

文章编号: 1000-4734(2004)03-0278-07

云南马关尖晶石相二辉橄榄岩包体的平衡 温压条件及其指示意义

魏启荣^{1, 2}, 王江海²

(1. 中国地质大学 材化学院, 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: 依据云南马关地区 8 个尖晶石二辉橄榄岩包体中 22 个单斜辉石-斜方辉石矿物对的电子探针成分, 采用 T_{BM85} 、 T_{BK90} 二辉石温度计和 T_{BK90Ca} 、 T_{W91en} 、 T_{X93Ca} 单辉石温度计估算了其平衡温度, 用 P_{M80en} 、 P_{M80di} 压力计估算了其平衡压力。温压估算表明, 马关尖晶石相二辉橄榄岩包体的平衡温压分别为 900 ~ 1150 °C 和 1.29 ~ 2.20 GPa (相当于地下深度 45 ~ 71 km)。由 T_{M80en} 与 P_{M80en} 、 T_{M80di} 与 P_{M80di} 的估算结果所分别构筑的马关地区上地幔地温曲线与大洋地温曲线非常吻合, 显示马关地区上地幔具有很高的热流值, 暗示青藏东缘及邻区于 0 ~ 16 Ma 期间有热的软流圈地幔上涌, 地幔上涌在构造上的响应即是青藏东缘乃至整个东亚地区区域性岩石圈的东-西向伸展。

关键词: 云南马关; 尖晶石相二辉橄榄岩包体; 平衡温压条件。

中图分类号: P581; P588.12 **文献标识码:** A

作者简介: 魏启荣, 男, 1964 年生, 副教授, 火山岩岩石学、地球化学和无机材料专业, E-mail: weiqr1030@cug.edu.cn.

上地幔的热结构和热状态是地球动力学的一个基本问题。以往对上地幔热结构的认识以及上地幔地温曲线的重建, 通常是根据地表大地热流值间接推导的。但是, 由这种方法得到的结果往往具有很大的不确定性^[1]。自 Davis 和 Boyd^[2]证明简单化学体系 CaO-MgO-SiO_2 (CMS) 中单斜辉石 (Cpx) 和斜方辉石 (Opx) 的混溶区间是温度的函数以来, 特别是随着高温高压实验技术的发展和实验数据的积累, 已陆续建立了数十个有关幔源包体矿物组合的地质温压计。随着对幔源包体研究的深入发展以及地质温压计的逐步完善, 我们有可能更为直接地探讨上地幔的热结构。

与中国东部上地幔热结构和热状态的研究^[3~7]相比较, 中国西部上地幔热结构和热状态的研究显得十分薄弱。这严重制约了对中国西部岩石圈上地幔热结构和热状态的认知, 也制约了青藏高原形成和演化的大陆动力学机制研究的开展。

云南马关地区新生代碧玄岩岩管中发育的地幔岩包体, 为我们研究和认识中国西部岩石圈上地幔热结构和热状态提供了可能。本文拟用马关地幔岩包体的矿物电子探针分析数据和现有的地质温压计, 来探讨马关地区上地幔的热结构和热状态及其所指示的地质意义。

1 大地构造背景

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^[8,9], 而且还控制着青藏东缘及邻区新生代的构造和岩浆活动^[9]。青藏东缘及邻区新生代构造活动可分为 3 个阶段: 28 ~ 40 Ma 间大规模的陆内俯冲作用^[10]; 16 ~ 24 Ma 间大规模的转换伸展作用^[11]; 0 ~ 16 Ma 间区域性的东西向伸展作用^[9,12,13]。与之对应青藏东缘及邻区新生代发育了早晚 2 期高钾岩浆活动。早期高钾岩浆活动 (28 ~ 40 Ma) 沿整个金沙江—红河构造带分布^[13], 岩石类型主要为正长岩、粗面岩、粗安岩和钾玄质煌斑岩, 该期岩浆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; 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

收稿日期: 2004-03-28

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

布^[13], 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浆岩系的碧玄岩岩管中^[14]。

2 岩石学特征

马关地幔岩包体产出在马关八寨一木厂街地区发育的碧玄岩岩管中^[13,14]。围岩地层时代为寒武纪—奥陶纪。碧玄岩呈岩管群沿断裂分布, 碧玄岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄为(11.9 ± 0.3) ~ (12.4 ± 0.2) Ma^[13], 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。

