文章编号: 0258-7106 (2020) 01-0001-18

Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2020. 01.001

# 辽吉古元古代活动带的双成矿带地质特征\*

沈保丰1,2,张 阔1,2,毕君辉1,2

(1中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170;2华北地质科技创新中心,天津 300170)

摘 要 辽吉活动带是华北陆块最具代表性的古元古代造山/活动带,不仅发育巨量的古元古代陆壳沉积物质 和岩浆活动,而且经历了十分复杂的构造演化过程,以及多期岩浆-变质事件的叠加改造。辽吉活动带的形成和构 造演化时期,也是该区的一次重要成矿期,以矿种多、规模大、层状或层控为主而发育大型-超大型矿床为特点,其中 菱镁矿、滑石、硼、铅锌、钴、金和铀等矿产具有重要的经济价值。辽吉活动带由出露厚度达万米的古元古代辽河 群、集安群、老岭群和不同阶段、不同类型的岩浆岩所组成。其主体发育两套变质岩石:一套为变质碎屑岩-碳酸盐 岩组合,以变质相相对较低为特征,出露地层为北辽河群和老岭群,形成于靠近龙岗陆块的被动大陆边缘浅海盆地 环境;另一套是由变质火山-沉积岩系和辽吉花岗岩共同组成的地质构造单元,变质相相对较高,地层分布在南辽河 群和集安群,形成于远离大陆边缘俯冲体系下的弧岩浆构造环境。此外,形成于与被动大陆边缘构造环境相关的 成矿带内分布着菱镁矿床、滑石矿床、铜钴矿床和铀矿床等,形成于活动大陆边缘弧岩浆构造坏境内的成矿带主要 分布硼、铅锌和金等矿床。研究表明,海城菱镁矿、后仙峪硼矿、翁泉沟硼矿、范家堡子滑石矿、大横路铜钴矿和猫 岭金矿等矿床均具有大型-超大型规模,其中海城菱镁矿矿床储量达8.84亿吨,为世界之最的超大型矿床,翁泉沟 硼矿床的 B,O,储量高达 2185 万吨,为超大型矿床,占全国总储量的 28.6%。辽吉古元古代活动带发育在太古宙 克拉通基底之上,经历了有限的拉伸裂陷、岩浆侵位、(火山)沉积、碰撞拼贴、变质改造、隆升拆离和消亡等发展演 化阶段,时限为 2.2~1.8 Ga。辽吉活动带的成矿构造-岩浆演化可以划分为 4 个阶段:① 2.2~2.0 Ga 岩浆作用和成 矿阶段; 22.0~1.9 Ga 沉积作用和成矿阶段; 31.90 Ga 大规模变质-变形和成矿阶段(碰撞造山期); 41.89~1.82 Ga碰撞后岩浆作用阶段。综上,辽吉活动带的形成与演化经历了从活动陆缘转变为被动陆缘最终碰撞造山的地 壳演化和成矿作用过程,其中成矿作用是由两类不同成矿构造环境所控制。同时,本区又经历了中生代构造-岩浆 成矿作用的叠加,使区内成矿作用更具复杂性、多样性和多期性。这种在同一个成矿区内,由双成矿带控制的成矿 在国内外很少见。因此,该区是形成多种矿产大规模成矿十分有利的地区及找矿远景地区。

关键词 地质学;辽吉地区;古元古代;活动带;双成矿带;成矿作用 中图分类号:P612 文献标志码:A

## Geological characteristics of double metallogenic belts in Paleoproterozoic Liaoji active belt

SHEN BaoFeng<sup>1, 2</sup>, ZHANG Kuo<sup>1, 2</sup> and BI JunHui<sup>1, 2</sup>

(1 Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2 North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China)

#### Abstract

The Liaoji belt is the most representative Paleoproterozoic orogenic/active belt in North China, which not only accepted a huge amount of Paleoproterozoic sedimentary material deposition and magmatic emplacement but also underwent a very complex tectonic evolution and multi-period magmatic-metamorphic events. The formation and tectonic evolution period of the Liaoji belt was also an important metallogenic period characterized by

<sup>\*</sup> 本文得到"中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务项目(矿产地质志)(编号:DD20160346)"资助

第一作者简介 沈保丰,男,1935年生,研究员,博士生导师,主要从事矿床和前寒武纪成矿作用的研究。Email:sbaofeng.2009@163.com 收稿日期 2019-06-14;改回日期 2019-09-30。张绮玲编辑。

multiple minerals, large scale and layered or stratabound forms in this area, such as magnesite, talc, boron, leadzinc, cobalt, gold and uranium polymetallic deposits with significant economic value. The Liaoji belt is composed of Liaohe, Ji'an, Laoling groups and magmatic rock in different stages. The rock mass in this belt is compose of two sets of metamorphic rocks: one consists of metamorphic clastic-carbonate assemblages characterized by relatively low metamorphic facies, which exists in the North Liaohe and Laoling groups. The other is composed of metamorphic volcano-sedimentary rocks and Liaoji granite characterized by relatively high metamorphic facies, which exists in the South Liaohe and Ji' an groups, and it was formed under the arc magmatic tectonic environment in a subduction system far from the continental margin. In addition, magnesite, talc, copper-cobalt and uranium deposits are distributed in the metallogenic belt related to the passive continental margin; on the contrary, the boron, lead, zinc and gold deposits were formed in an arc environment of the active continental margin. These deposits are all of large to superlarge scale, such as Haicheng magnesite deposit, Houxianyu boron deposit, Wengquangou boron deposit, Fanjiapuzi talc deposit, Dahenglu copper-cobalt deposit and Maoling gold deposit. Among them, the Haicheng magnesite deposit is the largest deposit with the reserves of 884 million tons, and the Wengquangou boron deposit is a superlarge deposit with the reserves of  $B_2O_3$  as high as 21.85 million tons, accounting for 28.60 % of total reserves in China. The Liaoji active belt in Paleoproterozoic was developed on the cratonic basement in Archean, and experienced the evolutionary phases of limited extension-rift, magma emplacement, volcanic sediment, collision, metamorphism, uplift-detachment and extinction in 2.2~1.8 Ga. The evolution of mineralization, tectonism and magmatism of Liaoji active belt is composed of four stages: 1 2.2~2.0 Ga magmatism and mineralization stage, 2 2.0~1.9 Ga sedimentation and mineralization stage, 3 ~1.9 Ga large-scale modification-deformation and mineralization stage (collisional orogeny stage), and ④ 1.89~1.82 Ga post-collision magmatism stage. In conclusion, the formation and evolution of the Liaoji active belt experienced the crustal evolution and mineralization processes from active continental margin to passive continental margin, in which the mineralizations were controlled by different tectonic environments. In addition, the mineralization was characteristics by complexity, diversity and multistage, due to the fact that this area experienced the superposition of Mesozoic tectonic magmatic mineralization. Double metallogenic belts controlling mineralization in the same area is rarely seen both in China and abroad. Therefore, this area is very favorable for the large-scale mineralization of many kinds of mineral resources and prospecting.

Key words: geology, Liaoji area, Paleoproterozoic, active belt, double metallogenic belts, mineralization

古元古代是地史上重大地质构造转变时期之 一,其构造体制发生了本质的变化,由太古宙全活动 体制转换为活动带和稳定地块并存的构造格局。在 此过程中,发育不同规模、不同构造性质的活动带、 裂谷、岛弧带、活动大陆边缘和被动大陆边缘等。古 元古代也是十分重要的成矿期,以矿种多、成矿规模 大、矿床类型复杂著称,产出金、铬铁矿、铂、铁、铜、 磷、锰、硼、菱镁矿和铅锌矿等大型-超大型矿产资源 (沈保丰等,2004)。

辽吉古元古代活动带位于华北陆块东北部,以 其为主体并与东部朝鲜检德附近的古元古代摩天岭 群共同构成一条位于太古宙龙岗地块、辽南地块和 狼林地块之间的古元古代辽-吉-朝活动带(图1)。 该活动带西起辽东湾,从辽宁省的营口和盖县(现称 盖州,下同)向东经岫岩、凤城、宽甸和桓仁,再经吉林省的集安和临江,过鸭绿江延伸至朝鲜,经检德向东南直至与日本海接壤。整个活动带延伸约500km,宽约40~80km(白瑾,1993)。

辽-吉-朝活动带的形成和演化时期,是本区的一次重要成矿期,以矿种多、规模大,层状或层控为主 而产生的大型-超大型矿床为特色,部分矿种在中国 和朝鲜矿产总储量中占有较大比例,其中的菱镁矿、 滑石、硼、铅锌、钴、金和铀矿等具有重要的经济价 值。如己探明的大型-超大型优质菱镁矿矿床6个及 一批中、小型矿床,探明矿石储量约为27亿吨,占中 国菱镁矿总储量的70.2%(赵正等,2014),其中仅海 城菱镁矿矿床的储量高达8.84亿吨,为世界之最的 超大型矿床(中国矿床发现史·综合卷编委会,



1-Archaean block; 2-Liao-Ji-Chao active belt; 3-Liaoji granite; 4-Fault; 5-Ductile shear zone; 6-National boundaries

2001)。凤城翁泉沟硼矿床B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>储量为2185万吨, 共生铁矿石储量2.8亿吨,为超大型硼矿床和大型铁 矿床,占中国硼矿总储量的28.6%(中国矿床发现 史·综合卷编委会,2001)。此外,产于朝鲜北部摩天 岭成矿带北大川统上部杂色白云岩内检德铅锌矿床 中的铅锌金属储量达7000万吨左右,是目前世界上 最大的铅锌矿床之一(戴自希等,2005)。

