

冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压变质矿物组合的确定及其形成的温压条件

——来自锆石中矿物包裹体的信息

刘福来¹⁾ 沈其韩¹⁾ 赵子然¹⁾ 耿元生¹⁾ I. Katayama²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 东京工业大学地球与行星科学系, 日本, 152-8551

内容提要 采用激光拉曼、阴极发光和电子探针技术, 确认冀西北石榴角闪二辉麻粒岩锆石中保存早期高压变质包体矿物组合: 石榴石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)+金红石(Rt)、单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)和石榴石(Grt)+单斜辉石(Cpx)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)。其中少量锆石具有继承性锆石的核, 而多数锆石则形成于高压麻粒岩相变质阶段。利用 TWQ 方法限定石榴角闪二辉麻粒岩锆石中所保存的高压包体矿物组合的变质温度条件为750~820℃, 压力为1.07~1.40 GPa。该项研究成果对于如何识别高压麻粒岩以及深入研究其成因机制均具有重要的科学意义。

关键词 高压矿物包体 锆石 激光拉曼 阴极发光 石榴角闪二辉麻粒岩 冀西北

自从王仁民等(1991)和翟明国等(1992)在恒山、旧怀安等地石榴角闪二辉麻粒岩中发现早期高压变质信息以来, 有关冀西北及其邻区高压麻粒岩的成因机制及其所反映的深部地壳物质组成和结构的研究, 已引起越来越多地质学家们的高度重视, 并相继在怀安东洋河、宣化大东沟、宣化西望山、赤城伙房村、大同、天镇瓦窑口等地发现这种具有高压成因信息的石榴角闪二辉麻粒岩(王仁民等, 1994; 翟明国等, 1994, 1996, 1998; 郭敬辉等, 1993, 1994, 2000; 刘树文等, 1996; Zhai, 1996)。部分研究者确定高压麻粒岩带西起大同, 经旧怀安到宣化西望山呈 NEE 向分布(翟明国等, 1994; 郭敬辉等 2000), 而有的研究者则认为高压麻粒岩带西起怀安大虎沟, 东至赤城沃麻坑大体呈东西向分布(王仁民等, 1994)。确定该类麻粒岩经历高压变质作用一个重要岩相学标志是, 在变斑晶石榴石中见有早期高压包体矿物组合: 单斜辉石+石英(翟明国等, 1992, 1994, 1996, 1998; 郭敬辉等, 1993, 1994)或单斜辉石+斜长石+石英(王仁民等, 1994; 刘树文等, 1996; 郭敬辉等, 2000)。但随着研究工作的不断深入, 许多研究者在研究区除发现上述包体矿物外, 在变斑晶石榴石中还确认以紫苏辉石为特征的包体矿物组

合: 紫苏辉石+单斜辉石+斜长石+石英、紫苏辉石+单斜辉石+角闪石+斜长石+石英、紫苏辉石+斜长石+石英和紫苏辉石+单斜辉石+斜长石等, 从而断定该类石榴角闪二辉麻粒岩并未经历高压变质作用(刘喜山等, 1994; 耿元生和吉成林, 1994; 阎月华, 1994; 梅华林等, 1994; 卢良兆等, 1996; 刘福来, 1997)。而有的研究者则认为冀西北地区即存在高压成因, 也存在非高压成因的石榴角闪二辉麻粒岩(刘树文等, 1996)。众所周知, 冀西北地区(如怀安蔓菁沟和宣化西望山等地)具有代表意义的石榴角闪二辉麻粒岩普遍经历了后期强烈退变质作用的改造, 常见沿变斑晶石榴石周围转变为紫苏辉石+斜长石、紫苏辉石+角闪石+斜长石等后成合晶(翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993; 王仁民等, 1994; 耿元生和吉成林, 1994; 阎月华, 1994; 梅华林等, 1994; 刘树文等, 1996; 卢良兆等, 1996; 刘福来, 1997)。其中石榴石呈变斑晶, 有的呈聚集晶, 粒晶约0.5~5.0 cm左右, 个别可达10 cm以上。显而易见, 由于切片方位的不同以及强烈退变质作用的改造, 单纯依据变斑晶石榴石中的包体矿物来判断该类岩石早期是否经历了高压变质作用显然不切合实际。此外, 即使变斑晶石榴石中的包体矿物能够代表早期的变质矿物

注: 本文为国土资源部科技项目(编号 2000409)和国家自然科学基金项目(编号 49872063, 49832030)资助的部分成果。

收稿日期: 2001-11-28; 改回日期: 2002-02-03; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 刘福来, 男, 1963年生。1990年和1995年于长春地质学院分别获得理学硕士和博士学位。现为中国地质科学院地质研究所研究员。主要从事变质岩石学研究。通讯地址: 100037, 北京百万庄路26号, 中国地质科学院地质研究所; Email: liufulai@hotmail.com。

