

朝鲜半岛与华北地质之对比研究:进展与问题*

翟明国^{1,2}

ZHAI MingGuo^{1,2}

1. 中国科学院矿产资源重点实验室,中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

2. 大陆动力学国家重点实验室,西北大学,西安 710069

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

2016-06-10 收稿, 2016-08-24 改回.

Zhai MG. 2016. Comparative study of geology in North China and Korean Peninsula: Research advances and key issues. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10):2915–2932

Abstract In terms of geological and tectonic evolution, the Korea Peninsula (KP) has long been thought to be strongly tied with the mainland of China, with the North China Craton (NCC) and KP collectively termed as the Sino-Korea Craton, although such correlation suffered from the absence of relevant geological information and data in North Korea. This paper introduces our study of comparative study of geology in North China and Korean Peninsula, including Precambrian basements, Paleozoic basins, orogenic belts and Mesozoic magmatism. Main summary and conclusions are as follows. (1) The KP comprises three major Precambrian massifs i. e., Rangrim, Gyeonggi, and Yongnam massifs. The Rangrim and Gyeonggi massifs are separated by the Imjingang Fold Belt, while the Gyeonggi and Yongnam massifs are separated by the Ogcheon Fold Belt; (2) The basements of the three massifs are correlated to the NCC; (3) Two main Paleozoic basins within the Rangnim massif and within the Gyeonggi and Yongnam massifs are the Phyongnam basin and Taebaeksan basin that have a similar Paleozoic tectono-stratigraphy to the NCC; (4) Although, at present, the nature and tectonic significance of the Imjingang and Ogcheon belts remain controversial, these two structural belts do not show characteristics and natures of collisional orogenic belt; (5) The eclogite-bearing Hongseong Complex (HSC) is located in the southwestern part of the Gyeonggi massif and has been separated from the Gyeonggi complex. The eclogitic rocks are commonly associated with serpentinites, and occur as lenses in granitic gneiss. An eclogite sample yielded a metamorphic age of ~230Ma and another protolith age of ~880Ma. Its hosting granitic gneiss yielded an age of ca. 820Ma. All these age records indicate that the Sulu Belt extends to the KP. However, no evidence supports the HSC as a tectonic zone cuts across the KP. A crustal detachment-thrust model envisages that the collisional suture between the North China Block (NCB) and South China Block (SCB) was along the Western Marginal Fault Zone of the KP; (6) Mesozoic igneous rocks are widespread throughout the northern and southern parts of the KP. Triassic magmatism is related to Indosinian orogeny. Jurassic and Cretaceous igneous rocks are different from those in the NCC on ages and spatial-temporal distribution. Late Cretaceous volcanic rocks are located only in the Gyeongsang basin in the southeastern corner of KP. This paper also suggests several key and controversial academic issues that are worth to study in the future.

Key words North China craton; Korea Peninsula; Comparative geologic study; Orogenic belts; Sedimentary basins

摘要 华北与朝鲜半岛山水相连,传统上称为中朝克拉通或中朝地块。但是中朝的地质对比研究并不深入。作者所在的研究组有幸同时与南北朝鲜半岛双方展开了合作研究达十年以上,内容涉及到前寒武纪基底、古生代沉积盆地、造山带演化、以及中生代岩浆活动。本文是对我们最新研究成果的一个简要总结,并提出一些仍未解决的或具争议的相关地质问题,希望以此能推动中朝地质和东北亚地质的研究。研究结果总结如下:(1)朝鲜半岛可划分为三个陆块,从北到南分别为狼林、京畿和岭南陆块,分别被临津江和沃川构造带分割;(2)三个陆块的前寒武纪基底虽有差别,但本文认为它们是相似的,并可与华北克拉通基底对比;(3)狼林地块的平南古生代盆地以及位于京畿陆块和岭南陆块之间的太白山古生代盆地与华北古生

* 本文受国家自然科学基金项目(41530208)和重大国际合作项目(41210003)联合资助。

第一作者简介:翟明国,1947年生,研究员,前寒武纪地质学专业,E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

代盆地可对比;(4)临津江和沃川构造带的演化还有待深入研究,它们并不具有陆陆碰撞造山带的特征;(5)在京畿陆块西南部发现了含榴辉岩的三叠纪变质杂岩(洪城杂岩),其变质时代和岩石组合都可以和苏鲁造山带对比,不含超高压变质矿物。这表明苏鲁造山带东延到朝鲜半岛,并在半岛的京畿陆块西南缘登陆。但是洪城杂岩出露有限,没有穿越切割半岛的证据,因此可能沿半岛西部断裂局部分布或在半岛西缘尖灭,其空间分布需进一步研究;(6)中生代岩浆岩在朝鲜半岛广泛存在,三叠纪岩浆作用可能与印支期造山作用有关;侏罗纪和白垩纪的岩浆岩分布与华北在时代和空间分布上有所差别,晚白垩世岩浆岩在朝鲜半岛集中出露于庆尚盆地。本文还在最后一部分,提出了朝鲜半岛以及中朝对比研究中有争议的和尚需进一步研究的关键问题。

关键词 华北克拉通;朝鲜半岛;地质对比;造山带;沉积盆地

中图法分类号 P544

朝鲜半岛不仅与华北山水相依,而且在地质上密切联系。中朝地质对比研究不仅对中国很关键,而且对于理解东亚地质演化也至关重要。我们有幸与朝鲜半岛双方建立了长达10~20年之久的合作研究,考察了朝鲜半岛大部分地区,积累了很多数据。虽然许多问题有待于继续研究,一些军事管制地区还缺乏考察和资料,但目前可对一些重要地质问题发表见解,以促进研究的深入。

本文在第一节简单介绍朝鲜半岛的地质构造单元划分,在第二节至第六节将对以下几个关键的地质问题进行讨论,它们是:(1)前寒武纪基底对比,以及朝鲜半岛全部或是部分在早前寒武纪是与华北属于同一古老陆块;(2)朝鲜半岛的古生代盆地;(3)朝鲜半岛两个著名的古生代构造带的性质;(4)三叠纪榴辉岩相变质杂岩以及苏鲁造山带如何延至朝鲜半岛;(5)朝鲜半岛的中生代岩浆作用,包括与华北的对比,以及对东北亚中生代构造演化的指示意义。本文的第七节是很重要的,将把目前对朝鲜半岛有争议的主要问题以及对将来研究的建议方向予以介绍和讨论。

1 朝鲜半岛构造单元

北、南朝鲜地质学家对朝鲜半岛的构造单元划分基本一致(Lee, 1987; Paek *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2007)。朝鲜半岛传统上划分为三个陆块,从北到南分别为狼林、京畿和岭南陆块,分别被临津江和沃川构造带分割(图1)。三个陆块都具有前寒武纪基底,其上发育古生代沉积盆地。平南古生代盆地位于狼林地块的南部,其北部和西部可见不整合或假整合于新元古代地层之上,南部与临津江构造带接触。太白山盆地位于京畿陆块南缘和岭南陆块北缘,其寒武系底部为砂岩或含砾砂岩,与元古界地层为不整合或假整合,部分地段由于后期构造改造接触关系不清。

构造单元划分重要的边界断裂是临津江和沃川两个构造带。在联系到苏鲁造山带在朝鲜半岛的表现和印支期碰撞造山作用后,虽然有不同模式,它们被分别认为是代表朝鲜半岛上华北与扬子陆块碰撞的缝合带。近年来对这两个构造带的岩石组合、变质作用、岩浆作用、构造变形以及同位素年代学研究已有不少数据积累。岩浆作用和变质作用年代学研究结果表明,这两个构造带显然与印支期造山事件相

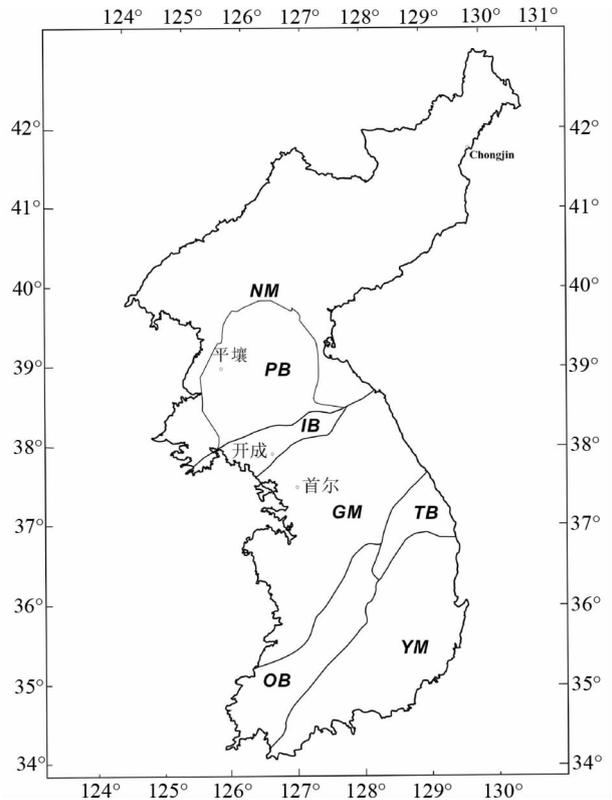


图1 朝鲜半岛构造格架(据 Lee *et al.*, 2007)

NM-狼林陆块;GM-京畿陆块;YM-岭南陆块;IB-临津江构造带;OB-沃川构造带;PB-平南盆地;TB-太白山盆地

Fig. 1 Tectonic outline of Korea Peninsula (after Lee *et al.*, 2007)

NM-Rangnim massif; GM-Gyeonggi massif; YM-Yeongnam massif; IB-Imjingang Belt; OB-Ogcheon Belt; PB-Pyeongnam basin; TB-Taebaeksan basin

关,但仍与典型碰撞造山带的特征存在较大差别。譬如,这两个构造带均没有横穿朝鲜半岛,它们向东延伸分别终止于太古宙杂岩体和古生代盆地。本文将在后面对此现象做简要讨论。

2 前寒武纪基底

朝鲜半岛和华北克拉通前寒武纪基底具有相同的地质

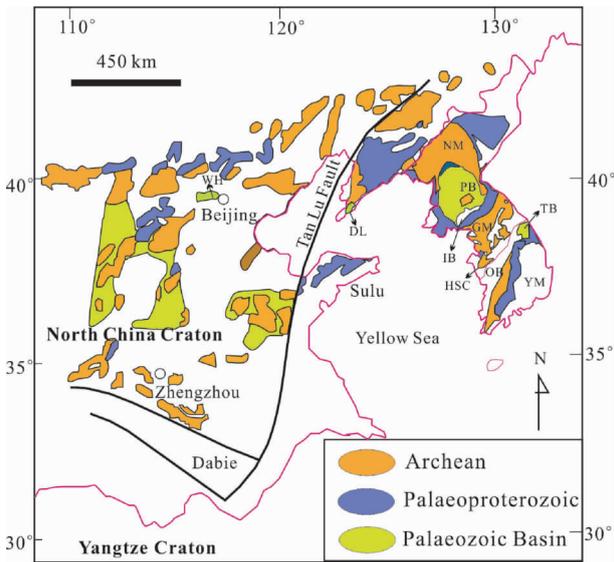


图2 华北克拉通东部与朝鲜半岛构造单元示意图

IB-临津江带; OB-沃川带; NM-狼林地块; GM-京畿地块; YM-岭南地块; PB-平南盆地; TB-太白山盆地; WH-西山盆地; DL-大连盆地; HC-洪城杂岩

Fig. 2 General map of Sino-Korea craton

IB-Imjingang Belt; OB-Ogcheon Belt; NM-Rangnim massif; GM-Gyeonggi massif; YM-Yeongnam massif; PB-Pyeongnam Basin; TB-Taebaeksan Basin; WH-Western Hill Basin; DL-Dalian Basin; HC-Hongseong Complex

演化历史(图2)。许多出版物将朝鲜半岛三个地块的底的麻粒岩相-角闪岩相高级变质岩对应于东北地区的鞍山群和辽河群或华北地区的迁西群和红旗营子群(张文佑, 1986; 钱祥麟, 1986; Lee, 1987; Paek, 1996)。也有一些研究认为狼林地块和岭南地块相当于华北克拉通, 而中部的京畿地块对应于扬子陆块(Yin and Nie, 1993), 或者认为狼林与京畿地块相当与华北克拉通, 而岭南相当于扬子陆块的意见(Oh, 2006)。

2.1 狼林地块

狼林地块位于鸭绿江以南和临津江带以北, 太古宙岩石分为冠冒杂岩(Kwanmo)和狼林(Rangnim)杂岩(Choe, 2005)。冠冒杂岩(Kwanmo)杂岩由茂山(Mushan)群表壳岩和花岗片麻岩组成, 具有绿岩带特点。茂山(Mushan)群表壳岩包括条带状铁建造(鞍山式)、云母片岩或片麻岩、绿片岩或斜长角闪岩, 变质程度为低角闪岩相-角闪岩相, 局部麻粒岩相, 同位素年龄在2700~2500Ma之间。条带状铁矿的围岩多为斜长角闪岩和细粒黑云变粒岩(片麻岩), 并被古元古代的斜长角闪岩墙侵入。在检德地区, 被认为是摩天岭群基底的冠冒杂岩, 其中有大的含条带状铁建造的岩片。TTG类片麻岩具有英云闪长岩和奥长花岗岩的岩石学和地球化学特征, 锆石U-Pb年龄是2.56Ga并经历了~2.52Ga和1.85Ga的变质(Kim *et al.*, 2008)。侵入片麻岩和条带状铁

矿的斜长角闪岩墙的锆石年龄为~1.83Ga。片麻岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是-16.9~+3.1, 模式年龄是2.84~3.73Ga; 角闪岩墙的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是-5.2~+5.2, 模式年龄是2.05~2.44Ga。这些都指示在此期片麻岩形成之前, 该区曾有更古老的地壳存在(Zhang *et al.*, 2016)。清津地区银德洞发育的变质深成侵入杂岩, 包括石英闪长岩、花岗闪长岩和钾长花岗岩。3个代表性样品的SIMS锆石U-Pb同位素年龄指示银德洞变质杂岩形成于2.54~2.52Ga, 并经历了~2.48Ga的变质热事件, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为(-1.7~+10.5)(张晓晖等, 2016)。

