

钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义*

张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 宋玉财, 刘英超, 柴 鹏

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘 要 作为一种战略性关键金属, 钴的现有矿床类型划分方案存在标准不统一等问题。文章从矿床成因角度提出新的划分方案, 认为钴矿床主要有岩浆型、热液型、风化型和化学沉积型 4 种基本矿床类型。热液型可细分为岩浆热液矿床和盆地流体有关矿床 2 个亚类型。这一新划分方案对于理解钴矿床成矿作用和指导找矿勘查等方面具有重要启示意义。研究发现热液过程对钴富集成矿具有重要作用, 而高盐度流体是钴迁移富集的关键所在。根据盆地流体有关热液钴矿床时空分布规律分析, 提出欧亚大陆南缘存在一条上万公里长的特提斯碰撞钴矿带。该带具有得天独厚的金属源区、流体运移和金属沉淀等成矿条件, 成矿潜力巨大。

关键词 地质学; 矿床成因; 矿床类型; 高盐度流体; 钴矿床; 特提斯
中图分类号: P618.62 **文献标志码**: A

A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt

ZHANG HongRui, HOU ZengQian, YANG ZhiMing, SONG YuCai, LIU YingChao and CHAI Peng
(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Cobalt is an important strategic metal. However, there exist many problems concerning the division of genetic types of cobalt deposits, which leads to a confused understanding on genesis of cobalt deposits. Here the authors propose a new division mainly based on ore genesis, with which global cobalt resources can be grouped into four basic deposit types, i.e., magmatic sulfide deposits, laterite deposits, chemical precipitation deposits, and hydrothermal deposits. The hydrothermal deposits can be further divided into two sub-types: magmatic-hydrothermal deposits and hydrothermal deposits formed from basin brines. The new genetic division of cobalt deposits would shed light on ore genesis and help identify new economically significant deposits. The hydrothermal deposits host 49% cobalt metal reserves, supply 62% of the world's Co production, and are genetically related to high-salinity fluids. All these data prove that hydrothermal process within the crust is important for cobalt deposits, and the high-salinity fluids are vital for cobalt enrichment. The authors hold that there exists a 10 000 km cobalt-rich belt within Tethyan collisional orogenic belt based on analysis of the spatial-temporal distribution of hydrothermal deposits formed from basin brines. The Tethyan belt has great potential for cobalt-rich deposits.

Key words: geology, ore genesis, deposit types, high-salinity fluid, cobalt-rich deposit, Tethyan belt

* 本文得到自然科学基金项目(编号:91962105, 41772088, 91955207, 91855214 和 41922022)和地调项目(编号:DD20190001)联合资助
第一作者简介 张洪瑞, 男, 1982 年生, 研究员, 主要从事区域构造与成矿作用研究。Email: zhanghr@yeah.net
收稿日期 2020-03-03; 改回日期 2020-04-17。赵海杰编辑。

钴是一种战略性关键金属,被广泛应用于新能源汽车、电子信息与通讯、航空航天、高端装备制造等新兴产业。然而,中国钴资源储量严重不足,目前对外依存度高达97%(Gulley et al., 2019)。随着新兴产业的快速发展,未来钴资源将更加紧缺。在当前严峻形势下,开展钴矿床成因机制研究,实现成矿理论创新,指明未来找矿方向,具有重要的科学和现实意义。

目前钴矿床的研究还处于起步阶段,通用的矿床类型划分方案中包括沉积岩容矿层控型、变质沉积岩容矿型等十余种(Zou et al., 2014; 王辉等, 2019; 赵俊兴等, 2019)。这一方案存在划分标准不一的问题,如成因类型、矿体描述以及专用名词等混用。矿床类型划分有助于深入理解矿床成因机制,同时还有利于指导找矿勘查和矿产评价工作。文章从钴矿床成因的角度,提出新的划分方案;并基于这一新方案,讨论了控制钴矿床形成的关键要素,提出了具有重大成矿潜力的新成矿带。

1 原有划分方案概述

钴在地壳中的丰度极低,很少独立成矿。绝大部分钴矿床都是铜、镍、铅锌和铁等矿床的伴生组分。目前钴矿床类型的划分主要沿用原主矿体的矿床类型(Smith, 2001; 丰成友等, 2004; Zou et al., 2014; Slack et al., 2017; Petavratzi et al., 2019; 张伟波等, 2018; 赵俊兴等, 2019),具体包括以下十几种(图1a, 2a):

(1) 沉积岩容矿层控型 Cu-Co 矿床。主要呈层状或似层状产在沉积盆地碎屑岩或碳酸盐岩中(Hitzman et al., 2012)。含铜矿物主要为黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿,含钴矿物为硫铜钴矿、硫钴矿(Cailteux et al., 2005)。品位一般为0.1%~0.2%,最高可达1.2%(图3a)。该类矿床以中非铜钴矿带最为著名,其钴储量占全球41%,产量占全球60%(Slack, 2017)。尽管其成矿时代、成矿背景还存在较大争议(Hitzman et al., 2017; Sillitoe et al., 2017),但对成矿流体来源的认识比较一致,即中-低温度、氧化性的富金属盆地卤水(图4a、b, McGowan et al., 2006; Greyling et al., 2005; El Desouky et al., 2009)。因此,它是典型的与盆地流体有关热液矿床。

(2) 风化型红土 Ni-Co 矿床。由超基性岩和玄武岩经长期强烈的风化和侵蚀作用而形成,主要表

现为富含铁、镍、钴的红土。该类矿床蕴含着世界陆地36%的钴资源(Slack, 2017),钴品位一般在0.02%~0.18%(图3a)。主要载钴矿物为钴土矿、含镍钴土矿和含钴的铁氢氧化物(Petavratzi et al., 2019)。

