

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/311647835>

# Detrital zircon U–Pb ages of the Machollyong Group in Korean Peninsula: Regional correlation and tectonic implications

Article in *Acta Petrologica Sinica* · January 2016

CITATIONS

4

READS

96

5 authors, including:



[Liao Xin](#)

Chinese Academy of Sciences

3 PUBLICATIONS 16 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

# 朝鲜半岛古元古代摩天岭群的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义\*

廖鑫<sup>1,2</sup> 张晓晖<sup>1\*\*</sup> 金胜贤<sup>3</sup> 朴雄<sup>3</sup> 郑哲寿<sup>3</sup>

LIAO Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG XiaoHui<sup>1\*\*</sup>, KIM SungHyon<sup>3</sup>, PARK Ung<sup>3</sup> and JONG Cholsu<sup>3</sup>

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 100039

3. 朝鲜国家科学院地质研究所, 平壤 3812100

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 100039, China

3. Institute of Geology, State Academy of Sciences, Pyongyang 3812100, DPRK

2016-05-02 收稿, 2016-08-23 改回.

Liao X, Zhang XH, Kim SH, Park U and Jong C. 2016. Detrital zircon U-Pb ages of the Machollyong Group in Korean Peninsula: Regional correlation and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10):2981–2992

**Abstract** The meta-sedimentary successions in the intra-cratonic mobile belts encapsulate essential information for deciphering the convergent and divergent geodynamic processes of constituent terranes during the construction of early supercontinents. The detrital zircon geochronology presents a key to probing it. With a view to bridging the gap in the characterization of massive meta-sedimentary successions in the most representative Paleoproterozoic mobile belts (i. e., the Liao-Ji-Korea mobile belt) in the North China Craton, this study carried out a detrital zircon SIMS U-Pb dating on the Machollyong Group at Komdok, Korean Peninsula. Zircons from one meta-pyroclastic sample of the Puktaechon formation yielded a dominant peak age of ca. 2.53Ga and a youngest peak age of ca. 2.19Ga, constraining their formation time to later than 2.2Ga. Detrital zircons from one meta-sedimentary sample of the Namdaechon formation yielded a dominant peak age span from 2.02 to 2.18Ga, a subordinate peak age of ca. 2.46Ga and a few older ages from 2.78 to 3.30Ga, reflecting dual provenances of the Paleoproterozoic plutons in the Rangnim Massif and the Neoarchean and Mesoarchean crusts in the neighboring terranes. The youngest detrital age constrains the maximum deposition time of the Namdaechon formation at ca. 2.02Ga. Regional comparison suggests that the Machollyong Group shows consistent detrital zircon age spectra with the Liaohe Group and Ji'an/Laoling groups in the Liao-Ji mobile belt. Such consistency indicates their synchronization in deposition and similarity in provenance. These coeval and consanguineous litho-stratigraphic sequences can provide insightful reference for calibrating the tectonic affinity in the Liao-Ji and Korea mobile belt during the Paleoproterozoic. The dominance of detrital zircons with ages close to the depositional age is characteristic of various basins on convergent plate margins, but inconsistent with rift basins commonly featuring much older detrital zircons than the depositional age.

**Key words** Detrital zircons; U-Pb geochronology; Tectonic affinity; Machollyong Group; Korean Peninsula

**摘要** 克拉通内部活动带变质沉积建造蕴藏了早期超大陆形成中地体聚-散动力学过程的重要信息,碎屑锆石年代学则是揭示这种信息的最佳工具之一。针对华北(中-朝)克拉通最具代表性的古元古代活动带(辽-吉-朝活动带)中巨量沉积建造精细表征方面的空白区域,本文开展了朝鲜半岛检德地区摩天岭群的碎屑锆石年代学研究。SIMS U-Pb 定年结果显示,北大川组变火山碎屑岩样品的锆石年龄谱记录了约 2.53Ga 的主要年龄峰值和约 2.19Ga 的最年轻峰值,说明北大川组开始沉积的时代应该晚于 2.2Ga。南大川组变沉积岩样品碎屑锆石记录的最年轻峰值年龄为约 2.02Ga,说明南大川组的沉积时代应

\* 本文受国家自然科学基金项目(41210003)、国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB416603)和国家自然科学基金重点项目(41530208)联合资助。

第一作者简介:廖鑫,男,1992年生,博士生,地球化学专业,E-mail: liaoxin@mail.iggcas.ac.cn

\*\* 通讯作者:张晓晖,男,1971年生,研究员,岩石学与地球化学专业,E-mail: zhangxh@mail.iggcas.ac.cn

该不早于 2.02Ga;其锆石年龄谱记录了一个主要年龄峰值区域(2.02~2.18Ga)、一个次要年龄峰值(约 2.46Ga)和一些 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邻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。这些时代一致、物源相近的沉积建造可以为甄别古元古代辽-吉-朝活动带的大地构造属性提供重要参考。与沉积年龄相近的碎屑锆石占据主导的碎屑锆石年龄谱反映了汇聚板块边缘各类盆地的典型特征,而相悖于大部分碎屑锆石年龄远大于地层沉积年龄的裂谷型盆地。

**关键词** 碎屑锆石; 锆石 U-Pb 年龄; 大地构造属性; 摩天岭群; 朝鲜半岛

**中图法分类号** P544; P597.3

## 1 引言

克拉通内部古老造山/活动带的识别和表征既是揭示全球古老克拉通形成演化的重要基础,又是重塑早期超大陆构造格局的关键纽带(Zhai and Santosh, 2011; Zhao *et al.*, 2012; 刘福来等, 2015)。这对于华北(中朝)克拉通而言尤其如此。作为东亚出露面积最大和最古老的陆块,华北克拉通经历了复杂程度远超全球其他克拉通的形成演化历史(Zhai and Santosh, 2011; Zhao *et al.*, 2012),也造就了过去三十年国际固体地球科学界最精彩纷呈的研究主题。回溯近年来层出不穷的科学进展,最重要的莫过于识别了三条古元古代造山/活动带(翟明国等, 1992; Zhao *et al.*, 2001, 2005, 2012, 2016; Kusky and Li, 2003; Zhai *et al.*, 2005; 翟明国和彭澎, 2007; Zhai and Santosh, 2011; 刘福来等, 2015),即胶-辽-吉带、中部造山带/晋豫活动带以及丰镇活动带/孔兹岩带(图 1a)。它们不仅直接记录了克拉通形成过程中微陆块拼贴-焊接的动力学过程,而且间接响应了华北克拉通在全球 Columbia 超大陆中的位置变迁(刘福来等, 2015)。

与位于中国境内的晋豫和丰镇活动带不同,胶-辽-吉带向东延伸至朝鲜半岛,其在北、南两侧以断裂带为界分别毗邻于华北克拉通东部龙岗地块和朝鲜狼林地块(图 1b)。该带不仅是一条记录多期岩浆-构造热事件的复合造山带(刘福来等, 2015),而且是一条赋存了与这些事件密切相关的多种金属(金、铅、锌等)和非金属(菱镁矿、硼矿等)的矿产资源富集带(Zhai and Santosh, 2013)。在华北克拉通东部的辽-吉地区,籍助于高精度测年手段和精细岩石地球化学方法的大量运用,近年来众多学者在揭示巨量沉积建造的形成时代和物质来源、厘定岩浆-变质事件年代格架以及刻画变质演化 *P-T-t* 轨迹等诸多方面取得了长足进展(详见 Zhao *et al.*, 2012 与刘福来等, 2015 的评述);另一方面,在与辽-吉地区毗邻的朝鲜半岛北部,近年来中国学者应用锆石 U-Pb 年代学在狼林地块和临津江带厘定了几期古元古代岩浆侵入事件(Zhao *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007a; Zhai *et al.*, 2007a),占据狼林地块主体的巨量古元古代火山沉积建造和太古宙变质基底则缺乏可靠的精细年代学约束。这不仅制约了对于胶-辽-吉活动带空间分布格局和狼林地块构造演化历史的全面认识,而且影响了对于辽-吉-朝一带巨量矿产资

源富集规律的科学评价。

新世纪以来的海量研究案例表明,碎屑锆石年代学已经成为确定沉积建造形成时代并示踪沉积物源区的最有效工具(Cawood *et al.*, 2012; Gehrels, 2014)。本次研究中,我们拟将这一方法应用于朝鲜半岛北部最重要的古元古代摩天岭群变质火山沉积建造,旨在精确约束其沉积时代和物质来源;并与辽吉地区同时代火山沉积建造进行对比,进而为探讨狼林地块演化历史和中朝克拉通古元古代大地构造格局提供重要区域案例。

## 2 区域地质背景

从大地构造格局来讲,朝鲜半岛大体呈现由三个前寒武地块与三个显生宙造山带间列分布的条块镶嵌格局(图 1c)。三个主要地块自北向南分别为狼林地块、京畿地块和岭南地块(Paek *et al.*, 1996);后者则包括东北部的豆满江造山带(或图们江褶皱带)、中部东西向延展的临津江带和南部呈北东走向的沃川造山带(Cluzel, 1992; Chang, 1996; Paek *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000; Cho *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2007b)。此外,朝鲜半岛发育的两个主要古生代盆地为北部的平南盆地和南部的庆尚盆地(Lee and Lee, 2003; Zhai *et al.*, 2007b)。

