

“关键资源地球化学勘查”专辑特邀主编寄语

——关键元素分布与关键资源勘查

王学求

自然资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000;
联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000

摘要: 关键资源已经成为工业 4.0 和低碳能源不可替代的原材料。构成关键资源的元素有 50 余种, 这些元素是现代社会的先进制造、电子产品、低碳能源、国防安全、生物医药等必须的原材料, 因此也称为关键元素。地球化学勘查是研究和探测关键元素分布和超常富集, 寻找关键资源行之有效的办法。中国在关键元素的分布和深部探测地球化学领域走在了国际前列, 形成了从全球尺度、全国尺度、矿区尺度直到纳米尺度地球化学探测技术体系, 实现从二维到三维、从浅表矿到千米深度矿产探测能力的飞跃, 不仅圈定了一批全国稀土、锂、铀的超常富集区, 而且取得了多处深部金矿和铜矿勘查的重大突破。本专辑选择部分研究成果介绍了稀土元素、新能源金属(铀、锂、钴)、金、铜等关键资源地球化学勘查中取得的新进展和成果。为了响应国家号召“把论文写在祖国大地上”, 专辑作者把优质素材形成的论文发表在自己的杂志上, 作为本期特邀主编对他们的奉献精神表示衷心感谢和崇高的敬意!

关键词: 关键资源; 关键元素; 地球化学勘查; 深部探测; 超常富集

中图分类号: P632; P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.111701

Guest Editor's Preface to the “Geochemical Exploration of Critical Resources”: Distribution of Critical Elements and Exploration of Critical Resources

WANG Xue-qiu

*Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;
UNESCO International Centre on Global-scale Geochemistry, Langfang, Hebei 065000*

Abstract: Critical minerals are required for the materials of industry 4.0 and low-carbon energy resources. More than 50 critical elements constitute critical materials essential for modern society in such aspects as advanced manufacturing, electronics, low-carbon energy, defence and medicine industries. Geochemical exploration is a cost-effective technology for delineation of spatial distribution and concentration targets for critical mineral resources. China is in the leading position in geochemical mapping spatial distribution of critical elements and exploration for deep-seated deposits. Geochemical mapping methodology for global-, national-, local- and nanometer-scale distribution of critical elements has been created. Deep-penetrating exploration capability has extended from 2 to 3 dimension patterns and from surface to the depth of thousand meters. Super-enriched concentration promising areas of rare earth elements, lithium, uranium in whole China were delineated and deep-seated gold and copper deposits were discovered according to the geochemical anomalies. This special issue shows some results of geochemical exploration for rare earth elements and new energy metals such as uranium, lithium and cobalt, gold and copper resources.

Key words: critical resources; critical elements; geochemistry; deep exploration; super-enriched concentration

收稿日期: 2020-11-01; 改回日期: 2020-11-04; 网络首发日期: 2020-11-18。责任编辑: 张改侠。

作者简介: 王学求, 男, 1963 年生。博士, 研究员。长期从事勘查地球化学研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道 84 号。

E-mail: wangxueqiu@igge.cn。

表 2 关键元素用途分类
Table 2 Usage category for critical elements

用途	关键元素
先进制造与国防安全	铍(Be)、镁(Mg)、铝(Al)、钛(Ti)、钒(V)、锰(Mn)、钴(Co)、铬(Cr)、锌(Zn)、锆(Zr)、铪(Hf)、钼(Mo)、稀土(REEs)、铂族元素(PGE)、金(Au)、银(Ag)、铀(U)、铜(Cu)、铁(Fe)等
电子产品	硅(Si)、镓(Ga)、锗(Ge)、砷(As)、碳(C)、铂族元素(PGE)、金(Au)等
低碳能源	铀(U)、锂(Li)、钴(Co)、氢(H)、氦(He)、稀土(REE)等
生物医药	碳(C)、氧(O)、氮(N)、氢(H)、磷(P)、硫(S)、钾(K)、钙(Ca)、氟(F)、氯(Cl)、溴(Br)、碘(I)、钛(Ti)等
生命必须的营养元素	碳(C)、氧(O)、氢(H)、氮(N)、磷(P)、硫(S)、钾(K)、钙(Ca)、钠(Na)、铁(Fe)、镁(Mg)、锌(Zn)、氟(F)、氯(Cl)、溴(Br)、碘(I)等
有毒有害元素	有毒重金属: 镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、锰(Mn) 放射性元素: 铀(U)、钍(Th)、钾(K)、镭(Ra)
地球物质循环与全球变化指示元素	氧循环(O) 碳循环(C) 氮循环(N) 硫循环(S) 地球循环指示元素: 惰性气体元素(He、Ne、Ar、Kr、Xe)、锆(Zr)、铪(Hf)、铀(U)、钍(Th)、铅(Pb)、碳(C)、铁(Fe)、卤素元素(F、Cl、Br、I)、铂族元素(Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt)等

