

南岭钨锡成矿作用几个关键科学问题 及其对区域找矿勘查的启示

袁顺达

中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室,北京 100037

摘要:南岭地区中生代多期次、大规模的钨锡多金属成矿作用造就了全球最为重要的钨锡成矿带。本文结合最新的相关研究成果及找矿突破,系统综述了南岭地区成岩成矿作用时空分布格局、成矿花岗岩的矿物学、地球化学特征和矿床模型的研究进展及存在问题,并在此基础上初步提出了该区深部找矿方向,以期推动区域找矿勘查取得新突破。

关键词:钨锡成矿作用;时空分布格局;成矿花岗岩;钨锡矿床模型;南岭

中图分类号:P618.6 文章编号:1007-2802(2017)05-0736-14 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2017.05.004

Several Crucial Scientific Issues Related to the W-Sn Metallogenesis in the Nanling Range and Their Implications for Regional Exploration: A Review

YUAN Shun-da

MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract: Multiple, large scale Mesozoic W-Sn polymetallic metallogenic events in the Nanling Range generate one of the most important W-Sn metallogenic belts in the world. Here, combined with the latest research advances and progresses on mineral exploration in the Nanling Range, we conduct a systematic review on the spatial-temporal distribution of the Mesozoic W-Sn polymetallic deposits and related granitic plutons, mineralogical and geochemical characteristics of W-Sn-bearing granites, and prospecting models for W-Sn mineralization in the Nanling Range. Based on the above, we analyze potential prospecting target in deep W-Sn polymetallic deposits in the Nanling Range, in order to promote regional mineral exploration.

Key words: W-Sn metallogenesis; spatial-temporal distribution; ore-related granite; W-Sn metallogenic model; Nanling Range

南岭是中国东部中生代爆发式成矿的重要地区,发育有西华山、大吉山、瑶岗仙、柿竹园、香花岭、芙蓉等一大批超大型-大型钨锡多金属矿床,据2007年的统计,南岭地区钨、锡保有储量分别占全国的83%和63%(王登红等,2007)。长期以来,许多学者对该区钨锡矿床及相关的花岗岩开展了大量的研究(Hsu, 1943; 黄汲清和陈廷愚,1986; 裴荣富等,2009),取得了一系列重要成果,尤其是改造型花岗岩与钨锡成矿的关系(Xu *et al.*, 1982)、石英脉型钨锡矿的“五层楼”式找矿模式(广东冶金地质勘探公司932队,1966; 柳志青等,1980),以及大规

模钨锡成矿作用与岩石圈多阶段的伸展关系(毛景文等,2004a, 2004b, 2007, 2008)等研究成果,这在很大程度上丰富了钨锡成矿理论,同时推动了找矿勘查工作取得一系列重大突破。华仁民等(2005, 2010)、毛景文等(2007)、彭建堂等(2008)、陈骏等(2008)及胡瑞忠等(2010)就南岭地区钨锡成岩成矿作用时限、钨锡大规模成矿作用的差异、成矿花岗岩的划分及成岩成矿背景等方面进行了全面、系统的分析和总结。近年来,随着地质找矿工作的不断推进,南岭地区钨锡多金属矿的勘查又取得了一系列重大突破,成岩成矿作用的研究也取得了许多

收稿日期:2017-01-15收到,2017-04-12改回

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0600205);国家自然科学基金项目(41373047,41672095)

作者简介:袁顺达(1980-),男,博士,研究员,获第16届侯德封奖,研究方向:华南花岗岩浆热液成矿作用. E-mail: shundayuan@cags.ac.cn.

新的认识。本文结合最新的找矿勘查进展和研究新认识,对南岭地区中生代钨锡多金属矿床的时空分布格局、成矿花岗岩的地球化学特征及找矿标识,以及矿床模型的构建等方面的研究进展及存在的问题进行了系统的论述,并在此基础上初步提出该区深部找矿方向,以期深化南岭地区钨锡成矿作用的研究,推动区域找矿勘查取得突破。

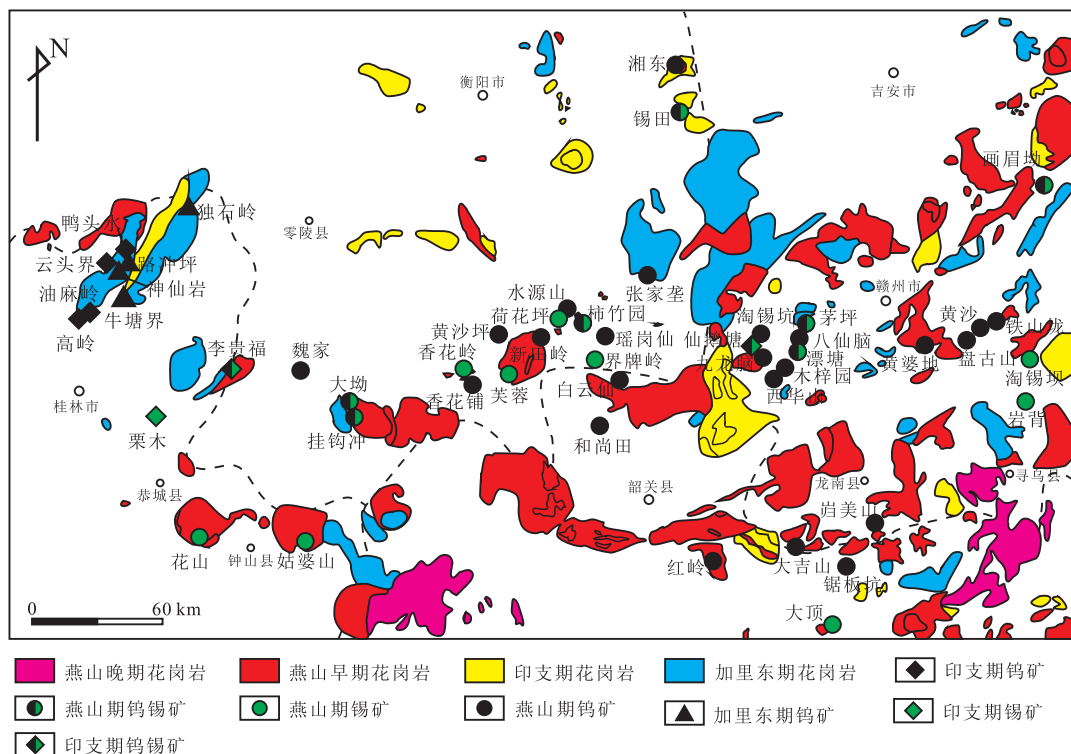
1 钨锡多金属矿床的时空分布格局

南岭地区位于华南腹地,横跨湘、桂、粤、赣、闽5省区,主体由越城岭、都庞岭、萌渚岭、骑田岭和大庾岭5大花岗岩体组成(舒良树等,2006)。目前,不同学者对南岭成矿带的边界划分有一定的差别,本文讨论的南岭钨锡成矿带的范围仅限于苗儿山-越城岭以东,武夷山以西地区,经纬度限定为东经 $110^{\circ}\sim 116^{\circ}$ 、北纬 $24^{\circ}\sim 27^{\circ}$,区内发育有西华山、大吉山、淘锡坑、柿竹园、香花岭、芙蓉、红旗岭及栗木等一系列超大型、大型钨、锡多金属矿床,这些矿床在时、空及成因上通常与出露面积较小的花岗岩株密切相关(图1);由于围岩性质的差异,在南岭东段湘赣粤加里东隆起区以发育石英脉型钨多金属矿床为主要特征,而在南岭西段湘桂粤海西-印支凹陷区则以矽卡岩型钨锡多金属矿床为主,而蚀变

花岗岩型、云英岩型及伟晶岩型矿化在全区范围内均有产出。自20世纪90年代以来,随着大量锆石 SHRIMP 和 LA-(MC)-ICP-MS U-Pb, 辉钼矿 Re-Os、云母 Ar-Ar 及锡石 U-Pb 等高精度同位素年代学数据的积累,南岭地区钨锡多金属矿床的时空分布格局逐渐明晰,除牛塘界钨矿白钨矿 Sm-Nd 年龄(421 ± 24) Ma 指示其形成于加里东期之外(杨振等,2014),绝大多数钨锡矿床形成于中生代,并具有多期次、爆发式成矿的特点(华仁民和毛景文,1999;毛景文等,2007;彭建堂等,2008;Yuan *et al.*, 2015),毛景文等(2008)和 Mao 等(2013)系统总结了近年来发表的高精度同位素年代学数据,将南岭地区钨锡多金属成矿作用主要划分为3期成矿事件,分别为:晚三叠世(230~210 Ma)、中晚侏罗世(160~150 Ma)和白垩纪(120~80 Ma)。最近,笔者等对南岭成矿带东南缘的粤北大顶大型锡铁矿床的花岗岩进行的锆石 SIMS U-Pb 及辉钼矿 Re-Os 测年结果显示,其成岩成矿主要集中于 189~186 Ma (袁顺达等未发表数据),指示南岭地区存在早侏罗世的锡成矿事件。

1.1 晚三叠世钨锡成矿作用

印支造山运动完成了华南与华北地块的拼合,形成了统一的中国大陆。南岭地区尽管处于华南



图件修改自: 陈骏等(2014)

图1 南岭地区花岗岩及钨锡矿分布图

Fig.1 Distribution of granitoids and associated W-Sn deposits in the Nanling Range

