

关键金属的富集机制、矿产勘查和综合利用:前言^{*}

周涛发^{1,2} 范裕^{1,2}

ZHOU TaoFa^{1,2} and FAN Yu^{1,2}

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥工业大学矿床成因与勘查技术研究中心(ODEC),合肥 230009

2. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心,合肥 230009

1. School of Resources and Environmental Engineering, Ore deposit and exploration Centre (ODEC), Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China

2021-06-02 收稿, 2021-08-21 改回.

Zhou TF and Fan Y. 2021. Enrichment mechanism, exploration and efficient utilization of critical metal. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9):2599–2603, doi:10.18654/1000-0569/2021.09.01

关键金属(critical metals)和关键矿产资源(critical minerals)是国际上近年来提出的新概念,是指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,其成矿特点和成矿机制研究已成为国际矿床学研究的热点(翟明国等,2019;陈骏等,2019;毛景文等,2019;蒋少涌等,2019)。在此背景下,国家基金委员会地球科学部,于2019年立项了重大研究计划《战略性关键金属超常富集成矿动力学》,提出关键矿产资源研究地质方面主要科学问题包括:元素地球化学性质和赋存状态、重大地质事件和层圈物质循环与成矿物质基础、超常富集的苛刻条件和成矿规律。在重大研究计划的资助下,本专辑重点从关键金属元素地球化学性质入手,围绕上述主要科学问题,结合地质过程和区域地质及一些具体矿床实例的研究,探讨关键金属的成矿机制。本专辑共包括17篇文章,内容涵盖锑、钴、硒、铈、锆、铷、铀、钼、PGE等多种关键金属。

1 综述性论文

铷是重要的“关键金属”矿产资源,是未来各国资源争夺的焦点。吴昌志等(2021)在对花岗(伟晶)岩铷矿主要研究进展进行综述的基础上,简介中亚造山带东、西段典型天河石花岗岩及相关铷等稀有金属矿床的主要特征和时空分布,并对未来研究重点进行了展望。综合分析后提出中亚造山带是全球最重要的天河石花岗岩和相关稀有金属矿床成矿

域,其西段大量发育三叠纪天河石花岗岩,而东段大量发育晚侏罗世至早白垩世天河石花岗岩。两者形成时代和构造背景分别与古亚洲洋向古特提斯洋构造域,以及古亚洲洋向古太平洋构造域的巨大转折相对应,铷等稀有金属成矿潜力巨大。

低熔点亲铜元素(LMCE)As、Sb、Bi、Hg、Pb、Se、Te、Tl、Sn等,均具有亲铜性、低熔点、半金属的特性,在成矿过程中可以形成LMCE熔体,并对Au、Ag、PGE等贵金属的高效富集沉淀起到一种重要的桥梁作用。刘家军等(2021)对前人研究资料与LMCE热力学相图进行了分析,并结合浅成低温热液型、造山型、卡林-类卡林型、碱性-偏碱性侵入岩型金矿床的研究成果,探讨了LMCE熔体形成、类型及其对Au、Ag、PGE等贵金属富集成矿的机理,并总结了LMCE熔体参与成矿的矿物组合与结构特征标志。

花岗岩型铀矿床是我国最重要的铀矿床类型之一,且主要分布在华南地区。张龙等(2021)在简要介绍华南花岗岩型铀矿床主要地质特征的基础上,重点总结了华南花岗岩型铀矿床的产铀花岗岩、成矿时代、成矿流体和成矿物质来源等方面的研究进展。论文综合分析后,提出了花岗岩型铀矿床的研究应重点加强花岗岩中铀活化机制、铀成矿时代、以及下庄铀矿田侏罗纪(175~145 Ma)铀成矿作用等方面。

陈涛亮等(2021)通过对全球斑岩型Cu(Mo)、Mo(Cu)矿床中Mo品位、辉钼矿的微量元素组成和Re-Os年龄、成矿岩体的化学组成、Sr-Nd同位素等数据的汇总,深入探讨了影

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(41872081,91962218)和中央高校基本科研业务费专项(PA2019GDZC0093)联合资助。

第一作者简介:周涛发,男,1964年生,教授,博导,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: tfzhou@hfut.edu.cn

