

doi: 10.12029/gc20220212

秦拯纬, 付建明, 邢光福, 程顺波, 卢友月, 祝颖雪. 2022. 南岭成矿带中一晚侏罗世成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩的差异性研究[J]. 中国地质, 49(2): 518–539.

Qin Zhengwei, Fu Jianming, Xing Guangfu, Cheng Shunbo, Lu Youyue, Zhu Yingxue. 2022. The petrogenetic differences of the Middle–Late Jurassic W–, Sn–, Pb–Zn–Cu–bearing granites in the Nanling Range, South China[J]. *Geology in China*, 49(2):518–539 (in Chinese with English abstract).

## 南岭成矿带中一晚侏罗世成钨、成锡、成铅锌(铜) 花岗岩的差异性研究

秦拯纬<sup>1,2,3</sup>, 付建明<sup>1,2</sup>, 邢光福<sup>1,2</sup>, 程顺波<sup>1,2</sup>, 卢友月<sup>1,2</sup>, 祝颖雪<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 3. 弗莱堡大学, 弗莱堡 79104; 4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**【研究目的】南岭地区以发育强烈的中一晚侏罗世岩浆作用与相关金属成矿作用为主要特色, 这些金属矿床尤以钨、锡、铅锌铜最具代表性。对这 3 类成矿花岗岩开展系统的对比研究, 深入分析成矿差异原因, 对指导区域找矿具有重要意义。【研究方法】本文通过搜集已发表的主量元素、微量元素、年代学、Sr–Nd–Hf 同位素和矿物化学数据, 并结合项目组长期野外地质调查进展, 对 3 类成矿花岗岩进行了差异性研究。【研究结果】通过对比发现成钨、成锡、成铅锌铜 3 类花岗岩在时空分布格局、野外地质特征、矿物组成、源区性质、包体成因类型、岩浆分异程度、形成温度和氧逸度等方面具有明显的差异。【结论】笔者认为花岗岩的岩石地球化学成分、源区物质组成、岩浆分异程度以及岩浆演化过程中物化条件(如氧逸度)的综合差异是导致南岭花岗岩形成 3 类不同金属矿床的主要原因。在此基础上, 进一步完善了南岭成矿带成钨、成锡、成铅锌铜花岗岩的综合判别标志, 指导区域找矿勘查。

**关键词:** 钨、锡、铅锌铜矿床; 成矿花岗岩; 中一晚侏罗世; 岩石成因; 矿产调查工程; 南岭

**创新点:** 从野外地质特征、包体成因类型、地球化学等方面完善了南岭成矿带成钨、成锡、成铅锌铜花岗岩的综合判别标志, 有助于指导区域找矿勘查。

中图分类号: P618.4; P618.67; P 588.12<sup>1</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2022)02–0518–24

## The petrogenetic differences of the Middle–Late Jurassic W–, Sn–, Pb–Zn– Cu–bearing granites in the Nanling Range, South China

QIN Zhengwei<sup>1,2,3</sup>, FU Jianming<sup>1,2</sup>, XING Guangfu<sup>1,2</sup>, CHENG Shunbo<sup>1,2</sup>, LU Youyue<sup>1,2</sup>, ZHU Yingxue<sup>4</sup>

(1. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Freiburg University, Freiburg 79104, Germany; 4. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

收稿日期: 2020–09–08; 改回日期: 2022–03–08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802069)、湖北省自然科学基金项目(2019CFB634)及中国地质调查局项目(DD20221689、DD20190154)联合资助。

作者简介: 秦拯纬, 男, 1987 年, 博士, 高级工程师, 从事花岗岩成岩成矿作用研究; E-mail: qzwwto1232006@126.com。

通讯作者: 付建明, 男, 1964 年, 博士, 研究员, 从事岩石地球化学研究; E-mail: ycfjianming@163.com。

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** The Nanling Range in southern China is characterized by extensive granitic magmatic activity and significant metal deposits during the Middle–Late Jurassic, with W, Sn and Pb–Zn–Cu as the most representative metallogenic categories. In this regard, a systematic comparison study on the three types of ore–bearing granites and a thorough analysis on the origin of mineralization differences would have great implications for regional prospecting. **[Methods]** In this contribution, the whole rock major and trace element concentrations as well as geochronological, Sr–Nd–Hf isotopical and mineral chemical data of these ore–bearing granites have been collected and reviewed to summarize their petrogenetic differences. **[Results]** In combination with our major progress in the long–term geological survey, we suggest that differences do exist among W–, Sn– and Pb–Zn–Cu–bearing granites in many aspects, including the spatial–temporal distribution of the metallic deposits and related granitic plutons, geological characteristics, mineral compositions, source nature, enclave origin, differentiation degree, formation temperatures and the oxygen fugacity as well. **[Conclusions]** It is concluded that the chemical component of granitic rocks, source materials, magmatic differentiation degree and physical–chemical environment during magma evolution are closely associated with the mineralization types (W, Sn, Pb–Zn–Cu) and control the processes of ore formation. Based on the above, the integrated classification criteria for the W–, Sn– and Pb–Zn–Cu–bearing granites from the Nanling Range has been improved, which would be helpful for ore prospecting in the region.

**Key words:** W, Sn and Pb–Zn–Cu deposits; ore–bearing granite; Middle–Late Jurassic; petrogenesis; mineral exploration engineering; Nanling

**Highlights:** The integrated classification criteria for the W–, Sn– and Pb–Zn–Cu–bearing granites from the Nanling Range has been improved in terms of their geological characteristic, enclave origin and geochemical index; This would be helpful for ore prospecting in Nanling.

**About the first author:** QIN Zhengwei, male, born in 1987, doctor, senior engineer, engaged in granite petrogenesis and mineralization; E–mail: qzwwto1232006@126.com.

**About the corresponding author:** FU Jianming, male, born in 1964, doctor, professor, engaged in petrogeochemistry; E–mail: ycfjianming@163.com.

**Found support:** Supported by NSF of China (No. 41802069)、NSF of Hubei Province (No. 2019CFB634)、China Geological Survey (No. DD20221689, No. DD20190154).

## 1 引言

众所周知,世界上许多重要的金属矿床,尤其是 Sn、W 和 Pb–Zn–Cu 矿床的产出总是围绕花岗岩类岩体分布,不少岩体本身也是工业矿体。因此,Sn、W、Pb–Zn–Cu 等矿床与花岗岩类岩体有着十分密切的成因联系;并且,花岗岩类型不同,与之相关产出矿床也有差别,即花岗岩存在成矿专属性问题。对不同类型的含矿花岗岩进行对比研究,不但可以揭示花岗岩成矿专属性的控制机理,而且有利于推动区域找矿勘查工作。南岭以中生代爆发式多金属成矿作用闻名于世,密集发育有一大批与花岗岩相关的大型—超大型钨、锡、铅锌铜等多金属矿床(王汝成等,2008;郭春丽等,2013,2014),是开展成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩差异性研究的理

想区域。前人研究表明,南岭侏罗纪成钨锡、成铅锌(铜)花岗岩在区域分布、成矿作用时间、地球化学特征上存在一定差异,但对最为直观的野外地质特征、形成物化条件、起源与演化过程等方面还缺少系统的对比总结。此外,由于 Sn 与 W 元素的类似属性,南岭成矿花岗岩真正单独以钨或锡为唯一有用元素的情况很少,客观上增加了对比研究成钨与成锡花岗岩的难度,其成矿专属性的原因还存有较大争议。基于此,武汉地质调查中心南岭成矿带项目组在 10 余年野外一线工作基础上,结合国内外南岭成矿花岗岩最近几年的研究进展,再次对与侏罗纪钨、锡、铅锌(铜)成矿作用有关的典型花岗岩体进行全面对比分析,进一步完善了南岭成矿带成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩的综合判别标志。这一成果对研究南岭成矿带的成矿规律,指导区域找

矿具有重要意义。

## 2 研究现状

南岭中生代大规模金属成矿作用与花岗岩存在密切成因联系已经成为共识,但针对不同类型成矿花岗岩(主要是成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩)的成因还存在不同的看法。国内诸多学者从岩石学、矿物学、地球化学、包裹体等方面进行了初步研究,提出了许多有效的成钨、成锡花岗岩的判别标志(张宏良和裴荣富,1988;王伟玉和韦文灼,1989;地矿部南岭项目花岗岩专题组,1989;朱金初和徐士进,1989;郑跃鹏等,1991;夏宏远和梁书艺,1991;梁书艺和夏宏远,1992;华仁民等,2003,2010;陈富文和付建明,2005;王汝成等,2008;朱金初等,2008;祝新友等,2012;付建明等,2013;郭春丽等,2013,2014;陈骏等,2014;黄旭栋等,2017;邢光福等,2017)。华仁民等(2003)曾将华南陆壳重熔型花岗岩类划分出“主体(S型)花岗岩”、“Li-F花岗岩”和“火山-侵入杂岩”3种类型,其中第一类与钨矿化密切相关。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、成钨锡花岗岩和成铌钽花岗岩。付建明等(2013)经过系统对比研究,将成锡花岗岩归入壳幔混合及其分异型(H型)和铝质A型,将成钨花岗岩归入壳源重熔型(C型),暗示了地幔物质贡献对锡成矿的关键作用。郭春丽等(2014)对南岭地区晚侏罗世典型含矿花岗岩的地球化学进行了对比,发现成锡花岗岩总体上具有更加亏损的Nd同位素组成,继而指出含锡花岗岩的物源中明显有新生地幔物质参与,而含钨花岗岩的物源则以地壳物质为主。陈骏等(2014)和Cao et al.(2018)随后对南岭成矿花岗岩的系统总结也得出了类似的结论。需要指出的一个基本事实是,锡的大规模成矿作用往往发生在有地幔物质参与的“十一杭带”,显示出锡的成矿作用与地幔物质的密切关系(朱金初等,2008)。尽管有关南岭成矿花岗岩的成因尚无统一定论,但一系列与锡矿关系密切的A型花岗岩的确认是近年来南岭地区花岗岩与成矿关系研究的重要进展之一,例如,付建明等(2005)研究认为与大坳锡多金属矿床有关的九嶷山金鸡岭花岗岩属于铝质A型花岗岩,形成于大陆边缘环境。

最新针对南岭成钨花岗岩的锆石Hf-O同位素研究显示,成钨花岗岩中钨元素的富集可能不仅与岩浆的高分异作用有关,富钨上地壳沉积物的混染可能也是导致W元素最终富集成矿的重要途径(Zhang et al.,2017)。

南岭地区侏罗纪成铅锌(铜)花岗岩与成锡成钨花岗岩无论在岩相学还是地球化学特征上都存在显著差异,但其产生差异的机制同样尚不明确,不同学者对成铅锌(铜)花岗岩成因的认识也有很大争议。Wang et al.(2003)认为湘东南地区闪长岩-花岗闪长岩的物源主要为亏损地幔部分熔融的玄武岩,并混入了古老地壳。Jiang et al.(2009)认为铜山岭花岗闪长斑岩产自变沉积岩基底的部分熔融,并混入了幔源玄武质岩浆。Li et al.(2018b)最近将南岭地区成矿花岗岩分为成铜钼和成钨锡花岗岩两个亚类,并认为前者源区主要为岩石圈地幔,且幔源岩浆在演化过程中经历了较低的分异作用和较小程度的上地壳混染,而后者则主要来自成熟度较高的上地壳沉积物部分熔融。但是需要指出的是,黄旭栋等(2017)发现铜山岭花岗闪长斑岩与其中暗色包体具有残留辉石和岩浆反应的印迹,且斜长石斑晶保留有富钙质核(牌号大于70),这表明铜山岭岩体中的暗色包体为源区残留体而非壳幔混合包体。铜山岭岩体富集的Nd-Hf同位素组成可能继承自下地壳镁铁质角闪岩。Yang et al.(2018)对水口山和西华山花岗岩进行了系统的磷灰石Sr-Nd和锆石Hf-O-Li同位素对比,同样认为成铅锌(铜)花岗岩主要产自下地壳角闪岩,而成钨花岗岩主要产自上地壳成熟度较高的富云母泥质岩。

由上可以看出,有关成锡成钨成铅锌(铜)花岗岩中成矿元素的来源及富存机理还存有较大争议。已有的年代学资料显示,南岭地区不同类型的成矿花岗岩主要集中在170~150 Ma,那么这些短时期内侵位的成矿花岗岩是同一母岩浆在不同演化阶段先后结晶的产物,还是不同源区岩浆先后侵位的结果?岩浆演化过程中的物化条件(如氧逸度)以及分异程度对成矿元素的富集又有何影响?这些问题都需要更加深入的研究和总结。前人对南岭成矿花岗岩的长期研究为对比不同成矿花岗岩的成因提供了大量可靠的年代学、矿物学和岩石地球化学数据。此外,众多研究表明,利用黑云母的



矿物化学数据来估算岩浆氧逸度是一种行之有效的方法,结合锆石  $Ce^{4+}/Ce^{3+}$  值可以用来判断岩浆结晶时的氧化还原条件(Li et al., 2017)。因此,本文将结合最新找矿勘查进展和研究新认识,对南岭地区中晚侏罗世典型成锡、成钨和成铅锌(铜)花岗岩的时空分布格局、矿物学和岩石地球化学特征及找矿标识进行系统对比,归纳三类成矿花岗岩的主要特征与区别,以期深化对南岭地区成矿花岗岩的理解。由于成矿花岗岩往往是多期次的、多阶段侵位的复式花岗岩或是复式杂岩体的某一岩相,为了更加直观地对比不同类型成矿花岗岩在岩石学、矿物学和地球化学上的差异,笔者选择的成矿岩体主要是指与成矿关系密切的某一岩石单元或者岩相。成锡花岗岩体主要包括骑田岭芙蓉单元、荷花坪、香花岭、锡田、大义山、姑婆山和密坑山岩体;成钨

花岗岩体主要包括西华山、九龙脑、新田岭和漂塘岩体;成铅锌(铜)花岗岩体则包括水口山、宝山和铜山岭岩体(图1)。

### 3 时空分布

在南岭地区,与钨锡成矿作用相关的花岗岩在全区广泛分布,成岩时代可以从晋宁期、加里东期、一直到印支期和燕山期,其中燕山期是区内钨锡成岩成矿的爆发时期。根据成矿元素组合、岩相学和地球化学特征,南岭地区侏罗纪含矿花岗岩主要可以分为成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩。成钨花岗岩主要为S型二云母、白云母和黑云母花岗岩,而锡矿化主要和铝质A型( $A_2$ 型)黑云母花岗岩有关(朱金初等, 2008; 陈骏等, 2014)。成铅锌(铜)花岗岩主要和含角闪石的准铝质钙碱性花岗闪长岩有关(黄

