

文章编号: D258-7106(2009)05-0653-10

# 阜平杂岩中低品位磁铁矿的形成与深熔作用的关系\*

任留东 杨崇辉 杜利林

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

**摘要** 在中-高级变质的阜平杂岩中可以形成低品位磁铁矿。除碎屑岩中继承的磁铁矿外, 新生变质磁铁矿多呈斑晶, 可出现于多种岩石类型, 如变基性岩、中性岩、酸性岩和变沉积岩中, 表明新生磁铁矿的形成不受层位控制。磁铁矿可由物理重结晶和化学反应 2 种形式形成, 重结晶过程主要为矿物颗粒的加粗, 但没有明显的脱水反应。变质化学反应形成的磁铁矿与各单元所经受的后期变质事件改造有关, 这类磁铁矿的出现与岩石中 TFe 的含量没有必然的联系, 关键在于变质反应中是否有适量的铁组分的迁移和富集。变质反应过程中, 初期黑云母变质转化形成角闪石, 即变质反应不全是脱水或吸水过程, 表明阜平杂岩主要的变质过程发生在含水体系中。在进一步的变质改造中, 黑云母、角闪石可深熔转化形成磁铁矿。在片麻岩的含水熔融过程中, Mg、Ca 优先迁移, 而 Fe(Ti, Al) 迁移微弱, 造成 Fe(Ti, Al) 与 Mg 组分的分离, 残留的相对富铁组分形成磁铁矿、钛铁矿。磁铁矿结晶时没有明显的挤压或剪切, 张应力可能占主导地位, 相应的深熔作用主要发生在构造静应期或体系略微抬升的过程中。

**关键词** 地质学; 磁铁矿; 变质过程; 有水深熔作用; 组分活动; 阜平杂岩

中图分类号: P571

文献标志码: A

## Formation of low-grade magnetite deposit and its relationship with anatexis in Fuping complex

REN LiuDong, YANG ChongHui and DU LiLin

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

### Abstract

The low-grade magnetite deposit could be formed in the high amphibolite-granulite facies metamorphic complex. Except for the detrital magnetite in the paragneisses, the newly-formed magnetite in the metamorphic process usually occurs as euhedral porphyroblasts. The magnetite ores can be found from the metabasic rock, meta-intermediate rock to acid rock and metasedimentary rocks, suggesting that the formation of magnetite was not confined to any special layers but was related to the metamorphic event which prevailed in nearly all the rock units in the Fuping complex. Not necessarily related to the high total iron contents of the bulk chemistry, the formation of metamorphic magnetite was dependent on the adequate migration and enrichment process of the iron component. It can be discerned that the major metamorphic event of the complex was of hydrous and two formation styles of magnetite, recrystallization and chemical reaction. The recrystallization is manifested by the coar-

\* 本文得到国土资源大调查项目“中国与亚洲早前寒武纪构造与地层划分对比”(1212010611802、1212010711815) 国家自然科学基金“南极拉斯曼丘陵深熔过程的研究”(40572041) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费资金“东南极普里兹带从罗迪尼亚到冈瓦纳大陆的演化”(J0704) 的联合资助

第一作者简介 任留东, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 主要从事南极地质和变质地质研究。Email: ldren@cags.net.cn

收稿日期 2009-02-17; 改回日期 2009-04-21。李德先编辑。

sening of magnetite, with no obvious dehydration reactions taking place. As to the metamorphic reaction processes, the initial biotite was transformed into hornblende, suggesting that the reactions were not through dehydration or hydration metamorphism. In the further transformation, both biotite and hornblende could be changed into magnetite in the anatexis process. In the aqueous partial melting of the complex, the Mg, Ca elements preferentially migrated, while Fe (Ti) (Al?) weakly migrated, which was responsible for the differentiation between the components Fe(Ti) (Al?) and Mg, and the residues were relatively rich in iron and magnetite with the formation of minor ilmenite. In this process, extensional stress was predominated with no obvious compression or shearing, and the corresponding partial melting occurred essentially in the static stress or slightly uplifting system.

**Key words:** geology, magnetite, metamorphic process, aqueous partial melting, component migration, Fuping complex

在阜平杂岩中的浅粒岩、片麻岩和少量镁铁质岩石中,经常出现一些粗粒自形磁铁矿,局部地段甚至可形成低品位铁矿。由于含磁铁矿层主要集中于湾子群团泊口组以副片麻岩为主的钾长浅粒岩中,磁铁矿被认为是原岩沉积而成(伍家善等,1989)。在与平阳岩体有关的复式向斜中存在厚层状的磁铁矿钾长浅粒岩(张西平,2001),浅粒岩中磁铁矿呈自形八面体星散分布或集中形成暗色条纹,表现出变余结构的特征(程裕淇等,2004)。通过野外和室内观察、分析可知,磁铁矿和相关金属氧化物并非局限于钾长浅粒岩中,在索家庄组黑云斜长片麻岩、角闪辉石麻岩,甚至深熔浅色体中均可出现。这些不透明金属氧化物形成于变质作用及相关的深熔过程,本文重点讨论其形成机制。

## 1 区域地质

根据地质填图和构造研究,张寿广等(1983)认为该区是由太古宙阜平群构成的穹状复合褶皱群,并先后经历了水平构造和垂直构造体制的转换。阜平杂岩主要为一套副变质岩系(如浅粒岩、片麻岩、大理岩和磁铁石英岩等),由少量正片麻岩和镁铁质变质岩(伍家善等,1989)以及大量的混合岩组成(谭应佳等,1993)。片麻岩的主要形成时期在 2.7 Ga、2.5 Ga (Guan et al., 2002) 和 2.0 Ga 左右(Liu et al., 2005)。

阜平杂岩中出现大量的浅粒岩、变粒岩和少量的片麻岩,造岩矿物为钾长石(通常为微斜长石)、斜长石、黑云母、石英和较少的角闪石,极少石榴子石;副矿物有磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐帘石、榍石、磷灰石、锆石和独居石等。镁铁质岩石中以角闪石、辉石、石榴子石和斜长石-石英为特征,偶尔有镁铁闪

