

# 南岭印支期花岗岩与钨锡成矿作用 研究进展



张云飞<sup>1, 2)</sup>, 许国锋<sup>1, 2)</sup>, 徐先兵<sup>3)</sup>, 刘磊<sup>1, 2)</sup>

1) 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙, 410083;

2) 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙, 410083;

3) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉, 430074

**内容提要:**华南中生代陆内环境成矿大爆发在区内形成了东部钨锡高温成矿省和西部金—铋—铅—锌低温成矿省, 造就了世界级金属成矿区。华南中部的南岭成矿带是世界上钨锡多金属矿床分布最密集的区域之一, 南岭在加里东期、印支期和燕山期都发育有与钨—锡成矿相关的成矿花岗岩, 区内印支期的成矿强度明显弱于燕山期, 对区内印支期岩体的研究相对滞后。笔者等在对比了南岭印支期钨锡花岗岩与不成矿花岗岩的地球化学特征并结合前人的研究发现可以结合花岗岩的高度的结晶分异、低镁、铁含量、高 REE+Y、Nb+Ta 值和 Ti、P 的强烈亏损来区分印支期钨—锡花岗岩与不成矿花岗岩。

**关键词:** 南岭成矿带; 印支运动; 高分异花岗岩; 岩浆热液矿床

华南陆块远离活动大陆边缘, 其成矿作用是典型的陆内成矿, 华南陆块中生代成矿大爆发, 形成了世界级的多金属成矿省(胡瑞忠等, 2024)。区内钨、锡储量巨大且类型丰富, 由于钨、锡矿床与花岗岩的关系密切, 因此, 长期以来人们将这些与钨、锡成矿相关的花岗岩称为“钨锡花岗岩”或“含钨锡花岗岩”(Yuan Shunda et al., 2018, 2019; Zhao Panlao et al., 2022a; 蒋少涌等, 2020)。区内成矿的主要时间有印支期(230~200 Ma), 燕山早期(160~150 Ma), 燕山晚期(134~80 Ma) 3个时期, 形成了东部高温成矿省(450°~300°, 钨—锡多金属)和西部低温成矿省(250°~120°, 金—铋—铅—锌等)(胡瑞忠等, 2024; 袁顺达, 2017; 袁顺达等, 2020)。位于华南中部的南岭成矿带在中生代多期次、大规模钨锡成矿作用下成为了全球最重要的钨锡成矿带, 但是区内只有部分花岗岩可以产生钨锡矿床, 目前哪些因素控制钨锡花岗岩的形成尚未明确(赵葵东等, 2022)。前人的研究表明, 分离结晶过程、初始富集的地壳源区和部分熔融过程都对成矿花岗岩的形成有明显的控制作用(Yuan Shunda et al., 2019; Lehmann 1990; 吴福元等, 2023; 毛景文等,

2023; 汪相, 2023), 对钨锡成矿解耦和钨锡成矿过程的不同有深入的研究(毛景文等, 2012, 2020, 2023; Lehmann 2021; Wu Fuyuan et al., 2023), 袁顺达等(2019)提出源区沉积岩成分的不同决定了其熔融方式和含金属元素的不同, 较低温度下富钨白云母分解而富锡黑云母不分解, 只释放钨; 较高温度下富钨白云母和富锡黑云母同时分解, 释放钨锡(Yuan Shunda et al., 2019)。这个模型可以解释南岭“东钨西锡”的原因以及钨锡花岗岩之间的差异, 但钨锡花岗岩和不含矿花岗岩之间的区别尚不明确。汪相等(2022a)提出的南岭燕山早期主体花岗岩(黑云母二长花岗岩)—燕山晚期补体花岗岩(二云母/白云母碱长花岗岩)—燕山晚期钨矿“三位一体”的成矿模式合理地揭示了南岭岩浆热液型矿床的许多地质现象。之前的研究工作主要聚焦在区内燕山期成矿花岗岩及矿床的研究, 近年来随着越来越多的印支期矿床被发现, 前人对华南三叠纪矿床初步建立了成矿动力学模型(谢桂青等, 2021; 王登红等, 2020; 马鑫等, 2023), 但对南岭钨锡花岗岩与不成矿花岗岩的区别有待进一步研究。笔者等在综合前人文献、搜集前人数据的基础上, 总结了南岭印支期钨

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41972198)的成果。

收稿日期: 2024-01-06; 改回日期: 2024-06-15; 网络首发: 2024-07-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.015

作者简介: 张云飞, 男, 2000年生, 硕士研究生, 矿床学, 地球化学专业; Email: Yunfei2021752724@outlook.com。通讯作者: 刘磊, 男, 1984年生, 副教授, 矿床学和地球化学专业; Email: liu01@ustc.edu.cn。

锡花岗岩与不成矿花岗岩的地球化学特征,分析了两类花岗岩地球化学特征的差异,探讨了南岭印支期岩浆活动对同时期钨锡矿化的影响,探讨哪些地球化学指标可以直接区分成矿花岗岩与不成矿花岗岩。

# 1 南岭成矿带地质背景

## 1.1 南岭成矿带岩浆岩的时空分布

南岭成矿带呈近东西向横跨华南陆块扬子地块、江南造山带以及华夏地块,其南、北界大致以梧州—四会隐伏断裂和茶陵—广昌隐伏断裂为主(舒良树,2012;徐先兵等,2021)。作为世界上最大的钨—锡—多金属成矿带,南岭拥有柿竹园、西华山和大厂等我国最重要的钨锡矿床,是世界上独具特色的与大陆花岗岩有关的成矿作用最为强烈的地区之一,具有鲜明的陆内成矿特点(胡瑞忠等,2024; Yuan Shunda et al., 2018; 王登红等,2020)。区内岩浆活动剧烈,主要有晋宁期、加里东期、印支期和燕山期4次岩浆活动,在南北两大构造体制的作用下成矿带内出现3条非常醒目的呈EW向花岗岩带,是南岭成矿带重要的标志(图1)。自北向南依次为:①九巍山—骑田岭—九峰山花岗岩带;②花

山—姑婆山—禾洞—大东山—贵东花岗岩带;③连阳—佛岗—新丰江—白石岗花岗岩带。这3条近东西向花岗岩带的分布受到了南北两大构造的限制,也受深部构造和褶皱、断裂控制(舒良树等,2006;舒良树,2012;徐先兵等,2009,2021)。

## 1.2 南岭印支期大地构造背景

258~243 Ma 华南印支造山运动开始后,区内从伸展构造向挤压构造转换,标志着华南进入陆内造山阶段(梁新权等,2005)。印支造山运动中华南陆块从北部沿大别山造山带向华北陆块下俯冲后演变成被动大陆边缘盆地和前陆盆地,在南部沿松马—松达缝合线与印支地块拼合,并在区内发育广泛分布的花岗岩(胡瑞忠等,2024; Wang Denghong et al., 2022)。这次岩浆活动可能起源于古特提斯洋的关闭过程中华南、华北和印支地块的相互作用(毛景文等,2012;王登红等,2020)或古太平洋板块向西平板俯冲(Li Zhengxiang et al., 2007; 褚杨等, 2015),总体的构造格局在255~220 Ma以挤压为主,220~200 Ma以造山后伸展为主。前人根据太平洋区域侏罗纪—白垩纪大洋磁异常条带和古地磁研究推测,依泽纳吉板块北边的洋中脊与洋脊三叉连

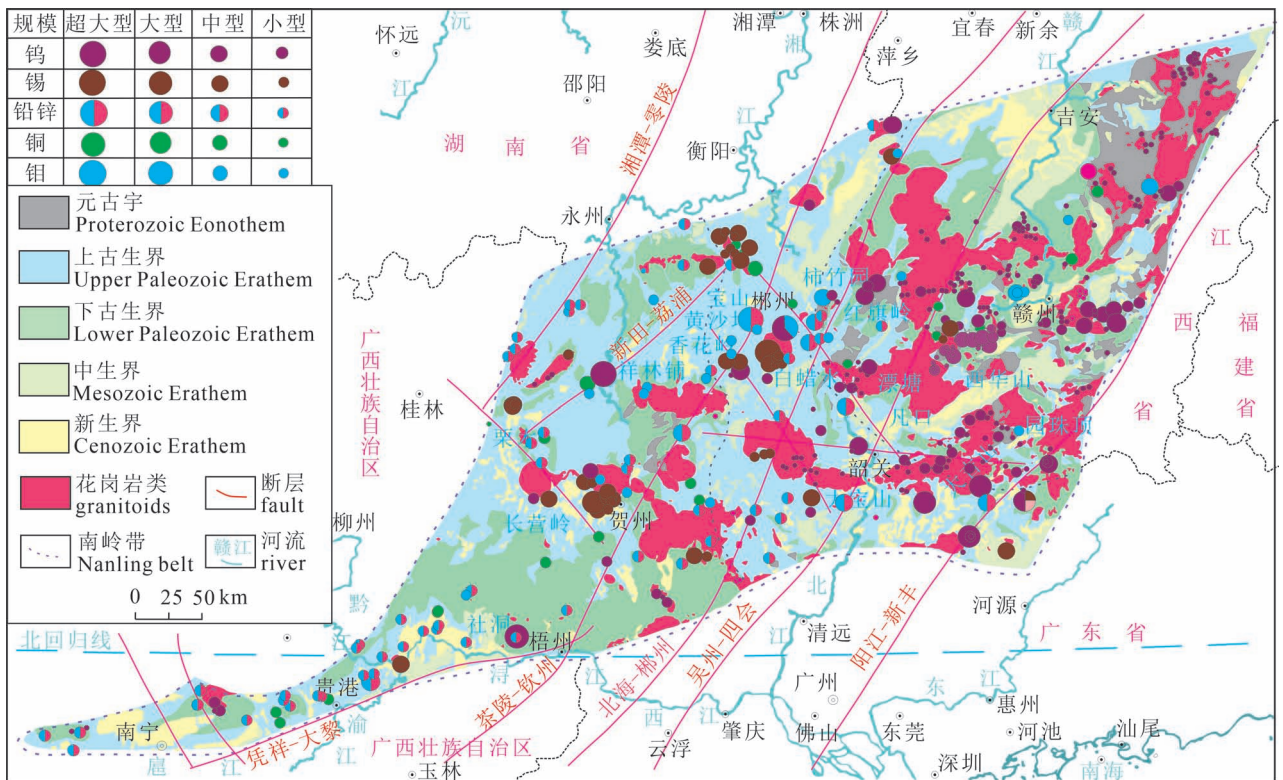


图1 南岭成矿带大地构造位置示意图和矿床分布图(据秦锦华等,2024;王岩等,2024 修改)

