

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.903



胶北地块斜长角闪岩的岩石学与年代学研究

陈爽, 李旭平*, 段文勇, 孙光明, 冯庆达

山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘要: 胶北地块位于华北克拉通东部陆块, 胶-辽-吉活动带的南端, 胶北地区荆山杂岩中存在一组与高压基性麻粒岩密切共生的斜长角闪岩, 是构成前寒武纪变质基底的重要组成部分。岩石学矿物学研究表明, 斜长角闪岩记录了3个阶段的变质作用: 峰期变质矿物组合(M1)为角闪石+斜长石+榍石, 根据NCKFMASHTO体系的成分视剖面图和角闪石压力计估算出温度条件 $T=660\sim 715\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力条件 $P=0.65\sim 0.71\text{ GPa}$; 其后经历了退变质作用(M2), 矿物组合为角闪石+绿帘石+斜长石+绿泥石+钠长石, 估算温压条件为 $537\sim 630\text{ }^{\circ}\text{C}/0.41\sim 0.58\text{ GPa}$; 晚期发生前绿片岩相退变质作用(M3), 其矿物组合为钠长石+葡萄石+绿泥石+方解石, 其温压条件 $<400\text{ }^{\circ}\text{C}/0.35\text{ GPa}$ 。斜长角闪石的CL图像显示其具有较弱的阴极发光效应和弱震荡环带, Th/U比值相对较小(0.06~0.43), 锆石形态和内部结构指示锆石形成于深熔作用过程, 21个锆石的LA-ICP-MS定年研究的结果表明, 斜长角闪岩记录的最老 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $2\ 075\pm 25\text{ Ma}$, 上交点年龄为 $1\ 845\pm 23\text{ Ma}$ (MSWD=0.35), 该组年龄记录了斜长角闪岩峰期变质作用时代的上限。斜长角闪岩在原岩形成以后, 可能曾经历麻粒岩相变质作用, 并记录了在胶-辽-吉带~1.85 Ga碰撞闭合过程中的深熔事件, 此后经历了角闪岩相变质作用, 及其二次退变质作用, 终结于前绿片岩相的变质温压条件。

关键词: 斜长角闪岩; 矿物化学; 年代学; 变质作用; 胶北地块。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)03-0716-17

收稿日期: 2017-12-25

Petrological and Geochronological Study of Amphibolite from Jiaobei Terrane

Chen Shuang, Li Xuping*, Duan Wenyong, Sun Guangming, Feng Qingda

College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: Jiaobei terrane lies in the southern segment of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt, eastern block of the North China craton. There is a set of amphibolite closely related to the high-pressure mafic granulite in Jingshan complex of Jiaobei terrane, which is an important component of the Precambrian metamorphic basement. Our petrological and mineralogical study shows that amphibolite records three stages of metamorphism. The peak stage (M1) shows a mineral assemblage $\text{Amp}_1 + \text{Pl} + \text{Ttn}$. The temperature calculated by pseudosection modeling and estimated pressure conditions are $T=660\text{--}715\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=0.65\text{--}0.71\text{ GPa}$. The mineral assemblage at post-peak stage (M2) is $\text{Amp}_2 + \text{Ep} + \text{Pl} + \text{Chl} + \text{Ab}$, suggesting temperature and pressure conditions $537\text{--}630\text{ }^{\circ}\text{C}/0.41\text{--}0.58\text{ GPa}$. The mineral assemblage at retrograde stage (M3) is $\text{Ab} + \text{Prh} + \text{Chl} + \text{Cal}$. Prehnite and calcite veins indicate that the amphibolite underwent a prehnite-pumpellyite facies metamorphism with $P\text{--}T$ conditions $<400\text{ }^{\circ}\text{C}/0.35\text{ GPa}$. LA-ICP-MS U-Pb geochronology combined with cathodoluminescence (CL) imaging of 21 zircons are all characterized by relatively low Th/U ratios (0.06–0.43), low luminescence and weakly oscillatory zoning. The morphological and internal structure features of zircons suggest that their growths were associated with partial melting, and they yielded $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean ages of $1\ 845\pm 23\text{ Ma}$ (MSWD=0.35). After formation of the mafic rock, it may have experienced granulite facies metamorphism, and then recorded the anataxis event during collisional convergence of the Jiao-Liao-Ji orogenic belt at ~1.85 Ga. The investigated amphibolite recorded amphibolite facies metamorphism, and subsequently two episodes of

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272072); 山东科技大学校创新团队项目(No.2015TDJH101); 国际(地区)合作与交流项目(No.41761144061)。

作者简介: 陈爽(1992-), 博士研究生, 矿物岩石学专业。ORCID:0000-0001-5445-2561.E-mail:15610026636@163.com

* **通讯作者:** 李旭平, ORCID:0000-0002-5408-8963.E-mail:lixuping@sdust.edu.cn

引用格式: 陈爽, 李旭平, 段文勇, 等, 2018. 胶北地块斜长角闪岩的岩石学与年代学研究. 地球科学, 43(3): 716–732.

retrogressive metamorphism during the lift of the belt.

Key words: amphibolite; mineral chemistry; geochronology; metamorphism; Jiaobei terrane.

0 引言

自胶北前寒武纪变质基底中的高压基性麻粒岩与高压泥质麻粒岩相继被发现以来(刘文军等, 1998;周喜文等,2004),国内外学者对胶北高压麻粒岩及相关岩石的矿物学、岩石学、变质演化、构造解析、岩石地球化学、年代学及其成因机制等做了大量的研究,并取得许多重大进展(Zhao *et al.*, 1998,

2001,2005,2012;Wan *et al.*,2006;Zhao and Zhai, 2013).如在对胶北高压麻粒岩及其相关岩石的锆石年代学和变质作用研究中,发现本区不同类型的基底岩石变质锆石不同程度地记录了两组具有重要地质意义的年代学信息,其中一组年龄为 1.95~1.87 Ga,代表了高压麻粒岩相变质时代,该类变质锆石微区含有高压麻粒岩相典型矿物组合;而第二

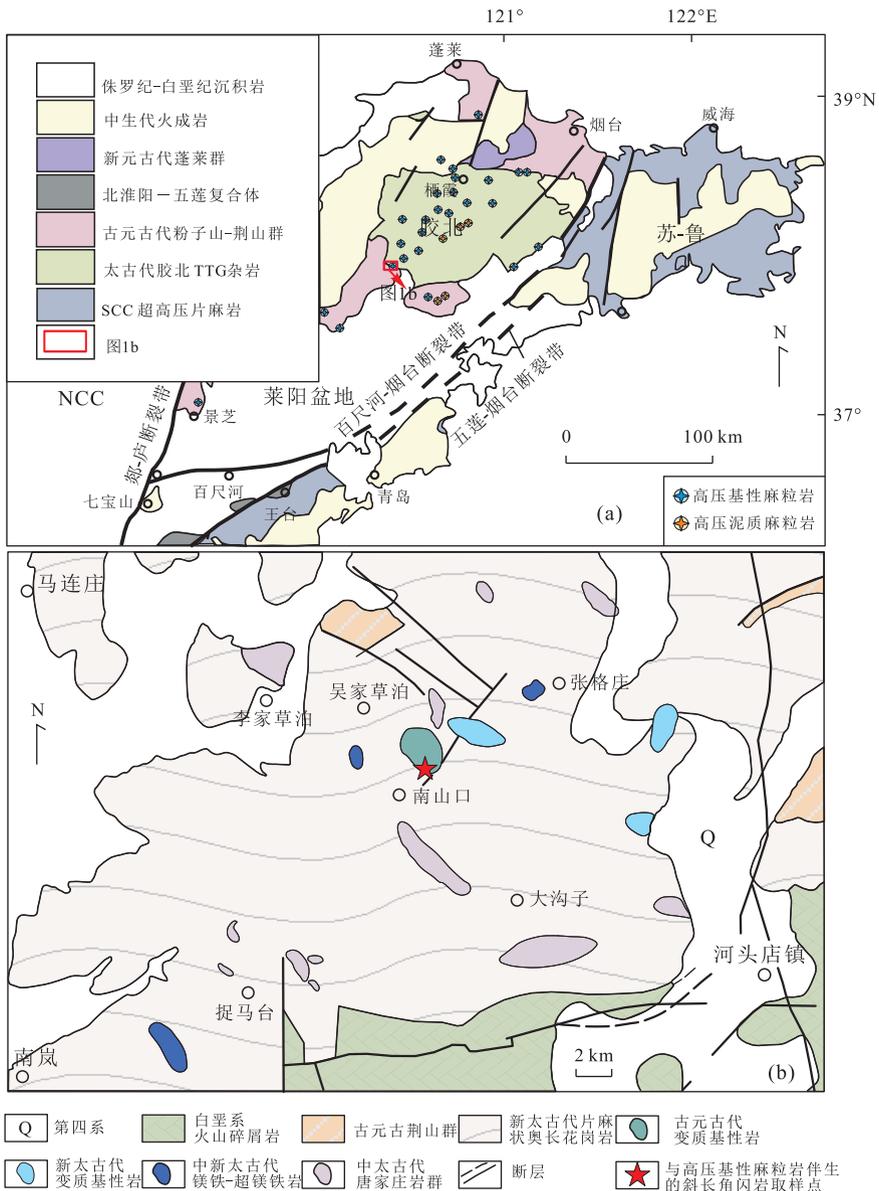


图 1 (a)胶东地区地质构造简图和研究区马连庄—河头店一带地质图及采样位置(b)

Fig.1 (a) Geological schematic map of the Jiaodong district; (b) geological map and sample localities in malianzhuang-hetoudian of study area

a 据周喜文等(2004)和 Tam *et al.*(2011)修改;b 据李旭平等(2013)

组变质年龄为 1.86~1.80 Ga, 该类变质锆石微区常含有中低压麻粒岩相典型矿物组合, 代表了造山后高压麻粒岩退变质时代以及造山后伸展过程中变基性岩的侵位时代. 从而构建了胶北地体中高压麻粒岩顺时针的 P - T - t 轨迹 (刘平华等, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2017; Tam *et al.*, 2011; 刘福来等, 2012; Liu *et al.*, 2014).

尽管前人的研究取得了上述重大的进展与突破, 但是仍有一些问题有待解决, 例如目前胶—辽—吉带关于变质岩石学和年代学的研究主要集中于高压泥质和高压基性麻粒岩峰期变质作用以及其后的等温降压退变质作用, 但关于二次抬升阶段的等压冷却作用的研究资料却比较少. 近期, 笔者在本区域内太古代岩石与元古代岩石交界处发现与高压基性麻粒岩密切共生的斜长角闪岩, 目前对于这些斜长角闪岩缺乏较为深入的研究. 因此, 本文在综合前人已有的对于本区高压基性麻粒岩的研究基础上, 以胶北地区南山口斜长角闪岩为研究对象, 通过对斜长角闪岩的岩石学、矿物学、变质演化以及年代学的综合研究, 探讨斜长角闪岩的变质作用 P - T 条件并构筑其 P - T - t 轨迹, 以丰富对胶北地区相关岩石在后期等压降温阶段中变质作用及演化历史的认识.

