

日照胡家岭石榴单辉辉石岩体的 地球化学特征及其成因

李天福, 杨经绥

(国土资源部大陆动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 与原始地幔相比, 苏鲁超高压变质带的日照胡家岭石榴单辉辉石岩体全岩化学成分易熔组分均较高, 而难熔组分均较低, 全岩的 SiO_2 含量为 44.04% ~ 50.50%, 高 MgO (12.77% ~ 18.73%), 高 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (1.6 ~ 8.0), 低碱, $\text{Mg}^\#$ 的变化范围为 74.82 ~ 86.13, 成分特点类似铝亏损型科马提岩。稀土元素配分型式为典型的单斜辉石稀土元素配分型式, 重稀土元素相对亏损, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 3.51 \sim 5.87$ 。铂族元素的总体丰度为 $19.18 \times 10^{-9} \sim 59.44 \times 10^{-9}$, 变化范围较大, 高于地幔橄榄岩的丰度, $(\text{Pd}/\text{Ir})_N$ 具有 8.58 ~ 11.07 的正斜率。这些特点表明形成石榴单辉辉石岩的岩浆为地幔源区残留石榴石、主要熔出单斜辉石的高程度部分熔融的产物, 折返前可能由单斜辉石+石榴石相组成。铂族元素丰度高、正斜率的特点表明其分布受到了地幔高程度部分熔融的控制且没有硫化物的分离, 说明熔浆中硫是不饱和的。

关键词: 石榴单辉辉石岩; 地球化学; 部分熔融; 铂族元素; 胡家岭; 日照

中图分类号: P588.12⁺5; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0469-07

Geochemical characteristics of garnet clinopyroxenite at Hujialing, Rizhao, and their bearing on petrogenesis

LI Tian_fu and YANG Jing_sui

(Key Laboratory for Continental Dynamics, Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China)

Abstract: Bulk rock chemistry of Hujialing garnet clinopyroxenite in Rizhao of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt is rich in fusible composition and low in refractory composition when compared with that of the primary mantle. Whole rock has 44.04% ~ 50.50% SiO_2 , high MgO (12.77% ~ 18.73%), high $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (1.6 ~ 8.0), low alkali and $\text{Mg}^\#$ (74.82 ~ 86.13), which shows that the rock has an affinity to alumina-depleted komatiite. The REE partition pattern has the form of clinopyroxene and relative HREE depletion with $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ being 3.51 ~ 5.87. The total PGE concentration varies in a wide range of $19.18 \times 10^{-9} \sim 59.44 \times 10^{-9}$ and is higher than that of xenolith and Alpine type peridotites with $(\text{Pd}/\text{Ir})_N$ of 8.58 ~ 11.07. All of these characteristics indicate that the magma which produced the garnet clinopyroxenite was formed mainly by melting of the clinopyroxene from the mantle source with residual garnet. The phases of the rock before exhumation might have been clinopyroxene+garnet. The high concentration and positive slope of PGE suggest that their distribution was controlled by a high degree of partial melting and that magma was sulfur-unsaturated without sulfide segregation.

Key words: garnet clinopyroxenite; geochemistry; partial melting; platinum group elements; Hujialing; Rizhao

苏鲁超高压变质地体是中朝和扬子克拉通之间三叠纪大别-苏鲁碰撞带的东延部分, 该地体由断裂围限的超高压和高压带组成, 其上被侏罗纪碎屑沉积地层和白垩纪火山-沉积不整合覆盖, 并被造山后中生代花岗岩侵入。该地体的片麻

岩、大理岩和橄榄岩中普遍见有含柯石英的榴辉岩透镜体或夹层(Zhang *et al.*, 1995a)。许多石榴石橄榄岩或橄榄岩-辉石岩杂岩体呈米级到千米级规模零星产于大别苏鲁碰撞带中, 对于这些辉石岩(毛屋、碧溪岭、胡家岭和仰口)的研究已

收稿日期: 2005-08-10; 修订日期: 2005-08-22

基金项目: 国土资源部基础项目(2001CCB00900); 973专项(2003CB716500); 国家自然科学基金重大项目(40399140)

作者简介: 李天福(1962-), 男, 副研究员, 从事火成岩岩石学研究。

做了许多工作 (Hiramatsu *et al.*, 1995; Liou *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 1995a, 1995b, 1998, 2000, 2003; Zhang and Liou, 1998, 2003), 其中苏鲁地体的胡家岭石榴单辉辉石岩因其具有特殊的矿物结构特点而备受瞩目 (Hiramatsu *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2000, 2003)。已有研究表明, 石榴单辉辉石岩的矿物氧同位素组成 (+ 4.83‰~ + 5.64‰) 近似或落于地幔成因的岩石氧同位素范围内 (+ 5.1‰~ + 6.6‰), 5 个单斜辉石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成在苏鲁地区最低 (0.703 8~ 0.704 4), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 组成在苏鲁地区最高 (0.5127~ 0.5128) (Zhang *et al.*, 2000), 在 $\epsilon\text{Nd}(220\text{ Ma})$ 和 $T_{\text{Sr}}(220\text{ Ma})$ 图解上, 落于地幔储集库范围, 具有地幔成因的特点 (Zhang *et al.*, 2000), 为直接从地幔折返上来的岩块 (Zhang *et al.*, 2000, 2003)。Zhang 等 (2003) 结合岩相学特征和实验研究提出, 折返前的矿物相为均一的超硅石榴石 (majoritic garnet) 相, 但是与岩石地球化学特征不相吻合。本文从地球化学、实验岩石学 (温压和成分)、岩浆演化方面对此进行讨论。

