

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2023.0301

冀北崇礼高压-超高压榴英岩的发现及其矿物化学 和锆石 U-Pb 年代学特征

刘 瑶¹, 倪志耀², 牛 腾², 周 新³, 潘 登², 田 涛⁴

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610000; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;
3. 西藏地质矿产勘查开发局 地热地质大队, 西藏 拉萨 850000; 4. 陕西省环境科学研究院,
陕西 西安 710000)

摘 要: 首次在冀北崇礼晚古生代红旗营子变质表壳岩中发现了高压-超高压榴英岩, 并对其进行了矿物化学研究及锆石 U-Pb 年代学限定。该高压-超高压榴英岩呈透镜状产出, 直接围岩为石榴黑云斜长片麻岩, 矿物成分主要为石榴子石和石英, 有少量角闪石、斜长石和重晶石, 副矿物可见磷灰石、钛铁矿以及铜铁硫化物等。石榴子石以高的 Grs+And 值 (23.08%~29.38%) 为特征, 属铁铝榴石-钙铝榴石-镁铝榴石系列, 铁铝榴石分子、钙铝榴石分子和镁铝榴石分子分别为 51.70%~61.87%、23.08%~28.45% 和 11.31%~16.75%。另有少量的锰铝榴石分子 (1.25%~2.45%)。磷灰石为氟磷灰石, F 含量介于 1.65%~3.29% 之间, 磷灰石包裹体周边石榴子石颗粒常具放射状减压膨胀缝, 显示出高压-超高压变质岩的退变质特征。重晶石可能为磷灰石在高压-超高压榴英岩的折返过程中减压分解出溶的结果, 该过程同时伴随有铜铁硫化物的形成。榴英岩形成的温压条件为 667~710°C、1.189~1.279 GPa, 与矿物学特征所显示的压力属性相一致。榴英岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得两组不同的年龄数据, 其中碎屑锆石的 Th/U 值较高 (0.23~3.81), 年龄介于 485.5~304.9 Ma 之间, 主要为 369.8~348.8 Ma, 加权平均年龄为 359.4±3.8 Ma, 对应的原岩可能为大陆边缘的陆源碎屑岩, 物源主要为晚古生代 (约 359 Ma) 岩浆岩; 变质锆石的 Th/U 值较低 (0.05~0.18), 年龄介于 277.0~259.4 Ma 之间, 加权平均年龄为 268.1±2.9 Ma, 应该是高压-超高压榴英岩的峰值变质年龄, 表明高压-超高压变质作用发生在晚古生代 (约 268 Ma), 可能与古亚洲洋壳向南俯冲消减过程中部分陆壳物质的加入有关。

关键词: 高压-超高压变质作用; 晚古生代; 榴英岩; 古亚洲洋; 冀北崇礼

中图分类号: P588.34; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)03-0313-16

Discovery of HP-UHP garnet quartzite from Chongli County, North Hebei Province, and its mineral chemistry and zircon SHRIMP U-Pb chronology

LIU Yao¹, NI Zhi-yao², NIU Teng², ZHOU Xin³, PAN Deng² and TIAN Tao⁴

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610000, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Geothermal and Geological Party, Bureau of Mineral Resource Exploration and Development of Tibet, Lhasa 850000, China; 4. Shaanxi Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710000, China)

Abstract: For the first time, the HP-UHP (high-pressure to ultrahigh-pressure) garnet quartzite has been discovered from the Late Paleozoic Hongqiyingzi metamorphic supracrustal rock characterized by amphibolite facies paragneisses in Chongli County, North Hebei Province. The garnet quartzite occurs as separate tectonic lenses within garnet

收稿日期: 2022-05-13; 接受日期: 2023-03-31; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41272087, 41072050, 40472041)

作者简介: 刘 瑶 (1990-), 女, 硕士, 工程师, 现从事地质学方面工作, E-mail: 1027135917@qq.com; 通讯作者: 倪志耀 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩石学的教学与科研工作, E-mail: nizyao@cdu.edu.cn.

biotite plagioclase gneisses. It mainly consists of garnet and quartz, with a small amount of amphibole, plagioclase and barite, and possesses accessory mineral assemblage of apatite, ilmenite and copper-iron sulfide. Garnets are characterized by a high Grs+And value (23.08% ~ 29.38%) with the end-member components of Alm_{51.70~61.87} Grs_{23.08~28.45} Prp_{11.31~16.75} Sps_{1.25~2.45}, belonging to almandine-pyrope-grossular garnet series. Compared with the HP granulites of North China Craton and retrograded eclogite in Chicheng County, the garnets of studied samples are richer in Grs+And and poorer in Prp than the former, and poorer in Prp than the latter. Apatite is fluorapatite with the contents of fluorine from 1.65% to 3.29%. Garnets surrounding the apatite inclusions often have radial decompression expansion joints, which is interpreted as the result of retrogression of HP-UHP metamorphic rock. Barite may be the result of decompression and dissolution of apatite during the exhumation of HP-UHP garnet quartzite, which is accompanied by the formation of copper iron sulfide. Thermobarometric computation shows that the temperature and pressure conditions for the formation of garnet quartzite are 667~710°C and 1.189~1.279 GPa, respectively, which are consistent with the pressure properties shown by mineralogical characteristics. Zircon SHRIMP U-Pb isotopic dating obtains two different groups of ages which from detrital zircons and metamorphic zircons separately. The former has higher value of Th/U from 0.23 to 3.81, which indicates that typical of magmatic crystallized zircon, ranging from 485.5 to 304.9 Ma and mainly from 369.8 to 348.8 Ma with a weighted mean age of 359.4±3.8 Ma. The protolith of garnet quartzite may be the terrigenous clastic rock at the continental margin, and the clastics chiefly from Late Paleozoic (~359 Ma) magmatic rocks. The latter has lower value of Th/U from 0.05 to 0.18, ranging from 277.0 to 259.4 Ma, with a weighted average age of 268.1±2.9 Ma, which is interpreted as the peak metamorphic age of HP-UHP garnet quartzite, indicating that HP-UHP metamorphism occurred in the late Paleozoic (~268 Ma), and may be related to the addition of some continental crust materials during the southward subduction of the ancient Paleo-Asian oceanic crust.

Key words: HP-UHP metamorphism; Late Paleozoic; garnet quartzite; Paleo-Asian Ocean; Chongli County, North Hebei Province

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41272087, 41072050, 40472041)

高压、超高压变质岩的形成与碰撞造山过程中的俯冲、消减作用息息相关,高压、超高压变质岩记录或保存有碰撞造山带形成演化的重要信息。对高压、超高压变质岩进行系统的矿物学、岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究,不但能够明确其原岩性质及成因归属,而且可为造山带形成演化乃至碰撞造山过程中的俯冲、消减性质的确定提供相应的岩石学约束。

华北克拉通北缘中段北以镶黄旗-多伦-赤峰断裂带为界与中亚造山带(古亚洲洋构造域)相连,南以集宁-尚义-崇礼-赤城-平泉断裂带为界与华北克拉通相接。在集宁-尚义-崇礼-赤城-平泉断裂带以南的华北克拉通内部,出露的高压、超高压变质岩主要为麻粒岩相的基性高压麻粒岩,广泛分布在冀北的怀安、宣化、赤城、滦平、承德、平泉以及辽西的建平、北票等地(王仁民等, 1991; 翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993; 季建清等, 1996; 李江海等, 1998; 毛德宝等, 1999; 魏春景等, 2001; 钟长

汀等, 2001; 初航等, 2012; 刘子燕, 2018)。与华北克拉通内部基性高压麻粒岩广泛出露不同,华北克拉通北缘中段的高压、超高压变质岩十分稀少,此前仅有报道在冀北赤城出露有晚古生代退变榴辉岩(倪志耀等, 2004; Ni *et al.*, 2004, 2006; 孔旭等, 2011),尚没有高压-超高压榴英岩存在的报道。本文首次在冀北崇礼晚古生代红旗营子变质表壳岩中发现了高压-超高压榴英岩,并在野外调查研究的基础上,对其进行了矿物化学研究和 U-Pb 同位素定年,探讨了其时代归属,这对于冀北大地构造演化乃至古亚洲洋俯冲消减作用性质的确定均具有重要的地质意义。

