

“深部综合信息矿产资源预测评价”专辑 特邀主编寄语

肖克炎

中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 深部综合信息矿产资源预测评价研究是地球系统科学研究中最具有交叉学科性质的领域。随着地表矿、浅部矿、易识别矿的日益减少, 地质找矿工作逐步向第二深度空间发展。深部矿产资源三维预测已成为当前成矿预测研究的重点领域, 地质学家们经过长期的持续研究, 在该领域取得了一系列重大成果与重要认识。《地球学报》集中在 2020 年第 2 期刊发 15 篇文章作为“深部综合信息矿产资源预测评价”专辑, 专辑涵盖了三个方向的研究成果: (1) 矿产资源三维预测; (2) 地质调查与研究; (3) 地质、地化数据处理方法等。这些工作主要涉及矿产资源预测评价的两个方面, 即预测方法和成矿规律, 具体包括深部构造三维重建技术方法、同位素定年及示踪在成矿规律研究中的应用以及地球化学异常信息机器学习提取方法等方面的内容。本文将简要介绍收入本专辑论文的研究工作, 对深入研究和认识深部综合信息矿产资源预测评价提供一定参考价值。

关键词: 三维预测; 成矿构造三维模型; 成矿规律; 机器学习

中图分类号: P62 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.030201

Guest Editor's Preface to the “Prediction and Assessment of Deep Mineral Resources Based on Integrated Geoinformation”

XIAO Ke-yan

*MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037*

Abstract: Prediction and assessment of deep mineral resources based on integrated geoinformation is the most interdisciplinary field in earth system science. With the decrease of surface deposits, shallow deposits and deposits which are easily identified, geological prospecting has gradually developed toward the second deep space. The three-dimensional prediction has become the key field of current metallogenic prediction research. Based on a long-term continuous research, geologists have obtained a series of major achievements and important understandings in the three-dimensional prediction. The special issue (No. 2, 2020) of *Acta Geoscientica Sinica* contains 15 papers concerning the prediction and assessment of deep mineral resources based on integrated geoinformation. This special issue covers the following three subjects: (1) three dimensional prediction, (2) geological survey and research, and (3) geological and geochemical data processing methods. These papers mainly discuss the three-dimensional reconstruction method of deep structure, the application of isotopic dating and tracing in metallogenic regularity study, and the geochemical anomaly analysis method. This introduction aims to briefly describe each study in the three subjects, in order to provide some reference for the further studying and understanding of the prediction and assessment of deep mineral resources.

Key words: three dimensional prediction; three dimensional model of metallogenic structure; metallogenic regularity; machine learning

随着地表矿、浅部矿、易识别矿的日益减少,地质找矿工作逐步向第二深度空间发展,成矿规律的研究与成矿预测方法的创新在找矿勘查中显得愈发重要(赵鹏大等, 2003),而深部综合信息矿产资源三维预测评价正是当前矿产资源定量预测与评价的趋势与前沿。深部资源三维预测研究是地球系统科学研究中最具有交叉学科性质的领域,涉及到矿床学、构造学、数学地质学及地球物理学等多种学科,其预测效果一直受深部有效信息相对缺乏、预测可靠性随深度增加逐渐降低等问题的制约。鉴于此,笔者于 2017 年申请了国家重点研发计划“深地资源勘查开采”专项项目——“深部资源预测系统技术研究”与示范(2017YFC0601500)”(以下简称项目),拟通过剖析和解决深部成矿空间三维结构重建机制、深部矿化定位机制及深部预测途径等重大科学问题,建立深部成矿空间矿产资源预测评价与指标体系,并开发先进、可靠及实用的深部三维可视化预测软件系统平台。在此基础上,在湖南—贵州锰矿整装勘查区、山东莱州—招远金矿整装勘查区及四川会理—会东矿集区等地,针对锰、金、铜等国家战略紧缺矿产,开展深部三维预测评价及找矿预测示范,建立地学多元综合信息三维预测模型,圈定深部找矿靶区并估算资源潜力。本专辑论文即是上述项目的阶段性研究成果,主要涉及示范区深部资源三维预测及相关内容,因此,专辑名称为:深部综合信息矿产资源预测评价。

