

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

西秦岭花崖沟-金厂沟一带金富集规律研究

滕飞^{1*}

1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100

西秦岭花崖沟-金厂沟一带作为陇南-凤太金矿带的重要组成部分, 地质背景复杂, 发育多期次岩浆活动与成矿作用叠加, 形成了多类型、多阶段的金矿化特征, 深入研究其金富集规律对于揭示该区的成矿机制、矿产资源潜力和找矿方向具有重要意义。研究表明, 该带内金矿化与岩浆热液活动的叠加改造密切相关, 形成两类显著差异的矿石类型: 一类为规模大但品位较低的构造蚀变岩型金矿, 另一类为高品位石英脉型金矿。石英脉型矿体进一步划分为陡倾与缓倾两种类型, 明金随处可见。其中缓倾石英脉金品位极高, 局部达 250 克/吨, 两期石英脉成矿热液具均有岩浆热液特征。矿物学分析表明, 缓倾石英脉型矿化与自然铋及铋化物(如辉铋矿、碲铋矿)紧密共生, 其矿物组合及成矿特征与华北克拉通破坏背景下燕山期金矿高度相似, 暗示深部岩浆-热液过程可能受

控于克拉通破坏相关的伸展构造体制。通过 TIMA 扫描、显微矿物学及热液矿物地球化学研究, 发现缓倾石英脉的形成与晚中生代岩浆热液活动有关, 成矿流体中富集铋元素, 其沉淀机制可能与氧化还原界面或硫化物饱和度突变相关。结合区域对比, 花崖沟-金厂沟一带的金富集规律既继承了西秦岭晚三叠世造山型金矿的构造-岩浆背景, 又叠加了燕山期克拉通破坏相关的深部热液活动, 形成多期次、多类型的复合成矿系统。这一研究为进一步理解西秦岭造山带东-西段的成矿差异及其与燕山期构造-岩浆事件之间的关系提供了新的证据, 并为陇南-凤太地区深部及外围金矿勘查的广阔前景提供了理论支持。

关键词: 花崖沟-金厂沟; 金富集规律, 岩浆热液叠加, 石英脉型金矿, 铋矿物

基金项目: 中国地质调查局项目“甘肃李子园-花崖沟金矿重点调查区调查评价(DD20242984)”, “秦岭-豫西地区战略性矿产调查(DD20240019)”和“自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(ZKKJ202414)”联合资助
第一作者简介: 滕飞(1988-), 男, 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 工程师。从事区域成矿规律和矿床学相关勘查和研究工作。E-mail: xatwenchuan@163.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

辽-吉造山带北缘变基性-超基性岩型 Ni-Co 矿床成 矿物质来源与富集机制

李同宇¹, 刘福来^{1*}, 王舫¹, 王伟¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

辽-吉造山带是华北克拉通东部一条极具代表性的古元古代造山带, 该造山带经历了多阶段复杂的岩浆-变质-构造演化过程, 并在古元古代接受了大量陆壳物质的沉积。区域地质调查资料表明, 造山带北缘后炒铁河-小女寨-高岭-马屯-草河口一带分布大面积的变基性-超基性岩床或岩体, 并普遍发生 Ni-Co 矿化。然而, 该类变基性-超基性岩型 Ni-Co 矿床的成矿物质来源与富集机制尚不明确。本研究选取了小女寨-高岭一带 5 个钻孔中的变基性-超基性岩(岩心)开展了岩相学及全岩地球化学研究, 并结合前人年代学以及同位素地球化学特征, 进一步探讨辽河群 Ni-Co 矿床成矿机制及物质来源。5 个钻孔除 24GL-4 外均发育不同程度的矿化, 其品位分别为: 24GL-1 (26 m, Co=0.018%~0.045%, Ni=0.130%~0.282%)、24GL-2 (10 m, Co=0.020%~0.025%, Ni=0.158%~0.315%)、24XNZ-3 (8 m, Co=0.020%~0.051%, Ni=0.110%~0.450%)、24XNZ-5 (7 m, Co=0.048%~0.119%, Ni=0.367%~0.910%)。变基性-超基性岩主体岩性为斜长角闪岩、变黑云闪长岩以及黑云(绿泥)透闪片岩, 原岩属性多为亚碱性玄武岩, 属于拉斑系列。具有较大变化的 SiO₂ (38.32%~53.51%)、MgO (6.48%~24.20%, 除 24GL-1-2 为 1.50%)、Fe₂O₃^T (9.26%~30.41%) 及 Mg[#] (40.2~82.9, 除 24GL-1-2 为 12.8)。相对富集轻稀土元素(LREE)而重稀土元素(HREE)平坦, 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 表明其源区受到了俯冲流体的交代作用。年代学特征显示北辽河

