

胶东玲珑金矿床热液蚀变作用过程的元素迁移规律

任 飞^{1,2,3}, 蒋 雷^{1,2*}, 李 超^{4,5}, 耿凯强^{1,2}, 张 娜^{1,2}, 李珊珊^{1,2,6}, 张琪彬^{1,2}, 丁正江^{1,2}

(1. 深部金矿探测大数据应用开发山东省工程研究中心; 2. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院; 4. 国家地质实验测试中心;

5. 中国地质调查局铼-钼同位素地球化学重点实验室; 6. 中国地质大学(北京)数理学院)

摘要:玲珑金矿床是胶东代表性矿床,其热液蚀变作用与金成矿过程密切相关。通过微区 X 射线荧光光谱法(Micro-XRF)、主成分分析法(PCA)及全岩地球化学法,系统研究了玲珑金矿床热液蚀变过程元素迁移规律及其对金沉淀的控制机制。结果表明:①钾长石化阶段以 Al、K、Si 富集和 Ca、Na 亏损为特征,斜长石交代为钾长石并伴随绿泥石形成;②绢英岩化阶段以 K 迁入、Si 和 Ca 迁出为主,长石分解形成绢云母和石英;③黄铁绢英岩化阶段是金富集的关键期,Fe、Cu 等元素以硫化物形式沉淀,导致 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 络合物失稳而释放金。主成分分析揭示了蚀变分带的空间演化规律,PC1(41.0%)和PC2(22.5%)分别表征钾长石化与硫化物成矿阶段。研究进一步提出,黄铁矿化与酸性流体环境的协同作用驱动了“流体-岩石反应—硫化物沉淀—金富集”的循环。Micro-XRF 结合 PCA 有效解析了混合蚀变信息,为热液成矿系统的动态模拟提供了高精度技术支持。研究可为胶东金矿床深部找矿预测及成矿机理研究提供重要依据。

关键词:胶东;玲珑金矿床;元素迁移;质量平衡;Micro-XRF;主成分分析法;金沉淀机理

中图分类号:TD11 P618.51

文章编号:1001-1277(2025)09-0016-12

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250902

引 言

热液蚀变作用是流体与围岩发生水-岩反应的结果,元素既是基本成矿要素,又是成矿作用过程的示踪剂^[1-6]。在破碎带蚀变岩型及石英脉型金矿勘查中,蚀变带的分布特征与物化特征常被作为关键指示标志。蚀变带能够有效记录成矿期热液的温度、压力及流体组分特征,可反演金属矿物沉淀的物理化学环境(如pH、氧逸度等)^[7-8]。热液与围岩间的交代反应过程对元素活化迁移及矿床定位具有关键控制作用,其中蕴含的信息可以指示金属沉淀的条件,同时反映热液和围岩的交代对元素迁移和成矿过程的潜在影响^[5,9-13]。因此,通过有效的岩石地球化学方法对水-岩反应中元素迁移探索,可以推测相关成矿水-岩反应过程,对揭示热液蚀变过程中元素迁移规律、研究热液蚀变机理、探讨金沉淀机制具有重要意义。

胶东作为中国黄金资源核心产区,其探明金储量约占全国的三分之一^[14]。玲珑金矿床位于胶东西北部,招远—平度断裂北部,远景金储量超过1 000 t^[15-23]。矿区内发育大规模蚀变带,而蚀变岩型

矿体主要发育在招远—平度断裂下盘玲珑型花岗岩内的绢英岩化蚀变带中,其空间定位与绢云母-石英-黄铁矿组合的蚀变带特征显著相关^[24]。随着深部成矿理论逐步完善及勘查技术迭代创新,玲珑金矿床深部找矿取得突破性进展,涵盖构造控矿机理、岩浆岩、成矿物质来源、成矿流体演化及蚀变-矿化耦合关系等领域^[2,8,19,25-39]。然而,多期次蚀变作用在相同构造域内叠加改造,导致蚀变矿物组合、元素迁移轨迹与矿化事件形成复杂的时空耦合关系,传统岩石地球化学方法难以有效解耦此类复合型地球化学信号,制约了对成矿元素迁移路径的精细刻画。玲珑金矿床热液蚀变与金成矿的动力学过程仍缺乏系统性模型,成为揭示胶东型金矿床成矿机制的关键科学瓶颈。因此,通过有效的岩石地球化学方法,系统解析水-岩反应中元素的迁移路径与富集特征,能够有效重建成矿期流体-岩石相互作用过程,为揭示热液蚀变阶段元素活化、迁移的时空规律,阐释蚀变矿物组合演化机制及金沉淀的物化条件提供科学依据。

微区 X 射线荧光光谱法(Micro-XRF)作为一种新型微区原位分析手段,其核心原理是基于 X 射线与样

收稿日期:2025-04-02; 修回日期:2025-04-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2906900);山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室项目(SDK202214)

作者简介:任 飞(1996—),男,助理工程师,硕士,从事找矿勘查研究工作;E-mail:renfei0627@qq.com

*通信作者:蒋 雷(1987—),男,高级工程师,硕士,从事地质矿产勘查研究工作;E-mail:lyjl612@126.com

品表层的原子相互作用,当高能X射线光子激发原子内层电子时,促使电子发生电离并脱离原有轨道,外层电子随即跃迁至空位并释放特征X射线。通过解析特征X射线能谱及其强度分布,可半定量获取样品表面元素的种类与空间分布特征^[40-43]。相较于传统检测方法,该技术无需复杂预处理即可实现多元素同步检测,且支持厘米级区域的原位微区扫描制图,在蚀变矿物微区元素迁移示踪领域展现出广阔的应用潜力。

本研究基于系统的野外观测与采样工作,查明了玲珑金矿床蚀变岩类型及其矿物共生序列,并按蚀变分带规律采集代表性岩石标本。通过全岩地球化学测试与Micro-XRF联用,定量探讨热液蚀变过程中元素迁移规律,初步揭示蚀变岩型矿体热液蚀变-矿化过程。

1 区域地质背景

胶东位于郯庐断裂东侧,太平洋俯冲带西侧^[44],三面环海,主要由东部的苏鲁地体和西部的胶北地体2个构造单元组成,以五莲—青岛—烟台断裂为缝合线^[45-47](见图1-A)。苏鲁地体为超高压变质带,胶北地体分为北部的胶北隆起和南部的胶莱盆地^[46]。中生代构造岩浆作用强烈^[47],晚侏罗世和早白垩世的岩浆分布普遍^[35,48],包括花岗岩体及中基性岩脉。胶东广泛分布着前寒武纪基底变质岩,主要包括胶北地块以TTG(奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩)片麻岩为主的新太古代胶东群,以变质沉积岩为主的元古宙景山群、粉子山群和蓬莱群^[49],以及苏鲁地体的三叠纪超高压变质岩。中生代,胶东发生大规模金成矿作用,金矿资源丰富^[27](见图1-B)。

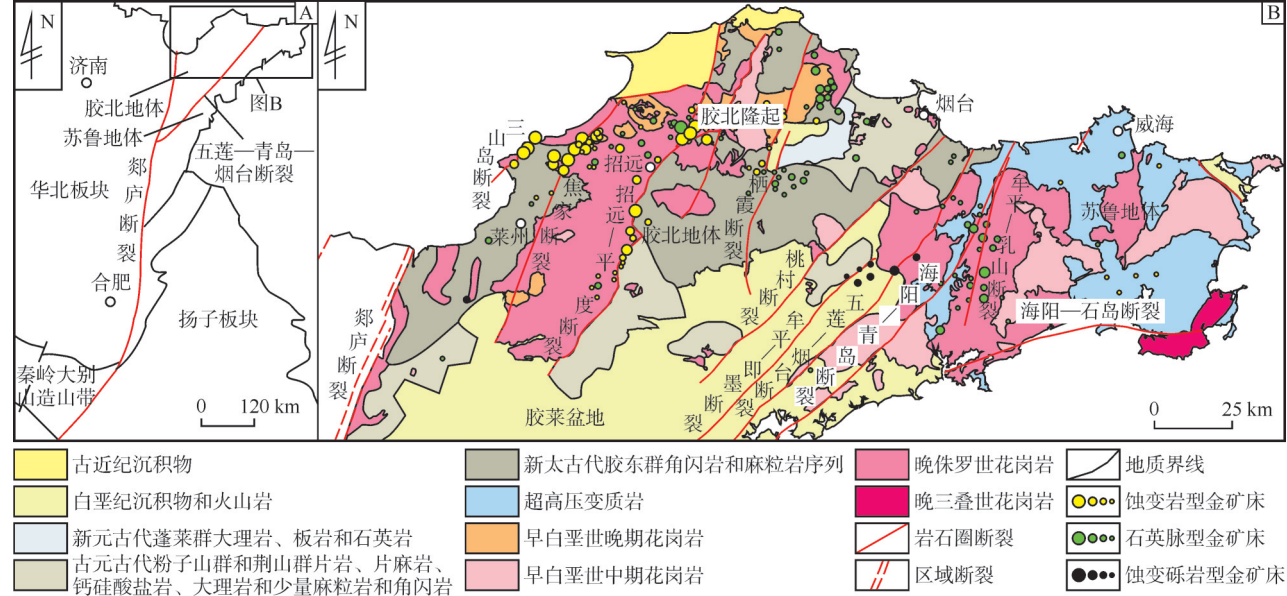


图1 胶东大地构造位置图(A)与金矿床分布地质图(B)(据文献[36]修改)

