

北大别木子店石榴辉石岩的麻粒岩相退变质作用

张泽明¹ 钟增球² 游振东² 胡开明³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 3. 浙江省区域地质调查院, 萧山 311203)

摘要: 详细的岩相学、矿物化学、岩石化学和变质作用温压条件计算表明, 大别变质地体北部角闪二辉麻粒岩是石榴辉石岩在其抬升过程中经历麻粒岩相退变质作用的产物, 峰期变质作用至少是发生在高压榴辉岩相条件下, 而且地温梯度较低. 石榴辉石岩的退变质作用 $p-t$ 轨迹以早期的近等温降压、中期的近等压升温和中期的降温降压为特征. 这一结果表明北大别变质地体的峰期变质作用并非仅达麻粒岩相.

关键词: 麻粒岩; 石榴辉石岩; 榴辉岩相; $p-t$ 轨迹; 北大别地体.

中图分类号: P588.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0295-07

作者简介: 张泽明, 男, 副教授, 博士后, 1961年生, 1996年毕业于中国地质大学, 获博士学位, 现主要从事岩石学与变质地质学研究.

随着大别—苏鲁高压超高压变质带各项研究工作的深入, 许多学者越来越认识到, 与超高压变质岩相关的花岗质片麻岩和麻粒岩的研究, 对于整个秦岭—大别造山带形成与演化历史的认识非常重要. 基于这一思路, 我们对分布于大别地体北部的麻粒岩做了进一步工作, 发现木子店地区角闪二辉麻粒岩的原岩是石榴辉石岩, 在其快速抬升过程中经历了降压升温过程, 发生了麻粒岩相退变质作用. 它要求我们重新认识秦岭—大别造山带根部的物质组成及其形成与演化历史.

1 地质背景

在大别山东段麻粒岩主要分布于大别变质地体的西北部(图1), 且多呈较小的孤立透镜状或团块状产出, 围岩主要为高角闪岩相变质的花岗质片麻岩和斜长角闪岩. 向大别变质地体的南部和东南部, 岩石的区域变质作用程度逐渐降低为低角闪岩相、绿帘角闪岩相. 但在这些变质程度相对较低的岩石中却含有大量的超高压榴辉岩相变质岩. 本文所研

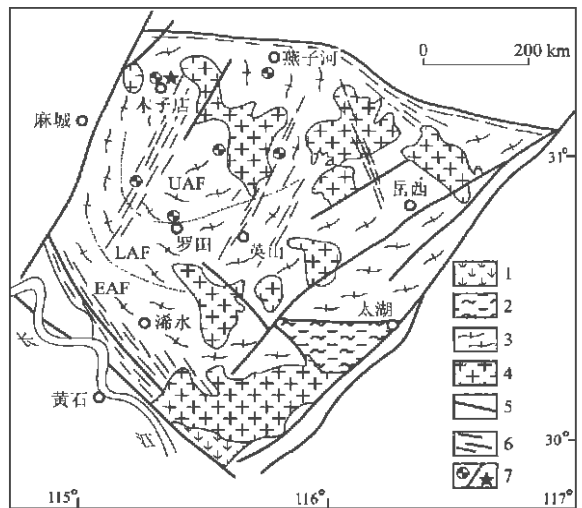


图1 大别地体简化地质图(据文献[1]修改)

Fig. 1 Sketch geological map of Dabie terrain

UAF·高角闪岩相; LAF·低角闪岩相; EAF·绿帘角闪岩相. 1. 随县群; 2. 宿松群; 3. 大别杂岩; 4. 花岗岩; 5. 断裂; 6. 剪切带; 7. 麻粒岩/样品位置

究样品采自大别变质地体西北部的麻城木子店, 该地区的麻粒岩相岩石包括角闪二辉麻粒岩、石榴夕线石片麻岩、石榴紫苏片麻岩和含斜方辉石斜长角闪岩. 这些岩石与磁铁石英岩和斜长角闪岩一起呈透镜状产于黑云斜长片麻岩之中, 而黑云斜长片岩

收稿日期: 1999-09-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 4979400), 面上项目(No. 49772142 和 No. 49772146); 国土资源部大陆动力学和壳幔体系组成、物质交换及动力学开放实验室资助项目.

