

长江中下游成矿带含稀散金属矿床特征初探*

谢桂青¹, 韩颖霄², 李新昊²

(1 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; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 稀散金属是关键金属的重要部分, 其矿化特点和成矿规律等方面受到矿床学界高度关注。文章总结了全球稀散金属矿化类型和分布规律, 除了镓、镉和铊矿床外, 其他锗、硒、铟、碲和铼 5 种稀散金属普遍伴生于斑岩-矽卡岩铜矿系统。笔者初步地绘制了全球斑岩型和矽卡岩型稀散金属的分布图、长江中下游成矿带含稀散金属矿床的分布图, 指出长江中下游成矿带有 2 种不同类型含稀散金属矿床: 一类呈伴生于斑岩-矽卡岩铜铁金和铅锌矿床, 以多种稀散金属为特征; 另一类呈独立稀散金属矿床; 以前者为主。文章以长江中下游成矿带鄂东南丰山矿田为例, 介绍碲和铊的赋存状态, 初步地建立了矽卡岩铜金碲矿床+远接触带低温金铊碲矿床组合模型。最后提出矽卡岩型稀散金属矿床重点关注的科学问题, 建议加强氧化型含金矽卡岩矿床伴生的稀散金属矿床的成矿机制研究。

关键词 地质学; 稀散金属矿床; 矽卡岩矿床; 赋存状态; 矿床模型
中图分类号: P618.6; P618.7 **文献标志码**: A

A preliminary study of characteristics of dispersed metal-bearing deposits in Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt

XIE GuiQing¹, HAN YingXiao² and LI XinHao²

(1 MNR key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Dispersed metals constitute an important part of critical metals, and have become critical mineral resource internationally. Their mineralization characteristics and metallogenic regularity have aroused much interest among economic geologists. In this paper, the authors summarize the mineralization characteristics and distribution of dispersed metals all over the world. Except gallium, cadmium and thallium, the other five dispersed metals including germanium, selenium, indium, tellurium, and rhenium are genetically associated with porphyry-skarn systems. The authors' study has outlined the distribution of porphyry and skarn dispersed metal deposits in the world as well as in the Middle-Lower Yangtze River Belt. Two different types of dispersed metal deposits in the Middle-Lower Yangtze River Belt were recognized: one consists of dispersed metals as by-products in porphyry-skarn Cu-Fe-Au or Pb-Zn deposits, and the other comprises dispersed metal-only deposits. Abundant telluride minerals are present in the Cu-Au skarn and distal Au-Tl deposits in the Fengshan area in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, and the genetic model of linkage between Cu-Au-Te skarn and distal Au-Tl-Te

* 本文得到国家重点研发计划课题(编号:2016YFC0600206)和国家自然科学基金(编号:4153042)联合资助
第一作者简介 谢桂青,男,1975年生,研究员,主要从事斑岩-矽卡岩矿床模型研究。Email: xieguiqing@cags.ac.cn
收稿日期 2019-06-06;改回日期 2019-07-06。秦思婷编辑。

deposit is proposed. Critical scientific issues on skarn dispersed metal deposits are pointed out and suggestions for strengthening of further studies of the metallogenic mechanism of oxidized gold-bearing skarn deposits with dispersed metal by-products are put forward.

Key words: geology, dispersed metal deposit, skarn deposit, mode of occurrence, mineral deposit model

关键金属(Critical Metals)和关键矿产资源(Critical Minerals)是国际上近年来提出的新概念,是指对战略性新兴产业的发展至关重要的一类金属元素及其矿床的总称(翟明国等,2019;蒋少涌等,2019),其成矿机制等方面已成为国际矿床学研究的热点。2012年第一届国际关键金属研讨会召开,2015年在“Ore Geology Reviews”出版一期专辑(Chakhmouradian et al., 2015)。国际上对这些关键矿产资源的定义和成矿元素种类未形成统一意见,正如涂光炽等(2004)指出“分散元素没有严格的定义,一般指在地壳中丰度很低(多为 10^{-9} 级),而且在岩石中以极为分散为特征的元素,包括镓(Ga)、锗(Ge)、硒(Se)、镉(Cd)、铟(In)、碲(Te)、铼(Re)、铊(Tl)8种元素”。有些学者将分散元素称为“分散金属”,1978年《稀有金属知识》编写组编著出版《分散金属》,1980年在广州召开全国首届分散金属学术会议,中国有色金属工业协会(2014)主编出版《中国分散金属》。有些学者将不包括镉(Cd)在内的7个元素称为“分散元素”(臧树良,2008)。考虑到这些分散元素为金属元素,独立矿物越来越多,主要呈共伴生产于金属矿床,因此,本文在此称它们为“分散金属”,相关的矿床称为“分散金属矿床”。

由于分散金属的重要性,国际上已开展成矿机制和成矿规律等研究工作,已取得了重要的进展。如国内较早开展分散金属矿床的成矿机制研究,以《分散元素地球化学和成矿机制》专著为最重要的代表性成果,确立了分散金属可以形成矿床的理论体系,定义了分散金属矿床的科学内涵(涂光炽等,2004)。国际上分散金属元素行为和相关的矿床的系统研究相对较少,如国际地科联曾在2003~2008年期间设立IGCP项目(Cook et al., 2009),主要研究富碲(Te)和硒(Se)的金矿床的成矿机制,该项目实施期间于2006年在期刊《Mineralogy and Petrology》出版了一期专辑(Ciobanu et al., 2006)。

由于分散金属品位极低,资源稀缺,多数伴生铜铅锌矿床,相比有色和黑色金属矿床来说,国际上分散金属矿化特征和成矿机制的研究相对薄弱,特别是矽卡岩成矿系统中的分散金属矿化特征研究很

少。据最新统计资料表明,尽管中国镓、锗、硒、镉和铟的资源储量在全球第一(中国地质科学院矿产资源研究所,2016),中国已发现多个独立的碲和铊分散金属矿床(涂光炽等,2004)。但是,中国分散金属矿床的成矿类型、成矿规律和矿床模型等方面研究程度相对较低。王瑞江等(2015)介绍8种分散金属的物理化学和地学特征、全球和中国的矿产资源概况。最新正在实施国家重点研发计划项目“分散矿产资源基地深部探测技术示范(2017~2020年)”,以扬子地块西缘的主要成矿系统和典型矿种为主要对象,主要开展镓、锗和铟3种分散金属矿床的成矿机制研究,近期在新矿床类型和成矿新模式取得了新认识,但主要研究低温条件分散金属矿化特征,斑岩-矽卡岩矿床仅涉及到都龙矽卡岩锡锌铜多金属矿床。本文综述全球分散金属矿化类型,编制斑岩-矽卡岩型分散金属矿床的分布图,并以中国矽卡岩矿床理论发源地——长江中下游成矿带为研究区域,利用已有的资料,初步总结了该带含分散金属矿床的区域成矿规律,介绍典型矿床中碲和铊的赋存状态,初步地建立了矿床组合模型;最后提出了需要深化研究的科学问题。

