

当前中国找矿勘查值得关注的问题与发展方向*

毛景文¹, 刘敏², 姚佛军¹, 谢桂青^{1,2}, 袁顺达²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质大学地球科学与资源学院 自然资源部战略性金属矿产找矿理论与技术重点实验室, 北京 100083)

摘要 中国正处于工业化的关键时期, 作为基础原材料的矿产资源供给尤为重要, 找大矿、找富矿、找好矿是当前的重要任务。文章论述了中国找矿勘查面临的几个问题。首先, 地质学界有必要进一步深刻理解矿产资源的定义, 包括其经济属性、技术属性、市场属性、现实可利用性和多组分合理利用。其次, 在新时代, 通过科技创新引领找矿突破尤为重要, 区域成矿规律是找矿部署的理论基础, 矿床模型是找矿勘查的指导, 找矿技术是找矿突破的关键。此外, 文章浅析了找矿技术, 包括航空勘查地球物理技术、地面和井下勘查地球物理技术、遥感找矿技术、勘查地球化学技术、钻探技术、AI大数据、云计算找矿靶区优选技术和智慧勘查技术体系的研究现状和发展趋势, 剖析了中国找矿勘查人才缺乏的内在因素, 鼓励更多的地质院校毕业生到找矿勘查一线建功立业, 同时有必要改善工作环境和提高待遇。最后, 文章强调持续优化矿业市场, 与国际接轨, 吸引海量社会资金开展风险勘查, 推动发现和探明更多、更好的矿产资源。

关键词 矿产资源; 矿产勘查; 勘查技术; 找矿突破

中图分类号: P622

文献标志码: A

Some points concerned in field of prospecting and exploration in China and future considerations

MAO JingWen¹, LIU Min², YAO FoJun¹, XIE GuiQing^{1,2} and YUAN ShunDa²

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 MNR Key Laboratory for Exploration Theory & Technology of Critical Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

It is the key stage of industrialization in China at this present. Mineral resources as a kind of basic raw materials are very important for sustainable development. The current big task for economic geologists in China is to find and explore more and more large, high-grade and available mineral resources. Face to the several problems of prospecting and exploration in China, we give some suggestions as followings. First, we should repeat again and again the definition of mineral resources carefully since we usually don't pay no more attention of it before. Mineral resources which can be used now have some characteristics of economy, technology, market, and comprehensive utilization of multiple elements. At present, it is very important for prospecting and exploration of mineral resources with new metallogenic theories and technologies. The knowledges of the regional regularity of mineral spatial-temporal distribution is the base for the arrangement of prospecting whereas the mineral models are the guidance for exploration. New and available technologies applied are the key factor for both prospecting and ex-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41820104010)和中国工程院战略研究与咨询项目(编号:2023-XZ-71)共同资助

第一作者简介 毛景文, 男, 1956年生, 研究员, 中国工程院院士, 长期从事成矿理论研究与找矿评价工作。Email: jingwenmao@263.net
收稿日期 2024-10-11; 改回日期 2024-11-06。赵海杰编辑。

ploration. In this paper we also briefly discuss the current situation and development trends of varied technologies including air reconnaissance geophysics, ground survey geophysics and tunnel geophysics, remote sensing, geochemical exploration, drilling technology, AI big data-cloud computing for targets selected and intelligence technology system of prospecting and exploration. We also discuss the reason why it is shortage of talent young people to join the exploration teams and encourage the graduate students and post-graduate students to do the job in the field rather than writing papers only in laboratory. At same time we suggest it is necessary to promote the working setting and welfare, which could attract people to join. Moreover, we strength that it must continue optimizing mining market so as to join international tracts and attract more and more social fund to invest in the field of prospecting and exploration. In this way, it can push to find and explore more and better mineral resources in near future.

Key words: mineral resources, mineral exploration, exploration technology, prospecting breakthrough

农业为人类生存繁衍提供粮食,矿产资源是工业的粮食,在工业化过程,尤其在复杂的国际形势下,矿产资源保障能力极其重要,正如习近平总书记指出,矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,矿产资源勘查开发事关国计民生和国家安全。中国经过70多年系统的地质调查和找矿勘查,取得了巨大成就,但进一步找矿勘查的潜力仍然很大。通过实施新一轮找矿突破性战略行动,有望实现找矿新突破。

笔者结合多年来在国内外实地考察和工作实践,浅谈当前中国找矿勘查领域值得关注的几个问题与发展方向。

1 什么是矿产资源

首先,作为矿产资源勘查和开发的地质工作者务必时刻牢记矿产资源的定义,即“在现有经济技术条件下可以开发利用的石头”。美国科罗拉多矿业学院是全球顶尖矿业大学,其校训就是“能赚钱的石头才是矿”。

1.1 矿产资源的经济属性

矿产资源需要具有一定的规模和相应的品位(就是每吨矿石中可利用的资源量),西方矿业公司的找矿目标始终是大矿、富矿和好矿,过去30多年以来,铜和金一直是其追逐的主要矿种。作为具有经济价值的矿产资源,人们不能仅仅着眼于储量和品位,而且还要考虑矿体埋深、矿石可分选性和回收率、国家法规及地方法规,生态环境、地形、气候、电力、人力、社区、道路、码头以及政局稳定性和社会安全性等。总而言之,矿产的开发利用,就是在执行ESG(Environment, Social and Governance)标准的前

提下,获得足够的利润。不同类型矿业公司对于利润追求的目标不同,例如,国际大型公司追求高额利润,而中国很多中小型企业有少量利润即可开发。

秘鲁南部Don Javier斑岩铜钼矿,尽管获探得铜资源量121万吨,品位0.4%,但矿体出露范围小,而且呈直筒状,深达1500 m,尚未封底,虽然深部品位在增加(Ye et al., 2022),但无论是露天开采还是地下开采,剥采比太大,是一个典型的呆矿,或者说仍然是石头。美国Resolution超大型铜矿是一个拟建的地下矿山,位于亚利桑那州凤凰城以东96.56 km处,靠近Superior镇,由力拓(55%)和必和必拓(45%)共同拥有。目前,该矿床探明铜资源量为2727万吨,平均品位为1.5%,但位于地表以下近2100 m处,已经探明近30年,尚未开发利用。由于2200 m深处的地下温度达80°C,在如此高温、高压的环境下采矿,既要保证工人足够安全,又要保证设备可靠运行,因此通风、降温和高应力是非常大的挑战。此外,还有每天大约3312 m³的地下水需要抽取。尽管目前铜价飙升到约8万元/吨,但该矿床开发仍在研讨之中。又如,中国一家民营企业在蒙古南部探明一处轻稀土矿,初步估算探明资源量400~500万吨,平均品位1%,且价格高市场需求量大的铽镱含量也不高。这种以铈磷灰石为主要矿物的轻稀土矿,即使在不存在选矿的前提下,也是一个呆矿,因为品位低、采选成本高,在市场上没有竞争力。

