

全球钴矿资源特征及勘查研究进展*

王 辉¹, 丰成友^{2**}, 张明玉³

(1 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;
3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 近年来, 钴矿相关新兴产业方兴未艾, 从新能源汽车的充电电池到喷气涡轮机中的超级合金, 钴均是不可或缺的关键金属材料之一。文章介绍了全球钴矿类型及分布特征, 着重对近年来全球钴矿的勘查、研究取得的进展进行了梳理和总结。迄今为止, 全球钴资源主要来源于沉积岩容矿型层控 Cu-Co 矿床、红土型 Ni-Co 矿床和岩浆型 Ni-Cu-Co 矿床及热液、火山成因钴多金属矿床, 但总体分布极不平衡。热液及火山成因 Co 多金属矿床多数以 Co 为主要金属, 表现出较大的找矿潜力。上述几种钴矿床大多与基性-超基性岩有着直接的或间接的成因联系。此外, 还有大量的钴资源赋存在洋底 Fe-Mn 结核与结壳内。关于钴矿的成矿条件、构造背景与成矿机理等关键问题仍亟需开展进一步的研究工作, 深入理解钴矿的成矿规律并建立行之有效的找矿模型, 将为“新能源时代”钴矿的勘查和开发提供有效的支撑和指导。

关键词 地质学; 钴矿床; 成因类型; 资源特征; 勘查进展; 研究现状
中图分类号: P618.62 **文献标志码**: A

Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits

WANG Hui¹, FENG ChengYou² and ZHANG MingYu³

(1 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 3 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The emerging industry related to cobalt is developing at a high speed in recent years. Cobalt is one of the indispensable metals in the manufacture of rechargeable batteries for new-energy vehicles and superalloy in turbine engines for jet aircrafts. This paper gives a brief account of the types and characteristics of global cobalt deposits and summarizes the progress of the cobalt prospecting and research. The global cobalt resources mainly occur in the forms of stratabound Cu-Co deposits, Ni-Co laterite deposits, magmatic Ni-Cu-Co sulfide deposits and hydrothermal and volcanogenic deposits, which exhibit extremely uneven distributions. The hydrothermal and volcanic Co-polymetallic deposits have mostly produced Co as the main commodity and have a good prospecting potentiality. Most Co deposits are more or less associated with mafic to ultramafic rocks. Moreover, large quantities of cobalt resources occur in extensive deposits of Fe-Mn nodules and crusts on the modern sea floor. There is absolutely an urgent need for further research on ore-forming conditions, tectonic settings and mineralization mechanism of cobalt deposits. The comprehensive understanding of metallogeny and practical prospecting models would be significantly beneficial for exploration and exploitation of cobalt resources in this “new-energy era”.

* 本文得到国家重点研发计划课题(编号: 2016YFC0600205)及长安大学中央高校基本科研业务费(编号: 300102279401、300102279103)联合资助

第一作者简介 王 辉, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 主要从事矿床地球化学研究。Email: wanghui16@chd.edu.cn

** 通讯作者 丰成友, 男, 1971 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床地质、地球化学研究。Email: fengchyou@cags.ac.cn

收稿日期 2019-06-28; 改回日期 2019-07-07。张绮玲编辑。

Key words: geology, cobalt deposit, classification of cobalt deposits, cobalt mineral resources, exploration progress, research progress

钴是一种新兴的关键金属矿产资源,近年来,随着新能源、新材料、绿色环保等新兴产业的快速发展,钴的重要性日益凸显。钴被很多国家列为重要的“战略物资”,中国2016年制定的《全国矿产资源规划(2016~2020年)》首次将钴列入战略性矿产目录;钴也同样被美国、欧盟重点列为至关重要的关键矿产资源(European Commission, 2014; 2017; U.S. Geological Survey, 2017)。钴在充电电池、军事、航空等领域有着广泛应用,其中最主要的用途是用作锂离子电池中的核心材料以及用于制造航天器发动机所需的超级合金。2011年以来,得益于新能源汽车工业的迅猛发展,钴市场需求不断攀升,是目前全球矿业公司追逐的热点矿种。然而,长期以来,钴主要来自于加工铜、镍等大宗矿产时回收的副产品,针对钴矿专门性的勘查、研究投入相对较少,这也制约着钴矿相关产业的持续健康发展。中国钴矿资源类型相对单一,储量严重不足,对外依存度较高,供求矛盾日益突出。本文介绍了钴的物理、化学性质及全球钴资源分布情况,重点对近年来主要的国内外钴矿的勘查、研究进展进行了梳理和总结,以期对国内钴矿成矿认知与找矿潜力评价提供参考,为加强关键金属矿产资源管理、保护和利用提供依据。

1 钴的性质

钴是一种银白色金属,硬度高,熔点高,耐腐蚀;具有铁磁性,但加热到1150℃时磁性消失;钴的高温性能良好,含钴合金在900~1000℃下仍有很高的强度;在常温下不和水发生作用,在潮湿的空气中很稳定,溶于稀盐酸、硫酸和硝酸;钴与硅结合呈现出强烈的蓝色。钴在周期表中属第4周期、第Ⅷ副族,原子序数27,位于铁和镍之间,与铜邻近,因此其在自然界中多与这几种金属相伴产出。

钴在地壳中的含量很低,90%呈分散状态,呈类质同象或包裹体形式产出。钴在地壳的丰度 $w(\text{Co})$ 约为 25×10^{-6} ,其中,超基性岩($w(\text{Co})$ 约 110×10^{-6})>基性岩($w(\text{Co})$ 约 47×10^{-6})>页岩($w(\text{Co})$ 约 19×10^{-6})>花岗岩($w(\text{Co})$ 约 2.4×10^{-6}) (Taylor et al., 1995; Krauskopf et al., 1995)。钴常见化合价为+2、+3,前

者稳定,后者氧化性强,均有较强的配位能力,形成多种配合物。钴矿床中包括原生的和次生的含钴矿物,原生矿物主要包括硫铜钴矿($\text{Cu}(\text{Co}, \text{Ni})_2\text{S}_4$)、硫钴矿(Co_3S_4)、含钴黄铁矿($(\text{Fe}, \text{Co})\text{S}_2$)、含钴磁黄铁矿($(\text{Fe}, \text{Co})_{1-x}\text{S}$)、辉钴矿(CoAsS)、方钴矿(CoAs_3)、斜方砷钴矿($(\text{Co}, \text{Fe})\text{As}_2$)等;次生矿物相主要为钴华($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$),其次为水钴矿($\text{CoO}(\text{OH})$)和钴土矿($(\text{Ni}, \text{Co})_{2-x}\text{Mn}(\text{O}, \text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)。

2 全球钴矿资源概况

全球钴矿资源并不稀缺,但分布极不均衡(图1)。据美国地质调查局最新统计数据(U.S. Geological Survey, 2019),目前陆地剩余探明钴储量约为690万吨,其中,中非铜-钴矿带上的刚果(金)钴储量为340万吨,占全球钴储量的近50%,其次为澳大利亚(120万吨,17%)、古巴(50万吨,7%)、菲律宾(28万吨,4%)。除此之外,还有大量尚不具备工业价值的钴矿资源蕴藏在大西洋、印度洋和太平洋洋底Fe-Mn结核和结壳之中(张富元等, 2015; 韦振权等, 2017)。据估算,洋底结核(壳)钴资源总量约是陆地探明钴总储量的5倍,具备极大的开发前景,是未来重要的接替资源(U.S. Geological Survey, 2019)。

中国是全球第一大精炼钴供应国,同时也是第一大钴资源消费国,然而国内钴资源明显不足,目前探明的钴储量仅占全球钴储量的1.1%,超过90%以上的钴原料进口自刚果(金)等国。此外,中国钴矿资源以伴生矿居多,品位相对较低(平均品位仅为0.02%,张福良等, 2014)。在国内资源短缺与外部因素导致进口不稳定的双重压力下,中国钴资源供应安全问题不容小觑。

