



引文格式: 林文海, 王焕, 贺海洋, 等. 全球沉积-变沉积型钴成矿规律及其对宁夏钴矿找矿研究的启示[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 177-195. DOI: 10.12401/j.nwg.2024007

Citation: LIN Wenhai, WANG Huan, HE Haiyang, et al. Metallogeny of Global Sedimentary-Metasedimentary Cobalt Deposits and Their Implications for the Exploration of Cobalt Deposits in Ningxia[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 177-195. DOI: 10.12401/j.nwg.2024007

## 全球沉积-变沉积型钴成矿规律及其 对宁夏钴矿找矿研究的启示

林文海<sup>1</sup>, 王焕<sup>2,\*</sup>, 贺海洋<sup>3</sup>, 张汐<sup>4</sup>, 周敖日格勒<sup>5</sup>, 隋清霖<sup>3</sup>,  
朱晓强<sup>6,7</sup>, 张焕宝<sup>3</sup>, 侯淡平<sup>3</sup>, 李朋刚<sup>3</sup>

(1. 四川省西南大地集团有限公司, 四川 成都 610032; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 3. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 4. 宁夏回族自治区有色金属地质勘察院(宁夏回族自治区地质资料馆), 宁夏 银川 750021; 5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 6. 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241000; 7. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 钴是全球战略性关键金属矿产, 对国民经济建设和新兴产业发展具有重要意义。宁夏北山钴矿被认为是具有多期热液叠加改造的沉积-变沉积型钴矿床, 但其成矿时代和构造背景以及钴的来源、赋存状态和迁移富集机制等研究还比较薄弱。为探讨上述问题并启示宁夏北山钴矿找矿研究, 笔者系统总结了全球沉积-变沉积型钴成矿规律, 其成矿时代主要集中在古元古代—新元古代, 空间上主要分布于中非赞比亚—刚果金、美国爱达荷、芬兰和中国等地, 与全球超大陆聚合与裂解旋回、全球大氧化和极端气候等重大地质事件有密切关系。基于上述研究, 笔者认为宁夏北山钴矿研究应在成矿年代学、重大地质事件与成矿关系、含矿地层地球化学特征、物源属性及其成矿构造背景、数据驱动的钴成矿预测等方面开展深入和详细的研究, 支撑服务战略性关键金属矿产找矿行动。

**关键词:** 钴矿床; 沉积-变沉积型; 成矿时代; 成矿预测; 宁夏

中图分类号: P617

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0177-19

### Metallogeny of Global Sedimentary-Metasedimentary Cobalt Deposits and Their Implications for the Exploration of Cobalt Deposits in Ningxia

LIN Wenhai<sup>1</sup>, WANG Huan<sup>2,\*</sup>, HE Haiyang<sup>3</sup>, ZHANG XI<sup>4</sup>, ZHOU Aorigele<sup>5</sup>, SUI Qinglin<sup>3</sup>,  
ZHU Xiaoqiang<sup>6,7</sup>, ZHANG Huanbao<sup>3</sup>, HOU Danping<sup>3</sup>, LI Penggang<sup>3</sup>

(1. Sichuan Province Southwest Dadi Group Co. Ltd., Chengdu 610032, Sichuan, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-12-13; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目“融合机器学习的羌塘早白垩世埃达克质岩成因及构造意义研究”(2023JJ30507),

湖南省教育厅优秀青年项目“青藏高原中部构造岩浆演化研究: 来自埃达克质岩的约束”(22B0433)联合资助。

作者简介: 林文海(1986-), 男, 工程师, 从事地质矿产研究。E-mail: linwenhai@xzzkky.com。

\*通讯作者: 王焕(1984-), 女, 工程师, 从事沉积矿产地质研究。E-mail: 648252774@qq.com。

4. Nonferrous Metals Geological Exploration of Ningxia Hui Autonomous Region (Geological Data Center of Ningxia Hui Autonomous Region), Yinchuan 750021, Ningxia, China; 5. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; 7. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** Cobalt is currently a globally strategic key metal mineral, which is of great significance for the construction of the national economy and the development of emerging industries. The Beishan cobalt deposit in Ningxia is considered to be a sedimentary-metamorphic cobalt deposit with multiple periods of hydrothermal superimposed transformation. However, research on its mineralization era and structural background, as well as the source, occurrence status, and migration and enrichment mechanism of cobalt, is still relatively weak. The Ningxia cobalt deposit is a sedimentary-metasedimentary cobalt, whose genesis is controlled by multi-factors such as sedimentation, metamorphism and hydrotherm. At present, the mineralization era and tectonic background of the deposit, as well as the source, occurrence state, and migration and enrichment mechanism of cobalt were poorly studied. To explore the above issues and inspire research on cobalt ore exploration in Ningxia, this study systematically summarizes the global sedimentary metamorphic cobalt mineralization patterns. The mineralization ages are mainly concentrated in the Paleoproterozoic and Neoproterozoic, and spatially distributed in Central Africa, Zambia Congo, Idaho, Finland, and China. Moreover, the formation of sedimentary-cobalt deposits is closely related to major geological events such as global supercontinent aggregation and fragmentation cycles, global large-scale oxidation, and extreme climate. Based on the above research, this study suggest that research on cobalt deposits in Ningxia region should be conducted in depth and detail in areas such as mineralization chronology, major geological events and their relationship with mineralization, geochemical characteristics of ore bearing strata, material source attributes and their mineralization tectonic background, and data-driven cobalt mineralization prediction. And this study will support the exploration of strategic key metal mineral resources.

**Keywords:** cobalt deposits; sedimentary-metasedimentary deposits; mineralization age; metallogenic prognosis; Ningxia

钴是全球重要的战略性关键矿产,具有良好的硬度、铁磁性、电学性和耐腐蚀性等物理和化学性质,广泛应用于合金制造、磁性材料、航空航天和石油化工等领域(毛景文等, 2019; 侯增谦等, 2020; 张照伟等, 2022; 王亚磊等, 2023)。近年来随着新能源产业的发展,钴作为电池材料之一,被大量应用于制造可充电电池等及相关行业(田丰等, 2017; 赵俊兴等, 2019; 苏本勋等, 2023a, 2023b; 张连昌等, 2023)。中国是世界上最大的钴消费国,但钴资源对外依存度却高达97%(许德如等, 2019)。因此,开展钴矿床成矿类型、时空分布特征、成矿机制等方面研究对该类型矿产资源找矿勘查,乃至资源安全保障具有重要意义(Qiu et al., 2016; 蒋少涌等, 2019; 王辉等, 2019; 刘东盛等, 2022; 张照伟等, 2023)。

全球钴矿可分为海底钴矿和大陆钴矿两种,尽管海底富钴的铁锰结壳和结核中含有大量钴资源,但由于技术限制无法开采(张富元等, 2015)。前人对大陆钴矿的成因类型进行了大量的研究,提出了不同的分类方案(Slack et al., 2017; 赵俊兴等, 2019; 王辉等, 2019; 张洪瑞等, 2020; Williams-Jones et al., 2022; 苏本勋等, 2023b)。其中,沉积-变沉积型钴矿床的工业产量占全球钴资源产量的65%以上(张连昌等, 2023)。目前,沉积-变沉积型钴矿床中钴的来源、富集机理、成矿时代、流体运移和后期变质作用等还存在较大争议。

宁夏北山地区是重要的金属矿集区,面积约700 km<sup>2</sup>,金、铁、铜、银、铅、钴等矿(化)点众多(刘勇等, 2010; 仲佳鑫等, 2012; 海连富等, 2021)。钴矿的发现填补

了宁夏的矿种类别(王改平等, 2014)。前人研究发现, 北山钴矿床为钴铜伴生矿, 矿石矿物有辉砷钴矿、钴黄铁矿和含钴黄铁矿等, 成矿物质被认为来源于石炭系地层, 印支晚期—燕山期构造运动产生的褶皱和断裂为地下水的运移提供了通道, 热卤水萃取了围岩中的Co元素, 并在有利的构造岩石中沉淀下来, 形成钴矿(化)体(吴文忠等, 2013a, 2013b; 王改平等, 2014; 马瑞赟等, 2022; 张连昌等, 2023)。然而, 钴矿成矿时代和构造背景, 以及钴的来源、赋存状态和迁移富集机制等尚未明确。

笔者综合研究了全球沉积-变沉积型钴矿, 分析和总结了其时空分布规律、钴的来源、成矿构造背景和成矿过程, 认为全球超大陆聚合与裂解旋回、全球大氧化和极端气候等重大地质事件与钴成矿作用关系密切, 古老稳定地块与构造活动区过渡带具有较好的钴找矿前景。因此, 提出宁夏北山钴矿在成矿年代学、重大地质事件与成矿关系、含矿地层地球化学特征、物源属性及其成矿构造背景、数据驱动的钴成矿预测等方面还需要更深入的研究。

## 1 钴的地球化学特征

钴的原子序数为27, 原子量为58.933 2, 位于元素周期表第4周期第VIII副族, 原子半径为 $1.25 \times 10^{-10}$ 。钴的电子构型为 $3d^7 4s^2$ , 易失去最外层电子氧化为 $Co^{2+}$ 和 $Co^{3+}$ , 有一个稳定的同位素 $^{58}Co$ , 具有亲硫亲铁双重属性(牟保磊, 1999)。钴在地球上的分布不均一, 其含量由地壳向地核迅速递增。钴在地壳中的丰度为 $27 \times 10^{-6}$ , 其中在上地壳、中地壳和下地壳中的元素丰度分别为 $17.3 \times 10^{-6}$ 、 $22 \times 10^{-6}$ 和 $36 \times 10^{-6}$ (Gao et al., 1998; Rudnick et al., 2003), 在原始地幔中的丰度为 $105 \times 10^{-6}$ , 在地核中的丰度为 $2500 \times 10^{-6}$ (McDonough, 2014)。钴在球粒陨石中的平均丰度为 $506 \times 10^{-6}$ (Lodders et al., 2009)。在不同岩石中, Co含量也有明显的不均一性, 呈现出从花岗岩( $2.4 \times 10^{-6}$ )、页岩( $19 \times 10^{-6}$ )、基性岩( $47 \times 10^{-6}$ )到超基性岩( $110 \times 10^{-6}$ )依次增加的趋势(Young, 1957; Hazen et al., 2017)。

钴主要以钴独立矿物、类质同象或包裹体等形式存在, 其中第二种赋存方式最为常见。钴主要产出形式: ①钴独立矿物, 包括硫化物、砷化物、氧化物等, 如硫钴矿、方硫钴矿、硫钴镍矿、辉砷钴矿、菱钴矿、水钴矿等。②以类质同象形式替代Mn、Fe、Cu、Ni

等矿物进入氧化物和硫化物中, 包括黄铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、硫镍矿、辉砷镍矿等(卢宜冠等, 2020)。

