

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.03.001

江南造山带钨锡稀有金属矿床成矿作用特征

陆建军¹, 章荣清^{1,2,3}, 黄旭栋^{1,3}, 张强¹, 李晓宇¹, 周维法¹,
黄迪¹, 黄玉¹, 马东升¹, 姜耀辉¹

LU Jian-Jun¹, ZHANG Rong-Qing^{1,2,3}, HUANG Xu-Dong^{1,3}, ZHANG Qiang¹, LI Xiao-Yu¹,
ZHOU Wei-Fa¹, HUANG Di¹, HUANG Yu¹, MA Dong-Sheng¹, JIANG Yao-Hui¹

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;
2. 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心, 江苏 南京 210023; 3. 南京大学大陆动力学研究院, 江苏 南京 210023
1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;
3. Institute of Continental Geodynamics, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China

摘要:江南造山带是世界上重要的钨锡稀有金属成矿带之一,发育矽卡岩型钨/锡矿、细脉浸染型钨矿、石英脉型黑钨矿/白钨矿、电气石-石英脉型锡矿、云英岩型钨/锡矿和花岗岩-伟晶岩型铌钽矿床,成矿时代包括新元古代、加里东期、印支期和燕山期。依据成矿元素组合,可将成矿花岗岩划分为W-Mo、W、Sn和Nb-Ta花岗岩,其演化程度和地球化学特征显示出明显差异,铌钽矿化发生在极端分异的钠长石花岗岩中。不同时代、不同类型的成矿花岗岩可能来自不同源区的部分熔融,江南造山带可能存在多个稀有金属富集的源区。成矿物质和成矿流体主要源自花岗质岩浆,岩浆分异演化促进了成矿元素在熔体中的富集。铌钽矿主要为岩浆成因,叠加热液矿化,钨锡矿主要通过流体充填和交代作用形成。

关键词:钨锡稀有金属矿床;岩浆演化;成矿类型;成矿过程;江南造山带

中图分类号:P617;P611

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)03-0359-23

Lu J J, Zhang R Q, Huang X D, Zhang Q, Li X Y, Zhou W F, Huang D, Huang Y, Ma D S and Jiang Y H. 2022. Metallogenic Characteristics of Tungsten, Tin, and Rare Metal Deposits in the Jiangnan Orogenic Belt. *South China Geology*, 38(3): 359-381.

Abstract: The Jiangnan Orogenic Belt is an important tungsten, tin, and rare metal metallogenic belt in the world. Skarn tungsten-tin deposits, veinlet-disseminated tungsten deposits, quartz-vein wolframite/scheelite deposits, tourmaline-quartz vein tin deposits, greisen tungsten-tin deposits, and granite-pegmatite niobium-tantalum deposits are developed in this belt. Four metallogenic epochs including Neoproterozoic, Caledonian, Indosinian, and Yanshanian have been identified. The ore-bearing granites can be divided into W-Mo, W, Sn, and Nb-Ta granites based on the metallogenic element assemblages, and their evolution degree and geochemical characteristics show significant differences. Nb-Ta mineralization occurs in the extremely differentiated albite granite. The ore-bearing granites with different ages and types are likely to have been derived from partial melting of sources. The ore-forming materials and fluids mainly originate from the granitic

收稿日期:2022-6-13;修回日期:2022-7-18

基金项目:国家自然科学基金(41830428)、关键地球物质循环前沿科学中心“科技人才团队”项目、中央高校基本科研业务费专项资金(2022300192)

第一作者:陆建军(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事花岗岩成岩成矿作用研究,E-mail:lujj@nju.edu.cn

melts, where the magmatic fractionation facilitates the enrichment of ore elements in the melts. The Nb-Ta deposits are primarily of magmatic origin and subordinately overprinted by hydrothermal mineralization, while the W and Sn deposits are dominantly formed through fluid filling and metasomatism.

Key words: W, Sn, and rare metal deposits; magmatic evolution; mineralization styles; ore-forming process; Jiangnan Orogenic Belt

关键金属,指当今社会必需、但安全供应存在风险的一类金属,主要包括稀有、稀土、稀散及稀贵金属。关键金属具有极度耐热、难熔、耐腐蚀、优良光电磁性能等特征,被誉为“工业牙齿”、“黄金”和“维生素”等。关键金属对于高新技术和国防安全具有不可替代性,其稳定供应能力关系到国家安全(Gulley et al., 2018;陈骏, 2019;毛景文等, 2019;王登红, 2019;翟明国等, 2019)。我国的关键金属分为紧缺性和优势关键金属两种,紧缺性关键金属对外依存度过高,被卡脖子风险大,优势关键金属卡脖子能力下降,形势严峻(陈骏, 2019;侯增谦等, 2020)。钨和锡在我国属于优势关键金属,而铌、钽、锂、铍等稀有金属在我国属于紧缺性关键金属,对外依存度在40%以上(陈骏, 2019)。

钨锡稀有金属矿床在全球呈现区域性分布,形

成成矿省或成矿带。华南是全球最重要的钨锡稀有金属成矿区域之一,钨锡稀有金属矿床主要分布在南岭、右江盆地和江南造山带。在过去很长一段时间内,南岭成矿带是世界上最大的钨成矿带(罗鹏等, 2021),赣南地区素有“世界钨都”之称。近年来,江南造山带找矿勘探取得了重大突破,先后发现了一批大型、超大型钨矿床,如大湖塘(107万吨)、朱溪(344万吨)和东坪(21.4万吨)钨矿(毛景文等, 2020)。这一系列矿床的发现,改变了中国钨矿分布格局,使得江南造山带成为全球最大的钨成矿带。在江南造山带也分布有多个大型稀有金属矿床,如湘东北平江县仁里 Nb-Ta 矿、赣东北葛源松树岗 Ta-Nb 矿和黄山 Nb-Ta-W-Sn 矿(图 1),显示出区内较大的稀有金属成矿潜力。

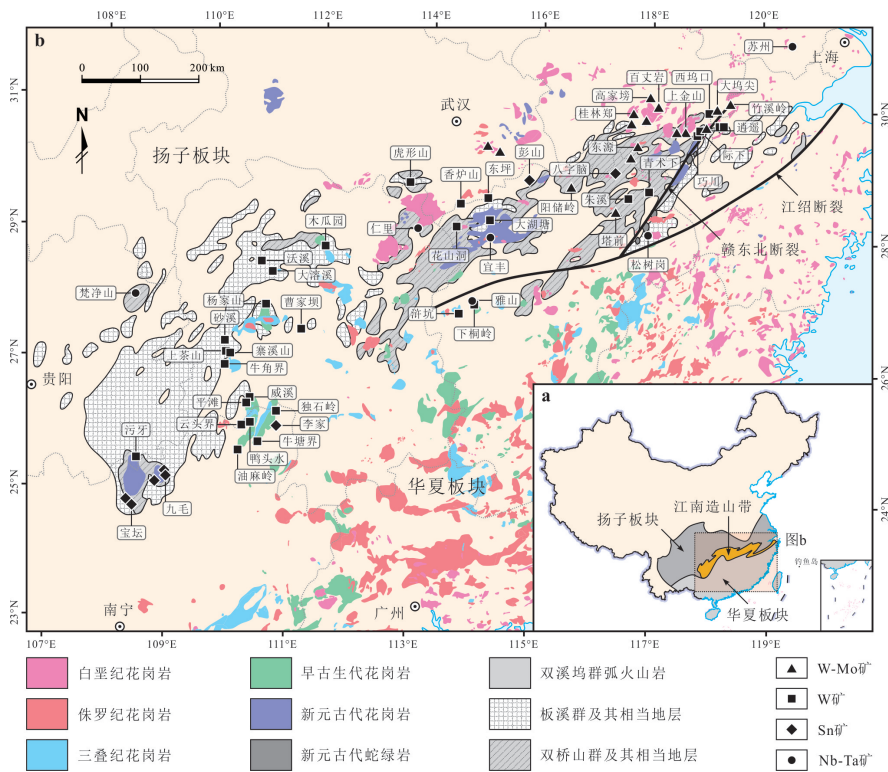


图1 江南造山带钨锡稀有金属矿床分布图(据孙涛, 2006; Wang X L et al., 2014 修改)

Fig. 1 Distribution of tungsten, tin, and rare metal deposits in the Jiangnan Orogen (modified after Sun T, 2006; Wang X L et al., 2014)

江南造山带位于扬子地块东南缘,由扬子地块与华夏地块在新元古代碰撞拼接形成,以出露新元古代双桥山群、板溪群、四堡群、冷家溪群等浅变质地层为特征,通常将扬子地块南缘江南造山带南侧作为扬子-华夏板块拼贴带的界线(舒良树等,1995)。王孝磊等(2017)对江南造山带的形成与演化进行了系统总结,认为其经历了洋洋俯冲(970~880 Ma)、弧陆碰撞(880~860 Ma)、弧后拉张(860~825 Ma)、碰撞后伸展(825~810 Ma)、造山后伸展(810~760 Ma)五个阶段。江南造山带发育多时代花岗岩,与之相关的钨锡稀有金属矿床也广泛分布,钨矿从浙西到桂北均有发育,大型、超大型矿床主要分布在赣北和皖南;锡矿主要分布在桂北和赣北,在皖南和浙西偶见锡矿化;Nb-Ta稀有金属矿床主要分布在湘东北和赣北地区及江苏苏州,黔东南和皖南地区偶见矿化(图1)。江南造山带钨锡稀有金属矿床成矿特征与南岭钨锡稀有金属成矿带明显不同,花岗岩也表现出独特的成矿专属性。前人对江南造山带单个钨锡稀有金属矿床开展了详细的研究,如对矿床地质特征、成矿

花岗岩类型和成因、成矿时代、成矿流体和成矿物质来源进行了深入探讨。本文在前人研究基础之上,结合课题组近年来的一些研究进展,总结了江南造山带钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成岩成矿时代和成矿地质特征、成矿花岗岩的地球化学特征,探讨了花岗岩演化与金属成矿的关系,讨论了与花岗岩有关钨锡稀有金属矿床的形成机理。

1 成矿类型和成矿特征

江南造山带钨矿主要成矿类型为矽卡岩型、细脉浸染型和石英脉型,许多矿床成矿类型为复合型。花山洞钨矿是目前华南发现的最老钨矿床,主要由云英岩型、石英脉型和角砾岩型矿石组成。云英岩型矿石不仅发育在成矿花岗岩的顶部,更多的发育在双桥山群安乐林组浅变质岩中(图2)。角砾岩型矿石主要由云英岩化的围岩角砾和石英胶结物组成(图3a)。石英脉型矿石分布于地层中。矿石矿物以白钨矿为主,热液角砾和石英脉中可见黑钨矿(黄迪,2021;黄迪等,2022)。

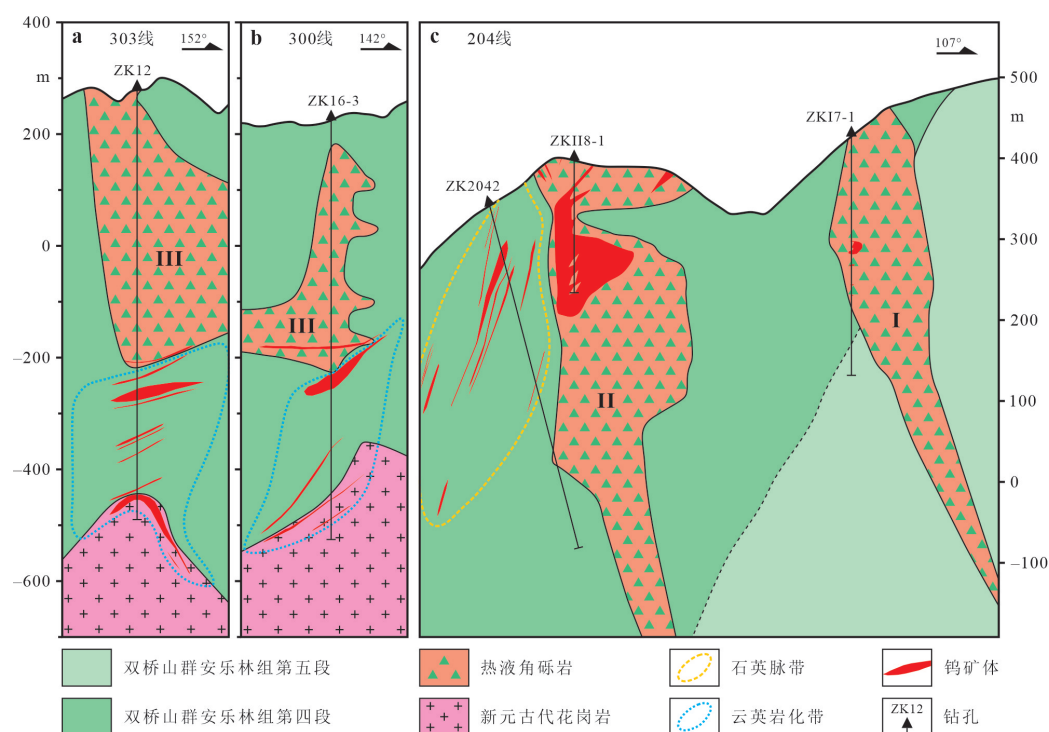


图2 花山洞钨矿303线(a)、300线(b)和204线(c)地质剖面图(据黄迪等,2022)

Fig. 2 Geological cross sections along the exploration lines 303 (a), 300 (b), and 204 (c) of the Huashandong W deposit (after Huang D et al., 2022)

