

文章编号: 1000-4734(2023)06-0729-06

# 贵州特色优势矿产资源: 代序

刘志臣<sup>1</sup>, 薛忠喜<sup>2,3</sup>, 黄智龙<sup>2\*</sup>

(1. 贵州省地矿局一〇二地质大队, 贵州 遵义 563003; 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, 贵州 贵阳 550081; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

关键金属是指现今社会发展所必需、关乎国家战略性需求的稀有金属、稀土金属、稀散金属等重要金属, 对其开展研究工作是提升国民经济、维护国家安全和推动新兴产业科技发展的重要战略性关键举措<sup>[1]</sup>。贵州省是我国重要的沉积矿产资源大省, 众多关键性金属矿床、非金属矿床、能源矿床等在贵州均有分布, 由此贵州具有开展相关矿床的成矿理论、找矿模型及成矿预测等工作得天独厚的条件。同时, 为认真落实新一轮找矿突破战略行动, 保障新能源电池材料等新兴产业高质量发展, 支撑“双碳”目标实现, 应对我国关键金属供需矛盾等现实风险, 围绕贵州省作为特色优势资源矿种的国家战略性关键矿产资源——稀土、钡、氟、锌锆等资源成矿作用开展研究具有十分重要的经济及现实意义。

本专辑刊出18篇论文, 以产学研相结合为主要研究路线指引, 研究总结了贵州稀土、钡、氟、锌锆等特色优势矿产资源的成矿规律, 阐述了这些矿种的地质-地球物理-地球化学-遥感地质大数据找矿预测关键技术, 系统反映了相关理论研究和实际应用的新进展。

## 1 主要科学问题

贵州稀土、钡、氟、锌锆等特色优势矿种研究的主要科学问题涉及到成矿地质背景、古沉积相分析、构造控矿关联、成矿物质与成矿流体来源及其迁移汇聚规律、地球物理与化学找矿预测及绿色勘察技术体系等方面。

**1) 贵州稀土资源成矿规律与找矿预测研究。**贵州西部地区上二叠统宣威组底部的“沉积型稀土”是一种罕见的、富含关键稀土元素的新类型稀土资源。赋矿层碎屑锆石年龄、微量元素与稀土元素配分模式、富稀土黏土岩 Hf 同位素均指示其物质来源与峨眉山大火成岩省密切相关<sup>[2]</sup>。稀土元素主要以纳米矿物的形态被“束缚”在黏土矿物层间结构中, 另外可能存在独立矿物态、类质同象态和离子吸附态<sup>[3-5]</sup>。其形成机制仍然存在较大争议, 一般认为在晚二叠世炎热、潮湿、强风化的气候条件下, 玄武岩等经过风化剥蚀后, 搬运沉积至基底低洼处的湖相环境中, 在后期陆表淋滤作用下, 元素不断解析富集, 从而被吸附性强的黏土矿物吸附于表面, 或进入矿物晶格, 形成富稀土层<sup>[6-8]</sup>。因此, 稀土元素的富集规律和成矿模式仍然是当前主要的科学问题。

**2) 贵州重晶石成矿规律与找矿预测研究。**沉积型重晶石矿床成矿常与热液活动、古海洋环境骤变等地质事件相互耦合。寒武纪、泥盆纪作为我国沉积型重晶石成矿的重要峰期在贵州表现尤为显著, 其中贵州“大河边式”、“乐纪式”重晶石矿床是典型代表。不过, 关于沉积型重晶石矿床的成因有不同的认识, “大河边式”重晶石矿床成因观点有海相化学沉积成因<sup>[9-10]</sup>、生物化学沉积成因<sup>[11]</sup>和海底

收稿日期: 2023-11-22

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.088

基金项目: 贵州省找矿突破战略行动重大协同创新项目(黔科合战略找矿[2022]ZD004)

第一作者: 刘志臣, 男, 1982年生, 正高级工程师, 博士研究生, 主要从事矿产地质勘查工作. E-mail: 123342436@qq.com

通讯作者: 黄智龙, 男, 1967年生, 博士研究生, 研究员, 主要从事成矿规律与成矿预测研究. E-mail: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn

热水喷流沉积成因<sup>[12-16]</sup>；“乐纪式”重晶石矿床物质很可能来源于受断裂系统控制的深源体系，而且在成矿过程中发现有古甲烷渗漏作用参与的强烈信号<sup>[17-18]</sup>。因此，精细刻画巨量钡超常富集成矿过程，查明关键控矿要素，摸清成矿规律，有效开展找矿预测，是当前极具挑战性的重要科学问题。

**3) 贵州萤石矿成矿规律与找矿预测研究。**萤石作为国家战略需求矿产，其矿产资源分布不均问题突出，在以气液爆破（隐爆）创新成矿理论<sup>[19-20]</sup>与矿产预测研究，对实现隐伏-半隐伏萤石矿床找矿突破有较好的意义。近年来，黔西南地区萤石在总结以往研究成果“不整合界面、层间滑脱构造、岩性界面”等类型萤石的成矿理论与找矿勘查方法的基础上，提炼以气液爆破（隐爆）角砾岩<sup>[21]</sup>、隐伏、半隐伏含矿断裂构造<sup>[22]</sup>的发现与识别，并在找矿实践中得以应用、追索气液爆破角砾岩与半隐伏断裂构造空间分布，提供找矿线索发现萤石矿的实例，如晴隆地区黑山箐一新寨萤石矿床，对气液爆破（隐爆）角砾岩作为重要找矿标志<sup>[21]</sup>、成矿作用研究逐渐成为该区隐伏-半隐伏萤石矿床找矿勘探的关键科学问题。黔东北—渝东南地区萤石主要集中在成矿物质来源、矿床地球化学与物质成分、成矿流体性质等方面的研究<sup>[22]</sup>，而对构造控矿、盆地演化、成矿规律等方面的科学问题，是制约开展该区萤石找矿预测的关键。

**4) 贵州铍锆等金属成矿规律与找矿预测研究。**川滇黔铅锌矿集区伴生 Ge 等稀散金属成矿规律研究程度相对较低，已有研究表明，低温热液铅锌矿床中 Ge、Ga、Cd 等稀散金属主要呈分散状态赋存于闪锌矿<sup>[23-24]</sup>，但在闪锌矿中的分布规律还存在很大争论，主要表现为 Ge 在不同成矿阶段的闪锌矿中含量存在显著差异，有学者认为 Ge 倾向于成矿晚阶段富集<sup>[25]</sup>，然而，对川滇黔铅锌矿集区多个矿床研究发现，Ge 倾向于在成矿作用的早阶段富集，即闪锌矿中铁含量越高 Ge 的含量也随之升高<sup>[26]</sup>。另外，以往川滇黔铅锌矿集区伴生 Ge 等稀散金属的查定多注重矿山生产的铅锌硫化物矿石，忽略了其在矿田、矿区、矿床、矿体以及矿石等不同尺度水平和垂直分布规律和富集特征，同时对伴生不同种类稀散金属的铅锌矿床地质特征缺乏对比研究，严重影响揭示低温热液型稀散金属超常富集成矿的苛刻条件，同时也限制了经济高效的矿石采选和稀散金属的靶区预测。

## 2 主要研究进展

本专辑论文针对上述主要科学问题开展了相关研究工作，从理论研究到实际生产等各个方面都取得了新的研究成果认识，具体研究进展如下。

### 2.1 贵州稀土资源成矿规律与找矿预测研究

课题研究团队以贵州西部威宁—赫章一带新发现的新类型稀土矿—“沉积型稀土”为研究对象，运用 XRF 分析、ICP-MS 分析、X 射线衍射分析，扫描电镜和能谱分析、电子探针分析、物相分析等手段，开展了稀土成矿物质来源、元素富集状态、沉积相等研究，对于稀土成矿地质条件、元素超常富集机理及区域成矿规律取得了较为深入的认识，在此基础上，建立了沉积型稀土的“源-汇-聚”系统，明确了成矿模式。为贵州西部“沉积型稀土”的找矿工作提供了理论依据。

黔西北玉龙地区稀土含矿层处于宣威组底部，假整合于峨眉山玄武岩组之上，是一套富集了 Nb、REE 的铁质、铝质黏土岩<sup>[27]</sup>。薛洪富等<sup>[27]</sup>研究认为铁质段、铝质段均经历过强烈的风化改造作用，铁质段与下伏峨眉山玄武岩具亲源性，形成于水动力较弱的氧化环境；而铝质段具有以峨眉山玄武岩提供主要物源与上地壳中酸性岩浆提供部分物源的混合物源特征，形成于水动力强—弱交替的氧化-还原界面。此外，铝质段是高品位稀土产出的直接影响因素，铝质黏土岩、含碳质铝质泥岩、致密状铝质泥岩、含碎屑/豆鲕铝质泥岩为稀土富集的优势岩相，由此，可以将是否存在铝质段和优势岩相组合齐全等特征来作为选择勘查首选区的重要参考指标<sup>[28]</sup>。

