



辽东-吉南成矿带硼矿成矿规律与找矿探讨

赵岩^{1,2}, 谢园宏³, 辛后田^{1,2}, 高荣臻⁴, 张艳飞^{1,2}, 梁帅^{1,2},
陈井胜^{1,2}, 杨中柱^{1,2}, 吴新伟^{1,2}

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034; 2. 东北地质科技创新中心, 辽宁沈阳 110034;
3. 辽宁省化工地质勘查院有限责任公司, 辽宁锦州 121000; 4. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819

摘要: 辽东-吉南成矿带是我国最主要的硬岩型硼矿产地。本文在收集辽东-吉南地区前寒武纪地质、胶辽吉造山带等基础地质科研成果和成矿作用研究基础上, 总结辽东地区古元古代造山作用与硼矿等成矿事件耦合关系, 建立辽东-吉南成矿带硼矿成矿模式。通过调研后仙峪、翁泉沟和砖庙-杨木杆等典型硼矿床, 汇总前人对硼、镁同位素分析结果, 重新作图分析。研究认为硼矿经历了早期富集、古元古代造山过程中成矿和后期改造 3 个主要过程; 富镁大理岩和初始富集硼为主要成矿物质来源; 基性和超基性岩块在造山变质过程中对富硼流体的圈闭起到了重要作用, 也贡献了部分成矿物质; 后期变质作用破坏矿体, 局部也起到了部分提高矿体品位的作用。同时分析了目前辽东地区制约硼矿找矿的主要因素, 认为有待加强古元古代建造构造填图、构造解析, 选择合适的勘查手段, 并探讨了下一步硼矿找矿思路。

关键词: 华北克拉通; 战略性矿产; 辽东-吉南成矿带; 硼矿; 成矿规律; 成矿模式

METALLOGENIC REGULARITY AND PROSPECTING OF BORON DEPOSITS IN EASTERN LIAONING-SOUTHERN JILIN METALLOGENIC BELT

ZHAO Yan^{1,2}, XIE Yuan-hong³, XIN Hou-tian^{1,2}, GAO Rong-zhen⁴, ZHANG Yan-fei^{1,2},
LIANG Shuai^{1,2}, CHEN Jing-sheng^{1,2}, YANG Zhong-zhu^{1,2}, WU Xin-wei^{1,2}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 3. Liaoning Chemical Geological Prospecting Institute Co., Ltd., Jinzhou 121000, Liaoning Province, China; 4. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: The eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt is the leading site of hard rock-type boron deposit in China. Based on the previous research results of Precambrian geology, Jiao-Liao-Ji orogenic belt, as well as metallogenesis, the paper summarizes the coupling relationship between Paleoproterozoic orogeny and boron metallogenetic events in eastern Liaoning region, and establishes the metallogenic model of boron deposits in eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt. With the field survey on the typical boron deposits of Houxianyu, Wengquangou and Zhuanmiao-Yangmugan, the previous B and Mg isotopic data of the deposits are summarized and drawn for analysis. The results show that the boron deposits have experienced three main processes, i.e. early

收稿日期: 2024-02-25; 修回日期: 2024-06-01. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“辽东大石桥-吉南和龙铜多金属及硼矿战略性矿产调查评价”(DD20230329); “辽宁翁泉沟-杨木杆硼金矿大型资源基地综合地质调查”(DD20242674); “辽东-吉南成矿带战略性矿产调查”(DD20240059).

作者简介: 赵岩(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 从事辽东半岛前寒武纪地质与成矿研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//cugzhaoyan@126.com

enrichment, mineralization during Paleoproterozoic orogeny and later reformation. Mg-rich marble and initially enriched B are the main ore-forming material sources. The basic and ultrabasic rocks play an important role in trapping B-rich fluids during orogenic metamorphism and contribute some ore-forming materials. The late metamorphism destroys orebody and partially improves the grade of ores. Finally, the paper also analyzes the main factors restricting boron prospecting in eastern Liaoning region, suggests that more attention be paid on the Paleoproterozoic formation and structure mapping, structural analysis and choice of suitable exploration means. The idea of further boron ore prospecting is also discussed.

Key words: North China Craton; strategic mineral; eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt; boron deposit; metallogenic regularity; metallogenic model

0 引言

硼作为一种重要的化工原料,除了自身能够提高玻璃制品强度和熔点,并在氢原子核聚变中与之反应而不产生危害性的高能中子之外,还能与过渡元素及金属氧化物反应形成具有质轻、阻燃、耐磨、耐熔、高硬度、高导电率等特性的化合物,在机械、冶金、建材、医药、化工、核工业、国防等领域具有重要应用^[1-5]。在新一轮的《战略性矿产找矿行动(2021—2035年)》中,硼矿已被列为我国战略性矿产资源。目前世界范围内99.5%的硼矿分布在土耳其、俄罗斯、美国、智利和中国5个国家,总储量约 11.5×10^8 t(2018年统计值)。我国硼矿资源约占全球硼矿储量的3%左右,与此同时,中国却是全球最大的硼矿产品进口国,以2017年为例,中国对硼矿产品进口量依存度高达80%^[6]。据自然资源部2023年《中国矿产资源报告》统计,我国硼矿资源分布以辽宁和青海为主,其中辽宁省硬岩型硼矿禀赋最佳,是主要的工业开采利用对象。

辽东-吉南成矿带是我国东北地区最重要的成矿带之一,带内赋存的矿产资源包括:铁、金、铅锌、银、钴、镍、菱镁矿、硫铁矿、重晶石、石墨、金刚石、硼等^[7-12],硼矿作为其中特殊的非金属矿产,占据了全国硬岩型硼矿的主产地位。从全球尺度来看,绝大多数硼矿产于土耳其安纳托利亚地区,其成矿时代为中新世^[13-14],而辽东-吉南地区是全球范围内为数不多的前寒武纪硼矿产区。新一轮找矿突破战略行动硼矿工作部署主要在辽宁省大石桥-盖州金硼矿资源基地和翁泉沟-杨木杆硼金矿两处大型资源基地内。本文在系统收集前寒武纪地质、胶辽吉古元古代造山与成矿作用、以及典型矿床调查研究等资料基础上,总结硼矿成矿规律,并探讨制约硼矿找矿的因素及找矿方向。

1 地质背景

1.1 辽吉造山带地质演化

华北克拉通是世界范围内最古老的克拉通之一,在早期地球演化过程中伴随Nuna超大陆的拼合,由东部地块、西部地块和中部造山带拼合而成^[15-17](图1)。与其他两个单元相比,东部地块具有较为争议的演化模式,早期主要观点有“陆内裂谷”模式和“弧(陆)-陆碰撞”模式。“陆内裂谷”观点认为辽北龙岗地块和南部狼林地块(?)原为一体,经历了古元古代大陆裂解形成一条裂谷,在裂谷内沉积了大量碎屑物质、火山-沉积岩,沉积形成包括硼矿、铅锌矿、硫铁矿等矿产资源,以及不同性质侵入岩等,至古元古代末期裂谷闭合形成胶辽吉造山带^[18-24];持“弧(陆)-陆碰撞”观点研究者^[25-34]则认为辽吉造山带内古元古代沉积物及硼矿、铅锌矿、硫铁矿等矿产源于不同弧后盆地,造山过程中经历了弧陆碰撞或陆陆碰撞过程,同样经历了强烈变质变形过程形成胶辽吉造山带。近年来研究者提出另一种“陆内裂解-俯冲-碰撞”模式^[15, 35-37],与早期“陆内裂谷”观点区别在于,认为太古宙基底裂解形成了初始洋盆、龙岗微陆块、狼林微陆块等单元,随后发生了洋壳俯冲和陆块碰撞,最终形成辽吉造山带。

相比之下,“弧(陆)-陆碰撞”模型在解释辽吉造山带演化中被越来越多的地质工作者接受。2300 Ma前后(2450~2300 Ma),龙岗陆块和辽南陆块没有大规模岩浆事件,出现大量伸展盆地。大约2200 Ma左右,龙岗地块和辽南-狼林地块之间洋壳向南俯冲,形成大量富水、高氧逸度岩浆弧,以造山带内广泛出露的片麻状二长花岗岩(又称“条痕状花岗岩”“辽吉花岗岩”,以含角闪石和磁铁矿等为特征)为主;在弧后拉张盆地一带形成含硼火山建造,包括大量钙碱性基性岩

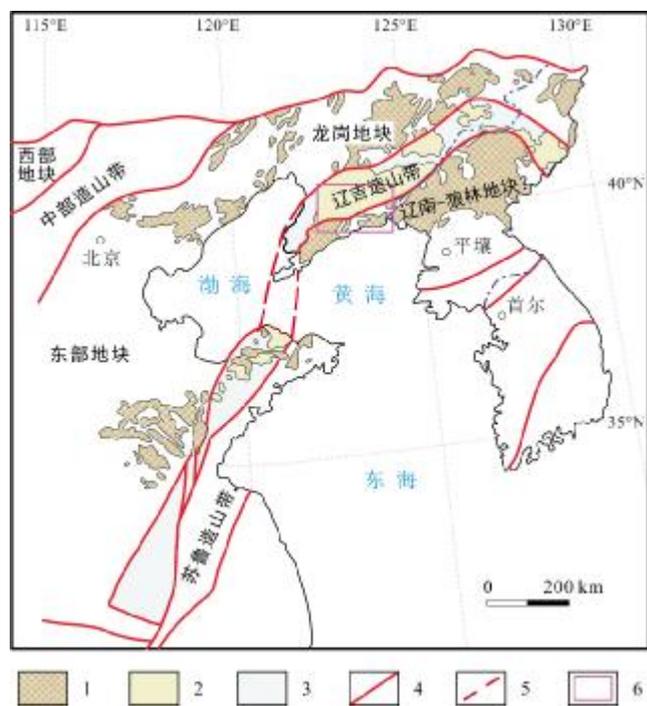


图1 辽东地区辽吉造山带区域地质图

(据文献[15, 17]修改)

Fig. 1 Regional geological map of Liao-Ji orogenic belt in eastern Liaoning

(Modified from References [15, 17])

1—太古宙基底(Archean basement); 2—辽河岩群变质岩系(metamorphic rock series of Liaohe lithogroup); 3—后期盖层(later caprock); 4—主要断裂(major fault); 5—推测断裂(inferred fault); 6—研究区位置(study area)

