

胶北新太古代两类片麻岩的岩石地球化学特征和成因指示*

单厚香^{1,2} 翟明国^{1**} 王芳¹ 张华锋³

SHAN HouXiang^{1, 2}, ZHAI MingGuo^{1**}, WANG Fang¹ and ZHANG HuaFeng³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Department of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2013-04-08 收稿, 2013-06-03 改回.

Shan HX, Zhai MG, Wang F and Zhang HF. 2013. Geochemical characteristics and petrogenesis of the two types of Neoproterozoic gneisses from the Jiaobei terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2295–2312

Abstract Two types of Neoproterozoic gneisses are identified in the three deep exploration drills in the Jiaobei terrane, including the dominating TTG gneisses and the minor garnet biotite plagiogneiss being sandwiched between the former. As recorded, their protoliths both formed at ~2.5 Ga. The TTG gneisses are rich in SiO₂ (53.95% ~ 75.56%), Al₂O₃ (most > 15%, 10.45% ~ 17.64%) and Na₂O (1.51% ~ 5.94%) with high Na₂O/K₂O ratios (> 1) and low Fe₂O₃^T (2.22% ~ 9.54%) and MgO (0.53% ~ 4.87%) contents. Their A/CNK ratios (1.18 ~ 1.75) indicate that they belong to high-Al TTG series. The TTG gneisses are rich in LILE (Rb, Ba and Sr) but deplete HFSE (Nb, Ta, Zr and Hf), characterized by high Sr contents (204 × 10⁻⁶ ~ 2906 × 10⁻⁶) and Sr/Y ratios (7.30 ~ 355), relatively high ΣREE contents (40.4 × 10⁻⁶ ~ 512 × 10⁻⁶), strongly fractionated REE patterns ((La/Yb)_N = 11.5 ~ 121) and positive or no Eu anomalies (δEu = 0.79 ~ 1.89). These geochemical features request melting of plagioclase component and relicts of garnet, amphibole and some Ti-bearing minerals in the source, indicating that the TTG were formed by partial melting of hydrous basaltic crust at high pressure. The whole rock Nd and zircon Hf isotopic studies, in which the *t*_{DM} is close to the formation age, indicate that the TTG may originate from a juvenile crust from a depleted mantle at 2.57 ~ 2.64 Ga. In addition, their high Mg[#] numbers (40 ~ 67) and high Cr (147 × 10⁻⁶ ~ 371 × 10⁻⁶) and Ni contents (6.68 × 10⁻⁶ ~ 156 × 10⁻⁶) indicate reaction with mantle wedge. Combining features such as negative Nb, Ta anomalies and the juvenile source, the TTG in this study may have formed in island arc environment related to subduction instead of thickened lower crust. DF values and the K-A diagram show that the protolith of garnet biotite plagiogneiss is pelitic-silty sedimentary rocks. Their Cr/Zr ratios (0.90 ~ 1.99, 1.62 on the average), Th/Sc ratios (0.30 on the average) and REE patterns are similar to the corresponding characteristics (1.44 and 0.4, respectively) of Archean sedimentary rocks, thus indicating their source is mainly composed of quartz-feldspathic material. Most samples are rich in LREE with weak negative or no Eu anomalies (δEu = 0.69 ~ 0.92, 0.84 on the average) and have relatively flat HREE patterns. The characteristic values of REE (176 × 10⁻⁶ on average) contents, (La/Yb)_N (14.7 on average) and LREE/HREE ratios (3.3 on average) indicate that the protolith may probably have formed in island arc environment or active continental margin. Amphibolite facies metamorphism, which is indicated by the peak metamorphic temperature obtained by Grt-Bi thermometer (549 ~ 663 °C) and biotite composition, may represent the imprint of retrogressive metamorphic stages of granulite-high amphibolite facies metamorphism at ~2.5 Ga. The protolith of garnet biotite plagiogneiss and TTG are the products of the same age and similar tectonic settings (island arc environment or active continental margin), suggesting a subduction process in the area at that time. And the metamorphism at ~2.5 Ga,

* 本文受国家 973 项目(2012CB4166006)和山东黄金集团技术创新项目联合资助。

第一作者简介: 单厚香, 女, 1989 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: shanhouxian123@163.com

** 通讯作者: 翟明国, 男, 1947 年生, 博士, 院士, 主要从事前寒武纪地质和变质地质学的研究, E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

which is slightly later than the TTG magma event, may be related to the collision process after subduction. Hence, a significant subduction-collision event may have occurred in the study area at ~ 2.5 Ga, during which TTG and the protolith of garnet biotite plagiogneiss formed at the subduction stage and granulite-high amphibolite facies metamorphism was caused by the following collision process.

Key words TTG gneisses; Garnet biotite plagiogneiss; Petrogenesis; Jiaobei terrane; Neoproterozoic

摘要 在胶北三口探矿深钻中识别出两类新太古代片麻岩,一种是TTG片麻岩,数量较多;另一类是石榴黑云斜长片麻岩,数量相对较少,以夹层状发育于TTG片麻岩中。已有年代学资料显示,两种片麻岩原岩均形成于 ~ 2.5 Ga。TTG片麻岩 SiO_2 含量为53.95%~75.56%, Na_2O 为1.51%~5.94%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$;贫 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (2.22%~9.54%) 和 MgO (0.53%~4.87%), Al_2O_3 多大于15%(10.45%~17.64%), $\text{A}/\text{CNK} = 1.18 \sim 1.75$,说明其属于高铝TTG岩系。富集大离子亲石元素(如Rb、Ba、Sr),亏损高场强元素(如Nb、Ta、Zr、Hf),Sr含量高($204 \times 10^{-6} \sim 2906 \times 10^{-6}$),Sr/Y比值高(7.30~355)。 ΣREE 含量($40.4 \times 10^{-6} \sim 512 \times 10^{-6}$)相对较高,轻重稀土强烈分异($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 11.5 \sim 121$),Eu无异常或弱正异常($\delta \text{Eu} = 0.79 \sim 1.89$)。以上地球化学性质表明,胶北TTG片麻岩是含水玄武质岩石高压下部分熔融形成的,残留相主要是石榴石、角闪石和含Ti矿物,没有斜长石。全岩Nd和锆石Hf同位素数据显示其模式年龄与形成年龄相近,表明岩石源区可能是来源于亏损地幔的2.57~2.64 Ga的初生玄武质地壳。另外,胶北TTG片麻岩高的 $\text{Mg}^{\#}$ 值(40~67)和Cr($147 \times 10^{-6} \sim 371 \times 10^{-6}$)、Ni($6.68 \times 10^{-6} \sim 156 \times 10^{-6}$)含量,表示与地幔楔发生了反应,结合Nb、Ta负异常以及源区为初生的玄武质地壳等特征,说明研究区TTG形成于与俯冲有关的岛弧环境,而非加厚的下地壳。DF值和K-A关系图显示,石榴黑云斜长片麻岩原岩是泥质-粉砂质沉积岩。Cr/Zr比值(0.90~1.99,平均为1.62)和Th/Sc比值(平均为0.30)与太古宙沉积岩相应值相近(分别为1.44和0.4),稀土配分型式与太古宙沉积岩类似,表明源区物质以长英质为主。绝大多数样品显示轻稀土富集、重稀土平坦的特征,总稀土含量平均为 176×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值平均为14.7, LREE/HREE平均为3.3, Eu无异常或微弱的负异常($\delta \text{Eu} = 0.69 \sim 0.92$,平均为0.84),这些特征值表明原岩形成的大地构造背景为岛弧或主动大陆边缘。Grt-Bi地质温度计得到的变质温度为549~663 $^{\circ}\text{C}$,其中黑云母化学成分与角闪岩相中黑云母特征相同,共同指示变质程度为角闪岩相,可能代表了 ~ 2.5 Ga麻粒岩相-高角闪岩相变质作用的退变质阶段。石榴黑云斜长片麻岩原岩与TTG属同一时代(~ 2.5 Ga)的产物,形成的构造背景类似(岛弧或主动大陆边缘),说明当时该区有俯冲过程发生;TTG岩浆事件和 ~ 2.5 Ga的变质事件大体同时,但变质事件较岩浆事件稍晚,可以用俯冲后的碰撞来解释。因此,研究区在 ~ 2.5 Ga可能发生过一次重要的俯冲-碰撞拼合事件:TTG和石榴黑云斜长片麻岩原岩形成于俯冲阶段,后期发生碰撞引发麻粒岩相-高角闪岩相的区域变质作用。

关键词 TTG片麻岩;石榴黑云斜长片麻岩;岩石成因;胶北地体;新太古代

中图法分类号 P588.345

1 引言

早前寒武纪地壳主要由长英质片麻岩(TTG质-花岗岩)、变辉长岩-斜长岩以及变质表壳岩组成。其中,TTG是英云闪长岩(Tonalite)-奥长花岗岩(Trondhjemite)-花岗闪长岩(Granodiorite)的合称(Jahn *et al.*, 1981),它们不仅是太古宙大陆地壳的主要组成部分,同时也是后太古宙大陆再造作用的主要对象(Martin *et al.*, 2005)。因此,研究TTG岩石的成因及构造环境可以为认识早期地壳演化的过程及机制提供重要信息(Condie, 2005)。变质表壳岩是由沉积岩和火山岩经区域变质作用形成的变质岩的统称。其中,变沉积岩记录了自前寒武纪以来重要的构造-热事件,比如2.5 Ga导致华北各微陆块拼贴形成统一克拉通的构造-热事件(翟明国和卞爱国, 2000)。因此,对其岩石地球化学特征的研究将为所在古陆块的重大岩浆-变质事件序列和大地构造背景提供制约,对推断地球早期的演化历史以及构造背景等不可或缺。

胶北地体是华北克拉通前寒武纪岩石典型发育地区之一,该区前寒武纪结晶基底主要由占基底出露面积60%以上

的TTG片麻岩(徐扬等, 2011)、高级变质的表壳岩,以及一些浅变质岩系组成(山东省地质矿产局, 1991),是研究早期陆壳形成和演化的理想地区。近年来,对该地区早前寒武纪结晶基底的研究表明,胶北在早前寒武纪期间经历了多期岩浆-变质热事件,主要表现为 ~ 2.9 Ga, ~ 2.7 Ga和 ~ 2.5 Ga的三期岩浆事件以及 ~ 1.86 Ga和 ~ 2.5 Ga的两期热变质事件(唐俊等, 2004; Tang *et al.*, 2007; Jahn *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008; 刘建辉等, 2011, 2012; 徐扬等, 2011; Liu *et al.*, 2013)。其中, ~ 2.5 Ga的地质事件值得引起注意,该时期的岩浆事件(主要是TTG岩浆)是该区最强的岩浆事件,并伴有几乎同时期的区域变质事件,与华北克拉通其他地区类似。因此,对 ~ 2.5 Ga重大地质事件的研究必定对胶北乃至华北克拉通的陆壳演化具有重要意义。然而,对胶北地区 ~ 2.5 Ga的TTG岩石的成因,特别是其形成的构造背景尚无定论,虽然有少数研究者倾向于认为胶北新太古代末的TTG形成于岛弧或主动大陆边缘(宋明春, 2008; 徐扬等, 2011)。胶北 ~ 2.5 Ga的表壳岩记录了 ~ 2.5 Ga麻粒岩相-高角闪岩相的区域变质作用(安郁宏, 1990; 宋明春, 2008),但对它们的研究多集中于地层层序方面(陆松年, 1998; 宋明春等, 2009),对其岩石地球化学特征的研究较少,对其原

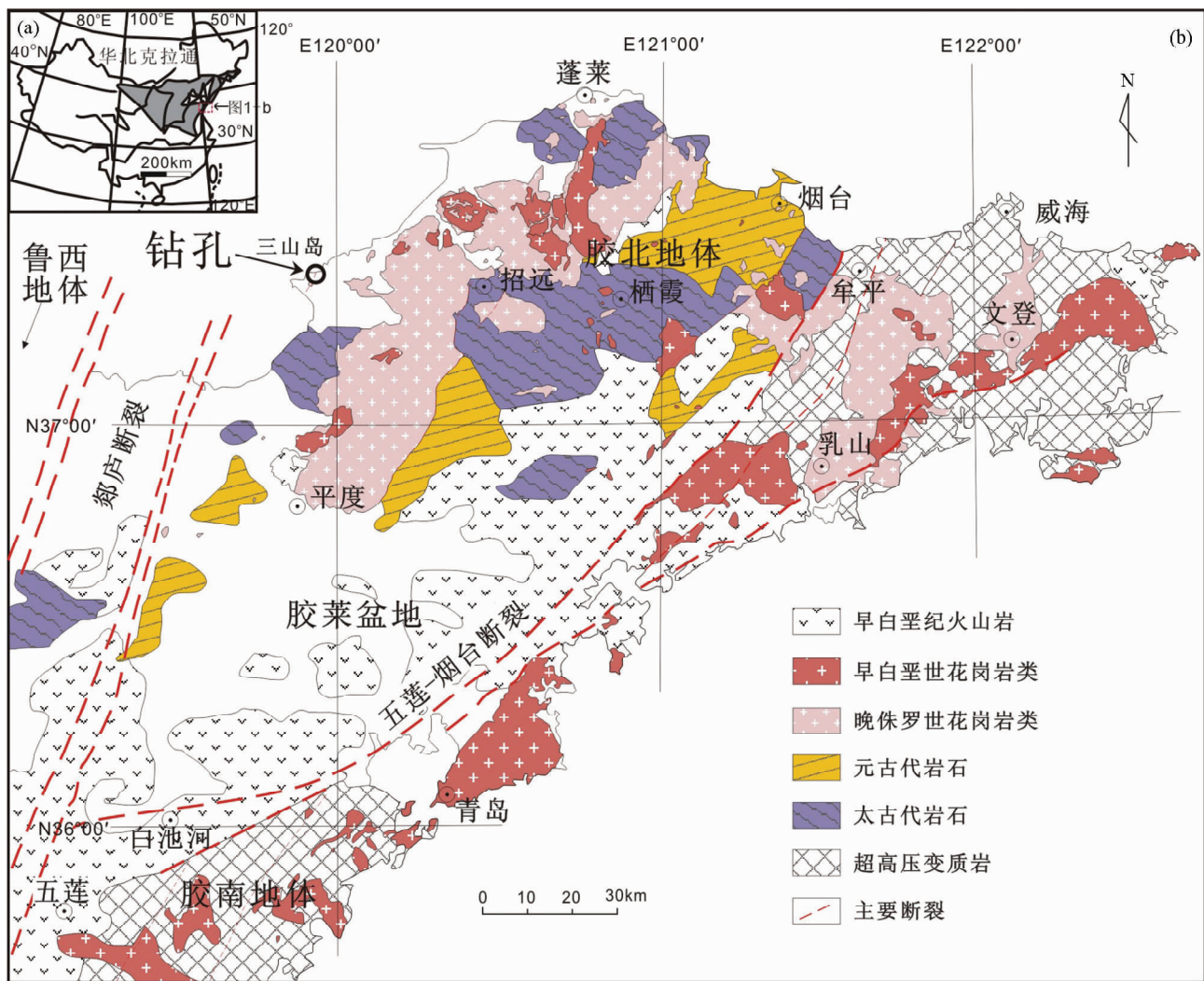


图1 胶东地区区域地质简图及研究区位置(据周喜文等, 2003 修改)

