

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

土壤地球化学测量多元素找矿指标研究 ——以二道坎银矿为例

符安宗^{1,2*}, 杨文鹏^{1,2}

1. 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

多宝山地区二道坎银矿共发育两条北西西向的银多金属矿体, I 号矿体于 318~328 线之间出露地表, 于 332~356 线之间向地下侧伏; II 号矿体于 279~284 线之间出露地表, 于 278~232 线之间向地下侧伏。1:2 万土壤地球化学测量仅在地表矿体上方出现高值 Ag 异常 ($>1.00 \times 10^{-6}$), 而向地下侧伏部位则仅出现弱的 Ag 异常 ($0.12 \times 10^{-6} \sim 0.32 \times 10^{-6}$)。这些侧伏矿体引起的弱异常在以往的工作中大都被忽略掉了, 因此亟需创新矿产勘查新方法去识别这些弱异常。本次研究采集了二道坎银矿区地表矿体上方土壤 (EDK1)、侧伏矿体上方土壤 (EDK2)、围岩上方土壤 (EDK3) 及矿区外围背景岩石上方土壤 (EDK4) 等样品, 分析 Au、Ag、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Bi、Mn、F、Cd、B、Li、Be、U、Ba、Ni、Co、Cr、La、Nb、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Zr、SiO₂、TFe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O、MgO、CaO 等 39 种元素和氧化物。结果显示: 与 EDK3 和 EDK4 相比, EDK1 具有高含量的 Ag、Pb、Zn、TFe₂O₃、Mn、As、Sb、Hg、Cd、W 和低含量的 Al₂O₃、CaO、K₂O、SiO₂、B、Ba、F、La、Sr、U、V, EDK2 具有高含量的 Ag、TFe₂O₃、Mn、As、Sb、Hg 和低含量的 CaO、Ba、F、U; EDK1 的 Sr/Mn、Au/Ag、Zn/Cd 明显偏低, EDK2 的 Sr/Mn、Au/Ag、Zn/Cd 偏低; EDK1 的 Pb/Zn、Pb/K₂O 明显偏高, EDK1 和 EDK2 的 Sb/Cu、Sb/Mo、Sb/W、Sb/Sn、Sb/Bi、Ag/Cu、Ag/Mo、Ag/W、Ag/Sn、Ag/Bi 明显偏大。各元素和氧化物的箱线图显示, EDK1→EDK2→EDK3→EDK4, TFe₂O₃、Ag、Sb、Hg 具有明显的下

降趋势, As 总体上显示下降趋势, CaO、K₂O、SiO₂、F、Ba、U 具有弱的上升趋势; EDK1 中的 Pb、Zn、Mn、W、Mo、Cd 含量明显比其在 EDK3 和 EDK4 中的含量高; EDK1 中的 La、Sr、V 含量较其在 EDK3 和 EDK4 中的含量低。本研究选择 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、F、Cd、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、TFe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 等元素和氧化物对数变换后的数据进行主成分分析, 通过提取累计方差约 64 % 的三个主成分 (PC) 绘制主成分分析 PCA 双标图。双标图显示, EDK1 多集中在右侧, 样品中的 Ag、Pb、Zn、TFe₂O₃、Mn、As、Sb、Hg、Cd、W、Mo、Sn 等元素呈正相关, 并与 K₂O、Na₂O、Ba、La、Sr、V、P 等元素呈负相关; EDK2 集中在原点附近靠右侧, 样品中各元素相关性与 EDK1 相似, 但相关性较弱; EDK3 和 EDK4 主要集中在左侧, 样品中各元素相关性与 EDK1、EDK2 相反。本研究绘制了大量的二元图解, 其中 As-Sb、F-Hg、As-Hg、Co-Sb、Cd-Zn、Mn-TFe₂O₃ 和 As/Cu-Sb/Cu 二元图解对地表矿体有很好的指示作用, Mg[#]-Cd/Zn 图解对隐伏矿体有很好的指示作用, As-Sb、Co-Sb 和 As/Cu-Sb/Cu 对隐伏矿体有一定的指示作用。这些特征可作为土壤地球化学测量的多元素找矿指标, 为银多金属矿产勘查中的微弱矿致异常的识别提供新的视角。

关键词: 二道坎银矿; 土壤地球化学测量; 矿致异常识别; 找矿指标

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

贵州埃迪卡拉纪沉积磷矿床成矿作用

高川黔¹, 杨瑞东^{1*}

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550000

在新元古代末期发生了一系列重大的地质历史事件, 诸如 Rodinia 超级大陆解体、“雪球事件”、全球大规模成磷事件等。在全球大规模成磷事件背景下, 扬子地块埃迪卡拉系陡山沱组不仅广泛发育海相沉积型磷矿床, 同时也保存了具有重要科学研究价值的古生物化石, 为早期生命的多细胞化、组织化提供了证据。贵州瓮安陡山沱组磷块岩矿床是此次成磷事件的典型代表之一, 在磷矿层中保存大量三维立体化石, 主要包括底栖的多细胞藻类、大型带刺疑源类、动物胚胎化石等类型。通过对贵州瓮安穿岩洞磷矿详细野外地质调查与室内研究, 发现该地区陡山沱组磷矿床上矿层底部磷块岩中沉积有数层球粒状磷块岩。以该岩石样品为研究对象, 利用体视显微镜、光学显微镜和电子显微镜观察其显微结构特征。在显微镜下, 球粒状磷块岩具有明显的生物结构特征, 化石体形态多样, 多呈圆球、次圆球、长椭球状; 由于受到地质作用的影响, 部分化石个体保存不完整, 常见有壳体破损、化石表面的纹饰模糊不清等现象。通过对比分析认为化石主要包括多细胞藻类、Megasphaera 球状化石以及可能从中脱落的单体细胞。磷块岩中富

含 P_2O_5 、CaO, 并且含有较高含量的 SiO_2 , 主要组成矿物为碳氟磷灰石; 磷块岩中部分微量元素相对比较富集, Sr 的含量为 1235×10^{-6} , Ba 为 828×10^{-6} , 远高于地壳平均值和碳酸盐岩平均值。此外, As、Zn、Cu 等元素也相对比较富集, 这些元素的富集反映出生物在磷块岩形成过程中的富磷作用。在此基础上, 探讨该地区陡山沱组球粒状磷块岩形成过程中微生物的成磷作用。研究区球粒状磷块岩的形成是多细胞藻类生物、多细胞真核生物以及其他微生物共同富磷作用的结果, 其形成过程主要可概括为: 生物吸附大量的磷质, 在其组织中聚集磷质, 微生物死亡后, 细胞内部吸附的成矿物质发生磷酸盐化, 形成磷灰石; 同时, 微生物死亡降解过程中产生的各种氨基酸、甲烷、二氧化碳等气体以及磷质进入水体中, 改变了水体环境, 降解释放的磷质增加了水体中磷质含量, 当海水中磷质达到饱和状态时, 磷灰石发生沉淀。

关键词: 贵州省; 瓮安; 陡山沱组; 球粒状磷块岩; 生物成磷作用

国家重点研发计划项目 (编号: 2023YFC2906604)、国家自然科学基金项目 (编号: U23A2027) 和贵州省地质勘查资金项目 (编号: 2024-2 号) 联合资助。

第一作者: 高川黔 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 沉积矿产, Email: 1922521159@qq.com

通讯作者: 杨瑞东 (1963-), 教授、博士生导师, 研究方向: 矿床学及地球化学, Email: rdyang@gzu.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

闪锌矿中关键金属铟富集机制的第一性原理计算模拟

肖凡^{1*}

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 珠海 519000

铟(In)是一种具有战略性资源意义的关键金属, 闪锌矿是 In 的主要载体矿物。研究表明, In 主要通过替代 Zn 而存在于闪锌矿晶格中, 但 In 在闪锌矿中的富集机理与制约条件仍不清晰。为了理解关键金属 In 在闪锌矿的富集过程, 运用第一性原理计算和分子动力学方法, 对成矿过程中常出现的两种耦合替代形式—— $\text{Cu (I) + In (III)} \rightarrow 2\text{Zn (II)}$ 和 $\text{Ag (I) + In (III)} \rightarrow 2\text{Zn (II)}$ 条件下, 以及 $\alpha\text{-ZnS}$ 与 $\beta\text{-ZnS}$ 相闪锌矿中, In 富集过程进行计算模拟, 包括: (1) In 取代 Zn 进入闪锌矿中的反应过程; (2) In 在 $\alpha\text{-ZnS}$

与 $\beta\text{-ZnS}$ 相闪锌矿中的替换 Zn 的过程; (3) In 在闪锌矿表面——(100)、(110) 和 (111) 的吸附过程。通过对模拟结果, 包括平衡构型、布居值、电子结构、表面能、形成能和吉布斯自由能等的分析, 揭示了 In 在闪锌矿替换 Zn 富集过程的物理化学特性与制约关系, 在原子或/和分子层面提升了对关键金属 In 成矿过程与有利条件的深刻理解。

关键词: 关键金属; 闪锌矿; 铟; 第一性原理; 分子动力学

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

滇东马路磷矿床富集机理与控制因素

庞雨雨¹, 高军波^{1*}

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550000

云南东北部是寒武纪早期沉积型磷矿发育的典型地区。本研究以滇东马路磷矿为主要对象, 在详细地野外沉积学调查研究基础之上, 通过精细地岩相学和元素地球化学分析, 探讨成磷环境, 揭示成磷过程, 综合探讨高品位磷矿床的形成机制和控制因素。

马路磷矿位于云南省会泽县马路乡, 属于云南五大磷矿聚集区之一的东川-会泽磷矿区, 大地构造位置位于扬子陆块-上扬子陆块-滇东被动陆缘-昭通陆棚。马路剖面由早寒武世梅树村组小歪头山段、中谊村段组成, 磷矿层赋存于中谊村段中, 由下部块状磷块岩和上部的厚层条带状磷块岩组成。矿石构造包括块状构造、条带状构造、纹层状构造、蜂窝状构造。主要矿石矿物为碳氟磷灰石, 脉石矿物有白云石、方解石、石英、铁氧化物和少量黏土矿物。矿石结构包括内碎屑结构、纤维聚晶结构、凝胶状结构。其中砂屑结构是马路磷矿最常见的结构, 粒径大小一般为 0.15~0.3mm, 分选性较好, 次棱角状-次圆状, 在矿石中含量约占 70%~95%, 胶结物主要为白云石和磷质胶结, 胶结方式以磷质纤状包壳叠加白云质亮晶孔

隙胶结为主。磷矿石主要化学成分包括 P_2O_5 、 MgO 、 CaO 、 SiO_2 、 F , 具富钙、低铝、低硅的特征。滇东地区处在早寒武世的开阔台地中, 发育以碳酸盐岩为主的浅水台地相, 属于潮间-潮下间歇性高能环境。马路磷块岩 V/Cr 、 δCe 、 Y/Ho 值等地球化学特征都反映其形成与较氧化的环境中。通过岩相观察马路磷矿小型楔状交错层理、砂屑结构等特征普遍发育, 结合 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 含量普遍较低, 且与 P_2O_5 含量都呈现负相关变化, 我们认为马路高品位磷矿可能形成与水下高地附近的浅水位置, 较强的水动力条件使得该磷块岩中颗粒分选良好, 呈次圆状-次棱角状, 泥沙质成分含量低。明显的砂糖状磷块岩、蜂窝状构造、溶蚀孔洞等暴露特征, 结合地球化学特征 MgO 与 P_2O_5 含量呈负相关变化, 说明后生淋滤风化作用使得碳酸盐成分流失, 磷品位进一步提高。综合认为岩相古地理和风化改造对成矿据重要的控制作用。

关键词: 富磷矿; 控矿要素; 成矿机理; 会泽; 云南

基金项目: 本文为国家重点研发计划项目 (2023YFC2906604)、贵州省科技支撑项目 (编号: 黔科合支撑[2024]一般 128) 和国家自然科学基金项目 (编号: 42163006, 42462008)、贵州省地质勘查资金项目 (编号: 2024-2 号) 联合资助的成果。

第一作者简介: 庞雨雨 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学, Email: 1520068289@qq.com

通讯作者简介: 高军波 (1985-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 沉积矿床教学与研究, Email: jbgao@gzu.edu.cn.

