



辽吉构造带钴-镍成矿地质背景及找矿方向

辛后田¹, 邢德和¹, 刘超², 刘航³, 王文清⁴, 李永飞¹, 刘琦¹, 杨佳林¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省自然资源厅, 辽宁 沈阳 110032;

3. 中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000;

4. 辽宁省地质勘探矿业集团, 辽宁 沈阳 110032

摘要: 针对辽吉构造带内钴-镍矿找矿问题, 从古元古代构造-建造等成矿地质条件入手, 在充分分析前人资料和总结前期研究成果的基础上, 对辽吉构造带钴-镍成矿物质来源、典型矿床(点)矿体特征、成矿作用进行了系统论述。研究表明, 原辽河群浪子山组到高家峪组是由稳定大陆边缘、活动大陆边缘乃至沟弧盆体系背景形成的复杂造山带增生岩系, 不同成因岩片间均为构造接触, 显示“总体无序、局部有序”的构造地层特点; 上覆大石桥组-盖县组为稳定的残余海盆沉积, 与下伏“地层”非整合接触, 显示有序地层的特点。总体来看, 该套“地层”既不能按有序地层简单划分, 也不能以变质变形程度进行区域对比, 一些变质岩石的原岩建造及其形成的大地构造环境仅依靠地球化学数据、图解来判断也是极不可靠的。“辽吉花岗岩(条痕状或条带状花岗岩)”是相对成熟的陆缘弧、岛弧岩石组合, 主体显示 TTG 特征, 其控矿意义尚不清楚; 造山期后伸展作用下形成的侵入岩多为同构造期的深熔(重熔)的(含)石榴石花岗岩或花岗质片麻岩(S型)和造山晚期加厚背景下的具埃达克性质的花岗闪长岩。区域铜钴镍矿的成矿物质主要来源于基性岩脉(墙)、陆壳火山碎屑岩、古洋壳残余的俯冲增生杂岩及远洋沉积岩等 4 种类型。在辽吉洋俯冲消亡过程中, 原始矿源层受造山作用、变质作用影响再富集成矿, 伸展作用下的基性-超基性成矿, 除此之外, 远洋环境中较高的碳质和盐度(海底热卤水)对矿产的富集也是不可或缺的因素。结合区域地球化学特征, 在辽吉构造带划分出 3 个钴-镍矿成矿带及 6 个找矿靶区, 提出了辽吉构造带钴-镍的找矿标志及找矿方向, 分析了成矿潜力, 为后期区域找矿突破战略行动提供了新思路。

关键词: 辽吉构造带; 钴-镍矿; 古元古代; 沟-弧-盆体系; 辽吉洋; 找矿预测

GEOLOGICAL SETTING AND PROSPECTING DIRECTION OF COBALT-NICKEL MINERALIZATION IN LIAONING-JILIN TECTONIC BELT

XIN Hou-tian¹, XING De-he¹, LIU Chao², LIU Hang³, WANG Wen-qing⁴, LI Yong-fei¹, LIU Qi¹, YANG Jia-lin¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Department of Natural Resources of Liaoning Province, Shenyang 110032, China; 3. Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065000, Hebei Province, China;

4. Liaoning Geological Exploration and Mining Group Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: The paper focuses on the prospecting of cobalt-nickel deposits in Liaoning-Jilin tectonic belt, on the basis of metallogenic geological conditions such as Paleoproterozoic structure-formation, to analyze previous data and research results and systematically discuss the sources of cobalt-nickel ore-forming material, characteristics of typical ore

收稿日期: 2024-08-12; 修回日期: 2024-08-22. 编辑: 黄欣.

基金项目: 国家自然科学基金“蒙古-鄂霍茨克洋俯冲带流体性质及其成矿效应”(U2244201); 中国地质调查局项目“辽吉南成矿区区域地质调查”(DD20240028).

作者简介: 辛后田(1969—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事大地构造、造山带演化与成矿作用研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//2680452804@qq.com

通信作者: 邢德和(1962—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事区域地质矿产研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//niaobs@163.com

deposits or occurrences and mineralization process in Liaoning-Jilin tectonic belt. The results show that the Langzishan Formation to Gaojiayu Formation of former Liaohe Group is a complex orogenic accretionary series formed under the stable continental margin, active continental margin and even trench-arc-basin system. There is structural contact between the rock slices of different origin, showing the tectonic formation characteristics of overall disorder and locally order. The overlying Dashiqiao Formation-Gaixian Formation is stable residual sea basin sediment, which are in non-conformable contact with the underlying strata, showing the characteristics of ordered strata. Overall, the set of formation can neither be simply divided as ordered strata, nor be regionally correlated by metamorphic deformation degree. It is quite unreliable to judge the protolith formation of some metamorphic rocks and the tectonic environment in which they formed only by geochemical data and diagrams. The *Liao-Ji granite* (streaky or banded granite) formed by relatively mature continental margin arc, and the rock assemblage of the island arc generally displays the characteristics of TTG, but its ore-controlling significance is still unclear. The intrusive rocks formed under post-orogenic extension are predominantly syntectonic garnet granites or granitic gneisses which were deeply melted or remelted S-type granite. Additionally, there are adakitic granitic diorites that emerged in the context of late orogenic thickening. The ore-forming materials of the Cu, Co and Ni deposits are primarily sourced from basic dykes, continental crust pyroclastic rocks, subduction accretion complexes and abyssal sedimentary rocks. In the process of subduction and extinction for the Liao-Ji Ocean, besides the re-enrichment of original mineral source layer by orogeny and metamorphism, and the mineralization of basic-ultrabasic rocks under extensional action, the high carbonaceous quality and salinity in pelagic environment (seafloor thermal brines) are essential factors for mineral enrichment. In conjunction with regional geochemistry, three cobalt-nickel mineralization zones and six target areas are delineated within the Liaoning-Jilin tectonic belt. With an evaluation for the mineralization potential, the prospecting indicators and directions for cobalt-nickel deposits in the belt are proposed, which offer a novel approach to the prospecting breakthrough strategic action in the region.

Key words: Liaoning-Jilin tectonic belt; cobalt-nickel deposit; Paleoproterozoic; trench-arc-basin system; Liao-Ji Ocean; prospecting prediction

0 引言

钴-镍是当今世界重要的关键金属资源,也是我国十分紧缺的战略性矿产资源。尤其是钴-镍作为清洁能源、动力电池和国防工业核心材料,未来的需求量势必迅猛增长。全球钴-镍资源主要赋存在现代海洋的铁锰(钴镍铜)结核或结壳,以及陆地的岩浆熔离型、红土型、变沉积岩容矿型和热液型4种类型矿床中^[1],以岩浆型和风化壳型钴镍矿为主要矿床类型。我国已探明的钴-镍矿床多具有规模小、类型多、品位低的特点,以岩浆熔离型为主,主要有金川、夏日哈木、红旗岭和攀枝花等典型矿床。变沉积岩容矿型相对较少,主要产于辽吉构造带和中条山构造带中^[2]。特别是在辽吉构造带(图1),既有岩浆熔离型钴镍矿,如吉林红旗

岭大型镍矿、漂河川镍矿、赤松柏大型铜镍矿和辽宁辽阳小女寨镍钴矿,又有变沉积岩容矿型钴镍矿,如吉林大横路大型铜钴矿、杉松岗钴镍矿及辽宁周家铁钴矿等。众多学者^[3-25]和科研单位^{①②③④⑤}对其成因进行勘查和研究工作,取得了一些认识。但钴-镍矿的成矿地质背景、成矿物质来源、赋存状态及富集成矿规律研究还不够深入,根源在于辽吉带的构造属性一直存在陆内裂谷模式^[26-39]和弧-陆碰撞模式^[40-74]的争议,导致成矿条件和钴镍富集机理的认识不明,找矿标志和针对性找矿勘查技术方法不清。为了促进新一轮找矿突破战略行动的开展,增强我国钴-镍资源的安全保障能力,本研究从辽吉构造带的钴镍成矿地质背景入手,探讨其找矿方向,以期拓展找矿思路。

①鞍钢四〇三队勘探队,一〇二队冶金勘探公司。周家铁矿勘探报告和周家钴矿区找矿评价报告。1976。

②吉林省地质局第四地质调查所。吉林省通化县赤柏松硫化铜镍矿床研究报告。1982。

③辽宁有色地质勘查局。辽吉东部重点成矿带(辽东段)金银多金属勘查及研究总结报告。1993。

④辽宁有色地质局。辽东古元古代裂谷底部层控型铜钴矿矿产资源评价地质报告。2004。

⑤中国地质调查局沈阳地质调查中心。辽吉东部成矿带基础地质综合研究成果报告。2014。



图1 研究区大地构造位置略图

Fig. 1 Tectonic sketch map of the study area

1—龙岗陆块(Longgang block); 2—辽南-狼林地块(Southern Liaoning-Rangnim massif); 3—辽吉构造带(Liaoning-Jilin tectonic belt); 4—松辽盆地(Songliao Basin); 5—韧性变形带(滑脱带)(ductile deformation/detachment zone); 6—断裂构造(fault structure)

1 成矿地质背景

研究区位于辽宁东部-吉林南部,大地构造位置为龙岗陆块和古元古代辽吉构造带(图1)。辽吉构造带发育大量古元古代火山-沉积岩系和中酸性侵入岩体及少量镁铁质岩系。有关该构造带的性质,不同的学者及科研单位进行了大量的研究工作,依旧存在陆内裂谷和古元古代造山带的认识分歧。陆内裂谷观点提出的重要依据是该带内发育双峰式火山岩^[26-33, 36-39, 75],具有低压逆时针的 $P-T$ 演化轨迹^[34-35],以及A型花岗岩^[76-88],认为其中的辽河群是张性环境下形成的有序地层,从而得出产于其中的铜钴镍硼等矿产也严格受层位控制;而造山带观点^[89-120]提出的主要依据为该带两侧古陆块的存在,辽吉花岗岩(条痕状、条带状花岗岩)是具有俯冲挤压特征的 A_2 和I型花岗岩^[89, 100]、非双峰式火山岩^[89, 91],以及具有顺时针的 $P-T$ 演化轨迹^[40-41, 73, 105, 116]。尽管这些学者从不同角度认可了陆-弧碰撞构造背景下形成的造山带,但均认为是华北陆块开裂形成裂谷→裂谷演化→闭合造山的演化过程,且原始地层也是有序的,也得出了产

于其中的铜钴镍硼等矿产也严格受层位控制的结论。而从野外调查^{①②}及近年来的综合研究成果^{③④}来看,上述两种观点很难解析清楚辽吉构造带的形成环境。其一是在该带内至今没有发现华北陆块开裂的证据,倒是发现了一些洋壳的残片^[40, 121-122]^④。在吉林通化财源一带的原集安群中,发现了辉长岩、辉石岩、二辉岩、橄榄岩、高镁安山岩、富铌玄武岩(斜长角闪岩)、斜长花岗岩-斜长岩和硅质岩、浊积岩(泥质板岩-泥质粉砂岩-细砂岩组合),以及麻粒岩(含紫苏透辉斜长角闪岩、含紫苏透辉麻粒岩、斜长角闪紫苏麻粒岩、含紫苏透闪斜长角闪岩)等混杂“共生”在一起的岩石组合^②,这些均暗示了古大洋(即“辽吉洋”)的存在。其二是狼林地块(也称“狼林陆块”)上保存了大量的古元古代岩浆、变质事件的记录^[123-126],狼林地块无论是物质组成、岩浆作用、成矿作用及形成时代,还是变质作用等均与华北陆块不同,但与辽吉古元古代构造带具有密切的亲缘性^[72]。而与裂谷张开并闭合观点相悖的是,龙岗陆块和狼林地块之前并不在一起,两陆块无亲缘关系,只是由于大洋的消失才使得两陆块最终拼合在一起,这说明所谓的狼林地块是曾参与到辽吉构造带古元古代的构造演化过程中的地块(包括辽南地块)^[73];有关狼林地块和辽南地块是否受到辽吉构造带的改造,构造归属是什么,还有待进一步探讨。其三是辽吉构造带经历了多期、复杂的变质-变形-岩浆作用,带内本身具有异常复杂的火山-沉积岩系,其物质组成、多期/多阶段的岩浆作用事件、不同类型的变质作用叠加和十分复杂的变质 $P-T-t$ 演化轨迹样式(集安群、南辽河群和荆山群部分高压泥质麻粒岩相岩石具有顺时针变质演化 $P-T-t$ 轨迹)、多期/多阶段复杂的构造变形特征及不同的形成环境等,很难用任何一种构造演化模式来加以合理解释。此外,部分学者^[49, 89, 91, 105, 113, 116, 127-129]也提出了辽河群可能并非形成于许多人坚持的裂谷环境,而可能是与大洋壳板块俯冲过程有关的陆缘弧或活动大陆边缘环境下的混杂岩。综合上述观点,该构造带内的地质体应为各类不同构造环境、不同岩石或组合的岩片叠加而成,代表

① 辽宁地质勘察院. 1:5万二棚甸子等4幅区域地质调查报告. 2016.