(3) 岩浆 Ni-Cu(-Co-PGE)硫化物矿床。该类矿床中的钴储量占全球的15%,代表性矿床如中国金川(汤中立, 1996)等。钴品位比较低,一般为0.05%~0.10%。成矿与幔源岩浆中硫化物饱和之后的熔离作用有关。主要硫化物为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,钴主要集中在镍黄铁矿中(秦克章等, 2007)。

(4) 变质沉积岩容矿型 Co-Cu-Au 矿床。矿体呈层状、似层状、脉状和角砾状赋存在元古代变形变质碎屑岩中。载钴矿物包括辉钴矿、硫砷钴矿、含钴黄铁矿等。具有矿床吨位小但钴品位高(0.1%~0.7%)的特点。该类矿床与沉积岩容矿层控型 Cu-Co 矿床的主要区别在于:矿区范围内缺少后者必有的红层。另外,在金属组合上比后者更富 As 和 Au。实际上,除了 Co-Cu-Au 以外,该类矿床还共生多种金属元素,如亲石元素(B、Be、Cl、F、REE、Th、U、W、Y),亲铁元素(Mo、Ni)和亲铜元素(Ag、As、Bi、Hg、Pb、Se、Te、Zn)等。代表性矿床有澳大利亚 Carlow Castle (Fox et al., 2019) 和美国 Blackbird 矿集区(后者也被划分为铁氧化物铜金型矿床, Slack et al., 2010)。

(5) 热液脉状多金属矿床。一般赋存在沉积岩中,矿体受构造(断层、褶皱等)控制呈脉状产出。伴生铜、钴、铋、砷、银、铅锌等多种金属,部分矿床可以见到自然银、铋、砷、汞等矿物(Markl et al., 2016)。钴成矿或与岩浆热液有关,或与盆地流体有关(贾敬伍等, 2014; Wang et al., 2018)。这类矿床钴品位高(>0.2%),长期以来一直作为钴、银矿床开采,对钴产量具有重要贡献(Kissin, 1992)。矿床遍布在全球各地,如摩洛哥 Bou Azzer、加拿大安大略省的 Cobalt-Gowganda、中国西南兰坪地区白秧坪等。

(6) 密西西比河谷型 Zn-Pb-(Co-Ni) 矿床。该类矿床是与盆地流体有关的铅锌矿床,少数矿床中伴生有钴(Horrall et al., 1993)。载钴矿物为硫铜钴矿、硫镍钴矿。

(7) 黑色页岩容矿型 Ni-Cu-Zn-Co 矿床。黑色页岩中富含铜、钼、镍、钒、钴等金属,局部可以富集成矿过程。钴主要赋存于黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿中,其成因很可能与海水沉积(Xu et al., 2013)或热

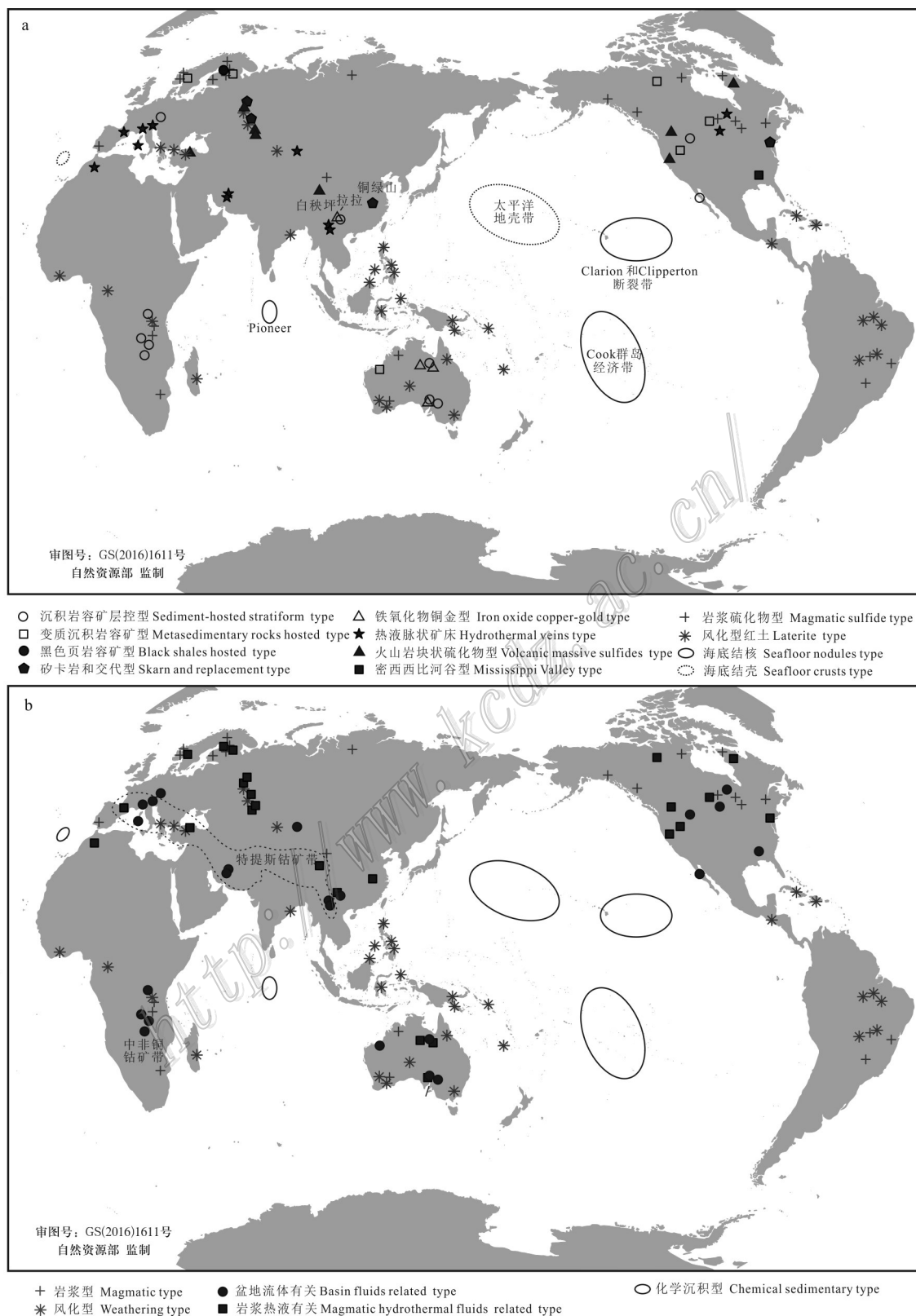


图 1 全球主要钴矿床类型与分布示意图

a. 原矿床类型划分方案; b. 本文划分方案

Fig. 1 The sketch of global distribution of major cobalt-bearing mineral deposits