## 2 全球沉积-变沉积型钴成矿规律

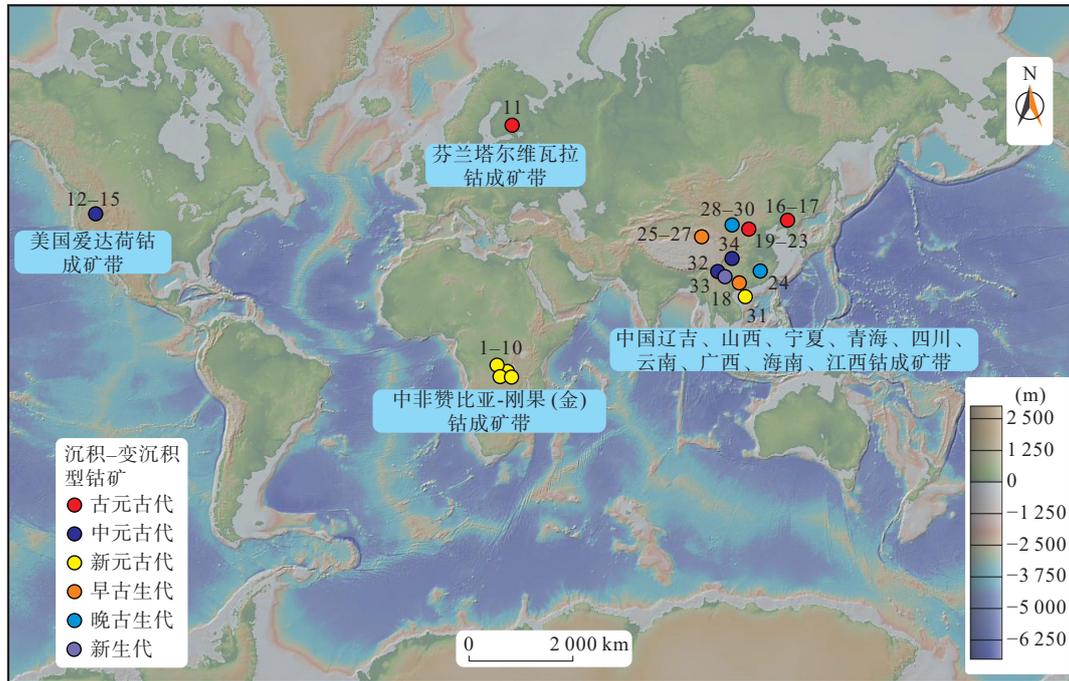
### 2.1 分布特征

目前全球可利用的钴矿资源主要来源于大陆钴矿, 保有的探明基础储量约为710万t(US Geological Survey, 2018)。前人根据容矿岩石、元素组合、矿床成因、富集方式和成矿过程等对大陆钴矿类型提出了不同的划分方案: 岩浆硫化物型、红土型、沉积岩赋矿层控型和多种其他次要类型(Slack et al., 2017; 赵俊兴等, 2019); 岩浆硫化物型、红土型、热液脉容矿型和沉积岩容矿型(王辉等, 2019; Williams-Jones et al., 2022); 岩浆型、热液型、风化壳型和化学沉积型(张洪瑞等, 2020); 岩浆型、红土型、沉积-变沉积型和热液型等(苏本勋等, 2023b; 张连昌等, 2023)。沉积-变沉积型、红土型和岩浆型钴工业产量分别占全球钴资源工业产量的65%、20%和14%(US Geological Survey, 2018)。因此, 开展沉积-变沉积型钴矿床形成条件、赋存状态、成矿过程和后期改造作用的迁移-富集机制等研究对钴矿勘察具有重要指示意义(张照伟等, 2022)。笔者将收集的全球沉积-变沉积型钴矿床的时空分布特征和矿床地质特征资料进行分类整理(图1, 表1)。

沉积-变沉积型钴矿总与Cu、Ni、Fe和Au等元素相伴而生, 常形成于大陆裂谷和被动大陆边缘的构造背景中(Muchez et al., 2008; Dehaine et al., 2021), 含矿层位主要有前寒武纪变沉积岩(含喷气沉积岩和海底热水沉积岩)和显生宙沉积岩(张连昌等, 2023)。矿床类型主要包括砂岩(黑色页岩)型、变沉积岩型和海底喷流沉积岩型等。世界沉积-变沉积型钴矿床主要分布在非洲中部、北美洲西部、欧洲北部和亚洲东部, 包括中非刚果(金)-赞比亚、美国爱达荷(Idaho)、芬兰塔尔维瓦拉(Talvivaara)和中国辽东-吉南、广西金秀、山西中条山、江西五宝山、青海东昆仑、宁夏卫宁北山、海南石碌、云南东川和永平, 以及四川拉拉铜钴成矿带(图1, 表1)。

### 2.2 形成时代

中非刚果(金)-赞比亚铜钴成矿带的铜钴成矿作用贯穿成矿带演化的整个过程, 其同位素年龄数据显



图中矿床序号同表1中矿床序号对应

图1 全球主要沉积-变沉积型钴矿床分布图(据赵俊兴等, 2019; 徐林刚等, 2022; 付浩等, 2024 修改)

Fig. 1 The distribution map of major sedimentary-metasedimentary cobalt deposits in the world

示铜钴矿化有 850~640 Ma、590~530 Ma、525~500 Ma 等 3 个时期 (Mucchez et al., 2008; El Desouky et al., 2010; Smith, 2013; 郭健等, 2018; 卢宜冠等, 2020, 卢宜冠等, 2021)。北美洲西部美国爱达荷 (Idaho) 铜钴成矿带的磷钇矿 SHRIMP U-Pb 年龄 (1370~1050 Ma; (Aleinikoff et al., 2012)) 和辉钴矿的 Re-Os 等时线年龄 (1349±76 Ma) (Saintilan et al., 2017)) 指示其成矿时代为中元古代。欧洲北部芬兰塔尔维瓦拉 (Talvivaara) 镍钴成矿带的黑色页岩形成于 2000~1900 Ma 的缺氧硫化的古海洋环境, 周围的基性岩石为成矿提供了物质来源, 随后经历海底热液萃取以及后期变形变质作用形成层状矿体 (Brown, 2014)。因此, 国外典型沉积-变沉积钴矿形成时代主要为元古代—早古生代 (图 2)。

中国钴矿床的形成时代可分为古元古代、中元古代—新元古代、早古生代、晚古生代、中生代和新生代 6 个重要成矿期, 以中元古代—新元古代、晚古生代和中生代最为重要 (丰成友等, 2004)。不同类型的矿床成矿时代具有明显差异, 其中沉积-变沉积型钴矿床主要形成于古元古代、早古生代和新生代 (表 1)。辽东-吉南铜钴成矿带包括多个钴矿床, 其中以大横路矿床为代表, 成矿时代为古元古代 (王慧宁等, 2023;

张勇等, 2023)。山西中条山铜钴矿是典型的沉积-变沉积型钴矿床, 辉钼矿 Re-Os 年龄为 ~1980 Ma、~1919 Ma (黄典豪等, 1996) 和 ~1952 Ma (Qiu et al., 2016), 黄铜矿 Re-Os 年龄为 ~1952 Ma (Qiu et al., 2016), 指示该矿床成矿时代在古元古代 (邱正杰等, 2023)。成矿时代为中元古代的矿床有云南东川因民铜钴矿床 (刘小平, 2012; 曾瑞垠, 2021) 和四川拉拉铜钴矿 (1088±88 Ma 和 1053±220 Ma) (Chen et al., 2018)。海南石碌铁钴铜矿床成矿过程包括海底火山喷流沉积期 (~840 Ma)、变质改造成矿期 (590~270 Ma)、早期热液叠加改造 (240~170 Ma) 和晚期热液叠加改造期 (135 Ma) 4 个成矿期 (杜保峰等, 2012a)。青海东昆仑驼路沟钴矿床的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 (423±23) Ma 和 (442±17) Ma, 指示矿床形成时代为早古生代 (丰成友等, 2006b)。广西金秀罗丹铜钴矿成矿时代也为早古生代 (李社宏等, 2018)。江西五宝山钴矿体成矿时代为晚古生代 (傅大捷, 1998; 周辉等, 2000)。云南水泄-厂街钴矿床的形成时代为新生代 (38.6~20 Ma) (董方浏, 2003)。

### 2.3 成矿构造背景

沉积-变沉积型钴矿成矿构造背景复杂。中非赞比亚-刚果(金)铜钴成矿带受新元古代泛非运动



续表 1

序号	矿床位置和名称	赋存形式	钴金属量(万t)	规模	品位(%)	矿体形态	含钴矿物	围岩蚀变	成矿年代(Ma)	参考文献
中国主要钴矿床										
16	吉林 大横路、杉松岗、张家沟、杨水杆、永甸、四道木川、四道沟、孟家堡、周家、瓦房沟	共生	5	大型	0.035~0.80	层状、似层状、脉状	辉砷钴矿、方钴矿、硫镍钴矿、含钴黄铁矿	硅化、绢云母化、钠长石活、碳酸盐化、黄铁矿化	古元古代	万丛礼等, 1999; 松权衡等, 2000; 杨言辰等, 2001; 周少红, 2001; 董耀松, 2001; 韦延光等, 2002; 郭文秀等, 2002; 杨言辰等, 2004; 任启武等, 2005; 刘培栋, 2008; 田丰等, 2017; 张勇等, 2023; 王慧宁等, 2023
17	辽宁 营口 周家、上华	共生	0.2	中型	0.013~0.042	层状、似层状、扁豆状	含钴黄铁矿、硫钴矿、铜硫钴矿	硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化	古元古代	刘培栋, 2008; 宋建潮, 2011
18	广西 金秀罗丹	独立	-	小型	0.034~0.048	透镜状、串珠状	辉钴矿	硅化、绿泥石化、白云母化	早古生代	李杜宏等, 2018 中国矿床发现史-山西卷编委会, 1996; 张晗, 2012; Qiu et al., 2021
19	山西 中条 山 麓子沟	伴生	1.3	小型	0.024	细脉浸染状、石英细脉状	硫钴矿、辉钴矿、钴镍黄铁矿	红钠长石化、方柱石化、黑云母化	古元古代 (2200~1850)	张晗, 2012 张晗, 2012; Qiu et al., 2016 庞雪娇, 2010
20	山西 中条 山 老宝滩、南和沟	伴生	-	-	-	-	-	-	-	王世俊, 2018
21	江西 铜矿峪	伴生	2.3	大型	0.021	细脉浸染状、石英脉状	辉钴矿	-	-	傅大捷, 1998; 周辉等, 2000
22	江西 五宝山	独立	0.2	中型	0.024~1.15	似层状、透镜状	辉钴矿和钴毒砂	硅化, 绿泥石化	晚古生代	傅大捷, 1998; 周辉等, 2000
23	江西 肯德可克	伴生	>2	大型	0.06~0.46	层状	方钴矿、毒砂	硅化、绿泥石化	元古代—古生代	潘彤等, 2001
24	青海 东昆仑 督冷沟	伴生	0.1	中型	0.02~1.31	层状	硫钴镍矿和辉钴矿	硅化、碳酸盐化、绿泥石化	-	潘彤等, 2006; 舒树兰等, 2015
25	青海 东昆仑 驼路沟	独立	2	大型	0.046~0.058	层状、透镜状	黄铁矿; 硫钴矿、辉钴矿	硅化、碳酸盐化和绢云母化等	早古生代 (442~432)	李厚民等, 2000, 2001; 张德全等, 2002a, 2002b; 唐健等, 2004; 朱华平等, 2004; 丰成友等, 2005, 2006a, 2006c; 朱华平等, 2007; 赵俊伟等, 2008; 查明娟等, 2019; 史连昌等, 2019