在南美诸多国家,社区问题是干扰采矿的难题,无论是并购还是由勘探所获得的矿权,只要遇到社区困扰,将大大延缓开采时间,甚至长期搁置。在非洲和亚洲一些国家,不稳定的政局和困难的交通运输及电力供给导致部分矿山难以开发利用。

1.2 矿产资源的技术属性

是否是矿产资源,技术是关键要素之一,即有用组分能否被有效地开采和提取出来,这取决于以下两个方面的技术创新:其一是开采技术创新,规模化开采是降低成本、高效利用资源的重要途径,例如,山西省铜峪斑岩铜矿由于品位低(平均0.61%),尽管在20世纪50年代探明资源量达276万吨(Meng et al., 2020),但长期难以开发利用,进入21世纪以后,北方铜业公司在中国率先使用自然崩落法大规模地下开采,日处理26 000多吨(930万吨/年)矿石,不仅实现高效开发,而且效益相当可观。又如,福建省紫金山铜金矿勘探时按照当时国家规定的标准,提交铜储量64万吨和金5.5 t,自20世纪90年代改为露天开采后,铜的边界品位降低到0.25%,金边界品位0.2 g/t,由此铜和金资源量分别提高到350万吨和350 t(陈毓川等,2022)。再如,巨龙铜矿原来备案的探明资源量是1040万吨,边界品位0.4%,紫金矿业集团获得矿权后,将边界品位降低到0.15%,重新计算后的铜资源量接近2800万吨,并同时采用露天和地下崩落法大规模开采,年产铜金属量达30~35万吨,成为全球最大铜矿山之一;其二是选冶技术创新,例如,贵州省水银洞是一个砷和碳含量高的金矿,探明金资源量295 t(贵州地质矿产勘查开发局,2022),过去回收率为70%~80%,通过科技创新后,回收率达到93%,现在已经成为一个单体超大型金矿。值得一提的是,地表堆浸法的广泛应用导致全球原来不能被开发利用的低品位浸染状金矿得到高效利用,大幅度增加了金的储量和产量。

1.3 矿产资源的市場属性

市场价格决定了矿产资源能否开采,例如美国克莱麦克斯超大型钼矿在钼金属价格好、利润丰厚的时候就大规模开采,一旦价格下行,只能获得微薄利润或者亏损,当即关闭。由于新能源汽车对于锂金属的需求量不断增大,过去每年仅需要几万吨碳酸锂,现在是每年达几十万吨,预计2035~2040年将达到300万吨左右。正是由于需求量的增加,大规模寻找锂矿工作已经开展,全球针对盐湖锂、伟晶岩型锂辉石、高分异花岗岩云母锂,甚至黏土岩锂开展寻找和探查,在短时间内探明了一大批锂资源,由此导致碳酸锂的价格从60多万元/t降至7~8万元/t,在目前的形势下,致使部分低品位锂矿不得不关闭。

另外,一些金属市场需求量很小,例如,铼、铷

铯、铟、锗、铍、铌钽和镓等都是中国优势矿产,通常呈伴生组分,尽管其战略意义重大,但需求量很小,市场供大于求,企业回收面临着难题。尤其是部分金属,例如,铍、铷和铌钽等,相比之下在非洲和南美购买价格具有明显优势。有一些矿产由于品位过低,例如,大横路沉积型钴矿的品位为0.02%,开发成本大,没有经济价值,属于富钴沉积岩类。

1.4 共伴生多种资源综合回收,变废为宝

中国资源禀赋特点是贫矿多、富矿少、共伴生组分多、难选冶程度高。如何高效分离多种组分,更多、更高比例回收共伴生资源是提高矿产可利用性的关键。国际上通常把可以利用的所有资源以最主要资源为主体计算当量,从而评价其整体经济价值。

栾川钼矿是一个典型的钼钨共生矿山,过去很长时间仅开发钼,2000年以前由于钼价格比较低,企业长期处于亏损状态。在21世纪之初,洛钼集团成立后首先攻克共生白钨矿回收利用的科技难题,成功盘活了几十万吨钨资源,从而一举扭亏为盈;内蒙古白云鄂博是世界最大的稀土矿,探明稀土资源量达1亿吨(毛景文等,2022),同时,也是超大型铁矿和铌矿;湖南省柿竹园矿床是有色金属博物馆,钨、锡、钼、铋4种有色金属均达到超大型规模。不仅如此,白云鄂博和柿竹园2个矿山还分别探明萤石资源1亿吨和8000万吨,近些年,萤石的开发利用产生了巨大的经济效益。由此,可以相信,随着科学技术的不断进步,多种组分矿产有望得到合理利用,将全面提高矿山经济价值,延长矿山服务年限。

2 理论技术创新引领找矿勘查

矿床学(或者经济地质学)是一门应用基础科学研究,在国际上,仅有极个别学者从事纯粹成矿过程或者成矿理论研究,或者一些非专业人员从不同角度,例如,从岩石化学或者同位素地球化学等切入,把矿石作为一种特殊岩石开展成岩成矿过程探索,而绝大多数经济地质人员面向找矿勘查开展研究,其目标就是高效发现和探明矿产资源。但在中国的形势则截然不同,长期以来,由于评价体系导致中国矿业界以论文论英雄,可以撰写论文的人才很多,但野外能够胜任找矿勘查任务或者指导找矿勘查的人员却少之又少。作为地质学的重要组成部分,矿床学是以野外现场为实验室,只有广泛开展实地调查研究,才能获得真知。

2.1 区域成矿规律是找矿部署的理论基础

区域成矿规律就是在一定构造背景下形成一套或者几套具有成因联系的矿产资源组合,因此,找矿勘查部署要结合地质背景和区域找矿规律。在传统的地槽与地台大地构造学说中明确提出:在地槽开裂早期形成与基性-超基性岩浆有关的铬矿、铂钨矿和黄铁矿型铜矿(即现代的VMS型铜矿),中期发育与中酸性岩浆有关的铜钼铁矿,在地槽褶皱回返阶段(即碰撞造山阶段)形成与酸性岩浆有关的钨锡、稀有金属矿产。

20世纪60~70年代板块构造的诞生和持续发展,推动成矿规律研究不断深化。人们研究总结提出:在洋中脊环境寻找VMS型铜矿或者铜锌矿;在弧后盆地寻找VMS型铜铅锌矿或者铅锌矿;在活动大陆边缘寻找与弧岩浆有关的斑岩铜钼矿或者铜钼金矿以及浅成低温热液型铜金矿、金银矿和造山型金矿;在大陆边缘弧后寻找与花岗岩有关的钨锡矿、钼矿以及卡林型金矿;在被动大陆边缘寻找锡、锆铪和钛砂矿;在造山带寻找锂、铍、铌、钽、钨、锡、钨、铜、铅、锌、金等矿产;在大陆裂谷寻找与基性岩墙有关铂钨矿和与碱性岩-碳酸岩有关的稀土矿,等等(Michell et al., 1981; Sawkins, 1984; 1990; 芮宗瑶等, 1986; Seltmann et al., 1994; Pirajno, 2009; Sillitoe, 2013)。除此之外, Mao等(2021)通过对东亚大陆边缘成矿作用研究,提出后俯冲成矿构造环境,即大规模成矿作用发生在活动大陆边缘的大规模伸展域内(可能由于俯冲板块后撤所引发),多来源矿产资源(包括铜铅锌,钨锡和金银)同时产出于伸展盆地、变质核杂岩和拆离断层中。这一新成矿环境的厘定,为寻找多金属矿产资源提出了新方向。

