

可可西里辉石岩包体矿物化学及其地质意义*

吴才来 杨经绥 许志琴 李海兵 史仁灯

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要 青藏高原北部可可西里鲸鱼湖、雄鹰台、双泉子火山岩中含有辉石岩包体, 其主要矿物为单斜辉石和斜方辉石。辉石的化学成分与国内外幔源包体——橄榄岩和辉石岩中的类似, 与麻粒岩中的明显不同; 辉石温压计计算结果表明, 辉石形成的温度为 1101~1400°C(平均为 1250°C), 压力为 3~6 GPa(平均为 4.6 GPa), 推测岩浆的来源深度大于 150 km。

关键词 辉石岩包体 矿物化学 可可西里

青藏高原可可西里地区的新生代火山岩(图 1), 前人做过不少工作^[1,2]。但迄今为止, 尚未见到过在本区火山岩中发现深源包体的报道。我们在鲸鱼湖、雄鹰台、双泉子火山岩中发现了辉石岩包体, 并通过 100 多个矿物电子探针的分析结果, 详细地研究了它们的矿物化学成分特征。同时与国内外幔源包体及麻粒岩中的辉石进行对比, 并采用 Mercier 的单辉石温压计进行计算, 得出了它们的形成温度和压力, 由此推断出本区岩浆的来源深度, 结果与地球物理研究成果十分吻合。

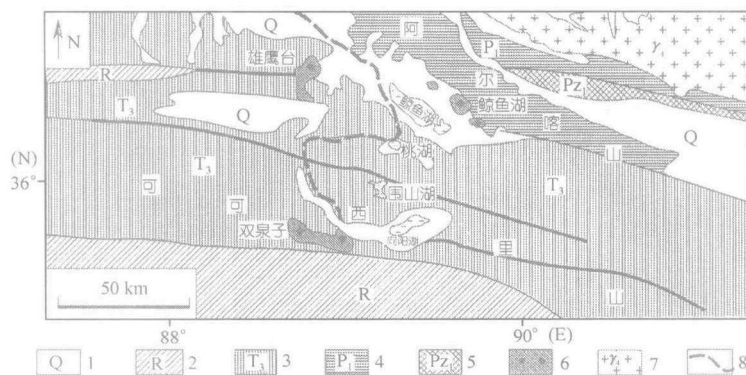


图 1 可可西里新生代火山岩分布图

1. 第四系砂土及砾石; 2. 第三系泥灰岩、油页岩及火山岩等碎屑岩; 3. 上三叠统碎屑岩、砂板岩; 4. 下二叠统碳酸盐岩、碎屑岩等; 5. 下古生界火山岩、硅质岩浅变质岩; 6. 新生代火山岩; 7. 晚古生代花岗岩; 8. 考察路线

1 火山岩及包体特征

从岩石类型来看, 鲸鱼湖火山岩与雄鹰台的相似, 主要为安粗岩, 其次为玄武安粗岩; 而

2001-02-21 收稿, 2001-07-02 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1998040800)和国家自然科学基金重点(批准号: 49732070)资助项目

双泉子火山岩类型较复杂,除玄武安粗岩和安粗岩外,还有英安岩和流纹岩.含辉石岩包体的火山岩主要为玄武安粗岩和安粗岩,其 SiO_2 变化于 53.61%~63.80% 之间,全碱含量在 6.47%~8.44% 之间,其中 K_2O 大于 3.5%, $2<\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}>1$, 且 $\text{Na}_2\text{O}<\text{K}_2\text{O}$, 属橄榄安粗岩系列^[2]; 岩石的稀土总量较高,为 396.66~957.83 $\mu\text{g/g}$, 轻稀土富集、无明显 Eu 异常,微量元素以富集 Sr、Ba 贫 Rb 为特征.

