

胶北地体古元古代中期花岗片麻岩的成因和构造意义

—— SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和全岩地球化学约束

谢士稳¹, 王 舫¹, 刘 倩²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021)

摘要: 报道了胶北地体古元古代中期花岗片麻岩的 SHRIMP 锆石年龄和全岩地球化学组成。锆石测年结果显示, 本次研究的花岗片麻岩年龄为 2 184~2 112 Ma, 经历了~1.85 Ga 的变质作用。尽管采自不同地区花岗片麻岩的地球化学组成存在明显差异, 但它们普遍具有高 SiO₂、Na₂O+K₂O、Zr 含量, 高 10 000Ga/Al 值以及高的锆石饱和温度, 指示其原岩为 A 型花岗岩。结合已发表数据, 认为胶北古元古代中期花岗片麻岩原岩主要形成于 2.13~2.10 Ga 和 2.19~2.17 Ga 两个阶段。通过对比发现, 2.13~2.10 Ga 的花岗片麻岩具有更高的 Zr 含量和锆石饱和温度, 且它们的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也高于 2.19~2.17 Ga 的花岗片麻岩。2.19~2.17 Ga 的花岗片麻岩原岩可能由胶北~2.7 Ga 和~2.9 Ga 的 TTG 高温脱水熔融而成, 而 2.13~2.10 Ga 的花岗片麻岩原岩可能由胶北~2.5 Ga 的 TTG 在更高的温度下部分熔融而成。两期花岗片麻岩原岩在源区和形成温度方面存在显著差异, 暗示着胶北地体古元古代中期可能先后经历了两期不同的拉张作用。

关键词: 华北克拉通; 胶北地体; A 型花岗岩; 古元古代; 岩石成因

中图分类号: P588.34⁺5; P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0371-25

Petrogenesis and tectonic significance of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses in the Jiaobei terrane, North China Craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry

XIE Shi-wen¹, WANG Fang¹ and LIU Qian²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Shandong Provincial NO. 4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang 261021, China)

Abstract: In this study, SHRIMP zircon U-Pb ages and whole-rock geochemical data are reported for the mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane, southeastern North China Craton. Geochronological results reveal that the granitic gneisses crystallized at 2 184~2 112 Ma and underwent metamorphism at ~1.85 Ga. Although the samples collected from different areas show obvious differences in geochemical composition, they commonly have high SiO₂, Na₂O+K₂O and Zr contents, high 10 000Ga/Al values, and high zircon saturation temperatures, indicating that their protoliths have an affinity to A-type granite. Together with published data in literatures, protoliths of the mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane were formed at two major stages: 2.13~2.10 Ga and 2.19~2.17 Ga. By comparison with the earlier stage granitic gneisses (2.19~2.17 Ga), the later stage granitic gneisses (2.13~2.10 Ga) show higher Zr contents and zircon saturation temperatures, and

收稿日期: 2021-11-27; **接受日期:** 2022-01-19; **编辑:** 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402167); 自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-20-9, J1901-8); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务经费(J1712, J2102); 山东省重大科技创新工程项目

作者简介: 谢士稳(1983-), 男, 副研究员, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: swxie210@163.com。

relatively higher zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values. We concluded that protoliths of the 2.19~2.17 Ga granitic gneisses were formed by high-temperature dehydration melting of ~2.7 Ga and ~2.9 Ga TTG in the Jiaobei terrane, whereas protoliths of the 2.13~2.10 Ga granitic gneisses originated from partial melting of ~2.5 Ga TTG in the Jiaobei terrane at higher temperature. The differences in magma source and melting temperature of the protoliths of the two stages granitic gneisses imply that the Jiaobei terrane underwent two separate extensional tectonic events during the mid-Paleoproterozoic.

Key words: North China Craton; Jiaobei terrane; A-type granite; Paleoproterozoic; petrogenesis

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41402167); The Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources (J1901-20-9, J1901-8); The Basic Scientific Research Foundations of the Institute of Geology, CAGS (J1712, J2102); The Key Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province

华北克拉通是全球早前寒武纪研究热点地区之一,其演化历史可以追溯到 3.8 Ga (Liu *et al.*, 1992; Wan *et al.*, 2012b)。与其他克拉通相比,华北克拉通记录了多期而复杂的构造演化过程。锆石 U-Pb 年代学结果表明,华北克拉通与全球其他克拉通类似,存在 ~2.7 Ga 的岩浆作用 (Wan *et al.*, 2014 及文中参考文献),而最强烈的岩浆事件发生在 ~2.5 Ga (例如, Yang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009; Wan *et al.*, 2010, 2012a; Geng *et al.*, 2012)。华北克拉通变质作用主要可分为 ~2.5 Ga 和 1.95~1.80 Ga 两期。前人围绕华北克拉通两期主要的构造热事件进行了大量有益的研究,并对华北克拉通早前寒武纪演化进行了深入的探讨。但是,目前对华北克拉通化的时代及拼合方式仍存在不同的认识。对此主要存在两种观点:一种观点认为华北克拉通主体在新太古代晚期 (~2.5 Ga) 已形成统一整体,随后又经历了板内的拉伸-破坏事件 (Zhai and Liu, 2003; 翟明国等, 2007; Zhai and Santosh, 2011); 另一种观点认为华北克拉通直到古元古代晚期 (~1.85 Ga) 才完成最终的克拉通化 (Zhao *et al.*, 1998, 1999a, 1999b, 2001, 2005; Kröner *et al.*, 2006)。确定华北克拉通新太古代晚期至古元古代晚期的演化过程,对认识华北克拉通化时代和拼合方式具有重要的指示意义。

胶-辽-吉带是一条位于华北克拉通东南缘呈北东-南西向展布的古元古代活动带 (图 1)。该活动带出露和保存了巨量的古元古代 (2.2~2.0 Ga) 变质 (火山) 沉积岩系和岩浆岩,为探讨华北克拉通新太古代晚期到古元古代晚期之间的构造演化过程提供了重要的研究对象。前人对胶-辽-吉带北段辽吉地区的变沉积岩沉积时代、物源以及沉积环境,岩

浆岩的成因与形成构造背景开展了大量的研究,并提出多种构造演化模式 (例如, Luo *et al.*, 2004, 2008; Li and Zhao, 2007; Wang *et al.*, 2017; Xu and Liu, 2019)。例如, Luo 等 (2004, 2008) 发现南、北辽河变沉积岩中碎屑锆石具有相似的年龄分布特征和 Hf 同位素组成,指示南、北辽河群之下的基底很可能发育在是同一太古宙陆块之上。南、北辽河群界限两侧古元古代中期辽吉花岗岩具有相似的 Nd 同位素组成,也暗示南、北辽河群之下具有相似的太古宙基底 (Li and Zhao, 2007)。这些结果均支持陆内裂谷打开-闭合模式,即胶-辽-吉带由同一陆块经历古元古代裂谷作用打开 (可能打开至形成洋盆) 和闭合形成 (例如, 张秋生等, 1988; Luo *et al.*, 2004, 2008; Li *et al.*, 2005; Li and Zhao, 2007; Tam *et al.*, 2011, 2012; Wang *et al.*, 2016)。一些研究人员 (Faure *et al.*, 2004; Li and Chen, 2014; Yuan *et al.*, 2015) 在辽吉地区发现具有弧地球化学特征的 2.2~2.1 Ga 岩浆岩,支持胶-辽-吉带的陆-弧-陆碰撞模式。最近,一些研究人员 (例如, 王惠初等, 2011; Meng *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2018; Xu and Liu, 2019) 认为辽吉地区 2.2~2.1 Ga 岩浆岩形成于弧后环境,进一步提出弧后盆地的打开和闭合模式。与辽吉地区相比,活动带南段胶北地体在相关方面的研究十分薄弱,古元古代岩浆岩的研究程度低,这也制约了辽吉地区和胶北地体古元古代构造演化的对比研究以及综合认识胶-辽-吉带构造演化过程的研究。与辽吉地区不同,胶北地体已识别的 2.2~2.0 Ga 花岗片麻岩相对较少,仅在昌邑、莱阳和郭城等地有少量报道,且研究工作主要集中在锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素方面,全岩地球化学、岩石类型以及岩石成因等方面的研究薄弱 (刘建辉

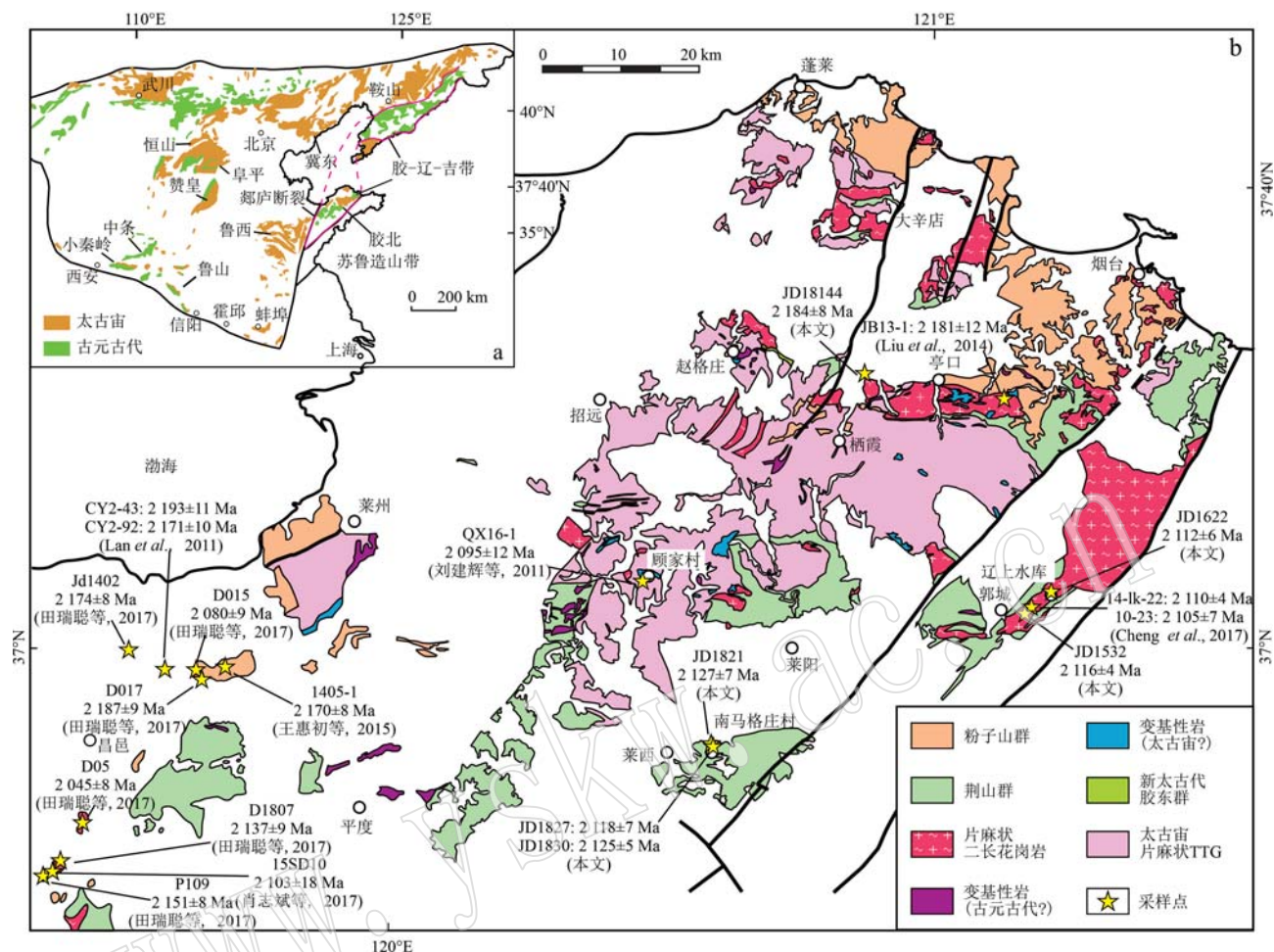


图1 华北克拉通早前寒武纪基底分布图(a, 据 Wan *et al.*, 2014)和胶北地体地质简图(b)

Fig. 1 Distribution map of the early Precambrian metamorphic terranes in the North China Craton(a, after Wan *et al.*, 2014) and simplified geological map of the Jiaobei terrane(b)

等, 2011; Liu *et al.*, 2014; Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; Cheng *et al.*, 2017; 田瑞聪等, 2017; 肖志斌等, 2017)。本文新识别了几处 2.2~2.0 Ga 的花岗片麻岩, 报道了它们的锆石 U-Pb 年龄和全岩地球化学组成, 并补充了前人(刘建辉等, 2011)报道的顾家村花岗片麻岩的地球化学数据。结合前人研究成果, 探讨胶北地体古元古代花岗片麻岩的岩石类型、成因以及形成环境, 为深入认识胶北地体古元古代构造演化过程提供一些新的制约。

1 地质背景

胶北地体西面与鲁西地区以郅庐断裂带为界, 东面以五莲-烟台断裂为界与苏鲁超高压变质带相接(图1a)。胶北地区出露岩石主要由太古宙基底

岩石、古元古代粉子山群和荆山群、中-新元古代浅变质的芝罘群、蓬莱群以及中生代侵入岩和沉积-火山盖层组成。太古宙基底岩石主要分布在栖霞地区, 由中-新太古代花岗质片麻岩和表壳岩组成。由于遭受后期变质作用的影响, 这些岩石普遍发育变形作用, 局部发生强烈的深熔作用。锆石年代学结果表明, 太古宙花岗质片麻岩及表壳岩的原岩形成于~2.9 Ga、~2.7 Ga 和~2.5 Ga (Tang *et al.*, 2007; Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011; Wang *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2014)。这些太古宙基底岩石普遍经历了~2.5 Ga 的变质作用, 少量新太古代花岗质岩石和一些基性岩包体还记录了古元古代晚期(1.90~1.80 Ga)的变质年龄 (Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011; Wu *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2014)。古元古代表壳岩荆山群分

布在莱阳-平度一带,粉子山群主要分布在栖霞庙后、莱州粉子山等地。二者原岩组合相似,主要由富铝的片岩-片麻岩、变粒岩、大理岩、长石石英岩和含石墨岩系组成,其中荆山群经历高角闪岩相-麻粒岩相变质作用,局部可见高压麻粒岩,而粉子山群变质级别较低,为绿片岩相-角闪岩相。与广泛出露的太古宙基底和古元古代壳岩相比,古元古代岩浆岩出露较少,尽管在昌邑、莱阳等多地均有报道,但出露规模均较小(图1)。古元古代岩浆岩主要形成于2.19~2.05 Ga和1.87~1.80 Ga两个时期(刘建辉等, 2011; Liu *et al.*, 2014, 2017, 2018b; Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; Cheng *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017; 田瑞聪等, 2017; 肖志斌等, 2017)。前一期花岗质岩浆岩遭受古元古代晚期变质作用改造,均发生强烈的变形,岩性主要为二长花岗岩和正长花岗岩;后一期花岗岩未变形或弱变形,部分具似斑状结构,该期花岗岩主要由正长花岗岩、二长花岗岩和钠长花岗岩组成。

2 野外产状和样品描述

对胶北郭城镇东、牟平区辽上水库、栖霞市北、莱西市南马格庄村和顾家村5个地区古元古代中期的花岗片麻岩开展了样品采集工作(图1),包括6

件锆石 U-Pb 测年样品和 33 件地球化学样品。

2.1 郭城镇东

该处露头位于郭城镇东约4 km的公路旁,露头沿公路呈北东-南西向延伸约200 m,出露岩石新鲜,为二长-正长花岗片麻岩。本次测年样品JD1532为正长花岗片麻岩(图2a),主要由钾长石(40%~50%,体积分数)和石英(40%~50%)组成(图3a),斜长石和暗色矿物含量较低,均为5%左右,暗色矿物主要为黑云母。显微镜下,斜长石可见聚片双晶,石英呈他形,不等粒粒状,具波状消光。

2.2 牟平区辽上水库

露头分布在辽上村东南的辽上水库旁,花岗片麻岩在东、西两岸均有出露,两岸露头均延伸近百米,出露岩石新鲜,变形强烈,出露岩石主要为钠长花岗片麻岩(图2b),局部可见基性岩脉侵入。本次测年样品JD1622采自水库东岸,主要由钠长石(40%~50%)和石英(40%~50%)组成(图3b)。此外,样品中还可见少量的白云母和黑云母(共约5%)。

