

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2024.44.026

华南印支期成钨与成锡（锡钨）花岗岩对比研究

岳晨曦^{1,2}, 潘力川^{1*}, 刘亮¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了揭示华南印支期与钨锡成矿相关花岗岩的成因和岩浆特征, 本文统计分析华南印支期成钨与成锡(锡钨)花岗岩的地球化学数据。研究结果表明, 华南地区印支期钨锡成矿花岗岩均属于高分异的过铝质高钾亚碱性系列, 主要为S型花岗岩, 部分I/A型。成矿花岗岩的源区主要为富泥质/黏土的壳源, 成钨花岗岩和成锡(锡钨)花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均高于华南地壳平均值, 表明其部分受到幔源物质的影响。成钨花岗岩相比成锡(锡钨)花岗岩具有更低的二阶段模式年龄, 表明成钨花岗岩源区为更年轻的地壳或可能受到更多的幔源物质的影响。与成钨花岗岩相比, 成锡(锡钨)花岗岩为较还原的钛铁矿系列花岗岩, 表明低氧逸度岩浆可能有利于锡的富集成矿。成钨花岗岩的锆饱和温度低于成锡(锡钨)花岗岩, 这可能是由于钨锡富集源区熔融温度差异造成, 这同时也解释了华南印支期钨锡矿分别以钨多金属矿和锡(锡钨)多金属矿在不同区域出现的现象。

关键词: 华南; 印支期; 钨锡花岗岩

中图分类号: P619.22+2 **文献标志码:** A

第一作者: 岳晨曦, 男, 1999年生, 硕士研究生, 从事钨锡矿研究. E-mail: yuechenxi@mail.gyig.ac.cn

A comparative study of the Indosinian W- and Sn (Sn-W)-bearing granites in South China

YUE Chengxi^{1,2}, PAN Lichuan^{1*}, LIU Liang¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reveal the genesis and magmatic natures of Indosinian granites associated with the W and Sn mineralization in South China, a series of geochemical data of the Indosinian W and Sn (Sn-W) mineralization associated granites in South China were collected and statistically analyzed in this paper. The results show that those Indosinian granites all belong to the highly differentiated high-K peraluminous subalkaline series and they are mainly S-type granites with minor I/A-type granites. The ore-forming granites were mainly sourced from the crust composed of argillaceous/clayey metamorphite. The $\epsilon_{Nd}(t)$ values of the W- and Sn-bearing granites are higher than that of the South China crust, indicating that their magmatic sources could be influenced partly by the mantle materials. The W-bearing granites have relatively young T_{2DM} ages comparing with the Sn(Sn-W)-bearing granites, indicating that the source of W-bearing granites could be relatively young crust or could be influenced by more mantle materials. Moreover, comparing to the W-bearing granite, the Sn(Sn-W)-bearing granite belongs to the relatively reduced ilmenite series granite, indicating that the magma with relatively low oxygen fugacity could be conducive to the Sn enrichment and mineralization. The W-bearing granites have lower zircon saturation temperatures than the Sn(Sn-W)-bearing granites. This may be caused by the difference between melting temperatures of source materials with respectively enriched Sn and W. This also explains why Indosinian W and Sn deposits in South China occurred as respective W polymetallic deposits and Sn (Sn-W) polymetallic deposits distributed in different districts of South China.

收稿日期: 2023-07-05

基金项目: 贵州省基础研究计划(科学技术基金)(黔科合基础-ZK[2021]一般 211)

*通信作者, E-mail: panlichuan@mail.gyig.ac.cn

Keywords: South China; Indosinian; W- and Sn-bearing granite

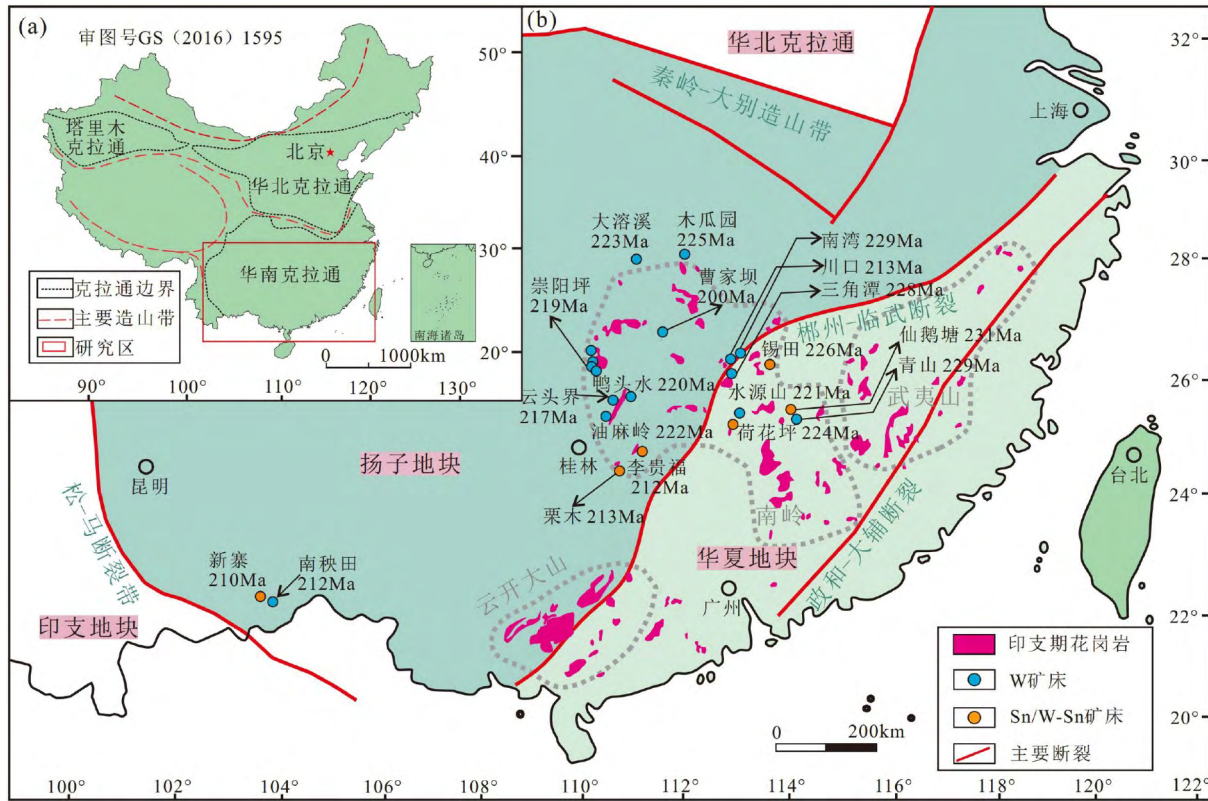
钨、锡是我国重要的战略性矿产资源,被广泛应用于清洁能源、航空航天、信息产业等重要领域。钨锡矿床属于典型的高温岩浆热液矿床,其形成主要经历了从岩浆源区部分熔融形成花岗质岩浆、岩浆演化到晚期析出热液流体、成矿物质随流体迁移并沉淀等复杂成矿过程^[1]。目前,前人针对钨锡成矿机制的研究已获得大量成果,比如针对成矿花岗岩中钨、锡高度富集的现象^[2,3],Romer等^[4-6]认为是花岗岩源区富集钨、锡导致的,源区可能经历了风化、沉积、成岩/构造等复杂的地质过程导致钨、锡的富集;而Lehmann^[1]则认为源区钨、锡的富集并不是成矿的必需条件,岩浆的高度分异演化才是富集的关键,这是因为钨、锡在酸性岩浆中为不相容元素,岩浆分异程度的增加,将会导致钨、锡在残余熔体中含量增高,从而有利于热液成矿。最近,Lehmann^[1]系统总结了锡成矿的机制,提出岩浆具有较低的氧逸度,并经历高度分异是锡成矿的重要前提。Che等^[7]实验表明,钨在岩浆中的溶解度受助溶剂和温度的影响大,而与氟、氯和氧逸度等几乎无关;相反,锡在岩浆中的溶解度受氧化还原条件的影响大^[8]。此外,花岗岩熔融温度的差异也被认为可能是钨、锡差异性成矿的关键因素^[9-12]。