狼林杂岩是麻粒岩相-高级角闪岩相变质, 由英云闪长质-花岗质片麻岩组成, 含少量表壳岩。后者主要是云母石英岩、堇青石片麻岩和辉石片麻岩。采自Huichon的堇青石片麻岩有2580~2500Ma的Sm-Nd和锆石U-Pb年龄; 正片麻岩有~3000Ma、2800~2700Ma和~2500Ma的同位素年龄, 并普遍有1930~1840Ma的变质年龄(Paek, 1996; Zhao *et al.*, 2006)。出露在狼林地块南缘的片麻岩有2521~2567Ma的锆石U-Pb年龄, 经历了古元古代1.87~1.89Ga的构造热事件改造, 表现为原始岩浆锆石不同程度的铅丢失以及变质锆石的形成(赵磊等, 2016a)。古元古代的甄山(Jung-san)杂岩主要出露于狼林地块的南部, 并作为平南盆地和临津江带的基底岩石。其中的表壳岩是孔兹岩系, 以富铝片麻岩和石墨片麻岩为主, 正片麻岩有花岗岩和紫苏花岗岩。夕线石片麻岩的锆石年龄主要在约2160~1850Ma(Paek, 1996; Choe, 2005), 与华北克拉通的古元古代高级变质沉积岩(孔兹岩系)以及石榴石基性麻粒岩特征相同。对含石墨片麻岩的甄山群的石榴云母片麻岩和石榴角闪岩的锆石-榍石-金红石U-Pb体系年代学研究, 说明甄山群在~1850Ma前发生高级变质, 1850~1830Ma开始抬升出露, 并成为中新元古界沉积岩物源与沉积基底(李秋立等, 2016)。变质表壳岩系多经历了变质深熔作用和混合演化。甄山群变质深熔和石榴石生长的时代为1841~1830Ma, 1785Ma可能代表深熔作用中抽取的熔体冷却的时代。南浦群岩石在1917Ma可能经历了第一期变质作用, 在1877~1855Ma经历了第二期变质深熔和石榴石持续生长, 熔体冷却结晶时代为1842Ma(赵磊等, 2016b)。由于国防安全的需要, 狼林地块北部的早前寒武纪岩石出露区不允许进行地质考察, 为准确厘定狼林杂岩的地壳性质与形成时代, 选择大同江、清川江、城川江、厚昌江和秃鲁江中的河沙样品作为研究对象(吴福元等, 2016)。分析结果显示, 狼林杂岩主要由18~19亿年的古元古代岩石组成, 太古宙岩石比例极为有限。但锆石Hf同位素模式年龄集中在28~29亿年, 与华北克拉通全岩样品的Nd同位素模式年龄一致, 推测狼林杂岩是与辽吉岩系基本类似的古元古代地体。但狼林地块南部和东部出露的晚太古代片麻岩, 似乎表明太古宙岩石所占的比例可能比河砂研究估计的要大(赵磊等, 2016a)。

摩天岭群是发育在狼林地块的厚层古元古代沉积岩系,

主要呈北西-南东带状展布于狼林地块东部,自下而上包括三个岩石地层单元,即由大理岩、片岩和角闪岩互层组成的城津统、以厚层碳酸岩为主的北大川统和以陆源碎屑岩组合为主的南大川统(Paek and Ju, 1996)。因为有巨大规模的铅锌矿而著名。采自南大川统的两个变质沉积岩中碎屑锆石的SIMS U-Pb定年结果显示,最年轻的岩浆成因锆石年龄分别为约1961Ma和2184Ma,说明摩天岭群南大川统的沉积时代应该不早于1.96Ga。样品的锆石年龄谱记录了两个主要年龄峰值,即2.48~2.58Ga和1.96~2.22Ga,此外尚有一些2.78~3.30Ga的古老年龄,指示其物质源区主要为同区古元古代地质体和临近地体上的太古宙变质基底。区域对比表明,摩天岭群与中国境内辽吉活动带中的辽河群及集安群/老岭群具有基本一致的碎屑锆石年龄谱,说明它们不仅是同一时代的产物,而且分享类似的物质源区(廖鑫等, 2016)。

妙香山奥长花岗岩和华北的密云-承德的非造山岩浆岩可能有成因联系(Paek and Rim, 2005; Choe, 2005; Zhai *et al.*, 2005)。岩体有1909~1870Ma K-Ar和Rb-Sr年龄(Paek, 1996)和1860Ma的锆石SHRIMP U-Pb年龄(Zhai *et al.*, 2007a)。彭澎等(2016b)将这些岩浆岩可以分为三类,分别为似斑状花岗岩系列(多为I型,以妙香山岩体为代表,年龄1895~1839Ma)、S型花岗岩系列(以嘉山岩体为代表,锆石U-Pb年龄~1862Ma)和正长岩系列(以龙浦岩体为代表,锆石U-Pb年龄~1857Ma)。定州-铁山地区与稀土矿密切相关的碱性岩(粗粒正长岩和霓辉石萤石正长岩)和花岗岩(似斑状花岗岩),SIMS锆石U-Pb定年结果,粗粒正长岩的岩浆结晶年龄为1865±6Ma,霓辉石萤石正长岩的岩浆结晶年龄为1868±8Ma,铁山地区的4件似斑状花岗岩的年龄结果分别为1871±13Ma、1866±8Ma、1872±6Ma和1873±7Ma(金正男等, 2016)。这种稀土矿化在华北没有报道,是需要注意的。

元古代祥原(Sangwon)系和岫岷(Kuhyon)系表壳岩,是未变质和浅变质的沉积岩,多认为是与华北长城-蓟县-青白口系可以对比的建造(Paek, 1996, 2005; Choe, 2005)。已有的研究表明,狼林地块的新元古代地层似乎更为发育,物源与华北克拉通东部中-新元古代裂谷沉积岩类似。在中-新元古代地层识别出~900Ma的岩系(Peng *et al.*, 2011),与华北克拉通的大石桥岩墙群时代相似。

2.2 京畿地块

京畿地块位于临津江和沃川带之间。早前寒武纪岩石可分为京畿杂岩和西山(Sosan)表壳岩(lee, 1987; Paek, 1996; Lee and Cho, 1995; Sagong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006)。京畿杂岩包括花岗岩和英云闪长质片麻岩、条带状片麻岩、镁铁质麻粒岩和角闪岩、条带状铁建造等。正片麻岩的同位素年龄可分为>2900Ma、ca. 2800~2700Ma和~2600~2500Ma三组,还有少量3000~3700Ma的数据。含铁石英岩和条带状建造主要出露于中部,并经历了混合岩

化。此外还有被称为上京畿杂岩的富铝片麻岩-石墨片麻岩等沉积岩,与紫苏花岗岩和少量的石榴辉石麻粒岩和石榴角闪岩共生。这些岩石与狼林地块的甄山(Jungsan)杂岩十分相似(Choe, 2005)。它们有2300~2100Ma和2000~1800Ma的同位素年龄(Lee *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2001; Sagong *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2003)。

Sagong群是一套含石英片岩和云母片岩的低级变质的表壳岩上覆于京畿杂岩之上(Lee and Cho, 1995; Sagong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006),与狼林地块的中-新元古代祥原(Sangwon)和岫岷(Kuhyon)沉积岩系相当(Lee, 1987; Paek, 1996, 2005; Choe, 2005)。

Zhai *et al.* (2005)识别出京畿地块中部原来被称为正长岩的岩体是奥长环斑花岗岩,它侵入含铁建造的正片麻岩中,SHRIMP U-Pb锆石年龄是1839±10Ma,与妙香山奥长环斑花岗岩年龄基本相同。

2.3 岭南地块

岭南地块前寒武纪岩石分为小白山(Sobaekson)杂岩和太白山(Taebaeksan)群(或率里Yulri或湖南Honam群),经历了多期变质作用(Lee, 1987; Paek, 1996)。小白山(Sobaekson)杂岩包括条带状片麻岩、斑状花岗岩片麻岩、混合片麻岩和花岗岩,有2900~2700Ma、2590~2470Ma和1910~1830Ma的同位素年龄(Sagong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006)。太白山(Taebaeksan)群由互层的变质沉积岩(孔兹岩)组成,原岩是泥质岩、泥沙质岩,变质达麻粒岩相,典型的矿物组合是夕线石(Sill)+堇青石(Cord)+石榴石(Grt)+石英(Qtz)+/-斜长石(Plg)+/-钾长石(Kf)。有浅色花岗岩侵入变质沉积岩中,前者的Pb-Pb等时线年龄是1862Ma,Sm-Nd等时线年龄1926Ma(Kim and Cho, 2003)。最近获得的新的研究资料表明,变质泥质岩有明确的约1920Ma和约1850Ma的变质年龄,泥质岩具有强烈的部分熔融,形成古元古代花岗岩(Li, 待发表)。

含钛铁矿的斜长岩出露在岭南地块的西南部,围岩是孔兹岩系,局部被紫苏花岗岩和花岗岩脉侵入。斜长岩的全岩-石榴石斜长石的Sm-Nd等时线年龄是1792±90Ma(Park *et al.*, 2001)。 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在-3.9±0.2, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值为0.70616~0.70619,指示了一个富集的地幔源区。紫苏花岗岩的Sm-Nd全岩-矿物等时线年龄是1827±32Ma和1820±20Ma。

2.4 基底变质岩的对比

朝鲜半岛三个地块基底具有相似的变质-岩浆岩组合,包括太古宙-早元古代基底变质岩石岩、中元古代非造山岩浆岩、中-新元古代裂谷盆地沉积。两次最重要的构造事件分别发生在~2500Ma和1900~1850Ma,与华北克拉通前寒武纪主要地质事件完全相同(赵宗溥, 1993; Zhao *et al.*, 2002; Zhai and Liu, 2003; Sagong *et al.*, 2003; Oh, 2006;

Kim *et al.*, 2006)。Sm-Nd 和 Hf 同位素研究表明,朝鲜半岛三个地块和华北克拉通地壳的主要生长期在 2800 ~ 2600Ma,峰期为 2800Ma 左右。1900 ~ 1800Ma 期间经历了强变质作用。只有沃川带变质岩显示了 1000 ~ 800Ma 的地质事件(Zhai *et al.*, 2007b),对其不同的地质解释已在前文表述。

3 临津江构造带和沃川构造带

对临津江带和沃川带的性质和构造意义一直存在不同认识。

3.1 临津江构造带

临津江构造带是由北朝鲜地质学家建立的,确定其位于狼林地块和京畿地块之间(Ri and Ri, 1990, 1994)。该构造带表现为一个大致东西走向的冲断带,内部岩石主要是古生代临津江群沉积岩,据早先报道含泥盆纪化石,厚度 >2000m。它的南、东和西侧均为前寒武纪基底变质岩,北侧是平南盆地,沉积寒武系-奥陶系地层。临津江群与相邻的岩石单元之间多为构造接触,局部表现出强烈糜棱岩化。临津江群主要是页岩、泥灰岩和灰岩,部分经受了变形和低级变质作用。变质度从北向南呈递增趋势,可分为未变质、绢云母、红柱石、十字石和蓝晶石带,属于中低压变质相系(图 3a, Zhai *et al.*, 2007b)。Ree *et al.* (1996) 提出,伏于临津江群沉积地层之下的 Samgot 杂岩也属于临津江群。Samgot 杂

岩含有斜长角闪岩和含石榴石的角闪岩。估算的变质温度压力是 8 ~ 13kb 和 630 ~ 790℃。全岩的 Sm-Nd 等时线年龄以及矿物的内部 Sm-Nd 等时线年龄是 1897 ~ 1742Ma,并显示了 820Ma 和 250Ma 的年龄记录。SHRIMP U-Pb 锆石年龄是 824 ± 123Ma、861 ± 7Ma 和 249 ± 31Ma (Lee and Cho, 1995; Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2001),似乎表明角闪岩是新元古代的岩石并在二叠-三叠纪经受了变质作用(图 3b)。这些数据成为某些研究者推测临津江带与苏鲁造山带相连的主要证据。

Paek and Rim (2005)通过对临津江带详细野外观察,认为临津江带具有下列重要特征:(1)临津江群为陆相沉积,顶部发育少量玄武岩;(2)临津江带南、北两侧前寒武纪基底是相同的,皆为含孔兹岩的古元古代麻粒岩相-高角闪岩相岩石以及岫岷系沉积岩;(3)临津江带是一个泥盆纪-早石炭纪的裂谷盆地。盆地规模有限,没有横穿朝鲜半岛,仅发育于平南盆地的西南侧。我们联合朝鲜科学家重新取样,没有再发现泥盆纪化石。其东是前寒武纪岩石和中生代花岗岩。因此,狼林地块南部和京畿地块北部具有统一的前寒武纪基底。有关临津江构造带的争议还将在下文论及。

3.2 沃川构造带

沃川带位于京畿地块和岭南地块之间,是一个北东走向的岩浆-褶皱带。湖南剪切带(HSZ)的几条断层被考虑为临津江带的南北边界(Cluzel, 1992)。但是该剪切带的年龄为侏罗纪-白垩纪,右旋剪切变形与大宝(Daebo)事件有关(Chough *et al.*, 2000)。沃川带实际上包括了几个不同时代的盆地和中生代花岗岩。Fitches and Zhu (2006) 和李忠等(2009)提出太白山盆地毫无争议的是华北型古生代盆地。然而,野外观察显示,湖南断层并不是太白盆地的边界,后者变形非常弱。盆地的寒武纪地层在北部和南部分别不整合于京畿地块基底和岭南地块基底之上(Kim *et al.*, 2001; Lee and Lee, 2003)。因此,太白盆地很可能不属于沃川带的岩石单元。

沃川带内时代不明的变质岩是角闪岩-绿片岩相,其中还有少量含铁石英呈透镜体或岩片的方式产出,推测为新太古代岩石的残片(Fitches and Zhu, 2006)。据 Koh and Cho (2006) 报道,带内大多数时代不明的变质岩可能为侏罗系的变质岩。几个规模小的寒武纪或二叠纪灰岩岩片在沃川带中部和南部被识别,可能属于太白山盆地的岩石(Lee and Lee, 2003)。

沃川群是指一套新元古代浅变质的岩石,分布范围不大,主要岩石为碎屑岩、泥质岩、钙质岩和基性-长英质岩石。泥质岩构成沃川群的主体,包括页岩、千枚岩和云母片岩(Lee, 1987)。基性和长英质岩石是火山岩以及浅部就位的侵入岩,地球化学上显示双峰式特点,推测形成于大陆裂谷环境(Cluzel, 1992; Lee and Chang, 1996; Park *et al.*, 2003)。一个变质角斑岩锆石 U-Pb 的上交点年龄为 755.8 ±

