



吉中-延边成矿带镍矿成矿规律与找矿方向

陈聪¹, 吴涛涛¹, 李爱², 张健¹, 卞雄飞¹, 李晓海¹, 孙求实¹,
苏飞¹, 杨佳林¹, 郇恒飞¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 青岛大学 计算机科学技术学院, 山东 青岛 266071

摘要: 吉中-延边成矿带是我国 12 个重要成矿带之一, 蕴含镍矿床(点)13 处, 镍资源储量超过 28 万吨, 是我国重要的镍矿资源基地。成矿带多期次构造岩浆活动强烈, 尤其在印支期造山后伸展背景下形成了一系列镁铁-超镁铁质岩群及与之相关的铜镍硫化物矿床。本次研究在红旗岭、长仁两处典型镍矿床基础上, 梳理成矿带内镍矿地质与成矿特征, 总结镍矿时空分布规律, 提取区域镍矿找矿标志。综合区域地质特征与重力、航磁等异常特征, 分析了吉中-延边成矿带铜镍硫化物矿床的找矿潜力, 探讨了镍矿找矿方向, 为下一步吉中-延边成矿带镍矿找矿行动部署提供科学依据。

关键词: 镍矿; 镁铁-超镁铁质岩; 成矿规律; 找矿方向; 吉中-延边成矿带

METALLOGENIC REGULARITY AND PROSPECTING DIRECTION OF NICKEL DEPOSITS IN CENTRAL JILIN-YANBIAN METALLOGENIC BELT

CHEN Cong¹, WU Tao-tao¹, LI Ai², ZHANG Jian¹, BIAN Xiong-fei¹, LI Xiao-hai¹,
SUN Qiu-shi¹, SU Fei¹, YANG Jia-lin¹, HUAN Heng-fei¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. College of Computer Science & Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong Province, China

Abstract: The Central Jilin-Yanbian metallogenic belt, one of the 12 important nickel mineralization belts in China, containing 13 nickel deposits (occurrences), with nickel reserves of more than 280 000 tons, is an important nickel resource base in China. There are intense multistage tectonomagmatic activities in the metallogenic belt, especially a series of ultramafic-mafic rock groups and related copper-nickel sulfide deposits were formed in the Indosinian post-orogenic extensional background. Through study on the two typical nickel deposits in Hongqiling and Changren, the paper sorts out the geological and metallogenic characteristics of nickel deposits, summarizes the spatiotemporal distribution regularity, and extracts the prospecting indicators. Based on the regional geological characteristics and gravity, aeromagnetic anomalies, the prospecting potential of copper-nickel sulfide deposits in Central Jilin-Yanbian

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-06-25. 编辑: 黄欣.

基金项目: 中国地质调查局项目“辽东-吉南成矿带宽甸-磐石地区铜镍矿产地质调查”(DD20230763); “东北地区区域成矿规律研究与总结”(DD20221678); “辽东-吉南成矿带战略性矿产调查”(DD20240059).

作者简介: 陈聪(1988—), 女, 博士, 高级工程师, 从事金属矿床成因与成矿规律研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//1010674241@qq.com

通信作者: 吴涛涛(1988—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事成矿规律与找矿预测研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//553583730@qq.com

metallogenic belt is analyzed, and the prospecting direction of nickel deposits is discussed to provide scientific basis for the further nickel prospecting deployment in the metallogenic belt.

Key words: nickel deposit; ultramafic-mafic rock; metallogenic regularity; prospecting direction; Central Jilin-Yanbian metallogenic belt

0 引言

镍是我国重要的战略性金属矿产资源之一^[1-2],被广泛应用于磁性材料和高温合金等领域,是新能源和航空航天等尖端新兴科技产业不可替代的关键金属^[3].我国镍矿富矿资源量少,国内需求缺口大,对外依存度居高不下^[4].鉴于此,加强镍矿典型矿床、区域成矿规律与找矿方向研究具有重要的现实意义.

与基性-超基性杂岩有关的岩浆硫化物矿床是镍、钴及铂族元素(PGE)的主要来源^[5].与全球岩浆型镍-铜-钴矿主要分布在克拉通不同,我国该类型矿床主要产出在造山带环境,多对应造山带碰撞后伸展背景,其储量及规模均较大,体现了“中国特色”^[6].我国造山带背景下形成的岩浆型镍(-铜-钴)矿主要分布在中亚造山带南缘及东昆仑造山带:如东昆仑造山带近年发现的夏日哈木镍钴矿床已达到世界级镍矿规模,同时还产出石头坑德、浪木日等一系列岩浆型镍矿^[7-8];中亚造山带分布有喀拉通克、黄山、黄山东、图拉尔根、红旗岭等大型矿床,被认为是长度超过4000 km、时间跨度达200 Ma的镍成矿“超带”^[6].“超带”中最古老的镍矿为早志留世菁布拉克矿床(~430 Ma)^[9-10],而最年轻的镍矿则集中分布在吉中-延边成矿带内,以红旗岭镍(-铜-钴)矿为代表(约220 Ma)^[11].

吉中-延边成矿带是我国12个重要成镍带之一^[6],目前已发现镍矿床(点)13处,其中大型1处(红旗岭)、中型1处(长仁)、小型9处(漂河川等),镍资源储量超过 28×10^4 t.带内镁铁-超镁铁质岩体十分发育,仅红旗岭地区就出露33处,长仁地区出露22处,漂河川一带出露约150处,显示吉中-延边成矿带具备优越的岩浆型镍矿形成条件和巨大的找矿潜力.本文旨在通过对吉中-延边成矿带镍矿资料进行综合整理,选取红旗岭和长仁镍(-铜-钴)矿床作为典型矿床,梳理成矿带镍成矿特征,全面总结镍矿成矿规律和找矿标志,并指出找矿方向,为吉中-延边成矿带进一步镍矿找矿勘查奠定基础.

1 吉中-延边成矿带基本特征

吉中-延边成矿带全称为吉中-延边(活动陆缘)Mo-Au-As-Cu-Ni-Zn-Fe成矿带(Ⅲ-55),隶属于滨太平洋成矿域(叠加在古亚洲洋成矿域之上)吉黑成矿省^[11].成矿带行政区划包括吉林省中东部、辽宁省北部以及黑龙江省南部等地区;大地构造位置处于华北板块与西伯利亚板块之间的中亚造山带的东段——兴蒙造山带的东南缘:南部以开原-海龙-富尔河-白金断裂为界,毗邻华北板块;东南部以图们江为界,与朝鲜“狼林地体”接壤;西部以沈阳-四平-德惠-逊克断裂为界,紧临松辽盆地;北部以长春-吉林-蛟河隐匿对接带、汪清-珲春隐匿对接带为界,与小兴安岭-张广才岭造山带相邻(图1).成矿带自古生代以来,先后经历了古亚洲洋和滨太平洋两大构造域的演化、叠加与转换.

吉中-延边成矿带前古生代地层主要包括新太古界老牛沟岩组残块,中新元古界塔东岩群,新元古界西保安岩组和青龙村岩群;古生代地层有寒武系漂河川组和江城岩组,奥陶系呼兰岩群、下二台岩群和放牛沟组,志留系头道沟岩组、桃山组及辽源群,泥盆系王家街组,石炭系通气沟组、余富屯组、鹿圈屯组及本溪组等,石炭-二叠系磨盘山组、石嘴子组及窝瓜地组等,二叠系双胜组、照北山岩组、寿山沟组、大河深组、范家屯组等.其中新元古界青龙村岩群、奥陶系呼兰岩群、二叠系寿山沟组和大河深组是带内镁铁-超镁铁质岩体的直接围岩.成矿带中、新生代地层亦较为发育,多沿断裂带和断陷盆地分布.

成矿带构造活动十分强烈,整体受华北板块北缘巨型断裂带,长春-吉林-蛟河隐匿对接带(断裂带),依兰-伊通、敦化-密山及集安-松江河等大型断裂带控制,不同期次、方向、序次的断裂、褶皱构造和韧性剪切带广泛发育,构成了成矿带整体构造格架.

成矿带岩浆岩分布较为广泛,以华力西期、印支期和燕山期中酸性侵入岩为主,岩石类型包括二长花岗



图1 吉中-延边成矿带大地构造位置及主要镍矿分布图
(据文献[11-13]修改)

Fig. 1 Tectonic location of Central Jilin-Yanbian metallogenic belt and distribution of main nickel deposits
(Modified from References [11-13])

1—断层 (fault); 2—缝合带 (suture zone); 3—镍矿 (nickel deposit); 4—研究区 (study area); F1—牡丹江断裂 (Mudanjiang fault); F2—敦化-密山断裂 (Dunhua-Mishan fault); F3—伊通-依兰断裂 (Yitong-Yilan fault); F4—赤峰-开原-海龙-富尔河-白金断裂 (Chifeng-Kaiyuan-Hailong-Fuerhe-Baijin fault); F5—西拉木伦-长春-汪清-珲春缝合带 (Xar Moron-Changchun-Wangqing-Hunchun suture); F6—贺根山-黑河断裂 (Hegenshan-Heihe fault); F7—塔源-喜桂图断裂 (Tayuan-Xiguitu fault); 带内主要镍矿 (nickel deposits): ①红旗岭大型镍矿 (Hongqiling large Ni deposit), ②长仁中型镍矿 (Changren medium Ni deposit), ③山门小型镍矿 (Shanmen small Ni deposit), ④三道岗小型镍矿 (Sandaogang small Ni deposit), ⑤茶尖岭小型镍矿 (Chajianling small Ni deposit), ⑥漂河川小型镍矿 (Piaohechuan small Ni deposit), ⑦漂河川115号岩体小型镍矿 (Piaohechuan small Ni deposit), ⑧石人沟小型镍矿 (Shirengou small Ni deposit), ⑨柳水坪小型镍矿 (Liushuiping small Ni deposit)

岩、花岗闪长岩、闪长岩等,多呈岩株或岩基状产出。不同期次的基性-超基性岩多呈岩株或脉岩,沿断裂构造成群、成组出露,岩石类型主要有辉长岩、辉绿岩、橄榄辉石岩、橄榄岩等,部分岩体内发育镍(铜钴)矿化。此外,带内花岗细晶岩、伟晶岩、闪长玢岩、安山玢岩等脉岩也十分发育,主要沿断裂构造侵入。

成矿带内生金属矿产十分丰富,包括斑岩型钼矿、岩浆热液型金(银)矿、夕卡岩型金矿、夕卡岩型铁矿、

岩浆型镍矿、沉积变质型铁矿等。

2 成矿带典型镍矿床

吉中-延边成矿带已发现红旗岭(大型),长仁(中型),漂河川、茶尖岭、柳水坪(小型)等镍矿床(图1;附表1,扫描首页 OSID 二维码可见)。这些矿床主要赋存在辉长岩、辉石岩、橄榄辉石岩、辉石橄榄岩等印支期镁铁-超镁铁质岩体中。矿体主要呈似层状、纺锤状、扁豆状,部分矿床发育岩浆熔离成因的底部似层状矿体,岩浆上侵流动分异中形成的上悬扁豆状岩体,以及底部填充在裂隙中的硫化物脉型矿体。不同矿床的矿石矿物略有不同,但整体仍以镍黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿-黄铁矿组合为主,普遍发育海绵陨铁、固溶体分离、包含、自形-半自形粒状等矿石结构,以及稠密浸染状、浸染状、细脉状、团块状、斑杂状等矿石构造。成矿带内已知镍矿床工业类型均属于岩浆型镍矿,成因上属于岩浆熔离-贯入型镍矿。镍矿床普遍伴生一定规模的铜、钴矿,部分矿床还伴生硒、碲、铂、钯、硫铁矿等。

2.1 红旗岭镍矿床

红旗岭镍矿发现较早,曾为我国第二大镍矿基地^[14]。截止到2018年底,查明镍资源储量为 22.01×10^4 t,平均品位为1.13%;伴生铜矿资源储量为 2.47×10^4 t,平均品位为0.20%;伴生钴资源储量为 0.53×10^4 t,平均品位为0.034%^[15]。目前,红旗岭镍资源储量居我国岩浆型镍矿第十位。近几年,红旗岭矿床实现了深部找矿重大突破^[16-17],也进一步证明了吉中-延边成矿带岩浆型镍矿床深部找矿潜力巨大^[17]。