响该类矿床辉钼矿中 Re 含量变化的主要因素。结果显示, Re 含量与矿床中钼的平均品位呈负相关,地幔物质的加入可能是形成高 Re 辉钼矿的基础。本研究证实,辉钼矿 Re 含量与其成矿时代不具耦合关系,并且 Re 的含量与辉钼矿沉淀的位置、以及辉钼矿多型之间亦无明显相关性,而可能与成矿岩体的成分、岩浆分异程度、成矿流体的性质、热液蚀变及表生作用过程有关。

地质冶金学是一门交叉学科,将矿体的地质学、地球化学和矿物学特征与冶金性能联系起来,目标是描述和了解矿体的冶金性质的多样性,并建立三维地质冶金学模型,用于协助矿山开采计划和优化工艺设计流程等。刘兰海等(2021)介绍了近年来典型的热液金矿床包括斑岩型、浅成低温热液型、IOCG 型、卡林型和矽卡岩型的地质冶金学的研究进展,以及应用于地质冶金学上的新方法如 VNIR-SWIR 高光谱技术、地球化学数据机器学习。关键金属具有含量低、矿物细小的研究难点,与金的地质冶金学研究具有诸多相似之处,因此本文提出将金的赋存状态研究的流程和新技术方法应用于关键金属矿床,并设计了关键金属赋存状态的研究流程和规范化表达,进一步延伸了地质冶金学的内涵和外延。

2 研究性论文

辉钼矿是 Re 的主要富集矿物,但纳米尺度上,Re 在辉钼矿中的赋存状态研究仍十分薄弱。陈雪峰等(2021)以安徽省泾县新发现的湛岭斑岩型钼矿床中的辉钼矿为研究对象,通过电子探针(EPMA)和激光剥蚀电杆耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)、聚焦离子束(FIB)原位取样和透射电镜(TEM)分析发现,在微米和纳米尺度上,辉钼矿 Re 含量均具有较大不均一性。研究表明,湛岭斑岩型钼矿床中的 Re 除了类质同象替代 Mo 进入辉钼矿晶格外,还以 Re-S 的形式吸附在辉钼矿晶格表面,Re 的两种赋存状态是辉钼矿中 Re 含量不均一性的主要原因。

城门山铜金矿床是长江中下游成矿带中典型的斑岩-矽卡岩型矿床,也是该区目前已报道的最大的共伴生铋矿床,然而铋在该矿床的赋存状态、铋的沉淀机制等尚不清楚。国显正等(2021)在详细划分成矿阶段基础上,对该矿床不同类型矿石中矿物开展电子探针测试、LA-ICP-MS 微量元素分析以及面扫描研究工作。研究表明铋的成矿物质来源应为岩浆来源,铋的成矿作用与花岗闪长斑岩岩浆热液作用有关。自花岗闪长斑岩向碳酸盐岩地层围岩,从成矿早阶段到晚阶段,硫逸度和温度逐渐降低,铋逸度升高,这是城门山矿床铋矿物沉淀的主要机制。

锆(Ge)是我国的一种优势战略性关键矿产,闪锌矿中锆的替代方式和超常富集机制仍缺乏深入理解。罗开等(2021)以扬子地块西南缘的川滇黔铅锌矿集区中乌斯河大型铅锌锆矿床为研究对象,开展了矿床中锆的超常富集机制

研究。综合研究认为,该矿床闪锌矿中 Ge 很可能是直接替代 Zn。乌斯河矿床同一闪锌矿颗粒不同部位(如扇形分区和振荡环带)Ge 含量变化显著,暗示 Ge 的超常富集很可能受闪锌矿的沉淀速率和结晶过程控制,而 Sp1 与 Sp2 中 Ge 含量的明显差异,则很可能与成矿流体演化过程流体成分和成矿物理化学条件改变有关。因此,乌斯河大型锆铅锌矿床锆的超常富集是流体成分、物化条件、沉淀速率和结晶过程等多要素耦合作用特殊地球化学过程的结果,并受到矿物和矿床等不同尺度苛刻成矿条件的影响。

以碳酸盐岩为容矿岩石的后生热液铅锌矿床(Mississippi Valley-type, MVT 矿床)是世界一种重要的铅锌矿床类型,也是锆的重要工业来源之一。位于贵州省贵定县境内的竹林沟锆锌矿床,是近年来新发现的富锆锌矿床。杨智谋等(2021)对矿床的综合研究表明,竹林沟锆锌矿床的形成经历如下过程:在伸展背景下,深循环盆地卤水萃取下伏地层和基底岩石中的 Zn、Ge 和 REE 等元素,形成富金属流体,受构造作用驱动沿区域性断裂不断向上运移,在赋矿层位与富硫流体发生混合作用,导致闪锌矿等硫化物沉淀;在整个成矿过程,成矿环境经历了还原→氧化的转变,成矿元素发生了共生分异,在竹林沟形成富锆锌矿体,在牛角塘形成富镉锌矿体,而 pH 始终保持弱酸性,直至被围岩碳酸盐岩中和。

