

DOI:10.13745/j.esf.sf.2020.3.15

扬子克拉通前寒武纪基底对中生代大面积低温成矿的制约

胡瑞忠^{1,2}, 陈伟¹, 毕献武¹, 付山岭¹, 尹润生¹, 肖加飞¹

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

HU Ruizhong^{1,2}, CHEN Wei¹, BI Xianwu¹, FU Shanling¹, YIN Runsheng¹, XIAO Jiafei¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

HU Ruizhong, CHEN Wei, BI Xianwu, et al. Control of the Precambrian basement on the formation of the Mesozoic large-scale low-temperature mineralization in the Yangtze Craton. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 137-150

Abstract: Large-scale low-temperature mineralization occurs throughout the Yangtze Craton and central-western USA, with the former containing more types of low-temperature deposit. In addition to the MVT Pb-Zn and Carlin-type Au-(As)-(Sb)-(Hg)-(Tl) deposits common to the central-western USA, the Yangtze Craton also contains numerous vein-type Sb, Hg, and As deposits, making it ideal for exploring low-temperature mineralization formation models. Numerous studies have been conducted on the Mesozoic large-scale low-temperature mineralization in the Yangtze Craton, and the deposit geology, ore components, ore-forming fluids, timing, and geodynamic setting of mineralization are generally well understood. This study revealed that different deposit types (e.g., Pb-Zn, Au-Hg-Sb-As, and Au-Sb) in the Yangtze Craton are not spatially associated but distributed in specific domains with distinct Precambrian basement rocks. There are some indications that the basement rocks are variably enriched with various metals. The metals are remobilized and transported by deep-circulating fluids responsible for late large-scale low-temperature mineralization. The specific distributions of different deposit types are likely mainly controlled by the spatial heterogeneity of ore-forming elements in the basement rocks of the Yangtze Craton. However, this interpretation requires further confirmation, as tracing the metal sources of low-temperature mineralization is highly complex.

Keywords: Yangtze Craton; Precambrian basement; Mesozoic large-scale low-temperature mineralization; metal sources

摘要: 大面积低温成矿主要见于扬子克拉通和美国中西部,且扬子克拉通比美国中西部具有更多的矿床类型,在全球极具特色,是建立大面积低温成矿理论的理想区域。前人对扬子克拉通中生代大面积低温矿作用进行了较系统的研究,在矿床地质特征、矿床物质组成、成矿流体特征、成矿时代和成矿动力学背景等方面,已取得重要进展。进一步的研究表明,扬子低温成矿域不同矿种的矿床组合(Pb-Zn、Au-Hg-Sb-As、Au-Sb等)在地理位置上是分区产出的,而这种不同矿床组合的分区对应着不同类型的前寒武纪基底。初步证据显示,扬子克拉通前寒武纪基底(含寒武纪)富含低温成矿元素,深循环流体浸取基底岩石中的成矿元素发生了大面积低温成矿,而基底岩石成矿元素组成的空间不均一分布则控制了不同区域矿床组合的差异。应指出的是,由于成矿金属元素来源示踪的复杂性,大面积低温成矿的物质基础尚需更系统的研究进一步证实。

收稿日期:2020-01-05;修回日期:2020-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41830432, U1812402);国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB440900)

作者简介:胡瑞忠(1958—),男,研究员,主要从事矿床学和矿床地球化学研究。E-mail:huruizhong@vip.gyig.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2020,27(2)

关键词: 扬子克拉通; 前寒武纪基底; 中生代大面积低温成矿; 成矿金属元素来源

中图分类号: P534.1; P611 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2020)02-0137-14

0 引言

中生代时期, 在扬子克拉通西南部川、滇、黔、桂、湘等省区面积约 50 万 km² 的广大范围内, 发生了大规模低温成矿作用, 形成了大面积分布的金、锑、汞、砷、铅、锌等低温热液矿床, 且其中不少为大型-超大型矿床, 构成华南低温成矿域^[1-3]。这种低温热液矿床大面积密集成群产出的区域, 在世界上主要见于扬子克拉通和美国中西部^[3-4], 在全球呈现出空间分布上的高度不均一性。对成矿作用时空不均一分布的研究, 一直受到国内外学者高度关注^[5-11]。然而, 特定元素组合为什么在某些区域而不是在其他区域发生大规模成矿? 对此虽已取得一些重要规律性认识, 但始终还是困扰地质学家的重要问题。

对扬子克拉通中生代的大面积低温矿, 近 20 年来研究人员进行了较系统深入的研究, 在矿床地质特征、矿床物质组成、成矿流体特征、成矿时代和成矿动力学背景等方面, 已取得重要研究进展^[1-4, 12-45], 大面积低温成矿理论的建立已处在突破的边缘。但是, 由于成矿金属元素来源研究的复杂性和受传统示踪手段的限制, 关于大面积低温成矿的物质基础, 目前尚未得到确认, 基于现有认知水平还较难从本质上回答为什么是在该区而不是其他区域发生金、锑、汞、砷、铅、锌等元素组合的大面积低温成矿这个重要问题, 在一定程度上制约了大面积低温成矿理论的系统建立。

一个重要事实是, 华南低温成矿域不同矿种的矿床组合 (Pb-Zn、Au-Hg-Sb-As、Au-Sb) 在地理位置上是分区产出的, 而这种不同矿床组合的分区, 对应着不同类型的前寒武纪基底 (图 1)^[46-47]。已有少

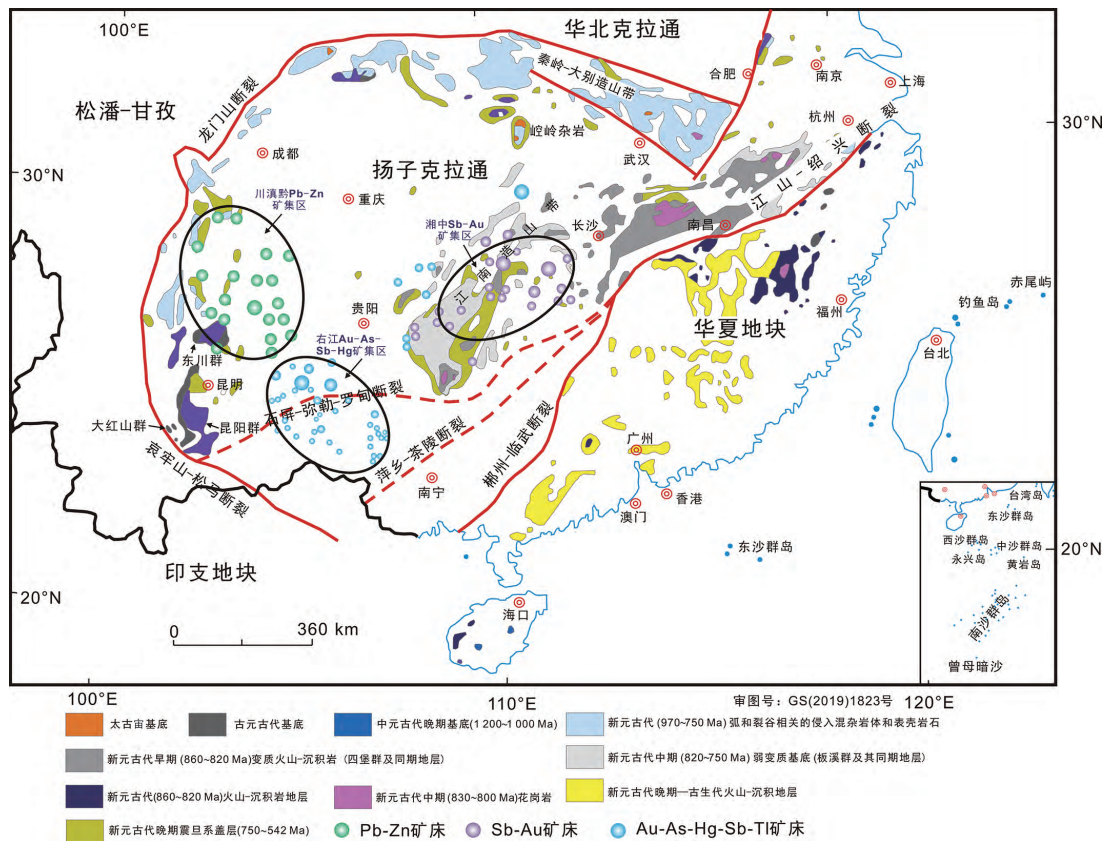


图 1 扬子克拉通前寒武纪基底和中生代低温矿床分布略图 (据文献^[46-47]修改)

Fig. 1 Simplified geological map showing the distributions of Precambrian basement rocks and Mesozoic low-temperature deposits in the Yangtze Craton. Modified form ^[46-47].