矽卡岩型白钨矿以朱溪、香炉山、逍遥、曹家坝、竹溪岭、高家塆、牛塘界等为代表。朱溪钨矿为全球已探明的最大钨矿(资源量和品位分别为3.44 Mt WO_3 和0.54%)(Song S W et al., 2018a),伴有铜矿化。浅部主要发育铜矿化,深部以钨矿化为主。铜矿体多呈脉状,伴有蛇纹石化,常伴生有白钨矿。钨矿化类型有脉型、蚀变花岗岩型和矽卡岩型,以矽卡岩型为主。石英-萤石-白云母-白钨矿脉和细脉切穿灰岩和早期矽卡岩,蚀变花岗岩型以浸染状白钨矿化为特征。厚层的似层状钨矽卡岩和钨铜矽卡岩发育在细粒花岗岩、黑云母二长花岗岩与石炭系-二叠系灰岩、白云质灰岩的接触带上。进变质矽卡岩阶段以石榴子石、硅灰石、透辉石等矿物为代表,退变质矽卡岩阶段发育符山石、透闪石、阳起石、绿帘石、榍石和萤石等矿物,白钨矿主要形成于退变质矽卡岩阶段(Song S W et al., 2019)。香炉山钨矿(资源量和品位分别为0.22 Mt WO_3 和0.64%)产于黑云母花岗岩和中寒武统灰岩接触带,矿体呈似层状和透镜状,具有典型的钙质矽卡岩矿物组

合。钨成矿过程分为云英岩、退变质矽卡岩和石英脉三个阶段,退变质矽卡岩为主成矿期,表现为白钨矿与绿帘石、角闪石、绿泥石、石英和萤石等矿物共生(Dai P et al., 2018)。在花岗岩顶部发育少量的云英岩型矿化,晚期的白钨矿-石英脉切穿矽卡岩和灰岩。

细脉浸染型钨矿以大湖塘钨、阳储岭钨钼(图4)、东源钨钼矿床为代表。这类矿床往往具有储量大、品位低的特征,早期发育云英岩化,晚期发育绢英岩化。大湖塘钨矿(资源量和品位分别为1.07 Mt WO_3 和0.15%)是目前发现的全球最大的细脉浸染型钨矿,以钨矿化为主,伴生铜和钼矿化,矿区发育燕山期似斑状黑云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩、花岗斑岩及新元古代花岗闪长岩,成矿与燕山期花岗岩有关;细脉浸染状矿化发育在燕山期花岗岩与新元古代花岗闪长岩的内、外接触带,矿石矿物以白钨矿为主(图3b);石英-黑钨矿大脉产于似斑状黑云母花岗岩中,伴生有铜矿化;在似斑状黑云母花岗岩岩体

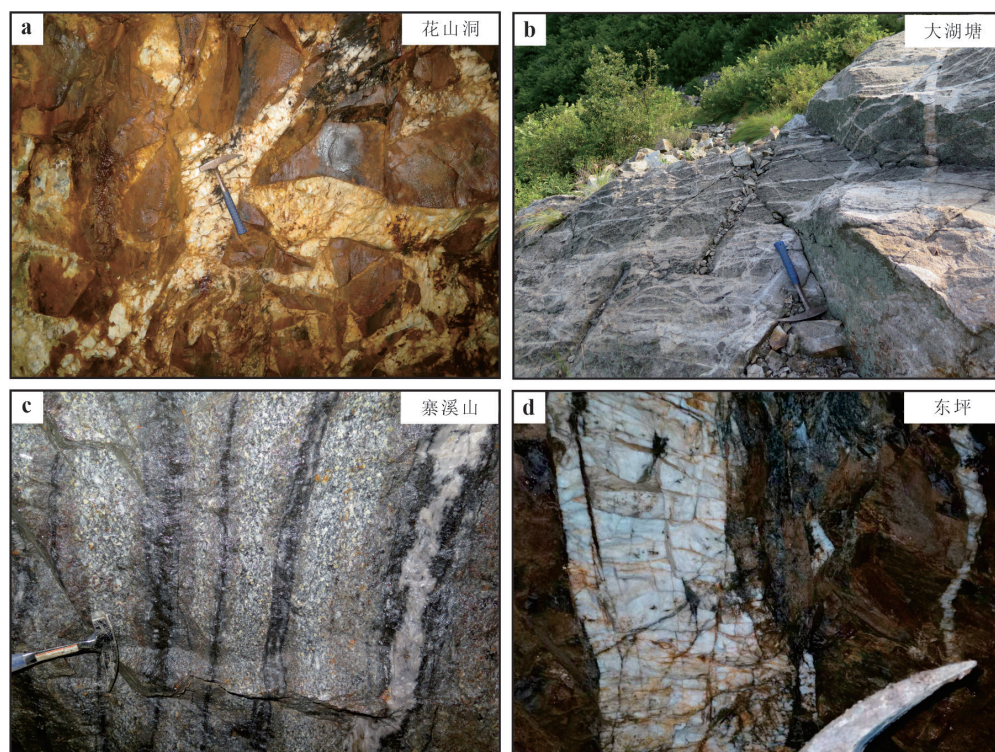


图3 江南造山带部分钨矿床野外照片

Fig. 3 Field photographs of some tungsten deposits in the Jiangnan Orogen

a. 花山洞钨矿热液角砾岩型矿化;b. 大湖塘钨矿网脉状矿化;c. 寨溪山钨矿含白钨矿电气石-石英脉;d. 东坪钨矿含黑钨矿石英脉

顶部以及围岩中发育角砾岩型钨铜矿化,矿石矿物主要为白钨矿和黄铜矿(Song W L et al., 2018)。而东源、阳储岭、木瓜园钨矿主要发育在与成矿同期的花岗闪长岩(斑岩)或二长花岗斑岩中(图4)。

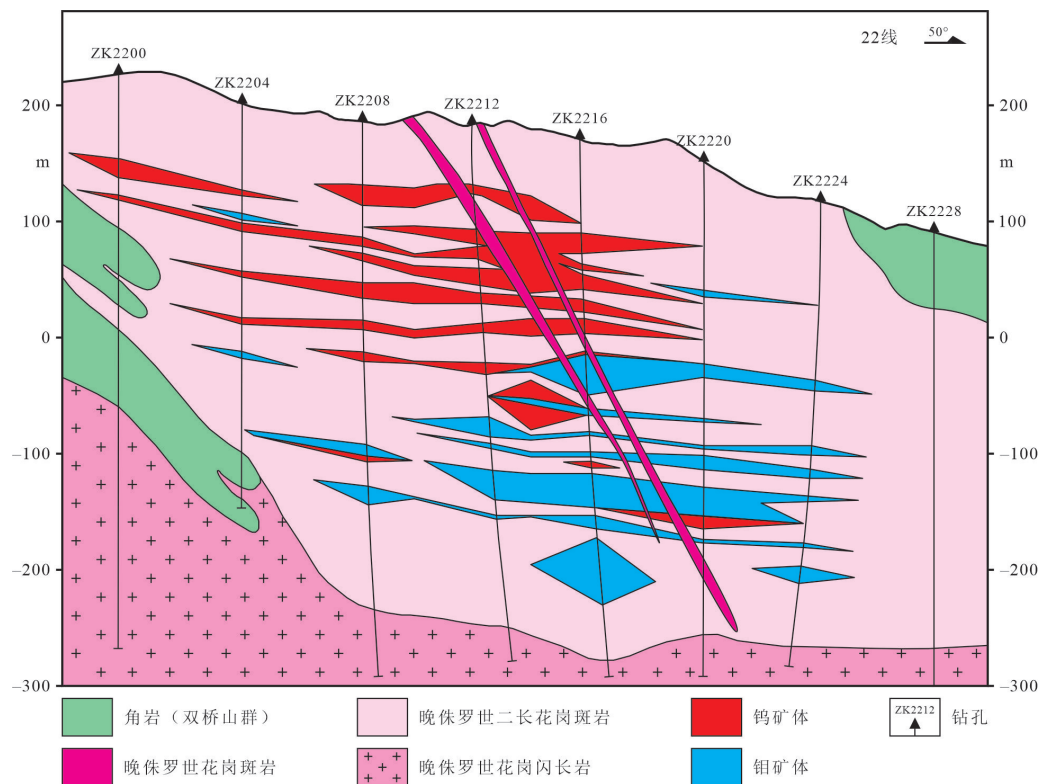


图4 阳储岭钨钼矿22线地质剖面图(据江西省地质矿产勘查开发局九一六大队,2019修改)

Fig. 4 Geological cross section along the exploration line 22 of the Yangchuling W-Mo deposit (modified after Team 916 of Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2019)

石英脉型钨矿床可分为石英脉型白钨矿和石英脉型黑钨矿,前者以杨家山和寨溪山为代表,后者以东坪和浒坑最为典型。寨溪山电气石-石英脉型白钨矿产于黑云母二长花岗岩中,脉体接近直立(图5a),脉两侧常发育云英岩化、钾长石化、钠长石化、电气石化等蚀变(图3c)(苏康明等,2016)。杨家山石英脉型白钨矿已探明 WO_3 资源量 3.86 万吨,品位为 0.70%,石英-白钨矿-硫化物脉从花岗岩延伸到新元古代高涧群漠滨组板岩、片岩和杂砂岩中(Xie G Q et al., 2019a; 张志远等, 2021)。东坪石英脉型黑钨矿(资源量和品位分别为 0.214 Mt WO_3 和 0.448%)是近年来在江南造山带发现的唯一以黑钨矿为主的大型钨矿床,钨矿体由 300 条以上的黑钨矿-石英脉组成,赋存在新元古代双桥山群板岩中,与深部的中粒黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云

母花岗岩有密切的成因联系(图5b);黑钨矿在石英脉中呈晶簇状,脉两侧发育云英岩化(图3d)(杨细浩等,2019; Yang S W et al., 2022)。

与钨矿床相比,锡矿床在江南造山带相对较少,典型的有宝坛电气石-石英脉型锡矿(图6a)、九毛和彭山矽卡岩型锡矿、李家石英脉型锡矿(图6b)。宝坛锡矿(锡矿石量和品位分别为 0.23 Mt 和 0.43%)主要产于四堡群变质沉积岩和镁铁质岩中,伴随强烈的电气石化、硅化和云英岩化,蚀变矿化期次可分为六个阶段:成矿前的高温蚀变、锡石-云英岩、锡石-电气石-石英、锡石-石英脉、锡石-硫化物和成矿期后的石英-方解石脉阶段。锡矿化主要发生在锡石-云英岩、锡石-电气石-石英和锡石-石英脉阶段(Zhang S T et al., 2019)。九毛矽卡岩型锡矿的形成经历了进变质矽卡岩、退变质矽卡岩和

硫化物脉阶段,锡成矿主要发生在退变质矽卡岩阶段和硫化物阶段,锡石在退变质矽卡岩中通常与普通角闪石、阳起石、透闪石、电气石和石英共生,锡石-硫化物脉切穿矽卡岩(Xiang L et al., 2018)。

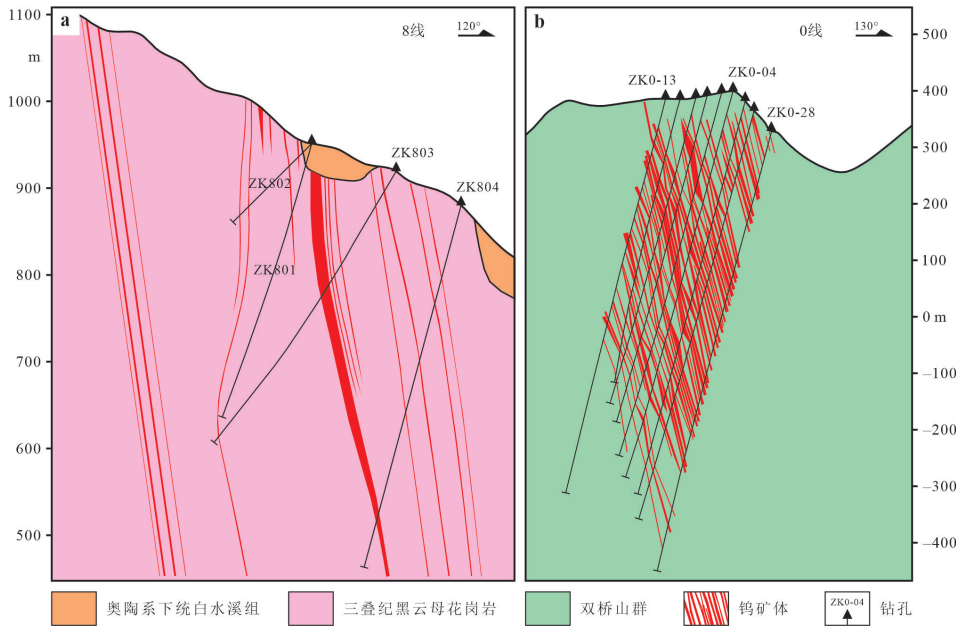


图5 寨溪山钨矿8线地质剖面图(a,据湖南省地质矿产勘查开发局四〇七队,2016修改)和东坪钨矿0线地质剖面图(b,据 Yang S W et al., 2022 修改)

Fig. 5 Geological cross sections along the exploration line 8 of the Zhaixishan W deposit (a, modified after Team 407 of Hunan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2016) and the exploration line 0 of the Dongping W deposit (b, modified after Yang S W et al., 2022)

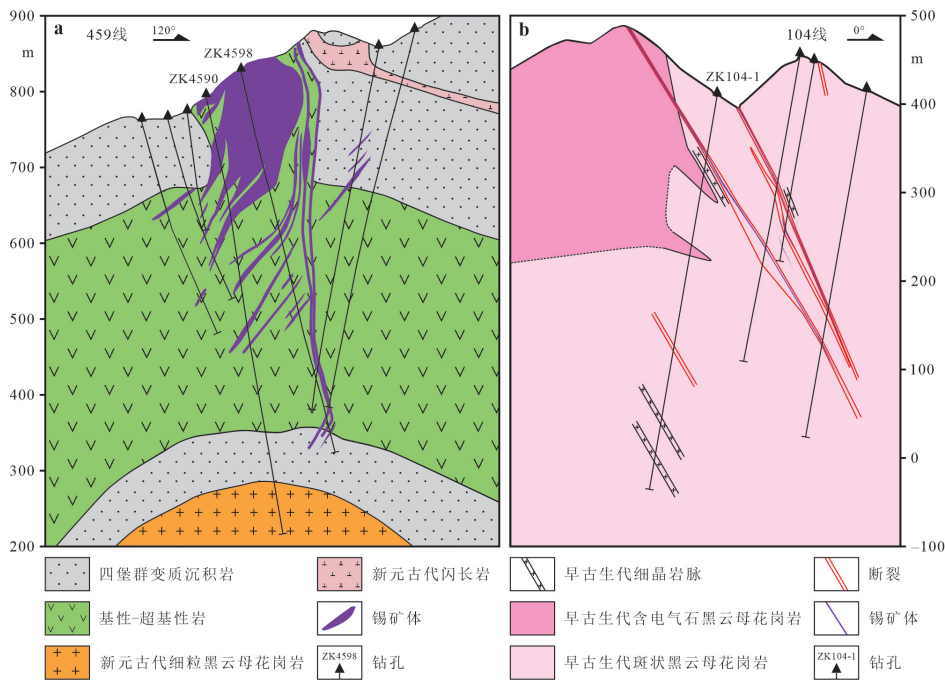


图6 宝坛锡矿459线地质剖面图(a,据 Zhang S T et al., 2019)和李家锡矿104线地质剖面图(b,据广西壮族自治区三一〇核地质大队,2016修改)

