辽-吉造山带东南边界位置探讨

张帅^{1*}, 朱光¹, 顾承串¹, 刘程¹, 李云剑¹, 赵田², 王薇¹

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601

* 联系人, E-mail: sdsyzs0610@163.com

2017-03-21 收稿, 2017-05-05 修回, 2017-05-09 接受, 2017-07-26 网络版发表

国家重点研发计划重点专项(2016YFC0600102)和国家自然科学基金重大研究计划(91414301)资助

摘要 华北克拉通内部的辽-吉造山带, 代表着东部陆块的汇聚带. 然而, 这一重要构造带的东南边界位置长期没有准确地限定, 存在着认识上的分歧. 本文选择丹东地区基底内变沉积岩与变形-变质侵入岩进行了锆石年代学分析. 结果表明, 在丹东地区多处残留的变沉积岩, 其沉积时代为古元古代, 可与辽-吉造山带内的辽河群对比. 丹东地区在古元古代也经历过广泛而强烈的区域变质作用, 变质时间限定为1910~1864 Ma, 可与辽-吉造山带碰撞造山中的变质作用对比. 锆石年代学结果显示, 丹东地区存在着一系列古元古代侵入岩, 以1882~1827 Ma间岩浆活动产物居多. 岩浆锆石年龄谱指示该区基底演化阶段经历过多期岩浆活动, 峰期分别为2665, 2500, 2200, 2095, 2030和1865 Ma, 也显示与辽-吉造山带的相似性. 这一系列事实表明, 丹东地区的基底组成与演化均与辽-吉造山带相似, 应划归为该造山带的一部分, 而非前人认为的狼林地块. 对比分析前人的研究成果发现, 整个辽东半岛都应属于辽-吉造山带的延伸, 其东南边界至少达北东走向的鸭绿江断裂带.

关键词 华北克拉通基底, 辽-吉造山带, 东南边界位置, 锆石 U-Pb 定年, 古元古代

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 其历史可以追溯至3.8 Ga前^[1,2]. 长期的研究表明, 华北克拉通在1.95~1.85 Ga(古元古代)经历了多块体碰撞造山事件, 最终东部和西部陆块在~1.85 Ga沿着中部造山带拼贴, 形成了华北克拉通统一基底^[3,4]. 华北克拉通古元古代汇聚过程属于Columbia超大陆聚合的一部分^[3,4], 对于它们的深入研究有助于加深对大陆形成与演化的理解.

华北东部陆块自西向东由华北-龙岗地块、胶-辽-吉造山带和狼林地块组成^[5~9](图1). 胶-辽-吉造山带是由华北-龙岗地块与狼林地块在古元古代碰撞而形成的碰撞造山带^[12,15,17~20]. 这两个地块以广泛存在太古代TTG岩系、缺失古元古代沉积岩与岩浆岩及区域变质作用为特征; 而胶-辽-吉造山带以存在古元古

代火山-沉积岩系、侵入岩及区域变质作用为特征^[3,4,12]. 对于辽南、辽东至吉南地区辽-吉造山带的空间位置, 以往主要是依据古元古代火山-沉积岩系与侵入岩出露位置限定的^[3,7,21]. 关于辽-吉造山带与龙岗地块的边界, 目前大家的认识较为统一, 沿着海城-桓仁北、白山北呈北东向展布^[3,22](图1(a)). 然而, 对于辽-吉造山带的东南边界, 由于下元古界的零星出露, 长期存在着不同的观点. 一些学者主张辽-吉造山带东南边界的南段沿着宽甸-凤城-岫岩-瓦房店-大连一线展布^[3](图1(a)), 在宽甸以北的北段基本上沿着鸭绿江断裂带延伸, 而东南部的丹东-大连一带被划归为狼林地块. 也有学者认为该造山带东南边界的南段沿着东港-庄河-牌坊店一线展布^[12~14](图1(a)), 在东港以北的北段沿着鸭绿江断裂带延伸, 东

引用格式: 张帅, 朱光, 顾承串, 等. 辽-吉造山带东南边界位置探讨. 科学通报, 2017, 62: 2814~2828

Zhang S, Zhu G, Gu C C, et al. Discussion on the southeastern boundary location of the Liao-Ji orogenic belt (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2814~2828, doi: 10.1360/N972017-00307

图 1 华北克拉通基底单元划分简图(a), 据文献[3]修改)及辽-吉造山带构造简图(b), 据文献[9~11]修改). AB, 阿拉善地块; CAO, 中亚造山带; CCO, 中央造山带; EB, 东部陆块; GM, 京畿地块; IB, 临津江带; JLJB, 胶-辽-吉造山带; KB, 孔兹岩带; LB, 龙岗地块; NB, 狼林地块; OB, 鄂尔多斯地块; OCB, 沃川带; SCB, 华南陆块; TNCO, 中部造山带; WB, 西部陆块; YB, 阴山地块; YM, 岭南地块; F₁, 依兰-伊通断裂带; F₂, 敦化-密山断裂带; F₃, 鸭绿江断裂带; LNMCC, 辽南变质核杂岩; WFMCC, 万福变质核杂岩; JZD, 金州拆离断层; WFD, 万福拆离断层; DYZD, 大营子拆离断层; 东南边界方案①据文献[3]; 东南边界方案②据文献[12~14]

Figure 1 Tectonic outline of the North China Craton (a) (modified after Ref. [3]) and structural sketch for the Liao-Ji orogenic belt (b) (modified after Refs. [9~11]). AB, Alxa Block; CAO, Centale Asia Orogen; CCO, Central China Orogen; EB, Eastern Block; GM, Gyeonggi Massif; IB, Imjingang Belt; JLJB, Jiao-Liao-Ji Belt; KB, Khondalite Belt; LB, Longgang Block; NB, Nangrim Block; OB, Ordos Block; OCB, Ogcheon Belt; SCB, South China Block; TNCO, Trans-North China Orogen; WB, Western Block; YB, Yinshan Block; YM, Yeongnam Massif; F₁, Yilan-Yitong Fault Zone; F₂, Dunhua-Mishan Fault Zone; F₃, Yalujiang Fault Zone; LNMCC, Liaonan Metamorphic Core Complex; WFMCC, Wanfu Metamorphic Core Complex; JZD, Jinzhou Detachment Fault; WFD, Wanfu Detachment Fault; DYZD, Dayingzi Detachment Fault. Southeastern boundary scheme ① after Ref. [3]; Southeastern boundary scheme ② after Refs. [12~14]

南部的大连-庄河一带被划归为狼林地块. 近年来一些锆石年代学分析表明, 在丹东地区^[15]及辽东半岛以东的长海群岛^[16,23], 皆存在着与古元古代辽河群相似的变质岩系(图1(a)), 因而辽-吉造山带东南边界位置需要重新认识.

基于上述背景, 本次工作选择了辽东半岛东南

部的丹东地区为研究区, 以基底内的变沉积岩与侵入岩为研究对象, 开展了详细的岩石学和锆石U-Pb年代学研究. 在此基础上, 再结合辽东半岛及其东侧海域已有的相关研究成果, 系统分析了辽-吉造山带东南边界位置, 提出了新的认识. 本次研究成果也为深入认识这一重要造山带的造山过程提供了有用的

年代学信息.