3 主要矿床类型及勘查、研究进展

全球钴矿大多数为伴生矿床,主要矿床类型包括沉积岩容矿型层控Cu-Co矿床(Cailteux et al., 2005; Bookstrom et al., 2016; Sillitoe et al., 2017)、红土型Ni-Co矿床(Dzemua et al., 2013; Putzolu et al., 2018)、岩浆型Ni-Cu-Co矿床(Naldrett et al., 2000; 秦克章等, 2007)及热液和火山成因钴多金属矿床(丰

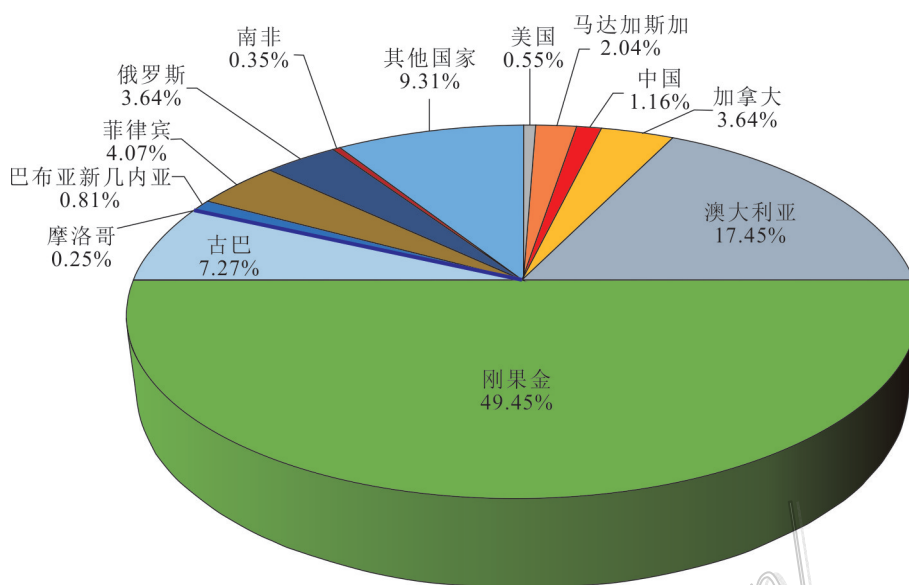


图1 2019年全球钴资源储量分布图(数据来自U.S. Geological Survey, 2019)

Fig. 1 Distribution of percentages of global cobalt reserves in 2019 (data after U.S. Geological Survey, 2019)

成友等, 2006; Oberthür et al., 2009; Bouabdellah et al., 2016)。迄今为止, 以沉积岩容矿型层控 Cu-Co 矿床中 Co 储量最为丰富, 约占总储量的 41%, 红土型 Ni-Co 矿床约占 36%, 岩浆型矿床占 15%, 热液及火山成因钴多金属矿床及其他成因矿床约占总储量的 8% (U.S. Geological Survey, 2017)。

3.1 沉积岩容矿型层控 Cu-Co 矿床

沉积岩容矿型层控 Cu-Co 矿床(也称为砂页岩型铜矿)是全球仅次于斑岩型铜矿床的铜矿类型, 同时共(伴)生经济价值巨大的 Co、Ag、Pb、Zn 等金属元素 (Hitzman et al., 2005)。横跨赞比亚、刚果(金)的中非铜-钴矿带(又称新元古代 Katangan 成矿带)是此类矿床最重要的产地(图2), 产出有 Mutanda (Co 储量 176 万吨, 平均品位 0.59%, Glencore International plc., 2011)、Tenke-Fungurume (Co 储量 165 万吨, 平均品位 0.245%, International Mining, 2012)、Kamoto (Co 储量 160 万吨, 平均品位 0.387%, El Desouky et al., 2010)、Kisanfu (Co 储量 116 万吨, 平均品位 1.08%, Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc., 2013)等多个世界级的 Cu-Co 矿床。带内赞比亚一侧富 Co 矿床中 Co/Cu 比值最高可达 1:15, 而刚果(金)一侧相比更加富 Co, 其 Co/Cu 比值最高可达 1:3, 平均为 1:13 (Cailteux et al., 2005)。美国西北部中元古代 Belt-Purcell 盆地中的 Idaho 钴矿带及 Sheep Creek 矿区也是沉积岩容矿型 Cu-Co 矿床的典

型分布区, 以 Blackbird Co-Cu 矿集区 (Co 储量 12.3 万吨, 平均品位 0.735%) 为代表 (Bookstrom et al., 2016)。此外, 近年的勘查工作表明, 在一些黑色页岩容矿的多金属矿床中也有一定规模的 Co 存在, 如芬兰超大型的 Talvivaara Ni-Cu-Zn-Co 矿床中, 伴生 Co 储量达到 31 万吨, 平均品位 0.02% (Loukola-Ruskeeniemi et al., 2013)。中国目前发现的此类矿床较少, 代表性矿床为古元古代辽吉裂谷内的大横路和杉松岗 Co (Cu) 矿床 (杨言辰等, 2004; 刘莹莹等, 2011), 在云南省易门、元江等“东川式铜矿”中也有工业 Co 矿床(体)产出 (薛步高, 2001)。

沉积岩容矿型层控 Cu-Co 矿床主要产于古老克拉通周围及裂谷构造背景中, 赋矿岩性以还原性的(变质)碎屑岩和碳酸盐岩为主, 矿体产状总体受地层控制, 由层状矿体与脉状矿体共同构成; 矿床中 Co 被认为主要来源于下伏基底地层中的基性、超基性岩, 并普遍经历多期的成矿作用过程 (Cailteux et al., 2005; Hitzman et al., 2010)。中非铜-钴矿带由刚果(金)向南东方向延至赞比亚中部, 长度近 700 km, 宽约 150 km, 产出的 Cu-Co 矿床规模大、品位高、埋藏浅, 一直是国际矿业公司投资的热点地区, 同时其矿化类型多样, 矿床的形成时代、矿床成因模式也一直是矿床学家研究的主要内容 (Cailteux et al., 2005; Sillitoe et al., 2010; 2015; 2017; Muchez et al., 2015; Saintilan et al., 2018)。新元古代 Katangan 超群(约