华南地区是我国钨、锡重要成矿区,承载了世界54%以上的钨、锡储量^[12]。尽管华南钨、锡大规模成矿集中在燕山期,但是印支期的成矿规模同样不容小觑,对印支期钨锡矿开展详细的成矿机制研究,有利于华南印支期进一步的找矿勘查工作。华南地区的印支期钨锡矿床主要分布在桂北、湘东南、赣南、闽西等地^[13,14]。目前,关于该时期钨锡矿前人已经做了大量的成岩成矿年龄、岩石主微量元素、同位素、矿物地球化学等工作,取得了如下认识:1)成矿类型主要以石英脉型、矽卡岩型和云英岩型为主,成岩成矿年代接近,集中在230~210 Ma^[15-39];2)成岩成矿时代滞后印支运动主碰撞期,形成背景为后碰撞伸展环境,地球动力学背景与东特提斯洋演化有关^[40-45];3)同一矿床存在多期次的岩浆活动,岩体多为复式岩体,且花岗岩中W-Sn含量明显高于平均值^[19,20,46-49]。但是大部分研究都局限于一个独立的矿床或岩体,或是将钨锡花岗岩作为整体笼统研究,缺乏对整个华南印支期成钨与成锡(锡钨)矿花岗岩的系统对比研究,对这些花岗岩的性质缺乏系统的讨论。针对上述问题,本文通过收集华南印支期一些典型钨锡成矿花岗岩的地球化学数据,讨论这些花岗岩的源区性质与岩浆条件,初步揭示花岗质岩浆控制钨锡成矿的关键机制。

1 华南印支期花岗岩与钨锡矿分布

华南地区北隔秦岭-大别造山带和华北块体相望,西以龙门山-横断山断裂与特提斯构造域青藏高原相连,南西侧以昌宁-马江断裂与东南亚块体接触,南东侧为西太平洋构造区^[36](图1a)。华南地区由扬子、华夏地块在新元古代碰撞拼贴而成^[50],在中生代再次活化^[51]。其中华夏地块由前寒武系基底、古生界-三叠系碎屑岩-碳酸盐岩盖层和晚中生代大陆碎屑岩和火山岩组成;扬子地块除了由前寒武系基底和古生界-三叠系碎屑岩-碳酸盐岩盖层组成外,还有大面积的晚二叠世峨眉山玄武岩,三叠系由下而上包括裂陷带火山-沉积建造、弧后复理石建造和克拉通内陆相碎屑岩建造,代表了印支运动^[52]。

中生代是华南陆内大规模成岩成矿的集中爆发时期,主要分为印支期和燕山期两个阶段的成岩成矿,形成了著名的南岭地区钨-锡-铋-钼-钨等多金属成矿带^[40,42,44,45]。华南地区印支期的花岗岩主要集中在广西壮族自治区、湖南省、江西省、福建省等地(图1b),这些岩体大多是多期次复式岩体的一部分^[41]。与印支期成钨锡矿有关的岩体有桂东北的苗儿山-越城岭岩体,该岩体为加里东期、印支期和燕山期岩体的复合,其中加里东期与印支期花岗岩与成矿关系密切。印支期成矿有



a. 研究区大地构造位置简图; b. 花岗岩与矿床位置分布图

图1 华南印支期花岗岩与钨锡矿点分布简图 (据文献[13,14,40,41,66]改编)

Fig. 1. The distribution of Indosinian granites and tin-tungsten deposits (occurrences) in South China (modified from references [13,14,40,41,66])

关的岩体为中-细粒二云母花岗岩[21,23,46,47]。广西壮族自治区桂林市的都庞岭岩体, 为加里东期、印支期和燕山期复式岩体, 与印支期成矿相关的岩体为细粒似斑状二云母二长花岗岩[15,26]。广西栗木岩体, 该岩体为印支期同源、同期、不同阶段的复式岩体, 可以分为3幕, 其中与成矿相关的是第2、3幕。与成矿有关的岩体分布在泡水岭、牛栏岭、香檀岭、金竹源、水溪庙、老虎头等地, 岩石类型为中-细粒斑状锂铁白云母花岗岩和中-细粒锂云母钠长石花岗岩[20,23,53,54]。湖南川口岩体, 岩石类型为斑状黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩[28,29,33,55]。湖南省西部的崇阳坪-瓦屋塘岩体, 该岩体岩性组成主要为黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩[34,39]。湖南省东北部的三仙坝岩体, 该岩体为一花岗斑岩体, 斑晶主要为石英和斜长石, 基质为长英质矿物[30]。湖南省西部的大神山岩体, 该岩体以中-细粒黑云母二长花岗岩为主[37,56]。湖南王仙岭岩体, 该岩体为多期次侵位的复式岩体, 主体为印支期岩体, 燕山期岩体主要为隐伏岩体。与印支期成矿有关的岩体类型为中-粗粒含电气石黑云母花岗岩[18,19,49,57-59]。湖南省东部的锡田岩体, 该岩体为印支-燕山两期的复式岩体, 其中印支期成矿相关岩体为中细粒斑状黑云母二长花岗岩[22,60]。江西省赣州市的柯树岭-仙鹅塘岩体, 该岩体岩性为中-细粒斑状二云母花岗岩[25,61,62]。

尽管华南印支期花岗岩分布比较广泛, 但是目前发现的大部分岩体并不成矿[41]。已经证实的印支期钨锡矿有广西云头界石英脉型钨钼矿床, 矿石矿物为黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿[17,24]; 广西高岭(油麻岭)石英脉型-矽卡岩型钨钼矿床, 主要成矿矿物有黑钨矿、白钨矿、黄铁矿、辉钼矿、辉铋矿等[21,23,46,47,63]; 广西鸭头水矽卡岩型钨矿, 矿石矿物主要为白钨矿、黑钨矿、磁黄铁矿[64]; 广西李贵福石英脉-云英岩型钨钼矿, 成矿矿物由黄铜矿、黄铁矿、锡石、辉

钼矿、黑钨矿、白钨矿、闪锌矿等组成^[23,26]；广西栗木锡钨多金属矿床，矿床类型有钨锡石英脉型、钨锡长石石英脉型、花岗伟晶岩脉型锡铌钽型和含锡铌钽花岗岩型，成矿矿物有黑钨矿、锡石、白钨矿、黝锡矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿、铌钽铁矿、锂铁云母等^[20,23,53,54]；湖南崇阳坪石英脉型钨多金属矿床，成矿矿物有黑钨矿、白钨矿、黄铁矿等^[34]；湖南东北部的木瓜园石英脉型钨矿床，成矿矿物有白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、自然金等，该矿床成矿过程与花岗斑岩密切相关^[30]；湖南荷花坪石英脉-矽卡岩型锡多金属矿床，成矿矿物有锡石、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、毒砂、闪锌矿等^[18,19,36,59]；江西青山锡钨多金属矿床，主要成矿矿物有黑钨矿、锡石、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、辉钼矿等^[32]；湖南锡田矽卡岩型钨锡多金属矿床，矿石矿物由白钨矿、黑钨矿、锡石、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、毒砂、磁铁矿、辉钼矿、辉铋矿等组成^[16,22,35,65]；湖南东北部的大溶溪钨多金属矿，矿石矿物有白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂、黄铁矿等^[37]；湖南水源山钨多金属矿床，成矿矿物由黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿等组成^[36]；湖南川口钨多金属矿床，矿石矿物有黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿等^[38]；湖南东部三角潭钨矿，该矿床矿石矿物以黑钨矿、白钨矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铋矿、毒砂、闪锌矿为主^[29,33]；湖南东部南湾钨矿，主要成矿矿物有白钨矿、黑钨矿、黄铁矿、辉钼矿、辉铋矿、黄铜矿、闪锌矿^[29,33,55]；江西仙鹅塘石英脉型钨锡矿床，主要矿物有黑钨矿、锡石、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、黄铁矿等^[25,61]。这些矿床的成岩与成矿年龄统计详见表1。