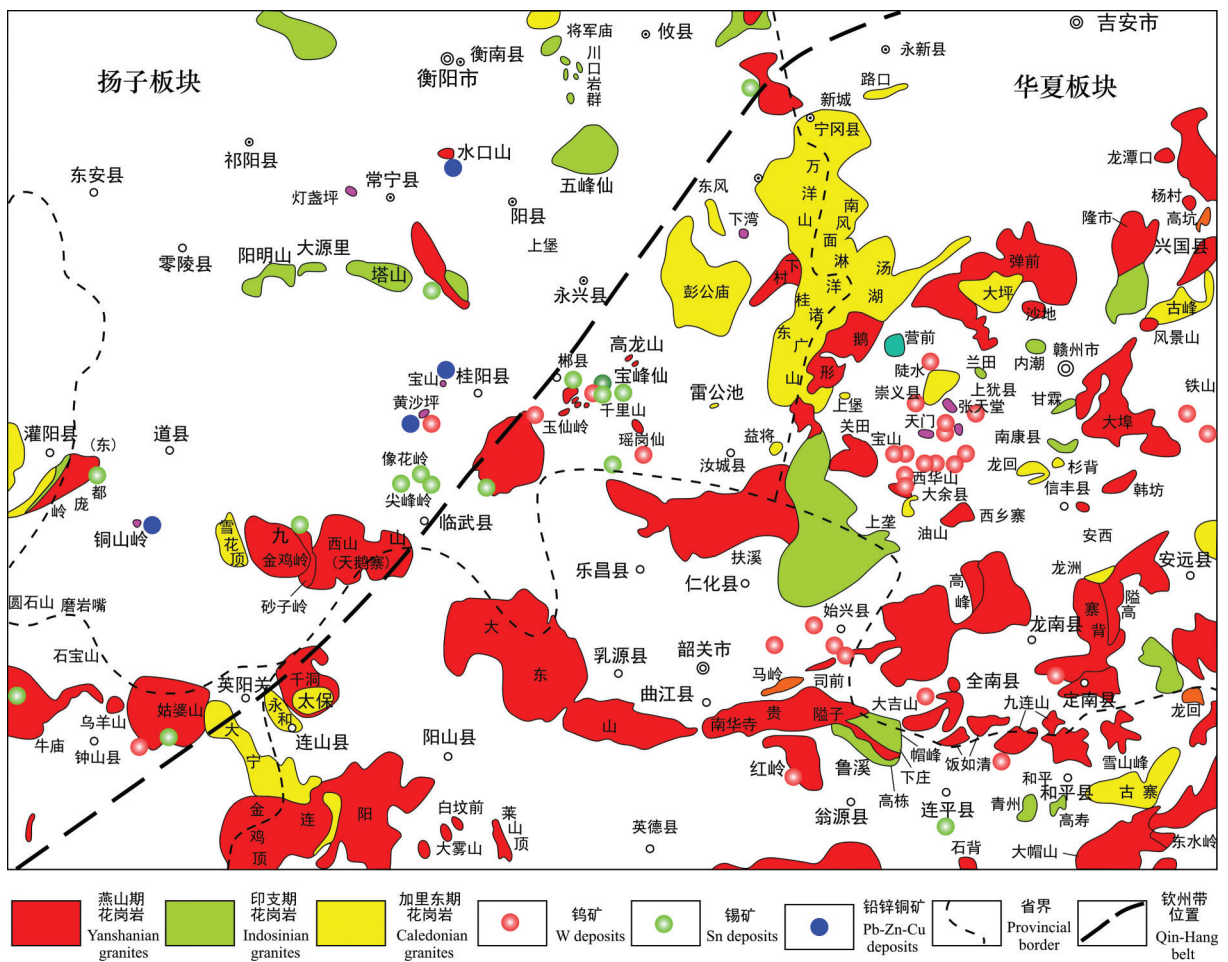


图1 南岭花岗岩及钨锡铅锌铜矿床分布图(据陈骏等, 2014)

Fig.1 Sketch map showing the distribution of granitic rocks and related W-Sn-Pb-Zn-Cu deposits in Nanling(after Chen Jun et al., 2014)



旭栋等,2017)。

燕山期成矿岩体出露面积大,构成南岭成矿花岗岩的主体,明显受华夏和扬子两大地块接合部北东向深大断裂及北西向隐伏深大断裂的控制,主要分布于两者之交汇部位。对南岭燕山期成矿花岗岩形成年龄统计显示成钨和成锡花岗岩年龄在150~165 Ma最为集中,是本区花岗岩的高峰期,而成铅锌(铜)花岗岩对比成锡和成钨花岗岩形成时间稍早5~10 Ma(图2)。南岭地区成钨成锡花岗岩在空间上呈现出“东钨西锡”的分布格局:东部赣南和粤北地区是成钨花岗岩集中分布区,主要岩体有西华山、九龙脑、漂塘、天门山、红桃岭、张天堂、大埠、大吉山等花岗岩,中西部地区锡的矿化明显增强,以大规模的锡成矿作用为特征,典型岩体有骑田岭、千里山、九嶷山、香花岭、锡田、邓阜仙、大义山等岩体。

#### 4 野外地质特征

前人研究表明,成锡、成钨花岗岩在时空分布、地球化学特征上存在一定差异,但对最为直观的野外地质特征还缺少系统对比总结。基于此,武汉地质调查中心南岭成矿带项目组在10余年野外一线工作基础上,提出了南岭成锡、成钨花岗岩在野外宏观地质特征上的一些异同点,以期为一线区域找矿勘查工作提供帮助。

在南岭成矿花岗岩体内或周围地区,经常出露

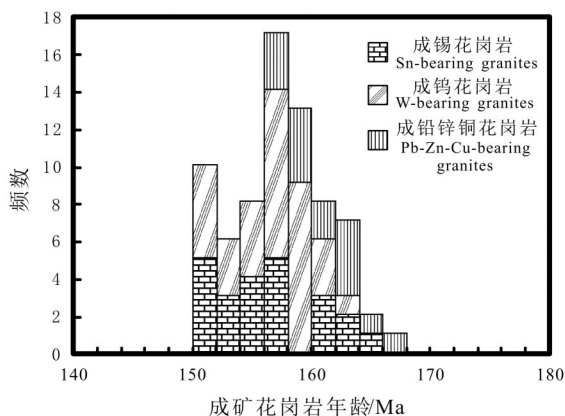


图2 南岭中一晚侏罗世成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩侵位年龄直方图

(数据引自黄旭栋等,2017;Cao et al.,2018)

Fig.2 The histogram of the emplacement ages of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites (data from Huang Xudong et al.,2017; Cao et al.,2018)

切割早期主体花岗岩的细晶岩脉(群)。这些细晶岩脉通常富含挥发分和钨锡稀有金属元素,为高演化的强过铝质酸性岩石(朱金初等,2002)。尽管对这些晚期岩脉与寄主花岗岩是否属于同一时期的产物还存在不同的认识,但毫无疑问,南岭地区钨锡稀有金属矿床大都显示出与晚期长英质细晶岩脉(群)的密切关系。谢磊等(2013)对湘南矿集区代表性长英质岩脉的系统研究表明,晚期密集发育的长英质岩脉群对寻找成矿花岗岩具有重要指示意义,特别是本身即为矿体的岩脉,可以指示深部或周围存在成矿作用。柏道远等(2007)认为千里山岩体之所以相比王仙岭岩体发生更加有效的成矿作用,关键在于千里山岩体边缘岩脉发育(图3a),岩浆中的成矿物质能随流体沿断裂裂隙向周围有效扩散并于局部聚集、沉淀而成矿;在西华山钨矿区,细晶岩脉群常成群出现,南京大学地质系同行在1964年就曾统计出200余条,它们与钨矿脉有着非常复杂的相互穿插关系,指示两者存在非常紧密的成因联系。

在南岭地区,锡成矿作用虽被证实通常与晚期缺失角闪石的细粒黑云母花岗岩有关(如骑田岭芙蓉锡矿),但这些成锡花岗岩的早期主体一般都含有角闪石,岩性为含角闪石花岗岩,这些早期基性端元中黑云母含量较高,一般为4%~6%,局部更加富集。在野外,成锡花岗岩中常见富氟副矿物黄玉、萤石,如骑田锡多金属矿、岩背锡矿等,这可能与锡的元素地球化学性质有关:锡在成矿热液中易与氟结合形成羟基氟络合物,显示亲氟的地球化学特征(华仁民等,2010)。此外,成锡花岗岩的一个突出特征是:在基性端元中常见到浑球状暗色微粒包体(MME),包体直径从几厘米到几十厘米大小,有的甚至可以达到几米(图3b)。在包体边缘,黑云母、角闪石、斜长石沿包体边界一致的方向排列,表现出高温条件下塑性活动导致定向的特点。大多数包体与寄主花岗岩接触界线是截然的,少数呈过渡关系,个别包体具冷凝边现象。这些暗色包体为闪长质,形态较规则,大多呈浑圆状外形,其次为椭圆状,通常含有寄主岩石的钾长石斑晶,并被熔蚀成浑圆状。包体常常具有斑状结构,斑晶为斜长石、黑云母和角闪石,但不同的包体中斑晶矿物组成不同,有的只有钾长石,基质矿物种类与寄主岩相似,但粒度相对要小。在包体与寄主岩界线处,经常可

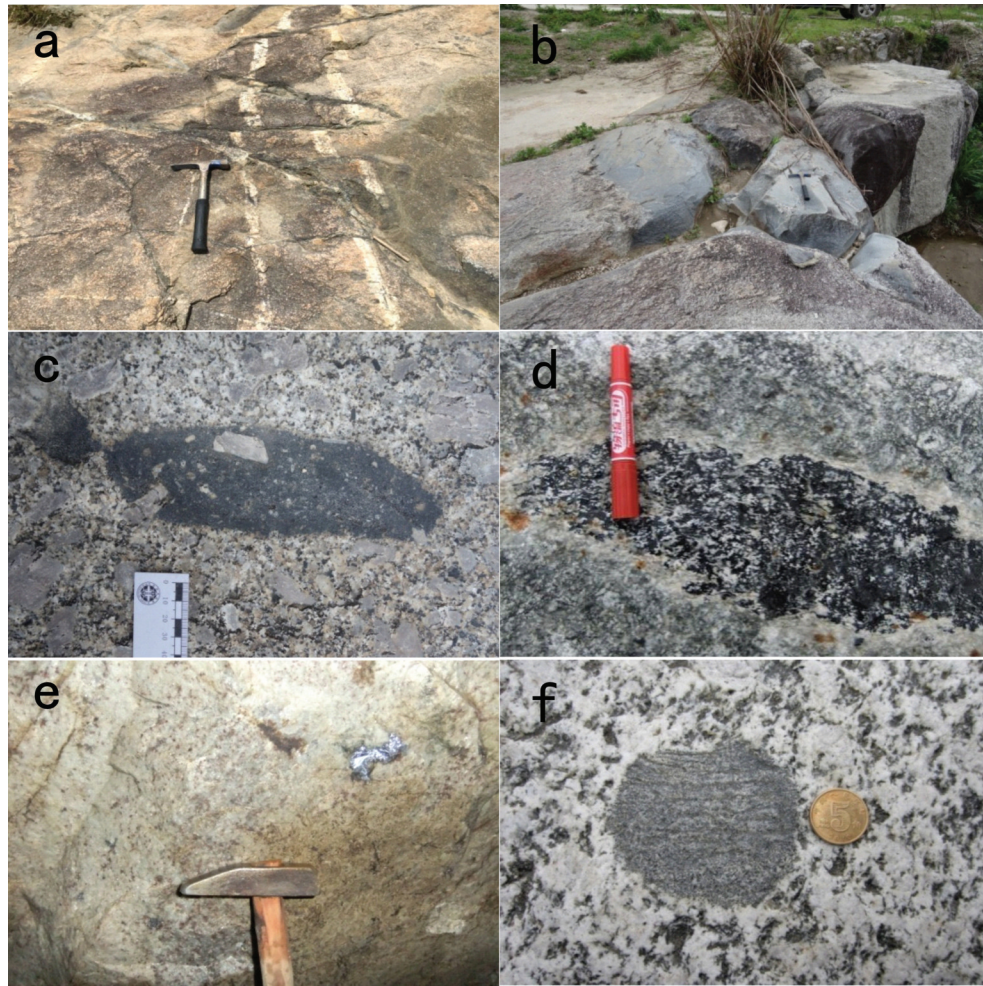


图3 不同类型成矿花岗岩野外特征

a—千里山岩体中晚期细晶岩脉; b, c—闪长质暗色微粒包体(姑婆山); d—电气石集合体(越城岭); e—含石榴子石细粒花岗岩(半径钨矿); f—变质岩捕虏体(越城岭)

Fig. 3 Field characteristics of different types ore-bearing granites

a—The later stage aplitic vein in Qianlishan pluton; b, c—Microgranular dioritic enclave in Guposhan pluton; d—Tourmaline aggregate in Yuechengling pluton; e—Garnet-bearing fine-grained granite from the Banjing W deposit; f—Metamorphic xenoliths in Yuechengling pluton

以见到指示壳幔岩浆相互作用的自形钾长石斑晶(图3c)。需要指出的是,近年来,南岭地区与锡多金属矿化有关的花岗岩多被归入A型花岗岩的范畴,且这些与锡矿化有关的A型花岗岩多沿“十一杭带”呈NE向分布。“十一杭带”是新元古代时期扬子与华夏陆块碰撞的缝合带,其作为一条应力薄弱带在之后可能经历了多次的拉张,成为地幔物质上涌加入地壳的一条重要通道(华仁民等,2010),这可能解释了为何与锡矿化有关的A型花岗岩或多或少都显示地幔岩浆的物质贡献(付建明等,2013)。

需指出的是,成锡花岗岩中暗色包体形成年龄与寄主岩相近,但具有相对更高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值及

更年轻的Nd/Hf同位素二阶段模式年龄,最典型的如骑田岭岩体芙蓉单元(Zhao et al., 2012)和姑婆山岩体(朱金初等,2006),这通常被认为是经历了明显壳幔相互作用的结果。成铅锌(铜)花岗岩以偏中性的含角闪石花岗闪长岩、花岗闪长斑岩为主,常呈小型岩株状产出,其中可见椭球状的闪长质暗色微粒包体,结构和组成同成锡花岗岩中包体相似,但相对成锡花岗岩,成铅锌(铜)花岗岩中包体的含量更少,直径更小。研究显示,成铅锌(铜)花岗岩中包体同寄主岩的形成年龄和Sr-Nd-Hf同位素组成相似,但成因机制还有较大争议,尚有源区残留体与壳幔混合包体之争,如铜山岭岩体(Jiang



et al., 2009; 黄旭栋等, 2017)。

不同于成锡和成铅锌(铜)花岗岩, 南岭成钨花岗岩基本不含闪长质暗色微粒包体, 而以富含电气石或电气石集合体为特征(图3d)。在成钨花岗岩基性端元中黑云母含量相对较低, 一般只有2%~4%; 在酸性端元中白云母含量急剧上升, 达到1%~2%, 有些甚至出现石榴子石富铝矿物(图3e), 局部岩性中白云母为主要云母种属。在桂北地区, 崇阳坪和越城岭等成钨花岗岩基性端元中也含有较多的黑云母, 但是凭借酸性端元中广泛存在的电气石析离体、伟晶岩团块, 可以将它们与成锡花岗岩区分开来。此外, 成钨花岗岩中经常见有少量的黑云母团块和围岩捕虏体, 均具有明显的变质结构, 围岩捕虏体大小从几厘米到几十厘米, 形态从长条状、浑圆状到不规则状, 受寄主岩浆烘烤后角岩化现象明显, 部分捕虏体还保留有残余层理(图3f)。总体来看, 南岭成锡花岗岩和成钨花岗岩岩性有较大的重叠, 均以黑云母-二云母花岗岩为主, 但是他们的端元组分在岩性上还是有所区别: 成锡花岗岩基性端元常为含角闪石的花岗闪长岩, 酸性端元为二云母花岗岩, 而成钨花岗岩基性端元是含黑云母的二长花岗岩, 酸性端元为(含石榴子石)白云母花岗岩。