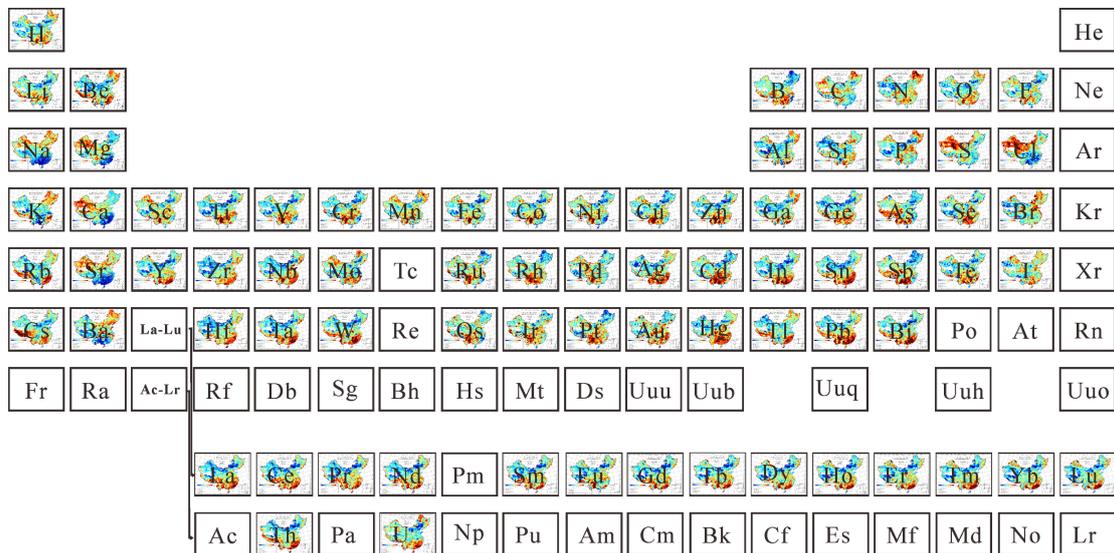


图 1 中国大地元素周期表
Fig. 1 Elements in the Periodical Table distributed in China

2 关键元素分布与超常富集

关键资源由于其重要性和不可替代性，越来越受到重视，寻找和评价关键资源是地质矿产调查和研究的主要任务之一。中国对关键资源的厘定和研究作出了大量贡献，发表了一批重要论文(侯增谦等, 2008; 陈毓川等, 2016; 翟明国等, 2019; 毛景文等, 2019; 王登红, 2019)。

地球化学勘查被证明是寻找关键资源行之有效的方法。利用水系沉积物测量的化探全国扫面计划，为中国近千余个金矿和有色金属矿的发现做出了突出贡献(谢学锦和孔牧, 2016; 王学求, 2016)。但遗憾的是过去地球化学调查计划使用水系沉积物采样，仅获得了全国 670 万 km² 基岩出露区数据，而且对三稀等关键元素没有分析，对盆地和覆盖区

也未开展调查工作，因此，无法对三稀元素、盆地砂岩型铀矿和卤水型锂矿等做出评价。自 2000 年以后，国家重点研发计划“穿透性地球化学勘查技术”，国家深部探测技术与实验研究专项“中国地球化学基准”项目，地质调查项目“化学地球基准与调查评价”，“化学地球”大科学计划、“一带一路”重点地区关键资源地球化学调查等项目的实施(王学求等, 2010; 王学求等 2016; Wang et al., 2016)，陆续积累了海量第一手地球化学数据，为研究关键元素在地球上的分布和循环，关键资源成矿地球化学背景和超常富集，圈定地球化学异常，发现关键资源提供了极为有利条件。

中国是稀土资源大国，但一直缺少稀土元素在全国的分布数据。王学求等(2020a)给出了全国岩石全稀土、轻稀土和重稀土背景值分别为：

ΣREE 157 $\mu\text{g/g}$, ΣLREE 121 $\mu\text{g/g}$, ΣHREE 35.0 $\mu\text{g/g}$, 轻重稀土比值为 3.5; 全国汇水域沉积物背景值分别为: ΣREE 173 $\mu\text{g/g}$, ΣLREE 134.0 $\mu\text{g/g}$, ΣHREE 38.5 $\mu\text{g/g}$, 轻重稀土比值为 3.5。根据稀土元素的分布, 在全国共圈定稀土地球化学异常区 35 处, 其中有 26 异常与已知稀土矿或稀土成矿带相吻合, 新发现稀土超富集中心的稀土异常 9 处, 这些异常显示具有寻找白云鄂博型、碱性岩型、离子吸附型、磷块岩型和泥岩型稀土矿的有利地区。特别是新发现泥岩是稀土富集层位, 稀土平均含量达 400 $\mu\text{g/g}$ 以上, 是地壳克拉克值的 3 倍, 如腾冲地块中新近系芒棒组泥岩芒棒组泥岩具有稀土超常富集, 可能具有形成稀土矿的潜力(刘东盛等, 2020)。