1 区域地质概况

华北克拉通由太古代-古元古代变质基底、中元古代-古生代海相盖层与中-新生代陆相盆地组成. 华北克拉通基底主体是由东西部陆块及其间的中部造山带构成(图1(a)). 东西部陆块最终发生碰撞与拼合(~ 1.85 Ga)之前, 各自在较早的古元古代还发生过块体碰撞与拼贴^[3,4]. 西部陆块由阴山地块、孔兹岩带及鄂尔多斯地块组成, 孔兹岩带代表了阴山地块和鄂尔多斯地块在 ~ 1.95 Ga发生陆-陆碰撞所形成的造山带^[3,4]. 华北中部造山带以东的东部陆块, 北邻中亚造山带东部(也称为兴蒙造山带), 南接大别-苏鲁造山带, 东端终止在朝鲜半岛中部的临津江造山带(图1(a)). 东部陆块上的华北-龙岗地块、胶-辽-吉造山带及狼林地块总体上呈北东-北北东向展布. 其中龙岗地块位于郯庐断裂带以东, 胶-辽-吉造山带包括郯庐断裂带以西的华北克拉通东南缘部分及该断裂带以东的胶东、辽东-辽南与吉南地区, 更向东则延入朝鲜半岛北部^[3,12,24,25](图1(a)). 狼林地块主体位于北朝鲜, 前人主张还应包括辽东南地区^[3,12~14](图1(a)).

1.1 辽-吉造山带

辽-吉造山带呈北东-南西向展布, 分布于辽南、辽东与吉南地区, 东端延入北朝鲜东北部(图1(a)). 该造山带北邻龙岗地块, 南接狼林地块. 辽-吉造山带与狼林地块的边界, 北段为鸭绿江断裂带, 前人认为南段延入辽东半岛中南部^[3,12~14](图1(a)). 北东走向的鸭绿江断裂带, 起源于晚中生代的左行走滑活动^[26], 在早白垩世期间转变为正断层而控制发育了断陷盆地与岩浆活动^[14], 属于辽-吉造山带形成之后叠加的晚期构造.

辽-吉造山带内的岩石主要由古元古代侵入岩及绿片-角闪岩相变质火山-沉积岩系组成^[5,7,9,27]. 变质火山-沉积岩系包括辽东地区的南、北辽河群以及吉南地区的老岭群和集安群, 原岩主要为一套陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩-火山岩建造^[28,29]. 根据岩石地层和变质作用的差异, 辽-吉造山带又可被进一步划分为西北带(出露北辽河群和老岭群)和东南带(出露南辽河群和集安群)^[8,27]. 这些变沉积岩中最年轻的岩浆成因碎屑锆石年龄集中于 ~ 2.0 Ga, 变质锆石记录的变质年龄为 $1.93\sim 1.85$ Ga, 表明沉积时代介于 $2.0\sim$

1.93 Ga^[15,18,19,30~32]之间. 对于这些古元古代火山-沉积岩系, 早期被认为属于大陆裂谷沉积产物^[5,7,9,18,19], 近年研究表明它们可能属于碰撞造山之前的弧前沉积物、弧后沉积物及可能的增生杂岩^[6,15,17,32], 并清楚地记录了古元古代碰撞造山中的变质作用. 因而, 它们的出露地区一般被认为代表了辽-吉造山带的分布区.

辽-吉造山带内古元古代花岗质岩石统称为辽花岗岩^[5], 包括 $2.2\sim 2.0$ Ga的造山期前花岗质岩石和 $1.9\sim 1.8$ Ga的后造山或非造山期的花岗质岩石^[9,12,13,15,33]. 早期 $2.2\sim 2.0$ Ga的花岗质岩石, 以二长花岗岩为主, 局部发育有同期的辉长岩和辉绿岩^[34,35], 可能是岛弧或活动陆缘岩浆活动产物^[6,34,35]. 它们在 ~ 1.9 Ga普遍经历了绿片-角闪岩相变质作用^[9,34]. 晚期 $1.9\sim 1.8$ Ga的花岗质岩石, 包括I型和S型花岗岩, 含少量正长岩和伟晶岩, 形成于后造山或非造山期的伸展构造背景中^[9,36~38].

辽-吉造山带早期称为辽-吉裂谷带或辽-吉活动带, 其中的古元古代双峰式火山岩-沉积岩系以及A型花岗岩被认为是裂谷活动的产物^[5]. 随着研究的深入, 人们发现该构造带具有古元古代弧-陆碰撞或陆-陆碰撞现象, 进而将其称为辽-吉造山带^[6,12]. 目前, 辽-吉造山带由龙岗地块与狼林地块在古元古代碰撞而形成已被多数学者认同^[3,4,15,17~21]. 已有的研究表明, 辽-吉造山带碰撞造山中的变质作用发生在 $1.93\sim 1.85$ Ga^[9,15,18,19,30~32,34]. 关于辽-吉造山带碰撞之前大洋的俯冲极性, 前人分别有向北俯冲^[6]、向南俯冲^[17]和双向(向南和向北)俯冲^[35]的观点, 并认为相应存在活动陆缘上的岩浆活动.

1.2 狼林地块

狼林地块位于辽-吉造山带与印支期临津江造山带之间(图1(a)). 中国境内的狼林地块也被称为辽南地块, 主要由新太古代辽南杂岩构成^[13,29]. 辽南杂岩主要出露于辽南金州地区(图1(a)), 为一系列闪长质-英云闪长质-花岗闪长质片麻岩, 侵位年龄为 $2.50\sim 2.44$ Ga^[13]. 由于晚中生代辽南与万福变质核杂岩以及一系列伸展拆离剪切带的发育^[11], 辽南杂岩大规模剥露, 并侵入了大量的中生代岩体^[10,14,39].

朝鲜北部的狼林地块, 变质基底为太古代-古元古代代表壳岩和TTG岩系, 上覆中元古代-古生代沉积盖层^[24,40]. 这些变质的表壳岩包括太古代高角闪-麻

粒岩相狼林群(Nangrim Group)、古元古代角闪岩相甑山群(Jungshan Group)以及古元古代绿片-角闪岩相摩天岭群(Machollyong Group)^[24]。狼林群主要由英云闪长质-花岗质片麻岩组成,含少量的变粒岩、堇青石片麻岩和云母石英岩等表壳岩系。甑山群是一套以富铝片麻岩、角闪岩、含磷大理岩和含石墨片麻岩为主的孔兹岩系。摩天岭群包括片岩、大理岩和变质碎屑岩等^[24]。近年来的年代学工作表明,狼林地块上确实存在着原岩时代为2.64~2.51 Ga的新太古代岩石^[40~42]。该地块上还发育有古元古代(1.91~1.84 Ga)侵入岩^[25,43,44],并有2.2~2.0 Ga的岩浆锆石信息^[25,45]。狼林地块上一些岩石内还记录了1.9~1.85 Ga的变质事件^[42,46,47]。由此可见,狼林地块基底的大地构造属性与演化历史可能较为复杂^[25,40,45,48],还需要更深入的研究。

1.3 龙岗地块

龙岗地块位于郯庐断裂带以东,北界为赤峰-开原断裂,南接辽-吉造山带(图1(a))。龙岗地块由太古代鞍山杂岩、辽北杂岩和吉南杂岩等组成。这些杂岩主体为TTG岩系,含少量镁铁质-长英质的变质火山-沉积岩系^[28,29]。它们的原岩时代多为2.56~2.50 Ga^[49~56],仅在鞍山-本溪地区局部存在3.8~3.0 Ga的太古代岩石^[1,2]。这些基底岩石普遍经历了中-高级变质作用,变质时代集中于2.52~2.47 Ga^[49~53,55,56]。总之,龙岗地块主体为太古代TTG岩系,变质时代为新太古代末,缺乏辽-吉造山带内特征的大规模古元古代沉积岩与岩浆岩及区域变质作用。

