

辽吉古元古代造山带的地层单元划分与构造属性

王惠初¹⁾, 任云伟¹⁾, 陆松年¹⁾, 康健丽¹⁾, 初航¹⁾, 于宏斌²⁾, 张长捷³⁾

1)天津地质矿产研究所, 天津 300170; 2)吉林省区域地质矿产调查所, 吉林长春 130022;

3)沈阳地质矿产研究所, 辽宁沈阳 110034

摘要: 辽吉古元古代造山带位于华北克拉通东部, 造山带的沉积构造背景和地层格架长期存在争议。最近的研究表明, 辽吉古元古代造山带的沉积环境为一活动大陆边缘弧后盆地, 经历了早期弧后盆地扩张和晚期盆地收缩-俯冲-造山的演化过程。北辽河群的浪子山组—里尔峪组(含老岭群达台山组)与南辽河群的里尔峪组和老岭群的蚂蚁河组应是同时异相的产物, 前者沉积在弧后盆地大陆边缘一侧, 以陆缘碎屑沉积为主夹少量酸性火山岩; 后者发育在弧后盆地岩浆弧一侧, 火山作用强烈。集安群(荒岔沟组和大东岔组)和南辽河群的中上部(南高家峪组—大石桥组)所构成的孔兹岩系为弧后盆地收缩-俯冲阶段的沉积建造(相当于弧前构造背景), 遭受了~1.9 Ga的变质作用, 并被~1.9 Ga的石榴石花岗岩侵入。河栏—草河口地区的“大石桥组一段”为一套大理岩夹变质基性火山岩的沉积建造, 变质基性火山岩和变质基性岩脉均具有岛弧拉斑玄武岩特征, 形成于弧后盆地的构造背景。依据其中基性火山岩~1.87 Ga的SHRIMP锆石U-Pb年龄, 推测其为弧后盆地俯冲收缩阶段的产物。狭义的盖县组及其相当地层的碎屑锆石反映出大量古元古代的年龄信息, 太古宙年龄信息相对较少, 故推测物源区主要来自南侧的岩浆弧, 所谓的“狼林地块”不是一个太古宙陆块, 而主要表现为一条古元古代岩浆弧。

关键词: 华北克拉通; 古元古代; 辽吉造山带; 地层划分; 弧后盆地

中图分类号: P534.3; P542.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.05.08

Stratigraphic Units and Tectonic Setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji Orogen

WANG Hui-chu¹⁾, REN Yun-wei¹⁾, LU Song-nian¹⁾, KANG Jian-li¹⁾, CHU Hang¹⁾, YU Hong-bin²⁾, ZHANG Chang-jie³⁾

1) Tianjin Institute of Geological and Mineral Resources, Tianjin 300170;

2) Jilin Institute of Geological and Mineral Survey, Jilin, Changchun 130022;

3) Shenyang Institute of Geological and Mineral Resources, Liaonin, Shenyang 110034

Abstract: Paleoproterozoic Liao-Ji orogen is located on the eastern margin of the North China Craton, and its sedimentary tectonic setting and stratigraphic framework are topics of much controversy. Recent studies indicate that the sedimentary environment of Paleoproterozoic Liao-Ji orogen was an active continental margin back-arc basin, which went through an evolutionary process of early basin expansion and late contraction-orogeny. The lower North Liaohe Group (Lanzishan Formation and Lieryu Formation, including the Dataishan Formation of Laoling Group) and the lower South Liaohe Group (Lieryu Formation, including the Mayihe Formation of Jian Group) were formed in different tectonic environments simultaneously, the former was a suite of clastic sediments with a small amount of acidic volcanic rocks formed on the inland side of back-arc basin, whereas the latter was developed on the side of the magmatic arc with intense volcanism. The khondalite composed of the Ji'an Group (Huangchagou Formation and Dadongcha Formation) and the upper South Liaohe Group (Gaojiayu Formation and Dashiqiao Formation) was formed in an sedimentary environment similar to one of the fore-arc basin during

本文由中国地质调查局地质调查项目“华北克拉通对哥伦比亚超大陆事件的响应与构造格架”(编号: 1212011120154)、“华北克拉通变质基底构造分区及其对成矿作用的制约”(编号: 12120114034201)和国家自然科学基金重点项目(编号: 41430210)联合资助。

收稿日期: 2015-04-27; 改回日期: 2015-08-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王惠初, 男, 1963年生。博士, 研究员。主要从事区域地质和前寒武纪地质研究。E-mail: tjwhuichu@163.com。

contraction and subduction of the back-arc basin, which was subjected to ~1.9 Ga metamorphism and the intrusion of ~1.9 Ga garnet-bearing granite. The lower Dashiqiao Formation of North Liaohe Group in the Helan-Caohekou area, a metamorphic sedimentary formation composed of marble and mafic volcanic rocks, was formed also in a tectonic setting of back-arc basin, as shown by the fact that the metamorphic mafic volcanic rocks and metamorphic mafic dikes have geochemical characteristics of island-arc tholeiite. According to SHRIMP U-Pb zircon age (~1.87 Ga) of the tholeiite which is regarded as the magmatic crystallization age, the authors hold that the tholeiite was formed at the stage of back-arc basin contraction-subduction. Because the detrital zircons from the narrow sense Gaixian Formation and equivalent strata recorded plenty of Paleoproterozoic age information but only recorded less Archean information, the authors consider that the clastics were mainly from magmatic arc on the south side of Liao-Ji Orogen, and hence the Rangrim Block is basically a Paleoproterozoic magmatic arc rather than an Archean block.

Key words: North China Craton; Paleoproterozoic; Liao-Ji Orogen; stratigraphic division; back-arc basin

辽吉古元古代造山带位于华北克拉通东部, 古老造山带中赋存有丰富的硼矿、铅锌矿、菱镁矿、滑石矿、金矿、铜矿、铁矿、磷、石墨等矿产资源, 尤以菱镁矿和硼镁铁矿为特色, 长期为国内外地质学家所关注。辽吉古元古代造山带是标志华北克拉通基底形成的重要造山带之一(白瑾, 1993; 李三忠等, 1998, 2001; Zhao et al., 2005, 2012; Lu et al., 2006; 赵国春, 2009; Zhai et al., 2010; Zhao and Zhai, 2013), 主要由古元古代的变质岩系(辽东地区的辽河群、吉南地区的集安群、老岭群)和古元古代花岗岩等组成(图 1)。辽吉古元古代造山带的地质划分和构造背景长期以来存在争议。构造背景方面, 许多学者认为辽吉活动带是一条古元古代的裂谷带(张秋生, 1988; 陈荣度, 1990; 陈荣度等, 2003; 杨振升等, 1995; Peng and Palmer, 1995; Liu et al., 1997; 李三忠等, 1997, 1998; Li et al., 2005, 2006; Luo et al., 2008), 经历了陆内裂解到裂谷封闭(褶皱造山)的演化过程; 另外一些学者则认为辽吉活动带是一条古元古代弧-陆或陆-陆碰撞造山带(白瑾, 1993; 贺高品和叶慧文, 1998; Faure et al., 2004; Lu et al., 2006), 是原本分离的两个陆块拼合造山的结果。在地质划分与对比方面, 辽宁和吉林两省的地质工作者一直有不同认识, 辽宁的地质工作者多认为南、北辽河群(除盖县组之外)为同时异相关系(辽宁省地质矿产局, 1989), 而吉林的地质工作者则认为老岭群和集安群为上下关系(吉林省地质矿产局, 1988); 还有一些学者提出了另外的地质划分对比方案(姜春潮, 1987; 张秋生, 1988; 白瑾, 1993); 这些认识上的分歧制约着地质找矿工作的思路和部署。针对这些制约找矿突破的基础地质问题, 近年来许多学者开展了大量的研究工作(Li et al., 2005, 2006, 2007; Luo et al., 2004, 2008; Wan et al., 2006; 路孝平等, 2004a, b; Lu et al., 2006; 王惠初等, 2011; Meng et al., 2013, 2014), 尤其是同位素年代学和同位素示踪的研究取得了重要进展。作者等借助地质调查项目

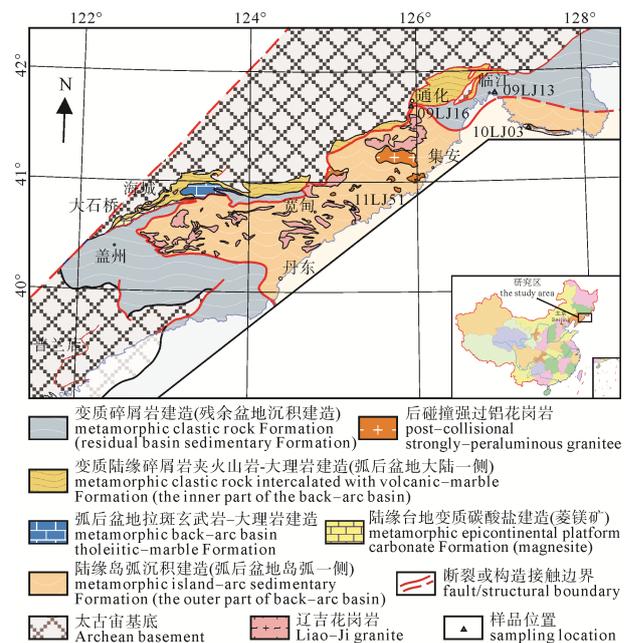


图 1 辽吉古元古代造山带地质单元划分简图

Fig. 1 Schematic structural map of Paleoproterozoic Liao-Ji Orogeny

的支持, 最近几年也在辽吉地区开展了较系统的调查和研究工作, 以岩浆作用研究为主线, 通过对辽吉造山带中古元古代岩浆作用、沉积作用和变形变质作用的综合研究, 取得了一些新的认识, 识别出 4 套侵入岩浆组合和 2 套火山沉积组合, 其中埃达克质侵入岩组合和大洋拉斑-钙碱性玄武岩组合对辽吉古元古代造山带的大地构造背景的判别有重要的地质意义(王惠初等, 2014)。本文是对辽吉古元古代造山带中岩石地层格架和建造划分对比的一些新认识, 冀望在研究思路能起到抛砖引玉的作用, 从而促进辽吉古元古代造山带成矿地质背景的研究。

1 辽吉古元古代变质地质划分沿革

1.1 辽东地区古元古代地质划分

辽东地区的古元古代辽河群是由斋藤林次

表 1 辽东地区古元古界辽河群地层划分对比沿革
Table 1 History of stratigraphic division of Paleoproterozoic Liaohe Group in east Liaoning Province