辉石岩包体呈深灰色,与寄主岩的颜色相同,肉眼不易分辨,大小为 1~1.5 cm. 次棱角状. 包体的矿物为单斜辉石和斜方辉石,两种辉石为不等粒状(图 2(a)), 颗粒之间呈紧密的镶嵌状(图 2(b)), 部分为重结晶的三联点结构(图 2(c)). 包体与寄主岩的接触界线较清楚,且包体边缘具有一圈呈泡沫状的反应边(图 2(d)). 反应边由橄榄石和碱性长石组成,橄榄石以富铁为特征,成分为(%): SiO_2 36.19, TiO_2 0.09, Al_2O_3 0.03, TFeO 31.05, MnO 0.44, MgO 29.25, CaO 0.27, Na_2O 0.04, K_2O 0.04 和 Fo 62.60, 属透铁橄榄石^[3]; 碱性长石的成分为(%): SiO_2 65.01, TiO_2 0.46, Al_2O_3 18.09, TFeO 0.76, MgO 0.11, CaO 0.74, Na_2O 4.42, K_2O 9.47, Or 56.33 和 Ab 39.95, 属钠正长石^[4]. 可见,辉石岩包体与寄主岩浆之间是不平衡的,它们之间存在着明显的反应关系,也说明了包体是被岩浆捕获的.

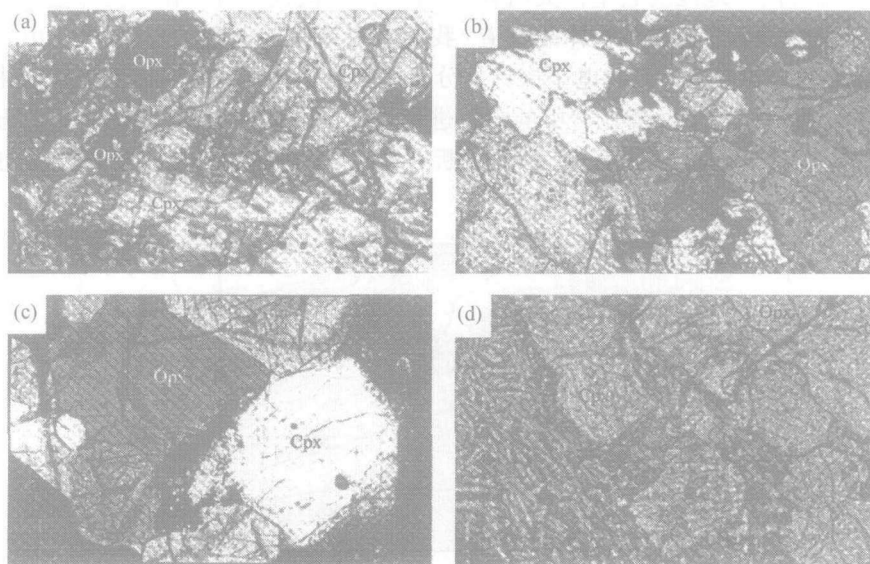


图 2 可可西里辉石岩包体显微结构

(a) 鲸鱼湖辉石岩包体,具不等粒结构; (b) 雄鹰台辉石岩包体,具镶嵌结构; (c) 双泉子辉石岩包体,具三联点结构; (d) 雄鹰台辉石岩包体中的反应边结构

2 矿物化学特征

2.1 斜方辉石

由表 1 可见,本区辉石岩中的斜方辉石 $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{TFeO})$ 比值为 60.26~71.32, Al_2O_3 , TfeO, MgO 和 CaO 含量(%)分别为 1.32~3.76, 11.84~17.04, 25.83~29.48 和 1.33~2.13, 但部分斜方辉石的边缘成分不同,主要表现为 Al_2O_3 (0.73%)和 MgO(22.28%)低、TFeO(22.45%)高,而