Fig. 1 The diagram of tectonic location and some deposits distribution of Nanling metallogenic belt (after Qin Jinhua et al., 2024&; Wang Yan et al., 2024&)

在晚侏罗世向下扬子克拉通地幔俯冲(杨文采, 2023), 库拉板块于早白垩世向欧亚大陆俯冲, 导致中国东南部沿海地带处于强烈挤压状态, 并提出造成中国东南部大规模的花岗质岩浆活动及其成矿作用的动力来源为一次新的造山作用—黄山运动, 该造山作用开始于约 135 Ma, 结束于约 100 Ma, 可以用挤压作用高峰期(约 127 Ma)和伸展作用高峰期(约 105 Ma)两段年龄来精确限定其时间范围(汪相, 2022b)。

南岭成矿带晚古生代滨海浅海相地层发生了广泛的褶皱和变形, 使区内前泥盆纪构造层被强烈再造, 发育了近东西向褶皱, 地壳发生不同程度增厚(徐先兵等, 2009; 梁新权等, 2005; 褚杨等, 2015; 张岳桥等, 2009)。这个阶段产生的很多构造变形后期受到燕山运动的改造和 NNE 向褶皱主体的叠加导致其被隐蔽, 区内近东西向的褶皱控制了印支早期岩体侵位展布(颜丹平等, 2018)。中—晚三叠世, 印支碰撞造山运动结束, 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, 形成了  $T_2/T_3$  之间的不整合面, 该不整合面是挤压构造向伸展构造转换的转换面, 标志着南岭成矿带内构造环境开始向伸展环境转变(梁新权等, 2005)。杨文采(2018)提出三叠纪华北和扬子克拉通碰撞时地壳原有的裂隙缝再度活化, 又使得热流体活动加剧和中地壳岩石逐渐重熔, 形成了雪峰山—幕阜山—皖南黄山的燕山期花岗岩带。印支造山运动碰撞挤压结束, 后造山伸展运动开始, 南岭成矿带在这种伸展体制下, 发育了一系列后碰撞花岗岩并伴随钨锡多金属成矿作用(袁顺达, 2017), 因此, 印支期陆内造山运动为同期钨锡成矿提供了成矿动力(胡瑞忠等, 2024)。南岭在 205~180 Ma 处于明显的岩浆活动平静期, 少见岩浆活动(毛景文等, 2007)。

### 1.3 南岭地层概况

南岭成矿带在前南华纪—早古生代强烈褶皱—变质的基底之上, 出露的地层可以分为 3 套。基底为一套巨厚层次深海相复理石碎屑岩建造, 以南华系—志留系碎屑岩和变碎屑岩为主, 沉积厚度逾万米(舒良树, 2012; 毛景文等, 2008)。盖层以泥盆系—三叠系广泛发育滨海相, 浅海相和海陆交互沉积及侏罗—白垩发育在断陷盆地中的碎屑岩, 火山岩和红层为主(徐先兵等, 2009, 2021)。在三叠纪期间, 南岭成矿带以浅海相碳酸盐岩夹硅质岩组合和台地相为特征, 化石丰富, 沉积厚度相对稳定

(舒良树, 2012)。区内印支期花岗岩的围岩地层岩性均为寒武系砂岩和板岩, 南华系—奥陶系杂砂岩和杂砂岩、泥盆系灰岩和砂岩、石炭系白云岩和灰岩(陈迪等, 2017; 李湘玉等, 2020; 邹先武等, 2009; 伍静等, 2012)。

## 2 南岭印支期钨、锡矿床类型和成因

### 2.1 南岭印支期钨、锡成矿作用

前人对华南陆块的 Hf 同位素填图显示华南的地壳深部物质组成呈现“马赛克”式的空间构架, 即古老地壳、新生地壳和再造地壳并置于华南陆块之上。南岭地壳再造程度极不均一, 侏罗纪幔源镁铁质岩浆的注入使区内东南缘和西南缘为两个强再造区, 中部为过渡区和弱再造区。与花岗岩相关的钨锡铋钼矿床主要分布在再造地壳域, 多阶段的地壳改造和中生代岩石圈减薄使得钨锡铋钼等金属元素被释放进入壳源岩浆中(Zhang Zhiyu et al., 2023)。

Yuan Shunda 等(2019)的研究表明初始源区的富集、分离结晶过程和部分熔融过程对钨锡矿床的形成都有明显的控制作用, 源区沉积岩的成分和源岩部分熔融的温度在钨锡矿床形成的过程中也起到关键作用(Yuan Shunda et al., 2019; Zhao Panlao et al., 2022b; 毛景文等, 2023)。前人提出的一个由源岩中云母的差异分解控制钨锡成矿差异的模型, 指出白云母和黑云母是源岩中主要赋存钨锡的矿物, 白云母在相对低的熔融温度( $< 750^{\circ}\text{C}$ )下的脱水熔融主导熔体中钨的富集, 而黑云母在相对高的熔融温度( $> 800^{\circ}\text{C}$ )下的脱水熔融主导熔体中锡的富集, 最终钨锡通过相同源区的不同熔融过程富集完成后, 在后续岩浆的高分异演化中造成钨锡解耦, 即钨和锡通常形成单独的矿床或钨锡中某一金属在矿床中的含量占绝对优势(Yuan Shunda et al., 2019)。锡花岗岩的温度较高并且源岩经历了高度变质作用, 钨花岗岩的温度较低且未经过变质作用。钨矿化是白云母脱水熔融的结果, 对应着低温熔体; 而锡矿化是黑云母脱水熔融的结果, 对应着高温熔体, 并可能伴随着低温熔体的损失(Song Shiwei et al., 2022)。前人对南岭中生代花岗岩的研究表明, 区内锡花岗岩的锆石饱和温度( $800 \pm 20^{\circ}\text{C}$ )高于钨花岗岩( $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ), 锡花岗岩中包含着大量的幔源暗色镁铁质微粒包体, 这在钨花岗岩中非常少见, 锡花岗岩的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  和  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  均高于钨花岗岩, 地幔为锡花岗岩形成所需的高温提供热量(Yuan Shunda et al., 2019)。

钨和锡都具有较高的电荷与离子半径,钨和锡在熔体中元素行为的差异,使两者具有不同的成矿专属性(章荣清等,2016;王登红等,2014)。锡在熔体中以 $\text{Sn}^{4+}$ 和 $\text{Sn}^{2+}$ 的形式存在,其在过铝质熔体中的地球化学行为受氧逸度控制,熔体中的氧逸度主要影响源区中锡的迁移能力和分离结晶过程中锡的地球化学行为。 $\text{Sn}^{4+}$ 在氧化性熔体中为相容元素,常常随着含Ti矿物(磁铁矿和榍石等)的分离结晶进入矿物相,难以在岩浆晚期富集形成锡矿床或仅形成浸染型矿化; $\text{Sn}^{2+}$ 在还原性熔体中为强不相容元素,倾向于以成矿流体的方式运移,可以随着岩浆分异富集成为岩浆热液型锡矿床(Yuan Shunda et al., 2019; 章荣清等,2016; Linnen et al., 1995; Ishihara, 1977; 温程明等,2023),因此,氧化还原反应是锡石沉淀的必要条件(Liu Xiangchong et al., 2023)。锡矿在成因上通常与高分异、还原性、与上地壳变泥质沉积岩重熔形成的钛铁矿系列花岗岩具有密切关系(毛景文等,2023)。钨赋存在白钨矿、黑钨矿、钨铁铌矿和铌黑钨矿中(蒋少涌等,2020; 王汝成等,2008)。前人在收集南岭的钨矿数据并结合瑞利分馏模型和蒙特卡罗模拟进行的研究表明,钨矿成矿的源区可以是上地壳、下地壳和壳幔边界,岩浆氧逸度并不控制大型钨矿的形成,源区的预富集和高度结晶分异是控制钨矿形成的重要因素(吴福元等,2023)。

## 2.2 南岭印支期钨锡矿床的类型

南岭钨锡矿床的类型主要有石英脉型、矽卡岩型、云英岩型和锡石硫化物型,由于钨锡成矿机制等方面的差异,两者的矿化类型各有侧重。在南岭东段的钨矿以赋存在岩体中石英脉型黑钨矿居多,在西段以矽卡岩型白钨矿居多,锡矿以锡石硫化物型居多(蒋少涌等,2020; Wang Denghon et al., 2020)。南岭成矿强度最大的燕山期钨锡矿床具有明显的分带性,东段以钨矿床的密集产出为特点,西段以大规模锡矿化作用为主,中段钨锡矿化并重但锡矿化明显增强,在晚三叠世以钨矿床为主,锡和铌钽矿化次之,钨锡矿化并没有明显的分带(谢桂青等,2021; 陈骏等,2014)。前人认为南岭地区的成矿作用与花岗岩岩浆的高度结晶分异作用密切相关,因此将这一类花岗岩统称为高分异花岗岩,即花岗岩是成矿的主要赋矿岩石之一,且为稀有金属矿床的成矿作用提供成矿流体和成矿物质(吴福元等,2023; 袁顺达等,2021; Zhao Panlao et al., 2022c)。岩体的总体演化特征可以概括为黑云母花岗岩→二云母