罗香建等<sup>[29]</sup>对赫章辅处地区沉积型富稀土岩系进行了地球化学分析研究, 研究区富稀土岩系分布稳定, 且杂色铝质黏土岩中稀土含量最高, 主量元素  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  三者含量之和占比在 81.13% 左右,  $\text{TiO}_2$  含量稳定, 其他相容元素损失严重。此外, 含矿岩系稀土元素配分模式显示为轻稀土元素富集、重稀土元素平坦特征, 与典型峨眉山玄武岩配分模式类似,  $\delta\text{Ce}$ 、 $\delta\text{Eu}$  均小于 1, 显示出弱的负异常特征, 结合其他相关地化指标证据等, 作者认为该研究区物源主体由峨眉山玄武岩提供, 富稀土岩性段还有中酸性火山灰的参与。

贵州西部晚二叠系玄武岩顶部新发现的“古陆相沉积型”稀土资源, 其富稀土岩系从下往上分别为铁质岩段、铝质岩段和宣威组底部的碎屑岩段<sup>[7]</sup>。其中, 铁质岩段为残积平原相、宣威组底部的碎屑岩段为河流-三角洲平原相, 中间富矿铝质岩段为“隆凹相间”的古地形地貌控制下的湖泊相, 通过对上述沉积岩系特征和沉积相分析, 作者建立了基底形成(风化剥蚀峨眉山玄武岩)—湿热气候湖泊沉积—河流发育沉积 3 阶段稀土岩系沉积模式<sup>[7]</sup>。

王彪等<sup>[5]</sup>以黔西北威宁县麻乍地区沉积型稀土矿为研究对象, 采用 XRF 分析、ICP-MS 分析、X 射线衍射分析, 扫描电镜和能谱分析、电子探针分析、物相分析等手段, 研究了稀土元素组成、矿物组成及稀土元素的赋存状态。研究表明, 稀土矿石主要由 Al、Si、Fe、K、Ti 组成, Al/Si 比在 0.8 以上, 稀土总量 (REO) 为  $1064 \times 10^{-6} \sim 14106 \times 10^{-6}$ , 呈轻稀土富集、重稀土亏损的特征; 矿石中矿物有硅酸盐矿物(主要为高岭石、伊利石)、金属氧化物(主要为褐铁矿、锐钛矿、金红石等)、碳酸盐矿物以及稀土矿物; 物相分析表明稀土元素的赋存状态主要为矿物相, 少量为离子相及胶体相, 化学连续提取相态分析表明稀土主要以残渣态存在, 稀土元素可能以类质同象形式赋存于黏土矿物中。

陈武等<sup>[30]</sup>对赫章户家沟剖面晚二叠世铁、铝岩系进行了沉积地球化学特征及沉积环境分析, 研究认为晚二叠世宣威组底部富集稀土的铝质岩系为在陆源近海低洼地带形成的湖相沉积, 其沉积古气候为温湿环境背景, 湖泊水体相对较深, 导致局部呈现弱氧化环境, 同时由于受到海侵作用的影响, 局部沉积水体盐度上升, 这种温湿、弱氧化、有盐分参与的沉积古环境可能有利于稀土元素的富集和保存。

李孟杰等<sup>[31]</sup>为查明铝土矿开发过程中关键金属的迁移规律, 以贵州某铝厂为例, 从拜耳法生产氧化铝的生产线上系统采集了原矿、中间产物、排放赤泥等一系列样品, 包括原矿、拜耳余液、铝硅酸岩沉淀物、脱硅溶液、洗涤液、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  沉淀物、水样、灰尘、赤泥滤饼、赤泥洗涤液、赤泥、赤泥压滤液等, 利用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 分析了这些样品中微量元素含量, 初步查明了 Li、Sc、Zr、REE 等关键金属的迁移规律, 为铝土矿拜耳法生产氧化铝过程中关键金属的综合利用提供了重要参考。

