

北极圈及邻区金属矿床地质特征、 形成作用与找矿潜力

聂凤军 石成龙 赵元艺 李振清

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 北极圈及邻区各类金属矿产资源十分丰富, 其找矿勘查和开发利用历来为西方各国所关注。随着气候不断变暖和交通条件改善, 该地区一大批新矿床发现和一系列新矿山的陆续建成投产必将为全球经济发展和进步注入新的活力。本文首次对北极圈及邻区产出的大型-超大型或代表性金属矿床地质特征和分布规律进行了总结, 对它们的产出环境、形成作用和找矿潜力进行了讨论, 旨在提高人们对这一特殊地区矿产资源重要性的认知水平, 进而为实施“两个市场, 两种资源”的全球矿产资源战略构想提供科学依据。

关键词: 金属矿床; 地质特征; 找矿潜力; 成矿作用; 北极圈及邻区

中图分类号: P618.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)04-0855-

北极圈是指北纬 66°34' 以北的广大地区, 主要由北冰洋、陆地海岸及岛屿和北极苔原所构成。如若以 66°34' 作为北极核心区边界, 那么它的分布面积为 2 100 万 km², 其中陆地面积有 800 万 km², 占全部面积的 38%^[1-3]。考虑到北极圈所有重要成矿区(带)均已经延伸到其南侧的部分地区, 本文所论述的部分矿床不完全位于北极圈之内, 因此, 我们将这一地区统称为北极圈及邻区(以下简称北-邻区)。北-邻区涵盖的国家包括俄罗斯、美国、加拿大、丹麦、冰岛、挪威、瑞典和芬兰, 人口有 900 万左右。需要提及的是, 俄罗斯 1/3 的领土和 2/3 的矿产资源位于北极圈及邻区, 并且是这一地域内矿产开发利用规模最大和时间最长的国家^[1-3]。

受多期次和长时间构造变动、沉积作用和岩浆活动影响, 北-邻区各类金属矿床(点)星罗棋布, 其中瑞典基律纳铁矿床、俄罗斯诺里尔斯克镍-铜-铂族元素矿床和托姆图尔铌多金属矿床、芬兰科密铬矿床、格陵兰伊苏亚铁矿床和菲斯克内塞特铬矿床、加拿大玛丽河铁矿床和沃伊斯湾镍-铜-钴矿床、美

国里德道格铅-锌矿床和美国福特诺克斯金矿床均是称著于世的超大型矿床。统计数据显示, 在过去的 10 年中, 北极地区铂族元素产量占世界总量的 50% 以上, 宝石级和工业级金刚石分别为 26% 和 28%, 镍、钴和铬分别为 22%、21% 和 15%, 铜、铁和铅-锌为 8%、7% 和 18%, 金和银分别为 7% 和 9%^[1-3]。另外, 有数据表明, 俄罗斯北极圈金刚石、铂族元素和镍产量分别占其全国总产量的 99%、98% 和 80%, 铬、锰和金分别为 90%、90% 和 40%^[4]。

随着气候逐渐变暖和陆地面积扩大以及找矿勘查力度增大, 一大批金属矿床的发现与开发必将会大幅度提高这一地区矿产品年产量, 进而为推动全球经济和社会的发展注入新的活力, 因此, 找矿勘查和开发利用历来为国际社会十分关注也是预料之中的事。本文首次对北-邻区代表性镍-铜-铂族元素、铜-金、铁、铬、金和金刚石矿床产出环境、地质特征、形成机理和找矿潜力进行了系统论述, 旨在提高中国地质学家对这一地区成矿作用的认知水平, 了解重要矿床的时空分布规律和找矿模型, 进而为我

收稿日期: 2012-04-24; 改回日期: 2012-05-30

基金项目: 国家重点自然科学基金项目(41030421)和中国地质调查局地质调查项目(1212010911029)资助。

作者简介: 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事金属矿床地质和地球化学研究; E-mail: nfj@mx.cei.gov.cn。

地质勘单位和矿山企业“走出去”在北-邻区开展综合性找矿评价提供技术支撑。

1 成矿环境

从大地构造位置上看,北-邻区地处劳亚和环太平洋成矿域北部,其南部边界横切北美洲、乌拉尔—蒙古、西伯利亚、北科迪勒拉和楚科奇—鄂霍茨克成矿区(带)。研究区范围内波罗的、西伯利亚、北极的和劳伦等前寒武纪古陆块体分布广泛,乌拉尔、贝加尔和格林威尔等造山带也或多或少延伸至这一地域,新元古代、寒武纪和奥陶纪蛇绿岩带或块体星罗棋布。另外,俄罗斯北极圈范围内二叠—三叠系镁铁质侵入岩十分发育,这是一处构造形迹复杂、矿床类型众多和找矿潜力巨大的拼合型成矿区^[5-9]。

以格陵兰岛东海岸(西经 30°左右)、乌拉尔山脉(东经 60°左右)和白令海峡(西经 170°左右)的南北延长线为界,可将北-邻区划分为 3 个不同的区段,既最西部的北美段,中部的欧洲段和东部的亚洲段(图 1):(1)北美区段:主要由格陵兰成矿区大部、北美成矿区和北科迪勒拉成矿带北部所构成。代表性岩(体)层主要出露在格陵兰岛、巴芬岛、伊利莎白女王群岛、维多利亚岛和布鲁克斯岭。区内早前寒武系变质岩和下古生界火山—沉积岩分布广泛,局部地段见有石炭—二叠系沉积岩,其上为侏罗系—白垩系火山—沉积岩所覆盖。各类侵入岩十分发育,其中以前寒武纪和中生代花岗岩类侵入岩为主,占全部岩层(体)出露面积的 26%^[7,9]。北美区段镍—铜—钴、铁、铅—锌和金矿床(点)星罗棋布,代表性矿床有伊苏亚铁矿床、费斯克纳塞特铬矿床、纳卢那金矿床、福特—诺克斯金矿床、玛丽河铁矿床、理德道格铅—锌矿床、尼克钴—金—铋矿床、迪阿维克金刚石矿床和沃依斯湾镍—铜—钴矿床(图 1 和表 1);(2)欧洲区段:主要为欧洲成矿区的北部及其北延部分。代表性岩层(体)主要分布在格陵兰岛东南部、斯瓦尔巴群岛、斯堪的纳维亚半岛北部、新地岛、科拉半岛和法兰士约瑟夫地群岛。区内前寒武系和下古生界变质火山—沉积岩出露广泛,局部地段见有二叠—三叠系沉积岩,侏罗—白垩系火山—沉积岩分布零星。侵入岩十分发育,占全部岩(层)体面积的 15%^[5-9]。欧洲区段铜、铁、铬和金矿床(点)星罗棋布,并且具有十分重要经济价值,其中代表性矿床有基律纳铁—磷矿区、毕蒂瓦格铜—金矿床、维斯卡里拉铜矿

床、凯迪拉金矿床、科密铬铁矿床、艾迪克铜—金矿床和珀辰尔镍—铜—钴矿床(图 1 和表 1)^[5-9];(3)亚洲区段:主要由乌拉尔—蒙古成矿带、西伯利亚成矿区和楚科奇—鄂霍茨克成矿带的北部所构成,代表性岩层(体)主要出现在泰梅尔半岛、北地群岛、新西伯利亚群岛、安茹群岛和费兰格尔岛。除了中部地带为西伯利亚地台前寒武系变质岩所占据外,其他地域古生界—中生界火山—沉积岩地层分布广泛。与前述 2 处区段不同,亚洲区段三叠系火山—沉积岩分布广泛,侏罗—白垩系火山—沉积岩常可见及。各类长英质和镁铁质—超镁铁质侵入岩十分发育,其中后者与镍—铜矿床(点)具有明显时空分布关系。统计数据显示,侵入岩占全部岩层(体)出露面积的 20%^[3-4]。区段内各类镍—铜、铅—锌、金刚石和铁矿床分布广泛,其中代表性矿床有诺里尔斯克镍—铜—铂族元素矿床、雅库茨克金刚石矿区和托姆图尔钽多金属矿床(图 1 和表 1)。

2 代表性矿床地质特征

2.1 诺里尔斯克镍—铜—铂族元素矿床

俄罗斯诺里尔斯克(Noril'sk)镍—铜—铂族元素矿床位于俄罗斯北极圈内,莫斯科东北方向 2 800 km 处,是世界上产出规模最大的镍和铂族元素矿床(图 1 和表 1)^[3,10]。诺里尔斯克矿区主要包括 5 处矿床,它们分别是奥克蒂亚布雷斯基(Oktyabrskiy)、科姆苏莫尔斯基(Komsomolskiy)、塔米尔斯基(Taymirskiy)、斯卡里斯特(Scalistiy)和格鲁布克依(Glubokiy)^[4,11-12]。截止 2004 年底,上述 5 处矿床已探明的矿石量为 4.79 亿 t,其中镍、铜和铂族元素储量分别为 627 万 t、937 万 t 和 2 346 t,平均品位为 1.77%、3.57%和 9.5×10^{-6} 。有数据表明,在过去的几年中,镍、铜和铂族元素的年产量分别为 25 万 t、43 万吨和 97 t,分别占俄罗斯全部年产量的 90%、55%和 99%,其中镍和铂族元素产量占世界年产量的 18%和 58%^[3-4]。

从大地构造位置上看,诺里尔斯克镍矿区位于西伯利亚地台最西北角,北部和南部分别为哈坦嘎(Khatanga)和叶尼赛(Yenesei)沉降带(图 1)^[10]。矿区范围内分布的地层主要有志留系、泥盆系、中石炭统和下二叠统沉积岩,其上为上二叠统大陆溢流玄武岩所覆盖。沉积岩的岩石类型有泥板岩、泥岩、页岩、白云岩、砂岩、细砂岩和蒸发岩以及煤层。三叠纪