包体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。

尖晶石二辉橄榄岩: 变晶结构, 以镶嵌结构为主, 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, 粒径大多为 0.5 ~ 1.5 mm, 在岩石中的体积百分含量(下同)为 60% ~ 70%。斜方辉石呈板状、短柱状, 晶面大多已遭受熔蚀而被破坏, 淡褐色—浅棕色, 解理缝细而疏, 大多呈平行消光, 粒径为 0.25 mm × 0.5 mm ~ 0.75 mm

× 1.5 mm, 最大颗粒可达 3 mm × 6 mm, 含量约为 15%。单斜辉石多表现为不规则板状, 浅绿色, 解理发育, 解理缝粗而多, 粒径多为 0.25 mm × 0.25 mm ~ 0.5 mm × 0.75 mm, 含量约为 6% ~ 10%。尖晶石呈棕色—棕褐色, 形状不规则, 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)。

3 测试分析

矿物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。分析条件为: 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。众所周知, 如果包体中的矿物存在明显的分带现象, 则说明矿物间没有达到最终的热平衡, 利用这些矿物对的成分计算出的 *p-T* 条件不能代表包体的平衡 *p-T* 条件。为此, 本文选用的均是没有成分分带的样品, 即矿物的边缘与其中心的成分几乎一致的样品。马关地区 8 个尖晶石二辉橄榄岩包体中 22 个单斜辉石-斜方辉石矿物对的电子探针分析结果列于表 1 和表 2。

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 the Maguan area

样 号	分析 点数	<i>w_B</i> / %											
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MgO	CaO	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
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
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
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
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
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
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
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
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
样 号	阳离子数 <i>n</i> (以 6 个氧原子为基础)												
	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Mg	Ca	Mn	Fe ²⁺	Ni	Na	K	Total
MG01-3	1.892	0.014	0.273	0.021	0.010	0.812	0.791	0.003	0.068	0.002	0.110	0.000	3.997
MG01-6	1.887	0.015	0.265	0.025	0.017	0.823	0.794	0.002	0.062	0.003	0.109	0.000	4.000
MG01-7	1.898	0.009	0.256	0.017	0.020	0.824	0.804	0.002	0.061	0.002	0.106	0.001	4.000
MG01-10	1.887	0.015	0.285	0.023	0.002	0.818	0.773	0.003	0.07	0.003	0.113	0.000	4.000
MG01-11	1.889	0.016	0.293	0.028	0.001	0.793	0.772	0.004	0.075	0.002	0.126	0.000	3.998
MG01-13	1.872	0.011	0.312	0.027	0.001	0.849	0.726	0.004	0.095	0.001	0.103	0.000	3.999
MG01-18	1.888	0.014	0.273	0.020	0.014	0.816	0.801	0.004	0.062	0.000	0.109	0.000	4.000
MG01-19	1.878	0.017	0.311	0.017	0.008	0.807	0.759	0.002	0.077	0.002	0.123	0.000	4.000

注: FeO* 为全铁(下同)。

表 2 马关尖晶石二辉橄榄岩中斜方辉石的电子探针分析结果

Table 2. Electron microprobe analyses of orthopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in the 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
MG01-3	4	55.56	0.14	4.32	0.37	6.18	32.95	0.64	0.14	0.09	0.10	0.00	100.49
MG01-6	2	55.90	0.19	4.23	0.40	6.00	32.96	0.68	0.10	0.06	0.06	0.00	100.58
MG01-7	2	55.42	0.07	4.37	0.29	6.31	32.59	0.66	0.14	0.07	0.10	0.01	100.03
MG01-10	2	55.67	0.15	4.83	0.31	5.65	32.72	0.73	0.18	0.07	0.11	0.04	100.46
MG01-11	4	55.47	0.15	4.36	0.34	6.00	32.68	0.64	0.17	0.05	0.11	0.01	99.98
MG01-13	3	54.36	0.17	5.70	0.56	6.05	31.49	1.14	0.14	0.08	0.16	0.01	99.86
MG01-18	2	55.26	0.12	4.19	0.36	6.18	32.61	0.67	0.14	0.08	0.08	0.01	99.70
MG01-19	3	55.29	0.19	5.12	0.26	5.98	32.42	0.81	0.14	0.09	0.11	0.00	100.41