续表1

序号	矿床位置和名称	赋存形式	钴金属量(万t)	规模	Co品位(%)	矿体形态	含钴矿物	围岩蚀变	成矿年代(Ma)	参考文献
28	宁夏 北山大铺沟	伴生	0.02	小型	0.032~0.061	浸染状、背膜状	辉砷钴矿、钴黄铁矿和含钴黄铁矿	褐铁矿化	晚古生代	刘志坚, 2013; 吴文忠等, 2013a, 2013b; 王改平等, 2014; 马瑞赞等, 2022; 张连昌等, 2023
29	宁夏 北山茶梁子	伴生	0.11	中型	0.006~0.047	脉状	含钴黄铁矿	褐铁矿化、硅化		
30	宁夏 北山老牛湾	伴生	-	-	0.042~0.149	脉状	含钴黄铁矿	褐铁矿化、硅化		
31	海南 石碌	共生	1.18	中型	0.29	层状、似层状、透镜体状	含钴黄铁矿、含钴磁黄铁矿、辉砷钴矿	镁质砂卡岩化	新元古代	刘裕庆, 1981; 肖勇等, 2010; 杜保峰等, 2012a, 2012b
32	云南 东川因民	伴生	-	中型	~0.11	层状、似层状、脉状	辉砷钴矿、镍辉砷钴矿、含钴毒砂、杂水钴矿	硅化、白云岩化	中元古代	薛步高, 1996; 刘小平, 2012; 郭玉乾等, 2019; 曾瑞根, 2021
33	云南 永平	共生	0.29	中型	0.03~0.1	脉状、透镜、囊状	含钴黄铁矿、镍辉砷钴矿、含钴毒砂、辉砷钴矿	硅化、黄铁矿化、菱铁矿化、重晶石化	新生代(38.6~20)	中国矿床发现史·云南卷编委会, 1996; 董方浏, 2003
34	四川 拉拉	伴生	1.74	大型	0.022	透镜状、似层状	含钴黄铁矿、硫钴镍矿、辉砷钴矿、方硫镍钴矿	黄铜矿化、黄铁矿化、磁铁矿化、硅化、钠长石化	中元古代	陈根文等, 2001; Chen et al., 2018

注: 小型<0.2万t, 中型为0.2~2万t, 大型>2万t(赵俊兴等, 2019)。

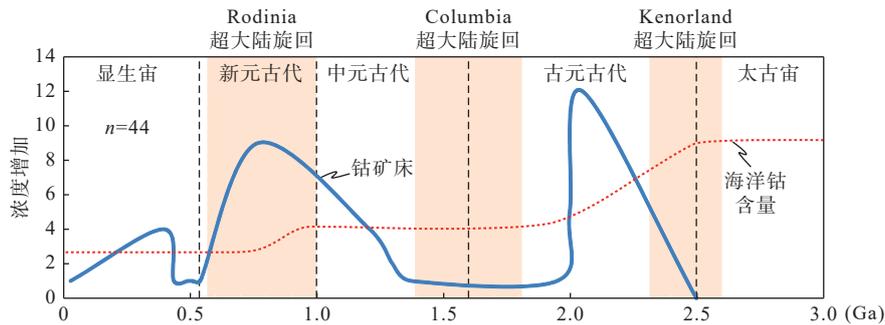


图2 沉积-变沉积型钴矿床形成时代、地质历史时期钴元素丰度变化和重大地质事件  
(钴矿床形成时代数据来源于表1; 据 Anbar, 2008; 张连昌等, 2023 修改)

Fig. 2 The formation ear of sedimentary-metasedimentary cobalt deposits, changes in cobalt element abundance during geological history, and major geological events (The data on the formation era of cobalt deposits are sourced from Table 1)

引起的位于刚果克拉通东南的卢菲利安弧形构造带控制(Cailteux et al., 2019; 卢宜冠等, 2021)。中非铜钴成矿带的铜钴成矿具有多期性, 第一期和第二期主要与大陆裂谷的发育有关, 第三期发生在卢菲利安弧碰撞造山晚期(Prave et al., 2016)。美国爱达荷铜钴成矿带位于被动大陆边缘的克拉通边缘凹陷中(Nold, 1990)。中国辽东-吉南铜钴成矿带位于辽南-狼林地块和龙岗地块之间的辽吉裂谷带, 构造上属于华北克拉通东北缘(张连昌等, 2023; 张勇等, 2023)。中国中条山铜钴成矿带位于华北克拉通中南部古元古代裂谷带(邱正杰等, 2023)。中国青海东昆仑肯德可克钴成矿带位于柴达木盆地的西南缘-塔柴板块的祁漫塔格弧后裂隙构造带中部(潘彤等, 2001), 驼路沟钴矿床位于东昆仑成矿带, 所处构造单元为南昆仑俯冲增生杂岩带(奎明娟等, 2019)。综上所述, 沉积-变沉积型钴矿床常形成于大陆裂谷、被动大陆边缘、碰撞造山带和陆内环境等构造背景(Muchez et al., 2008; Dehaine et al., 2021; 付浩等, 2024)。

沉积-变沉积型钴矿床钴的超常富集被认为与大陆裂解、古气候条件、大氧化时间等具有强相关性(图2)(Large et al., 2019; 徐林刚等, 2022; 苏本勋等, 2023b)。中国辽东-吉南和中条古元古代钴矿床的形成与肯诺兰超大陆的裂解(2300~2100 Ma)相对应, 美国爱达荷中元古代铜钴成矿带与哥伦比亚超大陆的裂解(1600~1400 Ma)相对应, 中非新元古代铜钴成矿带与罗迪尼亚超大陆的裂解(800~600 Ma)相对应(Anbar, 2008)。此外, 沉积-变沉积型钴矿床常形成在干旱气候环境和大氧化事件之后的氧化性海洋环境(Large et al., 2017)。

## 2.4 物质来源和成矿过程

关于钴金属的来源存在不同的认识, 包括早期认为的来源于海水(Brown, 2014), 经典沉积岩成矿模式的来源于外部地层(如红层或者是基性火山岩地层)(Hitzman et al., 2005, Hitzman et al., 2010)以及近期研究认为的来源于含钴的沉积地层(如黑色片岩等)(Qiu et al., 2021; 邱正杰等, 2023)等。在沉积阶段钴初始富集后, 后期地质作用中成矿流体对钴溶解、迁移与再富集起到控制作用。基于全球典型钴成矿带的研究, 前人提出了成矿流体的来源的不同观点, 包括中-低温氧化性的富金属盆地卤水(El Desouky et al., 2010)、中高温变质热液流体(卢宜冠等, 2021)、还原性和高盐度流体(Johnson et al., 2012), 以及高温高盐强氧化性流体等(Qiu et al., 2021)。

沉积-变沉积型钴矿床的早期成矿模型有裂谷成矿(Unrug, 1988)、同沉积成矿(Cailteux et al., 2005)、岩浆热液成矿(陈兴海等, 2012a)等。近年来, 随着中非铜钴成矿带、中条山铜钴矿床和辽东-吉南铜钴成矿带的深入研究, 进一步提出沉积成岩成矿-热液叠加改造、先沉积再变质的两阶段钴富集和沉积-变质变形-多期热液叠加改造的复杂演变过程等(卢宜冠等, 2021; 邱正杰等, 2023; 王慧宁等, 2023)。上述成矿模型均强调了沉积成岩过程为钴的初始富集提供了重要的成矿物质来源, 变质变形对钴的初始活化-富集起控制作用以及后期热液叠加改造通过释放-迁移-再富集过程形成钴矿化。因此, 沉积-变沉积型钴矿床的形成大致可以总结为以下3个阶段: ①Co的初始富集阶段, 在同沉积成矿阶段, 富含Co元素的古老基底岩石等被风化、剥蚀, Co元素进入到地表流水中, 在还原环境或硫化海盆等有利沉积环境下, 形成初始

矿源层。②Co的再富集阶段,在造山变质作用下,盆地构造活动强烈,为成矿流体的运移提供了通道,在成矿流体作用下,初始富集的钴活化-迁移-再富集沉淀成矿。③Co的后生富集阶段,成矿后新的构造隆升使含矿地层被抬升至浅表和地表,经过长时间的风化、剥蚀和淋滤作用,矿体发生次生氧化和富集过程,形成高品位氧化矿石。

综上所述,全球沉积-变沉积型钴矿主要分布在中非的刚果(金)-赞比亚,欧洲的芬兰和美国的西北。中国同类型钴矿主要分布在东部大陆边缘、裂谷、燕山期陆内环境和东秦岭碰撞造山带。全球沉积-变沉积型钴矿主要分布在元古代到古生代,而中国同类型钴矿主要分布在中元古代到新生代,以中元古代—新元古代、晚古生代和中生代最为集中。沉积-变沉积型钴矿的形成主要经历钴的初始富集、再富集和后生富集阶段。上述全球沉积-变沉积型钴矿成矿规律,将为中国该类型矿床的找矿提供借鉴。

### 3 宁夏北山钴矿成矿规律和有待深入研究的问题

#### 3.1 宁夏北山钴矿地质和成矿特征

宁夏北山地区出露地层主要有中上奥陶统狼嘴子组(O<sub>2,3l</sub>)浅变质砂岩、板岩和千枚岩等,上泥盆统老君山组(D<sub>3l</sub>)砂岩、泥岩和粉砂岩等,下石炭统前黑山组(C<sub>1q</sub>)砂岩、灰岩和泥岩等和臭牛沟组(C<sub>1c</sub>)砂岩和灰岩等,上石炭统土坡组(C<sub>2t</sub>)砂岩、泥岩和页岩等(图3、图4)。其中,中上奥陶统狼嘴子组与上泥盆统老君山组不整合接触。沉积相为中上泥盆统浊积岩系,上泥盆统陆相碎屑岩,下石炭统浅海、泻湖相碳酸盐岩、碎屑岩建造,上石炭统湖坪、泻湖、沼泽、河流三角洲沉积。区域岩浆岩零星出露,主要为辉绿岩体、似斑状含石英闪长岩脉及闪长玢岩脉(马秀军等, 2018)。研究区是一个多构造复合区,区域构造主体