朝鲜半岛北部涵盖三个构造单元:居中的狼林地块以及分列两翼的豆满江带与临津江带(图 1a)。狼林地块前寒武基底主要包括新太古代-古元古代表壳岩和 TTG-花岗质深成变质杂岩。依据岩石组合和变质程度的不同,表壳岩可以分为麻粒岩相-高角闪岩相变质的狼林群(Rangnim Group)、角闪岩相变质的甑山群(Jungsan Group)以及绿片岩相-角闪岩相变质的摩天岭群(Machollyong Group)(Paek *et al.*, 1996; 曹林和朱东, 1999)。狼林群主要岩性包括富铝片麻岩、变粒岩夹少量斜长角闪岩、石英岩和大理岩,局部发育麻粒岩与超镁铁变质岩。甑山群是一套以富铝片麻岩和石墨片麻岩为主的孔兹岩系,具体包括下部的富铝质片岩和角闪岩、中部大理岩和片岩、以及上部长英质片麻岩和石英岩。

摩天岭群主要呈北西-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组、以厚层碳酸岩为主的北大川组和以陆源碎屑岩组合为主的南大川组(Paek *et al.*, 1996)。与上述

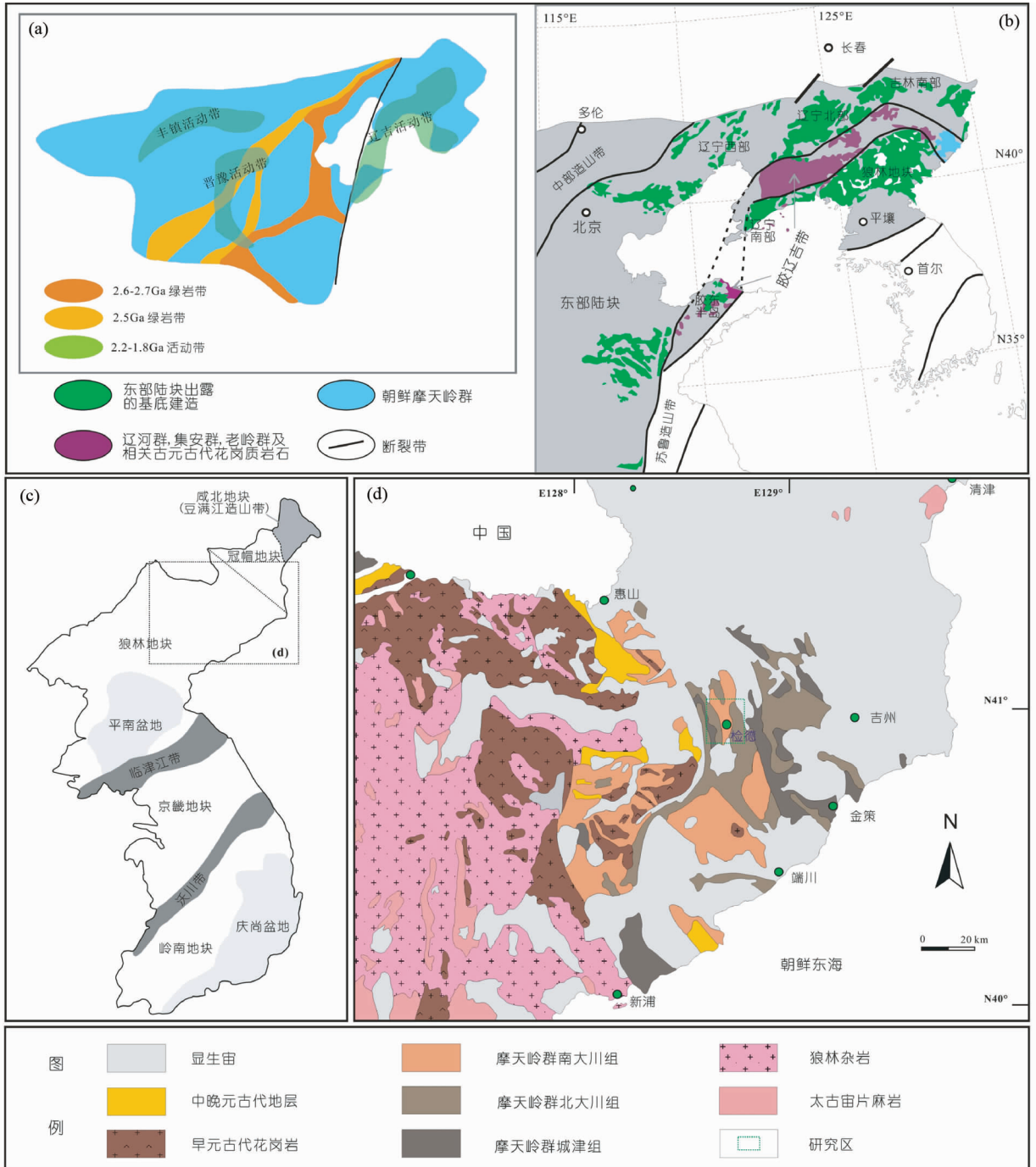


图1 华北克拉通古元古代活动带分布图(a,据 Zhai and Santosh, 2011 修改)、辽-吉-朝活动带地质简图(b,据 Zhao *et al.*, 2005 修改)、朝鲜半岛构造分区简图(c,据 Zhao *et al.*, 2006 修改)和狼林地块地质简图(d,据 IGSASDPRK, 1993 修改)  
 Fig.1 Paleoproterozoic mobile belts in North China Craton (a, after Zhai and Santosh, 2011), sketch geological map of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji mobile belt (b, modified after Zhao *et al.*, 2005), tectonic subdivisions of the Korean Peninsula (c, after Zhao *et al.*, 2006) and sketch geological map of the Rangnim massif (d, modified after IGSASDPRK, 1993)

表壳岩密切伴生的深成侵入杂岩包括 TTG 片麻岩、石榴石/夕线石 S 型花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩和斑状花岗岩等 (Zhao *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007a; Zhai *et al.*, 2007a)。锆石 U-Pb 测年显示 TTG 片麻岩侵位于 2.64 ~ 2.54Ga, S 型

花岗岩侵位于 1.91 ~ 1.90Ga, 而斑状花岗岩形成于 1.87 ~ 1.81Ga (Zhao *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007a; Zhai *et al.*, 2007a)。除上述变质杂岩之外, 中生代花岗岩 (包括碱性岩) 在狼林地块内广泛发育, 并可划分为三叠纪、侏罗纪和白垩

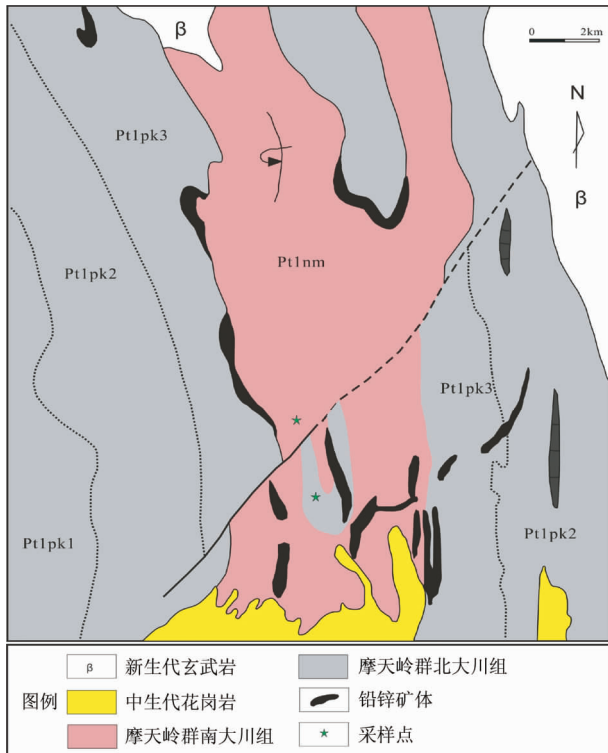


图2 朝鲜检德地区地质简图(据白龙俊等,1986修改)  
Fig.2 Sketch geological map in the Komdok region, DPRK

纪三个阶段,分别以惠山(Hyesan)、端川(Tanchon)和鸭绿江(Amnokgang)花岗岩为代表,大致相当于朝鲜南部的松林(Songnim)、大宝(Taebo)和载宁江(Jaeryonggang)运动(Paek *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2007a; Zhai *et al.*, 2016)。

注意到前寒武变质岩系分布的不均一性和变质程度差异,有些朝鲜学者将发育有前寒武变质岩系的冠帽峰一带单独命名为冠帽(Kwanmo)地块(Paek *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000)。其主要变质岩系由茂山群(Mushan)表壳岩和相关变质侵入杂岩组成。茂山群是一套经历低角闪岩相-角闪岩相变质作用的火山沉积建造,岩石组合主要包括条带状铁建造、石墨片岩、长英质片麻岩和斜长角闪岩。此外,该地块大部分由主要形成于侏罗纪的冠帽峰复合岩基所占据。

