

·“双清论坛”专题:战略性关键矿产资源·

战略性关键金属矿产资源:现状与问题

翟明国^{1*} 吴福元¹ 胡瑞忠² 蒋少涌³ 李文昌⁴
王汝成⁵ 王登红⁶ 齐涛⁷ 秦克章¹ 温汉捷^{2,8}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;
3. 中国地质大学(武汉), 紧缺战略矿产资源协同创新中心, 地质过程与矿产资源国家重点实验室和资源学院, 武汉 430074;
4. 中国地质调查局, 成都地质调查中心, 成都 610081;
5. 南京大学, 内生金属成矿机制国家重点实验室和地球科学与工程学院, 南京 210023;
6. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
7. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100080; 8. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 以稀有、稀散和稀土元素为主体的战略性关键金属矿产资源, 在新材料、新能源和信息技术等新兴产业具有不可替代的重大用途。近年来, 美欧等发达经济体先后制定了各自的关键矿产资源发展战略。未来几十年, 世界主要国家将会为这些资源的持续安全供给进行不懈努力。本文扼要总结了战略性关键金属矿产资源的基本特征为“稀”、“伴”和“细”; 提出关键金属矿床的五种主要类型, 即花岗岩-伟晶岩型、碱性岩-碳酸岩型、镁铁质-超镁铁质岩型、热液贱金属硫化物型和风化-沉积型; 建议应重点关注的科学问题为关键金属元素多圈层循环与超常富集机理以及关键金属元素赋存状态与高效清洁利用。

[关键词] 关键矿产资源; 基本特征; 矿床类型; 科学问题; 基础研究

关键金属(Critical Metals)和关键矿产资源(Critical Minerals)是国际上近年提出的新概念^[1-3], 是指对新材料、新能源、信息技术、航空航天、国防军工等新兴产业具有不可替代重大用途的一类金属元素及其矿床的总称。

关键金属之所以在新兴产业具有广泛用途, 在于其独特的材料性能。据预测, 随着科技和新兴产业的发展, 未来几十年全球对关键金属的需求将迅猛增长, 供需矛盾日益突出。但是, 这些金属在自然界的储量相对较少且分布高度不均, 存在较高供应风险^[1]。因此, 关键金属或关键矿产是重要战略资源。

基于关键矿产资源对国家安全和新兴产业发展的重大意义, 欧美等发达经济体, 近年先后制定了各自的关键矿产发展战略。美国更是于 2017 年由特

朗普总统签发了《确保关键矿产安全和可靠供应的联邦战略》的第 13817 号行政令, 强调要查明关键矿产的新来源, 减少因关键矿产供应链中断带来的国家安全与经济发展隐患, 保障美国对关键矿产资源的稳定供给。因此, 对关键矿产资源的研究已上升到发达经济体的国家战略层面。

欧盟 2018 年发布的《关键原材料和循环经济》报告中所列的关键金属为 27 种(类)^[2]; 美国 2017 年发布的《美国的关键矿产资源—经济和环境地质及未来供应展望》报告中所列的关键金属为 43 种^[3]。虽各国列出的关键金属种类和数量有所不同, 但这些元素绝大部分都属于稀有金属(如 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W 等)、稀土金属(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Sc、Y)、稀散金属(Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、

收稿日期: 2019-1-20; 修回日期: 2019-2-22

* 通信作者, Email: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

Tl)和其他稀少稀贵金属(PEG、Cr、Co等),可简称为“四稀”元素。

这些关键矿产中,我国紧缺的主要有Li、Be、Nb、Ta、Zr、Hf、Re、PGE、Cr、Co等,优势的主要包括W、REE、In、Ge、Ga、Se、Tl、Te等。本文将由上述“四稀”元素形成的矿床定义为我国的战略性关键矿产。尽管我国对这些矿产已开展相关研究并取得重要进展,但即使是对我国的上述优势矿产,也仍存在基础研究薄弱、资源家底不清,战略统筹不足等严重问题。需要地质、矿产、冶金等多学科的交叉合作,加强对关键金属元素圈层循环与成矿机理和成矿规律、关键金属元素赋存状态和高效清洁利用等问题的基础研究,为摸清我国关键矿产资源家底、提高关键矿产资源的战略统筹能力提供重要科学依据。