1 全球矿化类型和分布特征

分散元素是维尔纳茨基于1922年提出的,早先认为分散金属很难形成独立矿物,更难形成独立矿床,后来才提出了“分散元素独立矿床”的概念(涂光炽等,2004)。20世纪20~60年代分散金属矿化的研究主要由前苏联矿床学家完成,以俄文发表,很多文献无法获得。Sindeeva(1964)首次以英文出版含碲和硒的矿床的矿物和矿化地质特征的专著,得出14条重要结论,并展望需要进一步深化研究的科学问题,此专著一直被认为是含硒矿床研究的重要成果(Stillings, 2017)。

因为分散金属矿床是关键金属矿产的重要组成部分,近年来受到国际矿床学界的高度关注,总结发表了全球分散金属矿床类型、成矿规律和综合利用等方面成果。如英国地质调查局出版《Critical Met-

als Handbook》(Gunn, 2014),总结了全球镓、锗、铟、铼4种稀散金属矿床的区域成矿规律;美国地质调查局出版《Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply》(Schulz et al., 2017),系统总结全球镓、锗、铟、铼5种稀散金属矿床的区域成矿规律。美国经济地质学会2016年以矿床地质评述形式(Reviews in Economic Geology)出版矿床伴生的关键金属矿床,有4篇论文涉及到稀散金属矿床的成矿机制,如Goldfarb等(2016)总结类卡林型和浅成低温金矿床伴生的铟、铟、碲、铊4种稀散金属矿床特征;Kelley等(2016)总结与碱性岩有关的浅成低温金矿伴生的碲矿床特征;John等(2016)总结斑岩铜矿和钼矿系统伴生的碲、铟和铊矿床特征;Marsh等(2016)总结产于沉积岩中铅锌多金属矿床伴生的镓、锗和铟矿床特征。

到目前为止,在8种稀散金属矿床中,富铟矿床的矿化类型和全球分布规律的研究程度最高。最新编制了全球大型-超大型关键金属矿床的分布图,显示以铟、锗和镓为代表的稀散金属矿床的分布(蒋少涌等,2019)。Schwarz-Schampera等(2002)出版铟的地质、矿物和经济价值方面的专著,总结富铟矿床的成矿机制和区域成矿规律,指出富铟矿化以伴生形式产于火山岩和沉积岩中块状硫化型矿床、斑岩型铜矿床、浅成低温矿床、脉状-网脉状锡矿床和矽卡岩矿床(Schwarz-Schampera, 2014)。2002年专著给出全球富铟矿床的分布图,主要分布于欧洲,中国仅有5个富铟矿床在华南地区(Schwarz-Schampera et al., 2002)。Schwarz-Schampera(2014)给出全球富铟矿床的分布图增加了少量的富铟矿床。Murakami等(2013)研究玻利维亚、中国和日本锡多金属矿床中含铟的闪锌矿的微量元素特征,在全球富铟矿床的分布图标出了富铟矿床产于块状硫化型矿床、锡多金属矿床、脉状-网脉状钨锡矿床和矽卡岩矿床。Werner等(2017)将富铟矿床分为块状硫化物型矿床、浅成低温矿床、矽卡岩矿床、产于沉积岩中铅锌矿、与花岗岩有关的矿床、斑岩型矿床和沉积岩型层控铜矿等类型,指出铅锌和铜矿伴生铟矿化特征不同,一般铅锌矿床的铟品位相对较高。同时,该文献提供全球101个代表性富铟矿床的铟平均品位和铟资源储量,其中最大矿床的铟资源储量高达9120 t(俄罗斯乌拉尔块状硫化物矿床),中国大厂和多龙矽卡岩矿床的铟资源储量分别为8775 t和5124 t,属于资源

储量全球第二和第三的富铟矿床(Werner et al., 2017)。

相对富铟矿床来说,其他稀散金属矿床的全球分布规律的研究文献不多。Sindceva(1964)将富碲和硒的矿床分为岩浆型、火山岩型、热液型和表生4种类型,给出富硒和富碲的矿床全球分布图。Goldfarb(2017)认为富碲的矿床伴生于岩浆型铜镍硫化物矿床、铁氧化铜金型矿床(IOCG)、火山岩块状硫化型矿床、斑岩型矿床、矽卡岩型矿床、浅成低温型矿床、造山型金矿床和卡林型金矿床,给出全球不同类型富碲的矿床分布图,认为中国大水沟独立碲矿床是浅成低温类型。Stillings(2017)认为富硒的矿化伴生于岩浆(热液)型矿床、含硒化物的矿床(脉状矿床、不整合铀矿床、砂岩型铀矿床、浅成低温金银矿床)和沉积型矿床,但是没有给出全球不同类型富硒的矿床分布图。刘家军等(2018)认为硒化物金矿床的类型有与陆相火山岩有关的浅成热液矿床和富含碳质岩系中的卡林型矿床。最新统计资料表明,绝大多数的富碲和硒矿床伴生于斑岩铜矿系统(John et al., 2016),美国西部存在富硒和富碲的浅成低温金矿床的分带现象,与硒和碲的元素地球化学行为密切相关(Saunders et al., 2012)。Millensiferr等(2014)认为富铊的矿化伴生于斑岩矿床、脉状矿床、沉积岩铜矿床和铀矿床,给出全球不同类型富铊的矿床分布图,认为80%以上的铊伴生于斑岩铜钼矿,有10%~15%的铊资源储量来自于沉积岩中层状铜矿床(Marsh et al., 2016)。Höll等(2007)对锗的成矿学进行系统综述,指出富锗的矿化主要伴生于火山岩中块状硫化物矿床、斑岩铜钼金矿床、斑岩锡银矿床、脉状银铅锌矿床、沉积岩中块状硫化物铅锌铜矿床、碳酸盐岩中铅锌银多金属矿床、非硫化物铅锌矿、铁氧化物矿床、煤和铝土矿床,并给出全球不同类型富锗的矿床分布图。Melcher等(2014)对富锗的矿床类型进行简化,提出碳酸盐岩中铅锌矿床、沉积岩和火山岩中块状硫化物矿床、斑岩型矿床、脉状矿床、煤和铝土矿床,给出全球不同类型富锗的矿床分布图。已有资料表明,产于碳酸盐岩中Kipushi型铅锌铜矿床的锗品位最高,锗的产量主要来源于低温铅锌矿床(Shanks et al., 2017)。Marsh等(2016)认为南美地区矽卡岩矿床中锗的含量变化较大。

