

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.426>



战略性关键矿产勘查现状与对策：以青海省为例

苏慧敏^{1,2}, 车玉滢¹, 尹燕梁¹, 董加祥¹, 章伟², 蒋少涌^{1,2,3}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 紧缺战略矿产资源协同创新中心, 湖北武汉 430074
3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 关键矿产是指当前和未来相当长时间内现代社会可持续发展所必需、但在稳定供给方面存在高风险的战略性资源, 主要包括稀土、稀有、稀散金属等“三稀矿产”, 铬、锰、钛、钴、镍、钒等其他战略性金属矿产, 以及晶质石墨、萤石、滑石、硼等战略性非金属矿产。青海省的关键矿产种类丰富, 矿床成因类型多样, 资源潜力大。未来要聚焦关键金属元素超常富集基础地质理论研究和找矿勘查实践, 加强青海省关键矿产成矿条件、成矿规律、关键金属元素的地球化学行为和元素超常富集机制等方面的研究, 查明关键金属元素赋存状态, 提高关键矿产资源利用率, 减少环境污染, 提升矿产资源勘查开发利用水平。立足国际国内关键矿产资源形势, 以青海省为例提出了全面提升对战略性矿产的管理、勘查、开发和综合利用水平及保障矿产资源安全的思考和建议。

关键词: 战略性关键矿产; 勘查现状; 科学问题; 青海省; 矿床学。

中图分类号: P617

文章编号: 1000-2383(2023)04-1543-08

收稿日期: 2022-07-08

Present Situation and Research Direction of Strategic Critical Mineral Exploration: Taking Qinghai Province as an Example

Su Huimin^{1,2}, Che Yuying¹, Yin Yanliang¹, Dong Jiaxiang¹, Zhang Wei², Jiang Shaoyong^{1,2,3}

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Collaborative Innovation Center for Strategic Mineral Exploration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Critical mineral resources refer to strategic mineral resources that are necessary for the sustainable development of modern society at present and near future but have high risks in terms of stable supply, mainly including the so-called “three rare metals” (rare earth elements, rare metals, rare dispersed metals), and other strategic metals, such as chromium, manganese, titanium, cobalt, nickel, and vanadium, as well as strategic non-metallic minerals, such as crystalline graphite, fluorite, talc, and boron. Qinghai Province is rich in critical metal deposits with a variety of ore deposit types and potential large resource reserves. In future study, it should focus on the fundamental geological theory of super-enrichment of the critical metals and efficient and modern technology for mineral exploration, including the following major tasks: to unravel the ore-forming controlling factors, ore formation regulations, the behavior of critical metals and their enrichment mechanisms; to investigate the occurrence state of rare

基金项目: 自然资源部稀土稀有稀散矿产重点实验室开放基金(No. KLRM-KF202001); 科技部国家重点研发计划项目(No. 2022YFC2903504).

作者简介: 苏慧敏(1984-), 女, 副教授, 主要研究方向为岩浆-热液演化与稀有稀土金属富集。ORCID: 0000-0002-6195-6730. E-mail: suhm@cug.edu.cn

引用格式: 苏慧敏, 车玉滢, 尹燕梁, 董加祥, 章伟, 蒋少涌, 2023. 战略性关键矿产勘查现状与对策: 以青海省为例. 地球科学, 48(4): 1543-1550.

Citation: Su Huimin, Che Yuying, Yin Yanliang, Dong Jiaxiang, Zhang Wei, Jiang Shaoyong, 2023. Present Situation and Research Direction of Strategic Critical Mineral Exploration: Taking Qinghai Province as an Example. *Earth Science*, 48(4): 1543-1550.

metal elements, improve the utilization rate and reduce environmental pollution, and improve the level of exploration. Based on the situation of critical mineral resources in China and abroad, in this paper it puts forward some thoughts and suggestions on comprehensively improving the management, exploration, development and utilization level of critical mineral resources in Qinghai Province to secure the safety of mineral resources.

Key words: strategic critical minerals; exploration status; scientific problem; Qinghai Province; mineralogy.