花岗岩→白云母花岗岩,花岗岩经历高分异过程后,残余熔体会不断向富碱、富硅的方向演化(吴福元等,2017)。下面我们简要介绍南岭地区5个代表性印支期钨锡成矿区。

(1) 海洋山—都庞岭—栗木成矿区位于桂东北地区。大地构造位置位于江南造山带和华南褶皱带的过渡部位。区内岩浆活动强烈,多期次花岗质岩浆沿都庞岭背斜核部入侵,形成都庞岭和海洋山复式岩体,在南部形成的栗木岩体,栗木岩体呈小岩株产出,是同源同期、三个阶段形成的复式岩体(徐德明等,2017; 李晓峰等,2012)。区内印支期主要形成石英脉型、构造破碎带蚀变岩型的钨钼矿和铌钽矿床,如栗木锡铌钽矿床(覃宗光等,2011),李贵福钨锡多金属矿床(邹先武等,2009)。

(2) 越城岭—苗儿山成矿区地处桂北和湘东南交界,大地构造位置位于江南造山带东南侧的桂北台隆越城岭褶断带(林书平等,2017; 马鑫等,2023)。越城岭—苗儿山岩体是南岭成矿带西段出露面积最大的岩体,为多期次多阶段岩浆侵入活动形成的复式岩基,区内岩体呈北北东方向展布于复式背斜的轴部,与区域构造线的方向基本一致(伍静等,2012)。该区金属矿床的形成主要与越城岭岩体—苗儿山岩体多期次岩浆侵入作用有关,印支期主要形成矽卡岩型、云英岩型和石英脉型钨锡金属矿床,如油麻岭钨矿、界碑钨铜矿(程顺波等,2018)、高岭钨钼矿(李晓峰等,2008)和云头界钨钼矿(黄文婷等,2015)。

(3) 崇义—大余—上犹成矿区位于赣南西部,大地构造位置位于南北向诸广山构造岩浆岩带与大余南城构造带的交汇部位(王登红等,2016),是赣南钨矿床分布最集中的地区,成矿作用主要发生在燕山期,印支期也有钨锡成矿作用。区内印支期主要形成石英脉型钨锡矿床,如坳头锡矿(Liu Lei et al., 2023)、青山钨锡矿(李伟等,2021)、仙鹅塘钨锡矿床(刘善宝等,2008)。

(4) 锡田成矿区位于湖南东部茶陵县,大地构造位置在扬子板块与华夏板块之间钦州—杭州结合带中部(董超阁,2018),处于茶陵—永兴断陷盆地东缘,发育多期次岩浆活动和钨锡成矿,区内印支期岩浆活动主要发生在230~220 Ma,花岗岩中成矿元素含量从加里东期→印支期→燕山期逐渐升高(付建明等,2009)。区内印支期的成矿作用与成岩作用几乎同时发生,主要形成钨锡矿床和铜矿床,矿床类型是与花岗岩侵入有关的矽卡岩型、云英岩—

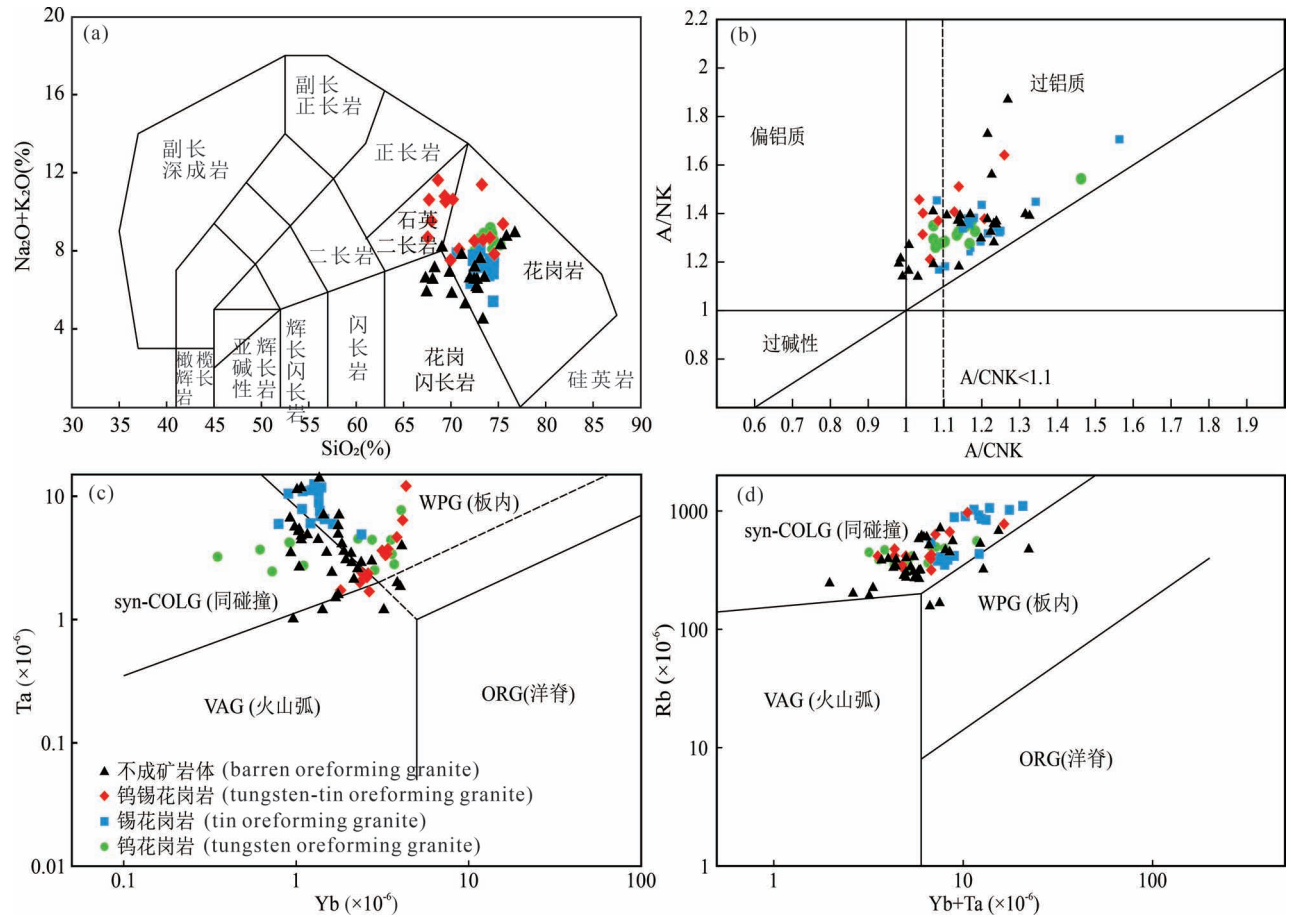


图 2 南岭印支期花岗岩 TAS 图解 (a); A/NK—A/CNK 图解 (b);  $K_2O$ — $SiO_2$  图解 (c) 和 Rb—Yb+Ta 图解 (d)

Fig. 2 TAS diagram (a);  $K_2O$ — $SiO_2$  diagram (b); A/NK—A/CNK diagram (c) and Rb—Yb+Ta diagram (d) of the Indosinian granites in Nanling Mountains area

数据来源见附表 1 (纸版略, 见网络版文末: [www.geojournals.cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev))

Data source see in table S1 (Omitted from paper version, see at the end of the online article: [www.geojournals.cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev))

石英脉型和花岗斑岩脉型热液矿床 (邓湘伟等, 2015), 如锡田钨锡多金属矿床 (董超阁, 2018) 和邓阜仙钨锡多金属矿床 (邓渲桐等, 2017)。

(5) 王仙岭—荷花坪成矿区位于南岭中段北部, 大地构造位置位于茶陵—郴州断裂带的东侧 (柏道远等, 2016), 区内存在印支晚期 (约 224 Ma)、燕山早期 (156~151 Ma) 和燕山晚期 (约 142 Ma) 3 期成矿作用 (蔡明海等, 2016)。区内印支期矿床主要有水源山白钨矿床和荷花坪锡多金属矿床。水源山白钨矿床位于岩体的东北部, 是区内储量最大的钨矿, 矿床主要类型为云英岩型和风化沉积型, 矽卡岩型和石英脉型白钨矿规模较小 (Zhao Panlao et al., 2022a)。荷花坪锡多金属矿床位于王仙岭岩体东南接触带, 矿床主要类型是早期的矽卡岩型和晚期的破碎带蚀变岩型 (郑佳浩和郭春丽, 2012)。

### 3 钨锡花岗岩和不成矿花岗岩的地球化学对比

花岗岩对钨锡成矿的控制因素主要体现在: ①花岗岩中成矿元素的预富集是成矿的基础; ②花岗质岩浆的结晶分异可以使钨锡在熔体—流体中富集, 即高分异有利于成矿; ③花岗岩中的成矿元素是否可以有效迁移 (袁顺达等, 2020; 吴福元等, 2023; 毛景文等, 2023; 王汝成等, 2008)。因此, 花岗岩的成矿潜力可以根据其地球化学特征来判断。前人将南岭中生代花岗岩划分为 3 个主要的类型: 钨花岗岩、钨锡花岗岩和铌钽花岗岩 (陈骏等, 2008), 笔者等结合前人的划分方法将花岗岩分为钨锡花岗岩、钨花岗岩、锡花岗岩和不成矿花岗岩进行地球化学对比, 探讨鉴别钨锡花岗岩与不成矿花岗岩的地球