墙、拉斑性质基性岩墙和钙碱性玄武质火山沉积岩,以辽宁省里尔峪岩组、吉林省蚂蚁河岩组等为代表。2 100~1 900 Ma 期间弧后盆地及洋盆一侧广泛的沉积作用形成了浅海相碳酸盐岩建造和陆源富铝沉积建造,辽宁省境内高家峪岩组、大石桥岩组、盖县岩组,吉林省内大东岔岩组、荒岔沟岩组、新农村岩组、花山岩组、珍珠门岩组、临江岩组、大栗子岩组等均沉积于该时期。推测来自龙岗陆块被动陆缘沉积与来自辽南陆块弧前沉积在碰撞缝合过程中发生构造混杂,并随后发生变质-变形而形成了古元古代沉积岩。大约 1 950 Ma, 龙岗陆块、辽南-狼林陆块(?)及其间的岩浆弧发生碰撞拼合,发生了峰期为 1 850 Ma 的大规模区域变质、变形作用。根据前人研究,该阶段变形最强,形成开阔的复式褶皱和岩浆穹隆^[32, 38],并能够达到高角闪岩相局部麻粒岩相的变质程度^[39-41],形成古元古代胶辽吉造山带的主体,其间还伴随了不少同构造花

岗岩的侵位产出。至 1 850~1 820 Ma, 进入造山带后碰撞阶段,以区域范围内造山后花岗岩脉、伟晶岩脉等出露为特征,代表了辽吉古元古代造山带的结束。

1.2 辽东-吉南地区古元古代造山过程中的成矿作用

根据全国成矿单元划分,辽东-吉南成矿带属华北成矿省,为 Fe-Cu-Pb-Zn-Au-U-B-菱镁矿-滑石-石墨-金刚石成矿带^[42-46]。成矿带内多数矿产成矿作用都与辽吉古元古代造山作用密切相关,包括铅锌矿、部分金矿、铀矿、硼矿、菱镁矿、滑石等。

根据前人对辽东地区古元古代造山作用和变质、变形研究结果,结合对辽东地区主要矿产野外产出状态考察,综合室内观察、现代同位素分析等测试结果,本研究初步总结了辽东地区古元古代造山作用与成矿事件的耦合关系(表 1)。本地区重要的成矿事件主要有 3 个阶段: 1) 早期伴随含硼火山建造沉积的钴、镍、硫铁矿等。钴、镍矿多以伴生矿产形式产出,典型矿床包括辽宁省的云盘硫铁矿、周家铁钴矿、小女寨镍钴矿和吉林大横路铜钴矿等。这些矿床特征之一就是,矿体包括微细硫化物脉,具有与围岩变质岩系几乎相同的面理产状。变质岩研究者报道了矿区附近变质独居石、基性麻粒岩等时代为 1 930~1 950 Ma^[55-56],限定了此类矿床成矿时代的上限。2) 伴随碳酸盐岩建造沉积的菱镁矿。辽东地区菱镁矿主要产出在营口大石桥、海城一带,其中海城马风镇一带菱镁矿中产出叠层石^[57],地质调研和地球化学研究也发现镁质未发生长距离迁移^[58],证明菱镁矿主要成矿应发生在沉积阶段^[58]。3) 主造山阶段变质变形形成的硼、金、铅锌、铀、重晶石、滑石、玉石矿。这些矿床中部分是早期沉积期发生初步富集,造山期最终成矿,如金、硼、重晶石,也有部分是早期成矿或造山期变质成矿,如滑石、玉石矿等。研究者或是通过沥青铀矿一类矿石矿物^[59],或是利用与金矿密切伴生的特征变质矿物对矿床的成矿时代进行了有效约束^[60],获得的结果为 1 896~1 851 Ma,与胶辽吉造山带主造山阶段一致。至于硼矿,由于硼元素原子量小,化学性质活泼,受成矿后地质活动影响较大。笔者在翁泉沟硼矿进行了相关研究,通过成矿后花岗闪长岩脉限定了其成矿时代约早于 1 842 Ma。

2 典型硼矿床特征

辽东-吉南地区硼矿分布相对集中,西起辽宁省营

表 1 辽东地区古元古代造山作用与成矿事件耦合表

Table 1 Correlation of Paleoproterozoic orogeny and metallogenic events in eastern Liaoning

原岩建造	区域变形	变质作用	花岗质岩浆作用	成矿作用
榆树砬子组碎屑沉积建造				
			造山后花岗岩脉、伟晶岩脉	
	F3 形成近东西向开阔复式褶皱与岩浆穹隆	M3-M4 峰期高角闪岩相-麻粒岩相变质	同造山花岗岩	硼、金、铅锌、铀、重晶石、滑石、玉石矿
	F2 主构造期近东西向紧闭褶皱, 全区透入性片理 S2	M2 低角闪岩相变质		
	F1 层间和层内褶皱, 形成片理 S1	M1 低绿片岩相变质		
陆源碎屑沉积富铝质建造				
浅海相碳酸盐岩建造			片麻状二长花岗岩	菱镁矿
含硼火山建造				钴(铜)、镍、硫铁矿

注:表中内容据文献[19,47-54]。

口大石桥,东至吉林省通化市一带,其分布与古元古代辽吉造山带变质岩系关系密切,通常称为“辽吉硼矿带”(图2)。主要的硼矿田包括:后仙峪硼矿田、翁泉沟硼矿田、砖庙-杨木杆硼矿田、高台沟硼矿田等。

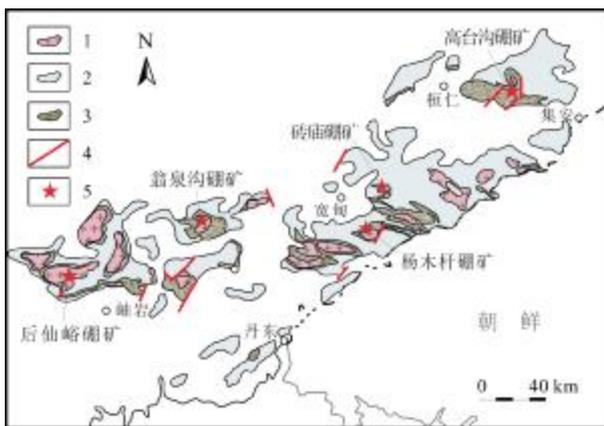


图2 辽东-吉南成矿带主要硼矿分布图
(据文献[18]修改)

Fig. 2 Distribution of significant boron deposits in eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt
(Modified from Reference [18])

1—片麻状花岗岩 (gneissic granite); 2—辽河岩群浅变质岩系 (epimetamorphic rock series of Liaohé lithogroup); 3—辽河岩群深变质岩系 (hypometamorphic rock series of Liaohé lithogroup); 4—主要断裂 (major fault); 5—硼矿 (boron deposit)

2.1 后仙峪硼矿

后仙峪硼矿是辽宁省营口市附近的一处大型硼矿(图3),附近还有岔沟、鲁家沟、冯家堡子等矿床(点),构成了辽东半岛著名的硼矿田^[61-63]。后仙峪硼矿具有储量大(探明储量约 700×10^4 t)、平均品位高(11.86%)、综合利用率高的特征。

古元古代里尔峪岩组是后仙峪硼矿区出露的主要地层,岩性由含电气变粒岩、透闪透辉浅粒岩夹斜长角闪岩、电气石岩、白云质大理岩及蛇纹石化橄榄岩组成。以往研究按照史密斯地层还将其划分为3段,其中硼矿体的产出主要与中段变粒岩、电英岩和蛇纹石化橄榄岩有关(图3)。矿区南端出露大面积的古元古代二长片麻岩(早期称“辽吉花岗岩”),从区域尺度看,该岩体是虎皮峪巨型背斜的核部(图2),具有片麻状构造(由其中黑云母、磁铁矿等暗色矿物定向排列构成)。矿区内断裂构造发育,以北西和近东西向为主,矿体局部受断裂控制明显。该矿区由数十条矿体组成,多为隐伏矿体,呈似层状、透镜状产出,一般延长200~500 m,延深不超过300 m,厚度通常在7~45 m之间^[64-65]。

矿石矿物主要有硼镁石、遂安石及少量的硼镁铁矿。变余沉积构造、热液交代构造、网脉状构造是主要的矿石构造。硼镁石又可细分为3个变种:板状、柱状

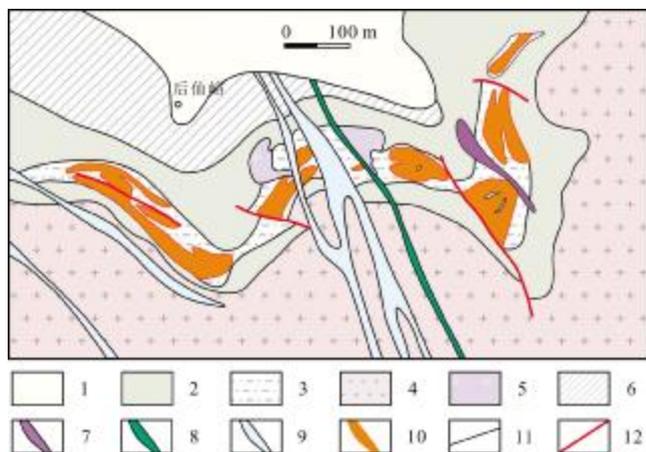


图3 辽东地区后仙峪硼矿地质图
(据文献[18]修改)

Fig. 3 Geological map of Houxianyu boron deposit in eastern Liaoning
(Modified from Reference [18])

1—第四系(Quaternary); 2—黑云变粒岩(biotite granulite); 3—蛇纹石化橄榄岩(serpentinized peridotite); 4—片麻状花岗岩(gneissic granite); 5—电气石伟晶岩(tourmaline pegmatite); 6—电气变粒岩夹黑云变粒岩(tourmaline granulite with biotite granulite); 7—闪长岩(diorite); 8—煌斑岩(lamprophyre); 9—闪长玢岩(diorite porphyrite); 10—硼矿体(boron orebody); 11—地质界线(geological boundary); 12—断裂(fault)

及纤维状硼镁石,以板状硼镁石为主,不同变种化学成分基本无差别,多产于蛇纹石化镁橄榄岩中. 遂安石与金云母透闪石等蚀变矿物共生,硼镁铁矿分布则很少. 脉石矿物主要为镁橄榄石、蛇纹石以及透闪石,还有少量金云母、菱镁矿、磁铁矿等. 围岩蚀变强烈,包括蛇纹石化、金云母化、透闪石化,以及滑石化、绿泥石化等.