有些矿产在同一地区可以形成于不同的构造环境内,例如,在中国三江地区延伸到东南亚地区的古特提斯成矿带中,发育志留纪(429 Ma)大洋海底喷流型Cu-Zn矿(例如,云南省思茅地区的大坪掌等矿床)(Lehmann et al., 2013),与活动大陆边缘弧岩浆(290~280 Ma)有关的斑岩型Cu-Au-Mo矿(例如,老挝Sepon, Phu Kham, KTL)和碰撞后与钙碱性花岗岩(240~215 Ma)有关的斑岩型Cu-Mo(Au), Cu-Au和Au矿床(例如,云南普朗和羊拉等,泰国的PUT和Phu Thap Fah以及柬埔寨的Phum Syrung)。

中国矿床地质学家自20世纪70年代末开始,研究提出矿床成矿系列概念,即在一定时间和空间形成一组具有成因联系的矿产资源组合,称为矿床成

矿系列,成矿系列中不同矿床互为找矿指示。这一研究概念在不断发展和提升,为中国找矿勘查部署起到了重要作用(程裕淇等, 1979; 陈毓川, 1983; 1994; 1997; 陈毓川等, 1994a; 1994b; 2006; 翟裕生等, 1992; 1996; 毛景文等, 1988; Mao, 1989; 王登红等, 2005; 2006)。与此同时,翟裕生等(1999; 2008)提出区域成矿系统概念(注明:不同于目前流行的成矿系统,例如斑岩成矿系统和浅成低温热液成矿系统等,这些仅限于矿床或者矿集区尺度),区域成矿系统与矿床成矿系列具有异曲同工之妙,同样对于找矿部署具有重要作用。值得指出的是,在中国实施的两轮成矿远景区域规划和矿产资源潜力评价重大项目中,全面运用矿床成矿系列学术思想为指导,省地勘局分别划分出各个省的矿床成矿系列,并编写系列专著,矿床成矿系列长期以来是中国地勘单位找矿部署的根据,为中国找矿突破发挥了重要作用。

2.2 矿床模型是找矿勘查的指导

在全球范围内尽管有各种各样的矿床模型,绝大多数是根据某一个研究矿床或矿集区的基本特点所建立,另外加上找矿技术方法组合构成找矿模型。事实上,构建普适性的矿床模型更加有效指导某些类型矿床的找矿勘查,例如,目前在国际上最为流行的矿床模型有斑岩铜矿成矿模型(Sillitoe, 2010)、斑岩-浅成低温热液型铜金银矿床模型(Hidenquist, 1996)和以弧后环境中酸性或者酸性火山岩为容岩的海底喷流型铜铅锌矿床(简称黑矿模型)(Sato, 1997; Ohmoto, 1996)等。这些模型在找矿实践中发挥着重要作用。

中国也有一些相对比较普适性的矿床模型,例如,五层楼钨矿模型(广东冶金地质勘探公司932地质队, 1966),尽管该模型于20世纪60年代就已经总结提出,迄今仍然有助于指导找矿勘查。基于长江中下游地区宁芜盆地所建立的玢岩铁矿模型(宁芜研究项目编写小组, 1978)不仅在陆相火山岩地区,而且在滨海相火山岩地区(例如西天山阿吾拉勒铁矿带)的找矿勘查也具有实用性。21世纪初研究提出的斑岩-矽卡岩型钼矿-脉状铅锌银金矿模型(毛景文等, 2009, 图1),推动中国通过脉状铅锌矿寻找隐伏斑岩-矽卡岩型钼矿的效果明显,不仅适于东部地区,而且同样适于念青唐古拉等类似构造环境地区的找矿评价,先后探明1000多万吨钼金属资源。尽管过去建立一些矿床模型在当时仅仅是针对某一矿床或者某一矿集区的组合矿床的总结,但在日后的

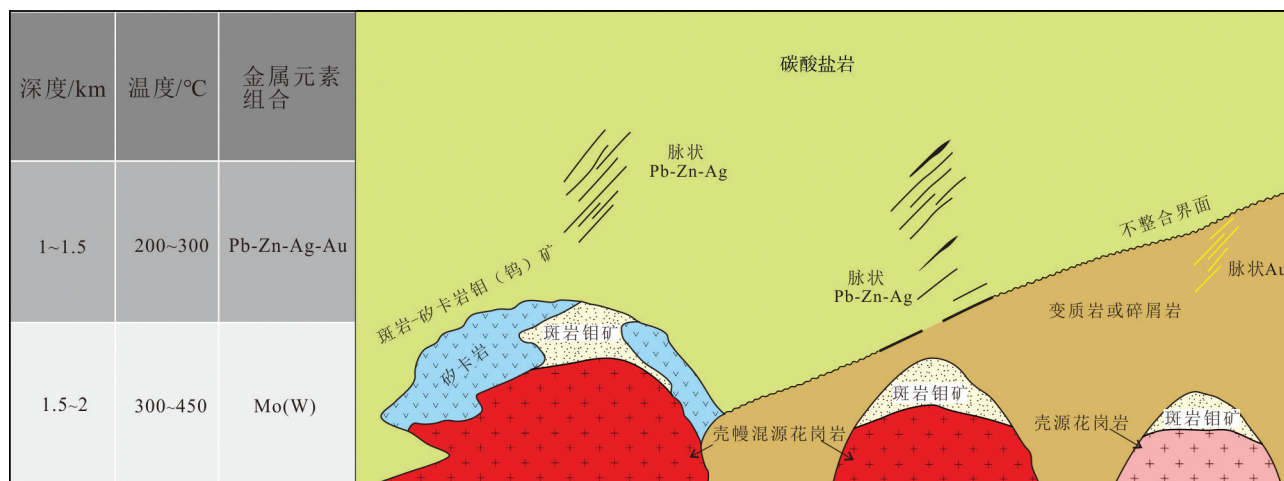


图1 斑岩-矽卡岩钼矿-远接触带脉状铅锌银矿模型(据毛景文等,2006修改)

Fig.1 Mineral model of the porphyry-skarn Mo and vein type Pb-Zn-Ag deposit in distal contact zone(modified from Mao et al.,2006)