0 引言

关键矿产(Critical Minerals)是国际上近年来提出的、对战略性新兴产业的发展至关重要的一类金属元素及其矿床的总称.关键矿产具有其他元素无法替代的重要经济性,同时又存在较高的供应风险(Mathieux *et al.*, 2017; Schulz *et al.*, 2017; Gulley *et al.*, 2018; 蒋少涌等, 2019; 翟明国等, 2019).当今世界处于百年未有之大变局中,特别是自 2020 年新冠肺炎爆发以及 2022 年初俄乌冲突以来,世界各国对战略性关键金属矿产和能源矿产的重视程度大大提高(胡新露等, 2021),部分关键矿产的需求也急剧增加.当前高技术产业和战略性新兴产业的迅猛发展,将加快新旧动能转换,带动新兴矿产原材料的消费,为矿业的再一次振兴释放出新的潜力.目前,中国约 2/3 的战略性矿产需要进口,其中除能源(石油、天然气)和大宗金属矿产(如铁、铜、铝)外,也包括关键金属矿产(如镍、铬、钴、铌、钽、锂、锰、铂族金属、铍等).战略性关键矿产中锂、钽、铍等的对外依存度超过 40%,而锰、铌、铬、钴、镍等的对外依存度更超过 80%(翟明国和胡波, 2021).未来,面对资源家底薄弱、全球市场控制力不足、全球政治格局新变化等挑战,加上新冠肺炎疫情和俄乌冲突等全球和区域事件暴露出的供应链安全和运输安全等问题,我国矿产资源形势将更为严峻.战略性关键矿产资源现状体现为:基础研究薄弱、资源家底不清、战略统筹不足,一些优势矿产传统优势不断减弱,话语权缺失,紧缺战略性矿产品长期依赖进口,随着新一代信息技术、高端装备制造等新兴产业的快速发展,我国战略性矿产(特别是一些用量较小的关键金属,如稀土、钴、锂等)需求还将快速增长.2016 年《全国矿产资源规划(2016—2020 年)》首次将 24 种矿产列入战略性矿产目录,包括能源矿产石油、天然气、页岩气、煤炭、煤层气、铀;金属矿产铁、铬、铜、铝、金、镍、钨、锡、钼、锑、钴、锂、稀土、锆;非金属矿产磷、钾盐、晶质石墨、萤石.随着“中国制造 2025”和“中国制造 2050”战略实施,产

业结构的进一步调整及战略性新兴产业的迅猛发展,制造业对于稀土、钴、锂、钒、钛等战略性矿产原材料的需求将大幅增加,未来战略性矿产的市场不容小视.为了实现中国战略性矿产资源的准确勘查和高效利用,必须紧紧围绕我国战略性关键矿产“稀、细、伴”和“难示踪、难辨识、难分离”的主要特征,加强关键金属矿床成矿理论、勘查技术和绿色开发利用(罗洪明等, 2021).青海省作为我国战略性关键金属的成矿大省,大有作为.

1 全球关键矿产目录

战略性关键矿产已成为当前国际学术界研究的热点,也是各国找矿勘查和资源储备的重要目标.特别是美国和欧盟,从其自身的资源特点、产业结构、供给链脆弱性及发展战略等方面考量,纷纷颁布了各自的关键矿产目录(表 1).这些目录虽各有差异,但无一例外均包括了大家所熟知的“稀土、稀有、稀散”三稀金属矿产及一些重要非金属矿产.美国内政部 2018 年 5 月确定 35 种矿产品为“关键矿产”,包括铝(铝土矿)、锑、砷、铍、铋、铀、钼、镓、锗、钨、铟、锂、镁、锰、铌、铂族金属、稀土元素族、铯、钶、钷、铽、钽、碲、锡、钛、钨、铀、钒和锆,以及非金属矿产如重晶石、萤石、石墨(天然)、钾盐和氦.一年后,美国政府又制定了“确保关键矿物安全可靠供应的联邦战略”六项行动计划,其重点包括加强研究和开发工作以寻找新的国内来源、减少国内矿产资源开发审批限制、精简许可和增加美国关键矿产劳动力、加强与盟国合作、促进关键矿物的生产等.2022 年 2 月美国地质调查局(USGS)公布了 50 种关键矿产清单,将稀土元素和铂族元素分成单独的条目,而不是将它们作为“矿产组”包括在内,增加了镍和锌,去除了氦、钾、铯和铷.2010 年 6 月欧盟发布了 14 种关键矿产原材料目录,包括稀土金属、铂族金属、钨、锑、镓、锗、铍、钴、镁、铌、钽、铟、萤石和石墨.每 3 年左右欧盟更新一次关键矿产清单,从最初的 14 种,2014 年增加到 20 种,2017 年增加到 26 种(不包括橡胶),2020 年扩大到 30 种.日本

来经历了长期而复杂的造山过程,其大地构造的基本特征是由一系列不同时代、不同造山机制的造山带、结合带及其被卷入和经过强烈改造的地块(基底残块)镶嵌而成的复杂造山系.根据地质特征,青海被划分为16个Ⅲ级成矿带(图1)(潘彤,2019).