辽宁区调队 (1975)		姜春潮(1987)		张秋生(1988)		辽宁省地矿局 (1989)		白瑾(1993)		辽宁省地调院(2013)				
辽河群上亚群	盖县组	辽阳群	大石桥组	上辽河群	盖县岩组		盖县组	三段	上部岩系	变质碳酸盐岩组合	盖县岩组	北区	南区	
	大石桥组		判甲炉组		二段	西		东						
		高家峪组	盖县组		一段	江还山(岩)段								
辽河群下亚群	里尔峪组	草河群	通远堡组	下辽河群	大石桥岩组		大石桥组	三段	下部岩系	变质碳酸盐岩组合	大石桥岩组	杨树沟(岩)段		
	浪子山组		石家沟组		二段	王家沟(岩)段								
			高家峪组		高家峪岩组	一段		三(岩)段						
			砖庙组		里尔峪岩组	含硼岩系	高家峪组				高家峪岩组	二(岩)段		
			林家台组		浪子山岩组(北部冒地槽建造)	辽吉花岗岩(南东部优地槽建造)	里尔峪组				高家峪组	一(岩)段		
			高小岭组				浪子山组				高家峪组	里尔峪(岩)组		
			刘家河组								高家峪组	未见		
			炒铁河组								高家峪组			
			双塔岭组								高家峪组			
			老营沟组								高家峪组			

(1938)所建立的“辽河系”演变而来, 经过 20 世纪 60 至 70 年代的大面积区域地质调查和研究, 基本确立了辽河群的地层框架(表 1)。辽河群角度不整合于新太古代鞍山群和花岗岩(连山关花岗岩)之上, 其上被中元古代榆树砬子群不整合覆盖。辽河群在 20 世纪 70 年代进行区域地质调查时自下而上划分为下亚群浪子山组、里尔峪组, 上亚群高家峪组、大石桥组和盖县组(辽宁省地质矿产局, 1989)。由于岩相变化、变质程度、构造变形和混合岩化程度等方面的差异, 通常以盖县—析木城—塔子岭—荏草甸子—绥阳一线为界, 将辽河群分为南北两区, 俗称南辽河群和北辽河群。南、北两个地区共用盖县组, 但盖县组之下地层尤其是里尔峪组有较大差异。许多学者和地调科研单位对辽河群开展了大量的调查研究工作, 从不同的研究角度出发, 提出了不同的地层划分和对比方案(表 1)(姜春潮, 1987; 张秋生, 1988; 白瑾, 1993; 贺高品和叶慧文, 1998)。

1.2 吉南地区古元古代地层划分

吉南地区与辽河群相当的变质地层为集安群(下部)和老岭群(上部), 其地层划分沿革见表 2。集安群主要分布于通化市以南的清河镇、财源及和平一带, 一度划分为清河组、新开河组和大东岔组, 现通常划分为蚂蚁河组(以含硼为特征)、荒岔沟组(以含石墨为特征)和大东岔组(以富铝为特征)(张景枝和张永焕, 1998)。目前集安岩群的蚂蚁河岩组(含硼岩系)、荒岔沟岩组(含石墨岩系)的含义和岩石组合已为多数研究者所认同, 而大东岔岩组(高铝岩

系)的层位及其区域对比仍存争议(王福润等, 1988; 吉林省地质矿产局, 1997)。老岭群自下而上划分为达台山组(林家沟组)、珍珠门组、花山组、临江组和大栗子组, 其时代归属曾有古元古界和中元古界之争。姜春潮(1987)认为达台山组是一套性质不明地层, 可能包括了鞍山群、集安群、草河群、辽阳群的组成部分。白瑾(1993)研究认为花山组和大栗子组属同一套地层, 均为一套浅变质泥砂质岩, 两者仅仅在变质程度上有细微差异。珍珠门组的地层位置也是辽吉地区古元古代地层划分问题之一。白瑾(1993)和邢树文等(2010)认为珍珠门组位于老岭群上部或顶部; 邵建波和范继璋(2004)则认为珍珠门组应该解体, 分布在浑江南岸老岭山脉两侧的珍珠门组与大石桥组相当, 而浑江北岸的珍珠门组相当于中元古代的高于庄组。

2 关键地层对比与构造属性

在总结前人观点与分歧的基础上, 作者等对地层划分对比中的一些关键部位和关键地层进行了调查和研究。

2.1 盖县组的划分对比

传统观点将盖县组视为辽河群的顶部层位和盖县—草河口复式向斜的核部, 并超覆到南辽河群的不同层位之上。但是目前区域上的盖县组却包罗万象, 既存在东西差异也存在南北差异, 且易与大石桥组和高家峪组中的富铝片岩混淆, 而许多变质作用研究是以盖县组片岩为基础, 很容易根据变质

表 2 吉南地区古元古代地层划分沿革
Table 2 History of division of Paleoproterozoic strata in south Jilin Province

长春地院吉南区队(1960)		吉林省地矿局(1988)		吉林省岩石地层(1997)		1:25万通化市幅(2003)		吉林省区调所(2013)							
古元古界	辽河群	大栗子组	中元古界	老岭群	大栗子组	中元古界	老岭群上亚群	临江组		古元古界	老岭岩群	大栗子岩组			
		临江组			临江组			临江岩组							
		花山组			花山组		花山组		花山岩组						
		珍珠门组			珍珠门组		珍珠门组		珍珠门岩组						
		达台山组			达台山组		老岭群下亚群	林家沟组	板房沟段 新农村段			林家沟岩组	板房沟段 新农村段	林家沟岩组	
	早沟板岩	板房沟岩组	板房沟段 新农村段	达台山岩组											
太古宙	中鞍山群	古元古界	集安岩群	古元古界	集安岩群	古元古界	集安岩群	大东岔岩组		古元古界	集安岩群	大东岔岩组			
								八宝沟组	荒岔沟岩组			荒岔沟岩组		荒岔沟岩组	
								小荒沟组	蚂蚁河岩组			蚂蚁河岩组		蚂蚁河岩组	
								何家街组	清河组			光华岩群	同心岩组	同心岩组	
													双庙岩组	双庙岩组	

程度人为地归属到南辽河群或北辽河群。

东西差异: 辽东西部盖县地区和东部宽甸地区的盖县组在岩石组合和变质程度上均明显不同。盖县地区为变质砂岩、千枚岩、云母片岩, 变质稍深部位普遍出现十字石和石榴石, 变余层理常可识别, 主要面理为 S_1 片理, 不同程度地发育褶劈理。东部宽甸的太平哨—下露河一带, 盖县组主要为石榴夕线黑云片岩(片麻岩)、含石榴黑云母片岩, 以含夕线石(+堇青石)为特征, 岩石的变余层理难以识别, 主要面理为 S_2 片理(构造置换面理), 并遭受了不同程度的部分熔融作用, 出现浅色的不规则长英质条带; 在太平哨附近的片岩、片麻岩或多或少地见含石墨。吉南地区与盖县组相当的变质地层一部分被划分为集安群的大东岔组(即宽甸地区的盖县组), 一部分被划分为花山组和大栗子组, 相当盖县地区的盖县组, 但吉南的花山组和大栗子组中均含有大理岩组合(相当小大石桥组), 且大栗子组中含有苏必利尔湖型变质沉积铁矿, 多呈似层状、透镜状产于靠近大理岩附近的千枚岩中。

南北差异: 辽宁区调队在区调工作中曾将隆昌—生铁岭一带作为解决南北辽河群对比的关键部位, 从两侧的里尔峪组向中间推进, 分别划分出高家峪组、大石桥组一二三段, 中间为盖县组, 认为层序完整, 对应关系较好。但该地段存在两个问题, 一是北侧的大石桥组一段厚度从东到西由巨厚变为极薄, 二是北大石桥组三段的菱镁矿大理岩在此处从西往东由巨厚迅速减薄甚至尖灭, 而这套菱镁矿大理岩两侧均为云母片岩, 却分别划分为大石桥组二段和盖县组。为解决南北辽河群的对比问题, 辽宁省地质局于 20 世纪 70 年代末部署了连山关—四门子地区 1:5 万非标准图幅填图工作(辽宁省地质局第

八地质大队, 1981)。地质填图在草河口西南部勾画出一个由盖县组构成的向斜构造, 但北侧所划的盖县组三段直接与大石桥组接触, 未见南侧的盖县组一段和二段。盖县组三段岩性为硬绿泥石千枚岩、板岩、变质粉砂岩、石英岩(具波痕构造), 变质程度为绿片岩相, 最高可达十字石带; 南侧的盖县组一、二段岩性为夕线二云片岩、十字二云片岩、变粒岩等, 变质程度为角闪岩相, 以含夕线石为特征; 所谓的向斜构造明显不对称。野外实地调查显示, 在石哈寨南河坎子村附近的大石桥组二段和其南侧的盖县组在岩性组合上没有本质的区别, 均为经过构造置换的含夕线石的二云母片岩, 而其北侧大滴台一带的盖县组三段则为浅变质粉砂岩。两者相距不足 1 km, 难以用变质相变解释, 只能是非正常接触关系(构造接触关系)。

从河坎子向西延, 在青城子镇北所见盖县组为瘤状云母片岩, 瘤状体直径一般为 1~3 cm, 最大约 8 cm。瘤状体主要由石英、夕线石和白云母构成, 瘤状体是岩石韧性剪切和构造置换的结果。该地大石桥组三段缺失, 盖县组片岩直接与大石桥组二段片岩接触, 两者难以区分。

通过区域追索可以看出, 宽甸地区原划分的盖县组不能同盖县—大石桥一带的盖县组对比, 应与吉林的集安群大东岔组对比。草河口—塔子岭一线的地层划分应重新厘定, 需要突破原来辽河群南北层序对应观念的束缚。

2.2 盖县组片岩与下伏地层的关系

在塔子岭—通远堡—宽甸—集安一带的盖县组(大东岔组), 不仅变质程度较深, 且均遭受了强烈的构造置换, 目前岩石显示的片理(片麻理)均非 S_1 面理, 表明变质作用温度峰期发生在片理褶皱期

间(北辽河群的变质作用峰期发生在片理褶皱之前)。因此,其与两侧岩石单位的接触均为构造接触关系,讨论是否为整合关系已无实际意义。

盖县博洛堡—析木城一带的盖县组与北侧大石桥组为断层或韧性剪切接触,接触带大石桥组一侧是重要的滑石矿产出层位;姜春潮(1987)认为大石桥组位于盖县组之上。在大安口附近,前人多将大安口南侧的盖县组片岩作为向斜的核部,而将大安口附近的含菱镁矿、滑石的大理岩建造与五间房东南侧的大理岩建造对比,分别视为向斜构造两侧的北辽河群和南辽河群的大石桥组三段;实际上,将大安口附近的含菱镁矿建造作为向形构造的核部更为合理,北侧的大石桥组二段富铝片岩与南侧盖县组富铝片岩可能是同一套地层,而大安口含菱镁矿建造构成的核部向东翘起直至尖灭。该地含菱镁矿建造与两侧的富铝片岩均为构造接触。

虎皮峪背斜南翼的汤池—黄土岭—老轿顶一带,盖县组片岩分别与大石桥组、高家峪组和里尔峪组接触,前人资料多认为是超覆接触或是构造尖灭。在汤池东南张家堡北可观察到盖县组变质泥砂岩逐渐过渡为大理岩,可以认为盖县组与所谓的“南大石桥组”保存了原来的正常沉积接触关系;在黄土岭北的向阳村附近,盖县组片岩之下未见大石桥组出露,仅出露为含炭质大理岩、含炭质透闪岩和变质碎屑岩,应属于高家峪组;而在黄土岭东的老轿顶一带所谓的高家峪组亦非常薄甚至尖灭,盖县组直接与里尔峪组变粒岩接触。从虎皮峪背斜北侧的南台子绕虎皮峪背斜核部到南翼的老轿顶一带追索,不协调接触界面不是出现在盖县组与下伏地层单位之间,而是出现在高家峪含石墨或含炭质岩系内部,这是辽吉花岗岩和南里尔峪组一起发生逆冲推覆构造的主要滑动面。