Fig. 1 Tectonic location map of Jiaodong (A) and geological map showing the distribution of gold deposits (B)

胶东的构造特征主要表现为区域性断裂,其中,以北东向—北北东向和北西向—北北西向构造为主,而北东向—北北东向断裂则由张性断裂构成,衍生出一系列次级断裂,金成矿作用主要受北东向—北北东向断裂控制^[23]。自沂沭断裂向东,依次呈现北东向—北北东向展布的三山岛断裂、焦家断裂和招远—平度断裂。北东向构造广泛发育,由早中生代华北、扬子板块陆-陆碰撞形成,主要表现为变质基底褶皱及相关的次级小断裂,伴生的东西向断裂多被后期地质作用反复改造。北东向—北北东向断裂是沂沭断裂的次级断裂,同时也是胶东最重要的控矿构造^[50],已探明金矿化几乎都与其相关,经历了多次挤压和拉伸,自西向东依次为三山岛断裂、焦家断裂、招远—平度断裂和牟平—乳山断裂^[51]。胶西北地区是北西向构

造的主要发育区域,其断裂形态呈明显的波状起伏,属于成矿后形成的断裂,控制了少数区域的晚期银矿化^[38]。

侵入岩大面积发育,包括玲珑型、郭家岭型和艾山型等3种花岗岩^[52-54]。玲珑型花岗岩以玲珑黑云母花岗岩和栾家河二长花岗岩为主,发育于招远—平度断裂与焦家断裂之间,并广泛出露于地质构造中。采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)测得玲珑型花岗岩锆石U-Pb年龄主要为149~166 Ma^[37]。郭家岭型花岗岩与新太古代胶东群和玲珑型花岗岩为侵入接触关系,一般分布于招远上庄和郭家岭地区,总体呈近东西向展布^[55-56],锆石U-Pb年龄显示其侵位时间为126~133 Ma,由下地壳前寒武纪变质基底部分熔融形成^[57]。艾山型花岗岩主要出

露在胶东东部,由未变形的碱性花岗岩组成。锆石 U-Pb 年龄显示,艾山型花岗岩主要侵位于 108~120 Ma^[33],具有壳幔混合成因特点^[58]。镁铁质岩脉分布广泛,但体积通常较小,锆石 U-Pb 年龄显示,基性岩脉侵位时间为 110~130 Ma,主要来源于岩石圈地幔的低程度部分熔融^[25]。玲珑型花岗岩和郭家岭型花岗岩为胶东金矿床的主要赋矿围岩^[19]。

2 矿区地质特征

玲珑金矿床位于胶东西北部,招远—平度断裂北

段,矿区东到东风、西到欧家乔、南到台上、北到大庄子,远景金储量超过 1 000 t,属于世界级超大型金矿床。矿区内出露地层主要为新太古代胶东群和新生代第四系,胶东群岩石组成以斜长角闪岩、黑云母片麻岩和片岩为主(见图 2),呈规模相对较小的层状或透镜状产出。古元古宙至早古生代,变质变形作用经历了从韧性剪切带到脆性破碎带,再到糜棱岩化的复杂过程。

玲珑金矿床的构造特征主要表现为区域性断裂,这些断裂在多次构造运动的作用下相互叠加,形成了

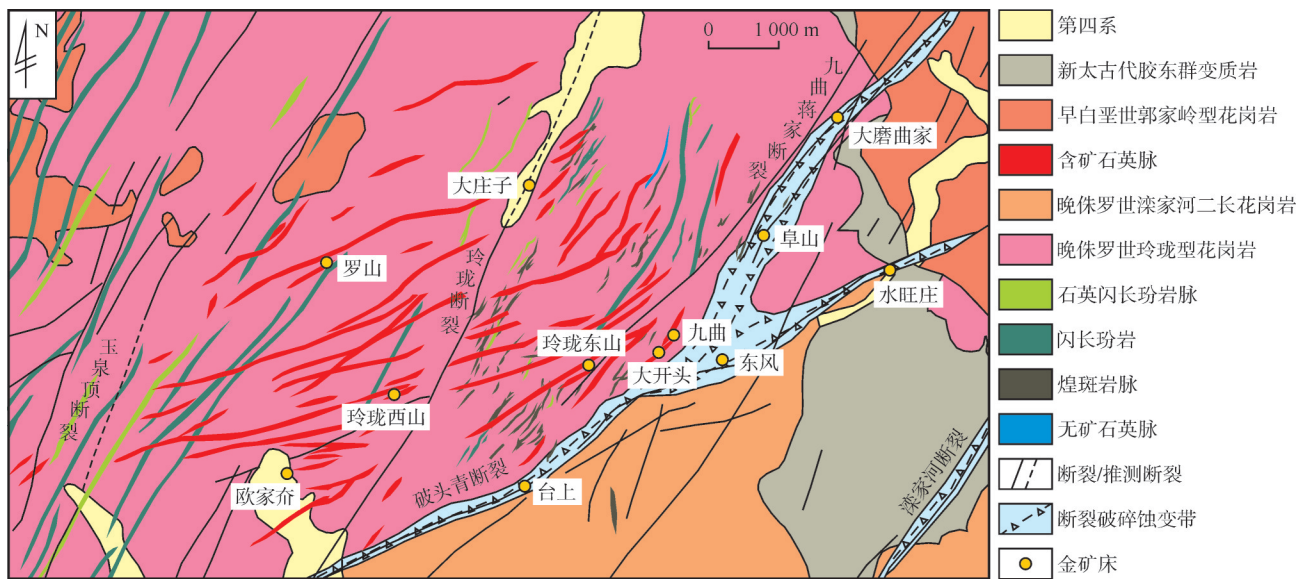


图2 玲珑金矿区地质图(据文献[19]修改)

Fig. 2 Geological map of the Linglong Gold District

规模不一、分布密集的次级断裂。金矿化与控矿断裂关系密切,矿化富集部位往往位于断裂附近或二者交会处。矿体产出的主要控制断裂为一级断裂,其下盘分布的二级断裂包括成矿期构造破头青断裂和成矿后构造玲珑断裂,矿区内北东向—北北东向断裂是发育数量最多的次级断裂,规模相对较小,主要分布在一级断裂两侧,属于成矿期构造。与其他控矿断裂相比,该断裂对金矿化有明显的切割作用和改造作用,呈带状展布于矿区中部和东部地区。

