

南岭-武夷成矿区带大陆再造、深部地质过程与钨锡金铜巨量富集

倪培*, 王国光*, 潘君屹, 李文生, 迟哲

南京大学地球科学与工程学院, 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

* 通讯作者, E-mail: peini@nju.edu.cn(倪培), ggwang@nju.edu.cn(王国光)

2025-04-11收稿, 2025-10-30修回, 2025-11-18接受, 2026-01-20网络版发表

国家重点研发计划项目(2016YFC0600205)和国家自然科学基金重点项目(92062220、41830426)资助

摘要 南岭-武夷地区是世界钨矿床和原生锡矿床分布最密集的地区之一, 也是我国重要金铜多金属成矿区带。南岭与武夷成矿具有典型的分带性, 前者以大规模的多时代花岗岩侵入和伴生的钨锡稀有金属矿化为特征, 后者以强烈的陆相火山作用以及伴生的金铜成矿为特点。南岭地区经历了多次强烈的地壳运动和构造运动, 显示多期活动的特征, 其中早古生代、早中生代、晚中生代等三个时期规模最大。南岭地区晚中生代钨锡成矿作用是强烈地壳再造与岩浆高程度结晶分异共同作用的产物。武夷成矿带晚中生代火山活动规模巨大, 主要集中于中晚侏罗世、早白垩世及晚白垩世早期。武夷带燕山期铜金成矿作用是古太平洋板块俯冲和古老富金铜成矿物质再造共同作用的产物。南岭、武夷两个地区迥异的深部地质过程形成了各自特色的成矿地质体与金属矿化类型。

关键词 大陆再造, 深部地质过程, 钨锡金铜, 南岭-武夷, 华南

1 引言

大陆地壳是地球长期演化的见证者和记录者(Zhu等, 2021)。大陆主要包括稳定的克拉通和活跃的造山带, 前者明显缺乏强烈的火山活动或构造运动(朱日祥等, 2012; Cooper和Miller, 2024)。有别于著名的华北克拉通、扬子克拉通和塔里木克拉通(Zhou等, 2021; Wang等, 2022; Liou等, 2023), 南岭-武夷成矿带所在的华夏地块经历了强烈的陆内造山(Wang等, 2023), 也孕育着巨量的钨锡铜金等矿产资源(陈骏等, 2014; Mao等, 2021; Ni等, 2021; Zhang H等, 2023; Zhang Z Y等, 2023)。通过对造山带中成矿地质体进行系统分析, 有助于深入理解其深部地质过程、大陆演化和资源环境效应。

造山带地区深部过程、地壳演化与金属富集是国际研究前沿问题。如欧洲著名的康沃尔-伊比利亚-比利牛斯-厄尔士巨型钨锡成矿带与海西期碰撞造山作用密切相

关(Lehmann, 2021), 中安第斯弧后的锡矿带与弧岩浆区域的部分同期铜金矿化(Sillitoe和Lehmann, 2022), 东南亚中南半岛构造演化与锡矿带(Yang等, 2020), 加拿大育空地区和美国西部深部过程与特色钨矿带(Legros等, 2020; Elongo等, 2022)等。前人针对钨锡金铜矿化的富集机制提出多种成因观点, 包括地幔贡献(Ince等, 2023; Zhou Z等, 2023)、结晶分异作用(Lehmann, 2021)、俯冲作用(Xiong等, 2021)、基底控制(Chen等, 2020; Deng等, 2022)等, 这反映了成矿作用的复杂性和区域地质演化的独特性。

华夏地块经历复杂的地质构造演化, 记录有元古宙、早古生代、早中生代和晚中生代等多次的大陆地壳再造(陈骏等, 2014; Ma等, 2021; Wang等, 2023), 形成复杂多样的钨锡铜金矿产资源, 是深刻理解深部过程、大陆再造与金属成矿的理想窗口。华夏地块的南岭成矿带靠近内陆发育多时代花岗岩, 而武夷成矿带靠近大陆边缘, 发育强烈的中生代火山岩-次火山岩(Ni等,

中文引用格式: 倪培, 王国光, 潘君屹, 李文生, 迟哲. 2026. 南岭-武夷成矿区带大陆再造、深部地质过程与钨锡金铜巨量富集. 中国科学: 地球科学, 56(9): 3274–3293, doi: 10.1360/SSTe-2025-0091

英文引用格式: Ni P, Wang G, Pan J, Li W, Chi Z. 2026. Reworking of continental crust, deep geological processes and large-scale W-Sn-Au-Cu mineralization in the Nanling-Wuyi metallogenic belts, South China. Science China Earth Sciences, 69(9): 3226–3243, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1771-8>

2021)。此外,同属华夏地块的南岭成矿带富集钨锡,但是武夷成矿带富集铜金,两者内在的根本控制因素尚不清楚。

本研究将系统梳理南岭、武夷成矿区带成矿岩体的高精度年代学、元素和同位素地球化学数据,在此基础上,进一步将南岭成矿带划分为成钨和成锡花岗岩,将武夷成矿带划分为成铜和成金(铜)斑岩体。研究表明,不同深部地质过程、源区组分和岩浆演化过程是造成特色矿种的关键控制因素。

2 区域地质背景

华南由扬子地块和华夏地块的碰撞拼贴而成,两者的形成演化有所差异(Zhao和Cawood, 2012; 倪培和王国光, 2017)。南岭与武夷成矿带主要位于华夏地块,为此,本文仅概要介绍华夏地块的前寒武纪基底特征。华夏地块的古老岩石则为出露在浙西南——闽西北一带的八都群,年龄为1.8–2.0 Ga左右(Yu等, 2012)。中-新元古代的地壳生长和再造则在华夏地块广泛发育(Yao等, 2017; Zhao等, 2023)。华夏地块经历了长期复杂的构造岩浆活动,尤以燕山期强烈的花岗质岩浆活动为特征,在南岭形成了大量的花岗岩,在武夷形成诸多的火山机构和火山岩(王德滋, 2004; Zhou等, 2006; Wang G G等, 2016; Liu等, 2020)。值得指出的是,两大成矿带的花岗岩与火山岩的空间分布差异也造就了成矿的差异性,前者主要为钨锡稀有金属,后者则为金铜铁铅锌矿化为特色(Ni等, 2021)。

南岭成矿带位于华南地块中部,有着悠久的勘查开发历史。截至2018年,南岭地区已探明钨、锡资源分别达770万吨和240万吨,分别占中国钨、锡总储量的75%和53%(中华人民共和国自然资源部公告, 2018年第21号),带内产出有新田岭钨钼矿、柿竹园钨锡矿、茅坪钨矿、淘锡坑钨矿、西华山钨矿、新田岭钨矿、芙蓉锡矿、香花岭锡矿、界牌岭锡矿、荷花坪锡矿、岩背锡矿等大型-超大型钨多金属矿床,是世界级的花岗岩相关钨锡多金属成矿带(Li Z L等, 2007; 毛景文等, 2007; 陈骏等, 2008; Hu和Zhou, 2012; Yuan, 2017; Wang等, 2020; Ni等, 2021, 2023; Chen等, 2024)。

华夏地块内东部沿海火山岩带上,顺着政和-大浦断裂带两侧,大量的金矿和铜矿构成著名的武夷金铜多金属成矿带(Ni等, 2021)。中生代火山-次火山活动有关的斑岩型-矽卡岩型-浅成热液型金铜矿床于带内广泛分布,如紫金山金铜矿、悦洋银金矿、邱村金矿、东洋金矿、德化金矿和船坑铜矿、铜山铜矿等矿床(Li等, 2018; Ni等, 2018; Chi等, 2020; Li S N等, 2020; Zhang X等,

2020; Zhang等, 2022)。截至2020年,武夷成矿带已发现110种矿产,探明储量60多种,大型矿床58处,中型130处,探明储量居全国前五位的矿种有金、铜等21种,形成巨大的经济社会效益(图1)。

2.1 南岭成矿带

南岭成矿带主要由变质基底和上覆沉积盖层组成。变质基底为新元古界含火山岩夹层的变质泥质砂岩。南岭地区盖层包括上泥盆统-下三叠统泥岩、砂岩和浅海碳酸盐岩相和三叠系-古近系火山碎屑岩、火山岩等(Ni等, 2021)。前人研究发现富钨锡地壳的存在以及成钨锡花岗岩起源于富钨锡地壳可能是钨锡矿形成的重要条件。陈骏(2000)识别出华南新元古界、寒武系、泥盆系和石炭系等诸多含钨锡地层,这些地层钨锡背景含量均较高,一般为地壳克拉克值的几倍、十几倍或数十倍,并提出这些地层可能作为富钨锡源区为成钨锡花岗岩提供物质基础。其中,前寒武系含钨锡碎屑岩、变质砂岩、板岩建造是形成与沉积作用有关钨锡矿床和含钨锡花岗岩的最重要基础,主要体现在赣南新元古界下部、震旦系等地层。

南岭地区经历了多期次强烈的地壳运动和断裂构造运动,各主要构造期均伴有规模不等的岩浆活动。形成了遍布全区的不同类型、大小不一的岩浆岩,以加里东期、印支期、燕山期等三个时期规模量大(陈骏等, 2014)。在地理上岩浆岩活动从早至晚有由北向南东逐渐变新的趋势(图2)。加里东期南岭地区岩浆活动遍布全区,主要分布于桂东北地区、湘东南地区和湘赣边境地区,代表性岩体有万洋山、彭公庙、雪花顶、大宁、苗儿山等岩体。印支期岩浆活动主要集中湘中-湘东南、广东云开地区等地,代表性岩体有越城岭、都庞岭、栗木等(Huang等, 2020)。而燕山期岩浆活动最为发育,且与南岭成矿带钨锡成矿作用的关系最为密切。中晚侏罗世(175–150 Ma)是南岭地区岩浆岩活动高峰期,165–150 Ma达到峰值,该时期南岭地区为岩浆和成矿作用大爆发期(Zhao等, 2016; Mao等, 2019; Li W S等, 2020; Wu B等, 2020; Ni等, 2021)。其中,西部地区以“十-杭”带为代表,典型岩体有花山-姑婆山、金鸡岭、骑田岭、铜山岭、西山、千里山等;东部出露大面积的岩基,如佛冈、贵东、大东山、广宁等及规模略小的岩体,如天门山、西华山、张天堂、全南黄埠和从化石岭等。150–140 Ma岩浆活动减弱,主要分布于南岭地区东部,如龙源坝、白石岗等。早白垩世(约140–100 Ma),岩体主要分布于东部,如密坑山、恶鸡脑、罗浮和连阳白浆等,而西部相对较少。晚白垩世(约100–80 Ma),

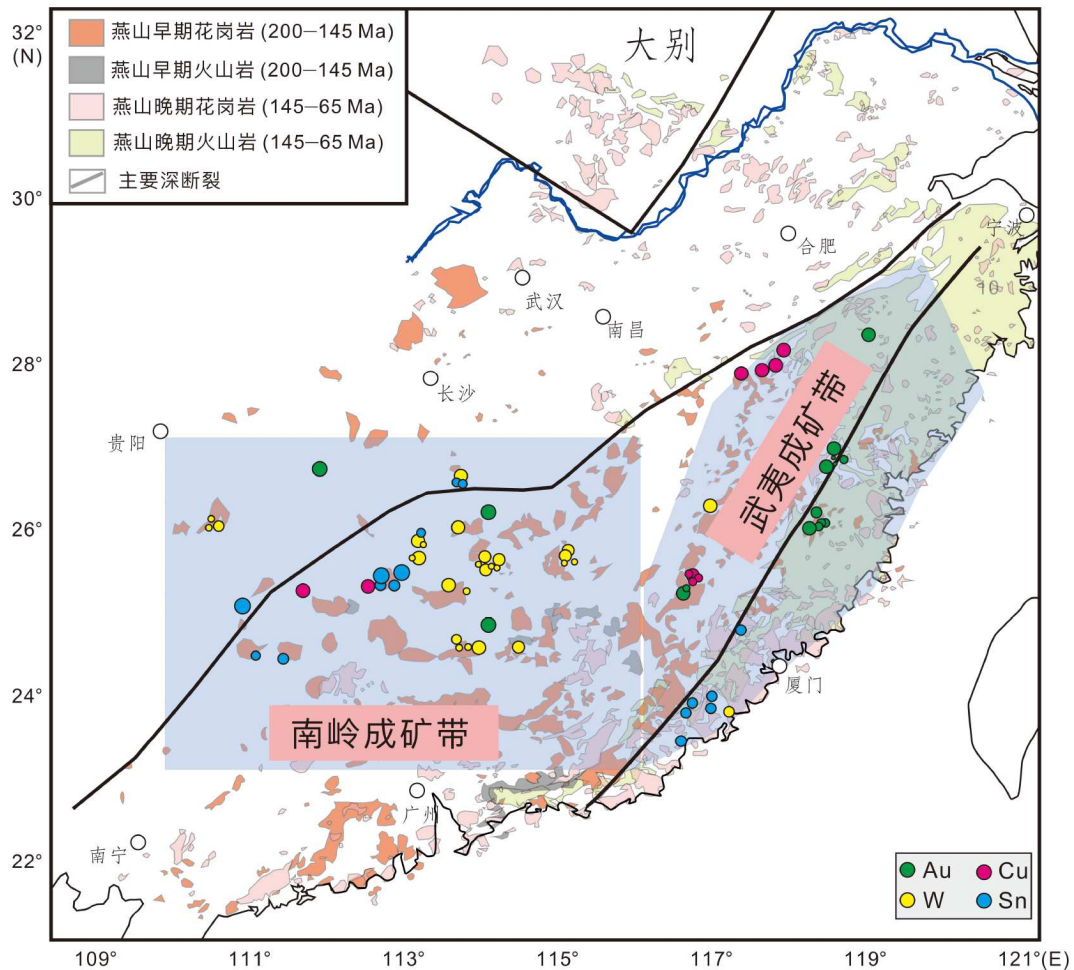


图1 华南燕山期岩浆岩与钨锡铜金矿床图

岩体主要分布于中西部地区，东部极少发育，常为一些大岩体的补体(网络版附表S1)。

2.2 武夷成矿带

武夷成矿带地层发育较为齐全，从古元古代至新生代均有出露。区带内地层可以分为三套大的岩系：前泥盆纪基底、泥盆纪-中三叠世海相沉积盖层和中新生代陆相碎屑及火山岩系。其中，前寒武纪基底对该区金(铜)、铅、锌、银矿产的形成起到重要控制作用。江西北武夷地区中-新元古界铁砂街岩组是一套海相变细碧角斑岩系，是重要的铜金矿的含矿层(Wang等, 2018)。浙江省陈蔡群是少量中酸性岩脉的类复理石建造，变质较深，含金层位主要赋存在建造底部。浙江省古元古界八都群和中元古界龙泉群也是重要的含金建造。福建新元古界马面山群中普遍发育基性火山岩和中酸性火山岩夹层，是福建省金银铜铅锌多金属矿的矿源层和含矿层(刘英俊和马东升, 1987)。