Fig.1 Simplified geological map of Jiaodong area and the location of research area (modified after Zhou *et al.* , 2003)

岩性质、源区特征以及原岩形成的构造背景尚无证据可寻 (Jahn *et al.* , 2008)。因此,对研究区 ~2.5Ga 岩浆事件和变质事件形成的构造背景和过程以及二者具体的因果关系还不清楚,仍需进一步深入研究。

2011 ~ 2012 年,山东黄金集团开展了金矿区超深实验深钻的工程,在胶北三山岛地区打了几口科学深钻,最深的 ZK96-5 孔设计深度 4000m,被称为“中国岩金勘查第一深钻”,由此获得一批深部的宝贵样品。对多个钻孔的岩芯观察显示胶北地区前寒武纪片麻岩位于地下 0 ~ 1km 深处,其下为中生代花岗岩。其中前寒武纪的岩石主要有新太古代的两种片麻岩和蚀变的辉长岩。一种片麻岩是 TTG 片麻岩,另一类是沉积岩变质形成的片麻岩-石榴黑云斜长片麻岩,后者数量相对较少,以夹层状发育于 TTG 片麻岩中,它们可以与地表 ~2.5Ga 的 TTG 片麻岩和表壳岩在成分和结构上进行对比。本文旨在通过对钻孔中两类片麻岩进行岩相学、矿物学和地球化学研究,初步解析该区 TTG 片麻岩和石榴黑

云斜长片麻岩的岩石成因,对胶北 ~2.5Ga 岩浆事件和变质事件发生的构造背景和过程以及二者的具体关系进行限定,为进一步探讨胶北乃至华北克拉通太古宙地壳的形成和演化提供依据。

2 区域地质背景和样品

胶北地区的前寒武纪基底在郯庐断裂与胶东半岛五莲-烟台断裂之间广泛出露(图 1a)。其岩石组合主要是太古宙条带状 TTG 片麻岩和变质表壳岩,古元古代变质沉积岩系(包括粉子山群、荆山群)、镁铁-超镁铁质岩和少量花岗片麻岩,以及新元古宙蓬莱群浅变质岩系等(山东省地质矿产局, 1991; 唐俊等, 2004; Jahn *et al.* , 2008; Zhou *et al.* , 2008)。

研究区新太古代岩石称为胶东杂岩,主要是 TTG-花岗质片麻岩,高级变质的表壳岩,以及少量的条带状铁矿

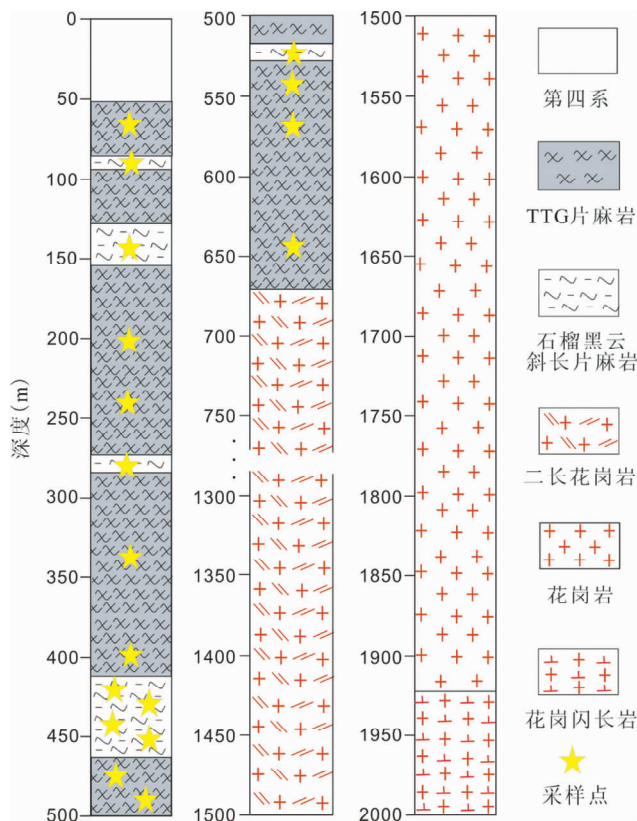


图2 山东金矿 ZK96-3 孔岩性简化柱状剖面及采样位置图

Fig. 2 Simplified lithological profile of the ZK96-3 drill hole of SD-GOLD and sample location

(BIF)。太古宙 TTG 片麻岩多呈穹窿状出露, 占据基底出露面积的 60% 以上(徐扬等, 2011), 是胶北前寒武纪结晶基底的主体部分, 在栖霞地区最为典型。在许多地方, TTG 片麻岩遭受强烈的变质变形和深熔作用改造, 形成条带状构造, 显示混合岩的外貌特征。高级变质表壳岩在太古宙岩石露头中所占比例不足 20%(陆松年, 1998), 变质程度多达到角闪岩相, 局部为麻粒岩相, 主要包括变质(超)基性-中酸性火山岩和变沉积岩, 岩石类型为黑云斜长片麻岩、黑云长英麻粒岩, 角闪岩和浅色麻粒岩等(Jahn *et al.*, 2008), 广泛出露于新太古代 TTG 片麻岩中, 在莱西-栖霞一线主要呈包体形式断续分布(Zhai *et al.*, 2000)。变质(超)基性岩可能是侵入到 TTG 片麻岩中的岩墙(颀颀强等, 2013), 而变沉积岩则主要与 TTG 片麻岩呈夹层产出(山东省地质矿产局, 1991)。

古元古代的岩石主要有花岗片麻岩、麻粒岩相-角闪岩相变质的火山沉积岩, 后者镶嵌在太古宙胶东群周边, 出露广泛, 南部变质程度高, 多为角闪岩相, 最高达到麻粒岩相, 称为荆山群; 北部变质程度相对较低, 以高绿片岩相-角闪岩相为主, 称为粉子山群, 二者通常被视为同期异相的产物(张增奇, 1994), 主要由高铝黑云片岩、变粒岩、大理岩、石墨片岩

等组成, 原岩与沉积岩组合无明显区别。

新元古代蓬莱群主要分布在蓬莱地区和栖霞北部, 主要岩性有结晶灰岩、板岩、石英岩等, 仅遭受了绿片岩相浅变质作用。

本文研究的两类新太古代片麻岩取自胶西北金矿集区超深部综合地质研究与资源预测项目 ZK96-3、ZK96-5 及 ZK96-6 三个钻孔。钻孔地点位于胶北的三山岛附近(图 1b), 采用超深钻采样, 其中图 2 示 ZK96-3 孔 0~2000m 岩性简化剖面, 共划分为 5 个岩性段, 分别是: TTG 片麻岩岩性段(55~415m, 455~676m)、石榴黑云斜长片麻岩岩性段(415~455m)、二长花岗岩岩性段(676~1500m)、花岗岩岩性段(1500~1925m)及花岗闪长岩岩性段(1925~2000m)。其中, TTG 片麻岩主要分布在 55~415m 及 455~676m 范围内, 并有石榴黑云斜长片麻岩的夹层出现, 而石榴黑云斜长片麻岩主要分布在 415~455m 之间。本文共采样品 45 个, 包括 40 个 TTG 片麻岩样品和 5 个石榴黑云斜长片麻岩样品。

3 分析方法

微量元素测试在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试, 测试所用仪器型号为 Shimadzu XRF-1500。标样为中国国家一级岩石标准样 GSR-1(黑云母花岗岩)和 GSR-3(橄榄玄武岩), 分析结果在误差范围内优于 0.2%(质量分数, 余同)。烧失量(LOI)设定为粉末样品在 1000°C 下灼烧 1h 后的质量减少。

微量元素分析测试在西北大学地质学系大陆动力学教育部重点实验室, 美国 Varian 公司 820-MS 型等离子体质谱仪上进行, 使用 HNO₃ + HF 混合酸溶解样品。标样为中国国家一级岩石标准样 GSR-1(黑云母花岗岩)、GSR-3(橄榄玄武岩), 分析误差在检出限之上优于 5%。分析流程见刘晔等(2007)。

电子探针分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成, 仪器型号为 JXA-8100, 空间分辨率 7nm, 工作条件为加速电压 15kV, 电子束流 20nA, 束斑 1μm。

4 岩石学特征

4.1 TTG 片麻岩

TTG 片麻岩呈灰白色或浅肉红色, 中细粒花岗变晶结构, 具有明显的片麻状构造。矿物组合主要是斜长石(40%~60%)、石英(15%~30%)和黑云母(10%~15%), 偶见钾长石和角闪石(图 3a); 副矿物为锆石、榍石、磷灰石及磁铁矿等。斜长石呈半自形-他形板状, 粒径约为 0.5~1.5mm, 部分发育简单双晶、聚片双晶和环带结构(图 3b), An = 20~35, 为更-中长石, 钠黝帘石化蚀变发育。石英颗粒边界呈锯齿状或港湾状接触, 可以看到三连点结构, 粒径约 0.2~1.0mm。黑云母褐色, 片状, 较自形, 极完全解理发育,

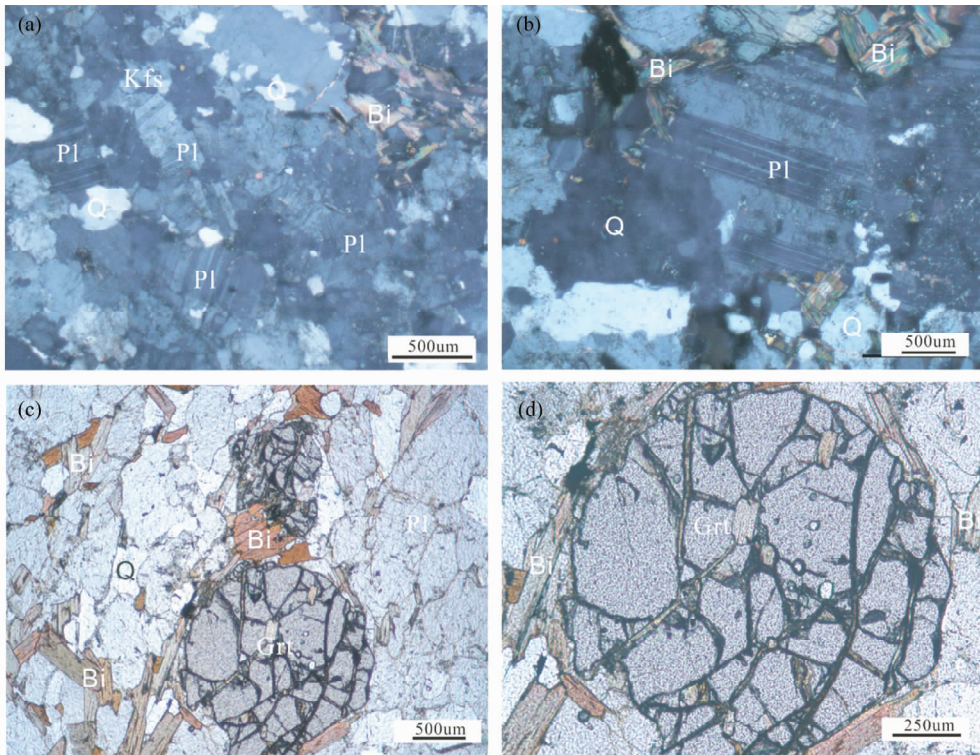


图3 胶北两类片麻岩镜下显微照片

Fig.3 Microphotographs of the two types of gneisses from the Jiaobei terrane

颗粒大小为0.1~0.5mm,多发生绿泥石化。

4.2 石榴黑云斜长片麻岩

4.2.1 岩相学特征

石榴黑云斜长片麻岩呈灰色,鳞片粒状变晶结构,片麻状构造。主要由斜长石(45%~50%)、石榴石(15%~20%)、石英(10%~15%)及黑云母(15%~20%)等矿物组成;副矿物为磷灰石、锆石、榍石等(图3c)。斜长石呈半自形板状-他形,粒径约为0.25~0.5mm,部分发育简单双晶和聚片双晶,大部分已发生明显的钠黝帘石化。石榴石多发育不规则裂纹,粒径约0.25~1.25mm,部分变斑晶发育筛状结构,包裹的矿物主要是长石、石英、黑云母等。石英无色,他形粒状,粒径约0.25~0.75mm。黑云母褐色,片状,较自形,具明显的多色性,颗粒大小为0.25~1.0mm,多与石榴石共生(图3d)。

4.2.2 矿物化学及Grt-Bi温度计

对石榴黑云斜长片麻岩中黑云母和石榴石进行了电子探针分析,数据及处理结果列于表1、表2、表3中。

黑云母MgO含量较高(7.19%~11.02%,平均为9.36%);FeO为15.48%~22.23%,平均为19.09%;TiO₂为0.38%~1.04%,平均为0.66%(表1)。除Z2963-3-2外,其余探针点的微区成分表现较均一,说明在变质过程中黑云母已经达到了比较充分的均一化。