成岩成矿阶段	岩石和矿化分带	岩石和矿化类型	围岩蚀变主要类型	形成温度 /°C	$f(O_2)$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	形成深度 /km
VII	多金属矿体	萤石-石英锡矿石和木锡石-蛋白石锡矿石	硅化、萤石化和重晶石化	180~280	10^{-10}	+14	1~3
III	矽卡岩化及相关矿体	矽卡岩锡石	矽卡岩化	400~520	10^{-30}	+10.3	1~2
VI		云英岩锡石	云英岩化、黄云化	300~410			
V		钠长石化及稀有金属锡矿体	钠长石化	120~500			
IV	钾化	钠长石稀有金属	钾长石化				
II	围岩	二长花岗岩/边缘发育辉绿岩和石英闪长岩脉的碱性长石花岗岩	绢云母化、高岭石化、绿泥石化	500~620	10^{-19}	+9.0	3~8
I	花岗岩	含暗色包体的花岗岩	硅化、绿泥石化、泥化	560~700	10^{-14}	+0.87	1~10
	岩浆源区						35~45

图2 云南腾冲地区与晚燕山期—早喜马拉雅期花岗岩有关锡多金属成矿系列的成矿模型(据Mao et al., 1988)

Fig.2 Model of Sn-polymetallic deposit related to Late Yanshanian—Early Himalayan granite in Tengchong area, Yunnan (Mao et al.,1988)

特定时间段会发挥作用。例如, Mao (1989) 基于滇西腾冲地区锡多金属矿提出的模型(图2)当时主要

突出如何寻找不同产状和类型的锡矿, 同时, 也明确提出在锡矿下部花岗岩隆起部位发育有与钠化有关

的稀有金属矿化(包括锂、铍、铌、钽、铷、铯)。由于新能源汽车快速普及,制造磷酸铁锂电池或者三元锂电池对锂金属需求量大幅度增加,因此,按照该模型可以在脉状和矽卡岩型锡矿下部的花岗岩隆起部位寻找锂(铍、铌、钽、铷、铯)矿。现今在湘南、赣西和赣南钨锡矿发现一系列大吨位锂矿与该模型非常相似,例如当年人们熟知的湘南正冲锡矿,就是如今的湘源超大型锂矿(约200万吨资源量),并伴生铌、钽、铷、铯。

2.3 找矿技术及新质生产力是找矿突破的关键

先进找矿勘查技术方法,特别是新质生产力是找矿突破的关键要素。就找矿勘查而言,金属矿产找矿分2种情况:其一:绿地找矿或新地找矿(Green field),主要寻找地表或浅表矿床;其二:棕地找矿(Brown field)或者已知矿山深部和外围找矿。绿地找矿在国际上普遍实施星-空-地-深立体勘查,代表着找矿综合勘查技术的新方向,有利于快速圈定找矿靶区。在靶区内勘查一次到位,钻孔疏密不一,依据经济技术的可行性,开采到一定深度;棕地勘查边探边采,达到经济技术的预期深度。

2.3.1 航空勘查地球物理技术

航空地球物理(包括重、磁、电、放)是西方发达国家最常用的找矿技术,在矿产勘查的不同阶段中发挥重要的直接或间接作用,尤其是对铁、铜、镍、钼等紧缺矿产勘查成效显著。在森林、山地、沙漠、沼泽等地区,航空重磁可以快速获取深部地层和构造信息。中国首套三轴稳定平台航空重力测量系统成功研发并应用,说明高精度、多参量测量是未来的发展方向。

最近,吴俊华等(2024)在调查评价花岗岩型锂矿时,发现高分异花岗岩富含放射性矿物,故以航空高放射性和低重力作为寻找花岗岩型锂矿的标志,具有明显的创新性。中国航空地球物理研究勘查技术研发水平比较高,连续获得国家重大项目的支持,但面临信息微弱、浅部干扰大、探测结果的解释不确定性等难题,还存在自主研发的新航空地球物理装备使用不够充分、实用化程度不够高,具有更高分辨率的航磁张量梯度,航空重力梯度和航空电磁等新技术发展滞后,先进实用的高精度航空地球物理数据采集与数据处理技术不完善,航空地球物理与地质和其他方法融合不深入等问题(熊盛青等,2023)。另外,需要研发更加简便的航空调查地球物理综合处理软件,使软件更加智能化、便利化。攻克小型化且高精度的装备,以无人机作为载体是航空地球物

理技术研发的新方向,国内无人机航空瞬变电磁系统攻克了系列技术难题,实现了低空仿地精准施工,属世界首创,技术水平国际领先(付志红,2023;徐正玉等,2023)。

2.3.2 地面和井中地球物理勘查技术

地面地球物理是在找矿靶区内和已知矿山深部开展找矿勘查的重要手段,通常采用地震波场、重力场、磁场、电场等方法探测隐伏地质体和推断矿体。常用的地面物探手段有IP、CSAMT、TEM等,在中国金属矿产勘查中发挥了重要作用。对于煤层和油气矿产以及没有遭受变形的沉积锰矿、砂岩铜矿、铝土矿和海底喷流型铜铅锌矿,深反射地震方法和大地电磁测深是有效的找矿勘查技术。井中物探由于更接近地质体,是探测井旁盲矿体的高效技术方法。近年来,国内井中物探技术方法体系和设备已逐步完善,包括井中磁测、井中激电、地下电磁波、井中声波、地-井瞬变电磁等。

迄今为止,中国大多数勘查地球物理仪器设备均来自国外,制造出具有自主知识产权且具有国际先进水平的地面地球物理设备乃当务之急。在理论和设备创新方面,湖南继善高科科技有限公司研发生产了广域电磁仪,提升了可控源电磁法的探测深度和精度;紫金矿业集团股份有限公司研发了震旦三维激电系统,并通过在国内外不同类型矿床应用试验表明,其具有勘探深度大、矿区抗干扰能力强、异常源定位准等优点;中国科学院上海微系统与信息技术研究所生产的低温超导和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所生产的高温超导均已取得较好的应用案例;其他多种地球物理仪器设备(包括地面电磁探测系统、地空一体化电磁技术和时频电磁系统等)也已经研制成功,正在市场开始推广应用或者制造单位在示范应用。可以相信,几年后中国将形成一批具有自主知识产权的地球物理设备。井中地球物理有助于坑道内钻探探测周围矿体的高效技术方法,但在中国金属矿勘查中使用较少,这是一个有待于高度重视和重点发展的方向。

2.3.3 遥感找矿技术

遥感找矿技术在全球整体呈稳步发展态势,无论在空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率,都已获得巨大的进展。民用卫星的空间分辨率已达0.25 m,接近军用的最高水平;连续成像的光谱分辨率已达纳米级,甚至波长长达10~12 nm以上,非成像系统的分辨率更是高达亚纳米级;地球同步凝视型卫星可

以在一定范围内将时间分辨率提到分钟甚至秒级;多卫星组网的方式也可以将时间分辨率大幅度提升;合成孔径雷达早已突破了云雾的限制,雷达的高精度编队运行提高了三维立体观测能力,为业务化监测地表形变提供了可能。激光雷达的应用为更高精度的地形测量奠定了基础。今后遥感技术发展可能已不是单一的技术,而是组合型的发展。