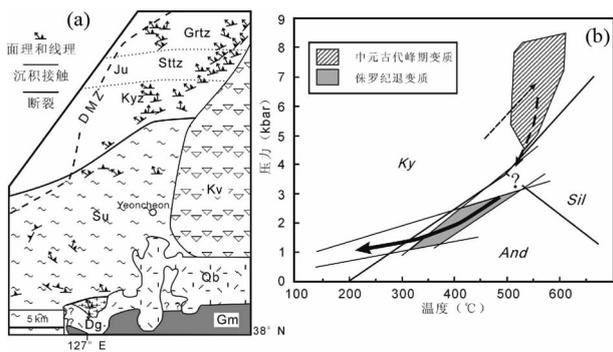


图 3 临津江带铁原地区变质岩分带示意图(a)和沃川带变质 P-T 图(b) (据 Ree *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1998; Oh *et al.*, 2004a, b; 翟明国等, 2007)

Grtz-石榴石带;Sttz-十字石带;Ju-Jingok 杂岩;Kyz-蓝晶石带;Kv-白垩纪凝灰岩;Su-Samgot 杂岩;Qb-第四纪玄武岩;Dg-变形花岗岩;Gm-京畿地块片麻岩

Fig. 3 Simplified map showing the metamorphic zone in Tiejueyuan Area in Injinggang Belt (a) and diagram of P-T conditions for metamorphic rocks in Ogcheon Belt (b) (after Ree *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1998; Oh *et al.*, 2004a, b; Zhai *et al.*, 2007)

1.3Ma (Lee *et al.*, 1998), 长英质凝灰岩锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄是 747Ma (Cho *et al.*, 2004)。还有几个 250~300Ma 的 Sm-Nd、Pb-Pb 和 CHIME 的年龄数据不精确, 意义尚不明确。沃川带构造比较复杂, 很可能由几个 NE 向推覆体叠置在一起 (Cluzel, 1992; Kim, 1996; Fitches and Zhu, 2006)。Oh (2006) 提出沃川带可能与南华裂谷相当, 随后的古生代事件可与华南和日本造山带相关联。沃川带内还发育一个早三叠纪的裂谷盆地 (Hwanggangri), 应该从以浅变质岩代表的沃川盆地分离出来。Chang and Park (2005) 通过盆地分析, 认为该盆地由含砾泥质岩开始, 充填了 (~750Ma?) 元古代沉积物, 其形成和发展可能与俯冲或碰撞构造过程无关。

值得提出的是, 对沃川带和太白山盆地的界限的划定存在不同意见。多数研究者认为, 在“原来沃川构造带的东段, 许多地层应属于太白山盆地而不属于沃川带”。因此, 沃川带并没有横穿朝鲜半岛。太白山盆地出露的范围如图 1 所示 (Lee *et al.*, 2007), 在横跨朝鲜半岛的方向上, 至少占据三分之一。沃川带与太白山盆地的接触关系仍不清楚, 需要进一步查明。然而, 沃川带大宝期 (侏罗纪) 断裂在太白山盆地也发育。

3.3 与秦岭-大别山-苏鲁造山带的对比

上述论证表明, 临津江带和沃川带与秦岭-大别山-苏鲁造山带无论在变质作用与岩石组合上都难以对比。临津江群中-低压变质岩石指示是正常厚度的地壳被抬升到地表, 并没有经历陆壳俯冲和碰撞引起的高级变质作用。另外, 临津江带的 Samgot 杂岩有 1900~1700Ma、~800Ma 和 ~250Ma 的年龄显示。Lee *et al.* (2003) 还报道, Samgot 杂岩附近的

碱性花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 ~740Ma, 附近还有三叠纪花岗岩。显然, 还需更多工作来确定这些资料的地质意义。沃川带经历了中生代强烈构造作用的改造。Chang (1996) 提出沃川盆地是一个元古代裂谷, 其时代和沉积特征与朝鲜北部临津江元古宙裂谷盆地沉积序列的上部相当 (Paek, 1996; Ri and Om, 1993)。Oh *et al.* (2004b) 提出不同意见, 认为新元古代浅变质沃川群相当于南华裂谷沉积。Fitches and Zhu (2006) 则提出沃川群在时代上对应于本溪群, 但岩石组合存在较大差别。Koh and Cho (2006) 提出三叠纪 Hwanggangri 盆地是一个拉伸盆地, 而 Chang (2000) 和 Chang and Park (2001, 2005) 则认为该盆地是通过黄海之下的转换断层从扬子陆块上推过来的裂谷盆地。因此, 临津江和沃川带都有待于继续深入研究, 特别是临津江和沃川构造带皆没有横穿朝鲜半岛这些地质事实及其大地构造意义值得重点探索。

4 古生代盆地

朝鲜半岛存在两个古生代盆地, 分别是北部的平南盆地和中部的太白山盆地。主要由下古生界 (寒武系-中奥陶统) 和上古生界 (中-晚石炭统-早三叠统) 组成, 之间有大大于 100Myr 的沉积间断 (Lee and Lee, 2003)。

4.1 下古生界

太白山盆地和平南盆地下古生界分别是 Joseon 超群和 Hwangju 超群, 主要为碳酸盐岩以及硅质碎屑岩, 并且两个超群的沉积层序非常相似。Joseon 超群被湖南剪切带 (HSZ) 分隔成东西两部分, 称为 Duwibong 和 Yeongweol 单元 (图 4,

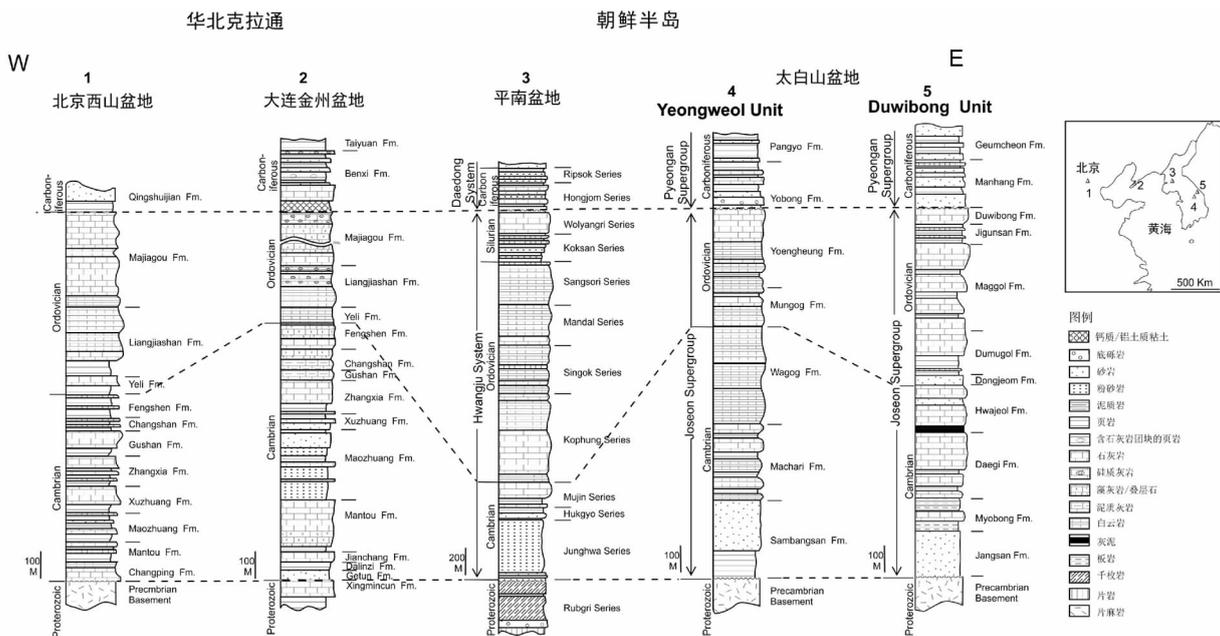


图 4 平南盆地和太白山盆地古生代地层与华北西山盆地和大连盆地对比图

Fig. 4 Stratigraphic correlation of columnar sections in the NCB (Western Hill, Dalian)

Cheong, 1969; Lee, 1987; Zhai *et al.*, 2007b)。

Duwibong 单元不整合在变质基底之上, 是一套厚 ~100m 的砂岩和页岩。中寒武统主要是块状灰岩, 夹鲕状灰岩和白云质灰岩。晚寒武世地层是灰岩、页岩和细粒砂岩。下-中奥陶统包括砂岩、砂质灰岩, 以及混合硅质碎屑岩和碳酸盐沉积, 厚层碳酸盐岩 (Lee and Kim, 1992; Ryu *et al.*, 2002)。最顶部层是黑灰色块状到生物碎屑和鲕状灰岩、泥质岩及钙质页岩, 指示碳酸盐缓坡环境 (Lee *et al.*, 2001)。

Yeongweol 单元中寒武统下部是紫色-绿色细砂岩、页岩、块状和薄层状细粒砂岩; 上部是泥质灰岩、生物碎屑灰岩、角砾灰岩和白云岩, 沉积于大陆斜坡 (Chung and Lee, 2001)。早奥陶纪沉积岩以碳酸盐岩为主, 有少量泥质岩和泥灰岩。中奥陶统下部为块状和薄层白云岩, 上部是灰岩。

平南盆地 Hwangju 超群在南部不整合于中-新元古代 Sangwon 和 Kuhyon 系之上, 在北部和东部不整合于早前寒武纪基底变质岩系之上。Hwangju 超群可分为六个群, 四个为寒武系, 二个为奥陶系, 沉积岩组合与 Yeongweol 和 Dunwibong Uni 单元相同 (Lee and Lee, 2003)。

4.2 上古生界

值得注意的是, 华北克拉通与朝鲜半岛的古生界都缺失志留系、泥盆系以及下石炭统。在太白山盆地和平南盆地, 中石炭统皆不整合或假整合于中奥陶世地层上。

朝鲜半岛上古生界(中石炭统-下三叠统)称为 Pyeongan 超群(或 Daedong 超群)。太白山盆地 Pyeongan 超群厚度达 1700m; 在平南盆地, 该地层厚度大于 1600m。Pyeongan 超群主要由砂岩、页岩及少量角砾岩、煤系和灰岩组成。上石炭统与上覆二叠-三叠系非海相厚层砂-页岩连续沉积。煤系主要发育于晚石炭世-二叠系中, 在平南盆地和太白山盆地中都形成大煤田。晚石炭世 Ripsok 组主要为薄煤层、页岩、粉砂岩与灰岩互层。下二叠统 Sadong 组含三层煤系, 它们与页岩、粉砂岩和中-粗-细粒砂岩构成三个沉积旋回 (Paek, 1996; Lee and Lee, 2003)。

4.3 与华北古生代沉积盆地的对比

作者曾对朝鲜半岛古生代盆地与辽东半岛的大连盆地以及北京的西山盆地做了详细对比研究 (Chen and Li, 2005; Zhai *et al.*, 2007b)。平南盆地和太白山盆地的 Yeongweol 单元、Duwibong 单元、大连盆地和西山盆地 5 个古生代沉积柱状剖面的沉积学、地层学、同位素地球化学和各时代地层之间的接触关系中都是可以对比的 (Lee and Lee, 2003; Jeong and Lee, 2004; Kim *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2004; Chen and Li, 2005)。地层序列的可对比性指示它们具有相同古生代构造-沉积演化历史。太白山盆地寒武系中碎屑锆石 LA-ICP-MS 年龄分布在 1800 ~ 2800Ma, 以 1800 ~ 2000Ma、2100 ~ 2300Ma 和 2400 ~ 2500Ma 更为集中 (图 5, 李忠等, 2009), 明显与华北寒武纪沉积岩的源区相当。研究认为, 太

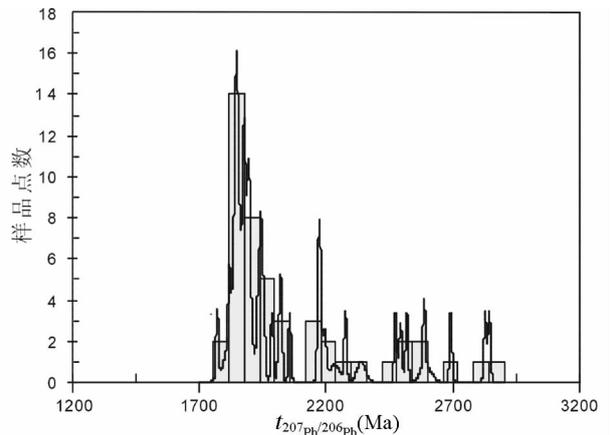


图 5 太白山盆地寒武系砂岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS 年龄分布图

Fig. 5 Stratigraphic correlation of columnar sections in the NCB and Korea Peninsula (Western Hill basin, Dalian basin, Pyeongnam basin, Taebaeksan basin)

白山盆地与京畿、岭南两个地块均发育大约 1850Ma 的构造热事件, 缺乏华南典型的新元古代构造热事件。对太白山盆地沉积供应体系和古地理分布的研究进一步反映, 太白山盆地与岭南地块之间存在密切的碎屑物源和构造属性联系, 其构造热事件记录与华北克拉通对比。另外, 在太白山盆地的南、北侧, 寒武纪地层皆不整合在基底片麻岩 (狼林陆块的 Taebaeksan 岩群和京畿陆块的京畿岩群) 之上, 这就使得我们很难把朝鲜南部两个陆块划归为亲扬子的陆块。李忠等 (2016) 通过对地层结构、相序、碎屑锆石年龄组成、物源分析和聚煤记录的综合分析, 提出朝鲜半岛与华北应属于统一的构造单元, 即“中-朝地块”。换言之, 朝鲜半岛与华北在晚古生代之前是一个陆块。

5 高压变质与苏鲁造山带的东延

苏鲁造山带是否延入朝鲜半岛是世界瞩目的一个重要地质问题 (Hsü *et al.*, 1990; Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Metcalfe, 2006)。在我们与韩国科学家进行合作研究之前, 对此问题存在两种意见: (1) 苏鲁造山带没有延入朝鲜半岛 (Lan *et al.*, 1995; Lee and Lee, 2003; Jeong and Lee, 2004), 它可能沿朝鲜半岛西缘的黄海向南绕过济洲岛 (Chang and Park, 2001, 2005; 郝天珧等, 2002; Hao *et al.*, 2007; Ishiwatari and Tsujimori, 2003), 然后到日本方向。(2) 苏鲁造山带沿临津江带或沃川带, 或者沿上述两个带延入朝鲜半岛 (Yin and Nie, 1993; Lee and Cho, 1995; Ree *et al.*, 2001; Sagong *et al.*, 2003; Cho *et al.*, 2004)。