石榴石无色,MgO含量为2.70%~5.41%(平均为4.39%),MnO为1.21%~2.21%(平均为1.56%),FeO为32.18%~35.62%(平均为33.69%),CaO为1.49%~2.57%(平均为2.14%),Al₂O₃为20.85%~21.77%(平均为21.15%),表现出高铁、铝和镁且低锰的特点。对石榴石电子探针分析数据进行端元组分计算表明(表2),本区石榴石端元分子主要是铁铝榴石(平均为71%),其次为镁铝榴石(平均为18%),钙铝榴石平均为4%,而锰铝榴石和钙铬榴石含量仅为3%和0.2%。从核部到边部,铁铝榴石略有增加,镁铝榴石略微减少,没有明显的成分环带。

本文对石榴黑云斜长片麻岩中的石榴石与基质中的黑云母进行测试,配备较适合本区的Grt-Bi地质温度计(Holdaway, 2000),采用峰期阶段形成的相邻Grt-Bi晶体中心化学成分,对其变质温度条件进行估算(表3),得到的变质温度集中于549~663℃之间,处于低-中角闪岩相范围内。

5 岩石地球化学特征

TTG片麻岩主量元素和微量元素地球化学分别有40个和39个,石榴黑云斜长片麻岩各有5个,详见表4和表5。

5.1 TTG片麻岩

5.1.1 主量元素

胶北新太古代TTG片麻岩SiO₂含量为53.95%~75.56%,

表1 胶北石榴黑云斜长片麻岩中黑云母电子探针分析 (wt%) 及计算结果

Table 1 Electron microprobe analyses of biotite in garnet biotite plagiogneiss from the Jiaobei terrane (wt%)

样品号	Z2963 -3-1	Z2963 -3-1	Z2963 -3-1	Z2963 -3-2	Z2963 -3-2	Z2963 -53-1	Z2963 -53-1	Z2963 -53-2
位置	核部	幔部	边部	核部	边部	核部	边部	核部
SiO ₂	36.26	36.59	36.74	36.72	49.91	37.01	31.10	36.79
TiO ₂	0.89	1.04	1.04	0.52	0.41	0.50	0.44	0.38
Al ₂ O ₃	17.90	17.51	17.09	18.00	13.58	18.29	15.39	19.37
Cr ₂ O ₃	0.06	0.05	0.02	0.08	0.39	0.15	0.09	0.21
FeO	22.23	21.30	21.37	20.89	15.48	17.92	16.50	17.54
MnO	0.18	0.20	0.17	0.28	0.17	0.09	0.08	0.09
MgO	8.62	8.87	8.80	9.58	7.19	11.02	10.48	10.86
CaO	0.00	0.00	0.02	0.04	0.11	0.01	0.05	0.02
Na ₂ O	0.34	0.34	0.33	0.20	0.20	0.14	0.13	0.18
K ₂ O	9.27	9.03	9.09	8.91	6.64	8.86	8.73	9.02
Total	96.11	95.45	95.11	95.57	94.22	94.07	83.23	94.58
O	22							
Si	5.56	5.63	5.67	5.61	7.17	5.63	5.46	5.56
Ti	0.10	0.12	0.12	0.06	0.04	0.06	0.06	0.04
Al ^{IV}	2.44	2.37	2.33	2.39	0.83	2.37	2.54	2.44
Al ^{VI}	0.80	0.80	0.78	0.85	1.46	0.91	0.64	1.01
Fe ²⁺	2.85	2.74	2.76	2.67	1.86	2.28	2.42	2.22
Cr	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.02	0.01	0.03
Mn	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
Mg	1.97	2.03	2.03	2.18	1.54	2.50	2.74	2.45
Ca	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00
Na	0.10	0.10	0.10	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05
K	1.81	1.77	1.79	1.73	1.22	1.72	1.95	1.74
X _{Mg}	0.41	0.43	0.42	0.45	0.45	0.52	0.53	0.52

注: X_{Mg} = Mg / (Fe²⁺ + Mg)

Al₂O₃ 多大于 15% (10.45% ~ 17.64%), Na₂O 为 1.51% ~ 5.94%, K₂O 多小于 2.5% (0.58% ~ 3.97%), Na₂O/K₂O > 1。MgO (0.53% ~ 4.87%) 和 Fe₂O₃^T (2.22% ~ 9.54%) 含量较低, Mg[#] 较高 (40 ~ 67, 表4)。在 An-Ab-Or 三角图中 (图4),

表2 胶北石榴黑云斜长片麻岩石榴石电子探针分析 (wt%) 及计算结果

Table 2 Electron microprobe analyses of garnet in garnet biotite plagiogneiss from the Jiaobei terrane (wt%)

样品号	Z2963 -3-1	Z2963 -3-1	Z2963 -3-2	Z2963 -3-2	Z2963 -3-2	Z2963 -53-1	Z2963 -53-2
位置	核部	边部	核部	幔部	边部	核部	核部
SiO ₂	38.28	38.92	39.26	38.08	36.94	38.21	38.10
TiO ₂	0.00	0.01	0.05	0.02	0.03	0.07	0.08
Al ₂ O ₃	21.26	20.89	20.85	20.88	21.77	21.19	20.85
FeO	32.46	32.69	32.68	32.18	32.93	35.35	35.62
Cr ₂ O ₃	0.03	0.07	0.05	0.05	0.01	0.11	0.05
MgO	5.41	5.30	5.20	5.20	4.56	3.05	2.70
MnO	1.31	1.23	1.21	1.21	1.42	2.03	2.21
CaO	2.41	2.29	2.57	2.42	2.39	1.66	1.49
Na ₂ O	0.01	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Total	101.17	101.40	101.93	100.04	100.09	101.67	101.10
O	24						
Si	6.00	6.08	6.10	6.04	5.89	6.04	6.07
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Al	3.93	3.85	3.82	3.90	4.09	3.95	3.92
Fe ²⁺	4.26	4.27	4.25	4.26	4.39	4.68	4.75
Cr	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
Mn	0.17	0.16	0.16	0.16	0.19	0.27	0.30
Mg	1.26	1.23	1.20	1.23	1.08	0.72	0.64
Ca	0.40	0.38	0.43	0.41	0.41	0.28	0.25
Na	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	16.03	15.99	15.99	16.01	16.07	15.97	15.95
Alm	0.722	0.738	0.740	0.728	0.715	0.787	0.807
Pyr	0.214	0.213	0.210	0.210	0.177	0.121	0.109
Spe	0.030	0.028	0.028	0.028	0.031	0.046	0.051
Gro	0.033	0.018	0.021	0.033	0.077	0.043	0.032
Uva	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000	0.003	0.002

注: 全铁以 FeO 计算

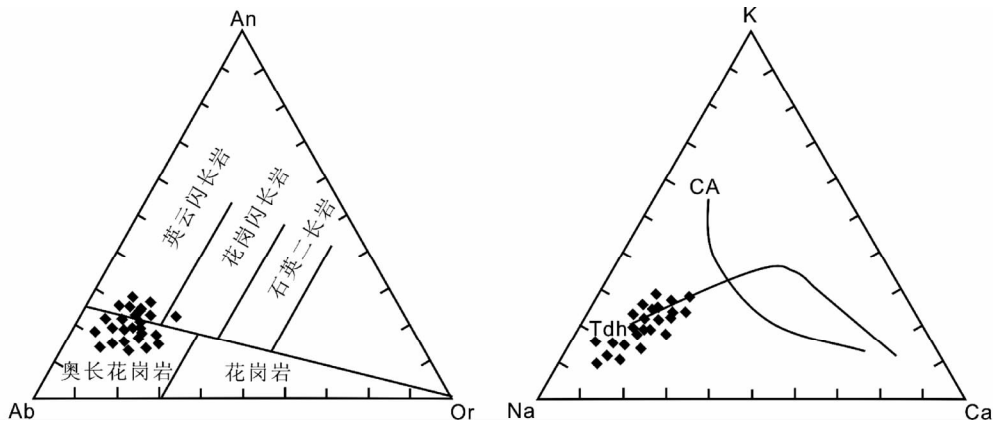


图4 胶北 TTG 片麻岩 An-Ab-Or 图解和 K-Na-Ca 图解

Fig. 4 Normative An-Ab-Or diagram and K-Na-Ca diagram for TTG gneisses from the Jiaobei terrane

表 3 胶北石榴黑云斜长片麻岩 Grt-Bi 温度计计算结果

Table 3 The calculated results of garnet-biotite geothermometers of garnet biotite plagiogneiss from the Jiaobei terrane

样品号	Z2963-3-1				Z2963-3-2				Z2963-53-1		Z2963-53-2	
	Grt		Bi		Grt		Bi		Grt	Bi	Grt	Bi
矿物	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	核部	核部	核部
位置	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	核部	核部	核部
SiO ₂ (wt%)	38.28	38.92	36.26	36.74	39.26	36.94	36.72	49.91	38.21	37.01	38.10	36.79
T (°C)	663				574				566		549	

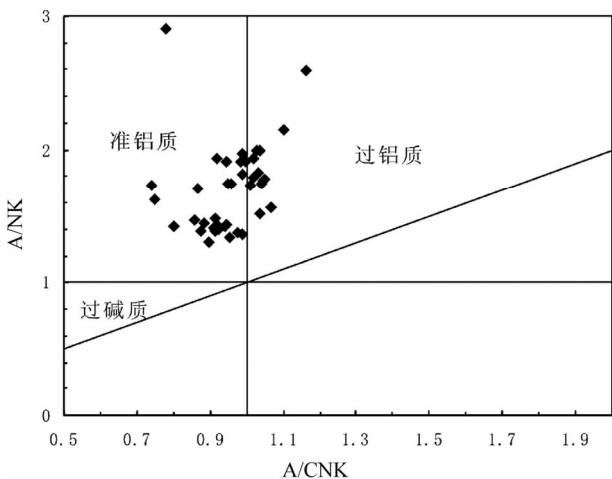


图 5 胶北 TTG 片麻岩 A/NK-A/CNK 图解

Fig. 5 A/NK vs. A/CNK diagram for TTG gneisses from the Jiaobei terrane

样品主体落在英云闪长岩和奥长花岗岩区域,少数落在花岗闪长岩区域。在 A/NK-A/CNK 图解(图 5)中,绝大多数样品则落入准铝质-弱过铝质区域,具有中等铝饱和性质。在主要元素协变图上(图 6a-f),MgO、Fe₂O₃^T、CaO、TiO₂ 与 SiO₂ 呈明显的负相关性,Na₂O 与 SiO₂ 显示较弱的正相关,而 Al₂O₃ 则不显示任何相关性。

5.1.2 微量元素

TTG 片麻岩稀土元素总量较高(40.4 × 10⁻⁶ ~ 512 × 10⁻⁶)(表 5)。在球粒陨石标准化稀土配分模式图中(图 7),绝大多数样品显示轻重稀土强烈的分馏((La/Yb)_N = 2.29 ~ 121),轻稀土富集,重稀土明显亏损。其中,重稀土较平坦。Eu 无异常或表现弱的正异常(δEu = 0.79 ~ 1.89)(图 7、表 5),与栖霞地区 2.5Ga 的 TTG 片麻岩具有非常类似的稀土配分模式(图 7)。在 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 图解(图 8)中,大多数样品落入太古宙 TTG 岩区。所有这些主、微量元素特征均表明胶北 TTG 片麻岩属于太古宙高铝 TTG 片麻岩(Barker and Arth, 1976)。

在原始地幔标准化微量元素分布图(图 7)中,TTG 片麻岩显示富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr)和亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)的特征,而栖霞地区的 TTG 片麻岩则显示 Ba 的负异常,其他元素特征一致。与太古宙平均 TTG(Sr > 400 × 10⁻⁶, Sr/Y > 40, Cr < 50 × 10⁻⁶, Ni < 30 × 10⁻⁶)(Martin *et al.*, 2005)相比,胶北 TTG 片麻岩 Sr 含量高,为 204 × 10⁻⁶ ~

2906 × 10⁻⁶, 平均为 916 × 10⁻⁶, 显示较弱的正异常, Sr/Y 比值高,平均为 101, 相容元素 Cr、Ni 含量高, Cr 变化于 147 × 10⁻⁶ ~ 371 × 10⁻⁶ 之间, Ni 为 6.68 × 10⁻⁶ ~ 156 × 10⁻⁶, 平均为 55.3 × 10⁻⁶。

5.1.3 锆石饱和温度计算

花岗岩多数是绝热式上升就位的,岩浆早期结晶温度可以近似代表岩浆形成时的温度,因此可以通过计算岩浆早期结晶温度来近似获得岩浆的起源温度(吴福元等, 2007)。锆石饱和温度计算是当前获得岩浆初始温度的主要方法之一,锆石在花岗岩岩浆体系中一般结晶较早,并且锆石中 Zr 的分配系数对温度极度敏感,其在岩浆中的含量与温度存在相关性,而其它因素对其影响较小,所以锆石的饱和温度就可以近似认为是岩浆的液相线温度(King *et al.*, 1997)。因此根据 Watson and Harrison (1983) 提出的利用 Zr 含量和主量元素含量计算花岗岩熔体锆石饱和温度的公式来获得岩浆形成时的温度:

$$T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{melt})]$$

式中: T 为绝对温度; M 为全岩的 (Na + K + 2Ca) / (Al × Si) 摩尔数(计算中, 令 Si + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1 (摩尔分数)); Zr_{melt} 为熔体中 Zr 的含量, 锆石在花岗岩岩石中是副矿物, 可用全岩的 Zr 含量近似代表熔体中的 Zr 含量。

胶北 TTG 片麻岩岩浆结晶温度计算结果列于表 6 中, 最低温度和最高温度分别为 652°C 和 816°C, 平均为 753°C。样品中含有较多继承性锆石残留核(翟明国和王芳, 2012^①), 说明 TTG 源区 Zr 是饱和的, 与 Miller *et al.* (2003) 提出的“冷花岗岩”相似, 计算结果反映了岩浆结晶的最高温度。

5.2 石榴黑云斜长片麻岩

5.2.1 主量元素

石榴黑云斜长片麻岩样品的主量元素含量变化较大(表 4)。SiO₂ 含量相对较低(53.34% ~ 67.32%), 可能是受变质作用或外生作用(如风化、搬运、成岩)等后期作用的影响所致, Al₂O₃ 为 12.21% ~ 15.32%, Na₂O 为 2.08% ~ 3.13%。K₂O 为 0.68% ~ 3.50%, 除样品 Z2963-41 (Na₂O/K₂O = 0.59) 外, 其余样品的 Na₂O 均大于 K₂O (Na₂O/K₂O = 1.05 ~ 4.60)。MgO = 1.57% ~ 7.34%, Fe₂O₃^T = 4.36% ~ 11.77%,