2.2 翁泉沟硼矿

翁泉沟硼矿田包括了凤城翁泉沟硼矿、二台子硼矿、暖河硼矿等. 其中翁泉沟硼矿是产于辽宁省凤城市西的一处超大型矿床,以富硼、铁,同时伴生磷、铀和稀土元素为特征,硼的储量超 $2\ 000 \times 10^4\ \text{t}$ ^[4]. 矿区出露的地层同样主要为群里尔峪岩组变质岩系,其中蛇纹岩与硼镁铁矿互层,也是矿区范围内铀、磷和稀土元素赋存的层位(图4). 矿区变质沉积岩地层变形强烈,褶皱构造发育,主要的翁泉沟向斜属区域范围内虎皮峪-翁泉沟-红石砬子复式背斜的次级褶皱构造,主矿体以及附近的铁、磷矿点的产出均受到褶皱构造的控制. 矿区发育近南北向、北东向和北西向3组主要断

裂构造,其中近南北向和北东向断裂较晚,为破矿构造或与矿化关系不大,而北西向构造对矿体有一定控制作用. 古元古代二长花岗岩是矿区出露的主要侵入岩,与区域范围内古元古代片麻状花岗岩岩石学特征相近^[67-68].

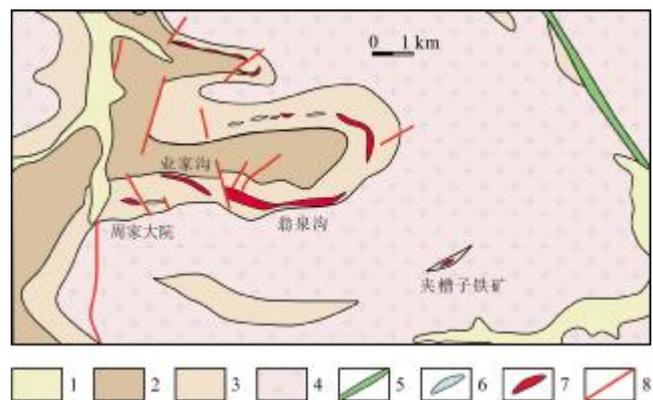


图4 辽东地区翁泉沟硼矿地质图
(据文献[66]修改)

Fig. 4 Geological map of Wengquangou boron deposit in eastern Liaoning
(Modified from Reference [66])

1—第四系(Quaternary); 2—里尔峪组一段(1st mem. of Lieryu fm.); 3—里尔峪组二段(2nd mem. of Lieryu fm.); 4—古元古代片麻状二长花岗岩(Paleoproterozoic gneissic monzogranite); 5—辉绿岩脉(diabase dike); 6—磷矿体(phosphorus orebody); 7—硼镁铁矿体(ludwigite orebody); 8—断裂(fault)

翁泉沟硼铁矿体严格受向斜构造控制,局部被后期断裂构造破坏. 进一步分为两个含矿层,其一分布在翁泉沟、业家沟和东台子地区,另一个分布在周家大院一带^[69]. 磁铁矿型、硼镁石型、硼镁石-磁铁矿型和含硼镁铁矿-磁铁矿型是主要的4种矿石类型. 主要矿石矿物为硼镁铁矿、磁铁矿、硼镁石和遂安石,脉石矿物有蛇纹石、镁橄榄石、透辉石、透闪石等. 围岩蚀变主要发育有透闪石化、蛇纹石化、金云母化和电气石化,其中蛇纹石化规模较大.

2.3 杨木杆硼矿

杨木杆硼矿是辽宁省宽甸县砖庙-杨木杆硼矿田内的一处中型硼矿床,该矿田包括了杨木杆、栾家沟、二人沟、花园沟、大西岔等硼矿,其中杨木杆硼矿以较高的硼矿石品位而著名. 该矿床平均矿石品位约10.3%,且是富硼的硼镁石型矿石,是辽东地区唯一没有硼镁铁矿型矿石的硼矿^[70].

矿区出露地层主要为古元古代里尔峪岩组和高家峪岩组。里尔峪岩组地层是矿区主要的赋矿围岩,又可分为两个岩性段:一是黑云母二长变粒岩夹薄层角闪电气变粒岩,二是电气钾长变粒岩夹薄层黑云母变粒岩、电英岩,含蛇纹石化大理岩、金云母岩及含硼蛇纹岩。高家峪组地层出露面积少,局部见与里尔峪组电气变粒岩呈不整合产出,主要岩性为含墨夕线石榴黑云变粒岩、黑云母变粒岩。矿区范围内杨木杆褶皱是主要的构造,呈近东西向展布,卷入的地层主要为电气钾长变粒岩夹蛇纹石化大理岩、含硼蛇纹岩等(图5)。矿区还发育后期北西向断裂,局部错断早期古元古代地层及后期脉岩,该断裂体系与区域范围内中生代北西向断裂一致。矿区东侧出露变形的古元古代片麻状二长花岗岩,其变形特征与周围里尔峪岩组变粒岩特征接近。已发现的 I 至 V 号矿体,经后期工程揭露和分析认为原为同一条矿体。矿石矿物硼镁石的产出形式主要有纤维状硼镁石和少量板状硼镁石两种,与之相关的脉石矿物有镁橄榄石、铬白云母、水镁石、电气石、白云石、蛇纹石等。矿石主要发育变晶和交代残余结构,此外脉石中还发育变余结构等。不管是贫矿石还是富矿石中,手标本和显微镜尺度下均可以看到后

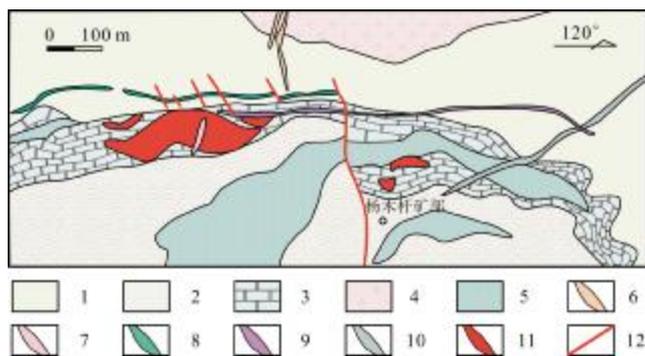


图5 辽东地区杨木杆硼矿地质图

(据[70-71]修改)

Fig. 5 Geological map of Yangmugan boron deposit in eastern Liaoning

(Modified from References [70-71])

1—黑云母二长变粒岩 (biotite monzogranulite); 2—电气钾长变粒岩 (tourmaline K-feldspar granulite); 3—蛇纹石化大理岩 (serpentinized marble); 4—片麻状二长花岗岩 (gneissic monzogranite); 5—斜长角闪岩 (plagioclase amphibolite); 6—电气伟晶岩 (tourmaline pegmatite); 7—角闪石伟晶岩 (hornblende pegmatite); 8—煌斑岩 (lamprophyre); 9—正长斑岩 (syenite porphyry); 10—闪长玢岩 (diorite porphyrite); 11—硼矿体 (boron orebody); 12—断裂 (fault)

期纤维状硼镁石交代早期富镁的蛇纹石等矿物,被交代的蛇纹石呈孤岛状、骸晶状产出在矿石之中。矿区常发生的蚀变包括蛇纹石化、水镁石化、透闪石化、绢云母化、滑石化等。

2.4 高台沟硼矿

高台沟硼矿位于吉林省集安市清河镇一带,发现于20世纪60年代,为硼镁石型硼矿^[4]。

高台沟硼矿区出露的地层为古元古代集安岩群变质岩,主要为蚂蚁河岩组,基本对应于辽宁省的里尔峪岩组。矿区出露的蚂蚁河岩组以蛇纹石化大理岩、蛇纹岩为主,还有电气变粒岩、黑云变粒岩和钠长浅粒岩,同时还包括了部分混合岩(图6),成分大致与辽宁省内片麻状二长花岗岩相当。矿区内的主要构造包括轴向北北西、倾向南西的高台沟向斜,以及主体北北向、北东向和近东西向的3组断裂带。矿区内岩浆岩不甚发育,仅见少量闪长玢岩脉沿后期中生代断裂产

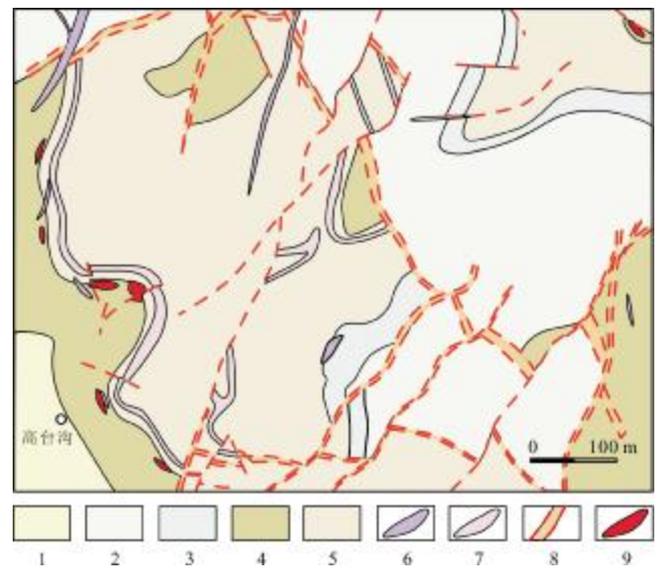


图6 吉南地区高台沟硼矿地质图

(据文献[72]修改)

Fig. 6 Geological map of Gaotaigou boron deposit in southern Jilin

(Modified from Reference [72])

1—第四系 (Quaternary); 2—大东岔岩组夕线石片麻岩、变粒岩、片岩 (sillimanite gneiss, granulite and schist of Dadongcha rock fm.); 3—荒岔沟组变粒岩、斜长片麻岩 (granulite and plagioclase gneiss of Huangchagou fm.); 4—蚂蚁河组浅粒岩 (leucoplexite of Mayihe rock fm.); 5—蚂蚁河岩组混合岩 (migmatite of Mayihe rock fm.); 6—闪长玢岩 (diorite porphyrite); 7—电气石变粒岩 (tourmaline granulite); 8—断裂带 (fault zone); 9—硼矿体 (boron orebody)

出. 已发现的 11 条工业矿体主要为隐伏矿体, 呈似层状、透镜状产出在蚂蚁河岩组赋矿地层中, 产状与围岩基本一致, 显示共同经历了变质变形的特征. 矿体倾角一般在 10~25° 之间, 厚度通常不超过 20 m, 且品位分布不均匀^[73]. 矿石矿物主要为硼镁铁矿, 次为硼镁石, 以及少量遂安石. 其中硼镁石以纤维状硼镁石为主, 显示了后期变质成因硼镁石特征. 脉石矿物有蛇纹石、方解石、菱镁矿、白云石、磁铁矿、金云母、滑石等. 矿区的围岩蚀变有蛇纹石化、金云母化、滑石化、硅化等.

