

冀北赤城红旗营子群黑云斜长片麻岩的 岩石学、地球化学及原岩特征

张 静¹,倪志耀¹,翟明国²,卢俊生³,严 刚¹,孔 旭¹,周 新¹

(1. 成都理工大学 地球科学学院,四川 成都 610059; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029;
3. 中国科学院 研究生院 地球科学学院,北京 100049)

摘 要:冀北赤城红旗营子群黑云斜长片麻岩具斑状变晶结构,变基质为中、细粒鳞片粒状变晶结构,片麻状构造,局部保留有变余砂状结构。岩石主要由斜长石(28%~32%)、石英(35%~40%)、黑云母(18%~25%)及少量石榴石(2%~8%)和石墨(1%~4%)等组成,其变质演化可能是一个降温、降压的过程。黑云斜长片麻岩样品具有较宽的常量元素变化范围,稀土元素含量不是很高且变化较大, ΣREE 介于 $49.45 \times 10^{-6} \sim 140.10 \times 10^{-6}$ 之间,具有轻稀土富集、重稀土平坦的球粒陨石标准化稀土配分模式,轻、重稀土元素比值为5.23~9.16 (La/Yb)_{CN}值为5.07~8.70。大多数样品具中等程度的负Eu异常和不太明显的负Ce异常(Eu/Eu^*)和(Ce/Ce^*)_{CN}值分别为0.63~0.81和0.82~1.01。岩石中Rb、Sr、Cs、Ba、Zr、Hf、Nb、Ta、Th和U等微量元素含量均低于上地壳的平均含量,但Sr/Ba和Th/U值高于上地壳的平均值。红旗营子群黑云斜长片麻岩的地球化学特征表明其原岩应为泥质(或含泥质)砂岩,可能形成于大陆岛弧环境。

关键词:岩石学,地球化学,原岩特征,黑云斜长片麻岩,冀北赤城

中图分类号:P588.34⁺5;P595

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2012)03-0307-16

Petrology, geochemistry and protolith of the biotite plagiogneiss from Hongqiyingsi Group in Chicheng County, northern Hebei Province

ZHANG Jing¹, NI Zhi-yao¹, ZHAI Ming-guo², LU Jun-sheng³, YAN Gang¹,
KONG Xu¹ and ZHOU Xin¹

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth Sciences, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Biotite plagiogneiss samples from Hongqiyingsi Group in Chicheng County of northern Hebei Province have porphyroblastic texture with medium-fine grained lepido-granoblastic groundmass and gneissic structure. Blastopsammitic texture is preserved locally. The rocks mainly consist of plagioclase (28%~32%), quartz (35%~40%) and biotite (18%~25%), with minor garnet (2%~8%, as porphyroblast) and graphite (1%~4%). Garnet compositional characteristics reveal that the temperature and pressure fell contemporaneously during the main metamorphic evolution. All the biotite plagiogneiss samples have wider variation in major components. The total REE values are not very high and vary in the range of $49.45 \times 10^{-6} \sim 140.10 \times 10^{-6}$, displaying LREE-enriched and HREE-flattened patterns with chondrite-normalized (La/Yb)_{CN} of 5.07~8.70 and

收稿日期:2011-09-27;修订日期:2012-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072050 41030316 40472041)

作者简介:张 静(1986-),女,在读硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业,研究方向:大地构造岩石学;通讯作者:倪志耀(1963-),男,教授,博士生导师,E-mail:nizyao@pku.org.cn

LREE/HREE of 5.23~9.16. Most of these samples show intermediate negative Eu anomalies and weak negative Ce anomalies, the chondrite-normalized Eu/Eu^* and Ce/Ce^* values are separately 0.63~0.81 and 0.82~1.01, and the rocks have lower Rb, Sr, Cs, Ba, Zr, Hf, Nb, Ta, Th and U and higher Sr/Ba and Th/U ratios relative to the upper crust. The geochemical characteristics of the biotite plagiogneiss samples from Hongqiyingzi Group suggest that their protolith might have been pelitic (or pelitic-bearing) sandstone and was formed in a tectonic environment similar to the continental island arc. This recognition is important with regard to understanding the tectonic evolution of the central part of the northern margin of the North China Craton.

Key words: petrology; geochemistry; protolith; biotite plagiogneiss; Chicheng County, northern Hebei Province

冀北红旗营子群呈近东西向展布于华北克拉通北缘中段,早期被认为主要是一套变质程度达角闪岩相的火山-沉积变质岩系,岩石类型主要为(石榴)黑云斜长片麻岩和(黑云)斜长角闪岩,另有少量磁铁矿英岩及钙质或泥质大理岩,具有明显的变余层状构造(张春华等,1990;白瑾等,1996)。近几年的研究表明,冀北红旗营子群可能由不同来源的微陆块组成,它们都经历了晚古生代的构造-热事件,是在古生代晚期才拼贴在华北克拉通北缘中段之上的(刘树文等,2007)。笔者的研究成果表明赤城红旗营子群的岩石组合具有自身的特殊性,其岩石类型主要为(石榴)黑云斜长片麻岩,尚有少量(蛇纹石化橄榄)大理岩存在,而分布于其内部的(黑云)斜长角闪岩多呈透镜体产出,走向上延伸不远,应该属于发生强烈退变质的(退变)榴辉岩类(倪志耀等,2004; Ni *et al.*, 2006)。

刘树文等(2007)曾对赤城红旗营子群石榴黑云斜长片麻岩(样号 JB6045)进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年并获得了多个岩浆成因锆石的年龄数据。其中 2 529~2 480 Ma 被解释为黑云斜长片麻岩的岩浆结晶年龄,1 841、1 095 和 399 Ma 等则被看作是后期改造年龄。笔者新近获得的石榴黑云斜长片麻岩(样号 050303 和 050405)中岩浆成因锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄数据介于 369~1 856 Ma 之间(详细成果另文发表),锆石特征显示它们应该是物源区岩浆岩的岩浆结晶年龄。因此,要正确解释石榴黑云斜长片麻岩中岩浆成因锆石年龄数据的地质意义,关键是要明确石榴黑云斜长片麻岩的原岩特征。

基于上述分析,本文拟在详细的野外工作基础上,对赤城红旗营子群(石榴)黑云斜长片麻岩进行较为系统的岩相学和地球化学研究,进而确定黑云斜长片麻岩的原岩类型及其形成时的大地构造环境,以期明确石榴黑云斜长片麻岩中岩浆成因锆

石年龄的地质意义以及冀北不同微陆块的拼贴特征乃至华北克拉通北缘中段大陆地壳演化提供新的岩石学依据。

1 基本地质特征

研究区位于华北克拉通北缘中段,赤城-崇礼断裂带以北的赤城县七里墩、东沟楼、吕河堡、云州、马营、清泉堡和半壁店等地(图 1),区内红旗营子群呈近北西向带状分布,总体走向稳定,倾向近北东,倾角一般为 50°左右,在赤城-崇礼断裂带附近由于受构造影响倾角变大,局部近于直立,同时伴随较强烈的混合岩化现象(图 2a),其脉体主要为眼球状、条带状和透镜状等长英质组分,而基体以(石榴)黑云斜长片麻岩为主,尚有少量退变榴辉岩(斜长角闪岩)存在。另外,云州以南出露的红旗营子群,岩石类型单一,主要为(石榴)黑云斜长片麻岩,尚有少量(蛇纹石化橄榄)大理岩存在。岩石中分布有大量退变榴辉岩和蛇纹岩等无根岩块,它们多呈透镜状或团块状产出,空间上紧密相伴,展布方向往往与区域片麻理方向一致(图 2b);云州以北的红旗营子群,虽有出露,但不太完整,多呈残留体形式存在。

赤城红旗营子群除北西、南东一带被侏罗系地层覆盖外,主要与“花岗片麻岩”(样墩片麻岩和西栅子片麻岩等)呈断层接触。这些所谓的“花岗片麻岩”其实都是花岗岩类,后期的变形变质才使其转变为碎裂花岗岩、花岗碎裂岩、糜棱岩和花岗片麻岩等。这些岩石似乎不应是典型区域变质作用的产物,可能是赤城红旗营子群整体构造侵位造成的。此外,研究区尚分布有印支期冰山梁花岗岩体以及燕山期红墩梁、东沟楼和舍身崖等花岗岩体,它们主要侵位于红旗营子群及其周围花岗片麻岩之中,局部被侏罗系地层所覆盖。