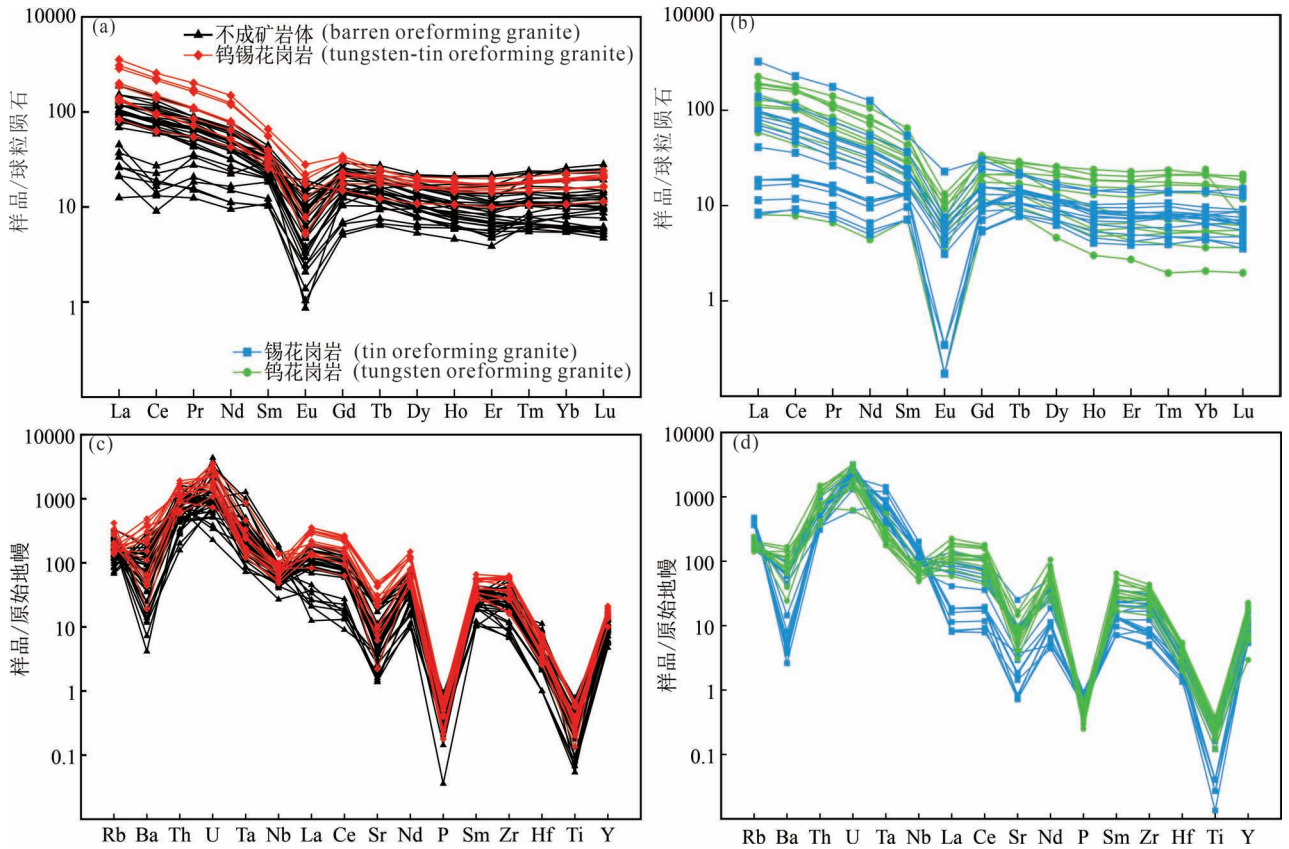


图3 南岭印支期花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a) (b) 和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(c) (d)  
 (原始地幔和球粒陨石标准化数据 Sun and McDonough 1989)

Fig. 3 The standardized distribution pattern of rare earth elements chondrites (a) (b) and the standardized trace elements spider diagram (c) (d) of the Indosinian granites in Nanling Mountains area (the values of primitive mantle and chondrites from Sun and McDonough, 1989)

数据来源见附表 1 (纸版略, 见网络版文末; [www.geojournals.cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev))

Data source see in table S1 (Omitted from paper version, see at the end of the online article; [www.geojournals.cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev))

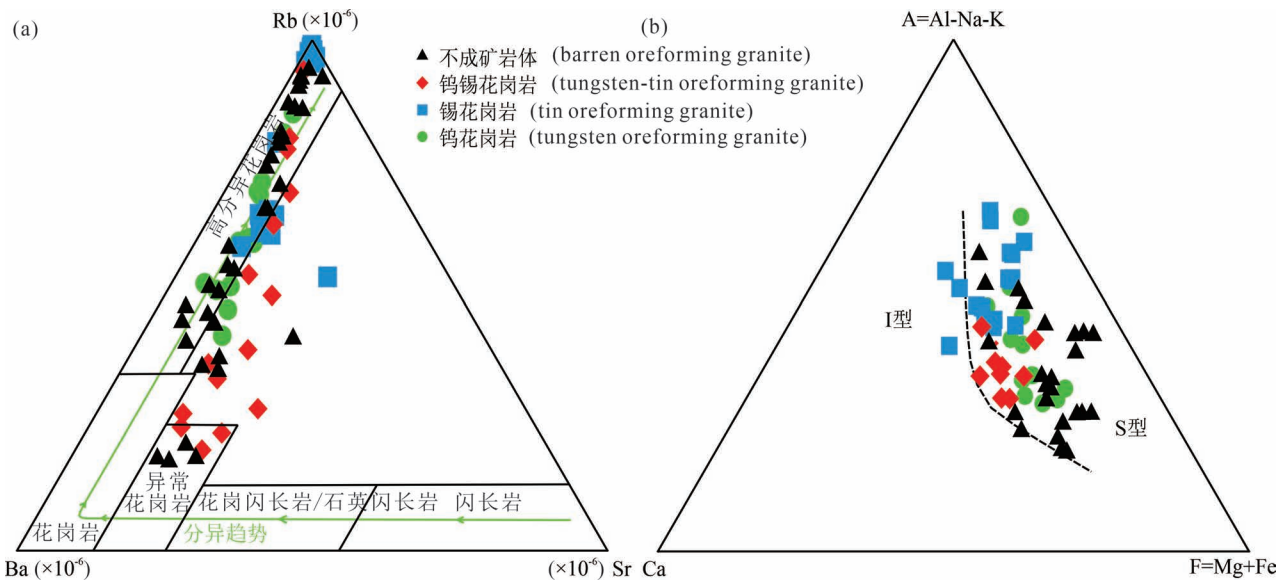


图 4 南岭印支期花岗岩 Rb—Sr—Ba(a) 图解和 ACF 图解(b)

Fig. 4 Rb—Sr—Ba diagram (a) and ACF diagram (b) of the Indosinian granites in Nanling Mountains area

数据来源见附表 1(纸版略,见网络版文末:www. geojournals. cn/georev)

Data source see in table S1(Omitted from paper version, see at the end of the online article; www. geojournals. cn/georev)

化学指标。

南岭印支期岩体主要为石英二长岩、花岗闪长岩和花岗岩(附表 1,纸版略,见网络版文末:www. geojournals. cn/georev),钨锡成矿主要与花岗岩相关(图 2a),钨锡花岗岩和不成矿岩体在 A/NK—A/CNK 图解中(图 2b)均落入过铝质的范围中。利用微量元素 Ta—Yb 构造判别图解(图 2c)和 Rb—(Yb+Ta)构造判别图解(图 2d),投点显示大部分岩体落在同碰撞区域和板内花岗岩的过渡区,指示区内印支期岩体形成于同碰撞造山环境或印支运动结束后的板内伸展环境。

稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 3a 和 3b)显示,4 类花岗岩都富集轻稀土元素、亏损重稀土元素,稀土元素配分图呈右倾,稀土元素总量没有明显差异,锡花岗岩的负 Eu 异常较钨花岗岩和不成矿岩体更强,暗示了锡花岗岩经历了更强的斜长石分离结晶。微量元素蛛网图(图 3c 和 3d)显示花岗岩都富集 Rb、U、Th、Zr 和 Hf,明显亏损 Ba、Pb、Sr、P

和 Ti,说明熔体在源区富集的过程中经历斜长石和钾长石的分离结晶(Yu Yang et al., 2024)。Sr 的亏损说明花岗岩经历斜长石的分离结晶,P 和 Ti 的亏损暗示了锡和钨花岗岩经历了磷灰石、榍石和钛铁矿等含 Ti 矿物的分离结晶。区内钨锡花岗岩与高分异花岗岩密切相关,Rb—Ba—Sr 图解(图 4a)显示印支期锡花岗岩的分异程度明显高于钨花岗岩、钨锡花岗岩和不成矿花岗岩,暗示了锡花岗岩经历更高分异的结晶分异,因此高分异的花岗岩可以作为锡花岗岩的识别指标。ACF 图解(图 4b)中,南岭印支期岩体的投点均落在 S 型花岗岩区域。不成矿岩体的 P 相较于其他 3 类花岗岩更加亏损,锡花岗岩的 Ti 和 Ba 相较于其他 3 类花岗岩更加亏损。微量元素特征暗示岩浆物质主要来自地壳,是印支期造山运动“同碰撞”和“碰撞后”地壳部分熔融的产物。