2 锆石年代学研究

2.1 样品描述

本次工作中在辽东半岛东南部丹东地区变质基底内共选取了9件代表性样品进行了LA-ICPMS锆石U-Pb年代学研究。其中2件样品为变沉积岩,另2件样品为伟晶岩脉,还有5件样品为花岗质岩石。具体采样位置见图1(a),样品描述见表1,主要样品野外照片见图S1。

变沉积岩样品YL029,为丹东市古楼子乡太平湾村所出露的辽河群(相当于南辽河群)盖县组(Pt₁gx)白云母片岩(图S1(a))。另一变沉积岩样品YL044,为水丰湖景区碑碣沟所出露的辽河群盖县组(Pt₁gx)变

粒岩(变质砂岩),呈弱片麻状构造(图S1(b))。

伟晶岩脉样品YL081,采自东港十字街镇南牯牛台采石场,为糜棱岩化含电气石花岗质伟晶岩脉(图S1(c))。另一伟晶岩脉样品YL075,采自东港长山镇前光秃山,为变形的含白云母花岗质伟晶岩脉(图S1(d))。

花岗质岩石样品YL040,采自宽甸长甸镇上河口村鸭绿江边,为弱变形的中粒花岗岩(图S1(e))。样品YL177采自东港十字街镇北双庙村采石场,样品YL178采自东港汤池镇铁甲水库南,两者皆为糜棱岩化二长花岗质片麻岩(图S1(f))。样品YL287采自东港前阳镇祥瑞村采石场,为糜棱岩化二云母花岗质片麻岩(图S1(g))。样品YL076采自东港长山镇长山村采石场,为糜棱岩化花岗质片麻岩(图S1(h))。

野外的接触关系显示,含电气石花岗质伟晶岩脉(YL081)侵入辽河群变沉积岩内(图S1(c))。其他侵入岩样品与辽河群之间的接触关系因露头限制而无法确定。本次所采集样品均发生了韧性变形,局部呈糜棱岩化。它们普遍卷入了北东-南西走向的、左行走滑韧性变形带的变形。

2.2 分析测试方法

对新鲜样品首先采用常规方法进行粉碎,然后用浮选、电磁选和重液等方法分选出单颗粒锆石。在双目显微镜下手工挑选含包裹体少、无明显裂隙且晶型较完整的锆石,制成环氧树脂样品靶,然后打磨抛光至锆石内部形态暴露。随后,对样品进行透射光、反射光以及阴极发光照相。本次样品LA-ICPMS锆石U-Pb同位素以及微量元素分析在合肥工业大学资源与环境工程学院质谱实验室完成。采用的质谱仪为Agilent7500a,激光剥蚀系统为GeoLasPro 193,激光器为COMPex PRO 102 ArF,以He作为剥蚀物质的载气。分析中激光脉冲频率为6 Hz,剥蚀束斑直径为32 mm,脉冲能量密度为10 J/cm²,剥蚀时间为50 s,背景信号时间为25 s。年龄计算时以国际标准锆石91500为外标,以⁹¹Zr为内标进行同位素分馏校正,以锆石标样Plesovice为监控盲样,其中91500传递误差设置为2.5%。微量元素含量采用国际标样NIST SRM 610作为外标,²⁹Si作为内标元素进行校正。本次实验测定的锆石标样结果与误差和推荐值一致。锆石测定点的同位素比值、U-Pb表面年龄和元素含量计算测试结果通过ICPMSDataCal 9.6软件计算得

表1 丹东地区LA-ICPMS锆石定年样品描述与定年结果

Table 1 Descriptions and LA-ICPMS zircon ages of dated samples from the Dandong area

样品号	纬度(N)	经度(E)	岩石类型	岩浆结晶年龄 (Ma)	继承/捕获锆石 年龄(Ma)	变质年龄 (Ma)
YL029	40°20'37.7"	124°42'10.9"	辽河群灰白色白云母片岩		3477~2013	1864±11
YL044	40°28'07.3"	124°55'50.2"	辽河群浅灰色中粒变粒岩(变质砂岩)		2766~2064	1910±28
YL081	39°58'17.6"	124°05'25.6"	灰白色含电气石花岗质伟晶岩脉	1827±14		
YL075	39°51'44.6"	124°02'13.4"	灰白色含白云母花岗质伟晶岩脉	1855±13	2623±24	
YL040	40°26'28.6"	124°51'42.8"	弱变形浅灰色中粗粒含黑云母花岗岩	1872±12		
					2046±42	
YL177	40°00'13.6"	124°06'54.6"	浅灰红色中粒二长花岗质片麻岩	1874±13	2139±36	
					2456±26	
YL178	40°02'05.2"	124°08'57.3"	浅灰红色中粒二长花岗质片麻岩	1875±12	2588~2006	
					2041±35	
YL287	40°00'37.0"	124°09'32.0"	灰白色中粒二云母花岗质片麻岩	1882±16	2161±24	
					2528±27	
YL076	39°53'58.3"	123°59'49.8"	浅灰色中粒花岗质片麻岩	2470±12	2668±21	

出, 并采用Andersen^[57]程序进行同位素比值的校正以扣除普通Pb的影响, 最终利用Isoplot 4.1进行年龄拟合计算及谐和图的绘制。

2.3 分析结果

本次对丹东地区变质基底内岩石样品的LA-ICPMS锆石U-Pb同位素定年结果和稀土元素分析结果见表1, S1和S2, 部分锆石的阴极发光(CL)图像和测试点位置见图S2, 稀土元素球粒陨石标准化配分图见图S3, 锆石U-Pb谐和图、年龄频谱图和Th/U比值图见图2, S4和S5. 本次采用锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄, 只对谐和或近谐和(discordance<10%)的年龄值进行统计和分析。

(i) 变沉积岩. 白云母片岩样品YL029, 其中的锆石以半自形-它形为主, 为无色透明或半透明, 略带淡褐色, 呈短柱状或不规则粒状, 粒径约60~110 mm. 锆石阴极发光图像显示主要为两种类型锆石(图S2). 第一类锆石具有核-边结构或核-幔-边结构, 核部与幔部多具有岩浆振荡生长环带, 显示为岩浆成因特征^[58]; 而边部则多为宽窄不一的星云状生长边, 无分带或弱分带, 弱阴极发光, 显示为变质成因特征^[58]. 第二类锆石内部结构均匀, 不具核-边结构, 无分带或弱的生长环带, 阴极发光较暗, 呈现为变质成因特点。

在球粒陨石标准化稀土元素配分图中(图S3), 所测试第一类锆石的核部与幔部表现为LREE亏损, HREE富集, 具明显的Ce正异常和Eu负异常, 而且Th/U比值普遍大于0.1(图2(e)), 进一步验证为岩浆成因锆石^[59]. 所测试第一类锆石的边部与第二类锆石, LREE亏损, 但稀土元素配分曲线较平缓, 呈相对弱的Ce正异常($Ce/Ce^*=0.98\sim18.72$)和相对弱的Eu负异常甚至正异常($Eu/Eu^*=0.14\sim1.26$), 且Th/U比值普遍小于0.1, 指示为变质成因^[59].