龙桥矽卡岩型铁矿床位于长江中下游成矿带,是成矿带内伴生钴含量最高的矽卡岩型铁矿床,开展铁矿床中钴的赋存状态和分布规律具有重要的理论意义和矿产综合利用价值。阎磊等(2021)对矿床中钴赋存状态和空间分布规律开展了相关研究。龙桥铁矿床中钴主要赋存在黄铁矿和磁铁矿中,其次为独立钴矿物(主要为辉砷钴矿)。黄铁矿总体上具有边缘富钴、核部贫钴的特征,黄铁矿边部的钴含量是核部的 100 ~ 1000 倍,Co 主要以类质同象形式替代 Fe 进入黄铁矿晶格。由于钴在黄铁矿中分布极不均匀,不同空间位置采集的黄铁矿样品中 Co 含量平均值和变化范围没有明显规律。通过类比,提出中国东部矽卡岩型铁矿床中钴矿物可能是普遍存在的,但以前受限于分析测试手段未能发现;如何在选矿过程中分离富集钴矿物和富钴黄铁矿,是矽卡岩型铁矿床硫精粉中钴回收利用的关键。

矿山产品矿精粉中关键金属的分布特征和可利用性是当前关键金属资源利用的核心问题之一。张一帆等(2021)对长江中下游成矿带内玢岩型铁矿床、矽卡岩型铁矿床、矽卡岩型铁铜矿床、矽卡岩型铜金矿床、斑岩型铜金矿床和角砾岩筒型铜金矿床等六类矿床的矿山产品(铜金粉,硫精粉,铁精粉和金精粉)进行了系统化学成分分析,在此基础上,本次工作利用综合矿物分析技术(TIMA)、扫描电镜(SEM)和激光剥蚀-等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)三种测试方法,系统开展了富钴硫精粉中钴的赋存状态研究。结果表明,龙桥硫精粉中钴矿物为辉砷钴矿、铁硫砷钴矿和硫铜钴矿,分别占硫精粉中总钴含量的 9.93%、0.64% 和 0.01%。黄铁矿晶格

中类质同象形式产出的钴占总量的 81.97%, 此外还有 7.46% 的钴赋存在其他矿物中。通过对比研究, 初步建立了矿精粉中关键金属元素赋存状态的研究方法流程, 为矿精粉中钴的回收利用提供了依据。

黄竹园银多金属矿床位于长江中下游成矿带庐枞矿集区东南缘, 是成矿带断凹区火山岩盆地内首次发现的浅成低温热液型银多金属矿床。刘杰添等(2021)基于矿床地质特征研究, 通过对矿床中采集样品进行手标本及室内镜下观察、短波红外分析测试(SWIR)、扫描电子显微镜(SEM-EDS)、电子探针分析(EPMA)和自动矿物综合分析(TIMA)等方法, 重点开展银和关键金属赋存状态及矿床成因类型研究。研究表明, 黄竹园矿床是高硫型浅成低温热液矿化叠加于斑岩型矿化之上的复合成矿的典型实例。通过与矿区北部钱铺酸性蚀变岩帽(<1km)之间对比研究, 提出黄竹园-钱铺酸性蚀变岩帽地区可能存在大型“斑岩-浅成低温热液成矿系统”, 为庐枞盆地下一步深部找矿提供了方向。

安徽桂林郑钨矿床位于江南钨矿带北部, 是目前区内唯一钨储量达到大型的钨矿床。张达玉等(2021)在对该矿床地质特征和已有成果总结基础上, 系统开展了矿床地质地球化学特征研究, 确定了矿床具镁质矽卡岩矿床特征, 是桂林郑花岗岩斑岩熔体与奥陶系白云质灰岩地层交代的产物。综合对比国内外相似矿床, 提出桂林郑钨矿床是首个以富钼钨矿为主要矿石矿物的钼-多金属矿床, 这一特殊钨矿床的发现深化了矽卡岩钨矿床的成因认识, 对江南钨矿带内区域成矿规律与找矿勘探工作的推进提供了依据。