武夷成矿带岩浆活动频繁，岩浆活动范围广。自中新元古代(包括震旦纪)、寒武纪至志留纪、泥盆纪至中三叠世、晚三叠世至白垩纪、第三纪等，都有不同规模的岩浆活动，以中生代岩浆活动最为强烈，是武夷成矿带最主要的岩浆活动时期。武夷成矿带中生代火山活动规模巨大，持续时间相当长，从三叠纪延续到白垩纪，主要集中于早侏罗世、早白垩世及晚白垩世。早侏罗世火山岩仅仅沿着深大断裂带零星出露，形成于陆缘弧形成的初始阶段(Li S N等, 2020)。早白垩世在武夷成矿带广泛发育安山岩-英安岩-流纹岩建造(145–120 Ma)，该期岩浆活动是武夷成矿带活动最强、影响范围最大、分布面积最广的一期火山活动，主要分布在余姚-丽水-政和-大埔断裂带北西侧的武夷隆起区内(Wang G G等, 2016; Xu等, 2021)。其与下伏前中生代或中侏罗世地层呈角度不整合接触(浙江省地质矿产局, 1996; 福建省地质矿产局, 1997)。早白垩世晚期-晚白垩世的双峰式玄武岩-流纹岩双峰式火山岩建造(110–90 Ma)，分布面

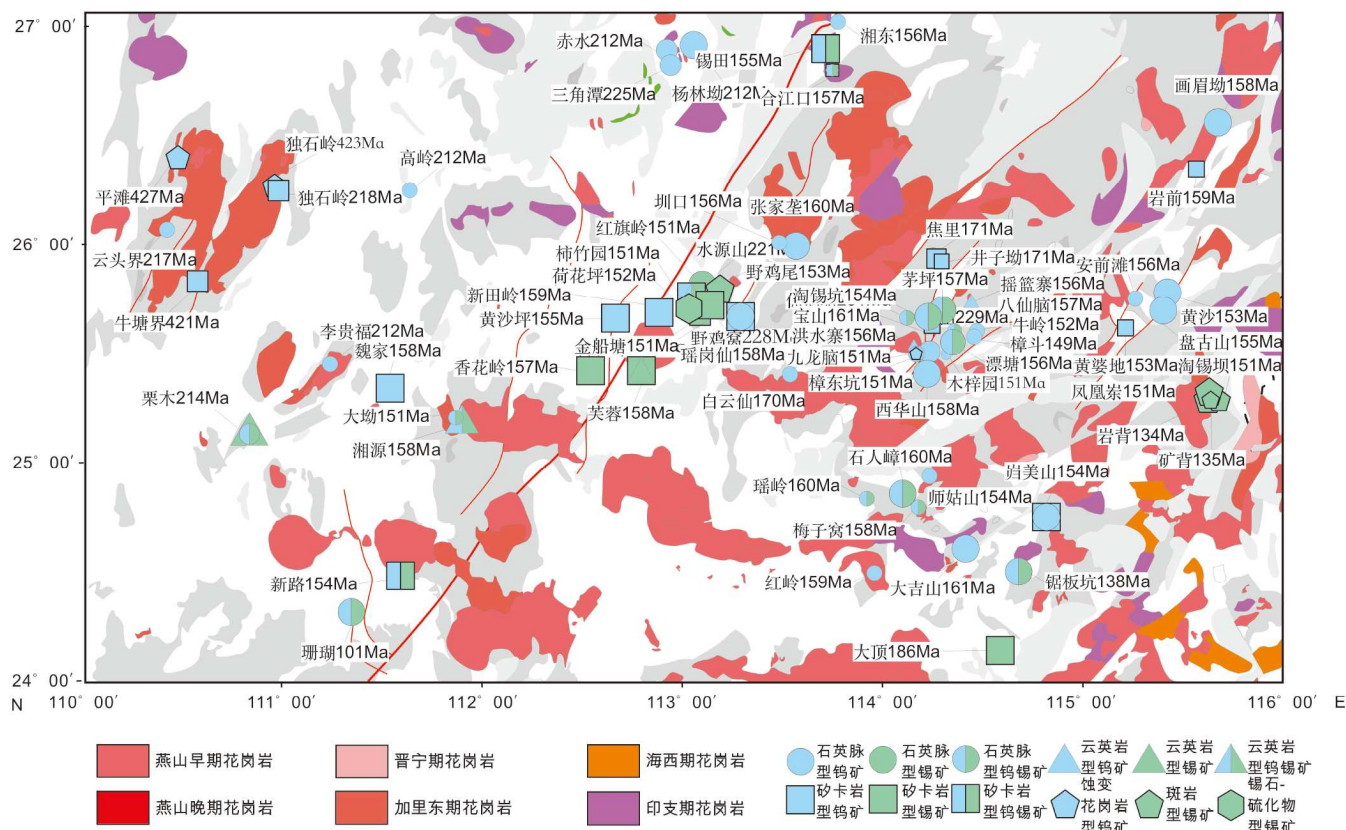


图2 南岭成矿带典型钨锡矿床分布图

积较小，主要分布于浙闽北东向断陷盆地之中(Xu等, 1999)。

晚中生代，武夷成矿带伴随大规模长英质岩浆喷发，产出了许多与火山-次火山热液相关金铜矿床。这些大规模金-铜成矿作用主要由斑岩型、砂卡岩型和浅成低温热液型矿床组成。其中，浅成低温热液型作为最主要的成矿类型又分为高硫型，中硫型和低硫型三种亚型(Ni等, 2018, 2019; Pan等, 2018; Chi等, 2020)。仅紫金山、五子骑龙高硫型浅成低温热液矿床就提供了武夷成矿带白垩纪金储量的87%，以冶岭头、锦屏、星溪等矿床为代表的低硫型浅成低温热液矿床以及悦洋、龙江亭、马仑头中等硫型浅成低温热液矿床分别提供了9%和4%的金。另外，紫金山、五子骑龙高硫型浅成低温热液矿床，罗卜岭、锦溪斑岩型矿床以及悦洋、龙江亭、马仑头、大岭口、五部、上山岗中硫型浅成低温热液矿床也提供了可观的铜矿资源(Bao等, 2020; Fan等, 2020, 2023; Yuan等, 2021)。此外，北武夷地区也是重要的铜成矿区域，包括永平铜矿、船坑铜矿、铜山铜矿等(Zhu等, 2016; Zhang X等, 2020; Zhang等, 2022, 2024)(附表S2; 图3)。

3 南岭成矿带钨锡多金属成矿作用

3.1 南岭成矿带钨锡矿床时空分布特征

南岭成矿带是我国重要的钨锡多金属成矿带，大多数钨锡矿床围绕着花岗岩类岩体产出，不少岩体本身也是矿体。因此，钨锡矿床与花岗岩类岩体有紧密的时空和成因联系(徐克勤和朱金初, 1987)。南岭成矿带存在有新元古代、加里东期、印支期和燕山期多时代钨锡成岩成矿作用，其中以燕山期巨量金属富集成矿最具特色，并且成岩与成矿年龄有很好的对应关系。南岭地区新元古代花岗岩出露较少，区内发现的锡多金属矿床主要有一洞、五地等，主要分布在桂北摩天岭地区。南岭地区加里东期花岗岩广泛出露，但是区内加里东期钨锡成矿花岗岩的发现相对较少。近年来，在湘南彭公庙和桂东北越城岭等加里东期岩体周边或内部陆续发现了一系列钨锡矿床(点)，越城岭落家冲白钨矿Sm-Nd等时线年龄 401.5 ± 9.4 Ma(杜云等, 2022)，越城岭平滩辉钨矿Re-Os等时线年龄为 432 ± 15 Ma(Chen等, 2019)。印支期岩浆岩主要产在湘桂和闽粤赣交界地区，前人研究认为，印支期花岗岩对钨锡成矿的约束有限。近年研究者在王仙

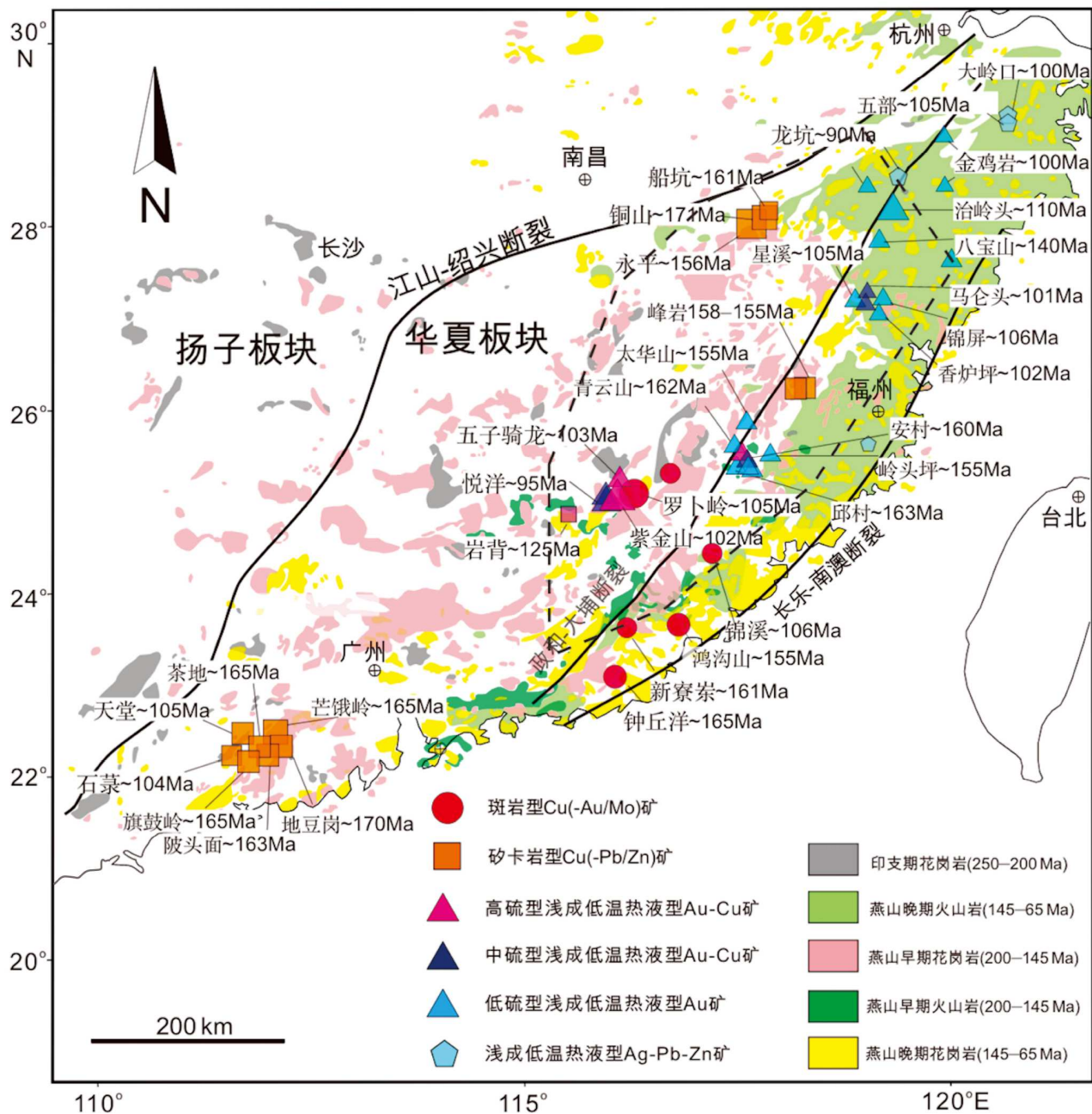


图3 武夷成矿带代表性金铜矿床分布图

岭岩体周围的野鸡窝获得锆石U-Pb年龄和辉钼矿Re-Os等时线年龄。李贵福、仙鹅塘、云头界、栗木、湘北木瓜园钨矿等钨多金属矿床也逐一被发现和报道(Ni等, 2023)。值得注意的是, 部分过去认为是形成于加里东期的彭公庙张家垄钨矿, 以及过去认为形成于印支期的荷花坪钨锡矿, 也有研究揭示出燕山期的成矿年龄(Zhang等, 2015; Yuan等, 2018)。但总体而言, 尽管南岭地区加里东期和印支期均有一定程度岩浆活动发生, 其矿化强度相比燕山期大规模成矿仍差之甚远。

燕山期南岭发生强烈频繁的构造-岩浆活动, 与钨锡稀有金属成矿大爆发密切相关, 是我国重要的岩浆成矿期。该时期成矿岩体大面积发育, 构成南岭成矿花岗岩的主体。到目前为止, 燕山时期形成的矿床占南岭地区经济钨资源的82%, 经济锡资源的97%(Mao等, 2019)。南岭除了界牌岭(90 Ma)、盐田岭(100 Ma)等少量燕山晚期岩体外, 绝大部分燕山期岩体均形成于燕山早期(约150-200 Ma; 图4A)。南岭地区燕山早期早侏罗世花岗岩相关W-Sn稀有金属成矿较为罕见, 目前仅有Zhao等