① 翟明国, 王芳. 2012. 胶北金矿集区超深部综合地质研究与资源预测项目报告

表4 胶北两类片麻岩主量元素特征(wt%)

Table 4 Major elements of the gneisses from the Jiaobei terrane (wt%)

岩性	TTG 片麻岩															
	Z2965 -01	Z2965 -02	Z2965 -05	Z2965 -07	Z2965 -08	Z2965 -09	Z2965 -11	Z2965 -12	Z2965 -13	Z2965 -14	Z2965 -15	Z2965 -16	Z2965 -20	Z2965 -24	Z2965 -26	
SiO ₂	67.33	64.76	62.51	62.36	63.62	63.52	53.95	61.08	58.18	64.32	59.75	63.21	62.07	63.45	67.28	
TiO ₂	0.50	0.62	0.81	0.70	0.59	0.66	0.83	0.67	0.78	0.70	0.60	0.84	0.44	0.40	0.26	
Al ₂ O ₃	14.14	14.29	15.91	15.26	15.7	15.77	16.96	17.64	17.15	16.01	13.21	14.69	15.82	15.88	16.03	
Fe ₂ O ₃ ^T	4.88	6.23	5.87	6.17	5.27	5.32	8.80	5.33	6.94	4.56	6.59	6.61	3.92	3.12	2.27	
MnO	0.06	0.08	0.07	0.09	0.07	0.05	0.09	0.06	0.09	0.05	0.09	0.09	0.06	0.04	0.04	
MgO	1.81	3.09	2.22	3.41	2.60	2.37	3.34	2.37	3.75	1.99	4.87	2.46	2.51	1.9	1.09	
CaO	2.33	3.33	4.19	4.05	4.25	3.34	5.32	4.51	5.07	3.63	5.23	4.59	4.75	2.66	2.63	
Na ₂ O	4.18	3.32	4.07	4.10	4.02	4.02	4.17	4.30	4.22	4.49	3.04	3.94	5.32	4.61	5.94	
K ₂ O	1.99	2.34	1.50	1.84	1.48	2.27	1.75	1.64	1.87	1.72	2.90	1.95	2.20	2.68	2.08	
P ₂ O ₅	0.15	0.22	0.15	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.32	0.31	0.35	0.18	0.24	0.19	0.12	
LOI	2.22	1.36	2.04	1.14	1.42	1.96	3.42	2.04	1.22	1.14	2.00	1.14	1.72	4.47	1.68	
Total	99.59	99.64	99.34	99.31	99.2	99.47	98.82	99.83	99.59	98.92	98.63	99.7	99.05	99.4	99.42	
Mg [#]	57	50	57	47	50	53	57	53	48	53	40	57	44	45	51	
DF	1.42	-0.24	2.32	1.24	1.85	2.01	2.98	3.23	2.29	3	-0.11	1.97	5.26	3.9	5.76	
K-A 图判别	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	
岩性	TTG 片麻岩															
	Z2965 -27	Z2965 -28	Z2965 -29	Z2965 -30	Z2965 -31	Z2965 -32	Z2965 -33	Z2965 -34	Z2965 -35	Z2965 -55	Z2966 -02	Z2966 -07	Z2966 -08	Z2966 -15	Z2966 -20	
SiO ₂	66.90	66.00	66.53	66.25	67.23	67.47	65.16	65.79	65.56	65.90	64.46	64.39	64.95	65.76	62.23	
TiO ₂	0.31	0.32	0.30	0.33	0.32	0.31	0.34	0.34	0.34	0.35	0.39	0.40	0.38	0.36	0.61	
Al ₂ O ₃	15.78	15.75	16.05	15.9	15.59	15.56	16.07	15.83	15.61	15.44	16.43	16.15	16.47	16.19	15.93	
Fe ₂ O ₃ ^T	2.22	2.76	2.65	2.39	2.42	2.29	2.90	2.72	2.61	2.85	3.71	3.26	3.11	3.03	5.97	
MnO	0.03	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.04	0.07	
MgO	1.06	1.47	1.43	1.35	1.20	1.14	1.67	1.63	1.38	1.52	1.82	1.87	1.82	1.69	3.11	
CaO	2.43	3.27	3.16	3.25	2.52	3.12	3.33	3.20	2.99	3.60	3.80	3.90	3.54	3.40	4.07	
Na ₂ O	5.02	5.07	5.21	5.17	5.27	5.32	5.29	4.86	5.12	5.15	5.15	5.07	5.43	5.19	3.61	
K ₂ O	3.05	2.73	2.55	2.72	2.51	1.91	2.46	3.06	3.26	2.45	2.40	2.64	2.53	2.61	2.12	
P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.14	0.15	0.11	0.10	0.16	0.16	0.14	0.15	0.20	0.20	0.18	0.17	0.2	
LOI	2.52	0.96	0.90	1.00	1.90	1.52	0.76	1.24	1.66	1.50	0.84	1.40	0.86	0.78	1.46	
Total	99.45	98.54	98.97	98.55	99.11	98.79	98.18	98.87	98.72	98.96	99.28	99.33	99.32	99.22	99.38	
Mg [#]	51	48	48	47	50	50	46	45	49	48	50	47	46	47	49	
DF	4.95	4.93	4.94	5.24	4.81	4.94	5.08	4.66	5.36	5.02	4.84	5.02	5.26	4.86	1.07	
K-A 图判别	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	
岩性	TTG 片麻岩										石榴黑云斜长片麻岩					
	Z2966 -24	Z2966 -32	Z2966 -37	Z2966 -44	Z2966 -52	Z2966 -53	Z2966 -29	Z2966 -32	Z2966 -38	Z2966 -51	Z2963 -03	Z2963 -08	Z2963 -11	Z2963 -11P	Z2963 -21	Z2963 -41
SiO ₂	63.88	63.11	59.36	67.62	57.93	71.21	60.65	57.86	68.77	75.56	66.28	67.32	53.34	53.41	58.46	56.63
TiO ₂	0.58	0.54	0.87	0.36	1.00	0.52	0.71	1.20	0.62	0.46	0.51	0.47	0.95	0.95	0.89	1.15
Al ₂ O ₃	15.55	15.07	17.58	15.5	13.01	14.22	15.92	14.89	13.67	10.45	14.73	13.95	15.26	15.32	14.74	12.21
Fe ₂ O ₃ ^T	5.23	3.86	5.98	3.58	7.98	3.16	6.46	9.54	5.25	4.63	4.36	6.94	11.77	11.69	9.46	5.87
MnO	0.07	0.06	0.15	0.05	0.15	0.04	0.06	0.15	0.10	0.06	0.04	0.15	0.22	0.22	0.22	0.08
MgO	2.42	2.51	3.02	1.16	4.26	1.00	3.61	2.71	1.28	1.88	1.57	2.62	5.81	5.79	3.67	7.34
CaO	4.32	4.02	4.58	3.59	5.54	3.59	3.90	7.69	2.95	2.96	1.39	2.37	3.64	3.60	2.48	6.10
Na ₂ O	3.60	3.83	1.51	4.41	2.98	4.23	2.92	2.61	3.94	3.00	2.97	3.13	2.61	2.60	2.69	2.08
K ₂ O	1.80	3.66	3.97	1.15	2.42	0.82	2.39	0.78	1.15	0.58	2.83	0.68	2.09	2.08	1.84	3.50
P ₂ O ₅	0.15	0.24	0.10	0.10	0.14	0.05	0.28	0.66	0.18	0.10	0.12	0.06	0.17	0.17	0.16	0.61
LOI	1.90	2.32	2.38	2.44	4.24	1.00	2.66	1.46	1.90	0.42	4.92	2.52	3.72	3.70	5.70	3.20
Total	99.49	99.22	99.5	99.96	99.65	99.84	99.56	99.55	99.81	100.1	99.72	100.21	99.58	99.54	100.31	98.77
Mg [#]	52	43	50	61	48	61	47	64	67	55	—	—	—	—	—	—
DF	1.58	3.27	-0.03	2.99	0.25	2.09	-0.20	1.04	1.06	1.33	0.22	-2.25	-3.28	-3.29	-2.18	-2.24
K-A 图判别	正	正	负	正	正	正	正	正	正	正	负	负	负	负	负	负

注: Mg[#] = 100 × [Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)]

表 5 胶北两类片麻岩微量元素及稀土元素特征($\times 10^{-6}$)

Table 5 Trace and rare earth elements of the gneisses from the Jiaobei terrane ($\times 10^{-6}$)

岩性	TTG 片麻岩															
	Z2965-1	Z2965-2	Z2965-5	Z2965-7	Z2965-8	Z2965-9	Z2965-11	Z2965-12	Z2965-13	Z2965-14	Z2965-15	Z2965-16	Z2965-20	Z2965-24	Z2965-26	Z2965-27
Sc	8.96	13.5	11.6	15.7	13.0	11.5	17.9	13.6	14.2	7.89	14.6	11.1	8.44	6.27	3.33	4.20
V	59.3	112	88.9	112	104	112	142	111	124	72.3	109	94.0	68.9	55.6	32.8	36.8
Cr	162	285	267	259	261	256	244	218	204	165	371	229	195	153	274	190
Co	16.0	20.4	20.0	25.2	19.1	20.2	28.3	19.0	26.5	17.3	27.4	17.9	18.0	11.0	7.71	7.24
Ni	29.0	35.8	66.3	74.5	54.6	63.6	84.1	52.3	75.8	38.5	156	47.6	58.5	43.9	28.4	25.1
Ga	16.7	18.9	20.6	19.4	19.9	19.7	20.4	21.9	22.4	21.5	18.8	19.7	20.8	20.7	19.0	20.0
Rb	55.9	73.4	44.9	52.2	44.7	86.4	37.9	51.4	60.7	64.4	102	66.4	69.2	66.5	79.4	58.9
Sr	406	648	783	620	698	641	504	714	676	792	691	923	1125	769	1295	1020
Y	13.0	17.5	10.5	14.2	8.81	6.07	9.72	8.07	15.4	14.2	20.0	12.7	10.9	9.85	7.87	7.51
Zr	192	149	117	154	117	120	131	147	142	183	132	98.0	162	177	128	114
Nb	5.07	8.6	5.89	4.91	4.66	4.84	4.78	5.6	5.26	6.01	6.5	6.46	4.13	4.58	2.84	3.35
Ba	542	462	537	535	517	614	472	544	606	683	927	487	1014	1432	1235	1487
La	17.9	30.1	13.8	19.0	23.1	21.6	16.9	22.8	31.5	59.4	58.6	17.7	54.9	51.4	34.4	35.4
Ce	37.9	66.6	29.6	42.2	46.3	42.1	33.0	45.5	69.8	127	126	40.8	111	105	67.6	73.2
Nd	18.4	33.1	16.2	22.3	20.9	19.1	15.4	20.1	36.4	56.7	59.7	23.3	49.4	45.5	28.4	32.5
Sm	3.69	6.02	3.44	4.30	3.39	3.07	2.75	3.32	6.62	8.83	9.86	4.72	7.75	7.05	4.33	5.22
Eu	1.08	1.66	1.16	1.23	1.24	1.16	1.25	1.34	1.60	2.15	2.32	1.43	2.06	1.90	1.27	1.43
Gd	3.26	4.61	2.87	3.54	2.49	2.09	2.25	2.44	4.75	5.39	6.41	3.69	4.64	4.20	2.65	3.12
Tb	0.46	0.60	0.39	0.48	0.32	0.26	0.30	0.31	0.60	0.63	0.77	0.49	0.53	0.48	0.31	0.36
Dy	2.48	3.22	2.04	2.62	1.65	1.25	1.70	1.57	3.07	2.90	3.78	2.49	2.37	2.13	1.46	1.58
Ho	0.45	0.59	0.37	0.49	0.30	0.21	0.33	0.28	0.52	0.45	0.65	0.43	0.36	0.32	0.24	0.24
Er	1.15	1.64	0.97	1.34	0.83	0.57	0.94	0.78	1.40	1.21	1.82	1.13	0.92	0.84	0.68	0.62
Tm	0.15	0.24	0.13	0.19	0.12	0.07	0.14	0.11	0.18	0.15	0.26	0.15	0.12	0.11	0.09	0.08
Yb	0.91	1.56	0.81	1.18	0.75	0.46	0.89	0.70	1.15	0.96	1.66	0.92	0.70	0.66	0.61	0.50
Lu	0.14	0.23	0.12	0.17	0.11	0.07	0.14	0.11	0.17	0.13	0.24	0.13	0.10	0.10	0.09	0.07
Hf	4.43	3.53	2.72	3.45	2.62	2.75	2.97	3.38	3.18	4.09	2.95	2.28	3.59	3.96	2.95	2.73
Ta	0.13	0.47	0.26	0.19	0.20	0.11	0.20	0.26	0.18	0.31	0.41	0.17	0.09	0.12	0.04	0.07
Pb	6.14	7.25	7.38	6.66	6.60	15.76	7.29	8.50	6.84	8.24	6.95	10.0	9.13	11.3	13.9	13.6
Th	2.23	3.73	0.29	0.22	0.30	0.56	0.41	0.64	0.38	5.97	9.22	0.24	3.50	2.07	0.83	0.26
U	0.30	0.69	0.13	0.21	0.15	0.15	0.20	0.28	0.15	0.51	0.79	0.07	0.20	0.25	0.16	0.12
ΣREE	87.9	150	72.0	99.0	102	92.0	76.0	99.3	158	266	272	97.4	235	220	142	154
Sr/Y	31.3	37.0	74.5	43.7	79.3	105	51.9	88.4	43.9	55.9	34.6	72.9	103	78.0	165	136
(La/Yb) _N	14.1	13.8	12.2	11.5	22.1	33.9	13.6	23.3	19.6	44.2	25.3	13.9	56.0	55.6	40.8	51.2
δEu	0.95	0.97	1.13	0.97	1.13	1.40	1.54	1.44	0.87	0.95	0.89	1.05	1.05	1.07	1.14	1.08

