



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：陆内伸展全温度域成矿模式及其在水口山地区的找矿突破

作者：王炯辉

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026126

投稿时间：2026-09-01

录用时间：2026-09-24

预出版时间：2026-09-24

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

引用格式: 王炯辉, 2026. 陆内伸展全温度域成矿模式及其在水口山地区的找矿突破[J].地质力学学报, 32 (5) 000-000. DOI: 10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2026126

Citation: WANG J H, 2026. The intracontinental-extensional full-temperature metallogenic model: application to the prospecting breakthroughs at the Shuikoushan ore field[J].Journal of Geomechanics, 32 (5) 000-000. DOI: 10. 12090 / j. issn. 1006-6616.2026126

陆内伸展全温度域成矿模式及其在水口山地区的找矿突破¹

王炯辉^{1,2}

WANG Jionghui^{1,2}

1 五矿勘查开发有限公司, 北京 100010;

2 中国五矿集团有限公司, 北京 100010

1 Minmetals Exploration and Development Co., Ltd., Beijing 100010, China ;

2 China Minmetals Corporation, Beijing, 100010, China

The intracontinental-extensional full-temperature metallogenic model: application to the prospecting breakthroughs at the Shuikoushan ore field

Abstract: [Objective] The central Nanling metallogenic belt is a representative region of intracontinental magmatic-hydrothermal mineralization in South China. Large Pb-Zn-Fe-Cu-Au-Ag deposits like the Shuikoushan ore field are concentrated in this belt but largely exhausted at shallow levels after a century of mining, making the succession of deep resources increasingly difficult. **[Methods]** To guide deep drilling in those old mines, this study systematically analyzes the metal sources, ore-controlling factors, temperature-dependent hydrothermal zonation, mineralization styles, and metal associations as well as their spatiotemporal coupling relationships across the material, structural, thermal, and metallogenic domains. **[Results]** The material domain reveals that magmas derived from different crustal levels and undergoing variable differentiation processes carry distinct metal inventories. Highly differentiated S- and A-type granites are enriched in W, Sn, Li, Be, Nb, and Ta, whereas weakly differentiated and oxidized I-type granodiorites are enriched in Fe, Cu, Au, Pb, and Zn. The structural domain shows that the intersections of deep faults and reversed folds, together with the calcareous-siliceous interfaces, provide the principal conduits and traps for ore-forming fluids. The thermal domain indicates that ore-forming metals are unloaded sequentially with decreasing temperature away from the intrusion. Tungsten, tin, molybdenum, and bismuth precipitate in the high-temperature proximal zone, together with iron and copper in the medium-high-temperature zone, lead, zinc, and gold in the medium-temperature zone, and gold and silver in the low-temperature distal zone. The metallogenic domain integrates the above three domains into a coherent framework, which can be summarized as one center, two structures, three systems, and multiple metals. This framework explains why distinct mineralization styles are superimposed within a single ore field. **[Conclusions]** On this basis, we propose an intracontinental-extensional full-temperature metallogenic model. This model emphasizes that magmas from different crustal levels and with variable differentiation were collectively emplaced at the intersections of deep faults and reversed folds. They successively formed high-temperature pegmatite-greisen Li-Be-Nb-Ta (400~600 °C), medium-to-high temperature skarn-porphyry W-Sn-Fe-Cu (250~550 °C), medium-temperature skarn Pb-Zn (200~450 °C), medium-low-temperature hydrothermal vein-type Pb-Zn-Au-Ag (150~350 °C), and epithermal Au-Ag (100~300 °C) mineralization. Distinct metallogenic systems can overlap at the same period. Application of this

¹**基金项目:** 国家科技重大专项 (2025ZD1008106); 战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心稀有金属矿产资源 (钨、锑、铋、铍) 开发全产业链科技攻关重点专项 (GC2026KJ010001, GC2026KJ010002)

第一作者: 王炯辉 (1964—), 男, 博士, 研究员, 长期从事资源勘查开发和新技术矿产研究利用等工作, Email: wangjh@minmetals.com

收稿日期: 2026-09-01; **修回日期:** 2026-09-24; **录用日期:** 2026-09-24; **网络出版日期:** YYYY-MM-DD; **责任编辑:** 范二平

Received: 2026-09-01; **Revised:** 2026-09-24; **Accepted:** 2026-09-24; **Available online:** YYYY-MM-DD; **Handling Editor:** Fan Erping

model to the Shuikoushan ore field achieved three prospecting breakthroughs, including the discovery of the IV-3 orebody cluster to the east of the F₂₂ fault at Kangjiawan via the "anticline + N faults" model, the recognition of high-temperature Cu-Au mineralization to the south of the Kangjiawan anticline based on the development of full-temperature mineralization along each concealed intrusion, the identification of skarn-porphyry type Cu-Fe-Au mineralization in the deeper Laoyachao-Yagongtang area guided by the concept that mineralization in different temperature domains serves as mutual prospecting indicators. [Significance] These results suggest that South China still holds extensive exploration potential for nonferrous and rare metals. The intracontinental-extensional full-temperature metallogenic model can provide new exploration strategies and target directions within mature mining districts.

Keywords: Intracontinental-extensional setting; Full-temperature metallogenic model; Nanling; Shuikoushan; Prospecting breakthrough

摘要: 南岭成矿带中段是华南陆内岩浆热液复合成矿作用的典型区域,以水口山矿田为代表的大型铅锌铁铜金银多金属矿床集中发育,但经过百余年开发后浅部资源日渐枯竭,深部资源接续困难。文章从物质域、构造域、温度域和成矿域 4 个维度出发,系统分析了区域有色稀有金属成矿系统的物质来源、控矿构造、温度分带、矿种组合及其时空变化关系,建立了陆内伸展全温度域成矿理论模式。该模式强调不同地壳层位来源、不同分异程度的岩浆在深大断裂与复式褶皱交汇空间集中侵位,递次发育高温伟晶岩-云英岩锂铍钨钽矿化(400~600 °C)、中高温矽卡岩-斑岩型钨锡铁铜矿化(250~550 °C)、中温矽卡岩型铅锌矿化(200~450 °C)、中-低温热液脉型铅锌金银矿化(150~350 °C)和浅成低温热液型金银矿化(100~300 °C)的完整成矿序列。以该理论为指导开展水口山矿田深边部找矿,提出“背斜+N 刀”找矿模型在康家湾矿区 F₂₂ 断裂以东新揭露 IV-3 矿体群;基于隐伏岩体独立发育全温度域矿化的认识揭露康家湾倒转翼深部高温铜金矿化;基于不同成矿温度域互为找矿标志理念在老鸦巢—鸭公塘深部揭露了矽卡岩型铜铁矿体和斑岩型铜金矿化线索。上述找矿实践表明,华南地区仍有广阔的有色稀有金属找矿空间,陆内伸展全温度域成矿模式可为勘查程度较高的老矿山深边部找矿提供新的找矿思路与方向。

关键词: 陆内伸展;全温度域成矿;南岭;水口山;找矿突破

中图分类号: P612 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(202×)00-0000-00

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026126

0 引言

南岭成矿带地处中国中东部,横跨赣、湘、粤、桂四省区,是中国乃至全球最重要的有色稀有金属矿集区,具有空间分布范围广、成矿时代集中、共伴生金属种类多样、矿床成因类型复杂的特点(陈毓川等,1989;舒良树等,2006;毛景文等,2007;陈骏等,2014)。新中国成立以来,南岭开展了多轮找矿会战,并在长期实践过程中系统总结了“五层楼”钨矿、离子吸附型重稀土矿、花岗岩型铀矿以及成矿系列等成矿与找矿模型(程裕淇等,1979;郑永飞,1986;陈德潜和吴静淑,1990;胡瑞忠,1990;黄国龙等,2006;许建祥等,2008;王登红等,2010;赵芝等,2017),极大丰富了中国岩浆热液体系和表生成矿体系的认识,为南岭现有大型一超大型钨、锡、稀土、铀及其他稀有稀散元素的勘探提供了理论指导。

然而随着浅部资源的枯竭,现有成矿理论对隐伏矿床的预测能力受限,常规地球物理与地球化学探测手段难以准确刻画区域复杂的地壳物质结构,深部找矿难度与找矿成本与日俱增(陈毓川等,1989;秦拯纬等,2022;王登红等,2022)。其中,多期次的构造运动和大规模的岩浆热液活动导致单一矿床的成矿要素难以识别,“五层楼+地下室”找矿模型可能叠加斑岩系统矿化,也可能存在横向矿化分带,经典成矿模型在复合成矿系统中的应用难度加大。此外,以往未被重视的低分异花岗岩和稀有稀散小矿种近年来逐渐受到关注(翟裕生等,2009;李胜虎,2015;Yang et al.,2018),亟需发展新的成矿理论指导新类型矿床勘查工作。与此同时,南岭地区大部分矿山开发已逾百年,复杂的巷道工程和强烈的地表活动严重干扰常规地球化学与地球物理探测手段,千米以深的成矿信息无法有效获取,深部资源勘查面临严峻挑战(赵鹏大等,2004)。为此,亟需

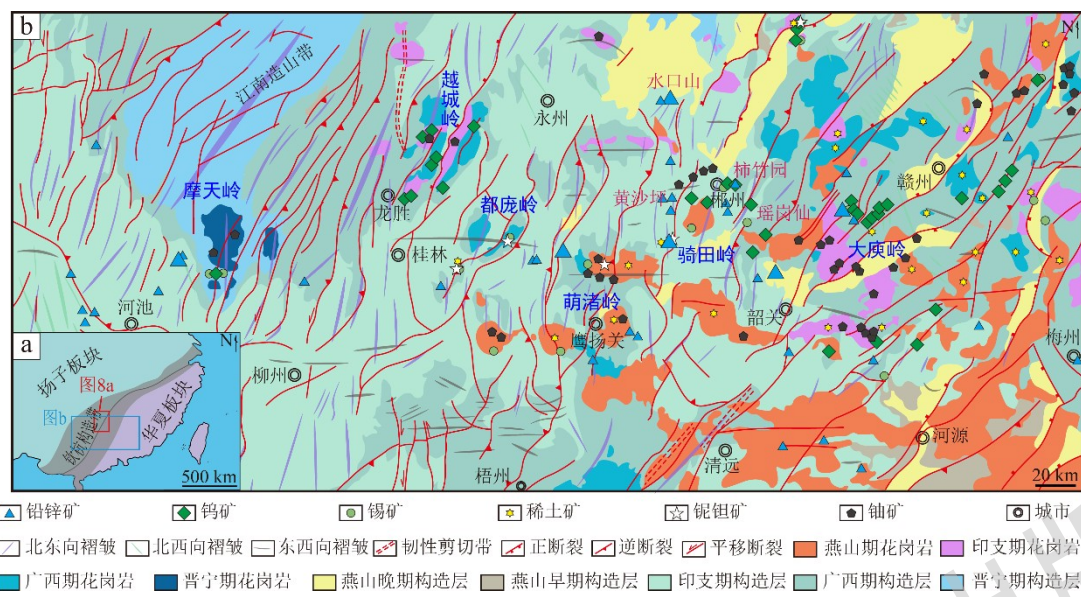
开展区域复合成矿系统理论再认识工作，依托南岭百年来积累的丰富地质资料梳理区域成矿演化规律和找矿标志，评价老矿山深边部找矿潜力，梳理找矿思路，提高深部钻探成功率。

作者团队长期从事华南地区矿产资源勘查工作，探索建立了适用于玢岩型铁（硫）矿深部勘查的找矿模型，成功突破庐枞盆地千余米覆盖层定位深部大型铁矿体（王炯辉等，2013）；开展两广地区钨锡多金属找矿工作，突破“东钨西锡”的经典认识，探获2座大型钨矿（王炯辉等，2014，2019）；深入分析华南地区离子吸附型重稀土矿床分布规律，推动南岭地区稀土资源整合开发（王炯辉等，2015）。基于已有的理论研究和上述找矿实践，总结发现南岭成矿带中段是华南地区中生代成矿大爆发最集中的区域。不同于长江中下游成矿带普遍发育的玢岩型-斑岩型/矽卡岩型高温铁铜（金）成矿系统和华夏板块中与花岗岩有关的高温钨锡锂铌钽矿床（周涛发等，2008；赵正等，2022），也区别于湘黔桂地区大面积分布的金锑汞砷矿低温矿化系统与川滇黔密西西比河谷型铅锌矿床（胡瑞忠等，2010，2016），南岭中段不仅发育典型的高温矽卡岩-云英岩-石英脉型钨锡钼铋矿床和斑岩-矽卡岩型铁铜铅锌矿床，其矿床顶部及外围还发育典型的中-低温热液脉型铅锌银（金）矿化与浅成低温热液型金银矿化，此外盆地热卤水循环还可形成大规模锑铅锌矿化（王炯辉，2024）。因此，南岭中段同一矿田内通常不止发育特定的高温或低温金属矿化，不同温度域的成矿系统往往在空间上彼此叠加，矿化分带显著，基本涵盖了华南陆内成矿体系典型的矿床类型和矿种组合，具有完整且鲜明的高-中-低温“全温度域”连续成矿特色，是开展南岭成矿理论再认识研究的理想地区。

文章主要基于作者团队2018年以来南岭边深部找矿的实际理论技术经验，重点聚焦不同成矿温度域有色稀有金属矿化类型与矿化组合特点，系统建立陆内伸展环境全温度域成矿理论模式，在水口山、黄沙坪、锡矿山、瑶岗仙等百年老矿山开展找矿实践，为新时期南岭找矿工作提供借鉴。

1 成矿地质背景

南岭成矿带位于华南板块中南部，属于新元古代扬子板块沿江南造山带与华夏板块碰撞拼合形成的华南大陆的一部分（舒良树等，2006，图1）。古生代以来，南岭地区构造运动频繁，经历多期次挤压—伸展作用，主要包括扬子—加里东期、海西—印支期和燕山—喜马拉雅期3个主要的构造旋回，分别发育东西向、北西向、北北东向构造框架，并伴随强烈岩浆活动和以燕山期为主的大规模成矿事件。南岭中段大地构造位置为扬子陆块与华夏陆块拼接过渡区域——钦杭结合带中南段，由早到晚经历了武陵期活动大陆边缘盆地、雪峰期—南华纪陆内裂谷盆地、震旦纪—早奥陶世被动陆缘盆地、中奥陶世—志留纪前陆盆地、泥盆纪—中三叠世陆表海盆地、晚三叠世—第四纪陆相盆地及地壳抬升7个大的构造阶段（柏道远等，2022；王登红等，2022）。区域地层分布总体较为连续，包括前寒武系变质结晶岩基底和古生代—中生代沉积盖层结构。不同层位在成矿过程中起着矿源层、屏蔽层、容矿层的作用。前寒武系—寒武系浅变质砂岩、板岩具有较高的钨背景值，可能成为区内岩浆—热液型钨矿床的成矿物质来源（江西省地质矿产局，1984）。古生代—中生代碳酸盐岩具有较高的孔隙度和渗透性，有利于流体在地层中弥散；中生代泥岩及页岩地层孔隙度较低，是理想的流体屏蔽层位。碳酸盐岩与砂页岩交互发育的海陆过渡相层位，易于成为构造薄弱面和流体运移界面。伴随区域挤压伸展作用，南岭中段广泛出露印支期和燕山期花岗岩或花岗闪长岩组成的复式岩体，围绕上述复式岩体发育有W、Sn、Pb、Zn、Fe、Cu、Au、Ag等多金属矿化，构成了以岩体为中心的成矿热液系统。