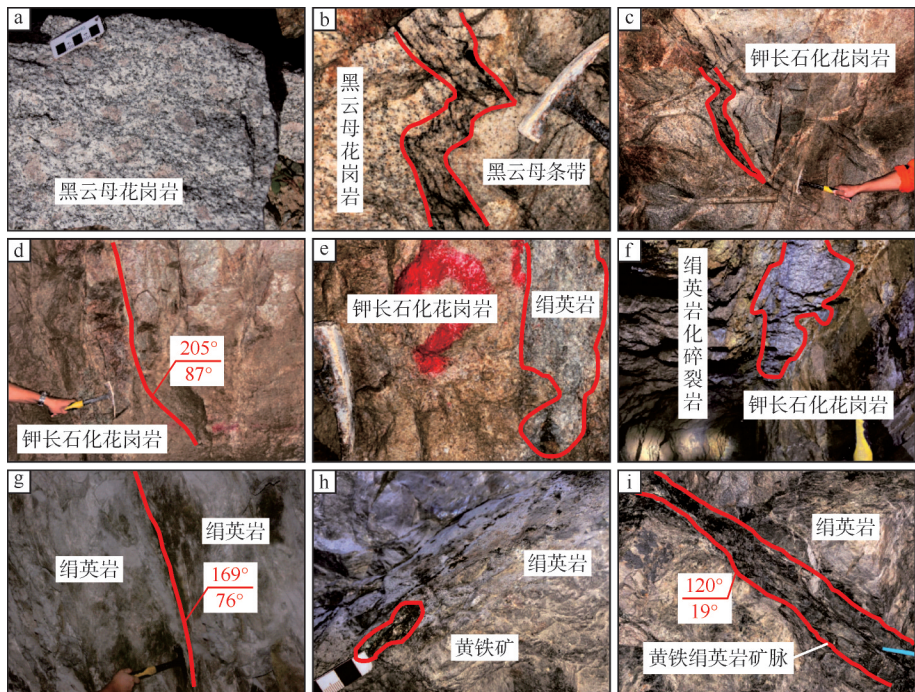
频繁而强烈的岩浆活动引发了岩浆岩的异常发育。通过对其围岩蚀变类型及特征进行研究,认为该矿床形成于后碰撞环境。玲珑型花岗岩、郭家岭型花岗岩和濞家河二长花岗岩是该地区主要赋矿岩体,而玲珑型花岗岩占据主导地位。根据前人研究,从破头青断裂北西向开始,随着暗色岩脉增多,岩性逐渐从中性向基性转变^[59]。玲珑金矿床中常见岩脉和矿体在时间和空间上呈现出相似的特征,所含微量元素的关系也是相同的,这表明可能是同源分异的产物。

3 蚀变类型及采样类型

3.1 蚀变类型

玲珑金矿床拥有广泛的围岩蚀变,在构造-热液活动下,破头青断裂下盘的黑云母花岗岩发生钾长石化、绢英岩化、黄铁绢英岩化等蚀变(见图3)。

钾长石化蚀变带:玲珑金矿床钾长石化蚀变一般位于远矿围岩中。钾长石化也称红化(钾长石化期间生成的赤铁矿也对红化有影响),根据蚀变程度也可分为强钾长石化和弱钾长石化,强钾长石化颜色为肉红色,弱钾长石化一般为浅肉红色至灰白色。钾长石化蚀变一般具有3种产出形式:其一形成早于绢英岩化蚀变阶段,远离主断裂,在绢英岩化带外围发育大规模的面状钾长石化蚀变,再向外,钾长石化蚀变减弱,则过渡到未蚀变的新鲜黑云母花岗岩;其二出于绢英岩化蚀变带内部,形成角砾状或不规则团块状残留体;其三呈脉状穿插于围岩中,形成宽大的伟晶岩脉。绢英岩化蚀变带:绢英岩化蚀变带在玲珑金矿床内相当发育,为靠近主断裂的成矿期热液蚀变,与



a—新鲜黑云母花岗岩 b—轻微钾长石化黑云母花岗岩 c—黑云母花岗岩过渡到钾长石化花岗岩 d—面状钾长石化花岗岩 e—钾长石化花岗岩中含部分绢英岩 f—绢英岩化碎裂岩分布于钾长石化花岗岩中 g—面状绢英岩 h—绢英岩中黄铁矿集合体 i—绢英岩中发育黄铁绢英岩矿脉

图 3 玲珑金矿床围岩及蚀变矿化特征

Fig. 3 Wall rocks and alteration mineralization characteristics of the Linglong Gold Deposit

更靠近主断裂的黄铁绢英岩化带和远离主断裂的钾长石化带呈渐变过渡(见图 4)。绢英岩化蚀变带规模一般较大,主要以面状展布,叠加在早期蚀变带之上,宽度 10 ~ 200 m;其次呈受次级断裂控制的脉状产出,宽度 0.1 ~ 1 m。

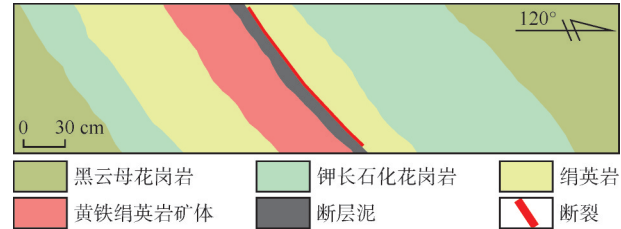


图 4 玲珑金矿床蚀变分带

Fig. 4 Alteration zoning of the Linglong Gold Deposit

黄铁绢英岩化蚀变带:黄铁绢英岩化蚀变是玲珑金矿床中金成矿期蚀变作用的产物,普遍分布,主要见于断裂内部,形成独立分带,宽度 0.1 ~ 30 m。该蚀变带以面状为主,宏观上构成脉状蚀变带,矿体分布其中,其与绢英岩的主要区别是黄铁矿含量的高低。

3.2 采样类型

黑云母花岗岩(见图 5-a):新鲜面为灰色,花岗结构,块状构造,主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母(见图 6-a)等成分构成。其中,石英呈他形粒状,占 26 % 左右;钾长石呈板状,占 15 %;斜长石呈板柱状,约占 55 %;黑云母呈片状分布,自形程度高;次要矿物为绿

泥石、角闪石等;副矿物主要为磷灰石、锆石、榍石。

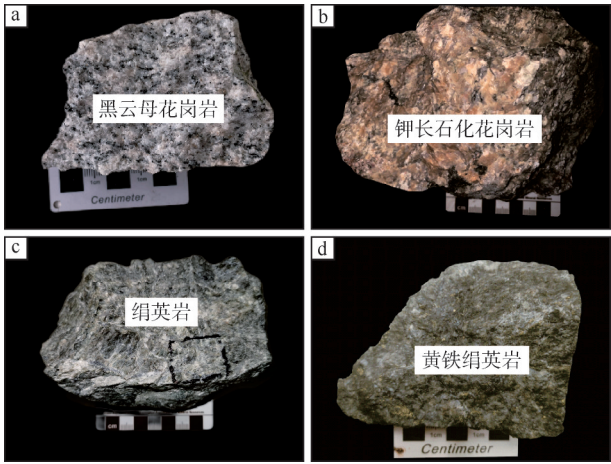
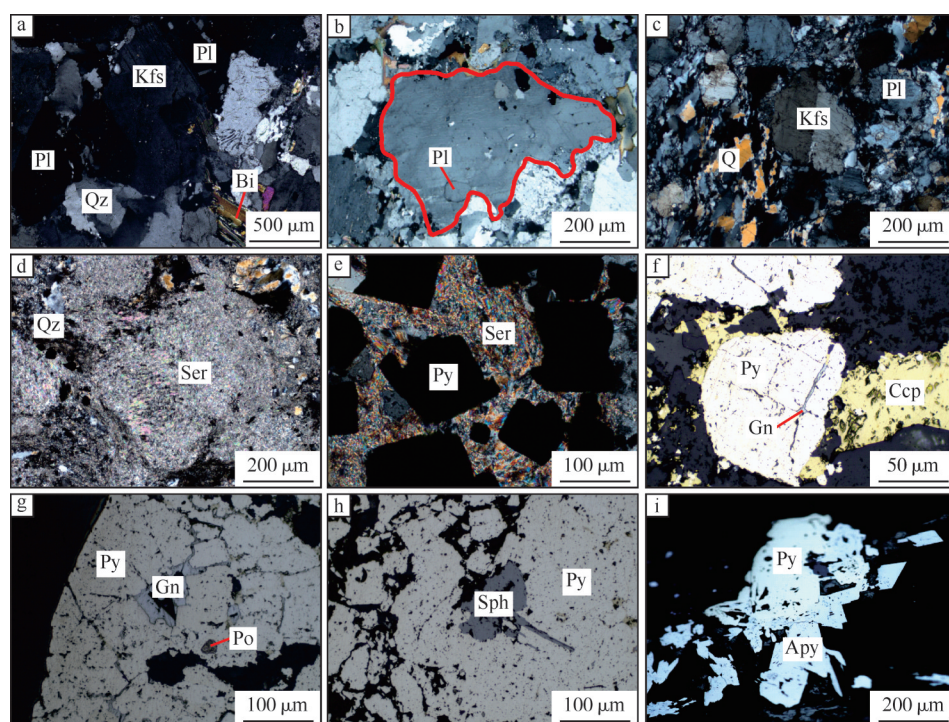


