

·“双清论坛”专题:战略性关键矿产资源·

中国钴矿资源现状与关键科学问题

许德如^{1, 2*} 王智琳³ 聂逢君¹ 邹少浩² 邓腾¹ 李增华¹

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;

3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083)

[摘要] 由于钴金属在材料、合金等领域的重要用途,已被许多国家列为关键战略资源。我国钴资源匮乏,是全球最大的钴进口国和消费国。本文在阐述了世界上钴矿资源的概况、分布特征及成因类型等基础上,结合我国钴矿多以共/伴生资源产出且品位低、规模小、成矿机理复杂等特点,提出了研究中存在的关键科学问题,给出了今后勘查开发和利用建议。

[关键词] 钴矿;战略资源;成因类型;关键科学问题

早在青铜器时代,钴被用来制作玻璃和陶瓷表面的蓝色釉材料^[1]。然而,直到1735年瑞典科学家Georg Brandt才首次分离出金属钴,1907年首次出现钴合金(钴-铬)。钴是高温合金、电池材料、防腐材料、磁性材料等重要原料,广泛应用于航空航天、电子电器、机械制造、汽车、化工农业、陶瓷等领域。特别是近几年新能源汽车行业的兴起和发展,导致金属钴价格大幅上涨。从移动电子设备,到新能源汽车的动力电池,再到电网储能,钴作为锂电池正极材料——钴酸锂的重要组成,都是不可或缺。因此,钴被世界上许多国家列为21世纪重要的关键战略资源。我国是世界上最大的钴资源进口国和消费国,矿山产量较低(图1),对外依赖程度相当高。在复杂的国内外政治和经济形势下,摸清我国钴资源的家底,增强我国钴矿资源供应保障程度,对我国国民经济发展和国家安全保障具有重要的战略意义。

1 钴地球化学特征

钴作为亲铁和亲铜元素,其价态主要为+2价和+3价,但+2价最为常见。 Co^{2+} 和 Co^{3+} 的离子半径分别为0.72 Å和0.63 Å,与 Mg^{2+} 、 Mn^{4+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Ni^{2+} 的离子半径接近。钴在地壳中平均丰度为15—30 ppm,其中上大陆地壳丰度为15

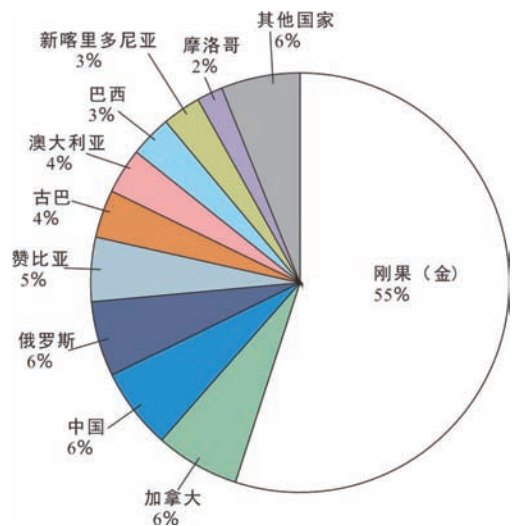


图1 世界各国2011年度矿山钴产量比例饼状图。
修改自文献^[2]

ppm。在地壳各类岩石中,超基性岩中钴的丰度最高,平均约为110 ppm,是花岗岩类的30—40倍^[2],这主要是由于钴在岩浆结晶过程中主要以类质同象的形式分散到造岩矿物和副矿物中,特别是橄榄石,其次为辉石、钛铁矿和磁铁矿^[3]。沉积岩中页岩含钴量最高(19 ppm),明显高于砂岩和碳酸盐岩^[3]。钴在热液中以氯络合物 $[\text{CoCl}_4]^{2-}$ (如摩洛哥的Bou

Azzer 矿床)、硫代硫酸盐络合物 $[\text{Co}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{2+}$ 、HS 络合物 $[\text{Co}(\text{SH})]^+$ 等形式迁移,由于 Co 的后两种络合物的不稳定常数大于 Ni、Zn、Fe、Pb、Cu、Ag 等,因此 Co 倾向于在高温热液阶段较早析出^[3]。

钴易与 Fe、Ni、Cu、S 结合形成硫化物、砷化物和复杂硫盐矿物。目前已发现的钴独立矿物有一百多种,常见的近二十种,主要以硫化物类如辉砷钴矿、硫钴矿、硫铜钴矿、方钴矿等形式与黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿等共生;在表生条件下,则以碳酸盐(如菱钴矿)、氢氧化物(如水钴矿)、砷酸盐(如钴华)等形式产出。此外,钴还可以类质同象替换黄铁矿、磁黄铁矿和毒砂等硫化物中的铁。