1 地质概况

日照胡家岭地区位于山东省东南部, 东濒黄海, 南临江苏省赣榆县, 位于鲁东地盾胶南隆起南侧, 西邻沂沭深大断裂,

东侧有青岛-日照深大断裂通过, 南部有近东西向的相邸大坊前大断裂和坪上安东卫大断裂, 这些以扭性压扭性为主的大断裂, 对本区地质构造起明显的控制作用。区内出露太古宙胶东群洙边组 and 坪上组, 由白云钾长片麻岩、黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪片岩等组成, 片理走向以北北西为主, 向北西逐渐转为东西向, 一般倾向南西或北东, 倾角 10~55° 不等。以上片麻岩系地层组成复式背斜构造, 构造线方向为北北西, 超镁铁岩体就位于上述地层中。在梭罗树地区产出有许多由辉石岩组成的超镁铁质岩块, 其中胡家岭超镁铁岩体大小为 (0.2~ 1) km × 2 km, 距梭罗树石棉矿西约 2 km, 与围岩片麻岩呈断层接触, 南北两端都向东呈镰刀形弯转, 中段被中生代北东向断层切割位移, 岩体长轴方向与围岩片麻理产状一致, 并随之变化。整个岩体在平面上呈顺层单斜向南西陡倾的长条形 (图 1)。其岩石组成边部为蛇纹岩, 内部为透镜状石榴单辉辉石岩, 最大的透镜体为 100 m × 225 m。过去曾经开挖探槽, 样品主要采自探槽和深槽附近的露头。该透镜体由变斑状石榴单辉辉石岩、含橄榄石石榴石单辉辉石岩 (或异剥橄榄岩) 和单辉辉石岩 (有时含微量石榴石) 组成, 人工重砂挑选的锆石非常少而且颗粒很小。本文用其中的 5 个样品进行讨论。

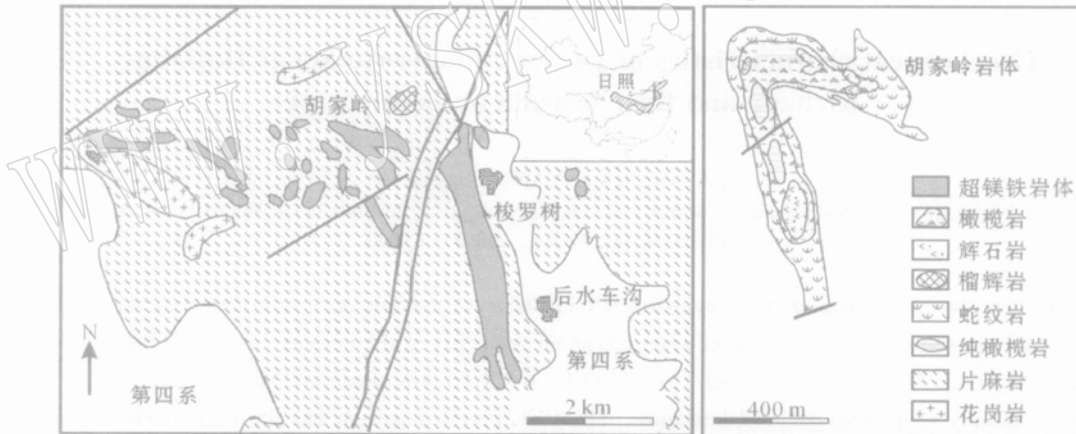


图 1 胡家岭岩体及附近地质简图 (引自 Zhang 等, 2003)

Fig. 1 Geological map of Hujialing intrusive body and its adjacent areas (after Zhang *et al.*, 2003)

2 样品描述

岩石主要呈斑状变晶结构或巨斑状变晶结构, 一般巨斑状变晶结构的样品在镜下显示矿物分布不均一, 当斑晶粒度较小时岩石较均一。斑晶主要为石榴石, 根据岩石基质粒度的大小, 石榴石斑晶的粒度下限为 1 mm 或 2 mm, 多为 2 mm, 最大可达 15 mm。有的样品中单斜辉石也呈斑晶。石榴石斑晶有各种产出状态, 如无包裹体的晶体、有包裹体的晶体、与单斜辉石斑晶交生的晶体。石榴石斑晶中所包含的矿物多为浑圆状单斜辉石晶体, 个别包含有冬青叶状绿色尖晶石, 还见有不透明的钛铁矿包裹体, 甚至与绿色尖晶石共生。石榴石斑晶含量变化较大, 为 5%~ 15%。单斜辉石斑晶粒

度比石榴石斑晶小, 内部含有条状钛铁矿出溶体, 含量约 5%。岩石的基质主要由单斜辉石和少量石榴石、钛铁矿组成, 其中单斜辉石多呈等轴状镶嵌粒状变晶结构, 粒度一般小于 1 mm, 有的小于 0.5 mm, 含量变化为 82%~ 91%。石榴石呈他形粒状, 粒度小于 1 mm, 含量低于 5%。钛铁矿呈他形在其他矿物的空隙产出, 粒度细小, 在某些样品中含量最高达到 3%。