相比而言,富镓、镉、铊的矿床类型和分布研究程度较低。Foley等(2017)认为富镓的矿化伴生于铝土矿床、沉积岩中铊矿和Kipushi型铅锌铜矿床,以

前两者为主,给出全球不同类型富镓的矿床分布图,在低温闪锌矿中镓含量最高(Marsh et al., 2016)。粉煤灰是锗和镓等分散金属的最重要来源,如煤型锗矿床产量占全球工业用锗的50%以上(Dai et al., 2018)。由于镉和铊是有毒的元素,未见它们的矿床类型和全球分布图的文献,其中铊常与低温温汞锑金矿床伴生,如美国西南部低温卡林型金矿存在红铊矿和铊矿化(Anthony et al., 1990)。另外,在马其顿 Alchar、中国贵州滥木厂和安徽和县香泉发现了独立的铊矿床,并受到高度关注(涂光炽等, 2004; Amthauer et al., 2012; Fan et al., 2014)。20世纪70年代以来,在马其顿 Alchar 大型铊矿区寻找红铊矿晶体,用于太阳中微子探测器,称为红铊矿实验(Lorandite Experiment) (Pavićević, 1994)。

综上所述,国际上对分散金属矿床类型和分布开展了一系列研究工作,分散金属多数呈伴生于铜铅锌和钨锡矿床。由于研究程度不高,矿化类型分布根据铜铅锌和钨锡矿床类型来进行划分,且不同学者给出的矿化类型方案不同。除了镓、镉和铊矿床外,其他锗、硒、铟、碲、铼5种分散金属普遍伴生于斑岩-

矽卡岩铜矿床系统。因此,本文利用最新资料,初步绘制了全球斑岩型和矽卡岩型锗、铟、碲和铼分散金属的分布图(图1),有些矿床是斑岩-矽卡岩型复合矿床,伴生多种分散金属,如美国 Bingham 铜矿伴生铼、碲和铟等分散金属矿化(Millensifer et al., 2014; Schwarz-Schampera, 2014; Goldfarb et al., 2017)。

2 长江中下游成矿带含分散金属的矿床

长江中下游成矿带是中国“矽卡岩理论”的发源地,前人对该成矿带做了大量矿产勘查和科研工作,在控矿构造格架、成岩成矿作用的时代、成矿系列、成矿规律和深部找矿等方面取得重要进展,且深部找矿潜力大(常印佛等, 2017)。该带斑岩-矽卡岩型复合矿床普遍发育,以铜铁金矿床为主体,近年发现和探明多个大、中型钨矿床(周涛发等, 2017),这些矿床以矿集区形式集中分布,铜多金属矿床的地区由东向西依次出现鄂东、九瑞、铜陵和宁镇矿集区(图2, Pan et al., 1999)。根据湖北、江西、安徽和

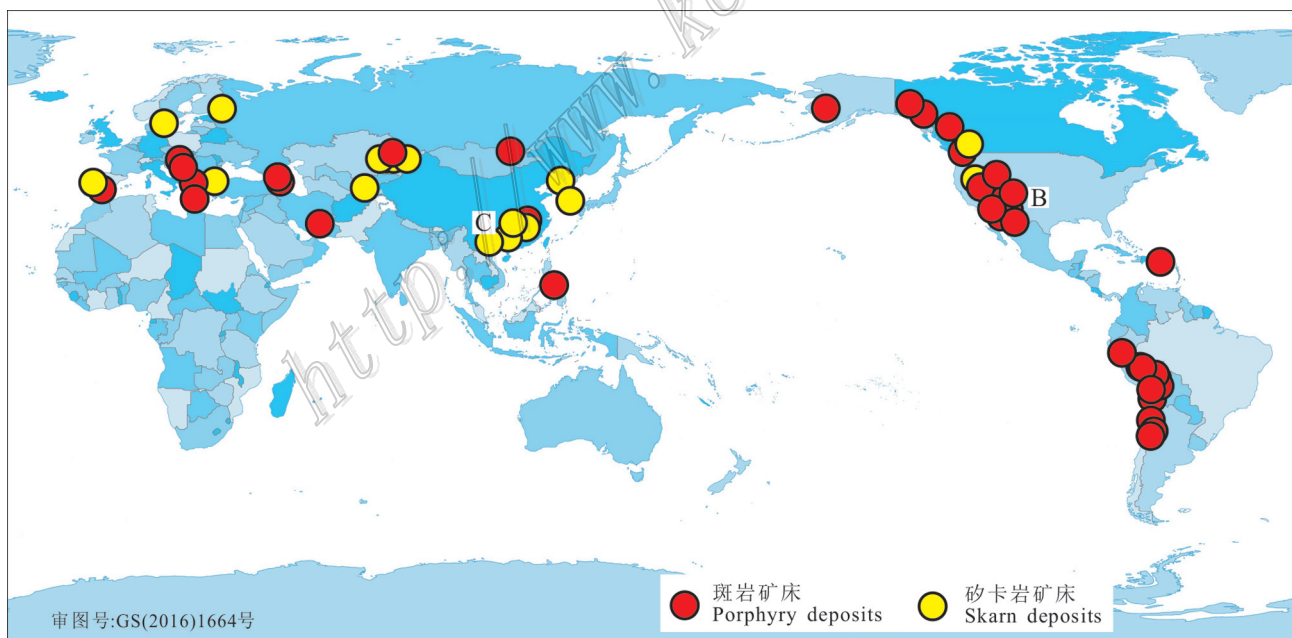


图1 全球斑岩和矽卡岩分散金属矿床分布示意图(据 Melcher et al., 2014; Millensifer et al., 2014; Schwarz-Schampera, 2014; Goldfarb et al., 2017 修改)

B—Bingham 铜矿床; C—城门山铜矿床

Fig. 1 The distribution of porphyry and skarn dispersed metal deposits in the world (modified from Melcher and Buchholz, 2014; Millensifer et al., 2014; Schwarz-Schampera, 2014; Goldfarb et al., 2017)