2.3 北大石桥组的东西对比

北辽河群分布于盖县—析木城—塔子岭—荏草甸子—绥阳一线以北。以辽阳隆昌为界分为东西两区,东区称辽阳河栏—本溪草河口地区,西区称海城—辽阳隆昌地区,东西两个分区的浪子山组和里尔峪组岩性亦有差异,大石桥组更是存在本质的区别。

东区(辽阳河栏—本溪草河口地区)发育“大石桥组一段”大理岩,而“大石桥组三段”则很薄或尖灭。大石桥组一段与下伏地层多呈不协调接触关系,尤其是隆昌地区的接触关系前人有不同的认识,姜春潮(1987)视为不整合的证据。大石桥组一段中见有多层变质基性熔岩和大量未变质的辉长辉绿岩,变质基性熔岩中保存有较好的枕状构造。变质基性熔岩主体具有岛弧拉斑玄武岩的特征,部分具有岛

弧钙碱性玄武岩特征,少量样品甚至具有高镁安山岩的地球化学特点,形成构造环境总体与岛弧或弧后盆地的大地构造背景相关。从变质枕状熔岩中获得了(1869±28) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(王惠初等, 2011),指示这套大理岩夹基性火山岩建造形成于~1.87 Ga 左右,明显晚于其北侧的浪子山组—里尔峪组(乃至高家峪组),侵入浪子山组—里尔峪组变质岩中的变质基性岩脉中已获得了(2110±31) Ma 的斜锆石 U-Pb 年龄(董春艳等, 2012)和~2.15 Ga 的锆石 U-Pb 年龄(Meng et al., 2014)。

西区(海城—辽阳隆昌地区)发育“大石桥组三段”大理岩,以产菱镁矿为特征,并含大量叠层石;大石桥组一段则较薄且与高家峪组不易区分。由于这套含菱镁矿的大理岩建造与盖县组片岩呈韧性剪切接触,无其它直接证据证明两者的先后顺序,目前看法仍有分歧。姜春潮(1987)和白瑾(1993)均认为这套菱镁矿建造自成不对称向斜构造,是辽河群的最新层位;邢树文等(2010)也认可吉林的珍珠门组含菱镁矿大理岩建造是老岭群的上部层位。但李三忠等(1997)和王成文等(1997)通过地质填图仍认为盖县组片岩位于大石桥菱镁矿建造之上。从大石桥组含菱镁矿大理岩建造中叠层石保存较好的情况看,这套岩石建造变形变质强度相对较弱,缺少盖县组和浪子山组片岩中普遍发育的褶劈理(S₂)。发育叠层石意味着远离河流入海口的滨海潮间带环境,较盖县组泥质-粉砂质沉积所反映的滨浅海环境有所不同,也不同于大石桥组一段夹基性火山岩的活动性盆地环境。结合大安口一带的观察本文暂将含菱镁矿建造置于盖县组片岩之上。

2.4 含硼岩系与硼镁铁矿的地质意义

辽吉南部的含硼岩系指辽河群的南里尔峪组和集安群的蚂蚁河组,以含电气石变粒岩、磁铁浅粒岩(含杨林式铁矿)和含硼镁铁矿(后仙峪式硼矿和翁泉沟式硼铁矿)为特征,空间上往往与辽吉花岗岩伴生。北里尔峪组中虽然局部见电气石变粒岩,但火山活动相对较弱;辽阳八会一带的北里尔峪组也见硼矿点但不构成工业矿体;更重要的是北里尔峪组中不存在硼镁铁矿,未见基性-超基性岩组合,却产有层状硫铁矿。

从虎皮峪、生铁岭和杨木杆岭等地区观察,里尔峪组岩石类型主要有电气石变粒岩、黑云母变粒岩(浅粒岩)、磁铁浅粒岩、电气磁铁变粒岩(浅粒岩)、角闪透辉变粒岩等,并夹有斜长角闪岩。如果按长石种类划分,则可分为钾长变粒岩(浅粒岩)、二长变粒岩(浅粒岩)和钠长变粒岩(浅粒岩)。前人对里尔峪组变粒岩(浅粒岩)的原岩进行过较多研究(区域地质调查资料;姜春潮, 1987; 张秋生, 1988),多

认为钠质变粒岩(浅粒岩)为酸性火山岩,二长变粒岩(浅粒岩)部分为酸性火山岩,部分为不成熟碎屑岩;钾长变粒岩(浅粒岩)则主要为不成熟碎屑岩。在生铁岭见较多含夕线石石英瘤状体的黑云浅粒岩,在虎皮峪背斜北侧里尔峪组浅粒岩中见残留的斜层理,其原岩均属碎屑沉积岩,变质碎屑岩在里尔峪组岩石中占有一定的比重。电气石变粒岩中也有部分为钠长变粒岩,电气石是在变质作用过程中硅酸盐矿物与含硼流体或熔体相互反应形成(黄作良等, 1996; Yan and Chen, 2014),而非原生沉积过程中形成。

硼镁铁矿是含硼岩系中特有的矿床类型,矿床成因有不同认识,主要观点有:蒸发沉积成矿(Peng and Palmer, 1995; Peng et al., 1998, 2002; Jiang et al., 1997; 胡古月等, 2014a, b);热水沉积型矿床(冯本智等, 1998);海底火山喷发-热液改造成矿(张秋生, 1988; 刘敬党等, 2007)。最近几年,随着矿区勘探工作的深入,蛇纹石化橄榄岩对硼铁矿床的控矿作用逐渐引起重视。在营口后仙峪、凤城翁泉沟、辽阳生铁岭影壁山、宽甸大西岔和吉林集安硼矿等地均见有以硼铁矿蛇纹岩或蛇纹石化硼镁铁矿橄榄岩为主要矿石类型的硼-铁矿床。王翠芝等(2006)和刘敬党等(2007)认为含硼岩系中的橄榄岩为岩浆成因,与秦岭造山带中松树沟超基性岩相似;硼镁石(硼镁铁矿)型硼矿的形成是后期含硼热液交代超镁橄榄岩的结果(王翠芝等, 2008),并将硼矿化类型分为镁橄榄岩型、橄榄玄武岩型和富镁大理岩型等三种类型(刘敬党等, 2007)。

实际上,早在 20 世纪 80 年代,方如恒和张亚范(1983)就认为翁泉沟铁矿是由橄榄岩演化而来,硼镁铁矿的形成是多次地质-地球化学作用的结果,主要成矿因素是橄榄岩水化以及与含硼流体的交代作用。对超镁铁质岩是超基性熔岩还是超镁铁质堆晶岩尚无定论,前人依据矿床的层控性倾向于镁铁质熔岩(方如恒和张亚范, 1983; 刘敬党等, 2007; 肖荣阁等, 2007)。但翁泉沟、大西岔和影壁山等矿区均存在大量的磁铁蛇纹岩,翁泉沟矿区可见磁铁蛇纹岩中夹有较纯的蛇纹石化橄榄岩,故作者等倾向于超镁铁质堆晶岩。对影壁山一带的硼镁铁矿研究显示,硼镁铁矿与镁橄榄石平衡共生(图 2),含硼镁铁矿的橄榄岩为变质橄榄岩。翁泉沟矿区的采选实践表明,未蚀变的硼镁铁矿选矿难度大,当硼镁铁矿橄榄岩蚀变分解为硼镁石、磁铁矿和蛇纹石等矿物时易于利用(夏学惠和魏祥松, 2005)。反之,可推测硼镁铁矿是富硼流体与蚀变的超镁铁质岩石在(高)角闪岩相变质条件下反应的结果。

超镁铁质岩石与变质酸性火山岩、变质碎屑

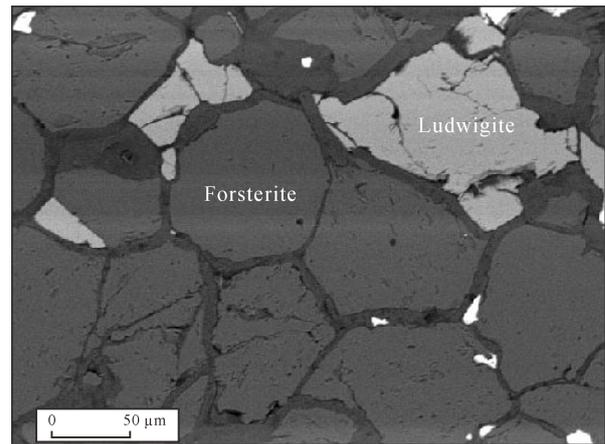


图 2 生铁岭橄榄岩中橄榄石与硼镁铁矿平衡共生(BSE 图像)

Fig. 2 Equilibrium coexistence between olivine and ludwigite in peridotite from Shengtieling area(BSE image)

岩、斜长角闪岩、石英岩、镁质大理岩等岩石类型共生,是一套不协调的岩石组合;翁泉沟的斜长角闪岩被认为是科马提质玄武岩,后仙峪的电气石英岩被认为是热水沉积的硅质岩(李雪梅等, 2008);这套岩石组合存在蛇绿混杂岩或增生杂岩的可能性。结合胶北地区高压麻粒岩的存在(周喜文等, 2004; Zhou et al., 2008; Tam et al., 2012),可以推测在辽吉古元古代造山带中曾经出现过洋壳和俯冲作用。这样南辽河群主体应该是洋盆另一侧的产物,不能简单地与北辽河群对比。

综上所述,辽吉造山带中古元古代变质地层划分和对比还存在较大分歧。究其原因主要有如下两个方面:(1)客观上的复杂性,辽吉造山带中的层状变质岩系空间上形成于不同的构造背景和不同的沉积环境,沉积相和沉积建造存在巨大差异;变形变质作用多期性和不均一性使其成为一套看似有序内部无序的变质地层,褶皱构造、韧性剪切构造和逆冲推覆构造发育,常存在重复叠置、地层缺失,以及同岩异貌、异岩趋同等现象。(2)研究方法和认识上的误区,辽吉古元古代活动带不论是裂谷封闭还是陆缘拼贴-碰撞,均认可最后的造山过程,即辽吉古元古代活动带是造山带。但造山带中的变质岩系不同于稳定陆块上的沉积盖层(如华北克拉通上的中新元古界)或陆内盆地沉积(如滹沱群),不能套用沉积地层学研究方法,而应采用构造地层学(非史密斯地层)和综合大地构造相分析的研究方法,摆脱传统观念的束缚。

3 同位素年代学对地层划分的制约

近几年,许多学者对辽吉造山带的不同地层单元和其中的古元古代侵入体开展了广泛的锆石年代学研究(Luo et al., 2004, 2008; 郝德峰等, 2004; Wan

et al., 2006; Lu et al., 2006; Li et al., 2006; Li and Zhao, 2007; Meng et al., 2013)。年代学研究对辽吉造山带的地质格架有重要制约作用。