冠帽地块以输城川(Susongchon)断裂为界与咸北(Hambuk)地块毗邻(图1c)。咸北地块以发育一系列晚古生代以来的火山沉积建造和侵入岩浆活动为特征(Paek *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2007a; 张晓晖等,2016),故又得名“豆满江造山带”,被认为属于中亚造山带的东南延伸(Paek *et al.*, 1996; 张晓晖等,2016)。

新生代以来,朝鲜北部主要发育以白头山为代表的火山活动,很多地方见及规模不等的玄武岩台地,部分碱性玄武岩中还发育新鲜的大小不等的橄榄岩包体(Yang *et al.*, 2010)。

### 3 样品及其岩相学特征

本文研究的样品采自检德地区的摩天岭群(图2),著名的检德铅锌矿就产在其中。该地区主要发育摩天岭群的北大川组和南大川组(图2)。其中,北大川组以厚层碳酸岩为主(图3a)。下部由白云岩及火山碎屑岩互层组成,中部为硅质白云岩,上部为白云岩(白龙俊等,1986<sup>①</sup>)。南大川组自下而上包括三个岩石地层单元(图3a),下部由大理岩和薄层片岩互层组成,中部为厚层片岩,上部为石英岩和砾岩(白龙俊等,1986)。该套地层受构造影响发生强烈褶皱(图4a, b)。由低级变质作用形成的绿泥石片岩、绢云母片岩到高级变质作用形成的夕线石黑云母片麻岩组成(徐月善和全贞爱,1986<sup>②</sup>)。

样品13NK-127采自南大川组,岩性为含夕线石二云母片岩(图4c),岩石具显微鳞片变晶结构,片状构造;主要矿物组成包括石英(40%)、白云母(20%)、黑云母(30%)和少量斜长石(2%);次要组成包括绿帘石、榍石、钛铁矿、锆石和夕线石。斜长石发生绢云母化,云母定向排列显著。

样品13NK-140采自北大川组下部的变火山碎屑岩夹层,岩性为含黑云母变斑晶的二云母片岩(图4d)。黑云母变斑晶含量约20%,绿泥石化强烈;基质主要由石英、绿泥石、白云母和黑云母组成;副矿物包括榍石、锆石和不透明金属矿物。

### 4 分析方法

采用常规方法分选锆石后,将锆石样品颗粒连同锆石标样Plésovice(Sláma *et al.*, 2008)和Qinghu(Li *et al.*, 2009)制成环氧树脂靶,然后抛光使其曝露一半晶面。样品靶制成后,首先在光学显微镜下对被测样品进行照相(包括透射光和反射光),然后在扫描电镜实验室进行锆石阴极发光(CL)图像分析,以检查锆石的内部结构,帮助选择适宜的测试点位。样品靶在真空下镀金以备分析。锆石单矿物挑选在河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室完成,制靶工作、反射光、透射光和CL阴极发光照片采集分别在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室和扫描电镜实验室完成。

锆石SIMS U-Pb分析在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室Cameca IMS-1280HR二次离子质谱仪

① 白龙俊,全富国,李明希,沈洙范. 1986. 论检德-文乐坪型矿床. 见:朝鲜检德地区铅锌矿地质译文集赵载振等译. 辽宁省地质矿产局(内部资料), 1-16

② 徐月善,全贞爱. 1986. 检德地区南大川组下部层片岩的岩石学特征. 见:朝鲜检德地区铅锌矿地质译文集. 赵载振等译. 辽宁省地质矿产局(内部资料), 78-84

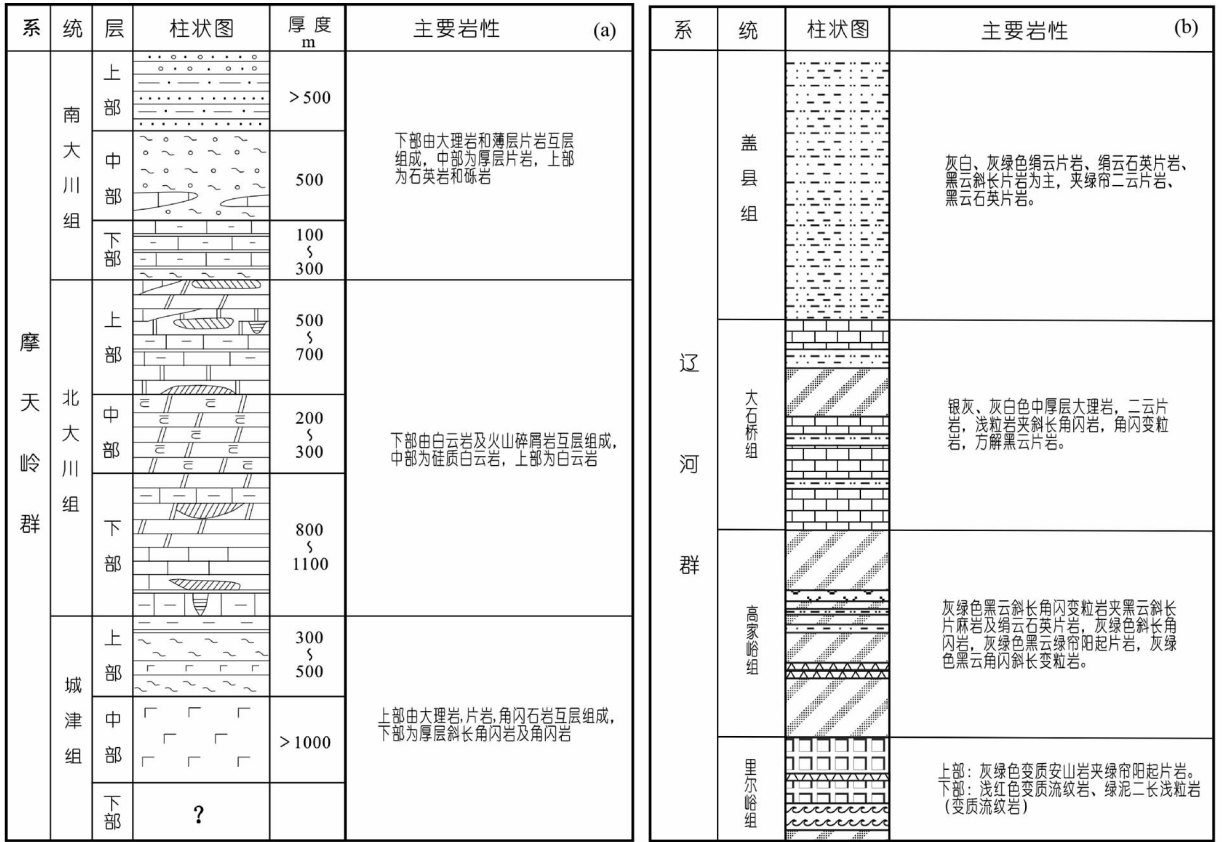


图3 摩天岭群(a, 据白龙俊等, 1996 修改)和辽河群(b, 据 Luo *et al.*, 2004 修改)柱状对比图

Fig. 3 Lithostratigraphic units of the Machollyong Group (a) and of the Liaohe Group (b, modified after Luo *et al.*, 2004)

上完成。应用 SIMS 进行 U-Th-Pb 分析的详细流程参见 Li *et al.* (2009)。锆石标样与锆石样品以 1 : 3 比例交替测定。U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice (337Ma, Sláma *et al.*, 2008) 校正获得, U 含量采用标准锆石 91500 ( $81 \times 10^{-6}$ , Wiedenbeck *et al.*, 1995) 校正获得, 以长期监测标准样品获得的标准偏差 ( $1SD = 1.5\%$ , Li *et al.*, 2010) 和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差, 以标准样品 Qinghu (159.5Ma, Li *et al.*, 2009) 作为未知样监测测量流程的稳定性和精确度。普通 Pb 校正采用实测  $^{204}\text{Pb}$  值。由于测得的普通 Pb 含量非常低, 假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染, 以现代地壳的平均 Pb 同位素组成 (Stacey and Kramers, 1975) 作为普通 Pb 组成进行校正。由于锆石年龄主要集中在太古代和古元古代, 锆石实测  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄内部精度过好, 考虑到离子探针仪器质量分馏的不确定度 ( $\sim 0.4\%$ , Stern *et al.*, 2009) 和古老锆石发生轻微 Pb 丢失而不易察觉的特点, 给  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄传递了一个 0.5% 的外部误差。同位素比值及年龄误差均为  $1\sigma$ 。采用 ISOPLOT 软件进行数据处理和年龄计算 (Ludwig, 2001)。