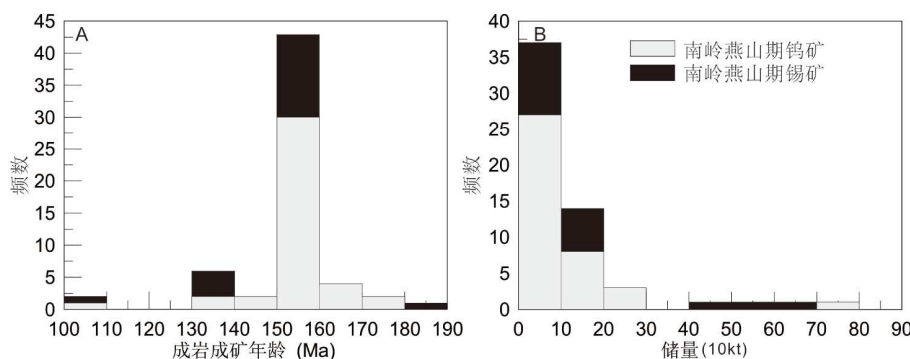


图4 南岭成矿带燕山期钨锡矿时代分布直方图

(2019)报道了大顶锡铁矿床成矿花岗岩锆石SIMS U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄分别为 189.5 ± 1.5 和 186.7 ± 1.2 Ma, 指示早侏罗世的成岩成矿作用。中晚侏罗世是南岭巨量钨锡多金属富集成矿的重要时期, 发育有西华山、大吉山、瑶岗仙、淘锡坑、茅坪、柿竹园、香花岭及芙蓉等一系列超大型、大型矿床。赣南茅坪石英脉型钨锡矿化相关的锡石U-Pb年龄为 157.0 ± 1.3 Ma; 柿竹园矿床内脉状云英岩型矿石中白云母Ar-Ar年龄为 151.1 ± 1.2 Ma; 野鸡尾矿床内含矿石英斑岩锆石U-Pb年龄为 152.7 ± 0.9 Ma (Zhao等, 2018); 瑶岗仙石英脉型黑钨矿石英脉中的锡石U-Pb年龄为 158.0 ± 1.9 Ma。研究表明这些典型矿床的钨锡稀有金属矿化均发生于中晚侏罗世。统计研究显示, 南岭成矿带内主要的超大型、大型矿床的辉钼矿Re-Os、锡石U-Pb及云母Ar-Ar年龄均主要集中于160–150 Ma以内 (Yuan等, 2008, 2011, 2019; Mao等, 2019; Ni等, 2021)。

南岭成矿带成矿具有东钨西锡的空间分布特征。东部地区是成钨花岗岩集中分布区, 主要岩体有西华山、九龙脑、漂塘、天门山、红桃岭、张天堂、大埠、大吉山等花岗岩, 西部地区是成钨花岗岩集中分布区, 典型岩体有骑田岭、千里山、九嶷山、香花岭、锡田、邓阜仙、大义山等岩体 (Wang等, 2010; Hu等, 2012; Zhao等, 2012; Chen等, 2023; Cui等, 2024)。虽然区内140–130 Ma的成矿年龄也有报道 (Wang X等, 2016), 但是相关的成钨锡花岗岩的成岩年龄却很少见到。100–90 Ma成钨锡矿床主要分布在南岭地区南部及外围, 如广西大厂、珊瑚、大明山等 (Yuan等, 2015; Zhang D等, 2020)。总体而言, 燕山期成钨锡花岗岩具有以湘南、粤北和赣南为中心 (160–150 Ma), 向四周变年轻 (140–90 Ma) 的趋势 (图4A)。据2007年的统计, 南岭地区钨、锡保有储量分别占全国的83%和63%。南岭钨矿储量接近300万吨, 锡矿储量也超过100万吨, 产出数十

个不同规模的矿床。如柿竹园钨矿储量可达80万吨, 锡矿储量30万吨; 锡田的锡储量也达32万吨 (图4B和附表S1)。

3.2 燕山期高分异稀有金属花岗岩与钨锡成矿

南岭钨锡矿化花岗岩可以分为成钨花岗岩和成锡花岗岩, 岩石地球化学成分可以帮助区分不同类型成矿岩体。南岭钨和锡成矿相关花岗岩样品主要绘制在($K_2O + Na_2O$) vs. SiO_2 图的花岗岩区域中 (图5A)。它们具有富硅和富碱的特征, 大部分样品属于高钾钙碱性花岗岩 (图5B)。钨锡花岗岩具有很强的Eu负异常 (Eu/Eu^*), 说明斜长石发生了强烈的分离结晶作用。对于南岭过铝质钨多金属花岗岩的分类, 存在着I型、S型和A型的争议 (Li X H等, 2007; 陈骏等, 2008; Ni等, 2021)。事实上, 高度演化的S、I型花岗岩和A型花岗岩经常难以区分, 具有相似的地球化学特征 (图5C)。南岭与钨锡成矿相关花岗岩则可能经历了高度岩浆分异作用, 不相容元素LILE (Rb、Ba、LREE)、HFSE (Zr、Hf、U、Th、Ta) 和稀有金属元素W、Sn等通常在最后阶段聚集 (Groves和McCarthy, 1978; 徐克勤和涂光炽, 1984; Zoheir等, 2020)。因此花岗岩化学分异程度高, 可能是形成大型钨锡矿床的重要因素之一。

从稀土元素和微量元素来看, 这些花岗岩呈现出“海鸥型”的稀土配分模式 (图6A), 表现出明显四分组效应。钨锡花岗岩强烈亏损Ba、Sr、P、Ti, 指示发生强烈长石、黑云母、磷灰石、含钛氧化物部分结晶; 强烈富集Nb、Ta、Th、Rb、U、Y, 表明经历强烈角闪石、黑云母、磷钇矿、磷灰石、锆石等矿物的分离结晶 (图6B)。

3.3 燕山期高分异稀有金属花岗岩岩浆源区

锆石的 ^{176}Lu - ^{176}Hf 放射性衰变体系也可以提供壳幔分异的信息 (Patchett等, 1981; Richards, 2003; Wu等,

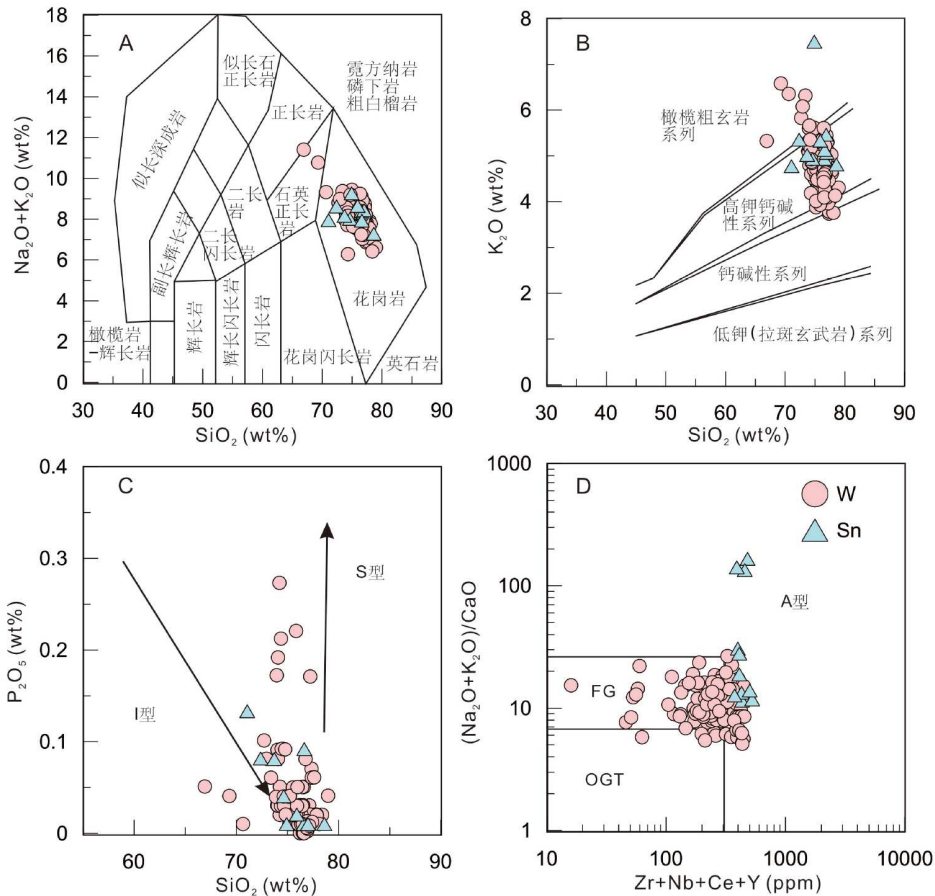


图5 南岭钨锡成矿岩体判别图解。(A) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 图解(底图根据Middlemost, 1994); (B) K_2O vs. SiO_2 图解(底图根据Rickwood, 1989); (C) P_2O_5 vs. SiO_2 图解; (D) $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 图解。底图根据Whalen等(1987)。数据来自: 华仁民等(2003, 2010)、Xie等(2010)、丰成友等(2011)、黄小娥等(2011)、李光来(2011)、Guo等(2012)、Yang等(2012)、杨帆等(2013)、Zhou等(2015)、Chen等(2016)、何苗等(2018)、Xiao等(2019)、Yuan等(2019)、Li W S等(2020)和Wu T等(2020)(详见附表S3–S4)

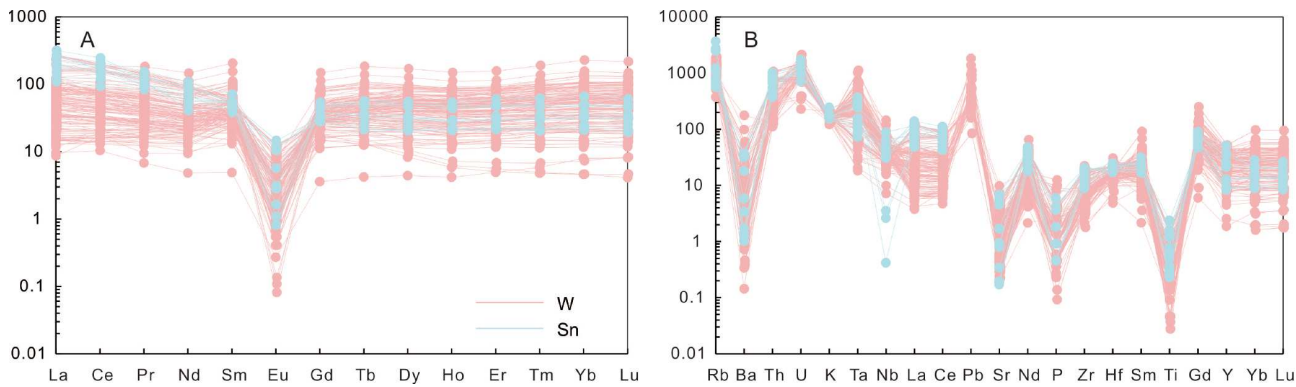


图6 南岭成矿带钨锡成矿岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图。球粒陨石和原始地幔标准化的值分别据Boynton(1984)、Sun和McDonough(1989), 数据来源同图5

2006; Zhou等, 2022)。如图7所示, 与钨矿化相关花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围在 -15.7 — -3.4 , 平均 $=-9.7$ 。锡矿化相关花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围在 -12.2 — -2.2 , 平均 $=-6.6$ 。锡多金属花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值显著高于钨多金属矿床相关的花岗

岩, 指示其岩浆源区有更多地幔物质的混入。成锡花岗岩多分布于南岭成矿带西部, 沿郴州-临武断裂分布, 地幔物质可通过断裂带运移上涌, 带来更多地幔组分贡献。钨多金属花岗岩也具有更高的两阶段模式年龄。与钨矿

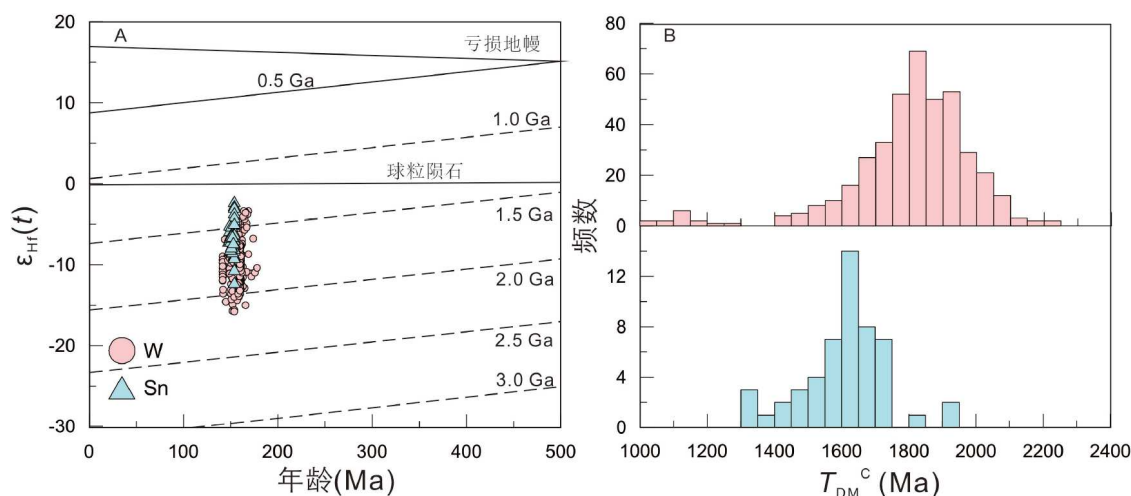


图7 南岭造山带钨锡矿床成矿花岗岩的锆石Hf同位素和两阶段模式年龄。数据来源：He等(2010)、Wang X L等(2014)、苏红中等(2015)、Zhang D等(2017)、何苗等(2018)、Jiang等(2019)、Li W S等(2020)和Guo等(2021)

化相关花岗岩为1.0–2.2 Ga，中值为1.8 Ga。锡多金属花岗岩两阶段模式年龄相对年龄，为1.3–1.9 Ga，中值为1.6 Ga。该结果也指示钨多金属矿化花岗岩主要来自元古代地壳上物质的部分熔融，而锡矿化花岗岩则可能形成于古老地壳和地幔物质的岩浆混合。

4 武夷成矿带金铜多金属成矿作用

4.1 武夷成矿带金铜矿床时空分布特征

晚中生代，武夷成矿带所在的东南沿海地区有大规模长英质岩浆喷发，伴随产出许多与火山-次火山热液相关金铜矿床。武夷成矿带中生代岩浆活动主要集中于中-晚侏罗世、早白垩世及晚白垩世，其中中-晚侏罗世火山活动相当微弱。因此前人研究认为，大部分矿床成矿时代为白垩纪，并赋存在白垩纪的火山岩-次火山岩中(Wang G G等, 2016; Zhong等, 2017)。但是近年来随着找矿工作的深入，在武夷成矿带发现一条侏罗纪火山岩带和一系列侏罗纪金铜矿床(图3)。截至2020年，武夷成矿带侏罗纪金储量超过41吨，铜储量超过217万吨(附表S2)。根据附表S2统计的武夷成矿带侏罗纪矿床的成岩成矿年龄，铜金矿化主要发生在中晚侏罗世，峰期为165–150 Ma，形成了包括铜山、船坑、永平铜矿和德化、邱村、东洋金矿在内的一系列铜金矿床。Li S N等(2020)在德化金矿集区内流纹板岩的热液锆石中获得了 163.1 ± 1.9 Ma的谐和年龄。最近对东洋金矿床中与成矿密切相关的黄铁矿Rb-Sr定年获得了 164.2 ± 9.9 Ma的等时线年龄(Xu等, 2018)。