南岭印支期钨锡花岗岩和不成矿花岗岩的  $\epsilon_{\text{Hf}}$  不同,钨锡花岗岩和钨花岗岩的  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值相近,不成矿岩体的  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值范围为  $-0.2 \sim -11.6$ (图 5a),锡花岗

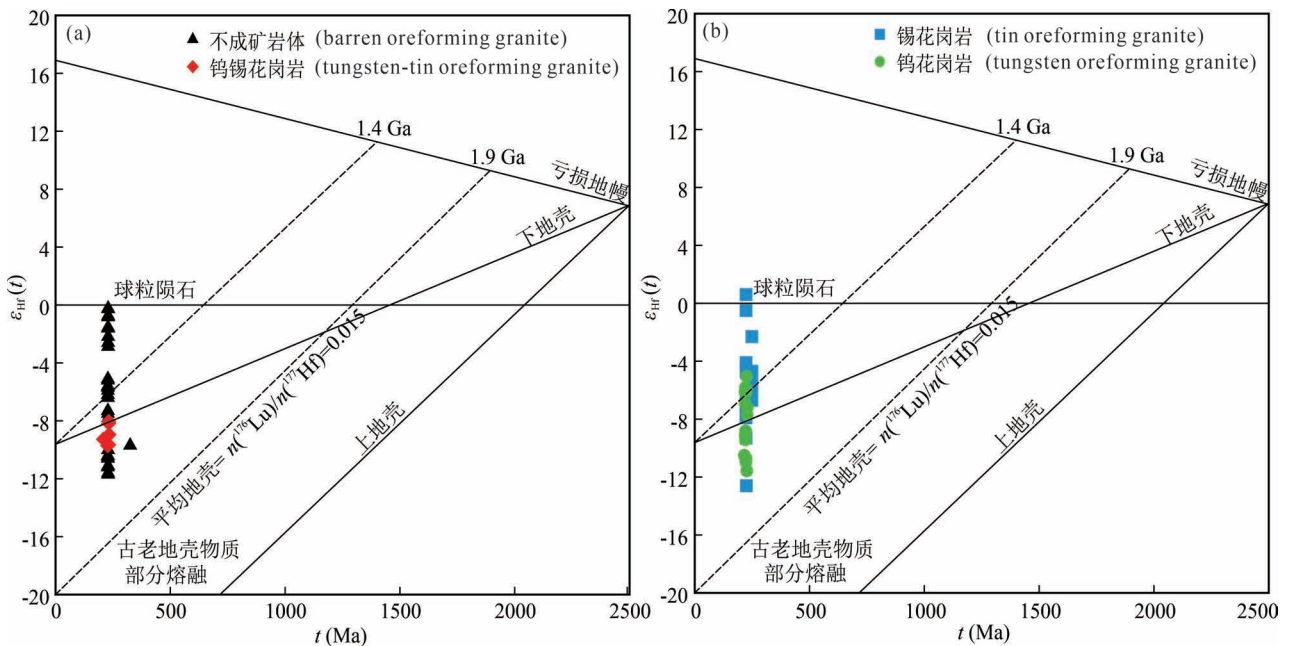


图 5 南岭印支期花岗岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  图解(底图据吴福元等,2007)

Fig. 5  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  diagram of the Indosinian granites in Nanling Mountains area (after Wu Fuyuan et al., 2007)

数据来源见附表 2(纸版略,见网络版文末:www. geojournals. cn/georev)

Data source see in table S2(Omitted from paper version, see at the end of the online article; www. geojournals. cn/georev)

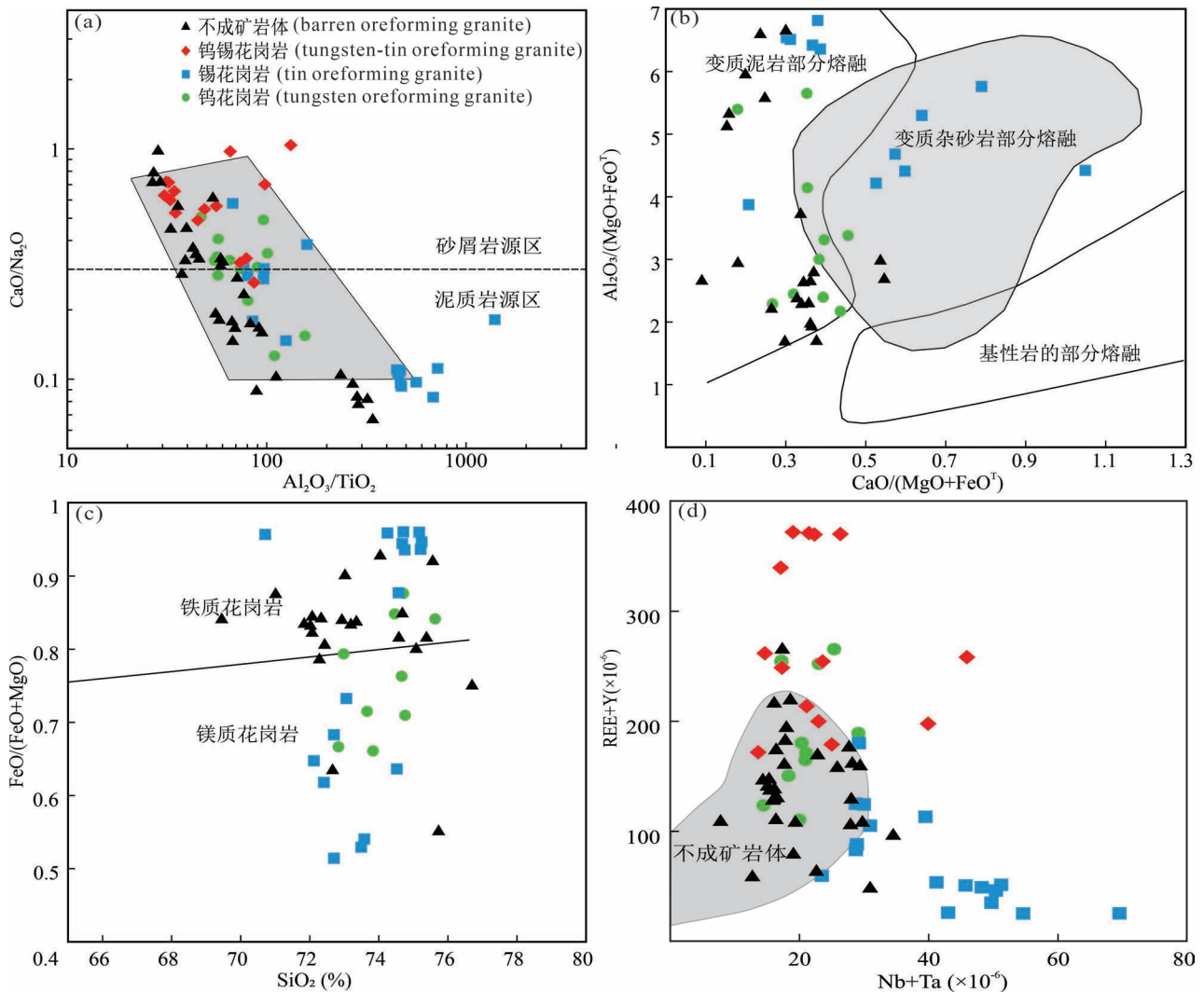


图6 南岭印支期花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解(a);  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})-\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})$ 图解(b);  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ 图解(c);  $(\text{REE}+\text{Y})-(\text{Nb}+\text{Ta})$ 图解(d)

Fig. 6  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  diagram (a);  $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})-\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}})$  diagram (b);  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$  diagram (c);  $(\text{REE}+\text{Y})-(\text{Nb}+\text{Ta})$  diagram (d) of the Indosinian granites in Nanling Mountains area

数据来源见附表1(纸版略,见网络版文末; [www. geojournals. cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev))

Data source see in table S1(Omitted from paper version, see at the end of the online article; [www. geojournals. cn/georev](http://www. geojournals. cn/georev))

岩的  $\varepsilon_{\text{HF}}$  范围为 0.6~ -17.3, 钨花岗岩的  $\varepsilon_{\text{HF}}$  范围为 -5.04~ -11.57(图 5b)。这表明钨花岗岩、锡花岗岩和不成矿岩体的成岩过程中以古老地壳的部分熔融为主,花岗岩源区判别图解(图 6a 和图 6b)显示区内印支期岩体主要源于变质泥岩的部分熔融和少量变质砂岩的部分熔融。前人研究表明钨锡成矿源于相同源区的不同过程的部分熔融,且地幔物质为源岩的部分熔融提供热量(Yuan Shunda et al., 2019)。不成矿岩体主要为镁质花岗岩,钨和锡花岗岩的投点分布在镁质和铁质花岗岩之间(图 6c),

钨和锡花岗岩有更高的 REE+Y 和 Nb+Ta 值(图 6d),因此可以用花岗岩的  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ , REE+Y 和 Nb+Ta 的值来共同区分成矿岩体和不成矿岩体。

## 4 结论

(1) 南岭成矿带在印支碰撞造山运动结束后从挤压构造体制向伸展构造体制转变,加厚的古老地壳部分熔融产生了大量的 S 型过铝质花岗岩并伴随着钨锡多金属成矿作用,花岗岩产出于相似的构造环境和地层。



(2) 源区的预富集、高度的结晶分异、源区沉积岩的成分和熔融温度、岩浆的氧逸度等关键因素决定岩体是否成矿,钨锡成矿的差异可能是同源区不同成分源岩在不同温度下部分熔融导致的。

(3) 结合花岗岩的  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 、 $\text{REE}+\text{Y}$  和  $\text{Nb}+\text{Ta}$  值和  $\text{Rb}-\text{Sr}-\text{Ba}$  图解反映的结晶分异程度以及微量元素蛛网图反映的  $\text{Ti}$  和  $\text{P}$  的强烈亏损可以来区分成矿花岗岩和不成矿花岗岩。

**致谢:**在成文过程中,感谢审稿专家对本文提出的修改意见。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柏道远, 吴能杰, 钟响, 贾朋远, 熊雄, 黄文义. 2016. 湘西南印支期瓦屋塘岩体年代学、成因与构造环境. 大地构造与成矿学, 40(5): 075~1091.