样 号	阳离子数 n (以 6 个氧原子为基础)												
	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Mg	Ca	Mn	Fe ²⁺	Ni	Na	K	Total
MG01-3	1.908	0.004	0.175	0.010	0.005	1.686	0.024	0.004	0.172	0.002	0.006	0.000	3.997
MG01-6	1.916	0.005	0.171	0.011	0.000	1.684	0.025	0.003	0.172	0.002	0.004	0.000	3.991
MG01-7	1.913	0.002	0.178	0.008	0.000	1.677	0.025	0.004	0.182	0.002	0.007	0.000	3.996
MG01-10	1.908	0.004	0.195	0.008	0.000	1.671	0.027	0.005	0.162	0.002	0.007	0.002	3.991
MG01-1	11.913	0.004	0.177	0.009	0.000	1.680	0.024	0.005	0.173	0.002	0.007	0.001	3.994
MG01-1	31.882	0.004	0.233	0.016	0.000	1.625	0.042	0.004	0.175	0.002	0.011	0.000	3.995
MG01-18	1.913	0.003	0.171	0.010	0.000	1.683	0.025	0.004	0.179	0.002	0.006	0.000	3.996
MG01-1	91.899	0.005	0.207	0.007	0.000	1.659	0.030	0.004	0.172	0.003	0.007	0.000	3.993

4 包体的平衡 p - T 条件和指示意义

目前,关于幔源包体的温压计为数众多。但对同一个包体样品,采用不同的温压计可以产生 50~200 °C 和 0.2~1.0 GPa (相当于 5~30 km) 的误差^[15]。故选择合适的地质温压计是正确估算包体平衡温压条件的前提。

4.1 地质温度计

有关尖晶石相幔源包体的地质温度计有基于包体中单斜辉石-斜方辉石 (Di-En) 矿物对的温度计 (二辉石温度计)、单斜辉石 (Di) 温度计和斜方辉石 (En) 温度计 (后 2 种简称单辉石温度计)。

二辉石温度计:包括 Wood & Banno 温度计^[16] (T_{WB73})、Wells 温度计^[17] (T_{W77})、Bertrand & Mercier 温度计^[18] (T_{BM85}) 和 Brey & Kohler 温度计^[19] (T_{BK90})。

T_{WB73} 是最早的二辉石温度计, T_{W77} 是 T_{WB73} 的改进型,它们都没有压力校正项^[16,17],因而对高压样品常常出现低估。 T_{WB73} 对 1150 °C 以上的温度区间有效, T_{W77} 适用于温度低于 1100 °C 的样品^[1]; T_{BM85} ^[18]是在尽可能简单的实验体系基础上,据顽火辉石 (En) 的转移反应 $(En)_{Opx} - (En)_{Cpx}$ 进行推导,并采用 $1 - w(Ca)/[1 - w(Na)]$ 的校正方法来计算辉石中两种端员组分的含量而建立起

来的二辉石温度计,该温度计能较好地吻合天然体系的实验结果^[1]; T_{BK90} 是根据新的实验数据并采用与 Bertrand & Mercier^[18]相似的校正方法推导出的二辉石温度计,与天然体系的实验结果能较好地吻合^[1]。

故用二辉石温度计估算尖晶石相幔源包体的平衡温度时,以 T_{BM85} 和 T_{BK90} 温度计的估算结果相对可靠。

单辉石温度计:主要包括 Mercier 斜方辉石温度计^[20] (T_{M80en}) 和单斜辉石温度计^[20] (T_{M80di}) 组、Sachtleben & Seck 的斜方辉石温度计^[21] (T_{SS81en})、Brey & Kohler 的斜方辉石温度计^[19] (T_{BK90Ca})、Witt & Seck 的斜方辉石温度计^[22] (T_{WS91en}) 和徐义刚的单斜辉石温度计^[1] (T_{X93Ca})。