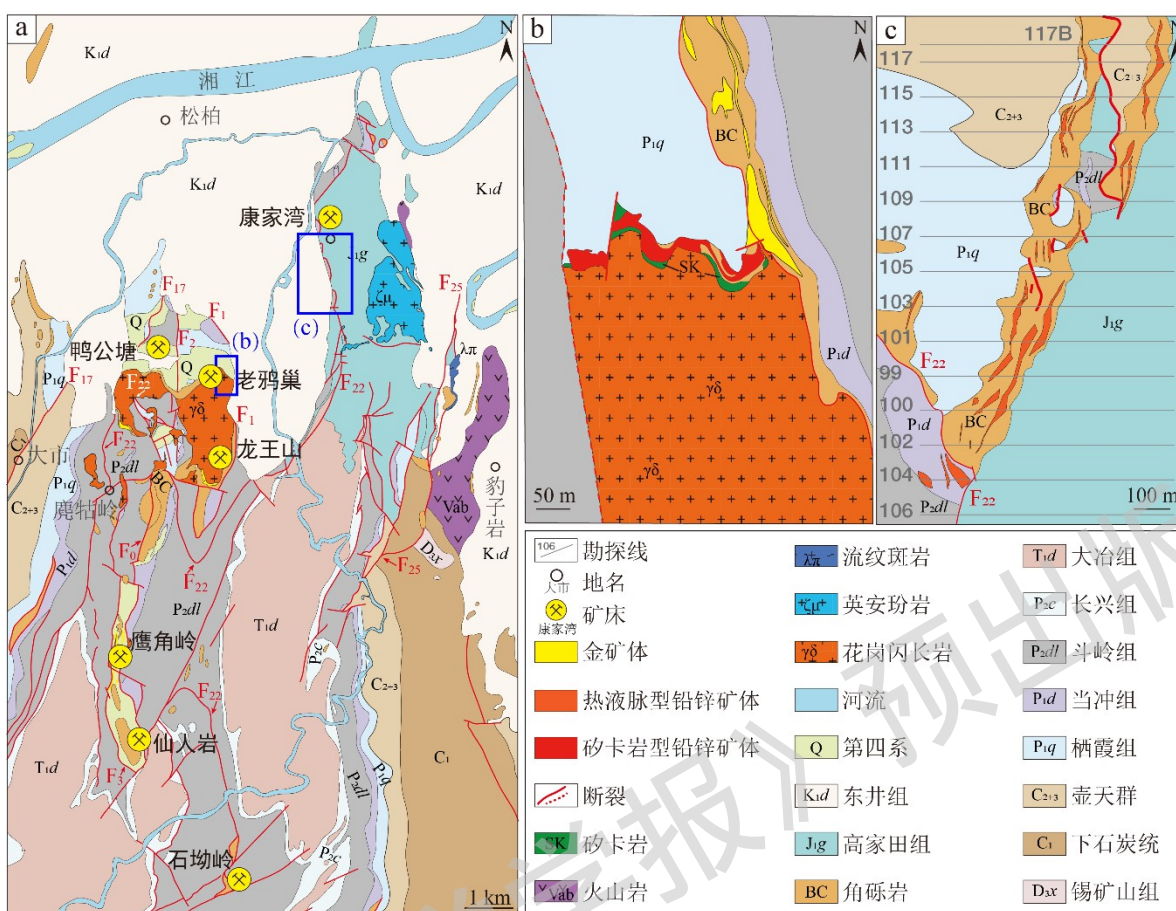
a—南岭成矿带构造位置简图；b—南岭成矿带地质构造与典型矿产分布简图（据徐先兵等，2021 修改）

图 1 南岭成矿带构造位置与地质矿产简图

Fig. 1 Simplified tectonic and geological map of the Nanling metallogenic belt showing the distribution of typical mineral deposits

(a) Simplified tectonic map of South China showing the location of Nanling metallogenic belt; (b) Simplified geological map of the Nanling metallogenic belt showing the distribution of typical mineral deposits (modified after Xu et al. 2021).

水口山矿田位于衡阳盆地南缘、耒阳—临武南北向褶皱断裂带北缘，地处盆-山转换、岩石圈由薄变厚的幔坡地带，受北东向和近东西向区域深大断裂夹持（李能强和彭超，1996；王炯辉，2024；图 2a）。矿田沉积基底以前寒武系浅变质冰川沉积岩为主，分布于衡阳盆地东北缘，属华夏板块西北缘沉积产物。盖层包括早古生代—二叠纪半深海—滨/浅海碳酸盐岩和碎屑沉积岩，集中出露于矿区中西部和南部。三叠纪之后矿区发生显著抬升，大量碳酸盐岩地层被剥蚀，形成一系列山间盆地，上覆侏罗纪陆相碎屑岩沉积。白垩纪区域发生沉陷，局部发育陆源红层。伴随侏罗系区域伸展作用，大量中酸性岩浆沿北北东向深大断裂侵位至背斜核部，与上覆砂岩层、区域断裂构成“三角地带”，同时诱发区域大规模岩浆热液活动和成矿事件，构成由老鸦巢铅锌矿床（图 2b）、鸭公塘铁铜矿床、康家湾铅锌矿（图 2c）、龙王山金矿床、仙人岩金矿床和外围多个矿化点组成的水口山铅锌金银铁铜矿田。



a—水口山矿田地质简图（据李能强和彭超，1996）；b—老鸦巢 11 中段地质平面图；c—康家湾 12 中段地质平面图

图 2 水口山矿田地质简图与老鸦巢、康家湾矿床地质平面图

Fig. 2 Simplified geological map of the Shuikoushan ore field and Laoyachao, Kangjiawan deposits

(a) Simplified geological map of the Shuikoushan ore field (after Li and Peng, 1996); (b) Geological map of the Laoyachao deposit at mine level 11; (c) Geological map of the Kangjiawan deposit at mining level 12

水口山矿田成矿作用时间长、矿化类型复杂、矿种组合多样，关于矿床的成矿成因类型与找矿思路的认识不断演变，主要包括以下 4 个阶段。

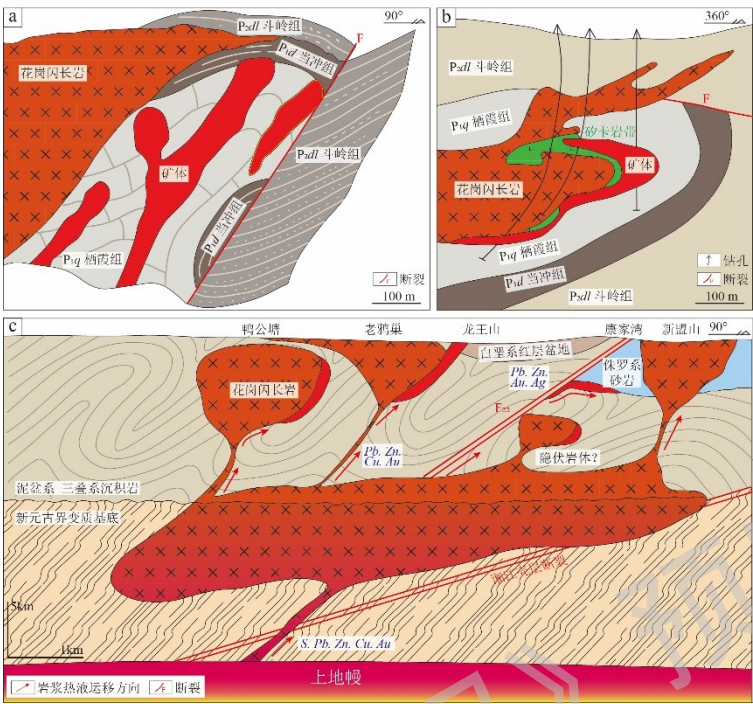
1.1 早期探索阶段

水口山矿田的现代地质研究始于 20 世纪 40 年代，刘国昌（1946）首先对区域地质单元进行了详细描述并识别出倒转背斜及其伴生的逆冲断裂系统。多位学者系统论证了花岗闪长岩与碳酸盐岩地层接触关系，提出接触交代热液成因矿床的基本认识（张有正，1957；图 3a），以此指导矿山围绕超覆岩体和围岩破碎带开展探矿工作，通过控制矽卡岩接触带延展空间探获十余万吨铅锌资源。

1.2 隐伏矿体定位阶段

20 世纪 70 年代中后期，水口山矿田老鸦巢铅锌矿逐步枯竭，矽卡岩型矿床找矿难度较大。相关学者通过引入浅成低温热液矿床成矿模式，明确区域金矿化受断裂控制，远离岩体的断裂破碎带和岩体顶部同样具有找矿潜力。217 地质队通过总结矿体分布规律，提出“倒转背斜+岩体超覆+砂页岩盖层”的“三角地带成矿”找矿模型（巩小栋等，2011；图 3b），相继发现鸭公塘和中区 2 个隐伏矿床。随后地质勘查工作对有利成矿要素的空间展布进行分析，判断水口山岩体外围还存在平行找矿空间，通过化探分析和电法测试定位康家湾地区

隐伏F₂₂断裂和上覆红层，在地表以下391 m见矿。以上工作累计探获巨大铅锌金银资源量。



a—接触带控矿模型（张有正，1957）；b—“三角带”找矿模型（李能强和彭超，1996）；c—多因复成成矿模式（杨传益，1985）

图3 不同时期的水口山矿田找矿模型

Fig. 3 Prospecting models of the Shuikou Mountain ore field in different periods

(a) Contact-zone model; (b) "Triangular belt" prospecting model; (c) Polygenetic superimposed metallogenic model

1.3 多种成矿模式并存阶段

进入20世纪90年代，随着外围矿床的陆续发现，水口山矿田的成因认识日趋多样。部分学者（银剑钊和王敏初，1993；高学兑，1995）提出区域金矿化包含隐爆角砾岩复合型（老鸦巢）、热液硅化角砾岩型（康家湾）、风化淋滤铁帽型（龙王山）以及黑土夹角砾型，并建立了相应的找矿评价标志体系。部分学者（石静坤和王清河，1988；喻亨祥和刘家远，1997b）则基于矿石结构类型和同位素分析结果分别提出康家湾矿床属于中温岩浆热液矿床和发育地洼型古岩溶铀金矿床的论断。同时，学界也注意到水口山矿田发育一系列浅成超浅成侵入岩浆活动（杨传益，1985；喻亨祥和刘家远，1997a），提出“多位一体、多因复成”的成矿模式（图3c），初步揭示水口山矿田不同类型矿化之间的成因关联。

1.4 深化研究阶段

21世纪初，伴随鸭公塘闭坑、老鸦巢枯竭、康家湾矿床可采富矿保有量不足5年，对水口山矿田的研究也逐步转向深部成矿动力学过程及外围找矿潜力进行评价。系统的年代学和同位素地球化学分析结果显示，水口山矿田各类型矿床均是中一晚侏罗世花岗闪长质岩体侵位的产物。成矿岩体侵位到水口山矿田深大断裂与背斜交汇部位，派生出的含矿热液主导了老鸦巢矽卡岩型铁铜矿床、老鸦巢矽卡岩型铅锌矿床和硅化角砾岩型金矿床、康家湾热液脉型铅锌金银矿床的形成（李永胜等，2011，2021；左昌虎，2015）。

尽管关于水口山矿田的矿床成因认识趋于统一，不同金属矿化类型在空间上的分带规律和控矿要素分歧仍然较大。部分学者（李永胜等，2012）从成矿岩体认识出发，提出在水口山矿田深部寻找斑岩型铜钼矿床和蚀

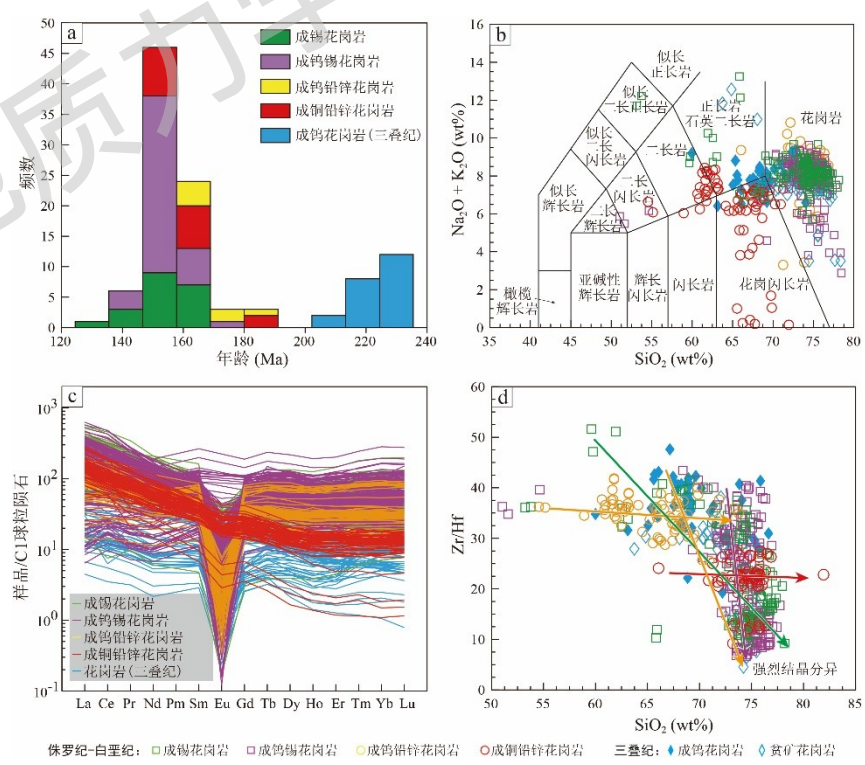
变岩型金矿床，并认为老鸦巢—鸭公塘是矿田热液活动中心，康家湾是远离成矿中心的远程矿化系统。以郭闯等（2023）为代表的研究对矿田内的成矿构造进行识别，提出钙硅界面控矿和 F₂₂ 断裂控矿的认识，并建立了经典的“背斜+1 刀”的找矿模式。由此出发，过去 20 年来区域找矿工作主要围绕水口山岩体外围接触带和康家湾 F₂₂ 断裂南北向延伸区域开展。其中，老鸦巢—鸭公塘矿区岩体边界已基本查明，接触带矽卡岩型矿化在深部连续性较差，尚未揭露具有经济价值的斑岩体。康家湾矿床北部经过钻孔的系统控制（图 2c），找矿效果不佳，西侧为厚大的白垩系覆盖层，向东侧远离 F₂₂ 断裂则含矿层位逐渐尖灭，向南侧 I 号矿体矿化趋势消失，已不存在“背斜+1 刀”模型理想的成矿空间。水口山矿田找矿工作因此陷入停滞，其所在的常宁市也在 2011 年被纳入第三批资源枯竭型城市名单。