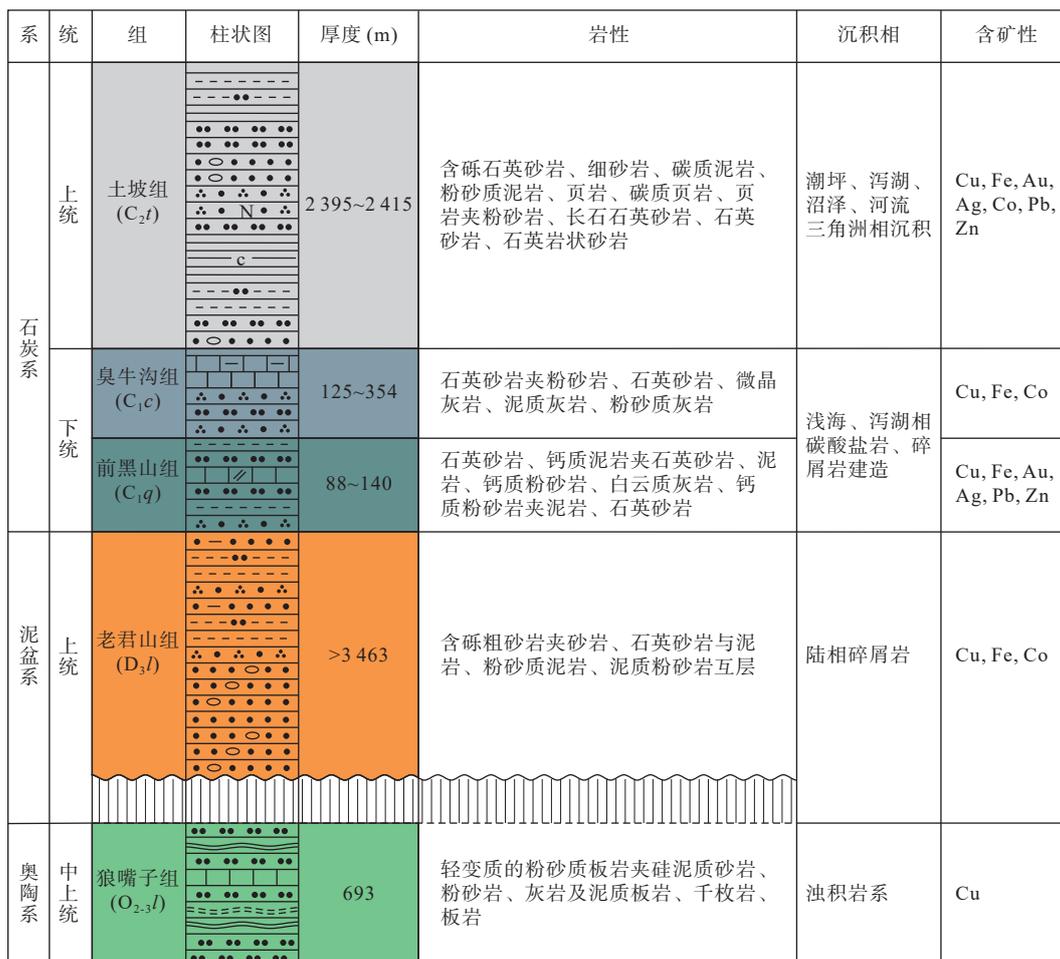


图3 宁夏北山钴矿研究区地层柱状图

Fig. 3 Stratigraphic histogram of the Beishan cobalt metallogenic belt

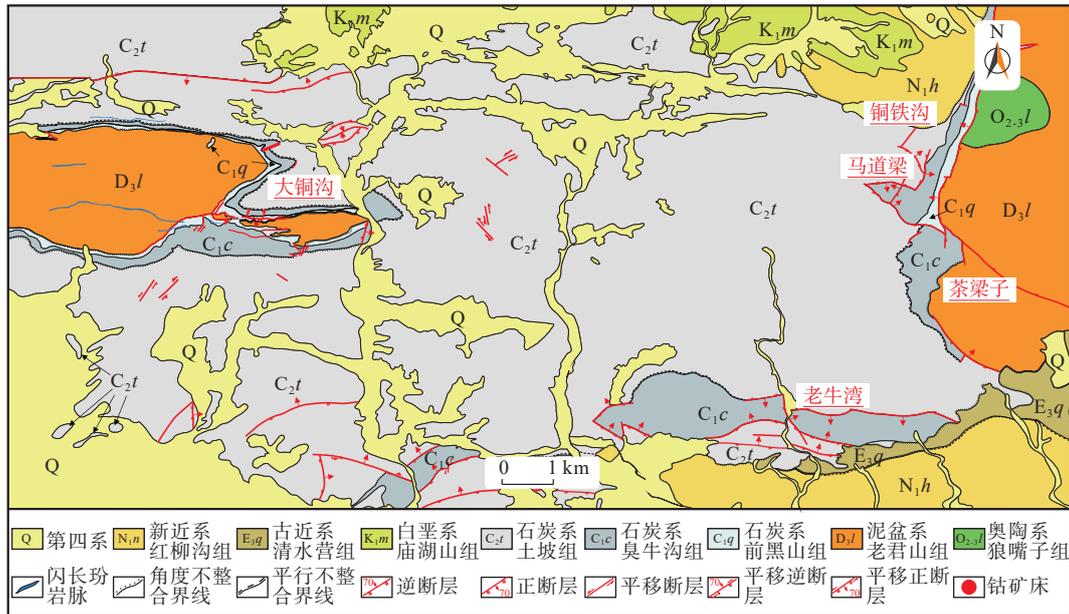


图4 宁夏北山区域地质简图(据海连富等, 2021 修改)

Fig. 4 Geological map of Beishan region in Ningxia

行迹以EW向为主。断裂构造东西部略有差异,西部以EW向或近EW向为主,东部以NW向、SN向为主,多为走滑性质的逆冲断层。背向斜、褶皱相间,规模不大。

北山地区是宁夏地质研究程度相对较高、地质调查和矿产勘查投入最多的地区之一。前人在北山多金属矿床(宋新华等, 2010; 刘志坚, 2013; 海连富等, 2020; 王泽晶等, 2022)、金场子金矿床(刘勇等, 2010; 仲佳鑫等, 2012; 艾宁, 2014; 海连富等, 2021; 李海峰等, 2021; 海连富等, 2023)和北山钴矿床(吴文忠等, 2013a, 2013b; 王改平等, 2014; 马瑞赞等, 2022)等矿床开展了部分研究工作。北山地区的钴矿为铜钴、铁钴和锰钴共生矿,现有矿(化)点7处,包括大铜沟3处、茶梁子3处和老牛湾1处(王改平等, 2014; 张连昌等, 2023)(图4)。大铜沟钴矿的赋矿地层为石炭系土坡组(C<sub>2t</sub>),钴与褐铁矿化存在共生关系。含矿岩性为含钴石英岩状砂岩和含钴矿物石英细脉,主要钴矿物为辉砷钴矿、钴黄铁矿和含钴黄铁矿,同时伴生黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和砷黄铁矿。矿石Co含量为0.010%~0.107%,钴矿体平均品位分别为0.032%、0.034%和0.061%。钴资源量为265.77 t。茶梁子钴矿包括铜铁沟、马道梁和茶梁子钴矿点,赋矿层位为下石炭统前黑山组(C<sub>1q</sub>)、臭牛沟组(C<sub>1c</sub>)及上泥盆统老君山组(D<sub>3l</sub>)。矿石类型有褐铁矿化断层泥和构造角砾岩、石英砂岩和粉砂岩,矿石矿物主要有赤铁矿和

褐铁矿。Co品位分别为0.006%~0.047%、0.006%~0.047%和0.006%~0.047%,预测资源量分别为100 t、50 t和1010 t(刘志坚等, 2013; 王改平等, 2014)。老牛湾钴矿为锰钴共生矿,赋存于上石炭统土坡组第三岩段层中, Mn品位为1.03%~21.18%, Co品位为0.042%~0.149%。矿石矿物主要为钾锰矿和褐铁矿。围岩发生硅化、黏土化、绢云母化和褐铁矿化等蚀变。老牛湾山锰钴矿石英脉发育、硅化强,层面断层较发育,矿体走向延伸(宁夏地质调查院, 2012)。

根据宁夏北山钴矿赋存于原沉积岩系,呈层状、似层状、叠瓦状和透镜状分布的矿体,块状、浸染状和细脉状的富钴矿物,后期热液叠加改造等特征,指示其为沉积-变沉积型钴矿床。北山钴矿构造上位于北祁连造山带东北缘、阿拉善稳定地块东南缘和鄂尔多斯地块西缘的交汇处(图5),属稳定地块与构造活动带的过渡带,钴矿成矿前景较大(赵国春, 2009; 仲佳鑫等, 2012; 赵晓辰等, 2017)。在北山地区,钴异常富集于石炭系土坡组内的各类构造,如背斜和向斜的转折端、两翼及其次级构造和南东向断裂构造部位(马瑞赞等, 2022)。

吴文忠等(2013b)开展了北山钴矿的含钴黄铁矿流体包裹体He、Ar和含钴黄铁矿S同位素研究。流体包裹体He和Ar同位素特征指示成矿流体来源于沉积地层水和大气降水, S同位素指示矿化体的硫来源于石炭系沉积地层。Co异常的物质来源于石炭系,

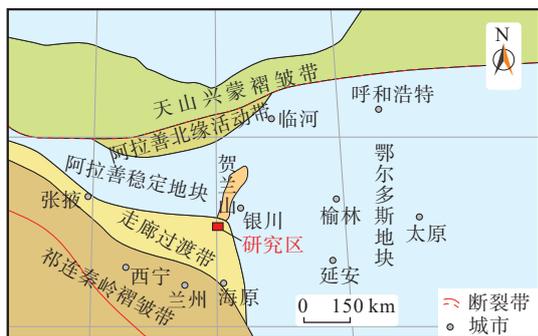


图5 研究区构造位置图(据赵晓辰等, 2017; 马秀军等, 2018 修改)

Fig. 5 Tectonic location map of the study area

与岩浆作用无关(吴文忠等, 2013a, 2013b)。

综上所述, 结合区域地质特征、钴赋存状态和 Co 异常的分布特征分析, 北山钴矿化体的具体成矿过程如下, 华力西期石炭系形成时沉积了微量的 Co 元素, 随后地下水沿褶皱和断裂构造渗流和环流时, 萃取了围岩中的钴元素。富含 Co 元素的热卤水在运移过程中与大气降水混合, 由于物理化学条件的变化, 在有利的构造空间富集成矿(吴文忠等, 2013b)。因此, 宁夏北山区域的背斜两翼及转折端、石英岩状砂岩和褐铁矿化是寻找钴矿的标志(吴文忠等, 2013a, 2013b; 王改平等, 2014)。

### 3.2 宁夏北山钴矿有待深入研究的问题

前人在北山地区开展了钴矿地质特征(王改平等, 2014)、Co 异常分布规律(吴文忠等, 2013a; 马瑞赞等, 2022)、Co 的赋存状态(张连昌等, 2023)和 Co 异常的物质来源(吴文忠等, 2013b)等研究工作。然而, 基于前述全球沉积-变沉积型钴矿的成矿规律, 笔者认为宁夏地区钴矿研究应在以下几方面开展进一步研究。

目前关于宁夏北山钴矿成矿时代的相关研究工作尚未开展。沉积-变质-热液叠加改造的年代学格架可以通过以下几种方式建立。沉积地层的年龄可以通过开展赋矿岩层的火山岩夹层锆石 U-Pb 年代学获得。如未发现火山岩夹层, 可通过开展碎屑锆石 U-Pb 年代学分析, 以最小年龄约束围岩时代(Saintilan et al., 2017)。约束金属矿床成矿时代最为有效和直接的方法是硫化物 Re-Os 同位素定年法(Stein, 2014)。其中, 黄铜矿和辉钼矿 Re-Os 同位素定年被广泛用于获得铜钴矿床成矿年龄(黄典豪等, 1996; 张亮等, 2013; Qiu et al., 2016)。前期的多金属矿调查中已在研究区发现黄铜矿, 可开展黄铜矿 Re-Os 同位素定年。矿石中的晶质铀矿、热液金红石、热液独居石和

