

张然,肖志斌,付超,等.胶东地区新立金矿中金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义[J].岩矿测试,2022,41(6):997-1006.

ZHANG Ran, XIAO Zhibin, FU Chao, et al. Genetic Mineralogy and Geological Significance of Gold Minerals and Gold-bearing Pyrites from the Xinli Gold Deposit in the Jiaodong Area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(6): 997-1006.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202111260189】

胶东地区新立金矿中金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义

张然¹,肖志斌^{1*},付超^{1*},付世兴²,朱昭明²

(1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170;

2.中国冶金地质总局山东正元地质勘查院,山东 济南 250101)

摘要:山东省胶东地区西北部是该地区最重要的金矿成矿区。新立金矿是三山岛—新立成矿带的重要矿床,也是该区典型金矿之一。对新立金矿的研究已开展多年且成果较多,但在金矿物与载金矿物的矿物学特征、矿物标型特征等方面还需开展深入研究。偏反光显微镜鉴定和电子探针定量成分分析是金矿物和载金矿物研究中的主要方法,本文将两种方法相结合,对新立金矿的金矿物和载金黄铁矿的物理性质、化学成分等矿物学特征进行详细研究,并通过矿物标型特征探讨其地质意义。结果表明:新立金矿中的金矿物主要为银金矿、少量自然金和金银矿,金成色在 336.2~834.9 不等,平均 699.8。载金黄铁矿中 S 含量为 51.69%~53.78%,平均 53.19%;Fe 含量为 45.69%~47.62%,平均 46.52%;S/Fe 值为 1.99,硫略亏损。黄铁矿形态标型呈粗粒立方体形—中细粒五角十二面体形—细粒立方体形的演化趋势,反映了不同成矿阶段热液流体温度逐渐降低的演化过程;成分标型特征显示,成矿热液具有典型的中浅成、中低温特点。据此认为,新立金矿热液蚀变期存在三阶段矿化,其中第三阶段为主成矿期,且在多阶段叠加复合部位更易富集成矿。

关键词:新立金矿;电子探针;金矿物;载金黄铁矿;成因矿物学

要点:

- (1) 利用电子探针探究胶东地区新立金矿中金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征。
- (2) 金矿物绝大多数为银金矿,载金黄铁矿多呈四面体和五角十二面体。
- (3) 新立金矿热液期第三阶段为主要成矿阶段,成矿热液具中浅成、中低温等特点。

中图分类号: P575.1; P578.292

文献标识码: A

金矿物的赋存状态和成分等特征可以反映成矿环境^[1],黄铁矿的形态、成分等特征与其形成时的地质条件如温度、压力、硫逸度等因素有关^[2],因此,开展金矿物和载金矿物的成因矿物学及其地质意义的研究对矿床成因认识和找矿具有重要指导作用^[3-4]。

构造蚀变岩型金矿是国内外重要的金矿类型

之一,该类型金矿与断裂构造及蚀变带密切相关^[5]。破碎带蚀变岩型(焦家式)金矿是中国特有的构造蚀变岩金矿类型,广泛分布于胶东、黔东南等地区。胶东地区是中国重要的金矿成矿区^[6],位于华北克拉通东部,黄金储量约占全国的 25%,焦家式金矿是该地区重要的金矿类型之一,通常产于古

收稿日期:2021-11-26;修回日期:2022-03-07;接受日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41802207);国家重点研发计划项目(2016YFC0600107-1);中国地质调查局地质调查项目(DD20221686)

第一作者:张然,硕士,工程师,主要从事成因矿物学与找矿矿物学研究。E-mail: rayna_zhang@126.com。

通信作者:肖志斌,硕士,高级工程师,主要从事分析地球化学研究。E-mail: zhibin_xiao@163.com。

通信作者:付超,硕士,高级工程师,主要从事战略性矿产调查评价与矿床学研究。E-mail: fuchaocugb@163.com。

老地层岩石的蚀变带中,蚀变分带是其主要特征,地层中 Au 的丰度以及热溶液的影响是金矿形成的主要因素^[7-8]。新立金矿位于胶东半岛,受三山岛—仓上断裂带控制,位于断裂带转折区,是胶东地区蚀变岩型(焦家式)金矿床的典型代表。新立金矿区勘查工作可以追溯到 20 世纪 50 年代。前人对新立金矿床控矿构造^[9]、地质特征^[10-11]、元素地球化学^[12]、成矿流体演化^[13-14]等方面进行了研究,其主控矿断层下盘为玲珑花岗岩,上盘为胶东群变质岩^[15]。围岩蚀变主要有钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化等^[16],Au、Ag、As、Sb 等元素随岩石蚀变程度加深呈现递增现象,暗示金矿化作用与热液蚀变关系密切^[17-18]。认为断层是障碍层,阻隔了成矿流体并形成了具有差异的蚀变矿化带,成矿元素在主断裂附近达到峰值。