## 2.2 贵州重晶石成矿规律与找矿预测研究

课题研究团队以成矿系统理论为指导, 运用盆地原型恢复方法、沉积体系分析和基于区域地物化遥大数据挖掘等新技术, 厘定了贵州“大河边式”重晶石成矿地质背景、总结了成矿规律与控矿因素, 重建了成矿模式。

贵州天柱大河边超大型喷流沉积型重晶石矿床的北西边界为坪地断裂 F1, 主要分布在圭匀—大代白—圭禄山—虾麻塘—大河边—坪能一带, 其中圭禄山—虾麻塘一带矿体厚度较大。刘明民等<sup>[32]</sup>主要应用音频大地电磁测深 (AMT) 手段, 并结合以往勘查成果, 针对 F1 断裂开展系统研究, 鉴别断裂性质并探讨其对重晶石成矿层的改造影响, 结果表明, F1 断裂为成矿后断裂, 具逆-右行平移性质, 其错断了含矿岩系及重晶石矿层, 作者推测 F1 断裂下盘仍叠置有厚大重晶石矿层, 找矿潜力巨大。李永刚等<sup>[33]</sup>通过分析重晶石矿层厚度等值线发现, 同样发现重晶石成矿与北东向 F1 断层关系密切, 并认为该

断层由导矿构造和逆断层等耦合组成,且至少经历 3 个阶段的演化:早期盆地基底断层或同沉积断层,并在震旦纪-寒武纪留茶坡时期喷流沉积成矿;中期加里东褶皱运动继承导矿构造上半段形成逆断层;后期褶皱运动应力释放松弛阶段形成正断层,但因滑距有限而仍然显示为逆断层的最终地层效应。

陈云明等<sup>[34]</sup>以务川地区蕉坝、田坝、金竹堡、清水和温泉等 5 个典型的脉状重晶石矿床为研究对象,通过对矿床地质特征、矿床成因、关键控矿因素等开展综合研究,结果表明,基底的寒武系黑色岩系很可能是钡的主要供给源,区域性大型隐伏断裂及其相关次级断裂是引起基底地层中的钡不断迁移、活化并进入裂隙或断层破碎带成矿的关键因素,该类矿床成因类型归属低温热液型重晶石矿床。

### 2.3 贵州萤石矿成矿规律与找矿预测研究

课题研究团队从成矿作用过程、地球物理、地球化学、微观组构等角度总结提炼了该地区萤石矿构造控矿判别要素、气液爆破(隐爆)角砾岩体重要找矿标志,系统分析黔西南地区萤石矿成矿作用与气液爆破作用的关联,以及黔东北地区构造控矿与盆地演化制约成矿的因素,拓展了贵州西南部、东北部隐伏-半隐伏萤石矿床的找矿思路,确定了科学合理的找矿标志及找矿新方向。

陈登等<sup>[35]</sup>研究认为贵州务川涪洋地区萤石矿床为北西向张性断裂和下奥陶统地层碳酸盐岩控制的中—低温热液充填交代型矿床,区内萤石的形成可能为同一成矿流体来源在不同阶段成矿,其中双河矿床经历了多个成矿阶段叠加形成了中型规模萤石矿,鹿坪矿床为成矿早期形成的萤石重晶石矿床,一碗水矿床为成矿晚期形成的萤石矿床,作者推测该区具有较大的找矿潜力。

刘志臣等<sup>[36]</sup>以黔东北萤石矿为例,从区域构造变形、成矿作用、成矿物质来源、地球化学特征等与萤石矿床的成因关联研究,总结了构造作用对萤石成矿的控制与影响,建立了成矿模式。研究认为黔东北地区萤石矿是多个成矿阶段叠加形成,主体受古生代早期的构造活动和盆地演化控制,而广西运动、燕山运动仅对早期形成的矿床发生改造与破坏作用。

郭宇等<sup>[37]</sup>对黔东北沿河地区代表性小型金亮萤石矿床中萤石开展稀土元素地球化学研究,结果表明萤石  $\Sigma\text{REE}$  为  $67.4 \times 10^{-6} \sim 90.55 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE/HREE}$  值范围为  $43.98 \sim 78.78$ ,  $\delta\text{Eu}$  为  $77.07 \sim 94.71$ ,  $\delta\text{Ce}$  为  $0.39 \sim 0.42$ 。矿床萤石稀土分布模式呈明显右倾曲线,为轻稀土相对富集型,以 Eu 正异常和 Ce 负异常为特征。结合矿床地质特征,作者认为该萤石矿床为构造控制的热液成因的产物,萤石为同源同期热液流体在氧化环境成矿。