2.1.1 矿区地质概况

矿区出露的地层主要为下古生界呼兰岩群,南部出露有少量白垩系黑崴子组砂砾岩。其中呼兰岩群为一套由石榴二云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、白云母片岩等组成的变质岩系,岩石均发生了强烈的韧性变形^[18]。含矿的基性-超基性岩体主要侵入于呼兰群下部的石榴二云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩中,岩体的延长方向与围岩片麻理走向一致,总体走向为 $310 \sim 330^\circ$,与围岩呈侵入接触关系。

矿区内的断裂构造主要沿北东向和北西向展布(图2)。北西向断裂是红旗岭地区的主要容矿断裂,产状多与地层一致,有些断裂与辉发河超深断裂相沟通,

被认为是由辉发河深大断裂长期活动产生的次一级断裂。北西向断裂主要包括付家-偏脸子断裂(F_1)、小岭屯-赵家屯断裂(F_2 、 F_3)及小朱奇-明德屯断裂(F_4 、 F_5)等3条压扭性断裂,它们共同控制着红旗岭地区33个镁铁质-超镁铁质岩体的分布。北东向断裂以压扭性为主,展布方向与区域深大断裂——辉发河断裂平行,具有多期次活动的特征。北东向断裂与北西向断裂交汇部位,往往是镁铁质-超镁铁质岩体成群产出的部位。

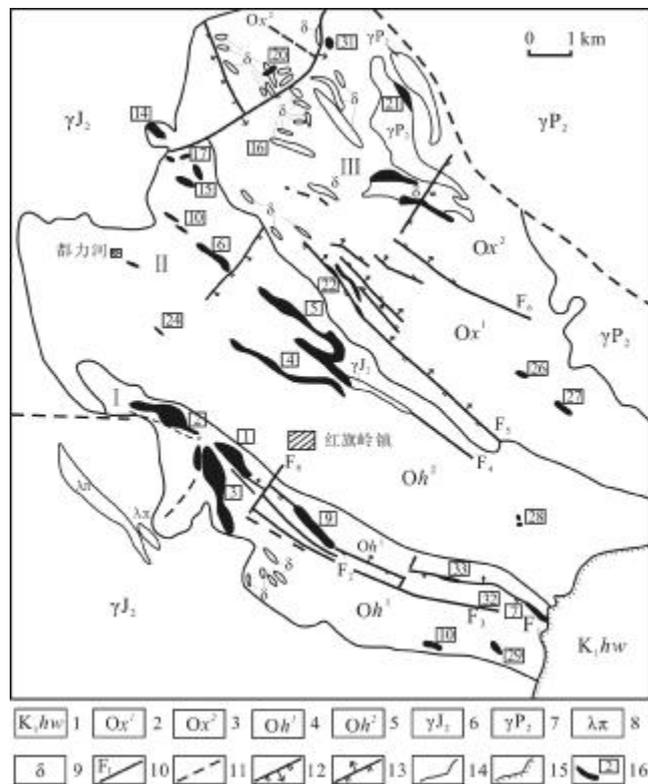


图2 吉林省磐石市红旗岭镍矿床地质图
(据文献[19]修改)

Fig. 2 Geological map of Hongqiling nickel deposit in Panshi City, Jilin Province
(Modified from Reference [19])

1—白垩系黑崴子组 (Cretaceous Heiwaizi fm.); 2—奥陶系小三个顶子岩组下段 (lower mem. of Xiaosangedingzi fm., Ordovician); 3—小三个顶子岩组上段 (upper mem. of Xiaosangedingzi fm.); 4—奥陶系黄英屯岩组下段 (lower mem. of Huangyingtun fm., Ordovician); 5—黄英屯岩组上段 (upper mem. of Huangyingtun fm.); 6—中侏罗世花岗岩 (Middle Jurassic granite); 7—中二叠世花岗岩 (Middle Permian granite); 8—石英斑岩 (quartz porphyry); 9—闪长岩 (diorite); 10—断层 (fault); 11—推测断层 (inferred fault); 12—正断层 (normal fault); 13—逆断层 (reverse fault); 14—角度不整合界线 (angular unconformity); 15—地质界线 (geological boundary); 16—镁铁、超镁铁质岩及编号 (mafic-ultramafic rock and number)

红旗岭地区长期频繁的构造运动伴随着强烈的岩浆活动,形成了加里东期、华力西期、印支期及燕山期侵入岩,主要包括华力西期和燕山期花岗岩,加里东期、华力西期及印支期镁铁-超镁铁质岩石,此外还有石英斑岩、花岗伟晶岩、闪长岩等脉岩产出。

红旗岭矿区内已发现33个镁铁-超镁铁质岩体,沿北西向断裂构造带分布,岩体出露规模均较小。根据岩体产出的构造部位、岩体类型及特征,划分为3个岩带(图2),其中主要工业矿体集中产出在岩带I。岩带I受付家-何家沟-北兴隆-长胜北西向断裂带控制,延长方向北西向(325°),长15 km,带内出露1、2、3、9、10、29、24、30及7号等岩体。围岩为呼兰岩群黄莺屯组下段黑云母片麻岩夹薄层角闪斜长片麻岩、大理岩等。岩石组合类型包括:辉长岩-辉岩-橄榄岩型(1号、2号岩体)、辉长岩-辉岩型(3号岩体)、角闪橄榄岩型(9号岩体)、橄榄岩型(F_1 断层下盘岩体)及斜方辉岩型(7号岩体)等(图3)。

2.1.2 矿床地质特征

红旗岭镍矿床的矿石类型为铜镍硫化物型。矿石中金属矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿(图4)、紫硫镍矿和黄铁矿,其次是砷镍矿、红砷镍矿、闪锌矿、磁铁矿、方铅矿、墨铜矿、辉钼矿和钛铁矿等。

矿石结构以半自形-他形晶粒状结构、焰状结构、环边状结构、海绵陨铁结构为主,此外还有填隙结构、蠕虫状结构、包含结构、结状结构、交代结构等。磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等硫化物在矿石中常共生,并被闪锌矿交代,尤其镍黄铁矿常被闪锌矿沿解理交代(图4a、c)。

矿石构造以浸染状构造、斑点状构造和致密块状构造等为主,其次是团块状构造、细脉浸染状构造、角砾状构造等。红旗岭不同含矿岩体的矿石构造存在一定差异。1号岩体矿石以浸染状、斑点状和团块状构造为主;2号岩体矿石以斑点状构造为主;3号岩体矿石以浸染状构造为主;而7号岩体的矿石以稠密浸染状构造为主,含少量稀疏浸染状和团块状构造^[20]。不同形态矿体的矿石构造也存在一定的差别。浸染状构造在橄榄岩中的上悬矿体及底部似层状矿体最为常见,具海绵陨铁结构的矿石则主要发育于橄榄辉岩、斜方辉岩赋矿地段^[21]。

红旗岭矿区含矿岩体整体蚀变作用较薄弱,主要

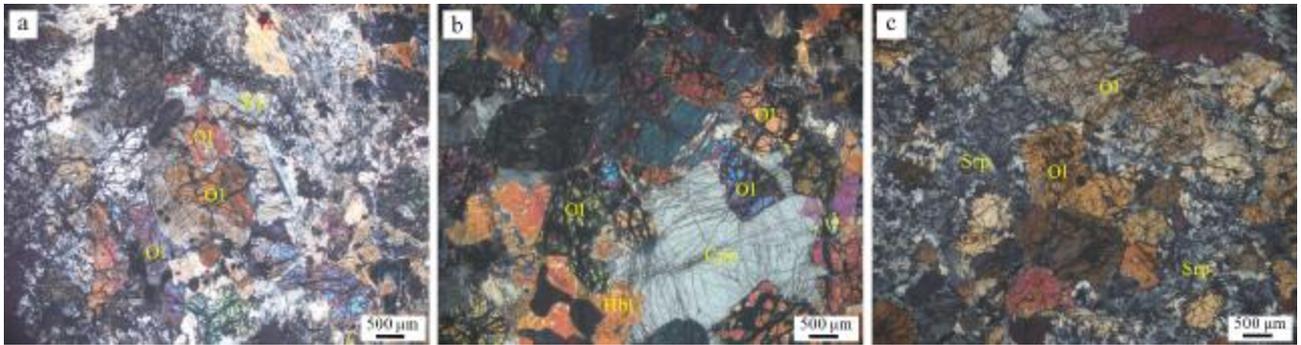


图 3 红旗岭矿区 I 岩带岩体镜下特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of rock body from No. I rock belt in Hongqiling ore field

a— 1 号岩体蚀角闪橄榄岩 (altered hornblende peridotite in No. 1 rock body); b— 1 号岩体角闪橄榄辉石岩 (hornblende olivine pyroxenite in No. 1 rock body); c— 33 号岩体蛇纹石化橄榄岩 (serpentinized peridotite in No. 33 intrusion); Cpx—单斜辉石 (clinopyroxene); Hbl—角闪石 (hornblende); Ol—橄榄石 (olivine); Srp—蛇纹石 (serpentine); Tr—透闪石 (tremolite)

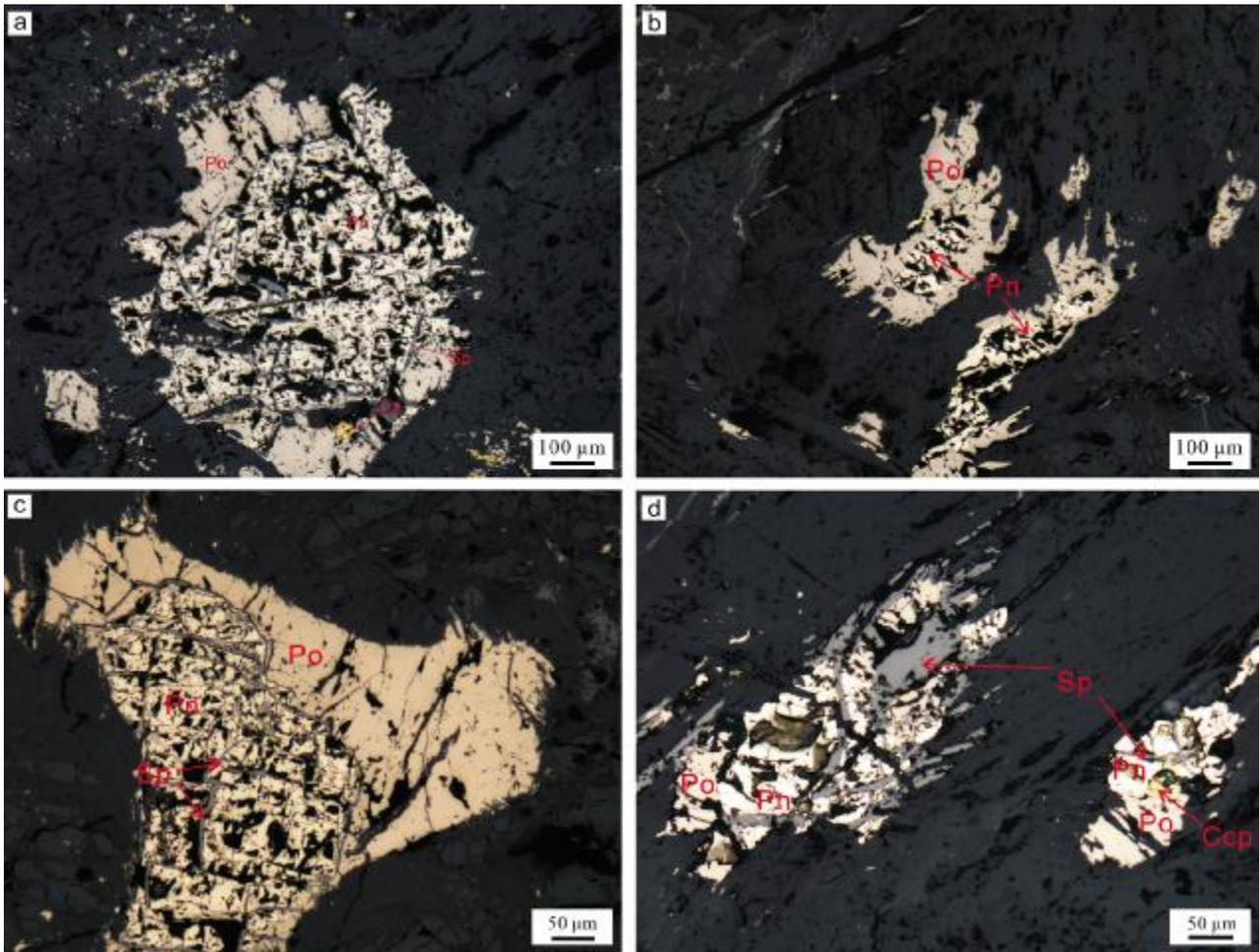


图 4 红旗岭镍矿床 1 号岩体矿石主要矿石矿物显微镜下照片

Fig. 4 Microphotographs of main ore minerals in No. 1 rock body from Hongqiling nickel deposit
 Ccp—黄铜矿 (chalcopyrite); Sp—闪锌矿 (sphalerite); Po—磁黄铁矿 (pyrrhotite); Pn—镍黄铁矿 (pentlandite)