Fig. 6 Geological cross sections along the exploration line 459 of the Baotan Sn deposit (a, after Zhang S T et al., 2019) and the exploration line 104 of the Lijia Sn deposit (b, modified after Nuclear Geological Team 310 of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 2016)

稀有金属矿床主要产于高分异的Li-F花岗岩和伟晶岩中,如松树岗、宜丰、梵净山、雅山等矿床为花岗岩型(图7),而断峰山和仁里矿床为伟晶岩型。松树岗Ta矿产于灵山杂岩体西部,与隐伏的白玉钠长石花岗岩有关(Zhu Z Y et al., 2015)。黄山富Li铁云母花岗岩和含黑鳞云母花岗岩位于灵山杂岩体的西南部,研究发现两类花岗岩Nb含量高达148 $\mu\text{g/g}$, Nb主要富集在云母中,铁云母平均含有1347 $\mu\text{g/g}$ Nb,黑鳞云母平均含有884 $\mu\text{g/g}$ Nb,因此,黄山花岗岩可能是Nb的一种新型资源(Zhu Z Y et al., 2018, 2019)。宜丰花岗岩岩体侵入到九岭新元古代花岗闪长岩中,由黑云母花岗岩、二云母花岗岩、富Li的白云母花岗岩、钠长石花岗岩和细晶岩脉组成,具有明显的岩相分带,精细矿物学研究表明宜丰花岗岩具有类似于雅山花岗岩

的稀有金属矿物组合,表现出较强的Li-Nb-Ta找矿潜力(Xie L et al., 2019)。贵州东部的梵净山浅色花岗岩中可见锡石、黑钨矿、铌黑钨矿、铌铁矿等矿物,显示出一定的稀有金属成矿潜力(Xiang L et al., 2020)。幕阜山复式岩体由新元古代和燕山期花岗岩组成,燕山期花岗岩主要包括石英二长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩。早期岩性以花岗闪长岩、石英二长岩和黑云母花岗岩为主,中期以二云母花岗岩为主,晚期为零散分布的白云母花岗岩岩株。二云母花岗岩和白云母花岗岩是稀有金属伟晶岩的成矿母岩(李鹏等, 2021)。幕阜山地区伟晶岩脉多达数千条,形态以网脉状、透镜状、囊状为主,常见多期次伟晶岩脉互相穿插现象。按特征矿物的发育程度划分为:电气石伟晶岩、电气石-绿柱石伟晶岩、绿柱石伟晶岩、绿柱石-铌钽铁矿和铌钽铁矿-锂电气石-锂云母伟晶岩五类,伟晶岩中稀有金属矿化种类包括Be、Nb、Ta、Li和Cs(王晶等, 2020)。根据成矿元素分类,可将区域稀有金属伟晶岩矿床分为Be矿化带(如麦市)、Be-Nb-Ta矿化带(如黄泥洞)、Be-Nb-Ta-(Li)矿化带(如断峰山)、Be-Nb-Ta-Li-(Cs)矿化带(如仁里)四个带,常见的矿石矿物有铌钽铁矿、锂辉石、锂电气石、锂云母、绿柱石等(李鹏等, 2021)。

一些矿床出现明显的金属分带。在赣西北彭山花岗岩与围岩接触带发育曾家垄、尖峰坡、黄金洼锡矿,在外围发育张十八铅锌矿,具有明显的矿田尺度元素分带(Xu B et al., 2017)。赣东北松树岗稀有金属矿床的成矿作用具有显著的分带性,深部为含Ta-Nb花岗岩,铌钽矿物赋存在钠长石花岗岩中,而浅部的黑钨矿-锡石-石英脉赋存在硅化的震旦纪千枚岩中(薛荣等, 2019)。

2 成岩成矿时代

成矿年龄是解剖矿床成因的突破口之一。常规的同位素测年方法主要有全岩及单矿物的K-Ar、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、Rb-Sr以及含钙矿物的Sm-Nd、硫化物Re-Os定年。K-Ar、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、Rb-Sr、Sm-Nd同位素体系的封闭温度较低,容易受到后期构造热事件

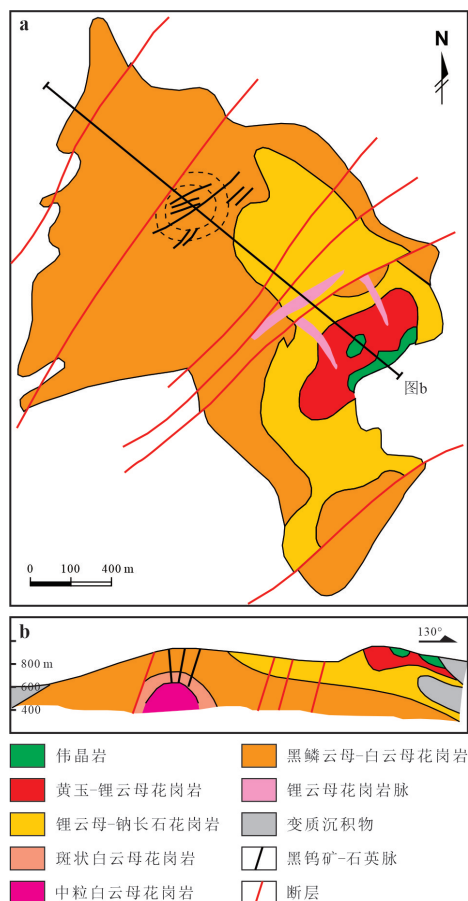


图7 雅山花岗岩平面地质简图(a)和剖面图(b)

(据 Yin L et al., 1995 修改)

Fig. 7 Simplified geological map (a) and cross section (b) of the Yashan granite (modified after Yin L et al., 1995)

的扰动或重置(Zhang R Q et al., 2017a)。含铀矿物的 U-Pb 同位素体系封闭温度高,受后期热事件干扰影响小。随着分析技术的发展,单矿物 TIMS、SIMS、SHRIMP、LA-(MC/FS)-ICP-MS U-Pb 定年方法在矿床成因研究领域得到越来越多的应用,石榴子石、榍石、铌钽矿、黑钨矿、白钨矿和锡石等定年方法的开发(Gulson and Jones, 1992; Romer and Wright, 1992; Smith et al., 2004; Romer and Luder, 2006; Amelin, 2009; Yuan S D et al., 2011; Sun J F et al., 2012; Che X D et al., 2015; Li C Y et al., 2016; Deng X D et al., 2017; Seman et al., 2017;

Zhang R Q et al., 2017a, 2017b; Harlaux et al., 2018a; Yang M et al., 2020, 2022; Carr et al., 2021; Li D F et al., 2022; Tang Y W et al., 2022; Wintzer et al., 2022)为更深入地揭示江南造山带钨锡稀有金属矿床成因提供了技术支撑。

江南造山带发育新元古代、加里东期、印支期、燕山期多时代花岗岩,钨锡稀有金属成矿与花岗岩在成因上密切相关,其成矿时代与花岗岩成岩事件基本对应,也可以分为新元古代、加里东期、印支期和燕山期(图8和表1)(华仁民等,2013;周涛发等, 2019; Mao J W et al., 2019;谢桂青等,2021)。

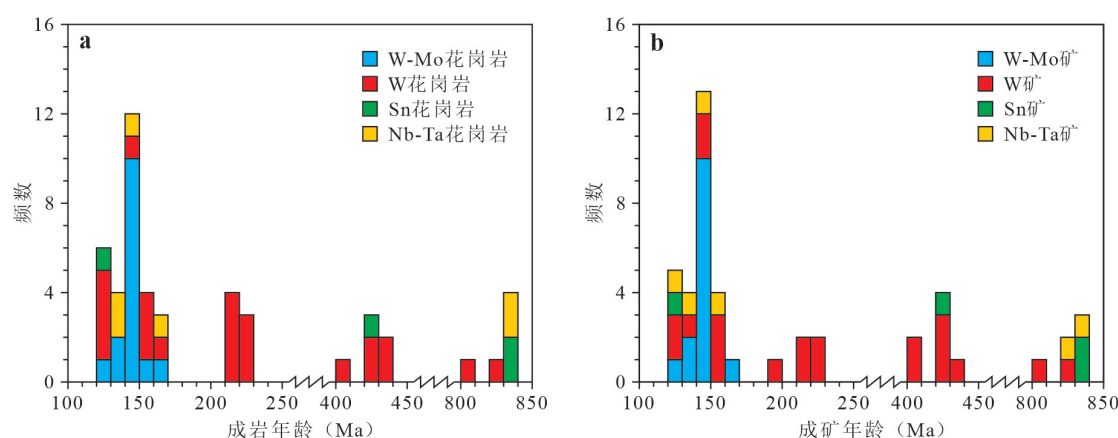


图8 江南造山带钨锡稀有金属矿床成岩(a)、成矿(b)年龄频率分布直方图(数据来源于表1)

Fig. 8 Frequency distribution histograms of granite-forming (a) and ore-forming (b) ages for the tungsten, tin, and rare metal deposits in the Jiangnan Orogen (data sources are listed in Table 1)

2.1 新元古代

江南造山带广泛分布有新元古代花岗岩,代表性的有浙西石耳山和道林山岩体,皖南的休宁、许村和歙县岩体,赣西北九岭岩体,湘东北幕阜山岩体,桂北三防和元宝山岩体,黔东北梵净山岩体等。其中,九岭、苗儿山、幕阜山为多时代复式岩体。新元古代岩体岩性变化大,主要为花岗闪长岩和黑云母花岗岩,部分与钨锡稀有金属矿床有关。宝坛和九毛锡矿与新元古代元宝山-三防高分异S型花岗岩有关(Xiang L et al., 2018; Zhang S T et al., 2019)。宝坛锡矿主成矿期电气石-石英脉和石英脉中两件锡石样品 U-Pb 同位素定年结果分别为 832 ± 5 Ma 和 834 ± 4 Ma,与平英岩体黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄一致(834.2 ± 5.1 Ma)(张世涛等,2016; Zhang S T et al., 2019)。元宝山岩体边缘相黑云母

花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 832 ± 5 Ma,与云英岩中锡石 U-Pb 年龄 831 ± 11 Ma 一致(Xiang L et al., 2018)。梵净山电气石-石英脉花岗岩和伟晶岩显示出明显的 Nb-Ta-Sn-W 成矿潜力,其锆石和铌钽矿给出的 U-Pb 年龄分别为 830 ± 5 Ma、 832.0 ± 9.1 Ma 和 832 ± 5 Ma(Xiang L et al., 2020; Lv Z H et al., 2021)。本课题组最新研究成果表明,九岭岩体是由约 820 Ma 和 800 Ma 的新元古代花岗闪长岩组成的复式岩体,花山洞钨矿存在两期新元古代钨成矿作用,在成因上分别与九岭岩体两期演化程度较高的花岗闪长岩有关,早期和晚期辉钼矿的 Re-Os 年龄分别与两期花岗岩的锆石 U-Pb 年龄一致(黄迪, 2021; 黄迪等, 2022)。

2.2 加里东期

苗儿山-越城岭复式岩体由新元古代、加里东

表 1 江南造山带钨锡稀有金属矿床成矿元素组合、成矿类型、花岗岩类型和成岩成矿年龄
Table 1 Ore element associations, mineralization styles, granite rock types, and granite-forming and ore-forming ages of the tungsten, tin, and rare metal deposits in the Jiangnan Orogen