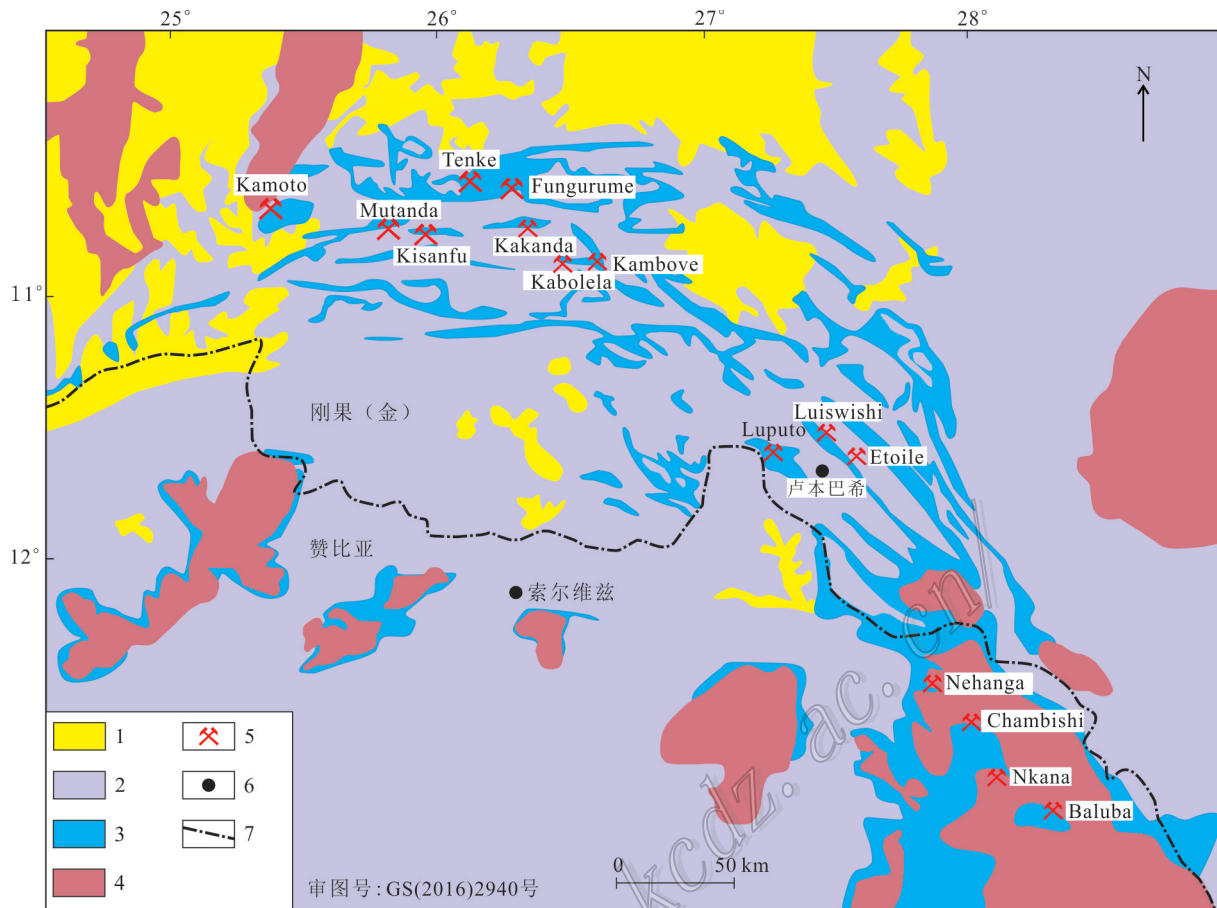


图2 中非铜-钴矿带主要沉积岩容矿型层控Cu-Co矿床分布图(据 Cailteux et al., 2005)

1—新生代盖层;2—Nguba群和Kundelungu群;3—Roan群;4—前Katangan基底;5—Cu-Co矿床;6—城市;7—国界线

Fig. 2 Geological map of the Central African copper-cobalt belt with the locations of main stratabound Cu-Co deposits (after Cailteux et al., 2005)

1—Cenozoic cover; 2—Nguba Group and Kundelungu Group; 3—Roan Group; 4—Pre-Katangan basement; 5—Cu-Co deposit; 6—City; 7—National boundaries

850~635 Ma)是Cu-Co矿床的主要赋存地层,自古向新由Roan群、Nguba群和Kundelungu群组成,其中Roan群碎屑沉积岩和碳酸盐岩是最主要的赋矿层位(图2)。Katangan岩系在随后的泛非Lufilian造山运动(约590~500 Ma)中经历了不同程度的变形和变质作用(Kampunzu et al., 1999; Rainaud et al., 2005)。关于这些Cu-Co矿床的成因半个多世纪以来一直存在较大的争议,主要分歧在于成矿作用是否在泛非Kufilian造山之前就已经开始,还是主要发生于泛非造山运动过程中。尽管沉积成岩-热液改造的成矿模式被广泛的接受(Sweeney et al., 1986; Cailteux et al., 2005; El Desouky et al., 2010; Hitzman et al., 2010; Muchez et al., 2015),但也不断有证据证实带内Cu-Co矿床的后生成矿特征,如

McGowan等(2003)获得Nchanga Cu-Co矿床硫化物矿石中硫同位素(-1‰ ~ $+18\text{‰}$)与沉积岩成岩阶段的黄铁矿硫同位素(-1‰ ~ -17‰)存在明显的差别;越来越多的辉钼矿的Re-Os同位素年龄证实Cu-Co成矿作用主要发生于540~490 Ma(Sillitoe et al., 2010; 2015; 2017; Nowecki, 2014; Saintilan et al., 2018),而目前缺少同沉积成矿作用的可靠年龄数据。

美国西北部Idaho钴矿带是世界上沉积岩容矿型层控Cu-Co矿床重要的分布区,也是目前钴矿勘探十分活跃的地区。Idaho钴矿带呈北西向展布,延伸约55 km,已探明规模不等的Co±Cu±Au矿床(点)45个。Blackbird地区是带内最主要的、以Co为主的矿化集中区,共(伴)生一定量的Cu、Au(Nold, 1990; Slack, 2012; Bookstrom et al., 2016)。矿集区内Co-

Cu矿体呈层状、似层状产于中元古代 Belt-Purcell 盆地的变质沉积岩内,赋矿岩性主要为 Lemhi 群变质粉砂岩(沉积年龄老于 1409 Ma, Aleinikoff et al., 2012)。Lemhi 群变质粉砂岩沉积后经历了多期变质作用及岩浆活动的影响。关于 Blackbird 矿集区内 Co-Cu 矿床成因曾存在喷流沉积-改造型(Bending et al., 2001)、沉积型(Nold, 1990)、IOCG 型(Slack, 2012)等多种认识,而目前多期变质-岩浆热液叠加成因被广泛接受(Landis et al., 2012; Johnson et al., 2012; Bookstrom et al., 2016),其中 Co 矿化主要发生于中元古代的岩浆作用(1379~1325 Ma)及变质作用(1200~1000 Ma)过程中(Saintilan et al., 2017),而 Cu 矿化主要与白垩纪麻粒岩相变质作用有关(151~93 Ma, Aleinikoff et al., 2012)。

3.2 红土型 Ni-Co 矿床

红土型 Ni-Co 矿床蕴含着世界陆地 60% 的镍资源和 36% 的钴资源(Butt et al., 2013)。红土型 Ni-Co 矿床一般具有规模大、埋藏浅、综合利用价值高(常共/伴生 REE、Sc、铂族元素、Cr、Mn、V 等元素),且易于勘探和开采等特点。截至 2011 年,全球 Co 产量中的 15% 来自于该类矿床(U.S. Geological Survey, 2017)。近年来,随着全球 Ni、Co 等关键金属需求量的大幅度增加,岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿山面临储量危机以及红土型 Ni-Co 矿床矿石选冶技术的突破(付伟等, 2013),红土型 Ni-Co 矿床正逐渐成为矿床学界关注的热点(Butt et al., 2013; Putzolu et al., 2018; Teitler et al., 2019)。

红土型 Ni-Co 矿床主要产于北纬 23.6° 与南纬 23.0° 之间的热带或亚热带地区,澳大利亚、喀麦隆、古巴、巴西、新喀里多尼亚、印尼、菲律宾是重要的红土型 Ni-Co 矿床产出国。喀麦隆东南部 Lomlé 地区是全球红土型 Co-Mn 矿床重要的分布区(图 3)。其中, Nkamouna Co-Mn 矿床钴储量达到 86 万吨,平均品位 0.22%,是目前探明的 Co 品位最高的红土型矿床,也是为数不多的以 Co 作为主要金属被开采的红土型矿床,其矿体主要产于蛇纹岩化橄榄岩的上部(图 3)。澳大利亚是目前全球钴矿勘查最活跃的地区,仅 2011 年至 2015 年针对红土型 Ni-Co 矿施工了勘查钻孔近 400 个,代表性红土型 Ni-Co 矿床如 Murrin Murrin 矿床(Co 储量 35 万吨,平均品位 0.076%, Minara Resources Pty Ltd., 2011)、Kalgoorlie 矿床(Co 储量 32 万吨,平均品位 0.044%, Heron Resources Ltd., 2013)。印尼也是红土型 Ni-Co 矿床勘查的热

点地区,据环太平洋钴业公司报道,位于印尼 Papua 省 Yapase 地区,正在施工的 Cyclops 项目预计 Co 储量可达 40 万吨,平均品位 0.11%(Pacific Rim Cobalt Corp., 2019)。世界其他典型红土型 Ni-Co 矿床包括古巴的 Moa 矿床(Co 储量 52 万吨,平均品位 0.18%, Berger et al., 2011)、巴西的 Jacaré 矿床(Co 储量 64 万吨,平均品位 0.13%, Berger et al., 2011)等。中国红土型 Ni-Co 矿床并不发育,土壤地球化学调查工作显示云南哀牢山西侧的墨江金厂-安定地区是寻找该类矿床潜力较大的地区之一(肖高强等, 2016)。