组合,但由于后期强烈退变质作用的改造,必然导致包体矿物与寄主矿物石榴石之间发生 Mg、Fe 成分交换,采用该类包体矿物成分来估算早期变质温压条件势必引起较大的误差。因此,采用先进的测试分析方法,在经受强烈退变质改造的石榴角闪二辉麻粒岩中寻找早期变质矿物组合,是证明该类麻粒岩是否经历高压变质作用最为有效的手段之一。众多研究表明,锆石是变质岩常见的副矿物,且可在较宽的温压范围内保持稳定,一旦捕获矿物包体,即使遭受后期强烈构造热事件的改造,包体矿物的结构及其化学成分也很难被改变。因此,锆石通常被认为是早期高压矿物最好的“保护容器”(Tabata et al., 1998; Ye et al., 2000; Liu et al., 2001)。本文以冀西北怀安蔓菁沟、宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩为对象,重点研究锆石中的矿物包体性质及其分布特征,查明早期高压变质矿物组合及其化学成分特征,配合温压条件估算,确定冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压变质作用的温压条件。

1 样品采集及其实验条件

为了准确标定石榴角闪二辉麻粒岩早期变质矿物组合特征,在前人普遍认为的高压麻粒岩出露地区旧怀安的蔓菁沟(样品号:Lh1, Lh2)和宣化的西望山(样品号:9294, XH)共采集了4件新鲜的石榴

角闪二辉麻粒岩样品(图1),每件样品重约4~8 kg。首先对每件样品进行破碎、筛选和清洗后,采用磁选和重液分离出锆石样品,然后在双目镜下进一步精选50~100(m 形态较完整的锆石120~150粒,最后将每件锆石样品制成符合激光拉曼测试要求的标准样品。所有的测试实验工作均在日本东京工业大学地球与行星科学系实验室完成。首先在显微镜下对锆石中矿物包体的分布特征进行系统观察和描述,然后采用 JASCO NRS-2000型激光拉曼谱仪对矿物包体进行详细鉴定,再采用 JSM-5310型阴极发光谱仪并配备光学显微镜对矿物包体的结构、形态及其在锆石中的分布规律进行系统照像,最后将测试的包体矿物磨至锆石的表面,采用 JEOL JXA 8800型电子探针仪(加速电压:15 kV;电子束:12 nA)对其化学成分进行定量测试,所有的矿物代号均采用 Kretz(1983)资料。

2 锆石中矿物包体性质及其分布特征

在所测试的4件样品的绝大多数锆石晶体中,均发现大量矿物包裹体,主要包括石榴石(Grt)、单斜辉石(Cpx)、斜长石(Pl)、石英(Qtz)、磷灰石(Ap)和金红石(Rt)。但在不同锆石晶体中,包体矿物性质及其分布特征存在较明显的差异。部分锆石晶体核部含有少量杂质组分,以旧怀安蔓菁沟样品Lh1

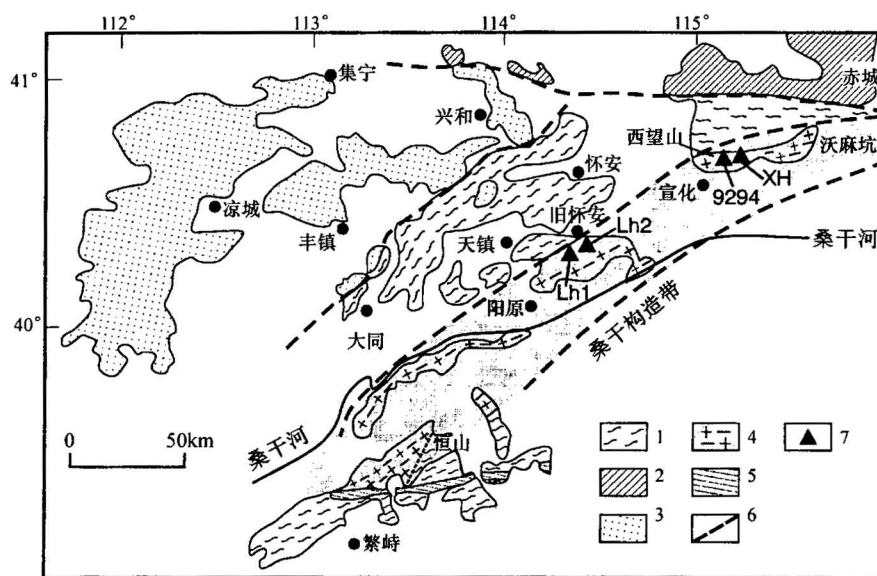


图1 冀西北及其邻区早前寒武纪地质简图(引自郭敬辉等,2000)

Fig. 1 Early Precambrian geological map of northwestern Hebei province and adjacent areas

(cited from Guo Jinghui et al., 2000)

1—怀安片麻岩;2—红旗营子群;3—孔兹岩系;4—桑干构造带;5—剪切带;6—断层;7—石榴角闪二辉麻粒岩采样点

1—Huai'an gneiss; 2—Hongqiyingzi Group; 3—khondalite series; 4—Sanggan tectonic belt; 5—shearing belt; 6—fault; 7—selected sample spots

编号为30的锆石晶体(Lh1(30))为例,包体矿物组合自锆石的晶体核部(C)到过渡带(M)至边缘(R)具有规律性的分布特点(图版 I-1, 2),且与阴极发光图像存在一一对应的关系(图版 I-3)。锆石晶体的核部(C)主要矿物包体为细小粒状斜长石+针状磷灰石以及细小的杂质组分(图版 I-1),其相应的核部(C)的阴极发光图像明显不同于过渡带(M)和边缘(R),具有继承原岩锆石的特征(图版 I-3),但明显受到变质热事件的改造。而在锆石晶体的过渡带(图版 I-3中M域),矿物包体的组成明显不同于核部,出现石榴石+单斜辉石+斜长石+石英等典型的高压包体矿物组合(图版 I-1, 2)。