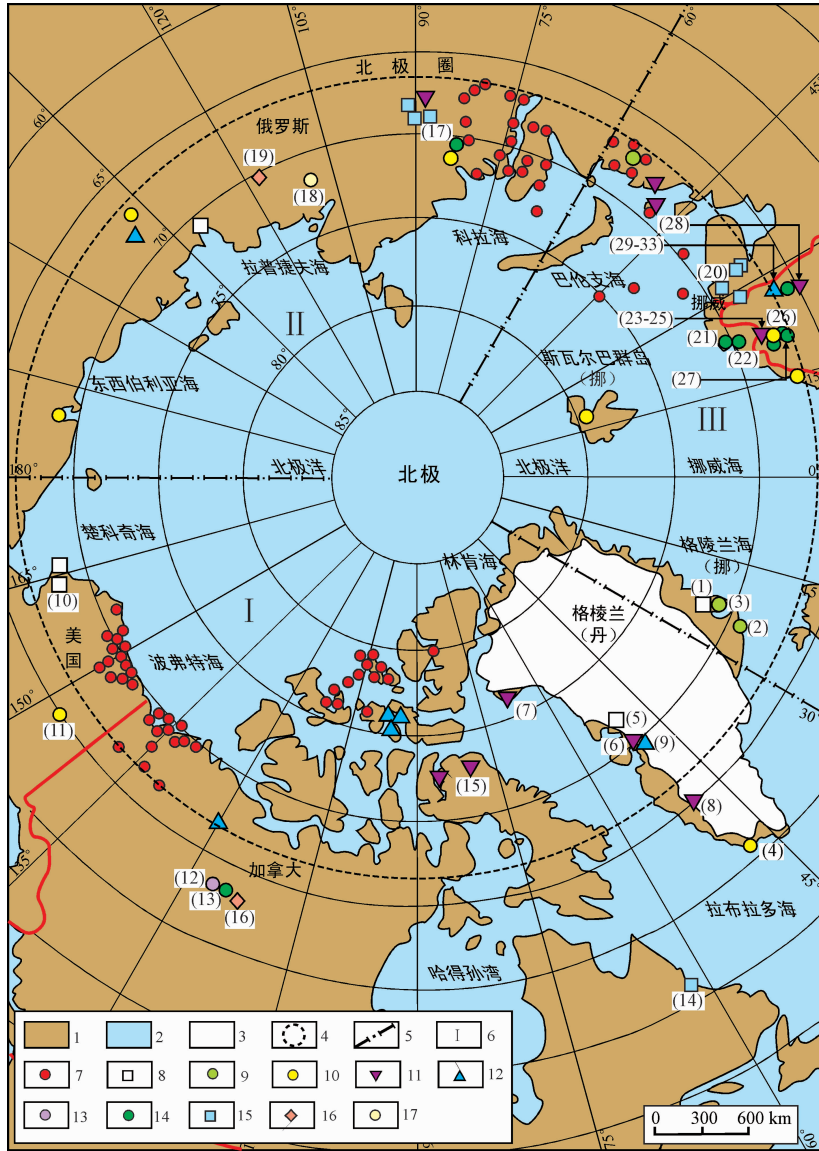


图 1 北极圈及邻区主要油气田和金属矿床(点)分布略图

一般图例方面:1—陆地;2—海洋;3—冰川;4—北极圈;5—成矿区(段)分界线;6—成矿区段(I—北美区段;II—欧洲区段;III—亚洲区段);7—油气田;8—铅—锌;9—钼;10—金;11—铁或铁多金属;12—铬;13—钴或钴多金属;14—铜或铜多金属;15—镍或镍多金属;16—金刚石;17—铌多金属矿床(点)方面:1—格陵兰毕利克里盆铅—锌矿床;2—弗拉莫费吉拉德钼矿床;3—马尔英伯格钼矿床;4—纳卢拿金矿床;5—黑天使铅—锌矿床;6—伊蒂利阿苏克铁矿床;7—劳格库奇—克斯特铁矿床;8—伊苏亚铁矿床;9—费斯克纳塞特铬矿床;10—里德道格铅—锌矿床;11—福特诺克斯金矿床;12—尼克钴—金—铋矿床;13—苏迪安尼铜—银矿床;14—沃伊斯湾镍—铜—钴矿床;15—玛丽河铁矿床;16—迪阿维克金刚石矿区;17—诺里尔—斯克镍—铜—铂族元素矿床;18—雅库茨克金刚石矿床;19—托姆图尔铌多金属矿床;20—珀辰尔镍—铜—钴矿床;21—毕蒂瓦格铜—金矿床;22—维斯卡拉铜矿床;23—玛尔莫伯格铁矿床;24—拉斯瓦尔铜—铅—锌矿床;25—基律纳铁矿床;26—凯迪拉金矿床;27—艾迪克铜—金—银矿床;28—科密铬矿床;29—瓦哈基科铁—铜—金—钴矿床;30—拉里诺加铁—铜—金矿床;31—库尔维迪科铁—铜—金矿床;32—奥图瓦拉铁—铜—金矿床;33—拉加尔维—普瑞铁—钒—磷矿床

Fig.1 Sketch map showing the distribution of major oil-gas fields and ore deposits (ore spots) in the Arctic Circle and its neighboring region
 General legend: 1—Land; 2—Ocean; 3—Glacier; 4—Arctic Circle; 5—Boundaries of metallogenic segment or province; 6—Metallogenic segment or province (I—Northern American; II—European; III—Asian); 7—Oil and gas fields; 8—Lead-zinc; 9—Molybdenum; 10—Gold; 11—Iron or iron polymetallic; 12—Chromium; 13—Cobalt or cobalt polymetallic; 14—Copper or copper polymetallic; 15—Nickel or nickel polymetallic; 16—Diamond; 17—Niobium or niobium polymetallic Mineral deposit: 1—Blyklippen Pb-Zn deposit; 2—Flammefeld Mo deposit; 3—Malmberg Mo deposit; 4—Nalunaq Au deposit; 5—Black Angel Pb-Zn deposit; 6—Itilliarsuk Fe deposit; 7—Laugekoch Kyst Fe deposit; 8—Isua Fe deposit; 9—Fiskenasset Cr deposit; 10—Red Dog Pb-Zn deposit; 11—Fort Knox Au deposit; 12—NICO Co-Au-Bi deposit; 13—Sue Dianne Cu-Ag deposit; 14—Voisey's Bay Ni-Cu deposit; 15—Marry River Fe deposit; 16—Diavik diamond district; 17—Noril'sk Cu-Ni-PGE deposit; 18—Yakutsk (Mir and Udachnaya) diamond district; 19—Tomtor Nb polymetallic deposit; 20—Pechenga Ni-Cu deposit; 21—Bidjovagge Cu-Au deposit; 22—Viscaria Cu deposit; 23—Malmberget Fe deposit; 24—Laisvall Cu-Pb-Zn deposit; 25—Kiuna Fe deposit; 26—Aitik Cu-Au-Ag deposit; 27—Aitik Cu-Au-Ag deposit; 28—Kemi Cr deposit; 29—Vzhjoki Fe-Cu-Au-Co deposit; 30—Laurinoja Fe-Cu-Au deposit; 31—Kuervitikko Fe-Cu-Au deposit; 32—Rautuvaara Fe-Cu-Au deposit; 33—Raajärvi & Puro Fe-V-P deposit

表 1 北极圈及邻区主要矿床地质特征一览表
Table 1 Principal geological features of the major mineral deposits in the Arctic Circle and its neighboring region

矿床名称	构造环境	容矿围岩	侵入岩 (Ma)	矿体特征 (Ma)	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	文献
一、北美区段								
1-格陵兰毕拉克里盆铅锌矿床	东部古近纪张裂火山-侵入岩带	砂岩、砾岩、页岩和泥岩 (C ₃ -P)	粒玄岩和煌斑岩席、脉和墙 (48~50 Ma) ^①	脉状和浸染状矿石构成透镜状和扁豆状矿体	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、石英、绢云母、方解石和重晶石	硅化、重晶石化、碳酸盐化和高岭石化	铅-锌/中, 锌、铅和铜分别为 9.3%、2.1%和 0.7%; 重晶石/中, 95%	[5, 39]
2-格陵兰弗拉莫费吉拉德铅矿床	东部古近纪陷盆地火山-侵入岩带	片麻岩、混合岩和斜长角闪岩 (Ar)	石英斑岩体和火山角砾岩筒以及花斑岩墙 (50~49 Ma) ^②	脉状、网脉状和浸染状矿石构成透镜状和似层状矿体 (39.6±0.1 Ma) ^③	黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、辉钨矿、石英、绢云母和钾长石	云英岩化、钾长石化、硅化和碳酸盐化	大型/0.23%	[5, 32]
3-格陵兰玛尔英伯格铅矿床	东部古近纪裂陷盆地火山-侵入岩带	灰岩、砂岩、片岩和泥岩 (C)	条带状花岗岩和长石-石英斑岩 (28~25 Ma) ^{④⑤⑥}	脉状、网脉状和浸入状矿石构成倒扣碗状和透镜状矿体 (25.8±0.1 Ma) ^⑦	辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钨矿; 石英和绢云母	云英岩化、硅化和碳酸盐化	大型/0.23%	[5, 32]
4-格陵兰纳卢拿金矿床	最南端柯蒂利克古宙造山带	斜长角闪岩、绿泥斜长片岩、片麻岩、碳酸盐岩和燧石岩 (Pt)	黑云母花岗岩、更长环斑花岗岩和斜长化角闪岩 (1 854~1 795 Ma) ^⑧	浸染状、脉状和细脉状矿石构成透镜状、条带状和脉状矿体	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、自然金和银金矿以及石英、绿泥石、绢云母和方解石	硅化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化	金/大型, 20×10 ⁻⁶	[5, 38]
5-格陵兰黑天使铅-锌矿床	克拉通块体 (Ar) 边缘古太古代造山带	碳酸盐、石英岩和片岩以及少量火山岩 (2 000 Ma) ^⑨	元古代花岗岩其杂岩体 (1 860 Ma) ^⑩	块状、条带状和浸染状矿石构成层状和似层状矿体	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、重晶石、石英、绿泥石和方解石	硅化、绿泥石化和重晶石化	锌/大, 12.3%; 铅/大, 4%; 银/中, 29×10 ⁻⁶	[5, 36]
6-格陵兰伊蒂利阿苏克铁矿床	格陵兰岛太古宙克拉通西北部的绿岩带内	斜长角闪岩、片麻岩、燧石、片岩、磁铁矿石岩和碳酸盐 (Ar)	花岗岩, 斜长花岗岩和英云闪长岩以及辉绿岩脉群 (Pt)	薄层状、层状和块状矿石构成层状、条带状和似层状矿体	磁铁矿和赤铁矿以及石英、阳起石、黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿	硅化、阳起石化、滑石化和石榴石化	铁/大型, TFeO 含量 20%	[5, 15]
7-格陵兰芬格库奇-克斯特铁矿床	格陵兰岛太古宙克拉通西北部绿岩带或边缘盆地	斜长角闪岩、片麻岩、磁铁矿石英岩和碳酸盐 (Ar)	斜长花岗岩和英云闪长岩及辉绿岩脉群 (Pt)	层状和块状矿石构成层状、条带状和似层状矿体	磁铁矿和赤铁矿以及石英、阳起石、黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿	硅化、阳起石化和石榴石化	铁/大型, TFeO 含量 30%	[5, 15]
8-格陵兰伊苏亚铁矿床	格陵兰岛太古宙克拉通西北部的绿岩带内	斜长角闪岩、长英质片麻岩、混合岩、磁铁矿石英岩和碳酸盐 (Ar)	花岗岩, 斜长花岗岩和英云闪长岩以及辉绿岩和辉绿岩脉群 (Pt)	薄层状、层状和块状矿石构成层状、条带状和似层状矿体	磁铁矿和赤铁矿以及石英、黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿	硅化、阳起石化、滑石化和石榴石化	铁/超大型, TFeO 含量 30%~40%	[5, 15]