对于该样品共获得了90个年龄值. 其中21个为变质生长边与单颗粒变质锆石的年龄值, 是一组较年轻的、谐和或近谐和的年龄, 介于1944~1823 Ma之间. 它们的加权平均年龄为 1864 ± 11 Ma($n=21$, MSWD=1.12; 图2(a)), 应代表了该样品所经历的变质作用时代. 该样品的岩浆锆石部位给出了63个谐和的年龄值, 介于3477~2013 Ma之间, 它们呈4个年龄峰值, 分别为~2500, ~2460, ~2236和~2085 Ma(图2(c)), 指示了源区的岩浆活动事件. 这一片岩样品中最年轻的岩浆锆石年龄(2013 ± 38 Ma)代表了沉积年龄的上限, 再结合所获得的变质时代(1864 ± 11 Ma), 可以限定这一辽河群样品的沉积时代介于 2013 ± 38 和 1864 ± 11 Ma之间, 属于古元古代。

变粒岩样品YL044中的锆石, 多数呈半自形-它形浑圆状或不规则粒状, 多为半透明, 略带淡黄色或

图2 变沉积岩样品锆石U-Pb年龄谐和图((a), (b))、频谱图((c), (d))及Th/U比值投图((e), (f))

Figure 2 Zircon U-Pb concordia diagrams ((a), (b)), histograms and relative probability (curves) of concordant zircon ages ((c), (d)), and Th/U ratio versus age diagrams ((e), (f)) for meta-sediment samples from the Liaohe Group in the Dandong area

淡褐色, 粒径约70~160 mm. CL图像显示(图S2), 所测试锆石多具有核-边结构或核-幔-边结构. 核部与幔部多发育岩浆振荡环带, 指示为岩浆成因; 而边部则表现为星云状无分带或弱分带等变质成因特征. 所测试锆石的核部与幔部, 表现出与岩浆锆石相似的REE配分型式(图S3), 而且Th/U比值多大于0.1, 进一步验证为岩浆成因(图2(f)). 所测试锆石的边部, 呈相对弱的Ce正异常($Ce/Ce^* = 1.29 \sim 5.37$)和相对弱的Eu负异常($Eu/Eu^* = 0.53 \sim 0.96$), 再加之较低的Th/U比值, 表明为变质成因.

对于该样品本次共获得50个年龄值. 其中变质生长边给出了一组较年轻的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 变质年龄(1939~1857 Ma), 其加权平均值为 1910 ± 28 Ma ($n=8$, $MSWD=0.51$)(图2(b)), 应代表了辽河群的变质年龄. 其余谐和的年龄值来自岩浆锆石部位, 介于2766~2064 Ma ($n=33$)之间, 指示了5组年龄峰值, 即~2743, ~2500, ~2439, ~2234和~2064 Ma(图2(d)). 样品中最年轻岩浆锆石年龄为 2064 ± 33 Ma, 再结合其变质时代, 可以限定该辽河群样品的沉积时代介于 2064 ± 33 和 1910 ± 28 Ma之间(古元古代).

(ii) 变形-变质侵入岩. 含电气石花岗质伟晶岩脉样品YL081, 其锆石呈自形-半自形柱状, 透明

度低, 呈浅或深褐色, 表面混浊, 粒径约100~260 mm, 长宽比约1.5:1~3:1. CL图像显示(图S2), 锆石普遍呈海绵状结构, 阴极发光较暗, 表面存在大量孔洞, 部分锆石局部保留振荡生长环带. 这些特征都指示它们为热液成因^[58]. 该样品锆石具有高U含量(2641~8661 ppm)(1 ppm=1 $\mu g/g$, 余同)与低Th/U比值(0.02~0.04)(图S4). HREE强烈富集, LREE亏损但配分曲线平缓(图S3), Ce正异常很低($Ce/Ce^* = 1.23 \sim 3.59$), 呈高的Eu负异常($Eu/Eu^* = 0.01 \sim 0.24$). 这些特征也指示为热液成因^[60]. 对于该样品本次共获得20个年龄值, 其中15个谐和的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄加权平均值为 1827 ± 14 Ma ($MSWD=0.37$), 对应的上交点年龄为 1836 ± 16 Ma(图S4), 两者在误差范围内相吻合. 本文解释该伟晶岩脉的侵位年龄为 1827 ± 14 Ma.

白云母花岗质伟晶岩脉样品YL075, 其锆石呈自形棱柱状或四方双锥状, 多为半透明状, 部分表面较混浊, 浅褐色, 粒径约70~260 mm, 长短轴比为1.5:1~2.5:1. 所测试锆石主要有两种类型(图S2). 第一类锆石阴极发光较暗, 呈海绵状或无分带, 发育少量孔洞, 为热液成因特征. 第二类锆石具有核-边结构, 边部呈热液锆石特征, 而核部呈岩浆锆石特征. 上述第一类锆石以及第二类锆石的边部, 均强烈富

U(467~7996 ppm), Th/U比值(0.01~0.07)均小于0.1(图S4), 也支持为热液锆石. 而第二类锆石核部的稀土元素特征(图S3)和Th/U比值则指示为岩浆成因. 该样品岩浆成因锆石给出了17个谐和的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值, 介于2716~2557 Ma之间, 加权平均年龄为 2623 ± 24 Ma(MSWD=3.2). 而热液成因锆石给出的谐和年龄值介于1910~1817 Ma之间, 加权平均年龄为 1855 ± 13 Ma($n=19$; MSWD=0.72)(图S4). 本文解释后者代表了该伟晶岩脉的侵位年龄.

花岗岩样品YL040, 其锆石呈自形-半自形, 为无色透明、淡黄色、柱状或四方双锥状, 粒径约100~230 mm, 长短轴比为1:1~3:1. CL图像显示它们普遍发育岩浆生长环带, 少量锆石发育狭窄的变质成因生长边(图S2). 所测试的锆石表现出与岩浆锆石相似的REE配分型式(图S3), 且Th/U比值普遍较高, 指示为岩浆成因(图S5). 该样品45个测试值中有36个为谐和年龄值, 介于1919~1805 Ma之间, 其加权平均年龄为 1872 ± 12 Ma(MSWD=0.53), 上交点年龄为 1876 ± 10 Ma(图S5). 本文解释前者代表了该岩体的结晶年龄.

二长花岗质片麻岩样品YL177, 锆石多为自形, 呈棱柱状-四方双锥状, 透明度高, 长约100~300 mm, 长短轴比约1.5:1~3.5:1. CL图像显示它们普遍呈核-边结构或核-幔-边结构. 核部或幔部多为岩浆成因, 生长边显示为变质成因(图S2). 稀土元素特征(图S3)和Th/U比值(图S5)也支持对这些锆石成因的判断. 本次共获得了该样品的40个年龄值, 其中8个较老的年龄来自岩浆成因的核部, 可分为3组(图S5), 对应的加权平均年龄分别为 2456 ± 26 Ma($n=4$; MSWD=0.48), 2139 ± 36 Ma($n=2$; MSWD=0.003)和 2046 ± 42 Ma($n=2$; MSWD=0.026). 其余32个较年轻锆石年龄来自幔部与边部, 沿不一致线分布, 上交点年龄为 1883 ± 16 Ma, 而交点附近谐和年龄的加权平均值为 1874 ± 13 Ma($n=19$; MSWD=0.77). 本文解释后者代表了该岩体的侵位时间.

二长花岗质片麻岩样品YL178, 锆石一般呈自形-半自形柱状或四方双锥状, 大小约70~200 mm, 长宽比约1.5:1~4:1. CL图像指示它们多具核-边结构或核-幔-边结构, 核与幔部多为岩浆成因, 而生长边为变质成因(图S2). 稀土元素特征(图S3)和Th/U比值(图S5)也支持这些锆石成因判断. 该样品7个岩浆成因核部的年龄值可分为2组(图S5), 分别为2558~2381

Ma($n=5$)和2007~2006 Ma($n=2$). 其余锆石幔部与边部的年龄值沿不一致线分布, 上交点年龄为 1886 ± 16 Ma, 交点附近谐和年龄的加权平均值为 1875 ± 12 Ma($n=18$; MSWD=0.65). 本文解释后者代表了岩体的结晶年龄.