群中变基性-超基性岩的原岩形成时代为 2150~2130 Ma (n=361), 变质时代为 1910~1850 Ma (n=216)。锆石 Hf 同位素特征显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -1.30~9.18, 二阶段模式年龄(t_{DM1})为 2150~2600 Ma (n=145)。较大的 Hf 同位素差异指示着其地幔源区的不均一性, 结合其地球化学特征表明变基性-超基性岩的原岩可能来自于弧后裂谷(盆地)拉张过程中受俯冲流体交代的富集地幔。值得注意的是, 变基性-超基性岩中的 Ni-Co 元素主要赋存在镍黄铁矿、辉钴矿以及辉砷钴矿中, 主要呈块状、网脉状以及斑点状分布。该类硫化物的 S 同位素分馏程度较弱, 且具有比地幔更重的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 指示硫化物中的 S 来源于大陆地壳。综上所述, 变基性-超基性岩型 Ni-Co 矿为岩浆-变质变形-热液叠加改造的复合造山型 Ni-Co 矿。2150~2130 Ma 期间, 岩石圈地幔在弧后裂谷(盆地)拉张过程中减压熔融形成基性母岩浆, 萃取了地幔中的 Ni-Co 元素, 并上升到地壳浅部岩浆房。随后地壳富硫流体的加入使基性母岩浆达到硫饱和, 促使 Ni-Co 元素进入硫化物中, 为 Ni-Co 矿初始预富集提供了重要的成矿条件与背景。1910~1850 Ma 期间, 区域碰撞造山事件对 Ni-Co 的活化与迁移起着关键的控制作用, 并主导了 Ni-Co 的超常富集与成矿。然而, 后期热液作用对于 Ni-Co 的富集作用尚不明确, 需进一步研究。

关键词: 辽-吉造山带; 变基性-超基性岩, 镍钴矿, 物质来源, 成矿机制

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号 2022YFC2903502)

第一作者简介: 李同宇, 男, 1996 年生, 在读博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: litongyu0117@sina.com

*通信作者简介: 刘福来, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lfl0225@sina.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

巴基斯坦 Siahdik 超大型斑岩铜矿床成矿流体来源及演化: 来自流体包裹体及 H、O、S 同位素证据

王小雨^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

Siahdik 矿床是近年来在巴基斯坦 Chagai 斑岩铜矿带新发现的一例超大型斑岩铜矿床。空间上, 该矿床由西部矿化中心(S1 矿段, 3.27 Mt, 0.32% Cu, 0.12 g/t Au)和东部矿化中心(S2 矿段, 4.84 Mt, 0.48% Cu, 0.10 g/t Au)两个矿段组成。本次研究, 在详细的野外地质调查和系统的样品采集基础上, 开展了详细的岩相学观察及成矿期次的划分, 并进行了流体包裹体显微测温、石英 H-O 同位素和硫化物原位 S 同位素分析。结果显示, Siahdik 矿床热液期不同阶段石英脉体中流体包裹体主要有 3 种类型, 分别是富液相包裹体(L 型)、富气相包裹体(V 型)和含子晶三相包裹体(S 型)。流体包裹体显微测温结果表明成矿早阶段(I 阶段)、主成矿阶段(II 阶段)及成矿晚阶段(III 阶段)石英中流体包裹体均一温度分别为 344~580 °C (平均 422 °C)、314~580 °C (平均 374 °C)和 254~399 °C (平均 305 °C), 盐度分别为 0.21%~59.09% (平均 10.54%)、0.65%~56.31% (平均 9.27%) 和 0.11%~14.38%