### 1 成矿地质背景

辽吉活动带位于华北陆块东部,是华北陆块上 重要的古元古代造山带之一,主要分布在辽东的大石 桥、海城、宽甸、盖县和丹东一带及吉林南部的浑江、 集安和通化地区。该活动带主要由古元古代变质岩 系(辽东的南、北辽河群,吉南的集安群和老岭群)和 花岗岩(辽吉花岗岩和强过铝质花岗岩)等组成。变 质岩系主体由两套岩石组成:一套以火山岩为主,变 质程度相对较高,峰期阶段的变质条件达高角闪岩 相,分布广泛,总体呈东西向至北东向分布于复式褶 皱带;另一套以沉积岩为主,变质程度相对较低,峰期 阶段的变质条件达低角闪岩相。在吉南地区将前一 套变质岩石称为集安群,后者称老岭群,而在辽东地 区将这两套变质岩石分别称为南辽河群和北辽河群, 或统称辽河群(张秋生等,1988;白瑾,1993;白瑾等, 1996;贺高品等,1998;王惠初等,2015)。

辽东地区古元古代层序的划分存在众多方案 (张秋生等,1988;白瑾,1993;白瑾等,1996;陈荣度 等,2003;王惠初等,2015)。通常将辽河群以青龙 山-枣儿岭断裂(或大石桥南-草河口-桓仁一线)为界 划分为南辽河群和北辽河群(图2)。北辽河群自下 而上包括浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组 和盖县组。广泛分布在草河口、海城、营口和盖县等 地。北辽河群以变质碎屑岩-砂泥质-泥质沉积开始, 其中包含少量的火山岩类,并以下部巨厚层碳酸盐 岩和上部巨厚泥质岩结束,反映其主要形成于较稳 定的浅海环境。



Fig. 2 Geological map of Liaodong area (after Li et al., 2015).

南辽河群自下而上包括里尔峪组、高家峪组、大 石桥组和盖县组,以变质火山岩的大量出露与北辽 河群相区别。南辽河群主要由变质的火山岩、火山 碎屑岩和凝灰岩夹泥砂质沉积岩和少量镁质碳酸盐 岩组成。其岩石类型包括变粒岩类、浅粒岩类、斜长 角闪岩类、钙硅酸盐岩(如透闪透辉变粒岩、石榴透 闪透辉钾长变粒岩等)及碳酸盐岩类的夹层,为一套 由中偏酸性火山岩夹基性火山岩、泥砂质沉积岩和 碳酸盐岩组成的海相火山-沉积岩系,岩石经受角闪 岩相变质作用。该岩系中的变沉积岩组合与变火山 岩类紧密相伴,主要变质为片岩、片麻岩和大理岩, 并有黑云变粒岩和斜长角闪岩夹层。

南、北辽河群地层的岩石组成和变质-变形程度 差异显著,长期以来尚未得出较统一的对比方案,南 辽河群主要由与弧岩浆活动有关的火山-沉积岩系 组成,具有亲洋壳地层系统的特征。北辽河群主要 形成于稳定大陆边缘的浅海环境,是形成于陆壳上 的地层系统。

集安群主要分布在吉南通化市以南的清河镇、 财源及和平一带,自下而上依次可划分为蚂蚁河组、 荒岔沟组和大东岔组。其岩石类型主要由斜长角闪 岩、(黑云、石墨)变粒岩、浅粒岩、斜长角闪片麻岩、 片岩和大理岩组成,自下而上火山活动由强变弱。 集安群的原岩为形成于岛弧或活动大陆边缘附近的 泥砂质火山-沉积岩和(白云质)灰岩类。老岭群自 下而上依次划分为达台山组、珍珠门组、花山组、临 江组和大栗子组,主要由变质砾岩、石英岩、千枚岩、 片岩和(白云质)大理岩组成。其原岩为一套以石英 砂岩、页岩和碳酸盐岩为主,并夹少量砾石和长石石 英岩的海相沉积建造。

辽吉地区古元古代花岗岩主要包括条痕状花岗 岩类和斑状花岗岩类。条痕状花岗岩(又称辽吉花 岗岩)主要分布在营口-宽甸-通化-集安一带,以营口 虎皮峪条痕状黑云角闪二长花岗岩体和宽甸鹰咀砬 子条痕状角闪二长花岗岩体为代表,其主体岩石是 条痕状角闪二长花岗岩,条痕状黑云角闪花岗岩、黑 云母花岗岩、细粒黑云二长花岗岩和电气石花岗岩 等次之,是一套多世代的淡色酸性花岗岩系,与硼矿 关系密切。研究表明,虎皮峪条痕状花岗岩的锆石 U-Pb年龄为(2199±10)Ma(陈斌等,2016)和(2163± 15)Ma(路孝平等,2004),代表花岗岩的侵位年龄。 通过对辽吉花岗岩的岩相学和地球化学研究,认为 其为弧岩浆花岗岩,主要是I型花岗岩,而不是以往 认为的A型花岗岩(陈斌等,2016;2018)。斑状花岗 岩主要分布在八河川-桓仁东部一带和盖县等地,岩 石以环斑或巨斑状结构为特征,主要矿物组成有微 斜长石、石英、黑云母和少量斜长石,部分样品中可 见石榴子石。年代学研究表明,环斑花岗岩锆石U-Pb年龄为1793 Ma(张秋生等, 1988)和(1853±10) Ma(路孝平等,2004)。

北辽河群和老岭群的岩石组合从下部至上部表 现出明显完整的沉积旋回,下部以碎屑岩为主,中部

5

为黏土岩夹碳酸盐岩,上部为厚层碳酸盐岩,属于稳 定克拉通边缘的浅海相沉积。其岩石的矿物组成中 常见有石榴子石、十字石和蓝晶石等特征变质矿物, 属于典型的中压变质作用的产物,峰期阶段的变质 条件达低角闪岩相。在构造样式上,发育显著的线 性构造,韧性剪切带也十分发育,而未见短轴背形和 穹隆构造。在岩浆作用上,未见同构造期的片麻状 花岗岩出露,但发育大量构造晚期侵位的辉绿岩和 辉长岩(贺高品等,1998)。

南辽河群和集安群的下段(里尔峪组和蚂蚁河 组)主要由变粒岩和浅粒岩组成,岩石以普遍发育磁 铁矿和电气石为主要特征,是硼矿的赋存层位;中段 (高家峪组、大石桥组和荒岔沟组)主要由变粒岩、片 麻岩、片岩和大理岩组成,岩石中以普遍含石墨为主 要特征;上段(盖县组和大东岔组)主要由片岩、片麻 岩和变粒岩组成,以岩石中含有较多的富铝变质矿 物为主要特征。岩石中常见有石榴子石、十字石、红 柱石、堇青石和矽线石等特征变质矿物,属于低压变 质作用,峰期阶段的变质条件达高角闪岩相。在区 域构造样式上,短轴背形和穹隆构造十分发育,而线 性构造发育并不明显。同时,区内发育大量同构造 期的花岗质岩石,它们与火山-沉积建造共同遭受变 质-变形作用的改造,形成广泛分布的片麻状花岗 岩,部分地区形成以片麻状花岗岩为核部的穹隆构 造(贺高品等,1998)。

南辽河群和集安群分布大量变质火山岩,以里 尔峪组最为显著。陈斌等(2016)对后仙峪硼矿区南 辽河群里尔峪组变质安山岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb定年,发现其锆石呈自形-半自形,具典型 的振荡环带结构,以及较高的 Th/U比值,定年结果 为(2182±6)Ma和(2229±22)Ma,该年龄代表了变质 安山岩原岩的形成时代。这些变质火山岩具有富硼 的特点,其层位中有大型-超大型的硼矿床产出,可 能起源于富集硼的交代地幔源区(Ozol,1977)。在 洋壳俯冲过程中,蚀变洋壳和/或远洋沉积物部分熔 融时所释放的富硼流体或熔体交代上覆地幔楔,可 形成富硼的岩浆岩和硼矿。此外,同南辽河群和集 安群,尤其是南辽河群里尔峪组和蚂蚁沟组紧密共 生的辽吉花岗岩,可能是俯冲体系下大陆弧岩浆的 产物(陈斌等,2016)。

由此可见,辽吉古元古代活动带存在两套地质 性质不同的变质地体,两者之间以断裂带或韧性剪 切带相接。其中一套由北辽河群和老岭群组成,岩 石组合以大规模出露碎屑岩和碳酸盐岩为特征,属 于亲陆壳地层系统,代表了稳定的被动大陆边缘沉 积(白瑾,1993;贺高品等,1998;路孝平等,2004;Lu et al.,2006)。另一套由南辽河群和集安群组成,岩 石组合以古元古代火山岩和辽吉花岗岩为主,属于 亲洋壳地层系统,形成于活动大陆边缘弧岩浆环境 (白瑾,1993;贺高品等,1998;路孝平等,2004;Lu et al.,2006;王惠初等,2015)。

### 2 辽吉古元古代活动带成矿带的矿床 地质特征

不同的构造地质环境,不仅其岩石组合和岩浆 岩组成存在明显的差别,而且各具不同的成矿作用 和矿床类型,如辽吉活动带内形成于活动大陆边缘 弧岩浆构造环境下的含硼岩系和硼矿床、铅锌矿床 等,以及形成于被动大陆边缘构造环境的浅海相碳 酸盐岩和巨大菱镁矿矿床、滑石矿床等(图3)。此 外,由于不同的成矿构造环境,在北辽河群里尔峪组 中形成了含铜硫铁矿床,而在南辽河群里尔峪组内 却分布着大量的硼矿床。