2 全温度域成矿理论再认识

找矿工作，理论先行。南岭中段有色稀有金属成矿系统物质来源多样、岩浆成分差异显著、构造控矿复杂、成矿分带显著、矿化组合丰富，是研究陆内伸展背景下岩浆热液成矿作用的理想对象，水口山矿田是其中的典型代表。为进一步厘清南岭中段有色稀有金属复合成矿过程，探讨中生代岩浆侵位与集中矿化事件的成因联系，厘定不同成矿类型关键控矿要素和找矿标志，文章分别从物质域、构造域、温度域和成矿域角度对区域典型矿床进行总结分析，建立陆内伸展背景全温度域成矿理论，指导矿山深边部找矿工作。

2.1 物质域：不同地壳层位来源岩浆集中侵位

南岭中段中生代岩浆活动主要集中于晚三叠世、中晚侏罗世和早白垩世（图 4a），大地构造背景与秦岭造山带远场挤压效应以及古太平洋低角度俯冲伴随的伸展作用密切相关（华仁民等，2005；毛景文等，2007），伴随区域伸展和软流圈底部加热，不同地壳层位来源和不同演化程度的岩浆房上涌侵位至北北东或北北西向深大断裂交汇部位，导致 W-Sn、W-Sn-Pb-Zn、Cu-Pb-Zn-Au-Ag 在岩浆热液系统中差异化富集。



a—成矿有关花岗岩锆石 U-Pb 年龄频率图；b—SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解；c—稀土元素蛛网图；d—SiO₂-Zr/Hf 图解

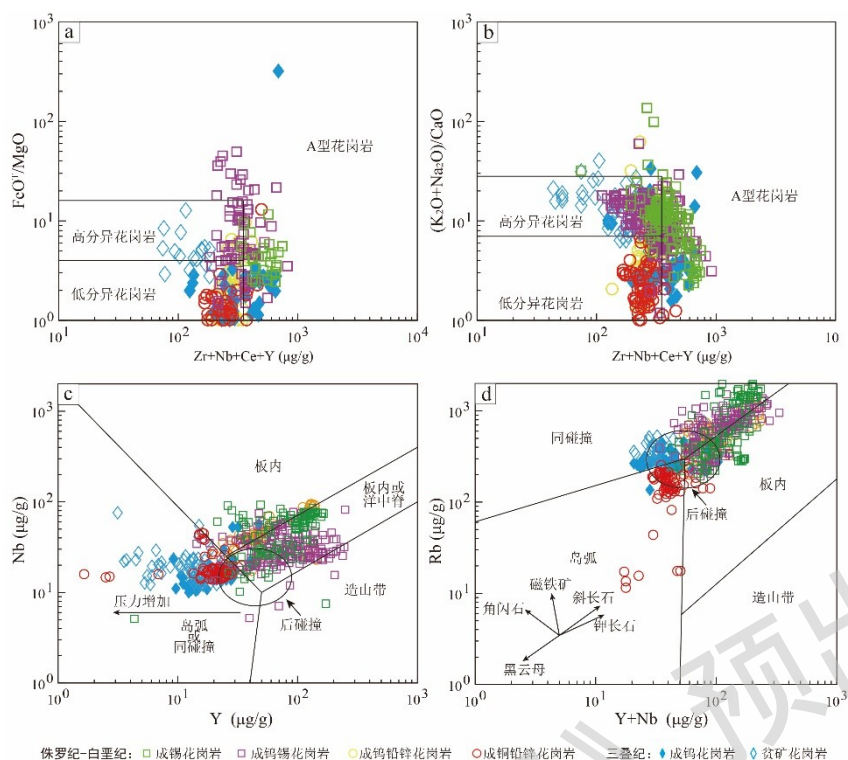
图4 南岭中段岩浆活动期次与岩浆成分图解（数据来源参见附加材料表1）

Fig. 4 Magmatic episodes and intrusion composition diagrams of the middle Nanling belt (See Appendix Table 1 for reference)

(a) The summary of zircon U-Pb ages of mineralized granites; (b) SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) diagram; (c) Rare Earth element pattern; (d) SiO_2 -Zr/Hf diagram

其中，晚三叠世区内主要发育壳源重熔S型花岗岩，岩浆源区多为华南陆块古老盖层，白云母部分熔融过程中释放大量成矿金属元素，这类花岗岩因此具有较高的钨背景值，就位过程中进一步发生强烈的斜长石结晶分异作用，导致残余岩浆高度富集不相容元素和挥发分，进一步形成钨多金属矿床（柏道远等，2007；褚杨等，2011；图4，图5）。中一晚侏罗世区域完成构造转换，大量俯冲带流体交代岩石圈地幔并加热不同深度地壳发生部分熔融。这一时期中上地壳地壳部分熔融形成的A型花岗岩来源略深，混染了一定量的深部地幔物质（图6），前者沿古老地体边缘深大断裂上涌过程中经历了高程度的结晶分异，大量斜长石通过结晶作用从岩浆房抽离，残余熔体四组分效应显著（图4c），强烈富集W、Sn、Li、Be、Nb、Ta、F、B等不相容元素，构成区域W、Sn矿化的物质基础（Chen et al., 2016; Huang et al., 2017; 秦拯纬等，2022）。中一晚侏罗世深部地壳部分熔融形成的I型花岗岩则通常具有较高的幔源组分和亲铜元素含量，地球化学组分显示其源区残留角闪石或少量石榴子石（图5），岩浆氧逸度较高，结晶分异不显著。这类花岗岩岩浆沿地壳薄弱区域快速上涌并就位至区域裂陷盆地周缘，构成区域Cu、Au、Pb、Zn、Ag矿床的成矿物质基础。

南岭地区不同岩浆热液成矿系统的成矿岩体具有差异化的物质组成，其中低分异岩体侵位时代集中于181~148 Ma，全岩 SiO_2 含量普遍低于73%（图4b），具有较低的铁镁比值（ $\text{Fe}/\text{Mg}<2$ ）、钠钾含量（ $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}<7\%$ ）和铷锶比值（ $\text{Rb}/\text{Sr}<24$ ），长石结晶分异不显著，Eu异常值一般大于0.24（图4c，图5），锆石氧 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 可大于200（秦拯纬等，2022）。晚三叠世到早白垩世侵位的高分异花岗岩经历了显著的锆石、磷灰石、长石、黑云母等结晶分异，这些花岗岩普遍具有较高的 SiO_2 含量（ $>73\%$ ）和铁镁比值（ $\text{Fe}/\text{Mg}>2$ ），通常还具有异常高的Rb含量（ $>400\text{ }\mu\text{g/g}$ ）和与 SiO_2 负相关的Zr/Hf比值（图4d，图5）。值得注意的是，全岩钨同位素和锆石钨同位素在判别岩浆成矿潜力与成矿系列时难度较大，不同地壳层位来源的岩浆之间同位素混染较为显著，钨同位素存在明显解耦（图6）。为克服传统放射性同位素受源区混染与高度结晶分异的不利影响，可采用锆、钡等非传统稳定同位素开展演化过程研究。Wang et al. (2025)研究表明，花岗岩全岩及其锆石的 $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ 值与岩浆结晶分异程度相关（图6）。南岭花岗岩的全岩 $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ 呈现出巨大差异，是高分异花岗岩显著锆石结晶分离的结果，这种分离过程同时伴随铀、钨、锡、铍在残余岩浆中的高度富集，相对更重的锆同位素组成能有效指示岩体形成W-Sn-Mo-Bi-Li-Ta-Nb-Be-U矿床的潜力。



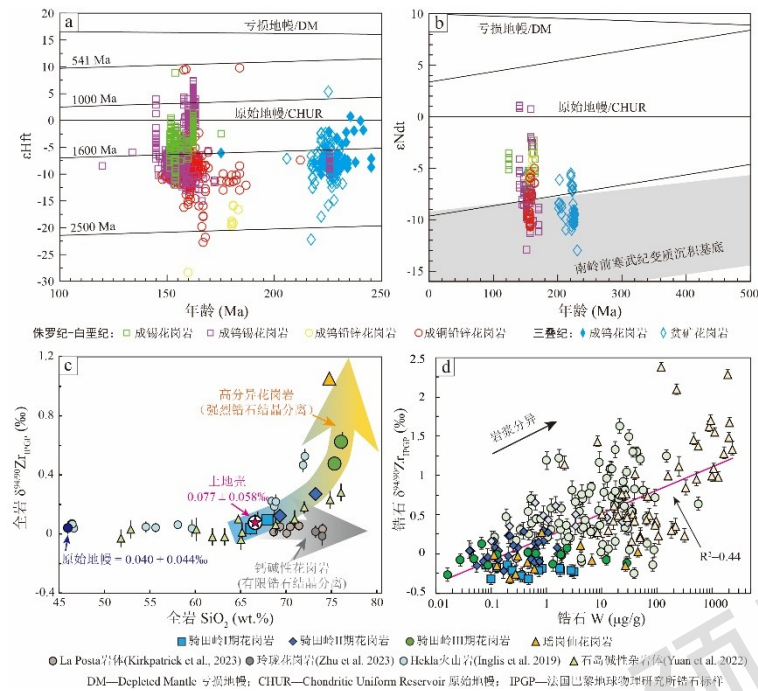
a— $(Zr+Nb+Ce+Y)-FeO^T/MgO$ 图解；b— $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO$ 图解；c—Y-Nb 图解；d— $(Y+Nb)-Rb$ 图解

图 5 南岭中段岩浆分异程度与构造环境判别图（数据来源同图 4）

Fig. 5 Magma differentiation and tectonic setting discrimination diagrams of the middle Nanling belt (See figure 4 for reference)

(a) $(Zr+Nb+Ce+Y)-FeO^T/MgO$ diagram; (b) $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO$ diagram; (c) Y-Nb diagram; (d) $(Y+Nb)-Rb$ diagram

由此，构成南岭中段差异性 W-Sn-Li-Be-Nb-Ta-Pb-Zn-Fe-Cu-Au-Ag 成矿组合的物质中心源于不同地壳层位来源并集中侵位的壳幔混源岩浆，三叠纪上地壳重熔 S 型花岗岩源区浅、演化程度高，主导区域 W-Ta-Nb-Sn 多金属成矿，晚侏罗世中—上地壳来源 A 型花岗岩结晶分异显著，形成多个世界级 W-Sn-Mo-Bi-Be 多金属矿床，中—晚侏罗世 I 型花岗闪长岩来源最深，地幔物质占比高，分异程度低，是区域 Fe-Cu-Pb-Zn-Au-Ag 矿化的母岩浆。



a—锆石年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解；b—岩体年龄- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解图解；c—全岩 SiO_2 -全岩 $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ 图解；d—锆石 W-锆石 $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ 图解

图6 南岭中段岩浆岩 Hf-Nd 同位素解耦与锆同位素分异成矿指示图 (王炯辉, 2024; Wang et al., 2025)

Fig. 6 Diagrams showing the decoupling of Hf-Nd isotopes and zircon isotope indicators for mineralization potential in the middle Nanling belt (Wang, 2024; Wang et al., 2025)

(a) zircon age- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram; (b) intrusion age- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram; (c) whole rock SiO_2 - $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ diagram; (d) zircon W- $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ diagram

2.2 构造域：深大断裂与复式褶皱提供成矿空间

华南地区经历前寒武纪基底沉积变质作用、古生代盖层沉积与陆内造山作用、中生代俯冲伸展与陆内裂陷沉积作用，发育多期次的深大断裂与复式褶皱系统，为不同深度来源岩浆热液提供了运移通道和就位空间，造就了区域复杂的成矿样式组合（图1，图7）。其中，区域东西向、北北西向、北北东向深大断裂构成深部岩浆的运移通道（图8a），不同断裂交汇部位更是岩体就位的理想位置，决定了深部含矿物质向上运移的潜力。在地壳隆升区域，与中生代钨多金属矿床有关的S型和A型花岗岩多就位于北北东向深大断裂及其次级构造区域，源于地壳重熔并高度演化的岩浆热液与碳酸盐岩围岩发生交代反应形成矽卡岩型钨矿，沿砂岩地层破碎带和地层不整合面运移形成典型的“五层楼式”石英脉型钨多金属矿（Yuan et al., 2007; Liao et al., 2021）。在地壳凹陷区域，深部断裂更有利于幔源岩浆侵位，不同地壳层位来源岩浆在水口山、黄沙坪等矿田尺度上集中侵位，形成多个复式岩体并派生出不同类型有色金属成矿系统（左昌虎, 2015）。在陆内伸展盆地，深部岩浆活动驱动盆地卤水循环萃取前寒武系变沉积基底，锑金汞铅锌等金属在中低温热液中沿断裂迁移至特定层位发生沉淀，构成湘黔桂地区大面积发育的低温矿化系统（Hu and Zhou, 2012; Fu et al., 2023）。