2.3 莱西市南马格庄村

花岗片麻岩出露在南马格庄村北的两处采坑内。样品JD1821采自距南马格庄村约1.5 km的大型采坑内(直径约200 m),采坑内出露岩石复杂,主

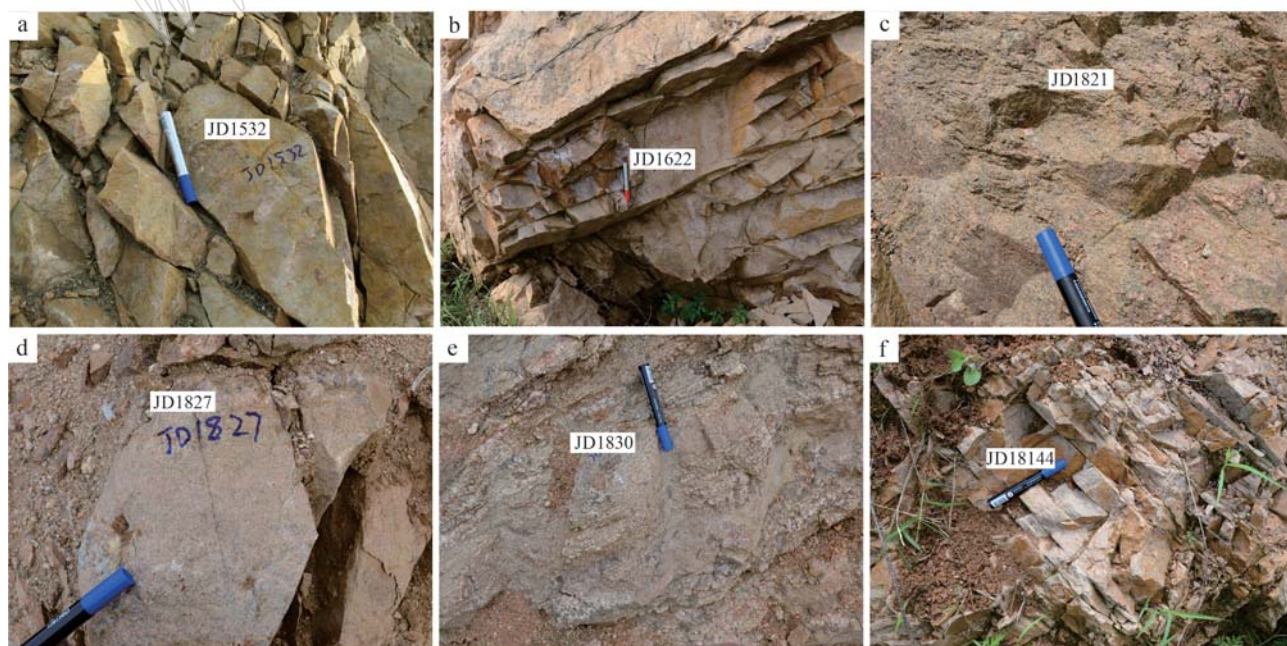


图2 胶北古元古代中期花岗片麻岩野外照片

Fig. 2 Representative field photographs of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane

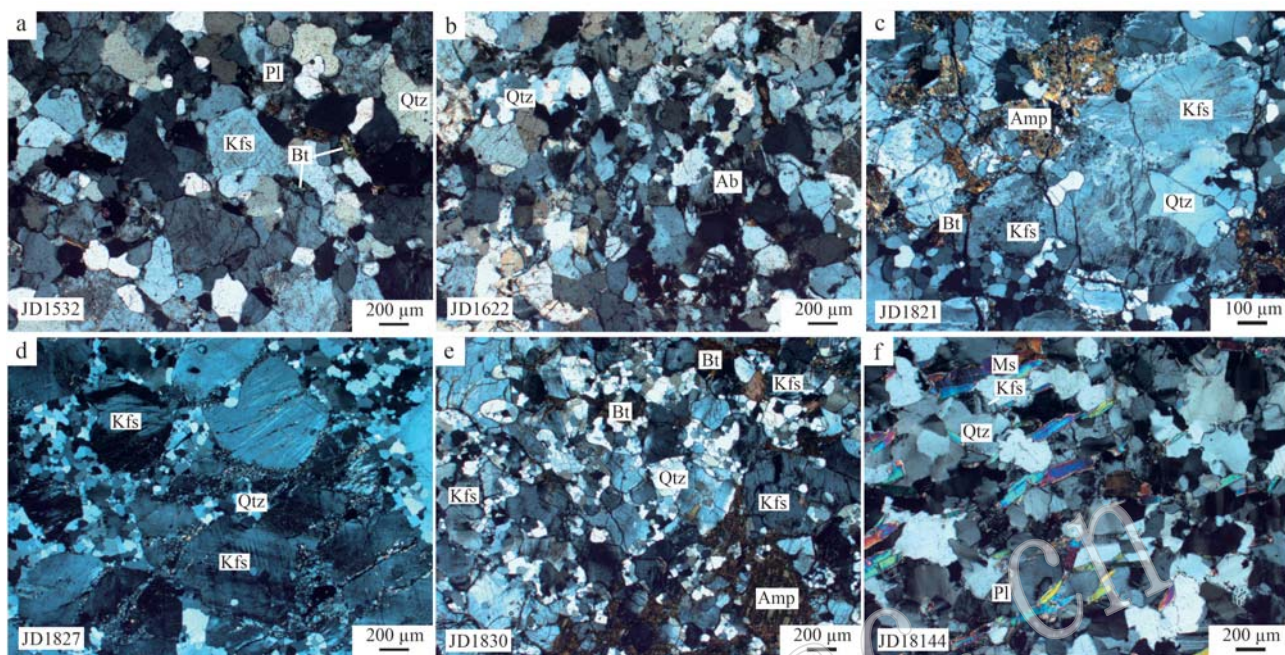


图3 胶北古元古代中期花岗片麻岩显微照片(正交偏光)

Fig. 3 Representative Photomicrograph of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (crossed polarized light)

Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Ab—钠长石; Qtz—石英; Bt—黑云母; Ms—白云母; Amp—角闪石

Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Ab—albite; Qtz—quartz; Bt—biotite; Ms—muscovite; Amp—amphibole

体为遭受不同程度变形改造的闪长-辉长岩,后期的花岗岩脉穿插其中,部分岩石破碎、风化较强。在采坑北部变形较弱的闪长岩中可见长轴约4 m的二长花岗片麻岩包体(图2c),二长花岗片麻岩中可见细小的花岗岩脉(脉宽1~2 cm)。JD1821采自该包体,该露头仅采集了测年样品,采样过程中尽可能避开脉体。JD1821包含条纹长石(40%~50%)、石英(30%~40%)、黑云母(~10%)和少量角闪石(1%~5%)(图3c)。条纹长石颗粒较大,一般为0.3~0.5 cm。石英呈他形,不等粒粒状,锯齿状边缘,具波状消光。样品JD1827和JD1830采自距南马格庄村约500 m的采坑内,该采坑直径约100 m,出露岩石主要为中细粒正长花岗片麻岩,从东向西,粒度逐渐变粗。JD1827采自露头东侧,新鲜(图2d)。主要矿物为条纹长石(40%~50%)和石英(40%~50%),基本不含暗色矿物(图3d)。条纹长石呈他形,粒状,颗粒较大,一般为0.5~1.0 cm。石英他形粒状,细粒,一般小于0.1 cm。JD1830采自露头中部,暗色矿物含量相对较高,中等风化(图2e)。主要矿物为长石(40%~50%)、石英(40%~50%)、黑云母(~10%),此外还含有少量角闪石

(~5%)(图3e)。长石以钾长石和条纹长石为主。钾长石可见格子双晶。石英他形粒状,可见波状消光。

2.4 栖霞市北

露头位于栖霞市北约4 km的公路旁,露头呈东-西走向,长约20 m,出露岩石新鲜,为正长花岗片麻岩(图2f)。样品JD18144采自该露头,主要矿物包括石英(45%~55%)、钾长石(25%~35%)、白云母(10%~15%)和斜长石(5%~10%)(图3f)。钾长石可见格子双晶。斜长石发生绢云母化。白云母呈鳞片状,定向排列。

2.5 顾家村

该地被农田覆盖严重,花岗片麻岩出露在顾家村东南的小河沟和小采坑内。出露岩石为二长花岗片麻岩,主要矿物为石英(35%~45%)、钾长石(25%~30%)、斜长石(20%~25%)以及少量角闪石和黑云母(~5%)。角闪石和黑云母呈定向排列,石英明显拉长。暗色矿物弱绿泥石化,长石遭受不同程度的绢云母化。由于前人已对采坑内的条带状二长花岗片麻岩进行测年,并获得 2095 ± 12 Ma的原岩侵位年龄(刘建辉等,2011),本次研究仅采集7

件地球化学样品。

3 分析方法

3.1 锆石 SHRIMP 定年

锆石 U-Pb 定年在北京离子探针中心采用 SHRIMP II 完成。详细分析方法见 Williams(1998)。测试时一次流 O^{-2} 强度为 3~5 nA, 束斑直径为 25~30 μm 。标样 M257($U = 840 \times 10^{-6}$, Nasdala *et al.*, 2008)和 TEMORA 2(年龄为 417 Ma, Black *et al.*, 2004)分别用于锆石 U 含量测定和年龄校正。每分析 3~4 个未知样品数据, 分析 1 次标准锆石 TEM。每个分析点采用 5 组扫描。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序。根据实测 ^{204}Pb 含量进行普通铅校正, 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为锆石年龄, 同位素比值和单点年龄误差均为 1σ 。加权平均年龄误差为 95% 置信度。

3.2 全岩地球化学

全岩主、微量元素在中国地质科学院国家地质实验测试中心实验室和武汉上谱分析科技有限责任公司完成。挑选新鲜、均匀的样品细碎至 200 目。国家地质实验测试中心主量元素分析采用 XRF 玻璃熔片法完成, 仪器型号为帕纳科 PW4400, 分析精确度为 2%~8%, FeO 由湿化学法获得, 换算后, 用 XRF 法获得的 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 减去 FeO 获得 Fe_2O_3 。烧失量由将样品在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 加热 2 h, 复称确定。微量元素采用 ICP-MS 溶液法分析, 仪器型号为 PE300D。将粉末样放入溶样弹中, 用 $\text{HF}+\text{HNO}_3$ 消解, 然后将加好酸的溶样弹放入钢套, 放置在烘箱中, 190 $^{\circ}\text{C}$ 加热 48 h 以上。大多数微量元素的精确度优于 5%。武汉上谱分析科技有限责任公司与国家地质实验测试中心分析方法相似, 主量元素分析利用 XRF 为日本理学 Primus II, 微量元素分析利用 ICP-MS 为 Agilent 7700e。主量元素分析精确度优于 5%, 微量元素分析精确度优于 5%~10%。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年结果

4.1.1 正长花岗片麻岩(JD1532)

样品中锆石多呈棱柱状-椭球状, 长轴为 100~200 μm 。CL 图像显示, 这些锆石发育复杂的核-幔-边结构(图 4a)。锆石核部呈灰白色, 具有弱的振

荡环带或均匀无分带结构, 锆石幔部发光较强呈亮色, 边部发光较弱呈灰黑色-黑色(图 4a)。锆石的幔部和边部通常较窄(小于 20 μm), 少量大于 30 μm 。对样品中 19 颗锆石进行了 23 次 U-Pb 年龄测试。17 个分析在锆石核部测试点的 U 含量为 143×10^{-6} ~ 595×10^{-6} , Th/U 值为 0.45~0.77, 除 2 个测试点落在谐和线以下外, 剩余 15 个测试点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分布在 2 129~2 105 Ma 之间, 它们的加权平均年龄为 $2 116 \pm 4$ Ma (MSWD = 0.94, 图 5a, 表 1), 代表花岗片麻岩原岩的侵入年龄。2 个测试点分析在锆石幔部, 其中一个测试点落在谐和线以下(点 6.1), 另一个测试点落在谐和线附近, 它的 U 含量为 379×10^{-6} , Th/U 值为 0.10, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1 935 \pm 8$ Ma, 可能代表早期的变质年龄。分析在灰黑色-黑色边部的 4 个测试点具有高的 U 含量($1 332 \times 10^{-6}$ ~ $2 406 \times 10^{-6}$)和低的 Th/U 值(0.03~0.05), 它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 856~1 868 Ma, 加权平均年龄为 $1 859 \pm 4$ Ma (MSWD = 1.00, 图 5a), 代表晚期的变质年龄。

4.1.2 钠长花岗片麻岩(JD1622)

样品中锆石大多为柱状, 颗粒加大, 长轴 150~250 μm 。与 JD1532 相似, 该样品中锆石具有复杂的内部结构(图 4b)。锆石核部呈灰白色, 发育弱的振荡环带或具有均匀无分带结构。锆石幔部发光较强, 呈亮色, 均匀结构。锆石最外层为发光较弱, 呈灰黑-黑色, 带状分带或无分带结构的边部(图 4b)。对样品中 15 颗锆石进行了 21 次 U-Pb 年龄测试。分析在核部的 12 个测试点的 U 含量为 422×10^{-6} ~ 761×10^{-6} , Th/U 值为 0.27~0.67, 其中 11 个测试点分布在谐和线附近, 它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 122~2 100 Ma, 加权平均年龄为 $2 112 \pm 6$ Ma (MSWD = 0.48, 图 5b), 代表花岗片麻岩原岩的侵入年龄。一个测试点(点 15.3, 图 4b)分析在亮色的幔部, 它的 U 含量为 78×10^{-6} , Th/U 值为 0.46, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2 114 \pm 30$ Ma, 该年龄误差相对较大, 且发生 Pb 丢失, 可能是后期改造的结果(图 5b)。8 个测试点分析在灰黑-黑色的锆石边部, 它们的 U 含量为 461×10^{-6} ~ $1 014 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.13~0.50, 除一个测试点(点 8.1)发生强烈 Pb 丢失外, 其他测试点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 850~1 841 Ma, 加权平均年龄为 $1 845 \pm 6$ Ma (MSWD = 0.16, 图 5b), 代表变质作用的年代。



图4 胶北古元古代中期花岗片麻岩中锆石阴极发光图像

Fig. 4 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane

4.1.3 二长花岗片麻岩(JD1821)

样品中锆石大多为椭球状或短柱状,长轴为100~200 μm 。样品中锆石发育核-幔-边结构,锆石核部大多发育清晰的振荡环带(图4c)。锆石幔部呈亮色,边部呈灰白色-灰色,二者均为无分带结构,且通常较窄(小于10 μm),少量锆石核部呈港湾状的区域发育较宽的幔和边(例如颗粒3,图4c)。对样品中13颗锆石进行了13次U-Pb年龄测试。12个测试点分析在锆石核部,它们的U含量为 $143 \times 10^{-6} \sim 561 \times 10^{-6}$,Th/U值为0.48~0.63,

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为2 129~2 115 Ma,加权平均年龄为 $2 121 \pm 7 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.18,图5c),代表花岗片麻岩原岩的侵入年龄。一个测试点分析在灰色的边部(点3.1,图4c),它的U含量为 269×10^{-6} ,Th/U值为0.01, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1 855 \pm 14 \text{ Ma}$ (图5c),代表遭受的变质作用的年龄。

4.1.4 正长花岗片麻岩(JD1827)