量线索显示,前寒武纪基底(含寒武纪)可能富含低温成矿元素,矿床中的成矿元素很可能主要来自基底岩石。在其他各种有利成矿因素的配合下,是否前寒武纪基底(含寒武纪)在宏观上控制了区域上的大面积低温成矿,而基底组成的空间不均一性控制了不同矿床组合的地理分区?显而易见,这些问题的解决或认识的深化,对建立大面积低温成矿理论,促进区域成矿学的发展,有效指导找矿勘查,具有重要意义。

1 全球成矿作用的不均一性

1.1 矿床在全球具有不均一分布的特点

已有研究表明,成矿作用常表现出很强的区域不均一分布特点。矿床的种类、时空分布与成岩作用和大地构造格局等因素密切相关^[7,48]。矿床学家很早就认识到,某些矿床只产于特定的大地构造背景,不同的大地构造环境可形成不同的岩石组合及相伴的矿床类型^[49-56]。例如,大陆碰撞造山带或洋壳俯冲带有利于斑岩型矿床(如 Cu、Mo、Au 等)和造山型金矿床等的形成;洋中脊离散边界主要形成块状硫化物矿床等;在大陆裂谷或地幔柱环境常产出一系列钒钛磁铁矿矿床、Cu-Ni-PGE 硫化物矿床及与火成碳酸岩或碱性岩相关的稀土矿床等。此外,即使形成于类似构造环境的同类矿床,在不同构造单元因受某些特定因素的影响,在金属品位、储量及伴生元素组合上也千差万别,从而一定程度上导致了全球矿产资源在区域上的不均一分布:(1)全球的稀土资源半数以上赋存于火成碳酸岩-碱性岩杂岩体中^[10],且大部分集中于少数国家的少数矿床,如中国白云鄂博、美国 Mountain pass 和中国牦牛坪矿床很长一段时间占据世界稀土总储量的 50% 以上^[10];(2)智利中部已探明的斑岩铜矿储量占世界铜储量的 30% 以上,南非兰德盆地已探明的黄金储量约占世界黄金储量的 40%,我国华南地区已探明的钨矿储量占世界钨储量的 60% 以上^[57];(3)目前世界上发现的 IOCG 矿床仅澳大利亚 Olympic Dam 矿床“一枝独秀”,占有全球第一的 U、第四的 Cu 及第五的 Au 储量^[58-60]。

矿产资源空间不均一分布的格局,究竟受制于何种因素?它们虽然与矿床形成后保存条件的差异有关,但就其更本质的影响因素而言,很可能主要与地壳成熟度、陆壳增生、壳幔过程、地幔柱活动、克拉通和造

山带演化等因素有着必然的联系^[5,8,11,33,53,55-56,61-65]。然而,矿床学家虽经多年研究取得了一些重要认识,但对于这种内在联系的整体规律和控制因素还亟待深入揭示。

1.2 前寒武纪基底岩石对成矿具有重要控制作用

尽管成矿作用的空间不均一性受控于众多内外因素,矿床学家已认识到具有古老结晶基底的克拉通,是大规模成矿的重要构造环境或重要控矿因素^[66-67]。据统计,古老克拉通上产出的矿床常比一些年轻地体中多^[9],特别是克拉通边缘,产出了众多世界级的超大型矿床^[2,6,13,68]。中国境内就有不少例子,包括扬子克拉通西缘世界第三大的牦牛坪稀土矿、华北克拉通北缘世界最大的白云鄂博稀土矿^[69]和 华北克拉通南缘钼矿的超常富集^[16,53,70]。其实,国内外不少学者很早就注意到,古老克拉通内前寒武纪基底的性质对显生宙矿床的类型、数量和分布有着明显的控制,主要表现在一些热液矿床的空间分带性和成矿元素组合上对前寒武纪基底有明显的继承性^[9,71-72],包括基底含矿建造提供成矿物质、基底特殊构造带提供有利的热液通道和扩容空间等等。例如,Lehuray 等^[73]证实,中爱尔兰 Pb-Zn 成矿省中不同矿床在成矿元素组合和 Pb 来源等方面的差别,与矿床所处的地理位置和不同的基底岩石类型有密切关系,成矿省西北部的基底岩石为 3.0~1.7 Ga Lewisian 片麻岩,其产出的 Pb-Zn 矿床具有相对低的放射成因 Pb,而东南部为新元古代岩石,产出了具明显高放射成因 Pb 的矿床。澳大利亚 Victorian 金成矿省是通过流体从基底岩石中获取金,然后运移到显生宙地层的断裂构造中形成的(图 2)^[74]。Kisvarsanyi^[71]的研究发现,美国密苏里州东南部的 MVT 铅锌矿的成矿物质来自前寒武纪基底,Vikre 等^[75]和 Field 等^[76]通过对 S、Pb 同位素和成矿年代学等方面的研究也证实,美国中部赋存在晚古生代地层中的 MVT 铅锌矿床和贵金属矿床的成矿物质主要是由前寒武系基底地层提供的。同样,华北南缘中生代的斑岩钼矿床均缺少 Cu,与国外岩浆弧(岛弧和陆缘弧)环境 Cu 与 Mo 矿床往往相伴产出^[77]的特征差异显著。不少证据显示,这种差异极可能与基底岩石组成有关,华北南缘的基底对矿床中金属 Mo 有重要贡献^[78-79]。除此之外,世界上其他克拉通也因为古老基底岩石的不同而产出不同的矿床类型,例如南非的 Kaapvaal 克拉通富集 Au 和 PGE 矿床,津巴布韦克拉通和 Yilgarn

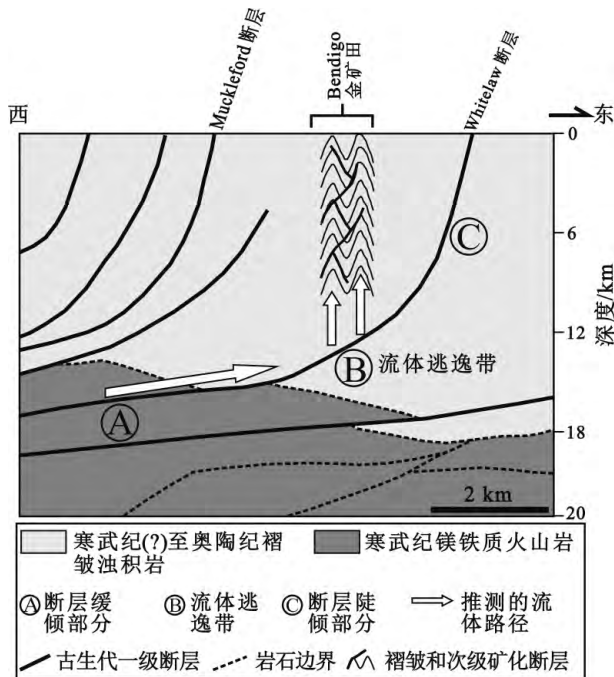


图2 澳大利亚 Victorian 金成矿省的物源受基底岩石控制 (据文献[74])

Fig. 2 A cartoon showing the basement controls of metal sources in the Victorian gold metallogenic province, Australia. Adapted from [74].

克拉通富集 Au 和 W, Sao Francisco 克拉通富集 Au、Cu、Pb 和 Zn 等,而 Amazon 克拉通富集 Au 和 Sn^[9,80-81]。

综上所述,克拉通前寒武纪基底的性质对矿床形成的重要性越来越受到矿床学家们的重视;从克拉通地壳组成、成熟度或前寒武纪基底演化的角度来研究成矿作用及战略选区,已逐渐成为当代地球科学与矿床勘查的研究热点与主要方向^[82]。毫无疑问,通过揭示前寒武纪基底与成矿作用的内在联系及其控制因素,可为某些特定矿床成矿理论的建立和找矿预测提供客观的科学依据。

2 扬子克拉通中生代成矿作用在全球的特殊性

华南陆块由扬子克拉通和华夏地块沿江绍断裂带(东起绍兴经长沙南部延伸至南宁东部^[83])在新元古代约 830 Ma 碰撞拼贴而形成^[84]。三叠纪时期,由于印支运动的结果,华南陆块分别通过北面的秦岭—大别造山带、西南面的松马断裂带和西北缘的龙门山断裂带,而与华北克拉通、印支地块和松潘甘孜地体相连接^[85-88]。