表 1 斜方辉石电子探针分析结果及阳离子系数($O = 6$)^{a)}

样品号	k231/2	K233/2	K233/3	K233/4	k229/1	k229/2	k229/3	k229/7	k38/2	k38/4	k31/3	k31/4	k31/7r	k756/2	k756/3	k7-56/7	k7-56/8
SiO ₂	53.17	53.64	53.38	52.45	54.49	53.34	54.69	53.49	53.44	52.89	54.27	55.15	52.70	53.02	52.86	51.49	50.40
TiO ₂	0.38	0.41	0.47	0.53	0.19	0.31	0.26	0.37	0.38	0.35	0.40	0.12	0.45	0.35	0.38	0.43	0.37
Al ₂ O ₃	2.17	2.02	1.88	2.62	1.32	1.58	1.78	2.79	3.15	3.37	2.77	2.16	0.73	3.52	3.80	3.76	3.46
Cr ₂ O ₃	0.07	0.10	0.00	0.01	0.00	0.04	0.12	0.13	0.15	0.27	0.22	0.26	0.06	0.25	0.28	0.25	0.30
Fe ₂ O ₃	2.60	1.16	2.17	2.21	0.80	1.38	1.10	1.42	1.47	3.14	0.95	1.35	1.95	0.86	2.19	1.49	2.51
MgO	26.45	26.91	26.74	26.27	27.62	25.83	27.89	27.34	27.97	28.32	28.50	29.48	22.28	27.80	27.86	27.22	26.67
CaO	1.56	1.69	1.55	1.56	1.67	1.33	1.78	2.13	1.82	2.00	1.75	1.80	1.82	1.71	1.88	1.89	1.71
MnO	0.39	0.28	0.32	0.25	0.35	0.53	0.32	0.35	0.22	0.28	0.19	0.15	0.59	0.27	0.29	0.18	0.24
FeO	14.03	13.99	14.09	13.98	13.56	15.66	13.07	12.31	11.49	9.81	11.64	10.50	20.50	11.14	10.59	10.42	9.33
NiO	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.09	0.00	0.11	0.09	0.09	0.00
Na ₂ O	0.08	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.05	0.03	0.07	0.09	0.08	0.10	0.06	0.10	0.10	0.07	0.26
总计	100.88	100.21	100.68	99.90	100.01	100.03	101.08	100.40	100.19	100.51	100.77	101.16	101.14	99.12	100.33	97.29	95.28
Si	1.910	1.930	1.919	1.901	1.957	1.939	1.941	1.911	1.904	1.878	1.919	1.934	1.946	1.904	1.881	1.886	1.884
Ti	0.010	0.011	0.013	0.014	0.005	0.008	0.007	0.010	0.010	0.009	0.011	0.003	0.013	0.010	0.010	0.012	0.010
Al	0.092	0.086	0.080	0.112	0.056	0.068	0.074	0.118	0.132	0.141	0.115	0.089	0.032	0.149	0.160	0.162	0.152
Cr	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.004	0.008	0.006	0.007	0.002	0.007	0.008	0.007	0.009
Fe ³⁺	0.070	0.031	0.059	0.060	0.022	0.038	0.030	0.038	0.039	0.084	0.025	0.036	0.054	0.023	0.059	0.041	0.071
Mg	1.417	1.443	1.433	1.419	1.478	1.400	1.475	1.456	1.486	1.498	1.502	1.541	1.226	1.488	1.478	1.485	1.486
Ca	0.060	0.065	0.060	0.061	0.064	0.052	0.068	0.082	0.069	0.076	0.066	0.068	0.072	0.066	0.072	0.074	0.068
Mn	0.012	0.008	0.010	0.008	0.011	0.016	0.010	0.011	0.007	0.008	0.006	0.004	0.018	0.008	0.009	0.006	0.008
Fe ²⁺	0.422	0.421	0.424	0.424	0.407	0.476	0.388	0.368	0.342	0.291	0.344	0.308	0.633	0.335	0.315	0.319	0.292
Ni	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.003	0.003	0.003	0.000
Na	0.005	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.005	0.007	0.006	0.007	0.004	0.007	0.007	0.005	0.019
总计	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w ₀	3.15	3.36	3.11	3.17	3.27	2.67	3.50	4.26	3.65	4.05	3.46	3.52	3.70	3.48	3.82	3.93	3.69
en	74.16	74.49	74.40	74.26	75.42	72.00	76.02	76.00	78.02	79.96	78.31	80.22	62.89	78.45	78.89	78.84	80.16
fs	22.69	22.16	22.50	22.57	21.31	25.33	20.48	19.75	18.33	15.98	18.23	16.26	33.42	18.70	17.29	17.22	16.14
fm/fmm	23.43	22.93	23.22	23.30	22.03	26.02	21.22	20.62	19.03	16.66	18.88	16.86	34.70	18.72	17.97	17.93	16.76
C/C _M	0.041	0.043	0.040	0.041	0.042	0.036	0.044	0.053	0.045	0.048	0.042	0.042	0.056	0.042	0.046	0.048	0.044

a) 分析单位: 中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室; $C/C_M = Ca/(Ca+Mg)$; $fm/fmm = (Fe+Mg)/(Fe+Mg+Mn)$; 鲕鱼湖: k231/2, K233/2, K233/3, K233/4, k229/1, k229/2, k229/3, k229/7, 双泉子: k38/2, k38/4, k31/3, k31/4, k31/7r, 雄鹰台: k756/2, k756/3, k7-56/7, k7-56/8