截至2020年底,青海省发现的战略性关键矿产主要包括锂、铍、铌、钽、锆、铈、铷、钨、锡等稀有金属,镧、钇、铀等稀土金属,镓、锗、铟、碲、硒等稀散金属(俗称“三稀金属”),以及铬、锰、钛、钴、镍、钒等其他战略性金属和晶质石墨、萤石、硼、重晶石、滑石、菱镁矿等战略性非金属矿产.这些矿产主要分布在东昆仑、柴达木盆地北缘、柴达木盆地等成矿带(图1).

2.1 稀有金属矿产

青海省已发现盐湖锂、铈、铷矿产,规模较大,已开发利用;锂矿(氯化锂)累计查明盐湖锂资源量1 724万t,分布在柴达木盆地,代表性矿产地有察尔汗盐湖(锂资源量1 030.45万t)、东台吉乃尔盐湖(锂资源量293.98万t)、茫崖市一里坪盐湖(锂资源

量179.94万t)等超大型矿床,均已开采(潘彤等,2022).柴达木盆地新发现深层卤水型锂矿点2处(镁锂比低),有望实现锂资源找矿的新突破(佚名,2014).

青海省硬岩型锂和铍矿近两年有新发现,潜力较大.近年在天峻茶卡北山地区伟晶岩型锂铍矿找矿取得重大突破,新发现一定规模的含矿伟晶岩脉密集带,圈定矿化体130余条,初步估算锂矿资源量1.42万t,铍矿资源量7 500 t,达中型规模,并共伴生有钽、铷、铯等矿产,具有较大找矿前景(王秉璋等,2020;潘彤等,2022);青海省地质调查院在马尔康—雅江—喀喇昆仑巨型锂矿带的青海省巴颜喀拉地区,发现印支期稀有金属锂、铍和钨、锡成矿相关的花岗岩—伟晶岩带,找矿前景广阔.青海省铈矿(天青石)已有茫崖市大风山(超大型)、尖顶山(大型)等开采矿区(朱朝良,2009).钨、锡矿分布于海西、海南、海北等地区,但是规模均较小;近年在格尔木铜金山、二道沟地区发现钨矿,估算资源量分别为1.79万t和1.13万t,均达中型规模(王泰山

