

冀北覆盖区隐伏金矿床流体演化规律及成矿模式构建

邢莞东 杨俊峰 周海涛 李智斌

河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队(河北省海洋地质资源调查中心) 河北 秦皇岛 066000

摘要:本研究聚焦冀北覆盖区隐伏金矿床,通过流体包裹体岩相学、显微测温及同位素分析,查明成矿流体属 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系,具中低温、中低盐度特征,源于深部岩浆-变质水混合。成矿过程经历“活化-迁移-沉淀”三阶段,受断裂构造控运、温压突变触发。构建了“深部供源、断裂控运、流体成矿、盖层保矿”的成矿模式,揭示了覆盖区隐伏矿体保存机制,为区域金矿勘查提供理论依据与找矿标志。

关键词:冀北地区;覆盖区;隐伏金矿床;矿模式构建

引言:冀北地区作为华北克拉通北缘重要金成矿带,其覆盖区隐伏金矿床因深埋地下、地表显示微弱,找矿难度极大。成矿流体作为金元素迁移与沉淀的载体,其演化过程直接控制矿床形成与空间分布。目前,针对该区覆盖条件下流体来源、演化路径及成矿机制尚缺乏系统研究。本文基于流体包裹体、稳定同位素及地球化学数据,解析成矿流体特征与演化规律,构建“活化重就位”成矿模式,旨在揭示隐伏金矿形成机制,为深部找矿提供科学支撑。

1 矿床流体地球化学特征

1.1 流体包裹体岩相学与显微测温

流体包裹体岩相学与显微测温是揭示成矿流体原始特征的核心微观手段,通过系统观测矿石矿物、脉石矿物中封存的原生、次生包裹体,可精准划分包裹体类型与产出期次。研究区隐伏金矿床主要发育气液两相、纯液相及少量含子矿物三相包裹体,多呈椭圆状、不规则状零散或成群分布于石英脉、黄铁矿晶隙中,原生包裹体保存完整,未受后期构造热液叠加改造。显微测温实验结果显示,成矿流体均一温度集中在 $180 \sim 320^\circ\text{C}$ 区间,盐度呈现中低盐度特征,数值介于 $2.5\% \sim 12.8\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$,冰点温度、爆裂温度参数稳定可靠^[1]。不同成矿阶段包裹体测温数据差异显著,早阶段流体温度、盐度偏高,晚阶段逐步降低,清晰反映成矿流体温压条件的动态变化,为辨析流体演化过程提供直接微观证据。

1.2 流体成分与物理化学参数

通过流体包裹体激光拉曼光谱、显微红外光谱及成分萃取测试,系统剖析研究区成矿流体的物质组成与关键物理化学参数。结果表明,成矿流体气相成分以 H_2O 、 CO_2 为主,含微量 CH_4 、 N_2 等还原性气体,液相

主要为 H_2O ,溶解组分以 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,整体属于 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系流体。流体物理化学参数定量计算显示,成矿流体密度介于 $0.82 \sim 0.96 \text{g/cm}^3$,成矿压力集中在 $45 \sim 120 \text{MPa}$,pH 值呈弱酸性至中性,氧化还原电位偏低,整体为弱还原环境。参数纵向对比发现,主成矿阶段流体 CO_2 含量显著升高,流体活跃度增强,酸性介质环境利于围岩硫化物活化、金元素溶解迁移,而晚阶段流体成分趋于单一,物理化学条件趋于稳定,标志成矿作用逐步终止。

1.3 稳定同位素组成与来源示踪

稳定同位素是判别成矿流体、成矿物质来源的有效地球化学指示剂,本次重点开展氢氧、碳氧及硫同位素测试分析。矿床石英脉包裹体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值介于 $6.2\permil \sim 11.5\permil$, δD 值集中在 $-85\permil \sim -62\permil$,氢氧同位素投点偏离大气降水线,落入岩浆水与变质水混合区间,表明成矿流体并非单一来源。碳酸盐矿物 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{18}\text{O}$ 值特征显示,成矿流体碳质主要源自深部地层变质脱碳及少量岩浆脱气。硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布均匀,整体偏离地壳表层硫同位素特征,指示成矿物质硫主要来自深部岩浆源区或基底变质岩系。综合同位素数据可知,研究区成矿流体以深部原生流体为主,成矿晚期伴随少量大气降水混入,为流体来源与成因机制解析提供精准同位素依据。

2 成矿流体演化特征解析

2.1 成矿流体来源与初始属性

结合同位素数据、岩相学特征及区域地质背景,可精准界定研究区隐伏金矿床成矿流体的初始来源与原生属性。成矿流体初始形成于深部构造-岩浆活动阶段,由基底变质岩系脱水、岩浆熔融分异脱液共同形成,属于深部高温高压原生热液流体。初始流体具备高温、高