尽管锆石晶体边缘(R)的阴极发光图像明显不同于晶体核部(C)和过渡带(M),但并未发现任何矿物包体,表明该类锆石晶体边缘可能与后期构造热事件有关。在同一样品中,多数锆石纯净透明,不含杂质。以编号为33和72号锆石晶体(Lh1(33), Lh1(72))为例,锆石中不含任何杂质,自晶体核部至边缘,包体矿物组合与Lh1(30)过渡带一致,为石榴石+单斜辉石+斜长石+石英(图版 I-4, 5),表明该类锆石形成于高压变质阶段。

在宣化西望山两件锆石样品中(9294, XH),锆石特征及其矿物包体性质与旧怀安蔓菁沟样品十分相似。除少量锆石晶体核部含有杂质组分外,大多数锆石晶体不含任何杂质,自晶体核部至边缘,矿物包体组合以不含紫苏辉石为特征,主要为:石榴石+单斜辉石+斜长石+石英+金红石(图版 I-6)、单斜辉石+斜长石+石英(图版 I-7)和石榴石+单斜辉石+斜长石+石英(图版 I-8)。在有的锆石晶体中则含有斜长石(Pl)或石榴石(Grt)等单矿物包体(图版 I-9, 10)。

综上所述,冀西北石榴角闪二辉麻粒岩少量锆石核部具有继承性锆石的特征,而围绕继承性锆石的核部,则分布以石榴石+单斜辉石+斜长石+石英等包体矿物组合,应代表该类麻粒岩早期高压变质作用的矿物组合特征;而绝大多数锆石并不具有继承性锆石的核,包体矿物组合以石榴石+单斜辉石+斜长石+石英+金红石、单斜辉石+斜长石+石英和石榴石+单斜辉石+斜长石+石英为其主要特征,表明该类锆石应形成于高压变质阶段。此外,在所测试的4件样品共计548粒锆石晶体中,从未发现一粒紫苏辉石和角闪石矿物包体,表明部分研究者以变斑晶石榴石中含紫苏辉石和角闪石的矿物组合为依据,来断定冀西北石榴角闪二辉麻粒岩并未

经历早期高压变质作用是不正确的。

3 锆石中包体矿物激光拉曼光谱特征

激光拉曼光谱是准确鉴定微细包体矿物最直接而有效的辅助手段之一。测试结果显示,研究区4件锆石样品中所发现的不同矿物包体激光拉曼光谱均存在明显差异(图2)。其中石英呈浑圆状,粒径约2~10(μm)左右,其激光拉曼光谱如图2a所示,具有典型石英的 466 cm^{-1} 主峰,并在 127 cm^{-1} 呈弱峰。石榴石包体呈不规则形状—浑圆状,粒径约2~40(μm),其激光拉曼谱图在 913 cm^{-1} 呈主峰,伴随 558 cm^{-1} 的弱峰(图2b)。单斜辉石包体呈浑圆状—不规则形状,粒径约1~30 μm 之间,其激光拉曼光谱如图2c所示,具有 665 cm^{-1} 主峰和 391 cm^{-1} 弱峰。斜长石呈浑圆状—不规则形状,粒径约5~40 μm 左右,其激光拉曼谱图以 514 cm^{-1} 和 478 cm^{-1} 双主峰为其特征,并伴随 286 cm^{-1} 弱峰(图2d)。磷灰石包体通常呈针状,其激光拉曼谱图具有 965 cm^{-1} 强主峰,并在 596 cm^{-1} 呈弱峰(图2e)。金红石包体则呈浑圆状,粒径约2~15 μm 左右,其激光拉曼光谱如图2f所示,通常在 612 cm^{-1} 处呈主峰。

4 锆石中包体矿物化学成分及其成因机制

为了确定石榴角闪二辉麻粒岩早期高压矿物化学成分,本文对锆石中早期高压变质包体矿物石榴石、单斜辉石和斜长石化学成分进行系统测试,其代表性测试结果列入表1中。石榴石:包体矿物石榴石的化学成分以富CaO、MgO和 $\langle\text{FeO}\rangle$ 、贫MnO为其主要特征。 $\text{CaO}=6.23\%\sim 10.30\%$,平均值为 8.19% ; $\text{MgO}=5.96\%\sim 6.88\%$,平均值为 6.29% ; $\langle\text{FeO}\rangle=23.31\%\sim 26.67\%$,平均值为 25.06% 。相应的铁铝榴石(Alm)+锰铝榴石(Spes)为 $42.7\sim 58.7$,平均值为 53.5 ; 镁铝榴石(Pyr)为 $22.1\sim 25.4$,平均值为 23.4 ; 钙铝榴石(Gros)为 $17.6\sim 27.3$,平均值为 23.1 (表1)。该类石榴石包体化学成分与石榴角闪二辉麻粒岩基质中相应矿物化学成分十分相似(王仁民等,1994;耿元生和吉成林,1994;刘福来,1997;Zhai, 1996),在 Lovering 等(1969)的(Alm+Spes)-Pyr-Gros图解中均落在麻粒岩相区,表明该类石榴石包体属于麻粒岩相变质。

