

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.03.002

关于深化钦杭成矿带古海洋喷流热水沉积及其成矿作用研究的思考

周永章^{1,2,3}, 杨威⁴, 虞鹏鹏^{1,2,3}, 郑义^{1,2,3}, 沈文杰^{1,2,3}, 张前龙^{1,2,3}

ZHOU Yong-Zhang^{1,2,3}, YANG Wei⁴, YU Peng-Peng^{1,2,3}, ZHENG Yi^{1,2,3}, SHEN Wen-Jie^{1,2,3},
ZHANG Qian-Long^{1,2,3}

1. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广东 广州 510275; 2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275; 3. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275; 4. 广东高质资源环境研究院, 广东 广州 510000

1. Center for Earth Environment & Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Processes, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

3. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

4. Guangdong Institute of Quality Resource & Environment, Guangzhou 510000, Guangdong, China

摘要:钦杭成矿带是扬子和华夏两个古陆间的巨型构造结合带,古海洋海底喷流热水沉积多层位多类型分布,是研究喷流热水沉积体系的精细时空结构与古陆间构造结合带演化耦合机制的理想场所。本文在评述已有研究基础上,提出了深化钦杭成矿带古海洋喷流热水沉积及其成矿作用研究的建议。从钦杭成矿带同时也是两个古陆结合带的整体视角,分析喷流热水沉积的时空分布特征和发育背景,区分不同沉积建造类型,剖析喷流热水沉积体系的地球化学三维空间结构,揭示喷流热水沉积体系时空结构与古陆间构造结合带演化的耦合机制。通过新设备、新手段和新思路,厘定不同层位和类型喷流热水沉积在矿物学、岩石学、地球化学方面表现出的同一性和多样性,剖析不同喷流热水沉积矿物微结构、微成分,以及B、S、Fe、Cu、Zn同位素信息的精细差异,揭示这些同一性、多样性和信息精细差异对古陆间构造体系及喷流热水沉积体系演化的响应,可望引发喷流热水沉积成矿作用研究的突破,研究结果将深化对喷流热水沉积成矿作用的认识,为海底喷流热水沉积矿床勘查提供指导,提升钦杭成矿理论水平。

关键词:热水沉积;SEDEX型矿床;沉积地球化学;钦杭成矿带

中图分类号:P617;P611

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)03-0382-12

Zhou Y Z, Yang W, Yu P P, Zheng Y, Shen W J and Zhang Q L. 2022. Considerations on Study of Pale-oceanic Seafloor Exhalative Hydrothermal Sedimentation and Related Mineral Deposits of the Qinzhou-Hangzhou Metallogenic Belt, South China. *South China Geology*, 38(3): 382-393

Abstract: The Qinzhou-Hangzhou Metallogenic Belt (QHMB) is a giant tectonic junction zone between the Yangtze and Cathaysia palaeo-continent. The multi-layered distribution of ancient marine submarine sedimentary exhalative (Sedex) makes it an ideal place to study the precise spatial and temporal structure of the Sedex system and the coupling mechanism of the evolution of the palaeo-continental tectonic junction belt. Based on the review of existing studies, this paper proposes more intensive research on the palaeo-oceanic

收稿日期:2022-4-11;修回日期:2022-8-5

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFC0600506)、国家自然科学基金(41273040)、中国地质调查局项目(12120113067600)

第一作者:周永章(1963—),男,教授,博士生导师,矿床地质地球化学、大数据与数学地球科学专业,E-mail:zhouyz@mail.sysu.edu.cn

Sedex and its mineralisation in the QHMB. From the perspective that the QHMB is also the junction belt of two palaeo-terrestrial zones, we analyse the spatial and temporal distribution characteristics and development setting of the Sedex deposits, so to distinguish different types of sedimentary construction, dissect the geochemical three-dimensional spatial structure of the Sedex system, and reveal the coupling mechanism between the spatial and temporal structure of the Sedex system and the evolution of the palaeo-terrestrial tectonic junction zone. With new equipment, new tools and new ideas, the homogeneity and diversity of mineralogy, petrology and geochemistry of different layers and types of the Sedex ore deposits could be identified, and the precise differences in the microstructure and micro-composition of different Sedex ore minerals and the isotopic information of B, S, Fe, Cu and Zn have been analysed to reveal these homogeneity, diversity and precise differences in correspondence with the inter-continent tectonic system and the evolution of the Sedex system. The results would deepen the understanding of the mineralisation of the Sedex system, provide guidance for the exploration of submarine Sedex deposits and improve the mineralisation theory research of the QHMB.

Key words: hydrothermal sedimentation; SEDEX deposit; sedimentary geochemistry; the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt

钦杭成矿带是近年来新提出的全国重点成矿区带。该成矿带南西自广西钦州湾,经湘东和赣中,往北东延伸至浙江杭州湾,全长约 2000 km,宽 50~200 km,拥有巨大的多金属矿找矿潜力,是一个极富特色的成矿带(中国地质调查局,2010)。

钦杭成矿带地处华南,区域位置大体相当于西北侧扬子与东南侧华夏两大陆块之间的巨型结合带。前人研究显示,钦杭成矿带最重要的成矿作用发生在中晚侏罗世至白垩纪,并形成特色鲜明的与燕山期花岗岩密切相关的钨锡铜铅锌多金属矿床成矿系列(毛景文等,2011)。同时,作为全球重要的矿床类型之一,喷流-热水沉积矿床在整个钦杭成矿带均有分布(周永章等,2015)。广东云浮大降坪硫铁矿、仁化凡口铅锌矿,广西武宣盘龙铅锌矿、下雷锰矿、怀群钒矿,湖南锡矿山铋矿、新晃重晶石矿、江西永平铜矿、新余铅锌矿,浙江西裘铜矿、水口山铅锌矿等,均有学者认为是或可能是喷流-热水沉积矿床(周永章等,2016)。因此,钦杭成矿带又被认为是一条新元古代-古生代喷流热水沉积矿床密集分布带,可以作为研究喷流热水沉积体系精细时空结构与古陆(板块)间构造结合带演化耦合机制的较为理想场所。

与国外同类矿床相比,钦杭成矿带喷流-热水沉积矿床的成矿条件更加复杂,由于该地区经历了

复杂的多阶段演化,太古宙和元古宙信息少而模糊,显生宙地质作用强烈叠加改造乃至再造。这使得钦杭成矿带不同喷流-热水沉积矿床的成矿环境存在极大的差异,特别是成矿后常常受到后期地质作用的改造和成矿作用的叠加又增加了研究难度。

钦杭成矿带喷流-热水沉积矿床研究存在如下亟待解决的科学问题:(1)作为海底喷流-热水沉积的两个端元,块状硫化物(VMS)型矿床与热水喷流沉积(SEDEX)型矿床在具有复杂地质背景和复杂地质历史区域如何共生演化,它们对所在区域的地质演化又是如何响应的?(2)海底喷流-热水沉积矿床成矿物质巨量集聚和大规模成矿的关键地质条件及其成矿动力学过程在钦杭成矿带是如何体现的?