发育次闪石化、滑石化、绿泥石化、角闪石化、黑云母化、金云母化、绢云母化、蛇纹石化及碳酸盐化。其中

部分次闪石化、蛇纹石化、绿泥石化等蚀变与成矿关系密切,但后期热液蚀变引起的透闪石化、绿泥石化、滑

石化和碳酸盐化与矿化无关^[22]。

红旗岭镍矿床主要由 H-7(大型)、H-1(中型)及 H-2、H-9(小型)等矿床组成,其中 H-7 赋存于 7 号岩体、H-1 赋存于 1 号岩体。

(1) H-7 矿床,即富家矿,主要发育似板状、脉状及纯硫化物脉状 3 种类型矿体^[23]。

似板状矿体:金属硫化物分布很普遍,绝大部分构成工业矿体,矿体形态、产状与岩体基本吻合。含矿岩石主要是顽火辉石岩或蚀变辉石岩,少量为苏长岩。矿石结构以海绵陨铁结构为主,矿石构造主要为浸染状构造、团块状构造。金属矿物组合主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿(包括少量紫硫镍矿)及黄铜矿。

脉状矿体:矿体主要产于辉石橄榄岩脉中,呈脉状,其形态、产状基本与所赋存的岩脉一致。矿石结构以海绵陨铁结构为主,矿石构造为浸染状和斑点状构造;主要金属矿物组合为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿。

纯硫化物脉状矿体:产于顽火辉石岩与辉石橄榄岩的接触破碎带中,三者界线清楚,呈突变关系。矿体全由致密块状矿石组成,主要金属矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,见少量的橄榄石、顽火辉石和棕色角闪石。镍黄铁矿常呈椭圆形作定向排列,显示矿体形成过程的运移特征^[24]。这种矿体沿走向和倾向变化不大,是稳定的脉状,延长大于延深。

(2) H-1 矿床,即大岭矿,主要发育似层状、上悬透镜状、脉状及纯硫化物矿脉 4 种类型矿(化)体,其中似层状矿体为该岩体中最主要的工业矿体(图 5)。

似层状矿体:赋存在 1 号岩体底部橄榄辉石岩相中,通常与其上部的橄榄岩相界线清楚,其形态、产状与赋存岩相基本吻合,呈似层状^[25]。在横剖面上,矿体两翼向中心倾斜;在纵剖面上向北西呈缓倾斜^[24-25]。矿石结构包含海绵陨铁结构、他形粒状结构、交代结构等,矿石构造主要为稠密浸染状、斑点状、浸染状构造。矿石中金属矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿及少量磁铁矿、黄铁矿、墨铜矿、钛铁矿等。

上悬透镜状矿体:矿体主要赋存于 1 号岩体上部,橄榄岩相的中、上部,形态不规则,呈透镜状或薄层状,主要由细粒浸染状矿石组成。矿石中金属矿物组合亦为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿及少量磁铁矿。

脉状矿体:发育于 1 号岩体下部,蚀变辉石岩脉内。这种脉岩由含量在 90% 以上的次闪石及少量



图 5 红旗岭镍矿 1 号岩体横剖面示意图

Fig. 5 Profile of No.1 rock body in Hongqiling nickel deposit
1—黑云母片麻岩 (biotite gneiss); 2—橄榄辉石岩相 (olivine pyroxene lithofacies); 3—橄榄岩相 (olivine lithofacies); 4—上悬矿体 (hanging orebody); 5—似层状矿体 (stratoid orebody); 6—脉状矿体 (vein orebody); 7—逆断层 (reverse fault)

的棕色角闪石、滑石、绿泥石、金云母等组成。其中金属硫化物含量约 2%~6%,呈稀疏斑点状、浸染状在岩石中不均匀分布,有时构成矿体^[25]。因此,这种脉状矿体在空间上是不稳定的。矿石中主要金属矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。

纯硫化物矿脉:这种矿脉多见于似层状矿体的原生节理中,或者受活动的原生节理控制,呈脉状或扁豆状,一般宽数厘米到十几厘米,最宽可达 20 cm 以上,断续出现,由致密块状矿石组成^[25]。其主要金属矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿及少量黄铜矿,个别见到黄铁矿、磁铁矿。有时矿脉两侧围岩有强烈蚀变。

此外,有时在橄榄岩相的斜方辉岩岩体中,以及某些辉长伟晶岩中亦见矿化,其中金属硫化物常呈星散状或团块状。金属矿物以磁黄铁矿为主,其次为镍黄铁矿及少量黄铜矿、磁铁矿、钛铁矿等。

在似层状矿体同片麻岩接触破碎带附近的蚀变辉岩中,有时可见不规则的团块状、细脉状和浸染状金属硫化物矿化。金属矿物组合为磁黄铁矿、黄铜矿及镍黄铁矿,3 种矿物含量变化很大,并且以前二者含量占优势为特征。在局部地段还见有红砷镍矿、砷镍矿、辉钼矿以及电气石、黑云母、绿泥石、石英等矿物。这种矿化通常镍品位较低。

2.2 长仁镍矿床

长仁-獐项一带镁铁-超镁铁质岩体 1960 年后陆

续被发现,于1992年开始矿山开采建设^[26].截止到2018年底,长仁镍-铜-钴矿床中镍查明资源储量为 3.10×10^4 t,平均品位为0.65%;伴生铜矿查明资源储量为5500 t,平均品位为0.23%;伴生钴查明资源储量为60 t,平均品位为0.03%.此外,还伴生铂和钯^[15].

长仁矿区内主要出露地层为新元古界青龙村岩群,呈北西向带状展布,为一套经历中级变质的浅海相海底-火山喷发沉积建造,可分为上、中、下3段,分别由角闪斜长片麻岩、方解石或硅质条带大理岩以及具中深成变质的片麻岩组成^[27].

长仁矿区构造较为发育,主要受古洞河深大断裂控制.北西向的长仁-青龙断裂和獐项断裂分布于长仁背斜的核部,平行于褶皱轴向,为向南西突出的弧形断褶带的一部分,与古洞河深断裂在卧龙至河西洞一带斜接,为矿区内主要的储岩构造^[28].受此断裂控制,

长仁矿区岩体及矿体多呈北西向到北北西向的似层状、透镜状、不规则状分布.

矿区内岩浆岩主要为黑云母斜长花岗岩和闪长岩,以及一系列基性-超基性岩体.长仁矿区内共分布有10余个超基性、基性岩体,其中以11、13、4号岩体的含矿性最佳,构成了长仁铜镍矿床的主体(图6a).据赵冬根等^[29]统计分析,长仁镍矿共11条矿体的产状与岩体产状基本一致,走向北东或近南北,以中等角度向西或北西倾斜;在垂直剖面上,多数矿体呈似层状、透镜状(图6b).矿体差异主要体现在规模上.这3个主要含矿岩体及赋存的矿体特征如下.

11号岩体:地表出露长320 m,宽40~60 m,厚50~70 m,最大厚度106 m,延深550 m,最大斜长1400 m,向北西倾斜,倾角40~50°,向南西侧伏,侧伏角15~25°,出露面积0.33 km².岩体在平面上呈串珠

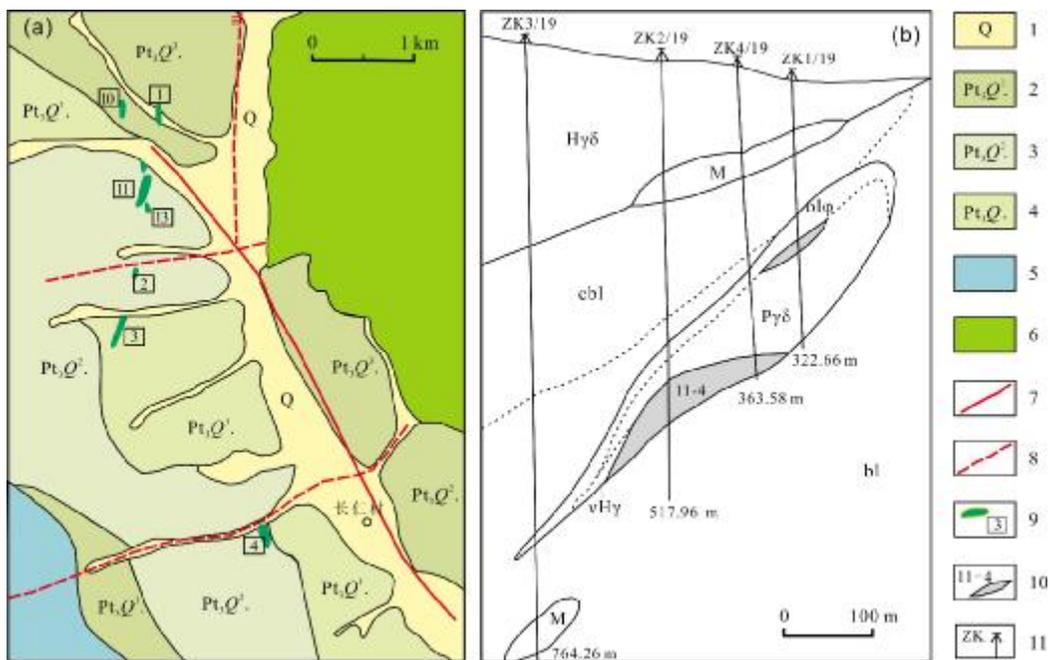


图6 长仁镍矿床矿区地质图及11号岩体19号勘探线地质剖面图

(据文献[27, 29]修改)

Fig. 6 Geological map of Changren nickel deposit and profile of No.11 rock body along No. 19 exploratory line

(Modified from References [27, 29])

1—第四系(Quaternary); 2—新元古界青龙村岩群黑云斜长片麻岩(biotite plagioclase gneiss of Qinglongcun rock group, Neoproterozoic); 3—青龙村岩群硅质条带大理岩、方解石大理岩(siliceous banded marble and calcite marble of Qinglongcun rock group); 4—青龙村岩群黑云斜长片麻岩夹薄层大理岩(biotite plagioclase gneiss with thin marble of Qinglongcun rock group); 5—闪长岩(diorite); 6—辉长岩(gabbro); 7—断层(fault); 8—推测断层(inferred fault); 9—基性-超基性岩体及编号(ultra basic-basic intrusion and number); 10—矿体及编号(orebody and number); 11—钻孔(drill hole); cbl—含石墨黑云角闪斜长片麻岩(graphite-bearing biotite hornblende plagioclase gneiss); bl—黑云角闪片麻岩(biotite hornblende gneiss); M—大理岩(marble); Pγδ—辉石橄榄岩(pyroxene peridotite); Hyδ—混染闪长岩(hybrid diorite); vHy—辉长质混染岩(gabbroic hybrid rock); olφ—橄榄辉石岩(olivine pyroxenolite)