② 辽宁地质勘察院有限责任公司. 1:5万霸王朝(K51E016023)、清河(K51E016024)区域地质调查报告. 2022.

③ 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部成矿带基础地质综合研究成果报告. 2014.

④ 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部关键地区区域地质调查成果报告. 2016.

了处于北部龙岗古陆块、南部辽南-狼林古陆块之间的辽吉洋俯冲增生-碰撞消亡过程中各类古元古代地质体拼贴汇聚而形成的复杂造山带, 所谓带内的“地层”为“总体无序、局部有序”的构造地层, 不能用某一种观点来解释其形成环境。据此, 在野外调研的基础上, 结合区域综合研究及铜钴镍矿产出状态等成果, 从与成矿有关各地质体形成的构造背景(图 2)出发, 提出如下的成矿地质背景。

1.1 稳定大陆边缘(造山前)——浪子山组

该地质单元为古元古代早期稳定大陆边缘或被动大陆边缘的产物, 形成一套富铝碎屑岩建造, 以片岩为主, 局部夹大理岩, 底部见变砾岩-变含砾石英砂岩(底砾岩)。由于受后期造山运动的影响, 局部被改造成构造片岩, 与北部龙岗地块多处为构造接触, 多见北部的结晶基底岩系逆冲至古元古代构造带之上, 偶见不整合接触关系的残余。该地层与吉林省老岭群林家沟组新农村段可以对比, 与区域铜钴镍矿产的形成无关。

前人在该地层中获得最年轻的碎屑锆石年龄主要为 2.05~2.19 Ga^[48,116], 变质玄武岩夹层的年龄介于

1.905~1.934 Ga^[130]①。而从后文中里尔峪岩组(酸性火山岩)的年代学研究来看, 这些年龄很难限制浪子山组的成岩时代; 从野外接触关系来看, 也说明其形成应早于里尔峪岩组, 尽管岩性组合与残余海盆的沉积物相似。

1.2 活动大陆边缘(造山前)——北里尔峪组

该单元为活动大陆边缘或主动大陆边缘的产物, 形成陆缘火山弧。原始岩浆起源于新太古代增生的下地壳物质的部分熔融, 其地球动力学机制与龙岗地块南缘受辽吉洋板块的俯冲作用有关^[73]。本文主要是指辽吉构造带北部地区原称北辽河群里尔峪组部分。岩性主要为变流纹质岩石(变流纹岩、变流纹质火山碎屑岩), 局部夹(蛇纹石化、透闪石化)大理岩, 岩石普遍发生糜棱岩化作用。地球化学特征显示, 岩石 SiO₂ 含量 63.75%~65.64%, Al₂O₃ 含量 16.33%~16.90%, K₂O 含量 4.62%~4.77%, Na₂O 含量 1.35%~2.77%, 含铝指数(A/CNK)为 1.27~1.50, 为过铝质岩石, 显示高硅、富铝、高钾特征; 岩石轻稀土富集, 重稀土亏损, 轻重稀土分馏明显, 且具有明显的负 Eu 异常; 亏损 Ba、Sr、Ti

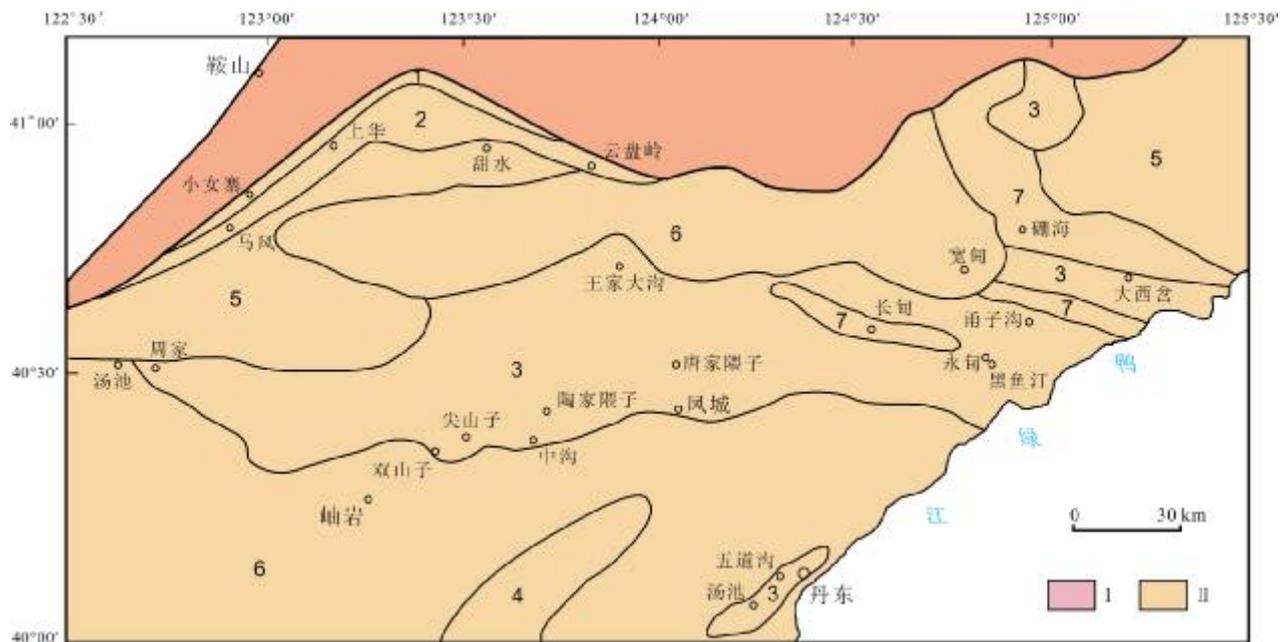


图 2 辽吉构造带构造背景略图

Fig. 2 Tectonic setting of Liaoning-Jilin tectonic belt

I—龙岗陆块 (Longgang block); II—辽吉构造带 (Liaoning-Jilin tectonic belt); 1—稳定大陆边缘 (stable continental margin); 2—活动大陆边缘 (active continental margin); 3—俯冲增生杂岩 (subduction accretionary complex); 4—远洋沉积 (pelagic sediment); 5—弧后盆地 (back-arc basin); 6—残余海盆 (residual sea basin); 7—陆缘弧 (continental marginal arc)

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部关键地区区域地质调查成果报告. 2016.

及较高的 Zr、(Zr+Nb+Ce+Y)含量, 10000Ga/Al 比值大于 2.6. 这些特点都显示为 A 型花岗岩特征, 说明其形成于地壳减薄伸展拉张环境. 北里尔峪组与浪子山组为构造接触, 与区域铜钴镍矿形成有关. 其中, 变余酸性火山岩(流纹岩及流纹质凝灰岩)主要形成于 2.15~2.19 Ga 之间^[91, 130-133]①.

1.3 俯冲增生杂岩构造背景(造山期)

这里所说的俯冲增生杂岩是指多种环境下形成的岩石堆积体, 包括洋内弧形成环境(高镁安山岩、富铌玄武岩)、大洋中脊形成环境(橄榄岩、辉石岩及其蚀变岩、角闪石岩、蛇纹石化尖晶石透辉透闪岩、斜长花岗岩)、远洋及斜坡相沉积形成环境(硅质岩、硅质泥岩、浊积岩)、洋岛海山(大理岩、基性岩)、活动大陆边缘环境(酸性火山碎屑岩)及俯冲的低温高压蓝闪石(青铝闪石)片岩等①. 对应的地质体为“南辽河群里尔峪组”, 以及吉南地区“集安群蚂蚁河组和部分大东岔组”, 其中的火山碎屑岩与铜钴镍成矿有关, 岩性为酸性火山碎屑岩变质而成的变粒岩或浅粒岩, 局部夹有电气石岩、电气石石英岩, 普遍含电气石、磁铁矿和硫铁矿等矿物. 而其中所“夹”的白云质大理岩(局部)应是海山或洋岛的产物, 并见有海山滑塌构造现象(图3). 这些赋矿岩石常与蛇纹岩、蛇纹石化橄榄岩、辉石岩等基性-超基性岩相“伴生”. 这套岩石建造为不同环境, 如与俯冲无关的大洋中脊、洋岛海山和与俯冲有关的活动大陆边缘、古海底火山喷发等, 所发育岩石服务组合在后期俯冲过程中形成构造混杂体, 不是简单的史密斯地层, 与区域铜钴镍、菱镁矿及硼矿等矿产的形成关系十分密切.



图3 海山中的塌积角砾岩(大理岩)

Fig. 3 Collapse breccia (marble) in seamount

至于该混杂岩中的变粒岩或浅粒岩的原岩是否全部或部分属于洋壳地层系统, 与超基性岩相伴生的蛇纹石化白云石大理岩是岩浆成因(碳酸岩)或是洋岛海山形成环境, 硼矿的物质来源, 以及与辽吉花岗岩相“伴生”的斜长角闪岩是否为“双峰火成岩”等等都悬而未决, 还有待深入研究. 其中, 活动大陆边缘环境形成的岩石(变粒岩、浅粒岩)主要形成于 2.16~2.19 Ga 之间^[91, 109, 111-113, 128], 洋内弧(高镁安山岩)为 2.34 Ga^①、橄榄辉石岩为 2.15 Ga^①.

1.4 远洋沉积——大栗子组

该地层主要分布于构造带东部, 即吉林东南部原老岭群大栗子组出露区, 是与南辽河群里尔峪组同期发育的远洋沉积产物, 火山活动不发育. 岩性主要为含碳绢云千枚岩, 原岩为还原-强还原环境形成的碳质泥岩或黑色页岩, 这种环境形成的岩石也包括宽甸地区发育的部分浊积岩(前人划归里尔峪组). 该环境下, 微生物繁盛, 致使碳质含量较高, 由于吸附作用把成矿物质固定于沉积层内, 与区域铜钴镍矿产的形成有关.

1.5 弧后盆地(造山后)——高家峪组

辽吉洋俯冲消减形成沟弧盆体系中的弧后盆地沉积, 主要包括原北辽河群高家峪组、大石桥组的王家沟段和部分华子峪段, 以及吉南地区的集安群荒岔沟组、大东岔组和老岭群林家沟组板房沟段. 岩性主要有片岩、(碳质)板岩和变粒岩、方解大理岩夹(枕状)玄武岩等. 岩石普遍含有石墨或碳质, 火山物质不发育. 在辽宁省辽阳隆昌、甜水、祁家堡子一带变质变形相对较弱的地带可见变余斜层理、波痕、水下冲刷面及粒序层理等原始沉积构造, 在碳质板岩中产微古植物化石. 需要指出的是, 原划分的大石桥组华子峪段、荒岔沟组及大东岔组中含有大量的变质深成岩, 即片麻岩或混合岩, 应从地层中剔除. 该环境形成的地质体与区域铜钴镍矿产的形成无关, 但局部形成(晶质)石墨矿.

1.6 活动大陆边缘及岛弧——(超)基性岩(群、墙)

该基性岩主要包括变质的辉石岩、辉长岩-辉绿岩和斜长角闪岩, 尽管它们在原划分的浪子山组、里尔峪组、高家峪组均可见及, 但高家峪组所赋存的基性岩(包括玄武岩)形成环境应与前者不同, 也与成矿无关. 这里主要探讨与成矿作用有关的早期基性岩(辉石岩、

① 辽宁地质勘查院有限责任公司. 1:5 万霸王朝(K51E016023)、清河(K51E016024)区域地质调查报告. 2022.