红土型 Ni-Co 矿床属于表生矿床,主要通过富橄榄石的基性、超基性岩的物理、化学风化作用而形成,多数产于增生地体中,与构造侵位的蛇绿岩套有关,少量产于克拉通地台中(Gleeson et al., 2003; Freyssinet et al., 2005)。其典型特征包括:矿带厚度约 10~40 m,从顶部到底部由表层土、褐铁矿、腐泥土及风化的超基性原岩组成;红土型 Ni-Co 矿床中的 Co 主要赋存在钴土矿和黏土(绿脱石和蒙脱石)、钴华、针铁矿、水钴矿、褐铁矿等矿物中(Butt et al., 2013)。红土型 Ni-Co 矿床的成因具有明显的多样性,按成因类似可分为氧化型、含水镁硅酸盐型和黏土型,其成矿条件依赖于热带气候环境、稳定的大地构造背景、纯橄榄岩母岩和剪切构造带等多种因素的耦合;成矿年龄集中在始新世至全新世(Freyssinet et al., 2005; 付伟等, 2013)。

3.3 岩浆型 Ni-Cu-Co 矿床

在岩浆型硫化物矿床中,Co 主要作为开采 Cu、Ni 矿的副产品。尽管岩浆型 Ni-Cu-Co 矿床中的 Co 储量仅占全球总储量的 15%,但由于此类矿床勘查、开发程度较高,矿石可选性好,工艺成熟,开采成本相对较低,截至 2011 年,全球 23% 的 Co 产量仍来自于此类矿床(U.S. Geological Survey, 2017)。岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床全球分布极不均匀,主要分布在加拿大、俄罗斯、澳大利亚、中国等。其中加拿大的 Sudbury 矿床 Co 储量达到 100.6 万吨(平均品位 0.038%, Naldrett, 2004),俄罗斯的 Noril'sk-Talnakh 地区铜镍硫化物矿床中 Co 储量达 79 万吨(平均品位 0.061%, Naldrett, 2004),其他典型矿床包括加拿大的 Voisey's Bay 矿床、Dumont 矿床,澳大利亚的 Kambalda 矿床等。岩浆型 Cu-Ni 矿床是中国生产 Co 最多的矿床类型,其中约有 70% 产自甘肃省金川镍矿床(Co 储量 9.8 万吨,平均品位 0.019%; Nal-

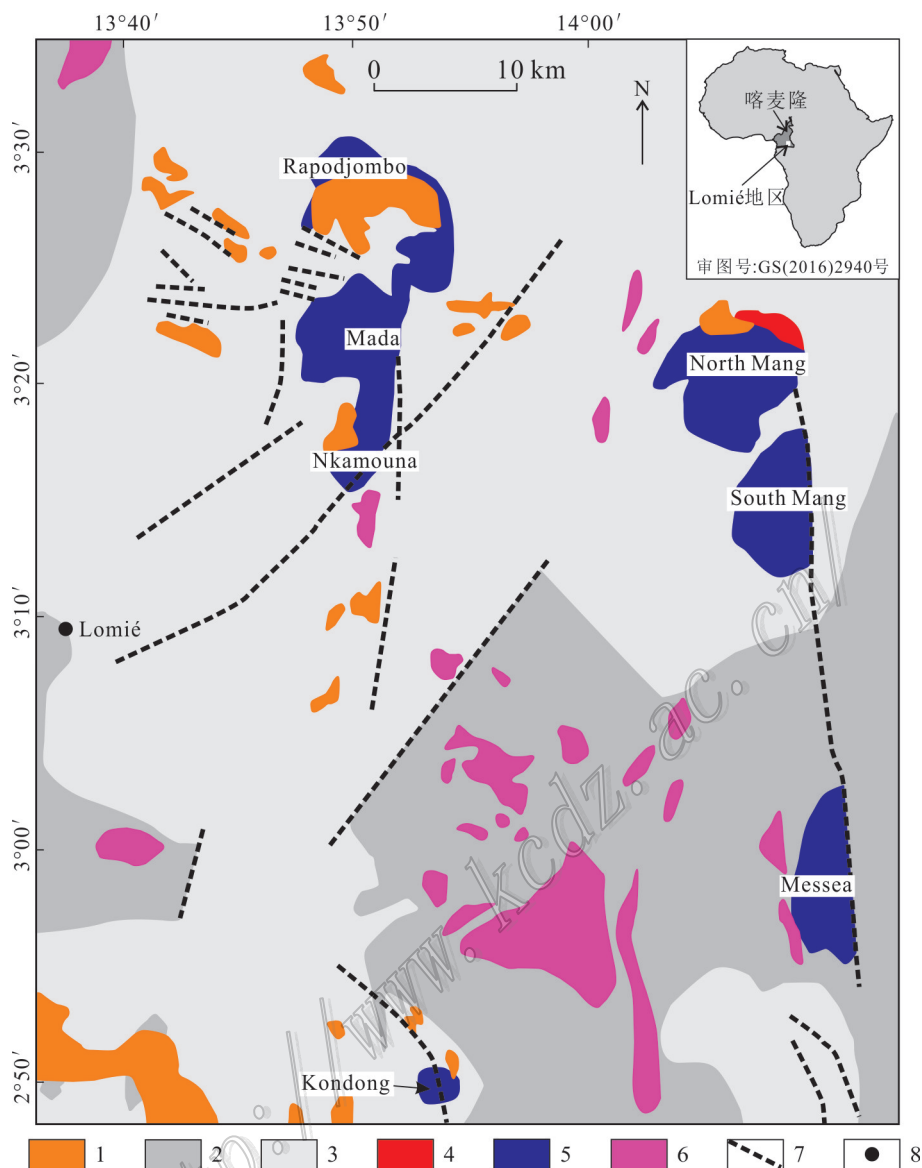


图3 喀麦隆东南部Lomié地区红土型Co-Mn矿床分布图(据Dzemua et al., 2013)

1—石英岩;2—变长英质火山岩;3—片岩;4—闪长岩;5—蛇纹岩地体及红土型矿床;6—变基性火山岩;7—断裂;8—城市

Fig. 3 Geological map of the Lomié district in southeast Cameroon, with the locations of main laterite Co-Mn deposits (after Dzemua et al., 2013)

1—Quartzite; 2—Met-felsic volcanic rocks; 3—Schist; 4—Diorite; 5—Serpentinite massifs with laterite deposits; 6—Meta-mafic volcanic rocks; 7—Faults; 8—City

drett, 2004)。近年来,在东昆仑成矿带探明的夏日哈木超大型镍钴矿床中,Co储量达到4.03万吨(平均品位0.013%, Song et al., 2016)。此外,新疆图拉尔根、白石泉矿床,吉林红旗岭矿床及四川杨柳坪等矿床中也伴生有工业价值的钴(董耀松等, 2004; 秦克章等, 2007)。

岩浆型Ni-Cu-Co矿床主要与幔源岩浆作用有

关(岩浆结晶分异、熔离作用),形成于地幔柱、大陆裂谷、碰撞造山后伸展等构造背景中(汤中立, 1996; 汤中立等 2007; Naldrett, 2004)。岩浆中Ni、Cu和Co的含量不仅取决于其部分熔融程度及地幔源区地球化学成分,还受分离结晶过程、特别是硫化物熔离作用的影响(宋谢炎等, 2010; 2018)。岩浆型Ni-Cu-Co矿床主要矿石矿物包括磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜

矿、磁铁矿等,钴主要赋存于含钴镍的黄铁矿中,少量存在于硫钴矿中,钴的含量与镍品位多数具有正相关关系。

3.4 热液及火山成因Co多金属矿床

广义的热液及火山成因Co多金属矿床包括富Co的热液脉型矿床、VMS型Cu-Co矿床、SEDEX型Co多金属矿床、矽卡岩型Fe-Co-Cu矿床等多种矿床类型,其中多数与基性-超基性岩空间关系密切。尽管相对前几种钴矿类型,目前发现的热液及火山成因Co多金属矿床在储量上并无优势,但其在世界各国均有产出,且多数为独立钴矿床或以Co为主要金属元素的矿床,因而同样具有较大的找矿前景和潜在的经济价值。