为此,需要对钦杭成矿带海底喷流-热水沉积及其成矿作用做更加深入细致的研究,需要精准厘定喷流-热水沉积的关键性识别标志,整体分析喷流-热水沉积作用在钦杭成矿带时空分布特征以及演化轨迹,深入解剖典型VMS型和SEDEX型矿床及其成矿过程,深刻认识喷流-热水沉积矿床成矿模式等。研究结果将加深对喷流-热水沉积矿床的理论认识,提升钦杭成矿带成矿理论研究水平,对在钦杭成矿带寻找该类型大型-超大型矿床具有重

要的指导意义。

1 古海洋喷流热水沉积作用

古海洋喷流热水沉积作用是一类十分重要的成矿作用,它所形成的喷流热水沉积型矿床是世界上最重要的矿床类型之一,是Pb、Zn、Cu、Fe、Au、Ag、Ga、S等许多矿产资源的重要来源(Scott, 2013)。

喷流-热水沉积矿床包括两个重要的端元:VMS型和SEDEX型。其中,VMS型与海底火山喷发有关,被定义为火山岩容矿的块状硫化物矿床(Volcanic-hosted massive sulfide deposits);SEDEX型不以火山喷发为必要条件,被定义为沉积岩容矿的热水喷流沉积型矿床(Sedimentary Exhalative Deposits)。在VMS和SEDEX类型下,又可以分出若干亚型。如VMS型可分为Kuroko(黑矿)型、Besshi(别子)型、Cyprus(塞浦路斯)型和Canadian Archean/Primitive(加拿大太古代/原始)型(Bonatti, 1975; CASE, 1985; Allen et al., 2011; Scott, 2013; Lobanov et al., 2014; Gillis et al., 2015; Spinks et al., 2016)。

喷流-热水沉积成矿作用是近代成矿理论研究的重大突破。学者对它的研究始于二十世纪中期海相火山成矿学术思想的复苏(Hutchinson, 1965; Sawkins, 1976)。矿床学家注意到,产于海相火山岩系块状硫化物矿床(VMS型)通常与沉积地层呈整合接触,部分呈网脉状侵入接触,它们广泛分布于世界各大造山带不同时代的海相火山岩系中。1966年红海现代海底热水活动(Miller et al., 1966)首次被报道以后,人们相继在各大洋洋中脊及各种海槽发现类似现象,并在加拿大大陆等地分出古“黑烟囱”和“白烟囱”遗迹,进而提出了不以火山喷发为必要条件的热水喷流沉积型矿床(SEDEX型)。对现代热水活动体系的观察和对古代热水沉积作用的识别与重建是喷流-热水沉积矿床研究的两项重要内容。

总体上,国外大型VMS和SEDEX型矿床的成矿作用相对简单,地质背景也简单明了。比较有代表性的工作包括对加拿大Matagami地区太古宙块

状硫化物矿床(VMS型)、BC省Sullivan元古代Pb-Zn-Ag矿床(SEDEX型),美国阿拉斯加Red Dog Pb-Zn-Ag矿床(SEDEX型),澳大利亚北部Pb-Zn矿床(SEDEX型),日本黑矿型块状硫化物矿床、Shimanto地区白垩系造山带硅岩建造,东太平洋脊高热流区沉积,哥斯达黎加太平洋海岸中生代硅质岩建造,巴布亚-新几内亚Western Woodlark盆地富含贵金属重晶石沉积物,以及全球范围内广泛分布的SEDEX型Pb、Zn矿床等的研究(Iijima et al., 1983; Rona and Scott, 1993; Larson and Cunningham, 1994; Piercey, 2011)。

国内学者对火山成因块状硫化物矿床的关注始于20世纪50年代,与国外海相火山成矿学术思想的复苏大体一致(杨开辉等,1992)。对热水沉积型矿床(SEDEX型)的研究始于20世纪80年代,得益于对层控矿床地球化学及超大型矿床研究的推动,学者们识别出了一大批古地热系统及其相关沉积物,并以此为基础讨论了一些矿床的热水成因属性,认识到喷流-热水沉积成矿作用是一类高效率的成矿作用(涂光炽,1987;陈先沛和陈多福,1989;周永章,1990)。后来研究者结合湖相热水原生白云岩、硅质岩、BIF建造和铅锌银矿床等的研究,深化了对喷流热水沉积的认识(李红中,2010;姚旭等,2013;郭强等,2014;薛春纪等,2014;Kemkin and Kemkina, 2015; Spinks et al., 2016; 刘飞等,2022)

利用先进设备和分析手段分析喷流热水沉积物的特征、物质来源,测定成矿年龄等是国内外喷流热水沉积研究的重要方面。学术界一直尝试利用各种先进设备和分析手段,探讨喷流热水沉积成矿作用。硅、氧、硼、硫、铅等同位素示踪技术用于判别热水沉积的物质来源(李延河等,1994;肖应凯等,1998; Marschal and Jiang S Y, 2011; Marin-Carbonne et al., 2012; 曹亮等,2019)。流体包裹体技术等用于成矿温度等物理化学条件的恢复(范宏瑞等,2003;倪培等,2005)。在测年方面,Pb-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd等方法得到较广泛的应用:王鹤年等(1996)应用Rb-Sr法于粤西块状硫化物矿床,获得与黄铁矿相间具沉积韵律结构的硅质岩条带拥有与地层一致的年龄;Re-Os法已成功应用于海底喷流沉积硫化物,特别是Re、Os含量较高的黄铁矿、

毒砂和黄铜矿的年龄测定,如郭维民等(2011)报道了安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿 Re-Os 同位素年龄为 319 ± 13 Ma, 并认为其为石炭纪海底喷流沉积成矿作用发生的时间。

依托现代分析仪器提取硅质岩微结构、微成分信息是进展的另一方向。周永章等(2006)分析了藏南中生代硅质岩中 SiO_2 矿物的微结构特征,发现这些微结构特征与其形成的地质地球化学环境或地球动力学背景有一定关系,相比正常沉积环境,热水沉积作用形成的 SiO_2 矿物的结晶度更高,原因在于石英晶体在生长过程中产生了“排异杂质元素”效应。他们认为,硅质岩在微观视角里实际是一个微矿物多晶聚集体系。后来该课题组受金刚石多晶的形成机制及局部过程研究(Heaney et al., 2005; Yang Z J et al., 2008)的启发,开展基于热水沉积硅质岩微矿物多晶聚集体系晶粒、包裹体及共生矿物的微成分、微结构的精细研究,以更加深入理解多晶生长过程中的物质环境变化、P-T- f_{O_2} 条件差异等,进而为热水沉积物多晶的形成机制及来源分析等提供科学线索。该研究目前正在国家自然科学基金面上项目的支持下开展工作。