1 地质背景

胶北地块前寒武纪变质基底包括晚太古代和古元古代岩石. 晚太古代岩石主要为 TTG 片麻岩和少量含基性麻粒岩、斜长角闪岩透镜体的表壳岩 (胶东岩群和唐家庄岩群). TTG 片麻岩呈穹隆状大面积出露, 包括英云闪长片麻岩、奥长花岗片麻岩、花岗闪长片麻岩以及少量花岗质片麻岩. 已有的年代学结果表明, 花岗质片麻岩的原岩时代主要为 ~2.5 Ga 和 ~2.1 Ga (刘建辉等, 2011), TTG 质片麻岩的原岩形成时代可分为 ~2.90 Ga、~2.70 Ga 和 ~2.50 Ga 3 期 (Jahn *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011; Liu *et al.*, 2013). 古元古代岩石包括粉子山群和荆山群, 粉子山群主要出露在胶北地块的西北部, 包含泥质片岩、细粒副片麻岩、大理岩、钙硅酸大理岩和少量斜长角闪岩; 荆山群位于东南部, 包含变质程度较高的泥质麻粒岩、泥质片麻岩、长英质副片麻岩、钙硅酸盐岩、大理岩、石英岩和少量高压泥质麻粒岩 (周喜文等, 2004, 2007; 王舫等, 2010; Tam *et al.*, 2011). 粉子山群与荆山群变质程度为角闪岩相到麻粒岩相, 其峰值和峰后变质年

龄分别为 1.93~1.90 Ga 和 1.86~1.80 Ga (Zhou *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011; Zhao and Guo, 2012). 这套古元古代变质岩系被中—新元古代蓬莱群不整合覆盖, 蓬莱群岩石组合包括变质灰岩、板岩和石英岩等 (Faure *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2008). 胶北地区还出现较多的变基性—超基性岩, 主要分布在莱西—莱阳、栖霞一带的新太古代花岗质或 TTG 质片麻岩中 (李旭平等, 2011, 2013; 孔凡梅等, 2015), 它们常以不规则透镜体、岩墙/岩脉群等形式产出 (刘平华等, 2015), 岩性为斜长角闪岩和基性麻粒岩 (图 1), 其面理与周围 TTG 和花岗质片麻岩一致. 本文研究的斜长角闪岩样品采自莱西北部马连庄镇南山口村, 来自采坑中挖出的 0.5~1.5 m 大小的大岩块.

2 分析方法

锆石制靶、抛光、CL 图像、LA-ICP-MS 测年均是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成. CL 图像是利用 FEI Quanta400 FEG 型场发射扫描电镜装载的 Mono CL3+ 阴极发光系统装置完成的. 激光剥蚀等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 采用德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 2005 型 193 nm 的 ArF 准分子激光器及相应的光学系统, 与 ICP-MS 联用构成. 锆石测年斑束为 32 μm , 激光脉冲频率为 6 Hz, 标样采用 91500 和 GJ-1, 微量元素采用 Nist610, 对 Ti、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 积分时间采用 20 ms, Th、U 采用 10 ms, 其余采用 6 ms. 数据处理采用 GLITTER4.0 程序进行. 普通 Pb 校正方法见 Anderson, 协和图采用 Isplot3 绘制.

矿物的电子探针分析数据是在德国 Ruhr University Bochum 电子探针实验室完成, 仪器型号 Cameca SX50; 分析条件: 加速电压 15 kV, 束流 15 nA, 束斑 1 μm . 用天然矿物硬玉 (Si)、镁橄榄石 (Mg)、铁铝榴石 (Fe)、钠长石 (Na, Al)、金红石 (Ti)、锰铝榴石 (Mn)、透长石 (K) 和 Cr_2O_3 (Cr) 做标准样品.

电子探针成分分析是在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的 JXA-8100 (JEOL) 上进行的. 分析条件: 加速电压 15 kV, 束流 20 nA, 束斑直径: <1 μm . 使用的标样: K、Na、Ca、Mg、Al、Ti 为美国国家标准局天然矿物标样——角闪石标样, Fe、Mn 用铁橄榄石标样, 而测角闪石中的 Si 用角闪石标样, 测斜长石中的 Si 用铁橄榄石标样. 文

中使用的矿物代号引自 Whitney and Evans(2010).

3 岩石学特征与矿物化学特征

3.1 岩相学特征

斜长角闪岩(09LY21、09LY23)主要由角闪石

(70%)、斜长石(15%~20%)和少量的绿帘石、绿泥石、葡萄石、榍石、方解石组成,此外还有5%左右的细粒不透明铁-钛氧化物矿物.中-细粒变晶结构,块状-弱片麻状构造(图 2).大部分角闪石(Amp₁)单偏光下呈深褐至浅褐色,颗粒较大(0.5~2.0 mm)常具有三连点结构(图 3a);在大颗粒角闪石周围还

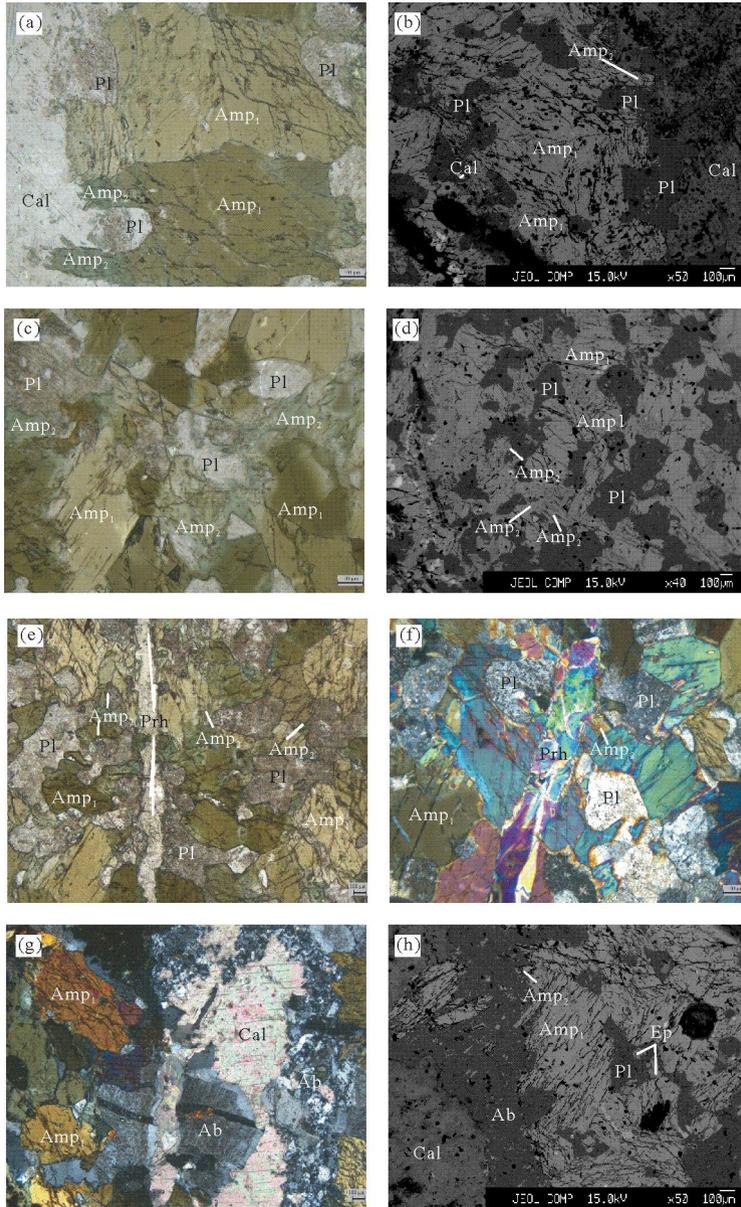


图 2 胶北地块斜长角闪岩的显微结构照片

Fig.2 Photomicrographs of amphibolite from Jiaobei terrane

a.样品 09LY21 的峰期(M1)角闪石颗粒较大(Amp₁),可见三连点结构,与斜长石(Pl)共生(单偏光图像);b.样品 09LY21 背散射(BSE)图像;c.样品 09LY23 峰期后(M2)角闪石边缘发生退变质形成退变角闪石(Amp₂),斜长石(Pl)开始退变质为钠长石(Ab)(单偏光图像);d.样品 09LY23 背散射(BSE)图像;e.样品 09LY23 中可见晚期(M3)出现葡萄石(Prh)脉体(单偏光图像);f.样品 09LY23 中斜长石(Pl)边缘浑圆,角闪石(Amp₁)港湾状边缘(正交偏光图像);g.样品 09LY23 中可见晚期(M3)出现方解石(Cal)脉体,斜长石(Pl)完全退变质为钠长石(Ab)端元(正交偏光图像);h.样品 09LY23 中部分角闪石(Amp₂)退变质为绿帘石(Ep),靠近方解石脉的斜长石均为钠长石(Ab)(背散射图像)

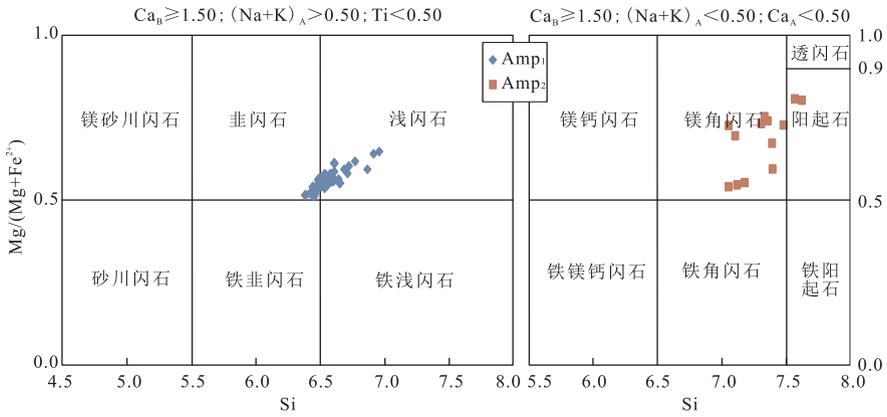


图 3 胶北地块斜长角闪岩中角闪石的 Si-Mg/(Mg+Fe²⁺) 成分分类图

Fig.3 Si-Mg/(Mg+Fe²⁺) diagram of amphibole from amphibolites in the Jiaobei terrane 据 Leake *et al.*(1997)

有少量细粒(≤0.5 mm)、浅蓝绿色角闪石,为晚期退变质的产物(Amp₂)。斜长石大多呈他形粒度为0.2~1.5 mm,常以不规则港湾状边联结在一起(图2d),指示峰期可能发生了部分熔融;部分斜长石沿方解石脉分布,粒径为20~100 μm。绿泥石、绿帘石、榍石很少,多分布于角闪石周围,可能为后期退变质阶段的产物。此外还存在脉状方解石和葡萄石。