1 区域地质及榴英岩产出特征

冀北崇礼位于华北克拉通北缘中段(图 1a)。在华北克拉通北缘中段的赤城-崇礼一带,出露的地层除新生代火山-沉积盖层外,主要为赤城云州变

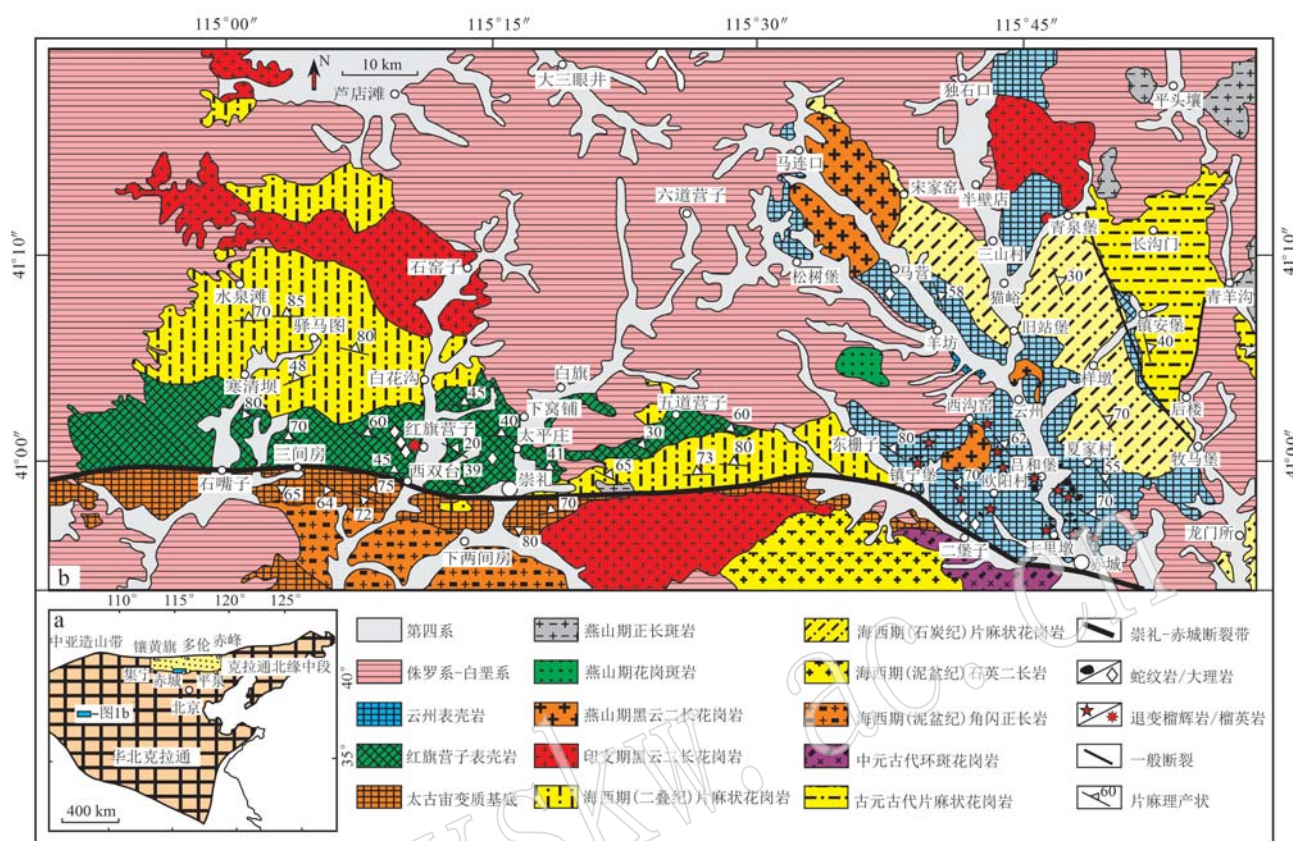


图1 华北克拉通北缘中段大地构造位置图(a)和赤城-崇礼区域地质图及榴英岩、退变榴辉岩产地(b)

[根据河北省地质矿产局区域地质调查大队(1990)补充修改]

Fig. 1 Tectonic setting of the central part of the northern margin of the North China Craton(a) and areal geological map showing location of the garnet quartzite and retrograded eclogite within Chicheng County and Chongli County(b) (according to Regional Geological Surveying Team of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, 1990)

质表壳岩和崇礼红旗营子变质表壳岩等(图1b)。

赤城云州变质表壳岩为一套沉积变质岩系,主要分布在崇礼-赤城断裂带以北的赤城镇宁堡、二堡子、七里墩、云州、旧站堡及马营等地(图1b),总体呈近北北西向带状分布,走向比较稳定,倾向近北东,倾角变化较大,一般在 55° 左右。靠近崇礼-赤城断裂带部分倾角变大,可达 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,局部则近于直立,同时伴随有较强烈的混合岩化现象。云州变质表壳岩属晚古生代沉积变质地层,岩石类型主要为石榴黑云斜长片麻岩。云州变质表壳岩及其内部的退变榴辉岩、蛇纹岩(蛇纹石化方辉橄榄岩)和蛇纹石化(橄榄)大理岩等透镜状构造岩块一起经历了晚古生代($326\sim 321$ Ma)区域角闪岩相变质事件(刘瑶等, 2015)。云州变质表壳岩之中的这些构造岩块应属“外来”的洋壳残片,成因上可能与古亚洲洋洋壳向南俯冲消减作用有关(Ni *et al.*, 2006)。其中,退变榴辉岩的原岩为兼具洋中脊和岛弧地球化学属

性的拉斑玄武岩类,在后期的俯冲消减过程中,这些拉斑玄武岩因俯冲作用而发生榴辉岩相高压变质,并混入了部分陆壳物质(Ni *et al.*, 2006)。退变榴辉岩的变质演化经历了大约355 Ma 峰值榴辉岩相变质、约341 Ma 高压麻粒岩相退变质以及 $326\sim 321$ Ma 区域角闪岩相退变质等事件(倪志耀等, 2004; Ni *et al.*, 2006; 孔旭等, 2011; 初航等, 2013)。

崇礼红旗营子变质表壳岩为一套火山-沉积变质岩系,主要分布在崇礼-赤城断裂带以北的崇礼三间房、西双台、红旗营子、太平庄、庙沟、下窝铺、三道沟及五道营子一带,总体呈近东西向带状分布,属晚古生代火山-沉积变质地层,岩石类型有(石榴)黑云斜长片麻岩及石榴斜长角闪岩等,内有“外来的”透辉大理岩及榴英岩等透镜状构造块体。红旗营子变质表壳岩后期经历了多期次变质热事件的改造,其中326、281、268 和 250 Ma 等变质热事件在区域上存在有相对应的岩浆活动(刘瑶, 2015; 田涛等,

2018),在崇礼-赤城一带存在有白花沟、东栅子及样墩等石炭纪、二叠纪片麻状花岗岩(图1b;王芳等,2009),其可能与古亚洲洋向南俯冲消减以及中亚造山带最终形成有关。

崇礼高压-超高压榴英岩出露在红旗营子村西侧山坡上,与红旗营子村相距不足500 m(图1b)。榴英岩多呈大小不等的构造透镜体分布在红旗营子变质表壳岩(石榴黑云斜长片麻岩)中,目前出露不多。榴英岩透镜体与石榴黑云斜长片麻岩的接触界线清楚(图2a、2b)。榴英岩透镜体有3种不同的产出形式:①以构造透镜体形式单独分布于石榴黑云斜长片麻岩之中,大小多在几厘米至十几厘米,最大可达70 cm×10 cm,但一般不超过50 cm(图2c中I);②与石榴斜长角闪岩一起组成构造透镜体,透镜体较大,大小多在50 cm×(20~200 cm)至60 cm×2.5 m之间,透镜体中榴英岩有两种形态,一是呈“镰刀”状(图2c中II),长约2.4 m,宽约5~8 cm,

产状为 $10^{\circ}\angle 24^{\circ}$;二是呈“蝌蚪状”,长约200 cm,宽约80 cm,后者与黑云斜长片麻岩的片麻理略斜交(图2c中III);③分布在石榴斜长角闪岩中(图2c中III),为石榴斜长角闪岩中条带,条带长短不一。榴英岩条带与石榴斜长角闪岩可交替出现,应该是后期构造变形使得一些小的榴英岩透镜体被挤压、拉长的结果。

2 岩相学及矿物化学

榴英岩新鲜面呈棕红色(图3a),具中-细粒粒状变晶结构(图3b),块状构造。主要矿物成分为石榴子石和石英,有少量的角闪石、斜长石和重晶石,副矿物可见钛铁矿、磷灰石及铜铁硫化物等。代表性矿物的电子探针分析是在核工业北京地质研究院电子探针室采用JEOL JXA 8100型电子探针仪完成的,加速电压20 kV,束斑电流10 nA,束斑直径1 μm ,

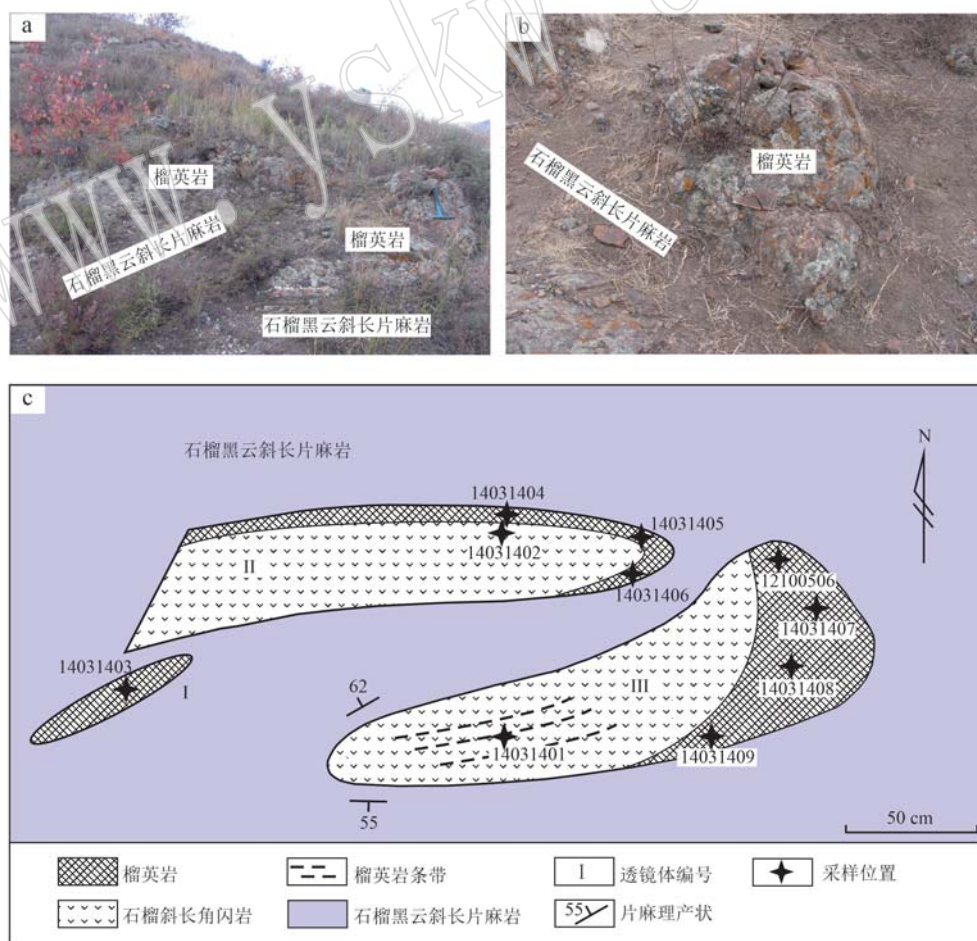


图2 榴英岩的野外分布特征

Fig. 2 Field distribution of the garnet quartzite within Hongqiyingzi metamorphic supracrustal rock