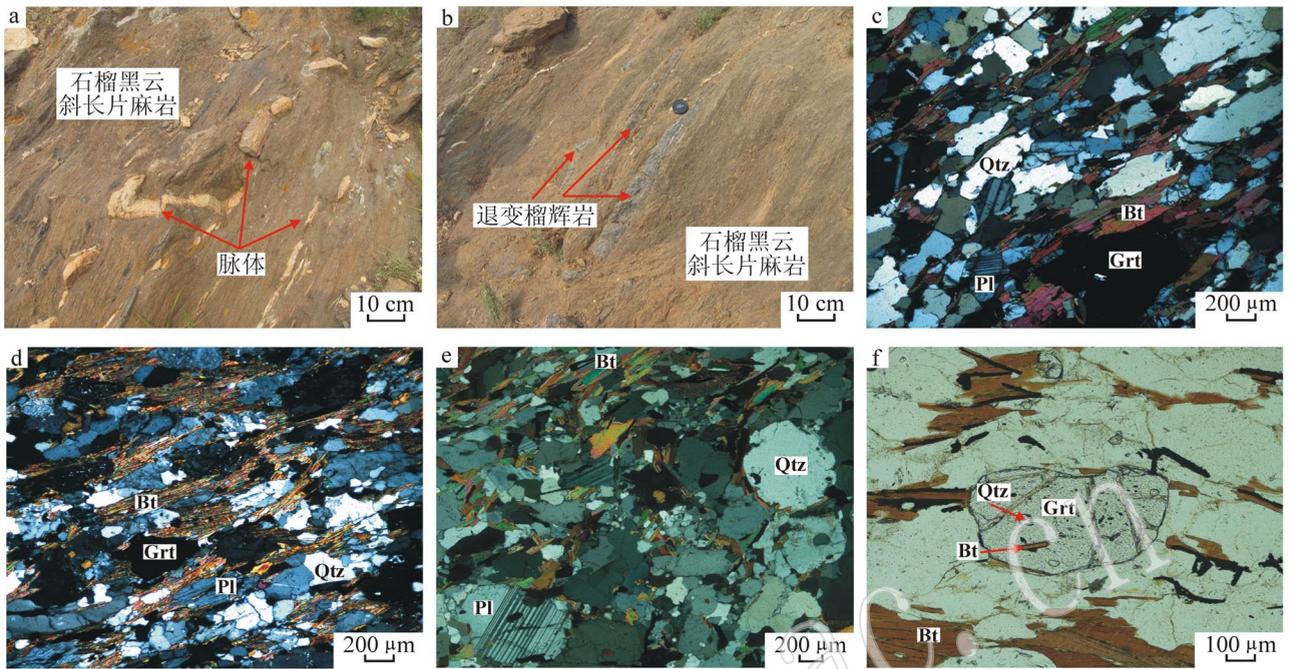


图 2 赤城红旗营子群黑云斜长片麻岩的宏观(a, b)与微观(c, d, e, f)特征

Fig. 2 Macroscopic (a, b) and microcosmic (c, d, e, f) characteristics of biotite plagiogneiss from Hongqiyingzi

Group in Chicheng County

a—黑云斜长片麻岩的混合岩化现象, 二堡子; b—黑云斜长片麻岩中的退变榴辉岩透镜体, 七里墩; c—石榴黑云斜长片麻岩, 主要由石英(Qtz)、斜长石(Pl)、黑云母(Bt)及少量石榴石(Grt)组成, 片麻状构造, 正交偏光, 样号 072401, 水沟; d—石榴黑云斜长片麻岩, 主要由石英、斜长石、黑云母及少量石榴石组成, 片麻状构造, 正交偏光, 样号 072906, 大榆沟; e—石榴黑云斜长片麻岩中的变余斜长石和变余石英, 正交偏光, 东沟, 样号 072807; f—石榴石颗粒中的石英、黑云母包体, 单偏光, 东沟, 样号 072807

a—migmatization of biotite plagiogneiss, Erbuzi; b—retrograded eclogite tectonic lenses within biotite plagiogneiss, Qilidun; c—garnet-biotite plagiogneiss with gneissic structure, consisting mainly of quartz (Qtz), plagioclase (Pl) and biotite (Bt) with minor garnet (Grt) in sample 072401 (crossed nicols), Shuigou; d—garnet-biotite plagiogneiss with gneissic structure, consisting mainly of quartz, plagioclase and biotite with minor garnet in sample 072906 (crossed nicols), Dayugou; e—relict plagioclase and quartz within garnet-biotite plagiogneiss in sample 072807 (crossed nicols), Donggou; f—quartz and biotite inclusions within garnet in sample 072807 (plainlight), Donggou

Donggou; f—quartz and biotite inclusions within garnet in sample 072807 (plainlight), Donggou

磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石等。

斜长石(28%~35%),灰白色,新鲜者无色透明,半自形板柱状,部分为不规则粒状,正低突起,聚片双晶发育。颗粒大小不等,一般为0.05 mm×0.15 mm~0.8 mm×1.0 mm,偶见大于2 mm的变余斜长石(图2e)。斜长石成分变化不大,主要为An=36.5~44.2的中长石。大榆沟黑云母斜长片麻岩中斜长石的Ab含量特高(Ab=98.9,样号072906),应为钠长石。

石英(30%~38%),无色、浅灰色,他形粒状,油脂光泽,常被压扁拉长成透镜状或不规则状。薄片多具波状消光,大小一般为0.05~0.8 mm,大的透镜体可达0.4×2.5 mm左右。

黑云母(18%~25%),黑色,片状,集合体为鳞

片状。具棕褐色~浅黄色的多色性,部分颗粒有微弱绿泥石化现象。颗粒大小介于0.02 mm×0.1 mm~0.5 mm×1.8 mm之间,常断续定向分布而形成片麻状构造。黑云母成分变化较大,除大榆沟和水沟黑云斜长片麻岩中黑云母分别具有最高和最低的MgO含量(分别为15.28%~16.17%和7.78%,分属高镁和高铁黑云母)外,其他产地黑云母的成分可分为两组:吕和堡、七里墩和东沟楼等地黑云母的MgO含量介于10.31%~11.77%之间,属于高镁黑云母,而东沟和庙沟等地黑云母的MgO含量则相对较低,介于9.25%~9.69%之间,属于高铁黑云母(图3a)。另外,黑云母颗粒的核部与边部的成分有一定的变化,但其变化规律性不太明显(表1)。

石榴石(2%~8%),暗褐色,薄片为无色至浅

续表 1
Continued Table 1

样品号 矿物	072803 (东沟楼)				072807 (东沟)				072906 (大榆沟)				072907 (唐沟)				082004 (七里墩)					
	C	R	Bt	PI	Grt	R	Bt	PI	Grt	R	Bt	PI	Grt	C	R	Bt	PI	Grt	C	R	Bt	PI
SiO ₂	40.44	39.64	36.68	58.99	37.85	35.67	56.93	66.80	36.99	36.24	36.24	56.08	39.76	38.07	36.62	36.74	56.96	39.76	38.07	36.62	36.74	56.96
TiO ₂	0.03	0.00	2.78	0.00	0.00	2.82	0.01	0.01	3.07	2.81	3.07	0.00	0.23	0.00	2.26	2.54	0.03	0.23	0.00	2.26	2.54	0.03
Al ₂ O ₃	21.37	21.18	16.29	25.06	21.83	19.36	26.56	17.71	17.18	17.76	19.55	27.02	21.86	21.62	16.71	16.38	25.37	21.86	21.62	16.71	16.38	25.37
FeO	24.60	27.35	19.09	0.00	31.04	18.96	0.08	26.97	22.06	21.76	0.08	18.40	24.89	26.39	18.33	18.86	0.27	24.89	26.39	18.33	18.86	0.27
MnO	0.62	3.37	0.07	0.00	2.90	0.06	0.03	6.28	0.22	0.19	0.00	0.20	0.53	3.30	0.07	0.08	0.00	0.53	3.30	0.07	0.08	0.00
MgO	5.50	3.69	11.51	0.00	3.55	9.69	0.00	3.30	16.17	15.28	0.01	9.46	6.38	3.55	11.72	11.77	0.00	6.38	3.55	11.72	11.77	0.00
CaO	7.63	4.78	0.00	8.39	2.53	0.00	8.61	6.35	0.06	0.10	0.15	0.05	6.94	5.48	0.00	8.69	0.00	6.94	5.48	0.00	8.69	0.00
Na ₂ O	0.01	0.05	0.39	7.53	0.00	0.20	7.22	11.73	0.09	0.06	11.73	0.18	0.05	0.05	0.29	0.03	7.12	0.05	0.05	0.29	0.03	7.12
K ₂ O	0.02	0.00	9.17	0.05	0.00	9.33	0.13	0.01	2.70	3.34	0.07	9.55	0.04	0.00	8.96	9.06	0.05	0.04	0.00	8.96	9.06	0.05
总和	100.22	100.06	95.98	100.02	99.70	96.09	99.57	93.06	92.73	93.06	98.40	95.08	100.68	98.46	94.96	95.46	98.49	100.68	98.46	94.96	95.46	98.49
Si	3.137	3.139	5.536	2.642	3.029	5.363	2.570	2.891	5.023	4.999	2.971	5.614	3.057	3.056	5.554	5.547	2.599	3.057	3.056	5.554	5.547	2.599
Ti	0.002	0.000	0.316	0.000	0.000	0.319	0.000	0.248	0.216	0.248	0.000	0.350	0.013	0.000	0.258	0.288	0.001	0.013	0.000	0.258	0.288	0.001
Al	1.952	1.975	2.896	1.322	2.057	3.428	1.412	1.975	3.090	3.210	1.024	3.193	1.979	2.044	2.985	2.912	1.364	1.979	2.044	2.985	2.912	1.364
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.278	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.596	1.811	2.410	0.000	2.077	2.384	0.003	1.484	2.846	2.801	0.003	2.335	1.600	1.772	2.325	2.381	0.010	1.600	1.772	2.325	2.381	0.010
Mn	0.041	0.226	0.009	0.000	0.197	0.008	0.001	0.415	0.029	0.025	0.000	0.026	0.035	0.224	0.009	0.010	0.000	0.035	0.224	0.009	0.010	0.000
Mg	0.636	0.436	2.590	0.000	0.423	2.172	0.000	0.384	3.719	3.506	0.001	2.140	0.731	0.425	2.650	2.649	0.000	0.731	0.425	2.650	2.649	0.000
Ca	0.634	0.406	0.000	0.403	0.217	0.000	0.416	0.531	0.010	0.016	0.007	0.008	0.572	0.471	0.000	0.425	0.000	0.572	0.471	0.000	0.425	0.000
Na	0.002	0.008	0.114	0.654	0.000	0.058	0.632	0.041	0.027	0.018	1.012	0.053	0.007	0.008	0.085	0.088	0.630	0.007	0.008	0.085	0.088	0.630
K	0.000	0.000	1.766	0.003	0.000	1.790	0.007	0.531	0.531	0.656	0.004	1.849	0.000	0.000	1.734	1.745	0.003	0.000	0.000	1.734	1.745	0.003
总和	8.000	8.000	15.637	5.024	8.000	15.522	5.041	8.000	15.491	15.479	5.022	15.446	8.000	8.000	15.600	15.620	5.032	8.000	8.000	15.600	15.620	5.032
Or				0.3			0.7				0.4						0.8					0.3
Ab				61.7			59.9				98.9						55.8					59.5
An				38.0			39.4				0.7						43.4					40.2
Grs	21.82	14.09			7.44			4.07					19.15	16.30								
Prp	21.88	15.13			14.53			13.65					24.89	14.67								
Alm	54.90	62.92			71.28			52.71					54.48	61.26								
Sps	1.40	7.86			6.75			14.76					1.18	7.76								
And	0.00	0.00			0.00			14.81					0.00	0.00								
Fe-Bt			0.48		0.52			0.43	0.43	0.44		0.52	0.54			0.47					0.47	
Mg-Bt			0.52		0.48			0.57	0.57	0.56		0.48	0.46			0.53					0.53	

