

# 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义

周喜文 魏春景 耿元生 张立飞

( 北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037. E-mail: [chouxiw@pku.edu.cn](mailto:chouxiw@pku.edu.cn))

**摘要** 在胶北栖霞地区基性高压麻粒岩分布区发现了具有石榴石 + 蓝晶石 + 正条纹长石 + 反条纹长石 + 白云母 + 金红石特征组合的泥质高压麻粒岩。通过 THERMOCALC 程序定量计算泥质岩石的  $P-T$  视剖面图, 确定该高压麻粒岩变质峰期的温压条件为  $T = 800\sim 840$  ,  $P = 1.0\sim 1.25$  GPa, 峰期后先呈现近等温降压(ITD)变化, 后期呈现近等压冷却(IBC)变化, 构成典型顺时针样式的  $P-T$  演化轨迹, 反映陆壳先发生碰撞增厚, 后又快速折返到正常地壳深度的变质动力学过程。

**关键词** 泥质高压麻粒岩 THERMOCALC 程序 顺时针  $P-T$  轨迹 陆-陆碰撞 胶北地区

胶北前寒武纪基性高压麻粒岩已报道多年<sup>[1-4]</sup>, 但是对于相关的泥砂质片麻岩围岩是否也经历了高压麻粒岩相变质作用, 至今却没有一个明确的认识。我们最近在胶北栖霞地区发现泥质高压麻粒岩, 为正确认识这一问题提供了重要依据。

## 1 地质背景

胶北地块位于华北克拉通的东部, 区内出露的古老变质岩系主要为晚太古宙胶东群和古元古代荆山群与粉子山群(图1)。胶东群主要在栖霞地区呈近东西向展布的穹隆状复背斜出露, 岩性主体为一套英云闪长质片麻岩。荆山群则环绕此穹隆广泛分布,

岩性以富铝的片岩-片麻岩、长英质片麻岩和大理岩为主, 夹基性斜长角闪岩和角闪二辉麻粒岩透镜体<sup>[6-9]</sup>。粉子山群主要分布于地块北部, 岩性主体也是一套泥砂质片岩-片麻岩和大理岩组合, 但变质程度相对较低, 为角闪岩相<sup>[6]</sup>。前人报道的基性高压麻粒岩主要分布于区内的莱西-栖霞地区, 并沿北东方向断续延伸成一基性高压麻粒岩带(图1)。本文发现泥质高压麻粒岩的太平庄地区正好处于该带之中。该地段出露的岩石以长英质和含黑云母混合花岗质片麻岩为主, 夹夕线石榴黑云片岩-片麻岩夹层, 夹层厚度从数米到数十米不等, 含蓝晶石和条纹长石