石和钾长石产出,可有磁铁矿。

粗粒自形磁铁矿在阜平杂岩的各个单元中均可出现,如在新太古代索家庄岩组、TTG、湾子群片麻岩、南营片麻岩、南营片麻岩中相对暗色体和深熔浅色体中均可出现磁铁矿。

## 2 岩相特征

整体而言,阜平杂岩的浅粒岩和长英质片麻岩中,很少甚至无石榴子石,但普遍出现磁铁矿,主要为变质过程中新形成的磁铁矿(图1),如二云母片麻岩(样品 F49-5)中可有矿物形成顺序:白云母→磁铁矿-微斜长石→黑云母+白云母→绿泥石;在中-基性成分的岩石或富黑云母片岩(样品 F47-5)中常有石榴子石,此时磁铁矿被石榴子石包裹,即黑云母+斜长石+磁铁矿→石榴子石,先有少量磁铁矿,后有石榴子石。即使在矽线石片麻岩中,也可有大量的不透明矿物,如 F46-1 和 F46-2 中:黑云母±白云母+矽线石→微斜长石→钠长石净边,其中与矽线石相伴的有赤铁矿、独居石、锆石、褐帘石等,并可形成组合磁铁矿+斜长石+微斜长石+普通角闪石+钛铁矿,微斜长石和角闪石基本同时形成,可见浑圆状的角闪石被赤铁矿、磁铁矿包裹。角闪黑云斜长片麻岩中可见黑云母向角闪石的转化关系(图 2c、d)。

磁铁矿一般为自形、半自形(图 2a),周围一般为石英、钾长石、斜长石或钠长石白边,有时沿磁铁矿边缘出现榍石或黑云母,附近常有锆石、独居石等。不透明金属氧化物(赤铁矿+钛铁矿+磁铁矿,赤铁矿)可呈聚晶结构(图 2b)。与磁铁矿密切接触的为斜长石、石英(图 2a、b)和黑云母,钾长石或微斜长石的出现相对晚一些。

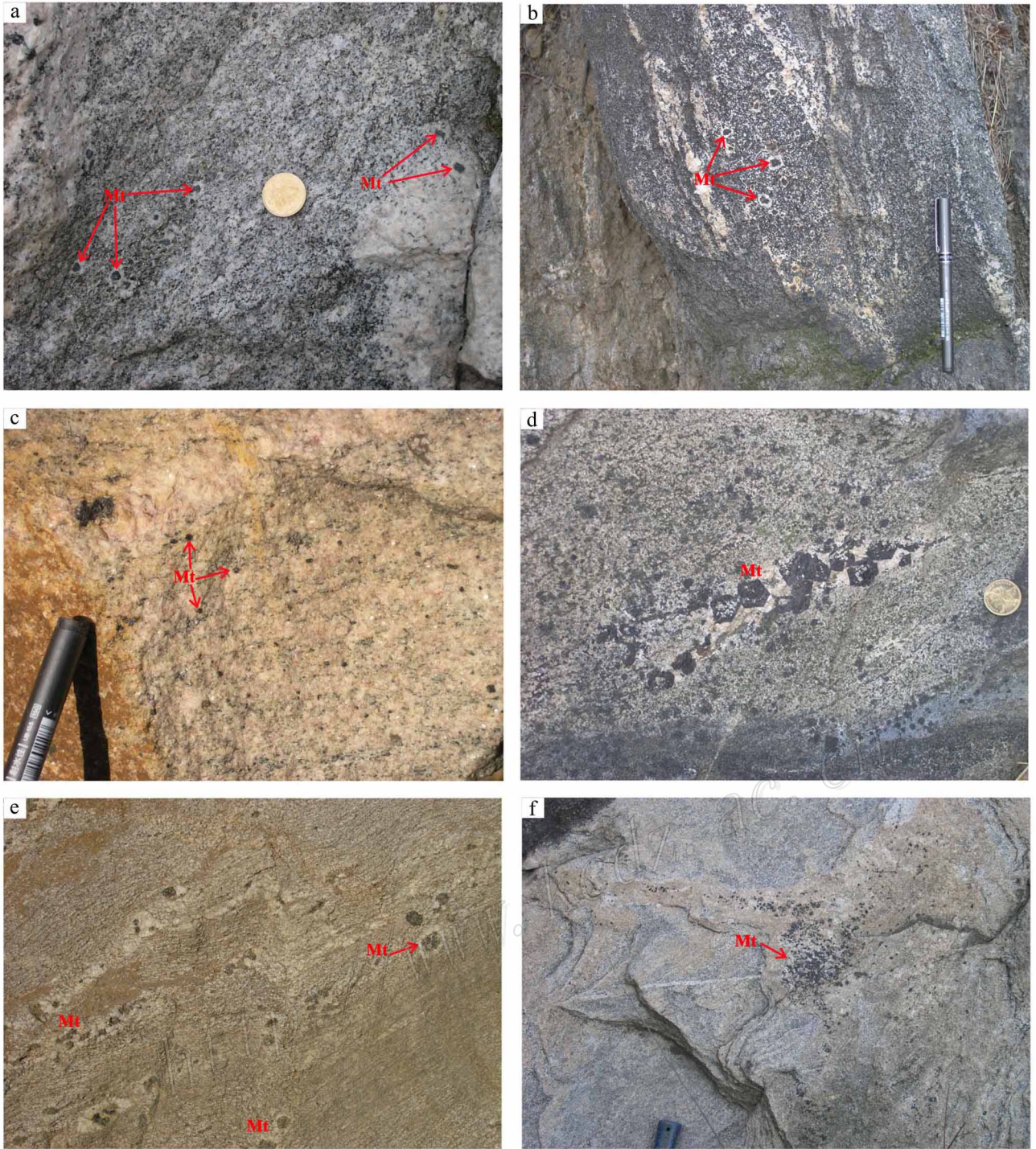


图 1 阜平杂岩中磁铁矿(Mt)的露头产状

a. 板桥沟湾子岩系; b. 猴石垭附近; c. 南营片麻岩; d. 猴石垭附近; e. 平阳岩体附近; f. 板桥沟湾子岩系

Fig. 1 Photographs of euhedral magnetites in various gneisses and leucosomes in Fuping complex

a. Wanzi Group at Banqiaogou valley; b. Near the mount Houshinao; c. Nanying orthogneiss; d. Near the mount Houshinao;

e. Near the western margin of Pingyang trondhjemite; f. Wanzi Group at Banqiaogou valley

