中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 6 期: 1792 ~ 1816
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 专题: 华南构造域深部地质过程与成矿响应

长江中下游成矿带和钦杭成矿带燕山期成矿系统的深部过程与时空演化

王世伟[1,2,3], 周涛发[1,2,3*], 范裕[1,2,3], 袁峰[1,2,3], 张达玉[1,2,3], 汪方跃[1,2,3], 常印佛[1]

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 矿床成因与勘查技术研究中心, 合肥 230009
2. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 合肥 230009
3. 安徽省战略性矿产资源深部探测与评价利用重点实验室, 合肥 230009
* 通讯作者, E-mail: tfzhou@hfut.edu.cn

收稿日期: 2024-02-16; 收修改稿日期: 2024-10-06; 接受日期: 2025-01-08; 网络版发表日期: 2025-03-17
国家重点研发计划项目(2022YFC2903503、2016YFC0600206)和国家自然科学基金项目(42172078、91962218、41702071)资助

摘要 长江中下游成矿带和钦杭成矿带作为华南成矿域中生代成矿的重要组成部分, 它们成矿的深部过程及动力学机制存在很大争议. 本文基于两个成矿带内主要矿床的地质特征和成矿时代对比研究, 将其燕山期的成矿作用划分为四个成矿系统: 钦杭成矿带Cu-Au系统(175~159Ma)和W-Cu系统(150~142Ma)、长江中下游成矿带Cu-Au(148~135Ma)和Fe(134~129Ma)成矿系统. 结合四个成矿系统成矿岩浆岩的岩石学、矿物学、地球化学特征和深部地球物理探测证据, 开展了含矿岩浆的源区特征、深部壳幔相互作用过程对含矿岩浆形成和演化的制约研究. 研究发现, 两个成矿带的Cu-Au成矿系统成矿岩浆为壳幔混源(新元古代新生下地壳+富集岩石圈地幔), W-Cu成矿系统成矿岩浆为壳源(新元古代古老地壳), Fe成矿系统成矿岩浆为幔源(富集岩石圈地幔), 它们的成矿金属分别来自新元古代新生下地壳、古老地壳和富集岩石圈地幔; 两个成矿带燕山期的成岩成矿作用属于同一成矿构造背景, 都是古太平洋板块俯冲作用下, 陆内由东南向西北方向的“新元古代地壳 ”(先存成矿物质) +“边界继承断裂”(先存块体边界)双活化的产物, 活化的新元古代地壳提供成矿所需金属元素, 活化的块体边界则提供成矿岩浆上升通道并控制矿床定位. 由此进一步建立了两个成矿带燕山期成岩成矿作用陆内“双活化”的深部成矿动力学模型.

关键词 长江中下游成矿带, 钦杭成矿带, 成矿系统, 陆内“双活化”成矿机制

1 引言

华南是我国最重要的金属矿产聚集区之一, 不仅拥有世界上最大的钨多金属成矿带, 同时也发育一批大型-超大型铜金铁多金属矿床和稀有、稀土金属矿床(华仁民等, 2007; 陈毓川和王登红, 2012; Mao J W 等, 2013, 2021; 陈骏等, 2014; 陈毓川等, 2014; 胡瑞忠等, 2016; 翟明国等, 2019; 倪培等, 2020; 毛景文等, 2020; 李晓峰等, 2021). 虽然这些金属矿床具有从新元古代到新生代多期多阶段成矿作用的特点(周涛发等,

中文引用格式: 王世伟, 周涛发, 范裕, 袁峰, 张达玉, 汪方跃, 常印佛. 2025. 长江中下游成矿带和钦杭成矿带燕山期成矿系统的深部过程与时空演化. 中国科学: 地球科学, 55(6): 1792–1816, doi: 10.1360/SSTe-2024-0051
英文引用格式: Wang S, Zhou T, Fan Y, Yuan F, Zhang D, Wang F, Chang Y. 2025. Linking deep processes and spatio-temporal evolution of the Yanshanian metallogenic systems in the middle-lower Yangtze River and Qin-Hang metallogenic belts. Science China Earth Sciences, 68(6): 1742–1766, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1510-1

© 2025 《中国科学》杂志社

2008, 2016; 陈骏等, 2014; Zhou等, 2015; 倪培和王国光, 2017; Mao等, 2019, 倪培等, 2023), 但主要的成矿作用发生在燕山期, 形成了“中生代成矿大爆发”(华仁民和毛景文, 1999). 长江中下游成矿带和钦杭成矿带作为华南成矿域中生代成矿的重要区带, 前人对这两个成矿带已开展了大量的研究工作, 系统建立了这些矿床成矿作用的多种模式和找矿模型(毛景文等, 2007, 2011; 王登红等, 2007; 倪培和王国光, 2017; Mao等, 2019; Li等, 2019), 取得了丰富的矿床学研究成果(如常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 华仁民和毛景文, 1999; 毛景文和胡瑞忠, 2004; 杨明桂等, 2009; 陈毓川等, 2014; 胡瑞忠等, 2016; 倪培和王国光, 2017; 范裕等, 2019; 倪培等, 2020), 但有关深部成矿作用的两个主要问题——成矿的物质来源和成矿作用的深部地球动力学过程——至今尚存在很大争议(邓晋福等, 2008; 孙卫东等, 2010; Mao J W等, 2013, 2021; Pirajno和Zhou, 2015; Zhou等, 2015; Zheng等, 2019; Zhang Z Y等, 2023; Zhang Y Q等, 2023).

近年来, 通过国家专项“深部探测技术与实验研究”(董树文等, 2011)和“华南陆内成矿系统的深部过程与物质响应”(吕庆田等, 2020; Zhang K等, 2021; 张永谦等, 2022; Zhang Z Y等, 2023; Zhang Y Q等, 2023)、“关键金属超常富集成矿动力学”(陈骏, 2019; 侯增谦等, 2020a)和“钴镍成矿规律与高效勘查技术示范研究”(蒋少涌和王微, 2022)等项目的实施, 使得对华南深部地壳结构的特征有了更深入的了解, 为进一步探讨区域成矿的深部过程提供了重要依据. 本文在系统总结前人工作的基础上, 将长江中下游成矿带和钦杭成矿带及邻区不同类型的成矿作用划分为四个不同的成矿系统, 对比分析不同成矿系统的矿床地质特征、成岩成矿年代学和地球化学特征等, 讨论深部过程对成矿系统形成与演化的控制作用, 并结合最新的地球物理探测成果, 建立了区域成矿的动力学模型, 旨在为研究区新一轮找矿突破行动计划及深部找矿提供理论依据和实践参考, 并进一步促进陆内成矿理论的发展.

2　成矿带成矿系统特征

2.1　成矿系统时空分布特征

长江中下游成矿带和钦杭成矿带是华南成矿域北部两个最重要的成矿带. 钦杭成矿带是一条巨型的构造-岩浆-成矿带, 已探明的特大型、大中型矿床达400余处, 包括德兴、银山、金山、永平、东乡、芙蓉、柿竹园等大型-超大型金属矿床(田)(杨明桂和梅勇文, 1997; 毛景文等, 2011). 近年来, 在成矿带东段又发现了朱溪和大湖塘两个世界级钨矿床, 该成矿带已成为一条重要的钨-铜-金(W-Cu-Au)多金属成矿带. 对于长江中下游成矿带, 前人主要将其定义为铜-金-铁(Cu-Au-Fe)多金属成矿带(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 陈毓川等, 2014), 主要由七大矿集区组成(常印佛等, 1991; 周涛发等, 2017; 范裕等, 2019). 其中, 铜陵、安庆-贵池、宣城、九瑞和鄂东南矿集区主要发育斑岩-矽卡岩型铜金(Cu-Au)矿床, 庐枞和宁芜矿集区主要发育玢岩型铁(Fe)矿床.

由成岩成矿年龄分布图可见, 钦杭成矿带Cu-Au矿床的成矿岩浆岩主要形成于175~159Ma, W-Cu矿床的成矿岩浆岩主要形成于150~142Ma; 长江中下游成矿带Cu-Au矿床的成矿岩浆岩主要形成于148~135Ma, Fe矿床的成矿岩浆岩主要形成于134~129Ma(图1). 参考不同学者对成矿系统的认识(吕庆田等, 2019), 在综合对比两个成矿带主要矿床的地质特征、岩浆岩性质和成岩成矿时代的基础上(表1), 我们将钦杭成矿带(东段, 下同)和长江中下游成矿带中生代的成矿作用划分为四个(类)主要成矿系统: (1) 钦杭成矿带175~159Ma的Cu-Au系统; (2) 钦杭成矿带150~142Ma的W-Cu系统; (3) 长江中下游成矿带148~135Ma的Cu-Au系统; (4) 长江中下游成矿带134~129Ma的Fe系统. 结合各自矿床的空间分布(图2)可见, 从南东向北西方向, 各类成矿系统的形成年龄有不断变小的趋势特征, 进一步结合地球物理和成矿学证据表明, 它们是同一个成矿系统在燕山期不同演化阶段的产物.

2.2　成矿系统的源区特征与深部过程

在对上述两个成矿带内成矿系统划分的基础上, 本文系统收集了区域内成矿岩浆岩的全岩和矿物(磷灰石、锆石)地球化学数据, 并对代表性矿床成矿岩浆岩中的继承锆石、角闪石开展了定年和主微量元素分析. 为了避免蚀变作用的影响, 主要选择LOI≤2.5的全岩主微量数据进行讨论. 对比研究发现: 钦杭成矿带和长江中下游成矿带内与斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿有关的岩浆岩主要落入高钾钙碱性系列岩石区域,

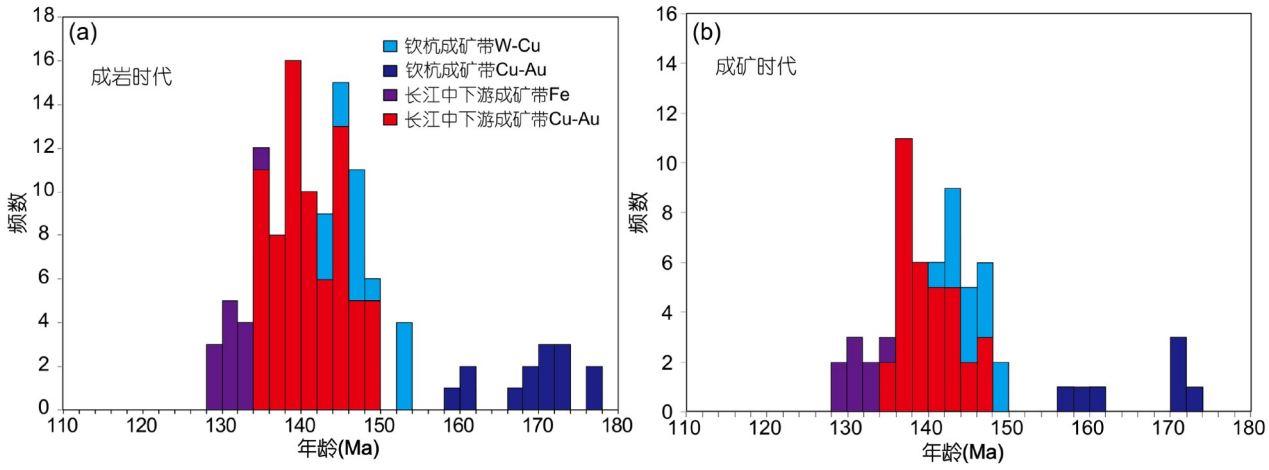

图 1　长江中下游成矿带和钦杭成矿带的成岩(a)和成矿(b)年龄分布直方图

数据来源: 王彦斌等(2004a, 2004b)、徐夕生等(2004)、狄永军等(2005)、狄永军等(2005)、张达等(2006)、杜杨松等(2007)、杨小男等(2007)、Li J W等(2008, 2009, 2010, 2014)、吴才来等(2008, 2010, 2013)、吴淦国等(2008)、谢建成等(2008)、徐晓春等(2008)、张乐骏等(2008, 2010)、周涛发等(2008, 2011, 2016)、Li等(2009)、李亮和蒋少涌(2009)、Li X H等(2010)、范裕等(2010)、秦燕等(2010)、瞿泓滢等(2010, 2012)、Xie等(2011)、Yang等(2011)、陈志洪等(2011)、王世伟等(2011)、吴星星等(2011)、Zhou等(2012a)、赖小东等(2012)、颜代蓉等(2012)、郭维民等(2013)、丁丽雪等(2013, 2014)、黄圭成等(2013)、刘绍锋等(2013)、夏金龙等(2013)、姚磊等(2013)、刘一男等(2014)、陆顺富等(2014)、钟国雄等(2014)、Yan等(2015)、Deng等(2015)、Wang等(2015)、贾丽琼等(2015)、王先广等(2015)、岳紫龙等(2015)、毛志昊(2016)、Chen等(2017)、Mao等(2017)、Song等(2018)、Su等(2018)、丁丽雪等(2018)、Chen等(2020)、郭宁宁等(2020)、吴迪等(2020)、Qi等(2020)、徐晓春等(2020)、Zhang X等(2020)、张小波等(2020)、Zhang W等(2020, 2021)、Xu等(2021)、Xiao等(2021)、Li等(2021)、Fan等(2021)、Zhang J D等(2021)、李忆南和陶波(2022)、Huo等(2022)、Yang等(2022)、刘泉(2023)、鲍波等(2023)和Jiang等(2024)

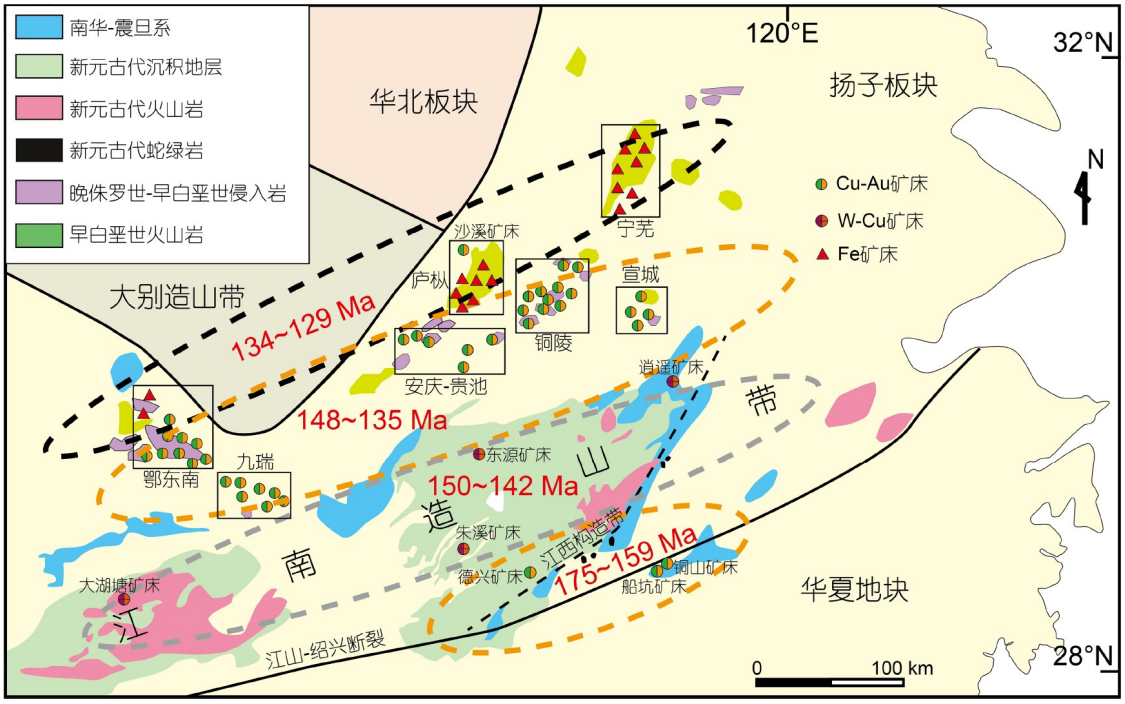

图 2　长江中下游成矿带和钦杭成矿带成矿时空分布简图

据Zhou等(2015)和Li等(2016)修改

表 1　钦杭和长江中下游成矿带四个成矿系统特征简述

特征	钦杭成矿带		长江中下游成矿带	
主要成矿金属元素	Cu-Au	W-Cu	Cu-Au	Fe
其他成矿金属元素	Mo、Pb、Zn、Ag、Re等	Mo、Sn等	Mo、Pb、Zn、Te、Se、Co等	Pb、Zn、Co、Ga等
主要矿床类型	斑岩型、矽卡岩型	矽卡岩型、类斑岩型、石英脉型	斑岩型、矽卡岩型	玢岩型、矽卡岩型
成岩成矿时代	175~159Ma	150~142Ma	148~135Ma	134~129Ma
围岩	碳酸盐、碎屑岩、变质岩	碳酸盐、碎屑岩、岩浆岩	碳酸盐、碎屑岩	碳酸盐、白垩系火山岩
岩浆岩类型	中酸性侵入岩	酸性侵入岩	中酸性侵入岩	中基性侵入岩和次火山岩
岩浆岩性质	I型	S型	I型	I型
埃达克岩亲和性	具有	不具有	具有	不具有
主要蚀变类型	矽卡岩化、钾化、青磐岩化、绢英岩化	矽卡岩化、云英岩化、钾化、青磐岩化	矽卡岩化、钾化、青磐岩化、绢英岩化	矽卡岩化、钠长石化、膏辉岩化、膏榴岩化、青磐岩化、绢英岩化、泥化
主要金属矿物	黄铜矿、黄铁矿	白钨矿、黑钨矿、黄铜矿	黄铜矿、黄铁矿	磁铁矿、赤铁矿
岩浆源区	壳幔混合、富集岩石圈地幔	壳幔混合、中上地壳	壳幔混合、富集岩石圈地幔	富集岩石圈地幔
参考文献	倪培和王国光, 2017; 王国光等, 2019; 侯增谦等, 2020b; Mao等, 2021; 侯爵等, 2022; Zhang Z Y等, 2023	Mao等, 2013; 蒋少涌等, 2015; 刘经纬等, 2017; Song等, 2018; 毛景文等, 2020; 侯爵等, 2022	Ling等, 2009, 2010; Liu等, 2010; 孙卫东等, 2010; Zhou等, 2015; 周涛发等, 2016; 周涛发等, 2017; Chen等, 2020; 侯爵等, 2022; Zhang Z Y等, 2023	Wang等, 2006; 谢智等, 2007; Tang等, 2012; Chen等, 2016, 2020; 赵新福等, 2020; Zhang Z Y等, 2023

