

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.004

西北地质调查与战略性矿产找矿勘查

张照伟¹, 谭文娟^{1,*}, 王小红¹, 彭素霞¹, 高永宝^{1,2}, 姜寒冰¹,
赵国斌¹, 张江伟¹, 李智明¹

(1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要:矿产资源是一个国家经济社会发展的基石,是工业化发展建设依赖的基础。战略性矿产的重大发现对服务国家战略和重大需求、保障国家矿产资源安全一直发挥着不可替代的关键作用。西北地区地质构造演化复杂,矿产资源丰富。笔者分 3 个时段分述地质调查找矿成果和服务国家需求的重大成效,全面总结西北地区重要成矿带成矿规律和资源潜力,提出未来战略性矿产找矿行动部署工作建议。这 3 个时段分别是 1962 年建所至 20 世纪 90 年代末、1999 年至党的十八大、党的十八大以来。西北地质调查与矿产勘查工作全程聚焦经济社会发展,站在全面服务国家重大战略需求的角度,创新成矿理论认识和勘查技术方法,驱动地质调查与矿产勘查取得显著成果,为西北地区工业现代化建设和西部大开发国家战略、脱贫攻坚、丝绸之路经济带核心区建设及乡村振兴做出了重要贡献,全面引领服务和支撑生态文明建设和经济社会健康快速高质量发展。为保障国家未来的经济安全、国防安全和战略性新兴产业发展需求,西北矿产地质调查工作全面服从服务于《战略性矿产找矿行动纲要(2021~2035 年)》,在铜、镍、钴、稀有金属等战略性矿产找矿突破方面作出新的贡献,全面提升西北地区战略性矿产资源保障国家需求与资源安全的能力和水平。

关键词:战略性矿产;找矿突破;服务成效;国家战略;西北地区

中图分类号:P588.1;P597

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)03-0044-20

Geological Survey and Prospecting of Strategic Minerals in Northwest China

ZHANG Zhaowei¹, TAN Wenjuan^{1,*}, WANG Xiaohong¹, PENG Suxia¹, GAO Yongbao^{1,2},
JIANG Hanbing¹, ZHAO Guobin¹, ZHANG Jiangwei¹, LI Zhiming¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey of China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

收稿日期:2022-01-06;**修回日期:**2022-05-11;**网络发表日期:**2022-08-15;**责任编辑:**吕鹏瑞

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究专题“稀贵金属(金、镍、钴、铬铁矿、铂族元素)科学考察与远景评估”(2019QZKK0801)、国家自然科学基金面上项目“东昆仑夏日哈木铜镍矿床硫化物不混溶作用研究”(41873053)、陕西省创新能力支撑计划-岩浆作用成矿与找矿创新团队(2020TD-030)、中国地质调查局项目“西北地区铜镍稀有金属等矿产地质调查”(DD20221691)及“全国海陆矿产资源图件编制更新”(DD20221696)联合资助。

作者简介:张照伟(1976-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事岩浆铜镍硫化物矿床成矿理论与镍矿资源调查评价工作。E-mail:zhaoweiz@126.com。

*** 通讯作者:**谭文娟(1980-),女,硕士,高级工程师,主要从事区域成矿规律研究和矿产资源潜力评价。E-mail:781683087@qq.com。

Abstract: Mineral resources are the cornerstone of a country's economic and social development. The major discoveries of strategic minerals have played an irreplaceable key role in serving national strategies and ensuring the security of national mineral resources. In the future, mineral resources will continue to play a vital role in economic and social development in China. The geological structure in Northwest China with abundant mineral resources has a complicated geological evolution process. To comprehensively summarize the metallogenic regularities and resource potentials of important metallogenic belts in Northwest China, this article divides the major achievements of geological surveys in Northwest China into three periods. These three periods are from the establishment of the Northwest Geological Survey in 1962 to the end of the 1990s, from 1999 to the 18th National Congress of the Communist Party of China, and after the 18th National Congress of the Communist Party of China, respectively. The geological survey and mineral exploration work in Northwest China focused on economic and social development throughout the entire process, served the country's major strategic needs, innovated the understanding of mineralization theory, explored techniques and methods, and driven the remarkable results of geological survey and mineral exploration. It contributed to the modernization of Northwest China's industry, the development of the western region, the national strategy for poverty alleviation, the construction of the core area of the Silk Road Economic Belt, and the revitalization of the countryside. It comprehensively leads services and supports the construction of ecological civilization and the rapid and high-quality development of economic and social health. To ensure the national economic security, national defense security, and the development of strategic emerging industries, the Northwest Geological Survey is fully obeyed and served in the "Strategic Mineral Prospecting Action Program (2021—2035)", which covers copper, nickel, cobalt, and rare metals, to make new contributions to breakthroughs in prospecting for strategic minerals, to comprehensively improve the ability and level of strategic mineral resources in the northwestern region, and to ensure national demand and resource security.

Keywords: strategic minerals; prospecting breakthrough; service effectiveness; national strategy; Northwest China

地质调查是经济社会发展重要的先行性、基础性工作,是保障国家能源资源、矿产资源及水资源安全和生态文明建设的重要支撑,是为社会公众提供地质公共信息产品和服务和各级政府自然资源管理决策提供重要的科学依据(莫宣学,2019;毛景文等,2019a;侯增谦等,2020)。新中国成立初期,工业和国防建设急需铁矿等大宗矿产原料作为支撑,地质工作得到了党和国家的高度重视,矿产勘查和科学研究成就卓显,为新中国建立独立的工业体系提供了重要的矿产资源保障。伴随国家经济社会的发展,对矿产资源的需求也发生着重要变化(陈华勇,2020;王汝成等,2020)。改革开放以来,现代化工业体系初步建立,社会经济快速发展对大宗紧缺和战略新兴矿产资源的需求愈加凸显(任纪舜等,2017;

李廷栋等,2019)。进入21世纪,地质调查工作不断得到加强,随着《国务院关于加强地质工作的决定》出台,危机矿山勘查专项、青藏高原地质矿产调查评价专项,新疆“358”项目及全国找矿突破战略行动(2011~2020年)的实施等,西北地区新发现一批大型-超大型矿床,资源储量大幅提升,已成为全国矿产资源的接替和保障基地。尤其是党的十八大以来,在经济新常态下,国家能源资源安全、资源环境并重、新兴产业崛起及绿色发展等一系列重大国家需求,对战略性矿产资源提出了新的挑战,也为地质工作提供了新的契机和发展机遇。自西安地质调查中心成立以来的60年,西北地质找矿勘查经历了地表找矿与群众报矿、勘查技术与矿床深部及浅覆盖区找矿、创新成矿理论与勘查技术综合找矿、将成

矿理论转化为找矿思维、指导区域矿产预测及勘查部署等发展历程,形成了在国际知名、国内领先的基性-超基性岩、海相火山岩学科方向,每个阶段都取得了找矿和研究成就。

当前,国际贸易争端跌宕起伏,逐渐由经济领域扩展到高科技领域,并蔓延至矿产资源领域。世界各主要国家对矿产资源,尤其是战略性新兴产业所需关键矿产的争夺日益加剧,纷纷制定发布战略报告,抢占新一轮矿产资源争夺的制高点(毛景文等,2019b)。随着战略性新兴产业的快速发展,美国较早开始了新一轮的关键矿产研究,美国能源部、美国国防研究所、美国国家研究理事会等机构都分别发布了关键矿产研究报告(唐金荣等,2014)。近年来,逆全球化趋势加剧,中美贸易摩擦不断升温。继美国内政部发布《关键矿产清单》(草案)-之后,又号召刚果民主共和国、赞比亚、纳米比亚、博茨瓦纳、秘鲁、阿根廷、巴西、菲律宾和澳大利亚等 9 个国家加入美国战略矿产倡议,十大矿业国家组建“大联盟”(韩见,2020)。可见,国际上对战略性关键矿产的争夺日益激烈,资源安全形势每况愈下,安全隐患持续加剧。

综合当前国际资源安全形式和国内战略性矿产资源现状。笔者在系统学习前人找矿成果和地质资料的基础上,首先回顾了以往找矿发现及服务国家战略的重大成效;在此基础上对西北地区重要成矿

带所取得找矿成果进行成矿规律与理论认识的简要总结;分析西北地区战略性矿产的找矿潜力;同时提出找矿过程中存在的关键科学问题,旨在明确新一轮战略性矿产地质调查及矿产勘查的部署建议;提升中国战略性矿产资源供应能力,进一步保障中国战略性矿产资源安全。

1 矿产发现与服务国家战略成效

西北地区地质构造演化复杂,矿产资源丰富(西安地质矿产研究所,2006;李文渊,2007)。在全国新确立的重要成矿区带中(表 1),西北地区阿尔泰-准噶尔北缘、天山西段、东天山-北山、西昆仑-阿尔金、东昆仑、祁连、秦岭和西南三江(北段)等成矿带,金属矿产勘查实现了重大找矿突破(图 1)(夏林圻等,2013)。自 1999 年以来,随着新一轮国土资源大调查工作的实施,西北地区又相继开展了一大批地质矿产调查评价项目,并伴随新疆“358”、“青藏专项”及全国找矿突破战略行动的成功实施,提交了丰富的地质资料与大批新发现的矿产地,形成了 16 处大型矿产资源基地。据不完全统计,累计发现超大型矿床 25 处、大型矿床 140 处,新查明资源储量增加显著,一批大型资源基地的雏形初现,为国民经济建设和社会发展提供了重要的矿产资源支撑。

表 1 西北成矿单元划分方案一览表(据徐志刚等,2008;杨合群等,2017 修订)
Tab. 1 The schedule on metallogenic unit division schemes in Northwest China

Ⅱ级-成矿省	Ⅲ级-成矿区带
阿尔泰成矿省	Ⅲ-1 北阿尔泰成矿带、Ⅲ-2 南阿尔泰成矿带
准噶尔-伊犁成矿省	Ⅲ-3 准噶尔北缘成矿带、Ⅲ-4 唐巴勒-卡拉麦里成矿带、Ⅲ-5 准噶尔盆地成矿区、Ⅲ-6 准噶尔南缘成矿带、Ⅲ-7 吐哈盆地成矿带、Ⅲ-8 觉罗塔格-黑鹰山成矿带、Ⅲ-9 伊犁北缘成矿带、Ⅲ-10 伊犁成矿带、Ⅲ-11 伊犁南缘-中天山-早山成矿带、Ⅲ-14 金窝子-公婆泉-东七一山成矿带
塔里木成矿省	Ⅲ-12 塔里木板块北缘成矿带、Ⅲ-13 塔里木陆块北缘隆起成矿带、Ⅲ-15 敦煌成矿区、Ⅲ-16 塔里木盆地成矿区、Ⅲ-17 铁克里克成矿带、Ⅲ-19 阿尔金成矿带
祁连成矿省	Ⅲ-20 河西走廊成矿带、Ⅲ-21 北祁连成矿带、Ⅲ-22 中祁连成矿带、Ⅲ-23 南祁连成矿带
昆仑成矿省	Ⅲ-24 柴达木北缘成矿带、Ⅲ-25 柴达木盆地成矿区、Ⅲ-26 东昆仑成矿带、Ⅲ-27 西昆仑成矿带
巴颜喀拉-松潘成矿省	Ⅲ-29 喀拉米兰(阿尼玛卿)成矿带、Ⅲ-30 北巴颜喀拉-马尔康成矿带、Ⅲ-31 南巴颜喀拉-雅江成矿带
喀喇昆仑-三江成矿省	Ⅲ-33 金沙江成矿带、Ⅲ-35 喀喇昆仑-羌北成矿带、Ⅲ-36 昌都-普洱成矿带
华北成矿省	Ⅲ-18 阿拉善成矿带、Ⅲ-59 鄂尔多斯西缘成矿带、Ⅲ-60 鄂尔多斯成矿区、Ⅲ-61 山西成矿带、Ⅲ-63 华北陆块南缘成矿带
秦岭成矿省	Ⅲ-66A 北秦岭成矿带、Ⅲ-66B 南秦岭成矿带东段、Ⅲ-28 南秦岭成矿带西段
扬子成矿省	Ⅲ-73 龙门山-大巴山成矿带