图 5 玲珑金矿床采集样品类型

Fig. 5 Sample types collected from the Linglong Gold Deposit

钾长石化花岗岩(见图 5-b):呈肉红色或淡肉红色,变余花岗结构,块状构造,主要包括石英、钾长石和斜长石(见图 6-b、c)。石英以他形粒状产出,波状明显消光;钾长石以他形粒状交代斜长石;斜长石为板状,聚片双晶结构;次要矿物为绿泥石、白云母等;副矿物为磷灰石、锆石、榍石、白钛矿。

绢英岩(见图 5-c):色泽绿—灰绿色,鳞片粒状变晶结构,块状构造,主要矿物成分为绢云母、石英(见图 6-d)。石英以他形粒状展布,波状消光;绢云母呈鳞片状排列。



a—未蚀变黑云母花岗岩 b、c—钾长石化花岗岩 d—绢英岩 e~i—黄铁绢英岩矿石中金属矿物 Pl—斜长石 Kfs—钾长石 Qz—石英 Bi—黑云母 Ser—绢云母 Py—黄铁矿 Gn—闪锌矿 Ccp—黄铜矿 Sph—闪锌矿 Po—磁黄铁矿

图6 玲珑金矿床岩石矿石显微镜下照片

Fig. 6 Microscopic photos of rocks and ores in Linglong Gold Deposit

黄铁绢英岩(见图5-d):黑灰色—灰褐色,主要矿物为绢云母、石英、黄铁矿(见图6-e~i)。石英为他形粒状,波状消光;绢云母多以细脉穿插石英空隙;黄铁矿规模不等,呈自形—半自形分布,为最常见硫化物之一,常以浸染状、细脉状出露。

4 分析方法

采用Bruker M4 Tornado台式微X射线荧光仪在近真空条件下对选定的样品进行分析,并采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)进行全岩微量元素测试分析,在中国地质调查局国家地质实验测试中心完成。

Micro-XRF采用1个30 W钨阳极金属陶瓷X射线管和2个30 mm硅漂移探测器。钨靶X射线源在设置最大能量(600 μ A, 50 kV)下运行,不使用过滤器。用多毛细管透镜将X射线聚焦为25 μ m。所有的Micro-XRF映射都采用每像素1 ms的标准积分时间和15 μ m的步长条件扫描总面积约2 cm $\times$ 3 cm的样品区域,选取Na、Mg、Al、Si、P、S、K、Ca、Ti、Fe的元素图,每次自动化运行大约需要10 h。Na元素映射具有较低信噪比,可以通过更高的分辨率或增加停留时间来减缓,但会导致更长的分析时间^[60]。

由Micro-XRF作图得到的直接定性结果是一个整体光谱图,代表了整个样品表面所有可测得的化学成分。从定性的XRF映射元素图中,选取感兴趣的区域及所需元素图像单独成图,在Micro-XRF单

元素映射图像的基础上利用ImageJ v1.48将单元素成图,进而根据矿物化学成分合成为多光谱图像得到矿物定性分布图。利用Python对转化的像素数据进行主成分分析(PCA)静态处理。

运用ICP-MS进行全岩微量元素测试分析,使用仪器为Thermo X2 ICP-MS,测试方法和依据为DZ/T 0223—2001《电感耦合等离子体质谱分析方法通则》。

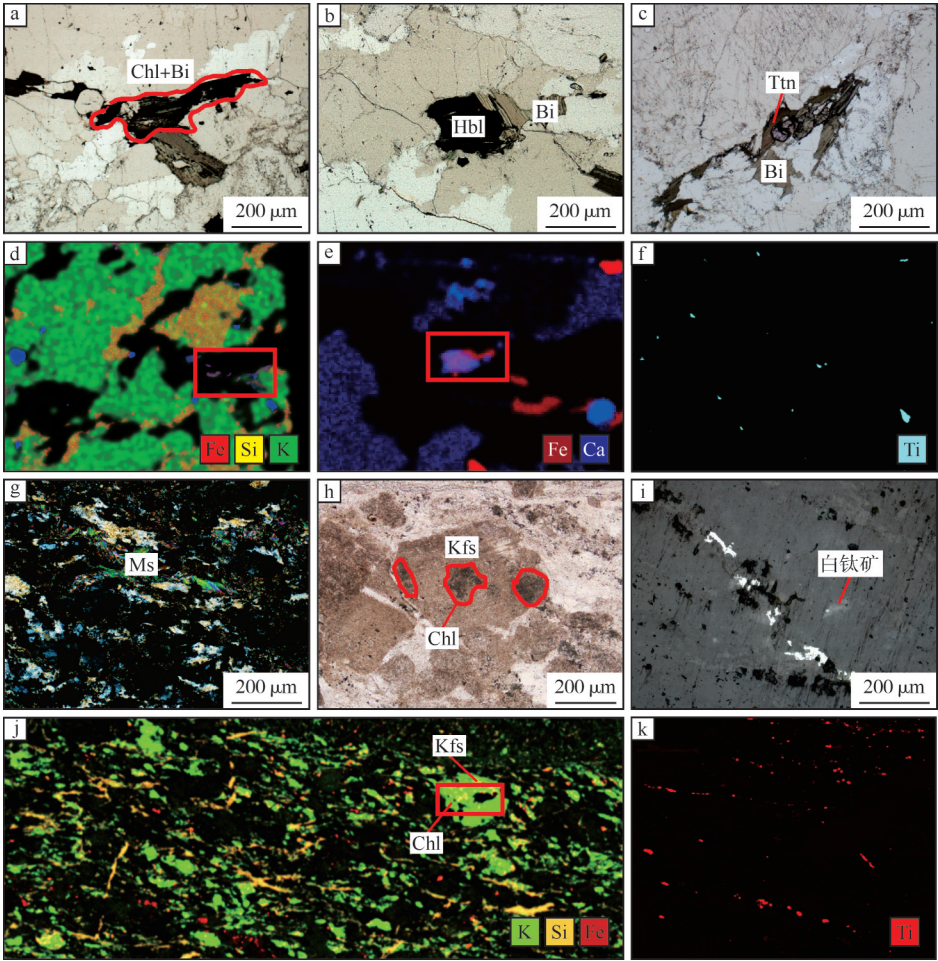
5 结 果

5.1 基于 μ -XRF图像制图

利用ImageJ v1.48和MultiSpecv3.4对得到的元素图进行数字图像分析,对每个元素图预先进行对比度/亮度调整和降噪的预处理,结合镜下观察,将每个样品中最有意义的图叠加成多光谱图像进行分析,通过化学成分识别不同的矿物相,结果见图7,并对其进行人工分割训练定义像素。利用Fisher线性判别算法进行高光谱空间分类,得到分类图像,结果见图8。对分类后的图像进行颜色阈值处理,并对每个颜色指定的成分和相位进行粒子分析。通过计算每个离散颗粒的大小和形状,提取定量矿物学数据,结果见图9。

5.2 主成分分析

通过主成分分析(PCA),可将复杂的XRF元素空间分布转化为直观的二维模式,揭示不同岩石类型的



a、d—绿泥石和绿泥石对应XRF制图 b、e—角闪石和黑云母对应XRF制图 c、f—黑云母中的榍石可用Ti单元元素映射图标识
g、h、j—白云母和钾长石内的绿泥石及对应XRF制图 i、k—反射光下白钛矿可用Ti单元元素映射图标识 Kfs—钾长石
Chl—绿泥石 Hbl—角闪石 Ttn—榍石 Bi—黑云母 Ms—白云母