电子探针(EPMA)分析技术是常见的微区原位分析测试技术之一,具有分析区域小、分析元素范围广以及绝对和相对灵敏度高等特点,是矿物学研究中重要的分析测试手段^[19]。偏反光显微镜是矿物鉴定及其形态、粒度、赋存状态等物理性质研究的常见方法和重要手段。前人对新立金矿构造及岩石学等方面的研究已较为深入且取得了丰富认识^[9-15],但尚未从矿物学角度对金矿物和含金硫化物开展详细的研究工作。因此,本文以成因矿物学研究为切入点,以新立大型金矿床为研究对象,采用偏光显微镜和电子探针相结合的方法手段,探究金矿物和载金黄铁矿的矿物学特征及成因意义,拟从矿物学角度为新立金矿成因及元素富集机理提供新的依据。

1 地质背景

新立金矿位于华北板块胶辽隆起区,胶北凸起的西北部、招掖成矿带的中心地区^[20]。矿体受三山岛—仓上断裂带控制,位于断裂带转折区。区域地层主要有中太古代唐家岩群(Ar_3t)、新太古代胶东岩群(Ar_j)、古元古代荆山群(Pt_j)和粉子山群(Pt_f)及第四纪沉积(Q),地层出露主要为第四系全新统^[21]。矿区脆性断裂构造发育,东北—北东东向的三山岛—新立断裂是该区的主要控矿断裂^[22](图1)。矿区岩浆岩分布广泛,新太古代至中生代均有岩浆活动,包括新太古代五台—阜平期马连庄序列、栖霞序列以及中生代燕山早期的玲珑序列^[23]。

已有研究显示,矿区蚀变分带明显,各蚀变带间呈渐变关系,以断层泥为中心不对称分布^[20,24]。

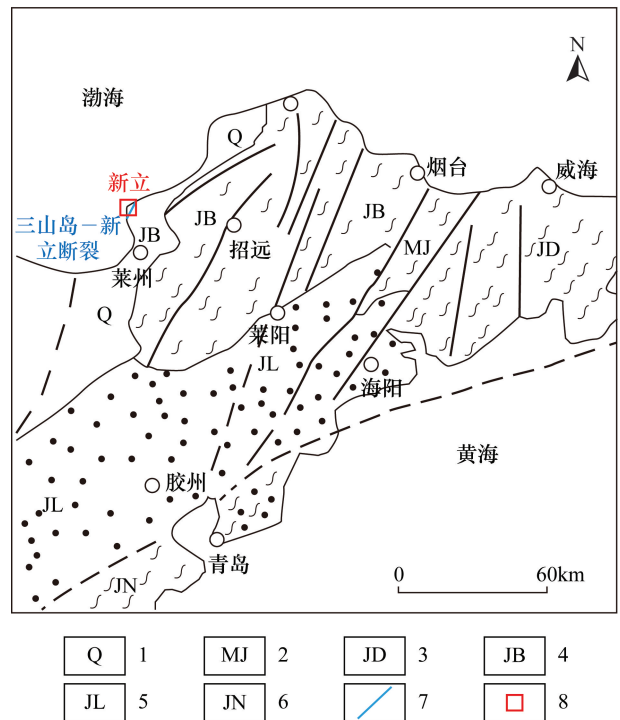
新立金矿共有矿体 38 个,可划分为 6 个矿体群,其中①号矿体群为矿区中最主要的矿体群,①-1 号矿体为主矿体,是本次研究的主要对象。矿体赋存于黄铁绢英岩化碎裂岩带中,形态简单,多为脉状或透镜状,可见膨胀夹缩现象。矿体总体走向 62° ,倾向南东,倾角 $35^\circ\sim 50^\circ$,由南至北倾角渐缓。矿体在倾向上表现出上部厚大、下部变薄趋势,厚度 $0.31\sim 44.29\text{m}$ 不等,平均 16.48m ,总体较为稳定。金品位为 $7.30\sim 1.05\mu\text{g/g}$,平均 2.72g/t ,品位变化较大^[25-27]。

新立金矿矿石类型主要有二长花岗岩、黄铁绢英岩化花岗岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩和黄铁绢英岩化碎裂岩。矿石中原生金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等,非金属矿物主要有石英、云母、长石、方解石等。

2 实验部分

2.1 样品采集与制备

本次研究样品均来自新立金矿①-1号矿体钻



1—第四纪; 2—阜平—即墨构造带; 3—胶东侵入岩变质岩区; 4—胶北隆起区; 5—胶莱拗陷区; 6—胶南隆起区; 7—三山岛—新立金矿; 8—新立矿区所在地。

图1 矿区大地构造位置(据王君亭等,2005^[22]修改)