随着新能源电池使用的大量需求, 锂矿和钴矿成为关键资源调查和研究的热点。王学求等(2020b)根据全国汇水域沉积物地球化学数据, 共圈出 31 个地球化学异常, 归为 19 个锂地球化学省(超常富集区), 特别是新发现的与泥质岩类有关的锂富集区和干旱盆地有关的卤水型锂异常, 对锂矿找矿具有重要指导意义。刘东盛等(2020)根据中国地球化学基准计划(CGB)数据计算了中国岩石钴的基准值为 6.4 mg/kg, 汇水域沉积物基准值为 10.99 mg/kg, 这一基准对钴资源异常评价将起到重要参照作用。

过去一直缺少盆地铀分布地球化学数据, 徐善法等(2020)根全全国汇水域沉积物地球化学数据分析, 在全国共圈出面积大于 1000 km^2 , 且具有明显异常浓集中心的地球化学块体共 79 处, 并结合前人研究成果, 圈定出铀矿找矿远景区 33 处。张必敏等(2020)针对我国中生代盆地铀矿地球化学调查难题, 阐述了穿透性地球化学勘查技术铀矿的原理, 重点列举了利用微细粒测量在吐哈盆地、二连盆地和鄂尔多斯盆地的技术试验和示范研究案例。填补了盆地砂岩型铀矿地球化学调查的空白。

作为新材料的石墨成为关键矿产资源, 梁钰琦等(2020)对山西省大同市新荣区石墨矿带采用变质岩原岩恢复和地球化学稀土元素比值及其配分曲线半定量的确认新荣区石墨矿带矿床为以黏土岩为主的区域变质成矿, 填补了该区域矿床成因类型研究的空白, 为下一步地质找矿及建模提供了重要依据。

金、铜一直都是关键资源的重要组成部分, 近年王学求团队一直从事“一带一路”关键资源地球化学调查工作。聂兰仕等(2020)、周建等(2020)文章对中蒙边界地区金、铜的分布和远景区进行了预测, 王玮等(2020)对老挝全国铜的地球化学异常空间分布进行了介绍。随着“一带一路”地球化学填图工作的持续开展, 相信我们会对周边国家一些巨型成

矿带和资源分布会有更多的了解。

对关键元素元素超聚集物质来源示踪是地球化学异常评价的重要一环。刘彬等(2020)利用碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年对长江中下游圈定的巨量铜聚集的地球化学块体进行了物源示踪, 清楚地识别出 4 个年龄峰值, 分别对应古元古代(1602.8 ~ 2527.5 Ma)、新元古代(700.1 ~ 1164.8 Ma)、早古生代(426.3 ~ 477.3 Ma)和中生代(137.2 ~ 248.0 Ma), 表明利用水系沉积物圈定的地球化学块体物质来源是多源的, 中生代是铜地球化学块体形成的一个重要时期, 通过水系沉积物采样能够捕获成矿信息, 铜异常与铜矿床密切相关。

3 深部矿产资源地球化学探测

目前国际上对千米以上矿产资源勘查主要是针对金矿。图 2 是根据 1950 年以来胶东地区发现的金矿统计, 发现的金矿深度在逐年增加, 特别是 2000 年以后, 有 10 个金矿矿体头部距地表埋深在 500 m 以下, 有 9 个矿体延伸达 1500 m 以下, 有 3 个矿体延伸达 2000 m 以下。发展金矿深部矿产勘查技术是急需解决的问题。自 20 世纪 90 年代开始, 在国内外诞生了深穿透地球化学, 经过近 30 年的发展, 特别是近年, 在金元素大深度迁移理论和立体地球化学探测模型的建立, 微粒和纳米地球化学探测技术、元素活动态提取技术等不断完善, 并取得了显著找矿应用效果。

建立元素大深度垂向迁移机理和立体地球化学探测模型是解决地球化学勘查从传统的浅表矿到覆盖区和深部资源勘查必须解决的理论基础问题。本专辑以“金矿立体地球化学探测模型与深部钻探验证”(王学求等, 2020c), “黔西南水银洞卡林型金矿构造地球化学及对隐伏矿找矿的指示”(谭亲平等, 2020), “山东莱州曲家金矿原生晕立体地球化学建模及地质意义”(杨德平等, 2020)论文为代表, 通过钻孔岩芯和地表微细粒土壤联合取样获得的数据, 建立了蚀变岩型金矿和卡林型金矿千米深度立体地球化学探测模型。王学求等(2020c)发现胶东蚀变岩型金矿体及上方围岩微裂隙、断层泥和土壤中纳米金, 表明成矿过程中流体从深部向浅部运移降温过程中析出纳米金, 岩石中纳米金又经风化作用进入到地表土壤中, 构成了从矿体到地表覆盖物的完整的垂向运移过程。Au、S 和 Hg 与金矿密切相关, 分布模式既有相似性又有差异性, Au 的立体几何分布模式兼具矿化剂元素 S 和远程指示元素 Hg 的双重特征, 金异常和矿化剂元素硫与矿体倾斜方向一致, 反映了成矿过程中流体沿控矿构造的轴向运移; 金异常与类气体元素汞在垂向上一致, 而且出现从

