alaoshan-Inshajiang alkali-rich intrusive rocks and their Sr and Nd isotopic characteristics [J]. Science in China (D) (中国科学 D 辑), 1997, 27(4): 289-293 (in Chinese).
- [16] Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibrium [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, 71: 13-22.
- [17] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer-geobarometer calibration: The garnet-clinopyroxene geothermometer revisited [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1985, 3: 231-243.
- [18] Kogoh E J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer: A reinterpretation of existing experimental data [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1988, 99: 44-48.
- [19] Ravna E K. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: An updated calibration [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 211-219.
- [20] Graham C M, Powell R. A garnet-hornblende geothermometer: Calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1984, 3: 13-21.
- [21] Ravna E K. Distribution of Fe^{2+} and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: An empirical calibration of the garnet-hornblende Fe-Mg geothermometer [J]. Lithos, 2000, 53: 265-277.
- [22] Blundy J D, Holland T J B. Calcic amphibole equilibrium and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1990, 104: 208-224.
- [23] Hammarstrom J M, Zen E A. Aluminum in hornblende: An empirical calibration of the geothermometer [J]. American Mineralogist, 1986, 71: 1 297-1 313.
- [24] Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, et al. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calcalkaline plutons [J]. American Mineralogist, 1987, 72: 231-239.
- [25] Johnson M C, Rutherford M J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geothermometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks [J]. Geology, 1989, 17: 837-841.
- [26] Liu F T, Liu J H, Zhong D L, et al. The subducted slab of Yangtze continental block beneath the Tethyan orogen in western Yunnan [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(5): 466-471.

EQUILIBRIUM P-T CONDITIONS OF MAFIC DEEP-DERIVED ENCLAVES AND ITS SIGNIFICANCE IN LIUHE-XIANGDUO AREA OF EASTERN TIBET

W EI Qi-rong^{1,2}, W ANG Jiang-hai²

(1. College of Materials Science & Chemical Engineering, China University of Geosciences Wuhan 430074, China;
2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on electron microprobe analyses of garnets, pyroxenes, amphiboles and plagioclases from mafic deep-derived enclaves in Liuhe-Xiangduo area, eastern Tibet, calculated equilibrium temperatures of the enclaves by Grt-Cpx geothermometers (T_{Gr79} , T_{P85} , T_{K88} , and T_{R2000}), Grt-Hbl geothermometers (T_{GP84} and T_{RV2000}), and Hbl-Pl geothermometers (T_{BH90}), and equilibrium pressures by aluminum-in-amphibole geobarometry ($P_{Al-in-Hbl}$). The results showed that equilibrium temperature and pressure conditions of garnet diopsidite, garnet amphibolite, garnethornblendite, amphibolite and hornblendite were 770 ~920 and 0.83 ~1.50 GPa (equivalent to 27 ~50 km depth), 730 ~950 and 0.85 ~1.04 GPa (28 ~34 km), 720 ~900 and 0.74 ~1.32 GPa (24 ~44 km), 512 ~753 and 0.71 ~0.98 GPa (23 ~32 km), and 0.60 ~0.84 GPa (20 ~28 km). The P-T conditions in the enclaves revealed the former three types of enclaves came from low-crust with higher P-T (720 ~950 and 0.74 ~1.50 GPa), and the latter two derived from middle-crust with lower P-T (510 ~735 and 0.60 ~0.98 GPa). The P-T condition of enclaves still indicated the source depth of the high-K magma is 50 km at least.

Key words: Eastern Tibet; Liuhe-Xiangduo; Mafic deep-derived enclave; Equilibrium temperature and pressure conditions.