富Co的热液脉型矿床主要受断裂与裂隙控制,矿体呈脉状产于变沉积岩或变岩浆岩内,一部分矿

床具有特征的Ag-Ni-Co-As-Bi五元素组合(Kissin, 1992),以相对较高的品位、低的吨位而著称(Ahmed et al., 2009)。摩洛哥Bou Azzer地区产出多个以钴为主要元素的矿床,是此类矿床的典型代表,其Co平均品位高达1.5%,储量约8.5万吨,为目前已知的Co品位最高的矿床(Bouabdellah et al., 2016)。该地区Co-Ni-As-(Au)矿体受产状较陡的剪切带控制,主要产于蛇纹岩与闪长岩的接触带内(图4),矿体走向延伸1~5 km,单个矿脉宽约0.2~2 m,原生的矿石矿物为Co-Ni-Fe砷化物和硫砷化物(Oberthür et al., 2009)。加拿大安大略省的Cobalt和Gowganda地区是历史悠久的产银地,同时也是富Co热液脉型矿床的代表性分布区(Petruck et al., 1971; Marshall et al., 2000)。该地区的最后一批银矿在30年前就已关闭,而最近针对钴的勘查活动为这个地区重新带来

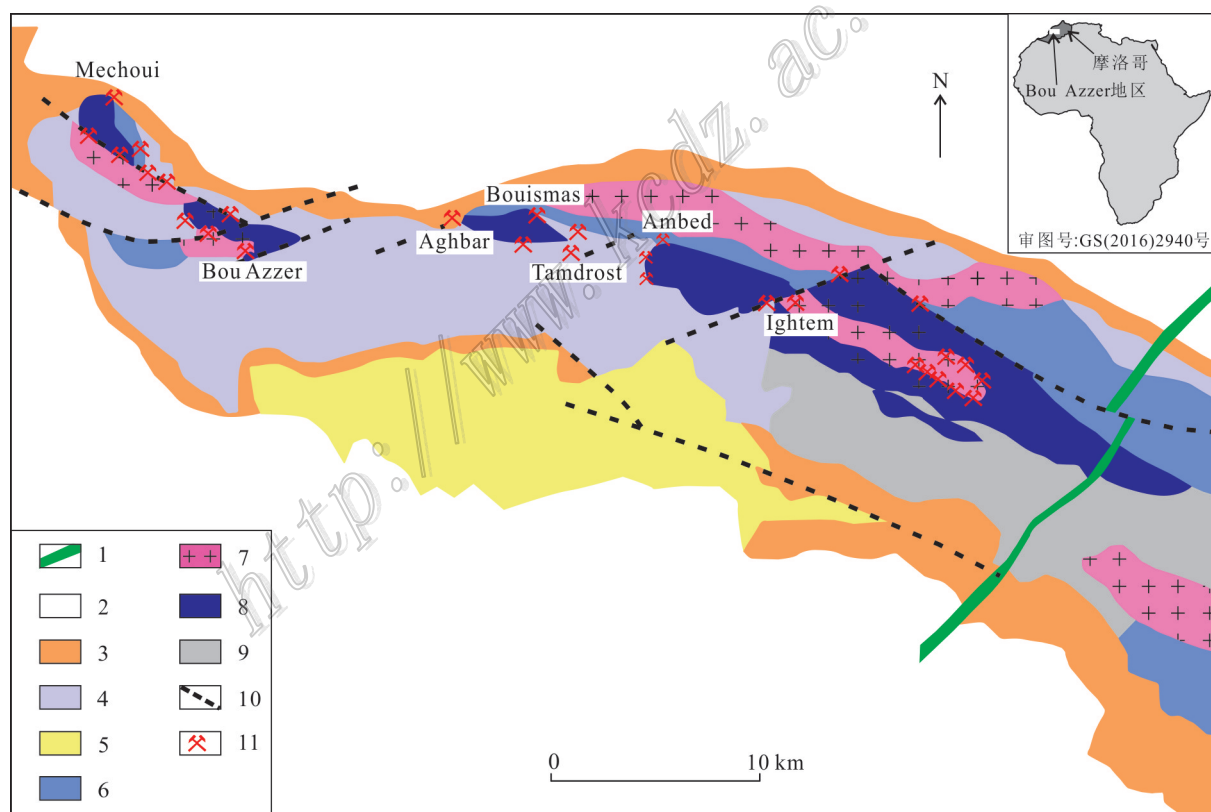


图4 摩洛哥Bou Azzer地区富Co脉型矿床分布图(据 Ahmed et al., 2009)

1—辉绿岩脉;2—古生代盖层;3—碳酸盐岩;4—熔结凝灰岩和砾岩;5—安山质-粗面质熔岩和凝灰岩;6—变质磨拉石沉积建造;
7—闪长岩;8—蛇纹岩;9—片麻岩和片岩;10—Co-Ni砷化物矿体;11—断裂

Fig. 4 Geological map of the Bou Azzer area in Morocco, with the locations of main Co-rich vein-type deposits
(after Ahmed et al., 2009)

1—Dolerite dykes; 2—Paleozoic cover; 3—Carbonate sequence; 4—Ignimbrites and conglomerate; 5—Andesite-trachyte lavas and tuffs; 6—Meta-morphosed molassic sedimentary succession; 7—Diorite; 8—Serpentinities; 9—Gneisses and schists; 10—Co-Ni arsenide orebodies; 11—Faults

了活力。加拿大第一钴业公司2018年7月发布公告显示,在该区的Drummond和Kerr Lake附近已探获了多条Co-Ag矿脉,延伸超过350 m(First Cobalt Corp., 2018)。近年来,在中国湖南东北部地区相继发现了横洞Co矿(Co储量1.24万吨,平均品位0.036%, Zou et al., 2018)、井冲Co-Cu矿(Co储量3718 t, 平均品位0.027%, Wang et al., 2017)等受构造控制的热液型钴矿床,显示出存在大型热液型钴矿的良好潜力。

VMS型矿床主要产于海相火山、火山沉积岩中,其中一些别子型及少量的塞浦路斯型(蛇绿岩型)VMS矿床中含有较高含量的Co(Peter et al., 1999; Herrington et al., 2005; Mosier et al., 2009)。典型矿床如加拿大的Windy Craggy Cu-Co-Au矿床(Co储量约20.5万吨,平均品位0.069%, Peter et al., 1999)、俄罗斯的Sibaiskoye矿床(Co储量约13万吨,平均品位0.13%, Prokin et al., 1998)及芬兰的Outokumpu Cu-Co矿床(Co储量约7.3万吨,平均品位0.25%, Peltonen et al., 2008)等。Windy Craggy Cu-Co-Au矿床位于加拿大不列颠哥伦比亚省,是目前已知的规模最大的别子型VMS矿床,矿体主要产于互层的玄武岩和泥质板岩之中(Peter et al., 1999)。中国东昆仑成矿带的德尔尼Cu-Co-Zn矿床(Co储量2.8万吨,平均品位0.089%, 焦建刚等, 2009)、督冷沟Cu-Co矿床(舒树兰等, 2015)等也属于此种类型。SEDEX型钴矿的典型实例如中国青海东昆仑成矿带中的驼路沟Co(Au)矿床(丰成友等, 2006)、肯德可克Co-Bi-Au矿床(潘彤等, 2003)等。

代表性的富Co矽卡岩型矿床包括俄罗斯的Magnitogorsk矿床(Co储量9万吨,平均品位0.018%; Herrington et al., 2005),中国海南的石碌Fe-Co-Cu矿床(Co储量1.18万吨,平均品位0.29%; Yu et al., 2014)等。此外,在一些IOCG型矿床也伴生着一定的钴,如澳大利亚超大型的Olympic Dam铜多金属矿床伴生Co约12.1万吨,平均品位0.02%(Williams et al., 2001),中国云南拉拉厂铜矿中伴生Co约4.4万吨,平均品位0.022%(朱志敏等, 2014)。