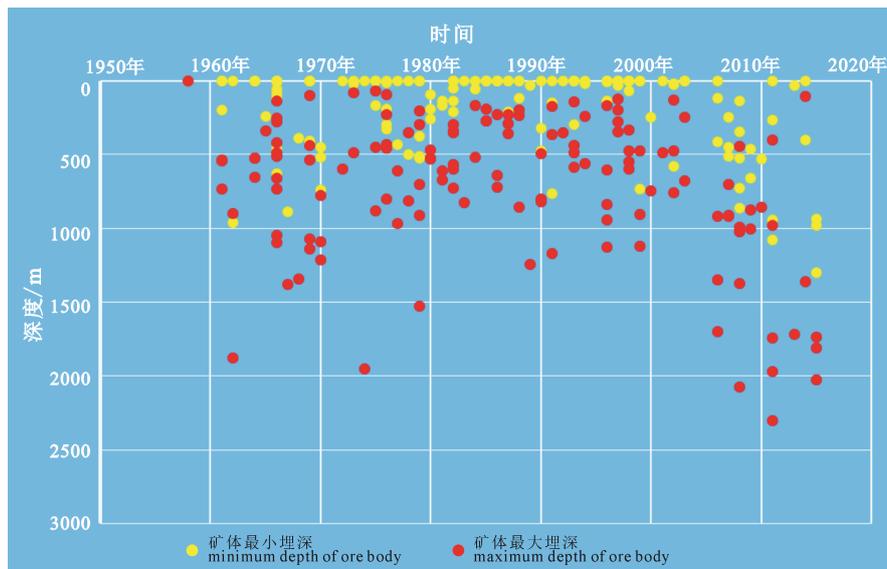


图2 胶东历年(1950—2018年)发现的金矿埋深统计
Fig. 2 The depths of gold orebodies discovered from 1950 to 2018

矿体到地表的连续贯通式异常,反映了流体沿微裂隙和纳米孔的垂向迁移。杨德平等(2020)通过对胶东曲家金矿的模型研究,显示 Au、Ag、Cu、Pb、As、Sb、Bi、Hg、Mo、W、S、Co、Ni、V、Cr、Ba、Sr、Cl、F、Se、Fe₂O₃、K₂O、CaO、MgO 等元素高值区域主要沿焦家断裂带分布,表明这些元素的迁移富集是成矿热液沿断裂破碎带活动引起, Ni、Co、Sb、Ba、F 等元素趋向在断裂蚀变带深部位富集,而 K₂O 则趋向在较浅部位富集。Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Bi、Hg、Cd、Se、Mo、W、S、F 等元素在垂向上也有较明显的迁移和成晕现象。这些元素垂向扩散形成的原生晕能够达到近地表部位,并可能在地表形成土壤的活动态异常,这对于穿透性地球化学和原生晕找矿机理研究有重要意义。孙雨沁等(2020)根据胶东莱州吴一村超深科研钻 ZK01 井位岩芯显微相学研究、电子探针分析、能谱分析等,综合研究深钻矿化特征及金的赋存状态,认为深钻揭示成矿热液存在多期活动,碎裂岩带为含金热液运移提供了通道,多重成矿阶段的叠加和复合导致金矿物多期次结晶,深部矿石金矿物成色较高,主要为含银自然金,其次为银金矿,说明该深钻深部金矿形成于高温、较深的成矿环境,矿石矿物生成顺序从早到晚依次为:(不含 Pb 黄铁矿、方铅矿、辉铋矿、金矿物)→(黄铜矿)→(含 Pb 黄铁矿)→(方铅矿、金矿物)→(重晶石)→(闪锌矿)。张苏坤等(2020)研究认为上宫金矿矿化样品与熊耳群安山岩、燕山期花岗岩有着相似的稀土元素特征,热液交代或成矿热液为富 Cl⁻ 的还原性流体, (Sm/Eu)_{样品}/(Sm/Eu)_{球粒陨石}-(Sm/Eu)_{样品} 图解,说明了岩浆热液为成矿提供了最初的热源和物源,而安山岩

和片麻岩的接触交代可能对成矿提供了部分物源。谭亲平等(2020)对贵州水银洞卡林型金矿的研究发现 Au 等成矿元素主要沿着背斜轴、中—上二叠统之间的构造蚀变体和逆断层富集, U 元素同样沿构造蚀变体和逆断层富集,但却没有沿着背斜轴富集,可能代表了另一期富 U 的热液活动。低 $\delta^{13}\text{C}$ ($<-2.3\text{‰}$)、高 $\delta^{18}\text{O}$ ($>22.1\text{‰}$) 和中稀土富集 ($\Delta\text{MREE}>1.89$) 的方解石主要沿背斜轴和逆断层分布。地表裂隙土壤成矿元素构造地球化学异常与深部隐伏矿体具有高度一致的对应关系。背斜轴及其相关的逆断层可能是深部成矿信息到达地表的通道。地表裂隙充填物和裂隙附近的土壤,能够有效提取深部成矿作用信息,达到直接探寻深部盲矿体的目的。