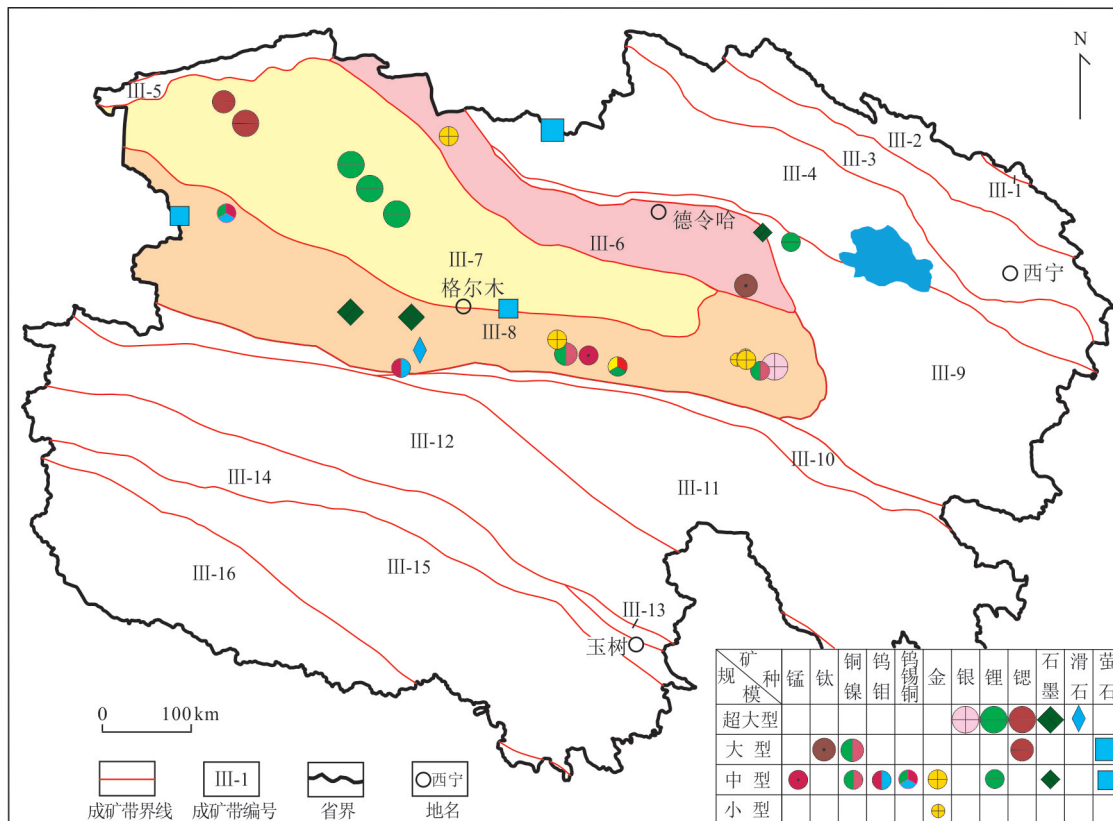


图1 青海省主要矿产分布图(修改自潘彤,2019)

Fig.1 Distribution of major mineral resources in Qinghai Province (modified after Pan, 2019)

III-1.河西走廊;III-2.北祁连;III-3.中祁连;III-4.南祁连;III-5.阿尔金;III-6.柴达木盆地北缘;III-7.柴达木盆地;III-8.东昆仑;III-9.西秦岭;III-10.阿尼玛卿;III-11.北巴颜喀拉—马尔康;III-12.南巴颜喀拉—雅江;III-13.哈秀—直门达;III-14.西金乌兰—巴塘;III-15.玛章错钦湖—囊谦;III-16.小唐古拉山

等,2016),在茫崖乌兰乌珠尔地区发现砂卡岩型锡矿,具有一定找矿前景。

2.2 稀土金属矿产

青海省稀土金属矿产以轻稀土(钷族)为主,分布在海东市平安区上庄磷矿中,经过详查和勘探,但尚未利用。柴北缘地区有较好的稀土元素化探异常显示,正在开展调查评价工作。在柴达木盆地的都兰金水口、格尔木大格勒西一大水沟新发现稀有稀土矿,为碱性岩—碳酸岩型Nb-REE矿床,该类型之前在东昆仑还未发现过,含矿岩石为碳酸岩、橄榄岩、辉石岩;矿石矿物以烧绿石、铈钽铁矿、磷灰石、独居石为主(李五福等,2022)。近年来,在哈图沟中部地区发现有轻稀土元素矿化,与正长花岗岩有关。

2.3 稀散金属矿产

主要有镓、铟、镉、锗、硒等,均以伴生组分形式分布于海西、海南各多金属矿床中,如大柴旦锡铁山、格尔木牛苦头、玛沁县德尔尼等(李善平等,2018)。此外,近两年在都兰、格尔木、德令哈—乌兰地区发现富硒土壤资源,圈定富硒土壤544 km²,其中富硒耕地106.6 km²,富硒林、草地437.5 km²(王瑜等,2018)。

2.4 铬、锰、钛、钴、镍、钒等其他战略性金属矿产

铬矿主要分布于北祁连及柴北缘地区,规模较小。锰矿主要分布于都兰三通沟地区,为沉积型锰矿,位于万宝沟群泥钙质粉砂岩中,矿石类型包括菱锰矿矿石及菱锰矿—褐锰矿矿石,初步估算锰资源量600万t,达到中型规模(赵静纯等,2020);都兰浪木日矿区南部亦新发现两条达到工业品位的锰矿带,为中—新元古代形成的海相沉积型锰矿床,该矿床沉积后遭受了较强的变质作用,碳酸锰矿物变质形成了蔷薇辉石类锰硅酸盐矿物(杨顺龙等,2022)。钛矿主要分布于柴北缘地区,发现有独立矿产地2处,累积查明金红石型TiO₂资源量94.4万t。大柴旦鱼卡地区金红石型钛矿初步估算TiO₂资源量73.8万t,共生石榴子石矿物资源量826万t,达大型规模,但属于难选冶矿石,成因上与超高压变质作用有关,产于超高压变质作用的榴辉岩中(林成贵,2017)。

镍、钴矿主要分布于东昆仑祁漫塔格、阿尼玛卿山、拉脊山及阿尔金山等地区,累计探获镍资源储量131.65万t,以夏日哈木镁铁质—超镁铁质岩型镍钴矿规模最大(镍118万t,超大型)(李世金等,2012;张照伟等,2021)。近年来,格尔木石头坑德镍钴矿区初步估算规模达到大型(镍13.92万t),赋矿

岩石为辉长岩、辉石岩和橄榄岩;金属矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿(段雪鹏等,2017;谢恩顺和董俊,2017)。钴矿有15处,累计查明资源储量8.1万t,代表性矿床为格尔木夏日哈木(钴约4万t,大型)(李世金等,2012;张照伟等,2021)。钒矿在格尔木大干沟地区由青海省地矿局新发现黑色页岩型钒矿,达中型规模。