腹地,但受多块体碰撞作用远程效应的影响(毛景文等,2012),依次发育有一系列早-中三叠世同碰撞花岗岩和晚三叠世后碰撞花岗岩(Zhou *et al.*, 2006)。梁新权等(2005)对广西十万大山沉积盆地的分析结果显示,晚三叠世陆相及海陆交互相碎屑沉积呈角度不整合覆盖于中三叠世过铝质花岗岩之上,指示印支运动碰撞挤压的结束及后造山伸展的开始。在这种伸展体制下,南岭地区晚三叠世发育了一系列后碰撞花岗岩,并伴随有钨锡多金属成矿作用,并由此拉开了该区中生代多期次、大规模钨锡成矿作用的序幕。蔡明海等(2006)较早获得湘南荷花坪矿区辉钼矿 Re-Os 年龄为 (224.0 ± 1.9) Ma,与王仙岭岩体电气石花岗岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(~ 224 Ma, Zhang *et al.*, 2015)相一致,指示南岭地区存在印支期稀有金属成矿作用。在南岭成矿带西段,杨锋等(2009)获得栗木大型锡铌钽矿云英岩化花岗岩的白云母 Ar-Ar 年龄为 (214 ± 1.9) Ma,康志强等(2012)和马丽艳等(2013)获得成矿花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 218 ~ 214 Ma; 邹先武等(2009)获得都庞岭地区李贵福钨锡矿辉钼矿 Re-Os 年龄为 (211.9 ± 6.4) Ma; 在赣南地区,刘善宝等(2008)获得了崇余犹矿集区仙鹅塘钨锡矿的白云母 Ar-Ar 年龄为 (231.4 ± 2.4) Ma; 在南岭成矿带东边界附近的闽西地区,赵蕾等(2006)获得了具有钨锡成矿潜力的红山花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (226.2 ± 2.4) Ma; 最近,在南岭西段的苗儿山-越城岭加里东期大花岗岩基的周缘也陆续发现了云头界、界牌、油麻岭及高岭等一系列印支期的钨多金属矿床(点)(伍静等,2012; 李晓峰等,2012; 杨振等,2013; 张迪等,2015); 而湘南王仙岭岩体周缘亦发现了水源山和野鸡窝等印支期的大、中型钨矿(Zhang *et al.*, 2015)。最近,笔者在考察印支期的塔山岩体周缘的田木冲钨锡矿时也发现,区内细粒电气石花岗岩发生强烈的云英岩化,并伴有含电气石的石英脉型钨多金属矿化,可能指示区内钨锡矿床亦形成于晚三叠世,但需要高精度成矿年代学数据的进一步支持。总体上,这些晚三叠世钨锡矿床成岩成矿时代的精确厘定,显示南岭地区存在晚三叠世重要的钨锡成矿事件。

尽管蔡明海等(2006)较早获得荷花坪矿区辉钼矿的 Re-Os 年龄为 (224.0 ± 1.9) Ma,但最近 Zhang 等(2015)对王仙岭岩体周缘钨锡矿中的锡石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 及白云母 Ar-Ar 的测年结果显示,辉钼矿 Re-Os 及云母 Ar-Ar 年龄集中于 224 ~

214 Ma,代表了该区钨矿化时限,而锡石 U-Pb 年龄约为 156 Ma,指示荷花坪锡矿形成于晚侏罗世。另外,锡田锡矿尽管产出于锡田印支期花岗岩基周缘,但高精度的年代学数据显示其锡成矿作用亦发生于晚侏罗世(郭春丽等,2014)。这些资料显示,尽管南岭地区晚三叠世整体上呈现钨锡并重的态势,但规模较大的锡矿仅有栗木,而钨矿床除了最大的湘南水源山钨矿外,还有其他较多矿床。因此,从矿床(点)数量来看,本区晚三叠世以钨为主的矿床(点)明显居多,进一步找矿的潜力也较大。从空间分布来看,尽管南岭晚三叠世钨锡矿呈面型分布于全区,但西段的成矿强度明显强于东段,通常围绕单个岩体周缘发育多个矿床及矿化点,如苗儿山-越城岭、海洋山、塔山及王仙岭岩体等,矿化类型包含矽卡岩型(如云头界)、云英岩型(如水源山)、石英脉型(如仙鹅塘)、伟晶岩型(栗木)及蚀变花岗岩型(栗木)等。结合南岭地区构造演化历史, Mao 等(2013)认为包括南岭地区在内的整个华南地区晚三叠世钨锡成矿作用发生于印支期华南地块与其周缘多块体碰撞的后造山伸展环境。

1.2 早侏罗世钨锡成矿作用

早中生代时期,华南地区经历了从东西向特提斯构造域向东北向太平洋构造域转换的重大调整,而早侏罗世被认为是重要的调整期,也是岩浆活动及成矿作用的宁静期(205 ~ 180 Ma, Zhou *et al.*, 2006)。然而,过去十几年积累的高精度同位素年代学数据显示,南岭地区零星分布有一系列早侏罗世的 A 型花岗岩、正长岩及辉长岩(陈培荣等, 1998, 2002; 丁兴等,2005; Yu *et al.*, 2009, 2010; Zhu *et al.*, 2010; 贾小辉等,2014),指示南岭地区早侏罗世处于地壳拉张、岩石圈伸展的构造背景之下,而针对该时期的钨锡成矿作用则很少有人涉及。

大顶大型锡铁矿床位于南岭成矿带东缘晚古生代永安-梅州凹陷带内,是南岭地区代表性的镁质矽卡岩型大型锡铁矿床,在构造上位于东北向展布的河源-广丰深大断裂带附近。以往研究认为,大顶锡铁矿床为同生沉积成矿或火山喷气成矿,并经历了花岗质岩浆热液叠加成矿(陈婉君和杨智荣, 2008; 郑昌平等,2009)。笔者最近对大顶锡铁矿床成矿花岗岩和矿石分别开展了锆石 SIMS U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年,获得锆石 SIMS U-Pb 年龄为 (189.0 ± 1.5) Ma,辉钼矿 Re-Os 年龄为 (186.7 ± 1.2) Ma(袁顺达等,未发表数据),指示其成岩成矿作用均发生于早侏罗世。由于目前南岭地区可以确定的早侏罗世钨锡矿床仅此一例,因而其时、空

分布格局还不明晰。但从其构造背景来看,南岭地区早侏罗世指示岩石圈伸展背景的岩石在桂北(贾小辉等, 2014)、湘南(刘勇等, 2010)、粤北(Yu *et al.*, 2009)及赣南地区(Li and Li, 2007; Yu *et al.*, 2010)均有分布,指示早侏罗世整个南岭地区均处于岩石圈伸展背景之下,因而区内早侏罗世的锡矿成岩成矿作用可能是区域岩石圈伸展的背景下构造-岩浆活动的产物。

1.3 中晚侏罗世钨锡成矿作用

中-晚侏罗世是南岭巨量钨锡多金属富集成矿的重要时期,到目前已获得的年龄来看,除了湘南白云仙将军寨钨矿辉钼矿 Re-Os 年龄为(169.6±2.7) Ma(王永磊等, 2009)外,西华山、大吉山、瑶岗仙、柿竹园、香花岭及芙蓉等主要的超大型、大型矿床的辉钼矿 Re-Os、锡石 U-Pb 及云母 Ar-Ar 年龄均主要集中于 160~150 Ma(毛景文等, 2004a, 2007, 2008; Li *et al.*, 2004; Peng *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007, 2008a, 2011; 袁顺达等, 2012a, 2012b; 刘晓菲等, 2012; Hu *et al.*, 2012a, 2012b; Hu and Zhou, 2012; Mao *et al.*, 2013; 原垭斌等, 2014; Chen *et al.*, 2014; 王志强等, 2014)。空间上,这期成矿作用存在东西分区、北东呈带的分布格局;南岭东段的赣南、粤北及湘赣交界区域以钨成矿作用为主,矿化类型主要为石英脉型黑钨矿;而西段的湘南及桂东地区则是钨锡成矿并重,矿化以矽卡岩型为主。这期成矿作用在分布范围、强度和规模上均占据南岭钨锡成矿作用的主导地位,巨量钨锡多金属的富集成矿与该区构造体制转换、岩石圈伸展背景下,强烈壳幔相互作用密切相关(Li *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012b),东北向与东西向断裂交汇部位往往是大规模成岩成矿作用的有利部位(毛景文等, 2007),但也有部分中晚侏罗世花岗岩沿着先存花岗岩侵位通道侵入到晚侏罗世之前的花岗岩中成矿,如大吉山钨矿、邓阜仙钨矿、张家垄钨矿、锡田锡矿及荷花坪锡矿等,王登红等(2012, 2014)将这类成矿作用称为“体中体”,笔者将在后面钨锡矿床与多期次花岗岩空间格架及成因关系部分重点述及这类矿床及其找矿方向。

1.4 白垩纪钨锡成矿作用

白垩纪的钨锡矿床在南岭地区分布较少,在赣东南会昌火山盆地,发育有岩背、淘锡坝、凤凰崇、苦竹崇、矿背及上湾等大中型锡多金属矿床(点),邱检生等(2006)获得与成矿有关的密坑山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(136.0±1.7) Ma,而高精度成矿年龄数据较为缺乏,仅有的两个辉钼矿

Re-Os 模式年龄分别为(120.2±5.3) Ma 和(114.0±1.6) Ma,全岩及石英 Rb-Sr 年龄为 128~125 Ma(梅玉萍等, 2007);区域上,许建祥等(2007)获得了寻乌铜坑嶂 Mo-Sn-W-Cu-Ag 矿 6 件辉钼矿 Re-Os 加权平均年龄为(133.77±0.65) Ma,与成矿岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(138±1) Ma(苏慧敏等, 2010)在误差范围内一致;考虑到不同测年方法的差异,铜坑嶂钼矿、岩背锡矿及区内其他钨锡矿床的成岩成矿作用可能主要发生于早白垩世,与相邻的武夷成矿带钨铅锌成矿时代接近(邱骏挺等, 2011)。在南岭西段,余勇等(2014)获得花山-姑婆山岩体的南缘盐田岭岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(106±13) Ma,与之相关的珊瑚钨锡矿热液绢云母的 Ar-Ar 年龄为(103.6±1.2) Ma,长营岭钨锡矿白云母 Ar-Ar 年龄为 102~100 Ma(肖荣等, 2011),指示珊瑚钨锡矿田成岩成矿作用发生于早白垩世晚期;在湘南地区, Yuan 等(2015)获得了界牌岭大型 Sn-Be-F 矿床成矿斑岩锆石 U-Pb 年龄为(90.5±0.9) Ma,云英岩型矿石白云母 Ar-Ar 年龄为(92.1±0.7) Ma,指示成岩成矿作用发生于晚白垩世,同时该矿床也是南岭地区目前发现的唯一一个晚白垩世锡矿床。相对而言,南岭地区白垩纪钨锡成矿作用的强度和规模明显弱于侏罗纪,从时间分布上,尽管这些矿床均形成于白垩纪,但成岩成矿年龄不连续,且跨度范围较大(138~90 Ma);在空间上,寻乌、会昌地区正好位于南岭成矿带东缘与武夷成矿带西缘的交汇部位,锡多金属矿床主要产于火山盆地内,这与整个武夷成矿带内以发育火山岩带及相关成矿作用相似,而与南岭主体地区以发育大规模中生代花岗质侵入岩明显不同;而南岭西段的白垩纪钨锡成矿作用则主要集中于早白垩世晚期至晚白垩世早期,与桂北地区的大厂锡矿(96~91 Ma, 王登红等, 2004; 王新宇等, 2015)及粤西银岩锡矿[辉钼矿 Re-Os 年龄为(78.65±0.98) Ma, Zheng *et al.*, 2016],及锡山钨锡矿床[锆石 U-Pb 年龄为(103±3) Ma, 梅玉萍等, 2013]在时间上更为接近。因而,南岭地区白垩纪钨锡成矿作用或许分别是武夷成矿带和右江成矿带白垩纪成矿延伸的结果。