a. The division in previous study; b. The division in this study

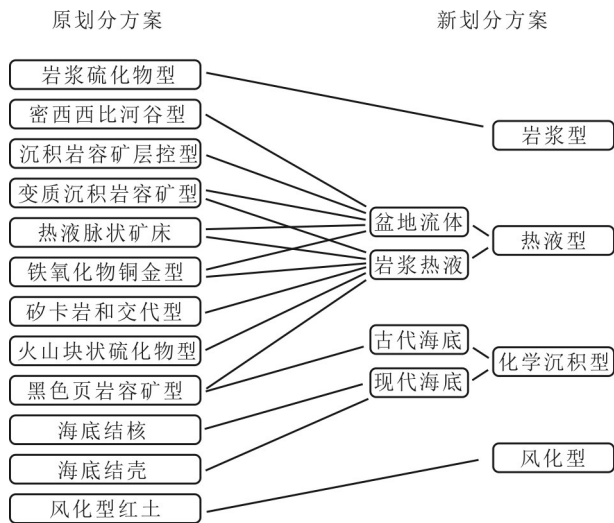


图2 钴矿床划分方案对比图

Fig. 2 Comparison between previous and new divisions for the cobalt deposit

液活动(Jiang et al., 2006)有关。典型矿床有芬兰北部的Talvivaara,其钴品位很低(0.02%),但由于吨位大,也构成了超大型钴矿床(Loukola-Ruskeeniemi et al., 2013)。

(8) 矽卡岩和交代型Fe-Cu-Co矿床。此类矿床中的钴品位比较低,一般在0.02%左右甚至更低。钴主要见于辉钴矿或者含钴黄铁矿等硫化物中。中国湖北大冶铜绿山即是此类矿床的代表(Zhao et al., 2012)。

(9) 铁氧化物铜金型Cu-Au-Ag-U-REE-Co-Ni

矿床。该类矿床吨位大小不一,但钴品位一般低于0.05%。这类矿床的成矿过程比较复杂,同一个矿床内可鉴别出岩浆热液、盆地卤水、变质流体及大气降水等多种不同性质的成矿流体。代表性矿床有澳大利亚南部的Olympic Dam矿床和中国云南拉拉矿床(Chen et al., 2012)。

(10) 火山岩块状硫化物型Cu(-Zn-Co-Ag-Au)矿床。矿体赋存在中基性火山岩中,主要产出铜、铅、锌、金、银等金属矿产,部分矿床中也富集钴。钴成矿与火山作用过程中的热液活动有关。代表性矿床有中国青海德尔尼和俄罗斯乌拉尔山地区的众多矿床等(王玉往等,1997)。

(11) 海底Fe-Mn(-Ni-Cu-Co-Mo)结核。生长在现代大洋底的深海平原(海平面下3500~6500 m),由铁锰氢氧化物沉淀而成。品位一般在0.2%~0.4%(Slack, 2017)。结核直径通常2~8 cm,钴通常在结核表层,被表壳氧化过程而吸附。生长速率差异较大,从1~250 mm/Ma不等。目前发现的结核集中于太平洋Clarion and Clipperton断裂区和Cook Islands专属经济区、印度洋Pioneer地区(Hein et al., 2013)。

(12) 海底Fe-Mn(-Co-Mo-REE)结壳。生长在水深800~3000 m的大洋海山、海底高原以及大洋中脊。结壳厚度不一,可以<1cm,最厚可达26 cm。成矿与海底结核过程类似,但生长速度极低(1~6 mm/Ma)。品位一般在0.35%~0.66%(Slack, 2017)。太平洋中西部是结壳的重要产区。

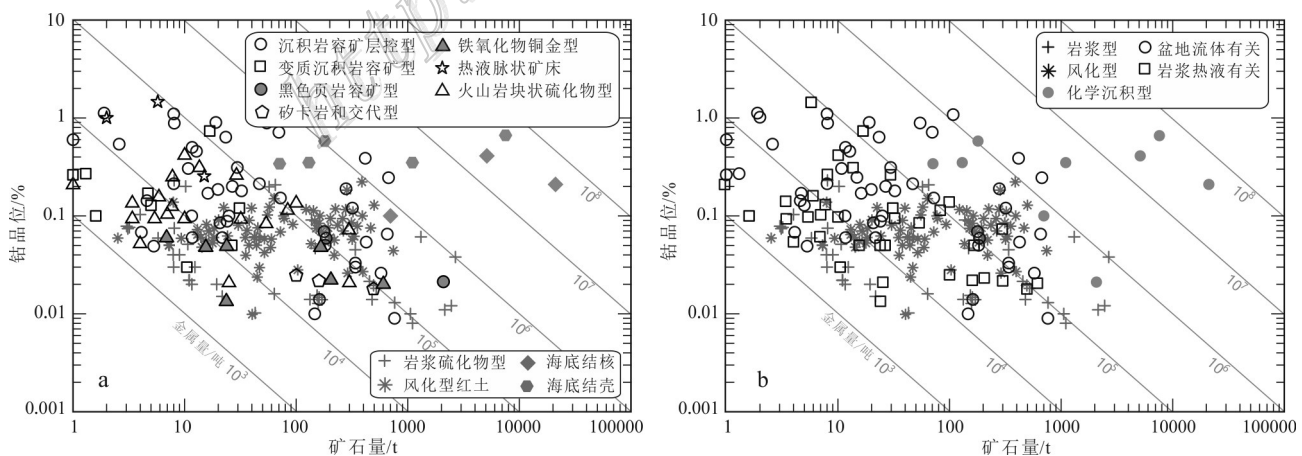


图3 世界主要钴矿床品位和矿石吨位协变图(修改自Slack, 2017)