与华夏地块和中国或世界其他克拉通相比,扬子克拉通在前寒武纪基底岩石及演化、显生宙构造演变等特征上存在明显差异^[46]。就显生宙而言,华夏地块和扬子克拉通的重大差别主要在于,中生代时期主要在华夏陆块一侧发生了强烈的花岗岩浆活动,形成了面积高达上百万 km² 的大花岗岩省^[85-90],但扬子克拉通的花岗岩浆活动微弱^[12-13,20-21];与此相对应的是,在华夏地块伴随发生了与花岗岩浆活动有关的 W、Sn 多金属的大规模高温成矿,而扬子克拉通西南部主要在沉积岩地层中则发生了 Au、Hg、Sb、As、Pb、Zn 等的大面积低温成矿^[3,32-33]。显而易见,花岗岩浆活动上的差异自然是导致上述两个单元中生代大规模成矿迥异的重要原因之一,但不是全部。因为世界上岩浆活动微弱的地质单元很多,但是发生了大面积低温成矿的区域则很少。这表明扬子克拉通中生代能大面积低温成矿的主控因素并不仅限于此。

2.1 扬子克拉通不同区域的基底组成和演化

扬子克拉通由前寒武纪基底和显生宙盖层组成。盖层主要是寒武纪到三叠纪的海相碳酸盐岩夹碎屑岩和泥质岩,以及侏罗纪到第四纪的陆相沉积岩^[91]。其中,寒武系黑色岩系发育^[92];二叠纪末期的峨眉山玄武岩在扬子克拉通西半部广泛分布^[93-94]。自古生代以来,该区长期处于较稳定状态。相对于华夏地块,扬子克拉通古生代以来的花岗岩浆活动微弱^[3,47]。

扬子克拉通的前寒武纪基底由太古宙到新元古代的岩石组成(图1、图3),具有以下特征^[46]。(1)太古宙到古元古代的结晶基底只零星出露在克拉通的北部和西部。北部以崆岭杂岩为代表,主要由一套太古宙(3.3~2.9 Ga)TTG 片麻岩、古元古代孔兹岩系和少量角闪岩类包体组成;西部以出露在滇中和川南的古元古代大红山群、东川群和河口群为代表,主要由一套绿片岩—角闪岩相变质火山—沉积岩组成。(2)中元古代晚期到新元古代早期褶皱带可进一步划分为东南缘的江南带和西缘的攀西带。江南带主要由新元古代早期火山—沉积变质岩(四堡群及同时代地层单元)组成,其中侵入有新元古代中期过铝质花岗岩,其上被新元古代中期弱变质地层(板溪群及同时代地层单元)和新元古代晚期未变质地层(震旦系)不整合覆盖;攀西带则由中元古代晚期到新元古代早期火山—沉积变质岩和新元古代侵入杂岩组成,前者包括中元古代晚期昆阳群、

年代地层	扬子克拉通西南缘及北缘					扬子克拉通东南缘						
	云南省中部、东部	四川省西部	陕西省南部	湖北省西部	安徽省中部	江苏省南部	贵州省东北部	广西省北部	湖南省中部	江西省西北部	江西省东北部 浙江省西部	安徽省南部
新元古	灯影组 陡山沱组	灯影组 观音崖组	灯影组 陡山沱组	灯影组 陡山沱组	灯影组 陡山沱组	灯影组 陡山沱组	留茶坡组 陡山沱组	老堡组 陡山沱组	留茶坡组 金家洞组	灯影组 陡山沱组		皮园村组 蓝田组
	南沱组 牛头山组	列古六组	南沱组 大塘坡组 古城组		苏家湾组	南沱组	南沱组 大塘坡组 铁丝坳组	南沱组 富禄组	南沱组 大塘坡组 富禄组	南沱组	雷公坞组 洋安组 下淮埠组	雷公坞组
	澄江组	开建桥组 苏雄组	莲沱组		周岗组	莲沱组	两界河组	长安组	长安组	铜门组	志棠组	休宁组
	柳坝塘群	北东陡岩	马槽园群	神农架群	张八岭群 肥东群	惠南板岩 金山群 埠城群	下江群	丹州群	板溪群	落可峡群	河上镇群	历口群
中元古界	昆阳群	盐边群 会理群	西乡群 火地垭群	神农架群	张八岭群 肥东群	惠南板岩 金山群 埠城群	梵净山群	四堡群	冷家溪群	双桥山群	双溪坞群	溪口群
古元古界	大红山群 /东川群	河口群	后河杂岩	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断
太古宇	沉积间断	沉积间断	崆岭杂岩	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断	沉积间断

图3 扬子克拉通不同区域前寒武纪地层层序表
(据文献[46]修改)

Fig. 3 Stratigraphic correlations of Precambrian strata in different domains of the Yangtze Craton. Modified from [46].

会理群和苴林群及新元古代延边群和西乡群等(图3)^[46],后者包括一系列花岗岩及铁镁质-超铁镁质侵入岩等^[95],这些岩浆岩的成因和构造背景长期存在争议,被认为与洋壳俯冲作用^[95]、地幔柱作用^[96]或裂谷作用^[97]有关。

由此可见,扬子克拉通的前寒武纪基底在其北部、西部和东南部有重大差别:(1)太古宙岩石仅出露在北部;(2)西部主要由古元古代结晶基底、中元古代到新元古代早期火山-沉积变质岩和震旦系地层组成;(3)东南部主要由新元古代早期火山-沉积变质岩、新元古代中期弱变质岩和震旦系地层组成。相对于西部,东南部缺古元古代结晶基底和中元古代变质岩,但是存在广泛分布(而在西部未见)的新元古代中期弱变质地层(板溪群等)。基底岩石这种区域上的差别,分别与扬子克拉通中生代大面积低温成矿的区域差异性分布相对应,即西部主要发生Pb、Zn大规模成矿,东南部则主要发生Au-Hg-Sb-As的大规模成矿。

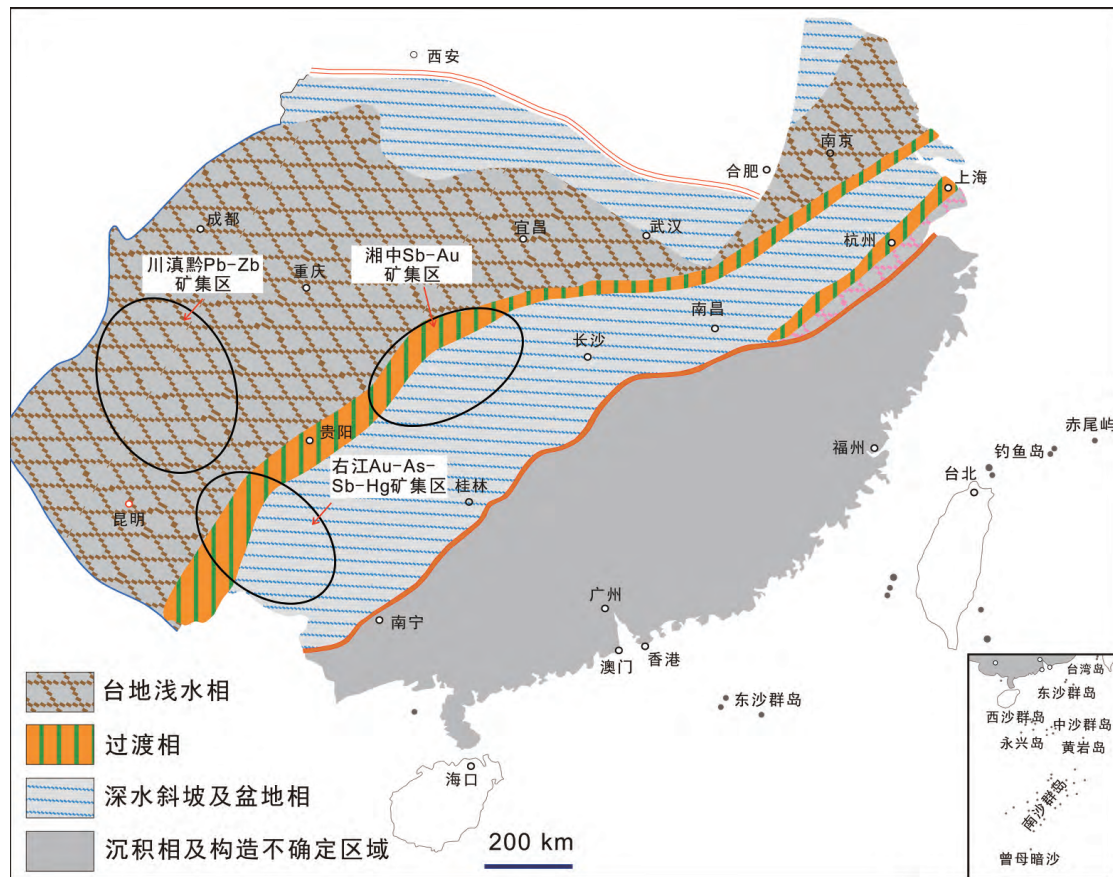
此外,元古宙之后的下寒武统黑色页岩主要呈北东向(图4^[92]中的过渡相)分布于扬子克拉通的东南部,它们的形成与全球寒武纪早期地球大陆格局、表面环境和生物组成等方面发生重大改变密切相关,通常高度富集Au、Hg、Sb、As等成矿元素^[92]。右江盆地Au-Hg-Sb-As矿集区和湘中盆地Sb-Au矿集区均有该套黑色页岩的分布,而在川滇黔接壤