变质磷灰石等矿物的 U-Pb 年龄也可限定铜钴矿化年龄(Qiu et al., 2021; Wang et al., 2022)。根据获得的年代学数据, 综合分析判断铜钴成矿是沉积阶段或造山变质改造阶段, 最终建立北山钴矿床的沉积-变质-矿化年代学格架。北山钴矿床赋矿地层为石炭系土坡组(吴文忠等, 2013b), 与世界典型的元古代沉积-变沉积型钴矿床成矿时代不同。因此, 开展北山钴矿床与全球重大地质事件的关系研究(如潘基亚超大陆的聚合和裂解以及晚古生代大冰期等), 将为全球钴矿找矿提供新的启示。

沉积-变沉积型钴矿含矿地层的地球化学特征、物源属性和构造背景研究将为认识其成矿规律提供重要依据, 然而宁夏北山钴矿尚未开展其详细研究。宁夏北山钴矿赋矿岩性主要为碎屑岩, 成分尽管由母岩区性质决定, 但风化、搬运及成岩作用等对其成分有较大影响(Johnsson, 1993)。化学蚀变指数和成分变异指数可以分别反映风化程度及气候环境和沉积岩源区成分成熟度(Cox et al., 1995; 张天福等, 2018)。高场强微量元素(如 REE、Sc、Zr 和 Th 等)几乎不受变质及风化作用影响, 在源岩和沉积碎屑中的含量接近, 常用来指示源岩属性(Cox et al., 1995)。碎屑岩的微量元素(如 La、Zr、Sc、Ti 和 Th 等)活动性较差, 主要受其源岩成分影响, 可以用来进行构造环境判别(McLennan et al., 1993)。因此, 在宁夏北山矿床(体)赋矿层位开展岩相学和主微量元素地球化学分析, 探讨其物源属性和成矿构造环境, 将为揭示其成矿规律提供依据。

随着地质数据的指数增长, 大数据挖掘和机器学习成为地质学发展的必然过程(周永章等, 2021; 张焕宝等, 2023)。以机器学习为主的数学预测模型为矿产预测提供了新的视角和思路(周永章等, 2017; 张振杰等, 2021)。因此, 建议在北山地区开展以下基于机器学习的钴成矿预测研究, 主要流程包括: ①成矿模型的研究和建立。②找矿模型的建立(如北山赋矿地层为石炭系土坡组、背斜构造和褐铁矿化)。③预测模型的建立, 主要方法有空间分析、空间插值、信息增强和模式识别等(Zhang et al., 2016)。④信息综合与集成, 采用的数学模型有支持向量机、随机森林、神经网络、决策树、深度学习、逻辑回归、朴素贝叶斯(或证据权)等机器学习方法(张振杰等, 2021)。⑤开展不同方法的预测性能和预测结果的不确定性评估。⑥圈定成矿远景区和找矿靶区。通过在北山钴矿开

展数据驱动的钴成矿预测,为基于地学大数据的矿产资源定量预测理论和方法体系的建立提供实例。

## 4 结论

(1) 沉积-变沉积型钴矿主要分布在非洲中部、北美洲西部、欧洲北部和亚洲东部,包括中非刚果(金)-赞比亚、美国爱达荷、芬兰塔尔维瓦拉和中国;成矿时代主要分布在元古代到新生代,以元古代最为发育。

(2) 宁夏北山地区钴矿研究需要注重成矿年代学、重大地质事件与成矿关系、含矿地层地球化学特征、物源属性及其成矿构造背景、数据驱动的钴成矿预测等方面。

致谢:感谢评审专家给予的修改建议和具体意见,感谢徐堂兴同学在图件绘制和论文写作过程中提供的帮助。

## 参考文献(References):

- 艾宁. 宁夏卫宁北山金场子金矿矿床地质与地球化学研究[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- AI Ning. Studies on the geochemical and geological characteristics of Weiningbeishan Jingchangzi gold deposit [D]. Xi'an: Northwester University, 2014.
- 曾瑞垠. 云南东川因民铜矿床与刚果(金)Luiswishi铜钴矿床成矿作用对比研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- ZHEN Ruiyin. Comparative Study on Mineralization between Yinmin Copper Deposit in Yunnan Dongchuan and Luiswishi Copper-cobalt Deposit in Democratic Republic of the Congo[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- 陈根文, 夏斌. 四川拉拉铜矿床成因研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 42-44.
- CHENG Genwen, XIA Bin. Study on the Genesis of Lala Copper Deposit, Sichuan Province[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20(1): 42-44.
- 陈兴海, 和志军, 董少波, 等. 刚果(金)KIMPE铜钴矿床地质特征及成因分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2012a, 64(5): 43-48.
- CHENG Xinghai, HE Zhijun, DONG Shaobo, et al. Geological characteristics and genesis analysis of KIMPE copper-cobalt deposit in D. R. Congo[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2012a, 64(5): 43-48.
- 陈兴海, 刘运纪, 杨焱, 等. 刚果(金)SICOMINES铜钴矿床地质特征及成因探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2012b, 64(6): 31-37.
- CHEN Xinghai, LIU Yunji, YANG Yan, et al. Geological characteristics and genesis analysis of SICOMINES copper-cobalt deposit in D. R. Congo[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2012b, 64(6): 31-37.
- 董方浏. 云南巍山—永平矿化集中区铜金多金属矿床成矿条件及成矿潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2003.
- DONG Fangliu. Study on metallogenic condition and potentiality of copper-gold-polymetallic deposits in Weishan-Yongping mineralization district, Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2003.
- 董耀松. 吉林大横路钴铜矿床钴元素地球化学特征及矿床成因[J]. 世界地质, 2001, 20(1): 30-33.
- DONG Yaosong. Cobalt element geochemical characteristics of dahenglu cobalt-copper ore deposit in Jilin province and its genetics[J]. World Geology, 2001, 20(1): 30-33.
- 杜保峰, 魏俊浩, 李艳军, 等. 海南石碌铁钴铜矿床成因及其成矿模式[J]. 中国地质, 2012a, 39(1): 170-182.
- DU Baofeng, WEI Junhao, LI Yanjun, et al. Ore genesis and metallogenic model of the Shilu Fe-Co-Cu deposit in Hainan Province[J]. Geology in China, 2012a, 39(1): 170-182.
- 杜保峰, 魏俊浩, 石文杰, 等. 海南石碌铁钴铜(金)矿床与国内外IOCG型矿床的对比研究[J]. 地质与勘探, 2012b, 48(2): 332-343.
- DU Baofeng, WEI Junhao, SHI Wenjie, et al. Comparisons between the Shilu Fe-Co-Cu(-Au) deposit in Hainan province and other IOCG-Type deposits at home and abroad[J]. Geology and Exploration, 2012b, 48(2): 332-343.
- 丰成友, 余宏全, 张德全, 等. 青海驼路沟钴(金)矿床成矿物质来源的黄铁矿氩硫铅同位素示踪[J]. 地质学报, 2006a, 80(9): 1465-1473.
- FENG Chengyou, YU Hongquan, ZHANG Dequan, et al. Sulfur and lead isotope tracing for sources of ore-forming material in the Tuolugou cobalt (Gold) deposit, Golmud city, Qinghai province, China[J]. Acta Geology Sinica, 2006a, 80(9): 1465-1473.
- 丰成友, 张德全, 党兴彦. 中国钴资源及其开发利用概况[J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 93-100.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, DANG Xingyan. Cobalt Resources of China and Their Exploitation and Utilization[J]. Mineral Depositist, 2004, 23(1): 93-100.
- 丰成友, 张德全, 党兴彦, 等. 青海格尔木地区驼路沟钴(金)矿床石英钠长石岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年——对“纳赤台群”时代的制约[J]. 地质通报, 2005, 24(6): 501-505.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, DANG Xingyan, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of quartz albitite from the Tuolugou cobalt (gold) deposit, Golmud, Qinghai, China: Constraints on the age of the Nalj Tal Group[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(6): 501-505.
- 丰成友, 张德全, 屈文俊, 等. 青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 地质学报, 2006b, 80(4):

- 571-576.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, QU Wenjun, et al. Re-Os isotopic dating of pyrite in the Tuolugou SEDEX cobalt (Gold) deposit, Golmud, Qinghai province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006b, 80(4): 571-576.
- 丰成友, 张德全, 余宏全, 等. 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*, 2006c, 25(5): 544-561.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, YU Quanhong, et al. Tectonic setting and metallogenic mechanism of Tuolugou cobalt (gold) deposit Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 2006c, 25(5): 544-561.
- 付浩, 王加昇, 李金龙, 等. 全球钴矿资源时空分布及成因类型[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(1): 1-22.
- FU Hao, WANG Jiasheng, LI Jinglong, et al. Spatio-temporal distribution and genesis types of global cobalt resources[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(1): 1-22.
- 傅大捷. 赣西五宝山钴矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿产与地质*, 1998, 12(2): 35-37.
- FU Taijie. Geological Features and Genesis of The Cobalt Deposit of Wubaoshan in Western Jiangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 1998, 12(2): 35-37.
- 高帮飞, 沈阳, 钟长汀, 等. 刚果(金)绿纱铜钴矿床黑色页岩 Rb-Sr 测年及其区域成矿意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(4): 1029-1049.
- GAO Bangfei, SHEN Yang, ZHON Changting, et al. Rb-Sr dating of the black shale and its significance for regional metallogenesis, Luishia Cu Co deposit, D R Congo[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(4): 1029-1049.
- 郭健, 牛斯达, 孙赫, 等. 赞比亚砂(页)岩型铜矿成矿年龄及其成因意义[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(3): 634-644.
- GUO Jian, NIU Sida, SUN He, et al. Mineralization age of the sediment-hosted stratiform copper deposits in Zambia and its implications for deposit genesis[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(3): 634-644.
- 郭文秀, 刘建民. 吉林省大横路铜、钴矿床地质特征及控矿因素[J]. *前寒武纪研究进展*, 2002, 25(3-4): 206-213.
- GUO Wenxiu, LIU Jianmin. The Geologic Features of Dahenglu Cu, Co Deposit and Ore-controlling Factors in Jinlin Province China[J]. *Progress in Precambrian Research*, 2002, 25(3-4): 206-213.
- 郭玉乾, 方维萱, 赵凯. 云南东川铜矿田铜钴和钴矿体发现及成因意义[C]. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会, 2019: 415-416.
- 海连富, 刘安璐, 陶瑞, 等. 宁夏卫宁北山金场子金矿床流体来源及矿床成因: 来自流体包裹体和 C-H-O 同位素证据[J]. *地球科学*, 2021, 46(12): 4274-4290.
- HAI Lianfu, LIU Anlu, TAO Rui, et al. Source of Fluid and Genesis of Jinchangzi Gold Deposit in Weiningbeishan, Ningxia: Evidence from Fluid Inclusions and C-H-O Isotopes[J]. *Earth Science*, 2021, 46(12): 4274-4290.
- 海连富, 刘金科, 李海峰, 等. 宁夏卫宁北山多金属矿床地质特征与找矿方向[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(1): 30-39.
- HAI Lianfu, LIU Jinke, LI Haifeng, et al. Geological Characteristics and Prospecting Directing of Weiningbeishan Polymetallic Deposit, Ningxia[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 35(1): 30-39.
- 海连富, 陶瑞, 张晓军, 等. 宁夏卫宁北山地区金场子金矿区找矿模型及成矿预测[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(2): 19-32.
- HAI Lianfu, TAO Rui, ZHANG Xiaojun, et al. Prospecting model and metallogenic prediction of the Jinchangzi gold deposit in the Weiningbeishan area. Ningxia[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(2): 19-32.
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3651-3652.
- HOU Zengqian, CHEN Jun, ZHAI Mingguo. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(33): 3651-3652.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 等. 华北地台铜(钴)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 1996, 15(4): 78-81+83-86.
- HUANG Dianhao, DU Andao, WU Chengyu, et al. Metallochronology of Molybdenum (-Copper) Deposits in the North China Platform: Re-Os Age of Molybdenite And its Geological Significance[J]. *Mineral Deposits*, 1996, 15(4): 78-81+83-86.
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 等. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向[J]. *中国科学基金*, 2019, 33(2): 112-118.
- JIANG Shaoyong, WEN Hanjie, XU Cheng, et al. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: major scientific issues for future research[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2019, 33(2): 112-118.
- 奎明娟, 张爱奎, 刘永乐, 等. 青海驼路沟钴矿床地质特征及找矿模式[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(1): 57-64.
- KUI Mingjuan, ZHANG Aikui, LIU Yongle, et al. The geological characteristics and prospecting mode of Tuolugou cobalt deposit, Qinghai[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(1): 57-64.
- 李海峰, 赵风顺, 刘金科, 等. 宁夏金场子金矿床关键控矿因素分析及找矿方向[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(21): 8770-8778.
- LI Haifeng, ZHAO Fengshun, LIU Jinke, et al. Analysis of Ore-controlling Factors and Prospecting Direction of Jinchangzi Gold Deposit in Ningxia[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(21): 8770-8778.
- 李厚民, 沈远超, 胡正国. 青海东昆仑驼路沟钴(金)矿床地质特征——一种新型的与富钠火山岩有关的钴(金)矿床[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 321-322.