CaO(1.82%)相近. 为了与国内外不同成因类型的斜方辉石化学成分进行比较, 我们收集了中国东部(包括东北、华北、华南)、澳大利亚、美国加利福尼亚、法国和蒙古新生代玄武岩中地幔橄榄岩和辉石岩包体中斜方辉石的化学成分资料^[5~8], 并作出图 3. 由图 3 可见, 本区辉石岩中的斜方辉石 $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{TFeO})$ 比值低于地幔橄榄岩中的辉石, 而与地幔橄榄岩共生的辉石岩中的辉石近似, 但高于麻粒岩中的斜方辉石; 从斜方辉石的几种主要成分来看, 本区辉石岩的斜方辉石 Al_2O_3 , TFeO , MgO 和 CaO 含量基本上和国内外幔源包体(橄榄岩和辉石岩)中的类似, 但与麻粒岩中的明显不同(图 3(a)~(d)). 需要指出的是, 部分斜方辉石的边缘成分落入麻粒岩辉石区. 按 Morimoto 等人^[9]的辉石分类, 本区辉石岩中的斜方辉石属顽火辉石系列, 主要为古铜辉石($\text{Wo}_{2.67-4.05}\text{En}_{72.00-80.22}\text{Fs}_{15.98-25.33}$), 部分辉石的边缘为紫苏辉石($\text{Wo}_{3.70}\text{En}_{62.89-}\text{Fs}_{33.42}$)^[10].

2.2 单斜辉石

由表 2 可见, 本区单斜辉石的 $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{TFeO})$ 比值为 53.26~67.93, 略低于斜方辉石, Al_2O_3 , TFeO , MgO 和 CaO 含量(%)分别为 2.54~6.61, 7.64~11.07, 12.278~16.94 和 17.39~20.06, 但部分单斜辉石的边缘成分略有差异, 主要是 TFeO (11.59%)略高和 Al_2O_3 (1.79%)低. 整体来看, 本区单斜辉石主要为普通辉石系列^[9]; 主要种属为普通辉石($\text{Wo}_{38.51-43.79}\text{En}_{39.56-51.15-}\text{Fs}_{10.23-19.59}$), 其次为顽透辉石($\text{Wo}_{39.62-42.24}\text{En}_{48.15-51.03}\text{Fs}_{9.35-9.89}$)^[10]. 与国内外不同成因类型的单斜辉石相比, 本区单斜辉石的 $\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 比值高于麻粒岩中的单斜辉石, 略低于或接近于幔源包体中的单斜辉石(图 2); Al_2O_3 的含量比玄武岩中巨晶的低, 但 MgO 和 CaO 比巨晶的高(图 3(e), (g), (h)); TFeO 的含量比国内外橄榄岩中的高, 而比麻粒岩中的低, 接近辉石岩和巨晶的全铁含量(图 3(f)); Al_2O_3 , MgO 和 CaO 的含量与国内外橄榄岩包体和辉石岩包体中的相近.

可见, 本区辉石岩中的两种辉石的化学成分与麻粒岩中的明显不同, 而与国内、外幔源包体中的类似, 其中辉石的铁含量比地幔岩的高而镁低. 本区辉石岩类似于绿色型辉石岩包体.

3 讨论

3.1 温度、压力

我们选择了 Mercier^[11]的单辉石温压计, 计算了 122 个辉石(其中单斜辉石 52 个、斜方辉石 70 个)温度、压力.

我们用 Brey 等人^[12]的二辉石温度计求出辉石的结晶温度为 946~1410°C, 平均为 1239°C. 与 Mercier 单辉石温度计得出的结果相近. 但 Mercier 单辉石压力计误差较大. 然而, 在没有更合适的压力计可用的情况下, Mercier 单辉石压力计得出的结果是否可以接受呢? 为此, 我们引用了 Kopylova^[13]的资料, 用 Mercier 的压力计计算了加拿大北部 Jericho 金伯利岩中的橄榄岩及辉石岩包体形成的压力, 并与有关资料进行对比, 结果十分相似(表 3).