样品中锆石大多为长柱状,少量为短柱状,长轴大多在150~250 μm 之间。这些锆石内部结构复杂,从核到边依次发育灰色均匀或具有弱振荡环带

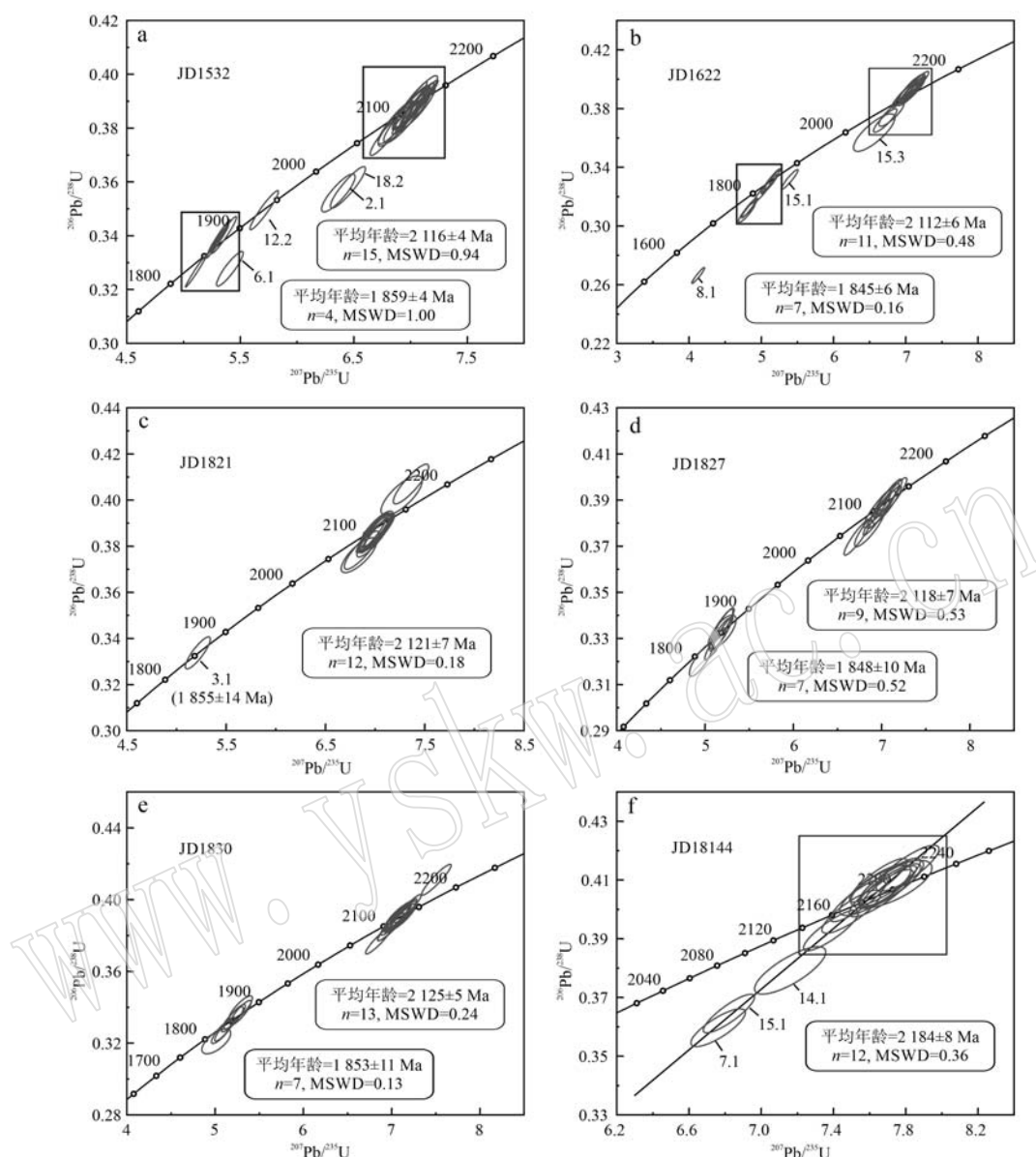


图5 胶北古元古代中期花岗片麻岩中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane

的核部,灰白色均匀的幔部,黑色均匀的幔部和灰色带状、面状或冷衫叶状分带的边部(图4d)。对15颗锆石进行了16次U-Pb年龄分析,其中9个测试点分析在锆石核部,7个测试点分析在边部。核部测试点的U含量为 $277 \times 10^{-6} \sim 470 \times 10^{-6}$, Th/U值为0.53~0.63, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为2127~2107 Ma,加权平均年龄为 2118 ± 7 Ma (MSWD = 0.53,图5d),代表原岩岩浆侵位的年龄。边部测试点的U含量为 $209 \times 10^{-6} \sim 685 \times 10^{-6}$, Th/U值为0.03~0.62, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为1854~1834 Ma,加权平均年龄为 1848 ± 10 Ma (MSWD = 0.52,图5d),代

表该样品遭受变质作用的年龄。

4.1.5 正长花岗片麻岩(JD1830)

样品中锆石为柱状、椭球状或等轴状,粒径变化较大,主要为100~250 μm 。与JD1827相似,该样品中锆石的内部结构复杂,由核到边依次发育灰白-灰色均匀或具有弱振荡环带的核部,白色均匀的幔部,黑色均匀的幔部以及灰色带状或面状分带的边部(例如颗粒15,图4e)。部分锆石改造较强,核部已完全被白色或黑色的幔部取代,少量锆石改造较弱,发育较窄的或缺失幔部和边部(例如颗粒9,图4e)。本次共对18颗锆石颗粒进行了20次分析,其

表 1 胶北古元古代中期花岗片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircon from mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane

样品	$w(^{206}\text{Pb}_e)$		$w_B/10^{-6}$		$^{32}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		同位素比值		误差相		年龄/Ma		不谐和度/%			
	/‰	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$					
JD1532, 岩浆年龄: $2.116 \pm 4 \text{ Ma}(n = 15)$; 变质年龄: $1.935 \pm 8 \text{ Ma}(n = 1)$, $1.859 \pm 4 \text{ Ma}(n = 4)$																	
JD1532-1.1	0.09	330	184	110	0.58	0.131 1	0.48	6.99	1.4	0.386 6	1.3	0.935	2 107	23	2 113	9	0
JD1532-2.1	0.20	249	138	76.4	0.57	0.129 8	0.79	6.37	1.5	0.355 9	1.3	0.855	1 963	22	2 095	14	6
JD1532-2.2	0.01	2 406	85	676	0.04	0.113 5	0.20	5.12	1.2	0.327 0	1.2	0.986	1 824	19	1 856	4	2
JD1532-3.1	0.05	400	255	133	0.66	0.132 3	0.43	7.04	1.3	0.385 8	1.3	0.945	2 103	23	2 129	8	1
JD1532-4.1	0.13	239	128	79.6	0.55	0.132 3	0.61	7.06	1.4	0.387 3	1.3	0.908	2 110	24	2 128	11	1
JD1532-5.1	0.13	186	108	62.1	0.60	0.131 4	0.68	7.01	1.5	0.387 2	1.3	0.892	2 110	24	2 116	12	0
JD1532-6.1	0.07	289	59	81.3	0.21	0.119 8	0.61	5.42	1.4	0.327 9	1.3	0.905	1 828	21	1 953	11	6
JD1532-19.1	0.03	1 681	74	488	0.05	0.113 9	0.24	5.31	1.2	0.337 9	1.2	0.980	1 876	19	1 862	4	-1
JD1532-7.1	0.23	181	101	59.5	0.57	0.131 5	0.74	6.93	1.5	0.382 2	1.4	0.877	2 086	24	2 118	13	1
JD1532-8.1	0.04	251	116	81.3	0.48	0.130 6	0.54	6.79	1.4	0.377 2	1.3	0.923	2 063	23	2 106	10	2
JD1532-9.1	0.02	562	348	188	0.64	0.131 7	0.35	7.07	1.3	0.389 5	1.2	0.962	2 121	22	2 121	6	0
JD1532-10.1	0.03	416	270	140	0.67	0.132 1	0.39	7.11	1.3	0.390 3	1.2	0.955	2 124	22	2 126	7	0
JD1532-11.1	0.18	232	138	77.8	0.62	0.131 3	0.69	7.05	1.8	0.389 3	1.7	0.926	2 120	31	2 115	12	0
JD1532-12.1	0.20	242	181	80.6	0.77	0.131 1	0.57	7.00	1.4	0.387 4	1.3	0.914	2 111	23	2 113	10	0
JD1532-13.1	0.06	202	87	67.3	0.45	0.131 2	0.58	7.02	1.4	0.388 0	1.3	0.914	2 114	24	2 114	10	0
JD1532-12.2	0.02	379	36	114	0.10	0.118 6	0.47	5.72	1.4	0.349 5	1.4	0.946	1 932	23	1 935	8	0
JD1532-14.1	0.03	327	186	108	0.59	0.131 6	0.43	6.98	1.3	0.384 8	1.3	0.945	2 099	23	2 120	8	1
JD1532-15.1	0.00	595	327	199	0.57	0.130 5	0.32	7.01	1.3	0.389 8	1.2	0.967	2 122	22	2 105	6	-1
JD1532-16.1	0.00	143	65	46.9	0.47	0.130 6	0.67	6.88	1.5	0.382 0	1.4	0.899	2 085	24	2 106	12	1
JD1532-16.2	0.01	1 698	49	496	0.03	0.113 6	0.22	5.32	1.2	0.339 8	1.2	0.983	1 886	20	1 858	4	-2
JD1532-17.1	0.03	1 332	48	390	0.04	0.114 3	0.39	5.36	1.4	0.340 4	1.3	0.959	1 888	22	1 868	7	-1
JD1532-18.1	0.16	172	80	56.5	0.48	0.131 0	0.75	6.89	1.6	0.381 5	1.4	0.887	2 083	26	2 111	13	1
JD1532-18.2	-	178	78	54.7	0.45	0.130 8	0.67	6.45	1.6	0.358 0	1.4	0.906	1 973	24	2 108	12	6
JD1622, 岩浆年龄: $2.112 \pm 6 \text{ Ma}(n = 11)$; 变质年龄: $1.845 \pm 6 \text{ Ma}(n = 7)$																	
JD1622-1.2	0.04	461	157	123	0.35	0.112 8	0.70	4.81	1.6	0.309 3	1.5	0.902	1 738	22	1 845	13	6
JD1622-1.1	0.13	209	106	67.5	0.52	0.131 4	0.90	6.81	1.7	0.376 0	1.4	0.849	2 058	25	2 117	16	3
JD1622-2.1	0.03	422	258	142	0.63	0.131 8	0.49	7.11	1.4	0.391 2	1.4	0.942	2 129	25	2 122	9	0
JD1622-3.1	0.03	293	157	99.0	0.55	0.130 4	0.60	7.08	1.6	0.393 6	1.5	0.928	2 139	27	2 103	11	-2
JD1622-2.2	0.02	489	164	131	0.35	0.112 6	0.56	4.85	1.5	0.312 7	1.4	0.926	1 754	21	1 841	10	5
JD1622-4.1	0.06	343	190	117	0.57	0.131 0	0.57	7.16	1.5	0.396 6	1.4	0.925	2 153	25	2 112	10	-2
JD1622-5.1	0.14	334	187	112	0.58	0.131 4	0.62	7.06	1.5	0.389 8	1.4	0.913	2 122	25	2 117	11	0
JD1622-6.1	0.09	244	145	82.8	0.61	0.130 6	0.70	7.10	1.6	0.394 4	1.5	0.902	2 143	27	2 105	12	-2
JD1622-6.2	0.02	971	209	276	0.22	0.112 9	0.38	5.16	1.4	0.331 4	1.3	0.962	1 845	21	1 847	7	0
JD1622-7.1	0.07	318	183	107	0.60	0.130 5	0.60	7.03	1.5	0.390 6	1.4	0.920	2 126	26	2 105	11	-1
JD1622-8.1	0.01	1 014	128	232	0.13	0.112 6	0.44	4.14	1.4	0.266 7	1.3	0.950	1 524	18	1 841	8	17
JD1622-9.1	0.11	280	156	89.5	0.57	0.131 2	0.74	6.72	1.6	0.371 6	1.4	0.884	2 037	25	2 114	13	4
JD1622-10.1	-	560	224	155	0.41	0.112 8	0.51	5.02	1.4	0.322 9	1.4	0.936	1 804	21	1 846	9	2

续表 1-1
Continued Table 1-1

样号	$w(^{206}\text{Pb}_e)$		$w_B/10^{-6}$		$^{32}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值				误差相 关系数	年龄/Ma		不谐和 度/%		
	%	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}_e$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$		$^{206}\text{Pb}_e/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}_e/^{206}\text{Pb}$			
JD1622-11.1	0.09	319	177	108	0.57	0.131 3	0.62	7.10	1.5	0.392 3	2 133	25	2 115	11	-1
JD1622-12.1	0.06	421	273	143	0.67	0.131 3	0.53	7.12	1.5	0.393 6	2 139	25	2 115	9	-1
JD1622-13.1	0.04	342	175	114	0.53	0.130 1	0.58	6.97	1.5	0.388 5	2 116	25	2 100	10	-1
JD1622-13.2	0.05	871	310	246	0.37	0.113 1	0.49	5.12	1.4	0.328 5	1 831	21	1 850	9	1
JD1622-15.1	0.19	761	200	217	0.27	0.118 1	0.49	5.40	1.4	0.331 8	1 847	21	1 928	9	4
JD1622-14.1	0.04	744	363	212	0.50	0.112 7	0.45	5.15	1.7	0.331 0	1 843	26	1 844	8	0
JD1622-15.2	0.01	997	211	267	0.22	0.112 5	0.39	4.84	1.4	0.311 9	1 750	20	1 841	7	5
JD1622-15.3	0.40	78	35	24.4	0.46	0.131 2	1.7	6.57	2.9	0.363 4	1 998	39	2 114	30	5
JD1821, 岩浆年龄: $2.121 \pm 7 \text{ Ma}(n = 12)$; 变质年龄: $1.855 \pm 14 \text{ Ma}(n = 1)$															
JD1821-1.1	0.13	278	164	92.3	0.61	0.131 9	0.71	7.01	1.6	0.385 8	2 103	26	2 123	12	1
JD1821-2.1	0.09	316	160	105	0.52	0.132 3	0.61	7.04	1.5	0.386 0	2 104	24	2 129	11	1
JD1821-3.1	0.24	269	2	77.4	0.01	0.113 4	0.80	5.22	1.6	0.334 0	1 858	22	1 855	14	0
JD1821-4.1	0.10	211	99	69.4	0.48	0.132 2	0.74	6.99	1.6	0.383 4	2 092	25	2 127	13	2
JD1821-5.1	0.01	205	122	68.0	0.61	0.131 4	0.68	7.00	1.5	0.386 1	2 105	25	2 117	12	1
JD1821-6.1	0.07	143	78	46.6	0.57	0.131 7	0.83	6.87	1.7	0.378 3	2 068	26	2 121	15	3
JD1821-7.1	0.09	289	143	95.9	0.51	0.131 7	0.66	7.01	1.5	0.385 9	2 104	24	2 121	12	1
JD1821-8.1	1.68	389	234	128	0.62	0.131 9	1.1	6.84	1.7	0.376 2	2 058	23	2 123	19	3
JD1821-9.1	0.47	335	203	116	0.63	0.131 3	1.2	7.27	1.9	0.401 8	2 177	26	2 115	22	-3
JD1821-10.1	0.03	400	226	132	0.58	0.131 3	0.51	6.97	1.4	0.384 8	2 099	24	2 115	9	1
JD1821-11.1	0.07	561	324	186	0.60	0.132 0	0.47	7.00	1.4	0.384 6	2 098	23	2 125	8	1
JD1821-12.1	0.37	435	244	145	0.58	0.131 4	0.84	7.02	1.6	0.387 5	2 111	24	2 116	15	0
JD1821-13.1	0.30	308	145	108	0.49	0.131 3	0.79	7.37	1.6	0.406 8	2 200	26	2 116	14	-4
JD1827, 岩浆年龄: $2.118 \pm 7 \text{ Ma}(n = 9)$; 变质年龄: $1.848 \pm 10 \text{ Ma}(n = 7)$															
JD1827-1.1	0.07	350	179	118	0.53	0.132 1	0.62	7.13	1.5	0.391 3	2 129	25	2 126	11	0
JD1827-2.1	0.02	259	135	71.4	0.54	0.112 1	0.99	4.96	1.7	0.320 8	1 794	22	1 834	18	2
JD1827-3.1	0.02	334	181	107	0.56	0.130 6	0.61	6.74	1.5	0.374 1	2 048	25	2 107	11	3
JD1827-4.1	0.40	277	148	90.4	0.55	0.131 9	0.79	6.87	1.6	0.377 9	2 066	25	2 124	14	3
JD1827-5.1	0.01	379	209	126	0.57	0.130 7	0.54	6.96	1.5	0.386 1	2 105	25	2 108	10	0
JD1827-5.2	0.07	685	22	196	0.03	0.113 5	0.50	5.21	1.4	0.333 0	1 853	22	1 857	9	0
JD1827-6.1	0.04	350	214	116	0.63	0.131 7	0.57	7.00	1.5	0.385 7	2 103	25	2 121	10	1
JD1827-7.1	0.04	360	190	120	0.55	0.132 2	0.56	7.07	1.5	0.387 9	2 113	25	2 127	10	1
JD1827-8.1	0.06	470	265	154	0.58	0.131 8	0.49	6.95	1.4	0.382 6	2 088	24	2 122	9	2
JD1827-9.1	0.21	209	102	60.0	0.50	0.113 3	1.4	5.20	2.0	0.333 1	1 853	23	1 853	25	0
JD1827-10.1	0.04	300	143	84.6	0.49	0.113 4	0.66	5.12	1.5	0.327 8	1 828	22	1 854	12	1
JD1827-11.1	0.02	297	179	85.7	0.62	0.112 4	0.69	5.21	1.6	0.336 3	1 869	23	1 839	12	-2
JD1827-12.1	-	239	108	68.9	0.47	0.112 3	0.75	5.20	1.6	0.335 6	1 865	23	1 837	14	-2
JD1827-13.1	0.12	280	144	79.8	0.53	0.113 2	0.74	5.18	1.6	0.332 0	1 848	23	1 852	13	0
JD1827-14.1	0.02	309	176	104	0.59	0.131 4	0.58	7.08	1.5	0.390 7	2 126	25	2 116	10	0
JD1827-15.1	0.06	351	205	117	0.60	0.131 3	0.55	7.04	1.5	0.389 0	2 118	25	2 115	10	0