## 5 主量元素特征

在主量元素特征上, 成锡成钨花岗岩表现为高硅、强过铝、富碱、贫钙镁铁等。成钨花岗岩 $\text{SiO}_2$ 含量一般 $>72\%$ , 成锡花岗岩的 $\text{SiO}_2$ 含量则可低至67%, 偏低者主要为各岩体基性端元中含角闪石花岗岩类, 成铅锌(铜)花岗岩则明显具有低的 $\text{SiO}_2$ 含量, 集中于58%~68%。相应的在TAS图解中, 成锡成钨花岗岩主要落入“花岗岩”区域, 少量成锡花岗岩落入“花岗闪长岩”区域, 成铅锌(铜)花岗岩则主要落入“正长闪长岩”和“花岗闪长岩”区域(图4a)。由于具有高的 $\text{K}_2\text{O}$ 含量, 成锡成钨成铅锌(铜)花岗岩均横跨钾玄岩与高钾钙碱性两个系列(图4b)。成锡与成钨花岗岩整体上呈准铝质—强过铝质, 铝饱和指数ACNK变化范围较大, 而成铅锌(铜)花岗岩主要为准铝质—弱过铝质(图4c)。在 $\text{SiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$ 图解中, 成锡与成铅锌(铜)花岗岩 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量随 $\text{SiO}_2$ 升高而降低, 与I型花岗岩相同, 而部分成钨花岗岩则显示 $\text{P}_2\text{O}_5$ 随 $\text{SiO}_2$ 正的相关性(图4d), 与S型花岗岩

一致(郭春丽等, 2014)。相对而言, 成锡花岗岩更加富含基性组分,  $\text{CaO}$ 多 $>1.5\%$ ,  $\text{MgO}$ 多 $>0.5\%$ ,  $\text{FeO}^\dagger$ 多 $>2.5\%$ ,  $\text{TiO}_2$ 多 $>0.2\%$ , 成钨花岗岩基性组分比较贫乏,  $\text{CaO}$ 多 $<1.5\%$ ,  $\text{MgO}$ 多 $<0.5\%$ ,  $\text{FeO}^\dagger$ 多 $<2.5\%$ ,  $\text{TiO}_2$ 多 $<0.2\%$ 。

## 6 微量元素特征

在微量元素原始地幔标准化图解中, 成锡与成钨花岗岩具有相似的分配形式, 均富集Rb、Th、U、Pb、Zr等元素, 而显著亏损Sr、Ba、P、和Ti等元素; 成铅锌(铜)花岗岩各微量元素变化范围较小, 且并无Sr、Ba、P、和Ti等元素明显负异常(图5)。在稀土元素球粒陨石标准化图解中, 部分成钨花岗岩与所有成锡花岗岩呈现“海鸥式”分配形式, 另一部分成钨花岗岩则呈现“右倾式”分配特征, 少数成钨花岗岩样品显示高分异特征, 具有极低的REE含量, 在球粒陨石标准化图解中显示不规则分配曲线。成锡与成钨花岗岩具有强烈的Eu负异常, 二者 $\delta\text{Eu}$ 均集中于0.10~0.30, 但成钨花岗岩还有相当一部分样品 $\delta\text{Eu} < 0.01$ ; 成铅锌(铜)花岗岩具有一致的右倾分配形式, Eu负异常相对不明显,  $\delta\text{Eu}$ 集中于0.21~0.38(图5)。

此外, 成铅锌(铜)花岗岩具有一致较高的LREE/HREE比值(6~11, 平均9.0), 成锡花岗岩LREE/HREE比值稍低(2~15, 平均5.3), 成钨花岗岩LREE/HREE比值则可低至0.4(0.4~15, 平均4.2)(图6a、b), 这与成锡和成铅锌(铜)花岗岩中出现富LREE的榍石副矿物相一致; 相对成钨花岗岩(0.1~25  $\mu\text{g/g}$ , 平均5  $\mu\text{g/g}$ ), 成锡(1~166  $\mu\text{g/g}$ , 平均27  $\mu\text{g/g}$ )与成铅锌(铜)花岗岩(3~78  $\mu\text{g/g}$ , 平均34  $\mu\text{g/g}$ )的基性元素(Cr+Ni)含量更高(图6c); 成铅锌(铜)花岗岩(Zr+Nb+Y+Ce)含量较为均一, 一般100~200  $\mu\text{g/g}$ , 成钨花岗岩(Zr+Nb+Y+Ce)含量一般 $<400 \mu\text{g/g}$ , 成锡花岗岩(Zr+Nb+Y+Ce)含量则可高达580  $\mu\text{g/g}$ (图6b、d)。成锡(16~32, 平均25)与成铅锌(铜)花岗岩(2.3~25, 平均22)的Zr/Hf比值相对较高, 成钨花岗岩的Zr/Hf比值明显较低(0.24~32, 平均16); 类似的, 成锡花岗岩(3~12, 平均7)与成铅锌(铜)花岗岩(0.3~11, 平均6)的Nb/Ta比值相对较高, 成钨花岗岩的Nb/Ta比值相对较低(0.9~12, 平均4)。

需要指出的是, 成锡花岗岩往往具有高的Ga/Al比值和(Zr+Nb+Y+Ce)含量, 因此在(10000Ga/



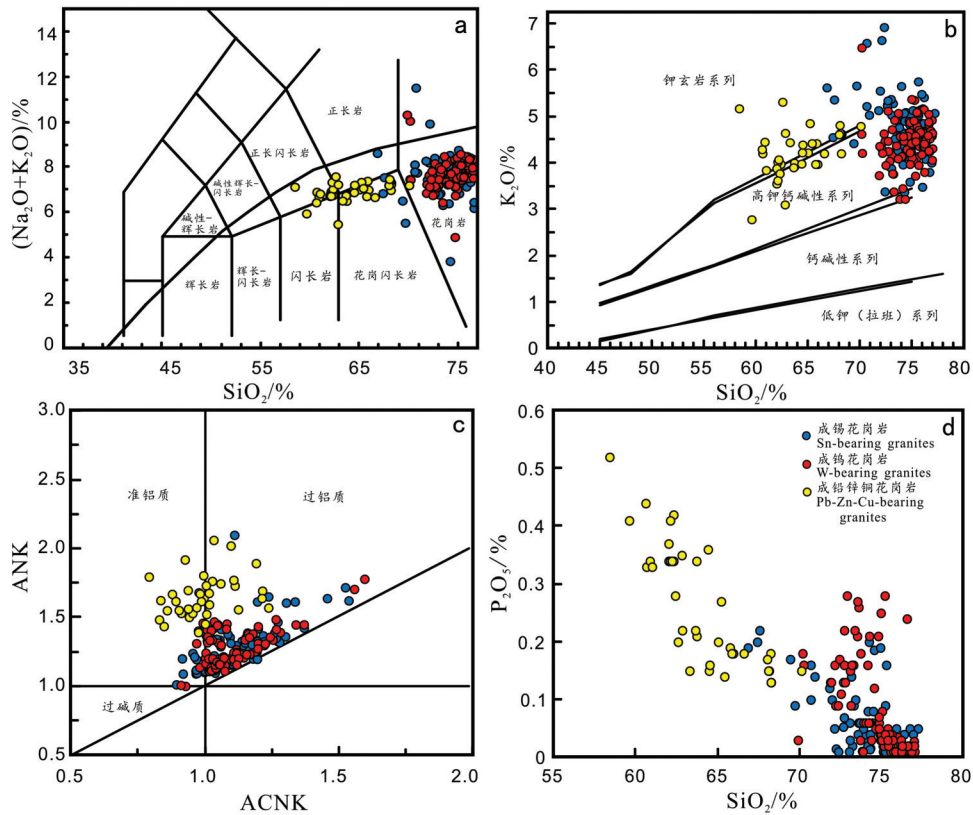


图4 成锡成钨成铅锌(铜)花岗岩地球化学分类图解

a—(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) - SiO<sub>2</sub>图解(Middlemost, 1994); b—K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub>图解(Rickwood, 1989); c—A/CNK (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)<sub>molar</sub>) - A/NK (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)<sub>molar</sub>)图解(Maniar 和 Piccoli, 1989); d—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - SiO<sub>2</sub>图解; 全岩和Nd-Hf同位素数据主要引自蔡宏渊(1991)、喻爱南(1992)、章邦桐等(2001)、邱瑞照等(2002)、华仁民等(2003)、马铁球等(2004)、邱检生等(2005)、唐朝永和刘利生(2005)、伍光英(2005)、顾晟彦等(2006)、谢银财等(2013)、左昌虎等(2014)、Yang et al.(2016)、郭春丽等(2017)、黄旭栋等(2017)

Fig. 4 Geochemical discrimination diagrams of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites

a—(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) vs. SiO<sub>2</sub> (TAS) diagram (Middlemost, 1994); b—K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> diagram (Rickwood, 1989); c—A/CNK (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)<sub>molar</sub>) vs. A/NK (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)<sub>molar</sub>) diagram (Maniar and Piccoli, 1989); d—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vs. SiO<sub>2</sub> diagram; The whole rock and Nd-Hf isotope data are mainly quoted from Cai Hongyuan (1991), Yu ainan (1992), Zhang bangtong et al. (2001), Qiu RUIZHAO et al. (2002), Hua Renmin et al. (2003), Ma tieqiu et al. (2004), Qiu Jiansheng et al. (2005), Tang Chaoyong and Liu Lisheng (2005), Wu Guangying (2005), Gu Shengyan et al. (2006), Xie Yincai et al. (2013), Zuo Changhu et al. (2014), Yang et al. (2016), Guo Chunli et al. (2017) Huang Xudong et al. (2017)

Al)-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)和(Zr+Nb+Y+Ce)-(FeO<sup>T</sup>+MgO)判别图中,成锡花岗岩往往落入A型花岗岩区域,而成钨花岗岩与成铅锌(铜)花岗岩分别主要落入I+S和I型花岗岩区域(图7a);在花岗岩ACF图解中,成钨花岗岩落入S型花岗岩区域,成铅锌(铜)花岗岩则主要落入I型花岗岩区域(图7b)。

### 7 Nd-Hf同位素特征

从收集的近200组Nd同位素数据可以看出,成锡花岗岩ε<sub>Nd</sub>(t)值为-2.3~-8.9,集中分布于-6~-8(图8a),平均值为-6.30;T<sub>2DM</sub>为1.1~1.7 Ga,集中分布于1.3~1.5 Ga(图8b),平均值为1.50 Ga;成钨花岗

岩ε<sub>Nd</sub>(t)值为-6.9和-12.3,集中分布于-8~-12(图8c),平均值为-8.90;T<sub>2DM</sub>Nd为1.32~1.94 Ga,集中分布于1.5~1.9 Ga范围内(图8d),平均值为1.68 Ga;成铅锌(铜)花岗岩ε<sub>Nd</sub>(t)值为-2.1~-7.1,集中分布于-5~-7.5(图8e),平均值为-5.30;T<sub>2DM</sub>为1.12~1.52 Ga,集中分布于1.2~1.6 Ga(图8f),平均值为1.38 Ga。

项目组已有和收集来的近400个Hf同位素数据显示,成锡花岗岩ε<sub>Hf</sub>(t)值为0.3~-15.5,集中分布于-4~-8,平均值为-5.4(图9a),T<sub>2DM</sub>Hf为1.19~1.98 Ga,集中分布于1.3~1.7 Ga,平均值为1.46 Ga(图9b);成钨花岗岩ε<sub>Hf</sub>(t)值为-2.8~-14.7,集中分布于-8~-12,平均值为-9.40(图9c),T<sub>2DM</sub>Hf为1.30~3.07

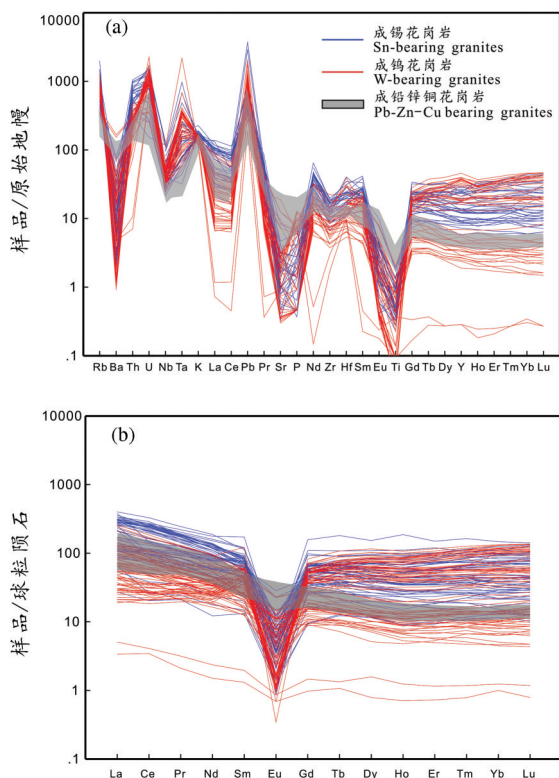


图5 成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩的微量(a)和稀土元素(b)标准化图

(数据来源同图4;原始地幔和球粒陨石数值引自 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig.5 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites

(data source is same as Fig. 4; primitive mantle and chondrite values are quoted from Sun and McDonough, 1989)

Ga, 集中分布于 1.7~2.1 Ga, 平均值为 1.97 Ga(图 9d);成铅锌(铜)花岗岩  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -0.2~-14.0, 集中分布于 -8~-12, 平均值为 -8.49(图 9e),  $T_{2\text{DM}}\text{Hf}$  为 1.22~2.08 Ga, 集中分布于 1.7~2.1 Ga, 平均值为 1.75 Ga(图 9f)。

总体上看,成锡成钨花岗岩 Nd-Hf 同位素变化范围较大,而成铅锌(铜)花岗岩变化范围较小;成锡花岗岩具有最为亏损的 Nd-Hf 同位素组成,成钨花岗岩具有最为富集的 Nd-Hf 同位素组成,而成铅锌(铜)花岗岩介于二者之间。

## 8 形成温度

众多研究表明,利用全岩“Zr”含量计算出的锆饱和温度能够有效代表花岗质岩浆结晶温度。笔

者利用 Watson and Harrison(1983)给出的计算公式,粗略计算了成锡成钨成铅锌(铜)花岗岩近 200 个样品的形成温度。结果显示,3 类成矿花岗岩均具有较低的结晶温度(均低于典型 A 型花岗岩的结晶温度),成锡花岗岩温度范围为 711~819°C(平均 781°C),成钨花岗岩温度范围较大,为 636~821°C(平均 731°C),成铅锌(铜)花岗岩温度范围较小,为 711~784°C(平均 753°C)。这与课题组利用 Harrison and Watson(1984)磷灰石温度计获得的结晶温度结果有所出入,但均显示成锡花岗岩形成温度略高于成钨花岗岩(南岭地调报告,2014—2015)。从表 1 中可以看出,即使是单个成矿岩体,典型成锡花岗岩体的结晶温度也显著高于成钨花岗岩体。在锆饱和温度直方图解中,所有成锡花岗岩的峰值温度(~800°C)明显高于成钨和成铅锌(铜)花岗岩峰值温度(小于 800°C)(图 10)。

华南成矿花岗岩大多经历了显著的分异结晶过程,属于高分异花岗岩类(吴福元等,2017)。岩浆分异过程中,表征温度数值的 Zr 元素含量在成锡成钨花岗岩中降低,进而导致计算出的锆饱和温度偏低,这就决定了高分异花岗岩应该具有较低的结晶温度。因此,即使成锡花岗岩属于 A 型花岗岩类,由于经历了显著的岩浆分异过程,其结晶温度势必会降低。