单斜辉石:单斜辉石包体以相对富 Al_2O_3 、贫 Na_2O 为其主要特征(表1)。 $\text{Al}_2\text{O}_3=3.33\%\sim 4.81\%$; $\text{Na}_2\text{O}=0.48\%\sim 0.59\%$; $\text{Wo}=45.4\sim$

48.5; En = 33.3 ~ 35.0; Fs = 17.2 ~ 20.3; Jd = 0.07 ~ 0.09, 这些特征与泛非和西澳高压麻粒岩中单斜辉石化学成分十分相似 (Smithies et al., 1997; Appel et al., 1998)。但与冀西北部分石榴角闪二辉麻粒岩在石榴石中呈包体形式存在的单斜辉石化学成分 (王仁民等, 1994) 对比, 后者 Al_2O_3 含量明显偏高, 个别可高达 7.84% 以上, 有关该类单斜辉石的成

因机制仍需进一步深入研究。

斜长石: 斜长石包体 $\text{CaO} = 10.40\% \sim 11.94\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 5.03\% \sim 5.89\%$; $\text{K}_2\text{O} = 0.20\% \sim 0.46\%$, 相应的 $\text{An} = 48.6 \sim 56.0$; $\text{Ab} = 42.7 \sim 48.8$; $\text{Or} = 1.2 \sim 2.6$, 属于中长石—拉长石。但与石榴角闪二辉麻粒岩在后期减压阶段, 由石榴石、单斜辉石等矿物退变而成的斜长石化学成分对比 (王仁民等,

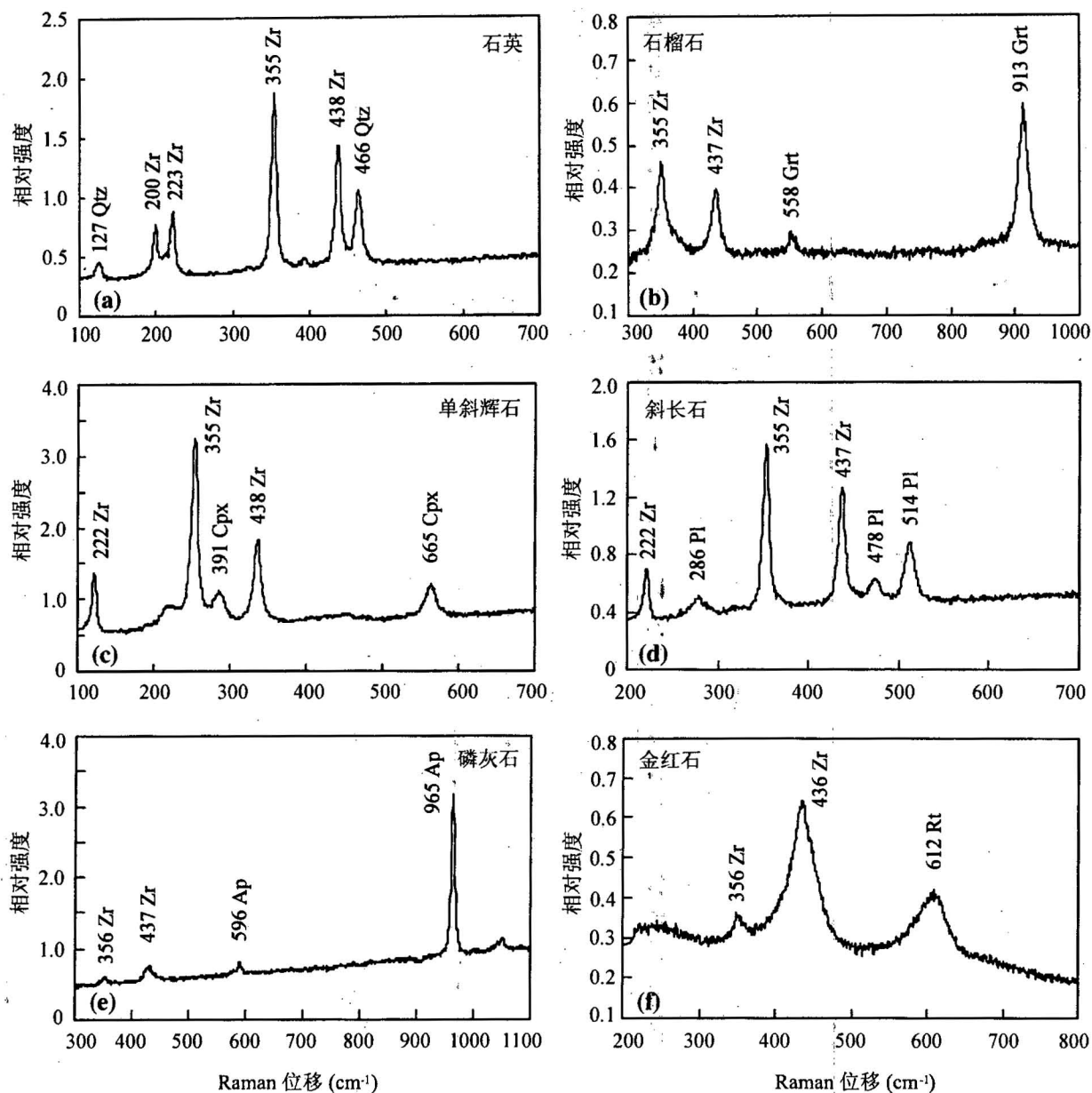


图2 石榴角闪二辉麻粒岩锆石中典型包体矿物激光拉曼谱图

Fig. 2 Representative Laser Raman spectra of minerals as inclusions preserved in zircons of garnet mafic granulite