### 2.1 被动大陆边缘成矿带

该成矿带主要分布在辽东的草河口、海城和营 口等地,吉南临江珍珠门一带,浑江北岸及通化南 部,紧邻新太古代龙岗地块(包括清原岩群、夹皮沟 岩群和鞍山岩群等)被动大陆边缘。该成矿带分布 着与浪子山组陆源碎屑岩建造有关的连山关铀矿 床,与基性-超基性侵入杂岩体有关的通化赤柏松铜 镍矿床,与北辽河群里尔峪组密切相关的云盘含铜 硫铁矿床,与北辽河群大石桥组三段富镁碳酸盐岩 有关的海城菱镁矿床和范家堡子滑石矿床等,与老 岭群珍珠门组有关的荒沟山铅锌矿床,以及与老岭 群大栗子组下段第二岩性段富镁、碳黏土岩有关的 大横路铜钻矿床等。

本文主要论述产于北辽河群大石桥组三段与富 镁碳酸盐岩有关的海城菱镁矿和范家堡子滑石矿等 矿床构成的成矿亚带。该成矿亚带主要集中分布在 辽宁省海城-大石桥一带。在长达60km的范围内, 分布有海城(包括下房身、金家堡子和王家堡子3个 矿段)、青山怀、铧子峪、圣水寺和牌楼等多个大型-超大型优质菱镁矿矿床和范家堡子、水泉及杨家甸 等滑石矿床(图4)。

该成矿亚带产于北辽河群大石桥组中。大石桥





 <sup>1—</sup>Archean block; 2—Paleoproterozoic passive continental margin metallogenic belt; 3—Paleoproterozoic active continental margin arc magmatic metallogenic belt; 4—Tectonic zone boundary (deep fault zone); 5—Shear fracture; 6—Tensional fault; 7—National boundaries; 8—Gold deposit;
 9—Boron deposit; 10—Lead-zinc deposit; 11—Magnesite and talc deposits; 12—Copper-bearing pyrite deposit

组岩石类型主要是一套产于大陆架环境中的碳酸盐 岩夹少量半黏土岩-黏土岩、砂岩建造,仅在个别地 段(如辽阳甜水)有火山碎屑岩。它的总厚度变化很 大,最薄处仅几十米,甚至尖灭,而西部最厚处则近 4000 m。根据岩性和层序特征,将北辽河群大石桥 组自下而上分为3个岩性段:一段主要为薄层条带 状灰岩夹钙质页岩,二段以页岩为主夹砂岩和灰岩; 三段为厚层白云岩(其中赋存有厚层菱镁矿层)。大 石桥组的一个重要特点是岩相变化剧烈,尤以三段 变化最大,极不稳定。其岩性从厚层白云岩向东依 次相变为厚层白云岩夹灰岩→中厚层白云岩与灰岩 可完全相变为页岩和砂岩。大石桥组以沉积大量碳酸盐岩为特征,是大区域范围内划分对比辽河群的标志层。此外,矿床主要赋存于古元古界北辽河群大石桥组三段镁质碳酸盐岩中,矿体呈似层状产出,普遍经受多期变质-变形作用的改造,形成似层状菱镁矿矿床。

海城菱镁矿矿床:位于海城市东南16 km处,矿 床呈北东-南西带状分布,长3600 m,宽1000 m,总面 积3.625 km<sup>2</sup>。该矿带自西南起可依次划分为王家 堡子、金家堡子和下房身3个矿段。矿床赋存于古 元古代界北辽河群大石桥组三段白云质大理岩中, 含矿岩系顶、底板清楚,其底板为大石桥组二段,顶



图4 海城-大石桥滑石-菱镁矿矿带区域地质略图(据朱国林等,1988)

1-第四系;2-盖县组云母片岩、千枚岩;3-大石桥组三段白云石大理岩(含矿层);4-大石桥组二段石榴石矽线石白云母片岩夹条带状白云石大理岩;5-大石桥组一段深灰色千枚岩、条带状大理岩夹变质凝灰岩;6-浪子山组变粒岩、白云二长片麻岩、石英二云母片岩;7-菱镁矿矿体(部分为菱镁岩);8-滑石矿体;9-花岗岩类(燕山期);10-花岗岩类(元古宙);11-中、基性岩脉;12-侵入地质界线Fig. 4 Regional geological sketch map of the Haicheng-Dashiqiao talc-magnesite ore belt (after Zhu et al., 1988)
1-Quaternary; 2-Gaixian Formation mica schist and phyllite, 3-Dolomite marble in the third section of Dashiqiao Formation (ore-bearing beds);

4—Banded dolomite marble intercalated with garnet and silica dolomite schist in the second section of Dashiqiao Formation; 5—Dark gray phyllite, banded marble with metamorphic tuff in the first section of Dashiqiao Formation; 6—Langzishan Formation granulite, dolomite monzonitic gneiss, quartz diorite schist; 7—Magnesite orebody (part of magnesite); 8—Talc orebody; 9—Granite (Yanshanian); 10—Granite (Proterozoic);

11-Intermediate and basic dikes; 12-Intrusive geological boundary

板为盖县组十字石石榴石云母片岩和千枚岩。含矿 岩系属滨海-浅海相沉积,构成一个巨大沉积旋回, 即从泥质沉积开始,经富镁碳酸盐岩沉积,最后以盖 县组泥质沉积结束。含矿岩系经历了绿片岩相-低 角闪岩相的区域变质和热动力变质作用。

矿床呈巨厚的似层状,自下而上分别为菱镁矿 层(体)、白云岩中菱镁矿层(体)和菱镁矿层(体)。3 个层位共含44个矿体。其中,下部菱镁矿层为主矿 层,走向长3625 m,平均厚度为205 m;上部矿层为 次矿层,走向长3625 m,平均厚度为137 m;中部白 云质大理岩中,矿层走向长度在110~769 m之间,平 均厚度介于6~55 m。该矿床的主要矿石矿物为菱镁 矿,透闪石、滑石和石英等次之。矿石的w(MgO)为 41%~47%,w(CaO)为0.6%~6%,w(SiO<sub>2</sub>)为0.6%~3.5%, 矿床类型属于晶质菱镁矿。截至1990年,累计探明 菱镁矿储量8.84亿吨(1988年全国储委批准为8.61 亿吨),其中王家堡子矿段2.42亿吨,金家堡子矿段 3.56亿吨,下房身矿段2.86亿吨(中国矿床发现史・ 综合卷编委会,2001)。目前,海城菱镁矿是中国乃 至全球最大的菱镁矿矿床,属于超大型矿床。

菱镁矿矿床形成于靠近北部龙岗地块被动大陆 边缘的泻湖盆地,并具有强烈的蒸发条件和大量镁 质供给。在2.0~1.9 Ga原始沉积时期,经成岩作用 而形成沉积菱镁矿层;约在1.9 Ga进入碰撞改造阶 段,沉积菱镁矿层经受了绿片岩相-低角闪岩相区域 变质-变形作用的改造,发生重结晶并形成晶质菱镁 矿和白云石大理岩。由于变形作用的叠加导致含矿 层产生褶皱,并在褶皱转折部位产出的矿层加厚,矿 石变富,随后由于南北向的强应力作用,发生了区域 性热动力变质作用,矿带内形成扇形构造,处在直立 带部位的菱镁矿层再次重结晶,形成粗晶、巨晶,菊 化状和梳状构造(朱国林等,1988)。

滑石矿床:区内滑石矿床的区域分布与菱镁矿 矿床的分布范围几乎一致,只要有菱镁矿(岩)产出 的地段就有滑石矿床出现。具有工业意义的滑石矿 床与菱镁矿矿床在空间上的分布存在一定的规律, 二者沿矿带走向基本上是相间出现。具一定规模的 滑石矿床,大部分都出现在菱镁矿层与白云石大理 岩层的接触带,形成挤压透镜状矿体。由于野外产 状、滑石脉的相互关系及产出的地质条件不同,导致 区内滑石矿的形成具有多期次、多成因的特点,并大 致可以划分为3期(张秋生等,1988):第一期是在区 域变质作用后期的变质热液作用下,部分岩层变成 滑石,具有分布稳定,与围岩(菱镁矿或白云石大理 岩)互层,层理清楚,并发育小型褶皱的特点,只有颜 色较深的层状滑石形成于区域变质作用过程中,但 其分布不广,质量不好,不具有工业意义;第二期是 形成于区域热动力变质作用中的滑石矿床,是本区 滑石矿床形成的主要时期,与扇形构造有密切关系。 滑石矿床主要分布在扇形构造直立带中的强应力部 位,滑石均沿着破劈理方向分布,特别是在菱镁矿层。 与白云石大理岩层的接触带内滑石分布较多,呈透 镜状、扁豆状和团块状产出。部分地区仅形成一条 挤压破碎带,该带亦是滑石矿体的产出部位。从区 域上看,滑石矿床与菱镁矿矿床相间出现,此种滑石 是在区域热动力变质作用中受到强应力作用的改 造,同时区内菱镁矿和白云石大理岩被含有大量 SiO<sub>2</sub>的热液交代形成滑石矿;第三期是脉状滑石,在 范家堡子滑石矿中可见到脉状滑石穿插煌斑岩脉的 现象,以及红色的滑石呈不规则脉状穿切白色或淡 绿色滑石,所以这种脉状滑石形成于岩浆期后热液 作用。