B—Bingham Cu deposit; C—Chengmenshan Cu deposit

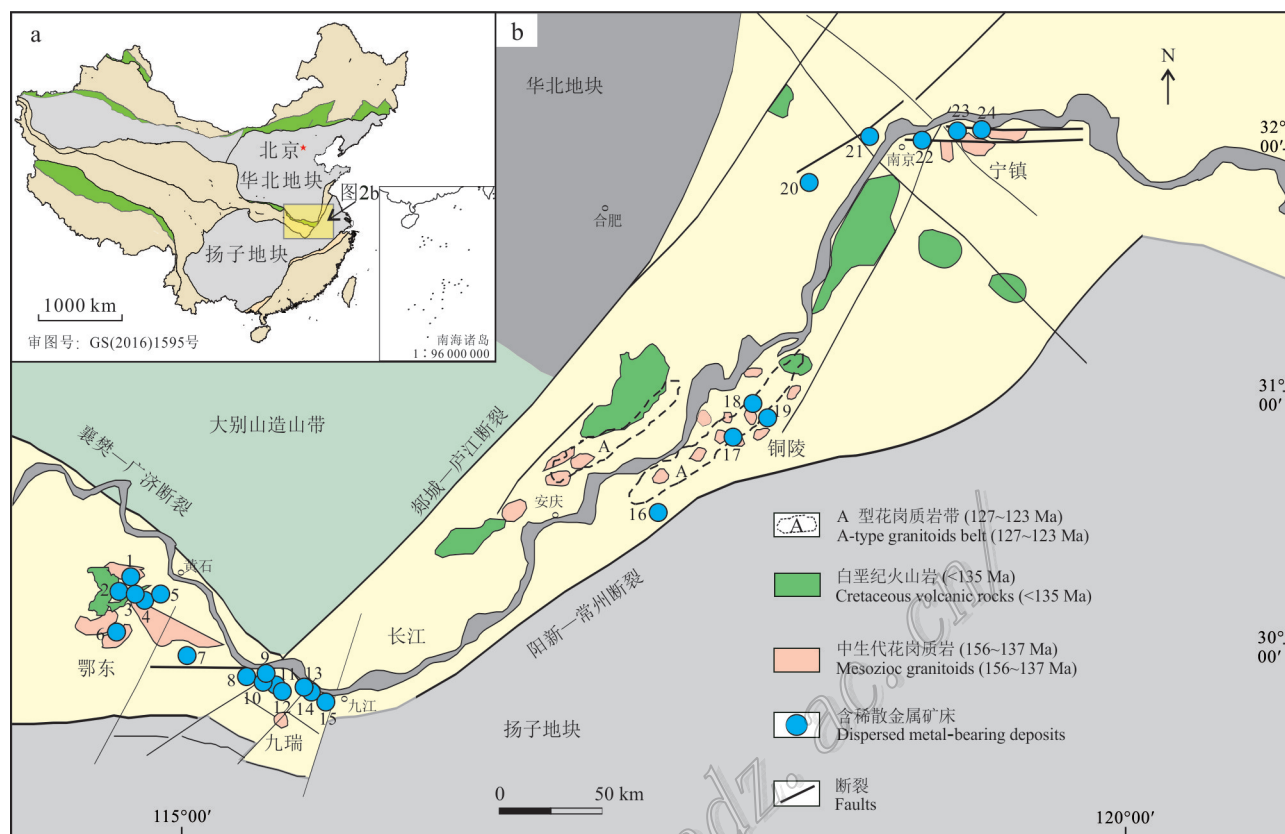


图2 长江中下游含稀散金属的矿床分布图(底图据Mao et al., 2011, 含稀散金属的矿床据湖北、江西、安徽和江苏四省矿床发现史;姚培慧, 1993;张伟等, 2014; Fan et al., 2014; Xie et al., 2019和作者未发表资料修编)

1—程潮;2—张福山;3—鸡冠咀;4—铜绿山;5—金井咀;6—铜山口;7—银山;8—鸡笼山;9—李家湾;10—曹家山;11—封三洞;12—竹林塘;13—吴家(武山外围);14—洋鸡山;15—城门山;16—黄山岭;17—狮子山;18—新桥;19—铁山头;20—香泉;21—万寿山;22—栖霞山;23—安基山;24—老人峰

Fig. 2 Distribution of dispersed metal deposits in Middle-Lower Yangtze River Belt (base map modified after Mao et al., 2011; History of mineral deposit discovery of Hubei, Jiangsu, Anhui and Jiangxi Province; Yao, 1993; Zhang et al., 2014; Fan et al., 2014; Xie et al., 2019)

1—Chengchao; 2—Zhangfushan; 3—Jiguanzui; 4—Tonglvshan; 5—Jinjingzui; 6—Tongshankou; 7—Yinshan; 8—Jilongshan; 9—Lijiawan; 10—Caojiashan; 11—Fengsandong; 12—Zhulintang; 13—Wujiajinkuang; 14—Yangjishan; 15—Chengmenshan; 16—Huangshanling; 17—Shizishan; 18—Xinqiao; 19—Tieshantou; 20—Xiangquan; 21—Wanshoushan; 22—Qixiashan; 23—Anjishan; 24—Laorenfeng

江苏四省矿床发现史的资料(中国矿床发现史湖北卷编委会, 1996; 中国矿床发现史安徽卷编委会, 1996; 中国矿床发现史江苏卷编委会, 1996; 中国矿床发现史江西卷编委会, 1996), 结合已发表的文献, 绘制长江中下游成矿带含稀散金属矿床的分布图(图2)。值得指出的是, 前人对含稀散金属的矿床关注度较低, 有可能部分斑岩-矽卡岩稀散金属矿床未能在此图反映。

由图2可知, 长江中下游成矿带有2种不同类型含稀散金属的矿床: 一类呈伴生于斑岩-矽卡岩铜金和铅锌矿床, 以多种稀散金属为特征, 以鄂东和

九瑞矿集区较集中。已有资料表明, 城门山与斑岩有关的矽卡岩铜矿(图2)伴生有超大型-大型的碲、镓和锗等稀散金属矿化, 碲资源储量5571 t(中国矿床发现史江西卷编委会, 1996), 为超大型规模, 江西省碲资源储量占全国71%(中国地质科学院矿产资源研究所, 2016)。最近, 城门山铜矿外围发现铅锌银矿床, 矿化类型、元素分带和伴生多种稀散金属矿化的特征类似于美国Bingham铜矿床(图1)。部分矽卡岩铁矿床常伴生镓金属, 如鄂东矿集区程潮矽卡岩铁矿(图2)的镓金属量为1482 t(姚培慧等, 1993), 相当于3个大型镓矿床。另一类为独立