矿床/花岗岩名称	成矿元素组合	成矿类型	花岗岩岩石类型	成岩年龄 (Ma)	成矿年龄 (Ma)	资料来源
W-Mo 矿						
东源	W-Mo	细脉浸染型	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb: 146±1	辉钼矿 Re-Os: 146.4±2.3	周期等, 2011
高家岭	W-Mo	矽卡岩型	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb: 145±2	辉钼矿 Re-Os: 146.1±4.8	肖鑫等, 2017
百丈岩	W-Mo	矽卡岩型	二长花岗岩	锆石 U-Pb: 133.3±1.3	辉钼矿 Re-Os: 134.1±2.2	Song G X et al., 2013
鸡头山	W-Mo	矽卡岩型	花岗闪长岩	锆石 U-Pb: 138.8±1.0	辉钼矿 Re-Os: 136.6±1.5	Song G X et al., 2012
道遥	W-Cu-Pb-Zn	矽卡岩型	花岗闪长岩	锆石 U-Pb: 149.4±1.1	辉钼矿 Re-Os: 148.7±2.5	Su Q W et al., 2018
竹溪岭	W-Mo-Ag	矽卡岩型	花岗闪长岩	锆石 U-Pb: 139.8±1.8	辉钼矿 Re-Os: 140.2±1.5	黄马等, 2018; 孔志岗等, 2018
大坞尖	W-Mo	矽卡岩型	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb: 148.3±2.2	辉钼矿 Re-Os: 144.4±1.5	李斌等, 2015
阳储岭	W-Mo	细脉浸染型	二长花岗岩	锆石 U-Pb: 146.2±1.2	辉钼矿 Re-Os: 146.4±1.0	Mao J W et al., 2017; 本课题组未发表数据
W 矿						
花山洞	W	云英岩型、热液角砾岩型、石英脉型	花岗闪长岩	锆石 U-Pb: 829.8 ±7.5, 822.9±6.8, 803.9±5.3	辉钼矿 Re-Os: 827.8±9.8, 805±5, 798.0±5.1	刘进先等, 2015; 黄迪, 2021
牛塘界	W	矽卡岩型	二云母、白云母花岗岩	锆石 U-Pb: 421.8±2.4, 421.0±1.5	白钨矿 Sm-Nd: 421±24 锡石 U-Pb: 420.8±8.0	杨振等, 2014; Chen X L et al., 2018
独石岭	W-Cu	矽卡岩型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 420.9±2.3, 421.5±2.5, 422.9±2.1, 423.2±2.4	白钨矿 Sm-Nd: 417±35 榍石 U-Pb: 423±6, 425±6, 426±7, 427±4, 427±5	陈文迪等, 2016; Li J D et al., 2020
平滩	W-Mo	破碎带蚀变花岗岩型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 430.8±2.4	辉钼矿 Re-Os: 427.0±5.4	Chen J F et al., 2019
威溪	W-Cu	矽卡岩型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 433.5±1.9	榍石 U-Pb: 430.6±3.1	周维法, 2020
杨家山	W	白钨矿-石英脉型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 406.6±2.8	锡石 U-Pb: 409.8±5.9 辉钼矿 Re-Os: 404.2±3.2	Xie G Q et al., 2019a
木瓜园	W	细脉浸染型	花岗斑岩	锆石 U-Pb: 226.1±1.8	辉钼矿 Re-Os: 219.0±6.8	Li X Y et al., 2021; 李晓宇, 2021
大溶溪	W	矽卡岩型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 224.3 ± 1.0	辉钼矿 Re-Os: 223.3±3.9	张龙升等, 2012, 2014
曹家坝	W	矽卡岩型			榍石 U-Pb: 206±5, 196±3	Xie G Q et al., 2019b
寨溪山	W	白钨矿-石英脉型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 214.2±1.7		苏康明等, 2016
云头界	W-Mo	石英脉型	白云母花岗岩	锆石 U-Pb: 216.8 ± 4.9	辉钼矿 Re-Os: 216.8±7.5	伍静等, 2012
油麻岭	W	矽卡岩型、石英脉型	二云母花岗岩	锆石 U-Pb: 221.6±2.4, 220.2±1.6	辉钼矿 Re-Os: 223.5±7.7 白钨矿 Sm-Nd: 212±20	李晓峰等, 2012; 张迪等, 2015

续表1

矿床/花岗岩名称	成矿元素组合	成矿类型	花岗岩岩石类型	成岩年龄(Ma)	成矿年龄(Ma)	资料来源
朱溪	W-Cu	矽卡岩型	黑云母、白云母花岗岩、 花岗岩斑岩	锆石 U-Pb: 153.5±1.0、152.9± 1.7、153.4±1.0、149.4±0.9、 149.0±1.0、148.3±1.4	白云母 Ar-Ar: 150.0±0.9、 150.2±0.9 楣石 U-Pb: 148.9±1.5、 149.9±1.3	Pan X F et al., 2017, 2018; Song S W et al., 2018a, 2018b, 2019
大湖塘	W-Cu-Mo	细脉浸染型、黑钨 矿-石英脉型、热液 角砾岩型	黑云母、二云母、白云母 花岗岩、花岗岩斑岩	锆石 U-Pb: 144.0±0.6、133.7± 0.5、130.3±1.1、130.7±1.1、 147.4±0.6、144.7±0.5、143.0±0.8	辉钼矿 Re-Os: 143.7±1.2、140.9± 3.6、149.6±1.2、139.2±1.0、137.9± 2.0	丰成友等, 2012; 项新葵等, 2013; Huang L C and Jiang S Y, 2014; Mao Z H et al., 2013, 2015; 张勇 等, 2017
东坪	W-Cu	黑钨矿-石英脉型	二云母花岗岩	锆石 U-Pb: 129.8±0.3	黑钨矿 U-Pb: 129.5±5.4	Yang S W et al., 2022
香炉山	W	矽卡岩型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 123.8±0.8	辉钼矿 Re-Os: 125.5±0.7	Dai P et al., 2018
虎形山	W-Be	石英脉型、云英岩 型	二云母花岗岩	锆石 U-Pb: 137.8±0.5	石英 Rb-Sr: 134±2	Wu J W et al., 2020
下桐岭	W-Mo	石英脉型、云英岩 型	二云母、白云母花岗岩	锆石 U-Pb: 154.7±1.7	辉钼矿 Re-Os: 156.0±2.1	Li X F et al., 2018
浒坑	W	黑钨矿-石英脉型	白云母花岗岩	锆石 U-Pb: 151.6±2.6	辉钼矿 Re-Os: 150.2±2.2	刘珺等, 2008a, 2008b
Sn 矿						
宝坛	Sn	锡石-电气石-石英 脉型、锡石-硫化物 脉型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 834.2±5.1	锡石 U-Pb: 832±5、834±4	张世涛等, 2016; Zhang S T et al., 2019
九毛	Sn	锡石-硫化物脉型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 832±5	锡石 U-Pb: 831±11	Xiang L et al., 2018
李家	Sn	石英脉型、云英岩 型	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb: 425.1±2.1、 427.2±1.3、429.0±1.5	锡石 U-Pb: 430.5±3.7、 428.0±2.2	张强, 2021
彭山	Sn-Pb-Zn	矽卡岩型	黑云母、二云母花岗岩	锆石 U-Pb: 128±1、129±2	锡石 U-Pb: 128.3±2.5	罗兰等, 2010; 徐斌等, 2015
Nb-Ta 矿/花岗岩						
梵净山	Ta-Nb-Sn-W	花岗岩型、伟晶岩 型	白云母花岗岩、钠长石花 岗岩	锆石 U-Pb: 830±5、 832.0±9.1	铌钽矿 U-Pb: 832±5	Xiang L et al., 2020; Lv Z H et al., 2021
雅山	Ta-Nb-Li	花岗岩型	二云母、白云母花岗岩、 钠长石花岗岩	锆石 U-Pb: 161.0±1.0	铌钽矿 U-Pb: 158±1、 158±2	楼法生等, 2005; Che X D et al., 2019
宜丰	Nb-Ta-Li	花岗岩型	二云母、白云母花岗岩、 钠长石花岗岩	锆石 U-Pb: 147.0±2.0、 146.0±1.2	铌钽矿 U-Pb: 144±5	Wang D et al., 2017; Xie L et al., 2019
仁里	Nb-Ta-Li	伟晶岩型	黑云母、二云母、白云母 花岗岩、钠长石花岗岩	锆石 U-Pb: 138.3±0.3、 131.2±2.4	铌钽矿 U-Pb: 133.0±2.6	Li P et al., 2020
松树岗	Ta-Nb-W-Sn	花岗岩型	钠长石花岗岩	锆石 U-Pb: 133.6±2.5	铌钽矿 U-Pb: 130±2、 129±1	Xiang Y X et al., 2017; Che X D et al., 2019

期、印支期、燕山期花岗岩组成,其中加里东期花岗岩出露面积最大。在这个复式岩体中发育多时代钨锡矿化。与加里东期花岗岩有关的钨锡矿床主要包括牛塘界、威溪、平滩和独石岭钨矿及李家锡矿。牛塘界矽卡岩型钨矿位于越城岭岩体的东南侧,白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄和锡石 U-Pb 年龄分别为 421 ± 24 Ma 和 420.8 ± 8.0 Ma,与越城岭加里东期花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(422 ± 2 Ma)基本一致(杨振等, 2014; Chen X L et al., 2018)。独石岭矽卡岩型钨铜矿位于越城岭岩体的东北侧,白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄为 417 ± 35 Ma,与白钨矿共生的榍石 U-Pb 年龄为 $423\sim 427$ Ma,成矿年龄接近花岗岩年龄($421\sim 427$ Ma)(陈文迪等, 2016; Li J D et al., 2020)。平滩钨矿位于苗儿山岩体的西北侧,蚀变花岗岩和白钨矿-石英脉中辉钼矿给出的 Re-Os 等时线年龄为 427 ± 5 Ma,与黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 431 ± 2 Ma 基本一致(Chen J F et al., 2019)。威溪矽卡岩型白钨矿中热液榍石 U-Pb 年龄为 430.6 ± 3.1 Ma,与矽卡岩形成密切相关的花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 433.5 ± 1.9 Ma,表明成岩成矿基本同时(周维法, 2020)。李家云英岩-石英脉型锡矿的锡石 U-Pb 年龄为 429 ± 2 Ma,与花岗岩锆石 U-Pb 年龄 $426\sim 429$ Ma 一致(张强, 2021)。湘中杨家山石英脉型白钨矿矿床中黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 407 ± 3 Ma,与白钨矿共生的锡石和辉钼矿给出的 U-Pb 年龄和 Re-Os 等时线年龄分别为 410 ± 6 Ma 和 404 ± 3 Ma,表明钨成矿与花岗质岩浆作用存在密切成因联系(Xie G Q et al., 2019a)。

2.3 印支期

云头界钨钼矿和鸭头水钨矿位于苗儿山岩体中部。云头界细脉状钨钼矿中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 217 ± 8 Ma,与花岗岩锆石 U-Pb 年龄 217 ± 5 Ma 年龄一致(伍静等, 2012)。油麻岭钨矿位于苗儿山岩体南部,花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $212\sim 220$ Ma,基本与辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 $215\sim 227$ Ma 一致(李晓峰等, 2012; 程顺波等, 2013; 杨振等, 2013; 张迪等, 2015)。湘中木瓜园细脉浸染型钨矿中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 219 ± 7 Ma,与成矿花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 226 ± 2 Ma 基本一致(Li X Y et al., 2021)。湘中曹家坝矽卡岩型钨矿中榍石

U-Pb 年龄为 206 ± 5 Ma 和 196 ± 3 Ma(Xie G Q et al., 2019b)。湘西崇阳坪地区从北向南发育中华山、崇阳坪和瓦屋塘三个花岗岩岩体,后两个岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 214 ± 2 Ma 和 223 ± 2 Ma(苏康明等, 2016)。沙溪和栗山坡钨矿与中华山花岗岩有关,上茶山、寨溪山、中村钨矿与崇阳坪花岗岩有关,而牛角界钨矿则与瓦屋塘花岗岩有关。湘西大溶溪层控矽卡岩型矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 224 ± 1 Ma,与大神山花岗岩锆石 U-Pb 年龄 223 ± 4 Ma 一致(张龙升等, 2012, 2014)。由此可见,江南造山带印支期主要发育钨矿床,未见独立的锡矿床和稀有金属矿床。

2.4 燕山期

燕山期是江南造山带钨矿和稀有金属矿床成矿爆发期。燕山期钨矿主要分布在赣北和赣中,钨钼矿主要分布在皖南,在湘西和浙西有少量钨矿产出,规模有限。燕山期钨矿和钨钼矿主要形成于 $156\sim 124$ Ma。朱溪矽卡岩白钨矿中榍石 U-Pb 年龄为 $150\sim 148$ Ma,与黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄 $153\sim 148$ Ma 一致(Pan X F et al., 2018; Song S W et al., 2018b, 2019)。大湖塘细脉浸染型钨矿床锆石 U-Pb 与辉钼矿 Re-Os 定年结果均变化于 $152\sim 130$ Ma 之间(Mao Z H et al., 2013, 2015; 项新葵等, 2013; Huang L C and Jiang S Y, 2014)。东坪石英脉型黑钨矿中黑钨矿和花岗岩中锆石给出的 U-Pb 年龄分别为 129.5 ± 5.4 Ma 和 129.8 ± 0.3 Ma,两者在误差范围内完全一致(Yang S W et al., 2022)。阳储岭细脉浸染型钨钼矿床中花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 146.2 ± 1.2 Ma,与辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 146.4 ± 1.0 Ma 一致(Mao J W et al., 2017)。皖南青阳钨钼矿集区成岩成矿年代分为 $146\sim 135$ Ma 和 $134\sim 128$ Ma 两期,以早期成矿为主,早期矿床分布在青阳岩体周边,晚期矿床主要分布于九华山岩体边部及外围(张达玉等, 2017)。

燕山期稀有金属矿床主要形成于 $160\sim 130$ Ma,包括伟晶岩型和花岗岩型,主要分布在湘东北、赣北、赣中等地区,如幕阜山复式岩体中仁里、断峰山、连云山和大兴伟晶岩以及宜丰、灵山、雅山和苏州花岗岩等。最近在苗儿山-越城岭地区也有燕山期 Sn-Nb-Ta-Be 稀有金属花岗岩和伟晶岩的

报道(锆石和锡石 U-Pb 年龄为 147~155 Ma, Tian E N et al., 2020), 其成矿规模还有待进一步勘探。雅山稀有金属花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 161 ± 1 Ma, 与铌钽矿 U-Pb 年龄(~ 158 Ma)一致(楼法生等, 2005; Che X D et al., 2019)。仁里伟晶岩中锆石和铌钽矿 U-Pb 年龄分别为 138.3 ± 0.3 Ma 和 133.0 ± 2.6 Ma (Li P et al., 2020)。锆石和铌钽矿 U-Pb 定年揭示宜丰稀有金属花岗岩形成年龄为 144~147 Ma (Wang D et al., 2017; Xie L et al., 2019)。灵山复式岩体中黄山富 Nb 花岗岩的铌铁矿 U-Pb 年龄为 ~ 133 Ma, 而松树岗富 Ta 黄玉钠长石花岗岩的锆石和铌钽矿 U-Pb 年龄分别为 132~134 Ma 和 129~130 Ma (Che X D et al., 2015, 2019)。苏州 Ta-Nb 花岗岩锆石和铌钽矿 U-Pb 定年结果为 126~121 Ma (Tian E N et al., 2021)。

江南造山带燕山期发育少量的锡矿床, 主要分布在赣西北, 在皖南地区偶见, 主要形成于 125~130 Ma。彭山矽卡岩型锡矿锡石 U-Pb 年龄为 128.3 ± 2.5 Ma, 与燕山期高分异还原性花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 128 ± 1 Ma 和 129 ± 2 Ma)有关(罗兰等, 2010; 徐斌等, 2015; Xu B et al., 2017)。八字脑地区发育多个云英岩(石英脉)型锡矿床和矿点, 如八字脑、茅棚店, 云英岩中锡石和花岗岩锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致, 约为 130 Ma (Meng X et al., 2022)。