3.2 矿物化学特征

3.2.1 角闪石 岩相学观察表明角闪石可分为两类:峰期变质角闪石(Amp₁)和退变质角闪石(Amp₂),二者在成分上明显不同。峰期角闪石(Amp₁) SiO₂ 含量较低,为41.94%~45.74%, Al₂O₃ 含量较高(8.42%~11.46%), TiO₂ 含量高(1.01%~1.76%);而退变质角闪石(Amp₂) SiO₂ 含量较高,为46.21%~48.67%, Al₂O₃ 含量较低(5.68%~7.83%), TiO₂ 含量较低,为0.09%~0.75%。此外,两类角闪石 FeO_T、MgO、Na₂O 和 K₂O 含量也存在明显差异。根据 Leake *et al.*(1997)角闪石命名法(图3),峰期角闪石(Amp₁)为非闪石-浅闪石,退变质角闪石(Amp₂)为镁角闪石-阳起石。在 Al^{IV}-Ti 和 Ti-(Na+K) 变异图上(图4),峰期角闪石(Amp₁)落在麻粒岩-高角闪岩相区,而峰期后退变质角闪石(Amp₂)落在低角闪岩相-绿片岩相区。

3.2.2 斜长石与其他矿物 斜长角闪岩中大颗粒斜长石为更长石 An=15.44~20.35,而方解石脉周围的细粒斜长石为钠长石, An=5.94~8.92。绿帘石和绿泥石为典型的角闪石退变质后形成的矿物(表2)。葡萄石是典型的葡萄石-绿纤石相矿物,与方解石脉共同出现。

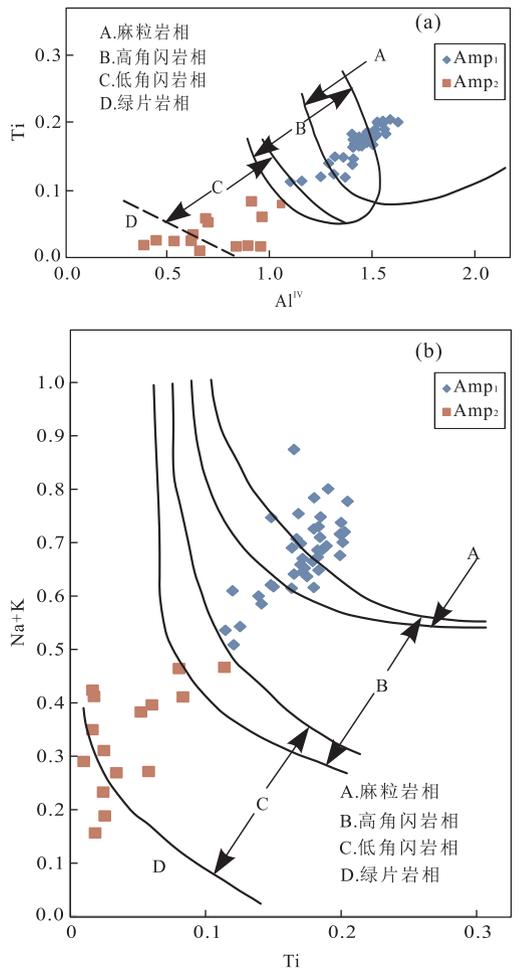


图 4 胶北地块斜长角闪岩中角闪石的 Al^{IV}-Ti (a) 和 Ti-(Na+K) (b) 成分图解

Fig.4 Amphibole chemistry from amphibolites in the Jiaobei terrane Al^{IV}-Ti (a) diagram and Ti-(Na+K) (b) diagram 据靳是琴(1991)

表 1 胶北地块斜长角闪岩中角闪石化学成分(%)特征

Table 1 Amphibole compositions (%) in the amphibolites from Jiaobei terrane

样品编号	09LY21					09LY23					09LY23				
	Amp ₁	Amp ₂													
SiO ₂	42.25	42.38	41.95	41.94	42.04	45.74	45.12	43.96	44.65	43.00	46.21	47.67	48.36	46.7	48.67
TiO ₂	1.61	1.60	1.72	1.59	1.76	1.01	1.01	1.23	1.11	1.21	0.15	0.75	0.22	0.53	0.09
Al ₂ O ₃	11.16	11.29	11.42	11.46	11.41	8.42	9.07	9.93	10.08	10.28	7.67	7.46	5.72	7.83	5.68
FeO	16.77	16.44	17.25	16.86	17.31	15.68	16.57	15.64	16.49	16.63	18.22	14.57	17.63	14.94	15.89
MnO	0.33	0.34	0.37	0.32	0.36	0.37	0.34	0.31	0.32	0.32	0.34	0.32	0.39	0.36	0.31
MgO	9.78	9.70	9.20	9.73	9.28	11.88	10.47	10.55	10.66	10.29	9.27	12.49	9.89	12.03	11.78
CaO	11.35	11.54	11.35	11.35	11.29	11.19	11.49	11.47	12.1	11.61	11.84	11.76	11.87	11.71	12.08
Na ₂ O	1.7	1.56	1.58	1.65	1.60	1.14	1.35	1.33	1.27	1.34	1.19	1.08	0.91	1.01	0.87
K ₂ O	1.25	1.26	1.26	1.23	1.25	0.70	0.72	0.99	0.90	1.04	0.29	0.52	0.21	0.53	0.19
Sum	96.20	96.11	96.10	96.13	96.30	96.13	96.14	95.41	97.58	95.72	95.18	96.62	95.20	95.64	95.56
Oxygens	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Si	6.47	6.48	6.45	6.43	6.45	6.90	6.84	6.71	6.69	6.60	7.11	7.09	7.38	7.04	7.34
Al ^{IV}	1.53	1.52	1.55	1.57	1.55	1.10	1.16	1.29	1.31	1.40	0.89	0.91	0.62	0.96	0.66
Al ^{VI}	0.49	0.52	0.52	0.50	0.51	0.39	0.47	0.50	0.47	0.46	0.50	0.39	0.41	0.43	0.35
Ti	0.19	0.18	0.20	0.18	0.20	0.11	0.12	0.14	0.13	0.14	0.02	0.08	0.03	0.06	0.01
Fe ³⁺	0.29	0.33	0.32	0.29	0.32	0.52	0.50	0.45	0.43	0.37	0.61	0.62	0.76	0.59	0.71
Fe ²⁺	1.86	1.77	1.89	1.88	1.9	1.45	1.60	1.54	1.63	1.77	1.73	1.19	1.49	1.29	1.29
Mn	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
Mg	2.23	2.21	2.11	2.23	2.12	2.67	2.37	2.40	2.38	2.35	2.13	2.77	2.25	2.70	2.65
Ca	1.86	1.89	1.87	1.87	1.86	1.81	1.87	1.88	1.94	1.91	1.95	1.87	1.94	1.89	1.95
Na	0.50	0.46	0.47	0.49	0.47	0.33	0.40	0.39	0.37	0.40	0.36	0.31	0.27	0.29	0.25
K	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.13	0.14	0.19	0.17	0.20	0.06	0.10	0.04	0.10	0.04
Mg/(Mg+Fe)	0.55	0.56	0.53	0.54	0.53	0.65	0.60	0.61	0.59	0.57	0.55	0.70	0.60	0.68	0.67

表 2 胶北地块斜长角闪岩中代表性矿物化学成分(%)特征

Table 2 Representative mineral compositions (%) in the amphibolites from Jiaobei terrane

样品	09LY23						09LY21		
	钠长石	斜长石	绿帘石	绿帘石	绿泥石	葡萄石	斜长石	绿帘石	楣石
矿物点数	5	3	2	2	2	2	3	2	1
SiO ₂	65.18	64.09	37.36	38.40	25.70	42.92	64.74	37.22	30.87
TiO ₂	0.03	0.07	0.23	0.19	0.06	0.04	0.02	0.27	36.83
Al ₂ O ₃	20.79	22.49	27.14	27.24	19.20	28.12	24.09	26.64	1.90
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
Fe ₂ O ₃	0.07	0.12	7.66	8.21	1.17	0.14	0.20	8.29	0.00
FeO	0.00	0.00	0.99	0.07	23.50	0.00	0.00	1.50	0.52
MnO	0.00	0.00	0.24	0.17	0.28	0.01	0.00	0.51	0.05
MgO	0.01	0.01	0.00	0.03	15.47	0.01	0.03	0.06	0.02
CaO	1.31	2.96	23.57	23.72	0.16	18.20	3.94	22.84	29.19
Na ₂ O	11.36	8.91	0.08	0.05	0.27	2.49	8.44	0.11	0.03
K ₂ O	0.09	0.07	0.01	0.00	0.07	0.08	0.12	0.03	0.01
Totals	98.84	98.73	97.29	98.08	85.88	92.01	101.59	97.46	99.44
Oxygens	8.00	8.00	12.50	12.50	14.00	11.00	8.00	12.50	5.00
Si	2.90	2.85	2.95	3.00	2.76	2.99	2.80	2.95	1.01
Al	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07
Ti	1.09	1.18	2.53	2.51	2.43	2.31	1.23	2.49	0.91
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.46	0.48	0.09	0.01	0.01	0.50	0.00
Mg	0.00	0.00	0.07	0.01	2.11	0.00	0.00	0.10	0.00
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.03	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	2.48	0.00	0.00	0.01	0.00
Na	0.98	0.77	2.00	1.98	0.02	1.36	0.71	1.94	0.00
Ca	0.06	0.14	0.01	0.01	0.06	0.34	0.18	0.02	1.03
K	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Sum	5.04	4.95	8.05	8.00	10.00	7.02	4.94	8.05	3.04
An	5.94	15.44			20.35				
Ab	93.55	84.12			78.94				

表 3 胶北斜长角闪岩(09LY21、09LY23)温压估算结果

Table 3 P - T estimates for amphibolite(09LY21、09LY23)in Jiaobei terrane

样品号	样品	Si _{Hb}	X _{ab}	K _D	LnK _D	Al ^T _{Hb}	$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{GPa})$
09LY21	Amp ₁	6.473	0.79	1.295	0.259	2.015	715.316	0.658
	Amp ₁	6.485	0.79	1.312	0.272	2.037	711.444	0.668
	Amp ₁	6.449	0.79	1.263	0.234	2.068	716.084	0.683
	Amp ₁	6.433	0.79	1.242	0.216	2.072	718.967	0.685
	Amp ₁	6.448	0.79	1.262	0.232	2.063	716.692	0.681
09LY23	Amp ₁	6.896	0.85	2.36	0.859	1.496	650.188	0.411
	Amp ₁	6.845	0.85	2.216	0.796	1.621	651.864	0.471
	Amp ₁	6.713	0.85	1.898	0.641	1.787	665.453	0.55
	Amp ₁	6.69	0.85	1.847	0.614	1.779	670.396	0.546
09LY23	Amp ₂	6.597	0.85	1.667	0.511	1.859	682.051	0.584
	Amp ₂	7.043	0.97	3.179	1.157	1.480	607.684	0.403
	Amp ₂	7.087	0.97	3.38	1.218	1.307	609.695	0.321
	Amp ₂	7.38	0.97	5.456	1.697	1.029	563.795	0.189
	Amp ₂	7.037	0.97	3.152	1.148	1.391	614.334	0.361
Amp ₂	7.339	0.97	5.052	1.620	1.010	574.368	0.180	