2.5 晶质石墨、滑石、萤石、硼等战略性非金属矿产

青海省的晶质石墨主要分布于柴达木周缘地区,赋存在古元古代达肯大阪岩群和金水口岩群中,重要矿床包括茫崖行委大通沟南山(大型),格尔木市那西郭勒(大型)(徐新文等,2019)。近年来,格尔木妥拉海河地区晶质石墨矿完成普查,可提交晶质石墨推断资源量1500万t以上,累计资源量超过2000万t,达到超大型,含矿地层为金水口岩群下岩组,矿石类型主要为大理岩型晶质石墨矿(庞小朋,2020;康维海,2021)。格尔木铜金山新发现超大型规模滑石矿床,新增滑石资源量7000万t以上,累计达1亿t以上(康维海,2021)。萤石分布在西宁、海北、海南、海西地区,德令哈牙马萤石资源量100万t,达到大型规模;格尔木喀雅克登北萤石资源量80万t,格尔木大格勒沟南萤石资源量38万t,均达中型。2019年青海省有色第三地质勘查院在都兰县德里特地区圈定了一定规模的萤石矿8条,产于泥盆系二长花岗岩中NWW向与NW向断裂控制的蚀变带中,具有较好的找矿前景(王焕鑫等,2021)。硼矿主要分布于柴达木盆地的大、小柴旦湖、察尔汗、一里坪、东台吉乃尔、西台吉乃尔等地,其中大中型硼矿各1处,小型4处。已探明的硼矿储量(以B₂O₃计)为1174.1万t,其中固体硼462.1万t,地下卤水硼695.0万t,地表卤水硼17.0万t。

3 青海省战略性关键矿产勘查开发中值得重视的几个问题

(1)战略性关键矿产基础研究薄弱、资源家底需进一步摸清。这一问题已对青海省该类矿产资源的准确勘查、高效利用形成严重制约;找矿方法技术落后,关键金属矿物识别能力不高,综合评价不足;新的地学理论和勘查技术方法应用水平低,重大基础地质和矿产地质问题研究不足。青海省关键金属资源成矿条件好,但基础研究较为薄弱,形成机制和富集机理以及对关键金属矿产的“稀、细、伴”的主要特征研究不够,制约了关键金属矿床成

矿理论和找矿勘查的新突破。

(2)对关键矿产的成矿规律认识有待深入,对青海省重要成矿带不同演化阶段和不同构造背景下关键矿产的分布规律、关键金属矿床的成矿专属性、元素共生分异规律等核心问题,目前尚未形成清晰认识。关键金属矿产形成的构造背景和物质基础等因素控制的时空分布规律,以及元素地球化学性质和物理化学条件等因素影响的矿化特征研究仍不够深入。

(3)关键金属元素超常富集的耦合条件研究不够,是哪些因素的耦合才能促使关键金属元素迁移和超常富集而成矿,目前尚未形成清晰认识。元素的超常富集成矿受内因和外因的综合作用,外因包括大的构造背景(如板块俯冲、大陆聚合和裂解)、岩浆作用(如岩浆源区特征、岩浆结晶分异)和表生作用(如古气候、古环境)等过程;内因包括挥发分、温度、压力、氧逸度、酸碱度等物理和化学因素控制。就青海省各主要类型矿床中的关键金属元素而言,对其迁移—超常富集的条件研究目前还很零星,远未得到清晰揭示。

(4)关键金属矿产资源利用率低、资源浪费和环境污染等问题需要重视,科技进步与创新能力需要提高,包括青海省在内的中国目前开采的主要关键金属矿产资源多属于低品位、共伴生、难分离的复杂矿产,在关键金属元素的赋存状态、有用元素的提取和综合利用方面研究较为薄弱,目前大多数关键金属元素的提取和回收率都比较低,资源浪费等问题亟待攻关解决。

4 关于青海省战略性关键矿产勘查与开发的几点建议

(1)大力加强关键矿产的基础地质研究,保障国家战略性矿产资源安全及青海省(特别是柴达木循环经济试验区)盐湖化工、金属产业、油气化工、高原特色生物和新能源、新材料等产业发展的需求,需加强先进找矿勘查方法技术(如遥感等高新技术)的利用,提高关键金属矿物识别能力。加强对镍、钴、锰、钒、铬等战略性矿产,“三稀”矿产,石墨、萤石、滑石等非金属矿产的重大地质事件驱动成矿的机制、壳幔物质和能量循环与关键元素富集机理、深部过程及表生环境圈层作用与关键元素富集机理等方面的研究,实现理论指导找矿突破。

