

# 冀北滦平-承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义\*

## The Discovery of Neoproterozoic High-pressure Granulites in Luanping-Chengde Area, Northern Hebei, and Their Tectono-geological Implication

李江海<sup>1</sup> 翟明国<sup>2</sup> 李永刚<sup>2</sup> 张毅刚<sup>2</sup>

Li Jianghai, Zhai Mingguo, Li Yonggang and Zhang Yigang

(1. 北京大学地质学系, 北京, 100871; 2. 中国科学院地质研究所, 北京, 100029)

(1. *Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871;*

*2. Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)*

**摘要** 在冀北地区原太古代“单塔子群”内多处发现了高压基性麻粒岩构造岩片或透镜体, 围岩为花岗片麻岩类, 在区域上呈构造带出现。高压基性麻粒岩早期矿物组合为单斜辉石+石榴石+石英, 退变组合为斜方辉石+斜长石+单斜辉石及更晚期的角闪石+斜长石, 明显经历了快速的抬升过程。上述高压麻粒岩在区域上可能对应于晋北-冀西北的高压麻粒岩带, 代表克拉通基底的重要构造边界, 对于认识区域早前寒武纪构造演化及深部地质作用过程将产生重要影响。

**Abstract** High-pressure mafic granulite (HPMG) enclaves or slices are identified in the former Neoproterozoic “Dantanzhi group”. They occur in the country rocks of granitic gneiss. The earlier assemblages Cpx-Grt-Qz of HPMG are commonly overprinted by the retrograde Opx-Pl-Cpx or late Hb-Pl. Regionally the HPMGs and their country rocks define a tectonic belt with length of more than 700km, which might represent an important boundary in the cratonic basement.

**主题词** 晚太古代; 高压麻粒岩; 构造带; 冀北

**Key words:** Late Archean; High-pressure granulites; Tectonic belt; Northern Hebei

**分类号:** P588.34

**Classific. code:** P588.34

\* 1997-07-29收到, 1997-10-28改回。

本文为国家自然科学基金资助项目成果 (49572140, 49302035)。

**第一作者简介:** 李江海, 男, 1963年出生, 副教授, 构造地质与前寒武纪地质专业。

## 1 引言

近年来,在冀西北及晋北、内蒙交界地区已确定一条晚太古代高压麻粒岩带(翟明国等,1992),它大致呈北东-近东西向展布,分隔了在时代和性质上有重大差别的怀安杂岩和恒山杂岩,是华北克拉通内一条重要的古老构造带。对其大地构造意义有不同解释,有人认为它代表太古宙碰撞造山带,也有人认为它是陆内不同岩石单元之间的大型拆离逆冲褶皱带(翟明国等,1992;李江海等,1996,1998;郭敬辉等1996)。该带西起山西省繁峙县双钱树,经应县、浑源、阳高、天镇、河北省阳原、怀安,东至宣化和赤城,长约300km,在冀晋内蒙地区称为桑干构造带。但是该带在宣化-赤城以东是否继续存在,规模如何,地质产状及构造特征有无变化?都是人们关心的重要问题,因为它对于探讨晚太古代华北克拉通的区域构造格架、深部构造机制具有重要意义。我们在1996年10月和12月的野外地质调查中发现,在冀北的滦平县虎什哈,经承德、平泉至辽西地区仍然广泛存在高压麻粒岩岩石(图1),而且在产状、岩石组合、围岩性质、构造特征上都与桑干构造带一致。除怀柔北部至丰宁西南部尚需进一步详查之外,可以认为这条高压麻粒岩带是从晋北向东可以延续到冀北以至辽西地区,其长度至少在700km以上。

