

浅论湘东北地区与燕山期花岗岩有关矿床的 成矿系列与找矿方向

陈剑锋^{1, 3, 4)}, 黄建中²⁾, 文春华^{1)*}, 张锦煦¹⁾, 彭薇¹⁾,
李胜苗¹⁾, 曹创华¹⁾, 安江华¹⁾

1)湖南省地质调查所, 湖南长沙 410116; 2)湖南省地质院, 湖南长沙 410014;
3)湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南长沙 410116;
4)中南大学, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083

摘要: 湘东北地区是华南重要的 Au、Cu、Co、Pb、Zn、W 等多金属以及 Nb、Ta、Li 等稀有金属的矿集区之一, 区内的(稀有)多金属矿床在空间展布及形成时间上显示与燕山期花岗岩关系密切。本文在系统梳理前人研究成果的基础上, 将湘东北地区燕山期花岗岩有关的(稀有)多金属矿床厘定为一个成矿系列以及 6 个成矿亚系列。与早燕山期侵入岩有关的铜多金属矿床成矿亚系列(I)的成矿岩体为石英斑岩, 为壳幔同熔的产物。与晚燕山期侵入岩有关的各成矿亚系列(II~VI)均与该区伸展拉张环境下深部地壳重熔形成的幕阜山和连云山花岗岩体有关, 其中铌钽等稀有金属成矿亚系列(II)属二云母二长花岗岩分异出的伟晶岩型矿床; 幕阜山岩体的酸性花岗岩岩浆所分异的成矿流体为钨多金属成矿亚系列(III)和铅锌多金属矿床(亚系列IV)提供了成矿物源; 连云山岩体花岗岩浆的上涌, 通过萃取元古宙地层中成矿元素以及致早期区域构造的重新活化, 为钴铜多金属成矿亚系列(V)以及金多金属成矿亚系列(VI)提供了成矿物源及矿质的运移、储存空间。依据区域成矿规律和“缺位找矿”理论, 本文认为长平大断裂南端是寻找钴铜矿的有利地段, 湘东北地区具备良好的稀有金属及金等矿床的找矿前景。

关键词: 多金属矿床; 成矿系列; 找矿方向; 燕山期花岗岩; 湘东北地区

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.012901

A Preliminary Study of Metallogenic Series and Its Prospecting Direction Related to Yanshannian Granites in Northeastern of Hunan Province

CHEN Jian-feng^{1, 3, 4)}, HUANG Jian-zhong²⁾, WEN Chun-hua^{1)*}, ZHANG Jin-xu¹⁾,
PENG Wei¹⁾, LI Sheng-miao¹⁾, CAO Chuang-hua¹⁾, AN Jiang-hua¹⁾

1) Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410116;

2) Geological Bureau of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014;

3) Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan, Changsha, Hunan 410116;

4) Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring
of Ministry of Education, Central South University, Changsha, Hunan 410083

Abstract: The northeastern Hunan Province is an important area of polymetallic (Au, Cu, Co, Pb, Zn, W) and rare-metal (Nb, Ta, Li) ore concentration in South China. The spatio-temporal distribution of polymetallic deposits and Yanshannian granites shows that the mineralization in the study area has a genetic relationship with granitoids. Based on previous studies, we hypothesize that these deposits belong to a single metallogenic

本文由湖南省地质院科研项目(编号: HNGSTP202306; HNGSTP202302; HNGSTP202105)、中国地质调查局二级项目(编号: DD20230055; DD20221695-16)、湖南省重点领域研发计划资助项目(编号: 2019SK2261)和湖南省自然资源厅科技计划项目(编号: 20230102DZ)联合资助。

收稿日期: 2022-11-01; 改回日期: 2023-01-25; 网络首发日期: 2023-01-31。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 陈剑锋, 男, 1985 年生。博士, 高级工程师。主要从事地质找矿及矿床学研究。E-mail: chenjianfeng021041@163.com。

*通讯作者: 文春华, 男, 1982 年生。博士, 正高级工程师。主要从事战略性矿产综合研究。E-mail: herowch2004@163.com。

series: the polymetallic (rare-metal) ore-deposit minerogenetic series related to the Yanshannian intrusion, which can be subdivided into six subseries of ore deposits. The Cu polymetallic deposit subseries (I) associated with Early Yanshannian intrusive rocks, which is genetic related to quartz porphyry originated from Mantle-Crust interaction. The others deposit subseries (II–VI) associated with Late Yanshannian intrusive rocks, are genetic related to Lianyunshan and Mufushan granitic batholith, which derived from partial melting of metasedimentary basement in an extensional tectonic setting. The Li-Nb-Ta rare-metal deposit subseries (II) is pegmatite-type deposit formed by differentiation of two-mica monzogranite. The ore metals of the W polymetallic deposit subseries (III) and Pb-Zn polymetallic deposit subseries (IV) were directly derived from the Mufushan granites. The ore-forming material extracted from basement and tectonic reactivated when magma upwelling in the Lianyunshan area, supplied ore metals and migration channels for Co-Cu polymetallic deposit subseries (V) and Au polymetallic deposit subseries (VI). Based on regional metallogenetic and “absence prospecting” theories, this paper argues that the southern region of Changsha-Pingjiang fault has excellent prospecting for Co-Cu deposits, and the northeastern of Hunan Province showing good Au and rare-metal searching prospects.

Key words: polymetal deposit; metallogenic series; prospecting direction; Yanshannian granites; northeastern of Hunan province

湘东北地区因作为华南重要的金、铅锌、铜、钴等多金属矿床的聚集地之一而长期受到地质工作者的关注,如区内已发现的黄金洞、大万等大型-超大型金矿床(毛景文等, 1997; Deng et al., 2017, 2020; Zhang et al., 2018, 2020; 周岳强等, 2021)、桃林和栗山等大型铅锌矿床(张鲲鹏等, 2017; 郭飞等, 2018, 2020; Yu et al., 2020, 2021)、虎形山大型钨矿床、七宝山铜多金属矿床(胡俊良等, 2015; 杨荣等, 2015; Yuan et al., 2018; Xu et al., 2020)以及井冲和横洞等钴(铜)多金属矿床(易祖水等, 2010; Wang et al., 2017, 2022; Zou et al., 2018)等表明该区为一成矿类型多样、找矿前景巨大的多金属成矿区。随着近年该区找矿工作的持续推进,在幕阜山—连云山地区仁里、断峰山、白沙窝等一批超大型-大型伟晶岩型 Nb-Ta-(Li)矿床的发现(刘翔等, 2019; 祝明明等, 2021; Wen et al., 2021),该区也成为了华南稀有金属矿床研究的热点。

在空间上,湘东北地区各类型的(稀有)多金属矿床主要分布于燕山期花岗岩岩体内外接触带或周缘,暗示该区成矿作用与燕山期花岗岩类关系密切(Mao et al., 2002; 贺转利等, 2004),因此,准确厘定湘东北地区燕山期花岗岩相关金属矿床的成矿系列,分析区域的成矿规律十分必要。本文以成矿系列理论为指导,在梳理该区燕山期花岗岩相关的典型多金属矿床的找矿与研究成果基础上,总结了钨、铜、钴、铅锌、金、稀有金属等矿床的地质特征、控矿因素、成矿物源及时空分布规律,初步划分了燕山期花岗岩的成矿系列与亚系列,以期对该区燕山期多金属矿床成矿作用的研究及区域找矿勘查工作提供借鉴和参考。

1 区域地质背景

湘东北地区位于江南造山带的中段,该区先后

经历了华夏板块与扬子板块的碰撞拼合(Shu et al., 2011)、新元古代与早古生代两板块先后发生裂解后的再次聚合和碰撞(Faure et al., 2009; Wang et al., 2010; Li et al., 2010)、晚古生代到早中生代的造山活动(Wang et al., 2005; Li and Li, 2007; Chu and Lin, 2014)、以及晚中生代太平洋板块向欧亚大陆边缘俯冲碰撞后的回撤作用所导致的包括该区在内的华南地壳发生伸展作用(Wang et al., 2003; 张岳桥等, 2012; Li et al., 2013, 2016)等,受这一系列的重大地质事件特别是燕山期构造-岩浆活动的影响,孕育了该区大规模(稀有)多金属矿床的成矿作用。

区内广泛出露的新元古代冷家溪群是该区的基底岩石(图 1),为一套灰色、灰绿色粉砂质板岩、绢云母泥质板岩、岩屑杂砂岩,局部夹火山岩,原岩主要为粉砂岩和泥岩,总厚 6 700~10 127 m(高林志等, 2011; 杨雪等, 2020);震旦—志留系分布于北东部一带,岩性为碳酸盐、砂岩、粉砂岩;泥盆—侏罗系局部出露于南部,岩性以灰岩、砂岩为主;区内西北部洞庭湖区域主要为第四系砂砾石层、黏土层覆盖。

受区域板块多次活动的影响,区内发育有大量褶皱、断裂和韧性剪切带等的构造组合。其中 NNE—NE 向区域深大断裂为区内最重要的构造,以长沙—平江、新宁—灰汤断裂为例,断裂两盘分别为白垩系盆地与前白垩纪地层,形成典型的盆-岭构造结构体系(Xu et al., 2017),同时区域深大断裂被认为是形成于加里东期且长期活动(至燕山期)的断裂构造(Li et al., 2013; Xu et al., 2017),具有切割早期形成的 NWW—EW 向褶皱及韧性剪切带的特征。

区内岩浆岩十分发育(图 1),新元古代花岗岩主要呈岩株状出露于幕阜山岩体西(南)部一带,其形成年龄为 840~810 Ma(陕亮等, 2017; Deng et al.,

2019; 陈旭等, 2023)。燕山期花岗岩体如幕阜山、连云山、望湘、金井、长乐街、桃花山、小墨山等岩体侵入于新元古界冷家溪群中, 其中幕阜山岩体呈北西向展布, 出露面积约 2 400 km², 整体岩性随中酸性向酸性演化(表 1), 从花岗闪长岩(151~149 Ma)、黑云母二长花岗岩(154~136 Ma)、二云母二长花岗岩(146~127 Ma)的年龄具有逐渐趋于年轻的特点, 此外, 幕阜山岩体内的伟晶岩年龄(140~130 Ma)稍晚于花岗岩年龄, 花岗岩类锆石的 Hf 同位素组成相近, 显示物源主要为壳源的特征(Wang et al., 2014; Ji et al., 2017), 而虎形山矿区的隐伏花岗岩以及栗山矿区的花岗岩中可能有少量幔源物质的混入(张鲲鹏, 2017; 陕亮, 2019; Xu et al., 2020)。连云山岩体位于长沙—平江大断裂的南西侧, 其走向大致平行于断裂产出。岩性包括有黑云母二长花岗岩(150~149 Ma)、二云母二长花岗岩(152~142 Ma)和白云母二长花岗岩(140 Ma), 其物

源主要为区域加厚地壳岩石的部分熔融(许德如等, 2017; 张鲲鹏, 2019)。望湘岩体除印支期的花岗岩组成外, 燕山期花岗岩的岩性主要为二云母二长花岗岩(147~146 Ma), 岩浆物源为地壳物质的重熔(Ji et al., 2017)。研究区最南端的七宝山石英斑岩脉形成年龄为 151~148 Ma, 其形成物源具有古老地壳重熔(70%~80%)和地幔物质(20%~30%)加入(Yuan et al., 2018)的特征。桃花山岩体(129~128 Ma)和小墨山岩体(118 Ma)位于该区的北西端, 其中桃花山岩体的源岩为古元古代的基底(王连训等, 2008; Ji et al., 2017); 软流圈地幔的底侵致基底地层的重熔, 壳幔物质的混合则构成了小墨山岩体的物质来源(王连训等, 2008)。

2 成矿系列

成矿系列理论的创立(程裕淇等, 1979, 1983; 陈毓川, 1994)对区域成矿规律的研究与找矿勘查

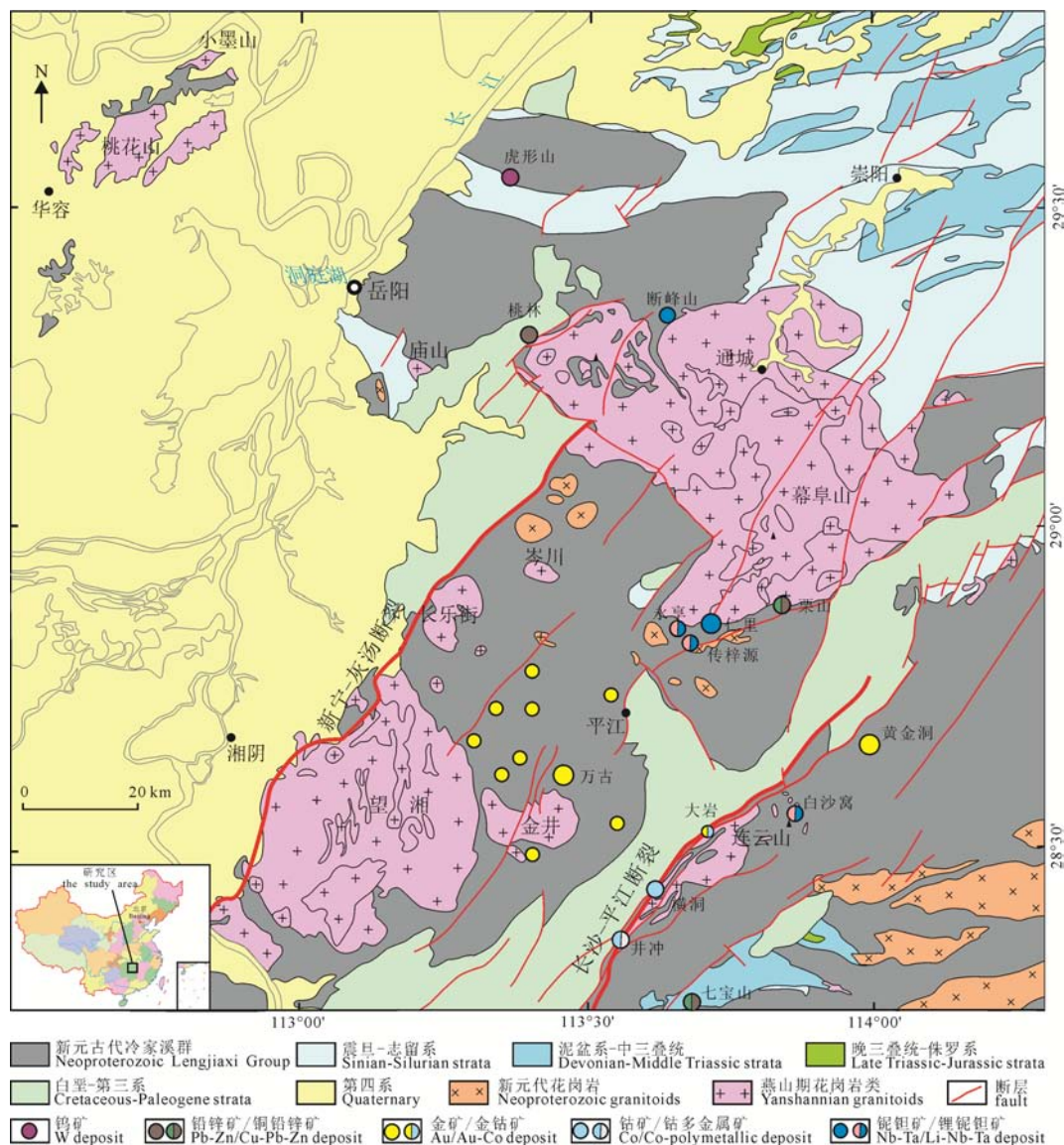


图 1 湘东北及邻区地质矿产简图(据 Ji et al., 2017 修改)