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

核边结构黄铁矿的形成机制

肖景丹¹, 谢卓君^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

卡林型金矿中的金主要以晶格金形式赋存于含砷黄铁矿中, 含砷黄铁矿通常围绕成矿早期的黄铁矿进行沉淀生长形成具有核边结构的黄铁矿。核边结构黄铁矿作为卡林型金矿最主要的载金矿物, 其形成机制尚不清楚。本报告是作者最新的研究进展, 从晶体

学角度揭示出外延生长是形成核边结构黄铁矿的最主要机制。

关键词: 卡林型金矿; 含砷黄铁矿; 核边结构黄铁矿; 晶格金

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

滇东南个旧锡矿锡石地球化学特征及意义

谢俊杰¹, 张嘉鑫¹, 刘英梅¹, 刘思芸¹, 傅佳丽¹, 李婉婷^{1*}

1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500

个旧锡矿位于滇东南锡矿带, 是全球最大的锡多金属矿床之一, 已探明的锡资源储量超过 200 万吨, 同时伴生 Cu、Pb、Zn、W、Bi、Mo、In 等多种金属矿产。该矿床的形成与燕山期高分异花岗岩侵入活动密切相关, 并经历多期次热液叠加成矿, 形成了云英岩型、矽卡岩硫化物型、块状硫化物型、层间氧化矿型、电气石细脉带型和含锡白云岩型 6 种主要矿石类型。本次研究综合利用扫描电子显微镜、电子探针和 LA-ICP-MS 等分析方法, 对个旧锡矿矽卡岩硫化物型和块状硫化物型矿石中锡石开展了原位主微量元素成分研究, 探讨了两类锡石的成分差异和流体演化过程。

矽卡岩硫化物型锡石与石榴石、透辉石等矽卡岩矿物共生, 呈浅棕-深棕色, 颗粒大小不一, 粒径约 0.12~3.68mm, 多为四方双锥, 少量可见四方柱状晶形, 部分锡石颗粒发育环带结构。该类锡石主要由 SnO₂ 和少量 CaO (0.53%~0.60%)、FeO (<0.29%)、TiO₂ (<1.28%)、V₂O₅ (<0.07%)、Sc₂O₃ (<0.46%)、WO₃ (<0.99%)、MnO (<0.05%)、MgO (<0.04%)、Al₂O₃ (<0.05%)、SiO₂ (<0.03%)、Nb₂O₅ (<0.05%)、Ta₂O₅ (<0.11%)、ZrO₂ (<0.03%) 组成, 富集 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素, 还含有极少量 In (<6×10⁻⁶)。块状硫化物型锡石多与黄铜矿、闪锌矿、黝锡矿等硫化物共生, 呈浅棕色-棕黄色, 粒径约 0.13~0.78mm, 多为他形或四方柱状, 少量为四方单锥晶形, 普遍发育环带, 部分颗粒发育增生结构。该类锡石主要由 SnO₂ 和少量 CaO(0.54%~0.61%)、FeO

(0.06%~2.37%)、TiO₂ (<0.28%)、V₂O₅ (<0.02%)、Sc₂O₃ (<0.41%)、WO₃ (<0.88%)、MnO (<0.02%)、MgO (<0.03%)、Al₂O₃ (<0.08%)、SiO₂ (<0.08%)、Nb₂O₅ (<0.10%)、Ta₂O₅ (<0.05%)、ZrO₂ (<0.03%) 组成, 其 Fe 和 In (24×10⁻⁶~59×10⁻⁶) 含量明显高于矽卡岩硫化物型锡石, Al、Be、Ga、Sb 等元素含量也略有升高, 而 Ti、V 及 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素含量明显降低。

两类锡石均发育环带结构, 表明它们经历了较缓慢的结晶作用, 随着成矿热液温度的降低, 从锡石颗粒中心到边缘, Fe、W、Ti、Sc 等含量逐渐降低, Sn 含量逐渐增加。然而, 本次研究发现块状硫化物型锡石颗粒常被较多细小锡石颗粒包裹交代形成增生边, 且增生的锡石小颗粒中 Fe、Sc 含量显著增加, Sn 含量显著降低, 表明 Fe、Sc 大量进入锡石晶体中替代 Sn, 可能反映了成矿环境的突然转变, 指示锡石受到后期流体活动的叠加改造。铟在锡石中的富集与成矿热液的成分、温度、压力及矿物共生组合密切相关, 前人研究指出矽卡岩硫化物型锡石形成于高温、氧化环境, 因此铟可能更倾向分散于硅酸盐或氧化物相, 锡石中高场强元素的富集可能与岩浆热液的早期演化相关; 而块状硫化物型锡石则沉淀于中低温、还原、富硫环境, 硫化物活度的升高可能促进了亲硫元素(如 In、Sb)的络合与共沉淀。

关键词: 个旧锡矿; 锡石; In 富集特征; 微量元素

基金项目: 云南省基础研究专项面上项目 (202101AT070551); 云南大学大学生创新创业训练项目 (省级, S202310673257)

第一作者简介: 谢俊杰 (2003-), 在读本科生, 研究方向: 地质学. Email: 2609190123@qq.com

*通讯作者 j 简介: 李婉婷 (1988-), 讲师, 研究方向: 矿床成因及成矿规律. Email: liwanting0930@foxmail.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

基于植被波谱异常的铜钼矿植被地球化学信息提取

史超^{1*}, 李书¹

1. 水利部长江勘测技术研究所, 武汉 430011

高光谱遥感技术相较于多光谱遥感而言,其具有多光谱遥感数据无法比拟的光谱分辨率,细化的光谱间隔使高光谱遥感在地物精细识别及探测方面、地表物质的分类、识别、有用信息的提取等方面具有明显的优势,且具有较高的精度,这种优势是多光谱遥感数据所无法比拟的。以 AVIRIS 为代表的航空高光谱成像光谱仪投入使用后,高光谱遥感应用得到了推进,特别是在地质找矿方面得到了广泛应用,并取得了众多的应用成果。随着时间的推移,众多航空高光谱成像光谱仪投入使用,如加拿大的 CASI/SFSI,美国的 ASI、HYDICE、SEBASS 和 AVIRIS,澳大利亚的 Hymap,以及中国的 OMIS、CMODIS 等高光谱成像光谱仪。现有的成像光谱仪包括 Terra 综合平台上 MODIS 成像光谱仪、新千年计划第一星的 EO-1,利用 EO-1 卫星的 Hyperion 数据在农业监测、生态与环境、矿产资源调查取得了大量的应用成果。高光谱遥感的光谱分辨率让其具有精确的地物探测能力,在植被覆盖区受植被及地表覆盖物的干扰,岩石及矿化信息表现为弱缓信息,限制了高光谱遥感技术在植被覆盖区地质找矿应用。基于成矿元素迁移规律和植被在吸收矿化元素后在叶片中积累,导致植被波谱发生异常,通过对比分析矿区与非矿区典型植被光谱特征,在光谱特征分析结果基础上得出矿区典型植被均不同程度受到了重金属元素胁迫,并造成光谱曲线发生

变异。在分析结果基础上,结合植被地球化学数据建立重金属与植被光谱胁迫相关性数学模型,提出矿区重金属与覆盖植被胁迫相关性,叶片中 Co, Cu, Zn, Mo, Ag, Hg, Mn, Bi 和 As 等金属元素含量与其光谱吸收深度的 R² 均大于等于 0.80,表明上述金属元素与植被的吸收深度间存在较强的相关性,基于相关性模型估算出土壤及植被中成矿元素的含量及其空间分布特征,利用加权叠加分析,获得高光谱金属元素反演综合结果。综合已有矿点、线性构造、环形构造解译结果验证反演结果,为植被覆盖区利用高光谱遥感调查评价金属元素的分布和富集提供一种方法。

研究思路如下:(1)采集矿区和矿区外围背景区典型植被样本,同时利用光谱仪采集对应样本的光谱数据;(2)测定获得典型植被样本金属元素含量,通过金属元素含量测定结果,确定矿区典型植被样本是否受重金属元素影响;(3)对比分析矿区和背景区典型植被的波形特征;(4)统计分析矿区和背景区典型典型植被光谱的红边位置;(5)基于相关性模型估算出土壤及植被中成矿元素的含量及其空间分布特征,利用加权叠加分析,获得高光谱金属元素反演综合结果。

关键词: 植被覆盖区; 波谱异常; 高光谱; 植被地球化学

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

Fe 同位素和黄铁矿 S 同位素证据揭示砂岩型铀矿成矿流体属性

刘源¹, 赵军红^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

砂岩型铀矿是全球最重要的经济易采铀矿类型, 但其矿床成因仍存在巨大争议。目前存在两种主要观点: 一种认为深部油气/煤储层衍生的还原性含烃热流体沿断裂上涌, 与氧化性地下水或含矿层发生耦合反应成矿; 另一种则认为成矿流体主要来源于大气水, 强调表生流体与砂岩内还原物质的持续反应成矿, 排除了深部含烃热流体的参与。因此, 矿床成因的争议焦点在于成矿流体的属性尚未明确, 尤其是深部还原性含烃热液流体是否参与成矿

过程, 缺乏有力证据的约束。本次研究以鄂尔多斯盆地东胜铀矿为对象, 通过矿物学、Fe 同位素及黄铁矿 S 同位素研究, 揭示了铀成矿过程中成矿流体的属性。这一研究不仅能够深化对砂岩型铀矿成矿机制的理解, 还将为后续的找矿勘探提供重要的理论依据。

关键词: 砂岩型铀矿; 铁同位素; 硫同位素; 成矿流体

第一作者简介: 刘源 (1994-), 博士后, 研究方向: 砂岩型铀矿成矿作用. Email: liuyuan@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 赵军红 (1975-), 研究员, 研究方向: 大陆动力学与矿床学. Email: jhzhao@mail.gyig.ac.cn

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

岩浆作用及成矿的动力学过程

姚卓森^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

岩浆是地幔内部物质和能量向外传递的主要载体, 其形成、运移到冷却成岩的过程往往也伴随着显著的成矿作用。以往工作更多聚焦于岩浆的成分演化和元素的分配富集, 而最近人们正在经历从传统的熔体岩浆房向穿地壳晶粥储库模型的范式转换。本文尝试从物理机制的角度介绍并归纳镁铁-超镁铁质岩浆作用及相关岩浆矿床的动力学过程。首先, 阐述硅酸盐熔体及岩浆的密度和动态粘度的变化规律及其主要控制因素; 随后分别梳理熔体岩浆房内的岩浆对流、补给和混合作用, 以及晶粥储

库模型所涉及的堆晶压实、成分对流、补给活化及反应熔体流等, 以期能将这些抽象的概念转换为具体的动力学过程, 揭示成矿物质在动态岩浆体系内迁移汇聚的物理机制; 最后列举了铜镍硫化物矿床、豆荚状铬铁矿矿床和层状岩体内铬铁矿及磁铁矿矿床等岩浆矿床可能经历的成矿动力学过程, 以期能促进相关领域的快速发展。

关键词: 岩浆动力学; 熔体岩浆房; 晶粥储库; 岩浆矿床; 物理机制

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

氟化物-硅酸盐熔体不混溶和结晶分异对碱性 花岗岩稀有稀土金属富集的作用

张道涵^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

氟化物-硅酸盐熔体不混溶被认为是碱性花岗岩体系中控制轻稀土 (LREE) 和 Y 富集的关键过程。然而, 该过程除了在加拿大 Strange Lake 岩体中报道外, 其他至今并未在其他碱性花岗岩中报道。因此, 氟化物-硅酸盐熔体不混溶过程对于稀土金属富集的重要性也有待商榷。本文选取了我国内蒙古巴尔哲矿床开展了碱性角闪石的矿物学和地球化学研究。巴尔哲成矿岩体由早到晚可依次分为细粒超溶相花岗岩、似斑状超溶相花岗岩、过渡相花岗岩、以及伟晶岩和梳状角闪石层。其中, 过渡相花岗岩是主要矿化部位, 而且该岩相内还存在超溶相包体。这些不同岩相中的碱性角闪石主要为钠铁闪石, 记录了结晶分异、机械混合、氟化物熔体不混溶、流体出溶和脱气等过程。钠铁闪石中氟化物包体的含量暗示, 除了过渡相和伟晶岩, 氟化物硅酸盐熔体不混溶过程在其他岩相中均有发生, 其中在似斑状超溶相花岗岩阶段尤为强烈。大

多数氟化物包裹体具有高 Ca, 富集 LREE、中稀土 (MREE) 和 Y 的特征。基于全岩 F 含量, 估算似斑状超溶相花岗岩中氟化物熔体含量小于 1%, 储存了体系约 2%~6% LREE 和高达 8%~15% MREE 和 Y。但是, 氟化物熔体的出溶并未影响到硅酸盐熔体中 REE 和高场强元素 (HFSE) 含量因结晶分异而持续增长的趋势。结合主要赋矿岩体过渡相花岗岩以及伟晶岩中氟化物熔体的缺失, 表明早期出溶的氟化物熔体并未在残余熔体中聚集。因此, 氟化物-硅酸盐熔体不混溶对于巴尔哲矿床中 LREE 和 Y 富集的贡献非常有限。与之相比, 石英、碱性长石和碱性角闪石等硅酸盐矿物的结晶分异过程, 则促使体系中 REE 和 HFSE 的富集可达 5 至 20 倍。

关键词: 氟化物-硅酸盐熔体不混溶; 碱性花岗岩; 稀有稀土金属富集; 碱性角闪石; 巴尔哲

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072093)

作者简介: 张道涵 (1990-), 研究员, 研究方向: 岩浆热液演化与金属富集. Email: zhangdaohan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