徐阳东等<sup>[38]</sup>对贵州晴隆碧痕营穹窿构造带中的代表性冬瓜林萤石矿床开展萤石及围岩样品的微量和稀土元素地球化学分析,认为冬瓜林萤石矿床与晴隆大厂铋矿属于同一个成矿系统,均为低温热液成因,萤石-铋矿化可能形成于相对还原的环境。此外,冬瓜林萤石矿床成矿物质主要来自于各类围岩,流体与围岩的相互作用,即水/岩反应是导致该区萤石沉淀富集成矿的重要因素。

### 2.4 贵州锌锗等金属成矿规律与找矿预测研究

课题研究团队通过开展音频大地电磁测深、激电测深综合电法、土壤有机烃等地物化遥勘查技术,在结合前人研究成果及理论分析的基础上,开发了有效的找矿预测方法,构建了合理的找矿模型,圈定了勘查区找矿远景区,为下一步找矿提供了重要参考。

大坪子铅锌矿位于垭都—蟒洞成矿带上,成矿地质条件优越,矿体受地层、构造和层间破碎控制明显<sup>[39]</sup>。农观海等<sup>[39]</sup>为进一步研究勘查区内深部成矿条件,推断有利成矿位置,定位矿体埋深,在研究矿体与围岩电性条件的基础上,开展了音频大地电磁测深和激电测深综合电法测量,研究认为,该区铅锌矿体一般位于音频大地电磁测深电阻率梯度变化带,激电测深低阻高极化突变位置,表现为(中)低阻高极化异常特征,作者通过总结该类型铅锌矿物探异常特征,圈定了勘查区找矿远景区,为下一

步寻找同类型硫化铅锌矿提供一些找矿思路。杜藎等<sup>[40]</sup>在黔西北大坪子铅锌矿区开展土壤有机烃结合金属活动态的深穿透地球化学勘查技术方法试验显示, 大坪子铅锌矿区土壤中烃类组份发育对偶双峰式和多峰式异常, 金属活动态在矿体上方和断裂构造地表出露位置有清晰的异常显示, 土壤有机烃和金属活动态可以有效地指示断裂构造, 并很好地反映深部隐伏铅锌矿体信息。土壤有机烃结合金属活动态的深穿透地球化学勘查技术可用于黔西北地区铅锌矿的深部找矿预测, 且对隐伏铅锌矿的找矿勘查具有较好的指导意义。

阮伟玲等<sup>[41]</sup>对猪拱塘铅锌矿区开展地物化遥勘查技术方法试验, 结果显示, 沿断裂构造带分布的遥感信息异常多与铅锌矿化有关, 音频大地电磁 (AMT) 测量圈定的低阻区域反映了铅锌矿体空间展布特征, 金属活动态以及有机烃异常与控矿断裂对应性良好。作者在此基础上构建了找矿模型: 成矿规律研究查明主控因素、预测找矿方向—遥感解译厘定构造格架, 确定成矿远景区—化探异常结合成矿地质条件分析圈定找矿靶区—AMT 等物探方法定位矿致异常—钻探工程验证圈定矿体。

青山矿床是黔西北地区代表性的中型铅锌矿床, 多伴生有黄铁矿, 但黄铁矿与铅锌成矿作用的关系相对研究薄弱, 吴莎等<sup>[42]</sup>对该矿床不同类型黄铁矿开展 EPMA 和 LA-ICP-MS 分析测试, 揭示其微量元素组成特征, 并探讨其成因和与铅锌成矿关系, 研究结果表明, 矿床中黄铁矿可划分为 2 期, 这 2 期黄铁矿均为同一热液活动的产物, 青山铅锌矿床黄铁矿为成岩期形成黄铁矿在中低温热液活动作用下重结晶形成, 故其微量元素继承了沉积型黄铁矿特征。