利用多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)技术测定 Fe、Cu、Zn 等过渡族元素同位素用于示踪成矿物质来源也取得了一些令人鼓舞的进展(Marechal et al., 1999; Zhu X K et al., 2000; 蒋少涌, 2003; Bennett et al., 2009)。Marechal et al. (1999)分析了采自世界各地的7个含铜矿物和现代大洋洋底沉积物的 Cu、Zn 同位素组成,发现 Cu 同位素组成变化范围较大, $\delta^{65}\text{Cu}$ 值为 $-3.03\text{‰} \sim +5.74\text{‰}$, 现代大洋洋底沉积物的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 为正值 ($+0.17\text{‰} \sim +0.33\text{‰}$), 而一个现代大洋底黑烟囱中硫化物矿物的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值为负值 (-0.19‰)。但这方面的研究尚未深入开展,因此利用 Fe、Cu、Zn 同位素揭示一些重要地质与成矿过程,特别是本文关注的喷流热水沉积作用,显然还需要更多的数据积累和进行更多的探索研究(Gagnevin et al., 2012; 朱祥坤等, 2013)。

前人研究取得许多共识:(1)喷流热水沉积作用统指来自深部的热水体系到达地表或地表附近时所发生的沉积作用、交代-充填作用和热动力作

用,层控、同生沉积构造、热水沉积岩石和地球化学标志是它们的共同特征;(2)喷流热水活动-沉积体系是一开放体系,是一类高效率的成矿作用,它形成的矿床是世界上最重要的矿床类型之一,是 Pb、Zn、Cu、Ag、S 等许多金属及非金属矿产资源的重要来源;(3)喷流热水沉积(矿床)可以受一级构造或次级构造的制约,产出的有利位置是拉张环境,包括大洋中脊、弧后和弧间盆地、裂谷或断陷盆地、地幔上隆区等,喷流热水沉积的特征与不同的地球动力学背景、不同的演化阶段、不同的演化途径密切相关;(4)与现代海洋喷流热水沉积作用相比,古海洋喷流热水沉积(矿床)通常是长时间跨度或多期次热水喷流活动的产物,因此其三维沉积建造同时记录了丰富的地质演化信息;(5)喷流热水沉积对源区、基底和古老地层沉积物具有显著的地球化学遗传性。

但喷流热水沉积体系的精细时空结构受古陆间构造结合带演化制约的机制尚未研究透彻。借助新设备、新技术、新思路探索分析喷流热水沉积矿物的微结构、微成分以及 S、B、Fe、Cu、Zn 同位素的精细特征,精确确定不同层位、类型喷流热水沉积形成的年龄,将是突破已有研究,更加精细分析喷流热水沉积体系时空结构及其受古陆间构造结合带演化制约的重要技术手段。这亦有助于理解不同层位和类型喷流热水沉积(矿床)在矿物学、岩石学、地球化学方面表现出的高度同一性和多样性以及它们发生的地质地球化学机制。

2 钦杭成矿带

钦杭成矿带所处的华南地区,长期以来是中国地质学研究和矿床勘探的重要基地。国内许多学者在该带开展了大量的深入研究,特别是对燕山期大规模成矿作用和与花岗岩有关的金属矿床研究已取得具有深远意义的学术成果(陈骏等, 2008; 胡瑞忠等, 2010; 毛景文等, 2011; 梁锦等, 2012)。

2009年,中国地质调查局将重点成矿区带从原来的16个扩充到19个,正式将“钦杭成矿带”纳入“全国重点成矿区带”,并部署了一系列的重点矿产勘查任务(中国地质调查局, 2010; 徐德明等,

2012),这吸引了越来越多研究者对该成矿带的关注。

对钦杭成矿带(结合带)的认识可以追溯到水涛(1987)、杨明桂等(1997)的研究。但目前学术界对钦杭成矿带(结合带)的大地构造性质和演化还存在分歧,甚至争议。就新元古代时期的地球动力学背景而言,多数学者接受洋盆和板块俯冲的观点,但也有持地幔柱的观点的;对拼贴造山和裂解的时间也有不同认识(Li Z X et al., 1999; Yu J H et al., 2010; 李献华等, 2012; 虞鹏鹏等, 2017)。关于古生代构造体系,有陆内造山和洋盆体系两种明显不同的观点(Shu L S et al., 2014; 于津海等, 2014; 周永章等, 2012, 2015)。还有一些学者剖析了钦杭成矿带在中生代如何从前太平洋板块构造体系转换为太平洋板块构造体系的问题(曾长育等, 2015)。

研究显示,钦杭结合带可分为北、中、南三段(图1)(周永章等, 2012)。其中,中段(II)与南岭成

矿带大体一致,主要分布在北纬24°-27°之间;北段(I)指南岭以北地区,即绍兴-江山-萍乡一带,与前人的划分一致;南段(III)位于南岭以南区域,大致与云开-十万大山带相当。三段划分方案在优势矿种的区域分布上有很好的体现。总体上,北段的优势矿种为Cu、Fe和贵金属,代表性矿床包括江西德兴铜矿、冷水坑斑岩型铅锌银矿、银山金铜铅锌矿、金山金矿。中段为南岭成矿带的一部分,是世界著名的花岗岩省和重要的钨锡多金属矿产地。南段的优势矿种有Au、Ag及多金属等,主要的矿产分布在云开地区、大瑶山地区、十万大山地区,新近发现若干较为特征的斑岩型铜钼矿床等。

研究还显示,钦杭成矿带在新元古代时期可能是一个多岛洋盆俯冲体系(周永章等, 2017),其证据为:浙北地区桃红和西裘英云闪长岩-花岗闪长岩岩体的SHRIMP 锆石U-Pb年龄分别为913±15 Ma和905±14 Ma,是典型的富角闪石钙碱性花岗