总体来看, 在江南造山带, 锡成矿主要发生在新元古代和早白垩世, 加里东期偶见小型锡矿; 钨和钨钼成矿主要发生在加里东期、印支期和燕山期, 新元古代钨成矿规模相对较小; 稀有金属成矿主要发生在早白垩世, 新元古代稀有金属成矿规模有限(表 1 和图 8)。江南造山带发育华南最老的钨锡稀有金属矿, 如宝坛、九毛、花山洞、梵净山。随着多种定年技术的发展, 许多加里东期和印支期钨锡矿也被识别出来。江南造山带发育大量的加里东期和印支期花岗岩, 因此, 围绕这些古生代和中生代花岗岩寻找钨锡矿将是今后找矿勘探的重要方向之一。

3 成矿花岗岩特征

按照成矿金属组合不同, 将江南造山带成矿花

岗岩分为钨矿化花岗岩、钨钼矿化花岗岩、锡矿化花岗岩和铌钽矿化花岗岩, 它们在岩石类型和岩石组合上表现出明显的差异。锡矿化有关的花岗岩岩石类型往往为黑云母二长花岗岩-黑云母碱长花岗岩; 钨矿化花岗岩主要表现为黑云母、二云母和白云母花岗岩组合, 少量为花岗闪长岩(如花山洞钨矿); 钨钼矿化花岗岩为花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩; 铌钽矿化花岗岩常为二云母花岗岩、白云母花岗岩和钠长石花岗岩组合, 有时见黑云母花岗岩(表 1)。四类矿化花岗岩大部分属于高钾钙碱性系列, 由于钠长石含量高, 钾长石含量低, 部分与铌钽矿化有关的钠长石花岗岩落入钙碱性系列花岗岩区域(图 9a)。钨钼矿化花岗岩常含有角闪石, 为准铝质到弱过铝质, SiO_2 含量通常较低, 具有类似于 I 型花岗岩的一些地球化学特征, 钨矿化、锡矿化和铌钽矿化花岗岩为弱过铝到强过铝质花岗岩, SiO_2 含量和碱质较高(图 9b)。钨矿化花岗岩和锡矿化花岗岩在成因类型上通常属于 S 型, 铌钽矿化花岗岩一般属于 S 型或 A₂ 型。

四类矿化花岗岩的微量元素和稀土元素也表现出较大的差异(图 10)。钨矿化花岗岩和锡矿化花岗岩轻重稀土比值较小, 常表现出强烈的 Eu 负异常, Ba、Nb、Sr 和 Ti 明显亏损。钨矿化有关的花岗闪长岩 Eu 亏损不明显。铌钽矿化有关花岗岩也表现较低的轻重稀土比值和明显的 Eu 负异常, Ba、Sr 和 Ti 强烈亏损, 特别是含铌钽的钠长石花岗岩具有更低的稀土总量和更强烈的 Eu 亏损。钨钼矿化花岗岩往往 Eu 亏损不强烈, 轻重稀土比值往往较高, Nb 亏损明显, Ba、Sr 和 Ti 有轻微亏损。

江南造山带钨钼矿化花岗岩多为磁铁矿系列的氧化性花岗岩(Yang Y S et al., 2021), 通常具有高的锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值, 例如, 皖南地区与钨钼成矿有关的花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩(竹溪岭、桂林郑、旌德、青阳-九华山)(Yang Y S et al., 2021)。与钨、锡和铌钽矿化有关的过铝质花岗岩往往呈现还原性特征, 钛铁氧化物以钛铁矿为主, 通常具有低的磁化率和锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值, 如大湖塘、朱溪、苏州和平英等花岗岩(Zhang S T et al., 2019; Yang Y S et al., 2021)。

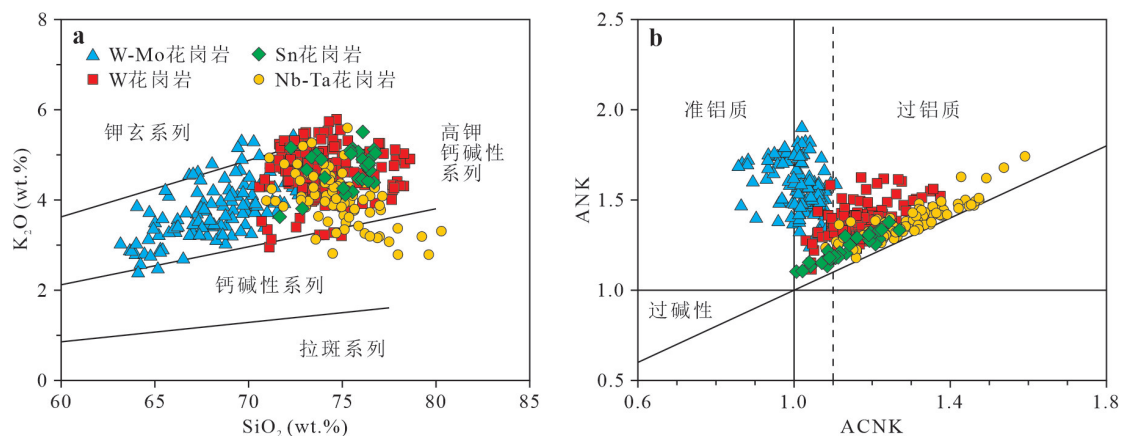


图9 江南造山带W-Mo、W、Sn和Nb-Ta花岗岩SiO₂-K₂O图解(a,底图据Rickwood, 1989)和ACNK-ANK图解(b,底图据Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 9 SiO₂-K₂O diagram (a, after Rickwood, 1989) and ACNK-ANK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989)

for the W-Mo, W, Sn, and Nb-Ta granites in the Jiangnan Orogen

数据来源:李洁和黄小龙, 2013; Huang L C and Jiang S Y, 2014; Wang L X et al., 2014; 杨振等, 2014; 陈国华等, 2015; Mao Z H et al., 2015; 陈文迪等, 2016; 张世涛等, 2016; Mao J W et al., 2017; Wang Y Y et al., 2017; Xiang Y X et al., 2017; Chen B et al., 2018; 胡正华等, 2018; Pan X F et al., 2018; Su Q W et al., 2018; Wei S D et al., 2018; Xiang L et al., 2020

不同钨锡稀有金属矿花岗岩的全岩Nd和锆石Hf同位素组成也显示出明显的差异(图11)。成因上属于A₂型的Nb-Ta花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较高, 分别集中在0~-5和+2~-3; 成因上属于S型的Nb-Ta花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大, 新元古代成矿花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为-13~-9和-9~-1, 燕山期成矿花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为-11~-7和-15~-3。燕山期钨矿化花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为-13~-3和-13~-0, 新元古代钨矿化花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为+1.5~-5, 明显高于燕山期成矿花岗岩。燕山期和新元古代锡矿化花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 比较相似, 主要集中在-9~-4, 而 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值稍有差异, 燕山期成矿花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要集中在-5~-0, 新元古代的集中在-6~-2。钨钼矿化花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别集中在-8~-6和-12~-0。全岩Nd和锆石Hf同位素特征显示, 成矿花岗岩主要是壳源成因, 部分燕山期花岗岩在形成过程中有幔源物质的参与, 不同时代、不同类型的成矿花岗岩可能源于不同的源区, 反映出江南造山带存在多个富钨锡稀有金属的物质源区。

4 花岗岩演化与钨锡稀有金属成矿

钨锡稀有金属花岗岩往往呈现出明显的岩相

变化, 从早期到晚期主要表现为岩石结构、矿物成分和岩石类型的变化。一些成矿花岗岩主要表现为岩石结构和矿物成分的变化, 从岩体中心相到边缘相矿物颗粒逐渐变细, 斜长石成分逐渐富钠, 典型例子是与新元古代宝坛锡矿有关的平英花岗岩(张世涛等, 2016); 一些成矿花岗岩表现出从黑云母花岗岩、二云母花岗岩到白云母花岗岩的演化序列, 有时出现极端分异的钠长石花岗岩。图7显示了与铌钽矿化有关的雅山花岗岩的岩相分带特征。从花岗岩演化程度和岩石类型来看, 只有当花岗质岩浆演化形成钠长石花岗岩时才会出现铌钽氧化物矿化。

不同成矿类型的花岗岩演化程度明显不同(图12)。总体来说, 钨矿化花岗岩、铌钽矿化花岗岩和锡矿化花岗岩演化程度较高, 钨钼矿化花岗岩演化程度较低。图12显示出, 从钨钼矿化花岗岩、钨矿化花岗岩和锡矿化花岗岩到铌钽矿化花岗岩, Rb/Sr比值逐渐升高, K/Rb、Nb/Ta和Zr/Hf比值逐渐降低, 反映出岩浆的分异演化程度逐渐升高, 花岗岩的Ba、Sr、Eu和Ti特征同样也反映出这一演化趋势。

矿物的结晶控制了元素在岩浆演化过程中的地球化学行为, 钨锡稀有金属元素属于不相容元素, 随着岩浆演化在残余熔体中会不断富集(Linnen and Cuney, 2005; Li X Y et al., 2021)。Yin R et

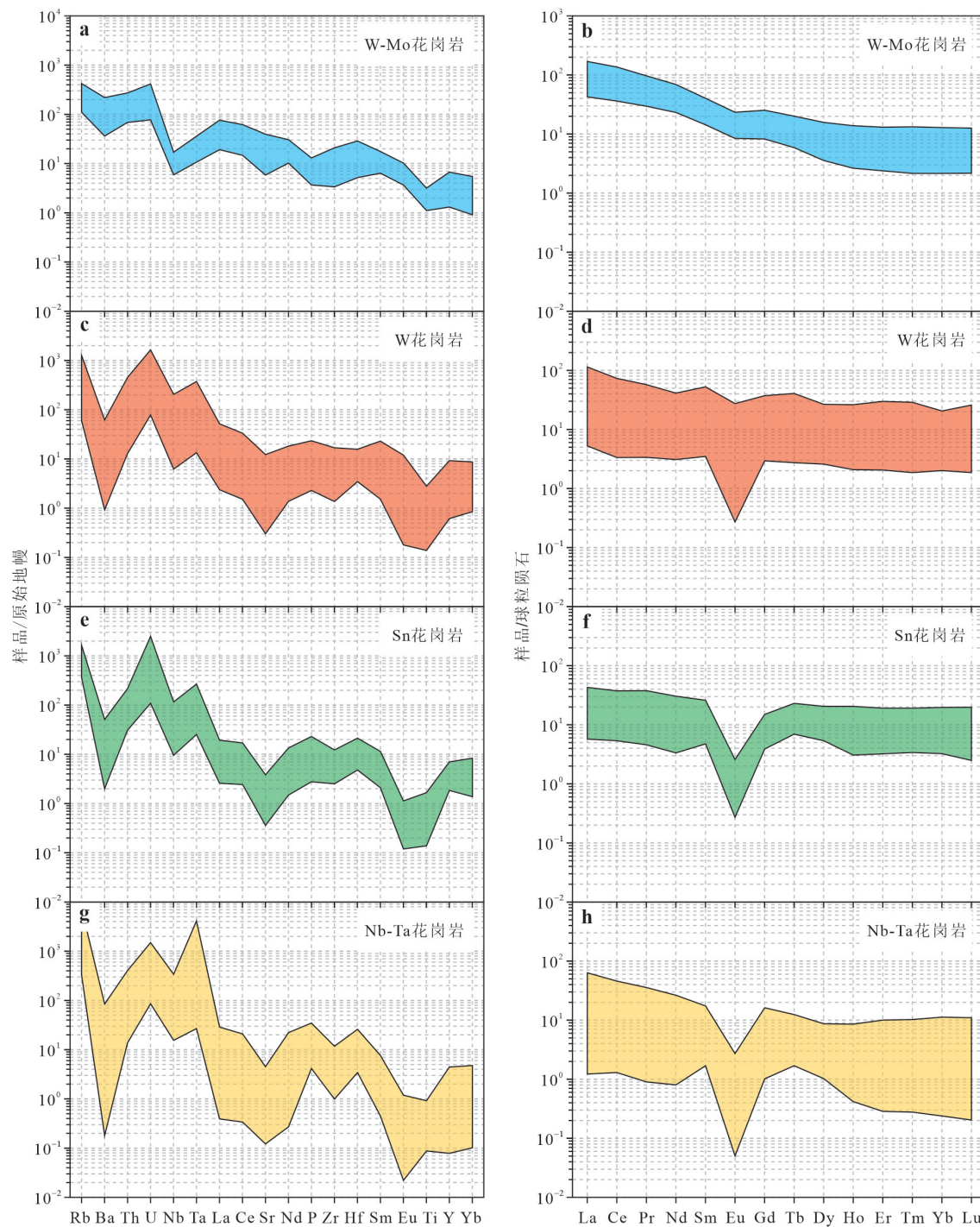


图10 江南造山带W-Mo、W、Sn和Nb-Ta花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a、c、e、g)和
稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(b、d、f、h)

Fig. 10 Primitive mantle-normalized (a,c,e,g) trace element patterns and chondrite-normalized (b, d, f, h) rare earth element patterns
for the W-Mo,W, Sn, and Nb-Ta granites in the Jiangnan Orogen

原始地幔标准化值据 [Sun and McDonough\(1989\)](#);球粒陨石标准化值据 [Boynton\(1984\)](#);数据来源同图9

[al.\(2019\)](#)研究了大湖塘成矿花岗岩的云母中钨含量变化,结果表明,从黑云母花岗岩到白云母花岗岩,云母中W含量明显增高。[Li X Y et al.\(2021\)](#)研