岩性	TTG 片麻岩															
	Z2965-28	Z2965-29	Z2965-30	Z2965-30P	Z2965-31	Z2965-32	Z2965-33	Z2965-34	Z2965-35	Z2965-55	Z2966-2	Z2966-7	Z2966-8	Z2966-15	Z2966-20	Z2966-24
Sc	4.59	4.48	4.25	4.27	2.26	2.46	5.02	5.58	4.09	4.78	4.93	3.67	4.63	4.08	12.04	9.51
V	41.7	38.7	39.0	39.5	33.0	32.5	44.0	43.9	37.6	40.7	53.8	49.3	46.1	46.7	99.6	96.7
Cr	170	229	212	210	168	169	198	175	199	158	212	147	187	185	318	223
Co	10.1	9.91	8.31	8.03	9.92	7.66	9.55	9.4	8.03	8.67	10.6	8.72	8.81	8.71	19.6	15.2
Ni	28.1	32.8	33.1	32.9	22.3	23.1	31.7	35.0	25.2	22.2	55.5	27.6	28.2	30.2	50	40.5
Ga	20.3	20.7	19.6	19.5	18.8	21.0	20.6	21.0	20.6	19.9	19.6	19.2	19.1	19.5	18.2	18.1
Rb	63.9	74.3	74.5	74.0	73.3	79.4	65.1	75.2	98.8	58.6	53.2	42.6	29.6	33.0	69.5	50.7
Sr	1233	1412	2906	2879	1027	1304	1339	1248	1340	1431	1059	541	949	965	579	604
Y	8.21	8.2	8.18	8.17	3.79	4.29	8.84	11.48	7.36	7.36	8.85	8.53	8.06	8.22	10.3	6.74
Zr	78.6	145	88.3	117	172	134	116	112	161	137	119	112	107	93.0	124	126
Nb	3.89	5.01	3.94	3.88	4.39	4.77	4.00	5.83	5.74	5.55	2.31	5.28	2.81	3.36	4.39	4.15
Ba	1369	1184	1468	14695	1238	874	1201	1387	1788	1285	1318	1022	1094	1210	619	546
La	38.3	33.8	42.0	43.0	33.9	48.6	42.3	47.3	38.2	43.5	46.6	34.5	39.5	34.7	27.4	18.2
Ce	79.5	71.9	83.4	85.4	59.5	86.0	87.3	103	75.0	85.4	92.7	73.3	83.3	72.0	55.1	35.4
Nd	34.6	33.4	35.8	36.8	20.5	28.5	39.4	48.0	31.9	34.2	45.6	36.1	39.0	35.6	26.0	16.3
Sm	5.51	5.39	5.76	5.88	2.78	3.42	6.28	8.03	4.88	5.22	7.86	6.15	6.73	6.64	4.9	3.12
Eu	1.46	1.47	1.75	1.76	1.29	1.20	1.63	1.71	1.55	1.60	1.84	1.36	1.39	1.33	1.33	1.12

续表 5

Continued Table 5

岩性	TTG 片麻岩															
	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2965	Z2966	Z2966	Z2966	Z2966	Z2966
样品号	-28	-29	-30	-30P	-31	-32	-33	-34	-35	-55	-2	-7	-8	-15	-20	-24
Gd	3.28	3.22	3.44	3.49	1.57	1.89	3.75	4.87	2.90	3.09	4.77	3.93	4.06	3.97	3.37	2.19
Tb	0.38	0.38	0.40	0.41	0.18	0.21	0.44	0.57	0.34	0.36	0.51	0.45	0.46	0.44	0.45	0.31
Dy	1.70	1.66	1.74	1.74	0.78	0.89	1.90	2.54	1.50	1.57	2.03	1.86	1.85	1.84	2.18	1.50
Ho	0.25	0.26	0.26	0.26	0.12	0.13	0.28	0.38	0.23	0.23	0.33	0.32	0.30	0.31	0.41	0.28
Er	0.67	0.66	0.65	0.64	0.32	0.36	0.73	0.98	0.59	0.62	0.79	0.78	0.73	0.75	1.14	0.74
Tm	0.09	0.08	0.08	0.08	0.04	0.05	0.09	0.13	0.08	0.08	0.10	0.11	0.10	0.10	0.17	0.11
Yb	0.52	0.53	0.48	0.49	0.27	0.29	0.56	0.74	0.48	0.50	0.62	0.66	0.59	0.61	1.19	0.72
Lu	0.08	0.08	0.07	0.07	0.04	0.04	0.08	0.11	0.07	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.19	0.13
Hf	1.95	3.59	2.16	2.79	4.18	3.18	2.73	2.91	3.81	3.36	2.92	2.93	2.67	2.4	3.14	3.20
Ta	0.08	0.20	0.10	0.10	0.22	0.18	0.12	0.24	0.19	0.23	0.09	0.30	0.12	0.15	0.27	0.23
Pb	17.2	18.6	15.4	15.5	14.6	15.3	14.4	14.4	14.6	14.4	14.3	10.9	11.6	17.2	6.92	6.86
Th	3.75	0.32	0.65	0.65	13.7	10.6	0.44	3.43	0.51	4.14	3.63	0.63	0.59	0.61	3.01	0.97
U	0.97	0.21	0.22	0.24	0.25	0.23	0.11	0.20	0.24	0.39	0.16	0.36	0.17	0.18	0.39	0.29
ΣREE	166	153	176	180	121	172	185	219	158	177	230	181	201	180	153	101
Sr/Y	150	172	355	353	271	304	152	109	182	194	120	63.4	118	117	56	89.6
(La/Yb) _N	52.9	45.8	62.8	63.0	88.6	121	54.1	45.6	57.0	62.9	53.5	37.2	48.0	41.1	16.6	18.3
δEu	1.05	1.08	1.20	1.18	1.89	1.44	1.03	0.84	1.26	1.22	0.92	0.84	0.81	0.79	1.00	1.30

岩性	TTG 片麻岩								石榴黑云斜长片麻岩					
	Z2966	Z2966	Z2966	Z2966	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963	Z2963
样品号	-32	-44	-52	-53	-29	-32	-38	-51	-3	-8	-11	-11P	-21	-41
Sc	6.75	3.98	23.1	2.41	11.4	15.1	11.2	6.54	10.0	13.8	21.1	22.8	27.5	13.5
V	66.5	52.7	226	56.8	117	133	17.0	64.7	96.2	91.6	186	186	148	129
Cr	199	201	156	300	209	253	276	284	240	341	245	246	279	362
Co	10.5	9.51	28.3	10.0	18.8	22.6	8.68	14.9	13.8	23.6	33.7	33.2	32.1	26.4
Ni	37.1	25.5	40.1	17.0	40.1	44.5	6.68	47.0	31.9	72.1	110	103	105	220
Ga	21.3	18.4	20.0	15.7	23.4	21.6	17.9	20.4	20.3	15.1	21.1	21.1	18.1	20.6
Rb	61.4	38.4	246	39.6	72.7	29.6	31.4	48.8	71.8	23	66.5	67.3	74.2	70.7
Sr	1773	424	334	365	632	685	204	453	233	250	372	376	347	1854
Y	15.3	8.12	14.8	3.72	12.4	18.4	28.0	3.83	12.9	25.5	21.0	21.5	33.3	17.0
Zr	257	108	72.6	441	140	237	257	113	150	171	137	140	168	401
Nb	8.69	2.56	4.79	9.71	6.54	13.9	8.85	5.05	5.25	5.00	8.29	8.30	7.48	13.6
Ba	3940	324	168	139	790	366	318	444	616	182	561	574	298	5104
La	125	10.1	6.48	9.14	36.2	39.3	23.1	11.8	26.6	16.9	13.6	13.9	21.9	106
Ce	225	22.7	16.4	15.7	76.2	93.2	52.9	22.5	47.5	37.2	31.9	32.2	48.1	200
Nd	84.4	12.5	9.44	4.41	37.1	48.7	24.0	8.59	26.3	14.4	17.2	17.7	23.6	84.2
Sm	12.8	2.79	2.45	0.71	6.89	9.19	5.40	1.47	4.83	2.97	4.16	4.13	5.24	13.7
Eu	2.58	0.80	0.71	0.61	1.69	2.15	1.48	0.76	1.14	0.92	1.15	1.16	1.19	3.07
Gd	7.84	2.29	2.35	0.60	4.83	6.73	5.08	1.18	3.53	3.17	3.86	3.98	5.41	9.23
Tb	0.82	0.36	0.42	0.10	0.57	0.85	0.81	0.15	0.47	0.61	0.66	0.68	0.97	0.93
Dy	3.48	1.87	2.73	0.55	2.52	3.96	5.01	0.68	2.39	4.16	3.98	3.98	6.14	4.09
Ho	0.61	0.33	0.61	0.12	0.45	0.72	1.05	0.13	0.45	0.91	0.81	0.82	1.31	0.68
Er	1.55	0.76	1.81	0.36	1.15	1.74	2.91	0.34	1.29	2.62	2.29	2.31	3.50	1.71
Tm	0.21	0.10	0.30	0.06	0.17	0.25	0.44	0.06	0.19	0.39	0.36	0.35	0.51	0.23
Yb	1.28	0.59	2.03	0.46	1.08	1.52	2.77	0.38	1.27	2.59	2.27	2.37	3.19	1.37
Lu	0.20	0.09	0.34	0.08	0.15	0.23	0.43	0.06	0.20	0.39	0.36	0.36	0.49	0.2
Hf	6.62	2.79	1.84	10.9	3.55	5.22	6.59	2.93	3.39	4.19	3.28	3.35	4.03	10.7
Ta	0.52	0.13	0.32	0.72	0.39	0.62	0.47	0.26	0.23	0.26	0.41	0.41	0.30	0.64
Pb	31.4	5.01	3.16	4.71	8.75	4.55	12.6	7.04	14.4	9.75	12.0	12.3	13.6	25.1
Th	23.3	0.16	0.15	0.95	5.54	0.47	2.08	0.46	5.09	2.73	0.61	0.65	2.13	12.4
U	3.46	0.08	0.22	0.87	1.34	0.08	0.33	0.20	0.58	0.38	0.19	0.18	0.29	2.15
ΣREE	512	70.3	86.1	40.4	202	255	171	60.9	139	126	125	128	182	455
Sr/Y	116	52.3	22.6	98.0	51.2	37.2	7.30	118	18.1	9.82	17.8	17.5	10.4	109
(La/Yb) _N	70.1	12.3	2.29	14.4	4.42	5.99	55.3	22.6	15.0	4.67	4.31	4.21	4.94	55.9
δEu	0.79	0.96	0.91	2.83	0.45	0.87	0.84	1.75	0.84	0.92	0.87	0.69	0.89	0.83

注: $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$

表 6 胶北 TTG 片麻岩锆石饱和温度计算结果

Table 6 Zirconium saturation temperatures of the TTG gneisses from the Jiaobei terrane

样品号	SiO ₂ (wt%)	Al ₂ O ₃ (wt%)	Fe ₂ O ₃ ^T (wt%)	MgO (wt%)	CaO (wt%)	Na ₂ O (wt%)	K ₂ O (wt%)	P ₂ O ₅ (wt%)	Zr (×10 ⁻⁶)	T(°C)
Z2965-01	67.33	14.14	4.88	1.81	2.33	4.18	1.99	0.15	176	791
Z2965-02	64.76	14.29	6.23	3.09	3.33	3.32	2.34	0.22	148	766
Z2965-05	62.51	15.91	5.87	2.22	4.19	4.07	1.5	0.15	119	743
Z2965-07	62.36	15.26	6.17	3.41	4.05	4.10	1.84	0.19	121	737
Z2965-08	63.62	15.70	5.27	2.60	4.25	4.02	1.48	0.18	124	746
Z2965-09	63.52	15.77	5.32	2.37	3.34	4.02	2.27	0.19	122	751
Z2965-14	64.32	16.01	4.56	1.99	3.63	4.49	1.72	0.31	171	777
Z2965-16	63.21	14.69	6.61	2.46	4.59	3.94	1.95	0.18	111	721
Z2965-20	62.07	15.82	3.92	2.51	4.75	5.32	2.20	0.24	128	718
Z2965-24	63.45	15.88	3.12	1.90	2.66	4.61	2.68	0.19	120	750
Z2965-26	67.28	16.03	2.27	1.09	2.63	5.94	2.08	0.12	119	743
Z2965-27	66.90	15.78	2.22	1.06	2.43	5.02	3.05	0.13	104	737
Z2965-28	66.00	15.75	2.76	1.47	3.27	5.07	2.73	0.15	112	732
Z2965-29	66.53	16.05	2.65	1.43	3.16	5.21	2.55	0.14	110	734
Z2965-30	66.25	15.90	2.39	1.35	3.25	5.17	2.72	0.15	138	749
Z2965-31	67.23	15.59	2.42	1.20	2.52	5.27	2.51	0.11	182	782
Z2965-32	67.47	15.56	2.29	1.14	3.12	5.32	1.91	0.10	149	762
Z2965-33	65.16	16.07	2.9	1.67	3.33	5.29	2.46	0.16	134	746
Z2965-34	65.79	15.83	2.72	1.63	3.20	4.86	3.06	0.16	133	747
Z2965-35	65.56	15.61	2.61	1.38	2.99	5.12	3.26	0.14	137	745
Z2965-55	65.90	15.44	2.85	1.52	3.6	5.15	2.45	0.15	165	758
Z2966-02	64.46	16.43	3.71	1.82	3.81	5.15	2.42	0.22	133	742
Z2966-07	64.39	16.15	3.26	1.87	3.92	5.07	2.64	0.21	137	740
Z2966-08	64.95	16.47	3.11	1.82	3.54	5.43	2.53	0.18	125	737
Z2966-15	65.76	16.19	3.03	1.69	3.43	5.19	2.61	0.17	126	741
Z2966-20	62.23	15.93	5.97	3.11	4.07	3.61	2.12	0.23	134	754
Z2966-24	63.88	15.55	5.23	2.42	4.32	3.64	1.8	0.15	123	747
Z2966-32	63.11	15.07	3.86	2.51	4.02	3.83	3.66	0.24	287	798
Z2966-37	59.36	17.58	5.98	3.02	4.58	1.51	3.97	0.14	219	808
Z2966-44	67.62	15.5	3.58	1.16	3.59	4.41	1.15	0.12	109	747
Z2966-52	57.93	13.01	7.98	4.26	5.54	2.98	2.42	0.14	61.5	652
Z2963-29	60.65	15.92	6.46	3.61	3.90	2.92	2.39	0.28	149	770
Z2963-33	57.86	14.89	9.54	2.71	7.69	2.61	0.78	0.66	225	754
Z2963-38	68.77	13.67	5.25	1.28	2.95	3.94	1.15	0.18	225	814
Z2963-38P	69.65	13.86	5.31	1.28	2.98	3.97	1.16	0.18	229	816
Z2963-51	67.27	15.24	4.63	1.88	3.97	3.68	1.45	0.11	121	754