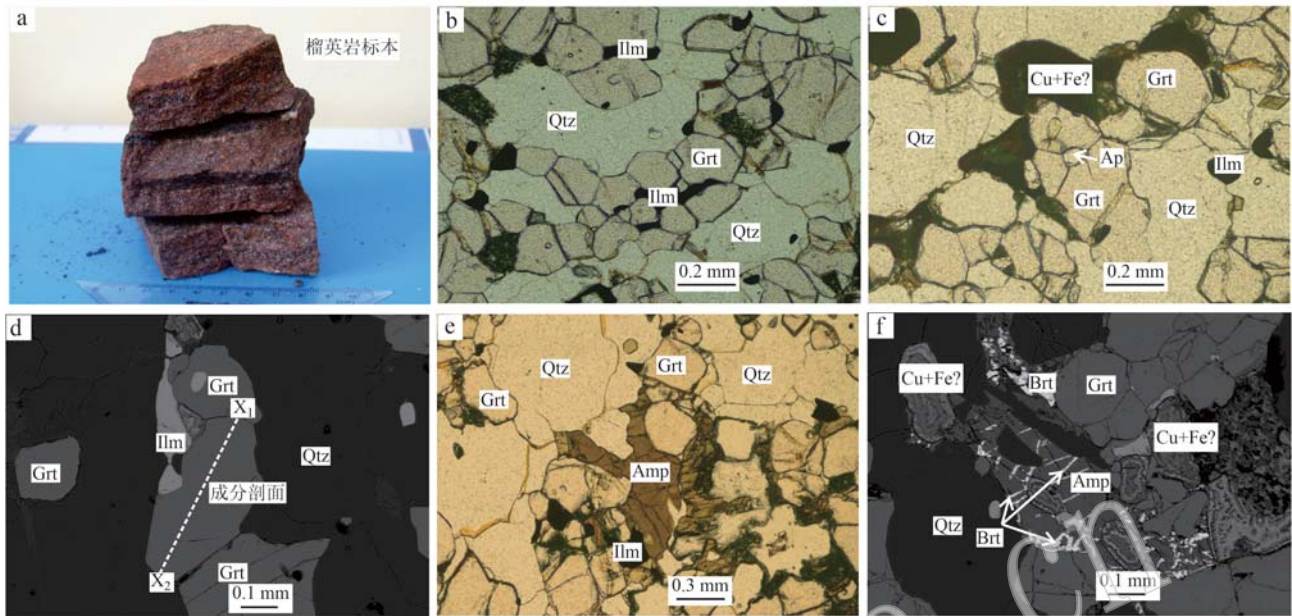


图3 榴英岩的宏观与微观特征

Fig. 3 Macroscopic and microcosmic characteristics of the garnet quartzite

a—榴英岩标本; b—榴英岩, 主要由石榴子石 (Grt)、石英 (Qtz) 及少量钛铁矿 (Ilm) 组成, 具典型的粒状变晶结构, 样号 12100506, 单偏光; c—石榴子石中的氟磷灰石 (Ap) 包体, 氟磷灰石颗粒周边的石榴子石具典型的放射状膨胀裂缝, 显示退变质特征, 岩石中尚存在 Cu-Fe 硫化物, 样号 12100506, 单偏光; d—测定成分剖面的石榴子石颗粒及成分剖面位置, 样号 12100506, BSE; e—榴英岩中的角闪石 (Amp)、石榴子石、石英及钛铁矿等矿物, 样号 14031405, 单偏光; f—单独产出及产出角闪石裂缝中的重晶石 (Brt), 样号 12100506, BSE

a—garnet quartzite specimen; b—garnet quartzite mainly composed of garnet (Grt), quartz (Qtz), and a small amount of ilmenite (Ilm), has a typical granular metamorphic structure, sample number 12100506, single polarized; c—the fluorapatite (Ap) inclusions in garnet, and the garnet which include the fluorapatite have typical radial expansion cracks, showing the characteristics of retrograde metamorphism, Cu-Fe sulfide exists in the rock, sample number 12100506, single polarized; d—garnet particle and location of composition profile, sample number 12100506, BSE image; e—minerals such as amphibole (Amp), garnet, quartz and ilmenite of garnet within garnet quartzite, sample number 14031405, single polarized; f—barite (Brt) produced separately and in hornblende fractures, sample number 12100506, BSE image

ZAF 法修正, 标样为美国 SPI 公司矿物标样。

2.1 石榴子石

榴英岩中石榴子石的含量多在 45%~50% 之间, 棕红色, 粒状, 颗粒大小不等, 多呈集合体产出。薄片呈无色半自形-自形粒状, 颗粒大小不等, 粒径多为 0.5~0.8 mm, 颗粒内部裂纹较发育, 常包含黑云母、磷灰石及石英等细小矿物颗粒。其中, 部分包含磷灰石的石榴子石颗粒内部具放射状减压膨胀裂缝 (图 3c), 这应该与后期退变质有关。

石榴子石的电子探针成分分析数据见表 1。榴英岩中石榴子石以相对较高的 Grs+And 值 (23.08%~29.38%, CaO 含量相应为 8.03%~9.40%) 为特征, 铁铝榴石分子 (Alm)、钙铝榴石分子 (Grs) 及镁铝榴石分子 (Prp) 分别为 51.70%~61.87%、23.08%~28.45% 和 11.31%~16.75% (MgO 含量相应为 2.84%~3.56%), 另有少量的锰铝榴石分子 (Sps 值为 1.25%~2.45%, MnO 含量相应为 0.56%~

1.08%) 和钙铁榴石分子 (And 值为 0.00~0.93%), 属于铁铝榴石-钙铝榴石-镁铝榴石系列石榴子石 (表 1)。与赤城退变榴辉岩 (Ni *et al.*, 2006) 及华北高压麻粒岩 (翟明国等, 1992) 相比, 榴英岩中石榴子石较赤城退变榴辉岩石榴子石贫 Prp, 较华北高压麻粒岩石榴子石贫 Prp、富 Grs+And (图 3a), 根据文献 (Carswell *et al.*, 2000; Enami and Banno, 2000) 估算, 该榴英岩的形成温度可能要低于赤城退变榴辉岩及华北高压麻粒岩, 而压力则高于华北高压麻粒岩。

榴英岩的石榴子石成分剖面 (样号 12100506; 图 3d、图 4b) 显示, 榴英岩中石榴子石颗粒自核部 (C) 至边部 (R), CaO、MgO 含量先降低后升高, 钙铝榴石、镁铝榴石含量也是先降低后升高, 显示出先降温、降压后升温、升压的特点 (Carswell *et al.*, 2000)。成分剖面两侧的 CaO、MgO 含量变化均呈不对称的变化趋势, CaO 含量右侧降幅较左侧大, 而

表 1 榴英岩中石榴子石化学成分的电子探针分析结果

Table 1 Representative microprobe mineral analyses of garnets in garnet quartzite																								
样号	颗粒	位置	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Si	Ti	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	And	Prp	Sps	Grs	Alm	
12100506	1	C	38.95	0.09	21.57	27.06	0.85	3.33	8.71	100.56	3.053	0.005	1.991	0.000	1.774	0.056	0.389	0.731	0.00	13.19	1.91	24.79	60.11	
		R	38.48	0.11	21.56	27.42	0.89	3.32	8.76	100.54	3.019	0.006	1.992	0.000	1.799	0.059	0.388	0.736	0.00	13.02	1.98	24.69	60.31	
	2	C	38.41	0.04	21.74	27.23	0.77	3.23	8.94	100.36	3.017	0.002	2.011	0.000	1.789	0.051	0.378	0.752	0.00	12.73	1.73	25.33	60.22	
		R	38.45	0.09	21.52	27.17	0.95	3.14	8.86	100.18	3.029	0.005	1.996	0.000	1.790	0.063	0.369	0.748	0.00	12.42	2.13	25.18	60.27	
	3	C	39.08	0.07	20.26	27.64	0.88	3.22	8.71	99.86	3.096	0.004	1.890	0.000	1.831	0.059	0.380	0.739	0.00	13.40	2.08	26.05	58.47	
		R	38.76	0.08	20.00	26.85	0.85	3.37	8.77	98.68	3.102	0.005	1.885	0.000	1.797	0.058	0.402	0.752	0.00	14.21	2.04	26.57	57.19	
	4	C	37.96	0.00	20.36	27.36	0.88	3.05	8.82	98.43	3.050	0.000	1.927	0.000	1.839	0.060	0.365	0.759	0.00	12.63	2.07	26.25	59.05	
		R	39.33	0.00	20.17	27.66	0.92	2.97	8.57	99.62	3.127	0.000	1.889	0.000	1.839	0.062	0.352	0.730	0.00	12.41	2.19	25.75	59.66	
14031401	1	C	37.99	0.13	20.83	27.27	0.95	3.29	9.21	99.67	3.009	0.008	1.943	0.018	1.789	0.064	0.388	0.782	0.89	13.20	2.17	25.66	58.09	
	R	37.97	0.06	21.59	27.20	1.01	3.14	8.64	99.61	3.008	0.004	2.014	0.000	1.802	0.068	0.371	0.733	0.00	12.47	2.28	24.66	60.59		
2	C	38.13	0.11	21.59	27.69	0.96	3.41	8.17	100.06	3.007	0.007	2.005	0.000	1.826	0.064	0.401	0.690	0.00	13.45	2.15	23.15	61.25		
	R	37.86	0.00	21.89	27.41	1.01	3.25	8.33	99.75	2.990	0.000	2.031	0.000	1.812	0.068	0.383	0.706	0.00	12.90	2.28	23.77	61.05		
14031403	1	C	38.57	0.08	21.67	27.04	0.69	3.10	9.30	100.45	3.027	0.005	2.003	0.000	1.775	0.046	0.363	0.782	0.00	12.23	1.55	26.37	59.85	
	R	38.67	0.00	21.64	27.26	0.56	3.12	9.28	100.53	3.032	0.000	1.998	0.000	1.788	0.037	0.365	0.780	0.00	12.28	1.25	26.26	60.21		
2	C	38.60	0.04	20.88	26.59	0.77	3.56	8.94	99.38	3.058	0.002	1.948	0.000	1.761	0.052	0.420	0.759	0.00	14.37	1.77	25.94	57.92		
	R	38.52	0.00	21.63	26.80	0.92	3.55	8.74	100.16	3.026	0.000	2.001	0.000	1.761	0.061	0.416	0.736	0.00	13.98	2.06	24.74	59.22		
14031404	1	C	38.27	0.12	21.27	27.58	0.85	3.28	8.03	99.40	3.041	0.007	1.990	0.000	1.833	0.057	0.389	0.684	0.00	13.12	1.93	23.08	61.87	
	R	38.54	0.06	21.26	27.51	0.89	3.22	8.50	99.98	3.044	0.004	1.977	0.000	1.817	0.060	0.379	0.719	0.00	12.77	2.01	24.23	61.00		
2	C	38.83	0.00	21.21	26.78	0.85	3.30	8.91	99.88	3.064	0.000	1.971	0.000	1.767	0.057	0.388	0.753	0.00	13.12	1.92	25.45	59.51		
	R	39.31	0.00	20.97	26.99	0.81	3.20	8.53	99.81	3.108	0.000	1.953	0.000	1.785	0.054	0.377	0.723	0.00	12.87	1.85	24.65	60.64		
14031405	1	C	38.84	0.04	21.14	26.81	1.08	3.31	8.76	99.98	3.064	0.002	1.964	0.000	1.769	0.072	0.389	0.740	0.00	13.20	2.447	25.11	59.24	
	R	38.18	0.10	21.22	26.52	1.05	3.07	9.16	99.30	3.033	0.006	1.985	0.000	1.762	0.071	0.364	0.780	0.00	12.22	2.374	26.20	59.21		
2	C	38.64	0.14	21.16	26.60	1.03	3.33	8.81	99.71	3.055	0.008	1.970	0.000	1.759	0.069	0.392	0.746	0.00	13.27	2.33	25.23	59.17		
	M	38.38	0.00	21.31	26.99	0.97	3.30	8.55	99.50	3.042	0.000	1.989	0.000	1.789	0.065	0.390	0.726	0.00	13.13	2.19	24.45	60.23		
14031406	R	38.34	0.00	21.35	27.02	1.07	3.26	9.06	100.10	3.020	0.000	1.981	0.000	1.780	0.071	0.383	0.765	0.00	12.87	2.40	25.71	59.01		
	2	R	38.79	0.06	21.23	26.14	0.88	3.21	8.70	99.01	3.086	0.004	1.989	0.000	1.739	0.059	0.381	0.742	0.00	13.04	2.03	25.39	59.55	
3	C	37.73	0.07	21.51	27.91	0.78	3.42	8.35	99.77	2.984	0.004	1.987	0.015	1.831	0.052	0.403	0.707	0.93	16.75	2.17	28.45	51.70		
	R	37.97	0.04	22.06	27.51	0.85	3.17	8.51	100.11	2.991	0.002	2.038	0.000	1.812	0.057	0.372	0.718	0.00	12.58	1.92	24.27	61.24		
14031407	1	C	38.67	0.06	21.20	26.86	0.71	3.02	8.72	99.24	3.075	0.004	1.986	0.000	1.786	0.048	0.358	0.743	0.00	12.20	1.63	25.31	60.86	
	2	R	38.79	0.00	21.37	27.22	0.72	2.92	9.25	100.27	3.055	0.000	1.982	0.000	1.793	0.048	0.343	0.780	0.00	11.57	1.62	26.33	60.48	
14031408	1	C	38.63	0.12	21.15	27.22	0.68	2.86	9.28	99.94	3.055	0.007	1.969	0.000	1.800	0.046	0.337	0.786	0.00	11.40	1.54	26.59	60.47	
	2	R	38.34	0.00	22.01	26.83	0.83	2.84	9.40	100.25	3.016	0.000	2.039	0.000	1.765	0.055	0.333	0.792	0.00	11.31	1.88	26.90	59.92	
14031409	1	C	38.57	0.06	21.33	27.45	0.73	3.32	8.63	100.09	3.040	0.004	1.980	0.000	1.809	0.049	0.390	0.729	0.00	13.12	1.64	24.52	60.72	
	2	R	39.19	0.00	21.22	27.46	0.84	3.34	8.12	100.17	3.088	0.000	1.969	0.000	1.808	0.056	0.392	0.685	0.00	13.33	1.91	23.29	61.48	