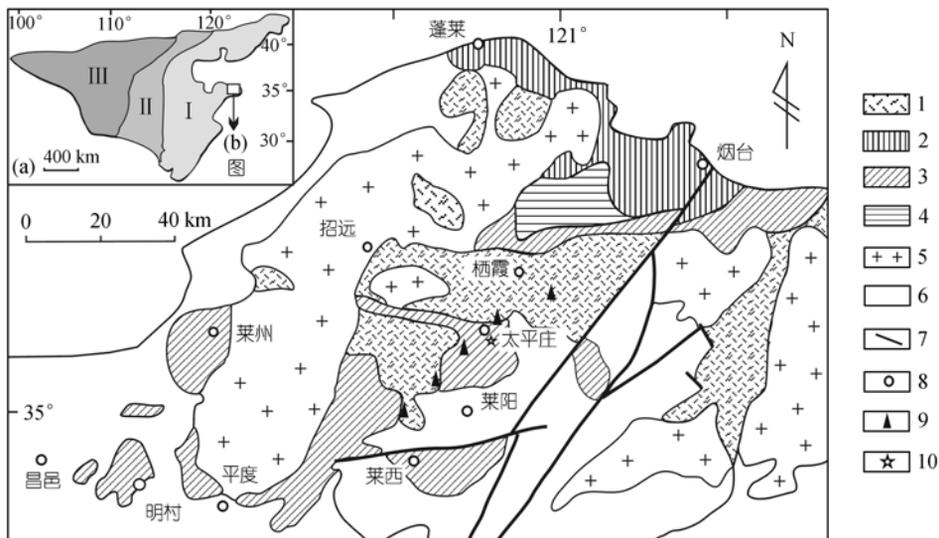


图1 胶北地块地质略图

(a) 华北克拉通构造单元划分草图(据Zhao等人<sup>[5]</sup>), : 东部陆块; : 中部带; : 西部陆块。(b) 胶北地块地质略图, 1. 太古宙胶东群; 2. 古元古代粉子山群; 3. 古元古代荆山群; 4. 新元古代蓬莱群; 5. 花岗岩; 6. 中生界; 7. 断裂; 8. 城镇; 9. 基性高压麻粒岩出露位置(据文献<sup>[2]</sup>粗略标注); 10. 泥质高压麻粒岩取样位置

的高压麻粒岩组合即见于该夹层的部分层位中. 按山东地质局最新 1/20 万区域地质调查报告, 将该段岩层划归荆山群禄格庄组.

## 2 岩相学与矿物微区化学

本区泥质高压麻粒岩的主要矿物组成为: 石榴石(10%~15%)、夕线石(5%~10%)、钾长石(10%~15%)、斜长石(5%~10%)、黑云母(30%~35%)、石英(25%~30%)、蓝晶石(3%~5%)、白云母(3%~5%), 少量金红石、独居石和锆石等副矿物. 石榴石多成巨大的变斑晶(粒径 5~10 mm), 内含较多石英、黑云母和金红石等矿物包体, 外围常被一些定向拉长的石英颗粒所包裹(图 2(a)). 探针分析结果(表 1)表明该石榴石为较富钙的镁-铁铝石榴石 ( $\text{Alm}_{52.8-66.9}\text{Pyr}_{18.2-28.1}\text{Gros}_{5.0-18.3}\text{Spes}_{0.9-3.1}$ ), 其核部(代表峰期成分<sup>[10]</sup>)的 CaO 含量达 5%~7%, 这在已报道的泥质高压麻粒岩中十分罕见. 成分剖面显示该石榴石发育有明显的扩散环带, 表现为由晶体核部到边缘, 铁含量增高, 钙、镁含量降低(图 3). 特别是钙含量的降低反映其可能经历过快速减压的过程<sup>[11]</sup>. 而且, 该石榴石核部成分均匀, 无任何生长环带痕迹, 说明其在抬升之前经历了长时间的高温改造.

蓝晶石主要以残晶形式存在, 具有明显受熔蚀改造的痕迹(图 2(b)), 部分晶体边部已退变为珍珠云母. 夕线石普遍成较大的纤柱状集合体, 常与大片黑云母交生(图 2(c)), 部分夕线石呈板柱状, 仍保持蓝晶石的假象(图 2(d)), 激光 Raman 分析图谱(图略)显示这种夕线石中残留有蓝晶石的结构特征, 说明该夕线石是由蓝晶石转变而来.

黑云母存在 3 种类型: 第 1 种为石榴石中的黑云母包体( $\text{bi}_1$ ), 具有较低的  $\text{TiO}_2$  含量(0.02%), 推测它可能为残留的峰期黑云母; 第 2 种为基质中与夕线石穿插共生的大片黑云母( $\text{bi}_2$ ), 它斜交了主期片麻理(图 2(c)), 可能为峰期后经降压改造的黑云母; 第 3 种为大量存在于基质中的细小鳞片状黑云母( $\text{bi}_3$ ), 形态较规则, 定向排列并构成主期片麻理, 可能为退变质后期大规模结晶生成. 后两种黑云母的成分非常接近, 说明在晚期黑云母大规模结晶的同时早期黑云母的成分也随温压变化发生了调整. 但是不同部位黑云母的成分却存在差异, 与石榴石相邻黑云母边部的 MgO 含量(13.09%)高于远离石榴石的黑云母(12.47%), 说明降温过程中相邻石榴石-黑云母间曾发生较强烈的铁-镁交换作用<sup>[10]</sup>. 岩石中白云母含量

较少, 但也存在两种类型: 一种颗粒较大、形态有些扭曲, 具有较高的  $\text{SiO}_2$  含量(48.66%~49.88%), 判断很可能为残留的峰期白云母( $\text{ms}_1$ )<sup>[12]</sup>; 另一种呈羽毛状集合体, 其  $\text{SiO}_2$  含量较低(45.76%), 为后期退变生成的白云母( $\text{ms}_2$ ).