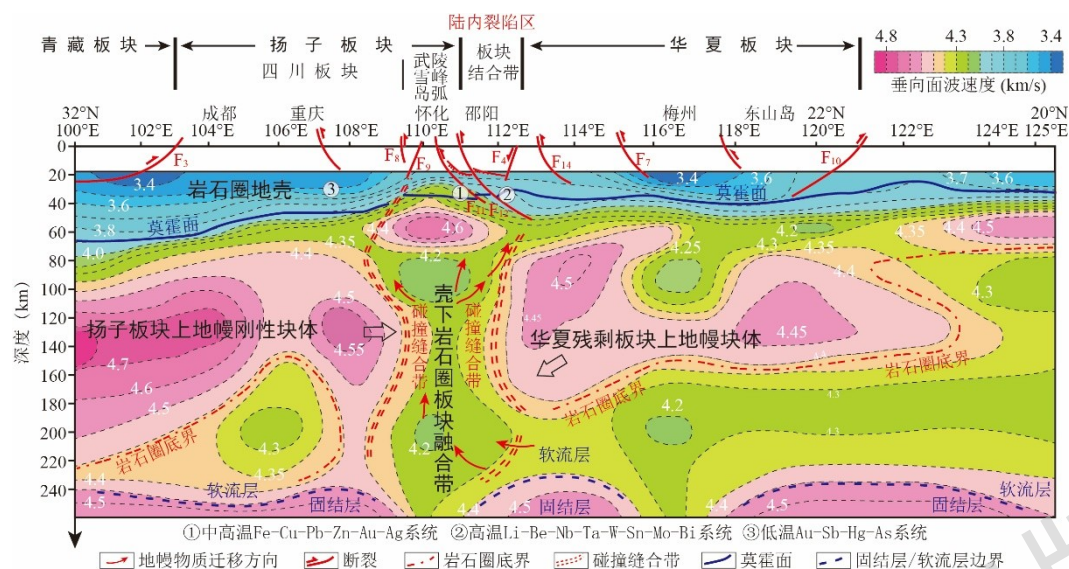
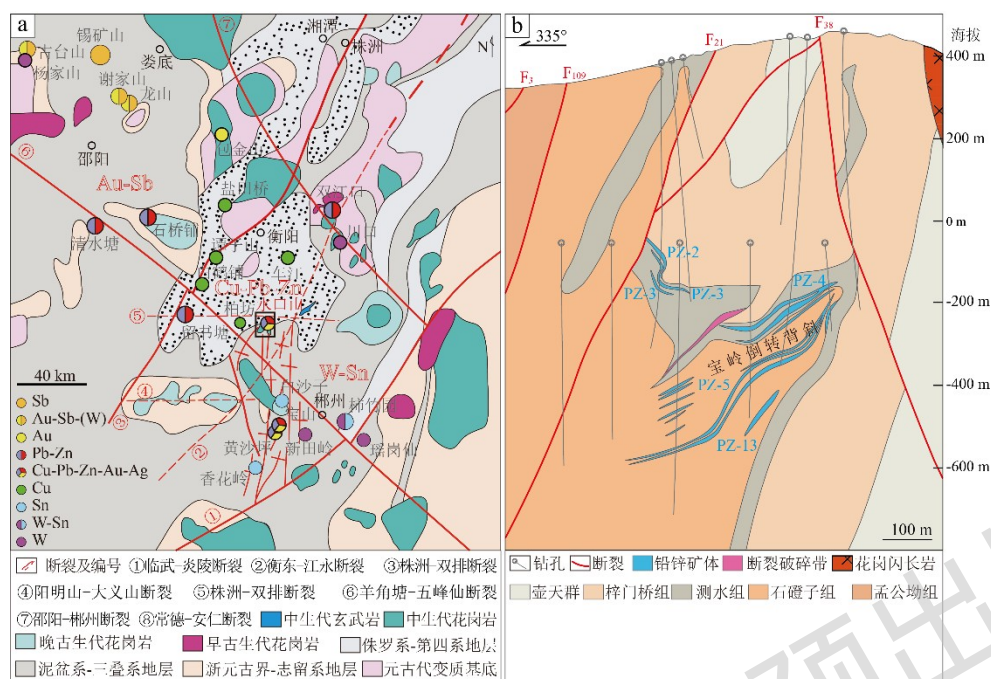


图 7 邛崃山—东山岛垂向面波速度断面和古板块推断断面图（据饶家荣等，2012 修改）

Fig. 7 The cross-section map showing the surface-wave velocity and inferred paleo-plate section between the Qionglai Mountains and Dongshan Island (after Rao et al., 2012)

相比深大断裂，区域浅表复式褶皱是成矿岩浆热液体系就位的理想屏障（图 8b）。华南地区自华夏地块与扬子地块沿江南造山带碰撞缝合以来长期处于稳定环境，古生代—早中生代时期沉积了厚层的碳酸盐岩和砂页岩盖层。伴随印支期古特提斯洋南北向碰撞造山作用、燕山期古太平洋北西向俯冲作用和喜马拉雅期新特提斯洋东西向碰撞走滑运动，区域沉积盖层发生不同程度挤压并形成“倒转背斜+系列逆冲断裂”的构造样式组合，碳酸盐岩与碎屑岩不整合面在推覆过程中发生构造滑脱。因此，当成矿流体沿系列逆冲断裂运移并向背斜核部聚集时，先期形成的断裂破碎带和层间滑脱面就构成了流体理想的卸载空间，上覆砂页岩地层能有效防止成矿热液弥散，共同主导了包括铅锌金银在内的中—低温矿种成矿（图 8b）。与此同时，中国中东部地区在古太平洋俯冲过程中发育了一系列走滑拉分盆地（Zhang et al., 2022），形成厚层的侏罗纪砂岩盆地和白垩纪红层沉积，为深部地壳上涌的岩浆提供良好的盖层保护空间。



a—南岭中段地质矿产简图；b—湖南宝山铅锌矿典型剖面地质图

图 8 南岭中段构造地质格架简图与宝山铅锌矿典型剖面地质图 (李能强和彭超, 1996; 谭仕敏等, 2016)

Fig. 8 Simplified tectonic framework of the middle Nanling belt and geological section of the Baoshan Pb-Zn deposit (after Li and Peng, 1996; Tan et al., 2016)

(a) Simplified geological map of the central Nanling belt showing the location of typical mineral deposits; (b) Representative geological section map of the Baoshan Pb-Zn deposit in Hunan

2.3 温度域：高中低温连续分带矿化

南岭中生代陆内伸展背景下，富含多种成矿金属元素的岩浆热液进入浅部就位空间，通过岩体内部的高温斑岩-伟晶岩化、岩体边缘的中高温云英岩化-矽卡岩化、远端通道的中—低温热液充填卸载、外围浅成低温热液蚀变等方式，可形成多种类型的有色稀有金属矿化，共同构成了包括水口山、黄沙坪、柿竹园、瑶岗仙、宝山等矿床主要的成矿样式组合。厘清不同成矿元素随温度递变的空间矿化分带规律，对新时期老矿山深边部隐伏资源的定位尤为重要。

结合南岭地区中生代成矿岩浆的物质专属性和成矿空间的构造特殊性，可将区内成矿岩浆热液系统划分为高分异岩体 W-Sn-Li-Bc-Nb-Ta-Pb-Zn-Ag 和低分异岩体 Fe-Cu-Pb-Zn-Au-Ag 两大谱系 (图 9)。其中，W、Sn、Mo、Bi、Li、Be、Nb、Ta 属于不相容元素，在岩浆结晶分异过程中倾向于在残余熔体或流体中富集，高度演化并经历长时间分异作用的 A/S 型花岗岩通常具有更高的金属元素含量 (Wang et al., 2025)。进入热液阶段，W、Sn、Mo 等主要以酸根形式或氟氯络合物形式迁移 (Shang et al., 2020; Wang et al., 2021; Liu et al., 2023)，Li、Be、Nb、Ta 更容易在强烈富氟的流体中络合迁移 (London, 1987)，体系中较高的 Ca、Fe 含量易对 W 的溶解迁移形成抑制，大量还原性硫的存在通常充当钨酸根离子的沉淀剂，氧化环境则导致 Sn^{2+} 转化为 Sn^{4+} ，后者更倾向于进入造岩矿物和副矿物中。上述金属络合物发生失稳时，除 Mo、Bi 形成硫化物外其余主要形成氧化物或硅酸盐矿物。因此，高分异花岗岩派生的岩浆热液通常在高温阶段卸载成矿元素，包括伟晶岩降温、云英岩与矽卡岩水岩反应、石英脉降压沸腾与流体混合等过程，形成锂辉石、锂云母、绿柱石、硅铍石、铌钽铁矿、黑钨矿、白钨矿、锡石、辉钼矿、辉铋矿等高温矿物，集中在 300~600 °C 成矿 (图

9)。这一系列矿化通常集中分布在高分异岩体顶部的伟晶岩壳、矽卡岩接触带与砂岩裂隙石英脉中，构成近岩体端高温成矿系统。

相比高分异岩浆，低分异 I 型花岗岩岩浆源区深度更深，富集亲铜元素（Fe、Cu、Au）、亏损不相容元素（W、Sn）。Fe、Cu、Au 等成矿元素的配分行为受体系氧逸度限制，基底岩石部分熔融和岩浆结晶过程中，高氧逸度条件能有效抑制金属硫化物形成，高价态金属含氯络合物能大量形成并随熔流体迁移至地壳浅部（Sun et al., 2015）。随后，侵位相对较深的斑岩体通过结晶分异派生高盐度成矿流体，后者在斑岩中经过减压沸腾和降温作用卸载 Cu、Au，在碳酸盐岩接触带发生水-岩反应形成磁铁矿和黄铜矿（Stefánsson and Seward, 2003; Akinfiyev and Zotov, 2010）。侵位更浅的玢岩则派生富铁高盐度熔流体并在岩体顶部不断聚集，最终在裂隙处发生急剧减压和降温作用，导致铁氧化物（磁铁矿）快速过饱和沉淀，形成玢岩型铁矿（Zeng et al., 2024）。上述与低分异岩体相关的高温成矿作用发育大量高温石榴子石、磁铁矿、磷灰石、透辉石、阳起石、符山石、钾长石、黑云母、透闪石、电气石等矿物，成矿温度在 250~550 °C 之间，矿化空间分布与高分异岩体成矿系统类似，主要集中在岩体顶部与围岩接触带之中。

进入中-低温成矿域，成矿热液的金属携带能力和流体有效运移距离发生显著变化，上文提到的大部分高温金属矿种伴随熔流体转变与高温络合物失稳发生卸载，仅少部分金属络合物能够在中低温环境中继续迁移。其中，与低分异花岗岩体更密切的金元素在 350 °C 以下逐步由金氯络合物转变为硫氢络合物（Williams-Jones et al., 2009），后者在中低温低盐度流体中溶解度较高，是金能在造山型金矿、卡林型金矿以及浅成低温热液型金矿中大量聚集的主要原因。Pb、Zn、Ag 对成矿岩体的分异程度以及物质来源深度选择性不高，既可以出现在钨锡多金属矿田的外围，也是斑岩体系铜金矿床浅部浅成低温热液成矿系统的必要组成部分，南岭地区因此发育多个与岩浆热液有关的大型铅锌矿床。尽管与金有着相似的地球化学行为， $\text{Ag}(\text{HS})^2$ 相比 $\text{Au}(\text{HS})^2$ 可以在低温低盐度的流体环境中稳定存在（Palyanova, 2008），两者往往共同出现在斑岩体浅部的低温蚀变带中，含银矿物的形成温度一般可低至 180 °C 左右。Pb、Zn 主要富集在中-上部地壳，存在于角闪石、辉石、黑云母等暗色矿物以及金属硫化物中，岩石部分熔融过程中上述矿物的分解可以提高岩浆中的铅锌含量，显著的暗色矿物分离则会降低残余岩浆的铅锌成矿潜力。和银一样，铅锌金属的含氯络合物和硫氢根络合物都具有较高的稳定性（Reed and Palandri, 2006; Akinfiyev and Tagirov, 2014），其中锌的氯络合物最稳定，银、铅络合物的稳定性依次降低。三者均可在中低温低盐度流体中稳定存在，酸性流体能显著提高含氯络合物的稳定性。因此，铅锌金属在南岭岩浆热液成矿系统中的矿化类型多样。在中-高温环境中，强烈的碳酸盐岩交代作用会形成大量二氧化碳，显著改变体系 pH 值，导致铅锌金属含氯络合物失稳，在矽卡岩接触带中大量沉淀，成矿温度稍低于矽卡岩型铁铜矿床（200~450 °C），矿石中可见较多绿泥石、绿帘石、方解石。当成矿流体沿断裂破碎带或地层不整合面向外围迁移时，体系降温与大气降水混合成为铅锌金属沉淀的主要控制因素，大量**热液脉型**铅锌金银矿体出现在深大断裂与褶皱钙硅界面交汇部位，成矿温度可进一步低至 150 °C。中-低温铅锌金银多金属成矿系统矿物组合较为简单，除闪锌矿、方铅矿、黄铁矿外可见大量的方解石、石英及少量绿泥石、绢云母和萤石等矿物。与铅锌银主要形成含氯络合物不同，**锑在中-低温度、富硫的成矿系统中，主要以羟基络合物（ $\text{Sb}(\text{OH})_3$ ）和硫代络合物的形式迁移。当含锑流体冷却至 250 °C 以下时，强烈的沸腾脱气（ H_2S 丢失）作用可导致大量辉锑矿与方解石、萤石、重晶石沉淀（Yu et al., 2023; 赵圣涛等, 2025）。此外，成矿流体进入钙硅地层界面导致体系 pH 值变化或混入大气降水时，含锑络合物的稳定性也会被破坏，形成顺层展布的锑矿体。**