塔里木盆地麦盖提斜坡断裂及控藏作用

赵宇豪^{1*}

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

麦盖提斜坡位于塔里木盆地南缘, 北靠巴楚隆起, 南接西南凹陷和东临唐古巴斯凹陷, 是塔里木盆地西南坳陷的一个次级构造单元, 总体上呈现出 NW 向展布, 是一个西高东低、北高南低的倾斜构造, 麦盖提斜坡受多期次复杂构造运动, 主要为加里东、海西及喜马拉雅三次构造运动的共同作用, 在其多期次构造运动的作用下形成了复杂的断裂体系, 纵向上可以分为下部基底断裂、中部滑脱断裂以及上部走滑断裂, 这些断裂体系能够对油气储集层的发育、油气的运移与聚集以及圈闭的形成与保

存产生控制作用, 从而对于油气的成藏达到控制。本文通过对地震资料解释综合分析、断裂的活动期次、断裂的几何特征和性质进行系统的分析, 并结合前人的钻探资料、成藏期次分析、已探明的油气成藏模式的研究成果, 系统探讨麦盖提斜坡断裂特征及其控藏作用, 并对于麦盖提斜坡有利油气聚集区进行预测。

关键词: 麦盖提斜坡; 构造运动; 断裂; 控藏作用; 油气藏预测

横向课题: 《塔西南地区构造演化及关键时期构造特征分析》

通讯作者简介: 赵宇豪 (2003-), 本科生, Email: 18209960807@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

东秦岭某伟晶岩型高纯石英形成过程与纯化机制研究

李晓宇^{1*}, 李开文^{1,2}, 蔡志超^{1,2}

1. 河南省地质研究院, 郑州 450016;

2. 超纯矿物产业技术研究院, 郑州 450016

高纯石英作为战略性新兴产业的关键基础材料, 其全球市场长期被美国垄断, 但中国东秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源的发现为打破这一局面提供了可能, 但对高纯石英的形成过程和纯化机制缺乏研究, 限制了资源勘探和开发。本研究选取东秦岭某含高纯石英伟晶岩开展研究。该伟晶岩脉近东西向侵入秦岭群黑云斜长片麻岩, 展布宽度约 50 米, 局部膨大至数百米, 发育复杂的分带结构: 从边部到中心分为文象带(钾长石-石英文象结构)→中粗粒伟晶岩带(斜长石-石英-白云母组合)→块体微斜长石带(微斜长石-绿柱石共生)→核部石英带(石英为主)。通过阴极发光(CL)成像与原位成分分析, 识别出三类石英: 早期岩浆石英(ZSG-I), 呈不规则状残存在团块石英内部, CL 图像明亮, 杂质元素偏高, 其中 Ti 含量 $3.65 \times 10^{-6} \sim 9.89 \times 10^{-6}$ (平均 4.30×10^{-6}), Al 为 $12.7 \times 10^{-6} \sim 36.3 \times 10^{-6}$ (平均 20.8×10^{-6}), Li 为 $0.48 \times 10^{-6} \sim 5.43 \times 10^{-6}$ (平均 2.57×10^{-6}), 从脉边部到核部, 石英中的 Ti 含量逐渐降低, Al 和 Li 逐渐升高; 溶解-再沉淀石英(ZSG-II), 以不规则状包被 ZSG-I, CL 暗色, 杂质元素含量显著降低, 其中 Al 为 $5.39 \times 10^{-6} \sim 24.8 \times 10^{-6}$ (平均 15.2×10^{-6}), Ti 为

$1.10 \times 10^{-6} \sim 5.30 \times 10^{-6}$ (平均 3.20×10^{-6}), Li 为 $0 \sim 2.43 \times 10^{-6}$ (平均 0.26×10^{-6}), 不同带内石英的元素含量变化不明显。晚期变质重结晶石英(ZSG-III), 呈细粒多晶集合体, 杂质元素最低, Al 为 $2.58 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$ (平均 7.24×10^{-6}), Ti 为 $0 \sim 5.98 \times 10^{-6}$ (平均 3.17×10^{-6}), Li 为 $0 \sim 0.86 \times 10^{-6}$ (平均 0.07×10^{-6})。研究发现伟晶岩在演化早期以斜长石与钾长石结晶分异占主导, 石英中 Ti 含量随温度降低而降低, 而 Al、Li 因熔体分异逐步富集; 演化晚期挥发分饱和和形成超临界流体, 沿矿物界面引发耦合溶解-沉淀作用, 造成 ZSG-II 沿边缘取代早期 ZSG-I。该过程排出杂质元素 (Al、Ti、Li 等), 成为石英纯度提升的核心机制。成岩后变质/变形作用使部分石英重结晶, 进一步降低杂质含量, 但其贡献受粒度与含量限制 (占比 <5%)。该研究发现伟晶岩中的石英通常具有复杂的成因序列和多样的地球化学成分, 不同类型石英的含量组成控制了原料最终的石英纯度, 溶解-再沉淀石英和重结晶石英占据比较大比例的原料是优质原料。

关键词: 东秦岭; 高纯石英; 花岗伟晶岩; 原位成分分析; 溶解共沉淀

基金项目: 2024 年度河南省地质研究院地质科技攻关项目 (批准号: 2024-904-XM02)

第一作者简介: 李晓宇, 男, 1992 年生, 工程师, 主要从事花岗岩成因与成矿研究。

*通讯作者, E-mail: hnsdzjyilee@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

鹿井小山铀矿床绿泥石特征及其与铀成矿作用关系

刘绪江¹, 余驰达^{2*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 南昌 330013

小山铀矿床位于鹿井矿田中部, 是核工业南方地勘中心所近年来新发现的中型铀矿床, 它属于典型的碎裂蚀变型铀矿床, 又与碱交代相关。矿床内主要出露寒武系和白垩系地层, 岩浆岩以粗粒似斑状黑云母二长花岗岩为主, 其次为细粒少斑黑云母花岗岩、二云母花岗岩。矿床的形成受北东向 QF_{II} 断裂控制, 围岩蚀变强烈, 与铀矿化密切相关的蚀变类型包括: 钾长石化、绿泥石化、赤铁矿化、黄铁矿化、硅化等。铀矿物主要为沥青铀矿、晶质铀矿、铀石。绿泥石对热液的温度、压力、物理化学性质及全岩成分高度敏感, 可用于反演其形成时的物理化学条件, 是一种重要的标型矿物。小山铀矿床中绿泥石化是与铀矿物密切共生的一种热液蚀变。因此, 本文以小山铀矿床的绿泥石为研究对象, 开展矿物学和元素地球化学特征研究, 旨在探讨绿泥石的类型、成因及形成环境, 并利用地质温度计估算其形成温度, 以期揭示小山铀矿床成矿作用特征提供依据。研究表明, 小山铀矿床的绿泥石分为四类: 裂隙充填型(ChI-I)、浸染分布型(ChI-II)、黑云母蚀变型(ChI-III)和长石蚀变型(ChI-IV)。

不同类型绿泥石矿物学和元素地球化学特征指示 ChI-I、ChI-II 与铀矿化密切相关, 而 ChI-III 和 ChI-IV 与铀矿化无关。 Si Vs. $Fe_{total} / (Fe+Mg)$ 分类图解和绿泥石主要阳离子与镁离子关系图指示小山绿泥石主要为铁绿泥石, 少量为铁镁绿泥石, 是多期热液活动的产物。利用绿泥石地质温度计估算绿泥石的形成温度, 结果表明: 与铀矿化密切相关的绿泥石形成温度介于 353~417℃, 平均值为 381℃; 与铀矿化无关的绿泥石形成温度介于 358~428℃, 平均值为 399℃。小山铀矿床绿泥石均为富铁绿泥石, 指示其形成环境为还原环境。成矿期前与铀成矿无关绿泥石温度(399℃)相比成矿期与绿泥石密切共生的绿泥石形成温度(381℃)更高, 指示小山铀矿床沥青铀矿形成于高温条件, 成矿流体降温、去气可能是导致 U 沉淀的重要因素。成矿流体温度降低会破坏流体的物理化学平衡, 引发铀酰络合物发生解离, 在还原环境中, 六价铀被还原成四价铀并形成沉淀。

关键词: 绿泥石; 地质温度计; 铀成矿; 小山铀矿床

第一作者简介: 刘绪江(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 铀矿地质与勘查. E-mail: 3159462640@qq.com

*通信作者简介: 余驰达(1990-), 讲师, 研究方向: 铀矿地质与勘查. E-mail: 841500824@qq.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

湘南柿竹园超大型稀有多金属矿床铍赋存 状态及铍矿物演化序列初探

林或涛¹, 王汝成^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

铍 (Be) 作为战略性关键金属, 是优异的功能和结构材料。湘南柿竹园矿床是一个世界级超大型稀有多金属矿床, 产于千里山杂岩体东南部与泥质条带灰岩接触带, 长 1200 m, 宽 1000 m, 垂直厚度 50~500 m, 呈透镜状体, 发育有 W-Sn-Mo-Bi-Be 多金属成矿系统, 是揭示铍在花岗质熔-流体中结晶行为与资源效应的理想研究对象。但现有勘查开发模式仍以钨锡为导向, 导致铍资源利用率不足, 铍的来源、赋存状态和成矿机制尚未查明。结合野外观察、岩相学观察、全岩地球化学测试及微区矿物学研究, 本研究精细化研究 Be 从微量置换到形成矿物的全周期富集过程及其成矿机制。首次确定千里山杂岩体中等粒铁锂云母花岗岩 (Be 含量可高达 214×10^{-6}) 为铍成矿母岩, 为铍成矿提供最初物源。此外, 通过对等粒铁锂云母花岗岩进行独居石原位 U-Th-Pb 定年, 确定其成岩年龄为 155.3 ± 0.9 Ma, 完善了柿竹园成岩成矿年代学格架。其次, 揭示了柿竹园铍矿化存在“绿柱石-

硅铍石/羟硅铍石-金绿宝石”的矿物演化序列, 指示其从低铝/硅饱和体系向高铝/硅不饱和体系转变的成矿环境。最后, 建立了“岩浆结晶-热液交代-流体沉淀”三阶段成矿模型: 在高分异花岗岩阶段, 绿柱石在熔体中饱和并结晶, 在云英岩阶段, 伴随羟硅铍石产出。在矽卡岩阶段, 铍赋存在硅酸盐矿物中, 或者经晚期含铍流体交代矽卡岩矿物沉淀出硅铍石、羟硅铍石等, 随着热液流体的运移, 在大理岩广泛分布的云母萤石网脉中发现大量次生热液铍矿物。其中 Al_2O_3/SiO_2 活度变化、Na/K 交代作用与高挥发分对铍富集和迁移起到控制作用。本研究证实高分异富高挥发组分的花岗岩浆-热液系统对稀有金属超常富集的关键作用, 对提升我国战略金属资源保障能力具有重要现实价值。

关键词: 柿竹园铍矿; 铍成矿矿物序列; 岩浆-交代-热液过程

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230809)

第一作者简介: 林或涛 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 成矿矿物学. Email: 602024290010@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 王汝成 (1962-), 教授, 研究方向: 成矿矿物学. Email: rcwang@nju.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

金的非传统超常富集机制：金属液滴对金的富集作用

简伟^{1*}

1. 中国地质大学（北京），北京 100083

主要由低熔点亲铜元以及金组成的金属液滴，可在常见热液金矿的成矿温度下以液态形式存在，已在全球多种类型的热液金矿中被发现，如造山型金矿，浅成低温热液金矿，班岩型（铜）金矿，矽卡岩型（铜）金矿床，与侵入岩相关的脉型金矿。金属液滴可在多次热液活动中，从金不饱和流体中高效中抽取金，并实现自我催化生长，代表了一种金的非常统超常富集机制。金属液滴结晶物的组成、外形、内部结构，以及金属液滴在寄主矿

物内移动所留下的痕迹，可作为鉴别金属液滴的依据。矿物-流体界面的吸附-还原作用，已有矿物组合的部分熔融，是金属液形成的两种重要机制。除黄铁矿等还原性矿物外，活化后的石英亦可吸附-还原流体中的金、银、碲、铋等金属络合物形成金属液滴。

关键词：热液金矿；金属液滴；吸附-还原；非传统；超常富集

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床成因 机制的矿物学及年代学研究

黄帅¹, 车旭东^{1*}, 王汝成¹, 陆现彩¹, 邓飞²

1. 南京大学 地球科学与工程学院关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023;

2. 广东省地质局佛山地质调查中心, 广东 佛山 528000

粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床位于广东省东北部, 处于华南板块的罗霄-云开湖盆系, 赋存于白垩系叶塘组地层, 为内陆湖泊相泥岩沉积(邵小阳等, 2024a)。矿层 Li_2O 含量为 0.1004%~0.2118%, 平均 0.1359%, 赋矿层位厚度约 450 m, 连续矿层厚度可达 226 m, 具有重要资源潜力。本研究综合采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、电子探针显微分析仪 (EPMA) 及激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 等分析技术, 对粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床进行了精细的矿物学和年代学研究分析。结果表明, 含矿的叶塘组泥岩及泥质粉砂岩的矿物组成以石英、长石及粘土矿物为主。其中粘土矿物以伊利石和绿泥石为主, 伊利石占全岩比重为 19.2%~30.5%, 绿泥石为 17.2%~22.8%。全岩地球化学分析显示, 全岩 Li 含量和粘土矿物的含量呈现明显的正相关, 且与 B、Rb、Ba 等热液元素呈正

