

北极圈及邻区重要矿产资源找矿勘查新进展

聂风军¹, 张伟波², 曹 毅¹, 赵宇安³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 石家庄经济学院, 石家庄 050031)

摘 要: 北极圈及邻区各类矿产资源十分丰富, 是美国、加拿大和北欧诸国以及俄罗斯的重要矿产资源供给基地, 其找矿勘查和开发利用历来为国际矿业界所关注。受国际市场金属价格坚挺、气候变暖和基础设施改善等多种因素的影响, 近几年来, 有关国家加大了这一地区找矿勘查和矿业开发投资力度, 并且发现和圈定了一大批矿床。这些新发现矿床的开发利用必将为区域和全球经济发展以及社会进步注入新的活力。对美国、加拿大和北欧诸国(含格陵兰岛)以及俄罗斯北极圈及邻区产出的主要矿床(点)的空间分布特点和找矿潜力进行了讨论, 对该区的找矿勘查和开发利用态势进行了总结, 旨在在进一步提高我国地质学家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; 矿床类型; 找矿勘查态势; 找矿潜力分析; 北极圈及邻区

中图分类号: P618.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2013)05-0001-08

考虑到北极圈(北纬 66°34' 以北的广大地区)所有重要成矿区(带)均已经延伸及其南侧的部分地区, 因此, 我们将北极圈及其周边地区统称为北极圈及邻区(以下简称北一邻区)。这一地区涵盖的国家包括俄罗斯、美国、加拿大、丹麦、冰岛(格陵兰岛)、挪威、瑞典和芬兰, 其中俄罗斯 1/3 的领土和 2/3 的矿产资源位于北一邻区, 并且是该区矿产开发利用规模最大和时间最长的国家^[1-6]。

从大地构造位置上看, 北一邻区的中心部位是北冰洋, 其周边为北美、欧洲和亚洲陆地边缘。波罗的、西伯利亚、北极和劳伦等古陆块分布广泛, 乌拉尔、贝加尔和格林威尔等造山带也都或多或少延伸至这一地域。受多期次和长时间构造变动、沉积作用和岩浆活动影响, 区内新元古代和早古生代蛇绿岩带(或块体)星罗棋布、中生代火成岩十分发育, 各个时代构造形迹十分复杂, 为各类金属矿床的形成提供了有利条件^[1,4-10]。因此, 笔者将对美国、加拿大和北欧诸国以及俄罗斯主要矿床的空间分布特点和找矿潜力进行总结, 对该区目前的找矿勘查态势进行讨论, 旨在在进一步提高我国地质学家对这一特殊地区矿产资源重要性的认知水平, 进而为我国地勘单位和矿山企业“走出去”在北一邻区开展综合性找矿评价提供科技支撑。

1 问题的提出

人口增长、环境污染和资源短缺是制约人类社

会进步的三大“瓶颈”要素, 能否解决好上述问题是关系到人类前途命运的大事。目前, 整个世界正处在经济和社会发展的“十字路口”, 有学者将其称为“引爆点”(tipping point)条件^[4]。有数据表明, 百余年来, 欧洲诸国和美国在全球经济发展进程中起到了“发动机”作用, 为人类社会进步做出了应有的贡献^[2-6]。时至今日, 欧共体(EU)和美国分别占全球价值创造力的 25% 和 23%, 而中国仅为 7%, 印度所占比例更是少得可怜。随着一些新兴大国的崛起, 预计到 2030 年, 中国和印度的全球价值创造力将分别占世界的 15% 和 9%, 而欧共体和美国将分别降低至 15% 和 16%, 届时, 全球几十亿人口将会从贫困状态解脱出来, 逐步达到西方发达国家现有的生活水平^[4]。另外, 到 2050 年, 全球人口数量将会从今天的 62 亿达到 92 亿。可以预料, 随着世界人口数量骤增和生活水平提高, 原材料的需求量必将会大幅度增加, 进而推动全球矿业的持续快速发展。基于上述分析, 就不难理解为什么人们对北一邻区矿产资源找矿勘查的关注度高于以往任何一个时期, 如何合理开发利用这一特殊地区的矿产资源将是一项极具挑战性的工作。

有数据表明, 北一邻区石油和天然气产量分别占全球总量的 11% 和 26%, 储量分别为 5.3% 和 22%; 与已探明的储量相比, 未发现石油和天然气的资源量分别占全球未发现总量的 21% 和 28%^[2-3,7]。油田和气田主要分布在西西伯利亚地台北缘、格陵

收稿日期: 2013-01-14

编辑: 禹华珍

基金项目: 中国地质调查局项目“全球巨型成矿带区域构造与成矿地质背景对比研究”(1212011120326)

作者简介: 聂风军(1956—), 男, 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: nfjj@cei.gov.cn