的Pb-Zn矿集区少见。

2.2 扬子克拉通中生代低温成矿作用在全球的特殊性

低温成矿域是指低温热液矿床大面积密集成群产出的区域^[3-4]。与国际同步,涂光焱^[12]采用200℃作为低温的上线,但他同时强调温度区间的划分既然是人为的,就不可能截然断开,中低温、高中温之间都存在过渡,应该把低温矿床定义为主成矿温度多在200℃以下更合适些。虽然低温矿床在世界各地都有分布,但低温成矿域在世界上的分布则较局限,世界上目前主要见于中国华南及美国中西部两个区域^[3-4]。在华南扬子克拉通和华夏地块交接部位扬子克拉通一侧的川、滇、黔、桂、湘等省区面积约50万km²的广大范围内,卡林型金矿和锑、汞、砷、铅、锌等低温矿床广泛发育,且不少为大型-超大型矿床^[3](图1)^[46-47]。该区锑矿储量占全球锑矿总储量的50%以上,金矿储量约占全国金矿总储量的10%,汞矿储量约占全国汞矿总储量的80%,同时还是我国铅锌矿的主要产区之一,显示大规模低温成矿的特征,构成华南低温成矿域^[3]。在美国中西部,广泛发育的MVT型铅锌矿床、卡林型金矿床等低温矿床,构成了美国的主要矿产资源基地之一^[8,98-101]。因此,究竟什么条件下才能形成低温成矿域,即使就全球而言都是很具特色的重要科学问题。

中国华南和美国中西部的两个低温成矿域,在



审图号: GS(2019)1823号

图4 扬子克拉通早寒武世岩相古地理、黑色页岩(过渡相)及中生代低温矿床分布略图

(底图据文献[92])

Fig. 4 Simplified litho-paleogeographic map of the Early Cambrian in the Yangtze Craton, and the distributions of black shales and Mesozoic low-temperature deposits. Modified from [92].

成矿作用和矿床组合特点上并不完全相同,甚至存在重大差别。例如,美国中西部主要是卡林型金矿^[98-101]和MVT型铅锌矿大规模成矿^[8],而扬子克拉通除卡林型金矿和MVT型铅锌矿大规模成矿外,还产出大量大型-超大型锑、汞、砷矿床^[3],其中的锡矿山锑矿是全球最大的超大型锑矿床,探明的锑储量曾占据世界总储量的半壁江山^[26]。因此,针对什么条件下才能形成具有多种矿床组合的低温成矿域这一问题,华南低温成矿域是研究大面积低温成矿、建立和发展大面积低温成矿理论的理想场所。

近20年来,在一些项目包括近年实施的国家“973”项目“华南大规模低温成矿作用”(2014—2018年)的支持下,国内外众多学者对该低温成矿域的矿床地质特征、矿床物质组成、成矿流体特征、成矿时代、元素-同位素地球化学和成矿动力学背景等方

面进行了较深入系统的研究,取得了重要研究进展。Hu等^[3]较系统地总结和提炼了以往的研究工作,主要认识包括以下几方面。(1)该区的前寒武纪基底主要为元古宙变质岩建造,盖层为显生宙碳酸盐岩-细碎屑岩建造,其中东南部寒武系黑色岩系发育,而西半部二叠纪末期的峨眉山玄武岩广泛分布;自古生代以来,长期处于较稳定状态,相对于华夏地块,扬子克拉通的花岗岩浆活动微弱。(2)该区的低温矿床主要集中分布在3个矿集区,分别是川滇黔接壤区的Pb-Zn矿集区、右江盆地Au-Sb-As-Hg矿集区、湘中盆地Sb-Au矿集区(图1)^[46-47]。(3)矿体主要呈脉状、透镜状、似层状、不规则状产出,明显受穿层断裂、层间破碎带、不整合面和岩溶构造控制,属于后生矿床(图5)^[3]。(4)虽然从前寒武到三叠系的地层中均有低温矿床产出,但不同矿种对地层时代或岩性有一定的选择性。卡林型金矿主要赋存在三叠

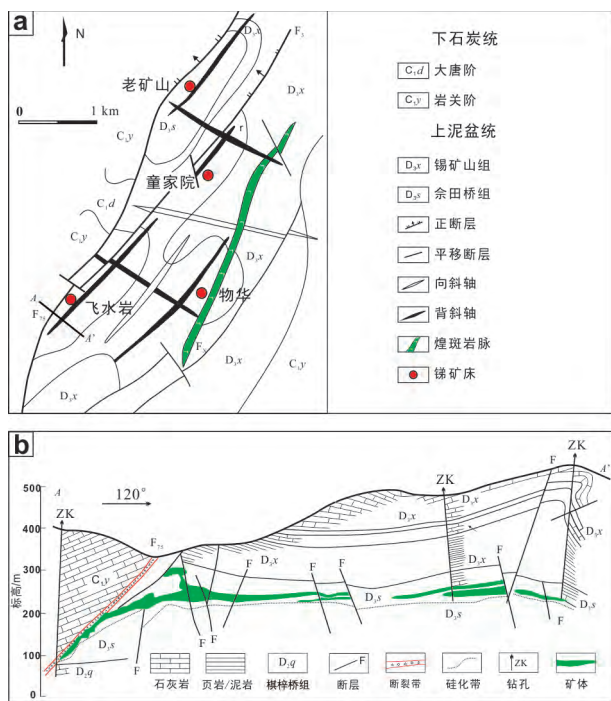


图 5 锡矿山超大型锑矿产在泥盆系地层层间破碎带中 (据文献[3])

Fig. 5 Geological map and cross-section of the Xikuangshan giant Sb deposit, showing that the ore bodies are located in interlayer fracture zones. Adapted from [3].

系泥质灰岩和钙质碎屑岩中; 锑矿主要赋存在泥盆系碳酸盐岩和钙质碎屑岩中; 汞矿主要赋存在寒武系地层中; 铅锌矿主要赋存在震旦系、石炭系和二叠系白云岩和白云质灰岩中。(5) 各类矿床具有不同的矿物和元素组合特征。卡林型金矿的矿石矿物主要为含砷黄铁矿、毒砂、辉锑矿、雄黄和雌黄, 金主要呈微细粒不可见金形式分布在含砷黄铁矿中, 脉石矿物主要为石英和方解石; 铅锌矿的矿石矿物主要为方铅矿和闪锌矿, 脉石矿物主要为石英和方解石; 锑矿的矿石矿物主要为辉锑矿、黄铁矿、毒砂、雄黄和雌黄, 脉石矿物主要为石英、方解石和萤石。卡林型金矿除 Au 外通常富集 As、Sb、Hg、Tl 等, 而铅锌矿中通常富集 Ag、Ge、Cd 等。(6) 成矿温度主要为 100~250 °C, 成矿流体大都为小于 10% NaCl 的低盐度流体, 但川滇黔接壤区的 Pb-Zn 矿床盐度可达 15%~25% NaCl; 成矿压力可高达 1 000~2 000 bar (1 bar=10⁵ Pa), 远比原想象的高, 说明成矿流体经历了深循环过程。(7) 大规模低温成矿主要有两个时期: 第一期的时代为 230~200 Ma, 相当于印支期; 第二期的时代为 160~130 Ma, 相当于燕山期。前者奠定了华南大规模低温成矿的主体格架, 而后