CaO 含量较高,除样品 Z2963-3 外,均大于 2%。

在主量元素协变图解中(图 6a-f),Fe₂O₃^T、MgO、CaO 和 TiO₂ 与 SiO₂ 呈现较好的负相关,Na₂O 与 SiO₂ 呈正相关,而 Al₂O₃ 与 SiO₂ 的相关性不明显。

5.2.2 微量元素

石榴黑云斜长片麻岩稀土元素总量为 125 × 10⁻⁶ ~ 455 × 10⁻⁶,与太古宙沉积岩稀土总量(102 × 10⁻⁶)(Taylor and McLennan, 1985)相比,总量较高。轻稀土富集,重稀土亏损,(La/Yb)_N值较高(4.21 ~ 55.9,平均为 14.7),略高于太古宙沉积岩(9 ~ 14)。在球粒陨石标准化稀土配分模式图

(图 7)中,绝大多数样品显示轻稀土富集,重稀土平坦的右倾模式,轻、重稀土分馏程度较太古宙沉积岩强, Eu 无异常或较弱的负异常(δEu = 0.69 ~ 0.92)(图 7、表 5),与太古宙沉积岩相似。

与太古宙沉积岩平均成分(Th = 5.6 × 10⁻⁶ ~ 7.8 × 10⁻⁶, U = 0.4 × 10⁻⁶ ~ 1.0 × 10⁻⁶, Rb = 50 × 10⁻⁶, Rb/Sr = 0.21)相比(图 7),石榴黑云斜长片麻岩的 Th 含量较低(平均为 3.94 × 10⁻⁶), U 含量相近(平均为 0.63 × 10⁻⁶), Rb 含量高(平均为 62.3 × 10⁻⁶), Rb/Sr 比值略低(Rb/Sr = 0.17)。Cr/Zr 比值(0.90 ~ 1.99,平均为 1.62)与 Th/Sc 比值

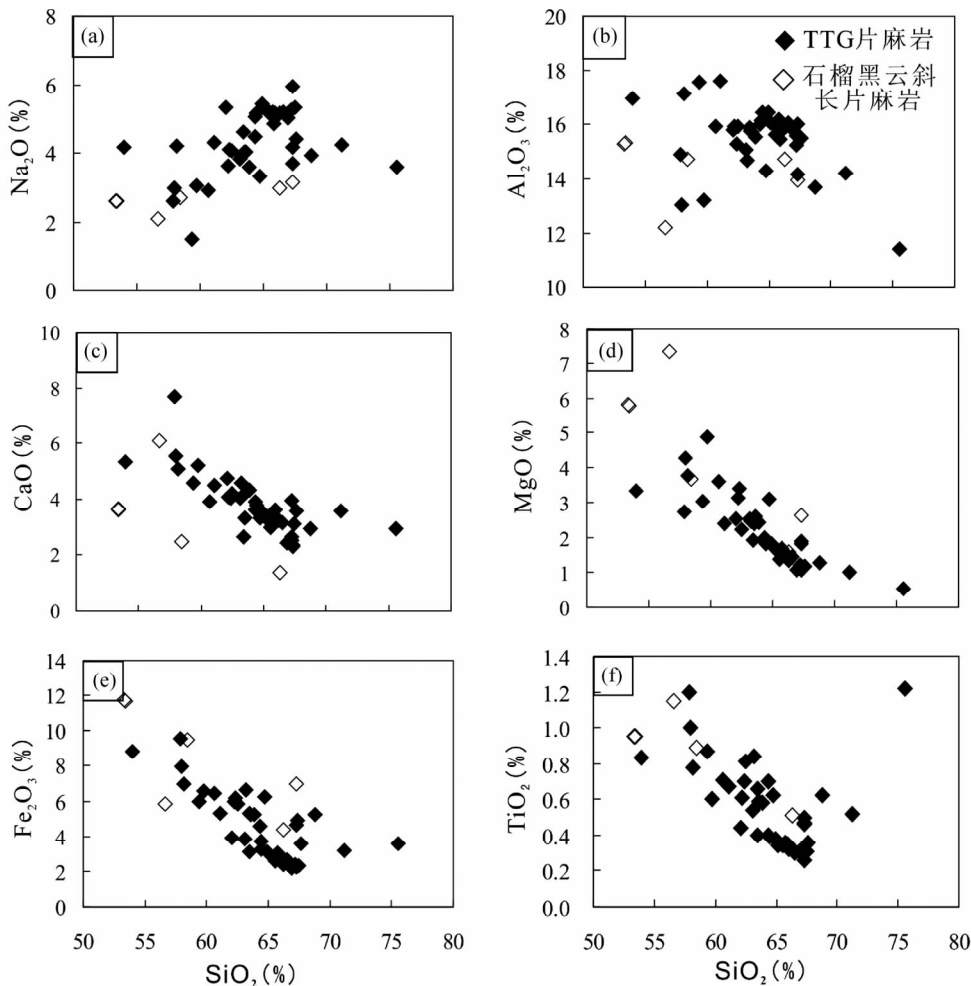


图6 胶北两类片麻岩主量元素与 SiO_2 协变图

Fig.6 Harker diagrams for selected major elements of the gneisses from the Jiaobei terrane

(平均为 0.30)均可以与太古宙上地壳的值(分别为 1.44 和 0.4, Taylor and McLennan, 1985)相比较。

6 讨论

6.1 TTG 片麻岩的岩石成因

对于 TTG 的成因,目前比较接受的观点是含水玄武质岩石的部分熔融,主要有两种观点:一种观点认为 TTG 形成于洋壳俯冲过程中,由消减板片在石榴角闪岩相发生部分熔融形成 (Martin, 1986; Drummond and Defant, 1990; Foley *et al.*, 2001);另一种观点认为 TTG 是在大陆地壳或加厚洋壳底部,由底侵的含水玄武质岩石在榴辉岩相条件下部分熔融形成 (Smithies, 2002; Smithies and Champion, 2000; Rapp *et al.*, 2003)。

6.1.1 残留相

胶北 TTG 片麻岩具有富 Na 贫 K, 负的 Nb、Ta 异常,轻、重稀土强烈分馏,低的 Yb_N 丰度,高的 Sr/Y 比值和低的 Y 丰

度, Eu 无异常或弱的正异常等特征。根据实验岩石学研究,这些地球化学特征都指示了含水玄武质岩石在高压下的部分熔融,角闪石或石榴石作为残留相 (Beard and Lofgren, 1991; Rapp *et al.*, 1991, 2003; Foley *et al.*, 2001, 2003; Moyen and Stevens, 2006)。由于石榴石强烈富集重稀土,而角闪石强烈富集中稀土 (Green *et al.*, 1994)。因此,当石榴石为主要残留相时,熔体表现为 HREE 的强烈亏损,当石榴石和角闪石为主要残留相时, HREE 相对仅有石榴石为残留相时要平坦。斜长石是 TTG 片麻岩中控制 Sr 含量和 Eu 异常的主要矿物相 (Martin, 1987),因此,如果在高压下部分熔融过程中斜长石分解了,那么形成的 TTG 岩浆会有高的 Sr 含量且无负 Eu 异常。胶北 TTG 片麻岩 HREE 分布较平坦,并且 Sr/Y 比值和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值变化较大 (图 9),说明残留相为角闪石与石榴石,并且二者的相对含量在不同样品中有变化。Sr 含量高且无明显的负 Eu 异常,说明没有斜长石残留。Nb、Ta 负异常说明 TTG 源区亏损 HFSE 元素 (图 7),这很大程度上与含 Ti 矿物 (金红石、榍石等) 残留有关 (Xiong *et al.*, 2005, 2009; Xiong, 2006)。以上特征说明,胶北 TTG 片

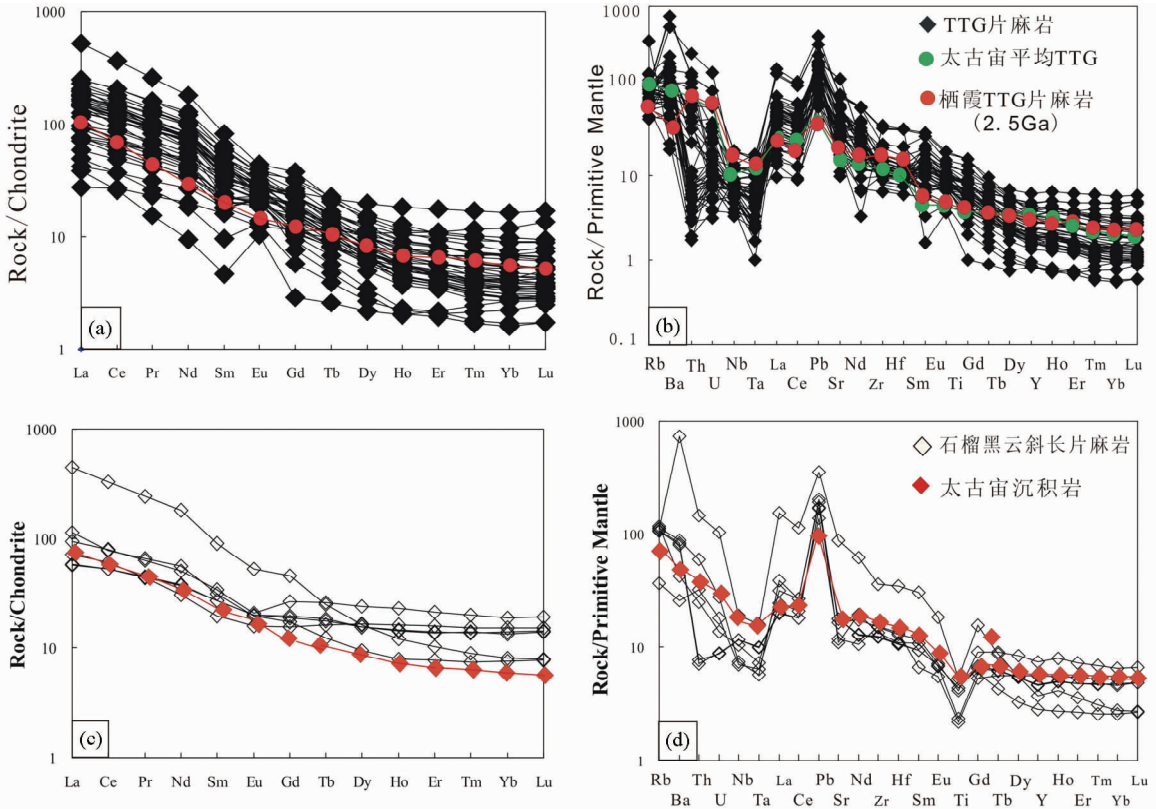


图7 胶北片麻岩原始地幔标准化蛛网图和球粒陨石标准化 REE 配分模式图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989) 太古宙平均 TTG 据 Martin, 1994; 栖霞 TTG 片麻岩(2.5Ga)据 Jahn *et al.*, 2008; 太古宙沉积岩据 Taylor and McLennan, 1985

Fig.7 PM-normalized spidergram and chondrite-normalized REE patterns of the gneisses from the Jiaobei terrane (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

Archean average TTG after Martin, 1994; Qixia TTG gneisses (2.5Ga) after Jahn *et al.*, 2008; Archean sedimentary rocks after Taylor and McLennan, 1985

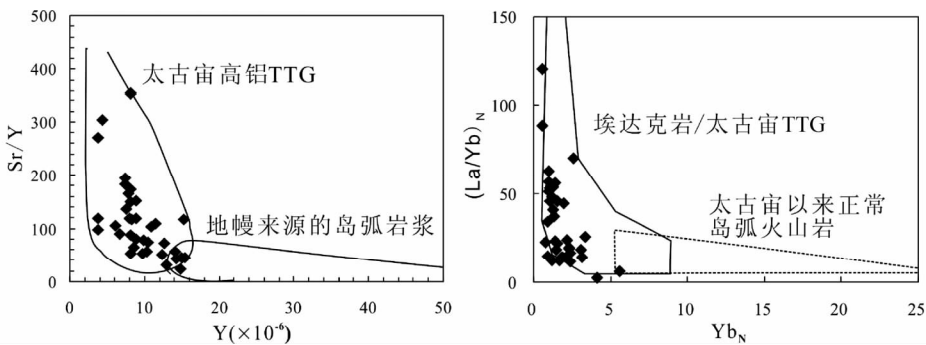


图8 胶北 TTG 片麻岩 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 图解

Fig.8 Sr/Y vs. Y and (La/Yb)_N vs. Yb_N diagrams for TTG gneisses from the Jiaobei terrane

麻岩是含水玄武质岩石高压下部分熔融形成的,残留相主要是石榴石、角闪石(图9)和含 Ti 矿物。石榴石稳定说明压力不低於 0.8Gpa(Wyllie and Wolf, 1993)。

6.1.2 构造环境

俯冲环境下含水玄武质洋壳部分熔融或者是含水的加厚镁铁质地壳部分熔融都可形成 TTG 岩浆。但是,以下岩石

学和地球化学特征表明,胶北 TTG 质岩石更可能是俯冲环境下形成的:(1) Nb、Ta 负异常以及较低的 Fe₂O₃^T、MgO、CaO 含量和 Fe₂O₃^T/(MgO + Fe₂O₃^T) 比值,与形成于岛弧或俯冲环境的岩石成分特征类似(Maniar and Piccoli, 1989)。(2) 实验岩石学资料表明,一般情况下(包括加厚下地壳),含水玄武质岩石部分熔融形成的熔体,其 Mg[#] 值不高(Rapp *et al.*,