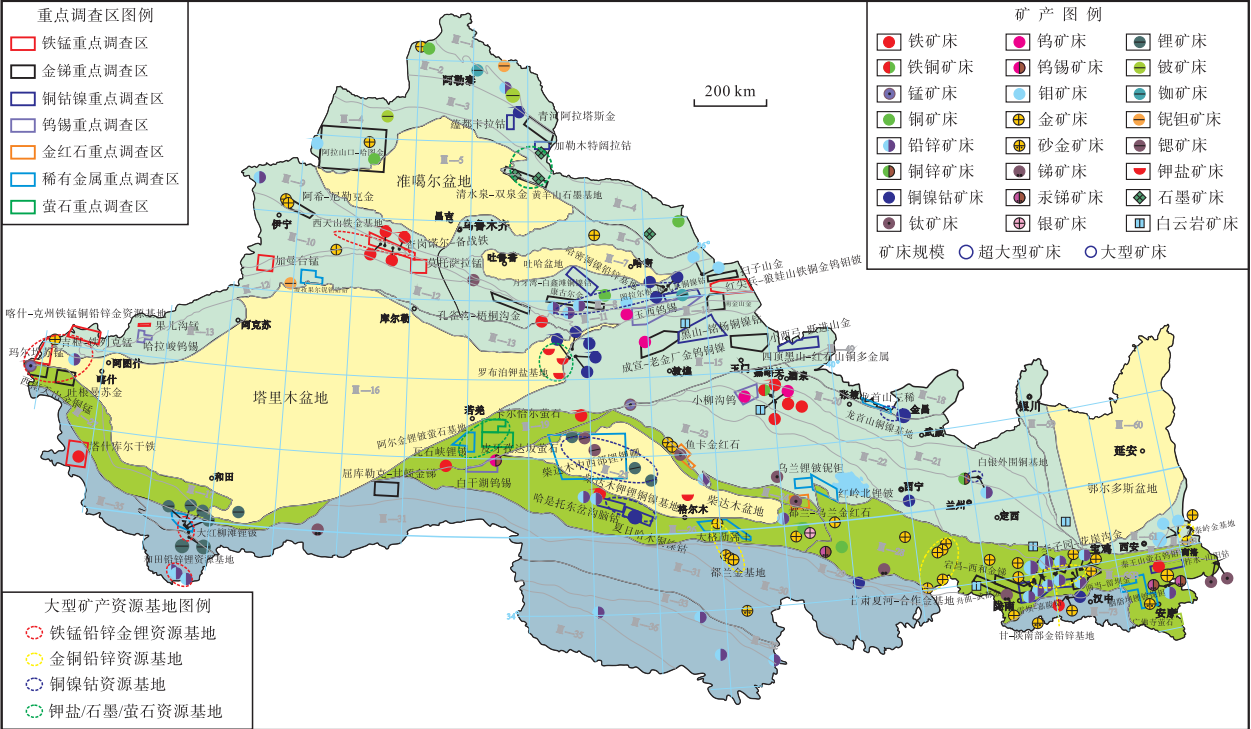


图 1 西北地区大型-超大型矿床、大型资源基地及重点调查区分布略图

Fig. 1 The distribution of large-super large deposits, resource base and key prospecting areas in Northwest China

1.1 西北地区找矿发现支撑服务新中国经济发展

建国初期,国家基础设施建设和工业化体系亟待振兴,钢铁等原材料极度匮乏,中央和地方矿产调查工作联合部署、密切合作。西北地区铁矿会战,先后发现了雅满苏铁矿、莫托沙拉铁矿、式可布台铁矿、磁海铁矿、蒙库铁矿、切列克其菱铁矿、肯德可克铁矿、小沙龙铁矿、镜铁山铁矿等矿床,提交了大批铁矿储量,为国家基础设施建设和工业化体系初步建立奠定了资源基础(图 1)。铜金属与基础设施建设及经济社会发展密切相关,在西北地区先后发现并勘查评价了白银厂铜矿、德尔尼铜钴矿、阿舍勒铜矿、包古图铜矿、土屋铜矿等大型-超大型矿床,提交了大批铜金属储量,为西北地区经济社会发展做出了重要贡献。

Ni 元素是不锈钢工业不可或缺的金属原料,建国初期,中国缺镍少铂,和石油一样,被西方国家看成是贫油国、贫镍国(莫宣学,2020;翟裕生,2020)。西北地区地质工作者不懈努力,汤中立院士等率先发现了金川超大型岩浆铜镍铂族元素矿床,一举改变了中国缺镍少铂的局面,可与原子弹爆炸相媲美(李文渊,2015)。随后发现了喀拉通克铜镍矿、黄山东铜镍矿等一系列大-中型岩浆铜镍硫化物矿床,为

西北地区工业发展提供了基础原料。可可托海稀有金属矿,世界上最著名的 3 号脉,赋存了世界上最大的铍矿床,被誉为“稀有金属天然博物馆”,为中国军事、航空工业的发展提供了不可或缺的关键原料,为 20 世纪 60 年代经济发展、帮助中国度过最困难时期做出了突出的贡献,被誉为中国的功勋矿山也是实至名归(李娜,2021)。

罗布泊钾盐矿、察尔汗盐湖、厂坝铅锌矿、邓家山铅锌矿、金堆城钼矿、阿希金矿及小秦岭和西秦岭金矿等一系列大型-超大型非金属、金属矿床的发现和勘查评价,提交了大批资源量和储量,支撑西北地区乃至建国初期以来的经济发展和新中国大规模基础设施建设及工业体系建立,服务国家重大战略和经济社会发展的矿产资源需求。当然,除了 165 处大型、超大型矿床之外,还发现了上千处中型及小型矿床,这些都为矿集区、整装勘查区或矿产资源基地的勘查开发奠定了资源基础;成矿理论认识及找矿勘查方法的创新驱动加速了后期整装勘查找矿突破和矿产资源基地的形成(图 1)。

1.2 矿产资源勘查开发助力工业体系现代化建设
进入 21 世纪以来,国家先后印发《国务院关于

加强地质工作的决定》(国发〔2006〕4号)、《国务院办公厅关于转发国土资源部等部门找矿突破战略行动纲要(2011~2020年)的通知》(国办发〔2011〕57号)等文件,对地质找矿、矿产勘查等工作作出了具体部署。随着青藏高原地质矿产调查评价专项、新疆“358”项目的实施,已取得了显著找矿成果,大幅提升了西北地区地质调查工作程度,改变了西北矿产资源格局;大批矿产资源的勘查开发,为西北地区社会稳定、经济发展提供了强有力保障,有效支撑了国家矿产资源需求保障(中国地质调查局,2018)。

西昆仑玛尔坎苏富锰矿带的突破,改变了中国锰矿分布格局,也结束了中国北方没有大型富锰矿的历史。随着阿克陶县奥尔特喀纳什富锰矿床的开发利用,在助力地方经济发展和解决就业等方面做出了重要贡献。西天山阿吾拉勒铁矿带、西昆仑塔什库尔干铁矿带、阿尔金山迪木那里克等铁矿的勘查开发,形成了国家铁矿资源基地,为地方经济发展和基础设施建设提供了资源保障(中国地质调查局西安地质调查中心,2018)。土屋-延东铜(钼)矿床、黄山南铜镍矿床、柯可卡尔德钨(锡)矿床、白山钼矿床、东戈壁钼矿床、卡特巴阿苏金矿床、夏日哈木镍矿床、锡铁山铅锌矿床、多才玛铅锌矿床、杂林格铁矿床、铜峪沟铜矿床、多彩铜铅锌矿床、瓦勒根金矿床、大场金矿田、乌拉根铅锌矿床、火烧云非硫化物铅锌矿床、苦水湖一带盐湖型硼矿、小柳沟钨矿床、大水金矿床、大桥金矿床、李坝金矿床、煎茶岭镍矿床、双王金矿、八卦庙金矿、煎茶岭金矿等大批大型-超大型矿床的发现和突破,为西北地区工业体系现代化建设和支撑服务西部大开发国家战略奠定了矿产资源保障能力的坚实基础。

1.3 西北地区找矿战略行动改变资源格局

党的十八大以来,西北地区矿产地质调查工作在国家规划布局指导下有序实施,中央和地方紧密合作,统一规划、统一部署、共同实施、成果共享,取得了一批找矿重大成果和新发现,为全国找矿突破战略行动成果目标的实现奠定了坚实的基础,取得了令国人为之振奋的重大成效(李文渊,2018;张国伟等,2019)。先后形成了小秦岭金矿、甘-陕南部金铅锌矿、甘肃夏河-合作金矿、白银外围铜矿、龙首山铜镍钴(铂族元素)矿、都兰金矿、柴达木钾盐锂铍铜镍矿、柴达木中西部锂铍钾盐硼矿、罗布泊钾盐、阿尔金锂铍萤石矿、哈密铜镍铅锌矿、西天山铁金矿、

黄羊山石墨矿、喀什-克州铁锰铜铅锌金矿、大红柳滩锂铍矿、和田铅锌锂矿等大型战略性矿产资源基地(图1)。西北地区的找矿突破和勘查开发,及时助力脱贫攻坚和生态文明建设,引领服务丝绸之路经济带核心区建设和经济社会高质量发展,有力支撑了国家重大战略和经济社会发展的矿产资源需求。

战略性关键金属元素以“稀”为主要特征。它们的地壳丰度很低(一般为 10^{-6} 级以下),成矿需要元素数百至上万倍的超常富集,成矿条件苛刻(陈骏,2019;张洪瑞等,2020)。战略性关键金属具有独特的材料性能,未来几十年全球对关键金属的需求将迅猛增长。未来国际矿产资源和科技的竞争,在很大程度上将集中于对关键矿产控制力和科技、市场的博弈。近年来,欧盟及美国、澳大利亚和日本等发达国家先后制定了关键矿产发展战略。可见,国际上对战略性关键矿产的掠夺和控制日趋激烈,中国亦不能独善其身。西北地区除大宗紧缺矿产找矿实现重大突破外,在战略新兴及关键金属方面,如大红柳滩一带锂铍矿田、蕴都卡拉铜钴矿、黄羊山岩浆热液型石墨矿床、卡尔恰尔萤石矿等新增一批资源储量,取得了突破性找矿成果(张照伟等,2020),这也为战略性关键矿产资源供应安全奠定了基础。

2 西北重要成矿带成矿规律与理论认识

在西北地区矿产地质调查工作过程中,地质矿产勘查与成矿理论认识深度融合,基于西北地区重要成矿带构造背景、成矿条件、成矿过程、典型矿床、成矿类型、控矿要素、找矿标志等的系统研究,在总结区域成矿规律、勘查技术方法等方面取得了系列创新认识和成果,并进行了资源潜力评价与矿产预测,评价重要成矿带战略性矿产找矿潜力。重点从西北地区战略性及优势矿产地质分布特点、成矿模式及找矿模型等方面简要总结成矿规律和成矿理论认识。

2.1 重要矿产时空分布特点

西北地区金属、非金属矿产资源丰富,是国家大宗紧缺和战略性矿产的重要后备基地,有41个Ⅲ级成矿(区)带,归属于10个成矿省及4个成矿域(表1)(徐志刚等,2008;杨合群等,2017)。主要优势矿产有富铁矿、优质富锰矿、铜矿、镍矿、钴矿、金矿、锂铍等稀有金属矿,钾盐、萤石、石墨等非金属矿产资源(李文渊等,2006;杨合群等,2017;董福辰等,2018)。

西北地区的金属矿产成矿以元古宙—古生代岩浆作用成矿为显著特色(张照伟等,2014,2015)。新疆北部、甘肃北部古亚洲成矿域范围,新疆南部边缘、青海,甘肃南部和陕西南部秦-祁-昆成矿域南部范围,主要产出华力西期海相火山岩型铜多金属矿床、铅锌矿床、斑岩型铜矿床、岩浆熔离型铜镍矿床、热水沉积型铅锌矿床和岩浆热液型金矿等;甘肃北祁连地区则以加里东期块状硫化物铜多金属矿床、矽卡岩型钨(钼)矿床和热液蚀变岩型铜矿床等成矿为主要特色。印支—燕山期的成矿作用主要是中低温热液型金矿和对元古宙—古生代成生矿床的叠加改造(图 1)。

西北地区铁矿主要有海相火山岩型、沉积型及沉积变质型(图 2)。海相火山岩型铁矿主要产于裂谷和岛弧 2 种构造环境。裂谷环境以天山阿吾拉勒石炭纪铁矿带为代表(查岗诺尔、备战、敦德、智博等