## 2 高压麻粒岩的地质产状

高压麻粒岩带出现于承德-滦平地区原太古代“单塔子群”白庙组内。它宽约20~40km,在区域上呈北东向展布。该带南北两侧的岩石有较大差别,其南侧为麻粒岩相的奥长花岗质-英云闪长质-石英闪长质片麻岩,以及少量的以条带状含铁建造(BIF)为主的麻粒岩相表壳岩;其北侧为角闪岩相岩石,以斜长角闪岩-变粒岩等组成的表壳岩系为主,并有部分角闪岩相的TTG或花岗质片麻岩,混合岩化较强。高压麻粒岩带主要由强烈韧性变形的花岗质片麻岩和其中出露的高压麻粒岩透镜体和岩片组成。该带的北缘尚出露一些变质的基性侵入岩岩片。高压麻粒岩主要是石榴辉石麻粒岩及由它退变的石榴斜长角闪岩或斜长角闪岩。它们多呈弱应变域构造透镜体出现于由花岗片麻岩组成的宽阔的复式剪切带内。高压麻粒岩透镜体多为椭球状,长宽比大于2,长度多为数米,亦可达数十米。局部可见透镜体塑性拉长,与围岩片麻岩一起卷入褶皱,形成薄互层状条带,条带宽仅数厘米,而长可达数十米,端部尖灭。透镜体及岩片展布方向与区域片麻理一致。透镜体的核部形变较弱,向边部逐渐增强,矿物定向并显示片理。同时角闪岩化退变质也向边部增强。透镜体和岩片成群分布,从局部露头看,成串珠状,从较大范围看,它们构成一个断续的岩带。花岗片麻岩作为围岩,其构造变形程度远大于高压麻粒岩透镜体和岩片,局部变为糜棱岩或糜棱状片麻岩,其片麻理围绕透镜体。花岗片麻岩的主要矿物组成是斜长石、条纹长石、石英、黑云母或角闪石。在某些露头上,可见在高压麻粒岩透镜体的周围,花岗片麻岩含较多石榴石。是否某些花岗片麻岩也经历了高压麻粒岩相变质作用,尚在作进一步研究。