状,剖面形态为似板状、似透镜状等,属于辉石岩-二辉橄榄岩型。岩体由中部、底部的橄榄岩相渐变过渡为边部和上部的辉石岩相,其中橄榄岩相占岩体的85%,为主要含矿岩相。岩石类型包括辉石橄榄岩、含长辉石橄榄岩,边部主要岩性为橄榄辉石岩、辉石岩、含长辉石岩等。岩体中矿石矿物富集到一定规模时构成矿体。该岩体见4条矿体,并随岩体向南西侧伏。11-1号矿体长500 m,延深100~150 m,最大延深200 m,厚1.59~28.28 m,平均9.35 m;主矿体11-4号矿体长900 m,延深100~200 m,最大延深300 m,厚度1.67~39.47 m,平均15.26 m;11-2、11-3号矿体规模小,由单工程控制(图6b)。

13号岩体:地表出露长200 m,斜长840 m,厚20~30 m,最大厚度78 m,延深近400 m,在平面上为月牙状,剖面形态为透镜状,倾向南西西,倾角35~50°。向南西侧伏,倾向角15~20°。

4号岩体:岩体形态为不规则的透镜状,北部被断裂所切割,地表出露长度240 m,宽度30~60 m,出露面积0.015 km²,岩体走向350°,向西倾斜,倾角40~50°,向南西侧伏。见2条矿体,4-1号矿体长300 m,延深80~100 m,厚度1~10 m,平均5.73 m;4-2号矿体长90 m,延深130 m,厚度1~4 m,平均2.5 m。

根据矿体在岩体中的赋存位置、矿体形态、矿石类型等特征,可将长仁铜镍矿体划分为底部矿体、上悬矿体及硫化物脉矿体3种类型^[29]。其中底部矿体主要赋存在岩体底部或倾伏端的辉石橄榄岩中,矿体多呈似层状、透镜状,矿石以浸染状为主,含镍品位中等,但其规模较大;上悬矿体则产出于岩体上部辉石岩相中,多呈小规模透镜体,品位较低,矿石多为稀疏浸染状;硫化物脉型矿体则位于岩体底部辉石橄榄岩相与围岩的接触部位,多充填于破碎裂隙或原生裂隙中,一般脉宽约几厘米至20 cm。

矿石矿物主要为镍黄铁矿、红砷镍矿、磁黄铁矿、黄铜矿等。矿石构造以浸染状构造为主,其次还有斑点状、细脉状、致密块状和压碎状等,矿石结构主要为他形粒状结构、半自形晶粒结构,其次还有固溶体分离结构、环状交代结构及海绵陨铁结构等。

矿区含矿岩石及围岩发育蛇纹石化、次闪石化、滑石化、金云母化、绿泥石化、碳酸盐化、黑云母化、硅化及沸石化等蚀变作用。

3 成矿带镍矿时空分布规律

3.1 镍矿时间分布规律

吉中-延边成矿带已知镍矿均为岩浆型,均产于镁铁-超镁铁质侵入岩中。这些镁铁-超镁铁质岩多呈岩脉或岩墙残留体赋存在新元古界青龙村岩群,奥陶系呼兰岩群,二叠系寿山沟组、大河深组及华力西期酸性侵入岩之中,或受后期岩浆事件的影响发生破坏。

早期镍矿成岩成矿时代研究主要针对红旗岭镍(-铜-钴)矿床。对红旗岭1号岩体的伟晶岩及辉长岩中辉石进行了K-Ar定年,获得了331~350 Ma的成岩年龄^[30];秦宽报道红旗岭1号和7号岩体辉石K-Ar同位素年龄为330~355 Ma^[24],界定红旗岭含矿镁铁-超镁铁质岩体的形成时间为海西期。

21世纪以来,随着同位素年代学测试技术的发展与进步,学者们纷纷利用角闪石、黑云母等单矿物Ar-Ar、LA-ICP-MS及SHRIMP锆石U-Pb法对成矿带内镁铁-超镁铁质岩体进行同位素年代学研究(表1)。张广良和吴福元报道了红旗岭1号岩体浅色辉长岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为216±5 Ma^[44];郝爱华等利用黑云母和角闪石Ar-Ar法测得红旗岭1号和8号岩体的结晶年龄分别为225 Ma和250 Ma^[18];刘金玉等对红旗岭3号岩体角闪辉石岩中角闪石进行了Ar-Ar同位素定年,获得了228±3 Ma结晶年龄^[36]。红旗岭1号、2号、3号、8号、31号等岩体亦被陆续报道出207~238 Ma的成岩年龄^[33-36]。另外,部分学者对这些镁铁-超镁铁质岩体的围岩呼兰岩群变质沉积岩进行了碎屑锆石U-Pb定年,获得了272.2±4.3 Ma及287±6 Ma的最年轻碎屑锆石年龄^[12, 38],间接表明这些镁铁-超镁铁质岩体的侵位晚于中、晚二叠世。长仁、山门等铜镍硫化物矿床的含矿镁铁-超镁铁质岩体的侵位年龄介于213~243 Ma^[14, 22, 28, 31, 38-40, 42],与红旗岭矿床成岩时代基本吻合。上述同位素年代学数据表明,吉中-延边成矿带的含矿镁铁-超镁铁质岩体主要形成于印支期晚期(208~243 Ma)。

为了精确厘定红旗岭铜镍矿床的成矿时代,学者们对1号及7号岩体矿石进行了Re-Os同位素定年,先后报道了208±21 Ma^[36]、222.9±9.1 Ma^[31]及237±16 Ma^[18]的等时线年龄,这与前述含矿镁铁-超镁铁质岩体的成岩年龄基本吻合,表明以红旗岭为代表的吉中-延边成矿带岩浆型镍矿的主要成岩成矿时代为晚

表 1 吉中-延边成矿带岩浆型镍矿成岩成矿年代学数据统计表

Table 1 Diagenetic and metallogenic age data of nickel deposits in Central Jilin-Yanbian metallogenic belt

矿区(岩群)	岩体编号	测试岩石(矿物)	测试方法	年龄/Ma	文献来源
红旗岭镍矿	1号岩体	黑云母	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	225±0.9	[18]
	1号岩体	辉长岩内锆石	SHRIMP U-Pb	216±5	[44]
	1号岩体	浸染状矿石	Re-Os	237±16	[31]
	1号岩体	硫化物	Re-Os	222.9±9.1	[32]
	2号岩体	角闪石	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	237.7±2.2	[33]
	2号岩体	辉长岩、闪长伟晶岩内锆石	SHRIMP U-Pb	212.5-212.2	[34]
	2号岩体	浸染状矿石	Re-Os	215±24	[31]
	3号岩体	角闪石	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	236.4±4.6	[33]
	3号岩体	橄榄辉石岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	220.6±2	[35]
	3号岩体	角闪石	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	228-230	[36]
	5号岩体	辉长岩内锆石	SHRIMP U-Pb	272.2±3.6	[33]
	6号岩体	辉长岩内锆石	SHRIMP U-Pb	258.8±3.4	[33]
	8号岩体	闪长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	238.1±2.7	[33]
	8号岩体	角闪石	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	250.8±0.25	[18]
	7号岩体	硫化物	Re-Os	208±21	[37]
31号岩体	辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	218.1±3.5	[33]	
茶尖岭镍矿	1号岩体	角闪石	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	231.2±2.6	[33]
	1号岩体	辉长岩内锆石	SHRIMP U-Pb	239.6±2.6	[38]
三道岗镍矿	1号岩体	辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	232.75±0.95	[39]
漂河川镍矿	4号岩体	辉长岩内锆石	SHRIMP	217±3	[14]
	5号岩体	辉长岩内锆石	SHRIMP	222±8	[40]
山门镍矿		辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	225.1	[41]
二道沟镍矿	115号岩体	角闪辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	213.0±1.1	[42]
石人沟镍矿		辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	225.6±7	[22]
长仁镍矿	11号岩体	橄榄岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	243.0±1.1	[22]
	11号岩体	橄榄辉石岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	226±1	[22]
樟项镍矿		橄榄岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	237.0±1.1	[22]
和龙福洞岩群	沙松顶子岩体	橄榄辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	175.6±1.1	[43]
	福洞 15 号和 26 号岩体	角闪辉长岩内锆石	LA-ICP-MS U-Pb	191-175	[22]

三叠世(图 7)。

此外,还有一些同位素年代学数据表明,红旗岭地区亦存在海西晚期镁铁-超镁铁质岩体的侵位,其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄介于 258~272 Ma^[33],但未发

育显著矿化。学者们还在和龙市福洞地区识别出早侏罗世的橄榄辉长岩(175.6±1.1 Ma)^[43]及角闪辉长岩(191~175 Ma)^[22],表明成矿带还存在早侏罗世的镁铁-超镁铁质岩体侵位,同样未发现铜镍矿化。

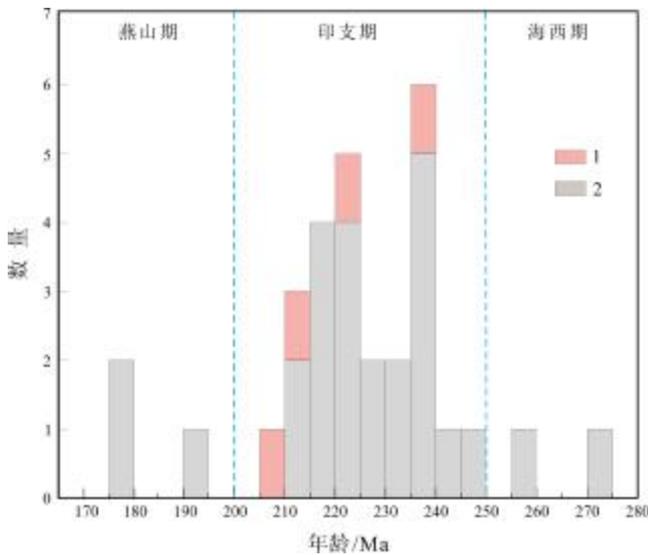


图7 吉中-延边成矿带成岩成矿年龄直方图
(引用数据详见表1)

Fig. 7 Histogram of diagenetic and metallogenic ages of nickel deposits in Central Jilin-Yanbian metallogenic belt
(Data from Table 1)

1—成矿年龄 (metallogenic age); 2—基性-超基性岩体年龄 (age of basic-ultra basic rock mass)

根据上述同位素年龄数据,吉中-延边成矿带发育3期镁铁质-超镁铁质岩侵入岩浆事件和1期成矿事件。具体表现为:中晚二叠世(258~270 Ma),代表性岩体为红旗岭5、6号岩体,未发现显著矿化;中晚三叠世(208~243 Ma),为铜镍硫化物矿床形成的主要时期,形成一系列含矿岩群/岩体,如红旗岭、漂河川、长仁-獐项等;早侏罗世(175 Ma),以和龙地区福洞岩群为代表,岩性主要为角闪辉长岩,无明显矿化。

3.2 镍矿空间分布规律

3.2.1 造山后伸展与岩浆型镍矿成矿

我国大部分造山带中镍钴矿形成于晚古生代,与造山作用和地幔柱事件颇为耦合,中亚造山带俯冲-增生-造山过程对中亚造山带南缘岩浆型镍钴矿的形成起到重要的控制作用^[45-46]。吉中-延边成矿带位于中亚造山带东段的兴蒙造山带东南缘,自古生代至早中生代先后经历了古亚洲洋的俯冲-增生-造山等演化过程。在此构造体制下,成矿带先后形成了中晚二叠世和晚三叠世两期造山后伸展背景下的镁铁-超镁铁质岩,但其含矿性却差异巨大。

成矿带中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩浆活动可能比较局限,规模较小。目前仅在红旗岭第Ⅱ岩带识别