2018年12月8—9日,由国家自然科学基金委员会地球科学部、化学科学部、工程与材料科学部与政策局共同主办的第217期“双清论坛”“战略性关键矿产资源”在四川成都召开。来自国内相关领域20多所高校与科研院所的70余位专家学者参会。论坛期间,与会专家围绕“战略性关键矿产资源”主题,讨论了战略性关键矿产资源国内外研究现状,分析和初步凝练了战略性关键矿产资源领域的重大科学问题和资助部署建议,供基金委在制定战略规划或资助建议时参考。

1 关键金属矿产的主要特征

关键金属矿产以“稀”、“伴”、“细”为主要特征。这些特征决定了认识关键金属矿床成矿机理、提高关键金属元素高效清洁利用水平,在客观上具有较大难度。

1.1 “稀”:关键金属元素地壳丰度极低

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ppm级以下),成矿需要元素数百—上万倍的超常富集,成矿条件苛刻^[4]。在什么条件下元素才能超常富集形成关键金属矿床,显然是正确认识关键金属成矿机制的首要问题。

关键金属矿床在全球分布极度不均。例如,全球已探明铍资源量超过8万吨,65%分布在美国;全球已探明铌资源量超过430万吨,95%分布在巴西;全球已探明钽资源主要分布在澳大利亚(62%)和巴西(36%);中国探明了全球铟、锗、镓、碲等稀散金属、钨等稀有金属和稀土金属的大部分资源量。因

此,要摸清资源家底,查明关键金属矿产的分布规律十分重要。

1.2 “伴”:关键金属独立成矿少、多以元素伴生成矿

许多关键金属矿产多为共、伴生矿产,元素组合复杂^[4,5]。目前这些矿产在我国还存在找矿效率不高,以及资源回收率低和环境污染严重等问题。厘定元素的共、伴生规律,开发多组分共伴生矿产综合回收技术,是有效预测关键矿产资源靶区和提高其清洁高效利用水平的重要环节。

1.3 “细”:关键金属元素的载体通常非常细小

除少数矿床外,大部分关键金属元素在矿床中的赋存均以“细”为特征^[4]。通常呈吸附(如离子吸附型稀土矿床)、类质同象和固溶体(如闪锌矿中的镉、方铅矿中的铟、云母中的铷和铯等)、极细小矿物(如许多铌钽铁矿物、稀土矿物等)形式存在,具有与人为善(被吸附)、精诚合作(类质同象)、挺身而出(固溶体)、居功不傲(小矿物)等典型特征,需要慧眼识英雄。因此,利用先进观测技术,正确厘定其微观尺度尤其是基于原子、分子尺度的赋存状态,是提高关键金属元素高效清洁利用水平的重要基础。

2 关键金属矿床主要类型

关键金属矿床类型复杂,不同学者有多种不同划分方案。本文认为以下五种类型在我国最为重要。

2.1 花岗岩-伟晶岩相关矿床

花岗岩型和伟晶岩型矿床在稀有金属矿床中占有十分重要的地位,是锂、铍、铷、铯、铌、钽、锆、钨和钨等金属的主要成矿类型^[5,6]。

花岗岩型稀有金属矿床包括高分异花岗岩型和碱性花岗岩型。前者在我国主要产于喜马拉雅、昆仑山、兴蒙地区和华南,典型实例如江西宜春414超大型铌钽铍矿床;后者的典型实例如内蒙古巴尔哲超大型铌钽铍稀土矿床。近年来,我国在藏南新发现与高分异花岗岩有关的错那洞铍多金属成矿带,显示巨大资源潜力^[7]。我国的钨矿床主要与花岗岩浆热液成矿有关^[8,9],已探明的超大型矿床7处。华南许多与花岗岩有关的钨锡矿床均共伴生产出铌、钽、锂、铍等稀有金属矿床^[10]。

伟晶岩型稀有金属矿床可分为LCT型和NYF型。LCT型以准铝至过铝质S型花岗质成分为主,

主要产于造山晚期及造山后,元素组合特征为 Li、Rb、Cs、Be、Sn、Ta>Nb,并富含 B、P、F。NYF 型以亚铝至准铝质 A 型花岗质成分为主,主要产于非造山期,元素组合特征为 Nb>Ta、Ti、Y、REE、Zr、U、Th,并富含 F,相对亏损 B、P。