**致谢:** 本专辑得到贵州省找矿突破战略行动重大协同创新项目-贵州稀土、钡、氟等特色资源成矿规律与找矿预测研究 (黔科合找矿战略[2022]ZD004) 的项目行政总指挥朱春孝副局长、项目技术总指挥周琦研究员、中国地质大学 (武汉) 吴冲龙教授、贵州省地质矿产勘查开发局科技信息处况顺达处长、刘建中副处长等领导 and 老师的悉心指导, 以及贵州稀土、钡、氟等特色资源成矿规律与找矿预测研究项目部全体同仁的帮助, 还有《矿物学报》的各位审稿专家提出的宝贵意见, 在此一一表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106-111.
- [2] Tian E Y, Xiao B, Zhang J J, et al. Origin and metal-enrichment mechanism of sedimentary rare earth element deposits in Yunnan and Guizhou provinces, western Yangtze Block, China[J]. *Ore Geol Rev*, 2023: 105380.
- [3] 中国地质科学院矿产综合利用研究所. 黔西北地区沉积型稀土普查阶段一般工业指标论证报告[R]. 2022.
- [4] 龚大兴, 田恩源, 肖斌, 等. 川滇黔相邻区古陆相沉积型稀土的发现及意义[J]. *矿床地质*, 2023, 42 (05): 1025-1033.
- [5] 王彪, 黄庆, 何良伦, 等. 黔西北麻乍地区沉积型稀土矿稀土元素赋存状态研究[J/OL]. *矿物学报*, 2023: 1-14. [2023-11-10]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.087>.
- [6] 田恩源, 龚大兴, 赖杨, 等. 贵州威宁地区沉积型稀土含矿岩系成因与富集规律[J]. *地球科学*, 2021, 46 (08): 2711-2731.
- [7] 罗香建, 覃英, 卢树藩, 等. 贵州西部晚二叠世富稀土岩系沉积相分析[J/OL]. *矿物学报*, 2023: 1-12. [2023-10-25]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.079>.
- [8] 苏之良, 薛洪富, 金中国, 等. 黔西北峨眉山玄武岩顶部 Fe-Al 岩系钨、铋、稀土分布特征与富集规律[J]. *矿物学报*, 2021, 41 (Z1): 520-530.
- [9] 胡清洁. 新晃贡溪超大型重晶石矿床的岩石学特征与沉积成岩作用[J]. *湖南地质*, 1997, 16(2): 106-111.
- [10] 褚有龙. 中国重晶石矿床的成因类型[J]. *矿床地质*, 1989, 8(4): 92-95.
- [11] 高怀忠. 中国早寒武世重晶石及毒重石矿床的生物化学沉积成矿模式[J]. *矿物岩石*, 1998, 18(2): 70-77.
- [12] 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 新晃贡溪-天柱大河边重晶石矿床热水沉积成因探讨[J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 1999, 35(6): 774-785.
- [13] 夏菲, 马东升, 潘家永, 等. 贵州天柱大河边和玉屏重晶石矿床热水沉积成因的锶同位素证据[J]. *科学通报*, 2004, 53(5): 2592-2595.
- [14] 杨瑞东, 魏怀端, 鲍淼, 等. 贵州天柱上公塘一大河边寒武纪重晶石矿床海底热水喷流沉积结构、构造特征[J]. *地质论评*, 2007, 53(5): 675-682.
- [15] 杨瑞东, 李鑫正, 莫洪成, 等. 湘西黔东南寒武纪重晶石成矿规律与成矿模式[J]. *矿物学报*, 2023, 43(2): 173-184.
- [16] 周琦, 袁良军, 吴冲龙, 等. 贵州新元古代锰、重晶石等矿床成矿系列及找矿突破[J]. *地球学报*, 2023, 44(5): 943-954.
- [17] 高军波, 瑞东, 陶平, 等. 贵州镇宁泥盆系大型重晶石矿床地球化学特征及其成因研究[J]. *现代地质*, 2013, 27(1): 46-55.
- [18] 张旭, 高军波, 杨瑞东, 等. 贵州紫云泥盆系重晶石矿床中与古甲烷渗漏事件有关的球状灰岩成因厘定[J]. *地质论评*, 2017, 63(3): 630-640.

