



期刊官网扫码浏览



更多信息扫码浏览

中国有色金属矿产勘查 70 年进展

戴塔根^{1,2}, 潘君庆^{1,2}, 张德贤^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿与环境监测(教育部)重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘 要: 矿产资源是国民建设的基础, 而有色金属在矿产资源中占着重要的地位。自新中国成立 70 年以来, 我国有色金属矿产勘查得到了巨大的发展。本文就以往我国有色金属矿产勘查进展予以回顾, 主要总结过去 70 年有色金属矿产地质勘查的主要成果、基于我国地质科学家提出的成矿与勘查理论应用进展、我国及世界上主要的地质勘查技术方法进展等实践成果和理论成果。

关键词: 矿产资源; 有色金属; 矿产勘查; 进展

文章编号: 1004-0609(2019)-09-1817-11

中图分类号: P62

文献标志码: A

矿产资源是国民建设的基础, 新中国成立初期因国家对能源与矿产资源的迫切需要而备受重视, 在油田勘探、地质找矿等领域投入了大量的人力和物力, 地质队伍得到了壮大, 并为我国的社会主义建设做出了巨大的贡献。随着国家的战略调整, 我国的地质行业出现了波动与起伏, 这些都反映于国家地质行业管理机构的废立变迁。1950 年全国地质工作计划指导委员会成立, 1952 年中国中央人民政府地质部成立, 1954 年更名为中华人民共和国地质部, 1970 年撤销地质部, 改设国家计划委员会地质总局, 1979 年国家地质总局改为中华人民共和国地质部, 1982 年更名为中华人民共和国地质矿产部。1998 年撤销地质矿产部, 将其职能并入新组建的国土资源部, 2018 年撤销国土资源部, 组建自然资源部。在 70 年的发展历程中, 地质行业经历了艰苦奋斗、由弱变强的历程^[1-4]。

有色金属资源是国民经济发展和国防建设的重要物质基础, 也是保持我国社会稳定和国家安全不可缺少的重要支撑。为了保证有色金属资源的有效供给, 1983 年, 中国有色金属总公司成立, 有色地质勘查总局整合全国有色地质勘查单位, 开展了有色金属勘查新局面, 进行 1:5 万区带地质找矿工作和有色金属矿山扩储工作, 取得了前所未有的成果。在有色金属矿产地质勘查、成矿与勘查理论研究和地质勘查技术方法等方面取得了重要的进展。

1 有色金属矿产地质勘查进展

我国有色金属矿产勘查已经历了 70 年辉煌的历史发展, 在有色金属矿产地质勘查、成矿与勘查理论研究、地质勘查技术方法和绿色环保矿山建设等方面取得了重要的进展。

1.1 从新中国成立初期至计划经济体制结束的 40 年

1950 年至 1990 年, 是新中国成立初期至计划经济体制结束的 40 年。在该时期内, 我国有色金属勘查按计划经济体制运行, 有色地质系统(含冶金地质)共向国家提交固体矿产地质勘查报告 1161 份、探明 12 种主要矿种储量(工业+远景), 矿产地 756 处, 如铝土矿矿石量 4.8 亿吨, 其他矿种金属量 7698 万吨^[2]。就矿种角度而言, 勘查程度以铝土矿为最高, 以铅、锌、钨、锡及镍、钼、锑、金等 8 个矿种的地质勘查工作程度为低, 尤其是金矿地质勘查工作程度最低。在提交的 756 处矿产地中, 新建矿山 300 余处。我国有色金属勘查和生产发展十分不平衡, 呈现西部秦岭地区, 新疆阿尔泰地区资源丰富, 但开发利用程度低, 中东部地区资源接替不足。国家在这 40 年间共投入地质勘查费用 59.52 亿元^[2-3]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41672082)

收稿日期: 2019-07-10; 修订日期: 2019-08-22

通信作者: 戴塔根, 教授, 博士; 电话: 0731-88836288; E-mail: dtg@csu.edu.cn

1.2 “九五”——当前(近30年)

在我国“九五”至“十五”期间,针对大部分矿山资源日益枯竭的局面,成立了全国危机矿山接替资源找矿办公室,有色金属地质迎来了春天。在该时期,有色地质找矿取得的主要进展在于:1)部分老矿山深部及近外围找矿取得突破。如在金川1号和2号矿区深部及龙首矿中西部勘探和新一轮找矿中发现富矿田体,新增矿石储量263万吨,铜、镍金属量分别为33654吨和61064吨,延长矿山服务年限4年以上;在青海锡铁山新增矿石储量1634万吨,铅锌金属量217万吨,金11.69吨,银1294吨;在会泽铅锌矿深部矿山厂和麒麟厂累计新增铅锌金属储量200多万吨;在锡矿山铋矿新增工业矿石储量200万吨,深部和外围预测资源量还有40万吨;2)有色金属危机矿山接替资源勘查工作全面启动,对云南楚雄矿冶股份有限公司小河—石门坎铜矿勘查、云南锡业集团有限责任公司老厂锡矿勘查、湖南省瑶岗仙钨矿勘查、抚顺红透山铜矿勘查等均取得成功,其中在老厂东深边部发现了铜矿体,探明铜资源量8.4万吨,在小河—石门坎铜矿和抚顺红透山铜矿深边部发现了铜矿体、在瑶岗仙钨矿深部发现了钨矿脉和钨钼矿脉^[3]。危机矿山项目第一批启动39个,施工项目总数达48个;3)我国西部和东北等地区新发现了一批有色金属资源地;4)有色金属找矿相关的基础地质工作进一步加强。

在我国“十一五”期间,我国有色金属企业技术装备水平明显提高,有色金属矿产勘查、采选技术进步明显。在“十一五”期间,有色金属产业须继续加强技术改造,推动技术进步。如何由有色金属大国变为强国,实现科学发展和可持续发展,是“十一五”乃至更长的时间里摆在我国有色金属行业面前的一项战略课题。有色金属工业要从主要依靠外延式规模扩张的粗放式发展方式,加快转变到依靠科技进步、技术创新、管理创新、劳动者素质提高等内涵式发展方式上来,当前要抓好结构调整、自主创新、节能减排和实施走出去战略等工作。

在我国“十二五”期间,有色金属矿产勘查取得了重大进展,新发现铜矿矿产地52处,其中大中型11处,新增查明资源储量2341万吨,在西藏、江西、云南等地新探获一批世界级铜矿区。铅锌矿新发现矿产地81处,其中大中型41处,铅矿、锌矿新增查明资源储量分别为2330.2万吨、3783.2万吨,主要分布在新疆、湖南、福建等地。镍矿新发现矿产地6处,新增查明资源储量279.2万吨,主要集中在新疆、内蒙古和青海等地,其中,新疆若羌县罗布泊北和青海夏日哈木发现超大型镍矿床。钨矿新发现矿产