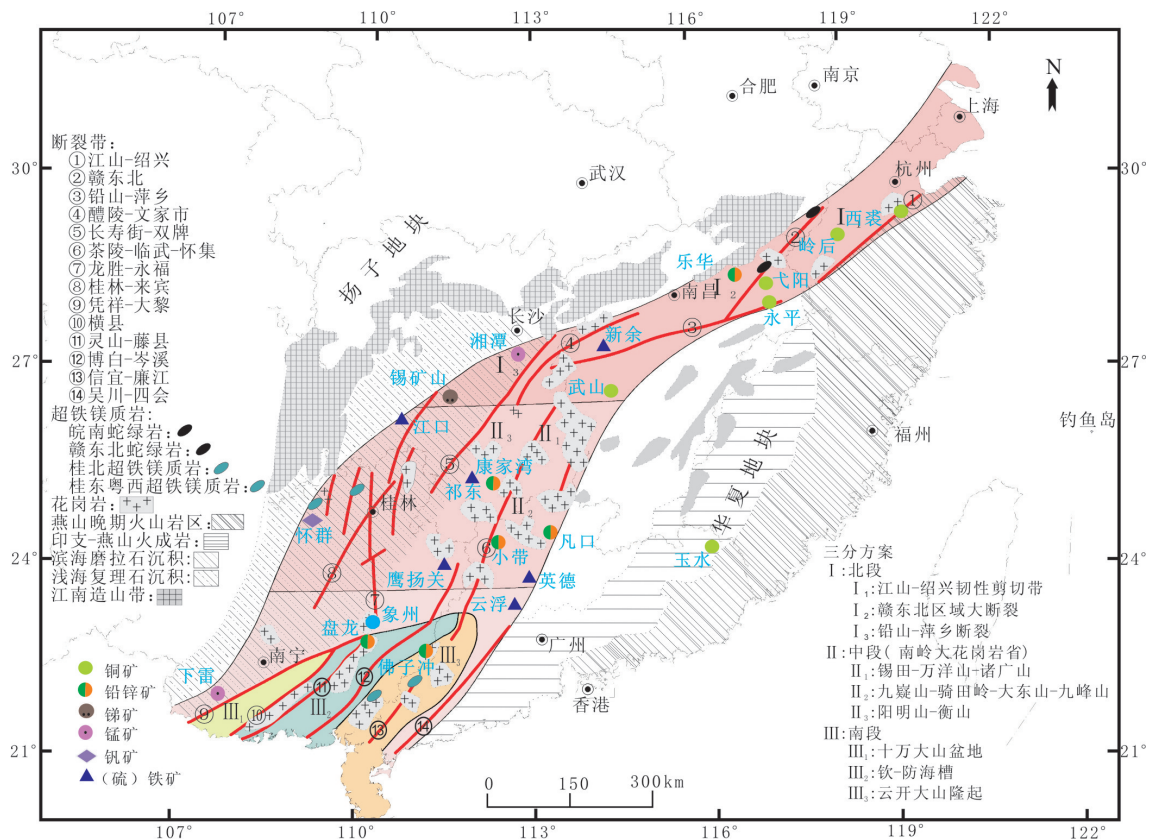


图1 钦杭成矿带喷流热水沉积建造与矿床(部分)分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing partly exhalation hydrothermal sedimentary formation and related deposits distribution in the Qingzhou-Hangzhou metallogenic belt

岩(ACG),原始岩浆起源于亏损地幔,桃红岩体初始 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为6.9~8.6, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为8.2~12.8, $\delta^{18}\text{O}$ 为5.7~6.1‰;西裘岩体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为6.4~7.8, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为9.5~11.5, $\delta^{18}\text{O}$ 为5.9~7.6‰,在Rb-Hf-Ta和Rb-Y+Nb构造判别图解上,属于火山弧花岗岩(VAG),形成于活动大陆边缘(叶美芳,2006)。在钦杭结合带南段云开地区腹地的信宜和陆川等地,发现有中新元古代变质基性火山岩、蛇绿岩,其地球化学特征显示为典型的大洋拉斑玄武岩(MORB)和岛弧型(ITA)玄武岩(覃小锋等,2007;徐德明等,2015;周永章等,2015)。

在矿床方面,钦杭成矿带的价值令人瞩目,它具有矿床规模大、矿化分布密集、矿床类型齐全、伴生组分多样的显著特点(中国地质调查局,2010)。前人对该成矿带中燕山期花岗岩的成岩成矿开展了许多深入的研究,并获得了大量有影响力的研究成果(蒋少涌等,2008;王汝成等,2008;Xu X S et al., 2010;李晓峰等,2013)。研究显示,中生代侏罗纪和白垩纪是钦杭成矿带最重要的成矿时代,与燕山期花岗岩浆活动有关的金属矿床是带内经济价值最高的矿床(胡瑞忠等,2010;毛景文等,2011)。

就目前研究认识而言,新元古代和古生宙也是钦杭成矿带的重要成矿时代,其中海底喷流热水沉积矿床相当发育,颇有特色,有时表现为预富矿源层对后期成矿作用产生影响(周永章等,2004,2016;倪培等,2005;Liu T et al., 2013;徐德明等,2015)。

我国学者曾对钦杭成矿带范围内的海底喷流热水沉积开展了大量研究,其中以对古老地热系及其相关沉积物的识别较为特色,并以此为基础讨论某些矿床的热水成因。经前人研究确认的钦杭成矿带内喷流热水沉积建造主要包括重晶石建造、硅质岩建造、硫化物建造、BIF建造等,主要分布层位有震旦系底部、寒武系底部、泥盆系榴江组、二叠系当冲/孤峰组等(周永章,1990;王忠诚等,1995;邱振和王清晨,2011;王卓卓等,2015)。

前人研究认为在钦杭成矿带中属于喷流热水沉积成因的矿床有广东云浮硫铁矿、长坑大型Ag(Au)矿床,广西武宣盘龙铅锌矿、下雷锰矿、怀群钒矿,湖南新晃重晶石矿,江西新余铁矿等(涂光炽

等,1987;中国地质调查局,2010;周永章等,2015;徐德明等,2015)。还有一些矿床存在成因认识的分歧,如广东仁化凡口铅锌矿,部分研究者提出它为喷流热水沉积矿床(涂光炽等,1987),也有研究者认为应属于MVT型矿床(祝新友等,2013)。

喷流热水沉积体系的时空结构及其与古陆(板块)间构造结合带演化的耦合机制是迄今尚未解决的科学问题,制约着该类型矿床研究和勘查水平的提高。就单个矿床而言,该问题涉及矿床空间形态的精细认识,包括从深部往浅部以及从热水喷口往外变化的地质地球化学演化。就一个成矿区域(带)而言,喷流热水沉积系统可以受一级构造也可以受次级构造的制约,与区域地球动力学背景、演化阶段、演化途径均密切相关。

3 关于深化钦杭成矿带古海洋喷流热水沉积及其成矿作用研究的思考

20世纪80年代中期,本文第一作者在中国科学院地球化学研究所攻读研究生,正值涂光炽等老一辈科学家领导中国层控矿床地球化学研究的热潮时期,于是选题华南古海洋热水沉积研究,后来承担了多项相关研究课题(周永章,1990;Zhou Y Z et al.,1994)。2010年以来,笔者曾承担中国地质调查局部署的“钦杭成矿带”专题研究项目,包括“钦杭成矿带喷流热水沉积的时空分布及其对矿床控制的研究”和“钦杭成矿带广东庞西垌地区矿产资源远景地质调查研究”,先后考察过数十个矿山,对工作区开展了面上实地调查分析,对钦杭成矿带的基础地质和矿产地质状况有了总体了解,积累了许多第一手材料。

至今笔者仍深刻感受到,钦杭带的喷流热水沉积体系时空结构还没有得到完整的揭示,对其受古陆间地质作用和地质演化的制约机制的认识也还没有提高到应有水平。此外,作为海底喷流-热水沉积的两个端元,VMS型矿床与SEDEX型矿床在钦杭成矿带这种复杂地质背景和复杂地质历史区域如何共生演化?它们对所在区域的地质演化又是如何响应的?海底喷流-热水沉积矿床成矿物质巨量集聚和大规模成矿的关键地质条件及其成矿动力

学过程在钦杭成矿带是如何体现的?