出少量中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩,如红旗岭4、5、6号岩体,且未发现显著矿化。魏俏巧提出红旗岭地区中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩的原始岩浆为受俯冲流体交代的岩石圈地幔,并有软流圈地幔成分的加入,地壳物质混染不明显,其形成可能与造山后的伸展构造环境下软流圈地幔上涌有关^[33]。该期镁铁-超镁铁质岩岩石组合为闪长岩-辉长岩-角闪辉石岩-二辉橄榄岩组合,与红旗岭含矿镁铁-超镁铁质岩的岩石组合相似;其橄榄石及辉石 F_o 值(73~90)均较高^[33],与红旗岭1号岩体($F_o=83.69\sim 89.00$)和7号岩体($F_o=83.02\sim 87.27$)^[20]较为接近。这些中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩虽然亦形成于造山后伸展背景,但并未发现显著矿化。学者们从不同方面讨论其原因:从岩浆源区方面,认为中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩源区更多保留俯冲流体交代特征,氧化性过强,在地幔部分熔融过程中影响了硫化物的大规模熔离^[33];从岩浆硫化物饱和和机制方面,中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩的初始岩浆中地壳物质加入不明显^[33],表明此幔源岩浆中无或极少有地壳硫的加入,岩浆可能难以达到硫的饱和状态,也难以熔离成矿^[47-48];从成岩构造环境方面,中晚二叠世镁铁-超镁铁质岩形成于由挤压向伸展拉张转换的构造背景^[33],此构造环境相对不稳定,可能影响了岩浆结晶分异和硫化物熔离并聚集成矿。

成矿带内印支期镁铁-超镁铁质岩浆活动较为强烈,晚三叠世镁铁-超镁铁质岩在空间上从成矿带西缘四平地区、中部红旗岭-茶尖岭地区,东延至和龙长仁地区,总体沿近东西向的华北板块北缘巨型断裂带展布(图8)。该期镁铁-超镁铁质岩普遍发育铜镍矿化,并形成大型的红旗岭镍矿,中型的长仁镍矿,小型的漂河川、茶尖镍矿等。印支早期,随着古亚洲洋在华北克拉通北缘东段沿西拉木伦河-长春缝合带最终闭合,至印支中晚期,成矿带进入到华北克拉通与兴蒙造山带碰撞造山后的伸展环境,代表了此一期造山事件的结束^[49-52]。这是一种相对稳定的构造环境,对岩浆在结晶过程中的充分分异起到稳定的保护作用,有利于岩浆中的硫化物充分熔离并聚集形成铜镍硫化物矿床^[34]。这种伸展构造环境导致加厚的岩石圈由于重力不稳定而发生岩石圈地幔大规模的拆沉,岩石圈地幔沉入软流圈,使得大量软流圈物质上涌,并诱发受俯冲流体交代的岩石圈地幔部分熔融^[20, 33, 35]。幔源岩浆沿

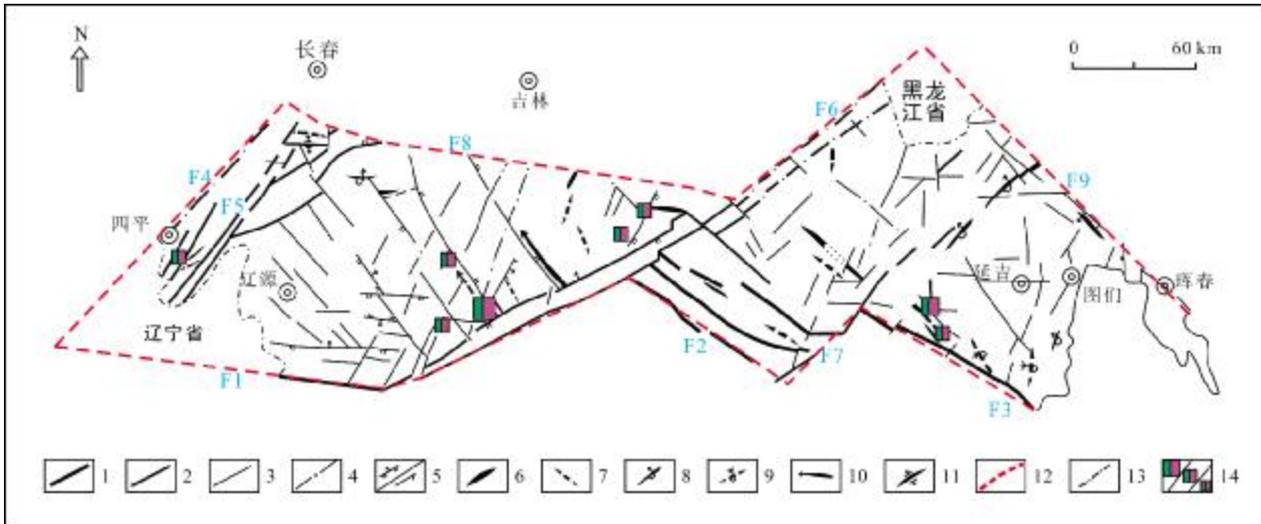


图8 吉中-延边成矿带主要构造与镍矿空间分布示意图

(据文献[30]修改)

Fig. 8 Distribution of major structures and nickel deposits in Central Jilin-Yanbian metallogenic belt

(Modified from Reference [30])

1—超岩石圈断裂(translithospheric fault); 2—岩石圈断裂(lithospheric fault); 3—壳断裂及一般断裂(crustal fault and general fault); 4—物探、遥感解译断裂(fault by geophysical prospecting and remote sensing interpretation); 5—逆断层及平移断层(reverse and strike-slip fault); 6—背斜(anticline); 7—向斜(syncline); 8—倒转背斜(overturmed anticline); 9—倾没向斜(plunging syncline); 10—复式背斜(anticlinorium); 11—复式褶皱(complex fold); 12—成矿带边界(boundary of metallogenic belt); 13—省界(provincial boundary); 14—大、中、小型镍矿(large/medium/small nickel deposit); F1—华北陆块北缘巨型断裂带小四平-海龙段(Xiaosiping-Hailong section of huge fault belt in the northern margin of North China Craton); F2—华北陆块北缘巨型断裂带柳树河子-大蒲柴河段(Liushuhezi-Dapuchaihe section of huge fault belt in the northern margin of North China Craton); F3—华北陆块北缘巨型断裂带古洞河-白金段(Gudonghe-Baijin section of huge fault belt in the northern margin of North China Craton); F4—四平-长春断裂(Siping-Changchun fault); F5—依兰-伊通断裂(Yilan-Yitong fault); F6—敦化-密山断裂(Dunhua-Mishan fault); F7—集安-松江河断裂(Ji'an-Songjianghe fault); F8—长春-吉林-蛟河隐匿对接带(Changchun-Jilin-Jiaohe concealed junction belt); F9—汪清-珲春隐匿对接带(Wangqing-Hunchun concealed junction belt)

辉发河、古洞河等深大断裂上升,经历复杂的岩浆演化并受重力作用影响,最终形成了成矿带内近东西向展布的一系列的早-晚三叠世镁铁-超镁铁质岩.红旗岭初始岩浆在深部岩浆房,以及上升至浅部岩浆房经历了一定的分离结晶、地壳混染、岩浆混合以及岩浆过冷却等作用^[14, 20, 51-52],尤其是地壳硫的加入,都有利于岩浆体系中成矿元素含量增高并促使硫达到饱和状态,进而发生金属硫化物熔离并富集成矿.

成矿带另外还发育燕山早期镁铁-超镁铁质岩浆活动,形成了以福洞岩群为代表的镁铁-超镁铁质岩体,为古太平洋板块俯冲体制下弧后伸展环境的产物,总体含矿性较差,没有发现成规模的铜镍矿床^[22].洋壳俯冲背景有关的铜镍硫化物矿床在中亚造山带比较少见,目前仅报道出小型的新疆西天山地区的菁布拉克铜镍矿,对应于南天山洋向中天山板块俯冲消减的

背景^[6].从全世界范围来看,燕山早期岩浆型铜镍矿床也十分稀少.

3.2.2 断裂构造控岩控矿特征显著

成矿带内岩浆型镍矿总体沿华北板块北缘巨型断裂带分布.该巨型断裂带可分为东、西两段,其中东段为富尔河-古洞河深大断裂,控制着长仁-獐项、新合、石人沟等镁铁-超镁铁质岩群;西段为辉发河深大断裂,控制着红旗岭-茶尖岭、漂河川、三道岗等镁铁-超镁铁质岩群.已有地球物理和遥感解译成果表明,富尔河-古洞河和辉发河两大断裂是区内规模最大、切割最深、发育最早、多期次长期活动的深大断裂^[21, 29],可作为幔源岩浆侵位的通道^[55].

由成矿带主要镍矿床的控矿构造特征可见,岩浆型镍矿床大多处于深大断裂派生的不同方向、不同规模的断裂构造与褶皱构造的交叉复合部位(图8;附表

2, 扫描首页 OSID 二维码可见). 如红旗岭-茶尖岭岩群、三道岗岩群等位于北东向辉发河深大断裂与北西向黑石-烟筒山断裂带交汇部位, 漂河川-西北岔岩群则产出在北东向辉发河深大断裂、北西向丰满-二道甸子断裂带交汇部位附近, 并处于二道甸子-漂河岭复背斜弧形构造北西向转折部. 长仁-獐项镁铁-超镁铁质岩群则位于长仁-青龙断裂派生的北东向和北西向断裂及长仁背斜的叠加区域^[28-29].

以红旗岭镍矿为例, 辉发河深大断裂派生的北西向断裂控矿特征显著, 不仅控制了镁铁-超镁铁质岩体的分布, 还直接影响了岩体的形态、产状等. 红旗岭矿区 33 个镁铁-超镁铁质岩的分布具有北西成串、近东西成带、交汇复合地段成群集中分布的规律, 如 I 岩带的 7、9、32、33、1 和 2 号岩体均沿北西向付家-偏脸子断裂斜列分布, 而且单个岩体长轴方向亦呈北西走向. 茶尖矿区的镁铁-超镁铁质岩体同样受北西向断裂控制. 北西向和北东向断裂的交汇复合地段, 往往是镁铁-超镁铁质岩成群产出的部位^[56].

漂河川-西北岔一带的镁铁-超镁铁质岩与成矿带其他镁铁-超镁铁质岩群的产出特征存在明显差异. 根据镁铁-超镁铁质岩体的分布特征, 可分为层控型和裂控型两种类型^[53]. 层控型岩体整体受二道甸子-漂河川弧形褶皱构造带控制, 沿层间裂隙带分布在黄莺屯组片岩和范家屯组变质砂岩、板岩中, 与地层一起形成向西突拱的弧形带, 体现了岩体的显著层控特征. 这些岩体走向与围岩层理大体一致, 总体倾向与围岩倾向相吻合, 显示出明显的成带展布特征. 漂河川裂控型镁铁-超镁铁质岩主要分布在二道沟、四道沟及西北岔一带, 平面上呈雁行式斜列分布, 侵位于斜切黄莺屯组片麻岩的平行裂隙中. 单个岩体呈脉状、岩墙状或透镜状, 平面上岩体有膨缩变化, 产状较陡, 岩体倾向与地层倾向相反. 裂控型岩体的边缘多呈不规则状, 或呈波浪弯曲或者两端分叉, 说明岩体受控于两组剪切裂隙形成的张性裂隙中. 上述两类岩体的岩石组合、岩相及矿化特征具有明显差别. 层控型岩体主要的岩石类型为角闪辉长岩, 均为单相岩体; 而裂控型岩体中少部分为复相岩体, 发育含长辉石岩-斜长角闪辉石岩-角闪辉长岩、含长橄榄辉石岩-斜长角闪辉石岩-角闪辉长岩等岩石组合, 总体反映出裂控岩体基础性程度较层控型岩体高. 层控岩体中常见的硫化物共

生组合为磁黄铁矿+黄铜矿+黄铁矿; 而裂控型岩体普遍发育镍黄铁矿, 构成磁黄铁矿+镍黄铁矿+黄铜矿+黄铁矿组合. 目前已知的镍矿床(体)仅见于裂控型岩体内, 这充分反映了张性裂隙对漂河川地区含矿镁铁-超镁铁质岩体的控制作用.