建立的金矿 1000~3000 m 立体地球化学模型不仅清晰地显示了矿体的展布几何形态和分布范围,而且为利用金及伴生元素和矿化剂元素进行深部矿体三维预测提供了重要依据。经深部钻探验证,胶东焦家成矿带 2800 m 深度发现金矿体,贵州水银洞金矿,在 300~1500 m 深度新增金资源量 203 t。理论模型建立和实践的成功,将地球化学探测能力由百米深度提高到千米深度,从二维扩展到三维,对深部找矿具有重要理论意义和实践意义。

以“福建上杭县罗卜岭斑岩型铜钼矿地球化学立体探测示范”论文为代表,赖晓丹等(2020)建立了斑岩型铜矿立体地球化学探测模型。罗卜岭矿区的原生晕地球化学三维模型显示,元素直观垂向分带序列大致为:(As、Sb、Hg)-(W、Bi、Sn)-Ga-Au、Ba-Cu、Ag-Pb、Zn-Mn-Mo; 前缘晕元素、氧化物组合为 As、Sb、Au、Ga、Al₂O₃, 矿体近矿晕元素

组合为 Ag、Pb、Zn, 缺失尾晕元素组合; Cu、Mo 可直接作为找矿指示元素, Au、Ag、Pb、Zn、As、Sb、Ga、Ba、Mn 可作为间接指示元素, 矿床深部 K_2O 正异常与 Al_2O_3 负异常可作为斑岩型铜钼矿的重要找矿标志, 这一规律对紫金山矿田深部和外围隐伏斑岩型矿体的勘查工作具有重要的参考意义。韩志轩等(2020)以江西通江岭铜矿为研究区, 开展土壤微细粒测量试验, 并讨论其异常形成机理。结果显示, 主成矿元素 Cu 与 Zn、Pb、Ag、Au 等有较强的相关性, 该组元素富集系数大、空间变异强, 在研究区内趋于强烈富集。面积性试验结果显示 Cu-Pb-Zn-Au 多元素组合异常与已知矿体有良好对应关系。剖面试验表明断层和地层接触界面土壤成矿元素含量较高, Cu、Pb、Zn 等异常可以指示隐伏矿体。根据元素组合及空间分布特征, 预测研究区东部第四系覆盖区存在隐伏铜金矿体以及 19 线南段深部有隐伏多金属矿体, 其中 19 号线南段在 2019 年详查工作中钻获铜铅锌多金属矿体。

4 结论

本专辑的特点是注重科学性和实用性相结合, 涵盖全国尺度、矿区尺度到纳米尺度元素分布及迁移机理研究, 创建了从二维到三维地球化学探测模型, 实现从浅表矿到千米深度矿产探测能力的飞跃。不仅提出了一批稀土、锂、铀的预测区, 而且取得了多处深部金矿勘查的突破。由于专辑篇幅有限, 还有很多关键元素地球化学探测研究成果没有体现在该论文集中, 今后将会陆续发表。

5 感谢

为了响应国家号召“把论文写在祖国大地上”, 很多勘查地球化学工作者长期工作在野外和实验室一线, 并放弃了在国际高水平杂志的论文首发权, 把优质素材形成的论文发表在自己的杂志上, 作为本期特邀主编对他们的奉献精神表示衷心感谢和崇高的敬意!

专辑的绝大部分论文研究工作得到国家重点研发计划项目“穿透性地球化学勘查技术”(编号: 2016YFC0600600)、国家专项“深部探测技术与实验研究”行业基金“中国地球化学基准项目”(编号: SinoProbe-04)、中国地质调查局地质调查项目“化学地球基准与调查评价”(编号: DD20190451)的联合资助。

参考文献:

陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2016. 中国重要矿产和区域成矿规律[M]. 北京: 地质出版社: 344-368.
迟乃杰, 韩作振, 单伟, 孙雨沁, 熊玉新, 舒磊, 刘传娥, 申颖,