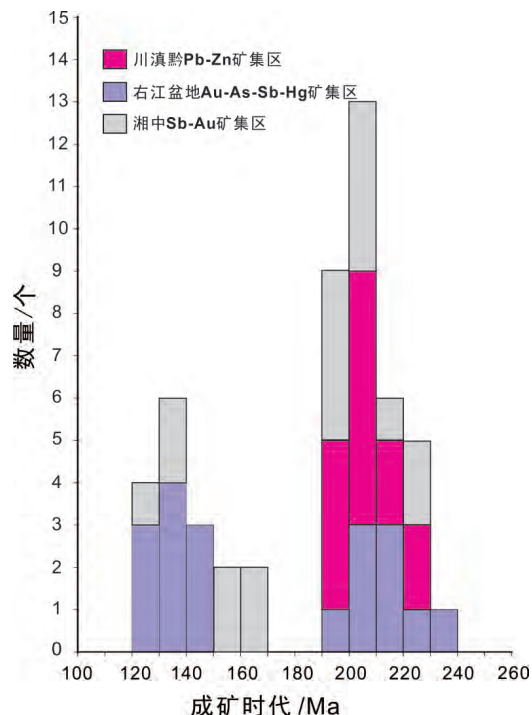
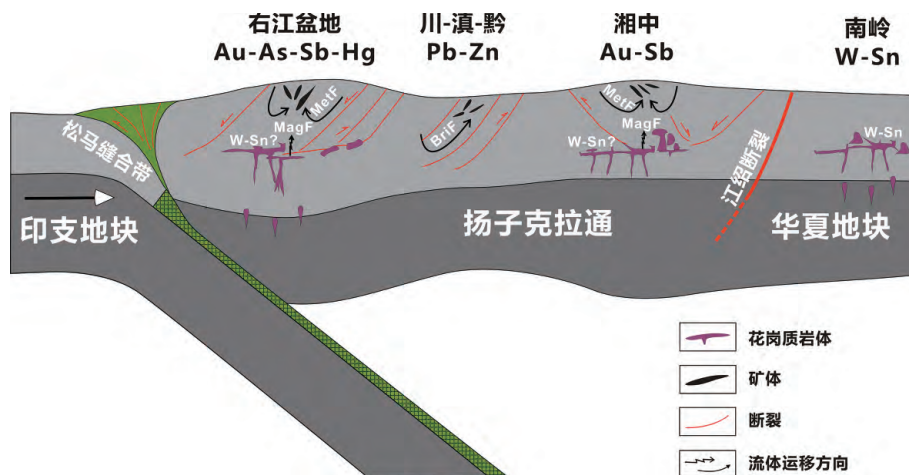


图 6 扬子克拉通中生代大规模低温成矿时代 (据文献[3]修改)

Fig. 6 Summary of the ages of the Mesozoic low-temperature mineralization in the Yangtze Craton. Modified from [3].

者只叠加在湘中盆地和右江盆地两个矿集区上(图 6)^[3]。(8) 川滇黔矿集区的 Pb-Zn 矿床为盆地卤水成因的 MVT 型 Pb-Zn 矿床, 而右江盆地和湘中盆地两个矿集区的成矿流体以雨水成因地下水为主, 但其中可辨别出微弱的岩浆流体信息。(9) 印支期 (230~200 Ma) 印支地块与华南陆块沿松马缝合带的后碰撞造山运动, 驱动较高盐度的盆地流体循环浸取出矿源层中的成矿元素并运移至相对开放的断裂空间成矿, 形成了川滇黔矿集区的 MVT 型 Pb-Zn 矿床。印支期后碰撞陆内造山背景下形成的深部花岗岩浆, 驱动大气成因地下水循环将矿源层中的成矿元素活化迁移至合适的构造部位沉淀富集, 形成了右江盆地矿集区的卡林型金矿床及湘中盆地矿集区基底地层中的锑-金矿床(图 7)^[3]; 燕山期主要形成部分锑、汞、砷、金等矿床, 这些矿床是岩石圈伸展背景下深部花岗岩浆活动驱动大气成因地下水循环、浸取矿源层中的成矿元素并成矿的产物。(10) 华南扬子克拉通中生代的这两期大规模低温成矿作用, 与其东侧华夏地块中与花岗岩浆活动有关的两期钨锡多金属成矿基本同时, 表明扬子的低温成矿与华夏的钨锡高温成矿具有相似的成矿动力学背景(图 7)。



MetF—雨水成因流体; BriF—卤水成因流体; MagF—岩浆成因流体。

图7 扬子克拉通印支期(230~200 Ma)大规模低温成矿动力学模型
(据文献[3]修改)

Fig. 7 A proposed metallogenic model for the Indosinian (230–200 Ma) large-scale low-temperature mineralization in the Yangtze Craton. Modified from [3].

2.3 前寒武纪基底对大面积低温成矿的控制

虽然上述研究进展基本回答了扬子克拉通中生代大面积低温成矿的成矿地质特征、成矿流体特征、成矿时代和成矿动力学背景等问题,但由于成矿金属元素来源研究的复杂性和受原有示踪手段的限制,大面积低温成矿的物质基础至今未能得到很好地确定,基于已有认知还较难从本质上回答为什么是在该区而不是其他区域发生金、锑、汞、砷、铅、锌等元素组合的大规模低温成矿这一重要问题,因而制约了华南大面积低温成矿理论的建立。

如上所述,一个重要的事实是,华南低温成矿域不同矿种的矿床组合(Pb-Zn、Au-Hg-Sb-As、Au-Sb)在地理位置上是分区产出的,而不同矿床组合的分区分别对应不同类型的前寒武纪基底(图1)^[46-47]。已有少量线索显示,前寒武纪基底可能富含低温成矿元素,矿床中的成矿元素很可能主要来自基底岩石。这些初步线索包括以下几方面。

(1)一些矿床直接产于元古宙基底岩石的断裂构造中。虽然各矿集区的低温矿床主要产于以显生宙的碳酸盐岩和碎屑岩为主的断裂构造中,显示后生热液矿床特征^[3,102],但也有不少矿床直接产于元古宙基底岩石的断裂构造中,矿区及其周围并无显生宙沉积岩分布,如湘中盆地Sb-Au矿集区的沃溪Au-Sb矿床、板溪Sb矿床、龙山Au-Sb矿床、万古Au矿床与Au-Sb矿床等^[31,103-105],川滇黔Pb-Zn矿集区的天宝山、大梁子和茂祖等Pb-Zn矿床^[106-108]。

(2)不同组成的基底对应不同矿种的矿集区。

如前所述,扬子克拉通的前寒武纪基底组成在西部(川滇黔Pb-Zn矿集区)和东南部(右江盆地Au-Hg-Sb-As矿集区和湘中盆地Sb-Au矿集区)有重大差别(图1)^[3,46];西部主要由古元古代结晶基底、中元古代到新元古代早期火山-沉积变质岩和震旦系地层组成;东南部主要由新元古代早期火山-沉积变质岩、新元古代中期弱变质岩和震旦系地层组成。相对于西部,东南部缺古元古代结晶基底和中元古代变质岩,但是存在广泛分布(而在西部未见)的新元古代中期弱变质地层(板溪群等),且寒武系黑色岩系亦主要分布在扬子克拉通东南部(图4)。这种差别很可能控制了扬子克拉通中生代大面积低温成矿在区域上的差异性分布^[3]。

(3)基底岩石富含低温成矿元素。前人研究了部分基底岩石的成矿元素丰度,并进行了水-岩相互作用实验的初步研究。研究发现,在Pb-Zn矿集区分布的滇东北地区,元古宙昆阳群和震旦系澄江组岩石中Pb、Zn、Ag等成矿元素的含量普遍高于扬子克拉通上地壳岩石的3倍以上^[109],昆阳群碎屑岩的Pb、Zn淋出率分别可达31%和44%^[110]。在Au-As-Sb-Hg矿床分布的扬子克拉通东南部地区,新元古代(冷家溪群、板溪群、震旦系等)岩石的Au、Sb含量普遍高于区域上的显生宙碎屑岩和碳酸盐岩,部分岩石(如震旦系地层)的Au、Sb含量甚至高达显生宙岩石的2~8倍,板溪群五强溪组碎屑岩Sb、Au、

Hg 等成矿元素的淋出率可达20%~90%。可能是由于成矿流体从中萃取了 Sb、Au 等成矿元素, 导致临近 Sb、Au 矿床的基底岩石存在 Sb、Au 的区域性亏损^[14]; 同样, 产于扬子克拉通东南部的寒武系黑色岩系显著富集 Au、As、Sb、Hg 等成矿元素^[92,111], 个别地区 Hg 的富集系数更是高达 10^4 以上^[112]。上述基底岩石(含寒武系)高的成矿元素丰度、较高的淋出率及低温矿床的元素组合特征与下伏元古宇基底的一致性, 一方面说明基底岩石(含寒武系)具有为大面积低温成矿提供物质基础的巨大潜力, 另一方面也暗示大面积低温成矿的金属元素很可能确实主要是由它们提供的。