二长花岗质片麻岩样品YL287, 锆石呈自形-半自形的短柱或棱柱状, 长约120~300 mm, 长短轴比约1:1~3:1. 所测试的锆石普遍发育核-边结构或核-幔-边结构, 根据CL图像(图S2), 再结合稀土元素特征(图S3)与Th/U比值(图S5), 表明本次所测试核部与幔部皆为岩浆成因. 本次从该样品共获得了35个年龄值. 其中20个核部与幔部岩浆成因部分的谐和年龄可分为两组(图S5), 对应的加权平均年龄分别为 2161 ± 24 Ma($n=13$; MSWD=0.86)和 2041 ± 35 Ma($n=3$; MSWD=0.86). 其余15个幔部与边部锆石年龄值的上交点年龄为 1886 ± 13 Ma, 交点附近谐和年龄的加权平均值为 1882 ± 16 Ma($n=13$; MSWD=0.78). 本文解释后者代表了该岩体的侵位年龄.

花岗闪长质片麻岩样品YL076, 锆石普遍呈自形-半自形, 为无色透明-淡黄色, 呈棱柱状或四方双锥状, 粒径约100~300 mm, 长短轴比为1.5:1~4.5:1. CL图像显示锆石多具核-边结构或核-幔-边结构, 各部位多发育岩浆振荡生长环带, 少数生长边呈变质成因特征(图S2). 所测试锆石的稀土元素特征(图S3)和Th/U比值(图S5)皆表现为与岩浆锆石相似的特征.

对于该样品共获取了55个年龄值. 核部继承岩浆锆石年龄分为两组, 分别为2719~2641和2569~2465 Ma, 加权平均值分别为 2668 ± 21 Ma($n=8$; MSWD=0.86)和 2528 ± 27 Ma($n=8$; MSWD=1.4)(图S5). 而岩浆成因的幔部与边部, 所给出的37个谐和年龄值为2529~2396 Ma, 其加权平均值为 2470 ± 12 Ma(MSWD=1.9), 代表了岩浆结晶年龄.

3 问题讨论

3.1 变沉积岩的沉积时代与地层对比

变沉积岩的最小碎屑锆石年龄可用作沉积时代的上限, 而其变质年龄可代表沉积时代的下限, 两者结合可限定沉积时代的区间. 本次工作对丹东地区2件辽河群盖县组变沉积岩样品的锆石定年, 各自分别给出了最小碎屑(岩浆)锆石年龄与变质年龄, 从而

可以限定各样品沉积时代区间. 定年的白云母片岩样品(YL029)限定的沉积时代范围为2013~1864 Ma; 而变粒岩样品(YL044)限定的沉积时代范围为2064~1910 Ma. 这两个变沉积岩样品的定年结果, 表明沉积时代皆为古元古代. 再结合它们的岩性特征与地层组合, 明显可与辽-吉造山带内的(南)辽河群对比^[15,18,19,30~32].

3.2 变质事件

本次所分析的丹东地区两个辽河群变沉积岩样品, 各自最年轻的一组年龄均为变质年龄, 测点为独立的变质锆石或变质生长边(图S2). 这些谐和的变质年龄的加权平均值, 给出了两个样品所经历的变质时间分别为1864±11 Ma(YL029-白云母片岩)和1910±28 Ma(YL044-变粒岩). 这两个样品均采自丹东东北部地区, 相距20 km左右(图1(b)), 具有相近的变质等级, 所给出的变质年龄在误差范围内接近. 本文解释这两个年龄值记录的是同一变质事件, 发生时间可限定为1910~1864 Ma.

本次所分析的变形-变质侵入岩样品中, 一些锆石发育了变质生长边(图S2), 指示古元古代岩浆活动之后也发生过变质事件. 但是, 这些锆石生长边十分狭窄, 小于激光束斑直径, 实际中没有获得变质生长边的可靠(谐和)年龄.

3.3 岩浆事件

本次对丹东地区变质基底内7件变形-变质侵入岩样品的锆石定年结果显示, 岩浆侵位年龄分别为1827±14 Ma(YL081), 1855±13 Ma(YL075), 1872±12 Ma(YL040), 1874±13 Ma(YL177), 1875±12 Ma(YL178), 1882±16 Ma(YL287)和2470±12 Ma(YL076). 它们指示丹东地区在1882~1827 Ma间和2470 Ma存在着岩浆活动, 并且前者的活动较为广泛.

综合统计本次及前人^[15]从丹东地区样品中获得的所有岩浆锆石年龄(图3(a)), 可以较全面地反映该区所经历过的前寒武纪各期岩浆事件与活动峰期. 这些岩浆锆石(谐和)年龄频谱图显示, 丹东地区在基底演化阶段经历过多期岩浆活动, 活动峰期分别为2665, 2500, 2200, 2095, 2030和1865 Ma(图3(a)). 这6个峰期岩浆活动可能对应6期岩浆事件, 而每期岩浆事件实际具有一定的持续时间, 其峰期指示的是该岩浆事件的最强活动时间. 本次工作所测试的7件侵

入岩样品, 应属于活动峰期分别为2500和1865 Ma岩浆事件的产物.

3.4 辽-吉造山带东南边界位置

(i) 丹东地区. 本次锆石年代学样品采自丹东地区. 该区是否属于辽-吉造山带曾有不同观点^[3,12~14]. 本次对该区两个变沉积岩样品的锆石年代学分析, 进一步证明了区内辽河群的存在. Lu等人^[15]对丹东地区另两处变质砂岩样品的锆石年代学分析, 也表明存在着与辽-吉造山带内相似的辽河群. 丹东地区目前多处保存着辽河群, 在一些部位成片出现, 在岩性与层序上均可与辽-吉造山带辽河群对比^[12,29](图1(b)). 丹东地区现今辽河群总体上的局部保存状况, 应是后期隆升与剥蚀的结果^[7,10,14,39]. 由此推断丹东地区早期应与辽-吉造山带一样广泛存在着古元古代(南)辽河群.

本次锆石定年结果表明, 丹东地区在1910~1864 Ma间发生了区域变质事件, 区内辽河群的中-高级区域变质作用与古元古代岩体的普遍变质现象皆为此一变质事件的结果. 正是这一变质事件最终形成了丹东地区的变质基底. 前人研究表明, 辽-吉造山带因碰撞造山而广泛经历过区域变质作用, 发生时间为1.93~1.85 Ga^[9,15,18,19,30~32,34]. 由此可见, 丹东地区在古元古代发生的区域变质作用可与辽-吉造山带碰撞造山中的变质事件对比(图3(a)和(b)).

本次锆石年代学分析表明, 丹东地区基底演化过程中经历过6期岩浆事件, 峰期分别为2665, 2500, 2200, 2095, 2030和1865 Ma(图3(a)). 本次所定年的7件侵入岩样品, 有6件为古元古代晚期(对应1865 Ma峰期)岩浆活动产物, 相当于辽-吉造山带内后碰撞岩浆活动产物^[9,36~38]. 这些信息表明, 丹东地区也较多地存在着古元古代辽吉花岗岩. 通过对比丹东地区与辽-吉造山带岩浆活动可见(图3(a)和(b)), 两者具有相似的活动历史与峰期.

值得指出的是, 前人将丹东地区划归狼林地块的主要依据之一是认为该区大面积出露的花岗质片麻岩属于太古代TTG岩系^[29,40]. 近年来大量年代学成果表明, 这些花岗质片麻岩多为中生代变形岩体^[7,39](图1(b)).