3.2 辉石岩包体的成因

目前, 对辉石岩的成因有 3 种观点: (1) 认为辉石岩是寄主岩的原生岩浆早期结晶矿物的堆积相, 即同源包体说^[14~17]; (2) 认为辉石岩包体是下地壳深变质作用的产物, 类似于榴辉岩的成因; (3) 认为辉石岩包体是原始地幔物质经局部熔融的产物, 即上地幔二辉橄榄岩(在底辟上升时)熔出辉石岩熔浆结晶形成的, 属绿色型辉石岩包体, 与尖晶石二辉橄榄岩具类似的

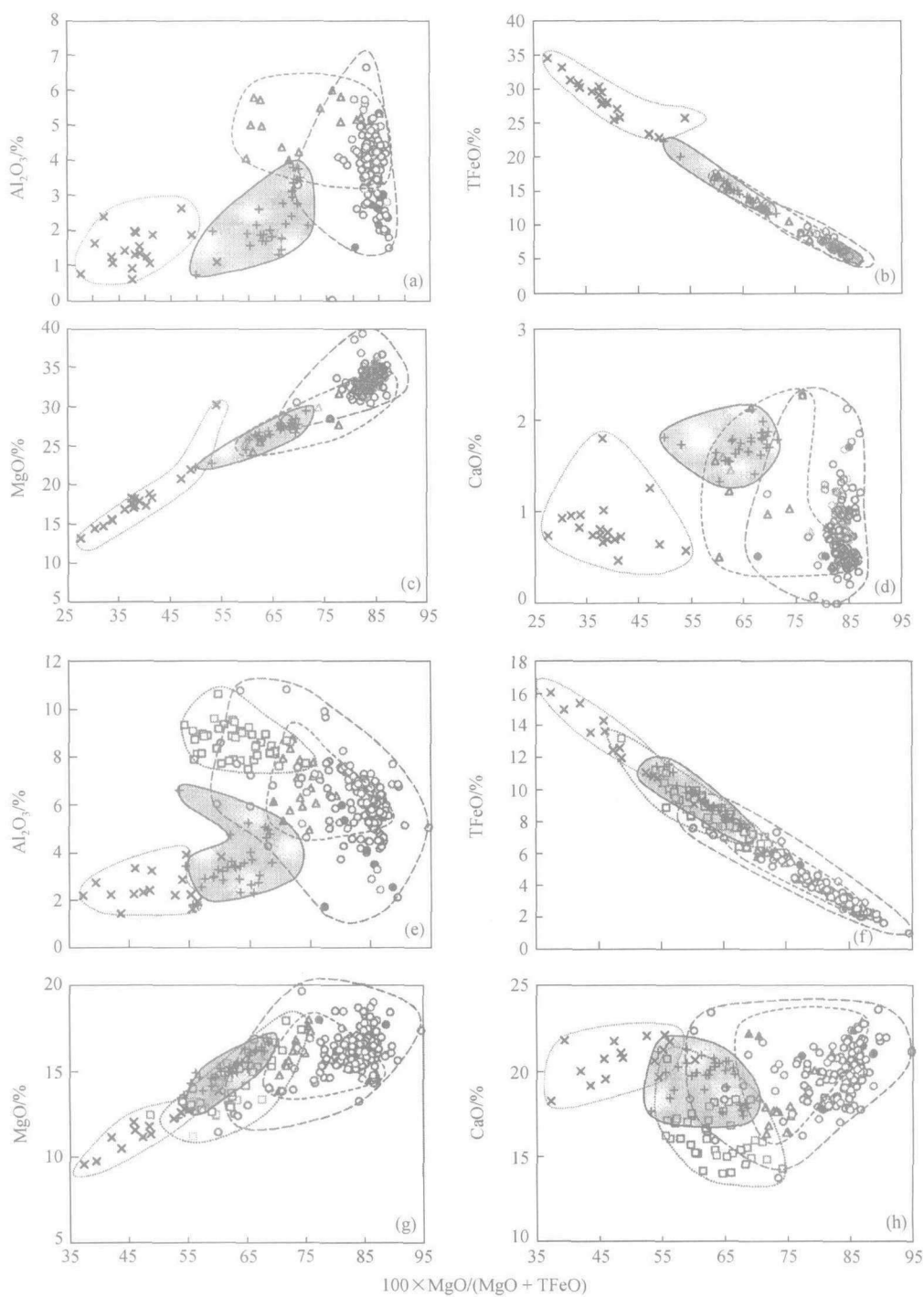


图3 辉石 $\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{TFeO})$ 分别对 Al_2O_3 , TfeO, MgO 和 CaO 变异图解