钾长石主要为微斜长石, 其中某些颗粒的核、边部位有熔蚀形成的蠕石英集合体(图 2(e)), 说明岩石曾经历部分熔融. 部分微斜长石颗粒中有出溶的钠长石微晶(图 2(g)), 为正条纹长石(per). 斜长石有两种类型, 一种颗粒较大( $\text{pl}_1$ ), 其中有定向排列的钾长石微晶(图 2(h)), 为反条纹长石(anti-per); 另一种颗粒细小( $\text{pl}_2$ ), 其中不含任何出溶矿物(图 2(f)), 应为峰期后新结晶产物, 该斜长石在岩石中含量低于 5%. 两期斜长石的成分差异较大, 新生成斜长石的钙含量明显高于早期反条纹长石中的斜长石, An 差值达 4%~6%. 由于上述石榴石边部的钙含量也明显低于核部, 故判断这种新生的斜长石很可能是由峰期石榴石发生降压分解反应  $\text{g}(\text{grs})+2\text{ky}+\text{q} = 3\text{pl}(\text{An})$  生成<sup>[13]</sup>. 如此, 我们利用这种新生的斜长石成分与石榴石边缘成分及相邻黑云母边缘成分配合, 通过石榴石-黑云母温度计和 GASP 压力计就可以获得相当可信的退变质阶段矿物的封闭温度和封闭压力.

根据上述特征, 本区高压泥质麻粒岩可识别出 3 个阶段的矿物组合: . 高压麻粒岩相变质峰期组合  $\text{g}+\text{ky}+\text{ter}(\text{kf}+\text{pl})+\text{bi}_1+\text{ms}_1+\text{rut}+\text{q}+\text{liq}$ (熔体), 受后期降压、降温作用改造, 该组合中矿物目前主要以残留体或矿物包体形式存在; . 峰期后退变质中期组合  $\text{g}+\text{sill}+\text{bi}_2+\text{per}(\text{kf}+\text{ab})+\text{anti-per}(\text{pl}_1+\text{kf})+\text{pl}_2+\text{q}+\text{liq}$ , 从峰期到该阶段的矿物演化表现为蓝晶石大量转变为夕线石, 白云母发生脱水熔融, 石榴石发生转化反应生成新的斜长石晶体( $\text{pl}_2$ ), 并使其边部的钙含量迅速降低, 早期的三元长石溶离成正、反条纹长石等; . 退变质晚期组合  $\text{g}+\text{sill}+\text{bi}_3+\text{ms}_2+\text{pl}_2$ , 矿物演化表现为熔体结晶、钾长石发生水化反应生成新的黑云母和白云母, 新生斜长石( $\text{pl}_2$ )成分与石榴石边缘成分随温压变化发生部分调整, 残余蓝晶石发生珍珠云母化等.

## 3 变质温压条件与 P-T 演化轨迹

如何定量确定高压麻粒岩相变质峰期的温压条件是当今变质地质学研究的一个难点. 由于泥质高压麻粒岩在降温、降压过程中, 其所包含的石榴石、黑云母、白云母、长石等矿物成分均要发生不同程度的调整, 因此传统的石榴石-黑云母温度计、石榴