Fig. 1 Geological map of the northeastern Hunan Province and adjacent areas (modified from Ji et al., 2017)

表 1 湘东北地区燕山期花岗(伟晶)岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素值统计表
Table 1 The zircon U-Pb age and Hf isotopic values of granites and pegmatites from northeastern of Hunan Province

岩体	岩石类型	矿区	年龄/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}2}/\text{Ga}$	文献来源
幕阜山	花岗闪长岩		151.5±1.3	-7.7~-4		Wang et al., 2014
			149.0±1.0	-8.6~-5.6	1.55~1.75	
	黑云母二长花岗岩		151.2±1.1	-8.5~-4.7	1.50~1.74	Ji et al., 2017
			151.4±1.1	-7.3~-4.3	1.47~1.66	
		桃林	148.3±1.4	-7.7~-4		Wang et al., 2014
			136±0.8	-6.8~-4.0	1.38~1.63	
			154.1±2.5			
			146.2±0.2	-10.8~-5.3,	1.54~1.88	
	二云母二长花岗岩	仁里	145.8±0.9	-7.7~-4.0		Wang et al., 2014
			143.5±1.8			
		虎形山	127.0±1.4	-9.6~-6.2	1.58~1.79	Ji et al., 2017
			131.8±1.5	-7.9~-3.6	1.42~1.69	
			137.8±0.5	-16.2~-6.6	0.74~2.18	
			131.9±1.1	-5.9~-2.4	1.33~1.55	
		仁里	141.0±1.2			刘翔等, 2019
			138.3±0.3	-5.5~-9.1	1.53~1.78	
			141.5±0.8	-8.7~-7.6,	1.68~1.73	
			131.2±2.4	-8.3~-6.6,	1.68~1.73	
连云山	微斜长石伟晶岩		134.5±0.8	-9.2~-4.2	1.56~1.74	Chen et al., 2023
	微斜长石钠长石伟晶岩					
	钠长石伟晶岩					
	黑云母二长花岗岩		150.2±2.5	-17.0~-2.6	1.4~1.8	Wang et al., 2016
			149.0±1.4	-6.9~-3.7	1.44~1.64	Ji et al., 2017
	二云母二长花岗岩		150.4±1.7	-12.4~-8.5	1.74~1.98	Wang et al., 2016
			152.9±2.5	-17.0~-2.6	1.4~1.8	
		井冲	145±1			许德如等, 2017
			142±2			
			149.4±1.1	-13.0~-7.8	1.69~2.02	
			149.5±1.2	-10.0~-8.0	1.70~1.90	
	白云母二长花岗岩	白沙窝	147.5±1.6	-14.1~-8.0	1.70~2.08	Wen et al., 2021
	二云母二长花岗岩		139.6±1.0	-10.9~-6.4	1.6~1.9	Wang et al., 2016
			147.3±1.5	-12.5~-6.4	1.61~1.99	
望湘	二云母二长花岗岩		146.0±1.4	-11.6~-5.9	1.57~1.93	Ji et al., 2017
桃花山	黑云母二长花岗岩		128.0±1.0	-10.1~-6.9	1.62~1.82	王连训等, 2008
	二云母二长花岗岩		129.4±1.1			
小墨山	黑云母二长花岗岩		117.4±1.0			胡俊良等, 2015
			154.8±1.8	-19.8~-4.9	1.52~2.45	
			152.9±1.3			
			154.8±2.1			
			148.33±0.95	-14.8~-5.5	1.6~1.9	
七宝山	石英斑岩	七宝山	151.4±0.94	-11.8~-7.6	1.6~1.9	Yuan et al., 2018

工作具有重要指导作用(陈毓川等, 2006, 2007, 2015, 2020, 2022; 唐菊兴等, 2014; 王登红等, 2011, 2020; 赵正等, 2022)。矿床的成矿系列是指一定的地质构造单元和一定的地质历史发展阶段, 与一定的成矿作用有关、在不同成矿阶段(期)和不同地质构造部位形成的不同矿种和不同类型, 但具有成因联系的一组矿床的自然组合(陈毓川等, 2006)。

本文在前人研究成果的基础上, 通过对湘东北地区典型矿床进行剖析, 总结该区的成矿地质条件, 依据成矿系列的理论, 认为湘东北地区可划分 1 个矿床成矿系列和 6 个矿床成矿亚系列: 即与燕山期

侵入岩有关的钨、铜、钴、铅锌、金、稀有等多金属成矿系列, 与燕山早期侵入岩有关的铜多金属成矿亚系列(I)、与燕山晚期侵入岩有关的锂铌钽等稀有金属成矿亚系列(II)、与燕山晚期侵入岩有关的钨多金属成矿亚系列(III)、与燕山晚期侵入岩有关的铅锌多金属成矿亚系列(IV)、与燕山晚期侵入岩有关的钴铜多金属成矿亚系列(V)和与燕山晚期侵入岩有关的金多金属成矿亚系列(VI)。

2.1 与燕山早期侵入岩有关的铜多金属矿床成矿亚系列(I)

目前在区内已发现的与燕山早期侵入岩有关

金属矿床仅为七宝山铜多金属矿床, 该矿床为湖南省探明储量最大的铜矿床, 位于研究区的最南端(图 1), 矿区出露的地层主要有新元古界青白口系冷家溪群、下震旦统莲沱组、下石炭统大塘组以及中上石炭统壶天群(图 2)。矿区总体表现为一倒转向斜, 具多期活动特征的近东西向区域性大断裂古港—横山断裂(F_1)从矿区中南部通过, 该断裂破碎带宽 200~300 m, 倾向南, 倾角 60° 左右, 致矿区壶天群与冷家溪群呈断层接触, 也是矿区主要赋矿构造。此外, 北西西向断层(F_2)发育在矿区北缘, 走向 290° 左右。七宝山石英斑岩岩株出露于矿区中部, 与壶天群呈侵入接触关系, 岩株形态大致平行于 F_1 断裂呈东西向延展, 出露面积约 2 km^2 (陕亮, 2019)。

矿床内围绕石英斑岩岩体为中心共发现有 200 余个矿体, 自西向东分布于老虎口、大七宝山、鸡公湾、江家湾等四个矿段, 矿体大部分隐伏, 绝大多数分布在以石英斑岩为侵入中心的 1 km 范围内, 矿体厚度呈现出远离岩体逐渐变薄直至尖灭的特征。矿床的成矿类型主要有斑岩型、矽卡岩型以及热液脉状充填型 3 类, 其中矽卡岩型是最主要的成矿类型, 矿体赋存于石英斑岩与中上石炭统壶天群的接触带中; 其次为斑岩型, 主要呈细脉浸染状矿体产于石英斑岩中。矿区矿石矿物主要为黄铜矿、磁铁矿、铁闪锌矿、黄铁矿, 次为磁黄铁矿、方铅矿等, 脉石矿物主要为方解石、石英、透闪石、阳起石、蛇纹石等(杨荣等, 2015)。

前人的研究获得矿区石英斑岩的锆石 U-Pb 年龄介于 148~155 Ma(胡俊良等, 2015, 2016; Yuan et al., 2018), 与矿区辉钼矿 Re-Os 年龄(152.7 ± 1.7 Ma,

Yuan et al., 2018)以及石英矿物的 Rb-Sr 定年结果(153.4 ± 2.0 Ma, 胡俊良等, 2017)相吻合, 同位素的证据指示矿床的形成与石英斑岩成岩过程密切相关(胡俊良等, 2017), 古老下地壳物质的部分熔融且有一定比例(20%~30%)的幔源物质(Yuan et al., 2018)参与所形成的深部岩浆, 在上侵过程中分异演化出含矿流体, 构成了该区的成岩成矿物源。

2.2 与燕山晚期侵入岩有关的锂铌钽等稀有金属成矿亚系列(II)

该成矿亚系列主要分布于幕阜山岩体和连云山岩体周缘, 包括幕阜山南部的仁里—传梓源锂铌钽稀有金属矿床、北部的断峰山钽铌矿床(湖北境内)以及连云山岩体北部的白沙窝锂铌钽矿床(图 1), 成矿类型均为伟晶岩型。

仁里—传梓源钽铌稀有金属矿区位于幕阜山岩体南缘(图 3)。湖南省核工业局 311 大队在仁里矿区普查阶段所探获的 Ta_2O_5 和 Nb_2O_5 资源量分别为 10 791 t(平均品位 0.036%)和 14 057 t(平均品位 0.047%)(刘翔等, 2018)显示其为一超大型钽铌矿床, 同时该区也具备寻找大型锂矿床的潜力(黄建中等, 2022), 矿区出露地层较单一, 为新元古界青白口系冷家溪群云母片岩, 冷家溪群分布于矿区南部, 与幕阜山岩体呈侵入接触关系; 此外少量第四系砂砾石层呈条带状沿矿区河流阶地覆盖在岩体及冷家溪群片岩之上。矿区断裂主要呈北北东向—北东向。

幕阜山岩体燕山期粗中粒斑状黑云母二长花岗岩分布于矿区北部, 与地层接触处显示出片麻状构造的特征; 二云母二长花岗岩分布于矿区北东部(图 3); 另矿区还可见中细粒白云母二长花岗岩

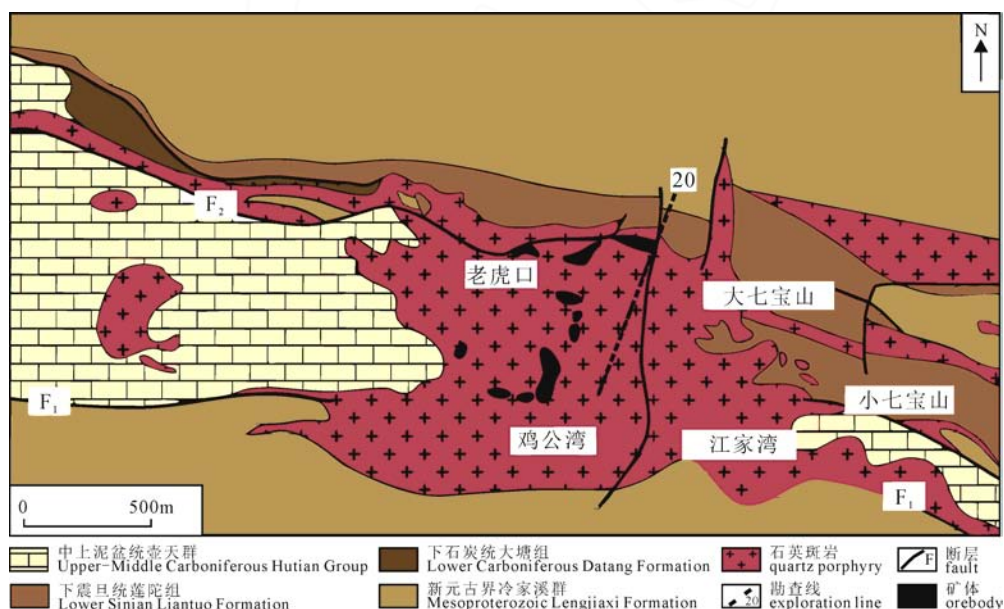


图 2 七宝山铜多金属矿区地质简图(据 Yuan et al., 2018 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Qibaoshan Cu polymetallic deposit (modified from Yuan et al., 2018)

呈小岩株侵入(Xiong et al., 2020)。雪峰期三墩、钟洞及梅仙花岗岩体分布于矿区南部, 主要岩性为中粒黑云母闪长花岗岩(图 3)。

区内伟晶岩脉十分发育, 产于幕阜山岩体内部及外围的冷家溪群地层内, 其中含矿伟晶岩脉基本产于冷家溪群片岩内, 大多数岩脉产状与矿区冷家溪群片理产状基本一致, 整体走向北西, 倾向南西。伟晶岩脉表现为由岩体边缘向外围, 长石类型以钾长石为主逐渐转为以钠长石为主(图 3)。分布于岩体附近冷家溪群中的伟晶岩类型为钠长石-微斜长石伟晶岩, 矿区的铌钽矿主要分布在这类伟晶岩脉的 2、3、5、6 号矿脉中, 其中 5 号与 2 号伟晶岩矿脉的 Ta_2O_5 资源量分别占整个矿区 Ta_2O_5 资源量的 67% 和 17%; 而矿区的含锂伟晶岩为距岩体较远的钠长石伟晶岩(图 3)。整体上, 在区内从岩体内部往南经岩体边缘至稍远离岩体, 伟晶岩中成矿组合呈 $Be \rightarrow Be$ 、 Nb 、 $Ta \rightarrow Li$ 、 Be 、 Nb 、 Ta 过渡演化的特征(陈剑锋等, 2022; Chen et al., 2023), 且在地表以锂矿化为主的伟晶岩脉往往具有在深部转化为以铌钽矿化为主的特点(黄建中等, 2022)。

含矿伟晶岩的母岩为矿区的二云母二长花岗

岩(Li et al., 2021; 黄建中等, 2022), 矿区二云母花岗岩的形成年龄为 139~138 Ma(刘翔等, 2019; Li et al., 2020), 不同稀有金属矿化类型伟晶岩的年龄介于 140~130 Ma 之间(Li et al., 2020; Xiong et al., 2020; 周芳春等, 2020; 黄小强等, 2021; 张立平等, 2021; Chen et al., 2023), 伟晶岩的成岩成矿物源具有与矿区花岗岩一致的特征, 均来自冷家溪群基底的部分熔融(Li et al., 2020; 陈剑锋等, 2022)。幕阜山北面断峰山铌钽矿区具有在矿化特征、成岩成矿年龄等方面与仁里矿区相似的特点(祝明明等, 2021; 黄建中等, 2022)。