## 9 黑云母的矿物化学研究

黑云母是花岗质岩石中分布最广泛的镁铁质矿物,其化学成分明显受岩浆结晶时物理化学条件(氧逸度、温压等)控制。因此,黑云母可以作为岩浆冷却结晶时物化条件的一种有效指示剂(Wones and Eugster, 1965)。“Ti”是云母中常见微量元素,由于“Sn、W”与“Ti”具有非常类似的晶体化学性质,它们在云母中属于相容性较强的元素。因此,云母可以为有效识别钨锡成矿花岗岩提供重要的矿物学信息(王汝成等,2008)。吕志成等(2003)甚至认为,黑云母的成分变化亦可作为成矿岩体的重要判别标志。

在本文中,笔者搜集了成锡花岗岩(包括骑田岭岩体芙蓉单元、花山—姑婆山岩体、岩背岩体)、成钨花岗岩(包括新田岭岩体、大湖塘岩体)、成铅锌(铜)花岗岩(包括铜山岭岩体、宝山岩体、水口山岩体)以

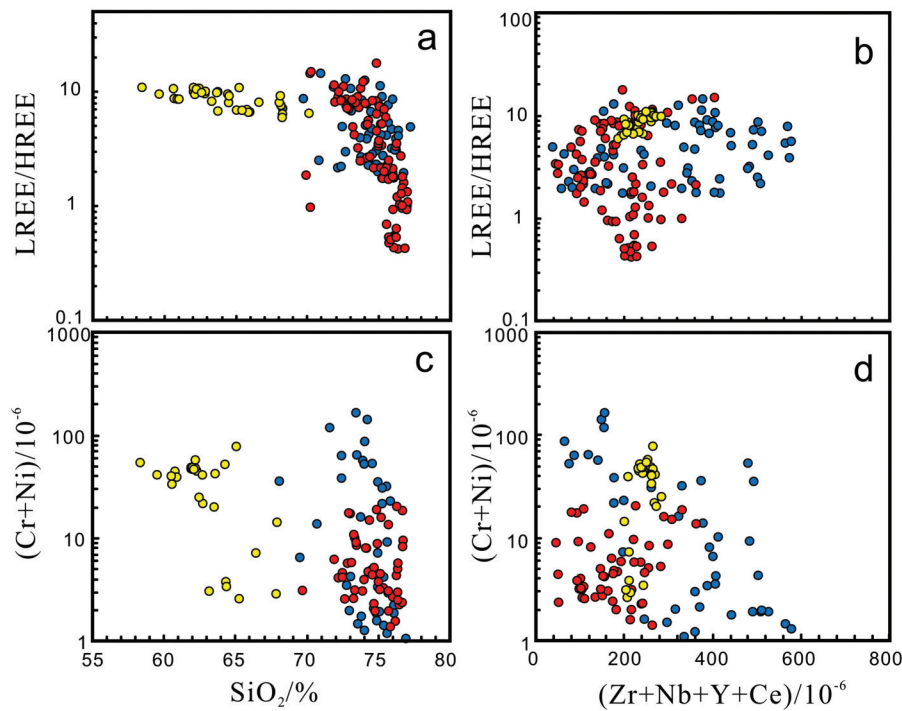


图6 成锡成钨成铅锌(铜)花岗岩 LREE/HREE-SiO<sub>2</sub>图(a),LREE/HREE-(Zr+Nb+Y+Ce)图(b),(Cr+Ni)-SiO<sub>2</sub>图(c)及(Cr+Ni)-(Zr+Nb+Y+Ce)图解(d,图例与数据来源同图4)

Fig.6 LREE/HREE-SiO<sub>2</sub> (a), LREE/HREE-(Zr+Nb+Y+Ce) (b), (Cr+Ni)-SiO<sub>2</sub> (c) and (Cr+Ni)-(Zr+Nb+Y+Ce) diagrams of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites (d, the legend and data source are same as Fig. 4)

及其中壳幔混源包体的原生黑云母主量元素数据。所有黑云母的 Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>值采用林文蔚等(1994)的计算方法获得,并以22个氧原子为单位计算黑云母的阳离子数及相关参数。在 Mg-(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn)图解(图11a)中,成锡与成钨花岗

岩中黑云母均落入铁质云母和铁叶云母区域,但还是可以凭借黑云母的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量将两类成矿花岗岩区分开,成锡花岗岩中黑云母 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量明显低于成钨花岗岩中黑云母,成铅锌(铜)花岗岩中黑云母则部分落入铁质云母,部分与壳幔混源包体中黑云母

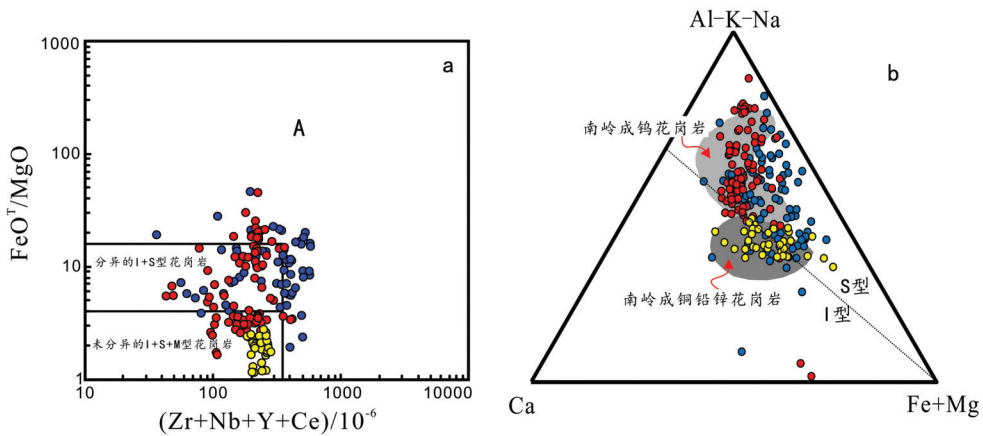


图7 成锡成钨成铅锌(铜)花岗岩 FeO<sup>T</sup>/MgO-(Zr+Nb+Y+Ce)(a, Whalen et al., 1987) 及 ACF 图解(b, Hine et al., 1978) (图例与数据来源同图4)

Fig.7 a-FeO<sup>T</sup>/MgO-(Zr+Nb+Y+Ce)/10<sup>-6</sup> and b-ACF diagrams of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites (the legend and data source are same as Fig.4)



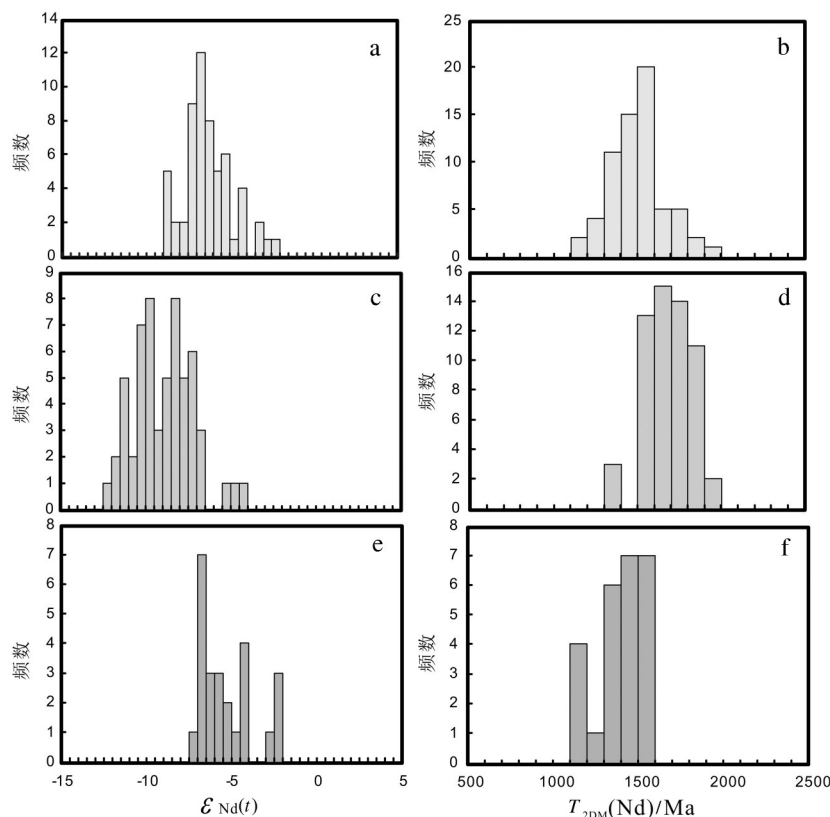


图8 成锡(a-b)、成钨(c-d)、成铅锌(铜)花岗岩(e-f)  $\epsilon_{Nd}(t)$  和  $T_{2DM}(Nd)$  直方图  
Fig.8 Histograms of  $\epsilon_{Nd}(t)$  and  $T_{2DM}(Nd)$  of the W-(a-b), Sn-(c-d) and Pb-Zn-Cu-bearing granites (e-f)

同落入镁质云母区域。郭娜欣等(2014)通过统计南岭地区中生代与钨锡钼铍和铜(钼)铅锌金银有关的两类花岗岩的黑云母矿物学特征,提出与钨锡钼铍成矿有关花岗岩以黑云母花岗岩为主,黑云母多属于铁质黑云母-铁叶云母,白云母常见;而与铜(钼)铅锌金银成矿有关花岗岩以花岗闪长岩为主,黑云母以镁质黑云母为主,白云母不常见,笔者的研究结果同样支持这一规律。

黑云母的化学成分在一定程度上可以反映岩浆-热流体系的氧逸度。从黑云母的  $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$  图解(图 11b)中可以看出,成铜铅锌和成钨花岗岩中黑云母均落入 HM 与 NNO 两条氧逸度缓冲线之间,指示其形成于较高的氧逸度条件,而成锡花岗岩中黑云母则有相当部分落入 NNO-FMQ 两条氧逸度缓冲线之间,显示相对较低的氧逸度结晶环境。

丁孝石(1988)分析认为黑云母中的 MgO 含量可以反映岩石物质来源,典型幔源黑云母中 MgO (%) 大于 15,壳源黑云母中 MgO (%) 小于 15。如图 11c 所示,成钨花岗岩中黑云母均落入“壳源”区域,

而大部分成铅锌(铜)花岗岩与壳幔混源包体以及少量成锡花岗岩中的黑云母落入“壳幔混合”区域,反映成钨花岗岩来自纯地壳物质的部分熔融,而成锡与成铅锌(铜)花岗岩中可能含有地幔物质的贡献。这与笔者野外观察到的岩体地质特征相符:成锡与成铅锌(铜)花岗岩中或多或少都含有一些闪长质暗色包体,指示幔源物质的贡献(图 3)。

Abdel-Rahman(1994)通过统计全球将近 325 个黑云母样品的主量元素的结果,根据铁镁含量不同系统地总结了非造山的碱性岩系、造山带钙碱性岩系和过铝质岩系的黑云母特征,结果显示非造山碱性岩浆岩中的黑云母富铁,接近铁云母,平均  $FeO^*/MgO$  为 7.04;过铝质(含 S 型)岩浆岩中的云母为铁叶云母,平均  $FeO^*/MgO$  为 3.48;俯冲造山环境的钙碱性岩浆岩的黑云母为富镁,平均  $FeO^*/MgO$  为 1.76。这是因为非造山碱性岩系产于高温、无水的环境,不利于磁铁矿及钛氧化物的晶出,故后期结晶形成的黑云母具有富 Fe 的特征,而造山带的钙碱性岩系则与俯冲有关,俯冲过程中产生的富水流

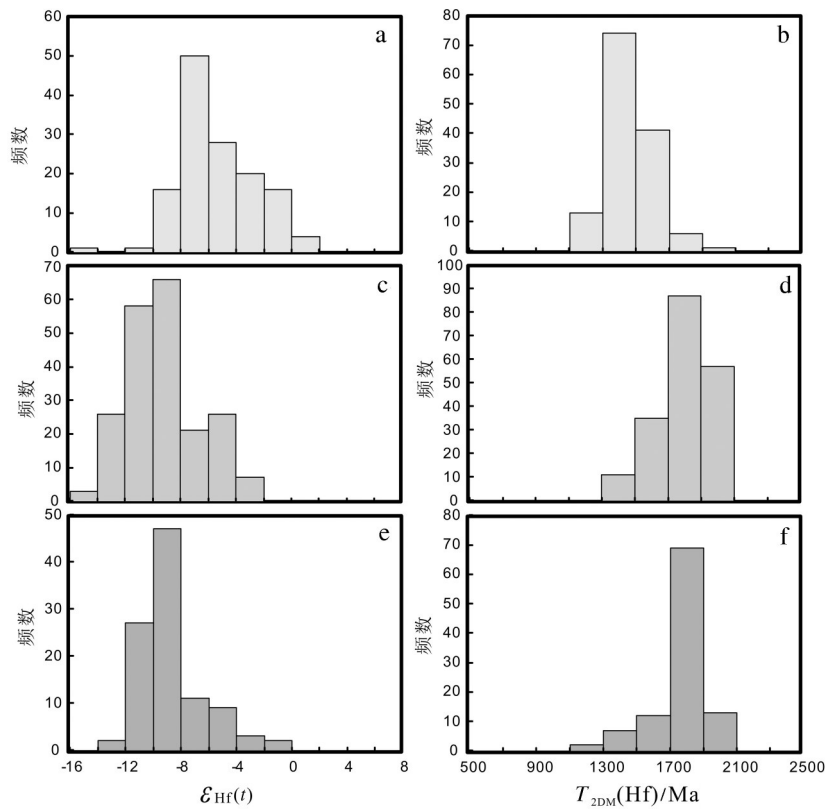


图9 成锡(a,b)、成钨(c,d)、成铅锌(铜)花岗岩(e,f)的锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  和  $T_{2DM}(Hf)$  直方图  
 Fig. 9 Histograms of  $\epsilon_{Hf}(t)$  and  $T_{2DM}(Hf)$  of the W- (a,b), Sn- (c,d) and Pb-Zn-Cu-bearing granites (e,f)

体特别有利于富铁角闪石和磁铁矿的早期晶出,致使晚期晶出的黑云母具有中等富Mg、相对富Al、贫Fe和Ti的特征。在MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>图解中(图11d),成铅锌(铜)花岗岩中黑云母分布在“造山带钙碱性花岗岩黑云母”区域,这可能与具有中等程度富镁的特征有关。成钨花岗岩中黑云母均落入“过铝质花岗岩黑云母”区域,证明了成钨花岗岩源区以地壳沉积岩为主,与成钨花岗岩中常见电气石、石榴

子石、白云母等过铝矿物相一致(图3)。成锡花岗岩中黑云母大部分落入“非造山带碱性花岗岩黑云母”区域,这指示其形成温度相对较高,可能与板内岩石圈伸展作用有关。

在黑云母成分温度图解(图12)上可以看到,3种类型成矿花岗岩的结晶温度均比较分散,很难得出确切的结晶温度,但总体上成钨花岗岩相对成锡、成铅锌(铜)花岗岩具有相对低的结晶温度。3类成矿花岗岩的结晶温度均位于600~800℃,显示相对低的结晶温度,与全岩锆饱和温度计估算结果相吻合。

表1 南岭地区代表性成锡、成钨花岗岩锆饱和温度  
 Table 1 Zircon saturation temperatures of the representative Sn- and W-bearing granites from Nanling

成矿花岗岩类型	岩体	$T_z$ 范围/℃	$T_z$ 平均值/℃
成锡花岗岩	荷花坪	756~819	798
	姑婆山	755~812	777
	密坑山	711~817	780
	岩背	787	787
成钨花岗岩	王仙岭	636~781	724
	西华山	698~782	756
	九龙脑	694~805	741
	新田岭	694~821	759