2 世界上钴资源分布及矿床类型

世界上钴资源多以伴生金属产于 Cu、Cu—Ni、Cu—Zn、Cu—Au、Cu—Fe 等矿床中,很少形成独立的工业矿床。全球钴资源分布较为集中,主要在刚果(金)、赞比亚、古巴、澳大利亚、俄罗斯、加拿大和美国等少数国家(图 2)。钴矿床类型复杂多样,包括沉积岩容矿的层状 Cu—Co 矿床、红土风化型 Ni—Co 矿床、岩浆岩型 Ni—Cu (—Co—PGE) 硫化物矿床、黑色页岩容矿的 Ni—Cu—Zn—Co 矿床、火山岩容矿的块状硫化物矿床、Fe—Cu—Co 矽卡岩型、IOCG 型、多金属(Ag—Ni—Co—As—Bi,即“五元素”)脉状矿床等。其中,前三种为世界上重要的钴矿床类型。考虑到热液体系成矿作用的复杂性,本文将除前三种类型之外的其他钴矿类型统一归为热液型。此外,还有一种潜在、未来可利用资源,即洋底富钴铁锰结核和结壳。

2.1 沉积岩容矿的层状矿床

该类型主要指沉积砂岩型铜钴矿,形成于被动大陆边缘和大陆裂谷的构造背景下^[4],以中非铜矿带为典型代表。中非铜矿带呈 NW 向展布,跨赞比亚和刚果(金)边界,包含 27 个铜矿床和 14 个富钴的铜矿床,是全球钴、铜资源的重要来源之一,其当前钴产量占全球的三分之二,年产量达 7 万吨^[1]。富钴的铜矿床主要赋存于新元古代 Katanga 超群内的 Roan 群,矿体呈层状产于硅质碎屑岩和碳酸盐岩中。由于 Lufilian 造山作用(ca. 590—510 Ma),矿体受褶皱和逆冲构造控制。主要的矿石矿物为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、辉砷钴矿、硫铜钴矿、方硫钴矿、硫镍钴矿、钴镍黄铁矿、黄铁矿(Co 含量高达 20 wt%) ;脉石矿物为钾长石、云母、钠长石、碳酸盐和石英;次生矿物见孔雀石、水钴矿等。研究认为硫化物矿石是在早期成岩作用过程中形成,Co 来源于海底热液活动,Cu 来源于基底中可能存在的斑岩型铜矿床和矿化的片麻岩;但也有观点认为后期造山构造运动是金属元素富集成矿的重要机制。最新的流体包裹体和 C、O、S、Sr 等同位素研究则认为中非铜矿带的大规模成矿与多成矿事件有关,同生-成岩作用控制了新元古代中非铜矿带的形成,其中金属成矿物质主要来源于更老的富 Cu、Co、Ni、Au、Ag 和 PGE 的基底地体的风化剥蚀,Lufilian 造山作用使初始成矿物质重新活化并富集形成高品位的矿石,而表生氧化作用则形成了上部富钴的氧化带(钴帽)^[4-5]。上部氧化性矿石在个别矿床中是重要的钴来源,如在 Tenke-Fungurume 矿床中氧化型矿石约占矿石量的一半。



图 2 世界上重要钴资源分布图,修改自文献^[1]

2.2 红土风化型镍钴矿

该类型矿床是全球重要的 Ni、Co 金属来源,提供了全球 70% 的 Ni 资源量,40% 的 Ni 产量、15% 的 Co 产量^[2],形成于克拉通内的太古宙-元古宙绿岩带或碰撞的构造背景下。红土风化型的 Ni-Co 矿床系热带-亚热带气候条件下超基性岩石长期风化的产物,伴随着含 Ni、Co 矿物如橄榄石、蛇纹石(Ni、Co 含量分别为 0.2%—0.4% 和 0.02%) 的蚀变风化, Si、Mg 和其他活泼元素被淋滤, Ni、Co 在风化壳富集^[6]。该类型矿床主要分布在 New Caledonia、古巴、澳大利亚等地,典型代表为阿联酋 Oman Mountains、西澳大利亚 Kalgoorlie 和 Murrin Murrin 矿床。该类型矿床风化壳整体上从下到上可分为原岩(如橄榄岩、辉长岩)、残积红土、氧化物红土、黏土红土、盖层(如碳酸盐岩、砾岩)。Ni、Co 主要以吸附的方式存于铁氧化物如褐铁矿、针铁矿、赤铁矿(1.5% Ni、0.1% Co), 锰的氧化物(高达 12% Ni、8.5% Co), 绿泥石, 利蛇纹石, 镍蛇纹石, 高岭石, 蒙脱石中^[6]。

2.3 岩浆岩型硫化物铜镍钴矿

岩浆型 Ni—Cu—Co 硫化物矿床提供了全球约 23% 的钴矿产量^[2]。该类型矿床形成于大陆裂谷构造背景下,被认为与液相硫化物相和基性或超基性岩浆的不混溶作用有关,伴随硫化物相熔滴的分离,亲铜元素 Cu、Ni、Co 等从硅酸盐熔体中分馏进入硫化物中^[7]。代表性例子为南非 Bushveld、俄罗斯 Noril'sk(Co 金属量 0.789 Mt, 品位 0.061%)、加拿大 Sudbury(Co 金属量 1.006 Mt, 品位 0.038%) 和 Voisey's Bay Ni—Cu—Co 矿床。加拿大 Voisey's Bay Ni—Cu—Co 矿床资源量为 136.7 百万吨, Ni 的品位为 1.59%、Cu 品位为 0.85%、Co 品位为 0.09%^[6]。主要矿石矿物是六方磁黄铁矿、陨硫铁、镍黄铁矿、黄铜矿、方黄铜矿、磁铁矿, 其中, 磁黄铁矿(Co 含量为 1.4%—4.3%) 和硫钴矿是主要的含钴矿物。