蔡明海, 张文兵, 彭振安, 刘虎, 郭腾飞, 谭泽模, 唐龙飞. 2016. 湘南荷花坪钨多金属矿床成矿年代研究. 岩石学报, 32(7): 2111~2123.

陈迪, 刘珏懿, 王先辉, 杨俊, 马铁球, 罗来. 2017. 湖南五峰仙岩体岩石地球化学、SHRIMP U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征. 地质科技情报, 36(6): 1~12.

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. 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.

程顺波, 付建明, 崔森, 卢友月, 马丽艳, 刘阿睢. 2018. 湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征. 地球科学, 43(7): 2330~2349.

褚杨, 林伟, Michel F, 王清晨. 2015. 华南板块早中生代陆内造山过程——以雪峰山—九岭为例. 岩石学报, 31(8): 2145~2155.

邓渲桐, 曹荆亚, 吴玺虹, 孔华, 奚小双. 2017. 湖南锡田和邓阜仙燕山期花岗岩的源区差异及其意义. 中南大学学报(自然科学版), 48(1): 212~222.

董超阁. 2018. 湖南锡田钨锡矿床和邓阜仙钨矿床成岩成矿年代学及动力学研究. 导师: 梁细荣和梁新权. 广州: 中国科学院大学/中国科学院广州地球化学研究所/博士学位论文: 1~158.

付建明, 伍式崇, 徐德明, 马丽艳, 程顺波, 陈希清. 2009. 湘东锡田钨锡多金属矿床成矿时代的再厘定. 华南地质与矿产, (3): 1~7.

胡瑞忠, 高伟, 付山岭, 苏文超, 彭建堂, 毕献武. 2024. 华南中生代陆内成矿作用. 地学前缘, 31(1): 226~238.

黄文婷, 伍静, 梁华英. 2015. 云头界 W—Mo 矿床高演化花岗岩地球化学及 Hf—Nd 同位素特征研究. 矿物学报, 35(S1): 23.

蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 苏慧敏, 熊索菲, 熊伊曲, 徐耀明, 章伟, 朱律运. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展. 科学通报, 65(33): 3730~3745.

李伟, 刘翠辉, 谭友, 陈伟, 鲁捷, 尹积扬, 陈再威. 2021. 赣南柯树岭岩体锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及成矿作用特征. 地质论评, 67(5): 1309~1320.

李湘玉, 易立文, 陈迪, 文春华, 唐分配, 张晓阳, 安江华, 邓蕾. 2020. 湖南将军庙花岗岩的成因: 岩石化学、锆石 U-Pb 年代学与 Sr—Nd—Hf 同位素制约. 矿物岩石地球化学通报, 39(4): 726~740.

李晓峰, Watannabe Yasushi, 华仁民. 2008. 华南地区中生代 Cu—(Mo)—W—Sn 矿床成矿作用与洋岭/转换断层俯冲. 地质学报, 82(5): 625~640.

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.

林书平, 伍静, 黄文婷, 张健, 陈喜连, 梁华英. 2017. 桂东北苗儿山—越城岭东北部界牌钨—铜矿区成矿岩体锆石 U-Pb 年龄及华南加里东期成矿分析. 大地构造与成矿学, 41(6): 1116~1127.

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—上犹矿区不同类型含矿石英中白云母<sup>(40)</sup>Ar<sup>(39)</sup>Ar 年龄及其地质意义. 地质学报, 82(7): 932~940.

刘伟, 曾佐勋, 陈德立, 贺赤诚, 莫皓然, 曾志方, 魏运许, 徐大良. 2014. 明山复式花岗岩的岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素约束. 岩石学报, 30(5): 1485~1504.

马鑫, 汪相. 2023. 华南印支期花岗岩成因再探——以湘西紫云山和桂东北石板弯复式花岗岩岩体为例. 地质论评, 69(6): 2047~2081.

毛景文, 宋世伟, 刘鹏, 刘敏, 赵盼捞, 袁顺达. 2023. 锡矿床研究现状及发展趋势. 岩石学报, 39(5): 1233~1240.

毛景文, 吴胜华, 宋世伟, 戴盼, 谢桂青, 苏蔷薇, 刘鹏, 王先广, 余忠珍, 陈祥云, 唐维新. 2020. 江南世界级钨矿带: 地质特征、成矿规律和矿床模型. 科学通报, 65(33): 3746~3762.

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, 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.

毛景文, 宋世伟, 刘鹏, 刘敏, 赵盼捞, 袁顺达. 2023. 锡矿床研究现状及发展趋势. 岩石学报, 39(5): 1233~1240.

毛景文, 吴胜华, 宋世伟, 戴盼, 谢桂青, 苏蔷薇, 刘鹏, 王先广, 余忠珍, 陈祥云, 唐维新. 2020. 江南世界级钨矿带: 地质特征、成矿规律和矿床模型. 科学通报, 65(33): 3746~3762.

舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035~1053.

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.

秦锦华, 王登红, 王岩, 黄凡, 赵芝, 郭志强, 赵晨辉, 赵云彪. 2024. 南岭成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿建议——《中国矿产地质志·南岭卷》研编. 地质论评, 70(3): 839~860.

覃宗光, 邓贵安, 董业才, 吴开华, 林德松. 2011. 栗木矿田鱼菜花岗岩型钨锡矿床. 矿产与地质, 25(1): 1~8.

汪相. 2023. 关于南岭花岗岩及其成矿作用问题的思考——与吴福元教授等商榷. 地质论评, 69(6): 2023~2031.

汪相, 楼法生. 2022a. 论岩浆热液矿床的成矿期——以南岭地区燕山期钨矿为例. 地质论评, 68(2): 507~530.

- 汪相. 2022b. 中国东南部黄山运动及其花岗质岩浆活动与成矿作用. 地质论评, 68(5): 1677~1728.
- 王登红, 陈毓川, 江彪, 黄凡, 王岩, 李华芹, 侯可军. 2020. 中国三叠纪大陆成矿体系, 地学前缘, 27(2): 45~59.
- 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, 赵正, 刘善宝, 郭娜欣, 梁婷, 陈伟, 周新鹏. 2016. 南岭东段九龙脑矿田成矿规律与找矿方向. 地质学报, 90(9): 2399~2411.
- 王登红, 陈毓川, 江彪, 黄凡, 王岩, 李华芹, 侯可军. 2020. 中国三叠纪大陆成矿体系, 地学前缘, 27(2): 45~59.
- 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.
- 王川, 彭建堂, 徐接标, 周杰华, 胡阿香, 陈宪佳. 2021. 湘中白马山复式岩体成因及其成矿效应. 岩石学报, 37(3): 805~829.
- 王岩, 王登红, 秦锦华, 黎华, 陈郑辉, 郭娜欣, 黄凡. 2024. 《南岭成矿带成矿规律图》研编创新点及其找矿意义. 地质论评, 70(3): 861~873.
- 温程明, 赵盼捞, 袁顺达. 2023. 岩浆性质对个旧超大型锡矿区不同花岗岩成矿潜力差异的控制. 岩石学报, 39(6): 1817~1828.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 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. 中国科学:地球科学, 47(7): 745~765.
- 吴福元, 郭春丽, 胡方洪, 刘小驰, 赵俊兴, 李晓峰, 秦克章. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿. 岩石学报, 39(1): 1~36.
- 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.
- 谢桂青, 毛景文, 张长青, 李伟, 宋世伟, 章荣清. 2021. 华南地区三叠纪矿床地质特征、成矿规律和矿床模型. 地学前缘, 28(3): 252~270.
- 徐德明, 付建明, 陈希清, 程顺波, 马丽艳, 张颀, 黄皓. 2017. 都庞岭环斑花岗岩的形成时代、成因及其地质意义. 大地构造与成矿学, 41(3): 561~576.
- 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 徐亚东. 2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景. 地球科学, 46(04): 1133~1150.
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 舒良树, 王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(03): 573~593.
- 杨文采. 2023. 长江中下游构造带成因与燕山期的大洋俯冲. 地质论评, 69(5): 1619~1627.
- 杨文采. 2018. 扬子区地壳密度扰动成像和华南燕山期花岗岩成因. 地质论评, 64(5): 1045~1054.
- 颜丹平, 邱亮, 陈峰, 李林, 赵磊, 杨文心, 张翼西. 2018. 华南地块雪峰山中生代板内造山带构造样式及其形成机制. 地学前缘, 25(1): 1~13.
- 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. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 736~749.
- 袁顺达, 赵盼捞. 2021. 基于新的合成流体包裹体方法对成矿金属在熔体—流体相间分配行为的实验研究. 中国科学:地球科学, 51(2): 241~249.
- 袁顺达, 赵盼捞, 刘敏. 2020. 与花岗岩有关锡矿成岩成矿作用研究若干问题讨论. 矿床地质, 39(4): 607~618.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234~247.
- 章荣清. 2014. 湘南含钨和含锡花岗岩成因与成矿作用: 以王仙岭和新田岭为例. 导师: 陆建军和 Bernd Lehman. 南京: 南京大学/硕士学位论文(申请博士学位): 1~193.
- 章荣清, 陆建军, 王汝成, 姚远, 丁腾, 胡加斌, 张怀峰. 2016. 湘南王仙岭地区中生代含钨与含锡花岗岩的岩石成因及其成矿差异机制. 地球化学, 45(2): 105~132.
- 赵葵东, 蒋少涌. 2022. 世界著名的华南钨锡成矿省是如何形成的? 地球科学, 47(10): 3882~3884.
- 郑佳浩, 郭春丽. 2012. 湘南王仙岭花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 75~90.
- 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.
- Bai Daoyuan, Wu Nengjie, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, Xiong Xiong, Huang Wenyi. 2016&. Geochronology and petrogenesis of Wawutang pluton in Southwestern Hunan and its tectonic setting during Indosinian period. Geotectonica et Metallogenia, 40(5): 1075~1091.
- Cai Minghai, Zhang Wenbing, Peng Zhenan, Liu Hu, Guo Tengfei, Tan Zemo, Tang Longfei. 2016&. Geochronology of the Hehuaping tin—polymetallic deposit in Southern Hunan Province. Acta Petrologica Sinica, 32(7): 2111~2123.
- Chen Di, LiuJueyi, Wang Xianhui, Yang Jun, Ma Tieqiu, Luo Lai. 2017&. The Petrogeochemistry, SHRIMP Zircon U-Pb Age, and Hf Isotope Character of Wufengxian Pluton in Hunan Province. Geological Science and Technology Information, 36(6): 1~12.
- 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. Geological Journal of China Universities, 14(4): 459~473.
- Chen Jun, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Lu Jianjun, Ma Dongsheng. 2014&. Multiple-aged granitoids and related tungsten—tin mineralization in the Nanling Range, South China. Science China Earth Sciences, 44(1): 111~121.
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Cui Sen, Lu Youyue, Ma Liyan, Liu A'sui. 2018&. Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry of the Indonesian Granitic Rocks from Northern Yuechengling Batholith in Guangxi—Hunan Junction. Earth Science, 43(7): 2330~2349.
- Chu Yang, Lin Wei, FAURE Michel, Wang Qingchen. 2015&. Early Mesozoic intracontinental orogeny: Example of the Xuefengshan—Jiuling Belt. Acta Petrologica Sinica, 31(8): 2145~2155.
- Deng Xuantong, Cao Jingya, Wu Jianhong, Kong Hua, Xi Xiaoshuang. 2017&. Difference of sources of the Yanshanian Xitian and Dengfuxian granites in Hunan Province and their implication. Journal of Central South University, 48(1): 212~222.
- Dong Chaoge. 2018. Supervisor: Liang Xirong and Liang Xinquan. Studies on granitic and metallogenic chronology and geodynamics of the Xitian tin—tungsten and Dengfuxian tungsten deposits, Hunan province. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences/Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences/Doctoral dissertation: 1~158.
- Fu Jianming, Wu Shichong, Xu Deming, Ma Liyan, Cheng Shunbo, Chen Xiqing. 2009&. Reconstraint from Zircon SHRIMP U-Pb Dating on the Age of Magma Intrusion and Mineralization in Xitian