+ 可可西里辉石岩包体(灰色区); × 华北麻粒岩; △ 中国东部辉石岩包体; □ 中国东部新生代玄武岩中辉石巨晶; ○ 中国东部二辉橄榄岩包体; ▲ 蒙古辉石岩包体; ● 分别为澳大利亚、法国、美国加利福尼亚和夏威夷、蒙古的橄榄岩包体

表 2 单斜辉石电子探针分析结果及阳离子系数(O = 6)^{a)}

样品号	j13/l	k231/l	k233/l	k233/6	k229/4	k229/5c	k229/6r	k229/62	k38/l	k38/3	k31/l	k31/2	k31/5r	k31/6	k756/l
SiO ₂	49.60	49.79	50.19	50.85	50.55	51.53	50.62	49.71	51.75	49.95	51.61	50.65	51.27	51.01	50.31
TiO ₂	1.06	1.10	1.17	0.95	0.92	0.73	0.74	0.88	0.73	0.86	0.79	0.81	0.91	1.08	0.77
Al ₂ O ₃	6.61	4.74	3.61	3.69	4.01	3.03	3.20	3.26	4.76	5.24	4.62	5.06	1.79	2.54	4.97
Cr ₂ O ₃	0.06	0.14	0.08	0.29	0.17	0.18	0.01	0.00	0.30	0.22	0.22	0.32	0.18	0.15	0.33
Fe ₂ O ₃	0.00	2.75	3.13	2.37	2.36	2.59	4.06	3.73	1.98	3.75	2.15	2.35	1.54	1.31	1.03
MgO	12.28	14.96	15.22	15.93	15.14	16.25	15.15	14.67	16.94	16.29	16.94	16.40	14.92	14.64	16.18
CaO	17.63	18.91	19.78	19.08	20.06	19.83	19.92	19.75	18.12	17.59	17.70	18.00	18.42	18.89	17.39
MnO	0.06	0.20	0.19	0.21	0.24	0.20	0.40	0.29	0.21	0.15	0.24	0.17	0.36	0.31	0.14
FeO	10.78	6.50	6.22	6.08	5.77	5.57	5.86	6.18	5.87	5.16	5.92	5.57	10.04	9.76	6.61
NiO	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00
Na ₂ O	1.04	0.62	0.47	0.54	0.55	0.46	0.52	0.49	0.66	0.77	0.73	0.69	0.33	0.34	0.64
K ₂ O	0.00	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
总计	99.11	99.75	100.08	100.00	99.79	100.40	100.48	99.00	101.32	100.02	100.91	100.08	99.77	100.05	98.37
Si	1.862	1.848	1.861	1.876	1.871	1.892	1.872	1.868	1.871	1.835	1.873	1.856	1.922	1.906	1.873
Ti	0.030	0.031	0.033	0.026	0.026	0.020	0.021	0.025	0.020	0.024	0.022	0.022	0.026	0.030	0.022
Al	0.292	0.207	0.158	0.161	0.175	0.131	0.139	0.144	0.203	0.227	0.198	0.218	0.079	0.112	0.218
Cr	0.002	0.004	0.002	0.008	0.005	0.005	0.000	0.000	0.009	0.006	0.006	0.009	0.005	0.004	0.010
Fe ²⁺	0.000	0.077	0.087	0.066	0.066	0.072	0.113	0.106	0.054	0.104	0.059	0.065	0.044	0.037	0.029
Mg	0.687	0.827	0.841	0.876	0.836	0.889	0.835	0.822	0.913	0.892	0.916	0.896	0.834	0.815	0.898
Ca	0.709	0.752	0.786	0.754	0.796	0.780	0.789	0.795	0.702	0.693	0.688	0.707	0.740	0.756	0.694
Mn	0.002	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.013	0.009	0.006	0.005	0.007	0.005	0.011	0.010	0.005
Fe ²⁺	0.338	0.202	0.193	0.188	0.179	0.171	0.181	0.194	0.178	0.159	0.180	0.171	0.315	0.305	0.206
Ni	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Na	0.075	0.045	0.034	0.039	0.040	0.032	0.037	0.036	0.046	0.055	0.051	0.049	0.024	0.025	0.046
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总计	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
wo	40.84	42.07	43.04	41.34	43.79	42.24	43.41	43.68	39.01	39.62	38.41	39.74	38.95	40.09	38.51
en	39.56	46.28	46.07	48.02	45.98	48.15	45.93	45.14	50.76	51.03	51.15	50.37	43.88	43.22	49.82
fs	19.59	11.65	10.89	10.64	10.23	9.6	10.66	11.18	10.23	9.35	10.44	9.89	17.17	16.68	11.67
fm/fmm	33.012	20.11	19.12	18.14	18.2	16.63	18.83	19.85	16.77	15.48	16.95	16.41	28.12	27.85	18.98