相关, 与 Ce 异常呈负相关, 表明成矿岩层中的 Li 很可能赋存于粘土矿物中, 成矿过程受热液活动控制。除此之外, 本研究对成矿岩层及其下伏优胜组火山岩进行了年代学工作。优胜组沉凝灰岩和流纹岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $95.3 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 和 $95.5 \pm 1.3 \text{ Ma}$, 属晚白垩世岩浆活动产物。含矿的叶塘组泥岩及泥质粉砂岩的碎屑锆石年龄谱呈现多峰特征: 主峰~100 Ma, 其次是~400 Ma 和 240~160 Ma, 说明优胜组火山岩是成矿岩层最主要的物质来源。

本研究通过对粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床的矿物学和年代学研究, 揭示了锂主要赋存在伊利石、绿泥石等粘土矿物中, 锂成矿与晚白垩世火山热液活动密切相关。

关键词: 石人背盆地; 火山粘土型锂矿; 火山热液活动

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 42272067); 广东省自然资源厅“广东和平地区 1: 5 万区域地质调查”。

第一作者简介: 黄帅, 男, 硕士研究生, 研究方向: 稀有金属成矿. E-mail: 502023290003@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 车旭东, 男, 副教授, 研究方向: 稀有金属成矿. E-mail: xdche@nju.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

形成超大型斑岩铜矿床的最佳岩浆氧逸度

朱经经^{1*}, 汪殿钟¹, 胡瑞忠¹, 毕献武¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

超大型斑岩铜矿床是由岩浆体积、岩浆物理化学条件、流体聚集、岩浆注入速率和铜金沉淀效率等多种地质过程的最佳组合形成的。普遍认为, 岩浆氧逸度控制了硫在硅酸盐熔体中的形态和溶解度, 最终对铜金的富集和矿化具有决定性作用。在还原条件下 ($\Delta\text{FMQ} < 0$), 熔体中的 S 主要以 S^{2-} 形态存在, 易导致高 $f\text{S}_2$ 岩浆的大量早期硫化物饱和, 从而导致演化熔体中亲硫元素 (如 Cu、Au 和 PGE) 的大量丢失, 最终不利于斑岩铜金矿的形成。因而, 一般认为, 高岩浆氧逸度对斑岩铜矿的形成至关重要, 且岩浆氧逸度越高越有利于成矿。然而, 通过对全球重要斑岩铜矿岩浆氧逸度的估算, 我们发现大部分斑岩铜矿形成

的岩浆氧逸度并不异常高, 集中分布在 $\Delta\text{FMQ} + 1$ 左右。通过数值模拟, 发现在岩浆氧逸度为 $\Delta\text{FMQ} + 1$ 时, 90% 的 S 在出溶热液中以 S^{2-} 形式存在, 从而绝大部分可用于沉淀 Cu; 然而在岩浆氧逸度为 $\Delta\text{FMQ} + 2$ 和 $\Delta\text{FMQ} + 3$ 时, 可用于沉淀 Cu 的 S 分别仅占总 S 的 33%~38% 和 15%~25%, 即当岩浆氧逸度过高时, Cu 的沉淀效率急剧降低。蒙特卡洛模拟进一步揭示, 中度氧化 ($\Delta\text{FMQ} \approx 1$) 而非高度氧化 ($\Delta\text{FMQ} > 2$) 的岩浆更有利于大型-超大型矿床的形成, 突破了传统认识。

关键词: 斑岩铜矿; 岩浆氧逸度; 数值模拟

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

阿尔金卡尔恰尔地区超大型萤石成矿带成矿流体性质研究

陈康^{1,2*}, 宋文磊¹, 高永宝²

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069;
2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100

近年来, 在新疆阿尔金卡尔恰尔地区发现了超大型萤石成矿带, 截止目前预估该地区萤石矿石储量达到 3500 万吨, 目前已成为我国最重要的萤石大型资源基地。本文以新疆阿尔金西段卡尔恰尔超大型萤石成矿带为重点研究对象, 厘定了卡尔恰尔超大型萤石成矿带矿区地质背景、矿化特征与关键控矿因素, 利用电子探针及 LA-ICP-MS 对萤石、碱长花岗岩、方解石、黑云斜长片麻岩进行主微量元素研究, 对与萤石伴生的碱长花岗岩进行锆石 U-Pb 年代学研究, 对不同类型和期次的萤石、方解石开展 C-H-O、Sr-Nd 同位素研究, 对不同类型矿石中的包裹体开展成矿流体地球化学研究, 总结成矿模式并开展成矿预测。取得的主要成果如下: 阿尔金西段地区卡尔恰尔地区超大型萤石成矿带形成于早古生代晚奥陶世, 与同期碱长花岗岩密切相关, 超大型萤石成矿主要受岩体和围岩控制, 大量矿体产于岩体的接触带位置, 形成于后

碰撞伸展阶段, 成矿流体来源于碱长花岗岩的熔体-流体演化, 卡尔恰尔萤石成矿带矿床成矿早期萤石沉淀机制主要为流体混合作用和水-岩反应, 晚期受流体混合作用致使流体温度的降低, 建立了奥陶纪“卡尔恰尔式”岩浆热液充填型萤石成矿模式。在系统梳理阿尔金西段卡尔恰尔超大型萤石成矿规律的基础上, 提出“碱长花岗岩+北东向断裂构造+阿尔金岩群富钙地层+F 化探异常+方解石空间分布”等重要找矿标志, 综合使用多源遥感数据创建了一种遥感萤石矿找矿模型。引领实现找矿新发现, 新发现矿产地 2 处, 提交找矿靶区 4 处, 推动了地勘基金和企业勘查投入, 促进形成了阿尔金西段萤石大型资源基地。

关键词: 萤石矿床; 岩浆-热液演化; 卡尔恰尔; 阿尔金西段

基金项目: 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目 (KC20230011)、中国地质调查局项目 (DD20243309)、(DD20211551) 联合资助。

第一作者简介: 陈康 (1991-), 高级工程师, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: kangchen320@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

云南思茅盆地勐野井 MK 钻孔盐矿物学研究

刘易德^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

云南思茅盆地江城含盐带的勐野钻孔钾盐矿是我国唯一具开采价值的古代氯化物型固体钾盐矿床, 但其成矿物源与动力学机制仍存在争议。本研究聚焦勐野钻孔 MK-1 和 MK-3 钻孔岩心样品, 综合矿物自动鉴别分析 (AMICS)、扫描电镜 (SEM) 及电子探针 (EPMA) 技术, 系统揭示了盐类矿物的微区地球化学特征及其对成矿过程的指示意义。研究表明, 石盐中 Br/Cl 比值及 K 含量特征显示成矿卤水经历多阶段蒸发浓缩, MK-1 钻孔石盐 $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 值 (0.02~0.44) 指示其母液兼具海源与陆源混合特征, 而高 K 含量 (>0.09%) 石盐的出现佐证了钾盐析出阶段的卤水演化。碳酸盐矿物 Sr/Ca、Fe/Mn 比值等均是揭示卤水蒸发序列、古盐度变化、氧化还原状态与成钾

关系的关键矿物指标, 因此, 本研究特别地对共生碳酸盐矿物进行了研究, 分析其微量变化特征对钾盐成矿物质来源以及成矿过程的指示意义, 如共生方解石的 Fe/Mn 分异反映构造驱动下的流体迁移与氧化还原波动。本研究突破传统单一盐类矿物研究的局限性, 建立多尺度地球化学表征方法, 为深化“二层楼”成矿理论提供微观地球化学证据。本研究预计将为思茅盆地钾盐成矿理论提供更全面的地球化学证据, 并为深部找钾勘探提供新的矿物学依据, 探索钾盐共生矿物对钾盐成矿物质来源和成矿模式的启示。

关键词: 钾盐; 石盐; 思茅盆地; 碳酸盐; 微区分析;

项目资助: 滇西南中生代海相钾盐成矿条件与成矿预测 (编号: 2023YFC2906504)。

第一作者简介: 刘易德, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事钾盐矿产地质调查、矿物学研究。Email: 502023290051@smail.nju.edu.cn

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

吉尔吉斯斯坦 Bozymchak 矽卡岩型金铜矿床 Au-Ag-Te 富集机制

章浩^{1*}

1. 国家地质实验测试中心 国家地质实验测试中心, 北京 100037

在天山成矿带 Chatkal-Kurama 地区 (中亚天山成矿带), 以 Kalmakyr 斑岩型铜金矿、Kochbulak 浅成低温热液型金矿及 Bozymchak 富金矽卡岩型矿床为代表的岩浆热液型 Au-Cu 矿床中, Au-Ag-Te 元素组合作为显著特征广泛发育。然而, 与碲化物伴生的金富集机制仍存在关键科学问题亟待解决 (如 Te 元素对金迁移-沉淀的具体控制机理尚不明确)。位于吉尔吉斯斯坦的 Bozymchak 矽卡岩型 Au-Cu 矿床具有高品位 Au (1.96 g/t)、Cu (1.14%)、Ag (13.2%) 及关键金属 Te、Se 等元素组合, 为研究岩浆热液系统中 Au-Ag-Te 富集过程提供了理想对象。本研究通过系统的岩相学观察, 结合电子探针 (EPMA)、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS)、激光剥蚀扫描成像 (LA-Mapping)、TIMA 矿物自动分析及 XRF 元素填图技术, 首次揭示了 Bozymchak 矿床中 Au-Ag 碲化物的精细矿物学特征及主要 Fe-Cu 硫化物的地球化学组成。矿床中金主要以自然金 (成色 792-886) 及碲化物形式赋存, 包括碲银矿 (Ag_2Te)、

针碲金银矿 (Ag_3AuTe_2)、硫铋铜矿 (Cu_3BiS_3) 及硒铅矿 (PbSe)。这些矿物与自然金紧密共生, 形成不规则粒状结构、共结边结构。根据矿物组合与热力学模拟, Au-Ag-Te 矿物形成于 $\text{Log } f(\text{S}_2) = -11.4 \sim -4.6$ 、 $\text{Log } f(\text{Te}_2) = -14.7 \sim -7.8$ 、 $\text{Log } f(\text{O}_2) = -34.9 \sim -28.0$ 的物理化学条件。Te 在 Fe-Cu 硫化物中显著富集, 其中斑铜矿含量最高 (平均 272×10^{-6}), 其次为黄铜矿 (129×10^{-6}) 及黄铁矿 (13.04×10^{-6})。Ag、Bi 呈现相似分布规律, 而 Au 含量相对较低 (斑铜矿 0.19×10^{-6} 、黄铜矿 1.02×10^{-6} 、黄铁矿 0.22×10^{-6})。研究表明, 硫化作用与低熔点亲铜元素 (LMCE) 熔体的共同驱动金的沉淀。随着黄铜矿、斑铜矿的晶出, 硫逸度降低促进金沉淀及 LMCE 熔体形成, 后者可进一步从流体或围岩中萃取出金元素, 最终导致 Bozymchak 矿床金的显著富集。

关键词: Au-Ag-Te 沉淀; 金的赋存状态; 低熔点亲铜元素 (LMCE) 熔体

第一作者简介: 章浩 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床学. Email: 2337937609@qq.com

通信作者简介: 李超 (1983-), 研究员, 研究方向: 地球化学. Email: Re-Os@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

黑龙江省大型二道坎银矿床岩矿石元素地球化学特征及其对矿产勘查的指示意义

杨文鹏^{1,2*}, 符安宗^{1,2}

1. 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

二道坎银矿床位于大小兴安岭结合带,是该地区首次发现的三叠纪大型银矿床。本次研究采集了二道坎银矿矿区钻孔中的矿体、矿化体、构造角砾岩、围岩和矿区外围背景岩石样品,分析 Au、Ag、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Bi、Mn、F、Cd、B、Li、Be、U、Ba、Ni、Co、Cr、La、Nb、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Zr、SiO₂、TFe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O、MgO、CaO 等 39 种元素和氧化物。结果显示:二道坎银矿矿体除了 Ag、Pb、Zn、TFe₂O₃、Mn 等元素含量高外, Au、As、Sb、Hg、Cd、W、Mo 等的元素含量也较高,而 Al₂O₃、CaO、K₂O、Na₂O、MgO、SiO₂、B、Ba、Co、Cr、F、La、P、Sr、Ti、U、V、Y 等氧化物和元素的含量相对较低;元素比值 Sr/Mn、Au/Ag、Zn/Cd、Au/Mo、Na₂O/CaO、Ti/La 在二道坎银矿矿体、矿化体中的含量明显低于其在围岩和背景岩石中的含量;Pb/Zn、Pb/K₂O、SiO₂/Al₂O₃、As/Ba、As/B、As/Cu、As/Mo、As/W、As/Sn、As/Bi、Sb/Cu、Sb/Mo、Sb/W、Sb/Sn、Sb/Bi、Ag/Cu、Ag/Mo、Ag/W、Ag/Sn、Ag/Bi 在二道坎银矿矿体、矿化体中的含量明显高于其在围岩和背景岩石中的含量。本研究绘制了二道坎银矿高品位矿石(Ag 品位>600 g/t)、中品位矿石(Ag 品位 200 g/t~600 g/t)、低品位矿石(Ag 品位<200 g/t)、银矿化体、构造角砾岩、围岩和背景岩石中各元素(氧化物)的箱线图,结果显示:从高品位矿石到背景岩石,Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、Cd、TFe₂O₃ 具有明显的下