5.1 榴辉岩与洪城杂岩

在朝鲜中部京畿陆块的西南角发现了榴辉岩, 由此识别出一个可能与苏鲁造山带的岩石组合类似的洪城杂岩 (Guo

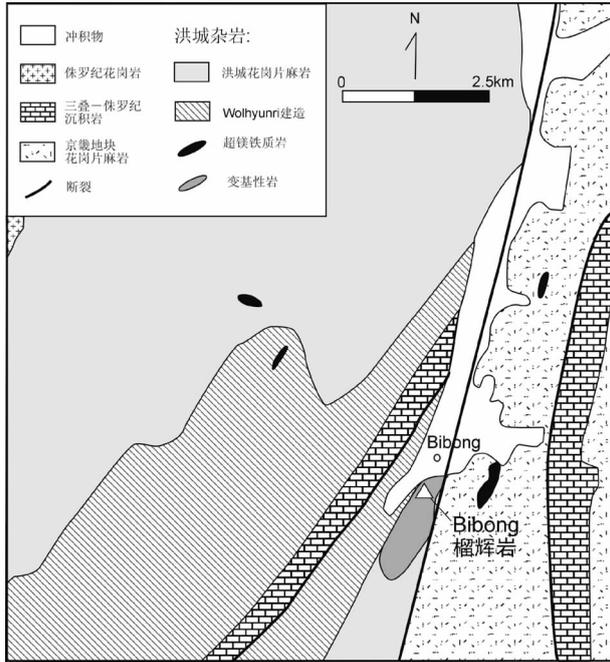


图6 洪城 Hongseong 杂岩地质简图

Fig. 6 Sketch map of the Hongseong area

et al., 2004; 郭敬辉等, 2005; Kim *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2004a, b, 2005; Zhai and Guo, 2005)。榴辉岩或退变成石榴麻粒岩/角闪岩成透镜体与蛇纹岩一起出露于花岗岩片麻岩中。

洪城杂岩(HC)位于京畿地块的西南角(图6)。传统上这些岩石被认为是晚太古代-古元古代的京畿变质杂岩(Lee, 1987; Paek, 1996)。一个主要的NNE向的断层穿过飞凤(Bibong),并将该区分隔成东西两部分,这两部分显示出在岩石组合、变质作用以及同位素年代学的重要差异。

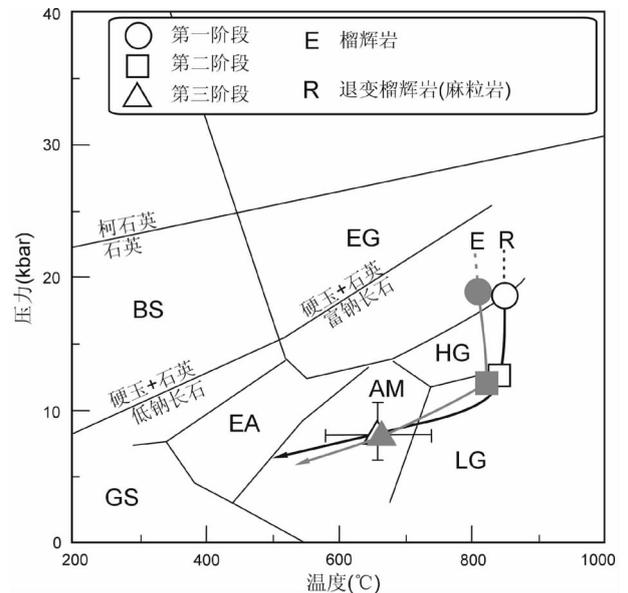
东部由花岗岩片麻岩和富铝的片麻岩组成的,变质程度达麻粒岩相。花岗岩片麻岩中可以见到紫苏辉石。富铝的片麻岩是孔兹岩系(Zhai *et al.*, 2007a),它们的主要变质矿物组合为:夕线石(Sil) + 石英(Qtz) + 斜长石(Plg) ± 钾长石(Kf) + 黑云母(Bi) ± 石墨。锆石U-Pb常规曲线的上交点年龄是1863 ± 9Ma,被解释为峰期变质年龄,并与华北克拉通同类岩石的年代相同(Kim *et al.*, 2006)。SHRIMP锆石U-Pb年代学测定,花岗岩片麻岩和富铝片麻岩都获得了1900 ~ 1800Ma和2600 ~ 2400Ma两组年龄。

西部主要由花岗岩片麻岩、变质沉积岩(Wolhyunr群)、以及变质的基性岩和超镁铁岩(蛇纹岩)的透镜体组成。Wolhyunr群包括黑云母片岩、斜长角闪岩和薄层大理岩。变质的基性岩和超镁铁岩(蛇纹岩)的透镜体与花岗岩片麻岩之间是构造接触,接触部位可见薄的但很强的韧性变形带。变基性岩主要是石榴麻粒岩,经常退变为角闪岩。超镁铁岩是强蛇纹岩化的方辉橄榄岩。花岗岩片麻岩SHRIMP锆石U-Pb测定,得到核部812 ± 14Ma和822 ± 17Ma的年龄,边部

~235Ma的年龄(Cho *et al.*, 2001)。

飞凤(Bibong)石榴麻粒岩石榴石包体中发现残留的绿辉石,主要由石榴石、单斜辉石、斜长石、角闪石和金红石组成。石榴石具有冠状次变边结构,后者由单斜辉石、斜长石和角闪石组成。详细的岩相学研究,识别出三期变质矿物组合:第一期(M1)的矿物组合是由石榴石中的矿物包裹体来代表的,它们是:石榴石(Grt) + 绿辉石(Omp) + Qtz + 金红石(Rtl) ± Plg。绿辉石含有3.03% ~ 3.40% Na₂O和8.76% ~ 9.22% Al₂O₃;第二期变质矿物组合(M2)是由基质中的矿物代表的,它们是:Grt + Cpx + Plg + Rtl + Qtz,变质程度是麻粒岩相;第三期变质矿物(M3)是角闪石和斜长石(Amp + Plg),它们部分交代第二期矿物。绿辉石中的硬玉(jadeite)分子含量在0.28 ~ 0.22,基质绿辉石和石榴石中包体的绿辉石中的硬玉分子含量未见差别。也可观察到基质中的绿辉石有分解成单斜辉石和钠质斜长石的反应。M1矿物组合用TWQ法计算得到压力和温度条件是:18.5 ~ 19.5kb和750 ~ 800°C。M2期即冠状反应边的矿物组合是Grt + 透辉石(Cpx) + 紫苏辉石(Opx) + Qtz ± 钛铁矿(ilmenite) + Plg。第三期矿物组合M3是:Amp + Plg ± Grt。这些变质反应构成了一个顺时针的P-T轨迹(图7)。

石榴石与全岩的Sm-Nd等时线年龄是224.8 ± 6Ma(Oh *et al.*, 2004)。对榴辉岩中的锆石做了SHRIMP离子探针U-

图7 榴辉岩和石榴石麻粒岩的P-T图解(据Guo *et al.*, 2004; Oh *et al.*, 2005)

EG-榴辉岩相;HG-高压麻粒岩相;LG-低压麻粒岩相;AM-角闪岩相;EA-绿帘角闪岩相;BS-蓝片岩相

Fig. 7 P-T diagram of eclogite and garnet granulites (after Guo *et al.*, 2004; Oh *et al.*, 2005)

EG-eclogite facies; HG-HP granulite facies; LG-LP granulite facies; AM-amphibolite facies; EA-epidote amphibolite facies; BS-blue schist facies

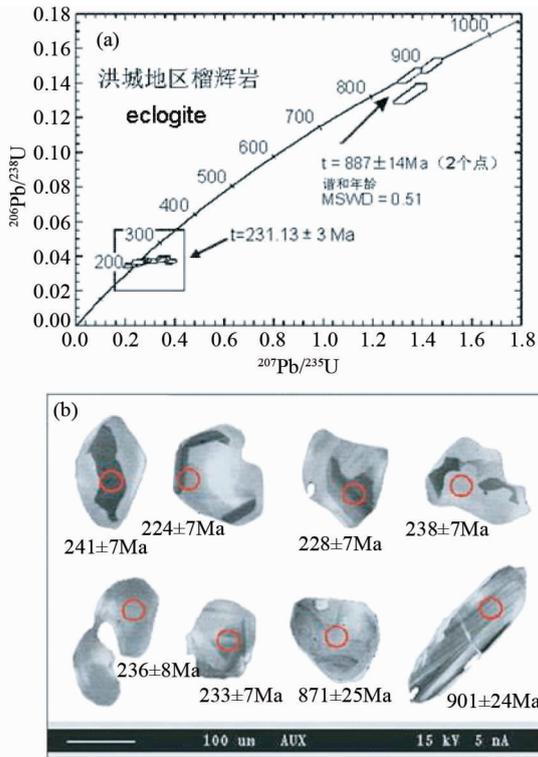


图8 榴辉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(a)和阴极发光图像(b)

Fig. 8 U-Pb zircon SHRIMP concordia diagram (a) and CL images (b) of zircon grains

Pb 年龄测定,分别在锆石的核部和边部得到 231.2 ± 3.3 Ma 和 887 ± 14 Ma (图8)。Guo *et al.* (2005) 根据锆石形态学和有关比值,解释它们分别代表榴辉岩相变质年龄和原岩年龄。

飞凤榴辉岩附近的透镜体状超镁铁岩是蛇纹石化方辉橄榄岩和二辉橄榄岩。通过变质成因的斜方辉石中的 Ca 和 Al 计算的温度和压力是 $750 \sim 950^\circ\text{C}$ 和 $16 \sim 20\text{kb}$,地球化学性质暗示它们来自大陆岩石圈地幔 (Seo *et al.*, 2004, 2010)。

5.2 苏鲁造山在朝鲜半岛的东延

由上可知,在洪城虽然没有发现超高压变质岩石,但是榴辉岩和退变榴辉岩(石榴石麻粒岩)的顺时针 *PT* 轨迹和同位素年龄,以及围岩片麻岩的特征和同位素年龄,都与苏鲁造山带的榴辉岩类似。以此我们将洪城地区主断层以东的岩石组合从京畿地块中划分出来,称为洪城杂岩。由于覆盖严重和研究程度低,洪城杂岩与京畿地块基底变质岩的界限目前仍不清楚。初步研究结果显示,洪城杂岩分布有限,在洪城地区北面 and 东面的两个断层构成洪城杂岩的边界,西面是侵入到洪城杂岩中的花岗岩类和辉长岩(图6)。洪城杂岩北东侧的前寒武纪岩石为紫苏花岗岩、黑云母花岗片麻

岩以及富铝的变质岩(孔兹岩),已获得 $2500 \sim 2600$ Ma 和 $1850 \sim 2000$ Ma 两组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄。

另外,飞凤榴辉岩附近存在一个超镁铁岩岩片,其中基性高压麻粒岩墙的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与榴辉岩不同,其核部与幔部分别约为 400 Ma 和 1000 Ma。它的围岩花岗片麻岩中得到 400 Ma 和 1000 Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄。变基性岩和围岩均没有 230 Ma 左右的变质时代显示。 400 Ma 的变质年龄在苏鲁造山带没有显示,但秦岭造山带却有此次变质事件的记录。 900 Ma 的变质年龄在扬子陆块非常常见,但是比苏鲁带花岗片麻岩 $650 \sim 800$ Ma 的年龄老。因此,洪城杂岩与苏鲁带不同的地质特征值得注意。

另一值得注意的地质现象为,从朝鲜半岛南南盆地北缘一直到沃川构造带的南缘,存在三叠纪花岗岩和碱性(花岗)岩。该期岩浆活动被一些研究者确定碰撞造山作用的依据 (Kim *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; 彭彭等, 2016a)。作者注意到在苏鲁-大别造山带,三叠纪花岗岩和碱性岩少有出露,而在华北中-北部发育大量三叠纪碱性(花岗)岩和花岗岩。研究者多将三叠纪岩浆活动与中亚(兴蒙)造山过程或陆内构造作用相联系 (Jiang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2012b)。作者认为,仅以此为依据把朝鲜半岛中部,甚至整个京畿地块和临津江、沃川带,作为碰撞造山带缺乏说服力。

侯泉林等(2008)、武昱东和侯泉林(2016)在构造分析和 Ar-Ar 年代学的基础上,提出朝鲜半岛中部的构造带在中生代经历了碰撞阶段(~ 210 Ma)、逆冲推覆造山和走滑剪切作用阶段($200 \sim 150$ Ma)、造山后伸展阶段($140 \sim 90$ Ma)三个主要的构造过程。上述作者还认为,从变形期次和变形特征看,临津江构造带与大别造山带的北淮阳构造带、苏鲁构造带北部威海地区具有可比性;沃川构造带与南大别构造带有相似之处;在朝鲜半岛,自临津江带至沃川带构成了较完整的中生代碰撞造山带,即大别-苏鲁造山带的东延部分。

Oh (2006) 注意带洪城杂岩的展布以及其东部的京畿地块显示了华北克拉通基底的特征,因此主张洪城杂岩向北延伸,连到临津江断裂带,构成朝鲜半岛内的碰撞造山带。沃川带则代表了华夏陆块与扬子陆块的边界,构筑了一个由南向北的从华夏-扬子-华北的朝鲜半岛构造划分模式。

Zhai *et al.* (2000) 认为苏鲁造山带与华北克拉通之间的界限在山东半岛不是一条断层,而是呈鳄鱼嘴构造,是经过超高压变质的下地壳在折返过程中与深部岩石圈发生拆离所造成的。Li (1994) 曾提出一个地壳拆离模式来解释苏鲁造山带(图9),推测扬子陆块的上地壳从下地块拆离并在碰撞期间被在华北陆块之上推覆 > 400 km, 扬子岩石圈的下部则沿着缝合带俯冲到华北陆块之下。

根据前寒武纪变质基底、古生代盆地、变质作用和岩浆作用等地质资料对比,可以确定印支期造山作用在朝鲜半岛有重要的印记,但横跨半岛造山带模型难以确立。两个可能的构造模式可用来解释朝鲜半岛构造发展:

(1) 假定京畿地块以亲苏鲁造山带的岩石为主,与华北

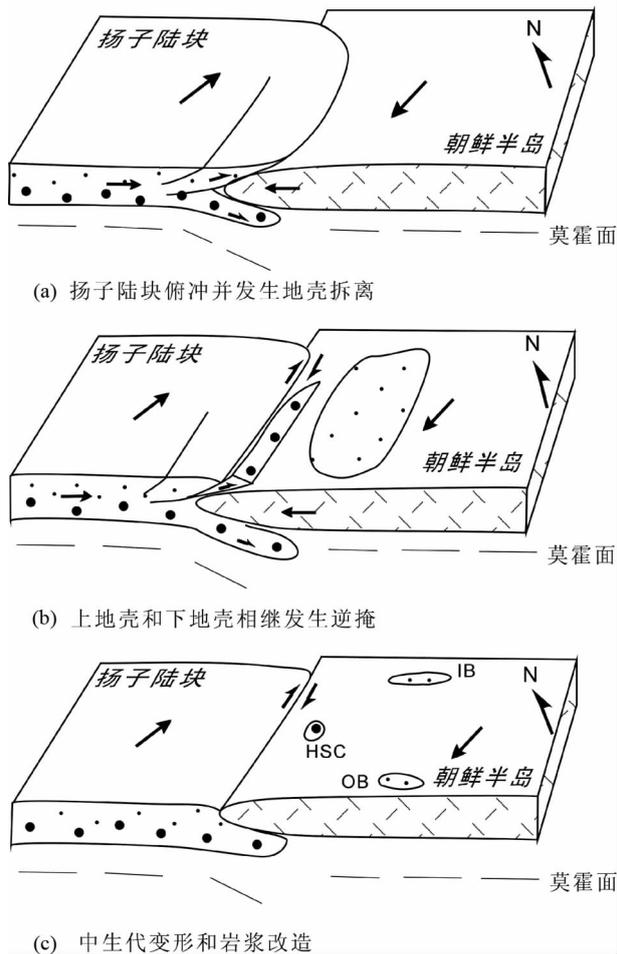


图9 扬子陆块与中朝陆块(朝鲜半岛)的拆离-逆掩模式

HSC-洪城杂岩; IB-临津江带; OB-沃川带

Fig. 9 Crustal-detachment model for the collision between the YB and NCB (Sino-Korea Craton) along the western margin of the Korean Peninsula

HSC-Hongseon Complex; IB-Imjinggang Belt; OB-Ogcheon Belt

克拉通相似的基底变质岩只是浮在地壳表面的岩片。由此即可基本认同 Yin and Nie (1993) 的模式, 整个京畿陆块视为碰撞造山带, 两个转换边界断层分别是临津江带和沃川带。然而, 该模式遇到的问题是, 除了在京畿陆块发育亲华北的前寒武纪基底岩石, 太白山盆地的华北克拉通属性和朝鲜半岛古生代盆地均具华北地质特征(李忠等, 2016)。另外, 临津江构造带和沃川构造带不具典型碰撞造山带的特征。

(2) 我们提出另一个构造模式, 即地壳拆离-逆掩模式(图9, 翟明国等, 2007; Zhai *et al.*, 2007b)。根据前寒武纪对比研究和古生代沉积盆地的研究, 该模式假设朝鲜半岛整体上属于华北克拉通, 而洪城杂岩以及可能还有若干小的岩片是属于与苏鲁造山带相似的外来岩石构造单元。碰撞带

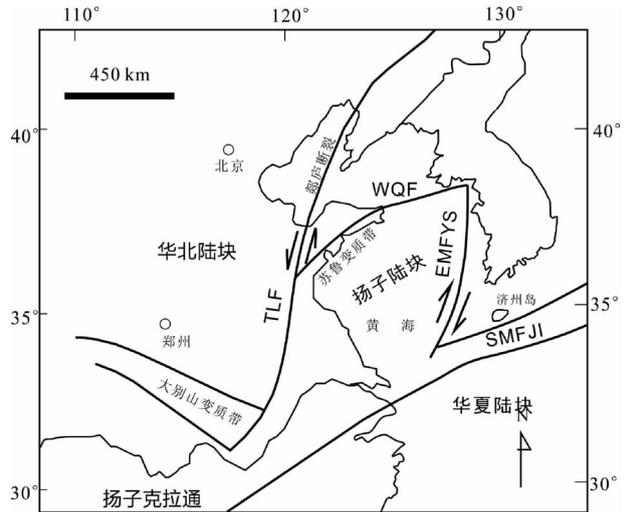


图10 根据地球物理资料解释推测的扬子陆块与朝鲜半岛的构造关系(据 Hao *et al.*, 2007)

TLF-郯庐断裂; WQF-五莲青岛(荣成)断裂; EMFYS-黄海东部边缘断裂; SMFJI-济州岛南缘断裂

Fig. 10 Distribution of the junction zone between East China and Korean Peninsula (after Hao *et al.*, 2007)

TLF-Tanlu Fault; WQF-Wilian-Qingdao (Rongcheng) Fault; EMFYS-Eastern Margin Fault of Yellow; SMFJI-Southern Margin Fault of Jeju Island

位置参考了郝天珧等(2002)和 Hao *et al.* (2007)的地球物理研究结果, 扬子陆块与朝鲜半岛的碰撞带是沿着朝鲜半岛西缘近南北向深断裂延伸, 没有深入到朝鲜半岛内部。

该模式假设扬子陆块与中朝克拉通碰撞的界限是沿着在朝鲜半岛西缘的东黄海边缘断裂(图10, 郝天珧等, 2002; Chang, 2000; Chang and Park, 2001, 2005)。扬子陆块岩石圈俯冲在中朝克拉通之下, 并形成鳄鱼嘴构造。形成的超高压岩片显然不可能折返到朝鲜半岛内部, 而指示局部仰冲到朝鲜半岛的西岸。洪城杂岩可能是从俯冲的扬子地块上拆离的下地壳残片, 并推覆到京畿地块的西南角。我们进一步推测, 扬子陆块的上地壳还有可能部分与下地壳拆离, 并在朝鲜半岛南部沿湖南剪切带(HSZ), 在朝鲜北部沿 Chugaryong 剪切带(CSZ)推覆到朝鲜半岛, 即临津江和沃川带。因此有争议的临津江和沃川构造带, 都有可能是扬子陆块的中或上地壳的岩片, 它们目前的展布是有大宝期的构造定位的。李忠等(2016)依据对朝鲜半岛古生代沉积特征的详细分析, 也认可这种推论的可能性。该模式还可解释朝鲜半岛普遍发育三叠纪具有碰撞后特征的岩浆岩, 它们以不具东西或北东方向呈带分布的特征。朝鲜半岛在晚中生代经历了非常强烈的构造变形, 即侏罗纪大宝(Daebo)和白垩纪 Bulgusa 事件(Lee, 1987; Paek, 1996; Chough *et al.*, 2000; Sagong *et al.*, 2003)。洪城杂岩(或许还有其它未被识别的小岩片)出露于朝鲜半岛基底之中, 并不构成一个横穿朝鲜半岛的变质(造山)带。因此, 朝鲜半岛总体上属华北克拉通

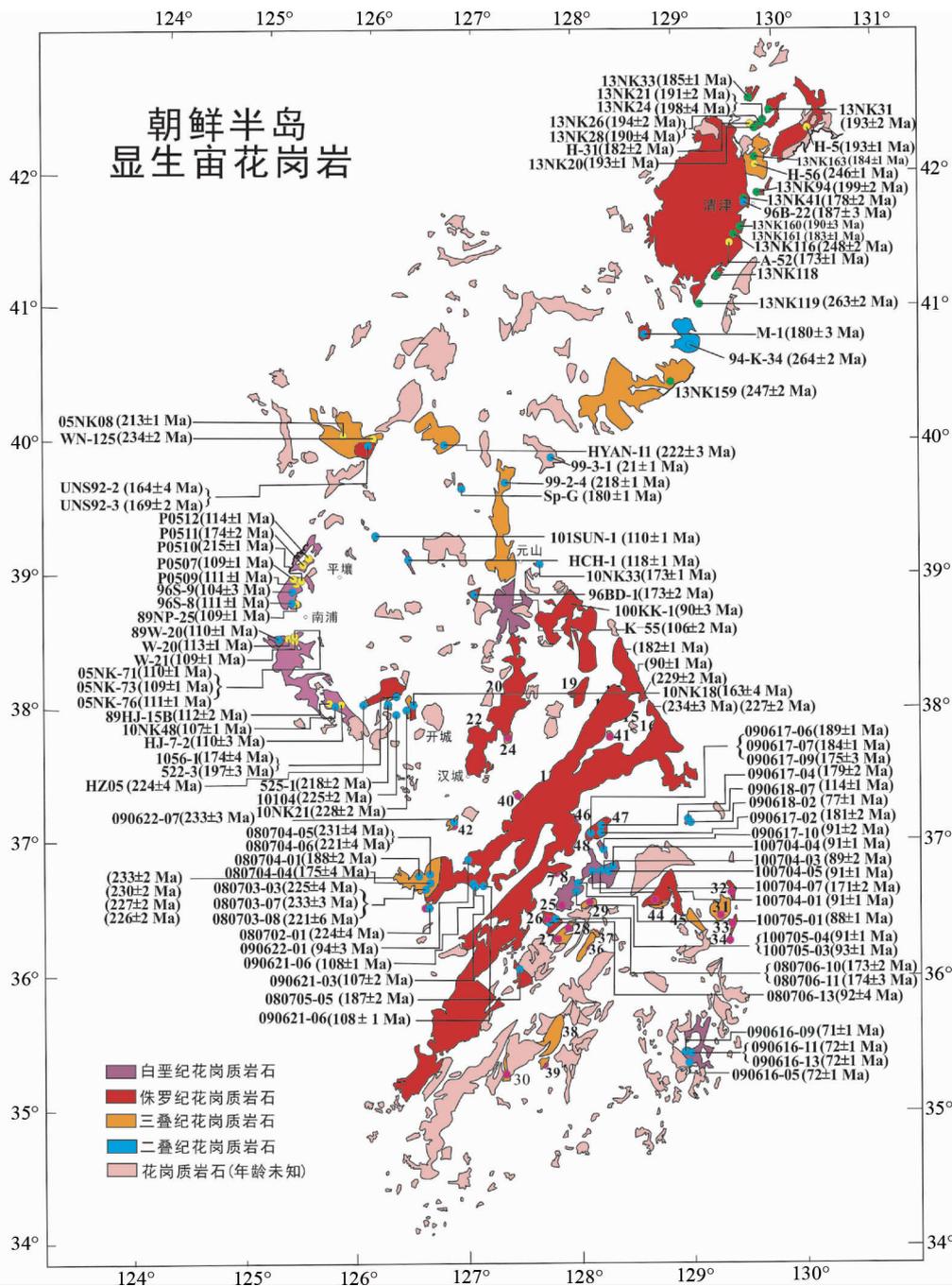


图 11 朝鲜半岛中生代岩浆岩分布图

Fig. 11 Distribution of Mesozoic igneous rocks in Korean Peninsula

的东延。Fitches and Zhu (2006) 提出 HSZ 自晚古生代开始到新生代, 共经历了四期变形。大量中生代花岗岩和一些小型白垩纪盆地在沃川带及其两侧分布。HSZ 最早一期变形发生在 ~160Ma。临津江带内的 Chugaryong 剪切带没有可靠的同位素年龄数据。洪城杂岩临津江带和沃川带的位置可能都发生过变化, 它们目前构造特征主要是中生代大宝期构造作用的结果。

6 中生代岩浆作用

朝鲜半岛的南、北部广泛发育中生代岩浆活动(图 11)。岩浆岩可以主要分为三叠纪, 侏罗纪和白垩纪三期, 此外有少量的古生代和新生代岩浆石。三叠纪和侏罗纪都以花岗岩为主, 有少量辉长岩, 很少有火山岩。早白垩纪晚期 (~110Ma) 多为花岗岩, 晚白垩纪 (ca. 90 ~ 60Ma) 火山岩主

要发育在朝鲜半岛东南缘的庆尚盆地。

6.1 三叠纪岩浆岩

三叠纪的花岗岩分布于整个朝鲜半岛,没有明显的分带,称为松里(Songnim)期岩浆岩。朝鲜西北部岩浆岩的相对数据较少,主要是因为国防原因未能取得分析样品。主要岩石类型是高钾花岗岩-钙碱性花岗岩,少量碱性岩和辉长岩。平南盆地元古代地层中还有少量金伯利岩。朝鲜半岛三叠纪岩浆岩锆石同位素年龄在213~253Ma,峰值是220~230Ma。样品中经常有前寒武纪的继承锆石,多在约2500~2800Ma和2000~1700Ma,与华北张家口和京北地区三叠纪花岗岩和碱性岩地球化学性质相近(Jiang *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2012a)。狼林地块南部出露锆石 U-Pb 年龄为224~234Ma的正长岩-辉长岩体,具有~0.7115的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和-20~-14的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,来源于富集岩石圈地幔(Peng *et al.*, 2008)。洪城杂岩附近的纹长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄是225~231Ma,含早前寒武纪残留锆石,平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.713, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-20(Zhai *et al.*, 2016)。与出露在胶东半岛威海地区的辉长岩-碱性花岗岩相比,后者的年龄较年轻(213~205Ma),并且出露有限,仅在苏鲁-大别山造山带的东北缘出露。朝鲜半岛三叠纪花岗岩是一些学者推断苏鲁造山带穿过朝鲜半岛的主要证据(Oh, 2006; Seo *et al.*, 2010; 彭澎等, 2016a),被认为是碰撞后伸展的产物。鉴于三叠纪岩浆岩的分布和年龄特征,与华北地区晚三叠世岩石可以进行对比,作者认为它们可能与苏鲁造山带有关。是否与中亚造山带有关目前也尚难定论(Zhai *et al.*, 2007b; Peng *et al.*, 2008)。

6.2 侏罗纪花岗岩

侏罗纪岩浆岩绝大多数是花岗岩,属于高钾钙碱性花岗岩,具有准铝质到过铝质地球化学性质。侏罗纪岩浆岩也呈面状分布,但与中侏罗世韧性剪切作用关系密切(Zhai *et al.*, 2016)。该期构造作用称为大宝(Daebo)运动,代表性韧性剪切带是Chugaryong断裂带(大致与临津江构造带一致,北部影响到平南盆地南部)和湖南断裂带(空间范围大致与沃川构造带一致,影响到太白山盆地及其南、北基底)。侏罗纪火山岩局部出露在太白山盆地,酸性火山岩年龄为186~187Ma(Han *et al.*, 2006),含有~1.9Ga的残余锆石。侏罗纪花岗岩大致分为黑云花岗岩和花岗闪长岩,前者表现为大面积岩基,后者多为岩枝和岩脉。侏罗纪花岗岩的锆石 U-Pb 年龄多在184~167Ma,并且都有负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-21.1~-13.4)和2.97~2.27Ga的Nd模式年龄。残留锆石的年龄是约1.8~2.5Ga,显示强烈下地壳重熔特征。多数研究者认为侏罗纪花岗岩与印支造山作用相关,是印支期后造山作用的结果。华北克拉通的侏罗纪花岗岩年龄多在165~145Ma(Wu *et al.*, 2007),朝鲜半岛花岗岩的年龄相对较老。朝鲜半岛东北部的侏罗纪花岗岩与中国东北的侏罗纪花岗岩连