a. 原矿床类型划分方案; b. 本文划分方案

Fig. 3 Grade-tonnage plot for major cobalt-bearing mineral deposits worldwide (modified after Slack, 2017)

a. The division in previous study; b. The division in this study

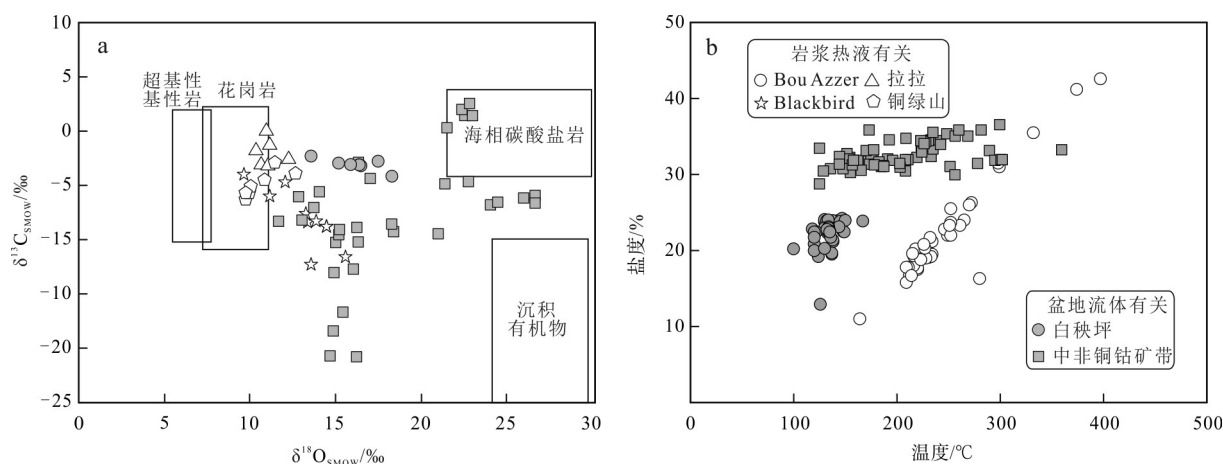


图4 代表性钴矿床含矿脉体C-O同位素(a)和成矿流体温度-盐度(b)协变图

数据来源: Bou Azzer (Dolansky, 2007); Blackbird (Johnson et al., 2012); 拉拉 (Chen et al., 2012); 铜绿山 (Zhao et al., 2012); 白秧坪 (Wang et al., 2018); 中非铜钴矿带 (Greyling et al., 2005)

Fig. 4 The carbon and oxygen isotopic composition of ore-bearing veins (a) and homogenization temperature (Th) versus salinity diagram of ore-bearing fluids for representative cobalt-bearing deposits (b)

Data source: Bou Azzer (Dolansky, 2007), Blackbird (Johnson et al., 2012), Lala (Chen et al., 2012), Tonglvshan (Zhao et al., 2012), Baiyangping (Wang et al., 2018), the Central African Copper Cobalt belt (Greyling et al., 2005)

2 钴矿床类型划分标准

从上节简述可知, 现有划分方案存在较大问题。一是划分标准不一, 有赋矿围岩(沉积岩、变质沉积岩)、矿体形态(层状、脉状)、矿床成因(岩浆型、风化型)等; 二是彼此存在重复, 如美国 Blackbird 矿集区同时属于铁氧化物铜金型矿床和变质沉积岩容矿型矿床; 三是沿用主矿体类型名称。对于伴生钴矿床来说, 其成因很可能与主矿体相同。因此, 套用名称来划分也无可厚非。但是也有一些矿床类型, 大多数都不伴生钴, 仅有少数几例有钴矿报道, 如密西西比河谷型矿床等。这反映了钴矿床具有更加独特的形成条件, 不能简单地套用原成矿模型。更重要的是, 沿用主矿体的划分方案禁锢了对钴矿床可能存在其他成因的思考。因此, 现有划分方案亟需修正。

而欲对矿床进行类型划分, 赋矿围岩显然不能作为唯一标准, 如碳酸盐岩可以作为密西西比河谷型和矽卡岩型矿床的围岩。矿体形态也不能作为标准, 实际上, 中非铜钴矿带除了发育层状矿床外, 还有大量脉状钴矿床(Cailteux et al., 2005)。另外, 金属组合也不能作为主要依据, 因为矿床金属组合主要取决于含矿流体流经的围岩。如果流经泥岩, 矿

床会富 As, 载钴矿物为辉钴矿(CoAsS); 而流经石英砂岩, 矿床则贫 As, 钴出现在硫钴矿(Co_3S_4) 和硫钴镍矿($(\text{Co}, \text{Ni})_3\text{S}_4$) 中 (Johnson, 2013)。

实验学研究构建了钴的地球化学行为和富集方式, 实例解剖揭示了钴矿床成因。这两方面资料可以用来理解钴成矿过程, 划分钴矿成因类型。研究表明, 钴在岩浆演化、热液活动、风化和沉积作用过程中都会富集并成矿(赵俊兴等, 2019)。岩浆演化阶段, 钴主要以类质同象的形式分散到造岩矿物和副矿物中, 优先进入橄榄石, 其次是辉石、钛铁矿和磁铁矿(Herzberg et al., 2016)。随着结晶过程的演化, 钴含量在岩浆体系中有一定的下降, 表现为晚结晶的橄榄石中钴含量逐渐降低(Matzen et al., 2016)。热液环境下, 钴主要以正二价氯络合物(CoCl_4^{2-})迁移(Liu et al., 2011); 当体系存在 H_2S 并且温度 $< 200^\circ\text{C}$ 的情况下, 钴则以 CoHS^+ 的形式迁移(Migdisov et al., 2011)。流体冷却和流体稀释会造成热液中钴的溶解度和 CoCl_4^{2-} 稳定性下降, 进而造成钴沉淀(Liu et al., 2011)。另外, 还原反应也会造成含钴硫化物的沉淀(Muchez et al., 2012)。风化作用过程中, 橄榄石、辉石等暗色矿物的晶格被破坏, 所含的钴、镍等元素从中释放出来。地表富氧的酸性水溶解 Co 和 Ni、Mn 等元素, 形成水钴矿以及铁、锰的氧化物或