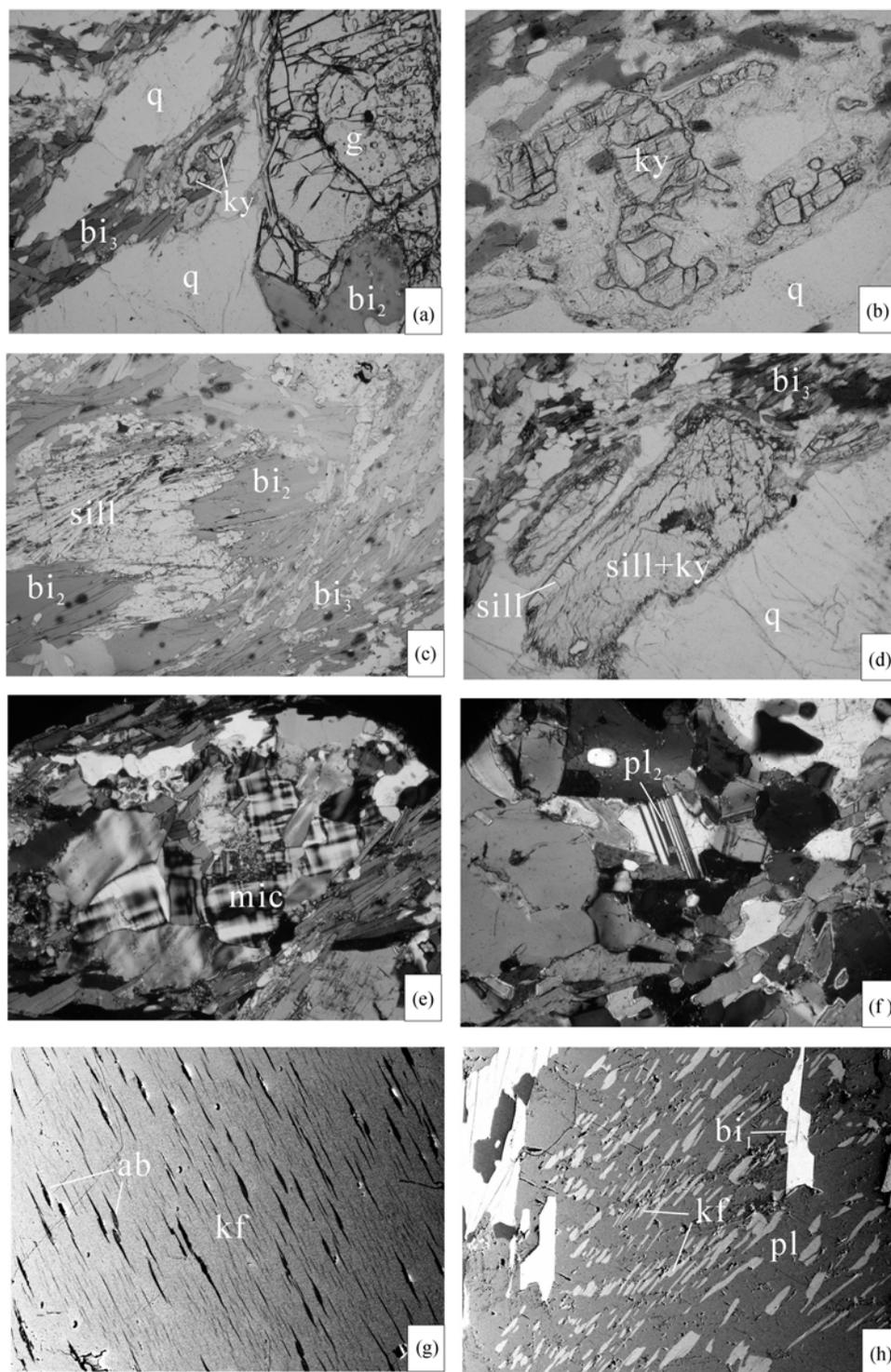


图2 胶北高压泥质麻粒岩特征变质矿物的显微图像

(a) 石榴石与蓝晶石、黑云母共生, 单偏光  $10\times 5$ ; (b) 蓝晶石残晶, 单偏光  $10\times 10$ ; (c) 纤柱状夕线石集合体与大片黑云母( $bi_2$ )穿插共生, 单偏光  $10\times 5$ ; (d) 具蓝晶石和夕线石混合结构特征的  $Al_2SiO_5$ , 单偏光  $10\times 5$ ; (e) 遭受熔蚀的微斜长石(mic), 正交偏光  $10\times 10$ ; (f) 新生斜长石颗粒( $pl_2$ ), 正交偏光  $10\times 10$ ; (g) 正条纹长石, 背散射图像; (h) 反条纹长石, 背散射图像