降趋势;F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 具有明显的上升趋势;其它元素和氧化物的变化趋势不明显。为了更好地了解二道坎银矿岩矿石中主微量元素的变化特征,本研究选择 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、F、Cd、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、TFe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 等元素和氧化物对数变换后的数据进行主成分分析,通过提取累计方差约 75%的两个主成分(PC)来认识二道坎银矿岩矿石主微量元素变化特征,绘制主成分分析 PCA 双标图。在双标图上矿体、矿化体多集中在左侧,样品中的 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、Cd、TFe₂O₃ 呈正相关,并与 F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 呈负相关;构造角砾岩集中在右侧,样品中的 F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 呈正相关;围岩和背景岩石分布在构造角砾岩的下方,样品中 F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 呈弱的正相关,并与 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、Cd、TFe₂O₃ 呈负相关。这些特征表明二道坎银矿岩矿石的主微量元素地球化学行为不同,这些元素地球化学特征对化探矿致异常的识别有较好的参考作用,部分特征可作为新的银多金属矿产勘查找矿指标。

关键词: 二道坎银矿;地球化学特征;找矿指标

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

蒙其古尔矿床黄铁矿的原位微量元素、硫和铅同位素组成及对成矿的意义

赵凯¹, 周义朋², 陈开运¹, 包志安¹, 张研¹, 安芳¹,
吴柏林¹, 黎广荣², 袁洪林^{1*}

1. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069;

2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点, 南昌 330013

蒙其古尔矿床产于古亚洲成矿域—天山铀成矿省—伊犁盆地铀成矿区。大地构造位置归属西天山构造带, 隶属哈萨克斯坦板块南部—中天山隆起带—伊犁微地块。该矿床是我国首个绿色千吨级的铀矿大基地的主力矿山, 建成以来开采效果相对较好。富含黄铁矿是蒙其古尔矿床的一个显著特点, 黄铁矿与铀元素的迁移沉淀之间具有密切的关系。开展黄铁矿原位微区研究对理解砂岩型铀的成矿过程具有重要科学意义。本研究针对中国西北部伊犁盆地蒙其古尔铀矿床中的黄铁矿进行了深入分析, 旨在揭示其在铀成矿过程中的作用。研究中运用了偏光显微镜、扫描电子显微镜 (SEM) 以及飞秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (Fs-La-ICP-MS) 等技术手段, 系统地分析了黄铁矿的形态特征、与铀矿物形成的时序关系、微量元素组成, 以及硫 (S) 和铅 (Pb) 的同位素特征。通过显微观察, 我们识别出了黄铁矿的四种不同形态: 黄铁矿碎屑 (Py1)、球状黄铁矿 (Py2)、细小自形黄铁矿 (Py3) 以及黄铁矿胶结物 (Py4)。其中, Py3 根据其接触情况进一步细分为与铀矿物接触的 Py3-U 和与周围岩石接触的 Py3-x。研究表明, Py1 形成于成岩作用之前, 而 Py2 和 Py3 则形成于铀成矿阶段, Py4 则出现在成矿的后期。微量元素分析结果表明, 从 Py3-U 到 Py3-X 再到 Py4, Co、Ni、As、Se、Mo、W 和 U 的含量逐渐降低。与铀成

矿过程紧密相关的 Py3-U 显示出较高的铀含量和较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (-53.99% ~ -50.22%), 这暗示了其可能具有生物成因。Py3-U 和 Py3-x 的 Co-Ni 分布模式表明, 蒙其古尔矿床的形成可能受到了煤层自燃的影响, 这可能导致了较高的成矿温度。黄铁矿中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的增加归因于成矿过程中铀的衰变, 这可以作为该阶段形成黄铁矿的一个标志。然而, 由于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的显著变化, 需要通过全面的矿物学分析来识别与成矿过程相关的黄铁矿。蒙其古尔铀矿物主要是以细小沥青铀矿颗粒或沥青铀矿胶结物形式存在的沥青铀矿。铀矿物和黄铁矿的形成过程密切相关, 其中 Py3-U 是与铀矿物同时形成的。具体来说, 在铀预富集阶段, 黄铁矿的溶解释放出 Fe^{3+} , 有助于铀 (U) 的迁移和富集。在早期成矿阶段, 黄铁矿作为还原剂, 促进了铀的沉淀。在主要成矿期, 显著的生物活动将 Fe^{3+} 和 U^{6+} 还原, 形成了新的黄铁矿 (Py2/Py3) 和细小沥青铀矿颗粒, 这些颗粒经历了多次的溶解-沉淀循环。在成矿的叠加阶段, 黄铁矿和铀矿石转变成了胶结材料。因此, 黄铁矿及其与铀矿物的相互作用共同塑造了铀成矿过程的复杂性和多样性。

关键词: 砂岩型铀矿; 黄铁矿; 微量元素; S 同位素; Pb 同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130102, 42173033, 42073051 和 41825007)

第一作者简介: 赵凯 (1994-), 博士后, 研究方向: 铀矿物学. Email: 2756582465@qq.com

*通信作者简介: 袁洪林 (1974-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: yhlshklcd@126.com

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

准格尔煤田魏家峁矿区 8 号煤系关键金属元素富集特征研究

石羽钧^{1,2,3}, 久博^{1,3*}, 郝惠迪^{1,3}, 黄文辉^{1,3}

1. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室 中国地质大学(北京), 北京 100083;
2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

鄂尔多斯盆地油-气-煤多种能源矿产富集, 是战略性关键矿产研究的前沿地带, 系列关键金属元素于煤炭中呈现出超常富集的特征。准格尔煤田石炭纪煤层巨厚, 发育伴生 Al-Ga 矿, 存在多个 Li, REE, Nb 异常高值层位, 元素迁移规律与富集特征复杂, 但目前研究集中于官板乌素、黑岱沟和哈尔乌素矿区太原组 6[#]煤, 对 8[#]煤没有进行研究, 其关键金属分布特征、赋存状态、富集控制因素探讨有待加强。研究使用系列矿物学及元素分析手段, 对魏家峁石炭纪 8[#]煤层关键金属元素的赋存状态与富集特征进行了研究, 初步探讨了煤中 Li、Ga 和 REY 富集控制因素。X 射线衍射分析结果显示, 高岭石及其同质多象体是煤顶底板、夹矸主要矿物(含量约 80%), 石英为次要矿物, 个别样品中存在黄铁矿。光学显微镜结合 SEM-EDS 分析结果表明煤中矿物主要为硅酸盐(主体铝硅酸盐)、氧化物(石英、金红石等)、氢氧化物(勃姆石)、硫化物(黄铁矿、闪锌矿)等, 此外还有磷酸盐、石盐等其他矿物。富集系数(CC)用于评定煤中元素富集程度。研究区主要元素不富集, SiO₂(8.61%)、Al₂O₃(6.43%) 平均含量高于中国煤(8.47%、5.98%)。微量元素方面, Li、Zn、Hf 元素平均含量为 61.85 μg/g、123.31 μg/g、6.18 μg/g。与世界煤相比, 准格尔煤田魏家峁煤 8 号煤富集 Li、Zn、Hf 元素, 轻度富集 Sc、Ni、Ga、Zr、Nb、In、Cs、Ta、Pb、Th 元素, Cu、Sr、Ba、Bi 亏损。REY 平均含量 102.33 μg/g, 低于中国煤(135.89 μg/g), 但高于世界煤中 REY 均值(68.47 μg/g), 在顶底板中呈现富集。δEu 轻微负异常, δCe 正异常, 可能受

到物源、海侵、热液流体综合影响。δY 呈现轻微负异常, 暗示煤中陆源碎屑主要为长英质岩石, 海侵影响有限, 符合海陆过渡相地层特点。煤层顶底板、夹矸与煤样稀土配分模式存在差异, 顶底板配分曲线在轻稀土段斜率较大, 重稀土段相对宽缓, 轻稀土分馏程度大而重稀土不明显; 夹矸配分曲线形态宽缓, 分馏程度较小; 煤样稀土元素配分模式基本一致, 为向左倾斜的左低右高型, 重稀土段斜率相对轻、中稀土段较大, 重稀土分馏程度较大, 轻、中稀土分馏程度较小; 主、微量元素垂向分布特征显示煤层顶底板、夹矸样品中 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂ 含量较高, 呈现近似的垂向分布规律, 其中 SiO₂、TiO₂ 于顶底板相对富集, 而 Al₂O₃ 于夹矸中相对富集, 暗示了酸性火山灰对研究区的影响。MgO、K₂O 与 Al、Si 也呈现良好相关性, 推测在煤层沉积过程中发生了一定程度的富 K、Mg 海水侵入, 使煤中黏土矿物普遍出现伊利石化, K 还可能与长英质火山灰输入有关。微量元素方面, 依研究区相对富集微量元素为主要参考(Ga、Li、Zn、Hf), 划分了煤层垂向剖面的三种微量元素分布的主要类型。综上, 笔者认为准格尔煤田魏家峁矿区 8 号煤关键元素富集受到陆源碎屑、沉积环境、火山灰、海侵、低温热液等因素的综合影响, 实验结果对于揭示鄂尔多斯盆地乃至其他沉积盆地中煤系关键元素的富集机理具有重要意义, 可有效助推准格尔煤田 8[#]煤系矿产资源的勘探与利用。

关键词: 准格尔煤田魏家峁矿区; 8 号煤; 煤系矿物学; 煤系关键金属元素富集;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2021YFC2902003)、国家自然科学基金面上项目(42272201)、国家自然科学基金青年基金项目(42302193)、北京市大学生创新创业训练计划项目(S202411415014)

第一作者简介: 石羽钧(2003-), 本科生, 研究方向: 关键金属成矿矿物学、高温高压矿物物理。Email: shi.yujun@foxmail.com

*通信作者简介: 久博(1995-), 副教授, 研究方向: 煤地质学。Email: bo.jiu@cugb.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

成矿元素空间变化规律对滇中新型锂矿成因机制的指示意义

朱平平^{1*}, 蔺子健¹, 农光信¹, 刘岳², 肖凡³, 成秋明³

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

3. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082

由于成矿元素以吸附形式赋存在早二叠世倒石
头组黏土矿物中和源区来源于下伏碳酸盐地台的特
征区别于已有矿床类型, 滇中锂矿被定义“碳酸盐黏
土型锂矿床”的新类型, 具有世界级的资源量潜力,
但锂(Li)元素富集机制以及与铝土矿(Al_2O_3)的
解耦等科学问题, 尚未充分揭示, 限制了关键矿产锂
与铝土矿进一步的找矿勘查工作。本研究从空间分布
规律的角度出发, 研究成矿元素 Li 与 Al_2O_3 的空间
变化规律和相互关系, 以期揭示成矿元素的富集机制
与解耦问题。研究表明, 在剖面上, 成矿元素有
显著的周期性, Li($\times 10^{-6}$)呈现~7 km 的周期, Al_2O_3
(%) 为 ~14 km 的周期, 地形为 ~21 km 的周期; 且
三者的周期为~7 km 的倍数关系, 富集矿体周期性出
现且与野外地质观察相符合, 解释了 Li 与 Al_2O_3 的
空间耦合和解耦特征, 即: 在周期起始 $7/4 = 1.75\text{km}$

处耦合, $7+7/4=8.75\text{ km}$ 处解耦; 由于高程与地壳厚
度有较强的相关关系, 高程的周期性变化, 即代表着
地壳厚度的周期性变化, 而地壳厚度的变化与地质历
史时期板块周期性聚合或单旋回震荡性聚合有关; 此
外, 该地区的锂元素勘查地球化学异常具有南北向的
分布优势, 与元古代超大陆旋回有关的南北向断裂
(例如: 绿汁江断裂、小江断裂) 关系密切。综合扬
子西缘的区域地质背景和分析结果, 本研究认为, 滇
中铝土矿和新型锂矿在空间上具有周期性分布的规
律, 可能根本上受控于扬子西缘元古代超大陆聚合过
程中产生的地形特征, 而华南早二叠世海平面周期性
变化产生的氧化还原环境只是直接因素。

关键词: 成矿元素; 空间分布; 周期性; 锂矿;
关键矿产

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1001600); 国家自然科学基金重点项目(42430111); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目(KKRD202221051); 云南省应用基础研究基金-面上项目(202301AT070447); 云南省高层次科技人才及创新团队选拔专项(202305AT350004)。