### 10 分异演化程度及其对成矿作用影响

微量元素的比值在衡量岩浆结晶分异程度方面有明显的优势,如通常使用的Rb/Sr、CaO/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)等。成铅锌(铜)花岗岩具有较低的分异指数和Rb/Sr比值以及较高的CaO/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)比值(图13a)和 $\delta Eu$ 值,Ba、Sr、P、Ti轻微亏损(图5),说明其分异演化程度低。相反,成锡与成钨花岗岩具有极高的分异指数、低的CaO/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)比值和高Rb/Sr

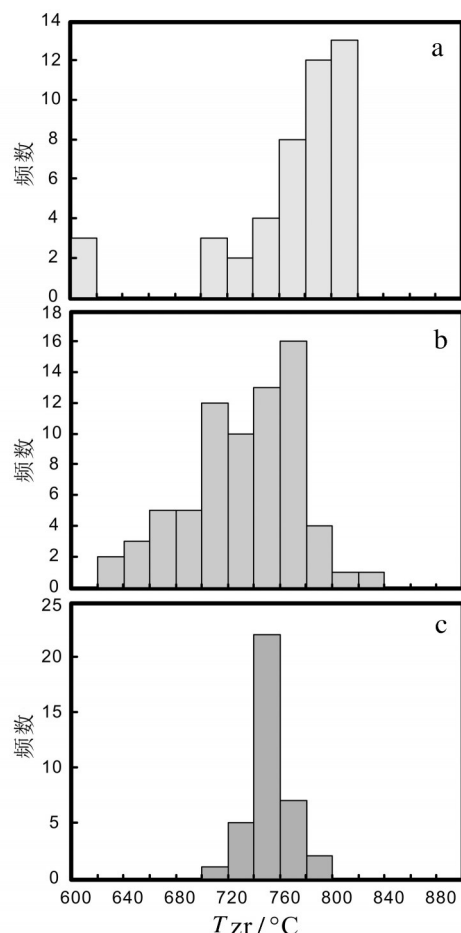


图10 成锡(a)、成钨(b)、成铅锌(铜)花岗岩(c)锆饱和温度直方图

Fig.10 Histograms of zircon saturation temperatures of the W- (a), Sn- (b) and Pb-Zn-Cu-bearing granites (c)

比值(图13a), Ba、Sr、P、Ti等元素强烈亏损, Eu负异常非常明显(图5), 说明成锡成钨花岗岩具有更高的分异演化程度, 属于高分异花岗岩。Zr/Hf和Nb/Ta等地球化学行为一致元素比值在一般的岩浆体系中并不发生数值的变化, 但当岩浆发生结晶分异而使岩浆性质发生改变时, 这些比值都将显著变小。因而, 全岩的Zr/Hf和Nb/Ta比值经常被视为花岗岩结晶分异程度的指示剂。南岭成锡和成钨花岗岩具有低的Zr/Hf和Nb/Ta比值, 说明其经历了显著的结晶分异作用。按照Ballouard et al.(2016)提出的超分异花岗岩的地球化学标准(Nb/Ta小于5), 不少成钨花岗岩是超分异的(图13b)。相对而言, 成铅锌(铜)花岗岩具有明显高的Zr/Hf和Nb/Ta比值, 说明其结晶分异作用较弱(图13b)。前人研究表明, 当花

岗岩不断向酸性岩浆演化时, LREE/HREE、Rb/Sr、Zr/Hf、Nb/Ta、 $\delta$ Eu等指标可以作为衡量岩浆结晶分异程度的参数(郭春丽等, 2017)。总体来看, 除成锡与成钨花岗岩的Rb/Sr比值区别不明显外, 成铅锌(铜)花岗岩-成锡花岗岩-成钨花岗岩, LREE/HREE、Nb/Ta、Zr/Hf、 $\delta$ Eu等参数有降低趋势。相应的, 在南岭成钨成锡花岗岩中, 笔者经常见到高Th、U含量的“黑锆石”, 这也是高分异花岗岩中晚期结晶锆石的一种特有形式。

需要指出的是, 从稀土元素球粒陨石标准化图解中可以看出, 两个高分异成钨花岗岩样品具有极低的REE含量, 但其Eu负异常反而并没有其他成钨花岗岩明显。前人研究已经表明, 花岗质岩浆极度的矿物(如磷灰石、褐帘石、独居石等)分离结晶作用会使岩浆整体稀土含量显著降低, 但与此同时也会使得Eu负异常不那么明显(Wu et al., 2003)。成钨花岗岩稀土元素的这种表现形式, 说明其可能经历了磷灰石、褐帘石等富LREE副矿物的高度分离结晶作用。成锡成钨花岗岩高的SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O含量、明显低的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量, 以及P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>与SiO<sub>2</sub>含量的负相关性也支持母岩浆发生过强烈的分离结晶作用(图4d)。成锡与成钨花岗岩在稀土元素上表现出的“四分组效应”也是岩浆高度分异的有力证据(图5)。除了岩浆体系自身的结晶分异过程外, Zhang et al.(2017)通过对赣南成钨花岗岩的系统研究, 认为南岭大规模钨成矿作用可能与花岗岩的高度分异以及富钨上地壳沉积物的混染密切相关。笔者在越城岭岩体中观察到的围岩捕虏体(图3)支持这一观点。相反, Cu被认为具有幔源成因, 多与未分异的I型花岗岩有关, 成铅锌(铜)花岗岩的分离结晶-同化混染过程会稀释岩浆中原有的“Cu”, 不利于铜铅锌成矿(Li et al., 2017)。

实验研究已经表明, F和B等挥发性元素的加入可以显著降低花岗质岩浆的黏度和固结温度, 这将导致花岗质岩浆有足够的时间进行演化, 进而促进花岗质岩浆高度的结晶分异并和围岩进行充足的物质交换(如同化混染等)。在野外, 经常可以看到成钨花岗岩以富含电气石为特征, 显示岩石中较高的B元素含量, 而成锡花岗岩周围经常可以见到萤石(如锡田岩体), 相对富集元素F。项目组以往统计结果显示南岭地区成钨锡花岗岩的F含量大多在



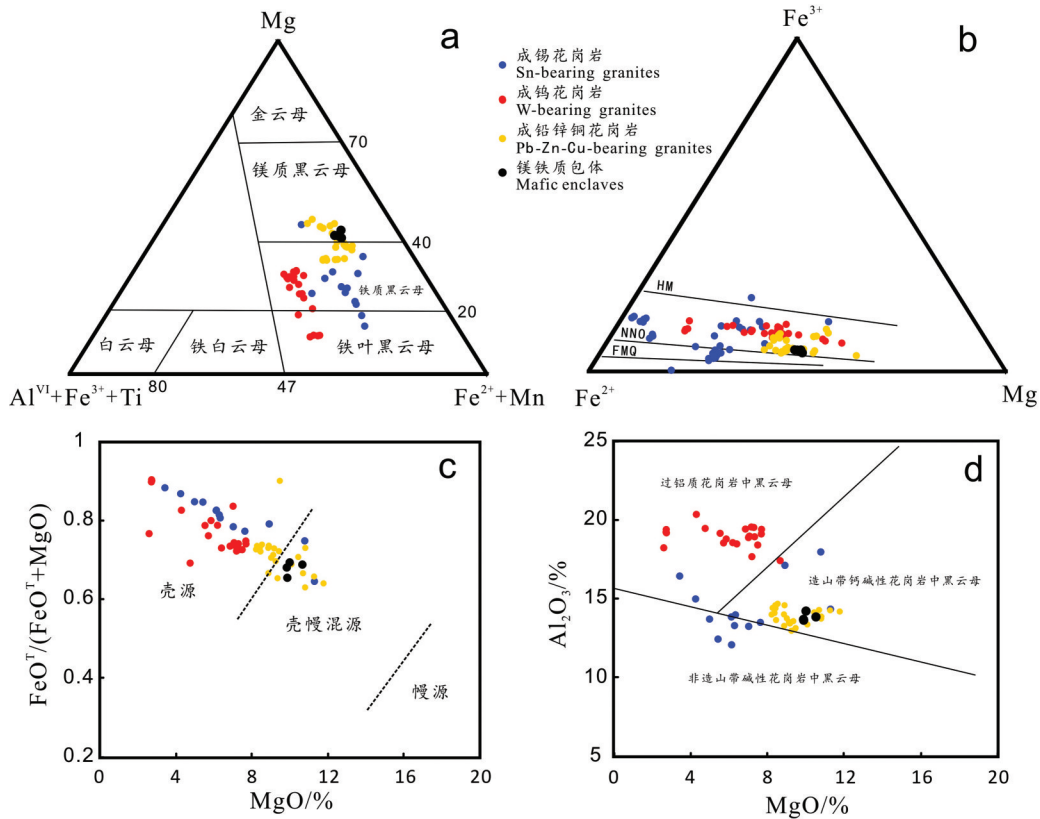


图11 云母 Mg-(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn)分类图(a, Foster, 1960),黑云母的 Fe<sup>3+</sup>-Fe<sup>2+</sup>-Mg 图解(b, HM=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的氧缓冲线, NNO=Ni-NiO的氧缓冲线, FMQ=Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的氧缓冲线, Wones and Eugster, 1965), 侵入岩黑云母的 FeO<sup>T</sup>/(FeO<sup>T</sup>+MgO)-MgO 图解(c, 周作侠, 1986)及黑云母 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 图解(d, 底图修改自 Abdel-Rahman, 1994) 黑云母数据引自吴光英(2005)、Wang et al. (2013)、南京大学地质调查项目报告(2013—2015)、张佳茹等(2014)、王辉等(2015)、Li et al. (2017) Fig.11 Biotite discrimination diagrams of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing: a-Mg-(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn)(Foster, 1960); b-Fe<sup>3+</sup>-Fe<sup>2+</sup>-Mg, HM=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; NNO=Ni-NiO; FMQ=Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(Wones and Eugster, 1965); c-FeO<sup>T</sup>/(FeO<sup>T</sup>+MgO)-MgO(Zhou, 1986); d-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO (Abdel-Rahman, 1994) Biotite data were from Wu Guangying (2005), Wang et al. (2013), Geological survey project report of Nanjing University (2013—2015), Zhang Jiuru et al. (2014), Wang Hui et al. (2015), Li et al. (2017)

1000 μg/g 以上, B 含量大多在 130 μg/g 以上, 在成锡花岗岩中 F 含量更高, 而成钨花岗岩中 B 含量更高。高的 F 和 B 等挥发性元素含量, 表明南岭成锡和成钨花岗岩更加容易进行强烈的结晶分异作用, 有助于钨锡成矿元素最终富集成矿。

最近, 袁顺达(2017)对芙蓉锡矿的野外考察发现, 骑田岭岩体南部早期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, 而晚期细粒的黑云母花岗岩与围岩接触带发育矽卡岩型矿化, 形成了芙蓉矿田最大规模的 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, 指示芙蓉锡矿与晚期高分异细粒黑云母花岗岩存在密切的成因联系。同样的, 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主体中粗粒角闪石黑云母花岗岩, 而是晚阶段高分异细粒白云母花岗岩(付建明等, 2004; 陈骏等, 2008)。这些基本地质事实说明, 钨锡成矿作用是相关花岗岩高度分异, 金属元素和挥发份高度富集的结果。这些晚阶段高分异花岗岩往往呈小岩株(枝)侵入南岭地区出露的大型花岗岩基内。因此, 在南岭大花岗岩基周缘找矿勘查过程中应注重这类晚期的细粒花岗岩及其与围岩接触带的勘查工作。

从理论研究和实际矿产勘查中可以看出, 低的岩浆分异程度有利于铜铅锌成矿, 而高结晶分异有利于钨和锡成矿, 上地壳富钨沉积物的混染可能对

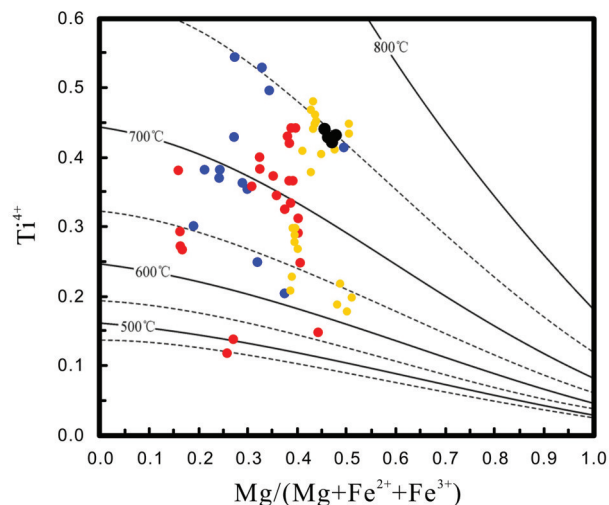


图12 成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩中黑云母Ti-Mg/(Mg+Fe<sup>3+</sup>+Fe<sup>2+</sup>)温度图解  
(图例和数据来源同图11)

Fig. 12 Diagram of Ti-Mg/(Mg+Fe<sup>3+</sup>+Fe<sup>2+</sup>) of the biotites in the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites (the legend and data source are same as Fig.11)

钨的最终富集成矿也起到了重要作用。

## 11 氧逸度及其对成矿作用指示

南岭地区以中生代大规模多金属成矿作用为特征,尤以钨、锡、铜铅锌最为明显。以往的研究多是通过岩相学、年代学和地球化学等手段对比不同金属成矿作用的差异,少有对成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩氧逸度的系统研究。在本文中,笔者利用锆石的Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup>比值和黑云母的化学成分对不同金属成矿花岗岩的氧逸度进行了估算。通过锆石

稀土元素和寄主花岗岩微量元素含量以及锆石与寄主岩之间Ce的分配系数可以估算锆石Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup>比值(Ballard et al., 2002)。黑云母的氧逸度可依据公式 $\log f_{O_2} = -A/T + B + C(P-1)/T$ 计算出来,其中P、T分别为黑云母化学成分估算的压力和温度。P和T的计算公式分别为: $P = 3.03 \times {}^TAl - 6.53$ 、 $T = [\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3]/b^{0.333}$ 。其中<sup>T</sup>Al为基于22个氧离子计算出的Al离子总数、 $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$ ;  $a = -2.3594$ 、 $b = 4.6482 \times 10^{-9}$ 、 $c = -1.7283$ ; A、B、C代表了不同氧逸度条件下的系数,可直接引用Wones and Eugster (1965)给出的实验参数。黑云母氧逸度的具体计算方法详见Li et al.(2017)。本文使用相对于NNO缓冲剂的氧逸度 $\Delta NNO$ 值来表示岩浆系统氧逸度的大小。

从图14和表2中可以看出,成铅锌(铜)花岗岩中锆石Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup>比值明显高于成锡和成钨花岗岩,成锡花岗岩的黑云母氧逸度 $\Delta NNO$ 则明显低于成钨和成铅锌(铜)花岗岩,这说明成铅锌(铜)花岗岩形成于较高氧逸度环境,而成锡花岗岩的氧逸度较低。以往研究表明,熔体中“硫”元素的氧化还原价态主要受控于氧逸度,当熔体中氧逸度较高时,“硫”主要以“SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>”和“SO<sub>2</sub>”的形式溶解在硅酸盐熔体中,不产生饱和的硫化物。因此,亲硫元素在岩浆演化过程中逐渐在熔体相中富集,最终进入流体相,从而有利于铜的富集成矿;而当氧逸度较低时,“硫”主要以“S<sup>2-</sup>”形式存在,不利亲硫元素在残留熔体中富集(Sun et al., 2015)。一系列的实验岩石学也表明,“铜、钼、金”等金属元素的硅酸盐熔体/黄铁矿