铁矿);岛弧环境以松潘构造带新元古代铁矿(杨家坝)和阿尔金早古生代铁矿(喀腊大湾)为典型代表。沉积型铁矿以中秦岭泥盆纪刘岭群前陆盆地前缘带欠补偿沉积型铁矿(大西沟)为典型,另还有鄂尔多斯地块碳酸盐古风化壳山西式铁矿。沉积变质型铁矿主要包括塔什库尔干新太古—古元古代结晶基底中深变质条带状磁铁建造相关铁矿(赞坎、老井,鱼洞子-黑山沟铁矿等)和中新元古代—早古生代伸展裂谷盆地沉积相关浅变质铁矿(祁连镜铁山铁矿、北山红山铁矿、阿尔金迪木那里克铁矿等)。

西北地区富锰矿主要为海相化学沉积型(图 2),以西昆仑玛尔坎苏富锰矿带(奥尔托喀纳什锰矿床)为典型,该带延长 65 km,是中国北方优质富锰矿带,主要分布于塔里木陆块与西昆仑构造带之间的石炭纪—二叠纪裂谷环境。

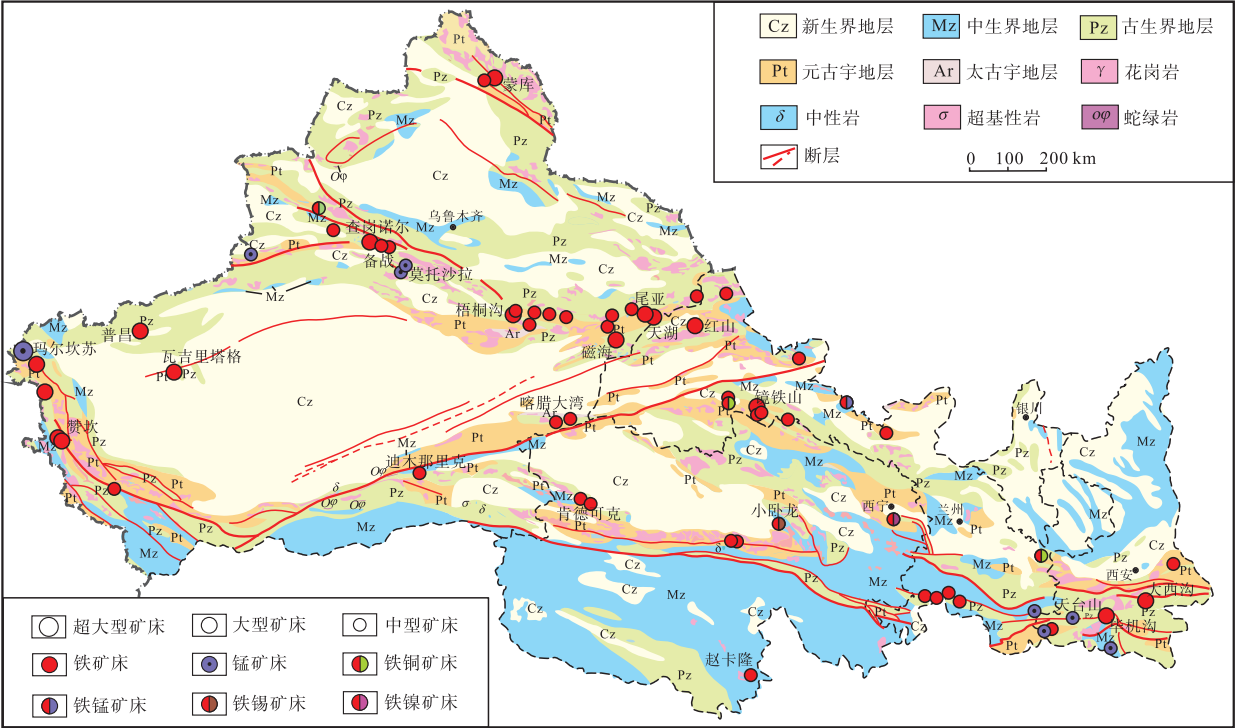


图 2 西北地区铁锰矿时空分布与成矿潜力图(据董福辰等,2018 修改)
Fig. 2 The distribution of Fe – Mn deposits and metallogenetic potential in Northwest China

西北地区铜矿主要有海相火山岩型和斑岩型(图 3)。海相火山岩型多产于地壳伸展背景,如西秦岭二叠纪裂谷铜峪沟铜矿、阿尔泰泥盆纪弧后裂谷阿舍勒铜矿、北祁连奥陶纪弧间盆地白银厂铜多金属矿;斑岩型多与后碰撞中酸性岩浆事件相关,如

中天山和西准噶尔石炭纪与后碰撞花岗岩相关的土屋-延东铜矿、包古图铜矿,东昆仑三叠纪与同碰撞—后碰撞中酸性岩相关的哈日扎铜多金属矿,青藏高原北部古近纪—新近纪与后碰撞偏碱性中酸性侵入岩相关的多彩铜铅锌矿、纳日贡玛铜钼矿等。

镍矿往往与铜钴共(伴)生,多与地幔柱作用、造山后地壳伸展或裂谷环境密切相关,多分布在稳定地块边缘,集中于阿拉善地块西南缘、塔里木地块东北缘、柴达木盆地南缘等(张照伟等,2016;李文渊,2018;张照伟等,2021a)。受地幔柱作用的岩浆铜镍硫化物矿床,如东天山-北山-北准噶尔二叠纪铜镍矿(黄山、黄山东、图拉尔根、坡一、坡十、喀拉通克)(三金柱等,2010;汤中立等,2011;宋谢炎,2019;秦克章等,2021);与超大陆裂解或后碰撞-后造山的裂谷环境密切相关的岩浆铜镍硫化物矿床,如与罗迪尼亚超大陆裂解或晋宁期后碰撞伸展相关铜镍矿(金川超大型铜镍矿);再如东昆仑早古生代末一晚古生代初与古特提斯裂解密切相关的铜镍矿(夏日哈木、石头坑德、冰沟南、浪木日等)(图3)(李文渊等,2020;张照伟等,2021a,李文渊等,2022)。

西北地区钴矿主要是与铜镍伴生的岩浆硫化物型,赋存于金属硫化物中。其他类型钴矿以产于阿尼玛卿构造带的德尔尼铜钴矿床为典型代表,是卷入蛇绿构造混杂岩的炭灰纪海相火山喷流热液沉积形成的块状硫化物铜锌矿,后期 Co 元素在铜锌矿边部磁黄铁矿交代黄铁矿同时富集形成了“套鞋状”

钴矿体(图3)(宋忠宝等,2007;王焰等,2020;张照伟等,2021b),复杂特征及成因概括起来称为蛇绿混杂岩型铜锌钴矿床(杨合群等,2017)。除此之外,与岩浆热液密切相关的钴矿在西北地区也有了新发现,如在南秦岭、东昆仑、阿尔泰-准噶尔北缘等地均发现了独立和伴生的钴矿,有的已达大型规模,找钴矿潜力巨大(朱伯鹏等,2020;张照伟等,2021a)。

铅锌矿也是西北地区的重要优势矿产之一,除前期发现的阿尔金喀腊大湾铅锌成矿区、西秦岭西成-凤太铅锌重点成矿区、东天山彩霞山铅锌矿、西南天山乌拉根铅锌成矿区及秦岭-大巴山的马元铅锌成矿带之外,近几年在西昆仑甜水海地区铅锌找矿取得重要进展,尤其是火烧云巨型铅锌矿的突破,一举改变了铅锌矿产资源在中国的分布格局(滕家欣等,2021)。

西北地区锂矿分为盐湖锂和硬岩锂。盐湖锂主要为新生代,尤其是晚更新世-全新世内陆湖泊化学沉积卤水型液体、固液共生锂矿,占总量 95% 以上,主要分布于柴达木盆地(西台吉乃尔湖、东台吉乃尔湖、一里坪、大浪滩、南翼山等),并与钾盐伴生;硬岩锂主要为后碰撞-后造山花岗伟晶岩型锂铍钨

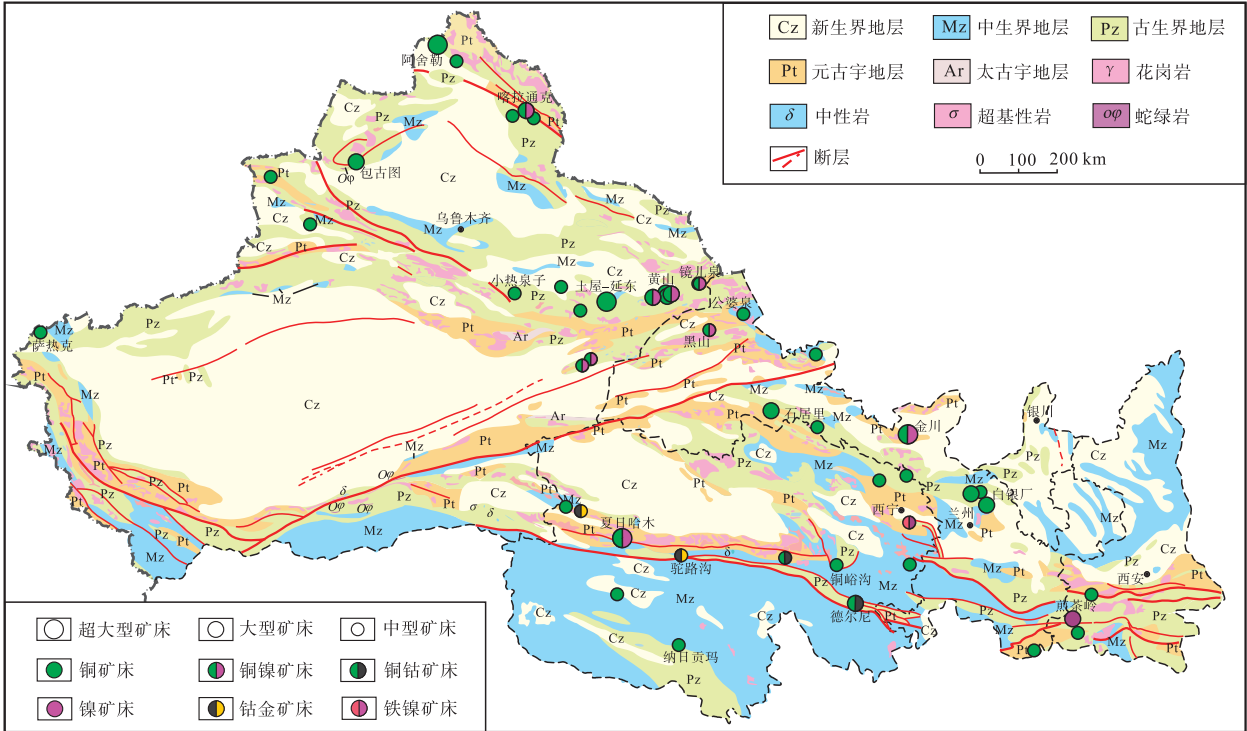


图3 西北地区铜镍钴矿时空分布与成矿潜力图(据董福辰等,2018 修改)

Fig. 3 The distribution diagram of Cu - Ni - Co deposits and metallogenic potential in northwest China