图 7 Micro-XRF 元素映射图制图

Fig. 7 Elemental projection mapping by Micro-XRF

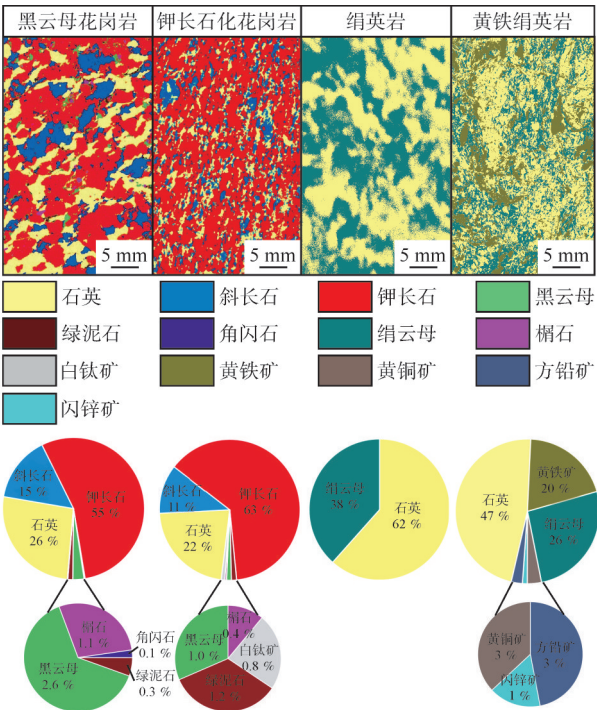


图 8 Micro-XRF 定量制图

Fig. 8 Quantitative mapping by Micro-XRF

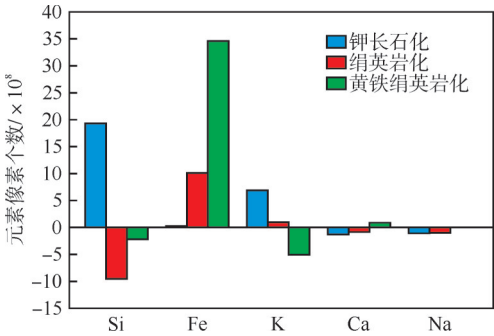


图 9 蚀变过程主元素迁移情况

Fig. 9 Major element migration during the alteration process

元素组合特征及蚀变过程的内在关联,为矿床成因研究和勘探提供数据支持。

主成分分析双图可视化结果见图 10。由图 10 可知:2 个主成分(PC1 和 PC2)分别为 41.0 % 和 22.5 % 的方差解释率,累积方差解释率达 63.5 %。该较高累积方差解释率表明,PC1-PC2 平面能够有效表征 3 类岩性的元素分布特征差异及其成因关联。

3 类岩石样品在 PCA 空间中分布呈现明显分带特征,揭示了花岗岩蚀变体系的空间演化规律:

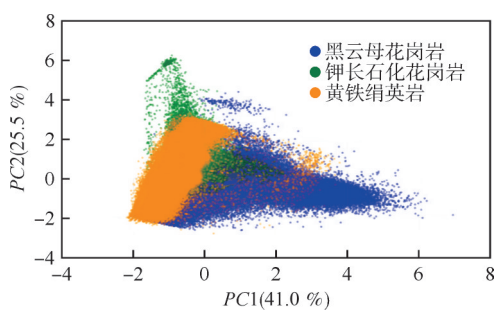


图 10 主成分分析双图可视化结果

Fig. 10 Biplot visualization results of principal component analysis

黑云母花岗岩(原生岩相)分布特征:密集分布于 $PC1=3.5\pm1.1$ 、 $PC2=1.2\pm0.9$ 区域,靠近 Al-Ca-Na 矢量汇聚区;该区域代表蚀变程度最低的原始岩相。钾长石化花岗岩(中期蚀变相)集中分布于 $PC1=0.2\pm1.2$ 、 $PC2=2.1\pm0.9$ 区域;黄铁绢英岩(晚期蚀变相)集中在 $PC1=-1.0\pm1.1$ 、 $PC2=1.2\pm0.9$ 区域。

5.3 微量元素分析

在成矿流体与围岩发生交代反应的过程中,形成了蚀变围岩,其微观特征表现为元素的带入和带出,即在特定条件下(如温压条件、孔隙度、pH、应力等),元素在成矿流体和围岩之间经历了活化、迁移和沉淀的过程。因此,通过分析和探讨矿床成因及成矿流体对岩体作用机理,有助于深入认识热液矿床。质量平衡研究的重点在于对蚀变岩石进行定量研究,以探究蚀变过程中元素的迁移情况^[61-65]。通过对岩矿石样品进行化学分析和同位素测试,发现其化学成分变化范围较大,且具有明显的分带性,因此采用化学动力学理论建立矿床中蚀变岩型矿石的质量守恒关系式,

后经过简化推导得出了质量平衡方程: $C_k^A = (M^B / M^A) (C_k^B + \Delta C_k)$ (C_k^A 、 C_k^B 分别为蚀变岩、原岩中第 k 种元素的质量分数; M^B 、 M^A 分别为原岩、蚀变岩的质量; ΔC_k 为元素 k 的质量变化)。

在运用质量平衡方程进行元素迁移定量计算时,至关重要的是明确蚀变过程中不活跃元素,即这些元素在蚀变过程中不会随着化学变化而从其原始环境中迁移。一般认为,在矿物溶解或沉淀之前,这些不活跃元素会被保留下来,称为不活跃元素,即相对于其他元素而言,不活跃元素的活跃度相对较低。本文微量元素迁移采用相对含量稳定 Zr 标准化,为平衡元素迁移量差距巨大的情况,作图时进行适量削减平衡数据,结果见图 11,实际迁移量见表 1 和表 2。

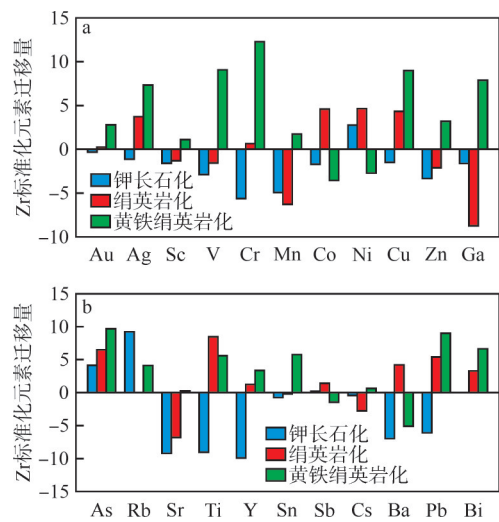


图 11 微量元素得失情况柱状图

Fig. 11 Histogram of gains and losses of trace elements

表 1 玲珑金矿床原岩及蚀变岩微量元素分析结果

Table 1 Trace element analysis results of protolith and altered rocks from the Linglong Gold Deposit $\times 10^{-6}$

元素	黑云母花岗岩		钾长石化花岗岩		绢英岩		黄铁绢英岩	
	LL22	LL37	D07	D12	DF-B1	DF-B2	DF-B4	DF-B7
Au	0.03	0.04	0.02	0	0.49	0.11	4.19	2.53
Ag	1.69	1.90	0.81	0.54	12.17	1.53	85.88	92.76
Li	15.31	29.88	2.47	6.21	2.73	0.99	2.77	2.57
Be	2.60	3.07	2.27	2.84	0.06	1.46	2.15	3.14
Sc	3.96	3.50	1.59	2.89	0.21	1.76	1.67	2.87
Ti	1 424.75	1 649.72	151.97	121.99	12.02	455.69	344.43	683.24
V	28.94	32.36	3.07	2.83	0.82	2.07	7.70	14.85
Cr	4.91	7.32	0.58	0.46	0.32	2.23	8.41	20.38
Mn	538.42	612.83	132.04	128.28	72.65	73.54	126.44	66.30
Co	2.63	2.09	0.11	1.18	95.08	0.95	3.09	21.23
Ni	2.28	2.37	1.00	50.22	30.12	31.96	7.35	14.59
Cu	2.52	2.27	1.28	0.65	355.61	5.64	5 147.74	3 942.98
Zn	43.17	42.80	4.69	7.21	4.83	3.29	117.29	169.62
Ga	16.37	17.68	15.09	17.57	0.59	15.41	12.65	21.27
Ge	1.10	1.23	1.54	1.93	0.67	0.99	1.10	1.07

表 1 (续)
Table 1 (continued)