3 岩石化学特征

所有分析均在国家地质实验测试中心完成。主要元素分析用 X 射线荧光光谱测定, 其中用化学法测定 FeO、CO₂、H₂O⁺ S 等元素。等离子质谱测定稀土元素、微量元素和贵金属。5 个样品的岩石化学主成分分析结果见表 1。这些成

表 1 胡家岭石榴单辉辉石岩岩石化学($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)和贵金属元素($w_B/10^{-9}$)分析结果

Table 1 Analytical results of petrochemical components ($w_B/\%$), trace elements ($w_B/10^{-6}$) and precious metals ($w_B/10^{-9}$) in Hujialing garnet clinopyroxenite

样品号	HJ1_2	HJ1_5	HJ4_6	HJ3_1_4	HJ4_13
岩性	变斑状石榴 橄榄辉石岩	石榴单辉辉 石岩	变斑状石榴 单辉辉石岩	变斑状石榴 单辉辉石岩	巨斑状石榴 单辉辉石岩
SiO ₂	44.04	46.98	46.26	50.50	45.01
TiO ₂	1.82	1.41	1.50	0.66	1.70
Al ₂ O ₃	11.33	7.31	10.30	2.31	11.17
Fe ₂ O ₃	2.64	3.53	2.50	2.37	2.46
FeO	5.28	4.58	4.58	3.24	5.12
MnO	0.09	0.12	0.09	0.10	0.11
MgO	12.77	13.81	13.99	18.73	13.95
CaO	20.28	19.43	19.58	18.65	18.12
Na ₂ O	0.47	0.92	0.47	0.44	0.69
K ₂ O	0.01	0.02	0.02	0.01	0.05
P ₂ O ₅	0.01	0.23	0.01	0.01	0.01
H ₂ O ⁺	0.52	0.68	0.62	2.02	0.94
CO ₂	0.27	0.41	0.23	0.19	0.16
SO ₃	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
烧失	0.30	0.59	0.25	1.69	0.33
总和	99.55	99.46	100.20	99.24	99.50
Mg [#]	74.82	76.04	78.51	86.13	77.22
La	2.70	15.90	1.00	1.44	1.17
Ce	9.64	31.20	4.29	6.02	4.56
Pr	1.78	4.14	0.99	1.14	1.02
Nd	9.89	18.60	6.43	6.16	6.31
Sm	3.00	3.74	2.36	1.86	2.24
Eu	1.10	1.22	0.91	0.64	0.89
Gd	2.95	2.77	2.46	1.73	2.54
Tb	0.44	0.40	0.35	0.27	0.40
Dy	2.21	2.01	1.76	1.39	2.28
Ho	0.37	0.37	0.28	0.24	0.42
Er	0.84	0.92	0.63	0.55	0.97
Tm		0.11			0.11
Yb	0.47	0.64	0.34	0.34	0.56
Lu		0.10			
Rb		1.4	2.5		1.4
Ba	28.2	67.8	27.3	6.2	25.2
Th		3.68			
U		0.58			
Sr	155.0	413.0	90.0	94.5	90.9
Nd	9.89	18.60	6.43	6.16	6.31
Zr	35.4	39.3	32.7	25.9	35.0
Hf	2.27	2.22	2.08	1.50	2.01
Y	8.02	6.56	6.18	4.82	7.50
Sc	68.30	14.80	60.00	57.00	13.50
V	330.0	272.0	332.0	145.0	304.0
Cr	623.00	2 209.00	1 083.00	3 381.00	823.00
Co	61.90	62.60	63.70	57.70	67.70
Ni	282.00	248.00	398.00	434.00	352.00
Cu	68.90	42.00	156.00	15.90	98.40
Pb	3.25	3.80	3.51	2.31	4.44
Zn	54.1	48.5	41.0	31.4	39.5
Os	0.83	1.19	4.38		
Ir	0.74	0.60	2.03		
Ru	0.88	2.02	3.12		
Rh	0.69	0.36	1.71		
Pt	8.30	7.10	20.80		
Pd	7.74	7.50	27.40		
Au	3.6	4.3	3.1		
Ag	0.03	0.13	0.10		

分的含量(质量分数,下同)范围为 SiO₂(44.04%~50.50%)、TiO₂(0.66%~1.82%)、Al₂O₃(2.31%~11.33%)、全 FeO(5.38%~7.76%)、MgO(12.77%~18.73%)、CaO(18.12%~20.28%)、Na₂O(0.44%~0.92%)和 K₂O(0.01%~0.05%)含量很低, Mg[#]的变化范围为 74.82~86.13。由于石榴单辉辉石岩的主要组成矿物为单斜辉石和石榴石,所以由矿物含量的差异表现出来的分带性在岩石化学主成分上也有表现。例如单斜辉石比石榴石含有较高的 SiO₂、MgO 和较低的 Al₂O₃、FeO,所以岩石中单斜辉石含量的增加会造成岩石 SiO₂、MgO 的增高和 Al₂O₃、FeO 的降低,因而使得样品 HJ3_1_4 的 SiO₂、MgO 含量最高而 Al₂O₃、FeO 最低,尽管该样品的 SiO₂ 含量最高(50.50%),但是其 Mg[#] 值也最高(86.13),因此该样品在化学成分上为超镁铁岩而非超基性岩。