通过对比辽-吉造山带可见, 丹东地区与该造山带在组成与演化方面十分相似^[9,13,15,18,19,30~38](图3(b)). 这些相似性表明丹东地区应属于辽-吉造山带

图3 研究区及周边基底岩石锆石年龄频谱图。(a) 丹东地区锆石U-Pb年龄汇总(数据来自本文和文献[15]); (b) 辽-吉造山带锆石U-Pb年龄汇总(数据来自文献[9,13,15,18,19,30~38]); (c) 长海地区锆石U-Pb年龄汇总(数据来自文献[16,23]); (d) 龙岗地块锆石U-Pb年龄汇总(数据来自文献[1,2,49~56]); (e) 狼林地块锆石U-Pb年龄汇总(数据来自文献[25,40~47])

Figure 3 Histograms and relative probability (curves) of concordant zircon ages for the basement rocks from this study area and adjacent regions. (a) Compilations of concordant zircon U-Pb ages from the Dandong area (data from this study and Ref. [15]); (b) compilations of concordant zircon U-Pb ages from the Liao-Ji orogenic belt (data from Refs. [9,13,15,18,19,30~38]); (c) compilations of concordant zircon U-Pb ages from the Changhai area (data from Refs. [16,23]); (d) compilations of concordant zircon U-Pb ages from the Longgang Block (data from Refs. [1,2,49~56]); (e) compilations of concordant zircon U-Pb ages from the Nangrim Block (data from Refs. [25,40~47])

的一部分。

(ii) 大连-庄河地区。辽南东部的大连-庄河地区,以往多认为不属于辽-吉造山带,主要原因是该区基底主要出露太古代辽南杂岩,辽河群仅局部残

留,并缺乏存在辽吉花岗岩的报道^[13,29]。近年来的研究表明,辽南地区在早白垩世发育了辽南与万福变质核杂岩^[11],大量晚中生代岩体侵位其中^[10,14,39],晚中生代发生了强烈的隆升与剥蚀^[11]。该区瓦房店以

东基底与盖层之间仍零星保存着辽河群^[29](图1(b)). 关于大连-庄河地区的基底组成与年代学, 至今研究程度不高, 许多问题仍难以确定. 本文推断, 该区由于早白垩世变质核杂岩的发育与隆升或古元古代造山中的隆升与剥蚀, 早期可能存在的古元古代辽河群与辽吉花岗岩被剥蚀殆尽, 从而应属于辽-吉造山带的一部分或造山带内的残留陆块^[45].

(iii) 长海地区. 辽东半岛以东的海域地区(长海地区), 以往也不认为属于辽-吉造山带^[3,12-14]. 这一海域内的长海群岛, 广泛出露变质基底^[29](图1(b)). 近年来的研究表明^[16,23], 长海群岛出露的变质岩多为变沉积岩系和新太古代(2.54~2.51 Ga)TTG岩系. 一系列锆石定年结果, 指示变沉积岩的原岩时代为古元古代, 可与辽-吉造山带内的(南)辽河群对比. 详细的锆石年代学分析表明^[16,23](图3(c)), 长海地区变沉积岩系和新太古代TTG岩系经历了1887 Ma(峰期)的区域变质作用, 也可与辽-吉造山带古元古代碰撞造山中的变质事件对比^[21]. 长海地区碎屑锆石年代学信息显示(图3(c)), 其源区岩石包括了新太古代与古元古代岩浆岩, 与辽-吉造山带年龄谱相似(图3(a)). 总之, 长海地区的组成与演化也类似于辽-吉造山带, 应属于该造山带的一部分^[21].

(iv) 与龙岗、狼林地块对比. 综合统计龙岗地块基底岩石已有的锆石年代学信息^[1,2,49-56](图3(d)), 显示存在着强烈的新太古代末岩浆-热事件, 但缺乏古元古代岩浆-热事件及辽河群与辽吉花岗岩. 对比表明, 丹东与长海地区的基底组成与演化完全不同于龙岗地块(图3(a), (c)和(d)), 显然不应属于前人认为的太古代地块^[3,29], 而应属于辽-吉造山带的一部分.

对于狼林地块, 以往认为其基底内主体为太古代岩石, 因而被当作稳定的古老地块^[24,40]. 但是, 近年来的锆石年代学分析(图3(e)), 显示该地块上存在着较多的古元古代岩浆岩^[25,43,44], 也存在着1.9~1.85 Ga的变质事件^[42,46,47], 新太古代岩石并不普遍^[41,42]. 一些学者由此推断狼林地块可能也为古元古代造山带^[45]. 另一种可能是, 该地块在古元古代处于活动陆缘环境^[48], 从而存在着较广泛的古元古代弧岩浆

活动与变质作用. 总之, 因为研究程度不高, 狼林地块的大地构造属性仍难以确定, 需要进一步的研究与分析.

上述综合对比表明, 丹东与长海地区在基底组成与演化历史方面均与辽-吉造山带相似, 应属于该造山带的一部分. 大连-庄河地区因早白垩世变质核杂岩的发育而剥蚀较强^[11], 但依据其空间位置与局部残留的辽河群^[29](图1(b)), 推断该地区也属于辽-吉造山带的一部分或为造山带内的残留陆块^[45]. 由此表明, 整个辽东半岛皆属于辽-吉造山带的一部分, 其东南边界至少延至北东-南西走向的鸭绿江断裂带.

4 结论

通过对丹东地区基底岩石的锆石年代学分析, 再结合前人相关研究成果, 可以得出以下主要结论.

(1) 通过本次对变沉积岩的锆石年代学分析, 进一步证明了丹东地区仍较多地保存有古元古代变沉积岩, 可以与辽-吉造山带内的(南)辽河群对比.

(2) 详细的锆石年代学分析显示, 丹东地区在1910~1864 Ma间经历过区域变质作用, 造成基底岩石广泛的中-高级变质. 该变质事件可以与辽-吉造山带内碰撞造山中的变质事件对比.

(3) 本次锆石定年结果, 表明丹东地区也存在一系列古元古代侵入岩, 可以与辽-吉造山带内的辽吉花岗岩对比. 丹东地区基底演化中发生过多期岩浆活动, 峰期分别为2665, 2500, 2200, 2095, 2030和1865 Ma.

(4) 丹东地区基底的组成与演化皆与辽-吉造山带相似, 应属于该造山带的一部分, 而非前人认为的太古代陆块. 该区辽河群的局部残留状况是后期抬升、剥蚀的结果.

(5) 综合对比分析有关研究成果, 表明长海海域地区也应属于辽-吉造山带的一部分. 推断大连-庄河地区也可能属于该造山带的一部分, 或者是造山带内的残留陆块. 由此表明, 整个辽东半岛皆属于辽-吉造山带的延伸, 其东南边界至少达北东走向的鸭绿江断裂带.