兰岛东部、阿拉斯加和巴伦支海,其蕴藏量分别占北—邻区全部资源量的 85%和 82%,可能是全球未来最重要的能源供给基地^[7]。与前述油气资源一样,北—邻区钼、铂、镍、铁、钴、铬、钨和铅-锌以及磷灰石、蛭石和金刚石矿床(点)星罗棋布,并且具有重要经济价值,钼、铂和镍的产量分别占世界总产量的 40%(俄罗斯)(括号内为此类金属的主要生产国,下同)、15%(俄罗斯)和 11%(俄罗斯),宝石级和工业级金刚石分别为 21%(俄罗斯、加拿大)和 23%(俄罗斯、加拿大);铁、钴和铬分别为 5.2%(瑞典)、11%(俄罗斯)和 4.2%(芬兰),铜、铅和锌分别为 3.8%(俄罗斯、瑞典)、5.6%(美国)和 7.8%(美国、加拿大);钨、铝和银分别为 9.2%(加拿大、俄罗斯)、3.6%(俄罗斯)和 3.6%(美国);磷灰石和蛭石分别为 11.4%(俄罗斯)和 5.8%(俄罗斯)^[2-3]。在上述所有金属矿床(点)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钽多金属矿床、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-锌矿床和福特诺克斯金矿床均是称著于世的超大型矿床,其成矿理论研究、找矿勘查和开发利用工作备受国际矿业界关注。

2 找矿勘查新进展

2.1 格陵兰岛

格陵兰岛(简称格岛)位于北美洲东北部,面积 217 万 km²,是世界第一大岛。从大地构造位置上看,除了在岛东、北和西部的一些地区出露有古生界和中、新生界火山—沉积岩地层外,大部分地区由早前寒武纪变质岩和侵入岩所构成^[8,10]。该岛的找矿勘查和开发利用工作始于 1800 年,迄今为止,先后发现和圈定各类铁、金、铅-锌、钼、铂族元素、铀和稀土元素以及金刚石矿床(点)百余处,其中伊苏亚铁矿床、纳卢娜金矿床、费斯肯纳色特铬-铂族元素矿床、马特费尔特铌-钽矿床、伊利马萨克稀有元素-铀矿床、希特伦峡湾铅-锌矿床和斯卡尔嘎尔德铂族元素矿床均是世界级的大型矿床^[8,10]。铁矿床呈条带状和厚层状主要产出在太古宙绿岩带,其中伊苏亚、伊迪利亚苏克和莫尔维勒—布格特矿床以产出规模大、杂质组分少和品位中等为特点,属阿尔戈马型铁矿床^[8,10-11]。金矿床(点)大都在太古宙克拉通周边的古元古代火山—沉积岩内呈脉状和浸染状产出,其中瑟尔米利戈尔苏克、库苏克和斯图尔以及纳卢娜矿床(点)最具有代表性,属造山型金矿床(点)^[8,10,12]。格岛元古宙镁铁质—超镁铁质侵入杂

岩体分布广泛,并且与铬、铂族元素和金矿床(点)具有密切时空分布关系,以费斯肯纳色特铬-铂族元素矿床和斯卡尔嘎尔德铂族元素矿床最具有代表性^[13]。格岛铌、钽、铀和稀土元素矿床(点)星罗棋布,并且具有重要经济价值,矿化大都发生在中—新元古代和中生代碱性侵入杂岩体(含火成碳酸岩)内,呈浸染状、条带状和块状产出,并且构成透镜状、脉状和囊状矿体,其中马特费尔特和伊利马萨克矿床以产出规模大、矿石品位高和元素组合复杂为特点^[10]。另外,格岛北部古生界沉积岩地层十分发育,并且产出有沉积岩型铅锌矿床(点),其中希特伦峡湾矿床铅-锌资源量大于千万吨。需要指出的是,格岛北部和西部的凯格尔卢萨格地区新生代金伯利岩墙(床)分布广泛,是寻找金刚石矿床的有利场所,找矿勘查工作正在进行之中。

2.2 加拿大北极区

该区铁、镍-铜、锌、铅、钼和铀矿床(点)分布广泛,并且具有重要经济意义。在所有已发现的矿床(点)中,沃依斯湾镍-铜矿床、玛丽河铁矿床和拉布拉多铁矿区以及迪阿维克金刚石矿区均是世界级矿床(区),其成矿理论研究和找矿勘查经验备受关注^[4,14-17]。20 世纪 90 年代之前,加拿大金刚石找矿勘查和开发利用处于空白状态,随着 1991 年耶洛奈夫北部 300 km 处拉格第格斯(Lac de Gras)含金刚石金伯利岩筒的发现与开采,该国一举成为世界金刚石生产大国,此后,迪阿维克、斯乃普湖、密斯里、嘎楚库、塔合拉和埃卡蒂矿床的相继发现与开发为加拿大金刚石产量持续增长提供了有利保障^[14-15]。巴芬岛玛丽河铁矿床是北极圈内产出规模最大的铁矿床之一,其探明的储量为 4 亿 t 左右,平均品位为 65%。矿山建设已经开始,预计在 2014 年投入生产,年产铁矿石 1 800 万 t^[17]。与前述金刚石和铁矿床(区)相比,沃依斯湾镍-铜-钴矿床地处拉布拉多半岛的东北部,为世界上最大镍-铜-钴矿床之一^[16]。考虑到加拿大北部位于北美克拉通北缘,其大地构造背景和成矿地质条件与格陵兰岛比较相似,因此,无论是铁和镍-铜矿床,还是金刚石矿床,它们的找矿勘查经验完全可以应用于格陵兰岛矿产地质调查与评价。为了多快好省地在加拿大北—邻区开展隐伏矿床的综合性评价工作,自 2009 年开始,加拿大联邦政府在该区实施了以铜、银、金、金刚石、铀和稀土元素为主要找矿目标的地质调查项目。尽管上述工作已经进行了 4 年,但是所获各项成果尚不能满足找矿工作的需要。有鉴于此,以最新的找矿技术为支撑的地质填图项目已经启动,旨在提高这一地区矿产资源潜力评价工作的科技含量。为了保障该项目的顺利实施,加拿大联邦政府和有关