李增胜. 2020. 胶西北焦家断裂带深部载金黄铁矿标型特征研究及其地质意义[J]. 地球学报, 41(6): 949-962.
韩志轩, 张必敏, 乔宇, 柳青青, 胡朗明, 郭祥义, 王永康, 付海平. 2020. 隐伏铜矿区土壤微细粒测量有效性实验——以江西通江岭铜矿为例[J]. 地球学报, 41(6): 977-986.
侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝, 杨志明. 2008. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 145-176.
赖晓丹, 张锦章, 祁进平, 王乾杰, 杨泽军. 2020. 福建紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿地球化学立体探测示范[J]. 地球学报, 41(6): 963-976.
梁钰琦, 赵永, 吴光存, 张越, 夏庆霖. 2020. 山西省大同市新荣区石墨矿岩石矿物地球化学特征与成因[J]. 地球学报, 41(6): 827-834.
刘彬, 王学求, 侯青叶. 2020. 长江中下游地区铜地球化学块体时间属性——来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的证据[J]. 地球学报, 41(6): 835-850.
刘东盛, 王学求, 周建, 刘汉粮, 张必敏, 聂兰仕, 王玮, 迟清华, 徐善法. 2020. 中国钴地球化学基准值特征及影响因素[J]. 地球学报, 41(6): 807-817.
刘东盛, 周建, 严桃桃, 迟清华, 徐善法, 王玮, 韩志轩, 李瑞红, 王强, 王学求. 2020. 腾冲地块稀土地球化学背景与泥岩中稀土超常富集特征[J]. 地球学报, 41(6): 759-769.
毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 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, 38(5): 935-969.
聂兰仕, 刘汉粮, 李江鹏, 范羽, 迟清华, 刘东盛, 周怡宁, 王学求. 2020. 中蒙边界地区铜区域地球化学分布及远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 851-860.
孙雨沁, 于学峰, 单伟, 熊玉新, 张岩, 迟乃杰, 舒磊, 李敏, 程伟. 2020. 胶东焦家断裂带 3000 m 深部矿化特征及金矿物赋存状态[J]. 地球学报, 41(6): 919-937.
谭亲平, 夏勇, 谢卓君, 王泽鹏, 李松涛, 韦东田, 闫俊, 赵亦猛. 2020. 黔西南水银洞卡林型金矿构造地球化学及对隐伏矿找矿的指示[J]. 地球学报, 41(6): 886-898.
王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6): 1190-1209.
王玮, 王学求, 张必敏, 聂兰仕, Sounthone LAOLO, Phomsylalai SOUKSAN, 周建, 刘汉粮, 韩志轩, 刘东盛, 迟清华, 徐善法. 2020. 老挝铜地球化学背景与异常特征[J]. 地球学报, 41(6): 861-867.
王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020b. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
王学求, 谢学锦, 张本仁, 张勤, 迟清华, 侯青叶, 徐善法, 聂兰仕, 张必敏. 2010. 地壳完全元素探测——构建“化学地球”[J]. 地质学报, 84(06): 854-864.
王学求, 张必敏, 于学峰, 杨德平, 夏勇, 谭亲平, 刘耀文, 张苏坤, 田密, 刘汉粮, 李瑞红, 韩志轩, 熊玉新, 吴慧, 张宝云. 2020c. 金矿立体地球化学探测模型与深部钻探验证[J]. 地球学报, 41(6): 869-885.
王学求, 周建, 迟清华, 王玮, 张必敏, 聂兰仕, 刘东盛, 徐善法, 吴慧, 高燕芳. 2020a. 中国稀土元素地球化学背景与远景区优选[J]. 地球学报, 41(6): 747-758.
王学求, 周建, 徐善法, 迟清华, 聂兰仕, 张必敏, 姚文生, 王玮, 刘汉粮, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青. 2016. 全国地球化

学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 43(5): 1469-1480.

王学求. 2016. 金矿地球化学勘查带动发现全国 999 处金矿[J]. 中国地质调查成果快讯, 2(8-9): 34-37.

谢学锦, 孔牧. 2016. 中国地球化学勘查在国际上的领先地位[J]. 中国地质调查成果快讯, 2(8-9): 1-4.

徐善法, 王学求, 张必敏, 王玮, 迟清华, 周建, 严桃桃. 2020. 中国铀地球化学块体与远景区划分[J]. 地球学报, 41(6): 785-796.

杨德平, 于学峰, 王林钢, 熊玉新, 刘鹏瑞, 舒磊, 宋英昕, 朱学礼, 牛志力. 2020. 山东省莱州曲家金矿区原生晕立体地球化学模型及对元素迁移和深部找矿的启示[J]. 地球学报, 41(6): 899-918.

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[J]. 中国科学基金, (2): 106-111.

张必敏, 王学求, 徐善法, 姚文生, 迟清华, 刘汉粮, 韩志轩, 柳青青, 严桃桃, 窦备, 鲁岳鑫. 2020. 穿透性地球化学勘查技术在隐伏砂岩型铀矿调查中的应用研究[J]. 地球学报, 41(6): 770-784.

张苏坤, 刘耀文, 汪江河, 冯绍平, 常嘉毅, 张争辉, 毛宁. 2020. 熊耳山上官金矿稀土元素特征及对金矿物质来源的指示意义[J]. 地球学报, 41(6): 938-948.

周建, 徐善法, 聂兰仕, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青, 张必敏, 刘汉粮, 迟清华. 2020. 内蒙古自治区大型金矿地球化学标志与预测[J]. 地球学报, 41(6): 818-826.