白垩世岩浆活动可以分为早白垩世和晚白垩世两期。

早白垩世(145–110 Ma)武夷成矿带处于古太平洋板块俯冲挤压后的伸展环境，全区发生强烈岩浆活动，形成大规模弧岩浆，但该阶段没有显著金铜成矿。晚白垩世(110–90 Ma)武夷成矿带处于后造山伸展环境，火山活动相对微弱，主要形成双峰式火山岩并伴随A型花岗岩，表明壳幔作用强烈，形成了众多相关金、铜多金属矿床。截至2020年，晚白垩世金铜矿的金储量超过350吨，铜储量超过420万吨，主要分布于福建罗卜岭、紫金山、悦洋、马仑头、锦屏、星溪和浙江怀溪、八宝山、金鸡岩等铜金多金属矿床(附表S2)。其中，截至2017年底，紫金山矿集区总计探明Au金属量400 t，Cu金属量4.6 Mt。Chi等(2020)使用LA-ICP-MS U-Pb测年方法测得紫金山铜金矿床英安玢岩成岩年代为 104.7 ± 0.5 Ma，Duan等(2017)使用辉钼矿Re-Os等时线法测得紫金山矿集区罗卜岭铜钼矿床成矿年龄为 105.5 ± 2.2 Ma。

综合上述统计结果表明，武夷成矿带火山-次火山岩浆活动可大致分为三期，分别为中晚侏罗世(165–150 Ma)、早白垩世(145–110 Ma)和晚白垩世(110–90 Ma)。金铜多金属成矿则集中于两个阶段，分别为中晚侏罗世和晚白垩世，在成矿规模和强度上，以晚白垩世成矿最盛，但是中-晚侏罗世成矿亦不容忽视。

4.2 燕山期金铜成矿相关火山-次火山岩与构造背景

武夷成矿带广泛发育流纹质酸性火山岩，不过需要特别指出的是，与Au-Cu成矿相关岩体主要为中酸性火山-次火山岩，属于安山岩至英安岩(图8A)。大部分样品具有较高的 K_2O 和 Al_2O_3 含量，但 Na_2O 含量低，属于钙碱性系列到钾玄岩系列(图8B)。成矿带内岩浆岩具有相

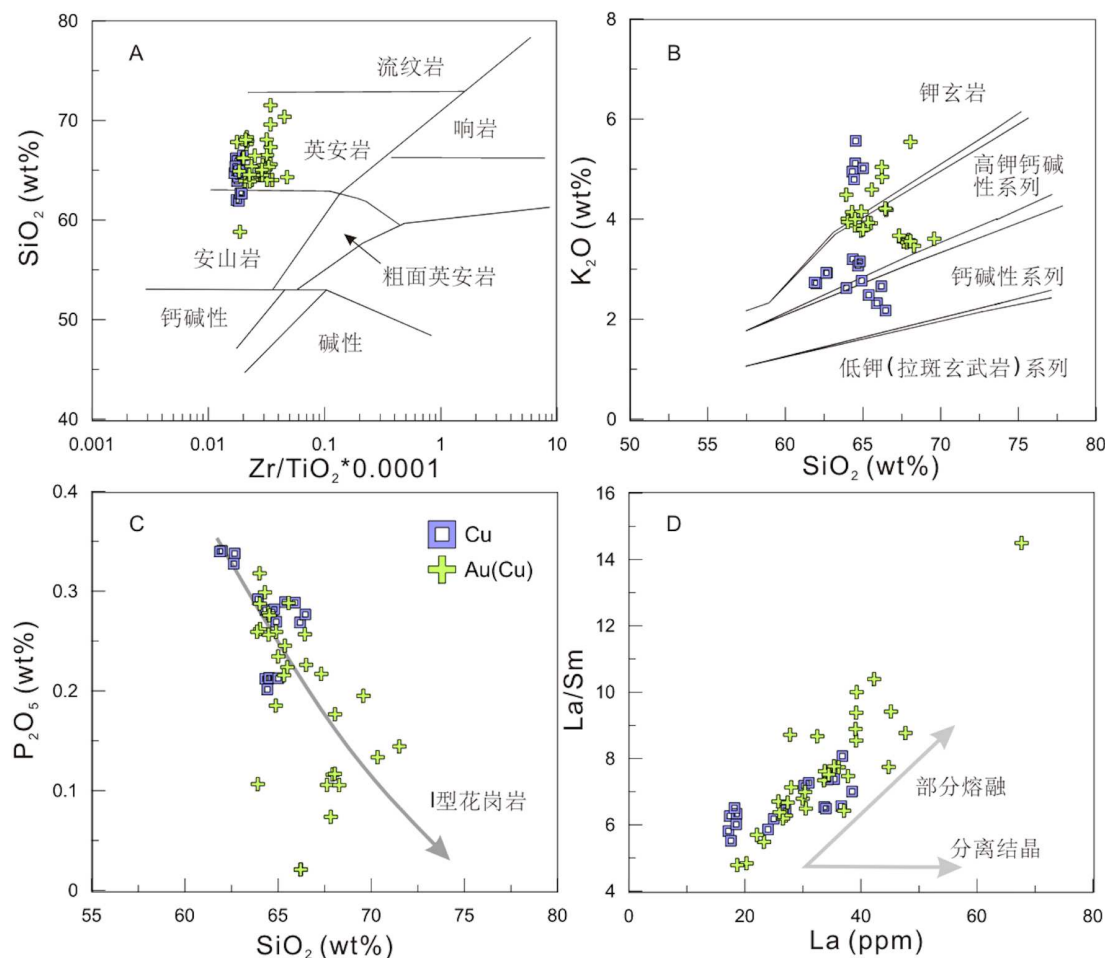


图8 武夷成矿带内火山岩和侵入岩的判别图解。(A) SiO_2 vs. Zr/TiO_2 成因分类图, 根据Winchester和Floyd(1977); (B) K_2O vs. SiO_2 图; (C) P_2O_5 vs. SiO_2 图; (D) La/Sm vs. La 部分熔融判别图解, 根据Wang G G等(2016)。数据来源: Chi等(2020)、Li S N等(2020)、Zhang X等(2020)和Zhang等(2022)(详见附表S5-S6)

对较高的 MgO 和 $\text{Mg\#}$ (29.3–64.5), 其显著高于在7–16 kbar(1 bar= 10^5 Pa)下玄武岩熔融的熔体成分, 暗示具有地幔物质的加入。这些岩体表现出I型演化趋势(图8C), La/Sm vs. La 图解显示部分熔融在岩浆过程起到主导作用(图8D)。此外, 绝大多数岩浆岩演化程度较低, REE配分模式表现出一定程度的LREE富集和不显著的负Eu异常。微量元素蛛网图揭示出它们具有典型弧岩浆的地球化学特征, 如富集大离子亲石元素(Rb、Ba、U、Th和LREE), 亏损高场强元素及具有Nb、Ta和Ti的负异常(图9)。这些特征表明该区燕山期火山岩具有弧岩浆的地球化学属性。

在构造判别图中德化金矿集区和铜山、船坑铜矿内的火山岩和侵入岩的数据判别投点均落在火山弧的区域(图10A), 表明该区中侏罗世岩浆活动可能形成于与古太平洋板块俯冲有关的大陆弧环境。德化金矿集区的火山岩和侵入岩图都属于大陆弧的区域。这种环境与板块

斜向俯冲引起的板块边界重组有关, 且以具有相对平坦的俯冲角度和宽Benioff带为特征(Müller等, 1992)。因此, 德化金矿集区是中国东南部弧火山岩的记录, 暗示了中侏罗世古太平洋板块的低角度俯冲。但是俯冲带距离铜山、船坑铜矿超过数百公里, 该俯冲板块难以到达铜山和船坑地区(Zhang X等, 2020; Zhang等, 2022)。结合其岩体主微量元素数据特征, 推测铜山和船坑成矿岩体可能是新元古代新生大陆地壳的部分熔融形成的。成矿岩体继承了弧岩浆参与形成的新生地壳的特征(Zhang X等, 2020; Zhang等, 2022), 这解释了为何陆内环境下形成的岩浆岩具有弧岩浆的属性(图10)。另外, 构造判别图解显示紫金山金铜矿集区岩浆岩处于伸展的构造背景。区域上, 晚白垩世武夷地区广泛发育双峰式火山岩和A型花岗岩, 这些也被认为是古太平洋板块后撤形成的弧后拉张背景的产物(Zhou等, 2006; He和Xu, 2012)。

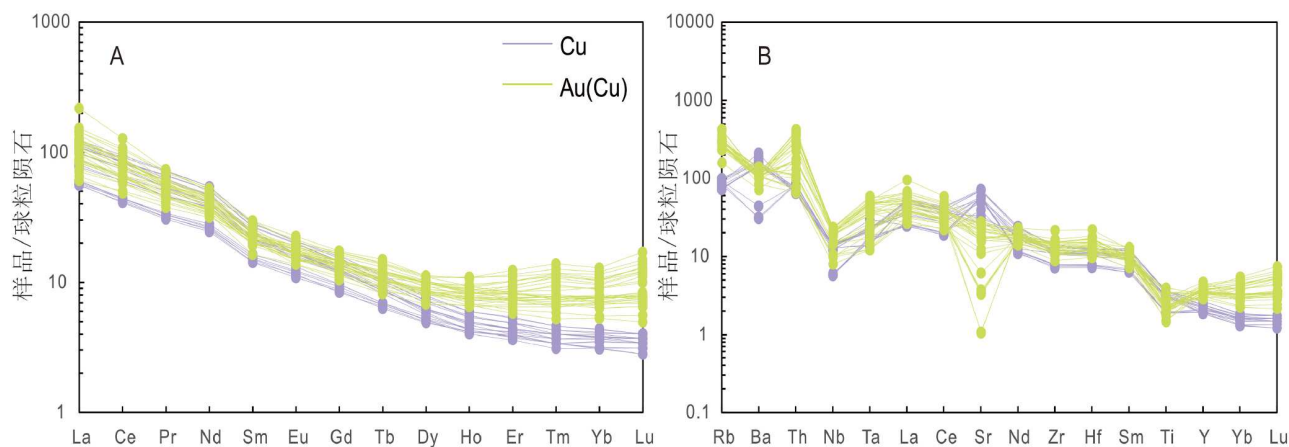


图9 武夷成矿带金铜成矿岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图。球粒陨石和原始地幔标准化的值分别据Boynnton(1984)、Sun和McDonough(1989), 数据来源同图8

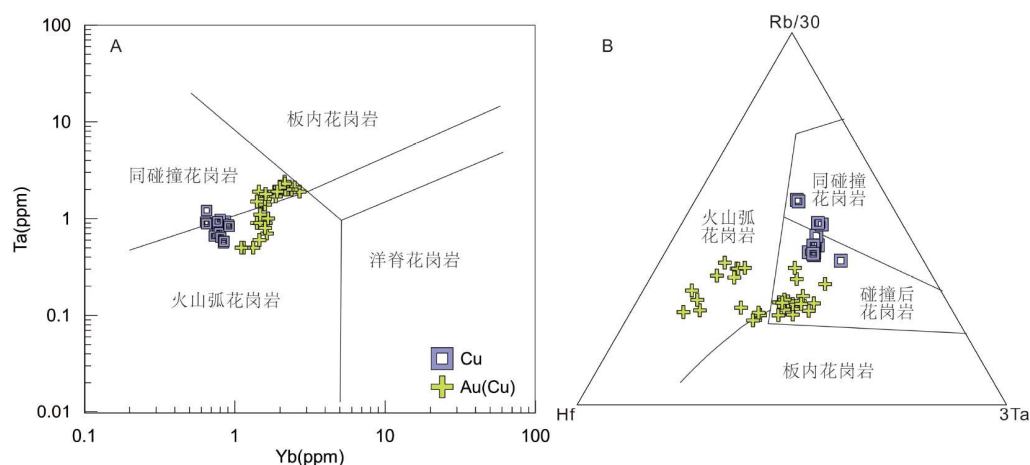


图10 武夷成矿带金铜成矿岩体构造背景判别图解。底图分别据Pearce等(1984)、Harris等(1986), 数据来源同图8

紫金山矿田中与成矿相关的岩浆岩主要形成于弧后拉张的构造背景(图11), 但同时其岩浆岩也具有显著的岛弧岩浆岩特征, 例如富集LILEs和LREE, 亏损HFSEs和Nb、Ta、Ti的属性(Li和Jiang, 2014; Jiang等, 2015; Li等, 2016; Duan等, 2017)。Pearce和Stern(2006)对典型的弧后盆地中的岩浆岩进行了系统研究(如Izu、Lau、Scotia、Mariana、Manus等), 其出现岛弧岩浆属性的原因可能来源于当时的俯冲活动或者之前俯冲活动交代产物。

4.3 武夷成矿带燕山期铜金成矿岩浆源区

武夷成矿带内的金铜成矿相关火山岩和侵入岩体现出明显的高钾特征, 高钾岩浆一般认为源自板片流体或熔体改造后的陆下岩石圈地幔的部分熔融(Foley和Peccerillo, 1992; Turner等, 1996; Rogers等, 1998;

Jiang等, 2002, 2006)。随着俯冲深度的增加, 温度和压力也逐渐升高, 这将导致俯冲板片中的洋壳沉积物脱水, 进而促进部分熔融的发生。含水的熔流体与地幔橄榄岩的相互作用可产生富钾源区, 其中富钾矿物如金云母的部分熔融将产生钾质熔体(Foley和Peccerillo, 1992; Conceição和Green, 2004; Jiang等, 2006; Condamine和Médard, 2014)。较高的Rb/Sr比(0.16–11.9)和较低的Ba/Rb比值(2.7–22.6), 暗示了源区的金云母作为主要含钾相的部分熔融。地壳重熔作用可能是该区大量长英质岩浆形成的最有可能的过程。带内火山岩-侵入岩岩石地球化学数据投点于中-高钾玄武岩为源区的区域, 暗示了这些岩浆岩可能形成于中-高钾玄武岩的部分熔融(图11)。