总体来讲,遥感技术向定量化、高精度、集成化方向发展,利用遥感技术开展地质填图日臻成熟,基于固定翼和无人机的高光谱填图应用越来越广泛,岩芯高光谱红外扫描(包括短波红外光谱和热红外光谱)是上市公司提供资料中必不可少的内容。近些年来,中国已经开始将这些技术推广应用于地质调查和勘查评价,并取得了初步进展(例如,连长云等,2005;姚佛军等,2010;2012;陈华勇等,2021;张忠雪等,2023;赖晓丹等,2023)。但是通过进一步深化研究,一些核心技术难题亟待破解,例如,传感器、接受信息的精密仪器和精确判读信息的工业软件等。另外,从地面到卫星高光谱有机结合(包括卫星光谱的大面积全覆盖区,无人机高光谱的高分辨率和地面红外光谱高精度),解决大比例尺蚀变矿的“图谱”合一的难题。矿物光谱数据库缺乏也是制约中国深度挖掘遥感识别矿物组成的一道难题。

值得指出的是,中国地质调查局南京地质调查中心研发的小型化成像光谱仪HMS400M,地面光谱仪CSD350B,岩芯光谱扫描仪CMS350B已经取得重要进展,经过在沙特地质填图和岩芯扫描中检验,几乎达到国际先进水平。通过进一步持续研发,这些仪器有望领先全球。

2.3.4 勘查地球化学技术

中国地球化学找矿技术在全球居于领先地位,自20世纪晚期在谢学锦院士倡导下,中国开展了大面积1:20万地球化学填图,发现和探获了一大批金矿,一举使中国成为金矿大国。过去20年中国已绘制了全国78个元素地球化学分布图,构成中国大地元素分布周期表,并与20余个国家合作,绘制了覆盖地球陆地面积30%的全球地球化学基准图。这些珍贵数据,对认知地球元素分布特点、找矿勘查部署、监测全球环境变化、合理利用土地资源等具有重要作用。例如,中国土壤锂地球化学分布图(王学求等,2020)与目前已经探明的各种类型锂矿床吻合度极高,对于新发现锂资源成矿区带具有重要指导意义。

过去20年,全球找矿目标多在高山区和浅覆盖

区,运用地球化学技术探寻隐伏矿体是一个具有挑战性的科技问题。由于澳大利亚绝大多数属于浅覆盖区,地质学家们通过对树叶和白蚂蚁窝的系统调查,发现地下几米、几十米,甚至上百米的隐伏矿体(Anand et al., 2014),并取得了较好的效果。王学求团队致力于隐伏区穿透性地球化学技术研发,针对地气和生物地球化学勘查技术开展系统研究,并研制出捕获地气的有关装置,吉林省地质调查院同行使用该装置找矿效果较好,在新生代玄武岩下部发现几米厚度的金矿体。王学求认为,“固体介质纳微米地球化学采样技术与筛分装备、土壤纳米金属颗粒萃取富集技术和纳米金属颗粒微观识别技术为今后穿透性地球化学找矿技术发展的新方向”。

测试技术是地球化学找矿勘查的重要支撑,中国分析化学设备主要依赖于进口,特别是测试稳定同位素和放射性同位素的大型质谱仪完全依赖于进口。尽管中国实施了多个变革性技术研发项目,但仅仅是补充或者提升国外已有仪器设备的某些参数,或是稍微拓展进口仪器的某些用途。

研发能够实现野外快速地球化学勘查的关键技术或装备,并具有小型化、便携化、集成化和智能化优点,故轻便多功能野外现场快速测试分析与装备,是未来仪器装备研发的一个主要方向。例如手持式多元素X射线荧光分析仪的应用,能够极大地加快化探数据采集,是未来化探能够在中高山快速找矿勘查中必不可少的挂件。最近,澳大利亚(Harris et al., 2024)研制的半自动X-荧光扫描仪在野外可以快速扫描岩芯,其精度与室内测试分析结果相当接近,不仅可以帮助野外地质工作者认识矿床成因和部署钻探工程决策,而且对评估资源的利用和回收具有重要意义。

国内仪器厂商和研究机构研制了X射线荧光光谱、激光诱导击穿光谱等便携仪器,开发了一批野外现场分析技术,集成研发了多种车载移动实验室,服务于固体矿产勘查等领域。国家测试中心研制并定型分析仪器装备,集成构建谱系化移动实验室,制定具有可操作性的仪器计量技术规范和技术方法标准,在应用示范的基础上升级完善,形成“研发-生产-标准化-应用-升级”的良性循环。因此,普及野外快速多功能移动测试实验室是未来发展和普及的新方向。

2.3.5 钻探技术

随着生态环保理念的不断强化,钻探技术的发展呈现出便携、低创、低成本、高效率等特点。适应

不同地质地貌景观区快速勘查的浅层钻探与定向钻探技术与装备,解决自动控制模块轻便化的问题,研发自动钻进和定向钻进控制软件及便携式自动化岩芯钻机;通过自适应钻进、自动提升、自动加减钻杆,实现高效钻进与特定景观区及特定矿床相适应的快速钻探技术方法体系,优化快速钻探技术路线。

钻具发展从大口径钻到小口径金刚石钻,迄今西方矿业公司普遍使用反循环钻。据悉,新西兰新研发的反循环合体金刚石钻性能优越,无矿地段使用反循环钻快速钻探,进入矿化蚀变带或者接近含矿层位转换成金刚石钻。澳大利亚 MinEx CRC 是目前世界上最大的矿产勘探合作组织,汇集了大型工业界、政府、大学和其他研究机构,总研究经费约 2.2 亿澳元,为期 10 年(2019~2029 年)。自 2019 年成立以来,该机构在矿产勘探中探索使用 Coiled Tubing (CT,“螺旋管”) Rig 钻探技术,开展“三位一体”的矿产资源勘查大型设备研制、创新与应用。在钻探的同时,同步获得井下地球化学、地球物理和矿物光谱数据。并用大数据与机器学习技术对海量钻井数据的快速处理(包括快速的岩芯编录与可视化,有效提取矿化和蚀变信息),然后开展准确地圈定找矿靶区和定位矿体以及多种地质数据的快速处理与可视化。

2.3.6 AI 大数据、云计算找矿靶区优选技术

近年来,大数据(Big data)与人工智能(AI)融合的新科学范式为探测资源带来了新契机。例如,Reichstein 等(2019)在 Nature 发表了地学大数据期刊文章以解决地球系统科学问题;Bergen 等(2019)在 Science 发表了机器学习(AI 技术)在地质、地球物理、地球化学、遥感等大数据集的深层次挖掘功能,促进了数学地球科学和矿产勘查的 AI 发展;美国地质调查局(2020)发布了“21 世纪科学战略(2020~2030)”,其强调将大数据、机器学习、云计算等新一代信息技术应用于找矿勘查,提高找矿效率;加拿大 GeologicAI(2023)国际矿业公司开发了 GeologicAI 硬件与软件一体化的移动平台,运用大数据分析 AI 技术,不仅能够实时的获取地质勘查大数据,还能识别大型数据集(可见光与短波红外连续光谱、XRF、磁法、电磁法等)的成因模式、成矿相关性和致矿异常,由此优化资源勘探和提高决策效率,在全球成矿区带的地学大数据、非线性方法及 AI(机器学习、深度学习)2D/3D 成矿预测(成秋明,2021)、中国华北重要金矿集区的地质勘查大数据与 AI(机器学