地25处,其中大中型23处,新增查明资源储量459.9万吨,主要分布在江西、湖南、甘肃、河南、新疆等地,江西南部地区发现超过200万吨的世界级矿床。钼矿新发现矿产地29处,新增查明资源储量1559.5万吨,主要集中在安徽、新疆、内蒙古、河南、黑龙江等地,发现超过100万吨的矿产地3处,其中安徽金寨县沙坪沟钼矿为世界级。金矿新发现矿产地131处,其中大中型51处,新增查明资源储量4949.4吨,主要分布在山东、内蒙古等地。磷矿新发现矿产地18处,新增查明资源储量58.1亿吨。石墨新发现矿产地17处,其中大中型12处,超过千万吨的矿产地1处^[4]。

在我国“十三五”期间,我国将重塑矿产资源开发保护战略格局,将有序开发稀土资源,保障稀有稀散金属资源供应,鼓励锂等能源金属矿产开发利用,强化优质石墨资源保护。其他金属品种方面,适度扩大铜、铝、镍等短缺矿产开发规模,控制铅锌资源开发强度,保护性开发钨锡铋等特定矿种,严格控制钼等产能过剩矿产开发,鼓励金银等贵金属矿勘查开发。

“深地资源勘查开采”是国家重点研发计划重点专项(简称“深地专项”,英文缩写DREAM)^[5]。专项第一批执行期从2016年至2020年,基于“十三五”科技创新规划在总体部署中强调的“建立保障国家安全和战略利益的技术体系,发展深海、深地、深空、深蓝等领域的战略高技术”,立足我国深部资源勘探开采领域在基础理论、技术装备和示范应用方面的核心研发需求,按照“提高深部资源时空分布规律认知,提升深部资源勘查评价与开采能力,促进深部资源能源发现与开发”的思路,共设置了“成矿系统的三维结构与控制要素、深部矿产资源评价理论与预测、移动平台地球物理探测技术装备与覆盖区勘查示范、大深度立体探测技术装备与深部找矿示范、深部矿产资源勘查增储应用示范、深部矿产资源开采理论与技术、超深层新层系油气资源形成理论与评价技术”等7项科研任务。项目集知识创新、技术创新和管理机制创新于一体,旨在有效获取能源资源、拓展危机矿山资源潜力、扩大紧缺金属产能、提高资源自给保障程度,缓解资源供给风险,增强行业国际竞争能力和提升矿业技术水平。2016~2017年共实施了31个项目,主要围绕克拉通破坏、增生造山、大陆碰撞和陆内变形等成矿动力学系统,深部资源评价理论、技术与建模,地球化学勘查与移动平台地球物理探测等深部探测关键技术与装备,紧缺矿产、战略性资源的评价勘查示范,深部矿产资源开采理论与技术等基础性研究、技术研发与勘查示范等方向。其中,2016年立项11项,总经费6.59亿元,平均支持强度5994万元/项。2017

年支持20项,经费约8.25亿元;2018年支持15个项目,经费概算约4.8亿元。重点针对大深度立体探测技术装备、深部矿产资源勘查增储应用示范、深部矿产智能与绿色开采等共性关键技术和应用示范类研究任务进行部署^[5]。目前,各项研究进展顺利,可望取得预期成果。

2 成矿与勘查理论主要新进展

目前,矿床成矿与勘查理论和方法技术研究的热点和前沿^[6-19]主要集中于有关分散元素成矿、超大型矿床成矿、热水沉积盆地成岩成矿、幔汁成矿与地幔柱-热点成矿、后碰撞(伸展)成矿系统、多岛弧盆成矿与陆内转换成矿和成矿系统论等方面。

1) 稀有分散成矿元素成矿理论

分散稀散元素成矿机制奠定了稀有分散元素成矿学的地球化学基础,丰富了矿床学与矿床地球化学理论^[3, 20-24]。分散稀散元素主要包括镉、锗、硒、铼、碲、铟、铊、铷、铯等,过去一直认为它们不能形成独立矿床。20世纪80年代以来,国外开始有少数稀有分散元素矿床的零星报道,如美国犹他州的阿佩克斯镉-锗矿床、玻利维亚的帕卡哈卡硒矿床、纳米比亚楚梅布锗矿床等,但一直没有稀有分散元素成矿的系统总结。我国也在中国西南地区发现了碲、锗、硒的独立矿点,自此稀散分散元素的成矿问题成为研究热点之一。以中国科学院涂光炽院士为首的课题组承担的“低温地球化学”国家自然科学基金重点项目研究中,在我国西南大面积低温成矿域中研究了贵州烂木厂独立铊矿床和云南临沧独立锗矿床^[20, 22]。同时,中国地质科学院陈毓川院士等和成都理工大学科研人员研究了四川石棉县大水沟的独立碲矿床等。

2) 多岛弧盆成矿论、陆内转换成矿

以李文昌、侯增谦为代表的科学家系统地解剖了“三江”构造-岩浆-成矿带^[3, 25],提出了古生代-中生代多岛弧盆系和新生代“横断山”式碰撞造山新模式;通过对“三江”复合造山带的时空结构、造山类型、成矿环境和成矿模型系统研究,提出了“多岛弧盆成矿论”和“陆内转换成矿论”,揭示了三江特提斯成矿域的成矿规律。在此成矿理论的指导下,厘定出10条重要成矿带,识别出12个主要成矿系统,提出6个主攻矿床类型,建立了20种不同矿床模型;研发了GIS智能成矿预测评价系统和综合信息成矿预测和靶区评价,在三江南段优选出28个重点找矿靶区,90%以上靶区被直接转化为国家和地方的勘查区,共

发现和评价了12个大型超大型矿床,查明资源量铜779万吨,铅锌1022万吨,银8074吨,金492吨,相当于在全国保有的铜铅锌银金资源量上增加10%以上。这些矿床都已规模化开发,目前已建矿山9座,在建矿山3座。一个新的国家战略性矿产资源基地已基本形成,将促进缓解国家的资源紧缺局面,有力地促进了地方经济发展。

3) 超大型矿床成矿

以赵振华为首席科学家^[3]主持了国家“九五”攀登计划预选项目。有关研究认为,超大型矿床形成是低概率事件,探索超大型矿床研究必须综合应用矿床学、地球化学、地质学、地球物理学等多学科的理论与方法,是地球科学一项高度综合性的系统工程。该研究团队以重大地质作用、地质时代与超大型矿床的形成、重要超大型矿床远景类型及成矿作用和超大型矿床形成的宏观地质背景研究等为中心,取得了一系列重要成果^[26-29]。他们提出:①古泛大陆及全球性构造事件制约超大型矿床形成;②构造体制的重大转折控制了超大型矿床的形成;③地球化学边界控制超大型矿床;④应用理论成果获得新发现、新认识及找矿成果。