位于连云山岩体北东部的白沙窝稀有金属矿床中的锂铌钽矿化伟晶岩脉的成矿年龄~140 Ma(Wen et al., 2021), 晚于伟晶岩的母岩花岗岩(二云母二长花岗岩, (147 ± 1.6) Ma)的年龄。

2.3 与燕山晚期侵入岩有关的钨多金属矿床成矿亚系列(III)

研究区与燕山晚期侵入岩有关的钨多金属矿床成矿亚系列(III)代表性矿床为虎形山钨矿, 该钨矿床在行政区域上位于临湘市北部, 南距幕阜山岩体约 40 km(图 1), 矿区北部大面积为第四系所覆盖, 南部

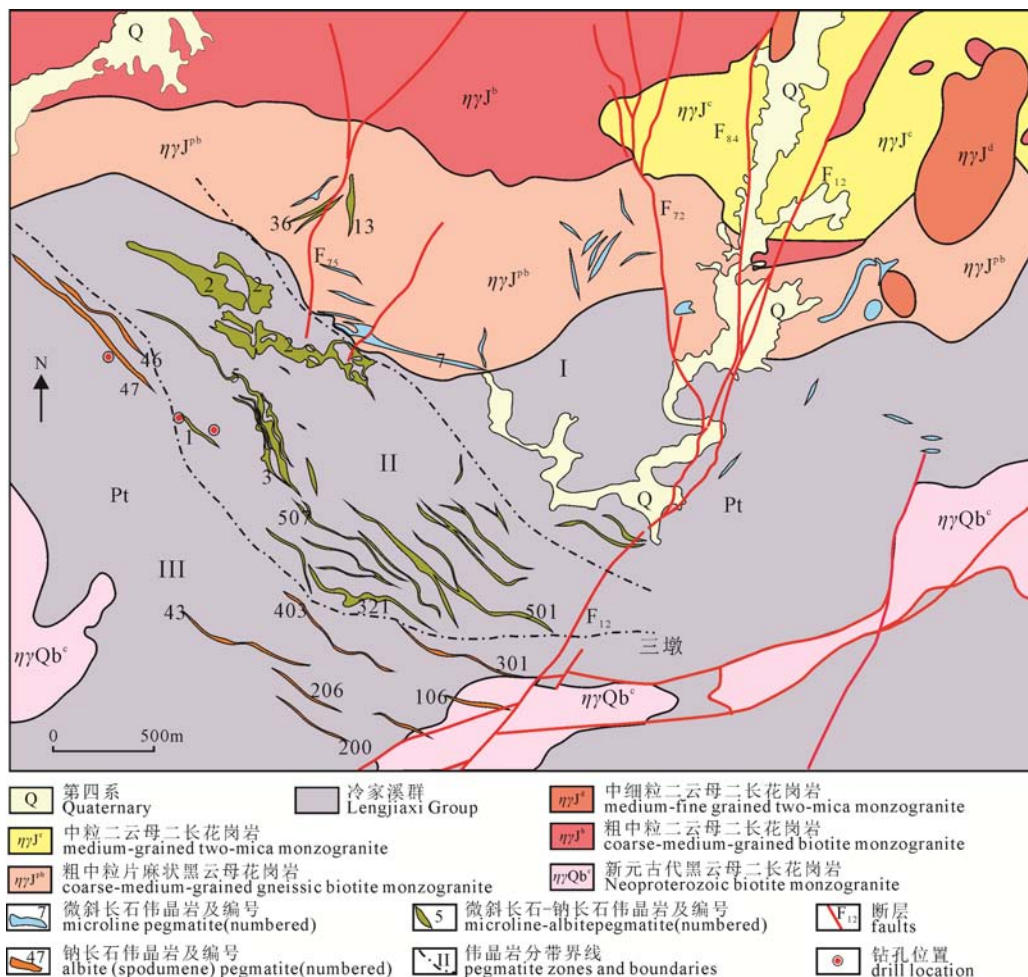


图 3 仁里—传梓源矿床地质简图(据李鹏等, 2017; 周芳春等, 2019)
Fig. 3 Geological map of the Renli-Chuanziyuan deposit (modified from LI et al., 2017; ZHOU et al., 2019)

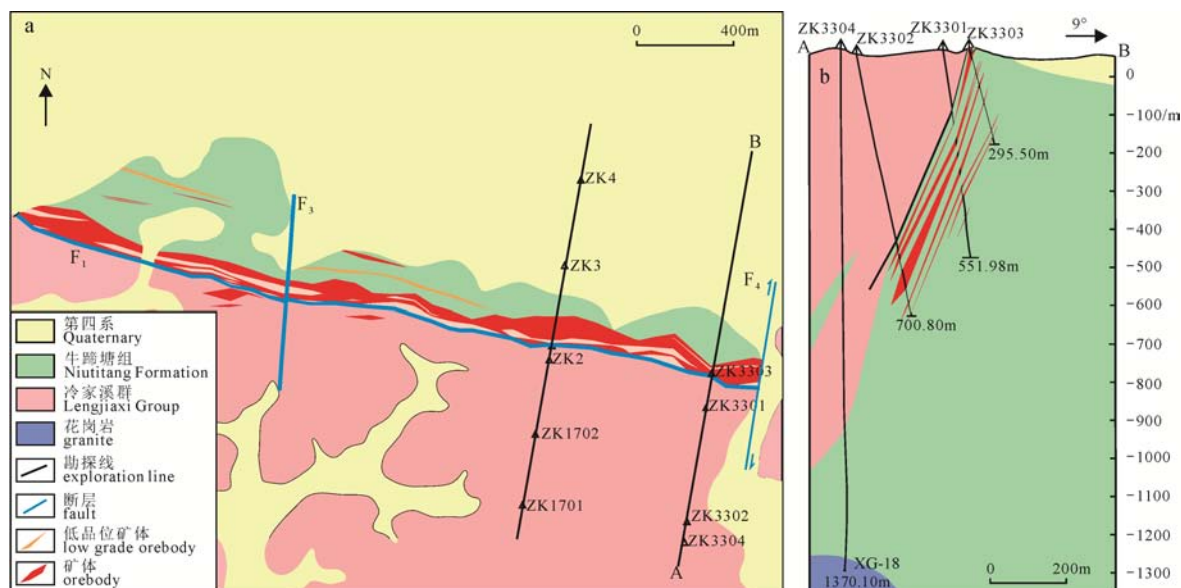


图4 虎形山钨矿区地质简图(a)和33线剖面图(b) (据 Xu et al., 2020 修改)

Fig. 4 Geological map(a) and geological cross-section of the Exploration Line 33(b) of the Huxingshan W deposit (modified from Xu et al., 2020)

出露的地层主要为新元古界青白口系冷家溪群以及下寒武统牛蹄塘组, 两者呈断层(F_1)不整合接触(图4a), 其中冷家溪群主要岩性组成为板岩、千枚岩以及变质凝灰质砂岩, 构成了 F_1 断层的上盘, 牛蹄塘组岩性主要为钙质板岩、泥质灰岩和白云质灰岩。

位于矿区中部的近东西向 F_1 号逆冲断裂控制了矿区的蚀变与矿化, 断裂及附近的地层内见有明显的硅化、云英岩化、黄铁矿化和绢云母化, 断裂中见有宽度小于 1 m 的小型花岗质岩脉, 此外, 矿区深孔 ZK3304 有揭露深部(1 250~1 370 m)的隐伏花岗岩体(图 4b), 其岩性为中粒二云母二长花岗岩。

矿区的钨矿脉主要以云英岩脉(石英-白钨矿-白云母)的形式赋存于 F_1 号断裂内及附近的牛蹄塘组地层内部, 钨矿脉产状平行于 F_1 号断裂产出, 走向近东西, 倾向南, 倾角多介于 $50^\circ \sim 85^\circ$ 之间。矿区内共圈定钨工业矿体 23 个, 主要矿体 5 个, 矿体厚度多介于 6~26 m, 沿走向长为 1 915~2 180 m, 沿倾向延深大多介于 470~640 m(图 4b), 矿体的 WO_3 平均品位为 0.12%~0.165%, 在普查阶段共探获 WO_3 金属资源量 16.3 万吨(Xu et al., 2020)。矿区内的矿石矿物主要为白钨矿, 其次为黑钨矿、绿柱石、辉钼矿、黄铁矿, 见少量黄铜矿、磁黄铁矿和方铅矿, 脉石矿物主要有方解石、白云石、石英、白云母等。

Xu et al.(2020)获得矿区与白钨矿共生石英矿物中流体的 Rb-Sr 等时线年龄为 (134 ± 2) Ma, 与矿区深部的二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄 (137.8 ± 0.5) Ma 相吻合, 认为矿床形成的物质来源于矿床深部花岗岩岩浆的分异, 同时锆石 Hf 同位

素的特征指示出花岗岩的物源主要来源于冷家溪群基底的部分熔融, 并伴有少量幔源物质的混入。虎形山大型钨矿床的成矿过程为该区壳幔相互作用, 致使冷家溪群基底部分熔融, 所形成的以壳源为主并含有少量幔源物质的岩浆, 在经历了高度分异演化后形成的富含 W 等矿质的流体, 沿矿区断裂运移充填所形成(Xu et al., 2020)。

2.4 与燕山晚期侵入岩有关的铅锌多金属矿床成矿亚系列(IV)

区内该成矿亚系列主要以幕阜山岩体北部外围的桃林铅锌矿以及南部的栗山铅锌铜多金属矿为代表。

栗山铅锌铜矿床位于幕阜山—望湘断隆带的北部, 矿区地层出露于南部, 为新元古界冷家溪群云母片岩, 此外, 中部局部见有第四系覆盖。矿区岩浆岩十分发育, 其中似斑状黑云母二长花岗岩和细粒花岗闪长岩分布于矿区西部局部地区, 中细粒二云母二长花岗岩大面积分布于矿区北部(图 5a), 另在矿区南部岩体与地层接触部位见发育有伟晶岩。矿区内断裂构造主要产于岩体内部及岩体与地层接触部位附近, 走向以近南北向为主, 其中 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 规模最大, 沿走向延伸几百米至一、两千米不等, 宽度介于 1~6.5 m, 断裂具有多期活动的特点, 其硅化蚀变强烈, 主要由热液石英及硅化构造角砾岩组成, 是矿区重要的含矿构造, 严格控制了各矿脉的产出(郭飞等, 2018)。

矿区内共发现铜铅锌矿脉共 11 条(图 5a), 在矿区探获铅锌矿资源量约 51 万吨, 铜约 5 万吨。矿体主要赋存于二云母二长花岗岩中

((131.9±1.1) Ma, 张鲲鹏等, 2017), 呈脉状充填于硅化破碎带中(图 5b), 与围岩界线清楚, 在走向上同样严格受断裂控制, 长 50~2 000 m, 平均约 700 m, 宽度为 0.3~5 m, 平均为 2 m 左右。矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿, 脉石矿物主要有石英、绿泥石和方解石。

该矿床的成矿流体主要来源于岩浆热液, 是在太平洋板块俯冲后回撤所引起的伸展构造背景下形成的与幕阜山岩体花岗岩岩浆热液有关的中温充填交代成因矿床(郭飞等, 2018, 2020), 矿床的成矿物质主要源于幕阜山花岗岩浆的分异, 花岗岩浆在上侵时混入有冷家溪群物质(Yu et al., 2021)。

与栗山铅锌多金属矿床相似, 位于幕阜山北部的桃林铅锌矿(铅锌资源量达 98 万吨), 为另一“与幕阜山花岗岩侵位相关的岩浆热液脉状充填-交代型铅-锌-铜多金属矿床”(陕亮, 2019), 矿区黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(136±0.8) Ma, 与闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄(135.4±2.6) Ma(陕亮, 2019)相吻合, 其成矿物质主要来源于幕阜山花岗岩浆的分异(Yu et al., 2020)。

2.5 与燕山晚期侵入岩有关的 Co-Cu 多金属矿床成矿亚系列(V)

该成矿亚系列分布于连云山岩体北西侧与地层接触带附近, 受长平断裂控制。其中钴金属资源量约有 1.6 万吨, 以浏阳井冲铜钴多金属矿床和平

江横洞钴铜矿床为代表, 矿床的矿体均赋存于长沙—平江断裂带下盘的构造蚀变带内, 成矿类型均以构造蚀变岩型为主(王智琳等, 2020), 其中井冲钴铜多金属矿床位于浏阳市社港镇, 连云山复式背斜西侧。矿区内构造以大致平行展布的 NNE 向断裂为主(图 6), 其中 F₂ 为长平断裂带的主干断裂, 与成矿关系密切。

矿区出露地层包括新元古界冷家溪群, 主要岩性为板岩、砂质板岩和千枚岩, 泥盆系跳马涧组(D₂t)、棋梓桥组(D₂q)和余田桥组(D₃s), 主要为砂质页岩、砾岩, 夹灰岩、泥灰岩和砂岩透镜体。受 F₂ 长平断裂带构造-岩浆作用的影响, 断裂上盘棋梓桥组发育有明显的挤压破碎带, 而下盘跳马涧组则发育有热液蚀变的构造角砾岩带, 构造角砾岩带构成了钴铜多金属矿体的赋存层位(图 6a, b)。白垩系紫红色厚层砂岩、砂砾岩及砾岩, 分布于矿区西部。连云山岩体出露于矿区东南部, 其岩性主要为二云母二长花岗岩、(似斑状)黑云母花岗岩和浅色花岗岩等, 岩体侵入于冷家溪群中, 两者接触部位发生强烈混合岩化, 形成宽 16~240 m 的混合岩带。此外, 矿区内还见有花岗斑岩脉产出。

在矿区内共圈出钴矿体 5 个、铜矿体 6 个、铅锌矿化体 4 个。矿体整体走向 NE, 倾向 NW, 倾角 36°~47°, 呈似层状或透镜状产出。其中铜、钴矿体产于热液蚀变构造角砾岩带的中下部, 铅锌矿体则分布