1.5 钨锡成矿作用的空间分区

南岭钨锡成矿作用不仅在时间上表现为多期次,而且不同区段矿种组合存在明显差异,以钦杭构造带为界,东段以广泛发育大型石英脉型钨矿,独立的或以锡为主的锡矿床很少(华仁民等, 2008),而在钦杭带及其以西发育有一系列大型锡

多金属矿床。另外,由于部分研究基于华南褶皱带涉及范围将南岭范围扩大到桂北至滇东南地区(华仁民等,2008; 李建康等,2013),因而“南岭”钨锡矿的空间分布规律可以总结为“东钨西锡”(华仁民等,2010)。事实上,传统上定义的南岭地区最突出的特点为东段以发育石英脉型黑钨矿,而西段则形成一系列超大型矽卡岩型钨锡多金属矿,从金属储量对比来看,南岭东段的赣南地区钨储量为 150 万 t(许建祥等,2008),而南岭西段仅在湘南地区除了锡的保有储量达 115.46 万 t 之外,钨的保有储量也达 166.69 万 t(车勤建等,2005)。近年来,又在王仙岭地区发现水源山大型钨矿,在铜山岭地区发现超大型魏家钨矿(赵盼捞等,2016; Zhao *et al.*, 2016),在南岭西界苗儿山-越城岭地区亦发育云头界等一系列钨多金属矿床(点),因而南岭西段也是钨成矿的有利地带。最近在赣西北发现了大湖塘和朱溪两大世界级钨多金属矿床,因而王登红等(2012)根据最新的资源分布格局进一步总结整个华南地区钨锡资源分布格局为“东钨西扩,南钨北扩”,对区域成矿作用研究及找矿勘查提供了重要信息。但总体来讲,南岭地区的锡多金属矿床多集中于南岭西段尤其是钦杭构造带及西侧,一些学者认为南岭西段花岗岩浆沿着钦杭深断裂带侵位的过程中,强烈的壳幔相互作用是大规模锡成矿的重要原因(赵振华等,2000; 华仁民等,2010),而 He-Ar 同位素的示踪结果显示,无论是南岭东段的钨矿还是西段的钨锡矿,成岩成矿过程中均有地幔物质的参与(Li *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012b; Wei *et al.*, 2012); 而从花岗岩的物质来源方面,Guo 等(2015)认为即使是钦杭构造带内的千里山花岗岩的形成仍以古老地壳物质的部分熔融为主,幔源物质的参与较少。但南岭西段的成矿花岗岩主要沿着郴州-临武深大断裂带分布,大多具有 A 型花岗岩的特征(朱金初等,2008; 蒋少涌等,2008; Chen *et al.*, 2014, 2016),这与南岭东段成矿花岗岩明显不同。因而,南岭钨锡成矿花岗岩物源主体为壳源,大规模成岩成矿作用与不同程度的壳幔相互作用密切相关已经得到普遍认同,但不同区段壳幔相互作用的强度差异及其对南岭西段巨量锡富集成矿作用的制约机制仍需深入研究。

1.6 钨锡矿床与多期次花岗岩的空间格架及成因关系

从钨锡矿床与花岗岩的空间关系来看,尽管南岭地区绝大多数钨锡多金属矿床与出露面积较小的花岗岩株或岩枝密切相关,但随着骑田岭大花岗

岩基南部芙蓉超大型锡矿的发现,大花岗岩基成矿受到广泛关注。南岭之名来自于地理上的五大花岗岩山岭,尽管大花岗岩基的绝对数量较少,但总出露面积大,因而围绕这些大花岗岩基开展找矿工作是该区找矿勘查工作的重要内容。最近在彭公庙加里东期大花岗岩基南缘发现了张家垄、杨梅坑及圳口等大中型钨矿,在桂东加里东期大花岗岩基内部发育有流源锡矿和竹园里钨矿,在苗儿山-越城岭、都庞岭、海洋山、锡田及邓阜仙花岗岩基周缘也发育有一系列钨锡矿床,指示了南岭地区大花岗岩基及其周缘具有较大的找矿潜力。然而,南岭地区的大花岗岩基为由多期次花岗岩组成的复式岩体,因而明确大岩基周围钨锡矿床与区内不同期次花岗岩的时间及成因关系对于区域找矿勘查工作具有重要的指导意义。而在开展成岩成矿年代学研究时,需要考虑不同测年方法的适用性及影响同位素年龄的因素,如南岭地区成钨锡花岗岩中的锆石多为高 U 锆石,高 U 含量容易破坏锆石晶格导致 Pb 的丢失而导致年龄数据较为混乱;而钾长石 K-Ar 封闭温度很低($<150^{\circ}\text{C}$),容易导致放射成因 Ar 丢失,不适合侵入岩的测年(高晶晶和刘玉琳,2006);同样地,Rb-Sr 同位素体系也容易发生放射成因 Sr 丢失而导致 Rb-Sr 年龄偏低(Walraven *et al.*, 1990; 彭建堂等,2007);更为重要的是,在采用流体包裹体 Rb-Sr 测年方法定年时,如何排除多期次流体包裹体形成混合年龄更为关键。因而,采用可靠的同位素测年方法获取成岩成矿年龄是合理解释成矿年代学数据的前提。目前,辉钼矿 Re-Os 测年已成为直接测定南岭地区钨锡成矿年龄的有效手段之一(李红艳等,1996; Peng *et al.*, 2006; 姚军明等,2007; 李光来等,2011; 袁顺达等,2012a; 刘晓菲等,2012),但由于 Mo 在流体中迁移的地球化学行为与 W 较为相似,而与 Sn 明显不同(华仁民等,2008),导致辉钼矿多与黑钨矿或白钨矿共生,而较少与锡石共生,因而辉钼矿的 Re-Os 年龄通常可以代表区内钨成矿年龄,但并不一定指示锡成矿年龄。但最近新开发的锡石 U-Pb 测年法则可以直接、精确测定锡成矿年龄(刘玉平等,2007; 袁顺达,2007; Yuan *et al.*, 2008a, 2011; 袁顺达等,2010)。将辉钼矿 Re-Os、锡石 U-Pb、云母 Ar-Ar、白钨矿 Sm-Nd、黑钨矿 U-Pb 及锆石 U-Pb 等测年手段相结合,可以精确厘定成岩成矿时限,对理解南岭地区复式花岗岩基周缘多期次钨锡成矿作用及指导区域找矿勘查工作具有重要意义。如蔡明海等(2006)根据荷花坪矿区辉钼矿 Re-Os 年龄(224.0 ± 1.9) Ma,认

为荷花坪锡矿形成于晚三叠世;而 Zhang 等(2015)通过系统的辉钼矿 Re-Os、锡石 U-Pb、云母 Ar-Ar 及锆石 U-Pb 测年,明确了荷花坪矿区存在晚三叠世和晚侏罗世两期成岩成矿事件,晚三叠世以钨钼成矿作用为主,与王仙岭印支期花岗岩存在密切的成因联系,而晚侏罗世发育荷花坪大型锡矿,与区内隐伏的晚侏罗世荷花坪黑云母花岗岩有关。

芙蓉锡矿以往被认为是大花岗岩基成矿的典型代表,学界对其成因存在着不同的认识(王登红等,2003;毛景文等,2004a; Zhao *et al.*, 2005; 彭建堂等,2007; 李鸿莉等,2007; 蒋少涌等,2008; Yuan *et al.*, 2008b; 2011)。以往的研究将骑田岭大花岗岩基的主体划分为两个阶段:第1阶段以角闪石黑云母花岗岩为主,主要分布在岩体东部、北部和西部;第2阶段则发育黑云母花岗岩,主要分布于岩体的中部和南部。也有研究认为,骑田岭岩体主体由早期的菜岭单元和晚期的芙蓉单元构成(朱金初等,2009),二者岩石特征相似,均含有角闪石(Zhao *et al.*, 2005)和榍石(谢磊等,2008)。笔者最近对芙蓉锡矿的野外考察发现,骑田岭岩体南部芙蓉锡矿的露天采场揭露的花岗岩与碳酸盐岩和矽卡岩的空间接触关系显示,骑田岭岩体南部也发育有中粗粒角闪石黑云母花岗岩,在粗粒角闪石黑云母花岗岩与碳酸盐岩接触带广泛发育大理岩而缺失矽卡岩;而细粒的黑云母花岗岩侵入到中粗粒角闪石黑云母花岗岩内部和碳酸盐岩围岩中,并在细粒花岗岩与围岩接触带发育矽卡岩型矿化,形成了芙蓉矿田规模最大的19号矽卡岩型矿体,镜下观察可见细粒黑云母花岗岩不含角闪石和榍石,局部发育内矽卡岩,指示芙蓉锡矿与细粒黑云母花岗岩存在密切的成因联系,这为芙蓉锡矿的岩浆热液成因提供了直接的地质证据。另外,骑田岭岩体北缘的新田岭大型钨钼矿床的成矿花岗岩也并非骑田岭岩体早阶段出露面积最大的中粗粒角闪石黑云母花岗岩,而是细粒白云母花岗岩(陈骏等,2008;王汝成等,2008)。

近年新发现的张家垄大型钨矿位于彭公庙加里东期花岗岩基的南缘,被认为是加里东期成矿的代表。而笔者最近获得加里东期岩体内部云英岩型钨矿化的花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄为 (441.3 ± 2.4) Ma, 辉钼矿 Re-Os 年龄为 (160.4 ± 2.2) Ma(袁顺达等,未发表数据),表明该区钨钼成矿作用发生于晚侏罗世,进而指示成矿可能与区内隐伏的晚侏罗世花岗岩有关,而彭公庙加里东期花岗岩仅作为成矿的围岩。同样地,在南岭西段的海洋山、苗