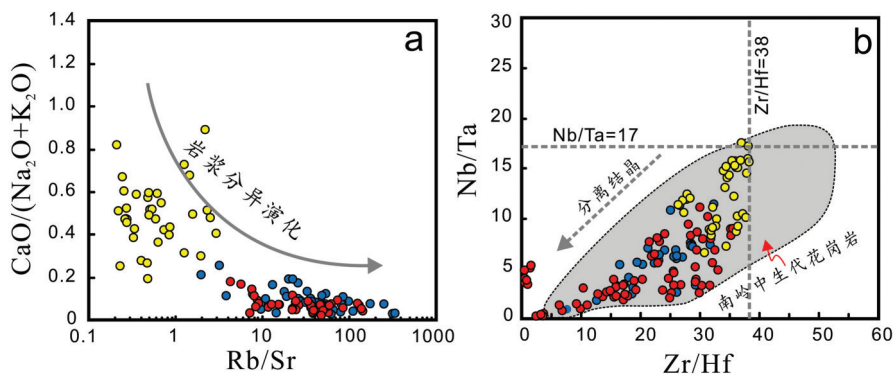


图13 成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩CaO/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)-Rb/Sr(a)及Nb/Ta-Zr/Hf图解(b)  
(南岭中生代花岗岩区域引自吴福元等,2017;图例与数据来源同图4)

Fig. 13 Diagrams of CaO/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)-Rb/Sr(a) and Nb/Ta-Zr/Hf(b) of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites (Nanling Mesozoic granite area is quoted from Wu Fuyuan et al., 2017; the legend and data source are same as Fig.4)

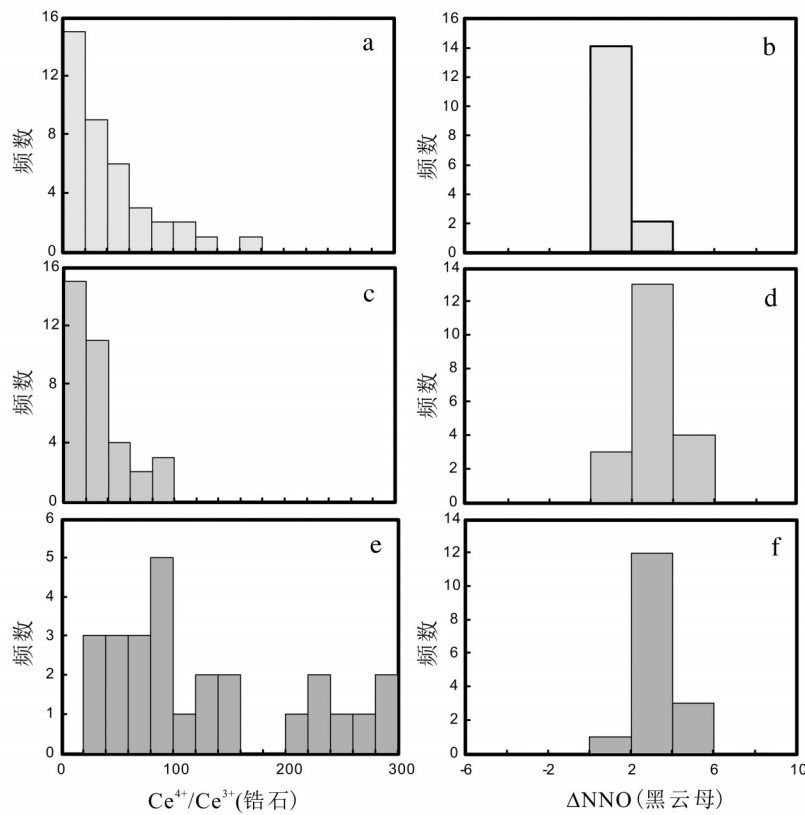


图14 成锡(a,b)、成钨(c,d)、成铅锌(铜)花岗岩(e,f)的锆石  $Ce^{4+}/Ce^{3+}$  与黑云母氧逸度  $\Delta NNO$  直方图  
(数据引自 Li et al., 2017; Yang et al., 2018)

Fig.14 Histograms of zircon  $Ce^{4+}/Ce^{3+}$  ratios and biotite oxygen fugacity (calculated  $\Delta NNO$ ) of the W- (a-b), Sn- (c-d) and Pb-Zn-Cu-bearing granites (e-f)  
(data quoted from Li et al., 2017; Yang et al., 2018)

分配系数与熔体中氧逸度成正比,因此高的氧逸度环境有助于铜等金属元素向熔体中富集。相反,在高氧逸度环境下,“锡”主要以“ $Sn^{4+}$ ”形式存在,容易替代磁铁矿、角闪石、黑云母中的“ $Ti^{4+}$ ”而进入早期结晶的镁铁质矿物晶体中,不利于岩浆演化晚期富集成矿;在低氧逸度环境下,“锡”主要以“ $Sn^{2+}$ ”形式存在,具有大的离子半径,在岩浆阶段不易形成络合物而“流失”,倾向于在残留熔体甚至是岩浆期后

热液流体中富集(Linnen et al., 1996)。因此,低的氧逸度有助于锡的富集成矿。

相对于锡,岩浆氧逸度对“钨”的化学行为的影响十分微弱。无论氧逸度高低,“钨”元素在硅酸盐熔体中始终作为不相容元素存在,因此,经常可以看到“钨”在较高氧逸度条件下单独富集成矿,也可以看到在低氧逸度条件下“钨”与“锡”矿化相伴生(Li et al., 2017)。

综上所述可以看出,岩浆氧逸度对金属成矿类型具有重要影响,高氧逸度有助于铜铅锌成矿,低氧逸度有助于锡成矿,而岩浆氧逸度对钨成矿的影响较小。

表2 南岭地区代表性成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩氧逸度  
Table 2 Oxygen fugacity of the representative W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites from Nanling

成矿花岗岩类型	岩体	锆石 $Ce^{4+}/Ce^{3+}$	黑云母 $\Delta NNO$
成锡花岗岩	芙蓉	7~116、平均40	0.2~2.4、平均1.0
	西华山	1~97、平均32	
成钨花岗岩	大吉山、大湖塘		0.6~4.8、平均3.3
成铅锌(铜)花岗岩	水口山	23~285、平均136	2.4~3.8、平均3.1

## 12 源区性质

较高的Th含量指示南岭中生代成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩主要产自地壳源区(图5)。绝大多数成矿花岗岩均具有较负的  $\epsilon_{Nd}(t)$  和  $\epsilon_{Hf}(t)$  值,显示以



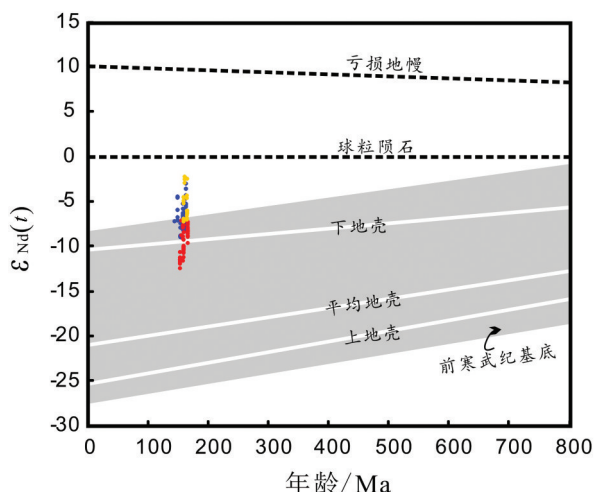


图15 南岭成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)-T$ 演化线(图例和数据来源同图4;地壳的Nd同位素演化线引自Chen and Jahn, 1998;华南前寒武纪基底范围修改自Yang et al., 2018)

Fig. 15 The evolutionary lines of  $\epsilon_{Nd}(t)-T$  of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites from Nanling (the legend and data source are same as Fig. 4; the Nd isotope evolution line of the crust is introduced from Chen and Jahn, 1998; the scope of the Precambrian basement in South China is modified from Yang et al., 2018)

地壳来源为主。相应的,这些花岗岩的二阶段模式年龄主要为古—中元古代,同样证明源区主要为地壳物质。在 $\epsilon_{Nd}(t)-T$ 演化图中,成铅锌(铜)花岗岩与成锡花岗岩主要落入下地壳演化线之上(图15),指示两类成矿花岗岩源区以中下地壳物质为主,且形

成过程中,可能有地幔物质的加入(郭春丽等, 2013)。在AMF-CMF和Rb/Ba-Rb/Sr源区判别图解(图16)中,成铅锌(铜)花岗岩主要落入变质玄武岩-英云闪长岩和贫粘土源区区域,同样说明其源区以镁铁质中下地壳为主。大陆中下地壳岩石以麻粒岩和角闪石为主,但成铅锌(铜)花岗岩的形成温度( $\sim 753^{\circ}\text{C}$ ,表1)明显低于道县玄武岩中麻粒岩相包体的形成温度( $840\sim 1139^{\circ}\text{C}$ ),说明其源区应不是麻粒岩相基底。实验岩石学表明,在高级变质岩体系(如麻粒岩)中,Pb和Zn元素由于具有较强的活动性而使其在下地壳麻粒岩中保持较低丰度,相反,下地壳角闪岩中可以具有较高的Pb和Zn含量(Hammerli et al., 2015),因此角闪岩的部分熔融更有助于Pb、Zn元素的富集成矿。在 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ 图解中,成铅锌(铜)花岗岩展现出和I型花岗岩一致的正相关性(图4d)。综上所述,笔者认为南岭地区水口山、铜山岭等典型成铅锌(铜)花岗岩属于“I型”花岗岩,其源区以下地壳角闪岩相基底为主,并伴随有少量幔源物质的加入。

成钨花岗岩落入华南前寒武纪基底演化线内,说明成钨花岗岩的主要源区可能为上地壳物质(图15)。由于高度演化的原因,南岭成钨花岗岩在AMF-CMF图解(图16a)中分布较分散,但在Rb/Ba-Rb/Sr源区判别图(16b)中,成钨花岗岩落入了富

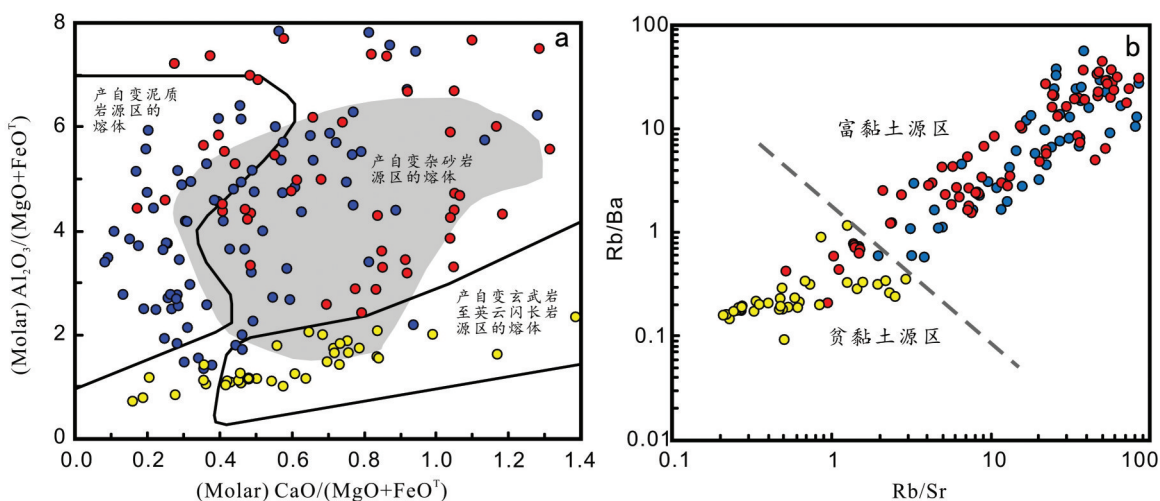


图16 南岭成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩AMF-CMF(a)及Rb/Ba-Rb/Sr(b)源区判别图(图例和数据来源同图4)

Fig. 16 The discrimination diagrams of the source nature of the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites from Nanling: a-AMF-CMF and b-Rb/Ba-Rb/Sr (the legend and data source are same as Fig. 4)

黏土的变泥质岩源区区域,这种源区性质与成钨花岗岩中出现石榴子石、白云母等富铝矿物相一致。W与Ti具有非常类似的晶体化学性质,在云母矿物中属于相容性较强的元素,因此上地壳成熟度较高的富云母和石英变泥质岩往往具有较高的W元素含量。Zhang et al.(2017)利用锆石Hf-O同位素对南岭赣南钨矿集区典型成钨花岗岩的系统研究表明,富W上地壳沉积岩(云母片岩)可能是成钨花岗岩中W元素的重要来源。最近, Yang et al.(2018)利用磷灰石Sr-Nd和锆石Hf-O-Li同位素对比研究了水口山和西华山花岗岩的成因,同样认为成铅锌(铜)花岗岩主要产自下地壳角闪岩,而成钨花岗岩则主要来自上地壳成熟度较高的富云母泥质岩。在南岭中生代花岗岩中,成钨花岗岩往往具有最为富集的Nd-Hf同位素组成,野外也少见暗色微粒包体,这说明其源区中可能没有地幔物质的直接参与。笔者注意到,在 $P_2O_5-SiO_2$ 图解中,部分成钨花岗岩展现出和S型花岗岩一致的负相关性(图4d)。结合其源区性质,倾向于把南岭成钨花岗岩划分为“C型”或“S型”,主要来自上地壳变泥质岩的部分熔融。

由于高度分异演化的原因,对南岭成锡花岗岩在成因类型上的划分还存在很大争议,大致存在“I型”与“A型”之争。由于 $P_2O_5$ 与 $SiO_2$ 整体上呈负的相关性,李献华等(2007)曾提出,华南燕山期花岗岩主体应为I型,但不可否认,一些成锡花岗岩表现出明显的A型花岗岩属性,如九嶷山金鸡岭(付建明等, 2005)、香花岭(Li et al., 2018a)铝质A型花岗岩。付建明等(2003)首次在该带九嶷山西山杂岩中发现铁辉石和铁橄榄石,有力确证了相关花岗岩体属于A型花岗岩。笔者认为,尽管成锡花岗岩在经历高度分异演化后,其原始地球化学成分已经发生较大改变,导致某些地球化学指标偏向“A型”花岗岩,如高的 $10000Ga/Al$ 比值,但同样是高分异的成钨花岗岩并没有显示出明显的“A型”花岗岩特征,在相关图解中依旧落于“S型(C型)”花岗岩区域,这本身就说明了两类花岗岩的成因类型有所区别,因此将南岭所有花岗岩都归为“高分异I型”花岗岩并不合适。在野外,成锡花岗岩中常见在大量的暗色微粒包体(图3),并伴生基性岩墙、岩脉(如千里山岩体),显示成锡花岗岩更明显具有地幔物质的参与。在Nd-Hf同位素组成上,成锡花岗岩相对成钨和成

铅锌(铜)花岗岩具有更加亏损的Nd-Hf同位素组成,且在 $\epsilon_{Nd}(t)-T$ 演化图中,主要落入下地壳演化线之上(图15),这说明地幔物质可能是成锡花岗岩的重要来源,这也能很好的解释为何成锡花岗岩具有相对高的锆饱和温度(图10)。此外,必须指出的一个基本事实是,锡的大规模成矿作用往往发生在有地幔物质参与的“十一杭带”,显示出锡的成矿作用与地幔物质的密切关系(朱金初等, 2008)。考虑到“十一杭带”是华南陆内一条构造薄弱带,在后新元古代时期的岩石圈伸展过程中,华南板块更有可能沿该带开合,并伴随地幔物质的上涌和壳幔相互作用。综上所述,笔者将含有铁辉石和铁橄榄石的成锡花岗岩划分为“铝质A型花岗岩”,其他则划分为表征壳幔混合成因的“H型花岗岩”。