续表 1

矿床名称	构造环境	岩矿围岩	侵入岩 (Ma)	矿体特征 (Ma)	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	文献
一、北美区段								
9-格陵兰费斯克纳塞特格矿床	格陵兰岛太古宙克拉通西南部的铁质火成岩发育区	斜长角闪岩、长英质片麻岩、石英岩和碳酸盐 (Ar)	英云闪长岩、钙长岩、斜长岩和杆柱岩 (2 860±50 Ma) ^①	浸染状和块状磁铁矿构成透镜状和条带状矿体	镁铁矿、假蓝宝石、钛铁矿尖晶石、刚玉、柱晶石、堇青石和绿帘云母	阳起石化、滑石化和石榴石化	铂/大型, Cr ₂ O ₃ 含量 20%~33%	[5, 40]
10-美国里德道格铅-锌矿床	科迪勒拉造山带北段, 阿拉斯加北极地体西段北缘	暗色细砂岩、燧石、硅质或炭质泥岩、页岩和碳酸盐 (C)	碱性辉绿岩脉、闪长玢岩脉和流纹岩脉(墙) (344~355 Ma) ^②	角砾状、团块状和脉状磁铁矿构成层状、似层状和透镜状矿体	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿和白铁矿以及绿帘石、绿帘石、泥质类和石英	硅化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化	铅、锌和银品位分别为 4%、14%和 85×10 ⁻⁶	[9, 22]
11-美国福特诺克斯金矿床	科迪勒拉造山带北段, 延蒂纳构造-岩浆岩带西北端	板岩、绿片岩、长英片岩、千枚岩和砂板岩 (Pt-Pz ₁)	花岗岩闪长岩、黑云母花岗岩和正长花岗岩 (100~90 Ma) ^③	席状脉、网状脉和浸染状磁铁矿构成透镜状、似层状和囊状矿体 (91±2Ma) ^④	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿、自然铂、自然金和金属碲化物	石英、绢云母、钾长石、钠长石、绿泥石和方解石	金/超大型, 金 0.44×10 ⁻⁶	[19~20]
12-加拿大尼克铂-金-银矿床	加拿大地盾西北缘大熊岩浆岩带的南段, 斯莱夫克拉通西侧	变质玄武岩、安山岩和流纹岩以及角砾岩、片岩和粉砂岩 (Pt)	花岗岩闪长岩、石英闪长岩、斜长花岗岩、黑云母花岗岩和正长花岗岩 (Pt ₂₋₃)	角砾状、浸染状、脉状和块状磁铁矿构成似层状、透镜状和囊状矿体	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、赤铁矿、自然金	阳起石、角闪石、绿泥石、黑云母和方解石	铂-金-银/大, 金、铂和银分别为 1.08×10 ⁻⁶ 、0.13%和 16%	[7]
13-加拿大苏迪安尼铜-银矿床	加拿大地盾西北缘大熊岩浆岩带的南段, 斯莱夫克拉通西侧	变质玄武岩、安山岩和流纹岩以及角砾岩、凝灰岩和粉砂岩 (Pt)	花岗岩闪长岩、石英闪长岩、斜长花岗岩、黑云母花岗岩和正长花岗岩 (Pt ₂₋₃)	角砾状、浸染状、脉状和块状磁铁矿构成似层状、透镜状和囊状矿体	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、赤铁矿、自然金	阳起石、角闪石、绿泥石、黑云母和方解石	铜-银/大, 铜和银分别为 0.72%和 2.7×10 ⁻⁶	[7]
14-加拿大沃伊斯湾铜-银-铂矿床	加拿大地盾内恩岩省与丘吉尔岩省片麻岩 (2 843 Ma) 块体碰撞对接带	片麻岩、斜长角闪岩、混合岩、磁铁矿石英岩和碳酸盐 (Ar)	辉长岩、橄长岩和橄辉辉长岩以及辉石岩、斜长岩、花岗岩和正长岩 (334~1 290 Ma) ^⑤	浸染状、条带状和团块状磁铁矿构成似层状、透镜状和椭圆状矿体	磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和黄铁矿和钛铁矿以及橄长石、辉石、斜长石和角闪石	磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和钛铁矿以及橄长石、辉石、斜长石和角闪石	铁-铜-铂/超大型, 镍、铜和铂分别为 1.9%、1.1%和 0.08%	[27]
15-加拿大玛丽河铁矿床	加拿大地盾西北侧巴芬岛中北部元古宙造山带	花岗岩片麻岩、斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩和石英岩 (Pt)	黑云母花岗岩、混合花岗岩和斜长花岗岩 (Pt ₂₋₃)	条带状、层纹状、角砾状和致密块状磁铁矿构成似层状、透镜状和囊状矿体	赤铁矿和磁铁矿以及少量石英、角闪石、绿帘石、绿帘石、石榴子石和方解石	石榴石化、绿泥石化和碳酸盐化	铁/超大型, 65%	[15]
16-加拿大迪阿维克金刚石矿床	加拿大地盾西北部斯莱夫岩省变质岩地体	板岩、千枚岩、片岩、片麻岩和斜长角闪岩 (Ar)	英云闪长岩、石英闪长岩和二云母花岗岩 (Ar) 以及辉绿岩墙 (Pt) 和金伯利岩 (50~35 Ma) ^⑥	含金刚石伯利岩呈陡倾半环状、筒状和管状产出	金刚石、低钙高铬铝榴石、富铬铬铁矿、透辉石和镁铬铁矿	绿泥石化和碳酸盐化	金刚石/特大型, 平均品位为 1.6~3.9 克拉/t (cpt)	[24]

续表 2

矿床名称	构造环境	岩矿围岩	侵入岩 (Ma)	矿体特征 (Ma)	矿物组合	围岩蚀变	规格/品位	文献
二、亚洲区段								
17-俄罗斯诺里尔斯克镍-铜-铂族元素矿床	西伯利亚地台北缘元古生代陆内裂陷带	白云岩、片麻岩、砂岩和砾岩 (P ₁) 以及沉积岩盖层 (P ₋₁)	镁铁质-超镁铁质侵入岩 G ₁ (详见正文)	似层状、席状和囊状矿体 (见正文)	铜和硫化物以及含铂硫化物 (详见正文)	绿泥石化、绿帘石化和蛇纹石化	镍/超大型, 铜/超大型 (详见正文)	[3]
18-俄罗斯雅库茨克金刚石矿床	西伯利亚地台北缘元古生代陆内裂陷带	白云岩、片麻岩、砂岩和砾岩 (C ₋₁)	金伯利岩、辉石岩和闪长岩以及辉绿岩	金刚石在筒状和管状金伯利岩体及其围岩中产出	低钙高铬镁榴石、富铁铬铁矿和镁铬铁铬铁矿	绿泥石化和碳酸盐化	金刚石/大型, 平均品位为 1~3 克拉/t (cpt)	[3]
19-俄罗斯托姆图尔钨多金属矿床	西伯利亚地台北缘元古生代陆内裂陷带	白云岩、片麻岩、砂岩和砾岩 (P ₁) 以及沉积岩盖层 (P ₋₁)	碳酸岩、霓辉正长岩、煌斑岩和黄长岩 (660~370 Ma) ^①	浸染状和条带状矿体构成透视镜状, 似层状和脉状矿体 (660~370 Ma) ^②	氟磷灰石、独居石、烧绿石、磷钇矿、钠长石、钾长石和白云母	钠长石化、钾长石化和云母化	钨-稀土元素-钨-钽/大型, Nb ₂ O ₅ 和 TiO ₂ 分别为 3.5%~4% 和 0.8%~2%	[3]
三、欧洲区段								
20-俄罗斯珀辰奈-铂-钨-铀矿床	科拉半岛西北部的辰奈-珀斯尼克元古代绿岩带	砂岩、粉砂岩、砾岩和玄武质凝灰岩 (P ₁)	辉长岩、辉石岩、堆晶岩、斜方辉石岩和橄辉岩 (1970±52 Ma) ^①	浸染状、条带状和团块状矿体构成似层状和透视镜状矿体	黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和黄铁矿以及橄榄石、辉石、斜长石和角闪石	阳起石化、碳酸盐化、绿泥石化和绿帘石化	银-铜/大型, 镍和铜含量分别为 0.9% 和 1.2%	[5, 13]
21-挪威蒂蒂瓦格铜金矿床	芬诺斯堪地纳地盾北部库哇斯古元古代绿岩带北段	石英岩和斜长角闪岩 (P ₁)	正长岩、辉长岩和辉绿岩 (P ₁₋₃)	浸染状、脉状、角砾状和条带状矿体构成透视镜状, 似层状和脉状矿体 (1886~1885 Ma) ^②	黄铁矿、磁黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、钨钼铁铁矿和碲金矿以及石英、钠长石、阳起石、方解石和绢云母	硅化、钠长石化、阳起石化、绿泥石化和绢云母化	铜/大, 12%; 金/中, 4×10 ⁻⁵	[5, 8]
22-瑞典维斯卡里-拉制矿床	芬诺斯堪地纳地盾北部早元古代绿岩带	碳酸盐、暗色片岩、燧石条带、凝灰质砂岩、凝灰岩和角砾岩	辉长岩、二长岩和花岗岩 (1890~1870 Ma) ^①	浸染状、条带状和团块状矿体构成似层状和层状矿体	黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和磁铁矿以及钠长石、钾长石和石英	钠长石化、方柱石化、电气石化、碳酸盐化和钾长石化	铜/中, 铜 1%~10% (2.29%)	[5, 13]
23-瑞典马尔莫伯格格特矿床	芬诺斯堪地纳地盾北部古元古代绿岩带	流纹岩、粗面岩和粗面安山岩以及凝灰岩、凝灰角砾岩和砾岩 (P ₁)	花岗岩、正长岩和辉绿岩 (1880 Ma) ^①	网脉状、块状、角砾状和球状矿体构成似层状、条带状和层状矿体	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿以及磷灰石、长石、黑云母、角闪石、辉石和石英	硅化、钠长石化、钾长石化和绢云母化	铁/大, TFeO 为 44%	[5, 13]
24-瑞典拉斯瓦-尔铜-铂-铀矿床	芬诺斯堪地纳地盾与加里东造山带接壤部位	砂岩、粉砂岩和页岩 (Cam-D)	尚未见及	浸染状、层纹状和块状矿体构成似层状、条带状和层状矿体	方铅矿、闪锌矿和黄铁矿以及方解石、萤石和重晶石	碳酸盐化、萤石化和重晶石化	铅-铀/超大型, 铅和铀分别为 4.6% 和 0.8%	[5, 41]
25-瑞典基律纳铁矿床	芬诺斯堪地纳地盾北部古元古代绿岩带	流纹岩、粗面岩和粗面安山岩以及凝灰岩、凝灰角砾岩和砾岩 (P ₁)	正长岩、流纹岩、花斑岩、辉绿岩和闪长岩脉 (1880±3 Ma) ^①	网脉状、块状、角砾状和球状矿体构成似层状、似层状和囊状矿体 (1900~1800 Ma)	磁铁矿和磷灰石以及阳起石、黑云母、方解石、石英、辉石、角闪石、滑石和钠长石	硅化、钠长石化、钾长石化和绢云母化	铁/超大型, TFeO 为 67%	[5, 13]