表 1 胶北高压泥质麻粒岩主要变质矿物的微区成分<sup>a)</sup>

样号	LY-6	LY-6	LY-7	LY-7	LY-7	LY-6	LY-7	LY-7	LY-6	LY-6	LY-6	LY-7	LY-6	LY-7
矿物	g(c)	g(r)	g(c)	g(r)	g(c)	bi <sub>3</sub> (c)	bi <sub>3</sub> (c)	bi <sub>3</sub> (r)	bi <sub>1</sub> (c)	ms <sub>1</sub>	ms <sub>1</sub>	ms <sub>2</sub>	sill	ky
SiO <sub>2</sub>	38.93	38.59	38.71	38.19	38.24	36.50	36.08	36.13	37.23	49.88	48.66	45.76	37.02	37.04
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.00	0.02	0.07	2.12	2.63	1.50	0.02	0.11	0.14	0.22	0.03	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.92	21.70	21.36	21.54	22.06	19.50	18.63	19.21	19.25	34.24	33.92	36.19	62.52	61.94
FeO	26.49	30.36	24.59	33.26	25.95	15.90	15.15	15.04	17.56	1.32	1.06	1.06	0.00	0.34
MnO	0.56	1.40	0.40	1.34	0.39	0.01	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	7.16	5.26	7.34	4.61	7.09	11.51	12.47	13.09	11.56	1.13	1.27	0.84	0.03	0.02
CaO	5.37	3.31	6.65	1.76	6.14	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.08	0.23	0.22	0.10	0.22	0.41	0.41	0.25	0.01
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	10.24	10.02	9.92	10.55	10.00	11.58	11.02	0.86	0.00
总和	100.44	100.63	99.07	100.75	99.95	95.87	95.29	95.11	96.32	96.90	97.04	95.50	100.72	99.41
Si	3.000	3.016	3.013	3.010	2.964	2.717	2.700	2.70	2.780	3.230	3.184	3.043	0.998	1.006
Ti	0.001	0.000	0.000	0.001	0.004	0.119	0.148	0.08	0.001	0.005	0.007	0.011	0.000	0.000
Al	1.992	1.999	1.960	2.002	2.016	1.711	1.643	1.69	1.694	2.614	2.617	2.837	1.987	1.984
Fe	1.708	1.985	1.601	2.193	1.683	0.990	0.948	0.94	1.097	0.072	0.058	0.059	0.000	0.000
Mn	0.037	0.093	0.026	0.089	0.026	0.001	0.004	0.00	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.823	0.613	0.852	0.542	0.819	1.278	1.391	1.46	1.286	0.109	0.124	0.083	0.000	0.000
Ca	0.444	0.277	0.555	0.149	0.51	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.001	0.003	0.002	0.00	0.011	0.033	0.03	0.014	0.028	0.052	0.053	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.002	0.00	0.973	0.957	0.95	1.005	0.826	0.967	0.935	0.000	0.000

样号	LY-7	LY-6	LY-6	LY-6	LY-6	LY-6	LY-6	LY-7	LY-7	LY-7	LY-7	LY-7	LY-7	
矿物	rut	kf	pl <sub>2</sub>	pl <sub>2</sub>	anti/pl <sub>1</sub>	per/ab	per/kf	ter	pl <sub>2</sub>	pl <sub>2</sub>	anti/pl <sub>1</sub>	anti/kf	anti/pl <sub>1</sub>	ter
SiO <sub>2</sub>	0.00	65.54	58.79	59.01	59.85	69.24	64.47	65.04	56.88	56.66	57.95	63.56	57.73	58.313
TiO <sub>2</sub>	98.10	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	19.29	26.57	26.02	26.31	19.64	18.32	18.48	27.41	27.69	27.35	18.49	27.25	26.37
FeO	0.22	0.01	0.10	0.078	0.00	0.01	0.00	0.00	0.08	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
MgO	0.04	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	7.87	7.93	7.19	0.01	0.00	0.00	9.76	9.21	8.67	0.08	8.58	7.73
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.89	7.10	7.06	7.39	11.61	0.67	1.98	6.07	6.29	6.74	0.56	6.49	5.90
K <sub>2</sub> O	0.00	15.22	0.20	0.23	0.10	0.13	16.10	14.18	0.15	0.14	0.16	15.66	0.23	1.77
总和	98.39	101.03	100.65	100.42	100.87	100.66	99.59	99.72	100.35	100.03	100.87	98.38	100.32	100.13
Si	0.000	2.981	2.611	2.627	2.643	3.001	2.993	2.994	2.546	2.541	2.573	2.983	2.576	2.614
Ti	0.998	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	1.034	1.391	1.365	1.369	1.003	1.003	1.003	1.446	1.464	1.431	1.023	1.433	1.394
Fe	0.003	0.000	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001
Mg	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.375	0.378	0.340	0.000	0.000	0.000	0.468	0.443	0.413	0.004	0.410	0.371
Na	0.000	0.078	0.612	0.609	0.633	0.976	0.060	0.177	0.527	0.547	0.580	0.051	0.562	0.513
K	0.000	0.883	0.011	0.013	0.006	0.007	0.954	0.833	0.009	0.008	0.009	0.938	0.013	0.101