从上可以看出,成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩源区成分、分异程度以及岩浆演化过程中物化条件(如氧逸度)的综合差异是导致其形成不同类型金属矿床的主要原因。

### 13 综合判别标志

综合以上分析,同时结合项目组以往研究成果,笔者总结了南岭地区成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩的综合判别标志,详见表3。

### 14 结 论

通过差异性对比分析,笔者发现南岭成钨、成锡、成铅锌铜3类花岗岩在时空分布格局、野外产状、矿物组成、源区性质、包体类型、岩浆分异程度、形成温度和氧逸度等方面有明显的差异,主要表现在:

(1)成铅锌铜花岗岩岩性以偏中性的花岗闪长岩为主,成锡花岗岩与成钨花岗岩岩性以高硅的黑云母花岗岩为主,但成锡花岗岩的基性端元中以常见角闪石可与成钨花岗岩区分。

(2)成钨与成锡花岗岩形成时代相近,形成年龄集中在150~165 Ma,而成铅锌铜花岗岩形成年龄稍早5~10 Ma;成锡与成铅锌铜花岗岩中常见同期的闪长质暗色包体,但成锡花岗岩中包体的直径更大,具有相对更高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值以及更年轻的Nd/Hf同位素二阶段模式年龄,成钨花岗岩基本不含闪长质微粒包体,而以富含电气石或电气石集合

表3 南岭地区成锡、成钨、成铅锌(铜)花岗岩综合判别标志

Table 3 The integrated classification criteria for the W-, Sn- and Pb-Zn-Cu-bearing granites from Nanling

比较项目 成因类型	成锡花岗岩		成钨花岗岩	成铅锌(铜)花岗岩
	铝质A型	H型	C型	I型
岩石共生组合	正长花岗岩和碱长花岗岩, 其次为二长花岗岩	花岗闪长岩和二长花岗岩为主, 其次为正长花岗岩和二云母花岗岩	二云母花岗岩和(含电气石)石榴子石白云母花岗岩	花岗闪长岩、花岗闪长斑岩
结构、构造	细粒结构为主, 块状构造	粗、中、细粒结构均有、斑状结构, 块状构造	细、中粒结构为主、早期斑状结构, 块状构造	斑状结构, 块状构造
暗色矿物	黑云母含量低(2%~4%), 个别有铁橄榄石和铁辉石	黑云母含量高(4%~6%或更高), 基性端元常见角闪石	黑云母含量低(2%~4%), 个别含角闪石	常见角闪石, 角闪石含量较高(~3%)、黑云母含量较高(~10%)
浅色造岩矿物	石英斑晶广泛分布	石英斑晶较多, 晚期端元白云母含量<1%	晚期端元含石英斑晶, 白云母含量也较高(1%~2%)	石英斑晶较少
挥发分矿物	少量黄玉, 局部较多	少量黄玉、萤石	电气石较为普遍	无
副矿物	榍石-褐帘石-磷灰石-磁铁矿-锆石组合	榍石-褐帘石-磷灰石-磁铁矿-锆石组合。基性端元含量高, 酸性端元低	钛铁矿-锆石-独居石和/或石榴石-磷灰石组合, 含量较低	磷灰石-褐帘石-锆石-榍石-金红石
包体	暗色微粒包体较多、直径几厘米至几米		围岩捕掳体及黑云母团块常见、暗色微粒包体较少	暗色微粒包体较少、直径较小
主量元素	SiO <sub>2</sub> <74%为主, ACNK变化大, 多为弱过铝质。基性端元P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> >0.20%为主, 富Ca、Mg、Fe	SiO <sub>2</sub> <73%为主, 准铝质-强过铝质。基性端元P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> >0.20%为主, 富Ca、Mg、Fe	SiO <sub>2</sub> >73%, 弱过铝-强过铝质。基性端元P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <0.10%为主, 贫Ca、Mg、Fe	SiO <sub>2</sub> : 58%~68%, 准铝质-弱过铝质
微量元素	Sr、Ba、P、和Ti负异常明显, Cr、Ni、Co略高, Zr+Nb+Y+Ce值高, Ga/Al较高, Sm/Nd值低		Sr、Ba、P、和Ti负异常强烈, Cr、Ni、Co略低, Zr+Nb+Y+Ce值低, Ga/Al中一低, Sm/Nd值高	无明显Sr、Ba、P、和Ti负异常, Cr、Ni、Co略高, Zr+Nb+Y+Ce值高, Ga/Al中一低,
稀土元素	ΣREE中一高, δEu 0.1~0.3, (La/Sm) <sub>N</sub> 值3~6为主		ΣREE中一低, δEu值<0.3, (La/Yb) <sub>N</sub> 多<3	ΣREE中, Eu负异常相对较弱0.21~0.38
同位素	$\epsilon_{Nd}(t)$ 相对较高(-6~-8), $T_{2DM}Nd < 1.6 Ga$	$\epsilon_{Nd}(t)$ 高(-6~-8), $T_{2DM}$ 平均值1.5 Ga; $\epsilon_{Hf}(t)$ 相对较高(-4~-8), $T_{2DM}Hf$ 平均值1.46Ga	$\epsilon_{Nd}(t)$ 较低(多-8~-12), $T_{2DM}Nd$ 平均值1.68 Ga; $\epsilon_{Hf}(t)$ 相对较低(-8~-12), $T_{2DM}Hf$ 平均值1.97 Ga	$\epsilon_{Nd}(t)$ 高(-5~-7.5), $T_{2DM}Nd$ 平均值1.38 Ga; $\epsilon_{Hf}(t)$ 相对较低(-8~-12), $T_{2DM}Hf$ 平均值1.75 Ga
锆饱和温度	较低-高711~819°C、平均781°C		低-高636~821°C、平均731°C	较低-较高711~784°C、平均753°C
幔源物质	多		无	少
源区性质	下地壳为主+地幔不同程度贡献		上地壳变泥质岩为主	下地壳角闪岩为主
时代	燕山早、晚期为主, 其次为印支期、晋宁期		燕山早期为主, 其次为印支期	燕山早期为主
分异程度	较高、LREE/HREE较低2~15, 平均5.3; Zr/Hf较低16~32, 平均25; Nb/Ta较低3~12, 平均7; Rb/Sr高, 主要集中于2~130, 平均34	高、LREE/HREE低0.4~15, 平均4.2; Zr/Hf低0.24~32, 平均16; Nb/Ta低0.9~12, 平均4; Rb/Sr高, 主要集中于1~137, 平均36	低、LREE/HREE较低6~11, 平均9; Zr/Hf较低2.3~25, 平均22; Nb/Ta较低0.3~11, 平均6; Rb/Sr极低, 主要集中于0.2~3, 平均0.8	低、LREE/HREE较低6~11, 平均9; Zr/Hf较低2.3~25, 平均22; Nb/Ta较低0.3~11, 平均6; Rb/Sr极低, 主要集中于0.2~3, 平均0.8
氧逸度	低、Ce <sup>4+</sup> /Ce <sup>3+</sup> 低-高7~116、平均40; ΔNNO低0.2~2.4、平均1.0	低-高、Ce <sup>4+</sup> /Ce <sup>3+</sup> 低-高1~97、平均32; ΔNNO低-高0.6~4.8、平均3.3	高、Ce <sup>4+</sup> /Ce <sup>3+</sup> 高23~285、平均136; ΔNNO高2.4~3.8、平均3.1	高、Ce <sup>4+</sup> /Ce <sup>3+</sup> 高23~285、平均136; ΔNNO高2.4~3.8、平均3.1
黑云母	铁质黑云母-铁叶云母; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量低-高12.1%~18.0%, 平均14.4%	铁质黑云母-铁叶云母; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量较高17.5%~20.4%, 平均19.1%	镁质黑云母-铁质黑云母; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量较低13.7%~14.4%, 平均14.3%	镁质黑云母-铁质黑云母; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量较低13.7%~14.4%, 平均14.3%
构造位置	靠近郴州—临武断裂带或分布于西侧		靠近郴州—临武断裂带或分布于东侧	靠近郴州—临武断裂带
代表性岩体	金鸡岭, 通天庙	骑田岭, 花山—姑婆山	西华山	水口山、铜山岭、宝山
矿床实例	大坳、香花岭	芙蓉、新路	西华山	水口山、铜山岭、宝山



体为特征。

(3)成铅锌铜花岗岩相对成钨、成锡花岗岩具有明显低的Rb/Sr比值以及高的CaO/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)比值,且成铅锌铜花岗岩-成锡花岗岩-成钨花岗岩,Nb/Ta、Zr/Hf等参数有降低趋势,说明成铅锌铜花岗岩分异程度最低,成钨花岗岩分异程度与成锡花岗岩相近或者更高;在南岭成钨与成锡花岗岩中,经常见到高Th、U含量的“黑锆石”,可能正是受分异晚期岩浆气液交代的结果。

(4)3类成矿花岗岩均具有较低的结晶温度,均低于典型A型花岗岩的结晶温度,但成锡花岗岩的结晶温度在三者中相对较高,可能与更多幔源贡献有关。

(5)黑云母和锆石的矿物化学特征指示成铅锌铜花岗岩形成于较高氧逸度环境,而成锡花岗岩的氧逸度较低,岩浆氧逸度对“钨”的化学行为的影响可能十分微弱。

(6)黑云母矿物化学与Nd/Hf同位素组成反映成锡与成铅锌铜花岗岩源区中“地幔”或“新生地壳成分”的比例更高,而成钨花岗岩主要来自不均一的表壳沉积物,这与其中常见电气石、石榴子石、白云母等过铝矿物的岩相学特征相一致。

**致谢:**十分感谢两位匿名审稿人和郝梓国主编、王学明副主编对本文提出的宝贵意见和建议,极大提升了论文质量和可读性;感谢武汉地质调查中心南岭成矿带工作组在野外工作中的帮助和支持。

## References

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Li Jindong, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2007. Important significance of regional tectonic regime to metallogenic capacity of Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan[J]. *Mineral Deposits*, 105: 122-139 (in Chinese with English abstract).
- Ballouard C, Marc P M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R, Vigneresse J. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. *Geology*, 44: 231-234.
- Ballard J R, Palin M J, Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 347-364.
- Cai Hongyuan. 1991. The metallogenic geological setting and

approach on ore genesis of Xiang hualing tin-polymetallic ore field[J]. *Mineral Resources and Geology*, 5(4): 272-283 (in Chinese with English abstract).

Cao Jingya, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, Wu Qianhong, Kong Hua, Li Huan, Wan Qiu, Xi Xiaoshuang, Gong Yushuang, Zhao Huarong. 2018. Formation and geodynamic implication of the Early Yanshanian granites associated with W-Sn mineralization in the Nanling range, South China: an overview[J]. *International Geology Review*, 60: 1744-1771.

Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284(1/2): 101-133.

Chen Fuwen, Fu Jianming. 2005. Geological and petrochemical characteristics of main Mesozoic tin-mineralized granitoids and regional metallogenetic regularities in Nanling Region[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2: 12-21 (in Chinese with English abstract).

Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, Wang Rucheng, Ma Dongsheng, Zhu Jinchu, Zhang Wenlan, Ji Junfeng. 2008. W-Sn-Nb-Ta-Bearing Granites in the Nanling Range and Their Relationship to Metallogenesis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 459-473 (in Chinese with English abstract).

Chen Jun, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Lu Jianjun, Ma Dongsheng. 2013. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 44(1): 459-473 (in Chinese).

Ding Xiaoshi. 1988. Study of typomorphic characteristics of micas from granitoids in central-southern Xizang and their geological implications[J]. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 33-55 (in Chinese with English abstract).

Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, Zhang Yeming, Peng Songbai, Liu Yunhua. 2003. The discovery of ultramafic enclaves in Xishan granitic volcanic-intrusive complex rocks in southern Hunan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23(3): 13-15 (in Chinese with English abstract).

Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, Zhang Yeming, Peng Songbai. 2004. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance[J]. *Geology in China*, 31(1): 96-100 (in Chinese with English abstract).

Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, Zhang Yeming, Peng Songbai. 2005. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings[J]. *Geochimica*, 34(3): 215-226 (in Chinese with English abstract).

Fu Jianming, Ma Liyan, Cheng Shunbo, Lu Youyue. 2013. Metallogenesis of W(Sn) deposits and their exploration in Nanling Range, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(2): 202-212 (in Chinese with English abstract).

Gu Shengyan, Hua Renmin, Qi Huawen. 2006. Study on zircon LA-

- ICP-MS U-Pb dating and Sr-Nd isotope of the Guposhan granite in Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 543-553 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chunli, Xu Yiming, Lou Fasheng, Zheng Jiajie. 2013. A comparative study of the Middle Jurassic granodiorite related to Cu and the Late Jurassic granites related to Sn in the Qin-Hang metallogenic belt and a tentative discussion on their tectonic dynamic setting[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 463-484 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chunli, Chen Zhenyu, Lou Fasheng, Xu Yiming. 2014. Geochemical characteristics and genetic types of the W-Sn bearing Late Jurassic granites in the Nanling Region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 301-311 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chunli, Zeng Lingsen, Gao Li'e, Su Hongzhong, Ma Xinghua, Yin Bing. 2017. Highly fractionated granitic minerals and whole-rock geochemistry prospecting markers in Hetian, Fujian Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1796-1817 (in Chinese with English abstract).
- Guo Naxin, Lü Xiaoqiang, Zhao Zheng, Chen Zhenyu. 2014. Petrological and mineralogical characteristics of two types of metallogenic granitoid formed during the Mesozoic period, Nanling Region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2423-2436 (in Chinese with English abstract).
- Hammerli J, Spandler C, Oliver N H S, Sossi P, Dipple G M. 2015. Zn and Pb mobility during metamorphism of sedimentary rocks and potential implications for some base metal deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 50(8): 657-664.
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Liu Xiaodong, Lu Jianjun, Lin Jinfu, Yao Junming, Qi Huawen, Zhang Zhanshu, Gu Shengyan. 2003. Study on Mesozoic and Cenozoic ore-forming systems related to granitic magmatism South China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 33(4): 335-343 (in Chinese).
- Hua Renmin, Li Guanglai, Zhang Wenlan, Hu Dongquan, Chen Peirong, Chen Weifeng, Wang Xudong. 2010. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 9-23 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xudong, Lu Jianjun, Sizaret S, Wang Rucheng, Ma Dongsheng, Zhang Rongqing, Zhao Xu, Wu Jingwei. 2017. Petrogenetic differences between the Middle-Late Jurassic Cu-Pb-Zn-bearing and W-bearing granites in the Nanling Range, South China: A case study of the Tongshanling and Weijia deposits in southern Hunan Province[J]. *Science China: Earth Sciences*, 47(7): 766-782 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, Liao Shiyong, Zhao Kuidong, Ling Hongfei. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. *Lithos*, 107: 185-204.
- Linnen R L, Pichavant M, Holtz F. 1996. The combined effects of f(O<sub>2</sub>) and melt composition on SnO<sub>2</sub> solubility and tin diffusivity in haplogranitic melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(24): 4965-4976.
- Liang Shuyi, Xia Hongyuan. 1992. On the petrochemical and mineralogical characteristics of the tungsten Tin, rare metal granites in South China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 12(1): 65-72 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007. On the genetic types and tectonic significance of early Yanshanian granites in Nanling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981-991 (in Chinese).
- Li Huan, Wu Jinghua, Noreen J. Evans, Jiang Weicheng, Zhou Zhekai. 2018a. Zircon geochronology and geochemistry of the Xianghualing A-type granitic rocks: Insights into multi-stage Sn-polymetallic mineralization in South China[J]. *Lithos*, 312/313: 1-20.
- Li Huan, Ladislav A. Palinkašb, Koichiro Watanabec, Xi Xiaoshuang. 2018b. Petrogenesis of Jurassic A-type granites associated with Cu-Mo and W-Sn deposits in the central Nanling region, South China: Relation to mantle upwelling and intra-continental extension[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 449-426.
- Li Xingyuan, Chi Guoxiong, Zhou Yongzhang, Teng Deng, Zhang Jingru. 2017. Oxygen fugacity of Yanshanian granites in South China and implications for metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 690-701.
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Dong Guanghua. 2003. Mineral chemistry of biotite from granites associated with different mineralization in three stages of Yanshanina period in the southern-middle parts of the Da Xing'anling mountains and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(2): 177-184 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Bai Daoyuan. 2004. Geochemical characteristics and its tectonic setting of the Xitian tungsten-tin-bearing granite pluton[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 11-16 (in Chinese with English abstract).
- Nanling Granite Research Group of Ministry of Geology and Mineral Resources. 1989. *Geology, Genesis and Mineralization of Nanling Granites*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-471 (in Chinese with English abstract).
- Nanjing University. 2013-2015. *Geological Survey Report: Perspective study and Evaluation of Mineral Resources in Western Edge of Qin-Hang Metallogenic Belt* (in Chinese).
- Qiu Ruizhao, Zhou Su, Chang Hailiang, Du Shaohua, Xiao Run. 2002. Evolution of rare earth elements of granitoid in Xianghualing Area, Hunan[J]. *Geoscience*, 16(1): 53-58 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, McInnes B I A, Jiang Shaoyong, Hu Jian. 2005. Geochemistry of the Mikengshan pluton in Huichang County, Jiangxi Province and new recognition about its genetic type[J].