4) 热水沉积盆地成岩成矿

方维萱等^[14-19]系统论述了秦岭造山带泥盆纪三级构造热水沉积成矿盆地的主控因素、热水沉积岩相、构造-热流体地质事件及大型-超大型矿床的地质背景,逐步形成了热水沉积成矿盆地成岩成矿理论体系。这些研究成果在热水沉积盆地分析和大型-超大型矿床定位预测与勘查中有重要指导作用及实用价值,使沉积盆地热水沉积成矿作用研究上升到新的阶段^[14-19]。其主要要点是:①从系统学和协同学角度,分析了秦岭造山带泥盆纪三级构造热水沉积成矿盆地的主控因素;②采用地质类比方法,提出热水沉积体系概念;③采用构造-沉积-成矿综合分析方法,研究了秦岭造山带大型-超大型矿床的地质块板内聚矿沉积盆地及秦岭微板北缘被动陆缘上聚矿沉积盆地,这些聚矿盆地均属伸展盆地;④指出了盆地内充填地层体中有机质及矿物可以记录热状态及热演化历史。在此基础上,方维萱等^[14-17]提出了扬子地块南缘及邻区构造-流体成矿模型为沉积盆地中热水沉积体系;沉积盆地中超压流体一次排泄运移模型;沉积盆地中层间欠压实含矿热流体模型;褶皱-断裂带中不连续的(液态油相)含矿超压热流体模型;连续的超压(天然气相)含矿层间流体在褶皱-断裂带中二次运移模型;断裂-褶皱带中热泉古岩溶管道流模型;提出了热水沉积岩相的亚相、微相划分方案,总结了其特征及其与沉积盆地和热水

流体演化的关系,并发现墨江金矿晚泥盆世热水沉积成岩成矿的岩石学和矿床学证据,获得四组 Sm-Nd、Rb-Sr 等时线年龄((354.7±0.72) Ma~(359±21) Ma),其定年结果对认识晚泥盆世火山-热水沉积作用与生物事件具有重要意义。

5) 特大型矿床的成矿偏在性理论

成矿偏在性是指成矿元素(矿种)、成矿类型、成矿时代、成矿背景(环境)等均具十分明显的选择性,并受控于异常成矿构造聚敛场,特别是“景”“场”“相”“床”四个成矿等级体制的最佳耦合^[10,30-31]。认为成矿作用爆发异常是导致特大型矿床形成的关键因素。对在地质历史上周期性地爆发出成矿作用异常的原因及其与常规成矿作用的“引潮共振”机制对比分析研究,从矿集区中发现矿汇,按等级体制最佳耦合形成特大型矿床的研究思路,有助于对特大型矿床的深入研究和勘查评价。特大型矿床的成矿偏在性表现在:①特大型矿床对元素(矿种)的偏在性;②特大型矿床类型的偏在性;③特大型矿床成矿时代的偏在性;④特大型矿床空间(环境)的偏在性。在此基础上,提出特大型矿床形成的异常成矿构造聚敛(场),从“演化是一切成矿因素的函数”和“时间维造就空间维”的动态成矿学概念出发,将中国陆上特大型金属矿床异常成矿构造聚敛场归纳为四个类型:①太古宙-古元古代同剪切形变异常成矿构造聚敛场;②中元古代-古生代“三同一体”异常成矿构造聚敛场;③中生代“行、列、汇”异常成矿构造聚敛场;④新生代多阶湖汇流异常成矿构造聚敛场。在此基础上,划分出国内与特大型矿床偏在的 17 个矿床组合区。

6) 成矿系统论

成矿系统研究是当今矿床学研究的重要内容之一。成矿系统是指在一定的地质时空域中,控制矿床形成、变化,保存了全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的矿床系列、矿化异常系列构成的整体,是具有成矿功能的自然系统^[3,32-33]。以翟裕生院士为代表,针对成矿作用的复杂性和矿床成因的多因性、矿床形成后的变化性及矿床分布的多样性,解剖了长江中下游成矿系统和华北陆块北缘成矿系统,建立了华北陆块周边绿岩带金成矿系统,将全国划分出 6 个成矿域,研究了每个成矿域的构造背景、成矿环境演化,主要成矿系统和形成的优势矿种等。成矿系统研究将成矿的环境、背景、要素、作用、过程、动力、产物和异常等作为一个自然作用的整体加以研究,有利于全面认识成矿动力学机制、矿床形成演变历史和矿床的时空分布规律,是提高矿床学科学水平的一

个重要途径。成矿系统的形成机制为:①多因耦合、临界转换;②源、运、储、保等是基本要素;③成矿系统是矿床系列、矿化异常带系列组成的矿化网络;④矿床形成、变化、保存的演化过程是成矿系统研究中不可缺少的环节;⑤成矿系统的研究还能够为区域环保提供科学资料,兼顾资源与环境两个方面。在此基础上,提出“成矿系统演化论”,认为它是成矿学研究的核心问题之一;又从中国大地构造与地质成矿特征出发,指出成矿系统演化研究对认识中国成矿规律的重要性,建立了成矿系统的框架结构,突出表现了边界成矿、转换成矿、耦合成矿的普遍意义。

7) 幔汁成矿论与地幔柱—热点成矿说

杜乐天通过对幔汁成矿和幔汁地球化学等深部成矿地质的研究^[34],认为幔汁沿深断裂上涌,产生火山作用、喷气、热泉及热水沉积地层,同时也富集了锰、钒、钴、镍、铅、锌、铜、金、铀、磷等成矿元素,对成矿起十分重要的作用,特别指出幔汁能源的问题^[3]。

地幔柱—热点成矿作用是当今矿床学研究的前沿课题之一。李红阳等^[11]、王登红等^[12]指出,地幔柱—热点活动可形成有利于成矿的“成矿物质大规模聚集的成矿物质场”、“驱动壳/幔成矿物质的热—化学交换和流体输导运移的成矿能量场”和“矿质迁移和沉淀的成矿空间场”,从根本上控制了“大矿集中区”的发育。王登红等^[12]在评述地幔柱—热点成矿作用中强调,地幔柱—热点可能影响到各种环境的矿床和地球演化各个阶段的成矿作用;刘从强等^[35]列举了大量实例说明伴随地幔柱活动的岩浆作用过程中的地幔去气和岩浆去气作用形成的流体参与了成矿作用。李红阳等^[11]对华北地台金银多金属矿床地幔柱—热点成矿作用做了较为系统的研究,侯增谦等^[13]论述了三江特提斯成矿域幔柱构造与成矿系统。海西期大规模喷发的峨眉玄武岩是我国较为典型地幔柱活动产物^[7-9,12,36]。到 20 世纪 90 年代,随着地幔柱—热点成矿作用研究不断深入,峨眉山玄武岩岩浆活动与成矿关系逐渐被我国矿床学家所关注。侯增谦等^[13]已将三江地区金属矿床与幔柱构造对应起来,将川—滇—黔铅锌金属成矿域赋存于碳酸盐岩地层的铅锌银矿床归入热幔柱成矿体系的热幔柱—热点成矿系统之内,其成矿体制为热动力成矿。王登红^[12]也认为,西南地区包括铅锌矿床在内的许多金属矿床的大规模成矿作用与地幔柱活动存在密切联系。川—滇—黔铅锌多金属成矿域的众多矿床(包括会泽超大型铅锌矿床及鲁甸乐马厂超大型银(铅锌)矿床等)的外围分布大面积峨眉山玄武岩,对峨眉山玄武岩岩浆活动与成矿的关系研究表明,会泽超