续表 1-2
Continued Table 1-2

样号	$w(^{206}\text{Pb}_c)$		$w_{\text{B}}/10^{-6}$		$^{32}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值		误差相		年龄/Ma		不谐和度/%		
	%	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			
JD1830, 岩浆年龄: $2.125 \pm 5 \text{ Ma}(n = 13)$; 变质年龄: $1.853 \pm 11 \text{ Ma}(n = 7)$														
JD1830-1.1	0.07	260	118	73.2	0.47	0.112 9	0.82	5.09	1.6	0.326 7	1.822	21	1 847 15	1
JD1830-2.1	0.07	417	257	140	0.64	0.132 3	0.51	7.14	1.4	0.391 4	2 130	23	2 128 9	0
JD1830-3.1	0.06	467	309	157	0.68	0.132 5	0.47	7.13	1.4	0.390 1	2 124	23	2 132 8	0
JD1830-4.1	0.02	671	423	237	0.65	0.132 6	0.54	7.51	1.5	0.410 9	2 219	26	2 133 9	-4
JD1830-5.1	0.02	552	365	185	0.68	0.131 9	0.43	7.08	1.3	0.389 2	2 119	23	2 123 8	0
JD1830-6.1	0.20	101	57	34.0	0.58	0.131 9	0.96	7.10	1.8	0.390 5	2 125	27	2 123 17	0
JD1830-6.2	0.18	247	120	70.9	0.50	0.113 2	0.78	5.20	1.6	0.333 5	1 855	22	1 851 14	0
JD1830-7.1	0.05	260	137	74.7	0.54	0.113 3	0.72	5.23	1.5	0.334 9	1 862	22	1 853 13	0
JD1830-8.1	0.11	268	142	77.6	0.55	0.114 0	0.75	5.30	1.5	0.337 1	1 873	22	1 863 14	-1
JD1830-9.1	0.03	339	195	112	0.59	0.132 0	0.54	7.00	1.4	0.384 8	2 098	23	2 125 10	1
JD1830-10.1	0.07	160	77	46.6	0.50	0.113 2	0.95	5.30	1.7	0.339 3	1 883	23	1 852 17	-2
JD1830-11.1	0.07	393	214	130	0.56	0.131 9	0.53	6.99	1.4	0.384 6	2 098	23	2 123 9	1
JD1830-12.1	0.00	279	165	92.9	0.61	0.131 6	0.60	7.04	1.5	0.387 9	2 113	24	2 119 10	0
JD1830-13.1	0.07	326	180	92.0	0.57	0.113 2	0.65	5.12	1.5	0.328 0	1 829	21	1 851 12	1
JD1830-14.1	0.01	464	263	155	0.59	0.131 9	0.49	7.08	1.4	0.389 2	2 119	24	2 123 9	0
JD1830-15.1	0.05	364	197	123	0.56	0.131 9	0.60	7.13	1.5	0.392 2	2 133	25	2 123 11	0
JD1830-16.1	0.02	478	276	162	0.60	0.132 0	0.48	7.19	1.4	0.394 9	2 146	24	2 125 8	-1
JD1830-15.2	0.94	187	98	52.1	0.54	0.113 4	1.60	5.02	2.2	0.321 2	1 795	22	1 855 30	3
JD1830-17.1	0.07	440	267	143	0.63	0.131 9	0.54	6.86	1.4	0.377 2	2 063	23	2 123 9	3
JD1830-18.1	0.02	360	215	121	0.62	0.131 4	0.55	7.07	1.4	0.390 3	2 124	24	2 116 10	0
JD18144, 岩浆年龄: $2.184 \pm 8 \text{ Ma}(n = 12)$														
JD18144-1.1	0.16	354	189	120	0.55	0.136 4	0.69	7.39	1.4	0.392 7	2 135	21	2 182 12	2
JD18144-2.1	0.07	219	120	75.1	0.57	0.136 3	0.77	7.50	1.4	0.399 1	2 165	23	2 181 13	1
JD18144-3.1	0.22	134	53	47.0	0.41	0.137 1	1.4	7.72	1.9	0.408 4	2 208	25	2 191 24	-1
JD18144-4.1	0.10	193	100	67.3	0.54	0.137 1	0.79	7.67	1.5	0.405 4	2 194	24	2 191 14	0
JD18144-5.1	0.08	228	118	80.5	0.53	0.135 4	0.67	7.65	1.4	0.409 7	2 213	22	2 169 12	-2
JD18144-6.1	0.11	316	122	111	0.40	0.137 1	0.61	7.71	1.3	0.407 7	2 204	21	2 191 11	-1
JD18144-7.1	0.36	234	152	72.5	0.67	0.136 4	0.87	6.76	1.5	0.359 7	1 981	20	2 182 15	9
JD18144-8.1	0.05	149	59	53.0	0.41	0.136 9	0.80	7.81	1.5	0.413 8	2 232	23	2 188 14	-2
JD18144-9.1	0.10	127	53	44.6	0.44	0.136 9	0.89	7.72	1.5	0.408 8	2 210	24	2 189 15	-1
JD18144-10.1	0.06	233	142	80.7	0.63	0.135 7	0.70	7.54	1.4	0.403 1	2 183	22	2 173 12	-1
JD18144-11.1	0.10	145	52	50.8	0.37	0.136 2	0.98	7.63	1.7	0.406 3	2 198	26	2 180 17	-1
JD18144-12.1	0.14	215	120	75.3	0.58	0.137 1	0.81	7.71	1.5	0.407 8	2 205	23	2 191 14	-1
JD18144-13.1	0.15	264	133	92.9	0.52	0.136 6	0.73	7.71	1.5	0.409 4	2 212	24	2 185 13	-1
JD18144-14.1	0.42	146	68	47.8	0.48	0.137 0	1.1	7.16	1.8	0.379 1	2 072	25	2 190 20	5
JD18144-15.1	0.07	314	203	98.4	0.67	0.135 8	0.71	6.82	1.4	0.364 5	2 003	20	2 174 12	8

注: ^{206}Pb 表示 ^{206}Pb 中普通 ^{206}Pb 的比例, * 表示放射成因 Pb , 单点年龄误差为 1σ , - 表示低于检测限。

中13个测试点分析在锆石核部,7个测试点分析在灰色的边部。锆石核部的U含量为 $101 \times 10^{-6} \sim 671 \times 10^{-6}$, Th/U 值为0.56~0.68, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,133 \sim 2\,116$ Ma, 加权平均年龄为 $2\,125 \pm 5$ Ma (MSWD = 0.24, 图5e), 代表原岩岩浆侵位的年龄。锆石边部的U含量为 $160 \times 10^{-6} \sim 326 \times 10^{-6}$, Th/U 值为0.47~0.57, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1\,863 \sim 1\,847$ Ma, 加权平均年龄为 $1\,853 \pm 11$ Ma (MSWD=0.13, 图5e), 解释为变质作用的年龄。

4.1.6 正长花岗片麻岩(JD18144)

样品中锆石大多为短柱状, 粒径为 $\sim 100\ \mu\text{m}$, 锆石颗粒内部裂隙发育。这些锆石发育弱的振荡环带, 挑选无裂隙、环带发育的颗粒进行锆石 U-Pb 分析(图4f)。分析在15颗锆石上的15个测试点的U含量为 $127 \times 10^{-6} \sim 354 \times 10^{-6}$, Th/U 值为0.37~0.67, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,191 \sim 2\,169$ Ma。除3个测试点发生Pb丢失外, 其他12个相对集中且落在谐和线上的测试点的加权平均年龄为 $2\,184 \pm 8$ Ma (MSWD = 0.36, 图5f), 代表花岗片麻岩原岩的侵入年龄。

4.2 地球化学组成

采自不同地区的花岗片麻岩的地球化学组成存在显著的差异(图6, 表2)。

郭城镇正长-二长花岗片麻岩的地球化学组成变化较大, SiO_2 含量71.35%~78.36%、 Al_2O_3 含量9.97%~13.62%, $^{\text{T}}\text{FeO}$ 含量0.88%~3.00%, MgO 含量0.16%~1.10%, CaO 含量0.12%~0.87%, Na_2O 含量0.96%~5.25%, K_2O 含量1.76%~8.89%(图6)。它们具有高的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量(6.19%~9.93%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 变化较大(0.35~9.26), A/CNK 为1.01~1.13, 属过铝质岩石(图7a)。这些花岗片麻岩的微量元素和稀土元素组成也变化较大, ΣREE 含量 $58.00 \times 10^{-6} \sim 1\,074.00 \times 10^{-6}$, Rb 含量 $35.90 \times 10^{-6} \sim 202.00 \times 10^{-6}$, Ba 含量 $258.00 \times 10^{-6} \sim 4\,220.00 \times 10^{-6}$, Th 含量 $11.10 \times 10^{-6} \sim 207.00 \times 10^{-6}$ 。这些样品具有平坦至右倾的稀土元素配分型式, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为1.0~29.0, 明显负的至无铈异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.35 \sim 1.02$)。尽管郭城花岗片麻岩的微量元素组成变化较大, 但在微量元素蛛网图中均表现出明显的Nb、Ta 亏损和强烈的Sr 的负异常(图8c, 8d)。

辽上水库钠长花岗片麻岩具有高的 SiO_2 (76.22%~79.97%), 低的 $^{\text{T}}\text{FeO}$ (0.37%~0.92%), MgO (0.05%~0.19%) 含量。这些样品以富 Na_2O

(4.99%~6.61%) 和贫 K_2O (0.84%~3.17%) 为特征(图6), 相应的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为0.13~0.60。它们的A/CNK 为0.87~1.03, 属准铝质-弱过铝质岩石(图7a)。这些样品的 ΣREE 为 $121.00 \times 10^{-6} \sim 223.00 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素含量较低且分异不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为1.11~1.52, 它们具有明显的负铈异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.44 \sim 0.73$) (图8c)。辽上水库花岗片麻岩的Th 较高, 亏损Rb、Ba、Sr(图8d)。由于轻稀土元素含量较低, 在蛛网图中未表现出明显的Nb、Ta 亏损(图8d)。

南马格庄正长花岗片麻岩以高 SiO_2 (71.89%~78.40%) 和 K_2O (5.82%~6.44%), 低 Al_2O_3 (10.38%~12.64%)、 $^{\text{T}}\text{FeO}$ (2.24%~2.84%) 和 Na_2O (1.90%~2.51%) 含量为特征(图6)。它们具有高的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (8.27%~8.38%) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(2.31~3.39)。这些样品的A/CNK 为1.00~1.07, 属弱过铝质岩石(图7a)。在微量元素和稀土元素方面, 这些花岗片麻岩具有低的稀土含量, ΣREE 为 $30.00 \times 10^{-6} \sim 45.20 \times 10^{-6}$, 富集轻稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为5.6~11.0, 具有明显的正铈异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.78 \sim 2.60$), 富集Rb、Ba, 亏损Nb、Ta(图8a, 8b)。

栖霞北正长花岗片麻岩以高 SiO_2 (81.51%~83.53%) 为特征, 具有高的 K_2O (4.41%~5.53%), 低的 Al_2O_3 (9.23%~10.55%), $^{\text{T}}\text{FeO}$ (0.42%~0.81%), MgO (0.18%~0.30%), CaO (0.03%~0.04%), Na_2O (0.13%~0.18%) 含量(图6)。这些样品具有低的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (4.55%~5.70%) 和异常高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(30.55~35.26)。它们的A/CNK 为1.50~1.92, 属过铝质岩石(图7a)。栖霞北花岗片麻岩 ΣREE 为 $171.00 \times 10^{-6} \sim 276.00 \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素分异显著, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为6.1~11.1, 具有明显的负铈异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.40 \sim 0.44$), 富集Rb、Ba、Th 和U, 亏损Nb、Ta 和Sr(图8e, 8f)。

顾家村二长花岗片麻岩具有相对均匀的地球化学组成, 它们的 SiO_2 含量69.10%~71.40%、 Al_2O_3 含量12.00%~12.87%, $^{\text{T}}\text{FeO}$ 含量3.74%~4.47%, MgO 含量0.41%~0.91%, CaO 含量1.00%~2.30%, Na_2O 含量3.02%~3.31%, K_2O 含量3.77%~4.45%(图6)。这些样品的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为7.05%~7.71%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为1.15~1.43, A/CNK 为0.88~1.12, 属准铝质-过铝质岩石(图7a)。

表 2 胶北古元古代中期花岗片麻岩主量 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 组成
Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements data for mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane

岩石类型	正长-二长花岗片麻岩											
采样位置	郭城镇东											
样品号	JD1532 *	JD1609 *	JD1614 *	JD1616 *	JD1617 *	JD1618 *	JD1847	JD1848	JD1849	JD1851	JD1852	JD1853
SiO ₂	72.97	74.58	73.79	73.60	78.36	75.91	73.69	76.17	78.05	73.32	77.29	71.35
TiO ₂	0.25	0.19	0.27	0.38	0.22	0.30	0.22	0.23	0.22	0.36	0.19	0.35
Al ₂ O ₃	11.90	13.25	12.26	13.26	9.97	11.73	12.37	12.12	12.14	13.62	11.22	13.37
Fe ₂ O ₃	2.28	0.50	1.44	1.22	1.09	1.97						
FeO	0.95	0.43	0.80	1.03	0.79	0.87						
^T FeO	3.00	0.88	2.10	2.13	1.77	2.64	1.87	1.15	1.09	1.91	2.63	1.27
MnO	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
MgO	0.16	0.29	0.25	0.36	0.17	0.47	1.10	0.49	0.32	0.33	0.32	0.79
CaO	0.21	0.39	0.17	0.87	0.12	0.63	0.51	0.15	0.69	0.56	0.29	0.76
Na ₂ O	1.25	3.48	0.96	4.21	1.41	4.43	3.01	2.67	5.25	4.49	3.84	1.85
K ₂ O	8.40	5.35	8.89	3.78	6.48	1.76	5.57	6.15	1.86	4.64	3.75	8.08
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.06	0.02	0.04
CO ₂	0.26	0.15	0.17	0.13	0.13	0.13						
H ₂ O ⁺	0.22	0.76	0.84	1.02	0.66	0.88						
LOI	0.27	0.61	0.44	0.63	0.33	0.88	1.09	0.64	0.53	0.44	0.44	1.13
Total	98.69	99.11	99.33	99.42	98.99	98.99	99.47	99.81	100.17	99.76	99.99	99.00
Mg [#]	8.7	37.0	17.5	23.2	14.6	24.1	51.1	43.4	34.0	23.4	17.6	52.6
^T FeO/MgO	18.76	3.03	8.38	5.91	10.42	5.62	1.70	2.32	3.46	5.84	8.32	1.61
A/CNK	1.03	1.08	1.07	1.05	1.04	1.13	1.04	1.07	1.02	1.01	1.03	1.02
Sc	3.97	1.41	4.03	2.69	2.6	3.97	3.70	2.79	1.75	3.08	1.32	4.43
Cr	1.68	1.84	1.80	0.91	1.44	2.18	1.65	2.22	1.97	1.27	1.68	1.98
Co	0.74	1.04	0.78	1.92	0.98	4.02	0.82	1.13	12.0	1.15	0.66	1.19
Ni	0.66	0.58	0.45	0.83	0.43	2.09	1.13	1.84	5.01	1.45	1.14	1.57
Cu							1.43	1.26	4.90	1.13	1.48	1.96
Zn							18.20	12.20	9.45	8.85	10.30	12.80
Ga	20.60	22.90	19.10	26.50	15.80	23.90	27.70	25.60	17.70	25.30	24.60	27.60
Rb	192.00	191.00	185.00	155.00	136.00	52.60	116.00	153.00	35.90	134.00	60.70	202.00
Sr	50.10	104.00	45.40	108.00	37.00	74.20	53.00	40.60	104.00	97.20	37.00	86.70
Y	49.50	30.80	46.90	62.00	36.30	44.30	94.30	60.50	48.40	66.40	47.00	25.70
Zr	492.00	227.00	500.00	413.00	423.00	420.00	473.00	509.00	476.00	416.00	396.00	673.00
Nb	20.30	15.00	22.90	27.80	19.90	17.00	35.50	26.80	23.60	29.30	20.00	21.80
Cs	0.71	0.51	0.78	0.43	0.38	0.42	0.27	0.33	0.11	0.37	0.18	0.69
Ba	3 057.00	799.00	4 220.00	586.00	1 375.00	258.00	2 010.00	1 064.00	394.00	587.00	635.00	2 852.00
La	51.10	111.00	16.20	244.00	5.85	85.20	218.00	43.10	32.50	227.00	44.40	43.10
Ce	107.00	234.00	33.90	474.00	13.80	168.00	457.00	100.00	73.90	367.00	98.90	99.40
Pr	14.40	21.00	4.14	45.50	1.69	19.10	56.10	11.60	8.51	50.70	11.70	11.60
Nd	57.00	67.60	17.10	149.00	8.58	71.70	212.00	48.00	35.20	171.00	48.70	46.70
Sm	13.10	9.40	4.61	20.20	3.47	13.30	44.40	11.00	8.91	28.50	10.50	9.75
Eu	3.41	1.14	1.89	1.89	1.38	1.96	6.21	2.21	1.68	2.67	2.03	2.70
Gd	11.90	6.57	6.98	13.80	5.25	12.00	32.00	10.70	9.74	18.40	10.20	8.29
Tb	1.87	1.02	1.50	2.12	0.99	1.73	4.22	1.79	1.59	2.68	1.56	1.15
Dy	12.00	5.83	9.77	11.70	6.41	9.09	20.50	11.30	9.70	13.60	9.09	5.97
Ho	2.18	1.11	1.88	2.16	1.26	1.59	3.38	2.13	1.77	2.39	1.68	0.99
Er	6.29	3.39	5.58	6.43	4.04	4.49	9.31	6.10	4.67	6.79	4.79	2.57
Tm	0.90	0.48	0.76	0.93	0.58	0.58	1.30	0.89	0.67	0.94	0.69	0.36
Yb	5.70	3.19	5.10	6.03	4.06	3.92	8.31	5.61	4.17	5.91	4.23	2.57
Lu	0.79	0.45	0.76	0.84	0.64	0.60	1.16	0.82	0.63	0.78	0.62	0.39
Hf	14.70	7.75	15.80	13.70	12.60	14.10	14.00	14.20	13.60	12.10	12.10	18.70
Ta	1.55	1.27	1.86	2.12	1.52	0.45	2.55	1.93	1.60	2.22	0.74	0.89
Pb	10.60	15.80	8.63	28.80	4.77	11.20	13.40	12.30	11.50	14.70	10.10	12.10
Th	11.10	135.00	12.80	207.00	13.80	23.30	25.40	13.80	16.70	107.00	19.00	15.00
U	2.29	7.39	2.73	11.50	2.69	1.93	3.53	2.45	3.30	5.00	1.84	2.25
(La/Yb) _N	6.4	25.0	2.3	29.0	1.0	15.6	18.8	5.5	5.6	27.6	7.5	12.0
Eu/Eu *	0.83	0.44	1.02	0.35	0.99	0.47	0.50	0.62	0.55	0.36	0.60	0.92
<i>t</i> _{zr} /°C	896	825	903	879	890	894	892	907	895	873	877	924

续表 2-1
 Continued Table 2-1

岩石类型	钠长花岗片麻岩						二长花岗片麻岩				
采样位置	辽上水库						顾家村				
样品号	JD1622 *	JD1623 *	JD18156	JD18158	JD18159	JD18160	S1356 *	S1357 *	14JD04 *	JD1603 *	JD1604 *
SiO ₂	76.60	76.22	77.23	79.97	78.45	77.53	70.24	70.11	71.40	69.10	71.15
TiO ₂	0.24	0.21	0.24	0.15	0.25	0.25	0.65	0.71	0.70	0.69	0.58
Al ₂ O ₃	12.37	11.95	12.10	11.42	12.49	12.44	12.87	12.72	12.82	12.00	12.80
Fe ₂ O ₃	0.71	0.76					2.44	2.46	2.81	2.67	2.23
FeO	0.25	0.24					1.95	2.26	1.37	2.05	1.73
^T FeO	0.89	0.92	0.82	0.37	0.38	0.58	4.15	4.47	3.90	4.45	3.74
MnO	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.08	0.10	0.03	0.09	0.04
MgO	0.12	0.18	0.19	0.05	0.08	0.08	0.58	0.91	0.53	0.81	0.42
CaO	0.69	1.26	1.10	0.19	0.53	0.12	1.96	2.13	1.00	2.30	1.26
Na ₂ O	5.90	5.98	5.93	4.99	6.61	5.30	3.02	3.21	3.17	3.09	3.26
K ₂ O	2.07	1.54	1.35	2.33	0.84	3.17	4.31	4.01	4.12	3.98	4.45
P ₂ O ₅	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.14	0.17	0.15	0.15	0.12
CO ₂	0.34	0.84					1.18	0.56		1.71	0.86
H ₂ O ⁺	0.84	0.72					0.78	0.38	1.20	1.30	1.04
LOI	0.83	1.35	1.10	0.21	0.44	0.28	1.17	0.56	1.68	1.92	1.27
Total	99.82	99.72	100.12	99.70	100.08	99.77	99.41	99.35	99.78	98.85	99.31
Mg [#]	19.4	25.8	29.6	19.3	26.4	19.5	20.0	26.6	19.5	24.5	16.7
^T FeO/MgO	7.41	5.13	4.24	7.43	4.97	7.34	7.15	4.92	7.36	5.50	8.90
A/CNK	0.94	0.87	0.92	1.03	0.98	1.01	0.98	0.94	1.12	0.88	1.03
Sc	3.46	2.93	1.64	0.28	0.13	2.51	9.17	10.60	9.30	11.10	8.73
Cr	1.18	0.84	4.00	2.54	2.78	1.85	11.0	11.30	18.50	6.21	4.70
Co	0.56	0.92	0.92	0.48	0.28	0.35	7.01	6.37		6.66	5.53
Ni	0.54	0.74	2.24	1.78	1.57	1.54	5.58	5.52	8.32	3.87	3.15
Cu			1.94	1.12	1.19	1.25					
Zn			5.70	4.34	4.42	5.10					
Ga	25.70	25.10	24.80	24.80	29.30	25.60	19.60	19.20	18.80	18.90	19.10
Rb	33.50	24.20	26.00	39.10	13.90	51.40	135.00	131.00	118.00	127.00	132.00
Sr	25.50	35.30	51.20	30.70	42.30	30.40	133.00	116.00	102.00	149.00	139.00
Y	52.30	43.10	49.70	30.90	39.70	73.60	40.90	49.30	42.50	51.10	40.80
Zr	510.00	442.00	500.00	400.00	573.00	531.00	437.00	385.00	450.00	351.00	324.00
Nb	27.30	34.30	32.40	31.40	34.60	32.90	19.20	21.40	27.80	21.40	16.90
Cs	0.15	0.12	0.12	0.09	0.08	0.18	0.70	0.42		4.24	0.88
Ba	279.00	211.00	128.00	209.00	64.60	447.00	1056.00	975.00	1103.00	966.00	1072.00
La	20.10	14.80	12.20	15.90	13.10	27.40	50.00	55.70	63.80	63.70	51.60
Ce	54.50	39.20	36.70	47.20	40.30	76.20	104.00	124.00	135.00	127.00	100.00
Pr	8.62	6.42	5.43	6.09	6.05	11.00	12.20	14.20	14.30	14.90	11.60
Nd	40.20	31.60	26.30	27.70	28.20	47.60	47.10	52.50	54.20	56.70	45.00
Sm	9.99	9.09	7.11	6.74	7.50	12.40	9.08	10.80	11.10	10.80	8.28
Eu	2.26	1.77	1.13	0.92	1.50	2.92	1.89	2.14	1.99	2.00	1.71
Gd	10.90	9.71	7.94	6.03	7.45	12.10	8.84	11.00	10.20	10.30	8.09
Tb	1.80	1.65	1.45	0.91	1.27	2.00	1.38	1.63	1.74	1.66	1.33
Dy	10.70	9.67	9.69	5.62	8.15	13.10	8.40	9.94	9.50	9.69	7.63
Ho	2.02	1.75	1.90	1.11	1.56	2.59	1.67	2.02	1.78	1.87	1.49
Er	5.89	4.99	5.36	3.33	4.24	7.15	4.90	5.90	5.33	5.69	4.49
Tm	0.78	0.68	0.74	0.47	0.61	1.03	0.69	0.88	0.71	0.80	0.63
Yb	5.02	4.54	4.58	3.16	3.86	6.61	4.05	4.97	4.62	5.46	4.24
Lu	0.72	0.67	0.67	0.45	0.48	0.84	0.66	0.78	0.67	0.80	0.62
Hf	16.00	15.30	13.00	12.30	14.80	14.00	11.60	10.40	11.50	10.70	9.68
Ta	2.19	2.59	2.02	2.78	2.05	2.05	1.25	1.39	2.11	1.42	1.43
Pb	3.52	2.75	3.28	2.61	2.24	1.99	12.30	12.30		13.60	12.70
Th	13.70	24.70	8.87	20.30	15.30	14.00	11.80	14.40	17.20	15.90	12.60
U	1.32	1.68	1.88	2.02	1.83	1.90	0.46	0.50	0.85	0.69	0.57
(La/Yb) _N	2.9	2.3	1.9	3.6	2.4	3.0	8.9	8.0	9.9	8.4	8.7
Eu/Eu [*]	0.66	0.58	0.46	0.44	0.61	0.73	0.64	0.60	0.57	0.58	0.64
<i>t_{zr}</i> /°C	889	864	885	881	909	904	872	854	894	837	850

续表 2-2
Continued Table 2-2

岩石类型	二长花岗片麻岩		正长花岗片麻岩				正长花岗片麻岩			
采样位置	顾家村		南马格庄村				栖霞北			
样品号	JD1605 *	JD1607 *	JD1826	JD1827	JD1828	JD1829	JD18143	JD18144	JD18145	JD18146
SiO ₂	69.47	71.29	71.89	78.09	78.40	77.99	81.51	83.53	83.28	83.49
TiO ₂	0.75	0.72	0.51	0.14	0.14	0.15	0.17	0.15	0.16	0.14
Al ₂ O ₃	12.14	12.76	12.64	10.46	10.38	10.54	10.55	9.45	9.77	9.23
Fe ₂ O ₃	2.37	2.47								
FeO	2.08	1.58								
^T FeO	4.21	3.80	2.84	2.31	2.24	2.42	0.81	0.58	0.78	0.42
MnO	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
MgO	0.61	0.41	1.30	0.07	0.06	0.06	0.23	0.19	0.30	0.18
CaO	2.13	1.08	0.75	0.10	0.16	0.15	0.04	0.04	0.04	0.03
Na ₂ O	3.28	3.31	2.51	1.90	2.00	1.97	0.18	0.17	0.13	0.18
K ₂ O	3.77	4.22	5.82	6.44	6.28	6.41	5.53	5.29	4.44	5.38
P ₂ O ₅	0.17	0.16	0.04	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02
CO ₂	1.84	0.71								
H ₂ O ⁺	1.12	1.36								
LOI	2.09	1.35	0.97	0.12	0.14	0.14	1.05	0.76	1.14	0.78
Total	98.93	99.38	99.27	99.64	99.81	99.84	100.09	100.18	100.07	99.87
Mg [#]	20.5	16.1	44.9	4.9	4.6	4.4	33.1	36.6	40.4	43.7
^T FeO/MgO	6.91	9.27	2.19	34.46	36.73	39.03	3.61	3.09	2.63	2.30
A/CNK	0.91	1.07	1.07	1.02	1.00	1.01	1.67	1.56	1.92	1.50
Sc	11.50	10.50	4.21	0.22	0.22	0.20	1.51	1.10	1.25	1.31
Cr	6.43	7.47	1.76	2.16	1.78	1.80	1.68	3.03	3.64	2.92
Co	5.71	5.86	4.48	1.34	1.12	1.39	0.78	1.02	0.95	0.49
Ni	3.39	3.55	1.61	2.13	1.58	1.61	2.25	2.86	3.11	2.43
Cu			3.43	1.70	2.42	4.56	5.02	14.40	25.80	3.83
Zn			38.30	12.60	7.48	7.18	28.20	19.50	27.90	21.30
Ga	18.70	20.10	19.90	13.90	14.80	14.90	18.00	15.10	17.90	13.80
Rb	119.00	129.00	171.00	154.00	137.00	144.00	188.00	176.00	169.00	186.00
Sr	162.00	124.00	302.00	248.00	130.00	113.00	83.00	47.70	129.00	55.60
Y	50.90	47.00	8.44	4.58	5.74	4.32	41.90	43.00	39.00	36.40
Zr	376.00	373.00	675.00	365.00	377.00	360.00	254.00	217.00	229.00	216.00
Nb	22.10	22.00	6.13	1.78	2.75	2.10	19.50	17.30	19.00	17.20
Cs	2.75	1.43	1.23	0.44	0.27	0.24	2.69	1.97	1.92	2.46
Ba	878.00	1 031.00	2 531.00	2 542.00	1 924.00	1 905.00	767.00	593.00	678.00	778.00
La	58.40	63.40	9.69	7.67	9.95	8.42	62.20	52.40	50.90	33.80
Ce	120.00	128.00	17.60	11.70	15.70	11.70	120.00	101.00	103.00	73.50
Pr	14.50	15.00	1.94	1.25	1.78	1.32	12.80	11.00	11.10	7.25
Nd	57.10	56.60	7.56	4.50	6.62	5.00	45.20	41.20	41.90	26.90
Sm	10.90	10.90	1.60	0.91	1.26	0.93	8.09	7.75	7.98	5.22
Eu	1.98	2.09	0.89	0.72	0.83	0.72	1.01	1.00	1.00	0.75
Gd	10.40	10.40	1.46	0.78	1.14	0.86	6.83	7.34	7.15	5.33
Tb	1.67	1.65	0.22	0.14	0.20	0.15	1.13	1.23	1.17	0.96
Dy	9.77	9.48	1.41	0.83	1.09	0.82	7.29	7.53	7.16	6.41
Ho	1.86	1.79	0.29	0.15	0.21	0.16	1.50	1.58	1.45	1.37
Er	5.59	5.28	0.91	0.48	0.61	0.48	4.32	4.50	4.20	3.99
Tm	0.79	0.73	0.16	0.09	0.09	0.08	0.65	0.66	0.62	0.57
Yb	5.24	4.84	1.25	0.60	0.71	0.55	4.16	4.28	4.16	3.95
Lu	0.76	0.71	0.23	0.11	0.13	0.11	0.62	0.65	0.65	0.60
Hf	11.40	11.60	16.80	10.50	11.10	10.60	7.66	6.39	6.86	6.45
Ta	1.43	1.56	0.27	0.14	0.22	0.15	1.64	1.46	1.47	1.43
Pb	13.60	14.00	12.80	12.00	10.50	11.20	15.30	20.90	15.90	14.70
Th	11.10	13.20	1.38	0.98	1.45	1.02	14.30	12.60	12.90	11.70
U	0.57	0.51	1.48	0.75	0.86	0.72	2.21	2.30	2.12	1.43
(La/Yb) _N	8.0	9.4	5.6	9.2	10.0	11.0	10.7	8.8	8.8	6.1
Eu/Eu [*]	0.57	0.60	1.78	2.60	2.11	2.45	0.42	0.41	0.40	0.44
t ₂₀ /°C	848	869	933	870	872	868	882	863	882	860