笔者认为,进一步的深化研究可围绕喷流热水沉积体系的时空结构及其与古陆间构造结合带演化的耦合机制这一核心问题,在面上工作基础上,重点分析中元古界、新元古界、寒武系、泥盆系、二叠系等若干较典型层位的热热水沉积建造,以及广西岑溪佛子冲铅锌矿、鹰扬关铁矿、下雷锰矿、怀群钒矿,广东云浮大降坪硫铁矿、仁化凡口铅锌矿,湖南锡矿山锑矿、新晃重晶石矿、水口山铅锌矿,江西永平铜矿、新余铅锌矿,浙江西裘铜矿、建德岭后铜矿等矿床。上述建造和矿床是较典型或经前人研究可能属于喷流-热水沉积成因的建造和矿床。主要研究内容包括:

(1)厘定钦杭成矿带喷流-热水沉积(矿床)的主要类型/亚型,并建立它们的关键性识别标志。这是基础性工作,包括对特征沉积建造组合、沉积岩石学特征、元素地球化学组合特征、S-B同位素特征、流体包裹体性质等的分析。

(2)分析典型喷流-热水沉积(矿床)形成的地质地球化学环境和关键性制约因素。除利用常规沉积岩石学和岩石地球化学研究方法外,探索利用矿物微组构、微成分以及Fe、Cu、Zn过渡族元素同位素的精细信息,分析它们与物源、流体性质、形成环境、形成机制和保存条件等关键性因素的制约关系,进而建立更精细的识别喷流-热水沉积地质事件,鉴定喷流-热水沉积(矿床)类型,指示区域地质地球化学环境演化的矿物微组构、微成分及Fe、Cu、Zn同位素标型特征等。

(3)厘定钦杭成矿带重大喷流-热水沉积地质事件及喷流-热水沉积的时空分布。根据喷流-热水沉积的关键性识别标志,分析同层位喷流-热水沉积空间分布范围,厘定钦杭成矿带重大喷流-热水沉积地质事件。在前人定年工作基础上,补充必要的同位素测年工作,建立钦杭成矿带内的喷流-热水沉积建造(矿床)在地质历史上的分布序列,进而分析喷流-热水沉积体系的演化轨迹。

(4)探讨VMS型与SEDEX型矿床在复杂地质背景和地质历史条件下的共生演化规律。包括分析它们分别与盆地属性、沉积环境及区域构造性质和演化阶段的关系,分析它们对钦杭成矿带以及喷

流-热水沉积体系演化的响应。

(5)建立区域及矿床尺度的喷流-热水沉积成矿模式。包括查明成矿物质来源、成矿时代和成矿流体演化,揭示巨量矿质堆填及成矿动力学关键过程在钦杭成矿带的表征方式,确定喷流-热水沉积大规模成矿作用的地层、构造、岩浆活动条件等,建立涵盖热水沉积事件与构造事件、岩浆活动、大规模成矿作用等重大地质事件的喷流-热水沉积矿床成矿模式。

此外,要重视建立古陆间构造结合带不同尺度的喷流热水沉积成矿模型,划分喷流热水沉积岩相的亚相,重建它们所代表的喷流热水沉积体系的地球化学三维空间结构,包括从热水喷口往外的特征地球化学变化系列,分析热水沉积和非热水沉积的过渡关系及地球化学特征;分析不同层位、不同类型、不同亚相喷流热水沉积在矿物学、岩石学、地球化学方面表现出的同一性和多样性,以及它们发生的地质地球化学机制;分析不同时代不同沉积环境下,元素(组合)在联结古老地层、基底与新生喷流热水沉积作用的地球化学机制以及它们对钦杭结合带以及喷流热水沉积体系演化的响应。

4 研究的技术路线

上述研究需要设置一套合理的研究技术路线。在研究中,最好采用野外与室内相结合、宏观与微观相结合、地质分析和仪器分析相结合、区域路线调查与典型矿集区解剖相结合的研究思路。重视对一些成因有争议的矿床的厘定,如经厘定确实不属于喷流热水沉积成因的,及时将其从喷流热水沉积成因清单中剔除。有些可能是复合成因的,需要评估喷流热水沉积的贡献比例。

(1)通过野外地质调查与室内分析相结合、区域路线调查与典型矿集区解剖相结合的方法,分析喷流热水沉积建造(矿床)的时空分布特征,确立研究区重大喷流热水沉积地质事件,确定喷流热水沉积建造(矿床)的主要亚型。

(2)通过宏观与微观相结合,地质分析和仪器测试分析相结合的方法,识别、恢复喷流热水沉积的原生组构和地球化学特征,分析喷流热水沉积作

用的地质背景、形成动力学过程以及对成矿的控制机理。

(3)对不同类型的典型喷流热水沉积矿床(矿田)进行深入解剖,分析其成矿作用特点、控矿要素配置(火成岩、地层、构造)和矿致信息,建立典型矿床尺度或矿集区尺度的成矿模式。

(4)从古陆结合带时空演化的角度出发,探讨喷流热水沉积事件与大规模成矿的耦合效应,提出区域尺度及矿床尺度的成矿模式,提出进一步找矿方向。

建议的研究技术路线如图2所示,主要实验研究手段包括:光(薄)片鉴定,矿相片鉴定,常量元

素、微量元素(含稀土元素)分析、矿物微结构分析、矿物包裹体测温 and 成分分析、同位素测年及S、B、Fe、Cu、Zn同位素分析等。

具体研究方案可以从面上资料调研和地质考察开始,重点考察钦杭成矿带有一定研究基础的沉积建造和矿床(矿集区),及时掌握钦杭成矿带的喷流热水沉积建造层位、矿床(矿集区)及其产出的地质背景,以及钦杭成矿带地质演化的基本框架。