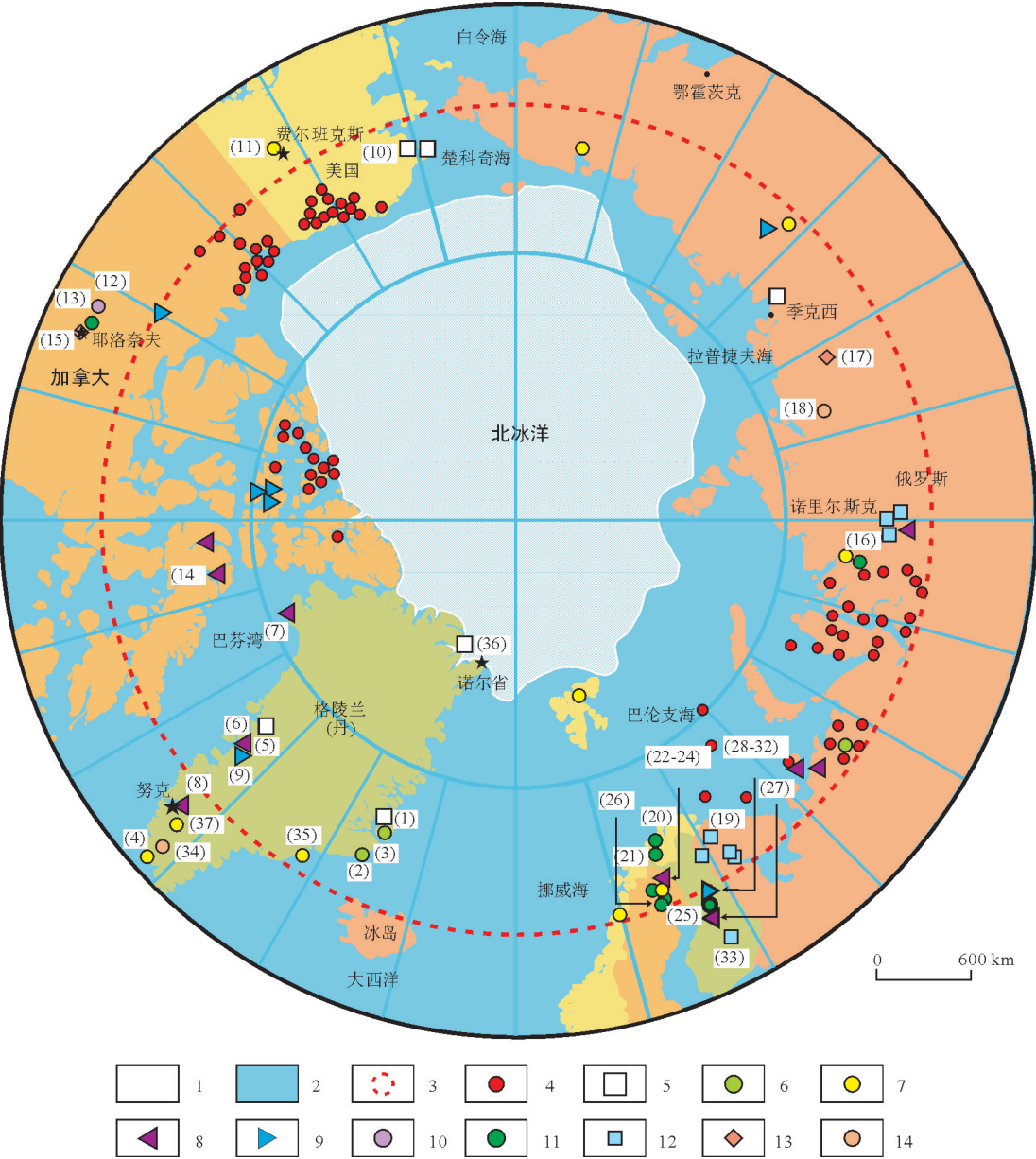


图 1 北极圈及邻区主要油气田和金属矿床(点)分布略图

Fig.1 Sketch map showing the distribution of major oil-gas fields and metal ore deposits(prospects) in the Arctic Circle and its neighboring region

1. 北冰洋; 2. 海洋; 3. 北极圈; 4. 油气田; 5. 铅-锌; 6. 钼; 7. 金; 8. 铁或铁多金属; 9. 铬; 10. 钴或钴多金属; 11. 铜或铜多金属; 12. 镍或镍多金属; 13. 金刚石; 14. 铌多金属。

矿床(点)方面: 1. 格陵兰巴利克里盆铅-锌矿床; 2. 弗拉莫费吉拉德钼矿床; 3. 玛尔英伯格钼矿床; 4. 纳卢娜金矿床; 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. 费斯克内塞特铬矿床; 10. 里德道格铅-锌矿床; 11. 福特诺克斯金矿床; 12. 尼克钻-金-铋矿床; 13. 苏迪安尼铜-银矿床; 14. 玛丽河铁矿床; 15. 迪阿维克金刚石矿区; 16. 诺里尔斯克镍-铜-铂族元素矿床; 17. 雅库茨克金刚石矿床; 18. 托姆图尔铌多金属矿床; 19. 珀辰辰镍-铜-钴矿床; 20. 毕蒂瓦格铜-金矿床; 21. 维斯卡里拉铜矿床; 22. 玛尔莫伯格铁矿床; 23. 拉斯瓦尔铜-铅-锌矿床; 24. 基律纳铁矿床; 25. 凯迪拉金矿床; 26. 艾迪克铜-金-银矿床; 27. 科密铬矿床; 28. 瓦哈基科铁-铜-金-钴矿床; 29. 拉里诺加铁-铜-金矿床; 30. 库维迪科铁-铜-金矿床; 31. 奥图瓦拉铁-铜-金矿床; 32. 拉加尔维-普瑞铁-钒-磷矿床; 33. 塔维瓦腊镍-钴-铜-锌矿床; 34. 伊犁马萨克铌-钽-稀土元素-铀矿床; 35. 斯喀尔嘎德金-铂族元素矿床; 36. 希特伦峡湾铅-锌矿床; 37. 塔尔图克金矿床。