儿山-越城岭、都庞岭等加里东期大花岗岩基周缘发现的钨锡矿床多被证实为印支期成岩成矿事件的产物,即使牛塘界矿床白钨矿 Sm-Nd 年龄指示其形成于加里东期,但在成因上亦与加里东期豆仵山花岗岩株有关(杨振等,2014),而非大面积出露的加里东期岩基。产出于湘东南邓阜仙和锡田花岗岩基周缘的邓阜仙钨矿和锡田锡矿也均被证实形成于晚侏罗世(蔡杨等,2012;郭春丽等,2014)。尽管 Liu 等(2016)获得锡田矿区辉钼矿 Re-Os 年龄为 (225.5 ± 3.6) Ma, 指示区内有印支期的成矿作用,但从矿石的矿物共生组合来看,这一年龄数据更可能代表印支期钨、钼的成矿年龄而非锡成矿年龄。在赣南大吉山钨矿区,大面积出露的为印支期的五里亭花岗岩基(出露面积约 100 km^2 , 张文兰等,2004),而钨矿成岩成矿作用则集中于中晚侏罗世(张思明等,2011),与成矿有关的花岗岩为隐伏的高分异花岗岩枝(华仁民等,2003;陈骏等,2008;张思明等,2011)。

综合上述,南岭地区大面积出露的花岗岩基基本上不能直接形成钨锡矿床,而岩体内部发育的同期或晚期的高演化、富挥发分的小岩株(枝)才可能与其周缘钨锡矿床有密切的成因联系,这与徐克勤等(1963)基于华南加里东期大花岗岩基的研究,提出的华南加里东旋回的花岗岩浆活动与钨多金属矿床的形成无关的认识相一致,因而在南岭大花岗岩基周缘找矿勘查过程中应注重这类花岗岩及其与围岩接触带部位的勘查工作。

2 钨锡成矿花岗岩的矿物学、地球化学特征及其找矿指示

南岭中生代与钨锡成矿有关的花岗岩的成因一直是区内成岩成矿作用研究的重要内容,但目前对花岗岩的成因还存在几种不同认识:①徐克勤等(1982)较早将南岭与钨锡成矿有关的花岗岩称为“改造型”花岗岩,由于这类花岗岩通常具有高的 I_{S} 和低的 ε_{Nd} , 以及较古老的 Nd 模式年龄(袁忠信和张宗清,1992;陈江峰等,1999; Shen *et al.*, 2000), 主要成岩物质来源于该区中元古代基底岩石(凌洪飞等,1992;王德滋和沈渭洲,2003),因而又称为壳源花岗岩或 S 型花岗岩(华仁民等,2003,2007;王德滋,2004);②由于南岭西段成钨锡花岗岩通常具有高的 $\text{TFEO}/(\text{TFEO} + \text{MgO})$ 值,高总碱,高 Ga/Al ($10000 \text{ Ga}/\text{Al} > 2.6$) 值,高 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Y} + \text{Ce}$ 含量 ($> 350 \times 10^{-6}$) 及高 Y/Nb 值 (> 1.2) 等地球化学特征,总体上沿北东郴州-临武深大断裂带分布,许多学者又将

其视为一条北东向的 A 型花岗岩带(蒋少涌等, 2008; 毕献武等, 2008; 朱金初等, 2008; Chen *et al.*, 2016); ③根据南岭成钨锡花岗岩 P_2O_5 与 SiO_2 含量通常呈弱的负相关性, 这类花岗岩又被称为高分异 I 型花岗岩(李献华等, 2007; Guo *et al.*, 2015)。此外, 也有研究者将这类花岗岩称为高分异 I-S 过渡型花岗岩(Guo *et al.*, 2012)。综上, 南岭地区钨锡多金属成矿作用可与 S 型或 A 型、I 型花岗岩建立成因联系, 甚至同一岩体既有学者视为 A 型花岗岩, 也有学者视为分异的 I 型花岗岩, 如骑田岭岩体(李献华等, 2007; 朱金初等, 2008; 毕献武等, 2008; 蒋少涌等, 2008), 因而仅仅从花岗岩的成因类型上, 很难将成矿花岗岩与不成矿花岗岩区分开来。

有效识别成矿钨锡花岗岩的矿物学及地球化学特征, 对区域找矿勘查工作部署很重要, 对矿床成因的理解亦具有重要意义。如 Zhao 等(2005)认为骑田岭岩体菜岭单元与芙蓉单元均为角闪石黑云母花岗岩, 具有较高的氧逸度, 而李鸿莉等(2007)则认为骑田岭岩体主要由早阶段角闪石黑云母花岗岩和晚阶段黑云母花岗岩组成, 前者具有较高的氧逸度, 后者则具有相对较低的氧逸度, 将二者分别视为成矿岩体, 可以对芙蓉锡矿的成因产生不同认识(Zhao *et al.*, 2005, 2012; 李鸿莉等, 2007; 彭建堂等, 2006; Yuan *et al.*, 2008b, 2011)。

2.1 钨锡成矿花岗岩的矿物学标志

王汝成等(2008)指出, 从矿物学角度来建立含矿花岗岩的判别标志, 既方便又经济, 尤其是矿物微区分析技术(电子探针、LA-ICP-MS、微区 X 射线衍射仪、FT-IR 及拉曼光谱)等的快速发展, 为精细研究矿物学特征提供了有力保障。王汝成等(2008, 2011)的研究表明, 无论是造岩矿物, 还是副矿物, 都可以作为花岗岩钨锡成矿能力的判别标志, 指出云母、榍石、金红石、锡石是含锡花岗岩的重要含锡矿物, 而白钨矿、黑钨矿、钨铁铌矿(铌黑钨矿)及金红石是含钨花岗岩的特征性含钨矿物。王汝成等(2011)通过对比研究含锡花岗岩和不含锡花岗岩榍石锡含量发现, 含锡花岗岩榍石具有明显较高的锡含量。这些矿物学研究, 为有效识别钨锡成矿花岗岩提供了重要的矿物学信息(Xie *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013)。

然而, Sn 在岩浆体系中主要以 Sn^{4+} 替代 Ti^{4+} 和 Fe^{3+} 进入黑云母和榍石等含锡矿物相中, 因而只有在相对氧化的岩浆体系中, 才有利于 Sn 进入岩浆造岩矿物或副矿物中; Wones(1989)也指出, 榍石和

磁铁矿的存在指示花岗岩具有相对高的氧逸度。另外, 原生锡石也是岩浆高氧化条件的重要矿物学标志(Pichavant *et al.*, 1996)。而传统认识是还原型花岗岩有利于锡成矿, 在还原条件下, Sn 主要以 Sn^{2+} 形式在岩浆结晶分异过程中进入残余熔/流体相(Blevin and Chappell, 1992)。因而, 深入研究岩浆体系内含锡矿物晶体相和与之平衡的熔体相及之后熔/流体相间成矿元素的分配行为, 可为成锡花岗岩矿物学标志的建立及深入理解矿床的成因提供重要依据。

另外, 尽管锡石、白钨矿及黑钨矿等可以作为成矿花岗岩的矿物学标志, 但在花岗岩中往往也可以发育大量热液成因的锡石、白钨矿及黑钨矿; 尽管王汝成等(2008, 2011)从矿物共生组合及这些矿物与造岩矿物的接触关系方面给出了重要的判别依据, 但有时同一接触关系或共生矿物组合可能具有多解性, 这给找矿勘查工作带来了困难。对伟晶岩矿床已有的研究表明, 锂辉石和绿柱石等矿物中均可以发育丰富的熔融包裹体, 在钨锡成矿花岗岩中, 锡石和白钨矿均为透明矿物, 黑钨矿也可以在红外显微镜下开展包裹体岩相学研究, 而熔融包裹体的存在, 可能为这些矿物的岩浆成因提供重要依据, 因而今后在开展钨锡成矿花岗岩矿物学研究中, 这类矿物熔融包裹体的研究可能对建立成矿花岗岩的矿物学标志具有重要意义。

2.2 钨锡成矿花岗岩的地球化学标志

花岗岩的成矿能力不仅体现在矿物学特征上, 其岩石学及地球化学特征亦可以为判断花岗岩成矿能力提供重要信息(Tischendorf, 1977)。研究表明, 尽管南岭成钨锡花岗岩可以有多种成因类型, 但这些花岗岩无疑具有很多一致的地球化学特征, 在主量元素组成上, 成钨锡花岗岩通常具有高硅、富碱、富铝, 贫钙、镁, 较低的 $Fe_2O_3/FeO+Fe_2O_3$ 值, 富集 F、B 等挥发分等特征(毛景文等, 1995; 王联魁等, 2000); 在微量元素组成上则以富集 Rb、Th、U、Zr、Hf 和 Ga, 强烈亏损 Ba、Nb、Sr、P、Eu、Ti, 高的 Rb/Sr、低 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值为特征, 稀土配分特征呈强烈 Eu 负异常, 具有明显的四分组效应(Masuda and Akagi, 1989; Maru  jol *et al.*, 1990; Liu *et al.*, 1999; Zhao *et al.*, 2002), 指示花岗岩浆经历过高度分异演化过程(Webster *et al.*, 1997; 华仁民等, 2003), 也有人将这类花岗岩称为“稀有金属花岗岩”(甘晓春等, 1992)。因而成矿花岗岩和不成矿花岗岩通常可以在 Rb/Sr-K/Rb 和 Nb/Ta-Zr/Hf 图解中被明显区分开来(Ballouard *et al.*, 2016; Yuan

et al., 2017, Under review)。显然,上述从矿物学、主、微量元素地球化学等方面对成矿信息的提取,与划分花岗岩的成因类型对研究稀有金属成矿作用及找矿勘查部署具有同样重要的现实意义。