大型铅锌矿成矿时代与玄武岩成岩时代相近,峨眉山玄武岩具有提供成矿物质的潜力,伴随峨眉山玄武岩岩浆活动过程中作用形成的流体参与了会泽超大型铅锌矿床及川—滇—黔铅锌多金属成矿域的成矿作用^[37-42]。眉山玄武岩岩浆活动在成矿过程中提供了热力。

8) 中亚型造山带碰撞成矿取得新成果

以王京彬和高峻为首席科学家完成的国家“973”项目“中国西部中亚型造山与成矿”(2002~2007)和夏彬、方维萱负责的05课题“古陆缘成矿”研究了成矿系统的大陆动力学背景及形成演化史,认为新疆阿尔泰山地区属于西伯利亚板块南缘活动大陆边缘,构建了其构造古地理单元和格局。向南俯冲产生,洋壳深熔形成的深源浅成中酸性岩岩浆(埃达克岩岩浆)侵入活动可能是古缘成矿系统超大型—大型斑岩金铜钼矿床的大规模成矿机制和主控因素;东天山阿齐山—雅满苏—沙泉子石炭纪属于活动大陆边缘陆缘弧,具有形成大型—超大型斑岩—矽卡岩型铜铁矿床的良好条件;准噶尔大洋板块向北东向俯冲消减,在西伯利亚南缘古生代活动大陆边缘上形成的新疆阿尔泰山前弧盆地和弧后—拉分盆地是大型金铜多金属铁矿床赋存和容纳空间,在大洋地壳俯冲形成的亏损地幔楔部分熔融产生的洋内弧和局部热幔柱上涌大陆边缘走滑伸展是金铜多金属铁矿大规模成矿机制和主控因素;塔里木西北缘多金属成矿亚带形成于古生代典型的被动大陆边缘,铅锌成矿受三级沉积盆地和后期构造改造复合控制。根据所建立的成矿预测准则,通过雅西371—西北坡掘金矿化带等5个成矿预测实例解剖研究,优选出了雅西371—西北坡铜金矿化带和沙泉子铁铜矿和铜矿成矿远景区,对东天山拉塔格斑岩铜矿、准北卡拉先格罗斑岩铜矿和西准噶尔包古图斑岩铜矿提出了新的成矿预测依据和建议,认为五个远景区均具有寻找大型—超大型金铜矿床潜力。

9) 矿床地球化学研究进展

矿床地球化学的主要任务是研究各种地质作用过程中矿床形成的地球化学问题,重点包括成矿元素的地球化学行为、成矿元素的源—运—储过程和矿床形成的驱动机制等^[43]。主要研究内容包括:(a) 大陆动力学与成矿关系;(b) 成矿流体地球化学;(c) 单个流体包裹体组成和性质。近年来,随着单个流体包裹体中元素和同位素组成 LA-(MC)-ICP-MS 分析技术的建立与完善,为深入研究成矿流体的组成、性质和演化特征,精细刻画成矿过程提供了重要技术支撑。流体包裹体的元素和同位素组成,是了解热液矿床成因最重要的信息之一。成矿元素在不同流体相中的分配,

是了解热液矿床成矿过程和元素共生分异机制的关键问题之一。热液矿床的形成是多种地质地球化学过程综合作用的结果,包括成矿流体温度、压力、盐度、氧逸度、pH、化学成分以及流体相分离和混合等条件的变化等。通过流体包裹体岩相学和显微测温学的系统研究,结合阴极射线激发荧光(CL)图像,建立流体包裹体形成的相对时序与矿物生成顺序的关系。在此基础上,运用 LA-ICP-MS 分析技术,精确测定各世代单个流体包裹体中主量元素(如 K、Na、Ca、Mg 等)和成矿元素(如 Cu、Pb、Zn、Au、As 等)的组成,可以提取由成矿流体成分变化所反映的成矿过程等方面的重要信息。显微红外测温技术在矿床研究中得到了重要的应用。热液矿床中大多数金属矿物在光学显微镜下不透明,以往流体包裹体研究仅局限于与金属矿物共生的石英等透明脉石矿物,在岩相学上,这些透明矿物通常早于或晚于金属矿物的形成,因此,透明矿物中捕获的流体包裹体不能直接完全真实反映金属矿物形成的流体性质。红外光强度对测定金属矿物中流体包裹体盐度和均一温度的影响。红外显微镜技术在矿床研究中的应用,实现了一些不透明金属矿物中流体包裹体的直接观察和性质(如温度和盐度)的测定以及单个流体包裹体成分的 LA-ICP-MS 分析。研究的金属矿物包括黑钨矿、硫砷铜矿、闪锌矿、黄铁矿、辉锑矿、赤铁矿、深红银矿、锡石及金红石等,为确定热液矿床形成的物理化学条件和成矿过程等提供了直接证据。

3 成矿与勘查理论应用

3.1 SEDEX 型矿床的成矿理论应用取得明显

邓吉牛等通过对锡铁山历年来所积累的地质资料系统分析,应用 SEDEX 型矿床等成矿理论,对矿区的地层层序、褶皱构造、矿床成因类型、矿体侧伏方向、主矿体产状、矿体空间分布规律、矿床剥蚀程度、矿床规模、喷流中心位置、火山作用与成矿作用的关系等提出了新的认识,预测锡铁山深边部具有巨大找矿潜力。通过加大勘探投入,在四年时间新增铅锌金属储量将达 500 万吨以上。在 3062 m 中段以下进行地质探矿,至 2002 年底新增铅锌金属量 217 万吨、金 11.69 吨、银 1294 吨。

3.2 新类型、新矿种的找矿突破

最典型的实例是近年来发现的云南东川播卡大型金矿床的找矿突破。目前认为是产于古老变质基底(昆

阳群)中剪切带控制的矿床^[44]。脆韧性剪切断裂构造活动为金的活化、迁移与富集提供了必备的通道和场所,并在强烈的脆韧性剪切作用下,分散在古老变质基底岩石中的金再次活化,构造-流体-含金地层岩石-成矿的耦合作用使构造-含金流体在脆韧性剪切带富集成矿。张学诚等^[45]认为该矿床为中-低温热液型,与碱性(钠质)岩浆作用密切相关。数十年来,地质工作者一直致力于在元古代昆阳群中寻找、铁矿床,播卡大型金矿床的发现,促使地质工作者重新认识其中是否亦存在金矿类型,观念的转变有望促进昆阳群找金的突破。