NaCl_{eq}, (平均 3.96%), 成矿流体温度和盐度从 I 阶段→II 阶段→III 阶段逐渐降低。Siahdik 矿床成矿流体属于 NaCl-H₂O 不混溶体系, 成矿流体从 I 阶段→II 阶段→III 阶段由高温-中高盐度 NaCl-H₂O 体系向中高温-中低盐度 NaCl-H₂O 体系演化。成矿早阶段、主成矿阶段和成矿晚阶段石英 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ ‰ 值分别为 -75.5‰~-57.5‰、-59.6‰~-54.1‰和 -81.7‰~-63.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ ‰ 值分别为 8.47‰~10.49‰、8.20‰~12.22‰和 9.41‰~12.64‰, 对应成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ‰ 值分别为 3.52‰~6.37‰、3.38‰~7.40‰和 2.54‰~5.77‰。H-O 同位素研究表明成矿流体中的水主要为岩浆水。矿床不同阶段脉体中的硫化物原位 S 同位素结果显示 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化于 -3.67‰~3.89‰ 之间, 具有明显岩浆硫源的特征。

关键词: Chagai 弧; 斑岩铜矿, 成矿流体, 氢氧同位素, 硫同位素

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

有机质在造山型金成矿过程中的作用

吴亚飞^{1*}, 刘旭洋¹, 李建威¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院、地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

造山型金矿床的容矿沉积岩中发育大量与含金硫化物密切共生的有机质, 对有机质参与金成矿作用的深入研究可以为全面理解造山型金矿床的成因提供重要的科学依据。前人对造山型金矿床中有机质的成熟度、同位素和有机地球化学组成等方面开展了大量研究, 但对有机质与共生硫化物相互作用过程中金的富集、迁移和沉淀等微观地球化学行为仍不清楚, 主要原因在于有机质颗粒细小、类型复杂且难以准确获得其中微量元素的含量。在详细的野外地质、矿床学和矿物学研究基础上, 本研究利用 SXRF、NanoSIMS 和 TEM 技术, 对西秦岭造山带三叠系含碳质浊积岩、志留系石墨片岩、以及大桥与夏家店金矿床金矿石中不同类型的有机质开展了系统深入的微区成分研究。研究结果显示, 在成岩过程中, 金和砷富集在莓球状黄铁矿中的沉积有机质基质内, 当黄铁矿及有机质重结晶

时, 金和砷发生活化迁移。在低绿片岩相变质过程中, 有机质发生溶解-再沉淀形成石墨、及黄铁矿被含碳质变质流体交代的过程, 均可导致其中的金被释放出来。在热液成矿过程中, 沉积岩中分散的沥青可通过吸附或还原作用导致流体中的金离子在其边部及周边的黄铁矿中富集; 同时细粒石墨还可与含金黄铁矿共同沉淀, 引起流体中 CO_2 和 H_2S 含量的降低, 从而导致包裹石墨的黄铁矿中富含金。表生氧化过程中, 大量纳米金颗粒在有机质中发生再次富集。综上所述, 有机质可在成岩过程中预富集金, 在重结晶和变质过程中释放金, 热液过程中促进金沉淀, 表生过程中再次富集金, 这些过程促进了造山型金矿床的形成与演化。