第一作者简介: 朱平平(1984-), 男, 湖北荆州人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 研究方向: 地质大数据挖掘与知识发现。E-mail: zhupingcug@qq.com。

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

贵州织金富稀土磷块岩稀土富集路径的微区结构及其地球化学约束

王漫¹, 谢宏^{1,2,3*}, 王昌建⁴, 李智¹, 杨承龙¹, 汪宇航¹

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025;

2. 贵州大学 国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室, 贵阳 550025;

3. 贵州省古生物与古环境全省重点实验室, 贵阳 550025;

4. 贵州省煤田地质勘查局勘查研究院, 贵阳 550023

磷块岩型稀土是近年来各国科学家们研究的热点之一, 但稀土富集过程的研究仍不够深入, 系统。为更好地开发利用这部分资源, 本文以贵州织金新华早寒武世富稀土磷矿床为例, 通过详实地野外调查, 深入剖析矿石的显微结构, 利用 XPF、ICP-MS、TOC 测试和 LA-ICP-MS 分析等手段, 精细刻画稀土的源、运、储过程。研究结果表明, 富稀土磷矿石具有典型的颗粒结构, 颗粒组分主要为生物碎屑, 其次为砂屑及团块, 颗粒的矿物成分主要为胶磷矿。胶结物多为亮晶白云石、其次为磷酸盐胶结物和硅质胶结物。胶结方式和支撑类型有两种, 一种是接触式-孔隙式胶结, 颗粒支撑; 另一种是基底式-孔隙式胶结, 杂基-颗粒支撑。根据 P_2O_5 含量及矿石结构胶结支撑类型, 富稀土磷矿石包括富稀土磷块岩和富稀土磷质岩两种类型, 它们的矿石矿物均为磷灰石, 均高度浓集稀土元素 (REY 平均含量分别为 1187.2、376.9), 且富稀土磷块岩富集程度更高。主量元素相关性系数及 LA-ICP-MS 分析结果显示, 稀土元素可能主要被隐晶质-非晶质胶磷灰石所吸附或以类质同象形式赋存于微晶-细晶磷灰石晶格

缺陷之中, 集中分布于小壳生物体内及壳壁, 其次分布于砂屑内、砂屑边缘和磷酸盐团块中, 在磷酸盐胶结物中也有富集。揭示了早寒武世繁盛一时的浅水碳酸盐台地相小壳生物死亡后, 其腔体为稀土元素富集提供了最佳容纳空间, 活体生物吸收磷质以建造壳壁的同时也富集了稀土。另外波浪潮汐作用下产生的砂屑、团块以及一些后期孔隙水也是稀土的重要载体。含矿岩系沉积地质特征、特征元素判别指标 Ni/Co 比值、自生铀 (AU)、Sr/Ba 比值及 Al_2O_3/MgO 比值、总有机碳 TOC 含量等表明, 磷-稀土的富集受控于台地边缘的生物碎屑滩古地理条件、偏氧化的氧化还原条件、优越的生物有机质条件, 尤其是环境由氧化向贫氧转化时, 更有利于成矿。富稀土磷矿的成矿作用过程主要经历了海底喷流+海水混合, 富磷-稀土水团形成阶段; 海平面上升, 磷-稀土齐迁移阶段; 环境变化, 磷-稀土同析出阶段; 成岩作用, 磷-稀土共沉淀阶段等四个阶段。

关键词: 富集过程; 微区结构; 原位地球化学; 磷块岩型稀土; 贵州织金

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 42062009、42262014); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台 ZSYS[2024]002)

第一作者简介: 王漫 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: 1762288132@qq.com

通讯作者简介: 谢宏 (1968-), 教授, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: hxie2@gzu.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

长英质熔体中钛铁矿结晶对 W, Nb, Ta 元素的配分的影响

李家掀^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

花岗岩是地表分布最广泛的岩石类型,也是许多关键金属矿产资源的主要宿主。钛铁矿(FeTiO_3)是 Ti-Fe-O 体系中的重要矿物,在自然界中钛铁矿(FeTiO_3)与赤铁矿(Fe_2O_3)组成固熔体常包含有大量微量元素,如 Mn、Cr、Mg、W、Sn、Mo、Zn、Nb、Ta、U 和 V。钛铁矿在花岗岩中较常见,其存在与否已被用于将其分为钛铁矿系列花岗岩和磁铁矿系列花岗岩。钛铁矿系花岗岩表明其氧逸度环境较低,通常与钨和锡矿床有关。磁铁矿系花岗岩与 I 型花岗岩相似,通常与斑岩铜矿床有关。前人研究指出花岗岩中的金红石和独居石的存在会影响相关微量元素在熔体中的地球化学行为。但花岗岩中的钛铁矿研究极为缺乏,仅少量数据可用。Brumm 的研究测量了石榴石辉石中 26 种微量元素在辉石和钛铁矿之间的钛铁矿/液体分配系数,间接获得了钛铁矿的分配系数。微量元素在钛铁矿和硅酸盐熔体之间的分配,但主要是为了了解月球的早期岩浆分异。Snyder et al.报道了镁铁质岩石中钛铁矿和磁铁矿结晶过程中矿物和熔体之间的微量元素配分。但遗憾的是这些研究都集中在镁铁质岩浆上,关于长英质熔体中钛铁

矿的数据极其有限。在本次研究中,我们配置了四组不同成分的岩石粉末进行活塞圆筒实验,模拟了长英质熔体中钛铁矿结晶对 Nb、Ta、Ni、W 等关键金属的影响。实验在 1 GPa, 800~1000°C 的条件下运行,并设置了不同氧逸度条件的对照组。传统研究多关注熔体成分对钛铁矿微量元素配分的影响,而对温度(T)、压力(P)、氧逸度($f\text{O}_2$)的协同作用缺乏系统认知。实验结果表明钛铁矿仅在低氧逸度的实验中结晶并与其他矿物相平衡,而高氧逸度条件下熔体中只存在钛赤铁矿这一种矿物。钛铁矿对 W 和 Sn 的分配能力均较弱,但熔体中 W 的富集可能是其倾向于与富硅相或后期热液流体结合,钛铁矿结晶刚好促进钨矿化这一过程。对 Nb、Ta 的分配能力金红石显著强于钛铁矿,这两种矿物是控制熔体中 Nb/Ta 的主要矿物。只存在钛铁矿的实验中熔体的 Nb/Ta 略高于原始熔体,同时存在钛铁矿和金红石的实验中熔体的 Nb/Ta 明显高于原始熔体。

关键词: 钛铁矿; 长英质熔体; 配分系数; 活塞圆筒实验

基金项目: 花岗岩熔体中钛铁矿的溶解度和微量元素分配实验研究: 了解花岗岩和金属矿床形成机制的新工具(42073058)

第一作者简介: 李家掀(1997-), 博士, 研究方向: 地质学. Email: 2202310074@cug.edu.cn

*通信作者简介: Aleksandr Stepanov(1981-), 教授, 研究方向: 地质学. Email: aleksandr@cug.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

Enrichment of IPGE in chromite from Ural-Alaskan intrusions: a novel exploration tool

Irina Zhukova^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

China's demand for platinum-group element (PGE) mineral resources is constantly increasing, however its supply relies on external sources (Wang et al., 2022). Exploration for new sources of PGE is thus strategically important. The Ural-Alaskan complexes are major sources of PGE-bearing placer deposits globally. These types of complexes consist of zoned mafic-ultramafic intrusions characterized by a variety of platinum-group minerals (PGM) found in chromitite lenses. A world-renowned example of an Ural-Alaskan intrusions (UAI) is the Kondyor dunite-clinopyroxenite intrusion located in East Siberia. We examined the distribution of PGEs in Kondyor chromite utilizing laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) spot analyses alongside laser ablation imaging. Notable concentrations of iridium-group PGEs—Ir, Ru, and Os (IPGE) —were found within the chromite lattice of both types, with levels reaching up to ~150 ppb, while platinum and palladium (PPGE) appeared to be below the limits of detection (1×10^{-9} ~ 2×10^{-9}). PGM

inclusions, evident as spikes in LA-ICP-MS signals were rare. The normalization to pyrolite (McDonough and Sun, 1995) indicates that Kondyor chromite shows up to a 100-fold enrichment in IPGE compared to the primitive mantle. Ruthenium and Rh-enriched mantle-normalized PGE patterns of UAI chromite closely resemble those of chromite from oxidised arcs, notably contrasting with known examples of plutonic chromite and ophiolite chromitite, which in-situ PGE content is low. This makes the in-situ PGE composition of chromite a possible exploration tool for UA-type deposits. The ability of chromite to retain PGE in a large intrusion that has undergone complex thermal evolution highlights its robustness as a petrological and exploration indicator. This suggests that examining chromite PGE geochemistry could offer valuable insights, especially for intrusions formed under oxidized conditions.

关键词: Platinum group element deposits; Ural-Alaskan-type intrusions; new exploration indicator.

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

平衡热力学模拟与钨成矿作用

刘向冲^{1*}

1. 中国地质科学院地质力学研究所 矿田构造研究室, 北京 100081

白钨矿与黑钨矿是两种最重要的钨矿石矿物。其中, 黑钨矿包含钨锰矿和钨铁矿两个端元, 且钨锰矿比钨铁矿罕见。钨锰矿在热液中的溶解度与沉淀机制长期属于研究空白。H₂WO₄ (钨在热液中主要物种之一)、钨锰矿、白钨矿等热力学数据不全, 这使许多钨矿床地球化学现象 (如黑钨矿的 Fe/Mn 比值分带现象、黑钨矿与白钨矿共存等) 始终停留在唯象阶段的归纳与演绎, 难以从理论的高度解释这些现象背后的地球化学机制。作者经多年理论探索和编程计算, 首次提出 H₂WO₄ 的 HKF 参数, 更新白钨矿、钨锰矿的比热容参数等, 它们可在误差允许范围内再现不同学者在 250~800°C 的约 70 个钨矿物水热实验数据点。在此基础上, 通过热力学模拟系统地揭示了钨锰矿、钨铁矿、白钨矿这三个钨矿物端元在溶解度与沉淀机制上的异同, 取得以下创新认识: 1. 钨锰矿的溶解度在相同条件下几倍于钨铁矿, 这阐释了钨锰矿比钨铁矿罕见的地球化学机制; 2. 热液中的 Fe/Mn 比值是影响黑钨矿

Fe/Mn 比值的主控变量; 由于形成钨锰矿或富锰黑钨矿需要高度富 Mn 的流体, 它们更容易在成矿早阶段形成, 故黑钨矿 Fe/Mn 在矿床尺度的分带现象可用来指示矿体中心; 3. 提出简单降压是白钨矿取代 (或交代) 黑钨矿的新机制; 随着成矿热液降温降压, 白钨矿比黑钨矿更容易发育在成矿系统的外带; 黑钨矿与白钨矿共存现象用于可指示矿体中心, 指导找矿勘查; 4. 白钨矿在富 CO₂ 热液中的溶解度高度依赖压力, 而对温度的变化不敏感。白钨矿溶解度对温度不敏感可促使富 CO₂ 热液将钨迁移至离源区 (如成矿母岩) 较远的地方。这种远距离迁移机制可解释脉型白钨矿或矽卡岩钨矿为什么能产在距离花岗岩较远的位置 (>1 km)。经多年积累, 作者建立了以开源 R 语言程序为基础的开放、自主的热力学计算平台, 以供国内同行共同探索热液成矿作用理论。

关键词: 钨矿; 黑钨矿; 白钨矿; 热力学模拟

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

都龙超大型锡锌铟多金属矿床铟的分布与赋存规律及富集机制

刘玉平^{1*} 叶霖¹

中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

都龙超大型锡锌铟多金属矿床, 位于扬子地块、华南地块及三江特提斯造山带交接部位, 是我国重要的锡锌铟资源基地, 以其保有铟资源量大于 5000 吨而享有“南疆铟都”之美誉。通过系统采集的地表样品, 2017 年及之前生产勘探相关数据, 基本查明都龙矿区铜-曼主产矿段 In-Ag 的分布规律。综合地表样品 In 含量分布, 勘探工程 In 的累积成矿强度平面、代表性勘探线横剖面、南北向纵剖面和不同标高平面, 表明隐伏岩体上方距顶板 600 m 之内的南北向陡倾斜 FM 断裂破碎带及其毗邻两侧, 是 In 及 Zn、Sn、Cu 等相关矿化最主要的空间分布地段。In 在不同类别矿物的分配率为, 矿石矿物 77.04%, 脉石矿物 22.96%。其中, 闪锌矿是都龙矿区中 In 主要载体矿