注: 电子探针结果数据单位为 wt% / %, 在核工业北京地质研究院电子探针室(JEOL-JXA 8100 型电子探针仪)进行波谱分析, ZAF 法修正。工作条件: 加速电压 20 kV, 束斑电流 10 nA, 束斑直径 1 μm; 所用标样为美国 SPI 公司矿物标样。其中, C 和 R 为分析矿物颗粒的核部和边部成分; 石榴石端员组分计算根据 Rickwood(1968)方法, Fe³⁺ 根据电价差值法求得, Grs、Prp、Alm、Sps 和 And 分别为石榴石中钙铝榴石、铁铝榴石、镁铝榴石、铁铝榴石和钙铁榴石等端员组分; Or、Ab 和 An 分别为斜长石中钾长石、钠长石和钙长石等端员组分; Fe-Bt 和 Mg-Bt 分别为黑云母的 Fe²⁺ / (Fe²⁺ + Mg) 和 Mg / (Mg + Fe²⁺) 值。

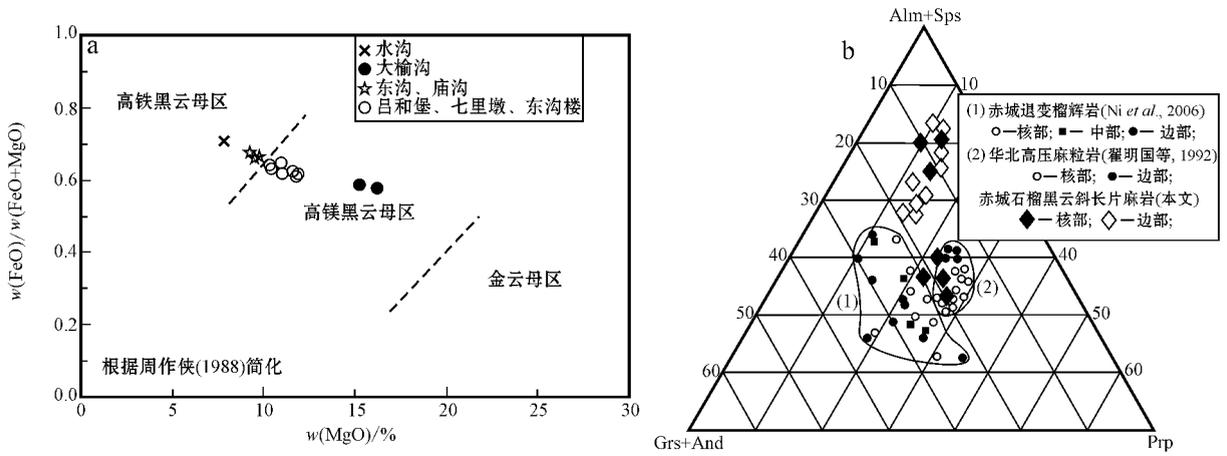


图3 黑云斜长片麻岩中黑云母(a)和石榴石(b)的成分特点

Fig. 3 Mineral composition of biotite (a) and garnet (b) from biotite plagiogneiss

玫瑰红色。自形~半自形粒状,部分呈集合体产出。分布不均匀,颗粒大小一般为0.3~1 mm,小者仅为0.05~0.35 mm,大者则介于0.5~1 mm之间(个别呈透镜状,大小为3 mm×1.6 mm),部分集合体可达5 mm左右。多为变斑晶,颗粒内部裂纹较发育,大多包含有黑云母、斜长石、石英、锆石及石墨等矿物(图2f)。岩石中石榴石主要由铁铝榴石(49.15%~71.28%)、钙铝榴石(4.07%~21.82%)和镁铝榴石(9.91%~27.08%)等组成,另含不等量的锰铝榴石(0.62%~14.76%)及少量的钙铁榴石(大多为0.00%~3.22%,个别可达14.81%)。其中,七里墩和东沟楼两地石榴石具有明显的成分环带,自颗粒核部到边部,钙铝榴石和镁铝榴石含量降低,而铁铝榴石和锰铝榴石含量则相应升高,显示出降温、降压的特点(Enami, 1998; Carswell *et al.*, 2000)表1);吕和堡和水沟两地石榴石成分的变化规律性在表1中不太明显,但从吕和堡石榴石颗粒的成分剖面(图4a、图5样号050303)来看,该地石榴石的成分环带所显示的降温、降压特点还是比较清楚的,而东沟(样号072807)和水沟(样号072401)两地石榴石的边部则具有较低的钙铝榴石含量且成分环带不明显(表1、图4b、图5)。另外,大榆沟石榴石具有最低的钙铝榴石含量(4.07%)和最高的钙铁榴石含量(14.81%)。结合其岩相学和矿物化学特征,大榆沟样品072906具有明显的变晶糜棱岩特征,黑云母有明显的绿泥石化现象,具黄色~浅黄色多色性(图2d),斜长石(富Na₂O, Ab为98.9)和黑云母(富MgO,为15.28%~16.17%)的成分特点表明此处

黑云斜长片麻岩可能受到后期构造事件作用的影响。因此,大榆沟黑云斜长片麻岩中石榴石成分的具有其特殊性。

与赤城退变榴辉岩(Ni *et al.*, 2006)和华北高压麻粒岩(翟明国等, 1992)相比,赤城黑云斜长片麻岩中石榴石的成分具有自身的特点(图3b)。其石榴石颗粒的核部和边部成分均较赤城退变榴辉岩贫CaO(Grs+And)(图3b),显示其形成压力要低于后者。另外,吕和堡、七里墩和东沟楼等地石榴石的核部成分与华北高压麻粒岩的石榴石成分相当,但其边部MgO含量(Prp)则明显低于后者;水沟、东沟和大榆沟等地石榴石核部和边部的MgO含量均低于华北高压麻粒岩的石榴石的MgO含量,显示其形成温度要低于后者。因此,赤城红旗营子群石榴黑云斜长片麻岩中石榴石的成分明显不同于赤城退变榴辉岩和华北高压麻粒岩。

石榴黑云斜长片麻岩中石榴石的成分变化具有一定的规律性。总的来说,随着石榴石中镁铝榴石(Prp)含量的升高,钙铝榴石(Grs)含量随之增加,而铁铝榴石(Alm)和锰铝榴石(Sps)含量则同步降低(图6),这一特征表明温度和压力在石榴石形成过程中是同步变化的。但是对具体的石榴石颗粒而言,不同产地黑云斜长片麻岩中石榴石的成分环带则是不同的。在退变榴辉岩岩块较集中的吕和堡地区,从石榴石颗粒(样号050303)的核部到边部,CaO含量明显降低,MgO含量也是同时降低的,但其明显程度不及CaO且两侧的降低程度不等。MgO和CaO的最大值出现在石榴石颗粒的近中部。另外,MnO