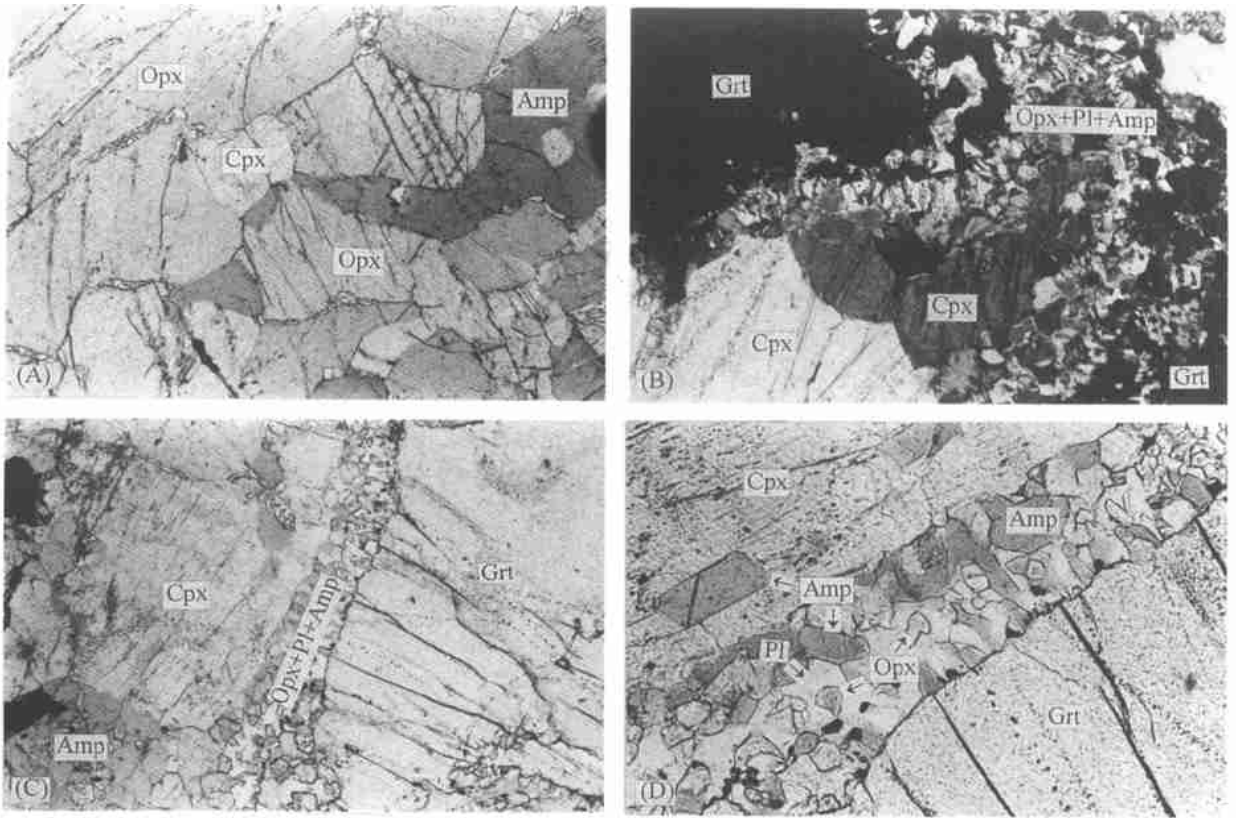


图 2 角闪二辉麻粒岩和石榴辉石岩残留体显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of amphibole two-pyroxene granulite and relic of garnet pyroxenite

A. 角闪二辉麻粒岩, 由斜方辉石(Opx)、斜长石(Pl)、角闪石(Amp)和少量单斜辉石(Cpx)组成; B. 角闪二辉麻粒岩中的石榴石后成合晶假象(Sym); C. 石榴辉石岩的残留体石榴石(Grt)和单斜辉石(Cpx), 石榴石发育由斜方辉石和斜长石组成的后成合晶冠状体(Sym); D. 石榴辉石岩的石榴石残留体(Grt)及其由斜方辉石和斜长石组成的后成合晶冠状体(Sym). A、B 和 C 为单偏光, 长边为 3.3 cm, D 为正交偏光, 长边 3.3 cm

又呈近 100 m 宽的透镜体产于花岗质片麻岩之中。

2 岩石学特征

在木子店地区, 角闪二辉麻粒岩呈灰黑色, 块状构造, 中粒粒柱状变质晶结构, 主要由斜方辉石(40%, 体积百分含量, 下同)、角闪石(25%)、斜长石(20%)和少量单斜辉石(10%)和石英(5%)组成(图 2A、B)。斜方辉石具有无色—浅粉红色多色性, 单斜辉石无色, 角闪石具黄—棕黄色多色性, 显示其富含 TiO_2 。

石榴辉石岩在角闪二辉麻粒岩中呈斑块残留体, 大小多在几 cm 以下, 岩石呈块状构造, 斑状变晶结构, 石榴石呈变斑晶或巨晶, 粒度可达 1.5~2.0 cm, 含单斜辉石和斜方辉石包体。变质基质主要由单斜辉石组成, 其粒度 < 1 mm。在手标本尺度上, 从石榴辉石岩斑块到角闪二辉麻粒岩可见矿物粒度和颜色