表现出I型花岗岩的特征; 长江中下游成矿带与玢岩型Fe矿床相关的成矿岩浆岩则主要落入钙碱性、高钾钙碱性系列岩石区域, 少量落入钾玄岩系列岩石区域, 具有I型花岗岩的特征; 钦杭成矿带与斑岩-矽卡岩型W-Cu矿床相关的岩浆岩则明显偏酸性, 主要落入高钾钙碱性系列岩石区域, 少量落入钾玄岩系列岩石区域, 具有S型花岗岩的特征(图3).

在岩石微量元素判别图解上(图4), 钦杭成矿带和长江中下游成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的成矿岩浆岩具有高Sr/Y、La/Yb, 低Y和Yb的特征, 主要落入埃达克岩区域; 长江中下游成矿带内玢岩型Fe矿床的成矿岩浆岩则具有中等Sr/Y和低La/Yb、Y、Yb的特征, 主要落入正常岛弧岩浆岩区域, 而钦杭成矿带内W-Cu矿床成矿岩浆岩具有中等La/Yb和低Sr/Y、Y和Yb的特征, 落入两个区域(图4b)或区域之外(图4a).

由此可见, 这两个成矿带不同类型矿床形成的物质源区和深部过程表现出了很大的复杂性, 下面分述各个成矿系统的源区特征和深部过程.

2.2.1　钦杭成矿带Cu-Au成矿系统

对于钦杭成矿带内的斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床, 有学者认为其成矿岩浆是古太平洋俯冲的大洋板片部分熔融的产物(Li和Li, 2007; Mao等, 2011; Zhou等, 2012b, 2012c; Zhang等, 2013; 周清等, 2013; Zhang等, 2017; Ren等, 2020; Mao等, 2021), 还有学者认为该区在新元古代九岭地体和怀玉地体的碰撞拼贴之后所经历的主要是板内构造活动(张国伟等, 2013; 胡瑞忠等, 2015; 华仁民等, 2000), 是古太平洋板块俯冲间接导致岩石圈部分熔融的产物(毛景文和胡瑞忠, 2004; 杨明桂等, 2009; 李晓峰等, 2019), 或是拆沉下地壳部分熔融, 在上升过程中与上覆的地幔岩石圈发生反应形成(王强等, 2004; Wang等, 2006). 有学者研究发现, 该成矿带内的成矿岩浆岩Hf-Nd同位素组成与新元古代岛弧岩石的同位素特征类似, 推测成岩成矿物质可能来自深部新元古代古华南洋俯冲的硫化物堆积体(Liu等, 2012; Hou等, 2013; Wang G G等, 2015, 2020; 倪培和王国光, 2017; 王国光等, 2019; 侯增谦等, 2020b; 侯爵等, 2022; Zhang Z Y等, 2023). 可见, 钦杭成矿带Cu-Au矿床的深部成矿过程的争议主要表现在成矿岩浆是否为古太平洋板块直接俯冲作用的产物.

由上述岩浆岩地球化学特征可知, 钦杭成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的成矿岩浆岩具有埃达克质岩石的特征(图4、图5). 对埃达克岩的形成机制存在许多不同的认识, 如俯冲板片熔融(Kay和Kay,

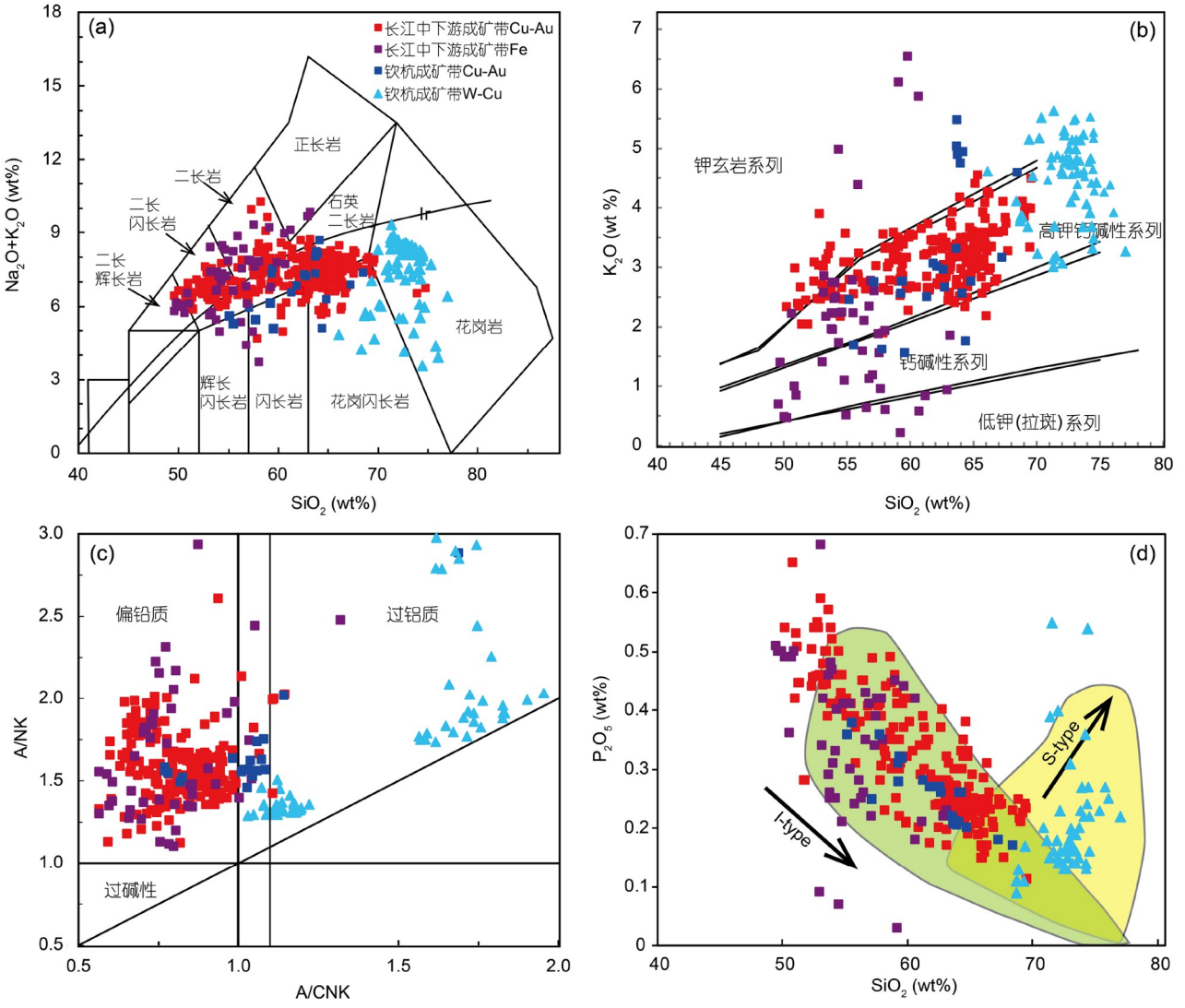

图 3　长江中下游成矿带和钦杭成矿带成矿岩浆岩成分图解

(a) SiO_2 vs. Na_2O+K_2O, 底图据Middlemost(1994); (b) SiO_2 vs. K_2O, 底图据Maniar和Piccoli(1989); (c) A/CNK vs. A/NK; (d) SiO_2 vs. P_2O_5. 数据来源: 王元龙等(2001)、邵拥军等(2003)、王强等(2004)、王彦斌等(2004a, 2004b)、Xu等(2006)、李进文等(2007)、杨小男等(2007)、杨光树等(2007)、Li等(2008)、Xie等(2008)、蒋少涌等(2008)、李顺庭(2008)、鲁鑫(2008)、王建中等(2008)、瞿泓滢等(2010)、Yang等(2011)、Zhang等(2011)、Wang G G等(2012, 2015)、Xie等(2012)、张乐骏(2012)、陈津华等(2012)、赖小东等(2012)、刘园园等(2012)、王彦博(2012)、郭维民等(2013)、Li等(2013)、李婉婷(2016)、Chen等(2017)、Liu等(2018)、褚平利等(2019)、Chen等(2020)、Zhang X等(2020)、Xiao等(2021)、Zhang J D等(2021)、Wang等(2021)、李艳红等(2021)、Huo等(2022)、Yang等(2022)、Cai等(2023)、刘泉(2023)、鲍波等(2023)

2002)、拆沉的下地壳熔融(Xu等, 2002)、有石榴石参与的高压分离结晶作用(Castillo, 2006; Macpherson等, 2006; Gao等, 2009)等. 在埃达克岩的成因判别图解(图5)和Sr-Nd同位素组成图解(图6a)上, 钦杭成矿带Cu-Au矿床的成矿岩浆岩主要落入下地壳部分熔融的埃达克岩区域, 不同于俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩, 表明它们不可能是古太平洋板块直接俯冲作用的产物, 而可能为下地壳部分熔融的产物.

前人研究发现, 在钦杭成矿带内最大的德兴斑岩型铜金矿床的成矿岩体中, 发育大量的新元古代继承锆石核(642~842Ma), 这些继承锆石核Th/U大于0.1, 具有LREE亏损、HREE富集的特征和明显的Ce负异常, 显示岩浆锆石的特点(Zhang等, 2017). 利用Smythe和Brenan(2015)提出的方法, Zhang等(2017)判定德兴

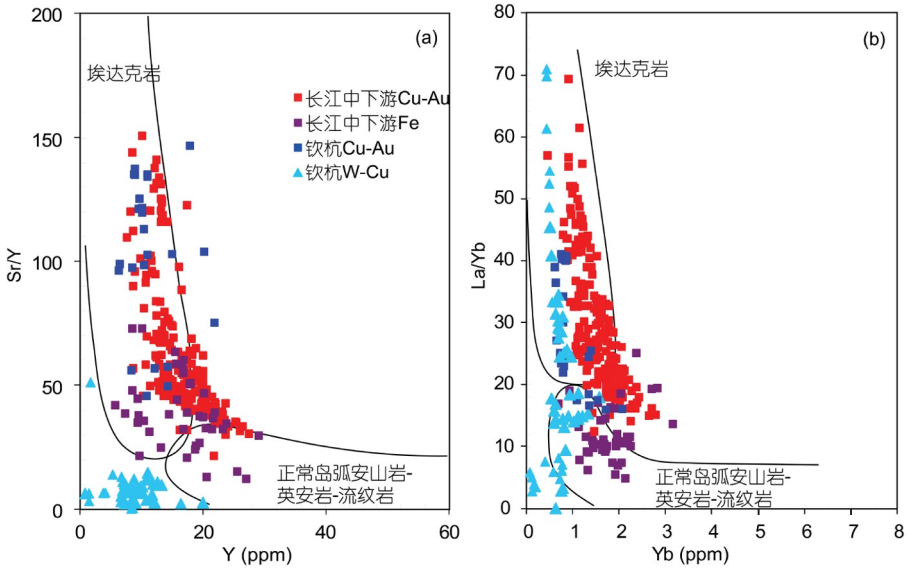

图 4　长江中下游成矿带和钦杭成矿带成矿岩浆岩微量元素图解

(a) Y vs. Sr/Y; (b) Yb vs. La/Yb. 数据来源同图3

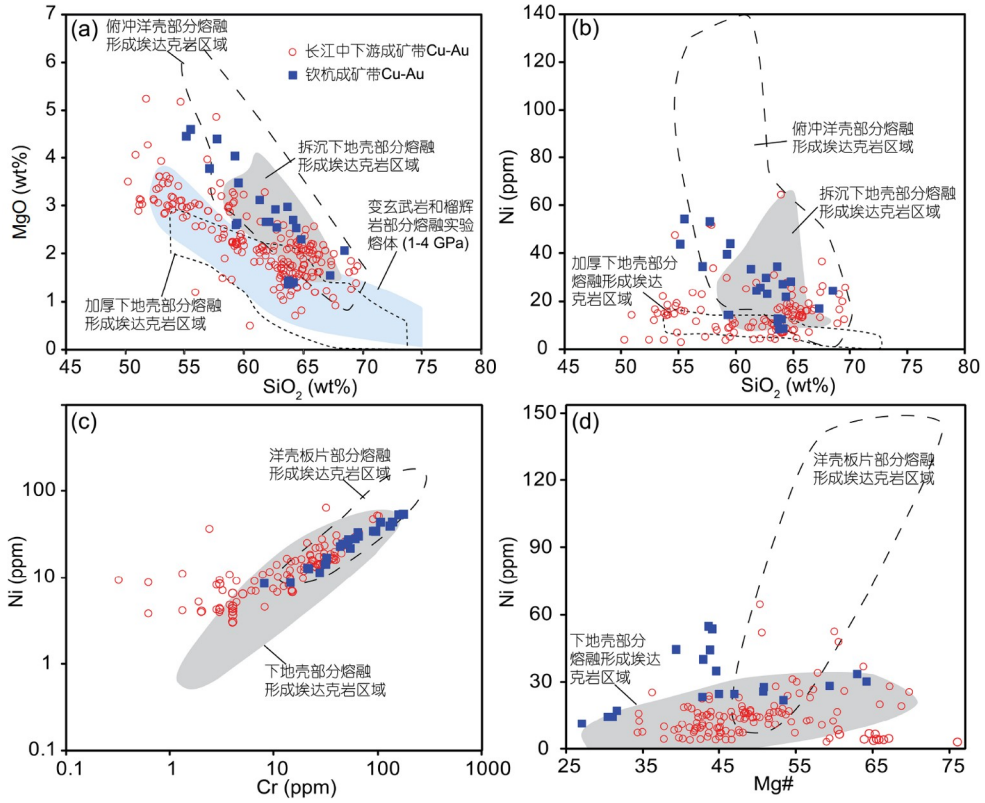

图 5　长江中下游成矿带和钦杭成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆岩成分图解

(a) SiO_2 vs MgO; (b) SiO_2 vs Ni, (c) Cr vs Ni; (d) $Mg^{\#}$ vs Ni. 下地壳来源埃达克岩数据来自Xu等(2002)、Gao等(2004)、王强等(2004)和Wang等(2006). 俯冲洋壳来源的埃达克岩的数据来自Wang等(2006); 变玄武岩和榴灰岩实验熔体(1~4.0GPa)数据来自Rapp等(1999, 2003); 数据来源同图3

矿床内继承锆石的源岩成分类似于双溪坞群的平水安山质火山岩. 此外, 钦杭成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的成矿岩浆岩$\varepsilon_{Nd}(t)$为−4.5~+1.3(集中于−2.9~+1.3), Nd同位素二阶段模式年龄(T_{DM2})主要介于905~1061Ma; $\varepsilon_{Hf}(t)$为−3.1~+6.0(集中于−0.9~+1.3), Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2})主要介于938~1249Ma, 落入新元古代岛弧岩石双溪坞群火山岩Hf同位素的演化区域(图6), 可见, 钦杭成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆可能来自深部新元古代古华南洋俯冲作用形成的新生下地壳(Liu等, 2012; Wang G G等, 2015, 2020; 倪培和王国光, 2017; 王国光等, 2019; 侯增谦等, 2020b). Zhang等(2017)计算获得这些新元古代继承锆石的氧逸度较低(ΔFMQ−2.4(±1.1)~ΔFMQ+0.7), 远低于侏罗纪成矿岩浆岩的氧逸度(ΔFMQ+0.7~ΔFMQ+1.9), 可见, 仅由新元古代新生下地壳部分熔融的岩浆不能满足成矿的氧逸度需要. Wang等(2020)发现德兴矿床内发育大量的与成矿岩浆岩同时代的安山玢岩, 该安山玢岩的Mg#为54~68, SiO_2含量较低(低至51.49wt%), 认为其为富集岩石圈地幔部分熔融的产物, 故推测德兴矿床成矿岩浆为含新元古代古华南洋俯冲作用形成的弧岩浆的新生下地壳部分熔融产生的壳源岩浆和富集岩石圈地幔部分熔融形成的幔源岩浆混合的产物.