3.3 大规模成矿作用与大型矿集区预测

以毛景文和胡瑞忠为首席科学家的研究团队,立足中国大陆演化特点,选择中国若干大规模成矿的典型地区(东部地区的小秦岭和胶东,长江中下游、永梅会、湘南和赣东北,扬子地块西缘,川滇西三江地区中南段和东天山等矿集区)作为重点研究区,以 Cu、Au、Ag、PGE、U、Pb-Zn 等矿种的大型-超大型矿床和大型矿集区为重点研究对象,在基础地质和矿产资源成矿理论研究方面取得重要进展。初步总结和提出了中国中生代大陆成矿新思维及理论,为预测大型矿集区奠定了理论基础;研制和发展了找矿新技术与方法,并圈定了 5 个矿集区尺度的找矿靶区,发现了一批新的矿化异常。

4 地质勘查技术方法进展

地质勘查技术是集应用地球物理、地球化学、构造、遥感和岩矿分析测试于一体的多元综合信息提取技术集成。有色地质部门的勘查工作紧密结合地质勘查工作的部署与要求,在勘查技术研发和应用上都取得了显著的科技成果。

4.1 应用地球物理勘查

应用地球物理勘查技术方面,首先,从矿区间接找矿发展到建立找矿预测模型,进行面积性找矿预测。例如,通过对铜陵铜矿、银山铜多金属矿、新疆等地的铜镍矿、山前阿勒泰及大宝山多金属矿、金窝子金矿、龙王排钨钼矿以及大厂、香花岭及滇东南锡多金属矿的矿床模型研究,建立了一批有色金属矿产综合地学找矿模型;进一步完善了模型理论,总结出一套建立模型的方法技术,对隐伏矿床的找矿预测形成了明确的方法技术。在中国地质学界,模型找矿思路已

经形成一个重要学术流派;其次,建立了找矿勘查综合方法系统,充分利用现代信息技术,开发物探数据处理系统;大力创新,开发具有自主知识产权的创新技术。近年来,仪器的主要研制成果有:研制成功了双频激发极化仪及其方法技术(何继善等),被较多的相关单位购置应用,获显著找矿效果,研制成功伪随机三频相位仪和瞬变电磁测深系统(何继善等),这些成果均有创新。伪随机三频相位仪,在消除感应合干扰和区分矿与非矿(即硫化矿与碳质岩层)异常具有一定作用。西北有色地质勘查局物化探总队在应用井-地、坑-地金、井-井等方式的不同方位地球物理勘探探测金属矿体在三维空间上分布规律,进行找矿预测,取得很好的找矿效果。伪随机相位法等方法技术,包括用频谱差异和非线性响应区分碳质异常、用斩波和相干积分直接消除感应耦合、用奇性指标除去浅部干扰及用定场源微分测深分辨三维矿体等。应用上述方法,在全国 20 多个矿山,与地质及其他物探方法相结合,均取得了较好的效果。

4.2 地球化学勘查技术

4.2.1 建立有色金属、贵金属矿床地球化学异常模式与勘查模型

有色地质部门历来重视已知矿区特别是典型矿床地质-地球化学特征和地球化学找矿标志的研究,在国内外各种地质成矿模式和找矿模式的启发下,开始了有色金属、贵金属矿床地球化学异常模式和勘查模型的研究工作,研究工作涉及 21 个省和自治区、32 个地区。通过多年工作,建立铜、钼、铅、锌、银、金、锑、钨、锡多金属、铋钼等矿种不同类型、不同层次的矿田、矿床地球化学异常模式与勘查模型 58 例^[46-48]。其中主要有代表性的案例如下,①斑岩铜矿床地球化学异常模式;②赣南脉状钨矿床地球化学异常模式;③湖南大乘山层控铅锌矿床地球化学异常模式;④陕西金堆城-黄龙铺铝矿田地球化学异常模式;⑤湘南典型锑矿床地球化学异常模式;⑥南京栖霞山铅锌银矿床地质-地球物理-地球化学综合勘查模型;⑦小秦岭金矿地质-地球物理-地球化学找矿模型;⑧河南祁雨沟金矿床地质-地球物理-地球化学找矿模型;⑨甘肃李坝金矿田物化探找矿模型。

常规化探方法对寻找隐伏矿、掩埋矿效果不佳,为获得隐伏矿、掩埋矿找矿信息,有色地质开展了化探新方法新技术试验研究,主要有:土壤汞气测量、地表气汞量测量、土壤热释法测汞;地电化学测量、氢离子浓度测量、电导率测量、室内电提取测量;元素活动态测量(含水提取相、非晶质铁锰氧化物相、有

机络合相、活动态金、热磁法等); 综合气体测量(H_2S 测量、烃类测量、热释 CO_2 、热释卤素); 植物地球化学测量等。

西北有色金属地勘局西北有色金属研究院龚美菱等从物相分析和运用痕量相态分析评价化探异常, 建立了铜、铅、锌、金、银、砷、锑、锡、铬、镍、钼等 10 多种元素的痕量相态分析方法, 在我国西北地区研究评价铁帽 62 处、化探异常 98 处。总结出运用相态分析评价铁帽和化探异常的方法、程序和评价准则, 并在实际应用中取得成效, 运用这种方法对铁帽化探异常评价的成功率达 80% 以上。

4.3 构造地球化学与矿物地球化学新方法技术

4.3.1 构造地球化学

构造地球化学是陈国达^[49]、涂光炽^[50]最早倡导的研究领域之一。构造地球化学主要研究控矿构造复合转变和在一定地球化学条件下成矿元素的空间分布规律, 探讨构造应力场控制下成矿流体的运移规律及化学元素的演化过程, 揭示有用物质组分在各种构造环境中的赋存规律, 是指导成矿预测、找矿勘探和生产开拓的依据之一。

4.3.2 矿物地球化学

方维萱对小秦岭、陕西金—铅锌矿床、云南墨江镍金矿床进行了化探—矿物地球化学找矿预测^[14-18], 并提出构造—矿物—地球化学、构造变形筛分—同位素地球化学约束等新研究方向和成矿预测方法。研究证明: 矿物—地球化学新方法在标型矿物组合与元素组合关系的研究、查明异常源性质、多建造晕的研究与预测、确定矿体的元素垂向分带序列、显微构造储矿特征研究、确定矿床的指示元素、区分不同的矿化类型、显微构造研究、成矿预测、矿床成因、地球化学场解析、成矿流体示踪等方面具有较大的应用价值和前景。

4.4 遥感地质勘查技术

有色地质部门将遥感地质勘查技术应用于地质找矿中, 其技术方法和应用效果均取得较好的效果, 为有色地质找矿做出了应有的贡献。

4.4.1 遥感地质技术及其应用

应用遥感技术信息增强提取, 将新型影像图制作与 GIS 相结合, 系统集成以遥感信息为主, 包括地理、地质矿产、物化探找矿信息, 进行综合成矿预测及矿产资源评价, 形成了既快速又有效的综合地学数据图像分析技术。