氢氧化物。下滤沉淀形成钴帽等风化型矿床(De-crée et al., 2010)。另外,海底化学沉积作用也会造成钴沉淀,主要表现为结壳或结核中的铁锰氢氧化物(主要为水羟锰矿)强烈吸附海水中的 Co^{2+} 离子,造成钴富集(Manheim, 1986)。

3 钴矿床类型划分新方案

根据钴富集方式和成矿过程,文章将钴矿床划分出岩浆型、风化型、热液型和化学沉积型4种基本类型(图1b、图2)。

(1) 岩浆型即岩浆铜镍硫化物矿床,主要分布在古老克拉通内部及造山带边缘,与地幔柱火山喷发(Li et al., 2005)或陆块裂解(Hou et al., 2015)背景下的超基性-基性岩浆活动有关。该类矿床钴品位主要为0.01%~0.20%(0.01%是伴生钴矿床的最低工业品位)。

(2) 风化型是指风化型红土Ni-Co矿床。新生代以来的风化型钴矿主要分布在炎热潮湿的热带地区,如菲律宾、印度尼西亚、巴西、澳大利亚等。此外,还有一些中生代风化型钴矿床出露在土耳其西部和俄罗斯乌拉尔地区。考虑到风化型钴矿形成所需的苛刻气候条件(Thorne et al., 2012),上述非热带地区的风化型钴矿床很可能当时也位于热带地区,后来的板块运动将之定位于此。因此,风化型钴矿床很可能对板块构造恢复具有一定的指示意义。风化型钴矿床品位集中在0.04%~0.10%之间,反映了地表风化作用造成了均一化钴富集。该类矿床钴最低品位也高于很多岩浆型矿床的品位(0.01%),说明钴产自超基性岩甚至是富钴超基性岩矿石的次生富集。

(3) 化学沉积型矿床指在洋底环境下由离子吸附作用或氧化还原反应等化学过程而沉积形成的钴矿,包括现代海底结核结壳和古代海底与沉积作用有关的黑色页岩容矿型矿床2个亚类型(Xu et al., 2013)。其中,结核主要分布在大洋内部的深海平原,没有洋中脊和海山影响,地势平坦,有利于金属沉淀。结壳主要生长在太平洋the Pacific prime crust zone。该区对应于地幔低速异常区(LLSVP, Torsvik et al., 2014),密集发育与地幔岩浆喷发有关的洋岛、海山等。这些洋岛海山是结壳发育的有利区域。囿于开采条件、成本等方面的限制,海底的富钴结核和结壳还未得到工业化开采。

(4) 热液型矿床指由热液作用迁移富集并沉淀

而形成的钴矿床。该类矿床包含的范围比较宽,可进一步细分为岩浆热液矿床和盆地流体有关矿床2个亚类型。原划分方案中的矽卡岩和交代型(如铜绿山)、火山岩块状硫化物型和铁氧化物铜金型矿床(如拉拉矿床)的形成都与岩浆热液有关(图4a)。另外,部分黑色页岩容矿型矿床(Jiang et al., 2006)、变质沉积岩容矿型矿床(如美国Blackbird矿集区)和热液脉状多金属矿床(如摩洛哥Bou Azzer)也属于岩浆热液矿床(图4a)。与盆地流体有关的钴矿床包括沉积岩容矿层控型、密西西比河谷型以及部分变质沉积岩容矿型矿床和部分热液脉状多金属矿床(如云南白秧坪矿集区,胡茂德等,2015)。这类矿床的形成时间可以与围岩时代较接近(如中非铜钴矿带, Cailteux et al., 2005),也可以是明显晚于围岩(白秧坪等脉状矿床)。

热液型钴矿床具有所有类型中最高的钴品位,甚至达到岩浆型矿床品位(0.01%)的120倍。统计数据显示,热液钴矿的储量(占陆地资源的49%)和产量(全球占比62%)都远高于岩浆型和风化型钴矿床(图3b)。其中,盆地流体有关钴矿床的金属量甚至可与化学沉积型矿床相媲美。这些数据表明,热液作用,尤其是盆地流体有关的热液过程,对钴富集成矿具有重要作用。不同亚类型钴矿床的成矿流体数据显示(图4b),无论是岩浆热液钴矿,还是盆地流体有关钴矿,成矿流体都具有高盐度的特征。这一点与钴的地球化学行为相符合。

值得提及的是,很多矿床的形成是一个非常复杂的过程,或者涉及到多种流体的相互作用,如Blackbird矿集区中岩浆热液、变质流体和盆地流体都有表现(Johnson, 2013);或者表现出多期成矿,如中非铜钴矿带很可能存在早期盆地流体成矿和晚期高温热液叠加(El Desouky et al., 2009)。因此,文章提出的岩浆型、风化型、热液型和化学沉积型是最基本的钴矿类型,划分出的岩浆热液和盆地流体是基本热液矿床端员。

4 特提斯钴矿带

原划分方案中,众多的矿床类型分布在不同地区甚至同一地区(图1a)。碎片化的信息难以分析成矿规律、对比矿带延伸。例如,中非地区泛非碰撞造山带内发育有著名的巨型沉积岩容矿层控型铜钴矿床和众多脉状钴矿床。尽管其成矿时代很可能一致