### 5 分析结果

2 个样品中的锆石 U-Pb 同位素分析结果列于表 1。其

中, 样品 13NK-127 中的碎屑锆石粒度细小, 长约  $30 \sim 80\mu\text{m}$ ; 形态多样, 从他形椭圆状到自形短柱状不定。在阴极发光图像中, 大部分锆石具有清晰的震荡环带, 个别无环带结构 (图 5a)。针对 45 颗具岩浆环带锆石进行的测试结果表明, 45 个数据点的 Th、U 含量变化较大, 分别为  $48 \times 10^{-6} \sim 1538 \times 10^{-6}$  和  $289 \times 10^{-6} \sim 2288 \times 10^{-6}$ ; Th/U 比值介于  $0.05 \sim 0.74$ 。45 个数据点沿谐和线分布 (图 6a),  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄介于 1961 ~ 3299Ma 之间, 四个主要峰值分别为 2018Ma、2052Ma、2121Ma 和 2179Ma (图 6b)。一个次要峰值为 2458Ma, 另外尚有 4 颗年龄谐和的 2.78 ~ 3.30Ga 碎屑锆石。值得一提的是, #21 分析点给出的最小谐和年龄为 1961Ma, 但阴极发光图像显示该锆石原始环带已模糊不清, Th/U 比值为 0.17, 很可能已受后期热事件重置。

样品 13NK-140 中的锆石颗粒大多为自形或半自形, 直径  $50 \sim 100\mu\text{m}$  左右; 阴极发光图像显示大部分锆石具有明显的震荡环带, 个别锆石原始环带模糊不清 (图 5b)。38 颗锆石的测试结果表明, 其 Th、U 含量分别为  $67 \times 10^{-6} \sim 2144 \times 10^{-6}$  和  $129 \times 10^{-6} \sim 2428 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值介于  $0.42 \sim 2.31$ , 契合岩浆成因锆石范围 (Belousova *et al.*, 2002)。数据点在锆石年龄谐和图上基本沿谐和线分布 (图 6c),  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄变化于 2178 ~ 2585Ma 之间, 主要年龄峰值为 2534Ma, 另外两个次要峰值为 2397Ma 和 2190Ma (图 6d)。此



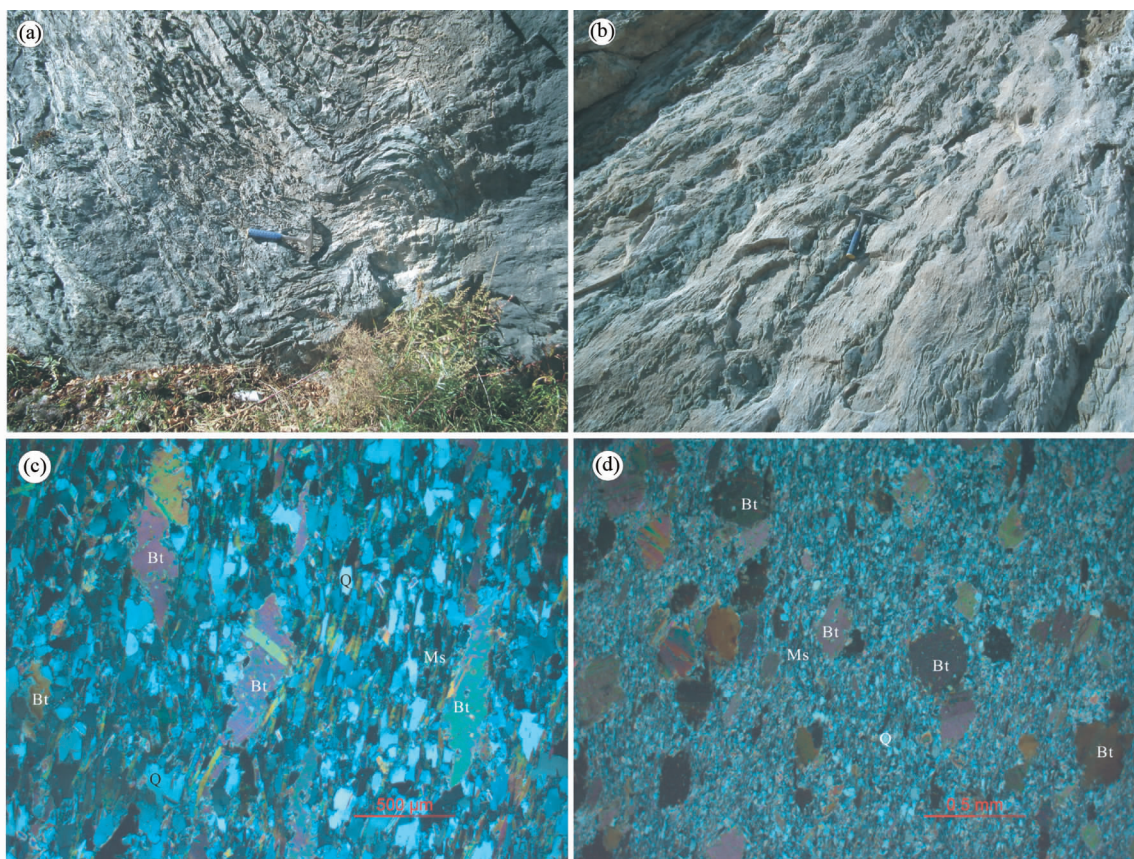


图4 朝鲜检德地区摩天岭群南大川组与北大川组变质沉积岩系的野外露头照片与代表性样品显微图像

(a) 中途场南大川组大理岩和薄层片岩互层; (b) 中途场北大川组片岩; (c) 片岩样品 13NK-127; (d) 片岩样品 13NK-140

Fig. 4 Outcrop photos of the Machollyong Group meta-sedimentary successions and micrographs of representative sample in the Komdok region, DPRK

(a) intercalated marbles and schists of the Namdaechon Formation at Jungtojang; (b) schists of the Puktaechon Formation at Jungtojang; (c) Sample 13NK-127; (d) Sample 13NK-140

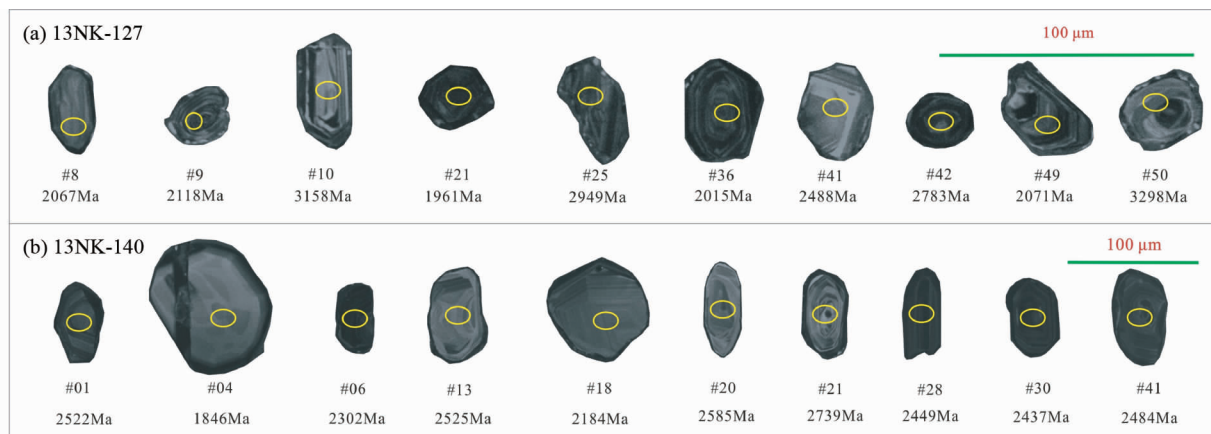


图5 朝鲜检德地区摩天岭群变质沉积岩中碎屑锆石的阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of detrital zircons from the meta-sedimentary successions of the Machollyong Group in the Komdok region, Korean Peninsula

(a) Sample 3NK-127; (b) Sample 13NK-140

表 1 朝鲜检德地区摩天岭群变质沉积岩中锆石 SIMS U-Th-Pb 分析数据

Table 1 SIMS zircon U-Th-Pb analytical data for the meta-sedimentary successions of the Machollyong Group in the Komdok region, Korean Peninsula