省(区)政府分别提供不同数额的经费资助,其中联邦政府的资助额度为每年 1 亿加元。上述项目的实施不仅可以在加拿大北一邻区优选出一系列找矿靶区,而且为国内外矿业公司在这一地域进行找矿勘查和矿山开发起到引领作用。

2.3 美国北极区

阿拉斯加州(以下简称阿州)是美国在本土以外面积最大的一块陆块,分布面积为 152 万 km^2 ,其中在北极圈的面积 50 万 km^2 ,占全州面积的 1/3。1872 年,美国地质学家首次在阿州东南部发现了砂金矿床,并且对其进行过小规模开采。在接下来的 25 年内,砂金的勘查和开采一直处于“升温”状态。1897 年阿州邻区克隆代克特大型砂金矿床的发现与开发将该地区的“淘金”热潮推向“顶峰”,并且极大地推动了经济和社会发展。在“淘金”热发生 2 年后的 1898 年,人们又在阿州北极圈内首次发现了石油和天然气,其储量和产量占美国总量的 50% 左右。另外,阿州煤炭资源储量巨大,占美国总量的 40% 左右。自 1987 年至今,矿业开发一直是阿州的支柱性产业,各类矿产品的年产值大体在 60 亿美元左右^[4,18-21]。在过去的 10 年内,矿业开发投入的经费超过 40 亿美元,为成矿理论研究和找矿勘查工作注入了新的活力,并且导致了一系列矿床的发现。就金矿床来讲,尽管金矿床找矿勘查许可证的面积仅占全州土地面积的 2%,但是黄金储量却从 1980 年的数百万盎司增加到今天的 1.4 亿盎司。另外,铜(金、钼)和铅-锌矿床的找矿勘查工作也获重要突破,里德道格铅-锌-银矿床、福特-诺克斯金矿床和彼伯利铜-金-钼矿床均为世界级大型到超大型矿床,它们以其独特的地质特征和所产生的巨大经济效益而为国际矿业界所关注^[4]。北极圈内分布的里德道格(Red Dog)矿床是世界上产出规模最大的铅-锌-银矿床之一,铅、锌和银的储量分别为 3 000 万 t、900 万 t 和数千吨,平均品位分别为 4%、14% 和 85×10^{-6} ^[19-20]。北极圈附近的福特-诺克斯(Fort Knox)金矿床的黄金储量为 174 t,平均品位为 0.44×10^{-6} ,是全球范围内产出规模最大的金矿床之一^[21]。与上述 2 处矿床相比,彼伯利(Pebble)铜-金-钼矿床位于布里斯托尔湾,已探明的铜、金和钼储量分别为 2 496 万 t、2 079 t 和 148 万 t,平均品位分别为 0.42%、 0.35×10^{-6} 和 0.03%,其产出规模在全球斑岩型铜矿床中列第二位。另外,矿区范围内铜、金和钼的推测资源量分别为 1 160 万 t、1 257 t 和 104 万 t,平均品位为 0.24%、 0.26×10^{-6} 和 0.02%^[22]。

2.4 欧洲北极区

欧洲北极区是指挪威、瑞典和芬兰北纬 $66^{\circ}34'$

以北的广大地区,其陆地面积占北欧诸国面积的 1/3。该区地处芬诺斯堪的纳地盾北部,是欧洲最重要的矿产资源供给基地^[2-4]。这一地区的矿业开发和找矿勘查活动始于 8 世纪中叶,迄今为止,先后在欧洲北极圈及邻区发现和圈定了各类矿床(点)数千处,其中大型矿床 155 处。统计数据表明,在所有 155 处矿床中,正在开采的有 47 处,尚未开发的有 51 处和准备开发的有 57 处^[4]。该区产出的重要金属矿床有:毕蒂瓦格铜-金矿床(挪威)、艾迪克铜矿床(瑞典)、凯迪拉金矿床(瑞典)、艾迪克铜-金-银矿床(瑞典)、莱斯瓦铅-锌矿床(瑞典)、基律纳和马尔英伯格特铁矿床(瑞典)、科密铬矿床(芬兰)、拉加尔维-普瑞铁-钨-磷矿床(芬兰)、瓦哈基科和拉里诺加铁-铜-金-钴矿床(芬兰)以及塔维瓦腊镍-钴-铜-锌矿床^[23-30]。在上述所有矿床中,基律纳和马尔英伯格特矿床是欧洲北极区产出规模最大、矿石品位最高和开采历史最长的铁-磷灰石矿床。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,全铁平均质量分数为 67%。在过去的几年里,基律纳矿区的铁产量大都维持在 1 800 万 t 左右,是全球最大的并采铁矿山^[24-25]。近几年来,受国际市场铁矿石价格持续坚挺的影响,两处矿山的年产量维持在 3 000 万 t 左右。基律纳矿区东南部数十千米处的艾迪克矿床是一处世界级金矿床,同时,也是目前北极圈内产出规模最大的金矿床,探明的矿石量和年开采量分别大于 10 亿 t 和 1 800 万 t^[27]。需要提及的是,艾迪克金矿床兼具斑岩型和氧化铁型(IOCG)矿床的双重特征,具有良好的找矿前景。芬兰北极圈内的拉普兰地区产出有一系列大中型金-铂、镍-铜和铁-铜矿床,其中代表性金-铂矿床有佩尼卡特和波尔蒂莫,铁-铜矿床有瓦哈基科和拉里诺加,金矿床有凯迪拉,镍-铜矿床有科威特萨^[4,28]。因此,挪威的芬马克、瑞典的北诺尔布腾和芬兰的拉普兰地区正在成为全球找矿勘查的“热点”地区之一。