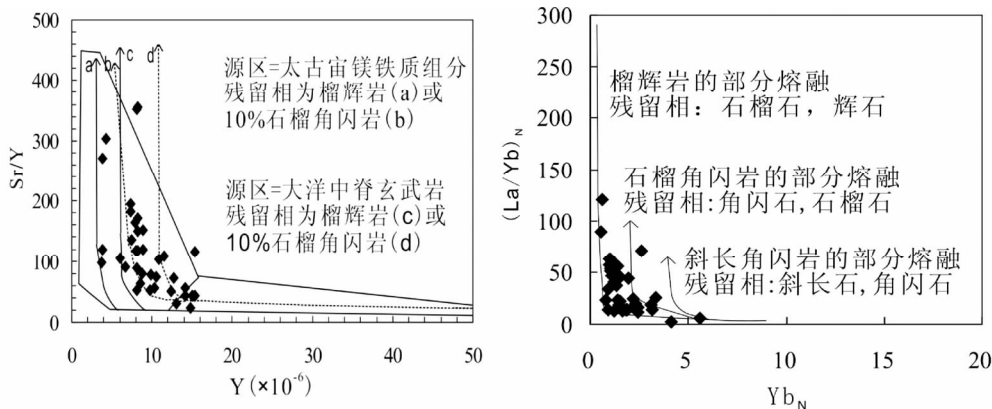


图9 胶北 TTG 片麻岩 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)_N-Yb_N 关系图解(熔融曲线据 Drummond and Defant, 1990; 田伟等, 2005)
Fig.9 Sr/Y-Y and (La/Yb)_N-Yb_N diagrams for TTG gneisses from the Jiaobei terrane (melting curves after Drummond and Defant, 1990; Tian et al., 2005)

1999; Rapp and Watson, 1995), Cr、Ni 含量较低。胶北 TTG 片麻岩表现高的 Mg[#]值(40~67, 表2)和 Cr、Ni 含量(表3), 表明在上升过程中与地幔楔发生反应, 与加厚下地壳部分熔融形成的岩石有明显区别; 而且加厚下地壳部分熔融形成的岩浆应该富钾(Martin, 1987), 但胶北 TTG 明显富钠低钾(表2)。虽然拆沉的下地壳部分熔融产生的熔体同样也可与橄榄岩地幔相互作用形成 TTG (Zegers and van Keken, 2001; Bédard, 2006), 但是这样的机制除形成 TTG 外, 还会形成大量同时代的基性岩浆, 这在胶北地区并未发现。(3) 一般未蚀变洋壳具有典型的地幔氧同位素组成, 由此部分熔融产生的 TTG 质花岗岩能够保持地幔的氧同位素组成特征。胶北新太古代 TTG 片麻岩中的原岩岩浆锆石 δ¹⁸O 值在 5.11‰~5.55‰ 左右(唐俊, 2005), 位于地幔锆石值(5.3±0.3)‰ 范围内, 这表明 TTG 片麻岩很可能是未蚀变的新生洋壳熔融形成的。(4) Nd、Hf 同位素特征和模式年龄计算结果(翟明国和王芳, 2012) 表明, 岩石源区可能是来源于亏损地幔的 2.57~2.64Ga 的初生玄武质地壳。(5) 由锆石饱和温度计得出的胶北 TTG 片麻岩原岩岩浆结晶温度都低于 800℃, 平均为 753℃, 显生宙的地温梯度大约在 7~16℃/km 之间, 太古宙地温梯度约为其 3 倍, 通常取 25℃/km, 则 753℃ 对应的深度大约为 30km, 这个深度即太古宙地壳的平均厚度(张旗和翟明国, 2012), 因此, 胶北 TTG 并非来源于加厚的下地壳。(6) 近来, 李洪奎等(2012) 研究表明, 鲁东新太古代 TTG 是洋壳俯冲环境下形成的。

综上所述, 胶北 TTG 片麻岩更可能是俯冲环境下新生的玄武质洋壳部分熔融形成, 而不是来源于加厚玄武质地壳的部分熔融, 残留相主要是石榴石、角闪石和一些含 Ti 矿物。

6.2 石榴黑云斜长片麻岩的岩石成因

6.2.1 原岩性质

$$“DF = 10.44 - 0.21SiO_2 - 0.32Fe_2O_3^T - 0.98MgO +$$

0.55CaO + 1.46Na₂O + 0.54K₂O”, 是一个可成功判别前寒武纪高级变质岩原岩正副属性的函数(Shaw, 1972)。胶北石榴黑云斜长片麻岩的 DF 值多为负值, 变化范围为 -3.29~0.22(表4), 显示原岩为沉积岩。另外, 根据岩石化学成分计算得到了两种片麻岩的 K 值和 A 值(A = Al₂O₃/(Al₂O₃ + CaO + Na₂O + K₂O), K = K₂O/(Na₂O + K₂O))。在 K-A 关系图中(图10), 石榴黑云斜长片麻岩样品落入泥质-粉砂质沉积岩区, 说明其原岩主要为泥质-粉砂质沉积岩。

碎屑锆石 U-Pb 年代学显示, 石榴黑云斜长片麻岩原岩

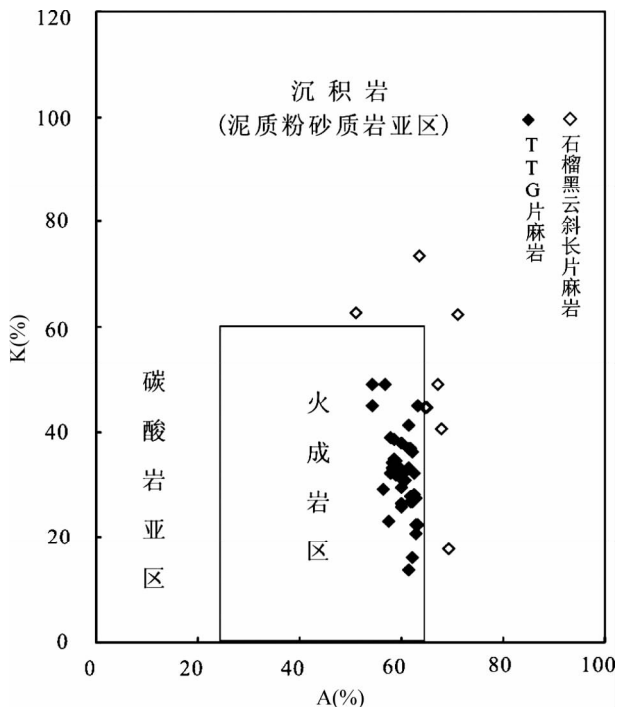


图10 胶北两类片麻岩 K-A 关系图
Fig.10 The K-A diagram for the two types of gneisses from the Jiaobei terrane

表 7 胶北石榴黑云斜长片麻岩稀土元素构造环境判别参数

Table 7 Rare earth element tectonic setting discrimination parameters for the garnet biotite plagiogneiss from the Jiaobei terrane

构造背景	La ($\times 10^{-6}$)	Ce ($\times 10^{-6}$)	Σ REE ($\times 10^{-6}$)	La/Yb	(La/Yb) _N	LREE/ HREE	δ Eu
石榴黑云斜长片麻岩	33.1	66.1	193	20.6	14.7	3.3	0.84
大洋岛弧	8 ± 1.7	19 ± 3.7	58 ± 10	4.2 ± 1.3	2.8 ± 0.9	3.8 ± 0.9	1.04 ± 0.11
大陆岛弧	27 ± 4.5	59 ± 8.2	146 ± 20	11.0 ± 3.6	7.5 ± 2.5	7.7 ± 1.7	0.79 ± 0.13
活动大陆边缘	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.60
被动大陆边缘	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56

注:不同构造背景沉积岩数据来自 Bhatia and Crook (1986)

年龄为 ~2.5Ga (翟明国, 未发表数据), 与本文中的 TTG 片麻岩大致属于同一时代。

6.2.2 源区特征及构造环境

虽然在变质作用过程中, 大离子亲石元素 (如 Sr、K、Rb 和 Ba 等) 和主量元素属于活动性元素, 其含量会出现明显变化 (Becker *et al.*, 2000), 但是重稀土元素、高场强元素 (如 Zr、Ti、Hf、Y 和 Nb) 和过渡族元素 (如 Cr、Ni、V) 的性质较稳定, 在变质过程中含量基本不变, 能较好地反映原岩的性质和源区特征 (王中刚等, 1989; Polat *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2004)。因此, 本文重点运用这些稳定元素而不是主量元素和其他微量元素以尽可能避免后期作用的影响, 试图反映胶北石榴黑云斜长片麻岩的源区特征, 进而对其原岩形成的构造背景进行制约。

石榴黑云斜长片麻岩的稀土配分型式 (包括 (La/Yb)_N 及 Eu/Eu*) 与太古宙沉积岩 (上地壳) 十分相似 (图 7), 反映源区平均组分为花岗岩质岩石。因为 Cr 和 Zr 元素主要反映铬铁矿和锆石的含量, 所以其比值可以反映镁铁质与长英质物质对沉积物的相对贡献 (Wronkiewicz and Condie, 1989)。石榴黑云斜长片麻岩的 Cr/Zr 比值 (0.90 ~ 1.99, 平均为 1.62) 与太古宙 Cr/Zr 比值相近 (1.44), 说明源区物质以长英质为主。另外, Taylor and McLennan (1985) 研究表明 Th/Sc 比值最适合于用来判别物源区性质。石榴黑云斜长片麻岩样品的 Th/Sc 比值呈现大的变化 (0.03 ~ 0.92), 但平均值 (0.30) 与晚太古代上地壳 Th/Sc 比值相当 (平均为 0.4, Taylor and McLennan, 1985), 同样表明源区物质以长英质为主。

胶北石榴黑云斜长片麻岩的总稀土含量平均为 176×10^{-6} , (La/Yb)_N 比值平均为 14.7, LREE/HREE 平均为 3.3, δ Eu 平均为 0.84, 这些特征值都与岛弧或主动大陆边缘沉积特点相符, 而与被动大陆边缘有所区别 (表 7, Bhatia and Crook, 1986)。另外, 有学者对胶北变沉积岩的研究表明, 其原岩形成的大地构造背景为岛弧或主动大陆边缘 (Zhou *et al.*, 2008; 宋明春, 2008)。

综上所述, 胶北石榴黑云斜长片麻岩的源区物质以长英质为主, 原岩形成的大地构造背景为岛弧或主动大陆边缘。

6.2.3 变质过程

如前所述, 胶北石榴黑云斜长片麻岩中的石榴石与基质中的黑云母平衡共生, Grt-Bi 地质温度计所估算的变质温度

集中于 549 ~ 663°C 之间, 处于低-中角闪岩相范围。

据翟淳 (1989) 对我国桐柏地区不同变质相中黑云母成分的研究, 麻粒岩相中黑云母含 TiO₂ 达 5% ~ 7%, MgO 达 13% ~ 16%, FeO 仅 11% ~ 16%; 角闪岩相中者平均含 TiO₂ 为 2.16%, MgO 为 9.57%, FeO 为 17.13%; 而绿片岩相中黑云母的 TiO₂、MgO 和 FeO 含量分别为 1.45%、8.38% 和 16.65% 左右。本区黑云母与角闪岩相中黑云母成分类似, 表明其变质条件与角闪岩相当。

胶北变沉积岩 (即本文的石榴黑云斜长片麻岩) 普遍遭受了 ~2.5Ga 麻粒岩相-高角闪岩相的区域变质作用 (安郁宏, 1990; 宋明春, 2008), 靳是琴等 (1987) 根据 Hb-Pl 温度计得知, 之后其又经历了不均匀的角闪岩相退变质作用, 与本文由 Grt-Bi 地质温度计和黑云母电子探针分析所得的变质温度基本吻合。因此, 胶北石榴黑云斜长片麻岩的变质矿物组合可能记录了 ~2.5Ga 区域变质作用退变质阶段的变质历史。

6.3 地质意义

翟明国和王芳 (2012) 研究表明, 胶北 TTG 片麻岩锆石 U-Pb 年龄为 ~2.5Ga, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值, 锆石 Hf 同位素模式年龄主要分布于 2.6 ~ 2.8Ga 之间; 绝大多数样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值, 在 2.6 ~ 3.3 之间, t_{DM1} 为 2.57 ~ 2.64Ga, 与锆石 U-Pb 年龄相近。因此, Hf 和 Nd 同位素以及地球化学特征共同指示, 虽伴有少量的地壳重熔与再造, 胶北地区 2.5Ga 的 TTG 岩浆作用总体表现为一次重要的陆壳水平生长。综合前人对华北克拉通不同构造部位、同时代 TTG 片麻岩的地球化学、锆石 U-Pb 年龄以及同位素研究结果 (杨崇辉等, 2004; 陈斌等, 2006; 周艳艳等, 2009; Liu *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2011) 可知, 这一时期华北克拉通与俯冲有关的 TTG 岩浆作用广泛而强烈, 指示 ~2.5Ga 有一期陆壳水平增生事件在华北克拉通广泛存在。

一方面, 石榴黑云斜长片麻岩原岩与 TTG 属同一时代 (~2.5Ga) 的产物, 形成的构造背景类似 (岛弧或主动大陆边缘), 推测该区当时可能有俯冲过程发生。另一方面, 年代学研究显示, 胶北晚太古代末变质事件与 TTG 岩浆事件分别集中于 2504 ~ 2513 Ma 和 2544 ~ 2564 Ma (刘建辉等, 2011)。这表明, 该区 TTG 岩浆事件和变质事件大体同时, 但变质事

件较岩浆事件晚约 40 ~ 50 Myr, 即麻粒岩相-高角闪岩相的区域变质作用是在 TTG 岩浆侵位后不久发生的, 很可能与俯冲后的碰撞有关。

因此, 我们提出如下假定模型: 研究区在 ~2.5 Ga 可能发生过一次重要的俯冲-碰撞拼合事件: TTG 和石榴黑云斜长片麻岩原岩形成于俯冲阶段, 后期发生碰撞引发麻粒岩相-高角闪岩相的区域变质作用, 石榴黑云斜长片麻岩的变质矿物组合记录了该区域变质作用退变质阶段的变质历史。