辉长岩-辉绿岩和斜长角闪岩)。岩相学研究表明,变辉石岩-辉长岩-辉绿(石)岩为岩浆成因,地球化学特征为富钠、低硅、高铁和高钛;稀土总量较低,模式配分曲线呈 LREE 略高于 HREE 的平坦型,总体与岛弧及洋中脊拉斑玄武岩形成的正角闪岩具有较为相似的稀土元素分布模式,与大洋拉斑玄武岩相似。其多为由大洋板块俯冲在活动大陆边缘形成的岩脉(墙)群,岩浆来源于地幔,代表大洋演化某一伸展期所形成的产物,但也不排除洋内岛弧或地幔柱成因的可能(宽甸地区)。前人通过地球化学的研究结果^[93, 101-108, 127, 134-137]多为拉张减压环境下形成的陆内裂谷^[93, 127, 134-137]、岛弧或弧后盆地^[102-103, 105-108],与俯冲无关的大洋岛弧和洋中脊^[101, 104, 121]。总体来看,该期岩石多呈脉状成群、成带分布,后期的构造改造使之与围岩呈“整合”接触,在宽甸等地被辽吉花岗岩侵入或呈捕虏体^①,这套活动大陆边缘形成的岩脉(墙)群与区域铜钴镍矿产关系密切。

这里需要强调的是,区域上斜长角闪岩的原岩包括3种:一是与上述辉石岩-辉长岩-辉绿岩具有相似的成因环境,只是受到后期强烈的动力改造而形成构造片岩、碎裂岩等,与区域铜钴镍矿产关系密切;二是由玄武岩变质而来,与枕状玄武岩一致的弧后盆地产物^[138-139],或由洋中脊玄武岩变质而成,与区域铜钴镍矿产关系不大;三为杂砂岩变质而成,为区域热-动力变质的产物,与区域铜钴镍矿产无关。

不同研究者得出了不同的成岩环境结论(大陆弧、大洋岛弧、洋中脊、陆内裂谷以及弧后盆地等)。但令人费解的是,即便是同一地质体也得出了不同的结论^[101, 104, 127, 134, 136],这使得通过地球化学特征来探讨岩石形成的源区和构造环境,由此进一步恢复胶-辽-吉造山带的早期构造演化变得更加不可信(辽吉花岗岩更是如此,见下文),尤其是对经过多期区域热-动力变质作用改造及壳源物质污染的变质岩来说更值得商榷。

同位素年代学研究表明,构造带内基性岩的形成时代大体可分为两期,早期年龄一般为 2.05~2.12 Ga^[102-103, 105-108, 127, 134, 136-137]^②,是在陆缘岩浆弧形成

后伸展环境下的活动大陆边缘产物,也构成了原始的矿源层;晚期年龄在 1.85~1.95 Ga^[133, 140]^③,是造山期后的产物,包括火山岩和脉岩(均产于弧后盆地环境——高家峪组),与区域铜钴镍形成无关。从这一点来看,它与上述的酸性火山岩年龄完全不同,也与所谓的裂谷“双峰式”火山岩不符。

1.7 陆缘弧(造山期)——辽吉花岗岩

辽吉构造带内古元古代花岗质岩体具有多期次、多成因、构造多样的特点^[96],既有俯冲挤压的弧岩浆性质的高分异 I 型花岗岩^[89-92],也有埃达克质的花岗闪长岩^[95],还有伸展环境下形成的 A 型花岗岩^[32, 76-88, 93-100]。时代上发育 2.2~2.1 Ga 和 1.88~1.85 Ga 两期岩浆事件^[85-92, 95-100]^{④⑤},前者就是所谓的辽吉花岗岩。

“辽吉花岗岩”是由张秋生 1988 年提出的,旧称混合岩或混合花岗岩,本文特指条痕状或条带状花岗岩,包括虎皮峪岩体(片麻状花岗岩、二长花岗质片麻岩及二长花岗岩等)^[82, 85, 87, 89-90, 93]、四门子岩体(二长花岗质片麻岩)^[90]、牧牛河岩体(二长花岗岩、角闪二长花岗岩)、顾家堡岩体(正长花岗岩、二长花岗岩)^[92]、哈达碑岩体(花岗片麻岩)^[90]、永甸-步达远岩体(二长花岗质片麻岩、花岗片麻岩)^[85, 96, 98]、大房身岩体(黑云母二长花岗岩、二长花岗质片麻岩及片麻状二长花岗岩)^[85, 95]、后仙峪岩体(条痕状混合岩、二长花岗岩)^[91, 99]、马风岩体(角闪二长花岗岩、含磁铁二长花岗岩)^[85, 97],及清河岩体(正长花岗岩)^[84]、前桌沟岩体(正长花岗岩)^[83]等。

但即便是同一岩体也可能由于取样部位不同(或岩相不同),不仅岩石的定名不同^[82, 85, 87, 89-93, 99],根据其地球化学特征所得出的形成环境、物源也不同(A 型或 A₂ 型、I 型、S 型)。所以,仅依靠地球化学数据(易受测试方法及精度、变质作用的影响)来判断岩石成因也是极不可靠的。

从野外地质特征来看,该岩体中存在较多的角闪石岩和变质基性岩(斜长角闪岩)包裹体(前者稀土元素含量较高,有明显的负 Eu 异常;后者稀土元素含量低,曲线平缓,显示地幔拉斑玄武岩特征,说明其物源

① 辽宁地质勘察院有限责任公司. 1:5 万霸王朝(K51E016023)、清河(K51E016024)区域地质调查报告. 2022.

② 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部关键地区区域地质调查成果报告. 2016.

③ 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部成矿带基础地质综合研究成果报告. 2014.

部分来自岩石圈地幔的部分熔融,而前人所认为的 A₂ 型花岗岩中存在的部分镁铁质侵入岩应是幔源物质残留的产物,并且有斜长石、石榴石的残留),以及变粒岩、浅粒岩残留体(说明物源主要来源于早期的火山弧),且岩石普遍发育原生的透入性条痕或条带状构造,局部含有角闪石、磁铁矿、电气石、楣石等。地球化学研究表明,这些大面积分布的所谓条痕状 A 型花岗岩多属于高钾钙碱性系列,稀土元素配分型式具有轻稀土富集、重稀土平坦、不具或具有弱的负 Eu 异常甚至个别样品显示轻度正 Eu 异常特征,负 Ho 异常明显,其 Y 相对于 Nb 更富集,具有与岛弧玄武岩相似的 Y/Nb 元素比值;痕量元素中则显示 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的强烈亏损,Rb、U、K 等大离子亲石元素强烈富集,这些具有明显的俯冲带岩浆特征,与岛弧岩浆岩亲缘性强,而明显不同于裂谷环境下形成的典型 A 型花岗岩^[73,93]。局部地区高压泥质麻粒岩的发现,以及集安群、南辽河群等部分高压麻粒岩相岩石具有顺时针变质演化的 *P-T-t* 轨迹^[40-41,73,105],进一步证实了研究区古元古代处于活动大陆边缘环境。综上,我们认为辽吉花岗岩形成环境为大洋俯冲作用下形成的陆缘岩浆弧,物源主要为早期的活动大陆边缘物质深熔,并受到了幔源物质的混染^[78-79],且越靠近大陆一侧,混染程度就越低。原始岩石总体显示 TTG 特点^①,其发育的条痕或条带为俯冲条件下形成的原生构造,与后期变质、变形作用无关。辽吉花岗岩更不是辽吉古裂谷的基底^[79,82],至于后期的花岗质岩石(成岩年龄多为 1.85~1.95 Ga^{[73]②③}),包括巨斑、环斑花岗岩及石榴石花岗岩、花岗质片麻岩等,它们均侵入早期岩体(辽吉花岗岩)或前期变质表壳岩(包括混杂岩)之中,内部含有的大量原集安群大东盆岩组及荒盆沟岩组片麻岩和变粒岩的残留体,均为伸展作用下深熔(或部分熔融)的 S 型花岗岩,具较高的 Ba、Th、Pb 和 Sr、P、Ti、Nb 负异常,表明物质来源于地壳,总体产于弧后盆地或后碰撞形成环境,可能与区域热-动力变质作用有关。由于其与区域铜钴镍矿形成关系不大(可能对早期的矿源层改造、成矿物质再富集起到了一定的作用,但不是主因),在此不加详述。

这种构造环境不仅形成了造山带中的岩浆弧,更为重要的是形成了区域铜钴镍成矿的容矿空间(韧性变形带或滑脱带、构造裂隙等)和高温热液。尽管其没有直接提供成矿物质,但对铜钴镍矿的再富集起到了决定性作用。

1.8 残余海盆形成环境——大石桥组-盖县组

这里所说的“大石桥组”仅为原北辽河群大石桥组的杨树沟段,与盖县组同为辽吉洋封闭后的残余海盆沉积,形成稳定的海相碳酸盐岩、富铝泥质碎屑岩建造,与下伏地质体为非整合接触。岩性有白云质大理岩、(二云)片岩、绢云绿泥千枚岩、变质(长石)石英砂岩、石英岩等,岩石总体变质变形较弱。在辽宁省海城-大石桥等地变质变形相对较弱的地带,可见有波痕、斜层理、水平和波状层理、霉痕和泥裂等变余沉积构造,并产有 *Colonnella*, *Jacutophyton*, *Liaoheella*, *Pseudogymnosolen*, *Tridentella*, *Floriscolumella*, *Lochmecolumella*, *Omachtenia*, *Eucapsiphora*, *Kussiella* 叠层石化石^[141]。该环境形成的地质体也包括吉南地区的珍珠门组、花山组和临江组,与区域铜钴镍矿产的形成无关,但产有菱镁矿、滑石和岫玉等,并赋存有金及铅锌银等矿产。需要指出的是,在宽甸地区的“盖县组”存在大量的变质深成岩,即片麻岩,应从地层中剔除,也不属于本次所厘定的残余海盆沉积;“大石桥组”也与北大石桥组在形成时代、形成环境上完全不同,尽管该地区也产菱镁矿等矿产,但其成岩环境、成岩与成矿时代完全不同于大石桥地区。

2 成矿物质来源及矿床类型

从辽吉构造带内铜钴镍矿产出状态、成矿类型和矿体特征来看,其成矿物质来源于基性岩-超基性岩、陆壳酸性火山碎屑岩、混杂岩带内酸性火山碎屑岩及远洋沉积岩 4 种类型。

2.1 基性-超基性岩

该矿源岩石类型为蚀变辉石岩和变辉长岩-辉绿岩,部分经动力变质形成透闪石阳起石片岩、黑云片岩、碎裂岩等,多赋存于活动大陆边缘环境的里尔峪期火山岩带之中,多呈近东西向带状断续分布于龙岗陆

① 辽宁地质勘查院有限责任公司. 1:5 万霸王朝(K51E016023)、清河(K51E016024)区域地质调查报告. 2022.

② 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部成矿带基础地质综合研究成果报告. 2014.

③ 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部关键地区区域地质调查成果报告. 2016.

块南缘. 在岫岩尖山子、大石桥小女寨地区, 岩体(岩脉)本身普遍具有 Cu、Co、Ni 矿化, 矿石矿物有辉砷钴矿、辉钴矿、硫镍钴矿、(磁、镍)黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、孔雀石等, 主要形成钴镍矿体, 部分 Cu、Ni、Co 的含量与岩体的 MgO 含量密切相关. 在岫岩中沟地区, 铜钴矿化多赋存于里尔峪期角闪变粒岩和斜长角闪岩中发育的强压扭性构造破碎带中, 矿体在破碎带中呈囊状、扁豆状、楔状断续分布, 与围岩界线不很清楚, 多呈渐变过渡关系. 成矿类型主要为岩浆型, 次为构造-蚀变岩型. 总体 $Co/Ni \approx 1$, 推测后期的岩浆热液对原始矿源层进行了富集、改造作用. 此类矿床(点)除辽宁尖山子、小女寨外, 还有庙东沟、夏家东沟、屈家堡、德盛、古龙、蔡家隈子、大西沟、小南沟, 也包括吉林赤柏松铜镍矿(只是围岩为新太古代而已), 但以尖山子、小女寨为代表.

2.2 陆壳酸性火山碎屑岩

该矿源岩石类型主要为陆壳火山碎屑岩, 以高硅、富铝、高钾酸性火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩为特征. 岩性包括变流纹质凝灰岩、变流纹质凝灰角砾岩, 部分变质凝灰质砂岩、凝灰质板岩、钙质变质凝灰质砂岩、凝灰质大理岩类、碳质凝灰质板岩等, 铜钴镍矿化多赋存在火山喷发间歇期转为正常沉积的过渡部位, 即主要赋存于凝灰质板岩与大理岩的过渡带中或其层间裂隙中. 矿化以层间硅化蚀变破碎带型为主, 局部为热液充填型. 主要分布于龙岗陆块南缘原北辽河群里尔峪组发育区. 在辽阳上华地区, 除个别矿带出现独立铜矿体外, 其余均为含铜钴黄铁矿或含钴黄铁矿矿体. 矿体总体呈层状、似层状, 且与围岩产出状态一致. 矿石矿物主要为(钴)黄铁矿、黄铜矿, 含少量镜铁矿、磁黄铁矿等. 黄铁矿常沿层理或裂隙呈稀疏或均匀的浸染状分布, 系早期火山喷发沉积的产物, 且展布方向严格受火山喷发带控制, 也可以说具有“层控”的特点. 地球化学研究表明, 矿石中的黄铁矿 Co/Ni 值大于 1, 说明硫源以火山来源为主, 金属物质主要来源于酸性火山碎屑岩. 该类矿床(点)除辽宁省上华外, 还有小北湾、大西沟、东塔沟、万正沟、王千层岭、上堡、河沿、摩天岭、连山关、高岭、云盘岭、梁家堡子等, 但以上华最具代表性.