2.5 俄罗斯北极区

俄罗斯北极圈及其邻近的雅库茨克(Yakutia)、玛嘎丹(Magadan)和楚克奇(Chukchi)地区面积占俄罗斯全部国土面积的 2/3,人口占全国人口总量的 1/3^[1-6]。区内油气、镍-铜、金、铁、锡和铀以及磷灰石和金刚石矿床(点)星罗棋布,总价值为 1.5 兆亿~2 兆亿美元。统计数据表明,这一地区油和气产量分别占俄罗斯总产量的 70% 和 95%,金刚石、铂族元素和镍产量所占比例分别为 99%、98% 和 80%,铬和锰产量所占比例均为 90%,金产量所占比例为 40%。铜、铋、锡、钨和稀有金属产量所占比例从 50% 至 90% 不等。在所有金属矿床(点)中,位

于北极圈内的诺里尔斯克(Noril'sk)镍-铜-铂族元素矿床,是世界上产出规模最大的镍和铂族元素矿床^[31]。截止2004年底,矿区范围内已探明矿石量为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2346t,平均品位为1.77%、3.57%和 9.5×10^{-6} 。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t和97t,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%^[5-6]。有数据显示,在过去的5年内,俄罗斯北极圈及邻区先后有25处新建矿山投入生产,其中绝大多数为镍-铜矿床^[2-3,10]。科拉半岛是另外一处矿产资源极为丰富的地域,其中镍-铜矿床和磷灰石矿床均以产出规模大和矿石品位高为特征。珀辰尢(Pechenga)矿床的镍和铜储量分别为470万t和350万t,镍和铜的品位分别为1.2%和0.9%,属世界级大型矿床^[4,5-6,8]。同时,该区海比尼(Khibiny)矿床是世界上产出规模最大的磷灰石矿床,其产量占俄罗斯全部产量的3/4。除了上述镍-铜和磷灰石矿床外,科拉半岛铁、钴、钛和稀有金属矿床(点)分布广泛,并且具有重要经济价值。与科拉半岛和诺里尔斯克成矿区(带)相比,雅库茨克、玛嘎丹和楚克奇地区金刚石、金-银和铌多金属矿床(点)星罗棋布,部分矿床(如密尔-马达契纳西金刚石矿床、托姆图尔铌多金属矿床和纳它尔卡金矿床)独特的地质特征、较大的产出规模和较好的开采条件为国际矿业界所关注,并且具有良好的找矿前景^[5-6]。

3 成矿潜力分析

尽管北极圈的陆地和海洋面积分别只有全球的1/20和1/25,但未发现石油和天然气的资源量分别占世界未发现总量的21%和28%,金属储量和资源量也占有相当高的比例,是未来全球最重要的矿产资源供给基地^[1,7-8]。初步研究结果表明,北-邻区已经发现,并且正在开采的主要矿床类型有变质岩型铁矿床,火山岩型铁和铜多金属硫化物矿床,岩浆岩型镍、铂族元素、铬和钛-钒矿床,造山型金矿床,斑岩型铜-金矿床,与侵入岩有关的铜、金矿床和沉积岩型铅锌矿床以及金刚石矿床^[1,8]。上述各种类型矿床的成矿理论研究和找矿勘查工作一直受到人们的高度关注,年度投资经费达到数十亿欧元。近几年来格陵兰岛、瑞典、芬兰、加拿大北部氧化物型(IOCg)铜-金矿床和碱性岩型铌-钽-稀土元素-铀矿床的发现进一步提升了人们在这些地区寻找大型或巨型金属矿床的信心^[10,28,32-33]。另外,近些年来人们在芬兰北部古元古代黑色页岩地层中找到的塔维

瓦腊(Talvivaara)矿床是一种新的矿床类型,其镍、钴、铜和锌的储量分别为221万t、20万t、131万t和502万t,其独特的地质特征和巨大的产出规模为世界矿床学界所关注^[8,30]。