的明显变化, 即从浅红色的巨晶石榴石→绿色的细粒单斜辉石环带→灰色微粒矿物(后成合晶)环带→黑绿色角闪二辉麻粒岩。石榴石巨晶与角闪二辉麻粒岩之间的后成合晶带一般宽几 mm 到 1cm 左右(图 2C、D)。

详细的岩相学观察表明, 石榴辉石岩中的石榴石和单斜辉石均不同程度地被后成合晶矿物所替代, 石榴石多呈不规则残晶状。斜方辉石+斜长石合晶呈冠状体围绕残晶石榴石或单斜辉石分布(图 2C、D), 或蠕虫状斜方辉石+斜长石呈石榴石、单斜辉石的后成合晶假象(图 2B)。部分后成合晶中含少量角闪石。在石榴石聚晶中含极细小的针状金红石出溶体, 并在主矿物中彼此呈 60° 夹角有规律分布; 在单斜辉石中含有石英出溶晶片, 并平行主矿物解理分布。

上述观察表明石榴辉石岩至少经历 3 个变质阶段: 石榴辉石岩阶段(榴辉岩相阶段), 矿物组合为石

表1 北大别木子店石榴辉石岩的代表性矿物电子探针分析结果

Table 1 Representative mineral analyses of garnet pyroxenite of Muzhidan of northern Dabie