- 李厚民, 沈远超, 胡正国, 等. 青海东昆仑骆驼沟钴(金)矿床地质特征及成因初探[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 60-64+95.
- LI Houmin, SHEN Yuanchao, HU Zhengguo, et al. Geological and Geochemical Features and Genesis of Guocheng Gold Deposit in Haliyang County Shandong Province[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(2): 60-64+95.
- 李社宏, 栗阳扬, 严松, 等. 广西金秀北部石英脉型铜矿地质特征与成因分析[J]. 矿产与地质, 2018, 32(1): 67-73.
- LI Shehong, LI Yangyang, YAN Song, et al. Geological characteristics and genetic analysis of quartz-vein-type copper deposit in North Jinxiu of Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2018, 32(1): 67-73.
- 李先富. 刚果(金)KIMPE铜钴矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- LI Xianfu. Discussion on geological characteristics and genesis of KIMPE copper-cobalt deposit in D. R. Congo[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- 李向前, 姜玉平, 赵锡岩, 等. 刚果(金)堪苏祁铜钴矿床地质特征及成因分析[J]. 地质与勘探, 2010, 46(1): 175-182.
- LI Xiangqian, JIANG Yuping, ZHAO Xiyan, et al. Geology and Genesis of Kansuki Copper-cobalt Deposit in Katanga Province, D-R-Congo[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(1): 175-182.
- 李向前, 毛景文, 闫艳玲. 中非刚果(金)加丹加铜钴矿带主要矿化类型及特征[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 366-380.
- LI Xiangqian, MAO Jingwen, YAN Yanling, et al. Regional geology and characteristics of ore deposits in Katangan copper-cobalt belt within Congo (Kinshasa) Central Africa[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 366-380.
- 李长根. 刚果民主共和国腾克丰古鲁梅铜钴矿床[J]. 矿产综合利用, 2012, (1): 64-68.
- LI Changgen. The DRC tenke fugurume copper and cobalt mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012, (1): 64-68.
- 刘东盛, 王学求, 聂兰仕, 等. 中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测[J]. 地球科学, 2022, 47(8): 2781-2794.
- LIU Dongsheng, WANG Xueqiu, NIE Lanshi, et al. Cobalt geochemical anomalies characteristics and genesis in China and metallogenic prospecting areas prediction[J]. Earth Science, 2022, 47(8): 2781-2794.
- 刘洪微. 刚果(金)KOLWEZI铜钴矿床地质特征及成因分析[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 856-866.
- LIU Hongwei. Geological characteristics and genesis of the Kolwezi Cu-Co deposit in democratic republic of Congo[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 856-866.
- 刘培栋. 辽东裂谷铜钴矿床资源特征与潜力评价[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- LIU Peidong. Evaluation on Cu and Co mineral resource characteristics and potential of Liaodong rift[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- 刘小平. 云南易门老厂土状氧化钴矿床地质特征及成因探讨[J]. 云南地质, 2012, 31(3): 348-350+296.
- LIU Xiaopin. A probe into the genesis and geologic feature of Laochang earthy oxidized Cobalt deposit in Yimen, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2012, 31(3): 348-350+296.
- 刘勇, 李廷栋, 王彦斌. 宁夏卫宁北山金场子闪长玢岩岩脉地质特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1575-1583.
- LIU Yong, LI Yandong, WANG Yanbin, et al. Geological characteristics and zircon SHRIMP U-Pb data of Jinchangzi dioritic porphyrite dykes in Zhongwei City, Ningxia[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1575-1583.
- 刘裕庆. 海南石碌铁钴铜矿床硫同位素研究和矿床成因讨论[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所分刊, 1981, 2(1): 51-65.
- 刘志坚. 宁夏卫宁北山金、铅、银多金属矿成矿地质特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- LIU Zhijian. Metallogenic characteristics of Weiningbeishan Au-Pb-Ag polymetallic deposit in Ningxia Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- 刘志坚, 侯明才, 王泽晶, 等. 宁夏中宁茶梁子铁钴矿床成矿地质特征[J]. 地质学刊, 2013, 37(4): 642-646.
- LIU Zhijian, HOU Mingcai, WANG Zejing, et al. Metallogenic geological characteristics of Chaliangzi Fe-Co deposit in Zhongning in Ningxia[J]. Journal of Geology, 2013, 37(4): 642-646.
- 卢宜冠, 郝波, 孙凯, 等. 钴金属资源概况与资源利用情况分析[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 72-80.
- LU Yiguan, HAO Bo, SUN Kai, et al. General situation of cobalt resource and its utilization analysis[J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(1): 72-80.
- 卢宜冠, 涂家润, 孙凯, 等. 中非赞比亚成矿带谦比希铜钴矿床钴的赋存状态与成矿规律[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 338-354.
- LU Yiguan, XU Jiarun, SUN Kai, et al. Cobalt occurrence and ore-forming process in the Chambishi deposit in the Zambian Copperbelt, Central Africa[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 338-354.
- 马瑞赞, 吴文忠. 宁夏卫宁北山大铜沟钴异常分布规律及找矿方向研究[J]. 宁夏工程技术, 2022, 21(3): 279-283+288.
- MA Ruiyun, WU Wenzhon. Remote Sensing Image Interpretation and Geothermal Resources Forecasting on the North of Zhongwei Industrial Park[J]. Ningxia Engineering Technology, 2022, 21(3): 279-283+288.
- 马秀军, 海连富, 母彩霞, 等. 卫宁北山多金属矿构造岩相成矿规律与找矿研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(S2): 91-95.
- MA Xiujun, HAI Lianfu, MU Caixia, et al. Study of the tectonolite facies mineralization regularities and prospecting of the mo-

- lymetallic deposit in Weiningbeishan[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(S2): 91-95.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 935-969.
- MAO Jingwen, YUAN Shunda, XIE Guiqing, et al. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 935-969.
- 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999.
- 宁夏地质调查院. 宁夏卫宁北山地区多金属矿调查报告[R]. 宁夏地质调查院, 2012.
- 潘彤, 陈克强, 李月隆. 青海省都兰县督冷沟铜-钴矿的发现过程与启示[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(4-5): 434-436.
- PAN Tong, CHENG Keqiang, LI Yuelong. Discovery of Dulenggou copper and cobalt deposit in Dulan county, Qinghai province and its inspiration[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(4-5): 434-436.
- 潘彤, 马梅生, 康祥瑞. 东昆仑肯德可克及外围钴多金属矿找矿突破的启示[J]. *中国地质*, 2001, 28(2): 17-20.
- 庞雪娇. 山西中条山南和沟、老宝滩铜矿床矿化富集规律及矿床成因探讨[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- PANG Xuejiao. Study on the enrichment regularities and the ore genetic rules of Nanhegou and Laobaotan copper deposits in Zhongtiao mountains, Shanxi province[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- 邱正杰, 范宏瑞, 杨奎峰, 等. 中条山古元古代沉积岩容矿型铜钴矿床钴来源及富集过程[J]. *岩石学报*, 2023, 39(4): 1019-1029.
- QIU Zhengjie, FAN Hongrui, YANG Kuifeng, et al. Cobalt sources and enrichment processes of the Palaeoproterozoic sedimentary rock-hosted Ca-Co deposits in the Zhongtiao Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 1019-1029.
- 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[J]. *吉林地质*, 2005, 24(4): 26-31.
- RENG Qiwu, XUE Jianbo, WANG Limei, et al. The ore-control factor and criteria for ore prospecting of the Dahenglu Co, Cu deposit[J]. *Jilin Geology*, 2005, 24(4): 26-31.
- 史连昌, 赵明福, 王文, 等. 东昆仑成矿带驼路沟钴金矿床的地球化学特征响应[J]. *西北地质*, 2019, 52(1): 176-182.
- SHI Lianchang, ZHAO Mingfu, WANG Wen, et al. Geological, geochemical and remote sensing characteristics of the Tuolugou cobalt-gold deposit in east Kunlun metallogenic belt[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(1): 176-182.
- 舒树兰, 李彬, 陈林. 东昆仑督冷沟铜钴矿床多期成矿特征及成矿过程探讨[J]. *西北地质*, 2015, 48(1): 137-144.
- SHU Shulan, LI Bin, CHEN Lin. Discussion on Metallogenic Characteristics and Multi-stage Mineralization Process of Dulenggou Copper-cobalt Deposit in East Kunlun. Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(1): 137-144.
- 松权衡, 魏发, 罗琛. 白山市大横路铜钴矿区含矿岩系大栗子组原岩性质及沉积环境地球学特征[J]. *吉林地质*, 2000, 19(3): 55-60.
- SONG Quanheng, WEI Fa, LUO Chen. The primary rock nature of the Dalizi formation of ore-bearing rock series in the Dahenglu Cu-Co mining area, Baishan area, Jilin province and its sedimentary environmental geochemical characteristics[J]. *Jilin Geology*, 2000, 19(3): 55-60.
- 宋建潮. 辽东裂谷金属矿床成矿系列与成矿作用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- SONG Jianchao. Minerogenetic series and ore-forming processes of metal deposits in the Liaodong rift[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- 宋新华, 尹秉喜, 闫红, 等. 航磁资料在卫宁北山寻找多金属矿中的应用[J]. *物探与化探*, 2010, 34(3): 289-293.
- SONG Xinhua, YIN Bingxi, YAN Hong, et al. The relationship between The Aeromagnetic weak anomalies and The Polymetallic ore deposits (Ore spots) in The beishanmountain in Weining[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(3): 289-293.
- 苏本勋, 蒋少涌, 崔梦萌, 等. 钴镍成矿规律与勘查技术研究进展: 前言[J]. *岩石学报*, 2023a, 39(4): 963-967.
- SUN Benxun, JIANG Shaoyong, CUI Mengmeng, et al. Progress in mineralization and prospecting technology of cobalt and nickel: Preface[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023a, 39(4): 963-967.
- 苏本勋, 秦克章, 蒋少涌, 等. 我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望[J]. *岩石学报*, 2023b, 39(4): 968-980.
- SUN Benxun, QIN Kezhang, JIANG Shaoyong, et al. Mineralization regularity, scientific issues, prospecting technology and research prospect of Co-Ni deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023b, 39(4): 968-980.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 中非加丹加-赞比亚多金属成矿带成矿演化及找矿潜力分析[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(1): 121-131.
- SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, et al. Metallogenic evolution and prospecting potential of Katanga-Zambia polymetallic metallogenic belt in central Africa[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(1): 121-131.
- 孙凯, 张航, 卢宜冠, 等. 中非铜钴成矿带地质特征与找矿前景分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(1): 103-120.
- SUN Kai, ZHANG Hang, LU Yiguan, et al. Analysis on geological characteristics and prospecting potential of the Central African Cu-Co metallogenic belt[J]. *Geology in China*, 2022, 49(1): 103-120.
- 唐健, 王发明, 许红英, 等. 青海驼路沟地区钴(金)矿床赋矿层与控矿构造特征[J]. *西北地质*, 2004, 37(1): 86-96.
- TANG Jian, WANG Faming, XU Hongying, et al. Characteristic of ore-hosted strata ore-controlling structure of Co-Au mineral de-