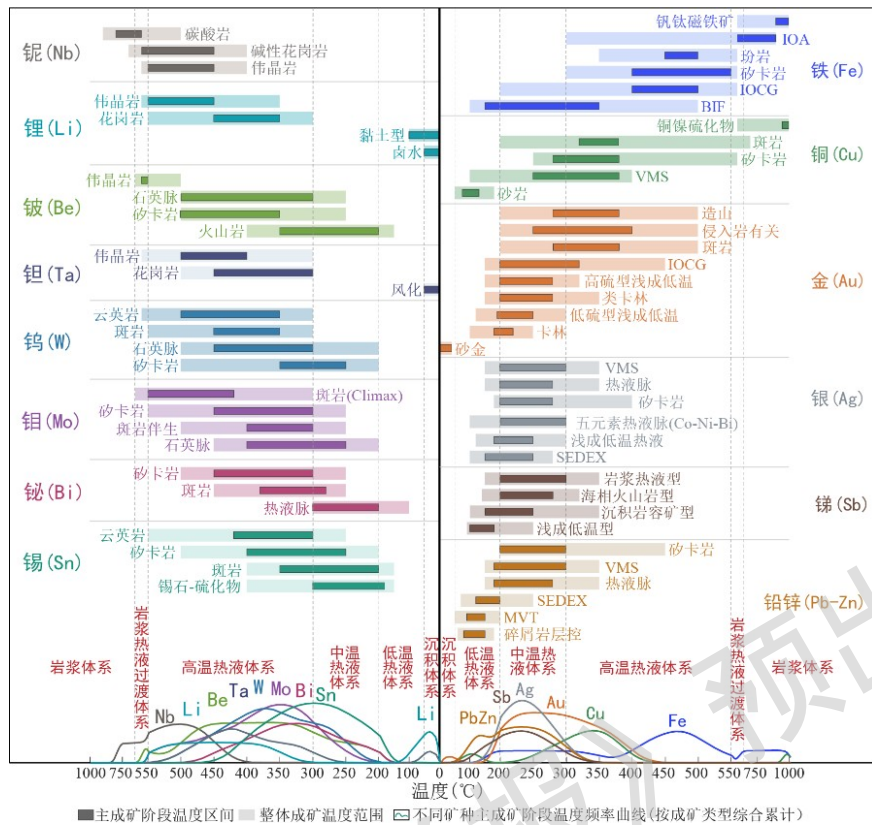


图9 不同金属矿种典型矿床成矿温度区间统计图（数据来源见附加材料表2）

Fig. 9 The summary of the mineralization temperature ranges of typical commodities and deposit types (See Appendix Table 2 for reference)

在更低温的岩体外围和导矿断裂末端，能够迁移并聚集的金属元素极少，仅有金银元素能以硫氢络合物或纳米级金属熔体的方式迁移（Williams-Jones and Heinrich, 2005），当富含挥发分的流体迁移至浅表后，将发生强烈的降压沸腾作用并溢出二氧化碳和硫化氢，改变成矿流体的酸碱度和氧逸度，从而引发沉淀。这一类型矿床的成矿范围在100~300 °C之间，根据体系氧逸度差别可进一步划分为高硫型矿化和低硫型矿化，前者常发育明矾石、叶蜡石、黄玉、高岭石、地开石等酸性蚀变矿物，后者伴生冰长石、绢云母、绿泥石和大量碳酸盐矿物。

2.4 陆内伸展全温度域成矿模式构建

通过对华南不同地区进行成矿物质域、构造域、温度域的系统对比（图10），可以发现南岭地区中生代岩浆热液成矿作用不同于典型大洋俯冲环境下的斑岩/矽卡岩—火山岩—浅成低温热液—IOCG型矿床的Fe-Cu-Mo-Pb-Zn-Au-Ag组合（Petersen, 1999; 陈华勇和吴超, 2020），也显著区别于陆陆碰撞造山伸展环境下的斑岩/矽卡岩—淡色花岗岩/伟晶岩—造山型矿床的Cu-Mo-Li-Be-Nb-Ta-W-Sn-Au组合（侯增谦, 2010; 陈衍景, 2013）。伸展背景下的南岭地区，不同地壳层位来源的岩浆在短时间内集中侵位到深大断裂于复式褶皱交汇空间，在同一矿田不同空间位置递次发育完整的高—中—低温“全温度域”多金属成矿系统（图11）。高温元素中的W、Sn、Mo、Bi、Li、Be、Nb、Ta倾向于进入高度结晶分异的岩浆热液，就位于岩体深部，在伟晶岩、云英岩和矽卡岩中呈现Nb-Ta-Li-Be-Mo-W-Sn-Bi分带特征（300~600 °C）。Fe、Cu、Au在低程度结晶分异岩浆中更为富集，流体沸腾过程中发生卸载，就位于岩体中深部斑岩、矽卡岩和玢岩成矿系统并形成Fe-Cu-Au分带（250~550 °C）。上述金属成矿机制共同构成了近岩体高温矿化域。Pb、Zn、Au、Ag作为典型的中低温金属元素（图9），既可以在矽卡岩化作用过程中因pH值改变发生金属卸载，就位于接触带近围岩侧（200~450 °C），也可经由中低温热液沿区域断裂或褶皱钙硅界面运移至远岩体围岩中，通过降温、沸腾、混

低温成矿省		全温度域复合成矿省		高温成矿省		成矿域
伟晶岩 Li-Be Nb-Ta	密西西比-卡林 Pb-Zn-Sb-Au-Hg-As	造山-层控 Au-Sb-W	Li-Be-Nb-Ta-W-Sn-Mo-Bi Fe-Cu-Pb-Zn-Au-Ag-Sb	伟晶岩-云英岩 W-Sn-Li-Nb-Ta	斑岩-浅成低温热液 Cu-Au	
高温	低温为主	中低温为主	高中低温发育	高温为主	中高温为主	
上地壳	中上地壳	中上地壳	岩石圈各圈层皆有	中上地壳	下地壳为主, 混杂地幔	
碰撞	稳定拗陷	陆内造山	陆内伸展裂陷	挤压伸展	洋陆俯冲	构造域

松潘
甘孜
四川盆地
扬子地块
雪峰山隆起
涟源盆地
衡阳盆地
华夏地块
台湾岛弧

新生代岩浆岩
造山带
变质核杂岩
盆地沉积
三叠纪岩浆岩
侏罗纪-白垩纪岩浆岩
白垩纪岩浆岩
弧前沉积

上地壳
中地壳
下地壳
地幔
太平洋
太平洋板块
洋壳

100°E
100 km

正断裂
逆冲断裂
走滑断裂

Fig. 10 The comparison of Mesozoic metallogenic systems in South China (modified after Wang, 2024)

由于陆内伸展背景下南岭不同类型矿床成矿时空更加集中、矿化叠加更加显著、矿种组合更加多样,难以采用单一类型矿床成矿模型概括矿集区短时间大规模成矿事件并指导找矿工作。由此,文章聚焦南岭中段伸展背景下的有色稀有金属复合成矿作用,建立陆内伸展环境全温度域成矿理论模型,探讨不同地壳层位来源跨温度域体系岩浆热液成矿过程。该模型可概括为“一中心、两构造、三系统、多金属”。“一中心”即不同地壳层位来源并集中侵位岩浆构成区域差异化成矿的物质基础;“两构造”即区域深大断裂与复式褶皱构成多类型金属矿化的有利空间;“三系统”即岩浆热液系统在温度场等关键因素驱动下发生的高一中一低温连续矿化蚀变;“多金属”即各类有色稀有金属在高中低温成矿域形成典型的Nb-Ta-Li-Be、Mo-W-Sn-Bi、Fe-Cu-Pb-Zn、Pb-Zn-Au-Ag、Au-Ag空间分带矿种组合。

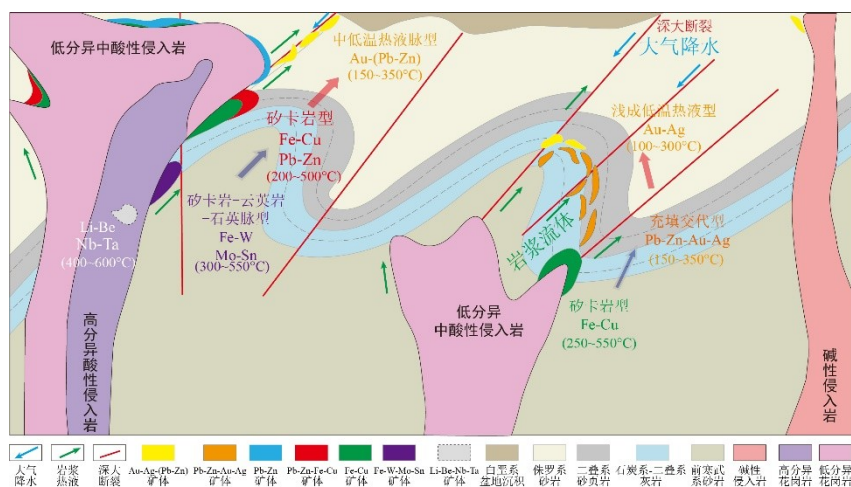


图 11 陆内伸展全温度域成矿构造模型简图与成矿要素分布图 (据王炯辉, 2024 修改)

Fig. 11 Conceptual model of the intracontinental-extensional full-temperature metallogenic system (modified after Wang, 2024)

遵循陆内伸展环境全温度域成矿模式，南岭地区不同矿化类型可在同一矿田（床）连续出现，不同矿化组合互为找矿标志。基于该模式，传统高分异花岗岩主导的“五层楼+地下室”钨成矿系统可能叠加低分异花岗岩斑岩-矽卡岩成矿体系，钨多金属矿床深部由此出现铜、金矿种组合；低分异花岗岩体除了形成矽卡岩-热液脉型-浅成低温热液等“多因复成”铅锌金银矿种组合，深部还有发育矽卡岩-斑岩型铁铜矿化的潜力；次火山岩玢岩体除发育磁铁矿化外，外围和深部有利位置可以形成大规模矽卡岩型-斑岩型铜矿化；钨多金属矿床深部导矿断裂与钙硅界面交汇处，极有可能发育隐伏金钨多金属矿化。找矿工作通过锁定矿集区成矿物质中心、关键控矿构造、典型温度分带，可在矿山深边部探获以往未被发现的新类型资源，提高深部探矿成功率。

3 水口山找矿工作实践

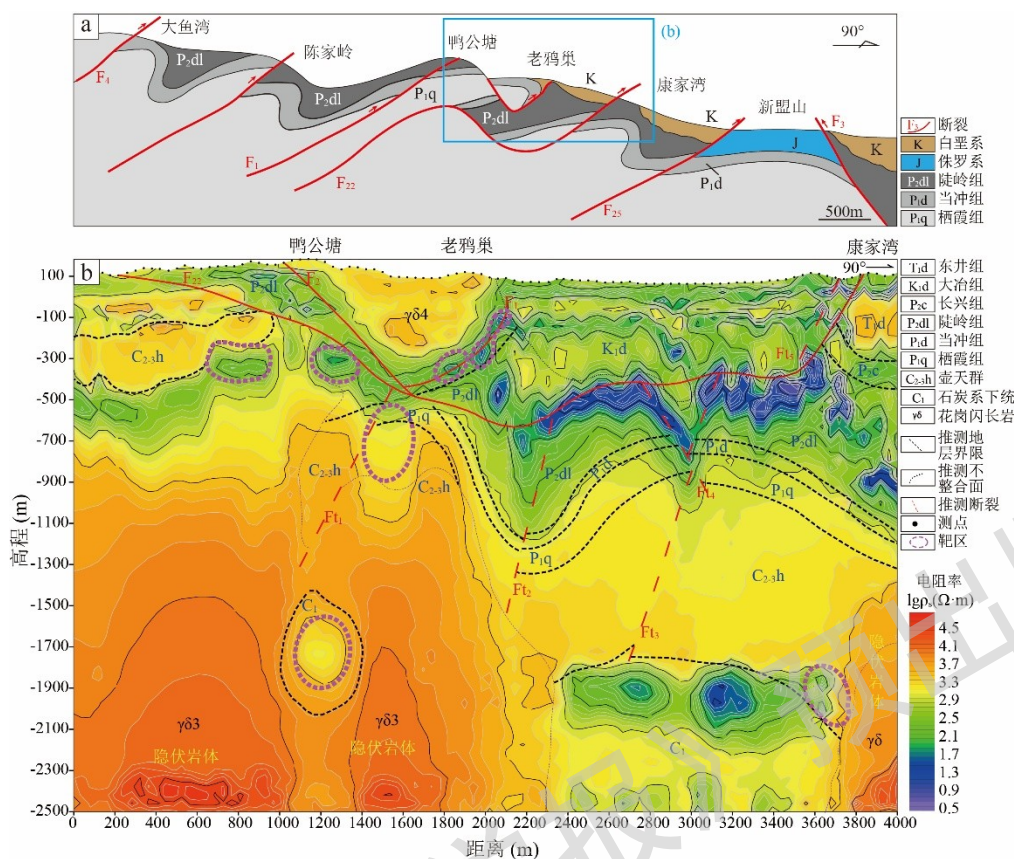
南岭地区历经百余年矿产开发，多数矿山资源趋于枯竭。在经过多轮勘查工作覆盖的老矿山边深部，探获大型资源储量的难度显著增大。为拓展老矿山深边部找矿潜力，研究团队系统总结水口山矿田陆内伸展环境下全温度域成矿规律，从物质域、构造域、温度域 3 个维度构建综合找矿模型，为老鸦巢、鸭公塘、康家湾等矿床勘查部署提供支撑。控矿构造层面，水口山矿田产出一系列近平行展布的倒转背斜与逆冲断裂，“倒转背斜+钙硅质岩界面+逆冲断裂”的控矿构造呈连续展布，具备多处有利成矿空间。物质来源方面，矿田成矿元素主要来自壳幔混源型低分异强氧化花岗质岩浆体系，可形成 Fe-Cu-Pb-Zn-Au-Ag 多金属矿化组合。温度分带特征表明，大量未揭露的隐伏岩体均可独立发育完整的矿化温度分带，不同温度域形成的矿床类型可互为找矿标志。

据此，研究团队提出水口山矿田“背斜+N刀”“多岩体独立发育完整成矿系列，各矿床类型互为找矿标志”“铅锌之外找铜金”的找矿新认识。依托大深度地球物理探测与三维地质建模预测技术实施勘查验证，相继在铅、锌、金、银、铜、铁多金属矿勘查上取得找矿突破。

3.1 从“背斜+1刀”到“背斜+N刀”

康家湾铅锌金银矿床自 1976 年发现以来（杨传益，1985），其勘查部署长期建立在以康家湾背斜和 F₂₂ 逆冲断裂为单一导矿构造的“背斜+1刀”模型之上。早期钻探表明，F₂₂ 断裂下盘的二叠系当冲组硅质岩与栖霞组碳酸盐岩之间的层间硅化角砾岩带为区内最主要的容矿空间，沿 F₂₂ 断裂走向延伸的硅化角砾岩带中连续揭露高品位的 I 号铅锌矿体（图 2c）。F₂₂ 断裂作为康家湾矿区经钻探系统验证的导矿构造，逐步成为勘查部署的核心依据。

然而，随着勘查工程沿 F₂₂ 的系统推进，矿区向北紧闭倒转背斜渐变为宽缓褶皱，钻孔控制新增矿体规模有限；向西受巨厚白垩系红层覆盖制约，已无中低温铅锌矿体有利找矿空间；向南 I 号矿体矿化沿 F₂₂ 走向逐步尖灭。基于单一断裂的“背斜+1刀”模型已接近找矿预测上限。



a—典型剖面褶皱-断裂格架图；b—老鸦巢-康家湾广域电磁测试典型剖面解译图

图 12 水口山矿田褶皱构造格架与典型剖面广域电磁解译图 (李能强和彭超, 1996; 王炯辉, 2024)