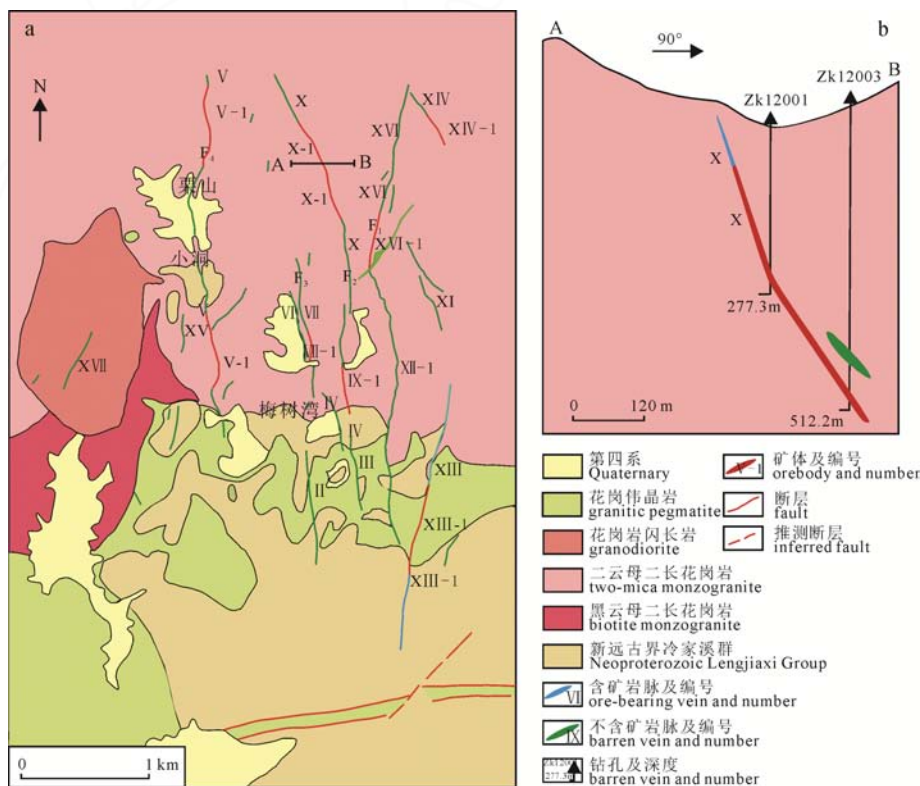


图 5 湘东北栗山铅锌铜多金属矿床矿区地质简图(a)和矿区第 120 勘探线剖面图(b)(据郭飞等, 2018 修改)
Fig. 5 Generalized geological map of the Lishan Pb-Zn deposit (a) and simplified exploration profile showing the occurrence of orebodies (b) (modified from GUO et al., 2018)

于上部(图 6b)。矿区矿石矿物包括黄铁矿、辉砷钴矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿, 及少量辉铜矿、斑铜矿等, 其中黄铁矿为矿区的主要含钴矿物之一, 脉石矿物以石英、绿泥石为主, 次为绢云母、方解石等。

前人的研究显示井冲铜钴矿床的形成与连云山岩体的侵入作用有关, 矿区二云母二长花岗岩的锆石年龄为~149 Ma(陕亮, 2019; 张鲲鹏等, 2019), 岩石来源于下地壳的部分熔融(张鲲鹏等, 2019), 其成矿年龄为(128.3±2.7) Ma(陕亮, 2019), 矿区黄铁矿具有超高的 Co/Ni 比值而明显区别于沉积成因黄铁矿(刘萌等, 2018), 且矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为-4.5‰~0.2‰(易祖水等, 2010), 显示矿床为岩浆热液成因, 其成矿流体主要来源于岩浆热液并混入有少量的变质水(Wang et al., 2017, 2022; Zou et al., 2018), 属于中温岩浆热液充填交代型铜-钴-铅-锌多金属矿床(刘萌等, 2018; 陕亮, 2019), 其成矿物质主要来源于元古宙基底地层连云山群, 由燕山晚期的岩浆热液在沿断裂运移过程中, 通过萃取基底地层中的 Cu、Co 等成矿元素在有利的构造部位沉淀成矿。

2.6 与燕山晚期侵入岩有关的多金属成矿亚系列(VI)

湘东北地区是华南重要的金成矿区, 前人关于区内金矿床的形成时代存在一定争议, 其成矿作用通常被认为发生于加里东期和燕山期(毛景文和李红艳, 1997; 韩凤彬等, 2010; Xu et al., 2017; Deng et al., 2017; 周岳强等, 2021), 区内黄金洞金矿床((129.7±7.4) Ma)以及大岩金矿床((130.6±6.1) Ma)的

成矿作用被认为与区内燕山晚期花岗岩的侵入有关(Deng et al., 2017; 周岳强等, 2021)。

黄金洞金矿床位于长平深大断裂带的 SE 侧(图 1), 矿区出露的地层主要为新元古界冷家溪群, 局部有第四系覆盖(图 7a), 冷家溪群主要岩性为粉砂质板岩、板岩和绢云母板岩, 岩石普遍发育绢云母化、弱硅化等蚀变。矿区内褶皱和断裂构造均十分发育, 褶皱主要为倒转背、向斜, 褶皱枢纽呈北西(西)走向。区内发育东西向—北西西向和北东向两组断裂, 东西向—北西西向断裂与区内褶皱枢纽大致平行, 北东向断裂主要为泥湾断裂以及近平行的次级断裂, 断裂倾向北西, 倾角通常大于 50°。矿区内未见花岗岩类出露(周岳强等, 2021)。

黄金洞金矿区已探明的金资源量(保有资源量+已开采资源量)达 82 t, 平均品位约 5 g/t (Zhang et al., 2019)。矿区共发现 19 条金矿脉, 在走向上受东西向—北西西向断裂控制。其中, 1 号脉和 3 号脉的金资源量占整个矿区金资源量的 50%以上。1 号脉倾向北, 倾角 20°~40°, 沿走向延伸长约 3 200 m, 矿体厚 0.46~2.16 m。3 号脉倾向南, 倾角 45°~70°, 沿走向延伸长约 3 300 m, 矿体厚约 0.74~3.65 m(图 7b)。矿石类型主要为石英脉型和蚀变岩型, 少量为构造角砾岩型。矿石矿物主要为毒砂和黄铁矿, 其次有白钨矿、辉锑矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和自然金等。脉石矿物主要有石英和方解石, 其次为绿泥石、绢云母和白云石等。

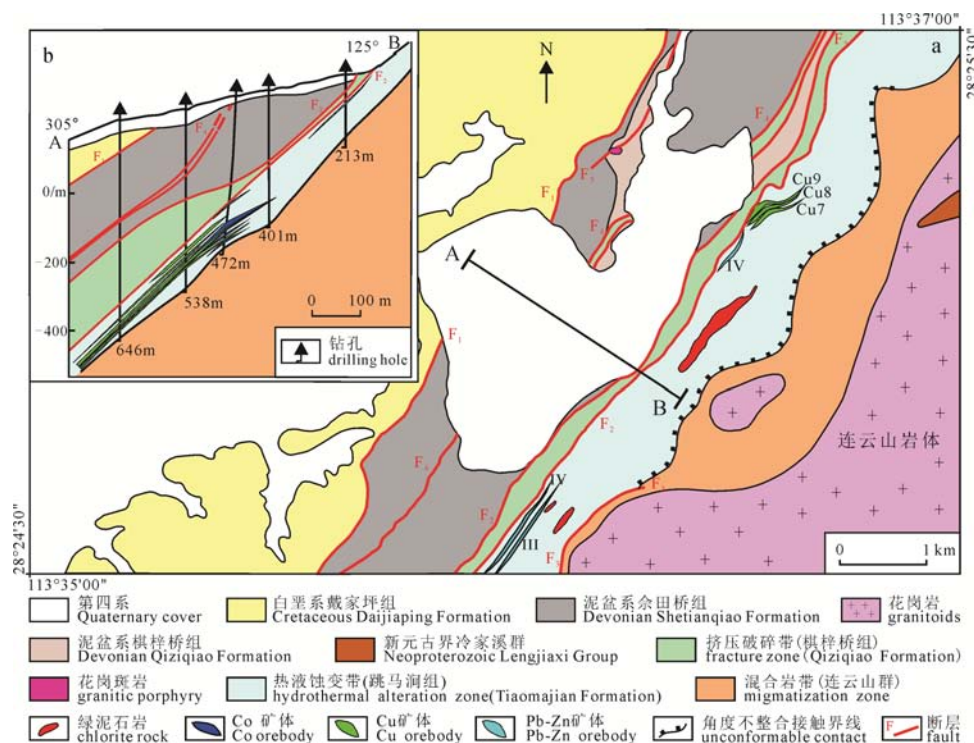


图 6 井冲钴铜多金属矿区地质简图(a)和 A-B 勘探线剖面图(b)(据 Wang et al., 2017 修改)

Fig. 6 Simplified geological map(a) and cross-section along line A-B(b) of the Jingchong Co-Cu polymetallic deposit (modified from Wang et al., 2017)

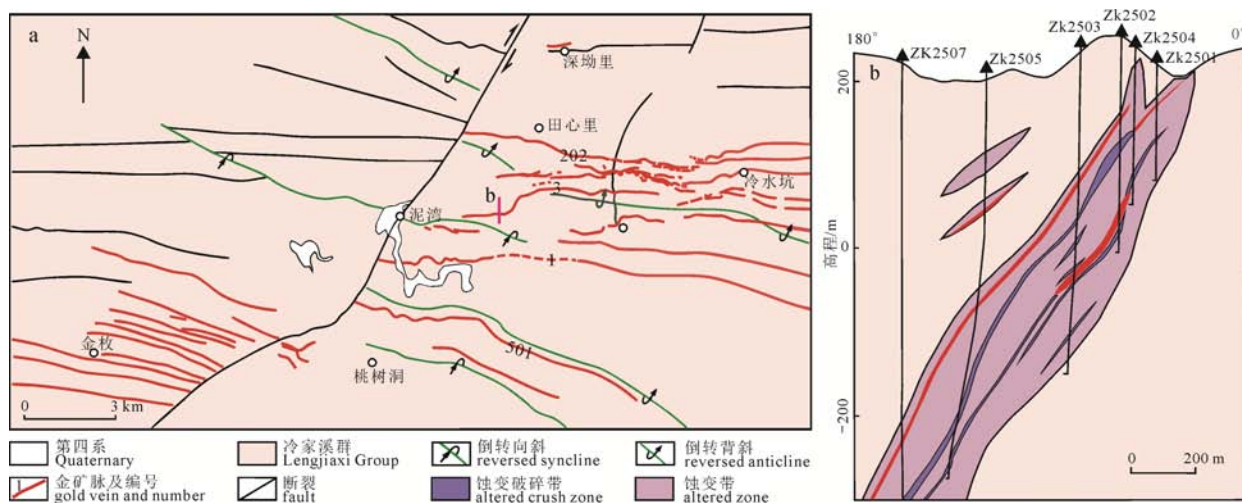


图7 黄金洞矿区地质简图(a)及勘查线剖面图(b)(据周岳强等, 2021 修改)

Fig. 7 Simplified geological map (a) and cross-sections (b) of the Huangjindong deposit (modified from ZHOU et al., 2021)

矿床的矿质来源于新元古界地层, 在区域变质作用和燕山期花岗岩浆的共同作用下, 矿源层中的金等成矿物质发生活化并沿重新活化的构造运移, 在适当部位发生了矿质的沉淀(周岳强等, 2021)。

3 矿床时空分布规律

区内已知被证实与燕山期花岗岩成因相关的矿床主要分布于幕阜山岩体南北两端的接触带及附近地层内, 以及临近连云山岩体的长沙—平江大断裂带附近, 暗示幕阜山与连云山岩体为区内最主要的致矿花岗岩体, 此外, 区内最南端的七宝山铜多金属矿床以及最北端的虎形山钨矿床的形成也分别被证实与矿区燕山期的石英斑岩及隐伏二云母二长花岗岩相关。在成岩成矿年代上(表 2), 胡俊良等(2017)获得研究区最南部七宝山铜多金属矿床(亚系列 I)的石英 Rb-Sr 等时线年龄为(153.4±2.0) Ma, 与所获得的矿区石英斑岩锆石 U-Pb 年龄(154.8±1.8) Ma、(152.9±1.3) Ma、(154.8±2.1) Ma(胡俊良等, 2015, 2016)在误差范围内一致, 同样 Yuan et al.(2018)获得该区辉钼矿 Re-Os 年龄(152.7±1.7) Ma, 与其利用 LA-ICP-MS 获得石英斑岩的锆石 U-Pb 年龄(148.3±1.0) Ma 和(151.4±1.0) Ma 非常吻合, 显示七宝山铜多金属矿床的形成与区内燕山早期侵入岩关系密切; Xu et al.(2020)获得研究区北部虎形山钨矿床(亚系列 III)的石英 Rb-Sr 年龄为(134±2) Ma, 与矿区深部隐伏的二云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(137.8±0.5) Ma 相近。

在幕阜山岩体地区成矿作用包括与燕山晚期侵入岩有关的锂铌钽等稀有金属成矿亚系列(II)和与燕山晚期侵入岩有关的铅锌多金属矿床成矿亚系列(IV)。整个岩基内部及周围分布有上万条伟晶岩

脉, 由岩体中心向岩体边缘靠近及至岩体外围的地层中, 伟晶岩的矿化带依次可划分 Be 矿化带、Nb-Ta-Be 矿化带和 Li-Nb-Ta 矿化带, 而富含稀有金属的伟晶岩主要分布于南北两端的冷家溪群片岩内, 形成了北部的断峰山铌钽矿床以及南部的仁里—传梓源锂铌钽矿床, 该区稀有金属伟晶岩的母岩为二云母二长花岗岩(Li et al., 2021; 黄建中等, 2022), 前人获得了多个幕阜山岩体二云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄, 其年龄介于 145~128 Ma(表 1), 刘翔等(2019)和 Li et al.(2020)分别获得仁里矿区的二云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(141.0±1.2) Ma 和(138.3±0.3) Ma, 与 Xiong et al.(2020)和祝明明等(2021)分别获得的仁里矿区伟晶岩钽铁矿 U-Pb 年龄((140.2±0.95) Ma)和断峰山矿区伟晶岩铌钽矿 U-Pb 年龄((136.6±0.9) Ma 和(136.2±0.4) Ma)较吻合, 而稍早于 Li et al.(2020)和周芳春等(2020)所获得的仁里矿区铌铁矿 U-Pb 年龄((133.0±2.6) Ma)和辉钼矿 Re-Os 年龄((130.1±1.1) Ma)(表 2)。

栗山铅锌多金属矿和桃林铅锌多金属矿床分别位于幕阜山岩体南北缘的接触带, 矿床均为与幕阜山花岗岩侵位相关的中低温岩浆热液脉状充填(交代)型铅-锌-铜多金属矿床(陕亮, 2019; Yu et al., 2020, 2021), 桃林矿区的黑云母二长花岗岩以及栗山矿区的二云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为(136.0±0.8) Ma(陕亮, 2019)和(131.9±1.1) Ma(张鲲等, 2017), 与陕亮(2019)获得桃林铅锌矿区闪锌矿的 Rb-Sr 年龄(135.4±2.6) Ma 相吻合。总体上, 幕阜山岩体南北缘产出的稀有及铅锌多金属矿床的形成与花岗岩的侵位密切相关, 各矿床的成岩、成矿时代基本一致, 从稀有金属到铅锌多金属, 各矿床成矿温度随距离岩体增加而降低。