稀散金属矿床,如安徽和县香泉铊矿床和江苏南京浦口区(以前江浦县)万寿山锗矿床(图2)。万寿山锗矿床1973年批准锗金属量69 t,规模很小(中国矿床发现史江苏卷编委会,1996)。香泉铊矿床探明铊资源量250 t,相当于中型规模,其矿床类型存在较大争议(Zhou et al., 2005; Fan et al., 2014)。最近笔者在长江中下游鄂东南阳新县竹林塘金矿床(图2),发现部分金矿石 $w(\text{Tl})$ 最高达 2016×10^{-6} ,是中国独立铊矿床工业品位(1000×10^{-6})的2倍以上(Xie et

al., 2017)。

程志中等(2012)绘制中国南方地区碲地球化学图,指出长江中下游成矿带存在安庆-铜陵和黄石-九江2个碲地球化学异常地区,与斑岩-矽卡岩铜多金属矿有关,铜绿山多金属矿石中 $w(\text{Te})$ 达 136×10^{-6} ,达到工业品位。安徽和县香泉铊矿床的研究程度较高,铊以类质同象进入黄铁矿晶格,存在少量细小($0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$)的含铊矿物(Zhou et al., 2005; Fan et al., 2014)。张伟等(2016)通过电子探针和扫描电镜

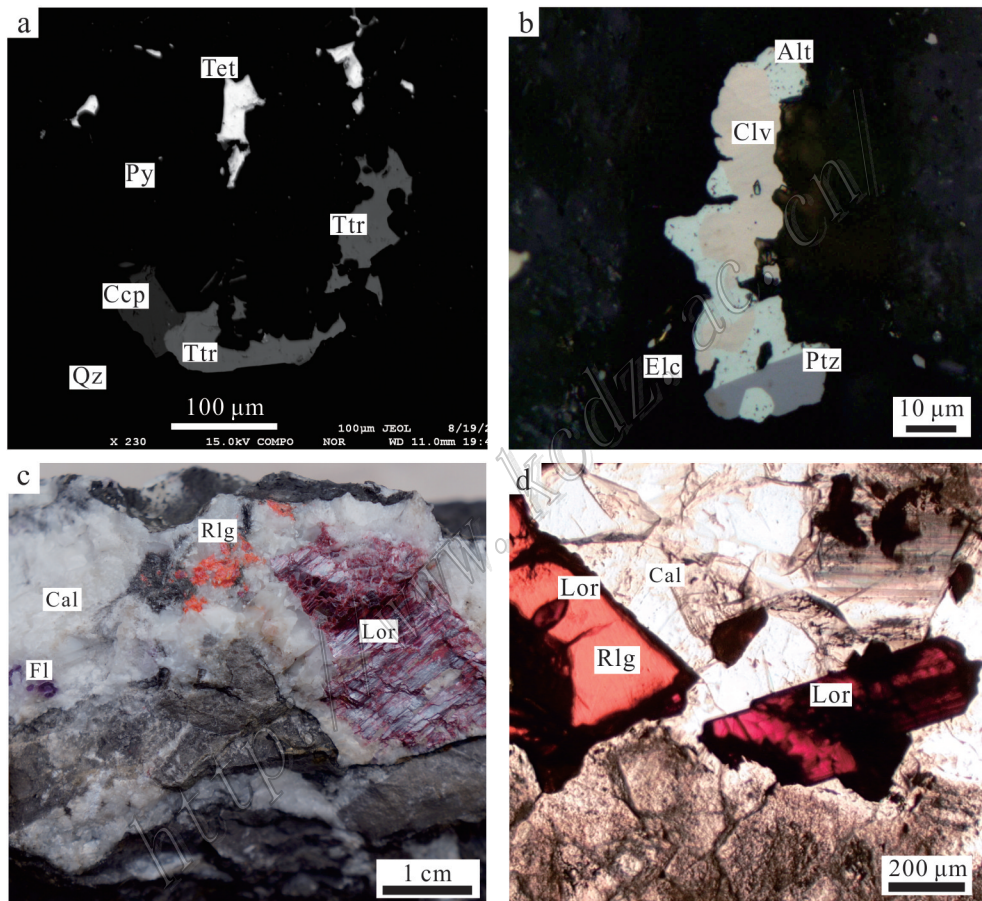


图3 长江中下游丰山矿田曹家山和竹林塘金矿床中稀散矿物的手标本和显微照片

(a, b据 Xie et al., 2019; c据 Xie et al., 2017)

- a. 鸡笼山矽卡岩铜金矿床的辉碲铋矿与黄铜矿、黝铜矿和黄铁矿共生(BSE); b. 曹家山金矿床的碲铅矿、碲金银矿、碲金矿、银金矿与方解石共生(反射光); c. 竹林塘金矿床的红碲矿、雄黄、萤石和方解石矿物组合(手标本); d. 竹林塘金矿床的红碲矿、雄黄和方解石矿物组合(单偏光)
- Tet—辉碲铋矿; Ttr—黝铜矿; Alt—碲铅矿; Clv—碲金银矿; Ptz—碲金矿; Elc—银金矿; Lor—红碲矿; Rlg—雄黄; Fl—萤石; Cal—方解石

Fig. 3 Specimen and photomicrographs of dispersed minerals in the Fengshan area, Middle-Lower Yangtze River Belt

(a, b after Xie et al., 2019; c after Xie et al., 2017)

- a. Tetradymite coexistent with chalcocite, tetrahedrite and pyrite at Jilongshan; b. Altaite, petzite, calaverite and electrum assemblage coexistent with calcite at Caojiashan (reflected light); c. Lorandite, realgar and fluorite assemblage in limestone at Zhulintang (hand specimen); d. Lorandite coexistent with realgar and calcite in limestone at Zhulintang (plainlight)

Tet—Tetradymite; Ttr—Tetrachalcite; Alt—Altaite; Clv—Calaverite; Ptz—Petzite; Elc—Electrum; Lor—Lorandite; Rlg—Realgar; Fl—Fluorite; Cal—Calcite