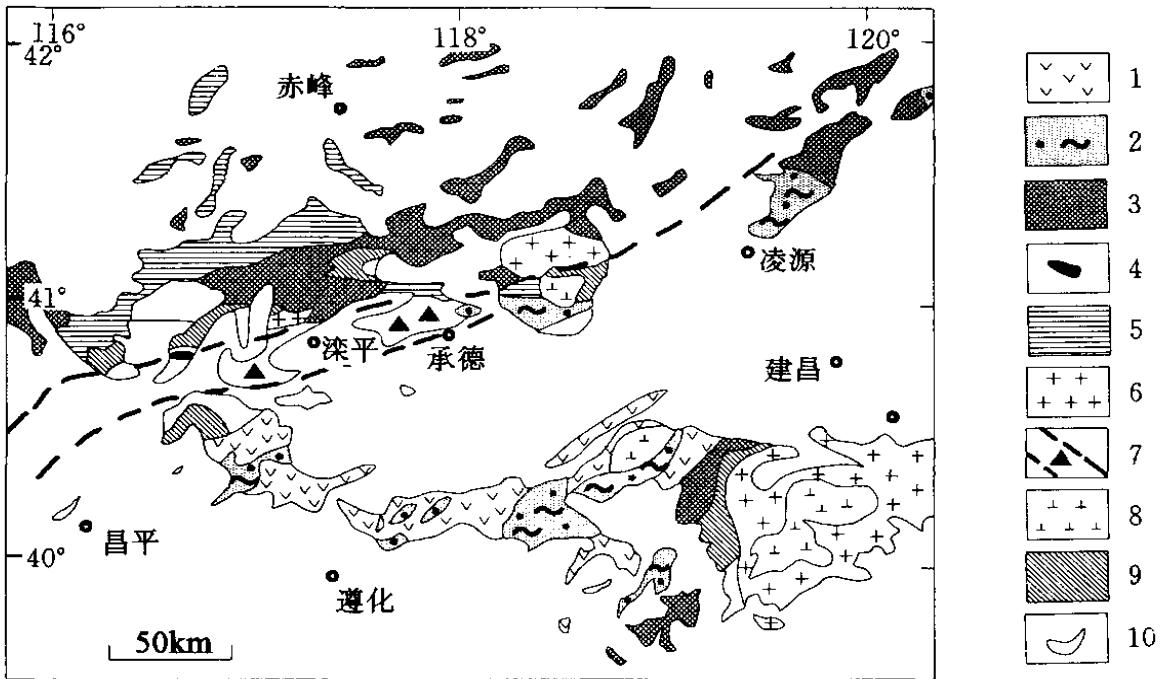


图1 冀北高压麻粒岩带及其相邻岩石分布略图

麻粒岩相: 1. 表壳岩系, 2. TTG 杂岩; 低角闪岩相 (部分绿片岩相): 3. 表壳岩系, 4. 基性岩体, 5. TTG 花岗质片麻岩, 6. 花岗片麻岩; 7. 高压麻粒岩带及采样点; 8. 显生宙花岗岩; 9. 高角闪岩相 TTG 杂岩; 10. 高角闪岩相表壳岩

Fig. 1 Sketch map showing geological distribution of high-pressure granulites and adjacent rock assemblages in North Hebei

### 3 岩相学特征

高压麻粒岩为灰黑色, 点缀有均匀分部的红色石榴石, 石榴石具有特征的白色冠状次变边 (白眼圈)。当退变质加强时, 白眼圈增宽, 核部石榴石变小, 以至全部消失, 变为一个圆形白斑。角闪石可部分或全部取代辉石。在露头上, 常可看到透镜体核部为石榴辉石麻粒岩, 向外渐变为含白斑的石榴角闪岩, 至边缘变为斜长石和角闪石均匀分布的斜长角闪岩。据岩相学研究, 高压麻粒岩在岩石结构呈两个结构域, 即斑晶结构域和基质结构域。斑晶结构域由石榴石变斑晶和它周围的冠状后生合晶反应边组成, 基质结构域由单斜辉石、紫苏辉石、角闪石等暗色矿物组成。由于后期退变质强烈, 常见角闪石和少量斜长石。单斜辉石和紫苏辉石常在部分角闪石的核部作为交代残留相出现。据变质矿物形成的顺序和反应关系, 可以识别三期变质矿物组合。

1. 第一期矿物组合仅以石榴石 (Grt) 及其中的矿物包裹体为代表, 石榴石作为一个封闭的容器, 包裹并保存了早期变质阶段所形成的矿物。包裹体基本上都是单斜辉石 (Cpx) 偶见石英 (Qtz)。尚未发现斜长石和角闪石。因此可确定早期矿物组合为  $Grt + Cpx + Qtz$ 。

2. 第二期矿物组合以 Grt 周围的白色冠状后生合晶为代表，后生合晶以细粒的单斜辉石、紫苏辉石、斜长石 (Pl) 和少量粉尘状磁铁矿组成。部分样品的后生合晶少或无紫苏辉石，而含较多的角闪石 (Hb)。因此第二期矿物组合为 Grt+Cpx±Opx±Hb+Pl。在基质结构域中，角闪石中所见到的交代残留的 Cpx 和 Opx 属第二期矿物组合。

3. 第三期矿物组合形成在斑晶结构域中，以斜长石和角闪石部分或全部交代石榴石和它周围的后生合晶为特征；在基质结构域中，以角闪石和斜长石交代辉石为特征，部分样品含有少量黝帘石 (Zoi)。矿物组合为 Hb+Pl±Zoi±Qtz。