对采集样品开展系统的光(薄)片、矿相片鉴定,分析它们的矿物组成与特征、沉积结构与构造特征,提取能反映岩相古环境和成因的岩石学标志等。

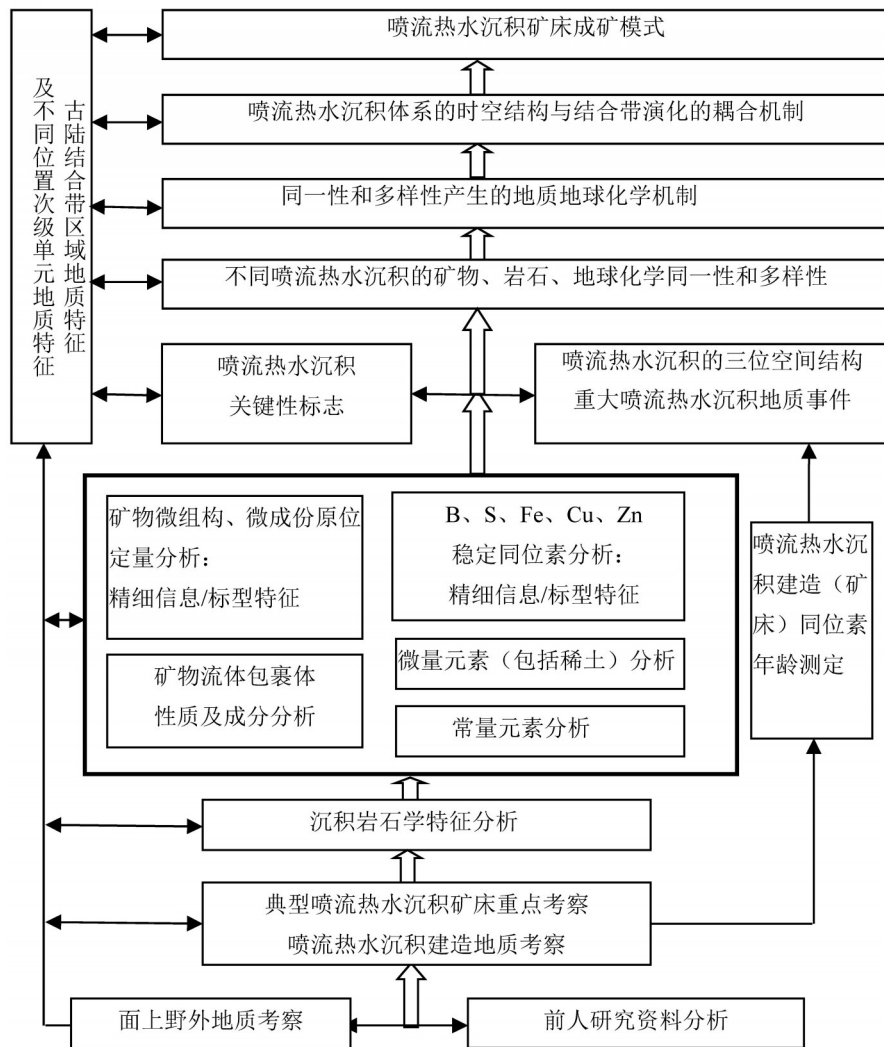


图2 钦杭成矿带海底喷流热水沉积及其成矿作用研究技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of submarine exhalation hydrothermal sedimentation and its mineralization in the Qingzhou-Hangzhou metallogenic belt

微区成分分析是值得做的一项工作,可以利用能谱仪和电子探针完成。对微形貌观察所确定的区域进行快速半定量的能谱和(或)定量的电子探针分析,以分析石英等微(细)晶与其它矿物相在成分上可能存在的继承关系。采用纳米离子探针进行硅质岩微区成份分析,以分析微(细)晶石英与其它矿物相在成分上可能存在的继承关系。

微晶成核、生长速率动力学分析是一项技术含量比较高的研究。可以参考前人对 HPHT 金刚石微晶的成核、生长速率动力学研究,依据状态方程所确定的压力与体积的关系、相变热力学计算所获的平衡线 P-T 关系式,结合研究区 SiO_2 矿物多晶的实际数据获得相关参数,分析它们在 SiO_2 矿物多晶形成中的意义。这涉及理论计算研究,主要方法包括量子化学从头计算法及半经验分子轨道理论法。通过计算各种元素位于 SiO_2 的晶格、空隙及化学键位置时能量、电子云密度等的差异,讨论它们在石英晶格中的稳定性,进而探讨这些元素存在的稳定位置及剔除的路径与方式。其次涉及微晶形成和演化的地球化学条件分析。根据包裹体测温及矿物对元素和同位素测试,对地质温度、压力等地球化学参数进行估算。利用微区 RAMAN 峰对温度、压力的变化等进行研究。

分析不同层位不同亚型喷流热水沉积在矿物学、岩石学、地球化学方面表现出的同一性和多样性,需要对比分析不同层位、不同亚型和产出背景样品所包含的喷流热水沉积体系特征,分析矿物晶粒微结构、微成分(含 Fe、Cu、Zn 同位素)的标型特征,分析多晶中与含 SiO_2 矿物共生的杂质矿物组成及配置模式。

分析不同层位不同亚型喷流热水沉积在矿物学、岩石学、地球化学方面表现出的同一性和多样性发生的地质地球化学机制,需要对比分析不同矿物晶粒微结构、微成分(含 Fe、Cu、Zn 同位素)的标型特征形成的关键性制约因素和精细关系,分析精细微结构、微成分对不同时代、不同背景喷流热水沉积建造形成的地质地球化学环境以及钦杭成矿带演化的响应。

上述分析涉及来源丰富的众多数据,可以结合大数据挖掘与机器学习算法,开展喷流热水沉积和

正常沉积有关因子的建模,挖掘隐含在大数据中的有价值信息。

5 结论

钦杭成矿带内新元古代和古生代海底喷流热水沉积很有特色,颇具找矿潜力,是研究喷流热水沉积体系时空结构与古陆间构造结合带演化耦合机制的理想场所。

进一步的深化研究需要从钦杭成矿带同时也是两个古陆结合带的整体视角,分析喷流热水沉积的时空分布特征和发育背景,区分不同沉积建造类型,厘定喷流热水沉积体系的地球化学三维空间结构,剖析不同层位和类型喷流热水沉积(矿床)在矿物学、岩石学、地球化学方面表现出的高度同一性和多样性,以及它们发生的地质地球化学机制,揭示喷流热水沉积体系时空结构与古陆间构造结合带演化的耦合机制,建立板块构造结合带演化框架下,区域及矿床尺度的喷流热水沉积成矿模式。研究结果将深化对喷流热水沉积成矿作用的认识,为海底喷流热水沉积矿床勘查提供指导,提升钦杭成矿理论研究和国际地位。

2022年,适逢中国地质调查局武汉地质调查中心迎来60周年华诞,魏道芳教授级高工特邀撰稿庆祝,作为华南地区研究的深度参与者,谨以此文祝贺武汉中心六十年辉煌!

参考文献:

- 曹亮,胡尚军,段其发,孙滕,周云,李江力,李志刚. 2019. 鄂西长阳锰矿稳定同位素特征及其地质意义 [J]. 华南地质, 35(2):226-237.
- 陈骏,陆建军,陈卫锋,王汝成,马东升,朱金初,张文兰,季峻峰. 2008. 南岭地区钨锡铌钽花岗岩及其成矿作用 [J]. 高校地质学报, 14(4):459-473.
- 陈先沛,陈多福. 1989. 广西上泥盆统乳房状燧石的热沉积地球化学特征 [J]. 地球化学, (1):1-8.
- 范宏瑞,陶克捷,谢奕汉,王凯怡. 2003. 白云鄂博 REE-Fe-Nb 矿床稀土氟碳酸盐矿物激光拉曼光谱特征及流体包裹体内稀土子矿物的鉴定 [J]. 岩石学报, 19(1): 169-172.

