

南岭地区钨矿床共(伴)生金属特征及其地质意义初探

华仁民, 张文兰, 李光来, 胡东泉, 王旭东

(内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093)

摘要: 南岭是世界上最重要的钨矿产地, 南岭钨矿床中与钨共(伴)生的有色、稀有及贵金属种类很多, 数量可观, 也是我国重要的矿产资源。论述了南岭及其邻近地区众多钨矿床中与钨共生或伴生的锡、钼、铋、铌钽、铜、铅锌、金银、稀土等元素的不同状况和特征, 其中锡、钼、铋是南岭钨矿床中最普遍最重要的共(伴)生元素, 铌钽只在演化程度较高的花岗岩相关的钨矿床中伴生产出, 铜、金作为钨矿床伴生金属的意义较小, 而钨矿床中伴生的银、铅锌具有相当重要的意义。从元素地球化学性质、南岭的区域地质背景、花岗岩演化、多期多阶段成矿作用等方面出发, 分析和解释了它们之间相互共(伴)生的原因及差异性, 探讨了其地质意义。

关键词: 钨矿床; 共(伴)生金属; 地球化学性质; 花岗岩; 多阶段成矿; 南岭

中图分类号: P618.67

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2008)-03-0527-12

A Preliminary Study on the Features and Geologic Implication of the Accompanying Metals in Tungsten Deposits in the Nanling Region

HUA Ren-min, ZHANG Wen-lan, LI Guang-lai, HU Dong-quan, WANG Xu-dong

(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Geological Sciences and Engineering,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Nanling Range area in South China is the most important tungsten producing district in the world. It also yields great amount of other nonferrous, rare, and precious metal resources as the accompaniments with tungsten mineralization. This paper describes the different situations and characteristics of several accompanying metals, e.g. Sn, Mo, Bi, Ta-Nb, Cu, Au, Ag, Pb-Zn and REE, in tungsten deposits in the Nanling Range and vicinity areas. Sn, Mo, and Bi are the most common and important elements among these accompaniments, whereas Ta-Nb is only accompanied with W deposits related to highly evolved granitic rocks. Cu and Au are not important accompanying members of tungsten mineralization in this area, while Ag and Pb-Zn are much more common in the Nanling tungsten deposits. The paper also explains the factors which caused the different behaviors of these elements from the view of geochemical features, regional geological backgrounds, evolution of granitic rocks, as well as the superposition of multi-staged mineralizations. The geological implication of these accompanying relations is also discussed.

Key words: W deposits; accompanying metals; geochemical features; granites; multi-staged mineralizations; the Nanling Region.

南岭, 尤其是赣南和湘东南地区, 是我国乃至世界上钨矿床最丰富、最集中分布的地区。长期的勘查、生产和科学研究成果均已显示, 南岭地区的钨矿床不仅类型齐全, 而且除了钨以外, 还有丰富的共生或伴生金属作为有用组份产出, 使南岭钨矿

床成为多种有色、稀有金属的重要来源(徐克勤等, 1959; 康永孚等, 1991; 王秋衡, 1991)。事实上, 南岭及其邻近地区产出的锡、钼、铋、铍、铌钽、铜、铅锌、银、锑、铀等金属在国内都占有重要地位, 有些甚至名列世界前茅; 而在许多情况下它们

收稿日期: 2008-09-27; 修回日期: 2008-10-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB411404)、国家自然科学基金项目(40572057, 40730423)资助

作者简介: 华仁民, 教授, 主要从事矿床学研究与教学; E-mail: huarenmin@nju.edu.cn

都是与钨矿共生或伴生产出的。

笔者等近年来在从事华南中生代花岗岩类及其成矿作用关系的研究中,也对钨矿床中共生或伴生的有色、稀有及贵金属元素的状况和特征进行了一些调研,得到了一些认识。本文介绍了南岭及邻近地区钨矿床中若干重要的共(伴)生金属元素的产出特征,并对其原因和地质意义进行了初步的分析和讨论。

需要指出的是,在南岭及其邻近地区众多的钨矿床中,真正单独以钨为唯一有用元素产出的是很少的,大多数钨矿床都有一种或几种共生或伴生金属,可以称为“钨-多金属矿床”。而本文所论述的共生或伴生金属,主要是那些具有工业利用价值、能独立计算储量,或能作为矿山副产品回收的那些金属元素。

1 锡与钨的共生关系

锡是南岭及其邻区堪与钨媲美的最重要的矿产资源之一。长期以来,国内地质学界往往将该地区的锡与钨并列,故有“南岭钨锡矿床”、“华南钨锡花岗岩”等名称。南岭地区钨-锡共生或伴生的矿床确实很多,甚至有些钨矿床最初是开采锡矿的,例如赣南崇义的淘锡坑钨矿就因此而得名。在最早总结我国赣南钨矿地质的经典著作《江西南部钨矿地质志》中,被明确冠以“钨锡矿床”的就有生龙口、洪水寨、一箩种、九龙脑、漂塘、鸭子脑、龟子背、盘龙山、新地、墨烟山、鸭溪山、桔竹巢、白石坳、茅坪、直坑、张天堂等(徐克勤等,1943),而另一些虽然被称为“钨矿床”的,如岿美山、荡坪等,实际上也是钨-锡共生的矿床。后来的工作则在赣南发现了更多的钨锡共生矿床,如柯树岭、樟东坑、新安子、八仙脑、牛岭、石雷(棕树坑)等。在南岭的其他地区如粤北、湘东南和桂东北等地,也有大量的钨-锡共生矿床;其中最著名的无疑是湘东南的柿竹园矿床,其钨、锡储量均达到了超大型矿床的规模(陈毓川等,1993;毛景文等,1998;刘义茂等,2000)。

众所周知,柿竹园矿床除了钨、锡共生外,还有钼、铋、铍等,因此堪称多金属矿床。与它类似,南岭及邻区的钨锡共生或伴生矿床实际上也大多是钨-锡多金属矿床或锡-钨多金属矿床,

亦即除了以钨-锡或锡-钨为主要的成矿金属元素外,矿床中或多或少还有其他共(伴)生的有用金属元素,只不过它们的含量有较大差异,有的达到了可供工业利用的程度,有的则未达到工业利用的数量而已。

尽管钨、锡在南岭地区共生十分普遍,但是,从元素本身的地球化学性质上来看,锡与钨的关系并不十分密切。锡与钨既非同一周期又非同一族,二者的电子构型、原子和离子半径、氧化还原电位等地球化学参数均有一定差异(刘英俊等,1984)。钨属于典型的亲氧元素,它在自然界中以 W^{6+} 的氧化态形式与 O^{2-} 结合形成 WO_4^{2-} 络阴离子,并再与Fe, Mn, Ca等元素结合形成钨酸盐类,因此,钨的天然矿物均以钨酸盐为主。与钨相比,锡虽然也属于亲氧元素(戚长谋,1991),但是锡不仅具有亲氧性,还具有亲铁性、亲硫性,可以在多种地质条件下形成多种锡的独立矿物,如锡的氧化物、氢氧化物、硫化物、硫酸盐、铋钨酸盐、硅酸盐和硼酸盐等。在自然界,锡容易与钛、铁、铋钨、铝等发生类质同象置换,但很少与钨形成类质同象;钛、铁、铋钨等也成为锡石——锡的最重要矿物中所包含的主要微量金属,而钨在锡石中的含量普遍较低。在目前已知的锡的六大类50多种矿物中,钨没有进入任何一种锡矿物的化学式(陈骏等,2000)。

事实上,从锡与钨二者在矿床中的主客关系来看,南岭及邻区大部分钨矿都有锡伴生,但在一些以锡为主的矿床中,钨可能并不是最重要的共生或伴生金属,例如桂东北的栗木矿田,原来是以锡为主的锡-钨共生矿床,但是从上世纪60年代起矿山就转为主要开采花岗岩型钨铋锡矿,并建立了老虎头、水溪庙和金竹源等3处花岗岩型钨(铋)-锡矿床,钨已经变得很不重要。对于许多独立锡矿床来说,其共生的钨也不多见,有的甚至基本上没有钨的共生或伴生,而是与银、铅锌等共生,如江西的德安曾家垅锡矿、石城松岭锡矿、会昌岩背锡矿等。广西大厂锡多金属矿床中的钨也并不是重要的伴生组份。当然,相反的情况同样存在。例如,虽然赣南地区众多的钨矿都有锡伴生,但是在江西的中部和北部,许多钨矿却没有锡伴生,如武功山地区的下桐岭钨矿床