Fig. 12 The Fold-and-fault framework of the Shuikoushan ore field and wide-field electromagnetic interpretation of a typical section (modified after Li and Peng, 1996; Wang, 2024)

(a)-Representative cross-section geological map showing the fold-and-fault framework; (b) the interpretation of a typical section from Laoyaochao to Kangjiawan area through wide-field electromagnetic method

基于对水口山矿田全温度域成矿理论再认识, 康家湾构造沉积格架下的容矿空间还存在更多可能。由于陆内伸展背景下的中—低温热液脉型矿化在构造上并不仅仅依赖某一特定导矿断裂, 还同时受控于层间滑脱面与切穿界面的断裂。就康家湾矿区而言, 区域构造分析显示, 伴随印支期区域东西向水平侧压应力作用, 区域形成了一系列轴向近南北的倒转褶皱, 单个倒转背斜或向斜的轴部形成次级断裂。进入燕山期挤压—伸展转换过程, 衡阳盆地南缘早期次级断裂继续活化形成了一套南北向展布、东西向叠置的推覆构造 (图 12a), 由西到东主要包括蓬塘—石头排断裂 (F₁)、石坳岭—康家湾断裂 (F₂₂)、狮子山—新盟山断裂 (F₃), 并伴随有 F₂₅、F₁₅₁ 等北北东向次级断裂。其中, F₁ 断裂主要控制老鸦巢岩体侵位空间, F₂₂ 断裂主导康家湾隐伏铅锌矿化。由于上述其他断裂的形成时代、压力性质及展布方向与 F₂₂ 基本一致, 可能成为“1 刀”断裂之外潜在的“N 刀”控矿构造。与此同时, 二叠系栖霞组与当冲组之间的钙硅界面发生了区域性层间滑动, 由此形成的层间硅化角砾岩带沿走向和倾向的连续分布。根据上述构造格架认识, 全温度域成矿模式预测康家湾矿区应该存在多个潜在的平行导矿—容矿空间, 倒转背斜本身具有汇聚深部成矿岩浆热液的优势, 任一切穿倒转背斜钙硅界面的逆冲断裂, 其下盘硅化角砾岩带均具备形成铅锌金银矿化的构造条件。这一预测将找矿靶区从单一的 F₂₂ 下盘拓展至倒转背斜翼部系列隐伏断裂与硅化角砾岩带的多个交汇部位, 构成“背斜+N 刀”找矿模型。

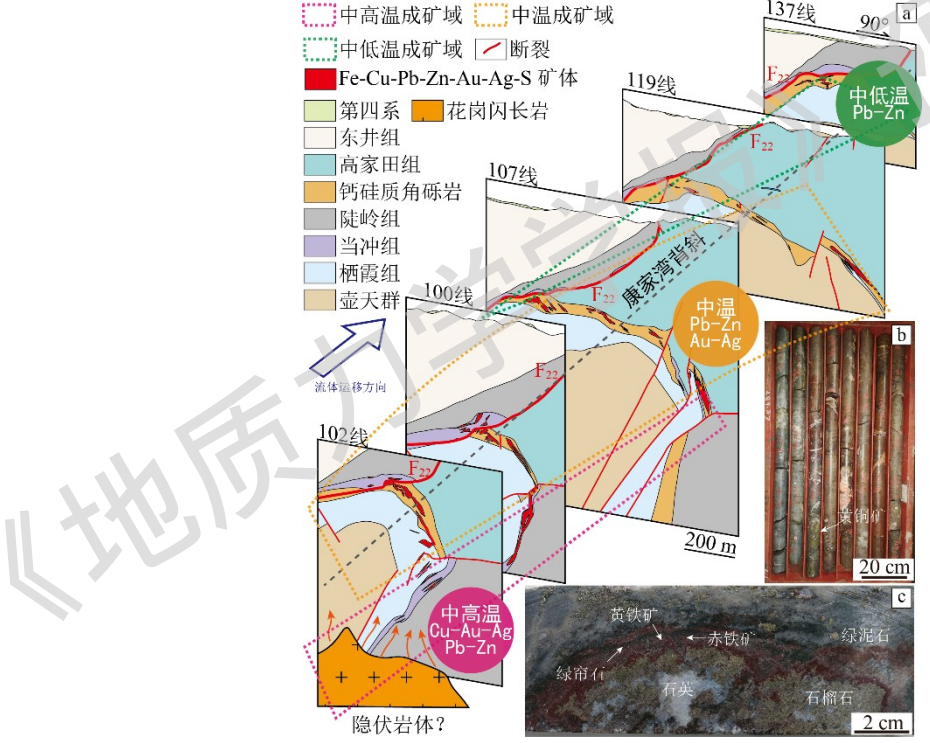
为了验证这一推断, 团队采用大深度广域瞬变电磁探测对上述模型预测的含矿空间进行定位 (图 12b)。

探测结果显示，康家湾背斜东侧的钙硅界面在深部具有连续的电性异常响应，展布范围超出了 F_{22} 断裂的控制区域，且界面附近发育多条隐伏的低阻异常带，其空间位置与叠瓦状逆冲推覆断裂的预测延伸方向基本一致。上述异常被解释为系列隐伏断裂与钙硅界面交汇部位的热液蚀变-矿化响应。

钻探验证工作据此在 F_{22} 断裂以东的隐伏断裂下盘部署了系列钻孔。工程相继打穿了上覆侏罗系砂页岩盖层，在预测的系列断裂 F_{150} — F_{157} 与硅化角砾岩带交汇部位揭露了新的铅锌金银矿体，即 IV-3 矿体群。该矿体群不仅铅锌品位较高，还共生高品位金银矿化。截至 2026 年，IV-3 矿体探获资源量规模金接近两倍大型，铅、锌、银均达到中型。这一结果与全温度域成矿模式中，中低温成矿域受钙硅界面与系列断裂联合控制的预测相符，从实践上将康家湾矿床找矿模型从“背斜+1 刀”扩展至“背斜+N 刀”，为康家湾背斜东翼提供了多个找矿空间。

3.2 从单一成矿中心到多中心独立发育全温度域矿化

全温度域成矿理论的基本前提之一，是陆内伸展背景下不同地壳层位来源的岩浆可在同一矿集区集中侵位，每个成矿岩浆物质中心均具备独立发育完整的高—中—低温成矿序列的潜力。既往研究（李永胜等，2012；左宗，2021）中，老鸦窠-鸭公塘岩体被认为是水口山矿田内唯一的热液活动中心，成矿流体沿 F_{22} 断裂向东长距离运移，在康家湾地区形成远端中—低温铅锌金银矿化。按照这一解释，康家湾矿床的深部并不是铅锌成矿流体的物质来源，成矿作用严格局限在 F_{22} 与钙硅界面交汇部位，倒转翼深部不存在有利矿化空间。



a—典型地质剖面与不同温度域矿种分布范围；b—典型铜锌矿石岩心；c—典型砂卡岩样品

图 13 康家湾矿床倒转翼找矿空间钻探验证成果

Fig. 13 The drilling work confirming the prospecting space in the inverted limb of the Kangjiawan deposit

(a) representative cross-section geological maps showing the distribution of different mineral assemblages in various temperature range; (b) the drilling cores of typical Cu-Zn ores; (c) typical skarn sample

文章从全温度域成矿理论物质域和温度域 2 个维度对这一认识提出了新的设想（图 13）。系统采样分析显示，康家湾倒转背斜沿走向自北向南、沿倾向自浅至深，成矿元素呈现 Pb-Zn-Ag-Au 的递变序列，伴生蚀变矿物从浅部的伊利石-萤石组合逐步过渡为深部的石榴子石-磁铁矿-赤铁矿组合（图 13）。这一由南向北、由

深至浅的温度递减趋势与“老鸦巢-鸭公塘自西向东流体迁移成矿”的单一中心模型方向相悖，指示康家湾可能存在以隐伏岩体为中心、由近及远、由深至浅发育的完整矿化分带，在垂向空间上保存了从高温矽卡岩铁铜到低温金银矿化的全温度域成矿序列。依据这一预测，康家湾深部的找矿方向不应局限于追索浅部硅化角砾岩带中一低温成矿系统的走向延伸，还应以隐伏岩体为中心，向下探索高温矽卡岩端元的矿化响应。

深边部找矿工作自 2023 年开始围绕康家湾 100 测线至 108 测线开展井中钻探。在-500~-900m 标高处，多个剖面均揭露了石榴子石矽卡岩、透辉石、阳起石、磁铁矿和赤铁矿的高温蚀变-矿化组合，与浅部硅化角砾岩带中一低温硫化物的矿物组合形成了差异显著的分带。其中，矽卡岩中的石榴子石原位 U-Pb 年龄为 159 Ma，闪锌矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 155~152 Ma，显示高温矽卡岩化与中一低温热液脉型矿化在时间序列上构成从早到晚的连续演化过程（Wang et al., 2023; 王炯辉, 2024）。

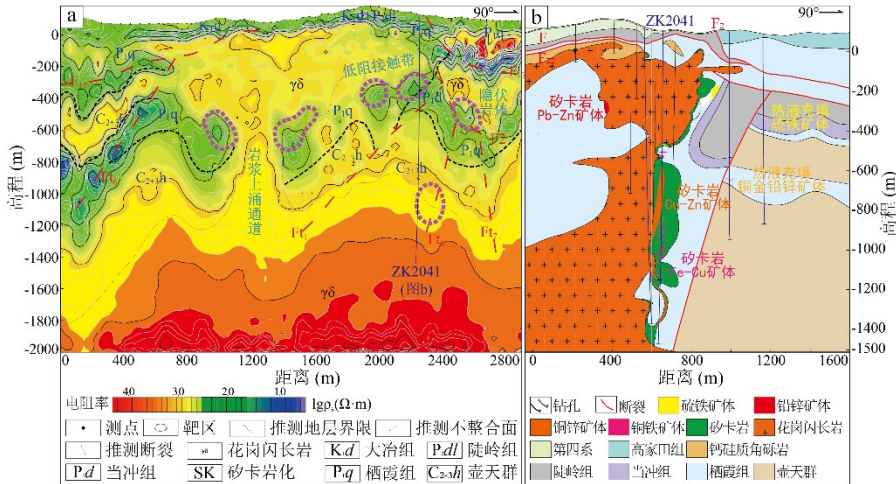
113B 测线至 117B 测线之间针对倒转背斜东南翼的钻探工作进一步提供了金属矿种组合的递变证据。倒转翼揭露的部分矿体中，铅锌共伴生的铜金品位显著升高，典型见矿段包括 12.42m 厚的铅锌铜金银矿化（Pb 品位为 0.3%、Zn 品位为 2.32%、Cu 品位为 0.24%、Au 品位为 0.88 g/t、Ag 品位为 43.69 g/t）和 6.55m 厚的独立金矿化段（Au 品位为 2.49 g/t; 图 13）。成矿元素组合从铅锌为主向铅锌铜金银共存的转变，与全温度域成矿模式预测的由浅部中一低温域热液脉型矿床向深部中一高温域矽卡岩型矿床过渡的趋势吻合。类比老鸦巢-鸭公塘矿区矽卡岩成矿系统，康家湾南侧倒转翼深部不仅发育矿化（如 102 测线），更可能成为水口山矿田另一处寻找铜金资源的有利靶区。

3.3 从浅部铅锌到深部铁铜

老鸦巢和鸭公塘是水口山矿田开采历史最长的 2 个矿区。以往探矿工程主要集中于花岗闪长岩与碳酸盐岩接触带，控制浅部矽卡岩铅锌矿体与断裂破碎带中的热液脉型金矿体（图 2b），垂深一般不超过 500m。对于接触带向深部延展部位的矿化类型和成矿潜力，因缺乏系统的深部探测资料而未得到充分评价。

对比南岭中段其他矿床成矿岩体，水口山花岗闪长岩属于低分异、强氧化、壳幔混源的 I 型岩浆端元，锆石氧逸度指标（ Ce^{4+}/Ce^{3+} ）偏高，全岩地球化学组成具有类埃达克质特征（秦拯纬等, 2022; Wang et al., 2023）。在全温度域成矿谱系中，此类低分异 I 型岩浆与高分异 S/A 型花岗岩在成矿专属性上存在显著差异，是 Fe-Cu-Pb-Zn-Au-Ag 序列的成矿母岩浆，铁铜元素尤为富集于岩浆-热液演化早期的高温阶段。老鸦巢-鸭公塘花岗闪长岩体侵位深度较深，有利深部发生充分的岩浆-热液分异过程，形成矽卡岩型乃至斑岩型铜多金属矿化。因此，浅部已探明的矽卡岩铅锌矿体仅是该岩体成矿序列的中一上部组成部分。

基于上述理论认识，团队采用广域瞬变电磁探测对老鸦巢-鸭公塘深部成矿空间进行了刻画（图 14a; 王炯辉, 2024），在老鸦巢-鸭公塘地区识别出多个与深部隐伏岩体形态相对应的高磁异常区。异常的空间展布与已知浅部花岗闪长岩体的深部延伸趋势一致，磁性体的顶面埋深普遍大于 500 m。广域瞬变电磁探测还显示岩体凹凸起伏区域和碳酸盐岩接触带的低阻异常，是高温含矿流体汇聚-反应的有利空间。



a—老鸦巢-鸭公塘广域电磁测试典型剖面解译图；b—老鸦巢-鸭公塘 204 线剖面图

图 14 老鸦巢-鸭公塘矿区广域电磁解译与钻探验证剖面图

Fig. 14 The wide-field electromagnetic interpretation and the geological map for the typical cross-section from the Laoyachao–Yagongtang area

(a) the interpretation of a typical section from Yagongtang to Laoyachao area through wide-field electromagnetic method; (b) the cross-section geological map of line 204

钻探工程对上述空间进行了系统验证（图 14b），在预测的 ZK2041 钻孔深部接触带连续揭露了厚大的矽卡岩型铜铁矿体。矿体矿石矿物以磁铁矿和黄铜矿为主，可见石榴子石、透辉石和阳起石等矽卡岩矿物。矿体视厚度超过 200m，铜品位最高超过 3%，伴生铁和金。在老鸦巢矿区深部花岗闪长岩体内，钻探工程揭露了钾硅酸盐化蚀变和石英-硫化物细脉，可见黄铜矿呈细脉状和浸染状赋存于钾长石化花岗闪长岩中，继续钻探有望揭露典型的斑岩型铜矿化。水口山矽卡岩型铁铜矿体的发现，是南岭中段继宝山之后又一重大突破，指示区域钨锡之外还有寻找大型铜金矿床的潜力，通过继续开展深部找矿，有望实现中国中东部地区深部铜资源勘查的连续突破。