地质学家们经过长期的持续研究,在深部资源预测研究方面取得了一系列重大成果与重要认识。本期《地球学报》收集了 15 篇关于深部资源三维预测及其相关内容的学术论文,主要以地区性研究论文为主,主要内容涉及目前地学界所研究的热点地区及锰、金等国家战略紧缺矿产,如湘黔地区锰矿、江南造山带(湖南段)金矿及胶东、胶西北金矿等。当前的专辑涵盖以下三个主题:(1)矿产资源三维预测;(2)地质调查与研究;(3)地质、地化数据处理方法。以下将对这三方面成果做一简要综述。

1 矿产资源三维预测

随着矿产资源预测的发展,深部综合信息矿产资源预测评价已经成为矿产勘查领域的热点,其工作流程主要包括三个步骤(陈建平, 2007; 肖克炎等, 2012):(1)分析总结研究区矿床成因、成矿规律、控矿地质条件和找矿标志,建立三维找矿地质模型和三维实体模型;(2)在成矿预测理论的指导下,补充与成矿有关的物、化、遥信息,提炼出综合找矿模型;(3)构建研究区三维立方体单元块,将找矿定量化信息赋予每一个立方体预测单元,最后使用合适的找矿信息处理方法,开展研究区深部矿体定

位、定量、定概率一体化的三维预测。本部分共有 6 篇研究性文章,其工作重点有成矿系统地质要素的预测转化模型(向杰等, 2020; 李伟等, 2020)、矿化信息定量提取模型(邓浩等, 2020)、深部构造三维模型(毛先成等, 2020; 陈进等, 2020)及矿产定量预测方法模型(张权平等, 2020)。

矿产预测及矿产勘查成败的核心在于,如何构建恰当的预测变量来反映成矿作用过程。李伟等(2020)分析总结了甘肃早子沟金矿的综合地质找矿模型为“控矿断裂+有利岩体+有利围岩蚀变+等间距控矿”,每个地质异常变量定量分析与提取结果在地质认识上都有较好的印证,采用证据权重法与信息量法两种预测方法进行叠加分析成矿预测,结果显示 Au1、Au9、Au30、M16 等主矿体深部具有良好的找矿潜力。向杰等(2020)以四川拉拉铜矿为例,将矿床成矿系统分析(知识驱动)与三维定量分析(数据驱动)相结合,将成矿作用过程及关键因素(源、运、储、保等)转化为可预测的具体空间要素,构建了区域找矿要素三维地质信息,以找矿信息量为数学模型,圈定了 4 个找矿靶区,分别位于红泥坡大型铜矿矿区南部、落函矿区东南部及东北部和黎洪矿区东南部。

在大数据时代,机器学习方法为我们提供了一种基于数据驱动建立预测模型的新途径和表达。然而,在三维预测中,深度学习需要以非结构化的三维地质模型为研究对象,这使得一般的适用于二维预测的深度学习方法难以直接扩展至三维预测。邓浩等(2020)以山东大尹格庄金矿床为例,提出了一种基于深度学习的隐伏矿体三维预测方法,方法以三维地质模型为输入,基于深度卷积网络自动提取找矿指标,构建三维地质模型到矿化信息的定量关联,并且利用该方法建立了大尹格庄金矿床的隐伏矿体三维预测模型,指示了矿床深部成矿有利地段,应用 ROC 曲线 AUC 面积对比了深度学习模型和人工建立找矿指标的预测模型,表明基于深度学习的预测模型较大地提升了预测准确性。