本次研究发现, 在钦杭成矿带德兴矿田内的安山玢岩中发育有石英捕掳晶, 晶体边部发育细粒角闪石集合体(图7a, 表2). 此外, 在成矿斑岩中还发现角闪石

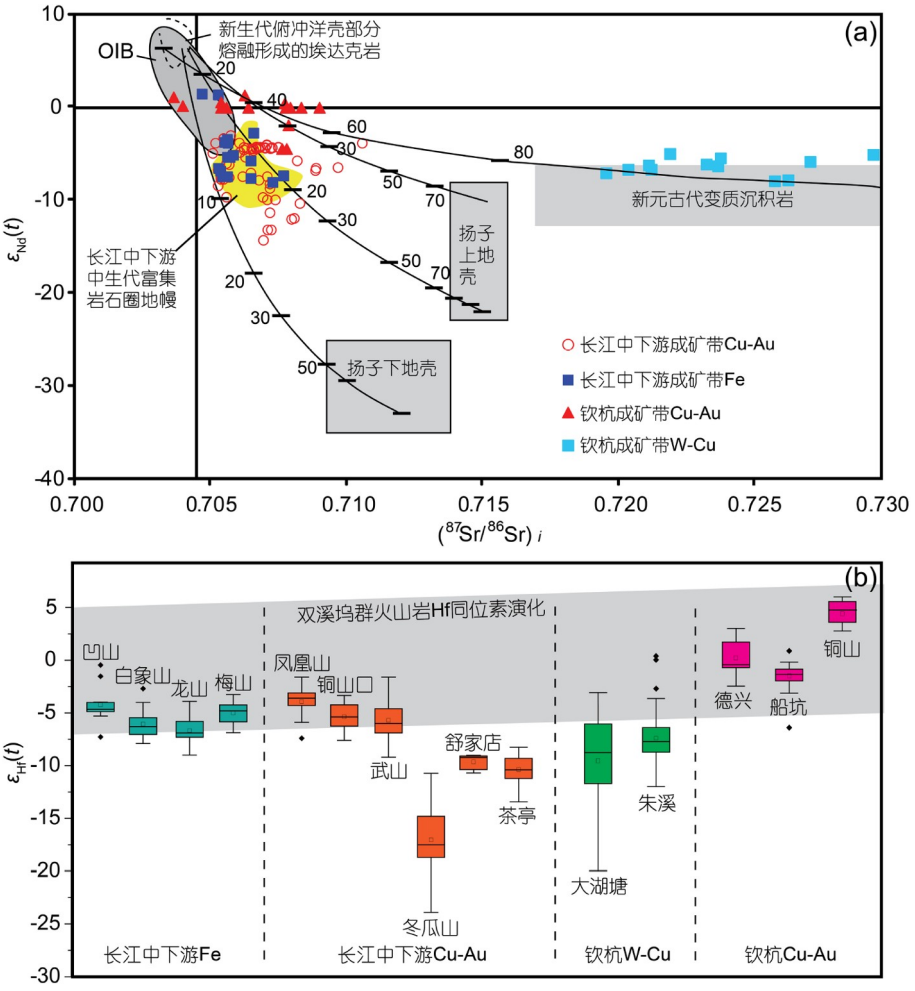

图 6　长江中下游成矿带和钦杭成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆岩同位素图解

(a) Sr-Nd同位素; (b) $\varepsilon_{Hf}(t)$值箱状图. 数据来源同图3

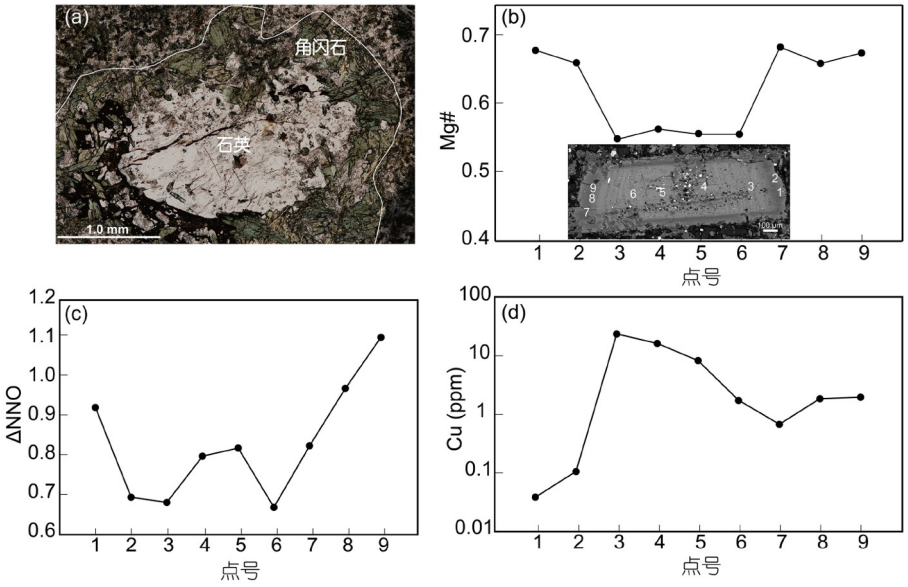

图 7　德兴矿床内安山玢岩中石英眼结构(a)和反环带角闪石斑晶的$Mg^{\#}$(b)、氧逸度(c)、Cu含量(d)变化特征

表 2　角闪石主量(wt%)和微量(ppm)元素成分分析结果[a)]

矿床	点号	F	Cl	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	NiO	MnO	Total	ΔNNO	$Mg^{\#}$	Cu
德兴矿床	1	–	0.1	42.1	2.5	12.2	13.9	11.6	11.4	1.7	0.8	0	–	0.2	96.5	0.9	0.68	0.04
	2	–	0	41.9	2.3	12.5	13.3	12.2	11.6	1.8	0.9	0.1	0	0.2	96.8	0.7	0.66	0.1
	3	–	0.4	44.3	1.8	8.6	11.6	17	11.3	1	0.9	0.1	–	0.4	97.3	0.7	0.55	23.42
	4	–	0.3	43.6	1.8	9.2	12	16.6	11.8	0.8	1.1	0.1	0.1	0.4	97.7	0.8	0.57	16.07
	5	–	0.3	43.8	1.8	9.1	11.9	17	11.5	0.9	1	0	0	0.4	97.6	0.8	0.56	8.2
	6	–	0.4	43.6	2	9.3	11.6	16.6	11.3	1	1.1	0.1	0	0.4	97.2	0.7	0.56	1.7
	7	–	0.1	42.8	2.4	12.5	13.9	11.4	11.6	1.6	0.9	0.1	0	0.1	97.5	0.8	0.69	0.66
	8	–	0.1	41.6	2.2	12.7	13.7	12.6	11.2	1.8	0.7	0	0	0.2	96.8	1	0.66	1.82
	9	–	0.1	42.1	2.3	12.7	14.2	12.1	11.4	1.6	0.7	0	0	0.1	97.5	1.1	0.68	1.93
沙溪矿床	1	0.1	0	41.6	1.4	14.2	14.3	11.5	9. 9	2.4	1.3	0	0	0.1	96.9	1.3	0.69	0.25
	2	0	0	41.7	1.4	14.2	14.4	11.6	10	2.4	1.2	0	0	0.1	97.2	1.3	0.69	0.25
	3	0.2	0	40.6	1.4	15	12.3	13.6	10.4	2.3	1.4	0	0	0.2	97.5	0.6	0.62	0.94
	4	0.1	0	40.3	1.4	14.9	12.3	13.7	10.5	2.3	1.4	0	0	0.2	97.3	0.6	0.62	0.56
	5	0	0	40.2	1.4	15	12.4	13.6	10.6	2.3	1.4	0	0	0.2	97.4	0.6	0.62	0.46
	6	0.5	0	42.4	1.4	13.6	14	12.2	10.1	2.4	1.1	0	0	0.2	98	1.2	0.67	0.34
	7	0.5	0	42.4	1.4	13.6	14	12.2	10.1	2.4	1.1	0	0	0.2	98	1.2	0.67	0.26

a) 主微量元素测试合肥工业大学进行, “–”代表低于检出限, 具体方法可见王娟等(2021)和汪方跃等(2017)

斑晶发育反环带结构, 幔边具有更高的$Mg^{\#}$(图7b, 表2), 这些都明确指示德兴矿床成矿岩浆形成过程中有幔源基性岩浆的混入(图7). 角闪石斑晶幔边具有更高的氧逸度(图7c, 表2), 暗示混入的幔源岩浆可能是导致成矿岩浆具有高氧逸度的主要原因. 此外, Hsu等(2017)研究发现, Cu在角闪石和熔体中的分配系数($D_{Cu}^{(amph/melt)}$)基本上是恒定的, 与温压条件和岩浆成分无关, 其Cu含量能直接反应岩浆Cu含量的高低. 本次研究发现反环带角闪石斑晶幔边具有更低的Cu含量(图7d; 表2), 表明幔源岩浆具有较低的Cu含量, 暗示成

矿金属(Cu、Au)主要来自新元古代古华南洋俯冲作用形成的新生下地壳. Wang等(2020)研究发现德兴矿床安山玢岩的全岩Cu含量明显低于花岗闪长斑岩(成矿岩浆岩), 也支持我们这一观点. 因此, 钦杭成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的成矿岩浆为新元古代古华南洋俯冲作用形成的新生下地壳部分熔融形成的壳源岩浆和富集岩石圈地幔部分熔融形成的幔源岩浆混合的产物, 成矿金属主要来自新生下地壳, 而幔源岩浆则主要提供高氧逸度流体和矿化剂.

2.2.2 钦杭成矿带W-Cu成矿系统

自从大湖塘和朱溪两个世界级的超大型钨矿床的发现, 前人对于钦杭成矿带内斑岩-矽卡岩型W-Cu矿床的成矿岩浆岩的成因开展了大量研究, 多认为它们是该区新元古代的双桥山群基底地层部分熔融的产物(Mao等, 2013; 蒋少涌等, 2015; 刘经纬等, 2017; Song等, 2018; 毛景文等, 2020; 侯爵等, 2022), 其中, 学者们对于钨的来源认识一致, 但对于铜的来源存在很大争议, 部分学者认为新元古代双桥山群不仅有以千枚岩和板岩为代表的富铝质沉积岩, 而且在局部有中基性-基性火山岩夹层, 甚至在东部存在元古代的蛇绿岩带, 由于这些中基性-基性火山岩的存在, 在岩浆上侵过程中, 这些基性火山岩中的Cu元素被活化进入成矿系统(Mao等, 2013; 蒋少涌等, 2015), 但也有部分学者认为是Cu元素来自地壳发生重熔时注入的幔源岩浆(毛景文等, 2020).

国内外研究表明, 铜矿床主要与分异程度较低(Rb/Sr≈0.01~0.1)、高氧化性(Fe_2O_3/FeO=0.5~5)的花岗质侵入体有关, 而钨矿床则与分异程度稍高(Rb/Sr≈0.1=10)、氧化性中等(Fe_2O_3/FeO=0.1~2.0)的花岗质侵入体有关; 与Cu(Mo)矿化有关的岩体主要是I型花岗质侵入体, 而与W矿化有关的主要是S型花岗质(少数为I型, 如皖南)侵入体(Teixeira等, 2012; Maulana等, 2013). 可见, 不同成矿元素的富集与岩浆的源区性质、分异演化过程密切相关. 钦杭成矿带W-Cu成矿系统中最具有代表性的大湖塘矿床和朱溪矿床的成矿岩浆岩具有高演化S型花岗岩的地球化学特征(图3), 但这样的高演化无法解释Cu的成矿作用, 因此它们的地球化学特征更可能是岩浆源区不均一造成的, 并不完全受结晶分异控制.

在S型花岗岩源区物质判定图解上(图8), 大湖塘矿床和朱溪矿床的成矿岩浆岩的源区主要落入杂砂岩和长英质泥质岩区域, 其锆石Hf同位素模式年龄为1349~1722Ma. 在Sr-Nd同位素相关图解上(图8), 主要落入江南古陆新元古代浅变质岩区域. 上述证据都支持大湖塘矿床和朱溪矿床的成矿岩浆岩为新元古代变质地层部分熔融的产物, 因此, 我们认为大湖塘矿床和朱溪矿床的成矿岩浆岩可能为新元古代的双桥山群基底地层部分熔融的产物, W和Cu共生可能是由于源区地层(沉积岩+火山岩)的不均一性导致的.

2.2.3 长江中下游成矿带Cu-Au成矿系统

前人对长江中下游成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆的来源开展了深入的研究, 但争议很大. 有学者认为其含矿岩浆为俯冲洋壳部分熔融形成的岩浆或之后交代的楔形上地幔部分熔融形成的岩浆(Ling等, 2009, 2010; Liu等, 2010; 孙卫东等, 2010; Meng等, 2024), 也有学者认为是拆沉或加厚古老下陆壳部分熔融而成的岩浆(张旗等, 2001; Xu等, 2002; 汪洋等, 2004; 王强等, 2004), 或由上地幔物质熔融形成的碱性玄武岩浆同化壳源物质形成的岩浆, 地壳物质起了重要的作用(常印佛等, 1991; 唐永成等, 1998; 杜杨松等, 2010), 或是由地幔和下地壳物质熔融形成的岩浆混合而成(吴才来等, 2003, 2008; 徐夕生等, 2004; 徐晓春等, 2012; Zhou等, 2015; 周涛发等, 2016). 近年来, 有学者提出长江中下游成矿带晚侏罗-早白垩世斑岩型矿床可能与古华南洋壳的俯冲作用有关(Li等, 2008; 周涛发等, 2017; Chen等, 2020; Yang等, 2021; 侯爵等, 2022; Zhang Z Y等, 2023). 可见, 判定古太平洋和古华南洋俯冲作用对于长江中下游成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的贡献是解决相关争议的关键.