(4) 初步的元素和同位素地球化学信息指示成矿元素来自基底岩石。以往开展了 H、O、C、S 等稳定同位素地球化学的大量研究, 这些研究揭示, 成矿流体中的水主要是盆地卤水或大气成因地下水, S 和 CO₂ 分别主要来自地层中相应组分的溶解, 尽管在右江盆地 Au-Hg-Sb-As 矿集区和湘中盆地 Sb-Au 矿集区的成矿流体中可辨析出微弱的岩浆流体信息^[3]。众所周知, 由于 H、O、C、S 与成矿元素的地球化学性质差异巨大, 它们并不能直接示踪成矿金属元素的来源。但是, Pb 同位素和 REE 可提供部分成矿金属元素来源的信息, 例如, 马东升等^[14]的研究表明, 湘中锡矿山超大型锑矿床辉锑矿和矿石具有与基底岩石相似的稀土元素分布特征, 说明基底在提供成矿元素方面可能发挥了重要作用; 扬子克拉通三个矿集区部分矿床的 Pb 同位素地球化学研究显示, 矿床的 Pb 同位素组成与基底地层的变化范围基本一致, 也暗示基底地层可能提供了 Pb^[110,113-118]。Fu 等^[38]研究了锡矿山锑矿床矿石矿物辉锑矿、矿床围岩和矿区基底岩石的 Hg 同位素组成, 发现矿床与基底岩石的信息更加一致。

基于上述线索, 笔者初步认为, 扬子克拉通前寒武纪基底(含寒武系)因其显著富集成矿元素并可被浸出, 极有可能对大面积低温成矿提供了重要的物质基础, 而基底成矿元素组成的空间不均一性则控制了不同区域矿床组合的差异。但是, 上述研究是初步的, 还存在以下缺陷。(1) 关于不同矿集区前寒武纪基底的成矿元素丰度, 目前仅研究了少数层位, 还不能揭示不同区域和不同层位成矿元素丰度的系统变化特征。(2) 以往的研究未能揭示成矿元素在岩石中的赋存状态。岩石中元素的赋存状态, 是决定其能否被后期热液浸出的关键因

素, 因为它直接决定着岩石中成矿元素的活动性(浸出率), 如锑石虽富含其他微量元素, 但它们在流体交代过程中很难被释放出来^[119]。在岩石中元素赋存状态不清的前提下, 将难以判断其提供成矿元素的潜力。岩石中元素的赋存状态研究高度依赖于矿物微区原位观测技术, 近年来包括聚焦离子束-高分辨透射电镜联用技术(FIB-HRTEM)、激光等离子体质谱技术(LA-ICPMS、LA-MC-ICP-MS)和纳米离子探针技术(NanoSIMS)等原位观测技术的高速发展^[45,120-125], 为这一问题的解决创造了良好的条件。(3) 关于成矿元素的活化和浸出机制。已有的水-岩相互作用实验研究只是针对个别层位和少数成矿元素开展的, 岩石中成矿元素转入流体的活化机制和条件仍尚待开展水-岩相互作用实验的系统研究来揭示。(4) 关于成矿元素来源精确示踪研究。示踪成矿金属元素的来源一直是个难题, 以往主要根据其他元素的同位素组成间接推断。利用成矿元素(如 Cu、Zn、Cd、Fe、Hg、Se、Ge 等)本身的同位素组成特征示踪成矿物质来源和演化, 是目前国际重要发展趋势, 可以避免由于传统同位素(如 H、O、C、S 等)与主成矿元素来源的不一致性而存在的多解性。近年来 Zn、Hg、Sb、Cd、Ge 等金属元素非传统同位素研究取得重要进步, 被证明是成矿金属元素来源的直接示踪手段^[126-133]。然而, 截至目前, 这些直接示踪理论和方法尚未被系统地应用到大面积低温成矿的成矿元素示踪研究中。

3 结论

成矿作用无论在全球还是克拉通尺度, 均表现出很强的区域不均一分布特点, 其根本原因受到国内外高度关注。低温热液矿床大面积密集成群产出的区域, 在世界上主要见于扬子克拉通和美国中西部, 且扬子克拉通比美国中西部具有更多的矿床类型, 是建立大面积低温成矿理论的理想区域。前人对扬子克拉通中生代大面积低温成矿作用的研究已取得大量成果, 大面积低温成矿理论的建立已处在突破的边缘。但由于成矿金属元素来源研究的复杂性和受传统示踪手段的限制, 大面积低温成矿的物质基础迄今仍未完全明晰。初步线索显示该区的前寒武纪基底(含寒武纪)富含低温成矿元素, 且可能为大面积低温成矿提供了成矿元素, 而基底岩石成矿元素组成的空间不均一性, 则控制了不同区域矿床组合的差

异。在这些基础上,亟待进一步研究前寒武纪基底(含寒武纪)岩石成矿元素的丰度和赋存状态、岩石中成矿元素转入成矿流体的潜力,以及矿床和基底岩石中成矿元素“基因”的匹配度,以系统回答为什么在该区发生金、锑、汞、砷、铅、锌等元素大面积低温成矿,且不同矿床组合分区产出这一重要问题。

长期以来,笔者得到了翟裕生老师无私的指导、帮助和爱护,在此表示衷心感谢。谨以此文庆贺尊敬的翟裕生老师从事地质工作70周年和90寿诞,祝翟裕生老师工作顺利、家庭幸福、健康长寿!

参考文献

- [1] 涂光炽. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(1): 1-2.
- [2] 赵振华, 涂光炽. 中国超大型矿床(II)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] HU R Z, FU S L, HUANG Y, et al. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: reviews and a new geodynamic model[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 137: 9-34.
- [4] 李朝阳. 中国低温热液矿床集中分布区的一些地质特点[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 164-171.
- [5] SAWKINS F G. Metal deposits in relation to plate tectonic [M]. New York: Springer-Verlag, 1984: 1-325.
- [6] TU G Z. Some problems pertaining to superlarge ore deposits of China[J]. Episodes, 1995, 18(1/2): 83-86.
- [7] MISRA K C. Understanding mineral deposits[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 1-845.
- [8] LEACH D, BRADLEY D, LEWCHUK M, et al. Mississippi valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36(8): 711-740.
- [9] THIART C, De WIT M J. Fingerprinting the metal endowment of early continental crust to test for secular changes in global mineralization[M]//KESLER S E, OHMOTO H. Evolution of early earth's atmosphere, hydrosphere, and biosphere: constraints from ore deposits. New York: Geological Society of America, 2006.
- [10] WENG Z H, JOWITT S M, MUDD G M, et al. A detailed assessment of global rare earth element resources: opportunities and challenges[J]. Economic Geology, 2015, 110(8): 1925-1952.
- [11] 翟裕生. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [12] 涂光炽. 低温地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [13] 涂光炽. 中国超大型矿床(I)[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [14] 马东升, 潘家永, 卢新卫. 湘西北—湘中地区金—锑矿床中—低温流体成矿作用的地球化学成因指示[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002, 38(3): 435-445.
- [15] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 等. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因: 兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [16] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区(下册)[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [17] 胡瑞忠, 苏文超, 毕献武, 等. 滇黔桂三角区微细浸染型金矿床成矿热液一种可能的演化途径: 年代学证据[J]. 矿物学报, 1995, 15(2): 144-149.
- [18] 胡瑞忠, 彭建堂, 马东升, 等. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代[J]. 矿床地质, 2007, 26(6): 583-596.
- [19] 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 等. 华南陆块陆内成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-903.
- [20] HU R Z, SU W C, BI X W, et al. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37(3/4): 378-392.
- [21] HU R Z, FU S L, XIAO J F. Major scientific problems on low-temperature metallogenesis in South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32: 3239-3251.
- [22] HOFSTRA A H, EMSBO P, CHRISTIANSEN W D, et al. Source of ore fluids in carlin-type gold deposits, China: implications for genetic models[M]//MAO J W, BIERLEIN F P. Mineral deposit research: meeting the global challenge. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 533-536.
- [23] ZHOU C X, WEI C S, GUO J Y, et al. The source of metals in the Qilinchang Zn-Pb deposit, Northeastern Yunnan, China: Pb-Sr isotope constraints[J]. Economic Geology, 2001, 96(3): 583-598.
- [24] ZHOU J X, HUANG Z L, ZHOU M F, et al. Zinc, sulfur and lead isotopic variations in carbonate-hosted Pb-Zn sulfide deposits, Southwest China[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 58: 41-54.
- [25] ZHOU J X, LUO K, LI B, et al. Geological and isotopic constraints on the origin of the Anle carbonate-hosted Zn-Pb deposit in Northwestern Yunnan Province, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 74: 88-100.
- [26] PENG J T, HU R Z, BURNARD P G. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): the potential of calcite as a geochronometer[J]. Chemical Geology, 2003, 200(1/2): 129-136.
- [27] SU W C, XIA B, ZHANG H T, et al. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for the environment and processes of ore formation[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33(3/4): 667-679.
- [28] SU W C, HU R Z, XIA B, et al. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. Chemical Geology, 2009, 258(3/4): 269-274.
- [29] SU W C, HEINRICH C A, PETTKE T, et al. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. Economic Geology