就没有锡伴生而有钼、铋、铍伴生(汪帮勤等, 2004)。

锡矿与钨矿在南岭及其邻区的分布也并不十分一致。总体上看, 南岭东段的赣南地区以钨矿的密集产出为特征, 尽管大部分钨矿床都有锡的共生或伴生, 但是独立的锡矿床或以锡为主的矿床相对较少; 南岭中段的湘东南、桂东北一带是钨、锡并重, 如瑶岗仙、柿竹园、锡田、姑婆山(水岩坝)、珊瑚(长营岭)等, 但是锡的矿化已明显增强, 出现了一些以锡为主的矿床, 如新路、荷花坪(吴寿宁, 2006)、香花岭(钟江临等, 2006)、香花铺及近年来发现的芙蓉锡矿等; 到了南岭西段的桂北至滇东南, 钨矿已很少, 但锡矿却格外丰富并十分重要, 如广西的大厂、德保, 云南的都龙、白牛厂、新寨、个旧等。

锡是否与钨共生可能还与钨矿床的类型有关。一般地说, 石英脉型(尤其是大脉型)黑钨矿床最易伴生锡的富集; 而斑岩型或细脉浸染型(白)钨矿床则较少有锡的共生, 如赣北的阳储岭斑岩钨(钼)矿床、广东的莲花山斑岩钨矿, 以及南岭地区以外的我国另一个重要钨矿资源产地——河南栾川三道庄斑岩钼钨矿床等。细脉浸染型钨矿床中的福建行洛坑矿床以钨钼伴生为特征, 锡成为很次要的伴生组份。夕卡岩型(白)钨矿床也较少有锡的共生, 如湘东南的新田岭钨矿。

对于锡钨共(伴)生矿床中钨与锡的产出特征, 不少研究者在一些具体矿床中进行了研究。例如, 柿竹园矿床产于千里山花岗岩体东南内弯处与泥盆系余田桥组泥质灰岩的内外接触带, 复杂的成矿作用形成了4种成因类型的矿体, 并呈现出明显的垂直分带, 自上而下为: (1) 大理岩细网脉型 Sn, (Be) 矿体; (2) 夕卡岩型 W, Bi 矿体; (3) 网脉状云英岩-夕卡岩型 W, (Sn), Mo, Bi 矿体; (4) 云英岩型 W, Sn, Mo, Bi 矿体(毛景文等, 1998; 刘义茂等, 2000)。可见, 钨与锡既有密切共生, 又有各自的富集规律, 钨矿化在空间上与矽卡岩体分布基本一致, 主要产于中部的夕卡岩型矿体中, 而锡在网脉型和云英岩型矿体中较为集中。宋慈安(1996)对广西珊瑚矿田的研究表明: 从浅部到深部, 矿床的石英、黑钨矿等矿物中的 W-Sb-Cu-Pb-Zn-Mo-Ag 含量增多, 而 Sn-Cl-F

含量有减少的趋势。这一现象似乎揭示了 Sn 与 F 之间的相关性。徐敏林等(2006)综合赣南若干钨锡矿床的特征, 也发现富锡石的黑钨矿石英脉常含较多的萤石和黄玉(尤其是萤石), 显示出成矿流体既富锡、又富氟的特征。笔者等近年来在考察赣南若干钨矿床时, 也发现富锡的矿石常有萤石出现, 如漂塘钨锡矿床、石雷钨锡矿床中常可见到含锡石的石英脉中有萤石发育。

当然, 从锡与钨在全球范围内的成矿作用、矿床类型及分布情况来看, 二者的差异也相当明显。钨的主要矿床均与分异程度高的酸性岩密切相关, 而锡矿的形成在岩浆岩专属性方面的选择余地显然要比钨矿床宽得多, 除了与分异程度高的酸性岩有关外, 还可以与富钙酸性岩、碱性岩、A 型花岗岩、中酸性花岗闪长岩、基性岩等有关。

2 钼、铋与钨的共生关系

2.1 钼与钨的共生

钼、铋是南岭钨矿床中十分普遍而且非常重要的伴生金属元素。

从元素的地球化学性质来看, 钼与钨之间的关系非常密切。在周期表上, 钼与钨都属于第六副族, 为同族元素; 二者不仅离子半径(正6价)相等, 而且 $(WO_4)^{2-}$ 和 $(MoO_4)^{2-}$ 络阴离子半径也相近, 因此, 钼是最容易与钨发生类质同象置换的元素。一些钨矿物中的钼含量可以相当高, 例如白钨矿、钨钼铅矿等。白钨矿可以含高达 3% 的 MoO_3 , 而钼白钨矿(seyrigite, $Ca[(W, Mo)O_4]$)所含的 MoO_3 可达 24% (刘英俊等, 1987)。

因此, 钼与钨共生的情况是相当普遍的, 尤其是当富含钼、钨等成矿元素的花岗岩类与碳酸盐岩石接触形成钙夕卡岩时, 常伴随钼、钨成矿作用。这种情形不仅发生在南岭, 而且也在其他许多地区, 河南栾川三道庄超大型斑岩-夕卡岩型钼钨矿床就是最重要的例子之一(裴荣富, 1995)。前文述及产于花岗岩体中的斑岩型、细脉浸染型钨矿床较少有锡的共生, 但却常常伴有钼的矿化, 如江西阳储岭等。在南岭地区, 湖南的柿竹园、新田岭, 福建的行洛坑, 江西的盘古山、大吉山、茅坪、漂塘(大龙山和木梓园)等都是具有代表性的大型钨钼共生矿床。近年来在赣南

一些钨矿床中还不断有新的共(伴)生钼矿化发现。

但是,钼与钨之间在元素地球化学性质上仍有较大的差异。钼在第五周期而钨在第六周期,电子构型的差异、得失电子的难易程度不同,是造成自然界中钼亲硫而钨亲氧的重要因素(刘英俊等,1984)。只有在较高的氧化条件下,钼可以形成钼酸钙(钼钙矿 CaMoO_4)或钼钨酸钙(钼钨钙矿 Ca_2MoWO_4);但通常钼主要以硫化物辉钼矿的形式存在。因此,与钨矿共生的钼,往往与硫化物共生,形成于相对还原的条件。

笔者等近年来在对赣南一些钨矿床进行调查研究时发现,钼与钨在不同的矿床中有不同的产出特征。例如,漂塘钨矿的木梓园矿区是钨-钼矿床,其中富钨-钼(贫锡)矿石主要分布在440中段以上,而富钨-锡(贫钼)矿石主要分布在390中段以下,显示上钨-钼、下钨-锡的特征;在平面上富钨-钼-铋矿石和富钨-锡(贫钼)矿石也有不同的分布,具一定的分带规律(聂荣锋等,2007)。但是在左拔、樟斗等矿床,产在围岩中的黑钨矿石英脉则显示出上钨下钼的特征;而且据江西有色地勘局等近年来的勘查工作,在西华山、樟东坑等钨矿床的深部,都出现云英岩化的细粒花岗岩,并普遍发育钼矿化,有些已具有工业价值,这也显示出总体上的上钨下钼的分带现象^①。

钨矿床中共(伴)生的钼数量是非常可观的。由于近年来钼的价值不断增高,所以矿业界十分关注钨矿床中的伴生钼;此外,对约占全国钨储量近半数的高钼的钨精矿的合理利用也越来越受到重视(吕莹等,2005)。还值得一提的是,正是南岭钨矿床中普遍共(伴)生的辉钼矿,为近年来这些矿床成矿年龄的精确测定提供了有利条件(杜安道等,1994)。

2.2 铋与钨的共生

我国的铋矿资源居世界第一,且极大部分产在南岭,尤其是湘东南地区。铋也是南岭钨矿的重要伴生元素之一,湘东南柿竹园不但是我国最大的钨矿床(约占全国已探明钨储量的一半),而且已探明的共生铋金属储量达30.5万吨,分别占世界和我国已探明铋储量的43%和62%,是名副