3.2.3 扭性断裂活动与镍矿体就位

前人对红旗岭主要控矿断裂的性质及其控矿特征进行了分析^[54]. 付家-偏脸子断裂东段呈北西走向, 与 7 号岩体(富家矿)产状吻合, 总体呈现压扭性特征, 但在 7 号岩体侵位时表现出右旋、张扭性特点. 当残余富矿熔浆侵位形成纯硫化物脉时, 该断裂性质又转变为左旋压性特征. 付家-偏脸子断裂西段亦为北西走向, 总体呈现左旋、压扭性活动特征. 早期贫矿岩浆侵位时, 该断裂呈现压扭性特征; 至含矿熔浆贯入时, 该断裂转变为右旋张性活动性质; 最后参与矿浆贯入形成纯硫化物脉时, 断裂性质又重新表现出压扭性特征. 由此可见, 红旗岭 I 号岩带主要控矿断裂——付家-偏脸子断裂呈现出多期活动特点, 且印支期的右旋、张扭性活动控制着含矿岩浆的侵位与矿体的就位.

成矿带其他镍矿床控矿构造特征研究仍较为薄弱, 但普遍认为扭性断裂或裂隙控制着含矿岩浆的侵位与矿体的就位. 漂河川地区含镍、铜的镁铁-超镁铁质岩石主要沿与地层斜交的张扭性裂隙侵入, 因此这些裂隙被认为既是导岩构造又是储岩构造. 长仁地区的 4、14、23 号等岩体受压性的长仁-青龙断裂派生的北东和北西向两组扭裂构造控制^[29]. 獐项 6 号岩体沿北西向压扭性断裂侵入到青龙村岩群变质岩系中, 该北西向压扭性断裂被认为是重要的控岩控矿构造^[55].

4 找矿标志

通过对红旗岭、长仁等典型矿床的深入研究, 结合成矿带镍矿区地层、构造、岩浆岩等成矿条件分析, 总结了成矿带岩浆型镍矿的成矿有利条件和找矿标志.

(1) 地质背景条件

吉中-延边成矿带位于兴蒙造山带东段, 为古亚洲洋和古太平洋构造域演化叠加复合地区. 带内断裂构造发育, 且表现出多期多组活动的特点, 岩浆活动频繁且强烈, 而且该区在海西晚期—印支期表现为俯冲-伸展转换的机制, 镁铁-超镁铁质岩体成群成组发育. 这为区内金、银、铅、锌、镍、铜等内生金属, 尤

其是岩浆型镍矿的形成提供了良好的地质背景条件.

(2) 围岩地层标志

通过对成矿带内含矿镁铁-超镁铁质岩石的围岩条件进行分析,发现这些含镍镁铁-超镁铁质岩石主要赋存在呼兰岩群黄莺屯岩组、寿山沟组、范家屯组、青龙村岩群等地层内,而岩体的直接围岩岩性大体可分为片岩-片麻岩以及变质砂岩-粉砂岩两类(附表1,扫描首页 OSID 二维码可见).红旗岭等铜镍矿床成岩成矿物质来源研究成果表明,成矿带镁铁-超镁铁质岩体的岩浆演化过程或多或少存在壳源硫的加入^[20,32,56].因此,成矿带内前中生界片岩-片麻岩以及变质砂岩-粉砂岩两类岩石分布区是寻找岩浆型镍矿的有利区.

(3) 岩石组合标志

吉中-延边成矿带含镍的镁铁-超镁铁质岩石大

多形成于晚三叠世,岩石组合主要包括橄榄岩-辉石岩-辉长岩(红旗岭1号岩体),斜方辉石岩-苏长岩(红旗岭7号岩体),角闪辉石岩-角闪辉长岩(茶尖岭、三道岗岩群),角闪辉石岩-角闪辉长岩-辉长辉绿岩(漂河川),辉石岩-二辉橄榄岩(长仁11号岩体)等类型.其中,主要的赋矿岩相为辉石橄榄岩相和辉石岩相(表2).

(4) 构造标志

近东西向的华北板块北缘巨型断裂带是镁铁-超镁铁质岩的第一级导岩构造,可分为辉发河深大断裂(西)和古洞河深大断裂(东)两段,具有切割深度大、继承性活动频繁等特点,构成区域性重要的控岩控矿构造带^[21].成矿带内主要的镁铁-超镁铁质岩群主要沿这两个深大断裂派生的北西向断裂构造侵位,多组构造叠加处更是对成矿有利.扭性断裂或裂隙控制着含矿岩浆的侵位与矿体的就位.

表2 吉中-延边成矿带主要镁铁-超镁铁质岩体岩石组合与 m/f 比值特征

Table 2 Rock assemblages and m/f ratios of major ultramafic-mafic intrusions in Central Jilin-Yanbian metallogenic belt

序号	岩体	含矿规模	岩石组合	m/f 比值	岩性分类	文献来源
1	红旗岭1号岩体	中型	橄榄岩-辉石岩-辉长岩	0.99~6.05,集中于4.77~6.05	铁质超基性岩	[14,20]
2	红旗岭2号岩体	小型	辉长岩-辉石岩-橄榄岩	3.47~5.05	铁质超基性岩	[20,36]
3	红旗岭3号岩体	小型	辉长岩-辉石岩相	3.82~6.02	铁质超基性岩	[20,38]
4	红旗岭7号岩体	大型	斜方辉石岩-苏长岩	0.87~5.28,集中于3.51~5.28	铁质超基性岩	[14,20,38,51]
5	茶尖岭	小型	角闪石岩-角闪辉石岩	2.22~4.87	铁质超基性岩	[57]
6	三道岗	小型	闪长岩-辉长岩-角闪辉石岩-辉石岩-角闪橄榄岩	1.05~3.46	铁质基性岩、铁质超基性岩	[58]
7	漂河川4号岩体	小型	辉长岩-角闪橄榄辉石岩	2.63~2.65	铁质超基性岩	[22]
8	漂河川5号岩体	矿化点	辉长岩-辉石岩	1.74~2.29	铁质基性岩	[22]
9	獐项5号岩体	矿化点	橄榄辉石岩-橄榄岩	5.76~5.98	铁质超基性岩	[22]
10	獐项6号岩体	矿化点	橄榄辉石岩-橄榄岩	5~5.8	铁质超基性岩	[55]
11	长仁11号岩体	中型	辉石岩-二辉橄榄岩	4.60~5.48	铁质超基性岩	[22,29]
12	二道沟115号岩体	小型	辉长岩-辉石岩	1.07~1.83	铁质基性岩	[22]
13	石人沟	矿化点	辉长岩-橄榄辉长岩	-	-	[22]
14	福洞岩群15号岩体		角闪辉长岩	1.42~1.82	铁质基性岩	[22]
15	福洞岩群26号岩体		辉长闪长岩	0.61~0.74	铁质基性岩	[22]

(5) 矿化蚀变标志

磁黄铁矿+镍黄铁矿+黄铜矿为成矿带岩浆型铜镍矿最普遍的金属矿物组合,也是Cu、Co、Ni等元素的主要载体。次闪石化、蛇纹石化、绿泥石化等蚀变与成矿关系密切。

(6) 成矿岩体地球化学标志

镁铁-超镁铁质岩体的m/f比值范围与形成某些特定的矿种具有一定的专属性,其中铁质基性岩(m/f介于0.5~2)和铁质超基性岩(m/f介于2~6.5)有利于Cu、Ni、PGE矿的形成,尤其是m/f介于4~6最为有利^[59]。由表2可见,成矿带镁铁-超镁铁质岩体大多数属于铁质超基性岩类(m/f介于2.44~6.05),少部分属于铁质基性岩类(m/f介于1.07~2.29),大多落在有利于铜镍矿形成的m/f比值区间。考虑到含矿规模,不难发现赋存中、大型镍矿的镁铁-超镁铁质岩体均属于铁质超基性岩类,m/f比值亦较高,大多集中在3.51~6.05。由此可见,成矿带具有高m/f比值的铁质超基性岩类可能具有成规模铜镍矿化的潜力。

(7) 成矿岩体造岩矿物学标志

成矿带主要含矿镁铁-超镁铁质岩石内的橄榄石普遍具有较高的Fo值,并亏损Ni。红旗岭主要含矿镁铁-超镁铁质岩石的橄榄石Fo值介于83.02~87.27,平均为85.04^[20];漂河川4号岩体的Fo值介于71.50~85.70^[60],介于富含铜镍硫化物矿床的镁铁-超镁铁质岩石的橄榄石Fo值范围内^[61]。红旗岭主要含矿镁铁-超镁铁质岩石的橄榄石Ni含量平均为 $1\ 988\times 10^{-6}$ ^[20],漂河川4号岩体的Ni含量平均为 $1\ 198.4\times 10^{-6}$ ^[60],均低于 $2\ 200\times 10^{-6}$,有利于成矿^[47]。

(8) 地球物理标志

岩浆铜镍硫化物矿床的含矿岩体来源于地幔岩浆,由于镁铁含量较高,且具有高的密度和较强的磁性特征,可以形成较明显的高重力和高磁异常^[62]。成矿带含矿的镁铁质-超镁铁质岩体区域地球物理特征显示为高磁力异常、高重力异常、高极化率异常、低电阻率异常,即“三高一低”的物探异常组合特征^[22]。

在实测物性方面,红旗岭1号岩体矿体呈现显著的高密度($2.85\sim 3.04\text{ g/cm}^3$,平均 2.95 g/cm^3)、高磁化率($1\ 453\times 10^{-6}\sim 4\ 620\times 10^{-6}$,平均 $2\ 600\times 10^{-6}$)及高极化率(5.65%~40%,平均22%)特征。同时其电阻率(847~5 994 Ωm ,平均3 130 Ωm)明显低于围岩和其他岩体

(6 000~15 000 Ωm),与区内地层及中酸性侵入岩具有明显的物性差异,体现出“三高一低”的物性特征。

(9) 地球化学标志

1:20万水系沉积物测量结果显示,Cu、Co、Ni、Cr单元素异常与红旗岭矿床的位置十分吻合,而且水系沉积物的Ni/Co高值区(12~20)亦与红旗岭矿床具有较好的对应关系,表明水系沉积物的Ni/Co比值可以有效地发现规模较大的含矿镁铁-超镁铁岩体^[63]。1:5万水系沉积物Cu、Co、Ni元素组合异常重现,Cu、Ni元素异常强度大,且具一定的浓集中心。1:1万土壤异常中,Cu、Co、Ni元素组合异常可直接有效定位镁铁-超镁铁岩体^[19]。

5 找矿方向

吉中-延边成矿带目前发现的镍矿床均产于晚三叠世镁铁-超镁铁质岩体内,属岩浆熔离-后期贯入型镍矿。依据上述成矿带镍矿床地质特征以及镍矿时空分布规律,分析以往地质勘查资料,明确了红旗岭深部及外围、长仁-獐项-漂河川-西北岔3个地区岩浆型镍矿找矿方向。

(1) 红旗岭深部及外围,地表已识别出33处镁铁-超镁铁质岩体,围岩主要为奥陶系呼兰岩群黄莺屯岩组和小三个顶子岩组变质岩以及二叠系寿山沟组浅变质岩。构造以北西向断裂为主,不同方向断裂构造互相交错。红旗岭已知含矿岩体(1、2、3、新3、9、7号等)均产出于I岩带,受北西向付家-何家沟-北兴隆-长胜北西向断裂带控制。红旗岭I岩带的矿产勘查工作以往多集中于7号和1号岩体的浅部(0~500 m),近年来才逐渐投入深部找矿勘查。杨学立通过红旗岭3号和新3号岩体重磁小波多尺度分析与可控源音频大地电磁反演结果,提出3号岩体下部有岩浆通道存在,深度在1 500~2 000 m范围内^[16]。许志河等通过多种数据处理与信息提取技术,结合2.5维人机交互式反演,推测3号岩体深部存在底部矿体,后经钻孔验证,在3号岩体底部700~1 100 m处见到5个脉状矿体^[17]。1号岩体底部矿体,通过3DMine软件建模发现1上岩体的岩浆通道^[64]。由此可见,红旗岭地区I岩带镁铁-超镁铁质岩体底部找矿潜力巨大。

红旗岭外围干饭盆-德胜山一带,地表出露奥陶系黄莺屯岩组上段黑云斜长变粒岩、硅质条带大理岩

等,德胜山西北产出数个辉长岩体。该区总体处于布格重力异常相对高值区,布格重力异常最大值为 $-33.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;航磁极化异常呈北西转北东向展布的条带状,存在干饭盆和德胜山上西北两个异常中心;重磁剩余异常相关性分析,德胜山上西北部为重磁正相关,同源性好,与辉长岩体的空间位置大体吻合。此外,该区还处于1:5万水系沉积物磐红84A₁-1 Cu、Ni、Co、Pb、Zn异常区的南缘,1:5 000岩石地球化学剖面检查发现该区局部地段Cu、Ni单元元素异常强度高。因此,德胜山地区是寻找岩浆熔离型镍矿的有利地区。