(a)—石英; (b)—石榴子石; (c)—单斜辉石; (d)—斜长石; (e)—磷灰石; (f)—金红石; 包体矿物激光拉曼谱图常含有寄主锆石

200 cm^{-1} , 222~223 cm^{-1} , 355~356 cm^{-1} 和 436~438 cm^{-1} 的峰

(a)—Quartz; (b)—garnet; (c)—clinopyroxene; (d)—plagioclase; (e)—apatite; (f)—rutile; These spectra also contain host zircon peaks at

200 cm^{-1} , 222~223 cm^{-1} , 355~356 cm^{-1} and 436~438 cm^{-1}

表1 石榴角闪二辉麻粒岩锆石中包体矿物化学成分(%)

Table 1 Chemical compositions(%) of minerals as inclusions preserved in zircons from garnet mafic granulites

样品号	XH						Lh1						9294					
锆石序号	XH(11)			XH(18)			Lh1(30)			Lh1(33)			9294(36)			9294(49)		
矿物代号	Grt	Cpx	Pl	Grt	Cpx	Pl	Grt	Cpx	Pl	Grt	Cpx	Pl	Grt	Cpx	Pl	Grt	Cpx	Pl
SiO ₂	37.64	49.50	54.24	37.62	49.55	54.91	37.72	49.07	54.03	38.78	48.65	54.14	37.87	48.99	54.33	37.66	48.92	53.72
TiO ₂	0.08	0.36	0.00	0.10	0.26	0.00	0.01	0.42	0.03	0.04	0.33	0.02	0.05	0.41	0.02	0.15	0.33	0.00
Al ₂ O ₃	21.55	3.61	28.55	21.59	3.33	28.29	21.58	4.12	28.57	20.91	4.16	28.79	21.31	4.29	28.42	21.26	4.81	28.37
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10	0.04	0.00	0.07	0.10	0.00	0.08	0.01	0.02	0.00	0.00	0.05
<FeO>	24.36	10.47	0.09	23.68	10.46	0.08	26.08	11.38	0.09	26.67	12.17	0.16	26.24	10.90	0.15	23.31	10.46	0.12
MnO	0.80	0.16	0.04	0.76	0.15	0.00	1.33	0.23	0.03	1.32	0.20	0.00	0.90	0.18	0.00	0.99	0.18	0.00
MgO	6.14	12.06	0.00	5.96	12.12	0.00	6.27	11.31	0.00	6.35	11.78	0.00	6.88	11.54	0.01	6.07	11.61	0.00
CaO	9.06	22.97	11.17	10.21	23.00	10.91	6.72	22.47	11.57	6.49	21.63	11.94	6.23	22.94	10.40	10.30	23.07	10.85
Na ₂ O	0.00	0.52	5.00	0.01	0.48	5.10	0.02	0.52	5.05	0.03	0.50	5.03	0.07	0.56	5.76	0.02	0.59	5.89
K ₂ O	0.01	0.00	0.40	0.00	0.00	0.33	0.00	0.01	0.20	0.01	0.00	0.23	0.00	0.01	0.46	0.02	0.00	0.46
Total	99.63	99.68	99.50	99.94	99.38	99.63	99.84	99.58	99.57	100.60	99.55	100.10	99.65	99.85	99.58	99.78	98.99	99.48
Grt、Cpx、Pl 分别以12、6、8个氧原子计算的阳离子系数, <FeO>=Fe ₂ O ₃ +FeO																		
Si	2.924	1.859	2.463	2.910	1.867	2.485	2.951	1.853	2.454	3.001	1.837	2.445	2.926	1.840	2.468	2.918	1.830	2.451
Ti	0.005	0.010	0.000	0.006	0.007	0.000	0.001	0.012	0.001	0.002	0.009	0.001	0.003	0.012	0.001	0.009	0.009	0.000
Al	1.971	0.159	1.527	1.967	0.147	1.508	1.988	0.183	1.528	1.905	0.185	1.531	1.939	0.190	1.520	1.939	0.212	1.524
Cr	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.006	0.001	0.000	0.004	0.003	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.582	0.329	0.003	1.532	0.330	0.003	1.706	0.359	0.003	1.726	0.384	0.006	1.502	0.342	0.006	1.510	0.328	0.005
Mn	0.053	0.005	0.002	0.050	0.005	0.000	0.088	0.007	0.001	0.087	0.006	0.000	0.059	0.006	0.000	0.065	0.006	0.000
Mg	0.711	0.675	0.000	0.687	0.681	0.000	0.731	0.637	0.000	0.732	0.663	0.000	0.792	0.646	0.001	0.701	0.648	0.000
Ca	0.754	0.924	0.544	0.846	0.928	0.529	0.526	0.909	0.563	0.538	0.875	0.578	0.764	0.923	0.506	0.855	0.925	0.530
Na	0.000	0.038	0.440	0.001	0.035	0.448	0.003	0.038	0.445	0.005	0.037	0.440	0.010	0.041	0.507	0.003	0.043	0.521
K	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000	0.027
Alm+Spes (Ab)	52.7		43.7	50.8		45.0	58.2		43.6	58.7		42.7	50.1		48.8	50.3		48.3
Pyr(An)	23.0		54.0	22.1		53.1	23.9		55.2	23.7		56.0	25.4		48.6	22.4		49.2
Gros(Or)	24.3		2.3	27.1		1.9	17.9		1.2	17.6		1.3	24.5		2.6	27.3		2.5