我国最著名的伟晶岩型稀有金属矿床为新疆可可托海三号伟晶岩脉^[11]。此外还有福建南平伟晶岩。近年来,我国在伟晶岩型稀有金属找矿方面取得重大突破,相继发现了四川甲基卡-可尔因超大型锂矿带、湖南仁里超大型铌、钽矿,新疆和田大红柳滩超大型锂、铍、铌、钽矿等。

2.2 碱性岩-碳酸岩相关矿床

从全球角度看,很多超大型稀土矿与碱性岩和碳酸岩相关^[12,13]。集中分布在中国、美国、巴西和澳大利亚等少数国家。我国白云鄂博是世界上最大的稀土矿床(3 500 万吨 REO),以产出轻稀土为特色,并与铌和铁共生。川西的冕宁德昌地区和南秦岭的竹山地区产有我国第二和第三的碳酸岩型稀土矿床。它们均以轻稀土为主。

重稀土矿床也产于个别碳酸岩中,如纳米比亚 Lofdal 碳酸岩型稀土矿床。我国陕西小秦岭碳酸岩,呈脉状延长几十公里,全岩具有异常高的重稀土,新疆巴楚碳酸岩也富含重稀土矿物,磷钇矿与独居石共生。它们应是我国潜在的重稀土矿床。

2.3 镁铁质-超镁铁质岩相关矿床

与镁铁-超镁铁质岩相关的关键金属元素矿床主要有岩浆铜镍硫化物型铂族元素矿床^[14]、钴矿床^[15]和层状岩体及蛇绿岩中的铬铁矿矿床等^[16]。

全球 90% 以上的铂族元素(PGE)矿产资源主要赋存在 Bushveld 以及 Great Dyke 和 Noril'sk 等几个超大型岩浆铜镍硫化物矿床中。全球重要 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床绝大多数形成在板内拉张环境,与地幔柱和裂谷岩浆作用有关,但 PGE 为主的矿床相对较少。近年来在汇聚板块边缘不断发现这些硫化物矿床,但矿石中的 PGE 含量较低。

与镁铁质-超镁铁质岩有关的岩浆铜镍硫化物矿床也是世界钴矿资源的重要来源。钴多以伴生金属产出,很少形成独立的或以钴为主的工业矿床。我国岩浆铜镍硫化物型矿床中钴资源仅占全球资源的 1.1%。

铬铁矿是唯一具经济价值的铬的矿石矿物,赋存于大型层状镁铁-超镁铁质岩体中,矿石呈层状产出,可延伸上百公里,也可赋存在蛇绿岩的地幔橄

榄岩部分,矿石呈透镜状、脉状、瘤状、层状产出。典型实例为南非布什维尔德铬铁矿矿床。我国铬铁矿主要分布在西藏罗布莎和新疆萨尔托海、内蒙古锡林郭勒盟赫格敖拉和甘肃的大道尔基。

2.4 热液贱金属硫化物矿床

稀散金属元素如锗、铟、硒、镉、碲、铊等在自然界中很难形成独立矿床,它们多产于热液贱金属硫化物矿床中^[4]。其中,铜矿中主要伴生硒、碲,锡石硫化物矿中主要伴生铟(如广西大厂和云南都龙大型-超大型锡多金属矿床),铅锌矿中主要伴生锗、铟、镉(如云南会泽和毛坪超大型铅锌矿床)。此外,值得一提的是四川大水沟碲矿床是世界首例独立碲矿床。而贵州滥木厂和安徽香泉铊矿床是全球少见的独立铊矿床,铊主要赋存在红砷铊汞矿和黄铁矿中。

2.5 风化-沉积作用相关矿床

与风化-沉积作用相关的关键金属元素矿床主要有盐湖型(卤水型)锂矿^[17]、花岗岩风化淋积离子吸附型稀土矿^[18]、远洋软泥中的吸附型稀土矿^[19]、大洋锰结核和锰结壳中钴和稀土元素等^[20]。

盐湖型(卤水型)锂矿是锂资源的一种重要类型。主要分布在玻利维亚、智利和阿根廷。其成因机制主要是在封闭盆地,特别是干旱沙漠地区的封闭盆地中,锂在卤水中发生富集并形成有开采价值的锂矿床。中国卤水型锂矿主要分布在青藏高原。

我国华南的花岗岩风化淋积离子吸附型稀土矿是目前全球最重要的重稀土产地(~1 000 万吨 REO)。稀土元素以离子的形式吸附在风化壳中的高岭石、埃洛石以及其他粘土矿物或者白云母、黑云母以及磁铁矿中。从现有资料推断,东南亚可能存在大量离子吸附型稀土矿。