关键词: 有机质; 黄铁矿; 造山型金矿; 西秦岭造山带

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

江西相山火山盆地中铀与铅锌成矿空间分异机制

周龙跃¹, 邓腾^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330000

热液型铀矿常共生多种金属元素矿产, 如 Co、Ni、As、Cu 和 REE 等。虽然前人在部分铀矿床中发现过铅锌矿化, 然而与其他金属元素相比, 铀矿床中的铅锌矿化的研究和勘探并未引起足够的重视。近年来, 作为世界三大火山岩型铀矿的相山矿田深部发现了大规模的铅锌矿化, 且呈现出明显的“上铀下铅锌”的空间分异特征。然而, 铀与铅锌矿化的关系, 及其成矿空间分异的机制仍不明确。本文通过野外考察、岩相学与综合矿物分析 (TIMA) 发现, 浅部铀矿体 (SUO) 中发育方铅矿和闪锌矿, 而深部铅锌矿体 (DPZO) 中也少量的有沥青铀矿和钛铀矿, 且铀矿物和铅锌矿物形成于同一热液阶段。此外, 在 SUO 与 DPZO 中存在相似的围岩蚀变, 如伊利石化、赤铁矿化、萤石矿化、绿泥石化和碳酸盐化等, 结合 SUO 与 DPZO 中硫化物和副矿物具有相似的 S-Pb-C-H-O 同位素组成, 指示 SUO 与 DPZO 形成于同一流体。通过电子探针分析和前人对于 SUO 与 DPZO 中磷灰石与绿泥矿的成分分析, 以及基于绿泥

石成分计算得的流体硫逸度, 表明成矿流体具有富硫、氧化和酸性特征。地球化学热力学模拟表明, 该性质的成矿流体可同时运移高浓度的 U^{6+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 的含氯络合物以及 HSO_4^- , 且氧逸度的降低会造成 U 先沉淀, 而 Pb-Zn 硫化物后沉淀。基于以上研究成果, 提出了相山盆地铀-多金属动力学-地球化学成矿模型: 铀-多金属成矿与流体对流密切相关, 当流体向上运移时, 流体流经红层, 大气降水参与流体对流, 流体的氧逸度增加, 进而萃取围岩中的 U、Pb 和 Zn 等多种金属元素; 当流体沿区域断裂向下流动时, 氧逸度逐步降低导致 U-Pb-Zn 沉淀并在空间上形成“上铀下铅锌”的金属分带。将该成矿模式与野外地质特征结合, 可预测铀与其他多金属矿化的位置, 对在相山盆地和其他类似火山盆地中进一步的铀-多金属矿床勘查具有重要意义。

关键词: 铀与铅锌矿化; 空间分异; 氧化还原反应; 地球化学热力学模拟; 相山火山盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目: 42362012; 2025 年江西省人才支持计划: 青年科技人才培养项目 (2025QT10)

第一作者简介: 周龙跃, 博士研究生在读, 研究方向: 热液型铀-多金属矿床; 矿床-流体地球化学

通讯作者简介: 邓腾, 副教授, 研究方向: 热液型矿床; 地球化学热力学模拟; 矿床-流体地球化学

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

脱挥发分驱动 Au 纳米颗粒高效迁移的高温高压实验研究 ——对造山型金矿成因机制的启示

王振江^{1,2*}, 赵少瑞², 李敬波³, 张艳飞², 王超², 金振民²

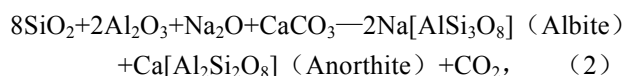
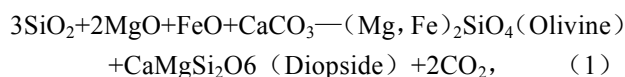
1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056203;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

3. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209

关键金属元素(如金)在地球深部的迁移过程与地壳浅部矿产资源的形成机制之间具有密切的地球动力学联系。普遍为大家所接受的观点认为变质脱挥发分产生的含碳等挥发份的流体促进了金等成矿物质的迁移富集,从而贡献了造山型金矿的形成。但是,造山型金矿的成矿流体如何从深部源区向上迁移进入浅部地壳,进而导致在造山运动后期应力转变过程中在多种深度(3~20 km)条件下连续成矿?前人研究普遍认为金等成矿物质需以含硫、氢或氯的络合物等形式溶解进入硅酸盐熔体或流体中从而随之迁移,即“化学迁移”,但是这种迁移模式无法解释超高品位金矿段的形成;为了解决这个矛盾,越来越多研究提出金以胶体纳米颗粒形式的高效迁移可能贡献了金的富集成矿,尤其是超高品位矿段的形成。然而,胶体金颗粒的稳定性、迁移驱动力及其与挥发份的关系仍存在较大争议。本研究在 0.5~1.5 GPa, 950~1100 °C 和 3~72 h 条件下,使用含硫化物蚀变洋壳(放置在样品下部)和方辉橄榄岩(放置在样品上部)作为初始物质进行了系统的分层反应实验研究,蚀变洋壳在变质脱挥发分反应(反应 1 和 2)之后产生透辉石、斜长石和少量橄榄石等硅酸盐矿物,而硫化物呈云雾状分布在其中;当恒温时间大于 10 h,样品上部初始不含硫化物的方辉橄榄岩区域中可观察到大量树枝状金属硫化物熔体和气孔,而且在其周边可观察到少量硅酸盐熔体(< 4 area.%)。据硫化物固相线计算模