- gy, 2009, 104(1): 73-93.
- [30] SU W C, ZHANG H T, HU R Z, et al. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 653-662.
- [31] GU X X, ZHANG Y M, LI B H, et al. Hydrocarbon- and ore-bearing basinal fluids: a possible link between gold mineralization and hydrocarbon accumulation in the Youjiang Basin, South China[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 663-682.
- [32] HU R Z, ZHOU M F. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: an introduction to the thematic issue [J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 579-588.
- [33] MAO J W, CHENG Y B, CHEN M H, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(3): 267-294.
- [34] CHEN M H, ZHANG Z Q, SANTOSH M, et al. The Carlin-type gold deposits of the "Golden Triangle" of SW China: Pb and S isotopic constraints for the ore genesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 115-128.
- [35] CHEN M H, MAO J W, LI C, et al. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi "Golden Triangle", Southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 316-327.
- [36] ZHANG C Q, WU Y, HOU L, et al. Geodynamic setting of mineralization of Mississippi Valley-type deposits in world-class Sichuan-Yunnan-Guizhou Zn-Pb Triangle, Southwest China: implications from age-dating studies in the past decade and the Sm-Nd age of Jinshachang Deposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 103-114.
- [37] FU S L, HU R Z, CHEN Y W, et al. Chronology of the Longshan Au-Sb deposit in central Hunan Province: constraints from pyrite Re-Os and zircon U-Th/He isotopic dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32: 3507-3517.
- [38] FU S L, HU R Z, YIN R S, et al. Mercury and in-situ sulfur isotopes as source constraints on ore materials for the world's largest Sb deposit (Xikuangshan, Southern China) [J]. *Mineralium Deposita*, 2019, doi.org/10.1007/s00126-019-00940-1.
- [39] HOU L, PENG H J, DING J, et al. Textures and in-situ chemical and isotopic analyses of pyrite, Huijiabao Trend, Youjiang Basin, China: implications for paragenesis and source of sulfur[J]. *Economic Geology*, 2016, 111(2): 331-353.
- [40] PI Q H, HU R Z, PENG K Q, et al. Geochronology of the Zhesang gold deposit and mafic rock in Funing County of Yunnan Province, with special reference to the dynamic background of Carlin-type gold deposits in the Dian-Qian-Gui region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32: 3331-3342.
- [41] PI Q H, HU R Z, XIONG B, et al. In-situ SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(8): 1179-1190.
- [42] ZHU J J, HU R Z, RICHARDS J P, et al. No genetic link between Late Cretaceous felsic dikes and Carlin-type Au deposits in the Youjiang Basin, Southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84: 328-337.
- [43] WANG Q F, GROVES D. Carlin-style gold deposits, Youjiang Basin, China: tectono-thermal and structural analogues of the Carlin-type gold deposits, Nevada, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(7): 909-918.
- [44] XIE Z J, XIA Y, CLINE J S, et al. Magmatic origin for sediment-hosted Au deposits, Guizhou Province, China: in situ chemistry and sulfur isotope composition of pyrites, Shuiyindong and Jinfeng Deposits[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(7): 1627-1652.
- [45] YAN J, HU R Z, LIU S, et al. NanoSIMS element mapping and sulfur isotope analysis of Au-bearing pyrite from Lannigou Carlin-type Au deposit in SW China: new insights into the origin and evolution of Au-bearing fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 29-41.
- [46] ZHAO G C, CAWOOD P A. Precambrian geology of China [J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 13-54.
- [47] HU R Z, CHEN W T, XU D R, et al. Reviews and new metallogenic models of mineral deposits in South China: an introduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 137: 1-8.
- [48] 翟裕生. 矿床学的百年回顾与发展趋势[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 719-725.
- [49] SHANKS W C III, BISCHOFF J L. Ore transport and deposition in the Red Sea geothermal system: a geochemical model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(10): 1507-1519.
- [50] MEYER C. Ore-forming processes in geologic history[J]. *Economic Geology*, 1981, 75: 6-41.
- [51] MITCHELL A H, GARSON M S. Mineral deposits and tectonic settings[M]. London: Academic Press, 1981.
- [52] NALDRETT A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. New York: Springer, 2004: 1-725.
- [53] CHEN Y J, ZHAI M G, JIANG S Y. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 2695-2726.
- [54] SILLITOE R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3-41.
- [55] HOU Z Q, YANG Z M, LU Y J, et al. A genetic linkage between subduction- and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. *Geology*, 2015, 43

- (3): 247-250.
- [56] RICHARDS J P, SENGÖR A M C. Did Paleo-Tethyan anoxia kill arc magma fertility for porphyry copper formation? [J]. *Geology*, 2017, 45(7): 591-594.
- [57] HU R Z, LIU J M, ZHAI M G. Mineral resources science in China: a roadmap to 2050 [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [58] SKIRROW R G, DAVIDSON G J. A special issue devoted to Proterozoic iron oxide Cu-Au-(U) and gold mineral systems of the Gawler Craton: preface [J]. *Economic Geology*, 2007, 102(8): 1373-1375.
- [59] CORRIVVEAU L. Iron oxide copper-gold deposits: a Canadian perspective [C]//GOODFELLOW W D. Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007 (5): 307-328.
- [60] GROVES D I, BIERLEIN F P, MEINERT L D, et al. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 641-654.
- [61] ZHOU M F, ARNDT N T, MALPAS J, et al. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103(3/4): 352-368.
- [62] ZHAI M G. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29: 24-36.
- [63] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 等. 中国矿床成矿系列初论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [64] 邓军, 杨立强, 王长明. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2501-2509.
- [65] 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 克拉通破坏型金矿床 [J]. *中国科学: D 辑*, 2015, 45(8): 1153-1168.
- [66] 涂光炽. 华南元古宙基底演化和成矿作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [67] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用 [J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 24-36.
- [68] 侯增谦, 郑远川, 耿元生. 克拉通边缘岩石圈金属再富集与金-钼-稀土元素成矿作用 [J]. *矿床地质*, 2015, 34(4): 641-674.
- [69] XIE Y L, HOU Z Q, GOLDFARB R J, et al. Rare earth element deposits in China [M]//VERPLANCK P L, HITZMAN M W. Rare earth and critical elements in ore deposits. New York: Society of Economic Geologists, 2016.
- [70] MAO J W, PIRAJNO F, XIANG J F, et al. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: characteristics and tectonic settings [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 264-293.
- [71] KISVARSANYI G. The role of the Precambrian igneous basement in the formation of the stratabound lead-zinc-copper deposits in Southeast Missouri [J]. *Economic Geology*, 1977, 72(3): 435-442.
- [72] 马东升. 华南重要金属矿床的成矿规律: 时代爆发性、空间分带性、基底继承性和热隆起成矿 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(3): 209-217.
- [73] LEHURAY A P, CAULFIELD J B D, RYE D M, et al. Basement controls on sediment-hosted Zn-Pb deposits: a pb isotope study of carboniferous mineralization in Central Ireland [J]. *Economic Geology*, 1987, 82(7): 1695-1709.
- [74] WILLMAN C E, KORSCH R J, MOORE D H, et al. Crustal-scale fluid pathways and source rocks in the Victorian Gold Province, Australia: insights from deep seismic reflection profiles [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(5): 895-915.
- [75] VIKRE P, BROWNE Q J, FLECK R, et al. Ages and sources of components of Zn-Pb, Cu, precious metal, and platinum group element deposits in the Goodsprings District, Clark County, Nevada [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(3): 381-412.
- [76] FIELD J D, APPOLD M S, RENSON V, et al. Lead and sulfur isotope composition of trace occurrences of Mississippi Valley-type mineralization in the US midcontinent [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 184: 66-81.
- [77] KERRICH R, GOLDFARB R J, GROVES D I, et al. The geodynamics of world-class gold deposits: characteristics, space-time distribution, and origins [M]//HAGEMANN S G, BROWN P E. Gold in 2000. New York: Society of Economic Geologists, 2000: 501-551.
- [78] 张本仁, 骆庭川, 高山, 等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 110-122.
- [79] 侯增谦, 杨志明. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型 [J]. *地质学报*, 2009, 83(12): 1779-1817.
- [80] GROVES D I, PHILLIPS G N. The genesis and tectonic control on Archaean gold deposits of the Western Australian Shield: a metamorphic replacement model [J]. *Ore Geology Reviews*, 1987, 2(4): 287-322.
- [81] DE WIT M, THIART C. Metallogenic fingerprints of Archaean cratons [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2005, 248(1): 59-70.
- [82] 秦克章, 翟明国, 李光明, 等. 中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(2): 305-325.
- [83] YAO J L, SHU L S, CAWOOD P A, et al. Delineating and characterizing the boundary of the Cathaysia Block and the Jiangnan orogenic belt in South China [J]. *Precambrian Research*, 2016, 275: 265-277.
- [84] ZHAO J H, ZHOU M F, YAN D P, et al. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: no connection with the Grenvillian orogeny [J]. *Geology*, 2011, 39(4): 299-302.