锆石Hf同位素可以有效地区分岩浆源区(Hawkesworth和Kemp, 2006)。该区域Cu成矿岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

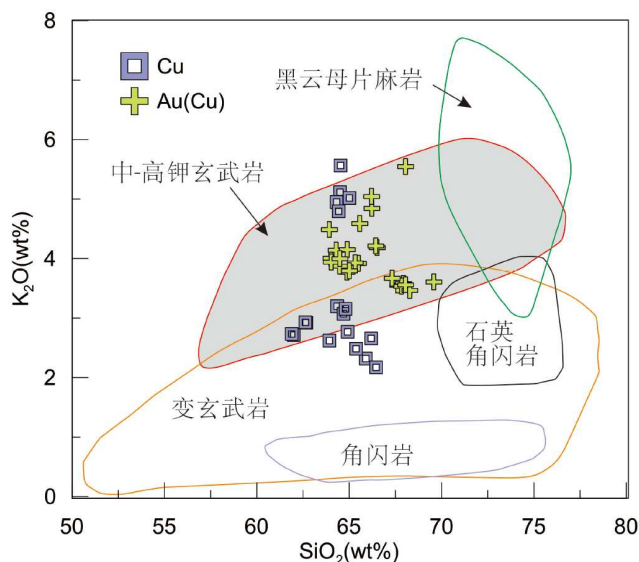


图11 武夷成矿带内金铜成矿岩体的 K_2O 组成和实验熔体资料的对比。底图据Li S N等(2020), 数据来源同图8

最高且范围较大, 为 -6.4 – 6.4 , 中值为 0.7 。Au-Cu成矿岩体的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -8.9 – 0.4 , 中值为 -5.0 。Au(Cu)成矿岩体的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值最低为 -12.6 – -2.1 , 中值为 -9.4 。Cu成矿岩体Hf同位素模式年龄为 0.8 – 1.6 Ga, 中值为 1.2 Ga, Au-Cu成矿岩体Hf同位素模式年龄为 1.1 – 1.7 Ga, 中值为 1.5 Ga。这些现象表明, 岩浆形成可能有地幔物质、富金铜的大陆地壳物质均参与了成岩成矿作用过程(图12)。已有许多研究人员都提出了早期俯冲事件形成的新生地壳中初始金属富集对矿床的重要性(例如: Lee等, 2012; Richards, 2013; Wang G G等, 2016)。富金属的大陆地壳物质以及地幔岩浆的共同作用可能是形成

大量金铜矿床的必要步骤。

5 燕山期南岭-武夷钨锡金铜成矿背景与深部过程

5.1 燕山期古太平洋板块俯冲转换与幕式成矿

中国东南部中生代大规模发育的岩浆活动被认为与古太平洋板块的俯冲有关(He等, 2010; Jiang等, 2015; Ni等, 2020; Zhang H等, 2023)。古太平洋板块的初始俯冲最有可能开始于中侏罗世(Zhou等, 2006; Wang G G等, 2016), 主要证据如下: (1) 三叠纪初潘集亚超大陆开始分裂, 古太平洋板块最初大约在 175 Ma产生并迅速生长(Veevers, 2004); (2) 沿东亚大陆边缘广泛发育侏罗纪增生杂岩体(Yui等, 2017); (3) 福建永梅盆地内约早侏罗世晚期发生的海退及中侏罗世开始的陆内长英质火山活动(邢光福, 2002)。Li S N等(2020)报道了德化地区沿政和-大浦断裂分布的中侏罗世弧火山岩, 认为该地区俯冲从 170 Ma左右开始。华南东南沿海地区的弧岩浆活动一直持续到 110 Ma左右才结束(Li等, 2014; Wang G G等, 2016)。

在早-中侏罗世(约 165 – 150 Ma), 古太平洋板块在华南的初始俯冲作用在南武夷德化地区产生弧火山岩(图13A)。地幔岩浆上涌并形成富金铜的新生陆壳基底物质, 新生地壳和古老地壳的混合重熔为斑岩-浅成低温热液型金铜矿床提供巨量金属来源, 形成富含金属的岩浆, 这些岩浆经历极弱的分异演化成矿。同时, 古太平洋的低角度俯冲作用使北武夷地区的深大断裂复活, 成为富铜金的陆壳部分熔融形成的岩浆向上运移的通道, 形成了一系列铜矿床, 如船坑和铜山铜多金属矿床等(Wang

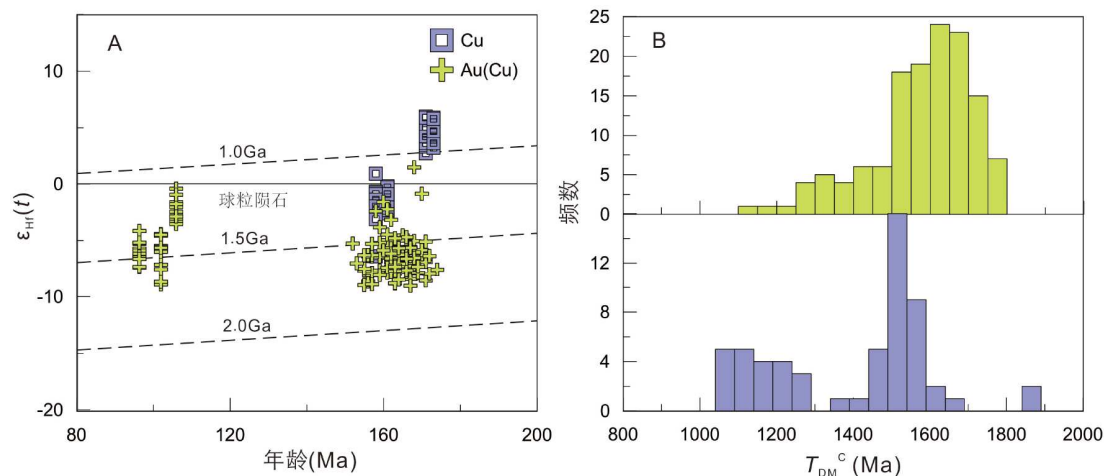


图12 武夷成矿带金铜成矿花岗岩的锆石Hf同位素和两阶段模式年龄。数据来源: Chi等(2020)、Li S N等(2020)、Zhang X等(2020)和Zhang等(2022)

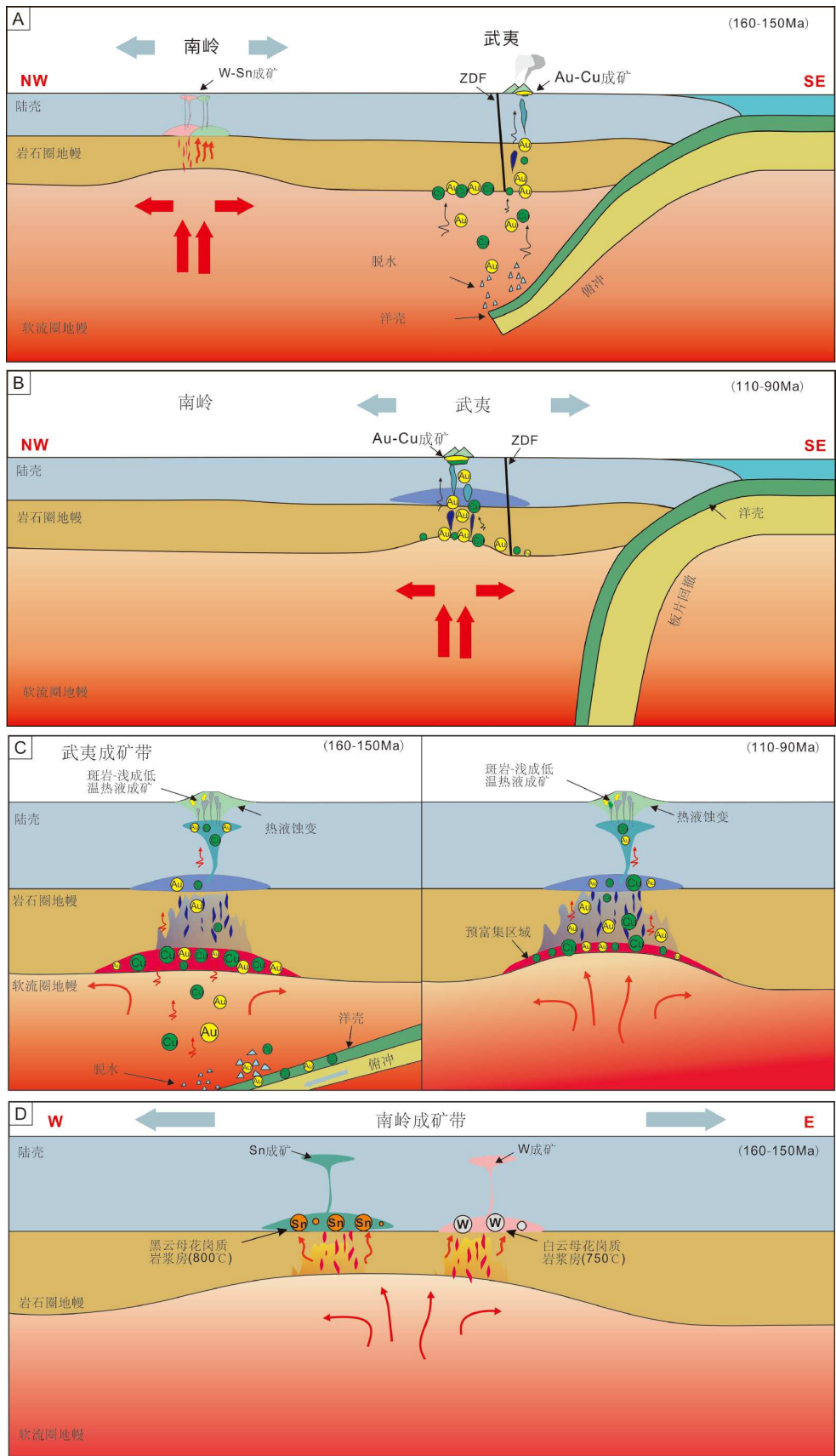


图 13 南岭、武夷成矿带燕山期钨锡金铜成矿作用模式图

等, 2015; Zhang X等, 2020)(图13C)。

由于古太平洋板块沿华南边缘俯冲的远程效应, 华夏地块内部的南岭地区在160–150 Ma期间发生了板内伸展。碱性玄武岩和正长岩在湖南广泛出露, 结合江西南部裂谷背景的特点和双峰式火山岩的分布表明岩石圈地幔上涌和岩石圈的伸展(Li等, 2003; Zhang H等, 2023)。因此, 在南岭地区发生了大规模的花岗岩岩浆活动, 这些花岗岩岩浆形成于岩石圈整体伸展减薄的背景下, 形成了大量的花岗岩, 如瑶岗仙、石人嶂、千里山、西华山、大东山和连云山等。南岭地区燕山早期花岗岩及与其相关的钨(锡)矿床均形成于晚侏罗世(约156–160 Ma), 我们认为该地区大规模W-Sn成矿作用形成于古太平洋板块俯冲引起的陆内伸展环境(图13A)。南岭东部钨成矿花岗岩形成于远离俯冲带的板内环境, 成熟度较高的富W古老地壳源区为岩体提供了物质来源, 有利于钨多金属矿的形成。岩浆的高度演化分异和熔流体交代作用有利于成矿元素在岩浆晚期富集(Zhao等, 2022b)。而在南岭西部, 郴州-临武深大断裂为深部幔源岩浆上移侵入地壳岩浆库提供了通道。成熟度略低的古老地壳物质和不同比例幔源物质混合并沿断裂带上移, 经历高度演化在附近形成大规模锡多金属矿化(图13D)。

在晚侏罗世-早白垩世(150–125 Ma), 古太平洋板块向华南板块俯冲角度变缓之后后撤, 在浙闽沿海形成大面积弧火山岩。在晚白垩世(约110–90 Ma), 古太平洋板片回撤发生拉张, 武夷成矿带位于弧后伸展的构造背景, 熔融了岩石圈地幔预富集区域, 产生了紫金山等金铜矿化(图13B–C)。区域上, 此时期武夷地区广泛发育双峰式火山岩、A型花岗岩和拉分盆地, 这些也被认为是古太平洋板块后撤形成的弧后拉张背景的产物(Zhou等, 2006; He和Xu, 2012; Wang G G等, 2016; Zhang H等, 2023)。

燕山期中国东部岩石圈性质发生了重大转变, 华北克拉通岩石圈厚度发生了超过100 km的减薄, 形成了巨量的金成矿作用(朱日祥等, 2015; 朱日祥和孙卫东, 2021)。与此同时, 中国东南沿海地区也发生了显著的岩石圈减薄(Dong等, 2020)。大规模的拆沉会对岩石圈进行改造, 导致地幔岩石圈的减薄, 触发软流圈的绝热上涌, 以及后续岩石圈的扩展和上覆地壳的大规模熔融。以武夷成矿带为代表的东南沿海地区, 金成矿作用与两期火山作用密切相关, 显示出岩石圈减薄对于武夷成矿带金铜成矿作用的重要贡献。尤其福建地区富金矿集区, 比如德化、政和地区, 是典型的减薄区, 形成重要的金矿集区(Ni等, 2018, 2019; Li S N等, 2020; Zhang H等, 2023)。

5.2 成矿区带的地壳结构以及深部地质过程

华南陆块深部结构复杂, 丰富的地球物理资料为揭示地壳深部过程与成矿作用的耦合关系提供了关键约束。南岭-武夷成矿区带横跨扬子与华夏地块, 其中南岭的西缘与扬子地块的江南造山带接壤, 南岭-武夷成矿带的绝大部分地区则处于华夏地块上。研究表明, 南岭与武夷两大成矿带在深部结构、物质来源及成矿元素方面存在显著差异。基于跨维度背景噪声成像的方法揭示出华南大陆在地震特征上表现出强烈的区域分带变化, 体现了多块体的拼合以及后期造山、变形的复杂地质历史过程(Li等, 2023)。华南大陆地壳的莫霍面深度在大约28–48 km, 整体而言, 存在从西北内陆向东南沿海方向逐渐减薄的特点(褚伟等, 2025)。