在 Mg[#] 对其他主要元素投点图(图 2)上, SiO₂ 与 Mg[#] 呈正相关关系($r = 0.913$), Al₂O₃ 与 Mg[#] 呈负相关关系($r = 0.855$)。与毛屋和碧溪岭辉石岩成分相比, SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量接近或稍低, MgO、全 FeO 含量偏低, TiO₂、CaO 含量较高, Mg[#] 值与毛屋辉石岩相似。与原始地幔(McDonough and Sun, 1995)相比,易熔组分均较高,而难熔组分均较低。岩石中的锆石非常细小而且含量极少,甚至比苏鲁地区来自地幔的芝麻房橄榄岩中的锆石含量还少,似乎说明岩石没有遭受后来的交代作用。

4 稀土元素和微量元素特征

5 个样品的稀土元素和微量元素分析结果见表 1。稀土元素总量为 $21.78 \times 10^{-6} \sim 35.39 \times 10^{-6}$, 其中一个样品的稀土元素总量高达 82.12×10^{-6} , 这些样品的稀土元素总量均高于原始地幔的 6.87×10^{-6} (McDonough and Sun, 1995)。在原始地幔标准化的稀土元素配分曲线图上(图 3), 多数样品显示, 中部的轻、中稀土元素比两侧的轻稀土元素和中、重稀土元素富集而呈上凸的弧形, 重稀土元素相对亏损[(Gd/Yb)_N = 3.51~5.87], 这与岩石以单斜辉石为主而单斜辉石富钙致使中稀土元素富集的特点密切相关。仅有一个样品具右倾斜特点, 其(La/Yb)_N 值为 16.9, 可能是由于粒间隐性组分的影响, 将留待进一步研究。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4)曲线没有显示从左到右规律的逐渐降低的特征, Ti 左边的元素近似平坦(K 由主量元素分析换算而得, 显示低谷)甚至有左倾斜, 这可能是地幔部分熔融程度高形成的岩浆微量元素的特点。稀土元素总量最高的样品也具有最高的大离子亲石元素丰度, 但是其 Rb 丰度没有同步显示高值。另一个特点是高场强元素 Zr、Hf、Ti 发生分异, Zr 具负异常, Hf、Ti 具正异常。Zr 赋存于锆石中, Hf 主要赋存于磷灰石中, 而 Ti 赋存于钛铁矿中, 低 Zr 而高 Hf、Ti 元素丰度特点与岩石中锆石含量低、主要矿物含有大量的磷灰石和钛铁矿包裹体的结果一致。岩石中有