- [85] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [86] WANG Y J, FAN W M, SUN M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block; a case study in the Hunan Province [J]. *Lithos*, 2007, 96(3/4): 475-502.
- [87] FAURE M, LEPVRIER C, NGUYEN V V, et al. The South China block-Indochina collision; where, when, and how? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 260-274.
- [88] WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1273-1305.
- [89] LI X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 293-305.
- [90] LI Z X, LI X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179-182.
- [91] YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. *Tectonophysics*, 2003, 361(3/4): 239-254.
- [92] JIANG S Y, YANG J H, LING H F, et al. Extreme enrichment of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au in Lower Cambrian black shales of South China: an Os isotope and PGE geochemical investigation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1/2): 217-228.
- [93] XU Y G, HE B, CHUNG S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 2004, 32(10): 917-920.
- [94] ZHOU M F, ZHAO J H, QI L, et al. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing Area, SW China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(1): 1-19.
- [95] ZHOU M F, YAN D P, KENNEDY A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(1/2): 51-67.
- [96] LI X H, LI Z X, GE W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at Ca. 825 Ma? [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/2/3/4): 45-83.
- [97] ZHENG Y F, ZHANG S B, ZHAO Z F, et al. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: implications for growth and reworking of continental crust[J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 127-150.
- [98] HOFSTRA A H, SNEE L W, RYE R O, et al. Age constraints on Jerritt Canyon and other Carlin-type gold deposits in the western United States: relationship to mid-tertiary extension and magmatism[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(6): 769-802.
- [99] CLINE J S. Timing of gold and arsenic sulfide mineral deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, North-Central Nevada[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(1): 75-89.
- [100] CLINE J S, HOFSTRA A H, MUNTEAN J L, et al. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models [M]//HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. One Hundredth Anniversary Volume. New York: Society of Economic Geologists, 2005: 451-484.
- [101] AREHART G B, CHAKURIAN A M, TERTBAR D R, et al. Evaluation of radioisotope dating of Carlin-type deposits in the Great Basin, Western North America, and implications for deposit genesis [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(2): 235-248.
- [102] ZHOU J X, XIANG Z Z, ZHOU M F, et al. The giant upper Yangtze Pb-Zn province in SW China: reviews, new advances and a new genetic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 280-315.
- [103] ZHU Y N, PENG J T. Infrared microthermometric and noble gas isotope study of fluid inclusions in ore minerals at the Woxi orogenic Au-Sb-W deposit, Western Hunan, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 55-69.
- [104] DENG T, XU D R, CHI G X, et al. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in Northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 619-637.
- [105] LI H, WU Q H, EVANS N J, et al. Geochemistry and geochronology of the Banxi Sb deposit: implications for fluid origin and the evolution of Sb mineralization in central-western Hunan, South China [J]. *Gondwana Research*, 2018, 55: 112-134.
- [106] ZAW K, PETERS S G, CROMIE P, et al. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1/2/3/4): 3-47.
- [107] ZHOU J X, HUANG Z L, YAN Z F. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China: constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 39-47.
- [108] WANG C M, DENG J, CARRANZA E J M, et al. Na-

- ture, diversity and temporal-spatial distributions of sediment-hosted Pb-Zn deposits in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 327-351.
- [109] 韩阳光, 颜丹平, 穆丹, 等. 滇东北驾车穹隆结构及其 Pb、Zn、Ag、As、Sb 元素异常特征[J]. *地学前缘*, 2018, 25(1): 65-79.
- [110] BAO Z W, LI Q, WANG C Y. Metal source of giant Huize Zn-Pb deposit in SW China: new constraints from in situ Pb isotopic compositions of galena[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 824-836.
- [111] 张岳, 颜丹平, 赵非, 等. 贵州开阳磷矿地区下寒武统牛蹄塘组地层层序及其 As、Sb、Au、Ag 丰度异常与赋存状态研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3252-3268.
- [112] YIN R S, XU L G, LEHMANN B, et al. Anomalous mercury enrichment in early Cambrian Black Shales of South China: mercury isotopes indicate a seawater source[J]. *Chemical Geology*, 2017, 467: 159-167.
- [113] 彭建堂, 胡瑞忠. 湘中锡矿山超大型锑矿床的碳、氧同位素体系[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 34-41.
- [114] 马东升, 潘家永, 解庆林. 湘中锑(金)矿床成矿物质来源: II. 同位素地球化学证据[J]. *矿床地质*, 2003, 22(1): 78-87.
- [115] WANG Z P, XIA Y, SONG X Y, et al. Study on the evolution of ore-formation fluids for Au-Sb ore deposits and the mechanism of Au-Sb paragenesis and differentiation in the southwestern part of Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2013, 32(1): 56-68.
- [116] TAN Q P, XIA Y, XIE Z J, et al. S, C, O, H, and Pb isotopic studies for the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Southwest Guizhou, China: constraints for ore genesis[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2015, 34(4): 525-539.
- [117] TAN S C, ZHOU J X, LI B, et al. In situ Pb and bulk Sr isotope analysis of the Yinchanggou Pb-Zn deposit in Sichuan Province (SW China): constraints on the origin and evolution of hydrothermal fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 432-443.
- [118] 孔志岗, 吴越, 张锋, 等. 川滇黔地区典型铅锌矿床成矿物质来源分析: 来自 S-Pb 同位素证据[J]. *地学前缘*, 2018, 25(1): 125-137.
- [119] CUNNEY M. Felsic magmatism and uranium deposits[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 2014, 185(2): 75-92.
- [120] WU F Y, YANG Y H, XIE L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234(1/2): 105-126.
- [121] COOK N J, CIOBANU C L, PRING A, et al. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(16): 4761-4791.
- [122] LI X H, LIU Y, LI Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2009, 10(4): Q04010.
- [123] DEDITIUS A P, UTSUNOMIYA S, REICH M, et al. Trace metal nanoparticles in pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 42(1): 32-46.
- [124] CIOBANU C L, COOK N J, UTSUNOMIYA S, et al. Gold-telluride nanoparticles revealed in arsenic-free pyrite[J]. *American Mineralogist*, 2012, 97(8/9): 1515-1518.
- [125] ZHANG J C, LIN Y T, YAN J, et al. Simultaneous determination of sulfur isotopes and trace elements in pyrite with a NanoSIMS 50L[J]. *Analytical Methods*, 2017, 9(47): 6653-6661.
- [126] SMITH C N, KESLER S E, BLUM J D, et al. Isotope geochemistry of mercury in source rocks, mineral deposits and spring deposits of the California Coast Ranges, USA [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 269(3/4): 399-407.
- [127] KELLEY K D, WILKINSON J J, CHAPMAN J B, et al. Zinc isotopes in sphalerite from base metal deposits in the Red Dog District, Northern Alaska[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(6): 767-773.
- [128] QI H W, ROUXEL O, HU R Z, et al. Germanium isotopic systematics in Ge-rich coal from the Lincang Ge deposit, Yunnan, Southwestern China[J]. *Chemical Geology*, 2011, 286: 252-265.
- [129] WEN H J, CARRIGNAN J. Selenium isotopes trace the source and redox processes in the black shale-hosted Se-rich deposits in China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(6): 1411-1427.
- [130] YIN R S, FENG X B, HURLEY J P, et al. Mercury isotopes as proxies to identify sources and environmental impacts of mercury in sphalerites[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18686.
- [131] ZHU C W, WEN H J, ZHANG Y X, et al. Cadmium isotope fractionation in the Fule Mississippi Valley-type deposit, Southwest China[J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(5): 675-686.
- [132] TANG Y Y, BI X W, YIN R S, et al. Concentrations and isotopic variability of mercury in sulfide minerals from the Jinding Zn-Pb deposit, Southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 958-969.
- [133] XU C X, YIN R S, PENG J T, et al. Mercury isotope constraints on the source for sediment-hosted lead-zinc deposits in the Changdu Area, Southwestern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(3): 339-352.