本文研究发现, 长江中下游成矿带Cu-Au矿床成矿岩浆岩具有类似的埃达克岩的特征(图4), 在埃达克岩的成因判别图解上, 主要落入下地壳部分熔融的埃达克岩区域(图5). 此外, 成矿带内多个斑岩型铜金矿床如沙溪、冬瓜山、茶亭等的成矿岩体中发育有大量的新元古代继承锆石核, 这些继承锆石的年龄集中于810~837Ma, 它们的Th/U大于0.1, 具有LREE亏损、HREE富集的特征和明显的Ce负异常, 显示岩浆锆石的特点(图9; 表3). 同时, 它们与钦杭成矿带的德兴矿床继承锆石有同样的微量元素特征(图9; 表3), 指示长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆

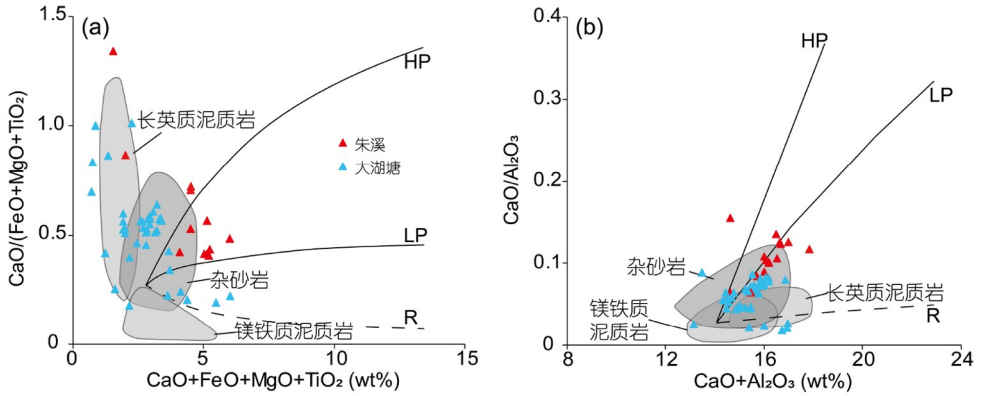

图 8　大湖塘和朱溪矿床成矿岩浆岩物质图解

(a) CaO/(FeO+MgO+TiO$_2$) vs. CaO+FeO+MgO+TiO$_2$; (b) CaO/Al$_2$O$_3$ vs. CaO+Al$_2$O$_3$. 数据来源: Li等(2013)、毛志昊(2016)、刘经纬等(2017)、Su等(2018)、Song等(2018)、李艳红等(2021)、Huo等(2022)、Yang等(2022)

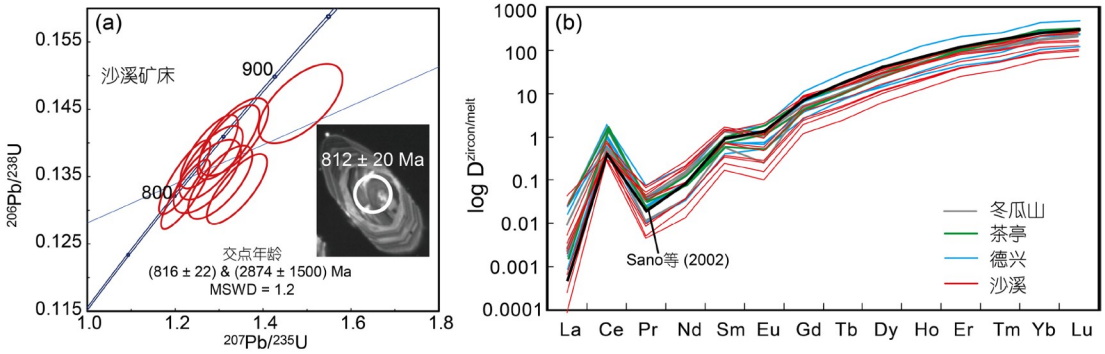

图 9　成矿岩浆岩中新元古代继承锆石谐和年龄图解(a)及稀土元素锆石/熔体分配系数图解(b)

(a) 沙溪矿床成矿岩浆岩中新元古代继承锆石谐和年龄图解; (b) 德兴和沙溪矿床成矿岩浆岩内新元古代继承锆石稀土元素锆石/熔体分配系数图解. 德兴、冬瓜山、茶亭继承锆石数据分别来自Wang等(2015)、Zhang等(2017)和Xiao等(2021)

源区可能也是新元古代古华南洋俯冲作用形成的新生下地壳. 但这些新生下地壳源岩浆能否提供成矿岩浆所需的高氧逸度(>FMQ+2; Mungall, 2002; Lee等, 2012)仍存在争议, 以成矿带内沙溪矿床为例, 本次研究基于Loucks等(2020)提出的氧逸度计算方法, 利用锆石的微量元素和U-Pb年龄计算获得矿床内新元古代继承锆石的氧逸度(ΔFMQ−2.18~ΔFMQ+0.17)较低, 表明沙溪矿床成矿岩浆的高氧逸度特征不是新生下地壳的贡献, 而是岩浆上升演化过程的产物. 本次矿物学和岩相学工作发现沙溪矿床成矿岩浆岩中的角闪石斑晶发育有反环带结构, 并与德兴矿床(图7)的角闪石岩相学和地球化学特征十分相似, 幔边同样具有更高的Mg$^{\#}$、氧逸度和更低的Cu含量(图10; 表2), 这也表明了成矿金属可能主要来自新元古代古华南洋俯冲作用形成的新生下地壳, 而成矿岩浆的高氧逸度特征可能是幔源岩浆混入的结果.

综上可知, 长江中下游成矿带内斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的成矿岩浆为新元古新生下地壳部分熔融形成的壳源岩浆与富集岩石圈地幔部分熔融形成的幔源岩浆混合的产物, 新生下地壳源岩浆主要提供成矿所需的金属成矿物质, 而混入的幔源岩浆则是使成矿岩浆具有高氧逸度的主要因素.

2.2.4　长江中下游成矿带Fe成矿系统

针对长江中下游成矿带玢岩型铁矿床成矿岩浆的来源前人提出了多种成因模式, 但绝大部分学者都认为它们是富集的岩石圈地幔部分熔融的产物, 但关于富集岩石圈地幔的成因存在争议. 有学者认为它们为

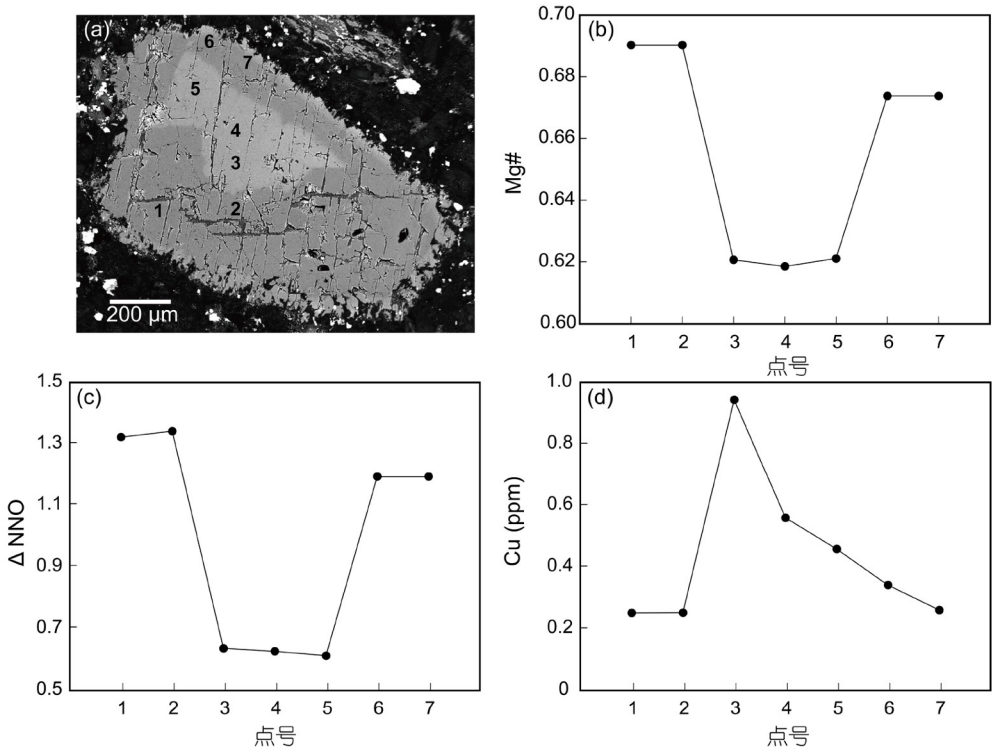

图 10　沙溪矿床成矿岩浆岩中反环带角闪石斑晶特征

(a) 岩相学特征; (b) $Mg^{\#}$含量; (c) 氧逸度含量; (d) Cu含量

古太平洋板片释放熔/流体交代作用的产物(唐永成等, 1998; 王元龙等, 2001; Wang等, 2006; 谢智等, 2007; 袁峰等, 2008; Meng等, 2024), 也有学者认为其与古华南洋壳俯冲作用有关(Tang等, 2012; Chen等, 2016, 2020; Yang等, 2021; Zhang Z Y等, 2023). 本文根据成矿带内玢岩型铁矿成矿岩浆岩的地球化学特征发现, 长江中下游成矿带内玢岩型Fe矿床成矿岩浆岩具有弧岩浆岩的地球化学特征, 表现为富集LREE和LILE、亏损Nb和Ta等高场强元素地球化学特征(图11), 表明其可能是富集岩石圈地幔部分熔融的产物. 同时, 长江中下游成矿带内玢岩型Fe矿床成矿岩浆岩的Sr-Nd同位素组成主要落入富集岩石圈地幔区域(图6a), Hf同位素落入双溪坞群火山岩Hf同位素演化区域(图6b), 因此, 长江中下游成矿带玢岩型Fe矿床的成矿岩浆可能是新元古代华南洋俯冲过程中洋壳释放流体交代岩石圈地幔部分熔融的产物.

参考董树文等(2010)的研究, 长江中下游成矿带火山盆地边缘的断裂为导通至地幔的深大断裂. 因此, 长江中下游成矿带玢岩型Fe矿床的成矿岩浆为富集岩石圈地幔部分熔融的产物, 熔融的镁铁质岩浆沿深大断裂快速上升, 铁等成矿物质主要来自富集岩石圈地幔.

2.3　成矿系统深部过程的差异性

2.3.1　长江中下游成矿带与钦杭成矿带Cu-Au成矿系统深部过程的异同

由上述研究可知, 长江中下游成矿带和钦杭成矿带Cu-Au矿床成矿岩浆岩都为新元古代新生下地壳部分熔融形成的壳源岩浆和富集岩石圈地幔部分熔融形成的幔源岩浆混合的产物, 但两者的Hf-Nd同位素组成明显不同, 长江中下游成矿带的Hf-Nd同位素更富集, 具有更大的分布范围, 整体落入富集岩石圈地幔和扬子古老下地壳的演化线之间, 表明长江中下游成矿带Cu-Au成矿岩浆岩的源区混入有古老地壳物质(图6). 同时, 在长江中下游成矿带的沙溪矿床中, 成矿前和成矿期岩浆岩同位素组成未显示明显的差异(王世伟, 2016), 这排除了岩浆上升过程中地壳物质混入的可能性. 同时, 岩浆上升过程中即使混染少量的地壳

表 3 沙溪矿床继承锆石LA ICP-MS U-Pb和微量元素(ppm)分析结果[a)]

$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		Rho	$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{238}U/^{232}Th$	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		
Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ		Ratio	1σ	Ratio	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ	Age (Ma)	1σ	
0.0671	0.0019	1.2233	0.0366	0.1324	0.0034	0.8571	0.0382	0.001	1.1479	839	58	811	17	801	19	757	19	
0.0659	0.0019	1.2213	0.0385	0.1349	0.0036	0.8523	0.0408	0.0011	0.8424	1200	59	810	18	816	21	809	22	
0.073	0.0022	1.3406	0.0452	0.1332	0.0034	0.7662	0.0413	0.0011	0.8637	1015	61	863	20	806	20	818	22	
0.0668	0.0021	1.2774	0.0433	0.1387	0.0036	0.7667	0.0418	0.0012	2.2398	833	65	836	19	837	20	827	23	
0.0704	0.0023	1.3025	0.0483	0.1342	0.0036	0.7234	0.041	0.0012	0.9017	939	68	847	21	812	20	811	22	
0.0679	0.0023	1.2818	0.0476	0.137	0.0036	0.7123	0.0399	0.0012	1.4277	865	69	838	21	828	21	792	23	
0.0682	0.0025	1.273	0.0506	0.135	0.0036	0.6722	0.0413	0.0012	1.3914	876	76	834	23	816	20	817	23	
0.0684	0.0021	1.3214	0.0465	0.1401	0.0036	0.7379	0.0425	0.0012	1.7457	880	64	855	20	845	21	842	23	
0.0687	0.0023	1.3333	0.0519	0.1409	0.0038	0.693	0.0432	0.0012	0.9584	900	73	860	23	850	21	856	24	
0.0743	0.0029	1.4852	0.063	0.1458	0.0039	0.6292	0.0499	0.0015	1.3101	1050	79	924	26	878	22	984	28	
Ti	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Th	U
7.24	968	0.29	23	0.15	1.74	3.16	0.68	17.3	5.26	72	26.5	144	30	339	64.9	10954	227	253
13.5	1290	0.06	19.8	0.28	4.18	6.56	1.11	31.1	8.65	109	37	179	33.3	337	59.6	9969	218	177
10.8	1232	0.04	8.65	0.22	3.5	5.88	2.4	27.9	7.81	102	34.4	174	34.6	372	68.5	8951	163	137
7.87	243	0	7.99	0.019	0.26	0.75	0.12	4.09	1.28	18.3	7.13	39.2	8.27	94.3	17.9	12942	38.2	84.8
16.1	975	0.022	12.2	0.19	3.88	6.77	1.29	29.6	7.64	89.9	28.8	133	24.6	247	41.9	10285	73.7	66
13	397	0.003	11.8	0.041	0.7	1.63	0.34	9.34	2.76	35.5	12.5	62.9	12.8	132	24.5	11249	36.9	52.1
15.2	383	0.001	8.54	0.036	0.73	1.52	0.3	8.28	2.59	34.1	12	61.1	12.6	133	24.2	10852	33.4	45.9
6.8	383	0.007	13.1	0.022	0.47	1.08	0.19	6.6	2.21	29.7	11.2	60.1	12.8	141	26.4	13025	64.4	111
16.9	913	0.029	12.1	0.31	5.35	7.51	1.39	28.1	7.5	86.9	26.9	125	23.4	232	39	9927	67.3	62.9
17.8	576	0.49	10.9	0.17	1.73	3.14	0.57	13.7	3.98	50.2	17.3	86.5	17.2	182	32.4	10770	41.5	52.4

a) 具体方法可见Wang等(2015)

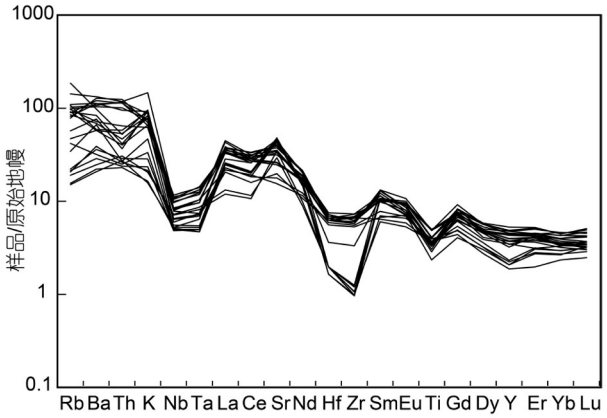

图 11　长江中下游成矿带玢岩型铁矿床成矿岩浆岩微量元素图解

数据来源同图3

物质，也难以造成两个成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆岩同位素组成如此大的差异，更可能是岩浆源区存在古老的地壳物质造成的.

吕庆田等(2015)研究发现，长江中下游成矿带铜陵矿集区的下地壳表现出“单斜”或负向“对冲”、Moho呈现错断的特征等挤压期构造痕迹, 表明下地壳及岩石圈地幔可能发生俯冲或叠置增厚. 我们据此推测，在长江中下游成矿带岩浆作用之前，新生下地壳赋存的区域已发生挤压变形，导致该区域混入有古老的地壳物质，幔源岩浆底垫至壳幔边界诱发该变形下地壳区域发生部分熔融，从而形成较钦杭成矿带Hf-Nd同位素更富集的斑岩-矽卡岩型Cu-Au成矿岩浆.

2.3.2　长江中下游成矿带中Cu-Au成矿系统与Fe成矿系统的异同

前人研究发现，斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的形成需要其成矿岩浆具有较高的金属含量、高氧逸度(>FMQ+1.3~FMQ+2; Mungall, 2002)、富硫(>1000ppm; Chambefort等, 2008)、富水(>4wt%; Richards, 2011)的特征. 锆石的微量元素特征已被证实可以指示岩浆的氧逸度、含水量(Lu等, 2016). 如在富水的岩浆中，角闪石的结晶会导致残余岩浆中Y亏损(Moore和Carmichael, 1998)，锆石的Ce/Nd比值、δCe与岩浆的氧逸度呈正比. 根据国内外已发表的资料，本文研究发现(图12)，锆石的Ce/Nd、δCe、δEu/Y、(Ce/Nd)/Y比值可以判定岩浆氧化还原状态和含水性.