从大地构造角度看,芬诺斯堪的纳地盾、北美克拉通、西伯利亚地块、乌拉尔山和楚科奇-鄂霍茨克造山带均或多或少延伸至这一地域,构成一幅绚丽多彩的地质画卷。就区域成矿带划分来讲,北-邻区涵盖了北科迪勒拉成矿带、楚科奇-鄂霍茨克成矿带、乌拉尔-蒙古成矿带、西伯利亚成矿区和欧洲成矿区的北部以及格陵兰成矿区的大部,其产出特点可概述为地质环境复杂、矿床数量众多、产出规模巨大和找矿潜力优越^[1-10]。有数据表明,北-邻区油气、金属和非金属资源蕴藏量巨大,是人类未来最重要的矿产资源供给基地^[2-4,7]。尽管通过数百年的找矿勘查和矿业开发活动,新的矿床(埋深大都小于300m)还在不断地被发现,但是受冰川冻土覆盖层的影响,北-邻区部分地域尚未进行过有效的找矿勘查,因此,采用最新的成矿理论和技术方法,通过系统的综合性找矿评价工作,寻找到大型金属矿床是完全有希望的。

从北-邻区已发现的各类金属矿床(点)的时空分布特点来看,它们大规模成矿的高峰期分别出现在太古宙、古元古代、早古生代、晚古生代和中新生代,其中以古元古代、早古生代和晚古生代最为明显,成矿作用贯穿整个地壳演化进程^[1,5-6,8-10]。太古宙时期(3800~2500Ma),受地幔柱构造作用影响,海底热液喷溢活动致使铁质组分发生一定规模的运移和富集,并且在构造有利地段沉淀形成铁矿层或“矿胚”。稍晚时候,区域变质和变形作用对原生铁矿层进行叠加改造,进而形成条带状含铁建造(磁铁矿石岩)。通过上述方式形成的铁矿床有格陵兰岛伊苏亚、劳格库奇-克斯特和伊蒂利阿苏克铁矿床(3800~3500Ma),加拿大玛丽河和拉布拉多铁矿床^[1,8,10-11,17]。另外,太古宙镁铁质-超镁铁质岩浆活动亦可在特定构造部位形成规模较大和品位较高的铬矿床,如格陵兰岛的费斯肯纳色特铬-铂族元素矿床 $[(2860 \pm 50) \text{ Ma}]$ 和塔尔图克金矿床(3000~2500Ma)以及芬兰的科密铬矿床(2449Ma)^[1,8,10-11,13]。需要提及的是,无论是在芬诺斯堪的纳地盾北部,还是在格陵兰克拉通中南部,在英云闪长岩-斜长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)岩体内部均可观察到浸染状或团块状钼和镍矿化点,局部地段构成条带状和透镜状矿化体。格陵兰岛努克东南部英云闪长质-花岗闪长质片麻岩的同位素年龄为3700Ma,而侵入到其内的花岗岩和辉长岩的同位素年龄值变化范围为2860~2550Ma^[10]。笔者

等对上述地区太古宙片麻岩中产出的 9 件辉钼矿样品进行了铼-钨同位素年龄测定,所获的等时线年龄为 $(2\,503 \pm 90)\text{Ma}$ ^[34]。初步研究结果表明,格陵兰岛东南部铬、铂族元素、钨和金矿化点以及元素异常带分布广泛,其形成作用可能与新太古代和古元古代之交的构造—岩浆活动事件有关,是开展找矿潜力评价的有利地区。北—邻区古元古代地壳演化历史大体可以划分为早期 $(2\,400 \sim 2\,100\text{Ma})$ 裂陷阶段和晚期 $(2\,000 \sim 1\,800\text{Ma})$ 造山阶段^[1,8,10]。古元古代强烈裂陷(伸展)作用诱发一定规模的岩浆活动,并且在太古宙变质岩地层中形成一系列镁铁质—超镁铁质和长英质侵入岩脉(墙、席)群及相关金属矿化点,格陵兰岛东南部、瑞典和芬兰北部以及加拿大巴芬岛地区铁、镍、铜-金矿化点就是此期构造—岩浆活动的产物^[8,10]。与前述伸展构造活动及相关成矿作用相比,古元古代晚期各个早前寒武纪变质岩块体之间以及陆块与洋盆之间的俯冲、碰撞和对接造山作用可导致局部地壳缩短,并且诱发大规模岩浆活动,同时产出一系列大、中型金属矿床。俄罗斯珀辰尔镍-铜-钴矿床 $[(1\,970 \pm 52)\text{Ma}]$,挪威毕蒂瓦格铜金矿床 $(1\,886 \sim 1\,885\text{Ma})$,瑞典维斯卡里拉铜矿床 $(1\,890 \sim 1\,870\text{Ma})$,凯迪拉金矿床 $(1\,823\text{Ma})$ 、艾迪克铜-金-银矿床 $[(1\,870 \pm 23)\text{Ma}]$ 、基律纳和玛尔莫伯格铁钴矿床 $(1\,800\text{Ma})$ 和格陵兰岛黑天使铅-锌矿床就是古元古代金属矿床的代表,其形成作用与古元古代造山作用具有密切成因联系^[1,8,10,24-25]。中—新元古代时期,古陆块的相互作用再次诱发构造—岩浆活动,并且形成规模巨大的金属矿床,加拿大沃伊斯湾世界级镍-铜-钴矿床 $(1\,334 \sim 1\,290\text{Ma})$ 和尼克钻-金-铋矿床的发现与开发即是很好的实例^[1,10,16,32-33]。另外,格陵兰岛南部伊利马萨克铋-钼-稀土元素-铀矿床亦是新元古代碱性岩浆活动的产物。需要指出的是,上述所有金属矿床的地质特征均十分复杂,它们要么兼具斑岩型和造山型矿床特征,要么兼具火山岩型和氧化铁型(IOCg)矿床特点,要么是斑岩型和氧化铁型矿床的混合体,暗示了其复杂的形成过程,属多期岩浆作用及相关流体活动相互叠加的结果。早—中古生代时期,受全球板块构造作用影响,前寒武纪块体再次发生活化,各种古陆块之间和古陆块与洋盆之间的碰撞与俯冲以及古陆块体内部伸展作用均可诱发不同规模的构造—岩浆作用及相关流体活动,并且为铅-锌、铜、钨多金属、镍-铜和铬矿床的形成创造了有利条件。鉴于北—邻区不同地区成矿环境差别较大,同一时期产出的矿床类型和元素组合也不完全一样,代表性矿床有俄罗斯托姆图尔钨多金属矿床、瑞典拉斯瓦尔铜-铅-锌矿床、美国里德道格铅-锌矿床