注:温度计算采用 Blundy and Holland(1990),压力计算采用 Schmidt(1992)。

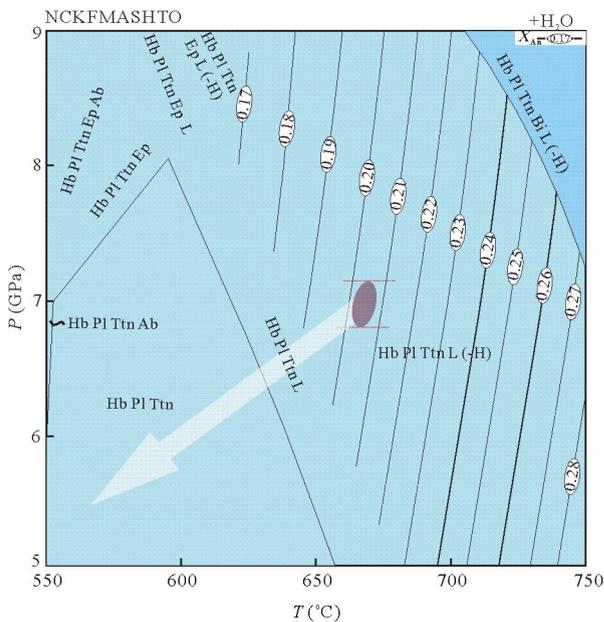


图 5 胶北地块斜长角闪岩(09LY21)在 NCKFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面

Fig. 5 P - T pseudosections for the amphibolite sample (09LY21) from Jiaobei terrane in the systems of NCKFMASHTO

图中矿物代号: Hb 为角闪石; Bi 为黑云母; Pl 为斜长石; Ab 为钠长石; Ep 为绿帘石; Ttn 为榍石; L 为熔体; H 为水, 全岩成分分析是利用德国鲁尔大学矿物、地质、地球物理研究生化学实验室 X-射线荧光光谱仪 (Philips PW 1400) 分析测定, 在 NCKFMASHTO 体系标准化之后的摩尔百分比为: $\text{SiO}_2 = 51.85$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8.51$ 、 $\text{CaO} = 11.28$ 、 $\text{MgO} = 11.77$ 、 $\text{FeO} = 11.37$ 、 $\text{K}_2\text{O} = 0.59$ 、 $\text{Na}_2\text{O} = 3.31$ 、 $\text{TiO}_2 = 0.72$ 、 $\text{O} = 0.51$

3.3 斜长角闪岩变质作用的 P - T 条件估算

根据斜长角闪岩中的矿物组合与相互关系, 可

划分出 3 个变质阶段: 峰期变质阶段 (M1)、峰期后退变质阶段 (M2) 和晚期退变质阶段 (M3)。

为了确定斜长角闪岩峰期阶段的 P - T 条件, 我们选择在 NCKFMASHTO (Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - O) 体系下进行相平衡模拟, 计算软件采用 THERMOCALC 3.45 (Powell *et al.*, 1998; 2016 年更新), 内部一致性热力学数据库采用 2011 年发表的最新版 ds62.txt, 流体组分设为纯 H_2O , 其他固溶体模型见 Green *et al.* (2016) 和 Powell *et al.* (2014), 全岩成分采用 XRF 分析结果并换算为模式体系中的摩尔百分比。 CO_2 和 P_2O_5 分别按照碳酸钙 $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2$ 和磷灰石 $(\text{CaO})_5 \cdot (\text{P}_2\text{O}_5)_{1.5} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{0.5}$ 扣除相应的组分。

岩相学观察所确定的峰期矿物组合 (M1) $\text{Amp}_1 + \text{Pl} + \text{Ttn} + \text{L}$ (熔体) 在图 5 中稳定在 $>600^{\circ}\text{C}$ 的高温部分, 在该稳定域中, 斜长石中 An 含量的等值线与 y 轴近平行, 并且随温度的升高而增加。利用所测定的斜长石 An 最大值为 0.2035, 并结合角闪石全铝压力计 (Schmidt, 1992) 估算其峰期温压条件, 估算结果为 $T = 660 \sim 675^{\circ}\text{C}$, $P = 0.68 \sim 0.71 \text{ GPa}$ 。

利用角闪石-斜长石温度计 (Blundy and Holland, 1990) 结合角闪石全铝压力计 (Schmidt, 1992) 得到峰期变质 P - T 条件为 $711 \sim 719^{\circ}\text{C}/0.68 \sim 0.71 \text{ GPa}$, 所计算的温度略高于相平衡模拟的结果 (表 3)。此外, 还利用锆石-Ti 温度计 (Watson *et al.*, 2006) 确定了斜长角闪岩的形成温度, 其所测定的锆石 Ti 含量为 2.72%~6.79%, 温度结果为 $648 \sim$

715 °C,与上述结果基本一致.

峰期后退变质阶段(M2)矿物组合为 Amp₂ + Ep+Pl+Chl+Ab.采用角闪石-斜长石温度计和角闪石的全铝压力计得到其 P-T 条件为 0.41~0.58 GPa/537~630 °C(表 3).

晚期退变质阶段(M3)矿物组合为 Ab+Prh+Chl+Cal.该矿物组合为典型的葡萄石绿纤石相矿物组合,葡萄石绿纤石相温压条件大致为 P=0.25~0.35 GPa,T=360~400 °C(程素华和游振东,2016).

4 锆石年代学分析

样品 09LY21 中锆石半自形到自形,颗粒较大,粒径 50~250 μm,具有较大的长宽比,晶棱较清晰.CL 图像(图 6)可见相对弱发光效应,内部结构清晰,部分自形锆石无明显的核边结构,整体呈现弱的振荡环带特征,这些锆石可能生长自深熔作用过程中的熔体(Liati and Gebauer, 1999; Zeh *et al.*, 2010).部分锆石颗粒边缘发育有一层 CL 发光较强的薄的增生边,有的具有面状分带或云雾状分带特征,这些锆石可能经历了后期变质作用的改造(Wu and Zheng, 2004).

对斜长角闪岩 09LY21 样品的锆石进行了 LA-ICP-MS 定年分析(表 4),对 21 个测试点进行定年,在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 关系图解中(图 7),这些锆石测试点皆落在谐和线上.²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 1 748±38 Ma~2 075±25 Ma,表明原岩年龄的下限应该在古元古代;20 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 上交点年龄为 1 845±23 Ma(MSWD=0.35).除了最老锆石的 Th/U 比值为 0.74,其他锆石的 Th/U 变化于 0.06~0.43.

样品 09LY21 中锆石的 LREE 相对亏损, HREE 相对富集,稀土元素总量较高,ΣREE 平均值为 811×10⁻⁶.Lu/Hf 平均比值为 0.007 7,Y 元素含量为 476.8×10⁻⁶~3 104.8×10⁻⁶,Th、U 含量变化范围较大,分别介于 69.87×10⁻⁶~2 491.66×10⁻⁶和 462.52×10⁻⁶~8 559.97×10⁻⁶之间,Th/U 比值相对较高,变化范围在 0.059~0.719 之间,平均值 0.21.Nb、Ta 含量分别为 1.74×10⁻⁶~29.68×10⁻⁶和 0.95×10⁻⁶~15.24×10⁻⁶,Nb/Ta 比值为 1.34~3.08,比值较高.

样品 09LY21 锆石的球粒陨石标准化的配分模式(图 8)显示,锆石稀土元素配分模式显示两种类型,第一类锆石 Ce 高正异常(Ce/Ce* = 2.28~

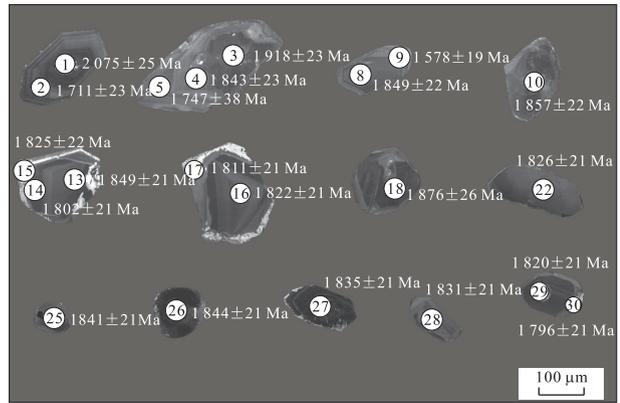


图 6 样品 09LY21 锆石阴极发光图像和 ²⁰⁶Pb/²³⁸Pb 年龄
Fig.6 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from sample 09LY21 with ²⁰⁶Pb/²³⁸Pb ages

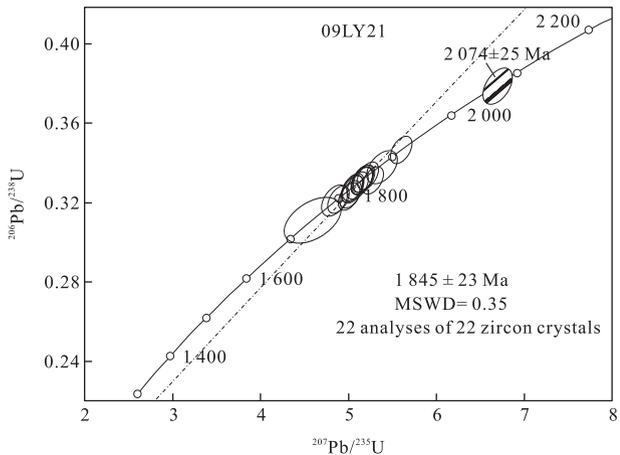


图 7 样品 09LY21 中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig.7 Concordia diagram of LA-ICP-MS zircons U-Pb ages from sample 09LY21

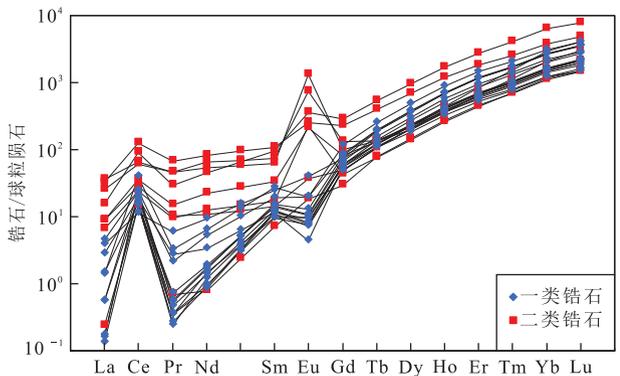


图 8 样品 09LY21 锆石分析微区球粒陨石标准化稀土元素配分曲线
Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of different zircons from the sample 09LY21