元素	黑云母花岗岩		钾长石化花岗岩		绢英岩		黄铁绢英岩	
	LL22	LL37	D07	D12	DF-B1	DF-B2	DF-B4	DF-B7
As	13.96	12.39	13.45	51.93	34.73	71.80	176.95	276.87
Rb	45.69	55.01	196.28	53.97	2.16	78.49	83.89	129.02
Sr	994.13	686.65	157.98	124.59	19.66	36.29	31.13	28.37
Y	13.03	17.72	6.26	4.38	5.14	8.73	16.06	5.89
Zr	253.15	275.05	122.21	69.00	113.97	215.30	329.58	205.04
Nb	10.95	14.31	5.28	4.63	0.06	8.32	2.34	4.70
Mo	3.33	1.08	2.62	1.04	2.59	1.08	1.12	1.64
Cd	0.04	0.02	0.01	0.01	0.07	0.02	1.74	2.28
In	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	1.83	1.76
Sn	1.22	1.55	0.65	0.61	0.08	0.88	4.86	8.46
Sb	0.07	0.13	0.10	0.57	3.29	0.32	0.28	0.50
Cs	2.33	4.50	4.77	1.54	0.03	0.68	0.80	1.12
Ba	1 683.79	1 062.47	105.89	55.39	107.86	772.17	221.90	233.98
Hf	5.19	5.74	4.29	1.72	2.31	4.94	7.69	4.85
Ta	0.16	0.17	0.16	0.19	0.00	0.31	0.19	0.18
W	0.17	0.65	0.12	0.09	0.04	0.22	0.80	1.86
Tl	0.43	0.48	1.17	0.42	0.15	0.43	0.36	0.48
Pb	20.54	20.16	23.79	6.22	249.74	20.55	1 785.56	1 031.72
Bi	0.02	0.03	0.02	0.01	6.66	0.42	58.96	34.73
Th	3.42	6.57	1.94	1.92	0.16	0.60	4.70	6.52
U	0.88	1.34	8.02	13.29	0.03	0.75	1.13	1.85

表 2 蚀变过程中微量元素平均得失量
Table 2 Average gains and losses of trace elements during the alteration process

元素	钾长石化	绢英岩化	黄铁绢英岩化
Au	-0.26	0.27	2.87
Ag	-1.16	3.78	7.37
Sc	-1.62	-1.31	1.16
V	-2.87	-1.59	9.19
Cr	-5.62	0.68	12.30
Mn	-4.90	-6.24	1.77
Co	-1.75	4.62	-3.55
Ni	2.88	4.65	-2.70
Cu	-1.48	4.34	9.00
Zn	-3.37	-2.12	3.19
Ga	-1.63	-8.79	7.99
As	4.22	6.53	9.68
Rb	9.28	0.18	4.23
Sr	-9.18	-6.91	0.08
Ti	-9.08	8.51	5.62
Y	-10.00	1.22	3.41
Sn	-0.79	-0.18	5.80
Sb	0.21	1.37	-1.44
Cs	-0.44	-2.82	0.55
Ba	-7.10	4.23	-5.10
Pb	-6.20	5.41	9.00
Bi	-0.01	3.32	6.63

在钾长石化阶段,As、Sb、Ni等元素为迁入,而Sr、Ti、Y、Sn、Ba、Pb、Ag、Cu、Mn、Zn等元素为迁出。Sr元素的强烈迁移主要源于斜长石的交代作用,当斜长石发生蚀变时,Sr会渗入成矿流体中。此外,在钾长石化蚀变过程中,Ti、Y元素明显迁出,是楣石、磷灰石、磷钇矿等副矿物的分解造成迁出。

在绢英岩化过程中,Ag、As、Ti、Y、Sb、Ba、Pb、Bi、Co、Ni、Cu等元素显著迁入,而Au则略有迁入,Sr、Cs、Sc、V、Mn、Zn等元素呈迁出状态。Sr的降幅较大,这可能是由于绢云母和石英对斜长石交代。

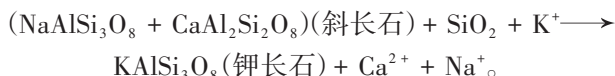
在黄铁绢英岩化过程中,Au、Ag、As、Ti、Y、Sn、Pb、Bi、V、Cr、Cu、Zn等元素呈迁入趋势,而Sb、Ba、Co、Ni等元素则呈迁出趋势。其中,Au、Ag元素相对于钾长石化及绢英岩化有大量迁入,在此阶段,Fe、Cu等元素以硫化物形态存在,而Au、Ag、Bi、As等元素则以硫化物形态存在于这些硫化物中,推测H₂S和Fe²⁺、Cu²⁺等金属离子被大量消耗,致使[Au(HS)₂]⁻络合物失稳,使得Au从络合物中释放,从而引发沉淀。

6 讨 论

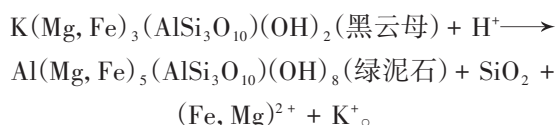
6.1 蚀变序列元素迁移

钾长石化蚀变是玲珑金矿床内广泛发育的成矿早期蚀变,常以面状、脉状分布于绢英岩化外侧,在矿

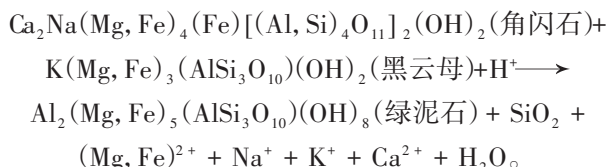
物学方面主要表现为钾长石对斜长石的交代或钾长石的次生加大。由图 11 可知:在元素地球化学方面,钾长石化蚀变过程中 Si、K 明显迁入, Ca、Na 迁出,指示玲珑金矿床内钾长石化蚀变反应式如下:



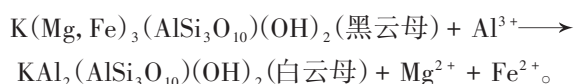
黑云母形成绿泥石,反应式如下:



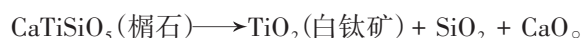
黑云母花岗岩中角闪石与部分黑云母可能并非直接蚀变形成绿泥石,而是被流体活化出 Fe 和 Mg 离子后,在斜长石核部形成绿泥石,反应式如下:



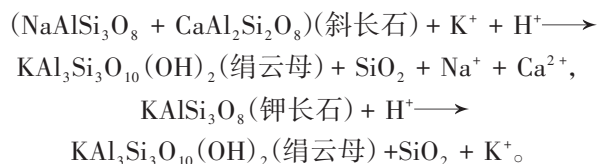
黑云母蚀变形成白云母,反应式如下:



副矿物榍石蚀变形成白钛矿,反应式如下:



绢英岩化蚀变现象十分普遍,长石被绢云母完全替代,同时原岩中的暗色矿物基本消失,形成了由石英和绢云母构成的典型矿物组合。钾长石化花岗岩中的钠长石、钾长石等矿物在含有 H^+ 、 HS^- 的溶液中失稳,发生了钾质交代和水解作用。绢英岩化蚀变作用导致绢云母和石英形成,元素迁移方面表现为 K 等迁入,而 Si、Ca、Na 则迁出。这一过程中,绢英岩发生了流体-岩石反应,反应式如下:



黄铁绢英岩化是一个重要的成矿阶段,其蚀变过程中 Fe 呈现明显的迁入, Si、K、Na 轻微迁出。野外地质观察表明,黄铁绢英岩化蚀变带内的铁含量高于其他蚀变带。因此,成矿热液中的 H_2S 和金属离子被大量消耗,从而形成金属硫化物,其反应式为:



6.2 主成分分析

PCA 双图的元素载荷矢量夹角直观揭示了元素间的协同/拮抗关系,为重建矿物共生序列提供了定量依据。

1) 正相关元素簇 Al-Ca-Na 三元体系(矢量夹角 <

30°):斜长石的标准化学式($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)决定了 Al、Ca、Na 三者的严格化学计量关系。载荷矢量的一致性表明,2 种元素主要赋存于钾长石和云母类矿物中,其空间分布受原生结晶作用和后期钾长石化、绢云母化蚀变共同控制。

2) 负相关元素对 Fe-Ca 拮抗体系(矢量夹角 > 120°):Fe 载荷与 Ca 载荷形成显著对比,反映铁镁质矿物(如黑云母)分解与钙质矿物(如斜长石)溶蚀的同步过程。这种负相关性常出现在中低温热液环境中,与富 CO_2 流体的渗滤作用密切相关。