C、M 和 R 分别为石榴子石颗粒的核部、中部及边缘测点；And、Prp、Sps、Grs 及 Alm 分别为石榴子石中钙铁榴石、镁铝榴石、钙铝榴石、铁铝榴石和铁钙榴石分子；Fe³⁺根据电价差值法求得；端员组分根据 Rickwood (1968) 方法计算得到。

MgO 含量变化趋势则与之相反,表现为左侧降幅较右侧大,且其变化趋势的明显程度不及 CaO 含量(Enami and Banno, 2000)。FeO 的环带特征不明显但核部含量最低(图 4b)。另外,赤城退变榴辉岩中石榴子石成分剖面显示石榴子石颗粒的核部 MgO

含量低,边部 MgO 含量高(图 4b),这与崇礼榴英岩也不太一样。赤城退变榴辉岩经历了自榴辉岩相经高压麻粒岩相、到角闪岩相的退变质演化(倪志耀等, 2004),崇礼高压-超高压榴英岩可能没有经历后期较强烈的退变质改造。

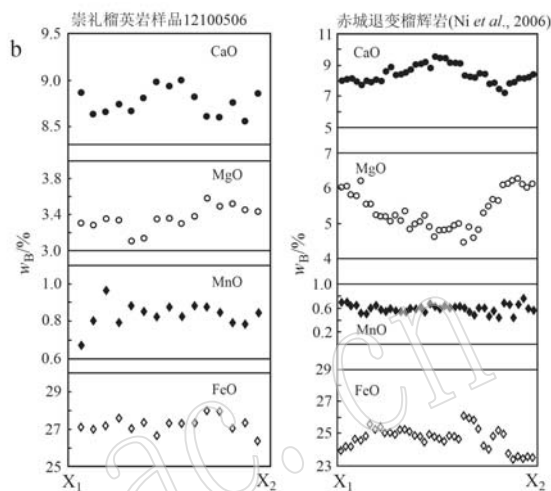
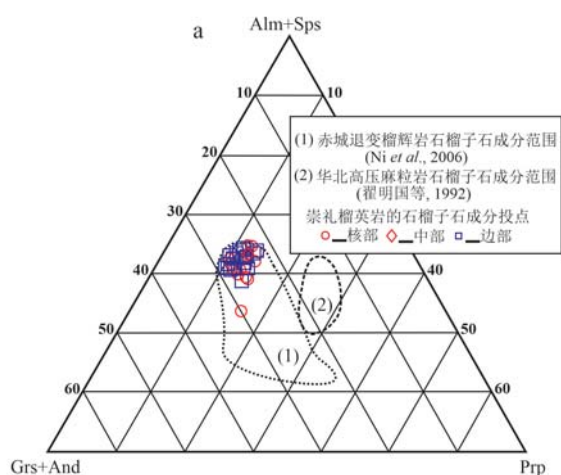


图 4 榴英岩中石榴子石成分特点(a)及成分剖面(b)

Fig. 4 Mineral composition plot (a) and compositional profile (b) of garnet within garnet quartzite

2.2 磷灰石

榴英岩中磷灰石含量不高,多在 4% 左右,无色,自形程度较高,横切面多为较自形的六边形,也可见针状、长柱状及细小的粒状颗粒,呈针状、柱状产出的磷灰石颗粒的纵切面多为平行消光。榴英岩中磷灰石主要有 3 种不同的产状:① 在石榴子石颗粒中以矿物包裹体形式存在,包含磷灰石的石榴子石多具有围绕磷灰石颗粒的放射状减压膨胀裂缝(图 3c);② 在石英颗粒中以矿物包裹体形式出现,磷灰石周围的石英颗粒少见放射状减压膨胀裂缝;③ 分布在石榴子石颗粒与石英颗粒之间,与磷灰石接触的石榴子石颗粒及石英颗粒均具放射状裂缝。

磷灰石的电子探针成分分析数据见表 2。磷灰石的主要化学成分为 CaO 及 P_2O_5 , 含量分别为 53.02%~56.30% 和 42.06%~44.07%。另外,还有一定的 F (1.65%~3.29%) 存在,属氟磷灰石(表 2)。变质成因磷灰石的 F 含量越高,其变质程度越高(Kapustin, 1987; Spear and Pyle, 2002)。崇礼榴英岩中氟磷灰石的 F 含量稍高于中国大陆科学钻探(CCSN)主孔榴辉岩中氟磷灰石的 F 含量(1.32%~2.54%; 陈振宇等, 2006),其中样品 14031401 及样品 14031408 中氟磷灰石 F 含量最高,分别为 2.87%~3.29% 和 2.99%,接近或高于北大别罗田超高压榴

辉岩中氟磷灰石的 F 含量(约 3%; 刘贻灿等, 2007)。从氟磷灰石的岩相学特征来看,榴英岩似乎经历了高压-超高压变质作用,在发生高压-超高压变质作用之后,因构造折返,压力降低导致氟磷灰石发生体膨胀,使得氟磷灰石包裹体周边石榴子石颗粒出现放射状减压膨胀裂缝,同时氟磷灰石的 F 含量有所降低。

2.3 石英

榴英岩中石英含量多在 40%~45% 之间,无色透明,油脂光泽,他形-半自形粒状,常与石榴子石形成典型的粒状变晶结构。矿物颗粒大小不等,大者可达 1.7 cm,小者仅为 0.1 mm,多在 0.5 mm~1 cm 之间。石英颗粒多具有波状消光现象。

2.4 角闪石

榴英岩中角闪石含量不高,多为 4%~6%。角闪石为棕色或绿色,具较强的多色性。其中,棕色角闪石具棕色至浅棕色的多色性,绿色角闪石则具绿色至浅黄绿色多色性。角闪石颗粒大多呈柱状产出,少量呈板柱状,颗粒大小多在 0.6 mm 至 1 cm 之间,一般可见清晰的角闪石式状解理,在极少数角闪石颗粒的解理缝、裂缝中可见呈脉状产出的重晶石(图 3f)。

角闪石的电子探针成分分析数据见表 3。角闪

表 2 榴英岩中磷灰石化学成分的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Representative microprobe mineral analyses of apatites in garnet quartzite

样号	12100506		14031401		14031403		14031404	14031406		14031407	14031408
测点	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1
SiO ₂	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.24	0.00	0.05	0.04	0.00	0.10
FeO	0.34	0.29	0.04	0.15	0.26	0.22	0.08	0.10	0.39	0.09	0.10
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00
MgO	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03
CaO	56.30	55.57	54.94	54.10	54.19	55.15	55.42	55.04	54.87	53.02	55.68
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	42.06	42.82	42.71	42.82	44.07	42.53	42.44	42.63	43.57	43.21	42.55
F	1.65	2.31	3.29	2.87	1.87	2.44	2.69	2.41	2.03	2.42	2.99
Total	100.37	100.99	101.12	99.99	100.39	100.60	100.63	100.23	100.96	98.77	101.45
Ca	4.837	4.750	4.723	4.675	4.597	4.733	4.773	4.737	4.657	4.595	4.771
P	2.856	2.892	2.901	2.924	2.954	2.884	2.888	2.899	2.922	2.959	2.881
Mg	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.004	0.000	0.004
Fe ²⁺	0.023	0.019	0.003	0.010	0.017	0.015	0.005	0.007	0.026	0.006	0.007
Si	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.019	0.000	0.004	0.003	0.000	0.008
K	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 3 榴英岩中角闪石化学成分的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 3 Representative microprobe mineral analyses of amphiboles in garnet quartzite