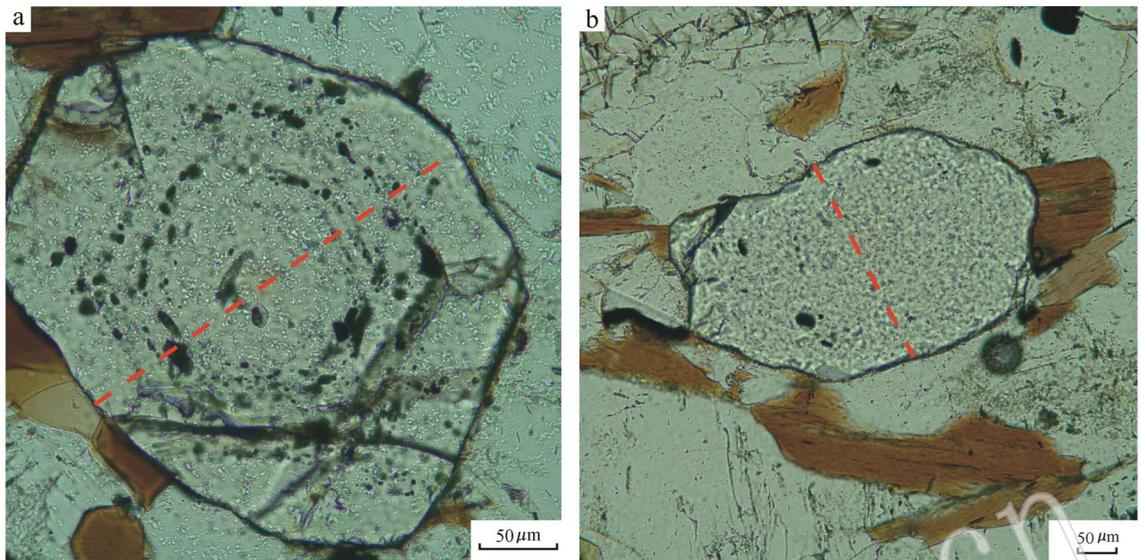


图 4 石榴石图像与电子探针剖面线示意图

Fig. 4 Profile line for garnet from samples 050303 and 072807 in biotite plagiogneiss

a—样品 050303 的石榴石探针剖面线, 单偏光, 吕和堡; b—样品 072807 的石榴石探针剖面线, 单偏光, 东沟

photomicrograph of garnet showing compositional profile line in samples 050303 (a, plainlight, Lühebu) and 072807 (b, plainlight, Donggou)

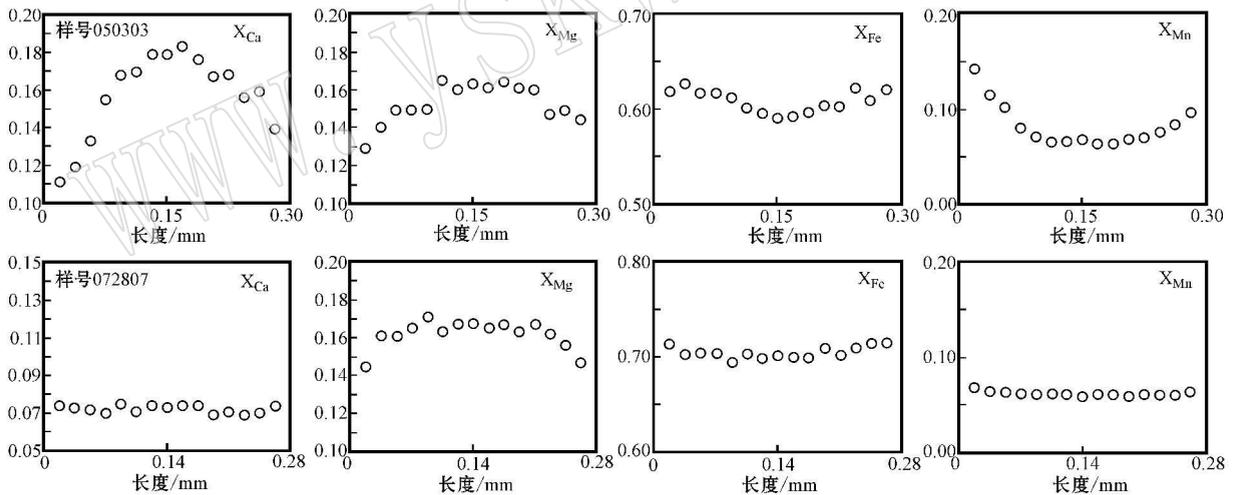
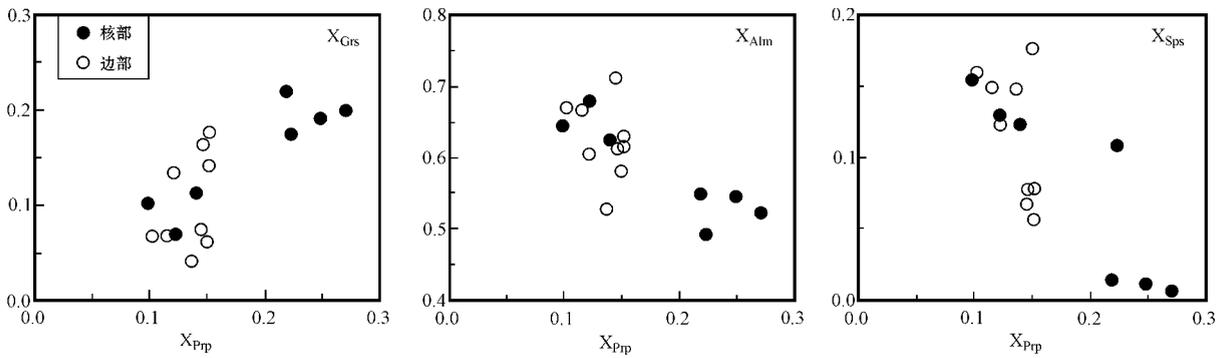


图 5 黑云斜长片麻岩中石榴石颗粒的成分剖面(050303 为吕和堡石榴黑云斜长片麻岩;072807 为东沟石榴黑云斜长片麻岩)

Fig. 5 Compositional profile for garnet from samples 050303 (Lühebu) and 072807 (Donggou) in biotite plagiogneiss

含量在颗粒核部最低, 向外逐渐升高, 但两侧的升高幅度不等。FeO 含量变化特征与 MnO 相似, 不同之处在于颗粒最边部 FeO 的含量有所降低。吕和堡黑云斜长片麻岩中石榴石颗粒的成分特征应为典型的降温、降压石榴石环带特征(Enami, 1998; Carswell *et al.*, 2000), 且压力降低较温度下降要快些(图 5); 在退变榴辉岩岩块较少的东沟一带, 石榴石颗粒

(样号 072807)的成分环带不太明显, 除 MgO 含量自颗粒核部到边部有一定程度降低外, CaO、FeO 和 MnO 等含量基本不变(图 5), 反映出该地区的黑云斜长片麻岩中石榴石主要显示降温的成分环带特征, 压力基本不变。上述两地石榴石颗粒成分环带的差异性是否与退变榴辉岩的变质演化有关有待于后续工作来进一步明确。

图6 黑云斜长片麻岩中石榴石 X_{Prp} 与 X_{Grs} 、 X_{Alm} 和 X_{Sps} 相关图Fig. 6 Correlation between X_{Prp} and X_{Grs} , X_{Alm} , X_{Sps} in garnet from biotite plagiogneiss

3 地球化学特征

3.1 分析方法

选取合适的黑云斜长片麻岩样品,经薄片鉴定为新鲜、无蚀变后,用清水清洗、晾干,在河北省廊坊市河北省区域地质调查大队实验室无污染破碎至200目以下,然后在核工业北京地质研究院分析测试中心进行样品处理和测试。

常量元素含量用XRF方法测定,所用仪器为飞利浦(Philips)公司生产的PW2404 X射线荧光光谱仪(XRF),采用国标GBW07103和GBW07104作为标样,工作条件为30 mA和100 kV,分析精度在1%以内。样品烧失量用称重法完成。在分析测试前,先取200目以下岩石粉末(0.6 g)与4 g四硼酸锂和2 g偏硼酸锂混合均匀后,并在铂金坩埚内于1 050℃下熔化成玻璃薄片。

微量元素和稀土元素的含量用ICP-MS方法测定,所用仪器为德国Finnigan-MAT公司生产的ELEMENT I高分辨电感耦合等离子体质谱仪,采用国标GBW 07106和GBW 07312作为标样,每分析10个样品测量一次标样和1个重复样,一般微量元素测量的精度在5%以内。在分析测试前,精确称量岩石粉末50 mg,加入1 mL HNO_3 和3 mL HF后,在高压罐内加温到200℃,溶解16 h。消解透亮后加0.5 mL $HClO_4$,然后蒸干样品至白烟冒尽,再加入5 mL(1+1) HNO_3 并在密闭条件下加热1 h。最后,样品用去离子水稀释到50 mL。ICP-MS测定的具体流程可参见Xie等(1994)以及其他作者的相关文章。

3.2 分析结果

3.2.1 主量元素

赤城红旗营子群黑云斜长片麻岩不同岩石样品的主量元素含量变化较大(表2), SiO_2 为58.47%~75.12%, Al_2O_3 为9.56%~14.43%, TiO_2 为0.80%~1.59%, FeO 为4.56%~8.45%, MgO 为1.74%~5.53%。岩石中CaO含量较高,所有样品均大于2%。 K_2O 和 Na_2O 的含量变化具有一定的规律性,东沟楼和大榆沟的样品 K_2O 含量高于 Na_2O , K_2O/Na_2O 为1.09~1.68;而其他产地样品 K_2O 含量则低于 Na_2O , K_2O/Na_2O 为0.68~0.98。另外,除个别样品(样号072907)的 Al_2O_3/SiO_2 值(0.13)较低外,其他样品的 Al_2O_3/SiO_2 值(0.20~0.24)变化不大。同样,在不考虑庙沟样品(样号072907)的情况下,随岩石中 SiO_2 含量的增加, MgO、CaO、FeO 和 Fe_2O_3 等氧化物的含量明显降低, TiO_2 和 Al_2O_3 的含量变化不大,而 Na_2O 和 K_2O 的含量则明显升高(图7),反映了赤城红旗营子群黑云斜长片麻岩岩石化学成分的演化特点。