测点号	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th	Th/U	$f_{206}$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm \sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm \sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm \sigma$ (%)	$\rho$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ (Ma)	$\pm \sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ (Ma)	$\pm \sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)	$\pm \sigma$
13NK127																	
13NK127@01	788	65	0.08	0.06	0.1243	0.52	6.455	1.59	0.3767	1.50	0.95	2018	9	2040	14	2061	27
13NK127@02	762	277	0.36	0.66	0.1269	0.54	6.516	1.61	0.3724	1.52	0.94	2056	10	2048	14	2041	27
13NK127@03	2071	1538	0.74	0.07	0.1316	0.52	7.346	1.64	0.4048	1.56	0.95	2119	9	2154	15	2191	29
13NK127@05	504	344	0.68	0.20	0.1602	0.52	10.21	1.59	0.4624	1.50	0.95	2458	9	2454	15	2450	31
13NK127@06	985	257	0.26	0.13	0.1359	0.53	7.734	1.60	0.4128	1.51	0.94	2175	9	2201	14	2228	29
13NK127@07	1576	229	0.15	0.04	0.1573	0.51	10.06	1.60	0.4640	1.52	0.95	2426	9	2440	15	2457	31
13NK127@08	656	66	0.10	0.07	0.1277	0.53	6.860	1.62	0.3895	1.53	0.94	2067	9	2094	14	2121	28
13NK127@09	1179	433	0.37	0.06	0.1315	0.53	7.111	1.60	0.3921	1.51	0.94	2119	9	2125	14	2132	27
13NK127@10	948	262	0.28	0.05	0.2459	0.57	21.54	1.61	0.6354	1.50	0.94	3158	9	3163	15	3171	38
13NK127@11	972	48	0.05	0.03	0.1555	0.51	9.742	1.65	0.4543	1.57	0.95	2408	9	2411	15	2414	32
13NK127@16	595	205	0.34	0.08	0.1260	0.53	6.405	1.60	0.3688	1.51	0.94	2042	9	2033	14	2024	26
13NK127@17	536	347	0.65	0.18	0.1376	0.60	8.011	1.62	0.4222	1.51	0.93	2197	10	2232	15	2270	29
13NK127@18	1513	284	0.19	0.72	0.1379	0.72	7.918	1.68	0.4164	1.51	0.90	2201	13	2222	15	2244	29
13NK127@19	516	268	0.52	0.15	0.1265	0.53	6.694	1.59	0.3837	1.50	0.94	2050	9	2072	14	2094	27
13NK127@20	426	129	0.30	0.29	0.1473	0.65	8.624	1.63	0.4245	1.50	0.92	2315	11	2299	15	2281	29
13NK127@21	852	146	0.17	0.25	0.1203	0.52	5.968	1.59	0.3597	1.50	0.94	1961	9	1971	14	1981	26
13NK127@22	1159	603	0.52	1.58	0.1380	3.63	7.940	4.01	0.4173	1.70	0.42	2203	63	2224	36	2248	32
13NK127@23	540	219	0.41	0.13	0.1595	0.72	10.02	2.03	0.4555	1.90	0.93	2451	12	2437	19	2420	38
13NK127@24	637	411	0.65	0.02	0.1359	0.52	7.670	1.64	0.4092	1.56	0.95	2176	9	2193	15	2211	29
13NK127@25	1158	197	0.17	0.04	0.2157	0.52	16.44	1.60	0.5527	1.51	0.95	2949	8	2903	15	2837	35
13NK127@26	1159	125	0.11	0.03	0.1294	0.52	6.641	1.59	0.3723	1.50	0.95	2090	9	2065	14	2040	26
13NK127@27	383	125	0.33	1.11	0.1325	0.96	7.215	2.08	0.3950	1.84	0.89	2131	17	2138	18	2146	34
13NK127@28	946	248	0.26	0.16	0.1240	0.55	6.305	1.60	0.3689	1.50	0.94	2014	10	2019	14	2024	26
13NK127@29	959	609	0.64	0.04	0.1358	0.52	7.575	1.62	0.4046	1.53	0.95	2174	9	2182	14	2190	29
13NK127@30	770	315	0.41	0.22	0.1321	0.58	7.003	3.05	0.3846	2.99	0.98	2126	10	2112	27	2098	54
13NK127@31	857	279	0.33	0.09	0.1299	0.54	6.866	1.59	0.3835	1.50	0.94	2096	9	2094	14	2092	27
13NK127@32	798	237	0.30	0.21	0.1341	0.59	6.881	1.70	0.3720	1.60	0.94	2153	10	2096	15	2039	28
13NK127@33	897	385	0.43	0.04	0.1245	0.52	6.241	1.59	0.3636	1.50	0.95	2022	9	2010	14	1999	26
13NK127@34	625	303	0.48	0.18	0.1342	0.55	7.568	1.61	0.4090	1.52	0.94	2153	10	2181	14	2211	28
13NK127@35	1224	453	0.37	0.03	0.1354	0.51	7.722	2.95	0.4138	2.90	0.98	2169	9	2199	26	2232	55
13NK127@36	1218	334	0.27	0.01	0.1241	0.51	6.461	1.59	0.3777	1.50	0.95	2016	9	2041	14	2065	27
13NK127@37	289	126	0.44	0.14	0.1308	0.65	6.851	1.82	0.3800	1.70	0.93	2108	11	2092	16	2076	30
13NK127@39	1297	290	0.22	0.06	0.1233	0.53	6.423	4.03	0.3778	3.99	0.99	2004	9	2035	35	2066	71
13NK127@40	783	297	0.38	0.15	0.1262	0.55	6.393	1.85	0.3675	1.77	0.95	2045	10	2031	16	2018	31
13NK127@41	429	283	0.66	0.08	0.1632	0.52	10.78	1.68	0.4790	1.59	0.95	2489	9	2504	15	2523	33
13NK127@42	1487	805	0.54	0.03	0.1948	0.51	14.30	1.67	0.5326	1.60	0.95	2783	8	2770	16	2752	36
13NK127@43	1514	771	0.51	0.04	0.1278	0.51	7.030	1.89	0.3989	1.82	0.96	2068	9	2115	17	2164	33
13NK127@44	866	260	0.30	0.10	0.1370	0.53	7.558	1.60	0.4000	1.51	0.94	2190	9	2180	14	2169	28
13NK127@45	2288	926	0.40	0.05	0.1220	0.51	6.189	1.65	0.3680	1.57	0.95	1985	9	2003	14	2020	27
13NK127@46	637	363	0.57	0.02	0.1437	0.52	8.542	1.65	0.4312	1.56	0.95	2272	9	2290	15	2311	30
13NK127@47	542	258	0.48	0.31	0.1260	0.56	6.645	1.70	0.3826	1.61	0.95	2042	10	2065	15	2088	29
13NK127@48	311	110	0.35	0.37	0.1369	0.62	7.045	1.62	0.3732	1.50	0.92	2188	11	2117	14	2045	26
13NK127@49	1688	916	0.54	0.04	0.1281	0.52	6.972	1.59	0.3949	1.50	0.95	2071	9	2108	14	2145	27
13NK127@50	607	59	0.10	0.03	0.2688	0.59	24.36	1.82	0.6575	1.72	0.95	3299	9	3283	18	3257	44
13NK140																	
13NK140@01	288	168	0.58	0.06	0.1665	0.74	10.68	1.68	0.4654	1.51	0.90	2522	12	2496	16	2463	31
13NK140@02	394	277	0.70	0.04	0.1677	0.60	10.18	1.62	0.4401	1.50	0.93	2535	10	2451	15	2351	30
13NK140@03	616	657	1.07	0.03	0.1678	1.17	10.79	1.95	0.4665	1.56	0.80	2536	20	2505	18	2468	32