a) 分析单位: 中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室; fm/fmm = (Fe+Mg)/(Fe+Mg+Mn); 鲕鱼湖: j13/l, k231/l, K233/1, K229/6, k229/4, k229/5c, k229/6r, k229/62; 双泉子: k38/l, k38/3, k31/l, k31/2, k31/5r, k31/6; 雄鹰台: k756/l

表3 不同温压计计算结果对比

温压计	Well(s(1977), Nickel & Green (1985)	Brey & Kohler(1990)	Finnerty & Boyd (1987), MacGregor (1974)	O'Neill & Wood (1979), MacGregor (1974)	Mercier (1985)
温度区间/°C	761~1178	648~1335	520~1287	679~1303	842~1359
平均温度/°C	981	1045	965	929	1098
压力区间/GPa	3.18~5.09	3.08~6.51	1.44~6.52	2.33~6.37	3.41~6.11
平均压力/GPa	4.37	4.73	4.62	4.38	4.01

成因^[6,15,18,19]。我们的研究表明,本区的辉石岩特征类似于绿色型辉石岩包体,是地幔岩在高温高压下部分熔融出辉石岩岩浆形成的。主要证据如下:

(i) 辉石岩与寄主岩之间存在着明显的反应边关系。即辉石岩包体周围存在一圈由橄榄石和碱性长石组成的反应边,显然,包体与寄主岩浆之间不是一种化学平衡关系;同时,本区辉石岩包体的单斜辉石化学成分不同于由碱性玄武岩岩浆在高压下结晶的巨晶,也就是说,本区的辉石岩包体并非是由寄主岩浆结晶形成。

(ii) 本区辉石岩包体中的单斜辉石和斜方辉石的化学成分特征与国内外地幔橄榄岩包体及其共生的辉石岩包体中的相同或相似,从而也说明,本区辉石岩包体是深源的;同时,两种辉石的边缘成分与其核心成分不同,也反映了它们经历了不同的温压环境。

(iii) 根据 Mercier^[11]温压计计算,本区辉石岩形成的温度为 1101~1400°C(平均为 1250°C),压力为 3~6 GPa(平均为 4.6 GPa),说明辉石岩是岩浆在高温高压的环境下结晶形成。

(iv) 一般认为,若伴随着熔融作用,则上地幔岩石逐渐亏损;若伴随着流体交代或地壳物质的掺合作用,则上地幔岩石逐渐富集不相容元素。从本区包体寄主岩富碱尤其富钾和不相容元素的特征以及辉石岩包体有一圈由橄榄石和碱性长石组成的反应边特征来看,岩浆的源岩经历着富碱流体的交代富集作用。即随着地幔流体的交代作用,导致地幔岩低度部分熔融形成辉石岩岩浆,而被交代过的富集地幔再次部分熔融时,则形成原生的橄榄粗安质岩浆。

(v) 近期国外实验岩石学研究表明,在地幔中, K_2O 在辉石中的溶解度随压力的增加而明显地增加,在 6~12.5 GPa 的压力范围内,辉石中的 K_2O 含量达到 1.4%~1.9%,说明地幔中辉石是钾的寄存矿物^[20~22]。在 5 GPa 压力下,含透长石和柯石英的上地幔部分熔融的岩浆含 K_2O 达 6.64%, SiO_2 达 61.7%,同时贫 Na_2O , MgO 和 FeO ^[22]。可见,由富含辉石的源岩部分熔融形成的岩浆是富钾的。这也证明了本区辉石岩包体及其寄主岩浆来源于深部地幔是可能的。