表1 华南印支期典型钨锡矿统计

Table 1. Statistics of typical Indosinian tungsten and tin deposits in South China

名称	矿种	含矿岩体	成矿矿物	成岩年龄/Ma	成矿年龄/Ma	成矿年龄测试方法	文献来源
水源山	W	中粒电气石白云母花岗岩	黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿	223.5±1.8 225.5±1.9 224.9±1.7	220.7±4.1 214.3±1.1	辉钼矿Re-Os 白云母Ar-Ar	[36]
三角潭	W	中粒斑状黑云母二长花岗岩和中细粒二云母二长花岗岩	黑钨矿、白钨矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铋矿、毒砂、闪锌矿	223.1±2.6	225.8±4.4 230.6±2.9	辉钼矿Re-Os	[29,33]
川口	W	中细粒白云母花岗岩	黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿	227.8±0.7 237.3±0.8	212.5±7.3 212.6±1.4	辉钼矿Re-Os 黑钨矿原位U-Pb	[28,55]
南湾	W	中细粒二云母二长花岗岩	白钨矿、黑钨矿、黄铁矿、辉钼矿、辉铋矿、黄铜矿、闪锌矿	223.1±2.6	229.4±2.6	辉钼矿Re-Os	[29,33]
油麻岭(高岭)	W	中细粒二云母花岗岩	黑钨矿、白钨矿、黄铁矿、辉钼矿、辉铋矿	224.9±1.4 221.6±2.4	219.0±4.0 225.1±5.8 227.3±3.4	辉钼矿Re-Os 白钨矿Sm-Nd	[21,47]
鸭头水	W	中细粒二云母花岗岩	白钨矿、黑钨矿、磁黄铁矿	219.9±4.3			[64]
云头界	W-Mo	细粒白云母花岗岩	黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿	216.8±4.9	216.8±7.5	辉钼矿Re-Os	[17,24]
崇阳坪	W	中细粒二长花岗岩	黑钨矿、白钨矿、黄铁矿	223.1±2.1 214.2±1.7			[34]
木瓜园	W	花岗斑岩	白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、自然金	224.2±2.0	225.4±1.4	辉钼矿Re-Os	[30,31]
大溶溪	W	黑云母二长花岗岩	白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂、黄铁矿	224.3±1.0	223.3±3.9	辉钼矿Re-Os	[37,56]
仙鹅塘	Sn-W	中细粒黑云母花岗岩	黑钨矿、锡石、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、黄铁矿	202.0±15.0	231.4±2.4	白云母Ar-Ar	[25,61,62]
青山	Sn-W	中粒黑云母花岗岩	黑钨矿、锡石、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、辉钼矿	231.9±1.0	228.7±2.5	辉钼矿Re-Os 白云母Ar-Ar	[32,62]

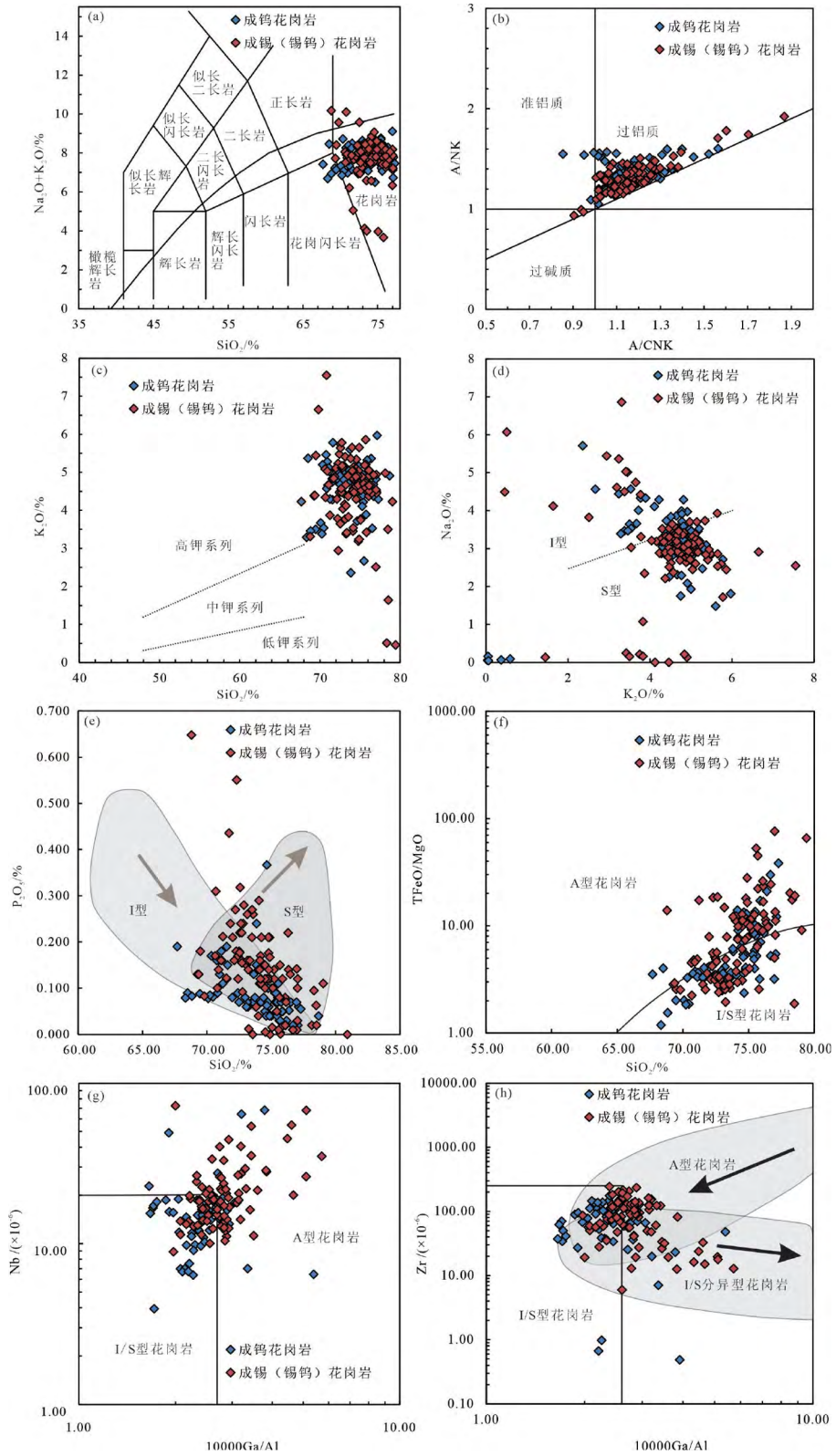
续表1

名称	矿种	含矿岩体	成矿物质	成岩年龄/Ma	成矿年龄/Ma	成矿年龄测试方法	文献来源
荷花坪	Sn	中粒电气石黑云母花岗岩	锡石、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、毒砂、闪锌矿	223.5±1.8 225.5±1.9 224.9±1.7	224.0±1.9	辉钨矿Re-Os	[18,49,58,59]
锡田	Sn-W	中粗粒斑状花岗岩和二云母花岗岩	白钨矿、黑钨矿、锡石、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、毒砂、磁铁矿、辉钨矿、辉铋矿	220.7±0.7	225.5±3.6	辉钨矿Re-Os	[16,35,60]
李贵福	Sn-W	细粒二云母二长花岗岩	黄铜矿、黄铁矿、锡石、辉钨矿、黑钨矿、白钨矿、闪锌矿	209	211.9±6.4	辉钨矿Re-Os	[15,26]
栗木	Sn-W-Nb-Ta	中细粒斑状白云母花岗岩、锂云母钠长石花岗岩	锡石、黑钨矿、白钨矿、黝锡矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、锰铋钨铁矿、锂铁云母	217.1±1.4	214.1±1.9	白云母Ar-Ar	[20,23,54]
			218.3±2.4	212.4±1.4			