矿床的形成明显地受地质构造的控制,深部矿产预测依赖于对研究区深部成矿构造推断和矿化分布规律的认识,深部成矿构造及深部成矿作用已成为当前深部找矿工作中的研究热点。陈进等(2020)以胶东大尹格庄金矿床为研究对象,通过三维地质建模及三维空间分析,认为断裂带的距离场因素反映热液活动的集中部位,断裂面的趋势-起伏因素和陡缓转换因素主要控制矿体的空间方位,断裂面坡度因素则能大致表征矿体的产状。采用迁移学习算法并结合地质情况圈定了三个找矿靶区,分别位于大尹格庄东方向约 4.9 km、赵家庵东北方向约 4 km 及 4.8 km 的区域。毛先成等(2020)以胶西北金

矿集区为研究对象,综合利用地质、地球物理、地球化学勘查等数据,提出了多源数据综合、浅部地质构造建模、深部地质构造推断、耦合处理建模四个过程组合与迭代的深部成矿构造三维建模方法;基于地质勘探、地震、重力、大地电磁和构造地球化学勘查数据,构建了胶西北金矿集区招平、焦家和三山岛三条成矿带 3000 m 以浅的深部成矿构造三维模型及其离散光滑插值(DSI)模型;综合利用胶西北金矿集区深部成矿构造三维模型,通过三维可视化矿化空间分析和成矿信息提取,圈定了招平断裂带找矿靶区 5 个,焦家断裂带找矿靶区 4 个,三山岛找矿靶区 3 个。

矿产资源定量预测的最后一步是成矿信息的统计预测,主要是指应用统计方法进行找矿信息量、找矿有利度的运算,进而确定找矿靶区。张权平等(2020)建立了贵州烂泥沟金矿的三维地质模型,应用“立方体预测模型”方法定量提取了控矿要素并实现异常信息的三维空间重构,通过三维证据权与找矿信息量相结合的综合圈定办法,有效减少了预测结果的不确定性,共圈定找矿靶区 5 处,其中 A 类靶区 2 处, B 类靶区 3 处。

2 地质调查与研究

矿床研究是成矿预测的基础,具体包括成矿地质背景、成岩成矿地球化学特征、矿床成因及成矿规律等。本部分共有 6 篇研究性文章,其中涉及湘西北地区锰矿成矿背景研究的文章 2 篇(邹光均等, 2020; 曹创华等, 2020), 研究江南造山带(湖南段)金矿成岩成矿地球化学特征、成矿规律的文章共 3 篇(黄建中等, 2020; 隗含涛等, 2020; 孙骥等, 2020)以及 1 篇研究南盘江—右江盆地构造演化与金锑成矿作用的文章(杨成富等, 2020), 此外还有 1 篇文章介绍了山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿的“三位一体”预测(郝兴中等, 2020)。

湘黔渝毗邻区大地构造位置位于扬子陆块东南缘,发育有完整的南华纪沉积记录,同时也是我国南华纪“大塘坡式”沉积型锰矿的重要富集区。邹光均等(2020)通过沉积相剖面的横向对比,用“优势相”成图法编制了湘黔渝毗邻区南华纪早世、中世、晚世的岩相古地理图件,研究区南华系沉积环境大致可分为大陆相区(河流相和湖泊相)、过渡相区(三角洲相)和海相区(海岸相以及浅海陆棚相);南华裂谷盆地形成与 Rodinia 超大陆裂解关系密切,自西向东分为武陵次级裂谷盆地、天柱—怀化隆起、雪峰次级裂谷盆地三个构造单元,南华纪“大塘坡式”沉积型锰矿主要形成于武陵次级裂谷盆地内的裂陷海湾相带中的次级半地堑或地堑盆地单元内。曹创华等(2020)在上述研究基础上,对区内经过民

乐锰矿的大地电磁测深剖面进行了处理和解释,结果表明大地电磁反演电阻率模型等值线图上的“凹中凹”地层结构是圈定成矿靶区的主要地球物理标志,民乐—花垣一带为古天然气渗漏口的过渡相和边缘相,含锰地层具有越往东北向埋深越浅、厚度也越来越薄的特点,一定意义上实现了地球物理深地探测技术对南华纪沉积型锰矿床的找矿指导。