本区滑石矿床主要产在北辽河群大石桥组三段,其矿体围岩主要是菱镁矿层和白云石大理岩,普 遍发生硅化、滑石化和绿泥石化。矿体产状与地层 产状一致,呈扁豆状、透镜状产于菱镁矿层或白云石 大理岩的挤压破碎带中。一般矿体长200~600 m,厚 度0.5~80 m,最大延深达500~700 m。矿石类型分为 纯滑石型、滑石-菱镁矿型和滑石-白云石型。矿石化 学成分具有高 MgO、SiO<sub>2</sub>,低 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的特征。 该类矿床的代表性矿床为海城范家堡子滑石矿床。 范家堡子滑石矿床位于北辽河群大石桥组三段 底部的菱镁矿层内(图5),其中工业矿体6个,1~3矿 体为主矿体。滑石矿体呈扁豆状和透镜状产出,长 300~600 m,厚24~40 m,延深150~600 m。矿体与围 岩产状一致,界线为渐变关系。滑石矿体周围发育 1~2 m宽的硅化带,并有石墨化、斜绿泥石化及黄铁 矿化。由于滑石化及硅化的影响,范家堡子一带的 菱镁矿矿体已成等外品。矿石矿物主要为滑石,脉 石以菱镁矿为主,石英、斜绿泥石和白云石等次之。 矿石的w(SiO<sub>2</sub>)为62.35%,w(MgO)为32.26%,w(CaO) 为0.17%,w(H<sub>2</sub>O)为4.95%,矿石中滑石质量分数为 60%左右。至1990年底,累计探明储量3808万吨 (中国矿床发现史·综合卷编委会,2001),为超大型 滑石矿床,其矿石质量和规模居全国第一位。

#### 2.2 活动大陆边缘成矿带

该成矿带自西向东出露于营口、岫岩、凤城、宽 甸、桓仁至集安地区,总体为呈东西一北东向分布的 复式褶皱带,远离龙岗地块大陆边缘,分布较广。在 该成矿带内形成了与南辽河群里尔峪组、集安群蚂 蚁河组含硼岩系有关的硼矿床,与南辽河群高家峪 组和大石桥组一、二段、集安群荒岔沟组的浊积岩系 有关的铅锌矿床,与南辽河群盖县组二段的猫岭金 矿床和与富镁碳酸盐岩建造有关的水镁石和岫玉矿 床等。本文重点论述硼矿床和铅锌矿床。

### 2.2.1 与钙碱性火山-沉积建造有关的硼矿床成矿 亚带

硼矿床成矿亚带产于古元古界南辽河群里尔 峪组和集安群蚂蚁河组内,构成东西一北东向分布 的具代表性的古元古代硼矿带。该硼矿带全长约 400 km,宽近160 km,自西向东集中分布在营口-岫 岩、凤城、宽甸和集安4处,产出近百处规模不等的 硼 矿床,是目前中国最大的硼矿床集中分布 区(图6)。

硼矿床主要产于南辽河群里尔峪组含硼岩系 中,含硼岩系是一套以富钠、铁和硼为特征,以中偏 酸性火山岩为主体夹基性火山岩和碳酸盐岩组成的 变质海相火山-沉积岩系,普遍遭受角闪岩相区域变 质作用。其底部出露"辽吉花岗岩",顶部为含石墨的 高家峪组。含硼岩系分上、下2个岩段,总厚度大于 2000 m,主要岩石类型为由角闪石、云母类及电气石 矿物组成的变粒岩、浅粒岩和富镁碳酸盐岩。硼矿床 主要赋存在由黑云变粒岩、电气石变粒岩夹含硼富镁 碳酸盐岩等组成的下岩段内(王翠芝等,2008)。



- 图 5 辽宁海城范家堡子滑石矿床剖面图(据陶维屏,1987) 1-表土;2-滑石富矿;3-滑石贫矿;4-菱镁矿;5-硅化和滑石化 菱镁矿;6-大石桥组;7-钻孔
- Fig. 5 Geological section of the Fanjiapuzi talc deposit, Haicheng, Liaoning Province (after Tao, 1987)
- 1—Topsoil; 2—Talc rich ore; 3—Talc lean ore; 4—Magnesite; 5—Silicification and talc magnesite; 6—Dashiqiao Formation; 7—Drill hole

区内硼矿床的空间展布,明显受构造控制,具 有多期性和复杂性的特点,表现为以发育一系列 东西向的大型复式褶皱为主。在区内特别是硼矿 集中区,含硼岩系受挤压作用表现出强烈的变形, 形成大面积紧密复式褶皱。在褶皱核部,辽吉花 岗岩或活化重就位,或以剪切带形式与上覆含硼 岩系构造接触。目前所见的硼矿床多处于向形构 造的翘起端和辽吉花岗岩扇形褶皱两侧的向形构 造中,向形构造和钩状褶皱控制着硼矿体的分布 和重就位。

前人对区内含硼岩系的原岩进行研究,认为含 电气石角闪变粒岩的原岩是安山岩,含电气石变粒 岩的原岩为流纹岩。上述研究表明区内含硼岩系的 原岩均为火山岩,而不是碎屑沉积岩。其中安山岩 的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(2200±8)Ma,流纹 岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(2201±5)Ma,辽吉 花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(2215±3)Ma (李壮等,2015;陈斌等,2016)。陈斌等(2016)提出 区内出露的火山岩并不是双峰式岩浆岩组合,而是 连续的岩浆序列。此外,2.2 Ga 的岩浆作用以酸性 岩浆占主导为特征,明显不同于东非裂谷的岩浆岩 岩石组合(以碱性玄武岩为主),同时也缺乏具有典 型大陆裂谷岩浆作用特征的岩石,如 OIB 性质的玄 武岩、碳酸岩和碱性岩等。另外,大部分辽吉花岗岩 并非A型花岗岩,而是以I型花岗岩为主。



图6 辽东一吉南硼矿床分布图(据冯本智等,1998)

1—市县驻地;2—超大型(翁泉沟等);3—大型(后仙峪等);4—中型(砖庙等);5—小型;6—矿化点;7—太古宙克拉通;8—辽吉古元古代活动带
 Fig. 6 Distribution of boron deposits in eastern Liaoning and southern Jilin (after Feng et al., 1998)
 1—City and county residence; 2—Superlarge (Wengquangou etc.); 3—Large (Houxianyu etc.); 4—Medium (Zhuanmiao etc.); 5—Small;

6-Mineralization spot; 7-Archean Craton; 8-Liaoji Paleoproterozoic active zone

区内硼矿床按其工业矿物种类不同可划分为2 种类型:①硼镁石型矿床,如后仙峪、岔沟、杨木杆、砖 庙沟、二台子和张虎沟等矿床,其中后仙峪、岔沟和砖 庙沟等矿床为大型矿床;②硼镁铁矿型矿床,如翁泉 沟、五道岭和牛皮闸等矿床。本文以后仙峪大型硼矿 床和翁泉沟超大型硼矿床为例进行详细介绍。

后仙峪大型硼矿床:该矿床的矿区及外围发育 在虎皮峪背形构造内,在背形构造核部分布辽吉花 岗岩。矿床分布在具有底辟特点的虎皮峪背形构造 南翼倒转部位,赋存在古元古界南辽河群里尔峪组 含硼岩系下岩性段(变粒岩段)下部黑云角闪变粒岩 和电气石变粒岩夹蛇纹石大理岩层中,在距离辽吉 花岗岩10~50 m处(图7)。矿区主要岩石类型为阳 起石化浅粒岩夹黑云变粒岩和透闪石化浅粒岩、蛇 纹石大理岩、黑云角闪变粒岩和电气石变粒岩。矿 区内变粒岩(原岩为安山岩)的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(2195±6)Ma和(2200±8)Ma(陈斌等, 2016),电英岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(2175± 6)Ma、(2175±5)Ma和(2171±9)Ma(Liu et al., 2012),表明矿区的成岩成矿时代约为2200 Ma。矿 区构造复杂,后仙峪"翻转"向形构造控制着含矿层 及矿体的空间分布(张秋生等,1984)。该矿区共有5 个矿化带,其中以Ⅱ号矿化带规模最大、矿化最佳, 储量占全矿区90%以上。Ⅱ号矿化带出露全长 1580 m,最宽处164 m,最窄处12 m,平均宽60 m,呈 W形,向下延深200~350m尖灭,形态为大透镜体。 赋存于Ⅱ号矿化带中的矿体共有6个,呈似层状或 透镜状赋存于蛇纹石大理岩中,产状与围岩一致。 其中5号矿体规模最大,呈似层状产出,该矿体地表 出露长度为369m,最宽85m,平均宽度29m,最大 延深为700m,储量占全区总储量的75%。其余矿 体均为延长百米的小矿体。主要矿石矿物为遂安 石、板状硼镁石和纤维硼镁石,另有少量柱硼镁石和 硼镁铁矿,主要为板柱状变晶结构、纤维状变晶结构 和交代残余结构,团块状、角砾状、网格状和花斑状 构造。遂安石是矿区最重要的工业矿物之一,有板 状和长柱状2种晶体,且晶体粗大,长可达5 cm,宽 可达3 cm。脉石矿物主要为镁橄榄石和蛇纹石,金 云母、滑石、透闪石、方解石、白云石和菱镁矿次之。 矿石类型有硼镁石型、遂安石型和硼镁铁矿型3种。



#### 图7 辽宁营口大石桥后仙峪硼矿床地质图(据张秋生等,1984)

1一第四系;2一辽吉花岗岩;3一黑云变粒岩;4一蚀变大理岩;5一硼矿体;6一电气石变粒岩夹黑云母变粒岩;7一电气石伟晶岩; 8一闪长岩;9一煌斑岩;10一闪长玢岩;11一断层

Fig. 7 Geological sketch map of the Houxianyu boron deposit, Dashiqiao, Yingkou, Liaoning Province (after Zhang et al., 1984)
 1—Quaternary; 2—Liaoji granite; 3—Biotite granulite; 4—Altered marble; 5—Boron orebody; 6—Tourmaline granulite with biotite granulite;
 7—Tourmaline pegmatite; 8—Diorite; 9—Lamprophyre; 10—Diorite porphyry; 11—Fault