3.1 变质地层的锆石年代学

变质地层的锆石测年可以分为直接年龄和间接年龄两种类型,前者对变质地层中的火山岩夹层定年,是地层时代确定的直接依据;后者对变质地层中碎屑锆石定年,只能作为确定地层时代的间接依据。

3.1.1 变质火山岩测年

Wan 等(2006)在海城北里尔峪组细粒黑云变粒岩(LD0106-1)中获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(2179±8) Ma,认为可代表原岩酸性火山岩的年龄。邢德和等(未发表资料)从隆昌里尔峪组浅变质流纹岩中获得的锆石 U-Pb 年龄为~2.18 Ga。

Lu 等(2006)在通化北部光华岩群变质玄武岩(Y022)中获得(2123±16) Ma 的锆石 U-Pb 年龄(代表原岩年龄),另外一组(2497±39) Ma 认为是继承锆石年龄。在清河镇西北蚂蚁河组含透辉片麻岩(Y006-1)获得一组(2103±18) Ma 锆石 U-Pb 年龄($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄),不一致上交点年龄为(2130±25) Ma,认为其原岩是中性火山岩,故年龄可代表火山岩成岩年龄,另外一组(2476±22) Ma 代表继承锆石年龄。

作者等曾在辽阳河栏地区大石桥组一段的变质枕状熔岩中获得(1869±28) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(王惠初等, 2011),锆石呈板状,阴极发光图像显示锆石内部有暗淡的板条状斑纹, Th/U 较高(0.4~10.06),无变质锆石迹象,年龄值可代表玄武岩形成年龄。最近对采自宽甸杨木杆岭的黑云二长变粒岩(11LJ51)进行了 LA-ICP-MS 法测年,锆石的阴极发光图像显示,大多数具有核边结构,核部具有较清晰的岩浆结晶锆石的震荡环带;变质边宽窄不一,颜色暗淡,具不均匀斑纹。锆石核部年龄测试数据集中,获得一组 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄(2181±5) Ma(29 个数据点, Th/U > 0.22)。变质生长边则大致获得一组(1915±15) Ma 的年龄(5 个数据点, Th/U < 0.09)(图 3);该样品原岩恢复为英安质火山岩,故(2181±5) Ma 可代表成岩年龄,与早期阶段的辽吉花岗岩形成时代相当。

孟恩等(2013)在宽甸大西岔附近采集含电气石浅粒岩(DD07-4, 里尔峪组)进行锆石 LA-ICP-MS 法测年,大多数锆石年龄数据介于 2220~2036 Ma,加权平均峰期年龄~2179 Ma。变质锆石或变质生长边的年龄为(1884±12) Ma($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1878~1895 Ma)。该样品为含电气石斜长浅粒岩,原岩应为酸性火山岩,~2179 Ma 的峰值应代表原岩形成

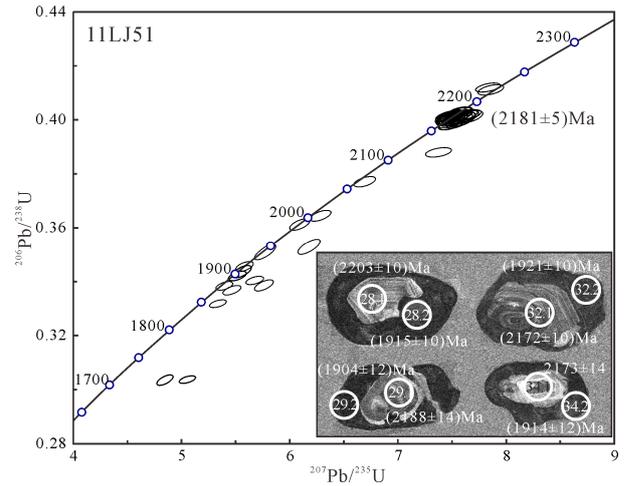


图 3 里尔峪组黑云变粒岩锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 3 U-Pb concordia diagram of the zircon from biotite leptynite in Lieryu Formation

年龄,其它年龄数据应为变质事件改造的结果。~2179 Ma 的年龄与作者等从杨木杆岭黑云二长变粒岩中获得的(2181±5) Ma 数据一致。

从上述测年结果看,辽吉造山带中的地层系统似乎可以划分为两个阶段,早期在~2.1~2.18 Ga,是辽吉造山带弧后张裂阶段的产物;晚期阶段在~1.87 Ga 前后,是汇聚造山阶段的产物。

3.1.2 碎屑锆石测年

3.1.2.1 辽东地区

Luo 等(2004)对海城附近的浪子山组进行了碎屑锆石 LA-ICP-MS 法测年,采自海城上英水库附近的中粗粒长英质片岩、泥质片岩样品获得的年龄数据为 2.05~2.24 Ga,并存在~1.93 Ga 变质作用记录,认为该样品的物质源区主要来自古元古代花岗岩。上英水库附近古元古代花岗岩发育,其物质来源具有合理性,缺少太古宙年龄信息,有可能是近源沉积的缘故。对隆昌大北湾附近里尔峪组样品的碎屑锆石测年,主要年龄数据集中在 2.03~2.28 Ga,少量 2.4 Ga,也缺少太古宙源区信息。Luo 等(2008)在华子峪菱镁矿北侧大石桥组下部采集的样品(十字黑云片岩和黑云斜长片岩)则给出了 2.25~2.53 Ga 的年龄信息,主体与太古宙 TTG 片麻岩一致,少部分可能来自古元古代花岗岩。这可能是盆地下沉,碎屑物来自更远的盆缘山系。

在虎皮峪背斜南翼,黄土岭老轿顶北侧里尔峪组黑云变粒岩中获得的锆石年龄主要在(2117±4) Ma 附近,并有部分 2.42 Ga 和 2.68 Ga 的年龄信息,而其上的高家峪组黑云变粒岩中获得的锆石 U-Pb 年龄则主要在~2.51 Ga,在~2.27 Ga、~2.42 Ga 和 ~2.66 Ga 也有小的峰值(Luo et al., 2008)。这一特点也可能预示早期沉积物主要为近源,来自古元古代辽吉花岗岩或同期火山岩,随后盆地扩张,源区更广泛。大石

桥建一附近的大石桥组长英质片麻岩中缺少太古宙年龄信息, 主要介于 2.01~2.28 Ga 之间, 并存在 1.93 Ga 的变质年龄。但区调填图(1/5 万接官厅幅)认为建一附近缺失大石桥组, 盖县组片岩直接与高家峪含炭质岩系接触, 因此该样品有可能代表的是盖县组片岩。张艳飞等(2010)曾对后仙峪矿区的电气石岩进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年, 3 个样品的锆石阴极发光图像显示, 多数锆石具有核边结构, 核部锆石震荡环带发育, 认为是来源于岩浆成因的碎屑锆石, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为~2175 Ma; 边部锆石也有暗淡的生长环带, 且 Th/U 比值较低, 获得的锆石 U-Pb 年龄为~1.9 Ga, 代表变质事件的记录。

大石桥地区的盖县组: Wan 等(2006)对大石桥附近盖县组石英岩中锆石进行 SHRIMP 测年显示年龄数据主要集中在 2021~2225 Ma, 来源于古元古代火山岩和花岗岩。Luo 等(2008)对虎皮峪背斜北侧盖县组黑云变粒岩碎屑锆石测年, 得到的数据主要介于 2.05~2.28 Ga 之间, 并有少量~2.4 Ga 的年龄, 与 Wan 等(2006)获得的结果类似, 同样缺少太古宙年龄信息。

丹东一宽甸地区: Lu 等(2006)在丹东市区西南的高家峪组中采集两个样品进行 SHRIMP 年龄测定, SD4-1(变质砂岩)的 8 个数据点中 4 个集中在 (2192±24) Ma, 另外 4 个介于 1886~2044 Ma 之间, 最小(1886±16) Ma, 为变质年龄。SD4-7(变质砂岩), 年龄较复杂, 最大 3356 Ma, 出现 2.7 Ga 和 2.5 Ga 两组碎屑锆石年龄, 最小的为(2087±24) Ma。孟恩等(2013)从宽甸大西岔附近的黑云石英片岩(DD07-2, 里尔峪组)中获得的碎屑锆石年龄介于 2033~2546 Ma 之间, 最大峰值为~2445 Ma, 存在一系列的 2033~2234 Ma 年龄数据, 3 个变质锆石测点加权平均年龄为(1884±18) Ma。年龄信息显示物源区主要为太古宙, 其次为古元古代地质体。作者等在宽甸步达远附近盖县组堇青石榴二云片岩中采样获得的锆石 U-Pb 年龄主体介于 1937~2259 Ma 之间, 最大峰值为~2.15 Ga, 其次为~2.21 Ga 和~2.02 Ga; 另有 5 个 2514~2851 Ma 的数据点, 以及(1861±16) Ma、(1906±16) Ma 两个锆石变质边的年龄数据。

3.1.2.2 吉南地区

集安群: Lu 等(2006)采自财源镇西北集安群荒岔沟组, 样品为含石墨片麻岩(Y015), 锆石测年数据显示, 大多数锆石铅丢失严重, 靠近一致线的数据点在 2.1~2.24 Ga 之间, 最小的(1838±25) Ma, 认为碎屑源区主要来自辽吉花岗岩; 并出现一个 2879 Ma 的数据。Y016 斜长角闪岩只有变质年龄(1847±8) Ma。本文作者等在集安高台沟附近蚂蚁

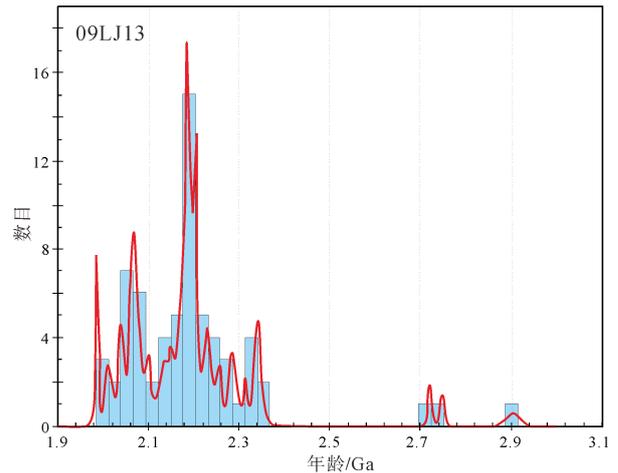


图 4 临江组石英岩(09JL13)的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱
Fig. 4 U-Pb detrital zircon age spectra of quartz (09JL13) in Linjiang Formation