“江南造山带”呈弧形横跨桂北、黔东、湘西、湘北、赣北、皖南以及浙北等广大区域(长达 1500 km, 宽约 200 km), 其中湖南段分布的金矿资源量极为丰富,集聚了湖南 90%以上的金矿,呈带状分布,累计探明金资源储量达 600 t, 且多数矿床勘查深度不足 500 m, 深部找矿潜力巨大,被誉为湖南的“金腰带”。

雪峰弧形构造带中段金(锑)矿床众多,为湖南重要的黄金生产基地,其中古台山矿床是颇具代表性的石英脉型金锑矿床。孙骥等(2020)研究了古台山矿床成矿流体 He-Ar、Sr 同位素地球化学特征,成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 0.011~0.038 Ra, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 414.4~732.6, 表明成矿流体主要为地壳流体,同时有部分大气降水的加入;含矿石英流体包裹体 $I_{\text{Sr-223.6}}$ 变化于 0.723 60 ~ 0.731 67, 平均 0.727 44, 通过与地层和岩体锶同位素组成对比,认为古台山矿床成矿流体是岩浆流体运移过程中与来自基底具有高锶同位素比值的碎屑岩水岩相互作用的结果;此外, He-Ar 同位素揭示矿区深部及周缘地区板溪群具有更好的资源潜力。

江南造山带湖南段早古生代花岗质岩石对于研究早古生代构造演化以及金成矿作用具有重要意义。金鸡矿床是湘东北地区新近发现的一个中型早古生代金矿床,其钻孔中发现的花岗岩和花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 (425.2 ± 1.5) Ma 和 (430.6 ± 1.5) Ma; 岩石地球化学数据表明,花岗岩属 I 型花岗岩,其来源于地壳中变泥质岩石的部分熔融;花岗闪长岩属埃达克岩,其起源于地壳中变砂质岩石的部分熔融;岩体岩石地球化学、年代学以及 Sr-Nd 同位素特征表明二者是华南早古生代陆内造山事件的产物,指示金鸡金矿床属于造山型金矿床(隗含涛等, 2020)。

黄建中等(2020)系统分析总结了江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力,从构造-岩浆作用-沉积建造角度,结合地质年代学、古地磁、岩相古地理分析,认为前寒武纪构造演化过程中发生了两次重要的金元素补给事件,奠定了区域金成矿的物质基础;加里东期和印支期两期金矿床分别形成于陆内造山、陆内伸展背景下,二者分区成带产出,构成一条复合型造山型金矿带,是横贯湖南的巨型“金腰带”;已有的研究成果及深部验证情况表明该成矿带深部找矿潜力巨大,2000 m 以浅金远景

资源量有望达到 3000 t。

南盘江—右江盆地独特的盆地构造演化历史和背景,是西南低温成矿域的重要组成部分,广泛发育有 Au-As-Sb-Hg-Tl 等低温热液矿床,金锑成矿作用与盆地构造演化密切相关。南盘江—右江盆地的构造演化划分为五个阶段,即早中泥盆世裂谷盆地阶段—晚石炭世裂陷洋盆发育阶段—二叠纪洋盆消失及前陆盆地发育阶段—中晚三叠世盆地消亡及碰撞后伸展阶段—中侏罗世—早白垩世晚期 NE 向挤压构造发育阶段;盆地构造、岩相古地理、流体演化及岩浆活动对金锑成矿控制明显;盆地找矿预测模型可以概述为中心为陆内斑岩型铜矿床,上部或边部为矽卡岩型铜矿床、脉状钨-锡-银-铅-锌矿床和远端低温热液型金-银-锑-汞矿床,该模型对研究区深部斑岩型矿床或与斑岩体有关的矽卡岩型矿床的找矿勘查具有重要意义(杨成富等, 2020)。