3 辽东硼矿成矿模式研究

3.1 典型硼矿矿化蚀变

通过对辽东-吉南地区主要典型硼矿考察发现, 硼矿范围内及附近发育强烈的特征蚀变, 包括成矿早期和主成矿期的电气石化、金云母化、透闪石化、蛇纹

石化, 以及成矿之后的纤维状硼镁石化、水镁石化、滑石化等(图 7). 电气石化发育范围较广, 广泛分布在矿区内片麻状二长花岗岩、变粒岩及硼矿体内. 可以识别出早期电气石化与造山带主变质事件吻合(图 7a), 晚期脉状电气石化比硼矿主成矿期及金云母化、透闪石化等稍晚(图 7b). 金云母化分布在靠近硼矿体附近, 蚀变强烈, 可见主要由金云母组成的金云母岩(图 7b). 透闪石与硼镁石、遂安石等矿石矿物共生产出(图 7c、d), 也分布在近矿的里尔峪组蛇纹石化橄榄岩、电气变粒岩中. 蛇纹石化则是另一种分布范围较广和强烈的蚀变类型, 不论是硼镁铁矿型矿体(图 7e、f), 还是硼镁石型硼矿, 蛇纹石化主要发育在富镁大理岩附近, 并与硼镁石具有密切的产出关系(图 7g).

成矿期后的蚀变以纤维状硼镁石化和弱蛇纹石化为主. 纤维状硼镁石化发生在早期板状硼镁石及柱状硼镁石等矿石矿物内, 呈纤维状产出, 与蛇纹石、蛇纹

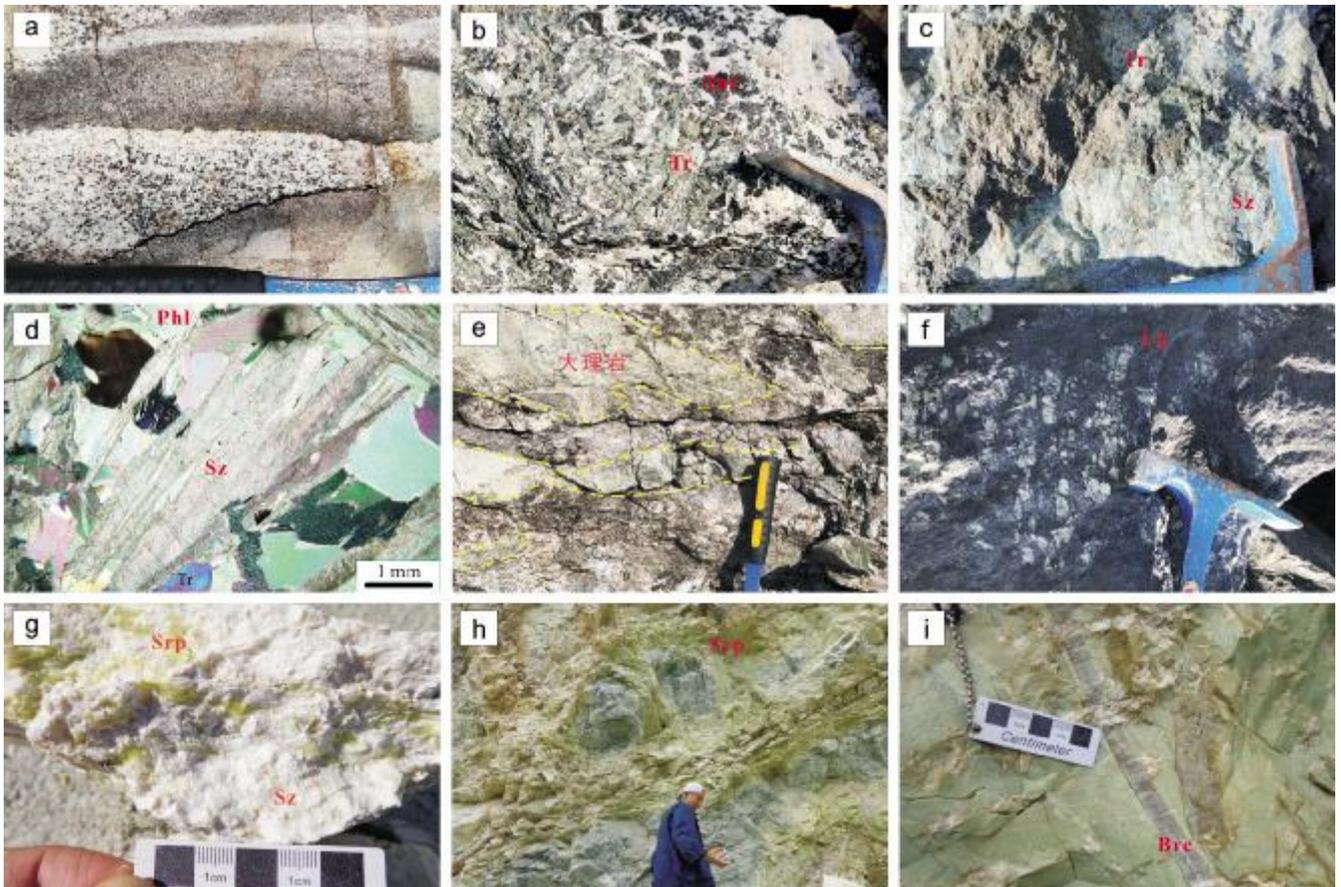


图 7 辽东-吉南成矿带主要硼矿床蚀变照片

Fig. 7 Alteration photographs of main boron deposits in eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt

Brc—水镁石(brucite); Lg—硼镁铁矿(ludwigite); Phl—金云母(phlogopite); Tr—透闪石(tremolite); Tur—电气石(tourmaline); Srp—蛇纹石(serpentine); Sz—硼镁石(szaibelyite)

石化大理岩产出关系密切;成矿期后蛇纹石化主要受构造控制,明显为小范围热液蚀变活动显示(图 7h)。成矿后的水镁石化和滑石化主要发育在富镁大理岩和靠近硼矿体的地段,水镁石主要呈细脉状产出(图 7i)。

3.2 硼矿成矿时代研究

辽东-吉南地区硼矿体多呈似层状、透镜状产出,早期研究多利用古元古界里尔峪岩组(蚂蚁河组)的年龄来限定硼矿成矿时代,认为硼成矿年龄在 2 150~2 200 Ma^[74]。虽然目前也没有直接针对矿石矿物的测年手段,后期研究者利用了其他方法对硼矿成矿时代予以限定。概括起来有以下 3 种: 1) 直接利用蚀变围岩锆石 U-Pb 年龄。张艳飞等^[75]在后仙峪硼矿 501 矿段采集了硼矿顶板的 3 件电气石岩样品,利用锆石 U-Pb 测年手段获得了约 2 170 Ma 的岩浆锆石年龄,代表了电气石岩原岩的形成时代;同时获得了 1 889~1 906 Ma 的锆石变质边年龄,认为代表电气石岩遭受变质作用的时期,也代表了硼矿的成矿时代。付燕刚等^[76]同样在后仙峪硼矿区采集的含电气混合花岗岩(片麻状二长花岗岩),也获得了类似的年龄结果,分别为 2 157 Ma 和 1 932 Ma,代表了原岩年龄和变质作用年龄。Hu 等^[77]在翁泉沟获得了约 2 130 Ma 的变粒岩和橄榄玄武岩锆石年龄,认为代表了原岩和初始硼矿沉积时代。2) 利用硼矿伴生矿物测年。在翁泉沟硼矿开展的成矿时代研究中,赵宇霆^[59]利用与硼镁铁矿石伴生的晶质铀矿开展了 U-Pb 测年,获得了 1 896~1 908 Ma 和 1 805 Ma 两组结果,并认为 1 805 Ma 能够代表硼矿成矿时代;路孝平等^[78]利用与遂安石共生的金云母 Pb-Pb 等时线年龄测试,获得了 1 920 Ma 的等时线年龄。3) 根据矿体、脉体间穿插关系,利用脉岩 U-Pb 年龄限定成矿时代。笔者在翁泉沟硼矿开展考察时发现露天采场东段北壁一侧花岗斑岩脉穿过硼镁铁矿体,通过对花岗斑岩开展锆石 U-Pb 年龄测试,获得了 1 842 Ma 的不一致曲线上交点年龄^[79],硼矿成矿时代不晚于该年龄。

利用不同的方法限定的硼矿成矿时代结果相近,主要分为两个阶段:一是赋矿围岩和初始硼矿形成于 2 130~2 170 Ma;二是硼矿主成矿年龄与辽吉造山带的变质时代一致,在 1 900 Ma 左右。

3.3 硼矿同位素地球化学特征

B、Mg 等非常规同位素地球化学分析在全面理解

硼矿成矿作用方面提供了良好思路^[80-82]。前人针对辽东-吉南地区多个硼矿开展了此类工作。本研究系统收集了前人在辽宁后仙峪硼矿、翁泉沟硼矿、砖庙硼矿田以及吉林高台沟硼矿内硼镁石、硼镁铁矿等硼矿矿石矿物及围岩全岩等 B 同位素及 Mg 同位素测试数据,统一作图分析(图 8、9),为增加对比添加了铍子峪镁矿的 Mg 同位素测试结果。由于篇幅限制,本文仅列出相应图件,原始数据详见相关原始参考文献。

从图 8 中可以看出,在辽东-吉南成矿带典型硼矿内不同硼矿的矿石矿物具有相近的 $\delta^{11}\text{B}$ 同位素组成:硼镁铁矿分别为 7.1‰~8.3‰(翁泉沟硼矿^[68])和 8.7‰~12.32‰(高台沟硼矿^[72-73]),硼镁石分别为 11.2‰~12.7‰(后仙峪硼矿^[77])、7.4‰~7.8‰(翁泉沟硼矿^[68])、9.3‰~12.7‰(砖庙硼矿^[3,77,96]),遂安石为 10.2‰~12.6‰(砖庙硼矿^[96])。与标准 B 同位素储库相比,硼矿石的 $\delta^{11}\text{B}$ 同位素落在了原始地幔、元古宇地壳以及海相蒸发岩之间(图 8)。而硼矿围岩中常见的蚀变矿物电气石则具有较大差异:从翁泉沟硼矿中的 -8.3‰~-9.9‰^[77],到砖庙硼矿的 5.7‰~10.9‰^[77],再到后仙峪硼矿的 1.2‰~8.4‰^[77]和 2.7‰~7.2‰^[97]。与之相似,辽河岩群里尔峪岩组变粒岩、蛇纹石化橄榄岩等围岩的全岩 B 同位素组成分布范围也较大,在 1.8‰~12.9‰之间^[3,77,98-99]。