近年来,日本和我国科学家相继在太平洋和印度洋水深 3 500—6 000 米的远洋软泥中发现大量吸附型稀土。据估计,海底稀土资源量是陆地的 800 倍,品位高达 400—2 200 ppm,低于陆地稀土矿的品位,但是容易提取且重稀土含量高,可能是未来的稀土资源。

大洋锰结核和锰结壳中含有 70 多种元素,其中钴的平均含量为 0.22%,仅太平洋海底就含约 30 亿吨钴资源量,相当于陆地矿山中储有钴的 3 000 倍。锰结核和锰结壳中稀土元素含量也较高,如太平洋麦哲伦海山富钴结壳中的 Σ REE 为 1 093—3 286 ppm,平均为 2 087 ppm。

3 关键矿产资源研究的主要科学问题

3.1 关键金属元素多圈层循环与超常富集机理

(1) 关键金属元素地球化学性质

以往关键金属矿产资源研究多集中于成矿机制,忽略了成矿元素本质地球化学性质这一基本问题。金属元素成矿的核心是元素在成矿过程中基于其性质的活化-迁移-富集过程,急需加强该方面的研究。

(2) 重大地质事件、层圈物质循环与成矿物质基础

“巧妇难为无米之炊”,物质基础是成矿的重要前提。例如,超富稀土的碳酸岩需富稀土的地幔源区,洋壳俯冲(富 REE 洋底沉积物加入)可能是形成富稀土地幔源区的重要机制^[21]。对与岩浆活动(花岗岩-伟晶岩、碱性岩-碳酸岩、镁铁-超镁铁岩)有关矿床而言,有三个关键因素对成矿物质基础起控制作用:一是源区物质成矿元素的含量,二是成矿元素从源区转入熔体的效率(含同化混染作用),三是受岩浆结晶分异控制的成矿元素行为。值得重视的主要科学问题包括: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、表生环境圈层作用与关键元素富集机理。

(3) 关键金属元素超常富集的苛刻条件

是什么因素促使关键金属元素迁移和超常富集的?元素的富集成矿,从宏观上与板块俯冲、大陆聚合和裂解、岩浆源区特征、岩浆结晶分异和表生作用等过程有关,微观上又受挥发份、温度、压力、氧逸度、酸碱度、古气候、古环境等物理的和化学的因素控制。但是,对一个具体的关键金属元素而言,其迁移-超常富集的苛刻条件目前远未得到清晰揭示。一个重要事实是,大多数关键金属元素常与主成矿元素相伴产出,具有共同迁移、沉淀的特征。例如,有研究表明关键金属元素 In 主要产于锡石硫化物矿床和富锡 Pb-Zn 矿床^[22],In 通常以类质同像形式进入闪锌矿晶格,且只有 Cd 含量为 0.4%左右的闪锌矿才富集 In(镉窗效应)^[23]。但是,为什么锡石硫化物矿床、富锡铅锌矿床才富镉?镉窗效应的本质是什么?哪些锡石硫化物矿床、富锡铅锌矿床才富镉?目前的认识非常模糊。值得重视的主要科学问题包括:岩浆一流体出溶过程和岩-水相互作用过程元素分配机制,关键金属元素与载体矿物的生成关系、控制因素和超常富集机制,关键金属元素成矿过程核心问题模拟实验。

(4) 关键金属矿床成矿规律

关键金属矿产资源在地球上的分布,具有高度不均一的特点。对地球不同演化阶段和不同构造背景下关键矿产资源分布规律、关键金属元素矿床的成矿专属性、元素共生分异规律等核心问题,目前尚未形成清晰认识。今后需要进一步开展两个方面的深入研究。一是由构造背景和物质基础等因素控制的时空分布规律,二是由元素性质和物理化学条件等因素控制的矿化特征(元素组合、矿物类型、赋存状态、矿床类型、定位空间、成矿专属性等)。

我国关键矿产资源潜力巨大,一些新类型关键金属矿床值得重视。砂岩型锂矿床、硬岩型重稀土矿床、碳酸盐粘土型 Li-Ga-REE 矿床、玄武岩风化壳型 Nb-Ga-REE 矿床、黑色岩系型 Re 矿床、磷块岩型稀土矿床等非传统矿床类型的资源前景,已初见端倪,可能是下一批关键金属矿产的重要来源。