其实的世界上最大铋矿床^②。因此有学者认为柿竹园实际上是“超大型钨、铋多金属矿床”(刘义茂等,2000)。湘东南的新田岭夕卡岩型(白)钨矿床也伴生数量可观的铋与钼。实际上,南岭地区丰富的铋资源基本上作为钨锡矿床的伴生元素产出的;即使是被称为“我国首个独立铋矿床”的金船塘(陈荣华等,1997;徐惠长等,2004),也是与锡共生,并伴有钨的工业矿化。

徐惠长等(2004)较系统划分了湘东南及邻区铋矿床的类型,认为以夕卡岩型最为重要,如柿竹园、金船塘、新田岭等;也有许多与钨锡矿床共生的铋产于花岗岩顶部或高侵位的岩枝中,属于蚀变花岗岩型或云英岩型,如大吉岭、野鸡尾等。

除了湘东南地区外,赣南的许多钨矿也有丰富的共生铋矿,而且铋与钼常常表现出正相关性。盘古山钨矿的铋储量超过1万吨;而且,随着矿山的生产、勘查向深部发展,显示出矿床深部在黑钨矿相对减少的同时,白钨矿含量相对增高,铋矿化含量略有提高,钼矿化则显著增强(叶际祎等,2000)。如前所述,漂塘的大龙山和木梓园矿区都是钨-钼共生矿床,其伴生的铋也很丰富。其他以黑钨矿石英脉为主的钨矿床如马岭、安前滩、大吉山、左拔、樟斗等也都有共生的铋或者钼-铋。此外,粤北的红岭、师姑山、瑶岭、棉土窝等钨矿床也伴生相当数量的铋。

铋具有明显的亲硫性,因此,南岭钨矿床中的铋矿化常常形成于成矿作用稍晚期(温度也较低)的硫化物阶段,铋一般也以辉铋矿或其他硫化物、硫酸盐矿物形式出现。但是,在流体中铋较丰富和贫硫的情况下,即使在温度较高的成矿作用早-中期,铋也能以自然铋的形式出现,并与黑钨矿共生于石英脉中。李岩等(1990)研究了赣南漂塘大龙山钨矿中自然铋的特征,发现在含钨石英脉中既有早阶段与黑钨矿、辉钼矿共生呈粗大自形晶的自然铋,也有在晚阶段与硫化物共生的自然铋集合体,这说明该矿床的形成经历了较完整、持续的高温到低温的过程。谭运金等(2002)也根据不同温度条件下共生的金属元素组合特征,认为盘古山钨(钼铋)矿床经历了由高温向低温

^① 据韦星林等(私人通讯)。

^② 据2008年8月湖南柿竹园公司网站www.hnszy.com资料。

的连续的演化过程。

3 铌、钽与钨的共生关系

铌、钽也是与钨类质同象关系非常密切的元素。 Nb^{5+} , Ta^{5+} 在自然界中都可以与 W^{6+} 呈类质同象置换关系,它们在置换时都呈各自的最高氧化态,具有相近的离子电位、离子半径和电负性,尤其是 Nb^{5+} 的电负性更接近于 W^{6+} ,二者更容易发生置换。因此在笔者研究的大吉山、铁山垅等钨矿床中都有铌黑钨矿出现。

大吉山是南岭地区钨和铌钽共生矿床的典型实例之一,它包含了钨和铌钽两种矿化的叠加。根据前人与笔者的研究,大吉山花岗岩包含了多个演化阶段的岩体,钨和铌钽两种矿化分别与不同阶段的花岗岩体有关(孙恭安等,1989;陈毓川等,1989;滕建德,1990;庄龙池等,1991;康永孚等,1994;华仁民等,2003;张文兰等,2003,2004,2006)。大吉山花岗岩的演化趋势与南岭地区同类型的花岗岩相似,即Ca, Mg, Fe, Ti含量逐渐减少, Si, K, Na和挥发份含量逐渐增多,稀有元素含量也逐渐增多, Ta, Nb逐渐聚集于高Si, 富含K, Na和挥发份的晚阶段侵入体中。大吉山与成矿有关的花岗岩可分为两期:较早的主体花岗岩和较晚的补体花岗岩。钨矿化在成因上与主体花岗岩密切相关。钨矿类型主要为含黑钨矿石英脉型,矿脉主要产在围岩中,其根部进入主体花岗岩的顶部;其次为蚀变花岗岩型,黑钨矿常以不均匀的矿巢在岩体中产出。而铌钽矿化则与高度演化的补体花岗岩(细粒白云母花岗岩)相关,矿石矿物主要为细晶石、钨钼锰矿和富钨钼锰矿类,它们在补体花岗岩中以副矿物的形式结晶出来,形成浸染状的花岗岩型Ta, Nb矿床。

笔者等在对大吉山的主要钨矿物——钨锰矿进行电子探针分析时,发现了一种主要由Nb, Ta, Fe, Mn, W组成的复杂氧化物——钨铌锰矿;这种矿物与富钨(的)铌锰矿交生,二者在成分上渐变过渡,构成了铌锰矿-钨铌锰矿-钨锰矿的连续系列。这也进一步证实自然界中铌(钽)与钨存在着广泛的类质同象置换现象(张文兰等,2003)。

铌钽和钨在大多数矿床中可能是伴生关系,二者在时间上有一定的先后,在空间上既可分开,

又可能重叠。由于铌钽的矿化类型主要是产于岩体内部的(蚀变)花岗岩型,而钨矿化最具代表性的是裂隙充填的黑钨矿石英脉型,所以在空间上一般来说是铌钽在下,钨在上。例如广西栗木锡钨钼矿床的钼铌(锡)矿体主要是产在(锂云母钠长石花岗岩)岩体的浸染状矿石中;而锡钨矿体主要是石英脉型矿石,产于岩体内部及岩株上部的围岩中(陈毓川等,1993)。在成矿时间上,由同一岩体形成的矿床应该是铌钽在先,钨在后,因此张金明(2006)认为在大吉山的花岗岩型矿体中,铌钽矿化早于钨矿化。但是,如前所述,由于大吉山的钨和铌钽分别与不同阶段的花岗岩体有成因联系,而与钨矿化密切相关的主体花岗岩稍早于铌钽矿化的补体花岗岩,因此很有可能钨矿化早于铌钽矿化。为了搞清它们之间的时间关系,笔者等对大吉山钨-铌钽矿床及花岗岩进行了成岩成矿年龄测定,用单颗粒锆石U-Pb法测得大吉山补体花岗岩的年龄为151.7 Ma,这一年龄值也可以近似地作为铌钽矿化的时间;用快中子活化 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测得大吉山主钨矿脉中云母的年龄为144 Ma和147 Ma,并以此作为钨矿脉的年龄(张文兰等,2006)。由此可见,大吉山与钨矿化相关的花岗岩体虽然稍早于与铌钽矿化相关的花岗岩体,但是钨矿化在总体上却仍然晚于铌钽矿化。

在南岭及其邻区,铌钽除了与钨(锡)共生外,还不乏独立的或以铌钽为主的矿化,前者如江西宜春,后者如广西栗木等。事实上,铌钽与钨的地球化学行为还是有较大差异的,铌钽倾向于在高度分异演化的花岗岩中富集,因此,南岭及邻区与铌钽矿床有关的花岗岩都是高度演化的花岗岩。从岩性上来看,它们以白云母花岗岩为主,如广西栗木与锡钨钼矿床有关的是白云母碱长花岗岩(陈毓川等,1993,1995),赣南大吉山钨-铌钽矿床有关的是细粒白云母花岗岩(孙恭安等,1989;康永孚等,1994)。江西宜春钽铌锂矿床有关的雅山花岗岩也经历了5个阶段的演化,钽铌锂矿化产于最晚期富磷的黄玉锂云母碱长花岗岩中(刘昌实等,1999;喻良桂,2007)。

由于高度分异演化,南岭及其邻区与铌钽矿床有关的花岗岩除了具有与钨锡矿化花岗岩相似的高硅富碱等特征外,更富集 H_2O 和Li, F, B, P

等组分,并表现为中等过铝质, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, Ta 含量较高而 REE 含量很低。正是由于二者之间存在这种较显著的差异,因此前人在关于南岭的成矿花岗岩研究中,曾经有“含钨花岗岩”和“含铌钽花岗岩”之分(夏宏远等,1984)。陈毓川等(1995)在总结桂北地区花岗岩类特征时,也指出富铌钽的栗木矿田花岗岩 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,而其他含锡花岗岩都是 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 。一些学者则把这些高度演化的富氟的铌钽花岗岩称为“Li-F 花岗岩”、“富锂氟含稀有金属矿化花岗岩”等(王联魁等,2000;朱金初等,2002)。笔者通过对赣南两个大型矿山大吉山(W-NbTa)和漂塘(W-Sn)与成矿有关花岗岩特征的对比,证实与铌钽矿化相关的大吉山花岗岩的岩浆分异演化程度比漂塘更高(华仁民等,2003)。