型可知实验中硫化物的化学成分在无挥发份条件下的固相线约为 1030~1066 °C,高于实验温度,这表明实验中挥发份(碳)的出现降低了硅酸盐和硫化物相的固相线,导致其发生低程度部分熔融。电子探针分析表明相对于样品下部的硫化物,样品上部硫化物熔体中具有更低的 Fe/S 比值和更高的 Ni/S 比值,而且 EPMA 面扫结果显示上部硫化物熔体中 Au、Ag 等金属元素含量明显高于下部。根据 HRTEM 观察可知 Au 和 Ag 在样品上部主要呈纳米银金矿颗粒(粒径: 3~10 nm)赋存于硫化物熔体中。理论计算可知假设脱挥发份反应 1 和 2 产生的 CO₂ 气体具有理想气体性质时,当反应时间大于 10 h 时,实验体系内累积的气体压力(~10⁸ Pa)将远大于硫化物熔体迁移的阻滞力(10¹ Pa)。因此,纳米银金矿颗粒在变质反应过程中倾向于赋存在硫化物熔体中,在含碳变质流体驱动下随之沿孔隙/裂隙高效迁移,推测这种气体压滤作用可能驱动含矿流体沿着超壳裂隙高效迁移贡献造山型金矿从深部至浅部地壳连续成矿。



关键词: 高温高压实验; 造山型金矿, 气体压滤, 纳米 Au-Ag 颗粒

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102057), 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2024051), 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(GPMR202413)

第一和通讯作者简介: 王振江(1989—), 副教授, 研究方向: 高温高压实验岩石学、矿床学. Email: zhenjiangwang@cug.edu.cn

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

西藏雄村斑岩型铜金矿集区 1 号矿体晚期多金属矿脉的成因及指示

邓煜霖^{1*}

1. 成都理工大学, 成都 610059

西藏雄村斑岩型铜金 (Cu-Au) 矿集区位于西藏冈底斯成矿带中段南缘, 主要由 1、2 号斑岩型 Cu-Au 矿体组成, 1 号矿体发育早期的斑岩型 Cu-Au 矿化和晚期叠加的多金属 (Zn-Ag-Au-Cu±Pb) 矿化 (脉)。根据多金属矿脉中金属硫化物地球化学特征以及石英的原位 O 同位素组成, 表明晚期从岩浆出溶的成矿流体在开放性裂隙中运移, 经大气降水的强烈混合, 引起含矿流体的温度、氧逸度、硫逸度和酸碱度的改变, 导致 Zn-Ag-Au-Cu-Pb 沉淀于开放性裂隙中, 形成了晚期的多金属矿脉。根据多金属矿脉的地质特

征, 其成因类型可能属于“次浅成低温热液矿脉”, 连接了深部斑岩型矿化和浅部的中硫型浅成低温热液矿化。结合斑岩型矿化和中硫型浅成低温热液矿化的地质特征及流体性质, 认为多金属矿脉的形成指示了晚期岩浆含矿流体与碱性流体的混合促进了 Cu 的过早沉淀, 导致中硫型浅成低温热液矿床相对于斑岩成矿系统中高硫型浅成低温热液矿床普遍缺乏 Cu。

关键词: 西藏; 冈底斯; 雄村; 斑岩成矿系统; 多金属脉

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230813)

第一作者简介: 邓煜霖 (1993-), 讲师, 研究方向: 斑岩型矿床. Email: dengyulin93@126.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