在连云山岩体地区, 包括与燕山晚期侵入岩有

关的 Cu-Co 多金属矿床成矿亚系列(V)和与燕山晚期侵入岩有关的金多金属成矿亚系列(VI)的多金属矿床的分布明显受控于长沙—平江断裂带及沿断裂带展布的连云山岩体,表现为这些 Cu、Co、Au 多金属矿床均分布于断裂带附近,且在以岩体为中心的断裂走向方向上,矿床的成矿温度随距离岩体增加而降低的特征(许德如等, 2009, 2017; 周岳强等, 2021)。连云山岩体的主要岩性组成为二云母二长花岗岩,也是白沙窝稀有金属矿、井冲铜钴多金属矿及横洞钴矿等矿区内花岗岩的主要岩性,前人已对该岩体的二云母二长花岗岩形成年龄完成了大量的测试,所获得的锆石 U-Pb 年龄(152~145 Ma, Wang et al., 2016; Deng et al., 2017; Ji et al., 2017; 许德如等, 2017; 陕亮, 2019; 张鲲等, 2019; Wen et al., 2021)均较接近,与 Wang et al.(2016)和 Ji et al.(2017)所获得的岩体内黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄((150.2±2.5) Ma 和(149.0±1.4) Ma)较为一致,早于白云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(139.6±1.0) Ma (Wang et al., 2016)。在该区的成矿年代上, Wen et al.(2021)获得白沙窝伟晶岩型稀有金属矿床的钽铁矿 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄分别为(140.7±1.5) Ma 和(140.2±3.3) Ma; 陕亮(2019)获得井冲铜钴多金属矿床的黄铁矿 Rb-Sr 年龄为(128.3±2.7) Ma; Zou et al.(2018)获得横洞钴矿床的白云母 Ar-Ar 年龄为(127.9±5.9) Ma 和(124.8±0.7) Ma; Deng et al.(2020)获得大岩金(钴)矿的白云母 Ar-Ar 年龄为(130.0±5.9) Ma; 周岳强等(2021)获得黄金洞金矿床的白钨矿 Sm-Nd 年龄为

(129.7±7.4) Ma(表 2)。由上可见,在连云山地区,除白沙窝稀有金属矿床的年龄与花岗岩年龄较接近外,其它铜钴、金矿床的成矿年龄(130~125 Ma)明显晚于连云山岩体花岗岩的侵入时代。

4 成岩成矿物质来源

湘东北与燕山早期侵入岩有关的铜铅锌多金属矿床成矿亚系列(I)的代表性矿床为七宝山铜多金属矿, Yuan et al.(2018)通过对矿区石英斑岩中的锆石 Hf、O 同位素的研究,认为石英斑岩的物源为古老地壳的熔融(70%~80%)和地幔物质(20%~30%)的加入,指出矿区 Cu 的物质来源于地幔,而铅锌等金属主要源于地壳(Yuan et al., 2018)。

区域其它成矿亚系列均产于幕阜山岩体及连云山岩体周缘,在花岗岩的物源方面,前人在对该区花岗岩的系统研究指出,包括幕阜山、连云山、望湘、桃花山岩体在内的燕山期花岗岩均为典型的 S 型花岗岩(许德如等, 2017),其花岗(伟晶)岩类具有相似的锆石 Hf 同位素特征(表 1),花岗岩物源为该区新元古代基底的部分熔融(许德如等, 2017; Ji et al., 2017; 张鲲等, 2017; Li et al., 2020; Wen et al., 2021),此外,在虎形山钨矿区隐伏的二云母二长花岗岩和栗山铅锌矿区的二云母二长花岗岩可能混入有少量的幔源物质(陕亮, 2019; 徐军伟, 2021)。在成矿物源方面,幕阜山和连云山地区的稀有金属伟晶岩(亚系列 II)均源自母岩花岗岩(二云母二长花岗岩)的结晶分异产出(Li et al., 2020; Wen et al., 2021; 黄建中等, 2022); 幕阜山地区与燕山晚期

表 2 湘东北地区燕山期典型矿床成矿年龄数据

Table 2 Metallogenic ages of the Yanshannian deposits in northeastern of Hunan Province

矿区名称	矿种类型	测年对象	测试方法	年龄/Ma	文献来源
七宝山	铜铅锌	石英	Rb-Sr	153.4±2.0	胡俊良等, 2017
		辉钼矿	Re-Os	152.7±1.7	Yuan et al., 2018
井冲	铜、钴、铅锌	黄铁矿	Rb-Sr	128.3±2.7	陕亮等, 2017
横洞	钴	白云母	Ar-Ar	127.9±5.9	Zou et al., 2018
				124.8±0.7	
大岩	金、钴	白云母	Ar-Ar	130±1.4	Deng et al., 2020
黄金洞	金	白钨矿	Sm-Nd	129.7±7.4	周岳强等, 2021
虎形山	钨矿	石英	Rb-Sr	134±2	Xu et al., 2020
桃林	铅锌	闪锌矿	Rb-Sr	135.4±2.6	陕亮, 2019
断峰山	铌、钽	铌钽矿	U-Pb	136.6±0.9	祝明明等, 2021
		铌钽矿	U-Pb	136.2±0.4	
		铌铁矿	U-Pb	133.0±2.6	Li et al., 2020
仁里	锂、铌钽	钽铁矿	U-Pb	140.2±0.95	Xiong et al., 2020
		辉钼矿	Re-Os	130.1±1.1	周芳春等, 2020
传梓源	锂、铌钽	白云母	Ar-Ar	135.4±1.4	张立平等, 2021
白沙窝	锂、铌钽	辉钼矿	Re-Os	140.2±3.3	Wen et al., 2021
		钽铁矿	U-Pb	140.7±1.5	

侵入岩有关的钨多金属矿床成矿亚系列(Ⅲ)以及铅锌多金属矿床成矿亚系列(Ⅳ)成矿物源均主要为幕阜山花岗岩浆的分异(Xu et al., 2020; Yu et al., 2020, 2021); 连云山地区与燕山晚期侵入岩有关的 Cu-Co 多金属矿床成矿亚系列(V)及与燕山晚期侵入岩有关的金多金属成矿亚系列(VI)中的 Cu、Co、Au 等成矿物源均来自元古宙基底(Zhang et al., 2018; Zou et al., 2018), 其中 Cu-Co 等矿质(亚系列 V)来自连云山群(Wang et al., 2017; 刘萌等, 2018), 而 Au 等矿质(亚系列 VI)的物源则主要来自于冷家溪群(Deng et al., 2017; 周岳强等, 2021)。

5 矿床的形成背景与找矿方向

5.1 矿床形成背景

在湘东北幕阜山岩体的北部, 存在有燕山早期((154.0±1.9) Ma, Wang et al., 2014)的幔源岩浆上涌事件, 可能代表了湘东北中生代岩石圈伸展的启动时间, 该次事件与研究区南部七宝山矿区石英斑岩的形成时间(155~153 Ma, 胡俊良等, 2015, 2016)契合, 幔源岩浆的上侵, 壳幔相互作用所形成的深部岩浆经较充分的分异演化, 富含 Cu、Pb、Zn 等矿质的岩浆热液流体在岩体内部及与围岩接触部位经充填交代作用, 形成了七宝山矿区与燕山早期(153~152 Ma, 胡俊良等, 2017; Yuan et al., 2018)侵入岩有关的铅锌多金属矿床成矿亚系列(I)。在燕山晚期, 受西太平洋板块西向俯冲回撤的影响, 湘东北地区整体处于伸展拉张环境, 壳幔相互作用致深部地壳物质重熔产生了壳源为主夹含少量幔源物质的酸性岩浆上涌, 在该区中基性岩浆长期持续活动(154~137 Ma, 陈剑锋等, 2022)提供热源的前提下, 酸性岩浆得到了充分的结晶分异, 形成了黑云母二长花岗、二云母二长花岗岩和白云母二长花岗岩演化序列(黄建中等, 2022)的同时, 促使了成矿元素得到富集, 其中二云母二长花岗岩分异出富含挥发分及稀有金属的伟晶岩浆沿冷家溪群片岩层间间隙运移及沉淀形成了以锂铌钽等为主的系列稀有金属矿床(亚系列 II)。幕阜山大岩基巨量的酸性岩浆在充分结晶分异后, 可直接形成富含 W、Pb、Zn 等的成矿流体, 在次级断裂及岩体与围岩接触部位, 经充填和交代作用分别形成了钨多金属矿床(亚系列 III)及铅锌多金属矿床(亚系列 IV); 在连云山地区, 则表现为岩浆活动致围岩中的矿质活化, 在岩浆上涌及所造成早期断裂构造重新活化的共同作用下, 从花岗岩浆出溶的流体与围岩发生混合岩化, 萃取连云山群中的 Cu、Co 等金属元素, 在岩体附近的构造蚀变带(混合岩化带或角砾岩带)沉淀成矿(亚

系列 V); 同时岩浆也为深部冷家溪群基底中 Au 等矿质的活化和迁移提供了动力, 前期存在的断裂构造在岩浆驱动力下发生再活化为含矿热液提供运移通道, 区内 Au 等成矿流体富集后运移至次级构造部位发生沉淀, 形成了该区金多金属矿床(亚系列 VI)。

5.2 区域找矿方向

通过对湘东北地区各成矿(亚)系列的研究, 依据成矿系列理论中“缺位找矿”的指导思想, 在对区域成矿条件进行对比的基础上, 本文初步提出以下几个矿种在找矿方向上的几点建议:

(1) 钴铜矿。井冲钴铜多金属矿区显示在垂向上钴铜矿体位于铅锌矿体下部的特征(Wang et al., 2017; 图 6b), 除辉砷钴矿外, 黄铁矿是湘东北地区重要的含钴矿物(Wang et al., 2022), 尤其在横洞钴矿区黄铁矿是最主要的载钴矿物。湘东北地区的钴铜多金属矿床主要受控于该区燕山晚期花岗岩浆与元古宙基底及两者在长平大断裂带附近发生的混合岩化作用。事实上, 长平深大断裂的向南延伸(其南部在有的文献中被称之为衡山断裂)可达湘中地区的衡阳盆地(Li et al., 2013), 与湘东北地区类似, 该断裂带在往南延伸部位的两侧也多表现为“盆-岭”格局(图 8), 即断裂北西侧多为白垩纪红层, 南东则多为元古宙古老地层, 目前在该断裂南延部位的衡阳盆地鸡笼街岩体(暂缺准确年代学数据)南东端的排山矿区早白垩世地层内的次级断裂内见有钴铜矿体产出, 本文推测该区的铜钴矿体可能和深部燕山晚期的岩浆活动有关, 与湘东北地区的钴铜多金属应属于同一亚系列(V), 但目前关于该矿区铜钴矿体暂缺乏系统的评价工作。在排山矿区沿长平深大断裂北东方向产出有南岳—白石峰岩体(分别形成于印支和燕山期), 该岩体在断裂带内与地层接触处同样发生有明显的混合岩化作用, 断裂带内存在有白垩世(136~97 Ma, Li et al., 2013)的韧性剪切活动, 因此, 白石峰岩体西部可能具备有与湘东北连云山岩体北西部铜钴金属矿床成矿亚系列(V)相似的成矿条件, 此外, 在长平大断裂的南东侧发育有区域的 Co 元素水系沉积物异常, 其长轴方向平行于断裂的走向(图 8), 指示了断裂附近具有良好的钴多金属矿(亚系列 V)找矿前景, 目前关于长平大断裂南部的找矿勘查工作程度过低, 因此, 在长平大断裂白石峰岩体及往南部位, 乃至整个断裂带上部署相关的地质矿产与物探工作, 揭示断裂带上可能存在的早白垩世隐伏花岗岩体及其成矿作用, 尤其是加强对衡阳盆地鸡笼街岩体一带铜钴矿床的评价与研究, 有望获得钴铜多金属矿床找矿工作

的突破。同时在断裂附近分布有系列铅锌(铜)矿点(图 8), 对铅锌矿体下部是否存在有钴铜矿体(与井冲钴铜多金属矿床相似)进行验证工作, 以及对铅锌(铜)矿区乃至整个断裂带中的黄铁矿进行含钴黄铁矿的识别工作, 在往后的勘查工作中同样应引起重视。

(2) 锂、铌钽稀有金属矿。湘东北地区与燕山晚期侵入岩有关的锂铌钽等稀有金属成矿亚系列(Ⅱ)的矿床分布于幕阜山、连云山岩体附近的冷家溪群片岩内, 含矿伟晶岩的母岩为二云母二长花岗岩(Li et al., 2021; Wen et al., 2021; 黄建中等, 2022), 黄建中等(2022)指出仁里—传梓源矿区从岩体接触带附近往稍远离岩体的地层的伟晶岩, 以及同一条伟晶岩脉从深部到浅部, 其矿化特征均具有从 Nb-Ta 矿化为主转为 Li 矿化为主的特征, 提出幕阜山南缘的传梓源到窄板洞地区可能孕育有含锂伟晶岩脉(黄建中等, 2022)。这在当前所进行的包括该区在内的永享矿区锂铌钽详查工作中得到了很好的证

实, 目前湖南省地质灾害调查监测所在该区地表及深部隐伏的稀有金属伟晶岩脉进行了系统的深部揭露与验证工作(图 9), 所完成的 60 余个钻孔钽/锂矿见矿率达 88.2%, 其中同时见有“钽+锂”矿体的钻孔达 11 个, 初步圈定 Ta_2O_5 工业矿体十余个, 矿体走向长数百米至千余米, 平均厚度 1.3~2.8 m, Li_2O 工业矿体 2 个, 矿体走向长约 400 m, 厚度 2.9 m, 显示出该区具备十分优越的伟晶岩型稀有金属矿床找矿前景。

在幕阜山北部的断峰山矿区在距稀有金属伟晶岩母(二云母二长花岗岩)的北东方向由近到远, 即从芋头坡→白冲屋→江家垅→铁竖尖矿段, 冷家溪群片岩中的伟晶岩群表现为由贫矿到钽钨矿化逐渐加强的特征, 目前在幕阜山北部尚未发现有锂辉石伟晶岩, 根据伟晶岩矿化规律, 断峰山锂辉石伟晶岩(在垂向上可能被剥蚀完)应出露于钽钨矿化最好矿段(铁竖尖)的北东部, 在矿区地质图上(张丽雅等, 2019), 该部位与岩体接触带的片岩带过窄且被