续表 3

矿床名称	构造环境	容矿围岩	侵入岩 (Ma)	矿体特征 (Ma)	矿物组合	围岩蚀变	规模/品位	文献
二、北美区段								
26-瑞典凯迪拉金矿床	芬诺斯堪的亚地盾北部凯迪拉前寒武纪绿岩带内	绿泥斜长片岩、斜长角闪岩、角闪岩、砂岩、板岩和碳酸盐 (Pt)	闪长岩、石英闪长岩、辉长岩、辉长岩和碱性正长岩 (Pt ₂₋₃)	脉状、细脉浸染状、角砾状和团块状矿体 似层状和囊状矿体	黄铁矿、毒砂、辉钨矿、铁磁黄铁矿和白铁矿以及石英、绿云母、绿帘石和方解石	硅化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化	金/超大型, 4.8×10^6	[5, 13]
27-瑞典艾迪克铜-金-银矿床	波罗的地盾北部端 (典卡 (累利阿) 元古宙造山带的诺尔布廷	云母片岩、黑云母片麻岩和长石-黑云母-角闪石片麻岩 (Pt)	伟晶岩和斑状石英二长闪长岩 (1 870 ± 23 Ma) ①	脉状、网脉状和细脉浸染状矿体 似层状和囊状矿体	黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿和辉钨矿	石英、阳起石、绿帘石、电气石、绿帘石、黑云母和方柱石	铜-金/超大型, 0.37% ; 0.2×10^6 和 3×10^6	[5, 17]
28-芬兰科密格矿床	芬诺斯堪的亚地盾的瑞典卡利阿-帕拉波加片岩带	花岗岩类杂岩体 (Ar)	橄榄岩、蛇纹岩、辉石岩、二辉岩、辉长岩、辉长苏长岩和斜长岩 (2 449 ~ 2 430 Ma)	角砾状、浸染状和团块状矿体 石构成薄层状、似层状、透视镜状和囊状矿体	磁铁矿、钛铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿	斜长石、橄榄石、角闪石、蛇纹石、辉石、金云母、滑石和碳酸盐	铬/超大型, Cr ₂ O ₃ 含量为 26% ~ 29%	[5, 17]
29-芬兰瓦哈基科铁-铜-金-铅矿床	芬诺斯堪的亚地盾北部帕拉波加片岩带最东段的米斯地区	斜长角闪岩、绿片岩、片麻岩、石英岩和大理岩 (Pt)	闪长岩、花岗闪长岩和正长花岗岩以及砂卡岩 (Pt)	脉状、浸染状和团块状矿体 构成层状、透视镜状和囊状矿体	磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钨矿、毒砂、闪铜矿、斑铜矿、自然金和铜矿	阳起石、角闪石、绿帘石、黑云母和方解石	铁/中型, 铁、铜和钨分别为 40%、0.4% 和 0.1%、金, (0.2 ~ 2) × 10 ⁶	[5, 31]
30-芬兰里诺加铁-铜-金矿床	芬诺斯堪的亚地盾北部中拉普兰德绿岩带西部	白云质大理岩、石英岩、云母片岩、斜长角闪岩和绿片岩 (Pt)	闪长岩、辉长岩和花岗闪长岩以及砂卡岩 (2 062 ~ 2 017 Ma)	脉状、角砾状和团块状矿体 和囊状矿体	磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、自然金、辉钨矿、独居石和褐帘石	阳起石、方柱石、方解石、黑云母、斜长石、石英和钾长石	铁/中型, 铁、铜和金分别为 43%、0.1% ~ 11.0% 和 (0.1 ~ 6.6) × 10 ⁶	[5, 31]
31-芬兰库尔维迪科铁-铜-金矿床	芬诺斯堪的亚地盾北部中拉普兰德绿岩带西部	白云质大理岩、石英岩、云母片岩、斜长角闪岩和绿片岩 (Pt)	闪长岩、辉长岩和花岗闪长岩以及砂卡岩 (2 062 ~ 2 017 Ma) ②	脉状、角砾状和团块状矿体 和囊状矿体	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、自然金和辉钨矿	阳起石、角闪石、方解石、方柱石、黑云母、斜长石、石英和钾长石	铁/中, 铁、铜和金分别为 36% ~ 53%、0.1% ~ 8.3% 和 (0.1 ~ 6.0) × 10 ⁶	[5, 31]
32-芬兰奥图瓦拉铁-铜-金矿床	芬诺斯堪的亚地盾北部中拉普兰德绿岩带西部	白云质大理岩、石英岩、云母片岩、斜长角闪岩和绿片岩 (Pt)	闪长岩、辉长岩和花岗闪长岩以及砂卡岩 (2 062 ~ 2 017 Ma) ③	脉状、角砾状和团块状矿体 和囊状矿体	磁铁矿、黄铜矿、钛铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿和	钠长石、直闪石、黑云母、方柱石、钾长石、绿帘石、辉石和 (0.1 ~ 2.6) × 10 ⁶	铁/中, 铁、铜和金分别为 43%、0.1% ~ 1.5% 和 (0.1 ~ 2.6) × 10 ⁶	[5, 31]
33-芬兰加瓦尔维-普瑞铁-铜-磷矿床	芬诺斯堪的亚地盾北部帕拉波加片岩带最东段的米斯地区	斜长角闪岩、绿片岩、片麻岩、石英岩和大理岩 (Pt)	闪长岩、花岗闪长岩和正长花岗岩以及砂卡岩 (Pt)	脉状、浸染状和团块状矿体 石构成层状、透视镜状和囊状矿体	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿、磷灰石和斑铜矿	阳起石、绿帘石、方解石、黑云母、滑石、透闪石和蛇纹石	铁/中型, 铁和钨分别为 46% 和 0.11%	[5, 31]

矿床编号; 表 1 中矿床编号与图 1 中矿床编号相同。岩 (体) 层时代: Ar-太古宙; C-P-石炭系; C-P-P-石炭-二叠系; C₂-P₁-石炭统-下二叠统; Cam-D-寒武-泥盆系; Pt-元古宙; Pt₁-元古宙-古生代; Pt₂-元古宙; Pt₃-中新元古代; Pt₄-新元古代; Pz₂-古生代; S-P-志留-二叠系。测试方法: ①-辉钨矿-铁-钨法; ②-含钾矿物钾-钨法; ③-含钾矿物钨-钨法; ④-全岩钨-钨法; ⑤-铅石-钨法; ⑥-铜-钨-钨法; ⑦-铜-钨-钨法; ⑧-全岩钨-钨法; ⑨-全岩钨-钨法。

镁铁质-超镁铁质侵入岩沿诺里尔斯克-塔尔纳赫深大断裂呈群或带分布,并且侵位到泥盆系-二叠系沉积岩地层,其中塔尔纳赫(Talnakh)、哈拉勒赫(Kharallakh)和诺里尔斯克岩体以产出规模大和含矿性好为特点。含矿岩石类型有角砾岩、辉长岩、闪长岩、橄辉长岩、辉绿岩、苦橄辉长岩和辉石岩。镍、铜和铂族元素矿化大都在镁铁质-超镁铁质岩席(墙或脉)及围岩中呈角砾状、条带状、浸染状和块状产出,并且构成似层状、席状和囊状矿体。矿石中金属矿物有磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿和硫铁铜矿以及含铂砷化物、锑矿化、硫化物和碲化物;脉石矿物有角闪石、辉石、绿泥石、阳起石和碳酸盐类。根据岩体、矿床和围岩的空间分布关系,并且结合岩(矿)石样品分析数据,有学者认为,该矿床中的镍、铜和铂族元素可能与幔源岩浆活动有关,而矿石中的硫很可能来自泥盆系-二叠系沉积岩地层,因此,诺里尔斯克矿床的成矿物质具有多来源特点,是多期成矿作用的结果^[3-4,10-12]。

2.2 基律纳铁矿区^①

瑞典基律纳(Kiruna)铁矿区位于瑞典北极圈内,东南方向距吕勒奥(Lula)市 280 km,是世界上产出规模最大的磁铁矿-磷灰石矿床(图 1 和表 1)^[5-9]。迄今为止,在南北长 12 km,东西宽 4~6 km 范围内先后发现和圈定矿床 7 处,确定的铁矿石量为 20 亿 t,全铁平均含量为 67%。在过去的几年里,基律纳矿区的铁年产量大都维持在 1 800 万 t 左右,是全球最大的并采铁矿山^[13-14]。

从大地构造位置上看,该矿床地处芬诺斯堪地纳地盾古元古代绿岩带内,与碱性火山岩和凝灰质沉积岩具有密切时空分布关系。含矿火山-沉积岩的岩石类型主要有碱性流纹岩、粗面岩和粗面安山岩以及相应的熔岩流和火山灰流,局部地段见有砂岩、砾岩和火成碎屑岩。铁矿化大都沿凝灰质沉积岩与粗面灰流凝灰岩接触带呈网脉状、块状、角砾状和球茎状产出,同时构成板状、似层状和囊状。从矿体的深部,经中部到浅部,热液蚀变分别为钠长石化、钾长石化和绢云母化-硅化。尽管在个别钻孔中见到有一定量的赤铁矿,但是铁矿石仍以磁铁矿和磷灰石为主,部分矿石样品含阳起石、黑云母、方解石、

石英、榴石、辉石、滑石和钠长石。大多数铁矿体为正长岩、流纹岩、花斑岩、辉绿岩和闪长岩脉(墙)所切割,其中长英质侵入岩脉锆石的铀-铅年龄为(1880±3) Ma^[14]。根据上述同位素数据,并且结合矿体与岩脉的空间分布关系,可以推测铁矿床的形成时间为 1 880~1 900 Ma^[13-14]。关于基律纳铁矿床成因,目前存在有 2 种学说,其一,不混溶熔体与钙-碱性到略富碱性母岩浆的分离作用可形成富挥发性组份的铁质岩浆,同时形成高品位铁矿床;其二,瑞典卡累利阿-赫德森造山作用可诱发大规模含铁流体喷溢活动,并且在构造有利部位形成产出规模巨大的铁矿床^[5-6,13-14]。