3) 独立演化元素 Si 的同步富集可能源于石英的次生加大或绢云母化过程中的硅质沉淀。

PC1 正方向(+PC1)以 Al、Na 和 Ca 为主导,负方向(-PC1)则与 Si 密切相关。这一分异特征指示岩石蚀变过程中的关键元素置换规律:PC2 正方向(+PC2)主要受 Fe、K 控制,同时与 Si 呈负相关。这种空间分布揭示了叠加蚀变作用的元素迁移规律:Fe 与黄铁矿(FeS_2)的广泛发育直接相关,标志着硫化物阶段的流体活动。Si 的负向偏移可能反映 2 个相反过程:在绢英岩化阶段,石英的次生沉淀导致局部 Si 富集;而在强烈硅化区域,原有石英的溶解可能造成 Si 流失,这种双重作用使 Si 在 PC2 方向表现出复杂响应。

6.3 金沉淀机理

黄铁绢英岩化过程中,Fe、Cu 等元素以硫化物形态存在,而 Au、Ag、Bi、As 等元素则以硫化物形态存在于这些硫化物中,推测 H_2S 和 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等金属离子被大量消耗, $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 络合物失稳,使得 Au 从络合物中释放,从而引发沉淀。

在热液蚀变过程中,流体与岩石之间发生了交代反应,特别是在黄铁绢英岩化蚀变过程, Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等金属离子和热液中的 H_2S 、 HS^- 等组分形成黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物,导致 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 络合物失稳分解,金从络合物中释放出来,而在金的沉淀过程中会产生 H^+ ,进一步增强了溶液环境的酸性,从而促进黄铁绢英岩化蚀变,二者互相循环促进,使成矿流体中的金完全沉淀,并发生大规模的沉淀聚集,最终形成了金矿。

7 结论与展望

1) 钾长石化阶段以 Al、K、Si 的显著富集和 Ca、Na 的流失为特征。斜长石被钾长石交代,并伴随绿泥石的形成;绢英岩化阶段, K 元素迁入, Si 和 Ca 迁出,长石分解为绢云母和石英,同时 Sr 因斜长石溶蚀而显著流失;黄铁绢英岩化阶段, Fe、Cu 等元素以硫化物(如黄铁矿)形式沉淀。

2) 主成分分析 PC1(41.0%)、PC2(22.5%) 分别

表征了蚀变体系中钾长石化与硫化物成矿阶段的元素迁移规律。PC1轴正方向(+PC1)以Al、Ca、Na富集为特征,反映斜长石等原生矿物的保留;负方向(-PC1)以K、Fe富集为主,指示钾长石化和黄铁矿化过程。PC2轴负方向(-PC2)与Si的复杂响应相关,表征硅化/绢云母化作用。3类岩相在PCA空间的分布呈现连续演化趋势:原生黑云母花岗岩($PC1=3.5\pm1.1$)→钾长石化花岗岩($PC1=0.2\pm1.2$)→黄铁绢英岩($PC1=-1.0\pm1.1$),揭示钾长石化蚀变强度递增与硫化物成矿阶段的叠加效应。

3)酸性流体环境下初始蚀变阶段,促使斜长石、黑云母等矿物的水解与交代,控制元素活化与再分配;蚀变后期在酸性环境下,硫化物沉淀导致流体中 $[Au(HS)_2]^-$ 络合物失稳,释放的金与硫化物共生,形成“流体-岩石反应—硫化物沉淀—金富集”的协同循环机制。

4)本研究明确了玲珑金矿床热液蚀变序列的时空演化规律,深化了对胶东成矿机制的理解,对区域深部找矿预测具有重要指导意义。未来可进一步结合同位素示踪与数值模拟,探索多期流体叠加的动力学过程及其对成矿规模的控制作用。

[参 考 文 献]

- [1] CHINNASAMY S S, MISHRA B. Greenstone metamorphism, hydrothermal alteration, and gold mineralization in the genetic context of the granodiorite-hosted gold deposit at Jonnagiri, Eastern Dharwar Craton, India [J]. *Economic Geology*, 2013, 108(5): 1 015–1 036.
- [2] QIU K F, TAYLOR R D, SONG Y H, et al. Geologic and geochemical insights into the formation of the Taiyangshan porphyry copper-molybdenum deposit, Western Qinling Orogenic Belt, China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 40–58.
- [3] SMITH D J, NADEN J, JENKIN G R T, et al. Hydrothermal alteration and fluid pH in alkaline-hosted epithermal systems [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 89: 772–779.
- [4] 刘向东, 邓军, 张良, 等. 胶西北寺庄金矿床热液蚀变作用 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(5): 1 551–1 565.
- [5] 张炳林. 胶东大尹格庄—夏甸金矿田黄铁绢英岩化蚀变与金成矿机理 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [6] 张炳林, 杨立强, 黄锁英, 等. 胶东焦家金矿床热液蚀变作用 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2 533–2 545.
- [7] 张志超, 李楠, 耿兴忠, 等. 西秦岭阳山金矿带安坝矿床热液蚀变作用 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(11): 3 405–3 419.
- [8] 张振, 于超, 吴志栋, 等. 胶东玲珑金矿床成矿地质特征及矿床成因 [J]. *黄金*, 2024, 45(7): 74–79.
- [9] CHRISTIE A B, BRATHWAITE R L. Hydrothermal alteration in metasedimentary rock-hosted orogenic gold deposits, Reefion gold-field, South Island, New Zealand [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38(1): 87–107.
- [10] KISHIDA A, KERRICH R. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario [J]. *Economic Geology*, 1987, 82(3): 649–690.
- [11] LASAGA A C. Fluid flow and chemical reaction kinetic in metamorphic systems [J]. *Chemical Geology*, 1988, 70(1/2): 80.
- [12] 宋志勇, 向胤合, 刘占坤, 等. 胶西北新东庄金矿床蚀变岩石地球化学特征与成矿作用 [J]. *黄金*, 2024, 45(8): 89–93, 98.
- [13] 王兴刚, 孙涛, 向胤合, 等. 胶西北大尹格庄金矿床与夏甸金矿床差异性研究 [J]. *黄金*, 2023, 44(2): 67–72.
- [14] 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 胶东金矿成矿模式 [J]. *矿床地质*, 2020, 39(2): 215–236.
- [15] DENG J, WANG Q F, WAN L, et al. A multifractal analysis of mineralization characteristics of the Dayingezhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 40(1): 54–64.
- [16] GOLDFARB R J, TAYLOR R D, COLLINS G S, et al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 48–102.
- [17] DENG J, YANG L Q, GE L S, et al. Research advances in the Mesozoic tectonic regimes during the formation of Jiaodong ore cluster area [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(8): 777–784.
- [18] DENG J, WANG Q F, YANG L Q, et al. The structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang Gold Deposit in Shandong Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2008, 82(4): 769–780.
- [19] YANG L Q, DENG J, GOLDFARB R J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1 469–1 483.
- [20] 范宏瑞, 冯凯, 李兴辉, 等. 胶东—朝鲜半岛中生代金成矿作用 [J]. *岩石学报*, 2016, 32(10): 3 225–3 238.
- [21] 宋明春, 崔书学, 伊丕厚, 等. 胶西北金矿集中区深部大型—超大型金矿找矿与成矿模式 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [22] 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议 [J]. *黄金科学技术*, 2018, 26(4): 406–422.
- [23] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2 447–2 467.
- [24] 任飞. 胶东玲珑金矿床热液蚀变与成矿过程 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
- [25] DENG J, LIU X F, WANG Q F, et al. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike—Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2017 (11/12): 1 379–1 407.
- [26] LI X Y, WANG F, DUAN T, et al. Distribution and mapping of temperate savanna in the sandy lands of eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2025, 68(1): 128–141.
- [27] GOLDFARB R J, GROVES D I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time [J]. *Lithos*, 2015, 233: 2–26.
- [28] GONG Q J, YAN T T, LI J Z, et al. Experimental simulation of element mass transfer and primary halo zone on water-rock interaction [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 69: 1–11.
- [29] HE D Y, QIU K F, SIMON A C, et al. Mantle oxidation by sulfur drives the formation of giant gold deposits in subduction zones [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(12): 4375–4380.