最近,陈骏等(2008)依据花岗岩的岩石学、地球化学及其矿化特征,将南岭地区稀有金属花岗岩进一步划分为含钨花岗岩、含钨锡花岗岩和含铌钽花岗岩。从岩石类型上,成锡花岗岩主要为黑云母花岗岩,成钨或钨锡花岗岩以二云母花岗岩为主,而成 Nb-Ta 或 Sn-W-Nb-Ta 花岗岩主要为钠长花岗岩(陈骏等,2008);在地球化学特征上,陈骏等(2008)认为,含钨花岗岩多呈铝过饱和、低的 Ba+Sr 和 TiO₂、低的 LREE/HREE、富 Y 和 Rb 及高的 Rb/Sr 值、强烈负 Eu 异常及高度分异的特征;而含锡钨花岗岩通常呈准铝-弱过铝质、具有高的 TiO₂、高 LREE/HREE 和 CaO/(K₂O+Na₂O)、富集高场强元素、高的 Ba+Sr 和 Rb,相对低的 Rb/Sr 值和较低的分异演化程度;含铌钽花岗岩则表现为强过铝质,高的 Al₂O₃/TiO₂、Rb/Sr 值,低的 TiO₂ 和 CaO/(K₂O+Na₂O)、贫 Ba+Sr、REE 及高场强元素,明显富集 Rb 和 Nb 及高度分异演化的特征。这些岩石学及地球化学特征的认识,对研究该区稀有金属成矿作用及找矿勘查具有重要意义。但成钨锡花岗岩往往是多期次、多阶段侵位的复式花岗岩或花岗质杂岩体中的某一岩相,因而在开展对比研究时一定要选择时、空及成因上与成矿具有密切关系的岩相,如骑田岭大岩基中早期具有较高氧逸度的准铝质的含榍石的中粗粒角闪石黑云母花岗岩以往被视为成锡钨花岗岩,而对芙蓉锡矿屋场坪露天采场揭露的接触关系研究显示,芙蓉锡矿与晚期缺乏角闪石和榍石的低氧逸度过铝质细粒黑云母花岗岩(李鸿莉等,2007;毕献武等,2008)密切相关;另外,荷花坪锡矿在空间上,产于王仙岭岩体的东南缘,因而王仙岭岩体亦被视为成锡钨花岗岩。然而,最近 Zhang 等(2016)的研究显示,王仙岭电气石花岗岩与水源山等印支期钨矿具有密切的成因联系,而荷花坪锡矿则形成于晚侏罗世,与隐伏的黑云母花岗岩有关。因而,针对钨锡稀有金属成矿花岗岩的矿物学及地球化学特征仍需进一步深化研究,尤其需要从岩浆源区性质、演化过程及其对钨锡稀有金属成矿差异的制约机制进行深入探讨,从机理上将矿物学、岩石地球化学特征与成岩成矿过程联系起来,将有助于建立成矿花岗岩的矿物学及地球化学识别标志,进而有效推动区域找矿勘查工作部署。

3 钨锡多金属矿床组合模型及深部找矿方向初探

与花岗岩类侵入有关的热液流体在运移和演化过程中,伴随着流体物理化学条件的变化,往往会形成有规律的蚀变矿化分带,基于这种分带构建的矿床蚀变分带模型及矿床组合模型在过去几十年的找矿勘查中发挥了重要作用,其中最具代表性的为斑岩型矿床模型、斑岩-矽卡岩或斑岩浅成低温热液型矿床组合模型。近年来,中国在沙坪沟、岔路口等超大型斑岩钼矿勘查过程中,浅部或外围铅锌矿床(点)均提供了重要找矿线索,是矿床组合模型指导找矿的典范。

中国作为钨锡资源大国,早在 20 世纪 60 年代就基于南岭东段石英脉型黑钨矿床的空间分带特征总结出了“五层楼”模式(广东冶金地质勘探公司 932 队,1966),并在找矿勘查实践中发挥了重要作用。近年来,基于危机矿山最新的找矿勘查成果,曾载淋和田幽军(2006)、许建祥等(2008)将“五层楼”模式拓展为“五层楼+地下室”模式,华仁民等(2015)在此基础上提出了南岭钨矿“上脉下体”成矿模式,这些矿床模型的完善和发展,又在南岭东段找矿实践中发挥了作用,相继指导发现了八仙脑、金银庵及南坑山等多处大中型钨矿床(陈国栋,2006)。南岭西段则以发育大规模的矽卡岩型钨锡多金属矿床为特征,其蚀变矿化分带与 Meinert 等(2003, 2005)和 Meinert(1987, 1992, 1997)总结出的经典矽卡岩蚀变矿化分带类似,这对区域找矿勘查也具有重要意义。事实上,柿竹园超大型 W-Sn-Mo-Bi 4 个矿带的划分(陈毓川等,1989)与典型矽卡岩蚀变矿化分带模式相一致,而且柿竹园超大型 W-Sn-Mo-Bi 矿床的发现过程中,出露地表的大理岩中的网脉状矿化提供了重要线索,这种网脉状矿化与经典矽卡岩矿床模型中远接触带发育的流体逃逸构造相类似(Meinert *et al.*, 2005),因而柿竹园矿床也可以算是矿床模型指导找矿的重要范例。最近,毛景文等(2009)基于柿竹园矽卡岩型 W-Sn-Mo-Bi 矿床与外围 Pb-Zn-Ag 矿的成因联系,构建了矽卡岩型钨锡多金属矿的矿床组合模型,并指出矽卡岩型 W-Sn 多金属矿与外围 Pb-Zn-Ag 矿可以互为找矿指示,为区域找矿工作提供了重要的理论指导。

然而,在应用这些模型指导找矿勘查的过程中,需要结合不同地段特定的地质条件进行评价,如洪都拉斯 El Mochito 地区,由于岩体侵位较深(>4 km, 0.13 GPa),在伸展背景下,岩浆热液流体

沿着高角度正断层向上运移可以形成远端矽卡岩型铅锌矿 (Samson *et al.*, 2008; William-Jones *et al.*, 2010); Palinkaš 等 (2013) 对科索沃 Trepča 远端矽卡岩型铅锌银矿流体包裹体、稳定同位素及地质温度计计算亦显示, 成矿深度可达 3.3 km (110 MPa), 因而与之相关的岩浆岩的侵位深度极有可能大于 4 km。这些矿床实例说明, 岩体侵位深度对矽卡岩型矿床的空间分布范围具有重要的控制作用。此外, 大量的研究显示, 远端矽卡岩型铅锌矿往往以发育富 Mn 矽卡岩矿物为特征 (Einaudi *et al.*, 1981; Meinert *et al.*, 2005; Palinkaš *et al.*, 2013), 这对于研究远端矽卡岩成因及其对铅锌找矿勘查的指示具有重要意义。而对于富 F 岩浆体系相关的矽卡岩矿床中, 由于 F 的富集可以将花岗岩的固相线温度降低至 525°C (Webster, 1987), 导致出溶的初始流体具有相对较低的温度, 此时 Pb-Zn-Ag 等低温元素可以与 Cu 等高温元素一起在离岩体较近的近端矽卡岩中沉淀成矿 (Chang and Meinert, 2004, 2008), 并且可以形成大规模的内矽卡岩矿体, 当这类花岗质岩浆浅侵位时, 可能指示深部具有高 F 斑岩型钼矿找矿潜力 (Chang and Meinert, 2008)。

南岭钨锡成矿带成矿花岗岩多为富 F 体系, 尽管带内钨锡矿与外围铅锌矿及高 F 花岗岩均具有密切的成因联系, 但相邻的钨锡矿与铅锌矿是否源于同一热演化中心, 这对找矿勘查具有重要意义。如湘南千里山岩体附近发育有以柿竹园钨锡钼铋矿为代表的数十个钨、锡、铅锌矿床, 像玛瑙山、蛇形坪等铅锌矿与邻近的钨锡矿床相距可在 3~4 km 以上, 针对这类矿床之间的热演化关系, 系统研究岩浆侵位深度、矿区构造条件及不同类型矿床之间的矿化蚀变分带关系, 对于理解其热演化过程及判断热液流体演化中心具有重要意义。最近在千里山岩体周缘的玛瑙山、妹子垄及牛角垄等铅锌矿床深部发现了一系列大中型钨锡矿体, 亦指示该区可能存在多个热演化中心; 类似地, 在香花岭锡矿外围鸡脚山铅锌矿深部也发现有达大中型规模的矽卡岩型锡多金属矿体。因而, 南岭地区远离钨锡矿的铅锌矿床的深部应是勘查近花岗岩体钨锡矿的有利部位。

另外, 由于南岭钨锡成矿花岗岩多为富 F 体系, 出溶的成矿流体亦多为富 F 流体, 这得到许多矿床发育大量萤石、黄玉等富 F 矿物的证实。这类富 F 流体易于与硅酸盐发生反应, 不仅能形成内矽卡岩型矿化 (Chang and Meinert, 2008), 而且当岩体侵位深度较大时可以在岩体顶部半封闭空间内发

育蚀变花岗岩型或云英岩型钨锡多金属矿化。事实上, 近年来针对石英脉型钨矿提出的“五层楼+地下室”模式中的“地下室”及“上脉下体”模式中的“下体”多为岩体内部蚀变花岗岩型矿体, 类似的矿化也可在南岭西段矽卡岩型矿床深部出现, 如在湘南许多钨锡矿床深部成矿岩体顶部也广泛发育云英岩型钨锡矿化, 如千里山岩体周缘的柿竹园面状云英岩型矿带、大吉岭云英岩型钨矿及玛瑙山矿区深部云英岩型钨锡矿、香花岭矿区及芙蓉矿区均有云英岩型或蚀变花岗岩型矿体的产出。最近, 王登红等 (2010) 将“五层楼+地下室”模式进一步推广应用于其他类型矿床, 对深部找矿工作具有重要指导意义。然而, 笔者认为, 矿床组合模型的各个组成部分之间应存在直接或间接的成因联系, 如湘南芙蓉锡矿和荷花坪锡矿这类晚期岩体侵位于早期花岗岩体内部形成的矿床, 仅仅是在偶然的地质条件下不同期次花岗岩浆沿着同一构造通道侵位成矿的结果, 因而很难基于浅部或外围含矿信息指导深部找矿工作, 不宜作为“五层楼+地下室”模型中典型的“地下室”案例。