3.2 关键金属元素赋存状态与高效清洁利用

(1) 关键金属元素赋存状态

关键金属元素的赋存状态是决定矿床可利用性的重要因素之一,同时也是高效清洁利用关键金属和制备关键金属高值材料的理论基础。关键金属元素矿物在矿床中大多呈分散状分布,关键金属赋存状态研究的主要问题包括:① 金属成键类型对于关键金属氧化物、硅酸盐或磷酸盐结晶的控制机制;② 关键金属在矿物/熔体间的分配行为对其在矿物中置换能力的影响;③ 关键金属元素配位多面体性质(四面体、八面体、或结构层间等)对矿物物理化学性质(密度、解理、表面反应性等)的影响,以及关键金属矿物次生变化对元素赋存状态的制约。

我国稀土资源丰富,离子吸附型稀土矿是我国最有特色和 control 力的资源,最新研究表明纳米重稀土矿物与铁锰氧化物的共沉淀机制是具挑战性的问题。深海软泥中存在富稀土沉积物,稀土的来源和赋存状态值得研究。白云鄂博矿床中稀土元素赋存形式仍未彻底弄清楚,制约了微米级稀土矿选矿。同样,我国西南地区前寒武纪磷块岩也非常富集稀土,但稀土元素的赋存形式限制了其有效利用。

(2) 关键金属元素高效清洁利用

我国目前开采的关键金属矿产资源多属于低品位、共伴生、难分离的复杂矿产资源。已有传统技术的资源利用率低、资源浪费和环境污染严重,清洁高

效利用技术的研发已成为关键金属工业的重大需求,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。主要包括:① 介质高效转化的强化和调控原理、多相复杂体系界面特性、相间传递及调控和产品构效关系与定向调控;② 金属元素选择性转化与分配规律、多组元物相结构调控机制;③ 多元多相分离提纯-材料合成一体化的新理论新方法、分离过程各元素微观行为精细调控。

要加强关键金属新材料基础研究,从源头发掘材料的新功能新用途。稀土新材料的研究开发与应用是国际上最关注也是竞争最激烈的领域之一。稀土元素在多个重要材料领域中的基本功能还没有得到充分开发利用。需要聚焦于稀土电子结构-物性的关联、4f 电子特性机理等关键问题的深度研究。

4 结 语

在当前深刻变革和复杂调整的国际政治经济形势下,西方国家十分关注战略性关键矿产资源,先后制定了各自的关键矿产资源发展战略,未来世界各国将会为这些矿产资源的持续安全供给进行不懈努力。比较而言,我国对关键矿产资源还存在基础研究薄弱、资源家底不清、战略统筹不足等严重问题。为此,建议我国尽快从国家层面制定相关发展战略和研究计划,通过地质、矿产、冶金等多学科的交叉合作,加强对关键金属元素多圈层循环与成矿机理和成矿规律、关键金属元素赋存状态和高效清洁利用等问题的基础研究,为摸清我国关键矿产资源家底、提高关键矿产资源战略统筹能力提供重要科学依据。