样号	12100506				14031404		14031405		14031406		14031407	14031408	14031409	
测点	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2			1	2
SiO ₂	43.67	43.46	44.17	43.28	43.61	42.94	42.48	42.91	43.51	42.75	43.61	43.16	43.57	44.44
TiO ₂	1.65	1.99	1.72	2.59	2.11	1.88	0.98	2.09	1.92	1.76	1.60	1.34	1.55	1.51
Al ₂ O ₃	11.43	11.81	11.53	11.47	11.49	12.85	12.87	12.25	11.85	12.66	11.66	13.30	11.92	11.05
FeO	18.19	18.35	17.52	18.01	16.39	17.67	18.81	17.62	17.32	16.80	18.36	17.28	17.42	17.40
MnO	0.09	0.09	0.05	0.06	0.14	0.06	0.12	0.12	0.11	0.06	0.00	0.09	0.07	0.14
MgO	8.40	8.57	9.09	8.36	9.84	8.52	8.52	8.35	8.68	9.03	7.95	8.26	8.71	9.09
CaO	11.23	11.28	11.16	11.14	11.01	10.87	11.04	11.09	10.96	11.14	11.52	11.18	11.14	10.98
Na ₂ O	1.59	1.39	1.47	1.56	1.59	1.35	1.40	1.26	1.55	1.67	1.25	1.41	1.56	1.38
K ₂ O	1.26	1.28	1.20	1.44	1.35	1.32	1.05	1.48	1.36	1.38	1.06	1.21	1.35	1.18
Total	97.51	98.22	97.91	97.91	97.53	97.46	97.27	97.17	97.26	97.25	97.01	97.23	97.29	97.17
Si	6.587	6.485	6.575	6.517	6.500	6.415	6.354	6.472	6.545	6.421	6.611	6.474	6.557	6.655
Ti	0.187	0.223	0.193	0.293	0.237	0.211	0.110	0.237	0.217	0.199	0.182	0.151	0.175	0.170
Al	2.031	2.076	2.021	2.034	2.017	2.261	2.268	2.176	2.099	2.240	2.082	2.349	2.112	1.949
Fe ³⁺	0.083	0.246	0.225	0.015	0.278	0.364	0.658	0.169	0.132	0.183	0.016	0.166	0.116	0.252
Fe ²⁺	2.211	2.043	1.956	2.253	1.765	1.844	1.695	2.054	2.047	1.927	2.312	2.001	2.076	1.928
Mn	0.011	0.011	0.006	0.008	0.018	0.008	0.015	0.015	0.014	0.008	0.000	0.011	0.009	0.018
Mg	1.889	1.906	2.017	1.877	2.186	1.898	1.900	1.877	1.946	2.022	1.797	1.847	1.954	2.029
Ca	1.815	1.803	1.780	1.797	1.758	1.740	1.769	1.792	1.766	1.793	1.871	1.797	1.796	1.762
Na	0.465	0.403	0.424	0.456	0.460	0.391	0.406	0.369	0.452	0.486	0.368	0.410	0.455	0.400
K	0.242	0.244	0.228	0.277	0.257	0.252	0.200	0.285	0.261	0.264	0.205	0.232	0.259	0.225
X _{Ca}	0.720	0.736	0.732	0.710	0.710	0.730	0.745	0.733	0.712	0.705	0.766	0.737	0.716	0.738
Na _B	0.185	0.197	0.220	0.203	0.242	0.260	0.231	0.208	0.234	0.207	0.129	0.203	0.204	0.238
(Na+K) _A	0.522	0.449	0.432	0.529	0.474	0.383	0.376	0.445	0.479	0.544	0.444	0.438	0.511	0.388
Mg [*]	0.461	0.483	0.508	0.455	0.553	0.507	0.529	0.478	0.487	0.512	0.437	0.480	0.485	0.513

Fe³⁺系根据阳离子总数为 13(不包括 Ca+Na+K)计算得到; Mg^{*} = Mg/(Mg+Fe²⁺); X_{Ca} = Ca/(Ca+Na+K)。

石的 Ca_B 和 Na_B 分别为 1.740~1.871 和 0.129~0.260, CaO 含量 (10.87%~11.52%) 变化不大 (表 3), 均属钙质角闪石 (Leake *et al.*, 1997)。其中, $(Na+K)_A \geq 0.5$ (0.511~0.544) 的样品, 其 Si 值为 6.421~6.587, $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 值介于 0.455~0.512 之间, Na_B 值为 0.185~0.207, 属于浅闪石或韭闪石; $(Na+K)_A < 0.5$ (0.376~0.479) 的样品, 其 Si 值为 6.354~6.655, $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 值介于 0.437~0.553 之间, Na_B 值为 0.129~0.260, 属于普通角闪石或钙镁闪石 (Leake *et al.*, 1997; Enami and Banno, 2000)。

2.5 斜长石

榴英岩中斜长石含量不高, 仅为 3%~5%, 无色, 多呈半自形板柱状, 少数为不规则粒状。部分斜长石颗粒边部有碎裂现象, 颗粒裂隙和边缘中可见较

为明显的绢云母化现象, 其成分主要为中长石 ($An = 33.67 \sim 40.88$), K_2O 含量较低 (0.10%~0.29%), 相应的 Or 端员组分仅为 0.57~1.58 (表 4)。

2.6 重晶石

榴英岩中重晶石含量极少, 约为 1%, 无色透明, 正中突起, 有两种不同的产状: 在角闪石颗粒的解理缝或裂缝中呈脉状或长条状产出 (图 3f); 呈粒状或块状单独产出 (图 3f)。榴英岩中重晶石含有一定量的 F 含量 (0.14%~0.26%, 表 4), 这可能表明重晶石的形成与氟磷灰石在降温、减压时出溶有关 (陈振宇等, 2006, 2009)。氟磷灰石减压形成重晶石的现象在中国大陆科学钻探 (CCSD) 高压-超高压榴辉岩中同样存在 (汤倩等, 2006; 杨红等, 2006)。

表 4 榴英岩中斜长石、钛铁矿及重晶石化学成分的电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 4 Representative microprobe mineral analyses of plagioclases, ilmenites and barites in garnet quartzite

矿物 样号	斜长石				钛铁矿			重晶石	
	12100506	14031401	14031405	14031406	12100506			12100506	
SiO_2	58.38	58.63	58.58	59.72	0.00	0.03	0.00	0.06	0.89
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	53.47	52.71	51.66	0.81	0.90
Al_2O_3	23.72	26.01	25.65	24.95	0.00	0.00	0.02	0.07	0.28
FeO	0.00	0.08	0.08	0.05	44.73	45.83	45.69	0.12	0.77
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.45	0.23	0.00	0.08
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.22	0.21	0.08	0.20
CaO	8.09	7.82	7.37	6.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
Na_2O	6.02	6.88	7.36	7.31	0.00	0.08	0.00	0.03	0.25
K_2O	0.14	0.24	0.15	0.19	0.02	0.02	0.00	0.07	0.07
F								0.26	0.14
BaO								62.69	59.66
SO_3								34.87	36.08
Total	96.35	99.66	99.19	99.05	98.98	99.34	97.81	99.00	99.37
Si	2.695	2.627	2.637	2.682	0.000	0.001	0.000	0.002	0.033
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	1.024	1.006	1.002	0.023	0.025
Al	1.290	1.373	1.360	1.320	0.000	0.000	0.001	0.003	0.012
Fe^{2+}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.952	0.971	0.984	0.004	0.024
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.010	0.005	0.000	0.002
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.008	0.008	0.005	0.011
Ca	0.400	0.375	0.355	0.329	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
Na	0.539	0.598	0.642	0.637	0.000	0.004	0.000	0.002	0.018
K	0.008	0.014	0.009	0.011	0.001	0.001	0.000	0.003	0.003
F								0.031	0.016
Ba								0.933	0.859
S								0.994	0.995
Or	0.88	1.39	0.85	1.12					
Ab	56.88	60.57	63.83	65.21					
An	42.24	38.04	35.32	33.67					

Or 、 Ab 及 An 分别为斜长石中钾长石、钠长石及钙长石分子。

2.7 铜铁硫化物、钛铁矿

铜铁硫化物及钛铁矿在榴英岩中以副矿物形式存在,单独产出或包裹于其他矿物颗粒之中。其中,铜铁硫化物为片状,褐红色,个别颗粒偶见环带特征;钛铁矿为褐黑色,不透明,多为叶片状或薄板状,少数呈片状包裹体出现在石榴子石颗粒内部及石榴子石裂缝中(表 4)。榴英岩中钛铁矿及铜铁硫化物含量也不高,仅为 4% 左右。与重晶石成因相似,铜铁硫化物也有可能是氟磷灰石在退变质过程中降温、减压以及氧逸度(f_{O_2})变化条件下,元素在矿物间进行重新分配的结果(洪吉安等, 2003; 朱永峰等, 2005; 陈晶等, 2006; 梁凤华等, 2006; 陈振宇等, 2009)。

3 变质作用温度-压力条件

不同的温度计、压力计适用于不同化学成分的岩石,本文采用适用于非超高压的含榴斜长岩类的角闪石-斜长石(Hbl-Pl)温度计(Holland and Blundy, 1994)、石榴子石-角闪石-斜长石-石英(GH-PQ)压力计(Dale *et al.*, 2000)及适用于非超高压的变质泥质岩、变质长英质岩石的石榴子石(Grt)压力计(Wu, 2019)估算榴英岩变质作用的温度和压力条件。石榴子石和角闪石中 Fe^{3+} 根据 Holland 和 Blundy(1994)、Dale 等(2000)的方法计算。温度计和压力计的计算结果显示,榴英岩变质作用的温度和压力分别为 667~710°C(Hbl-Pl)、0.897~0.947 GPa(GHPQ)、1.189~1.279 GPa(Grt),具体计算结果见表 5。结合本文榴英岩中包含磷灰石的石榴子石具