钽矿,如西昆仑晚三叠世大红柳滩超大型锂铍矿、阿尔泰晚石炭世—早侏罗世可可托海稀有金属矿、柯鲁木特锂铌钽矿等。此外,还有和田喀拉卡锂铍矿等(图4)。

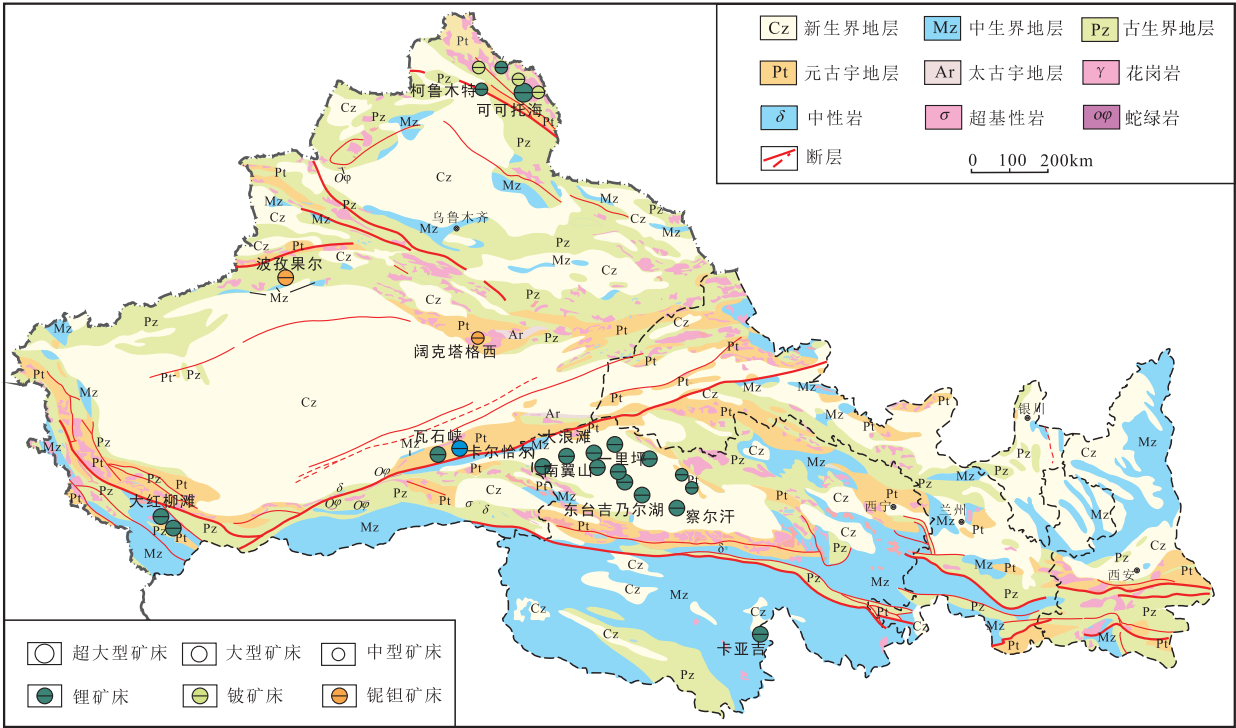


图4 西北地区稀有金属矿时空分布与成矿潜力图(据董福辰等,2018修改)

Fig. 4 The distribution of rare metals deposits and metallogenic potential in northwest China

西北地区金矿成因复杂,但其形成离不开有利的矿源层和不同成因的热源。东昆仑-西秦岭造山带是印支晚期—燕山早期由挤压造山向造山后伸展转换的重要构造部位,挤压推覆与滑脱构造作用、深部中酸性岩浆作用导致的热液活跃;在南秦岭构造带早期被动陆缘盆地和前陆盆地伴随同生断裂构造热蚀变(钠化等)的欠补偿细碎屑岩-碳酸盐岩矿源层中,形成了西北地区重要的区域金成矿带。前者如寨上、李坝、八卦庙、双王等金矿,后者如阳山-石泉、大场、加给陇洼、瓦勒根、加甘滩、早子沟、大水、大桥、阳山等金矿;黑色岩系矿源层相关“萨瓦亚尔顿式”金矿与此类似。古老陆块结晶基底中深变质岩是重要金矿源层,后期热液再造形成重要金矿(小秦岭桐峪、葫芦沟,东昆仑五龙沟、贺兰山牛头沟等)。陆相火山岩型金矿主要分布于天山构造带,并主要与早石炭世中酸性-中基性火山岩相关,产于火山穹窿环状与放射状断裂系统及潜火山岩、远火山口层间破碎带中(阿希、京希、索尔巴斯陶金矿等)。另外,在长期活动的构造带构造-岩浆复杂条件下形

成大型金矿(西准哈图金矿、卡拉麦里金矿、那拉提构造带卡特巴阿苏金矿等)。

西北地区钾盐有现代盐湖型和地下卤水型2种。前者主要分布在塔里木盆地罗布泊和柴达木盆地察尔汗、大浪滩、察汗斯拉图、昆特依、尕斯库勒等成盐盆地;后者主要为柴达木盆地西部赋存于古近纪—新近纪细碎屑岩、泥灰岩、藻灰岩中的封闭条件下成矿的南翼山钾盐矿产。

2.2 重要成矿理论认识

在长期的矿产地质调查和成矿认识研究的过程中,中国学者从地质勘查实践出发,以能支撑和指导野外找矿实现突破的成矿模式和成因认识为创新点,找矿实践和理论研究深度融合,形成了西北地区战略性关键矿产成矿理论认识,实现了成矿理论创新和支撑找矿实践的双突破。成矿模式和成矿理论既来源和孕育于找矿实践,反过来又指导找矿实践(李建威等,2019)。中国几代矿床学家针对西北地区主要矿床类型建立了符合地质实际的矿床模式,并逐渐完善,形成和创新了一系列成矿理论认识。

基性-超基性岩浆作用与成矿和海相火山岩浆作用与成矿一直是西北地质矿产勘查和科技创新的优势学科和重点方向,岩浆铜镍钴(铂族元素)矿床和 VHMS 矿床也是西北地区战略性优势矿产的主要矿床类型;勘查研究形成了超大型矿床成矿背景-过程-勘查的成矿系统(陈永清等,2021),创新建立成矿模式与找矿模型(曾庆栋等,2021),形成了小岩体成大矿及海相火山岩浆成矿的支撑和指导西北地区找矿持续实现突破的成矿理论认识。

找矿实践发现岩浆铜镍硫化物矿床主要赋存在镁铁-超镁铁质小岩体中,总结了“小岩体成大矿”的规律认识及幔源岩浆多期次侵位贯入-扩散成矿、岩浆深部熔离-贯入成矿等成矿模式(汤中立等,1991)。研究表明,苦橄质、玄武质或玻镁安山质母岩浆经历壳源物质(S、SiO₂、CO₂等组分)的混染是硫化物熔离、巨量金属元素聚集和岩浆硫化物矿床形成的关键因素,而大量幔源岩浆的连续补给则是巨量金属富集和形成大型-超大型矿床的重要条件(宋谢炎等,2010;Wang et al.,2018;李文渊等,2021)。随着东天山图拉尔根大型铜镍硫化物矿床和东昆仑夏日哈木超大型铜镍硫化物矿床的突破,逐渐地认识到中国岩浆铜镍硫化物矿床的形成不仅与地幔柱作用下的裂谷环境关系密切,也可能由俯冲-碰撞过程导致的造山带背景有关(Song et al.,2016;秦克章等,2017;Liu et al.,2018;张照伟等,2020),也可能是裂谷环境的产物(东昆仑夏日哈木矿床)(李文渊等,2021)。西北地区超镁铁质岩有关镍矿不仅有同生型矿床(以甘肃金川超大型铜镍矿床为代表),还有后生型矿床(以陕西煎茶岭大型镍矿床为代表)和风化型矿床(以青海元石山大型铁镍矿床为代表)(杨合群等,2017)。

火山成因块状硫化物矿床或赋存于火山岩中的硫化物矿床是指与海底岩浆活动有关的含矿热液喷出海底并在海底火山岩或沉积岩中堆积而成的多金属硫化物矿床,一般形成于弧后盆地或大陆边缘裂陷盆地,与蛇绿岩-基性火山岩或双峰式火山岩有关(李建威等,2019)。西北的 VHMS 矿床主要分布在祁连-秦岭造山带、阿尔泰造山带等地,典型代表为甘肃白银厂铜多金属矿床(黄崇轲等,2001)。白银厂铜矿床位于北祁连晚元古代一早古生代造山带早寒武世海相石英角斑岩中。宋叔和(1991)初步提出白银厂铜矿床属于中温深成热液交代矿床,铜矿化与容矿的中

酸性火山岩有关。随后,明确提出白银厂铜矿床为火山成因块状硫化物矿床即 VHMS 矿床,基于矿床的蚀变分布、矿石类型和分带、流体包裹体类型与成因、成矿流体演化与矿石沉淀机制的研究,建立了矿床成因模式(邬介人等,1994;彭礼贵等,1995;侯增谦等,2003),并指导找矿实践获得新突破。

2.2.1 重大地质事件与成矿

地质历史上,重大地质事件多数伴随有重要的成矿作用(Li et al.,2008)。最典型的就是地幔柱与岩浆矿床,如西伯利亚大火成岩省、峨眉山大火成岩省、塔里木大火成岩省,对应的地幔柱岩浆活动分别成就了世界上最大的俄罗斯诺里尔斯克铜镍硫化物矿床和中国的攀枝花钒钛磁铁矿矿床及瓦吉里塔格钒钛磁铁矿矿床;新疆北部晚古生代巨量内生金属矿床的集中爆发与塔里木地幔柱关系密切(李文渊等,2019)。有学者研究认为,世界第三大金川岩浆铜镍硫化物矿床也是地幔柱作用的结果(李献华等,2004;Franco et al.,2008)。地幔柱是地球动力系统的重要组成部分,与地幔柱活动有关的大火成岩省记录了地球各圈层之间物质和能量的交换,为形成大规模的岩浆矿床提供了重要条件(李献华,2021)。西北地区与地幔柱有关的大火成岩省是塔里木大火成岩省,形成大量与镁铁-超镁铁质岩石相关的铜镍硫化物矿床和钒钛磁铁矿矿床。地幔柱成矿作用与岩浆过程有关,地幔柱活动引发的大规模岩浆作用为巨量金属元素的聚集和成矿提供了重要的物质基础,而再循环洋壳熔/流体与岩浆源区橄榄石反应是形成含矿母岩浆的重要条件,复杂的岩浆过程(源区不均一性、不同的岩浆分离结晶和地壳混染过程)及含矿岩浆从地壳深部岩浆房沿岩浆通道上升侵位过程的复杂变化则是地幔柱成矿多样性及矿体空间定位多变性的主要控制因素(李建威等,2019)。

新疆北部晚古生代大量内生金属矿床集中爆发,是什么成矿理论认识促使了这些矿床的集中发育(李文渊等,2012)。以往认为最晚寒武纪古亚洲洋已存在,奥陶纪就已发生洋壳俯冲消减,并一直持续存在于晚古生代,也就是说大量的与岩浆作用有关的内生金属矿床是与板块俯冲消减的岩浆岛弧有关。Yang et al.(2006)根据塔里木火山岩的发育规模和发育特征,结合全球其他大火成岩省的特点,首次提出了塔里木早二叠世大火成岩省的概念。夏林圪则提出天山(塔里木)石炭纪一早二叠世大火成岩

省 (LIPs) 的主张 (夏林圻等, 2006; Xia et al., 2008)。李文渊等 (2012) 研究认为, 新疆北部晚古生代大规模岩浆作用和集中成矿的特点可能是地幔柱与板块构造同时并存叠加的反映 (图 5)。大火成岩省 (LIPs) 是短时间内巨量喷发的结果, 通常小于 1 Ma, 但可再现 (刘月高等, 2019)。地幔柱活动时间则可长达 5 亿年, 一个地幔柱活动可以产生多个

大火成岩省 (Marschall et al., 2012)。这样板块构造解释了地壳与浅地幔对流作用, 地幔柱解释了地壳与深地幔的关系 (李三忠等, 2019)。李文渊等 (2019) 提出了地幔柱与板块构造叠加的概念模型, 发现不仅在岩浆作用方面, 在成矿特点上也与斑岩型铜矿、岩浆型铜镍矿及岩浆型磁铁矿等特征一致, 表现出了区域找矿的指导意义。