样号	R281-7-0						R281-7-2						R281-7-3						R281-7-4						R281-7-5						R281-7-8							
	Grt	Cpx	Cpx	Opx	Pl	Grt	Grt	Pl	Opx	Pl	Amph	Grt	Opx	Pl	Amph	Pl	Opx	Pl	Grt	Opx	Pl	Amph	Pl	Opx	Pl	Opx	Pl	Amph	Pl	Opx	Pl	Grt	Opx	Pl	Amph	Pl	Opx	Pl
SiO ₂	39.68	52.16	52.28	51.90	49.22	39.12	39.12	46.63	46.56	42.30	39.77	52.41	48.89	52.67	45.70	53.34	52.67	45.70	53.34	52.41	48.89	52.67	45.70	53.34	52.67	45.70	53.34	52.78	51.64	55.72	53.34	52.78	51.64	55.72				
TiO ₂	0.01	0.21	0.13	0.06	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	1.26	0.03	0.05	0.00	0.06	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.00	0.06	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.08	0.00	0.00	0.05	0.08	0.00	0.00				
Al ₂ O ₃	22.45	2.92	2.17	1.79	32.43	21.89	2.65	33.36	34.12	13.15	22.44	2.15	33.00	1.97	35.26	1.49	1.97	35.26	1.49	2.15	33.00	1.97	35.26	1.49	1.97	35.26	1.49	2.02	31.99	27.48	1.49	2.02	31.99	27.48				
FeO	22.26	7.07	7.90	23.17	0.31	23.76	21.25	0.35	0.12	13.21	22.74	21.10	0.38	21.20	0.43	19.11	21.20	0.43	19.11	21.10	0.38	21.20	0.43	19.11	21.20	0.43	19.11	7.36	0.14	0.31	19.11	7.36	0.14	0.31				
MnO	0.77	0.14	0.15	0.49	0.01	1.04	0.30	0.00	0.00	0.10	1.05	0.30	0.05	0.30	0.04	0.37	0.30	0.04	0.37	0.30	0.05	0.30	0.04	0.37	0.30	0.04	0.37	0.09	0.00	0.00	0.37	0.09	0.00	0.00				
MgO	9.53	14.52	14.41	21.92	0.01	8.18	22.82	0.02	0.00	12.30	8.51	23.29	0.00	23.39	0.03	23.84	23.39	0.03	23.84	23.29	0.00	23.39	0.03	23.84	23.39	0.03	23.84	15.12	0.01	0.04	23.84	15.12	0.01	0.04				
CaO	5.81	21.37	23.04	0.58	16.23	6.53	0.20	15.08	15.01	11.71	5.81	0.52	15.10	0.53	16.93	0.46	0.53	16.93	0.46	0.52	15.10	0.53	16.93	0.46	0.53	16.93	0.46	22.39	13.19	9.79	22.39	13.19	9.79	12.16				
Na ₂ O	0.04	0.44	0.41	0.01	3.25	0.03	0.00	2.80	2.41	2.70	0.00	0.01	2.77	0.03	1.07	0.00	0.03	1.07	0.00	0.01	2.77	0.03	1.07	0.00	0.03	1.07	0.00	0.36	3.92	6.93	0.36	3.92	6.93	2.30				
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00	0.03	0.01	0.63	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.07	0.13	0.01	0.07	0.13	0.52				
Cr ₂ O ₃	0.08	0.09	0.09	0.07	0.03	0.05	0.11	0.00	0.00	0.26	0.00	0.08	0.01	0.09	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.08	0.01	0.09	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.08	0.00	0.02	0.08	0.00	0.00	0.20				
总量	100.62	98.92	100.61	99.98	101.54	100.62	99.63	98.28	98.26	97.36	100.34	99.90	100.20	100.24	99.51	98.66	100.24	99.51	98.66	99.90	100.20	100.24	99.51	98.66	100.24	99.51	98.66	100.28	100.95	100.42	100.28	100.95	100.42	97.34				
O	12	6	6	6	32	12	6	32	32	23	12	6	32	6	32	6	6	32	6	6	32	6	32	6	6	32	6	6	32	32	32	32	23					
Si	2.996	1.945	1.924	1.936	8.916	2.982	1.940	8.703	8.662	6.285	3.029	1.937	8.921	1.940	8.432	1.985	1.940	8.432	1.985	1.937	8.921	1.940	8.432	1.985	1.940	8.432	1.985	1.941	9.286	10.037	6.353	1.941	9.286	10.037	6.353			
Ti	0.001	0.006	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.141	0.002	0.001	0.000	0.002	0.006	0.001	0.002	0.006	0.001	0.001	0.000	0.002	0.006	0.001	0.002	0.006	0.001	0.002	0.000	0.000	0.127	0.002	0.000	0.127				
Al	1.996	0.129	0.094	0.079	6.918	1.965	0.116	7.332	7.475	2.301	2.013	0.093	7.092	0.086	7.661	0.066	0.086	7.661	0.066	0.093	7.092	0.086	7.661	0.066	0.086	7.661	0.066	0.088	6.774	5.830	2.148	0.088	6.774	5.830	2.148			
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.078	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	0.000	0.030	0.000	0.000	0.030	0.000	0.000	0.028	0.000	0.030	0.000	0.000	0.030	0.000	0.000	0.049	0.000	0.118	0.049	0.000	0.118					
Fe ²⁺	1.405	0.221	0.164	0.679	0.047	1.515	0.660	0.055	0.019	1.641	1.448	0.624	0.058	0.623	0.066	0.595	0.623	0.066	0.595	0.624	0.058	0.623	0.066	0.595	0.623	0.066	0.595	0.178	0.021	0.047	0.178	0.021	0.047	1.238				
Mn	0.049	0.004	0.005	0.015	0.002	0.067	0.009	0.000	0.000	0.013	0.068	0.009	0.008	0.009	0.006	0.012	0.009	0.006	0.012	0.009	0.008	0.009	0.006	0.012	0.009	0.006	0.012	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.010				
Mg	1.073	0.807	0.790	1.219	0.003	0.930	1.263	0.006	0.000	2.724	0.966	1.283	0.000	1.284	0.008	1.323	1.284	0.008	1.323	1.283	0.000	1.284	0.008	1.323	1.284	0.008	1.323	0.829	0.003	0.011	3.073	0.829	0.003	0.011	3.073			
Ca	0.470	0.854	0.908	0.023	3.150	0.533	0.008	3.015	2.992	1.864	0.474	0.021	2.952	0.021	3.347	0.018	0.021	3.347	0.018	0.021	2.952	0.021	3.347	0.018	0.021	3.347	0.018	0.882	2.541	1.890	0.882	2.541	1.890	1.910				
Na	0.006	0.032	0.029	0.001	1.142	0.004	0.000	1.013	0.869	0.778	0.000	0.001	0.980	0.002	0.383	0.000	0.002	0.383	0.000	0.001	0.980	0.002	0.383	0.000	0.002	0.383	0.000	0.025	1.367	2.421	0.654	0.025	1.367	2.421	0.654			
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.007	0.002	0.002	0.119	0.000	0.000	0.002	0.000	0.005	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.002	0.000	0.005	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.016	0.030	0.000	0.016	0.030	0.000	0.030			
Cr	0.005	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.031	0.000	0.002	0.002	0.003	0.003	0.000	0.003	0.003	0.000	0.002	0.002	0.003	0.003	0.000	0.003	0.003	0.000	0.002	0.000	0.023	0.002	0.000	0.023					
阳离子数	8.001	4.001	3.999	4.000	21.191	8.000	3.999	20.131	20.022	15.897	8.000	3.999	20.013	4.000	19.914	4.000	4.000	19.914	4.000	3.999	20.013	4.000	19.914	4.000	4.000	19.914	4.000	4.000	20.008	20.266	15.751	4.000	20.008	20.266	15.751			