该矿床累计探明资源储量69.6万吨,属大型矿床。

硼矿化形成具有多阶段性,硼质来源应以深部 火山源为主,在约2200 Ma存在多期成矿作用,早期 火山沉积作用形成初始矿体,随后变质作用对早期 形成的初始矿体进行改造和富集,构造变形作用为 变质期所形成的硼矿床提供了有利空间并使硼矿体 发生塑性迁移重就位。因此,后仙峪硼矿床的成因 属于火山沉积-变质再造型硼矿床。

翁泉沟硼矿床:该矿床由超大型硼矿床和大型 铁矿床组成,并伴生稀土元素和铀。矿区地层为古 元古界南辽河群里尔峪组的中、下部地层,自下而上 可划分为变粒岩段、浅粒岩段和黑云片岩-变粒岩 段。变粒岩段岩性复杂,岩石类型包括角闪黑云变 粒岩、黑云变粒岩、电气石变粒岩和角闪透辉变粒岩 等,上部夹浅粒岩,中、下部夹白云质大理岩、蛇纹 岩、透辉岩和金云母岩等。本段为含矿层,矿层与蛇 纹石化白云质大理岩密切伴生。浅粒岩段岩性为磁 铁浅粒岩、黑云浅粒岩和电气石浅粒岩,下部夹黄铁 矿浅粒岩,上部有斜长角闪岩、矽线黑云片麻岩和石 榴磁铁透辉岩等。黑云片岩-变粒岩段上部为斜长 角闪岩和大理岩互层,下部为变粒岩、大理岩和矽线 黑云片麻岩。

该矿床产于轴向近东西向的翁泉沟马蹄形向形构造的两翼,向形构造核部发育大面积花岗岩,向两 翼依次为里尔峪组各岩段,构成镶边构造(图8)。矿 区内断层规模较大,中酸性岩脉较发育。矿体总体 呈东西走向,受向形构造控制。矿区共分为翁泉沟 矿段、业家沟矿段、周家大院矿段和东台子矿段,其 中周家大院、业家沟和翁泉沟矿段产于向形构造南 翼,东台子矿段产于向形构造北翼。矿体产状变化 较大,浅部倾角在40°~50°,局部在80°以上,甚至倒 转,深部倾角缓,近向形构造轴部呈水平产出。矿体 呈似层状、透镜状,延长800~1000 m不等,最长1800 m(业家沟矿段),小者仅100~200 m。矿床厚度变化 较大,最厚达170 m,小者10~30 m,最大延深超过 400 m。

铁硼矿体在多数情况下密切共生,局部地段构成硼的单独矿体,向西铁硼矿体尖灭,出现含稀土元素的磷灰石矿体。矿石类型主要为硼镁铁矿-磁铁矿矿石、硼镁石-磁铁矿-砌镁铁矿-硼镁铁矿矿石、硼镁石-磁铁矿石、硼镁石矿石和含稀土元素磷灰石矿石。矿石矿物已发现20多种,主要金属矿物为磁铁矿、假象磁铁矿、硼镁铁矿,硼镁石、遂安石、晶质铀矿、独居石和铈硼硅石次之。脉石矿物为蛇纹石、粒硅镁石、透辉石、金云母和镁橄榄石等,主要呈变晶、交代残余结构,条带状、致密块状和斑杂状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造,面硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。由硼镁石所组成的矿石具有典型的条带状构造。



图8 辽宁凤城翁泉沟硼矿区地质简图(a)及剖面图(b,据王登红等,2018)

Fig. 8 Geological sketch map (a) and geological section (b) of the Wengquangou boron deposit, Fengcheng, Liaoning Province (after Wang et al., 2018)

1—Quaternary; 2—Liaohe Group Gaojiayu Formation biotite diopside granulite; 3—Liaohe Group Li'eryu Formation; 4—Liaohe Group Li'eryu Formation amphibole diopside granulite; 5—Liaohe Group Li'eryu Formation dolomite marble and shallow granulite; 6—Liaohe Group Li'eryu Formation biotite granulite; 7—Liaoji granite; 8—Boron ore body; 9—Fault; 10—Drill hole 化、电气石化、金云母化和绿帘石化等。

Hu 等(2015)通过对矿体上盘浅粒岩进行研究, 获得其锆石核部的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb加权平均年龄为 (2139±13)Ma。陈毓川等(2006)对矿区矿石进行同 位素测年,获得东台子矿段磁铁矿-硼镁铁矿矿石 Pb-Pb等时线年龄为(1917±48)Ma,矿区中金云母的 Ar-Ar快中子活化法坪年龄为(1923±1.5)Ma,等时线 年龄为(1924±2.5)Ma,上述定年结果表明该矿床形 成于2139~1917 Ma。

翁泉沟矿床的矿石 w(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)最高达 22.68%, 一般 4%~10%。矿石平均品位:w(TFe)=30.65%, w(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)=7.23%,w(S)=0.3%。截至 1990年,累计探 明铁矿石储量 28302 万吨,硼储量 2184.9 万吨,而 2016年全国硼矿的总储量为 7647.6 万吨(国土资源 部,2017),占中国硼矿总储量的 28.6%,为超大型硼 矿床和大型铁矿床。此外,研究表明翁泉沟矿床属 于火山沉积-变质再造型硼矿床。

2.2.2 与火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造相关的铅锌 矿床成矿亚带

铅锌矿床是辽吉活动带内分布最广泛的有色金 属矿产之一。其空间产出受辽河群和集安群多个层 位控制,主要为南辽河群高家峪组二岩性段条带状 含石墨大理岩、大石桥组一岩性段条带状厚层含石 墨大理岩和三岩性段白云石大理岩,以及集安群荒 岔沟组石墨大理岩和斜长角闪岩,均以碳酸盐岩为 容矿岩石,具有明显的层控和岩控特点。铅锌矿床 成矿亚带自西向东延伸,从辽宁小孤山、胡家堡子、 北瓦沟、东胜、青城子、大金坑和张家堡子至吉林正 岔(图9)。本文以青城子、张家堡子和北瓦沟等矿床 为例,按矿体形态和产状划分为整合型矿体-层状矿 体和非整合型矿体-脉状矿体。2类矿体在各矿区的 储量不同,据青城子矿区的统计,层状矿体占储量的 2/3,脉状矿体占储量的1/3。层状矿体均分布在含矿 岩系碳酸盐岩内,而脉状矿体则分布在含矿岩系的 中上部,出现"上脉下层"的矿体空间分布规律。其 中层状矿体可细分为Pb型层状矿体和Zn型层状矿 体,前者位于含矿岩系下部火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩 组合中,而后者则位于含矿岩系上部碎屑岩-碳酸盐 岩组合中,表现出"上Pb下Zn"的分带性。

Zn型层状矿体赋存于火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩 组合中,相当于深水还原环境浊流沉积。赋矿岩石 为灰黑色碳质碳酸盐岩,矿体顶板为异地的黏土质 粉砂岩(云母片岩-石英片岩),底板为具有浊流沉积 的多成分(如火山凝灰岩、原地碳质、硫化物、白云 岩、页岩及异地砂岩和粉砂岩)、多层理构造的互层 状岩石。这些特征表明矿化是在高能环境之后相对



#### 图9 辽东古元古代主要铅锌矿床分布略图(据张秋生等,1988修改)

1—太古宙龙岗陆块;2—碳酸盐岩建造;3—浊积岩系;4—被动大陆边缘和活动大陆边缘弧岩浆交接带;5—层状铅锌矿床;6—脉状铅锌矿床
 Fig. 9 Distribution of main Paleoproterozoic lead-zinc deposits in eastern Liaoning Province (modified after Zhang et al., 1988)
 1—Archean Longgang block; 2—Carbonate Formation; 3—Turbidite series; 4—Passive continental margin and active continental margin arc magmatic junction zone; 5—Layered lead-zinc deposit; 6—Veined lead-zinc deposit

低能宁静环境下,形成于含碳质碳酸盐岩的沉积过 程中,其中矿石的Zn/Pb比值一般大于5。

Pb型层状矿体赋存于碎屑岩-碳酸盐岩组合中, 含矿岩石为较纯的原地堆积的白云岩(白云质大理 岩)。矿体的顶、底板为具变形层理构造的富含泥砂 质白云质灰岩,其附近普遍发育准同生角砾岩和同 沉积断裂构造,以及受重力流滑移作用影响产生的 准同生褶皱构造,形成环境相当于碳酸盐岩的浊流 沉积,其矿石中Zn/Pb比值一般小于1。

青城子铅锌矿田:该矿田产出于辽吉活动带活 动大陆边缘盆地中部,位于南、北辽河群分布区的南 辽河群一侧。矿床沿南辽河群高家峪组二岩性段、 大石桥组三岩性段的一定层位产出。矿田内地质构 造复杂,花岗岩侵入体出露面积占1/5以上,其中古 元古代辽吉花岗岩体主要分布在矿田的东南部,在 矿田中部也有少量出露,印支期双顶沟黑云母花岗 岩体主要出露于矿田的南部和北部。矿体形态具 层状(榛子沟式)、似层状、脉状(喜鹊沟式)和囊状 (南山式)。脉状矿体多出现在层状矿体的上盘或 受层间韧-脆性断裂及旁侧的羽毛状裂隙所控制。 层状类型矿体的矿石矿物组合比脉状、似层状型矿 体简单,前者以闪锌矿为主,后者以方铅矿为主,伴 生矿物有黄铁矿、黄铜矿、毒砂、磁黄铁矿和微量 雌黄。