a) 表中数据由北京大学地球与空间科学学院电子探针室(Jeol 8800R 型)测定。分析条件: 加速电压 15 kV, 束流  $1 \times 10^{-8}$  A, 束斑 1  $\mu$ m。各矿物的阳离子数均以其标准化学式的氧原子数为基础计算。ab: 钠长石; bi: 黑云母; g: 石榴石; kf: 钾长石; ky: 蓝晶石; ms: 白云母; pl: 斜长石; rut: 金红石; sill: 夕线石; ter: 三元长石; per/ab: 正条纹长石中的钠长石出溶微晶; per/kf: 正条纹长石中的钾长石主晶; anti/kf: 反条纹长石中的钾长石出溶微晶; anti/pl: 反条纹长石中的斜长石主晶; (c): 晶体核部, (r): 晶体边部

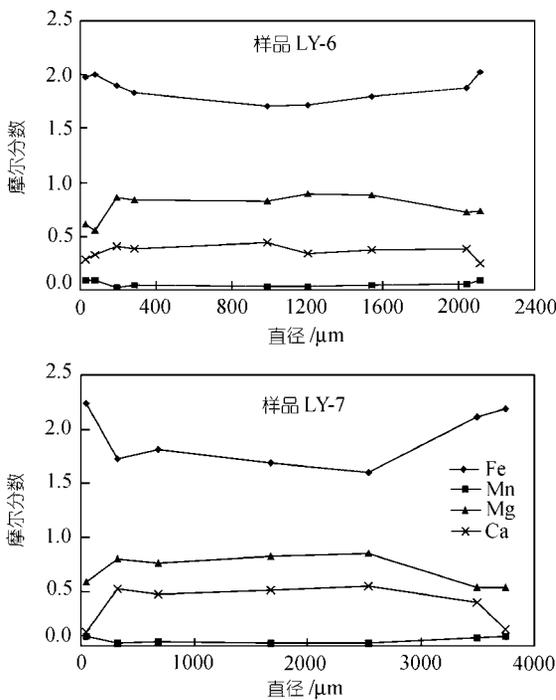


图3 胶北高压泥质麻粒岩中石榴石的微区成分变化剖面

石-白云母温度计在此均不适用. 虽然多数学者采用恢复的三元长石成分通过三元长石温度计<sup>[13]</sup>和GASP压力计来估算变质峰期的温压数值<sup>[14-16]</sup>, 但是由于这种成分恢复多是通过条纹长石微区成分进行统计换算获得的, 受长石晶内成分的不均匀性(不同条纹长石颗粒中出溶微晶的大小及分布往往不同)及后期成分改造影响, 所恢复成分本身就存在较大误差, 其估算结果也自然可信度不高. 本文据此方法获得峰期温压条件为  $T = 800\sim 1100$  ,  $P = 1.1\sim 1.6$  GPa, 其变化范围较大, 成因意义也不明确. 因此, 目前较可信的方法是利用内部一致性热力学数据和THERMOCALC程序定量计算岩石的  $P-T$  视剖面图<sup>[17]</sup>. 这种图解表示某一特定成分岩石在  $P-T$  空间内的相平衡关系, 即随  $P-T$  条件变化其可能出现的矿物组合. 将实际观测的矿物组合及反应结构与图中所示矿物组合进行对比, 确定岩石的  $P-T$  条件及  $P-T$  演化轨迹. 图4为依据KMnFMASH体系的  $P-T$  投影图<sup>[18]</sup>和泥质岩石平均成分计算的  $P-T$  视剖面图. 该图主要由三变和四变组合域构成, 少量为双变和五变组合域. 本区泥质高压麻粒岩的峰期组合  $g + k y + bi + ms + kf + q + (pl + liq)$  在KMnFMASH体系(忽略CaO,