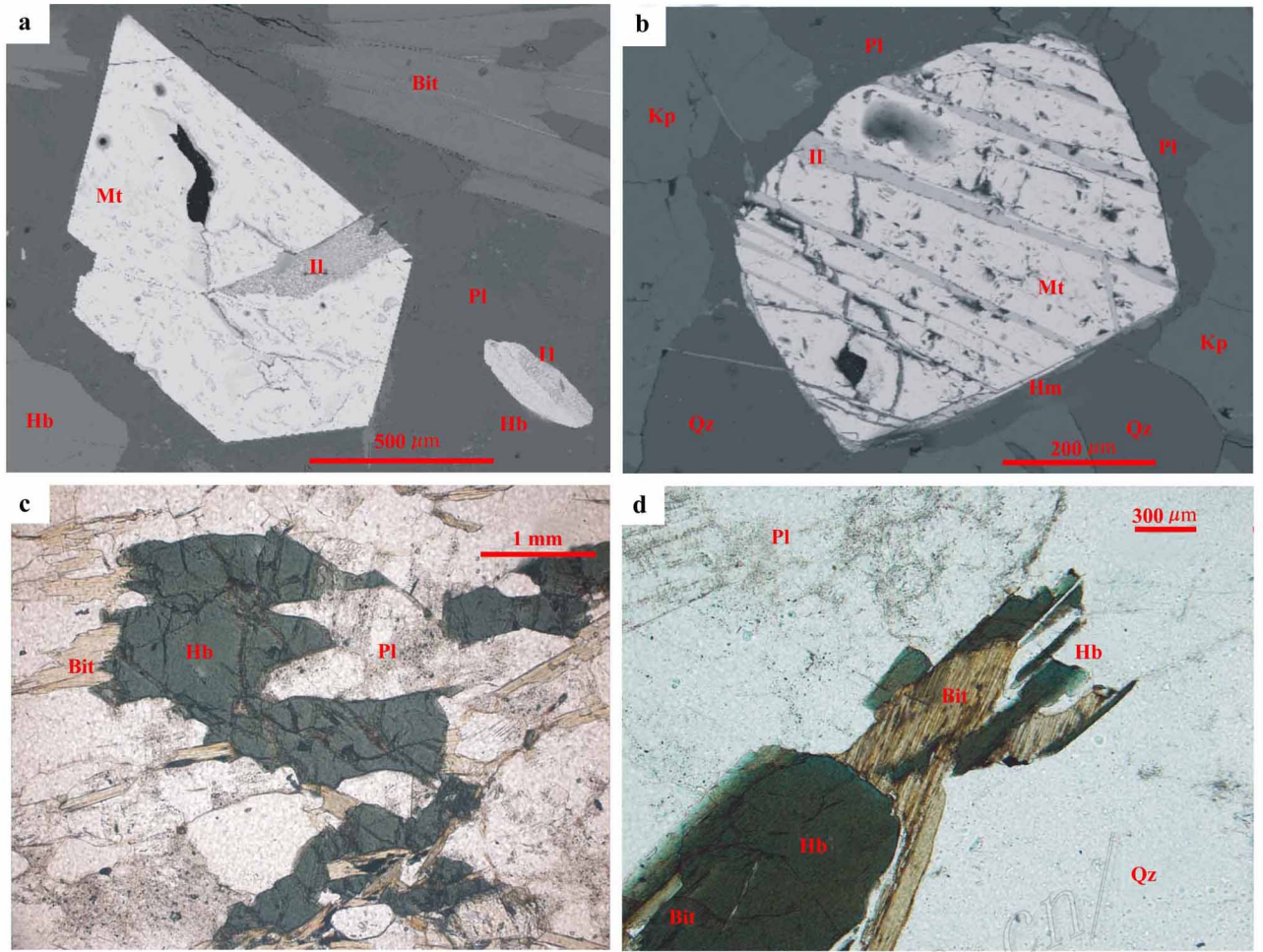


图2 长英质片麻岩中的铁钛氧化物 BSE 图象和黑云母向角闪石转化的显微照片

a. 长英质片麻岩中不透明矿物 BSE 图象(样品 F5011M44); b. 长英质片麻岩中不透明矿物赤铁矿+磁铁矿+钛铁矿聚晶结构 BSE 图象(样品 F01-96-3); c,d. 角闪黑云斜长片麻岩中黑云母向角闪石的转化(c: 样品号 F62-1; d: 样品号 F44-3); Bit—黑云母; Pl—斜长石; Hb—普通角闪石; Kp—钾长石; Qz—石英; Hm—赤铁矿; Mt—磁铁矿; Il—钛铁矿

Fig. 2 BSE images of euhedral Fe-Ti oxides in gneiss and the microphotographs of transformation of biotite to amphibole

a. BSE image of euhedral magnetite in quartz-feldspathic gneiss; b. Image of synneis texture enveloped in plagioclase halo in quartz-feldspathic gneiss; c,d. Transformation of biotite to amphibole in Bit-Hb gneiss, plane polarized; Bit—Biotite; Pl—Feldspar; Hb—Hornblende; Kp—Potassic; Qz—Quartz; Hm—Hematite; Mt—Magnetite; Il—Ilmenite

### 3 矿物成分特征

本文只讨论与磁铁矿形成有关的黑云母、角闪石和斜长石的成分特征。一般情况下,角闪石的  $Mg/(Mg+Fe)$  原子百分比比黑云母的高(表1)。斜长石成分的变化(主要考虑斜长石  $An$  牌号),根据岩石中黑云母和角闪石的含量,可以分为若干种情形:

(1) 有黑云母但无角闪石时,不透明金属氧化物主要为磁铁矿,有时为多种氧化物的聚晶结构(图

2b)。斜长石成分多变,内部为早期基质钠长石( $An$  4.0~5.5),边缘为钠长石环带( $An$  6.6~7.5),再向外是钠长石净边( $An$  1.4~3.8)。

(2) 黑云母较少( $\leq 5\%$ , 体积含量,下同),并在转化为角闪石时(样品 F57-2),斜长石牌号略有减少( $An$  27.2~26.7,表2),在黑云母周围可形成钾长石,并熔蚀斜长石和石英。