和格陵兰岛希特伦峡湾铅-锌矿床^[1,2-4,8,10]。晚古生代时期,受地幔柱作用影响,俄罗斯北极地区发生大规模幔源岩浆活动,并且形成大面积分布的镁铁质—超镁铁质岩浆岩,其内产出有诺里尔斯克镍-铜-铂族元素矿床。中—新生代,北极圈及邻区进入到一个全新的地壳演化阶段,洋壳与古大陆的俯冲和碰撞作用诱发大规模岩浆活动,并且在古大陆边缘形成巨厚的火山—沉积岩及其相关的钨和金矿床。美国福特诺克斯金矿床 $(100 \sim 90\text{Ma})$,格陵兰岛的毕利克里盆铅-锌矿床 $(50 \sim 48\text{Ma})$ 、斯卡尔嘎德金-铂族元素矿床、弗拉莫费吉拉德钨矿床 $(50 \sim 49\text{Ma})$ 和玛尔英伯格钨矿床 $(28 \sim 25\text{Ma})$ 就是这一阶段岩浆作用及相关流体活动的产物^[1,8,10,21]。另外,无论是在加拿大的北部,还是在格陵兰岛的中南部中新生代金伯利岩岩管均分布广泛,其中个别岩管内见有金刚石,是寻找金刚石矿床的有利地区。

4 结 论

(1)北—邻区早前寒武纪变质岩块体出露广泛、构造形迹复杂、侵入岩发育和金属矿床(点)星罗棋布,具有十分优越的成矿地质条件,是我国矿山企业“走出去”,实施“两个市场、两种资源”战略构想的最佳选区。

(2)欧洲北—邻区铁-磷灰石、铜-金和金矿床大都产出在古元古代绿岩带内,与碱性侵入岩脉群具有密切时空分布关系。这些矿床大都兼具两种以上矿床地质特征,其形成作用由多个阶段所构成,是多期岩浆作用及相关流体活动的产物。

(3)俄罗斯北—邻区镍-铜-铂族元素矿床(点)分布广泛,并且分别与古元古代和三叠纪镁铁质—超镁铁质侵入岩有关,为古大陆内部伸展构造作用的产物。该区和加拿大拉布拉多东北部是寻找镍多金属矿床的理想场所。

(4)格陵兰岛中南部地区铁、铬、金和稀有(土)元素矿床(点)星罗棋布,并且分别与太古宙绿岩带、镁铁质侵入岩和碱性杂岩体有密切时空分布关系,前述侵入岩属古大陆内部伸展作用的产物,是寻找稀有(土)元素和金矿床的有效目标之一。

(5)无论是在加拿大北部,还是在格陵兰岛中南部,在早前寒武纪变质岩内均产出有一系列中—新生代金伯利岩岩管,其地形地貌、产出环境、岩石学和矿物学特点与加拿大北—邻区已发现的金刚石矿床相似,是寻找金刚石矿床的有利地区。

参考文献:

- [1] 聂凤军,石成龙,赵元艺,等. 北极圈及邻区金属矿床地质特征、形成作用与找矿潜力[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 855-870.