3.5 洋底富Co结核与结壳资源

除以上分布在陆地上的含钴矿床外,还有大量的钴资源赋存在洋底Fe-Mn结核与结壳内(Glasby et al., 2010; Hein et al., 2013; 张富元等, 2015)。洋底

结核和结壳产出在不同的地形单元中,结核产于3500~6500 m的深海环境,而结壳主要分布于海山、岛屿斜坡和海底高地上,水深范围一般为800~2500 m。与结核相比,结壳具有更高的Co、Fe含量(Co平均品位0.55%)和相对低的Mn、Ni、Cu含量,是一种具有巨大潜在经济价值和战略意义的矿产资源(Hein et al., 2013; 游国庆等, 2014)。富钴结壳按形态可分为板状结壳、砾状结壳和钴结核3种类型。主要矿物成分为自生的铁锰矿物,包括水羟锰矿、钡镁锰矿、羟铁矿、四方纤铁矿、六方纤铁矿、针铁矿等。富含Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Pb、Zn等金属元素以及稀土元素和铂族元素,其中Co含量尤为显著。西、中太平洋海山区被认为是全球富钴结壳的最主要产出区(韦振权等, 2017)。

随着陆地Co资源的不断消耗,加快对海洋优质Co资源的勘探开发进程已经成为世界各国的共识。各国针对富钴结壳的调查始于20世纪80年代初,截至目前,已有多个国家与国际海底管理局签订了富钴结壳勘探合同。中国自1997年起,对太平洋5个海山区的28座海山开展了富钴结壳资源调查。在此基础上,2014年,中国大洋协会与国际海底管理局签订了为期15年的国际海底富钴结壳勘探合同,矿区位于西北太平洋麦哲伦海山区,面积为3000 km²。截至目前,勘探工作的首个五年任务已经完成,初步开展了富钴结壳资源开发和综合利用评价工作,并完成了富钴结壳开采系统方案设计、海上采掘功能试验以及富钴结壳可选冶性评价工作。

4 总结与建议

钴是支撑新兴产业大力发展的重要战略性金属,近年来钴矿的勘查与开发利用受到了各国的高度关注。钴矿全球范围内分布极不均衡,其中沉积岩容矿型层控Cu-Co矿床、红土型Ni-Co矿床集中了目前陆地77%的钴矿资源,其余来自岩浆型Ni-Cu-Co矿床和热液及火山成因Co多金属矿床。已有研究表明,上述富钴矿床多数与基性-超基性岩有着直接的或间接的成因联系,但成矿作用十分复杂。

尽管近年来钴矿的勘查和研究工作取得了一定的进展,但关于钴矿的成矿条件、构造背景与成矿机理等关键问题仍亟需开展深入的研究工作,深入总

结钴矿的成矿规律并建立行之有效的找矿模型,将为“新能源时代”钴矿的勘查和开发提供有效的支撑和指导。对中国来说,积极开拓全球的钴矿资源市场,同时加大国内钴矿的针对性勘查、研究投入,寻求多元化的钴资源供应,建立钴矿资源的储备体系势在必行。

References

- Ahmed A H, Arai S and Ikenne M. 2009. Mineralogy and paragenesis of the Co-Ni arsenide ores of Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco[J]. *Econ. Geol.*, 104(2): 249-266.
- Aleinikoff J N, Slack J F, Lund K, Evans K V, Fanning C M, Mazdab F K, Joseph L W and Pillers R M. 2012. Constraints on the timing of Co-Cu±Au mineralization in the Blackbird district, Idaho, using SHRIMP U-Pb ages of monazite and xenotime plus zircon ages of related Mesoproterozoic orthogneisses and metasedimentary rocks[J]. *Econ. Geol.*, 107(6): 1143-1175.
- Bending J S and Scales W G. 2001. New production in the Idaho cobalt belt: A unique metallogenic province[J]. *Applied Earth Science*, 110(2): 81-87.
- Berger V I, Singer D A, Bliss J D and Moring B. 2011. Ni-Co laterite deposits of the world—Database and grade and tonnage models[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2011-1058, 1-26.
- Bookstrom A A, Box S E, Cossette P M, Frost T P, Gillerman V S, King G R and Zirakparvar N A. 2016. Geologic history of the Blackbird Co-Cu district in the Lemhi subbasin of the Belt-Purcell Basin[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 522, SPE522-08.
- Bouabdellah M, Maacha L, Levresse G and Saddiqi O. 2016 The Bou Azzer Co-Ni-Fe-As(±Au ± Ag) district of Central Anti-Atlas (Morocco)—Along-lived Late Hercynian to Triassic magmatic-hydrothermal to low-sulphidation epithermal system[A]. In: Bouabdellah M and Slack J F, eds. *Mineral deposits of north Africa*[M]. Berlin: Springer-Verlag. 229-247.
- Butt C R M and Cluzel D. 2013. Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites[J]. *Elements*, 9(2): 123-128.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, Kaputo A K and Milesi J P. 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, Central African copper belt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1-5): 134-158.
- Dong Y S, Fan J Z, Yang Y C and Sun D Y. 2004. Study on the metallogenic feature and ore genesis of Hongqiling copper-nickel deposit, Jilin Province[J]. *Geoscience*, 18(2): 197-202(in Chinese with English abstract).
- Dzemua G L, Gleeson S A and Schofield P F. 2013. Mineralogical characterization of the Nkamouna Co-Mn laterite ore, southeast Cameroon[J]. *Mineralium Deposita*, 48(2): 155-171.
- El Desouky H A, Muchez P, Boyce A J, Schneider J, Cailteux J L, Dewaele S and von Quadt A. 2010. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga copper belt (Democratic Republic of Congo)[J]. *Mineralium Deposita*, 45(8): 735-763.
- European Commission. 2014. Report on critical raw materials for the EU[R]. In: Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. 41p.
- European Commission. 2017. Study on the review of the list of critical raw materials[R]. In: Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. 93p.
- Feng C Y, Zhang D Q, She H Q, Dang X Y, Li D X, Li J W and Cui Y H. 2006. Tectonic setting and metallogenic mechanism of Tuolugou cobalt(gold) deposit, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 544-561(in Chinese with English abstract).
- First Cobalt Corp. 2018. First cobalt identifies second cobalt mineralization trend in Kerr Area of Cobalt Camp[EB/OL]. <https://www.firstcobalt.com/investors/news/first-cobalt-identifies-second-cobalt-mineralization-trend-in-kerr-area-of-cobalt-camp->.
- Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc. 2013. Form 10-K-2012: Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc. [EB/OL]. accessed February 18, 2016, at <http://investors.fcx.com/investorcenter/financial-information/annual-reports-and-proxy/default.aspx>.
- Freyssinet P, Butt C R M, Morris R C and Piantone P. 2005. Ore-forming processes related to laterite weathering[J]. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume: 681-722.
- Fu W, Niu H J, Huang X R, Yang M L and Chen Y R. 2013. Diversified genesis of the laterite nickel deposits: A comparative study based on the global scale[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(6), 832-849 (in Chinese with English abstract).
- Glasby G P, Mountain B, Vineesh T C, Banakar V, Rajani R and Ren X. 2010. Role of hydrology in the formation of Co-rich Mn Crusts from the Equatorial N Pacific, Equatorial S Indian Ocean and the NE Atlantic Ocean[J]. *Resource Geology*, 60(2): 165-177.
- Gleeson S A, Butt C R M and Elias M. 2003. Nickel laterites: a review[J]. *SEG Newsletter*, 54: 11-18.
- Glencore International Plc. 2011. Mutanda report: Glencore International plc. [EB / OL]. accessed April 22, 2013, at http://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2011/0513/00805_1074520/EWPGLENCORE-20110511-44.pdf.
- Hein J R, Mizell K, Koschinsky A and Conrad T A. 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high-and green-technology applications: Comparison with land-based resources[J]. *Ore Geology Reviews*, 51, 1-14.
- Heron Resources Ltd. 2013. Kalgoorlie nickel project: Heron Resources Ltd[EB/OL]. Web page, accessed April 22, 2013, at <http://www.heronresources.com.au/knp.php>.
- Herrington R J, Zaykov V V, Maslennikov V V, Brown D and Puchkov V N. 2005. Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution[J]. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume: 1069-1095.
- Hitzman M W, Selley D and Bull S. 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history[J].