(3) 黑云母与角闪石均稍多时(5%~10%)(样品 F42-3),基质中的斜长石( $An$  30~32)在形成角闪初期  $An$  牌号略有降低( $An$  28),随后斜长石的牌号又稍有升高( $An$  30)。

表 1 黑云角闪片麻岩中黑云母和角闪石的电子探针成分分析

Table 1 Electron microprobe analyses of biotite and hornblende in Bit-Hb gneiss of Fuping complex

岩石类型及 样品编号	矿物	$w_B/\%$										Mg/(Mg + Fe)*
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	FeO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	总计	
角闪黑云钾长片麻岩												
F42-3	Bit	35.600	3.039	13.971	7.743	0	0.393	24.141	0.034	10.084	95.038	0.364
F42-3	Bit <sub>1</sub>	36.220	3.177	14.227	7.913	0	0.355	24.228	0.065	10.358	96.572	0.368
F42-3	Bit <sub>2</sub>	35.671	3.211	14.139	8.305	0	0.329	23.717	0.029	10.177	95.626	0.384
含角闪黑云片麻岩												
F57-2	Bit	36.739	4.484	12.941	11.742	0.011	0.163	19.293	0.050	10.372	95.831	0.520
角闪黑云钾长片麻岩												
F42-3	Hb	41.357	0.959	10.900	6.043	11.603	0.679	23.083	1.182	1.467	97.273	0.318
F42-3	Hb	40.059	1.067	11.461	5.991	11.360	0.565	23.422	1.326	1.668	96.946	0.313
磁铁黑云角闪片麻岩												
F50-11	Hb	44.810	0.877	10.772	11.738	11.328	0.276	15.731	1.540	0.338	97.521	0.571
F50-11	Hb <sub>i</sub>	45.614	0.783	10.653	11.947	11.342	0.192	15.627	1.603	0.423	98.205	0.577
F50-11	Hb	41.873	0.861	13.973	10.163	11.484	0.232	16.319	1.883	0.603	97.478	0.526
角闪黑云斜长片麻岩												
F62-1	Hb	42.823	0.640	10.971	8.979	11.884	0.449	19.914	1.324	1.538	98.522	0.446
含角闪黑云片麻岩												
F57-2	Hb	43.717	1.645	9.329	10.805	12.477	0.266	17.342	1.643	1.377	98.673	0.526

岩石类型及 样品编号	矿物	$w_B/\%$										Al(4)	Al(6)
		Si	Ti	Al	Mg	Ca	Mn	Fe	Na	K	总计		
角闪黑云钾长片麻岩													
F42-3	Bit	2.817	0.181	1.303	0.913	0	0.026	1.598	0.005	1.018	7.861	1.183	0.120
F42-3	Bit <sub>1</sub>	2.818	0.186	1.304	0.918	0	0.023	1.576	0.010	1.028	7.863	1.182	0.122
F42-3	Bit <sub>2</sub>	2.799	0.190	1.308	0.972	0	0.022	1.556	0.004	1.019	7.870	1.201	0.107
含角闪黑云片麻岩													
F57-2	Bit	2.815	0.258	1.169	1.341	0.001	0.011	1.236	0.007	1.014	7.852	1.185	-0.016
角闪黑云钾长片麻岩													
F42-3	Hb	6.478	0.113	2.012	1.411	1.947	0.090	3.024	0.359	0.293	15.728		
F42-3	Hb	6.332	0.127	2.135	1.412	1.924	0.076	3.096	0.406	0.336	15.845		
磁铁黑云角闪片麻岩													
F50-11	Hb	6.661	0.098	1.887	2.601	1.804	0.035	1.956	0.444	0.064	15.551		
F50-11	Hb <sub>i</sub>	6.714	0.087	1.848	2.622	1.789	0.024	1.924	0.457	0.079	15.544		
F50-11	Hb	6.284	0.097	2.472	2.274	1.847	0.029	2.048	0.548	0.115	15.714		
角闪黑云斜长片麻岩													
F62-1	Hb	6.505	0.073	1.964	2.033	1.934	0.058	2.530	0.390	0.298	15.784		
含角闪黑云片麻岩													
F57-2	Hb	6.569	0.186	1.652	2.420	2.009	0.034	2.179	0.479	0.264	15.791		

注 Bit—黑云母 ;Bit<sub>1</sub>—早期黑云母 ;Bit<sub>2</sub>—晚期黑云母 ;Hb—普通角闪石 ;Hb<sub>i</sub>—磁铁矿所包裹的角闪石。测试单位：中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室；实验仪器：JXA-8800A；测试条件：20 kV, 20 nA。\* 为原子百分比。

(4) 黑云母与角闪石均较多时(≥10%) 样品 F62-1 (图 2c, d), 基质中的斜长石 (An 30~33) 在形成角闪石初期时牌号略有降低 (An 17~23), 在斜长石中可见钾长石条块, 随后斜长石的牌号又升高 (An 30~32)。

(5) 有一定的黑云母 (5% 左右) 而角闪石很多 (>20%) 时 (样品 F50-11) 斜长石的成分变化较大：基质中的斜长石为 An30 左右, 先期形成的斜长石

为 An 26, 伴随的金属氧化物为赤铁矿-钛铁矿, 后期角闪石分解时, 斜长石牌号急剧升高, An 39~45, 相应的金属氧化物为磁铁矿, 并有极少的钛铁矿 (赤铁矿中可含 2.2% 的 MnO) 伴随 (图 2)。

总之, 早期与黑云母共生的斜长石牌号较高。当黑云母转化为角闪石时, 新生成的与角闪石共生的斜长石牌号明显降低; 角闪石分解成为磁铁矿时斜长石牌号增加, 促使斜长石的边缘更富钙长石。

表2 黑云角闪片麻岩中斜长石的电子探针成分分析( $w_B/\%$ )Table 2 Electron microprobe analyses of plagioclase in Bit-Hb gneiss of Fuping complex( $w_B/\%$ )