究了木瓜园钨矿成矿花岗岩中具有明显振荡环带结构锆石的W含量变化,结果显示晚期结晶锆石中的W含量明显高于早期结晶的锆石,表明随岩

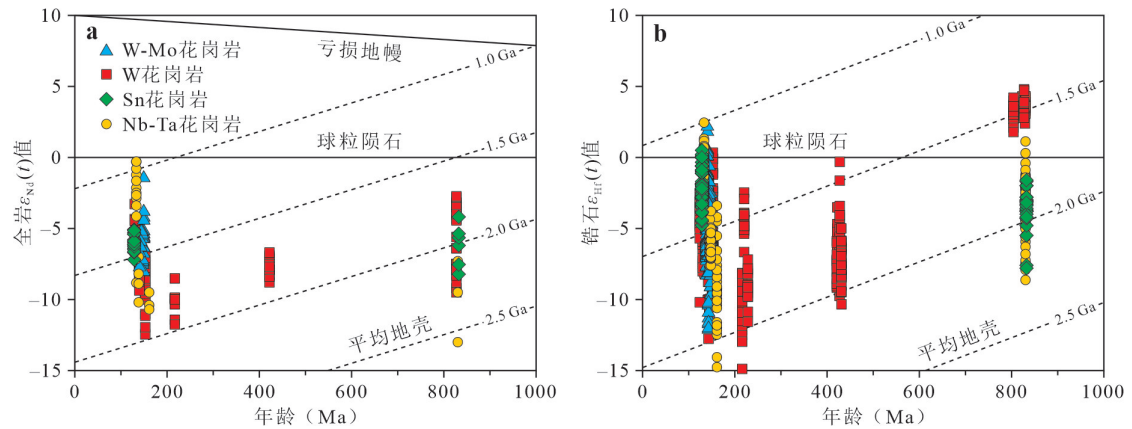


图11 江南造山带W-Mo、W、Sn和Nb-Ta花岗岩全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值-年龄(a)和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值-年龄(b)图解

Fig. 11 Whole-rock $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value vs. age diagram (a) and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value vs. age diagram (b) for the W-Mo, W, Sn, and Nb-Ta granites in the Jiangnan Orogen

数据来源:王德恩等, 2011; 陈雪霏等, 2013; Huang L C and Jiang S Y, 2014; Wang L X et al., 2014; 杨泽黎等, 2014; Mao Z H et al., 2015; Mao J W et al., 2017; Xiang Y X et al., 2017; Chen B et al., 2018; Chen L et al., 2018; Chen X L et al., 2018; 胡正华等, 2018; Pan X F et al., 2018; Su Q W et al., 2018; Wei S D et al., 2018

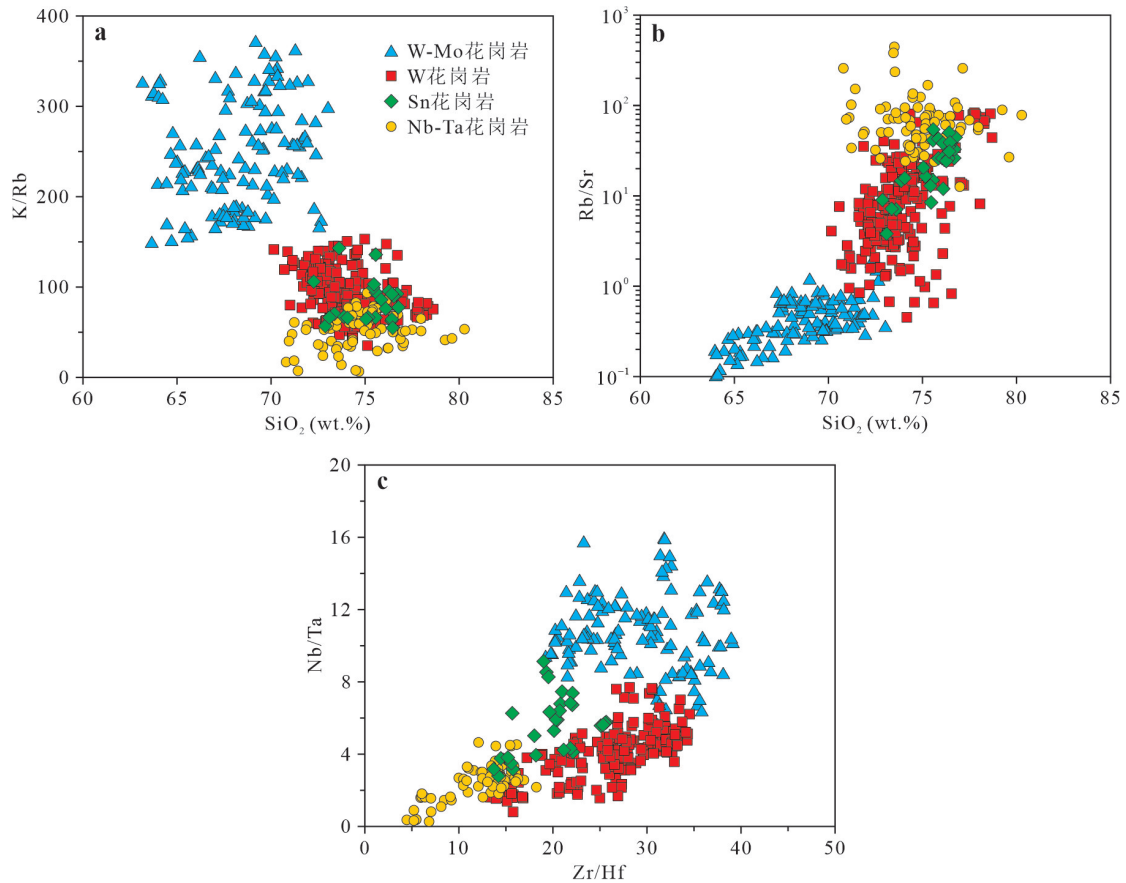


图12 江南造山带W-Mo、W、Sn和Nb-Ta花岗岩 SiO_2 -K/Rb(a)、 SiO_2 -Rb/Sr(b)和Zr/Hf-Nb/Ta(c)图解

Fig. 12 SiO_2 -K/Rb (a), SiO_2 -Rb/Sr (b), and Zr/Hf-Nb/Ta (c) diagrams for the W-Mo, W, Sn, and Nb-Ta granites in the Jiangnan Orogen

数据来源同图9

浆演化熔体中W不断富集。估算表明,当锆石中W含量从0.05 $\mu\text{g/g}$ 增加到2.81 $\mu\text{g/g}$ 时,岩浆中钨含量可以增加约50倍(Li X Y et al., 2021)。

5 钨锡稀有金属成矿作用

现有研究表明,钨锡稀有金属矿床属于岩浆-热液成因,总体来说,成矿元素主要来自花岗岩,岩浆演化晚期流体出溶产生含矿流体,晚期有大气降水参与(Xu B et al., 2017; Harlaux et al., 2018b; Sun K K et al., 2019; Xie G Q et al., 2019a)。江南造山带钨锡稀有金属矿床成矿物质也主要来自成矿花岗岩,地层可能提供少量成矿物质(杜玉雕等, 2013; 张达玉等, 2017; Sun K K and Chen B, 2017; Wang Y Y et al., 2017; Li X Y et al., 2018; Song S W et al., 2018b; Zhang Q et al., 2018)。岩浆中钨锡稀有金属主要源自花岗岩源区。Li X Y et al. (2021)通过模拟计算得出,板溪群变质沉积岩经过35%的部分熔融可以产生初始钨含量为21 $\mu\text{g/g}$ 的花岗质熔体。最近几年,白钨矿微区微量元素分析已成为示踪成矿过程重要的研究手段。早期形成的白钨矿微量元素继承了花岗岩的微量元素特征,表明成矿流

体主要来自花岗质岩浆的出溶(Li X Y et al., 2018; Sun K K and Chen B, 2017)。Li X Y et al. (2021)研究揭示,木瓜园钨矿第一期出溶的流体富Cl、Na和LREE、贫W,导致钠长石化和绿泥石化,第二期出溶的流体为富F、P和W的流体,导致云英岩化、绢英岩化,同时形成钨矿化。钨锡矿化机制主要包括热液交代和充填成矿作用(Li X Y et al., 2018; Zhang Q et al., 2018),而铌钽矿床主要是岩浆成因,晚期热液成因的铌钽矿物可叠加在早期岩浆成因的铌钽矿物之上(Zhu Z Y et al., 2015; Tian E N et al., 2020)。花岗岩围岩的差异会导致成矿类型的不同,当围岩是富硅质沉积岩或变质沉积岩时,往往通过流体充填作用形成脉型矿床;当围岩为富钙花岗质岩石时,流体与花岗岩反应使岩石中的斜长石发生分解,释放出Ca,与流体中的 WO_4^{2-} 结合形成细脉浸染型白钨矿矿床;当围岩为贫钙花岗质岩石时,在岩体顶部流体与花岗岩反应形成云英岩型矿床;当围岩为碳酸盐岩时,流体与围岩反应形成矽卡岩型矿床(Sun K K and Chen B, 2017; Li X Y et al., 2018; Zhang Q et al., 2018; Huang X D et al., 2022)。综合钨锡稀有金属矿床的研究成果,可以把江南造山带钨锡稀有金属矿床的成矿过程概括如

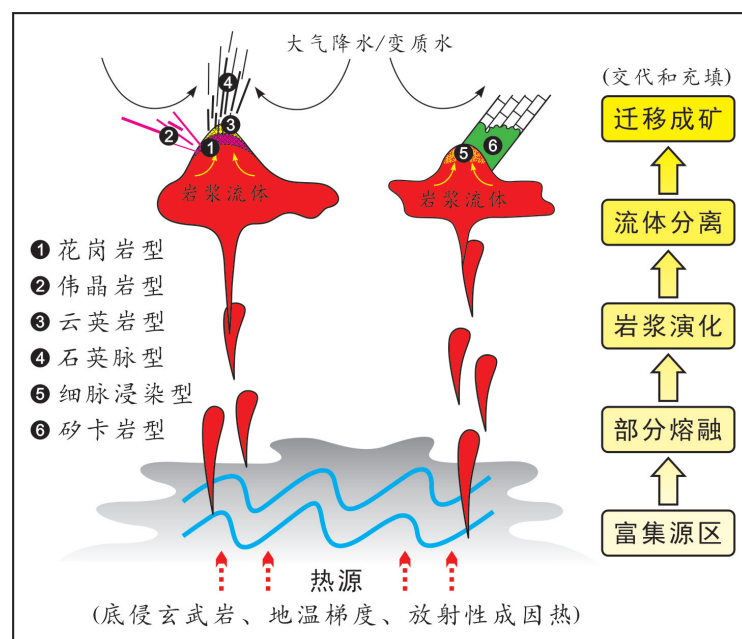


图13 钨锡稀有金属矿床形成过程模式图

Fig. 13 Schematic model illustrating the formation processes of tungsten, tin, and rare metal deposits

下(图13):含钨锡稀有金属的花岗岩源区部分熔融形成含矿的初始花岗质岩浆,在岩浆演化过程中成矿元素不断富集,在岩浆演化晚期,铌钽在钠长石花岗岩中结晶形成矿床,钨锡则进入出溶的流体相,含矿流体通过充填或者交代作用形成脉型、矽卡岩型、细脉浸染型和云英岩型矿床;随着花岗岩岩浆演化,岩浆会发生不混溶作用而形成与花岗岩有关的伟晶岩型稀有金属矿床。

2022年,适逢中国地质调查局武汉地质调查中心60周年华诞,魏道芳教授级高工特邀撰稿庆祝,作为华南地质研究的深度参与者,谨以此文祝贺武汉地调中心六十年辉煌!

参考文献:

- 陈骏. 2019. 关键金属超常富集成矿和高效利用 [J]. 科技导报, 37(24):1.
- 陈国华, 舒良树, 舒立旻, 张诚, 欧阳永棚. 2015. 江南东段朱溪钨(铜)多金属矿床的地质特征与成矿背景 [J]. 中国科学:地球科学, 45(12):1799-1818+1-6.
- 陈文迪, 张文兰, 王汝成, 储著银, 肖荣, 张迪, 车旭东. 2016. 桂北苗儿山-越城岭地区独石岭钨(铜)矿床研究:对复式岩体多时代差异性成矿的启示 [J]. 中国科学:地球科学, 46(12):1602-1625.
- 陈雪霏, 汪应庚, 孙卫东, 杨晓勇. 2013. 皖南宁国竹溪岭地区花岗岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学及其成因研究 [J]. 地质学报, 87(11):1662-1678.
- 程顺波, 付建明, 马丽艳, 蒋桂新, 陈希清, 卢友月, 童喜润. 2013. 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, 40(4):1189-1201.
- 杜玉雕, 刘家军, 余心起, 周翔, 杨赫鸣, 杨隆勃, 黄永海. 2013. 安徽逍遥钨多金属矿床成矿物质来源与成矿:碳、硫和铅同位素证据 [J]. 中国地质, 40(2):566-579.
- 丰成友, 张德全, 项新葵, 李大新, 瞿泓滢, 刘建楠, 肖晔. 2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其意义 [J]. 岩石学报, 28(12):3858-3868.
- 广西壮族自治区三一〇核地质大队. 2016. 广西全州县李家矿区锡矿详查报告 [R].
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿 [J]. 科学通报, 65(33):3651-3652.
- 湖南省地质矿产勘查开发局四〇七队. 2016. 湖南省绥宁县寨溪山矿区钨矿普查报告 [R].
- 胡正华, 楼法生, 李永明, 李吉明, 王先广, 陈建平, 曾庆权, 吴师金, 聂龙敏, 龚良信, 文亮先, 刘高峰, 李倩, 余希. 2018. 江西武宁县东坪钨矿床中与成矿有关的岩浆岩年代学、地球化学及岩石成因 [J]. 地球科学, 43(S1):243-263.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 翟伟, 李光来. 2013. 初论华南加里东花岗岩与大规模成矿作用的关系 [J]. 高校地质学报, 19(1):1-11.
- 黄迪. 2021. 赣西北花山洞钨矿床地质和成岩成矿年代学研究 [D]. 南京大学硕士学位论文.
- 黄迪, 黄旭栋, 章荣清, 陆建军, 吴劲薇, 黄玉. 2022. 赣西北花山洞与九岭花岗岩对比及其成矿指示意义 [J]. 地质学刊, 46(1):22-33.
- 黄马, 徐晓春, 谢巧勤, 韦导忠, 徐生发, 王德恩. 2018. 皖南宁国竹溪岭钨银矿床及相关岩体的同位素地质年龄 [J]. 大地构造与成矿学, 42(2):279-290.
- 江西省地质矿产勘查开发局九一六大队. 2019. 阳储岭钨矿资源储量核实报告 [R].
- 孔志岗, 梁婷, 毛景文, 徐生发, 许红兵, 闫盼盼, 金修勇. 2018. 皖南竹溪岭钨多金属矿床花岗闪长岩成因、成矿时代及成岩成矿背景研究 [J]. 岩石学报, 34(9):2632-2656.
- 李斌, 张赞赞, 吴明安, 周涛发, 赵文广, 蔡晓兵, 狄勤松. 2015. 皖南宁国大坞尖钨钼矿床成岩成矿年龄——以花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄为依据 [J]. 地质通报, 34(Z1):569-578.
- 李鹏, 张立平, 李建康, 黄志飏, 周芳春, 姜鹏飞. 2021. 江南造山带中段幕阜山地区稀有金属成矿规律及其在找矿中的应用 [J]. 矿床地质, 40(4):819-841.
- 李洁, 黄小龙. 2013. 江西雅山花岗岩岩浆演化及其 Ta-Nb 富集机制 [J]. 岩石学报, 29(12):4311-4322.
- 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 [J]. 地质学报, 86(11):1713-1725.
- 李晓宇. 2021. 江南造山带中部桃江地区印支期花岗岩的成因与钨成矿作用 [D]. 南京大学博士学位论文.
- 刘珺, 毛景文, 叶会寿, 谢桂青, 杨国强, 章伟. 2008a. 江西省武功山地区浒坑花岗岩的锆石 U-Pb 定年及元素地球化学特征 [J]. 岩石学报, 24(8):1813-1822.
- 刘珺, 叶会寿, 谢桂青, 杨国强, 章伟. 2008b. 江西省武功山地区浒坑钨矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 地质学报, 82(11):1572-1579.
- 刘进先, 陈浩文, 刘兴畅, 王高, 李超, 张继高. 2015. 江西修