2 成钨与成锡(锡钨)花岗岩对比

本文统计了上述华南地区印支期与钨锡成矿相关花岗岩的一些地球化学数据(数据来自文献[15,17,19-22,25,28,39,47,55,56,62,67])以及作者在高岭-油麻岭、云头界、李贵福、荷花坪、锡田、栗木矿区未发表的数据共44组。由于华南印支期钨锡矿主要是钨多金属矿和锡(锡钨)多金属矿,为方便对比,故将这些花岗岩分为成钨与成锡(锡钨)两类(详细分类见表1)。统计数据表明,这些印支期与钨锡成矿相关的花岗岩均表现出富集SiO₂(67.6~77.28%,均值为75.09%)、K₂O(0.04~7.55%,均值为4.42),贫Na₂O(0.01~6.86%,均值为3.06%)和CaO(0.01~4.09%,均值为0.75%)特征,岩石的SiO₂含量较高,几乎均落入钙碱性花岗岩的区域(图2a)。成钨花岗岩的A/CNK值范围为0.83~2.5,均值为1.18,成锡(锡钨)花岗岩A/CNK值范围为0.90~3.54,均值为1.32,在岩石A/CNK-A/NK图解中,两者均落在(弱)过铝质区域(图2b)。成钨花岗岩的岩石的分异指数DI(An+Ab+Or+Ne+Lc+Kp)范围为76.0~98.2,均值为91.4,而成锡(锡钨)花岗岩DI指数范围为83.9~98.1,均值为91.8,表明两者均具有显著高分异的特征。岩石的SiO₂-K₂O图解中,这些花岗岩均落入高K系列区域,表明岩石整体是富钾的(图2c)。在岩石的K₂O-Na₂O、SiO₂-P₂O₅图解中,这些花岗岩大部分落入S型花岗岩的区域,少部分落入I型花岗岩区域(图2d,e)。在岩石的SiO₂-TFeO/MgO、10000Ga/Al-Nb、10000Ga/Al-Zr图解中,可以发现这些成钨和成锡(锡钨)花岗岩除部分落在I/S型花岗岩区域,还有部分成钨和成锡(锡钨)花岗岩落入A型花岗岩区域(图2f~h),说明成矿花岗岩可能I/S/A型均有。

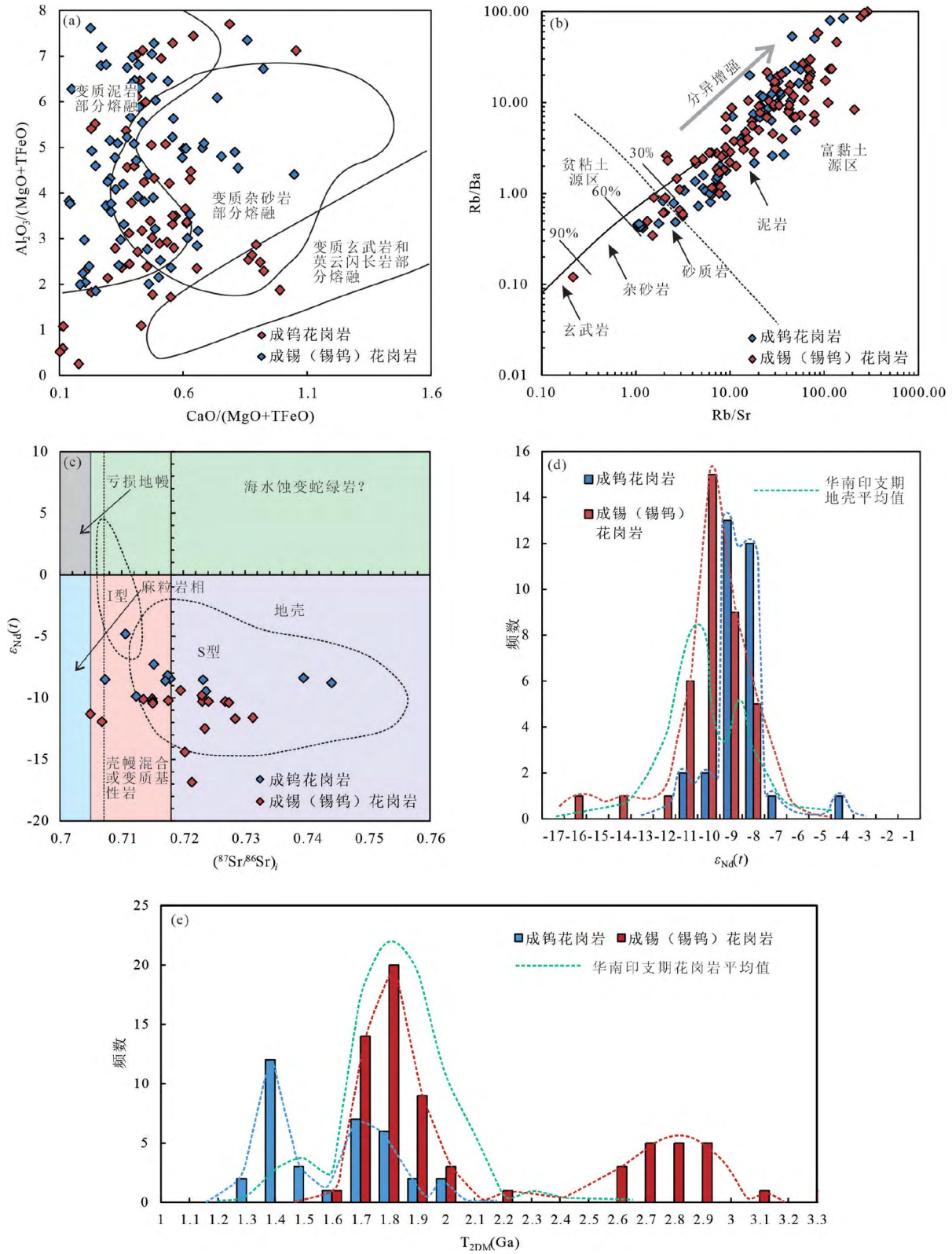
关于这些花岗岩的源区,在花岗岩的 $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{MgO}+\text{TFeO})-n\text{CaO}/n(\text{MgO}+\text{TFeO})$ 图解中,两类花岗岩均落在变质泥岩和变质杂砂岩的熔融区域(图3a)。在岩石的Rb/Ba-Rb/Sr值图解中,成矿花岗岩均落在富集黏土的区域(图3b),同时岩石的Rb/Ba-Rb/Sr值演化趋势同样表明这些岩石具有高分异的特征。利用岩石的Sr-Nd同位素示踪其源区,在岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中,可以发现部分成矿花岗岩具有地壳和亏损地幔混源的特征(图3c)。基于大陆地壳从地幔中派生的基本假设和一定的模式假设,计算获得的一个地壳样品从地幔源区分离至今的时间,就是样品的模式年龄。一阶段模式年龄假设前提是样品和初始的大陆地壳同时形成,二阶段模式年龄假设前提是先形成大陆地壳,然后再由地壳分离出样品。本次研究所统计的华南印支期成钨锡花岗岩的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和二阶段Nd模式年龄($T_{2\text{DM}}$)显示,成钨花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于-11~-8,总体与成锡(锡钨)花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-16~-8)接近,同时二者均高于华南陆块对应时期的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值^[73,74](-15~-7)(图3d)。同时,成钨花岗岩的 $T_{2\text{DM}}$ 集中在1.4~1.2 Ga和2.0~1.6 Ga两个区间,成锡(或钨锡)花岗岩则集中



a. 华南地区印支期钨锡成矿花岗岩的TAS图解 (底图据文献[68]) ; b. A/CNK-A/NK图解 (底图据文献[69]) ; c. $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解 (底图据文献[68]) ; d. $\text{K}_2\text{O-Na}_2\text{O}$ 图解 (底图据文献[68]) ; e. $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 图解 (底图据文献[70]) ; f. $\text{SiO}_2\text{-TFeO/MgO}$ 图解 (底图据文献[71]) ; g. 10000Ga/Al-Nb 图解 (底图据文献[71]) ; h. 10000Ga/Al-Zr 图解 (底图据文献[72])