4 认识与展望

(1) 南岭成矿带中生代钨锡成矿作用可以划分为 4 期: 晚三叠世 (230~210 Ma)、早侏罗世 (190~180 Ma)、中-晚侏罗世 (160~150 Ma) 及白垩纪 (140~90 Ma)。其中, 晚三叠世钨锡矿尽管遍及全区, 但西段明显强于东段, 矿种组合表现为钨锡并重, 但钨矿分布范围更广, 矿床 (点) 占据绝对优势, 多以单个岩体为中心成群成带分布。早侏罗世锡矿目前仅有粤北大顶锡铁矿床, 因而其空间分布格局还不明晰, 但可以确定其成岩成矿作用主要形成于区域岩石圈伸展背景之下。中晚侏罗世大规模钨锡成矿作用与区域岩石圈伸展背景下强烈的壳幔相互作用密切相关, 但不同区段壳幔相互作用强度及其对东段以钨为主而西段钨锡并重的资源分布格局的制约机制仍需持续深入研究。而白垩纪的钨锡成矿作用时间跨度较大, 早白垩世早期钨锡矿床主要集中分布于南岭成矿带与武夷成矿带的结合部位, 而早白垩世晚期-晚白垩世早期的钨锡矿床则分布于南岭西段与右江锡矿带结合部位, 但矿种组合均以锡为主, 二者源区物质组成及成岩成矿的深部地球动力学过程有待深化研究。

(2) 花岗岩的矿物学、岩石地球化学特征可以作为重要的找矿标志, 但仍需从机理上将花岗岩的矿物学及岩石地球化学特征与成岩成矿过程相联

系。笔者通过对比研究,认为南岭地区的大花岗岩基不能直接成矿,而与之相关或后期高分异的花岗岩株(枝)可能是大岩基内部及周缘钨锡矿床的成矿岩体。直接利用辉钼矿(Re-Os)、锡石和黑钨矿(U-Pb)及白钨矿(Sm-Nd)等矿石矿物开展高精度测年,可以有效识别该区多期次钨锡成矿作用,对指导区域找矿勘查工作具有重要意义。

(3)矿床组合模型可以对深部找矿提供重要指导,在远离钨锡矿及花岗岩体的铅锌矿深部具有寻找钨锡矿的潜力,而高F钨锡成矿体系的深部有利于寻找蚀变花岗岩型或云英岩型钨锡矿。

(4)南岭钨锡矿床的时空分布格局、成矿花岗岩成因及成岩成矿背景等方面的研究已经取得丰硕的成果,但对成岩成矿过程的定量研究还比较薄弱,尤其是Nb-Ta-W-Sn多金属在岩浆热液演化过程中富集过程及分带成矿机制等仍需要深化研究。近年来,随着LA-ICP-MS矿物微区和单个包裹体微量物质组分分析技术的逐步发展和完善,成岩成矿过程的定量研究将有望成为研究南岭地区钨锡成矿作用的重要方向。

致谢: 成文过程中,华仁民教授、毛景文研究员、彭建堂研究员、张怡军高级工程师及王旭东博士提出了许多宝贵的建议和意见,审稿人提出了诸多有益建议,在此一并表示由衷感谢!

参考文献 (References):

- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R, Vigneresse J L. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 44(3): 231-234
- Blevin P L, Chappell B W. 1992. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. *Transactions of Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 305-16
- Chang Z S, Meinert L D. 2004. The magmatic-hydrothermal transition—Evidence from quartz phenocryst textures and endoskarn abundance in Cu-Zn skarns at the Empire Mine, Idaho, USA. *Chemical Geology*, 210(1-4): 149-171
- Chang Z S, Meinert L D. 2008. The empire Cu-Zn mine, Idaho: Exploration implications of unusual skarn features related to high fluorine activity. *Economic Geology*, 103(5): 909-938
- Chen B, Ma X H, Wang Z Q. 2014. Origin of the fluorine-rich highly differentiated granites from the Qianlishan composite plutons (South China) and implications for polymetallic mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 301-314
- Chen Y X, Li H, Sun W D, Ireland T, Tian X F, Hu Y B, Yang W B, Chen C, Xu D R. 2016. Generation of Late Mesozoic Qianlishan A₂-type granite in Nanling Range, South China: Implications for

- Shizhuyuan W-Sn mineralization and tectonic evolution. *Lithos*, 266-267: 435-452
- Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. 1981. Skarn deposits. In: *Economic Geology 75th Anniversary Volume*. El Paso, Tex.: Economic Geology Pub. Co., 317-391
- Guo C L, Chen Y C, Zeng Z L, Lou F S. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan granites in southeastern China: Constraints from geochemistry and in-situ analyses of zircon U-Pb-Hf-O isotopes. *Lithos*, 148: 209-227
- Guo C L, Wang R C, Yuan S D, Wu S H, Yin B. 2015. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis and geodynamic setting of the Qianlishan granitic pluton, Southeast China. *Mineralogy and Petrology*, 109(2): 253-282
- Hsu K Q. 1943. Tungsten deposits of southern Kiangsi, China. *Economic Geology*, 38(6): 431-474
- Hu R Z, Bi X W, Jiang G H, Chen H W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Wei W F. 2012b. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, Southeastern China. *Mineralium Deposita*, 47(6): 623-632
- Hu R Z, Wei W F, Bi X W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Chen Y W. 2012a. Molybdenite Re-Os and muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Lithos*, 150: 111-118
- Hu R Z, Zhou M F. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China—an introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579-588
- Li X H, Li Z X. 2007. Formation of the 1300 km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179-182
- Li X H, Liu D Y, Sun M, Li W X, Liang X R, Liu Y. 2004. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China. *Geological Magazine*, 141(2): 225-231
- Li Z L, Hu R Z, Yang J S, Peng J T, Li X M, Bi X W. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China. *Lithos*, 97(1-2): 161-173
- Liu C S, Ling H F, Xiong X L, Shen W Z, Wang D Z, Huang X L, Wang R C. 1999. An F-rich, Sn-bearing volcanic-intrusive complex in Yanbei, South China. *Economic Geology*, 94(3): 325-341
- Liu D B, Yang L, Deng X W, Dai X L, Wang X J, Chong K Y, Du G F, Wei H P. 2016. Re-Os isotopic data for molybdenum from Hejiangkou tungsten and tin polymetallic deposit in Chenzhou and its geological significance. *Journal of Central South University*, 23(5): 1071-1084
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267-294
- Maruéjol P, Cuney M, Turpin L. 1990. Magmatic and hydrothermal R.E. fractionation in the Xihuashan granites (SE China). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(6): 668-680
- Masuda A, Akagi T. 1989. Lanthanide tetrad effect observed in leucogranites from China. *Geochemical Journal*, 23(5): 245-253
- Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. 2005. World Skarn Deposits. In:

- Economic Geology 100th Anniversary Volume. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, Inc.
- Meinert L D, Hedenquist J W, Satoh H, Matsuhisa Y. 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids. *Economic Geology*, 98(1): 147-156
- Meinert L D. 1987. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog Mine, Central mining district, New Mexico. *Economic Geology*, 82(3): 523-545
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19(4): 145-162
- Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration. *Exploration & Mining Geology*, 6(2): 185-208
- Palinkaš S S, Palinkaš L A, Renac C, Spangenberg J E, Lüders V, Molnar F, Maliqi G. 2013. Metallogenic model of the trepča Pb-Zn-Ag skarn deposit, kosovo: Evidence from fluid inclusions, rare earth elements, and stable isotope data. *Economic Geology*, 108(1): 135-162
- Peng J T, Zhou M F, Hu R Z, Shen N P, Yuan S D, Bi X W, Du A D, Qu W J. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Mineralium Deposita*, 41(7): 661-669
- Pichavant M, Hammouda T, Scaillet B. 1996. Control of redox state and Sr isotopic composition of granitic magmas: A critical evaluation of the role of source rocks. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh—Earth Sciences*, 87: 321-329
- Samson I M, Williams-Jones A E, Ault K M, Gagnon J E, Fryer B J. 2008. Source of fluids forming distal Zn-Pb-Ag skarns: Evidence from laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis of fluid inclusions from El Mochito, Honduras. *Geology*, 36(12): 947-950
- Shen W Z, Ling H F, Li W X, Wang D Z. 2000. Crust evolution in Southeast China: Evidence from Nd model ages of granitoids. *Science in China(Series D)*, 43(1): 36-49
- Tischendorf G. 1977. Geochemical and petrographic characteristics of silicic magmatic rocks associated with rare-element mineralisation, in Stemrok, M., Burnol L., and Tischendorf G. eds., *Metallization associated with acid magmatism*; Stuttgart, Schweizerbart'sche, v. 2, p. 41-96
- Walraven F, Strydom J H, Strydom N. 1990. Rb-Sr open-system behaviour and its application as a pathfinder for Sn mineralisation in granites of the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 37(3): 333-350
- Wang R C, Xie L, Chen J, Yu A P, Wang L B, Lu J J, Zhu J C. 2013. Tin-carrier minerals in metaluminous granites of the western Nanling Range(southern China): Constraints on processes of tin mineralization in oxidized granites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 361-372
- Webster J D, Holloway J R, Hervig R L. 1987. Phase equilibria of a Be, U and F-enriched vitrophyre from Spor Mountain, Utah. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3): 389-402
- Webster J D, Thomas R, Rhede D, Förster H J, Seltmann R. 1997. Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite: Geochemical evidence for strong tin enrichment in fluorine-rich and phosphorus-rich residual liquids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2589-2604
- Wei W F, Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Su W C, Song S Q, Shi S H. 2012. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi province, China. *Mineralium Deposita*, 47(6): 589-605
- Williams-Jones A E, Samson I M, Ault K M, Gagnon E, Fryer B J. 2010. The genesis of distal zinc skarns: Evidence from the mochito deposit, Honduras. *Economic Geology*, 105(8): 1411-1440
- Wones D R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks *American Mineralogist*, 74: 744-749
- Wu L Y, Hu R Z, Peng J T, Bi X W, Jiang G H, Chen H W, Wang Q Y, Liu Y Y. 2011. He and Ar isotopic compositions and genetic implications for the giant Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposit, Hunan Province, South China. *International Geology Review*, 53(5-6): 677-690
- Xie L, Wang R C, Chen J, Zhu J C. 2010. Mineralogical evidence for magmatic and hydrothermal processes in the Qitianling oxidized tin-bearing granite (Hunan, South China): EMP and (MC) - LA-ICPMS investigations of three types of titanite. *Chemical Geology*, 276(1-2): 53-68
- Xu K Q, Sun N, Wang D Z. 1982. Petrogenesis of the granitoids and their metallogenic relations in South China. In: Xu K Q, Tu G C eds. *Geology of Granites and their Metallogenic Relations*. Beijing: Science Press, 1-31
- Yu X Q, Di Y J, Wu G G, Zhang D, Zheng Y, Dai Y P. 2009. The early Jurassic magmatism in northern Guangdong Province, southeastern China: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating of Xilan complex. *Science in China(series D)*, 52(4): 471-483
- Yu X Q, Wu G G, Zhao X X, Gao J F, Di Y J, Zheng Y, Dai Y P, Li C L, Qiu J T. 2010. The Early Jurassic tectono-magmatic events in southern Jiangxi and northern Guangdong provinces, Se China: Constraints from the SHRIMP zircon U-Pb dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5): 408-422
- Yuan S D, Mao J W, Cook N J, Wang X D, Liu X F, Yuan Y B. 2015. A Late Cretaceous tin metallogenic event in Nanling W-Sn metallogenic province: Constraints from U-Pb, Ar-Ar geochronology at the Jiepailing Sn-Be-F deposit, Hunan, China. *Ore Geology Reviews*, 65: 283-293
- Yuan S D, Mao J W, Zhao P L, Zhang D L. 2017. Late Mesozoic tungsten mineralization of the Zhangjialong W deposit in the Caledonian Penggongmiao granite batholith, southern Hunan: Implications for tungsten ore formation and mineral exploration in the Nanling Range. *Mineralium Deposita*, Under review
- Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H M, Geng J Z, Zhang D L. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 235-242
- Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, Bi X W, Qi L, Li Z L, Li X M, Shuang Y. 2008b. Characteristics of rare-earth elements(REE), strontium and neodymium isotopes in hydrothermal fluorites from the Bailashui tin deposit in the Furong ore field, southern Hunan Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27(4): 342-350
- Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, Li H M, Shen N P, Zhang D L. 2008a.