- 郭强, 李子颖, 秦明宽, 钟大康, 张放东, 贾翠, 邬军. 2014. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷热水沉积序列探讨 [J]. 沉积学报, 32(5):809-815.
- 郭维民, 陆建军, 蒋少涌, 章荣清, 漆亮. 2011. 安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿 Re-Os 同位素定年:海底喷流沉积成矿的年代学证据 [J]. 科学通报, 56(36):3023-3028.
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题 [J]. 地学前缘, 17(2):13-26.
- 蒋少涌. 2003. 过渡族金属元素同位素分析方法及其地质应用 [J]. 地学前缘, 10(2):269-278.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 戴宝章. 2008. 十杭带湘南—桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论 [J]. 高校地质学报, 14(4):496-509.
- 李红中, 周永章, 杨志军, 何俊国, 马占武, 吕文超, 周国富, 安燕飞, 李文, 梁锦, 王驰. 2010. 西秦岭八方山—二里河 Pb-Zn 矿区硅质岩的微区成分特征及演化 [J]. 地学前缘, 17(4):290-298.
- 李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6):543-559.
- 李晓峰, 胡瑞忠, 华仁民, 马东升, 武丽艳, 齐有强, 彭建堂. 2013. 华南中生代与同熔型花岗岩有关的铜铅锌多金属矿床时空分布及其岩浆源区特征 [J]. 岩石学报, 29(12):4037-4050.
- 李延河, 蒋少涌, 薛春纪. 1994. 秦岭凤太泥盆系铅锌矿海底喷气成因的硅、氧同位素证据 [J]. 科学通报, 39(22):2112.
- 梁锦, 周永章, 李红中, 尹缀缀, 周留煜, 曾长育, 虞鹏鹏. 2012. 钦-杭结合带斑岩型铜矿的基本地质特征及成因分析 [J]. 岩石学报, 28(10):3361-3372.
- 刘飞, 严乐佳, 李堃, 黄圭成, 汤朝阳, 邱啸飞. 2022. 右江盆地东缘早泥盆世莫丁组硅质岩地球化学特征及地质意义 [J]. 华南地质, 38(1):135-146.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律 [J]. 地质学报, 85(5):636-658.
- 倪培, 田京辉, 朱筱婷, 凌洪飞, 蒋少涌, 顾连兴. 2005. 江西永平铜矿下盘网脉状矿化的流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 21(5):1339-1346.
- 邱振, 王清晨. 2011. 广西来宾中上二叠统硅质岩海底热液成因的地球化学证据 [J]. 中国科学:地球科学, 41(5):725-737.
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局 [J]. 中国科学(B辑), (4):414-422.
- 覃小锋, 潘元明, 夏斌, 李容森, 周府生, 胡贵昂, 陆国斌. 2007. 云开地块北缘构造带中变质基性火山岩的地球化学特征及其大地构造意义 [J]. 地球化学, 36(3):311-322.
- 涂光炽等. 1987. 中国层控矿床地球化学(第二卷) [M]. 北京:科学出版社.
- 王鹤年, 李红艳, 王银喜, 王海红. 1996. 广东大降坪块状硫化物矿床形成时代——硅质岩 Rb-Sr 同位素研究 [J]. 科学通报, 41(21):1960-1962.
- 王汝成, 朱金初, 张文兰, 谢磊, 于阿朋, 车旭东. 2008. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学:概念与实例 [J]. 高校地质学报, 14(4):485-495.
- 王忠诚, 吴浩若, 邝国敦. 1995. 广西晚古生代硅岩的地球化学及其形成的大地构造环境 [J]. 岩石学报, 11(4):449-455.
- 王卓卓, 施立志, 张永生, 陈代钊, 梁江平. 2015. 湘桂地区泥盆纪硅岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素地球化学特征及构造沉积背景研究 [J]. 沉积学报, 33(4):679-686.
- 肖应凯, 刘卫国, 魏海珍. 1998. 硼同位素测定的进展及存在的问题 [J]. 质谱学报, 19(4):65-75.
- 徐德明, 蒯志永, 龙文国, 张鲲, 王磊, 周岱, 黄皓. 2012. 钦杭成矿带的研究历史和现状 [J]. 华南地质与矿产, 28(4):277-289.
- 徐德明, 蒯志永, 骆学全, 张鲲, 张雪辉, 黄皓. 2015. 钦-杭成矿带主要金属矿床成矿系列 [J]. 地学前缘, 22(2):7-24.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 陈毓川, 董连慧, 顾雪祥, 张招崇, Nurtaev B, Pak N, 李志丹, 王新利, 张国震, 亚夏尔亚力坤, 冯博, 俎波, 刘家瑛. 2014. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造成矿演化和找矿方向 [J]. 地质学报, 88(12):2490-2531.
- 杨开辉, 侯增谦, 莫宣学. 1992. “三江”地区火山成因块状硫化物矿床的基本特征与主要类型 [J]. 矿床地质, 11(1):35-44+64.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征 [J]. 华南地质与矿产, (3):52-59.
- 姚旭, 周瑶琪, 李素, 李斗. 2013. 硅质岩与二叠纪硅质沉积事件研究现状及进展 [J]. 地球科学进展, 28(11):1189-1200.
- 叶美芳. 2006. 扬子板块东南缘新元古代四堡期岩浆弧:来自浙北花岗质侵入体的年代学、地球化学和 Nd-Hf-O 同位素证据 [D]. 中国科学院广州地球化学研究所硕士