通过硼同位素分析结果可以看出:1) 硼镁石型硼矿(俗称“白硼”)的主要矿石矿物(硼镁石、遂安石等)与硼镁铁矿型硼矿(俗称“黑硼”)中的硼镁铁矿 B 同位素组成基本一致,反映了白硼与黑硼二者经历的成矿过程相似,应为同一成矿事件;2) 含硼矿物的 B 同位素组成与原始地幔存在较大差异,暗示硼矿直接来源于地幔的可能性不大,硼矿区出露的基性、超基性岩可能不直接成矿,但能够提供部分成矿物质,与硼成矿之间联系需进一步研究;3) 辽东地区硼矿中电气石(电气石化)的 B 同位素组成与硼镁石等硼矿化具有明显差异,反而与硼矿的蚀变围岩类似,具有相对分散的 B 同位素组成,暗示了电气石化可能仅为近矿围岩蚀变,并不为硼成矿提供直接的物质来源;4) 硼矿石矿物的硼同位素与 2.2 Ga 地壳岩石和蒸发岩具有更多相似性,指示了硼成矿物质更多来自变质岩系,硼成矿主要与辽河岩群早期火山沉积建造和陆源碎屑建造有关。

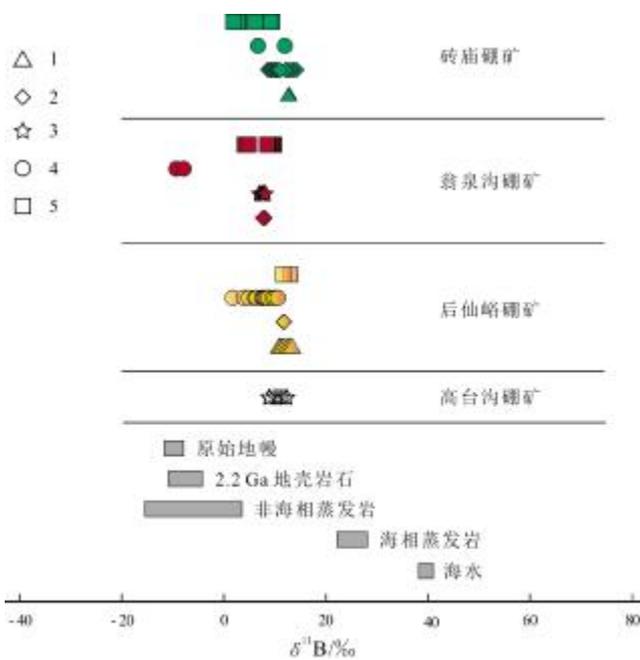


图 8 辽东-吉南成矿带主要硼矿床 B 同位素分布图
(数据据文献[68, 72-73, 77, 83-85, 96])

Fig. 8 B isotope distribution of main boron deposits in eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt
(Data from References [68, 72-73, 77, 83-85, 96])

1—硼镁矿 (boromagnesite); 2—硼镁石+遂安石 (szaibelyite & suanite);
3—硼镁铁矿 (ludwigite); 4—电气石 (tourmaline); 5—蚀变围岩 (altered wallrock)

在以往研究中, Mg 同位素也被用来限定硼矿的成矿物质来源、成矿流体等. 从图 9 中可以看出, 硼镁石矿的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 同位素组成较集中, 在 $-0.62\text{‰} \sim -0.4\text{‰}$ 之间; 翁泉沟及后仙峪硼矿的蛇纹岩、蛇纹石化橄榄岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 同位素组成与之最为接近, 在 $-0.8\text{‰} \sim -0.44\text{‰}$ 和 $-0.54\text{‰} \sim -0.39\text{‰}$ 之间. 相比之下, 围岩大理岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 同位素值更低, 在 $-1.48\text{‰} \sim -1.07\text{‰}$ 之间, 在白云岩和萨布哈白云岩 Mg 同位素储库值范围内^[58, 100]. 通过收集前人 Mg 同位素分析结果可以看出, 硼矿石具有和以蛇纹岩及大理岩为代表的变质沉积岩系, 以及以蛇纹石化橄榄岩为代表的超基性岩均较接近的特征 (图 9), 指示了硼矿成矿可能与二者均有一定联系, 硼成矿的物质来源可能不是单一来源.

3.4 硼矿成矿模式

辽东-吉南地区硼矿成矿过程经历了初期沉积、变质成矿和后期改造等主要阶段.

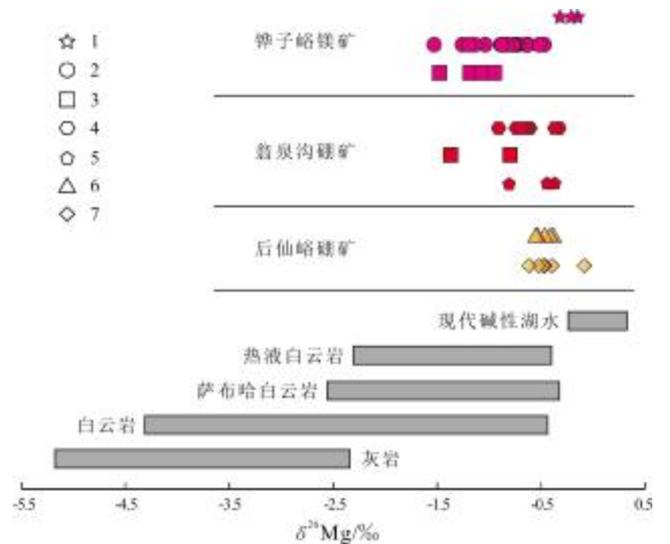


图 9 辽东-吉南成矿带主要硼矿床 Mg 同位素分布图
(数据据文献[58, 86-95, 99-100])

Fig. 9 Mg isotope distribution of main boron deposits in eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt
(Data from References [58, 86-95, 99-100])

1—滑石 (talc); 2—菱镁矿 (magnesite); 3—大理岩 (marble); 4—菱镁矿石 (magnesite ore); 5—蛇纹岩 (serpentinite); 6—硼镁矿 (boromagnesite); 7—蛇纹石化橄榄岩 (serpentinized peridotite)

3.4.1 初期沉积阶段

古元古代初期大约 2.2~2.1 Ga 期间, 南东侧古大洋向太古宙龙岗地块俯冲, 形成了早期岩浆弧, 伴随着俯冲继续, 在岩浆弧后和龙岗地块的大陆之间形成了一个较为稳定的弧后盆地. 弧后盆地的拉张环境造就了该时期沉积了里尔峪岩组 (蚂蚁河岩组) 含硼火山建造, 包括基性火山岩、橄榄岩、初始富硼沉积岩等, 也包括一些中酸性花岗质侵入体、辉绿岩脉等 (图 10 a), 这些沉积物构成了辽吉造山带丰富的硼、钴、镍、铅锌等成矿物质基础. 稍后沉积了以辽宁大石桥岩组 (吉林花山岩组和珍珠门岩组) 为代表的碳酸盐岩建造, 产出世界级菱镁矿等巨量富镁岩石组合, 火山建造和碳酸盐岩建造为最终的硼镁石和硼镁铁矿石成矿奠定了物质基础.

3.4.2 变质成矿阶段

随着大洋的俯冲, 古陆块之间发生了碰撞拼合, 大约在 1.95~1.85 Ga 间发生了强烈的造山以及变质和变形作用. 变质作用由浅到深依次为绿片岩相、角闪岩相和麻粒岩相, 甚至局部能够达到岩浆作用边界, 形成

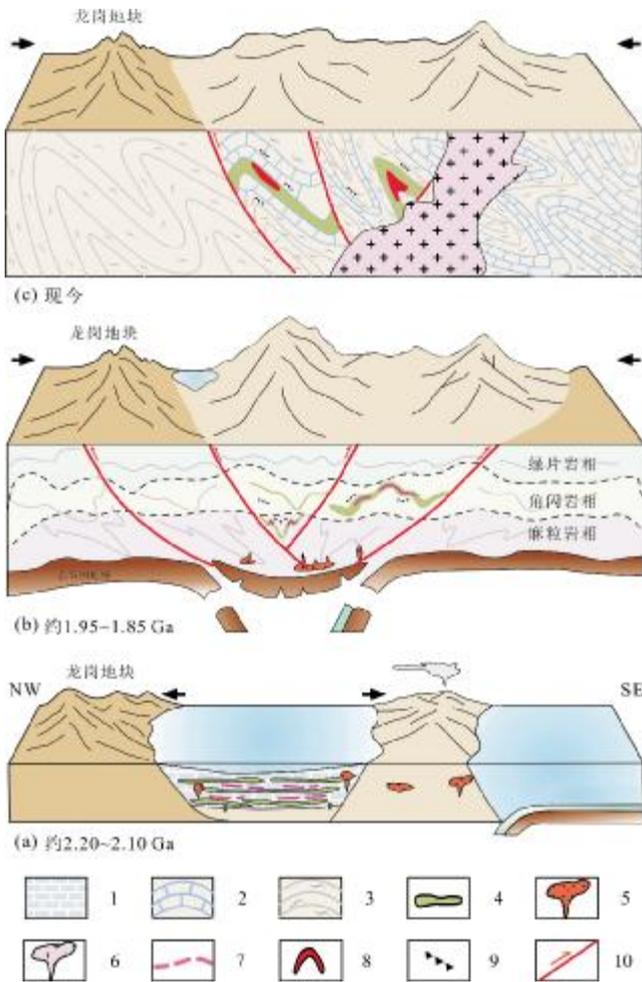


图 10 辽东-吉南成矿带硼矿成矿模式图

(底图据文献[10, 51, 77]修改)

Fig. 10 Metallogenic model of boron deposits in eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt

(Modified from References [10, 51, 77])

1—古元古代碳酸盐岩原始建造 (original formation of Paleoproterozoic carbonate rock); 2—古元古代碳酸盐岩建造 (Paleoproterozoic carbonate rock formation); 3—古元古代其他建造 (other Paleoproterozoic formation); 4—古元古代基性、超基性岩 (Paleoproterozoic basic and ultrabasic rock); 5—古元古代花岗岩 (Paleoproterozoic granite); 6—中生代花岗岩 (Mesozoic granite); 7—初始硼矿体 (original boron orebody); 8—硼矿体 (boron orebody); 9—电气石化 (tourmalinization); 10—断裂 (fault)

原地重熔的花岗岩类。硼矿的形成主要集中在角闪岩相到麻粒岩相之间^[1, 101], 根据人工合成实验的结果, 硼镁铁矿一类矿物形成温度较高, 可高达 680 °C, 遂安石可稳定存在于 450~600 °C^[102-103]。在高温和高压环境下, 随着变质作用进行, 一些矿物的脱水脱气促进了硼由初始富集状态向稳定的硼镁石和硼镁铁矿等转