- A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). *Mineralium Deposita*, 43(4): 375-382
- Yuan S D, Peng J T, Shen N P, Hu R Z, Dai T M. 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the Xianghualing Sn-polymetallic orefield in southern Hunan, China and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 278-286
- Zhang R Q, Lu J J, Wang R C, Yang P, Zhu J C, Yao Y, Gao J F, Li C, Lei Z H, Zhang W L, Guo W M. 2015. Constraints of *in situ* zircon and cassiterite U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages on multiple generations of granitic magmatism and related W-Sn mineralization in the Wangxianling area, Nanling Range, South China. *Ore Geology Reviews*, 65: 1021-1042
- Zhao K D, Jiang S Y, Jiang Y H, Wang R C. 2005. Mineral chemistry of the Qitianling granitoid and the Furong tin ore deposit in Hunan Province, South China: Implication for the genesis of granite and related tin mineralization. *European Journal of Mineralogy*, 17(4): 635-648
- Zhao K D, Jiang S Y, Yang S Y, Dai B Z, Lu J J. 2012. Mineral chemistry, trace elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China. *Gondwana Research*, 22(1): 310-324
- Zhao P L, Yuan S D, Mao J W, Santosh M, Li C, Hou K J. 2016. Geochronological and petrogeochemical constraints on the skarn deposits in Tongshanling ore district, southern Hunan Province: Implications for Jurassic Cu and W metallogenic events in South China. *Ore Geology Reviews*, 78: 120-137
- Zhao Z H, Xiong X L, Han X D, Wang Y X, Wang Q, Bao Z W, Jahn B. 2002. Controls on the REE tetrad effect in Evidence from the Qianlishan and Baerzhe granites: Granites, China. *Geochemical Journal*, 36(6): 527-543
- Zheng W, Mao J W, Zhao C S, Ouyang H G, Wang X Y. 2016. Re-Os geochronology of molybdenite from Yinyan porphyry Sn-deposit in South China. *Resource Geology*, 66(1): 63-70
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26-33
- Zhu W G, Zhong H, Li X H, He D F, Song X Y, Ren T, Chen Z Q, Sun H S, Liao J Q. 2010. The early Jurassic mafic-ultramafic intrusion and A-type granite from northeastern Guangdong SE China: Age, origin, and tectonic significance. *Lithos*, 119: 313-329
- 毕献武, 李鸿莉, 双燕, 胡晓燕, 胡瑞忠, 彭建堂. 2008. 骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征——对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示. *高校地质学报*, 14(4): 539-548
- 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 2006. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年. *矿床地质*, 25(3): 263-268
- 蔡杨, 马东升, 陆建军, 黄卉, 章荣清, 屈文俊. 2012. 湖南邓阜仙钨矿辉钼矿铼-钨同位素定年及硫同位素地球化学研究. *岩石学报*, 28(12): 3798-3808
- 车勤建, 李金冬, 魏绍六, 伍光英. 2005. 湖南千里山-骑田岭矿集区形成的构造背景初探. *大地构造与成矿学*, 29(2): 204-214
- 曾载淋, 田幽军. 2006. 赣南地区钨矿找矿史回顾及新一轮钨矿找矿思考. *资源调查与环境*, 27(2): 94-102
- 陈国栋. 2006. 用科学发展观指导新一轮钨矿找矿. *资源调查与环境*, 27(2): 79-82
- 陈江峰, 江博明, 郑永飞. 1999. 钨、铼、铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞, 编. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社
- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 王汝成, 马东升, 朱金初, 张文兰, 季峻峰. 2008. 南岭地区钨锡铋钼花岗岩及其成矿作用. *高校地质学报*, 14(4): 459-473
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. *中国科学(地球科学)*, 44(1): 111-121
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. *中国科学(D 辑)*, 32(4): 279-289
- 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 1998. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义. *岩石学报*, 14(3): 163-173
- 陈婉君, 杨智荣. 2008. 广东大顶锡矿田多金属矿床地质特征及成矿规律. *科技创新导报*, 29: 98-99
- 陈毓川, 李文祥, 朱裕生. 1989. 巨型、大型和世界级矿床地质——找矿的总趋势. *地球科学进展*, 4(6): 37-41
- 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 黄宏业, 周新民. 2005. 湖南沩山花岗岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年: 成岩启示和意义. *中国科学(D 辑)*, 35(7): 606-616
- 甘晓春, 朱金初, 沈渭洲. 1992. 广西栗木水西庙稀有金属花岗岩成因. *地质找矿论丛*, 7(2): 35-45
- 高晶晶, 刘玉琳. 2006. 钾长石 K-Ar 定年若干问题的讨论. *高校地质学报*, 12(3): 375-377
- 广东冶金地质勘探公司 932 队. 1966. 我们是怎样用“五层楼”规律寻找、评价和勘探黑钨石英脉矿床的. *地质与勘探*, (5): 15-19
- 郭春丽, 李超, 伍式崇, 许以明. 2014. 湘东南锡田辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. *岩矿测试*, 33(1): 142-152
- 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. *地学前缘*, 17(2): 13-26
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 刘晓东, 陆建军, 林锦富, 姚军明, 戚华文, 张展适, 顾晟彦. 2003. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统. *中国科学(D 辑)*, 33(4): 335-343
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. *高校地质学报*, 11(3): 291-304
- 华仁民, 李光来, 张文兰, 胡东泉, 陈培荣, 陈卫锋, 王旭东. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探. *矿床地质*, 29(1): 9-23
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. *矿床地质*, 18(4): 300-308
- 华仁民, 韦星林, 王定生, 郭家松, 黄小娥, 李光来. 2015. 试论南岭钨矿“上脉下体”成矿模式. *中国钨业*, (1): 16-23
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 陈培荣. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比. *岩石学报*, 23(10): 2321-2328
- 华仁民, 张文兰, 李光来, 胡东泉, 王旭东. 2008. 南岭地区钨矿床共(伴)生金属特征及其地质意义初探. *高校地质学报*, 14(4): 527-538
- 黄汲清, 陈廷愚. 1986. 华南钨、锡矿之多旋回成矿问题. *地质论评*,