3.4 找矿成果与效益

依托陆内伸展环境全温度域成矿理论模式，五矿勘查边深部找矿团队在水口山、黄沙坪、锡矿山等百年老矿山开展找矿实践，自 2016 以来连续取得找矿重要突破，累计新探获铅锌、金、钨均达大型矿床规模 3 倍，银达 2 倍，锡达大型，萤石达超大型。找矿成果为康家湾 70 万吨采选扩建工程和黄沙坪边深部资源综合利用工程提供了坚实的资源支撑。

4 全温度域成矿理论在华南陆内伸展区域的应用前景

水口山矿田找矿突破是对陆内伸展全温度域成矿理论从理论预测到工程验证的系统检验，验证了陆内伸展背景下的成矿组合多样性和空间分带性特征，进一步指示华南地区还存在新的找矿空间。

全温度域成矿理论已在水口山地区实现中高温铜金成矿系统的找矿突破。既往研究（黄建中等，2020）表明湖南省中北部存在一条由江南造山带为基底的“金腰带”。该区与钦杭成矿带构造叠合，在湘东北—湘中地区分布有一系列侏罗纪中酸性侵入岩。这些岩体多就位于衡阳盆地等中生代裂陷盆地周缘的盆-山转换部位，与碳酸盐岩围岩的接触带具备发育矽卡岩型铜金矿化的有利条件，部分岩体深部可能保存斑岩型矿化，是华南铜金资源勘查的重点攻关方向。

在中—低温铋金多金属勘查领域，华西南部自湘中经黔东南至桂西北的显生宙盖层广泛发育复式褶皱和盆地卤水系统，前寒武系基底同时具有较高的铋、钨、铅锌、金、汞背景值。以上成矿有利条件共同构成了世界上最大规模的铋金矿集区（Hu and Zhou, 2012; 胡瑞忠等，2016）。这一区域具有全温度域成矿理论中—低温端元齐全的成矿要素，沿主要控矿断裂与容矿层位向深部追索有望取得突破。以锡矿山为例，团队依据全温度域成矿理论提出的构造域控矿要素认识，建立了锡矿山“多刀+多层”找矿模型，在褶皱-断裂系统的深部有利部位，识别出以往未被发现的找铋空间。

全温度域成矿理论可进一步向高温稀有金属领域拓展。根据该理论，高分异花岗岩在伟晶岩-云英岩-矽卡岩阶段可以集中沉淀锂、铍、铌、钽等紧缺稀有金属，与钨锡矿化构成温度递变的共生序列。团队在瑶岗仙矿区的勘查实践中，依据该模式在深部石英脉型钨钼矿化带上部揭露了石英脉型绿柱石矿体，铍矿化与“五层楼”式钨矿化垂向叠置，指示了高温稀有金属与钨锡共生的分带规律（王炯辉，2026）。这一发现表明，南岭众多已经资源枯竭的钨锡老矿山，其深部仍具有可观的稀有金属勘查潜力。

5 结语

文章提出的陆内伸展全温度域成矿理论模式，将南岭地区此前彼此孤立的伟晶岩-云英岩型锂铍铌钽矿床、

矽卡岩-石英脉型钨锡矿床、斑岩-矽卡岩型铁铜金矿床、热液脉型铅锌金银矿床和浅成低温热液型金银矿床有机整合,明确不同分异程度的壳幔混源岩浆、不同伸展程度的构造样式与差异温度条件下的流体演化路径共同决定了陆内伸展环境下的有色稀有金属矿种组合与空间分带规律。基于全温度域成矿模式“一中心、两构造、三系统、多金属”框架,水口山矿田建立“背斜+N刀”的找矿新模型,突破单一热液成矿中心的传统认识,拓展铁铜金矿种成矿谱系,开辟了深部第二找矿空间。应用该成矿模式,水口山、黄沙坪、锡矿山连续取得重要找矿突破,新探获多个矿种资源量均达到大型规模。陆内伸展全温度域成矿模式在华南地区仍有广阔应用前景,湘中-湘东北伸展盆地深部有望揭露更多水口山式低分异铜金矿化岩体,湘黔桂地区完整发育的褶皱断裂系统深部可能发现更多矿化类型,南岭高分异岩体钨锡成矿系统之下还发育规模可观的稀有金属矿化。深入开展全温度域成矿模式下的找矿实践,有望为更多老矿山深边部找矿提供新方向。

附加材料:附表1、附表2由作者提供,数据真实性由作者负责。

作者贡献声明:王炯辉负责全文构思、整理、撰写、修改及数据收集整理与图件编制工作。作者已阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: WANG Jionghui was responsible for full-text writing, data collection, revision, processing, and figure compilation. The author has read and approved the submission and publication of this manuscript.

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

参考文献

- AKINFIEV N N, ZOTOV A V, 2010. Thermodynamic description of aqueous species in the system Cu-Ag-Au-S-O-H at temperatures of 0-600°C and pressures of 1-3000 bar[J]. *Geochemistry International*, 48(7): 714-720.
- AKINFIEV N N, TAGIROV B R, 2014. Zn in hydrothermal systems: thermodynamic description of hydroxide, chloride, and hydrosulfide complexes[J]. *Geochemistry International*, 52(3): 197-214.
- BAI D Y, HUANG J Z, LI J D, et al., 2007. Multiple geological elements constraint on the Mesozoic tectonic evolution of South China: apocalypse of the Mesozoic geological evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- BAI D Y, TANG F P, LI B, et al., 2022. Summary of main mineralization events in Hunan Province[J]. *Geology in China*, 49(1): 151-180. (in Chinese with English abstract)
- CHEN D Q, WU J S, 1990. The mineralization mechanism of ion-adsorption rare earth deposits[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 8(2): 175-179. (in Chinese)
- CHEN H Y, WU C, 2020. Metallogenesis and major challenges of porphyry copper systems above subduction zones[J]. *Science China Earth Sciences*, 63(7): 899-918.
- CHEN J, WANG R C, ZHU J C, et al., 2013. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 56(12): 2045-2055.
- CHEN Y C, PEI R F, ZHANG H L, et al., 1989. The geology of non-ferrous and rare metal deposits related to Mesozoic granitoids in Nanling region[M]. Beijing: Geological Publishing House: 508. (in Chinese)
- CHEN Y J, 2013. The development of continental collision metallogeny and its application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y X, LI H, SUN W D, et al., 2016. Generation of Late Mesozoic Qianlishan A₂-type granite in Nanling Range, South China: implications for Shizhuyuan W-Sn mineralization and tectonic evolution[J]. *Lithos*, 266-267: 435-452.
- CHENG Y Q, CHEN Y C, ZHAO Y M, 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)

- CHU Y, LIN W, FAURE M, et al., 2011. Tectonic evolution of the Early Mesozoic Xuefengshan belt: insights from structural analysis and geochronological constraints[J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(1): 146-160. (in Chinese with English abstract)
- FU S L, HU R Z, PENG J T, et al., 2023. A comprehensive genetic model for the world's largest Sb deposit (Xikuangshan, China)[J]. *GSA Bulletin*, 135(3-4): 1074-1088.
- GAO X D, 1995. Main types of gold deposit in Shuikoushan ore field and the prospective areas for Au-searching[J]. *Hunan Geology*, 14(4): 220-225. (in Chinese with English abstract)
- GONG X D, LI Y S, GONG F Y, et al., 2011. Geological characteristics of the Laoyachao lead-zinc-gold deposit in the Shuikoushan area, Hunan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 20-21. (in Chinese)
- GUO C, LU Y J, OUYANG Z Q, et al., 2023. Geological characteristics and genetic analysis of Laoyachao gold deposit in Shuikoushan, Hunan Province[J]. *Northwestern Geology*, 56(5): 294-307. (in Chinese with English abstract)
- HOU Z Q, 2010. Metallogensis of continental collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 30-58. (in Chinese with English abstract)
- HU R Z, 1990. A possible metallogenic model for granite-type uranium deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 35(7): 526-528. (in Chinese)
- HU R Z, MAO J W, FAN W M, et al., 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 13-26. (in Chinese with English abstract)
- HU R Z, ZHOU M F, 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China: an introduction to the thematic issue[J]. *Mineralium Deposita*, 47(6): 579-588.
- HU R Z, FU S L, XIAO J F, 2016. Major scientific problems on low-temperature metallogenesis in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3239-3251. (in Chinese with English abstract)
- HUA R M, CHEN P R, ZHANG W L, et al., 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling Range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291-304. (in Chinese with English abstract)
- HUANG G L, WU L Q, DENG P, et al., 2006. Prospecting potential and direction for granite uranium deposit in north Guangdong, China[J]. *Uranium Geology*, 22(5): 267-275, 280. (in Chinese with English abstract)
- HUANG J Z, SUN J, ZHOU C, et al., 2020. Metallogenic regularity and resource potential of gold deposits of Hunan area in the Jiangnan orogenic belt, South China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(2): 230-252. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X D, LU J J, SIZARET S, et al., 2017. Petrogenetic differences between the Middle-Late Jurassic Cu-Pb-Zn-bearing and W-bearing granites in the Nanling Range, South China: a case study of the Tongshanling and Weijia deposits in southern Hunan Province[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1220-1236.
- Inglis E C, Moynier F, Creech J, et al. 2019. Isotopic fractionation of zirconium during magmatic differentiation and the stable isotope composition of the silicate Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*[J], 250: 311-323.
- Kirkpatrick H M, Harrison T M, Ibañez-Mejia M, et al. 2023. Temperature and co-crystallization effects on Zr isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*[J], 352: 69-85.
- JIANGXI BUREAU OF GEOLOGY AND MINERAL RESOURCES, 1984. Regional geology of Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 921. (in Chinese)
- LI N Q, PENG C, 1996. Shuikoushan lead-zinc-gold-silver Orefield, Hunan, China[M]. Beijing: Seismological Press: 107. (in Chinese)
- LI S H, 2015. Ore-forming mechanisms and prospecting models of typical granite type rare metal deposits in South China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- LI Y S, ZHEN S M, GONG F Y, et al., 2011. Identification of the ore-forming geological body of the Kangjiawan lead-zinc-gold-silver deposit in Hunan Province and its significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 964-965. (in Chinese)
- LI Y S, ZHEN S M, GONG F Y, et al., 2012. A discussion on the source of ore-forming materials in the Shuikoushan lead-zinc-gold-silver ore field, Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 31(S1): 571-572. (in Chinese)
- LI Y S, ZHANG B L, GONG F Y, et al., 2021. Genesis of the giant Kangjiawan lead-zinc ore deposit in Hunan Province: evidences from fluid inclusion, H-O and S isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6): 1847-1866. (in Chinese with English abstract)
- LIAO Y Z, ZHAO B, ZHANG D H, et al., 2021. Evidence for temporal relationship between the Late Mesozoic multistage Qianlishan granite complex and the Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi deposit, SE China[J]. *Scientific Reports*, 11(1): 5828.
- LIU G C, 1946. A geological discussion on the Shuikoushan area, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 11(S1): 29-38. (in Chinese)
- LIU X C, YU P P, XIAO C H, 2023. Tin transport and cassiterite precipitation from hydrothermal fluids[J]. *Geoscience Frontiers*, 14(6): 101624.

MAO J W, XIE G Q, GUO C L, et al., 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329-2338. (in Chinese with English abstract)

London D. 1987. Internal differentiation of rare-element pegmatites: Effects of boron, phosphorus, and fluorine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*[J], 51(3): 403-420.

PAL'YANOVA G, 2008. Physicochemical modeling of the coupled behavior of gold and silver in hydrothermal processes: gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implications[J]. *Chemical Geology*, 255(3-4): 399-413.

PETERSEN U, 1999. Magmatic and metallogenic evolution of the central Andes[M]//SKINNER B J. *Geology and ore deposits of the central Andes*. Littleton: Society of Economic Geologists: 109-154.

QIN Z W, FU J M, XING G F, et al., 2022. The petrogenetic differences of the Middle-Late Jurassic W-, Sn-, Pb-Zn-Cu-bearing granites in the Nanling Range, South China[J]. *Geology in China*, 49(2): 518-541. (in Chinese with English abstract)

RAO J R, XIAO H Y, LIU Y R, et al., 2012. Location of the Yangtze-Cathaysia plate convergence zone in Hunan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2): 484-502. (in Chinese with English abstract)

REED M H, PALANDRI J, 2006. Sulfide mineral precipitation from hydrothermal fluids[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1): 609-631.

SHANG L B, WILLIAMS-JONES A E, WANG X S, et al., 2020. An experimental study of the solubility and speciation of $\text{MoO}_3(\text{s})$ in hydrothermal fluids at temperatures up to 350°C: a reply[J]. *Economic Geology*, 115(8): 1872-1873.

SHI J K, WANG Q H, 1988. Discovery of a Diwa-type Paleokarst uranium-gold deposit in the Shuikoushan mining district, Hunan Province and its prospecting significance[J]. *Carsologica Sinica*, 7(S1): 115-125. (in Chinese)

SHU L S, ZHOU X M, DENG P, et al., 2006. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China[J]. *Geological Review*, 52(2): 251-265. (in Chinese with English abstract)

STEFÁNSSON A, SEWARD T M, 2003. Experimental determination of the stability and stoichiometry of sulphide complexes of silver(I) in hydrothermal solutions to 400°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(7): 1395-1413.

SUN W D, HUANG R F, LI H, et al., 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 97-131.

TAN S M, LIU B D, ZHOU L T, 2016. The geological survey report on the mineral deposits in Baoshan area, Hunan[R]. (in Chinese)

WANG D H, TANG J X, YING L J, et al., 2010. Application of "five levels + basement" model for prospecting deposits into depth[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 733-738. (in Chinese with English abstract)

WANG D H, WANG Y, QIN J H, 2022. *Geology of mineral resources in China: volume of Nanling*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1060. (in Chinese)

WANG J H, LI Y, HUANG D M, et al., 2013. Reserves estimation of the Nihe iron deposits in Anhui based on ordinary kriging[J]. *Geology and Exploration*, 49(6): 1108-1113. (in Chinese with English abstract)

WANG J H, MA X H, LI Y, et al., 2014. Petrogenesis of granitic complexes and implications for the W-Mo mineralization: a case study from the Youmapo pluton, Guangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1219-1235. (in Chinese with English abstract)

WANG J H, ZHANG X, CHEN D G, et al., 2015. Influence of during south ion-absorbed-type rare earth deposit mining on groundwater and it's monitoring[J]. *Science & Technology Review*, 33(18): 23-27. (in Chinese with English abstract)

WANG J H, ZHANG Y, ZHANG C X, et al., 2019. Exploration progress and prospecting orientation at depth of Huangshaping lead-zinc polymetallic ore deposit, Hunan[J]. *Mineral Exploration*, 10(4): 835-844. (in Chinese with English abstract)

WANG J H, DU Y L, ZHANG F H, et al., 2023. Deeply derived magma controlling the polymetallic mineralization at Shuikoushan, South China: constraints from mineral U-Pb dating and whole-rock geochemistry[J]. *Minerals*, 13(12): 1508.