- [19] 邱小平, 刘世川, 魏密. 黔西南水银洞爆破角砾岩筒与金元素超常富集[J]. 地球学报, 2021, 42(6): 849-858.
- [20] 周振昊, 杜远生. 贵州铜仁枫木寨隐爆角砾岩筒的发现及地质意义[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 94-98.
- [21] 贵州省地矿局地球物理地球化学勘查院. 黔西南地区萤石矿产成矿规律与找矿预测研究阶段性总结报告[R]. 2023.
- [22] 邹瀛, 淡永, 张寿庭, 等. 重庆东南部彭水地区重晶石-萤石矿床的成矿物质来源探讨:地球化学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(1): 71-85.
- [23] Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, et al. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73(16): 4761-4791.
- [24] Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA-ICPMS study[J]. *Ore Geol Rev*, 2011, 39(4): 188-217.
- [25] Holl R, Kling M, Schroll E. Metallogenesis of germanium—a review[J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 30 (3/4): 145-180.
- [26] Wei C, Ye L, Hu Y S, et al. Distribution and occurrence of Ge and related trace elements in sphalerite from the Lehong carbo ate-hosted Zn-Pb deposit, northeastern Yunnan, China: insights from SEM and LA-ICP-MS studies[J]. *Ore Geol Rev*, 2019, 115: 103175.
- [27] 薛洪富, 黄威虎, 曾道国, 等. 黔西北玉龙地区稀土含矿层地球化学特征[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-16. [2023-10-25]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.075>.
- [28] 薛洪富, 黄威虎, 曾道国, 等. 黔西北玉龙地区 REE 矿化主控因素与找矿方向[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-11. [2023-10-25]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.076>.
- [29] 罗香建, 覃英, 卢树藩, 等. 赫章辅处地区沉积型富稀土岩系地球化学特征及物源分析[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-17. [2023-11-07]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.078>.
- [30] 陈武, 覃英, 罗香建, 等. 黔西北晚二叠世铁、铝岩系沉积地球化学特征及沉积环境分析——以赫章户家沟剖面为例[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-12. [2023-10-27]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.081>.
- [31] 李孟杰, 范宏鹏, 金中国, 等. 贵州某铝厂拜耳法生产氧化铝工艺流程中关键金属的迁移规律[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-3. [2023-10-24]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.077>.
- [32] 刘明民, 谢兴友, 苏特, 等. 贵州天柱大河边超大型重晶石矿床成矿后断裂(F1)对矿层的改造作用研究[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-8. [2023-10-31]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.080>.
- [33] 李永刚, 杨光忠, 王家俊, 等. 贵州天柱大河边重晶石矿区 F1 断层构造特征及其对成矿的控制[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-10. [2023-10-20]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.074>.
- [34] 陈云明, 刘志臣, 郭宇, 等. 贵州务川地区热液型重晶石矿床地质特征与控矿因素研究[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-12. [2023-10-19]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.073>.
- [35] 陈登, 刘志臣, 汤子程, 等. 贵州务川涪洋地区萤石矿床稀土元素地球化学特征[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-13. [2023-10-31]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.084>.
- [36] 刘志臣, 杨坤光, 汤子程, 等. 黔东北地区构造作用对萤石成矿的控制与影响[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-14. [2023-11-07]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.082>.
- [37] 郭宇, 陈登, 汤子程, 等. 黔东北地区金亮萤石矿床稀土元素地球化学特征及成矿物质来源探讨[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-9. [2023-08-22]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.071>.
- [38] 徐阳东, 祁连素, 尹廷龙, 等. 贵州晴隆冬瓜林萤石矿床微量和稀土元素地球化学特征[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-9. [2023-11-09]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.085>.
- [39] 农观海, 黄凯, 邓耀辉, 等. 黔西北大坪子铅锌矿区电法组合异常特征及找矿潜力分析[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-11. [2023-11-14]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.083>.
- [40] 杜蔺, 田超, 郑明泓, 等. 深穿透地球化学勘查技术在黔西北大坪子铅锌矿找矿中的应用[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-15. [2023-08-23]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.070>.
- [41] 阮伟玲, 杜蔺, 郑明泓, 等. 黔西北铅锌矿勘查技术方法试验与找矿模型构建——以猪拱塘铅锌矿为例[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-10. [2023-10-18]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.072>.
- [42] 吴莎, 阮伟玲, 金中国, 等. 黔西北青山铅锌矿床黄铁矿微量元素组成特征及其地质意义[J/OL]. 矿物学报, 2023: 1-13. [2023-11-10]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.086>.