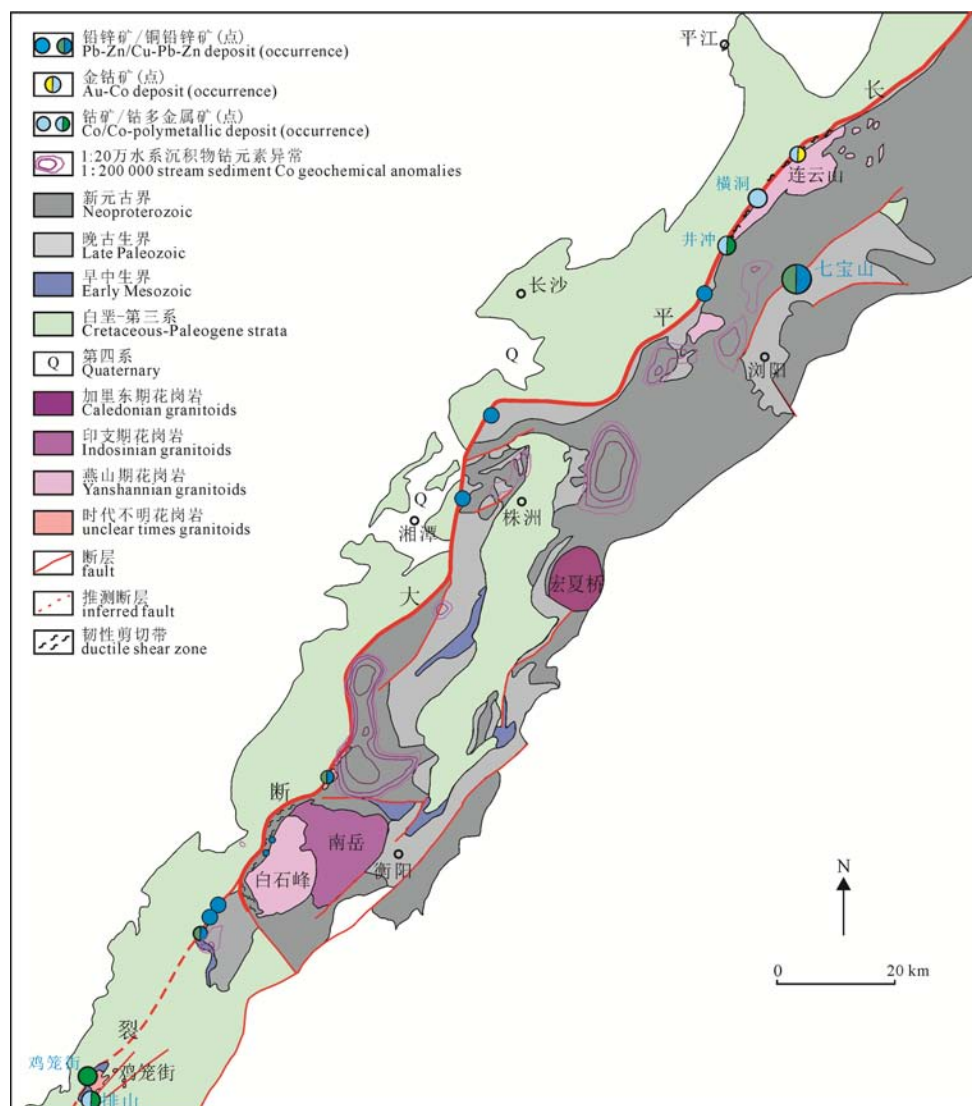


图 8 长沙—平江大断裂及附近地质简图(据 Li et al., 2013 修改)

Fig. 8 Simplified geological map of the Changsha-Pingjiang fault and adjacent regions (modified after Li et al., 2013)

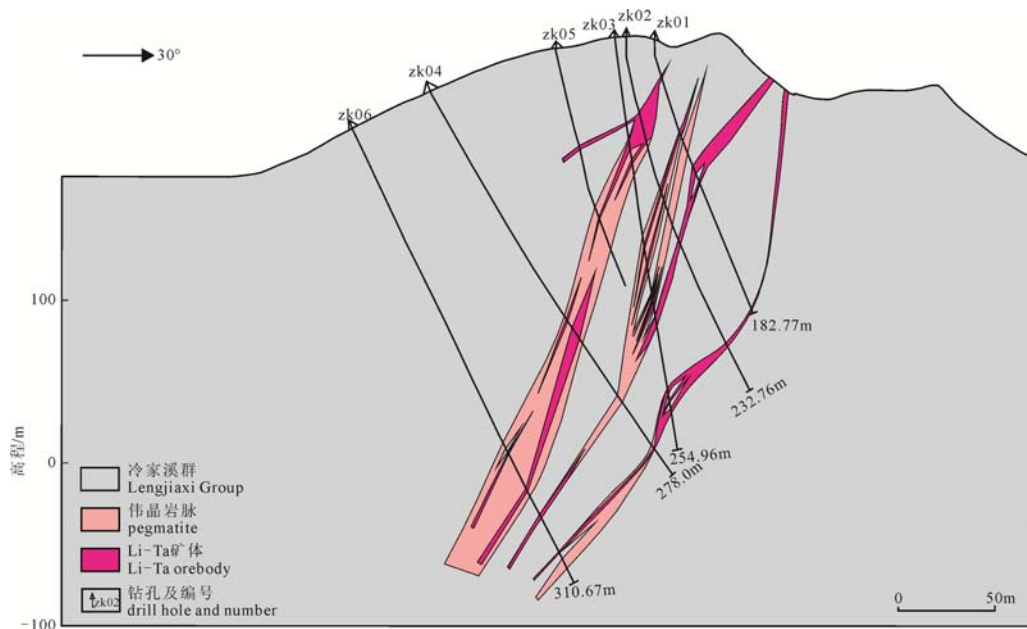


图9 永享稀有金属矿区22号勘探线剖面图

Fig. 9 No. 22 cross-sections of the Yongxiang rare metal deposit

第四系覆盖,第四系覆盖的片岩区域应是寻找赋锂伟晶岩脉的重要区域。此外,在除幕阜山以及连云山的湘东北其它地区,望湘、金井、桃花山以及金井岩体内同样大面积存在有作为稀有金属伟晶岩母岩的早白垩世二云母二长花岗岩,在往后湘东北地区的稀有金属矿床找矿工作中,关于区内其它二云母二长花岗岩岩体的稀有金属成矿作用应引起重视。

(3)金矿。湘东北地区的冷家溪群地层中蕴含巨量的Au成矿物质基础(黄建中等, 2020),区内早白垩世的岩浆作用一方面为地层中的Au发生活化与聚集提供了热能,另一方面致先期存在的构造重新活化,为含金热液的迁移和沉淀提供了空间。湘东北地区广泛分布的冷家溪群地层及大规模的早白垩世岩浆侵入作用显示了该区十分优越的金矿(亚系列VI)成矿条件,这在近年区内万古、黄金洞等大型金矿山深边部找矿工作中所取得重要突破也得到了证实(黄建中等, 2020),区内Au元素异常十分发育,由于受该区构造复杂及地形陡峭等多因素影响,区内连云山—幕阜山岩体周缘所存在的多个砂金矿点的原生金矿脉到目前为止并未得到有效揭示,因此,区内燕山期花岗岩岩体周边的次级构造带并有Au元素异常出现的部位,金矿的找矿工作值得持续推进。

6 结论

(1)湘东北地区的多金属矿床可厘定为一个成矿系列和6个亚系列,即与燕山期侵入岩有关的钨、铜、钴、铅锌、金、稀有等多金属成矿系列,与燕山早期侵入岩有关的铜多金属成矿亚系列(I)、

与燕山晚期侵入岩有关的锂铌钽等稀有金属成矿亚系列(II)、与燕山晚期侵入岩有关的钨多金属成矿亚系列(III)、与燕山晚期侵入岩有关的铅锌多金属成矿亚系列(IV)、与燕山晚期侵入岩有关的钴铜多金属成矿亚系列(V)及与燕山晚期侵入岩有关的金多金属成矿亚系列(VI)。

(2)与燕山早期侵入岩有关的铜多金属成矿亚系列(I)的成岩成矿物源均来自壳幔相互作用;区内燕山晚期的花岗岩主要由深部地壳重熔形成,其中与燕山晚期侵入岩有关的锂铌钽等稀有金属成矿亚系列(II)的伟晶岩型矿床源自二云母二长花岗岩的直接分异;幕阜山地区的与燕山晚期侵入岩有关的钨多金属成矿亚系列(III)及铅锌多金属成矿亚系列(IV)成矿物质均源自岩浆分异出的热液成矿流体;而连云山地区与燕山晚期侵入岩有关的钴铜多金属成矿亚系列(V)及金多金属成矿亚系列(VI)成矿物质来自岩浆上侵时对区内元古宙地层内成矿元素的萃取。

(3)依据成矿系列理论指导下的“缺位找矿”思想,长平大断裂带及南向延伸至衡阳盆地的部位是寻找钴铜矿的有利地段;湘东北地区具有形成稀有金属及金等矿床的优越地质条件及良好的找矿前景。

Acknowledgements:

This study was supported by Geological Bureau of Hunan Province (Nos. HNGSTP202306, HNGSTP202302 and HNGSTP202105), China Geological Survey (Nos. DD20230055 and DD20221695-16), Research and Development Plan in Key Fields of Hunan Province (No. 2019SK2261), and

Reserch Foundation of the Department of Natural Resources of Hunan Province (No. 20230102DZ).

参考文献:

- 陈剑锋, 文春华, 黄建中, 张锦煦, 汪程, 唐勇, 吕正航, 周芳春, 陈虎, 曹创华, 陈宇鹏. 2022. 幕阜山南缘仁里稀有金属矿区7号伟晶岩脉-辉石闪长岩脉特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 46(5): 951-967.
- 陈旭, 邵拥军, 孟德保, 文春华, 陈剑锋, 曹创华. 2023. 湘东北幕阜山梅仙花岗岩成因及其构造意义: 锆石 U-Pb-Hf 同位素与全岩地球化学制约[J/OL]. 地质学报: 1-19[2023-01-02]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023125>.
- 陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘, 1(3-4): 90-94.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 80(10): 1501-1508.
- 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 徐志刚. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2015. 中国重要矿产和区域成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2020. 论地球系统四维成矿及矿床学研究趋向——七论矿床的成矿系列[J]. 矿床地质, 39(5): 745-753.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2022. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 96(1): 123-130.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 1(1): 32-58.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, (6): 1-64.
- 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 刘耀荣, 张传恒, 张恒, 刘燕学, 庞维华, 张玉海. 2011. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄——对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 30(7): 1001-1008.
- 郭飞, 王智琳, 许德如, 董国军, 宁钧陶, 王展, 邓腾, 于得水, 崔宇. 2018. 湘东北地区栗山铅锌铜多金属矿床的成因探讨: 来自矿床地质、矿物学和硫同位素的证据[J]. 南京大学学报(自然科学), 54(2): 366-385.
- 郭飞, 王智琳, 许德如, 于得水, 董国军, 宁钧陶, 康博, 彭尔柯. 2020. 湖南栗山铅锌铜多金属矿床闪锌矿微量元素特征及成矿指示意义[J]. 地学前缘, 27(4): 66-81.
- 胡俊良, 徐德明, 张鲲鹏. 2015. 湖南七宝山矿床石英斑岩锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素地球化学[J]. 华南地质与矿产, 31(3): 236-245.
- 胡俊良, 徐德明, 张鲲鹏, 刘劲松. 2016. 湖南七宝山铜多金属矿床石英斑岩时代与成因: 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 大地构造与成矿学, 40(6): 1185-1199.
- 胡俊良, 陈娇霞, 徐德明, 吴昌雄, 张鲲鹏, 刘劲松, 刘阿睢, 刘重芃. 2017. 湘东北七宝山铜多金属矿床成矿时代及成矿物质来源——石英脉 Rb-Sr 定年和 S-Pb 同位素组成[J]. 地质通报, 36(5): 857-866.
- 韩凤彬, 常亮, 蔡明海, 刘孙决, 张诗启, 陈艳, 彭振安, 徐明. 2010. 湘东北地区金矿成矿时代研究[J]. 矿床地质, 29(3): 563-571.
- 贺转利, 许德如, 陈广浩, 夏斌, 李鹏春, 符巩固. 2004. 湘东北燕山期陆内碰撞造山带金多金属成矿地球化学[J]. 矿床地质, 23(1): 39-51.
- 黄建中, 孙骥, 周超, 陆文, 肖荣, 郭爱民, 黄革非, 谭仕敏, 隗含涛. 2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力[J]. 地球学报, 41(2): 230-252.
- 黄建中, 陈剑锋, 文春华, 周厚祥, 李胜苗, 张立平, 黄志飏, 成永生, 曹创华, 刘钧, 陈虎. 2022. 湘东北地区伟晶岩型锂矿成矿模型及找矿潜力分析[J]. 地球学报, 43(4): 527-541.
- 黄小强, 李鹏, 张立平, 刘翔, 黄志飏, 柳清琦, 李建康, 周芳春, 苏俊男, 曾乐, 万海辉, 陈虎. 2021. 湖南仁里稀有金属矿田 36 号伟晶岩地球化学特征、成矿时代及其意义[J]. 矿床地质, 40(6): 1248-1266.
- 李鹏, 李建康, 裴荣富, 冷双梁, 张旭, 周芳春, 李胜苗. 2017. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰: 年代学依据[J]. 地球科学, 42(10): 1684-1696.
- 李鹏, 周芳春, 李建康, 刘翔, 黄志飏, 张立平. 2020. 湘东北仁里-传梓源钨钼矿床隐伏花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 486-500.
- 刘萌, 王智琳, 许德如, 伍杨, 董国军, 宁钧陶, 邓腾, 崔宇. 2018. 湖南井冲钴铜多金属矿床绿泥石、黄铁矿和黄铜矿的矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(5): 862-879.
- 刘翔, 周芳春, 黄志飏, 李建康, 周厚祥, 肖国强, 包云河, 李鹏, 谭黎明, 石威科, 苏俊男, 黄小强, 陈虎, 汪宣民, 林跃, 刘晓敏. 2018. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型钨钼多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(2): 235-243.
- 刘翔, 周芳春, 李鹏, 李建康, 黄志飏, 石威科, 黄小强, 张立平, 苏俊男. 2019. 湖南仁里稀有金属矿田地质特征、成矿时代及其找矿意义[J]. 矿床地质, 38(4): 771-791.
- 毛景文, 李红艳. 1997. 江南古陆某些金矿床成因讨论[J]. 地球化学, 26(5): 71-81.
- 毛景文, 李红艳, 徐钰, 罗福庭. 1997. 湖南万古地区金矿地质与成因[M]. 北京: 原子能出版社.
- 唐菊兴, 王勤, 杨超, 丁帅, 郎兴海, 刘鸿飞, 黄勇, 郑文宝, 王立强, 高一鸣, 冯军, 段吉琳, 宋杨, 王艺云, 林彬, 方向, 张志, 杨欢欢. 2014. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1151-1170.
- 陕亮, 柯贤忠, 庞迎春, 刘家军, 赵辛敏, 王晶, 康博, 张鲲鹏. 2017. 湘东北栗山地区新元古代岩浆活动及其地质意义: 锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素证据[J]. 地质科技情报, 36(6): 32-42.
- 陕亮. 2019. 湘东北地区铜-铅-锌-钴多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 陈郑辉, 沈保丰, 汤中立, 裴荣富. 2011. 成矿体系的研究进展及其在成矿预测中的应用[J]. 地球学报, 32(4): 385-395.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 黄凡, 王岩, 裴荣富. 2020. 矿床成矿系列组——六论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 94(1): 18-35.
- 王连训, 马昌前, 张金阳, 陈玲, 张超. 2008. 湘东北早白垩世桃花山—小墨山花岗岩体岩石地球化学特征及成因[J]. 高校地质学报, 14(3): 334-349.
- 王智琳, 伍杨, 许德如, 邹少浩, 董国军, 彭尔柯, 宁钧陶, 康博. 2020. 湘东北长沙—平江断裂带关键金属钴的赋存状态与成矿规律[J]. 黄金科学技术, 28(6): 779-785.
- 许德如, 王力, 李鹏春, 陈广浩, 贺转利, 符巩固, 吴俊. 2009. 湘东北地区连云山花岗岩的成因及地球动力学暗示[J]. 岩石学报, 25(5): 1056-1078.
- 许德如, 邓腾, 董国军, 宁钧陶, 王智琳, 张俊岭, 邹凤辉, 周岳强, 陈根文, 于得水, 叶挺威. 2017. 湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征: 对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示[J]. 地学前缘, 24(2): 104-122.
- 徐军伟. 2021. 湘东北虎形山钨多金属矿床成矿作用与找矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 杨荣, 符巩固, 陈必河, 陈剑锋, 司程山, 刘邦定, 郑正福. 2015. 湖南七宝山铜多金属矿床地质特征与找矿方向[J]. 华南地质与矿产, 31(3): 246-252.
- 杨雪, 张玉芝, 崔翔, 虞鹏鹏, 徐文景. 2020. 湘东北新元古代冷家溪群沉积岩的地球化学特征和碎屑锆石 U-Pb 年代学[J]. 地球科学, 45(9): 3461-3474.
- 易祖水, 罗小亚, 周东红, 肖朝阳. 2010. 浏阳市井冲钴铜多金属矿床地质特征及成因浅析[J]. 华南地质与矿产, (3):