物, 其次为黄铜矿, 钙铁榴石和锡石亦含有一定量的 In (钙铁榴石 In 平均含量达 135×10^{-6} , 对 In 的回收率造成一定影响); 类质同象是 In 主要赋存形式, 前人偶见的 In 独立矿物仅具有矿物学意义。结合成矿流体包裹体等地球化学研究, 解析了 In 的富集机制, 总结了元素亲合性、有利的地质地球化学条件等富集因素, 认为隐伏岩体及其上方的 Fm 断裂带是主要的控制因素; In 的富集与温度存在明显关系, 中-高温形成的闪锌矿和黄铜矿相对富集 In, In 富集的有利温度 $\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 铟; 分布与赋存规律; 富集机制; 都龙; 云南

基金项目: 云南华联锌铟股份有限公司科研项目 (ZY-201807-03)

作者简介:

刘玉平 (1971-), 研究员, 研究方向: 区域成矿规律与找矿预测. E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn

叶霖 (1970-), 研究员, 研究方向: 典型矿床地球化学. E-mail: yelin@vip.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

大兴安岭南段铍矿化特征与时空分布规律

朱昱升^{1*}, 杨浩², 葛文春², 李晓峰^{1,3}, 杨进辉^{1,3}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029;

2. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130026;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

金属铍因其优异的物理性能, 广泛应用于国防及尖端科技领域, 是重要的战略性关键金属。近年来, 国际市场对铍的需求急剧增长。然而, 全球铍资源分布极不均衡, 主要集中于与高分异花岗质岩浆作用相关的花岗岩-伟晶岩型和火山岩型铍矿床, 这些矿床主要形成于中生代并与伸展构造背景有关。大兴安岭地区位于中国东北部, 分布有超过 10 万 km² 的高分异花岗岩和火山岩, 并呈现出明显的铍地球化学异常, 显示出较大的铍资源潜力。然而, 该区铍矿化研究仍处于起步阶段。本研究通过系统的野外调查与室内分析, 在大兴安岭南段确认并识别出 21 处铍矿化点, 涵盖 5 种类型: 花岗岩-伟晶岩型、石英脉型、云英岩型、火山岩型和矽卡岩型。花岗岩-伟晶岩型矿化集中于共生花岗岩边缘或侵入外围地层的伟晶岩中; 石英脉型则沿地层或早期岩体裂隙填充, 伴生花岗岩侵入体; 火山岩型铍矿脉分布于花岗斑岩外围, 并填充于凝灰岩裂隙中; 云英岩型矿化位于花岗

岩体内部, 逐渐过渡至铍矿化带; 矽卡岩型则出现在花岗岩与碳酸盐围岩的接触变质带。绿柱石为主要铍矿物, 伴有少量次生硅铍石和羟硅铍石, 以及矽卡岩型矿化中的日光榴石。为精准测定矿化事件年龄, 本研究采用原位微区云母 Rb-Sr 等时线定年技术, 获得 29 个有效年龄数据, 揭示出晚三叠世 (230~237 Ma) 和晚侏罗世-早白垩世 (128~149 Ma) 两期铍矿化事件。晚三叠世铍矿化带沿西拉木伦-长春缝合带近东西向展布, 反映古亚洲洋闭合后岩石圈伸展环境; 而早白垩世矿化带则北东向延展, 与古太平洋板块回卷方向垂直, 指示该期成矿受古太平洋板块回卷导致的岩石圈伸展控制。本研究揭示了大兴安岭南段铍矿化的时空分布规律及成矿机制, 为区域铍资源勘查和成矿模式研究提供了科学依据。

关键词: 铍矿; 大兴安岭; 成矿时代; 云母 Rb-Sr 定年;

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

大兴安岭南段拜仁达坝 Ag-Pb-Zn 多金属矿床成因研究

杨沙沙¹, 曹明雨^{1*}

1. 内蒙古工业大学 地质工程系, 呼和浩特 010051

拜仁达坝矿床是大兴安岭南段内典型的大型-超大型银多金属矿床。野外观察和矿相学研究表明该矿床热液成矿作用可划分为 3 个阶段: (I) 铜锌多金属硫化物-石英-绢云母阶段, (II) 银铅锌多金属硫化物-石英-萤石阶段和 (III) 银多金属硫化物-石英-方解石阶段。拜仁达坝矿床中黑钨矿的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 133.5 ± 5.7 Ma, 属于早白垩世成矿, 与维拉斯托矿床成矿年龄在误差范围内一致。石英和萤石的流体包裹体显微测温显示: I 阶段均一温度为 $223 \sim 376^\circ\text{C}$, 均值 309°C , 盐度为 $3.55\% \sim 12.16\%$, 均值 6.77% ; II 阶段均一温度为 $187 \sim 326^\circ\text{C}$, 均值 249°C , 盐度为 $1.57\% \sim 9.60\%$, 均值 4.85% ; III 阶段均一温度为 $156 \sim 254^\circ\text{C}$, 均值 198°C , 盐度为 $0.53\% \sim 7.17\%$, 均值 3.39% 。激光拉曼光谱特征显示包裹体气相成分主要为 CH_4 、 CO_2 和少量 H_2S , 成矿流体属于中低温、中低盐度的 CO_2 - CH_4 - H_2O - NaCl 热液流体体系, 与维拉斯托矿床高温、高盐度流体形成显著高温、中低温的热液矿化分带特征。H-O 同位素显示, 该矿床成矿流体具有混合来源特征, 主要为岩浆热液流体晚期混合大气降水 ($\delta^{18}\text{O}_w$ $0.19\% \sim 5.73\%$, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ $-125.9\% \sim -114.6\%$), 与维拉斯托矿床流体成分呈现从早到晚的规律性变化。石英和萤石的 C 同位素表明 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ $-13.68\% \sim -6.68\%$), 表明碳主要为岩浆来源, 在晚阶段可能由于大气降水的加入混入了地层相关物质。原位 S 同位素结果 ($\delta^{34}\text{S}$ $-3.3\% \sim 0.3\%$) 表明拜仁达坝矿床与维拉斯托矿床具有相似的硫同位素组成, 主要为岩浆来

源硫。闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素分析结果显示拜仁达坝矿床闪锌矿形成于中低温环境, 以富集 Fe、Mn、Cd、In、Ga、Ge 等元素, 而亏损 Sn、Se、Co、Ni 等元素为特征。闪锌矿中 In-In-Ga 成因判别图也显示, 维拉斯托-拜仁达坝矿床均属于岩浆热液脉型矿床, 后者在晚阶段混入地层相关物质。拜仁达坝矿床中含银矿物主要沉淀在 III 阶段, 银主要以多种独立银矿物形式存在, 其次以显微-次显微银 (辉锑铅银矿) 呈它形粒状或细小不混溶包裹物出溶在方铅矿中, 少量以类质同象银赋存于黝锡矿、方铅矿和黄铜矿等硫化物中。随着成矿流体的演化和温度的降低, Ag^+ 逐渐增加 Cu^+ 减少, 依次形成辉锑铅银矿、深红银矿、脆银矿、辉银矿, 当体系中 Ag^+ 逐渐消耗殆尽时, 硫锑铅矿和不含银的方铅矿等矿物逐步沉淀。总的来说, 成矿热液温度下降, pH 值上升共同控制着拜仁达坝矿床的矿石矿物沉淀顺序、银的赋存状态及银矿物种类。综上所述, 本文认为拜仁达坝 Ag-Pb-Zn 多金属矿床是受断裂控制的与岩浆热液相关的中低温热液脉状矿床, 属于早白垩世成矿, 与邻近的维拉斯托矿床组成了一个由温度场控制的具有明显矿化分带现象的 Sn-Li-Pb-Zn-Ag 热液脉状多金属成矿系统, 拜仁达坝矿床是维拉斯托矿床的远端成矿响应。

关键词: 拜仁达坝 Ag-Pb-Zn 多金属矿床; 岩浆热液脉型矿床; 银的赋存状态; 沉淀机制; 热液脉状多金属成矿系统

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金青年基金 (2024QN04002) .内蒙古科技厅中央引导地方科技发展资金项目.内蒙古自治区拜仁达坝银多金属矿床深部三维预测评价 (2022ZY0084)。

第一作者简介: 杨沙沙 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 地下工程与地质技术. E-mail: yanmshas@163.com

*通讯作者简介: 曹明雨 (1993-), 博士, 讲师, 研究方向: 矿床学、地球化学、矿产普查与勘探. E-mail: Mingyucao@imut.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

原子尺度揭示高铟闪锌矿中铟的赋存形式及富集机制

刘文元^{1*}

1. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350108

关键金属铟主要以类质同象的形式赋存于具有四面体配位的硫化物中, 少数矿床中出现独立矿物相。其中闪锌矿是铟的最主要载体, 多数研究表明含铟闪锌矿中 ($\text{In} < 2\%$) 的铟主要以固溶体的形式进入晶体结构中, 其主要替代机制是 $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} = 2\text{Zn}^{2+}$ 。而一些富铟的矿床中常出现异常高铟的闪锌矿 (In 最高可达 24.7%), 其铟的赋存状态存在显著争议: 是新矿物相? 还是纳米混合物交生? 还是类质同象替代? 本文选择了内蒙古一个典型富铟矿床中的高铟闪锌矿为研究对象, 通过耦合利用 FIB-SEM (双束扫描电镜)、

AC-TEM (球差电镜) 和 APT (原子探针) 等微区分析技术, 开展原子尺度的矿物形貌、晶体结构和元素分布表征分析。研究结果表明高铟闪锌矿中的铟主要以纳米尺度的“富铟新矿物相”出溶体的形式出现, 同时提出了一种纳米尺度下铟的超常富集机制, 即溶解-沉淀和元素扩散双机制的耦合作用下实现了铟的超常富集, 并形成了一种新的纳米铟矿物自组织结构。

关键词: 关键金属铟; 赋存状态; 纳米矿物相; 富集机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230807)

第一作者简介: 刘文元 (1982-), 教授, 研究方向: 矿床矿物学、斑岩-浅成低温热液矿床、关键金属矿床. Email: 15146@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

大陆俯冲提升玉龙铜矿带地幔氧逸度

许岳^{1*}, 毕献武²

1. 崂山国家实验室, 山东 青岛 266237;
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

在洋-陆后俯冲环境中, 岩浆高氧逸度 (fO_2) 通过抑制硫化物饱和, 促使铜富集于残余熔体与流体, 是斑岩型铜矿成矿的关键机制之一。传统“古地幔继承说”认为高 fO_2 成矿岩浆源于早期俯冲大洋氧化性流体改造的古地幔楔, 但玉龙铜矿带的最新研究对此提出挑战。古特提斯洋位于赤道半封闭环境, 发育大规模还原性沉积地层, 其“缺氧”属性与“后俯冲阶段高 fO_2 继承自古大洋”假说存在矛盾。为此, 研究聚焦以下科学问题: (1) 幔源岩浆高 fO_2 是否继承自古地幔楔? (2) 若否, 高 fO_2 源区如何形成? (3) 幔源岩浆如何控制深部成矿?

1. 幔源岩浆非源于古大洋改造地幔。通过对比古特提斯弧岩浆与新生代高镁玄武岩的地球化学特征, 发现二者氧逸度与物质来源显著差异: (1) 古特提斯弧锆石 ΔFMQ 值为负 (-2.40~-0.77), 磷灰石 S 含量低于检测限, 反映还原性源区; 而高镁玄武岩 ΔFMQ 值达+1.99, S 含量显著富集。(2) 锆石 Hf-O 同位素显示, 古特提斯弧具高 ϵHf ($t=37$ Ma) (9.3~13.4) 与 $\delta^{18}O$ (5.6‰~7.9‰), 而高镁玄武岩 ϵHf ($t=37$ Ma) (4.0~9.3) 与 $\delta^{18}O$ (4.1‰~5.4‰) 较低, 表明后者源区未受早期大洋俯冲改造。

2. 幔源岩浆源于同期大陆俯冲重熔。地球物理资料揭示, 玉龙成矿期松潘-甘孜地块向南俯冲, 与岩浆活动时空耦合。高镁玄武岩呈现典型“碳酸盐交代”特征: (1) 单斜辉石含方解石脉, 全岩 Sr、Ba、

LREE 及 LREE/HREE 比值显著偏高; (2) 单斜辉石 Ca/Al 比值升高。松潘-甘孜地块下部为新元古代铁质-超镁铁质岩 (低 $\delta^{18}O \approx 4.2\text{‰}$, $\Delta FMQ \approx 2.08$), 中部为被动陆缘碳酸盐层。二者混合熔融可解释高镁玄武岩的高氧逸度与碳酸盐化特征。此外, P 波低速异常体显示俯冲大陆板块地温梯度升高, 碳酸盐加入降低硅酸盐固相线, 促进上地幔熔融。

3. 陆内俯冲驱动深部成矿。传统模型认为古大洋改造地幔重熔形成含水玄武质岩浆, 活化富铜弧根成矿。本研究修正为: 俯冲的松潘-甘孜陆块物质生成高 fO_2 ($\Delta FMQ \approx 2.08$)、高温 (1278~1287°C) 且碳酸盐化的岩浆, 注入下地壳形成氧化性岩浆房。单斜辉石-熔体温压计显示岩浆房位于莫霍面附近 (46~63 km), 与玉龙成矿系统初始岩浆深度-温度一致。高氧逸度岩浆触发古特提斯“还原性”弧根释放铜元素, 最终形成壳内斑岩矿床。