3.2.2 稀土元素

赤城红旗营子群黑云斜长片麻岩的稀土元素含量不是很高,但变化较大(表2), ΣREE 介于 49.45×10^{-6} ~ 140.10×10^{-6} 之间,轻稀土元素富集,轻、重稀土元素比值为5.23~9.16 (La/Yb) $_{CN}$ 值则为5.07~8.70。球粒陨石标准化稀土配分曲线基本一致,都作向右倾斜,具有轻稀土富集、重稀土平坦的特点,并且绝大多数样品具有中等程度的负Eu异常(Eu/Eu^*) $_{CN}$ 值为0.63~0.81,这与显生宙沉积岩的稀土配分模式十分相似(Taylor, 1979)(图8a)。个别样品(样号072707)具明显的正Eu异常(Eu/Eu^*) $_{CN}$ 为1.43。考虑到其稀土总量(49.45×10^{-6})

表 2 黑云斜长片麻岩的主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)含量及相关参数Table 2 Major element ($w_B/\%$), trace element ($w_B/10^{-6}$) content and related parameters of biotite plagiogneiss

样号	050303	050405	072707	072401	072803	072807	072906	072907	平均值
产地	吕和堡	七里墩	七里墩	水沟	东沟楼	东沟	大榆沟	庙沟	
SiO ₂	61.07	58.47	66.70	65.58	59.39	63.59	62.29	75.12	66.66
TiO ₂	1.09	1.04	0.93	0.80	0.90	0.93	0.90	0.82	0.97
Al ₂ O ₃	12.65	13.05	13.02	13.37	13.96	14.43	12.45	9.56	13.35
Fe ₂ O ₃	7.50	8.07	2.62	1.60	2.96	1.64	3.61	2.56	3.99
FeO	1.36	0.63	3.16	4.55	4.78	4.92	4.02	2.15	3.33
MnO	0.17	0.14	0.09	0.11	0.09	0.10	0.14	0.08	0.12
MgO	4.08	5.53	2.42	1.86	4.94	2.40	3.81	1.74	3.50
CaO	4.87	4.88	2.94	2.99	3.45	3.48	2.02	2.31	3.51
Na ₂ O	1.85	1.75	2.60	3.00	1.43	2.55	2.31	1.41	2.20
K ₂ O	1.27	1.61	2.44	2.40	2.40	2.50	2.51	1.86	2.21
P ₂ O ₅	0.13	0.21	0.17	0.15	0.16	0.16	0.13	0.10	0.16
烧失量	3.44	4.22	2.08	2.86	4.52	2.34	4.82	1.44	
总量	99.48	99.60	99.17	99.27	98.98	99.04	99.01	99.15	100.00
FeO	8.45	8.27	6.21	5.68	7.88	6.62	7.72	4.56	6.92
Fe ₂ O ₃	9.39	9.19	6.90	6.31	8.75	7.35	8.57	5.06	7.69
DF	-3.76	-4.66	-1.51	-0.35	-5.10	-0.92	-3.97	-4.64	-3.11
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.21	0.22	0.20	0.20	0.24	0.23	0.20	0.13	0.20
K ₂ O/Na ₂ O	0.68	0.92	0.80	0.94	1.68	0.98	1.09	1.32	1.00
La	19.01	20.61	10.82	16.61	28.01	28.41	19.82	20.52	20.48
Ce	35.42	38.72	16.71	32.81	55.51	56.41	40.61	44.11	40.04
Pr	4.92	6.12	2.55	4.11	6.82	6.91	4.91	5.09	5.18
Nd	18.51	24.61	9.33	15.22	24.41	25.01	17.92	17.62	19.08
Sm	3.85	5.12	1.71	2.81	4.39	4.72	3.28	3.13	3.63
Eu	0.98	1.06	0.84	1.01	1.16	1.25	0.87	0.81	1.00
Gd	4.22	5.03	1.86	2.89	4.35	4.81	3.52	2.91	3.70
Tb	0.68	0.74	0.29	0.42	0.62	0.74	0.56	0.42	0.56
Dy	4.08	4.28	1.83	2.74	3.66	4.52	3.51	2.46	3.39
Ho	0.87	0.91	0.44	0.58	0.77	0.96	0.75	0.51	0.72
Er	2.65	2.59	1.33	1.75	2.29	2.86	2.24	1.58	2.16
Tm	0.39	0.39	0.20	0.27	0.33	0.42	0.33	0.24	0.32
Yb	2.53	2.35	1.32	1.77	2.18	2.65	2.19	1.59	2.07
Lu	0.39	0.38	0.22	0.27	0.34	0.43	0.36	0.25	0.33
ΣREE	98.50	112.91	49.45	83.26	134.84	140.10	100.87	101.24	102.65
LREE/HREE	5.23	5.77	5.60	6.79	8.27	7.06	6.49	9.16	6.75
(Eu/Eu*) _{CN}	0.74	0.63	1.43	1.07	0.80	0.80	0.78	0.81	0.83
(Ce/Ce*) _{CN}	0.86	0.82	0.74	0.93	0.94	0.94	0.96	1.01	0.91
(La/Yb) _{CN}	5.07	5.91	5.53	6.33	8.66	7.23	6.10	8.70	6.66
(Eu/Eu*) _{NN}	1.06	0.92	2.06	1.55	1.16	1.15	1.12	1.18	1.19
(Ce/Ce*) _{NN}	0.80	0.75	0.69	0.86	0.87	0.88	0.90	0.94	0.85
(La/Yb) _{NN}	0.73	0.85	0.79	0.91	1.24	1.04	0.88	1.25	0.96
Rb	66.01	64.60	77.80	78.41	83.71	97.41	96.42	69.43	70.97
Sr	159.02	169.01	280.01	267.00	318.12	244.01	252.11	177.02	233.29
Cs	3.21	2.46	1.78	1.82	3.51	6.76	1.59	1.97	2.89
Ba	179.01	239.00	612.00	433.01	599.11	493.10	432.12	489.12	434.56
Zr	27.00	42.01	22.31	13.61	53.00	97.61	23.00	19.21	37.22
Hf	0.86	1.25	0.64	0.38	1.51	2.75	0.65	0.54	1.07
Nb	12.30	12.91	14.01	13.31	13.30	14.71	10.81	11.31	12.83
Ta	0.90	0.84	0.86	0.81	0.85	1.01	0.57	0.72	0.82
U	0.56	0.67	2.01	1.62	1.11	1.93	0.78	0.55	1.15
Th	6.05	6.27	9.97	8.71	9.81	10.11	6.96	8.01	8.24
Y	22.71	22.30	11.61	14.81	19.51	24.42	19.52	12.91	18.47
Th/U	10.80	9.36	4.96	5.38	8.84	5.24	8.92	14.56	7.17
Sr/Ba	0.89	0.71	0.46	0.62	0.53	0.49	0.58	0.36	0.54
Hf/Ta	0.96	1.49	0.74	0.47	1.78	2.72	1.14	0.75	1.31
Zr/Ta	30.00	50.01	25.94	16.80	62.35	96.64	40.35	26.68	45.39

注:① 主量元素由核工业北京地质研究院分析测试研究中心 XRF 分析,微量元素由核工业北京地质研究院分析测试研究中心 ICP-MS 分析;② FeO 和 Fe₂O₃ 为所有的铁氧化物分别换算成 FeO 和 Fe₂O₃;③ DF = 10.44 + 0.55CaO + 1.46Na₂O + 0.54K₂O - 0.21SiO₂ - 0.32Fe₂O₃ - 0.98MgO (Shaw, 1972);④ 主量元素相关参数的平均值为去烧失量后的计算值;⑤ 下标 CN 和 NN 分别表示球粒陨石(Boynton, 1984)和北美页岩(Haskin *et al.*, 1968)标准化值;⑥ 相关参数的平均值系根据各元素含量的平均值计算而成。