(Cailteux, 2005),但不同成因模式导致两者看上去没有任何联系。按照文章提出的划分方案,这些层状矿床和脉状矿床都属于盆地流体有关矿床。按照泛非碰撞造山带空间位置,脉状矿床位于褶皱逆冲带内,而层状矿床则发育在盆地内。这很可能暗示了一种全新的综合成矿模型,即碰撞挤压驱动盆地流体运移,在褶皱逆冲带内沉积脉状矿床,而盆地内沉淀层状矿体。

这种盆山结构下两种矿床类型组合在全球并非孤例。欧洲中南部阿尔卑斯地区碰撞造山带内发育一系列热液脉状钴多金属矿床(Kissin, 1992),造山带北侧中欧盆地内则发育层状铜钴矿床。两者成矿时代很可能一致,即大陆碰撞之时(新生代初, Kissin, 1992; Symons et al., 2011)。另外,在青藏高原东缘,兰坪—思茅地区发育白秧坪、水泄等脉状钴多金属矿床(胡茂德等, 2015),远离碰撞带的楚雄盆地内发育层状铜矿床(韩润生等, 2010)。该盆地还没有钴矿的报道。如果笔者的模型符合实际的话,楚雄盆地很可能具有钴成矿潜力。

沿着碰撞造山带钴矿床的思路继续思考,笔者发现,阿尔卑斯和青藏高原都位于欧亚大陆南缘特提斯碰撞造山链内。该造山链内的伊朗地区也发育众多热液脉状钴多金属矿床(Bagheri et al., 2007; Kuhanestani et al., 2014)。这些矿床,与阿尔卑斯和青藏高原的脉状多金属矿床一样,都形成于新生代,就位特提斯洋盆闭合后的大陆碰撞造山带内(张洪瑞等, 2015; 2018),具有统一的动力学背景。成矿与盆地流体密切相关,矿体呈脉状产出,受构造控制明显。这些空间分布、产出环境和主控因素表明,上述矿床很可能构成一条上万公里长的特提斯碰撞钴矿带(图1b)。

文章认为,这一钴矿带还具有巨大钴成矿潜力,具体体现在:

金属来源:目前盆地流体有关钴矿床钴来源还存在争议,三种可能的源区包括氧化红层(Selley et al., 2005)、中基性火山岩(Van Wilderode et al., 2015)和超基性岩(Cailteux et al., 2005)。特提斯钴矿带所在地区经历过多期裂解汇聚过程(Hou et al., 2015)。陆块裂解和洋壳仰冲造成大量基性超基性岩就位(如特提斯蛇绿岩带);洋盆俯冲造就了上万公里长的中基性弧岩浆岩;大陆碰撞后前陆盆地内沉积有厚层红色碎屑岩。这些岩石组合可以为钴成矿提供充足的来源。

流体运移:特提斯碰撞造山带的前陆盆地内沉积有大量膏盐建造,证明存在潜在的大量高盐度盆地卤水。另外,大型碰撞造山事件有利于驱动盆地流体大规模运移,从而萃取活化含钴地层中的钴。

金属沉淀:实验模拟工作证实含钴热液沉淀与流体降温或稀释有关(Liu et al., 2011),但经典成矿模型中强调氧化还原反应导致硫化物沉淀(McGowan et al., 2006)。如果是前一种沉淀成矿模式的话,盆地流体只需运移至地壳浅部,与大气降水混合即可。这一条件在任何造山带都很容易满足。如果是后一种模式,特提斯造山带在俯冲阶段发育有碳质泥岩(局部夹煤层)、碰撞以来形成有陆相盆地红层。这些氧化还原界面有利于含钴流体的沉淀。

5 结 语

由于钴主要是伴生矿产,过去的研究多集中在主矿体成矿方面,专注于伴生钴的研究较少。可以说,当前的钴矿研究还处于起步阶段。亟待解决的问题有:①繁杂甬乱的资料掩盖了钴成矿规律。文章概述了前人划分的12种钴矿床类型,但还不全面。例如,少量斑岩型铜矿床中也伴生有钴,被称之为斑岩型铜钴矿床;②复杂的成矿作用使得主矿体研究认识和成果不一定适用于钴矿体。例如,黑色页岩容矿型矿床中发育Ni-Cu-Zn-Co多金属矿化,有研究认为钴和镍都来自于超基性岩(Loukola-Ruskeeniemi et al., 2013)。但是,也有数据表明,矿石中黄铁矿和磁黄铁矿所含的钴和镍具有负相关性(Loukola-Ruskeeniemi et al., 1996)。再如,研究表明,铁氧化物铜金型矿床矿化可分为早期铁矿化和晚期铜矿化(Williams et al., 2005),但是钴在哪一期沉淀还不清楚。

因此,今后钴矿床研究,一方面要宏观把握,化繁为简,高度概括凝练成矿规律,文章即是此背景下的初步尝试。另一方面,又要细处着手,仔细解剖典型矿床,在清晰厘定主矿与伴生钴矿关系的基础上,建立起真正的钴矿成因机制与成矿模型。

References

- Bagheri H, Moore F and Alderton D H M. 2007. Cu-Ni-Co-As (U) mineralization in the Anarak area of central Iran[J]. Journal of