2.3 伊苏亚铁矿区

格陵兰伊苏亚铁矿区位于格陵兰岛东南部,西南方向距努克(Nuuk)镇 150 km,是格陵兰岛产出规模最大的铁矿床(图 1 和表 1)。伊苏亚铁矿床发现于 1962 年,初步估算的铁资源量为 20 亿 t,平均品位为 33%。自 2006 年以来,力拓(Rio Tinto)矿业公司在部分交通便利的铁矿化区(段)进行系统钻(坑)探工作,所获铁的储量为 9.6 亿 t,平均品位 34%,其中露天可采储量为 1.8 亿 t,平均品位 36.48%。如若稍作分选,铁矿石的全铁含量可达 70%,SiO₂、Al₂O₃ 和硫含量分别为 1.9%、0.05% 和 0.2%,完全可以满足钢铁冶炼的要求^[5,15]。

从大地构造位置上看,伊苏亚铁矿床地处格陵兰岛太古宙克拉通西北部的绿岩带内(图 1)。这条太古宙绿岩带沿着格陵兰岛西南海岸线分布,南北长 40 km,东西宽 3.5~6 km,其内产出有规模大小不等的超镁铁质侵入岩和含铁建造(BIF)以及少量镁铁质火山岩^[5,16]。伊苏亚条带状含铁建造及其所在的绿岩带在平面上为一向北开口的“U”字型条带,其西半部的长度为 10 km,宽度为 2~4 km,分布面积 30 km²,东西半部长度为 16 km,宽度为 0.8~2.2 km,分布面积 20 km²。一般情况下,石英和磁铁矿薄层交替出现,并且构成十分明显的条带状构造,上述条带的厚度为几个毫米到数个厘米,其内除了出现有石英和磁铁矿外,还见有少量黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、阳起石、石榴子石和石墨。另外,在铁矿化区的局部地段,也可观察到铁铝榴石和富铁滑石。鉴于伊

① 7 处矿床分别是基律纳、罗萨瓦拉(Luossa Vaara)、瑞克图仁(Rektorn)、亨利(Henry)、哈呼克瓦拉(Haki Vaara)、努库图斯瓦拉(Nukutus Vaara)和图罗瓦拉(Tuollo Vaara)。

苏亚条带状含铁建造的锆石 U-Pb 年龄为 38~36 Ga,因此,它也许是世界上最古老的铁矿石^[15]。关于伊苏亚铁矿床的成因,有学者将深海热液流体与正常海水按照 1:100 的比例进行配比,并且发现此种混合流体的微量和稀土元素含量与伊苏亚铁矿床代表性铁矿石样品十分相近,据此,这部分学者认为伊苏亚铁矿床是一种稀释后的热液流体与镁铁质-超镁铁质火成岩相互作用的产物^[16]。另外,也有学者指出,铁矿床的成矿作用与早前寒武纪构造-岩浆活动有关,海底火山喷发所诱发的含矿流体活动可以形成一系列铁矿体或矿胚,之后,晚期岩浆热液活动对早期矿体或矿胚的叠加和改造致使成矿组分发生不同程度富集,并且形成产出规模巨大的铁矿床^[15]。

2.4 科密铬矿床

芬兰科密(Kemi)铬矿床位于波的尼亚湾最北端,芬兰北极圈南侧,东南方向距奥卢(Oulu)市 90 km,是欧洲产出规模最大的铬矿床。迄今为止,在东西长 15 km,南北宽 0.2~2 km 的范围内先后发现和圈定矿体十余米,确定的矿石量为 2.36 亿 t, Cr₂O₃ 的平均含量为 26%~29%。在过去的几年里,铬矿石的年产量维持在 110~130 万 t(图 1 和表 1)^[5-6,17]。

从大地构造位置上看,该矿床地处芬诺斯堪的亚地盾的瑞典卡利阿-帕拉波加(Perapohja)片岩带内,并且与古元古代层状镁铁质杂岩体具有密切时空分布关系^[17]。科密含矿层状镁铁质岩体侵位到太古宙花岗岩类杂岩体内,岩石类型有橄榄岩、蛇纹岩、古铜辉石岩、二辉岩、异剥岩、辉长苏长岩、浅色辉长岩、斜长岩和花岗岩。部分全岩样品 Pb-Pb 同位素年龄值分别为(2 449±15)Ma 和(2 430±4)Ma^[17]。铬矿化大都在科密层状镁铁质岩墙内呈角砾状、浸染状和团块状产出,并且构成薄层状、似层状、透镜状和囊状矿体。整个矿带的长度为 15 km,宽度为 0.2~2 km,倾斜延伸可达 2.0~2.5 km。从含矿岩体的浅部到深部,矿体的产状分别为薄层状,似层状(团块状)和角砾状。单个矿体的长度为数百米到 4 500 m,厚度为几厘米到百余米。矿石金属矿物有铬铁矿、钛铁矿和磁铁矿以及微量黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿;脉石矿物有斜长石、橄榄石、角闪石、斜长石、蛇纹石、辉石、金云母、滑石和碳酸盐。矿石的 Cr/Fe 比值为 1.53。关于科密铬矿床的成因,部分学者认为,古一中元古代瑞典(典)卡累利阿造山作用诱发大规模幔源岩浆活动,并且形成科密层状镁铁质-超镁铁质侵

入岩,初始镁铁质岩浆多期次侵入活动及其对太古宙基底岩层的相互作用导致铬铁矿沉淀堆积、并且形成大型铬铁矿床^[5-6,17]。

2.5 艾迪克铜-金-银矿床

瑞典艾迪克(Aitik)铜-金-银矿床位于瑞典北极圈诺尔布廷(Norrbotten)成矿省的最南部,西北方向距基律纳铁矿床 95 km,是北欧地区产出规模最大的铜多金属矿床(图 1 和表 1)。迄今为止,该矿区先后探获的铜、金和银的储量分别为 236 万 t, 121 t 和 1 820 t,平均品位为 0.37%, 0.2×10⁻⁶ 和 3×10⁻⁶^[5-6,18]。需要提及的是,诺尔布廷地区是瑞典北部最重要的铁、铜和金产地,主要由 7 处铁矿床和 12 处铜-金矿床所构成,其矿石年产量占瑞典全部铜和金年产量的 90%^[5-6,18]。

从大地构造位置上看,艾迪克矿床地处波罗的地盾北部瑞典(典)卡(累利阿)元古代造山带的诺尔布廷一带,与古元古代绿岩带和侵入岩(1 900-1 800 Ma)具有密切空间分布关系。铜-金矿化大都在古元古代变质岩和侵入岩脉(墙或株)内呈脉状、网脉状和细脉浸染状产出,并且构成似层状、透镜状和囊状矿体。主矿体的露天采场南北长 2 500 m,东西宽 600~800 m,平均值 700 m,倾斜延伸数百米。从主矿体的中心向外,容矿围岩分别为白云母-绢云母片岩、黑云母片麻岩和黑云母-角闪石片麻岩以及伟晶岩和斑状石英二长闪长岩,其中后者锆石 U-Pb 同位素年龄值为(1 870±23)Ma^[18]。矿石的金属矿物主要有黄铜矿和黄铁矿以及微量磁铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿和辉钼矿;脉石矿物有石英、阳起石、绿泥石、电气石、绿帘石、黑云母和方柱石。艾迪克矿床兼具斑岩型和氧化铁型铜-金矿床(IOCG)双重特征,属古元古代构造-岩浆作用及相关流体活动的产物。岩浆热液与蒸发岩的水-岩反应是高盐度含矿流体形成和成矿物质沉淀堆积的主导因素^[18]。

2.6 福特诺克斯金矿床

美国福特诺克斯(Fort Knox)金矿床位于美国阿拉斯加州中东部,费尔班克斯(Fairbanks)东北方向 40 km 处,为北极圈周边产出规模最大的金矿床(图 1 和表 1)。截止到 2010 年底,该矿床已探明的金矿石量 4 亿 t,黄金储量 174 t,平均品位 0.44×10⁻⁶,年产量为 6.2~7.2 t^[19-20]。

从大地构造位置上看,福特诺克斯矿床地处北科迪勒拉造山带廷蒂纳(Tintina)构造-岩浆岩带的

西北端,并且与白垩纪汤伯斯统(Tombstone)深成侵入岩套中的部分花岗岩类侵入岩具有密切空间分布关系。含矿花岗岩和花岗闪长岩呈岩株状侵入到前寒武纪-早古生代变质火山-沉积岩(片岩)地层,同时构成金矿体的容矿围岩。该矿床与东林科里克(Dunlin Creek, 金储量 315 t)、帕狗(Pogo, 金储量 160 t)和布来维尔瑞-科里克(Brewery Creek, 金储量 40 t)等矿床(点)一起构成北美最为著名的廷蒂纳(Tintina)金成矿带^[19-20]。金矿化大多在花岗岩和花岗闪长岩体内呈席状脉、网状脉、浸染状和条带状产出,并且构成透镜状、似层状和囊状矿体。矿石金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿、自然铋、自然金和金铋碲化物;脉石矿物有石英、绢云母、钾长石、钠长石、绿泥石和方解石。主要元素组合为金-铋-碲-砷-锑-钨-钼。辉钼矿的Re-Os 同位素年龄值为 $(91\pm 2)\text{Ma}$ ^[21]。研究表明,该矿床的成矿流体为低盐度含CO₂溶液,形成温度和深度分别为250°~500℃和4~5 km (1.5×10^5 kPa),这是一处与氧化型中酸性岩浆作用及相关流体活动有关的侵入岩型金矿床^[19-20]。

2.7 里德道格铅-锌矿区

美国里德道格(Red Dog)铅-锌矿区位于美国阿拉斯加州布鲁克斯(Brooks)山脉西段,东南方向距菲尔班克斯 760 km,是世界上产出规模最大的铅-锌和重晶石矿区之一(图 1 和表 1)^[9, 22-23]。迄今为止,人们在东西长 35 km,南北宽数百米到几千米的范围内,先后发现和圈定铅-锌和重晶石矿床(点)十余处,获得铅-锌矿石 2.23 亿 t,其中铅、锌和银的储量分别为 3 000 万 t、900 万 t 和数千吨,平均品位为 4%、14%和 $85\%\times 10^{-6}$ ^[23]。