$Na_2O$ )中为一狭长的双变组合, 其稳定  $P-T$  条件约为  $T = 800\sim 840$  ,  $P = 1.0\sim 1.25$  GPa. 第二期矿物组合  $g + sill + bi + kf + q + (pl + liq)$  在图4中为一个三变组合, 其可由上述峰期组合减压形成, 这与本区石榴石的钙成分环带特征及蓝晶石大量转变为夕线石的结构现象正好吻合, 表明从峰期到该阶段的  $P-T$  轨迹应近ITD样式. 由于该麻粒岩中始终未见低压变质矿物堇青石, 表明抬升轨迹不会进入堇青石的稳定域, 而是在适当部位(图中区域)逐渐转变为以降温为主的IBC样式, 并穿越  $g + sill + bi + ms + liq$  三变域和  $g + sill + bi + ms + liq + H_2O$  双边域, 最终进入第三期矿物组合  $g + sill + bi + ms + q + (pl)$  的稳定域. 利用相邻石榴石-黑云母矿物对各自边缘成分通过石榴石-黑云母温度计<sup>[19]</sup>获得该阶段的矿物封闭温度为  $620\sim 680$  , 利用石榴石边缘成分与后期新结晶的斜长石成分通过GASP压力计<sup>[20]</sup>获得的封闭压力为  $0.58\sim 0.72$  GPa. 说明本区高压麻粒岩地体在抬升过程中并未出现大规模的拉张减薄, 而是在正常地壳厚度下逐渐冷却.

#### 4 地质意义讨论

华北克拉通的高压麻粒岩作为世界上为数不多的早前寒武纪高压麻粒岩相变质地体之一, 近年受到了越来越多的关注. 但是已报道的高压麻粒岩绝大多数为基性岩包体, 相关围岩经历高压麻粒岩相变质的证据很少<sup>[15]</sup>. 因此我们在胶北基性高压麻粒岩分布区发现泥质高压麻粒岩, 无疑是对该区, 乃至华北克拉通高压麻粒岩相变质作用研究的重要补充, 证明这些表壳岩与其所包裹的基性岩一样经历了高压麻粒岩相变质作用, 即这期变质作用很可能是区域性的.

与华北克拉通北部相比, 胶北地区的高压麻粒岩既有其相似性, 又有其特殊性. 首先两者都经历了一个快速抬升的过程, 否则泥质岩中的蓝晶石不可能得以保存; 其次二者在变质后期都曾经历了近等压冷却的过程. 但是从本区高压泥质岩中石榴石较高的钙含量, 以及广泛发育的扩散环带和未保留生长环带的痕迹, 似乎表明胶北地区的高压麻粒岩经历了更高压力和更长时间的麻粒岩相变质作用改造. 因为据马军等人<sup>[15]</sup>报道的泥质高压麻粒岩中石榴石的CaO含量仅达1.28%, 而Guo等人<sup>[21]</sup>对基性高压麻粒岩中石榴石的微区成分分析结果亦显示其保留了生长环带痕迹.



成因用该模式解释似乎比较困难。其形成时代可能与中部发生碰撞的时代相同,亦或稍早,具体尚需进一步研究。

## 5 结论

( ) 在胶北地区发现了具有石榴石+蓝晶石+正/反条纹长石+白云母+金红石特征矿物组合的泥质高压麻粒岩,证明该区存在与陆-陆碰撞有关的高压麻粒岩相变质事件。

( ) 通过定量计算的泥质岩石  $P-T$  视剖面图,确定胶北地区高压麻粒岩相变质峰期的温压条件为  $T = 800 \sim 840$  ,  $P = 1.0 \sim 1.25$  GPa。