- 32(2): 138-143
- 贾小辉, 王晓地, 杨文强, 牛志军. 2014. 桂北圆石山早侏罗世 A 型花岗岩的岩石成因及意义. 地球科学(中国地质大学学报), 39(1): 21-36
- 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. 高校地质学报, 14(4): 496-509
- 康志强, 冯佐海, 杨锋, 廖家飞, 潘会彬. 2012. 广西桂林地区东部栗木花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 31(8): 1306-1312
- 李光来, 华仁民, 黄小娥, 韦星林, 屈文俊, 王旭东. 2011. 赣中下桐岭钨矿辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 矿床地质, 30(6): 1075-1084
- 李红艳, 毛景文, 孙亚利, 邹晓秋, 何红蓼, 杜安道. 1996. 柿竹园钨多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄研究. 地质论评, 42(3): 261-267
- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 双燕, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学组成及其对锡成矿的指示意义. 岩石学报, 23(10): 2605-2614
- 李建康, 王登红, 梁婷, 许以明, 张怡军, 梁华英, 卢焕章, 赵斌, 李建国, 屈文俊, 周四春, 王汝成, 韦龙明, 林锦福. 2013. 南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对西藏钨锡找矿的指示. 地球学报, 34(1): 58-74
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981-991
- 李晓峰, 冯佐海, 肖荣, 宋慈安, 杨锋, 王翠云, 康志强, 毛伟. 2012. 桂东北钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景. 地质学报, 86(11): 1713-1725
- 梁新权, 李献华, 丘元禧, 杨东生. 2005. 华南印支期碰撞造山-十万大山盆地构造和沉积学证据. 大地构造与成矿学, 29(1): 99-112
- 凌洪飞, 沈渭洲, 章邦桐, 刘继顺, 杨杰东, 陶仙聪. 1992. 江西修水地区震旦纪前沉积岩的 Nd 同位素组成和物质来源. 岩石学报, 8(2): 190-194
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 李建康, 应立娟, 许建祥, 曾载淋. 2008. 赣南崇义-大余-上犹矿集区不同类型含矿石英中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 地质学报, 82(7): 932-940
- 刘晓菲, 袁顺达, 吴胜华. 2012. 湖南金船塘锡铋矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 39-51
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 耿树方, 王涛, 陈必河. 2010. 湘南宁远地区碱性玄武岩形成时代的新证据: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年. 地质通报, 29(6): 833-841
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件. 岩石学报, 23(5): 967-976
- 柳志青, 倪纪文, 朱雄飞, 丁武宝, 汪予忠. 1980. 夏色岭钨铜矿床反 S 形构造形成机理. 地质与勘探, (1): 11-13
- 马丽艳, 付建明, 程顺波, 卢友月, 徐德明, 陈希清. 2013. 广西栗木锡铋钼矿田矿化花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 华南地质与矿产, 29(4): 292-298
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 千里山花岗岩体地质地球化学及与成矿关系. 矿床地质, 14(1): 12-25
- 毛景文, 李晓峰, Lehmann B, 陈文, 蓝晓明, 魏绍六. 2004a. 湖南芙蓉锡矿床锡矿石和有关花岗岩的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地球动力学意义. 矿床地质, 23(2): 164-175
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 陈毓川. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型. 地质论评, 55(3): 347-354
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2329-2338
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004b. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 45-55
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 王义天, 张长青, 彭惠娟, 于森. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景. 中国地质, 39(6): 1437-1471
- 梅玉萍, 李华芹, 王登红, 路远发, 杨红梅, 许建祥, 张家菁. 2007. 江西背岩斑岩锡矿的成岩成矿时代及其地质意义. 地球学报, 28(5): 456-461
- 梅玉萍, 杨红梅, 段瑞春, 张利国, 蔡应雄, 童喜润, 谭娟娟, 刘重瓦, 卢山松. 2013. 广东阳春锡山钨锡矿床成岩成矿年代学研究. 地质学报, 87(9): 1370-1376
- 裴荣富, 王永磊, 王浩琳. 2009. 南岭钨锡多金属矿床成矿系列与构造岩浆侵位接触构造动力成矿专属. 中国地质, 36(3): 483-489
- 彭建堂, 符亚洲, 袁顺达, 沈能平, 张东亮. 2006. 热液矿床中含钙矿物的 Sm-Nd 同位素定年. 地质论评, 52(5): 662-667
- 彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴樟谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 2007. 湖南芙蓉锡矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 26(3): 237-248
- 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 2008. 湘南中生代花岗岩质岩石成岩成矿的时限. 地质论评, 54(5): 617-625
- 邱检生, 蒋少涌, 胡建, McInnes B I A, 凌洪飞. 2006. 同位素年代学研究对江西会昌密坑山锡矿田成矿作用的启示. 岩石学报, 22(10): 2444-2450
- 邱骏挺, 余心起, 吴淦国, 屈文俊, 狄永军, 张达, 罗平, 杜安道. 2011. 北武夷董碧矿区逆冲推覆构造及其与钼、铅-锌成矿作用关系. 地学前缘, 18(5): 243-255
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 2006. 南岭构造带的基本地质特征. 地质论评, 52(2): 251-265
- 苏慧敏, 谢桂青, 孙嘉, 张承帅, 程彦博. 2010. 江西铜坑埠钨矿和红山铜矿含矿斑岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 26(3): 819-829
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209-220
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望. 高校地质学报, 10(3): 305-314
- 王登红, 陈毓川, 陈文, 桑海清, 李华芹, 路远发, 陈开礼, 林枝茂. 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代. 地质学报, 78(1): 132-138
- 王登红, 陈毓川, 陈郑辉, 刘善宝, 许建祥, 张家菁, 曾载淋, 陈富文, 李华芹, 郭春丽. 2007. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究. 地质学报, 81(7): 882-890
- 王登红, 陈毓川, 李华芹, 陈正宏, 余金杰, 路远发, 李寄岷. 2003. 湖南芙蓉锡矿的地质地球化学特征及找矿意义. 地质通报, 22(1): 50-56

- 王登红, 陈振宇, 黄凡, 王成辉, 赵芝, 陈郑辉, 赵正, 刘新星. 2014. 南岭岩浆岩成矿专属性及相关问题探讨. 大地构造与成矿学, 38(2): 230-238
- 王登红, 陈郑辉, 黄国成, 武国忠, 陈芳. 2012. 华南“南钨北扩”、“东钨西扩”及其找矿方向探讨. 大地构造与成矿学, 36(3): 322-329
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 陈郑辉, 许建祥, 张家菁, 李水如, 曾载淋. 2010. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 733-738
- 王联魁, 王慧芬, 黄智龙. 2000. Li-F 花岗岩液态分离的微量元素地球化学标志. 岩石学报, 16(2): 145-152
- 王汝成, 谢磊, 陈骏, 于阿朋, 王禄斌, 陆建军, 朱金初. 2011. 南岭中段花岗岩中榍石对锡成矿能力的指示意义. 高校地质学报, 17(3): 368-380
- 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. 高校地质学报, 14(4): 485-495
- 王新宇, 黄宏伟, 陈能松, 黄锡强, 吴祥珂, 郝爽, 李惠民. 2015. 广西大厂矿田长坡——铜坑锡多金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评, 61(4): 892-900
- 王永磊, 裴荣富, 李进文, 王浩琳, 刘喜峰. 2009. 湘东南将军寨钨矿花岗岩地球化学特征及铼-钨同位素定年. 岩矿测试, 28(3): 274-278
- 王志强, 陈斌, 马星华. 2014. 南岭芙蓉锡矿田锡石原位 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及地球化学研究: 对成矿流体来源和演化的意义. 科学通报, 59(25): 2505-2519
- 伍静, 梁华英, 黄文婷, 王春龙, 孙卫东, 孙亚莉, 李晶, 莫济海, 王秀璋. 2012. 桂东北苗儿山-越城岭南西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析. 科学通报, 57(13): 1126-1136
- 肖荣, 李晓峰, 冯佐海, 杨锋, 宋慈安. 2011. 广西珊瑚钨锡矿床含钨石英脉中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 矿床地质, 30(3): 488-496
- 谢磊, 王汝成, 陈骏, 朱金初, 张文兰, 王德滋, 于阿朋. 2008. 湖南骑田岭花岗岩中的原生含锡榍石: 一个重要的含锡矿物及其找矿指示意义. 科学通报, 53(24): 3112-3119
- 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 叶俊. 1982. 华南 2 个成因系列花岗岩及其成矿特征. 矿床地质, (2): 1-14
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 胡受奚. 1963. 华南多旋迴的花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨(续). 地质学报, 43(2): 141-155
- 许建祥, 曾载淋, 李雪琴, 刘俊生, 陈郑辉, 刘善宝, 郭春丽, 王成辉. 2007. 江西寻乌铜坑钨矿床地质特征及其成矿时代. 地质学报, 81(7): 924-928
- 许建祥, 曾载淋, 王登红, 陈郑辉, 刘善宝, 王成辉, 应立娟. 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型. 地质学报, 82(7): 880-887
- 杨锋, 李晓峰, 冯佐海, 白艳萍. 2009. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 桂林工学院学报, 29(1): 21-24
- 杨振, 王汝成, 张文兰, 储著银, 陈骏, 朱金初, 章荣清. 2014. 桂北牛塘界加里东期花岗岩及其矽卡岩型钨矿成矿作用研究. 中国科学(D 辑), 44(7): 1357-1373
- 杨振, 张文兰, 王汝成, 陆建军, 谢磊, 车旭东. 2013. 桂北油麻岭钨矿区成矿岩体的年代学、地球化学及其地质意义. 高校地质学报, 19(1): 159-172
- 姚军明, 华仁民, 屈文俊, 戚华文, 林锦富, 杜安道. 2007. 湘南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(4): 471-477
- 余勇, 李晓峰, 肖荣, 毛伟, 贾亦真. 2014. 广西珊瑚钨锡矿田锆石 U-Pb 和绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 矿物学报, 34(3): 297-304
- 袁顺达, 李惠民, 郝爽, 耿建珍, 张东亮. 2010. 湘南芙蓉超大型锡矿锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义. 矿床地质, 29(S1): 543-544
- 袁顺达, 刘晓菲, 王旭东, 吴胜华, 原亚斌, 李雪凯, 王铁柱. 2012b. 湘南红旗岭锡多金属矿床地质特征及 Ar-Ar 同位素年代学研究. 岩石学报, 28(12): 3787-3797
- 袁顺达, 张东亮, 双燕, 杜安道, 屈文俊. 2012a. 湘南新田岭大型钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 27-38
- 袁顺达. 2007. 香花岭锡多金属矿床同位素年代学及地球化学[博士学位论文]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所
- 袁忠信, 张宗清. 1992. 南岭花岗岩类岩石 Sm-Nd 同位素特征及岩石成因探讨. 地质论评, 38(1): 1-15
- 原亚斌, 袁顺达, 陈长江, 霍然. 2014. 黄沙坪矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 30(1): 64-78
- 张迪, 张文兰, 王汝成, 储著银, 龚名文, 蒋桂新. 2015. 桂北苗儿山地区高岭印支期花岗岩及石英脉型钨成矿作用. 地质论评, 61(4): 817-834
- 张思明, 陈郑辉, 施光海, 李丽侠, 屈文俊, 李超. 2011. 江西省大吉山钨矿床辉钼矿铼-钨同位素定年. 矿床地质, 30(6): 1113-1121
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 李惠民, 陈培荣. 2004. 江西大吉山五里亭花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义探讨. 地质学报, 78(3): 352-358
- 赵蕾, 于津海, 王丽娟, 谢磊, 孙涛, 邱检生. 2006. 红山含黄玉花岗岩的形成时代及其成矿能力分析. 矿床地质, 25(6): 672-682
- 赵盼裴, 袁顺达, 原亚斌. 2016. 湘南魏家湾矿区祥林铺岩体锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年-对南岭西端晚侏罗世钨锡成岩成矿作用的指示. 中国地质, 43(1): 120-131
- 赵振华, 包志伟, 张伯友, 熊小林. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景. 中国科学(D 辑), 30(S1): 161-168
- 郑昌平, 欧阳玉飞, 王涌泉. 2009. 广东连平大顶铁矿床地质特征及成因探讨. 甘肃冶金, 31(1): 51-53
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带. 高校地质学报, 14(4): 474-484
- 朱金初, 王汝成, 张佩华, 谢才富, 张文兰, 赵葵东, 谢磊, 杨策, 车旭东, 于阿朋, 王禄彬. 2009. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石 U-Pb 年代学格架. 中国科学(D 辑), 39(8): 1112-1127
- 邹先武, 崔森, 屈文俊, 白云山, 陈希清. 2009. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究. 中国地质, 36(4): 837-844

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 高剑峰)