化。但是由于硼元素化学性质活泼, 容易形成角闪石而分散在变质岩系中, 只有在有效的圈闭空间中才能得以有效保存。由于早期或同时期形成的基性火山岩和超基性岩相比中酸性火山岩和火山碎屑岩更致密, 对于含硼成矿流体的圈闭起到了一定保护作用, 所以不管是在角闪岩相变质作用下还是变质程度更高环境下, 硼矿体都优先聚集在圈闭空间内。同时硼矿石的形成还需要大量的镁质, 根据 Mg 同位素研究结果, 更可能的镁质来源还是富镁大理岩这种在较低温度和压力下更容易进入流体相的富镁来源。这一点从目前发现的硼矿中发现石膏一类蒸发矿物也能够得到印证。靠近矿体部分形成了强烈的电气石化, 以及富镁基性岩蚀变的蛇纹石化、透闪石化、金云母化等(图 10b)。由于局部变质程度较高, 可能达到了麻粒岩相范畴, 早期弧陆碰撞阶段形成的花岗岩以及长英质岩石经历了强烈的变质作用而形成片麻状花岗岩类。

3.4.3 后期改造

尽管硼矿形成在一定构造圈闭空间内相对稳定, 但进入中生代之后, 华北克拉通经历了来自不同方位的构造岩浆作用影响, 硼矿体也经受构造和后期热事件影响而发生了改造。早期硼矿体和近矿基性岩都遭受了蚀变, 早期形成的硼矿矿石矿物变为纤维状硼镁石, 提高了硼矿石品位, 辽宁省宽甸地区杨木杆硼矿就是一个典型; 近矿的基性岩中也能够观察到明显的构造热液蚀变现象。另外, 围岩中富镁岩石也发生了滑石化和水镁石化等。后期构造改造使得造山期形成的硼矿体形态支离破碎, 更加复杂(图 10c)。

4 硼矿找矿思考与结论

4.1 制约辽东地区硼矿找矿的主要因素

辽东-吉南地区作为国内最主要的硬岩型硼矿产区, 主要的硼矿都在 20 世纪勘查过程中被发现, 近些年来硼矿找矿成果突破不大, 究其原因可能有以下主要几点。

1) 古元古代含硼火山建造和碳酸盐岩沉积建造填图有待加强。虽然经历了多轮的地质调查项目填图, 但针对古元古代辽吉造山带内特征建造的岩性填图较少。比如, 按照以往的传统将蛇纹石化橄榄岩、橄榄大理岩等基性岩块归入里尔峪岩组、蚂蚁河岩组等史密斯地层的做法不再合适; 再者填图过程中, 对不同岩性

组合之间的建造重视不足,而过分强调各个“组”之间的岩性归并与对比.上述问题也可能归咎于辽吉地区局部遭受的变质作用过强,难以开展详细的原岩建造恢复.

2) 构造形态恢复有待加强.总结辽东-吉南地区硼矿成矿模式过程中注意到,构造对于硼矿体最终就位具有明显控制作用,成矿后中生代构造对于矿体也有明显的错动、破坏作用.虽然前期勘查中就注意到硼矿的产出与古元古代复背斜和复向斜具有一定联系,但对于辽吉造山带整体复式褶皱的恢复不够.可能是由于辽东-吉南地区地表覆盖较厚,对于以往填图过程中的中等尺度构造恢复有待加强,该项工作与上述建造填图联合开展会更具成效.

3) 缺少直接针对硼矿勘查的方法手段.经过几十年的硼矿勘查工作,地表出露的硼矿体已大致查明.由于B元素的化学性质较活泼,地球化学测量结果中发现的B元素异常范围又较大,具有一定距离的迁移,单纯利用化探手段难以达到有效找矿效果,更多需要结合物探手段.通过总结资料发现:①磁法测量在硼镁铁矿型硼矿找矿中具有优势.硼镁铁矿型矿石常与磁铁矿共生,具有较强的磁异常,利用磁法测量通常能够比较有效地追索该类型硼矿体.辽宁省地质勘探矿业集团近年来在翁泉沟硼矿外围获得了一定的找矿成果就有赖于磁法测量.②“硼镁石型”硼矿找矿需多种手段的联合解释.鉴于基性、超基性岩块与硼矿体的密切产出关系,通常将其作为“含矿层位”指导找矿.在此过程中,供电功率在200 kW的大功率激电装置,联合可控源音频大地电磁法在找矿中具有一定成功应用^[104],高精度磁测也有成功应用案例^[105].

4.2 辽东-吉南地区硼矿找矿思考

根据总结的硼矿成矿模型,结合目前资料,辽东-吉南地区硼矿找矿应以就矿找矿为主,以古元古代含硼火山建造和富镁碳酸盐岩建造为背景,筛选中比例尺B、Mg地球化学测量异常,重点是其中的高磁和大功率激电异常.通过恢复有利赋矿构造空间,圈定有利找矿靶区,进行深部钻探验证,探获新的硼矿储量.

新一轮硼矿战略性矿产找矿突破行动布署中,应注重以下几方面工作:1)重新部署辽东-吉南成矿带重点地区古元古代建造构造填图,特别是变质程度较高、构造变形强烈地区,通过构造恢复和变质岩原岩

恢复,从基础地质方面提供新的找矿有利地段和有利成矿地质体;2)尝试新的地球物理勘查方法,如广域电磁、人工地震、地震频率谐振勘探技术等非传统硼矿物探找矿方法,重新筛选有利硼矿找矿靶区,再进行验证;3)利用已有勘查成果的大数据统计、分析,开展人工智能学习,进行辽东-吉南地区硼矿勘查模型的三维地质建模,指导硼矿找矿.

致谢:新一轮硼矿战略性矿产找矿突破行动布局实施以来,得到了辽宁省自然资源厅、吉林省自然资源厅、辽宁省地矿集团、吉林省地质调查院、辽宁省第五地质大队有限责任公司、辽宁省第七地质大队有限责任公司、辽宁省化工地质勘查院有限责任公司等东北地区地勘单位领导的热情帮助,也得到了中国地质调查局沈阳地质调查中心实验室的鼎力支持,在此一并感谢!感谢审稿专家提出的建设性修改意见,感谢编辑部老师在论文出版中付出的辛勤劳动!

参考文献(References):

- [1]中国科学院地质研究所.东北内生硼矿床的矿物组成和矿床成因研究[M].北京:科学出版社,1974:1-36.
Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Mineral composition and genesis of endogenous boron deposits in Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 1974: 1-36. (in Chinese)
- [2]彭齐鸣,许虹.辽东-吉南地区早元古宙变质蒸发岩系及硼矿床[M].长春:东北师范大学出版社,1994:1-235.
Peng Q M, Xu H. The Paleoproterozoic metaevaporitic and boron deposits in eastern Liaoning and southern Jilin [M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1994:1-235. (in Chinese)
- [3]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.
- [4]刘敬堂,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,2007:1-246.
Liu J D, Xiao R G, Wang W W, et al. Regional metallogenesis of borate deposit in eastern Liaoning, China [M]. Beijing: Geology Press, 2007:1-246.
- [5]林秋婷,陈晨,刘海洋.硼的地球化学性质及其在俯冲带的循环与成矿初探[J].岩石学报,2020,36(1):5-12.
Lin C, Chen C, Liu H Y. Boron prospecting based on boron cycling in subduction zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(1): 5-12.
- [6]焦森,郑厚义,屈云燕,等.全球硼矿资源供需形势分析[J].国土资源情报,2020(10):85-89.

- Jiao S, Zheng H Y, Qu Y Y, et al. Supply and demand situation of global boron resources [J]. *Land and Resources Information*, 2020 (10):85-89.
- [7]姜春潮. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1987:281-287.
- Jiang C C. Precambrian geology of the eastern part of Liaoning and Jilin [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1987:281-287. (in Chinese)
- [8]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.
- [9]白瑾, 黄学光, 王惠初, 等. 中国前寒武纪地壳演化[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 1996: 28-127.
- Bai J, Huang X G, Wang H C, et al. Evolution of the crust in Precambrian of China [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1996:28-127. (in Chinese)
- [10]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.
- [11]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[M]. 北京: 科学出版社, 2018:241-255.
- Zhai M G, Zhang L C, Chen B, et al. Precambrian major geological events and mineralization in North China Craton [M]. Beijing: Science Press, 2018: 241-255. (in Chinese)
- [12]李东涛, 张朋, 赵岩, 等. 辽东-吉南成矿带地质背景与矿产[M]. 北京: 地质出版社, 2021:1-56.
- Li D T, Zhang P, Zhao Y, et al. Geological setting and mineral resources of the Liaodong-Ji'nan metallogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021: 1-56. (in Chinese)
- [13]Helvacı C, Alonso R N. Borate deposits of Turkey and Argentina: A summary and geological comparison [J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2000, 9(1): 1-27.
- [14]Helvacı C, Öztürk Y Y, Emmermann A. Fluorescence survey of Turkish borate minerals: Comparative measurements of fluorescence spectra of the most important borate mineral species, Turkey [J]. *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 2017, 194(1): 1-17.
- [15]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.
- [16]Li Z, Li J, Chen B. Early Precambrian tectono-thermal events: Coupled U-Pb-Hf of detrital zircons from Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(15): 424.
- [17]Li Z, Wei C J, Chen B, et al. Late Neoproterozoic reworking of the Mesoproterozoic crustal remnant in northern Liaoning, North China Craton: A U-Pb-Hf-O-Nd perspective [J]. *Gondwana Research*, 2020, 80: 350-369.
- [18]张秋生, 杨振升, 刘连登. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1988:1-574.
- Zhang Q S, Yang Z S, Liu L D. Early crust and mineral deposits of Liaodong Peninsula, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:1-574.
- [19]卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[M]. 长春: 长春出版社, 1996:219-230.
- Lu L Z, Xu X C, Liu F L. Khondalite series in Early pre-Cambrian North China [M]. Changchun: Changchun Press, 1996:219-230. (in Chinese)
- [20]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.
- [21]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.
- [22]Li S Z, Zhao G C, Sun M, et al. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the eastern block of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 659-674.
- [23]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.
- [24]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.
- [25]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, 1993:47-89.
- Bai J. The Precambrian geology and Pb-Zn mineralization in the northern margin of North China platform [M]. Beijing: Geology Press, 1993:47-89. (in Chinese)
- [26]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.
- [27]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.
- [28] 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.
- [29] Li Z, Chen B, Wei C J, et al. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Insights from detrital zircon U-Pb geochronology, whole-rock Sm-Nd isotopes, and geochemistry [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 111: 711-732.
- [30] Li Z, Chen B, Wei C J. Is the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt (North China Craton) a rift? [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(1): 355-375.
- [31] Li Z, Chen B, Yan X L. The Liaohe Group: An insight into the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2019, 326: 174-195.
- [32] Yang C W, Liu J L, Yang H X, et al. Tectonics of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic belt in the Liaodong Peninsula, North China Craton: A review [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 176: 141-156.
- [33] Zhao Y, Lin S F, Zhang P, et al. Geochronology and geochemical characteristics of Paleoproterozoic syn-orogenic granitoids and constraints on the geological evolution of the Jiao-Liao-Ji orogenic Belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2021, 365: 106386.
- [34] Zhao Y, Lyu J C, Han X, et al. Geochronology and geological implications of Paleoproterozoic post-collisional monzogranitic dykes in the NE Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Minerals*, 2023, 13(7): 928.
- [35] Peng P, Wang X P, Windley B F, et al. Spatial distribution of ~1950-1800 Ma metamorphic events in the North China Craton: Implications for tectonic subdivision of the craton [J]. *Lithos*, 2014, 202-203: 250-266.
- [36] Xu Z H, Sun F Y, Xin W, et al. Formation and evolution of Paleoproterozoic orogenic belt in southern Jilin, Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Constraints from geophysics [J]. *Precambrian Research*, 2019, 333: 105433.
- [37] 于泓超. 胶-辽-吉造山带吉南地区古元古代沉积-岩浆作用及构造意义 [D]. 长春: 吉林大学, 2023: 1-151.
- Yu H C. Paleoproterozoic sedimentary-magmatism and its tectonic significance in the southern Jilin Province of Jiao-Liao-Ji orogenic belt [D]. Changchun: Jilin University, 2023: 1-151.
- [38] 刘俊来, 陈小宇, 张健, 等. 大陆地壳活动带片麻岩穹隆构造与分层流变 [J]. *地质学报*, 2022, 96(9): 3158-3181.
- Liu J L, Chen X Y, Zhang J, et al. Gneiss domes and stratified middle to lower crustal flow in continental mobile belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(9): 3158-3181.
- [39] Cai J, Liu F L, Liu P H, et al. Discovery of granulite-facies metamorphic rocks in the Ji'an area, northeastern Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton: Metamorphic *P-T* evolution and geological implications [J]. *Precambrian Research*, 2017, 303: 626-640.
- [40] Liu P H, Liu F L, Tian Z H, et al. Petrological and geochronological evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2019, 327: 121-143.
- [41] Wang X H, Oh C W, Wang X P, et al. The ~1.87 Ga granulite facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji belt and its tectonic implications [J]. *Lithos*, 2021, 392-393: 106081.
- [42] 朱裕生, 王全明, 张晓华, 等. 中国成矿区带划分及有关问题 [J]. *地质与勘探*, 1999, 35(4): 1-4.
- Zhu Y S, Wang Q M, Zhang X H, et al. Some problems on division of metallogenic belts in China [J]. *Geology and Prospecting*, 1999, 35(4): 1-4.
- [43] 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等. 中国成矿区带划分方案 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-138.
- Xu Z G, Chen Y C, Wang D H, et al. Scheme of the classification of the minerogenetic units in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-138.
- [44] 陈毓川. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-536.
- Chen Y C. The prospective evaluation of mineral resources in the main metallogenic regions in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-536. (in Chinese)
- [45] 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.
- [46] 中国地质调查局, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国地质调查局沈阳地质调查中心. 中国重要成矿区带成矿特征、资源潜力和选区部署——辽东-吉南成矿区 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016: 93-193.
- China Geological Survey, Institute of Mineral Resources of Chinese Academy of Geological Sciences, Shenyang Center of China Geological Survey. Metallogenic characteristics, resources potential and area selection of important metallogenic zones in China: Liaodong-Ji'an metallogenic zone [M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2016:

- 93–193. (in Chinese)
- [47] Tam P Y, Zhao G C, Liu F L, et al. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(1): 150–162.
- [48] Tian Z H, Liu F L, Windley B F, et al. Polyphase structural deformation of low- to medium-grade metamorphic rocks of the Liaohu Group in the Jiao-Liao-Ji orogenic belt, North China Craton: correlations with tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2017, 303: 641–659.
- [49] 陈井胜, 邢德和, 刘森, 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 Liaohu Group from the Liaoyang area, Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(9): 2792–2810.
- [50] 刘军, 李铁刚, 段超. 辽宁猫岭大型金矿床成岩成矿年龄及同位素地球化学特征[J]. *地质通报*, 2018, 37(7): 1325–1337.
- Liu J, Li T G, Duan C. Geochronology and isotopic geochemistry characteristics of the Maoling large gold deposit, Liaoning Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(7): 1325–1337.
- [51] Xu W, Liu F L. Geochronological and geochemical insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt, Sino-Korean Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193: 162–198.
- [52] Zhao Y, Zhang P, Li Y, et al. Geochemistry of two types of Palaeoproterozoic granites, and zircon U-Pb dating, and Lu-Hf isotopic characteristics in the Kuandian area within the Jiao-Liao-Ji belt: Implications for regional tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(11): 7564–7580.
- [53] 赵岩, 张朋, 毕中伟, 等. 辽东岫岩地区两类古元古代花岗岩年代学、地球化学及地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(11): 4072–4090.
- Zhao Y, Zhang P, Bi Z W, et al. Geochronology and geochemistry of two types of Paleoproterozoic granites and their geological implications in the Xiuyan area, Liaodong Peninsula[J]. *Earth Science*, 2020, 45(11): 4072–4090.
- [54] 赵岩, 杨宏智, 杨凤超, 等. 辽东半岛青城子矿田典型金矿成因: 来自硫、氢、氧同位素的证据[J]. *地质与资源*, 2020, 29(1): 21–28.
- Zhao Y, Yang H Z, Yang F C, et al. Genesis of the typical gold deposits in Qingchengzi orefield, Liaodong Peninsula: Evidences from S-D-O isotopes[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(1): 21–28.
- [55] 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: 来自平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2649–2674.
- Liu P H, Cai J, Zou L. Metamorphic $P-T-t$ path and its geological implication of the Sanjiazi 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.
- [56] 田忠华, 刘福来, 刘超辉, 等. 多期构造变形事件对吉林南部大横路 Cu-Co 矿床富集成矿的制约[J]. *地质学报*, 2023, 97(11): 3673–3695.
- Tian Z H, Liu F L, Liu C H, et al. Constraints of multi-stage tectonic deformational events on enrichment and mineralization of the Dahenglu Cu-Co ore deposit in southern Jilin Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(11): 3673–3695.
- [57] Misch D, Pluch H, Mali H, et al. Genesis of giant Early Proterozoic magnesite and related talc deposits in the Mafeng area, Liaoning Province, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160: 1–12.
- [58] 胡古月, 孙新胜, 郑军, 等. 辽东半岛海城-大石桥菱镁矿床成因探讨[J]. *地质学报*, 2022, 96(4): 1340–1355.
- Hu G Y, Sun X S, Zheng J, et al. The genesis of Haicheng-Dashiqiao magnesite deposits, Liaodong Peninsula [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(4): 1340–1355.
- [59] 赵宇霆. 辽宁凤城翁泉沟地区含铀硼铁矿床成岩成矿年代学研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018: 1–85.
- Zhao Y T. Diagenetic and metallogenic geochronology of uranium-bearing boron iron deposit in Wengquangou area, Fengcheng, Liaoning Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 1–85.
- [60] Zhao Y, Zhang P, Yang H Z, et al. Paleoproterozoic mineralization of the Lijiapuzi gold deposit in the Liaodong Peninsula, NE China: Constraints from $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age, S-Pb isotopes, and in situ analyses [J]. *Minerals*, 2022, 12(8): 971.
- [61] 薛建玲, 许虹, 高一鸣, 等. 辽宁后仙峪硼矿床中电气石的矿物学特征及其成岩成矿意义[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1386–1392.
- Xue J L, Xu H, Gao Y M, et al. Mineralogical characteristics of tourmaline in the Houxianyu boron deposit in Liaoning and their significance for rock and ore formation [J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1386–1392.
- [62] 李雪梅, 孙丰月, 李碧乐, 等. 辽东地区后仙峪及翁泉沟硼矿床流体包裹体特征研究[J]. *现代地质*, 2007, 21(4): 645–653.
- Li X M, Sun F Y, Li B L, et al. Study on the fluid inclusions from Houxianyu and Wengquangou borate deposits in eastern Liaoning Province [J]. *Geoscience*, 2007, 21(4): 645–653.
- [63] 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 辽东硼矿的成矿机制及成矿模式[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2008, 33(6): 813–824.
- Wang C Z, Xiao R G, Liu J D. Ore-forming genesis and model of Eastern Liaoning borate deposits [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(6): 813–824.
- [64] 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.
- [65]肖荣阁, 大井隆夫, 费红彩, 等. 辽东地区沉积变质硼矿床及硼同位素研究[J]. *现代地质*, 2003, 17(2): 137-142.
- Xiao R G, Takao O, Fei H C, et al. Sedimentary-metamorphic boron deposits and their boron isotopic compositions in eastern Liaoning Province[J]. *Geoscience*, 2003, 17(2): 137-142.
- [66]夏学惠, 阎飞, 赵玉海, 等. 辽东裂谷硼铁矿床地质及成矿作用[J]. *矿床地质*, 2006, 25(1): 83-88.
- Xia X H, Yan F, Zhao Y H, et al. Geological features and ore-forming process of uranium-bearing vonsonite deposit in Liaodong rift, eastern Liaoning Province, China [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(1): 83-88.
- [67]温德娟, 滕寿仁. 辽宁省翁泉沟铁硼矿床地球化学找矿模型初探[J]. *地质与资源*, 2014, 23(3): 256-260.
- Wen D J, Teng S R. Preliminary discussion on the geochemical prospecting model for the Wengquangou iron-boron deposit in Liaoning Province [J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(3): 256-260.
- [68]胡古月, 李延河, 范昌福, 等. 辽东翁泉沟硼镁铁矿床海相蒸发成因: 来自稳定同位素地球化学证据[J]. *矿床地质*, 2014, 33(4): 821-832.
- Hu G Y, Li Y H, Fan C F, et al. Marine evaporative genesis of Wengquangou ludwigite deposit in eastern Liaoning Province: Evidences from stable isotopic compositions [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(4): 821-832.
- [69]王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党. 辽东翁泉沟橄榄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 Wengquangou olivine basalt in Liaoning Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(5): 542-552.
- [70]谢宏远, 冯本智, 邹日, 等. 辽宁杨木杆硼矿床地质地球化学特征[J]. *矿床地质*, 1998, 17(4): 355-362.
- Xie H Y, Feng B Z, Zou R, et al. Geological and geochemical characteristics of the Yangmugan boron deposit, Liaoning Province [J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17(4): 355-362.
- [71]赵岩, 张朋, 毕中伟, 等. 沉积建造在辽东半岛古元古代杨木杆硼矿富集成矿过程中的重要作用[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(2): 207-219.
- Zhao Y, Zhang P, Bi Z W, et al. Key role of sedimentary formation played in the mineralization process of the Paleoproterozoic Yangmugan boron deposit in Liaodong Peninsula, NE China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(2): 207-219.
- [72]叶丽娜. 吉林东部前寒武纪热水沉积成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021:1-220.
- Ye L N. Research of Precambrian sedimentary exhalative metallogenesis in eastern Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2021:1-220.
- [73]张天旭. 吉林省集安市高台沟硼矿床地质特征及成因探讨[D]. 长春: 吉林大学, 2020:11-24.
- Zhang T X. The geological features and genesis discussion of Gaotaigou boron deposit in Ji'an City, Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020:11-24.
- [74]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.
- [75]张艳飞, 刘敬党, 肖荣阁, 等. 辽宁后仙峪硼矿区古元古代电气石岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(6): 985-999.
- Zhang Y F, Liu J D, Xiao R G, et al. The hyalotourmalites of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning: Zircon features and SHRIMP dating [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(6): 985-999.
- [76]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.
- [77]Hu G Y, Li Y H, Fan C F, et al. In situ LA-MC-ICP-MS boron isotope and zircon U-Pb age determinations of Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning Province, northeastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 1127-1141.
- [78]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.
- [79]赵岩, 李生辉, 杨中柱, 等. 辽东翁泉沟硼矿区二长花岗岩脉锆石 U-Pb 年龄及对成矿时代的制约[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 342-350.
- Zhao Y, Li S H, Yang Z Z, et al. Zircon U-Pb dating of monzogranite dikes in Wengquangou boron orefield, eastern Liaoning: Constraints on metallogenic age [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 342-350.
- [80]蒋少涌. 硼同位素及其地质应用研究[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 1-16.
- Jiang S Y. Boron isotope and its geological applications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(1): 1-16.