T_{M80en} 只在 1100~1200 °C 范围内才能给出较为合理的估计, T_{M80di} 总体上高估约 100 °C^[1]; T_{SS81en} 对低于 1200 °C 的样品估计较好,但对高于 1200 °C 的样品会过低估算 100~120 °C^[1]; T_{BK90Ca} 是 Brey & Kohler^[19]依据斜方辉石中 Ca 离子溶解度与温度的关系建立的一种比较适合深源包体温度估算的单辉石温度计; T_{WS91en} 是 Witt & Seck^[22]依据斜方辉石中 Cr 和 Al 在 M_1 位上的含量与温度之间的关系并假定压力为 1.5 GPa 的前提下建立的单辉石温度计; T_{X93Ca} 是徐义刚^[1]在 Bertrand &

Mercier 方法^[18]的基础上,假定压力为 1.5 GPa 的条件下推导出的 Ca 单斜辉石温度计,它能较合理地估算深源包体的温度。

故用单辉石温度计估算幔源包体平衡温度时,以 T_{BK90Ca} 、 T_{WS91en} 和 T_{X93Ca} 温度计的估算结果较为合理。

4.2 地质压力计

对尖晶石相幔源包体的压力计算,迄今为止还没有得到很好的解决。目前使用的地质压力计有 Mercier 单斜辉石压力计^[20](P_{M80di})和斜方辉石压力计^[20](P_{M80en}),以及 Kohler & Brey 的 Ca 压力计^[23](P_{KB90})。

P_{M80di} 和 P_{M80en} 压力计是据辉石中 Ca、Mg、Fe、Mn、Al、Cr、Na 等 7 种变量与压力之间的关系而构筑起来的压力计,该压力计适合幔源条件下矿物形成的压力计算^[24],尤其是对没有合适压力计的尖晶石相地幔岩包体。

P_{KB90} 是 Kohler & Brey^[23] 据 Ca 在共生的橄榄石和单斜辉石之间的平衡分配建立的用于尖晶石相橄榄石-单斜辉石 Ca 交换反应的压力计,但该压力计对单斜辉石和橄榄石中 CaO 的分析精度要求很高,而橄榄石中 CaO 含量又非常的低,不易准确测定,故该压力计在实际使用中受到很大

程度的限制。

因此,估算尖晶石相幔源包体的平衡压力,目前还是采用 P_{M80di} 和 P_{M80en} 。

4.3 p - T 条件的估算及其指示意义

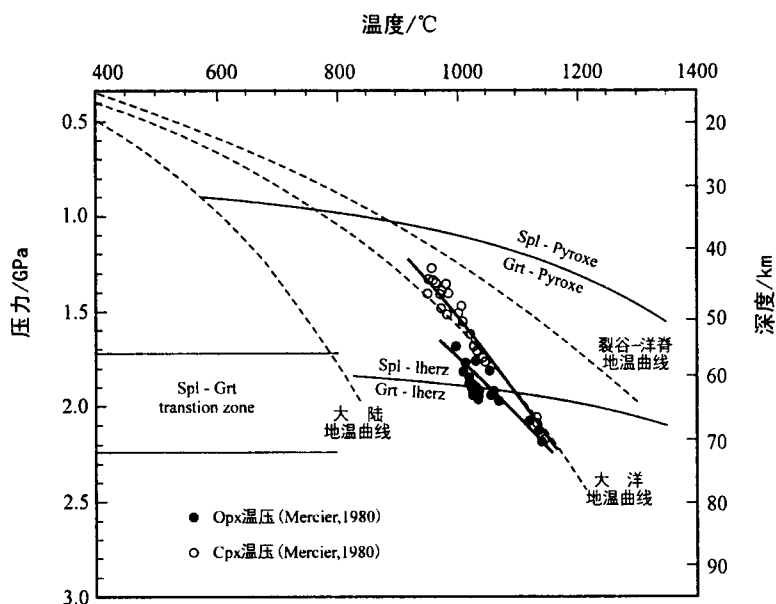
根据上述讨论,在估算马关尖晶石相地幔岩包体的平衡温压时采用 T_{BM85} 、 T_{BK90} 二辉石温度计和 T_{BK90Ca} 、 T_{WS91en} 、 T_{X93Ca} 单辉石温度计来估算其平衡温度,用 P_{M80en} 、 P_{M80di} 压力计来估算其平衡压力。在构筑上地幔地温线时,因其压力估算采用的是 P_{M80en} 、 P_{M80di} 压力计,因此,用 T_{BM85} 、 T_{BK90} 、 T_{BK90Ca} 、 T_{WS91en} 、 T_{X93Ca} 温度计估算的温度与用 P_{M80en} 、 P_{M80di} 压力计估算的压力来构筑地温线,势必会造成各种随机误差。而 T_{M80en} 、 T_{M80di} 温度计与 P_{M80en} 、 P_{M80di} 压力计是在相同的原理条件下构筑而成的,即使温压计存在误差,那也只是系统误差,对由此构筑的地温线的形态和地温线结果的解释是不会有太大的影响。同样是考虑到不同温压计之间的误差问题,在构筑马关地区上地幔地温线时分别取 T_{M80en} 、 T_{M80di} 温度计估算的温度与 P_{M80en} 、 P_{M80di} 压力计估算的压力来进行。马关尖晶石二辉橄榄岩包体的平衡温压估算结果列于表 3。由 T_{M80en} 与 P_{M80en} 、 T_{M80di} 与 P_{M80di} 的计算结果所构筑的马关地区地幔地温曲线如图 1 所示。