从大地构造位置上看,里德道格矿区地处阿拉斯加北极地体西段北缘,与石炭系沉积岩(355~330 Ma)具有密切空间分布关系^[9, 22-23]。含矿沉积岩地层褶皱和断裂构造十分复杂,并且为海西期(344~355 Ma)碱性辉绿岩脉、闪长玢岩脉和流纹岩脉(墙)所切割。铅-锌矿化大都在石炭系库纳组上部暗色细砂岩、燧石、硅质或炭质泥岩、页岩和碳酸盐中呈条带状、角砾状、团块状和脉状产出,并且构成层状、似层状和厚大镜体状矿体。单个矿体的长度为千余米到 7 000 m,宽度为数百米到千余米,厚度为 30~160 m,铅-锌矿体之上为重晶石层所覆盖,厚度为 65~140 m,分布面积大于 20 km²。矿石金属矿物有闪锌

矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿和白铁矿;脉石矿物有绿泥石、绿帘石、泥质类和石英。研究结果表明,大规模氧化型含矿(盐)热液流体(小于 200℃)与还原型富HS-孔隙流体的混合作用可导致闪锌矿和方铅矿沉淀富集,并且在黑色页岩内形成厚层状铅-锌矿体,属密西西比河谷型(MVT)矿床,而并非是人前人所认为的喷气沉积型(SEDEX)矿床^[23]。

2.8 迪阿维克金刚石矿区

加拿大迪阿维克(Diavik)金刚石矿区位于加拿大西北省的北部、大熊湖东南,西南方向距耶洛奈夫市 260~300 km,是世界上产出规模最大的金刚石矿区之一(图 1 和表 1)^[24-25]。迪阿维克矿区主要由一系列含金刚石金伯利岩管所组成,其中代表性岩管有拉克德格拉斯(Lac De Gras)、埃卡蒂(Ekati)、迪阿维克(Diavik)、斯纳普莱克(Snap Lake)和塔哈拉(Tahara)以及嘎茨奥(Gahcho)和密斯里(Misery)。据不完全统计,这一地区已探明的金刚石资源量为 1.5~2 亿克拉,平均品位为 1.6~3.9 克拉/t^[24-25]。鉴于上述 7 处岩管(矿床或预查区)大体相似,这里仅以迪阿维克矿床为例,对这一地区金刚石矿床产出环境和地质特征进行简要论述。矿区范围内出露的地层主要为中斯莱夫(Slave)岩省太古宙变质岩和新生界火山-沉积岩,英云闪长岩、石英闪长岩和二云母花岗岩呈岩基状或岩株状分布,其锆石 U-Pb 同位素年龄值为 2 610~2 580 Ma^[25]。上述岩体(层)为拉克德格拉斯(2 020 Ma)马里(Maley, 2 230 Ma)和马更些(Mackenzie 1 270 Ma)辉绿岩墙(或脉)所切割。始新世(50~35 Ma)含金刚石金伯利岩在太古宙变质岩内呈陡倾半环状、筒状和管状产出,并且明显受北东向和北西向断裂交汇部位控制。岩筒(管)的直径为几十米到数百米,倾斜延伸为数百米到千余米。主要含矿岩石类型有金伯利岩、凝灰岩和凝灰质角砾岩以及各类碎屑岩和变质沉积岩。常见的金刚石指示矿物有低钙高铬镁铝榴石、富镁铬铁矿、透辉石和镁铬钛铁矿。系统的钻(坑)探结果表明,迪阿维克矿床的矿石量为 2 700 万 t,金刚石为 1 亿 7 百万克拉,平均品位为 3.9 克拉/t^[24-25]。系统对比研究结果表明,迪阿维克矿区无论在产出环境和地质特征上,还是在指示矿物组合和找矿标志上均可与澳大利亚和非洲中南部产出的金刚石矿床相似,它们均属幔源苦橄质和橄榄质岩浆作用及相关流体多期次上侵或爆发活动的产物^[24-26]。

2.9 沃依斯湾镍-铜-钴矿床

加拿大沃依斯湾 (Voisey's Bay) 矿床位于加拿大纽芬兰—拉布拉多省北部,内恩 (Nain) 镇西南 35 km 处。迄今为止,在东西长 5.6 km,南北宽 500~1 200 m 的范围内,人们先后发现和圈定 3 条矿化带,探明镍-铜-钴矿石量 1.5 亿 t,其中镍、铜和钴的金属量分别为 285 万 t、165t 和 12 万 t,平均品位为 1.9%、1.1%和 0.08% (图 1 和表 1)^[10,12,27]。

从大地构造位置上看,沃依斯湾矿床地处内恩 (Nain) 岩省太古宙片麻岩 (2 843 Ma) 块体与丘吉尔 (Churchill) 岩省古太古代片麻岩地体的碰撞对接带内,并且与内恩深成侵入岩套中的沃依斯湾火成杂岩体具有密切时空分布关系^[10,12]。主要岩石类型有辉长岩、橄长岩和橄榄辉长岩以及漏管状辉长岩墙 (feeder dyke)。沃依斯湾矿区主要由两处向东侧伏的含矿侵入岩体及相关镍-铜-钴矿体所组成,即西北部的里得布鲁斯 (Reid Brook, 简称里-布) 和东南部的伊斯特迪普斯 (Eastern Deeps, 简称依-迪)。依-迪岩体为一处裸露在地表的岩株,东西长 2.8 km,南北宽 0.8~1.5 km,出露面积为 3.5 km²。相比之下,里-布岩体为一隐伏的不规则状岩株,长度和宽带分别大于 2 km 和 0.5 km,厚度大于 300 m。镍-铜-钴矿化大都在橄榄辉长岩和橄长岩岩株以及漏管状辉长岩墙内呈浸染状、条带状和团块状产出,并且构成似层状、透镜状和椭圆状矿体。根据系统钻(坑)探结果,人们将整个矿区从西北到东南划分为 3 个矿化带,即西南部、中部和东南部,其中西南部矿化带全部位于里-布岩株内部,是该矿床首先露采矿段。矿石中金属矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和黄铁矿以及方硫镍钴矿、含钴砷镍矿和钛铁矿;脉石矿物有橄榄石、辉石、斜长石、角闪石、方解石、阳起石、绿泥石、绿帘石和阳起石。前人的研究表明,沃依斯湾矿床与俄罗斯诺里尔斯克和澳大利亚卡姆巴尔达镍-铜矿床大体相似,早前寒武纪地壳伸展作用和幔源岩浆活动是导致该矿床形成的主要因素。幔源岩浆沿着连接里-布和依-迪岩株的漏管状岩墙上涌,并且在岩墙和岩株的有利构造部位形成厚大的镍-铜-钴矿床^[10,12,27]。

3 成矿作用与找矿潜力讨论

尽管北-邻区零星的探险活动始于 19 世纪早期,但是系统的找矿勘查和成矿理论研究是从 20 世

纪 20 年代开始的。近百年来,人们先后在这一地区发现镍-铜、铜-金、金、铁、铅-锌和铬矿床以及金刚石矿床(点)千余处,并且具有重要经济价值。上述矿床(点)大体可以划分为以下 8 种成因类型,即斑岩型矿床、与侵入岩有关矿床、火山岩型矿床、氧化铁型铜-金矿床、沉积岩型矿床、变质岩型矿床和造山型矿床以及金刚石矿床 (表 2)。在所有上述矿床(点)中,与镁铁质侵入岩有关的诺里尔斯克镍-铂族元素矿床、火山岩型基律纳铁镍矿床、与长英质侵入岩有关的托姆图尔铌多金属矿床和沉积岩型里德道格铅-锌矿床以及雅库茨克和迪阿维克金刚石矿区均是称著于世的超大型矿床(区),其开发利用所带来的巨大经济效益为世人所关注^[3-6]。

与全球其他金属成矿区(带)一样,北-邻区金属矿床(点、区)成矿元素的富集程度是其背景值的 2-5 个(或更高)数量级。究竟是什么样的地质营力能够导致成矿元素发生如此大规模、突发性和超巨量富集?那么答案只有一个,那就是大陆岩石圈多旋回性拼合和裂解。另外,大气圈和水圈的氧化-还原状态的周期性变化也会对部分矿床(如部分砂金和砂铀矿床)的形成过程产生重要的影响^[28-29]。在地球演化进程中,古大陆块体发生过多期次拼合和裂解,同时诱发有大规模造山运动,其中最具有代表性的造山运动有基诺拉 (Kenorland)、哥伦比亚 (Columbia)、罗地尼亚 (Rodinia) 和潘基亚 (Pangea)。古大陆块体的会聚和离散均可产生无比巨大的 (Exceptional) 热力能和机械能,同时为大规模岩浆作用及相关流体活动提供了动力来源^[7,28-31]。关于北-邻区范围内矿床的产出环境,他们可以是大洋岛弧和古大陆边缘,也可以古大陆内部张裂盆地。各种不同构造背景均有自己特定的成矿专属性,例如大洋弧和岛弧环境内产出有斑岩型金属矿床,而古大陆内部则出现与镁铁质侵入岩有关铜-镍硫化物矿床^[5-6]。尽管部分金属矿床的成矿作用与古大陆拼合所诱发的构造-岩浆活动有关,但是绝大多数矿床是岩石圈伸展过程中流体活动的产物。北-邻区矿床的形成时间大体可以划分为 4 个阶段,即古太古代地壳增生 (3 800~2 700 Ma)、新太古代古陆裂陷 (2 500~2 100 Ma)、古元古代瑞芬造山 (1 920~1 800 Ma) 和中新古陆活化 (250~199 Ma, 50~30 Ma), 其中 80% 矿床的成矿作用与早元古代瑞芬造山作用所诱发的构造-岩浆活动有关^[5-6,31-32]。

表2 北极圈及邻区主要矿床成因类型

Table 2 Genetic type of mineral deposits in the Arctic Circle and its neighboring region