等手段,发现鸡冠嘴矽卡岩铜金矿床中有硒银矿、硒铅矿、碲铋矿和碲银矿等碲化物和硒化物,探讨金银富集机理。笔者曾对长江中下游鄂东南丰山矿田的碲化物进行了研究,发现鸡冠山矽卡岩铜金矿床(图2)有丰富的碲铋矿物、碲银矿和碲汞矿(韩颖霄等, 2016),石英硫化物脉有辉碲铋矿与黝铜矿、黄铜矿和黄铁矿共生(图3a)。产于灰岩的低温金矿——曹家山和竹林塘金矿床(图2)有丰富的碲金矿、碲金银矿、碲银矿、碲铅矿、碲汞矿和自然碲等碲化物,灰岩中含金方解石脉有碲铅矿、碲金银矿、碲金矿和银金矿的矿物组合(图3b)。另外,在竹林塘金矿床发现粗粒的红碲矿、碲矿化,红碲矿的确定已得到化学成分、XRD和拉曼等证据确认(Xie et al., 2017),红碲矿与雄黄、萤石和方解石等矿物组合产于灰岩中(图3c),手标本和单偏光下红碲矿的特征均明显不同于雄黄(图3d)。长江中下游鄂东南鸡冠山矽卡岩铜金矿存在铜金、金铜、铅锌和金碲元素分带特征,产于灰岩中的低温金矿与矽卡岩铜金矿中的金碲矿体有类似的控矿构造、雄黄+雌黄和碲汞矿(HgTe)矿物组合;低温金矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与矽卡岩铜金矿中的热液硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值类似,分别为 $-4.8\text{‰}\sim+2.6\text{‰}$ 和 $-2.5\text{‰}\sim+6.4\text{‰}$ (Xie et al., 2019)。Xie等(2019)认为丰山矿田产于灰岩中的低温金矿床是远接触带低温金矿床,与矽卡岩铜金矿床属于同一成矿系统,初

步建立了矽卡岩铜金碲矿床+远接触带低温金碲碲矿床组合模型(图4)。这些初步认识需要进一步的深化研究。

3 研究展望

稀散金属矿床是关键矿产资源的重要组成部分,被称为高科技矿产,其矿化特征和成矿规律已成为国际矿床学研究热点和难点。正如前文所述,国际上召开多次关键金属研讨会,美国 and 英国地质调查局及经济地质学会发表了全球稀散金属矿床的研究报告和综述性论文。2018年在阿根廷第15届国际矿床成因大会设立了高科技矿产专题,刊物《Minerals》2019年计划出版“High-Tech Critical Metals: Evaluation and Deposit Models (高科技关键矿产:评价和矿床模型)”专辑。

中国矿床学界的前辈们提出了加强稀散金属矿床的研究,如孟宪民等(1959)提出中国许多有色金属矿床中有工业价值的分散元素,建议加强综合利用研究。涂光炽(1994)发表“分散元素可以形成独立矿床”论文,揭示中国西南低温热液矿床中分散元素的成矿规律(涂光炽等,2004),多次建议加强稀散金属矿床的研究。翟明国等(2019)提出关键矿产资源研究的地质方面主要科学问题包括:元素地球化学性质和赋存状态、重大地质事件和层圈物质循环与成矿物质基础、超常富集的苛刻条件和成矿规律。对于稀散金属矿床来说,建议重点加强稀散金属成矿的专属性、元素共生分异、分配系数、物理化学条件与化学动力学机制研究,同时加强稀散金属矿产资源形成的特殊地质作用的研究(蒋少涌等,2019)。如前文所述,锗、硒、铟、碲、铼5种稀散金属普遍伴生于斑岩-矽卡岩铜矿床,据统计矽卡岩铜矿床伴生碲为中国提供44%碲资源储量(中国地质科学院矿产资源研究所,2016),矽卡岩稀散金属矿床的重点关注的科学问题类似于关键矿产资源,主要包括4个方面:①稀散金属如何赋存于矽卡岩矿床中?这些研究对于稀散金属高效清洁利用和新矿物的发现具有重要的科学意义;②在矽卡岩矿床成矿系统的岩浆-流体出溶和热液阶段,稀散金属具有何种的分配行为、迁移过程和超常富集机制?③由于矽卡岩矿床常表现出明显的元素共/伴生和分带现象,那么稀散金属在不同的成矿尺度下是否同样具有分带性?④碲等有毒稀散金属对生态环境的影响?

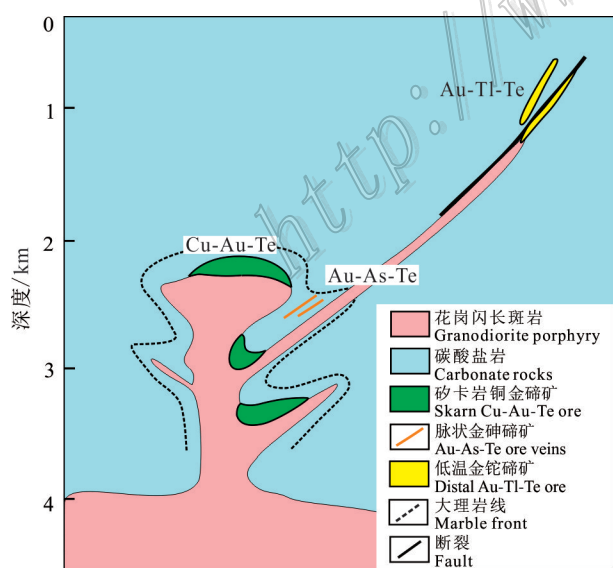


图4 矽卡岩碲铜金矿床+远接触带低温金碲碲矿床组合模型(据Xie et al., 2019修改)

Fig. 4 Genetic model of relationship between Cu-Au-Te skarn and distal Au-Tl-Te deposit (modified after Xie et al., 2019)

前人对于矽卡岩稀散金属矿床的研究程度相对较低。Meinert等(2005)提到还原性矽卡岩金矿床和产于区域变质地块体的年轻矽卡岩金矿存在Au-Bi-Te矿化元素组合,未关注氧化型矽卡岩矿床伴生的碲矿化。长江中下游成矿带含金矽卡岩矿床在含矿岩体性质、矽卡岩矿物组合、Cu/Au和Ag/Au比均不同于北美地区还原性矽卡岩金矿,是氧化型含金矽卡岩矿床(Zhao et al., 1999)。已有的研究表明,不同氧化还原条件,岩浆-热液矿床中含Bi和Te的矿物组合不同,一般碲化物形成于氧化条件(Ciobanu et al., 2010)。国际上对氧化型矽卡岩矿床中碲化物和硒化物的研究文献相对较少(Cepedal et al., 2006; Prendergast et al., 2005)。笔者建议以长江中下游成矿带氧化型含金矽卡岩矿床伴生的稀散金属矿床作为研究对象,开展稀散金属的赋存状态、超常富集机制和成矿规律等方面研究,有望取得创新性成果。