致谢 中国海洋大学李三忠教授与吉林大学刘永江教授对本文提出了宝贵的修改意见, 在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res*, 1996, 78: 79–94
- 2 Wan Y S, Liu D Y, Nutman A, et al. Multiple 3.8–3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2012, 54–55: 18–30
- 3 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177–202
- 4 Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, et al. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Res*, 2012, 222–223: 55–76
- 5 Zhang Q S, Yang Z S, Liu L D. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1988. 1–552 [张秋生, 杨振升, 刘连登. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京: 地质出版社, 1988. 1–552]
- 6 Bai J. The Precambrian Geology and Pb–Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Plateform (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1993 [白瑾. 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, 1993]
- 7 Li S Z, Zhao G C, Sun M, et al. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U–Pb zircon ages of two Liaoji granites, Eastern Block, North China Craton. *Int Geol Rev*, 2004, 46: 162–176
- 8 Li S Z, Zhao G C, Sun M, et al. Are the South and North Liaohe groups of North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints. *Gondwana Res*, 2006, 9: 198–208
- 9 Li S Z, Zhao G C. SHRIMP U–Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao–Liao–Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2007, 158: 1–16
- 10 Yang J H, Sun J F, Zhang J H, et al. Petrogenesis of Late Triassic intrusive rocks in the northern Liaodong Peninsula related to decratonization of the North China Craton: Zircon U–Pb age and Hf–O isotope evidence. *Lithos*, 2012, 153: 108–128
- 11 Liu J L, Shen L, Ji M, et al. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. *Tectonics*, 2013, 32: 1121–1141
- 12 Li S Z, Hao D F, Han Z Z, et al. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao–Liao massif (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2003, 77: 328–340 [李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 等. 胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程. 岩石学报, 2003, 77: 328–340]
- 13 Lu X P, Wu F Y, Lin J Q, et al. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in Southern Liaodong peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton (in Chinese). *Chin J Geol*, 2004, 39: 123–138 [路孝平, 吴福元, 林景仟, 等. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩岩浆作用的年代学格架. 地质科学, 2004, 39: 123–138]
- 14 Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 103–119
- 15 Lu X P, Wu F Y, Guo J H, et al. Zircon U–Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2006, 146: 138–164
- 16 Meng E, Liu F L, Cui Y, et al. Zircon U–Pb and Lu–Hf isotopic and whole-rock geochemical constraints on the protolith and tectonic history of the Changhai metamorphic supracrustal sequence in the Jiao–Liao–Ji Belt, southeast Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res*, 2013, 233: 297–315
- 17 Faure M, Lin W, Monié P, et al. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula, NE China. *Terra Nova*, 2004, 16: 75–80
- 18 Luo Y, Sun M, Zhao G C, et al. 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 Res*, 2004, 134: 349–371
- 19 Luo Y, Sun M, Zhao G C, et al. 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 Res*, 2008, 163: 279–306
- 20 Li S Z, Zhao G C, Liu X, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao–Liao–Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Res*, 2012, 200–203: 59–73
- 21 Liu F L, Liu P H, Wang F, et al. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao–Liao–Ji orogenic/mobile belt, North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2015, 31: 2816–2846 [刘福来, 刘平华, 王舫, 等. 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, 2015, 31: 2816–2846]
- 22 Peng C, Xue L F, Zhu M, et al. The location and evolution of the tectonic boundary between the Paleoproterozoic Jiao–Liao–Ji Belt and the Longgang Block, northeast China. *Precambrian Res*, 2016, 272: 18–38

- 23 Meng E, Liu F L, Liu J H, et al. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic constraints on Archean crustal evolution in the Liaonan complex of Northeast China. *Lithos*, 2013, 177: 164–183
- 24 Paek R J, Kang H G, Jon G P. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 1996. 1–631
- 25 Wu F Y, Han R H, Yang J H, et al. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 2007, 238: 232–248
- 26 Xu J W, Zhu G, Tong W X, et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 1987, 134: 273–310
- 27 He G P, Ye H W. Two types of Early Proterozoic metamorphism in the eastern Liaoning and southern Jilin provinces and their tectonic implications (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1998, 14: 152–162 [贺高品, 叶惠文. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义. *岩石学报*, 1998, 14: 152–162]
- 28 Bureau of Geology and Mineral Resource of Jilin Province. *Regional Geology of Jilin Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1988. 13–37 [吉林省地质矿产局. *吉林省区域地质志*. 北京: 地质出版社, 1988. 13–37]
- 29 Bureau of Geology and Mineral Resource of Liaoning Province. *Regional Geology of Liaoning Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989. 6–324 [辽宁省地质矿产局. *辽宁省区域地质志*. 北京: 地质出版社, 1989. 6–324]
- 30 Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Paleoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Res*, 2006, 149: 249–271
- 31 Meng E, Liu F L, Cui Y, et al. Depositional ages and tectonic implications for the Kuandian South Liaohe Group in Northeast Liaodong Peninsula, Northeast China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 29: 2465–2480 [孟恩, 刘福来, 崔莹, 等. 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*, 2013, 29: 2465–2480]
- 32 Li Z, Chen B, Wei C J, et al. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Insights from detrital zircon U-Pb geochronology, whole-rock Sm-Nd isotopes, and geochemistry. *J Asian Earth Sci*, 2015, 111: 711–732
- 33 Lu X P, Wu F Y, Zhang Y B, et al. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2004, 20: 381–392 [路孝平, 吴福元, 张艳斌, 等. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位时代与形成构造背景. *岩石学报*, 2004, 20: 381–392]
- 34 Meng E, Liu F L, Liu P H, et al. 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 Res*, 2014, 247: 92–109
- 35 Yuan L L, Zhang X H, Xue F H, et al. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Res*, 2015, 264: 119–139
- 36 Lu X P, Wu F Y, Guo J H, et al. Late Paleoproterozoic granitic magmatism and crustal evolution in Tonghua region, northeast China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2005, 21: 721–736 [路孝平, 吴福元, 郭敬辉, 等. 通化地区古元古代晚期花岗质岩浆作用与地壳演化. *岩石学报*, 2005, 21: 721–736]
- 37 Yang J H, Wu F Y, Xie L W, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints from *in-situ* zircon U-Pb ages and Hf isotopes (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2007, 23: 263–276 [杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 等. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *岩石学报*, 2007, 23: 263–276]
- 38 Wang H C, Lu S N, Chu H, et al. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohe Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province (in Chinese). *J Jilin Univ*, 2011, 41: 1321–1334 [王惠初, 陆松年, 初航, 等. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景. *吉林大学学报*, 2011, 41: 1322–1334]
- 39 Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem Geol*, 2005, 221: 127–156
- 40 Zhao G C, Cao L, Wilde S A, et al. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 251: 365–379
- 41 Zhang X H, Wang H Z, Park H N, et al. Basement affinity of the Kwanmo Massif, Korean Peninsula: Evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Yindedong meta-intrusive complex (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 2965–2980 [张晓晖, 王浩铮, 朴贤旭, 等. 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*, 2016, 32: 2965–2980]
- 42 Zhao L, Zhang Y B, Yang J H, et al. Archean rocks at the southeastern margin of the Rangnim massif, northern Korean Peninsula, and their response to Paleoproterozoic tectonothermal events (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2016, 32: 3045–3069 [赵磊, 张艳斌, 杨正赫, 等. 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*, 2016, 32: 3045–3069]