表 3 马关尖晶石二辉橄榄岩包体的平衡温压估算结果 ($T/^{\circ}C$, p/GPa)

Table 3. Equilibrium temperatures ($^{\circ}C$) and pressures (GPa) of spinel-lherzolite xenoliths in the Maguan area

样 号	MG01-3	MG01-6	MG01-7	MG01-10	MG01-11	MG01-13	Mg01-18	MG01-19
T_{BM85}	920 ~ 970 (950)	950 ~ 955 (953)	916 ~ 940 (928)	980 ~ 982 (981)	935 ~ 965 (953)	1090 ~ 1110 (1105)	900 ~ 950 (928)	995 ~ 1005 (999)
T_{BK90}	950 ~ 1060 (989)	975 ~ 990 (983)	935 ~ 970 (954)	1033 ~ 1036 (1034)	980 ~ 1018 (1004)	1135 ~ 1150 (1144)	945 ~ 965 (957)	1025 ~ 1055 (1045)
T_{BK90Ca}	935 ~ 965 (948)	959 ~ 962 (961)	945 ~ 965 (956)	960 ~ 995 (977)	915 ~ 960 (948)	1075 ~ 1110 (1090)	950 ~ 970 (960)	985 ~ 1015 (1001)
T_{WS91en}	940 ~ 971 (953)	945 ~ 968 (957)	918 ~ 946 (932)	935 ~ 967 (952)	911 ~ 971 (947)	1082 ~ 1096 (1091)	945 ~ 947 (946)	923 ~ 958 (946)
T_{X93Ca}	957 ~ 1044 (987)	976 ~ 986 (981)	944 ~ 969 (957)	1025 ~ 1027 (1026)	984 ~ 1006 (1002)	1134 ~ 1143 (1139)	948 ~ 967 (958)	1025 ~ 1048 (1040)
T_{M80en}	1008 ~ 1030 (1018)	1026 ~ 1029 (1028)	1018 ~ 1030 (1024)	1031 ~ 1055 (1043)	997 ~ 1033 (1019)	1122 ~ 1139 (1131)	1020 ~ 1033 (1027)	1053 ~ 1068 (1061)
T_{M80di}	953 ~ 1019 (979)	974 ~ 982 (978)	950 ~ 972 (961)	1027 ~ 1030 (1028)	983 ~ 1009 (995)	1129 ~ 1143 (1134)	957 ~ 960 (958)	1007 ~ 1045 (1032)
P_{M80en}	1.78 ~ 1.92 (1.86)	1.91 ~ 1.95 (1.93)	1.86 ~ 1.93 (1.90)	1.77 ~ 1.95 (1.87)	1.69 ~ 1.93 (1.85)	2.09 ~ 2.20 (2.14)	1.93 ~ 1.97 (1.95)	1.82 ~ 1.98 (1.91)
P_{M80di}	1.34 ~ 1.64 (1.44)	1.40 ~ 1.53 (1.46)	1.42 ~ 1.50 (1.46)	1.70 ~ 1.72 (1.71)	1.37 ~ 1.57 (1.47)	2.08 ~ 2.20 (2.13)	1.29 ~ 1.35 (1.32)	1.49 ~ 1.78 (1.68)