- [81]张生, 陈根文, Seward T M, 等. 硼在共存水蒸气-富硼熔体之间分配的实验研究及其地质意义[J]. 地球化学, 2014, 43(6): 583-591.
Zhang S, Chen G W, Seward T M, et al. Experimental study on boron distribution between coexisting water vapor and boron-rich melt and its geological implications[J]. *Geochimica*, 2014, 43(6): 583-591.
- [82]郑绵平, 陈文西, 齐文. 青藏高原火山-沉积硼矿找矿的新发现与远景分析[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 407-418.
Zheng M P, Chen W X, Qi W. New findings and perspective analysis of prospecting for volcanic sedimentary boron deposits in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(4): 407-418.
- [83]Chaussidon M, Albarède F. Secular boron isotope variations in the continental crust: An ion microprobe study[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 108(4): 229-241.
- [84]Chaussidon M, Marty B. Primitive boron isotope composition of the mantle[J]. *Science*, 1995, 269(5222): 383-386.
- [85]Swihart G H, Moore P B, Callis E L. Boron isotopic composition of marine and nonmarine evaporite borates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(6): 1297-1301.
- [86]Azmy K, Lavoie D, Wang Z R. Magnesium-isotope and REE compositions of Lower Ordovician carbonates from eastern Laurentia: Implications for the origin of dolomites and limestones[J]. *Chemical Geology*, 2013, 356: 64-75.
- [87]Galy A, Bar-Matthews M, Halicz L, et al. Mg isotopic composition of carbonate: Insight from speleothem formation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(1): 105-115.
- [88]Geske A, Goldstein R H, Mavromatis V, et al. The magnesium isotope ($\delta^{26}\text{Mg}$) signature of dolomites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 149: 131-151.
- [89]Geske A, Lokier S, Dietzel M, et al. Magnesium isotope composition of sabkha porewater and related (sub-)recent stoichiometric dolomites, Abu Dhabi (UAE) [J]. *Chemical Geology*, 2015, 393-394: 112-124.
- [90]Geske A, Zorlu J, Richter D K, et al. Impact of diagenesis and low grade metamorphism on isotope ($\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and elemental (Ca, Mg, Mn, Fe and Sr) signatures of Triassic sabkha dolomites[J]. *Chemical Geology*, 2012, 332-333: 45-64.
- [91]Immenhauser A, Buhl D, Richter D, et al. Magnesium-isotope fractionation during low-Mg calcite precipitation in a limestone cave: Field study and experiments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(15): 4346-4364.
- [92]Jacobson AD, Zhang Z F, Lundstrom C, et al. Behavior of Mg isotopes during dedolomitization in the Madison Aquifer, South Dakota[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(3/4): 446-452.
- [93]Lavoie D, Jackson S, Girard I. Magnesium isotopes in high-temperature saddle dolomite cements in the Lower Paleozoic of Canada [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 305: 58-68.
- [94]Shirokova L S, Mavromatis V, Bundeleva I A, et al. Using Mg isotopes to trace cyanobacterially mediated magnesium carbonate precipitation in alkaline lakes[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2013, 19(1): 1-24.
- [95]孙剑, 房楠, 李世珍, 等. 白云鄂博矿床成因的 Mg 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2890-2902.
Sun J, Fang N, Li SZ, et al. Magnesium isotopic constraints on the genesis of Bayan Obo ore deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(9): 2890-2902.
- [96]胡古月, 范昌福, 李延河, 等. 辽东砖庙矿区硼矿床的海相蒸发成因——来自硼、硫、碳同位素的证据[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 445-453.
Hu G Y, Fan C F, Li Y H, et al. Marine evaporative genesis of Mg-borate deposits in the Zhuanniao ore district, eastern Liaoning Province: Evidence from B, S, C isotope [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(4): 445-453.
- [97]Wang Z Q, Chen B, Yan X L. Geochemistry and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic amphibolites, NE China: Implications for the origin of borate deposit [J]. *Precambrian Research*, 2019, 326: 258-271.
- [98]Yan X L, Chen B. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic Houxianyu borate deposit, NE China: Implications for the origin of borate deposit [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 94: 252-266.
- [99]Dong A G, Zhu X K, Li Z H, et al. A multi-isotope approach towards constraining the origin of large-scale Paleoproterozoic B-(Fe) mineralization in NE China[J]. *Precambrian Research*, 2017, 292: 115-129.
- [100]Dong A G, Zhu X K, Li S Z, et al. Genesis of a giant Paleoproterozoic strata-bound magnesite deposit: Constraints from Mg isotopes [J]. *Precambrian Research*, 2016, 281, 673-683.
- [101]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-super large boron deposits in Liaoning and Jilin provinces, China [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998, 28(1): 1-15.
- [102]刘玉山. 遂安石的合成及其成因[J]. 岩矿测试, 1982, 1(4): 30-36, 80.
Liu Y S. Synthesis of Suanite and its origin[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1982, 1(4): 30-36, 80.

- [12]刘军, 武广, 邱华宁, 等. 大兴安岭北部砂宝斯金矿床含金石英脉⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其构造意义[J]. 地质学报, 2013, 87(10): 1570–1579.
- Liu J, Wu G, Qiu H N, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of gold-bearing quartz vein from the Shabaosi gold deposit at the northern end of the Great Xing'an Range and its tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(10): 1570–1579.
- [13]秦克章, 王之田, 潘龙驹. 满洲里-新巴尔虎右旗铜、钼、铅、锌、银带成矿条件与斑岩体含矿性评价标志[J]. 地质论评, 1990, 36(6): 479–488.
- Qin K Z, Wang Z T, Pan L J. Metallogenic conditions and criteria for evaluating the ore potentiality of porphyry bodies in the Manzhouli-Xinbaerhuyouqi Cu, Mo, Pb, Zn and Ag metallogenic belt [J]. Geological review, 1990, 36(6): 479–488.
- [14]陈祥. 内蒙古额仁陶勒盖银矿床稳定同位素研究[J]. 内蒙古地质, 2000(1): 11–16.
- Chen X. Study on stable isotope in Inner Mongolia Erentaolegai silver deposit [J]. Geology of Inner Mongolia, 2000(1): 11–16.
- [15]刘宝山, 张春鹏, 程招勋, 等. 黑龙江争光大型金矿成矿流体 He-Ar-S 同位素组成及成矿流体来源的示踪[J]. 中国地质, 2023, 50(3): 952–961.
- Liu B S, Zhang C P, Cheng Z X, et al. Source tracing and He-Ar-S isotopic compositions of ore-forming fluid in the Zhengguang large gold deposit, Heilongjiang Province [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 952–961.
- [16]Mi K F, Liu Z J, Li C F, et al. Origin of the Badaguan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Constraints from geology, isotope geochemistry and geochronology [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81: 154–172.
- [17]Mi K F, Liu Z J, Liu R B, et al. U-Pb Zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of the intrusions from Wunugetushan porphyry deposit, Northeast China: Implication for Triassic-Jurassic Cu-Mo mineralization in Mongolia-Erguna metallogenic belt [J]. International Geology Review, 2018, 60(4): 496–512.
- [18]吕志成, 张培萍, 段国正, 等. 内蒙古额仁陶勒盖银矿床锰矿物的矿物学初步研究[J]. 矿物岩石, 2002, 22(1): 1–5.
- Lü Z C, Zhang P P, Duan G Z, et al. Study on manganese minerals of E'rentaolegai silver deposit [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2002, 22(1): 1–5.
- [19]田京, 李进文, 王润和, 等. 内蒙古额仁陶勒盖地区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1092–1107.
- Tian J, Li J W, Wang R H, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical features of intrusions in Erentaolegai area of Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1092–1107.
- [20]陈毓川, 李兆鼎, 毋瑞身, 等. 中国金矿床及其成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1–465.
- Chen Y C, Li Z N, Wu R S, et al. Gold deposits and their metallogenic regularity in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 1–465. (in Chinese)

(上接第 508 页/Continued from Page 508)

- [103]黄作良, 王璞, 冯本智. 辽吉硼矿床矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1–145.
- Huang Z L, Wang P, Feng B Z. Mineralogy of boron deposits in Liaoning and Jilin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1–145. (in Chinese)
- [104]王猛, 张旭, 武奕立, 等. 物化探综合找矿方法在辽宁宽甸硼矿勘查中的应用 [J]. 矿产与地质, 2022, 36(1): 154–158.
- Wang M, Zhang X, Wu Y L, et al. Application of geophysical and geochemical exploration methods in the prospecting of boron deposit in Kuandian County of Liaoning [J]. Mineral Resources and Geology, 2022, 36(1): 154–158.
- [105]侯跃武, 王生志. 高精度磁法在找硼矿上的尝试——以牛皮闸硼矿为例 [J]. 化工矿产地质, 2005, 27(3): 185–188.
- Hou Y W, Wang S Z. Attempt of boron prospecting with high precision magnetic method: Take the example of Niupizha boron deposit [J]. Geology of Chemical Minerals, 2005, 27(3): 185–188.