### 4 主要变质矿物成分特点及变质作用演化

主要矿物成分列于表1。

石榴石中的铁铝榴石 (Alm)、镁铝榴石 (Pyr)、钙铁榴石 (Spe) 和钙铝榴石 (Grs) 端元分子含量分别为50.5%~58%、21.5%~25.8%、1.6%~3.6%和13.8%~19.3%，与河北省怀安县蔓菁沟的高压麻粒岩的石榴石成分相同 (翟明国等, 1992)；与山西应县白马石退变榴辉岩的石榴石成分接近 (翟明国等, 1995)，相对含有更高的 Pyr 和稍低的 Grs 含量。石榴石没有明显的成分环带，总体上讲，核部的 MgO 及 CaO 含量比边部稍高，FeO 含量略低。

单斜辉石的 CaO 含量为19%~22%，FeO\* 为9%~13%，MgO 11%~13.5%，为次透辉石。第一期组合中的 Cpx 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为1.7%~1.9%，Na<sub>2</sub>O 含量为0.5%~0.7%。在高倍镜小，发现部分早期单斜辉石分解，未能普遍保留早期成分特点。

紫苏辉石的 MgO 含量为18%~20%，FeO 含量为26%~28%，Mg/(Mg+Fe) 比值平均为0.55。Opx 与 Cpx 的 Fe-Mg 分配系数 KD=3.76%~2.15%。

斜长石的成分变化较大，多数斜长石的 An 为14~28。

角闪石的 Mg/(Mg+Fe) 比值约为 0.46~0.65，Si 含量在6.25~6.5之间，为角闪岩相的韭闪石。

根据 Grt-Cpx-Pl-Qtz 压力计 (Mukhopadhyay, 1991; Newton et al., 1982; Moecher et al., 1988) 和二辉石及 Grt-Cpx 温度计 (Ellis et al., 1979; Powell, 1989; Wells, 1977; Wood et al., 1984) 对四个高压麻粒岩样品的变质温度压力计算，得出第二期矿物组合，即石榴石的冠状后成合晶的变质温度压力分别为：样品961221号，T 为760℃~870℃，P 为0.99GPa~1.07GPa；样品961205号，T 为770℃，P 为0.94GPa；样品961246号，T 为750℃~800℃，P 为1.04~1.20GPa；样品961244号，T 为750℃~770℃，P 为1.14~1.20GPa。不同样品的计算结果大致相似，温度集中于750℃~800℃，压力集中于1.00~1.20GPa。第一期矿物组合的Grt(核)-Cpx(包裹体)温度估算结果为710℃~750℃，与第二期基本相似。由于没

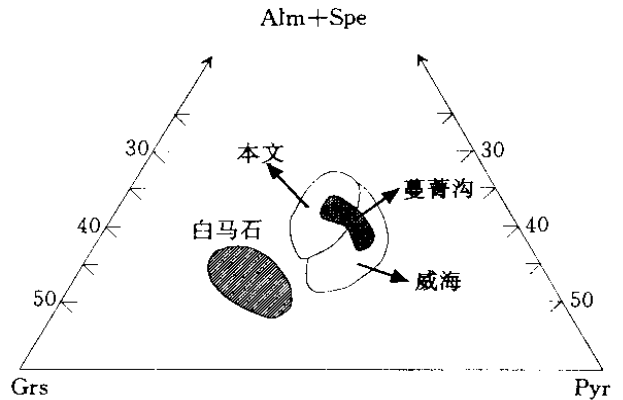


图2 高压麻粒岩石榴石的(Alm+Spe)-Pyr-Grs图解  
Fig. 2 (Alm+Spe)-Pyr-Grs diagram for garnets from high-pressure mafic granulites