注: 样品号后 * 代表该样品由中国地质科学院国家地质实验测试中心分析, 不带 * 的样品在武汉上谱分析科技有限责任公司分析, 空白表示没有检测。

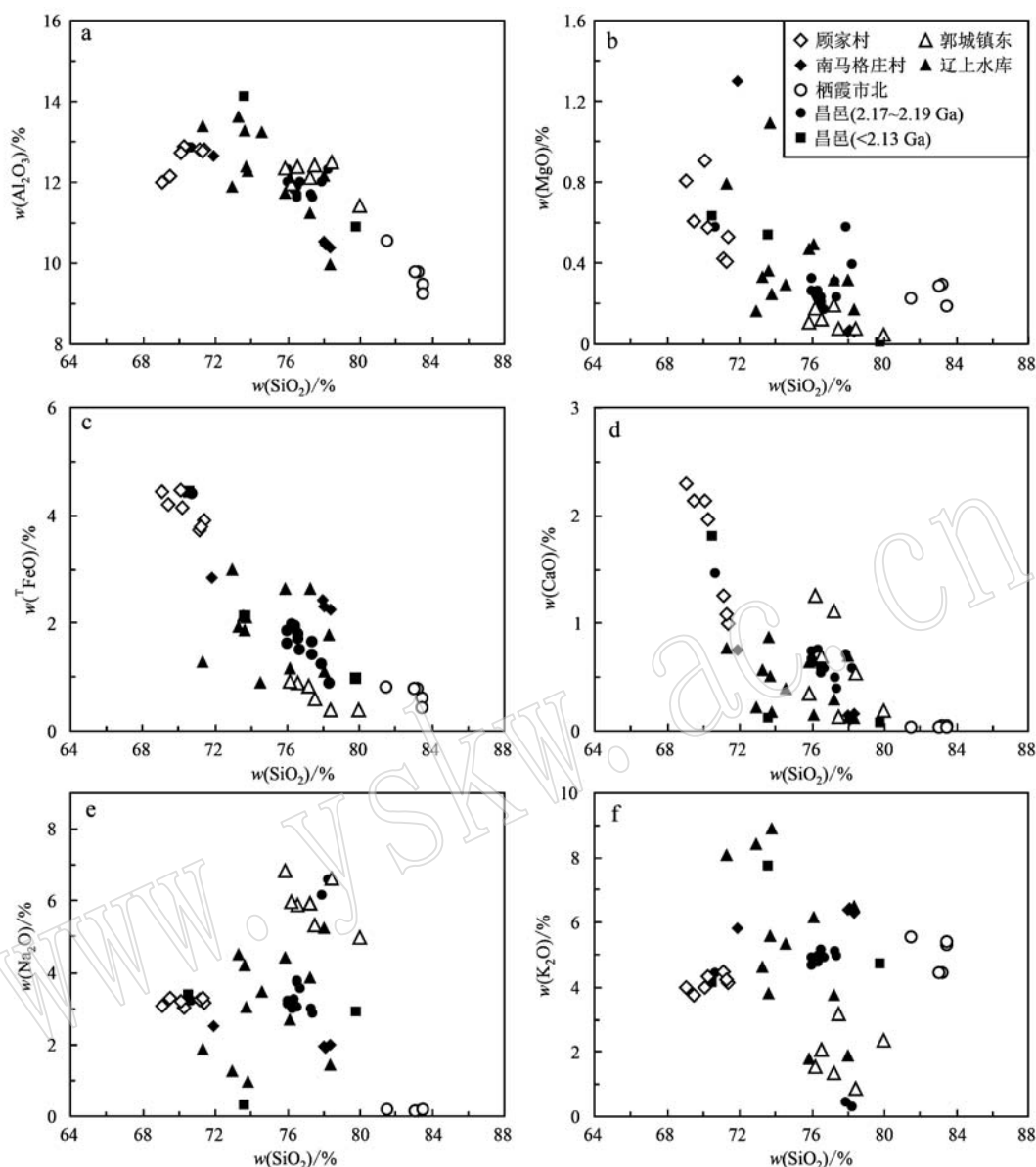


图 6 胶北古元古代中期花岗片麻岩 Harker 图解(昌邑数据引自 Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; 田瑞聪等, 2017)

Fig. 6 Harker diagrams of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (data for Changyi from Lan *et al.*, 2015; Wang Huichu *et al.*, 2015; Tian Ruicong *et al.*, 2017)

顾家二长花岗片麻岩的稀土元素总量为 $247.00 \times 10^{-6} \sim 315.00 \times 10^{-6}$, 富集轻稀土元素, $(La/Yb)_N$ 值为 $8.0 \sim 9.9$, 具有明显的负铕异常 ($Eu/Eu^* = 0.57 \sim 0.64$) (图 8a), 富集 Rb、Ba、Th、Pb, 亏损 Nb、Ta、Sr (图 8b)。

5 讨论

5.1 胶北古元古代中期岩浆作用

近年来, 研究人员在胶北地区陆续发现少量古

元古代中期的花岗片麻岩 (图 1, 表 3), 包括顾家村 2095 ± 12 Ma 的条带状黑云角闪二长花岗片麻岩 (刘建辉等, 2011), 黑石村 2181 ± 12 Ma 的黑云二长花岗片麻岩 (Liu *et al.*, 2014), 昌邑地区 $2193 \sim 2045$ Ma 的花岗片麻岩 (Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; 田瑞聪等, 2017; 肖志斌等, 2017) 以及郭城镇牧牛山 $2110 \sim 2105$ Ma 的二长花岗片麻岩 (Cheng *et al.*, 2017)。结合本次在莱西、郭城镇、栖霞等地获得的年代学结果, 可以发现胶北地体古元古代中期的花岗片麻岩分布较广, 主要形成于 $2.13 \sim$

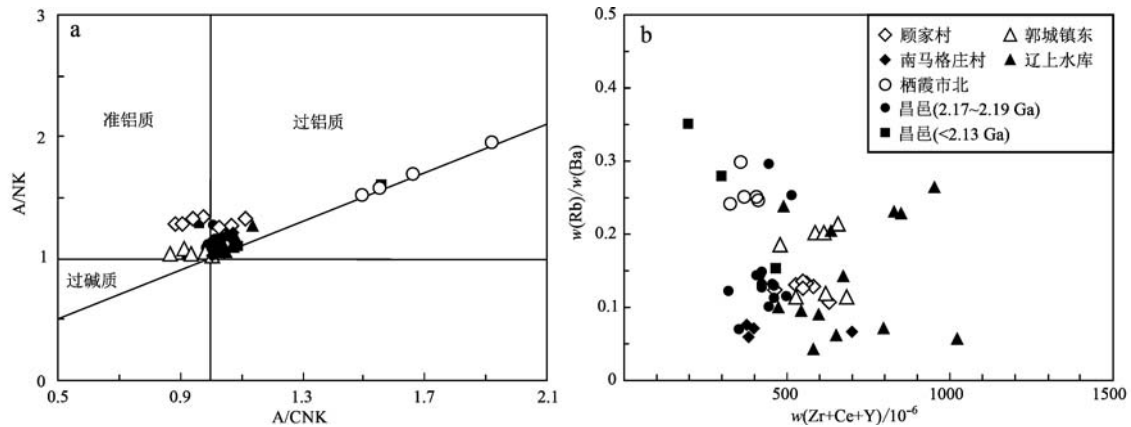


图7 胶北古元古代中期花岗片麻岩 A/NK-A/CNK 图解(a)和 Rb/Ba-Zr+Ce+Y 关系图(b) (昌邑数据引自 Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; 田瑞聪等, 2017)

Fig. 7 A/NK-A/CNK diagram(a) and Rb/Ba vs. Zr+Ce+Y diagram(b) of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (data for Changyi from Lan *et al.*, 2015; Wang Huichu *et al.*, 2015; Tian Ruicong *et al.*, 2017)

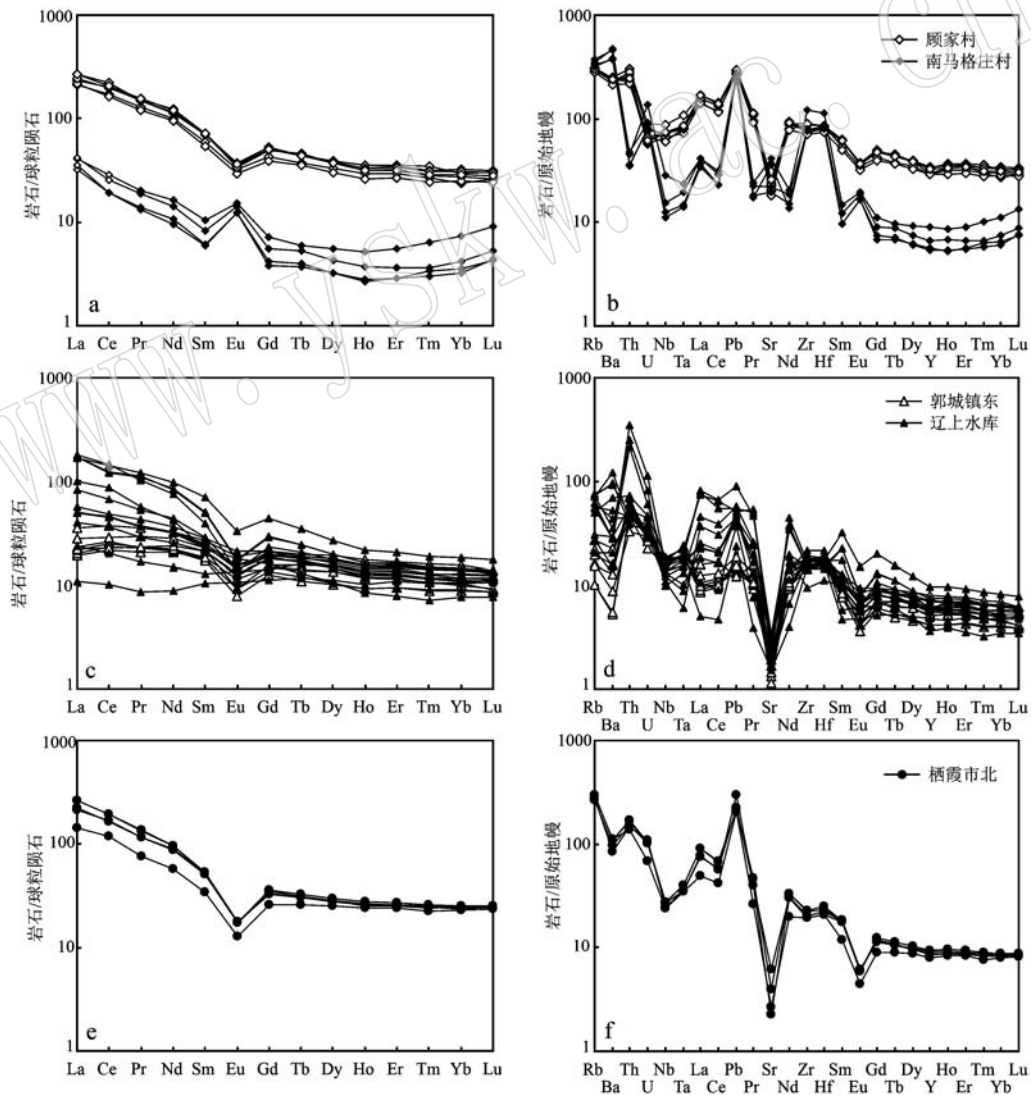


图8 胶北古元古代中期花岗片麻岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, c, e)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, d, f) (球粒陨石和原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b, d, f) of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表 3 胶北古元古代中期花岗片麻岩结晶年龄统计表

Table 3 Summary of crystallization ages of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane

样号	岩性	采样位置	分析方法	结晶年龄/Ma	变质年龄/Ma	参考文献
CY2-92	碱长花岗片麻岩	昌邑铁矿	LA-ICP-MS	2 193 ± 11		Lan <i>et al.</i> , 2015
D017	含黑云二长花岗片麻岩	平度市三埠肖家	LA-ICP-MS	2 187 ± 9		田瑞聪等, 2017
JD18144	正长花岗片麻岩	栖霞北	SHRIMP	2 184 ± 8		本次研究
JB13-1	黑云母二长花岗片麻岩	黑石村	LA-ICP-MS	2 181 ± 12		Liu <i>et al.</i> , 2014
14JD02	二长花岗片麻岩	昌邑市东辛庄	SHRIMP	2 174 ± 8		田瑞聪等, 2017
CY2-43	钠长花岗片麻岩	昌邑铁矿	LA-ICP-MS	2 171 ± 10	~1 870	Lan <i>et al.</i> , 2015
1405-1	黑云母二长花岗片麻岩	灰埠西南	LA-ICP-MS	2 170 ± 8		王惠初等, 2015
P109	细粒二长花岗片麻岩	昌邑市博陆山	LA-ICP-MS	2 151 ± 8		田瑞聪等, 2017
D1807	细粒二长花岗片麻岩	昌邑市青龙山	LA-ICP-MS	2 137 ± 9		田瑞聪等, 2017
JD1830	正长花岗片麻岩	南马格庄村	SHRIMP	2 125 ± 5	1 853 ± 11	本次研究
JD1821	正长花岗片麻岩	南马格庄村	SHRIMP	2 121 ± 7	1 855 ± 14	本次研究
JD1827	正长花岗片麻岩	南马格庄村	SHRIMP	2 118 ± 7	1 848 ± 10	本次研究
JD1532	正长花岗片麻岩	郭城镇东	SHRIMP	2 116 ± 4	1 859 ± 4	本次研究
JD1622	钠长花岗片麻岩	牟平区辽上水库	SHRIMP	2 112 ± 6	1 845 ± 6	本次研究
14-lk-22	二长花岗片麻岩	郭城龙口矿区	SHRIMP	2 110 ± 4	1 855 ± 7	Cheng <i>et al.</i> , 2017
10-23	二长花岗片麻岩	崖子镇西涝口村	SHRIMP	2 105 ± 7	1 841 ± 7	Cheng <i>et al.</i> , 2017
15SD10	黑云母钾长花岗片麻岩	昌邑市饮马镇	LA-ICP-MS	2 103 ± 18		肖志斌等, 2017
QX16-1	角闪二长花岗质片麻岩	莱西市顾家村	LA-ICP-MS	2 095 ± 12		刘建辉等, 2011
D015	含黑云二长花岗片麻岩	平度市三埠李家	LA-ICP-MS	2 080 ± 9		田瑞聪等, 2017
D05	细粒二长花岗片麻岩	昌邑市青山	LA-ICP-MS	2 045 ± 8		田瑞聪等, 2017

2. 10 Ga 和 2. 19~2. 17 Ga 两个阶段(图 9)。粉子山群和荆山群变沉积岩中含有大量 2. 2~2. 0 Ga 的碎屑锆石, 也暗示胶北地体经历了强烈的 2. 2~2. 0 Ga 岩浆活动(Wan *et al.* , 2006; 谢士稳, 2012; 谢士稳