该方法先后在内蒙古、新疆、青海、辽宁、吉林、黑龙江、云南、贵州、广西、江西等有色金属、贵金

属成矿区带中进行了矿化围岩蚀变信息提取的试验研究, 取得了良好效果。它不仅为工作区提供了大量的基础图像(件), 还有效地提供了有实用价值的可为进一步地质勘查工作方向, 或提供了重要的找矿信息的依据, 部分遥感找矿项目经验证, 获得了较好的矿化线索。

在我国“十五”期间, 有色金属矿产地质调查中心和青海有色金属地勘局等建立了一套适用于西部高寒山区的铜金矿产勘查评价技术方法。通过“十五”国家科技攻关项目“西部优势矿产资源勘查关键技术研究”项目第四课题“西部高寒山区铜金矿产勘查评价技术方法与综合示范研究”的实施。成功地研制了一套 1:50000 遥感快速找矿信息技术和“遥感信息多层次分离定量提取软件系统(RSIE Ver 1.0)”, 实现了地质、地球化学、地球物理与遥感地质矿产等多种信息协同结合, 形成一套中大比例尺快速矿产资源勘查的立体勘查技术组合。该技术为区域矿产调查、新一轮 1:50000 矿产调查提供先导性资料; 在都兰巴音山铜铅锌银矿集区、青海东昆仑成矿带和祁漫塔格山东段等 8 个铜、铅、锌、银、钴、金矿区进行面积总计为 6200 km^2 的 1:50000 遥感综合找矿、成矿预测示范研究, 确定了 29 处成矿远景区和优选了 57 处找矿靶区, 发现了具中型规模的赛钦铜矿等 4 处新的矿产地。

5 结语

在新中国成立 70 年来的发展过程中, 我国有色金属矿产勘查工作为社会主义建设事业做出了巨大的贡献。在 70 年的历程中, 有色地质部门不但为国家提供了充足的矿产资源, 而且找矿理论与技术也取得了重大突破, 很多理论与技术达到了国际先进水平。随着我国工业化和城镇化的不断推进, 国民经济对矿产资源的需求日益增大, 目前, 我国有色金属产量和消费量均居世界第一。作为世界最大的有色金属资源消耗国, 要保持国民经济的可持续发展, 我国有色金属矿产勘查工作任重道远。

REFERENCES

- [1] 国连杰, 叶大年. 中国地质学的产生与发展—写在地质调查所创建 100 周年之际[J]. 地质科学, 2013, 48(4): 945-969.
- GUO Lian-jie, YE Da-nian. Origin and development of geology in China: The 100th anniversary commemoration

- for the geological survey of China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(4): 945–969.
- [2] 刘和发, 殷淑丽, 黄超. 40年来有色地质矿产勘查工作的投入与产出分析[J]. *有色金属矿产与勘查*, 1997, 6(S1): 71–75.
- LIU He-fa, YIN Shu-li, HUANG Chao. Analysis on investment and output of geological exploration for Non-ferrous metallic mineral resources since 1950[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 1997, 6(S1): 71–75.
- [3] 周爱民, 朱谷昌, 王福良, 王明和. 有色金属进展(1996—2005)[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 501.
- ZHOU Ai-ming, ZHU Gu-chang, WANG Fu-liang, WANG Min-he. *Progress in non-ferrous metals*[M]. Changsha: Central South University Press, 2007: 501.
- [4] 中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告[R]. 2016.
- Ministry of Land and Resources. *China mineral resources*[R]. Beijing: 2016.
- [5] 樊俊, 郭源阳, 董树文. DREAM—国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项解析[J]. *有色金属工程*, 2018, 8(3): 1–6.
- FAN Jun, GUO Yuan-yang, DONG Shu-wen. Analysis on DREAM-deep resources exploration and mining—A special project in the Framework of National Key R&D Program of China[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2018, 8(3): 1–6.
- [6] 陈国达. 关于多因复成矿床的一些问题[J]. *大地构造与成矿学*, 2000, 24(3): 199–201.
- CHEN Guo-da. Some questions about poly-genetic compound deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2000, 24(3): 199–201.
- [7] CHUNG S L, JAHN B. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 889.
- [8] XU Y, CHUNG S L, JAHN B M, WU G. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 58(3): 145–168.
- [9] SONG Xie-yan, ZHOU Mei-fu, HOU Zheng-qian, CAO Zhi-min, WANG Yun-liang, LI You-guo. Geochemical constraints on the mantle source of the upper Permian Emeishan continental flood basalts, Southwestern China[J]. *International Geology Review*, 2001, 43(3): 213–225.
- [10] 裴荣富, 梅燕雄, 李进文. 特大型矿床与异常成矿作用[J]. *地学前缘*, 2004, 18(2): 323–331.
- PEN Rong-fu, MEI Yan-xiong, LI Jin-wen. Giant ore deposits and abnormal mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 18(2): 323–331.
- [11] 李红阳, 阎升好, 王金锁, 张建珍, 王国富. 初论地幔热柱与成矿[J]. *矿床地质*, 1996, 15(3): 249–256.
- LI Hong-yang, YAN Sheng-hao, WANG Jing-suo, ZHANG Jian-zhen, YANG Qiu-rong. Mantle plume and metallization[J]. *Mineral Deposit*, 1996, 15(3): 249–256.
- [12] 王登红. 地幔柱与热点的成矿作用[J]. *地球学报*, 1996, 15(4): 393–400.
- WANG Deng-hong. Mineralization of plumes and hot spots[J]. *Acta Geosciences Sinica*, 1996, 15(4): 393–400.
- [13] 侯增谦, 李红阳. 试论幔柱构造与成矿系统: 以三江特提斯成矿域为例[J]. *矿床地质*, 1998, 17(2): 97–113.
- HOU Zeng-qian, LI Hong-yang. On mantle-column structure and metallogenic system: A case study of Sanjiang Tethys metallogenic domain[J]. *Mineral Deposit*, 1998, 17(2): 97–113.
- [14] 方维萱. 秦岭造山带古热水场地球化学类型及流体动力学模型探讨——热水沉积成矿盆地分析与研究方法之二[J]. *西北地质科学*, 1999, 20(2): 19–29.
- FANG Wei-xuan. Discusses on model of fluid dynamics for hydrothermal water system and geochemical patterns of pattern of paleo hydrothermal fluids in the Qinling origin—The analysis and approach of sedimentary basin with hydrothermal sedimentation (Part II)[J]. *Northwest Geosciences*, 1999, 20(2): 19–29.
- [15] 方维萱. 秦岭造山带中热水沉积成矿盆地的研究思路与方法初探——兼论秦岭超大型金属矿集区的研究与勘查[J]. *西北地质科学*, 1999, 20(2): 30–43.
- FANG Wei-xuan. Approach on sedimentary basin with hydrothermal deposition in the Qinling[J]. *Northwest Geosciences*, 1999, 20(2): 30–43.
- [16] 方维萱, 胡瑞忠. 秦岭造山带泥盆纪三级构造热水沉积成矿盆地主控因素——大型-超大型矿床集中区研究(I)[J]. *大地构造与成矿学*, 2001, 25(1): 27–35.
- FANG Wei-xuan, HU Rui-zhong. Key controls of Devonian three-order hydrothermal sedimentary basin with mineralizer in the Qinling origin, China — Research on accumulative district of large-superlarge ore deposits(Part I)[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2001, 25(1): 27–35.
- [17] 方维萱, 黄转莹, 刘方杰. 八卦庙超大型金矿床构造-矿物-地球化学[J]. *矿物学报*, 2000, 20(2): 121–127.
- FANG Wei-xuan, HUANG Zhuan-yin, LIU Fang-jie. Research on tectonics-mineral-geochemistry of superlarge Baguamiao gold deposit, Fengxian county, Shaanxi[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(2): 121–127.
- [18] 方维萱, 刘方杰, 胡瑞忠, 陈梦熊. 八方山大型多金属矿床热水沉积岩相特征与矿化剂组分关系[J]. *矿物学报*,