- States of America, 2024(52):e2404731121.
- [30] QIU K F, DENG J, CRYSTAL L, et al. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 343: 133–141.
- [31] QIU K F, DENG J, SHENGXUN S, et al. Low-temperature thermochronology for defining the tectonic controls on heterogeneous gold endowment across the Jiaodong Peninsula, Eastern China [J]. *Tectonics*, 2023, 42(1):e2022TC007669.
- [32] QIU K F, ROMER R L, LONG Z Y, et al. The role of an oxidized lithospheric mantle in gold mobilization [J]. *Science Advances*, 2024, 10(41):eado6262.
- [33] TANG H Y, ZHENG J P, YU C M, et al. Multistage crust–mantle interactions during the destruction of the North China Craton: Age and composition of the Early Cretaceous intrusions in the Jiaodong Peninsula [J]. *Lithos*, 2014, 190: 52–70.
- [34] YANG L Q, DENG J, WANG Z L, et al. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2 447–2 467.
- [35] YANG L Q, YILDIRIM D, WANG Z L, et al. Late Jurassic, high Ba–Sr Linglong granites in the Jiaodong Peninsula, East China: Lower crustal melting products in the eastern North China Craton [J]. *Geological Magazine*, 2017(5): 1 040–1 062.
- [36] ZHANG L, ROBERTO W, YANG L Q, et al. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120 ± 2 Ma during cooling of pregold granite intrusions [J]. *Economic Geology*, 2020, 115(2): 415–441.
- [37] ZHAO R, WANG Q F, DENG J, et al. Characterizing episodic orogenesis and magmatism in eastern China based on detrital zircon from the Jiaolai Basin [J]. *American Journal of Science*, 2019, 319(6): 500–525.
- [38] 邓军, 王庆飞, 张良, 等. 胶东型金矿成因模型 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2023, 53(10): 2 323–2 347.
- [39] 杨立强, 邓军, 张良, 等. 胶东型金矿 [J]. *岩石学报*, 2024, 40(6): 1 691–1 711.
- [40] CROUDACE I W, ROTHWELL R G. Micro-XRF studies of sediment cores [M]. Dordrecht: Springer, 2015.
- [41] FLUDE S, HASCHKE M, STOREY M. Application of benchtop micro-XRF to geological materials [J]. *Mineralogical Magazine*, 2017, 81(4): 923–948.
- [42] MENTZER S M. Micro XRF [M] // NICOSIA C, STOOPS G. Archaeological soil and sediment micromorphology. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017: 431–440.
- [43] 林梵宇, 尹希杰, 黄杰超, 等. 利用微区 XRF 技术测定地质样品中元素含量研究 [J]. *矿物岩石*, 2021, 41(4): 59–67.
- [44] YANG L Q, DENG J, WANG Q F, et al. Coupling effects on gold mineralization of deep and shallow structures in the northwestern Jiaodong Peninsula, Eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2010, 80(3): 400–411.
- [45] TAN J, WEI J H, AUDÉTAT A, et al. Source of metals in the Guocheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, North China Craton: Link to early Cretaceous mafic magmatism originating from Paleoproterozoic metasomatized lithospheric mantle [J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48(5): 70–87.
- [46] MAO J W, WANG Y T, LI H M, et al. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D–O–C–S isotope systematics [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33(3/4): 361–381.
- [47] 翟明国, 从柏林, 郭敬辉, 等. 苏鲁造山带东北端石榴辉石麻粒岩的 Sm–Nd 同位素年代学及其大地构造含义 [J]. *地质科学*, 1999, 34(3): 301–310.
- [48] JAHN B M, LIU D, WAN Y, et al. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry [J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(3): 232–269.
- [49] TANG J, ZHENG Y F, WU Y B, et al. Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China [J]. *Precambrian Research*, 2007, 161(3/4): 389–418.
- [50] GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1/2): 1–75.
- [51] 邓军, 杨立强, 葛良胜, 等. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展 [J]. *自然科学进展*, 2006, 16(5): 513–518.
- [52] MA L, JIANG S Y, HOFMANN A W, et al. Lithospheric and asthenospheric sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 124: 250–271.
- [53] SUN W D, DING X, HU Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4): 533–542.
- [54] WANG Z L, YANG L Q, DENG J, et al. Gold-hosting high Ba–Sr granitoids in the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, East China: Petrogenesis and tectonic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 95(4): 274–299.
- [55] 李洪奎, 李逸凡, 耿科, 等. 山东鲁东碰撞造山型金矿成矿作用探讨 [J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(4): 533–542.
- [56] 赵立翔, 丁正江, 张琪彬, 等. 胶东地区中生代花岗岩年代学、地球化学特征及与金银多金属成矿的关系 [J]. *黄金*, 2024, 45(4): 57–64.
- [57] HOU M L, JIANG Y H, JIANG S Y, et al. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination [J]. *Geological Magazine*, 2007, 144(4): 619–631.
- [58] CHARLES N, AUGIER R, GUMIAUX C, et al. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems: Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia) [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(1): 412–428.
- [59] STEEFEL C I, LICHTNER P C. Multicomponent reactive transport in discrete fractures: II: Infiltration of hyperalkaline groundwater at Maqarin, Jordan, a natural analogue site [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 209(1/2/3/4): 200–224.
- [60] KASKES P, DÉHAIS T, DE GRAAFF S J, et al. Micro-X-ray fluorescence (μ XRF) analysis of proximal impactites: High-resolution element mapping, digital image analysis, and quantifications [J]. *Journal Geological Society Special Publications*, 2021, 550: 171–206.
- [61] GRANT J A. The isocon diagram—A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration [J]. *Economic Geology*, 1986,

- 81(8):1 976–1 982.
- [62] GRESENS R L. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. *Chemical Geology*, 1967, 2(12):47–65.
- [63] 申玉科. 胶西北金矿集中区构造—蚀变网络研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [64] 张潮, 黄涛, 刘向东, 等. 胶西北新城金矿床热液蚀变作用[J]. *岩石学报*, 2016, 32(8):2 433–2 450.
- [65] 张可清, 杨勇. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(3):104–107.

Element migration during hydrothermal alteration in the Linglong Gold Deposit, Jiaodong Peninsula

Ren Fei^{1,2,3}, Jiang Lei^{1,2}, Li Chao^{4,5}, Geng Kaiqiang^{1,2}, Zhang Na^{1,2}, Li Shanshan^{1,2,6}, Zhang Qibin^{1,2}, Ding Zhengjiang^{1,2}

(1. *Shandong Engineering Research Center of Application and Development of Big Data for Deep Gold Exploration*;

2. *No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources*;

3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing*;

4. *National Research Center for Geoanalysis*; 5. *Key Laboratory of Re–Os Isotope Geochemistry, China Geological Survey*;

6. *School of Science, China University of Geosciences, Beijing*)

Abstract: The Linglong Gold Deposit is the representative deposit in the Jiaodong Peninsula. Its hydrothermal alteration is closely related to gold mineralization. This study investigates element migration patterns during hydrothermal alteration and their controlling mechanisms on gold precipitation using micro-X-ray fluorescence spectroscopy (Micro-XRF), principal component analysis (PCA), and whole-rock geochemistry. The results show that: ①The K-feldspar alteration stage is characterized by enrichment in Al, K, and Si and depletion in Ca and Na, during which plagioclase is replaced by K-feldspar accompanied by the formation of chlorite. ②The sericitization stage involves the influx of K and the leaching of Si and Ca, where feldspar decomposes to form sericite and quartz. ③The pyrite-sericite alteration stage marks the key phase of gold enrichment, during which Fe and Cu precipitate as sulfides, destabilizing $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ complexes and triggering gold release. Principal component analysis reveals the spatial zoning of alteration: PC1 (41.0 %) represents the potassic alteration stage, and PC2 (22.5 %) corresponds to the sulfide mineralization stage. The study further proposes that the interaction between pyritization and acidic hydrothermal fluids drives a cyclic process of "fluid–rock interaction–sulfide precipitation–gold enrichment". The combination of Micro-XRF and PCA enables precise interpretation of overlapping alteration signals, offering high-resolution technical support for dynamic modeling of hydrothermal mineralizing systems. These findings provide important insights for deep prospecting and metallogenic mechanism research in the Jiaodong Gold Deposit.

Keywords: Jiaodong Peninsula; Linglong Gold Deposit; element migration; mass balance; Micro-XRF; principal component analysis; gold precipitation mechanism