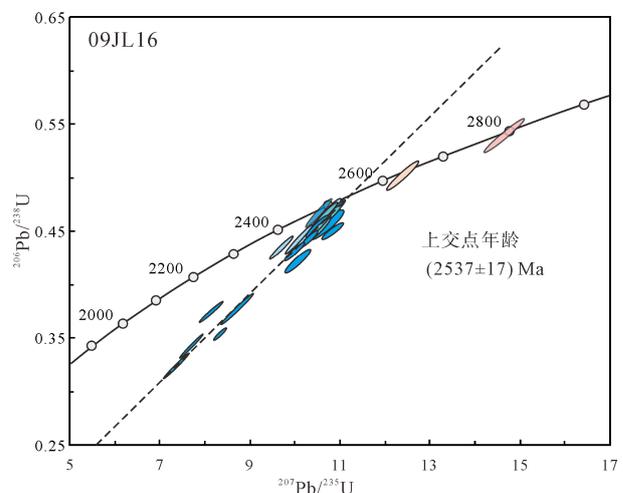


图 5 花山组石英岩(09JL16)的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 5 U-Pb concordia diagram of the detrital zircon from quartz (09JL16) in Huashan Formation

河组中采集的斜长角闪岩(09JL21)分选出的锆石也均为变质锆石, 锆石 U-Pb 年龄为(1864±8) Ma, 与 Lu 等(2006)获得的斜长角闪岩年龄在误差范围内一致。

老岭群: Lu 等(2006)采自大泉源南老岭群粗粒石英岩(TPVIII-19)的碎屑锆石年龄介于 2732~2330 Ma 之间, 峰值为(2546±12) Ma, 显示碎屑物主要来源于太古宙基底。而通化南花山组的细粒石英岩(Y026)给出(2156±14) Ma 和(2039±15) Ma 两组峰值, 另有少量 2357~2500 Ma 的数据, 源区主要是古元古代岩石。

作者等在老岭群中也采集了两个样品进行锆石 U-Pb 测年。采自临江附近的临江组石英岩(09JL13)样品测试的 80 个测点中, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄最大值为 3386 Ma, 其它 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄均大于 1984 Ma, 绝大多数数据点介于 2.0~2.35 Ga 之间(图 4), 谐和线附近测点年龄谱最大峰值为~2.18 Ga, 其次为 2.06 Ga。碎屑锆石年龄谱结构表明临江组石

英岩物质来源以古元古代中期的地质体为主,不是来源于北侧的龙岗太古宙地块,而是来自造山带东南侧岛弧带。通化南的花山组石英岩(09JL16)的锆石 30 个有效数测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值均大于 2.42 Ga, 极少数数据大于 2.6 Ga, 最大年龄值为 2802 Ma, 以 2500~2550 Ma 之间居多, 不一致线上交点年龄为(2537±17) Ma(图 5), 谐和线附近的 18 个数据点加权平均年龄为(2531±6) Ma, 表明花山组石英的碎屑源区为较单一的新太古代地质体。推测其物质来源主要来自于北侧的龙岗地块。

以上不完全数据统计显示, 辽吉造山带北侧大石桥—辽阳隆昌一线的浪子山组和里尔峪组以古元古代的年龄信息为主, 缺少新太古代的年龄信息, 这可能意味着物源区是附近的古元古代花岗岩和火山岩, 为近源沉积。而其上的大石桥组片岩则以 ~2.5 Ga 的碎屑源区为主, 说明盆地下沉, 源区以北侧大陆新太古代片麻岩为主。

辽吉造山带南部的里尔峪组以古元古代火山岩为主, 对于一些浅粒岩和变粒岩样品的原岩性质较难判断, 不能排除目前获得的年龄数据部分代表火山岩的成岩年龄, 而碎屑锆石则可能主要来自于与辽吉花岗岩同期的火山岩。其上的高家峪组同样表现为盆地下沉出现较多周缘新太古代的源区信息。

通化—宽甸地区的里尔峪组和高家峪组以古元古代的年龄信息为主, 但或多或少有太古宙的年龄信息。但老岭群的碎屑锆石年龄结构较复杂, 一部分均来自新太古代变质基底, 一部分主要为古元古代的年龄信息。推测在盆地早期陆缘沉积的碎屑岩以新太古代基底片麻岩为碎屑源区, 这部分相当于达台山组, 与辽宁的浪子山组相当, 只是因在通化西侧一带缺少辽吉花岗岩。而缺少太古代年龄信息的部分则与狭义的盖县组(不包括宽甸地区的盖县组和吉南的大东岔组)相当。

从东到西盖县组片岩(以及老岭群的相当地层)的碎屑源区均为古元古代地质体, 太古宙年龄信息稀少, 故推测碎屑物质主要来自于造山带南侧的岩浆弧, 因俯冲造山南侧已隆起为山系。从碎屑锆石的年龄分布看, 南侧岩浆弧应还存在许多不同阶段(1.9~2.1 Ga)的花岗质侵入体。故现今的老岭群可能包含早晚两部分地层, 早期碎屑源区来自北侧新太古代古大陆, 晚期源区来自南侧岩浆弧。

但是, 必须看到, 变质岩中利用碎屑锆石判断原岩沉积时代还存在较大的局限性, 将最小碎屑锆石年龄视为沉积下限的方法值得商榷, Kröner 等(2014)对麻粒岩相变质岩的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 法测年对比分析表明, LA-ICP-MS 法测年的年龄数

据在岩浆结晶年龄和变质年龄之间可能存在线性串珠状分布, 中间的一系列数据点并不具备有效的地质意义。辽吉古元古代造山带中变质岩系的变质程度为绿片岩相-高角闪岩相, 对其中的碎屑锆石年龄会有一定程度的影响, 特别是对宽甸—通化地区高角闪岩相变质岩的 LA-ICP-MS 法碎屑锆石年龄的地质解释应慎重。

3.2 花岗岩质侵入体的年代学制约

辽吉造山带古元古代侵入岩浆作用强烈, 前人工作总结了三期主要的岩浆事件, 即 2.2~2.1 Ga 的张裂阶段、1.95~1.86 Ga 的造山阶段和 1.86~1.84 Ga 后造山阶段的侵入岩浆作用(Li et al., 2007; Lu et al., 2006)。

3.2.1 辽吉花岗岩

辽吉花岗岩前人已进行了大量研究工作。张秋生(1988)将其视为辽吉岩套的一部分, 可见其与含硼岩系的紧密关系。辽吉花岗岩不仅发育在南部地区, 在北侧的大石桥—隆昌一带也有较广泛的分布, 但物质成分的复杂性和变形强度明显不如南部地区。最近几年, 许多学者对辽吉花岗岩进行了年代学和同位素示踪研究, 确定辽吉花岗岩形成于 2.18~2.10 Ga 之间(Li et al., 2006, 2007; Wan et al., 2006; Lu et al., 2006)。多数研究者认可铝质“A”型花岗岩的观点, 认为其形成环境为裂谷背景(Sun et al., 1993; 刘永江和李三忠, 1996; 李三忠等, 1997; 路孝平等, 2004b; 郝德峰等, 2004), 并认为是辽河群沉积的主要碎屑源区之一(路孝平等, 2004a; Li et al., 2007; Lu et al., 2006; Luo et al., 2004, 2008)。野外地质调查表明, 辽吉花岗岩与地层之间多为构造接触关系或侵入接触关系, 真正的沉积接触关系并未观察到, 主要是根据变质碎屑岩中锆石年龄谱推断而来。在辽吉造山带的北侧, 辽吉花岗岩与浪子山组、里尔峪组甚至高家峪组均为断层或韧性剪切关系。南部的许多部位可以见到辽吉花岗岩逆冲到变质地层之上, 如后仙峪矿区(刘敬党等, 2007)、集安高台沟矿区(冯小珍等, 2008)和青城子矿区(杨振升和刘俊来, 1989), 在北瓦沟玉石矿北的恒山里岩体则被认为是飞来峰式的逆冲推覆体(王惠初和袁桂邦, 1992)。在三家子等地可以见到辽吉花岗岩侵入到里尔峪组电气变粒岩和高家峪组含墨云母片岩中。辽吉花岗岩作为辽吉造山带物质组成的一部分卷入了造山作用, 是辽吉造山带演化早期的产物, 地球化学特征显示其是在伸展减薄的背景下形成, 但具有较明显的火山弧岩浆作用的印记。新的研究(王惠初等, 2014)显示辽吉花岗岩可分为钾质和钠质两种类型, 钠质辽吉花岗岩相对钾质辽吉花岗岩形成稍晚(~2.1 Ga), 具有非常低 Sr 高 Yb 特征, 与洋脊斜长

花岗岩的 Sr、Yb 含量相当(张旗等, 2006), 形成于低压环境; 这表明辽吉花岗岩可能经历了一个逐渐减薄的过程, 其中钠质花岗岩可能形成于扩张盆地的后期阶段。

3.2.2 强过铝花岗岩

辽吉南部地区的强过铝花岗岩已获得了较确切的同位素年龄, 如通化南部的巨斑状石榴石花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1856~1876 Ma(路孝平等, 2004b; Li et al., 2007)。据 Zhao 等(2006)研究, 狼林地块上强过铝花岗岩的年龄为(1908±12) Ma 和(1903±49) Ma。

作者等在长白县鸭绿江边十一道沟采集了含石榴花岗岩样品(10JL03), 分选出的锆石均具有岩浆结晶的生长环带, 未见变质生长边。LA-ICP-MS 测年显示 34 个测点, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄大多数介于 1901~1954 Ma 之间, 大致构成的不一致线上交点年龄为(1904±9) Ma, 2 个测点在~2080 Ma, 3 个测点~2015 Ma。在十二道沟侵入含石榴花岗岩的辉绿岩中取样(样品 10JL04-2), 其中的捕获锆石大部分数据给出了(1904±6) Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄, 一致上交点年龄为(1905±13) Ma, 该年龄数据与样品 10JL03 的年龄误差范围内一致, 反映的应该是石榴花岗岩的形成时代(王惠初等, 2014)。这组年龄值与 Zhao 等(2006)在朝鲜狼林地块上获得的强过铝花岗岩(1908±12) Ma 和(1903±49) Ma 的年龄在误差范围内一致, 但较路孝平等(2004b)在通化地区获得的 SHRIMP 年龄~1.87 Ga 略大, 目前尚难判断是测试误差还是强过铝花岗岩在不同部位的形成时代略有不同。

强过铝花岗岩是“S”型花岗岩, 来自于富铝质碎屑岩的重熔, 这表明在这一阶段弧后盆地已开始封闭, 早期的陆缘沉积物随俯冲作用进入地壳深部发生部分熔融, 上侵到集安群中(含有夕线石榴片麻岩的包体), 制约了集安群上部片岩的形成时代和变质作用峰期的时代。

4 辽吉古元古代变质地层单元的重新划分

依据辽吉古元古代造山带不同变质沉积(火山-沉积)建造的岩石组合特点、变质变形特征、锆石年代学信息及碎屑物质来源, 以及与古元古代不同期次岩浆侵入体的相互关系, 按照板块构造思路对辽吉古元古代造山带的演化和变质地层进行重新梳理。

(1)从海城的北里尔峪组和通化的光华岩群中获得了~2.12~2.18 Ga 的火山岩成岩年龄(Lu et al., 2006; Wan et al., 2006), 并从侵入到北里尔峪组地层的变质基性岩墙中获得了(2110±31) Ma 的斜锆石 U-Pb 年龄(董春艳等, 2012), 证实这套组合形成于