本次工作通过对长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床与玢岩型Fe矿床成矿岩浆岩的锆石微量元素对比研究，发现它们基本都落入了斑岩型Cu-Au矿床成矿岩浆的区域(图12)，这表明长江中下游成矿带Fe矿床的成矿岩浆也具有类似Cu-Au矿床的高氧逸度和富水的特征(图12).

富硫(>1000ppm)是斑岩-矽卡岩型铜金矿床成矿岩浆的重要特征之一(Chambefort等, 2008)，岩浆中的硫含量可以通过成矿岩浆岩中磷灰石中的硫含量估算(Richards等, 2017). 通过计算发现, 长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆中硫含量为0.01~0.16wt%，主要集中在0.02~0.16wt%，而玢岩型Fe矿床成矿岩浆中硫含量为0~0.04wt%, 主要集中在0~0.03wt%, 明显低于斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床的成矿岩浆(图13), 这表明长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au成矿岩浆与玢岩型Fe成矿岩浆中硫含量明显不同.

由上述研究可知, 长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au成矿系统、玢岩型Fe成矿系统的岩浆源区具有明显的差异，斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床成矿岩浆岩的岩浆源区主要由新元古代新生下地壳、古老地壳和富集岩石圈地幔三部分组成，玢岩型铁矿床成矿岩浆主要来自富集岩石圈地幔部分熔融. 可见, Cu-Au成矿系统和Fe成矿系统岩浆源区的壳源岩浆和幔源岩浆比例差异明显，Cu-Au成矿系统的岩浆源区有更多的壳源物质. 同时，长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床、玢岩型Fe矿床成矿岩浆岩的Hf-Nd同位素明显不同, 前者的Hf-Nd同位素组成整体更富集(图6), 这也指示其岩浆源区具有更多的壳源物质. 由此推测, 长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床、玢岩型Fe矿床成矿岩浆中壳源和幔源岩浆的所占比例存在显著差异, 这可能是导致两个系统成矿岩浆性质差异(如硫、氯含量不同)的主要因素.

综上可知，钦杭成矿带Cu-Au、W-Cu和长江中下游成矿带Cu-Au、Fe成矿系统的成矿岩浆的源区主要由先存的新元古代新生下地壳、富集岩石圈地幔和古老地壳三部分组成，新生下地壳活化部分熔融提供金属Cu、Au等成矿物质, 富集岩石圈部分熔融提供金属Fe等成矿物质.

2.3.3　岩浆上升通道

前人对长江中下游成矿带和钦杭成矿带的区域构

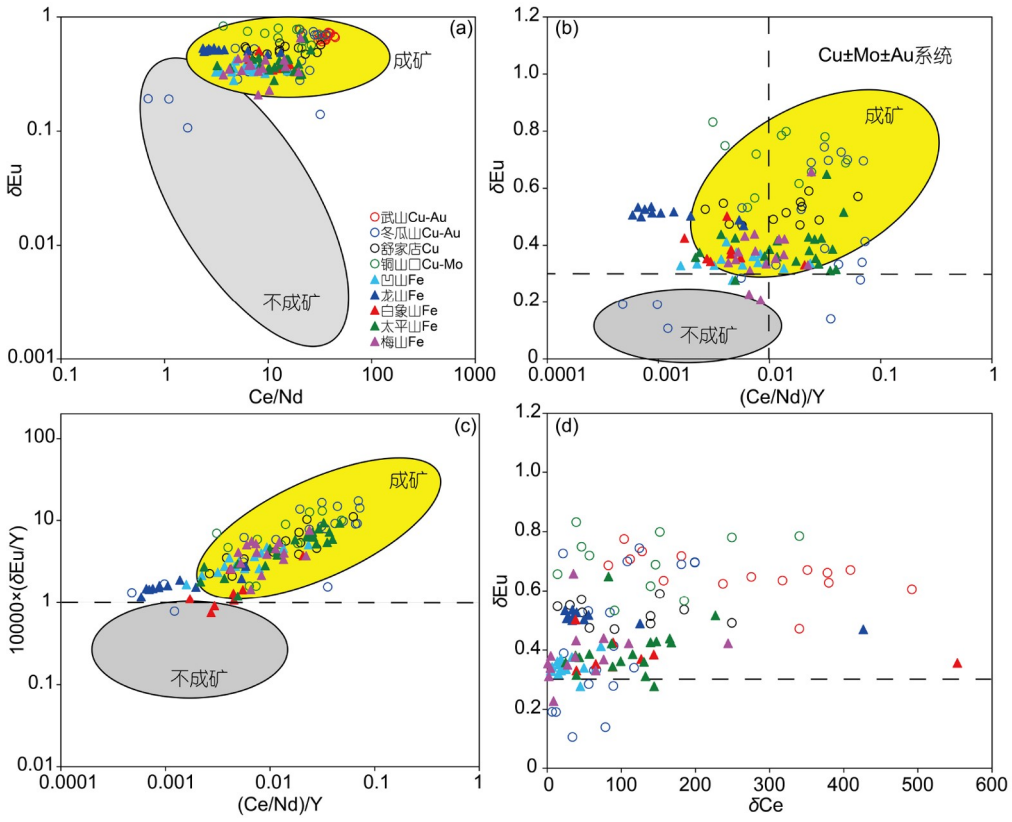

图 12　长江中下游成矿带斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床与玢岩型Fe矿床成矿岩浆岩中锆石微量元素相关图解

成矿和不成矿范围据Lu等(2016)修改. 数据来自段超等(2012)、Wang等(2013)、车林睿(2015)、王世伟(2016)、Sun等(2017)、Duan等(2019)、Nie等(2020)

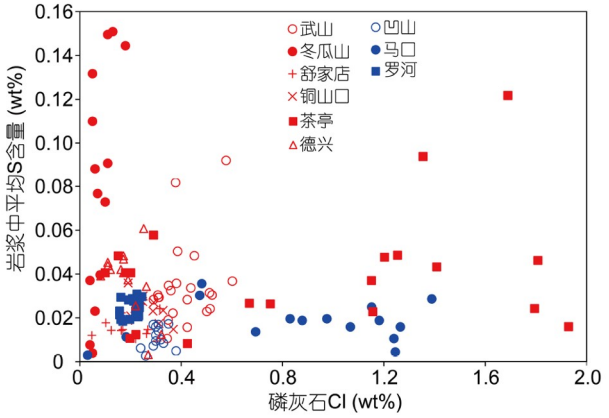

图 13　长江中下游成矿带成矿岩浆岩中磷灰石Cl含量和成矿岩浆中S含量关系图解

红色符号示意Cu-Au成矿系统, 蓝色符号示意Fe成矿系统. 数据来源同图12

造背景开展过不少讨论. 钦杭成矿带在大地构造上属于扬子与华夏地块新元古代的结合带, 最早认为其是钦州湾至杭州湾绵延近2000km、宽80~100km的S型区域(简称钦杭结合带; 杨明桂和梅勇文, 1997), 随后发现它也是中国东南部一条最重要的构造、岩浆和成矿带, 并命之为"钦杭成矿带"(徐德明等, 2012). 但也有学者怀疑其是否是板块结合带, 主要是由于有学者对于是否存在洋盆、华夏古陆(残余)还存在争议(潘桂棠等, 2009; 杨明桂等, 2009, 2012; Wang等, 2023). 最新的综合地球物理探测资料显示, 钦杭成矿带两侧的重力场、磁力场都具有明显不同, 钦杭成矿带应该是扬子板块和华夏板块拼贴带的南界(严加永等, 2019).

长江中下游成矿带位于两个前震旦基底的接合部位, 其上接受了加里东和海西-印支旋回的盖层沉积, 形成"一盖两底"的格局(常印佛等, 1991). 其在大地构造上属于大别-苏鲁造山带的前陆盆地, 关于其构造性质, 有学者认为它是自晚中生代以来的大陆裂谷带(秦大正等, 1983), 也有学者认为它是两组断裂构成的巨型"锯齿状"断裂带(刘湘培等, 1988)、具有深断裂性质

的破碎带(常印佛等, 1991), 是“陆内俯冲带”中一个地壳级断裂带(吕庆田等, 2014), 也有学者认为其最初由多个“微地体”或“岛屿”拼接而成, 不属于深断裂范畴, 表现出“岩石圈尺度”不连续的性质, 随后在中生代复活形成的具有深断裂性质的构造带(邓晋福等, 2006). 常印佛等(2019)认为长江中下游成矿带构造上是燕山期形成的陆内碰撞带, 沿“陆内俯冲带”发生了大规模、强烈的岩浆活动, 大量幔源物质沿长江深断裂侵入到上地壳, 控制了区域岩浆和成矿带的分布, 因此, 在构造上是燕山期形成的陆内碰撞带, 扬子板块和华北板块的南北对峙控制了长江中下游成矿带的构造格局, 不同级别和尺度上的对冲现象成为成矿带上地壳陆内变形的一个特色, 区域上由“压扭”向“张扭”的转换过程控制成矿带成岩成矿大爆发.

综上可见, 尽管长江中下游成矿带和钦杭成矿带的构造性质存在争议, 但它们都是在晚侏罗世之前形成的具有边界性质的地质单元进一步“复活”发展成为具有断裂性质的构造带, 为深部岩浆的上升提供了“通道”.

3 成岩成矿动力学机制

前人关于两个成矿带斑岩-矽卡岩型矿床成矿岩浆形成动力学模式主要有两大类: 陆内增厚的下地壳/岩石圈地幔拆沉与熔融(Xu等, 2002; Wang等, 2006; Zhou等, 2015; Chen等, 2020; Lü等, 2021; Zhang K等, 2021; Zhang Z Y等, 2023; Zhang Y Q等, 2023); 俯冲的洋壳部分熔融, 或俯冲引起的富集岩石圈地幔部分熔融(Ling等, 2009; Li和Li, 2007; Mao等, 2021).

全岩稀土元素La/Yb和Gd/Yb比值可以作为地壳厚度的替代指标, 较高的比值指示岩浆来源更深(Hollings等, 2006, 2011; Haschke等, 2002). 本次研究收集和分析了长江中下游成矿带、钦杭成矿带及邻区岩浆岩数据发现, 长江中下游成矿带和钦杭成矿带内的成矿岩浆岩和无矿岩浆岩的La/Yb和Gd/Yb比值具有相似的变化规律, 整体表现为La/Yb和Gd/Yb值在180~155和150~135Ma期间先增大后减小的变化特征, 峰值为~170和~142Ma, 表明这期间存在地壳的增厚、减薄过程(图14a, 14b). 钦杭成矿带Cu-Au和W-Cu、长江中下游成矿带Cu-Au成矿作用也主要发生在这两个时期, 显示它们可能与增厚的下地壳/岩石圈地幔拆沉

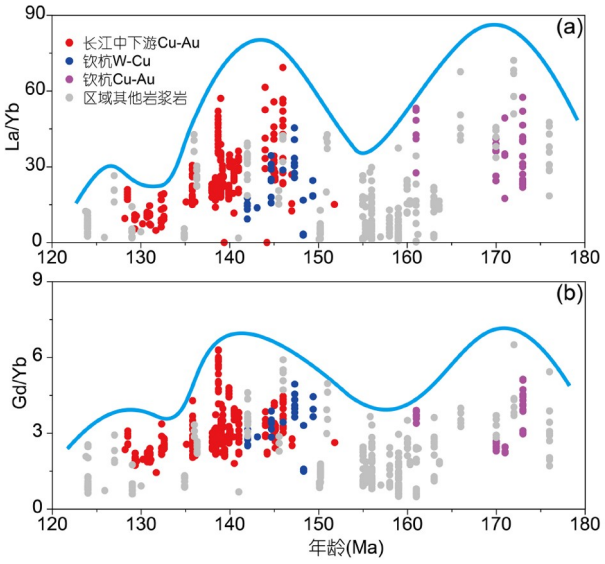

图 14 钦杭和长江中下游成矿带及邻区La/Yb(a)和Gd/Yb(b)比值变化图解

作用有关. 此外, 两个成矿带内成矿岩浆岩的La/Yb和Gd/Yb比值整体上高于邻区其他无矿岩浆岩, 表明两个成矿带的地壳厚度大于同时代的相邻区域. 最新的地球物理资料(Yan等, 2021)显示, 两个成矿带内的Moho面深度较浅, 二者相互验证, 进一步证明两个成矿带发生过大规模的拆沉作用.

前人大量的研究提出, 中国东部印支-燕山期在构造格局由以挤压为主的EW向构造转为以伸展为主的NNE向构造的过程中, 岩浆活动由陆内造山型中酸性岩向伸展型幔源或壳/幔混源岩浆岩转变, 岩石圈发生巨大减薄, 厚度约由200km快速减薄至80km(Xu等, 2002; 吴福元等, 2003; Gao等, 2004; 侯增谦和杨志明, 2009). 根据大规模幔源岩浆活动时限, 邓晋福等(2003)提出华北克拉通岩石圈去根始于早侏罗世, 而下扬子地区的岩石圈去根则于晚侏罗世达到高峰. 从厚达100km的岩石圈根突发性地快速“消失”现象看, 这种晚侏罗世的岩石圈巨大减薄更可能与大规模拆沉有关(吴福元等, 2003; 吕庆田等, 2014). 本文研究进一步表明, 长江中下游成矿带和钦杭成矿带的成矿岩浆不是古太平洋板块直接俯冲作用的产物, 而是陆内环境下地壳/岩石圈地幔拆沉部分熔融的结果.

因此, 长江中下游成矿带和钦杭成矿带的成岩成矿过程可以概括如下(图15): 晚侏罗世开始(~176Ma; 张岳桥等, 2012), 华南板块开始由特提斯构造体制向

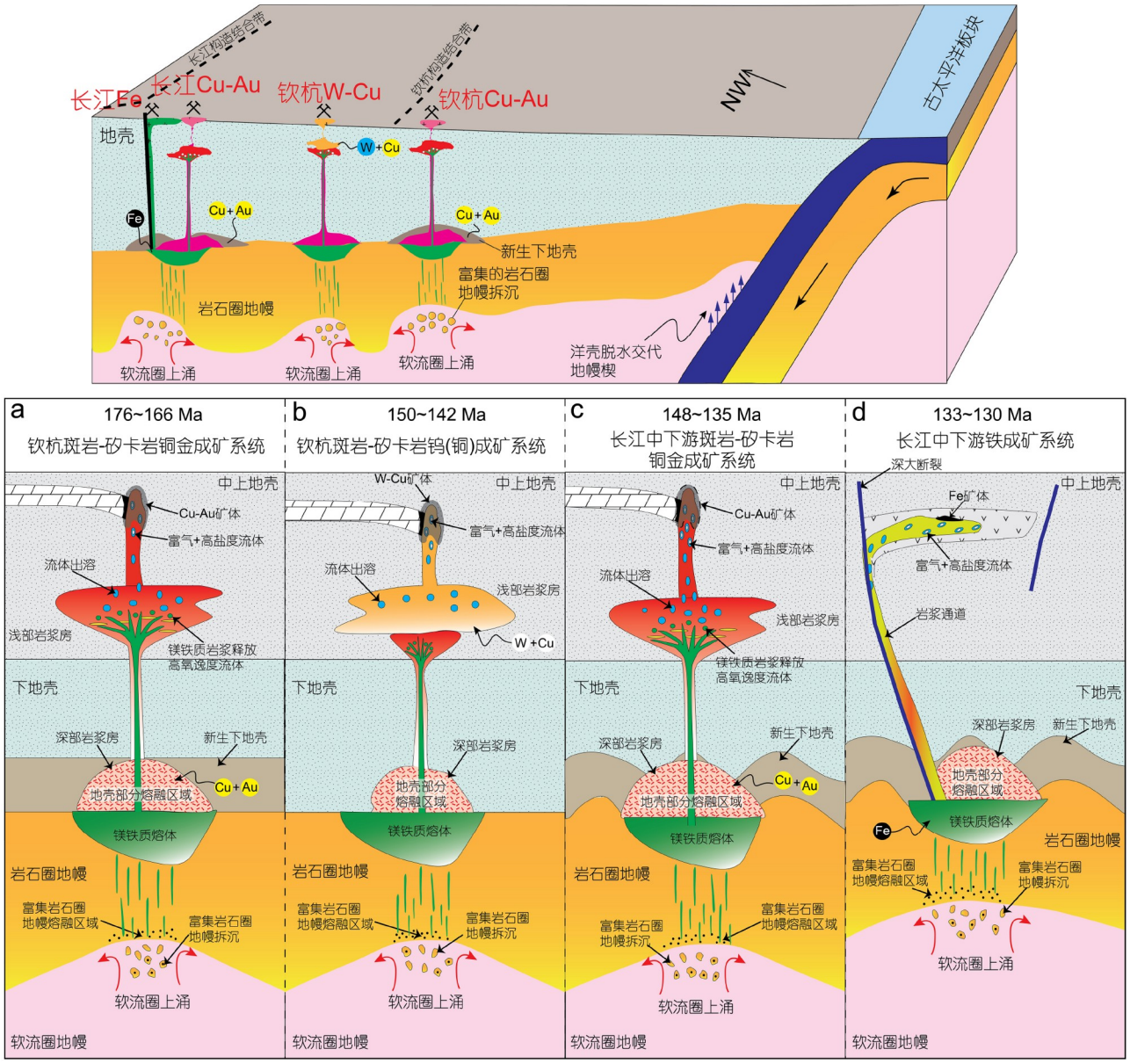

图 15　长江中下游成矿带和钦杭成矿带中生代成岩成矿深部过程模式图

古太平洋构造体制转换, 地壳不断加厚, 以太平洋板块俯冲为主的NW向挤压作用导致钦杭成矿带东南部岩石圈开始构造垮塌、拆沉, 拆沉的富集岩石圈地幔部分熔融形成的幔源基性岩浆底垫到壳幔过渡带, 引起赋存在该部位的新元古代新生下地壳发生部分熔融, 重熔加厚下地壳形成的岩浆上升形成深部岩浆房, 源自富集岩石圈地幔的基性岩浆上升注入到深部岩浆房中并发生壳幔岩浆混合作用, 混合后的岩浆具有埃达克岩性质, 成矿岩浆沿钦杭结合带薄弱部位上升, 进一步演化形成钦杭成矿带的高Sr/Y侵入岩及相关的斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床(图15a).