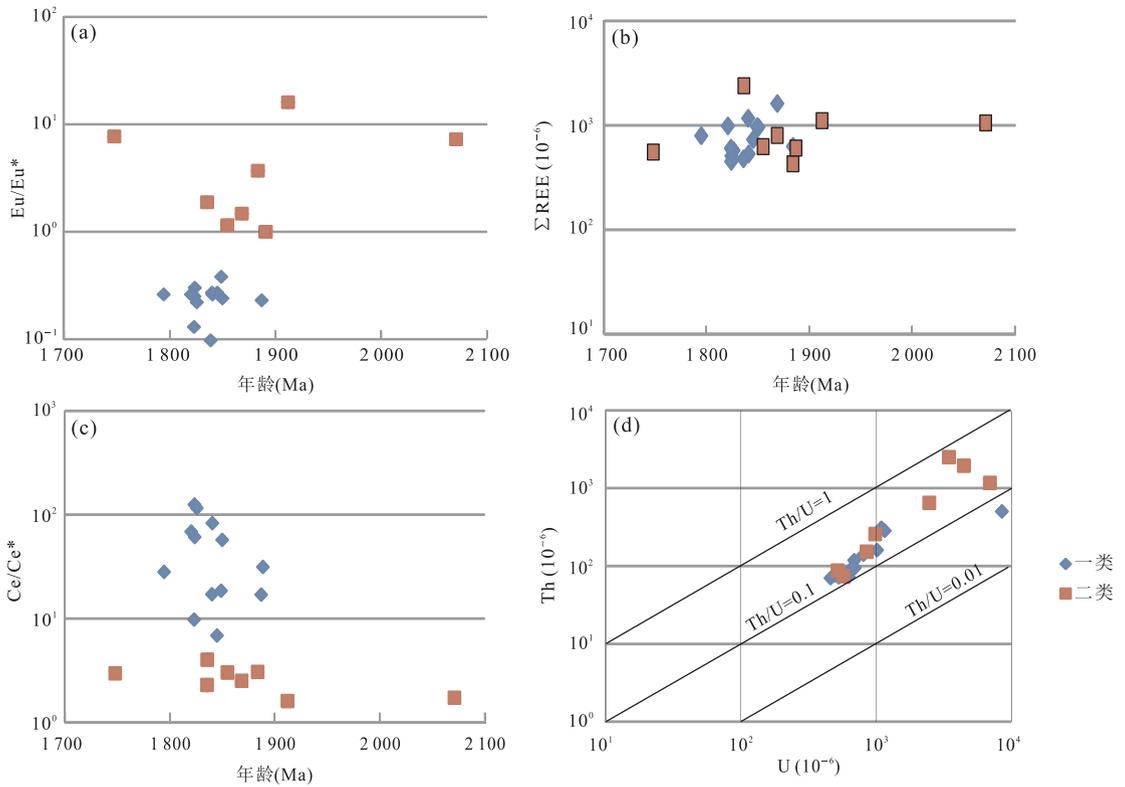


图 9 样品 09LY21 锆石微量元素特征图解

Fig.9 Trace elements and REE discrimination plots for zircon from the sample 09LY21

a. Eu/Eu^* 与年龄关系图解; b. ΣREE 与年龄关系图解; c. Ce/Ce^* 与年龄关系图解; d. 锆石的 Th, U 含量和 Th/U 比值图解

125.13), Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.13 \sim 0.80$), REE 总量较低 (图 8, 表 5), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 $1796 \pm 21 \text{ Ma} \sim 1876 \pm 26 \text{ Ma}$ 之间; 第二类锆石 Eu 正异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.15 \sim 16.00$), Ce 异常比前者较小 ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1.60 \sim 4.00$) (图 8, 表 6), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 $1747 \pm 38 \text{ Ma} \sim 2075 \pm 25 \text{ Ma}$ 之间. 由图 9 可见, 两种锆石的配分模式与年龄相关性不大; 第一类锆石 Th/U 比值为 $0.06 \sim 0.28$, 第二类锆石略高 ($\text{Th}/\text{U} = 0.17 \sim 0.43$), 差异不很明显 (表 4, 图 9d). 大多数锆石 REE 表现为第一种类型的配分方式, Ce 正异常, 显示锆石结晶时相对氧化的条件, 但由于岩浆中斜长石的分异结晶带走大量的 Eu, 而这一过程斜长石比锆石优先结晶或同时进行, 所以锆石继承了熔体的 Eu 亏损因此出现负异常 (Hoskin and Schaltegger, 2003). 第二种锆石 REE 配分模式出现的较少, 具有 Eu 正异常的锆石一般具有较低的 Ce 正异常, 除去锆石中钠长石包裹体的污染的原因, 这种锆石可能形成一个比 Eu 负异常的锆石更为还原的环境 (Yui *et al.*, 2010), 也可能是由于锆石受到晚期 Ca 质流体交代作用的原因 (李旭平等, 2011, 2013).

5 讨论与结论

5.1 胶北地块斜长角闪岩的变质作用演化

如图 10 所示, 前人通过对本区基性和泥质麻粒岩的岩相学、矿物学、变质演化以及年代学的系统研究, 运用相平衡模拟的方法并结合传统温压计的使用, 构建了胶北高压基性、泥质麻粒岩顺时针 P - T - t 轨迹, 其主要具有大陆碰撞造山带中压相系变质作用的演化特征. 研究表明高压麻粒岩的峰期变质条件为 $T = 750 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 1.2 \sim 1.5 \text{ GPa}$; 峰期之后岩石经历等温降压后的中压麻粒岩相变质作用, 其 P - T 条件为 $750 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}/0.4 \sim 0.8 \text{ GPa}$, 反映了高压麻粒岩经历的一次构造抬升过程; 随后在 $5 \sim 7 \text{ ka}$ 的中下地壳发生等压冷却 (周喜文等, 2004; 王舫等, 2010; Tam *et al.*, 2012a, 2012b, 2012c; Liu *et al.*, 2013; 刘平华等, 2017). 本文所研究的斜长角闪岩峰期变质 P - T 条件为 $660 \sim 715 \text{ }^\circ\text{C}/0.65 \sim 0.71 \text{ GPa}$, 可能反映了高压麻粒岩等压冷却之后的又一次变质作用. 刘平华等 (2017) 认为胶-辽-吉带三家子石榴斜长角闪岩, 遭受了峰后中-低压角闪岩相退变质作用, 并在该阶段形成角闪石+斜长

表 4 胶北地块斜长角闪岩锆石(09LY21) LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data from amphibolite (09LY21) in Jiaobei terrane

测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm(\%)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ
1	2 492	3 464	0.72	0.379 7	1.4	6.706 2	1.5	0.128 0	3.0	2.075	25	2.073	13	2.071	52
2	153	854	0.18	0.304 0	1.5	4.833 3	2.1	0.115 3	3.3	1.711	23	1.791	18	1.884	59
3	1 934	4 477	0.43	0.346 6	1.4	5.597 3	1.4	0.117 1	3.0	1.918	23	1.916	12	1.912	53
4	70	463	0.15	0.331 0	1.4	5.277 0	1.6	0.115 6	3.1	1.843	23	1.865	14	1.889	54
5	257	990	0.26	0.311 3	2.5	4.592 3	4.6	0.106 9	5.2	1.747	38	1.748	39	1.748	93
8	119	692	0.17	0.332 2	1.4	5.183 2	1.4	0.113 1	3.0	1.849	22	1.850	12	1.850	53
9	645	2 483	0.26	0.277 4	1.3	4.371 5	1.3	0.114 3	2.9	1.578	19	1.707	11	1.869	52
10	87	521	0.17	0.333 8	1.4	5.221 1	1.4	0.113 4	3.0	1.857	22	1.856	12	1.855	53
13	160	1 019	0.16	0.332 2	1.3	5.179 5	1.3	0.113 1	2.9	1.849	21	1.849	11	1.849	52
14	72	531	0.13	0.322 6	1.3	5.006 0	1.4	0.112 5	3.0	1.802	21	1.820	12	1.841	53
15	72	630	0.11	0.327 2	1.4	5.031 1	1.5	0.111 5	3.0	1.825	22	1.825	13	1.824	53
16	73	583	0.13	0.326 6	1.3	5.020 6	1.4	0.111 5	3.0	1.822	21	1.823	12	1.824	53
17	76	495	0.15	0.324 3	1.4	4.990 9	1.4	0.111 6	3.0	1.811	21	1.818	12	1.826	53
18	80	578	0.14	0.337 8	1.6	5.379 2	2.2	0.115 5	3.4	1.876	26	1.882	19	1.887	60
22	309	1 098	0.28	0.327 4	1.3	5.031 8	1.3	0.111 5	2.9	1.826	21	1.825	11	1.823	52
25	94	698	0.13	0.330 5	1.3	5.141 1	1.3	0.112 8	2.9	1.841	21	1.843	11	1.845	52
26	284	1 163	0.24	0.331 2	1.3	5.138 2	1.3	0.112 5	2.9	1.844	21	1.842	11	1.840	52
27	502	8 560	0.06	0.329 3	1.3	5.094 5	1.3	0.112 2	2.9	1.835	21	1.835	11	1.836	51
28	1 162	6 966	0.17	0.328 5	1.3	5.083 2	1.3	0.112 2	2.9	1.831	21	1.833	11	1.836	51
29	139	808	0.17	0.326 2	1.3	5.006 0	1.3	0.111 3	2.9	1.820	21	1.820	11	1.821	52
30	96	671	0.14	0.321 3	1.3	4.860 9	1.4	0.109 7	2.9	1.796	21	1.796	12	1.795	52

表 5 胶北地块斜长角闪岩锆石(09LY21)LA-ICP-MS 稀土元素和微量元素测试结果(10^{-6})

Table 5 LA-ICP-MS zircon REE and mean trace-element data from amphibolite (09LY21) in Jiaobei terrane