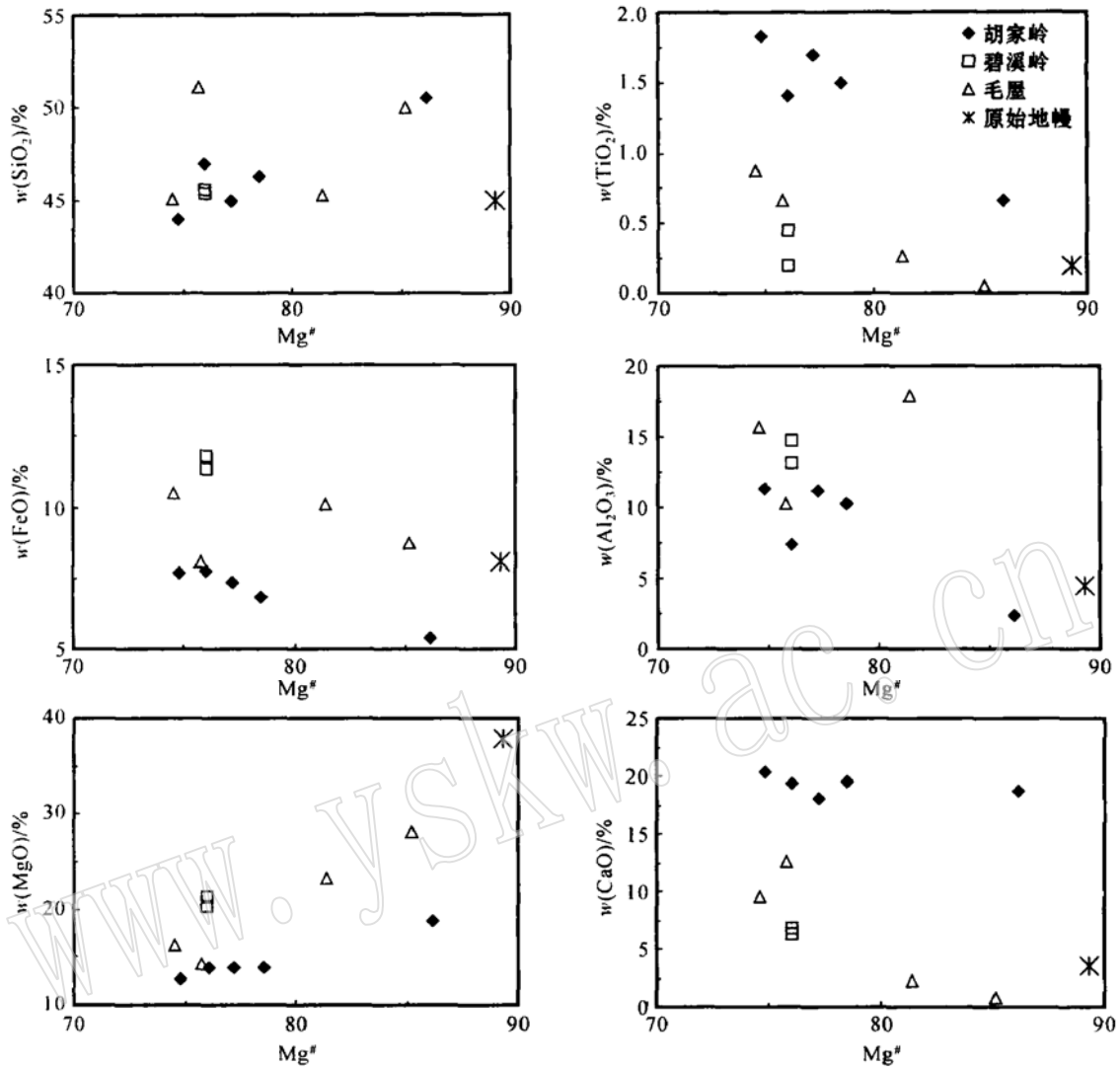


图2 胡家岭岩体和大别山辉石岩的 $Mg^{\#}$ 对某些主量元素的相关图

Fig. 2 Correlative diagram of $Mg^{\#}$ versus some major elements in Hujialing intrusive body and other pyroxenites within the Dabie Mountain

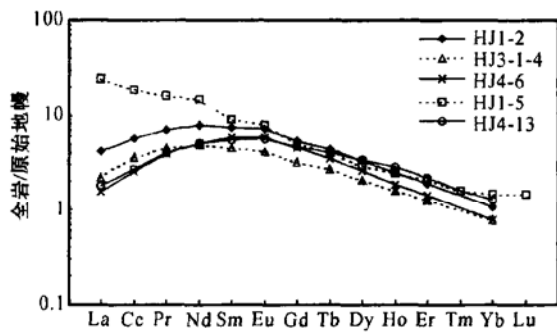


图3 胡家岭石榴单辉辉石岩全岩稀土元素配分型式图

Fig. 3 Bulk rock REE partition pattern of Hujialing garnet clinopyroxenite

较多的石榴石,但是主要赋存于石榴石(包括超硅石榴石, majorite)中的 Yb 元素却呈低值,其解释见讨论部分。

5 铂族元素特征

3 个样品的铂族元素(PGE)和 Au 分析结果见表 1。铂族元素的总体丰度为 $19.18 \times 10^{-9} \sim 59.44 \times 10^{-9}$, 变化范围较大,其中两个样品的铂族元素丰度接近而较低($18.77 \times 10^{-9} \sim 19.18 \times 10^{-9}$),而另一个样品 HJ4_6 的铂族元素丰度大大高于上两个样品可能是块金效应因素造成。这些样品的铂族元素丰度高于中国大陆科学钻探工程主孔石榴单辉橄岩的 $1.14 \times 10^{-9} \sim 2.72 \times 10^{-9}$ (待发表),接近或高于原始地幔的 23.5×10^{-9} (McDonough and Sun, 1995)、Ronda 橄岩的

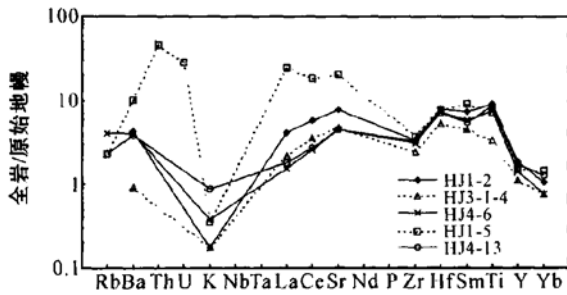


图 4 胡家岭石榴单辉辉石岩全岩微量元素蛛网图
Fig. 4 Bulk rock spidergram for trace elements of Hujialing garnet clinopyroxenite

17.5 × 10⁻⁹ ~ 37.5 × 10⁻⁹ (Gueddari *et al.*, 1996) 和中国东部新生代玄武岩中橄榄岩包体的 16.2 × 10⁻⁹ ~ 50.7 × 10⁻⁹ (徐义刚等, 1998)。从 IPGE (Os, Ir, Ru) 到 PPGE (Rh, Pt, Pd), 单个元素的丰度分别是原始地幔对应元素的 0.18 ~ 7.03 倍。

对于 PGE 含量很低的样品, 分析结果相对精确的贵金属元素为 Au, Pd 和 Ir (Barnes *et al.*, 1985)。这几个元素处于 PGE 分布型式图的两端, 可以控制丰度曲线的总体特征, (Pd/Ir)_N 值可用来确定分配型式的斜率。在本文的样品测试报告中铂族元素没有低于检测限, 保证了分析结果的可靠性。在用原始地幔值 (McDonough and Sun, 1995) 标准化的 PGE 丰度型式图 (图 5) 上, 3 个样品均显示为左倾斜的丰度曲线。对于 PGE 来说, 从 Os 到 Ru 基本上为近于平坦甚至右倾的曲线, 而从 Ru 到 Pd 则为左倾斜, (Pd/Ir)_N 值为 8.58 ~ 11.07, (Pd/Pt)_N 值为 1.7 ~ 2.4, 并且 Ir 或 Ru 同时或同步地相对于其两侧的 Os 和 Rh 较亏损。PGE 丰度曲线型式与大陆拉斑玄武岩和科马提岩的相似 (Barnes *et al.*, 1985)。