4 金、银、铜、铅、锌与钨的共生关系

一般来说,金、银、铜、铅、锌以及砷、锑、汞等被认为是典型的亲铜或亲硫元素(刘英俊等,1984),与钨、锡、锂、铍、铌钽等亲氧元素具有不同的地球化学性质。前人关于华南花岗岩及其成矿关系的研究成果表明,钨、锡、锂、铍、铌钽等元素的成矿作用一般与壳源的改造型或陆壳重熔型或S型花岗岩有关,而铁、铜、金、银、铅、锌等元素的成矿作用则与壳-幔混源的同熔型或I型花岗岩有成因联系(Xu et al, 1984)。因此,长期以来人们较少考虑铜、金、银、铅、锌等元素与钨的共生。但是实际上,南岭地区不少钨-多金属矿床中都含有上述元素的共(伴)生现象。总体上来看,铜、金在南岭地区钨矿床中的共(伴)生相对较少,意义也较小,而银、铅、锌在南岭地区钨矿床中的共(伴)生现象则要普遍和重要得多。

4.1 金、铜与钨的共(伴)生

金与钨在某些情况下是可以密切共生的。在扬子板块东缘的江南造山带,有不少层控或改造型的W-Au-Sb矿床产于元古代板溪群、冷家溪群等地层中,如湘西的沃溪W-Sb-Au矿床等(刘英俊等,1993;康永孚等,1994;裴荣富,1995)。

但是,从化学性质上来看,金与钨的差别较大。与金矿床有关的花岗岩类在岩石学、矿物学、地球化学特征上也与钨锡花岗岩有较大区别(徐克勤等,1992)。一些学者认为,金主要以铁镁矿

物为载体,随着火成岩的铁镁矿物含量减少,即向酸性岩的演化中,金的含量也逐渐减少;而钨则倾向于在花岗岩类演化的晚阶段集中,因此金与钨在(花岗岩类)岩浆作用产物中不容易共生。华南地区与花岗岩类有关的钨矿床中,金与钨共生的现象较少,二者之间的关系并不明显。

Thompson等(1999)报道了国外几个在钨-锡矿区与(花岗岩类)岩浆作用有关的金矿床的实例,如美国阿拉斯加的Fort Knox、捷克的Mokrsko等。笔者也曾参与过在美国阿拉斯加Circle地区与花岗岩类有关的金和锡矿化的地质调查工作(Menzie et al, 1987)。看来,与花岗岩有成因联系的金与钨锡共生或伴生的情况似乎并不罕见;但是,Thompson等报道的国外7个产在钨-锡矿区的金矿中,只有Fort Knox的花岗岩属于钛铁矿系列花岗岩,而其余6个矿床的花岗岩类都是I型或磁铁矿系列的花岗岩。值得注意的是,除了个别矿床外,成矿流体都是较低温度($< 330^\circ\text{C}$)、低盐度($< 10\%$)、富 CO_2 的流体。As-Sb-Bi和Te, Mo是这些矿床中最常见的与金伴生元素。

广东的莲花山钨矿可能是华南地区唯一具有一定规模的钨-金共生矿床(柳少波等,1997)。不过,莲花山钨矿已经处在东南沿海地带,在大地构造背景上与南岭地区有明显差异。

近年来在南岭地区尤其是赣南钨矿密集分布区也有一些金矿化的新发现。例如曾经是赣南四大钨矿之一的岿美山,因资源枯竭而闭坑,上世纪末发现在该矿床钨矿脉的南东延长段,钨矿化逐渐变为金矿体,矿体厚8 m,金的平均品位为 3.37×10^{-6} ,最高达 21×10^{-6} ,推测具中型以上远景(尹意求等,2000)。此外,在黄沙钨矿区的断裂破碎带中也发现了金矿化体(王定生,2001)。

这些发现为在钨矿区及其外围寻找金矿床提供了实例和有益的线索。但是迄今为止这些金矿化与钨矿及相关花岗岩的成因联系还不很清楚,因此二者是否属于共生或伴生尚难评述。不过,与上面提到的国外若干金矿床相类似,金也常常与铋-碲矿物共生;在赣南盘古山、岿美山、大吉山等钨矿的铋精矿中,金的含量都相当高(王定生,2001)。

谭运金(2001)在分析了国内外若干与钨矿

共生的金矿床特征后，认为相关的花岗岩主要是高钾的钙碱性花岗岩，共生的钨矿是成矿温度较低、硫化物含量较低但富含铋、碲的矿床，并提出在南岭地区寻找共生金矿床应首选 W-Be-Mo-Bi 型黑钨矿床及其外围。

王定生（2001）还提出赣南地区的金矿与加里东期花岗岩的关系比较密切，而燕山期的花岗岩则与银矿关系密切；而断裂构造是金、银矿化最重要的控制因素。

华南地区的铜矿化主要分布在长江中下游、江南造山带东缘和东南沿海；这些地区的铜矿床中很少有钨共（伴）生，仅有的几个例子包括江西的东乡枫林铜钨矿床和铅山永平铜（钨）矿床、皖南的铜山铜钨矿床（刘心兵，2002）等。总体来说，南岭地区缺乏与花岗岩类有关的重要铜矿床。在南岭众多的钨多金属矿床中，虽然也有若干共（伴）生的铜矿化，如赣南于都的小东坑钨铜矿床，广西中部大明山成矿带的马岭、高田钨铜矿床等（李水如等，2007），但在更普遍的情况下，铜只是在（以铅锌为主的）硫化物中少量地产出，如湘东南的长沙坪矿床，赣南的崇义宝山矿床、大余石雷矿床、下垅矿床等，虽然有些矿床的铜可以作为副产品回收，但一般来说南岭钨矿床中的铜并不构成铜的重要资源。

4.2 银-铅锌与钨的共（伴）生

南岭及其邻区是我国银的主要成矿区之一，代表性的银矿床有云南蒙自白牛厂、广西隆安凤凰山、广东高明富湾和梅州嵩溪等。银在南岭地区钨（锡）矿床中的共（伴）生现象也比金普遍和重要得多。

杨树德（2000）统计了我国华南西华山等 13 个钨矿床的矿石中伴生银含量，从较低的 15 g/t（广西珊瑚），到较高的 335 g/t（赣南漂塘）。这些矿床中的银除了以独立银矿物存在外，还大量分布在方铅矿等硫化物和硫盐矿物中。

钨矿床中的伴生银在大多数情况下与铅锌共同产出，如赣南的崇义宝山、上犹焦里，湘南的柿竹园、长沙坪等；部分与铜铅锌共生，如野鸡尾锡多金属矿、长沙钨矿等；也有 Cu（Mo）-Ag-Te 组合，如长沙坪（钟正春等，1997）。笔者等在研究漂塘矿区的矿石矿物组合时，除了鉴别出自然

银、辉银矿、铅铋银矿、硫铅铋铜银矿、角银矿以及含银硫镉矿、含银辉铋铅矿、含银黝铜矿等银矿物和含银矿物，还新发现一种化学式大致为 $(\text{AgCuFe})\text{S}_3$ 的含银矿物，暂定名为“银黄铜矿”（张文兰，2004）。

钨矿床中伴生的铅锌-银有两种不同的产出状况。一种是铅锌-银直接产在钨矿体中，如前文所述的漂塘是赣南大型钨矿床之一，也是南岭地区较典型的伴生银矿床，仅漂塘本区的银储量就有 300 吨（黄崇轲等，1997），银主要赋存在成矿作用中-晚期的黑钨矿硫化物石英脉中，其次在中期的锡石黑钨矿黄玉石英脉中。另一种是铅锌-银矿体与钨矿体分别产出，在形成时间上有一定的先后关系，而矿体和成矿元素在空间上则出现一定的分带性，这种情况在一些大型矿床或矿田范围内更为明显，例如在湘东南柿竹园（东坡）矿田，第一、二阶段的黑云母花岗岩侵位及相关的块状夕卡岩化、云英岩化等形成了 W-Sn-Mo-Bi 矿床，而第三阶段的花岗斑岩及相关的锰质夕卡岩化则形成了 Pb-Zn-Ag 矿床（毛景文等，1998）。在湘东南长沙坪矿床，夕卡岩和高温热液阶段主要是 Fe-W-Mo-Cu 矿化，中温热液阶段以 Cu-Pb-Zn 矿化为主，中-低温热液阶段则为 Ag-Pb-Zn 矿化。表现为空间上，无论在长沙坪的 301 矿带还是 304 矿带，W-Mo（-Bi）矿化都形成于温度较高的夕卡岩阶段，产于花岗质岩体内外接触带；而 Ag-Pb-Zn 矿化则属于中低温热液充填型，产于离岩体较远的灰岩中（钟正春等，1997）。