习、深度学习)的 3D/4D 成矿预测(王功文等,2021)等领域取得了较好成果。

综上所述,国内外探测资源的发展趋势是以大数据-大模型-大算力为基础的时空智能,通过地质找矿理论知识嵌入、地质勘查大数据和人工智能技术融合,开展矿产资源智能化空间预测评价和找矿靶区圈定。因此,通过发展 AI 找矿新质生产力,突破解决中国资源评价与预测的重大科学问题与技术难题,是当前中国资源领域发展方向之一。

此外,基于大数据研发的工业软件不仅对于矿山开发规划方面具有重要意义,而且也有利于指导在已有矿山的深边部以及对新发现矿产地的进一步勘查和发现新矿体。但是,在国际上广泛应用的三维建模软件主要是来自澳大利亚、加拿大等国(如 Surpac、Micromine、leapfrog、Vulcan 或 Datamine),这些三维建模软件在中国也有较多用户。可见,自主研发具有自主知识产权的三维建模软件是中国当前的一项重要任务。

2.3.7 智慧勘查技术体系

随着计算机科学技术、网络技术、人工智能、大数据、云计算等现代信息技术的迅速发展,智慧勘探在近 10 年逐渐成为发展热点。智慧勘探主要技术包括:知识模型、协同研究、业务微循环、信息技术、探测技术、通讯(网络)技术、智能数据库技术、找矿决策、智能钻探、虚拟存储技术、大数据、云计算等。目前,在金属矿找矿领域,高光谱遥感、红外光谱、无人机载平台、航空物探仪器、野外快速测试分析仪器、自动钻探和定向钻探技术、智慧勘探等方向技术仍在迅速发展,未来金属矿找矿勘探发展方向是越来越解放人力,智能化和自动化越来越高。中国亟待尽快研发相关新型仪器设备,筛选具有应用前景的方法技术或技术组合,优化和规范相关技术环节,形成一套具有先进科学性和广泛实用性的新找矿范式。

3 人才是中国找矿勘查面临的困境

科学技术是第一生产力,而人是科学技术的创造者。目前,找矿勘查行业从业者存在两大难题:其一是后继乏人,由于地质找矿是一项长期在野外作业艰苦且危险,在新中国成立之初,地质队伍被誉为新时代的地下侦察兵,不仅有“三光荣、四特别”为国找矿的高尚情怀,也有高补助、高福利的特殊政策,中国地质队伍迅速壮大,为新中国发现和探明了大

量矿产资源,有力地支撑了国家经济社会发展,同时培养了一批又一批经验丰富的找矿专家。时至今日,经济社会高速发展,信息化程度日益提高,国内外同行交往频繁,年轻一代的理念和追求发生了根本变化。由于低收入、少假期、工作环境艰苦、与家人团聚困难、与繁华城市几乎隔绝,缺少应有的尊严,等等,地质找矿行业在人们心目中既没有地位,也缺少必要的生活保障,因此,后继乏人在所难免;其二,人才培养出现巨大偏差,过去20多年以来,攀比发表论文数量和在国外有影响力刊物发表论文成了主流,无论是人才帽子,还是评职称,都是以论文、发明专利和奖项为标准,尽管党中央三令五申“五不唯”,但这种趋势难以改变,科技人员和学生们挖空心思写论文,耗费了大量时间和精力。正是在这种大环境下,本科生、硕士研究生、博士研究生到博士后工作人员或多或少都能写论文,但是绝大多数人到野外工作缺少基本技能,知识面很窄,胜任找矿勘查工作仍需要较长时间再培养。地质找矿是一项实践性很强的学科,百闻不如一见,中国亟待培养大批具有实践经验,能够解决找矿难题的专业人才。

此外,尽管加强基础研究十分重要,但并非全民皆兵。只有将兴趣融于志向,孜孜不倦追求,才有可能实现从零到一的原创新。全球从事矿床学研究的纯粹理论人员不到1%(这些科学家大多数一生发表的论文仅10~20篇,甚至更少),其余大于99%的科技人员都是针对社会需求或者企业需要,通过研究解决问题,助推或者直接实现找矿突破,一旦在找矿过程有新发现,才可以写出创新性科技论文,例如,当今全球矿床学界最具影响力的科学家 Richard Sillitoe 和 Jeffery Hedenquist 都是地质咨询专家,在矿业咨询公司工作,充分体现了“实践出真知”。

4 合理探矿权政策是中国找矿勘查行业发展的核心

找矿勘查是一种高风险、高回报行业,全球探矿成功率不到3%。对于这种高风险行业,国际上已经有比较成熟的运作方式,即根据公益性地质调查圈定的异常或者他人放弃的探矿权,在计算机网络上进行优先申请登记探矿区块,按照区块面积投入勘查费或者缴纳租赁金,一旦不投入即视为放弃探矿权。这样以来,没有人为操作,可以有效地规避不法行为。

中国在20世纪末原地质矿产部与原国家土地局合并后,成立了国土资源部,探矿权出让管理开始

学习土地出让管理办法,实行招拍挂方式出让探矿权。土地可以丈量,不同地段价值不同,由此可以招拍挂出让。但是,地下是否有矿产,是什么矿产,有多大量,都是未知数,即使发现矿化异常,能否找到可以开发利用的矿产仍然是未知数。正是由于招拍挂出让探矿权方式的实施,企业拿不到探矿权,社会资金难以进入探矿市场,导致矿业界缺少资金周转,一派萧条。

自从实施新一轮找矿突破战略行动以来,自然资源部不断优化矿业政策,推动提升增储上产能力。目前,按照工作程度推进探矿权招拍挂是较为有效途径,地质调查工作程度越低,拍卖起价越低,这样有利于探矿权出让。随着各省地勘队伍企业化改革逐渐完成,可供招拍挂或者拍卖的探矿权越来越少,申请在先将成为探矿权出让的最重要形式。申请在先在网上登记探矿权既规避了腐败,又能够吸引社会资金及企业资金投入到勘查市场,将大幅度推进国内增储上产,保障国家安全。

后记:今年是中国著名的矿床地质与矿产勘查专家陈毓川院士90华诞,他将毕生贡献给中国找矿勘查事业,他在成矿理论、找矿实践,全国找矿勘查部署、矿产资源区域规划和潜力评价以及勘查开发政策建议等方面做出了卓越贡献。作为他的学生,撰写此文,表述学习他的学术思想和爱国精神的体会。此文涉及面较广,感谢诸多同行的热忱帮助,包括王功文、王瑜、冯锐、洪为、程彦博,等等。感谢王京彬总地质师和李月臣教授级高级工程师在百忙之中为本文提出诸多宝贵建议。