- posit in Tuolugou area, Qinhai[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(1): 86–96.
- 田丰, 王可勇, 梁一鸿, 等. 吉林省大横路钴铜矿床地质特征及成矿流体来源讨论[J]. *西北地质*, 2017, 50(2): 167–177.
- TIAN Feng, WANG Keyong, LIANG Yiming, et al. Characteristic of hydrothermal superimposed mineralization and source of Ore-forming fluids in the Dahenglu Co-Cu deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2): 167–177.
- 万丛礼, 刘荣访. 浅析吉林省大横路钴铜矿床成矿条件[J]. *世界地质*, 1999, 18(1): 22–25.
- WAN Congli, LIU Rongfang. A preliminary analysis of the metallogenic conditions of Dahenglu Co-Cu deposit in Jilin province[J]. *World Geology*, 1999, 18(1): 22–25.
- 王改平, 张玉霞, 王兴强. 卫宁北山地区钴矿地质特征及找矿前景[J]. *中国西部科技*, 2014, 13(4): 24–26.
- 王辉, 丰成友, 张明玉. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 739–750.
- WANG Hui, FENG Chengyou, ZHANG Mingyu. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 739–750.
- 王慧宁, 刘福来, 朱志勇, 等. 吉林省大横路铜钴矿复杂的沉积-变质变形-热液作用演化过程及其对钴的赋存状态和富集成矿的制约[J]. *岩石学报*, 2023, 39(4): 998–1018.
- WANG Huining, LIU Fulai, ZHU Zhiyong, et al. Complex evolution of the sedimentation, metamorphism-deformation and hydrothermal processes and their constraints on the occurrence, enrichment and mineralization of Co in the Dahenglu Cu-Co deposit, Jilin Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 998–1018.
- 王世俊. 浅谈铜矿峪铜矿矿体特征及资源储量估算[J]. *华北国土资源*, 2018, (3): 18–19.
- 王武名, 盛涛, 王丽娟, 等. 刚果(金)加丹加鲁苏西铜钴矿床S、C、O、Sr同位素特征及矿床成因[J]. *地学前缘*, 2021, 28(6): 318–330.
- WANG Wuming, SHENG Tao, WANG Lijuan, et al. Characteristics of S, C, O and Sr isotopes and genesis of the Luiswishi Cu-Co deposit in Katanga, Democratic Republic of Congo[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(6): 318–330.
- 王亚磊, 李文渊, 林艳海, 等. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 133–150.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, LIN Yanhai, et al. Study on the Occurrence State and Enrichment Process of Cobalt in Jinchuan Giant Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 133–150.
- 王泽晶, 唐媛, 刘志坚. 宁夏卫宁北山地区地球化学背景及与成矿作用关系的研究[J]. *中国金属通报*, 2022, 9: 50–52.
- 韦延光, 王可勇, 杨言辰, 等. 吉林白山市大横路 Cu-Co 矿床变质成矿流体特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(2): 128–133.
- WEI Yanguang, WANG Keyong, YANG Yan, et al. The feature of metamorphic minerogenetic fluid of Dahenglu Cu-Co deposit in Baishan County, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002, 32(2): 128–133.
- 吴文忠, 孟方, 王红, 等. 宁夏卫宁北山钴异常分布规律及其形成机制[J]. *中国西部科技*, 2013a, 12(5): 26–28.
- 吴文忠, 孟方, 王红, 等. 宁夏卫宁北山钴异常的物质来源研究[J]. *太原理工大学学报*, 2013b, 44(4): 485–489.
- WU Wenzhong, MENG Fang, WANG Hong, et al. Research on Material Sources of Cobalt Abnormality in the Weining Beishan of Ningxia[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013b, 44(4): 485–489.
- 肖勇, 蔡仁杰, 符启基, 等. 海南岛石碌铁、钴、铜多金属矿集区地质特征及找矿方向[J]. *矿产与地质*, 2010, 24(3): 251–255.
- XIAO Yong, CAI Renjie, FU Qiji, et al. Geological characteristics and prospecting orientation of Shilu iron, cobalt and copper polymetallic ore accumulation zone[J]. *Mineral Resources of Geology*, 2010, 24(3): 251–255.
- 徐林刚, 孙凯, 闫浩, 等. 黑色页岩容矿型 Ni-Co 矿床: 研究进展与展望[J]. *岩石学报*, 2022, 38(10): 3052–3066.
- XU Lingang, SUN Kai, YAN Hao, et al. Black shale-hosted nickel-cobalt deposit: current understanding and outlook to future prospecting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(10): 3052–3066.
- 许德如, 王智琳, 聂逢君, 等. 中国钴矿资源现状与关键科学问题[J]. *中国科学基金*, 2019, 2: 125–133.
- XU Deru, WANG Zhilin, NIE Fengjun, et al. Cobalt resources in China: current research status and key scientific issues[J]. *Science Foundation in China*, 2019, 2: 125–133.
- 薛步高. 论易门铜矿区叠加钴矿化地质特征[J]. *矿产与地质*, 1996, 10(6): 29–35.
- XUE Bugao. Geological characteristics of superimposed cobalt mineralization in the Yimen copper district[J]. *Mineral Resources of Geology*, 1996, 10(6): 29–35.
- 杨言辰, 冯本智, 刘鹏鹏. 吉林老岭大横路式热水沉积叠加改造型钴矿床[J]. *长春科技大学学报*, 2001, 31(1): 40–45.
- YANG Yanchen, FENG Benzhi, LIU Penge. Dahenglu type of cobalt deposit in Laoling area, Jilin province: A sedex deposit with late reformation[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2001, 31(1): 40–45.
- 杨言辰, 王可勇, 冯本智. 大横路式钴(铜)矿床地质特征及成因探讨[J]. *地质与勘探*, 2004, 40(1): 7–11.
- YANG Yanchen, WANG Keyong, FENG Benzhi. Geological characteristics and genesis of the Dahenglu type cobalt (Copper) deposits, Jilin province[J]. *Geology and Prospecting*, 2004, 40(1): 7–11.
- 张德全, 余宏全, 徐文艺, 等. 驼路沟喷气沉积型钴(金)矿床成矿地质背景及矿床成因的地球化学限制[J]. *地球学报*,

- 2002a, 23(6): 527-534.
- ZHANG Dequan, YU Hongquan, XU Wenyi, et al. Geochemical constraint on the metallogenetical geological background and genesis of Tuolugou sedimentary-exhalative cobalt-gold deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002a, 23(6): 527-534.
- 张德全, 王彦, 丰成友, 等. 驼路沟喷气沉积型钴(金)矿床的地质-地球化学[J]. *矿床地质*, 2002b, 21(3): 213-222.
- ZHANG Dequan, WANG Yan, FENG Chenyou, et al. Geology and Geochemistry of Tuolugou Exhalative-Sedimentary Co-Au Deposit, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 2002b, 21(3): 213-222.
- 张富元, 章伟艳, 任向文, 等. 全球三大洋海山钴结壳资源量估算[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 88-105
- ZHANF Fuyuan, ZHANG Weiyuan, REN Xiangwen, et al. Resource estimation of Co-rich crusts of seamounts in the three oceans[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37: 88-105.
- 张晗. 山西中条山北段古元古代铜矿成矿作用[D]. 长春: 吉林大学, 2012
- ZHANG Han. Metallogenesis of Paleoproterozoic copper deposits in the Northern Zhongtiaoshan Mountains, Shanxi Province[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. *矿床地质*, 2020, 39(3): 501-510.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(3): 501-510.
- 张焕宝, 贺海洋, 杨仕教等. 基于机器学习的埃达克质岩构造背景判别研究[J/OL]. *地学前缘*, 2023, 1-14.
- ZHANG Huanbao, HE Haiyang, YANG Shijiao, et al. Machine learning-based approach for andakitic rock tectonic setting determination[J/OL]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 1-14.
- 张连昌, 张爱奎, 刘永乐, 等. 沉积岩-变沉积岩型钴矿研究进展与问题[J]. *岩石学报*, 2023, 39(4): 981-997.
- ZHANG Lianchang, ZHANG Aikui, LIU Yongle, et al. Research progresses and problems of sedimentary-metasedimentary rock-hosted cobalt deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 981-997.
- 张亮, 李碧乐, 张晗, 等. 山西中条山桐木沟铜矿床辉钼矿的铼-钨测年及地质意义[J]. *世界地质*, 2013, 32(4): 740-746.
- ZHANG Liang, LI Biye, ZHANG Han, et al. Re-Os isotopic dating and its geological significance of molybdenite from Tongmugou copper deposit in Zhongtiaoshan, Shanxi[J]. *Global Geology*, 2013, 32(4): 740-746.
- 张天福, 张云, 苗培森, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中晚侏罗世地层化学蚀变指数(CIA)研究及其意义[J]. *地质调查与研究*, 2018, 41(4): 258-262+279.
- ZHANG Tianfu, ZHANG Yun, MIAO Peisen, et al. Study on the chemical index of alteration of the Middle and Late Jurassic Strata in the western margin of Ordos basin and its implications[J]. *Geological Survey and Research*, 2018, 41(4): 258-262+279.
- 张勇, 丁建华, 松权衡, 等. 东北地区富钴矿床成矿规律、成因类型与远景区预测[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(3): 693-712.
- ZHANG Yong, DING Jianhua, SONG Quanheng, et al. Metallogenic Regularity, Genetic Type and Potential Prospects of Cobalt Deposits in Northeast China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(3): 693-712.
- 张照伟, 李文渊, 丰成友, 等. 中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术[J]. *西北地质*, 2022, 55(2): 14-34.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, FENG Chengyou, et al. Study on Metallogenic Regularity of Co-Ni Deposits in China and Its Efficient Exploration Techniques[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 14-34.
- 张照伟, 张江伟, 王亚磊, 等. 准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿成矿特征[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 1-10.
- ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, WANG Yalei, et al. Metallogenic Characteristics of Yundukala Co Deposit in Northern Margin of Junggar Metallogenic Belt, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 1-10.
- 张振杰, 成秋明, 杨玠, 等. 机器学习与成矿预测: 以闽西南铁多金属矿预测为例[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 221-235.
- ZHANG Zhenjie, CHENG Qiuming, YANG Jie, et al. Machine learning for mineral prospectivity: A case study of iron-poly-metallic mineral prospectivity in southwestern Fujian[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(3): 221-235.
- 赵国春. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. *岩石学报*, 2009, 25(8): 1772-1792.
- ZHAO Guochun. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(8): 1772-1792.
- 赵俊伟, 孙丰月, 李世金, 等. 青海驼路沟钴矿成矿特征及控矿规律研究[J]. *世界地质*, 2008, 27(1): 7-13+29.
- ZHAO Junwei, SUN Fengyue, LI Shijin, et al. Study on metallogenic features and ore-controlling regularity of Tuolugou cobalt deposit in Qinghai Province[J]. *World Geology*, 2008, 27(1): 7-13+29.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. *科学通报*, 2019, 64(24): 2484-2500.
- ZHAO Junxing, LI Guangming, QIN Kezhang, et al. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(24): 2484-2500.
- 赵晓辰, 刘池洋, 赵岩, 等. 河西走廊过渡带东部香山群硅质岩地球化学特征及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(1): 83-94.
- ZHAO Xiaochen, LIU Chiyang, ZHAO Yan, et al. Geochemical Characteristics and Its Geological Implications of the Cherts in