矿床(区)成因类型	矿床成因亚类及代表性矿床	
1-斑岩型金属矿床	格陵兰弗拉莫费吉拉德钼矿床(2)、格陵兰玛尔英伯格钼矿床(3)、挪威毕蒂瓦格铜-金矿床(21)和瑞典艾迪克铜-金矿床(27)	
2-与侵入岩有关金属矿床	2.1 与镁铁质-超镁铁质侵入岩有关矿床	费斯克纳塞特铬矿床(9)、加拿大沃伊斯湾镍-铜-钴矿床(14)、俄罗斯诺里尔斯克镍-铜-铂族元素矿床(17)、俄罗斯珀钦尔镍-铜矿床(20)和芬兰科密铬矿床(28)
	2.2 与长英质侵入岩有关矿床	美国福特-诺克斯金矿床(11)、俄罗斯托姆图尔铌多金属矿床(19)、美国银狐金矿床和美国雷恩洛德金矿床
3-火山岩型金属矿床	3.1 火山岩型铁多金属矿床	玛尔莫伯格特铁-磷矿床(23)和瑞典基律纳铁-磷矿床(25)
	3.2 火山岩型铜多金属矿床	瑞典维斯卡里拉铜矿床(22)和格陵兰布罗格特德铜矿点
4-氧化铁型铜-金矿床	加拿大尼克钴-金-铋矿床(12)、加拿大苏迪安尼铜-银矿床(13)、瑞典艾迪克铜-金-银矿床(27)、芬兰瓦哈基科铁-铜-金-钴矿床(29)、芬兰拉里诺加铁-铜-金矿床(30)、库尔维迪科铁-铜-金矿床(31)、奥图瓦拉铁-铜-金矿床(32)和拉加维-普瑞铁-钼-磷矿床(33)	
5-沉积岩型金属矿床	格陵兰黑天使铅-锌矿床(5)、美国里德道格铅-锌矿床(10)和瑞典拉斯瓦尔铜-铅-锌矿床(24)	
6-变质岩型金属矿床	格陵兰伊蒂利阿苏克铁矿床(6)、格陵兰劳格库奇-克斯特铁矿床(7)、格陵兰伊苏亚铁矿床(8)和加拿大玛丽河铁矿床(15)	
7-造山型金属矿床	格陵兰毕利克里盆铅-锌矿床(1)、格陵兰纳卢拿金矿床(4)和瑞典凯迪拉金矿床(26)	
8-金刚石矿床	加拿大迪阿维克金刚石矿区(16)和俄罗斯雅库茨克金刚石矿区(18)	

注:矿床名称后的编号与表1和图1矿床编号相同。

古元古代斑岩型铜-金矿床(点)大多在欧洲成矿区段的挪威、瑞典和芬兰北部产出,其中挪威的毕蒂瓦格铜-金矿床和瑞典艾迪克铜-金矿床以产出规模大和品位高为特征,具有重要经济价值(图1、表1~2)。另外,在格陵兰岛东部,新生代斑岩型钼矿床分布广泛,并且具有巨大的找矿潜力,玛尔英伯格和弗拉莫费吉拉德矿床即是很好实例^[32]。初步研究表明,尽管研究区古元古代斑岩型铜-金矿床与西南太平洋成矿带同类矿床在形成时代上存在有明显差别,但是二者在产出环境、地质特征和形成作用方面存在有许多相似之处。它们均在初始大洋弧环境内产出,并且与交代地幔楔重熔作用所诱发的岩浆活动有关。大规模富水镁铁质岩浆通过同化-分馏-结晶(AFC)模型或熔融-同化-储集-均一化(MASH)机制产生中酸性岩浆,同时形成大量含矿流体,最终在构造有利部位沉淀-堆积成矿^[8,18,33]。与前述古元古代斑岩型铜-金矿床相比,北-邻区新生代斑岩型钼矿床大都在古大陆内部张裂构造带内产出,并且与新生代碱性侵入杂岩体具有密切时空分布关系,大陆岩石圈的伸展效应可以诱发碱性镁铁质岩浆活动,并且造成陆壳重熔,进而产生含钼岩浆。钼矿床的形成作用与美国克莱麦克斯和中国岔路口钼矿床相似,均属岩浆热液活动产物^[32]。

与侵入岩有关的镍-铜、铬、金和铌多金属矿床

主要出现在俄罗斯(亚洲段和欧洲段),芬兰(欧洲段),格陵兰、美国和加拿大(北美段)(图1、表1~2)。此类矿床大体可以划分为2大类,其一,与镁铁质-超镁铁质侵入岩有关的镍-铜-铂族元素、钴和铬矿床(以下统称镍多金属矿床),代表性矿床有俄罗斯诺里尔斯克和珀钦尔、芬兰科密、格陵兰费斯克纳塞特和加拿大沃伊斯湾;其二,与长英质侵入岩有关的金和铌多金属矿床,代表性矿床有美国福特-诺克斯、银狐和雷恩洛德以及俄罗斯托姆图尔。一般情况下,镍多金属矿床大都在太古宙克拉通块体边缘伸展构造带内产出,分别与古元古代(珀钦尔、科密、费斯克纳塞特和沃伊斯湾矿床)和中生代(诺里尔斯克矿床)富碱性镁铁质-超镁铁质火成岩具有密切时空分布关系。地幔柱对地幔岩石圈的碰接效应以及古大陆的裂解作用可以产生大量玄武质岩浆,并且为矿床的形成提供了物质、热力和动力来源。镁铁质-超镁铁质岩浆的分凝效应和混合作用以及长时间和多期次上侵定位是导致镍多金属堆积和富集,并且形成一系列矿体的主导因素^[10,11-12,27]。相比之下,与侵入岩有关金和铌多金属矿床大都在古大陆边缘远后弧(far back arc)或裂陷带内产出,并且与古生代(托姆图尔)碳酸岩-霓辉正长岩或中生代(福特-诺克斯)黑云母花岗岩-花岗闪长岩具有密切时空分布关系^[3,19-21]。同样,地幔柱与古大陆的碰

接效应以及稍后的伸展作用可诱发大规模混源岩浆活动,同时产生富金或钨多金属的成矿流体,进而在碱性或富碱性火成杂岩体内部及旁侧围岩中形成具有工业价值的矿床^[4,19-21]。

火山岩型铁(主要指铁-磷矿床)和铜矿床主要分布在瑞典北部的基律纳和玛尔莫伯格特以及格陵兰赫卡拉-孙德地区,为北-邻区最重要的金属矿床类型之一。对比研究结果表明,基律纳和玛尔莫伯格特铁-磷矿床以及维斯卡里拉和布罗格特德铜矿床(点)的产出环境大体可与氧化铁型铜-金(IOCG)矿床相似,均在太古宙克拉通边缘古元古代构造-岩浆岩带(100 km 范围内)产出,并且发育较明显的钠长石化或钾长石化蚀变带^[5,13-14]。尽管人们对此类矿床的成因还存在有不同认识,但是矿床与古元古代芬诺造山作用之后伸展环境富碱性镁铁质火成岩(火山岩和侵入岩)密切伴生却是不争的事实,其成矿作用是非造山岩浆作用及流体活动的组成部分^[5,13-14,31]。大陆岩石圈地幔的变质交代效应产生一定规模的镁铁质岩浆活动,并且形成广泛分布的火山岩和侵入岩。富碱性镁铁质岩浆的喷发活动可直接在古海相盆地中形成富含磁铁矿-磷灰石或铜矿体或矿胚,稍后的岩浆侵入作用可致使成矿物质进一步富集,同时形成大规模和高品位铁和铜矿床^[5,13]。

变质岩型铁矿床(条带状建造-BIF)主要分布在加拿大西北部和格陵兰岛中南部地区,代表性矿床有玛丽河、伊苏亚、苏格库奇-克斯特和依蒂利阿苏克。这些铁矿床大都在被动古大陆边缘产出,并且与早前寒武纪(3 800~2 650 Ma)海水沉积作用、热液活动和次生富集效应有关。与世界上其他古老克拉通块体一样,从中太古代开始,北-邻区早前寒武纪块体也开始从以地幔柱为主导的构造体制向以陆-洋俯冲为主导的体制转变。受上述构造作用影响,海底大规模热液活动可将铁质组分携带到大陆架的特定部位,并且在缺氧条件下沉淀形成具有韵律层结构的含铁建造,在此之后,岩浆热液活动和次生富集效应可导致原存矿体铁含量增加,并且最终形成产出规模巨大的铁矿床^[5,15]。

沉积岩型铅-锌矿床主要出现在阿拉斯加北部和格陵兰岛中部以及瑞典中北部,代表性矿床有里德道格铅-锌矿床、黑天使铅-锌矿床和拉斯瓦尔铜-铅-锌矿床,其中前者是北美地区产出规模最大的铅-锌矿床,后三者同样具有重要工业意义。上述

矿床大都在古生代(泥盆纪)远后弧夭折的裂陷盆地内产出,与巨厚碳酸盐地层具有密切时空分布关系,其产出环境和地质特征与澳洲北部芒特艾萨、麦克阿瑟河和世纪沉积岩型铅-锌矿床大体相同^[9,29]。一般来讲,元古宙和古生代时期,古大陆块体聚合和裂解作用可以产生一系列张裂性盆地和热液对流运动。盆地海水对早期沉积岩地层的淋滤萃取作用可以形成含矿流体,并且在构造有利部位形成层状似层状铅-锌矿床。对比研究结果表明,研究区范围内沉积岩型铅-锌矿床与侵入岩型锡-钨和金矿床以及卡林型金矿床(点)在空间上密切共生,这 3 类矿床的产出环境大体相似^[9,22-23,29]。

氧化铁型铜-金(IOCG)矿床主要分布在格陵兰萨法尔图、夸威尔苏克、阿弗尔苏费克和蒂柯萨克地区,加拿大西北省大熊湖地区、育空省威尔尼克地区和纽芬兰-拉布拉多省中央成矿带,瑞典的诺尔布腾地区、芬兰的珀拉普加和中拉普兰德地区^[5,14,31,34](表 1 和表 2)。在所有上述成矿区(带)中,代表性矿床有尼克钴-金-铋矿床、苏迪安尼铜-银矿床、瓦哈基科铁-铜-金-钴矿床和拉里诺加铁-铜-金矿床。此类矿床大多在古大陆边缘拉张性岩浆弧和古克拉通盆地内产出,其容矿围岩主要为早前寒武纪变质火山-沉积岩,局部地段见有红层和蒸发岩。侵入岩主要有辉长岩、闪长岩、二长岩、花岗闪长岩和正长岩以及火成碳酸岩。研究表明,无论是在芬兰和瑞典北部以及格陵兰岛,还是在加拿大的西北和育空地区,构造-岩浆活动在氧化铁型铜-金矿床形成过程中发挥了重要作用。镁铁质到长英质岩浆活动为热液流体的对流循环提供了动力和热力来源,热液流体对围岩(特别是蒸发岩)的萃取效应可形成富钠(或钾)、铜和金的成矿流体,并且在构造有利部位形成具有工业价值的矿床^[5,28,34]。

造山型金矿床和铅-锌矿床主要分布在瑞典北部和格陵兰岛南部,代表性矿床有凯迪拉金矿床、纳卢拿金矿床和毕力克利盆铅-锌矿床^[35-36](表 1~2)。此类矿床大都在会聚板块边缘(前到后弧)挤压性-扭压性构造带内产出,其形成作用与岩石圈减薄所诱发的热液活动有关。与一般岩浆热液矿床(形成深度小于 3 km,最深为 6 km)相比,造山型金和铅-锌矿床的形成深度较大,可达 20 km 左右。研究结果表明,地幔楔的脱挥发份效应可以产生一定规模的流体活动,其对上地壳岩(体)层的淋滤萃取作用可