- 学位论文.
- 于津海, 楼法生, 王丽娟, 沈林伟, 周雪瑶, 张春晖, 黄志忠. 2014. 赣东北弋阳早古生代麻粒岩的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 59(35):3508-3516.
- 虞鹏鹏, 周永章, 郑义, 陈炳辉, 杨威, 牛佳, 周维丽. 2017. 钦-杭结合带南段新元古代俯冲作用:来自粤西贵子混杂岩变基性岩年代学和地球化学的证据 [J]. 岩石学报, 33(3):739-752.
- 曾长育, 周永章, 郑义, 虞鹏鹏, 牛佳, 梁锦. 2015. 钦-杭结合带在中生代构造转折事件以前的板块构造机制 [J]. 地学前缘, 22(2):54-63.
- 中国地质调查局. 2010. 钦杭成矿带重要矿产勘查部署方案 [Z].
- 周永章, 付伟, 杨志军, 聂凤军, 何俊国, 赵元艺, 李振清, 胡朋, 石贵勇, 李文. 2006. 雅鲁藏布江缝合带及藏南地区硅质岩微组构特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 22(3):742-750.
- 周永章. 1990. 丹池盆地热水成因硅岩的沉积地球化学特征 [J]. 沉积学报, 8(3):75-83.
- 周永章, 何俊国, 杨志军, 付伟, 杨小强, 张澄博, 杨海生. 2004. 华南热水沉积硅质岩建造及其成矿效应 [J]. 地学前缘, 11(2):373-377.
- 周永章, 郑义, 曾长育, 梁锦. 2015. 关于钦-杭成矿带的若干认识 [J]. 地学前缘, 22(2):1-6.
- 周永章, 曾长育, 李红中, 安燕飞, 梁锦, 吕文超, 杨志军, 何俊国, 沈文杰. 2012. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向 [J]. 地质通报, 31(2-3):486-491.
- 周永章, 李兴远, 郑义, 沈文杰, 何俊国, 虞鹏鹏, 牛佳, 曾长育. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律 [J]. 岩石学报, 33(3):667-681.
- 周永章, 牛佳, 林振文, 王树功, 虞鹏鹏, 陈钰, 李景哲, 李兴远, 梁志鹏, 杨瞳, 郑蕾, 张介棠, 唐沐阳, 郭晓昱, 杨威, 刘奇缘. 2016. 钦杭成矿带西段资源远景调查评价报告 [R]. 中国地质调查局.
- 周永章, 张国桓, 吴勇庆, 曾长育, 梁锦, 陈钰, 林振文, 虞鹏鹏, 牛佳, 李兴远, 李森, 张春辉, 温永辉, 张国欢, 张轩国. 2016. 广东庞西垌地区矿产远景调查报告(文地幅、石角幅、塘蓬幅、河唇幅, 1:50000) [R]. 中国地质调查局.
- 朱祥坤, 王跃, 闫斌, 李津, 董爱国, 李志红, 孙剑. 2013. 非传统稳定同位素地球化学的创建与发展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(6):651-688.
- 祝新友, 王京彬, 刘慎波, 王艳丽, 韩英, 甄世民, 郭宁宁. 2013. 广东凡口MVT铅锌矿床成矿年代——来自辉绿岩锆石 SHRIMP 定年证据 [J]. 地质学报, 87(2):167-177.
- Allen R L, Tornos F, Peter J M. 2011. A thematic issue on the geological setting and genesis of volcanogenic massive sulfide(VMS)deposits [J]. Mineralium Deposita, 46(5-6):429-430.
- Bennett S A, Rouxel O, Schmidt K, Garbe-Schönberg D, Statham P J, German C R. 2009. Iron isotope fractionation in a buoyant hydrothermal plume, 5°S Mid-Atlantic Ridge [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(19):5619-5634.
- Bonatti, E. 1975. Metallogenesis at Oceanic Spreading Centers [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 3(1):401-431.
- CASE(Canadian American Seamount Expedition). 1985. Hydrothermal vents on an axis seamount of the Juan de Fuca ridge [J]. Nature, 313:212-214.
- Gagnevin D, Boyce A J, Barrie C D, Menuge J F, Blake-man R J. 2012. Zn, Fe and S isotope fractionation in a large hydrothermal system [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 88(1):183-198.
- Gillis K M, Coogan L A, Brant C. 2015. The role of sedimentation history and lithology on fluid flow and reactions in off-axis hydrothermal systems: A perspective from the Troodos ophiolite [J]. Chemical Geology, 414:84-94.
- Heaney P J, Vicenzi E P, De S. 2005. Strange Diamonds: The Mysterious Origins of Carbonado and Framesite [J]. Elements, 1(2):85-89.
- Hutchinson R W. 1965. Genesis of Canadian massive sulphides reconsidered by comparison to Cyprus deposits [J]. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 58(641):972-986.
- Iijima A, Hein J R, Seiver R. 1983. Siliceous deposits in the Pacific region [M]. Amsterdam: Elsevier, 193-194.
- Kemkin I V, Kemkina R A. 2015. Depositional Environment of Cherts of the Sikhote-Alin Region (Russia Far East): Evidence from Major, Trace and Rare Earth Elements geochemistry [J]. Journal of Earth Science, 26(2):259-272.
- Larson P B, Cunningham C G. 1994. Large-scale alteration effects in the Rico paleothermal anomaly, South Colorado [J]. Economic Geology, 89(8):1769-1779.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South

- China? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 173: 171-181.
- Liu T, Liu C D, Yan Z B, Chen Y P. 2013. Meso-Proterozoic Marine Exhalative Mineralization in Qinhang Belt—An Example from Xingyuanchong Copper Deposit in Wanzai, Jiangxi [J]. *Advances in Geosciences*, 3(2):117-121.
- Lobanov K, Yakubchuk A, Creaser R A. 2014. Besshi-Type VMS Deposits of the Rudny Altai (Central Asia) [J]. *Economic Geology*, 109(5): 1403-1430.
- Maréchal C N, Télouk P, Albarède F. 1999. Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry [J]. *Chemical Geology*, 156(1-4): 251-273.
- Marin-Carbonne J, Chaussidon M, Robert F. 2012. Micrometer-scale chemical and isotopic criteria (O and Si) on the origin and history of Precambrian cherts: Implications for paleo-temperature reconstructions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92(1): 129-147.
- Marschall H R, Jiang S Y. 2011. Tourmaline Isotopes: No Element Left Behind [J]. *Elements*, 7(5): 313-319.
- Miller A R, Densmore C D, Degens E T, Hathaway J C, Manheim F T, McFarlin P F, Pocklington R, Jokela A. 1966. Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 30(3): 341-359.
- Piercey S J. 2011. The setting, style and role of magmatism in the formation of volcanogenic massive sulfide deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 46(5-6): 449-471.
- Rona P A, Scott S D. 1993. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization [J]. *Economic Geology*, 88(8): 1935-1976.
- Sawkins F J. 1976. Massive sulfide deposits in relation to tectonics [A]. // In: Strong D F (ed.). *Metallogeny and Plate Tectonics* [C]. Geological Association of Canada, Special Paper, 14: 221-240.
- Scott S D. 2013. Modern and fossil sea-floor VMS and SEDEX ore deposit models [C] in *Society of Economic Geologists Short Course Volume*, Guangzhou, 1.
- Shu L S, Jahn B M, Charvet J, Santosh M, Wang B, Xu X S, Jiang S Y. 2014. Early Paleozoic depositional environment and intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia Block (South China): Evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations [J]. *American Journal of Science*, 314(1): 154-186.
- Spinks S C, Schmid S, Pagés A, Bluett J. 2016. Evidence for SEDEX-style mineralization in the 1.7 Ga Tawallah group, McArthur basin, Australia [J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 122-139.
- Xu X S, Suzuki K, Liu L, Wang D Z. 2010. Petrogenesis and tectonic implications of Late Mesozoic granites in the NE Yangtze Block, China: further insights from the Jiuhuashan-Qingyang complex [J]. *Geological Magazine*, 147(2): 219-232.
- Yang Z J, Li H Z, Peng M S, Chen J, Lin F and Su Y W. 2008. Study on the HPHT synthetic diamond crystal from Fe-C(H) system and its significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(1): 137-144.
- Yu J H, O'Reilly S Y, Wang L J, Griffin W L, Zhou M F, Zhang M, Shu L S. 2010. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments [J]. *Precambrian Research*, 181(1-4): 97-114.
- Zhou Y Z, Chown E H, Guha J, Lu H Z, Tu G Z. 1994. Hydrothermal origin of Late Proterozoic bedded chert at Gusui, Guangdong, China: Petrologic and geochemical evidence [J]. *Sedimentology*, 41(3): 605-619.
- Zhu X K, O'Nions R K, Guo Y, Reynolds B C. 2000. Secular variation of iron isotopes in North Atlantic deep water [J]. *Science*, 287(5460): 2000-2002.