邯邢式矽卡岩型铁矿床保存机制研究

王艳楠^{1*}

1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

矿床的产出一般会经历“源-运-储-变-保”多个阶段, 矿床学研究应兼顾矿床的形成(“源-运-储”)和变化-保存(“变-保”)两个方面。低温热年代学是定量揭示矿床变化与保存过程的有力工具。邯邢式矽卡岩型铁矿床位于华北克拉通中部, 是中国重要的高品位铁矿聚集区, 西石门铁矿是该区重要的铁矿床, 其保存过程尚不明晰。本研究在矿区岩体开展了系统的磷灰石裂变径迹和磷灰石(U-Th)/He 测年, 结果表明, 矿床经历了早白垩世快速冷却、早白垩世-新

生代早期极慢速剥露和新生早期快速剥露三个阶段的热历史, 总体的剥蚀量为~2.67 km, 小于矿床的就位深度(~3 km), 矿床被完整保存。晚中生代的慢速剥露和新生代早期的有限剥露是西石门矿床保存的关键条件, 对比研究已有矿床的保存机制, 发现特殊的构造位置在矿床保存和分布中扮演了重要角色。

关键词: 低温热年代学; 剥露, 矿床保存, 矽卡岩型矿床

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902088)

第一作者简介: 王艳楠(1988-), 副教授, 研究方向: 构造热年代学. Email: yannanwang2012@163.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

俯冲带造山型金矿成矿流体来源

钟日晨^{1*}, 于畅¹

1. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083

中生代造山型金矿的成因与环太平洋俯冲体系具有显著成因关联。除中国的金矿外, 全球该类矿床主要集中发育于俯冲带弧前增生楔(如美国西北部、新西兰等)。其典型地质特征表现为: (1) 赋存于绿片岩-角闪岩相变质带, 围岩以泥质岩、浊积岩为主; (2) 成矿流体及其硫组分主要源自地壳岩石; (3) 矿化时序晚于增生楔形成; (4) 成矿介质为变质流体。在俯冲构造体系中, 板片变质脱水形成的板片流体被认为是重要变质流体源区。现有研究表明, 地壳尺度变质作用产生的流体具备金迁移能力并可形成造山型金矿, 据此部分学者推测板片流体可能具有相似成矿潜力。新西兰 Otago 片岩带及加拿大北 Cascadia 弧前区发现的板片流体直接形成的石英脉, 为此假说提供了间接证据, 但尚未形成理论支撑。本研究通过热力学模拟, 系统计算了

300~800 °C、0.2~5.5 GPa 条件下变质基性岩与泥质岩平衡流体中金溶解度, 定量评估了常规俯冲过程中板片及上覆沉积物体系的金释放量, 以及增生楔在洋脊俯冲等热异常事件中发生变质过程的脱金效率。主要发现: (1) 金溶解度与压力呈显著负相关, 板片流体金溶解度较地壳压力下的变质流体低 2 个数量级以上; (2) 常规俯冲过程金释放量不超过 0.1×10^{-6} , 证实板片流体缺乏成矿潜力; (3) 泥质岩/浊积岩较蚀变洋壳具有更高金背景值; (4) 增生楔内造山型金矿化需洋脊俯冲等热事件驱动, 通过高温低压变质作用促使其中的泥质岩和浊积岩释放富金流体。

关键词: 造山型金矿; 俯冲带, 增生楔, 变质流体金溶解度

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222303)

第一作者简介: 钟日晨(1986-), 教授, 研究方向: 热液成矿作用热力学模拟, Email: zhongrichen@126.com

*通信作者简介: 钟日晨(1986-), 教授, 研究方向: 热液成矿作用热力学模拟, Email: zhongrichen@126.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

西藏冈底斯斑岩型铜矿床时空分布规律及控制机制

王旭辉^{1*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

冈底斯铜矿带位于青藏高原南拉萨地块, 发育了侏罗纪斑岩型 Cu-Au 矿床和中新世斑岩型 Cu-Mo 矿床, 这两种矿床呈现南北分带现象, 分别出露于南部侏罗纪岩浆弧和北部侏罗纪弧后区域。南拉萨地块南部侏罗纪弧岩浆岩与北部侏罗纪弧后岩浆岩相比, 具有更高的 V/Yb 比值、Cu 含量、 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值和锆石 Eu/Eu^* , 这表明南带侏罗纪弧岩浆岩具有更高的氧逸度 ($f\text{O}_2$) 和 H_2O 含量, 这是因为侏罗纪新特提斯洋壳的陡俯冲导致洋壳脱水释放出的高氧逸度流体在