续表 1

Continued Table 1

测点号	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th	Th/U	$f_{206}$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm \sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm \sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm \sigma$ (%)	$\rho$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ (Ma)	$\pm \sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ (Ma)	$\pm \sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ (Ma)	$\pm \sigma$
13NK140@04	324	169	0.52	0.04	0.1128	0.99	5.033	1.81	0.3235	1.51	0.83	1846	18	1825	15	1807	24
13NK140@05	983	409	0.42	0.03	0.1660	0.94	10.11	1.78	0.4416	1.51	0.85	2517	16	2444	16	2358	30
13NK140@06	2428	2144	0.88	0.06	0.1462	0.57	8.550	1.60	0.4241	1.50	0.94	2302	10	2291	14	2279	29
13NK140@08	778	1280	1.65	0.03	0.1539	0.55	9.385	1.60	0.4423	1.50	0.94	2389	9	2376	15	2361	30
13NK140@09	956	931	0.97	0.02	0.1620	1.21	10.36	1.94	0.4640	1.51	0.78	2476	20	2468	18	2457	31
13NK140@11	891	1090	1.22	0.01	0.1661	0.54	10.94	1.62	0.4775	1.53	0.94	2519	9	2518	15	2516	32
13NK140@12	416	317	0.76	0.02	0.1707	0.58	11.57	1.63	0.4915	1.52	0.94	2565	10	2570	15	2577	32
13NK140@13	117	67	0.57	0.06	0.1668	1.04	10.87	1.84	0.4727	1.52	0.83	2525	17	2512	17	2495	32
13NK140@14	475	841	1.77	0.00	0.1657	0.59	10.95	1.62	0.4793	1.51	0.93	2515	10	2519	15	2524	32
13NK140@15	364	488	1.34	0.01	0.1678	0.66	11.09	1.65	0.4795	1.51	0.92	2536	11	2531	15	2525	32
13NK140@17	176	197	1.12	0.04	0.1674	2.00	10.73	2.50	0.4647	1.50	0.60	2532	34	2500	23	2460	31
13NK140@18	129	72	0.56	0.07	0.1366	0.82	7.382	1.71	0.3920	1.50	0.88	2184	14	2159	15	2132	27
13NK140@19	352	345	0.98	0.02	0.1727	0.77	11.51	1.70	0.4831	1.51	0.89	2584	13	2565	16	2541	32
13NK140@20	234	181	0.78	0.00	0.1728	1.13	11.45	1.91	0.4806	1.54	0.81	2585	19	2561	18	2530	32
13NK140@21	214	129	0.60	1.28	0.1896	1.02	13.71	1.86	0.5245	1.55	0.84	2739	17	2730	17	2718	35
13NK140@22	315	166	0.53	0.02	0.1684	0.60	11.09	1.64	0.4776	1.53	0.93	2541	10	2530	15	2517	32
13NK140@23	300	126	0.42	0.01	0.1726	0.81	11.80	1.78	0.4957	1.58	0.89	2583	14	2588	17	2595	34
13NK140@25	499	214	0.43	0.75	0.1361	2.03	7.006	2.77	0.3733	1.89	0.68	2178	35	2112	24	2045	33
13NK140@26	231	144	0.62	>1e6	0.1716	0.78	11.31	1.74	0.4781	1.56	0.90	2574	13	2549	16	2519	33
13NK140@27	469	321	0.68	0.26	0.1552	0.78	11.13	3.42	0.5201	3.33	0.97	2404	13	2534	31	2700	74
13NK140@28	813	942	1.16	0.02	0.1594	1.04	10.56	1.91	0.4805	1.60	0.84	2449	18	2485	18	2529	34
13NK140@30	569	885	1.55	0.05	0.1582	1.26	10.28	1.96	0.4712	1.50	0.77	2437	21	2460	18	2489	31
13NK140@31	442	1020	2.31	0.02	0.1639	0.73	10.84	1.78	0.4797	1.62	0.91	2496	12	2510	16	2526	34
13NK140@34	280	268	0.96	0.19	0.1702	1.12	10.80	2.24	0.4602	1.94	0.87	2560	19	2506	21	2440	39
13NK140@35	163	87	0.53	0.10	0.1681	0.82	11.22	1.71	0.4842	1.50	0.88	2539	14	2542	16	2546	32
13NK140@37	139	118	0.85	0.02	0.1727	0.66	11.31	1.65	0.4747	1.52	0.92	2584	11	2549	15	2504	32
13NK140@38	226	346	1.53	0.07	0.1702	0.70	11.52	1.66	0.4907	1.50	0.91	2560	12	2566	15	2574	32
13NK140@39	480	405	0.84	0.07	0.1588	0.95	9.853	2.50	0.4500	2.32	0.93	2443	16	2421	23	2395	46
13NK140@40	363	549	1.51	0.00	0.1634	0.66	10.79	1.64	0.4788	1.50	0.92	2491	11	2505	15	2522	31
13NK140@41	334	698	2.09	0.07	0.1627	0.76	10.02	2.17	0.4468	2.04	0.94	2484	13	2437	20	2381	41
13NK140@42	519	683	1.32	0.01	0.1645	0.55	10.50	1.60	0.4630	1.50	0.94	2502	9	2480	15	2453	31
13NK140@44	158	187	1.19	0.01	0.1698	0.91	11.39	1.85	0.4865	1.61	0.87	2556	15	2556	17	2556	34
13NK140@45	548	353	0.64	0.01	0.1671	0.54	10.89	1.60	0.4727	1.50	0.94	2529	9	2514	15	2495	31
13NK140@46	214	376	1.75	0.02	0.1685	1.06	10.96	2.04	0.4720	1.74	0.85	2542	18	2520	19	2492	36
13NK140@47	830	398	0.48	0.09	0.1663	1.48	10.32	2.36	0.4503	1.83	0.78	2520	25	2464	22	2397	37

外, #4 锆石分析点给出的最小谐和年龄为约 1846Ma, 阴极发光图像显示其核部结构已遭受变质重结晶影响(图 5b)。

## 6 讨论

### 6.1 摩天岭群的形成时代

摩天岭群是朝鲜半岛北部最重要的古元古代变质沉积建造, 朝鲜学者主要依据岩石组合和变质程度差异将其自下而上分为城津组、北大川组和南大川组(Paek *et al.*, 1996)。由于缺乏精确的年代学数据, 上述划分方案及各组具体时代归属一直存在很大争议。譬如, 注意到城津组在岩石组合、

原岩性质和变质程度等方面与后二者之间的显著差别, 有学者建议将其划归为新太古代壳岩系(曹林和朱东, 1999)。近期我们在金策西北部的布巨地区, 从原摩天岭群城津组中鉴别出一套含 BIF 建造的片麻岩-斜长角闪岩系, 并获得约 25.6 亿年的成岩年龄(Zhang *et al.*, 2016), 证实了上述推断。

关于检德地区摩天岭群北大川组的时代归属, 有些朝鲜学者认为由碳酸盐岩及火山碎屑岩互层组成的下部层位可能相当于城津组(白龙俊等, 1986)。从变火山碎屑岩样品 13NK-140 记录的主要年龄峰值(约 2.53Ga)和两个次要峰值(2397Ma 和 2190Ma)来看, 前者与邻区布巨地区片麻岩-斜长角闪岩系的原岩形成时代相当, 后者也与布巨片麻岩系

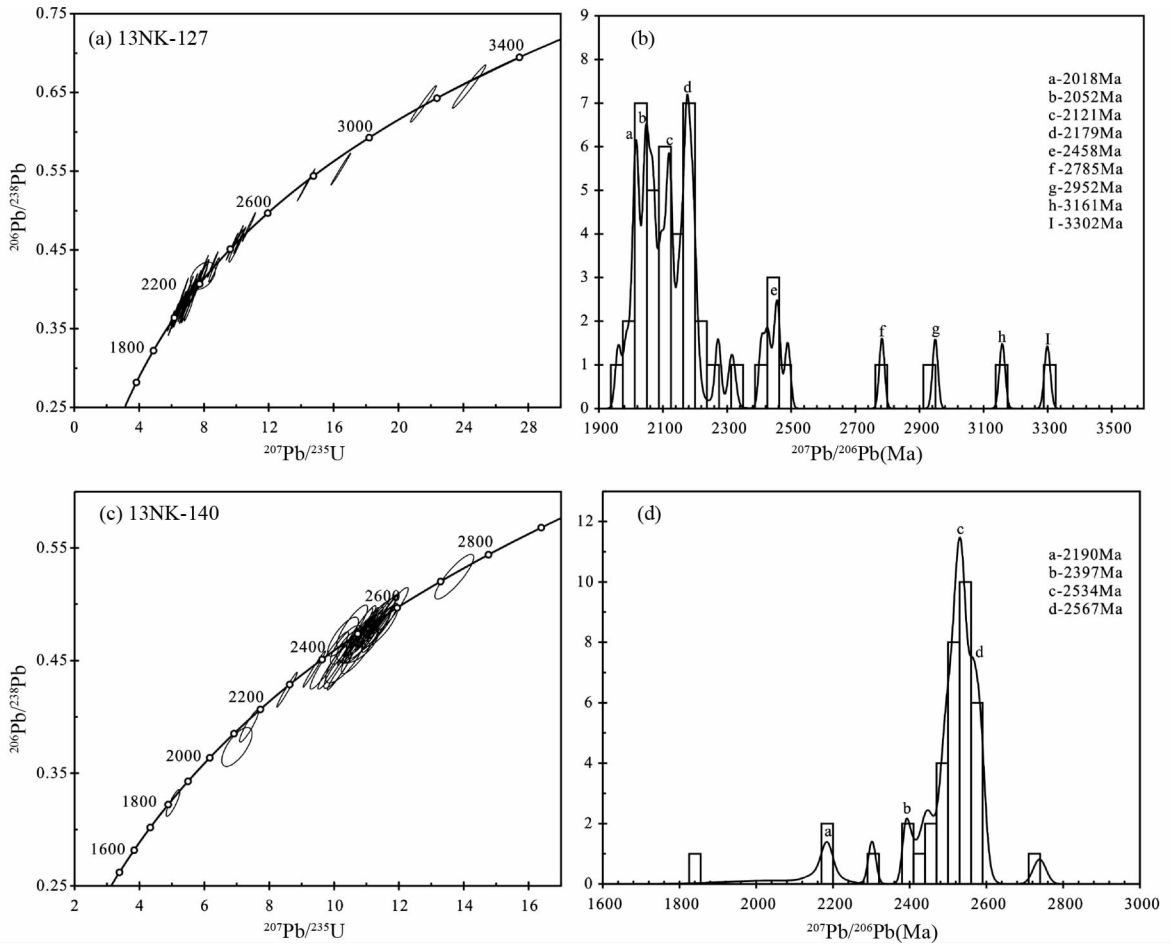


图6 朝鲜检德地区摩天岭群变质沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄谐和图与频率直方图

样品 13NK-127 的谐和图 (a) 和直方图 (b)；样品 13NK-140 的谐和图 (c) 和直方图 (d)

Fig.6 U-Pb age diagrams for detrital zircons from the meta-sedimentary successions of the Machollyong Group in the Komdok region, Korean Peninsula