- 2003, 23(1): 75–81.
- FANG Wei-xuan, LIU Fang-jie, HU Rui-zhong, CHEN Meng-xiong. Characteristics of hydrothermal sedimentary faces in relation with mineralizer in Bafangshan polymetallic deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2003, 23(1): 75–81.
- [19] 方维萱, 胡瑞忠, 苏文超, 漆亮, 肖加飞, 蒋国豪. 大河边–新晃超大型重晶石矿床地球化学特征及形成的地质背景[J]. *岩石学报*, 2002, 18(2): 247–256.
- FANG Wei-xuan, HU Rui-zhong, SU Wen-chao, QI Liang, XIAO Jia-fei, JIANG Guo-hao. Geochemical characteristics of Dahebian-Gongxi superlarge barite deposits and analysis on its background of tectonic geology, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(2): 247–256.
- [20] 张乾, 刘玉平, 叶霖, 邵树勋. 分散元素成矿专属性探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(03): 247–253.
- ZHANG Qian, LIU Yu-ping, YE Lin, SHAO Shu-xun. Discussion on the mineralization specificity of dispersed elements[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(3): 247–253.
- [21] 张乾, 朱笑青, 高振敏, 潘家永. 中国分散元素富集与成矿研究新进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(4): 342–349.
- ZHANG Qian, ZHU Xiao-qing, GAO Zhen-min, PAN Jia-yong. A review of enrichment and mineralization of the dispersed element in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(4): 342–349.
- [22] 涂光炽, 高振敏. 分散元素成矿机制研究获重大进展[J]. *中国科学院院刊*, 2003(5): 358–361.
- TU Guang-chi, GAO Zhen-min. Ore-forming mechanism of the dispersed element[J]. *Proceeding of the Chinese Academy of Sciences*, 2003(5): 358–361.
- [23] 刘玉平, 谷团. 分散元素独立矿床刍议[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 362–364.
- LIU Yu-ping, GU Tuan. Basis discussion on dispersed element deposit[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19(4): 362–364.
- [24] 刘和发, 殷淑丽, 黄超. 40年来有色地质矿产勘查工作的投入与产出分析[J]. *有色金属矿产与勘查*, 1997(S1): 71–75.
- LIU He-fa, YIN Shu-li, HUANG Chao. Analysis on the investment and output of non-ferrous metal exploration in the past 40 years[J]. *Non-ferrous Metals Minerals and Exploration*, 1997(S1): 71–75.
- [25] 李文昌, 余海军. 陆内转换成矿论[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1): 409.
- LI Wen-chang, YU Hai-jun. Intracontinental transformation mineralization theory[J]. *Journal of Minerals*, 2015, 35(S1): 409.
- [26] 赵振华. 从超大型矿床研究对中国矿产资源的思考[J]. *科学通报*, 1999, 44(8): 890–894.
- ZHAO Zhen-hua. Considerations on China's mineral resources from the study of super-large deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(8): 890–894.
- [27] 赵振华, 熊小林, 王强, 包志伟, 张玉泉, 谢应雯, 任双奎. 我国富碱火成岩及有关的大型–超大型金铜矿床成矿作用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, 33(S2): 1–10.
- ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, WANG Qiang, BAO Zhi-wei, ZHANG Yu-quan, XIE Ying-wen, REN Shuang-kui. Mineralization of alkali-rich igneous rocks and related large-superlarge gold-copper deposits in China[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2003, 33(S2): 1–10.
- [28] 赵振华, 包志伟, 张伯友, 熊小林. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2000, 30(S1): 161–168.
- ZHAO Zhen-hua, BAO Zhi-wei, ZHANG Bo-you, XIONG Xiao-lin. Crust-mantle interaction background of the formation of the Shizhuyuan super-large tungsten polymetallic deposit[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2000, 30(S1): 161–168.
- [29] 赵振华, 熊小林, 王强, 包志伟, 张玉泉, 谢应雯, 任双奎. 我国富碱火成岩及有关的大型–超大型金铜矿床成矿作用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2002, 32(S1): 1–10.
- ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin, WANG Qiang, BAO Zhi-wei, ZHANG Yu-quan, XIE Ying-wen, REN Shuang-kui. Alkali-rich igneous rocks and related mineralization of large and super-large gold and copper deposits in China[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2002, 32(S1): 1–10.
- [30] 裴荣富, 叶锦华, 梅燕雄, 尹冰川. 特大型矿床研究若干问题探讨[J]. *中国地质*, 2001, 28(7): 9–15.
- PEI Rong-fu, YE Jin-hua, MEI Yan-xiong, YIN Bing-chuang. Discussion on some problems in the study of extra-large deposits[J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(7): 9–15.
- [31] 裴荣富, 熊群尧. 中国特大型金属矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛(场)[J]. *矿床地质*, 1999, 18(1): 40–49.
- PEI Rong-fu, XIONG Qun-yao. Metallogenicity and tectonic convergence (field) of China's extra-large metallic deposits[J]. *Ore Deposit Geology*, 1999, 18(1): 40–49.
- [32] 翟裕生, 王建平, 邓军, 彭润民. 成矿系统与矿化网络研究[J]. *矿床地质*, 2002, 21(2): 106–112.
- ZHAI Yu-sheng, WANG Jian-ping, DENG Jun, PENG Run-ming. Study on metallogenic system and mineralization network[J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21(2): 106–112.