References

- Anand R, Lintern M, Noble R, Aspandiar M, Macfarlane C, Hough R, Aaron A, Wakelin S, Townley B and Reid N. 2014. Geochemical dispersion through transported cover in regolith-dominated terranes-Toward an understanding of process[J]. SEG Special Publication, 18: 97-125.
- Bergen K J P, Johnson P A, De Hoop M V and Beroza G C. 2019. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience[J]. Science, 363: 1-10.
- Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province. 2022. https://dk.guizhou.gov.cn/xwzx/jrtt/202206/t20220629_75331457.html.
- Chen H Y, Xiao B and Zhang S T. 2021. Alteration mineral exploration identification system[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

- Chen Y C. 1983. The metallogenic series of the rare-earth, rare and nonferrous metal deposits related to the Yanshan granites in South China[J]. *Mineral Deposits*, (2): 15-24(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C. 1994. Metallogenic series of ore deposits[J]. *Geoscience Frontiers*, 1(3): 90-94(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Wang P A, Qin K L, Zhao D H and Mao J W. 1994a. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogenic in Qinling area[J]. *Mineral Deposits*, 13(4): 289-298(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Mao J W and Wang P A. 1994b. Metallogenic history and evolution of metal deposits in northern Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 324-338(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C. 1997. Present situation and trend of research on metallogenic series of ore deposits[J]. *Geology and Prospecting*, 33(1): 21-25 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Pei R F and Wang D H. 2006. On minerogenetic (metallogenic) series: Third discussion[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C and Mao J W. 2022. Increase the investment in mining development technology, domestic prospecting is promising[J]. *China Science & Technology Industry*, (8): 6-10(in Chinese).
- Cheng Q M. 2021. What are mathematical geosciences and its frontiers[J]? *Geoscience Frontiers*, 28(3): 6-25(in Chinese with English abstract).
- Cheng Y Q, Chen Y C and Zhao Y M. 1979. The problems of metallogenic series of ore deposits are discussed[J]. *Journal of Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 32-58(in Chinese).
- Fu Z H. 2023. UAV transient electromagnetic system and application of fine detection[A]. The second national mineral exploration conference[C]. Weihai: Geophysical Society of China. 129-130(in Chinese).
- Guangdong Metallurgical Geological Exploration Company 932 Geological Team. 1966. How do we find, evaluate and explore wolstenite quartz vein deposits with the "five-story" rule[J]. *Geology and Prospection*, (5): 15-19.
- Harris A C, Finn D J, MacCorquodale Ravella M, Clarke W J, Krnate S, Battig E and Maguire S. 2024. Empowering geologists in the exploration process—Maximizing data use from enabling scanning technologies[J]. *SEG Discovery*, 136: 3-16.
- Lai X D, Zhang J Z, Li J, Yang K, Qi J P and Jiang J J. 2023. Quantitative prediction of big data of altered minerals based on short-wave infrared spectroscopy: A case study of Zijinshan gold-copper deposit, Shanghang County, Fujian Province[J]. *Ore Geology Reviews*, 42(1): 55-65.
- Lehmann B, Zhao X F, Zhou M F, Du A D, Mao J W, Zeng P S, Henjes-Kunst F and Hepe K. 2013. Mid-Silurian back-arc spreading at the northeastern margin of Gondwana: The Dapingzhang dacite-hosted massive sulfide deposit, Lancangjiang zone, southwestern Yunnan, China[J]. *Gondwana Research*, 24: 648-663.
- Lian C Y, Zhang G and Yuan C H. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy to Pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province[J]. *Ore Geology Reviews*, 24 (6): 621-637.
- Mao J W, Song S H and Chen Y C. 1988. Igneous rock and tin polymetallic deposit metallogenic series in northern Guangxi[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press. 196(in Chinese).
- Mao J W. 1989. The igneous rock series and tin polymetallic minerogenetic series in the Tengchong area, Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2(2): 175-187.
- Mao J W, Xie G Q, Cheng Y B and Chen Y C. 2009. Mineral deposit models of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 72-79(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Liu P, Goldfarb R J, Goryachev N A, Pirajno F, Zheng W, Zhou M, Zhao C, Xie G, Yuan S and Liu M. 2021. Cretaceous large-scale metal accumulation triggered by post-subductional large-scale extension, East Asia[J]. *Ore Geology Reviews*, 136: 104270.
- Mao J W, Song S W, Liu M and Meng J Y. 2022. REE deposits: Basic characteristics and global metallogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3675-3697(in Chinese with English abstract).
- Meng X, Richards J P, Mao J W, Ye H S, DuFrane S A, Creaser R, Marsh J and Petrus J. 2020. The Tongkuangyu Cu deposit, Trans-North China orogen: A metamorphosed Paleoproterozoic porphyry Cu deposit[J]. *Economic Geology*, 115: 51-77.
- Mitchell A H G and Garson M S. 1981. Mineral deposits and global tectonic settings[M]. New York: Academic Press.
- Ningwu Research Project Preparation Group. 1978. Ningwu porphyrite iron ore deposit[M]. Beijing: Geology Press. 196p(in Chinese).
- Ohmoto H. 1996. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective[J]. *Ore Geology Reviews*, 10: 135-177.
- Pirajno F. 2009. Hydrothermal process and mineral systems[M]. Berlin: Springer Netherlands.
- Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J, Carvalhais N and Prabhat N. 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science[J]. *Nature*, 566: 195-204.
- Rui Z Y and Zhang H T. 1986. Porphyry deposit series of China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 14: 89-99(in Chinese).
- Sato T. 1974. Distribution and setting of the Kuroko deposits[J]. *Mineralogists Special issue*, 6: 1-10.
- Sawkins F J. 1984. Metal deposits in relation to plate tectonics[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Sawkins F J. 1990. Metal deposits in relation to plate tectonics(2nd edition)[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Seltmann R and Faragher R E. 1994. Metallogeny of collisional orogen-review papers[A]. In: Seltmann R, Kampt H and Moller P, eds. *Metallogeny of collisional orogen*[C]. Prague: Czech Geological Survey. 218-223.
- Sillitoe R H. 2013. Metallogeny and regulatory inequalities around the northern Pacific rim: Implication for discovery[J]. *SEG Special*