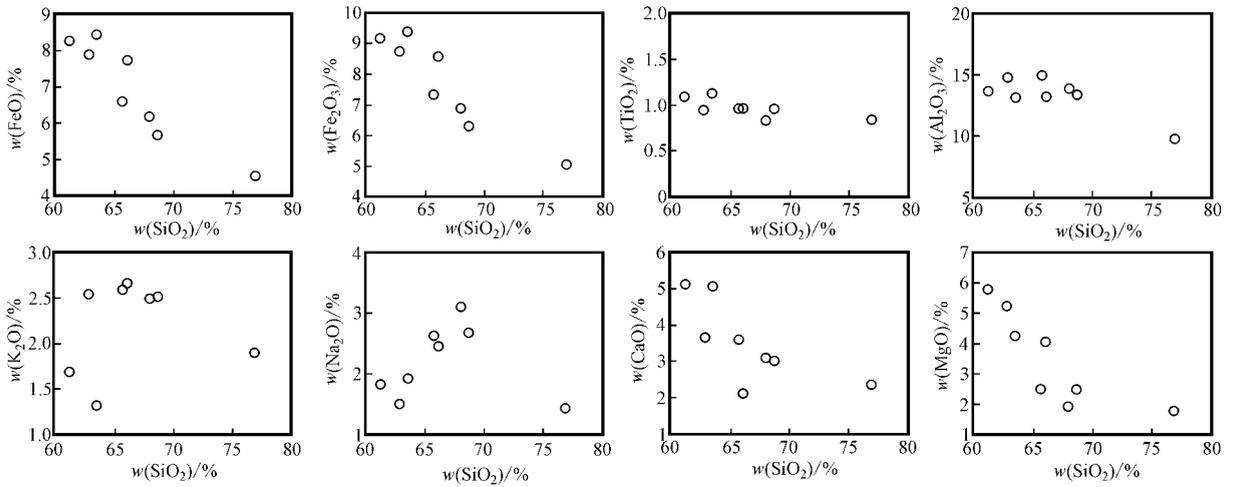


图 7 黑云斜长片麻岩的 SiO₂与主要氧化物的相关图

Fig. 7 Correlogram between SiO₂ and main oxides in biotite plagiogneiss

最低且与下地壳的稀土总量和正 Eu 异常值相近 (Taylor, 1979), 故该样品较高的正 Eu 异常值似乎与源区岩石类型有关, 也即原岩中可能含有较多的太古宙岩浆岩组分 (赵振华, 1993) 结合样品 072707 的岩相学特征, 此处的正 Eu 异常可能与长石含量的增加与石榴石含量的减少有关。另外, 在北美页岩标准化 (NASC) 的稀土配分模式 (图 8b) 上, 黑云斜长片麻岩样品具有较平缓的配分曲线 (La/Yb)_{NN} 值为 0.73~1.25, 具有一定程度的负 Ce 异常和正 Eu 异常 (Ce/Ce*)_{NN} 和 (Eu/Eu*)_{NN} 值分别为 0.69~0.94 (平均 0.85) 和 0.92~2.06 (平均 1.19), 且与北美页岩的比值均小于 1, 表明黑云斜长片麻岩样品

具有不同于北美页岩的稀土元素特征。另外, 随着岩石中 SiO₂ 含量的增加, ΣREE 具有明显的降低趋势 (图 9)。

3.2.3 微量元素

Rb, Sr, Cs 和 Ba 等大离子亲石元素, 除 Sr 和 Ba 含量均低于上地壳和下地壳的平均值 (Wedepohl, 1995, 下同) 外, Rb, Cs 两元素含量较下地壳高, 但较上地壳的平均含量低; Zr, Hf, Nb 和 Ta 等高场强元素, 除 Zr 和 Hf 含量均低于上地壳和下地壳的平均值外, Nb 含量低于上地壳而大多高于下地壳, Ta 含量低于上地壳而与下地壳含量相差不大; 放射性元素 Th 和 U 含量均低于上地壳。另外, Y 含量低于

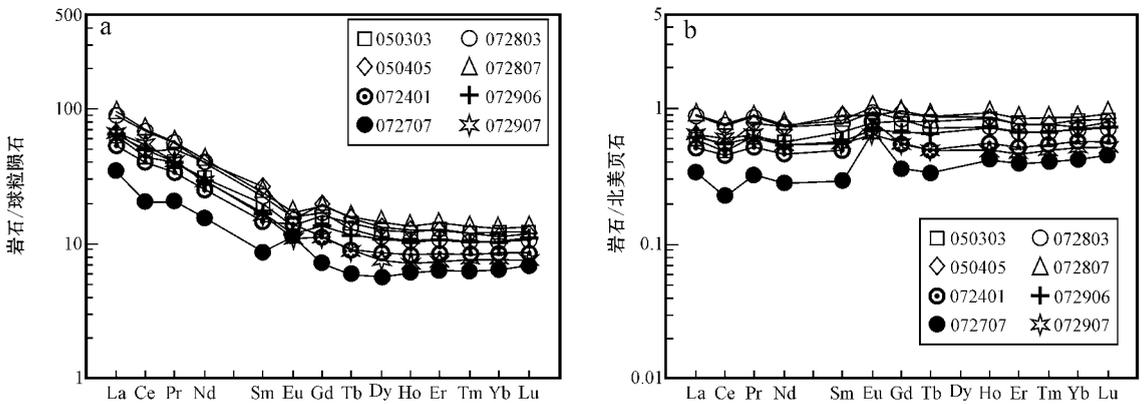


图 8 黑云斜长片麻岩的稀土元素配分模式

Fig. 8 Chondrite- and NASC-normalized REE patterns of biotite plagiogneiss

球粒陨石标准化值据 Boynton (1984); 北美页岩标准化值据 Haskin 等 (1968)

normalizing values of chondrite after Boynton (1984) and North American Shale Composite (NASC) after Haskin *et al.* (1968)

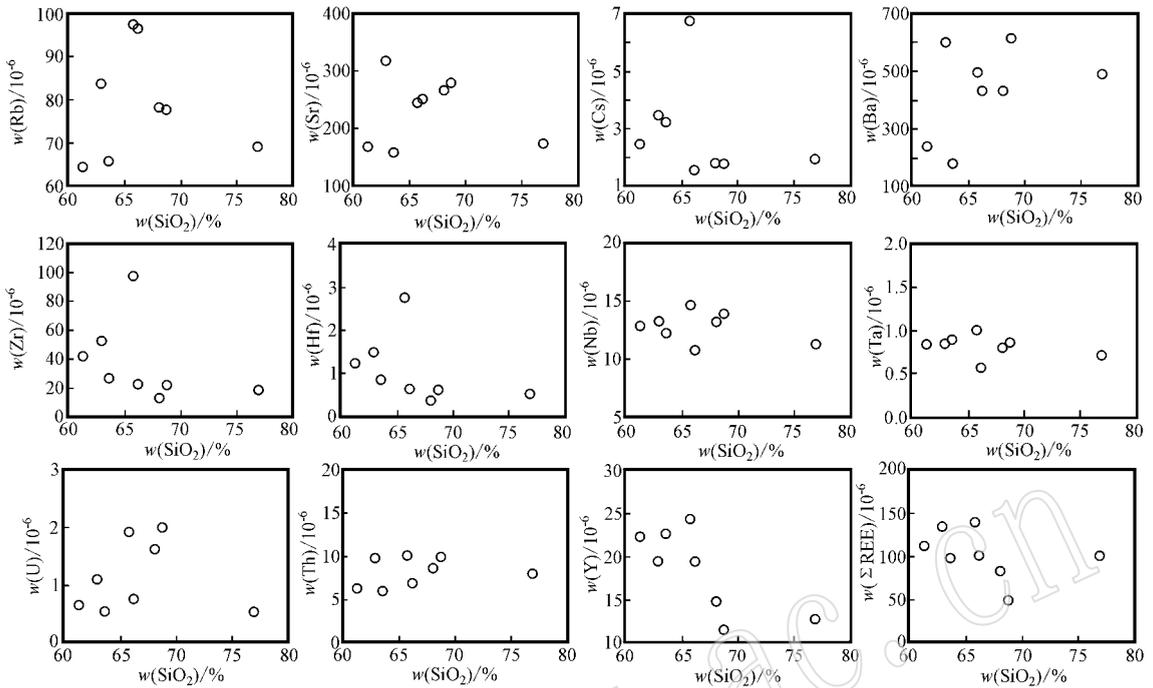


图 9 黑云斜长片麻岩的 SiO_2 与某些微量元素的相关图

Fig. 9 Correlation between SiO_2 and some trace elements in biotite plagiogneiss

下地壳,其与上地壳含量之间的相对高低关系不明显。还有,岩石的 Sr/Ba 值大多为 0.46~0.89,仅个别样品为 0.36,高于上地壳平均值(0.47); Th/U 值为 4.96~14.56,也高于上地壳平均值(4.12)。

岩石中各种微量元素与 SiO_2 含量具有一定的相关性。随着岩石中 SiO_2 含量的增加, Zr 、 Hf 、 Nb 、 Ta 和 Y 等元素的含量相应增加,而 Th 含量基本不变,其他元素的变化规律不明显(图 9)。另外,亲石元素 Rb 、 Sr 、 Cs 、 Ba 和放射性元素 U 、 Th 与岩石中 K_2O 含量也具有一定的相关性(图 10)。除 Cs 与 K_2O 之间的正相关关系不太明显外,其余元素与 K_2O 之间的正相关关系比较明显,表明它们具有相似的地球化学行为。

岩石的 Th/U 比值变化较大,介于 4.96~14.56 之间,其与 U 或 Th 之间具有较明显的负相关性(图 11a、11b)。非活动元素 Zr 、 Hf 和 Ta 之间的相关关系表现为 Zr 与 Zr/Ta (和 Hf/Ta) 之间的线性相关性十分明显(图 11c、11d)。随着 Zr 含量的增加, Zr/Ta 和 Hf/Ta 也随之增加,这一特征与四川冕宁尤黑木变质沉积岩十分相似(倪志耀等,1998),反映出黑云斜长片麻岩的原岩可能是在大陆岛弧的热液沉积环