(2)加强对青海省重要成矿带地质背景的研究,建议重点开展东昆仑造山带和柴达木盆地周缘地区的研究,在前人已有研究基础上,需重点加强如

下几方面的研究:成矿区带不同地质演化阶段以及不同构造背景下关键矿产资源的控制因素和分布规律;关键金属元素矿床的成矿专属性以及元素共生分异规律,应特别关注青海省内关键金属矿床的新类型、新矿种、新赋矿层位,及时总结其成矿规律。通过省内同一成矿带、不同成矿带以及与国内外其他典型矿床的综合对比研究,总结构造背景和物质基础等因素控制下的关键矿产时空分布规律,揭示元素性质和物理化学条件等因素对关键矿产的元素组合、赋存状态、矿床类型、成矿专属性等矿化特征的制约。

(3)加强关键金属元素超常富集条件及成矿过程中活化—迁移—富集过程及机制研究,根据青海省特色矿产资源的产出及近年来重大找矿突破,建议大力加强与基性—超基性岩浆作用有关的钴镍矿床以及与花岗岩—伟晶岩有关的稀有金属矿床成矿过程与机理研究,查明地幔岩浆源区特征、研究岩浆—流体出溶过程和水—岩反应过程中元素的迁移活化与分配机制,查明关键金属元素共伴生特征及与载体矿物的生成关系、控制因素和超常富集机制,对关键金属元素成矿过程核心问题可开展相关的理论计算和模拟实验,力争建立青海最具特色的镍、钴矿产资源新基地、硬岩型锂铍等稀有金属资源新基地,做强做大盐湖锂钾资源基地。

(4)加强关键金属新材料高效清洁利用方面的研究,查明各类关键金属元素的赋存状态、提高关键金属矿产资源利用率,尤其加强清洁高效利用技术方面的研究,特别需要开展复杂共伴生金属原生及二次资源高效转化、清洁分离新原理、新过程和新技术的研究,积极开展金红石型钛矿、深层卤水型锂矿、盐湖型硼矿、晶质石墨等矿产可选性试验及开发利用研究,提升青海省战略性新兴矿产资源开发利用水平。

5 结论

为保障战略性关键矿产资源安全,应加强青海省关键金属矿产成矿机理、成矿规律、关键金属元素赋存状态的研究;加强对青海省特色的和典型的关键金属矿床中元素迁移、分离和共生及超常富集的过程与机理方面的研究;加强关键金属新材料高效清洁利用方面的研究,提高青海省关键金属矿产资源利用率、保护矿山环境,提升青海省矿产资源勘查开发利用水平,相关研究举措及成果也可为我国其他地区的战略性关键金属矿产资源研究与开发提供借鉴。