测点号	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
1	896.26	6.89	5.930	37.33	4.360	30.30	11.36	42.820	26.73	4.99	50.27	20.36	108.95	28.76
2	803.52	4.04	2.100	22.20	1.421	10.44	5.08	12.180	16.64	4.98	59.37	24.03	114.76	26.00
3	1 039.40	6.69	8.460	39.92	4.340	25.03	9.59	75.62	20.61	5.00	56.85	24.55	140.50	39.23
4	476.81	1.94	0.056	8.82	0.065	0.36	1.07	1.070	6.08	2.92	36.69	15.46	76.73	17.37
5	486.96	2.53	1.553	14.53	0.900	5.92	2.58	13.24	8.76	2.82	34.75	14.55	73.01	17.80
8	1 205.55	2.87	0.040	12.69	0.053	0.80	2.23	0.618	15.36	6.97	91.29	38.66	192.59	43.32
9	2 183.22	11.68	7.720	76.47	6.380	38.20	16.63	14.48	47.52	14.82	173.80	67.13	302.14	65.15
10	683.12	3.48	2.090	17.56	0.976	5.03	2.17	2.130	10.18	3.89	52.50	21.66	106.15	24.44
13	1 255.94	3.58	0.130	14.94	0.199	2.41	2.93	1.140	17.53	7.38	95.88	39.32	192.06	43.54
14	663.97	2.20	0	9.05	0.034	0.44	1.46	0.444	10.01	4.06	52.00	21.20	102.27	23.77
15	631.57	1.95	0.031	8.90	0.033	0.68	1.48	0.570	11.35	4.09	50.69	20.13	97.41	22.25
16	571.47	1.74	0	9.27	0.023	0.56	1.70	0.424	9.89	4.06	46.29	18.50	87.24	19.56
17	716.62	1.99	0	9.31	0.025	0.42	1.83	0.456	12.49	4.57	56.26	23.15	111.07	25.80
18	729.30	2.10	0.341	9.88	0.044	0.65	1.90	0.469	12.13	4.50	57.07	23.23	112.34	25.77
22	778.78	3.33	1.053	14.29	0.033	0.39	1.72	0.253	11.33	4.52	59.06	23.96	116.42	27.04
25	905.36	3.23	0.656	11.49	0.258	1.54	1.79	0.539	12.00	5.21	68.45	29.07	143.97	33.40
26	1 554.97	6.35	0.329	24.19	0.307	2.95	4.19	1.150	24.08	9.51	122.14	50.44	238.31	52.63
27	720.19	3.47	0.925	6.88	0.564	4.33	3.81	2.300	15.21	5.02	56.08	20.56	92.63	20.42
28	3 104.76	29.68	3.620	54.77	2.800	20.72	14.67	20.660	58.31	20.05	244.33	94.93	449.34	102.61
29	1 265.33	4.50	0.037	14.55	0.051	0.77	2.36	0.736	16.72	7.20	95.13	40.16	196.53	44.70
30	1 007.91	2.98	0.131	10.91	0.068	0.87	2.11	0.610	13.79	5.81	77.21	32.29	158.11	36.06

测点号	Yb	Lu	Hf	Ta	ΣREE	Lu/Hf	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
1	347.04	75.96	10 240.90	4.680	795	0.007 4	7.23	1.72	0.012 26	0.337 0	0.063 7
2	268.41	53.84	9 139.18	1.544	621	0.005 9	3.68	3.05	0.005 61	0.266 9	0.051 3
3	494.88	103.04	11 184.80	3.330	1 048	0.009 2	16.00	1.60	0.012 26	0.569 5	0.034 5
4	188.11	36.54	9 612.42	1.088	391	0.003 8	1.01	31.31	0.000 21	0.033 8	0.026 7
5	196.21	38.31	9 994.19	1.589	425	0.003 8	7.67	2.96	0.005 68	0.388 6	0.036 9
8	452.66	90.09	8 542.40	1.125	947	0.010 5	0.24	57.07	0.000 06	0.011 6	0.028 1
9	648.09	123.50	9 513.55	5.390	1 602	0.013 0	1.47	2.51	0.008 54	0.299 7	0.060 7
10	253.41	49.40	8 815.19	1.630	552	0.005 6	1.15	3.01	0.005 92	0.621 8	0.033 2
13	451.31	89.52	8 854.67	1.364	958	0.010 1	0.38	18.47	0.000 21	0.028 6	0.032 1
14	250.83	50.39	8 959.63	0.951	526	0.005 6	0.26	82.64	0	0	0.033 0
15	239.10	46.83	9 011.79	1.260	504	0.005 2	0.30	60.83	0.000 09	0.013 5	0.039 3
16	208.52	41.24	8 707.77	0.988	447	0.004 7	0.25	125.13	0	0	0.039 2
17	267.63	54.41	8 347.96	1.126	567	0.006 5	0.22	115.61	0	0	0.038 6
18	273.43	54.50	9 074.33	1.006	576	0.006 0	0.23	16.98	0.000 89	0.115 9	0.036 7
22	281.43	56.10	10 141.30	2.480	598	0.005 5	0.13	9.75	0.002 68	0.395 2	0.033 3
25	343.88	69.16	10 769.70	2.040	721	0.006 4	0.27	6.85	0.001 37	0.236 6	0.028 9
26	526.29	102.32	8 983.52	2.060	1 159	0.011 4	0.27	17.11	0.000 45	0.050 7	0.037 9
27	205.60	37.53	7 314.13	1.870	472	0.005 1	0.80	2.28	0.003 23	0.156 7	0.061 2
28	1075.63	196.70	11 053.50	15.240	2 359	0.017 8	1.88	4.00	0.002 41	0.159 3	0.044 8
29	464.46	91.96	8 938.02	1.577	975	0.010 3	0.26	68.62	0.000 06	0.010 1	0.029 8
30	376.80	72.03	8 838.76	1.369	787	0.008 1	0.26	28.11	0.000 25	0.040 1	0.030 3

石+石英+铁钛氧化物的矿物组合,其 $P-T$ 条件为 $T=670\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $P=0.52\sim 0.61\text{ GPa}$,其峰后退变阶段矿物组合与 $P-T$ 条件皆与本文研究的斜长角闪岩峰期变质阶段基本一致.并且,野外露头观察发现,研究区斜长角闪岩产状与其伴生的麻粒岩产状基本一致.因此本区斜长角闪岩峰期变质记录的可

能是高压麻粒岩经过等温降压阶段后的再次矿物平衡组合,反应出高压麻粒岩经历了第二次构造抬升和减压降温变质作用.此外,研究区斜长角闪岩中冷却退变阶段(M2)矿物组合为: $\text{Amp}_2 + \text{Ep} + \text{Pl} + \text{Chl} + \text{Ab}$,其 $P-T$ 条件为 $537\sim 630\text{ }^{\circ}\text{C}/0.41\sim 0.58\text{ GPa}$;其后的钙质加入发生了钙硅酸盐化(M3),形

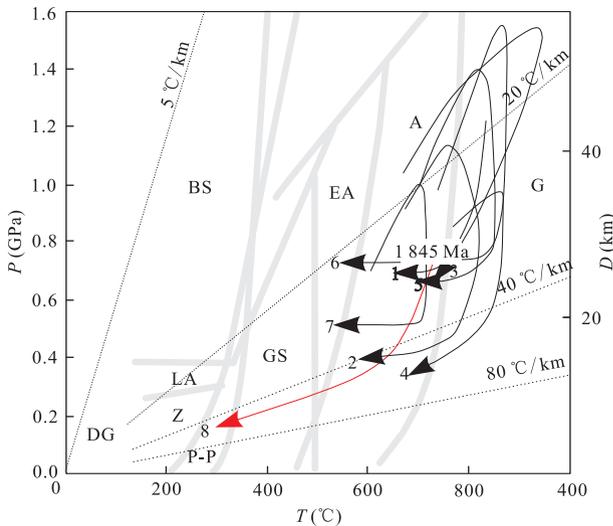


图10 胶北斜长角闪岩与胶-辽-吉带古元古代变质演化 P - T - t 轨迹图

Fig.10 P - T - t projection showing the P - T - t paths determined in this study for amphibolite (a and red bold lines), and previous metamorphic P - T - t paths depicted by other researchers from the Jiao-Liao-Ji belt

变质相边界引自桑隆康和马昌前(2012);Z.沸石相;P-P.葡萄石-绿纤石相;LA.硬柱石-钠长石-绿泥石相;BS.蓝片岩相;GS.绿片岩相;EA.绿帘角闪岩相;A.角闪岩相;G.麻粒岩相;1.胶北高压泥质麻粒岩(周喜文等,2004);2.胶北高压泥质麻粒岩(王筋等,2010);3.胶北高压泥质麻粒岩(Tam *et al.*,2012a);4.胶北中压泥质麻粒岩(Tam *et al.*,2012b);5.胶北高压基性麻粒岩(Tam *et al.*,2012c);6.胶北高压基性麻粒岩(Liu *et al.*,2013);7.三家子石榴斜长角闪岩(刘平华等,2017);8.胶北斜长角闪岩(本文)

成 $Ab+Prh+Chl+Cal$ 的矿物组合,终止于前绿片岩相的变质条件。

值得注意的是,在钙硅酸盐化形成过程中,钙的来源与形成机理仍值得进一步探究。通常情况下,在蛇纹岩化过程中,橄榄岩中的单斜辉石分解产生的钙不能被蛇纹结构所吸收,流体中的钙在蛇纹岩化过程中积累,并与围岩发生钙质交代反应,形成异剥钙榴岩(Li *et al.*,2004,2007)。由于露头条件限制,周围未发现超基性岩围岩,但是刘文军等(1998)在本区采样点附近且处于同一条构造带中发现蛇纹岩化超基性岩,并发现同样发生钙硅酸盐化的岩石,与通常所见的异剥钙榴岩极为相似。此外,周围荆山群大理岩等碳酸盐岩的存在,也可能作为本文斜长角闪岩中额外的钙的来源。

5.2 斜长角闪岩的年龄及其意义

很多学者报道了胶北地块中高压麻粒岩的峰期变质年龄。如 Tam *et al.*(2011)运用 SHRIMP U-Pb

锆石定年技术确定了胶北地块中南山口高压基性麻粒岩和太平庄荆山群泥质麻粒岩的峰期变质年龄为 1.95 Ga 和 1.88 Ga。刘平华等(2013)认为,胶北地区高压麻粒岩,在 1950~1870 Ma 被构造增厚至 50~55 km 的加厚下地壳或岛弧根部带,并经历峰期高压麻粒岩相变质作用。总之,近年来的年代学研究结果显示,胶北地块基性麻粒岩的峰期变质年代在 ~1.95~1.87 Ga(Tang *et al.*,2007;Zhou *et al.*,2008;Tam *et al.*,2011;Zhao and Guo,2012;Liu *et al.*,2013)。而变质年龄 1.86~1.84 Ga 则代表了高压麻粒岩等温减压、引发深熔作用的时期(Liu *et al.*,2010,2014,2013,2015;刘福来等,2015;蔡佳等,2017)。本文斜长角闪岩样品 09LY21 中的锆石颗粒较大,晶形较完整,CL 图像发光较弱,部分具有弱振荡环带、反应边和面状分带现象,较低的 Th/U 比值,锆石形态学和内部结构上显示出深熔锆石的特征(Liati and Gebauer,1999;Wu and Zheng,2004;Zeh *et al.*,2010)。因此,1845±23 Ma 的年龄应代表研究样品角闪岩相峰期变质作用的年代,可能与胶北地块麻粒岩相变质作用后等温减压过程中引发的深熔熔体冷却结晶有关,其峰期变质条件或许代表了在高压麻粒岩经历的第二次构造抬升阶段、减压降温过程的再平衡的矿物组合,其后斜长角闪岩又经历了近等压冷却过程和前绿片岩相交代变质作用。斜长角闪岩经历的这一深熔作用事件在华北克拉通西部带的孔兹岩带也有存在,反应了孔兹岩带最终碰撞闭合前,从下地壳到中地壳的二次抬升退变质作用,其年龄也在 1.85~1.82 Ga 之间(翟明国,2009;Chen *et al.*,2013)。