磷灰石可以记录和保存岩浆和热液活动的信息。可可托海伟晶岩型稀有金属矿床磷灰石发育, 为研究该矿床伟晶岩成岩成矿过程提供了优良的条件。白应雄等(2021)选取可可托海伟晶岩型稀有金属矿床富矿伟晶岩脉(3号脉)和相对贫矿伟晶岩脉(1号、2b号和3a号脉)中的磷灰石作为研究对象, 进行磷灰石岩相学和地球化学研究。研究表明, 在伟晶岩形成过程中, 磷灰石并非保持稳定, 其分带结构和主微量成分变化记录了后期热液活动, 暗示后期热液活动对伟晶岩的成矿具有重要作用。

全球范围内出露的碳酸岩大多为钙质、镁质、铁质碳酸岩, 少量为钠质和硅质碳酸岩, 极少有富 Sr 碳酸岩的报道, 其岩石成因、资源意义及对碳酸岩岩浆演化的指示意义尚不清楚。曲云伟等(2021)在四川省牦牛坪稀土矿区南部包子山稀土矿床的露天采坑中发现了超级富 Sr 的碳酸岩。对这类特殊碳酸盐的综合地质地球化学研究表明, 早期基性矿物(如霓辉石、黑云母)及碳酸盐矿物(如方解石、白云石等)的结晶分离是造成晚期碳酸岩中稀土元素富集的重要原因。富 Sr 碳酸岩中石英斑晶的发现和其较低的 SiO₂ 含量表明碳酸岩岩浆演化晚期可能是硅饱和的, 且这种岩浆具有很低的 SiO₂ 溶解能力。以菱锆矿(体积分数>50%)为主要碳酸盐矿物的稀土碳酸岩可能代表了一种新的碳酸岩类型, 其明显不同于已知的钙质、镁质、铁质和钠质碳酸岩。

岩浆演化和热液蚀变过程中 PGE 的迁移富集机制和 PGM 的成因, 一直是研究 PGE 地球化学行为非常关注的问题。董宇等(2021)对金川铜镍硫化物矿床中 PGM 的研究发现, 其主要类型包括含 PGE 的硫砷化物(硫砷铌矿)和砷化物(砷铂矿)、Pd 的铋化物、碲化物和硒化物、以及少量其他铂族矿物。系统的矿物学, 地球化学研究表明, 岩浆期后酸性、高盐度、高氧逸度的富 Cl⁻ 流体对金川铜镍硫化物矿床中 Pd 的迁移和富集起到了关键控制作用。

西藏冈底斯带中段的岗班斑岩铜-钼矿床发育多期次侵入体, 而成矿作用主要与其中一期岩体(流纹英安斑岩)密切相关, 为探究其原因, 田丰等(2021)对岗班斑岩铜-钼矿床中发育的各期次侵入体进行了全岩主、微量元素分析, 并重点研究各期次侵入体内部新鲜斑晶(黑云母、斜长石)和副矿物(锆石、磷灰石)的化学成分和结构特征。结果表明矿区各期次侵入岩均属于高钾钙碱性系列, 具有相近的锆石饱和温度, 都来自较为氧化的岩浆。此外, 相比其他期次侵入岩, 主成矿期的流纹英安斑岩中的磷灰石具有较高的 SO₃、Cl 含量和较低的 F 含量, 黑云母含有较高的 Cl 含量和较低的 F 含量。同时, 斜长石发育反环带。这些数据表明在主成矿期岩浆就位之前, 存在富 S、Cl 的偏基性岩浆注入了深部岩浆房, 并发生岩浆混合作用, 这不仅导致了主成矿期斑岩体就位, 同时还诱发流体出溶进入浅部岩浆房, 并最终形成岗班斑岩铜-钼矿床。

致谢 本专辑的出版得到了期刊编辑部的大力支持, 俞良军常务副主编付出了大量工作。36 名审稿专家在百忙之中对稿件进行了认真的审阅, 并给予了建设性意见, 提高了论文的质量。在此一并致以衷心地感谢!