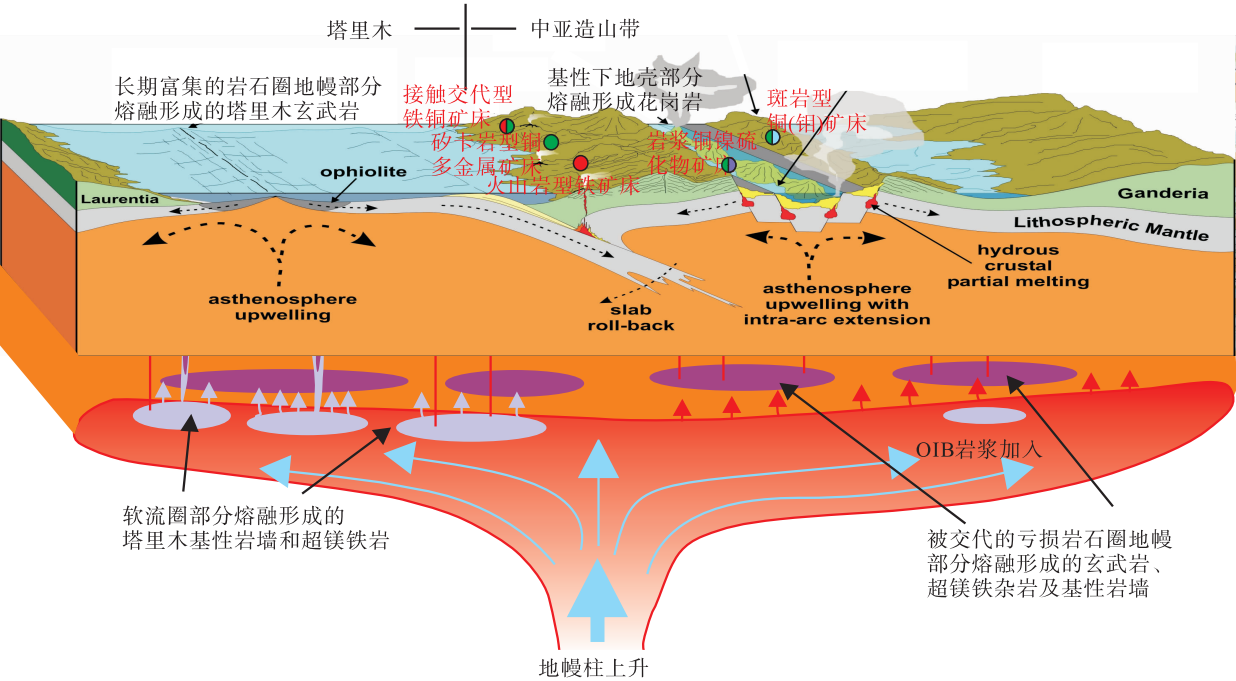


图 5 板块构造与地幔柱两种地球动力学机制叠加的成矿动力学模式图 (李文渊等, 2019)

Fig. 5 The metallogenic dynamic model of mechanism superposition between plate tectonics and mantle plume

2.2.2 小岩体成大矿

中国造山带中岩浆铜-镍-钴硫化物矿床主要集中分布于西北地区, 且主要表现为塔里木陆块周缘分布的特点 (Zhou et al., 2004; 汤中立等, 2006)。其中, 造山带中岩浆铜-镍-钴硫化物矿床主要是分布于塔里木陆块的北缘, 即天山-北山、阿尔泰-东准噶尔造山带中, 为“中亚型”的早二叠世造山带中岩浆铜-镍-钴硫化物矿床; 分布于南缘, 即东昆仑-南祁连造山带中, 为“特提斯型”志留纪末-泥盆纪早期造山带中岩浆铜-镍-钴硫化物矿床。“中亚型”和“特提斯型”造山带中岩浆铜-镍-钴硫化物矿床与金川超大型矿床为代表的克拉通中的岩浆铜-镍-钴硫化物矿床相比, 有显著差别, “中亚型”和“特提斯型”之间也有明显的不同 (李文渊等, 2022)。

成镍事件与大陆裂解过程中构造转换关系密切

(毛亚晶等, 2014; 姜常义等, 2015; 王亚磊等, 2017; 王岩等, 2020; 李文渊等, 2021)。“特提斯型”夏日哈木超大型岩浆铜-镍-钴硫化物矿床为古特提斯洋初期大陆裂谷环境的产物, “中亚型”坡一是新生的天山-北山造山带中在地幔柱作用下, 发生地幔广泛的部分熔融, 形成的一系列二叠纪岩浆型铜-镍-钴硫化物矿床及镁铁-超镁铁岩体 (Matthew J et al., 2016)。中国 3 期岩浆铜-镍-钴硫化物成矿事件实际与全球超大陆旋回密切相关: ①新元古代罗迪尼亚大陆超大陆离散。②早古生代冈瓦纳超大陆离散。③晚古生代潘吉亚超大陆汇聚和离散 (李文渊等, 2021)。

软流圈部分熔融“大岩浆”与上侵入地壳“小岩体成大矿”。“R”因子 (硅酸盐岩浆与硫化物的质量比) 模拟计算, 金川“R”因子为 150~1 000, 夏日

哈木为 100~1 000, 坡一为 500~5 000, 平均为 2 333; 说明硫化物均是从“大岩浆”中熔离出来的(刘美玉等, 2020; 李文渊等, 2021)。母岩浆成分模拟计算, 金川、夏日哈木、坡一 MgO 含量分别为 11.79%~12.9%、9.79%~12.48%、12.26%~14.91%, 表明均发生了较高级度的部分熔融(张照伟等, 2017, 2018)。母岩浆基性程度并不是成矿决定性因素, 关键在于后期的岩浆演化与地壳混染过程中的熔离与分异, 深部熔离形成富矿岩浆上侵到地表, 才能表现出“小岩体成大矿”, 但仅仅就地熔离是不可能形成大矿。

俯冲消减至软流圈洋壳对成矿的间接贡献(Marsh et al., 2013; 祁生胜等, 2014)。地幔柱作用在软流圈发生部分熔融, 形成的熔体则可能沿着陆块边缘的构造薄弱带上升, 期间吸收了先期俯冲洋壳物质中的 Cu、Ni、Co 和 S 等, 同时接受陆壳物质混染, 促使熔体铜-镍-钴硫化物液相与硅酸盐熔体之间熔离, 即深部熔离作用(李文渊等, 2021); 这个“深部”是一个连续的过程, 并非一个特定的深度。大洋岩石圈的铜、镍、钴物质和陆壳物质混染对造山带中的岩浆铜-镍-钴硫化物矿床的形成有着重要的贡献(Zhang et al., 2014, 2017)。绝大多数大型矿床都是超级地质作用导致金属元素异常集中的结果, 多发生于一个地质作用结束或另一个地质作用开始时期, 并且均发生在地壳之中。实验岩石学研究表明, 地幔部分熔融形成的幔源岩浆硫是不饱和的, 而且随着岩浆的上升硫的溶解度与压力之间呈反相关关系, 更不利于岩浆中硫的过饱和。地壳物质混染是导致岩浆中硫过饱和的关键因素(李文渊等, 2021)。Sr-Nd 同位素模拟计算, 金川矿床母岩浆发生了约 20% 的上地壳物质混染, 夏日哈木约 10%~30% 的混染, 坡一矿床仅约 3%~8% 的混染。坡一的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显小于夏日哈木, 指示了夏日哈木混染了较多的地壳硫(Li et al., 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018; 张照伟等, 2019)。后期陆内造山作用使含矿镁铁-超镁铁岩空间就位(Zhou et al., 2009; Zhang et al., 2018), 夏日哈木和坡一矿床同样也经历了该过程, 但目前该方面的研究则相对较弱, 尤其是坡一矿床; 目前, 发现的矿体多位于岩体的中、下部, 岩体的整体抬升将有利于其进一步出露地表, 增加其开发价值及经济意义(曾昭发等, 2020; Wang et al.,

2021)。塔里木陆块周缘 3 期岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿代表了中国最重要的 3 期成镍事件, 实际反映了塔里木陆块在全球大陆聚散演化中与超大陆之间关键的聚散事件(李文渊等, 2021)。其中, 后 2 期形成于造山带中, 并非造山作用的产物, 只是其造山的缝合带更容易拉裂, 使幔源含矿岩浆易于上升(Matthew et al., 2020)。

2.2.3 构造转换与成矿

区域性构造转换或突变(转折端)往往能形成大型矿床, 主要原因是为成矿物质的运移和聚集提供了通道和空间。基于东昆仑夏日哈木早古生代末($411\pm 2.3\text{Ma}$)超大型镍钴硫化物矿床、帕米尔玛尔坎苏晚石炭世($302\pm 9.2\text{Ma}$)大型火山沉积型富锰矿和西昆仑大红柳滩晚三叠世(211Ma)大型伟晶岩型锂铍矿床发现事实, 提出它们分别代表了古特提斯裂解、大洋扩张和闭合后碰撞构造转换结果的认识(李文渊等, 2021)。认为与古亚洲洋同期的原特提斯洋于志留纪末碰撞闭合后, 在冈瓦纳大陆北缘由于地幔柱作用改造的软流圈发生部分熔融而裂解, 形成了以夏日哈木与裂解背景幔源镁铁-超镁铁岩有关的超大型岩浆镍钴硫化物矿床; 随着进一步扩张, 在早石炭世形成了古特提斯成熟大洋(李荣社等, 2008; 李文渊等, 2011), 由于大洋中脊喷发提供的成矿物质, 在晚石炭世随着大洋快速扩张向消减的转换, 洋底碳酸盐岩沉积中形成了玛尔坎苏大型富菱锰矿矿床(高永宝等, 2018); 古特提斯洋闭合后, 于中三叠世进入碰撞造山阶段, 于晚三叠世后碰撞阶段地壳重熔形成 S 型花岗岩高温热液流体, 并造就了大红柳滩大型伟晶岩型锂铍矿床(高永宝等, 2020)。早晚古生代之交是古特提斯洋裂解的开始, 此时以秦祁昆洋为代表的原特提斯主洋已经闭合, 作为原特提斯洋弧后盆地的古亚洲洋尽管尚未闭合, 但夏日哈木镍钴矿床则是原特提斯造山后陆壳再次裂解的产物, 并非形成于原特提斯洋岛弧或后碰撞的环境(Zhang et al., 2019; Zheng et al., 2020); Mn 是亲石元素, 岩浆作用中不富集, 而在外生沉积作用中富集, 说明古特提斯早石炭世新生洋壳是富锰的, 淋滤出的锰离子在晚石炭世相对宁静洋底深处碱性环境中形成沉积型碳酸锰矿, 代表了较为强烈的岩浆作用阶段向相对宁静的沉积环境的转换(高永宝等, 2018); 大红柳滩 S 型花岗岩基及其大规模伟晶岩型锂铍矿的产出, 则反映了强烈的碰

碰撞造山作用导致地壳重熔的地球动力学背景,应是古特提斯洋缝合造山后或后碰撞伸展的环境(王汝成等,2021)。就已有的成矿事实,东昆仑康西瓦-阿尼玛卿古特提斯缝合带与南部巴颜喀拉的西金乌兰-金沙江和羌塘的龙木错-双湖古特提斯缝合带相比(校培喜等,2014;潘桂棠等,2019),更富有地质意

义。古特提斯不同时空特殊矿产的成矿作用所代表的构造环境的厘定,对重塑已经消失的古特提构造演化特别是关键构造转换具有重要的意义,支撑铅锌矿的重大找矿发现(宋玉财等,2017;滕家欣等,2021),反过来又可帮助理解并指导区域找矿实现新突破(图 6)。