参 考 文 献

- [1] Gulley AL, Nassar NT, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies. *PNAS*, 2018, 115(16): 4111—4115.
- [2] European Union, Report on critical raw materials and the circular economy. 2018.
- [3] U. S. Department of the Interior and U. S. Geological Survey. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply. USGS Professional Paper 1802. , 2017.
- [4] 涂光炽,高振敏,胡瑞忠,等. 分散元素地球化学及成矿机制,北京:地质出版社. 2004.
- [5] London D. Rare-element Granitic Pegmatites. In: Verplanck PL, Hitzman MW, Eds. Rare Earth and Critical Elements in Major Deposit Types, *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, 2016, 18: 165—193.
- [6] Zhou MF, Gao JF, Zhao Z, Zhao WW. Introduction to the special issue of Mesozoic W-Sn deposits in South China. *Ore Geology Reviews*, 2018, 101: 432—436.
- [7] 吴福元,刘小驰,纪伟强,王佳敏,杨雷. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学:地球科学*, 2017, 47(7): 745—765.
- [8] Hu RZ, Zhou MF. Multiple Mesozoic mineralization events in South China—an introduction to the thematic issue. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 579—588.
- [9] Mao JW, Cheng YB, Chen MH, Pirajno F. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 2013, 48: 267—294.
- [10] Guo NX, Zhao Z, Gao JF, Chen W, Wang DH, Chen YC. Magmatic evolution and W-Sn-U-Nb-Ta mineralization of the Mesozoic Jiulongnao granitic complex, Nanling Range, South China. *Ore Geology Reviews*, 2018, 94: 414—434.
- [11] Wang RC, Che XD, Zhang WL, Zhang AC, Zhang H. Geochemical evolution and late re-equilibration of Na-Cs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China). *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21: 795—809.
- [12] Song WL, Xu C, Smith MP, Chakhmouradian AR, Brenna M, Kynicky J, Chen W, Yang YH, Deng M, Tang HY. Genesis of the world's largest rare earth element deposit, Bayan Obo, China: Protracted mineralization evolution over similar to 1 b. y. *Geology*, 2018, 46: 323—326.
- [13] Kynicky J, Smith MP, Xu C. Diversity of Rare Earth Deposits: The Key Example of China. *Elements*, 2012, 8: 361—367.
- [14] Naldrett AJ. Secular variation of magmatic sulfide deposits and their source magmas. *Economic Geology*, 2010, 105: 669—688.
- [15] Song XY, Yi JN, Chen LM, She YW, Liu CZ, Dang XY, Yang QA, Wu SK. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the east Kunlun orogenic belt, northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, 2016, 111: 29—55.
- [16] 陈艳虹,杨经绥. 豆荚状铬铁矿床研究回顾与展望. *地球科学*, 2018, 43(4): 991—1010.
- [17] Benson TR, Coble MA, Rytuba JJ, Mahood GA. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, 2017, 8: 270, DOI: 10.1038/s41467-017-00234-y.

- [18] Xu C, Kynicky J, Smith MP, et al. Origin of heavy rare earth mineralization in South China. *Nature Communications*, 2017, 8: 4598, DOI: 10.1038/ncomms14598.
- [19] Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, Takaya Y, Kitamura K, Ohta J, Toda R, Nakashima T, Iwamori H. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 535—539.
- [20] 韦振权, 何高文, 邓希光, 姚会强, 刘永刚, 杨永, 任江波. 大洋富钴结壳资源调查与研究进展. *中国地质*, 2017, 44(3): 460—472.
- [21] Hou ZQ, Liu Y, Tian SH, Yang ZM, Xie YL. Formation of carbonatite-related giant rare earth element deposits by the recycling of marine sediments. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10231.
- [22] Schwarz-Schampera U, Herzig PM. *Indium: Geology, Mineralogy, and Economics*. Berlin: Springer, 2002. 1—257.
- [23] Dill HG, Garrido MM, Melcher F, Gomez MC, Weber B, Luna LI. Sulfidic and non-sulfidic indium mineralization of the epithermal Au—Cu—Zn—Pb—Ag deposit in San Roque (Provincia Rio Negro, Se Argentina)—with special reference to the “indium window” in zinc sulfide. *Ore Geology Reviews*, 2013, 51: 103—128.

Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues

Zhai Ming-Guo¹ Wu Fu-Yuan¹ Hu Rui-Zhong² Jiang Shao-Yong³ Li Wenchang⁴
Wang Rucheng⁵ Wang Deng-Hong⁶ Qi Tao⁷ Qin Kezhang¹ Wen Han-Jie^{2,8}

- (1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;
2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081;
3. Collaborative Innovation Center for Exploration of Strategic Mineral Resources, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074;
4. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Chengdu 610081;
5. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023;
6. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
7. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;
8. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The strategic critical mineral resources, which are mainly rare metals, rare disperse elements and rare earth elements, have irreplaceable and significant uses in emerging industries such as new materials, new energy and information technology. In recent years, developed economies such as the United States and Europe have successively formulated their own critical mineral resources development strategies. In the coming decades, the world's major countries will make unremitting efforts for the continued and safe supply of these critical resources. This paper summarizes the basic characteristics of strategic critical mineral resources as “thin”, “companion” and “fine”. Five major ore deposit types are proposed, including the granite-pegmatite type, alkaline rock-carbonate type, mafic-ultramafic rock type, hydrothermal base metal sulfide type and weathering-sedimentary type. The key scientific issues that should be focused on include the multiple earth sphere cycling and super-enrichment mechanism of the critical metal elements, as well as the occurrence and clean utilization of the critical metal elements.

Key words critical mineral resources; basic features; ore genetic types; scientific issues; basic research