Concordia diagram (a) and age frequency histogram (b) for sample 13NK-127; concordia diagram (c) and age frequency histogram (d) for sample 13NK-140

记录的多期混合岩化事件基本一致 (Zhang *et al.*, 2016)。根据最年轻年龄峰值,可以约束北大川组的沉积时代应该晚于 2.19Ga。

对于以陆源碎屑岩组合为主的南大川组而言,基于碎屑锆石年龄谱约束地层沉积时代的基本原理,本文变沉积岩样品中具岩浆成因结构的碎屑锆石记录的最年轻谐和年龄可以提供其沉积的最大年龄。由于样品 13NK-127 中岩浆成因锆石记录的最年轻峰值年龄为 2018Ma,因此可以推断南大川组的沉积时代应该不早于 2.02Ga。

### 6.2 物源区分析

如前所述,北大川组变火山碎屑岩呈现类似于邻区布巨片麻岩-斜长角闪岩系的锆石年龄谱,结合新太古代-古元古代早期锆石占据主导地位的事实,表明北大川组下部层位或者代表同期的火山碎屑岩建造,或者属于物源区主要为邻近新太古代壳岩的古元古代火山沉积建造。

相比而言,南大川组变沉积岩样品中碎屑锆石的有效年龄记录呈现四个介于 2018 ~ 2179Ma 的主要年龄峰值、一个 2458Ma 的次要峰值以及一些中-古太古代锆石。就狼林地块范围来看,4 颗中-古太古代锆石年龄记录虽少但并不孤立,起源于狼林山脉东部的城川江 (Songchon River) 和大同江 (Daedong River) 的河砂中不乏一些年龄介于 2.66 ~ 3.37 Ga 的碎屑锆石 (Wu *et al.*, 2007b; 吴福元等,2016),暗示狼林地块东部可能存在过古太古代的陆壳物质。

南大川组中次要峰值为 2458Ma 的锆石年龄变化于 2408 ~ 2489Ma 之间。一方面,流经狼林地块河流的河砂中存在类似的碎屑锆石年龄记录 (Wu *et al.*, 2007b);另一方面,相似年龄的锆石既见于同区北大川组下部火山沉积建造,也见于邻区布巨地区遭受古元古代早期混合岩化作用影响的新太古代片麻岩-斜长角闪岩系 (Zhang *et al.*, 2016)。表明这些区域古老结晶基底和表壳岩系为南大川组提供了重要物源。

南大川组中岩浆成因碎屑锆石记录的介于 2000 ~ 2200Ma 的四个主要年龄峰值,一方面区别于罕有 2.0 ~ 2.2Ga 锆石的狼林地块河沙样品(Wu *et al.*, 2007a),另一方面部分叠合于狼林地块之上目前揭示的集中于 1.81 ~ 2.09Ga 的岩浆事件(Zhao *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007a)。这或者暗示狼林地块东部存在尚未被揭示的 2.1 ~ 2.2Ga 岩浆事件,或者暗示其他更广泛物源区的存在。

### 6.3 区域对比与地质意义

从区域上来看,2.0 ~ 2.2Ga 正是华北克拉通东部辽吉活动带发展的重要时期,以辽河群和集安群/老岭群为代表的巨量火山-沉积建造在此阶段形成(Luo *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; Li and Chen, 2014; 李壮等, 2015; 刘福来等, 2015),大量花岗岩岩浆岩(Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007)和基性岩墙群(Meng *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2015)也在此期间侵入。

辽河群是一套出露于辽东南地区的低绿片岩相-角闪岩相的变质火山-沉积建造,可进一步以青龙山-枣儿岭断裂为界划分为南辽河群和北辽河群(辽宁省地质矿产局, 1989)。在吉南地区,与之相对应的巨量火山-沉积建造称作集安群和老岭群(吉林省地质矿产局, 1988; Li *et al.*, 2005, 2012)。依据传统地层学观点,辽河群自下而上又可细分为浪子山组/里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组(图 3b)(辽宁省地质矿产局, 1989)。

近年来不同学者针对南北辽河群、集安群和老岭群中的变质沉积岩开展了大量碎屑锆石年代学研究。综合不同地区辽河群各组变沉积岩的碎屑锆石年龄谱(Luo *et al.*, 2004, 2008; 孟恩等, 2013; 李壮等, 2015; 刘福来等, 2015),其中岩浆成因锆石比较一致地记录了 2.0 ~ 2.2Ga 的主要峰值,2.4 ~ 2.6Ga 的次要峰值和少量中-古太古代(> 2.8Ga)年龄,而变质成因锆石记录的年龄为 1.90 ~ 1.95Ga(Luo *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; Li and Chen, 2014; 李壮等, 2015; 刘福来等, 2015)。结合辽河群中火山岩和基性岩墙群记录的 2.0 ~ 2.2Ga 岩浆活动(Li and Chen, 2014; 李壮等, 2015; Meng *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2015),这些碎屑锆石年龄不仅限定南北辽河群的形成时代应为 1.95 ~ 2.05Ga 之间,而且指示其物质来源主要为辽吉花岗岩和南北两侧的太古宙变质基底(刘福来等, 2015)。

集安群和老岭群变沉积岩系的碎屑锆石也呈现相似的年龄谱,岩浆成因锆石除记录了两个明显的 2.1 ~ 2.2Ga 和 2.45 ~ 2.5Ga 的主峰之外,还显示 3.1Ga 和 3.6 Ga 的古老年龄信息,变质锆石则记录了 1.80 ~ 1.95Ga 的变质年龄(Lu *et al.*, 2006; 刘福来等, 2015),从而可以限定其原岩形成时代介于 1.95 ~ 2.1Ga 之间。考虑到集安群和老岭群北侧的龙岗地块和南侧的辽南地块均存在新太古代变质基底,结合集安群和老岭群内部发育大量 2.1 ~ 2.2Ga 的 A 型花岗岩和高钾钙碱性花岗质岩石(Zhao *et al.*, 2012),可以推断集安群

和老岭群变沉积岩系的物质来源主要为上述花岗岩和龙岗地块的太古宙变质基底(刘福来等, 2015)。

长期以来,中朝学者就注意到摩天岭群与辽河群在岩性和层序上的可类比性(Paek *et al.*, 1996; 曹林和朱东, 1999; Zhai *et al.*, 2007b; 梁道俊和刘永江, 2009; Zhao *et al.*, 2012; 刘福来等, 2015),但一直缺乏精确的年代学依据。本文报道的两个样品的碎屑锆石年龄谱首次提供了这一证据。如前所述,它们记录了两个主要年龄峰值(2458 ~ 2567Ma 和 2018 ~ 2179Ma)和一些 2.78 ~ 3.30Ga 的古老年龄。这与辽河群以及集安群/老岭群的碎屑锆石年龄谱基本一致,说明它们不仅是同一时代的产物,而且分享相似的物质源区。

这些时代一致、物源相近的沉积建造可以为甄别古元古代辽-吉-朝活动带的大地构造属性提供重要参考。就后者而言,尽管众多地质学家开展了长期的研究,但其当前现状仍然可谓莫衷一是,不同观点包括陆内裂谷开启-闭合模式(张秋生和杨振升, 1988; Li *et al.*, 2005, 2006; Luo *et al.*, 2004, 2008; Li and Zhao, 2007)、弧-陆碰撞模式(白瑾, 1993; Faure *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2006)、朝鲜弧模式(Peng *et al.*, 2014)、裂解-俯冲-碰撞模式(翟明国和彭澎, 2007; Zhao *et al.*, 2012; Yuan *et al.*, 2015)。虽然全面再现辽-吉-朝古元古代活动带的形成演化过程有待综合地层学、岩浆岩成因、变质演化、同位素年代学、构造变形等方面的集成研究(刘福来等, 2015),但当前积累的大量精确的碎屑锆石年龄谱可以提供如下启示。首先,各地稳定但微弱的太古宙锆石年龄信息暗示太古宙岩石是漂浮在一个广袤古元古代造山带的一些残留块体(吴福元等, 2016)。其次,不同地区常见的存在碎屑锆石年龄记录但实体岩石露头尚付阙如的现象,可能与汇聚板块边缘易形成大量岩浆岩但又不易保存它们的背景特征有关(Scholl and von Huene, 2009);再次,与沉积年龄相近(< 2000Ma)的碎屑锆石占据主导的碎屑锆石年龄谱反映了汇聚板块边缘各类盆地的典型特征,而相悖于大部分碎屑锆石年龄远大于地层沉积年龄的裂谷盆地(Cawood *et al.*, 2012)。

## 7 结论

基于本文获得的锆石 U-Pb 年代学数据,可以得出如下认识:

(1) 朝鲜检德地区摩天岭群北大川组变火山碎屑岩样品的锆石年龄谱记录了约 2.53Ga 的主要年龄峰值和约 2.19Ga 的最年轻峰值,说明北大川组开始沉积的时代应该晚于 2.20Ga。