笔者等近期考察的江西上犹焦里 Ag-W-Pb-Zn 夕卡岩型矿床也属于后一种情况。焦里矿床产于营前花岗岩体与寒武系地层的接触带上，钨矿化产物为白钨矿，形成于相对较早的夕卡岩阶段，银矿化则形成于较晚的硫化物阶段，且主要赋存于方铅矿中。值得一提的是，与成矿有关的营前花岗岩是一个复式岩体，目前资料显示其由印支和燕山两个时代的岩体组成，其中印支期的为花岗闪长岩，含巨大的长石斑晶及大小不等的暗色团块。这些暗色团块是否属于偏基性的岩石包体，尚有待于进一步工作，但是这种情形在赣南钨矿区来说是比较少见的。

由于南岭及邻近地区的许多钨矿都是钨、锡

共生矿床,而如前所述,钨、锡在元素性质和成矿特征上又有许多不同,因此关于该地区银(铅锌)与钨、锡矿床的共(伴)生情况,有两点特征是值得注意的:

1)与钨、锡矿床区域分布的总体特征相一致,钨-银共生矿床主要分布在南岭东段的赣南,如上犹的焦里,崇义的宝山,大余的西华山、漂塘、樟斗,全南的大吉山,定南的岢美山,于都的黄沙、盘古山等;而从南岭的中段至西段,随着钨成矿作用的减弱和锡成矿作用的加强,表现为从钨-锡-银共生(湘东南柿竹园、黄沙坪等)向以锡-银共生为主(湘东南红旗岭、香花岭、野鸡尾、东坡山,广西大厂、芒场,滇东南个旧、白牛厂等)转变的特征。

2)总体上来看,银与钨的共生关系似乎不如银与锡的共生关系密切,表现为:(1)钨-银矿床不如锡-银矿床规模大、分布广。南岭及邻近地区规模较大的锡-银矿床有广东厚婆坳锡-银矿床、滇东南白牛厂超大型银(锡)矿床等,而广西大厂和云南个旧这两个超大型锡多金属矿床也都伴生或含有丰富的银。(2)在钨-银共生矿床中,除了焦里、宝山这两个夕卡岩型矿床的银可以作为独立矿床外,其余矿床中银只作为伴生矿床或含银矿床,而许多锡-银矿床的银可以作为独立矿床,如湘南的香花铺、铁砂坪,广东的厚婆坳,滇东南的白牛厂、个旧卡房的龙树脚等。这一现象的原因尚待研究。前人研究指出,在与花岗岩有关的钨-锡-银共生矿床中,钨的成矿温度较高,锡次之,而银较低,故总体上成矿作用的时间顺序为“钨→锡(铜、银)→铅锌、银”(黄崇轲等,1997);由于银与钨在不同矿化阶段富集,因而在空间上共生机会较低。前人研究还指出:“南岭地区的银主要是与地幔相联系的深源成矿元素,它们的主要成矿母岩是同熔型和过渡型花岗岩类”(黄崇轲等,1997);这一特征与赣南钨成矿相关的陆壳重熔型花岗岩明显不同而与含锡花岗岩更类似,从而可以从物质来源上对这一现象作出解释。笔者认为,从钨、锡和银三个元素的地球化学特征来看:钨具有亲氧性和亲铁性;锡除了具有亲氧性、亲铁性外,还具有一定的亲硫性,可以形成黝锡矿(黄锡矿)、圆柱锡矿等硫化物、

硫盐矿物;银则具有亲硫性和亲铁性(刘英俊等,1984)。因此,锡和银共有的亲硫性可能是二者在较还原、富硫的环境下更容易共生的原因之一。

南岭某些钨矿床中的伴生银也与铋密切相关。在江西浒坑钨矿,伴生的铋、银含量在钨矿砂中呈明显的正相关(许德清,1995)。谭运金等(2002)运用多元相关分析研究了江西盘古山钨矿近矿蚀变岩石中的金属元素组合特征,结果表明,银与铋具有明显的正相关,成为该矿床的4种主要元素组合之一。在自然界,银与铋的关系确实比较密切,其原因可能是:一方面,银与铋可以共存于硫铋铅银矿(ourayite, $\text{Ag}_{25}\text{Pb}_{30}\text{Bi}_{41}\text{S}_{104}$)、硫铋银矿(matildite, AgBiS_2)、硫铋锑银矿(aramayoite, $\text{Ag}(\text{Sb}, \text{Bi})\text{S}_2$)、硫铋铜银矿(arcubisite, $\text{Ag}_6\text{CuBiS}_4$)、硫铋铜银铅矿(cupropavonite, $\text{PbAgCu}_2\text{Bi}_5\text{S}_{10}$)等复杂的硫化物中;另一方面,铋与银可以共同替换方铅矿中的铅,即 $\text{Bi}^{3+}\text{Ag}^+ \longleftrightarrow 2\text{Pb}^{2+}$ (刘英俊等,1987),因此方铅矿中经常含有铋与银。

5 稀土与钨(锡)矿化的关系

南岭及其邻近地区是我国重要的稀土资源产地。该地区的稀土成矿作用,除了少数原生岩浆型矿化(如西华山)以及砂矿(如姑婆山)外,真正具有工业意义的主要是由花岗岩风化后形成的风化壳型(或称离子吸附型)稀土矿床。从上世纪60年代末在赣南的足洞和关西首次发现了风化壳型稀土矿床起,这类矿床很快在华南的许多地方被大量发现,尤以赣南和广东最为丰富。

南岭及邻区风化壳型稀土矿床与该地区广泛分布的钨锡等稀有金属矿床的形成环境、条件、时间空间等相差悬殊,所以二者实际上并不共生。笔者等曾经以赣南大吉山地区的花岗岩、桂东北的花山-姑婆山复式花岗岩为例,讨论了稀土元素与W, Sn等成矿元素在岩浆演化过程中的不同行为;即随着岩浆分异程度的提高,花岗岩中W, Sn等成矿元素的含量逐渐增加,但是稀土元素含量却由于其主要载体黑云母及许多副矿物的大量减少而显著降低。笔者等还指出了南岭地区与风化壳型稀土矿床有关的岩石主要是演化程度较低的弱分异花岗岩类,例如印支期准铝质花岗岩、燕山期A型花岗岩、燕山中-晚期黑云母二长花岗

岩等(华仁民等, 2007)。

6 结论与讨论

6.1 南岭地区钨矿床中某些金属共(伴)生的主要特征

从本文论述中可以看出, 南岭及其邻近地区绝大多数钨矿床中都有其他金属的共(伴)生, 但是不同的金属有着不同的共(伴)生特征:

(1) 南岭地区锡与钨在成矿作用中的共(伴)生现象非常普遍, 很大一部分钨矿床实际上是钨-锡-多金属矿床。但是钨和锡在南岭及其邻近地区有着各自的分布特征: 南岭东段的赣南以钨矿为主, 独立的锡矿相对较少; 南岭中段的湘东南、桂东北一带钨锡并重, 但锡的矿化已明显增强; 南岭西段的桂北至滇东南, 钨矿已很少, 但锡矿却格外丰富。

(2) 铈和铋是南岭钨矿床中十分普遍而且很重要的伴生金属元素。铈、铋虽然也与钨有很密切的类质同象关系, 但是由于大多数与钨矿化有关的花岗岩中铈、铋含量较低, 因此大部分钨矿床中缺乏有工业意义的共生铈、铋矿化。只有在那些高度分异演化的花岗岩中才有钨(锡)与铈铋的共生, 或形成独立的铈铋矿床。