有围绕磷灰石颗粒的放射状减压膨胀裂缝、磷灰石周围的石英颗粒少见放射状减压膨胀裂缝、磷灰石 F 含量较高等特征,对榴英岩变质温压计算结果中的压力范围取用较高的 1.189~1.279 GPa。

4 锆石 U-Pb 年代学

榴英岩中锆石的挑选是由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成的。首先将新鲜、无蚀变的岩石样品用清水清洗、晾干,破碎,然后经浮选及磁选分选出锆石颗粒,并在双目镜下人工挑纯。在挑出锆石颗粒后,将具代表性的锆石颗粒与数颗 Temora(标准样品)粘贴至直径为 25 mm 的环氧树脂中,然后将其磨薄至一半厚度,抛光并镀金,用于透射光、反射光及阴极发光下照相以供年龄测定所需。样品锆石的 SHRIMP U-Pb 分析是在北京离子探针中心 SHRIMP II 上用标准测定程序完成的,详细的测定原理及步骤可参见 Williams(1998)。其中,选用 SL13(572 Ma, 238×10^{-6})及 TEM(417 Ma)作为标样分别进行锆石 U、Th 含量及年龄校正。在测定中,每分析 3 至 4 个测点后测定标样(TEM)1 次,以控制仪器的稳定性和离子计数的准确性。每次测定的 U、Th 和 Pb 含量均为同一测点连续 5 次分析的平均值,测试数据处理(相应的各种比值和年龄计算)采用 SQUID1.03d(Ludwig, 2001)和 ISOPLLOT 2.94h(Ludwig, 1999)程序。年龄计算中,采用 Steiger & Jager(1977)推荐的衰变常数。对于年龄小于 1 000 Ma 的锆石颗粒, U-Pb 同位素年龄值选用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄数据。

表 5 榴英岩的矿物温压计计算结果

Table 5 Results of mineral thermomanometer in garnet quartzite

样号		矿物成分									温度-压力计算结果		
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Hbl-Pl/℃	GHPQ/GPa	Grt/GPa
12100506	Grt	38.68	0.06	20.90	27.30	0.87	3.20	8.77	0.00	0.00	710	0.904	1.279
	Pl	58.38	0.00	23.72	0.00	0.00	0.00	8.09	6.02	0.14			
	Hbl	43.65	1.99	11.56	18.02	0.07	8.61	11.20	1.50	1.30			
14031405	Grt	38.51	0.07	21.18	26.67	1.07	3.19	8.96	0.00	0.00	675	0.897	1.222
	Pl	58.58	0.00	25.65	0.08	0.00	0.00	7.37	7.36	0.15			
	Hbl	42.70	1.54	12.56	18.22	0.12	8.44	11.07	1.33	1.27			
14031406	Grt	38.31	0.05	21.44	27.03	0.93	3.28	8.66	0.00	0.00	667	0.947	1.189
	Pl	59.72	0.00	24.95	0.05	0.00	0.00	6.83	7.31	0.19			
	Hbl	43.13	1.84	12.26	17.06	0.09	8.86	11.05	1.61	1.37			

Grt、Hbl、Pl 分别代表石榴石、角闪石、斜长石, Grt-Hbl 为石榴石-角闪石温度计, GHPQ 为石榴石-角闪石-斜长石-石英压力计, Grt 为石榴石压力计。

用于年龄测定的榴英岩(样号 12100506)采自崇礼县红旗营子村西(115°11'25.9"E, 41°0'28.6"N; 图 2c)。岩石新鲜面呈棕红色,中-细粒粒状变晶结构,块状构造,主要矿物成分为石榴子石(40±%) and 石英(40±%),尚有少量的斜长石(4±%)、角闪石(6±%)、钛铁矿、重晶石(1±%)、磷灰石(4±%)及铜铁硫化物(5±%)等。

锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定共获得 29 个测点数据(表 6)。从锆石颗粒的阴极发光图像(图 5a)来看,有两种不同成因的锆石颗粒,一种为残留的碎屑锆石,锆石的 Th/U 值为 0.23~3.81(均大于 0.2),具有明显的核-幔结构,属岩浆成因锆石。该种锆石颗粒共获得了 15 个测点的年龄数据。从它们的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据来看,变化较大,为 485.5~304.9 Ma,主要集中在 369.8~348.8 Ma 之间(9 个测点),9 个测点的加权平均年龄为 359.4±3.8 Ma(图 5c)。这个年龄数据与赤城退变榴辉岩峰值变质年龄(约 355 Ma,孔旭等,2011;初航等,2013)基本一致,这似乎暗示古亚洲洋俯冲消减过程中的高压、超高压变质作用存在有相对应的岩浆活动。榴英岩碎屑锆石的年龄数据说明榴英岩的原岩可能为大陆边缘的陆源碎屑岩,物源区主要为晚古生代(晚泥盆世)岩浆岩,没有早于奥陶纪(年龄数据老于 485.5 Ma)的碎屑来源。另一种为变质成因锆石,包括残留碎屑锆石的变质增生边或新生的变质锆石(多呈短柱状产出,无环带,部分颗粒内部尚保留有极少量的残留碎屑锆石)等,其 Th/U 值较低,为 0.05~0.18,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据变化较小,为 277.0~259.4 Ma(14 个测点),14 个测点的加权平均年龄为 268.1±2.9 Ma(图 5b)。该年龄应为榴英岩的原岩发生高压-超高压变质作用(高压-超高压榴英岩形成)的时代,可能与古亚洲洋在晚古生代晚期(中二叠世中期)向南俯冲、消减作用有关。另外,残留碎屑锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据的最小值为 304.9 Ma(测点 18.1)显示榴英岩原岩的沉积作用不会早于 304.9 Ma,榴英岩沉积-变质时限应在 340.9~268.1 Ma 之间。

5 讨论

从榴英岩的矿物组合以及石榴子石、磷灰石等矿物的化学成分来看,冀北崇礼存在有高压-超高压榴英岩,这是华北克拉通北缘中段继赤城晚古生代

退变榴辉岩发现以来,又一处高压-超高压变质岩产地,它的发现是十分有科学意义的。

现确定的崇礼高压-超高压榴英岩同赤城退变榴辉岩一样,也位于尚义-崇礼-赤城-平泉断裂带的北侧,且离断裂带不远(图 1b)。两者的产状也基本一样,均呈大小不等的构造透镜体分布在晚古生代变质表壳岩中,暗示了尚义-崇礼-赤城-平泉断裂带极有可能是高压、超高压变质岩(榴英岩、退变榴辉岩)的折返通道。如果真是这样的话,该断裂带的性质需要重新认识。

崇礼高压-超高压榴英岩与赤城退变榴辉岩相比,两者具有一定的差异。崇礼高压-超高压榴英岩位于近东西向展布的红旗营子变质表壳岩之中,形成于晚古生代晚期(中二叠世中期),峰值变质年龄约为 268 Ma,原岩为大陆边缘沉积的陆源碎屑岩;赤城退变榴辉岩位于近北西向展布的云州变质表壳岩之中,形成于晚古生代中期(早石炭世早期),峰值变质年龄约为 355 Ma(孔旭等,2011;初航等,2013),原岩为兼具洋中脊和岛弧属性的拉斑玄武岩。崇礼高压-超高压榴英岩与赤城退变榴辉岩似乎属于不同性质的高压、超高压变质岩,应该是古亚洲洋多次俯冲、消减作用的产物。其中,赤城退变榴辉岩所显示的俯冲消减作用发生较早(约 355 Ma),此时以洋壳俯冲、消减为主,发生高压变质作用的温度较高;崇礼高压-超高压榴英岩所显示的俯冲消减作用发生较晚(约 268 Ma),此时大陆边缘的陆缘碎屑岩被带入而一并发生俯冲消减,其发生高压-超高压变质作用的温度相对较低。崇礼高压-超高压榴英岩的确定暗示古亚洲洋在最终闭合之前,在后期的洋壳俯冲消减过程中,可能有陆壳物质的带入。

崇礼高压-超高压榴英岩峰值变质年龄所显示的约 268 Ma 变质-构造热事件,在冀北康保有相应的酸性岩浆活动的地质记录(康保石柱梁花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄为约 269 Ma;田涛等,2018)。因此,冀北崇礼、康保等地的约 268 Ma 岩浆-变质构造热事件应该与古亚洲洋的构造演化有关,也即古亚洲洋向南的俯冲消减具有多期次、多阶段的特点。

6 结论

(1) 新发现的崇礼高压-超高压榴英岩总体呈透镜状构造岩块分布在红旗营子变质表壳岩(石榴黑云斜长片麻岩)之中,榴英岩透镜体的岩性可以是

表 6 榴英岩(样号 12100506)的锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果
Table 6 SHRIMP U-Pb data of zircons in sample 12100506 from garnet quartzite within Chongli County