境下形成的。

4 原岩类型及其形成环境

赤城红旗营子群石榴黑云斜长片麻岩虽然存在有较强烈的混合岩化现象,但仅局限在赤城-崇礼断裂带附近。由于采样点远离该断裂带(图 1),所采岩石样品应该不会受到此混合岩化作用的影响。另外,岩石样品也比较新鲜,镜下观察没有发现后期交代蚀变现象的存在。因此,石榴黑云斜长片麻岩的形成可以看作是一个等化学过程,合适的地球化学参数可以用于原岩恢复及其形成构造环境的判别。

4.1 原岩类型

根据岩石化学成分计算得到的黑云斜长片麻岩 DF 值均为负值(-0.35~-5.10,平均值为-3.11,表 2),表明黑云斜长片麻岩的原岩应为沉积岩类(Shaw, 1972)。在 TiO_2 - SiO_2 图解中,黑云斜长片麻岩所有样品的投影点均落在沉积岩区(图 12a);在 La/Yb - ΣREE 图解中,样品投影点全部位于砂岩和杂砂岩区(图 12b);在 $(\text{al} + \text{fm})$ - $(\text{c} + \text{alk})$ - Si 图解中,样品的投影点则位于泥质沉积岩与砂质沉积岩之间(图 12c)。因此,赤城红旗营子群黑云斜长片麻

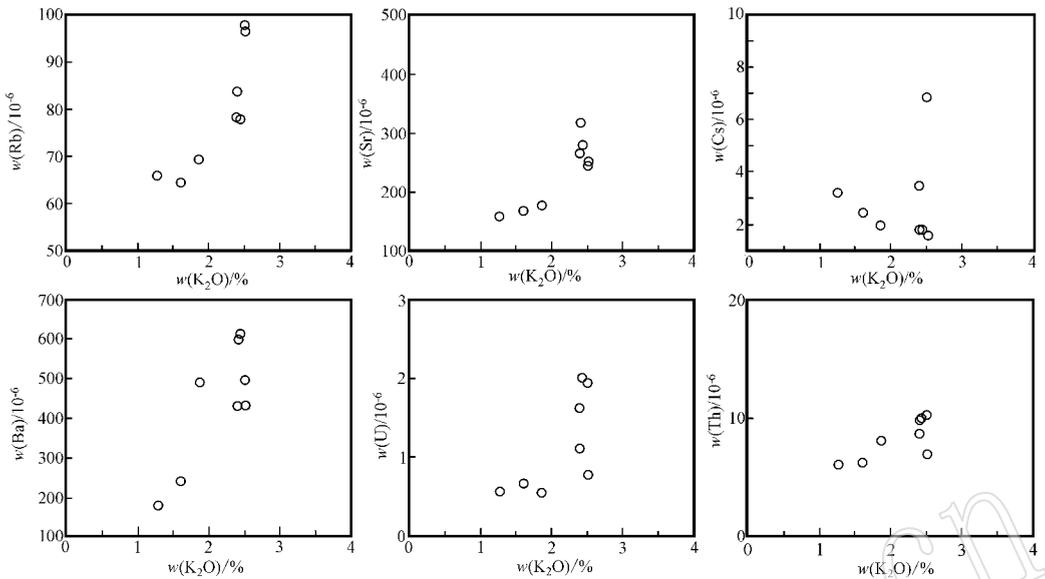


图 10 黑云斜长片麻岩的 K_2O 与某些微量元素 U 的相关图

Fig. 10 Correlogram between K_2O and some trace elements U in biotite plagioclase

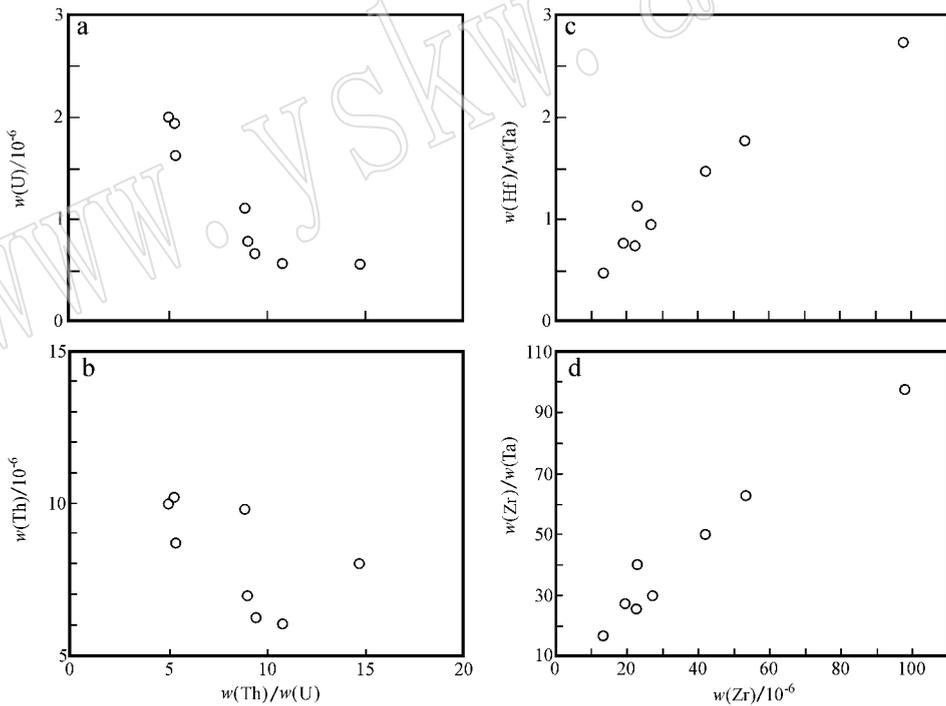


图 11 黑云斜长片麻岩的 Th/U 与 Th/U (a, b) 或 Hf/Ta , Zr/Ta 与 Zr (c, d) 相关图

Fig. 11 Correlogram between Th/U and Th/U (a, b) or Hf/Ta , Zr/Ta and Zr (c, d) in biotite plagioclase

岩的原岩应该为泥质(或含泥质)砂岩,这与“黑云斜长片麻岩普遍含石墨矿物并局部保留变余砂状结构”这一地质事实相吻合。

4.2 形成环境

Bhatia(1983, 1985)和 Bhatia & Crook(1986)等

的研究成果表明,砂岩的岩石地球化学成分与其形成时的大地构造背景密切相关。从被动大陆边缘、活动大陆边缘、大陆岛弧到大洋岛弧,砂岩的 $Fe_2O_3 + MgO$, TiO_2 , Al_2O_3/SiO_2 和 $(Eu/Eu^*)_{\lambda N}$ 等值依次增加,而 K_2O/Na_2O , $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$,

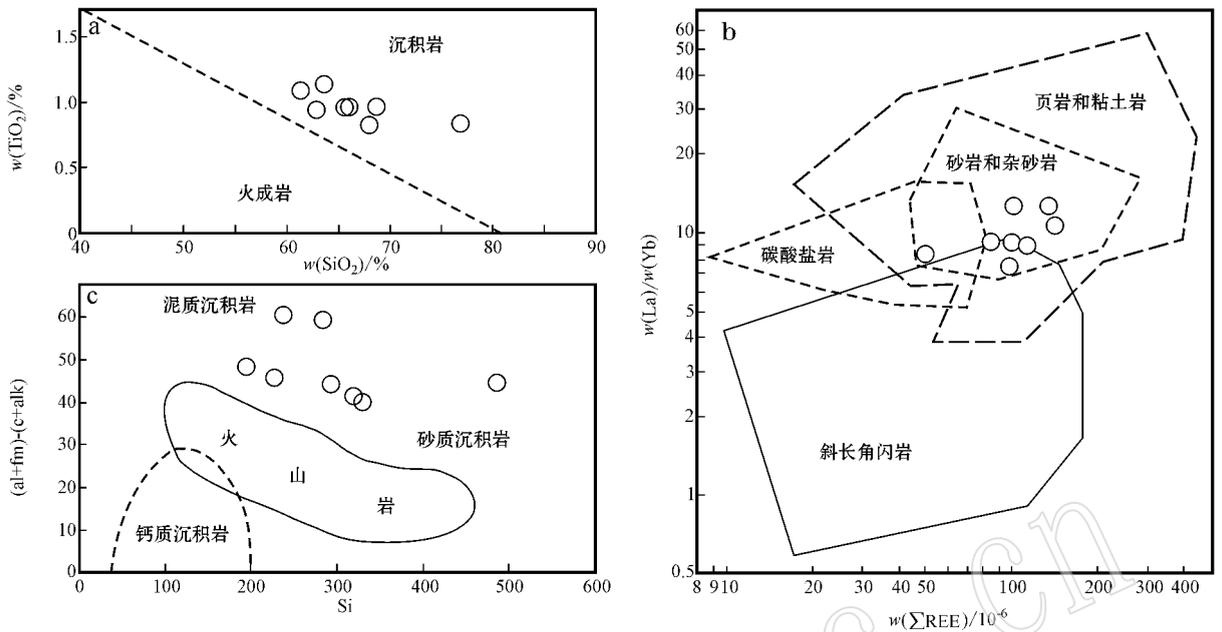


图 12 黑云斜长片麻岩原岩类型的判别

Fig. 12 Discrimination of the protolith of biotite plagiogneiss

a 据 Tarney(1976); b 据王仁民等(1987); c 据 Simonen(1953)

a after Tarney(1976); b after Wang Renmin *et al.* (1987); c after Simonen(1953)