弧下地幔聚集, 使得南带弧岩浆岩具有高的 $f\text{O}_2$ 和 H_2O 含量。南带侏罗纪弧岩浆岩高的 $f\text{O}_2$ 和 H_2O 含量抑制了硫化物在岩浆演化过程中过饱和, 有利于侏罗纪斑岩型矿床的形成。相反, 北带侏罗纪弧后岩浆岩具有低的 $f\text{O}_2$ 和 H_2O 含量, 导致硫化物的过饱和, 进而形成富含硫化物的下地壳, 为中新世斑岩型矿床提供了成矿物质。

关键词: 斑岩型矿床; 冈底斯; 氧逸度; 水含量

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

中国东北中生代铜成矿作用

曹延¹, 舒启海^{1,2*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)深时数字地球前沿科学中心, 北京 100083

中国东北地区中生代古太平洋板块俯冲作用形成了大量以钼为主的斑岩型矿床,但相较于全球其他俯冲带,该区斑岩铜矿床极为稀少,其成因机制尚不明确。本文对大兴安岭北段新发现的宝泉斑岩铜矿床含矿与贫矿岩体开展年代学与地球化学研究,为揭示岩浆属性对铜成矿的机制提供新证据。锆石 U-Pb 定年显示,宝泉矿床含矿石英闪长斑岩与贫矿正长花岗岩侵位时代分别为~115 Ma 和~312 Ma。含矿岩体具有高硅($\text{SiO}_2=62.7\%\sim 63.9\%$)、准铝质-弱过铝质($\text{A/CNK}=1.00\sim 1.09$)及富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.82\%\sim 8.28\%$)特征,富集 LILE (K、Rb、Ba、Sr、U)而亏损 HFSE (Th、Nb、Ta、Zr)。全岩具有初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7049~0.7067)与正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+1.9~+2.0),结合锆石正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+4.9~+13.6),指示母岩浆主要源自受古太平洋俯冲板片物质交代的富集地幔,并经历下地壳混染后演化成了埃达克质特征。贫矿岩体则以高硅(76.4%~78.0%)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=8.30\%\sim 8.82\text{ wt}\%$)、高碱钙比值($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}=26.5\sim 39.4$)为特征,显著亏损 Sr($40.6\times 10^{-6}\sim 82.4\times 10^{-6}$)、Ba ($348\times 10^{-6}\sim 498\times 10^{-6}$)而富集

Zr+Y+Ce+Nb ($206\times 10^{-6}\sim 277\times 10^{-6}$),显示 A 型花岗岩属性。其正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+4.8~+20.1)与新元古代二阶段 Hf 模式年龄(418~1017 Ma)表明岩浆源于新生地壳并受幔源物质影响。相较于贫矿岩体(锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 均值 34.7、Eu/Eu 均值 0.21、Ce/Nd 均值 15.4、 ΔFMQ 均值+0.6),含矿岩体具有显著升高的锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ (均值 588)、Eu/Eu(均值 0.62)、Ce/Nd(均值 21.9)及 ΔFMQ 值(均值+1.2),与东北及全球斑岩铜矿特征一致。含矿岩体低 Zr 含量(均值 151 ppm)、Sr/Zr 比值(均值 7.96),高 Sr/Y 比值(78.0~130)、低 Dy/Yb 比值(1.86~2.03)及弱 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.79\sim 0.96$),表明岩浆结晶过程以锆石-角闪石分异为主,暗示高水含量特征。综合区域成矿岩体资料,提出高氧逸度、富水岩浆经高压分异是铜成矿的关键控制因素。此类岩体主要分布于中生代地壳显著增厚的东北地区北缘,具有重要找矿潜力,应作为未来勘查的重点靶区。