形成以变质水为主的成矿流体,并且在构造有利部位形成造山型金矿床或铅-锌矿床^[37-39]。

4 结 论

(1)研究区主要由北美、北科迪勒拉、欧洲、西伯利亚和楚科奇—鄂霍茨克以及格陵兰岛成矿区带所构成,属多元拼贴型成矿区。从西到东,大体可以划分为北美段、欧洲段和亚洲段。古大陆岩石圈的裂解和拼合可以导致古陆块多期活化,为矿床形成奠定了物质基础。

(2)初步研究结果表明,北美段镍-铜、铁、金、铅-锌、金刚石和金矿床(点)分布广泛,欧洲段以产出有铜-金、镍-铜、铁和铬矿床(点)为特点,而亚洲段则是寻找镍-铜-铂族元素和钽多金属以及金刚石矿床的有利地区,部分矿床具有特殊性和异常性特点。

(3)研究区前寒武纪古元古代变质岩块体、晚古生代—中生代侵入岩和伸展构造与矿床(点)具有密切时空分布关系,强烈的构造-岩浆作用及相关流体活动对古老变质岩块体的叠加改造作用为成矿物质的大规模运移-聚集和沉淀提供了物质、动力和热力来源。

(4)矿床的形成时间大体可以划分为4个阶段,即古太古代地壳增生、新太古代古陆裂陷、古元古代瑞芬造山和中新生代古陆活化,其中大多数矿床的成矿作用与古元古代瑞芬造山作用所诱发的构造-岩浆活动有关成矿作用,个别矿床则是中生代岩浆活动的产物。

参考文献(References):

- [1] Glomsr S, Aslaksen I (eds.). The Economy of the North[M]. Oslo: Statistics Norway, 2006:1-99.
- [2] Glomsr S, Aslaksen I (eds.). The Economy of the North[M]. Oslo: Statistics Norway, 2008, 1-102.
- [3] Dobretsov N L, Pokhilenko N P. Mineral resources and development in the Russian Arctic [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51:98-111.
- [4] Safonov YG. Mineral potential of the Russian Arctic: state and efficient development [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51:112-120.
- [5] Weihed P, Eilu P, Larsen R B, et al. Metallic mineral deposits in the Nordic countries [J]. Episodes, 2008, 31(1):125-132.
- [6] Weihed P, Arndt N, Billström K et al. Precambrian geodynamics and ore formation: the Fennoscandian Shield [J]. Ore Geology

- Reviews, 2005, 27:273-322.
- [7] Corriveau L. Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective [C]// Goodfellow W D (ed.). Mineral Deposits of Canada. A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Special Publication, 2007, (5): 307-328.
- [8] Nie F J, Bjfilykke A, Nilsen K S. The origin of Proterozoic gold-copper deposits in the Bidjovagge district, Finnmark, Northern Norway, as deduced from rare earth element and Nd-Sr isotope evidences of calcite [J]. Resource Geology, 1999, 49 (1):13-25.
- [9] Moore T E, Wallace W K, Bird K J, et al. Geology of northern Alaska—the geology of Alaska [M]. Geol. Soc. Am., 1994,G-1:49-140.
- [10] Lightfoot P C. Advances in Ni-Cu-PGE sulphide deposit models and implications for exploration technologies [C]//Milkereit B (ed.). Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007:629-646.
- [11] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits; key factors in their genesis [J]. Miner Deposita, 1999, 34:227-240.
- [12] Naldrett AJ. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits; implications for exploration [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44:283-316.
- [13] Harlov D E, Andersson U B, Foerster H, et al. Apatite-monazite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden [J]. Chemical Geology, 2002, 191:47-72
- [14] Nyström J O, Henriquez F. Magmatic features of iron ores of the Kiruna-type in Chile and Sweden; Ore textures and magnetite geochemistry [J]. Economic Geology, 1994, 89: 820-839.
- [15] Stendal H, Secher K. Iron ore potential in Greenland [J]. Geology and Ore, 2011, (19):1-12.
- [16] Dymek RF, Klein C. Chemistry, petrology and origin of banded iron formation lithologies from the 3 800 Ma Isua supracrustal belt, west Greenland [J]. Precambrian Research, 1988, 39:247-302.
- [17] Alapieti T, Kujanpää J, Lahtinen J J, et al. The Kemi stratiform chromitite deposit, northern Finland [J]. Economic Geology, 1989, 84:1057-1077.
- [18] Wanhainen C, Broman C, Martinsson O. The Aitik Cu-Au-Ag deposit in Northern Sweden: A product of high salinity fluids [J]. Miner Deposita, 2003, 38:715-726.
- [19] Hart C J R, Baker T, Burke M. New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold system: Tintina gold belt in Yukon [C]//Tucker T L, Smith M T (eds.). The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries [M]. British Columbia and Yukon Chamber of Mines Special Volume, 2000, 2:145-172.
- [20] Bakke A A. The Fort Knox "porphyry" gold deposit: structurally controlled stockwork and shear quartz vein, sulfide-poor mineralization hosted by a Late Cretaceous pluton, east-central

- Alaska [C]//Schroeter TG (ed), Porphyry Deposits of the Northwestern Cordillera of North America. Can. Inst. Min. Metall. Spec., 1995, 46:795-802.
- [21] Lang J R, Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding [J]. Miner. Deposita, 2001, 36:477-489.
- [22] Moore D W, Young L E, Modene J S, et al. Geologic setting and genesis of the Red Dog Zn - Pb - Ag deposit, western Brooks Range, Alaska [J]. Econ. Geol., 1986, 81:1696-1727.
- [23] Schardt C, Garven G, Kelley K D, et al. Reactive flow models of the Anarraaq Zn - Pb - Ag deposit, Red Dog district, Alaska [J]. Miner. Deposita, 2008, 43:735 - 757.
- [24] Bryan D, Bonner R. The Diavik diamond mine, Lac de Gras, northwest Territories, Canada [C]//Kjarsgaard BA (ed.). VIIIth International Kimberlite Conference, Slave Province and Northern Alberta Field Trip Guidebook, 2003: 61-65.
- [25] Graham I, Burgess J L, Bryan D, et al. Exploration history and geology of the Diavik kimberlites, Lac de Gras, Northwest Territories, Canada [C]//Gurney J J, Gurney J L, Pascoe M D, et al (eds.). Proceedings, VIIth International Kimberlite Conference, 1999, (1):262-279.
- [26] Scott S B H. Kimberlites [C]//Mitchel RH (ed.). Undersaturated Alkaline Rocks: Mineralogy, Petrogenesis, and Economic Potential. Mineralogical Association of Canada, Short Course, 1996, 24:217-243.
- [27] Lightfoot P C, Keays R R, Evans-Lamswood D, et al. S saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: origin of the Voisey's Bay Ni - Cu - Co sulfide deposit, Labrador, Canada [J]. Miner. Deposita, 2012, 47:23-50.
- [28] Groves D I, Bierlein F P, Meinert L D, et al. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits [J]. Economic Geology, 2010, 105:641 - 654.
- [29] Groves D I, Bierlein F P. Geodynamic settings of mineral deposit systems [J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164:19-30.
- [30] Meyer C. Ore deposits as guides to geologic history of the Earth [J]: Annual Reviews of Earth and Planetary Science, 1988, 16:147 - 171.
- [31] Niirani T. Iron oxide - copper - gold deposits in Finland: Case studies from the Peräpohja schist belt and the Central Lapland greenstone belt [D]. PhD thesis of the Department of Geology, University of Helsinki, 2005, 187:1-27.
- [32] Brooks K, Tegner C, Stein H, et al. Re-Os and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of porphyry molybdenum deposits in the East Greenland and volcanic-rifted margin [J]. Economic Geology, 2004, 99:1215 - 1222.
- [33] Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution and tectonic controls [J]. Economic Geology, 2005, 100:801-818.
- [34] Kolb J, Stensgaard B M. Iron oxide copper - gold mineralising systems in Greenland [J]. Geology and Ore, 2009, 13:1-12.
- [35] Secher K, Stendal H, Stensgaard B M. The Nalunaq gold mine [J]. Geology and Ore, 2008. (11):1-12.
- [36] Thomassen B. The Black Angel lead-zinc mine at Maarmorilik in West Greenland [J]. Geology and Ore, 2003, (2):1-12.
- [37] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geological time: A global synthesis [J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18:1 - 75.
- [38] Stendal H, Secher K. Gold mineralization and gold potential in South Greenland [J]. Geology and Ore, 2002, (1):1-12.
- [39] Thomassen B. The Blyklippen lead-zinc mine at Mesters Vig, East Greenland [J]. Geology and Ore, 2005, 5:1-12.
- [40] Peck W H, Valley J W. The Fiskenaasset anorthosite complex: stable isotope evidence for shallow emplacement into Archean ocean crust [J]. Geology, 1996, 24(6):523 - 526.
- [41] Richard D T, Willden M Y, Marinder N E, et al. Studies on the genesis of the Laisvall sandstone lead - zinc deposit, Sweden [J]. Economic Geology, 1979, 74:1255-1285.

Geological features, ore-forming processes and exploration potential of the Arctic Circle and its neighboring region

NIE Feng-jun, SHI Cheng-long, ZHAO Yuan-yi, LI Zhen-qing

(Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China)

Abstract: Nickel-copper, copper (gold), iron-apatite, chromium and diamond deposits and ore spots are widely distributed in the Arctic Circle and its neighboring region (ACNR), and show considerable economic significance. Studies show that the ACNR will be one of the most important metal suppliers and resource bases in the world in the coming years. With the discovery of several world-class mineral deposits and the re-opening of a number of old mines, the metallogenic studies and mineral exploration have attracted increasing attention among the international mining communities. In carrying out the idea of "two types of mining markets and two kinds of mineral resources" in China, the ACNR will be one of the best choices. Although the ACNR is still a frontier area for exploration and mining, the present activity of exploration is very promising. For the purpose of clear understanding of the crust evolution and regional metallogeny, this paper has summarized the geological features and temporal-spatial distribution regularities. Meanwhile, the geological setting, ore-forming processes and exploration potential have also been discussed. The purpose of this study is to fill the knowledge gap of our understanding of the metallogeny of the ACNR. To better find new mineral deposits in the ACNR, we should conduct more detailed researches both on regional metallogeny and on individual mineral deposits.

Key words: mineral deposit; geological feature; exploration potential; ore-forming process; Arctic Circle and its neighboring region

About the first author: NIE Feng-jun, male, born in 1956, senior researcher, supervisor of doctor candidates, engages in the study of mineral deposits; E-mail: nfjj@mx.cei.gov.cn.