References:

CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, XU Zhi-gang. 2016. Important mineral resources and regional metallogenic regularity in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 344-368(in Chinese).

CHI Nai-jie, HAN Zuo-zhen, SHAN Wei, SUN Yu-qin, XIONG Yu-xin, SHU Lei, LIU Chuan-e, SHEN Ying, LI Zeng-sheng. 2020. Typomorphic Characteristics of Gold-bearing Pyrite in Jiaojia Fault Deep Zone of Northwest Jiaodong Peninsula and Its Geological Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 949-962 (in Chinese with English abstract).

European Commission. 2014. Report on critical raw materials for the EU[R]//Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials: 41.

HAN Zhi-xuan, ZHANG Bi-min, QIAO Yu, LIU Qing-qing, HU Lang-ming, GUO Xiang-yi, WANG Yong-kang, FU Hai-ping. 2020. Validity Experiments of Fine-grained Soil Geochemical Survey for Exploring Concealed Copper Deposits: A Case Study in the Tongjiangling Copper Deposit, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 977-986(in Chinese with English abstract).

HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, XIE Yu-ling, YUAN Zhong-xin, YANG Zhu-SENG, YIN Shu-ping, FEI Cai-hong, ZOU Tian-ren, LI Xiao-yu, YANG Zhi-ming. 2008. Mian-ning-Dechang himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. Mineral Deposits, 27(2): 145-176(in Chinese with English abstract).

LAI Xiao-dan, ZHANG Jin-zhang, QI Jin-ping, WANG Qian-jie, YANG Ze-jun. 2020. The Demonstration of 3D Geochemical

Exploration in the Luoboling Porphyry Cu-Mo Deposit, Zijinshan Orefield, Fujian Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 963-976(in Chinese with English abstract).

LIANG Yu-qi, ZHAO Yong, WU Guang-cun, ZHANG Yue, XIA Qing-lin. 2020. Research on Geochemistry Characteristics and Genesis of the Graphite Deposit in Xinrong District of Datong City, Shanxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 827-834(in Chinese with English abstract).

LIU Bin, WANG Xue-qiu, HOU Qing-ye. 2020. Temporal Distribution of Copper Geochemical Blocks in the Middle-Lower Yangtze River Region: Evidence from Detrital Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 835-850(in Chinese with English abstract).

LIU Dong-sheng, WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, LIU Han-liang, ZHANG Bi-min, NIE Lan-shi, WANG Wei, CHI Qing-hua, XU Shan-fa. 2020. Characteristics of China's Cobalt Geochemical Baselines and Their Influence Factors[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 807-817(in Chinese with English abstract).

LIU Dong-sheng, ZHOU Jian, YAN Tao-tao, CHI Qing-hua, XU Shan-fa, WANG Wei, HAN Zhi-xuan, LI Rui-hong, WANG Qiang, WANG Xue-qiu. 2020. Geochemical Background of REEs: Super-enrichment in Argillaceous Rocks in Tengchong Block[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 759-769(in Chinese with English abstract).

MAO Jing-wen, YUAN Shun-da, XIE Gui-qing, SONG Shi-wei, ZHOU Qi, GAO Yong-Bao, LIU Xiang, FU Xiao fang, CAO Jing, ZENG Zai-Lin, LI Tong-guo, FAN Xi-yin. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. Mineral Deposits, 38(5): 935-969(in Chinese with English abstract).

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2020. A Vision for NSF Earth Sciences 2020-2030: Earth in Time[R]. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25761>.

NIE Lan-shi, LIU Han-liang, LI Jiang-peng, FAN Yu, CHI Qing-hua, LIU Dong-sheng, ZHOU Yi-ning, WANG Xue-qiu. 2020. Regional Geochemistry and Distribution of Anomalies Related to Potential Copper Metallogenic Areas in China-Mongolia Border Region[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 851-860(in Chinese with English abstract).

SUN Yu-qin, YU Xue-feng, SHAN Wei, XIONG Yu-xin, ZHANG Yan, CHI Nai-jie, SHU Lei, LI Min, CHENG Wei. 2020. Mineralization Characteristics and Modes of Occurrence of Gold Minerals at the Depth of 3000 Meters in Jiaojia Fault Zone, Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 919-937(in Chinese with English abstract).

TAN Qin-ping, XIA Yong, XIE Zhuo-jun, WANG Ze-peng, LI Song-tao, WEI Dong-tian, YAN Jun, ZHAO Yi-meng. 2020. Tectono-geochemistry and Concealed Ores Prospecting in the Shuiyindong Gold Deposit of Southwestern Guizhou[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 886-898(in Chinese with English abstract).

U. S. Geological Survey. 2017. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U. S. Geological Survey Professional Paper: 1802.