2.3 混杂岩带内酸性火山碎屑岩

该矿源岩石类型主要为混杂岩带内的火山碎屑

岩, 主要分布于原南辽河群里尔峪组发育区. 其中的火山碎屑岩以富钠、贫钾为特征, 岩性包括原岩为酸性火山碎屑岩变质的浅粒岩和变粒岩. 该成矿物质来源的铜钴镍矿(化)点众多, 该层位也是区域铜钴镍矿的主要矿源层, 找矿潜力巨大. 矿体赋存于含磁铁浅粒岩、黄铁矿化浅粒岩及电气石变粒岩接触带或其裂隙中, 层间断裂构造控矿明显, 蚀变带内硅化、褐铁矿化较强. 矿体多呈似层状、透镜状, 产出状态与围岩基本一致, 总体近东西向断续展布. 矿石矿物主要为黄铁矿, 次为磁(镍)黄铁矿、辉钴矿、砷钴矿、方钴矿、黄铜矿和硫铜钴矿等, 镜下见到砷钴矿和辉钴矿呈微小针状包裹在黄铁矿中. 矿石类型多为构造-破碎蚀变岩型, 次为蚀变磁铁变粒岩型和磁铁浅粒岩型. 据钻探资料, 矿体上部以铜为主, 中部为铜、铁矿体或铁矿体, 下部为钴镍矿体, 局部显示了成矿物质分带的特点; 矿体中既有铜、钴、铁单独的矿体, 又有复合矿体. 黄铁矿中的 Co/Ni 值接近 1, 说明硫源以火山来源为主, 金属物质来源主要是酸性火山碎屑岩, 即原始的矿源层. 该类矿床(点)除辽宁省周家(于家堡子)外, 还有粉城墙、王家大沟、小王家沟、中沟、陶家隈子、庙西沟、姜家堡子、柞树岭、汤池-五道沟、黑鱼汀、大滚沟、会房沟、大个岭、甬子沟、洼子沟、小韭菜沟、殷家堡子、小杨木杆、杨林、四平街、魏家沟等, 但以周家(于家堡子)、黑鱼汀最为代表.

从上述分析来看, 该成矿物质来源是否与陆壳酸性火山碎屑岩为同一来源还不是十分清楚. 但根据现阶段研究成果来说, 该区域还没有发现真正的酸性火山岩实体, 而所谓的变火山岩(变粒岩、浅粒岩)均是通过地球化学恢复而来的, 且它们多与蛇纹岩、蛇纹石化橄榄岩(赋存有硼矿)及蛇纹石化大理岩、镁质大理岩(赋存有菱镁矿)“整合共生”, 这本身就说通不通. 所以笔者认为, 它们最有可能是受到洋壳物质混染而成的活动大陆边缘产物, 且更靠近大洋一侧, 后期的岩浆作用和变质、改造作用使之成为最有远景的矿源层之一.

2.4 远洋沉积岩

辽吉构造带中赋存在古元古界老岭群中的吉林大横路、杉松岗等铜钴矿是这类变质岩容矿型矿床的代表, 其矿源层主要为远洋沉积的细碎屑岩, 包括绢云千枚岩、含碳绿泥绢云千枚岩、碳质条带千枚岩等, 缺少

火山物质,主要见于吉林省通化-白山地区。矿体呈层状、似层状,产于大栗子组含碳绢云千枚岩中,层控特征明显。前人研究表明,金属矿物主要以硫化物、砷化物及次氧化物的形式存在,有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、硫镍钴矿、辉铜矿、毒砂、孔雀石、褐铁矿等;钴主要以独立矿物硫镍钴矿出现,其次赋存于孔雀石、褐铁矿中;矿石化学成分较稳定,从常量组分看,矿石与围岩基本一致,只是有益组分含量较高而已。该类矿床(点)有吉林大横路、杉松岗等, Ni、Co 以及其他多金属成矿物质来源于海底热液喷流沉积^[142]。

3 成矿作用

现代大洋中脊的扩张以及海底正在进行着的“黑烟卤”“白烟卤”硫化物矿床成矿作用^[141,143-146]的发现,为古海底火山喷发(气)成因矿床的研究提供了新的思路。现代洋底硫化物矿床和海水温度异常带沿裂谷带和弧后扩张中心呈线性排布^[147-149],这一特征与辽吉构造带内的铜钴镍等硫化物矿床的成矿作用具有可比性。

在辽吉洋演化早期(造山前),由于辽吉洋洋脊的持续扩张和洋壳的不断俯冲,大洋内除了形成超基性的辉石岩、镁橄榄岩(蛇纹岩的主体,现多蚀变为蛇纹岩)、镁质大理岩及玄武岩(洋岛海山)外,同时也发生了洋(海)底火山喷发(气)作用,形成了一套富含金属硫化物的火山碎屑-沉积岩,其除本身在火山口附近形成铜钴铁硫等火山块状硫化物矿床和浸染状矿化外,这些富含成矿物质的火山碎屑也顺着洋流在洋(海)底与远洋物质一起沉积,形成了区域铜钴镍等原始矿源层。与此同时,由于构造作用除在增生楔处形成增生杂岩(高镁安山岩、低温高压变质岩)外,在活动大陆边缘也发生了火山作用,形成了富含金属矿物的火山碎屑岩矿源层。

在辽吉洋演化中期(造山期),在挤压环境下形成了以辽吉花岗岩(特指条痕状花岗岩)为代表的岛弧岩浆岩,沟-弧体系基本建立。它不仅标志着辽吉洋洋壳演化阶段的结束,同时也提供了成矿流体(热液)、形成了容矿空间和控矿构造,使早期原始矿源层活化富集,

或对已存在的矿(化)体进行了二次改造,从而使矿体更加富集,最终形成铜钴镍硼等矿产。总体来看,该阶段对辽吉构造带内的铜钴镍硼等矿产的形成起到了控制作用。

在辽吉洋演化中晚期,在造山后伸展背景下,普遍发育了代表造山结束的基性岩脉(墙)和酸性岩脉(在岫岩县中沟地区,花岗斑岩与铜钴成矿关系密切,其接触带铜品位明显变富,最高可达 25%,或部分花岗斑岩就是矿体),是区域上岩浆熔离型铜钴镍矿形成的重要阶段之一。同时,发育 S 型花岗岩(巨斑-环斑状二长花岗岩、正长花岗岩和花岗质片麻岩,年龄为 1.85~1.87 Ga),以及弧后盆地沉积(相当于本次厘定的高家峪组),伴生有基性、酸性岩脉的侵入(1.85 Ga 左右^{①②})和主体为两期的热-动力变质(非区域变质作用)、变形作用(1.91~1.93 Ga^[73]^②及 1.83~1.85 Ga^②)。至此,形成了该造山带完整的沟-弧-盆体系。该时期的岩浆活动、变质作用对区域铜钴镍成矿作用可能起到了一定的改造、局部富集作用,但不是主因。

在辽吉洋演化末期(非造山期),主要是辽吉洋消失后所残留的残余海盆沉积,对应的地层单位是大石桥组和盖县组,沉积物中未见火山物质,大约在 1.80 Ga^②左右海盆消亡,结束所谓的“辽吉洋”演化历史,最终形成了胶-辽-吉古元古代构造带,也成为了华北克拉通的一部分。该阶段尽管与区域铜钴镍成矿无关,但对大石桥-海城-岫岩-凤城地区的菱镁矿、滑石矿、岫玉及金银铅锌等矿产的形成起到了控制作用,且具有层控特点。此外,现代海洋调查发现^[150-158],正常海域沉积的黏土钡含量仅为 $500 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$,而只有在海底热液活动地区的沉积物中,钡含量可高达 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 以上。同时,深水中的硼含量与海水的盐度成正比,且处于 pH 或 E_h 值的过渡带上。区域上大横路铜钴矿床的研究表明^[6-10],矿石品位变化明显与碳质含量变化有关,这种环境微生物繁盛,致使沉积物中碳质含量较高,可以有效地吸附周围的成矿物质,与铜钴矿等形成于缺氧的弱还原—还原环境一致,且本区含矿层也处于较高盐度热卤水的沉积环境中,反映了海底热卤水参与了成矿过程。

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部成矿带基础地质综合研究成果报告. 2014.

②中国地质调查局沈阳地质调查中心. 辽吉东部关键地区区域地质调查成果报告. 2016.

4 找矿标志

4.1 地质标志

一是活动大陆边缘环境形成的富含磁铁矿、黄铁矿及电气石的酸性火山碎屑岩,尤其是铁帽及老的硫化铁矿点(如周家矿原来是铁矿点,后来变成了铜钴矿,上华铜钴矿是由硫化铁矿“转化”而来等)。二是上述地质体中所发育的构造破碎带,不同岩性之间的层间破碎带或变形带等部位,均是铜钴镍硼等矿的赋存部位,更应引起重视。三是发育于活动大陆边缘环境的基性-超基性岩脉(群)或其构造岩-蚀变岩,也包括其中的闪长岩(脉)。

4.2 地球物理标志

磁化率高强区(含铁浅粒岩平均值 $46\ 813 \times 10^{-3} \times 4\pi$ SI, 最高值 $360\ 384 \times 10^{-3} \times 4\pi$ SI) 及高磁异常带区(多呈近东西向断续展布,多峰成带,异常强度不一,但在断裂带铁矿物更富集,或磁性体分布区异常明显偏高,峰值中心明显且附近有负值异常相伴的地带),这些地带多为矿化体的反映,已知的铜钴镍矿床(点)多断续分布在带状低缓航磁异常、重力正负异常过渡带上偏向正异常一侧,尤其是重、磁等值线扭曲的转折点或断裂通过的地方,是成矿的有利部位。

4.3 地球化学标志

一是铜钴镍(综合)化探异常浓度分带清晰,且与磁异常吻合地区,其展布方向与上述矿源层、层间断裂破碎带或已知矿化体相一致的地区。其二是 B、Ba 元素强烈富集区,以及有机碳高值区。

5 成矿区带划分及找矿方向

依据本区成矿地质背景、已知矿床(点)的分布及物化探异常特征,将区域铜钴镍矿大体划分为 3 个成矿带,即北部大陆边缘成矿带、南部增生杂岩成矿带和东部远洋建造成矿带,相应提出了 6 个找矿靶区(图 4),这也是今后的找矿方向。具体特征如下。

a. 辽宁海城马风-辽阳甜水-本溪云盘岭找矿靶区

该靶区位于辽吉构造带北部,北部大陆边缘成矿带内。总体近东西向展布,东西向断续长大于 130 km,南北宽 5~25 km 不等。尽管里尔峪期地质体出露较窄,但带内断续分布有基性岩脉(辉长岩-辉绿岩)、闪长岩(脉)和大量的铜钴镍矿(化)点,是找寻“上华式”“小女寨式”铜钴镍矿的有利地区。

b. 辽宁凤城四门子-通远堡找矿靶区

该靶区位于辽吉构造带中部,中部混杂岩成矿带中部。东西及南北跨度均 20 km 左右。尽管该区面积不大,但里尔峪期地质体较为发育,且辽吉花岗岩分布于四周,已发现多个铜钴镍矿(化)点,是找寻“周家式”铜钴镍矿的较有利地区。

c. 辽宁大石桥汤池-岫岩双山子-凤城唐家隈子找矿靶区

该靶区位于辽吉构造带中西部,中部混杂岩成矿带内。近东西向展布,东西断续延长大于 120 km,南北宽 10~25 km 不等。里尔峪期地质体出露较宽且连续分布,辽吉花岗岩较发育,且多构成了所谓的“背斜”核部,已发现多处矿(化)点,是找寻“周家氏”“尖山子式”“小女寨式”铜钴镍矿的最有利地区,找矿潜力较大。

d. 辽宁丹东汤池-五道沟找矿靶区

该靶区位于辽吉构造带南部,中部混杂岩成矿带内。北东向展布,北东断续延长约 30 km,宽约 20 km。里尔峪期地质体出露较窄,辽吉花岗岩在其西部大量发育,已发现多处矿(化)点,但品位不佳,是找寻“周家氏”铜钴镍矿的较好地区,但找矿潜力不大。

e. 辽宁宽甸毛甸-永甸-硼海-大西岔找矿靶区

该靶区位于辽吉构造带东部,中部混杂岩成矿带内。近东西向展布,东西延长约 100 km 至鸭绿江边,南北宽大于 40 km。该带里尔峪期地质体出露广且连续分布,辽吉花岗岩极为发育,且多构成所谓的“背斜”核部(与周家类似),已发现众多的铜钴镍矿(化)点,尤其是南部的毛甸-永甸地区,是找寻“周家氏”“黑鱼汀式”铜钴镍矿的最为有利地区,找矿潜力巨大。