12-18.

- 张鲲, 徐德明, 胡俊良, 卢友月, 黄皓. 2017. 湘东北三墩铜铅锌矿区花岗岩的岩石成因——锆石 U-Pb 测年、岩石地球化学和 Hf 同位素约束[J]. 地质通报, 36(9): 1591-1600.
- 张鲲, 徐德明, 宁钧陶, 胡俊良, 卢友月, 黄皓, 胡军, 陕亮. 2019. 湘东北井冲钴铜矿区连云山花岗岩的岩石成因——锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和 Hf 同位素约束[J]. 岩石矿物学杂志, 38(1): 21-33.
- 张丽雅, 张成乘, 赵帆, 黄若龙. 2019. 湖北省断峰山铌钽矿床地质特征及成因[J]. 现代矿业, 35(6): 45-50.
- 张立平, 李鹏, 黄志彪, 刘翔, 李建康, 黄小强, 苏俊男, 周芳春, 曾乐, 陈虎, 姜鹏飞. 2021. 湖南仁里稀有金属矿田 206 号锂辉石伟晶岩脉地球化学特征及成矿时代[J]. 矿床地质, 40(6): 1267-1284.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257-279.
- 赵正, 陈毓川, 王登红, 李建康, 刘善宝, 陈振宇, 郭春丽, 王平安. 2022. 华南中生代动力体制转换与钨锡铋铌钽稀土矿床成矿系列的叠加演化[J]. 岩石学报, 38(2): 301-322.
- 周芳春, 刘翔, 李建康, 黄志彪, 肖国强, 李鹏, 周厚祥, 石威科, 谭黎明, 苏俊男, 陈虎, 汪宣民. 2019. 湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征与成矿模型[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 77-91.
- 周芳春, 黄志彪, 刘翔, 苏俊男, 黄小强, 王臻, 陈虎, 张宗栋, 雒小荣, 李建斌, 李振红, 张立平, 曾乐, 李旭明. 2020. 湖南仁里铌钽矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 476-485.
- 周岳强, 董国军, 许德如, 邓腾, 吴俊, 王翔, 高磊, 陈孝刚. 2021. 湖南黄金洞金矿床白钨矿 Sm-Nd 年龄及其地质意义[J]. 地球化学, 50(4): 381-397.
- 祝明明, 邹建林, 王闯, 冯超, 付宏林, 赵鹏, 陈阳, 徐海军. 2021. 幕阜山地区断峰山铌钽矿的矿物学、年代学和赋存状态[J]. 地质科技通报, 40(6): 55-69.
- CHEN Jian-feng, WEN Chun-hua, HUANG Jian-zhong, ZHANG Jin-xu, WANG Cheng, TANG Yong, LÜ Zheng-hang, ZHOU Fang-chun, CHEN Hu, CAO Chuang-hua, CHEN Yu-peng. 2022. Characteristics of No.7 Pegmatite Vein and Pyroxene Diorite in Renli Rare Metal Deposit, South Margin of Mufushan Batholiths and its Geological Implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 46(5): 951-967(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-feng, WEN Chun-hua, LÜ Zheng-hang, HUANG Jian-zhong, ZHANG Jin-xu, TANG Yong, CAO Chuang-hua. 2023. Petrogenesis of Mesozoic Li-, Cs-, and Ta-rich (LCT) pegmatites from the Neoproterozoic Jiangnan Orogenic Belt, South China: An alternative origin model for the LCT type pegmatite[J]. Ore Geology Reviews, 153: 105276.
- CHEN Xu, SHAO Yong-jun, MENG De-bao, WEN Chun-hua, CHEN Jian-feng, CAO Chuang-hua. 2023. Zircon U-Pb-Hf isotope and whole-rock geochemical constraints on the origin and tectonic significance of the Meixian granites in the Mufushan area, NE Hunan[J/OL]. Acta Geologica Sinica, 1-19. [2023-01-02]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023125>(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan. 1994. Metallogenic series of ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 1(3-4): 90-94(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong. 2006. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, ZHU Yu-sheng, XU Zhi-gang. 2007. Chinese metallogenic system and regional metallogenetic evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, XU Zhi-gang. 2015. Important mineral resources and regional metallogenetic regularities in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2020. Four-dimensional metallogeny in earth system and study trends of mineral deposits: A discussion on minerogenetic series(VII)[J]. Mineral Deposits, 39(5): 745-753(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposit(VIII)[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 123-130(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32-58(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming, SONG Tian-rui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences, (6): 1-64(in Chinese with English abstract).
- CHU Yang, LIN Wei. 2014. Phanerozoic polyorogenic deformation in southern Jiuling Massif, northern South China block: Constraints from structural analysis and geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 86: 117-130.
- DENG Teng, XU De-ru, CHI Guo-xiang, WANG Zhi-lin, JIAO Qian-qian, NING Jun-tao, DONG Guo-jun, ZOU Feng-hui. 2017. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China[J]. Ore Geology Reviews, 88: 619-637.
- DENG Teng, XU De-ru, CHI Guo-xiang, ZHU Yu-hua, WANG Zhi-lin, CHEN Gen-wen, LI Zeng-hua, ZHANG Jun-ling, YE Ting-wei, YU De-shui. 2019. Revisiting the ca. 845-820 Ma S-type granitic magmatism in the Jiangnan Orogen: new insights on the Neoproterozoic tectono-magmatic evolution of South China[J]. International Geology Review, 61(6): 383-403.
- DENG Teng, XU De-ru, CHI Guo-xiang, WANG Zhi-lin, CHEN Gen-wen, ZHOU Yue-qiang, LI Zeng-hua, YE Ting-wei, YU De-shui. 2020. Caledonian (Early Paleozoic) veins overprinted by Yanshanian (Late Mesozoic) gold mineralization in the Jiangnan Orogen: A case study on gold deposits in northeastern Hunan, South China[J]. Ore Geology Reviews, 124: 103586.
- FAURE M, SHU Liang-shu, WANG Bo, CHARVET J, CHOULET F, MONIE P. 2009. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China[J]. Terra Nova, 21(5): 360-368.
- GAO Lin-zhi, CHEN Jun, DING Xiao-zhong, LIU Yao-rong, ZHANG Chuan-heng, ZHANG Heng, LIU Yan-xue, PANG Wei-hua, ZHANG Yu-hai. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed of Lengjiaxi and Banxi groups, northeastern Hunan: constraints on the Wuling Movement[J]. Geological-Bulletin of China, 30(7): 1001-1008(in Chinese with English abstract).
- GUO Fei, WANG Zhi-lin, XU De-ru, DONG Guo-jun, NING Jun-tao, WANG Zhan, DENG Teng, YU De-shui, CUI Yu.

2018. Genesis of Lishan Pb-Zn-Cu polymetallic deposit in northeastern Hunan province: evidences from the geology, mineralogy and sulfur isotopes[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 54(2): 366-385(in Chinese with English abstract).
- GUO Fei, WANG Zhi-lin, XU De-ru, YU De-shui, DONG Guo-jun, NING Jun-tao, KANG Bo, PENG Er-ke. 2020. Trace element characteristics of sphalerite in the Lishan Pb-Zn-Cu polymetallic deposit in Hunan Province and the metallogenic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(4): 66-81(in Chinese with English abstract).
- HU Jun-liang, XU De-ming, ZHANG Kun. 2015. Zircon U-Pb dating, Hf isotope of magmatic rocks from Qibaoshan Cu polymetallic deposit, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(3): 236-245(in Chinese with English abstract).
- HU Jun-liang, XU De-ming, ZHANG Kun, LIU Jin-song. 2016. Zircon U-Pb Dating, Hf Isotope and REE Geochemistry of the Quartz-porphyry in the Qibaoshan Cu-polymetallic Deposit in Hunan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(6): 1185-1199(in Chinese with English abstract).
- HU Jun-liang, CHEN Jiao-xia, XU De-ming, WU Chang-xiong, ZHANG Kun, LIU Jin-song, LIU A-sui, LIU Chong-peng. 2017. Age and sources of the ore-forming material for the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit in Hu'nan Province: Evidence from quartz vein Rb-Sr isotopic dating and S-Pb isotopes[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 857-866(in Chinese with English abstract).
- HAN Feng-bin, CHANG Liang, CAI Ming-Hai, LIU Sun-yang, ZHANG Shi-qi, CHEN Yan, PENG Zhen-an, XU Ming. 2010. Ore-forming epoch of gold deposits in northeastern Hunan[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 563-571(in Chinese with English abstract).
- HE Zhuan-li, XU De-ru, CHEN Guang-hao, XIA Bin, LI Peng-chun, FU Gong-gu. 2004. Gold-polymetallic ore-forming geochemistry of Yanshannian intracontinental collision orogen, northeastern Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 39-51(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jian-zhong, SUN Ji, ZHOU Chao, LU Wen, XIAO Rong, GUO Ai-min, HUANG GE-fei, TAN Shi-min, WEI Han-tao. 2020. Metallogenic regularity and resource potential of gold deposits of Hunan area in the Jiangnan orogenic belt, South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 230-252(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jian-zhong, CHEN Jian-feng, WEN Chun-hua, ZHOU Hou-xiang, LI Sheng-miao, ZHANG Li-ping, HUANG Zhi-biao, CHENG Yong-sheng, CAO Chuang-hua, LIU Jun, CHEN Hu. 2022. The metallogenic model and prospecting potentiality of the pegmatite type Li deposit in northwestern Hunan province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(4): 527-541(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xiao-qiang, LI Peng, ZHANG Li-ping, LIU Xiang, HUANG Zhi-biao, LIU Qing-qi, LI Jian-kang, ZHOU Fang-chun, SU Jun-nan, ZENG Le, WAN Hai-hui, CHEN Hu. 2021. Geochemical characteristics and metallogenic age of No. 36 pegmatite in Renli rare metal ore field, Hunan Province, and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 40(6): 1248-1266(in Chinese with English abstract).
- JI Wen-bin, LIN Wei, FAURE M, CHEN Yan, CHU Yang, XUE Zhen-hua. 2017. Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous peraluminous granitoids in the northeastern Hunan province (middle Yangtze region), South China: Geodynamic implications for the Paleo-Pacific subduction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 141: 174-193.
- LI Zheng-xiang, LI Xian-hua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- LI Xiao-feng, WANG Chun-zeng, HUA Ren-min, WEI Xing-lin. 2010. Fluid origin and structural enhancement during mineralization of the Jinshan orogenic gold deposit, South China[J]. *Mineralium Deposita*, 45(6): 583-597.
- LI Jian-hua, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, SU Jin-hao, LI Yong, CUI Jian-jun, SHI Wei. 2013. The Hengshan low-angle normal fault zone: Structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China[J]. *Tectonophysics*, 606: 97-115.
- LI Jian-hua, SHI Wei, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, MA Zhi-li. 2016. Thermal evolution of the Hengshan extensional dome in central South China and its tectonic implications: New insights into low-angle detachment formation[J]. *Gondwana Research*, 35: 425-441.
- LI Peng, LI Jian-kang, PEI Rong-fu, LENG Shuang-liang, ZHANG Xu, ZHOU Fang-chun, LI Sheng-miao. 2017. Multistage magmatic evolution and Cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite mass: Constrains from geochronological evidence[J]. *Earth Science*, 42(10): 1684-1696 (in Chinese with English abstract).
- LI Peng, ZHOU Fang-chun, LI Jian-kang, LIU Xiang, HUANG Zhi-biao, ZHANG Li-ping. 2020. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the concealed granite of Renli-Chuangziyuan deposit, NE Hunan and geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 486-500(in Chinese with English abstract).
- LI Peng, LI Jian-kang, LIU Xiang, LI Chao, HUANG Zhi-biao, ZHOU Fang-chun. 2020. Geochronology and source of the rare-metal pegmatite in the Mufushan area of the Jiangnan orogenic belt: A case study of the giant Renli Nb-Ta deposit in Hunan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 116: 103237.
- LI Peng, LI Jian-kang, CHEN Zhen-yu, LIU Xiang, HUANG Zhi-biao, ZHOU Fang-chun. 2021. Compositional evolution of the muscovite of Renli pegmatite-type rare-metal deposit, northeast Hunan, China: Implications for its petrogenesis and mineralization potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 138: 104380.
- LIU Meng, WANG Zhi-lin, XU De-ru, WU Yang, DONG Guo-jun, NING Jun-tao, DENG Teng, CUI Yu. 2018. Mineralogy of Chlorite, Pyrite and Chalcopyrite in the Jingchong Co-Cu Polymetallic Deposit in Northeastern Hunan Province, South China: Implications for Ore Genesis[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 862-879(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiang, ZHOU Fang-chun, HUANG Zhi-biao, LI Jian-kang, ZHOU Hou-xiang, XIAO Guo-qiang, BAO Yun-he, LI Peng, TAN Li-ming, SHI Wei-ke, SU Jun-nan, HUANG Xiao-qiang, CHEN Hu, WANG Xuan-min, LIN Yue, LIU Xiao-min. 2018. Discovery of Renli Superlarge Pegmatite-type Nb-Ta Polymetallic Deposit in Pingjiang, Hunan Province and its Significances[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(2): 235-243(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiang, ZHOU Fang-chun, LI Peng, LI Jian-kang, HUANG Zhi-biao, SHI Wei-ke, HUANG Xiao-qiang, ZHANG Li-ping, SU Jun-nan. 2019. Geological characteristics and metallogenic age of Renli rare metal orefield in Hunan and its prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 771-791(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, LI Hong-yan. 1997. Research on genesis of the gold deposits in the Jiangnan terrain[J]. *Geochemica*, 26(5): 71-81(in Chinese with English abstract).