La、Ce、 Σ REE、La/Yb、 $(La/Yb)_{CN}$ 和 Σ LREE/ Σ HREE 等值则相应减少(稀土配分模式也会随之发生相应的变化)。由于稀土元素属于较惰性的元素,在变质作用过程中的变化相对较小。因此,对于沉积变质岩来说,稀土元素较主量元素更能反映其原岩形成时的大地构造背景(吴素珍,1988;王中刚等,1989)。从表 3 中可以看出,黑云斜长片麻岩原岩形

成环境的稀土元素判别标志介于大洋岛弧与大陆岛弧之间,且更接近后者的稀土元素特征。另外,黑云斜长片麻岩的 $(Ce/Ce^*)_{CN}$ 值为 0.74~1.01(平均为 0.91,表 2),介于大洋盆地(0.55)与大陆边缘(0.90~1.30)之间(Murray *et al.*, 1990)。因此,从黑云斜长片麻岩所表现出来的稀土元素地球化学特征来看,其原岩的形成环境似乎应属于大陆岛弧环境。

表 3 黑云斜长片麻岩原岩形成的构造环境判别

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Discrimination of tectonic setting for the protolith of biotite plagiogneiss

序号	构造背景	样数	La	Ce	Σ REE	La/Yb	$(La/Yb)_{CN}$	Σ LREE/ Σ HREE	$(Eu/Eu^*)_{CN}$
1	大洋岛弧	9	8±1.7	19±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
2	大陆岛弧	9	27±4.5	59±8.2	146±20	11.0±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
3	活动大陆边缘	2	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.60
4	被动大陆边缘	2	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56
5	黑云斜长片麻岩	8	20.48	40.04	102.65	9.89	6.66	6.75	0.83

注:序号 1~4 据 Bhatia(1985),序号 5 为黑云斜长片麻岩的平均值。

5 讨论与结论

(1) 冀北赤城红旗营子群(石榴)黑云斜长片麻岩与赤城退变榴辉岩和华北高压麻粒岩的石榴石成

分相比,它的石榴石较前者贫 Ca($Grs + And$),但吕和堡、七里墩和东沟楼等地石榴石的核部成分则与后者相当,并且自颗粒核部到边部,钙铝榴石和镁铝榴石含量降低,而铁铝榴石和锰铝榴石含量则相应升高,显示其变质演化应该是一个降温、降压过程。

(2) (石榴)黑云斜长片麻岩样品具有较宽的常量元素变化范围,岩石的稀土元素含量不是很高且变化较大,具有轻稀土富集、重稀土平坦的球粒陨石标准化稀土配分模式,大多数样品具中等程度的负Eu异常和不太明显的负Ce异常。岩石样品北美页岩标准化的稀土配分模式具有较平缓的配分曲线,(La/Yb)_{SN}值为0.73~1.25,具有一定程度的负Ce异常和正Eu异常,且与北美页岩的比值均小于1;Rb、Sr、Cs、Ba、Zr、Hf、Nb、Ta、Th和U等微量元素含量均低于上地壳的平均含量,但Sr/Ba和Th/U值则高于上地壳的平均值。随着岩石中SiO₂含量的增加,Zr、Hf、Nb、Ta和Y等元素的含量相应增加,而Th含量基本不变,其它元素的变化规律不明显。

(3) 赤城红旗营子群(石榴)黑云斜长片麻岩的DF值均小于0(-0.35~-5.10)。在TiO₂-SiO₂图解、La/Yb-ΣREE图解以及(al+fm)-(c+alk)-Si图解中的投影点分别位于沉积岩区、砂岩-杂砂岩区以及泥质-砂质沉积岩区。另外(石榴)黑云斜长片麻岩原岩形成环境的稀土元素判别标志介于大洋岛弧与大陆岛弧之间,且更接近后者的稀土元素特征,并且岩石的(Ce/Ce*)_{SN}值为0.74~1.01,该值介于大洋盆地(0.55)与大陆边缘(0.90~1.30)之间。因此(石榴)黑云斜长片麻岩的原岩应该属于泥质(或含泥质)砂岩,可能形成于大陆岛弧环境。这样(石榴)黑云斜长片麻岩中岩浆成因锆石似乎属于碎屑锆石,其年龄数据反映的应该是原岩物源区岩浆岩的岩浆结晶年龄,这也是岩石中岩浆成因锆石年龄数据多样性的原因所在。显然,刘树文等(2007)将其解释为黑云斜长片麻岩的岩浆结晶年龄是值得商榷的。

References

- Bai Jin, Huang Xueguang, Dai Fengyan, *et al.* 1996. The Precambrian Crustal Evolution of China (2th Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English in abstract).
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone [J]. *Journal of Geology*, 91: 611~627.
- Bhatia M R. 1985. Rare Earth Element geochemistry of Australian Paleozoic graywacks and mudrocks: provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97~113.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywacks and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
- Boynnton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite studies [A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Carswell D A, Wilson R N and Zhai M G. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China [J]. *Lithos*, 52: 121~155.
- Enami M. 1998. Pressure-temperature path of Sanhagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 97~106.
- Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, *et al.* 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the Rare Earth [A]. Ahrens L H. Origin and Distribution of the Element [C]. Oxford: Pergamon Press.
- Liu Shuwen, Lü Yongjun, Feng Yonggang, *et al.* 2007. Zircon and monazite geochronology of the Hongqiyingzi complex, northern Hebei, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1086~1100 (in Chinese with English abstract).
- Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Jones D L, *et al.* 1990. Rare Earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 18: 268~271.
- Ni Zhiyao and Mo Huaiyi. 1998. Geochemistry and age of the Precambrian metamorphic sedimentary rock in the Mianning, Sichuan Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 34(6): 783~792 (in Chinese with English abstract).
- Ni Zhiyao, Zhai Mingguo, Wang Renmin, *et al.* 2004. Retrograded eclogites on the northern margin of North China Craton, Hebei Province, China: Mineral chemistry and retrogressive metamorphism [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(4): 381~390 (in Chinese with English abstract).
- Ni Z Y, Zhai M G, Wang R M, *et al.* 2006. Late Paleozoic retrograded eclogites from within the northern margin of the North China Craton: Evidence for subduction of the Paleo-Asian ocean [J]. *Gondwana Research*, 9: 209~224.
- Rickwood P C. 1968. On recasting analyses of garnet into end-member molecules [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 18: 175~198.
- Shaw D M. 1972. The origin of Apsley gneiss, Ontario [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 9: 18~35.
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. *Bulletin of Common Geology of Finland*, 160: 1~64.
- Tamey J. 1976. Geochemistry of Archean high grade gneiss, with implications as to origin and evolution of the Precambrian crust [A]. Windley B F. The Early History of Earth [C]. London: John Wiley & Sons.
- Taylor S R. 1979. Chemical composition and evolution of the continental crust: the Rare Earth Element evidence [A]. McElhinny M W. The Earth: Its Origin, Structure and Evolution [C]. London: Academic Press.

- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, *et al.* 1987. Some Diagrammatical Discriminances of the Protolith for Metamorphic Rock [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan and Zhao Zhenhua. 1989, Geochemistry of the Rare Earth Elements [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1 217~1 232.
- Wu Suzhen. 1988. REE geochemistry of Precambrian metamorphic rocks in Wutaishan region [J]. *Geochimica*, 17(2): 118~128 (in Chinese with English abstract).
- Xie Q, Jain J, Sun M, *et al.* 1994. Multiple element analysis of low abundance international reference material BIR-1: results by ICP-MS [J]. *Geostandards Newsletter*, 18: 53~63.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, *et al.* 1992. Discovery and preliminary study of the Archean high-pressure granulites in the North China [J]. *Sciences in China (B)*, 25(12): 1 325~1 330 (in Chinese).
- Zhang Chunhua, Wang Qichao, Gao Mingwen, *et al.* 1990. The Early Precambrian Metamorphism of Hebei [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1993. The controlling factors of Europium geochemical characteristics [J]. *Journal of NanJing University (Earth Sciences)*, 5(3): 271~280 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4(3): 63~72 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 戴凤严, 等. 1996. 中国前寒武纪地壳演化(第二版) [M]. 北京: 地质出版社.
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 等. 2007. 冀北红旗营子杂岩的锆石、独居石年代学及地质意义 [J]. *地质通报*, 26(9): 1 086~1 100.
- 倪志耀, 莫怀毅. 1998. 四川冕宁前寒武纪变质沉积岩的地球化学及其时代 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 34(6): 783~792.
- 倪志耀, 翟明国, 王仁民, 等. 2004. 华北克拉通北缘退变榴辉岩的矿物化学与退变质作用 [J]. *矿物学报*, 24(4): 381~390.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 1987. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社.
- 吴素珍. 1988. 五台山地区前寒武纪变质岩的稀土元素地球化学 [J]. *地球化学*, 17(2): 118~128.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 1992. 中国华北太古宙基性麻粒的发现及初步研究 [J]. *中国科学(B辑)*, 22(2): 1 325~1 330.
- 张春华, 王启超, 高明文, 等. 1990. 河北早前寒武纪变质作用 [M]. 北京: 地质出版社.
- 赵振华. 1993. 铕(Eu)地球化学特征的控制因素 [M]. *南京大学学报(地球科学)*, 5(3): 271~280.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 4(3): 63~72.