- [33] 翟裕生. 按成矿系列思路找寻铜-金矿床[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(3): 158.
- ZHAI Yu-shen. Search for copper-gold deposits based on metallogenic series[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1994, 3(3): 158.
- [34] 杜乐天. 幔汁(HACONS 流体)地球内动因探索[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 739-748.
- DU Le-tian. Mantle ichor (HACONS fluids): The interior crucial factor of geodynamics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(6): 739-748.
- [35] 刘丛强, 黄智龙, 李和平, 苏根利. 地幔流体及其成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- LIU Cong-qiang, HUANG Zhi-long, LI He-ping, SU Gen-li. Mantle fluid and its mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [36] HAN R S, XUE C D, HU Y Z, HUANG Z L. Enrichment features and significances of Ag and dispersed elements in the ores in the Huize Carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag-Ge) District, Yunnan, China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(18): A544.
- [37] 韩润生, 吴 鹏, 王 峰, 周高明, 李文尧, 邱文龙. 论热液矿床深部大比例尺“四步式”找矿方法—以川滇黔接壤区毛坪富锗铅锌矿为例[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(2): 246-257.
- HAN Run-sheng, WU Peng, WANG Feng, ZHOU Gao-ming, LI Wen-yao, QIU Wen-long. ‘Four steps type’ ore-prospecting method for deeply concealed hydrothermal ore deposits—A case study of the Maoping Zn-Pb-(Ag-Ge) deposit in Southwestern China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(2): 246-257.
- [38] 韩润生, 李 波, 倪 培, 邱文龙, 王旭东, 王天刚. 闪锌矿流体包裹体显微红外测温及其矿床成因意义——以云南会泽超大型富锗银铅锌矿床为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 91-104.
- HAN Run-sheng, LI Bo, NI Pei, QIU Wen-long, WANG Xu-dong, WANG Tian-gang. Infrared micro-thermometry of fluid inclusions in sphalerite and geological significance of Huize super-large Zn-Pb-(Ge-Ag) deposit, Yunnan Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1): 91-104.
- [39] 文德潇, 韩润生, 吴 鹏, 贺皎皎. 云南会泽 HZT 型铅锌矿床蚀变白云岩特征及岩石-地球化学找矿标志[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 235-245.
- WEN De-xiao, HAN Run-sheng, WU Peng, HE Jiao-jiao. Altered dolomite features and petro-geochemical prospecting indicators in the Huize lead-zinc deposit[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 235-245.
- [40] 陈 进, 韩润生, 高德荣, 赵德顺. 云南会泽铅锌矿床地质特征及找矿方法模式[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 124-129.
- CHEN Jin, HAN Run-sheng, GAO De-rong, ZHAO De-shun. Geological characteristics of Huize Pb-Zn deposit, Yunnan and model of ore-prospecting method[J]. Geology-Geochemistry, 2001, 29(3): 124-129.
- [41] 韩润生, 陈 进, 李 元, 马德云, 赵德顺. 云南会泽铅锌矿床构造控矿规律及其隐伏矿预测[J]. 矿物学报, 2001, 21(2): 265-269.
- HAN Run-sheng, CHEN Jin, LI Yuan, MA De-yun, ZHAO De-shun, MA Geng-sheng. Ore-controlling tectonics and prognosis of concealed ores in Huize Pb-Zn deposit, Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(2): 265-269.
- [42] 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 李 元, 陈 进. 云南会泽铅锌矿床构造控矿及断裂构造岩稀土元素组成特征[J]. 矿物岩石, 2000, 20(4): 11-18.
- HAN Run-sheng, LIU Cong-qiang, HUANG Zhi-long, LI Yuan, CHEN Jin. Characteristics of ore-controlling structures and REE composition of fault rocks in Huize Pb-Zn deposit, Yunnan[J]. Journal of Mineral Petrology, 2000, 20(4): 11-18.
- [43] 胡瑞忠, 温汉捷, 苏文超, 彭建堂, 毕献武, 陈佑纬. 矿床地球化学近十年若干研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(2): 127-144.
- HU Rui-zhong, WEN Han-jie, SU Wen-chao, PENG Jian-tang, BI Xian-wu, CHEN You-wei. Some advances in ore deposit geochemistry in last decade[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(2): 127-144.
- [44] 张翼飞. 云南东川地区含金剪切带型金矿[J]. 云南地质, 2003, 22(4): 360-370.
- ZHANG Yi-fei. The gold deposit in gold-bearing shear zone of Dongchuan area, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2003, 22(4): 360-370.
- [45] 张学诚, 高俊彩. 昆明市东川拖布卡金矿矿石岩石学研究[J]. 云南地质, 2006, 25(3): 276-285.
- ZHANG Xue-cheng, GAO Jun-cai. A lithological study on the Au ore of Tuobuka Au deposit in Dongchuan, Kunming[J]. Yunnan Geology, 2006, 25(3): 276-285.
- [46] 姚锦其, 李 惠. 广西栗木锡铌钽矿床地球化学分带模型与找矿评价标志[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 221-226.
- YAO Jin-qi, LI Hui. Geological zoning model and ore-search assessment indicators of Limu Sn-Nb-Ta ore deposit, Guangxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 221-226.
- [47] 李 惠, 付志忠. 鄂东矽卡岩型铜矿床的地球化学异常模

- 式[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1986, 6(2): 177-184.
- LI Hui, FU Zhi-zhong. Geochemical anomaly pattern of skarn copper deposit in eastern Hubei[J]. Journal of Guilin College of Geology, 1986, 6(2): 177-184.
- [48] 李 惠. 金矿床地球化学异常模式研究的新进展[J]. 地质与勘探, 1997, 33(2): 43-47.
- LI Hui. The new development in geochemical anomaly models of gold deposit[J]. Geology and Prospecting, 1997, 33(2): 43-47.
- [49] 陈国达, 黄瑞华. 关于构造地球化学的几个问题[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(1): 7-18.
- CHEN Guo-da, HUANG Rui-hua. A few questions about structural geochemistry[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 8(1): 7-18.
- [50] 涂光炽. 构造与地球化学 (在长沙举行的全国构造地球化学讨论会上的发言提要)[J]. 地质地球化学, 1984, 3(4): 26-27.
- TU Guang-chi. Structural geochemistry(Outline of speech at national conference on structure and geochemistry held in Changsha)[J]. Geology-Geochemistry, 1984, 3(4): 26-27.

The 70-year progress of non-ferrous metal exploration in China

DAI Ta-gen^{1,2}, PAN Jun-qing^{1,2}, ZHANG De-xian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Mineral resources are the foundation of national construction. Non-ferrous metals play an important role in mineral resources. Non-ferrous metal exploration has made great progress in the past 70 years(1949-2019). This paper reviews the 70-year progress of Chinese non-ferrous metals exploration. It mainly summarizes the main achievements of geological exploration of non-ferrous metals, the theoretical research progress of mineralization and exploration proposed by Chinese geologists, the progress of major geological exploration techniques and methods in China and the world.

Key words: mineral resources; non-ferrous metals; geological exploration; progress

Foundation Item: Project(41672082) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-07-10; **Accepted date:** 2019-08-22

Corresponding author: DAI Ta-gen; Tel: +86-731-88836288; E-mail: dtg@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)