WANG J H, 2024. *The metallogenic process of magmatic-hydrothermal Pb-Zn polymetallic deposits in Nanling Range*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 232. (in Chinese)

WANG J H, ZHANG X, ZHU Z X, et al., 2025. Zirconium isotope evidence for crystal-melt segregation during high-silica granitic magma differentiation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 655: 119251.

WANG J H, 2026. Finding beryllium in tungsten: discovery of quartz-vein-type W-Be mineralization in Nanling and its exploration implications[J]. *Earth Science*, 1-21, doi: 10.3799/dqkx.2026.136. (in Chinese with English abstract)

WANG X S, WILLIAMS-JONES A E, HU R Z, et al., 2021. The role of fluorine in granite-related hydrothermal tungsten ore genesis: results of experiments and modeling[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 292: 170-187.

- WILLIAMS-JONES A E, HEINRICH C A, 2005. 100th anniversary special paper: vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 100(7): 1287-1312.
- WILLIAMS-JONES A E, BOWELL R J, MIGDISOV A A, 2009. Gold in solution[J]. *Elements*, 5(5): 281-287.
- XU J X, ZENG Z L, WANG D H, et al., 2008. A new type of tungsten deposit in southern Jiangxi and the new model of "five floors + basement" for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 880-887. (in Chinese with English abstract)
- XU X B, LIANG C H, CHEN J J, et al., 2021. Fundamental geological features and metallogenic geological backgrounds of Nanling tectonic belt[J]. *Earth Science*, 46(4): 1133-1150. (in Chinese with English abstract)
- YANG C Y, 1985. Discovery and genesis of the Kangjiawan lead-zinc deposit, Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 21(5): 1-7. (in Chinese)
- YANG J H, KANG L F, PENG J T, et al., 2018. In-situ elemental and isotopic compositions of apatite and zircon from the Shuikoushan and Xihuashan granitic plutons: implication for Jurassic granitoid-related Cu-Pb-Zn and W mineralization in the Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 382-403.
- YIN J Z, WANG M C, 1993. Geological characteristics and genesis of the Longwangshan gold deposit in the Shuikoushan ore field, Hunan Province[J]. *Gold Geology*(3): 46-50. (in Chinese)
- YU H C, QIU K F, SIMON A C, et al., 2023. Telescoped boiling and cooling mechanisms triggered hydrothermal stibnite precipitation: insights from the world's largest antimony deposit in Xikuangshan China[J]. *American Mineralogist*, 108(7): 1213-1223.
- YU H X, LIU J Y, 1997a. The characteristic and petrogenesis of the granitic subvolcanic complex in the Shuikoushan Orefield[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 21(1): 32-40. (in Chinese with English abstract)
- YU H X, LIU J Y, 1997b. The granitic subvolcanic complex and polymetallic mineralization in Shuikoushan Orefield[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 12(4): 35-44. (in Chinese with English abstract)
- YUAN S D, PENG J T, SHEN N P, et al., 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn-polymetallic Orefield in southern Hunan, China and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 81(2): 278-286.
- Yuan Y, Guo J-L, Zong K, et al. 2022. Stable zirconium isotopic fractionation during alkaline magma differentiation: Implications for the differentiation of continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*[J], 326: 41-55.
- ZENG L P, ZHAO X F, SPANDLER C, et al., 2024. The role of iron-rich hydrosaline liquids in the formation of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits[J]. *Science Advances*, 10(17): eadk2174.
- ZHAI Y S, WANG J P, PENG R M, et al., 2009. Research on superimposed metallogenic systems and polygenetic mineral deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 282-290. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W, ZHANG F Q, DILEK Y, et al., 2022. Basin response to the Jurassic geodynamic turnover from flat subduction to normal subduction in South China[J]. *GSA Bulletin*, 134(7-8): 1681-1700.
- ZHANG Y Z, 1957. The Shuikoushan Pb-Zn deposit in Hunan[J]. *Geological Review*, 17(3): 310-323. (in Chinese)
- ZHAO P D, ZHANG S T, CHEN J P, 2004. Discussion on prediction and appraisalment of replaceable resources of crisis mine[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(2): 111-117. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO S T, MAO S D, ZHANG W G, et al., 2025. Stibnite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: constraints from thermodynamic modeling[J]. *Geochimica*, 54(3): 379-389. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z, WANG D H, CHEN Z H, et al., 2017. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the Nanling Range[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2814-2827. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z, CHEN Y C, WANG D H, et al., 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)
- ZHENG Y F, 1986. An investigation of genetic model for a certain granite-type uranium deposit in southern China[J]. *Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 7(1): 51-59. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU T F, FAN Y, YUAN F, 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665-1678. (in Chinese with English abstract)
- Zhu Z, Zhang W, Wang J, et al. 2023. Magmatic crystallization drives zircon Zr isotopic variations in a large granite batholith. *Geochimica et Cosmochimica Acta*[J], 342: 15-30.

ZUO C H, 2015. Study of the Kangjiawan lead-zinc deposit genesis and relationship with surrounding magmatism in Changning City, Hunan Province[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)

ZUO Z, 2021. Metallogenic study and prospecting direction of Shuikoushan ore field[J]. World Nonferrous Metals(3): 83-85. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 柏道远, 黄建中, 李金冬, 等, 2007. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束: 湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. 大地构造与成矿学, 31 (1): 1-13.
- 柏道远, 唐分配, 李彬, 等, 2022. 湖南省成矿地质事件纲要[J]. 中国地质, 49 (1): 151-180.
- 陈德潜, 吴静淑, 1990. 离子吸附型稀土矿床的成矿机制[J]. 中国稀土学报, 8 (2): 175-179.
- 陈华勇, 吴超, 2020. 俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战[J]. 中国科学: 地球科学, 50 (7): 865-886.
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 等, 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. 中国科学: 地球科学, 44 (1): 111-121.
- 陈衍景, 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用[J]. 岩石学报, 29 (1): 1-17.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 等, 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社: 508.
- 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.
- 褚杨, 林伟, FAURE M, et al, 2011. 雪峰山早中生代构造演化: 构造学和年代学分析[J]. 地质科学, 46 (1): 146-160.
- 高学兑, 1995. 水口山矿田主要金矿床类型及其找矿方向[J]. 湖南地质, 14 (4): 220-225.
- 巩小栋, 李永胜, 公凡影, 等, 2011. 湖南水口山老鸭巢铅锌金矿床地质特征[J]. 矿物学报, 31 (S1): 20-21.
- 郭闯, 卢玉杰, 欧阳志强, 等, 2023. 湖南水口山老鸭巢金矿床地质特征及成因分析[J]. 西北地质, 56 (5): 294-307.
- 侯增谦, 2010. 大陆碰撞成矿论[J]. 地质学报, 84 (1): 30-58.
- 胡瑞忠, 1990. 花岗岩型铀矿床一种可能的成矿模式[J]. 科学通报, 35 (7): 526-528.
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 等, 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题[J]. 地学前缘, 17 (2): 13-26.
- 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[J]. 岩石学报, 32 (11): 3239-3251.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等, 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 11 (3): 291-304.
- 黄国龙, 吴烈勤, 邓平, 等, 2006. 粤北花岗岩型铀矿找矿潜力及找矿方向[J]. 铀矿地质, 22 (5): 267-275, 280.
- 黄建中, 孙骥, 周超, 等, 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.
- 江西省地质矿产局, 1984. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 921.
- 李能强, 彭超, 1996. 湖南水口山铅锌金银矿床[M]. 北京: 地震出版社: 107.
- 李胜虎, 2015. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李永胜, 甄世民, 公凡影, 等, 2011. 湖南省康家湾铅锌金银矿床成矿地质体的判定及其意义[J]. 矿物学报, 31 (S1): 964-965.
- 李永胜, 甄世民, 公凡影, 等, 2012. 湖南水口山铅锌金银矿田成矿物质来源探讨[J]. 矿床地质, 31 (S1): 571-572.
- 李永胜, 张帮禄, 公凡影, 等, 2021. 湖南康家湾大型隐伏铅锌矿床成因探讨: 流体包裹体、氢氧同位素及硫同位素证据[J]. 岩石学报, 37 (6): 1847-1866.
- 刘国昌, 1946. 湖南水口山地质论述[J]. 地质论评, 11 (S1): 29-38.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等, 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23 (10): 2329-2338.
- 秦拯纬, 付建明, 邢光福, 等, 2022. 南岭成矿带中一晚侏罗世成钨、成锡、成铅锌(铜)花岗岩的差异性研究[J]. 中国地质, 49 (2): 518-541.
- 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣, 等, 2012. 扬子-华夏古板块会聚带在湖南的位置[J]. 地球物理学报, 55 (2): 484-502.
- 石静坤, 王清河, 1988. 湖南水口山矿区地洼型古岩溶 U-Au 矿的发现及找矿意义[J]. 中国岩溶, 7 (S1): 115-125.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等, 2006. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 52 (2): 251-265.
- 谭仕敏, 刘邦定, 周立同, 2016. 湖南宝山区矿产地质调查成果报告[R]. 长沙: 湖南省地质调查院
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等, 2010. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40 (4): 733-738.
- 王登红, 王岩, 秦锦华, 2022. 中国矿产地质志·南岭卷[M]. 北京: 地质出版社: 1060.
- 王炯辉, 李毅, 黄冬梅, 等, 2013. 基于普通克里格法的泥河铁矿床资源储量估算研究[J]. 地质与勘探, 49 (6): 1108-1113.
- 王炯辉, 马星华, 李毅, 等, 2014. 花岗岩复式岩体成因及其与 W-Mo 成矿的关系: 以广西油麻坡岩体为例[J]. 地质学报, 88 (7): 1219-1235.

王炯辉, 张喜, 陈道贵, 等, 2015. 南方离子型稀土矿开采对地下水的影响及其监控[J]. 科技导报, 33 (18): 23-27.

王炯辉, 张义, 张成学, 等, 2019. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿深部找矿进展和找矿方向[J]. 矿产勘查, 10 (4): 835-844.

王炯辉, 2024. 南岭成矿带典型岩浆热液铅锌多金属成矿作用[M]. 北京: 地质出版社: 232.

王炯辉, 2026. 钨中找铍—南岭石英脉型钨铍矿化的发现及其找矿意义[J]. 地球科学, 1-21, doi: 10.3799/dqkx.2026.136.

许建祥, 曾载淋, 王登红, 等, 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型[J]. 地质学报, 82 (7): 880-887.

徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 等, 2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 46 (4): 1133-1150.

杨传益, 1985. 康家湾铅锌矿床的发现及成因[J]. 地质与勘探, 21 (5): 1-7.

银剑钊, 王敏初, 1993. 湖南省水口山矿田龙王山金矿床地质特征及成因[J]. 黄金地质科技 (3): 46-50.

喻亨祥, 刘家远. 1997a. 水口山矿田花岗质潜火山杂岩的成因特征[J]. 大地构造与成矿学, 21 (1): 32-40.

喻亨祥, 刘家远. 1997b. 水口山矿田花岗质潜火山杂岩与多金属成矿[J]. 地质找矿论丛, 12 (4): 35-44.

翟裕生, 王建平, 彭润民, 等, 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究[J]. 地学前缘, 16 (6): 282-290.

张有正, 1957. 湖南水口山铅锌矿床[J]. 地质论评, 17 (3): 310-323.

赵鹏大, 张寿庭, 陈建平, 2004. 危机矿山可接替资源预测评价若干问题探讨[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 31 (2): 111-117.

赵圣涛, 毛世德, 张文高, 等, 2025. 辉铋矿在热液中的溶解度与沉淀机制: 来自热力学计算的约束[J]. 地球化学, 54 (3): 379-389.

赵正, 陈毓川, 王登红, 等, 2022. 华南中生代动力体制转换与钨锡铋铍铌钽稀土矿床成矿系列的叠加演化[J]. 岩石学报, 38 (2): 301-322.

赵芝, 王登红, 陈郑辉, 等, 2017. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展[J]. 地质学报, 91 (12): 2814-2827.

郑永飞, 1986. 华南某花岗岩型铀矿床成矿模式研究[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 7 (1): 51-59.

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[J]. 岩石学报, 24 (8): 1665-1678.

左昌虎, 2015. 湖南常宁康家湾铅锌矿床成因及与周边岩浆作用关系研究[D]. 南京: 南京大学.

左宗, 2021. 水口山矿田成矿研究与找矿方向探讨[J]. 世界有色金属 (3): 83-85.

获奖者简历:

王炯辉, 研究员, 博士生导师, 原中国五矿股份有限公司副总经理、五矿勘查开发有限公司董事长。1987年毕业于长春地质学院应用地球物理专业, 2025年荣获第十九次李四光地质科学奖野外奖, 现任中国五矿首席技术专家、中国矿业联合会副会长, 矿产储量国际报告标准委员会中国观察员, 深地国家科技重大专项专家组成员。王炯辉同志长期从事资源勘查开发与新技术矿产研究利用等工作, 创造地质找矿新机制“泥河模式”和“嵩县模式”, 创新陆内伸展环境全温度域成矿模式, 在多座百年老矿山边深部连续取得找矿重大突破, 累计发现15座大型—超大型矿床; 首创“新技术矿产”战略体系, 整合勘探出全球单体最大的云山石墨矿, 致力于找矿、产业、新技术融合创新, 建成行业产能最大的绿色智能石墨矿山。先后在EPSL、GSAB等权威期刊发表学术论文60余篇 (其中, SCI 22篇, EI 3篇), 出版专著1部, 授权发明专利37项。个人荣获省部级科学技术奖一等奖2项 (2R1)、二等奖7项 (6R1、1R2), 自然资源部高层次科技创新人才工程“南岭边深部找矿创新团队”首席专家, 国家重点研发计划首席科学家, 享受国务院政府特殊津贴, 获全国劳动模范荣誉称号。



《地质力学学报》预出版