近期地球物理工作对武夷成矿带有较为深入的认识。基于双聚焦噪声成像技术揭示的武夷成矿带S波速度结构显示出长期活动的深大断裂, 如政和-大浦断裂, 控制中生代火山-沉积盆地发育(侯爵等, 2022), 对区域内火山岩-次火山岩相关的金铜成矿具有重要制约。武夷成矿带上地壳主要由高S波速度的壳源花岗岩和酸性火山岩构成, 而下地壳则广泛发育低速异常, 代表长英质古老地壳基底, 这说明武夷成矿带相对富金, 这与古老基底有关。此外, “中国深部探测”(SINOPROBE)深地震反射剖面揭示出在古太平洋俯冲作用影响下, 武夷成矿带呈现显著的岩浆底侵作用和地幔物质向地壳的注入, 在中下地壳形成了层状基性新生地壳(Dong等, 2020), 这些新生地壳可能为区域提供了丰富的成矿物质铜。

南岭地区的下地壳(27–33 km)以一系列近水平、层状、弥散展布的反射层为典型特征, 莫霍面总体比较平坦, 局部存在隆起带, 代表了地壳经历了强烈的减薄作用, 这与南岭地区燕山期地幔上涌以及发生大规模的花岗岩岩浆作用相一致(李建华等, 2024)。综合重力异常、地震成像和大地电磁探测资料, 进一步证实南岭深部存在一个大规模的低密度、低速的陆壳重熔区, 该重熔区的形成被认为主要源于软流圈地幔楔玄武岩浆的底侵作用(陈国雄等, 2014), 底侵带来的热力导致中下地壳岩石发生大规模部分熔融。卫星重力同样揭示其处于莫霍面隆-陷交替区(罗凡等, 2019), 但南岭成矿带的主导成矿物质主要来源于重熔的古老陆壳, 最终主要形成了以钨、锡等元素为主的矿床(陈国雄等, 2014; 罗凡等, 2019), 而地幔物质在此过程中可能主要扮演热驱动角色, 而没有物质参与。

综上, 地球物理证据清晰地指示: 南岭成矿带以壳源物质重熔为主, 形成钨锡矿床; 而武夷成矿带则以幔源物质上涌为主, 形成铜金矿床, 两者深部过程虽有壳

幔相互作用的共性，但物质来源与成矿元素组合截然不同。

5.3 深部过程的差异性与金属矿化空间分带

花岗岩中的锆石Hf同位素填图可以清晰揭示出深部地壳的性质。近期有学者以中生代花岗质岩石和长英质火山岩样品为研究对象，基于大量岩浆锆石Lu-Hf同位素数据，开展了大陆尺度的锆石Hf同位素填图研究，绘出华南地壳深部物质组成呈现“马赛克”样式的空间架构(Zhang Z Y等, 2023)。他们的研究揭示出，南岭地区却显示低的 ϵ_{Hf} 值，结合 V_p/V_s 比值和地壳厚度均有显著变化的再造地壳为主特征，武夷地区则显示高 ϵ_{Hf} 为特征的新生地壳域。这一Hf同位素填图结果与该区带地球物理工作取得的认识具有高度一致性。

地球物理资料以及锆石Hf同位素揭示出来的地壳分区特征，对于武夷-南岭成矿区带的矿化分区具有重要启示。武夷成矿带的北部产出船坑和铜山为代表的富铜矿床，以及武夷成矿带西南部，如紫金山，则形成于相对厚地壳地区，说明富铜新生地壳的重要贡献(Chi等, 2020; Zhang X等, 2020; Zhang等, 2022)。武夷带斑岩-浅成低温金铜成矿的深部地质过程可以描述为，含Au-Cu硫化物在较低氧逸度条件下沉淀并被捕获于新生下地壳，形成了富铜的硫化物堆积体。下地壳富金铜的堆积体在全球范围广泛报道，为这一假设提供了地质支撑(Hou等, 2013, 2015, 2017; Jenner, 2017; Chen等, 2020; Zheng等, 2020; Zhou Y等, 2023)。下地壳富金铜的堆积体在西南三江地区、西藏冈底斯地球都有报道，充分证实了硫化物堆积体对于超大型、大型金铜成矿作用的重要意义。

如何促使新生下地壳物质熔融过程中，成矿物质发生分解并且迁移到地壳浅部，需要有合适的物理化学条件。尤其需要关注的是高氧逸度和高水含量(Wang等, 2014b; Lu等, 2015; Dong等, 2023; Miao等, 2023)。晚中生代古太平洋板块俯冲作用可以为上述两个关键条件提供便利条件。比如，铜以硫化物形式或硫酸盐形式迁移，其迁移能力可以相差上万倍。高氧逸度条件下，硫酸盐条件是活化迁移下地壳硫化物堆积体的有利条件(Wang等, 2014a; Zhang C C等, 2017; Dong等, 2023; Zhao等, 2025)。与此同时，斑岩型铜金成矿系统中，高含水量有利于流体出溶，考虑到铜具有亲流体的特征，岩浆具有高水含量被认为是成矿作用的重要因素(Wang等, 2014b, 2024; Huang等, 2019; Yuan等, 2025)。俯冲带环境，由于俯冲板片的上覆沉积物含有大量的富水矿物，俯冲过程提供大量的流体，这为富水岩浆的形

成提供了关键支撑。在晚中生代古太平洋板块俯冲作用下，成矿元素被释放到埃达克质岩浆中，迁移到地壳浅部，在合适的地方发生流体出溶，金属沉淀，进而形成大型-超大型Au-Cu矿床。

武夷成矿带重要的特征是金成矿作用与富金基底有密切的成因联系。华夏地块古老的基底为浙西南地区八都群，八都群也是浙江最大的金矿-遂昌金矿的赋矿地层，而且从矿田构造来看，遂昌金矿与八都群的韧性剪切作用密切相关(全国危机矿山专项-南京大学闽浙赣项目组, 2012)。尽管有多项研究提出了金成矿作用与燕山期火山、次火山作用的联系，但是不可否认，金与基底的密切联系。金主要赋存在八都群的韧性剪切带中，而不是燕山期的火山岩、次火山岩范围。类似的，福建双旗山金矿赋存在新元古代马面山群中。成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系，成矿流体可能以变质热液为主；而流体不混溶是金沉淀的重要机制(Bao等, 2021; Ma等, 2021)。与金成矿作用相比，武夷成矿带的金铜成矿作用有更多地幔物质的贡献。根据锆石Hf同位素组成，该区域金铜成矿岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-6.4~-6.4，中值为0.7，而金成矿岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-8.9~-0.4，中值为-5.0(图12)。这表明可能有地幔物质参与了成岩成矿作用过程。

尽管古太平洋板块俯冲作用在中国东部影响范围广泛，但是目前，没有证据表明，古太平洋板块俯冲为南岭地区直接提供显著物质贡献。南岭地区成钨花岗岩是以强过铝花岗岩为特征(Li W S等, 2020)，这类花岗岩源区是经历强烈地表风化作用的产物，铝的过量是钙等其他元素在风化过程中淋滤散失的结果。南岭地区成锡花岗岩尽管有一定地幔物质贡献，但是总体仍然是以地壳来源物质为主(Ni等, 2021)。与此同时，考虑到南岭地区属于弧后伸展环境，远离俯冲带，相应的，南岭地区具有相对较低的氧逸度，这也与广泛发育还原性的S型花岗岩有关。因此，构造地质背景是形成不同类型成矿地质体的一级控制因素。

钨和锡主要分布在我国南岭及其邻近地区，两种矿化类型成因关系密切，总体呈现出相互共生的趋势，但两者之间仍然存在着很明显的差异，存在着东钨西锡的空间分布规律(Ni等, 2023)。从成矿花岗岩的地质证据来看，成钨花岗岩一般少见暗色包体，但是在成锡花岗岩，常见暗色包体(Wu等, 2023)。从成矿花岗岩的地球化学组成来看，成钨花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围在-15.7~-3.4，平均=-9.7，锡矿化相关花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围在-12.2~-2.2，平均=-6.6，后者显著高于钨多金属矿床相关的花岗岩，指示其岩浆源区有更多地幔物质的混入。从成矿流体的He-Ar同位素数据来看，锡矿的成矿流体

具有更高的幔源流体的加入(Ni等, 2021)。这可以解释为源区沉积岩的成分及引起这些原岩部分熔融所需的热源的分布起关键控制作用(Yuan等, 2019; Zhao等, 2022a)。成钨花岗岩的锆石饱和温度(约750 °C)低于锡矿化花岗岩(约800 °C), 这一差异表明: 形成钨矿化花岗岩的岩浆主要是白云母脱水熔融的产物, 而形成锡矿化花岗岩的岩浆则主要来源于黑云母脱水熔融(Zhao等, 2022a)。成锡花岗岩熔融的温度更高(约800 °C)(Yuan等, 2019), 如果有地幔物质的加入将有利于更高温度的部分熔融。

本研究认为南岭-武夷地区出现钨锡、金铜空间解耦的关键控制要素是基底和俯冲带相对位置。在远离俯冲带, 以地壳重熔为主的地区, 有利于形成钨锡矿化; 在靠近俯冲带, 有显著俯冲板片贡献的地区, 有利于形成金矿; 铜矿往往与富铜新生地壳有密切联系。钨锡矿化的深部岩浆源区以古老再循环地壳物质特征, 铜矿化的深部岩浆源区则是以新生地壳物质为主, 这是形成南岭钨锡成矿带和武夷铜金成矿带的根本控制因素。

此外, 本文进一步提出, 即使在武夷、南岭成矿区带内容, 仍然存在着金、金铜矿化的空间解耦, 以及钨、锡矿化的空间解耦。与金矿化的成矿岩体相比, 金铜矿化岩体有更多地幔物质的贡献。类似的, 与成钨花岗岩相比, 成锡花岗岩具有更多地幔物质的参与以及更高的锆石饱和温度。因此, 在成矿区带内部, 物理化学条件的不同, 对矿化类型具有重要控制作用。

事实上, 南岭地区也存在少量金锑矿, 例如龙山金锑矿、宝山金矿; 武夷地区也发育一些钨锡矿, 包括莲花山钨锡矿、长埔钨锡矿等。这充分说明了, 即使在南岭或者武夷成矿区带, 并不是仅仅发育某一类单一矿种, 同时发育有多类型的矿化类型。在金铜成矿带发育钨锡矿床, 在钨锡成矿带发育金锑矿床, 充分反映了地壳的复杂性和不均一性。

6 结论

南岭成矿带过铝质钨锡花岗岩形成于板内环境。成矿成矿物质主要来自古老地壳的再造重熔, 在深大断裂附近有少量地幔物质贡献。成矿作用与岩浆的高分异演化作用有关。南岭存在加里东期、印支期和燕山期多期岩浆构造活动, 燕山期古太平洋板块俯冲的远程效应是南岭钨锡巨型成矿带的有利构造因素。钨锡空间解耦的重要因素在于锡成矿作用有显著的地幔物质贡献, 具有更高的成矿岩浆形成温度。

武夷成矿带准铝质金铜花岗岩形成于俯冲带或弧后环境。金铜成矿岩体往往与富金铜的基底地层有密切的

空间联系, 金铜成矿作用受到板片俯冲重熔与古老基底的双重控制。武夷成矿带燕山期成矿活动有两个峰期, 分别对应于晚侏罗世和早白垩世晚期; 构造体制转换是金铜成矿的有利构造因素。金铜矿化的空间解耦的关键控制因素是金矿化主要与古老富金基底有关, 铜矿化需要有更多新生地壳物质的参与。

南岭和武夷成矿带是典型的造山带相关的金属巨量富集的典型范例。武夷成矿带形成于金铜成矿作用相关的俯冲带。南岭成矿带的钨锡成矿物质远离燕山期俯冲带, 显示了钨锡成矿作用往往与大陆地壳的多期次再造有关。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责, 详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- 陈国雄, 刘天佑, 孙劲松, 等. 2014. 南岭成矿带多尺度重力场及深部构造特征. 地球科学——中国地质大学学报, 39: 240–251
- 陈骏. 2000. 锡的地球化学. 南京: 南京大学出版社
- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 等. 2008. 南岭地区钨锡钨钼花岗岩及其成矿作用. 高校地质学报, 14: 459–473
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 等. 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: 111–121
- 陈文迪, 张文兰, 王汝成, 等. 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. 中国科学: 地球科学, 46: 1602–1625
- 褚伟, 徐亚, 张健, 等. 2025. 华南陆缘地壳深部结构与大型花岗岩体特征: 来自三维密度结构反演的启示. 中国科学: 地球科学, 55: 1942–1959
- 杜云, 田磊, 郑正福, 等. 2022. 湘西南落家冲钨锡矿床加里东期成矿年龄的测定: 对华南多旋回构造-岩浆活动与成矿作用的启示. 地质通报, 41: 886–902
- 丰成友, 黄凡, 屈文俊, 等. 2011. 赣南九龙岗矿田东南部不同类型钨矿的辉钨矿Re-Os年龄及地质意义. 中国钨业, 26: 6–11
- 福建省地质矿产局. 1997. 福建省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社
- 何苗, 刘庆, 侯泉林, 等. 2018. 湘东邓阜仙花岗岩成因及对成矿的制约: 锆石/锡石U-Pb年代学、锆石Hf-O同位素及全岩地球化学特征. 岩石学报, 34: 637–655
- 侯爵, 徐涛, 吕庆田, 等. 2022. 双聚束噪声成像揭示钦杭与武夷山成矿带上地壳精细结构. 地球物理学报, 65: 3881–3899
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 2003. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比. 高校地质学报, 9: 609–619
- 华仁民, 李光来, 张文兰, 等. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探. 矿床地质, 29: 9–23
- 黄小娥, 李光来, 郭家松, 等. 2011. 赣南樟东坑钨矿成矿花岗岩及矿化特征. 矿物学报, 31: 34–35
- 李光来. 2011. 赣南及邻区燕山期花岗岩演化与成矿作用. 博士学位论文. 南京: 南京大学
- 李建华, 董树文, 赵国春, 等. 2024. 华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学. 地质学报, 98: 829–861
- 刘英俊, 马东升. 1987. 华南含金建造的地球化学特征. 地质找矿论丛, (4): 1–14
- 罗凡, 严加永, 付光明, 等. 2019. 华南地区地壳厚度变化及对成矿类型的制约: 来自卫星重力数据的约束. 中国地质, 46: 759–774

- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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: 2329–2338
- 倪培, 王国光. 2017. 大陆再造与钦杭带北东段多期铜金成矿作用. *岩石学报*, 33: 3373–3394
- 全国危机矿山专项-南京大学闽浙赣项目组. 2012. 浙江省丽水市遂昌县治岭头金矿典型矿床研究
- 苏红中, 郭春丽, 伍式崇, 等. 2015. 锡田印支-燕山期复式花岗质岩浆-热液活动时限和物质来源. *地质学报*, 89: 1853–1872
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望. *高校地质学报*, 10: 305–314
- 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 等. 2002. 东南大陆边缘早侏罗世火成岩特征及其构造意义. *地质通报*, 25: 384–391
- 徐克勤, 涂光炽. 1984. 花岗岩地质和成矿关系(国际学术会议论文集). 南京: 江苏科学技术出版社
- 徐克勤, 朱金初. 1987. 华南锡钨矿床的时空分布和成矿控制. 北京: 地质出版社
- 严宸, 赵海杰, 赵盼盼, 等. 2019. 湘南圳口石英脉型黑钨矿床白云母Ar-Ar同位素测年及其对区域找矿勘查的指示. *矿床地质*, 38: 1147–1158
- 杨帆, 肖荣阁, 白凤军, 等. 2013. 江西赣州淘锡坑钨矿床稀土地球化学研究. *地质与勘探*, 49: 1139–1152
- 浙江省地质矿产局. 1996. 浙江省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社
- 朱日祥, 孙卫东. 2021. 大地幔楔与克拉通破坏型金矿. *中国科学: 地球科学*, 51: 1444–1456
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 42: 1135–1159
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 2015. 克拉通破坏型金矿床. *中国科学: 地球科学*, 45: 1153–1168
- Bao T, Ni P, Li S N, et al. 2020. Geological, fluid inclusion, and H-O-C-S-Pb isotopic constraints on the genesis of the Shuangqishan gold deposit, Fujian, China. *J Geochem Explor*, 214: 106544
- Bao T, Ni P, Dai B Z, et al. 2021. Pyrite Rb-Sr geochronology, LA-ICP-MS trace element and telluride mineralogy constraints on the genesis of the Shuangqishan gold deposit, Fujian, China. *Ore Geol Rev*, 138: 104158
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. *Rare Earth Element Geochemistry*. New York: Elsevier
- Chen J, Sheng D, Shao Y, et al. 2019. Silurian S-type granite-related W-(Mo) mineralization in the Nanling Range, South China: A case study of the Pingtan W-(Mo) deposit. *Ore Geol Rev*, 107: 186–200
- Chen K, Tang M, Lee C T A, et al. 2020. Sulfide-bearing cumulates in deep continental arcs: The missing copper reservoir. *Earth Planet Sci Lett*, 531: 115971
- Chen Y K, Ni P, Pan J Y, et al. 2023. Fluid evolution and metallogenic mechanism of the Xianghualing skarn-type Sn deposit, South China: Evidence from petrography, fluid inclusions and trace-element composition of cassiterite. *Ore Geol Rev*, 154: 105351
- Chen Y K, Ni P, Pan J Y, et al. 2024. Tracing the magmatic-hydrothermal evolution of the Xianghualing tin-polymetallic skarn deposit, South China: Insights from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Miner Depos*, 59: 1553–1578
- Chen Y X, Li H, Sun W D, et al. 2016. Generation of Late Mesozoic Qianlishan A2-type granite in Nanling Range, South China: Implications for Shizhuyuan W-Sn mineralization and tectonic evolution. *Lithos*, 266–267: 435–452
- Chi Z, Ni P, Pan J Y, et al. 2020. Petrogenesis and tectonic setting of the Cretaceous volcanic-intrusive complex in the Zijinshan ore district, Southeast China: Implications for different stages of mineralization. *J Asian Earth Sci*, 192: 104265
- Conceição R, Green D H. 2004. Derivation of potassic (shoshonitic) magmas by decompression melting of phlogopite+pargasite lherzolite. *Lithos*, 72: 209–229
- Condamine P, Médard E. 2014. Experimental melting of phlogopite-bearing mantle at 1 GPa: Implications for potassic magmatism. *Earth Planet Sci Lett*, 397: 80–92
- Cooper C M, Miller M S. 2024. Embracing craton complexity at depth. *Elements*, 20: 187–192
- Cui J M, Ni P, Pan J Y, et al. 2024. Fluid inclusion constraint on sulfide precipitation in wolframite-quartz veins: A case study of the giant Dajishan W polymetallic deposit, South China. *J Geochem Explor*, 259: 107423
- Deng J, Wang Q, Sun X, et al. 2022. Tibetan ore deposits: A conjunction of accretionary orogeny and continental collision. *Earth-Sci Rev*, 235: 104245
- Dong S, Li J, Cawood P A, et al. 2020. Mantle influx compensates crustal thinning beneath the Cathaysia Block, South China: Evidence from SINOPROBE reflection profiling. *Earth Planet Sci Lett*, 544: 116360
- Dong L, Yang Z, Liu Y, et al. 2023. Possible source of Au in the Jiaodong area from lower crustal sulfide cumulates: Evidence from oxygen states and chalcophile elements contents of Mesozoic magmatic suites. *Ore Geol Rev*, 153: 105268
- Duan G, Chen H, Hollings P, et al. 2017. The Mesozoic magmatic sources and tectonic setting of the Zijinshan mineral field, South China: Constraints from geochronology and geochemistry of igneous rocks in the Southeastern Ore Segment. *Ore Geol Rev*, 80: 800–827
- Elongo V, Falck H, Rasmussen K L, et al. 2022. Ancient roots of tungsten in western North America. *Geology*, 50: 791–795
- Fan M S, Ni P, Pan J Y, et al. 2020. Mineralogical, fluid inclusion, and stable isotopic study of the Shangshan'gang Au deposit, southeast China: Implications for ore formation and exploration. *J Geochem Explor*, 215: 106564
- Fan M S, Ni P, Pan J Y, et al. 2023. Rare disperse elements in epithermal deposit: Insights from LA-ICP-MS study of sphalerite at Dalingkou, South China. *J Geochem Explor*, 244: 107124
- Foley S, Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28: 181–185
- Groves D I, McCarthy T S. 1978. Fractional crystallization and the origin of tin deposits in granitoids. *Mineral Depos*, 13: 11–26
- Guo C, Chen Y, Zeng Z, et al. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan granites in southeastern China: Constraints from geochemistry and in-situ analyses of zircon U-Pb-Hf-O isotopes. *Lithos*, 148: 209–227
- Guo X, Wu K, Cai Y, et al. 2021. Petrogenesis of ore-forming granites with implications for W mineralization in the Huangsha-Tieshanlong Deposit, Southern Jiangxi Province, South China. *J Geochem Explor*, 224: 106736
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 19: 67–81
- Hawkesworth C J, Kemp A I S. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chem Geol*, 226: 144–162
- He Z Y, Xu X S. 2012. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chem Geol*, 328: 208–221
- He Z, Xu X, Zou H, et al. 2010. Geochronology, petrogenesis and metallogeny of Piaotang granitoids in the tungsten deposit region of South China. *Geochem J*, 44: 299–313
- Hou Z, Pan X, Li Q, et al. 2013. The giant Dexing porphyry Cu-Mo-Au deposit in east China: Product of melting of juvenile lower crust in an intracontinental setting. *Miner Depos*, 48: 1019–1045
- Hou Z, Li Q, Gao Y, et al. 2015. Lower-crustal magmatic hornblende in North China Craton: Insight into the genesis of porphyry Cu deposits.

- Econ Geol, 110: 1879–1904
- Hou Z, Zhou Y, Wang R, et al. 2017. Recycling of metal-fertilized lower continental crust: Origin of non-arc Au-rich porphyry deposits at cratonic edges. *Geology*, 45: 563–566
- Hu R Z, Wei W F, Bi X W, et al. 2012. Molybdenite Re-Os and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Lithos*, 150: 111–118
- Hu R Z, Zhou M F. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China—An introduction to the thematic issue. *Miner Depos*, 47: 579–588
- Huang M L, Bi X W, Richards J P, et al. 2019. High water contents of magmas and extensive fluid exsolution during the formation of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit, eastern Tibet. *J Asian Earth Sci*, 176: 168–183
- Huang W, Wu J, Liang H, et al. 2020. Ages and genesis of W-Sn and Ta-Nb-Sn-W mineralization associated with the Limu granite complex, Guangxi, China. *Lithos*, 352–353: 105321
- Ince M, Hagemann S, Fiorentini M, et al. 2023. The interplay between magma source and geodynamic evolution in porphyry Cu-Au fertility of the Farallon Negro Volcanic Complex, Argentina. *Lithos*, 458–459: 107340
- Jenner F E. 2017. Cumulate causes for the low contents of sulfide-loving elements in the continental crust. *Nat Geosci*, 10: 524–529
- Jiang S H, Bagas L, Liang Q L. 2015. New insights into the petrogenesis of volcanic rocks in the Shanghang Basin in the Fujian Province, China. *J Asian Earth Sci*, 105: 48–67
- Jiang W C, Li H, Mathur R, et al. 2019. Genesis of the giant Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi-Pb-Zn polymetallic deposit, South China: Constraints from zircon geochronology and geochemistry in skarns. *Or Geol Rev*, 111: 102980
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. 2002. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: Implications for granitoid geneses. *Lithos*, 63: 165–187
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. *Earth Planet Sci Lett*, 241: 617–633
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J, et al. 2012. Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation. *Science*, 336: 64–68
- Legros H, Lecumberri-Sanchez P, Elongo V, et al. 2020. Fluid evolution of the Cantung tungsten skarn, Northwest Territories, Canada: Differentiation and fluid-rock interaction. *Or Geol Rev*, 127: 103866
- Lehmann B. 2021. Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, 402–403: 105756
- Li B, Jiang S Y. 2014. Geochronology and geochemistry of Cretaceous Nanshanping alkaline rocks from the Zijinshan district in Fujian Province, South China: Implications for crust-mantle interaction and lithospheric extension. *J Asian Earth Sci*, 93: 253–274
- Li B, Jiang S Y, Lu A H, et al. 2016. Petrogenesis of Late Jurassic granodiorites from Gutian, Fujian Province, South China: Implications for multiple magma sources and origin of porphyry Cu-Mo mineralization. *Lithos*, 264: 540–554
- Li S N, Ni P, Bao T, et al. 2018. Geology, fluid inclusion, and stable isotope systematics of the Dongyang epithermal gold deposit, Fujian Province, southeast China: Implications for ore genesis and mineral exploration. *J Geochem Explor*, 195: 16–30
- Li S N, Ni P, Wang G G, et al. 2020. The Jurassic volcanic-intrusive complex in the Dehua gold orefield, coastal region of SE China: Implications for the tectonic setting and epithermal mineralization. *J Asian Earth Sci*, 197: 104390
- Li T, Jiang M, Zhao L, et al. 2023. Continental fragments in the South China Block: Constraints from crustal radial anisotropy. *J Geophys Res-Solid Earth*, 128: e2023JB026998
- Li W S, Ni P, Wang G G, et al. 2020. A possible linkage between highly fractionated granitoids and associated W-mineralization in the Mesozoic Yaogangxian granitic intrusion, Nanling region, South China. *J Asian Earth Sci*, 193: 104314
- Li X H, Chen Z, Liu D, et al. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *Int Geol Rev*, 45: 898–921
- Li X H, Li W X, Li Z X. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chin Sci Bull*, 52: 1873–1885
- Li Z L, Hu R, Yang J, et al. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China. *Lithos*, 97: 161–173
- Li Z, Qiu J S, Yang X M. 2014. A review of the geochronology and geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) plutons along the Fujian coastal area of southeastern China: Implications for magma evolution related to slab break-off and rollback in the Cretaceous. *Earth-Sci Rev*, 128: 232–248
- Liou P, Guo J, Peng P, et al. 2023. Geological evolution of the North China Craton in the first billion years of Earth's history. *Earth-Sci Rev*, 247: 104608
- Liu J X, Wang S, Wang X L, et al. 2020. Refining the spatio-temporal distributions of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in SE China. *J Asian Earth Sci*, 201: 104503
- Lu Y J, Loucks R R, Fiorentini M L, et al. 2015. Fluid flux melting generated postcollisional high Sr/Y copper ore-forming water-rich magmas in Tibet. *Geology*, 43: 583–586
- Ma Y, Jiang S Y, Frimmel H E, et al. 2021. Early Paleozoic orogenic gold deposit in the Cathaysia Block, China: A first example from the Shuangqishan deposit. *Gondwana Res*, 91: 231–253
- Mao J W, Ouyang H, Song S W, et al. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and Tin deposits in China. In: China Geological Survey, ed. Mineral Deposits of China. 22: 411–482
- Mao J, Zheng W, Xie G, et al. 2021. Recognition of a Middle–Late Jurassic arc-related porphyry copper belt along the southeast China coast: Geological characteristics and metallogenic implications. *Geology*, 49: 592–596
- Miao X, Wang R, Hou Z, et al. 2023. Mo endowment of porphyry deposits in the southern margin of the North China Craton controlled by magmatic water content. *Miner Depos*, 58: 1499–1518
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci Rev*, 37: 215–224
- Müller D, Stumpf E F, Taylor W R. 1992. Shoshonitic and alkaline lamprophyres with elevated Au and PGE concentrations from the Kreuzeck Mountains, Eastern Alps, Austria. *Mineral Petrol*, 46: 23–42
- Ni P, Pan J Y, Huang B, et al. 2018. Geology, ore-forming fluid and genesis of the Qiucun gold deposit: Implication for mineral exploration at Dehua prospecting region, SE China. *J Geochem Explor*, 195: 3–15
- Ni P, Li S N, Bao T, et al. 2019. Mapping of fluid, alteration and soil geochemical anomaly as a guide to regional mineral exploration for the Dehua gold orefield of Fujian Province, SE China. *GEEA*, 19: 74–90
- Ni P, Li W, Pan J. 2020. Ore-forming fluid and metallogenic mechanism of wolframite-quartz vein-type tungsten deposits in South China. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 94: 1774–1796
- Ni P, Wang G G, Li W S, et al. 2021. A review of the Yanshanian ore-related felsic magmatism and tectonic settings in the Nanling W-Sn and Wuyi