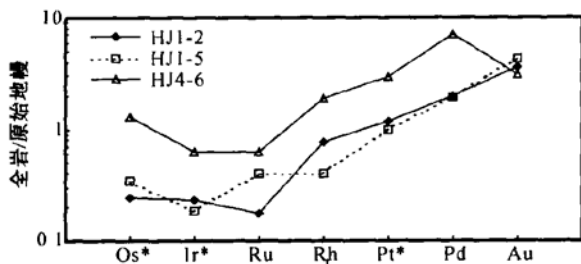


图 5 胡家岭石榴单辉辉石岩全岩贵金属丰度型式图
Fig. 5 Bulk rock precious metal distribution pattern of Hujialing garnet clinopyroxenite

6 讨论

6.1 岩石地球化学反映的成因

根据已有资料, 胡家岭岩体具有典型的地幔 Sm_{Nd}, Rb, Sr 和氧同位素特征, 是俯冲陆壳折返时从地幔直接裹挟到地

壳的辉石岩 (Zhang *et al.*, 2000), 而且折返前超高压矿物相是均一的超硅石榴石相 (Zhang *et al.*, 2003)。但是这与本文已知的地球化学特征不相吻合。

将主量元素成分与玄武质科马提岩成分进行对比后发现, 其成分落于玄武质科马提岩的成分范围。根据全岩的 CaO/Al₂O₃ = 1.6 ~ 8.0 和 Al₂O₃/TiO₂ = 3.5 ~ 6.8, 确定其成分类似于铝亏损型科马提岩。前述 SiO₂ 与 Mg[#] 呈正相关关系 (r = 0.913), Al₂O₃ 与 Mg[#] 呈负相关关系 (r = 0.855), 这种特点与有关形成科马提岩的部分熔融实验结果相似 (Herzberg, 1992)。由于全岩的稀土元素 (Gd/Yb)_N = 3.51 ~ 5.87 也与铝亏损型科马提岩的特点相似, 铂族元素丰度型式与科马提岩的相似 (Barnes *et al.*, 1985), 拟将岩浆的形成机制与科马提岩浆的形成机制进行类比。为了判别原生岩浆, 必须先判别形成岩石的岩浆是否发生过分离结晶作用。

这种高镁的、类似科马提岩的岩浆必须是单阶段高程度部分熔融形成, 否则会在达到 20% ~ 30% 的部分熔融程度之前就因为浮力而喷出 (Arndt, 1977); 在很高压 (> 4 GPa) 下, 形成的高镁质岩浆与橄榄石的密度相似 (Nisbet and Walker, 1982), 不会轻易喷发。因此, 这种岩浆的形成机制更可能是批式部分熔融, Sm, Nd, Rb, Sr 和氧同位素的特征表明没有遭受过交代作用。由利用批式部分熔融模型和分离结晶模型制作的 La/Sm - La 判别图 (图 6a) 可知, 岩浆为部分熔融形成, 未发生明显的分离结晶作用。难熔元素 (Ni) - 不相容元素 (Sr) 图解 (图 6b) 显示岩浆为部分熔融成因。

全岩具有单斜辉石特点的稀土元素配分曲线 (图 3) 说明地幔源区在部分熔融形成熔浆时熔出的主要矿物相为单斜辉石。由于石榴石和超硅石榴石的 (Gd/Yb)_N 约为 0.15 (Hauri and Hart, 1995), 因此在部分熔融形成熔浆时, 如果有大量石榴石的熔融, 全岩将会具有重稀土元素富集的特点。但是胡家岭辉石岩的稀土元素配分型式并非如此, 是重稀土元素相对亏损 [(Gd/Yb)_N = 3.51 ~ 5.87 >> 1], 所以在部分熔融发生时源区应有石榴石的残余。

虽然岩石中含有大量石榴石, 但是全岩具重稀土元素亏损的特点表明是由地幔源区以单斜辉石为主的矿物熔融形成的熔浆凝结而成, 所以即使在后来的俯冲增压或降温过程中形成石榴石相矿物, 全岩也不可能具有石榴石或超硅石榴石

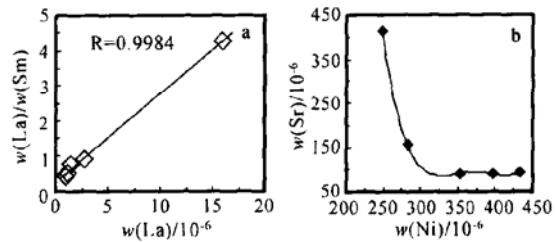


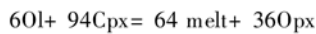
图 6 胡家岭石榴单辉辉石岩岩浆过程判别图
Fig. 6 Discriminative diagram for the magmatic process of Hujialing garnet clinopyroxenite

本来的稀土元素配分特点(Ohtani *et al.*, 1989), 而主要显示单斜辉石的稀土元素特点。

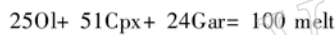
蛛网图上微量元素配分曲线不具明显右倾斜的特点, 说明岩石没有经历过流体(甚至地幔流体)交代作用, 这与其 Sr-Nd 同位素具有亏损地幔特征是一致的(Zhang *et al.*, 2000), 同时也说明发生部分熔融形成熔浆地幔源区是亏损大离子亲石元素的。