成一体,因此推测与中亚造山带的演化直接相关(张艳斌等, 2016)。湖南剪切带附近的侏罗纪花岗岩与朝鲜北部的侏罗纪花岗岩没有任何差别,残留锆石年龄都集中于约1.8~2.5Ga。侏罗纪花岗岩的残留年龄似乎指示朝鲜半岛基底为中朝地块基底,这与与盆地分析结果一致(李忠等, 2016)。

6.3 白垩纪岩浆岩

白垩纪花岗岩广泛分布于朝鲜半岛,但火山岩仅分布在庆尚盆地。花岗岩锆石年龄变化在114~92Ma,~110Ma为峰值。这个年龄值也被朝鲜境内河流砂中碎屑锆石年龄所记录,说明朝鲜北部的国防管控区内也存在白垩纪花岗岩。花岗岩多是亚碱性,从准铝质到过铝质,表现出明显的壳熔花岗岩特征。多数花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.7084~0.7139, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值从-13.3可达-20。~1.8~2.6Ga残留锆石普遍出现在各个样品中。花岗岩矿化形成Au-Ag,成矿年龄大约为100~70Ma(Choi *et al.*, 2005)。朝鲜半岛与华北克拉通白垩纪花岗岩有两个明显差别:(1)形成年龄,后者明确要晚10~20Myr;(2)成矿特征,前者是Au成矿,局部为Mo,成矿时代是130~115Ma;后者是Au-Ag,成矿时代晚于100Ma。

庆尚盆地是一个火山-沉积盆地。底部下部由砾岩、砂岩、泥岩等组成,上部岩组主要为火山岩,包括玄武岩、粗面安山岩、安山岩和粗面岩以及英安岩和流纹岩(Chang, 1977, 1988)。火山岩属高钾钙碱系列,痕量元素表现为Nb、Ta、P和Ti亏损,有较宽的Rb、Ba和Sr含量。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值一般低于0.7070。安山岩和凝灰岩的锆石年龄是91~65Ma(Zhang *et al.*, 2012a, 2014),可能是一个岛弧带。值得注意的是,庆尚盆地东南侧的日本岛存在一系列晚白垩世岩石单元(图12a)。最外侧的第三纪四万十(Shimanto)增生杂岩带,其走向近北东,向北依次是晚白垩世四万十(Shimanto)混杂岩带,晚白垩纪三波川(Sanbagawa)变质带和弧前盆地,然后是朝鲜半岛东南侧的庆尚岛弧带。混杂岩带中还发育有侏罗纪伏父(Chichibu)增生杂岩。三波川(Sanbagawa)带的变质年龄为90~70Ma,弧前带流纹岩和花岗岩的年龄是86~84Ma和74~62Ma(Sonehara and Harayama, 2007; 毛建仁等, 2014)。日本海和黄海的扩张发生在~15Ma之后(Jolivet *et al.*, 1994)。因此,晚白垩世日本岛,朝鲜半岛和华北应该是一体。根据以上构造单元组合特征和排列次序,可以勾勒出晚白垩世太平洋板块俯冲模式图(图12b)。依据日本、朝鲜半岛和中国东部的地质观察、岩浆活动和大地构造单元的时空分布,图12b所显示的应是能够推测的最古老的太平洋俯冲带。华北在晚白垩世期间仍然没有明确的对太平洋俯冲的响应。在中国东南沿海,在晚白垩世,有与此相对应的岩浆活动,但从几何学上把它们与太平洋俯冲的构造活动勾连还有困难。

6.4 朝鲜半岛与华北、东北和日本中生代岩浆岩的对比

朝鲜半岛和中国东部大量岩浆岩数据的积累为对比朝

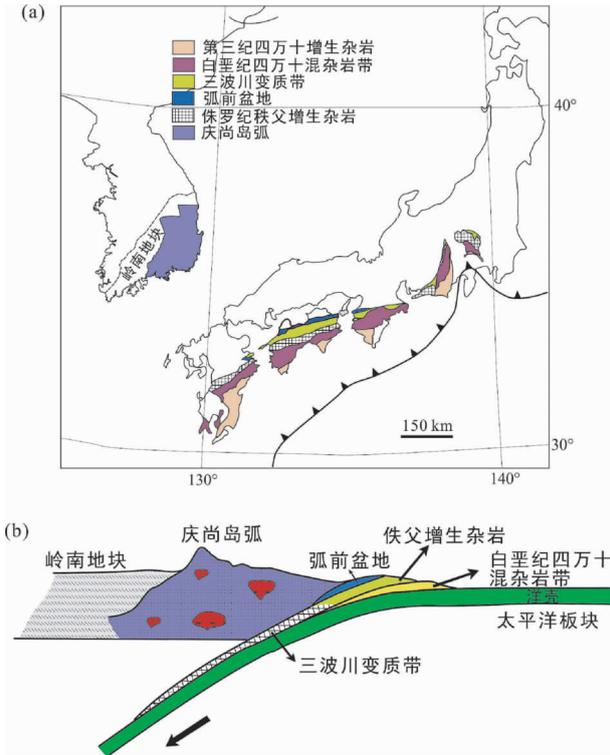


图 12 庆尚盆地和日本的中生代岩石的分布与构造带划分示意图(a)和晚白垩纪太平洋俯冲模式(据 Zhang *et al.*, 2012c)

Fig. 12 Simplified diagram of geotectonic profile of the Gyeongsang Basin and Japanese island (a) and simplified model of the Late Cretaceous Japanese island arc system (b) (after Zhang *et al.*, 2012c)

朝鲜半岛与华北、东北、华南和日本的构造演化奠定了基础。此前,毛建仁等(2014)和许文良等(2013)对华南或北与周边的岩浆岩进行过对比。图 13 是朝鲜半岛中生代岩浆作用与华北、东北、华南和日本对比示意图。从图中可以清楚地看到,日本、朝鲜半岛、东北、华北和华南都存在三叠纪岩浆

活动,岩浆活动的峰值在 220 ~ 230Ma,主要岩石类型为碱性岩、碱性花岗岩和高钾钙碱性花岗岩,地球化学性质指示造山后伸展背景。我们基本可以认为,朝鲜半岛、中国东部和日本在三叠纪处在同一大地构造背景下,都受到了印支造山作用的影响。

早侏罗世时期,朝鲜半岛的岩浆作用强烈,主要的岩浆岩是具有壳熔特点的花岗岩类。日本有该期花岗岩,而在华北并不发育。中侏罗世华北岩浆活动强烈,其时代对应于我们通常所言的燕山运动 A 幕。与此相对应,东北、朝鲜半岛和华南都有岩浆活动,且都表现出壳熔花岗岩的特点,但是日本却没有该期岩浆作用。在晚侏罗世至早白垩世的早期 (>120Ma),这是华北岩浆作用的高潮期,对应于为燕山运动的 B 幕晚期,也是华北克拉通破坏的峰期。与华北明确的差别是,朝鲜半岛和日本都没有此期岩浆活动。早白垩世晚期(115 ~ 90Ma,峰值 110Ma),在朝鲜半岛发生强烈岩浆活动,日本的岩浆活动则微弱。从岩石大地构造的角度看,在板块的俯冲和碰撞带,都会出现规律的构造岩浆甚至变质带。因此从中生代岩浆作用的对比研究而言,在早白垩世晚期之前,日本-朝鲜-华北(东北)区域内没有太平洋俯冲的证据。在晚白垩世,日本和朝鲜半岛南部的岩石组合显示太平洋板块可能开始了向西的俯冲(图 11),并且从第三纪到现在,可以识别多条俯冲带。

7 几个重要和有争议的地质问题

华北与朝鲜半岛的地质对比研究已取得了长足进展,然而对一些关键地质问题的认识仍需完善。

7.1 前寒武纪变质基底对比

基底对比研究是朝鲜半岛地质演化的基础。狼林地块是早前寒武纪岩石出露最广泛的地区,但是由于朝鲜军事管制等原因,对狼林地块的考察基本限于其南缘、东缘和西南缘。狼林地块分为冠冒亚地块和狼林亚地块。冠冒亚地块

	华北克拉通			日本	朝鲜半岛		东北	华南地块 东南沿海地区
	西山	冀北	胶东		北部	南部		
65Ma	K ₃			100(110)-90Ma 火山岩 90-65Ma 三波川变质带		庆尚岩浆作用 100-77Ma	97-88Ma 少量火山岩	97-65Ma 火山岩
100Ma	K ₂			125-105Ma 花岗岩(较弱)	110±5Ma 花岗岩(强烈)	110±5Ma 花岗岩(强烈)	火山岩 花岗岩	120-100Ma 火山岩/花岗岩
120Ma	K ₁	髫髻山组 花岗岩	花岗岩 花岗岩	125-120Ma			火山岩 花岗岩	火山岩 花岗岩
135Ma	J ₁ -K ₁	九龙山组 张家口组	花岗岩 花岗岩					花岗岩
157Ma	J ₂	花岗岩	花岗岩 花岗岩					花岗岩
175Ma	J ₁		花岗岩		173-163Ma 花岗岩		170-165Ma 花岗岩/火山岩	火山岩 花岗岩
205Ma	T	230-210Ma 花岗岩	230-210Ma 花岗岩	197Ma 船津花岗岩	花岗岩, 火山岩 197-175Ma	230-210Ma 花岗岩	230-210Ma 花岗岩	250-200Ma 花岗岩
250Ma			少量花岗岩	220Ma 飞驒变质带 248-245Ma 古老花岗岩	230-210Ma (246Ma;264Ma)	230-210Ma 花岗岩	250-200Ma 花岗岩	230-205Ma (276Ma)

图 13 朝鲜半岛与华北、东北和日本中生代岩浆岩对比

Fig. 13 Chart showing distribution of Mesozoic granitoids and related volcanic rocks in main geological terrenes in NE Asia

由晚太古代含 BIF 变质表壳岩和片麻岩组成,与华北鞍山杂岩可对比。狼林亚地块有少量晚太古代片麻岩,而其南缘大多是古元古代高级变质岩,包括含石墨片麻岩和矽线石榴片麻岩、大理岩等变质沉积岩系(孔兹岩系),以及具有地壳熔融特点的含榴花岗岩和紫苏花岗岩、混合岩以及少量石榴石基性麻粒岩,有巨量 Pb-Zn 矿化,并古元古代晚期砂香山花岗岩,整体特征与辽吉岩系相当。相关对比研究对了解华北与朝鲜古元古代构造演化具有重要意义。出露于元山以南的狼山杂岩(花岗岩片麻岩-TTG 片麻岩)延续到了京畿地块。京畿地块和岭南地块的中-晚太古代岩石出露很少,研究程度低,但古元古代紫苏花岗岩和孔兹岩类岩石都有发育。京畿地块奥长环斑花岗岩和岭南地块斜长岩年龄相当,同属非造山岩浆岩,与狼山亚地块有相似性。此外,狼林地块新元古代地层比华北更为发育(Peng *et al.*, 2008, 2011),对于了解中-朝元古宙演化非常重要。

7.2 太白山盆地

太白山盆地是一个非常重要的构造单元,对它研究的重要性被严重低估。太白山盆地有三个重要特点:(1)具有与华北古生代盆地相同的沉积层序,标志是中奥陶统碳酸盐岩被中石炭统含煤地层不整合覆盖;(2)寒武系砂岩的碎屑锆石特征与大连盆地和西山盆地相同,没有新元古代锆石的记录;(3)太白山盆地虽然受到大宝期构造的影响,但一般认为它在南部和北部不整合或假整合于岭南地块和京畿地块的元古代地层之上。最近研究发现,太白山盆地的分布范围比原来地质图描绘的要大。特别值得注意的是,它与沃川群的界限被大大地向西推移,这样沃川带和临津江带一样,并不是横穿朝鲜半岛的构造带(图 1)。因此,太白山盆地对基底对比研究和造山带演化制约都至关重要,是今后研究中的重要课题。

7.3 洪城杂岩与苏鲁造山带的东延

三叠纪榴辉岩和洪城杂岩的厘定为苏鲁造山带延伸至朝鲜半岛提供了地质证据。然而,洪城杂岩出露有限,并未在朝鲜半岛构成一个高压变质带。洪城-飞凤地区变质岩的片麻理为 NE-NNE 向,近于 NNE-NS 向的断层东侧是古元古代杂岩(图 6)。除 ~230Ma 的变质年龄之外,在基性变质岩中存在 ~400Ma 的变质年龄。围岩片麻岩的锆石年龄多在 ~900Ma,略老于苏鲁带 700~800Ma 片麻岩。此外,洪城杂岩至今未能发现超高压变质矿物,变质压力不大于 20kb。因此,简单地把洪城杂岩与临津江带和沃川带,甚至整个京畿地块相连,明显缺乏证据。洪城杂岩的构造特征和空间延伸与苏鲁造山带(或者秦岭造山带)之间的详细的对比研究十分重要。