- Au-Cu metallogenic belts, Cathaysia Block, South China. *Ore Geol Rev*, 133: 104088
- Ni P, Pan J Y, Han L, et al. 2023. Tungsten and tin deposits in South China: Temporal and spatial distribution, metallogenic models and prospecting directions. *Ore Geol Rev*, 157: 105453
- Pan J Y, Ni P, Chi Z, et al. 2018. Spatial distribution and variation of ore body, alteration and ore-forming fluid of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au deposit, SE China: Implication for mineral exploration. *GEEA*, 18: 279–293
- Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, et al. 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes. *Contrib Mineral Petrol*, 78: 279–297
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol*, 25: 956–983
- Pearce J A, Stern R J. 2006. Origin of back-arc basin magmas: Trace element and isotope perspectives. In: Christie D M, Fisher C R, Lee S M, et al, eds. *Back-Arc Spreading Systems: Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions*. Washington, D C: AGU Press. 166: 63–86
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Econ Geol*, 98: 1515–1533
- Richards J P. 2013. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nat Geosci*, 6: 911–916
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247–263
- Rogers N W, James D, Kelley S P, et al. 1998. The generation of potassic lavas from the eastern Virunga province, Rwanda. *J Petrol*, 39: 1223–1247
- Sillitoe R H, Lehmann B. 2022. Copper-rich tin deposits. *Miner Depos*, 57: 1–11
- Sun S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 42: 313–345
- Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *J Petrol*, 37: 45–71
- Veevers J J. 2004. Gondwanaland from 650–500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185–100 Ma breakup: Supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating. *Earth-Sci Rev*, 68: 1–132
- Wang D, Huang F, Wang Y, et al. 2020. Regional metallogeny of Tungsten-tin-polymetallic deposits in Nanling region, South China. *Ore Geol Rev*, 120: 103305
- Wang G G, Ni P, Yao J, et al. 2015. The link between subduction-modified lithosphere and the giant Dexing porphyry copper deposit, South China: Constraints from high-Mg adakitic rocks. *Ore Geol Rev*, 67: 109–126
- Wang G G, Ni P, Zhao C, et al. 2016. Spatiotemporal reconstruction of Late Mesozoic silicic large igneous province and related epithermal mineralization in South China: Insights from the Zhilintou volcanic-intrusive complex. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 7903–7928
- Wang G G, Ni P, Zhu A D, et al. 2018. 1.01–0.98 Ga mafic intra-plate magmatism and related Cu-Au mineralization in the eastern Jiangnan orogen: Evidence from Liujia and Tieshajie basalts. *Precambrian Res*, 309: 6–21
- Wang J, Wang Q, Xu C B, et al. 2022. Cenozoic delamination of the southwestern Yangtze craton owing to densification during subduction and collision. *Geology*, 50: 912–917
- Wang L, Lin S, Xiao W. 2023. Yangtze and Cathaysia blocks of South China: Their separate positions in Gondwana until early Paleozoic juxtaposition. *Geology*, 51: 723–727
- Wang R, Richards J P, Hou Z, et al. 2014a. Increasing magmatic oxidation state from Paleocene to Miocene in the eastern Gangdese belt, Tibet: Implication for collision-related porphyry Cu-Mo±Au mineralization. *Econ Geol*, 109: 1943–1965
- Wang R, Richards J P, Hou Z, et al. 2014b. Increased magmatic water content—The key to Oligo-Miocene porphyry Cu-Mo±Au formation in the eastern Gangdese belt, Tibet. *Econ Geol*, 109: 1315–1339
- Wang X L, Coble M A, Valley J W, et al. 2014. Influence of radiation damage on Late Jurassic zircon from southern China: Evidence from *in situ* measurements of oxygen isotopes, laser Raman, U-Pb ages, and trace elements. *Chem Geol*, 389: 122–136
- Wang X, Chen J, Ren M. 2016. Hydrothermal zircon geochronology: Age constraint on Nanling Range tungsten mineralization (Southeast China). *Ore Geol Rev*, 74: 63–75
- Wang X, Lang X, Turlin F, et al. 2024. Copper behavior in arc-back-arc systems: Insights into the porphyry Cu metallogeny of the Gangdese belt, southern Tibet. *Miner Depos*, 59: 133–154
- Wang X D, Ni P, Jiang S Y, et al. 2010. Origin of ore-forming fluid in the Piaotang tungsten deposit in Jiangxi Province: Evidence from helium and argon isotopes. *Chin Sci Bull*, 55: 628–634
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib Miner Petrol*, 95: 407–419
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem Geol*, 20: 325–343
- Wu B, Wang R C, Li G L, et al. 2020. Mineralogy and fluid inclusion study of the Anqiantan tungsten deposit in southern Jiangxi Province. *J Nanjing Univ-Nat Sci*, 56: 788–799
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 234: 105–126
- Wu F Y, Guo C L, Hu F Y, et al. 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China. *Acta Petrol Sin*, 39: 1–36
- Wu T, Huang Z, Yang M, et al. 2020. Petrogenesis and tectonic setting of the highly fractionated Junye granitic intrusion in the Yiliu tungsten polymetallic deposit, Guangdong Province, South China: Constraints from geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *Minerals*, 10: 631
- Xiao C H, Shen Y K, Wei C S. 2019. Petrogenesis of low Sr and high Yb A-type granitoids in the Xianghualing Sn polymetallic deposit, South China: Constraints from geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *Minerals*, 9: 182
- Xie L, Wang R C, Chen J, et al. 2010. Mineralogical evidence for magmatic and hydrothermal processes in the Qitianling oxidized tin-bearing granite (Hunan, South China): EMP and (MC)-LA-ICPMS investigations of three types of titanite. *Chem Geol*, 276: 53–68
- Xiong L, Zhao X, Zhao S, et al. 2021. Formation of giant gold provinces by subduction-induced reactivation of fossilized, metasomatized continental lithospheric mantle in the North China Craton. *Chem Geol*, 580: 120362
- Xu N, Li S R, Santosh M, et al. 2018. Petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Jurassic porphyry dykes in the Dehua gold field, Southeast China: Genesis and geodynamics. *Geol J*, 53: 547–564
- Xu X, Dong C, Li W, et al. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: The significance of the gabbro-diorite-granite association. *Lithos*, 46: 299–315
- Xu X, Zhao K, He Z, et al. 2021. Cretaceous volcanic-plutonic magmatism in SE China and a genetic model. *Lithos*, 402–403: 105728
- Yang J H, Peng J T, Zhao J H, et al. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan

- Granite in Southern Jiangxi Province, South China: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd isotopes. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 86: 131–152
- Yang J H, Zhou M F, Hu R Z, et al. 2020. Granite-related Tin metallogenic events and key controlling factors in peninsular Malaysia, Southeast Asia: New insights from cassiterite U-Pb dating and zircon geochemistry. *Econ Geol*, 115: 581–601
- Yao J, Shu L, Cawood P A, et al. 2017. Constraining timing and tectonic implications of Neoproterozoic metamorphic event in the Cathaysia Block, South China. *Precambrian Res*, 293: 1–12
- Yu J H, O'Reilly S Y, Zhou M F, et al. 2012. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block. *Precambrian Res*, 222–223: 424–449
- Yuan H X, Ni P, Chen H, et al. 2021. Geology, fluid inclusion and H-O-S-Pb isotope constraint on the genesis of the Changxing gold deposit, Fujian, South China. *Ore Geol Rev*, 129: 103887
- Yuan S. 2017. Several crucial scientific issues related to the W-Sn metallogenesis in the Nanling range and their implications for regional exploration: A review. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 36: 736–749
- Yuan S, Peng J, Hu R, et al. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). *Miner Depos*, 43: 375–382
- Yuan S, Peng J, Hao S, et al. 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. *Ore Geol Rev*, 43: 235–242
- Yuan S, Mao J, Cook N J, et al. 2015. A Late Cretaceous tin metallogenic event in Nanling W-Sn metallogenic province: Constraints from U-Pb, Ar-Ar geochronology at the Jiepailing Sn-Be-F deposit, Hunan, China. *Ore Geol Rev*, 65: 283–293
- Yuan S, Williams-Jones A E, Mao J, et al. 2018. The origin of the Zhangjialong tungsten deposit, South China: Implications for W-Sn mineralization in large granite batholiths. *Econ Geol*, 113: 1193–1208
- Yuan S, Williams-Jones A E, Romer R L, et al. 2019. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn-W metallogenic provinces: Insights from the Nanling region, China. *Econ Geol*, 114: 1005–1012
- Yuan S, Williams-Jones A E, Bodnar R J, et al. 2025. The role of magma differentiation in optimizing the fluid-assisted extraction of copper to generate large porphyry-type deposits. *Sci Adv*, 11: eadr8464
- Yui T F, Chu H T, Suga K, et al. 2017. Subduction-related 200 Ma Talun metagranite, SE Taiwan: An age constraint for palaeo-Pacific plate subduction beneath South China Block during the Mesozoic. *Int Geol Rev*, 59: 333–346
- Zhang C C, Sun W, Wang J, et al. 2017. Oxygen fugacity and porphyry mineralization: A zircon perspective of Dexing porphyry Cu deposit, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 206: 343–363
- Zhang D, Zhou T, Yuan F, et al. 2017. Petrogenesis and W-Mo fertility indicators of the Gaojiabang “satellite” granodiorite porphyry in southern Anhui Province, South China. *Ore Geol Rev*, 88: 550–564
- Zhang D, Zhao K D, Wang B D, et al. 2020. Cretaceous granitic magmatism and mineralization in the Shanhu W-Sn ore deposit in the Nanling Range in South China. *Ore Geol Rev*, 126: 103758
- Zhang H, Lü Q T, Wang X L, et al. 2023. Seismically imaged lithospheric delamination and its controls on the Mesozoic Magmatic Province in South China. *Nat Commun*, 14: 2718
- Zhang R Q, Lu J J, Wang R C, et al. 2015. 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. *Ore Geol Rev*, 65: 1021–1042
- Zhang X, Ni P, Wang G G, et al. 2020. Petrogenesis and oxidation state of granodiorite porphyry in the Jurassic Chuankeng skarn Cu deposit, South China: Implications for the Cu fertility and mineralization potential. *J Asian Earth Sci*, 191: 104184
- Zhang X, Ni P, Wang G, et al. 2022. Magmatic controls on the mineralization potential of a porphyry Cu system: The case of Jurassic Tongshan skarn Cu deposit in the Qin-Hang belt, South China. *Gondwana Res*, 101: 203–223
- Zhang X, Ni P, Wang G G, et al. 2024. Reconstructing fluid evolution and precipitation mechanism of the Chuankeng skarn copper deposits, China: New insight from microthermometry and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Ore Geol Rev*, 168: 106057
- Zhang Z Y, Hou Z Q, Lü Q T, et al. 2023. Crustal architectural controls on critical metal ore systems in South China based on Hf isotopic mapping. *Geology*, 51: 738–742
- Zhao G, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Res*, 222–223: 13–54
- Zhao K D, Jiang S Y, Yang S Y, et al. 2012. Mineral chemistry, trace elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China. *Gondwana Res*, 22: 310–324
- Zhao L, Zhai M, Zhou X. 2023. Early Precambrian basement components of the Cathaysia Block in South China exhumed by Phanerozoic orogenic events. *Precambrian Res*, 398: 107218
- Zhao P, Zhao H, Yuan S, et al. 2019. The Early Jurassic Fe-Sn metallogenic event and its geodynamic setting in South China: Evidence from Re-Os, U-Pb geochronology and geochemistry of the Dading magnesian skarn Fe-Sn deposit. *Ore Geol Rev*, 111: 102970
- Zhao P, Yuan S, Williams-Jones A E, et al. 2022a. 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. *Econ Geol*, 117: 667–682
- Zhao P, Zajacz Z, Tsay A, et al. 2022b. Magmatic-hydrothermal tin deposits form in response to efficient tin extraction upon magma degassing. *Geochim Cosmochim Acta*, 316: 331–346
- Zhao P L, Yuan S D, Yuan Y B. 2016. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of the Xianglinpu granites from the Weijia tungsten deposit in southern Hunan Province and its implications for the Late Jurassic tungsten metallogenesis in the westernmost Nanling W-Sn metallogenic belt. *Geol China*, 43: 120–131
- Zhao X, Zheng Y, Liu C, et al. 2025. Magmatic characteristics and oxygen fugacity variations in the Eocene Yulong porphyry copper belt. *Ore Geol Rev*, 178: 106459
- Zhao Z, Zhao W W, Lu L, et al. 2018. Constraints of multiple dating of the Qingshan tungsten deposit on the Triassic W(-Sn) mineralization in the Nanling region, South China. *Ore Geol Rev*, 94: 46–57
- Zheng Y, Wang L, Xue C, et al. 2020. Porphyry Cu deposits linked to episodic growth of an underlying parental magma chamber. *Sci China Earth Sci*, 63: 1807–1816
- Zhong J, Pirajno F, Chen Y J. 2017. Epithermal deposits in South China: Geology, geochemistry, geochronology and tectonic setting. *Gondwana Res*, 42: 193–219
- Zhou J, Ge W, Jiang Y, et al. 2015. Petrochemistry and mineralogy of Dongyuan tungsten-bearing pluton in eastern Jiangnan Orogen. *Geochimica*, 44: 117–130
- Zhou J, Jin C, Suo Y, et al. 2022. The Yanshanian (Mesozoic) metallogenesis in China linked to crust-mantle interaction in the western Pacific margin: An overview from the Zhejiang Province.

- [Gondwana Res](#), 102: 95–132
- Zhou T, Ge R, Zhu W, et al. 2021. Is there a Grenvillian orogen in the southwestern Tarim Craton? [Precambrian Res](#), 354: 106053
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. [Episodes](#), 29: 26–33
- Zhou Y, Hou Z, Wang R, et al. 2023. Origin of biotite-rich xenoliths in the Eocene Beiya porphyry: Implications for upper-crustal Au remobilization and formation of giant porphyry Au systems in a collisional setting. [Lithos](#), 442–443: 107063
- Zhou Z, Mao J, Stuart F M, et al. 2023. The role of mantle melting in granite-associated hydrothermal systems: He-Ar isotopes in fluids responsible for Sn-Ag-Pb-Zn mineralization in northeast China. [Miner Depos](#), 58: 1421–1443
- Zhu R, Zhao G, Xiao W, et al. 2021. Origin, accretion, and reworking of continents. [Rev Geophys](#), 59: e2019RG000689
- Zhu X T, Ni P, Wang G G, et al. 2016. Fluid inclusion, H-O isotope and Pb-Pb age constraints on the genesis of the Yongping copper deposit, South China. [J Geochem Explor](#), 171: 55–70
- Zoheir B, Lehmann B, Emam A, et al. 2020. Extreme fractionation and magmatic-hydrothermal transition in the formation of the Abu Dabbab rare-metal granite, Eastern Desert, Egypt. [Lithos](#), 352–353: 105329

(责任编辑：王汝成)