- 水花山洞钨矿床同位素年代学研究及其意义[J]. 资源调查与环境, 36(1):1-9.
- 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 舒良树, 吴富江, 张芳荣, 于津海. 2005. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地质学报, 79(5):636-644.
- 罗兰, 蒋少涌, 杨水源, 赵葵东, 汪石林, 高文亮. 2010. 江西彭山锡多金属矿集区隐伏花岗岩体的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 26(9):2818-2834.
- 罗鹏, 陈迪, 杨俊, 凌跃新, 罗来. 2021. 湖南川口印支期花岗岩成因及与钨成矿关系[J]. 华南地质, 37(3):247-264.
- 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[J]. 科学通报, 65(33):3746-3762.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5):935-969.
- 舒良树, 施央申, 郭令智, Charvet J, 孙岩. 1995. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学[M]. 南京:南京大学出版社.
- 苏康明, 吕书君, 孔令兵, 杨富全, 向君峰. 2016. 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, 35(5):902-912.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3):332-335+426-427.
- 王德恩, 周翔, 余心起, 杜玉雕, 杨赫鸣, 傅建真, 董会明. 2011. 皖南祁门地区东源钨矿矿区花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 30(10):1514-1529.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6):1189-1209.
- 王孝磊, 周金城, 陈昕, 张凤凤, 孙梓铭. 2017. 江南造山带的形成与演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5):714-735+696.
- 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, 57(13):1126-1136.
- 项新葵, 王朋, 孙德明, 钟波. 2013. 赣北石门寺钨多金属矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 32(11):1824-1831.
- 肖鑫, 周涛发, 袁峰, 范羽, 张达玉, 刘东周, 黄伟平, 陈雪锋. 2017. 安徽青阳高家塆钨钼矿床成岩成矿时代及其地质意义[J]. 岩石学报, 33(3):859-872.
- 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[J]. 地质前缘, 28(3):252-270.
- 徐斌, 蒋少涌, 罗兰. 2015. 江西彭山锡多金属矿集区尖峰坡锡矿床 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(3):701-708.
- 薛荣, 王汝成, 陈光弘, 车旭东, 谢磊, 诸泽颖. 2019. 松树岗钼铌钨锡矿床石英脉的矿物学研究——云母和黑钨矿成分对热液成矿过程的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 38(4):507-520.
- 杨振, 张文兰, 王汝成, 陆建军, 谢磊, 车旭东. 2013. 桂北油麻岭钨矿区成矿岩体的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 高校地质学报, 19(1):159-172.
- 杨振, 王汝成, 张文兰, 储著银, 陈骏, 朱金初, 章荣清. 2014. 桂北牛塘界加里东期花岗岩及其矽卡岩型钨矿成矿作用研究[J]. 中国科学:地球科学, 44(7):1357-1373.
- 杨细浩, 胡文洁, 钟起泓, 朱昌杰, 万欢, 胡正华. 2019. 江西东坪石英脉型黑钨矿矿床地质特征、控矿因素及找矿标志[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(5):1301-1316.
- 杨泽黎, 邱检生, 邢光福, 余明刚, 赵蛟龙. 2014. 江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约[J]. 地质学报, 88(5):850-868.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2):106-111.
- 张迪, 张文兰, 王汝成, 储著银, 龚名文, 蒋桂新. 2015. 桂北苗儿山地区高岭印支期花岗岩及石英脉型钨成矿作用[J]. 地质论评, 61(4):817-834.
- 张强. 2021. 江南造山带西段苗儿山-越城岭复式岩体成因、岩浆演化与钨锡成矿作用[D]. 南京大学博士学位论文.
- 张勇, 潘家永, 马东升, 但小华, 张雷雷, 徐国辉, 杨春鹏, 江青霞, 江超强. 2017. 赣西北大雾塘钨矿区地质特征及 Re-Os 同位素年代学研究[J]. 矿床地质, 36(3):749-769.
- 张达玉, 位鸥祥, 陈雪锋, 叶龙翔, 丁宁, 吕启良. 2017. 江南古陆北缘青阳钨钼矿集区成岩成矿作用研究[J]. 岩石学报, 33(11):3659-3674.
- 张龙升, 彭建堂, 胡阿香, 林芳梅, 张婷. 2014. 湘西大溶溪

- 钨矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义 [J]. 矿床地质, 33(1):181-189.
- 张龙升, 彭建堂, 张东亮, 胡阿香, 阳杰华. 2012. 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, 36(1):137-148.
- 张世涛, 马东升, 陆建军, 章荣清, 蔡 杨, 丁超超. 2016. 桂北平英花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义 [J]. 高校地质学报, 22(1):92-104.
- 张志远, 谢桂青, 李 伟. 2021. 湘中矿集区杨家山石英脉白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 LA-ICP-MS 锡石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 37(3):794-804.
- 周 翔, 余心起, 王德恩, 张德会, 李春麟, 傅建真, 董会明. 2011. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究 [J]. 现代地质, 25(2):201-210.
- 周涛发, 聂利青, 王世伟, 汪方跃, 张千明. 2019. 长江中下游成矿带钨矿床 [J]. 岩石学报, 35(12):3592-3608.
- 周维法. 2020. 苗儿山-越城岭地区新元古代-加里东期花岗岩及威溪钨矿成因研究 [D]. 南京大学硕士学位论文.
- Amelin Y. 2009. Sm-Nd and U-Pb systematics of single titanite grains [J]. Chemical Geology, 261: 53-61.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [J]. Developments in Geochemistry, 2: 63-114.
- Carr P A, Mercadier J, Harlaux M, Romer R L, Moreira E, Legros H, Cuney M, Marignac C, Cauzid J, Salsi L, Lecomte A, Rouer O, Peiffert C. 2021. U/Pb geochronology of wolframite by LA-ICP-MS; mineralogical constraints, analytical procedures, data interpretation, and comparison with ID-TIMS [J]. Chemical Geology, 584: 120511.
- Che X D, Wu F Y, Wang R C, Gerdes A, Ji W Q, Zhao Z H, Yang J H, Zhu Z Y. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS [J]. Ore Geology Reviews, 65: 979-989.
- Che X D, Wang R C, Wu F Y, Zhu Z Y, Zhang W L, Hu H, Xie L, Lu J J, Zhang D. 2019. Episodic Nb-Ta mineralisation in South China: Constraints from in situ LA-ICP-MS columbite-tantalite U-Pb dating [J]. Ore Geology Reviews, 105:71-85.
- Chen B, Gu H O, Chen Y J, Sun K K, Chen W. 2018. Lithium isotope behaviour during partial melting of metapelites from the Jiangnan Orogen, South China: Implications for the origin of REE tetrad effect of F-rich granite and associated rare-metal mineralization [J]. Chemical Geology, 483: 372-384.
- Chen J F, Sheng D, Shao Y J, Zhang J X, Liu Z F, Wei H T, Yang Q D, Luo X Y, Du Y. 2019. Silurian S-type granite-related W-(Mo) mineralization in the Nanling Range, South China: A case study of the Pingtan W-(Mo) deposit [J]. Ore Geology Reviews, 107: 186-200.
- Chen L, Wang Z Q, Yan Z, Gong J H, Ma S X. 2018. Zircon and cassiterite U-Pb ages, petrogeochemistry and metallogenesis of Sn deposits in the Sibao area, northern Guangxi: constraints on the neoproterozoic granitic magmatism and related Sn mineralization in the western Jiangnan Orogen, South China [J]. Mineralogy and Petrology, 112(4): 437-463.
- Chen X L, Liang H Y, Richards J P, Huang W T, Zhang J, Wu J, Sotiriou P. 2018. Age and granite association of skarn W mineralization at Niutangjie district, South China Block [J]. Ore Geology Reviews, 102: 268-283.
- Dai P, Mao J W, Wu S H, Xie G Q, Luo X H. 2018. Multiple dating and tectonic setting of the Early Cretaceous Xianglushan W deposit, Jiangxi Province, South China [J]. Ore Geology Reviews, 95: 1161-1178.
- Deng X D, Li J W, Luo T, Wang H Q. 2017. Dating magmatic and hydrothermal processes using andradite-rich garnet U-Pb geochronometry [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 172(9): 1-11.
- Gulley A L, Nassar N T, Xun S. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies [J]. Proceedings of National Academy of Sciences, 115(16): 4111-4115.
- Gulson B L, Jones M T. 1992. Cassiterite - Potential for direct dating of mineral-deposits and a precise Age for the Bushveld Complex granites [J]. Geology, 20(4):355-358.
- Harlaux M, Romer R L, Mercadier J, Morlot C, Marignac C, Cuney M. 2018a. 40 Ma of hydrothermal W mineralization during the Variscan orogenic evolution of the French Massif Central revealed by U-Pb dating of wolframite [J]. Mineralium Deposita, 53(1): 21-51.
- Harlaux M, Mercadier J, Marignac C, Peiffert C, Cloquet C, Cuney M. 2018b. Tracing metal sources in peribatholithic hydrothermal W deposits based on the chemical composition of wolframite: The example of the Variscan French Massif Central [J]. Chemical Geology, 479: 58-85.
- Huang L C, Jiang S Y. 2014. Highly fractionated S-type granites from the giant Dahutang tungsten deposit in Jiang-

- nan Orogen, Southeast China: geochronology, petrogenesis and their relationship with W-mineralization [J]. *Lithos*, 202: 207-226.
- Huang X D, Lu J J, Zhang R Q, Sizaret S, Ma D S, Wang R C, Zhu X, He Z Y. 2022. Garnet and scheelite chemistry of the Weijia tungsten deposit, South China: Implications for fluid evolution and W skarn mineralization in F-rich ore system [J]. *Ore Geology Reviews*, 142: 104729.
- Li C Y, Zhang R Q, Ding X, Ling M X, Fan W M, Sun W D. 2016. Dating cassiterite using laser ablation ICP-MS [J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 313-322.
- Li D F, Fu Y, Hollings P, Mitchell R, Zurevinski S, Kamo S, Zhang R Q, Zhang Y, Liu Q F, Liao J L, Liang Y J, Sun X M. 2022. PL57 garnet as a new natural reference material for in situ U-Pb isotope analysis and its perspective for geological applications [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(2): 1-18.
- Li J D, Li X F, Xiao R. 2020. In situ LA-ICP-MS U-Pb geochronology and trace element analysis of hydrothermal titanite from the Jiepai W-Cu deposit, South China: Implications for W mineralization [J]. *Canadian Mineralogist*, 58(1): 45-69.
- Li P, Li J K, Liu X, Li C, Huang Z B, Zhou F C. 2020. Geochronology and source of the rare-metal pegmatite in the Mufushan area of the Jiangnan orogenic belt: A case study of the giant Renli Nb-Ta deposit in Hunan, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 116: 103237.
- Li X F, Yi X K, Huang C, Wang C Z, Wei X L, Zhu Y T, Xu J. 2018. Zircon U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite Ar-Ar geochronology of the Yashan W-Mo and Xiaotongling W-Mo-Be deposits: Insights for the duration and cooling history of magmatism and mineralization in the Wugongshan district, Jiangxi, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 102: 1-17.
- Li X Y, Gao J F, Zhang R Q, Lu J J, Chen W H, Wu J W. 2018. Origin of the Muguayuan veinlet-disseminated tungsten deposit, South China: Constraints from in-situ trace element analyses of scheelite [J]. *Ore Geology Reviews*, 99: 180-194.
- Li X Y, Lu J J, Zhang R Q, Gao J F, Wu J W. 2021. Magma evolution leading to veinlet-disseminated tungsten mineralization at the Muguayuan deposit: In-situ analysis of igneous minerals [J]. *Ore Geology Reviews*, 138: 104406.
- Linnen R L, Cuney M. 2005. Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization [A]. //In: Linnen R L and Samson I M, eds., rare-element geochemistry and mineral deposits [C]. Geological Association of Canada, GAC, Short Course.
- Lv Z H, Chen J, Zhang H, Tang Y. 2021. Petrogenesis of Neoproterozoic rare metal granite-pegmatite suite in Jiangnan Orogen and its implications for rare metal mineralization of peraluminous rock in South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 128: 103923.
- Mao J W, Xiong B K, Liu J, Pirajno F, Cheng Y B, Ye H S, Song S W, Dai P. 2017. Molybdenite Re/Os dating, zircon U-Pb age and geochemistry of granitoids in the Yangchuling porphyry W-Mo deposit (Jiangnan tungsten ore belt), China: Implications for petrogenesis, mineralization and geodynamic setting [J]. *Lithos*, 286:35-52.
- Mao J W, Ouyang H G, Song S W, Santosh M, Yuan S D, Zhou Z H, Zheng W, Liu H, Liu P, Cheng Y, Chen M H. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 22: 411-482.
- Mao Z H, Cheng Y B, Liu J J, Yuan S D, Wu S H, Xiang X K, Luo X H. 2013. Geology and molybdenite Re-Os age of the Dahutang granite-related veinlets-disseminated tungsten ore field in the Jiangxin Province, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 422-433.
- Mao Z H, Liu J J, Mao J W, Deng J, Zhang F, Meng X Y, Xiong B K, Xiang X K, Luo X H. 2015. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization [J]. *Gondwana Research*, 28(2): 816-836.
- Meng X, Zhang D Y, Ren K D, Zhang F, Zhou T F, Zhang R Q, Yu Z D, Noel W C. 2022. Geochronology and geochemical characteristics of ore-forming granite in Maopengdian tin deposit, northern Jiangxi Province [J]. *Ore Geology Reviews*, under review.
- Maniar P A, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101: 635-643.
- Pan X F, Hou Z Q, Li Y, Chen G H, Zhao M, Zhang T F, Zhang C, Wei J, Kang C. 2017. Dating the giant Zhuxi W-Cu deposit (Taqian-Fuchun Ore Belt) in South China using molybdenite Re-Os and muscovite Ar-Ar sys-