- Asian Earth Sciences, 29: 651-665.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, Kaputo A and Milesi J. 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African Copper belt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42: 134-158.
- Chen W T and Zhou M-F. 2012. Paragenesis, stable isotopes and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, southwest China[J]. *Econ. Geol.*, 107: 459-480.
- Decrée S, Deloule É, Ruffet G, Dewaele S, Mees F, Marignac C, Yans J and Putter T D. 2010. Geodynamic and climate controls in the formation of Mio-Pliocene world-class oxidized cobalt and manganese ores in the Katanga Province, DR Congo[J]. *Mineralium Deposita*, 45: 621-629.
- Dolansky L M. 2007. Controls on the genesis of hydrothermal cobalt mineralization: Insights from the mineralogy and geochemistry of the Bou Azzer deposits, Morocco (Master Dissertation)[D]. Montreal, QC, Canada: McGill University.
- El Desouky H A, Muchez P and Cailteux J. 2009. Two Cu-Co sulfide phases and contrasting fluid systems in the Katanga Copper belt, Democratic Republic of Congo[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 315-332.
- Feng C Y, Zhang D Q and Dang X Y. 2004. Cobalt resources of China and their exploration and utilization[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 93-100(in Chinese with English abstract).
- Fox D C, Spinks S C, Pearce M A, Barham M, Le Vaillant M, Thorne R L, Aspandiar M and Verrall M. 2019. Plundering Carlow Castle: First look at a unique Mesoproterozoic-hosted Cu-Co-Au deposit[J]. *Econ. Geol.*, 114: 1021-1031.
- Greyling L N, Robb L J, Master S, Boiron M C and Yao Y. 2005. The nature of early basinal fluids in the Zambian copper belt: A case study from the Chambishi deposit[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42: 159-172.
- Gulley A L, McCullough E A and Shedd K B. 2019. China's domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain[J]. *Resources Policy*, 62: 317-323.
- Han R S, Zou H J, Wu P, Fang W X and Hu Y Z. 2010. Coupling tectonic-fluid metallogenic model for sandstone-type copper deposit in Chuxiong Basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(10): 1438-1447(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Herzberg C, Vidito C, Starkey N A. 2016. Nickel-cobalt contents of olivine record origins of mantle peridotite and related rocks[J]. *American Mineralogist*, 101(9): 1952-1966.
- Hitzman M W, Broughton D, Selley D, Woodhead J, Wood D and Bull S. 2012. The Central African copper belt: Diverse stratigraphic, structural, and temporal settings in the world's largest sedimentary copper district[C]. *Society of Economic Geologists Special Publication* 16, 487-514.
- Hitzman M W and Broughton D W. 2017. Discussion: "Age of the Zambian copper belt"[J]. *Mineralium Deposita*, 52: 1-3.
- Horral K B, Hagni R D and Kisvarsanyi G. 1993. Mafic and ultramafic plutons associated with the New Madrid rift complex: A possible major source of the copper-cobalt-nickel mineralization of southeast Missouri[J]. *Econ. Geol.*, 88: 328-343.
- Hou Z and Zhang H. 2015. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 346-384.
- Hu M D, Zhang H R, Jia J W and Liu Y Y. 2015. Structural control, oxygen and carbon isotope, and REE geochemistry of Liziping Pb-Zn ore deposit, Lanping Basin, Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 34(5): 1057-1071(in Chinese with English abstract).
- Jia J W, Zhang H R and Hu M D. 2014. The progress in the study of vein Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic epithermal deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 726-746(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Chen Y Q, Ling H F, Yang J-H, Feng H-Z and Ni P. 2006. Trace- and rare-earth element geochemistry and Pb-Pb dating of black shales and intercalated Ni-Mo-PGE-Au sulfide ores in Lower Cambrian strata, Yangtze platform, South China[J]. *Mineralium Deposita*, 41: 453-467.
- 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: 1207-1221.
- Johnson C A. 2013. Geochemical characteristics, chap. G-11[A]. In: Slack J F, ed. *Descriptive and geoenvironmental model for cobalt-copper-gold deposits in metasedimentary rocks*[C]. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-G, 105-112, <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/g/>.
- Kissin S A. 1992. Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) veins[J]. *Geosci. Canada*, 19: 113-124.
- Kuhanestani N M, Mohammadi B M, Alderton D H M, Tabatabaei S H and Bagheri H. 2014. Mineralogical and geochemical studies on the Gowd-e-Morad (Ni, Co, As-Cu) mineral deposit, Anarak (central Iran) [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 4779-4791.
- Li X, Su L, Chung S L, Liu Y, Song B and Liu D. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~825 Ma south China mantle plume[J]. *Geochemistry, geophysics, geosystems*, 6: doi: 10.1029/2005GC001006.
- Liu W, Borg S J, Testemale D, Etschmann B, Hazemann J-L and Brugger J. 2011. Speciation and thermodynamic properties for cobalt chloride complexes in hydrothermal fluids at 35-440°C and 600 bar: An in-situ XAS study[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75: 1227-1248.
- Loukola-Ruskeeniemi K and Heino T. 1996. Geochemistry and genesis of the black shale-hosted Ni-Cu-Zn deposit at Talvivaara, Finland[J]. *Econ. Geol.*, 91: 80-110.
- Loukola-Ruskeeniemi K and Lahtinen H. 2013. Multiphase evolution in the black-shale-hosted Ni-Cu-Zn-Co deposit at Talvivaara, Fin-