岩石类型及样品编号	测点	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	FeO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	总计
含角闪黑云片麻岩									
F57-2	2-pl <sub>1</sub>	62.822	23.004	5.465	0	0.159	8.081	0.408	99.982
F57-2	2-pl <sub>2</sub>	62.655	22.999	5.342	0.028	0.196	8.105	0.393	99.740
角闪黑云钾长片麻岩									
F42-3	2-pl	62.059	23.962	6.720	0.003	0.115	7.791	0.257	100.953
F42-3	6-pl <sub>1</sub>	61.169	24.062	6.831	0.003	0.207	7.642	0.166	100.110
F42-3	4-pl <sub>r</sub>	62.579	23.351	5.784	0	0.092	7.972	0.185	100.001
角闪黑云斜长片麻岩									
F62-1	1-pl <sub>1</sub>	60.389	23.877	6.664	0	0.123	7.483	0.186	98.739
F62-1	3-pl <sub>c</sub>	63.042	22.315	4.544	0.003	0.138	8.418	0.240	98.708
F62-1	6-pl	65.567	21.844	3.516	0.037	0.093	9.336	0.169	100.564
磁铁黑云角闪片麻岩									
F50-11	1-pl	62.842	22.633	5.461	0	0.078	8.400	0.117	99.531
F50-11	1-pl <sub>i</sub>	60.448	23.008	6.134	0.019	0.694	7.765	0.060	98.384
F50-11	2-pl <sub>1</sub>	57.847	26.013	9.252	0.019	0.118	6.258	0.053	99.560
F50-11	2-pl <sub>r</sub>	59.365	24.922	8.079	0.024	0.116	6.881	0.050	99.441
岩石类型及样品编号	测点	Si	Al	Ca	Fe	Na	K	总计	An
含角闪黑云片麻岩									
F57-2	2-pl <sub>1</sub>	2.785	1.202	0.260	0.006	0.695	0.023	4.971	27.2
F57-2	2-pl <sub>2</sub>	2.784	1.205	0.254	0.007	0.698	0.022	4.973	26.7
角闪黑云钾长片麻岩									
F42-3	2-pl	2.735	1.245	0.317	0.004	0.666	0.014	4.982	32.3
F42-3	6-pl <sub>1</sub>	2.720	1.261	0.325	0.008	0.659	0.009	4.983	33.1
F42-3	4-pl <sub>r</sub>	2.772	1.219	0.275	0.003	0.685	0.010	4.965	28.6
角闪黑云斜长片麻岩									
F62-1	1-pl <sub>1</sub>	2.720	1.267	0.322	0.005	0.653	0.011	4.978	33.0
F62-1	3-pl <sub>c</sub>	2.820	1.176	0.218	0.005	0.730	0.014	4.963	23.0
F62-1	6-pl	2.870	1.127	0.165	0.003	0.792	0.009	4.968	17.2
磁铁黑云角闪片麻岩									
F50-11	1-pl	2.796	1.187	0.260	0.003	0.725	0.007	4.977	26.4
F50-11	1-pl <sub>i</sub>	2.737	1.228	0.298	0.026	0.682	0.003	4.986	30.4
F50-11	2-pl <sub>1</sub>	2.603	1.379	0.446	0.004	0.546	0.003	4.982	45.0
F50-11	2-pl <sub>r</sub>	2.664	1.318	0.388	0.004	0.599	0.003	4.978	39.4

注 pl<sub>1</sub>—斜长石包裹体 pl<sub>c</sub>—斜长石核部 pl<sub>1</sub>—早期斜长石 pl<sub>2</sub>—晚期斜长石 pl<sub>r</sub>—斜长石边缘。测试单位：中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室；实验仪器：JXA-8800A；测试条件：20 kV 20 nA。

## 4 岩石化学

通常,岩石中铁矿物的有无或含量多少应与岩石中的铁含量密切相关,但是,根据阜平杂岩中含磁铁片麻岩岩石化学分析结果(笔者未发表数据)可知,变质新生磁铁矿的出现与TFe( $Fe_2O_3 + FeO$ )含量没有必然联系,含自形磁铁片麻岩TFe的变化范围为2.26%~11.15%,而一些岩石TFe含量高于此上限,却仅形成含铁硅酸盐矿物而不出现磁铁矿。因此,决定变质磁铁矿出现与否的关键不在于

岩石中的TFe含量,而在于是否有适量的铁组分的迁移和富集。

从岩石类型上看,通过对变质岩的原岩恢复,出现自形磁铁矿的岩石可以分布于多个层位或单元,并有许多类型,如从新太古代TTG片麻岩,到古元古代湾子群表壳岩,直至深熔浅色脉体(表3)。仅从稀土元素配分型式上即可得知含磁铁矿岩石类型的多样性(表3;图3)。因此,变质磁铁矿在阜平杂岩的很多单元中均可出现,而不是局限于特定的单元内,表明变质磁铁矿的形成并不是严格受层位控制,并且与岩石中TFe的含量没有直接关系。

表 3 阜平杂岩含磁铁矿片麻岩的原岩类型  
Table 3 Possible protoliths of magnetite-bearing gneisses in Fuping complex

样品编号	采样地点	地质背景	岩石类型	原岩类型	Eu/Eu*
F43-1	营里板桥沟	湾子群	含磁铁矿白云母钾长浅粒岩	长石绢云石英岩	0.69
F43-2	营里板桥沟	TTG	含磁铁矿条带状黑云斜长片麻岩	闪长岩或安山岩	0.90
F46-3	蛟潭庄西苇园南	湾子群	含磁铁矿二长浅粒岩	含酸性物质的沉凝灰岩	0.62
F49-5	灵寿长峪村南	湾子群	含磁铁矿白云母钾长浅粒岩	复矿物砂岩	0.70
F50-12	灵寿长峪村北	湾子群	条带状黑云角闪片麻岩(见有磁铁矿白眼圈)	基性岩	0.94
F52-1	阜平西槽口桥头	新太古代索家庄岩组	含磁铁矿条带状黑云斜长片麻岩	长石绢云石英岩	0.99
F63-1	阜平龙泉关南大偏梁	南营片麻岩(菜树庄片麻岩)	中粒片麻岩含磁铁矿黑云母二长花岗岩	流纹岩或沉凝灰岩	0.21
F63-2	阜平龙泉关南大偏梁	南营片麻岩中相对暗色的层	中细粒片麻岩含磁铁矿黑云母二长花岗岩	花岗岩及其喷出岩	0.29
F64-1	阜平龙泉关南大偏梁	南营片麻岩(菜树庄片麻岩)	中粒片麻岩含磁铁矿黑云母二长花岗岩	花岗岩及其喷出岩或沉凝灰岩	0.31
F64-4	阜平龙泉关南大偏梁	深熔浅色体	中粒片麻岩含磁铁矿黑云母二长花岗岩中的深熔条带	深熔浅色体	0.32
F72-3	阜平西板峪店西	平阳岩体西侧围岩	含磁铁矿钾长浅粒岩	花岗岩及其喷出岩或沉凝灰岩	0.30