关键词: 宝泉斑岩铜矿; 岩浆属性; 埃达克质特征; 成矿潜力

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

基于机器学习的闪锌矿微量元素判别铅锌矿床类型

陈忠元¹, 任涛^{1*}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650000

为了解闪锌矿微量元素特征对不同成因矿床类型是否能够进行有效判别, 本研究系统收集了全球典型的沉积喷流型、密西西比河谷型、火山块状硫化物、矽卡岩型和浅成低温热液型铅锌矿床中 3117 条闪锌矿的 12 种微量元素含量数据 (Mn、Fe、Co、Cu、Ga、Ge、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Pb), 使用基于 Tree-structured Parzen Estimator (TPE) 优化的支持向量机机器学习算法建立了闪锌矿微量元素分类模型, 并使用 SHAP (SHapley Additive exPlanations) 方法解释预测模型和进行特征重要性分析。结果表明, 经

优化的 TPE-SVM 模型在测试集上展现出优异的分类能力, 准确率、召回率和 F1 值均超过 0.97。通过 SHAP 解释发现闪锌矿中 Mn、Ge、Co 为矿床成因类型判别三大关键元素。本文建立的闪锌矿微量元素判别指标体系, 不仅为矿床成因鉴定提供了新的技术手段, 更可为复合成矿系统解析、隐伏矿体预测等复杂地质问题提供创新解决方案。

关键词: 闪锌矿; 微量元素; 机器学习; TPE 优化算法; SHAP 算法

基金项目: 国家自然科学基金 (42163005)

第一作者: 陈忠元 (2000-), 男, 研究生, 地质工程专业。Email: 2820904039@qq.com

*通讯作者: 任涛 (1982-), 男, 教授, 主要从事矿床学、地球化学研究。Email: rentao@kust.edu.cn

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

滇西北羊拉铜多金属矿床白钨矿 U-Pb 年代学及地球化学特征

应元灿^{1*}, 李文昌¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093

三江成矿带是特提斯-喜马拉雅成矿带的重要组成部分, 蕴藏着众多贵金属和贱金属矿床, 包括一系列大型斑岩和矽卡岩型 Cu-Au 多金属矿床。而位于该成矿带内的羊拉铜矿床在近年来的勘探过程中新发现了一批 W-Sb 矿体, W-Sb 成矿机制及其与铜矿体的成因关系成为亟待解决的科学问题。白钨矿是羊拉矿床中唯一的含钨矿物, 在里农矿段发深部广泛发育。通过对里农矿段不同中段的白钨矿开展系统采样和地球化学分析, 从岩相学和白钨矿结构特征上将其划分为 3 类。原生白钨矿 (Sch-I) 在 CL 图像中一般呈现震荡环带, REE ($3.8 \times 10^{-6} \sim 142 \times 10^{-6}$) 含量最低, Sr ($604 \times 10^{-6} \sim 1480 \times 10^{-6}$) 含量最高。次生白钨矿 (Sch-III) 通常作为原生晶体上的叠印边缘沉淀, 其 REE ($145 \times 10^{-6} \sim 1071 \times 10^{-6}$) 和 Sr ($376 \times$

$10^{-6} \sim 793 \times 10^{-6}$) 含量最高。相比之下, Sch-II 属于从原生到次生的过渡阶段, 其 REE 和 Sr 含量处于中等含量。Sch-I 的特征是富含 LREE, 在球粒陨石稀土配分模式中呈现正 Eu 异常, 而 Sch-III 则呈现 MREE 富集模式, 具有弱正 Eu 异常。白钨矿的 U-Pb 定年 (30.3 ± 1.5 Ma) 表明, W 矿化与羊拉矿区三叠纪花岗岩的成因无关, W 矿化可能与新生代金沙江断裂带的隐伏岩浆活动和构造热事件有关。鉴于白钨矿具有较高的 $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ 比值 ($0.71771 \sim 0.72229$), 且明显高于三叠纪花岗岩和赋矿大理岩, 我们认为 Sch-I 的地球化学特征继承自初始成矿流体, 很可能有区域古老基底释放的变质流体参与。

关键词: 羊拉; 白钨矿; U-Pb 定年; 地球化学