注: XH(11), XH(18) 分别代表宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩锆石样品(XH)第11和18粒晶体中包体矿物化学成分; Lh1(30), Lh1(33) 分别代表旧怀安蔓菁沟石榴角闪二辉麻粒岩锆石样品(Lh)第30和33粒晶体中包体矿物化学成分; 9294(36), 9294(49) 分别代表宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩锆石样品(9294)第36和49粒晶体中包体矿物化学成分; 由东京工业大学地球与行星科学部电子探针室测定。

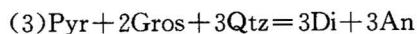
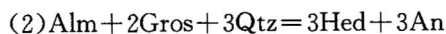
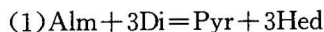
1994; 耿元生等, 1994; 梅华林等, 1994; 阎月华, 1994; 刘福来, 1997; Zhai, 1996), 其 An 值明显偏低, 表明在锆石中呈包体形式存在的斜长石应形成于早期高压麻粒岩相变质阶段。

5 锆石中高压包体矿物组合形成的温压条件

鉴于传统地质温度计-地质压力计存在许多不确定因素, 以及采用不同程序计算矿物化学成分, 尤其是 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 的区分所引起的误差, 本文采用 Berman (1991) 的 TWQ 程序对研究区石榴角闪二辉麻粒岩锆石中早期包体矿物组合形成的 *p-t* 条件进行计算。

依据前述包体矿物组合特征, 选择 CaO-MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂ 体系中7个矿物端元组分: 铁铝榴石(Alm)、镁铝榴石(Pyr)、钙铝榴石(Gros)、透辉石

(Di)、钙铁辉石(Hed)、钙长石(An)和石英(Qtz)。其中石榴石的活度模式采用 Berman (1990) 的四元非对称模式, 斜长石选择 Fuhrman and Lindsley (1988) 的模式, 单斜辉石选择理想溶液模式, 建立以下三条变质反应线:



其中反应(1)为石榴石和单斜辉石之间的 Fe-Mg 交换反应, 它限定了这一组合的温度条件, 目前众多石榴石-单斜辉石地质温度计均以该反应为基础。反应(2)和(3)分别为石榴石的 Fe 端元和 Mg 端元转变为单斜辉石+斜长石的反应, 二者决定该组合的压力条件。对研究区3件样品共计5组矿物组合计算结果来看, 上述三条反应线均完好相交于一点(图3), 表明石榴角闪二辉麻粒岩锆石中的早期高压

包体矿物组合已达到了平衡(Berman, 1991; Powell, 1994)。用这些交点确定的变质温压范围为 $t = 750 \sim 820^\circ\text{C}$, $p = 1.07 \sim 1.40 \text{ GPa}$ (详见图3), 且不同样品之间的温压条件变化较小。该项资料进一步证明, 锆石中存在的包体矿物组合: $\text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Rt}$, $\text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ 和 $\text{Grt} + \text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ 应真实代表冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压麻粒岩相变质矿物平衡组合。

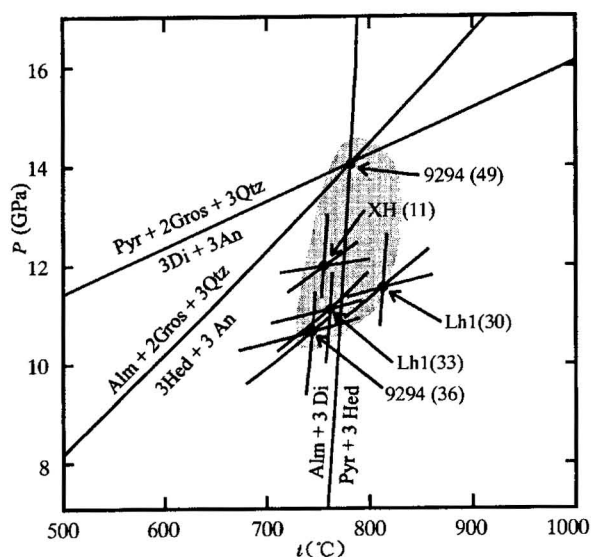


图3 采用 TWQ 程序确定冀西北石榴角闪二辉麻粒岩锆石中包体矿物组合的 p - t 条件(样品号参见表1)

Fig. 3 p - t conditions of mineral assemblage as inclusions preserved in zircons of garnet mafic granulites, north-western Hebei province calculated by TWQ program