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	$f_{206}/\%$	同位素比值				年龄/Ma					
	U	Th			$^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma/\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma/\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
1.1	143	9	5.20	0.07	1.71	0.045 7	16	0.263 0	16	0.041 7	2.2	390	263. 3	5. 7
2.1	582	560	29. 7	0. 99	0. 59	0.055 3	5. 8	0.450 1	6. 0	0.059 0	1. 6	130	369. 8	5. 6
3.1	210	28	8. 07	0. 14	2. 73	0.039 0	30	0.237 1	30	0.043 6	2. 5	770	275. 0	6. 9
4.1	594	2 194	41. 4	3. 81	3. 59	0.057 3	9. 1	0.618 1	9. 2	0.078 2	1. 6	200	485. 5	7. 5
5.1	188	17	6. 88	0. 10	1. 53	0.049 6	15	0.287 0	15	0.041 9	2. 0	350	264. 7	5. 2
6.1	693	412	34. 7	0. 61	2. 17	0.059 8	8. 3	0.470 1	8. 5	0.057 0	1. 7	180	357. 5	6. 0
7.1	204	23	7. 55	0. 12	0. 95	0.056 0	20	0.328 1	20	0.042 6	2. 7	440	269. 0	7. 2
8.1	440	868	21. 5	2. 04	0. 63	0.058 9	3. 8	0.458 0	4. 2	0.056 5	1. 6	84	354. 0	5. 6
9.1	221	38	8. 17	0. 18	0. 78	0.059 4	12	0.349 1	12	0.042 6	1. 9	260	269. 0	5. 0
10.1	523	660	23. 8	1. 30	2. 74	0.060 7	13	0.431 1	13	0.051 5	1. 7	280	323. 8	5. 5
11.1	604	589	29. 1	1. 01	0. 96	0.053 1	5. 4	0.407 0	5. 6	0.055 6	1. 5	120	348. 8	5. 1
12.1	174	18	6. 70	0. 10	1. 96	0.060 1	18	0.363 1	18	0.043 9	2. 0	400	277. 0	5. 5
13.1	613	588	27. 5	0. 99	1. 50	0.048 6	8	0.344 1	8. 2	0.051 3	1. 5	190	322. 6	4. 8
14.1	195	23	7. 27	0. 12	1. 60	0.058 1	20	0.343 0	20	0.042 8	2. 1	450	269. 9	5. 5
15.1	581	215	29. 2	0. 38	1. 55	0.053 0	8. 6	0.421 1	8. 8	0.057 7	1. 6	200	361. 4	5. 5
16.1	193	9	7. 30	0. 05	0. 45	0.069 5	7. 9	0.420 2	8. 1	0.043 8	1. 9	160	276. 4	5. 1
17.1	638	740	32. 1	1. 20	2. 53	0.061 4	14	0.484 1	15	0.057 1	1. 7	310	358. 1	5. 9
18.1	745	165	31. 8	0. 23	2. 70	0.061 1	12	0.408 0	13	0.048 4	1. 5	270	304. 9	4. 6
19.1	180	10	6. 71	0. 06	1. 50	0.060 0	18	0.352 2	18	0.042 6	2. 0	380	269. 1	5. 2
20.1	791	232	40. 2	0. 30	0. 24	0.057 6	2. 9	0.468 0	3. 5	0.058 9	1. 9	64	369. 2	6. 7
21.1	189	18	6. 93	0. 10	3. 64	0.037 0	37	0.212 1	37	0.041 2	2. 7	990	260. 2	6. 9
22.1	210	22	7. 68	0. 11	3. 59	0.027 1	36	0.154 1	36	0.041 1	2. 1	1 200	259. 4	5. 4
23.1	540	309	26. 8	0. 59	0. 40	0.057 1	4. 1	0.453 1	4. 4	0.057 6	1. 7	90	360. 7	6. 0
24.1	834	560	37. 4	0. 69	0. 48	0.056 4	3. 2	0.404 1	3. 5	0.051 9	1. 5	71	326. 4	4. 6
25.1	534	577	26. 4	1. 12	0. 48	0.059 6	3. 2	0.472 1	3. 5	0.057 4	1. 5	69	359. 6	5. 3
26.1	115	20	4. 55	0. 18	5. 52	0.060 1	28	0.361 1	29	0.043 4	3. 4	610	273. 8	9. 0
27.1	142	18	5. 25	0. 13	2. 42	0.057 1	22	0.328 0	23	0.042 0	2. 2	500	264. 9	5. 6
28.1	344	56	12. 5	0. 17	0. 57	0.054 7	5. 3	0.317 1	5. 5	0.042 0	1. 7	120	265. 5	4. 3
29.1	492	495	26. 6	1. 04	0. 38	0.086 1	26	0.741 1	26	0.062 6	1. 5	500	391. 7	5. 8

锆石的 U-Pb 年龄值选用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据,其年龄误差为 1σ ; f_{206} 为普通 ^{206}Pb 占总 ^{206}Pb 的百分比; $^{206}\text{Pb}^*$ 为放射性 ^{206}Pb ; 普通铅校正应用 ^{204}Pb 实测值。

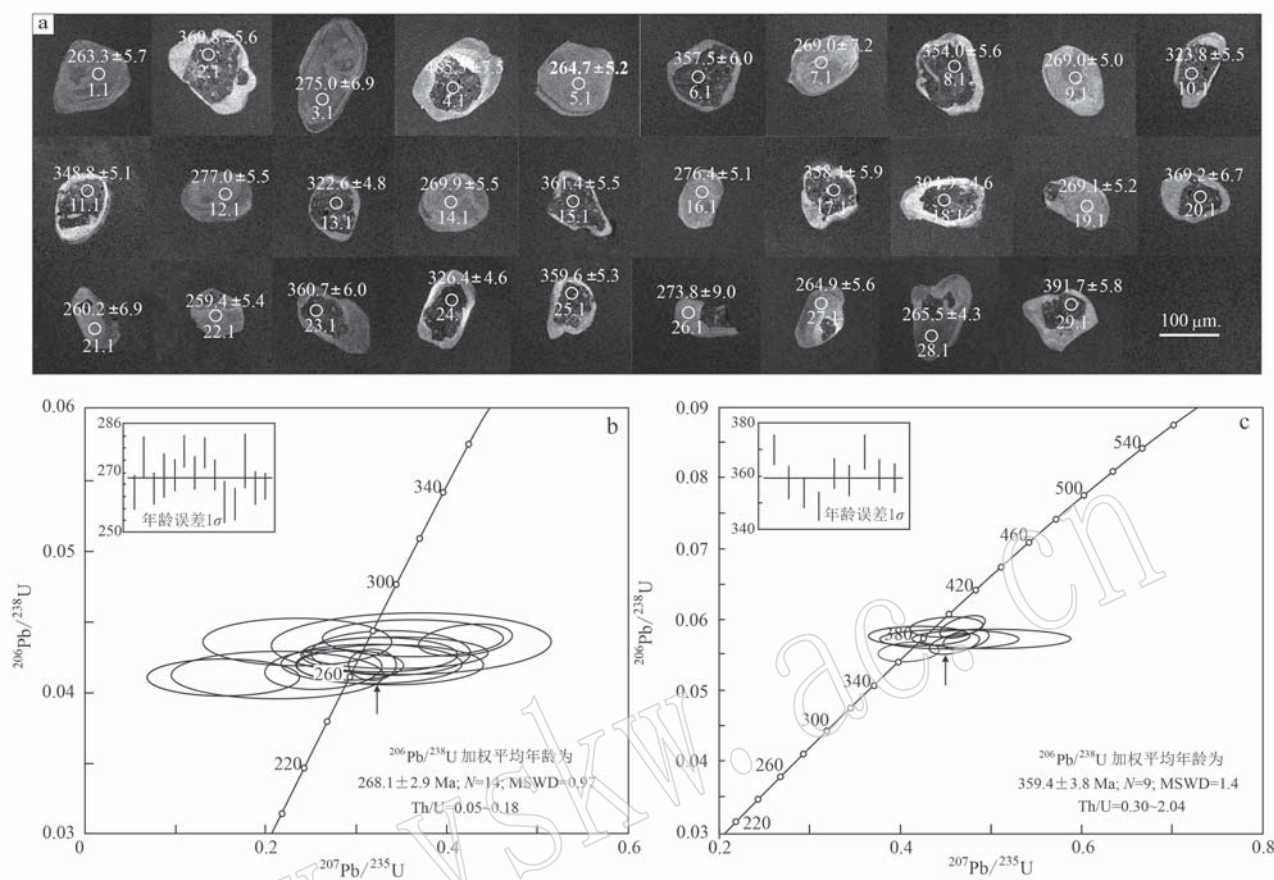


图5 榴英岩(样号 12100506)的锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of analyzed zircons and concordia plot showing zircon analysis from sample 12100506 in garnet quartzite

单一的榴英岩,也可以是榴英岩与石榴斜长角闪岩组合。在部分与石榴斜长角闪岩组合而成的透镜体中,细小榴英岩透镜体由于遭受后期构造变形而呈条带状,并与石榴斜长角闪岩交替出现。

(2) 榴英岩的主要矿物成分为石榴子石和石英,可见少量斜长石、角闪石及重晶石等矿物,副矿物有氟磷灰石、钛铁矿及铜铁硫化物等。其中,石榴子石属于铁铝榴石-钙铝榴石-镁铝榴石系列石榴子石,铁铝榴石分子、钙铝榴石分子及镁铝榴石分子分别为 51.70%~61.87%、23.08%~28.45%和 11.31%~16.75%,另有少量锰铝榴石分子和钙铁榴石分子。氟磷灰石呈矿物包裹体形式分布在石榴子石或石英颗粒内部,或分布在石英与石榴子石颗粒之间,包含氟磷灰石包裹体的石榴子石颗粒常具放射状减压膨胀缝。氟磷灰石的 F 含量为 1.65%~3.29%,显示出高压-超高压变质的属性,表明榴英岩的原岩曾经历

过高压-超高压变质作用;重晶石呈脉状产于角闪石颗粒的裂隙中或呈块状、粒状矿物单独产出,可能为榴英岩折返过程中氟磷灰石减压分解出溶的产物,同时伴随有铜铁硫化物的形成。

(3) 榴英岩形成的温度和压力分别为 667~710℃和 1.189~1.279 GPa,与矿物学特征所显示的压力属性相一致。

(4) 高压-超高压榴英岩的原岩可能为大陆边缘的陆源碎屑岩,物源区主要为晚古生代(晚泥盆世,锆石 U-Pb 年龄为 $359.4 \pm 3.8 \text{ Ma}$)岩浆岩。榴英岩的峰值变质年龄为 $268.1 \pm 2.9 \text{ Ma}$,这是榴英岩原岩发生高压-超高压变质作用的年龄,可能与古亚洲洋在晚古生代晚期(中二叠世晚期)向南俯冲消减作用有关。崇礼高压-超高压榴英岩的确定暗示古亚洲洋最终闭合(也即中亚造山带最终形成)之前,后期的洋壳俯冲消减过程中有部分陆壳物质的带入。

致谢 审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,这促成了本文学术水平的进一步提高,谨向他们致以真挚的感谢。