等, 2014; 刘福来等, 2015; Liu *et al.* , 2018b)。

5. 2 岩浆演化与岩石成因

尽管胶北不同时代、地区的古元古代花岗片麻岩的地球化学组成存在很大的差异(表 2, 图 6~图 8), 但是这些花岗片麻岩普遍具有高的 SiO₂、Na₂O+K₂O、Zr 含量, 显著低的 Sr 含量和负的 Eu 异常(南马格庄样品除外)。绝大多数花岗片麻岩具有高的 Zr+Nb+Ce+Y (大于 350×10⁻⁶) 和 10 000 Ga/Al 值(除昌邑 2. 19~2. 17 Ga 的花岗片麻岩较低外, 其他样品普遍大于 2. 6)。在 Whalen 等(1987)花岗岩分类图解中, 均落在 A 型花岗岩区域(图 10)。由于分离结晶作用, 导致高分异的 I 和 S 型花岗岩与 A 型花岗岩具有相似的地球化学特征。例如, 很多高分异的花岗岩同样具有高的 10 000 Ga/Al 值, 以致它们在岩石分类判别图中落在 A 型花岗岩区域(Pérez-Soba and Villaseca, 2010; Breiter *et al.* , 2013; 吴福元等, 2017)。同样, A 型花岗岩经历强烈的结晶分异作用, 也会表现出高分异花岗岩的特征(King *et al.* , 2001; 吴福元等, 2017)。通过对比, 吴福元等(2017)提出 A 型花岗岩经历结晶分异作用, 表现为从 A 型花岗岩向高分异花岗岩演化的趋势。而 I 和 S 型花岗岩在结晶分异过程中, 10 000 Ga/Al 值逐渐升高, 显示与 A 型花岗岩分异相反的趋势(图10a)。胶北古元古代中期的花岗片

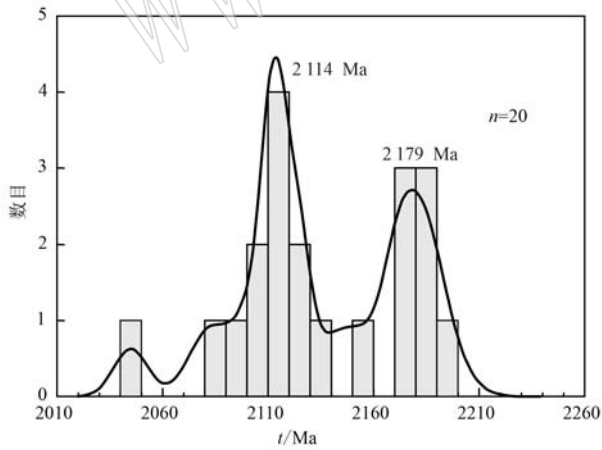


图 9 胶北古元古代中期花岗片麻岩形成时代频率分布直方图(数据来自:本次研究; 刘建辉等, 2011; Liu *et al.* , 2014; Lan *et al.* , 2015; 王惠初等, 2015; Cheng *et al.* , 2017; 田瑞聪等, 2017; 肖志斌等, 2017)

Fig. 9 Emplacement age histogram diagram of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane(data from this study; Liu Jianhui *et al.* , 2011; Liu *et al.* , 2014; Lan *et al.* , 2015; Wang Huichu *et al.* , 2015; Cheng *et al.* , 2017; Tian Ruicong *et al.* , 2017; Xiao Zhibin *et al.* , 2017)

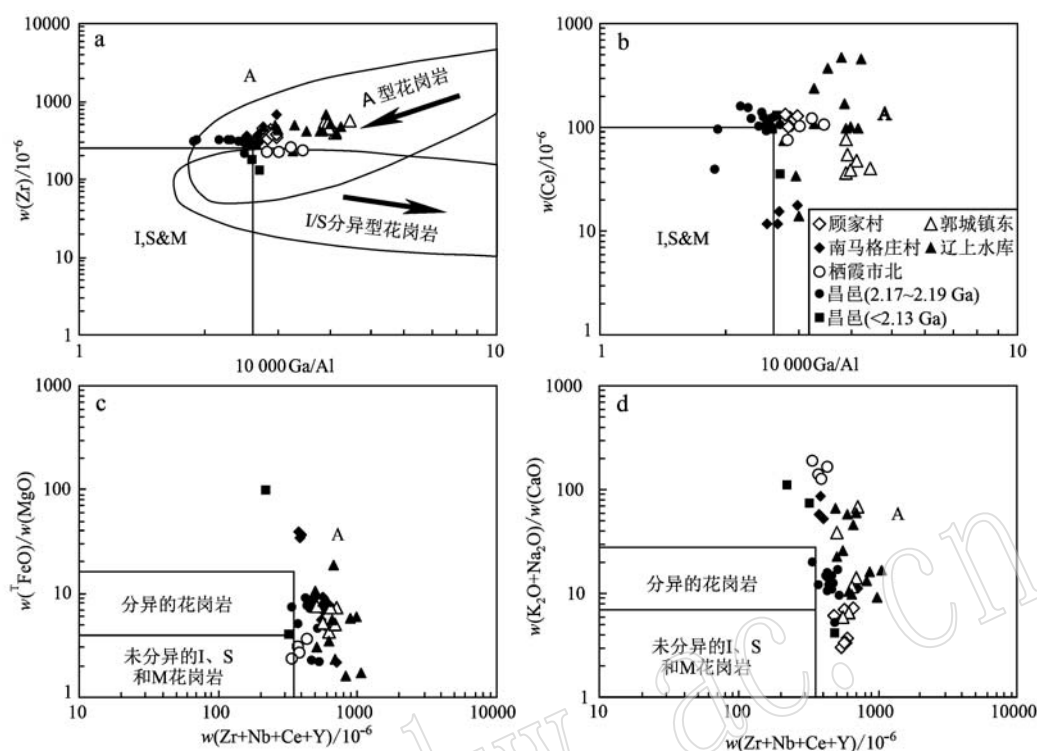


图 10 胶北古元古代中期花岗片麻岩的岩石分类判别图解(底图据 Whalen *et al.*, 1987; 吴福元等, 2017; 昌邑数据引自 Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; 田瑞聪等, 2017)

Fig. 10 Geochemical discrimination diagrams of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (base map after Whalen *et al.*, 1987; Wu Fuyuan *et al.*, 2017; data for Changyi from Lan *et al.*, 2015; Wang Huichu *et al.*, 2015; Tian Ruicong *et al.*, 2017)

麻岩大多具有高硅的特征,但在图中表现出 A 型花岗岩演化的趋势(图 10a)。此外,高分异的 I 或 S 型花岗岩的 Rb/Ba 和 $Zr+Ce+Y$ 值具有明显的负相关性,而 A 型花岗岩相应的值之间没有明显的相互关系(Whalen *et al.*, 1987)。胶北不同地区的花岗片麻岩的 Rb/Ba 值和 $Zr+Ce+Y$ 含量均无明显的相关性,呈分散状分布(图 7b)。另一方面, A 型花岗岩的一大特点是高温,胶北古元古代中期的花岗片麻岩大多具有高的 Zr 含量($>200 \times 10^{-6}$),应用锆石饱和温度计估算(Watson and Harrison, 1983),除昌邑一件 2 045 Ma 的花岗片麻岩样品给出原岩岩浆温度 t_{Zr} 为 781℃外,其他样品原岩的岩浆温度均大于 820℃(图 11),明显高于分异和未分异的 I 型花岗岩(King *et al.*, 1997)。以上结果均支持胶北古元古代中期的花岗片麻岩原岩为 A 型花岗岩。

关于 A 型花岗岩的成因有多种模式,其岩浆源区物质来自幔源岩浆(Eby, 1990, 1992; Turner *et al.*, 1992; Frost *et al.*, 1999; Mushkin *et al.*, 2003)、地壳物质重熔(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Creaser *et al.*, 1991; King *et al.*, 2001)

还是壳源与幔源岩浆的混合(Kerr and Fryer, 1993; Wickham *et al.*, 1996; Mingram *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2006)一直是研究的焦点。胶北 2.19~2.17 Ga 的花岗片麻岩的 SiO_2 含量大多高于 76%,且具有低的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值($-7.4 \sim -2.9$)(Liu *et al.*, 2014; Lan *et al.*, 2015; 田瑞聪等, 2017),这些结果不支持该期花岗片麻岩原岩来自幔源岩浆的分异。此外,该期花岗片麻岩的野外露头中未见基性岩包体,全岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值不随 SiO_2 含量的变化而变化,不支持岩浆混合的成因(Lan *et al.*, 2015)。晚于 ~2.13 Ga 的花岗片麻岩的 SiO_2 含量变化较大(69.10%~79.97%), $\epsilon_{Hf}(t)$ 值偏高($-2.9 \sim +4.1$)(Liu *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2017; 田瑞聪等, 2017; 肖志斌等, 2017)。尽管该期花岗片麻岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值大多大于 0,但均远低于同时期的亏损地幔演化值,落在胶北 ~2.5 Ga TTG 锆石 Hf 同位素大陆地壳演化值范围内(图 12)。此外,该期花岗片麻岩的野外露头中也未见基性岩包体,不同地区、不同类型花

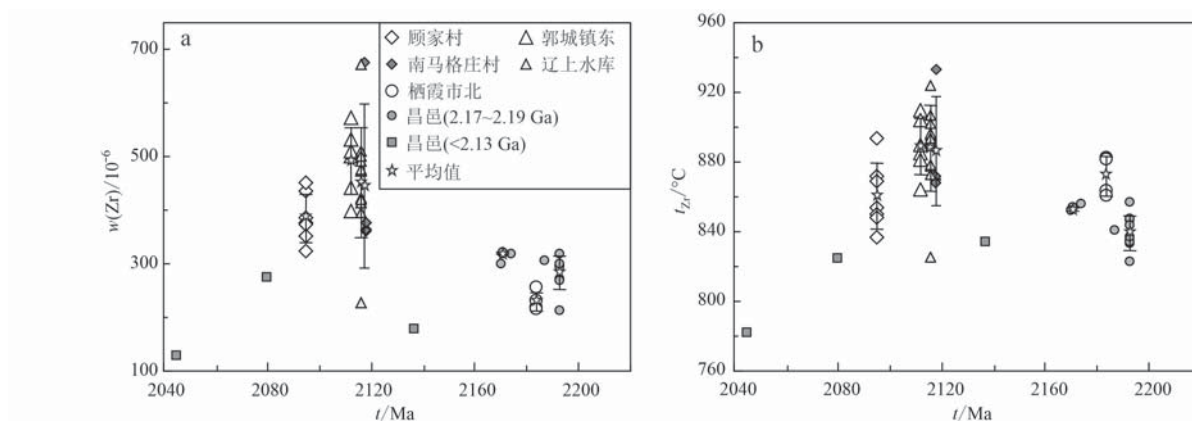


图 11 胶北古元古代中期花岗片麻岩的 Zr 含量(a), 锆石饱和温度(b)与结晶年龄的关系图(昌邑数据引自 Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; 田瑞聪等, 2017)

Fig. 11 Zr content (a) and zircon saturation temperature (b) vs. crystallization age diagrams of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (data for Changyi from Lan *et al.*, 2015; Wang Huichu *et al.*, 2015; Tian Ruicong *et al.*, 2017)

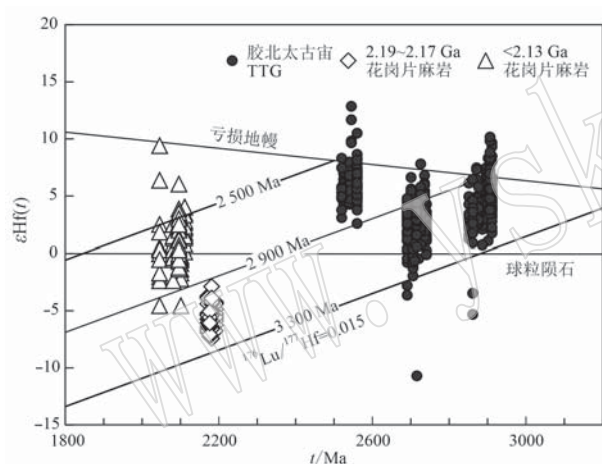


图 12 胶北古元古代中期花岗片麻岩和太古宙 TTG 的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 与年龄的关系图

Fig. 12 Plot of crystallization $\varepsilon\text{Hf}(t)$ vs. ages values for mid-Paleoproterozoic granitic gneisses and Archean TTG from the Jiaobei terrane

胶北太古宙 TTG 数据引自谢士稳, 2012; Liu *et al.*, 2013a; Wan *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; 古元古代花岗片麻岩数据引自 Liu *et al.*, 2014; Lan *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2017; 田瑞聪等, 2017; 肖志斌等, 2017

data for Archean TTG from Xie Shiwen, 2012; Liu *et al.*, 2013a; Wan *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; data for mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from Liu *et al.*, 2014; Lan *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2017; Tian Ruicong *et al.*, 2017; Xiao Zhibin *et al.*, 2017

岗片麻岩之间具有一致的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值(图 12), 这些结果表明, 晚于~2.13 Ga 的花岗片麻岩原岩可能也不是来自幔源岩浆的分异或壳源和幔源岩浆的混合。Creaser 等(1991)认为英云闪长质和花岗闪

长质岩石作为源岩可以熔融形成 A 型花岗岩。实验岩石学研究也证实, 在低压、高温的条件下, 英云闪长岩和花岗闪长岩通过脱水熔融可以产生 A 型花岗质熔体(Skjerlie and Johnston, 1992; Patiño Douce, 1997)。胶北地区广泛出露~2.9 Ga、~2.7 Ga 和~2.5 Ga 的 TTG 片麻岩(例如, Jahn *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011; Wu *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2014; 谢士稳等, 2015)。对比锆石 Hf 同位素组成, 可以发现 2.19~2.17 Ga 花岗片麻岩与~2.9 Ga 和~2.7 Ga TTG 片麻岩的锆石 Hf 模式年龄(t_{DM2})相当, 而晚于~2.13 Ga 的花岗片麻岩的锆石 t_{DM2} 值偏年轻, 与~2.5 Ga 的 TTG 相似。在图 12 中, 2.19~2.17 Ga 的花岗片麻岩的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值位于~2.9 Ga 和~2.7 Ga TTG 片麻岩 Hf 同位素组成的平均地壳演化线上, 而晚于~2.13 Ga 的花岗片麻岩的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值落在~2.5 Ga TTG 片麻岩 Hf 同位素组成的平均地壳演化线上(图 12)。这些结果支持胶北古元古代中期的花岗片麻岩原岩由太古宙 TTG 在高温条件下部分熔融而成, 2.19~2.17 Ga 的花岗片麻岩原岩可能由~2.9 Ga 和~2.7 Ga TTG 片麻岩重熔而成, 而晚于~2.13 Ga 的花岗片麻岩原岩由~2.5 Ga 的 TTG 岩石部分熔融而成。值得注意的是, 2.19~2.17 Ga 花岗片麻岩的 Zr 含量和锆石饱和温度低于~2.13 Ga 之后的花岗片麻岩(图 11), 指示相对于 2.19~2.17 Ga 花岗片麻岩, 2.13 Ga 之后的花岗片麻岩原岩可能形成于更高的温度。

5.3 胶北地体古元古代中期构造演化过程

尽管 A 型花岗岩的形成环境多种多样, 但是 A

型花岗岩形成需要在浅部地壳高温部分熔融而成, 这种环境大多只会在拉张情况下出现, 因此 A 型花岗岩是判断伸展背景的重要岩石学标志(吴福元等, 2007)。胶北古元古代中期花岗片麻岩原岩为 A 型花岗岩, 反映当时处于伸展环境。由图 9 可见, 胶北花岗片麻岩原岩主要形成于 2.19~2.17 Ga 和 2.13~2.10 Ga 两个阶段, 且两期花岗片麻岩原岩的形成温度和源区存在明显的差异(图 11, 图 12), 暗示着胶北可能先后经历了两期不同的拉张作用, 而不是持续的拉张。Eby (1992) 将 A 型花岗岩划分为 A1 和 A2 两种类型。A1 型被认为代表一种热点、地幔柱或大陆裂谷背景下的非造山环境, 而 A2 型可形成于多种构造环境, 包括后碰撞环境。根据 Eby (1992) 的分类, 胶北古元古代中期的花岗片麻岩绝大多数落在 A2 型花岗岩区域, 其原岩应属于 A2 型