References

- Anonymity, 2014. The Newly Discovered Potash Reserves in Qaidam Basin are Expected to Reach 2.6 Billion Tons. *Chlor-Alkali Industry*, 50(11): 48(in Chinese).
- Bauer, D., Diamond, D., Li, J., et al., 2010. U.S. Department of Energy Critical Materials Strategy. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc834802/>: accessed July 4, 2022.
- Chen, C. X., Cui, R. G., Li, Z., et al., 2020. Research Progress, Definition, Classification, and Application Prospect of High-Tech Minerals. *Land and Resources Information*, (10): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Duan, X. P., Meng, F. C., Fan, Y. Z., 2017. Comparison of Mafic-Ultramafic Rocks from Shitoukengde and Xiarihamu, East Kunlun. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(Suppl.): 333–334(in Chinese).
- Gulley, A. L., Nassar, N. T., Xun, S. A., 2018. China, the United States, and Competition for Resources that Enable Emerging Technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16): 4111–4115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717152115>
- Hu, X.L., Yao, S.Z., He, M.C., et al., 2021. An Overview of Advances in Tellurium Mineralization in Telluride-Rich Gold Deposits. *Earth Science*, 46(11): 3807–3817 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.Y., Wen, H.J., Xu, C., et al., 2019. Earth Sphere Cycling and Enrichment Mechanism of Critical Metals: Major Scientific Issues for Future Research. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 112–118(in Chinese with English abstract).
- Kang, W.H., 2021. Providing Good Resource Guarantee for Accelerating Development—The “Thirteenth Five-Year Plan” Geological Exploration in Qinghai has Achieved Fruitful Results. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, (1): 14–19(in Chinese with English abstract).
- Li, S.J., Sun, F.Y., Gao, Y.W., et al., 2012. The Theoretical Guidance and the Practice of Small Intrusions Forming Large Deposits—The Enlightenment and Significance for Searching Breakthrough of Cu-Ni Sulfide Deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai. *Northwestern Geology*, 45(4): 185–191(in Chinese with English abstract).
- Li, S.P., Xue, W.W., Ren, H., et al., 2018. Present Situation and Metallogenic Regularity of “Three Rare” Mineral Resources in Qinghai Province. *Qinghai Science and Technology*, 25(6): 10–15(in Chinese with English abstract).
- Li, W. F., Wang, T., Wang, B. Z., et al., 2022. Discovery and Significance of Rare and REE Mineralized Alkaline Complex in Dagele Area of East Kunlun. *Geotectonica et Metallogenia* (in Press) (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. G., 2017. Geological and Geochemical Characteristics of Yuqia Rutile Ore and Ore-Controlling Factors Research, Qinghai Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Luo, H.M., Han, X.Q., Wang, Y.J., et al., 2021. Preliminary Study on the Enrichment Mechanism of Strategic Metals and Their Resource Prospects in Global Modern Seafloor Massive Sulfide Deposits. *Earth Science*, 46(9): 3123–3138(in Chinese with English abstract).
- Mathieux, F., Ardente, F., Bobba, S., et al., 2017. Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Pan, T., 2019. Discussion on the Minerogenetic Series of Deposits in Qinghai, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(3): 297–315(in Chinese).
- Pan, T., Li, S. P., Wang, T., et al., 2022. Metallogenic Characteristics and Prospecting Potential of Lithium Deposits in the Qinghai Province. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1827–1854(in Chinese with English abstract).
- Pang, X.P., 2020. Geological Characteristics and Genesis of Graphite Deposits in Tuolahaihe River Area, Qinghai Province. *China Non-Metallic Minerals Industry*, (2): 21–23(in Chinese with English abstract).
- Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Jr., et al., 2017. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. U.S. Geological Survey, USGS Professional Paper, 1802. <https://doi.org/10.3133/pp1802>
- USGS, 2022. Mineral Commodity Summaries 2022. USGS Publications Warehouse, Reston. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>
- Wang, B.Z., Han, J., Xie, X.L., et al., 2020. Discovery of the Indosinian (Beryl-Bearing) Spodumene Pegmatitic Dike Swarm in the Chakaibeishan Area in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau: Implications for Li-Be Mineralization. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 69–79(in Chinese with English abstract).
- Wang, H. X., Sun, F. Y., Zhang, T., et al., 2021. Discussion on Genesis of Delite Fluorite Deposit in Eastern Kunlun, Qinghai Province: Evidence from Fluid Inclusions and Stable Isotopes. *World Geology*, 40(4): 807–815(in Chinese with English abstract).
- Wang, T.S., Lu, H.F., Zhang, Y., et al., 2016. Geological Features of the Erdaogou Scheelite Deposit in the Geermu of Qinghai Province. *China Tungsten Industry*, 31(4): 14–20(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Luo, S.F., Wang, L.H., 2018. Open New Green Treasure—On-the-Spot Report of Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources’ Integration into the Economic and Social Development of Haixi Mongolian