- Econ. Geol., 105(3): 627-639.
- Hitzman M, Kirkham R, Broughton D, Thorson J and Selley D. 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system[J]. Econ. Geol. 100th Anniversary Volume: 609-642.
- International Mining. 2012. Tenke Fungurume copper/cobalt mine progressing well with phase 2 expansion in the DRC: International Mining, January 4, accessed November 19, 2013[EB/OL]. at <http://www.im-mining.com/2012/01/04/tenke-fungurumecoppercobalt-mine-progressing-well-with-phase-2-expansion-in-the-drc/>.
- Jiao J G, Huang X F, Yuan H C, Chen B, Sun T and Liu R P. 2009. Progress in the research of De'erni Cu(Co) ore deposit[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 31(1): 42-47(in Chinese with English abstract).
- Johnson C A, Bookstrom A A and Slack J F. 2012. Sulfur, carbon, hydrogen, and oxygen isotope geochemistry of the Idaho cobalt belt[J]. Econ. Geol., 107(6): 1207-1221.
- Kampunzu A B and Cailteux J. 1999. Tectonic evolution of the Lufilian Arc (Central Africa Copper Belt) during Neoproterozoic Pan African orogenesis[J]. Gondwana Research, 2(3): 401-421.
- Kissin S A. 1992. Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) veins[J]. Geoscience Canada, 19(3): 113-124.
- Krauskopf K B and Bird D K. 1995. Introduction to geochemistry[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1-647.
- Landis G P and Hofstra A H. 2012. Ore genesis constraints on the Idaho cobalt belt from fluid inclusion gas, noble gas isotope, and ion ratio analyses[J]. Econ. Geol., 107(6): 1189-1205.
- Liu Y Y, Zhang Y, Liu D W, Bi S Y, Li H S and Li D D. 2011. Geological features and ore-forming process of black rock series, Huashan Formation, Laoling Group, Mesoproterozoic in Jilin Province[J]. Jilin Geology, 30(3): 31-37(in Chinese with English abstract).
- Loukola-Ruskeeniemi K and Lahtinen H. 2013. Multiphase evolution in the black-shale-hosted Ni-Cu-Zn-Co deposit at Talvivaara, Finland[J]. Ore Geology Reviews, 52: 85-99.
- Marshall D and Watkinson D H. 2000. The Cobalt mining district: Silver sources, transport and deposition[J]. Exploration and Mining Geology, 9(2): 81-90.
- McGowan R R, Roberts S, Foster R P, Boyce A J and Collier D. 2003. Origin of the copper-cobalt deposits of the Zambian copper belt: An epigenetic view from Nchanga[J]. Geology, 31(6): 497-500.
- Minara Resources Pty Ltd. 2011. Annual report 2010: Perth, Western Australia, Australia, Minara Resources Pty Ltd. [EB/OL]. accessed April 22, 2013, at www.minara.com.au/files/docs/329_2010_Annual_Report_to_Shareholders.
- Mosier D L, Berger V I and Singer D A. 2009. Volcanogenic massive sulfide deposits of the world—Database and grade and tonnage models[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2009 – 1034. 1-46.
- Muchez P, André-Mayer A S, El Desouky H A and Reisberg L. 2015. Diagenetic origin of the stratiform Cu-Co deposit at Kamoto in the Central African copper belt[J]. Mineralium Deposita, 50(4): 437-447.
- Naldrett A J, Asif M, Krstic S and Li C. 2000. The composition of mineralization at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to platinum-group elements[J]. Econ. Geol., 95(4): 845-865.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic sulfide deposits—Geology, geochemistry, and exploration[M]. Berlin: Springer Verlag. 1-727.
- Nold J L. 1990. The Idaho cobalt belt, northwestern United States—a metamorphosed Proterozoic exhalative ore district[J]. Mineralium Deposita, 25(3): 163-168.
- Nowecki J P. 2014. Tracing seawater evaporation and its role in the formation of sediment-hosted stratiform copper deposits[D]. Ph. D. thesis, University of Southampton, Southampton, UK. 1-217.
- Oberthür T, Melcher F, Henjes-Kunst F, Gerdes A, Stein H, Zimmerman A and El Ghorfi M. 2009. Hercynian age of the cobalt-nickel-arsenide-(gold) ores, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco: Re-Os, Sm-Nd, and U-Pb age determinations[J]. Econ. Geol., 104(7): 1065-1079.
- Pacific Rim Cobalt Corp. 2019. New shallow drilling returns discovery of strong nickel and cobalt mineralization[EB/OL]. <https://pacificrimcobalt.com/2019/03/05/new-shallow-drilling-returns-discovery-of-strong-nickel-and-cobalt-mineralization/>.
- Pan T and Sun F Y. 2003. The mineralization characteristic and prospecting of Kendekeke Co-Bi-Au deposit in Dunkunlun, Qinghai Province[J]. Geology and Prospecting, 39(1): 18-22 (in Chinese with English abstract).
- Peltonen P, Kontinen A, Huhma H and Kuronen U. 2008. Outokumpu revisited: new mineral deposit model for the mantle peridotite-associated Cu-Co-Zn-Ni-Ag-Au sulphide deposits[J]. Ore Geology Reviews, 33(3-4): 559-617.
- Peter J M and Scott S D. 1999. Windy Craggy, northwestern British Columbia; the world's largest bessehi-type deposit[J]. Reviews in Econ. Geol., 8: 261-295.
- Petruck W, Harris D C, Cabri L J and Stewart J M. 1971. Characteristics of the silver-antimony minerals[J]. The Canadian Mineralogist, 11(1): 187-195.
- Prokin V A and Buslaev F P. 1998. Massive copper – zinc sulphide deposits in the Urals[J]. Ore Geology Reviews, 14(1): 1-69.
- Putzolu F, Balassone G, Boni M, Maczura M, Mondillo N, Najorka J and Pirajno F. 2018. Mineralogical association and Ni-Co deportment in the Wingellina oxide-type laterite deposit (Western Australia)[J]. Ore Geology Reviews, 97: 21-34.
- Qin K Z, Ding K S, Xu Y X, Sun H, Xu X W, Tang D M and Mao Q. 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 26(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- Rainaud C, Master S, Armstrong R A and Robb L J. 2005. Geochronology and nature of the Palaeoproterozoic basement in the Central African Copperbelt (Zambia and the Democratic Republic of Congo), with regional implications[J]. Journal of African Earth Sci-