WANG Wei, WANG Xue-qiu, ZHANG Bi-min, NIE Lan-shi,

- Sounthone LAOLO, Phomsylalai SOUKSAN, ZHOU Jian, LIU Han-liang, HAN Zhi-xuan, LIU Dong-sheng, CHI Qing-hua, XU Shan-fa. 2020. Geochemical Background and Anomalies of Copper in Laos[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 861-867(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2016. Contribution of knowledge and technology innovation for gold exploration to discovery of 1000 gold deposits in China[J]. Letters of China Geological Survey, 2(8-9): 34-37.
- WANG Xue-qiu, LIU Han-liang, WANG Wei, ZHOU Jian, ZHANG Bi-min, XU Shan-fa. 2020b. Geochemical Abundance and Spatial Distribution of Lithium in China: Implications for Potential Prospects[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 797-806(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, the CGB Sampling Team. 2015. China geochemical baselines: Sampling methodology[J]. Journal of Geochemical Exploration, 148: 25-39.
- WANG Xue-qiu, XIE Xue-jing, ZHANG Ben-ren, ZHANG Qin, CHI Qing-hua, HOU Qing-ye, XU Shan-fa, NIE Lan-shi, ZHANG Bi-min. 2010. China geochemical probe : making “geochemical earth”[J]. Acta Geologica Sinica, 84(06): 854-864(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, XU Shan-fa, CHENG Zhi-zhong, LIU Hong-yan, SHI Shu-juan. 2006. Progress on international geochemical mapping[J]. Acta Geologica Sinica, (10): 1598-1606(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, ZHANG Bi-min, YU Xue-feng, YANG De-ping, XIA Yong, TAN Qin-ping, LIU Yao-wen, ZHANG Su-kun, TIAN Mi, LIU Han-liang, LI Rui-hong, HAN Zhi-xuan, XIONG Yu-xin, WU Hui, ZHANG Bao-yun. 2020a. Three-dimension Geochemical Patterns of Gold Deposits: Implications for the Discovery of Deep-seated Orebodies[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 869-885(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, CHI Qing-hua, WANG Wei, ZHANG Bi-min, NIE Lan-shi, LIU Dong-sheng, XU Shan-fa, WU Hui, GAO Yan-fang. 2020a. Geochemical Background and Distribution of Rare Earth Elements in China: Implications for Potential Prospects[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 747-758(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, XU Shan-fa, CHI Qing-hua, NIE Lan-shi, ZHANG Bi-min, YAO Wen-sheng, WANG Wei, LIU Han-liang, LIU Dong-sheng, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics[J]. Geology in China, 43(5): 1469-1480(in Chinese with English abstract).
- XIE Xue-jin, KONG Mu. 2016. Regional Geochemistry-National Reconnaissance Project Laid the Geochemical Exploration of China in the Leading Position in the World[J]. News Letters of China Geological Survey, 2(8-9): 1-4.
- XU Shan-fa, WANG Xue-qiu, ZHANG Bi-min, WANG Wei, CHI Qing-hua, ZHOU Jian, YAN Tao-tao. 2020. China's Uranium Geochemical Blocks: Implications for Delineation of Uranium Prospective Areas[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 785-796(in Chinese with English abstract).
- YANG De-ping, YU Xue-feng, WANG Lin-gang, XIONG Yu-xin, LIU Peng-rui, SHU Lei, SONG Ying-xin, ZHU Xue-li, NIU Zhi-li. 2020. A Study of Geochemical Modeling of Primary Halos in the Qujia Gold Deposit, Laizhou, Shandong Province, and Its Revelation for Migration of Elements and Deep Prospecting[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 899-918(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, WU Fu-yuan, HU Rui-zhong, JIANG Shao-yong, LI Wen-chang, WANG Ru-cheng, WANG Deng-hong, QI Tao, QIN Ke-zhang, WEN Han-jie. 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Science Foundation in China, (2): 106-111(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bi-min, WANG Xue-qiu, XU Shan-fa, YAO Wen-sheng, CHI Qing-hua, LIU Han-liang, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing, YAN Tao-tao, DOU Bei, LU Yue-xin. 2020. The Research and Application of Deep-penetrating Geochemical Exploration Technology in the Survey of Concealed Sandstone-type Uranium Deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 770-784(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Su-kun, LIU Yao-wen, WANG Jiang-he, FENG Shao-ping, Chang Jia-yi, ZHANG Zheng-hui, MAO Ning. 2020. The Implications of REE Characteristics for Gold Sources of the Shangong Gold Deposit in Xionger Mountain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 938-948(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian, XU Shan-fa, NIE Lan-shi, LIU Dong-sheng, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing, ZHANG Bi-min, LIU Han-liang, CHI Qing-hua. 2020. The Geochemical Indicator and Prognosis of Large Gold Ore Districts in Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 818-826(in Chinese with English abstract).

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研究员, 副总工程师
 自然资源部地球化学探测重点实验室主任
 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心首席科学家
 《地球学报》副主编



二〇二〇年十月三十日于廊坊