6 讨论与结论

依据冀西北石榴角闪二辉麻粒岩锆石中矿物包体性质及其分布特征, 确定早期高压变质矿物组合为石榴石+单斜辉石+斜长石+石英+金红石、单斜辉石+斜长石+石英和石榴石+单斜辉石+斜长石+石英。依据温压条件估算结果, 确定冀西北石榴角闪二辉麻粒岩早期高压变质温度-压力条件为 $t = 750 \sim 820^\circ\text{C}$, $p = 1.07 \sim 1.40 \text{ GPa}$ 。

阴极发光图像及相应的矿物包体分布特征显示, 冀西北石榴角闪二辉麻粒岩中少量锆石具有继承性锆石的核, 而大部分锆石则形成于高压麻粒岩相变质阶段。因此, 在充分研究锆石矿物包体分布特征及相应的阴极发光图像的基础上, 采用离子探针技术(SHRIMP)对锆石不同微区进行测年, 可获得具有实际意义的年代学信息, 该项工作目前正在进

行中。

此外, 尽管许多研究者确认冀西北高压麻粒岩呈带状分布, 但与高压麻粒岩直接接触的围岩, 如灰色片麻岩(TTG)是否也经历了高压变质作用, 仍需进一步深入研究。

本文的室内测试工作得到日本东京工业大学地球与行星科学系实验室和 S. Maruyama 教授的资助, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学. 岩石学报, 9: 329~341.
- 郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 等. 1994. 晋冀内蒙交界地区早前寒武纪变质杂岩同位素年代学及其构造意义. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 130~144.
- 郭敬辉, 翟明国. 2000. 华北克拉通桑干地区高压麻粒岩变质作用的 Sm-Nd 年代学. 科学通报, 45: 2055~2061.
- 耿元生, 吉成林. 1994. 河北怀安东洋河地区石榴基性麻粒岩的变质演化. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 89~99.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 16~69.
- 刘福来. 1997. 怀安—大同一带基性麻粒岩变质反应序列与水活度. 岩石学报, 13: 27~43.
- 刘树文, 沈其韩, 耿元生. 1996. 冀西北两类石榴基性麻粒岩的变质演化及 Gibbs 分析方法. 岩石学报, 12: 261~275.
- 刘喜山, 李树勋, 金巍. 1994. 大青山造山带内基底再造杂岩叠加变质作用特征. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 100~109.
- 梅华林, 吴昌华, 钟长汀. 1994. 内蒙古中南部地区含石榴石基性麻粒岩和紫苏花岗岩变质 PT 轨迹和热模拟比较. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 110~119.
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义. 岩石学报, 7: 36~45.
- 王仁民, 赖兴运, 董卫东, 等. 1994. 冀西北晚太古宙碰撞带的一些证据. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 7~20.
- 阎月华. 1994. 大同孤山含石榴石麻粒岩的成因讨论. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 199~209.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学(B辑), 22: 1325~1330.
- 翟明国, 郭敬辉, 李永刚. 1994. 晋冀内蒙交界地区高压基性麻粒岩带及其相邻岩石组合的性质. 见: 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 21~30.
- 翟明国, 李永刚, 郭敬辉, 等. 1996. 晋冀内蒙交界地区麻粒岩地体中两条花岗岩带及其对早前寒武纪地壳生长的意义. 岩石学报, 12: 299~314.
- 翟明国. 1998. 中国三条高温高压变质带及其地质意义. 岩石学报, 14: 419~429.