注:括号中的数字为平均值。



尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩之间的相转变界线据文献[26];尖晶石二辉辉石岩与石榴石二辉辉石岩之间的相转变界线据文献[27];大陆地温线、大洋地温线、裂谷-洋脊地温线据文献[21];尖晶石相-石榴石相橄榄岩过渡带据文献[5];Ol-橄榄石, Opx-斜方辉石, Cpx-单斜辉石, Spl-尖晶石, Grt-石榴石, lherz-二辉橄榄岩, Pyrox-辉石岩, Spl-Grt transition zone-尖晶石相橄榄岩与石榴石相橄榄岩过渡带

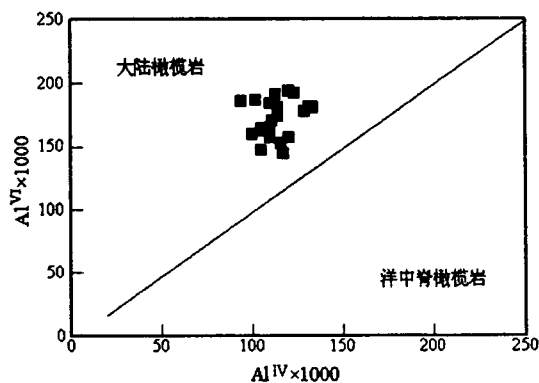
图1 云南马关地区0~16 Ma时期上地幔地温曲线

Fig. 1. The geothermal curve of the upper mantle during 0~16 Ma in the Maguan area, Yunnan Province.

从表3中看出,马关尖晶石相二辉橄榄岩包体的平衡温压分别为900~1150℃和1.29~2.20 GPa。若采用云南地区现代地壳厚度为40 km^[25],那么马关地幔岩包体的平衡压力所反映的深度为45~71 km。

表1和图1显示,由 P_{M80di} 压力计所计算的马关包体的平衡压力与O'Neill^[26]所确定的尖晶石相二辉橄榄岩的压力范围非常吻合,而由 P_{M80en} 压力计所计算的马关包体的平衡压力则明显偏高。故若用 P_{M80di} 和 P_{M80en} 压力计来计算尖晶石相地幔岩包体的平衡压力时,应采用 P_{M80di} 压力计的计算结果较为合理。

在图1中,由单斜辉石和斜方辉石估算的温度和压力所构筑的马关地区上地幔地温曲线均与大洋地温曲线非常吻合,尤其以单斜辉石构筑的地温曲线与大洋地温曲线更为一致。图2同时也表明,马关尖晶石二辉橄榄岩包体属大陆地幔橄榄岩。这种大陆地幔具有大洋地温曲线的现象说明,马关地区上地幔具有很高的热流值,这种高热流值可能与0~16 Ma期间热的软流圈地幔上涌对上覆岩石圈的加热作用有关。软流圈地幔上涌在构造上的响应即是在青藏东缘乃至在整个东亚地区发生的区域性岩石圈的东-西向伸展^[9,12-13]。



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

图2 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 & Bonatti^[28])

Fig. 2. Al^VI - Al^IV correlogram of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in the Maguan area.

5 结论

(1)马关尖晶石二辉橄榄岩包体的平衡温度为900~1150℃,平衡压力为1.29~2.20 GPa,反映包体来源于深度为45~71 km的上地幔区;

(2)马关地区上地幔地温线为高热流值的大洋型地温曲线。暗示青藏东缘及邻区于0~16 Ma期间有热的软流圈地幔上涌,并由此导致了

青藏东缘乃至整个东亚地区区域性岩石圈的东-西向伸展。

参考文献:

- [1] 徐义刚. 适用于幔源包体的地质温度计[J]. 岩石学报, 1993, 9(3): 167 ~ 180.
- [2] Davis B T C, Boyd F R. The join $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ at 30 kilobars pressure and its application to pyroxenes from kimberlites [J]. *J Geophys Res*, 1966, 71: 3567 ~ 3576.
- [3] 徐义刚, 林传勇, 史兰斌, 等. 中国东部上地幔地温线及其地质意义[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(8): 874 ~ 881.
- [4] 樊祺诚, 刘若新, 谢鸿森, 等. 上地幔尖晶石-石榴石相转变实验研究及其意义[J]. 中国科学(D辑), 1997, 27(2): 109 ~ 114.
- [5] Xu Y G, Menzies M A, Vroon P, et al. Texture-temperature-geochemistry relationship in the upper mantle as revealed from spinel peridotite xenoliths from Wangqing, NE China [J]. *J Petrol*, 1998, 39(3): 1 ~ 25.
- [6] Xu Y G, Lin C Y, Shi L B. The geotherm of the lithosphere beneath Qilin, SE China: A re-appraisal and implications for P-T estimation of Fe-rich pyroxenites [J]. *Lithos*, 1999, 47: 181 ~ 193.
- [7] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism [J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26(9/10): 747 ~ 757.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈道公, 李彬贤, 支霞臣, 等. 江苏六合橄榄岩包体的矿物化学、稀土元素组成及其意义[J]. 岩石学报, 1994, 10(1): 324 ~ 331.
- [16] Wood B J, Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1973, 42: 109 ~ 124.
- [17] Wells P R A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1977, 62: 129 ~ 139.
- [18] Bertrand P, Mercier J C C. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: Toward an absolute geothermometer for the natural system? [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1985/1986, 76, 109 ~ 122.
- [19] Brey G P, Kohler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II, new thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers [J]. *J Petrol*, 1990, 31: 1353 ~ 1378.
- [20] Mercier J C. Signal-pyroxene thermobarometry [J]. *Tectonophysics*, 1980, 70: 1 ~ 37.
- [21] Sachtleben T, Seck H A. Chemical control on the Al-solubility in orthopyroxene and its implications on pyroxene geothermometry [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1981, 78: 157 ~ 165.
- [22] Witt G E, Seck H A. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: An improved version of an empirical geothermometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1991, 106: 431 ~ 439.
- [23] Kohler T, Brey G P. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as geothermobarometer for natural peridotites from 2-60 kb with application [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 2375 ~ 2388.
- [24] 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征[M]. 北京: 科学出版社, 1996, 1 ~ 106.
- [25] 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.
- [26] O'Neill H C. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1981, 77: 185 ~ 194.
- [27] Herzberg C. Pyroxene geothermometry and geobarometry: experimental, and thermodynamic evaluation of some subsolidus phase involving clinopyroxenes in the system CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, 42: 945 ~ 957.
- [28] 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.

EQUILIBRIUM p - T CONDITIONS OF SPINEL-LHERZOLITE XENOLITHS AND THEIR SIGNIFICANCE IN THE MAGUAN AREA, YUNNAN PROVINCE

WEI Qi-rong^{1,2}, WANG Jiang-hai²

(1. China University of Geosciences, College of Materials Science & Chemical Engineering, Wuhan 430074, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on electron microprobe analyses of 22 mineral pairs from 8 spinel-lherzolite xenoliths in the Maguan area, Yunnan Province, equilibrium temperatures of the xenoliths were calculated by two-pyroxene geothermometers (T_{BM85} and T_{BK90}) and single-pyroxene geothermometers (T_{BK90Ca} , T_{W91en} , and T_{X93Ca}), and equilibrium pressures by P_{M80en} and P_{M80di} geobarometers. The results showed that equilibrium temperatures and pressures of the xenoliths were from 900 to 1105°C and 1.29 to 2.20 GPa (equivalent to 45 ~ 71 km depth), respectively. A geothermal curve of the upper mantle in the Maguan area was established according to the estimated p - T conditions by T_{M80en} and P_{M80en} , and T_{M80di} and P_{M80di} , respectively, which is similar to the ocean-type upper-mantle geothermal curve. It is revealed the lithospheric mantle in the Maguan area has a high value of thermal flow, indicating hot asthenosphere upwelling in the period of 0 ~ 16 Ma in eastern Asia, which resulted in E-W lithospheric extension in eastern Tibet and the whole East Asia.

Key words: Maguan; Yunnan Province; spinel-lherzolite xenolith; equilibrium temperature and pressure conditions