注:变质岩原岩恢复主要根据王仁民等(1987)和桑隆康(1993)。

## 5 讨论

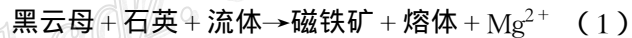
阜平杂岩长英质片麻岩中很少甚至无石榴子石,但普遍含有磁铁矿,而中-基性岩或富黑云母片麻岩中常有石榴子石和磁铁矿。磁铁矿的出现,既不严格受岩石中 TFe 含量的控制,又不局限于特定的层位或单元内。片麻岩中磁铁矿的形成,可分为物理变化和化学变化 2 种情形。

首先是物理变化。岩石中早期镁铁质矿物基本为黑云母,少或无角闪石。因体系中有足够多的水分,含水矿物如云母的脱水分解等过程发育不显著(图 1c),在流体溶解或压溶作用下(Rutter, 1983),粒状矿物如长石、石英中的磁铁矿等趋于溶解。对于已结晶的矿物而言,空间自由度较大,组分的供应也是基本敞开的,并具有足够充分的流体活动,此时体系以物理变化为主,即体系没有明显的脱水反应时,变质体系中磁铁矿可以溶解和重结晶(Collins, 1969),磁铁矿或金属氧化物可通过变质重结晶的形式形成,如分散的细粒铁组分溶解、再汇聚形成粗粒磁铁矿,局部还可形成磁铁矿变斑晶,或者磁铁矿和石英压溶转化成为赤铁矿(Lagoeiro, 1998)。该变化过程中的矿物如长石+石英+磁铁矿+黑云母±白云母组合没有实质性的改变。浅粒岩中继承原碎

屑岩的磁铁矿的集中、加大即属于此种情形。

除了原岩继承的碎屑磁铁矿外,变质新生磁铁矿的出现应主要与各单元共同经受的后期变质事件的改造即化学变化有关。又可细分出 2 种不同的情况:

一是片麻岩中基本无角闪石。因中-高级变质作用而在合适的部位发生如下化学反应:



熔体结晶形成斜长石+石英±钾长石组合,浅色体中出现磁铁矿(图 1e、f),自形磁铁矿周围有浅色环带(斜长石+石英,图 1a、b、d)可能都与此反应有关。平阳岩体很可能形成于类似机制。此时与磁铁矿形成有关的组分变化是 Mg、Fe 之间的分离,即 Mg 发生迁移,而 Fe 相对稳定,从而造成长英质片麻岩中本来就很少的 Mg 组分消失殆尽,仅剩 Fe 组分,形成磁铁矿等矿物。

阜平杂岩已达中-高级的变质程度,很多岩石中已发生深熔作用。如果深熔时  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  分压较低即无水部分熔融,组分的迁移主要靠不一致熔融形成的熔体, Mg、Fe、Al 一起作为残留组分聚集,导致 Mg、Fe、Al 与 Ca 的分离,共同形成富镁铁(铝)而贫钙组分的矿物,如尖晶石、堇青石或石榴子石等,本区长英质片麻岩中通常缺失这些矿物,表明区域环境不属于无水熔融(Kriegsman, 2001),而是有水深熔(另文介绍)。

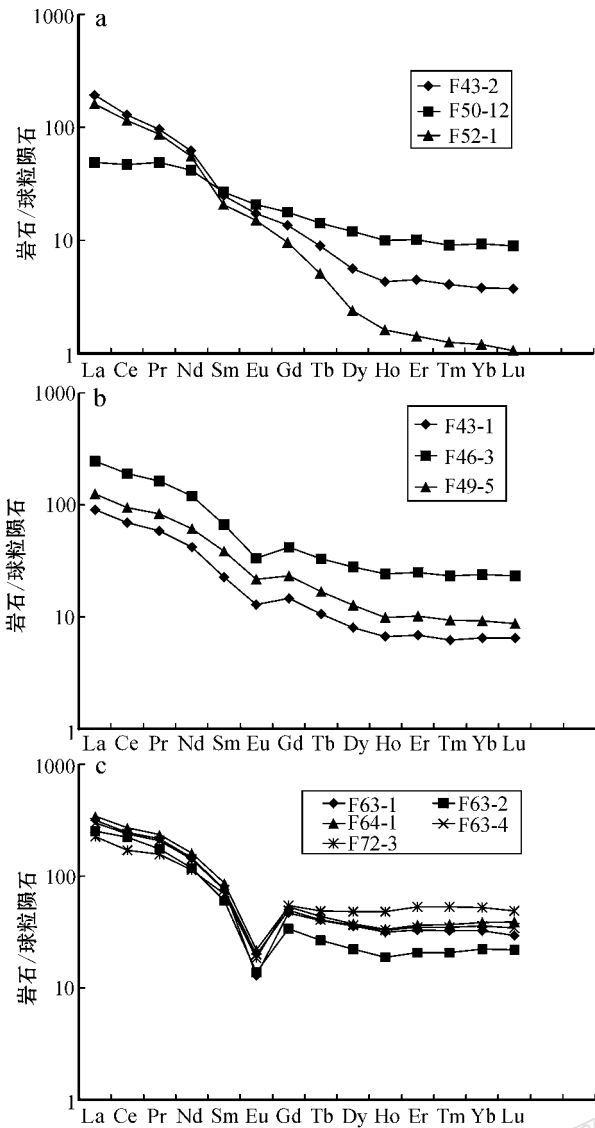


图3 含磁铁矿岩石不同的稀土元素配分型式

a. 太古代索家庄组或TTG, 无或弱负铕异常; b. 湾子群副变质岩, 中度负铕异常; c. 古元古代南营片麻岩或其浅色体, 强烈负铕异常

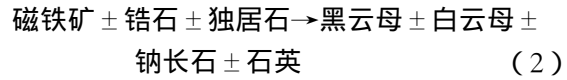
Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of magnetite-bearing rocks in Fuping complex

a. Archean Suojiazhuang Formation or TTG, with no or weak negative Eu/Eu\* anomaly; b. Paragneiss of Wanzi Group, with moderate negative Eu/Eu\* anomaly; c. Paleoproterozoic Nanying gneiss or its light-colored body, with strong negative Eu/Eu\* anomaly