尽管研究区斜长角闪岩记录了最老的 2075±25 Ma 年龄,代表了原岩年龄的下限,或许代表的也是一次变质年龄。由于没有得到足够的年代学证据,斜长角闪岩原岩的时代问题仍未得到解决。Tang *et al.*(2007) 在研究胶北地块基性麻粒岩和角闪岩的年代学中,得到有角闪岩的原岩 2379±54 Ma 的年龄。鉴于研究区斜长角闪岩代表了高压基性麻粒岩退变之后的再平衡组合,其原岩可能与其伴生的高压基性麻粒岩相同。前人研究表明,胶北地体高压基性麻粒岩中的岩浆锆石分别记录了 2703~2500 Ma 和 2379~2102 Ma 的年龄(Tang *et al.*,2007;Tam *et al.*,2011;刘平华等,2013;Liu *et al.*,2015),并认为它们应该代表胶北地块变基性岩的原岩形成时代。华北克拉通岩浆活动具有多期的特点,其中胶北地块基性岩浆活动至少包括 2550~

2 500 Ma、2 300~2 000 Ma 和 1 950~1 800 Ma 3 期基性岩浆活动(Tang *et al.*, 2007; Tam *et al.*, 2011; 董春艳等, 2011; 2012; 刘建辉等, 2011, 2014, 2015; 刘平华等, 2013; Meng *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015; 曹正琦等, 2016; 杨凤超等, 2016)。1:5 万地质图表明研究区的高压基性麻粒岩是古元古代变质基性岩, 是分布在新太古代 TTG 片麻岩与花岗质片麻岩中的透镜体。前人年代学数据表明, 胶-辽-吉带古元古代拉伸裂陷盆地形成时期为 2.3~2.0 Ga。盆地接受沉积的年龄为 2.05~1.93 Ga, 碰撞造山事件发生于 1.93~1.85 Ga(Luo *et al.*, 2004, 2008; Li *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007; Zhou *et al.*, 2008; 翟明国, 2009, 2010; 董春艳等, 2011; Liu *et al.*, 2013; 刘平华等, 2013)。此外, 刘平华等(2013)在本研究区附近的西留村附近取得~2.1 Ga, 且以不规则透镜体的形式赋存于新太古代花岗片麻岩与云英质片麻岩之中的变基性岩, 并在 1.9 Ga 发生麻粒岩相变质, 随后退变成斜长角闪岩。其野外展布与后来发生的变质作用皆与本区的麻粒岩及斜长角闪岩相似。因此, 研究区高压基性麻粒岩及本文斜长角闪岩的原岩可能形成于新太古代到古元古代期间, 胶辽裂谷形成之前。

综上, 本文斜长角闪岩在古元古代原岩形成以后, 可能经历了麻粒岩相变质作用, 在高压麻粒岩二次构造抬升中达到平衡的角闪岩相矿物组合, 记录了在胶-辽-吉带~1.85 Ga 碰撞闭合过程中的深熔事件, 在此阶段之后经历了角闪岩相变质作用, 又在后来的退变质过程中经历近等压降温变质作用和钙质交代变质作用。

致谢: 衷心感谢北京大学魏春景教授和评审专家王舫博士、初航博士提出的宝贵修改意见。

References

Blundy, J. D., Holland, T. J. B., 1990. Calcic Amphibole Equilibria and a New Amphibole-Plagioclase Geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104 (2): 208–224. <https://doi.org/10.1007/bf00306444>

Cai, J., Liu, P. H., Ji, L., et al., 2017. Zircon Geochronology of the Paleoproterozoic High-Grade Supercrustal Rocks from the Huai'an Terrane, Northwestern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (9): 2811–2826 (in Chinese with English abstract).

Cao, Z. Q., Zhai, W. J., Jiang, X. F., et al., 2016. About 2.5 Ga Tectono-Metamorphic Event in Southern Margin of North

China Craton and Its Significance. *Earth Science*, 41 (4): 570–585 (in Chinese with English abstract).

Chen, N., Liao, F., Wang, L., et al., 2013. Late Paleoproterozoic Multiple Metamorphic Events in the Quanji Massif: Links with Tarim and North China Cratons and Implications for Assembly of the Columbia Supercontinent. *Precambrian Research*, 228: 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.01.03>

Cheng, S. H., You, Z. D., 2016. *Metamorphic Petrology*. Geological Publishing House, Beijing, 53 (in Chinese).

Dong, C. Y., Ma, M. Z., Liu, S. J., et al., 2012. Middle Paleoproterozoic Crustal Extensional Regime in the North China Craton: New Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Whole-Rock Geochemistry of Metagabbro in the Anshan-Gongchangling Area. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (9): 2785–2792 (in Chinese with English abstract).

Dong, C. Y., Wang, S. J., Liu, D. Y., et al., 2011. Late Paleoproterozoic Crustal Evolution of the North China Craton and Formation Time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Meta-Intermediate-Basic Intrusive Rocks in Eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (6): 1699–1706 (in Chinese with English abstract).

Faure, M., Lin, W., Monié, P., et al., 2004. Paleoproterozoic Arc Magmatism and Collision in Liaodong Peninsula (North-East China). *Terra Nova*, 16 (2): 75–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00533.x>

Green, E. C. R., White, R. W., Diener, J. F. A., et al., 2016. Activity-Composition Relations for the Calculation of Partial Melting Equilibria in Metabasic Rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 34 (9): 845–869. <https://doi.org/10.13039/100004807>

Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1): 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>

Jahn, B. M., Liu, D., Wan, Y., et al., 2008. Archean Crustal Evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as Revealed by Zircon SHRIMP Geochronology, Elemental and Nd-Isotope Geochemistry. *American Journal of Science*, 308 (3): 232–269. <https://doi.org/10.2475/03.2008.03>

Jin, S. Q., 1991. Composition Characteristics of Calc-Amphiboles in Different Regional Metamorphic Facies. *Chinese Science Bulletin*, 36 (11): 851–854 (in Chinese).

Kong, F. M., Liu, Y., Li, X. P., et al., 2015. Mineralogical and Petrogeochemical Characteristics of Ultramafic Rocks from the Metamorphic Basement of the Jiaobei Terrane.

- Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1549—1563 (in Chinese with English abstract).
- 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. *European Journal of Mineralogy*, 9(3): 623—651. <https://doi.org/10.1127/ejm/9/3/0623>
- Li, S. Z., Zhao, G. C., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Liaoji Granitoids: Constraints on the Evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 158(1/2): 1—16. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.001>
- Li, S. Z., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2005. Deformation History of the Paleoproterozoic Liaohe Assemblage in the Eastern Block of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 659—674. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.11.008>
- Li, X. P., Guo, J. H., Zhao, G. C., et al., 2011. Formation of the Paleoproterozoic Calc-Silicate and High-Pressure Mafic Granulite in the Jiaobei Terrane, Eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 961—968 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. P., Liu, Y., Guo, J. H., et al., 2013. Petrogeochemical Characteristics of the Paleoproterozoic High-Pressure Mafic Granulite and Calc-Silicate from the Nanshankou of the Jiaobei Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2340—2352 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. P., Rahn, M., Bucher, K., 2004. Metamorphic Processes in Rodingites of the Zermatt-Saas Ophiolites. *International Geology Review*, 46(1): 28—51. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.1.28>
- Li, X. P., Zhang, L., Wei, C., et al., 2007. Petrology of Rodingite Derived from Eclogite in Western Tianshan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(3): 363—382. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00700.x>
- Liati, A., Gebauer, D., 1999. Constraining the Prograde and Retrograde P - T - t Path of Eocene HP Rocks by SHRIMP Dating of Different Zircon Domains: Inferred Rates of Heating, Burial, Cooling and Exhumation for Central Rhodope, Northern Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(4): 340—354. <https://doi.org/10.1007/s004100050516>
- Liu, F. L., Liu, P. H., Ding, Z. J., et al., 2012. Genetic Mechanism of Granitic Leucosome within High-Pressure Granulite from the Early Precambrian Metamorphic Basement of Shandong Peninsula, SE North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2686—2696 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Liu, P. H., Wang, F., et al., 2014. U-Pb Dating of Zircons from Granitic Leucosomes in Migmatites of the Jiaobei Terrane, Southwestern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Constraints on the Timing and Nature of Partial Melting. *Precambrian Research*, 245: 80—99. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.01.001>
- Liu, F. L., Liu, P. H., Wang, F., et al., 2015. Progresses and Overviews of Voluminous Meta-Sedimentary Series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Orogenic/Mobile Belt, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2816—2846 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Robinson, P. T., Gerdes, A., et al., 2010. Zircon U-Pb Ages, REE Concentrations and Hf Isotope Compositions of Granitic Leucosome and Pegmatite from the North Sulu UHP Terrane in China: Constraints on the Timing and Nature of Partial Melting. *Lithos*, 117(1/2/3/4): 247—268. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.03.002>
- Liu, J. H., Liu, F. L., Ding, Z. J., et al., 2014. U-Pb Dating and Hf Isotope Study of Early Archean Zircons from the Jiaobei Terrane, North China Craton: Evidence for Growth and Recycling of Ancient Continental Crust. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2941—2950 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Liu, F. L., Ding, Z. J., et al., 2015. Early Precambrian Major Magmatic Events, and Growth and Evolution of Continental Crust in the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2942—2958 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Liu, F. L., Liu, P. H., et al., 2011. Polyphase Magmatic and Metamorphic Events from Early Precambrian Metamorphic Basement in Jiaobei Area: Evidences from the Zircon U-Pb Dating of TTG and Granitic Gneisses. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943—960 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. H., Cai, J., Zou, L., 2017. Metamorphic P - T - t Path and Its Geological Implication of the Sanjiazi Garnet Amphibolites from the Northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji Belt: Constraints on Phase Equilibria and Zircon U-Pb Dating. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2649—2674 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. H., Liu, F. L., Liu, C. H., et al., 2013. Petrogenesis, P - T - t Path, and Tectonic Significance of High-Pressure Mafic Granulites from the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, 233: 237—258. <https://doi.org/10.13039/501100001809>