随着古太平洋板块俯冲NW向作用力继续向陆内不断传递, 钦杭成矿带西北部岩石圈地幔开始拆沉(~150Ma), 拆沉的岩石圈地幔部分熔融形成的基性岩浆底垫到壳幔过渡带, 导致下地壳发生部分熔融形成长英质岩浆, 随后岩浆上升至中上地壳, 引起新元古代的双桥山群基底岩石发生部分熔融, 随后岩浆上升至地壳浅部形成S型花岗岩及相关的斑岩-矽卡岩型

W-Cu矿床(图15b).

随着古太平洋板块俯冲NW向作用力进一步传递至长江中下游地区(~148Ma), 导致长江中下游成矿带岩石圈构造垮塌、拆沉(周涛发等, 2011), 富集岩石圈地幔的拆沉导致软流圈物质上涌, 引起富集岩石圈地幔发生部分熔融, 形成基性岩浆; 这些基性岩浆上升底侵到加厚的下地壳底部, 引起加厚的下地壳(新生下地壳+古老陆壳)部分熔融, 形成的岩浆上升形成深部岩浆房, 源自富集岩石圈地幔的基性岩浆上升侵入到深部岩浆房中并发生混合作用, 混合后具有埃达克岩性质、富含成矿物质的岩浆上升, 进一步演化形成长江中下游成矿带埃达克质岩及有关的斑岩-矽卡岩型Cu-Au矿床(图15c).

约135Ma后, 区域完全进入古太平洋构造体制, 古太平洋板块俯冲方向的变化导致长江中下游成矿带进入剪切-伸展阶段, 区域伸展作用增强, 导致富集岩石圈地幔进一步发生拆沉作用(周涛发等, 2017), 富集岩石圈地幔部分熔融形成的基性岩浆沿深大断裂快速上升至浅部, 形成长江中下游成矿带玢岩型Fe矿床的成矿岩浆岩及铁矿床(图15d).

综上可知, 钦杭成矿带和长江中下游成矿带燕山期成岩成矿作用是同一动力学机制下作用的产物, 都是古太平洋俯冲作用下陆内“新元古代地壳”(先存成矿物质)+“边界继承断裂”(先存块体边界)由东南向西北方向先后活化的产物.

4 结论

(1) 钦杭成矿带和长江中下游成矿带中生代的成岩成矿作用属于同一动力学背景, 主要是古太平洋板块NW向俯冲作用下陆内由近及远“源区+构造”“双活化”的产物.

(2) 华南东段的钦杭成矿带和长江中下游成矿带中生代的成岩成矿作用由东南至西北先后发生: 钦杭成矿带Cu-Au(175~159Ma)→钦杭成矿带W-Cu(150~142Ma)→长江中下游成矿带Cu-Au(148~135Ma)→长江中下游成矿带Fe(134~129Ma).

(3) 长江中下游成矿带和钦杭成矿带中的Cu-Au成矿系统成矿岩浆为壳幔混源(新元古代新生下地壳+富集岩石圈地幔), W-Cu成矿系统成矿岩浆为壳源(新元古代古老地壳), 成矿物质主要受控于源区活化; Fe成矿系统成矿岩浆为幔源(富集岩石圈地幔). 成矿金属Cu-Au、W-Cu和Fe分别来自新生下地壳、新元古代古老地壳和富集岩石圈地幔, Cu-Au成矿系统成矿岩浆的高氧逸度特征是幔源岩浆混入的结果.

(4) 长江中下游成矿带和钦杭成矿带Cu-Au成矿系统岩浆来源和演化等深部过程类似, Moho变形导致源区卷入古老地壳物质可能是导致它们成矿岩浆岩同位素组成差异的因素之一. 长江中下游成矿带内Cu-Au成矿系统和Fe成矿系统岩浆来源和演化等深部过程不同, 后者的成矿岩浆相对更基性、同位素更亏损、硫含量较低, 源区混入的新生地壳物质较少, 可能是岩浆沿深大断裂快速上升导致的.

致谢 感谢编委和审稿人提出的建设性意见. 感谢王汝成教授、杨志明研究员在本文撰写期间提供的指导.

参考文献

鲍波, 姜军胜, 于玉帅, 秦拯纬, 郑忠超, 柳潇, 陕亮, 董宜勇, 李福林. 2023. 江西德兴斑岩铜矿石英闪长玢岩成因及成矿学意义. 岩石矿物学杂志, 42: 483–501

常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带. 北京: 地质出版社. 1–379

常印佛, 李加好, 宋传中. 2019. 长江中下游成矿带区域构造格局的新认识. 岩石学报, 35: 3579–3591

车林睿. 2015. 宁芜盆地与梅山铁多金属矿床有关的火山-次火山岩的岩石地球化学和年代学研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–133

陈津华, 曾键年, 王思源, 李锦伟, 邱金亮, 张燕. 2012. 宁芜和庐枞火山岩盆地玢岩铁矿矿床地球化学特征及其成矿动力学背景探讨. 地质科技情报, 31: 86–94

陈骏. 2019. 关键金属超常富集成矿和高效利用. 科技导报, 37: 1

陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. 中国科学: 地球科学, 44: 111–121

陈毓川, 王登红. 2012. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题. 大地构造与成矿学, 36: 315–321

陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要. 大地构造与成矿学, 38: 219–229

陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 曾勇, 匡福祥, 贺振宇, 柯学, 余明刚, 赵希林, 张勇. 2011. 长江中下游成矿带九瑞矿集区(北部)含矿岩体的锆石U-Pb定年及其地质意义. 地质学报, 85: 1146–1158

褚平利, 段政, 廖圣兵, 黄文成, 洪文涛, 朱延辉, 舒徐洁. 2019. 江西大湖塘中生代花岗岩的成因与构造指示意义: 年代学、矿物化学、地球化学与Lu-Hf同位素制约. 地质学报, 93: 1687–1707

邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 莫宣学, 肖庆辉, 周肃, 刘翠, 赵国春. 2003.

华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘, 10: 41–50
邓晋福, 赵国春, 苏尚国, 刘翠, 周肃, 刘义勤. 2006. 地球史中的构造活动论和发展阶段论. 地学前缘, 13: 14–21
邓晋福, 滕吉文, 彭聪, 洪大卫, 邱瑞照. 2008. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿. 北京: 地质出版社. 1–212
狄永军, 吴淦国, 张达, 宋彪, 臧文拴, 张忠义, 李进文. 2005. 铜陵地区小铜官山和沙滩脚岩体锆石SHRIMP U-Pb年代学研究及其岩石学意义. 地质学报, 79: 804
丁丽雪, 黄圭成, 夏金龙, 吴昌熊, 祝敬明, 金尚刚. 2013. 鄂东南地区姜桥花岗闪长岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 32: 275–290
丁丽雪, 黄圭成, 夏金龙. 2014. 鄂东南地区龙角山—付家山斑岩体成因及其对成矿作用的指示. 地质学报, 88: 1513–1527
丁丽雪, 黄圭成, 夏金龙. 2018. 鄂东南地区鄂城岩体的时代、成因及其对成矿作用的指示. 地球科学, 43: 2350–2369
董树文, 项怀顺, 高锐, 吕庆田, 李建设, 战双庆, 卢占武, 马立成. 2010. 长江中下游庐江-枞阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. 岩石学报, 26: 2529–2542
董树文, 李廷栋, SinoProbe团队. 2011. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe). 地球学报, 32(增刊): 3–23
杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 秦新龙, 楼亚儿. 2007. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程——岩浆底侵、同化混染和分离结晶. 现代地质, 21: 71–77
杜杨松, 秦新龙, 曹毅. 2010. 安徽铜陵中生代侵入岩及其岩石包体中的硫化物-氧化物包裹体研究. 矿床地质, 29: 71–84
段超, 李延河, 毛景文, 侯可军, 袁顺达. 2012. 宁芜火山岩盆地凹山铁矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义. 中国地质, 39: 1874–1884
范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, David R C. 2010. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义. 岩石学报, 26: 2715–2728
范裕, 常印佛, 周涛发, 王世伟, 李加好, 李双应, 陈安国, 宋传中. 2019. 中国矿产地质志•长江中下游卷. 北京: 地质出版社. 1–303
郭宁宁, 徐江嬿, 张小波, 刘俊安. 2020. 鄂东南铜山口外围饶家山小岩体锆石U-Pb定年及地质意义. 资源环境与工程, 34: 1–7
郭维民, 陆建军, 蒋少涌, 章荣清, 招湛杰. 2013. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩年代学、Hf同位素、地球化学及岩石成因. 中国科学: 地球科学, 43: 1268–1286
侯爵, 徐涛, 吕庆田, 白志明, 张永谦, 张智宇, 杨丹. 2022. 华南东北部中生代铜金钨大规模成矿的深部背景: 来自英山-常山宽角地震资源的约束. 中国科学: 地球科学, 52: 2305–2322
侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型. 地质学报, 83: 1779–1817
侯增谦, 陈骏, 翟明国. 2020a. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿. 科学通报, 65: 3651–3652
侯增谦, 杨志明, 王瑞, 郑远川. 2020b. 再论中国大陆斑岩Cu-Mo-Au矿床成矿作用. 地学前缘, 27: 20–44
胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社. 1–903
胡瑞忠, 付山岭, 肖加飞. 2016. 华南大规模低温成矿的主要科学问题. 岩石学报, 32: 3239–3251
华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 18: 300–307
华仁民, 李晓峰, 陆建军, 陈培荣, 邱德同, 王果. 2000. 德兴大型铜金矿集区构造环境和成矿流体研究进展. 地球科学进展, 15: 525–533
华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 陈培荣. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比. 岩石学报, 23: 2321–2328
黄圭成, 夏金龙, 丁丽雪, 金尚刚, 柯于富, 吴昌雄, 祝敬明. 2013. 鄂东南地区铜绿山岩体的侵入期次和物源: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素证据. 中国地质, 40: 1392–1408
贾丽琼, 杨丹, 徐文艺, 吕庆田, 杨竹森, 莫宣学, 王梁. 2015. 江西九瑞地区东雷湾矽卡岩型铜多金属矿床锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地质意义. 地球学报, 36: 177–186
蒋少涌, 王微. 2022. 战略性关键金属是如何发生超常富集成矿的? 地球科学(中国地质大学学报), 47: 3869–3871
蒋少涌, 李亮, 朱碧, 丁昕, 姜耀辉. 2008. 江西武山铜矿区花岗闪长斑岩的地球化学和Sr-Nd-Hf同位素组成及成因探讨. 岩石学报, 24: 1679–1690
蒋少涌, 彭宁俊, 黄兰椿, 徐耀明, 占岗乐, 但小华. 2015. 赣北大湖塘矿集区超大型钨矿地质特征及成因探讨. 岩石学报, 31: 639–655
赖小东, 杨晓勇, 孙卫东, 曹晓生. 2012. 铜陵舒家店岩体年代学、岩石地球化学特征及成矿意义. 地质学报, 86: 470–485
李进文, 裴荣富, 张德全, 梅燕雄, 臧文拴, 孟贵祥, 曾普胜, 李铁军, 狄永军. 2007. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义. 地球学报, 28: 11–22
李亮, 蒋少涌. 2009. 长江中下游地区九瑞矿集区邓家山花岗闪长斑岩的地球化学与成因研究. 岩石学报, 25: 2877–2888
李顺庭. 2008. 宁芜地区蒋庙和姑山岩体的特征和成因. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–41
李婉婷. 2016. 宁芜及庐枞地区陆相次火山岩型铁矿床成矿流体及矿床成因研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–204
李晓峰, 华仁民, 马东升, 徐净, 张龙, 齐有强, 武丽艳, 朱艺婷. 2019. 大陆岩石圈伸展与斑岩铜矿成矿作用. 岩石学报, 35: 76–88
李晓峰, 韦星林, 朱艺婷, 李祖福, 邓宣驰. 2021. 华南稀有金属矿床: 类型、特点、时空分布与背景. 岩石学报, 37: 3591–3614
李艳红, 唐炜, 陈祺, 邹静, 饶建锋, 欧阳永棚, 武彬. 2021. 朱溪矿集区黑云母石英二长斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 矿床地质, 40: 1285–1298
李忆南, 陶波. 2022. 铜陵蛤蟆岭岩体锆石U-Pb同位素年代学特征及其找矿意义. 现代矿业, 38: 43–47
刘经纬, 陈斌, 陈军胜, 李壮, 孙克克. 2017. 赣东北朱溪钨(铜)矿区高