~2.1 Ga 以前。

(2)南里尔峪组中已获得多个~2.18 Ga 的中酸性火山岩年龄(本文; 孟恩等, 2013), 蚂蚁河组中性火山岩中也获得了~2.1 Ga 的成岩年龄(Lu et al., 2006), 说明南里尔峪组形成时代不晚于~2.10 Ga。

(3)辽吉花岗岩中获得了大量~2.18~2.10 Ga 的年龄数据, 其中钠质辽吉花岗岩的形成时代在 2.10~2.13 Ga(王惠初等, 2014), 并见辽吉花岗岩侵入到南辽河群的高家峪组和里尔峪组。这表明 2.10~2.18 Ga 之间火山作用与岩浆作用同时发生, 这个阶段的沉积物碎屑锆石可能主要来自于同期的火山岩, 部分来自于盆地边缘抬升到地表的辽吉花岗岩。

(4)变质碎屑岩中存在大量~2.28~1.95 Ga 的岩浆结晶锆石, 并存在~2.27 Ga、~2.18 Ga、~2.08 Ga、~2.0 Ga 的多个峰值, 而北侧龙岗地块上缺少相关地质体记录; 结合朝鲜境内地层对比和花岗质岩石及碎屑锆石测年资料(陈荣度等, 2003; Zhao et al., 2006; Wu et al., 2007; 翟明国等, 2007; Zhai et al., 2007)分析, 狼林地块上新太古代的年龄信息远不如中国境内的华北克拉通丰富, 早前寒武纪的年龄信息主要集中在古元古代, 有确切证据的太古宙地块为临津江带(Zhao et al., 2006), 因此推断狼林地块不是一个太古宙陆块, 而是一条古元古代的大陆边缘岩浆弧(含有与龙岗地块相似的新太古代基底残留), 是辽吉造山带的一部分, 是提供盖县组等地层的主要碎

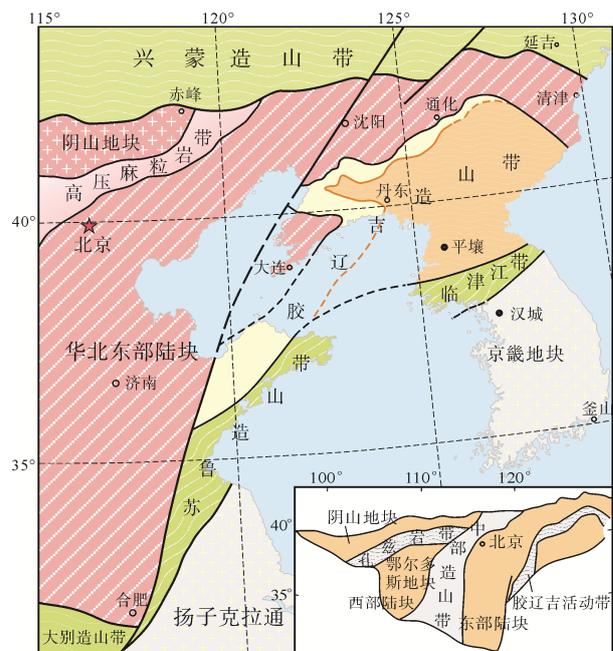


图 6 华北克拉通东缘胶-辽-吉古元古代造山带展布示意图(内插图据 Zhao et al., 2005)

Fig. 6 Sketch map showing distribution of Jiao-Liao-Ji Paleoproterozoic orogen on the eastern margin of the North China Craton (inset after Zhao et al., 2005)

表 3 辽吉古元古代造山带地层格架
Table 3 Stratigraphic framework of the Paleoproterozoic Liao-Ji Orogen

建造类型			构造背景
残余盆地 沉积	变质白云岩-菱镁矿建造: 相当于大石桥—塔子岭一带的大石桥组三段, 吉南的珍珠门组		盆地收缩-造山阶段(1.93~1.86 Ga)
	变质碎屑岩建造: 相当于盖县组、临江组、大栗子组及部分花山组		
	变质碳酸盐岩-拉斑玄武岩建造: 相当于河栏—草河口地区的大石桥组一段		过渡转换阶段 (2.1~1.93 Ga)
大陆边缘沉积(弧后盆地 大陆一侧)	变质碎屑岩-碳酸盐岩建造: 相当于北高家峪组、部分大石桥组	岛弧沉积 (弧后盆地靠 岛弧一侧)	孔兹岩系: 包括上部的变质碎屑岩建造(大东岔组大部, 宽甸地区的盖县组)和下部的浊积岩建造(南高家峪组和荒岔沟组, 及部分南大石桥组) 含硼岩系(增生杂岩): 相当于南里尔峪组和蚂蚁河组(含硼镁铁矿超镁铁质岩)
	变质碎屑岩夹火山岩-碳酸盐岩建造: 相当于浪子山组、达台山组、北里尔峪组		
			弧后盆地张裂阶段(2.18~2.1 Ga)

屑源区。华北克拉通东缘的胶辽吉造山带的东南部构造边界应位于朝鲜半岛的临津江带(图 6)。

(5)南、北里尔峪组形成时代上一致, 在物质组成上有一定的相似性, 且南北均发育辽吉花岗岩, 属于同一盆地同时异相产物的可能性较大。但陆内裂谷缺少裂谷封闭造山的动力学背景, 故推测辽吉造山带的沉积构造背景是活动陆缘盆地(即大陆边缘弧后盆地), 弧后盆地靠近大陆一侧相当于较稳定的大陆边缘, 火山作用相对微弱; 而靠近岩浆弧一侧则火山活动强烈。

(6)南里尔峪含硼岩系中存在许多硼镁铁矿, 这些硼镁铁矿是水化蚀变的超镁铁质岩与富硼流体在变质作用过程中生成。超镁铁质岩石的存在可能预示着弧(岩浆弧)后盆地曾经出现有限的洋壳, 在后期的封闭造山过程中俯冲增生到南侧的岩浆弧之下, 具有俯冲增生杂岩(蛇绿混杂岩)的构造意义。

(7)石榴花岗岩侵位到集安群和宽甸地区的辽河群中, 石榴花岗岩的形成时代与变质作用峰期一致。表明集安群和宽甸地区的辽河群变质变形发生在~1.9 Ga, 弧后盆地收缩起始于~1.9 Ga 之前。

(8)大河栏—草河口地区的大石桥组一段发育岛弧拉斑玄武岩(王惠初等, 2011), 变质基性岩脉也具有岛弧拉斑玄武岩系列特点(Meng et al., 2014)。该套岩石建造的形成环境应为弧后盆地背景, 而非 Faure 等(2004)所认为的岩浆弧。拉斑玄武岩所获得的年龄为~1.87 Ga, 意味着这套地层应晚于集安群和宽甸地区的辽河群。

(9)狭义的盖县组及临江组、大栗子组等的碎屑锆石缺少太古宙的年龄信息, 预示着碎屑物质主要来源于南侧的岩浆弧。由于北侧龙岗地块向南侧岩浆弧下俯冲, 使岩浆弧隆起造山; 弧后盆地收缩, 此时的沉积盆地相当于残余盆地, 盖县组及相当地层和大石桥组菱镁矿建造为残余盆地建造。

综上所述, 辽吉古元古代活动带的变质地层可

以划分为两个阶段, 早期为弧后盆地扩张阶段, 晚期为盆地收缩-俯冲阶段。~2.18~2.10 Ga 扩张作用强烈, 火山活动频繁。在弧后盆地靠陆一侧, 形成浪子山组—里尔峪组、达台山组等大陆边缘沉积, 物源具有近源性, 火山活动较弱; 在弧后盆地靠岩浆弧一侧, 沉积了含硼建造(南里尔峪组和蚂蚁河组), 火山活动强烈, 由中酸性向双峰式演化; ~2.10 Ga 弧后盆地拉张出洋壳。~2.10~1.93 Ga, 盆地沉积相对稳定, 由扩张向收缩转化。南侧的火山活动延续到高家峪组, 以拉斑玄武岩为主, 弧后盆地的属性愈加明显; 大东岔组及其相当地层(如宽甸地区的盖县组)相当于弧后盆地开始收缩北侧大陆向南侧岩浆弧俯冲的弧前沉积。北侧则仍为大陆边缘沉积。~1.93~1.86 Ga, 弧后盆地收缩俯冲造山, 强烈的变形变质作用, ~1.90 Ga 为变质作用峰期; 陆缘碎屑岩进入地壳深部部分熔融形成含石榴花岗岩; 残余盆地中沉积了碳酸盐岩-拉斑玄武岩建造、碎屑岩建造和菱镁矿建造(表 3, 图 1)。最终在~1.85 Ga 形成标志造山作用结束的后造山正长岩-石英二长岩-二长花岗岩组合。

5 结论

(1)辽吉古元古代造山带的沉积环境为活动大陆边缘盆地(大陆边缘岩浆弧的弧后盆地), 经历了早期盆地扩张和晚期盆地收缩-俯冲-造山的过程, 并曾扩张出有限的洋壳, 里尔峪组中含硼镁铁矿的超镁铁质岩应是古洋壳的遗迹。

(2)北辽河群的浪子山组—里尔峪组(含老岭群达台山组)与南辽河群的里尔峪组和老岭群的蚂蚁河组是同时异相的产物, 前者沉积在弧后盆地大陆边缘一侧, 以陆缘碎屑沉积为主夹少量酸性火山岩; 后者是弧后盆地岩浆弧一侧的火山-沉积建造, 火山作用强烈。

(3)集安群和南辽河群的中上部(南高家峪组—

大石桥组, 荒盆沟组和大东岔组)所构成的孔兹岩系由弧后盆地岩浆弧一侧的火山-沉积演化为弧后盆地收缩-俯冲的弧前沉积, 遭受了~1.9 Ga 的变质作用, 并被~1.9 Ga 的石榴石花岗岩侵入, 地层形成时代在~1.9 Ga 以前。

(4)河栏—草河口地区的“大石桥组一段”为一套大理岩夹变质基性火山岩的沉积建造, 变质基性火山岩和变质基性岩脉均具有岛弧拉斑玄武岩特征, 形成于弧后盆地的构造背景。依据其中基性火山岩~1.87 Ga 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 推测其为弧后盆地俯冲收缩阶段的产物。

(5)狭义的盖县组(含老岭群的临江组、大栗子组和部分花山组)的碎屑锆石缺少太古宙信息, 推测物源区主要来自南侧的岩浆弧。根据碎屑锆石年龄谱的结构推测辽吉造山带南侧为一自~2.2 Ga 以来的岩浆弧, 所谓的“狼林地块”不是一个太古宙陆块, 而主要表现为一条古元古代岩浆弧。

谨以此文祝贺王泽九先生八十华诞。

致谢: 参加研究工作的还有天津地调中心的刘欢、常青松、张阔、张家辉等同志, 以及辽宁省地质矿产勘查局的王文清教授级高工、孔庆波高级工程师。工作过程中与计划项目负责人刘福来研究员进行了多次讨论并共同考察。成文过程中得到了中国地质科学院地质研究所耿元生研究员和万渝生研究员的帮助和指导。在此一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 1212011120154 and 12120114034201) and Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 41430210).

参考文献:

白瑾(主编). 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质与铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.