- 43 Kim Z N, Han R Y, Zhao L, et al. 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 (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 3123–3138 [金正男, 韩龙渊, 赵磊, 等. 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*, 2016, 32: 3123–3138]
- 44 Peng P, Wang C, Yang J H, et al. A preliminary study on the rock series and tectonic environment of the ~1.9 Ga plutonic rocks in North Korea (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 2993–3018 [彭澎, 王冲, 杨正赫, 等. 朝鲜~1.9 亿年侵入岩的岩石类型与构造背景初探. *岩石学报*, 2016, 32: 2993–3018]
- 45 Wu F Y, Li Q L, Yang J H, et al. Crustal growth and evolution of the Rangnim Massif, northern Korean Peninsula (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 2933–2947 [吴福元, 李秋立, 杨正赫, 等. 朝鲜北部狼林地块构造归属与地壳形成时代. *岩石学报*, 2016, 32: 2933–2947]
- 46 Li Q L, Zhao L, Zhang Y B, et al. Zircon-titanite-rutile U-Pb system from metamorphic rocks of Jungshan “Group” in Korea: Implications of tectono-thermal events from Paleoproterozoic to Mesozoic (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 3019–3032 [李秋立, 赵磊, 张艳斌, 等. 朝鲜甑山“群”变质岩中锆石-榍石-金红石 U-Pb 体系: 古元古代-中生代构造-热事件记录. *岩石学报*, 2016, 32: 3019–3032]
- 47 Zhao L, Zhang Y B, Wu F Y, et al. Paleoproterozoic high temperature metamorphism and anatexis in northwestern Korean Peninsula: Constraints from petrology and zircon U-Pb geochronology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 2948–2964 [赵磊, 张艳斌, 吴福元, 等. 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*, 2016, 32: 2948–2964]
- 48 Wang H C, Ren Y W, Lu S N, et al. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji Orogen (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2015, 36: 1–16 [王惠初, 任云伟, 陆松年, 等. 辽吉古元古代造山带的地层单元划分与构造属性. *地球学报*, 2015, 36: 1–16]
- 49 Wan Y S, Song B, Yang C, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2005, 79: 78–87 [万渝生, 宋彪, 杨淳, 等. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *地质学报*, 2005, 79: 78–87]
- 50 Grant M L, Wilde S A, Wu F Y, et al. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. *Chem Geol*, 2009, 261: 155–171
- 51 Bai X, Liu S W, Yan M, et al. Geological event series of Early Precambrian metamorphic complex in South Fushun area, Liaoning Province (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2014, 30: 2905–2924 [白翔, 刘树文, 阎明, 等. 抚顺南部早前寒武纪变质杂岩的地质事件序列. *岩石学报*, 2014, 30: 2905–2924]
- 52 Guo B R, Liu S W, Zhang J, et al. Zircon U-Pb-Hf isotope systematics and geochemistry of Helong granite-greenstone belt in Southern Jilin Province, China: Implications for Neoproterozoic crustal evolution of the northeastern margin of North China Craton. *Precambrian Res*, 2015, 271: 254–277
- 53 Peng P, Wang C, Wang X P, et al. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the Eastern North China Craton: Root of a Neoproterozoic arc. *Tectonophysics*, 2015, 662: 7–21
- 54 Li P C, Guo W, Guan Q B, et al. Late Neoproterozoic crustal growth in the northeast of the North China Craton: Evidence from the geochronology and Hf isotope composition of Banshigou supracrustal rocks (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 2839–2855 [李鹏川, 郭巍, 关庆彬, 等. 华北克拉通东北部新太古代晚期地壳生长: 来自板石沟表壳岩年代学和 Hf 同位素的证据. *岩石学报*, 2016, 32: 2839–2855]
- 55 Wang W, Liu S W, Cawood P A, et al. Late Neoproterozoic subduction-related crustal growth in the Northern Liaoning region of the North China Craton: Evidence from ~2.55 to 2.50 Ga granitoid gneisses. *Precambrian Res*, 2016, 281: 200–223
- 56 Wu M L, Lin S F, Wan Y S, et al. Crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of the North Liaoning Complex. *Precambrian Res*, 2016, 275: 35–47
- 57 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59–79
- 58 Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures. *Rev Miner Geochem*, 2003, 53: 469–500
- 59 Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev Miner Geochem*, 2003, 53: 27–62
- 60 Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69: 637–648

补充材料

- 图 S1** 丹东地区锆石定年代表性样品野外照片
图 S2 定年样品部分锆石阴极发光(CL)图像和测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值
图 S3 定年样品锆石稀土元素球粒陨石标准化配分图
图 S4 伟晶岩脉样品锆石 U-Pb 年龄谐和图、频谱图及 Th/U 比值投图
图 S5 变形-变质侵入岩样品锆石 U-Pb 年龄谐和图、频谱图及 Th/U 比值投图
表 S1 锆石 U-Pb 年龄
表 S2 锆石稀土元素数据

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “辽-吉造山带东南边界位置探讨”

Discussion on the southeastern boundary location of the Liao-Ji orogenic belt

ZHANG Shuai^{1*}, ZHU Guang¹, GU ChengChuan¹, LIU Cheng¹, LI YunJian¹, ZHAO Tian² & WANG Wei¹¹ School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;² School of Resource and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

* Corresponding author, E-mail: sdsyzs0610@163.com

The basement of the North China Craton formed through collision of the Eastern and Western blocks along the Trans-ortheast China Orogen at ca. 1.85 Ga. The Liao-Ji orogenic belt in the Liaodong Peninsula and southern Jilin represents a Paleoproterozoic convergent belt between the Longgang and Nangrim blocks in the Eastern Block, and has been considered as the northern segment of the entire NNE- to NE-trending Jiao-Liao-Ji Orogen across the whole Eastern Block from south to north. The Liao-Ji orogenic belt is characterized by the presence of sedimentary and volcanic successions, metamorphism, deformation and magmatism of the Paleoproterozoic ages whereas the Archean blocks show the dominance of Archean TTG gneisses and the absence of the Paleoproterozoic sedimentation, metamorphism and magmatism. However, the southeastern boundary location of the Liao-Ji orogenic belt remains uncertain and controversial, and the southeastern Liaodong Peninsula was considered as an Archean block by many authors. Two samples of meta-sediments and seven samples of meta-igneous rocks were collected from the Dandong area for zircon U-Pb dating in this study. Detrital zircon dating for the two meta-sediment samples, muscovite schist and meta-sandstone, constrains their depositional ages between 2013 (youngest magmatic zircon age) and 1864 Ma (metamorphic age), 2064 and 1910 Ma respectively, indicating Paleoproterozoic ages for their deposition. The Paleoproterozoic meta-sediments, also called the Liaohe Group, are scattered in many places of the Dandong area, and show similar lithology and metamorphic grade to those in the Liao-Ji orogenic belt. These show that the Paleoproterozoic meta-sediments in the Dandong area can be correlated with the Liaohe Group in the Liao-Ji orogenic belt. The basement rocks in the Dandong area, including meta-sediments and meta-plutons, exhibit extensive medium-grade metamorphism. Our zircon dating results suggest that the regional metamorphism experienced by the basement rocks in the Dandong area took place at 1910–1864 Ma (Paleoproterozoic). The obtained metamorphic ages in the Dandong area are synchronous with those recognized in the Liao-Ji orogenic belt, which have been interpreted as time of the collision-related metamorphism. The zircon U-Pb dating results for seven igneous samples in the basement, including granitic pegmatite, weakly deformed granite, monzonitic granitic gneiss and granitic gneiss, give late Paleoproterozoic emplacement time (1882–1827 Ma) for six samples and a 2470 Ma emplacement age for one sample, indicating extensive magmatism of the late Paleoproterozoic. Age spectra of magmatic zircons obtained in this study exhibit that the basement in the Dandong area experienced multi-stage magmatic activities, with age peaks at ca. 2665, 2500, 2200, 2095, 2030, and 1865 Ma respectively. They are similar to those obtained from Liao-Ji orogenic belt, but different from those from the Longgang Block. Previous detrital zircon dating also proved the presence of the Paleoproterozoic sediments and metamorphism in the Dandong area. These facts demonstrate that component and evolution of the basement rocks in the Dandong area show obvious similarity to those in the Liao-Ji orogenic belt, and the basement in the Dandong area belongs to a part of the Liao-Ji orogenic belt, rather than an Archean block as previously considered. Previous zircon dating results have shown that the Paleoproterozoic sediments and metamorphism occur extensively in the Changhai area, just east of the Liaodong Peninsula. The absence of the Paleoproterozoic sediments in the southern Liaodong Peninsula might be related to exhumation and erosion caused by the Liaonan and Wanfu metamorphic core complexes of the Early Cretaceous. It is proposed therefore that the Liao-Ji orogenic belt extends across the entire Liaodong Peninsula, and its southeastern boundary should reach to the NE-striking Yalujiang Fault Zone at least.

basement of the North China Craton, Liao-Ji orogenic belt, location of the southeastern boundary, zircon U-Pb ages, Paleoproterozoic

doi: 10.1360/N972017-00307