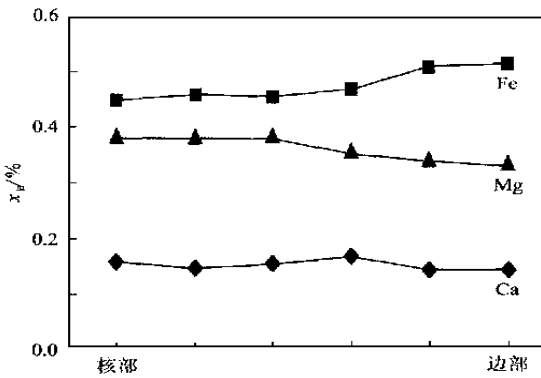


图 3 石榴石的化学成分环带

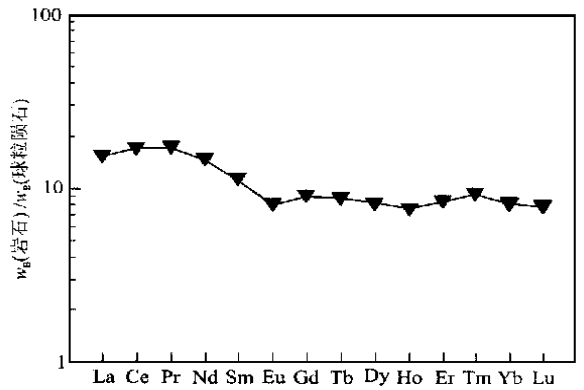
Fig. 3 Chemical compositional zoning of garnet
分析点间距为 0.03 mm

图 4 石榴辉石岩稀土元素球粒陨石标准化分配型式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution pattern of garnet pyroxenite

榴石+单斜辉石+斜方辉石；后成合晶阶段，矿物组合为斜方辉石+斜长石+角闪石+石英；麻粒岩相阶段，矿物组合为斜方辉石+单斜辉石+斜长石+角闪石+石英。从石榴辉石岩阶段到后成合晶阶段，发生下列变质反应：

石榴石+单斜辉石+石英=斜方辉石+斜长石。

其中石榴石在后一阶段已是不稳定矿物，而斜长石的出现标志着变质作用由榴辉岩相进入到了麻粒岩相。据矿物组合，后两个阶段都是发生在麻粒岩相变质条件下，但由于所组成矿物在产状、分布、结构，以及成分上存在差异，可将其划分成两个变质阶段，温压计算结果也表明这两个阶段的变质条件是不同的。

笔者对各阶段的矿物进行了详细电子探针分析，代表性分析结果见表 1。石榴辉石岩中的石榴石主要由铁铝（摩尔分数 48.2%~52.0%）、镁铝（28.9%~33.2%）和钙铝（13.2%~17.9%）榴石组成，含少量锰铝榴石（1.9%~2.2%）。残晶石榴石具明显成分环带，从中心到边缘 $x(\text{Mg})$ 降低， $x(\text{Fe})$ 升高（图 3），这应是在麻粒岩相退变质作用过程中形成的扩散环带。3 个变质阶段形成的斜方辉石均为顽火辉石，但其成分不同，榴辉岩相的斜方辉石含 Al_2O_3 最高（2.65%），后成合晶阶段的斜方辉石次之（1.79%~2.15%），而麻粒岩相阶段的斜方辉石含量最低（1.49%）；这表明斜方辉石的形成压力从榴辉岩相，到后成合晶阶段，到麻粒岩相阶段不断降低。榴辉岩相和麻粒岩相阶段的单斜辉石均为透辉石，但从早到晚单斜辉石的 Na_2O 和 Al_2O_3 含量降低，这说明单斜辉石的形成压力降低，与一般榴辉岩

中的单斜辉石相比，石榴辉石岩中的单斜辉石明显贫 Na_2O ，这是因为岩石本身含 Na_2O 很低，即使是经历了高压或超高压变质作用单斜辉石也不会富 Na_2O 。两阶段形成的斜长石具有比较明显的成分差异，后成合晶阶段的斜长石比较富钙， $x(\text{An}) > 73\%$ ，最高达 89%，相当于倍长石；而麻粒岩相的大颗粒斜长石含较低的钙长石分子（43%~65%），为中长石或拉长石。两阶段形成的角闪石为普通角闪石，均较富 TiO_2 ，从后成合晶阶段到麻粒岩相阶段，角闪石的 FeO 降低，而 MgO 升高。

石榴辉石岩的常量元素质量分数为： SiO_2 46.56%， TiO_2 0.62%， Al_2O_3 11.27%， Fe_2O_3 2.78%， FeO 10.73%， MgO 14.20%， CaO 11.07%， Na_2O 0.63%， K_2O 0.41%， MnO 0.28%， P_2O_5 0.04%， CO_2 0.04%， H_2O 1.16%。稀土元素含量是球粒陨石的 8~20 倍，呈轻稀土略显富集，重稀土平坦分配型式（图 4）。在多个岩石分类图解中，石榴辉石岩的原岩大多落入玄武岩区，但接近超基性岩。