(3) 金、银、铜、铅、锌在南岭地区不少钨-多金属矿床中都有共(伴)生现象, 尤其是银和铅、锌在南岭钨矿中的共(伴)生现象相当普遍并且有重要价值。

6.2 南岭地区钨矿床中金属共(伴)生的原因探讨

迄今为止, 南岭地区钨矿床中广泛发育的有色、稀有和贵金属共(伴)生现象及其不同特征的原因尚未得到充分的研究。笔者初步认为可以从以下几个方面进行探讨:

(1) 元素的地球化学特性决定了它们在岩浆-热液-成矿作用中的行为。

南岭地区在钨矿床中最容易与W共(伴)生产出的主要是Sn, Bi, Mo, Li, Be, Nb, Ta等元素。它们具有共同的或相似的地球化学性质, 一般来说它们在地壳中的丰度较大, 在陆壳发生部分熔融形成花岗质岩浆的过程中, 它们都倾向于在晚期残余岩浆中富集, 因此它们都是花岗岩的特征元素。关于这一点, 前人已经有很多论述, 本文

不必再予讨论。

(2) 华南地区特殊的地质背景及其演化历史为钨和其他有色、稀有和贵金属的富集成矿提供了物质基础。

华南地处扬子古陆东缘江南造山带以及华南加里东褶皱带等构造单元; 南岭钨多金属矿床所在的构造位置——华南震旦-加里东褶皱带的地层是以复理石、浊积岩为主的沉积物, 厚度巨大, 且经历了多旋回的地壳发展演化, 成熟度高, 其地层中钨锡等元素含量丰富。据迟清华等(2007)统计的中国东部内蒙兴安-吉黑造山带、华北地台、秦岭-大别造山带、扬子地台(东)和华南褶皱系等5个构造单元沉积盖层和结晶基底的化学组成和元素丰度数据表明, 无论是沉积盖层还是结晶基底, 5个构造单元中都以华南褶皱系的SiO₂和K₂O含量最高, 说明其地壳最为成熟; 而8个相关的有色及稀有金属成矿元素W, Sn, Bi, Mo, Li, Be, Nb, Ta的丰度也以华南褶皱系和扬子地台(东)最大。可见, 南岭及其邻近地区是一个成矿元素的高丰度区。

(3) 南岭地区广泛发育的陆壳重熔型花岗岩集中了丰富的成矿元素, 是钨及其他有色、稀有金属的成矿母岩。

迟清华等(2007)也统计了中国东部上述5个构造单元花岗岩的8个成矿微量元素丰度, 除了Sn以外的其他7个元素都在华南褶皱系的花岗岩中丰度最高, Sn的丰度则在扬子地台(东)的花岗岩中最高、华南褶皱系次之。而且这些元素在华南褶皱系和扬子地台(东)这两个构造单元的花岗岩中的丰度要明显高于其他构造单元, 例如W的丰度在上述5个构造单元花岗岩中的丰度分别为 0.68×10^{-6} , 0.49×10^{-6} , 0.47×10^{-6} , 1.6×10^{-6} 和 1.7×10^{-6} 。类似地, 在中国东部上述5个构造单元的碱(正)长花岗岩和二长花岗岩中, 该8个成矿微量元素的丰度也明显以华南褶皱系和扬子地台(东)为最高。

例如, 与柿竹园、金船塘等超大型、大型矿床有关的千里山花岗岩体富含W, Sn, Mo, Bi, Be等金属元素, W含量为地壳平均值的数倍至数十倍(毛景文等, 1998; 刘义茂等, 2000), 为这些元素的富集成矿提供了物质基础。该岩体的黑

云母是这些成矿元素的主要载体,其W, Sn, Mo, Bi的含量,据陈荣华等(1997)的研究结果分别为 87.5×10^{-6} , 212.8×10^{-6} , 12.2×10^{-6} 和 130.4×10^{-6} ;据刘义茂等(2000)的研究结果则分别为 $(56 \sim 3020) \times 10^{-6}$, $(90 \sim 350) \times 10^{-6}$, $(0 \sim 1530) \times 10^{-6}$ 和 $(170 \sim 2120) \times 10^{-6}$ 。

(4)多期次多阶段岩浆-热液成矿作用的叠加是多种元素共生的重要机制之一。

华南地区多期多阶段的大规模花岗岩类活动,是形成钨多金属矿床的最重要因素。花岗岩的不断分异演化,往往伴随着多期次、多阶段、由高温到低温的岩浆-热液成矿作用,导致多种金属元素的富集。而这些多阶段成矿作用的叠加,也是不同金属共(伴)生的重要原因之一。研究表明,那些具有较丰富的共生或伴生元素的大型、超大型矿床,往往是多期次多阶段岩浆-热液成矿作用叠加的产物。例如,西华山钨矿经历了四次成矿作用(吴永乐等,1987),而柿竹园超大型矿床基本上是由三期岩浆-热液及其所伴随的金属矿化叠加而成为复合矿体(刘义茂等,2000),从而导致了多种有用金属元素的共生或伴生。漂塘大龙山钨矿中既有早阶段与黑钨矿、辉钼矿共生呈粗大自形晶的自然铋,也有在晚阶段与硫化物共生的自然铋集合体,说明该矿床经历了较完整、持续的高温到低温的过程(李岩等,1990)。谭运金等(2002)也根据不同温度条件下共生的金属元素组合特征,认为盘古山钨矿经历了由高温向低温的连续的演化过程。

致谢: 本文野外调研工作得到江西有色地勘局韦星林、王定生、郭家松、黄小娥等的热情帮助,以及铁山垅、盘古山、安前滩、大吉山、漂塘、荡坪、下垅、石雷、茅坪、焦里、浒坑等许多矿山的大力支持;笔者还从与韦星林等人的讨论交流中获得许多有益的信息和启发。在此谨向他们致以诚挚的感谢。

References:

- Chen Jun, et al. 2000. Geochemistry of Tin [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1-320. (in Chinese)
- Chen Ronghua, Liu Changxin and Xu Shiguang. 1997. Jinchuantang Sn-Bi deposit in Chengzhou city and its metallogeny [J]. *Hunan Geology*, 16(2): 101-105. (in Chinese with English abstract)
- Chen Yuchuan, Mao Jingwen, et al. 1995. Metallogenic Series of Ore Deposits and Metallogenic Evolution through Geological History in North Guangxi [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1-433. (in Chinese)
- Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, et al. 1989. Geology of Non-Ferrous and Rare Metal Deposits Related with Mesozoic Granitoids in the Nanling Area [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- Chen Yuchuan, Zhu Yusheng, et al. 1993. Mineral Deposit Models of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-367. (in Chinese)
- Chi Qinghua and Yan Mingcai. 2007. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-148. (in Chinese with English abstract)
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, et al. 1994. A study on the Rhenium-Osmium geochronometry of molybdenites [J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339-347. (in Chinese with English abstract)
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, et al. 2003. Comparison in the characteristics, origin and related metallogeny between granites in Dajishan and Piaotang, southern Jiangxi, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 609-619. (in Chinese with English abstract)
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Gu Shengyan, et al. 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling region, South China, and their mineralizations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2321-2328. (in Chinese with English abstract)
- Huang Chongke, Zhu Yusheng, Zhang Zhongwei, et al. 1997. Silver Deposits in the Nanling Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-293. (in Chinese)
- Kang Yongfu and Li Chongyou. 1991. Geological characteristics, types and distribution of tungsten deposits in China [J]. *Mineral Deposits*, 10(1): 19-26. (in Chinese with English abstract)
- Kang Yongfu, Miao Shuping, Li Chongyou, et al. 1994. Tungsten deposits in China [M] // Editorial Committee of Mineral Deposits in China. *Mineral Deposits in China*, V2, Beijing: Geological Publishing House, 1-104. (in Chinese)
- Li Shuiru, Wei Junhao, Deng Jun, et al. 2007. Ore types of tungsten polymetallic deposits and prospecting indications in Damingshan area, Guangxi [J]. *China Tungsten Industry*, 22(6): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- Li Yan and Sheng Jifu. 1990. Native bismuth in the Dalongshan tungsten deposit in Jiangxi Province [J]. *Geological Review*, 36(4): 364-369. (in Chinese with English abstract)
- Liu Changshi, Huang Xiaolong, Wang Rucheng, et al. 1999. The phosphorus distribution in feldspars from Yashan granites, Jiangxi province, south China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 291-297. (in Chinese with English abstract)
- Liu Shaobo and Wang Liankui. 1997. Alteration and mineralization characteristics and model of Lianhuashan porphyry type W-Au deposit, Guangdong [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(3): 296-303. (in Chinese with English abstract)
- Liu Xinbing. 2002. Ore controls and prospecting suggestion for the Tongshan Cu-W deposit [J]. *Express Information of Mining Industry*, 8: 7-10. (in Chinese)
- Liu Yimao, Wang Changlie, Xu Youzhi, et al. 2000. The Shizhuyuan super-large tungsten polymetallic deposit: Genetic features, metallogenic process, and ore deposit model [M] // Tu Guangchi et al. *The Super-large Ore Deposits in China (I)*. Beijing: Science Press, 27-48. (in Chinese)
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. 1984. Geochemistry of Elements [M]. Beijing: Science Press, 1-548. (in Chinese)
- Liu Yingjun and Ma Dongsheng. 1987. Geochemistry of Tungsten [M]. Beijing: Science Press, 1-232. (in Chinese)
- Liu Yingjun, Ma Dongsheng, Ji Junfeng, et al. 1993. Gold Deposits in