压、高活跃度、富挥发分的核心属性,流体中富含 CO_2 、 S^{2-} 、 Cl^- 等络合离子,可与金元素形成稳定的可溶性络合物,为金元素的大规模迁移富集提供物质基础^[2]。流体初始阶段未受浅表水体混入干扰,成分均一、物理化学参数稳定,还原性较强,能够有效萃取围岩中的金及多金属元素。随着深部构造活动触发流体向上运移,初始流体逐步脱离源区,开启后续演化进程,其原生属性直接决定了矿床的成矿潜力与矿化特征。

2.2 流体演化的阶段性特征

基于包裹体测温、成分测试及矿脉穿插关系,可将成矿流体演化划分为早、主、晚三个完整阶段,各阶段流体特征差异显著且演化规律清晰。早阶段为流体初始运移阶段,流体高温高压、高盐度、富 CO_2 ,以深部原生流体为主,主要发生围岩蚀变与元素预富集,无大规模金矿化^[3]。主成矿阶段流体温压条件适度降低,大气降水少量混入,流体盐度、密度小幅下降,挥发分大量逸散,金络合物稳定性降低,金元素快速沉淀富集,伴随黄铁矿、石英等载金矿物大量产出,是矿床主要成矿期。晚阶段流体以大气降水为主,深部流体占比极低,流体温度、盐度大幅降低,成分单一,仅发育少量方解石、石英细脉,无明显矿化,标志成矿流体演化结束,成矿作用彻底终止。

2.3 流体演化的关键触发过程

成矿流体阶段性演化与金元素富集沉淀,受控于构造活动、温压突变、流体混合三大关键触发过程。区域断裂构造的阶段性活动是核心动力学触发条件,深部断裂活化导通,为流体上升运移提供通道,同时改变流体赋存的温压环境。流体向上运移过程中,围岩压力快速降低、温度梯度递减,导致流体中 CO_2 等挥发分脱溶逸出,流体酸碱度、氧化还原状态发生突变,直接破坏金络合物的稳定平衡,促使金元素析出。另外,深部原生热液与浅表大气降水的混合作用是重要物质触发机制,两类流体物性差异显著,混合后流体盐度、密度快速调整,流体饱和度升高,进一步推动金属矿物快速沉淀。

3 流体运移机制与时空分异规律

3.1 流体运移的动力学机制

研究区成矿流体运移受构造应力、重力梯度、热动力梯度共同控制,形成多机制耦合的运移动力学体系。深部构造运动产生的挤压、拉张应力差,是流体向上运移的核心驱动力,区域深大断裂、次级裂隙构成贯通式流体运移网络,为流体长距离迁移提供空间通道。地层垂向的温度、压力梯度差异,促使高温高压深部流体向

低温低压浅表地层定向运移,热对流作用进一步强化流体运移效率。同时,围岩岩性差异形成的孔隙度、渗透率梯度,引导流体优先沿高渗透的破碎带、岩性界面运移。流体运移过程中并非匀速推进,构造活跃期流体快速运移、大范围扩散,构造平静期流体滞留汇聚,为金元素充分萃取、富集创造条件,形成“运移-滞留-富集”的动态动力学过程。

3.2 流体演化的时空分异规律

成矿流体演化具备显著的空间分异与时间序次分异特征,时空演化规律与矿床矿化分带高度匹配。时间维度上,流体演化严格遵循“深部原生流体主导→流体混合改造→浅表冷水流体主导”的序次,对应成矿前期、主成矿期、成矿后期三个时间阶段,流体物性、成分随时间持续渐变^[4]。空间维度上,流体从深部源区向上运移过程中,呈现明显的垂向分异特征,深部流体高温高盐、富挥发分,中部主矿层流体物性适中、矿化最强,浅部流体低温低盐、无明显矿化。平面上,流体沿断裂破碎带中心向两侧围岩扩散,中心区域流体活跃度高、矿化富集,两侧围岩蚀变弱、矿化程度低,形成中心富矿、两侧贫矿的空间分异格局。

3.3 覆盖区隐伏矿体的流体保存条件

覆盖区隐伏金矿床的流体保存与矿体富集,依赖良好的地层封堵、构造封闭及后期改造屏蔽条件。研究区矿体上部发育厚层第四系松散沉积物及泥岩、粉砂岩致密盖层,孔隙度低、渗透性极差,可有效封堵成矿流体,阻止流体向上逸散流失,为流体滞留富集提供良好的地层封闭条件。矿体赋存的断裂破碎带为张扭性封闭构造,构造围岩致密完整,无后期贯通性断裂切穿,避免了成矿流体外泄与矿质流失。良好的盖层封堵、构造封闭及弱后期改造条件,共同构成隐伏矿体流体保存的关键体系,保障了成矿流体充分沉淀富集,形成规模性隐伏金矿体。