图2 花岗岩类型判别图解

Fig. 2. Diagrams for discriminating granite types



a. 花岗岩 $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{MgO}+\text{TFeO})-n(\text{CaO})/n(\text{MgO}+\text{TFeO})$ 图解(底图据文献[75]); b. 花岗岩 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解(底图据文献[76]); c. 花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(底图据文献[77]); d. 花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 统计图(华南地壳数据来源文献[74]); e. 花岗岩 $T_{2\text{DM}}$ 统计图(华南印支期平均花岗岩数据来源文献[73])

图3 花岗岩源区判别图解

Fig. 3. Diagrams for the discrimination of granite sources

在2.2~1.6 Ga, 3.2~2.6 Ga两个区间, 而同期华南印支期地壳平均 T_{2DM} 为2.0~1.5 Ga^[73] (图3e)。以上结果表明成钨花岗岩的地壳源区更加年轻, 或者成钨花岗岩源区可能具有更多地幔组分的参与。

前人的研究表明, 花岗岩的SI (固结指数, $SI=100MgO/MgO+FeO+Fe_2O_3+Na_2O+K_2O$) <6, $DI>88$, $TFeO+MgO+TiO_2$ 含量小于6%, 可以作为高分异的花岗岩的判别标准^[78]。在这些成矿花岗岩的DI-SI、 $SiO_2-TFeO+MgO+TiO_2$ 图解中, 大部分花岗岩均显示高分异花岗岩的特征 (图4a, b)。在岩石的 $SiO_2-Al_2O_3$ 图解中, SiO_2 与 Al_2O_3 显示较好的相关性, 说明存在含铝质矿物的分离结晶 (图4c)。在酸性岩浆中, Ti和Zr均为相容元素, 而Ta为不相容元素, 岩浆的结晶分异过程中, Ti和Zr的含量会逐渐降低, 而Ta的含量会逐渐升高。统计的结果显示, 这些成钨锡花岗岩的Ti, Zr, Ta含量偏离地壳上述元素平均含量范围, 且与Lehamnn^[1]统计的其他国家含钨锡花岗岩演化趋势一致 (图4e, f), 同时, 在这些成钨与成锡 (锡钨) 花岗岩的Zr/Hf-Nb/Ta图解中, 几乎所有花岗岩都落在 $Nb/Ta<17$ 、 $Zr/Hf<38$ 的区域中, 展现了较好结晶分异演化的趋势 (图4d), 表明这些花岗岩浆可能经历了高度的分异。而在岩石的Zr/Hf-Y/Ho值图解中, 随着Zr/Hf值的降低, Y/Ho值反而有快速升高的趋势 (图4g), 这可能与岩浆演化后期含F流体加入有关, F会与Y形成络合物, 导致熔体中的Y/Ho值升高^[79]。

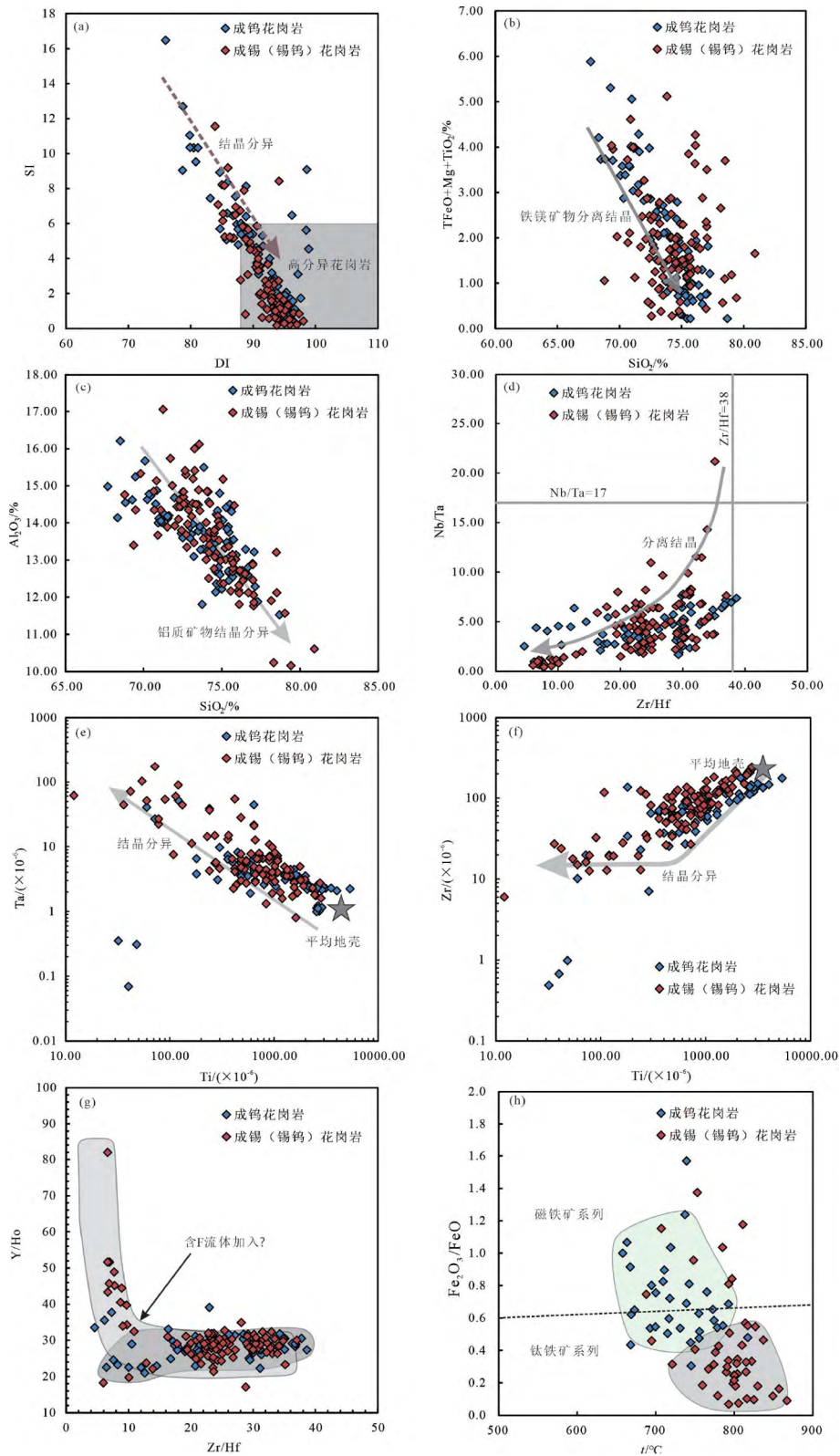
对这些成钨锡的花岗岩做 $t-Fe_2O_3/FeO$ 图解 (图4h), 其中, 由于部分文献只给出岩石全铁含量, 故只统计给出 Fe_2O_3 和FeO单独含量的文献中数据, 并将铁的质量百分含量换算成物质的量含量^[80]。结果显示, 大部分成锡 (锡钨) 花岗岩落入了钛铁矿花岗岩系列区域, 少量磁铁矿区域, 而成钨花岗岩在钛铁矿区域和磁铁矿区域均有出现, 表明成锡 (锡钨) 岩浆熔体整体上是比较还原的。

花岗岩浆中由于锆石结晶比较早, 故可以选用锆石饱和温度来计算岩浆的液相线温度。本文根据Miller等^[81]提出的计算方法, 统计并计算了华南印支期典型含钨锡矿的花岗岩的温度, 结果表明, 华南地区成钨花岗岩的温度明显偏低 (647~818 °C, 均值<800 °C), 而成锡 (锡钨) 的花岗岩温度明显更高 (658~876 °C, 均值>800 °C) (图4h), 这一结果与目前的研究结果相吻合^[9,12,82]。