- Publication, 17: 1-16.
- Wang D H, Chen Y C and Xu Z G. 2005. Preliminary study on Cretaceous mineralization systems in China: Implications for future prospecting[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 231-239(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Zhu Y S, Zhu M Y and Xu Z G. 2006. The construction of the Chinese ore-forming system based on minerogenetic series and its application[J]. *Mineral Deposits*, 25 (Supp.): 43-46(in Chinese).
- Wang G W, Zhang Z Q, Li R X, Li J J, Sha D M, Zeng Q D, Pang Z S, Li D P and Huang L L. 2021. Resource prediction and assessment based on 3D/4D big data modeling and deep integration in key ore districts of North China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 51(9): 1594-1610(in Chinese with English abstract).
- Wang X Q, Liu H L, Wang W, Zhou J, Zhang B M and Xu S F. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(6): 797-806(in Chinese with English abstract).
- Wu J H, Gong M, Li M G, Wu Z H, Ji H, Zhou J T, Kuan E L and Li Y J. 2024. High yield hot granite and lithium mineralization: A case study of Yifeng-Fengxin giant lithium ore field in West Jiangxi Province[J]. *Earth Science*(in press).
- Xiong S Q and Xu X Y. 2023. Application prospect of aerogeophysics in strategic mineral exploration[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(2): 143-156(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Y, Luo C P, Fu Z H, Liao X, Liu L H and Lü R Q. 2023. Experimental study on unexploded bomb detection by UAV airborne transient electromagnetic method[J]. *Modern Radar*, 45(12): 47-52 (in Chinese with English abstract).
- Yao F J, Yang J M and Geng X X. 2010. Preliminary study of radar data in geological structure recognition[J]. *Mineral Deposits*, 29 (Supp.): 695-696(in Chinese).
- Yao F J, Zhang Y J, Yang J M and Geng X X. 2012. Application of AS-TER remote sensing data to extraction of alteration zoning information from Dexing porphyry copper deposit[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 881-890(in Chinese with English abstract).
- Ye Z C, Mao J W, Lu M J, Zhu X S, Chen N, Wei H T, Jin W Q and Meng X Y. 2022. Geology and geochronology of the Don Javier Cu-Mo porphyry deposit, southern Peru[J]. *Ore Geology Reviews*, 143: 104777.
- Zhai Y S. 1992. Some problems on the study of metallogenic series[J]. *Geoscience*, 6(3): 301-308(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z and Cui B. 1996. Metallogenic series study[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 192p(in Chinese).
- Zhai Y S. 1999. On the metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Wang J P, Deng J, Peng R M and Liu J J. 2008. Temporal-spatial evolution of metallogenic systems and its significance to mineral exploration[J]. *Geoscience*, 22(2): 143-150(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X, Dai J J, Wang X G, Hu Z H, Wan X, Peng B, Fu M H and Zhao L X. 2023. Shortwave infrared characteristics of muscovite from giant Shimensi tungsten deposit in northern Jiangxi Province and implication to exploration[J]. *Mineral Deposits*, 42(1): 116-127(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈华勇, 肖兵, 张世涛. 2021. 蚀变矿物勘查标识体系[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈毓川. 1983. 华南与燕山期花岗岩有关的稀土、稀有、有色金属矿床成矿系列[J]. *矿床地质*, (2): 15-24.
- 陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列[J]. *地质前缘*, 1(3): 90-94.
- 陈毓川, 王平安, 秦克令, 赵东宏, 毛景文. 1994a. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列的划分及区域成矿规律探讨[J]. *矿床地质*, 13(4): 289-298.
- 陈毓川, 毛景文, 王平安. 1994b. 桂北地区金属矿床成矿历史演化程式[J]. *地质学报*, 68(4): 324-338.
- 陈毓川. 1997. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. *地质与勘探*, 33 (1): 21-25.
- 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, 毛景文. 2022. 加大矿业开发科技投入, 国内找矿大有可为[J]. *中国科技产业*, (8): 6-10.
- 成秋明. 2021. 什么是数学地球科学及其前沿领域[J]? *地质前缘*, 28 (3): 6-25.
- 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): 32-58.
- 付志红. 2023. 无人机航空瞬变电磁系统及精细化探测应用[A]. 第二届全国矿产勘查大会[C]. 威海: 中国地球物理学会. 129-130.
- 广东冶金地质勘探公司932地质队. 1966. 我们是怎样用“五层楼”规律寻找、评价和勘探黑钨矿石英脉矿床[J]. *地质与勘探*, (5): 15-19.
- 贵州省地质矿产勘查开发局. 2022. https://dk.guizhou.gov.cn/xwzx/jrtt/202206/t20220629_75331457.html
- 赖晓丹, 张锦章, 李晶, 杨凯, 祁进平, 蒋姣姣. 2023. 基于短波红外光谱技术的蚀变矿物大数据定量预测方法探索——以福建上杭县紫金山金铜矿床为例[J]. *矿床地质*, 42(1): 55-65.
- 连长云, 章革, 元春华. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. *矿床地质*, 24(6): 621-637.
- 毛景文, 宋叔和, 陈毓川. 1988. 桂北地区火成岩系列与锡多金属矿床成矿系列[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 196页.
- 毛景文, 叶会寿, 王瑞廷, 代军治, 简伟, 向君锋, 周珂, 孟芳. 2009. 东秦岭中生代钨铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. *地质通报*, 28(1): 72-79.
- 毛景文, 宋世伟, 刘敏, 孟健寅. 2022. 稀土矿床: 基本特点与全球分布规律[J]. *地质学报*, 96(11): 3675-3697.
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 196页.

- 芮宗瑶,张洪涛. 1986. 试论中国斑岩型矿床系列[J]. 中国地质科学院院报, 14: 89-99.
- 王登红,陈毓川,徐志刚. 2005. 中国白垩纪大陆成矿体系的初步研究及找矿前景浅析[J]. 地学前缘, 12(2): 231-239.
- 王登红,陈毓川,朱裕生,朱明玉,徐志刚. 2006. 以矿床成矿系列构筑中国成矿体系及运用[J]. 矿床地质, 25(增刊): 43-46.
- 王功文,张智强,李瑞喜,李俊建,沙德铭,曾庆栋,庞振山,李大鹏,黄蕾蕾. 2021. 华北重点矿集区大数据三维/四维建模与深层次集成的资源预测评价[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1594-1610.
- 王学求,刘汉粮,王伟,周建,张必敏,徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 吴俊华,龚敏,李国猛,吴赞华,季浩,周建廷,况二龙,李艳军. 2024. 高产热花岗岩与锂成矿作用: 以赣西地区宜丰-奉新巨型锂矿田为例[J]. 地球科学(待刊).
- 熊盛青,徐学义. 2023. 航空地球物理在战略性矿产勘查中的应用前景[J]. 地球科学与环境学报, 45(2): 143-156.
- 徐正玉,罗朝鹏,付志红,廖先,刘龙欢,吕荣其. 2023. 无人机航空瞬变电磁法未爆弹探测试验研究[J]. 现代雷达, 45(12): 47-52.
- 姚佛军,杨建民,耿新霞. 2010. 雷达数据在地质构造识别中的初步研究[J]. 矿床地质, 29(增刊): 695-696.
- 姚佛军,张玉君,杨建民,耿新霞. 2012. 利用ASTER提取德兴斑岩铜矿遥感蚀变分带信息[J]. 矿床地质, 31(4): 881-890.
- 翟裕生. 1992. 成矿系列研究问题[J]. 现代地质, 6(3): 301-308.
- 翟裕生,姚书振,崔彬. 1996. 成矿系列研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 192页.
- 翟裕生. 1999. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 6(1): 1-11.
- 翟裕生,王建平,邓军,彭润民,刘家军. 2008. 矿床成矿系统及其找矿意义[J]. 现代地质, 22(2): 143-150.
- 张忠雪,代晶晶,王先广,胡正华,万新,彭勃,傅明海,赵龙贤. 2023. 赣北石门寺超大型钨矿床白云母短波红外特征及其勘查指示意义[J]. 矿床地质, 42(1): 116-127.