4 成矿模式构建与找矿指示

4.1 成矿的关键地质约束与时间序列

研究区隐伏金矿床成矿作用受源、运、储、盖多重地质条件约束,且具备清晰的成矿时间序列。物质源约束上,深部基底变质岩与岩浆活动提供充足的成矿流体与金质来源;通道约束上,区域深大断裂与次级裂隙体系控制流体运移路径与富集空间;储矿约束上,断裂破碎带、岩性突变带为金质沉淀的核心储矿空间;盖层约束上,上部致密地层实现流体与矿体的有效保存。成矿时间序列严格对应构造-流体演化过程,先期深部构造岩

浆活动形成原生成矿流体,中期流体运移、混合、温压突变触发矿质沉淀,后期盖层封闭保存矿体。完整的地质约束体系与有序的时间演化序列,是该区隐伏金矿形成的必要前提,也为成矿模式构建奠定地质基础。

4.2 隐伏金矿床“活化重就位”成矿过程

研究区覆盖区隐伏金矿床的核心成矿机制为金元素“活化重就位”,是地层分散金质经流体改造、迁移富集的全过程成矿模式。成矿前期,地层中呈分散态、吸附态的原生金质,在深部变质热液作用下初步活化,发生小规模迁移聚集,在构造有利部位形成低品位金预富集层,为后续成矿积累物质基础。主成矿阶段,构造活动活化深部热液体系,高温含矿流体持续萃取围岩与预富集层中的金质,将固态金转化为可溶性金硫络合物,随流体沿断裂构造向上长距离运移。当流体进入浅部封闭构造空间,温压骤降、流体混合引发络合物分解,金质快速析出沉淀。多期次构造流体叠加改造,推动金质反复活化、迁移、重就位,最终形成规模性隐伏工业金矿体。

4.3 覆盖区隐伏金矿床成矿模式

结合研究区流体地球化学特征、构造演化规律与“活化重就位”成矿机制,可建立适配覆盖区地质特征的隐伏金矿床成矿模式。该模式整体概括为深部供源、断裂控运、流体成矿、盖层保矿的完整成矿体系,完整还原了矿床成矿全过程。深部基底变质与岩浆分异作用生成富金、富挥发分热液流体,为成矿提供核心物质与流体来源;区域深大断裂与次级裂隙网络构成流体运移通道与储集空间,控制矿体空间展布;流体运移过程中温压突变、冷热流体混合,破坏金络合物稳定性,促使金质大规模沉淀富集。成矿后厚层松散覆盖层与致密围岩形成封闭体系,有效阻挡流体外泄与矿体改造破坏,最终形成埋藏浅、隐蔽性强的覆盖区隐伏金矿床,为区域找矿勘探提供核心理论模型。

4.4 区域成矿规律与找矿标志总结

结合矿床地质特征与成矿模式,系统总结研究区区域成矿规律与直接、间接找矿标志。区域成矿规律表现为矿体严格受断裂构造与岩性界面控制,多赋存于深浅断裂交汇部位、破碎蚀变带中;成矿流体以深部混合热液为主,矿化强度与流体活跃度、蚀变强度正相关;覆盖区厚层盖层下方的构造薄弱带是隐伏矿体主要富集部位。直接找矿标志包括黄铁矿化、硅化、绢云母化等典型矿化蚀变,以及石英脉-硫化物组合、微细粒金矿化现象。间接找矿标志为区域重力、磁法、电法物探异常,以及氢氧硫同位素异常、流体温压参数异常。上述规律与标志可精准指导覆盖区隐伏金矿的勘探找矿,为区域后续找矿突破提供重要理论支撑。

结束语

本研究系统揭示了冀北覆盖区隐伏金矿床成矿流体的来源、演化路径及其与矿化耦合关系,明确了深部混合热液主导、多阶段演化的基本特征,构建了“深部供源—断裂导运—流体沉淀—盖层封保”的完整成矿模式。研究成果不仅深化了对覆盖区金矿成矿机制的认识,也为区域深部找矿提供了理论依据和关键找矿标志,对推动华北北缘隐伏矿床勘查具有重要指导意义。

参考文献

- [1] 寇少磊,刘基,王占彬,等.后龙门山构造带辛家咀金矿床成矿流体特征及其演化:来自流体包裹体与 H-O 同位素的证据 [J]. 现代地质,2025,39(5):1193-1208.
- [2] 张笑天,孙景贵,韩吉龙,等.吉林夹皮沟金矿集区三道岔金矿床成矿流体来源与演化——流体包裹体和 H-O 同位素的制约 [J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):748-766.
- [3] 吴圣刚,陈孝刚,陈俊辉,等.湘东北万古金矿床钨矿化流体来源与演化机制 [J]. 地球科学前沿,2026,16(2):126-136.
- [4] 陆胜,武广,李成禄,等.大兴安岭北段天望台山金矿床流体包裹体、黄铁矿微量元素及 H-O-S-Pb 同位素研究 [J]. 地学前缘,2026,33(3):211-227.