表1 矿物电子探针分析结果

Table 1 Analyses for mineral by electronic probe

样品号	1221	1221	1221	1221	1221	1221	1221	1221	1221	1221	1223	1223	1209
矿物	石榴石	包体单斜辉石	单斜辉石	斜长石	角闪石	绿帘石	斜长石	紫苏辉石	单斜辉石	石榴石	单斜辉石	斜长石	石榴石
SiO <sub>2</sub>	38.99	51.29	51.31	61.29	41.18	39.50	61.35	52.19	51.73	38.06	0.38	0.03	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.35	0.19	0.00	2.13	0.00	0.00	0.08	0.34	0.04	4.30	23.74	20.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.13	3.44	1.85	23.98	11.04	29.77	24.11	0.70	2.53	20.62	0.00	0.05	0.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.05	0.03	3.15	—	1.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16	1.60	2.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.65	1.2	10.80	0.02	4.21
MgO	6.64	12.71	10.99	0.00	8.57	0.10	0.00	18.95	13.04	2.14	19.84	6.32	8.18
CaO	7.82	21.19	21.22	5.99	11.31	23.30	6.02	0.43	21.96	11.49	0.18	0.00	1.15
MnO	0.71	0.14	0.16	0.00	0.08	0.10	0.00	0.67	0.11	1.46	9.92	0.07	26.78
FeO	23.26	7.89	10.95	0.04	19.92	4.48	0.04	27.45	7.63	25.11	0.12	0.05	0.09
NiO	0.00	0.04	0.02	0.06	0.04	0.08	0.06	0.03	0.00	0.01	1.04	7.76	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.81	0.78	8.05	1.74	0.09	8.11	0.00	0.64	0.00	0.03	0.38	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.25	1.41	0.00	0.27	0.00	0.00	0.02	—	—	—
H <sub>2</sub> O	—	—	—	—	1.95	1.93	—	—	—	—	—	—	—
总量	99.78	99.49	99.59	99.69	99.38	99.40	99.74	100.51	99.71	100.19	99.47	99.19	99.86
氧离子数	24	6	6	8	24	26	8	6	6	24	6	8	24
P	—	—	—	—	—	0.00	—	—	—	—	—	—	—
Si	6.03	1.92	1.95	2.73	6.34	6.14	2.74	1.98	1.93	6.02	1.89	2.73	5.95
Ti	0.00	0.01	0.01	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Al	3.86	0.15	0.08	1.26	2.00	5.45	1.35	0.03	0.11	3.84	0.19	1.26	3.87
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe	0.14	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.05	0.15	0.09	—	0.13
Mg	1.53	0.71	0.62	0	1.97	0.023	0.00	1.07	0.73	0.51	0.61	0.00	0.99
Ca	1.30	0.85	0.86	0.29	1.87	3.88	0.29	0.02	0.88	1.95	0.81	0.30	1.39
Mn	0.09	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.19	0.01	0.00	0.15
Fe	3.01	0.25	0.35	0.00	2.57	0.58	0.00	0.87	0.24	3.32	0.31	0.00	3.55
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	0.01	0.06	0.06	0.70	0.52	0.03	0.70	0.00	0.05	0.00	0.08	0.68	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.01	0.28	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
总量	15.97	4.00	4.00	4.99	15.80	16.14	5.01	4.00	4.00	15.98	4.00	4.99	16.05
Uv	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	0.09	—	—	0.22
Ad	3.46	—	—	—	—	—	—	—	—	3.73	—	—	3.26
Gr	18.39	—	—	—	—	—	—	—	—	28.77	—	—	19.3
Py	50.75	—	—	—	—	—	—	—	—	8.47	—	—	16.34
Sp	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.27	—	—	2.54
Wo	—	46.95	46.97	—	—	—	—	0.88	47.52	—	46.4	—	—
En	—	39.17	33.84	—	—	—	—	54.08	39.41	—	35.15	—	—
Fs	—	13.88	19.19	—	—	—	—	45.05	13.07	—	18.44	—	—
Ab	—	—	—	69.85	—	—	70.05	—	—	—	—	67.45	—
Or	—	—	—	1.44	—	—	1.42	—	—	—	—	2.17	—
An	—	—	—	28.72	—	—	28.32	—	—	—	—	30.38	—