- Liu, P. H., Liu, F. L., Wang, F., et al., 2010. Genetic Mineralogy and Metamorphic Evolution of Mafic High-Pressure (HP) Granulites from the Shandong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2039–2056 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. H., Liu, F. L., Wang, F., et al., 2012. Geochemical Characteristics and Genesis of the High-Pressure Mafic Granulite in the Jiaobei High-Grade Metamorphic Basement, Eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2705–2720 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. H., Liu, F. L., Wang, F., et al., 2013. Petrological and Geochronological Preliminary Study of the Xiliu ~2.1 Ga Meta-Gabbro from the Jiaobei Terrane, the Southern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2371–2390 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. H., Liu, F. L., Wang, F., et al., 2014. Preliminary Study of Petrology and U-Pb Zircon Dating of the Nanshankou Garnet-Bearing Pyroxenolites from the Jiaobei Terrane, the Southeastern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2951–2972 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. H., Liu, F. L., Wang, F., et al., 2015. *P-T-t* Paths of the Multiple Metamorphic Events of the Jiaobei Terrane in the Southeastern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt (JLJB), in the North China Craton: Implication for Formation and Evolution of the JLJB. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2889–2941 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. J., Jahn, B. M., Wan, Y. S., et al., 2015. Neoproterozoic to Paleoproterozoic High-Pressure Mafic Granulite from the Jiaodong Terrain, North China Craton: Petrology, Zircon Age Determination and Geological Implications. *Gondwana Research*, 28(2): 493–508. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Liu, W. J., Zhai, M. G., Li, Y. G., 1998. Metamorphism of the High-Pressure Basic Granulites in Laixi, Eastern Shandong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2004. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the Evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. *Precambrian Research*, 134(3/4): 349–371. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.07.002>
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2008. A Comparison of U-Pb and Hf Isotopic Compositions of Detrital Zircons from the North and South Liaohe Groups: Constraints on the Evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 163(3/4): 279–306. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.01.002>
- Meng, E., Liu, F. L., Liu, P. H., et al., 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Paleoproterozoic Meta-Mafic Rocks from Central Liaodong Peninsula, Northeast China: Evidence from Zircon U-Pb Dating and In Situ Lu-Hf Isotopes, and Whole-Rock Geochemistry. *Precambrian Research*, 247: 92–109. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.03.017>
- Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating Phase Diagrams Involving Solid Solutions via Non-Linear Equations, with Examples Using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 577–588. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00157.x>
- Powell, R., White, R. W., Green, E. C. R., et al., 2014. On Parameterizing Thermodynamic Descriptions of Minerals for Petrological Calculations. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(3): 245–260. <https://doi.org/10.1111/jmg.12070>
- Sang, L. K., Ma, C. Q., 2012. Petrology (2nd Edition). Geological Publishing House, Beijing, 478 (in Chinese).
- Schmidt, M. W., 1992. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al-in-Hornblende Barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2/3): 304–310. <https://doi.org/10.1007/bf00310745>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Liu, F. L., et al., 2011. Timing of Metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Granulites, Gneisses and Marbles of the Jiaobei Massif in the North China Craton. *Gondwana Research*, 19(1): 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.05.007>
- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2012a. Metamorphic *P-T* Path and Tectonic Implications of Medium-Pressure Pelitic Granulites from the Jiaobei Massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 220–221: 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.008>
- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2012b. Petrology and Metamorphic *P-T* Path of High-Pressure Mafic Granulites from the Jiaobei Massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Lithos*, 155: 94–109. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.018>

- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Zhou, X. W., et al., 2012c. Metamorphic *P-T* Path and Implications of High-Pressure Pelitic Granulites from the Jiaobei Massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Gondwana Research*, 22(1): 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.006>
- Tang, J., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2007. Geochronology and Geochemistry of Metamorphic Rocks in the Jiaobei Terrane: Constraints on Its Tectonic Affinity in the Sulu Orogen. *Precambrian Research*, 152(1/2): 48–82. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.09.001>
- Wan, Y. S., Song, B., Liu, D. Y., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of Palaeoproterozoic Metasedimentary Rocks in the North China Craton: Evidence for a Major Late Palaeoproterozoic Tectonothermal Event. *Precambrian Research*, 149(3/4): 249–271. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.006>
- Wang, F., Liu, F. L., Liu, P. H., et al., 2010. Metamorphic Evolution of Early Precambrian Khondalite Series in North Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2057–2072 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., Wark, D. A., Thomas, J. B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>
- Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569. <https://doi.org/10.1007/bf03184122>
- Yang, F. C., Sun, J. G., Song, Y. H., et al., 2016. SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope Composition and Geochemical Characteristics of Neoproterozoic Granitic Complex in Liaodong Lianshan-guan Area, NE China. *Earth Science*, 41(12): 2008–2018 (in Chinese with English abstract).
- Yui, T. F., Maki, K., Usuki, T., et al., 2010. Genesis of Guatemala Jadeitite and Related Fluid Characteristics: Insight from Zircon. *Chemical Geology*, 270(1/2/3/4): 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.004>
- Zeh, A., Gerdes, A., Barton, J. Jr., et al., 2010. U-Th-Pb and Lu-Hf Systematics of Zircon from TTGs, Leucosomes, Meta-Anorthosites and Quartzites of the Limpopo Belt (South Africa): Constraints for the Formation, Recycling and Metamorphism of Palaeoproterozoic Crust. *Precambrian Research*, 179(1/2/3/4): 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.012>
- Zhai, M. G., 2009. Two Kinds of Granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their Genetic Relation and Geotectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1753–1771 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2010. Tectonic Evolution and Metallogeneses of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Li, S. Z., et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Precambrian Research*, 222–223: 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016>
- Zhao, G. C., Guo, J. H., 2012. Precambrian Geology of China: Preface. *Precambrian Research*, 222–223: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.018>
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archaean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202.
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 1998. Thermal Evolution of Archean Basement Rocks from the Eastern Part of the North China Craton and Its Bearing on Tectonic Setting. *International Geology Review*, 40(8): 706–721. <https://doi.org/10.1080/00206819809465233>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and *P-T* Path Constrains and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107: 45–73.
- Zhao, G. C., Zhai, M. G., 2013. Lithotectonic Elements of Precambrian Basement in the North China Craton: Review and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 23(4): 1207–1240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.08.016>
- Zhao, L., Li, T. S., Peng, P., et al., 2015. Anatomy of Zircon Growth in High Pressure Granulites: SIMS U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopes from the Jiaobei Terrane, Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 28(4): 1373–1390. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Zhou, X., Zhao, G., Wei, C., et al., 2008. EPMA U-Th-Pb Monazite and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of High-Pressure Pelitic Granulites in the Jiaobei Massif of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3): 328–350. <https://doi.org/10.2475/03.2008.06>
- Zhou, X. W., Wei, C. J., Geng, Y. S., 2007. Phase Equilibria *P-T* Path of the High- and Low-Pressure Pelitic Granulites from the Jiaobei Massif. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 135–143 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. W., Wei, C. J., Geng, Y. S., et al., 2004. Discovery and Implications of the High-Pressure Pelitic Granulite from

the Jiaobei Massif. *Chinese Science Bulletin*, 49 (18): 1424–1430 (in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡佳, 刘平华, 冀磊, 等, 2017. 冀西北怀安地体高级变质表壳岩的锆石年代学研究. *岩石学报*, 33(9): 2811–2826.
- 曹正琦, 翟文建, 蒋幸福, 等, 2016. 华北克拉通南缘约 2.5Ga 构造变质事件及意义. *地球科学*, 41(4): 570–585.
- 程素华, 游振东, 2016. 变质岩岩石学. 北京: 地质出版社, 53.
- 董春艳, 马铭株, 刘守偈, 等, 2012. 华北克拉通古元古代中期伸展体制新证据: 鞍山—弓长岭地区变质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学. *岩石学报*, 28(9): 2785–2792.
- 董春艳, 王世进, 刘敦一, 等, 2011. 华北克拉通古元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中—基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *岩石学报*, 27(6): 1699–1706.
- 靳是琴, 1991. 不同区域变质相中钙质角闪石的成分特征. *科学通报*, 36(11): 851–854.
- 孔凡梅, 刘云, 李旭平, 等, 2015. 胶北地块变质基底超镁铁岩的矿物岩石地球化学特征. *岩石学报*, 31(6): 1549–1563.
- 李旭平, 郭敬辉, 赵国春, 等, 2011. 胶北地块早元古代钙硅酸盐岩与高压基性麻粒岩成因及地质意义. *岩石学报*, 27(4): 961–968.
- 李旭平, 刘云, 郭敬辉, 等, 2013. 胶北南山口古元古代高压基性麻粒岩和钙硅酸盐岩的岩石地球化学特征探讨. *岩石学报*, 29(7): 2340–2352.
- 刘福来, 刘平华, 丁正江, 等, 2012. 山东半岛高压麻粒岩中花岗质浅色脉体的成因. *岩石学报*, 28(9): 2686–2696.
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 等, 2015. 胶—辽—吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展. *岩石学报*, 31(10): 2816–2846.
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 等, 2014. 胶北太古宙早期锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究: 华北克拉通古老陆壳增生及再循环的证据. *岩石学报*, 30(10): 2941–2950.
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 等, 2015. 胶北地体早前寒武纪重大岩浆事件、陆壳增生及演化. *岩石学报*, 31(10): 2942–2958.
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 等, 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆—变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗质片

麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据. *岩石学报*, 27(4): 943–960.

- 刘平华, 蔡佳, 邹雷, 2017. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化 $P-T-t$ 轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束. *岩石学报*, 33(9): 2649–2674.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等, 2010. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因矿物学及变质演化. *岩石学报*, 26(7): 2039–2056.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等, 2012. 胶北高级变质基底中高压基性麻粒岩的地球化学特征及其成因. *岩石学报*, 28(9): 2705–2720.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等, 2013. 胶北西留古元古代~2.1Ga 变辉长岩岩石学与年代学初步研究. *岩石学报*, 29(7): 2371–2390.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等, 2014. 胶北南山口含榴辉石岩岩石学与锆石 U-Pb 定年的初步研究. *岩石学报*, 30(10): 2951–2972.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等, 2015. 胶北地体多期变质事件的 $P-T-t$ 轨迹及其对胶—辽—吉带形成与演化的制约. *岩石学报*, 31(10): 2889–2941.
- 刘文军, 翟明国, 李永刚, 1998. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用. *岩石学报*, 14(4): 449–459.
- 桑隆康, 马昌前, 2012. 岩石学(第二版). 北京: 地质出版社, 478.
- 王舫, 刘福来, 刘平华, 等, 2010. 胶北地区早前寒武纪孔兹岩系的变质演化. *岩石学报*, 26(7): 2057–2072.
- 杨凤超, 孙景贵, 宋运红, 等, 2016. 辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义. *地球科学*, 41(12): 2008–2018.
- 翟明国, 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩 (HT-HP 和 HT-UHT) 及其相关问题. *岩石学报*, 25(8): 1753–1771.
- 翟明国, 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 24–36.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 2007. 胶北地块高压与低压泥质麻粒岩的相平衡关系与 $P-T$ 演化轨迹. *地学前缘*, 14(1): 135–143.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 等, 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 49(14): 1424–1430.