4 深源包体发现的岩石学意义

在橄榄安粗岩中发现深源的辉石岩包体,首先意味着这套火山岩岩浆来源深度大。一般认为,富集地幔可以熔融出碱性玄武岩岩浆。那么什么样的地幔成分能熔融出这种较富硅、富钾、富集不相容元素的岩浆呢?我们认为,再循环地幔可以熔出这样的岩浆。据统计,世界上大多数地区,大量进入深部地幔的玄武质洋壳含有 10%左右的富钾的碱性玄武岩^[21,22]。在本区,随着昆仑板块和藏北板块的俯冲闭合,古特提斯洋壳沉没于青藏高原之下的过程中^[23],将大量的壳源物质携带至地幔,这些地壳物质在高温高压下脱水,形成了富含碱和不相容元素的高密度流体,这种流体沿地幔中存在的裂隙上升过程中,对原始地幔发生交代作用,形成了一种再富集地幔。这种地幔岩的部分熔融,形成了这种相对富硅、富碱、富集不相容元素的橄榄安粗岩浆。辉石岩包体则是先前富碱的流体交代地幔过程中诱发的地幔低度部分熔融的辉石

岩岩浆结晶形成,后被橄榄安粗岩岩浆所捕获.此外,地震层析剖面揭示,本区在 150 km 深度以下存在着明显的低速层^[24, 25],而对辉石岩包体的温度和压力估算,得出来的深度也是 150 km 左右,两者十分吻合,说明这些低速层有可能是岩浆的生成区.

参 考 文 献

- 1 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩. 北京: 地质出版社, 1998
- 2 Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *J Petrol*, 1996, 37(1): 45 ~ 71
- 3 Deer W A, Howie R A, Zussman J. An Introduction to the Rock-forming Minerals. New York: Copublished in the United States with John Wiley & Sons, Inc, 1996
- 4 Smith J V, Brown W L. Feldspar Minerals 1. Crystal Structures, Physical Chemical and Microtextural Properties. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1988
- 5 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. 北京: 科学出版社, 1996
- 6 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1987
- 7 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 中国早前寒纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992
- 8 钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994
- 9 Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes. *Min Mag*, 1988, 52: 535 ~ 550
- 10 王 濮, 潘兆枢, 翁玲宝. 系统矿物学(中册). 北京: 地质出版社, 1984
- 11 Mercier J C. Single-pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, 1980, 70: 1 ~ 37
- 12 Brey G P, Kohler T P. Geothermobarometry in four-phase lherzolite. II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J Petrol*, 1990, 31: 1353 ~ 1378
- 13 Kopylova M G. Petrology of Peridotite and Pyroxenite Xenoliths from the Jericho Kimberlite: Implications for the Thermal State of the Mantle beneath the Slave Craton, Northern Canada. *Petrology*, 1999, 40(1): 70 ~ 104
- 14 Aoki K, Kushiro I. Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel. *Contrib. Mineral Petro*, 1968, 18, 326 ~ 337
- 15 White R W. Ultramafic inclusions in basaltic rocks from Hawaii. *Contrib Mineral Petro*, 1966, 12: 254 ~ 314
- 16 Carter N L, Ave' Lallement H G. High temperature flow of dunite and peridotite. *Geol Soc Amer Bull*, 1970, 81: 2181 ~ 2202
- 17 Green D H, Hibberson W. The instability of plagioclase in peridotite at high pressure. *Lithos*, 1970, 3: 209 ~ 221
- 18 Jackson E D, Wright T L. Xenoliths in the Honolulu volcanic series. *J Petrol*, 1970, 13: 405 ~ 430
- 19 Wilshire H G. Amphibole-rich veins in lherzolite xenoliths, Dish Hill and Deadman Lake, California. *Am Jour Sci*, 1980, 280-A: 576 ~ 593
- 20 Harlow G E. K in clinopyroxenes at high pressure and temperature: an experimental study. *American Mineralogist*, 1997, 82: 259 ~ 269
- 21 Tsuruta K, Takahashi E. Melting study of an alkali basalt JB1 up to 12.5 GPa: Behavior of potassium in the deep mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, 107: 119 ~ 130
- 22 Wang Wuyi, Takahashi E. Subsolidus and melting experiments of a K-rich basaltic composition to 27 GPa: Implication for the behavior of potassium in the mantle. *American Mineralogist*, 1999, 84: 357 ~ 361
- 23 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造. 北京: 地质出版社, 1992
- 24 许志琴, 姜 枚, 杨经绥. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用. *地质学报*, 1996, 70(3): 195 ~ 206
- 25 许志琴, 杨经绥, 姜 枚, 等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起. *地学前缘*, 1999, 6(3): 139 ~ 151