青城子铅锌矿田是区内产出规模最大的矿田, 由12个矿床所组成,分东、西2个区,面积约50 km<sup>2</sup>。 东区分布有榛子沟、甸南等4个矿床,西区分布有喜 鹊沟、麻泡、二道、南山等8个矿床,以及200多个铅 锌矿体(图10)。各个矿床的成矿特征不尽相同,集 中反映了火山沉积-变质-岩浆热液叠加的复杂成矿 过程。在矿田东区,以榛子沟层状铅锌矿为代表,容 矿围岩为高家峪组二岩性段的条纹状含石墨大理岩 层;西区以喜鹊沟脉状铅锌矿为代表,容矿围岩为大 石桥组三岩性段的透闪透辉大理岩层。

层状铅锌矿床以榛子沟矿床为代表,包括榛子 沟、甸南和大地等矿床。矿体严格受地层控制,矿体 与围岩为同沉积接触,无明显蚀变交代现象,可见矿 层与含矿层同步褶皱。矿石组成简单,金属矿物主 要为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿和方铅矿,非金属矿 物以白云石和方解石为主,矿石发育变余沉积构造。 榛子沟矿床中下含矿层289号矿体和顶部的2号矿 体具有一定的代表性,直接容矿围岩为含石墨大理 岩。289号矿体矿化带宽17m,长1500m,矿体沿走 向有尖灭再现,产状与围岩一致。单个矿体一般长 50~150 m,个别长 250~300 m,厚 0.5~15 m,铅品位 2.33%,锌品位 2.01%。

脉状铅锌矿床以喜鹊沟为代表,包括南山、北砬 子、喜鹊沟、麻泡、本山和二道沟等矿床。该矿床受 断裂构造控制,在断裂中形成交代充填矿体(如本山 矿床)或在断裂旁侧形成层间剥离断裂(如南山矿 床)。矿体以脉状或不规则状产出,大小不一,铅品 位普遍较高,Pb/Zn比值为4左右,如喜鹊沟6406号 矿体延长可达300m,宽15m,平均品位:w(Pb)为 5.87%,w(Zn)为1.51%,伴生银含量较高。该类矿床 矿石组成较复杂,以方铅矿为主,闪锌矿次之,并伴 生黄铁矿、黄铜矿、毒砂和磁黄铁矿等。围岩蚀变有 硅化、碳酸盐化和绢云母化等。

该成矿亚带中各类矿床的形成与火山-沉积作 用关系密切,主要是喷流沉积作用形成了以碳酸盐 岩为容矿的层状矿体。在其上隆拉伸与挤压褶皱阶 段,发生了"变质重就位",形成了层状矿体衍生的脉 状矿体和囊状矿体。矿床成因较复杂,经历了火山 喷气沉积、变质-变形和岩浆热液叠加改造等地质作 用。累计探明铅金属储量73.24万吨,锌金属储量 34.83万吨,Pb/Zn比值为1:0.47,银为主要的有益伴 生元素(中国矿床发展史·辽宁卷编委会,1996)。

## 3 辽吉古元古代活动带地质构造演 化与成矿

根据前人可靠的年代学数据和地质特征研究, 将辽吉古元古代活动带地质构造演化与成矿划分为 以下4个阶段:岩浆作用和成矿阶段(2.2~2.0 Ga)、 沉积作用和成矿阶段(2.0~1.90 Ga)、大规模变质-变 形作用和成矿阶段(弧-陆碰撞期)(约1.9 Ga)和碰撞 后岩浆作用阶段(1.89~1.82 Ga)(陈斌等, 2016; 2018)。

(1) 2.2~2.0 Ga岩浆作用和成矿阶段

该期岩浆作用主要表现为辽吉花岗岩、南辽河 群里尔峪组、高家峪组和集安群蚂蚁河组、荒岔沟组 的火山岩和火山-沉积岩。辽吉花岗岩主要分布在 营口-宽甸-通化-集安一带,以营口虎皮峪条痕状黑 云角闪二长花岗岩和宽甸鹰咀砬子条痕状角闪二长 花岗岩为代表,是一套多世代的淡色酸性花岗岩系。 虎皮峪条痕状黑云角闪二长花岗岩的锆石 U-Pb年 龄为(2199±10)Ma(陈斌等,2016)和(2163±15)Ma



图10 辽宁青城子矿床地质略图(据王魁元等,1994)

 1一第四系;2一南辽河群盖县组;3一南辽河群高家峪组至大石桥组三段第一层未分;4一南辽河群高家峪组至大石桥组第三段第二层未分;
 5一南辽河群大石桥组第三段第三、四层;6一南辽河群大石桥组第二段第二层;7一南辽河群大石桥组第三段第一层;8一南辽河群高家峪组至 大石桥组第三段第一层;9一南辽河群大石桥组第一段和第二段;10一新太古界;11一吕梁期花岗岩;12一燕山期花岗岩;13一断层;
 14—飞来峰;15—矿点;16—生产矿山;17—已采完矿山

Fig. 10 Geological sketch map of the Qingchengzi deposit, Liaoning Province (after Wang et al., 1994)
1—Quaternary; 2—Gaixian Formation of South Liaohe Group; 3— First layer of the third member of Dashiqiao Formation and Gaojiayu
Formation of the South Liaohe Group (undivided); 4—Second layer of the third member of Dashiqiao Formation and Gaojiayu Formation
of the South Liaohe Group (undivided); 5—First and forth layers of the third member of Dashiqiao Formation of the South Liaohe Group;
6—Second layer of the second member of Dashiqiao Formation of the South Liaohe Group; 7—First layer of the third member of Dashiqiao Formation of the South Liaohe Group;
8—First layer of the third member of Dashiqiao Formation and Gaojiayu Formation of the South Liaohe Group;
8—First layer of the third member of Dashiqiao Formation and Gaojiayu Formation of the South Liaohe Group;
9—First and second member of Dashiqiao Formation of South Liaohe Group;
10—Neoarchaear;
11—Luliang granite;
12—Yanshanian granite;
13—Fault;
14—Klippe;
15—Ore spot;
16—Production mine;
17—Mined mine

(路孝平等,2004),代表花岗岩的侵位年龄。南辽河 群里尔峪组、高家峪组和集安群蚂蚁河组、荒岔沟组 的火山岩主要变质-变形为浅粒岩和变粒岩(原岩为 流纹岩和安山岩),锆石LA-ICP-MS和SHRIMP U-Pb年龄为2230~2150 Ma,该年龄代表变质流纹岩和 安山岩的原岩形成年龄(陈斌等,2018)。辽吉花岗 岩和南辽河群里尔峪组、高家峪组火山岩的形成时 代大致相同,可能是同期岩浆作用的产物,这也与野 外地质观察均为构造接触相一致。根据这两类岩石 的野外地质和地球化学特征,笔者认为它们均形成 于远离大陆边缘的弧岩浆构造环境,同时,形成以南 辽河群里尔峪组、高家峪组和集安群蚂蚁河组、荒岔 沟组火山岩、火山沉积岩及辽吉花岗岩为主体的成 矿带。出露于南辽河群里尔峪组以中偏酸性火山岩 为主体夹基性火山岩和碳酸盐岩组成的含硼岩系中 产出超大型翁泉沟、后仙峪、砖庙沟、杨木杆和二台 子等一批大-中型硼矿床。研究表明,硼来源于深部 火山源,经早期的火山-沉积形成初始矿体,变质-变 形对早期初始矿体进行改造和富集,最终成矿。另 外,铅锌矿床包括小弧山、胡家堡子、北瓦沟、东胜、 青城子和张家堡子等矿床,产于南辽河群高家峪组 和大石桥组的火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩组合中,相 当于深水还原环境的浊流沉积,容矿岩石是石墨大 理岩。该类矿床多产于浊积岩系下部或中上部,层 状矿体产于浊积岩相高能环境向低能环境转化的 低能带。矿床形成与火山喷气作用有关,随后又遭 受变质-变形作用的改造,层状矿体发生重就位,形 成不同规模的脉状矿体,以及"上脉下层"的空间分 布规律。

(2) 2.0~1.90 Ga沉积作用和成矿阶段

北辽河群和老岭群主要由变质碎屑岩-碳酸盐 岩系组成,岩石类型包括各种片岩、片麻岩、千枚岩、 石英岩和大理岩类。北辽河群自下而上包括浪子山 组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组,广泛分 布在草河口、海城、营口和盖县等地。辽河群变质沉 积岩中最年轻的具有岩浆成因特征的碎屑错 石<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb谐和年龄为2.027 Ga(浪子山组)(Luo et al.,2004)、2.032 Ga(北辽河群的里尔峪组和高家 峪组)(Luo et al.,2008)、2.012 Ga(大石桥组)(Luo et al.,2008)和1.981 Ga(盖县组)(孟恩等,2013;Li et al., 2015;李壮等,2015)。结合辽河群沉积岩的沉积作用 应早于大规模变质-变形作用的时代(约1.9 Ga),进一 步限定辽河群的沉积时限为2.0~1.9 Ga。