在较高  $p_{H_2O}$  分压条件下的深熔作用中, 长英质片麻岩的含水熔融过程主要呈溶液状态, 并对 Mg、Ca 优先迁移, 从而造成 Fe (Ti, Al) 与 Mg 组分的分离, 残留的相对富铁组分形成磁铁矿、钛铁矿。此外, 由于  $p_{H_2O}$  的增大导致形成石榴子石所需的温度升高 (Bayon et al., 2006), 因此, 岩石中不易形成石榴子

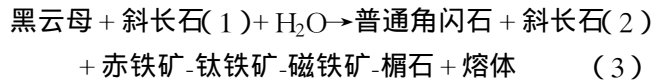
石。接近熔融时 Al、Fe 共同迁移, 一旦发生挥发分的突然离散, 残余组分便形成矽线石、铁-钛金属氧化物 (图 1e、f) 独居石等。

磁铁矿形成过程可能伴随着明显的组分活动和迁移, 在颗粒尺度内体系不封闭, 或者说, 体系仅对部分组分 ( $Al_2O_3$ ,  $FeO-Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ) 封闭, 对其余组分 ( $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $H_2O$ , B, F, Cl) 则是开放的。因组分的明显迁移, 磁铁矿与其形成前的矿物间转变关系不明显, 但磁铁矿形成后的变化较明确, 如磁铁矿边缘云母、长石的出现, 反映了如下时间顺序:



长英质片麻岩中晚期的斜长石则为钠长石净边,  $An$  牌号最低。

另一情形是岩石中含角闪石, 如变中-基性岩或富黑云母片岩中 (图 1a、b、d), 岩石中 Mg 组分较多。如前所述, 阜平杂岩的变质-深熔过程具有较高  $p_{H_2O}$  的分压条件, 从而使得 Mg 组分较为活动, 促使 Mg 组分迁移的关键因素在于有合适的迁移介质条件, 如溶液或熔体的存在, 溶液比熔体粘度小等条件下, 更容易迁移, 且迁移距离较远 (朱永峰, 1996)。黑云母分解后向外迁移的 Mg 组分可形成角闪石, 阜平杂岩片麻岩中常有一定量的角闪石与此相符。尽管 Mg 可能有一定的迁移, 但仍保留有一定的数量, 与 Fe 组分一起形成石榴子石。残留的 Fe、Ti 组分基本沉淀, 且分别形成不同的矿物: 前者为磁铁矿, 后者为钛铁矿或榍石, 从而出现 Mg-Fe-Ti 之间的分异, 即阜平杂岩在变质过程中发生了 Mg、Fe 之间的差异性迁移和分异。根据变质反应结构 (图 2c、d), 应发生了如下物质的变化:

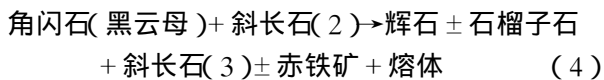


其中斜长石 (1) 为早期与黑云母共生的基质斜长石, 斜长石 (2) 为与角闪石共生的斜长石。熔体结晶形成钾长石 + 石英  $\pm$  斜长石组合, 即浅色体, 此反应实际上代表了有水熔融 (Mogk, 1992)。黑云母  $\rightarrow$  角闪石时 (白云母中亦可有相当数量的 FeO、MgO 组分), 通常情况下, 伴随着 K、Al、Fe 的减少, Ca、Si 的增多, Mg 也减少, 而角闪石的  $Mg/(Mg + Fe)$  原子百分比总是增大, 这可能就是该区片麻岩中易出现磁铁矿、钾长石 (微斜长石) 和角闪石的主要原因。角闪石化时形成斜长石 (2), 比早期斜长石  $An$  牌号



低(表2)。若分解的黑云母较多,新形成的角闪石较少,则易出现磁铁矿、钾长石(微斜长石)和榍石;若角闪石较多,Fe、Ti组分均可被其吸收,不易形成磁铁矿和榍石;上述反应说明本区的脱水并不明显,在长英质片麻岩中不易形成石榴子石。

另外,富水体系中多余的Ti组分难以形成独立的TiO<sub>2</sub>相(金红石),而是形成榍石-CaTi<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>](O, OH, Cl, F)岩石普遍富钾贫钙,磷灰石较少,由黑云母或角闪石分解出的稀土元素(Ce, Y)可形成褐帘石(Ce, Ca, Y)<sub>2</sub>(Al, Fe)<sub>3</sub>[SiO<sub>4</sub>](OH)。因此,变质反应不全是脱水或吸水过程,即使在基本不发生流体迁出或迁入的情况下,亦可发生岩石的变质作用改造。因岩石中出现角闪石,在其形成后的进一步升温过程中,角闪石分解形成辉石和不透明金属氧化物赤铁矿、磁铁矿,后者中可见浑圆状的角闪石包裹体,说明可能有一定程度的脱水反应:



角闪石(可能同时有黑云母)脱水形成斜长石(3),牌号最高,Ti、Ca等组分则形成榍石、褐帘石等。在中-基性岩或富黑云母片岩中常有石榴子石,即为此阶段的反映。

综上所述,在阜平杂岩内,流体较充分的部位容易发生磁铁矿的重结晶;沿剪切带则容易形成矽线石片麻岩等,剪切带附近的黑云片麻岩中最容易发生组分的活化和迁移,残留组分结晶为自形磁铁矿,出现于浅色体或团块状脉体中,其野外和镜下产出状态表明,磁铁矿结晶时没有明显的挤压或剪切,相应的深熔作用主要发生于构造静应力期或略微抬升的过程中,张应力可能占主导地位。即岩石中常量组分的迁移和残留富集形成了一定程度的不透明金属氧化物的集中。因变质-深熔作用的分异程度通常比典型的岩浆作用要低得多,难于出现磁铁矿等矿物的明显集中,变质新生的磁铁矿与变碎屑岩中继承原来的磁铁矿一道,形成较分散、有一定规模的低品位铁矿。