- [2] Glomsr S, Aslaksen I. The economy of the North[M]. Oslo: Statistics Norway, 2006: 1-99.
- [3] Glomsr S, Aslaksen I. The economy of the North[M]. Oslo: Statistics Norway, 2008: 1-102.
- [4] Morten S. Mining in the Arctic[C]// Anon. 5th Arctic Frontiers Conference Oral Report, Tromsø, Norway, 2011-January-23-28. [S. l.]: [s. n.], 2011: 1-32.
- [5] Dobretsov N L, Pokhilenko N P. Mineral resources and development in the Russian Arctic[J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51: 98-111.
- [6] Safonov Y G. Mineral potential of the Russian Arctic: State and efficient development[J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51: 112-120.
- [7] Gautier D L. Oil and gas resource potential north of the arctic circle[C]// Anon. 2011 International Oil Spill Conference, Proceedings (IOSC). [S. l.]: American Petroleum Institute, 2011 (1): 203.
- [8] Weiheid P, Eilu P, Larsen R B, et al. Metallic mineral deposits in the Nordic countries[J]. Episodes, 2008, 31(1): 125-132.
- [9] Weiheid P, Arndt N, Billström K et al. Precambrian geodynamics and ore formation: The Fennoscandian Shield[J]. Ore Geology Reviews, 2005, 27: 273-322.
- [10] Henriksen N. Geological history of Greenland-Four billion years of earth evolution[M]. Copenhagen: Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), 2008: 1-272.
- [11] Stendal H, Secher K. Iron ore potential in Greenland[J]. Geology and Ore, 2011, 19: 1-12.
- [12] Stendal H, Secher K. Gold mineralisation and gold potential in South Greenland[J]. Geology and Ore, 2002, 1: 1-12.
- [13] Peck W H, Valley J W. The Fiskenaesset anorthosite complex: stable isotope evidence for shallow emplacement into Archean ocean crust[J]. Geology, 1996, 24(6): 523-526.
- [14] Bryan D, Bonner R. The Diavik diamond mine, Lac de Gras, northwest Territories, Canada[C]// Kjarsgaard B A. VIIIth International Kimberlite Conference, Slave Province and Northern Alberta Field Trip Guidebook. [S. l.]: [s. n.], 2003: 61-65.
- [15] 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. Proceedings, VIIth International Kimberlite Conference. [S. l.]: [s. n.], 1999(1): 262-279.
- [16] 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
- [17] Missal G. Mary River iron ore deposits-the path to development[C]// Anon. Nunavut Mining Symposium. 2010. April 13. [S. l.]: [s. n.], 2010: 1-35.
- [18] 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
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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 T G. Porphyry deposits of the North-western Cordillera of North America. [S. l.]: Can. Inst. Min. Metall. Spec., 1995, 46: 795-802.
- [22] Kremenetskii A A, Popov V S, Gromalova N A. The formation age of ores from the Pebble Cu-Au-Mo giant deposit (Alaska, United States)[J]. Doklady Earth Sciences, 2012, 442(2): 196-201.
- [23] Nie F J, Bjørlykke 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.
- [24] Harlov D E, Andersson U B, Foerster H, et al. Apatite-monzonite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden[J]. Chemical Geology, 2002, 191: 47-72.
- [25] Nyström J O, Henriquez F. Magmatic features of iron ores of the Kiruna-type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry[J]. Econ. Geol., 1994, 89: 820-839.
- [26] Alapieti T, Kujanpää J, Lahtinen J J, et al. The Kemi stratiform chromitite deposit, northern Finland [J]. Econ. Geol., 1989, 84: 1057-1077.
- [27] 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.
- [28] Niiranen T. Iron oxide-copper-gold deposits in Finland: Case studies from the Peräpohja schist belt and the Central Lapland greenstone belt[D]. [S. l.]: University of Helsinki, 2005: 187: 1-27.
- [29] Richard D T, Willden M Y, Marinder N E, et al. Studies on the genesis of the Laisvall sandstone lead-zinc deposit, Sweden[J]. Econ. Geol., 1979, 74: 1255-1285.
- [30] Loukola-Ruskeeniemi K, Heino T. Geochemistry and genesis of the black shale-hosted Ni-Cu-Zn deposit at Talvivaara, Finland[J]. Econ. Geol., 1996, 91: 80-110.
- [31] Naldrett A J. 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.
- [32] Kolb J, Stensgaard B M. Iron oxide copper-gold mineralising systems in Greenland[J]. Geology and Ore, 2009, 13: 1-12.
- [33] Corriveau L. Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective[C]// Goodfellow W D. Mineral deposits of Canada. A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. [S. l.]: Geological Association of Canada, Special Publication, 2007 (5): 307-328.
- [34] 赵元艺, 聂凤军, 李振清. 北美—格陵兰重要成矿带成矿规律与优势矿产资源潜力评价研究(境外风险专项第三批 D₃ 项目). 2012 年度工作总结[R]. 北京: 中国地质调查局矿产资源研究所, 2012: 1-100.

New Progress on the Exploration of the Important Mineral Resources of the Arctic Circle and Its Adjacent Region

NIE Feng-jun¹, ZHANG Wei-bo², CAO Yi¹, ZHAO Yu-an³

(1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Arctic Circle and its adjacent region (ACAR) contain various abundant mineral deposits and therefore its mining exploration and development has been concerned by the international mining society for a long time. During the past hundred years, the ACAR has been one of the most important metallic resource suppliers to USA, Canada, Russia and European Union. Metals are produced from active mines in all countries of ACAR except Iceland and related industries are thriving in all countries. Important metallic mineral deposit types include volcanic massive sulfide copper-polymetallic deposit, magmatic Ni, PGE, Cr, Ti±V deposits, structure-related gold deposit, intrusion-related copper and gold deposit and sedimentary lead-zinc deposits. Besides these well-documented deposits, new type of deposits are being explored, e. g. , iron oxide-copper-gold (IOCG) and shale-hosted Ni-Zn-Cu deposits. With the recently discoveries of several world-class metallic deposits and the re-open of a number of old mines, the regional metallogenic studies and mineral exploration of the region has attracted attention from the international geologists. To carry out the idea of "two types of mining markets and two kinds of mineral resources" in China, the ACAR will be one of the best choices. Although the ACAR is still a frontier area with great challenge for exploration and mining, the present high activity of exploration indicates that this area has a very broad prospecting. For a clearly understanding the potential of mineral resources in the ACAR, the present mineral exploration situation and basic geological features of the important mineral deposits have been summarized. Meanwhile, the geological setting and exploration potential have been discussed in this paper. The purpose of this work is to fill the knowledge gaps of our understanding on the potential of mineral resources of the ACAR. To better find new mineral deposits in the ACAR, we need more detailed studies both on regional metallogeny and individual deposit.

Key words: metallic mineral deposit; geological feature; deposit type; mineral exploration situation; exploration potential analyses; Arctic circle and its adjacent region