References

- Carswell D A, Wilson R N and Zhai M G. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultrahigh pressure eclogites in the Dabieshan of central China [J]. *Lithos*, 52: 121~155.
- Chu Hang, Wang Huichu, Wei Chunjing, *et al.* 2012. The metamorphic evolution history of high pressure granulites in Chengde area, northern margin of North China: Zircon chronology and geochemical evidence [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(6): 977~987 (in Chinese with English abstract).
- Chu Hang, Wang Huichu, Wei Chunjing, *et al.* 2013. Geochronology of the Paleozoic metamorphism in the Chicheng area, North Hebei and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1 234~1 246 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jing, Zeng Lingsen, Chen Fangyuan, *et al.* 2006. Primary study of exsolution in apatite from the Qinglongshan, Jiangsu Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1 921~1 926 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhenyu, Zeng Lingsen, Liang Fenghua, *et al.* 2006. On the mineral chemistry of apatite in eclogites from the CCSD main borehole and the geochemical behaviors of F, Cl, Sr and other elements in eclogites [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1 842~1 850 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhenyu, Zeng Lingsen and Meng Lijuan. 2009. Mineralogy and trace elemental geochemistry of apatite in Sulu eclogites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1 663~1 677 (in Chinese with English abstract).
- Dale J, Holland T and Powell R. 2000. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: A natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 353~362.
- Enami M and Banno S. 2000. Major rock-forming minerals in UHP metamorphic rocks[C]//Ernst W G & Liou J G. *Ultrahigh Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-type Orogenic Belts*. Columbia: Bellwether Publishing, 207~215.
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Yigang, *et al.* 1993. Early precambrian Manjinggou high-pressure granulite mélange belt on the south edge of the Huaian complex, North China Craton: geological features, petrology and isotopic geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 329~340 (in Chinese with English abstract).
- Hong Ji'an, Li Shuguang, William C M, *et al.* 2003. Needle-like exsolutions from apatite in ultrahigh -pressure eclogite and their genesis [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(3): 273~277 (in Chinese with English abstract).
- Ji Jianqing and Cheng Manyun. 1996. Genesis and significance of the myrmekitic symplectite from the Jianping metamorphic rock complex, the Western Liaoning, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 514~529 (in Chinese with English abstract).
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433~447.
- Kong Xu, Ni Zhiyao, Zhai Mingguo, *et al.* 2011. Time sequence of evolution for the retrograded eclogite from Chicheng, Northern Hebei Province: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(2): 15~22 (in Chinese with English abstract).
- Kapustin Y L. 1987. The composition of apatite from metamorphic rocks [J]. *Geochemistry International*, 24(4): 45~51.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names [J]. *Mineralogical Magazine*, 61: 295~321.
- Li Jianghai, Zhai Mingguo, Li Yonggang, *et al.* 1998. The discovery of Neoproterozoic high-pressure granulites in Luanping-Chengde area, Northern Hebei, and their tectono-geological implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 34~41 (in Chinese with English abstract).
- Liang Fenghua, Zeng Lingsen, Chen Jing, *et al.* 2006. Discovery of apatite with copper-bearing pyrrhotite exsolution in an eclogite from Rongcheng, eastern Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 433~438 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yao. 2015. Rock Association and Age Assignment of the Hongqiyingzi Group within Chongli County, North Hebei Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1~101 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yao, Ni Zhiyao, Kong Xu, *et al.* 2015. Geological characteristics and implication of Hongqiyingzi complex in Chicheng, North Hebei, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 42(3): 268~278 (in Chinese with English abstract).

- Liu Yican, Gu Xiaofeng, Li Shuguang, *et al.* 2007. Allanite and fluorapatite formed under ultrahigh-pressure conditions from the Luotian eclogites in the North Dabie complex zone[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 38(3): 933~939 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ziyang. 2018. Metamorphic Evolution and Zircon U-Pb Geochronology of Granulite within Pingquan, North Hebei Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1999. Using isoplot/EX, Version 2, a geochronological toolkit for Microsoft Excel [C]//Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1a: 47.
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02: A user manual [C]//Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2: 19.
- Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, *et al.* 1999. The isotope ages and their geological implications of high-pressure basic granulites in north region to Chengde, Hebei Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 524~531 (in Chinese with English abstract).
- Ni Z Y, Zhai M G, Wang R M, *et al.* 2004. Discovery of Late Paleozoic retrograded eclogites from the middle part of the northern margin of North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 600~606.
- 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.
- Ni Zhiyao, Zhai Mingguo, Wang Renmin, *et al.* 2004. Retrograded eclogites on the northern margin of North China Craton, Hebei Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(4): 381~390 (in Chinese with English abstract).
- Regional Geological Surveying Team of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. Geological Survey Report of Chicheng (SHEET K-50-26) with A Scale of 1:200 000[R]. 1~110 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1968. On recasting analyses of garnet into end-member molecules[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 18: 175~198.
- Spear F S and Pyle J M. 2002. Apatite, monazite and xenotime in metamorphic rocks[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 48(1): 293~335.
- Steiger R H and Tager E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359~362.
- Tang Qian, Sun Xiaoming, Xu Li, *et al.* 2006. Discovery of iron oxide, monazite and barite exsolution in apatite veins in eclogite from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1 915~1 920 (in Chinese with English abstract).
- Tian Tao, Ni Zhiyao, Pan Deng, *et al.* 2018. Late Paleozoic granites within Kangbao area, North Hebei Province: Zircon U-Pb dating and tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 53(2): 661~677 (in Chinese with English abstract).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [C]//McKibben M A, Shanks W C III and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Wang Fang, Chen Fukun, Hou Zhenhui, *et al.* 2009. Zircon ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition of late Paleozoic granitoids in the Chongli-Chicheng area, northern margin of the North China block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3 057~3 074 (in Chinese with English abstract).
- Wang Renmin, Chen Zhenzhen and Chen Fei. 1991. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi Province, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 36~45 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing, Zhang Cuiguang, Zhang Ali, *et al.* 2001. Metamorphic *P-T* conditions and geological significance of high pressure granulite from the Jianping complex, western Liaoning province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 269~282 (in Chinese with English abstract).
- Wu C M. 2019. Original calibration of a garnet geobarometer in metapelite[J]. *Mineral*, 9: 540.
- Yang Hong, Zhang Lifei and Liu Fulai. 2006. Barite-bearing UHP eclogite from the main borehole core of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1 892~1 897 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, *et al.* 1992. Discovery and preliminary study of Archean High Pressure basic granulite in North China[J]. *Science in China (Series B)*, 22(12): 1 325~1 330 (in Chinese).
- Zhong Changting, Mao Debao, Zhao Fengqing, *et al.* 2001. Rock units of the high-pressure granulite belt in the Northern Hebei Province North China: Their properties, isotopic and evolution[J]. *Progress in Precambrian Research*, 249(3): 175~183 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng and Massonne H J. 2005. Discovery of pyrrhotite exsolution in apatite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 405~410 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 初航, 王惠初, 魏春景, 等. 2012. 华北北缘承德地区高压麻粒岩的变质演化历史——锆石年代学和地球化学证据[J]. 地球学报, 33(6): 977~987.
- 初航, 王惠初, 魏春景, 等. 2013. 冀北赤城地区古生代变质作用年代学研究及构造意义[J]. 地质学报, 87(9): 1 234~1 246.
- 陈晶, 曾令森, 陈方远, 等. 2006. 江苏青龙山磷灰石中出溶体的初步研究[J]. 岩石学报, 22(7): 1 921~1 926.
- 陈振宇, 曾令森, 梁风华, 等. 2006. CCSD 主孔榴辉岩中磷灰石的矿物化学特征及对榴辉岩中 F、Cl、Sr 等元素地球化学行为的影响[J]. 地质学报, 80(12): 1 842~1 850.
- 陈振宇, 曾令森, 孟丽娟. 2009. 苏鲁榴辉岩中磷灰石的矿物学和微量元素地球化学[J]. 岩石学报, 25(7): 1 663~1 677.
- 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[J]. 岩石学报, 9(4): 329~340.
- 河北省地质矿产局区域地质调查大队. 1990. 赤城幅 1:20 万 (K-50-26) 区域地质调查报告[R]. 1~110.
- 洪吉安, 李曙光, William C T, 等. 2003. 超高压榴辉岩中磷灰石的针状出溶物及其成因[J]. 矿物学报, 23(3): 273~277.
- 季建清, 陈曼云. 1996. 辽西建平变质杂岩区蠕虫状后成合晶的成因与意义[J]. 岩石学报, 12(4): 514~529.
- 孔旭, 倪志耀, 翟明国, 等. 2011. 冀北赤城榴辉岩的时间序列: 来自锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的证据[J]. 矿物岩石, 31(2): 15~22.
- 李江海, 翟明国, 李永刚, 等. 1998. 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[J]. 岩石学报, 14(1): 34~41.
- 梁风华, 曾令森, 陈晶, 等. 2006. 胶东荣成榴辉岩中含铜磁黄铁矿出溶结构的磷灰石的发现及其意义[J]. 岩石学报, 22(2): 433~438.
- 刘瑶. 2015. 冀北崇礼红旗营子群的岩石组合及时代归属[D]. 成都理工大学, 1~101.
- 刘瑶, 倪志耀, 孔旭, 等. 2015. 冀北赤城红旗营子杂岩的地质特征及意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 42(3): 268~278.
- 刘貽灿, 古晓峰, 李曙光, 等. 2007. 北大别罗田超高压榴辉岩中峰期变质矿物: 褐帘石和氟磷灰石[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8): 933~937.
- 刘子燕. 2018. 冀北平泉麻粒岩的变质演化及锆石 U-Pb 年代学特征[D]. 成都理工大学, 1~10.
- 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 1999. 承德北部高压基性麻粒岩的同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 15(4): 524~531.
- 倪志耀, 翟明国, 王仁民, 等. 2004. 华北古陆块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.
- 汤倩, 孙晓明, 徐莉, 等. 2006. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 榴辉岩磷灰石脉体中铁的氧化物、重晶石和独居石出溶物的发现及其意义[J]. 岩石学报, 22(7): 1 915~1 920.
- 田涛, 倪志耀, 潘登, 等. 2018. 冀北康保晚古生代花岗质岩浆作用: 年龄数据及构造意义[J]. 地质科学, 53(2): 661~677.
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 等. 2009. 华北陆块北缘崇礼-赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 25(11): 3 057~3 074.
- 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[J]. 岩石学报, 7(4): 36~45.
- 魏春景, 张翠光, 张阿利, 等. 2001. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 $P-T$ 条件及其地质意义[J]. 岩石学报, 17(2): 269~282.
- 杨红, 张立飞, 刘福来. 2006. 中国大陆科学钻探主孔榴辉岩中重晶石的发现及其意义[J]. 地质学报, 80(12): 1 892~1 897.
- 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[J]. 中国科学(B 辑), 22(12): 1 325~1 330.
- 钟长汀, 毛德宝, 赵凤清, 等. 2001. 冀北高压麻粒岩带岩石组合性质、同位素特征及其演化[J]. 前寒武纪研究进展, 24(3): 175~183.
- 朱永峰, Massonne H J. 2005. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现[J]. 岩石学报, 21(2): 405~410.