( ) 确定胶北地区的泥质高压麻粒岩具有顺时针样式的  $P-T$  演化轨迹,退变质早期呈现 ITD 样式,后期为 IBC 样式,反映陆壳碰撞发生高压麻粒岩相变质作用,后又快速折返到正常地壳深度的变质动力学过程。

致谢 叶凯研究员和匿名评审人的意见对本文的修改提供了很大帮助,在此致以诚挚谢意。本工作受国家自然科学基金(批准号:40372032)、教育部高校青年教师教学科研奖励计划和中国博士后科学基金资助。

## 参 考 文 献

- 1 翟明国,从柏林. 苏鲁-大别山变质带岩石大地构造学. 中国科学, D 辑, 1996, 26(3): 258~264
- 2 李永刚,翟明国,刘文军,等. 胶东莱西地区高压麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学. 地质科学, 1997, 32(3): 283~290
- 3 刘文军,翟明国,李永刚. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用. 岩石学报, 1998, 14(4): 449~459
- 4 翟明国,从柏林,郭敬辉,等. 苏鲁造山带东北端石榴石辉石麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学及其大地构造含义. 地质科学, 1999, 34(3): 301~310
- 5 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1-1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. Earth-Sci Rev, 2002, 59(1-4): 125~162 [DOI]
- 6 卢良兆,徐学纯,刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1996. 219~234
- 7 靳是琴,李殿超,李宪洲,等. 胶东莱西-平度一带麻粒岩相岩石的变质作用特征. 地质学报, 1987, 61(3): 240~252
- 8 卢良兆,董永胜. 胶东早元古代荆山群富铝片麻岩中矿物共生的  $P-T-X$  关系及其演化. 岩石学报, 1998, 14(2): 140~151
- 9 周喜文,董永胜,魏存弟. 山东南墅地区孔兹岩系变质矿物的成因及演化. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 116~121
- 10 周喜文,魏春景,董永胜,等. 胶北荆山群富铝岩系石榴石扩散环带特征及其成因指示意义. 岩石学报, 2003, 19(4): 752~760
- 11 Spear F S, Florence F P. Thermobarometry in granulites: Pitfall and new approaches. Precambrian Res, 1992, 55: 209~241 [DOI]
- 12 Wei C J, Powell R. Phase relations in high-pressure metapelites in the system KFMASH (K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) with application to natural rocks. Contrib Mineral Petrol, 2003, 145: 301~315 [DOI]
- 13 Fuhrman M L, Lindsley D H. Ternary feldspar modeling and thermometry. American Mineralogist, 1988, 73: 201~216
- 14 Carswell D A, O'Brien P J. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulite: Examples from the Moldanubian zone of the Bohemian Massif in lower Austria. J Petrol, 1993, 34: 427~459
- 15 马军,王仁民. 宣化赤诚高压麻粒岩蓝晶石-正条纹长石组合的发现及其地质意义. 岩石学报, 1995, 11(3): 273~278
- 16 丁林,钟大赉. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义. 中国科学, D 辑, 1999, 29(5): 385~397
- 17 魏春景,周喜文. 变质相平衡研究进展. 地学前缘, 2003, 8(3-4): 341~351
- 18 Wei C J, Powell R, Clarke, G L. Calculated phase equilibria for low-and medium-pressure metapelites in the KFMASH and KMnFMASH systems. J Metamorphic Geol, 2004 (in press)
- 19 Holdaway M J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. American Mineralogist, 2000, 85(7-8): 881~892
- 20 Holdaway M J. Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer. American Mineralogist, 2001, 86(10): 1117~1129
- 21 Guo J H, O'Brien P J, Zhai M G. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton: Metamorphic evolution, P-T paths and geotectonic significance. J Metamorphic Geol, 2002, 20(8): 1741~1756
- 22 纪壮义. 胶北元古界变质岩的同位素测年新成果及其地质意义. 山东地质, 1993, 9(1): 43~51
- 23 Liu S W, LI J H, Pan Y M, et al. An Archean continental block in the Taihangshan and Hengshan regions: Constraints from geochronology and geochemistry. Progress In Natural Science, 2002, 12(8): 562~568

(2004-04-29 收稿, 2004-06-14 收修改稿)