根据 Walter(1998) 的实验研究, 固相线以上进一步增温可使单斜辉石发生不一致熔融, 形成斜方辉石和熔体。在 4 GPa 时的转熔反应发生时达到约 12% 的部分熔融程度, 在 7 GPa 时则达到约 38%, 并且压力高于 4.2 GPa 时首先消失的矿物相是单斜辉石, 在部分熔融程度更高时, 石榴石稳定程度比斜方辉石更高(Walter, 1998)。7 GPa 时, 在固相线上不出现斜方辉石, 熔融反应为共熔型; 在部分熔融程度达到约 38% 时, 斜方辉石从熔体中结晶; 在部分熔融程度达到约 46% 时, 斜方辉石结晶量达到最大, 而此时单斜辉石在残余相中极少。此时低压和高压两端的反应方程式可以大概说明熔出相的比例:

3 GPa 时, 10% ~ 23% (Cpx 消失, Opx 极大)



7 GPa 时, 10% ~ 38% (Opx 出现)



7 GPa 时, 38% ~ 46% (Cpx 消失, Opx 极大)



从上述方程式可见, 在适当的部分熔融程度范围内, 主要的熔出相为单斜辉石。

该实验说明, 在 4.2~7 GPa 压力范围内, 对应的部分熔融程度为 30% 到 48% 以上, 上地幔主要的熔出相为单斜辉石, 橄榄石和石榴石的比例较小, 并且源区有石榴石的残余, 因此 $CaO/Al_2O_3 > 1$, 从而大致确定胡家岭石榴单辉辉石岩岩浆的部分熔融温压条件为 1600~1800 °C 和 4.2~7 GPa。这样可以解释胡家岭石榴辉石岩的高 $CaO/Al_2O_3 (> 1)$ 、岩石具有单斜辉石特点的稀土元素配分曲线、 $(Gd/Yb)_N = 3.51 \sim 5.87 (>> 1)$ 等特征。

科马提质岩石的成分差异可能并不反映源区的成分特点, 而是反映了在很高压下相平衡起着主要的控制作用(Arndt, 1986; Herzberg, 1992)。因此, 胡家岭石榴单辉辉石岩也是由于受相平衡的控制在地幔部分熔融时主要熔出单斜辉石形成的岩浆。在压力大于 4.2 GPa 时, 固相线之下的稳定组成为单斜辉石+石榴石(Walter, 1998)。

本文的推断否定了胡家岭石榴单辉辉石岩的原岩为均一的超硅石榴石固溶体的推断(Zhang *et al.*, 2003), 支持了原岩是辉石岩。后来的大陆俯冲作用过程中将其带入地幔更深处, 变质重结晶形成了石榴单辉辉石岩, 在大陆壳折返时被带到地壳浅处。

6.2 铂族元素反映的成因

铂族元素均为亲铁元素, 其行为可以揭示某些亲石元素

所不能揭示的岩石的地质历史, 例如是否有过硫化物的饱和。影响铂族元素在岩石中的丰度和分布型的因素有部分熔融程度、分离结晶作用、硫化物熔体分离、合金残留、交代作用和氧逸度等。前面已经叙述了胡家岭石榴单辉辉石岩岩浆主要是部分熔融程度作用形成的, 下面主要从部分熔融和是否有硫化物分离方面来讨论。

IPGE(Os, Ir, Ru) 具有难熔而且相容性特征, 经常在高温时形成合金, 滞留在地幔残留体中; PPGE(Rh, Pt, Pd) 具有在金属硫化物中赋存的特点, 较多呈现为不相容性, 部分熔融时优先进入硅酸盐熔体(Gueddari *et al.*, 1996)。从石榴单辉辉石岩原始地幔标准化后的铂族元素丰度形式上看, 铂族元素的丰度受到部分熔融程度的控制。前面已经表明, 石榴单辉辉石岩富易熔组分、贫难熔组分, 而铂族元素的丰度却高于典型的地幔橄榄岩, 这更说明了岩浆是在高温和部分熔融程度高的条件下形成的。

如果 Rh、Pt 和 Pd 随硫化物从熔浆中分离出去, 可使岩浆中的这些元素含量低于本来有的含量, 丰度型式呈负斜率, 因此具有假相容性的特点(Fleet and Stone, 1993)。胡家岭石榴单辉辉石岩样品的铂族元素丰度相对较高, 原始地幔标准化的丰度分布形式呈正斜率, 说明没有硫化物的分离。Pt、Pd 与 Cu 呈正相关关系(图 7a), 说明了 Pt、Pd 赋存在硫化物中; 而 Pt、Pd 与 Au 呈负相关关系(图 7b), 这可以用地幔低 S 时 Cu 显示良好的不相容性而 Au 不能形成含硫相而显示相容性来解释(Gueddari *et al.*, 1996)。这也说明了岩浆的 S 含量低, 未达饱和, 没有硫化物的分离。因此, 在很高熔融程度的前提下, 地幔源区的硫化物应当全部熔出, 由熔体 S 不饱和说明地幔源区也是低 S 的。