- Jiangnan Region and Its Geochemical Background of Ore Formation [M]. Nanjing: Nanjing University Press. (in Chinese)
- Lv Ying and Li Honggui. 2005. Utilize tungsten concentrates of high molybdenum rationally [J]. *China Tungsten Industry*, 20(5): 15–16. (in Chinese with English abstract)
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Song Xuexin, et al. 1998. Geology and Geochemistry of the Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi Polymetallic Deposit, Hunan, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–215. (in Chinese)
- Menzie W D, Hua R M and Foster H L. 1987. Newly located occurrences of lode gold near Table Mountain, Circle quadrangle, Alaska. U. S. Geological Survey Bulletin, No.1682: 13p.
- Nie Rongfeng and Lu Kehao. 2007. Efficiency of prospecting in Muziyuan ore section of Piaotang tungsten deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 21(3): 312–315. (in Chinese with English abstract)
- Pei Rongfu (ed.). 1995. Mineral Deposit Models of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 1–357. (in Chinese)
- Qi Changmou. 1991. A discussion for geochemical classification of elements [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(4): 361–365. (in Chinese with English abstract)
- Song Cian. 1996. The character of geochemical anomaly and prospecting and prognostic model in Shanhu W-Sn mining area, Guangxi [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 16(4): 353–361. (in Chinese with English abstract)
- Sun Gong'an, Shi Mingkui, Zhang Hongliang, et al. 1989. Study on petrology, geochemistry, and metallogeny of Dajishan granite [G] // Yichang Institute of Geology. Scientific Reports on Geology and Mineral Resources in Nanling (2). Wuhan: China University of Geoscience Press. 326–363. (in Chinese)
- Tan Yunjin, Tong Qiquan, Pi Junming, et al. 2002. Geological-geochemical features of near-ore alteration rocks in Pangushan tungsten deposit [J]. *China Tungsten Industry*, 17(5): 21–26. (in Chinese with English abstract)
- Tan Yunjin. 2001. The gold deposits associated with tungsten deposits and their exploration [J]. *China Tungsten Industry*, 16(2): 1–21. (in Chinese with English abstract)
- Teng Jiande. 1990. Vertical zoning distribution of mineralization in the Dajishan Mine [J]. *Mining Geology*, 11(2): 13–24. (in Chinese)
- Thompson J F H, Sillitoe R H and Baker T. et al. Intrusion related gold deposits associated with tungsten-tin provinces [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34(4): 323–334.
- Wang Bangqin, Huang Dingtang, Li Xinzhi, et al. 2004. Metallogenesis and geological characteristics of Xiatongling tungsten polymetallic deposit [J]. *China Tungsten Industry*, 19(6): 25–29. (in Chinese with English abstract)
- Wang Dingsheng. 2001. Perspective analysis for exploring gold and silver in tungsten mines and adjacent area in southern Jiangxi [J]. *China Tungsten Industry*, 16(4): 21–24. (in Chinese with English abstract)
- Wang Liankui and Huang Zhilong. 2000. Liquid Segregation of Li-F Granite and Experiment [M]. Beijing: Science Press, 1–280. (in Chinese)
- Wang Qiuhe. 1991. Metallogenic series of tungsten deposits in China and their zonal distribution of metallic elements [J]. *Non-ferrous Metal: Mining Part*, 6: 29–33. (in Chinese)
- Wu Shouning. 2006. Geological characteristics of the Huhuaping tin polymetallic deposit in Chenzhou, Hunan Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(1): 43–46. (in Chinese with English abstract)
- Wu Yongle, Mei Yongwen, Liu Pengcheng, et al. 1987. Geology of the Xihuashan Tungsten Ore Field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–317. (in Chinese with English abstract)
- Xia Hongyuan and Liang Shuyi. 1984. The evolutionary peculiarity of the W-bearing and Nb, Ta-bearing granites in South China [M] // Xu & Tu. *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Beijing: Science Press, 651–669.
- Xu Deqing. 1995. The existence and recovery situation of accompanying silver and bismuth in the Fukeng tungsten deposit [J]. *Jiangxi Non-ferrous Metal*, 9(1): 34–39. (in Chinese)
- Xu Huichang, Tang Fenpei, Deng Songhua, et al. 2004. Classification of primary bismuth deposits in South Hunan and its neighboring area [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1: 39–42. (in Chinese with English abstract)
- Xu Keqin and Ding Yi. 1943. Geology of Tungsten Deposits in Southern Jiangxi [M]. Special Report of China Geological Survey, A17, 149p. (in Chinese)
- Xu Keqin, Liu Yingjun and Yu Shoujun. 1959. Types of tungsten deposits of China and their distribution with relation to geotectonics [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2: 31–54. (in Chinese with English abstract)
- Xu Keqin, Lu Jianjun and Ni Pei. 1992. The petrochemical and geochemical characteristics of the granitoids associated with gold deposits [J]. *Journal of Guilin Institute of Metallurgical Geology*, 12(1): 1–11. (in Chinese with English abstract)
- Xu Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, et al. 1984. Petrogenesis of the granitoids and their metallogenetic relations in South China [M] // Xu & Tu. *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Beijing: Science Press, 1–31.
- Xu Minlin, Feng Weidong, Zhang Fengrong, et al. 2006. Metallogenic characteristics of Taokikeng wolfram deposit, Chongyi [J]. *Resources Survey & Environment*, 27(2): 159–163. (in Chinese with English abstract)
- Yang Shude. 2000. The occurrence state and synthesis utilization of accompanying silver in tungsten deposits of China [J]. *China Tungsten Industry*, 15(3): 16–20. (in Chinese with English abstract)
- Ye Jiyi, Deng Guozheng, Pi Junming, et al. 2000. An analysis on the characteristics of deep deposit of Pangushan tungsten mine and the vistas of prospecting [J]. *China Tungsten Industry*, 15(4): 17–19. (in Chinese with English abstract)
- Yin Yiqiu, Wei Xinglin, Wang Dingsheng, et al. 2000. The gold deposit and prospecting sense outside tungsten mine of Kuimeishan [J]. *China Tungsten Industry*, 15(4): 20–21. (in Chinese with English abstract)
- Yu Lianggui. 2007. Evolution of Yashan granite and tantalum–lithium mineralization [J]. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 21(2): 7–10. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jinming. 2006. Geological characteristics of Dajishan tungsten mine, Jiangxi [J]. *Resources Survey and Environment*, 27(2): 149–152. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Wenlan, Hua Renmin and Wang Rucheng. 2003. Intergrowth of wolframioxiolite and W-rich manganocolumbite in Dajishan tungsten deposit, Jiangxi Province, South China [J]. *Mineral Deposits*, 22(2): 158–165. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Wenlan, Hua Renmin, Wang Rucheng, et al. 2006. New Dating of the Dajishan granite and related tungsten mineralization in southern Jiangxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 956–962. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Wenlan. 2004. Study of granites in Dajishan and Piaotang, southern Jiangxi Province, and their related metallogeny [D]. Ph.D dissertation of Nanjing University, 1–160. (in Chinese with English abstract)
- Zhong Jianglin and Li Chuping. 2006. Geological characteristics and genesis of Xianghualing skarn type tin deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(2): 147–151. (in Chinese with English abstract)
- Zhong Zhengchun, Deng Shengfu, Wang Lihua, et al. 1997. Association of silver mineralization in the Huangshaping lead-zinc deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 11(1): 46–52. (in Chinese with English abstract)