3 花岗岩对印支期钨锡成矿的约束

大量的研究表明, 钨锡成矿一般经历了以下几个过程: 1) 稳定大陆上强烈化学风化过程中W-Sn的残余富集; 2) 被动大陆边缘发育过程中, 强烈风化沉积物向大陆边缘的重新分布; 3) 活动大陆边缘增生和碰撞初期, 富W-Sn的沉积物堆积在大陆架; 4) 俯冲过程中沉积岩的部分熔融; 5) 花岗岩熔体演化的过程中W-Sn的富集; 6) W-Sn在花岗岩流体出溶中的重新分布; 7) W-Sn在伟晶岩和云英岩、矽卡岩矿脉矿化中的沉淀^[1,4-6,84]。由此可见, 成矿花岗岩的形成与演化是导致钨锡成矿的重要环节, 下面将从岩石的源区与类型、结晶分异程度、氧逸度、温度四个方面分别进行讨论这些花岗岩对钨锡成矿的制约。

本次对这些成矿花岗岩的地球化学统计分析表明, 成钨和成锡花岗岩均主要源自地壳深部泥砂质变质岩的部分熔融 (图3a, b)。岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值统计结果显示, 成钨花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和成锡 (锡钨) 花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均高于华南地壳的平均值 (图3d), 并且 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i-\epsilon_{Nd}(t)$ 图解显示部分花岗岩具有地壳和亏损地幔混合的特点, 花岗岩的二阶段模式年龄统计结果表明, 成钨花岗岩的二阶段模式年龄在1.4~1.2 Ga和2.0~1.6 Ga两个区间, 成锡 (或锡钨) 花岗岩则集中在2.2~1.6 Ga和3.2~2.6 Ga两个区间, 表明这些成钨锡花岗岩的源区时代可能为华南中元古代及古元古代和部分太古代 (图3e), 但是成钨花岗岩的模式年龄低于成锡 (锡钨) 花岗岩, 并且也部分低于华南陆块印支期



a. 花岗岩DI-SI图解; b. 花岗岩SiO₂-TFeO+MgO+TiO₂图解; c. 花岗岩SiO₂-Al₂O₃图解; d. 花岗岩Zr/Hf-Nb/Ta相关性图解(底图据文献[72,83]); e. 花岗岩Ti-Ta相关性图解(底图据文献[1]); f. 花岗岩Ti-Zr相关性图解(底图据文献[1]); g. 花岗岩Zr/Hf-Y/Ho图解(底图据文献[79]); h. 磁铁矿-钛铁矿花岗岩判别图解(底图据文献[12])

图4 花岗岩岩浆分异程度与氧化还原程度判别图解

Fig. 4. Diagrams for discriminating the differentiation degrees and oxidation-reduction types of granitic magmas

花岗岩的平均 T_{2DM} (2.0~1.5 Ga), 因此可以推测华南印支期成钨花岗岩源区可能具有更多的地幔组分的参与, 或者成钨花岗岩的地壳源区较成锡(锡钨)更年轻。此外, 在大陆地壳物质化学风化期间钨、锡被释放, 在搬运的过程中通过吸附在黏土矿物和铁氧化物上而富集, 这些黏土沉积物在埋藏变质过程中形成云母和硅酸盐矿物, 由于钨、锡为不相容元素, 在部分熔融过程中会优先进入熔体而富集。研究表明, 在岩浆流体结晶去气演化的最晚期锡被提取的效率最高, 高度的结晶分异程度下, 具有较低初始水浓度和较高ASI的岩浆会出溶较高锡浓度的流体, 从而具有较高的锡成矿潜力^[4,11]。富黏土矿物和泥质岩均为富铝和钾质的岩石, 熔融产物以S型花岗岩为代表, 因此, 这就解释为什么这些成矿花岗岩大部分为高钾过铝质的S型花岗岩。值得注意的是, 并不是只有S型花岗岩成矿, 本文和前人的研究均表明, 部分I/A型花岗岩也具有钨锡成矿潜力^[22,85,86] (图2d~h)。此外, 成矿花岗岩具有地幔物质来源的特征, 不代表钨和锡也存在地幔来源, 钨锡成矿物质的详细来源, 需要更进一步的研究。

高分异花岗岩常伴生的矿产有W、Sn、Nb、Ta、Li、Be、Rb、Ce、和REE等矿产^[72]。W、Sn在酸性岩浆中为不相容元素, 结晶分异过程中更倾向分配在熔体中, 因此, 分异程度越高, 可能更加有利于钨锡在残余岩浆中的富集。利用Ti作为岩浆分异的指示元素, 因为Ti在磁铁矿结晶之后为相容元素, 且在热液过程中相对稳定, 而锡在热液中更容易运移。Lehmann^[1]研究发现, 当岩浆的Ti含量达到 100×10^{-6} 左右时, 锡开始在热液中大量成矿, 形成许多脉状的锡矿床, 如Erzgebirge锡矿床^[1], 此时, 岩浆分异程度几乎达到最高。华南地区印支期成钨锡花岗岩具有较低的Zr/Hf值(6.2~37.0, 均值为25.1)、Nb/Ta值(0.9~21.2, 均值为5.2)和较高的Rb/Sr值(0.2~266.2, 均值27.3), 并且成钨和成锡(锡钨)花岗岩的分异指数 $DI > 90$, 固结指数 $SI < 6$ (图4a), 大部分岩石 $TFeO+MgO+TiO_2$ 含量小于6%, SiO_2 和 Al_2O_3 以及 $TFeO+MgO+TiO_2$ 具有明显的相关性(图4b、c), 说明了这些成矿岩浆具有铝质矿物和镁铁质矿物分离结晶的特征, 与在造岩矿物上黄玉、磁黄铁矿、钛铁矿、锆石、金红石等出现表现一致。微量元素上, Zr/Hf-Nb/Ta、Ti-Zr、Ti-Ta图解均显示出明显的高程度分异演化特征, 与Lehmann^[1]对Erzgebirge、Massif Central、Abu Dabbab等矿床的成矿花岗岩以及吴福元^[83]对华南燕山期钨锡矿成矿花岗岩的统计一致(图4d~f)。而部分成锡(锡钨)花岗岩的Y/Ho值具有随Zr/Hf值上升的趋势(图4g), 推测可能与含F流体的加入有关, 在造岩矿物上表现出萤石出现的特征, 典型的如锡田矿床^[35,65]。

花岗岩浆的氧化还原条件是控制钨锡成矿的另一重要因素。实验岩石学证明, 过铝质花岗岩中锡的溶解度强烈依赖于氧逸度, 还原环境中Sn主要以二价形式存在, 而氧化环境中Sn主要以 Sn^{4+} 存在, 很容易进入硅酸盐矿物中。在强还原条件下, Sn的溶解度可以达到几个 10^{-6} , 这是因为在强还原条件下, 锡石自身歧化形成 Sn^{2+} 和 O_2 ^[8], 只有在极高的氧逸度下(高于NNO缓冲液一个数量级), 锡石的溶解度才与氧化还原条件无关。同时, 锡的溶解度也与熔体碱度有关, 过碱质的熔体中即使低氧逸度, 锡几乎也不会溶解^[87]。Ishihara^[87]观察到锡的富集仅出现在钛铁矿系列花岗岩中, 而磁铁矿和伴生钼矿的花岗岩中并未出现锡的富集, 因为二价的Sn在钛铁矿系列花岗岩中表现出不相容, 而四价的Sn在磁铁矿系列花岗岩中是相容的^[87]。在磁铁矿系列花岗岩中, Sn^{4+} 与 Ti^{4+} 表现出相似的性质, 因此 Sn^{4+} 很容易在早期结晶中进入黑云母或者磁铁矿中, 造成熔体锡的亏损。与锡不相同的是, 钨的溶解度几乎与氧逸度无关, 熔体中钨以 W^{6+} 形式存在^[7], 除简单的钨酸盐外, 钨还可能与其他络合物类型^[88]。华南地区印支期的钨锡矿花岗岩 $T-Fe_2O_3/FeO$ 图解表明(图4h), 成锡(锡钨)花岗岩大部分为钛铁矿系列花岗岩, 也说明了较还原的花岗岩有利于锡的富集成矿。关于华南印支期钨锡成矿岩浆的氧化还原性质分析, 目前报道的数据很少, 故本文只能根据岩浆中三价铁和二价铁的相对含量值初步估计, 更加精确的岩浆氧逸度分析(如锆石微量元素法、锆石 Ce^{3+}/Ce^{4+} 法