如上所述,北辽河群主要由变质碎屑岩-碳酸盐 岩系组成,其下部岩组原岩主要为石英砂岩和黏土 岩,中部为黏土岩和粉砂岩夹碳酸盐岩,上部主要为 各种厚层碳酸盐岩和片岩,它们均形成于稳定克拉 通边缘的浅海沉积,属于被动大陆边缘构造环境。 也就是说,在2.0~1.9 Ga,辽吉地区构造体系由活动 大陆边缘转变为被动大陆边缘,同时形成一系列与 被动大陆边缘有关的矿床,如菱镁矿、滑石、铀矿、 硫铁矿和铜钴矿等矿床。以菱镁矿为例,出露于辽 东海城-大石桥一带的北辽河群大石桥组三段富镁 碳酸盐岩中,在长达60km的范围内集中产出海 城、青山怀、铧子峪和圣水城等大型-超大型优质菱 镁矿矿床。菱镁矿的形成经历了一个比较复杂的 成矿过程,在2.0~1.9 Ga紧邻龙岗地块南缘被动大 陆边缘的泻湖盆地具有强烈的蒸发条件和大量的 镁质供给环境,在此沉积了原始菱镁矿矿体,后经 成岩作用,形成沉积菱镁矿矿体。约1.9 Ga进入碰 撞改造阶段,沉积菱镁矿矿体经受绿片岩相-低角 闪岩相变质-变形作用的改造,最终形成菱镁矿 矿床。

(3) 1.90 Ga 大规模变质-变形及碰撞作用和成 矿阶段

1.90 Ga是辽吉活动带大规模的变质-变形时期, 也是弧-陆和陆-陆碰撞期。如在北辽河群的主拆离 剪切带中黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄为(1896±7)Ma(Yin et al., 1996), 南辽河群里尔峪组电英岩 SHRIMP变 质锆石 U-Pb 年龄为(1906±4) Ma 和(1889±62) Ma (Liu et al., 2012), 辽吉花岗岩 SHRIMP 变质锆石 U-Pb年龄为(1914±13)Ma(Li et al., 2007),南辽河群盖 县组浅粒岩LA-ICP-MS变质锆石U-Pb年龄为 (1889±12)Ma和黑云石英片岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb变质年龄为(1884±12)Ma(孟恩等,2013),大石桥 组斜长角闪岩 LA-ICP-MS 变质锆石 U-Pb 年龄为 (1896±22)Ma和变质辉长岩岩墙LA-ICP-MS 锆石 U-Pb年龄为(1896±22)Ma(Meng et al., 2014)。该类 变质锆石一般无核边或弱分带结构,具高U、低Th 和Th/U比值较低(大部分<0.1)的特征。上述定年结 果普遍被认为是弧-陆碰撞过程中辽河群以及花岗 岩-基性侵入体的峰期变质时代。

在变质-变形作用下,赋存于火山岩和沉积岩中 的原始矿体,经历了从绿片岩相到角闪岩相不同程 度变质-变形作用的改造,形成(火山)沉积再造矿 床,如海城菱镁矿在1.9 Ga左右经受绿片岩相-低角 闪岩的变质作用,最终形成变质沉积菱镁矿矿床;青 城子矿床早期形成以喷流沉积作用为主的似层状矿 体,1.9 Ga在变质-变形作用下经历了上隆拉伸和挤 压褶皱,并发生了"变质重就位"形成脉状矿体和囊 状矿体,并最终形成"上脉下层"的青城子铅锌矿床。

(4) 1.89~1.82 Ga碰撞后岩浆作用阶段

碰撞期后岩浆作用较为发育,侵入岩类型较多, 包括环斑花岗岩、似斑状花岗岩、石英闪长岩、角闪 辉石正长岩、正长岩和花岗伟晶岩脉等。这些岩浆 岩的结晶时代在1.89~1.82 Ga,如环斑花岗岩的 SHRIMP锆石U-Pb年龄为(1817±18)Ma(路孝平等, 2004),似斑状花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 (1872±8)Ma(路孝平等,2004),石英闪长岩的 SHRIMP锆石U-Pb年龄为(1872±11)Ma(路孝平等, 2004),正长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 (1874±18)Ma(杨进辉等,2007),花岗伟晶岩脉的 LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(1870±8)Ma(王惠初 等,2011)等。该期侵入体和岩脉穿切早期辽吉花岗 岩和辽河群,代表了拉张背景下的岩浆作用,标志着 古元古代辽吉活动带构造演化的结束。 在造山后的伸展阶段,形成榆树砬子群的山前 磨拉石建造。榆树砬子群的岩性主要为石英岩、千 枚岩、绢云石英片岩和变质砂岩,不整合覆盖在辽河 群盖县组之上,是一套产于褶皱回返期后由滨海相 向陆相磨拉石堆积过渡的陆源碎屑沉积岩。

## 4 中生代印支期一燕山期构造岩浆 活动的叠加成矿作用

辽吉活动带内的矿床存在多种成因,在其分布 和成因上具有受含矿岩系特定层位控制较为明显的 特征。矿床形成大部分既受古元古代海底热水喷流 (喷气)等沉积作用控制,又遭受到后期热液的叠加 改造,形成不同成因、不同产状矿体组合同时产出的 矿床。然而,对成矿热液作用的性质、产生机制和形 成时代,以及对某一具体矿床在成因上的认识仍存在 分歧。中生代以来,本区受滨西太平洋构造域的控 制,印支期—燕山期构造岩浆活动踪迹在辽吉活动带 范围内经常可见。成矿带内矿床的热液成矿作用普 遍存在,通常认为其热液来源于印支期—燕山期岩浆 活动。目前,由于缺少有效的方法来获取精确的热液 形成年龄,因此对热液成因的认识还存在分歧。总 之,印支-燕山期构造岩浆活动是辽吉活动带演化不可 忽视的热事件。古元古代形成的含矿建造或矿床部 分遭受印支期—燕山期构造岩浆活动热事件的叠加 改造,特别是金(银)矿床的出现与该期岩浆活动热事 件更是密不可分。因此,研究中生代构造-岩浆活动带 叠加成矿作用既具有理论意义,又具有十分重要的实 际意义。

综上所述,辽吉古元古代活动带的成矿作用是 由形成于被动大陆边缘构造环境和活动大陆边缘弧 岩浆构造环境中的两条重要成矿带所控制。在同一 个地区内、不同部位形成一系列大型-超大型硼、菱 镁矿、滑石、钴、铅锌和金等矿床,而且表现出由双成 矿带成矿控制作用在国内外很少见。

### 5 结 论

(1) 辽吉活动带是华北陆块最具代表性的古元 古代造山/活动带。该活动带由出露厚度达万米的 古元古界辽河群、集安群、老岭群和古元古代不同阶 段的岩浆岩组合所组成,并发育两套特征不同的变质 岩系,一套为由北辽河群和老岭群所组成的变质碎屑 岩-碳酸盐岩系,以变质相相对较低为特征,是形成在 稳定克拉通边缘的浅海沉积;另一套是由南辽河群和 集安群的变质火山-沉积岩系和辽吉花岗岩所组成的 地质单元,以变质相相对较高为特征,形成于远离大 陆边缘俯冲体系下的弧岩浆构造环境。

(2) 按成矿地质构造特征不同,辽吉古元古代 活动带内可划分为形成于被动大陆边缘构造环境和 活动大陆边缘弧岩浆构造环境的成矿带,前者主要 产出菱镁矿矿床、滑石矿床、铜钴矿床和铀矿床等, 后者分布着硼矿床、铅锌矿床和金矿床等。文中简 要阐述了两类成矿带中具有代表性和重大经济价值 的大型-超大型的海城菱镁矿矿床、范家堡子滑石矿 床、后仙峪硼矿床、翁泉沟硼矿床和青城子铅锌矿床 的成矿地质特征。

(3) 辽吉活动带地质构造演化和成矿作用包括 4个阶段:① 2.2~2.0 Ga岩浆作用和成矿阶段;② 2.0~ 1.9 Ga沉积作用和成矿阶段;③ 1.9 Ga大规模变质-变形和成矿阶段(碰撞造山期);④ 1.89~1.82 Ga碰 撞后岩浆作用阶段。在 2.2~1.82 Ga,近 0.4 Ga时限 内,辽吉活动带经历了从有限拉伸裂陷→活动陆缘 →被动陆缘→碰撞造山→碰撞后岩浆作用等地壳演 化和成矿作用。

(4) 辽吉活动带的成矿作用是由两类不同成矿构造环境所控制。这种在同一个成矿区内,由双成 矿带控制的成矿作用在国内外很少见。同时本区又 有中生代构造岩浆成矿作用的叠加,使本区成矿作 用更具复杂性和多样性。因此,本区是多种矿产大 规模成矿十分有利的地区及找矿远景地区。

**致** 谢 在工作过程中得到陈毓川院士和王登 红研究员的大力支持和帮助,审稿人提出宝贵的修 改意见,作者表示十分感谢!

#### References

- Bai J. 1993. The Precambrian geology and Pb-Zn mineralization in the northern margin of North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-132(in Chinese).
- Bai J, Huang X G and Wang H C. 1996. The Precambrian crustal evolution of China (second edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-259(in Chinese).
- Chen B, Li Z, Wang J L, Zhang L and Yan X L. 2016. Liaodong Peninsula ~2.2 Ga magmatic event and geological significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(2): 303-320(in

Chinese with English abstract).