3 变质作用温压条件及 $p-t$ 轨迹

基于各阶段矿物组合及反应关系，选用合适的矿物成分，笔者对各阶段变质作用的温压条件进行了估算（表 2）。其中对石榴辉石岩的计算选用的是石榴石和单斜辉石较大残晶颗粒的核部成分，以避免后期退变质作用过程中成分扩散的影响；而对后成合晶阶段，利用的是后成合晶矿物成分，以及与其相邻的石榴石和单斜辉石残晶的边部成分进行计算，以避免矿物对之间的不平衡。矿物化学研究显示

表2 各阶段变质温压条件估算

Table 2 Estimated $p-t$ conditions for various stages of metamorphism

变质阶段	方 法	所利用矿物成分	$t/^\circ\text{C}$	p/GPa
石榴辉石岩阶段	Powell 石榴石-单斜辉石 Fe-Mg 分配系数温度计 ^[2]	残留的矿物对核部	765 810	(1.5) (3.0)
	Harley 石榴石-斜方辉石压力计 ^[3]	残留的矿物对核部	(727) (827)	2.2 2.3
	Harley 石榴石-斜方辉石 Fe-Mg 分配系数温度计 ^[4]	后成合晶斜方辉石和残留的石榴石边部	721~744	(0.9)
后成合晶阶段	Sen 等石榴石-斜方辉石 Fe-Mg 分配系数温度计 ^[5]	后成合晶斜方辉石和残留的石榴石边部	740~770	(0.9)
	Newton 等石榴石-斜方辉石-斜长石-石英反应压力计 ^[6]	后成合晶矿物和残留的石榴石边部	(750)	0.85~0.91
	Paria 等石榴石-单斜辉石-斜方辉石-斜长石-石英反应压力计 ^[7]	后成合晶矿物和残留的石榴石边部	(750)	0.85~0.95
	Wood 等二辉石温度计(据文献[8])	晚期形成的斜方辉石和单斜辉石	840~910	
麻粒岩相阶段	Brey 等二辉石温度计 ^[9]	晚期形成的斜方辉石和单斜辉石	802	(1.0)
	Brey 等斜方辉石中的 Ca 含量温度计 ^[9]	晚期形成的斜方辉石	869	(1.0)
	Blundy 等角闪石-斜长石温度计 ^[10]	晚期形成的角闪石和斜长石	830~840	(0.8)
	Schmidt ^[11] , Hammarstrom 等 ^[12] 和 Hollister 等 ^[13] 的角闪石中 Al 压力计	晚期形成的角闪石		0.76~0.82

括号中的数字代表计算时假定的压力或温度。

3个不同阶段形成的同种矿物在成分上是不同的,这表明麻粒岩相退变质作用并没有完全改变早期的矿物成分,所以,应用共生矿物对分配系数温压计可获得相应变质阶段的温压条件。

石榴辉石岩的形成条件可以采用石榴石-单斜辉石 Fe-Mg 分配系数温度计和与石榴石共生的斜方辉石中铝可溶性压力计估算。上述两个 p, t 单变线大约相交在 787°C 和 2.25 GPa (图5)。这一温压估算结果至少表明石榴辉石岩形成在榴辉岩相条件下,而且地温梯度也比较低(相当于 $8^\circ\text{C}/\text{km}$)。石榴辉石岩中普遍发育的快速减压退变质结构,斜方辉石富 Al_2O_3 , 单斜辉石富 Na_2O , 石榴石中的金红石出溶针,以及单斜辉石中的石英出溶晶片都有利于这种岩石曾经历高压变质作用的结论。对于后成合晶阶段,由于存在一个麻粒岩中很常见的变质反应:石榴石+单斜辉石+石英=斜方辉石+斜长石,并且有多个温压计可以利用,所以该阶段温压条件的估算应该还是比较确切的。实际上,几个温压计给出的结果也比较接近,相交在一个较小的 $p-t$ 区间(图5)。对麻粒岩相阶段,在 $0.8\sim 1.0\text{ GPa}$ 的压力下,用 Wood 和 Banno, Wells 的二辉石温度计得出的温度为 $840\sim 910^\circ\text{C}$, 而用较新的 Bery 和 Kohler 二辉石温度计得出的温度较低,约为 800°C 。用 Bery 和 Kohler 的斜方辉石中 Ca 含量温度计得出的温度为 860°C 。角闪石-斜长石温度计给出的温度也相对

较低,为 $830\sim 840^\circ\text{C}$ 。上述结果至少表明,麻粒岩相的变质温度在 800°C , 或更高。可利用的多个角闪石压力计给出了近 0.8 GPa 的压力。