2.4 热液型矿床

该类型矿床主要形成于大陆裂谷、洋中脊等伸展构造背景或大陆边缘,以火山岩容矿的铜钴矿床和一些脉状矿床为重要代表。

针对于火山岩容矿的铜钴矿床(VMS),传统观点认为金属来源于加热的海水与地壳或上地幔岩石的淋滤作用,热的富含金属的海水与冷的海水混合导致了金属沉淀。这一观点较好地解释了金属沉淀机制,但根据质量平衡原理,难以解释 VMS 矿床的

大规模成矿,故有观点认为岩浆热液贡献了部分金属。对大西洋洋中脊彩虹热液卤田(Rainbow hydrothermal vent field)这一超基性岩容矿的块状硫化物矿床的研究表明,硅酸盐(如橄榄石、辉石)的蛇纹石化过程中会导致金属元素(如 Fe、Ni、Co)的重新活化并进入硫化物中^[8]。该认识为一些与超基性岩有关的 VMS 的成矿提供了新见解,如芬兰 Outokumpu Cu—Co—Au 矿床、我国青海德尔尼铜(锌钴)矿床^[9]。

典型的脉状钴矿床如摩洛哥 Bou Azzer Co—Ni—Fe—As—Au—Ag 矿床、加拿大安大略省 Cobalt-Gowganda 和 Thunder Bay 地区的 Ni—Co—Ag—As—Bi 脉状矿床以及美国 Idaho 钴矿带的 Cu—Au—Co 矿床。其中,摩洛哥 Bou Azzer Co—Ni—Fe—As—Au—Ag 矿床是世界上唯一的以钴为主的大型(一超大型)矿床,平均年矿石产量为 10 万吨, Co、Ni 平均品位为 1%, Ag 为 3—42 g/t, Au 为 3—4 g/t, 贡献了世界钴生产量的 2%^[10]。该矿床产于 Agadir 以东 320 km 的新元古代蛇绿岩套中,空间上与一系列呈 NE 向展布的 Au—Ag 矿床伴生。矿体为石英-碳酸盐脉型,呈脉状、透镜状、网脉状分布于蛇绿岩化的超基性岩或蛇绿岩与石英闪长岩的接触带,受 WNW-ESE 向断层构造体系控制。Bou Azzer 矿化以钴和镍的砷化物(如 CoAs_3 、 CoAs_2 、 FeAs_2 、 NiAs 、 NiAs_2) 为主, 次为硫砷化物(如 FeAsS 、 NiAsS) 和硫化物(如斑铜矿、辉铜矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黝铜矿)。在中等还原和高的水/岩比条件下,酸性的岩浆流体或深部盆地卤水从蛇绿岩中淋滤出成矿元素(Co、Ni、Fe、As), 当 pH 升高和氧逸度发生变化,成矿流体与低温、氧化、富 CO_2 大气降水混和导致成矿元素沉淀富集。

与 Bou Azzer 不同,对于产于古老的结晶基底或沉积-火山岩地体中的五元素脉状矿床, S、H、O 同位素数据支持非岩浆模式,认为流体主要来自建造水^[11]。美国 Idaho 钴矿带成矿元素组合为 Fe—Co—Cu—Au—Bi—Y—REE, 在元素组合方面与五元素矿床非常类似,但具有明显的层控特征,矿床产在绿片岩相-角闪岩相的中元古代细粒、富铁的硅质碎屑和火山碎屑沉积岩地层中,主要的矿石矿物有黄铜矿、毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿和辉钴矿等, Cu—Co—Au 矿化被认为与富含金属的海底火山热液和热泉喷流作用有关,表现出 VMS 和 SEDEX 矿床的特征^[12]。根据高 REE、Y 含量、高的流体盐度和黑

云母富 Cl 等特征,有观点提出 Blackbird 矿床为 IOCG 型^[13]。最新的硫化物 Re—Os 定年和副矿物独居石、磷钇矿的 U—Th—Pb 年代学研究表明 Idaho 钴矿带形成于中元古代岩浆热液活动,但在格林威尔造山作用和白垩纪变质作用中发生活化富集^[14]。

3 我国钴资源分布与矿床类型

我国已知的钴矿产地有 150 多处,主要分布在青海、甘肃、云南、吉林、江西、湖南、云南、海南等省份(图 3),全国钴金属储量为 68.78 万吨^[15],约为全球储量 10%。我国钴资源特征如下:

(1) 矿床类型多样,包括岩浆铜镍硫化物型、红土风化型、沉积砂岩型、热液型(如沉积喷流型、砂卡岩型、斑岩型、IOCG 型等)。大部分钴矿为伴生矿,主要伴生铜、镍金属产出,其次伴生铜铁矿床。与世界上钴矿资源相比,我国钴矿规模小、品位低,钴仅作为副产品回收利用。例如甘肃金川岩浆铜镍(钴)硫化物矿床是我国最大的伴生钴矿床,已探明 Ni 金属储量超过 550 万吨,平均品位 1.02%;Cu 储量 350 万吨,品位 0.72%;钴金属储量 10 万吨,品位 0.07%—0.2%;PGE 储量约 100 吨^[16]。Co 主要呈类质同象赋存在镍黄铁矿(3 100—13 900 ppm)、磁黄铁矿(6—2 000 ppm,高达 11 700 ppm)、黄铜矿(高达 3 000 ppm)、黄铁矿(高达 0.88%)、方黄铜矿(高达 1.1%)^[7]。对于铜镍矿床来说,钴和镍往往是一同从冶炼镍的炉渣中回收的,因此提取钴的生产成本较低,是我国回收钴的重要资源;而对于铁矿石中以类质同象或显微包裹体存在于硫化物和砷硫化物中的钴,需加设浮选流程才能回收。

(2) 独立或以钴为主的工业矿床较少,主要为钴土矿,次为以钴为主的原生矿床。典型例子如青海驼路沟钴金矿、青海德尔尼 Cu—Co—Zn 矿、吉林大横路钴铜矿、湘东北钴(多金属)矿、江西五宝山钴矿、海南石碌铁钴铜多金属矿床等(表 1)。其中,青海格尔木驼路沟钴(金)矿床是西北首例独立的大型沉积喷流型钴(金)矿床,位于东昆仑之昆南构造带的中段,已探明钴金属储量 2 万吨,平均钴品位 0.06%,最高品位 0.46%;Au 金属储量 4 吨,品位 0.45—1.05 g/t,最高为 5.19 g/t。矿体受近东西向展布的构造蚀变带控制,呈层状或透镜状断续分布于奥陶系—志留系绿片岩相海相火山—沉积碎屑岩,赋矿岩石为硅质钠长质岩、绿泥绢云石英片岩、绢云

石英片岩,其中硅质钠长质岩是最重要的含矿主岩。蚀变主要为硅化、碳酸盐化、绢云母化、黄铁矿化和钠长石化。地质特征与世界上其他层控的 Cu—Co 和 Co—Cu—Au 矿床如 Idaho 钴矿带的 Blackbird 类似。矿石矿物包括黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、硫钴矿、硫铜钴矿、闪锌矿、毒砂、褐铁矿;脉石矿物有绢云母、石英、钠长石和方解石。黄铁矿是主要的含钴矿物,Co 含量达 2.38%。成矿流体具有中低温(220—300℃)、中低盐度(0.6 wt%—13.7 wt% NaCl_{eq.})、低密度、弱还原—还原的性质,结合氧同位素值($\delta^{18}\text{O}=11.4\text{‰}$ — 16.2‰),暗示同生—喷流过程控制了钴成矿作用^[16]。吉林大横路钴铜矿床是中国近年探明的唯一一处以钴为主的大型钴铜矿床,已探明钴金属量 5 万吨、平均钴品位 0.035%—0.08%(最高达 0.596%);Cu 金属量 10 万吨、平均品位 0.1%—0.2%^[17]。

(3) 成矿时代跨度大,从元古宙到燕山期均有分布(表 1),部分矿床由于叠加改造往往具多成矿时代。我国最大的伴生钴矿床——甘肃金川岩浆铜镍(钴)硫化物矿床形成于 831 Ma^[18],为典型的元古宙钴矿床。青海德尔尼铜(钴)矿床形成时代为晚石炭世—早二叠世^[19]。驼路沟钴(金)黄铁矿 Re—Os 同位素定年获得成矿年龄 429 Ma,与围岩时代接近^[16]。湘东北井冲—北山一带的含钴或钴独立矿床(如井冲钴铜多金属矿床、横洞钴矿床、大岩钴金矿化点)形成于 130—125 Ma(白云母 Ar—Ar 定年和锆石 U—Th—Pb 定年)^[20-21]。海南石碌铁钴铜多金属矿床被认为是热液和构造改造的沉积变质型 BIF 矿床,经历了约 1 075—840 Ma 的 BIF 沉积、约 560—440 Ma 的加里东期变质改造和富化、约 260—210 Ma 的印支期接触变质和砂卡岩化和约 130—90 Ma 的燕山晚期的绿片岩相退变质和岩浆热液矿化叠加(锆石 LA—ICP—MS、SHRIMP 法、独居石 CHIME 化学定年、Sm—Nd 法、Ar—Ar 法)^[22-23]。然而,由于成矿作用的复杂性和同位素定年方法的局限性,其他大部分矿床的成矿时代依然难以精确厘定或存在争议。

(4) 根据成矿区带的划分,我国不同类型钴矿的空间分布具有差异性。岩浆铜镍硫化物矿床主要分布在阿尔泰成矿带、天山—北山成矿带、祁连成矿带、辽东—吉南成矿带、西南三江成矿带、川滇黔成矿带(图 3),如喀拉通克、哈拉通沟、黄山、金川、红旗岭、赤柏松、金平(白马寨)、冷水箐铜镍硫化物矿床