需要指出的是,在该区东北部太平哨一带,发育盖县期地质体的地段,也可能是找矿的有利地区。

f. 吉林通化头道阳岔-白山大横路-临江杉松岗找矿靶区

该靶区位于辽吉构造带东北部,东部洋壳成矿带内。北东东向展布,总面积约 450 km²。区内大栗子组出露面积大,且较连续分布。矿源层主要为远洋的细碎屑岩,铜钴镍矿主要产于其中。已发现较多的矿床、矿(化)点,是找寻“大横路式”铜钴镍矿的最为有利地区,找矿潜力巨大。

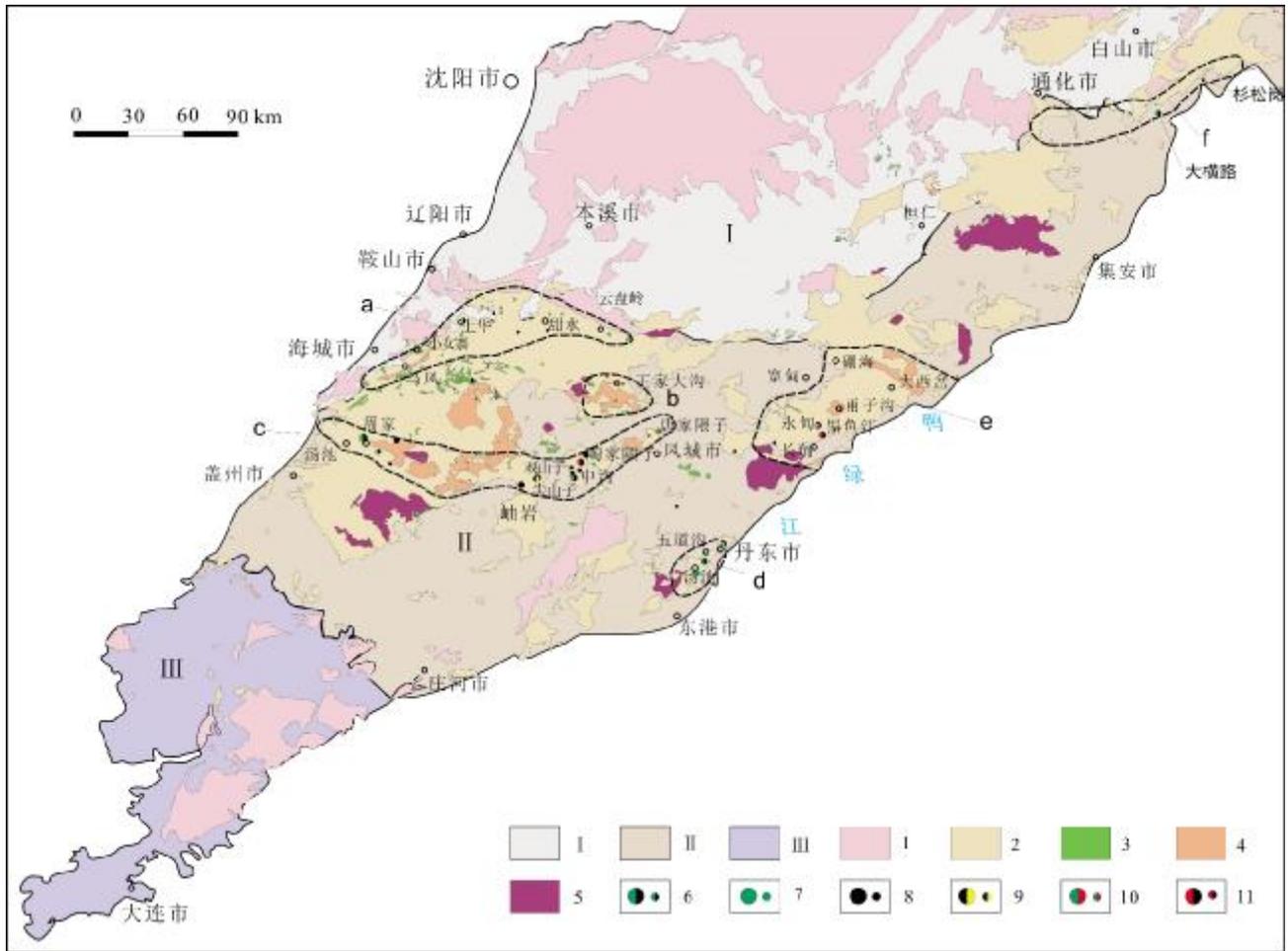


图 4 辽吉构造带铜钴镍矿找矿靶区

Fig. 4 Prospecting targets for copper-cobalt-nickel deposits in Liaoning-Jilin tectonic belt

I—龙岗陆块(Longgang block); II—辽吉构造带(Liaoning-Jilin tectonic belt); III—辽南地块(Southern Liaoning massif); 1—太古宙地质体(Archean geological body); 2—古元古代壳岩(Paleoproterozoic supracrustal rock); 3—古元古代变基性岩(Paleoproterozoic metabasic rock); 4—古元古代早期花岗岩(early Paleoproterozoic granite); 5—古元古代晚期花岗岩(late Paleoproterozoic granite); 6—铜钴矿点(Cu-Co ore occurrence); 7—铜矿点(Cu ore occurrence); 8—钴矿点(Co ore occurrence); 9—钴镍矿点(Co-Ni ore occurrence); 10—铜铁矿点(Cu-Fe ore occurrence); 11—铁钴矿点(Fe-Co ore occurrence); a—辽宁海城马风-辽阳甜水-本溪云盘岭找矿靶区; b—辽宁凤城四门子-通远堡找矿靶区; c—辽宁大石桥汤池-岫岩双山子-凤城唐家隈子找矿靶区; d—辽宁丹东汤池-五道沟找矿靶区; e—辽宁宽甸毛甸-永甸-硼海-大西岔找矿靶区; f—吉林通化头道阳岔-白山大横路-临江杉松岗找矿靶区

6 结论

本文在系统分析前人大量研究资料和近几年区域地质调查新认识的基础上,对辽吉构造带的成矿地质条件和成矿作用进行了总结,认识如下:

1)原辽河群南北有别,东西差异也大.浪子山组-里尔峪组-高家峪组是由稳定大陆边缘、活动大陆边缘及弧后盆地乃至远洋等同环境形成的以增生杂岩为主的复杂造山带地层,不同成因岩片间均为构造接触,显示“总体无序、局部有序”构造地层特点,且构成了较完整的造山带沟-弧-盆体系.大石桥组-盖县组为稳

定的残余海盆盖层沉积,显示有序地层的特点,与下伏“地层”非整合接触.总体来看,辽吉构造带“地层”既不能按有序地层简单来划分,也不能以变质及变形程度来进行区域对比.

2)辽吉花岗岩(条痕状或条带状花岗岩)既有非成熟的岛弧或者洋内弧的成分,呈现 TTG 岩石组合的特点,或者明显混合岩化的特点;也有较为成熟的陆缘岩浆弧的 GG 岩石组合.辽吉花岗岩和原辽河群下部层位遭受了相同的变形变质改造,均形成于俯冲汇聚的背景下,并非铜钴镍矿以及硼矿的控矿岩系.而造山

期后伸展作用下的基性岩脉(墙)多由活动大陆边缘或岛弧环境形成,岩浆均来源于地幔。

3)辽吉构造带经历了多期次、多阶段的岩浆作用及不同类型的变质作用(区域热-动力变质作用)联合改造过程,带内地质体为各类不同大地构造环境、不同岩石或组合的岩片叠加而成的产物,其形成环境很难用一种构造演化模式来加以合理解释,且仅根据地球化学数据来判断形成环境及原岩恢复也是极不可靠的。

4)区域铜钴镍矿的成矿物质主要来源于基性岩脉(墙)、陆壳酸性火山碎屑岩、混杂岩带内的酸性火山碎屑岩及远洋沉积岩4种类型。与基性岩脉(墙)有关的岩浆熔离型钴镍矿,受断裂构造控制,多形成细脉状、脉状矿体,规模相对较小,化探异常元素组合为Ag-Ni-Co-As-S。与远洋沉积岩和火山岩有关的沉积变质型钴(铁、铜)矿,主要呈层状、似层状产出,构造破碎带、层间破碎带控矿明显;而较高的碳质和盐度(海底热卤水),对区域矿产的富集与成矿是不可或缺的因素。

5)划分了3个成矿带及6个铜钴镍找矿靶区(找矿方向)。总体显示混杂岩带内的酸性火山岩和远洋沉积岩找矿潜力巨大,而基性-超基性岩熔离型铜钴镍矿也具有较好的找矿前景,并指出了找矿标志。

6)探讨了“辽吉洋”的演化历史及对成矿作用的控制,提出了该构造带存在的主要地质矿产问题,为后期找矿战略行动提供了新思路。

参考文献(References):

- [1]张洪瑞,侯增谦,杨志明,等. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(3): 501-510.
Zhang H R, Hou Z Q, Yang Z M, et al. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(3): 501-510.
- [2]苏本勋,秦克章,蒋少涌,等. 我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望[J]. 岩石学报, 2023, 39(4): 968-980.
Su B X, Qin K Z, Jiang S Y, et al. Mineralization regularity, scientific issues, prospecting technology and research prospect of Co-Ni deposits in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(4): 968-980.
- [3]邹日,冯本智. 辽吉地区早元古代含硼建造中电英岩的特征及成因[J]. 长春地质学院学报, 1993, 23(4): 373-379.
Zou R, Feng B Z. Geology and origin of the tourmalines in the Early Proterozoic boron-bearing sequence in Liaoning-Jilin [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1993, 23(4): 373-379.
- [4]邹日,冯本智. 营口后仙峪硼矿容矿火山-热水沉积岩系特征[J]. 地球化学, 1995, 24(S1): 46-54.
Zou R, Feng B Z. The features of ore-hosting volcanic-hydrothermal sedimentary series in Houxianyu boron deposits, Yingkou, Liaoning [J]. Geochimica, 1995, 24(S1): 46-54.
- [5]冯本智,卢静文,邹日,等. 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, 1998, 28(1): 1-15.
Feng B Z, Lu J W, Zou R, et al. Ore-forming conditions for the Early Proterozoic large-superlarge boron deposits in Liaoning and Jilin Provinces, China [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1998, 28(1): 1-15.
- [6]杨言辰,冯本智,刘鹏鸷. 吉林老岭大横路式热水沉积叠加改造型钴矿床[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 40-45.
Yang Y C, Feng B Z, Liu P E. Dahenglu type of cobalt deposit in Laoling area, Jilin Province: A sedex deposit with late reformation [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(1): 40-45.
- [7]周少红. 大横路钴矿钴镍赋存状态与共生规律的数学分析[J]. 世界地质, 2001, 20(1): 40-42, 61.
Zhou S H. Mathematical analysis of cobalt and nickel occurrence with commensal rules in Dahenglu cobalt ore deposit [J]. World Geology, 2001, 20(1): 40-42, 61.
- [8]郭文秀,刘建民. 吉林省大横路铜、钴矿床地质特征及控矿因素[J]. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(3/4): 206-213.
Guo W X, Liu J M. The geologic features of Dahenglu Cu, Co deposit and ore-controlling factors in Jinlin Province, China [J]. Progress in Precambrian Research, 2002, 25(3/4): 206-213.
- [9]松权衡,李景波,于城,等. 白山市大横路铜钴矿床找矿地球化学模式[J]. 吉林地质, 2002, 21(1/2): 56-64.
Song Q H, Li J B, Yu C, et al. The geochemical model for prospecting of the Dahenglu Cu, Co deposit, Baishan area, Jilin Province [J]. Jilin Geology, 2002, 21(1/2): 56-64.
- [10]韦延光,王可勇,杨言辰,等. 吉林白山市大横路Cu-Co矿床变质成矿流体特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(2): 128-133.
Wei Y G, Wang K Y, Yang Y C, et al. The features of metamorphic mineralogenic fluid of Dahenglu Cu-Co deposit in Baishan County, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32(2): 128-133.
- [11]Peng Q M, Palmer M R. The Paleoproterozoic Mg and Mg-Fe borate deposits of Liaoning and Jilin provinces, Northeast China [J]. Economic Geology, 2002, 97(1): 93-108.
- [12]杨言辰,王可勇,冯本智. 大横路式钴(铜)矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质与勘探, 2004, 40(1): 7-11.
Yang Y C, Wang K Y, Feng B Z. Geological characteristics and genesis of the Dahenglu type cobalt (copper) deposits, Jilin Province [J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(1): 7-11.