本研究建立陆内俯冲与碰撞型斑岩成矿系统的成因联系, 挑战了传统大洋俯冲主导的成矿理论。通过揭示大陆板块重熔对地幔氧逸度的调控机制, 为陆内斑岩铜矿勘探提供了新模型。此外, 碳酸盐参与熔融的发现拓展了成矿流体来源的认知, 对全球类似构造环境矿床研究具有借鉴价值。

关键词: 斑岩铜矿; 陆内非弧环境; 氧逸度; 大陆俯冲

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿床黄铁矿的地球化学研究 及其对铀成矿的指示

杨玉蝶^{1*}

1. 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 550002

黄铁矿作为砂岩型铀矿床中最常见的还原介质之一, 其矿物学及地球化学特征对铀富集机理具有重要的指示作用。鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿床黄铁矿分布广泛, 与铀矿物关系密切。通过钻孔岩心观察、光学显微镜、扫描电镜、电子探针、NanoSIMS 等分析测试方法, 阐明了黄铁矿的宏观和微观形态、识别

不同期次黄铁矿、黄铁矿的地球化学特征等, 硫同位素及微量元素组成揭示了黄铁矿的成因, 进而分析了黄铁矿与铀成矿的关系及其对铀成矿的指示。

关键词: 鄂尔多斯; 纳岭沟; 黄铁矿; 硫同位素; 微量元素

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFC2906702)

第一作者简介: 杨玉蝶 (2000 至今), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: 3264246009@qq.com

*通信作者简介: 陈佑纬 (1983 至今), 正高级工程师, 研究方向: 长期从事矿床地球化学工作. Email: chenyouwei@mail.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

白云鄂博超大型稀土矿床中钪的富集机制: 多期次岩浆-热液演化过程的矿物学证据

许雅婷¹, 王汝成^{1*}, 车旭东¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

钪 (Sc) 作为战略性关键金属, 其高度分散的地球化学行为导致工业可采独立矿床极度匮乏。华北克拉通北缘的白云鄂博矿床是全球最大的碳酸岩型稀土-铈-铁矿床, 赋存于中元古代白云鄂博群 H8 碳酸岩中, 其成矿与碳酸岩-霓长岩杂岩体密切相关, 并经历了多期构造-热液活动的叠加改造。本研究通过野外地质调查、岩相学观察, 结合电子探针显微分析 (EPMA)、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 等微区矿物学分析技术, 首次揭示了岩浆-热液演化过程中 Sc 元素的时空富集规律。研究发现: 岩浆阶段 Sc 主要赋存于钪铈铁矿 ($(\text{Sc}, \text{Nb}_{2/3}\text{Fe}^{2+}_{1/3})\text{O}_2$, Sc_2O_3 含量达 22%) 和霓石 ($\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$, 含 ~2% Sc_2O_3) 中, 而热液阶段则以钪钇石 ($(\text{Sc}, \text{Y})_2\text{Si}_2\text{O}_7$, Sc_2O_3 含量高达 48%) 为特征载体, 证实条带状矿化与萤石化是控制 Sc 超常富集的关键地质过程。晚期脉状成矿阶段中, 镁钠铁闪石、硅钽铈矿及铈钇矿等矿物 (含 Sc_2O_3 ~1%) 的 Sc 次生富集现象, 揭示了流体改造对

Sc 再活化的控制机制。通过钪钇石共生的独居石与氟碳铈矿的 Th-Pb 同位素定年, 获得 421 ± 6 Ma (早古生代岩浆活动) 和 269 ± 4 Ma (晚古生代热液叠加) 两期成矿年龄, 首次证实 Sc-Nb-REE 元素具有同步矿化特征。基于矿物组合演化序列与年代学证据, 创新性提出“两阶段 Sc 成矿模型”: 早阶段碳酸岩浆结晶分异形成 Sc 初始富集 (Sc_2O_3 含量 >20%), 晚阶段热液交代作用促使 Sc 在高温流体中二次富集 (Sc_2O_3 含量达 48%), 其中岩浆过程的富集对 Sc 成矿起决定性控制作用。该研究不仅系统阐明了碳酸岩型矿床中稀有金属 Sc 的完整成矿过程, 建立的“岩浆-热液”多期次富集与改造成矿的理论模型更深化了对关键金属富集机理的认识, 为白云鄂博矿床深部隐伏 Sc 资源勘查提供了重要的矿物学依据。

关键词: 钪; 成矿过程; 白云鄂博矿床; 碳酸岩型矿床; 原位微区分析

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230809, 92262001)

第一作者简介: 许雅婷 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 碳酸岩型稀有关键金属成矿. E-mail: xuyating007@smail.nju.edu.cn

*通讯作者简介: 王汝成 (1962-), 教授, 研究方向: 稀有金属成岩成矿矿物学. E-mail: rcwang@nju.edu.cn

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

峨眉大火成岩省攀西钒钛磁铁矿矿集区关键金属资源

宋谢炎^{1*}

1. 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

峨眉大火成岩省内带的攀西地区攀枝花、红格、白马、太和等矿床钒钛磁铁矿矿石量约 100 亿 t, V₂O₅ 储量 1580 万 t, TiO₂ 储量 8.7 亿 t, 还蕴含着丰富的 Co、Ga、Sc、Cr 等十多种稀有金属。其中 Co、Ga 和 Sc 在新能源、半导体和航空航天材料中是不可或缺的关键金属。尽管自上世纪 80~90 年代 V 和 Ti 逐渐得到了利用, 但是 Co、Ga、Sc、Cr 等元素尚未得到综合利用。我国西南峨眉大火成岩省内带的攀枝花-西昌地区是世界最大的钒钛磁铁矿矿集区。笔者和研究生一起自 2010 年以来对攀枝花、红格、白马和太和等 4 个主要矿床开展了较系统的成因研究, 积累的大量全岩主、微量元素和磁铁矿、钛铁矿、单斜辉石电子探针和激光等离子质谱原位分析的常、微量元素数据。本文以这些数据为基础, 分析了各个层状岩体不同类型钒钛磁铁矿矿石和镁铁-超镁铁岩石 Co、Ga 和 Sc 等元素(也兼论 Cr 和 V)的含量变化和赋存状态, 发现攀西地区层状岩体的 Ga 和 Cr 主要赋存在磁铁矿中; Co 主要赋存在硫化物中, 其次是磁铁矿; Sc 则主要赋存在单斜辉石中, 其次是钛铁矿; 不同矿床中不仅各类矿石的 Ga、Co、Sc 含量存在差异, 而且, 不同矿物中这些元素的含量也有显著不同; 数十年积累的尾矿中不仅残存大量 Fe、

Ti、V, 也蕴含着大量的 Ga、Co、Cr 和 Sc。在此基础上, 初步评价了这些元素的富集规律, 探讨了攀西地区钒钛磁铁矿矿床这些元素的资源潜力。

以钒钛磁铁矿矿石 Ga 平均含量 25×10^{-6} 计算, 攀西地区 Ga 的资源量大约为 25 万 t。Ga 主要以类质同象形式赋存于磁铁矿中, 矿石中磁铁矿的 Ga 含量高于 40×10^{-6} , 最高达 120×10^{-6} 。以矿石中 Co 的平均含量 150×10^{-6} 计算(最高达 300×10^{-6}), 攀西地区块状矿石和大多数浸染状钒钛磁铁矿矿石的 Co 含量高于 150×10^{-6} , 蕴含的 Co 资源量约为 150 万 t; Co 与 Cu 良好的正相关关系表明 Co 主要富集在硫化物中。Sc 与 Ga 和 Co 不同, 全岩 Sc 与 TFe₂O₃ 的关系以及单斜辉石较磁铁矿和钛铁矿高的 Sc 含量, 表明单斜辉石是主要的含 Sc 矿物, 其最高含量可达 130×10^{-6} , 但钛铁矿的 Sc 含量也高于全岩平均值。

这些分析为矿石、尾矿甚至某些岩石中这些元素的综合利用提供了重要信息。例如, 尾矿中单斜辉石相对矿石原岩更加富集, Sc 的全岩含量会有不同程度的增高。

关键词: 钒钛磁铁矿; 钴; 镓; 钪; 峨眉大火成岩省

基金项目: 国家自然科学基金(42330807, 42121003)

第一及通讯作者: 宋谢炎(1962-), 研究员, 研究方向: 岩浆矿床及幔源岩浆作用

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

中越边境龙脖河-新泉 Fe-Cu 成矿带: 基本特征、 时空格架及成因进展

陈伟^{1*}, 刘磊¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

沿中越边境哀牢山-红河剪切带分布的元古代地层, 发育了一系列矿化特征类似的 Fe-Cu 矿床, 形成长约近百公里的龙脖河-新泉 Fe-Cu 成矿带。这些矿床均具有早期 Fe 矿化(磁铁矿)和晚期 Cu-REE-Au 矿化(黄铜矿、富稀土褐帘石等)的特征; 在蚀变类型上以成矿前区域 Na 化、Fe 矿化期 Na-(Ca) 化及 Cu 矿化期钾化等为特点, 与世界典型铁氧化物-铜金矿床(IOCG)极为类似。最新定年数据表明, 其赋矿火山-沉积地层形成于~1700 Ma 和~870 Ma, 大致能与我国西南康滇地区的元古宙地层相对比, 表明该带曾是康滇地区的一部分, 晚期被新生代哀牢山-红河剪切带错段至目前位置。新近的热液矿物原位

U-Pb 定年精确限定了该成矿带主要形成于 850~840 Ma, 与区域俯冲相关的岩浆作用同期, 代表了目前世界较少报道的、与俯冲背景有关的前寒武纪 IOCG 成矿带。矿物原位 O-S-Nd-Hf 同位素分析进一步揭示, 早期 Fe 与晚期 Cu-REE-Au 成矿流体以高温岩浆热液为主, 但可能涉及到不同来源的岩浆流体。基于目前研究进展, 本文也对今后研究中值得关注的问题提出了一些展望, 包括前寒武纪俯冲型 IOCG 的独特性、区域找矿意义等方面。

关键词: 龙脖河-新泉 Fe-Cu 成矿带; 红河剪切带; 俯冲背景; IOCG 矿床

· 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 ·

粤北韶关地区风化壳型稀土矿床典型剖面研究

谭娟娟^{1,2*}, 郭敏³, 王磊^{1,2}, 肖细炼^{1,2}, 王节涛¹, 汪实³, 黄华谷³,
丁丽雪^{1,2}, 邵鑫¹, 邱啸飞^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205;

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉 430205;

3. 广东省地质调查院, 广州 510080

稀土元素在高科技领域、军事工业和新能源等方面都有不可替代的作用。风化壳型(离子吸附型)稀土矿床以其储量大、易提取的特点, 受到地学界研究者的重点关注。华南地区赋存大量该类型稀土矿床, 对其开展相关研究对了解稀土富集成因及迁移转化机制等均具有重要意义。本研究对粤北韶关一带新发现的该类型矿床中三个典型风化壳剖面开展了岩石学、矿物学、锆石 U-Pb 年代学及地球化学综合研究。结果表明, 含矿剖面从上到下可分为全风化层、半风化层和基岩三部分, 其中基岩主要为黑云钾长花岗岩和黑云二长花岗岩, 锆石 U-Pb 定年均集中在~160 Ma。基岩中主要含稀土矿物为磷灰石、锆石、榍石、独居石、黝帘石、磷钇矿等。矿体主要集中在半风化层, 厚度 5~10 米不等, 该层样品中稀土元素含量最高可达 2363×10^{-6} , 其中稀土氧化物浸出分量最高达

1576×10^{-6} , 整体浸出率最高可达 82%。三个剖面的 (La/Yb) n 比值均大于 10, 为轻稀土富集型矿床。稀土形态分析结果进一步表明, 新鲜基岩中的稀土形态主要为残渣态, 占比可达 80%; 而在风化壳的矿体中则是离子交换态占绝大多数, 占比可达 62%, 其次是碳酸盐结合态和残渣态, 铁氧化物态则可忽略不计。矿物学研究发现基岩中的黝帘石和磷灰石发育明显成分环带, 氟碳铈矿和独居石等矿物充填磷灰石和独居石的裂隙, 表明后期热液过程使花岗岩中的稀土元素发生了迁移, 副矿物中所含的稀土元素在热液和风化过程中释放、迁移、分异, 随后被造岩矿物风化形成的黏土矿物吸附成矿。

关键词: 华南; 稀土; 风化壳; 离子吸附型稀土矿床; 迁移富集机制

基金项目: 广东省地质勘查与城市地质专项“广东省重要成矿区稀土资源评价项目”(编号 2024032)与国家自然科学基金面上项目“北大别始太古代基底岩系的组成、地球化学特征及其对早期地壳演化的制约”(编号 42272229)联合资助

第一作者简介: 谭娟娟(1985-), 高级工程师, 研究方向: 矿物学, 矿床学. Email: tanjuanjuan@mail.cgs.gov.cn