7.4 临津江和沃川构造带变形历史与属性研究

临津江和沃川构造带被认为是重要块体之间造山带说

法由来已久,但存在以下问题:(1)两个构造带的岩石主体,即临津江群和沃川群,没有横跨朝鲜半岛,因此,这两个岩群也都被一些研究者认为是陆内裂谷带;(2)两个构造带经历了复杂的构造变形,特别是三叠纪变形的遗迹,但最强烈构造变形发生在侏罗纪大宝期,该期构造基本确定了朝鲜半岛现今构造形态。大宝期与华北燕山运动早期(A 幕)相当。燕山运动早期的构造变形成因存在不同观点,如中亚(兴蒙)造山带造山后伸展、古太平洋俯冲、鄂霍次克洋俯冲/碰撞等。对临津江和沃川带的构造分析还需深入;(3)临津江带部分岩石属于古元古代变质岩,记录了约 1.8~1.9Ga 的变质事件,但可能收到 ~800Ma 和约 250~230Ma 变质作用的叠加。临津江群曾报道发现志留纪-泥盆纪化石,但这一报道验证。临津江群砂岩碎屑锆石年龄谱指示其年龄应小于 ~400Ma,多集中在 2.5~2.8Ga、1.8~2.0Ga、1.4~1.2Ga 和 1.0~0.8Ga 区间。前寒武纪碎屑锆石的特点与华北鲁西和辽东新元古代地层的碎屑锆石记录相似(Hu *et al.*, 2012),也与华夏陆块河砂碎屑锆石年龄谱有相似之处,只是后者晚太古代年龄不多,峰值在 1000~500Ma(Xu *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2010; Zhai, 2013);(4)沃川带与华夏陆块之间的可比性主要依据是两者都发育 ~750Ma 火山岩(Oh, 2006)。最近在华北克拉通冀东地区以及徐淮地区,也识别出新元古代基性岩墙,锆石年龄为 775Ma(王冲, 2016)。因此,沃川群不一定必须要与华夏陆块对比。沃川带与太白山盆地的界限以及接触关系也是一个没有解决的重要地质问题。

7.5 地球物理资料解读与深部构造

郝天姚研究员及其课题组与韩国地球物理学家合作,对华北与朝鲜半岛之间构造关联提供重要的深部资料(郝天姚等, 2002; Hao *et al.*, 2007; 郝天姚, 2015^①)。地震和重力资料表明,黄海及周边地区的地球物理场特征具有明显的分区性,不仅南、北黄海,东、西黄海的地球物理场也不相同。有些是不同地质单元的反映,有些则应与 NNW 向延伸的黄海中央断裂带有密切的关系。中国东部一些主要断裂带在海区确有东延,但它们大部分被朝鲜半岛西缘断裂带,或称为黄海东缘断裂带(EMFYS),所阻隔,未能与朝鲜半岛上主要断裂带相贯通,如五莲-青岛-荣城断裂带向东不与临津江断裂或湖南断裂相连。中朝与扬子块体的结合带位于研究区西侧,在胶东五莲-青岛-荣城和嘉山-响水断裂一带。在朝鲜半岛,该结合带则位于济州岛南缘断裂带。黄海东缘断裂带和济州岛南缘断裂带形成“Z”字型。黄海东缘断裂带为右行走滑断裂,中国东部郯庐断裂带为左旋走滑带,两者正好协调了扬子陆块向北运动,形成一个巨大的嵌入构造。华夏陆块则出露在济州岛南缘断裂带以南地区。充分研读黄海和朝鲜半岛地球物理资料,加强地球物理与地质研究交叉

① 郝天姚. 2015. 东北亚地质与亚洲大陆边缘地球物理特征学术讨论会发言. 北京

研究, 对于理解朝鲜半岛构造演化极为重要。

致谢 本项研究是在中国科学院和国家基金委多个项目支持的结果, 也是国家基金委重大国际合作项目(41210003)和国家重点基础研究项目(2012CB416600)的研究成果。从最早的合作开始, 已陆续进行了近二十年。我们要感谢我们在朝鲜的合作者, 他们来自朝鲜科学院地质研究所; 韩国的合作者, 他们来自全北大学、高丽大学和庆北大学以及其他高校。北南双方的合作者中, 都有因病去世的, 他们为合作起了很大的推动作用。在这里我们要表示深深的敬意和怀念。在研究中还得到许多地质学、地球物理学和地球化学的同行们的帮助与指导, 他们是刘嘉祺、钱祥麟、闫月华、郝天姚、常旭、樊祺诚、范蔚茗、孟庆任、林伟, 以及其他的许多人, 未能一一署名。我还要感谢我的课题组的所有同伴, 以及学生们, 大家的共同努力推动东北亚地质研究的进步。

References

- Chang EZ. 1996. Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 13(3-5): 267-277
- Chang KH. 1977. Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of Southeastern Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 13: 76-90
- Chang KH. 1988. Cretaceous stratigraphy and paleocurrent analysis of Kyongsang Basin, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 24: 194-205
- Chang KH. 2000. Palaeozoic Yellow-Sea transform fault and Mesozoic Korea. *Geoscience Journal*, 4: 4-6
- Chang KH and Park SO. 2001. Paleozoic Yellow Sea transform fault: Its role in the tectonic history of Korea and adjacent regions. *Gondwana Research*, 4(4): 588-589
- Chang KH and Park SO. 2005. Sino-Korea Peninsula and Yellow Sea transform fault (YSTF). In: *Gondwana to Asia Symposium 2005, Abstract Volume*. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 5-6
- Chen DZ and Li Z. 2005. Depositional environments and evolution of Cambro-Ordovician deposits at Fuzhou Bay area, Liaodong Peninsula, NE China. In: *Gondwana to Asia Symposium of 2005, Abstract Volume*. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 57-59
- Cheong CH. 1969. Stratigraphy and paleontology of the Samcheong coalfield, Gangweondo, Korea (1). *Journal of Geological Society of Korea*, 5: 13-56
- Cho DL, Kwon ST, Jeon EY and Armstrong R. 2001. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of an amphibolite and a paragneiss from the Samgot unit, Yeoncheon Complex in the Imjingang Belt, Korea: Tectonic implication. *Geological Society of Korea*, 56: 89
- Cho M, Kim T and Kim H. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of felsic meta-tuff in the Ogcheon metamorphic belt, Korea: Neoproterozoic (ca. 750Ma) evolution. *Journal of Petrological Society of Korea*, 13: 119-125
- Choe WJ. 2005. The evolutionary features of tectonic-metamorphism of the Archean Rangnim complex in the border of the Korea-China craton northern part of the Korea Peninsula. In: *Gondwana to Asia Symposium of 2005, Abstract Volume*. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, A-1-8
- Choi SG, Ryu IC, Pak SJ, Wee SM, Kim CS and Park ME. 2005. Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geology Reviews*, 26(1-2): 115-135
- Chough SK, Kwon ST, Ree JH and Choi DK. 2000. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: A review and new view. *Earth-Science Reviews*, 52(1-3): 175-235
- Chung GS and Lee YL. 2001. Facies and sequence analysis on the Lower Ordovician Mungok Formation. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 9: 1-15
- Cluzel D. 1992. Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): Intracontinental rift-related volcanic activity. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 7(2-3): 195-209
- Ernst WG and Liou JG. 1995. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, 23(4): 353-356
- Fitches WR and Zhu G. 2006. Is the Ogcheon metamorphic belt of Korea the eastward continuation of the Nanhua Basin of China? *Gondwana Research*, 9(1-2): 68-84
- Guo JH, Zhai MG, Oh CW and Kim SW. 2004. Discovery of eclogite from Bibong, Hongseong area, Gyeonggi Massif, South Korea: HP metamorphism, zircon SHRIMP U-Pb ages and tectonic implication. In: *Gondwana to Asia of 2004, Abstract Volume*. Chonju: Chonbuk University, 11-12
- Guo JH, Chen FK, Zhang XM, Siebel W and Zhai MG. 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1281-1301 (in Chinese with English abstract)
- Han R, Ree JH, Cho DL, Kwon ST and Armstrong R. 2006. SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Research*, 9(1-2): 106-117
- Hao TY, Suh M, Wang QS, Choi S, Jiang WW, Song HB, Yan XW, Liu JH and Yan CL. 2002. A study on the extension of fault zones in Yellow Sea and its adjacent areas based on gravity data. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(3): 385-397 (in Chinese with English abstract)
- Hao TY, Xu Y, Suh M, Xu Y, Liu JH, Zhang LL and Dai MG. 2007. East marginal fault of the Yellow Sea: A part of the conjunction zone between Sino-Korea and Yangtze Blocks? In: Zhai MG, Windley BF, Kusky T and Meng QR (eds.). *Mesozoic Sub-continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia*. Geological Society, London, Special Publication, 281-292
- Hou QL, Wu YD, Wu FY, Zhai MG, Guo JH and Li Z. 2008. Possible tectonic manifestations of the Dabie-Sulu orogenic belt on the Korean Peninsula. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1659-1666 (in Chinese with English abstract)
- Hsü KJ, Li JL, Chen HH, Wang QC, Su S and Şengür AMC. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology. *Tectonophysics*, 183(1-4): 9-39
- Hu B, Zhai MG, Li TS, Li Z, Peng P, Guo JH and Kusky TM. 2012. Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Research*, 22(3-4): 828-842
- Ishiwatari A and Tsujimori T. 2003. Paleozoic ophiolites and blueschists in Japan and Russian Primorye in the tectonic framework of East Asia: A synthesis. *The Island Arc*, 12(2): 190-206
- Jeong H and Lee YI. 2004. Nd isotopic study of Upper Cambrian conodonts from Korea and implications for Early Paleozoic paleogeography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212(1-2): 77-94
- Jiang N, Liu YS, Zhou WG, Yang JH and Zhang SQ. 2007. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2591-2608
- Jiang N, Zhang SQ, Zhou WG and Liu YS. 2009. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 113-130
- Jolivet L, Tamaki K and Fournier M. 1994. Japan Sea, opening history

- and mechanism: A synthesis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B11): 22237–22259
- Kim CB, Turek A, Chang HW, Park YS and Ahn KS. 1999. U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. *Journal of Korean Geochemistry*, 33: 379–397
- Kim J and Cho M. 2003. Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea; Implication for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precambrian Research*, 122(1–4): 235–251
- Kim JH. 1996. Mesozoic tectonics in Korea. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3–5): 251–265
- Kim JH, Lee YI, Li MS and Bai ZQ. 2001. Comparison of the Ordovician-Carboniferous boundary between Korea and NE China: Implications for correlation and tectonic evolution. *Gondwana Research*, 4(1): 39–53
- Kim SW, Oh CW, Choi SG, Ryu IC and Itaya T. 2005. Ridge subduction-related Jurassic plutonism in and around the Okcheon metamorphic belt, South Korea, and implications for Northeast Asian tectonics. *International Geology Review*, 47(3): 248–269
- Kim SW, Oh CW, Williams IS, Rubatto D, Ryu IC, Rajesh VJ, Kim CB, Guo JH and Zhai MG. 2006. Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Massif, South Korea; Implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92(3–4): 357–377
- Kim SW, Williams IS, Kwon S and Oh CW. 2008. SHRIMP zircon geochronology, and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the south-western Gyeonggi Block, Korea; Implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean Peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162(3–4): 475–497
- Kim SW, Kwon S and Ryu IC. 2009. Geochronological constraints on multiple deformations of the Honam Shear Zone, South Korea and its tectonic implication. *Gondwana Research*, 16(1): 82–89
- Kim ZN, Han RY, Zhao L, Li QL and Kim SS. 2016. Study on the petrographic and SIMS zircon U-Pb geochronological characteristics of the magmatic rocks associated with the Jongju and Cholsan REE deposits in northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3123–3138 (in Chinese with English abstract)
- Koh JK and Cho DL. 2006. Depositional age and implication of the Bansong Group, Korea. In: 1st International Symposium on Geological Correlation between Korea and Eastern China. Taejon-Beijing: KIGAM, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 10–11
- Lan CY, Lee T, Zhou XH and Kwon ST. 1995. Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea; Evidence for Early Archean crust. *Geology*, 23(3): 249–252
- Lee DS. 1987. *Geology of Korea*. Seoul: Geological Society of Korea, Kyohak-Sa Publishing Corporation
- Lee KS and Chang HO. 1996. Sm-Nd isotopic and geochemical studies of the Ogcheon amphibolites from the Munkyeong-Gaun area, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 32: 172–186
- Lee KS, Chang HW and Park KH. 1998. Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: Age and tectonic implication. *Precambrian Research*, 89(1–2): 47–57
- Lee SR and Cho M. 1995. Tectonometamorphic evolution of the Chuncheon Amphibolite, Central Gyeonggi massif, South Korea. *Journal of Metamorphic Geology*, 13(2): 315–328
- Lee SR, Cho M, Hwang JH, Lee BJ, Kim YB and Kim JC. 2003. Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea; Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precambrian Research*, 121(1–2): 25–34
- Lee SR, Cho DL, Cho M, Kim HC, Jeon H and Wu FY. 2007. Hf isotopic evidence for Paleoproterozoic (>3.5Ga) crustal components in the Korean Peninsula. *Geosciences Journal*, 11(4): 271–277
- Lee YI and Kim DW. 1992. Storm-influenced siliciclastic and carbonate ramp deposits, the Lower Ordovician Dumugol Formation, South Korea. *Sedimentology*, 39(6): 951–969
- Lee YI, Hyeong K and Yoo CM. 2001. Cyclic sedimentation across a Middle Ordovician carbonate ramp (Duwibong Formation), Korea. *Facies*, 44(1): 61–73
- Lee YI and Lee JI. 2003. Paleozoic sedimentation and tectonics in Korea: A review. *The Island Arc*, 12(2): 162–179
- Li QL, Zhao L, Zhang YB, Yang ZH, Kim ZN and Han RY. 2016. Zircon-titanite-rutile U-Pb system from metamorphic rocks of Jungshan “Group” in Korea; Implications of tectono-thermal events from Paleoproterozoic to Mesozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3019–3032 (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Chen DZ and Zhai MG. 2004. Paleozoic sedimentary records correlation between Korea and North China; Implication on the united Sino-Korea Block. In: *Gondwana to Asia of 2004*, Abstract Volume. Chonju: Chonbuk University, 31–32
- Li Z, Peng ST, Xu CW, Han YX and Zhai MG. 2009. U-Pb ages of the Paleozoic sandstone detrital zircons and their tectonic implications in the Tabeaksan basin, Korea. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 182–192 (in Chinese with English abstract)
- Li Z, Ni LM and Xu JQ. 2016. The Paleozoic records of sedimentary sequences and detrital zircon geochronology in Korean Peninsula and North China; Implications for tectonic attributes and division. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3139–3154 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX. 1994. Collision between the North and South China blocks; A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22(8): 739–742
- Liao X, Zhang XH, Kim SY, Park U and Jong CS. 2016. Detrital zircon U-Pb ages of the Machollyong Group in North Korea; Regional correlation and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2981–2992 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Ye HM, Takahashi Y, Li ZL, Kee WS, Zhao XL and Liu K. 2014. Geodynamic characteristics of Cretaceous-Paleogene volcano-intrusive belts between in Southeast China coast and Southwest Japan. *Resources Survey and Environment*, 35(3): 157–168 (in Chinese with English abstract)
- Metcalfe I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, 9(1–2): 24–46
- Oh CW, Kim SW, Ryu IC, Okada T, Hyodo H and Itaya T. 2004b. Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon Metamorphic belt, South Korea; Tectonic implications in East Asia. *The Island Arc*, 13(2): 387–402
- Oh CW, Choi SW, Choi SG, Zhai MG, Guo JH and Krishnan S. 2005. First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *The Journal of Geology*, 113(2): 226–232
- Oh CW. 2006. A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan; Histories from the Late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9(1–2): 47–61
- Paek RJ. 1996. Lower Proterozoic era stratigraphy. In: *Geological Institute, Academy of Sciences and North Korea (eds.)*. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 41–52
- Paek RJ and Ju YJ. 1996. Geophysical field and deep structure of the crust. In: *Geological Institute, Academy of Sciences and North Korea (eds.)*. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Language Book Publishing House, 619
- Paek RJ, Institute of Geology, State Academy of Sciences and DPR of Korea. 1996. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House
- Paek RJ and Rim DS. 2005. On the Rimjinang belt. In: *Gondwana to Asia Symposium of 2005*, Abstract Volume. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, B–1–5
- Park JG, Kim SW, Oh CW and Kim HS. 2003. Geochemical and geochronological studies on metaigneous rocks in the Gyemyeongsan Formation, northwestern Okcheon metamorphic belt and their tectonic implication. *Journal of Petrological Society of the Korea*, 12(4): 155–169