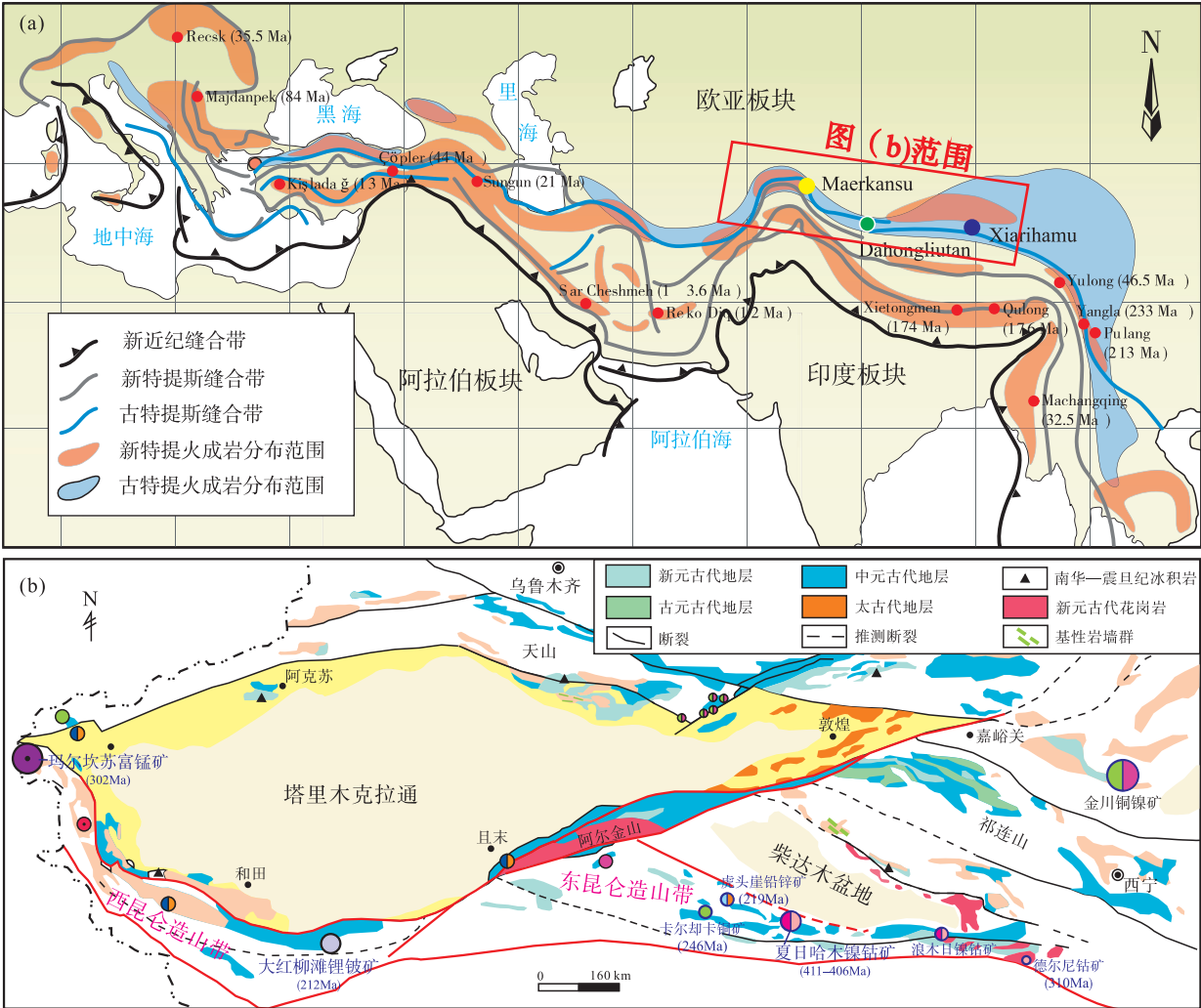


图 6 (a)特提斯构造带大地构造图和(b)昆仑古特提斯主要矿床分布图

Fig. 6 (a)The geotectonic map of Tethys tectonic belt and (b) the distribution of major deposits in Kunlun Paleotethys

在原特提斯洋闭合与阿尔金锂铍-萤石成矿、古特提斯洋裂离与东昆仑岩浆型镍钴成矿、石炭纪洋盆扩张与西昆仑及中亚地区沉积型富锰成矿、三叠纪碰撞造山-伸展转换与伟晶岩型锂铍成矿及新特提斯扩张-闭合俯冲消减与热液-交代型富铅锌成矿等成矿理论认识的基础上(高永宝等,2019),建立了“卡尔恰尔式”热液型萤石矿、“夏日哈木式”岩浆型

镍钴矿、“玛尔坎苏式”沉积型富锰矿、“大红柳滩式”伟晶岩型稀有金属矿和“火烧云式”热液-交代型铅锌矿成矿模型(高永宝等,2020)。

2.2.4 火山岩浆作用与成矿

对亚洲中部(中国中西部及邻区)新元古代以来若干大规模内火山作用的性质与演化进行了系统研究,发现亚洲大陆是世界上面积最大、地质结构和

演化历史最为复杂的一个大陆(潘桂棠等,2019)。中国西北地区新元古代以来若干(新元古中—晚期、石炭纪—早二叠世、二叠纪—三叠纪之交、中—新生代)大规模板内火山活动和(或)大火成岩省岩浆事件,深入研究并阐释了这些大规模火山岩浆事件产生的地质背景、深部过程、火山岩成因机制等,从全球构造与火山岩浆作用的研究视角,对大陆岩石圈拉伸与火山作用的关系进行了厘定(夏林圻等,2016)。这一大陆地质与大陆动力学前沿领域及若干区域性重大地质问题进行的原创性探索,对于认识中国和亚洲大陆地质演化与相关成矿地质背景和成矿作用具有指导作用(秦克章等,2021;牛耀龄,2022)。祁连成矿带 VHMS 矿床大多是火山岩浆成矿作用的结果,典型的当属白银厂铜多金属矿床(夏林圻等,2016)。新疆阿舍勒铜矿、西天山阿吾拉勒富铁成矿带也是该成矿模式的代表。对西北重要成矿带关键含矿火山岩系(西天山大哈拉军组等)进行了深入研究,在含矿火山岩时空分布及变化特征、构造环境与成矿地质背景及对相关金属成矿作用的制约方面取得了一系列新认识(夏林圻等,2013)。西天山大哈拉军山组火山岩系是该区众多火山岩型铁矿、金矿的赋矿地层;提出早石炭世伊犁地块深部可能存在相对稳定、持续的深部地幔物质的上涌和火山喷发,并使得早期喷出的火山岩(以基性玄武岩为主)在晚期逐渐推移至地块两侧,类似于洋中脊的扩张过程的初始裂谷作用(夏林圻等,2013);形成了多个大型—超大型铁、金、铜矿床。

除此之外,西北地区的钼、金等矿床都是中国的优势矿产和主要富集地区。斑岩钼矿床是最主要的钼矿床类型,提供了全国约 78% 的钼资源量(Zeng et al.,2013)。西北地区斑岩钼矿床主要集中分布在秦岭—大别、中亚造山带等地。其中,秦岭—大别地区的钼资源量达 800 万 t,超过了传统斑岩钼成矿理论诞生地 Climax-Henderson 钼成矿带的储量,成为世界上钼资源量最大的成矿省(Chen et al.,2017;Li et al.,2017)。赵东宏等(2020)系统研究了秦岭地区钼钨矿控矿条件,认为印支末期壳源中酸性侵入岩+北东向构造控制了秦岭成矿带钼钨矿床的分布,矿床分布具有东西向成带、北东向等间距成串集中分布的规律。进一步指出钼、钨成矿主要与印支—燕山期的花岗岩或构造有关;北东向构造带自小秦岭地区向南延伸到宁陕—柞水一带,与印支期—

燕山期花岗岩叠加,控制了这一带钼钨矿床的分布(赵东宏等,2020)。厘定了秦岭印支期—燕山期构造岩浆岩与巨量金属成矿大爆发耦合的关系及金矿床成群产出的规律;提出了秦岭成矿带金矿田控矿为矿源—热再造—赋矿空间三位一体的新模式(赵东宏等,2020)。

3 分析与展望

3.1 西北地区战略性矿产潜力分析与找矿前景

西北地区横跨特提斯和古亚洲成矿域,地处欧亚大陆腹地,为典型的陆内造山带发育地区,主要矿种以镍、铜、铅锌、金、钼、铁、钨、稀有稀土金属为主,并且以元古宙—古生代金属成矿为显著特色(王旋等,2021)。目前,找矿勘查工作程度较低,发现矿床数量较多的成矿区带为祁连山、秦岭、北山和天山,但总体以中小型矿床为主。近年来,在以往工作程度低的西天山、西昆仑、阿尔金、东昆仑运用有效的技术方法,均有重要矿产地发现,多数都是大型、超大型矿床,如西昆仑玛尔坎苏富锰矿、大红柳滩锂铍矿、火烧云铅锌矿、东昆仑夏日哈木铜镍矿、阿尔金锂铍—萤石矿等,展示了良好的成矿潜力和找矿前景。昆仑—柴达木陆块南缘,在华力西中晚期有较深幔源镁铁—超镁铁岩的上侵,形成铜镍矿成矿的有利条件。太古宙、古元古代的古老变质岩系中较普遍分布的条带状磁铁矿,在造山带中镶嵌的古陆块是寻找该类型铁矿的有利地区,如西昆仑、东天山、秦岭等重要成矿带。西北地区以往取得的重要成矿规律认识和矿床大发现,彰显了该地区良好的成矿条件和巨大的找矿潜力,推动矿产勘查转型升级,构建全生命周期支撑战略性矿产资源基地建设体系,不断提升国家战略性矿产资源安全保障能力,都是西北地区矿产资源禀赋条件所决定的。

3.2 西北地区战略性矿产找矿勘查与部署建议

西北地区矿产地质调查工作全面服从服务于《战略性矿产找矿行动纲要(2021~2035 年)》,在富铁、铜、镍、钴、稀有金属、萤石等战略性矿产找矿突破方面作出新的贡献。围绕重点成矿区带和大型矿产资源基地建设,聚焦重点调查区和成矿规律认识,优选重要勘查区块和战略靶区,摸清战略性矿产资源潜力家底,全面提升西北地区战略性矿产资源保障国家需求和资源安全的能力和水平。依据总体布局,按

照五年、十年和十五年3个阶段统筹规划、部署和推进西北地区战略性矿产地质调查和勘查工作。

第一阶段(2021~2025年),重点部署优选一批战略性矿产选区(图1),提交一批可供进一步勘查的勘查区块、重要矿产地和找矿靶区。

西北地区铜镍稀有金属等矿产地质调查。立足阿尔金西段-柴北缘伟晶岩型锂铍矿、热液型萤石矿、东天山-北山岩浆型铜镍矿,阿尔泰-准噶尔北缘岩浆热液型铜钴矿等矿产地质调查,进一步揭示西北地区重要成矿带铜镍锂铍萤石矿等成矿规律,评价成矿潜力,在卡尔恰尔-瓦石峡一带开展锂铍萤石矿“三位一体”综合地质调查,为大型资源基地建设提供支撑(图1)。总结完善西北地区重要成矿带伟晶岩型锂铍等稀有金属矿、热液型萤石矿、岩浆型铜镍矿、岩浆热液型铜钴矿成矿认识;创建浅覆盖及高寒深切割地区地质+遥感+地球化学“空地一体”快速勘查技术方法体系。围绕西昆仑成矿带大红柳滩地区锂铍矿、玛尔坎苏地区富锰矿、团结峰地区铜镍矿、东昆仑成矿带屈库勒克地区锑金矿、白干湖地区钨锡矿、夏日哈木外围镍铜钴矿、柴北缘成矿带红岭北-石乃亥地区锂铍等战略性矿产成矿潜力区,开展矿产地质调查(图1),进一步总结昆仑地区锂铍、锰、铜镍等成矿规律,力争取得锂铍、富锰矿找矿新发现;调查评价该区铜镍等矿产资源潜力,提交找矿靶区和勘查区块。通过对西南天山哈拉峻一带进行钨锡、稀有金属、萤石等战略性矿产调查区、西南天山吉根一带锰矿调查区、波孜果尔、克其克-果儿沟等铌钽、锰等战略性矿产调查区、西天山加曼台、西准噶尔哈图等锰、金战略性矿产调查区、东天山海豹滩-乱石滩一带铜镍矿调查区及东天山哈密市玉西一带钨锡矿调查区的矿产地质调查(图1),查明天山-准噶尔钨锡铌钽锰多金属矿等的资源潜力,圈定找矿靶区,力争找矿取得重要新发现。以陕西柞水-山阳一带钴多金属矿、甘肃龙首山一带三稀铀钴矿、甘肃宕昌-西和一带锑钴金和陕西南秦岭牛山-胭脂坝锂铍铌钽矿为重点开展矿产地质调查(图1),揭示秦岭-祁连锑铍多金属矿成矿潜力,圈定找矿靶区。总结秦岭-祁连地区热液型锑钴、伟晶岩型锂铍、碱长花岗岩型稀有稀土矿成矿规律,开展动态资源潜力评价;为西北地区战略性矿产找矿行动及时取得新突破提供支撑。

第二阶段(2026~2030年),在继续加强勘查区

块优选和圈定战略勘查选区的基础上,支撑促进找矿重大突破和形成一批具有较大规模矿产资源远景的战略性矿产勘查开发资源基地。

第三阶段(2031~2035年),重点加强战略性矿产资源基地的深部勘查,查明其资源潜力和开展资源基地资源潜力、开发条件和环境影响“三位一体”综合评价,为矿产开发、产业发展规划提供技术支撑。

致谢:谨以此文庆祝中国地质调查局西安地质调查中心成立60周年。

参考文献(References):