- and Tibetan Autonomous Prefecture. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, (4): 41–44(in Chinese with English abstract).
- Xie, E. S., Dong, J., 2017. Petrography and Mineragraphy for the Shitoukengde Ni Deposit in the East Kunlun. *Acta Geologica Sichuan*, 37(2): 233–238(in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Duan, J. H., Lu, Y. Z., et al., 2019. Geological Characteristics and Availability Evaluation of Graphite Deposit in Qinghai Province. *Metal Mine*, (1): 125–140 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. L., Mao, S. L., Duan, H. C., et al., 2022. Geological Significance of Prospecting Manganese Deposits in the Southern Langmuri Area of the Dongkunlun Metallogenic Belt. *Mining Technology*, 22(3): 210–214 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Hu, B., 2021. Thinking to State Security, International Competition and National Strategy of Mineral Resources. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Wu, F. Y., Hu, R. Z., et al., 2019. Critical Metal Mineral Resources: Current Research Status and Scientific Issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106–111(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. W., Wang, Y. L., Shao, J., et al., 2021. Metallogenic Characteristics of Xiarihamu Super-Large Magmatic Ni-Co Sulfide Deposit in Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Mineral Deposits*, 40(6): 1230–1247(in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. C., Dai, W., Qu, G. J., et al., 2020. Geological Characteristics and Prospecting Potentiality of North Santonggou Manganese Deposit in Dulan County, Qinghai Province. *Mineral Exploration*, 11(7): 1372–1378 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C. L., 2009. Metallogenic Geologic Characteristics and Prospect of Celestite in the Chaidamu Basin, Qinghai Province. *China Non-Metallic Minerals Industry*, (4): 55–57(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈从喜, 崔荣国, 李政, 等, 2020. 高技术矿产的内涵、分类及应用前景. *国土资源情报*, (10): 5–11.
- 段雪鹏, 孟繁聪, 范亚洲, 2017. 东昆仑石头坑德和夏日哈木镁铁超镁铁岩对比. *矿物岩石地球化学通报*, 36(增刊): 333–334.
- 胡新露, 姚书振, 何谋恣, 等, 2021. 富砷化物金矿床中砷的成矿作用研究进展. *地球科学*, 46(11): 3807–3817.
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 等, 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向. *中国科学基金*, 33(2): 112–118.
- 康维海, 2021. 为加快发展提供好资源保障: 青海“十三五”地质勘查工作取得丰硕成果圆满收官. *青海国土经略*, (1): 14–19.
- 李善平, 薛万文, 任华, 等, 2018. 青海省“三稀”矿产资源现状及成矿规律. *青海科技*, 25(6): 10–15.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 等, 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践: 青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义. *西北地质*, 45(4): 185–191.
- 李五福, 王涛, 王秉璋, 等, 2022. 东昆仑大格勒地区稀有和稀土矿化碱性杂岩体的发现及意义. *大地构造与成矿学* (待刊).
- 林成贵, 2017. 青海省鱼卡金红石矿床地质地化特征及控矿因素研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 罗洪明, 韩喜球, 王叶剑, 等, 2021. 全球现代海底块状硫化物战略性金属富集机理及资源前景初探. *地球科学*, 46(9): 3123–3138.
- 潘彤, 2019. 青海矿床成矿系列探讨. *地球科学与环境学报*, 41(3): 297–315.
- 潘彤, 李善平, 王涛, 等, 2022. 青海锂矿成矿特征及找矿潜力. *地质学报*, 96(5): 1827–1854.
- 庞小朋, 2020. 青海妥拉海河一带石墨矿地质特征及成因浅析. *中国非金属矿工业导刊*, (2): 21–23.
- 王秉璋, 韩杰, 谢祥镭, 等, 2020. 青藏高原东北缘茶卡北山印支期(含绿柱石)锂辉石伟晶岩脉群的发现及 Li-Be 成矿意义. *大地构造与成矿学*, 44(1): 69–79.
- 王焕鑫, 孙丰月, 张涛, 等, 2021. 青海东昆仑德里特萤石矿成因探讨: 来自流体包裹体和稳定同位素的证据. *世界地质*, 40(4): 807–815.
- 王泰山, 鲁海峰, 张尧, 等, 2016. 青海省格尔木二道沟白钨矿床地质特征初析. *中国钨业*, 31(4): 14–20.
- 王瑜, 罗生福, 王丽华, 2018. 打开绿色新宝藏: 青海地矿局融入海西蒙古族藏族自治州经济社会发展纪实. *青海国土经略*, (4): 41–44.
- 谢恩顺, 董俊, 2017. 东昆仑石头坑德镍矿床岩石矿物特征. *四川地质学报*, 37(2): 233–238.
- 徐新文, 段建华, 路耀祖, 等, 2019. 青海省石墨矿地质特征及可利用性评价. *金属矿山*, (1): 125–140.
- 佚名, 2014. 柴达木盆地新发现钾盐资源储量预计将达 26 亿吨. *氯碱工业*, 50(11): 48.
- 杨顺龙, 毛生录, 段鸿昌, 等, 2022. 东昆仑成矿带浪木日南区锰矿找矿地质意义. *采矿技术*, 22(3): 210–214.
- 张照伟, 王亚磊, 邵继, 等, 2021. 东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床成矿特征. *矿床地质*, 40(6): 1230–1247.
- 翟明国, 胡波, 2021. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考. *地球科学与环境学报*, 43(1): 1–11.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. *中国科学基金*, 33(2): 106–111.
- 赵静纯, 代威, 屈光菊, 等, 2020. 青海都兰县三通沟北地区锰矿地质特征及找矿前景. *矿产勘查*, 11(7): 1372–1378.
- 朱朝良, 2009. 柴达木盆地天青石矿成矿地质特征及开发利用优势. *中国非金属矿工业导刊*, (4): 55–57.