花岗岩(图 13), 暗示它们可能不是形成于非造山的拉张环境(例如, 板内裂谷环境), 可能与后碰撞环境有关。但是值得注意的是, 胶北地区古元古代中-早期未发现板块碰撞的记录, 被认为与板块俯冲碰撞作用有关的高压麻粒岩形成于古元古代晚期(1.93~1.80 Ga; 例如, Zhou *et al.*, 2008; Tam *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013b, 2017)。因此, 胶北古元古代中期的花岗片麻岩原岩不可能形成于后碰撞环境。综上所述, 胶北古元古代中期处于的伸展背景很可能与板内裂谷和后碰撞背景无关。考虑到胶-辽-吉带内发育~2.17 Ga 与大洋板块俯冲有关的钙碱性长英质弧火山岩(Xu *et al.*, 2019)和~2.13 Ga 具有岛弧地球化学特征的拉斑-钙碱性变镁铁质岩石(Liu *et al.*, 2018a), 推测古元古代中期的拉张环境很可能与洋壳的俯冲过程有关(例如, 弧后拉伸)。

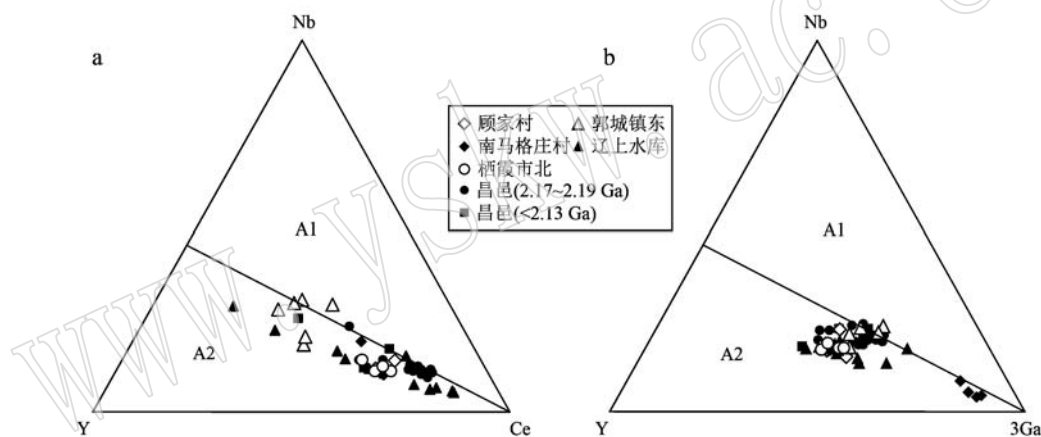


图 13 胶北古元古代中期花岗片麻岩的 A1-A2 型花岗岩判别图解(底图据 Eby, 1992; 昌邑数据引自: Lan *et al.*, 2015; 王惠初等, 2015; 田瑞聪等, 2017)

Fig. 13 A1 and A2 subgroup discrimination diagrams of mid-Paleoproterozoic granitic gneisses from the Jiaobei terrane (base map after Eby, 1992; data for Changyi from Lan *et al.*, 2015; Wang Huichu *et al.*, 2015; Tian Ruicong *et al.*, 2017)

6 结论

(1) 胶北古元古代中期的花岗片麻岩原岩形成时代跨度较大(2 193~2 045 Ma), 主要形成于 2.19~2.17 Ga 和 2.13~2.10 Ga 两个阶段。

(2) 这些花岗片麻岩具有高的 Zr+Nb+Ce+Y 含量和 10 000Ga/Al 值, 原岩属 A 型花岗岩。

(3) 两期花岗片麻岩原岩在源岩和形成温度方面存在显著差异, 2.19~2.17 Ga 的 A 型花岗片麻岩原岩的源岩可能为胶北~2.9 Ga 和~2.7 Ga 的

TTG, 而 2.10~2.13 Ga 的 A 型花岗片麻岩的原岩可能由胶北~2.5 Ga 的 TTG 在更高的温度下部分熔融而成。

(4) 胶北古元古代中期处于伸展背景, 可能先后经历了两期不同的拉张作用。

致谢 感谢邱啸飞研究员提出的宝贵修改意见; 感谢北京离子探针中心刘建辉等在锆石 U-Pb 年龄测试中给予的帮助。恰逢著名地质学家沈其韩院士百岁寿诞, 谨以此文向先生致以崇高的敬意、献上最美好的祝福。

References

- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect: SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards[J]. *Chemical Geology*, 205: 115~140.
- Breiter K, Gadenová N, Kanický V, *et al.* 2013. Gallium and germanium geochemistry during magmatic fractionation and post-magmatic alteration in different types of granitoids: A case study from the Bohemian Massif (Czech Republic)[J]. *Geologica Carpathica*, 64(3): 171.
- Cheng S B, Liu Z J, Wang Q F, *et al.* 2017. SHRIMP zircon U-Pb dating and Hf isotope analyses of the Muniushan Monzogranite, Guocheng, Jiaobei Terrane, China: Implications for the tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 301: 36~48.
- Collins W, Beams S, White A, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189~200.
- Creaser R A, Price R C and Wormald R J. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model[J]. *Geology*, 19(2): 163~166.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26(1~2): 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Faure M, Lin W, Monié P, *et al.* 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China) [J]. *Terra Nova*, 16(2): 75~80.
- Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, *et al.* 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivi-type anorogenic granite[J]. *Journal of Petrology*, 40(12): 1771~1802.
- Geng Y S, Du L L and Ren L D. 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 21: 517~529.
- Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, *et al.* 2008. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry [J]. *American Journal of Science*, 308(3): 232~269.
- Kerr A and Fryer B J. 1993. Nd isotope evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada [J]. *Chemical Geology*, 104(1): 39~60.
- King P L, Chappell B W, Allen C M, *et al.* 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 501~514.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Kröner A, Wilde S A, Zhao G C, *et al.* 2006. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 146: 45~67.
- Lan T G, Fan H R, Yang K F, *et al.* 2015. Geochronology, mineralogy and geochemistry of alkali-feldspar granite and albite granite association from the Changyi area of Jiao-Liao-Ji Belt: Implications for Paleoproterozoic rifting of eastern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 266: 86~107.
- Li S Z and 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[J]. *Precambrian Research*, 158: 1~16.
- 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[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 659~674.
- Li Y L, Zhang H F, Guo J H, *et al.* 2017. Petrogenesis of the Huili Paleoproterozoic leucogranite in the Jiaobei Terrane of the North China Craton: A highly fractionated albite granite forced by K-feldspar fractionation[J]. *Chemical Geology*, 450: 165~182.
- Li Z and Chen B. 2014. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic metabasalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 255: 653~667.
- Liu C H, Zhao G C, Liu F L, *et al.* 2018a. The southwestern extension of the Jiao-Liao-Ji belt in the North China Craton: Geochronological and geochemical evidence from the Wuhe Group in the Bengbu area [J]. *Lithos*, 304~307: 258~279.
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of ≥ 3.8 Ga crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20: 339~342.
- Liu F, Guo J H, Lu X P, *et al.* 2009. Crustal growth at ~2.5 Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(24): 4704~4713.
- Liu F L, Liu C H, Itano K, *et al.* 2017. Geochemistry, U-Pb dating,

- and Lu-Hf isotopes of zircon and monazite of porphyritic granites within the Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 300: 78~106.
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, *et al.* 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 816~2 846(in Chinese with English abstract).
- Liu J H, Liu F L, Ding Z J, *et al.* 2013a. The growth, reworking and metamorphism of early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton: Constraints from U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses[J]. *Precambrian Research*, 224: 287~303.
- Liu J H, Liu F L, Ding Z J, *et al.* 2014. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Paleoproterozoic granitoid rocks in the Jiaobei Terrane, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 255: 685~698.
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Liu Pinghua, *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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 943~960 (in Chinese with English abstract).
- Liu L S, Liu F L, Santosh M, *et al.* 2018b. Paleoproterozoic and Triassic metamorphic events in the Jiaobei Terrane, Jiao-Liao-Ji Belt, China: Hidden clues on multiple metamorphism and new insights into complex tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 60: 105~128.
- Liu P H, Liu F L, Cai J, *et al.* 2017. Discovery and geological significance of high-pressure mafic granulites in the Pingdu-Anqiu area of the Jiaobei Terrane, the Jiao-Liao-Ji Belt, the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 303: 445~469.
- Liu P H, Liu F L, Liu C H, *et al.* 2013b. Petrogenesis, *P-T-t* path, and tectonic significance of high-pressure mafic granulites from the Jiaobei terrane, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 233: 237~258.
- 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[J]. *Precambrian Research*, 134: 349~371.
- 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[J]. *Precambrian Research*, 163: 279~306.
- 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 [J]. *Precambrian Research*, 247: 92~109.
- Mingram B, Trumbull R B, Littman S, *et al.* 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: Evidence for mixing of crust and mantle-derived components[J]. *Lithos*, 54(1): 1~22.
- Mushkin A, Navon O, Halicz L, *et al.* 2003. The Petrogenesis of A-type Magmas from the Amram Massif, Southern Israel[J]. *Journal of Petrology*, 44(5): 815~832.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247~265.
- Patiño Douce A E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids [J]. *Geology*, 25(8): 743~746.
- Pérez-Soba C and Villaseca C. 2010. Petrogenesis of highly fractionated I-type peraluminous granites: La Pedriza pluton (Spanish Central System) [J]. *Geologica Acta*, 8(2): 131~149.
- Skjerlie K P and Johnston A D. 1992. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite-and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites[J]. *Geology*, 20(3): 263~266.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- 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[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 150~162.
- Tam P Y, Zhao G C, Zhou X W, *et al.* 2012. Metamorphic P-T path and implications of high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 22(1): 104~117.
- 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 [J]. *Precambrian Research*, 152: 48~82.
- Tian Ruicong, Li Dapeng, Hou Jianhua, *et al.* 2017. Zircon dating, Hf isotope composition and tectono-magmatic evolutionary significance the Paleoproterozoic monzogranite in Changyi area, Eastern Shandong [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2 710~2 726(in Chinese with English abstract).
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151~179.

- Wan Y S, Dong C Y, Liu D Y, *et al.* 2012a. Zircon ages and geochemistry of late Neoproterozoic syenogranites in the North China Craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 222~223: 265~289.
- Wan Y S, Liu D Y, Nutman A, *et al.* 2012b. Multiple 3.8~3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54~55: 18~30.
- Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, *et al.* 2010. Juvenile magmatism and crustal recycling at the end of the Neoproterozoic in Western Shandong Province, North China Craton: Evidence from SHRIMP zircon dating[J]. *American Journal of Science*, 310: 1 503~1 552.
- 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[J]. *Precambrian Research*, 149: 249~271.
- Wan Y S, Xie S W, Yang C H, *et al.* 2014. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) tectono-thermal events in the North China Craton: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 247: 45~63.
- Wang F, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2017. In situ zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of metasedimentary rocks from South Liaohé Group, Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Constraints on the depositional and metamorphic ages, and implications for tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 303: 764~780.
- Wang Huichu, Kang Jianli, Ren Yunwei, *et al.* 2015. Identification of ~2.7 Ga BIF in North China Craton: Evidence from geochronology of iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area, Jiaobei terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 991~3 011 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Lu Songnian, Chu Hang, *et al.* 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohé Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1 322~1 334 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Zhai M G, Li T S, *et al.* 2014. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution in the eastern North China Craton: Zircon U-Th-Pb and Lu-Hf evidence from the Jiaobei terrane[J]. *Precambrian Research*, 241: 146~160.
- Wang X P, Peng P, Wang C, *et al.* 2016. Petrogenesis of the 2 115 Ma Haicheng mafic sills from the Eastern North China Craton: Implications for an intra-continental rifting[J]. *Gondwana Research*, 39: 347~364.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K and Chappell B. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wickham S M, Alberts A D, Zandvilevich A N, *et al.* 1996. A stable isotope study of anorogenic magmatism in East Central Asia[J]. *Journal of Petrology*, 37(5): 1 063~1 095.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1 201~1 219 (in Chinese with English abstract).
- Wu M L, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Jiaodong Terrane: Implications for the crustal evolution of the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Lithos*, 190~191: 71~84.
- Xiao Zhibin, Wang Huichu, Kang Jianli, *et al.* 2017. U-Pb chronology, Hf isotope and geological implication of zircons from the Neoproterozoic quartzite in Changyi area, eastern Shandong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2 925~2 938 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shiwen. 2012. Zircon Chronology and Geochemical Characteristics of Jiaolai Basin and its Basement[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Xie Shiwen, Wang Shijin, Xie Hangqiang, *et al.* 2014. SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons from Fenzishan Group in Jiaodong terrane, North China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2 989~2 998 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shiwen, Wang Shijin, Xie Hangqiang, *et al.* 2015. Petrogenesis of ca. 2.7 Ga TTG rocks in the Jiaodong terrane, North China craton and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2 974~2 990 (in Chinese with English abstract).
- Xie S W, Xie H Q, Wang S J, *et al.* 2014. Ca. 2.9 Ga granitoid magmatism in eastern Shandong, North China Craton: Zircon dating, Hf-in-zircon isotopic analysis and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 255: 538~562.
- Xu W and Liu F L. 2019. Geochronological and geochemical insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt, Sino-Korean Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 193: 162~198.
- Xu W, Liu F L, Tian Z H, *et al.* 2018. Source and petrogenesis of Paleoproterozoic meta-mafic rocks intruding into the North Liaohé Group: Implications for back-arc extension prior to the formation of the Jiao-

- Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 307: 66~81.
- Xu W, Liu F L, Wang F, *et al.* 2019. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Geochemical and isotopic evidence from ca. 2.17 Ga felsic tuff[J]. *Geological Journal*, 55: 409~424.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1): 89~106.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, *et al.* 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Precambrian Research*, 167: 125~149.
- Yuan L L, Zhang X H, Xue F H, *et al.* 2015. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 264: 119~139.
- Zhai M G and Liu W J. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 122: 183~199.
- Zhai Mingguo and Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the north China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665~2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 20: 6~25.
- Zhang Qiusheng, Yang Zhensheng and Liu Liandeng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Zhang S B, Tang J and Zheng Y F. 2014. Contrasting Lu-Hf isotopes in zircon from Precambrian metamorphic rocks in the Jiaodong Peninsula: Constraints on the tectonic suture between North China and South China[J]. *Precambrian Research*, 245: 29~50.
- Zhao G C, Cawood P A and Lu L Z. 1999a. Petrology and *P-T* history of the Wutai amphibolites: Implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China[J]. *Precambrian Research*, 93: 181~199.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177~202.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 1998. Thermal evolution of archaean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting[J]. *International Geology Review*, 40(8): 706~721.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 1999b. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China craton: Evidence for both mantle plume and collisional tectonics[J]. *Geological Magazine*, 136(3): 223~240.
- 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 constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107: 45~73.
- Zhou X W, Zhao G C, Wei C J, *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[J]. *American Journal of Science*, 308(3): 328~350.

附中文参考文献

- 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[J]. *岩石学报*, 31(10): 2816~2846.
- 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[J]. *岩石学报*, 27(4): 943~960.
- 田瑞聪, 李大鹏, 侯建华, 等. 2017. 胶东昌邑地区古元古代二长花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其构造岩浆演化意义[J]. *地质学报*, 91(12): 2710~2726.
- 王惠初, 康健丽, 任云伟, 等. 2015. 华北克拉通~2.7 Ga 的 BIF: 来自莱州-昌邑地区含铁建造的年代学证据[J]. *岩石学报*, 31(10): 2991~3011.
- 王惠初, 陆松年, 初 航, 等. 2011. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1322~1334, 1361.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1217~1238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745~765.
- 肖志斌, 王惠初, 康健丽, 等. 2017. 胶东昌邑地区新太古代石英岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 33(9): 2925~2938.
- 谢士稳. 2012. 胶莱盆地及基底锆石年代学和地球化学特征[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 谢士稳, 王世进, 颜炳强, 等. 2014. 华北克拉通胶东地区粉子山群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *岩石学报*, 30(10): 2989~2998.
- 谢士稳, 王世进, 颜炳强, 等. 2015. 华北克拉通胶东地区~2.7 Ga TTG 岩石的成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 31(10): 2974~2990.
- 翟明国, 彭 澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. *岩石学报*, 23(11): 2665~2682.
- 张秋生, 杨振升, 刘连登. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社.