- Tungsten—tin Polymetallic Orefield, Eastern Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2009(3): 1~7.
- Hu Ruizhong, Gao Wei, Fu Shanling, Su Wenchao, Peng Jiantang, Bi Xianwu. 2024#. Mesozoic intraplate metallogenesis in South China. *Earth Science Frontiers*, 31(1): 226~238.
- Huang Wenting, Wu Jin, Liang Huaying. 2015#. Geochemistry and Hf—Nd isotopic characteristics of the highly evolved granites in the Yuntou W—Mo deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 23.
- Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Hai, Su Huimin, Xiong Suofei, Xiong Yiqu, Xu Yaoming, Zhang Wei, Zhu Liyun. 2020#. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposits in China: An overview. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3730~3745.
- Lehmann B. 2021. Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, 105756.
- Lehmann B. 1990. *Metallogeny of Tin*. Springer—Verlag.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 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 Wei, Liu Cuihui, Tan You, Chen Wei, Lu Jie, Yin Jiyang, Chen Zaiwei. 2021#. Zircon U—Pb age, petro-geochemical and mineralization characteristics of Keshuling granites in southern Jiangxi Province. *Geological Review*, 67(5): 1309~1320.
- Li Xiaofeng, Watanabe Yasushi, Hua Renmin, Mao Jingwen. 2008#. Mesozoic Cu—Mo—W—Sn Mineralization and Ridge/Triple Subduction in South China. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 625~640.
- Li Xiangyu, Yi Liwen, Chen Di, Wen Chunhua, Tang Fenpei, Zhang Xiaoyang, An Jianghua, Deng Lei. 2020#. Petrogenesis of the Jiangjunmiao Granitic Pluton in Hunan Province: Constraints from Petrochemistry, Zircon U—Pb Dating, and Sr—Nd—Hf Isotopes. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 39(4): 726~740.
- Li Xiaofeng, Feng Zuohai, Xiao Rong, Song Cian, Yang Feng, Wang Cuiyun, Kang Zhiqiang, Mao Wei. 2012#. Spatial and Temporal Distributions and the Geological Setting of the W—Sn—Mo—Nb—Ta Deposits at the Northeast Guangxi, South China. *Acta Geologica Sinica*, 86(11): 1713~1725.
- Liang Xinquan, Li Xianhua, Qiu Yuanxi, Yang Dongsheng. 2005#. Indosinian collisional orogeny: Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan Basin, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 99~112.
- Lin Shuping, Wu Jing, HuangWenting, Zou Yinqiao, Zhang Jian, Liang Huaying. 2017#. Zircon U—Pb Ages of Ore-bearing Intrusions in Jiepai W—Cu Deposit Northeastern Guangxi and Implication on Caledonian Mineralization in South China. *Geotectonica et Metallogeniad*, 41(6): 1116~1127.
- Liu Shanbao, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Li Jiankang, Ying Lijuan, Xu Jianxiang, Zeng Zailin. 2008#.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ages of Muscovite from Different Types Tungsten-Bearing Quartz Veins in the Chong-Yu-You Concentrated Mineral Area in Gannan Region and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 932~940.
- Liu Lei, Xu Guofeng, Lu Youyue, Fu Jianming, Sun Lin, Chen Xiaoyong, Zhang Yunfei, Cheng Shunbo, Zhang Chuangye, Chen Qiaoyun, Huang Ming, Zhang Zunzun, Hu Tianyang, Zhang Kun. 2023. Muscovite  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and cassiterite U—Pb dating of the Indosinian Aotou quartz-vein type tin deposit, southern China and its geological significance. *Ore Geology Reviews*, (158): 105516.
- Liu Xiangchong, Yu Pingping, Xiao Changhao. 2023. Tin transport and cassiterite precipitation from hydrothermal fluids. *Geoscience Frontiers*, 14(6): 101624.
- Liu Wei, Zeng Zuoxun, Chen Deli, He Chicheng, Mo Haoran, Zeng Zhifang, Wei Yunxu, Xu Daliang. 2014#. Petrogenesis of the Yangmingshan composite granites in South Hunan Province: Constraints from geochemistry, zircon U—Pb geochronology and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1485~1504.
- Ma Xin, Wang Xiang. 2023. Re-exploration of Indosinian granites in South China—A case study from the Ziyunshan granitic complex in western Hunan and the Shibawan complex granites in northeastern Guangxi. *Geological Review*, 69(6): 2047~2081.
- Mao Jingwen, Song Shiwei, Liu Peng, Liu Min, Zhao Panlao, Yuan Shunda. 2023#. Current progress and development trend of the research on tin deposits. *Acta Geologica Sinica*, 39(5): 1233~1240.
- Mao Jingwen, Wu Shenghua, Song Shiwei, Dai Pan, Xie Guiqing, Su Qiangwei, Liu Peng, Wang Xianguang, Yu Zhongzhen, Chen Xiangyun, Tang Weixin. 2020#. The world-class Jiangnan tungsten belt: Geological characteristics, metallogeny, and ore deposit model. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3746~3762.
- Mao Jingwen, Xie Guqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007#. Large-scale tungsten—tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329~2338.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Yuan Shunda, Cheng Yanbo, Chen Yuchuan. 2008#. Spatial—Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510~526.
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Feng Chengyou, Wang Yitian, Zhang Changqing, Peng Huijuan, Yu Miao. 2012#. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting. *Geology in China*, 39(6): 1437~1471.
- Shu Liangshu. 2012#. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035~1053.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi. 2006#. Principal Geological Features of Nanling Tectonic Belt, South China. *Geological Review*, 52(2): 251~265.
- Song Shiwei, Mao Jingwen, Yuan Shunda, Jian Wei. 2022. Decoupling of Sn and W mineralization in a highly fractionated reduced granitic magma province: a case study from the Youjiang basin and Jiangnan tungsten belt. *Mineralium Deposita*, 57(07): 1251~1267.
- Sun, Mc Donough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Qin Jinhua, Wang Denghong, Wang Yan, Huang Fan, Zhao Zhi, Guo Zhiqiang, Zhao Chenhui, Zhao Yunbiao. 2024#. The metallogenic regularities, century exploration achievement, and suggestions of new round of prospecting in Nanling Metallogenic Belt—Compilation of Mineral Geology of China · Nanling Volume. *Geological Review*, 70(3): 839~860.
- Qin Zongguang, Deng Guian, Dong Yecai, Wu Kaihua, Lin Desong. 2021#. Petrogenesis and metallogenic effect of the Baimashan granitic complex in central Hunan, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 805~829.