陈荣度, 李显东, 张福生. 2003. 对辽东古元古代地质若干问题的讨论[J]. 中国地质, 30(2): 207-213.

陈荣度. 1990. 辽东裂谷的地质构造演化[J]. 中国区域地质, 4: 305-315.

董春艳, 马铭株, 刘守偈, 颀颀强, 刘敦一, 李雪梅, 万渝生. 2012. 华北克拉通古元古代中期伸展体制新证据: 鞍山-弓长岭地区变质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学[J]. 岩石学报, 28(9): 2785-2792.

方如恒, 张亚范. 1983. 翁泉沟式铁矿成因的初步研究[J]. 地质论评, 29(6): 527-533.

冯本智, 卢静文, 邹日, 明厚利, 谢宏远. 1998. 中国辽吉地区早元古代大型-超大型硼矿床的形成条件[J]. 长春科技大学学报, 28(1): 1-15.

冯小珍, 肖晔, 刘长学. 2008. 高台沟硼矿地质地球化学及成因分析[J]. 化工矿产地质, 3(4): 207-216.

郝德峰, 李三忠, 赵国春, 孙敏, 韩宗珠, 赵广涛. 2004. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及其对构造演化的制约[J]. 岩石学报, 20(6): 1409-1416.

贺高品, 叶慧文. 1998. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义[J]. 岩石学报, 14(2): 152-162.

胡古月, 李延河, 范昌福, 侯可军, 王成玉, 谢桂青. 2014a. 辽东翁泉沟硼镁铁矿矿床海相蒸发成因: 来自稳定同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 33(4): 821-832.

胡古月, 范昌福, 李延河, 侯可军, 刘焱, 陈贤. 2014b. 辽东砖庙矿区硼矿床的海相蒸发成因——来自硼、硫、碳同位素的证据[J]. 地球学报, 35(4): 445-453.

黄作良, 莫珉, 祖恩东. 1996. 辽东硼矿床中电气石的矿物学特征及成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 15(4): 365-378.

吉林省地质矿产局(李东津主编). 1997. 吉林省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 324.

吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 13-17.

吉林省区域地质矿产调查所. 2013. 吉林省成矿地质背景研究报告[R]. 长春: 吉林省区域地质矿产调查所.

姜春潮. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社: 321.

李三忠, 韩宗珠, 刘永江, 杨振升, 马瑞. 2001. 辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义[J]. 地质论评, 47(1): 9-18.

李三忠, 刘永江, 杨振升. 1998. 辽吉地区古元古代造山作用的大陆动力学过程及其壳内响应[J]. 地球物理学报, 41(Suppl.): 142-152.

李三忠, 杨振升, 刘永江, 刘俊来. 1997. 胶辽吉地区古元古代早期花岗岩的侵位模式及其与隆滑构造的关系[J]. 岩石学报, 13(2): 189-202.

李雪梅, 孙丰月, 李碧乐, 霍亮, 李延军. 2008. 辽东后仙峪硼矿床含硼岩系中电英岩的地球化学特征及其成因[J]. 世界地质, 27(3): 260-266.

辽宁省地质调查院. 2013. 辽宁省矿产资源潜力评价成果报告[R]. 沈阳: 辽宁省地质调查院.

辽宁省地质局第八地质大队. 1981. 本溪连山关-凤城四门子地质图(1: 50000)及说明书[R]. 本溪: 辽宁省地质局第八地质大队.

辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 33-55.

刘敬党, 肖荣阁, 王文武, 王翠芝. 2007. 辽东硼矿区域成矿模型[M]. 北京: 地质出版社: 462.

刘永江, 李三忠. 1996. 辽宁海城一大石桥-吉洞地区早元古代花岗岩[J]. 辽宁地质, 1: 10-18.

路孝平, 吴福元, 林景任, 孙德有, 张艳斌, 郭春丽. 2004a. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩质岩浆作用的年代学格架[J]. 地质科学, 39: 123-138.

路孝平, 吴福元, 张艳斌, 赵成弼, 郭春丽. 2004b. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景[J].

- 岩石学报, 20(3): 381-392.
- 邵建波, 范继璋. 2004. 吉南珍珠门组的解体与古-中元古界层序的重建[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 161-167.
- 王成文, 刘永江, 李东涛. 1997. 辽河岩群南北区域对比的新证据[J]. 长春地质学院学报, 27(1): 17-24.
- 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党, 周红春, 刘敬青. 2006. 辽宁营口后仙峪硼矿区超镁橄榄岩的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 中国地质, 33(6): 1247-1255.
- 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 2008. 辽东硼矿的成矿机制及成矿模式[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 33(6): 813-824.
- 王福润, 张廷秀, 韩雪, 王显武. 1988. 吉南地区集安群与老岭群接触关系的确立[J]. 吉林地质, 7(3): 21-28.
- 王惠初, 陆松年, 初航, 相振群, 张长捷, 刘欢. 2011. 辽阳河栏地区辽河群中变质基性熔岩的锆石 U-Pb 年龄与形成构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1322-1334.
- 王惠初, 任云伟, 康健丽, 初航, 相振群, 于宏斌, 王文清. 2014. “华北克拉通对哥伦比亚超大陆事件的响应及大地构造格架”研究报告[R]. 天津: 中国地质调查局天津地质调查中心.
- 王惠初, 袁桂邦. 1992. 对辽南胡家—北瓦沟地区辽河群构造变形的认识[A]//中国地质科学院天津地质矿产研究所文集: 26-27, 199-206.
- 肖荣阁, 刘敬党, 吴振, 王斌, 冯佳睿. 2007. 辽东后仙峪地区元古界超镁橄榄岩岩石学及其成因[J]. 现代地质, 21(4): 638-644.
- 夏学惠, 魏祥松. 2005. 翁泉沟含铀硼铁矿床综合利用研究与对策[J]. 化工矿产地质, 27(2): 65-69.
- 邢树文, 马玉波, 张学海, 孙永杰, 李军, 李宏茂, 张增杰. 2010. 吉林南部老岭群的原岩恢复和古沉积环境[J]. 地质与资源, 19(4): 271-279.
- 杨振升, 李三忠, 刘永江, 刘俊来. 1995. 大造山带中的隆-滑构造——一种前造山期伸展构造型式[J]. 长春地质学院学报, 4: 361-367.
- 杨振升, 刘俊来. 1989. 辽东早元古宙变质岩系中的一个推覆构造——青城子褶皱推覆构造[J]. 长春地质学院学报, 19(2): 121-129.
- 张景枝, 张永焕. 1998. 吉林省早前寒武纪地质研究[J]. 吉林地质, 17(3): 22-31.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2249-2269.
- 张秋生. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社: 574.
- 张艳飞, 刘敬党, 肖荣阁, 王生志, 王瑾, 包德军. 2010. 辽宁后仙峪硼矿区古元古代电气石岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 5(6): 985-998.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1772-1792.
- 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[J]. 高校地质学报, 13(3): 415-428.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 张立飞. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 49(14): 1424-1430.

References:

- BAI Jin. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1997. Stratigraphy(Lithostratic) of Jilin Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 324(in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. Regional geology of Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 13-17(in Chinese with English Summary).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. 1989. Regional geology of Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 33-55(in Chinese with English summary).
- CHEN Rong-du, LI Xian-dong, ZHANG Fu-sheng. 2003. Several problems about the Paleoproterozoic geology of eastern Liaodong[J]. Geology in China, 30(2): 207-213(in Chinese with English abstract).
- CHEN Rong-du. 1990. The tectonic evolution of the Liaodong rift[J]. Regional Geology of China, 4: 306-315(in Chinese with English abstract).
- DONG Chun-yan, MA Ming-zhu, LIU Shou-jie, XIE Hang-qiang, LIU Dun-yi, LI Xue-mei, WAN Yu-sheng. 2012. Middle Paleoproterozoic crustal extensional regime in the North China Craton: new evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of meta-grabbro in the Anshan-Gongchangling area[J]. Acta Petrologica Sinica, 28: 2785-2792(in Chinese with English abstract).
- FANG Ru-heng, ZHANG Ya-fan. 1983. Preliminary study on the genesis of the Wengquangou-type iron deposit[J]. Geological Review, 29(6): 527-533(in Chinese with English abstract).
- FAURE M, LINN W, MONIE P, BRUGUIER O. 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China)[J]. Terra Nova, 16: 75-80.
- FENG Ben-zhi, LU Jing-wen, ZHOU Ri, MING Hou-li, XIE Hong-yuan. 1998. Ore-forming conditions for the early Proterozoic large-superlarge boron deposits in Liaoning and Jilin Province, China[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 28(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- FENG Xiao-zhen, XIAO Ye, LIU Chang-xue. 2008. Geology and geochemistry of the Gaotaigou boron deposit in southern Jilin[J]. China Geology of Chemical Minerals, 3(4): 207-216(in Chinese with English abstract).
- HAO De-feng, LI San-zhong, ZHAO Guo-chun, SUN Min, HANG