- Park KH, Kim DY and Song YS. 2001. Sm-Nd mineral ages of charnokite and ilmenite-bearing anorthositic rocks of the Jirisan area and their genetic relationship. *Journal of Petrological Society of Korea*, 10: 27–35
- Peng P, Zhai MG, Guo JH, Zhang HF and Zhang YB. 2008. Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton; An example from North Korea. *Geological Magazine*, 145(5): 637–647
- Peng P, Zhai MG, Li QL, Wu FY, Hou QL, Li Z, Li TS and Zhang YB. 2011. Neoproterozoic (~900Ma) Sariwon sills in North Korea; Geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 243–254
- Peng P, Yang SY and Wang XP. 2016a. A preliminary study on the distribution, magma series and petrogenesis of the Triassic igneous rocks in the Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3083–3097 (in Chinese with English abstract)
- Peng P, Wang C, Yang JH and Jin ZN. 2016b. A preliminary study on the rock series and tectonic environment of the ~1.9Ga plutonic rocks in North Korea. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2993–3018 (in Chinese with English abstract)
- Qian XL. 1986. Sino-Korea fault block. In: Zhang WY (ed.). *Continental-Oceanic Geotectonics of China and Adjacent Areas*. Beijing: Scientific Press, 160–162 (in Chinese)
- Ree JH, Cho M, Kwon ST and Nakamura E. 1996. Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea; The Imjingang belt. *Geology*, 24(12): 1071–1074
- Ree JH, Kwon SH, Park Y, Kwon ST and Prak SH. 2001. Pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granulitoids in the south central Okcheon belt, South Korea; Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20(6): 850–867
- Ri JN and Ri JC. 1990. *Geological Construction of Korea 6*. Pyongyang, North Korea: Industrial Publishing House, 1–216
- Ri JN and Ri JC. 1994. *Tectonic Map of Korea (1:1000000 scale) and Explanatory Text*. Pyongyang, North Korea: Central Geological Survey of Mineral Resources, 22
- Ri SR and Om HY. 1993. Middle-upper Proterozoic ERA. In: *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 41–52
- Ryu IC, Doh SJ and Choi SG. 2002. Carbonate breccias in the Lower-middle Ordovician Maggol limestone (Taebaek Basin, South Korea): Implications for regional tectonism. *Facies*, 46(1): 35–56
- Sagong H, Cheong CS and Kwon ST. 2003. Paleoproterozoic orogeny in South Korea; Evidence from Sm-Nd and Pb step-leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precambrian Research*, 122(1–4): 275–295
- Seo J, Choi SG, Oh CW, Kim SW, Krishnan S and Song SH. 2004. Genetic implication of two type ultramafic rocks from Bibong and Baekdong areas from western Korea. In: *Gondwana to Asia of 2004*, Abstract Volume. Chonju: Chonbook University, 30–35
- Seo J, Choi SG and Oh CW. 2010. Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18(2–3): 479–496
- Sonehara T and Harayama S. 2007. Petrology of the Nohi rhyolite and its related granulitoids: A Late Cretaceous large silicic igneous field in central Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1–4): 57–80
- Song YS, Park KH, Park ME, Cao L, Jin W, Zhang X and Rhoo HJ. 2001. Petrological, geochemical and geochronological studies of Precambrian in Northeast Asia region; 2. zircon ages of some metamorphic rocks from Gyeonggi massif. *Journal of Petrological Society of Korea*, 10: 95–105
- Wang C. 2016. Tectonic environments of Yan-Liao rift during Earth's Middle Age (1.7~0.75Ga); Evidence from mafic dyke swarms in Jiaodong. Master Degree Thesis. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Wu FY, Han RH, Yang JH, Wilde SA, Zhai MG and Park SC. 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238(3–4): 232–248
- Wu FY, Li QL, Yang JH, Jin ZN and Han RY. 2016. Crustal growth and evolution of the Rangnim Massif, northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2933–2947 (in Chinese with English abstract)
- Wu YD and Hou QL. 2016. The extension of the Dabie-Sulu orogenic belt in Korean Peninsula; Base on ⁴⁰Ar/³⁹Ar Tectonic chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3187–3204 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Wang F, Pei FP, Meng E, Tang J, Xu MJ and Wang W. 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China; Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339–353 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL, Wang XL, Pearson NJ and He ZY. 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes. *Precambrian Research*, 158(1–2): 51–78
- Yin A and Nie SY. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801–813
- Yu JH, O'Reilly SY, Wang LJ, Griffin WL, Zhou MF, Zhang M and Shu LS. 2010. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China; Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments. *Precambrian Research*, 181(1–4): 97–114
- Zhai MG, Cong BL, Guo JH, Liu WJ, Li YG 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 and Liu WJ. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review. *Precambrian Research*, 122(1–4): 183–199
- Zhai MG and Guo JH. 2005. Discovery of eclogites and extension of Sulu UHP belt in South Korea. *Mitteilungen Der sterreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 150: 172
- Zhai MG, Ni ZY, Oh CW, Guo JH and Choi SG. 2005. SHRIMP zircon age of a Proterozoic rapakivi granite batholith in the Gyeonggi massif (South Korea) and its geological implications. *Geological Magazine*, 142(1): 23–30
- Zhai MG, Guo JH, Li Z, Chen DZ, Peng P, Li TS, Zhang YB, Hou QL, Fan QC and Hu B. 2007. Extension of the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula; Evidence from Orogenic belts, Precambrian basements, and Paleozoic sedimentary basins. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 415–428 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Guo JH, Peng P and Hu B. 2007a. U-Pb zircon age dating of a rapakivi granite batholith in Rangnim massif, North Korea. *Geological Magazine*, 144(3): 547–552
- Zhai MG, Guo JH, Li Z, Chen DZ, Peng P, Li TS, Hou QL and Fan QC. 2007b. Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula; Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, 12(4): 388–403
- Zhai MG. 2013. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent. *Science China (Earth Sciences)*, 56(11): 1829–1852, doi: 10.1007/s11430-013-4665-7
- Zhai MG, Zhang YB, Zhang XH, Wu FY, Peng P, Li QL, Hou QL, Li TS and Zhao L. 2016. Renewed profile of the Mesozoic magmatism in Korean Peninsula; Regional correlation and broader implication for cratonic destruction in the North China Craton. *Science China (Earth Sciences)*, doi: 10.1007/s11430-016-0107-0
- Zhang SH, Zhao Y, Ye H, Hou KJ and Li CF. 2012a. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton; Implications for cratonic lithospheric destruction. *Lithos*, 155: 1–18
- Zhang SH, Zhao Y, Davis GA, Ye H and Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the

- North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Science Reviews*, 131: 49–87
- Zhang WY. 1986. Continental-Oceanic Geotectonics of China and Adjacent Areas. Beijing: Scientific Press, 45–56 (in Chinese)
- Zhang XH, Yuan LL, Xue FH and Zhang YB. 2012b. Contrasting Triassic ferroan granitoids from northwestern Liaoning, North China: Magmatic monitor of Mesozoic decratonization and a craton-orogen boundary. *Lithos*, 144–145: 12–23
- Zhang XH, Zhang YB, Zhai MG, Wu FY, Hou QL and Yuan LL. 2016. Decoding Neoproterozoic to Palaeoproterozoic tectonothermal events in the Rangnim Massif, Korean Peninsula: Regional correlation and broader implications. *International Geology Review*. doi: 10.1080/00206814.2016.1198995
- Zhang XH, Wang HZ, Park HN, Yang JH and Kim JN. 2016. Basement affinity of the Kwanmo Massif, Korean Peninsula: Evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Yindedong meta-intrusive complex. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2965–2980 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YB, Zhai MG, Hou QL, Li TS, Liu F and Hu B. 2012c. Late Cretaceous volcanic rocks and associated granites in Gyeongsang Basin, SE Korea: Their chronological ages and tectonic implications for cratonic destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 252–264
- Zhang YB, Wu FY, Yang JH, Kim JN and Han RY. 2016. Petrogenesis and geological implications of Phanerozoic granitoids at northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3098–3122 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Sun M. 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59(1–4): 125–162
- Zhao GC, Cao L, Wilde SA, Sun M, Choe WJ and Li SZ. 2006. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(3–4): 365–379
- Zhao L, Zhang YB, Yang JH, Han RY and Kim JN. 2016a. Archean rocks at the southeastern margin of the Rangnim massif, northern Korean Peninsula, and their response to Paleoproterozoic tectonothermal events. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3045–3069 (in Chinese with English abstract)
- Zhao L, Zhang YB, Wu FY, Li QL, Yang JH, Kim JN and Choi WJ. 2016b. Paleoproterozoic high temperature metamorphism and anatexis in northwestern Korean Peninsula: Constraints from petrology and zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2948–2964 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZP. 1993. Precambrian Crustal Evolution of the Sino-Korean Paraplatform. Beijing: Science Press, 389–390 (in Chinese)
- 构造-热事件记录. *岩石学报*, 32(10): 3019–3032
- 李忠, 彭守涛, 许承武, 韩银学, 翟明国. 2009. 韩国太白山盆地古生界砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代及其区域构造含义. *岩石学报*, 25(1): 182–192
- 李忠, 倪玲梅, 徐建强. 2016. 朝鲜半岛-华北古生界沉积序列与碎屑锆石年代学记录及其构造属性分析. *岩石学报*, 32(10): 3139–3154
- 廖鑫, 张晓晖, 金胜贤, 朴雄, 郑哲寿. 2016. 朝鲜元古代摩天岭群的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 32(10): 2981–2992
- 毛建仁, 叶海敏, Takahashi Y, 厉子龙, Kee WS, 赵希林, 刘凯. 2014. 中国东南沿海与西南日本白垩纪-古近纪火山-侵入岩带的地球动力学特征. *资源调查与环境*, 35(3): 157–168
- 彭澎, 杨书艳, 王欣平. 2016a. 朝鲜半岛三叠纪岩浆岩的分布、系列与成因浅析. *岩石学报*, 32(10): 3083–3097
- 彭澎, 王冲, 杨正赫, 金正男. 2016b. 朝鲜~19 亿年侵入岩的岩石类型与构造背景初探. *岩石学报*, 32(10): 2993–3018
- 钱祥麟. 1986. 中朝断块. 见: 张文佑. 中国及邻区海陆构造. 北京: 科学出版社, 160–162
- 王冲. 2016. 燕辽裂谷地球中期 (1.7–0.75 Ga) 构造背景: 来自冀东基性岩墙群的证据. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所
- 吴福元, 李秋立, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜北部狼林地块构造归属与地壳形成时代. *岩石学报*, 32(10): 2933–2947
- 武显东, 侯泉林. 2016. 大别-苏鲁造山带在中朝板块的东延方式——基于⁴⁰Ar/³⁹Ar 构造年代学的约束. *岩石学报*, 32(10): 3187–3204
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 孟恩, 唐杰, 徐美君, 王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约. *岩石学报*, 29(2): 339–353
- 翟明国, 郭敬辉, 李忠, 陈代钊, 彭澎, 李铁胜, 张艳斌, 侯泉林, 樊祺诚, 胡波. 2007. 苏鲁造山带在朝鲜半岛的延伸: 造山带、前寒武纪基底以及古生代沉积盆地的证据与制约. *高校地质学报*, 13(3): 415–428
- 张文佑. 1986. 中国及邻区海陆大地构造. 北京: 科学出版社, 45–56
- 张晓晖, 王浩铮, 朴贤旭, 杨正赫, 金正男. 2016. 朝鲜半岛冠帽地块的基底属性: 来自银德洞变质侵入杂岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据. *岩石学报*, 32(10): 2965–2980
- 张艳斌, 吴福元, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩成因研究及地质意义. *岩石学报*, 32(10): 3098–3122
- 赵磊, 张艳斌, 杨正赫, 韩龙渊, 金正男. 2016a. 朝鲜狼林地块东南缘太古代岩石及其对古元古代构造构造热事件的响应. *岩石学报*, 32(10): 3045–3069
- 赵磊, 张艳斌, 吴福元, 李秋立, 杨正赫, 金正男, 崔元正. 2016b. 朝鲜半岛西北部古元古代高温变质-深熔作用: 宏观和微观岩石学以及锆石 U-Pb 年代学制约. *岩石学报*, 32(10): 2948–2964
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 389–390

附中文参考文献

- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 21(4): 1281–1301
- 郝天珧, Suh M, 王谦身, Choi S, 江为为, 宋海斌, 阎晓蔚, 刘建华, 姚长利. 2002. 根据重力数据研究黄海周边断裂带在海区的延伸. *地球物理学报*, 45(3): 385–397
- 侯泉林, 武显东, 吴福元, 翟明国, 郭敬辉, 李忠. 2008. 大别-苏鲁造山带在朝鲜半岛可能的构造表现. *地质通报*, 27(10): 1659–1666
- 金正男, 韩龙渊, 赵磊, 李秋立, 金石山. 2016. 朝鲜半岛北部定州与铁山稀土矿相关碱性岩和花岗岩的岩石学和 SIMS 锆石 U-Pb 年代学特征研究. *岩石学报*, 32(10): 3123–3138
- 李秋立, 赵磊, 张艳斌, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜甑山“群”变质岩中锆石-榍石-金红石 U-Pb 体系: 古元古代-中生代