等)还需要进一步的研究。

尽管钨锡两种元素在成矿过程中表现出许多相似性,但在一些方面钨锡的行为却表现出很明显的差异性,这可能与含钨锡物质在岩浆初始熔融阶段的释放有关,典型的就华南地区燕山期的钨锡成矿带在时间空间上有明显的“东钨西锡,早钨晚锡”现象^[9,12,82],但是针对印支期花岗岩而言,本次统计显示其在空间上并不存在“东钨西锡”分布特点。最近的实验岩石学证据表明,云母等层状硅酸盐的脱水熔融会释放钨锡,低温(<750℃)情况下,白云母的脱水熔融将导致钨的出溶成矿,而高温(>800℃)情况下,黑云母的脱水熔融导致残余钨和锡的出溶成矿^[10,82]。这也解释了为何华南的钨锡矿总以钨多金属矿和锡(锡钨)多金属矿两种形式出现,也从侧面反映了将印支期钨锡花岗岩分为成钨花岗岩和成锡(锡钨)花岗岩两类进行分析的合理性。本文统计的华南印支期成钨与成锡(锡钨)花岗岩的温度分布同样论证了温度对钨锡成矿的影响,成钨的花岗岩熔融温度为647~818℃,平均值<800℃,而成锡(锡钨)的花岗岩温度明显更高(658~876℃,均值>800℃),印支期成钨与成锡(锡钨)花岗岩的熔融温度差异,推测与其差异性的成岩成矿背景有关,造成二者源区部分熔融差异条件的根本原因有待进一步研究。

4 结论

1) 华南印支期的成钨与成锡(锡钨)花岗岩均具有高钾过铝质亚碱性的特征,主要岩石类型主要为S型花岗岩,部分I型和A花岗岩,且均具有高分异花岗岩的特征。

2) 成矿花岗岩的源区主要为富泥质/黏土的壳源,部分受到幔源物质的影响,成钨花岗岩和成锡(锡钨)花岗岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值均高于华南地壳平均值;成钨花岗岩相比成锡(锡钨)花岗岩更低的二阶段模式年龄,表明成钨花岗岩源区为更年轻的地壳或可能受到更多的幔源物质的影响。

3) 成锡(锡钨)花岗岩相比成钨花岗岩为较还原的钛铁矿系列花岗岩,表明低氧逸度岩浆可能有利于锡的富集成矿,而钨的成矿与氧逸度关系不大。

4) 成钨花岗岩的温度低于成锡(锡钨)花岗岩,这可能是由于富集钨的白云母和富集锡(以及残余钨)的黑云母二者熔融温度差异造成的,同时解释了华南印支期钨锡矿分别以钨多金属矿或锡(锡钨)多金属矿在不同区域出现的现象。

参考文献:

- [1] Lehmann B. Formation of tin ore deposits: A reassessment[J]. *Lithos*, 2021, 402.
- [2] Lehmann B, Zoheir B A, Neymark L A, et al. Monazite and cassiterite U-Pb dating of the Abu Dabbab rare-metal granite, Egypt: Late Cryogenian metalliferous granite magmatism in the Arabian-Nubian Shield[J]. *Gondwana Research*, 2020, 84: 71–80.
- [3] Raimbault L, Cuney M, Azencott C, et al. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central[J]. *Economic Geology*, 1995, 90: 548–576.
- [4] Romer R L, Kroner U, Schmidt C, et al. Mobilization of tin during continental subduction-accretion processes[J]. *Geology*, 2022, 50(12): 1361–1365.
- [5] Romer R L, Kroner U. Phanerozoic tin and tungsten mineralization—Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting[J]. *Gondwana Research*, 2016, 31: 60–95.
- [6] Romer R L, Kroner U. Sediment and weathering control on the distribution of Paleozoic magmatic tin-tungsten mineralization[J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50(3): 327–338.
- [7] Che X D, Linnen R L, Wang R C, et al. Tungsten solubility in evolved granitic melts: An evaluation of magmatic wolframite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 106: 84–98.
- [8] Linnen R L, Pichavant M, Holtz F. The combined effects of $f\text{O}_2$ and melt composition on SnO_2 solubility and tin diffusivity in haplogranitic melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(24): 4965–4976.
- [9] Zhao P, Chu X, Williams-Jones A E, et al. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces[J]. *Geology*, 2022, 50(1): 121–125.
- [10] Kunz B E, Warren C J, Jenner F E, et al. Critical metal enrichment in crustal melts: The role of metamorphic mica[J]. *Geology*, 2022, 50(11): 1219–

- 1223.
- [11] Zhao P L, Zajacz Z, Tsay A, et al. Magmatic-hydrothermal tin deposits form in response to efficient tin extraction upon magma degassing[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2022, 316: 331–346.
- [12] Yuan S, Williams-Jones A E, Romer R L, et al. Protolith-Related Thermal Controls on the Decoupling of Sn and W in Sn-W Metallogenic Provinces: Insights from the Nanling Region, China[J]. *Economic Geology*, 2019, 114(5): 1005–1012.
- [13] Hu R Z, Zhou M F. Multiple Mesozoic mineralization events in South China—an introduction to the thematic issue[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 579–588.
- [14] 谢桂青, 毛景文, 张长青, 等. 华南地区三叠纪矿床地质特征、成矿规律和矿床模型[J]. *地学前缘*, 2021, 28(03): 252–270.
- [15] 陈迪, 罗鹏, 曾志方, 等. 湘南都庞岭复式花岗岩成因及地质意义: 矿物化学、锆石U-Pb年代学、地球化学与Nd-Hf同位素制约[J]. *地质力学学报*, 2022, 28(04): 617–641.
- [16] 刘飏, 吴玺虹, 孔华, 等. 湖南锡田矿田花岗岩时空分布与锡钨成矿关系: 来自锆石U-Pb年代学与岩石地球化学的约束[J]. *地球科学*, 2022, 47(01): 240–258.
- [17] Huang W T, Wu J, Zhang J, et al. Geochemistry and Hf-Nd isotope characteristics and forming processes of the Yuntoujie granites associated with W-Mo deposit, Guangxi, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 81: 953–964.
- [18] 蔡明海, 张文兵, 彭振安, 等. 湘南荷花坪锡多金属矿床成矿年代研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(07): 2111–2123.
- [19] 章荣清. 湘南含钨和含锡花岗岩成因及成矿作用[D]. 南京大学, 2015.
- [20] 张怀峰, 陆建军, 王汝成, 等. 广西栗木大岐岭隐伏花岗岩的成因及其构造意义: 岩石地球化学、锆石U-Pb年代学和Nd-Hf同位素制约[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(05): 901–918.
- [21] 程顺波, 付建明, 马丽艳, 等. 桂东北越城岭—苗儿山地区印支期成矿作用: 油麻岭和界牌矿区成矿花岗岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素制约[J]. *中国地质*, 2013, 40(04): 1189–1201.
- [22] 姚远, 陈骏, 陆建军, 等. 湘东锡田A型花岗岩的年代学、Hf同位素、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(03): 467–488.
- [23] 李晓峰, 冯佐海, 肖荣, 等. 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[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1713–1725.
- [24] 伍静, 梁华英, 黄文婷, 等. 桂东北苗儿山—越城岭西南部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析[J]. *科学通报*, 2012, 57(13): 1126–1136.
- [25] 郭春丽, 陈毓川, 蒯志永, 等. 赣南印支期柯树岭花岗岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄、地球化学、锆石Hf同位素特征及成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(04): 567–580.
- [26] 邹先武, 崔森, 屈文俊, 等. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿Re-Os同位素定年研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(04): 837–844.
- [27] 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 等. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(06): 1441–1456.
- [28] 蔡富成, 秦锦华, 覃金宁, 等. 湖南川口岩体钨矿赋矿花岗岩地球化学特征及LA-ICP-MS锆石U-Pb定年[J]. *中国地质*, 2021, 48(04): 1212–1224.
- [29] Qin J H, Wang D H, Li C, et al. The molybdenite Re-Os isotope chronology, in situ scheelite and wolframite trace elements and Sr isotope characteristics of the Chuankou tungsten ore field, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126.
- [30] 陕亮, 庞迎春, 柯贤忠, 等. 湖南省东北部地区桃江县木瓜园钨多金属矿成矿时代及其对区域成矿作用的启示[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(01): 100–112.
- [31] 李洪英, 杨磊, 陈剑锋. 湖南桃江县木瓜园钨矿床地质特征及含矿岩体成岩时代[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(05): 1285–1300.
- [32] Zhao Z, Zhao W W, Lu L, et al. Constraints of multiple dating of the Qingshan tungsten deposit on the Triassic W(-Sn) mineralization in the Nanling region, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 94: 46–57.
- [33] 彭能立, 王先辉, 杨俊, 等. 湖南川口三角潭钨矿床中辉钨矿Re-Os同位素定年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2017, 36(06): 1402–1414.
- [34] 苏康明, 吕书君, 孔令兵, 等. 湖南崇阳坪地区石英脉型钨矿床的地质特征、成矿规律及成矿模式[J]. *矿床地质*, 2016, 35(05): 902–912.
- [35] 邓湘伟, 刘继顺, 戴雪灵. 湘东锡田合江口钨锡多金属矿床地质特征及辉钨矿Re-Os同位素年龄[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(10): 2883–2897.
- [36] Zhang R, Lu J, Wang R, et al. Constraints of in situ zircon and cassiterite U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages on multiple generations of granitic magmatism and related W-Sn mineralization in the Wangxianling area, Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 1021–1042.
- [37] 张龙升, 彭建堂, 胡阿香, 等. 湘西大溶溪钨矿床中辉钨矿Re-Os同位素定年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2014, 33(01): 181–189.
- [38] Li W S, Ni P, Pan J Y, et al. Constraints on the timing and genetic link of scheelite- and wolframite-bearing quartz veins in the chuankou W ore field, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 133.
- [39] 柏道远, 吴能杰, 钟响, 等. 湘西南印支期瓦屋塘岩体年代学、成因与构造环境[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(05): 1075–1091.
- [40] Mao J, Cheng Y, Chen M, et al. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(3): 267–294.
- [41] 郭春丽, 郑佳浩, 楼法生, 等. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(03): 457–472.
- [42] 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. *中国地质*, 2012, 39(06): 1437–1471.
- [43] 许志琴, 杨经绥, 李化启, 等. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. *岩石学报*, 2012, 28(06): 1697–1709.
- [44] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(04): 17.
- [45] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. *矿床地质*, 2005, (02): 9.
- [46] 张迪, 张文兰, 王汝成, 等. 桂北苗儿山地区高岭印支期花岗岩及石英脉型钨成矿作用[J]. *地质论评*, 2015, 61(04): 817–834.