(2)长仁-獐项地区,出露20余个镁铁-超镁铁质岩体,其中11号岩体中型铜镍矿和4号、5号和6号岩体小型铜镍矿床,主要赋存在新元古界青龙村岩群变质岩内。古洞河深大断裂及派生的北西、北东向断裂构造发育。近年来,根据高精度重力、磁法测量,在该区圈定出隐伏岩体——18号岩体。根据地表工程揭露,该隐伏岩体为辉石岩-橄榄辉石岩-辉石橄榄岩,在辉石橄榄岩相中发育磁黄铁矿化、镍黄铁矿化、黄铜矿化等。该岩体分布区呈现明显的“三高一低”的地球物理特征。因此,18号隐伏岩体具有巨大的找矿潜力。

(3)漂河川-西北盆地区,地表已识别出大量的镁铁-超镁铁质岩体,存在漂河川小型矿床(4号和5号岩体)、115号岩体小型矿床、120号岩体镍矿点等。该区发育成矿带内重要的含矿层位——黄莺屯组和范家屯组。受辉发河深大断裂控制,不同方向断裂和二道甸子-漂河川弧形褶皱构造带相互交错。该区已圈定10余处激电异常、磁异常及30余处土壤测量综合异常,异常套合较好。Cr、Ni、Co、Cu元素组合异常与已知的基性-超基性岩体位置较为吻合。由此可见,该区成矿地质条件十分优越,大量的物化探异常尚未查证,是寻找新的岩浆熔离型镍矿的有利地区。

6 结论

文章分析了成矿带镍矿的地质背景条件,总结了围岩地层、岩浆岩、构造、岩石地球化学等9个镍矿找矿标志,探讨了红旗岭深部及外围、长仁-獐项、漂河川-西北盆3个地区岩浆型镍矿找矿方向。

(1)吉中-延边成矿带已发现13处镍矿床(点),均为与镁铁-超镁铁质岩体有关的岩浆熔离型镍矿床。镍矿体主要呈似层状、纺锤状、扁豆状和脉状,赋存在

以辉石橄榄岩相和辉石岩相为主的镁铁-超镁铁质岩内;矿石矿物以镍黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿-黄铁矿组合为主;普遍发育海绵陨铁、固溶体分离、包含、自形-半自形粒状等矿石结构,以及稠密浸染状、浸染状、细脉状、团块状、斑杂状等矿石构造。

(2)成矿带内目前至少厘定出3期镁铁-超镁铁质岩石(华力西期、印支期和燕山期),仅印支期镁铁-超镁铁质岩(245~206 Ma)中镍不同程度富集成矿,常伴生一定规模的铜、钴,形成于印支期造山后伸展的构造背景。

(3)成矿带内镁铁-超镁铁质岩及相关镍矿床主要沿华北板块北缘断裂带分布,具体分东、西两段。其中,东段(长仁-獐项岩群)受古洞河深大断裂及次级断裂构造控制,西段(红旗岭-茶尖岩群、漂河川-西北盆岩群等)则受控于辉发河深大断裂及次级的断裂构造。

致谢:感谢吉林省地质调查院刘万臻工程师为吉林地区镍矿考察提供了大力支持与帮助。

参考文献(References):

- [1]毛景文,杨宗喜,谢桂青,等.关键矿产——国际动向与思考[J].矿床地质,2019,38(4):689-698.
Mao J W, Yang Z X, Xie G Q, et al. Critical minerals: International trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 689-698.
- [2]侯增谦,陈俊,翟明国.战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J].科学通报,2020,65(33):3651-3652.
Hou Z Q, Chen J, Zhai M G. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3651-3652.
- [3]周艳晶,李颖,柳群义,等.中国钴需求趋势及供应问题浅析[J].中国矿业,2014,23(12):16-19,41.
Zhou Y J, Li Y, Liu Q Y, et al. Analysis of cobalt demand trends and brief supply in China[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(12): 16-19, 41.
- [4]王岩,王登红,孙涛,等.中国镍成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J].地质学报,2020,94(1):217-240.
Wang Y, Wang D H, Sun T, et al. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(1): 217-240.
- [5]Mudd G M, Jowitt S M. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments[J]. Economic Geology, 2014, 109(7): 1813-1841.

- [6]孙涛,王登红.中国矿产地质志·镍矿卷[M].北京:地质出版社,2019:1-878.
Sun T, Wang D H. Geology of mineral resources in China: Nickel [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019: 1-878.
- [7]Zhang Z W, Wang Y L, Qian B, et al. Metallogeny and tectonomagmatic setting of Ni-Cu magmatic sulfide mineralization, Number I Shitoukengde mafic-ultramafic complex, East Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 96: 236-246.
- [8]Jia L H, Mao J W, Li B L, et al. Geochronology and petrogenesis of the Late Silurian Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion, NW China: Implications for the tectonic setting and magmatic Ni-Cu mineralization in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. International Geology Review, 2021, 63(5): 549-570.
- [9]张江伟,张照伟,李文渊,等.新疆菁布拉克含铜镍矿杂岩体形成时代与地球化学特征[J].西北地质,2012,45(4):302-313.
Zhang J W, Zhang Z W, Li W Y, et al. Chronology and Geochemistry of Jingbulake complex containing Cu-Ni mineralization, West Tianshan Mountain, NW China[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 302-313.
- [10]Yang S H, Zhou M F. Geochemistry of the ~430-Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: Implications for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt[J]. Lithos, 2009, 113(1/2): 259-273.
- [11]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,2008:71-74.
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: 71-74.
- [12]Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, et al. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30(3/4): 542-556.
- [13]Chen C, Ren Y S, Zhao H L, et al. Age, tectonic setting, and metallogenic implication of Phanerozoic granitic magmatism at the eastern margin of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt, NE China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 144: 368-383.
- [14]Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, et al. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 781-797.
- [15]《中国矿产地质志·吉林卷》编撰委员会.中国矿产地质志·吉林卷[M].北京:地质出版社,2023.
Jilin Geological Survey Institute. Geology of mineral resources in China: Jilin Province[M]. Beijing: Geology Press, 2023. (in Chinese)
- [16]杨学立.铜镍硫化物矿床深部找矿地球物理方法综合研究——以吉林省磐石县红旗岭铜镍矿为例[D].北京:中国地质大学,2012:1-133.
Yang X L. Research of geophysical methods on deep Cu-Ni sulfide deposit exploration: Case studies on Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012: 1-133.
- [17]许志河,孙丰月,顾观文,等.中亚造山带岩浆铜镍硫化物矿床深部找矿——以红旗岭铜镍矿床为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(5):1649-1657.
Xu Z H, Sun F Y, Gu G W, et al. Deep mineral exploration of magmatic Cu-Ni sulfide deposits in the Central Asian Orogenic Belt: Taking Hongqiling Cu-Ni deposit as an example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1649-1657.
- [18]郝爱华,顾连兴,李绪俊,等.中国北方造山带岩浆铜镍硫化物矿床及其地球动力学背景——以吉林红旗岭矿床为例[J].地质学报,2006,80(11):1721-1729.
Xi A H, Gu L X, Li X J, et al. The magmatic sulphide Cu-Ni deposits and their earth dynamics setting in North Orogenic Belt of China: A case study of Hongqiling deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(11): 1721-1729.
- [19]孙英华,周树亮,衣欣,等.吉林红旗岭矿区3号岩体地球化学特征及成因初探[J].地质与资源,2010,19(1):15-21.
Sun Y H, Zhou S L, Yi X, et al. Geochemistry and genesis of No.3 rock body in the Hongqiling orefield, Jilin Province[J]. Geology and Resources, 2010, 19(1): 15-21.
- [20]李爱.吉林红旗岭镁铁-超镁铁质岩体矿物、岩石地球化学及成矿作用[D].长春:吉林大学,2019:1-133.
Li A. Mineralogy, petrogeochemistry and Ni-Cu mineralization for the mafic-ultramafic intrusions from the Hongqiling area, Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 1-133.
- [21]董耀松,范继璋,杨言辰,等.吉林红旗岭铜镍矿床的地质特征及成因[J].现代地质,2004,18(2):197-202.
Dong Y S, Fan J Z, Yang Y C, et al. Study on the metallogenic feature and ore genesis of Hongqiling copper-nickel deposit, Jilin Province[J]. Geoscience, 2004, 18(2): 197-202.
- [22]薛昊日.吉林省镁铁质-超镁铁质岩特征及成矿作用研究[D].长春:吉林大学,2020:1-231.
Xue H R. Features of the mafic-ultramafic rocks in Jilin Province and their metallogenesis[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 1-231.
- [23]董耀松.吉林红旗岭铜镍矿床综合找矿模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(2):152-155,177.
Dong Y S. Synthesis prospecting model of copper-nickel deposit of Hongqiling, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(2): 152-155, 177.
- [24]秦宽.红旗岭岩浆硫化铜镍矿床地质特征[J].吉林地质,1995,14(3):17-30.
Qin K. Geological features of magmatic sulfide Cu-Ni deposit at the Hongqiling, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 1995, 14(3): 17-30.
- [25]汪志刚.吉林东部中生代内生金属矿床成矿作用研究[D].长春:吉林大学,2012:1-193.
Wang Z G. Study on metallogenesis of Mesozoic endogenous metal

- deposits in the eastern part of Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 1-193.
- [26]《中国矿床发现史·吉林卷》编委会. 中国矿床发现史·吉林卷[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-137.
Editorial Committee for Discovery History of Mineral Deposits of China: Jilin Province. Discovery History of Mineral Deposits of China: Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-137.(in Chinese)
- [27]朴景道, 高岫生, 徐明芳, 等. 吉林长仁铜镍矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. 吉林地质, 2011, 30(2): 70-74.
Piao J D, Gao X S, Xu M F, et al. Geologic features and genesis of Changren copper-nickel deposit in Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2011, 30(2): 70-74.
- [28]吴琼, 孙丰月, 刘金龙, 等. 吉林和龙长仁铜镍矿区含矿橄榄辉石岩年代学及其地质意义[J]. 矿床地质, 2019, 38(3): 620-630.
Wu Q, Sun F Y, Liu J L, et al. Zircon U-Pb geochronology of ore-bearing olivine-pyroxenite of Changren Cu-Ni mining area in Helong, Jilin, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(3): 620-630.
- [29]赵东根, 王宏达. 长仁铜镍矿地质特征及成因分析[J]. 吉林地质, 1986(1): 15-28.
Zhao D G, Wang H D. Geological features of the Changren copper-nickel deposit and its genesis[J]. Jilin Geology, 1986(1): 15-28.
- [30]吉林省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质专报(一), 第10号: 区域地质, 吉林省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-698
Jilin Bureau of Geology and Mineral Resources. Geological memoirs of the Ministry of Geology and Mineral Resources, People's Republic of China: Regional geology of Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-698. (in Chinese)
- [31]郝立波, 吴超, 孙立吉, 等. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素特征及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 507-517.
Hao L B, Wu C, Sun L J, et al. Re-Os isotope characteristics of Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit in Jilin Province and its significance [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(2): 507-517.
- [32]Han C M, Xiao W J, Zhao G C, et al. Re-Os isotopic age of the Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit in Jilin province, NE China and its geological significance[J]. Resource Geology, 2014, 64(3): 247-261.
- [33]魏俏巧. 吉林省中东部地区晚海西期—印支期镁铁-超镁铁质岩与铜镍成矿作用[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-136.
Wei Q Q. Late Hercynian-Indosinian mafic-ultramafic rocks of the central-eastern part of Jilin Province and Cu-Ni metallization [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 1-124.
- [34]郝立波, 孙立吉, 赵玉岩, 等. 吉林红旗岭2号岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S3): 166-178.
Hao L B, Sun L J, Zhao Y Y, et al. The No.2 mafic-ultramafic intrusion SHRIMP U-Pb zircon dating and its geological significance in Hongqiling area of Jilin Province, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(S3): 166-178.
- [35]冯光英, 刘桑, 冯彩霞, 等. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1594-1606.
Feng G Y, Liu S, Feng C X, et al. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and the petrogenesis of the ultramafic pluton in Hongqiling, Jiling Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1594-1606.
- [36]刘金玉, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 红旗岭3号含矿岩体地质年龄及其岩石学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(2): 321-326.
Liu J Y, Xi A H, Ge Y H, et al. Mineralization age of the No.3 ore-bearing intrusion and its petrological significance in Hongqiling Cu-Ni sulfide deposits, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 321-326.
- [37]Lü L S, Mao J W, Li H B, et al. Pyrrhotite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of the Hongqiling Ni-Cu sulfide deposits in Northeast China[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 106-119.
- [38]郝立波, 孙立吉, 赵玉岩, 等. 吉林红旗岭镍矿田茶尖岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其意义[J]. 地球科学, 2013, 38(2): 233-240.
Hao L B, Sun L J, Zhao Y Y, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of Chajian mafic-ultramafic rocks in Hongqiling mine field, Jilin Province, and its implications [J]. Earth Science, 2013, 38(2): 233-240.
- [39]汪志刚, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 吉林磐石三道岗含铜镍硫化物矿床岩体群年代学意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(S1): 126-132, 180.
Wang Z G, Xi A H, Ge Y H, et al. Chronology significance of the intrusion group in Sandaogang Cu-Ni sulfide deposit, Panshi, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(S1): 126-132, 180.
- [40]颜颜强, 张福勤, 苗来成, 等. 吉林中部漂河川镁铁-超镁铁质杂岩带的特征: 对华北东北缘构造带性质和演化的约束[J]. 地质通报, 2007, 26(7): 810-822.
Xie H Q, Zhang F Q, Miao L C, et al. Characteristics of the Piaohochuan mafic-ultramafic complex, central Jilin, Northeast China: Constrains on the nature and evolution of the northeastern North China marginal tectonic belt[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(7): 810-822.
- [41]郝爱华, 蔡元峰, 葛玉辉, 等. 四平山门 Cu-Ni 矿化辉长岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2008, 27(1): 57-