- 陈华勇. 对我国矿床学未来发展方向的思考[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 99-105.
- CHEN Huayong. Meditations on the future development of ore deposit science in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 99-105.
- 陈骏. 战略性关键金属超常富集成矿动力学[R]. “战略性关键金属矿产资源高级论坛”院士大会报告, 2019.
- 陈永清, 莫宣学. 超大型矿床成矿背景-过程-勘查三位一体的找矿理念[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 26-48.
- CHEN Yongqing, MO Xuanxue. Metallogenic background, process and exploration as one: A trinity concept for prospecting for super-large ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 26-48.
- 董福辰, 谭文娟, 姜寒冰, 等. 西北地区重要矿产资源潜力分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- 范宏瑞, 牛贺才, 李晓春, 等. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. 科学通报, 2020, 65: 3778-3793.
- FAN Hongrui, NIU Hecai, LI Xiaochun, et al. The types, ore genesis and resource perspective of endogenic REE deposits in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65: 3778-3793.
- 高永宝, 滕家欣, 李文渊, 等. 新疆西昆仑奥尔托喀纳什锰矿地质、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2341-2358.
- GAO Yongbao, TENG Jiaxin, LI Wenyuan, et al. Geology, geochemistry and ore genesis of the Aoertuokanashi manganese deposit, western Kunlun, Xinjiang, Northwest China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2341-2358.
- 高永宝, 李侃, 滕家欣, 等. 新疆喀喇昆仑火烧云超大型铅锌矿床矿物学、地球化学及成因[J]. 西北地质, 2019, 52(4): 152-169.
- GAO Yongbao, LI Kan, TENG Jiaxin, et al. Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Giant Huoshaoyun Zn-Pb

- Deposit in Karakoram Area, Xinjiang, NW China[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 152-169.
- 高永宝,赵辛敏,赵晓健,等. 新疆喀喇昆仑多宝山铅锌矿床矿物学、地球化学及成因[J]. *西北地质*, 2020, 51(1): 122-137.
- GAO Yongbao, ZHAO Xinmin, ZHAO Xiaojian, et al. Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Duobaoshan Zn - Pb Deposit, in Karakoram, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 51(1): 122-137.
- 韩见. 针对矿产资源美国今年搞了 5 件大事[Z]. *矿业界*. 2020. 09. 22. <https://mp.zgkyb.com/m/news/21990>.
- 侯增谦,李荫清,张绮玲,等. 海底热水成矿系统中的流体端元与混合过程: 来自白银厂和呷村 VMS 矿床的流体包裹体证据[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 221-234.
- HOU Zengqian, LI Yinqing, ZHANG Qiling, et al. End-members and mixing of fluids in submarine hydrothermal system: evidence from fluid inclusions in the Baiyinchang and Gacun VMS deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(2): 221-234.
- 侯增谦,陈骏,翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3651-3652.
- HOU Zengqian, CHEN Jun, ZHAI Mingguo. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(33): 3651-3652.
- 黄崇軻,白治,朱裕生,等. 中国铜矿床(下册)[M]. 北京:地质出版社, 2001, 373-450.
- 姜常义,凌锦兰,周伟,等. 东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景[J]. *岩石学报*, 2015, 31(4): 1117-1136.
- JIANG Changyi, LING Jinlan, ZHOU Wei, et al. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni-bearing layered mafic-ultramafic intrusion, east Kunlun: implications for its extensional island arc environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(4): 1117-1136.
- 李建威,赵新福,邓晓东,等. 新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1720-1771.
- LI Jianwei, ZHAO Xinfu, DENG Xiaodong, et al. An overview of the advance on the study of China's ore deposits during the last seventy years [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49: 1720-1771.
- 李娜. “心上人,我在可可托海等你”,揭秘地下 136 米掏出来的水电站[R]. *人民日报*, 2021. 9. 22.
- 李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社, 2008, 15-309.
- 李三忠,王光增,索艳慧. 板块驱动力: 问题本源与本质[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(4): 605-643.
- LI Sanzhong, WANG Guangzeng, SUO Yanhui. Driving Force of Plate Tectonics: Origin and Nature[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(4): 605-643.
- 李廷栋,肖庆辉,潘桂棠,等. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1441-1451.
- LI Tingdong, XIAO Qinghui, PAN Guitang, et al. A Consideration about the Development of Ocean Plate Geology[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1441-1451.
- 李文渊,董福辰,姜寒冰,等. 西北地区重要金属矿产成矿特征及其找矿潜力[J]. *西北地质*, 2006, 39(2): 1-16.
- LI Wenyuan, DONG Fuchen, JIANG Hanbing, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Potential of Major Metallic Minerals in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(2): 1-16.
- 李文渊. 岩浆 Cu - Ni - PGE 矿床研究现状及发展趋势[J]. *西北地质*, 2007, 40(2): 1-28.
- LI Wenyuan. The Current Status and Prospect on Magmatic Ni - Cu - PGE Deposits [J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(2): 1-28.
- 李文渊,张照伟,高永宝,等. 秦祁昆造山带重要成矿事件与构造响应[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1135-1149.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, GAO Yongbao, et al. Important metallogenic events and tectonic response of Qinling, Qilian and Kunlun orogenic belts[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1135-1149.
- 李文渊,牛耀龄,张照伟,等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆成矿的地球动力学背景和战略找矿远景[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 41-50.
- LI Wenyuan, NIU Yaoling, ZHANG Zhaowei, et al. Geodynamic setting and further exploration of magmatism related mineralization concentrated in the Late Paleozoic in the northern Xinjiang Autonomous Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 41-50.
- 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 365-380.
- LI Wenyuan. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 365-380.
- 李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. *岩石学报*, 2018, 34(8): 2201-2210.
- LI Wenyuan. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(8): 2201-2210.
- 李文渊,张照伟,张江伟,等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究[M]. 北京:科学出版社, 2019, 1-324.
- 李文渊,王亚磊,钱兵,等. 塔里木陆块周缘岩浆 Cu - Ni - Co 硫化物矿床形成的探讨[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2):

- 276-293.
- LI Wenyuan, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Discussion on the formation of magmatic Cu - Ni - Co sulfide deposits in margin of Tarim Block [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 276-293.
- 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等. 昆仑古特提斯构造转换与镍钴锰锂关键矿产成矿作用研究[J]. *中国地质*, 1-26. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20211118.0847.002.html>.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, GAO Yongbao, et al. On the Study between the Tectonic Transformation and the Metallization of Nickel, Cobalt, Manganese and Lithium Critical Mineral Resources in the Kunlun Orogen of Paleo-Tethys, North China [J]. *Geology in China*, 2021, 1-26. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20211118.0847.002.html>.
- 李文渊, 张照伟, 王亚磊, 等. 东昆仑原、古特提斯构造转换与岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿作用[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(1): 1-19.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, et al. Tectonic Transformation of Proto- and Paleo-Tethys and the Metallization of Magmatic Ni - Cu - Co Sulfide Deposits in Kunlun Orogen, Northwest China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(1): 1-19.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄及地质意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(4): 401-402.
- LI Xianhua, SU Li, SONG Biao, et al. The age of zircon SHRIMP U - Pb and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 401-402.
- 李献华. 超大陆裂解的主要驱动力——地幔柱或深俯冲? [J]. *地质学报*, 2021, 95(1): 20-31.
- LI Xianhua. The major driving force triggering breakup of supercontinent: mantle plumes or deep subduction? [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 20-31.
- 刘美玉, 苏尚国, 姚远, 等. 金川岩浆铜镍(铂)硫化物矿床中两类橄榄石的发现及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 2020, 36(4): 151-170.
- LIU Meiyu, SU Shangguo, YAO Yuan, et al. Discovery and genesis of two types of olivines and its significance to metalogeny in Jinchuan magmatic copper-nickel (PGE) sulfide deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(4): 151-170.
- 刘月高, 吕新彪, 阮班晓, 等. 新疆北山早二叠世岩浆型铜镍硫化物矿床综合信息勘查模式[J]. *矿床地质*, 2019, 38(3): 644-666.
- LIU Yuegao, LÜ Xinbiao, RUAN Banxiao, et al. A comprehensive information exploration model for magmatic Cu - Ni sulfide deposits in Beishan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(3): 644-666.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. *矿床地质*, 2019a, 38(5): 935-969.
- MAO Jingwen, YUAN Shunda, XIE Guiqing, et al. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 2019a, 38(5): 935-969.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产——国际动向与思考[J]. *矿床地质*, 2019b, 38(4): 689-698.
- MAO Jingwen, YANG Zongxi, XIE Guiqing, et al. Critical minerals: International trends and thinking[J]. *Mineral Deposits*, 2019b, 38(4): 689-698.
- 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 等. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1575-1594.
- MAO Yajing, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by the Huangshan Ni - Cu deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1575-1594.
- 莫宣学. 岩浆作用与地球深部过程[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1487-1493.
- MO Xuanxue. Magmatism and Deep Geological Process[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1487-1493.
- 莫宣学. 大型-超大型矿床成矿地球动力学背景[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 13-19.
- MO Xuanxue. Geodynamic background of metalogenesis of large-superlarge ore deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 13-19.
- 牛耀龄. 范式革命: 玄武岩记录有喷发时岩石圈厚度的信息, 没有地幔潜在温度的记忆[J]. *科学通报*, 2022, 67(03): 301-306.
- NIU Yaoling. A paradigm change: Basalts have no memory of mantle potential temperature, but record the lithosphere thickness at the time of eruption[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(03): 301-306.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1544-1561.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, ZHANG Kexin, et al. Recognition of the Oceanic Subduction-Accretion Zones from the Orogenic Belt in Continents and Its Important Scientific Significance[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1544-1561.
- 彭礼贵, 任有祥, 李智佩, 等. 甘肃省白银厂铜多金属矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995, 1-204.

- 祁生胜,宋述光,史连昌,等.东昆仑西段夏日哈木-苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义[J].岩石学报,2014,30(11):3345-3356.
- QI Shengsheng, SONG Shuguang, SHI Lianchang, et al. Discovery and its geological significance of Early Paleozoic eclogite in Xiarihamu-Suhaitu area, western part of the East Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3345-3356.
- 秦克章,翟明国,李光明,等.中国陆壳演化、多块体拼合造山与特色成矿的关系[J].岩石学报,2017,33(2):305-325.
- QIN Kezhang, ZHAI Mingguo, LI Guangming, et al. Links of colage orogenesis of multiblocks and crust evolution to characteristic metallogenesis in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(2): 305-325.
- 秦克章,赵俊兴,范宏瑞,等.试论主要类型矿床的形成深度与最大延深垂幅[J].地学前缘,2021,28(3):271-294.
- QIN Kezhang, ZHAO Junxing, FAN Hongrui, et al. On the ore-forming depth and possible maximum vertical extension of the major type ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 271-294.
- 任纪舜,赵磊,李崇,等.中国大地构造研究之思考——中国地质学家的责任与担当[J].中国地质,2017,44(1):33-43.
- REN Jishun, ZHAO Lei, LI Chong, et al. Thinking on Chinese tectonics: Duty and responsibility of Chinese geologists[J]. Geology in China, 2017, 44(1): 33-43.
- 三金柱,秦克章,汤中立,等.东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].岩石学报,2010,26(10):3027-3035.
- SAN Jinzhu, QIN Kezhang, TANG Zhongli, et al. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 3027-3035.
- 宋叔和.中国一些主要金属矿床类型及其时空分布规律问题[J].矿床地质,1991,10(1):10-18.
- SONG Shuhe. Time and space distribution of some major types of metallic ore deposits of China[J]. Mineral Deposits, 1991, 10(1): 10-18.
- 宋谢炎,肖家飞,朱丹,等.岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J].地学前缘,2010,17(1):153-163.
- SONG Xieyan, XIAO Jiafei, ZHU Dan, et al. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 153-163.
- 宋谢炎.岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题[J].矿床地质,2019,38(4):699-710.
- SONG Xieyan. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 699-710.
- 宋玉财,侯增谦,刘英超,等.特提斯域的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床[J].中国地质,2017,44(4):664-689.
- SONG Yucai, HOU Zengqian, LIU Yingchao, et al. Mississippi Valley-Type (MVT) Pb-Zn deposits in the Tethyandomain: A review[J]. Geology in China, 2017, 44(4): 664-689.
- 宋忠宝,王轩,任有祥,等.东昆仑德尔尼矿床中矿床(体)的叠加成矿作用研究[J].西北地质,2007,40(4):1-6.
- SONG Zhongbao, WANG Xuan, REN Youxiang, et al. Superimposed mineralization of Deerni Co-Cu deposit, East Kunlun mountains, NW China[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(4): 1-6.
- 唐金荣,杨宗喜,周平,等.国外关键矿产战略研究进展及其启示[J].地质通报,2014,33(9):1445-1453.
- TANG Jinrong, YANG Zongxi, ZHOU Ping, et al. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(9): 1445-1453.
- 汤中立,李文渊.中国硫化镍矿床成矿规律的研究与展望[J].矿床地质,1991,10(3):193-203.
- TANG Zhongli, LI Wenyuan. Studies of Metallogenic Regularity of Nickel Sulfide Deposits in China and Their Prospects [J]. Mineral Deposits, 1991, 10(3): 193-203.
- 汤中立,钱壮志,姜常义,等.中国镍铜铂族岩浆硫化物矿床与成矿预测[M].北京:地质出版社,2006,1-270.
- 汤中立,钱壮志,姜常义,等.岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J].地球科学与环境学报,2011,33(1):1-9.
- TANG Zhongli, QIAN Zhuangzhi, JIANG Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 1-9.
- 滕家欣,高永宝,贺永康,等.西昆仑锰锂铅锌铁区域成矿规律与资源潜力[M].北京:地质出版社,2021,1-323.
- 王汝成,车旭东,邬斌,等.中国铌钽铅钨资源[J].科学通报,2020,65(33):3763-3777.
- WANG Rucheng, CHE Xudong, WU Bin, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China (in Chinese) [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3763-3777.
- 王汝成,邬斌,谢磊,等.稀有金属成矿全球时空分布与大陆演化[J].地质学报,2021,95(1):182-193.
- WANG Rucheng, WU Bin, XIE Lei, et al. Global tempo-