山东省德州市齐河—禹城深覆盖区发育有明显的航磁异常和重力异常,具有良好的矽卡岩型铁矿产成地质条件。区内铁矿体控矿要素为奥陶纪碳酸盐岩地层和石炭纪—二叠纪碎屑岩地层,燕山晚期闪长岩体,以及奥陶纪地层和岩体接触带及其附近成矿有利部位等,郝兴中等(2020)总结了该地区矽卡岩型铁矿的“三位一体”综合找矿预测模型,并圈定了李楼西、石庄、郭店村、丁寺东南、大张村、朱庄南共 6 个最小预测区。

3 地质、地化数据处理方法

矿产资源三维预测需要对多种地质信息进行处理,包括地质、物探、化探及遥感等,提取与成矿有关的异常信息进行综合分析,进而达到优选找矿靶区的目的。本部分共有 2 篇研究性文章,包括地形可视化的算法和模拟(李朝奎等, 2020)以及地球化学异常信息提取算法(李苍柏等, 2020)。

地形可视化是利用数字高程模型 DEM,采用计算机图形学和图像处理技术进行三维地形模拟显示。利用 GPU 高性能并行计算功能,将其与 ROAM 算法相结合进行地形可视化研究,可为矿产资源评价、三维地质建模等工作提供基础分析数据(李朝奎等, 2020);运用强制分割方法对 ROAM 算法所产生的裂缝进行修复,能够消除地形建模过程中产生的地形裂缝;利用 GPU 进行加速实验时,随着计算量的增大,计算效果越来越明显,当计算量达到一定值时,加速效果达到一个稳定的趋势。

地球化学异常识别对矿产资源的定位、定量预测具有重要的指示作用。在矿产资源勘查的新形式以及海量数据的支持下,研发复杂地质条件下地球化学的提取技术,对勘查地球化学数据进行挖掘和再开发,进而带动找矿突破显得尤为重要。李苍柏等(2020)通

过设计理论实验,可视化了不同算法,认为不同机器学习方法在不同地区的地球化学异常信息提取中的效果存在不一致性;将人工神经网络、随机森林以及支持向量机应用于湖南香花岭锡多金属矿及甘肃合作金矿的地球化学异常信息的识别与提取时,人工神经网络的结果在香花岭研究区较好,随机森林的结果在合作研究区较好;在地球化学异常信息提取中,比较不同监督机器学习算法的训练集、测试集精确度,可以选出最佳算法,构建最优模型,从而使地球化学异常信息提取的结果更具备可靠性。

4 结论

本专辑发表的 15 篇文章,涉及矿产资源三维预测、地质调查与研究及地质、地化数据处理方法等研究方向与内容,主要系统总结了项目的阶段性研究方法及其成果。我们希望通过本文的简要介绍有助于读者了解这批文献关于深部矿产资源预测评价的研究方法。总之,深部资源预测研究不仅包含着数学地质学、岩石学、构造学、矿床学、地球物理学、地球化学众多的学科内容,而且是一个长期研究的过程。

致谢: 本专辑得到许多地质学家们的帮助与支持,中国地质科学院矿产资源研究所隗含涛、向杰两位博士后在专辑的组织过程中付出了努力,在此一并表示衷心的感谢。同时,感谢本专辑编辑付出的辛勤劳动。

参考文献:

- 曹创华, 邹光均, 彭杰, 楼法生, 邓居智, 孟德保, 康方平, 文春华, 李坤鹏, 韩中骥. 2020. 湘西北民乐毗邻区深部电性结构及其地质意义[J]. 地球学报, 41(2): 219-229.
- 陈建平, 吕鹏, 吴文, 赵洁, 胡青. 2007. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测[J]. 地学前缘, 14(5): 56-64.
- 陈进, 毛先成, 邓浩. 2020. 山东大尹格庄金矿床深部三维定量成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 179-191.
- 邓浩, 郑扬, 陈进, 魏运凤, 毛先成. 2020. 基于深度学习的山东大尹格庄金矿床深部三维预测模型[J]. 地球学报, 41(2): 157-165.
- 郝兴中, 郑金明, 刘伟, 王润生, 王巧云, 张贵丽. 2020. 山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 293-302.
- 黄建中, 孙骥, 周超, 陆文, 肖荣, 郭爱民, 黄革非, 谭仕敏, 隗含涛. 2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力[J]. 地球学报, 41(2): 230-252.
- 李苍柏, 肖克炎, 李楠, 宋相龙, 王凯, 楚文楷, 曹瑞. 2020. 支持向量机、随机森林和人工神经网络机器学习算法在地球化学异常信息提取中的对比研究[J]. 地球学报, 41(2): 309-319.
- 李朝奎, 方军, 肖克炎, 王宁, 周青蓝, 隗含涛. 2020. 基于 GPU 的地形可视化加速算法研究[J]. 地球学报, 41(2): 303-308.
- 李伟, 陈建平, 贾玉乐, 周冠云, 毛先成, 肖克炎. 2020. 甘肃早子沟金矿三维建模与综合成矿预测[J]. 地球学报, 41(2): 144-156.
- 毛先成, 王琪, 陈进, 邓浩, 刘占坤, 王金利, 陈建平, 肖克炎. 2020. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义[J]. 地球学报, 41(2): 166-178.
- 孙骥, 周超, 陆文, 郭爱民, 肖荣, 隗含涛, 谭仕敏, 贾朋远. 2020. 湖南古台山金锑矿床成矿流体 He-Ar、Sr 同位素地球化学及深部找矿意义[J]. 地球学报, 41(2): 267-279.

- 隗含涛, 邵拥军, 汪程, 刘清泉, 刘忠法, 肖克炎. 2020. 湘东北金鸡金矿床岩体成岩机制[J]. 地球学报, 41(2): 253-266.
- 向杰, 肖克炎, 陈建平, 李诗. 2020. 基于成矿系统的三维定量预测研究——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地球学报, 41(2): 135-143.
- 肖克炎, 李楠, 孙莉, 邹伟, 李莹. 2012. 基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径[J]. 地质学刊, 36(3): 229-236.
- 杨成富, 刘建中, 顾雪祥, 王泽鹏, 陈发恩, 王大福, 徐良易, 李俊海. 2020. 南盘江—右江盆地构造演化与金梯成矿作用[J]. 地球学报, 41(2): 280-292.
- 张权平, 陈建平, 陈雪薇, 李国超, 刘畅, 朱静. 2020. 贵州烂泥沟金矿三维定量预测[J]. 地球学报, 41(2): 193-206.
- 赵鹏大, 陈建平, 张寿庭. 2003. “三联式”成矿预测新进展[J]. 地学前缘, 10(2): 455-463.
- 邹光均, 黄建中, 凌跃新, 谭仕敏, 曹创华, 黄革非, 文春华. 2020. 湘黔渝毗邻区南华纪岩相古地理及沉积盆地演化[J]. 地球学报, 41(2): 207-218.

References:

- CAO Chuang-hua, ZOU Guang-jun, PENG Jie, LOU Fa-sheng, DENG Ju-zhi, MENG De-bao, KANG Fang-ping, WEN Chun-hua, LI Kun-peng, HAN Zhong-ji. 2020. Deep Electrical Structure in the Neighboring Areas of Minle in Northwestern Hunan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 219-229(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, LÜ Peng, WU Wen, ZHAO Jie, HU Qing. 2007. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 56-64(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jin, MAO Xian-cheng, DENG Hao. 2020. 3D Quantitative Mineral Prediction in the Depth of the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 179-191(in Chinese with English abstract).
- DENG Hao, ZHENG Yang, CHEN Jin, WEI Yun-feng, MAO Xian-cheng. 2020. Deep Learning-based 3D Prediction Model for the Dayingezhuang Gold Deposit, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 157-165(in Chinese with English abstract).
- HAO Xing-zhong, ZHENG Jin-ming, LIU Wei, WANG Run-sheng, WANG Qiao-yun, ZHANG Gui-li. 2020. Metallogenic Prognosis of Skarn-type Iron Ore Deposits in Qihe-Yucheng Area, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 293-302(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jian-zhong, SUN Ji, ZHOU Chao, LU Wen, XIAO Rong, GUO Ai-min, HUANG Ge-fei, TAN Shi-min, WEI Han-tao. 2020. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Gold Deposits of Hunan Area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 230-252(in Chinese with English abstract).
- LI Cang-bai, XIAO Ke-yan, LI Nan, SONG Xiang-long, ZHANG Shuai, WANG Kai, CHU Wen-kai, CAO Rui. 2020. A Comparative Study of Support Vector Machine, Random Forest and Artificial Neural Network Machine Learning Algorithms in Geochemical Anomaly Information Extraction[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 309-319(in Chinese with English abstract).
- LI Chao-kui, FANG Jun, XIAO Ke-yan, WANG Ning, ZHOU Qing-lan, WEI Han-tao. 2020. Research on Acceleration Algorithm of Terrain Visualization Based on GPU[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 303-308(in Chinese with English abstract).
- LI Wei, CHEN Jian-ping, JIA Yu-le, ZHOU Guan-yun, MAO Xian-cheng, XIAO Ke-yan. 2020. Three-dimensional Modeling and Comprehensive Metallogenic Prediction of the Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 144-156(in Chinese with English abstract).
- MAO Xian-cheng, WANG Qi, CHEN Jin, DENG Hao, LIU Zhan-kun, WANG Jin-li, CHEN Jian-ping, XIAO Ke-yan. 2020. Three-dimensional Modeling of Deep Metallogenic Structure in Northwestern Jiaodong Peninsula and Its Gold Prospecting Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 166-178(in Chinese with English abstract).
- SUN Ji, ZHOU Chao, LU Wen, GUO Ai-min, XIAO Rong, WEI Han-tao, TAN Shi-min, JIA Peng-yuan. 2020. He-Ar-Sr Isotope Geochemistry of Ore-forming Fluids in the Gutaishan Au-Sb Deposit in Hunan Province and Its Significance for Deep Prospecting[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 267-279(in Chinese with English abstract).
- WEI Han-tao, SHAO Yong-jun, WANG Cheng, LIU Qing-quan, LIU Zhong-fa, XIAO Ke-yan. 2020. Petrogenesis of the Granitoids in the Jinji Au Deposit, Northeastern Hunan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 253-266(in Chinese with English abstract).
- XIANG Jie, XIAO Ke-yan, CHEN Jian-ping, LI Shi. 2020. 3D Metallogenic Prediction Based on Metallogenic System Analysis: A Case Study in the Lala Copper Mine of Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 135-143(in Chinese with English abstract).
- XIAO Ke-yan, LI Nan, SUN Li, ZOU Wei, LI Ying. 2012. Large scale 3D mineral prediction methods and channels based on 3D information technology[J]. Journal of Geology, 36(3): 229-236(in Chinese with English abstract).
- YANG Cheng-fu, LIU Jian-zhong, GU Xue-xiang, WANG Ze-peng, CHEN Fa-en, WANG Da-fu, XU Liang-yi, LI Jun-hai. 2020. The Relationship of Tectonic Evolution and Au-Sb Mineralization in Nanpanjiang-Youjiang Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 280-292(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Quan-ping, CHEN Jian-ping, CHEN Xue-wei, LI Guo-chao, LIU Chang, ZHU Jing. 2020. 3D Quantitative Prediction in the Lannigou Gold Deposit, Guizhou Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 193-206(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Peng-da, CHEN Jian-ping, ZHANG Shou-ting. 2003. The New Development of “Three Components” Quantitative Mineral Prediction[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 10(2): 455-463(in Chinese with English abstract).
- ZOU Guang-jun, HUANG Jian-zhong, LING Yue-xin, TAN Shi-min, CAO Chuang-hua, HUANG Ge-fei, WEN Chun-hua. 2020. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Nanhua Period in Hunan-Guizhou-Chongqing Border Area, South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 207-218(in Chinese with English abstract).

中国地质科学院矿产资源研究所研究员, 博士生导师
自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室首席科学家
《地球学报》常务编委



二〇二〇年三月二日于北京