7 结论

本文选择胶北金矿深钻中的两类片麻岩为研究对象, 进行了系统的岩相学、矿物学、全岩主、微量元素测试, 着重分析了其岩石成因及地质意义, 主要获得以下 4 点结论:

(1) 两类片麻岩主要由 TTG 质片麻岩和石榴黑云斜长片麻岩组成。其中, TTG 片麻岩是一套高铝的 TTG 质片麻岩套, 石榴黑云斜长片麻岩为变沉积岩。

(2) 胶北 TTG 片麻岩是新生的玄武质洋壳部分熔融形成, 残留相主要是石榴石、角闪石和含 Ti 矿物。高的 Mg[#] 值和 Cr、Ni 含量, 代表其与地幔楔发生了反应, 结合 Nb、Ta 负异常以及源区为初生的玄武质地壳等特征, 说明研究区 TTG 可能形成于与俯冲有关的岛弧环境, 而非加厚的下地壳。

(3) 石榴黑云斜长片麻岩原岩是泥质-粉砂质沉积岩, 形成的大地构造背景为岛弧环境或主动大陆边缘; 源区物质以长英质为主; Grt-Bi 地质温度计得到的变质温度 (549 ~ 663 °C) 及其中黑云母成分均与角闪岩相特征类似。

(4) 研究区在 ~2.5 Ga 可能发生过一次重要的俯冲-碰撞拼合事件。TTG 和石榴黑云斜长片麻岩原岩形成于俯冲阶段, 后期发生碰撞引发麻粒岩相-高角闪岩相的区域变质作用, 石榴黑云斜长片麻岩的变质矿物组合记录了该区域变质作用退变质阶段的变质历史。

致谢 论文写作过程中得到周艳艳博士、祝禧艳博士和彭澎研究员的帮助; 周喜文研究员、彭头平博士、王伟博士对本文进行了评审并提出宝贵意见; 谨此一并致谢。

References

An YH. 1990. A new division of the metamorphosed strata in the Jiaodong region; An account on the newly delimited Jiaodong Group and Jingshan Group. *Geology of Shandong*, 6(1): 97 - 103 (in Chinese with English abstract)

Barker F and Arth JG. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemites-basalt suites. *Geology*, 4: 596 - 600

Beard JS and Lofgren GE. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb. *Journal of Petrology*, 32(2): 365 - 401

Becker H, Jochum KP and Carlson RW. 2000. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure

terranes and the implications for element fluxes in subduction zones. *Chemical Geology*, 163(1-4): 65 - 99

Bédard JH. 2006. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(5): 1188 - 1214

Bhatia MR and Crook KAW. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181 - 193

Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. 1991. *Regional Geology of Shandong Province*. Beijing: Geological Publishing House, 6 - 524 (in Chinese)

Chen B, Liu SW, Geng YS and Liu CQ. 2006. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and significance of the Late Archean-Paleoproterozoic granitoids from the Wutai-Luliang terrain, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 296 - 304 (in Chinese with English abstract)

Condie KC. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 80(1-4): 33 - 44

Diwu CR, Sun Y, Guo AL, Wang HL and Liu XM. 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga; Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 20(1): 149 - 170

Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 95(B13): 21503 - 21521

Foley SF, Tiepolo M and Vannucci R. 2001. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417(6891): 837 - 840

Foley SF, Buhre S and Jacob DE. 2003. Evolution of the Archaean crust by delamination and shallow subduction. *Nature*, 421(6920): 249 - 252

Green NL, Green NL, Defant MJ and Drummond MS. 1994. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc: Comments and Reply. *Geology*, 22(2): 187 - 190

Holdaway MJ. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist*, 85: 881 - 892

Jahn BM, Glikson AY, Peucat JJ and Hickman AH. 1981. REE geochemistry and isotopic data of Archaean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, Western Australia: Implications for the early crustal evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45(9): 1633 - 1652

Jahn BM, Liu DY, Wan YS, Song B and Wu JS. 2008. Archaean 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

Jin SQ, Li DC, Li XZ and Liu FL. 1987. The metamorphic characteristics of granulite facies rocks in the Laixi-Pingdu area in eastern Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, (3): 240 - 252 (in Chinese with English abstract)

King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371 - 391

Li HK, Geng K, Zhuo CY, Liang TT and Chen L. 2012. Evolution and continental crust growth of Early Precambrian granitoids in eastern Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 28(4): 8 - 14 (in Chinese with English abstract)

Liu F, Guo JH, Lu XP and Diwu CR. 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. *Chinese Sci. Bull.*, 54(24): 4704 - 4713

Liu JH, Liu FL, Liu PH, Wang F and Ding ZJ. 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 JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH and Wang F. 2012. The zircon Hf isotopes characteristics of ~2.5Ga magmatic event, and implication for the crustal evolution in the Jiaobei terrane, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2697–2704 (in Chinese with English abstract)
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu CH, Yang H, Liu PH, Wang F and Meng E. 2013. 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. *Precambrian Research*, 224: 287–303
- Liu Y, Liu XM, Hu RH, Diwu CR, Yuan HL and Gao S. 2007. Evaluation of accuracy and long-term stability of determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1203–1210 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN. 1998. Geochronology and Sm-Nd isotopic geochemistry of Precambrian crystalline basement in eastern Shandong Province. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 275–283 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Martin H. 1986. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14(9): 753–756
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archean trondhjemites, tonalites, and granodiorites from Eastern Finland; Major and trace element geochemistry. *Journal of Petrology*, 28(5): 921–953
- Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust. In: Condie KC (ed.). *Archean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 205–259
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529–532
- Moyen JF and Stevens G. 2006. Experimental constraints on TTG petrogenesis; Implications for Archean geodynamics. In: Benn K, Mareschal JC and Condie KC (eds.). *Archean Geodynamics and Environments*, Geophysical Monograph Series. Washington: American Geophysical Union, 164: 149–178
- Polat A, Hofmann AW and Rosing MT. 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7–3.8Ga Isua greenstone belt, West Greenland: Geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth. *Chemical Geology*, 184(3): 231–254
- Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51(1–4): 1–25
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32kbar; Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356
- Rapp RP, Shimizu N and Norman MD. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425(6958): 605–609
- Shaw DW. 1972. The origin of the Apsley gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Science*, (9): 18–35
- Smithies RH and Champion DC. 2000. The Archean high-Mg diorite suite: Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for Early Archean crustal growth. *Journal of Petrology*, 41(12): 1653–1671
- Smithies RH. 2002. Archean boninite-like rocks in an intracratonic setting. *Earth and Planetary Science Letters*, 197(1–2): 19–34
- Song MC. 2008. Tectonic framework and tectonic evolution of Shandong Province. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English summary)
- Song MC, Xu JX and Wang PC. 2009. Tectonic Framework and Tectonic Evolution of the Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–272 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WE. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Zha XP and Zhou JB. 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotopes of metamorphic rocks in the western part of the Shandong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1063–1086 (in Chinese with English abstract)
- Tang J. 2005. An isotope geochemical study of metamorphic rocks in the Shandong Peninsula. Ph. D. Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China (in Chinese with English summary)
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Gong B and Liu XM. 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
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1–312
- Tian W, Liu SW, Liu CH, Yu SQ, Li QC and Wang YR. 2005. The zircon SHRIMP geochronology and geochemistry: Geology implications of TTG in Sushui Complex, Zhongtiao Shan. *Progress in Nature Science*, 15(12): 1476–1484 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZG, Yu XY and Zhao ZH. 1989. *Rare Earth Element Geochemistry*. Beijing: Science Press, 133–289 (in Chinese)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magmas types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304
- Wronkiewicz DJ and Condie KC. 1989. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa; Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(7): 1537–1549
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zeng YF. 2007. Discussion on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Wyllie PJ and Wolf MB. 1993. Amphibolite-dehydration melting: Sorting out the solidus. In: Pritchard HM, Alabaster T, Harris N and Neary CR (eds.). *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geological Society London Special Publications, 76: 405–416
- Xie HQ, Wan YS, Wang SJ, Liu DY, Xie SW, Liu SJ, Dong CY and Ma MZ. 2013. Geology and zircon dating of trondhjemitic gneiss and amphibolite in the Tangezhuang area, eastern Shandong. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 619–629 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3–4): 339–359
- Xiong XL. 2006. Trace element evidence for growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite. *Geology*, 34(11): 945–948
- Xiong XL, Keppler H, Audetat A, Gudfinnsson G, Sun WD, Song MS, Xiao WS and Li Y. 2009. Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis. *American Mineralogist*, 94(8–9): 1175–1186
- Xu Y, Feng Y and Li RH. 2011. Main progresses in the study of Precambrian basement of Jiaobei terrane, eastern China. *Geoscience*, 25(5): 965–974 (in Chinese with English abstract)
- Yang CH, Du LL, Wan YS and Liu ZX. 2004. SHRIMP zircon U-Pb chronology of tonalitic gneiss in Banqiaogou area, Pingshan County, Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 10(4):

- 514–522 (in Chinese with English abstract)
- Zegers TE and van Keken PE. 2001. Middle Archean continent formation by crustal delamination. *Geology*, 29(12): 1083–1086
- Zhai C. 1989. *Tongbo Block Geology*. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press (in Chinese)
- Zhai MG, Cong BL, Guo JH, Liu WJ, Li YC and Wang QC. 2000. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication. *Lithos*, 52(1–4): 23–33
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of the Neo-Archean and its breakup during Late Paleoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl.): 219–232
- Zhang Q and Zhai MG. 2012. What is the Archean TTG? *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3446–3456 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Song ZY, Zhang SF and Chi SX. 1994. Suggestions on the stratigraphic division and correlation of the Precambrian rocks in the eastern Shandong region. *Geology of Shandong*, 10(Suppl.): 14–27 (in Chinese)
- Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B, Li L and Zhao ZF. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4145–4165
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zheng CQ, Jin W, Zhang ZX and Cheng H. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications. *Precambrian Research*, 160(3–4): 323–340
- Zhou XW, Wei CJ, Dong YS and Lu LZ. 2003. Characteristics and genetic implications of diffusion zoning in garnet from Al-rich rock series of the Jingshan Group in north Jiaodong. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 752–760 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YY, Zhao TP, Wang LW, Wang SY and Gao JF. 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneisses in the Songshan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 331–347 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 安郁宏. 1990. 胶东地区变质地层新划分-新厘定胶东群、荆山群介绍. *山东地质*, 6(1): 97–103
- 陈斌, 刘树文, 耿元生, 刘超群. 2006. 吕梁-五台地区晚太古宙-古元古代花岗岩类岩石锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. *岩石学报*, 22(2): 296–304
- 靳是琴, 李殿超, 李宪洲, 刘福来. 1987. 胶东莱西-平度一带麻粒岩相岩石的变质作用特征. *地质学报*, (3): 240–252
- 李洪奎, 耿科, 嵇传源, 梁太涛, 陈莉. 2012. 鲁东地区早前寒武纪花岗岩类演化及大陆地壳生长. *山东国土资源*, 28(4): 8–14
- 刘建辉, 刘福来, 刘平华, 王舫, 丁正江. 2011. 胶北早前寒武纪变质基底多期岩浆变质热事件: 来自 TTG 片麻岩和花岗岩片麻岩中锆石 U-Pb 定年的证据. *岩石学报*, 27(4): 943–960
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 刘平华, 王舫, 游君君. 2012. 胶北 ~2.5Ga 岩浆事件的锆石 Hf 同位素特征及其对地壳演化的指示意义. *岩石学报*, 28(9): 2697–2704
- 刘晔, 柳小明, 胡兆初, 第五春荣, 袁洪林, 高山. 2007. ICP-MS 测定地质样品中 37 个元素的准确性和长期稳定性分析. *岩石学报*, 23(5): 1203–1210
- 陆松年. 1998. 鲁东前寒武纪结晶基底的年代学及 Sm-Nd 同位素地球化学. *地质学前沿*, 5(4): 275–283
- 山东省地质矿产局. 1991. *山东省区域地质志*. 北京: 地质出版社, 6–524
- 宋明春. 2008. *山东省大地构造格局和地质构造演化*. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 宋明春, 徐军祥, 王沛成. 2009. *山东省大地构造格局和地质构造演化*. 北京: 地质出版社, 1–272
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 查向平, 周建波. 2004. 胶东地块西部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究. *岩石学报*, 20(5): 1063–1086
- 唐俊. 2005. *胶东地块变质岩同位素地球化学研究*. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学
- 田伟, 刘树文, 刘超辉, 余盛强, 李秋根, 王月然. 2005. 中条山涑水杂岩中 TTG 系列岩石的锆石 SHRIMP 年代学和地球化学及其地质意义. *自然科学进展*, 15(12): 1476–1484
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. *稀土元素地球化学*. 北京: 科学出版社, 133–289
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238
- 颀颀强, 万渝生, 王世进, 刘敦一, 谢士稳, 刘守偈, 董春艳, 马铭株. 2013. 胶东谭格庄地区奥长花岗岩质片麻岩和斜长角闪岩的野外地质和锆石 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 29(2): 619–629
- 徐扬, 冯岩, 李日辉. 2011. 胶北地块前寒武纪基底研究新进展. *现代地质*, 25(5): 965–974
- 杨崇辉, 杜利林, 万渝生, 刘增校. 2004. 河北平山英云闪长质片麻岩锆石 SHRIMP 年代学. *高校地质学报*, 10(4): 514–522
- 翟淳. 1989. *桐柏块体地质*. 成都: 成都科技大学出版社
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通晚太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. *中国科学(D 辑)*, 30(增刊): 129–137
- 张旗, 翟明国. 2012. 太古宙 TTG 岩石是什么含义? *岩石学报*, 28(11): 3446–3456
- 张增奇, 宋志勇, 张淑芳, 迟守祥. 1994. 鲁东前寒武纪岩石地层清理意见. *山东地质*, 10(增刊): 14–27
- 周喜文, 魏春景, 董永胜, 卢良兆. 2003. 胶北荆山群富铝岩系石榴石扩散环带特征及其成因指示意义. *岩石学报*, 19(4): 752–760
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑峰. 2009. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. *岩石学报*, 25(2): 331–347