(2) 南大川组变沉积岩样品中岩浆成因碎屑锆石记录了一个主要年龄峰值区间(2.02 ~ 2.18Ga)、一个次要年龄峰值(约 2.46Ga)和一些 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邻近地体上的太古宙变质基底。同时,根据最年轻峰值年龄推断南大川组的沉积时

代应该不早于 2.02Ga。

(3) 摩天岭群与辽河群以及集安群/老岭群的碎屑锆石年龄谱基本一致, 说明它们不仅是同一时代的产物, 而且分享相似的物质源区。它们可以为甄别古元古代辽-吉-朝活动带的大地构造属性提供重要参考。

**致谢** 刘富博士参与了朝鲜野外地质考察工作; 祝禧艳博士和颀颀强博士提出了许多建设性的修改意见; 在此一并表示诚挚感谢。

## References

- Bai J. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform. Beijing: Geological Publishing House, 47–89 (in Chinese)
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5): 602–622
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. Regional Geology of Jilin Province. Beijing: Geological Publishing House, 13–37 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1989. Regional Geology of Liaoning Province. Beijing: Geological Publishing House, 33–55 (in Chinese)
- Cao L and Ju D. 1999. The comparison and evolutionary phases of the Early Precambrian metamorphic rock system in eastern China-Korea palaeocontinent. *World Geology*, 18(2): 36–46 (in Chinese with English abstract)
- Cawood PA, Hawkesworth CJ and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 875–878
- 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
- Cho M, Kim Y and Ahn J. 2007. Metamorphic evolution of the Imjingang belt, Korea; Implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, 49(1): 30–51
- 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
- Cluzel D. 1992. Ordovician bimodal magmatism in the Ogecheon belt (South Korea): Intracontinental refit-related volcanic activity. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 7(2–3): 195–209
- Faure M, Lin W, Monié P and Bruguier O. 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China). *Terra Nova*, 16(2): 75–80
- Gehrels G. 2014. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1): 127–149
- Institute of Geology, State Academy of Sciences, DPR of Korea (IGSASDPRK). 1993. 1:1000000 Geological Map of Korea. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
- Lee YI and Lee JL. 2003. Paleozoic sedimentation and tectonics in Korea; A review. *Island Arc*, 12(2): 162–179
- Li QL, Li XH, Liu Y, Tang GQ, Yang JH and Zhu WG. 2010. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(7): 1107–1113
- Li SZ, Zhao GC, Sun M, Han ZZ, Luo Y, Hao DF and Xia XP. 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the Eastern Block of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 659–674
- Li SZ, Zhao GC, Sun M, Han ZZ, Zhao GT and Hao DF. 2006. Are the South and North Liaohe groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints. *Gondwana Research*, 9(1–2): 198–208
- Li SZ and Zhao GC. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liao-Ji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 158(1–2): 1–16
- Li SZ, Zhao GC, Santosh M, Liu X, Lai LM, Suo YH, Tam PY, Song MC and Wang PC. 2012. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 200–203: 59–73
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(4): Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400
- Li Z and Chen B. 2014. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic meta-basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton; Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Precambrian Research*, 255: 653–667
- Li Z, Chen B, Liu JW, Zhang L and Yang C. 2015. Zircon U-Pb ages and their implications for the South Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1589–1605 (in Chinese with English abstract)
- Liang DJ and Liu YJ. 2009. Formation and evolution of Early Precambrian crust in Korean Peninsula: Formation stages of palaeocontinent (Ar-Pt<sub>1</sub>). *Global Geology*, 28(3): 271–279 (in Chinese with English abstract)
- Liu FL, Liu PH, Wang F, Liu CH and Cai J. 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2816–2846 (in Chinese with English abstract)
- Lu XP, Wu FY, Guo JH, Wilde SA, Yang JH, Liu XM and Zhang XO. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146(3–4): 138–164
- Ludwig KR. 2001. Squid 1.02, A User Manual: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2: 19
- Luo Y, Sun M, Zhao GC, Li SZ, Xu P, Ye K and Xia XP. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton; Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. *Precambrian Research*, 134(3–4): 349–371
- Luo Y, Sun M, Zhao GC, Li SZ, Ayers JC, Xia XP and Zhang JH. 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Groups; Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 163(3–4): 279–306
- Meng E, Liu FL, Liu PH, Liu CH, Shi JR, Kong QB and Lian T. 2013. Depositional ages and tectonic implications for South Liaohe Group from Kuandian area in northeastern Liaodong Peninsula, Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2465–2480 (in Chinese with English abstract)
- Meng E, Liu FL, Liu PH, Liu CH, Yang H, Wang F, Shi JR and Cai J. 2014. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, Northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 247: 92–109
- Paek RJ, Kang HG and Jon GP. 1996. Geology of Korea. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 1–631
- Peng P, Wang XP, Windley BF, Guo JH, Zhai MG and Li Y. 2014. Spatial distribution of ca. 1950–1800Ma metamorphic events in the North China Craton: Implications for tectonic subdivision of the craton. *Lithos*, 202–203: 250–266
- Scholl DW and von Huene R. 2009. Implications of estimated magmatic additions and recycling losses at the subduction zones of accretionary (non-collisional) and collisional (suturing) orogens. In: Cawood PA and Kröner A (eds.). *Earth Accretionary Systems in Space and Time*. Geological Society, London, Special Publication, 318: 105–125

- Sláma J, Košler J, Condon DJ *et al.* 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207–221
- Stern RA, Bodorkos S, Kamo SL, Hickman AH and Corfu F. 2009. Measurement of SIMS Instrumental Mass Fractionation of Pb isotopes during zircon dating. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 33(2): 145–168
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23
- Wu FY, Han RH, Yang JH, Wilde SA, Zhai MG and Park SC. 2007a. 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, Yang JH, Wilde SA, Liu XM, Guo JH and Zhai MG. 2007b. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Research*, 159(3–4): 155–177
- Wu FY, Li QL, Yang JH, Kim JN 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)
- Yang JH, O'Reilly S, Walker RJ, Griffin WL, Wu FY, Zhang M and Pearson N. 2010. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea. *Geology*, 38(9): 799–802
- Yuan LL, Zhang XH, Xue FH, Han CM, Chen HH and Zhai MG. 2015. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 264: 119–139
- Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Han XL and Li YG. 1993. Discovery of high-pressure basic granulite terrain in north China Archaean Craton and preliminary study. *Science China (Series B)*, 36(11): 1402–1408
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547–561
- Zhai MG and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665–2682 (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*, 114(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 and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25
- Zhai MG and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24(1): 275–297
- Zhai MG, Zhang YB, Zhang XH, Li QL, Peng P, Wu FY, 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 Science)*, doi: 10.1007/s11430-016-0107-0
- Zhang QS and Yang ZS. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula, China. Beijing: Geological Publishing House, 218–450 (in Chinese)
- Zhang XH, Zhang YB, Zhai MG, Wu FY, Hou QL and Yuan LL. 2016. Decoding Neoproterozoic to Paleoproterozoic tectonothermal events in the Rangnim Massif, North Korea: Regional correlation and broader implications. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2016.1198995
- Zhang XH, Zhang YB, Yuan LL, Li YS, Choi WJ and Kim H. 2016. Late Permian mafic volcanic rocks in the Hambuk massif, Korean Peninsula: Geochemistry, origin and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3070–3082 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- 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 GC, Cawood PA, Li SZ, Wilde SA, Sun M, Zhang J, He YH and Yin CQ. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Research*, 222–223: 55–76
- Zhao L, Zhu XY and Zhai MG. 2016. Major advances in the study of the Precambrian geology and metallogenesis of the north China Craton: A review. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 1122–1155

#### 附中文参考文献

- 白瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用. 北京: 地质出版社, 47–89
- 曹林, 朱东. 1999. 中朝古大陆东部早期前寒武纪变质岩系对比及其演化阶段划分. *世界地质*, 18(2): 36–46
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 13–37
- 李壮, 陈斌, 刘经纬, 张璐, 杨川. 2015. 辽东半岛南辽河群锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *岩石学报*, 31(6): 1589–1605
- 梁道俊, 刘永江. 2009. 前寒武纪早期朝鲜半岛地壳的形成与演化-古陆的形成阶段(Ar-Pt<sub>1</sub>). *世界地质*, 28(3): 271–279
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 33–55
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 刘超辉, 蔡佳. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展. *岩石学报*, 31(10): 2816–2846
- 孟恩, 刘福来, 刘平华, 刘超辉, 施建荣, 孔庆波, 廉涛. 2013. 辽东半岛东北部宽甸地区南辽河群沉积时限的确定及其构造意义. *岩石学报*, 29(7): 2465–2480
- 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
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 韩秀伶, 李永刚. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *中国科学(B辑)*, (12): 1325–1330
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. *岩石学报*, 23(11): 2665–2682
- 张秋生, 杨振升. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京: 地质出版社, 218–450
- 张晓晖, 张艳斌, 袁玲玲, 李永植, 崔远正, 金宪. 2016. 朝鲜半岛咸北地区晚二叠世基性火山岩的地球化学特征: 岩石成因与地质意义. *岩石学报*, 32(10): 3070–3082