图5为石榴辉石岩的变质作用 $p-t$ 轨迹,其特点是从石榴辉石岩到后成合晶阶段为近等温降压过程,之后经过近等压升温到达麻粒岩相阶段。在北大别地块广泛出露的是角闪石相变质岩,在麻粒岩相之后经历了角闪岩相退变质作用已被大量研究所证实。因此,推测上述变质作用 $p-t$ 轨迹也应经历降温、降压过程到达角闪岩相区。这一 $p-t$ 轨迹与南大别地区超高压变质岩的 $p-t$ 轨迹具有一个共同的特征,即均经历了明显的快速减压抬升过程,但后者并没有经历升温过程,而是直接进入角闪岩相区(图5)。

4 讨论与结论

本文的初步研究结果表明,大别变质地体北部木子店地区的石榴辉石岩是高压变质作用的产物,在其抬升过程中经历了麻粒岩相退变质作用,其退变质作用 $p-t$ 轨迹表现为早期的近等温降压,中期的近等压升温和晚期的降温、降压。这说明北大别地区也经历了榴辉岩相峰期变质作用,而并非仅为麻粒岩相。

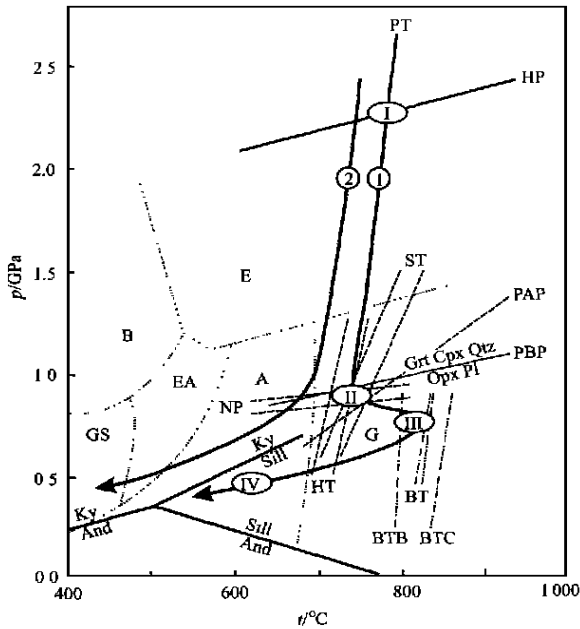


图 5 石榴辉石岩变质作用 $p-t$ 轨迹

Fig. 5 Metamorphic $p-t$ path of garnet pyroxenite

图中变质相界据 Evans^[19]. E. 榴辉岩相; G. 麻粒岩相; A. 角闪岩相; EA. 绿帘角闪岩相; B. 蓝片岩相; GS. 绿片岩相. Al_2O_3 多型转变反应据 Holdaway^[20]; 图中轨迹为石榴辉石岩变质作用 $p-t$ 轨迹. I. 石榴辉石岩阶段; II. 后成合晶阶段; III. 麻粒岩相阶段; IV. 角闪岩相阶段; 轨迹为南大别地区超高压变质岩的 $p-t$ 轨迹^[21,14]; 温压计单变线分别为: BT Blundy 和 Holland 角闪石-斜长石温度计, BTB Brey 和 Kokler 的二辉石温度计, BTC Brey 和 Kokler 的斜方辉石中 Ca 含量温度计, HP Harley 石榴石-斜方辉石压力计, HT Harley 石榴石-斜方辉石温度计, NP Newton 和 Parkins 石榴石-斜方辉石-斜长石-石英反应压力计, PAP Paria 等石榴石-单斜辉石-斜方辉石-斜长石-石英反应 Fe 端元压力计, PBP Paria 等石榴石-单斜辉石-斜方辉石-斜长石-石英反应 Mg 端元压力计, PT Powell 石榴石-单斜辉石温度计, S T Sen 和 Bhattacharya 石榴石-斜方辉石温度计. Ky. 蓝晶石; And. 红柱石; Sill. 夕线石; Grt. 石榴石; Cpx. 单斜辉石; Opx. 斜方辉石; Pl. 斜长石; Qtz. 石英

在大别-苏鲁超高压变质带, 石榴辉石岩有多处分布, 如大别地区的太湖石马毛屋、苏鲁地区的日照胡家林、荣城的迟家店等地. 由于在这些地区石榴辉石岩与石榴橄榄岩等超基性岩一起产出, 并且与含柯石英的超高压榴辉岩伴生, 游振东等^[14]都认为这些岩石与榴辉岩一起经历了超高压变质作用. 石榴辉石岩和石榴橄榄岩等的温压计算也获得了与超高压榴辉岩相似的条件和相似的变质作用 $p-t$ 轨迹. 据研究, 在苏鲁地区, 某些超高压变质岩经历了麻粒岩相退变质作用. 如在威海发现含柯石英榴辉

岩退变质形成麻粒岩, 其 $p-t$ 轨迹也显示出升温过程^[16~18]. 在荣城迟家店, 超基性超高压变质岩经历了麻粒岩相退变质作用^[17]. 木子店地区石的石榴辉石岩与上述地区的同类岩石在岩相学、矿物学和变质条件及 $p-t$ 轨迹等方面有诸多相似之处. 如果本文的基本结论得到进一步证实, 它将对大别-苏鲁超高压变质带的研究具有重要意义.