## 6 结 论

根据前面的论述,可得出如下初步认识:

(1)磁铁矿的形成可分为物理重结晶和化学反应2种形式,对于含水体系前者的作用不容忽视,重结晶过程中主要为矿物的加粗,但没有明显的脱水

反应。

(2)阜平杂岩中变质新生的磁铁矿斑晶可出现于很多单元的变基性岩、中性岩、酸性岩和变沉积岩中,而不是局限于特定的单元内,表明磁铁矿的形成不受层位控制,其形成与各单元共同经受的后期变质事件的改造有关。

(3)对于变质反应过程,初期黑云母的转化主要是形成新的含水矿物——角闪石,表明变质反应不全是脱水或吸水过程,即使在基本不发生流体迁出或迁入的情况下,亦可发生岩石的变质作用改造。在有水环境中,黑云母、角闪石的进一步深熔转化形成磁铁矿。

(4)变质反应形成的磁铁矿与岩石中TFe的含量没有必然的联系,关键在于是否有适量的铁组分的迁移和富集。长英质片麻岩在含水熔融过程中Mg、Ca优先迁移,而Fe(Ti, Al)迁移微弱,造成Fe(Ti, Al)与Mg组分的分离,残留的相对富铁组分形成磁铁矿、钛铁矿。

(5)磁铁矿结晶时张应力可能占主导地位,相应的深熔作用主要发生于构造静应力期或略微抬升的过程中,没有明显的挤压或剪切。

志 谢 审稿人对论文的初稿提出了很多建设性的修改意见,国家地质实验测试中心在样品测试过程中给予帮助,在此一并表示感谢。

## References

- Bayon R L, de Capitani C and Frey M. 2006. Modelling phase-assembly diagrams for magnesian metapelites in the system K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: Geodynamic consequences for the Monte Rosa nappe, western Alps[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151: 395-412.
- Cheng Y Q, Yang C H, Wan Y S, Liu Z X, Zhang X P, Du L L, Zhang S G, Wu J S and Gao J F. 2004. Precambrian geology and reconstruction of crustal rocks through anatexis in the central to northern Taihang Mts[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 191p(in Chinese).
- Collins L G. 1969. Regional recrystallization and the formation of magnetite concentrations, Dover magnetite district, New Jersey[J]. *Econ. Geol.*, 64: 17-33.
- Guan H, Sun M, Wilde S A, Zhou X H and Zhai M G. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 113: 1-18.
- Kriegsman L M. 2001. Partial melting, partial melt extraction and par-

- tial back reaction in anatectic migmatites[J]. *Lithos.*, 56: 75-96.
- Lagoeiro L E. 1998. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 415-423.
- Liu S, Pan Y, Xie Q, Zhang J, Li Q and Yang B. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanyang granitic gneisses in the Fuping Complex: Implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 643-658.
- Mogk D W. 1992. Ductile shearing and migmatization at mid-crustal levels in an Archean high grade gneiss belt, northern Gallatin Range, Montana, USA[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 10: 427-438.
- Rutter E H. 1983. Pressure solution in nature, theory and experiment[J]. *Journal of the Geological Society*, 40: 725-740.
- Sang L K. 1993. Quantitative classification in bulk chemistry of metamorphic rocks and the protoliths[J]. *Collection on Mineralogy and Petrology*, 8: 65-74 (in Chinese).
- Tan Y J, Wang F Z and Zhao W X. 1993. The early Precambrian geology of the southern Fuping uplift, Taihang Mountains and discussion of some questions and research methods on Archean geology[M]. Beijing: China Geoscience University Press. 161p (in Chinese).
- Wang R M, He G P, Chen Z Z, Zheng S Y and Geng Y S. 1987. Diagrams in discrimination of metamorphic protoliths[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Wu J S, Geng Y S, Xu H F, Jin L G, He S Y and Sun S W. 1989. Metamorphic geology of Fuping Group[J]. *Bulletin of Institute of Geology, CAGS*, 19: 219p (in Chinese).
- Zhang S G, Jin L G and Xiao Q H. 1983. Structural style and deformational history of the Fuping Archean domal composite fold group[J]. *Regional Geology of China*, (4): 97-110 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X P. 2001. Origin of Pingyang gneissic granite, Fuping, Hebei (dissertation for Doctor degree [D]). Beijing: Chinese Academy of Geological Science (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F and Zhang C Q. 1996. Textures in silicate melt (including the volatile components of the melt) [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 186p (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 程裕淇, 杨崇辉, 万渝生, 刘增效, 张西平, 杜利林, 张寿广, 伍家善, 高吉凤. 2004. 太行山中北段早前寒武纪地质和深熔作用对地壳岩石的改造[M]. 北京: 地质出版社. 191页.
- 桑隆康. 1993. 变质岩岩石化学定量分类与原岩恢复[J]. *矿物岩石学论丛* 8: 65-74.
- 谭应佳, 王方正, 赵温霞. 1993. 太行山阜平隆起南部早前寒武纪地质——兼论太古宙地质若干问题及研究方法[M]. 北京: 中国地质大学出版社. 161页.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社.
- 伍家善, 耿元生, 徐惠芬, 金龙国, 贺绍英, 孙世伟. 1989. 阜平群变质地质[J]. *中国地质科学院地质研究所所刊*, 19: 219页.
- 张寿广, 金龙国, 肖庆辉. 1983. 阜平太古宙穹状复合褶皱群的构造样式及变形史[J]. *中国区域地质* (4): 97-110.
- 张西平. 2001. 河北阜平平阳片麻状花岗岩及其成因(博士论文)[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 朱永峰, 张传清. 1996. 硅酸盐熔体结构学(含岩浆熔体中的挥发性组分)[M]. 北京: 地质出版社. 186页.

<http://www.kcdz.com.cn/>