- ences, 42(1-5): 1-31.
- Saintilan N J, Creaser R A and Bookstrom A A. 2017. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 509-525.
- Saintilan N J, Selby D, Creaser R A and Dewaele S. 2018. Sulfide Re-Os geochronology links orogenesis, salt and Cu-Co ores in the Central African Copperbelt[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 14946.
- Shu S L, Li B and Chen L. 2015. Discussion on metallogenic characteristics and multi-stage mineralization process of Dulenggou copper-cobalt deposit in East Kunlun, Qinghai Province[J]. *North-western Geology*, 48(1): 137-144(in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H, Perelló J and García A. 2010. Sulfide-bearing veinlets throughout the stratiform mineralization of the Central African copper belt: Temporal and genetic implications[J]. *Econ. Geol.*, 105(8): 1361-1368.
- Sillitoe R H, Perelló J, Creaser R A, Wilton J and Dawborn T. 2015. Two ages of copper mineralization in the Mwombezhi dome, northwestern Zambia: Metallogenic implications for the Central African Copperbelt[J]. *Econ. Geol.*, 110(8): 1917-1923.
- Sillitoe R H, Perelló J, Creaser R A, Wilton J, Wilson A J and Dawborn T. 2017. Age of the Zambian copper belt[J]. *Mineralium Deposita*, 52(8): 1245-1268.
- Slack J F. 2012. Strata-bound Fe-Co-Cu-Au-Bi-Y-REE deposits of the Idaho cobalt belt: Multistage hydrothermal mineralization in a magmatic-related iron oxide copper-gold system[J]. *Econ. Geol.*, 107(6): 1089-1113.
- Song X Y, Xiao J F, Zhu D, Zhu W G and Chen L M. 2010. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 153-163(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, She Y W, Liu C Z, Dang X Y, Yang Q A and Wu S K. 2016. The giant Xiarhamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet plateau, China[J]. *Econ. Geol.*, 111(1): 29-55.
- Song X Y, Hu R Z and Chen L M. 2018. Characteristics and inspirations of the Ni-Cu sulfide deposits in China[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 54(2): 221-235(in Chinese with English abstract).
- Sweeney M, Turner P and Vaughan D J. 1986. Stable isotope and geochemical studies in the role of early diagenesis in ore formation, Konkola Basin, Zambian copper belt[J]. *Econ. Geol.*, 81(8): 1838-1852.
- Tang Z L. 1996. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 237-243(in Chinese with English abstract).
- Tang Z L, Yan H Q, Jiao J G and Pan Z X. 2007. Regional metallogenic controls of small-intrusion-hosted Ni-Cu (PGE) ore deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 92-103 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of geophysics*, 33(2): 241-265.
- Teitler Y, Cathelineau M, Ulrich M, Ambrosi J P, Munoz M and Sevin B. 2019. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 196: 131-155.
- U.S. Geological Survey. 2017. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802.
- U. S. Geological Survey. 2019. Mineral Commodity Summaries[R].
- Wang Z, Xu D, Chi G, Shao Y, Lai J, Deng T, Guo F, Wang Z, Dong G, Ning J and Zou S. 2017. Mineralogical and isotopic constraints on the genesis of the Jingchong Co-Cu polymetallic ore deposit in northeastern Hunan Province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 638-654.
- Wei Z Q, He G W, Deng X G, Yao H Q, Liu Y G, Yang Y and Ren J B. 2017. The progress in the study and survey of oceanic cobalt-rich crust resources[J]. *Geology in China*, 44(3): 460-472(in Chinese with English abstract).
- Williams P J and Pollard P J. 2001. Australian Proterozoic iron oxide-Cu-Au deposits: An overview with new metallogenic and exploration data from the Cloncurry district, northwest Queensland[J]. *Exploration and Mining Geology*, 10(3): 191-213.
- Xiao G Q, Xu J, Chen J and Xiang L Z. 2016. The Co, Ni geochemical feature and significance of ultra basic rock weathering crust of west side of Ailaoshan MTS[J]. *Yunnan Geology*, 35(3): 410-415 (in Chinese with English abstract).
- Xue B G. 2001. Geological characteristics of cobalt resources in Yunnan and its exploring guide[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(4): 210-216(in Chinese with English abstract).
- Yang Y C, Wang K Y and Feng B Z. 2004. Geological characteristics and genesis of the Dahenglu type cobalt (copper) deposits, Jilin Province[J]. *Geology and Prospecting*, 40(1): 7-11(in Chinese with English abstract).
- You G Q, Liu S Q and Pan J H. 2014. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of tellurium in Co-rich crusts from Pacific Ocean[J]. *Mineral Deposits*, 33(1): 223-232(in Chinese with English abstract).
- Yu J J, Mao J W, Chen F X, Wang Y H, Che L R, Wang T Z and Liang J. 2014. Metallogeny of the Shilu Fe-Co-Cu deposit, Hainan Island, South China: Constraints from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 351-362.
- Zhang F L, Cui D, Hu Y D, Peng J, Lei X L, Ma C and Du Y L. 2014. Analysis on the development situation of cobalt ore resources and recommended management strategies[J]. *China Mining Magazine*, 23(7): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Zhang F Y, Zhang W Y, Ren X W, Zhang X Y and Zhu K C. 2015. Resource estimation of Co-rich crusts of sea mounts in the three oceans[J]. *Haiyang Xuebao*, 37(1): 88-105(in Chinese with Eng-

lish abstract).

- Zhu Z M, Li T X, Chen L, Tan H Q and Liu Y D. 2014. Sulfur isotope geochemistry of the Lala IOCG deposit in Sichuan Province[J]. Geological Journal of China Universities, 20(1): 28-37(in Chinese with English abstract).
- Zou S H, Zou F H, Ning J T, Deng T, Yu D S, Ye T W, Xu D R and Wang Z L. 2018. A stand-alone Co mineral deposit in northeastern Hunan Province, South China: Its timing, origin of ore fluids and metal Co, and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 92: 42-60.
- ### 附中文参考文献
- 董耀松, 范继璋, 杨言辰, 孙德有. 2004. 吉林红旗岭铜镍矿床的地质特征及成因[J]. 现代地质, 18(2): 197-202.
- 丰成友, 张德全, 余宏全, 党兴彦, 李大新, 李进文, 崔艳合. 2006. 青海驼路沟钴(金)矿床形成的构造环境及钴富集成矿机制[J]. 矿床地质, 25(5): 544-561.
- 付伟, 牛虎杰, 黄小荣, 杨梦力, 陈远荣. 2013. 红土型镍矿床成因的多样性: 基于全球尺度的对比研究[J]. 地质学报, 87(6): 832-849.
- 焦建刚, 黄喜峰, 袁海潮, 陈博, 孙涛, 刘瑞平. 2009. 青海德尔尼铜(钴)矿床研究新进展[J]. 地球科学与环境学报, 31(1), 42-47.
- 刘莹莹, 张宇, 刘大玮, 毕守业, 李宏帅, 李殿东. 2011. 吉林省中元古界老岭群花山组黑色岩系主要地质特征及其成矿作用[J]. 吉林地质, 30(3): 31-37.
- 潘彤, 孙丰月. 2003. 青海东昆仑肯德可克钴铋金矿床成矿特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 39(1): 18-22.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 孙赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛骞. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 26(1): 1-14.
- 舒树兰, 李彬, 陈林. 2015. 东昆仑冷沟铜钴矿床多期成矿特征及成矿过程探讨[J]. 西北地质, 48(1): 137-144.
- 宋谢炎, 肖家飞, 朱丹, 朱维光, 陈列锰. 2010. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 17(1): 153-163.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2018. 中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示[J]. 南京大学学报(自然科学), 54(2): 221-235.
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 70(3): 237-243.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 潘振兴. 2007. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. 地学前缘, 14(5): 92-103.
- 韦振权, 何高文, 邓希光, 姚会强, 刘永刚, 杨永, 任江波. 2017. 大洋富钴结壳资源调查与研究进展[J]. 中国地质, 44(3): 460-472.
- 肖高强, 许晶, 陈杰, 向龙洲. 2016. 哀牢山西侧超基性岩风化壳Co、Ni地球化学特征及意义[J]. 云南地质, 35(3): 410-415.
- 薛步高. 2001. 云南钴矿地质特征及找矿探讨[J]. 化工矿产地质, 23(4): 210-216.
- 杨言辰, 王可勇, 冯本智. 2004. 大横路式钴(铜)矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质与勘探, 40(1): 7-11.
- 游国庆, 刘淑琴, 潘家华. 2014. 太平洋富钴结壳中碲元素的地球化学特征及其富集机制探讨[J]. 矿床地质, 33(1): 223-232.
- 张福良, 崔笛, 胡永达, 彭杰, 雷晓力, 马骋, 杜铁伦. 2014. 钴矿资源形势分析及管理对策建议[J]. 中国矿业, 23(7): 6-10.
- 张富元, 章伟艳, 任向文, 张霄宇, 朱克超. 2015. 全球三大洋海山钴结壳资源量估算[J]. 海洋学报, 37(1): 88-105.
- 朱志敏, 李庭学, 陈良, 谭洪旗, 刘应冬. 2014. 四川拉拉铁氧化物铜金矿床硫同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 20(1): 28-37.