References

- Bai YX, Shen P, Cao C, Pan HD, Li CH, Luo YQ, Feng HX and Suo QY. 2021. Geochemical characteristics and significance of apatite from the Koktokay pegmatitic rare-metal deposit, Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2843 – 2860 (in Chinese with English abstract)
- Chen J. 2019. Enrichment and efficient utilization of critical metals. *Science & Technology Review*, 37(1): 1 – 10 (in Chinese)
- Chen TL, Ren Z, Li KX, Liu F, Duan FH and Leng CB. 2021. Distribution characteristics and influencing factors of rhenium concentrations in molybdenite from the porphyry Cu-systems: A review. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2677 – 2690 (in Chinese with English abstract)
- Chen XF, Fan Y and Zhou TF. 2021. The occurrence of rhenium in the Zhanling porphyry molybdenum deposit, Jing County, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2705 – 2722 (in Chinese with English abstract)
- Dong Y, Wei B and Wang CY. 2021. Major types and occurrences of platinum-group minerals in the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit: Insights for PGE enrichment during hydrothermal alteration. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2875 – 2888 (in Chinese with English abstract)
- Guo XZ, Zhou TF, Wang FY, Ye SZ and Feng DS. 2021. Study of occurrence states and precipitation mechanism of tellurium in

- Chengmenshan porphyry-skarn deposit from the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2723–2742 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Wen HJ, Xu C, Wang Y, Su HM and Sun WD. 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)
- Liu JJ, Wang DZ, Zhai DG, Xia Q, Zheng B, Gao S, Zhong RC, Zhao SJ. 2021. Super-enrichment mechanisms of precious metals by low-melting point copper-philic element (LMCE) melts. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2629–2656 (in Chinese with English abstract)
- Liu JT, Chen J, Fan Y, Liu J and Li XX. 2021. Study on geological characteristics and critical metal deportment of the Huangzhuyuan silver polymetallic deposit in Luzong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2805–2820 (in Chinese with English abstract)
- Liu LH, Chen J, Zhou TF, Zhang YF and Li MM. 2021. The new application of geometallurgy in deportment of gold and critical metals studies. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2691–2704 (in Chinese with English abstract)
- Luo K, Zhou JX, Xu C, He KJ, Wang YB and Sun GT. 2021. Characteristics and significance of abnormal Ge enrichment of the Wushe large-scale Ge-Pb-Zn deposit, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2761–2777 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Yuan SD, Xie GQ, Song SW, Zhou Q, Gao YB, Liu X, Fu XF, Cao J, Zeng ZL, Li TG and Fan XY. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century. *Mineral Deposits*, 38(5): 935–969 (in Chinese with English abstract)
- Qu YW, Xie YL, Yin SP, Yu C and Xia JM. 2021. The discovery of Sr-rich carbonatite and its significance in Baozishan REE deposit, Mianning, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2861–2874 (in Chinese with English abstract)
- Tian F, Leng CB, Zhang XC, Tian ZD and Zhang W. 2021. The key role of volatile-rich magma replenishment in the formation of porphyry Cu-Mo deposits; A case study of Gangjiang porphyry Cu-Mo deposit, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2889–2909 (in Chinese with English abstract)
- Wu CZ, Jia L, Lei RX, Chen BY, Feng ZJ, Feng ZG, Zhi J and Bai SH. 2021. Advances and general characteristics of the amazonite granite and related rubidium deposits in Central Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2604–2628 (in Chinese with English abstract)