等；喷流沉积型和火山岩容矿的层控硫化物矿床主要分布在东昆仑-阿尔金成矿带，如青海驼路沟钴金矿、德尔尼铜钴矿、肯德可克钴金铋矿床等；沉积砂岩型和脉状钴（铜）矿床主要分布在钦杭成矿带，包括江西五宝山、七宝山钴矿和湖南井冲钴铜多金属矿床、横洞矿床；砂卡岩型伴生钴矿主要分布在长江中下游成矿带，包括铜陵铜多金属矿、铜录山铜铁矿、大冶铁矿、程潮铁矿等；与斑岩有关的铜钴矿床分布在豫西成矿带，如山西中条山铜矿峪铜钴矿、篦子沟铜矿等；风化型钴土矿主要分布在云南、海南等地，如云南易门老厂、元江-墨江和海南居丁、蓬莱钴土矿等。

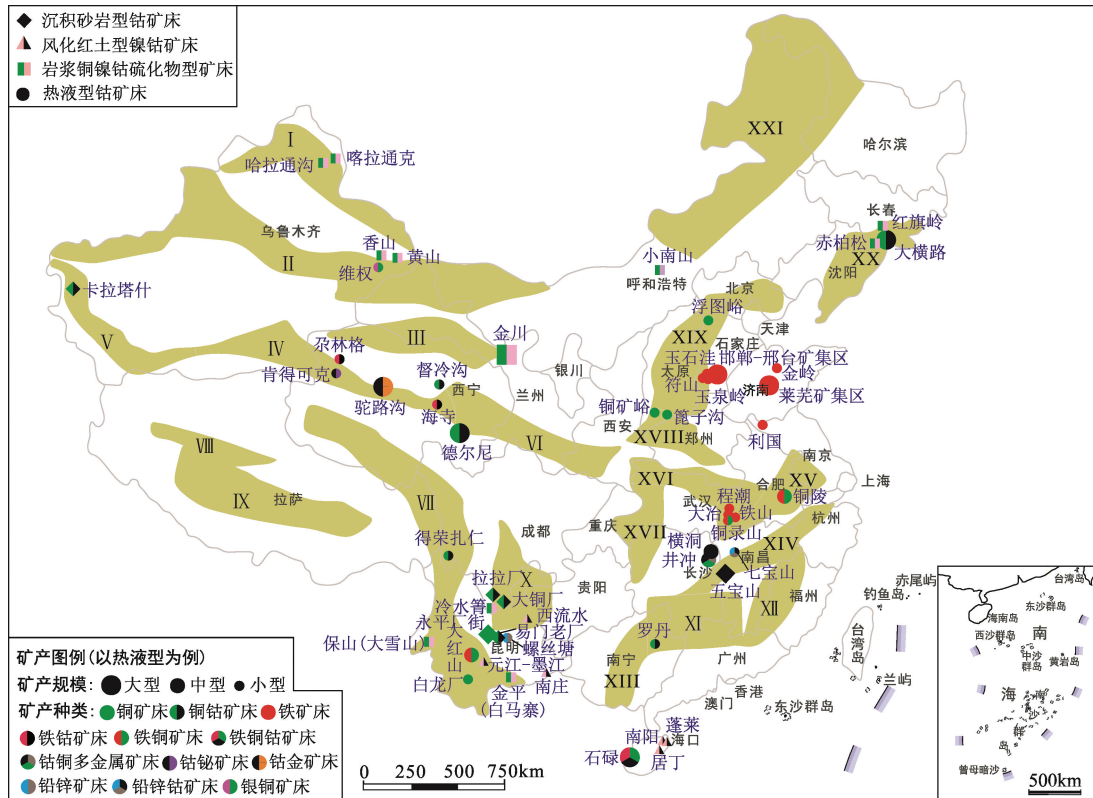
4 关键科学问题和建议

在美国内政部、美国地质调查局 2017 年发布的《美国关键矿产资源——经济、环境地质以及未来供应前景》一文中^[2]，钴被列为 43 种关键矿产资源之一。与英国地质调查局合作出版的《关键金属手册》^[1]中，钴也被列为 16 种关键金属之一。由此可

见，钴资源及其开发利用已上升到国家战略层面。总体来看，世界钴资源丰富，但分布集中在少数国家。从我国钴矿产的分布和消费情况来看，我国并不具备钴资源优势，资源匮乏，对外资源依赖程度极高，形势不容乐观。另一方面，通过剖析当前国内外钴矿的研究成果，可以发现钴矿的成矿过程与富集机理与关键控制因素、成矿物质与含矿流体的来源、钴与其他多金属的地球化学行为和动力学背景、以及成矿作用时代等仍存在显著分歧，或相关研究仍较为薄弱。考虑到钴金属的重要战略意义，为满足国民经济建设对钴金属的重大需求，我国除加快钴矿产勘查开发“走出去”的步伐，亟需加强国内钴矿产的勘查开发和清洁利用相关的科学技术研究。