- [13]任启武, 薛剑波, 王丽梅, 等. 大横路钴铜矿床控矿因素及找矿标志[J]. 吉林地质, 2005, 24(4): 26-31.
Ren Q W, Xue J B, Wang L M, et al. The ore-control factor and criteria for ore prospecting of the Dahenglu Co, Cu deposit[J]. Jilin Geology, 2005, 24(4): 26-31.
- [14]翟安民, 沈保丰, 杨春亮, 等. 辽吉古裂谷地质演化与成矿[J]. 地质调查与研究, 2005, 28(4): 213-213.
Zhai A M, Shen B F, Yang C L, et al. Geological evolution and ore-forming of the Liaoning-Jilin Paleoproterozoic rift[J]. Geological Survey and Research, 2005, 28(4): 213-220.
- [15]刘敬党, 肖荣阁, 王文武, 等. 辽东硼矿区域成矿模型[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Liu J D, Xiao R G, Wang W W, et al. Regional metallogenesis of borate deposit in eastern Liaoning, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [16]邢树文, 马玉波, 张学海, 等. 吉林南部老岭群的原岩恢复和古沉积环境[J]. 地质与资源, 2010, 19(4): 271-279.
Xing S W, Ma Y B, Zhang X H, et al. Protolith recovering and paleosedimentary environment of Laoling Group in southern Jilin Province[J]. Geology and Resources, 2010, 19(4): 271-279.
- [17]翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 24-36.
Zhai M G. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 24-36.
- [18]张艳飞, 刘敬党, 王刚, 等. 辽东地区硼矿床区域成矿系统分析[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 605-614.
Zhang Y F, Liu J D, Wang G, et al. Analysis of the metallogenic system for borate deposits in eastern Liaoning Province[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 605-614.
- [19]王玉波, 高侃, 李丁丁, 等. 通化市矿产资源调查评价现状、重要成矿区带和优势矿种资源潜力[J]. 吉林地质, 2011, 30(3): 137-144.
Wang Y B, Gao K, Li D D, et al. Mineral resources evaluation and status, important metallogenic belt and the dominant mineral resource potential of Tonghua City, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2011, 30(3): 137-144.
- [20]于洪顺, 王景明. 吉林省白山市大横路铜钴矿综合找矿模型[J]. 吉林地质, 2012, 31(1): 41-45.
Yu H S, Wang J M. The integrated exploration model of Dahenglu copper-cobalt deposit of Baishan City, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2012, 31(1): 41-45.
- [21]邵建波. 吉林省成矿地质背景概述[J]. 吉林地质, 2013, 32(3): 1-8.
Shao J B. Summary of regional ore-forming geological background of Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2013, 32(3): 1-8.
- [22]谢忠, 张海涛, 初晓强, 等. 辽宁宽甸地区硼矿区域成矿特征及找矿标志[J]. 中国矿业, 2015, 24(8): 79-83.
Xie Z, Zhang H T, Chu X Q, et al. The regional metallogenic characteristics and prospecting criteria of boron deposit in Kuandian area of Liaoning Province[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(8): 79-83.
- [23]马玉波, 邢树文, 肖克炎, 等. 辽东-吉南 Fe-菱镁矿-Cu-Au 成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J]. 地质学报, 2016, 90(7): 1298-1315.
Ma Y B, Xing S W, Xiao K Y, et al. Geological metallogenic characteristics and resource analysis of the Liaodong-Jinan Fe-Mg-Cu-Au metallogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(7): 1298-1315.
- [24]田丰, 王可勇, 梁一鸿, 等. 吉林省大横路钴铜矿床地质特征及成矿流体来源讨论[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 167-177.
Tian F, Wang K Y, Liang Y H, et al. Characteristics of hydrothermal superimposed mineralization and source of ore-forming fluids in the Dahenglu Co-Cu deposit[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(2): 167-177.
- [25]王慧宁, 刘福来, 朱志勇, 等. 吉林省大横路铜钴矿复杂的沉积-变质变形-热液作用演化过程及其对钴的赋存状态和富集成矿的制约[J]. 岩石学报, 2023, 39(4): 998-1018.
Wang H N, Liu F L, Zhu Z Y, et al. Complex evolution of the sedimentation, metamorphism-deformation and hydrothermal processes and their constraints on the occurrence, enrichment and mineralization of Co in the Dahenglu Cu-Co deposit, Jilin Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(4): 998-1018.
- [26]陈荣度. 一个早元古代裂谷盆地——辽东裂谷[J]. 辽宁地质, 1984(2): 125-133.
Chen R D. A Paleoproterozoic rift basin: Liaodong Rift[J]. Liaoning Geology, 1984(2): 125-133.
- [27]陈荣度. 辽东裂谷的地质构造演化[J]. 中国区域地质, 1990(4): 306-315, 333.
Chen R D. The tectonic evolution of the Liaodong rift[J]. Regional Geology of China, 1990(4): 306-315, 333.
- [28]邵建波, 毕守业, 杨豹. 论吉南古元古代构造演化[J]. 吉林地质, 1993, 12(1): 34-41.
Shao J B, Bi S Y, Yang B. On Palaeoproterozoic structure evolution in western Jilin area[J]. Jilin Geology, 1993, 12(1): 34-41.
- [29]陈荣度, 王有爵. 辽东吉南早元古代裂谷演化与成矿[M]//张贻侠, 刘连登. 中国前寒武纪矿床和构造. 北京: 地震出版社, 1994: 186-200.
Chen R D, Wang Y J, The evolution of the early Proterozoic rift in east Liaoning and south Jilin, and associated mineral deposits[M]//Zhang Y X, Liu L D. Precambrian ore deposits and tectonics in China. Beijing: Seismological Press, 1994: 186-200.
- [30]李守义. 辽吉古裂谷中的双峰式火山岩及岩浆演化[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(2): 143-147.
Li S Y. The bimodal volcanic rocks and magma evolution in Liaoji

- Paleo-rift [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1994, 24(2): 143-147.
- [31] Peng Q M, Palmer M R. The Palaeoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporite[J]. *Precambrian Research*, 1995, 72(3/4): 185-197.
- [32] 李三忠, 杨振升, 刘永江, 等. 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*, 1997, 13(2): 189-202.
- Li S Z, Yang Z S, Liu Y J, et al. 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*, 1997, 13(2): 189-202.
- [33] 李三忠. 胶辽地块古元古代大地构造问题: 历史观与活动论[J]. *西北地质*, 1997, 18(3): 27-35.
- Li S Z. Palaeoproterozoic geotectonic problems of the Jiao-Liao Massif: Evolutionism and mobilism[J]. *Northwestern Geology*, 1997, 18(3): 27-35.
- [34] 李三忠, 刘永江. 胶辽地块古元古代沉积组合: 年代与层序[J]. *西北地质*, 1997, 18(3): 13-20.
- Li S Z, Liu Y J. Palaeoproterozoic sedimentary assemblages in the Jiao-Liao Massif: Ages and stratigraphic sequence[J]. *Northwestern Geology*, 1997, 18(3): 13-20.
- [35] 贺高品, 叶慧文. 辽东-吉南地区早元古代变质地体的组成及主要特征[J]. *长春科技大学学报*, 1998, 28(2): 121-134.
- He G P, Ye H W. Composition and main characteristics of Early Proterozoic metamorphic terranes in eastern Liaoning and southern Jilin areas [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998, 28(2): 121-134.
- [36] 贺高品, 叶慧文. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1998, 14(2): 152-162.
- He G P, Ye H W. Two types of early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(2): 152-162.
- [37] 李三忠, 韩宗珠, 刘永江, 等. 辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 9-18.
- Li S Z, Han Z Z, Liu Y J, et al. Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohe Group[J]. *Geological Review*, 2001, 47(1): 9-18.
- [38] Zhai M G, Liu W J. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/4): 183-199.
- [39] 辽宁省地质勘查院. 中国区域地质志·辽宁志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Liaoning Institute of Geological Exploration. Regional geology of China: Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [40] Sun M, Lee Armstrong R, Lambert R S J, et al. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of the Paleoproterozoic Kuandian complex, the eastern Liaoning Province, China [J]. *Precambrian Research*, 1993, 62(1/2): 171-190.
- [41] 白瑾. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-123.
- Bai J. The Precambrian geology and Pb-Zn mineralization in the northern margin of North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-123.
- [42] 白瑾, 黄学光, 郭进京, 等. 中国前寒武纪地壳演化[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1996: 1-259.
- Bai J, Huang X G, Guo J J, et al. The Precambrian crustal evolution of China[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-259.
- [43] Liu J L, Liu Y J, Chen H, et al. The inner zone of the Liaoji paleorift: Its early structural styles and structural evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1997, 15(1): 19-31.
- [44] Peng Q M, Palmer M R, Lu J W. Geology and geochemistry of the Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning-Jilin, northeastern China: Evidence of metaevaporites [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 381(1): 51-57.
- [45] 李三忠, 刘永江, 杨振升. 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*, 1998, 41(S1): 142-152.
- Li S Z, Liu Y J, Yang Z S. Intra-crustal response to continental dynamic processes of the Paleoproterozoic orogeny in Liao-Ji area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(S1): 142-152.
- [46] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2001, 107(1/2): 45-73.
- [47] 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[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 328-340.
- Li S Z, Hao D F, Han Z Z, et al. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao Massif[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 328-340.
- [48] Kusky T M, Li J H. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22(4): 383-397.
- [49] 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 [J]. *Precambrian Research*, 2004, 134(3/4): 349-371.
- [50] 翟明国. 华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. *岩石学报*, 2004, 20(6): 1343-1354.
- Zhai M G. 2.1~1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1343-1354.
- [51] Faure M, Lin W, Monié P, et al. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (Northeast China) [J]. *Terra*

- Nova, 2004, 16(2): 75-80.
- [52] Zhai M G. Precambrian geological events in the North China Craton [M]//Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, et al. Tectonic Evolution of China. Geological Society, London, Special Publication, 2004: 57-72.
- [53] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 177-202.
- [54] 王艺芬, 徐贵忠, 余宏全, 等. 辽东地区早元古代火山岩特征及其形成的动力学背景[J]. 现代地质, 2005, 19(3): 315-324.
Wang Y F, Xu G Z, She H Q, et al. Characteristics of the Early Proterozoic volcanic rocks and its dynamic background of formation in the Liaodong area[J]. Geoscience, 2005, 19(3): 315-324.
- [55] 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[J]. Gondwana Research, 2006, 9(1/2): 198-208.
- [56] Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. Precambrian Research, 2006, 149(3/4): 249-271.
- [57] 翟明国, 彭澎. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2665-2682.
Zhai M G, Peng P. Paleoproterozoic events in the North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2665-2682.
- [58] Kusky T M, Windley B F, Zhai M G. Tectonic evolution of the North China Block: From orogen to craton to orogen[M]//Zhai M G, Windley B F, Kusky T, et al. Mesozoic sub-continental lithospheric thinning under eastern Asia. Geological Society, London, Special Publication, 2007: 1-34.
- [59] Faure M, Trap P, Lin W, et al. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt: New insights from the Liliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs[J]. Episodes, 2007, 30(2): 95-106.
- [60] 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 [J]. Precambrian Research, 2008, 163(3/4): 279-306.
- [61] Li S Z, Zhao G C, Santosh M, et al. Palaeoproterozoic tectonothermal evolution and deep crustal processes in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A review[J]. Geological Journal, 2011, 46(6): 525-543.
- [62] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1037-1046.
Zhai M G. Cratonization and the ancient North China Continent: A summary and review[J]. Science China Earth Science, 2011, 41(8): 1037-1046.
- [63] Zhai M G, Santosh M. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview [J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 6-25.
- [64] Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, et al. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion [J]. Precambrian Research, 2012, 222-223: 55-76.
- [65] Li S Z, Zhao G C, Santosh M, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. Precambrian Research, 2012, 200-203: 59-73.
- [66] Zhao G C, Cawood P A. Precambrian geology of China [J]. Precambrian Research, 2012, 222-223: 13-54.
- [67] Zhao G C, Zhai M G. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1207-1240.
- [68] Zhai M G, Santosh M. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving earth [J]. Gondwana Research, 2013, 24(1): 275-297.
- [69] 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, Northeast China [J]. Precambrian Research, 2013, 233: 297-315.
- [70] 刘小杨, 薛林福, 刘正宏, 等. 辽吉古裂谷部分地区深部地质结构特征[J]. 地震地质, 2014, 36(2): 489-500.
Liu X Y, Xue L F, Liu Z H, et al. The deep geological structure characteristics of parts of Liaoji paleorift [J]. Seismology and Geology, 2014, 36(2): 489-500.
- [71] Xu W, Liu F L, Liu P H, et al. Paleoproterozoic transition in tectonic regime recorded by the Eastern Block of the North China Craton: Evidence from detrital zircons of the Langzishan Formation, Jiao-Liao-Ji Belt [J]. International Geology Review, 2020, 62(2): 168-185.
- [72] 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[J]. 地球学报, 2015, 36(5): 583-598.
Wang H C, Ren Y W, Lu S N, et al. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji orogen [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(5): 583-598.
- [73] 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[J]. 岩石学报, 2015, 31(10): 2816-2846.
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 [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 2816-2846.
- [74] Kusky T M, Polat A, Windley B F, et al. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: A record of outward growth of Precambrian continents [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 162: 387-432.