致谢 笔者在野外工作过程中得到了湖北省地质局第一地质大队、中国冶金地质总局中南地质勘查院和相关矿山的大力支持,参加野外工作的还有朱乔乔、李伟、王建、张志远等研究生,成文过程中得益于与毛景文研究员、蒋少涌教授、温汉捷研究员、肖唐付研究员和苏文超研究员等多位老师讨论,审稿专家周涛发教授提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

References

- Amthauer G, Pavićević M K, Jelenković R, Goresy A, Boev B and Lazić P. 2012. State of geoscientific research within the lorandite experiment (lorex) [J]. *Mineralogy and Petrology*, 105(3-4): 157-169.
- Anhui Volume Editorial Committee of the History of Mineral Deposit Discovery in China. 1996. History of mineral deposit discovery in China (Anhui volume)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-173(in Chinese).
- Anthony J W, Bideaux R A, Bladh K W and Nichols M C. 1990. Handbook of mineralogy: Mineralogical society of America[M]. Chantilly, VA 20151-1110, USA. 1-4129.
- Cepedal A, Fuertes-Fuente M, Martín-Izard A, González-Nistal S and Rodríguez-Pevida L. 2006. Tellurides, selenides and Bi-mineral assemblages from the Río Narcea gold belt, Asturias, Spain: Genetic implications in Cu-Au and Au skarns[J]. *Mineralogy and Petrology*, 87(3-4):277-304.
- Chakhmouradian A R, Smith M P and Kynicky J. 2015. From “strategic” tungsten to “green” neodymium: A century of critical metals at a glance[J]. *Ore Geology Reviews*, (64):455-458.
- Chang Y F, Zhou T F and Fan Y. 2017. Review of exploration and geological research progress in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11):3333-3352(in Chinese with English abstract).
- Cheng Z Z, Xie X J, Pan H J and Yang R. 2012. Tellurium geochemistry of South China[J]. *Geology in China*, 39(2):295-301(in Chinese with English abstract).
- China Nonferrous Metals Industry Association. 2014. Dispersed metals of China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1-203(in Chinese).
- Ciobanu C L, Cook, N J and Spry P G. 2006. Preface-special issue: Telluride and selenide minerals in gold deposits-how and why[J]? *Mineralogy and Petrology*, 87(3-4):163-169.
- Ciobanu C L, Birch W D, Cook N J, Pring A and Grundler P V. 2010. Petrogenetic significance of Au-Bi-Te-S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia[J]. *Lithos*, 116(1-2):1-17.
- Cook N J, Ciobanu C L, Spry P G and Voudouris P. 2009. Understanding gold-silver-telluride-selenide mineral deposits[J]. *Episodes*, 32(4): 249-263.
- Dai S F and Finkelman R B. 2018. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects[J]. *International Journal of Coal Geology*, 186:155-164.
- Fan Y, Zhou T, Yuan F and Wu M A. 2014. Geological and geochemical constraints on the genesis of the Xiangquan Tl-only deposit eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 59:97-108.
- Foley N K, Jaskula B W, Kimball B E and Schulte R F. 2017. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. Reston: U. S. Geological Survey. H1-H35.
- Goldfarb R J, Hofstra A H and Simmons S F. 2016. Critical elements in Carlin, epithermal, and orogenic gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 18:217-244.
- Goldfarb R J, Berger B R, George M W and Seal R R II. 2017. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. Reston: U. S. Geological Survey. R1-R14.
- Gunn G. 2014. Critical metals handbook[M]. New York: Wiley. 1-439.
- Han Y X and Xie G Q. 2016. Modes of occurrence of Au, Ag, Te and Bi elements and their constraint on the ore-forming physicochemical conditions of the Jilongshan skarn Au-Cu deposit, southeast Hubei Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(4):655-676(in Chinese with English abstract).
- Höll R, Kling M and Schroll E. 2007. Metallogenesis of germanium—A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 30(3-4): 145-180.
- Hubei Volume Editorial Committee of the History of Mineral Deposit Discovery in China. 1996. History of mineral deposit discovery in China(Hubei volume)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-177(in Chinese).

- Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 2016. Distribution and statistics of rare earth, rare metal and dispersed element mineral resources of China and foreign countries[R]. Beijing: China Geological Survey. 1-125(in Chinese).
- Jiang S Y, Wen H J Xu C, Wang Y, Su H M and Sun W D. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2):112-118(in Chinese with English abstract).
- Jiangsu Volume Editorial Committee of the History of Mineral Deposit Discovery in China. 1996. History of mineral deposit discovery in China (Jiangsu volume)[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-155(in Chinese).
- Jiangxi Volume Editorial Committee of the History of Mineral Deposit Discovery in China. 1996. History of mineral deposit discovery in China (Jiangxi volume) [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-245(in Chinese).
- John D A and Taylor R D. 2016. By-products of porphyry copper and molybdenum deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 18:137-164.
- Kelley K D, Spry P G and Mclemore V T. 2016. Critical elements in alkaline igneous rock-related epithermal gold deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 18: 195-216.
- Liu J J and Zhai D G. 2019. Metallogenic regularity and prospecting direction of telluride and selenide type gold deposit[R]. Chengdu: Shuangqing Conference. 217:32(in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen Y C. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 43(1): 294-314.
- Marsh E, Hitzman M and Leach D L. 2016. Critical elements in sediment-hosted deposits clastic-dominated Zn-Pb-Ag, Mississippi Valley-type Zn-Pb, sedimentary rock-hosted stratiform Cu, and carbonate-hosted polymetallic deposits: A review[J]. Reviews in Economic Geology, 18:307-321.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. Economic Geology, 100th Anniversary Volume : 299-336.
- Melcher F and Buchholz P. G. 2014. Critical metals handbook[M]. New York: Wiley. 312-339.
- Meng X M and Tu G C. 1959. Mineral geology of nonferrous metals[A]. China sciences in recent ten years geological sciences (1949~1959)[C]. Beijing: Science Press. 62-74(in Chinese).
- Millensifer T A, Sinclair D, Jonasson I and Lipmann A. Rhenium. 2014. Critical metals handbook[M]. John Wiley & Sons. 340-360.
- Murakami H and Ishihara S. 2013. Trace elements of indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: A Femto-second LA-ICPMS study[J]. Ore Geology Reviews, 53:223-243.
- Pan Y and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East China: Intrusion-and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 15 (4):177-242.
- Pavićević M K. 1994. The "Lorex" - Project, Solar neutrino detection with the mineral lorandite[J]. Neues Jahrbuchfür Mineralogie—Abhandlungen, 167:205-245.
- Prendergast K, Clarke G W, Pearson N J and Harris K. 2005. Genesis of pyrite-Au-As-Zn-Bi-Te zones associated with Cu-Au skarns: Evidence from the Big Gossan and Wanagon gold deposits, Ertsberg district, Papua, Indonesia[J]. Econ. Geol., 100(5):1021-1050.
- Saunders J A and Brueseke M E. 2012. Volatility of Se and Te during subduction-related distillation and the geochemistry of epithermal ores of the western United States[J]. Econ. Geol., 107(1):165-172.
- Schulz K J, DeYoung J H, Bradley D C and Seal R R. 2017. Critical mineral resources of the United States—An introduction[A]. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[C]. Reston: U. S. Geological Survey: A1-A14.
- Schwarz-Schampera U and Herzig P M. 2002. Indium: Geology, mineralogy, and economics[M]. Berlin, Heidelberg: Springer. 1-257.
- Schwarz-Schampera U. 2014. Indium. Critical metals handbook[M]. Oxford, UK: John Wiley and Sons. 70 - 121.
- Shanks W C P, Kimball B E, Tolcin A C and Guberman D E. 2017. Germanium and indium. In: Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply[R]. Reston: U.S. Geological Survey: I1-I27.
- Sindeeva N D. 1964. Mineralogy and types of deposits of selenium and tellurium[M]. New York: Interscience Publishers. 1-363.
- Stillings L L. 2017. Selenium. In: Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. Reston: U.S. Geological Survey. 1802: Q1-Q55.
- Tu G C. 1994. Dispersed elements can form independent ore deposit—A to be developed and deepened new field of resources[A]. Progress of mineralogy, petrology and geochemistry in China[C]. Lanzhou: Lanzhou University Press. 234(in Chinese).
- Tu G C, Gao Z M, Hu R Z, Zhang Q, Li C Y, Zhao Z H and Zhang B G. 2004. Geochemistry and ore forming mechanism of dispersed elements[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-424(in Chinese).
- Wang R J, Wang D H, Li J K, Sun Y and Li D X. Rare metal, rare-earth metal and dispersed metal resources and development[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-429(in Chinese).
- Werner T T, Mudd G M and Jowitt S M. 2017. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium[J]. Ore Geology Reviews, 86:939-956.
- Xie G Q, Mao J W, Han Y X, Jian W and Han J Y. 2017. Discovery of lorandite TlAs₂ at the distal Au-Tl deposit in a skarn system, Fengshan area, Middle-Lower Yangtze River, eastern China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 91: 1493-1494.