4.1 关键科学问题

由于钴矿并非我国优势矿种，其矿产勘查程度整体上远落后于其他矿种，目前仅对个别独立钴矿床或以钴为主的工业矿床开展过少量的科学研究。因此，针对于我国钴矿薄弱的研究现状，亟需解决以下关键科学问题：



I-阿尔泰山成矿带；II-天山-北山成矿带；III-祁连山成矿带；IV-东昆仑-阿尔金成矿带；V-西昆仑成矿带；VI-秦岭成矿带；VII-西南三江成矿带；VIII-班公湖-怒江成矿带；IX-冈底斯成矿带；X-川滇黔成矿带；XI-南岭成矿带；XII-武夷山成矿带；XIII-钦杭成矿带(西段)；XIV-钦杭成矿带(东段)；XV-长江中下游成矿带；XVI-武当-桐柏-大别成矿带；XVII-湘西-鄂西成矿带；XVIII-豫西成矿带；XIX-晋冀成矿带；XX-辽东-吉南成矿带；XXI-大兴安岭成矿带

图 3 中国钴矿主要类型及分布图

表1 中国代表性钴矿床地质特征汇总表

矿床名称	吉林大横路钴铜矿床 ^[17]	青海格尔木市驼路沟钴(金)矿床 ^[16]	青海玛沁县德尔尼Cu—Co—Zn大型矿床 ^[19]	海南石碌铁钴铜多金属矿床 ^[22-23]	江南古陆湘东北地区钴(多金属)矿床 ^[20-21]
构造背景	华北地台北缘东段,辽吉古元古代裂谷中段	东昆仑褶皱系布尔汗布达褶皱区与巴颜喀拉甘孜褶皱系相接部位	松潘-甘孜褶皱系的阿尼玛卿山褶皱带东段	新元古裂解环境?	燕山期与深大断裂活动有关的伸展构造
含矿地层	古元古代老岭群大栗子组浅变质含碳质的细碎屑岩夹碳酸盐岩	奥陶系-志留系绿片岩相海相火山-沉积碎屑岩	中晚元古的长英砂岩、硬砂岩	新元古代石碌群火山-碎屑岩和碳酸盐岩	新元古代冷家溪群/泥盆系构造角砾岩带
矿体产状	层状、似层状、分枝复合状	层状、透镜状	似层状、透镜状	层状、似层状	似层状、透镜状
容矿围岩	绢云母千枚岩,石英岩	钠长岩,绢云母石英片岩	超基性火山岩	透辉石透闪石岩、透辉石透闪石化白云岩、白云岩等	硅质板岩
矿石矿物	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、硫镍钴矿等	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、硫钴矿、硫铜钴矿、硫镍钴矿等	黄铜矿,黄铁矿,磁黄铁矿,闪锌矿等	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、辉砷钴矿、硫钴矿、镍黄铁矿、硫镍钴矿等	黄铁矿、黄铜矿、毒砂等
矿石结构构造	条带状、浸染状、细脉状构造;包含结构、溶离结构、他形粒状结构	半自形粒状、浸染状、条带状;条带状、浸染状、块状构造;自形-他形粒状结构	块状为主,有条带状、浸染状;主要为半自形粒状结构	条带状、浸染状、细脉状构造;自形-他形粒状结构、角砾结构	浸染状、脉状、细脉状构造;自形-他形粒状结构、角砾结构
矿石品位	Co为0.035%—0.080%之间,Cu为0.1%—0.2%	Co为0.0236%—0.0924%,Au为 $0.11 \times 10^{-6} \sim 1.05 \times 10^{-6}$	Cu为1.17%; Zn为0.93%—2.21%; Co为0.054%—0.111%		Co为0.027%—0.036%; Cu为0.1%—0.619%
矿化组合	Co, Cu	Co, Au	Cu, Co, Zn	Fe—Cu—Co	Co—(Cu)—(Au)
后期改造	存在后期热液改造	存在变质改造作用	存在变质改造作用	存在后期构造-热液叠加改造	无
成矿时代	—	~429 Ma	943—1025 Ma? 晚石炭世-早二叠世?	多期次	燕山期
矿床成因	热水沉积叠加改造型	海底热水喷流沉积-改造型	海底火山喷流沉积改造型	热液和构造改造的沉积变质型 BIF	中高温热液交代型

1. 钴矿床的成因类型和成矿机理。我国钴矿床虽然类型多样,但钴多呈共/伴生产出,且品位低、规模相对较小。随研究程度的提高,一些矿床(如海南省石碌钴-铜矿床、吉林省大横路钴铜矿床、青海省驼路沟钴(金)矿床和德尔尼 Cu—Co—Zn 矿床、以及江南造山带钴(多金属)矿床等)的成因类型不断有着不同观点提出。因此,急需通过与世界典型钴矿床类型对比,正确厘定我国钴矿床的成因,并阐明钴和共/伴生金属的富集机理。