续表1

样品号	1209	1209	1209	1209	1215	1215	1215	1215	1215	1215	1215	1240	1240
矿物	包体单斜辉石	单斜辉石	斜长石	斜长石	石榴石	包体单斜辉石	斜长石	角闪石	角闪石	绿帘石	斜长石	石榴石	石榴石
SiO <sub>2</sub>	51.35	50.98	59.28	67.18	38.19	50.28	60.95	40.16	40.35	38.27	63.91	38.93	38.54
Ti <sub>2</sub> O	0.34	0.30	0.01	0.04	0.06	0.53	0.04	2.11	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
Al <sub>2</sub> O	1.99	3.44	25.66	19.70	20.89	3.43	24.46	11.06	16.61	25.78	22.11	21.26	21.59
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.08	0.00	0.00	0.06	0.02	0.14	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.33	2.00	—	—	1.20	3.36	—	—	—	—	—	0.85	0.50
MgO	11.67	12.22	0.00	0.03	5.55	11.57	0.01	7.79	5.07	0.00	0.06	5.96	6.05
CaO	21.08	21.88	7.89	1.29	7.56	21.39	6.44	11.29	11.09	23.41	3.59	6.33	6.41
MnO	0.22	0.15	0.00	0.00	0.73	0.18	0.00	0.16	0.18	0.15	0.00	0.97	0.92
FeO	10.29	8.09	0.05	0.33	25.79	7.72	0.11	20.96	20.90	9.34	0.60	25.92	26.72
NiO	0.00	0.09	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.73	0.67	6.82	11.18	0.03	1.01	7.63	1.55	2.22	0.00	9.50	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.35	0.10	0.00	0.00	0.53	1.75	0.43	0.00	0.10	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—
H <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	—	1.92	1.95	1.86	—	—	—
总量	100.05	99.90	100.10	99.85	100.10	99.49	100.32	98.81	98.81	99.01	99.88	100.22	100.77
氧离子数	6	6	8	8	24	6	8	24	24	26	8	24	24
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—
Si	1.94	1.91	2.65	2.96	5.97	1.90	2.71	6.28	6.20	6.16	2.83	6.04	5.97
Ti	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.09	0.15	1.35	1.02	3.85	0.15	1.28	2.04	3.01	4.89	1.15	3.89	3.94
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.07	0.06	—	—	0.14	0.10	—	—	—	—	—	0.10	0.06
Mg	0.66	0.68	0.00	0.00	1.29	0.65	0.00	1.81	1.16	0.00	0.00	1.38	1.40
Ca	0.85	0.88	0.38	0.06	1.27	0.86	0.30	1.89	1.83	4.04	0.17	1.05	1.06
Mn	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.13	0.12
Fe	0.33	0.25	0.00	0.01	3.37	0.24	0.00	2.74	2.69	1.26	0.02	3.37	3.46
Ni	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Na	0.05	0.05	0.59	0.95	0.01	0.07	0.66	0.47	0.66	0.00	0.82	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.35	0.08	0.00	0.01	0.00	0.00
总量	4.01	3.99	4.98	5.01	16.02	4.00	4.99	15.86	15.65	16.40	5.00	15.96	16.06
Uv	—	—	—	—	0.17	—	—	—	—	—	—	0.00	0.05
Ad	—	—	—	—	3.62	—	—	—	—	—	—	2.51	1.48
Gr	—	—	—	—	17.17	—	—	—	—	—	—	15.27	16.06
Py	—	—	—	—	21.47	—	—	—	—	—	—	23.27	23.11
Sp	—	—	—	—	1.6	—	—	—	—	—	—	2.14	2.00
Wo	46.3	48.28	—	—	—	48.99	—	—	—	—	—	—	—
En	35.66	37.52	—	—	—	36.89	—	—	—	—	—	—	—
Fs	18.04	14.2	—	—	—	14.12	—	—	—	—	—	—	—
Ab	—	—	59.76	93.5	—	—	66.15	—	—	—	82.28	—	—
Or	—	—	2.01	0.54	—	—	3.01	—	—	—	0.55	—	—
An	—	—	38.22	5.96	—	—	30.84	—	—	—	17.18	—	—