- tem [J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 719-733.
- Pan X F, Hou Z Q, Zhao M, Chen G H, Rao J F, Li Y, Wei J, Ouyang Y P. 2018. Geochronology and geochemistry of the granites from the Zhuxi W-Cu ore deposit in South China: Implication for petrogenesis, geodynamical setting and mineralization [J]. *Lithos*, 304: 155-179.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 22: 247-263.
- Romer R L, Luders V. 2006. Direct dating of hydrothermal W mineralization: U-Pb age for hubnerite (MnWO₄), Sweet Home Mine, Colorado [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): 4725-4733.
- Romer R L, Wright J E. 1992. U-Pb dating of columbites: A geochronological tool to date magmatism and ore deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(5): 2137-2142.
- Seman S, Stockli D F, McLean N M. 2017. U-Pb geochronology of grossular-andradite garnet [J]. *Chemical Geology*, 460: 106-116.
- Smith S R, Foster G L, Romer R L, Tindle A G, Kelley S P, Noble S R, Horstwood M, Breaks F W. 2004. U-Pb columbite-tantalite chronology of rare-element pegmatites using TIMS and Laser Ablation-Multi Collector-ICP-MS [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 147(5): 549-564.
- Song G X, Qin K Z, Li G M, Li X H, Qu W J. 2013. Geochronology and Ore-Forming Fluids of the Baizhangyan W-Mo Deposit in the Chizhou Area, Middle-Lower Yangtze Valley, SE-China [J]. *Resource Geology*, 63(1): 57-71.
- Song G X, Qin K Z, Li G M, Liu T B, Li J X, Li X H, Chang Z S. 2012. Geochronologic and isotope geochemical constraints on magmatism and associated W-Mo mineralization of the Jitoushan W-Mo deposit, middle-lower Yangtze Valley [J]. *International Geology Review*, 54(13): 1532-1547.
- Song S W, Mao J W, Xie G Q, Chen L, Santosh M, Chen G H, Rao J F, Ouyang Y P. 2019. In situ LA-ICP-MS U-Pb geochronology and trace element analysis of hydrothermal titanite from the giant Zhuxi W (Cu) skarn deposit, South China [J]. *Mineralium Deposita*, 54(4): 569-590.
- Song S W, Mao J W, Xie G Q, Yao Z Y, Chen G H, Rao J F, Ouyang Y P. 2018a. The formation of the world-class Zhuxi scheelite skarn deposit: Implications from the petrogenesis of scheelite-bearing anorthosite [J]. *Lithos*, 312: 153-170.
- Song S W, Mao J W, Zhu Y F, Yao Z Y, Chen G H, Rao J F, Ouyang Y P. 2018b. Partial-melting of fertile metasedimentary rocks controlling the ore formation in the Jiangnan porphyry-skarn tungsten belt, south China: A case study at the giant Zhuxi W-Cu skarn deposit [J]. *Lithos*, 304-307: 180-199.
- Song W L, Yao J M, Chen H Y, Sun W D, Ding J Y, Xiang X K, Zuo Q S, Lai C K. 2018. Mineral paragenesis, fluid inclusions, H-O isotopes and ore-forming processes of the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 99: 116-150.
- Su Q W, Mao J W, Wu S H, Zhang Z C, Xu S F. 2018. Geochronology and geochemistry of the granitoids and ore-forming age in the Xiaoyao tungsten polymetallic skarn deposit in the Jiangnan Massif tungsten belt, China: Implications for their petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization [J]. *Lithos*, 296(1): 365-381.
- Sun J F, Yang J H, Wu F Y, Xie L W, Yang Y H, Liu Z C, Li X H. 2012. In situ U-Pb dating of titanite by LA-ICPMS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 2506-2516.
- Sun K K, Chen B. 2017. Trace elements and Sr-Nd isotopes of scheelite: Implications for the W-Cu-Mo polymetallic mineralization of the Shimensi deposit, South China [J]. *American Mineralogist*, 102(5): 1114-1128.
- Sun K K, Chen B, Deng J. 2019. Biotite in highly evolved granites from the Shimensi W-Cu-Mo polymetallic ore deposit, China: Insights into magma source and evolution [J]. *Lithos*, 350: 105245.
- 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(1): 313-345.
- Tang Y W, Han J J, Lan T G, Gao J F, Liu L, Xiao C H, Yang J H. 2022. Two reliable calibration methods for accurate in situ U-Pb dating of scheelite [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 37: 358-368.
- Tian E N, Xie L, Wang R C, Duan X H, Huang F F, Che X D, Chen X M, Wang L J. 2021. Mineralogical constraints on Nb-Ta fractionation in Early Cretaceous A-type granites from the Suzhou pluton, SE China [J]. *Lithos*, 402-403: 106286.

- Tian E N, Wang R C, Xie L, Zhang W L, Che X D, Zhang R Q. 2020. Mineralogy and geochemistry of the newly discovered Late Mesozoic granite-pegmatite and associated Sn-Nb-Ta-Be mineralization in the Miao'ershan-Yuechengling composite batholith, northern Guangxi, South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190:104149.
- Wang D, Wang X L, Cai Y, Chen X, Zhang F R, Zhang F F. 2017. Heterogeneous Conservation of Zircon Xenocrysts in Late Jurassic Granitic Intrusions within the Neoproterozoic Jiuling Batholith, South China: a Magma Chamber Growth Model in Deep Crustal Hot Zones [J]. *Journal of Petrology*, 58(9): 1781-1810.
- Wang L X, Ma C Q, Zhang C, Zhang J Y, Marks M A W. 2014. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China [J]. *Lithos*, 206-207: 147-163.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Zhao G C, Yu J H, Qiu J S, Zhang Y J, Xing G F. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: Isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China [J]. *Precambrian Research*, 242: 154-171.
- Wang Y Y, Van den Kerkhof A, Xiao Y L, Sun H, Yang X Y, Lai J Q, Wang Y G. 2017. Geochemistry and fluid inclusions of scheelite-mineralized granodiorite porphyries from southern Anhui Province, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 89: 988-1005.
- Wei S D, Liu H, Zhao J H. 2018. Tectonic evolution of the western Jiangnan Orogen: Constraints from the Neoproterozoic igneous rocks in the Fanjingshan region, South China [J]. *Precambrian Research*, 318: 89-102.
- Wintzer N E, Schmitz M D, Gillerman V S, Vervoort J D. 2022. U-Pb scheelite ages of tungsten and antimony mineralization in the Stibnite-Yellow Pine district, Central Idaho [J]. *Economic Geology*, doi: <https://doi.org/10.5382/econgeo.4953>
- Wu J W, Lai J Q, Li B, Lu A H, Rocholl A, Dick J M, Peng J T, Wang K L. 2020. Tungsten mineralization during slab subduction: a case study from the Huxingshan deposit in northeastern Hunan Province, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 124:103657.
- Xiang L, Wang R C, Erdmann S, Sizaret S, Lu J J, Zhang W L, Xie L, Che X D, Zhang R Q. 2018. Neoproterozoic mineralization in a hydrothermal cassiterite-sulfide deposit at Jiumao, northern Guangxi, South China: Mineral-scale constraints on metal origins and ore-forming processes [J]. *Ore Geology Reviews*, 94: 172-192.
- Xiang L, Wang R C, Romer R L, Che X D, Hu H, Xie L, Tian E N. 2020. Neoproterozoic Nb-Ta-W-Sn bearing tourmaline leucogranite in the western part of Jiangnan Orogen: Implications for episodic mineralization in South China [J]. *Lithos*, 360-361:105450.
- Xiang Y X, Yang J H, Chen J Y, Zhang Y. 2017. Petrogenesis of Lingshan highly fractionated granites in the Southeast China: Implication for Nb-Ta mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 89: 495-525.
- Xie G Q, Mao J W, Li W, Fu B, Zhang Z Y. 2019a. Granite-related Yangjiashan tungsten deposit, southern China [J]. *Mineralium Deposita*, 54(1): 67-80.
- Xie G Q, Mao J W, Bagas L, Fu B, Zhang Z Y. 2019b. Mineralogy and titanite geochronology of the Caojiaba W deposit, Xiangzhong metallogenic province, southern China: implications for a distal reduced skarn W formation [J]. *Mineralium Deposita*, 54(3): 459-472.
- Xie L, Liu Y, Wang R C, Hu H, Che X D, Xiang L. 2019. Li-Nb-Ta mineralization in the Jurassic Yifeng granite-aplite intrusion within the Neoproterozoic Jiuling batholith, south China: A fluid-rich and quenching ore-forming process [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 185: 104047.
- Xu B, Jiang S Y, Luo L, Zhao K D, Ma L. 2017. Origin of the granites and related Sn and Pb-Zn polymetallic ore deposits in the Pengshan district, Jiangxi Province, South China: constraints from geochronology, geochemistry, mineral chemistry, and Sr-Nd-Hf-Pb-S isotopes [J]. *Mineralium Deposita*, 52(3): 337-360.
- Yang M, Yang Y H, Wu S T, Romer R L, Che X D, Zhao Z F, Li W S, Yang J H, Wu F Y, Xie L W, Huang C, Zhang D, Zhang Y. 2020. Accurate and precise in situ U-Pb isotope dating of wolframite series minerals via LA-SF-ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 35(10): 2191-2203.
- Yang M, Romer R L, Yang Y H, Wu S T, Wang H, Tu J R, Zhou H Y, Xie L W, Huang C, Xu L, Yang J H, Wu F Y. 2022. U-Pb isotopic dating of cassiterite: Development of reference materials and in situ applications by LA-SF-ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 593: 120754.
- Yang S W, Lou F S, Xu C, Feng C Y, Cao S H, Xu D R, Tang

- Y W. 2022. Two significant quartz-wolframite-veining mineralization events in the Jiangnan Orogen, South China: Constraints from in-situ U-Pb dating of wolframite in the Dongping and Dahutang W-(Cu-Mo) deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 141: 104598.
- Yang Y S, Pan X F, Hou Z Q, Deng Y. 2021. Redox states and protoliths of Late Mesozoic granitoids in the eastern Jiangnan Orogen: Implications for W, Mo, Cu, Sn, and (Au) mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 134: 104038.
- Yin L, Pollard P J, Hu S X, Taylor R G. 1995. Geologic and Geochemical Characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li Deposit, Jiangxi Province, South China [J]. *Economic Geology*, 90(3): 577-585.
- Yin R, Han L, Huang X L, Li J, Li W X, Chen L L. 2019. Textural and chemical variations of micas as indicators for tungsten mineralization: Evidence from highly evolved granites in the Dahutang tungsten deposit, South China [J]. *American Mineralogist*, 104(7): 949-965.
- Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H M, Geng J Z, Zhang D L. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 235-242.
- Zhang Q, Zhang R Q, Gao J F, Lu J J, Wu J W. 2018. In-situ LA-ICP-MS trace element analyses of scheelite and wolframite: Constraints on the genesis of veinlet-disseminated and vein-type tungsten deposits, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 99: 166-179.
- Zhang R Q, Lehmann B, Seltnann R, Sun W D, Li C Y. 2017a. Cassiterite U-Pb geochronology constrains magmatic-hydrothermal evolution in complex evolved granite systems: The classic Erzgebirge tin province (Saxony and Bohemia) [J]. *Geology*, 45(12): 1095-1098.
- Zhang R Q, Lu J J, Lehmann B, Li C Y, Li G L, Zhang L P, Guo J, Sun W D. 2017b. Combined zircon and cassiterite U-Pb dating of the Piaotang granite-related tungsten-tin deposit, southern Jiangxi tungsten district, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 82: 268-284.
- Zhang S T, Zhang R Q, Lu J J, Ma D S, Ding T, Gao S Y, Zhang Q. 2019. Neoproterozoic tin mineralization in South China: geology and cassiterite U-Pb age of the Baotan tin deposit in northern Guangxi [J]. *Mineralium Deposita*, 54(8): 1125-1142.
- Zhu Z Y, Wang R C, Che X D, Zhu J C, Wei X L, Huang X E. 2015. Magmatic-hydrothermal rare-element mineralization in the Songshugang granite (northeastern Jiangxi, China): Insights from an electron-microprobe study of Nb-Ta-Zr minerals [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 749-760.
- Zhu Z Y, Wang R C, Marignac C, Cuney M, Mercadier J, Che X D, Charles N, Lespinasse M. 2019. Petrogenesis of Nb-(Ta) aplo-pegmatites and fine-grained granites from the Early Cretaceous Huangshan rare-metal granite suite, northeast Jiangxi Province, southeast China [J]. *Lithos*, 346-347: 105150.
- Zhu Z Y, Wang R C, Marignac C, Cuney M, Mercadier J, Che X D, Lespinasse M Y. 2018. A new style of rare metal granite with Nb-rich mica: The Early Cretaceous Huangshan rare-metal granite suite, northeast Jiangxi Province, southeast China [J]. *American Mineralogist*, 103(10): 1530-1544.