2. 钴与其他亲铜、亲铁元素在地质作用过程(如岩浆结晶和分异作用、水-岩相互作用、风化剥蚀等)中的地球化学和动力学行为。由于钴金属主要源于地幔,因此,阐明幔源岩浆的性质和成矿元素丰度、岩浆演化过程壳-幔相互作用特征、Co 在热液和

风化过程中迁移、富集和/或沉淀机制等问题,将有助于揭示钴和相关金属在岩浆-热液演化和/或风化过程中的地球化学行为与动力学过程,为深入了解独立钴矿床、共/伴生矿床的形成机制提供科学依据。

3. 成矿环境、关键控制因素和时空分布规律。目前关于不同类型钴矿床的成矿背景或构造环境仍存在着争议,而由于以往研究程度的偏低,有关不同类型矿床钴金属富集成矿的关键控制因素尚未彻底查明,不仅制约了对不同类型时空发育规律的深入认识,更重要的是不利于明确找矿勘查方向。

因此,充分采用现代先进测试分析技术(如岩/矿相学观察技术、单矿物结构和原位元素与同位素

分析技术、单矿物原位定年技术、单个流体包裹体分析技术、非传统稳定和放射性同位素分析技术等),对重要钴多金属成矿带、典型含钴金属矿床系统开展野外地质调查和室内精细解剖,将有助于正确理解我国境内钴矿床成因类型和时空分布规律,阐明不同类型钴矿床的成矿背景、形成过程和富集机理,也是全面查清我国境内钴金属成矿潜力、开展成矿预测和找矿勘查的首要任务和核心问题。

4.2 我国伴生钴矿勘查开发和利用建议

从我国现有钴资源的分布情况来看,我国钴矿大多为伴生矿,其中,仅甘肃省金川铜镍硫化物矿床中的伴生钴就占据了我国钴资源的一半,其他重要来源的钴资源也大都为岩浆铜镍硫化物矿床、沉积岩或火山岩容矿的硫化物矿床、热液相关的矿床(矽卡岩型、斑岩型、IOCG型等)、以及风化型矿床中的伴生矿种。因此,我国钴矿的找矿勘查和开发需要对伴生钴矿引起足够重视。另外,应加大国内已发现重点钴成矿区带的勘查和评价,以期发现更多钴矿床或新的钴矿床类型,如近年来华北地块北缘东段、西部中央造山带、以及华南江南造山带和钦杭成矿带的找矿勘查中已陆续新发现了一批钴矿床(点),但其规模、分布规律和成因类型等仍处于初步研究阶段,有关其勘查和开发技术也属于探索过程,需要将有效的地质、地球化学和地球物理等方法和技术应用于不同类型钴矿床的找矿实践中。

此外,我国大多数钴矿品位低,平均品位仅略高于边界品位,但考虑到为伴生矿种,大部分钴矿仍可回收利用。因此,加强钴金属的综合回收利用以及选冶技术以提高钴金属的利用率,也是应对迅猛增长的钴需求的良策。

5 结束语

由于世界上钴矿产资源和时空分布的不均一性,特别是钴金属在现代工业革命的重要地位,钴金属已被世界上大多数国家列为关键战略资源之一。但世界上钴矿产多以共/伴生形式出现,独立钴矿床少。我国钴矿床成因类型虽然多样,但品位普遍偏低、规模相对较小,且相对国外不同类型钴矿床,它们的成矿环境、控制因素、成矿富集过程与机理、以及矿床成因和时空发育规律等关键科学问题研究仍非常薄弱或存在显著分歧,已制约我国境内钴矿床找矿勘查的突破,对钴矿产的合理开发和利用也产

生了极不利影响。因此,加快我国钴矿产相关科学问题研究,摸清我国钴资源家底,不仅有利于我国政府精准制定钴矿产勘查与开发利用的政策,也有利于应对因世界政治经济形势变化而导致的钴资源“卡脖子”等不稳定因素。

致谢 本文受2016年度和2017年度国家重点研发计划项目(2016YFC0600401、2017YFC0602302)和国家自然科学基金(No. 41302049,41672077)共同资助。蒋少涌、孙卫东、李晓峰、钟宏等教授对本文提出了宝贵修改意见,特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Roberts S, Gunn G. Cobalt. In: Gunn G. Ed. *Critical Metals Handbook*. Chichester: Wiley. 2014. 361—385.
- [2] Schulz KJ, DeYoung JH, Jr, Seal RR, et al. *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and environmental Geology and Prospects For Future Supply*: U. S. Geological Survey Professional Paper 1802. 2018. 797
- [3] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. *元素地球化学*. 北京: 科学出版社. 1984.
- [4] Muchez P, Vanderhaeghen P, Desouky HE, et al. Anhydrite pseudomorphs and the origin of stratiform Cu—Co ores in the Katangan Copperbelt (Democratic Republic of Congo). *Mineralium Deposita*, 2008, 43(5):575.
- [5] Desouky HAE, Muchez P, Boyce AJ, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper—cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo). *Mineralium Deposita*, 2010, 45(8): 735—763.
- [6] Al-Khribash S. Genesis and mineralogical classification of Ni-laterites, Oman Mountains. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(65):199—212.
- [7] Naldrett AJ, Singh J, Krstic S, et al. The mineralogy of the Voisey's Bay Ni—Cu—Co deposit, Northern Labrador, Canada: Influence of oxidation state on textures and mineral Compositions. *Economic Geology*, 2000, 95(4):889—900.
- [8] Marques AFA, Barriga FJAS, Scott SD. Sulfide mineralization in an ultramafic-rock hosted seafloor hydrothermal system: From serpentinization to the formation of Cu—Zn—(Co)-rich massive sulfides. *Marine Geology*, 2007, 245(1): 20—39.
- [9] Liu S, Fan H-R, Yang K-F, et al. Mesoproterozoic and Paleozoic hydrothermal metasomatism in the giant Bayan Obo REE—Nb—Fe deposit: Constrains from trace elements and Sr—Nd isotope of fluorite and preliminary thermodynamic calculation. *Precambrian Research*, 2018, 311:228—246.