- Zong-zhu, ZHAO Guang-tao. 2004. Orogen and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin Province, Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1409-1416(in Chinese with English abstract).
- HE Gao-pin, YE Hui-wen. 1998. Two types of Early Proterozoic metamorphism in the Eastern Liaoning and Southern Jilin provinces and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 152-162(in Chinese with English abstract).
- HU Gu-yue, LI Yan-he, FAN Chang-fu, HOU Ke-jun, WANG Cheng-yu, XIE Gui-qing. 2014a. Marine evaporative genesis of Wengquangou ludwigite deposit in eastern Liaoning Province: Evidences from stable isotopic compositions[J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 821-832(in Chinese with English abstract).
- HU Gu-yue, FAN Chang-fu, LI Yan-he, HOU Ke-jun, LIU Yi, CHEN Xian. 2014b. Marine Evaporative Genesis of Mg-borate Deposits in the Zhuanniao Ore District, Eastern Liaoning Province: Evidence from B, S, C Isotopes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(4): 445-453(in Chinese with English abstract).
- HUANG Zuo-liang, MO Min, ZU En-dong. 1996. Mineralogical Features and Genetic Significance of Tourmalines from Boron Deposits in Eastern Liaoning[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 15(4): 365-378(in Chinese with English abstract).
- Jilin Institute of Geological and Mineral Survey. 2013. Report of Mineralization geological background of Jilin Province[R]. Changchun: Jilin Institute of Geological and Mineral Survey(in Chinese).
- JIANG Chun-chao. 1987. Precambrian Geology of Eastern part of Liaoning and Jilin[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press: 321(in Chinese with English summary).
- JIANG S Y, PALMER M R, PENG Q M, YANG J H. 1997. Chemical and stable isotopic compositions of Proterozoic metamorphosed evaporites and associated tourmalines from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning, China[J]. *Chemica Geology*, 135: 189-211.
- KRÖNER A, WAN Y S, LIU X M, LIU D Y. 2014. Dating of zircon from high-grade rocks: Which is the most reliable method?[J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 515-523.
- Liaoning Institute of Geological Survey. 2013. Report of Mineral resource potential evaluation of Liaoning Province[R]. Shenyang: Liaoning Institute of Geological Survey(in Chinese).
- LI S Z, ZHAO G C, SUN M, HAN Z Z, HAO D F, LUO Y, XIA X P. 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 659-674.
- LI S Z, ZHAO G C, SUN M, HAN Z Z, ZHAO G T, HAO D F. 2006. Are the South and North Liaohe Groups of the North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints[J]. *Gondwana Research*, 9: 198-208.
- LI S Z, ZHAO G C. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji Granitoids: constraints on the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the eastern block of the North China craton[J]. *Precambrian Research*, 158(1-2): 1-16.
- LI San-zhong, HAN Zhong-zhu, LIU Yong-jiang, YANG Zhen-sheng, MA Rui. 2001. Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohe Group[J]. *Geological Review*, 47(1): 9-18(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, LIU Yong-jiang, YANG Zhen-sheng. 1998. Intracrustal response to continental dynamic processes of the Paleoproterozoic orogeny in Liao-Ji area[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 41(Suppl.): 142-152(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, YANG Zhen-sheng, LIU Yong-jiang, LIU Jun-lai. 1997. Emplacement model of Palaeoproterozoic early-granite in Jiao-Liao-Ji area and its relation to the uplift bedding-delamination Structural Series[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 189-202(in Chinese with English abstract).
- LI Xue-mei, SUN Feng-yue, LI Bi-le, HUO Liang, LI Yan-jun. 2008. Geochemistry and origin of tourmalite from boron-bearing rock series of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning[J]. *Global Geology*, 27(3): 260-266(in Chinese with English abstract).
- LIU J, LIU Y, CHEN H, SHA D, WANG H. 1997. The inner zone of the Liaoji paleo-rift: its early structures and structural evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(1): 19-31.
- LIU Jing-dang, XIAO Rong-ge, WANG Wen-wu, WANG Cui-zhi. 2007. Regional Metallogenesis of Borate Deposit in Eastern Liaoning[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- LIU Yong-jiang, LI Shan-zhong. 1996. Palaeoproterozoic granite in Haicheng-Dashiqiao-Jidong area, eastern Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, 1: 10-18(in Chinese with English abstract).
- LU X P, WU F Y, GUO J H, WILDE S A, YANG J H, LIU X M, ZHANG X O. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146: 138-164.
- LU Xiao-ping, WU Fu-yuan, LIN Jing-qian, SUN De-you, ZHANG Yan-bin, GUO Chun-li. 2004a. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong Peninsula and its constraint on tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 39: 123-138(in Chinese with English abstract).
- LU Xiao-ping, WU Fu-yuan, ZHANG Yan-bin, ZHAO Cheng-Bi, GUO Chun-li. 2004b. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381-392(in Chinese with English abstract).
- LUO Y, SUN M, ZHAO G C, AYERS J C, LI S Z, XIA X P, ZHANG J H. 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic

- compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Group: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 163: 279-306.
- LUO Y, SUN M, ZHAO G C, LI S Z, XU P, YE K, XIA X P. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt[J]. *Precambrian Research*, 134: 349-371.
- MENG E, LIU F L, CUI Y, CAI J. 2013. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic and wholerock geochemical constraints on the protolith and tectonic history of the Changhai metamorphic supracrustal sequence in the Jiao-Liao-Ji Belt, southeast Liaoning Province, northeast China[J]. *Precambrian Research*, 233: 297-315.
- MENG E, LIU F L, LIU P H, LIU C H, YANG H, WANG F, SHI J R, 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[J]. *Precambrian Research*, 247: 92-109.
- PENG Q M, PALMER M R, LU J W. 1998. Geology and geochemistry of the Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning-Jilin, northeastern China: Evidence of metaevaporites[J]. *Hydrobiologia*, 381: 51-57.
- PENG Q M, PALMER M R. 2002. The Paleoproterozoic Mg-Fe borate deposits of Liaoning and Jilin Provinces, Northeast China[J]. *Economic Geology*, 97: 93-108.
- PENG Q M, PALMER M R. 1995. The Paleoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporate[J]. *Precambrian Research*, 72: 185-197.
- SHAO Jian-bo, FAN Ji-zhang. 2004. The disintegration of the Zhenzhumen Formation and the reconstruction of the paleo-middle Proterozoic Group[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 34(2): 161-167(in Chinese with English abstract).
- SUN M, ARMSTRONG R L, LAMBERT R S J, JIANG C C, WU J H. 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of the Paleoproterozoic Kuandian Complex, the eastern Liaoning province, China[J]. *Precambrian Research*, 62: 171-190.
- TAM P Y, ZHAO G C, ZHOU X W, SUN M, LIS Z, YIN C Q, WU M L, HE Y H. 2012. Metamorphic P-T path and implications of high-pressure polydeformed granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 22: 104-117.
- The Eighth Team, Bureau of Geology of Liaoning Province. 1981. Geological map (1:50000) of Lianshanguan, Benxi-Simenzi, Fengcheng area and instructions[R]. Benxi: No.8 Team of Liaoning Bureau of Geology(in Chinese).
- WAN Y S, SONG B, LIU D Y, WILDE S A. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[R]. *Precambrian Research*, 149: 249-271.
- WANG Cheng-wen, LIU Yong-jiang, LI Dong-tao. 1997. New evidences on the correlation of Liaohe lithogroup between the southern and the northern regions in eastern Liaoning Province[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(1): 17-24(in Chinese with English abstract).
- WANG Cui-zhi, XIAO Rong-ge, LIU Jing-dang. 2008. Ore-Forming Genesis and Model of Eastern Liaoning Borate Deposits[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 33(6): 813-824(in Chinese with English abstract).
- WANG Cui-zhi, XIAO Rong-ge, LIU Jing-dang, ZHOU Hong-chun, LIU Jing-qing. 2006. Geochemistry of super-magnesium Peridotite in the Houxianyu boron deposit, Yingkou, Liaoning, and its constraints on the source region[J]. *Geology in China*, 33(6): 1247-1255(in Chinese with English abstract).
- WANG Fu-run, ZHANG Ting-xiu, HANG Xue, WANG Xian-wu. 1988. The establishment of the contact relationship between the Ji'an Group and the Laoling Group in southern Jilin[J]. *Jilin Geology*, 7(3): 21-28(in Chinese with English abstract).
- WANG Hui-chu, LU Song-nian, CHU Hang, XIANG Zhen-qun, ZHANG Chang-jie, LIU Huan. 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of meta-basalts of Liaohe Group in Helan area, Liaoyang, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 41(5): 1322-1334(in Chinese with English abstract).
- WANG Hui-chu, REN Yun-wei, KANG Jian-li, CHU Hang, XIANG Zhen-qun, YU Hong-bin, WANG Wen-qing. 2014. "Response of the North China Craton to Columbia Supercontinental Events and tectonic framework"[R]. Tianjin: Tianjin center, China Geological Survey(in Chinese).
- WANG Hui-chu, YANG Gui-bang. 1992. The new understanding for the deformation of Liaohe Group in Hujia-Beiwagou area, Southern Liaoning[A]//The corpus of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 26-27: 199-206(in Chinese with English abstract).
- WU F Y, YANG J H, WILDE S A, LIU X M, GUO J H, ZHAI M G. 2007. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the crustal evolution of North Korea[J]. *Precambrian Res.*, 159: 155-177.
- XIAO Rong-ge, LIU Jing-dang, WU Zhen, WANG Bin, FENG Jia-rui. 2007. Lithology and Genesis of the Proterozoic ultra-Mafic Peridotite of the Houxianyu district in Eastern Liaoning[J]. *Geoscience*, 21(4): 638-644(in Chinese with

English abstract).

- XIA Xue-hui, WEI Xiang-song. 2005. Study and counter measure of comprehensive utilization of wengquangou uranium-bearing vonsenite deposit[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 27(2): 65-69(in Chinese with English abstract).
- XING Shu-wen, MA Yu-bo, ZHANG Xue-hai, SUN Yong-jie, LI Jun, LI Hong-mao, ZHANG Zeng-jie. 2010. Protolith recovering and paleosedimentary environment of Laoling group in southern Jilin province[J]. *Geology and Resources*, 19(4): 271-279(in Chinese with English abstract).
- YAN X L, CHEN B. 2014. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic Houxianyu borate deposit, NE China: Implications for the origin of borate deposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 252-266.
- YANG Zheng-Shen, LI San-zhong, LIU Yong-jiang, LIU Jun-lai. 1995. Uplifting bedding-delamination structures in continental Orogen—a new model of preorogenic extensional tectonics[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 25: 361-367(in Chinese with English abstract).
- YANG Z, LIU J. 1989. Nappe structures in the early Proterozoic complexes in Liaodong Peninsula, China: an example of fold nappe from Qingchengzi[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 19(2): 121-129(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, GUO Jing-hui, LI Zhong, CHEN Dai-zhao, PENG Peng, LI Tie-sheng, ZHANG Yan-bin, HOU Quan-lin, FAN QI-cheng, HU Bo. 2007. Extension of the Sulu UHP Belt to the Korean Peninsula: Evidence From Orogenic Belts, Precambrian Basements, and Paleozoic Sedimentary Basins[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 415-428(in Chinese with English abstract).
- ZHAI M G, GUO J H, PENG P, HU B. 2007. U-Pb zircon age dating of a rapakivi granite batholith in Rangnim massif, North Korea[J]. *Geological Magazine*, 144(3): 1-6. doi: 10.1017/S0016756807003287.
- ZHAI M G, LI T S, PENG P, HU B, LIU F, ZHANG Y B. 2010. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton[J]. *Geological Society of London, Special Publication*, 338: 235-262. doi: 10.1144/SP338.12.
- ZHANG Jing-zi, ZHANG Yong-huan. 1998. A study on the early Precambrian geology of Jilin province[J]. *Jilin Geology*, 17(3): 22-31.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LI Cheng-dong, WANG Yuan-long, JIN Wei-jun, JIA Xiu-qin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249-2269(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qiu-sheng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula, China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 574(in Chinese with English summary).
- ZHANG Yan-fei, LIU Jing-dang, XIAO Rong-ge, WANG Sheng-zhi, WANG Jin, BAO De-jun. 2010. The Hyalotourmalites of Houxianyu Borate Deposit in Eastern Liaoning: Zircon Features and SHRIMP Dating[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 5(6): 985-998(in Chinese with English abstract).
- ZHAO G C, CAO L, WILDE S A, SUN M, CHOE W J, LI S Z. 2006. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 365-379.
- ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, LI S Z. 2005. Late Archean to Palaeoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177-202.
- ZHAO G C, ZHAI M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 23: 1207-1240.
- ZHAO G C, CAWOOD P A, LI S Z, WILDE S A, SUN M, ZHANG J, HE Y H, YIN C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 55-76.
- ZHAO G C. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: key issues and discussion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25: 1772-1792(in Chinese with English abstract).
- ZHOU X W, WEI C J, GENG Y S, ZHANG L F. 2004. Discovery and implications of high pressure pelitic granulite from the north Jiaodong, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1942-1948.
- ZHOU X W, ZHAO G C, WEI C J, GENG Y S, SUN M. 2008. EPMA U-Th-Pb monazite and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 308: 328-350.