- Geochimica, 34(1): 20–32 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345.
- Sun Weidong, Huang Ruifang, Li He, Hu Yongbin, Zhang Chanchan, Sun Saijun, Zhang Lipeng, Ding Xing, Li Congying, Zartman R.E., Ling Mingxing. 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas[J]. Ore Geology Reviews, 65: 97–131.
- Tang Chaoyong, Liu Lisheng. 2015. Trace elements geochemical characteristics and prospecting significance of Xianghualing tin polymetallic ore field, Hunan[J]. Mineral Resources and Geology, 19(6): 688–691 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 64: 295–304.
- Wang Weiyu, Wei Wenzhuo. 1989. Potential of granites in different tectonic units in Guangxi and some areas of South China[J]. Geological Review, 35(2): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng. 2003. Geochemistry of Early Mesozoic potassium-rich diorites–granodiorites in southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Geochemical Journal, 37: 427–448.
- Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Zhang Wenlan, Xie Lei, Yu Apeng, Che Xudong. 2008. Ore-forming mineralogy of W–Sn granites in the Nanling Range: Concept and case study[J]. Geological Journal of China Universities, 14(4): 485–495 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rucheng, Xie Lei, Chen Jun, Yu Apeng, Wang Lubin, Lu Jianjun, Zhu Jinchu. 2013. Tin-carrier minerals in metaluminous granites of the western Nanling Range (southern China): Constraints on processes of tin mineralization in oxidized granites[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 74(25): 361–372.
- Wu Guangying. 2005. The Yanshanian Granitoids and Their Cosmical Mineralization Interaction in Poly Metallogenic Deposit-Concentrated, Area in Southeastern Hunan[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. Science China: Earth Sciences, 47(7): 745–765 (in Chinese).
- Wones D, Eugster H. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory, and application[J]. American Mineralogist, 50(9): 1228–1272.
- Wu Fuyuan, Jahn B.M., Wilde S.A., Lo Chinghua, Yui Tzenfu, Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China(I): Geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 66: 241–273.
- Xia Hongyuan, Liang Shuyi, Zhang Qianming. 1991. Horizontal mineralized zoning and mineralogenetic mechanism of Shanhu tungsten-tin deposit[J]. Mineralogy and Petrology, 11(1): 59–72 (in Chinese with English abstract).
- Xie Lei, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Lu Jianjun, Zhang Wenlan, Che Xudong, Zhang Rongqing, Huang Fangfang. 2013. Felsic dykes in the metallogenic area of southern Hunan Province and their implications for mineralization and exploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(12): 4261–4280 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yincai, Lu Jianjun, Ma Dongsheng, Zhang Rongqing, Gao Jianfeng, Yao Yuan. 2013. Origin of granodiorite porphyry and mafic microgranular enclave in the Baoshan Pb–Zn polymetallic deposit, southern Hunan Province: Zircon U–Pb chronological, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(12): 4261–4280 (in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Hong Wentao, Zhang Xuehui, Zhao Xilin, Ban Yizhong, Xiao Fan. 2017. Yanshanian granitic magmatism and their mineralizations in East China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1517–1590 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiehua, Peng Jiantang, Zheng Yongfei, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Zhao Junhong, Huang Jinchuan, Zhang Banglu. 2016. Petrogenesis of the Mesozoic Shuikoushan peraluminous I-type granodioritic intrusion in Hunan Province, South China: Middle–lower crustal reworking in an extensional tectonic setting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 123(1): 224–242.
- Yang Jiehua, Kang Lifang, Peng Jiantang. 2018. In-situ elemental and isotopic compositions of apatite and zircon from the Shuikoushan and Xihuashan granitic plutons: Implication for Jurassic granitoid-related Cu–Pb–Zn and W mineralization in the Nanling Range, South China[J]. Ore Geology Reviews, 93: 382–402.
- Yu Ainan. 1992. Petrologic Features of the Tin-bearing Granitic Porphyries in Jiepailing, Southern Hunan[J]. Hunan Geology, 11(1): 7–10 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Shunda. 2017. Several crucial scientific issues related to the W–Sn metallogenesis in the Nanling Range and their implications for regional exploration: A review[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(5): 736–749 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Dai Yongshan, Wang Qu, Bai Chouyong, Liu Honglei. 2001. Geology and magma-dynamical feature of Jinjiling composite granitic batholith in the western Nanling region[J]. Geological Journal of China Universities, 7(1): 50–61 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yang, Yang Jinhui, Chen Jingyuan, Wang Hao, Xiang Yuanxin. 2017. Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon U–Pb and Hf–O isotopes[J]. Lithos, 281: 166–180.
- Zhen Yuepeng, Yu Tiejie, Wu Kaihua. 1991. The characteristic and geological implication of fluid inclusion of Maoping W–polymetallic deposit[J]. Mineral Resource and Geology, 5(4): 97–



- 103 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Kudong, Jiang Shaoyong, Yang Shuiyuan, Dai Baozhang, Lu Jianjun. 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[J]. *Gondwana Research*, 22: 310–324.
- Zhu Jinchu, Xu Shijin. 1989. REE patterns of tin/tungsten–bearing granites in South China and their petrogenetic implications[J]. *Mineral Deposits*, 8(3): 21–31 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Rao Bing, Li Fuchun, Xiong Xiaolin. 2002. Anatomy and inspiration of Yichun rare metal granite and Keketuohai rare metal pegmatite[J]. *Mineral Deposits*, 21: 841–844 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, Zhang Hui, Yang Ce. 2006. The Huashan–Guposhan A–type granitoid belt in the western part of the Nanling Mountains: Petrology, geochemistry and genetic interpretations[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 529–542 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Chen Jun, Wang Rucheng, Lu Jianjun, Xie Lei. 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W–bearing A–type granites in the western–middle part of the Nanling Mts Region[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 474–484 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, Cheng Xiyin, He Peng, Fu Qibin, Li Shunting. 2012. Characteristics of alkali feldspar granite in tungsten (tin) deposits of Nanling region[J]. *Geology in China*, 39(2): 359–381 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Changhu, Lu Rui, Zhao Zengxia, Xu Zhaowen, Lu Jianjun, Wang Rucheng, Chen Jingquan. 2014. Characterization of element geochemistry, LA–ICP–MS Zircon U–Pb age, and Hf isotope of granodiorite in the Shuikoushan deposit, Changning, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 60(4): 811–823 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yu, Liang Xinquan, Wu Shichong, Cai Yongfeng, Liang Xirong, Shao Tongbin, Wang Ce, Fu Jiangang, Jiang Ying. 2015. Isotopic geochemistry, zircon U–Pb ages and Hf isotopes of A–type granites from the Xitian W–Sn deposit, SE China: Constraints on petrogenesis and tectonic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 122–139.
- 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[J]. *中国科学(D辑)*, 44(1): 459–473.
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1–471.
- 丁孝石. 1988. 西藏中南部各类花岗岩中云母标型特征及其地质意义[J]. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, (1): 33–55.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏, 刘云华. 2003. 湘南西山花岗岩质火山岩–侵入杂岩中发现超镁铁岩包体[J]. *矿物岩石*, 23(3): 13–15.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2004. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年及其意义[J]. *中国地质*, 31(1): 96–100.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2005. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. *地球化学*, 34(3): 215–226.
- 付建明, 马丽艳, 程顺波, 卢友月. 2013. 南岭地区锡(钨)矿成矿规律及找矿[J]. *高校地质学报*, 19(2): 202–212.
- 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 2006. 广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石 LA–ICP–MS U–Pb 定年及全岩 Sr–Nd 同位素研究[J]. *地质学报*, 80(4): 543–553.
- 郭春丽, 许以明, 楼法生, 郑佳浩. 2013. 钦杭带侏罗纪与铜和锡矿有关的两类花岗岩对比及动力学背景探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 463–484.
- 郭春丽, 陈振宇, 楼法生, 许以明. 2014. 南岭与钨锡矿床有关晚侏罗世花岗岩的成矿专属性研究[J]. *大地构造与成矿学*, 38(2): 301–311.
- 郭春丽, 曾令森, 高利娥, 苏红中, 马星华, 尹冰. 2017. 福建河田高分异花岗岩的矿物和全岩地球化学找矿标志研究[J]. *地质学报*, 91(8): 1796–1817.
- 郭娜欣, 吕晓强, 赵正, 陈振宇. 2014. 南岭地区中生代两种成矿花岗岩的岩石学和矿物学特征探讨[J]. *地质学报*, 88(12): 2423–2436.
- 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[J]. *中国科学(D辑)*, 33(4): 335–343.
- 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[J]. *矿床地质*, 29(1): 9–23.
- 黄旭栋, 陆建军, Stanislas SIZARET, 王汝成, 马东升, 章荣清, 赵旭, 吴劲薇. 2017. 南岭中–晚侏罗世含铜铅锌与含钨花岗岩的成因差异: 以湘南铜山岭和魏家矿床为例[J]. *中国科学:地球科学*, 47(7): 766–782.
- 梁书艺, 夏宏远. 1992. 华南钨锡稀有金属花岗岩的岩石化学和矿物学特征[J]. *矿物岩石*, 12(1): 65–72.
- 吕志成, 段国正, 董广华. 2003. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成矿成矿意义[J]. *矿物学报*, 23(2): 177–184.

## 附中文参考文献

- 柏道远, 贾宝华, 李金冬, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 2007. 区域构造体制对湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力的重要意义[J]. *矿床地质*, 26(5): 487–500.
- 蔡宏渊. 1991. 香花岭锡多金属矿田成矿地质条件及矿床成因探讨[J]. *矿产与地质*, 5(4): 272–283.
- 陈富文, 付建明. 2005. 南岭地区中生代主要成锡花岗岩地质地球化学特征与锡矿成矿规律[J]. *华南地质与矿产*, 2: 12–21.

- 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[J]. 科学通报, 52(9): 981-991.
- 马铁球, 王先辉, 柏道远. 2004. 锡田含W、Sn花岗岩体的地球化学特征及其形成构造背景[J]. 华南地质与矿产, (1): 11-16.
- 南京大学地质调查项目报告. 2013-2015. 钦杭成矿带西段资源远景调查评价.
- 邱瑞照, 周肃, 常海亮, 杜绍华, 肖润. 2002. 香花岭花岗岩稀土元素演化[J]. 现代地质, 16(1): 53-58.
- 邱检生, McInnes B I A, 蒋少涌, 胡建. 2005. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J]. 地球化学, 34(1): 20-32.
- 唐朝永, 刘利生. 2015. 香花岭锡多金属矿田微量元素地球化学特征及找矿意义[J]. 矿产与地质, 19(6): 688-691.
- 王韦玉, 韦文灼. 1989. 关于广西及华南某些地区不同构造单元中的花岗岩含矿性演化的讨论[J]. 地质论评, 35(2): 68-73.
- 伍光英. 2005. 湘东南多金属矿集区燕山期花岗岩类及其大规模成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 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.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745-765.
- 夏宏远, 梁书艺, 张千明. 1991. 珊瑚钨锡矿床的矿化水平带和成矿机理[J]. 矿物岩石, 11(1): 59-72.
- 谢磊, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 张文兰, 车旭东, 章荣清, 黄芳芳. 2013. 湘南矿集区长英质岩脉的特征及其成矿找矿意义[J]. 岩石学报, 29(12): 4261-4280.
- 谢银财, 陆建军, 马东升, 章荣清, 高剑峰, 姚远. 2013. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩及其暗色包体成因: 锆石U-Pb年代学、岩石地球化学和Sr-Nd-Hf同位素制约[J]. 岩石学报, 29(12): 4186-4214.
- 邢光福, 洪文涛, 张雪辉, 赵希林, 班宜忠, 肖凡. 2017. 华东地区燕山期花岗质岩浆与成矿作用关系研究[J]. 岩石学报, 33(5): 1517-1590.
- 喻爱南. 1992. 湘南界牌岭含锡花岗斑岩的岩石学特征[J]. 湖南地质, 11(1): 7-10.
- 袁顺达. 2017. 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[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 736-749.
- 朱金初, 徐士进. 1989. 华南含锡钨花岗岩的稀土元素地球化学特征和岩石成因[J]. 矿床地质, 8(3): 21-31.
- 朱金初, 张佩华, 饶冰, 李福春, 熊小林. 2002. 宜春稀有矿化花岗岩与可可托海稀有矿化伟晶岩的异同剖析和启迪[J]. 矿床地质, 21: 841-844.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006. 南岭西段花山一姑婆山A型花岗质杂岩带: 岩石学, 地球化学和岩石成因[J]. 地质学报, 80(4): 529-542.
- 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[J]. 高校地质学报, 14(4): 474-484.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 程细音, 何鹏, 傅其斌, 李顺庭. 2012. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. 中国地质, 39(2): 359-381.
- 郑跃鹏, 喻铁阶, 吴开华. 1991. 茅坪钨锡多金属矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 矿产与地质, 5(4): 97-103.
- 章邦桐, 戴永善, 王驹, 柏仇勇, 刘洪磊. 2001. 南岭西段金鸡岭复式花岗岩地质及岩浆动力学特征[J]. 高校地质学报, 7(1): 50-61.
- 左昌虎, 路睿, 赵增霞, 徐兆文, 陆建军, 王汝成, 陈进全. 2014. 湖南常宁水口山Pb-Zn矿区花岗闪长岩元素地球化学、LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征[J]. 地质论评, 60(4): 811-823.