- land[J]. *Ore Geology Reviews*, 52: 85-99.
- Manheim F T. 1986. Marine cobalt resources[J]. *Science*, 232(4750): 600-608.
- Matzen A K, Baker M B, Beckett J R, Wood B J and Stolper E M. 2016. The effect of liquid composition on the partitioning of Ni between olivine and silicate melt[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(1): 3, <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1319-8>.
- Markl G, Burisch M and Neumann U. 2016. Natural fracking and the genesis of five-element veins[J]. *Mineralium Deposita*, 51: 703-712.
- McGowan R R, Roberts S and Boyce A J. 2006. Origin of the Nchanga copper-cobalt deposits of the Zambian copper belt[J]. *Mineralium Deposita*, 40: 617-638.
- Migdisov A A, Zevin D and Williams-Jones A E. 2011. An experimental study of Cobalt (II) complexation in Cl and H₂S-bearing hydrothermal solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 4065-4079.
- Muchez P and Corbella M. 2012. Factors controlling the precipitation of copper and cobalt minerals in sediment-hosted ore deposits: Advances and restrictions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 118: 38-46.
- Petavratzi E, Gunn G and Kresse C. 2019. Commodity review: Cobalt[R]. British Geological Survey.
- 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]. *Miner Deposits*, 26(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- Selley D, Broughton D, Scott R, Hitzman M, Bull S, Large R, McGoldrick P, Croaker M and Pollington N. 2005. A new look at the geology of the Zambian Copper belt[J]. *Econ. Geol.*, 100: 965-1000.
- 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: 1245-1268.
- Slack J F, Causey J D, Eppinger R G, Gray J E, Johnson C A, Lund K I and Schulz K J. 2010. Co-Cu-Au deposits in metasedimentary rocks—A preliminary report[C]. US Geological Survey Open-File Report 2010-1212, US Geological Survey.
- Slack J F, Kimball B E and Shedd, K B. 2017. Cobalt[A]. In: Schulz K J, DeYoung J H, Seal II R R, and Bradley D C, eds. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, F1-F40, <https://doi.org/10.3133/pp1802F>.
- Smith C G. 2001. Always the bridesmaid, never the bride: Cobalt geology and resources[J]. *Applied Earth Science*, 110(2): 75-80.
- Symons D T A, Kawasaki K, Walther S and Borg G. 2011. Paleomagnetism of the Cu-Zn-Pb-bearing Kupferschiefer black shale (Upper Permian) at Sangerhausen, Germany[J]. *Mineralium Deposita*, 46: 137-152.
- 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).
- Thorne R L, Roberts S and Herrington R. 2012. Climate change and the formation of nickel laterite deposits[J]. *Geology*, 40(4): 331-334.
- Torsvik T H, van der Voo R, Doubrovine P V, Burke K, Steinberger B, Ashwal L D, Tronnes R G, Webb S J and Bull A L. 2014. Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(24): 8735-8740.
- Van Wilderode J, Debruyne D, Torremans K, Elburg M A, Vanhaecke F and Muchez P. 2015. Metal sources for the Nkana and Konkola stratiform Cu-Co deposits (Zambian copper belt): Insights from Sr and Nd isotope ratios[J]. *Ore Geology Reviews*, 67: 127-138.
- Wang H, Feng C Y and Zhang M Y. 2019. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 739-750(in Chinese with English abstract).
- Wang X, Song Y, Zhang H, Liu Y, Pan X and Guo T. 2018. Metallogeny of the Baiyangping lead-zinc polymetallic ore concentration area, northern Lanping basin of Yunnan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1486-1507.
- Wang Y W and Qin K Z. 1997. The extremely basic member of VAMSD deposit series—The De'erni large copper-cobalt deposit of Qinghai Province: Its geological characteristics and genetic type[J]. *Mineral Deposits*, 16(1): 2-11(in Chinese with English abstract).
- Williams P J, Barton M D, Johnson D A, Fontboté L, De Haller A, Mark G, Oliver N H and Marschik R. 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin[J]. *Econ. Geol.*, 100: 371-405.
- Xu L, Lehmann B and Mao J. 2013. Seawater contribution to polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian black shales of South China: Evidence from Mo isotope, PGE, trace element, and REE geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 52: 66-84.
- Zhang H R and Hou Z Q. 2015. Pattern and process of continent-continent collision orogeny: A case study of the Tethys Collisional Orogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(9): 1539-1559(in Chinese with English abstract).
- Zhang H R and Hou Z Q. 2018. Metallogenesis within continental collision zones: Comparisons of modern collisional orogens[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(12): 1737-1760.
- Zhang W B, Ye J H, Chen X F, Li N, He X F, Chen X F and Liu Y F. 2018. Global cobalt resources distribution and exploration potentials[J]. *Resources & Industries*, 20(4): 56-61(in Chinese with English abstract).
- Zhao H, Xie G, Wei K, Ke Y. 2012. Mineral compositions and fluid evolution of the Tonglushan skarn Cu-Fe deposit, SE Hubei, east-central China[J]. *International Geology Review*, 54(7): 737-764.
- Zhao J X, Li G M, Qin K Z, Tang D M. 2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(24): 2484-2500.

Zou F, Xu D, Wang Z, Den T, Hou M and Chen G. 2014. Co-Cu ore deposit in China continent: Geological characteristics, ore deposit-types and dynamic settings[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(S2): 344-345.

附中文参考文献

丰成友,张德全,党兴彦. 2004. 中国钴资源及其开发利用概况[J]. *矿床地质*, 23(1): 93-100.

韩润生,邹海俊,吴鹏,方维萱,胡煜昭. 2010. 楚雄盆地砂岩型铜矿床构造-流体耦合成矿模型[J]. *地质学报*, 84(10):1438-1447.

胡茂德,张洪瑞,贾敬伍,刘于源. 2015. 云南兰坪李子坪铅锌矿床的控矿构造、碳和氧同位素及稀土元素地球化学特征[J]. *矿床地质*, 34(5):1057-1071.

贾敬伍,张洪瑞,胡茂德. 2014. 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(4): 726-746.

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.

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.

王辉,丰成友,张明玉. 2019. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. *矿床地质*, 38(4):739-750.

王玉往,秦克章. 1997. Vamsd矿床系列最基性端员——青海省德尔尼大型铜钴矿床的地质特征和成因类型[J]. *矿床地质*, 16(1): 2-11.

张洪瑞,侯增谦. 2015. 大陆碰撞造山样式与过程:来自特提斯碰撞造山带的实例[J]. *地质学报*, 89(9): 1539-1559.

张洪瑞,侯增谦. 2018. 大陆碰撞带成矿作用: 年轻碰撞造山带对比研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 48(12): 1629-1654.

张伟波,叶锦华,陈秀法,李娜,何学洲,陈喜峰,刘翼飞. 2018. 全球钴矿资源分布与找矿潜力[J]. *资源与产业*, 20(4): 56-61.

赵俊兴,李光明,秦克章,唐冬梅. 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. *科学通报*, 64(24): 2484-2500.

<http://www.kcdz.ac.cn/>