- Zhu Jinchu, Rao Bing, Xiong Xiaolin, et al. 2002. Comparison and genetic interpretation of Li-F rich, rare-metal bearing granitic rocks [J]. *Geochimica*, 31(2): 141-152. (in Chinese with English abstract)
- Zhuang Longchi, Lin Weisheng and Xie Tinghuan. 1991. Stable isotope geochemistry of the Dajieshan tungsten deposit [J]. *Bulletin of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 16: 109-120. (in Chinese)

参考文献:

- 陈骏等. 2000. 锡的地球化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1-320.
- 陈荣华, 刘昌新, 许世广. 1997. 郴州市金船塘锡矿床地质特征及成矿规律探讨[J]. *湖南地质*, 16(2): 101-105.
- 陈毓川, 毛景文, 等. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1-433.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 朱裕生, 等. 1993. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1-367.
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 1-148.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4): 339-347.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 2003. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比[J]. *高校地质学报*, 9(4): 609-619.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 等. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. *岩石学报*, (10): 2321-2328.
- 黄崇珂, 朱裕生, 张忠伟, 等. 1997. 南岭银矿[M]. 北京: 地质出版社, 1-293.
- 康永孚, 李崇佑. 1991. 中国钨矿床地质特征类型及其分布[J]. *矿床地质*, 10(1): 19-26.
- 康永孚, 苗树屏, 李崇佑, 等. 1994. 中国钨矿床[M] // 《中国矿床》编委会. 中国矿床(中册). 北京: 地质出版社, 1-104.
- 李水如, 魏俊浩, 邓军, 等. 2007. 广西大明山矿集区钨多金属矿床类型及控矿因素与找矿标志[J]. *中国钨业*, 22(6): 19-24.
- 李岩, 盛继福. 1990. 江西大龙山钨矿床自然铋研究[J]. *地质论评*, 36(4): 364-369.
- 刘昌实, 黄小龙, 王汝成, 等. 1999. 江西雅山花岗岩长石中磷的分布及意义[J]. *岩石学报*, 15(2): 291-297.
- 柳少波, 王联魁. 1997. 广东莲花山斑岩型钨-金矿床蚀变矿化特征及分带模式[J]. *长春地质学院学报*, 27(3): 296-303.
- 刘心兵. 2002. 铜山铜钨矿控矿因素及找矿建议[J]. *矿业快报*, 8: 7-10.
- 刘义茂, 王昌烈, 胥友志, 等. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床的成因特征、成矿作用与成矿模式[M] // 涂光炽等. 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 27-48.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-548.
- 刘英俊, 马东升. 1987. 钨的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-232.
- 刘英俊, 马东升, 李峻峰, 等. 1993. 江南金矿及其成矿地球化学背景[M]. 南京: 南京大学出版社.
- 吕莹, 李洪桂. 2005. 合理利用我国高钼钨精矿[J]. *中国钨业*, 20(5): 15-16.
- 毛景文, 李红艳, 宋学信, 等. 1998. 湖南柿竹园钨锡钼多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 215p.
- 聂荣峰, 卢克毫. 2007. 漂塘钨矿木梓园矿区地质找矿成效[J]. *矿产与地质*, 21(3): 312-315.
- 裴荣富(主编). 1995. 中国矿床模式[M]. 北京: 地质出版社, 1-357.
- 戚长谋. 1991. 元素地球化学分类探讨[J]. *长春地质学院学报*, 21(4): 361-365.
- 宋慈安. 1996. 广西钨锡矿田地球化学异常特征及预测模式[J]. *桂林工学院学报*, 16(4): 353-361.
- 孙恭安, 史明魁, 张宏良, 等. 1989. 大吉山花岗岩体岩石学、地球化学及成矿作用的研究[G] // 宜昌地质矿产研究所. 南岭地质矿产科研报告集(二). 武汉: 中国地质大学出版社, 326-363.
- 谭运金, 童启荃, 皮俊明, 等. 2002. 盘古山钨矿床近矿热液蚀变岩石的地质地球化学[J]. *中国钨业*, 17(5): 21-26.
- 谭运金. 2001. 与钨矿床共生的金矿床及其找矿[J]. *中国钨业*, 16(2): 1-21.
- 滕建德. 1990. 大吉山矿区矿化垂直带状分布[J]. *矿山地质*, 11(2): 13-24.
- 汪帮勤, 黄定堂, 李新芝, 等. 2004. 下桐岭钨多金属矿床地质特征及成矿作用[J]. *中国钨业*, 19(6): 25-29.
- 王定生. 2001. 赣南钨矿山及周边金银找矿前景分析[J]. *中国钨业*, 16(4): 21-24.
- 王联魁, 黄智龙. 2000. Li-F花岗岩液态分离与实验[J]. 北京: 科学出版社, 1-280.
- 王秋衡. 1991. 中国钨矿床的成矿系列及其金属元素的带状分布[J]. 有色金属: 矿山部分, 6: 29-33.
- 吴寿宁. 2006. 湖南郴州荷花坪钨多金属矿床地质特征[J]. *矿产与地质*, 20(1): 43-46.
- 吴永乐, 梅勇文, 刘鹏程, 等. 1987. 西华山钨矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1-317.
- 夏宏远, 梁书艺. 1984. 华南含钨花岗岩和含钨钼花岗岩的演化特征及成矿作用[M] // 徐克勤, 涂光炽. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社, 438-452.
- 许德清. 1995. 游坑钨伴生银、铋的赋存状态及回收状况分析[J]. *江西有色金属*, 9(1): 34-39.
- 徐惠长, 唐分配, 邓松华, 等. 2004. 湘南及其相邻地区原生铋矿床的分类[J]. *华南地质与矿产*, 1: 39-42.
- 徐克勤, 丁毅. 1943. 江西南部钨矿地质志[M]. 中央地质调查所地质专报, 甲种第17号, 1-149.
- 徐克勤, 刘英俊, 俞受望. 1959. 中国钨矿的类型及其分布规律[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2: 31-54.
- 徐克勤, 陆建军, 倪培. 1992. 与金矿床有关花岗岩类的岩石地球化学特征[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 12(1): 1-11.
- 徐敏林, 冯卫东, 张凤荣, 等. 2006. 崇义淘锡坑钨矿成矿地质特征[J]. *资源调查与环境*, 27(2): 159-163.
- 杨树德. 2000. 我国钨矿床中伴生银的赋存状态及其综合利用[J]. *中国钨业*, 15(3): 16-20.
- 叶际祯, 邓国政, 皮俊明, 等. 2000. 盘古山钨矿深部矿床赋存特征及找矿前景[J]. *中国钨业*, 15(4): 17-19.
- 尹意求, 韦星林, 王定生, 等. 2000. 岫山外围金矿床及其地质找矿意义[J]. *中国钨业*, 15(4): 20-21.
- 喻良桂. 2007. 雅山花岗岩演化与钨锂成矿[J]. *江西有色金属*, 21(2): 7-10.
- 张金明. 2006. 江西大吉山钨矿地质特征[J]. *资源调查与环境*, 27(2): 149-152.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 等. 2006. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究[J]. *地质学报*, 80(7): 956-962.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成. 2003. 大吉山钨矿中钨铋钼与富铋铋钼矿的共生现象及其成因探讨[J]. *矿床地质*, 22(2): 158-165.
- 张文兰. 2004. 赣南大吉山和漂塘花岗岩特征及成矿作用研究[D]. 南京: 南京大学地科科学与工程学院, 1-160.
- 钟江临, 李楚平. 2006. 湖南香花岭夕卡岩型钨矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *矿产与地质*, 20(2): 147-151.
- 钟正春, 邓圣富, 王立华, 等. 1997. 黄沙坪铅锌矿床中银矿化组合特征[J]. *矿产与地质*, 11(1): 46-52.
- 朱金初, 饶冰, 熊小林, 等. 2002. 富锂氟含稀有金属矿化花岗岩岩石的对比和成因思考[J]. *地球化学*, 31(2): 141-152.
- 庄龙池, 林伟圣, 谢廷焕. 1991. 大吉山钨矿稳定同位素地球化学[J]. 宜昌地质矿产研究所刊, 16号: 109-120.