分异花岗岩的成因及与钨矿的关系. 岩石学报, 33: 3161–3182
刘泉. 2023. 鄂东南付家山大型(钼)铜钨矿床成岩成矿作用及成矿模式. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1–88
刘绍锋, 杜杨松, 付水兴, 钟宏, 曹毅. 2013. 安徽姚家岭锌金多金属矿区花岗闪长斑岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素特征及其地质意义. 地球科学(中国地质大学学报), 38(增刊): 91–102
刘湘培, 常印佛, 吴言昌. 1988. 论长江中下游地区成矿条件和成矿规律. 地质学报, 2: 167–177
刘一男, 范裕, 严四华, 司志远, 周涛发, 袁峰. 2014. 长江中下游成矿带安庆-贵池矿集区五横岩体的成岩年代和区域岩浆活动演化研究. 岩石学报, 30: 1117–1129
刘园园, 马昌前, 吕昭英, 黄卫平. 2012. 长江中下游贵池矿集区燕山期岩浆作用及其地质意义: 年代学、地球化学及Sr-Nd-Hf同位素证据. 岩石学报, 28: 3287–3305
鲁鑫. 2008. 安徽铜陵地区中生代侵入岩特征和成因. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–57
陆顺富, 曾键年, 李锦伟, 吴亚飞, 李小芬, 黄志伟. 2014. 铜陵狮子山地区胡村岩体年代学及地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 33: 355–365
吕庆田, 董树文, 史大年, 汤井田, 江国明, 张永谦, 徐涛, SinoProbe-03-CJ项目组. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测(SinoProbe)综述. 岩石学报, 30: 889–906
吕庆田, 董树文, 汤井田, 史大年, 常印佛. 2015. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe-03)进展. 地球物理学报, 58: 4319–4343
吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 赵金花, 龚雪婧. 2019. 成矿系统的多尺度探测:概念与进展——以长江中下游成矿带为例. 中国地质, 46: 673–689
吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 龚雪晴, 高凤霞. 2020. 长江中下游成矿带铁-铜成矿系统结构的地球物理探测: 综合分析. 地学前缘, 27: 232–253
毛景文, 胡瑞忠. 2004. 大规模成矿作用与大型矿集区预测研究. 中国基础科学, 6: 5–8
毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23: 2329–2338
毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85: 636–658
毛景文, 吴胜华, 宋世伟, 戴盼, 谢桂青, 苏蔷薇, 刘鹏, 王先广, 余忠珍, 陈祥云, 唐维新. 2020. 江南世界级钨矿带: 地质特征、成矿规律和矿床模型. 科学通报, 65: 3746–3762
毛志昊. 2016. 江西大湖塘超大型斑岩钨矿床成矿动力学背景与成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–149
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
倪培, 潘君屹, 迟哲. 2020. 华南燕山期大规模铜成矿作用的成矿模式及找矿方向. 矿床地质, 39: 754–784
倪培, 潘君屹, 韩亮, 崔健铭, 高严, 范明森, 李文生, 迟哲, 张凯涵, 程郅麟. 2023. 华南与花岗岩有关大规模钨锡成矿作用的时空分布、成矿模式及找矿方向. 地质学报, 97: 3497–3544
潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 36: 1–28
秦大正, 刘昌森, 丁颂华, 何岳宝. 1983. 长江断裂带东延问题及裂谷特性的讨论. 地震地质, 5: 70–95
秦燕, 王登红, 侯可军, 吴礼彬, 梅玉萍. 2010. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石SHRIMP U-Pb年龄及Hf同位素特征. 矿床地质, 29(增刊): 497–498
瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 王永磊, 邓月金. 2010. 安徽铜陵凤凰山燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其与金属成矿关系. 中国地质, 37: 311–323
瞿泓滢, 裴荣富, 姚磊, 王永磊, 王浩琳. 2012. 湖北大冶与矽卡岩型铁矿床有关的铁山岩体中黑云母、角闪石^{40}Ar-^{39}Ar同位素年龄及其地质意义. 中国地质, 39: 1635–1646
邵拥军, 彭省临, 吴淦国, 张达. 2003. 铜陵凤凰山岩体成岩机制探讨. 地质与勘探, 39: 39–43
孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 范蔚茗, 丁兴, 梁华英. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. 中国科学: 地球科学, 40: 127–137
唐永成, 吴言昌, 储国正. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社. 1–351
汪方跃, 葛粲, 宁思远, 聂利青, 钟国雄, White N C. 2017. 一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用. 岩石学报, 33: 3422–3436
汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. 岩石学报, 20: 297–311
王登红, 陈毓川, 陈郑辉, 刘善宝, 许建祥, 张家菁, 曾载淋, 陈富文, 李华芹, 郭春丽. 2007. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究. 地质学报, 81: 882–890
王国光, 倪培, 赵超, 姚静, 李利, 赵丹蕾, 胡金山, 朱安冬, 张鑫. 2019. 德兴大型铜金矿集区的研究进展和成矿模式. 岩石学报, 35: 3644–3658
王建中, 李建威, 赵新福, 钱壮志, 马昌前. 2008. 铜陵地区朝山矽卡岩型金矿床及含矿岩体的成因: ^{40}Ar/^{39}Ar年龄、元素地球化学及多元同位素证据. 岩石学报, 24: 1875–1888
王娟, 宋传中, 石永红, 李加好, 刘玉娟, 王智慧. 2021. 蚌埠荆山地区变质P-T条件评价与锆石U-Pb定年分析. 地质科学, 56: 914–935
王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. 岩石学报, 20: 351–360
王世伟. 2016. 长江中下游成矿带(安徽段)斑岩型矿床成岩成矿作用研究. 博士学位论文. 合肥: 合肥工业大学. 1–274
王世伟, 周涛发, 袁峰, 范裕, 吕玉琢. 2011. 铜陵舒家店岩体的年代学和地球化学特征研究. 地质学报, 85: 849–861

王先广, 刘战庆, 刘善宝, 王成辉, 刘建光, 万浩章, 陈国华, 张树德, 刘小林. 2015. 江西朱溪铜钨矿细粒花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和岩石地球化学研究. 岩矿测试, 34: 592–599

王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004a. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石SHRIMP的U-Pb年龄及其成因指示. 岩石矿物学杂志, 23: 298–304

王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹胜, 田世洪. 2004b. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石SHRIMP年代学及其意义. 中国地质, 31: 169–173

王彦博. 2012. 湖北铜绿山铜铁矿床地球化学特征与矿床成因. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–74

王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17: 565–575

吴才来, 陈松永, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因. 地球学报, 24: 41–48

吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石SHRIMP U-Pb定年及岩浆作用的深部过程. 岩石学报, 24: 1801–1812

吴才来, 高前明, 国和平, 郭祥炎, 刘良根, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 陈其龙. 2010. 铜陵地区铜官山矿田侵入岩锆石SHRIMP定年. 地质学报, 84: 1746–1758

吴才来, 郭祥焱, 王次松, 武秀平, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, 陈其龙. 2013. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩锆石U-Pb年代学及其地质意义. 地球化学, 42: 11–28

吴迪, 于炳松, 吴才来, 雷敏, 徐楠, 郑坤. 2020. 安徽铜陵焦冲矿田侵入岩锆石U-Pb定年、Hf同位素特征及成因. 中国地质, 47: 1069–1091

吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10: 51–60

吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文拴, 张祥信, 宋彪, 张忠义. 2008. 铜陵矿集区侵入岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其深部动力学背景. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 630–645

吴星星, 闫峻, 唐裕禄, 初晓强, 彭戈. 2011. 安徽铜陵沙滩脚岩体年代学及地球化学特征. 矿物岩石, 31: 75–82

夏金龙, 黄圭成, 丁丽雪, 吴昌雄, 祝敬明, 金尚刚. 2013. 鄂东南地区古家山岩体锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成: 对岩浆源区的指示. 华南地质与矿产, 29: 116–125

谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 孙卫东. 2008. 铜陵地区中生代侵入岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学及Cu-Au成矿指示意义. 岩石学报, 24: 1782–1800

谢智, 李全忠, 陈江峰, 高天山. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义. 高校地质学报, 13: 235–249

徐德明, 藺志永, 龙文国, 张鲲, 王磊, 周岱, 黄皓. 2012. 钦杭成矿带的研究历史和现状. 华南地质与矿产, 28: 277–289

徐夕生, 范钦成, Reilly S Y O, 蒋少涌, Griffin W L, 王汝成, 邱检生. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石U-Pb定年与成因探讨. 科学通报, 49: 1883–1891

徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 柏林, 储国正. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石SHRIMP定年及其成因意义. 地质学报, 82: 500–509

徐晓春, 白茹玉, 谢巧勤, 楼金伟, 张赞赞, 刘启能, 陈莉薇. 2012. 安徽铜陵中生代侵入岩地质地球化学特征再认识及成因讨论. 岩石学报, 28: 3139–3169

徐晓春, 安昱华, 许心悦, 傅仲阳. 2020. 安徽南陵-宣城地区岩浆岩锆石U-Pb年龄及元素地球化学特征. 地球科学与环境学报, 42: 15–35

严加永, 吕庆田, 罗凡, 陈安国, 叶高峰, 张永谦, 张昆, 赵金花, 张冲, 刘振东, 刘彦. 2019. 钦杭何在?来自综合地球物理探测的认识. 中国地质, 46: 690–703

颜代蓉, 邓晓东, 胡浩, 李建威. 2012. 鄂东南地区阮家湾和犀牛山花岗闪长岩的时代、成因及成矿和找矿意义. 岩石学报, 28: 3373–3388

杨光树, 温汉捷, 胡瑞忠, 于文修, 樊海峰. 2007. 安徽月山岩体岩石地球化学特征及成因. 矿物学报, 27: 406–413

杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, 3: 52–59

杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36: 528–543

杨明桂, 刘亚光, 黄志忠, 吴福江, 宋志瑞. 2012. 江西中新元古代地层的划分及其与邻区对比. 中国地质, 39: 43–53

杨小男, 徐兆文. 张军, 王云健, 徐夕生, 蒋少涌, 凌洪飞, 刘良根, 陈达源. 2007. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究. 岩石学报, 23: 1543–1551

姚磊, 谢桂青, 吕志成, 赵财胜, 王建, 郑先伟, 何哲峰, 李伟. 2013. 鄂东南程潮铁矿床花岗质岩和闪长岩的岩体时代、成因及地质意义—锆石年龄、地球化学和Hf同位素新证据. 吉林大学学报(地球科学版), 43: 1393–1422

袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏慧. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24: 1691–1702

岳紫龙, 杜杨松, 曹毅, 左晓敏, 张爱萍, 黄文明. 2015. 铜陵桂花冲花岗闪长斑岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及其地质意义. 矿物岩石, 35: 82–90

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. 中国科学基金, 33: 106–111

翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床. 北京: 地质出版社. 1–120

张达, 吴淦国, 狄永军, 臧文拴, 邵拥军, 余心起, 张祥信, 汪群峰. 2006. 铜陵凤凰山岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约. 地球科学, 31: 823–829

张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有,

鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学: 地球科学, 43: 1553–1582

张乐骏. 2012. 安徽庐枞盆地成岩成矿作用研究. 博士学位论文. 合肥: 合肥工业大学. 1–289

张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 安徽月山岩体的锆石SHRIMP U-Pb定年及其意义. 岩石学报, 24: 1725–1732

张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰, 马良, 钱兵. 2010. 安徽庐枞盆地井边铜矿床的成矿时代及其找矿指示意义. 岩石学报, 26: 2729–2738

张旗, 王焰, 王元龙. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探——埃达克质岩Sr-Nd同位素制约. 岩石学报, 17: 505–513

张小波, 张世涛, 陈华勇, 刘俊安, 程佳敏, 初高彬, 李莎莎. 2020. 石榴子石U-Pb定年在矽卡岩矿床中的应用: 以鄂东南高椅山硅灰石(-铜)矿床为例. 地球科学, 45: 856–868

张永谦, 吕庆田, 严加永, 徐峣, 林吉焱, 皮娇龙, 陈淼, 张文文. 2022. 江南造山带中段地壳结构与成矿启示: 基于广昌-浏阳剖面接收函数的认识. 岩石学报, 38: 559–572

张岳桥, 董树文, 李建华, 崔健军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33: 257–279

赵新福, 曾丽平, 廖旺, 李婉婷, 胡浩, 李建威. 2020. 长江中下游成矿带玢岩铁矿研究新进展及对矿床成因的启示. 地学前缘, 27: 197–217

钟国雄, 周涛发, 袁峰, 蒋其胜, 范裕, 张达玉, 黄建满. 2014. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成岩成矿年代学研究. 岩石学报, 30: 1075–1086

周清, 姜耀辉, 廖世勇, 靳国栋, 赵鹏, 刘铮, 贾儒雅. 2013. 德兴斑岩铜矿床研究新进展. 地质论评, 59: 933–940

周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24: 1665–1678

周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 杨西飞, David R C. 2011. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学: 地球科学, 41: 960–971

周涛发, 王世伟, 袁峰, 范裕, 张达玉, 常印佛, White N C. 2016. 长江中下游成矿带陆内斑岩型矿床的成岩成矿作用. 岩石学报, 32: 271–288

周涛发, 范裕, 王世伟, White N C. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式. 岩石学报, 33: 3353–3372

Cai Y, Ni P, Wang G, Chen H. 2023. Geochemical characteristics of the granodiorite porphyry in Dongxiang W-Cu deposit, SE China. Minerals, 13: 380

Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis. Chin Sci Bull, 51: 257–268

Chambefort I, Dilles J H, Kent A J R. 2008. Anhydrite-bearing andesite and dacite as a source for sulfur in magmatic-hydrothermal mineral deposits. Geology, 36: 719–722

Chen H, Ni P, Wang G G, Chen R Y, Lü Z C, Pang Z S, Geng L, Zhang S B, Yuan H X. 2017. Petrogenesis of ore-related granodiorite porphyry in the Jiande copper deposit, SE China: Implications for the tectonic setting and mineralization. Resour Geol, 67: 117–138

Chen L, Zheng Y F, Zhao Z F. 2016. Geochemical constraints on the origin of Late Mesozoic andesites from the Ningwu basin in the Middle-Lower Yangtze Valley, South China. Lithos, 254-255: 94–117

Chen L, Zheng Y F, Zhao Z F. 2020. Origin of arc-like magmatism at fossil convergent plate boundaries: Geochemical insights from Mesozoic igneous rocks in the Middle to Lower Yangtze Valley, South China. Earth-Sci Rev, 211: 103416

Deng X D, Li J W, Zhou M F, Zhao X F, Yan D R. 2015. *In-situ* LA-ICPMS trace elements and U-Pb analysis of titanite from the Mesozoic Ruanjiawan W-Cu-Mo skarn deposit, Daye district, China. Ore Geol Rev, 65: 990–1004

Duan X X, Chen B, Sun K K, Wang Z Q, Yan X, Zhang Z. 2019. Accessory mineral chemistry as a monitor of petrogenetic and metallogenetic processes: A comparative study of zircon and apatite from Wushan Cu- and Zhuxiling W(Mo)-mineralization-related granitoids. Ore Geol Rev, 111: 102940

Fan X K, Zhang Z Y, Hou Z Q, Mavrogenes J, Pan X F, Zhang X, Dai J L, Wu X Y. 2021. Magmatic processes recorded in plagioclase and the geodynamic implications in the giant Shimensi W-Cu-Mo deposit, Dahutang ore field, South China. J Asian Earth Sci, 212: 104734

Gao J, Klemd R, Long L L, Xiong X M, Qian Q. 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélange belt, South China. Lithos, 110: 277–293

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432: 892–897

Haschke M, Siebel W, Günther A, Scheuber E. 2002. Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in north Chile (21°–26°S). J Geophys Res, 107: B1

Hollings P, Cooke D R, Clark A. 2006. Regional geochemistry of Tertiary igneous rocks in central Chile: Implications for the geodynamic environment of giant porphyry copper and epithermal gold mineralization. Econ Geol, 100: 887–904

Hollings P, Cooke D R, Waters P J, Cousens B. 2011. Igneous geochemistry of mineralized rocks of the Baguio district, Philippines: Implications for tectonic evolution and the genesis of porphyry-style mineralization. Econ Geol, 106: 1317–1333

Hou Z Q, Pan X F, Li Q Y, Yang Z M, Song Y C. 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

Hsu Y J, Zajacz Z, Ulmer P, Heinrich C A. 2017. Copper partitioning between silicate melts and amphibole: Experimental insight into magma evolution leading to porphyry copper ore formation. Chem Geol, 448: 151–163

Huo H L, Zhang D, Chen Z L, Di Y J, He X L, Li N, Hu B J. 2022. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Zhuxi Granites in the Jingdezhen Area, Jiangxi Province, China: Implications for the Mesozoic tectonic development of South China. Minerals, 12: 283

Jiang C Y, Liu P, Gleeson S A, Bao Z A, Li C, Mathur R, Ouyang Y P, Lv N, Mao J W, Yuan H L. 2024. Ore genesis of the Tieshajie Cu deposit: Implications for Cu mineralization in the Qin-Hang metallogenic belt, South China. Ore Geol Rev, 164: 105846

Kay R W, Kay S M. 2002. Andean adakites: Three ways to make them. Acta Petrol Sin, 18: 303–311

Lee C T A, Luffi P, Chin E J, Bouchet R, Dasgupta R, Morton D M, Le Roux V, Yin Q Z, Jin D. 2012. Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation. Science, 336: 64–68

Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Vasconcelos P, Ma C Q, Deng X D, de Souza Z S, Zhao Y X, Wu G. 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze Craton, Eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. Miner Depos, 43: 315–336

Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Ma C Q, de Souza Z S, Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. Contrib Miner Petrol, 157: 383–409

Li J W, Deng X D, Zhou M F, Liu Y S, Zhao X F, Guo J L. 2010. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China. Chem Geol, 270: 56–67