- Yan L, Fan Y and Liu YN. 2021. Study on occurrence and spatial distribution of cobalt in Longqiao iron deposit in Luzong Basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2778–2790 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZM, Zhou JX, Luo K, Yang DZ, Yu J and Zhou FC. 2021. Mineralogy and mineral chemistry of carbonates and their geological significance for the Zhulingou Ge-Zn deposit in Guizhou Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2743–2760 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Wu FY, Hu RZ, Jiang SY, Li WC, Wang RC, Wang DH, Qi T, Qin KZ and Wen HJ. 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)
- Zhang DY, Meng X, Ren KD, Chen XF, Ye LX, Xiong ZY. 2021. Mineralogy, temporal and spatial distribution of Mo mineralization in Guilinzheng Mo-W deposit, Jiangnan W mineralization belt and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2821–2842 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L, Chen ZY and Wang FY Zhou TF. 2021. Major characteristics and research progresses in metallogenesis of granite-related uranium deposits in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2657–2676 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YF, Fan Y, Chen J, Liu LH and Li MM. 2021. Establishment of a research workflow for occurrence state of critical metal in ore concentrate powder; A case study of the cobalt-rich sulfur ore concentrate powder from the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2791–2804 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白应雄, 申萍, 曹冲, 潘鸿迪, 李昌昊, 罗耀清, 冯浩轩, 索青宇. 2021. 新疆阿尔泰可可托海伟晶岩型稀有金属矿床中磷灰石地球化学特征及意义. *岩石学报*, 37(9): 2843–2860
- 陈骏. 2019. 关键金属超常富集成矿和高效利用. *科技导报*, 37(1): 1–10
- 陈涛亮, 任志, 李凯旋, 刘飞, 段丰浩, 冷成彪. 2021. 斑岩铜-钼成矿体系中铕含量分布特征及其制约因素探讨. *岩石学报*, 37(9): 2677–2690
- 陈雪锋, 范裕, 周涛发. 2021. 安徽泾县湛岭斑岩型钼矿床中铕的赋存状态研究. *岩石学报*, 37(9): 2705–2722
- 董宇, 魏博, 王焰. 2021. 金川铜镍硫化物矿床中铂族矿物的主要类型和产出特征: 热液蚀变过程中铂族元素的富集机理. *岩石学报*, 37(9): 2875–2888
- 国显正, 周涛发, 汪方跃, 叶少贞, 冯道水. 2021. 长江中下游成矿带城门山斑岩-矽卡岩型铜金矿床碲元素赋存状态及沉淀机制初步研究. *岩石学报*, 37(9): 2723–2742
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 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
- 刘家军, 王大钊, 翟德高, 夏清, 郑波, 高燊, 钟日晨, 赵胜金. 2021. 低熔点亲铜元素 (LMCE) 熔体超常富集贵金属的机制. *岩石学报*, 37(9): 2629–2656
- 刘杰添, 陈静, 范裕, 刘军, 李旋旋. 2021. 安徽庐枞盆地黄竹园银多金属矿床地质特征和关键金属赋存状态研究. *岩石学报*, 37(9): 2805–2820
- 刘兰海, 陈静, 周涛发, 张一帆, 李梦梦. 2021. 地质冶金学及其在金和关键金属赋存状态研究中的新应用. *岩石学报*, 37(9): 2691–2704
- 罗开, 周家喜, 徐畅, 贺康建, 王永彬, 孙国涛. 2021. 四川乌斯河大型锆铅锌矿床锆超常富集特征及其地质意义. *岩石学报*, 37(9): 2761–2777
- 毛景文, 曾戟淋, 李通国, 樊锡银, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔. 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展. *矿床地质*, 38(5): 935–969
- 曲云伟, 谢玉玲, 尹淑苹, 于超, 夏加明. 2021. 四川冕宁包子山稀土矿床富 Sr 碳酸岩的发现及意义. *岩石学报*, 37(9): 2861–2874
- 田丰, 冷成彪, 张兴春, 田振东, 张伟. 2021. 富挥发分岩浆补给对斑岩型铜-钼矿床形成的关键作用: 以西藏尼木岗讲矿床为例. *岩石学报*, 37(9): 2889–2909
- 吴昌志, 贾力, 雷如雄, 陈博洋, 丰志杰, 凤永刚, 智俊, 白世恒. 2021. 中亚造山带天河石花岗岩及相关铀矿床的主要特征与研究进展. *岩石学报*, 37(9): 2604–2628
- 阎磊, 范裕, 刘一男. 2021. 安徽庐枞盆地龙桥铁矿床中铕的赋存状

态和空间分布规律研究. 岩石学报, 37(9): 2778 – 2790

杨智谋, 周家喜, 罗开, 杨德智, 余杰, 周发朝. 2021. 贵州竹林沟
锗锌矿床碳酸盐矿物学和矿物化学特征及其地质意义. 岩石学
报, 37(9): 2743 – 2760

翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛,
秦克章, 温汉捷. 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

张达玉, 孟翔, 任康达, 陈雪锋, 叶龙翔, 熊珍银. 2021. 江南钨矿
带桂林郑钨矿床钨的赋存状态、时空分布及其研究意义. 岩
石学报, 37(9): 2821 – 2842

张龙, 陈振宇, 汪方跃. 2021. 华南花岗岩型铀矿床主要特征与成矿
作用研究进展. 岩石学报, 37(9): 2657 – 2676

张一帆, 范裕, 陈静, 刘兰海, 李梦梦. 2021. 矿精粉中关键金属元
素赋存状态研究方法流程的建立-以长江中下游成矿带富钴硫
矿精粉为例. 岩石学报, 37(9): 2791 – 2804