References

- Appel P, Moller A, Schenk V. 1998. High-pressure granulite facies metamorphism in the Pan-African belt of eastern Tanzania: *PTt* evidence against granulite formation by continent collision. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 491~509.
- Berman R G. 1990. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *Am. Mineral.*, 75: 328~344.
- Berman R G. 1991. Thermobarometry using multiequilibrium calculation: a new technique with petrologic applications. *Can. Mineral.*, 29: 833~855.
- Fuhrman M L, Lindsley D H. 1988. Ternary-feldspar modeling and thermometry. *Am. Mineral.*, 73: 201~216.
- Geng Yuansheng, Ji Chenglin. 1994. Metamorphic evolution of garnet mafic granulite in the dongyanghe region of Huai'an county, Hebei province. In: Qian Xianglin, Wang Renmin, ed. Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 89~99 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Yigang, et al. 1993. Early Precambrian manjinggou high-pressure granulite melange belt on the south edge of the Huaian complex, north China craton: geological features, petrology and isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 9: 329~341 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Li Yonggang, et al. 1994. Isotopic ages and their tectonic significance of metamorphic rocks from middle part of the early Precambrian granulite belt, north China craton. In: Qian Xianglin, Wang Renmin, ed. Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 130~144 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo. 2000. Sm-Nd geochronology of high-pressure granulite in Sanggan area, north China craton. *Chinese Science Bulletin*, 45: 2055~2061.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, 68: 227~279.
- Liu Fulai. 1997. The metamorphic reaction and water activity of basic granulite in the Datong-Huaian region. *Acta Petrologica Sinica*, 13: 27~43.
- Liu F L, Xu Z Q, Yang J S. 2001. Mineral inclusions of zircon and UHP metamorphic evidence from paragneiss and orthogneiss of pre-pilot drillhole CCSD-PP2 in north Jiangsu province, China. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1037~1042.
- Liu Shuwen, Shen Qihan, Geng Yuansheng. 1996. Metamorphic evolution of two types of garnet-granulites in northwestern Hebei Province and analyses by Gibbs method. *Acta Petrologica Sinica*, 12: 261~275 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xishan, Li Shuxun, Jin Wei. 1994. Metamorphic overprinting of reworked basement complex in Daqingshan orogenic belt. In: Qian Xianglin, Wang Renmin, ed. Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 100~109 (in Chinese with English abstract).
- Lovering J F, White A J R. 1969. Granulite and eclogitic inclusions from basic pipes at Delegate, Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 21: 9~52.
- Lu Liangzhao, Xu Xuechun, Liu Fulai. 1996. Early Precambrian khondalite series in north China. Changchun: Changchun Publishing House (in Chinese).
- Mei Hualin, Wu Changhua, Zhong Changting. 1994. Metamorphic *PTt* path from garnet-bearing basic granulite and charnockite and tectonothermal evolution of south-central Nei Mongol. In: Qian Xianglin, Wang Renmin, ed. Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 110~119 (in Chinese with English abstract).
- Smithies R H, Bagas L. 1997. High pressure amphibolite-granulite facies metamorphism in the Paleoproterozoic Rudall complex, central western Australia. *Precambrian Research*, 83: 243~265.
- Tabata H, Yamauchi K, Maruyama S. 1998. Tracing the extent of a UHP metamorphic terrane: Mineral-inclusions study of zircons in gneisses from the Dabieshan. In: When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Kluwer Academic Publisher, 261~273.
- Wang Renmin, Chen Zhenzhen, Chen Fei. 1991. Grey tonalitic and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi province, and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 7: 36~45 (in Chinese with English abstract).
- Ye K, Yao Y P, Katayama I, et al. 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos.*, 52: 157~164.
- Yan Yuehua. 1994. The origin of garnet-bearing granulite in Datong, Shanxi, China. In: Qian Xianglin, Wang Renmin, ed. Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 199~209 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, et al. 1992. The discovery of Archaean high-pressure granulite. *Science in China (series B)*, 22: 1325~1330 (in Chinese).
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Li Yonggang. 1994. Rock units of the Archaean granulite terrain in joining region of Shanxi-Hebei-Nei Mongol of north China: their properties, mutual relations and evolution. In: Qian Xianglin, Wang Renmin, ed. Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 21~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 1996. Granulites and lower continental crust in north China archaean craton. Beijing: Seismological Press.
- Zhai Mingguo, Li Yonggang, Guo Jinghui, et al. 1996. Two linear granite zones in Shanxi-Hebei-Nei Mongol juncture region and their implication for early Precambrian continental evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 12: 299~314 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 1998. Three important high-pressure and high-temper-

ature metamorphic zones in China and their geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 419~429 (in Chinese with English abstract).

图 版 说 明

- 1, 2. 旧怀安石榴角闪二辉麻粒岩(Lh1)第30粒锆石晶体(Lh1(30))中的矿物包体(单偏光)。
3. 图版 I-1, 2中锆石阴极发光图像。
4. 旧怀安石榴角闪二辉麻粒岩(Lh1)第33粒锆石晶体(Lh1(33))中的矿物包体(单偏光)。
5. 旧怀安石榴角闪二辉麻粒岩(Lh1)第72粒锆石晶体(Lh(72))中的矿物包体(单偏光)。
6. 宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩(9294)第49粒锆石晶体(9294(49))中的矿物包体(单偏光)。
7. 宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩(XH)第8粒锆石晶体(XH(8))中的矿物包体(单偏光)。
8. 宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩(XH)第11粒锆石晶体(XH(11))中的矿物包体(单偏光)。
9. 宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩(XH)第46粒锆石晶体(XH(46))中的矿物包体(单偏光)。
10. 宣化西望山石榴角闪二辉麻粒岩(XH)第55粒锆石晶体(XH(55))中的矿物包体(单偏光)。

Identification of High-pressure Mineral Assemblages in Garnet Mafic Granulites, Northwestern Hebei Province: Evidence from Mineral Inclusions in Zircons

LIU Fulai¹⁾, SHEN Qihan¹⁾, ZHAO Ziran¹⁾, GENG Yuansheng¹⁾, I. Katayama²⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China*

2) *Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8551, Japan*

Abstract

High-pressure mineral assemblages were identified in zircons separating from garnet mafic granulites in northwestern Hebei province by the Laser Raman spectroscopy, cathodoluminescence and electron microprobe method. High-pressure mineral assemblages consist mainly of garnet + clinopyroxene + plagioclase + quartz + rutile, clinopyroxene + plagioclase + quartz and garnet + clinopyroxene + plagioclase + quartz. Some zircons preserved the inherited cores, while most zircons were formed at the high-pressure granulite-facies metamorphic stage. The metamorphic p - t conditions of high-pressure mineral assemblage inclusions have been estimated as $t = 750 \sim 820^\circ\text{C}$, $p = 1.07 \sim 1.40 \text{ GPa}$. This research may be of great significance for the identification of high-pressure granulites and an in-depth study of the genetic mechanism of high-pressure granulites.

Key words: high-pressure mineral inclusions; zircon; Laser Raman; cathodoluminescence; garnet mafic granulite; northwestern Hebei province