- Wang Xiang. 2023&. Thoughts on granite and its mineralization in Nanling Range —A discussion with Prof. Wu Fuyuan et al. *Geological Review*, 69(6): 2023~2031.
- Wang Xiang, Lou Fasheng. 2022a&. On the ore-forming period of magmatic—hydrothermal deposits—A case study of the Yanshanian tungsten deposits in the Nanling Range. *Geological Review*, 68(2): 507~530.
- Wang Xiang. 2022b&. Huangshan Movement in SE China and its granitic magmatism and mineralization. *Geological Review*, 68(5): 1677~1728.
- Wang Chuan, Peng Jiantang, Xu Jiebiao, Yang Jiehua, Hu Axing, Chen Xianjia. 2021&. Petrogenesis and metallogenic effect of the Baimashan granitic complex in central Hunan, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 805~829.
- Wang Yan, Wang Denghong, Qin Jinhua, Li Hua, Chen Zhenghui, Guo Naxin, Huang Fan. 2024&. Innovative points and their prospecting significance of Metallogenic Regularity Map of Nanling Metallogenic Belt. *Geological Review*, 70(3): 861~873.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Jiang Biao, Huang Fan, Wang Yan, Li Huaqin, Hou Kejun. 2020&. Preliminary study on the Triassic continental mineralization system in China. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 45~59.
- Wang Denghong, Chen Zhenyu, Huang Fan, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Chen Zhenghui, Zhao Zheng, Liu Xinxiang. 2014&. Discussion on Metallogenic Specialization of the Magmatic Rocks and Related Issues in the Nanling Region. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 230~238.
- Wang Denghong, Zhao Zheng, Liu Shanbao, Guo Naxin, Liang Ting, Chen Wei, Zhou Xinpeng. 2016&. Patterns of Metallogenesis of Jiulongnao Orefield in the East Section of the Nanling Region and Direction for Prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2399~2411.
- Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Zhang Wen'an, Xie Lei, Yu A'peng, Che Xudong. 2008&. Ore-Forming Mineralogy of W—Sn Granites in the Nanling Range: Concept and Case Study. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 485~495.
- Wen Chengming, Zhao Panlao, Yuan Shunda. 2023&. Magmatic control on the contrasting Sn fertility of different granite plutons in the giant Gejiu orefield. *Acta Petrologica Sinica*, 39(6): 1817~1828.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017&. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Scientia Sinica (Terrae)*, 47(7): 745~765.
- Wu Fuyuan, Guo Chunli, Hu Fangyang, Liu Xiaochi, Zhao Junxing, Li Xiaofeng, Qin Kezhang. 2023&. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1~36.
- Wu Jing, Liang Huaying, Huang Wenting, Wang Chunlong, Sun Weidong, Sun Yali, Li Jing, Mo Jihai, Wang Xiuzhang. 2012&. Isotopic age of rock mass and ore deposits in western Miaoershan—Yuechenglingnan in northeast Gui and metallogenic analysis of Indochinese period in South China. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1126~1136.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Zhang Changqing, Li Wei, Song Shiwei, Zhang Rongqing. 2021&. Triassic deposits in South China: Geological characteristics, ore-forming mechanism and ore deposit model. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 252~270.
- Xu Deming, Fu Jianming, Chen Xiqing, Cheng Shunbo, Ma Liyan, Zhang Kun, Huang Hao. 2017&. Formation Age and Petrogenesis of the Dupangling Rapakivi Granites and its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(3): 561~576.
- Xu Xianbing, Liang Chenghua, Chen Jiayu, Xu Yadong. 2021&. Fundamental Geological Features and Metallogenic Geological Backgrounds of Nanling Tectonic Belt. *Earth Science*, 46(4): 1133~1150.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009&. Early Mesozoic geotectonic processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573~593.
- Yang Wencai. 2023&. Origin of the Mid—Lower-Yangtze tectonic belt and Yanshanian ocean subduction. *Geological Review*, 69(5): 1619~1627.
- Yang Wencai. 2018&. Crustal Density Imaging of Yangtze Craton and Formation of the Yanshanian Granitites in South China. *Geological Review*, 64(5): 1045~1054.
- Yan Danping, Qiu Liang, Chen Feng, Li Lin, Zhao Lei, Yang Wenxin, Zhang Yixi. 2018&. Structural style and kinematics of the Mesozoic Xuefengshan intraplate orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 1~13.
- 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. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 736~749.
- Yuan Shunda, Williams J A E, Mao Jingwen, Zhao Panlao, Yan Chen, Zhang Dongliang. 2018. The origin of the Zhangjialong tungsten deposit, south China: Implications for W—Sn mineralization in large granite batholiths. *Economic Geology*, 113(5): 1193~1208.
- Yuan Shunda, Williams-Jones A E, Romer R L, Zhao Panlao, Mao Jinwen. 2019. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn—W metallogenic province: Insights from the Nanling region, China. *Economic Geology*, 114(5): 1005~1012.
- Yuan Shunda, Zhao Panlao. 2021&. New synthetic fluid inclusion method to investigate partition behavior of ore metals between melt and fluid phases. *Scientia Sinica Terrae*, 51(2): 241~249.
- Yuan Shunda, Zhao Panlao, Liu Min. 2020&. Some problems involving in petrogenesis and metallogenesis of granite-related tin deposits. *Mineral Deposits*, 39(4): 607~618.
- Yu Yang, Huang Xiaolong, Roberto F. Weinberg, Sun Min, He Pengli, Zhang Le. 2024. Melting and melt segregation processes controlling granitic melt composition. *American Mineralogist*, 109(1): 35~50.
- Zhang Rongqing. 2014. Petrogenesis and Metallogeny of the W- and Sn-bearing Granites in Southern Hunan Province: Case Study from Wang xianling and Xintianling. Nanjing: Nanjing University/ Master dissertation (PhD. Candidate): 1~193.
- Zhang Rongqing, Lu Jianjun, Wang Rucheng, Yao Yuan, Ding Teng, Hu Jiabin, Zhang, Huafeng. 2016&. Petrogenesis of W- and Sn-bearing granites and the mechanism of their metallogenic diversity in the Wangxianling area, southern Hunan Province. *Geochimica*, 45(2): 105~132.
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong. 2022#. How was the World famous South China Tungsten—Tin Metallogenic Province formed? *Earth Science*, 47(10): 3882~3884.
- Zheng Jiahao, Guo Chunli. 2012&. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Wangxianling granitic intrusion in South Hunan Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 75~90.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, Shu Liangshu. 2009&.

Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234~247.

Zhang Zhiyu, Hou Zengqian, Lü Qingtian, Zhang Xiaowei, Pan Xiaofei, Fan Xianke, Zhang Yongqian, Wang Chenguang, Lü Yongjun. 2023. Crustal architectural controls on critical metal ore systems in South China based on Hf isotopic mapping. *Geology*, 51(8): 738~742.

Zhao Panlao, Xu Chuxu, Williams J A E, Mao Jinwen, Yuan Shunda. 2022a. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W—Sn metallogenic provinces. *Geology*, 50(1): 121~125.

Zhao Panlao, Yuan Shunda, Williams-Jones A E, Romer R L, Chen Yan, Song Shiwei, Mao Jinwen. 2022b. Temporal separation of W and Sn mineralization by temperature-controlled incongruent melting of a single protolith: Evidence from the Wangxianling area, Nanling region, South China. *Economic Geology*, 117(3): 667~682.

Zhao Panlao, Zajacz Z, Tsay A, Yuan Shunda. 2022c. Magmatic—hydrothermal tin deposits form in response to efficient tin extraction upon magma degassing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316: 331~346.

Zou Xianwu, Cui Sen, Qu Wenjun, Bai Yunshan, Chen Xiqing. 2009. Re-Os isotope dating of the Liguifu tungsten—tin polymetallic deposit in Dupangling area, Guangxi. *Geology in China*, 36(4): 837~844.

## Research progress on the relationship between Indosinian granite and tungsten—tin mineralization in Nanling metallogenic belt

ZHANG Yunfei<sup>1, 2)</sup>, XU Guofeng<sup>1, 2)</sup>, XU Xianbing<sup>3)</sup>, LIU Lei<sup>1, 2)</sup>

1) *Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education in Central South University, Changsha, 410083;*

2) *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, 410083;*

3) *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, 430074*

**Abstract:** The large-scale mineralization occurring in South China block far away from active continental margins during the Mesozoic. It formed two distinct metallogenic provinces: the eastern tungsten—tin high-temperature metallogenic province and the western gold—antimony—lead—zinc low-temperature metallogenic province, establishing globally significant metallogenic regions. The Nanling metallogenic belt in central South China block, is one of the most densely distribution regions of tungsten—tin polymetallic deposits in this world. The Nanling metallogenic belt has developed mineralized granites related to tungsten—tin deposits during Caledonian, Indosinian and Yanshanian periods. During the Indosinian period, the metallogenic activity in the region was obviously weaker compared with the Yanshanian period, and research on Indosinian period rocks in Nanling area is relatively lagging behind. This article compares the geochemical features between Indosinian tungsten—tin granites and barren oreforming granites in Nanling. By integrating previous research findings, it is found that high crystallized differentiation, low magnesium iron content, high REE+Y, Nb+Ta values, and mightily depletion of Ti and P.

**Keywords:** Nanling metallogenic belt; Indosinian movement; highly fractionated granite; magmatic hydrothermal deposit

**Acknowledgements:** This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41972198)

**First author:** ZHANG Yunfei, male, born in 2000, master student, is majoring in geochemistry of ore deposit; Email: Yunfei2021752724@outlook.com

**Corresponding author:** LIU Lei, male, born in 1984, associate professor, is mainly engaged in mineral deposit science and geochemistry; Email: liu01@ustc.edu.cn

**Manuscript** received on: 2024-01-06; Accepted on: 2024-06-15; Published online on: 2024-07-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2024.07.015

**Edited by:** ZHANG Yuxu