有斜长石而未能估算变质压力,但据早期 Cpx 稍高的  $Al_3O_2$  和  $Na_2O$  含量,其压力应高于第二期组合。因此高压麻粒岩曾经历近等温或增温的降压变质过程。以角闪岩相的非闪石-斜长石组合为标志的第三期组合的温度压力已降为  $0.50\sim 0.70\text{GPa}$ ,  $630^\circ\text{C}\sim 680^\circ\text{C}$ 。总体上看,上述三期变质矿物组合指示顺时针近等温降压的  $P-T-t$  轨迹。

## 5 地质意义

一般认为太古宙大陆热流偏高,而不出现高压变质作用。华北克拉通内晚太古代高压麻粒岩带在晋冀内蒙交界地区的发现,对重新认识和探讨早期地壳的形成和演化及克拉通深部组成提供了新的论据。但在此之前的高压麻粒岩带(桑干构造带)主要出露于冀西北和晋北,长约  $200\text{km}$ ,规模有限,对它的展布、产状尚有争议。滦平-承德一带高压麻粒岩的发现,有理由可以认为桑干构造带大大向东延伸,成为华北克拉通北部的一个重要的岩石-构造单位。特别是这条长  $700\text{km}$  以上的岩带南北两侧的变质岩区表现出重大的差异,因而这条高压变质带是一条重要的构造边界,它们可能记录了晚太古代不同克拉通陆块之间的构造拼合历史及后期近东西向构造带的叠加改造作用。另一方面,大量高压麻粒岩在区域上的不断发现,为建立华北克拉通太古代下地壳剖面、从三维上认识克拉通的构造演化提供了重要依据。

**致谢** 本项研究是在钱祥麟先生的指导下进行的,参加部分野外工作和室内研究的还有刘文均和黄雄南,一并向他们致谢。

## 参 考 文 献

- 李江海,钱祥麟,翟明国,郭敬辉. 1996. 华北中北部高级变质岩区的构造区划及其晚太古代构造演化. 岩石学报, 12 (2): 179~192
- 李江海,翟明国,钱祥麟,郭敬辉. 1998. 华北中北部晚太古代高压麻粒岩的地质产状及其出露机制. 岩石学报 (待刊)
- 郭敬辉,翟明国,李江海,李永刚. 1996. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质. 岩石学报, 12 (2): 193~207
- 翟明国,郭敬辉,阎月华,李永刚,张雯华. 1992. 中国华北高压麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学(B), 12: 1325~1330
- 翟明国,郭敬辉,李江海,李永刚,阎月华,张雯华. 1995. 华北太古宙退变榴辉岩的发现及其含义. 科学通报, 40 (17): 1590~1594
- Ellis D J and Green D H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Contrib. Mineral. Petrol., 71: 13~22
- Mukhopadhyay B. 1991. Garnet-clinopyroxene geobarometry: the problems, a prospect, and an approximate solution with some applications. Am. Mineralogists, 76: 512~529.
- Moecher D L, Essen E J and Anovity L M. 1988. Calculation and application of clinopyroxene-garnet-plagioclase-quartz geobarometers. Contrib. Mineral. Petrol., 100: 92~106
- Newton R C and Perkins D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. Am. Mineral., 67: 203~222
- Powell R. 1989. Geothermometry and geobarometry: a discussion. J. Geol. Soc. London, 142: 29~38
- Wells P R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. Contrib. Mineral. Petrol., 62: 129~139
- Wood B J and Hollway J R. 1984. A thermodynamic model for subsolids equilibria in the system  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . Geochim. Cosmochim. Acta., 48: 159~176