63.
Xi A H, Cai Y F, Ge Y H, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Longwang gabbro of Shanmen silver deposit in Siping City and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(1): 57-63.
- [42]张立仕. 吉林中部地区内生金属矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 1-255.
Zhang L S. Study on metallogenesis of endogenous metal deposits in central Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 1-254.
- [43]雷聪聪. 吉林延边和龙地区中生代构造演化: 来自沉积-岩浆岩的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-88.
Lei C C. The Mesozoic tectonic evolution of Helong area in Jilin Province: Constrains from sedimentary-magmatic rocks [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 1-88.
- [44]张广良, 吴福元. 吉林红旗岭地区造山后镁铁-超镁铁岩体的年代测定及其意义[J]. *地震地质*, 2005, 27(4): 600-608.
Zhang G L, Wu F Y. Geochronology significances of the post-orogenic mafic-ultramafic rocks in Hongqiling area of Jilin Province, NE China [J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(4): 600-608.
- [45]秦克章, 翟明国, 李光明, 等. 中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系[J]. *岩石学报*, 2017, 33(2): 305-325.
Qin K Z, Zhai M G, Li G M, et al. Links of collage orogenesis of multiblocks and crust evolution to characteristic metallogenesis in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(2): 305-325.
- [46]Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, et al. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume [J]. *American Journal of Science*, 2012, 311(3): 237-260.
- [47]Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34(3): 227-240.
- [48]Ripley E M, Li C S. Sulfide saturation in mafic magmas: Is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis? [J]. *Economic Geology*, 2013, 108(1): 45-58.
- [49]Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1/2): 143-173.
- [50]Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- [51]Wei B, Wang C Y, Li C S, et al. Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 orthopyroxenite intrusion, Central Asian Orogenic Belt, northeastern China [J]. *Economic Geology*, 2013, 108(8): 1813-1831.
- [52]吕林素, 毛景文, 周振华, 等. 吉林红旗岭 1 号和 7 号岩体中含矿超镁铁质岩的矿物化学特征: 对岩浆演化过程以及铜镍硫化物矿床形成机制的约束[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 319-344.
Lü L S, Mao J W, Zhou Z H, et al. Mineral chemistry of ore-bearing ultramafic rocks from the Hongqiling Nos.1 and 7 intrusions in Jilin Province: Constraints on the magmatic processes and the metallogenesis of Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 319-344.
- [53]支学军. 吉林红旗岭铜镍矿床成矿规律及找矿远景评价[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
Zhi X J. Metallogenic law and prospecting assessment Cu, Ni sulphide deposit in Hongqiling, Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [54]崔翼万, 张绍荣, 刘继德. 吉林省漂河川基性岩带岩体地质特征及其含矿性[J]. *吉林地质*, 1983(1): 44-52.
Cui Y W, Zhang S T, Liu J D. The geological features and its ore-bearing character of the masses in the zone of basic rocks in Piaohochuan, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 1983(1): 44-52.
- [55]杨洪波, 许承平, 牛特, 等. 吉林省和龙市柳水坪镍矿床地质特征及成因初探[J]. *吉林地质*, 2015, 34(4): 61-65, 83.
Yang H B, Xu C P, Niu T, et al. Study on geological characteristics and genesis of Liushuiping nickel deposit in Helong City, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 2015, 34(4): 61-65, 83.
- [56]吕林素, 李宏博, 周振华, 等. 吉林红旗岭富家矿床矿石矿物化学和硫同位素特征——对铜镍硫化物矿床成因及成矿过程的约束[J]. *地球学报*, 2017, 38(2): 193-207.
Lü L S, Li H B, Zhou Z H, et al. Mineral chemistry and sulfur isotopic characteristics of ores from the Fujia deposit in Hongqiling area, Jilin Province: Constraints on the genesis and ore-forming processes of Ni-Cu sulfide deposit [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38(2): 193-207.
- [57]周树亮, 万文周, 孙雪峰, 等. 吉林省红旗岭茶尖矿区镁铁-超镁铁岩石地球化学特征及找矿意义[J]. *地质与资源*, 2010, 19(2): 109-114, 98.
Zhou S L, Wan W Z, Sun X F, et al. Geochemistry and prospecting implication of the mafic-ultramafic rocks in Chajian ore district, Jilin Province[J]. *Geology and Resources*, 2010, 19(2): 109-114, 98.
- [58]张向东, 刘大伟, 张旭, 等. 吉林磐石市三道岗镁铁-超镁铁质岩体成矿地质特征及找矿意义[J]. *吉林地质*, 2009, 28(4): 17-22.
Zhang X D, Liu D W, Zhang X, et al. The ore-forming geological features and prospecting significance of mafic and ultramafic intrusions in Sandaogang area, Panshi City, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 2009, 28(4): 17-22.
- [59]吴利仁. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性[J]. *地质科学*, 1963(1): 29-41.
Wu L R. Metallogenic specialization of basic-ultrabasic rocks in China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1963(1): 29-41. (in Chinese)

- 程地球物理学报, 2017, 14(2): 180-184.
- Chen Y S, Ge Z G, Fu F H. Comprehensive geophysical study on deep iron ore in Anshan area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(2): 180-184.
- [23] 付海涛. 鞍本地区 EW 向深大断裂地质特征[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(4): 471-479.
- Fu H T. Geological characteristics of huge and deep EW fracture at Anshan-Benxi area [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2014, 29(4): 471-479.
- [24] 孙中任, 赵雪娟, 滕寿仁, 等. 相对视电阻率异常的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 30(6): 2760-2765.
- Sun Z R, Zhao X J, Teng S R, et al. Application of relative apparent resistivity anomaly [J]. Progress in Geophysics, 2017, 30(6): 2760-2765.
- [25] 刘明军, 李厚民, 薛春纪, 等. 辽宁弓长岭铁矿床二矿区矿石及类矽卡岩的地球化学特征及其找矿意义[J]. 地质学报, 2014, 88(10): 1889-1903.
- Liu M J, Li H M, Xue C J, et al. Geochemical characteristics and prospecting significance of ores and skarnoid of No. 2 diggings of the Gongchangling iron deposit in Liaoning [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(10): 1889-1903.
- [26] 刘军, 靳淑韵. 辽宁弓长岭铁矿磁铁矿富矿的成因研究[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 80-88.
- Liu J, Jin S Y. Genesis study of magnetite-rich ore in Gongchangling iron deposit, Liaoning [J]. Geoscience, 2010, 24(1): 80-88.
- [27] 李鸿业, 赵秀德. 鞍本地区鞍山式铁矿区地质构造[J]. 前寒武纪研究进展, 1999, 22(3): 22-29.
- Li H Y, Zhao X D. Geological structure of BIF mining district in Anshan-Benxi area, Liaoning Province [J]. Progress in Precambrian Research, 1999, 22(3): 22-29.
- [28] 白银增, 赵涌涛, 王泽蛟, 等. 辽宁查马屯铁矿三维地质建模及深部预测[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 321-325.
- Bai Y Z, Zhao Y T, Wang Z J, et al. 3D geological modeling and deep prospecting prediction in Chamatun iron deposit, Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 321-325.
- [29] 李莹, 何保, 滕寿仁, 等. 辽宁本溪大台沟铁矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石, 2019, 39(1): 74-81.
- Li Y, He B, Teng S R, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Dataigou iron deposit in Benxi, Liaoning Province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2019, 39(1): 74-81.
- [30] 张林. 地质物探综合方法在辽宁张家堡地区隐伏铁矿普查中的应用[J]. 矿产勘查, 2017, 8(2): 288-292.
- Zhang L. Application of comprehensive method of geological exploration and geophysical method in prospecting the concealed iron ore body in Zhangjiapu area, Liaoning [J]. Mineral Exploration, 2017, 8(2): 288-292.
- [31] 郭兰昌, 许雷, 潘洪英. 多种数据处理方法用于辽宁本溪某铁矿的磁异常解释[J]. 科技与企业, 2015(11): 109, 111.
- Guo L C, Xu L, Pan H Y. A variety of data processing methods for magnetic anomaly interpretation of an iron ore mine in Benxi, Liaoning Province [J]. Science and Technology Enterprises, 2015(11): 109, 111. (in Chinese)
- [32] 王建复. 小波多尺度分解用于辽宁铁岭下峪铁矿磁异常的解釋[J]. 物探与化探, 2013, 37(4): 615-619.
- Wang J F. The application of wavelet multi-scale solution to the magnetic anomaly interpretation of the Xiayu iron ore deposit in Tieling, Liaoning Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(4): 615-619.

(上接第 536 页/Continued from Page 536)

- [60] 魏博. 吉林红旗岭-茶尖岭-漂河川地区铜镍硫化物矿床铂族元素和铼-钨同位素地球化学特征[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2013: 1-157.
- Wei B. Platinum-group element and Re-Os isotopic compositions of the magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the Hongqiling-Chajianling-Piaohechuan region, eastern part of the Central Asian Orogenic Belt [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2013: 1-157.
- [61] 姜常义, 凌锦兰, 赵彦锋, 等. 镁铁质-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系——应用于寻找岩浆硫化物矿床[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 51-60.
- Jiang C Y, Ling J L, Zhao Y F, et al. Ore-bearing potential evaluation index system of mafic and ultramafic intrusions: Used to search for magmatic sulfide deposits [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 51-60.
- [62] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-273.
- Zeng H L. Gravity field and gravity exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 1-273.
- [63] 孙立吉. 红旗岭铜镍硫化物矿床地质地球化学特征及找矿技术方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-171.
- Sun L J. Geological and geochemical characteristics of Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit and prospecting techniques for the same type deposit [D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1-171.
- [64] 尹贵志, 翟国红, 贾万金, 等. 吉林省红旗岭矿区 1 号岩体地质特征及深部铜镍资源潜力分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(2): 44-51.
- Yin G Z, Zhai G H, Jia W J, et al. Geological characteristics of No.1 rock mass and potential of deep copper and nickel resources in Hongqiling mining area of Jilin Province [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(2): 44-51.