- [10] Bouabdellah M, Maacha L, Levresse G, et al. The Bou Azzer Co—Ni—Fe—As(±Au±Ag) district of central Anti-Atlas (Morocco): A long-lived Late Hercynian to Triassic magmatic-hydrothermal to low-sulphidation epithermal system. In: Bouabdellah M, Slack JF, editors. Mineral Deposits of North Africa. Cham: Springer International Publishing, 2016. 229—247.
- [11] Kissin S. Five-element (Ni—Co—As—Ag—Bi) Veins. *Geoscience Canada*, 1992, 19(3): 113—124.
- [12] Nash JT, Connor JJ. Iron and chlorine as guides to stratiform Cu—Co—Au deposits, Idaho cobalt belt, USA. *Mineralium Deposita*, 1993, 28(2):99—106.
- [13] Slack JF. High REE and Y concentrations in Co—Cu—Au ores of the Blackbird District, Idaho. *Economic Geology*, 2006, 101(2): 275—280.
- [14] Saintilan NJ, Creaser RA, Bookstrom AA. Re—Os systematics and geochemistry of cobaltite (CoAsS) in the Idaho cobalt belt, Belt-Purcell Basin, USA; Evidence for middle Mesoproterozoic sediment-hosted Co—Cu sulfide mineralization with Grenvillian and Cretaceous remobilization. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86:509—525.
- [15] 中国矿产资源报告. 中华人民共和国自然资源部编. 北京: 地质出版社, 2018. 1—49.
- [16] Feng CY, Qu WJ, Zhang DQ, et al. Re—Os dating of pyrite from the Tuolugou stratabound Co (Au) deposit, eastern Kunlun Orogenic Belt, northwestern China. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(1—3): 213—220.
- [17] 任启武, 薛剑波, 王丽梅, 等. 大横路钴铜矿床控矿因素及找矿标志. *吉林地质*, 2005, 24(4):26—31.
- [18] Zhang M, Kamo SL, Li C, et al. Precise U—Pb zircon—baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China. *Mineralium Deposita*, 2010, 45(1):3—9.
- [19] 李小虎, 初凤友, 雷吉江, 等. 青海德尔尼铜(锌钴)矿床硫化物 Cu 同位素组成及矿床成因探讨. *地质学前沿*, 2014, 21(1):196—204.
- [20] Wang Z, Xu D, Chi G, et al. Mineralogical and isotopic constraints on the genesis of the Jingchong Co—Cu polymetallic ore deposit in northeastern Hunan Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88:638—654.
- [21] Zou S, Zou F, Ning J, et al. A stand-alone Co mineral deposit in northeastern Hunan Province, South China: its timing, origin of ore fluids and metal Co, and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92:42—60.
- [22] Xu D, Kusiak MA, Wang Z, et al. Microstructural observation and chemical dating on monazite from the Shilu Group, Hainan Province of South China: Implications for origin and evolution of the Shilu Fe—Co—Cu ore district. *Lithos*, 2015, 216—217: 158—177.
- [23] Wang Z, Xu D, Hu G, et al. Detrital zircon U—Pb ages of the Proterozoic metaclastic-sedimentary rocks in Hainan Province of South China: New constraints on the depositional time, source area, and tectonic setting of the Shilu Fe—Co—Cu ore district. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 1143—1161.

Cobalt resources in China: current research status and key scientific issues

Xu Deru^{1, 2*} Wang Zhilin³ Nie Fengjun¹ Zou Shaohao² Deng Teng¹ Li Zenghua¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013;

2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guangzhou 510640;

3. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education,

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083)

Abstract Due to the important use of cobalt metal in the fields of materials and alloys industries, it has been listed as a strategic critical resource by many countries. China's cobalt resources are scarce and it is the world's largest cobalt importer and consumer. This paper summarizes the general distribution characteristics and genetic types of cobalt ore resources in the world. According to the characteristics of cobalt as a co-existing or by-product together with other metal resources, and the low grade, small scale and complex metallogenic mechanism of cobalt deposits in China, this paper emphasizes the following key scientific issues should be addressed, and suggests future exploration, development and utilization of the cobalt resources.

Key words Cobalt; stratigic resource; ore genesis; key scientific issues