- [75]张秋生. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
Zhang Q S. Early crust and mineral deposits of Liaodong Peninsula, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [76]赵凤顺, 胡平. 虎皮峪条痕状花岗质岩石特征及成因探讨[J]. 辽宁地质, 1989(4): 298-311.
Zhao F S, Hu P. Features and origin of streaky granitic-rocks from Hupiyu[J]. Liaoning Geology, 1989(4): 298-311.
- [77]刘永江, 李三忠. 辽宁海城-大石桥-吉洞地区早元古代花岗岩[J]. 辽宁地质, 1996(1): 10-18.
Liu Y J, Li S Z. Palaeoproterozoic granite in Haicheng-Dashiqiao-Jidong area, eastern Liaoning[J]. Liaoning Geology, 1996(1): 10-18.
- [78]曲洪祥, 张永, 雷广新, 等. 试论辽东地区古元古代壳幔混合杂岩[J]. 辽宁地质, 2000, 17(3): 199-205.
Qu H X, Zhang Y, Li G X, et al. On the Paleoproterozoic crust-mantle mixed complex in East Liaoning[J]. Liaoning Geology, 2000, 17(3): 199-205.
- [79]陈树良, 郇彦清, 郇志波. 辽东地区古元古代侵入岩特征及构造岩浆大陆动力学演化[J]. 辽宁地质, 2001, 18(1): 43-51.
Chen S L, Huan Y Q, Bing Z B. Characteristics of Paleoproterozoic intrusive rocks and continental dynamic evolution pattern of tectonomagma in East Liaoning[J]. Liaoning Geology, 2001, 18(1): 43-51.
- [80]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[J]. International Geology Review, 2004, 46(2): 162-176.
- [81]李雪梅, 孙丰月, 李碧乐, 等. 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, 2008, 27(3): 260-266.
Li X M, Sun F Y, Li B L, et al. Geochemistry and origin of tourmalite from boron-bearing rock series of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning[J]. Global Geology, 2008, 27(3): 260-266.
- [82]路孝平, 吴福元, 林景仟, 等. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 123-138.
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[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 123-138.
- [83]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年代与形成构造背景[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 381-392.
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[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 381-392.
- [84]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[J]. Precambrian Research, 2006, 146(3/4): 138-164.
- [85]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[J]. Precambrian Research, 2007, 158(1/2): 1-16.
- [86]张艳飞, 刘敬党, 付艳春, 等. 辽东硼矿区层状混合岩的地质地球化学特征及其成因探讨[J]. 地质与勘探, 2009, 45(5): 549-557.
Zhang Y F, Liu J D, Fu Y C, et al. Study on the genesis and geological and geochemical characteristics of layered migmatites in East Liaoning, China[J]. Geology and Exploration, 2009, 45(5): 549-557.
- [87]秦亚. 辽吉元古裂谷带构造演化的年代学制约[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Qin Y. Geochronological constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Liao-Ji rift zone[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [88]胡古月, 范昌福, 李延河, 等. 辽东明安硼镁矿床混合花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及对成矿时代的制约[J]. 矿床地质, 2014, 33(2): 397-405.
Hu G Y, Fan C F, Li Y H, et al. Zircon U-Pb dating of migmatitic granites of Ming'an Mg-borate deposit in Kuandian area, eastern Liaoning Province, and its constraints on mineralization age [J]. Mineral Deposits, 2014, 33(2): 397-405.
- [89]Li Z, Chen B. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic meta-basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting [J]. Precambrian Research, 2014, 255: 653-667.
- [90]杨明春, 陈斌, 闫聪. 华北克拉通胶-辽-吉带古元古代条痕状花岗岩成因及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(5): 31-51.
Yang M C, Chen B, Yan C. Petrogenesis of Paleoproterozoic gneissic granites from Jiao-Liao-Ji belt of North China Craton and their tectonic implications[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(5): 31-51.
- [91]陈斌, 李壮, 王家林, 等. 辽东半岛 ~2.2 Ga 岩浆事件及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(2): 303-320.
Chen B, Li Z, Wang J L, et al. Liaodong Peninsula ~2.2 Ga magmatic event and its geological significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(2): 303-320.
- [92]宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 等. 辽东地区古元古代花岗岩 SHRIMP-U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及构造意义[J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2620-2636.
Song Y H, Yang F C, Yan G L, et al. SHRIMP U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2620-2636.

- [93]李超, 陈斌, 李壮, 等. 辽东岫岩-宽甸地区古元古代条痕状花岗岩的岩石地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 963-977.
- Li C, Chen B, Li Z, et al. Petrologic and geochemical characteristics of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses from Xiuyan-Kuandian area in Liaodong Peninsula and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(3): 963-977.
- [94]任云伟, 王惠初, 康健丽, 等. 辽宁营口虎皮峪地区古元古代岩浆事件及地质意义[J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2456-2472.
- Ren Y W, Wang H C, Kang J L, et al. Paleoproterozoic magmatic events in the Hupiyu area in Yingkou, Liaoning Province and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(11): 2456-2472.
- [95]王鹏森, 董永胜, 李富强, 等. 辽东黄花甸地区古元古代花岗岩质浆作用及其地质意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(9): 2708-2724.
- Wang P S, Dong Y S, Li F Q, et al. Paleoproterozoic granitic magmatism and geological significance in Huanghuadian area, eastern Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2708-2724.
- [96]王祥俭, 刘建辉, 冀磊. 胶-辽-吉带辽东宽甸地区古元古代二长(正长)花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2017, 33(9): 2689-2707.
- Wang X J, Liu J H, Ji L. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Paleoproterozoic monzogranitic gneisses in Kuandian area, eastern Liaoning Province, Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2689-2707.
- [97]郝德峰, 李三忠, 赵国春, 等. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及对构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 1409-1416.
- Hao D F, Li S Z, Zhao G C, et al. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin province, North China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6): 1409-1416.
- [98]滕大伟, 王玉奎, 郝鑫健, 等. 辽宁永甸地区辽吉花岗岩成因及对辽吉活动带构造演化的制约[J]. 世界地质, 2017, 36(4): 1100-1115.
- Teng D W, Wang Y K, Hao X J, et al. Petrogenesis of Liaoji granites in Yongdian area of Liaoning and their constraints on tectonic evolution of Liao-Ji mobile belt[J]. *Global Geology*, 2017, 36(4): 1100-1115.
- [99]付燕刚, 胡古月, 李延河, 等. 辽宁后仙峪硼矿区混合岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对硼矿成矿演化的制约[J]. 地质论评, 2018, 64(2): 405-417.
- Fu Y G, Hu G Y, Li Y H, et al. LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon ages of Paleoproterozoic migmatitized granites from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning: Constraints on the evolution of the borate deposits[J]. *Geological Review*, 2018, 64(2): 405-417.
- [100]杨玉伟, 余超, 王广伟, 等. 辽东黑沟地区古元古代碱长花岗岩年代学、地球化学、Hf 同位素特征及其对辽吉造山带构造演化的制约[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2212-2226.
- Yang Y W, Yu C, Wang G W, et al. Chronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Paleoproterozoic alkali feldspar granite from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: Constraints on the tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2212-2226.
- [101]马立杰, 崔迎春, 刘俊来, 等. 辽东北辽河群斜长角闪岩的地球化学特征及构造背景[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2007, 30(4): 515-523.
- Ma L J, Cui Y C, Liu J L, et al. Geochemical characteristics and the tectonic setting of amphibolites of the North Liaohe Group in Liaodong area [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2007, 30(4): 515-523.
- [102]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[J]. *Precambrian Research*, 2015, 264: 119-139.
- [103]Wang X P, Peng P, Wang C, et al. Petrogenesis of the 2115 Ma Haicheng mafic sills from the eastern North China Craton: Implications for an intra-continental rifting[J]. *Gondwana Research*, 2016, 39: 347-364.
- [104]杨玉伟, 余超. 辽河群含硼岩系基性火山岩地球化学特征及形成环境[J]. 吉林地质, 2016, 35(3): 44-47.
- Yang Y W, Yu C. Geochemical characteristics and forming environment of boron-bearing rock series base volcano rock in Liaohe Group[J]. *Jilin Geology*, 2016, 35(3): 44-47.
- [105]刘平华, 蔡佳, 邹雷. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化 P-T-t 轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束[J]. 岩石学报, 2017, 33(9): 2749-2674.
- Liu P H, Cai J, Zou L. Metamorphic P-T-t path and its geological implication of the Sanjiazhi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and Zircon U-Pb dating [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2649-2674.
- [106]李超, 孙克克, 陈斌. 辽东营口-辽阳地区古元古代花岗岩和变质基性岩形成时代及意义[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(2): 143-160.
- Li C, Sun K K, Chen B. Paleoproterozoic granites and meta-mafic rocks from Yingkou-Liaoyang area of the eastern Liaoning and their significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(2): 143-160.
- [107]陈井胜, 田德欣, 邢德和, 等. 辽宁宽甸地区辽河群里尔峪组基性火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(9): 3282-3294.
- Chen J S, Tian D X, Xing D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and its geological significance of the basic volcanic rocks from the