- MAO Jing-wen, LI Hong-yan, XU Yu, LUO Fu-ting. 1997. Geology and genesis of the Wangu gold deposit in Hunan province, China[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese).
- MAO Jing-wen, KERRICH R, LI Hong-yan, LI Yan-he. 2002. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Wangu gold deposit, Hunan province, China: Implications for mantle fluids along the Tanlu deep fault zone[J]. *Geochemical Journal*, 36(3): 197-208.
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Chao, DING Shuai, LANG XING-hai, LIU Hong-fei, HUANG Yong, ZHENG Wen-bao, WANG Li-qiang, GAO Yi-ming, FENG Jun, DUAN Ji-lin, SONG Yang, WANG Yi-yun, LIN Bin, FANG Xiang, ZHANG Zhi, YANG Huan-huan. 2014. Two porphyry epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau: Practice of "absence projecting" deposit metallogenic series[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1151-1170(in Chinese with English abstract).
- SHAN Liang, KE Xian-zhong, PANG Ying-chun, LIU Jia-jun, ZHAO Xin-min, WANG Jing, KANG Bo, ZHANG Kun. 2017. Zircon LA-ICP-MS U-Pb chronology, Lu-Hf isotopic characteristics and its geological significance of the Neoproterozoic magma activity in Lishan area from the Northeastern Hunan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(6): 32-42(in Chinese with English abstract).
- SHAN Liang. 2019. Metallogenic system of copper-lead-zinc-cobalt polymetallic deposits, northeastern Hu'nian Province, South China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- SHU Liang-shu, FAURE M, YU Jin-hai, JAHN B-M. 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 187(3-4): 263-276.
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, CHEN Zheng-hui, SHEN Bao-feng, TANG Zhong-li, PEI Rong-fu. 2011. Advance in the study of mineralization system and its application to assessment of mineral resources[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(4): 385-395(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, HUANG Fan, WANG Yan, PEI Rong-fu. 2020. Minerogenetic series group: discussion on minerogenetic series(VI)[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 18-35(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-qing, SHU Liang-shu, SANTOSH M. 2016. Petrogenesis and tectonic evolution of Lianyunshan complex, South China: Insights on Neoproterozoic and late Mesozoic tectonic evolution of the central Jiangnan Orogen[J]. *Gondwana Research*, 39: 114-130.
- WANG Lian-xun, MA Chang-qian, ZHANG Jin-yang, CHEN Ling, ZHANG Chao. 2008. Petrological and Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Early Cretaceous Taohuashan-Xiaomoshan Granites in Northeastern Hunan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 334-349(in Chinese with English abstract).
- WANG Lian-xun, MA Chang-qian, ZHANG Chao, ZHANG Jin-yang, MARKS M A W. 2014. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China[J]. *Lithos*, 206-207: 147-163.
- WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, GUO Feng, PENG Tou-ping, LI Chao-wen. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the Lithospheric Boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *International Geology Review*, 45(3): 263-286.
- WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, LIANG Xin-quan, PENG Tou-ping, SHI Yu-ruo. 2005. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(13): 1395-1403.
- WANG Yue-jun, ZHANG Fei-fei, FAN Wei-ming, ZHANG Guo-wei, CHEN Shi-yue, CAWOOD P A, ZHANG Ai-mei. 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. *Tectonics*, 29(6): 421-436.
- WANG Zhi-lin, XU De-ru, CHI Guo-xiang, SHAO Yong-jun, LAI Jian-qing, DENG Teng, GUO Fei, WANG Zhan, DONG Guo-jun, NING Jun-tao, ZOU Shao-hao. 2017. Mineralogical and isotopic constraints on the genesis of the Jingchong Co-Cu polymetallic ore deposit in northeastern Hunan Province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 638-654.
- WANG Zhi-lin, WANG Yu-fei, PENG Er-ke, ZOU Shao-hao, DENG Teng, LAI Feng, NING Jun-tao, DONG Guo-jun, XU De-ru. 2022. Micro-textural and chemical fingerprints of hydrothermal cobalt enrichment in the Jingchong Co-Cu polymetallic deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 142: 104721.
- WANG Zhi-lin, WU Yang, XU De-ru, ZOU Shao-hao, DONG Guo-jun, PENG Er-ke, NING Jun-tao, KANG Bo. 2020. Occurrence state and ore-forming regularity of critical metal cobalt in the Changsha-Pingjiang fault zone, northeastern Hunan Province[J]. *Gold Science and Technology*, 28(6): 779-785(in Chinese with English abstract).
- WEN Chun-hua, SHAO Yong-jun, XIONG Yi-qu, LI Jian-kang, JIANG Shao-yong. 2021. Ore genesis of the Baishawo Be-Li-Nb-Ta deposit in the northeast Hunan Province, south China: Evidence from geological, geochemical, and U-Pb and Re-Os geochronologic data[J]. *Ore Geology Reviews*, 129: 103895.
- XIONG Yi-qu, JIANG Shao-yong, WEN Chun-hua, YU Hao-yu. 2020. Granite-pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: Constraints from U-Th-Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon[J]. *Lithos*, 358-359: 105422.
- XU De-ru, WANG Li, LI Peng-chun, CHEN Guang-hao, HE Zhuan-li, FU Gong-gu, WU Jun. 2009. Petrogenesis of the Lianyunshan granites in northeastern Hunan Province, South China, and its geodynamic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1056-1078(in Chinese with English abstract).
- XU De-ru, DENG Teng, DONG Guo-jun, NING Jun-tao, WANG Zhi-lin, ZHANG Jun-ling, ZOU Feng-hui, ZHOU Yue-qiang, CHEN Gen-wen, YU De-shui, YE Ting-wei. 2017. Zircon U-Pb geochronological and geochemical characteristics of the Lianyunshan two-mica monzogranites in northeastern Hunan Province: implications for petrogenesis and tectonic setting associated with polymetallic mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 104-122(in Chinese with English abstract).
- XU De-ru, DENG Teng, CHI Guo-xiang, WANG Zhi-lin, ZOU Feng-hui, ZHANG Jun-ling, ZOU Shao-hao. 2017. Gold mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of South China: Geological, geochemical and geochronological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 565-618.
- XU Jun-wei, LAI Jian-qing, LI Bin, LU An-huai, ROCHOLL A, DICK J M, PENG Jian-tang, WANG Kai-lang. 2020. Tungsten mineralization during slab subduction: A case study from

- the Huxingshan deposit in northeastern Hunan Province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 124: 103657.
- XU Jun-wei. 2021. Research on Metallogenesis and Prospecting Prediction of the Huxingshan tungsten polymetallic deposit in the northeastern of Hunan Province[D]. Changsha: Central South University(in Chinese with English abstract).
- YANG Rong, FU Gong-gu, CHEN Bi-he, CHEN Jian-feng, SI Cheng-shan, LIU Bang-ding, ZHENG Zheng-fu. 2015. Geological characteristics of Qibaoshan Cu-polymetallic deposit in Hunan Province and its prospecting orientation[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(3): 246-252(in Chinese with English abstract).
- YANG Xue, ZHANG Yu-zhi, CUI Xiang, YU Peng-peng, XU Wen-jing. 2020. Geochemistry and Detrital Zircon U-Pb Ages of Sedimentary Rocks from Neoproterozoic Lengjiaxi Group in NE Hunan Province[J]. *Earth Science*, 45(9): 3461-3474(in Chinese with English abstract).
- YI Zu-shui, LUO Xiao-ya, ZHOU Dong-hong, XIAO Chao-yang. 2010. Geological Characteristics and Genesis of Jinchong Co-Cu Polymetal Deposit, Liuyan, Hunan Province[J]. *Geology & Mineral Resources of South China*, (3): 12-18(in Chinese with English abstract).
- YU De-shui, XU De-ru, ZHAO Zhao-xia, HUANG Qin-yi, WANG Zhi-lin, DENG Teng, ZOU Shao-hao. 2020. Genesis of the Taolin Pb-Zn deposit in northeastern Hunan Province, South China: constraints from trace elements and oxygen-sulfur-lead isotopes of the hydrothermal minerals[J]. *Mineralium Deposita*, 55: 1467-1488.
- YU De-shui, XU De-ru, WANG Zhi-lin, XU Ke, HUANG Qin-yi, ZOU Shao-hao, ZHAO Zhao-xia, DENG Teng. 2021. Trace element geochemistry and O-S-Pb-He-Ar isotopic systematics of the Lishan Pb-Zn-Cu hydrothermal deposit, NE Hunan, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 133: 104091.
- YUAN Shun-da, MAO Jing-wen, ZHAO Pan-lao, YUAN Ya-bin. 2018. Geochronology and petrogenesis of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit, northeastern Hunan Province: Implications for the metal source and metallogenic evolution of the intracontinental Qinhang Cu-polymetallic belt, South China[J]. *Lithos*, 302-303: 519-534.
- ZHANG Kun, XU De-ming, HU Jun-liang, LU You-yue, HUANG Hao. 2017. Petrogenesis of the granites in Sandun area-Constraints from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf Isotope[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(9): 1591-1600(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Kun, XU De-ming, NING Jun-tao, HU Jun-liang, LU You-yue, HUANG Hao, HU Jun, SHAN Liang. 2019. Petrogenesis of the Lianyunshan granites in Jingchong Co-Cu polymetallic deposit in northeastern Hunan: Constraints from zircon U-Pb chronology, petrochemistry and Hf isotope[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(1): 21-33(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Li-ya, ZHANG Cheng-cheng, ZHAO Fan, HUANG Ruo-long. 2019. Geological Characteristics and Genesis of Duanfengshan Niobium-tantalum Deposit in Hubei Province[J]. *Morden Mining*, 35(6): 45-50(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Liang, YANG Li-qiang, GROVES D I, LIU Yu, SUN Si-chen, QI Peng, WU Sheng-gang, PENG Jin-song. 2018. Geological and isotopic constraints on ore genesis, Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogen, southern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 99: 264-281.
- ZHANG Liang, GROVES D I, YANG Li-qiang, SUN Si-chen, WEINBERG R F, WANG Jiu-yi, WU Sheng-gang, GAO Lei, YUAN Lan-ling, LI Rong-hua. 2020. Utilization of pre-existing competent and barren quartz veins as hosts to later orogenic gold ores at Huangjindong gold deposit, Jiangnan Orogen, southern China[J]. *Mineralium Deposita*, 55: 363-380.
- ZHANG Li-ping, LI Peng, HUANG Zhi-biao, LIU Xiang, LI Jian-kang, HUANG Xiao-qiang, SU Jun-nan, ZHOU Fang-chun, ZENG Le, CHEN Hu, JIANG Peng-fei. 2021. Geochemical characteristics and metallogenic age of the No. 206 spodumene pegmatite vein in Renli rare metal ore field, Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 40(6): 1267-1284(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Jian-hua, CUI Jian-jun, SHI Wei, SU Jin-bao, LI Yong. 2012. The New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 257-279(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zheng, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, LI Jian-kang, LIU Shan-bao, CHEN Zhen-yu, GUO Chun-li, WANG Ping-an. 2022. Transformation of Mesozoic dynamic systems and superposition of metallogenic series of W-Sn-Li-Be-Nb-Ta-REE mineral deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2): 301-322(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Fang-chun, LIU Xiang, LI Jian-kang, HUANG Zhi-biao, XIAO Guo-qiang, LI Peng, ZHOU Hou-xiang, SHI Wei-ke, TAN Li-ming, SU Jun-nan, CHEN Hu, WANG Xuan-min. 2019. Metallogenic characteristics and prospecting direction of Renli super-large rare metal deposit in Hunan Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 77-91(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Fang-chun, HUANG Zhi-biao, LIU Xiang, SU Jun-nan, HUANG Xiao-qiang, WANG Zhen, CHEN Hu, ZHANG Zong-dong, LUO Xiao-rong, LI Jian-bin, LI Zhen-hong, ZHANG Li-ping, ZENG Le, LI Xu-ming. 2020. Re-Os Dating of Molybdenite from the Renli Nb-Ta Deposit, Hunan Province, and its Geological Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 476-485(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yue-qiao, DONG Guo-jun, XU De-ru, DENG Teng, WU Jun, WANG Xiang, GAO Lei, CHEN Xiao-gang. 2021. Scheelite Sm-Nd age of the Huangjindong Au deposit in Hunan and its geological significance[J]. *Geochimica*, 50(4): 381-397(in Chinese with English abstract).
- ZHU Ming-ming, ZOU Jian-lin, WANG Chuang, FENG Chao, FU Hong-lin, ZHAO Peng, CHEN Yang, XU Hai-jun. 2021. Mineralogy, geochronology and occurrence state of the Duanfengshan Nb-Ta deposit in Mufushan area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(6): 55-69(in Chinese with English abstract).
- ZOU Shao-hao, ZOU Feng-hui, NING Jun-tao, DENG Teng, YU De-shui, YE Ting-wei, XU De-ru, WANG Zhi-lin. 2018. A stand-alone Co mineral deposit in northeastern Hunan Province, South China: Its timing, origin of ore fluids and metal Co, and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 42-60.