- Xie G Q, Mao J W, Richards J P, Han Y X and Fu B. 2019. Distal Au deposits associated with Cu-Au skarn mineralization in the Fengshan area, eastern China[J]. *Econ. Geol.*, 114(1):127-142.
- Yao P H. 1993. Iron ore log of China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1-662(in Chinese).
- Zang S L. 2008. Chemistry and application of rare-scattered elements[M]. Beijing: China Petrochemical Press. 1-289(in Chinese).
- Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, Jiang S Y, Li W C, Wang R C, Wang D Hong, Qi T, Qin K Z and Wen H J. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2):106-111(in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Wang H Q, Deng X D, Hu H and Li J W. 2016. Mineralogy of the Au-Ag-Bi-Te-Se assemblages in the Jiguanzui Cu-Au skarn deposit, Daye district, southeastern Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 456-470(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Zhang Y N and Bi C S. 1999. Geology of gold-bearing skarn deposits in the Middle and Lower Yangtze River Valley and adjacent regions[J]. *Ore Geology Reviews*, 14(3-4):227-249.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Wu M A, Hou M J, Voicu G, Hu Q H, Zhang Q M and Yue S C. 2005. A preliminary geological and geochemical study of the Xiangquan Tl deposit, eastern China: The world's first Tl-only mine[J]. *Mineralogy and Petrology*, 85:243-251.
- Zhou T F, Fan Y, Wang S W and White N C. 2017. Metallogenic regularities and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze Valley metallogenic belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3353-3372(in Chinese with English abstract).
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 2019. 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*, 33(2):112-118.
- 刘家军, 翟德高. 2019. 碲化物型、硒化物型金矿床成矿规律与找矿方向[C]. 成都: 双清论坛. 217:32.
- 孟宪民, 涂光炽. 1959. 有色金属矿产地质学[A]. 十年来的中国科学—地质学(1949~1959)[C]. 北京: 科学出版社. 1-178.
- 涂光炽. 1994. 分散元素可以形成独立矿床——一个有待开拓深化的新矿产领域[A]. 中国矿物学岩石学地球化学新进展[C]. 兰州: 兰州大学出版社. 234.
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社. 1-424.
- 姚培慧. 1993. 中国铁矿志[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1-662.
- 臧树良. 2008. 稀散元素化学与应用[M]. 北京: 中国石化出版社. 1-289.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 地质出版社现状与问题[J]. *中国科学基金*, 33(2):106-111.
- 张伟, 王宏强, 邓晓东, 胡浩, 李建威. 2016. 鄂东南地区鸡冠嘴铜金矿床 Au-Ag-Bi-Te-Se 矿物学研究及金银富集机理[J]. *岩石学报*, 32(2): 456-470.
- 中国地质科学院矿产资源研究所. 2016. 国内外三稀资源图集[R]. 北京: 中国地质调查局. 1-125.
- 中国矿床发现史安徽卷编委会. 1996. 中国矿床发现史(安徽卷)[M]. 北京: 地质出版社. 1-173.
- 中国矿床发现史湖北卷编委会. 1996. 中国矿床发现史(湖北卷)[M]. 北京: 地质出版社. 1-177.
- 中国矿床发现史江苏卷编委会. 1996. 中国矿床发现史(江苏卷)[M]. 北京: 地质出版社. 1-155.
- 中国矿床发现史江西卷编委会. 1996. 中国矿床发现史(江西卷)[M]. 北京: 地质出版社. 1-245.
- 中国有色金属工业协会专家委员会组织编写. 2014. 中国稀散金属[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1-203.
- 周涛发, 范裕, 王世伟, White N C. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. *岩石学报*, 33(11): 3353-3372.

附中文参考文献

- 常印佛, 周涛发, 范裕. 2017. 长江中下游成矿带矿产勘查-科研工作回顾和展望[J]. *岩石学报*, 33(11): 3333-3352.
- 程志中, 谢学锦, 潘含江, 杨榕. 2012. 中国南方地区碲地球化学特征[J]. *中国地质*, 39(2):295-301.
- 韩颖霄, 谢桂青. 2016. 鄂东南鸡冠山矽卡岩型金铜矿床金、银、碲、铋的赋存状态及其对成矿条件的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 35