- spatial distribution of rare-metal mineralization and continental evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 182-193.
- 王旋,曹俊,张盖之. 造山带铜镍硫化物矿床的岩浆起源:以东天山黄山南铜镍矿床为例[J]. *地球科学*, 2021, 46(11): 3829-3849.
- WANG Xuan, CAO Jun, ZHANG Gaizhi. Origin of Ore-Forming Magmas Associated with Ni - Cu Sulfide Deposits in Orogenic Belts: Case Study of Permian Huangshannan Magmatic Ni - Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, NW China[J]. *Earth Science*, 2021, 46(11): 3829-3849.
- 王焰,钟宏,曹勇华,等. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3825-3838.
- WANG Yang, ZHONG Hong, CAO Yanghua, et al. Genetic classification, distribution and ore genesis of major PGE, Co and Cr deposits in China: A critical review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(33): 3825-3838.
- 王岩,王登红,孙涛,等. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J]. *地质学报*, 2020, 94(1): 217-240.
- WANG Yan, WANG Denghong, SUN Tao, et al. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1): 217-240.
- 王亚磊,张照伟,张江伟,等. 新疆坡北铜镍矿床铂族元素特征及其对成矿过程的约束[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 13-24.
- WANG Yalei, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. Geochemical Characters of Platinum-group Elements and Its Significances on the Mineralization Process of the Pobei Cu - Ni Sulfide Deposit in Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 13-24.
- 邬介人,任秉琛,黄玉春. 西北海相火山岩地区块状硫化物矿床[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1994,1-271.
- 西安地质矿产研究所. 西北地区矿产资源找矿潜力[M]. 北京:地质出版社,2006.
- 夏林圻,李向民,夏祖春,等. 天山石炭—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. *西北地质*, 2006, 39(1): 1-49.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, XIA Zuchun, et al. Carboniferous-Permian Rift-Related Volcanism and Mantle Plume in the Tianshan, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(1): 1-49.
- 夏林圻. 超大陆构造、地幔动力学和岩浆—成矿响应[J]. *西北地质*, 2013, 46(3): 1-38.
- XIA Linqi. Supercontinent Tectonics, Mantle Dynamics and Response of Magmatism and Metallogeny [J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(3): 1-38.
- 夏林圻,李向民,余吉远,等. 祁连山新元古代中—晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. *中国地质*, 2016, 43(4): 1087-1138.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyan, et al. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1087-1138.
- 校培喜,高晓峰,胡云绪,等. 阿尔金—东昆仑西段成矿带地质背景研究[M]. 北京:地质出版社,2014,1-261.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,等. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京:地质出版社,2008.
- 杨合群,姜寒冰,谭文娟,等. 西北地区重要矿产概论[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2017.
- 曾庆栋,底青云,薛国强,等. 成矿模式与找矿模式研究的现代科学技术[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 295-308.
- ZENG Qingdong, DI Qingyun, XUE Guoqiang, et al. Modern science and technology in metallogenic and prospecting model studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(3): 295-308.
- 曾昭发,周宁远,张建民,等. 深部金属矿综合地球物理响应与综合预测方法——以金川超大型铜镍硫化物矿床为例[J]. *黄金*, 2020, 41(9): 22-27.
- ZENG Zhaofa, ZHOU Ningyuan, ZHANG Jianming, et al. Comprehensive geophysical responses and comprehensive prediction method for deep metal deposit: A case study of Jinchuan super-large Cu - Ni sulfide deposit [J]. *Gold*, 2020, 41(9): 22-27.
- 翟裕生. 矿床学思维方法探讨[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 1-12.
- ZHAI Yusheng. On the method of thinking in studying mineral deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 1-12.
- 张国伟,郭安林. 关于大陆构造研究的一些思考与讨论[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1464-1475.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin. Thoughts on Continental Tectonics[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1464-1475.
- 张洪瑞,侯增谦,杨志明,等. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. *矿床地质*, 2020, 39(3): 501-510.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(3): 501-510.
- 张照伟,李文渊,张江伟,等. 新疆天山石炭—二叠纪大规模岩浆成矿事件与形成机制探讨[J]. *西北地质*, 2014, 47(1): 36-51.

- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, et al. Mineralization and Formation Mechanism of Carboniferous-Permian Large-scale Magmatic Ore Deposits in Tianshan Orogenic Belt and Adjacent Area, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(1): 36-51.
- 张照伟, 李文渊, 张江伟, 等. 新疆北部岩浆铜镍硫化物矿床地质分布特点与成矿背景探讨[J]. *西北地质*, 2015, 48(3): 335-354.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, et al. Geological Distribution Characteristics and Metallogenic Background of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in the North Part of Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(3): 335-354.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 青海省夏日哈木铜镍矿床岩石地球化学特征及其意义[J]. *西北地质*, 2016, 49(2): 45-58.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Petro-geochemical characteristics of the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in Qinghai province and its study for olivine [J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(2): 45-58.
- 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 东昆仑冰沟南铜镍矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(4): 724-735.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Zircon SHRIMP U Pb Age of the Binggounan Magmatic Ni-Cu Deposit in East Kunlun Mountains and Its Tectonic Implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(4): 724-735.
- 张照伟, 王驰源, 钱兵, 等. 东昆仑志留纪辉长岩地球化学特征及与铜镍成矿关系探讨[J]. *岩石学报*, 2018, 34(8): 2262-2274.
- ZHANG Zhaowei, WANG Chiyuan, QIAN Bing, et al. The geochemistry characteristics of Silurian gabbro in eastern Kunlun orogenic belt and its mineralization relationship with magmatic Ni-Cu sulfide deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(8): 2262-2274.
- 张照伟, 王驰源, 刘超, 等. 东昆仑夏日哈木矿区岩体含矿性特点与形成机理探讨[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 35-45.
- ZHANG Zhaowei, WANG Chiyuan, LIU Chao, et al. Mineralization Characteristics and Formation Mechanism of the Intrusions in Xiarihamu Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Kunlun Orogenic Belt, Northwest China [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 35-45.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 东昆仑夏日哈木镍成矿赋矿机理认识与找矿方向指示[J]. *西北地质*, 2020, 53(3): 35-45.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Understanding of metallogenic ore-forming mechanism and its indication of prospecting direction in Xiarihamu magmatic Ni-Co sulfide deposit, eastern Kunlun orogenic belt, Northwestern China [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3): 35-45.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 中国西北地区岩浆铜镍矿床地质特点与找矿潜力[J]. *西北地质*, 2021a, 54(1): 82-99.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Geological Characteristics and Prospecting Potential of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in Northwest China [J]. *Northwestern Geology*, 2021a, 54(1): 82-99.
- 张照伟, 王亚磊, 邵继, 等. 东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床成矿特征[J]. *矿床地质*, 2021b, 40(6): 1230-1247.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, SHAO Ji, et al. Metallogenic characteristics of Xiarihamu super-large magmatic Ni-Co sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt [J]. *Mineral Deposits*, 2021b, 40(6): 1230-1247.
- 中国地质调查局. 改革开放 40 年的地质工作 [R]. 2018. 12. 19.
- 中国地质调查局西安地质调查中心. 行走与坚守: 中国地质调查局西安地质调查中心史 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 2018.
- 赵东宏, 杨忠堂, 李宗会, 等. 秦岭成矿带成矿地质背景及优势矿产成矿规律 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-408.
- 朱伯鹏, 张汉清, 秦纪华, 等. 新疆准噶尔东北缘蕴都卡拉金铜钴矿床地质特征及前景分析 [J]. *地质论评*, 2020, 66(1): 157-168.
- ZHU Bopeng, ZHANG Hanqing, QIN Jihua, et al. Geological characteristics and prospect analysis of the Yundukala Au-Cu-Co deposit in the northeastern margin of Junggar, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 2020, 66(1): 157-168.
- Chen Y J, Wang P, Li N, Yang Y F, et al. The collision-type porphyry Mo deposits in Dabie Shan, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 81: 405-430.
- Franco P J, Mao J W, Zhang Z C, et al. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 165-183.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, et al. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China [J]. *Lithos*, 2015, 216-217: 224-240.

- Li N, Pirajno F. Early Mesozoic Mo mineralization in the Qinling Orogen: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 81: 431-450.
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1): 179-210.
- Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, et al. The Dynamic Sulfide Saturation Process and a Possible Slab Break-off Model for the Giant Xiarihamu Magmatic Nickel Ore Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(6): 1383-1417.
- Marschall H, Schumacher J. Arc magmas sourced from mélange diapirs in subduction zones[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 862-867.
- Matthew J Manor, James S Scoates, Graham T Nixon, et al. The Giant Mascot Ni - Cu - PGE Deposit, British Columbia: Mineralized Conduits in a Convergent Margin Tectonic Setting[J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 57-87.
- Matthew Steele-MacInnis, Craig E Manning. *Hydrothermal Fluids*[M]. Washington: Elements Publishing, 2020.
- Marsh E E, Anderson E D, Gray F. Nickel-Cobalt Laterites—A Deposit Model[R]. US Scientific Investigations Report 2010-5070-H, US Geological Survey, 2013.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, et al. The giant Xiarihamu Ni - Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet plateau, China[J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 29-55.
- Wang C Y, Wei B, Zhou M F, et al. A synthesis of magmatic Ni - Cu -(PGE) sulfide deposits in the ~260 Ma Emeishan large igneous province, SW China and northern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 162-186.
- Wang C Y, Zhang Z W, Zhang C J, et al. Constraints on sulfide saturation by crustal contamination in the Shitoukengde Cu - Ni deposit, East Kunlun orogenic belt, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Geosciences Journal*, 2021, 25(3): 401-415.
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31: 357-378.
- Yang S F, Li Z L, Chen H L, et al. Permian large volume basalts in Tarim basin[R]. 2006. <http://www.largeigneousprovinces.org/06june.html>.
- Zeng Q D, Liu J M, Qin K Z, et al. Types, characteristics, and time-space distribution of molybdenum deposits in China[J]. *International Geology Review*, 2013, 55: 1311-1358.
- Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: zircon U - Pb age and Sr - Nd - Os - Si isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions [J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49(2): 279-292.
- Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, et al. Sr - Nd - Os isotopes and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, China [J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52: 51-68.
- Zhang Z W, Wang Y L, Qian B, et al. Metallogeny and tectonomagmatic setting of Ni - Cu magmatic sulfide mineralization, number I Shitoukengde mafic-ultramafic complex, East Kunlun Orogenic Belt, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 96: 236-246.
- Zhang Z W, Wang Y L, Wang C Y, et al. Mafic-ultramafic magma activity and copper-nickel sulfide metallogeny during Paleozoic in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 2019, 2(4): 467-477.
- Zheng F, Dai L Q, Zhao Z F, et al. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Geochemical evidence from the early Paleozoic Fushui mafic rocks in the Qinling orogen, Central China[J]. *Lithos*, 2020, (352-353): 105318.
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni - Cu -(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt [J]. *Chemical Geology*, 2004, 209(3/4): 233-257.
- Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, et al. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province [J]. *Lithos*, 2009, 113(3): 583-594.