Li J W, Vasconcelos P M, Zhou M F, Deng X D, Cohen B, Bi S J, Zhao X F, Selby D. 2014. Longevity of magmatic-hydrothermal systems in the Daye Cu-Fe-Au district, eastern China with implications for mineral exploration. Ore Geol Rev, 57: 375–392

Li J, Li X, Xiao R. 2019. Multiple-stage tungsten mineralization in the Silurian Jiepai W skarn deposit, South China: Insights from cathodoluminescence images, trace elements, and fluid inclusions of scheelite. J Asian Earth Sci, 181: 103898

Li L M, Lin S F, Xing G F, Davis D W, Jiang Y, Davis W, Zhang Y J. 2016. Ca. 830 Ma back-arc type volcanic rocks in the eastern part of the Jiangnan orogen: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of South China Block. Precambrian Res, 275: 209–224

Li X H, Li W X, Wang X C, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, Gao Y Y, Wu F Y. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River metallogenic belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension. Lithos, 119: 427–438

Li X H, Li Z X, Li W X, Wang X C, Gao Y. 2013. Revisiting the "C-type adakites" of the Lower Yangtze River belt, central eastern China: *In-situ* zircon Hf-O isotope and geochemical constraints. Chem Geol, 345: 1–15

Li Y, Yuan F, Jowitt S M, Wang F Y, Li X H, Deng Y F, Zhou T F. 2021. Molybdenite Re-Os, titanite and garnet U-Pb dating of the Magushan skarn Cu-Mo deposit, Xuancheng district, Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt. Geosci Front, 12: 101116

Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. Geology, 35: 179

Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y, Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze River belt, Eastern China. Econ Geol, 104: 303–321

Ling M X, Wang F Y, Ding X, Zhou J B, Sun W. 2010. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River belt, eastern China: Geochemical constraints. Int Geol Rev, 53: 727–740

Liu S A, Li S, He Y, Huang F. 2010. Geochemical contrasts between early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China: Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization. Geochim Cosmochim Acta, 74: 7160–7178

Liu W H, Jiang M R, Zhang X J, Xia Y, Algeo T J, Li H. 2018. An evolving magmatic-hydrothermal system in the formation of the Mesozoic Meishan magnetite-apatite deposit in the Ningwu volcanic basin, eastern China. J Asian Earth Sci, 158: 1–17

Liu X, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Li Q L, Yang Y H, Liu Y S. 2012. Remelting of Neoproterozoic relict volcanic arcs in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, Southeastern China. Lithos, 150: 85–100

Loucks R R, Fiorentini M L, Henríquez G J. 2020. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. J Petrol, 61: egaa034

Lü Q T, Meng G X, Zhang K, Liu Z D, Yan J Y, Shi D N, Han J G, Gong X J. 2021. The lithospheric architecture of the Lower Yangtze metallogenic belt, East China: Insights into an extensive Fe-Cu mineral system. Ore Geol Rev, 132: 103989

Lu Y J, Loucks R R, Fiorentini M, McCuaig T C, Evans N J, Yang Z M, Hou Z Q, Kirkland C L, Parra-Avila L A, Kobussen A. 2016. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu±Mo±Au deposits. In: Richards J, ed. Society of Economic Geologists Special Publication No. 19 on Tethyan Tectonics and Metallogeny. Chapter: 13 Society of Economic Geologists. 329–347

Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. 2006. Adakites without

slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth Planet Sci Lett, 243: 581–593

Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. GSA Bull, 101: 635–643

Mao J W, Zhang J D, Pirajno F, Ishiyama D, Su H M, Guo C L, Chen Y C. 2011. Porphyry Cu-Au-Mo-epithermal Ag-Pb-Zn-distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi Province, east China—A linked ore system. Ore Geol Rev, 43: 203–216

Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. Miner Depos, 48: 267–294

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. Lithos, 286-287: 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 B, Chen M H. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China. Econ Geol, 22: 441–482

Mao J W, Zheng W, Xie G Q, Lehmann B, Goldfarb R. 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

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. Ore Geol Rev, 53: 422–433

Maulana A, Watanabe K, Imai A, Yonezu K. 2013. Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in Sulawesi, Indonesia: Magma genesis and regional metallogenic constraint. Procedia Earth Planet Sci, 6: 50–57

Meng X Y, Mao J W, Simon A, Duan C, Xie G Q, Su H M, Hou T, Shi K, Chen N. 2024. Contrasting tectonomagmatic conditions for coexisting iron oxide-apatite deposits and porphyry and skarn Cu ±Au deposits in the Middle-Lower Yangtze river metallogenic belt, China. Econ Geol, 119: 1059–1087

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Sci Rev, 37: 215–224

Moore G, Carmichael I S E. 1998. The hydrous phase equilibria (to 3 kbar) of an andesite and basaltic andesite from western Mexico: Constraints on water content and conditions of phenocryst growth. Contrib Mineral Petrol, 130: 304–319

Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. Geology, 30: 915

Nie L Q, Zhou T F, White N, Wang F Y, Song Y L. 2020. Zircon geochemistry of Edong granitoids in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt (Eastern China): Constraints on W-Cu-Fe skarn mineralization. Ore Geol Rev, 120: 103461

Pirajno F, Zhou T F. 2015. Intracontinental porphyry and porphyry-skarn mineral systems in eastern China: Scrutiny of a special case "Made-in-China". Econ Geol, 110: 603–629

Qi H S, Lu S M, Yang X Y, Zhao L L, Zhou Y Z, Deng J H, Li J S. 2020. Genesis of Cretaceous igneous rocks and its related large scale porphyry Cu-Au mineralization in Chating, the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt: The geochemical constrains. Ore Geol Rev, 127: 103793

Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. Chem Geol, 160: 335–356

Rapp R, Shimizu N, Norman M. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. Nature, 425: 605–609

Ren L, Bao Z W, Huang W T, Lin S P, Xie S X, Liao J, Li J, Liang H Y. 2020. Flat-slab subduction and formation of "intraplate" porphyry deposits: Insights from the Jurassic high and low La/Yb ore-forming porphyries along the Qin-Hang belt, South China. Ore Geol Rev, 123: 103574

Richards J P. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: Just add water. Econ Geol, 106: 1075–1081

Richards J P, López G P, Zhu J J, Creaser R A, Locock A J, Mumin A H. 2017. Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with Cretaceous porphyry Cu±Mo±Au and intrusion-related iron oxide Cu-Au deposits in northern Chile. Econ Geol, 112: 295–318

Smythe D J, Brenan J M. 2015. Cerium oxidation state in silicate melts: Combined fO_2, temperature and compositional effects. Geochim Cosmochim Acta, 170: 173–187

Song S W, Mao J W, Zhu Y F, Yao Z Y, Chen G H, Rao J F, Ouyang Y P. 2018. 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. Lithos, 304-307: 180–199

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. Lithos, 296-299: 365–381

Sun W A, Yuan F, Jowitt S M, Zhou T F, Hollings P, Liu G X, Li X H. 2017. Geochronology and geochemistry of the Fe ore-bearing Zhonggu intrusions of the Ningwu Basin: Implications for tectonic setting and contemporaneous Cu-Au mineralization in the Middle-

Lower Yangzte metallogenic belt. Ore Geol Rev, 84: 246–272

Tang M, Wang X L, Xu X S, Zhu C, Cheng T, Yu Y. 2012. Neoproterozoic subducted materials in the generation of Mesozoic Luzong volcanic rocks: Evidence from apatite geochemistry and Hf-Nd isotopic decoupling. Gondwana Res, 21: 266–280

Teixeira R J S, Neiva A M R, Gomes M E P, Corfu F, Cuesta A, Croudace I W. 2012. The role of fractional crystallization in the genesis of early syn-D3, tin-mineralized Variscan two-mica granites from the Carrazeda de Ansiães area, northern Portugal. Lithos, 153: 177–191

Wang F Y, Liu S A, Li S G, He Y S. 2013. Contrasting zircon Hf-O isotopes and trace elements between ore-bearing and ore-barren adakitic rocks in central-eastern China: Implications for genetic relation to Cu-Au mineralization. Lithos, 156-159: 97–111

Wang G G, Ni P, Zhao K D, Wang X L, Liu J Q, Jiang S Y, Chen H. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization. Lithos, 150: 135–154

Wang G G, Ni P, Yao J, Wang X L, Zhao K D, Zhu R Z, Xu Y F, Pan J Y, Li L, Zhang Y H. 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, Li L, Wang X L, Zhu A D, Zhang Y H, Zhang X, Zheng L, Li B. 2020. Petrogenesis of the Middle Jurassic andesitic dikes in the giant Dexing porphyry copper ore field, South China: Implications for mineralization. J Asian Earth Sci, 196: 104375

Wang L J, Lin S F, Xiao W J. 2023. Yangtze and Cathaysia blocks of South China: Their separate positions in Gondwana until early Paleozoic juxtaposition. Geology, 51: 723–727

Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L, Ma J L. 2006. Petrogenesis of Adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. J Petrol, 47: 119–144

Wang S W, Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Zhang L J, Song Y L. 2015. Petrogenesis of Dongguashan skarn-porphyry Cu-Au deposit related intrusion in the Tongling district, eastern China: Geochronological, mineralogical, geochemical and Hf isotopic evidence. Ore Geol Rev, 64: 53–70

Wang Y, Yang X Y, Deng J H, Liu S S, Sun C, Hou Q, Wang L J. 2021. A comprehensive overview on the origin of intrusive rocks and polymetallic mineralization in the Tongling ore-cluster region, lower Yangtze River metallogenic belt: Geological and geochemical constraints. Ore Geol Rev, 141: 104625

Xiao Q L, Zhou T F, Hollings P, Wang S W, Liu J, Yang Q G, Yuan F. 2021. Mineral and whole-rock chemistry of the Chating porphyry Cu-Au deposit related intrusions in the Middle-Lower Yangtze River belt, eastern China: Implications for magma evolution and mineralization. Lithos, 380-381: 105881

Xie G Q, Mao J W, Li R L, Bierlein F P. 2008. Geochemistry and Nd–Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle–Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 104: 216–230

Xie G Q, Mao J W, Li X W, Duan C, Yao L. 2011. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River belt (YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implications. Lithos, 127: 144–164

Xie J C, Yang X Y, Sun W D, Du J G. 2012. Early Cretaceous dioritic rocks in the Tongling region, eastern China: Implications for the tectonic settings. Lithos, 150: 49–61

Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? Geology, 30: 1111

Xu X C, Lu S M, Xie Q Q, Chu G Z, Xiong Y P. 2006. Rare earth element geochemistry on magmatic rocks and gold deposits in Shizishan ore-field of Tongling, China. J Rare Earths, 24: 617–625

Xu Y M, Jiang S Y, Zhu J X. 2021. Factors controlling the formation of large porphyry Cu deposits: A case study from the Jiurui ore district of Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt using in situ zircon and apatite chemistry from syn-mineralization intrusions. Ore Geol Rev, 133: 104082

Yan J Y, Lü Q T, Luo F, Cheng S B, Zhang K, Zhang Y Q, Xu Y, Zhang C, Liu Z D, Ruan S, Wang X. 2021. A gravity and magnetic study of lithospheric architecture and structures of South China with implications for the distribution of plutons and mineral systems of the main metallogenic belts. J Asian Earth Sci, 221: 104938

Yan J, Liu J M, Li Q Z, Xing G F, Liu X Q, Xie J C, Chu X Q, Chen Z H. 2015. *In situ* zircon Hf-O isotopic analyses of late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River belt, central eastern China: Implications for petrogenesis and geodynamic evolution. Lithos, 227: 57–76

Yang D, Lü Q T, Yang Z S, Yan J Y, Xiong X, Chen Y X. 2021. Zircon Hf-isotopic mapping of Middle-Lower Yangtze River valley metallogenic belt, China: Constraints on crustal properties and ore cluster formation. Lithos, 406-407: 106526

Yang X N, Xu Z W, Lu X C, Jiang S Y, Ling H F, Liu L G, Chen D Y. 2011. Porphyry and skarn Au-Cu deposits in the Shizishan orefield, Tongling, east China: U-Pb dating and *in-situ* Hf isotope analysis of zircons and petrogenesis of associated granitoids. Ore Geol Rev, 43: 182–193

Yang Y S, Pan X F, Hou Z Q, Deng Y, Zhang Z Y, Fan X K, Li X, Liu

D W. 2022. Petrogenesis and redox state of late Mesozoic granites in the Pingmiao deposit: Implications for the W-Cu-Mo mineralization in the Dahutang district. Ore Geol Rev, 145: 104898

Zhang C C, Sun W D, Wang J T, Zhang L P, Sun S J, Wu K. 2017. Oxygen fugacity and porphyry mineralization: A zircon perspective of Dexing porphyry Cu deposit, China. Geochim Cosmochim Acta, 206: 343–363

Zhang H, Ling M X, Liu Y L, Tu X L, Wang F Y, Li C Y, Liang H Y, Yang X Y, Arndt N T, Sun W D. 2013. High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry copper deposits, southeastern China. J Geol, 121: 289–305

Zhang J D, Liu L, Yu Z Q, Yang X Y, Liu Z F, Li H. 2021. Petrogenesis and metallogeny of the Dongguashan Cu-Au deposit in the Tongling ore-cluster region, the Lower Yangtze River metallogenic belt: Constraints from geochemistry and geochronology. Geochemistry, 81: 125822

Zhang K, Lü Q T, Lan X Y, Guo D, Wang Q N, Yan J Y, Zhao J H. 2021. Magnetotelluric evidence for crustal decoupling: Insights into tectonic controls on the magmatic mineral system in the Nanling-Xuancheng area, SE China. Ore Geol Rev, 131: 104045

Zhang L J, Zhou T F, Yuan F, Fan Y, Cooke D R. 2011. Petrogenetic-metallogenetic setting and temporal-spatial framework of the Yueshan district, Anhui Province, east-central China. Int Geol Rev, 53: 542–561

Zhang W, Jiang S Y, Gao T S, Ouyang Y P, Zhang D. 2020. The effect of magma differentiation and degassing on ore metal enrichment during the formation of the world-class Zhuxi W-Cu skarn deposit: Evidence from U-Pb ages, Hf isotopes and trace elements of zircon, and whole-rock geochemistry. Ore Geol Rev, 127: 103801

Zhang W, Jiang S Y, Ouyang Y P, Zhang D. 2021. Geochronology and textural and compositional complexity of apatite from the mineralization-related granites in the world-class Zhuxi W-Cu skarn deposit: A record of magma evolution and W enrichment in the magmatic system. Ore Geol Rev, 128: 103885

Zhang X, Ni P, Wang G G, Jiang Y H, Jiang D S, Li S N, Fan M S. 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 Y Q, Lü Q T, Shi D N, Yang Y J, Afonso J C, Xu Y, Yan J Y, Gong X J, Xu T. 2023. The crustal and uppermost mantle V_S structure of the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt: Implications for metallogenic process. J Geophys Res-Solid Earth, 128: e2023JB026817

Zhang Z Y, Hou Z Q, Lü Q T, Zhang X W, Pan X F, Fan X K, Zhang Y Q, Wang C G, Lü Y J. 2023. Crustal architectural controls on critical metal ore systems in South China based on Hf isotopic mapping. Geology, 51: 738–742

Zheng Y F, Mao J W, Chen Y J, Sun W D, Ni P, Yang X Y. 2019. Hydrothermal ore deposits in collisional orogens. Sci Bull, 64: 205–212

Zhou Q, Jiang Y H, Zhao P, Liao S Y, Jin G D, Liu Z, Jia R Y. 2012a. SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircons: Evidence for an early Cretaceous epithermal event in the middle Jurassic Dexing porphyry copper deposit, southeast China. Econ Geol, 107: 1507–1514

Zhou Q, Jiang Y H, Zhao P, Liao S Y, Jin G D. 2012b. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: Elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. Int Geol Rev, 54: 572–592

Zhou Q, Jiang Y H, Zhang H H, Liao S Y, Jin G D, Zhao P, Jia R Y, Liu Z. 2012c. Mantle origin of the Dexing porphyry copper deposit, SE China. Int Geol Rev, 55: 337–349

Zhou T F, Wang S W, Fan Y, Yuan F, Zhang D Y, White N C. 2015. A review of the intracontinental porphyry deposits in the Middle-Lower Yangtze River valley metallogenic belt, Eastern China. Ore Geol Rev, 65: 433–456

(责任编委: 王汝成)