- Chen B and Li Z. 2018. Active Belt of Jiaodong Liaodong Peninsula[A]. In: Zhai M G, Zhang L C, Chen B, et al. Precambrian important geological event and mineralization of the North China Craton[C]. Beijing: Science Press. 241-255(in Chinese).
- Chen R D and Wang Y J. 1994. The evolution and mineralization of the Early Proterozoic rift in the eastern Liaoning and southern Jilin areas[A]. In: Zhang Y X, Liu L D, eds. Precambrian ore deposits and tectonics in China[C]. Beijing: Seismological Publishing House. 186-201(in Chinese).
- Chen R D, Li X D and Zhang F S. 2003. Several problems about the Paleoproterozoic geology of eastern Liaodong[J]. Geology in China, 30(2): 207-213(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Li X H, Li H Q, Chen J F and Xue C J. 2006. Detailed determination of the large-scale ore-formation age and minerogenetic lineage[A]. In: Mao J W, Hu R Z, et al. Large-scale ore-forming events and large ore dense areas Book 1[C]. Beijing: Geological Publishing House. 69-77(in Chinese).
- Dai Z X, Sheng J F and Bai Y. 2005. Distribution and potentiality of lead and zinc resources in the world[M]. Beijing: Seismological Publishing House. 96-102(in Chinese).
- Editorial Board of the Discovery History of Mineral Deposits of China · Volume of Liaoning Province. 1996. The discovery history of mineral deposits of China · volume of Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-189(in Chinese).
- Editorial Board of the Discovery History of Mineral Deposits of China · General Summary Volume. 2001. The discovery history of mineral deposits of China · General summary volume[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-801(in Chinese).
- Feng B Z, Lu J W, Zou R, Ming H L and Xie H Y. 1998. 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, 28(1): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- He G P and Ye H W. 1998. 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, 28(2): 121-134(in Chinese with English abstract).
- Hu G Y, Li Y H, Fan C F, Hou K J, Zhao Y and Zeng L S. 2015. In situ LA-MC-ICP-MS boron and zircon U-Pb age determinations of Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning Province, northeastern China[J]. Ore Geology Reviews, 65: 1127-1141.
- Li S Z and Zhao G C. 2007. 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, 158: 1-16.
- Li Z, Chen B, Liu J W, Zhang L and Yang C. 2015. Zircon U-Pb ages and their implication for the South Liaohe Group in the Liaodong Peninsula, northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(6): 1589-1605(in Chinese with English abstract).
- Li Z, Chen B, Wei C J, Wang C X and Han W. 2015. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks

from the Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Insights from detrital zircon U-Pb geochronology, whole-rock Sr-Nd isotopes, and geochemistry[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 111: 711-732.

- Liu J D, Xiao R G, Zhang Y F, Fan M H, Wang S Z, Jin Y G, Wang G and Liu Z X. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tourmalines from boron-bearing series of borate deposits in Eastern Liaoning and its geological implications[J]. Acta Geologica Sinica, 86: 118-130.
- Lu X P, Wu F Y, Lin J Q, Sun D Y, Zhang Y B and Guo C L. 2004. 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 Geology, 39(1): 123-138 (in Chinese with English abstract).
- Lu X P, Wu F Y, Guo J H, Wilde S A, Yang J H, Liu X M and 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(3): 138-164.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, Li S Z, Xu R, Ye K and 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 Orogen[J]. Precambrian Research, 134: 349-371.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, Ayers J C, Li S Z, Xia X P and Zhang J H.
   2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrial 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.
- Meng E, Liu F L, Liu P H, Liu C H, Shi J R, Kong Q B and Lian T. 2013. Depositional ages and tectonic implications for South Liaohe Group from Kuandian area in northeastern Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(7): 2465-2480 (in Chinese with English abstract).
- Meng E, Liu F L, Liu P H, Liu C H, Yang H, Wang E, Shi J R and Cai J. 2014. Petrogenesis and tectonic implications 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.
- Ministry of Land and Resources, PRC. 2017. China mineral resources [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-66(in Chinese).
- Ozol A A. 1977. Plate tectonics and the processes of volcanogenic-sedimentary formation of boron[J]. International Geology Review, 20 (6): 692-698.
- Shen B F, Yang C L, Zhai A M and Hu X D. 2004. Temporal and spatial distribution of Precambrian mineral deposits in China[J]. Mineral Deposits, 23(S1): 78-89(in Chinese with English abstract).
- Tao W P. 1987. Industrial mineral and rock of Chain (first volume)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-432(in Chinese).
- Wang C Z, Xiao R G and Liu J D. 2008. Ore-controlling factors and metallogenesis of borate in eastern Liaoning and southern Jilin[J]. Mineral Deposits, 27(6): 727-741 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Zhang S H and Xiong X X. 2018. Geology of mineral resources in China Overview of typical mineral deposits volume 2[M]. Bei-

jing: Geological Publishing House. 776-777(in Chinese abstract).

- Wang H C, Lu S N, Chu H, Xiang Z Q, Zhang C J and Liu H. 2011. Zircon U-Pb age and tectonic setting of metabasalts of Liaohe Group in the Helan Area, Liaoyang, Liaoning Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(5): 1322-1334 (in Chinese with English abstract).
- Wang H C, Ren Y W, Lu S N Kang J L, Chu H, Xiang I Q and Zhang C J. 2015. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji orogen[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 583-598 (in Chinese with English abstract).
- Wang K Y, Zhao Y M and Cao X L. 1994. The Proterozoic type leadzinc deposits in northern border of North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-190(in Chinese).
- Yang J H, Wu F Y, Xie L W and Liu X M. 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, East North China Craton: Constraints from in-suit zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 263-276(in Chinese with English abstract).
- Yin A and Nie S. 1996. Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions[A]. In: Yin A, Harrison T M, eds. The tectonic evolution of Asian[C]. New York: Cambridge University Press. 285-442.
- Zhang Q S, et al. 1984. Geology and metallogeny of the Early Precambrian in China[M]. Changchun: Jilin People's Publishing House. 196-264(in Chinese).
- Zhang Q S, Yang Z S and Liu L D. 1988. Early Crust and mineral deposits of Liaodong[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-574(in Chinese).
- Zhao Z, Bai G, Wang D H, Chen Y C and Xu Z G. 2014. The metallogenic belts of Chinese magnesite deposits and key scientific issues[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2326-2338(in Chinese with English abstract).
- Zhu G L and Li X J. 1988. Early Proterozoic stratabound Magnesite-Talc-Jade ore deposits[A]. In: Zhang Q S, et al. Early crust and mineral deposits of Liaodong Peninsula, in China[C]. Beijing: Geological Publishing House. 424-450 (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 白瑾.1993.华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M].北京: 地质出版社.1-132.
- 白瑾,黄学光,王惠初.1996.中国前寒武纪地壳演化(第二版)[M]. 北京:地质出版社.1-259.
- 陈斌, 李壮, 王家林, 张璐, 鄢雪龙. 2016. 辽东半岛~2.2Ga岩浆事件 及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(2): 303-320.
- 陈斌,李壮.2018. 胶辽活动带[A]见: 翟明国,张连昌,陈斌,等.华北 克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿[C].北京:科学出版社. 241-255.
- 陈荣度, 王有爵. 1994. 辽东-吉南早元古代裂谷演化与成矿[A]. 见: 张贻侠, 刘连登主编. 中国前寒武纪矿床和构造[C]. 北京: 地震 出版社. 186-201.
- 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.

- 陈毓川,李献华,李华芹,陈江峰,薛春纪.2006.大规模成矿时代年 龄精测与成矿谱系[A].见:毛景文,胡瑞忠,等.大规模成矿作 用与大型矿集区(上册)[C].北京:地质出版社.69-77.
- 戴自希, 盛继福, 白冶. 2005. 世界铅锌资源的分布与潜力[M]. 北京: 地震出版社. 96-102.
- 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.
- 国土资源部.2017.中国矿产资源报告[M].北京:地质出版社.1-66.
- 贺高品, 叶慧文. 1998. 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, 28(2): 121-134.
- 李壮, 陈斌, 刘经纬, 张璐, 杨川. 2015. 辽东半岛南辽河群锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(6): 1589-1605.
- 路孝平, 吴福元, 林景仟, 孙德有, 张艳斌, 郭春丽. 2004. 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, 39 (1): 123-138.
- 孟恩,刘福来,刘平华,刘超辉,施建荣,孔庆波,廉涛.2013. 辽东半岛东北部宽甸地区南辽河群沉积时限的确定及其构造意义[J]. 岩石学报,29(7):2465-2480.
- 沈保丰,杨春亮,翟安民,胡小蝶.2004.中国前寒武纪地壳演化与成 矿[J].矿床地质、23(S1):78-89.
- 陶维屏.1987.《中国工业矿物和岩石》上册[M].北京:地质出版社. 1-432.
- 王翠芝,肖荣阁,刘敬党.2008.辽东-吉南硼矿的控矿因素及成矿作 用研究[J].矿床地质,27(6):727-741.
- E登红,章少华,熊先孝.2018.中国矿产地质志典型矿床总述卷 (下册)[M].北京:地质出版社.776-777.
- ① 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,陆松年,康健丽,初航,于宏斌,张长捷.2015. 辽吉 古元古代造山带的地房单元划分与构造属性[J]. 地球学报, 36 (5): 583-598.
  - 王魁元,赵彦明,曹秀兰.1994.华北陆台北缘元古宙典型铅锌矿地 质[M].北京:地质出版社.1-190.
  - 杨进辉,吴福元,谢烈文,柳小明.2007.辽东矿洞沟正长岩成因及其 构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学 报,23(2): 263-276.
  - 张秋生,等.1984.中国早前寒武纪地质及成矿作用[M].长春:吉林 人民出版社.196-264.
  - 张秋生,杨振升,刘连登.1988.辽东半岛早期地壳与矿床[M].北京: 地质出版社.1-574.
  - 赵正, 白鸽, 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 2014. 中国成菱镁矿区带与关 键科学问题[J]. 地质学报, 88(12): 2326-2338.
  - 中国矿床发现史·辽宁卷编委会.1996.中国矿床发现史·辽宁卷[M]. 北京:地质出版社.1-189.
  - 中国矿床发现史·综合卷编委会.2001.中国矿床发现史·综合卷[M]. 北京:地质出版社.1-801.
  - 朱国林,李绪俊.1988.早元古宙层控菱鎂矿-滑石-玉石矿床[A].见: 张秋生,等.辽东半岛早期地壳与矿床[C].北京:地质出版社. 424-450.