- the Xiangshan Group of the Eastern Hexi Corridor Belt, NW China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(1): 83–94.
- 朱华平, 孙丰月, 李碧乐, 等. 青海驼路沟钴矿床流体包裹体及成矿物理化学条件[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(4): 351–355.
- ZHU Huaping, SUN Fengyue, LI Biyue, et al. Fluid Inclusions Characteristics and Physicochemical Condition of Tuolugou Cobalt Deposit, Qinghai[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2007, 29(4): 351–355.
- 中国矿床发现史·云南卷编委会. 中国矿床发现史·云南卷[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- 中国矿床发现史·山西卷编委会. 中国矿床发现史·山西卷[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- 周辉, 曾书明. 江西五宝山(式)钴矿床成矿模型及地质—地球化学找矿模式[J]. *江西地质*, 2000, 14(4): 271–275.
- ZHOU Hui, ZENG Shuming. Genetic Model of The Wubaoshan Type Cobalt deposit in Jiangxi and The Geological-Geological Model for Ore-Searching[J]. *Jiangxi Geology*, 2000, 14(4): 271–275.
- 仲佳鑫, 李欢, 李鹏, 等. 宁夏卫宁北山金场子金矿床地质特征与控矿因素分析[J]. *西北地质*, 2012, 45(3): 81–92.
- ZHONG Jiixin, LI Huan, LI Peng, et al. Geological Characteristics, Ore-Controlling Factors and Mineralization Law of Gold Ore in the North Mountain of Weining Area, Ningxia[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(3): 81–92.
- 周少红. 大横路钴矿钴镍赋存状态与共生规律的数学分析[J]. *世界地质*, 2001, 20(1): 40–42+61.
- ZHOU Shaohong. Mathematical Analysis of Cobalt and Nickel Occurrence with Commensal Rules in Dahenglu Cobalt Ore Deposit[J]. *World Geology*, 2001, 20(1): 40–42+61.
- 周永章, 黎培兴, 王树功, 等. 矿床大数据及智能矿床模型研究背景与进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(2): 327–331+344.
- ZHOU Yongzhang, LI Peixing, WANG Shugong, et al. Research Progress on Big Data and Intelligent Modelling of Mineral Deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(2): 327–331+344.
- 周永章, 左仁广. 数学地球科学跨越发展的十年: 大数据、人工智能算法正在改变地质学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(3): 556–573
- ZHOU Yongzhang, ZUO Renguang. The Great-leap-forward Development of Mathematical Geoscience During 2010–2019: Big Data and Artificial Intelligence Algorithm Are Changing Mathematical Geoscience[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(3): 556–573.
- 朱华平, 孙丰月, 李碧乐, 等. 青海驼路沟钴矿床地质特征及找矿方向研究[J]. *地质找矿论丛*, 2004, 19(3): 147–152.
- ZHU Huaping, SUN Fengyue, LI Biyue, et al. Study on The Geological Characteristics of Tuolugou Co Deposit and Ore prospecting, Qinghai Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2004, 19(3): 147–152.
- Aleinikoff J N, Slack J F, Lund K L, et al. 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]. *Economic Geology*, 2012, 107: 1143–1175.
- Anbar A D. Elements and Evolution[J]. *Science*, 2008, 322: 1481–1483.
- Bending J S, Scales W G. New production in the Idaho Cobalt Belt: a unique metallogenic province[J]. *Applied Earth Science*, 2013, 110: 81–87.
- Brown A C. Low-Temperature Sediment-Hosted Copper Deposits [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 251–271.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African Copperbelt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42: 134–158.
- Cailteux J L H., De Putter T. The neoproterozoic Katanga supergroup (D. R. Congo): state-of-the-art and revisions of the lithostratigraphy, sedimentary basin and geodynamic evolution [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 150, 522–531.
- Chen W T, Zhou M F, Li X, et al. In situ Pb-Pb isotopic dating of sulfides from hydrothermal deposits: a case study of the Lala Fe-Cu deposit, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 54: 671–682.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919–2940.
- Dehaine Q, Tijsseling L T, Glass H J, et al. Geometallurgy of cobalt ores: A review[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 160.
- El Desouky H A, Muchez P, Boyce A J, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo)[J]. *Mineralium Deposita*, 2010, 45: 735–763.
- Gao S, Zhang B R, Jin Z M, et al. How mafic is the lower continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 101–117.
- Greenwood P F, Brocks J J, Grice K, et al. Organic geochemistry and mineralogy: I. Characterisation of organic matter associated with metal deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 50: 1–27.
- Hazen R M, Hystad G, Golden J J, et al. Cobalt mineral ecology[J]. *American Mineralogist*, 2017, 102: 108–116.
- Hitzman M, Kirkham R, Broughton D, et al. The sediment-hosted stratiform copper ore system[J]. 2005, *Economic Geology*

- 100th Anniversary Volume: 609–642.
- Hitzman M W, Bookstrom A A, Slack J F, et al. Cobalt-Styles of deposits and the search for primary deposits [J]. 2017, 1–53.
- Hitzman M W, Selly D, Bull S, Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history [J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 627–639.
- Johnson C A, Bookstrom A A, Slack J F. Sulfur, Carbon, Hydrogen, and Oxygen Isotope Geochemistry of the Idaho Cobalt Belt [J]. *Economic Geology*, 2012, 107: 1207–1221.
- Johnsson M J. The system controlling the composition of clastic sediments [J]. *Geological Society of America*, 1993, 284: 1–20.
- Large R R, Mukherjee I, Gregory D D, et al. Ocean and Atmosphere Geochemical Proxies Derived from Trace Elements in Marine Pyrite: Implications for Ore Genesis in Sedimentary Basins [J]. *Economic Geology*, 2017, 112: 423–450.
- Large R R, Mukherjee I, Gregory D, et al. Atmosphere oxygen cycling through the Proterozoic and Phanerozoic [J]. *Mineralium Deposita*, 2019, 54: 485–506.
- Lodders K, Palme H, Gail H P. 4.4 Abundances of the elements in the Solar System [C]. *Solar System*, 2009, 712–770.
- McDonough W F. Compositional Model for the Earth's Core [C]. *Treatise on Geochemistry*, 2014: 559–577.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 284: 21–40.
- Muchez P, André-Mayer A S, El Desouky H A, et al. Diagenetic origin of the stratiform Cu–Co deposit at Kamoto in the Central African Copperbelt [J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50: 437–447.
- Muchez P, Vanderhaeghen P, El Desouky H, et al. Anhydrite pseudomorphs and the origin of stratiform Cu–Co ores in the Katangan Copperbelt (Democratic Republic of Congo) [J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 575–589.
- Nold J L. The Idaho cobalt belt, northwestern United States: A metamorphosed Proterozoic exhalative ore district [J]. *Mineral Deposits*, 1990, 25: 163–168.
- Prave A R, Condon D J, Hoffmann K H, et al. Duration and nature of the end-Cryogenian (Marinoan) glaciation [J]. *Geology*, 2016, 44, 631–634.
- Qiu Z J, Fan H R, Goldfarb R, et al. Cobalt concentration in a sulfidic sea and mobilization during orogenesis: Implications for targeting epigenetic sediment-hosted Cu–Co deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 305: 1–18.
- Qiu Z J, Fan H R, Liu X, et al. Mineralogy, chalcopyrite ReOs geochemistry and sulfur isotope of the Hujiayu Cu deposit in the Zhongtiao Mountains, North China Craton: Implications for a Paleoproterozoic metamorphogenic copper mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 252–267.
- Rudnick R L, Gao S. The composition of the continental crust [A]. *The Crust Treatise on Geochemistry* [M]. Oxford: Elsevier, 2003.
- Saintilan N J, Creaser R A, Bookstrom A A. 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*, 2017, 86: 509–525.
- Slack J F. 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]. *Economic Geology*, 2012, 107: 1059–1113.
- Slack J F, Causey J D, Eppinger R G, et al. Co–Cu–Au Deposits in Metasedimentary Rocks—A Preliminary Report [M]. *US Geological Survey*, 2017, 1212.
- Smith C G. Always the bridesmaid, never the bride: cobalt geology and resources [J]. *Applied Earth Science*, 2013, 110: 75–80.
- Stein J H. Dating and Tracing the History of Ore Formation [A]. *Treatise on Geochemistry 2nd Edition* [M]. 2014, 1–32.
- Unrug R. Mineralization Controls and Source of Metals in the Lufilian Fold Belt, Shaba (Zaire), Zambia, and Angola [J]. *Economic Geology*, 1988, 83: 1247–1258.
- US Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2018 [M]. *US Geological Survey*, 2018, 1–6.
- Wang M, Mao J, Ye H, et al. The Age of Hubi Copper (Cobalt) Ore Mineralization in the Zhongtiao Mountain Area, Southern Margin of the Trans-North China Orogen: New Constraints from U–Pb Dating of Rutile and Monazite [J]. *Minerals*, 2022, 12: 1–30.
- Williams-Jones A E, Vasyukova O V. Constraints on the Genesis of Cobalt Deposits: Part I. Theoretical Considerations [J]. *Economic Geology*, 2022, 117: 513–528.
- Young R S. The geochemistry of cobalt [J]. *Geochimica et cosmochimica*, 1957, 13: 28–41.
- Zhang Z J, Zuo R G, Xiong Y H. A comparative study of fuzzy weights of evidence and random forests for mapping mineral prospectivity for skarn-type Fe deposits in the southwestern Fujian metallogenic belt, China [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2016, 59: 556–572.