- Li'eryu Formation, Liaohe Group in Kuandian area [J]. *Earth Science*, 2020, 45(9): 3282-3294.
- [108] 杨玉伟, 于海峰, 石玉学, 等. 华北克拉通东部辽河群中两类斜长角闪岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(12): 3705-3720.
- Yang Y W, Yu H F, Shi Y X, et al. Chronology, geochemical characteristics and geological significance of the two types of amphibolites within the Liaohe Group in the eastern block of the North China Craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95 (12): 3705-3720.
- [109] 李壮, 陈斌, 刘经纬, 等. 辽东半岛南辽河群锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(6): 1589-1605.
- Li Z, Chen B, Liu J W, et al. Zircon U-Pb ages and their implications for the South Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6): 1589-1605.
- [110] 田忠华, 许王, 刘利双, 等. 辽东半岛河栏镇火山-沉积岩构造研究——对古元古代弧后盆地张裂与闭合的启示[J]. *地球科学*, 2020, 45(09): 3217-3238.
- Tian Z H, Xu W, Liu L S, et al. Paleoproterozoic back-arc basin opening and closure: Evidence from the structural research of the volcanic-sedimentary rocks in the Helan Town, Liaodong Peninsula [J]. *Earth Science*, 2020, 45(09): 3217-3238.
- [111] 孟恩, 王朝阳, 刘超辉, 等. 辽东半岛东南部南辽河群变质火山岩的时代、成因及其对区域构造演化的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(6): 1589-1619.
- Meng E, Wang C Y, Liu C H, et al. Geochronology, petrogenesis and constraints on regional tectonic evolution of the meta-volcanic rocks in southeastern Liaodong Peninsula [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(6): 1589-1619.
- [112] Dong Y, Bi J H, Xing D H, et al. Geochronology and geochemistry of Liaohe Group and Liaoji granitoid in the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2019, 332: 105399.
- [113] 杨玉伟, 余超, 苏特, 等. 辽东黑沟地区辽河群成因及其对辽吉造山带构造演化的制约[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1397-1412.
- Yang Y W, Yu C, Su T, et al. Petrogenesis of the Liaohe Group from the Heigou area in the eastern Liaoning Province: Constraints on tectonic evolution of the Liao-Ji orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1397-1412.
- [114] 姜春潮. 辽吉东部古元古代大陆边缘褶皱带——宽甸-草河褶皱带的形成和演化[J]. *地质论评*, 2014, 60(3): 576-579.
- Jiang C C. The formation and evolution of the Paleoproterozoic continent marginal fold belt: Kuandian-Caohe fold belt in eastern of Liaoning and Jilin Provinces [J]. *Geological Review*, 2014, 60(3): 576-579.
- [115] 姜春潮. 分出辽阳群是解决辽吉东部元古宇地质问题的关键[J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 52-54.
- Jiang C C. Separating out the Liaoyang Group is the key for solving the geological problems of Proterozoic Eonothem in eastern Liaoning [J]. *Geological Review*, 2014, 60(1): 52-54.
- [116] 李壮, 王家林, 王盟, 等. 北辽河群浪子山组地层的重新厘定[J]. *地球科学前沿*, 2014, 4(6): 397-403.
- Li Z, Wang J L, Wang M, et al. Redefinition of the Langzishan Formation in the North Liaohe Group [J]. *Advances in Geosciences*, 2014, 4(6): 397-403.
- [117] 田忠华, 刘利双, 董永胜. 胶-辽-吉构造带中段古元古代辽河群早期构造事件(D1)中构造要素几何学特征及其动力学来源[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2758-2774.
- Tian Z H, Liu L S, Dong Y S. Geodynamic origin of the earliest tectonic event (D1) and its related structural elements in the Paleoproterozoic Liaohe Group, central Jiao-Liao-Ji structural belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2758-2774.
- [118] 高铂森, 董永胜, 李富强, 等. 辽东黄花甸地区南辽河群里尔峪组成因研究[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2725-2742.
- Gao B S, Dong Y S, Li F Q, et al. Petrogenesis of the Li'eryu Formation of the South Liaohe Group in the Huanghuadian area, Liaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33 (9): 2725-2742.
- [119] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting [J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875-878.
- [120] Wang C Y, Meng E, Yang H, et al. Geochronological and petrogenetic constraints on the regional tectonic evolution of the Guanghua Group in northeastern Jiao-Liao-Ji belt, China [J]. *Precambrian Research*, 2018, 305: 427-443.
- [121] 杜伟为, 王仁民, 王关玉. 丹东-宽甸东部地区存在古蛇绿岩残片的线索[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(2): 254-258.
- Du W W, Wang R M, Wang G Y. Some clues of remained pieces of paleoophiolites in the east part of Dandong-Kuandian district [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35 (2): 254-258.
- [122] 孟恩, 刘福来, 刘平华, 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[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2465-2480.
- Meng E, Liu F L, Liu P H, et al. Depositional ages and tectonic implications for South Liaohe Group from Kuandian area in northeastern Liaodong Peninsula, Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2465-2480.
- [123] 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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 251 (3/4): 365-379.
- [124] Kim S W, Kwon S H, Yi K W, et al. Arc magmatism in the

- Yeongnam Massif, Korean Peninsula: Imprints of Columbia and Rodinia supercontinents[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(3/4): 1009-1027.
- [125] 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[J]. *岩石学报*, 2016, 32(10): 2933-2947.
Wu F Y, Li Q L, Yang Z H, et al. Crustal growth and evolution of the Rangnim Massif, northern Korean Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(10): 2933-2947.
- [126] 杨正赫, 彭澎, 郑哲寿, 等. 朝鲜平南盆地古元古界一下古生界沉积岩碎屑锆石年龄谱对比及意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(10): 3155-3179.
Yang Z H, Peng P, Zheng Z S, et al. Comparison on ages of detrital zircons from the Paleoproterozoic to Lower Paleozoic sedimentary rocks in the Pyongnam Basin, Korea [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(10): 3155-3179.
- [127] 秦亚, 梁一鸿, 张青伟, 等. 辽东地区什司县变质基性岩墙群的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J]. *矿物学报*, 2015, 35(4): 540-544.
Qin Y, Liang Y H, Zhang Q W, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of plagioclase amphibolite from Shensixian mafic dyke swarm in Liaodong area, China and its significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, 35(4): 540-544.
- [128] 王舫, 刘建辉, 刘超辉. 辽南三家子地区南辽河群里尔峪组变沉积岩中碎屑锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2785-2891.
Wang F, Liu J H, Liu C H. Detrital zircon U-Pb geochronology of metasedimentary rocks from the Li'eryu Formation of the South Liaohe Group in Sanjiazzi area, the south Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2785-2791.
- [129] Bi J H, Ge W C, Xing D H, et al. Palaeoproterozoic meta-rhyolite and meta-dacite of the Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Petrogenesis and implications for tectonic Setting [J]. *Precambrian Research*, 2018, 314: 306-324.
- [130] 陈井胜, 蒋职权, 李崑崑, 等. 辽宁本溪连山关地区辽河群浪子山组、里尔峪组形成时代及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(9): 1693-1703.
Chen J S, Jiang Z Q, Li W W, et al. The formation ages of the Langzishan and Li'eryu Formations in Lianshanguan area, Benxi, Liaoning Province, and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(9): 1693-1703.
- [131] 陈井胜, 邢德和, 刘淼, 等. 辽宁辽阳地区辽河群酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2792-2810.
Chen J S, Xing D H, Liu M, et al. Zircon U-Pb chronology and geological significance of felsic volcanic rocks in the Liaohe Group from the Liaoyang area, Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2792-2810.
- [132] 毕君辉, 邢德和, 葛文春, 等. 辽东地区北辽河群变酸性火山岩形成的时代及构造背景: 古元古代陆内裂谷, 还是活动大陆边缘? [J]. *地学前缘*, 2018, 25(3): 295-308.
Bi J H, Xing D H, Ge W C, et al. Age and tectonic setting of meta-acid volcanic rocks from the North Liaohe Group in the Liaodong area: Paleoproterozoic intracontinental rift or active continental margin? [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 295-308.
- [133] 陈井胜, 李崑崑, 邢德和, 等. 辽宁辽河群高家峪组火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(11): 3934-3949.
Chen J S, Li W W, Xing D H, et al. Zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks from Gaojiayu Formation, Liaohe Group, Liaoning Province and its geological significance [J]. *Earth Science*, 2020, 45(11): 3934-3949.
- [134] 于介江, 杨德彬, 冯虹, 等. 辽南海城斜长角闪岩原岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年证据[J]. *世界地质*, 2007, 26(4): 391-396, 408.
Yu J J, Yang D B, Feng H, et al. Chronology of amphibolite protolith in Haicheng of southern Liaoning: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating [J]. *Global Geology*, 2007, 26(4): 391-396, 408.
- [135] 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 辽宁翁泉沟橄辉玄武岩的地质地球化学特征及其形成环境[J]. *地球学报*, 2008, 29(5): 542-552.
Wang C Z, Xiao R G, Liu J D. Geological and geochemical characteristics and formation environment of the Wenquanguou olivine basalt in Liaoning Province [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2008, 29(5): 542-552.
- [136] 董春艳, 马铭株, 刘守偈, 等. 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*, 2012, 28(9): 2785-2792.
Dong C Y, Ma M Z, Liu S J, et al. Middle Paleoproterozoic crustal extensional regime in the North China Craton: New evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of metagabbro in the Anshan-Gongchangling area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 2785-2792.
- [137] 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 [J]. *Precambrian Research*, 2014, 247: 92-109.
- [138] 刘永达, 邴志波, 董景超. 辽东半岛早元古宙海相拉斑玄武岩特征及其意义[J]. *辽宁地质*, 1989, 6(4): 289-297.
Liu Y D, Bing Z B, Dong J C. Features and significance of marine tholeiite of Early Proterozoic in Liaodong Peninsula [J]. *Liaoning Geology*, 1989, 6(4): 289-297.
- [139] 许王, 刘福来, 刘超辉. 胶-辽-吉造山带北辽河变基性岩的成因、地球化学属性及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9):

- 2743-2757.
- Xu W, Liu F L, Liu C H. Petrogenesis and geochemical characteristics of the north Liaohe metabasic rocks, Jiao-Liao-Ji orogenic belt and their tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2743-2757.
- [140] 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[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1322-1334, 1361.
- 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 [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1322-1334, 1361.
- [141] 梁玉左, 曹瑞骥, 张录易, 等. 中国晚前寒武纪假裸枝叠层石科(新科)[J]. *中国科学(B辑)*, 1984(1): 59-70.
- Liang Z Y, Cao R J, Zhang L Y, et al. Pseudogymnosolenidae (fam. nov.) from Late Precambrian in China [J]. *Science in China (Series B)*, 1984(1): 59-70. (in Chinese)
- [142] 徐林刚, 孙凯, 闫浩, 等. 黑色页岩容矿型 Ni-Co 矿床: 研究进展与展望 [J]. *岩石学报*, 2022, 38(10): 3052-3066, doi: 10.18654/1000-0569/2022.10.10.
- Xu L G, Sun K, Yan H, et al. Black shale-hosted nickel-cobalt deposit: Current understanding and outlook to future prospecting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(10): 3052-3066.
- [143] Spiess F N, Macdonald K C, Atwater T, et al. East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments [J]. *Science*, 1980, 207(4438): 1421-1433.
- [144] Rona P A, Klinkhammer G, Nelsen T A, et al. Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Nature*, 1986, 321(6065): 33-37.
- [145] Binns R A, Scott S D. Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea [J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 2226-2236.
- [146] Rona P A, Scott S D. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: New perspectives [J]. *Economic Geology*, 1993, 88(8): 1935-1976.
- [147] 戴宝章, 赵葵东, 蒋少涌. 现代海底热液活动与块状硫化物矿床成因研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(3): 246-254.
- Dai B Z, Zhao K D, Jang S Y. Modern sea-floor hydrothermal activity and genesis of massive sulfide deposits: An overview [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(3): 246-254.
- [148] 李军. 现代海底热液块状硫化物矿床的资源潜力评价 [J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(6): 23-30.
- Li J. Assessment of potential resources of modern submarine hydrothermal massive sulfide deposits [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2007, 23(6): 23-30.
- [149] 李军, 桑树勋, 林会喜, 等. 渤海湾盆地石炭-二叠系稀土元素特征及其地质意义 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 589-596.
- Li J, Sang S X, Lin H X, et al. REE Characteristics and its geological significance of the Permo-Carboniferous in Bohaiwan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4): 589-596.
- [150] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [151] 顾连兴. A 型花岗岩的特征、成因及成矿 [J]. *地质科技情报*, 1990, 9(1): 25-31.
- Gu L X. Geological features, petrogenesis and metallogeny of A-type granites [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1990, 9(1): 25-31.
- [152] 苏玉平, 唐红峰. A 型花岗岩的微量元素地球化学 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(3): 245-251.
- Su Y P, Tang H F. Trace element geochemistry of A-type granites [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(3): 245-251.
- [153] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- Zhang Q, Wang Y, Li C D, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [154] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A 型花岗岩研究现状及其述评 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57-66.
- Wu S P, Wang M Y, Qi K J. Present situation of researches on A-type granites: A review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(1): 57-66.
- [155] 李小伟, 莫宣学, 赵志丹, 等. 关于 A 型花岗岩判别过程中若干问题的讨论 [J]. *地质通报*, 2010, 29(2/3): 278-285.
- Li X W, Mo X X, Zhao Z D, et al. A discussion on how to discriminate A-type granite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(2/3): 278-285.
- [156] 周宇章. A 型花岗岩研究进展与问题讨论 [J]. *安徽地质*, 2011, 21(3): 169-175.
- Zhou Y Z. Progress made in A-type granite study and discussion on some issues [J]. *Geology of Anhui*, 2011, 21(3): 169-175.
- [157] 张旗, 冉焱, 李承东. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(4): 621-626.
- Zhang Q, Ran H, Li C D. A-type granite: What is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(4): 621-626.
- [158] 张旗. A 型花岗岩的标志和判别——兼答汪洋等对“A 型花岗岩的实质是什么”的质疑 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(2): 267-274.
- Zhang Q. The criteria and discrimination for A-type granites: A reply to the question put forward by Wang Yang and some other persons for “A-type granite: what is the essence?” [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(2): 267-274.