- [47] 杨振, 张文兰, 王汝成, 等. 桂北油麻岭钨矿区成矿岩体的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2013, 19(01): 159–172.
- [48] 章荣清, 陆建军, 朱金初, 等. 湘南荷花坪花岗岩斑岩锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb年龄、Hf同位素制约及地质意义[J]. 高校地质学报, 2010, 16(04): 436–447.
- [49] 章荣清, 陆建军, 姚远, 等. 湘南荷花坪锡多金属矿区花岗岩锆石年代学和岩石地球化学研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 549–550.
- [50] Zhao G. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction[J]. Gondwana Research, 2015, 27(3): 1173–1180.
- [51] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(07): 1035–1053.
- [52] 汪啸风, 陈孝红. 中国各地质时代地层划分与对比[M]. 中国各地质时代地层划分与对比, 2005.
- [53] 董业才, 丁汝福. 广西栗木矿田花岗岩体地球化学特征制约因素及其动力学背景[J]. 矿产与地质, 2016, 30(06): 998–1005.
- [54] 康志强, 冯佐海, 杨锋, 等. 广西桂林地区东部栗木花岗岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄[J]. 地质通报, 2012, 31(08): 1306–1312.
- [55] 罗鹏, 陈迪, 杨俊, 等. 湖南川口印支期花岗岩成因及与钨成矿关系[J]. 华南地质, 2021, 37(03): 247–264.
- [56] 张龙升, 彭建堂, 张东亮, 等. 湘西大神山印支期花岗岩的岩石学和地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(01): 137–148.
- [57] 蔡明海, 王昱彬, 长尾敬介, 等. 湘南荷花坪锡多金属矿床稀有气体同位素特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(06): 1163–1170.
- [58] 蔡明海, 王昱彬, 彭振安, 等. 湘南荷花坪锡多金属矿区花岗岩岩石Sm-Nd同位素研究[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(03): 530–538.
- [59] 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 等. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿Re-Os测年[J]. 矿床地质, 2006, 25(03): 263–268.
- [60] 董超阁. 湖南锡田锡钨矿床和邓阜仙钨矿床成岩成矿年代学及动力学研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2018.
- [61] 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 等. 赣南崇义—大余—上犹矿集区不同类型含矿石英中白云母 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})$ 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(07): 932–940.
- [62] 李伟, 刘翠辉, 谭友, 等. 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[J]. 地质评论, 2021, 67(05): 1309–1320.
- [63] 蒋桂新, 陆小平, 张慧. 兴安油麻岭钨矿类型的多样性及成矿富集规律[J]. 矿产与地质, 2010, 24(04): 300–304.
- [64] 张迪. 桂北苗儿山地区印支期花岗岩与成矿作用研究[D]. 南京大学, 2016.
- [65] Liu D, Yang L, Deng X, et al. Re-Os isotopic data for molybdenum from Hejiangkou tungsten and tin polymetallic deposit in Chenzhou and its geological significance[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1071–1084.
- [66] Yuan S, Williams-Jones A E, Mao J, et al. The origin of the Zhangjialong tungsten deposit, south china: implications for w-sn mineralization in large granite batholiths[J]. Economic Geology, 2018, 113(5): 1193–1208.
- [67] 郑佳浩, 郭春丽. 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[J]. 岩石学报, 2012, 28(01): 75–90.
- [68] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3): 215–224.
- [69] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [70] Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46(3): 535–551.
- [71] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1987, 95(4): 407–419.
- [72] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学:地球科学, 2017, 47(07): 745–765.
- [73] 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 2003, 10(03): 209–220.
- [74] Chen J, Jahn B. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. Tectonophysics, 1998, 284(1): 101–133.
- [75] Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50: 51–73.
- [76] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 1998, 45(1): 29–44.
- [77] Faure G. Principles of Isotope Geology, 2nd edition.: Geological Magazine[M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [78] 杨飞. 高分异花岗岩: 矿物学、地球化学特征及其找矿意义探讨[D]. 中国地质大学(北京), 2020.
- [79] Badanina E V, Trumbull R B, Dulski P, et al. The behavior of rare-earth and lithophile trace elements in rare-metal granites: A study of fluorite, melt inclusions and host rocks from the Khangai lay complex, Transbaikalia, Russia[J]. The Canadian Mineralogist, 2006, 44(3): 667–692.
- [80] 邱家骧, 林景迁. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [81] Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. Geology, 2003, 31: 529–532.
- [82] Zhao P, Yuan S, Williams-Jones A E, et al. 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[J]. Economic Geology, 2022, 117(3): 667–682.
- [83] 吴福元, 郭春丽, 胡方泐, 等. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿[J]. 岩石学报, 2023, 39(01): 1–36.
- [84] Lehmann B. Metallogeny of Tin[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [85] 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等. 十杭带湘南—桂北段中生代A型花岗岩成岩成矿特征及成因讨论[J]. 高校地质学报, 2008, 14(04): 496–509.
- [86] Ishihara S. The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks[J]. Mining Geology, 1977.
- [87] Ishihara S. Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic granitic belts[J]. Resource Geology, 1998, 48(4): 219–224.
- [88] Zajacz Z, Halter W E, Pettko T, et al. Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICP-MS analysis of co-existing fluid and silicate melt inclusions: Controls on element partitioning[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(8): 2169–2197.