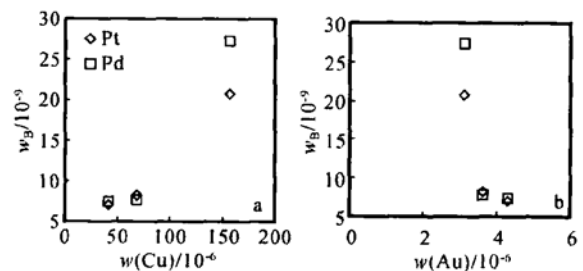


图7 胡家岭石榴单辉辉石岩 Cu、Au 与 Pt 和 Pd 相关图

Fig. 7 Correlative diagram of Cu and Au versus Pt and Pd for Hujialing garnet clinopyroxenite

7 结论

(1) 岩石地球化学特征表明, 日照胡家岭石榴单辉辉石岩为地幔高程度部分熔融形成的岩浆凝结而成。

(2) 铂族元素丰度高、正斜率的特点表明, 成岩岩浆主要受高程度部分熔融的控制, 岩浆没有达到硫饱和, 未发生硫化物的分离。

(3) 这种岩浆是地幔源区残留石榴石、主要熔出单斜辉石而形成的。与有关实验研究类比可知, 其形成压力大于 4.2 GPa, 部分熔融程度大于 30%, 该岩体折返前的矿物相组成可能为单斜辉石+ 石榴石。

Reference

- Arndt N T. 1977. Ultrabasic magmas and high_degree melting of the mantle[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 64: 205~221.
- Arndt N T. 1986. Komatiites: a dirty window to the Archean mantle [J]. *Terra Cognita*, 6: 59~ 66.
- Banes S J, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum_group elements in terrestrial magmas [J]. *Chemical Geology*, 53: 303~ 323.
- Fleet M E and Stone W E. 1993. Partitioning of platinum_group elements in the Fe_Ni_S system and their fractionation in nature[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 245~ 253.
- Gueddari K, Piboule M and Amosse J. 1996. Differentiation of platinum_group elements (PGE) and of gold during partial melting of peridotites in the lherzolithic massifs of the Betico - Rifean range (Ronda and Beni Bousera) [J]. *Chemical Geology*, 134: 181~ 197.
- Hauri E H and Hart S R. 1995. Correction to 'Contents on melt migration from mantle plume: a trace element study of peridotite xenoliths from Savai'i, western Samoa' [J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 2 003.
- Herzberg C. 1992. Depth and degree of melting of komatiites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 97: 4 521~ 4 540.
- Hiramatsu N and Hirajima T. 1995. Petrology of the Hujialin garnet clinopyroxenite in the Su_Lu ultrahigh_pressure province, eastern China[J]. *Island Arc*, 4: 310~ 323.
- Liou J G and Zhang R Y. 1998. Petrogenesis of an ultrahigh_pressure garnet_bearing ultramafic body from Maowu, Dabie Mountains, east_central China[J]. *Island Arc*, 7: 115~ 134.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223~ 254.
- Nisbet E G and Walker D. 1982. Komatiites and the structure of the Archean mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 60: 105~ 113.
- Ohtani E, Kawabe I, Moriyama J, Nagata Y. 1989. Partitioning of elements between majorite garnet and melt and implications for petrogenesis of komatiite[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103: 263~ 269.
- Ouma N, Ninomiya S and Nagasawa H. 1981. Mineral_groundmass partition coefficients for nepheline, melilite, clinopyroxene and perovskite in melilite_nepheline basalt, Nyiragongo, Zaire [J]. *Geochemistry Journal*, 15: 221~ 228.
- Walter M J. 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere[J]. *Journal of Petrology*, 39: 29~ 60.
- Xu Y G, Orberger B and Reeves S J. 1998. Fractionation of platinum group elements in the upper mantle_evidence from peridotite xenoliths, Wangqing, eastern China[J]. *Science in China D*, 28: 201~ 207.
- Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, *et al.* 1995a. Petrology of ultrahigh_pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 13: 659~ 675.
- Zhang R Y and Liou J G. 1998. Ultrahigh_pressure metamorphism of the Sulu terrane, eastern China: a prospective view [J]. *Continental Dynamics*, 3: 32~ 53.
- Zhang R Y, Liou J G and Cong B L. 1994. Petrogenesis of garnet_bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su_Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 12: 169~ 186.
- Zhang R Y, Liou J G and Cong B L. 1995b. Talc., magnesite and Ti clinohumite_bearing ultrahigh_pressure meta_mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China [J]. *Journal of Petrology*, 36: 1 011~ 1 037.
- Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, *et al.* 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie_Sulu UHP terrane, eastern_central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 149~ 166.
- Zhang R Y, Rumble D, Liou J G, *et al.* 1998. Low $\delta^{18}\text{O}$, ultra_high P garnet_bearing mafic and ultramafic rocks from Dabie Shan, China [J]. *Chemical Geology*, 150: 161~ 170.
- Zhang R Y, Zhai S M, Fei Y W, *et al.* 2003. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: the significance of exsolved rutile in garnet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 591~ 601.
- Zhang R Y and Liou J G. 2003. Clinopyroxenite from the Sulu ultrahigh_pressure terrane, eastern China: origin and evolution of garnet exsolution in clinopyroxene [J]. *American mineralogist*, 88: 1 591 ~ 1 600.

附中文参考文献

- 徐义刚, Orberger B, Reeves S J. 1998. 上地幔铂族元素的分异——吉林汪清橄榄岩包体提供的证据[J]. *中国科学(D辑)*, 28: 201 ~ 208.