研究工作得到了许志琴院士指导. 论文初稿承蒙沈其韩院士审阅并提出宝贵意见. 矿物电子探针分析由中国地质大学(武汉)测试中心杨勇和郑曙完成, 岩石化学成分由国土资源部湖北岩矿测试中心分析.

参考文献:

- [1] Chen N S, Sun M, You Z D, et al. Well-preserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie mountains, central China [J]. *J Metamorphic Geol*, 1998, 16: 213~222.
- [2] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited [J]. *J Metamorphic Geol*, 1985, 3: 231~243.
- [3] Harley S L. The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet in $FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ and $CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ [J]. *J Petrology*, 1984, 25: 665~696.
- [4] Harley S L. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 86: 359~373.
- [5] Sen S K, Bhattacharya A. An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 88: 64~71.
- [6] Newton R C, Perkins III D. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz [J]. *American Mineralogist*, 1982, 67: 203~222.
- [7] Paria P, Bhattacharya A, Sen S K. The reaction garnet + clinopyroxene + quartz = 2 orthopyroxene + anorthite: A potential geobarometer for granulites [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 99: 126~133.
- [8] 从柏林, 张儒瑛. 矿物温度计与压力计 [M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [9] Brey G P, Kohler T. Geothermobarometry in four-phase granulites. II: new thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers [J]. *J Petrol*, 1990, 31: 1353~1378.

- [10] Blundy J D, Holland T J B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, 104: 208~224.
- [11] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, 110: 304~310.
- [12] Hammarstrom J M, Zen E-An. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer [J]. *Am Mineral*, 1986, 71: 1297~1313.
- [13] 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 calc-alkaline plutons [J]. *Am Mineral*, 1987, 72: 231~239.
- [14] 游振东, 韩郁菁, 张泽明. 秦岭—大别造山带根部超高压变质岩隆升的岩石学证迹 [J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(增刊): 83~88.
- [15] Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Sulu ultrahigh-*p* metamorphic terrane, eastern China [J]. *J Metamorphic Geol*, 1994, 12: 169~186.
- [16] Cong B L, Wang Q C, Zhang R Y, et al. Discovery of the coesite-bearing granulite in the Weihai, Shandong Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37: 4~5.
- [17] Cong B L, Zhang R Y, Liou J G, et al. Metamorphism evolution of UHMP rocks, Chapter 8 [A]. In: Cong B L ed. *Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China* [C]. Beijing: Science Press, 1996. 132~135.
- [18] Wang Q C, Ishiwatari A, Zhao Z Y, et al. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China [J]. *Eur J Mineral*, 1993, 5: 141~152.
- [19] Evans W G. Phase relations of epidote-blueschists [J]. *Lithos*, 1990, 25: 3~23.
- [20] Holdaway M J. Stability of andalusite and the aluminium silicate phase diagram [J]. *Am J Sci*, 1971, 271: 97~131.
- [21] Zhang Z M, You Z D, Han Y J, et al. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, eastern-central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 9: 134~156.

GRANULITE-FACIES RETROGRADE METAMORPHISM OF GARNET PYROXENITE IN MUZIDIAN, NORTHERN DABIE MOUNTAINS

Zhang Zeming¹ Zhong Zengqiu² You Zhendong² Hu Kaiming³

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 3. *Zhejiang Institute of Regional Geological Survey, Xiaoshan 311203, China*)

Abstract: The detailed investigation into the amphibole two-pyroxene granulite in the north of Dabie metamorphic terrain in terms of petrography, mineral chemistry, petrochemistry, and estimated *p-t* conditions for metamorphism indicates that this rock is a product of the garnet pyroxenite that experienced the granulite-facies retrograde metamorphism during its uplift. The peak metamorphism occurred at least in the high-pressure eclogite facies at a lower temperature gradient. The retrograde metamorphism *p-t* path of the garnet pyroxenite was characterized by the near isothermal decompression in the early stage, the near isobaric temperature rise in the middle stage and the temperature fall and decompression in the late stage. These features suggest that the *p-t* conditions of peak metamorphism in the northern Dabie terrain are higher than that of granulite facies.

Key words: granulite; garnet pyroxenite; eclogite facies; *p-t* path; northern Dabie terrain.