Fig. 1 Geotectonic location of mining area (Revised according to Wang, et al., 2005^[22])

孔矿石样品,选取主成矿期具有代表性的样品磨制成薄片,应用偏反光显微镜寻找并观察黄铁矿特征和金矿物赋存状态;将探针片进行表面喷碳处理,应用电子探针进行黄铁矿、金矿物背散射图像观察和微区原位成分分析。

2.2 实验仪器和测试条件

偏反光显微镜观察及鉴定:在中国地质调查局天津地质调查中心完成,应用蔡司 Axioskop MRc5 型号显微镜,分别在 10 倍、20 倍、50 倍、100 倍物镜下观察金矿物及黄铁矿的形态、粒度、赋存状态等特征。

电子探针分析:在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,应用 JEOL JXA-8230 型电子探针进行测试。测试条件为:加速电压 20kV,束流 2.0×10^{-8} A, ZAF 修正法。分析中,主量元素(含量大于 1%)峰值积分时间 10s,背景积分时间 5s;微量元素(含量小于 1%)峰值积分时间 20s,背景积分时间 10s。所用标准样品均为美国 SPI 矿物标准。

2.3 实验方法

首先,在偏反光显微镜下观察矿石矿物组成,寻找黄铁矿并观察其形态、颜色、粒度等,之后在高倍物镜下寻找金矿物,观察并统计其形态、粒度、赋存状态等信息。然后应用电子探针,先在高倍数下观

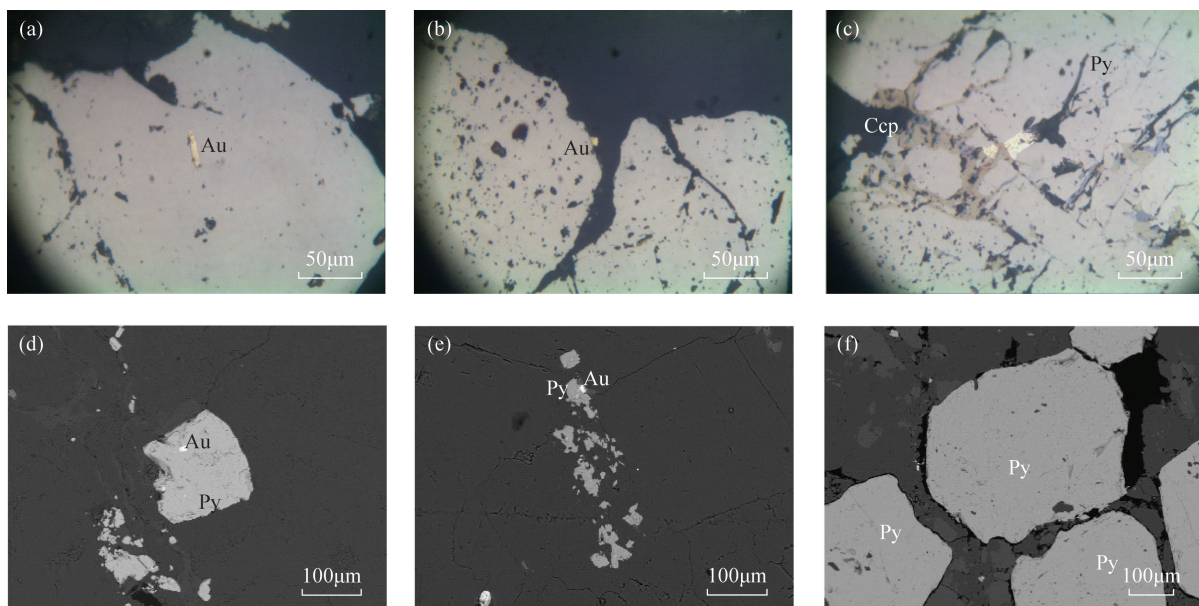
察金矿物和载金黄铁矿的背散射电子图像,以弥补光学显微镜的局限性。背散射图像中黄铁矿呈暗灰色,其亮度明显高于非金属矿物,裂隙发育;金矿物与黄铁矿伴生,呈亮灰色。之后,选取表面光滑、成分均一处进行电子探针分析,对于部分颗粒较大的金矿物,从边缘到中心连续选点以观察其成分变化。

3 结果与讨论

3.1 金矿物的矿物学特征

金矿物的形态、粒度和成分等矿物学特征可以为金矿床成因研究提供理论依据^[4]。新立金矿中金以独立矿物形式赋存于以黄铁矿和石英为主的载金矿物中,本次样品中共发现金矿物 139 粒,光学显微镜下可见金矿物在反射光下呈现金黄色,反射率 I 级。金矿物形态多样,多数为椭圆粒状和不规则棱角状,还可见脉状、树枝状、片状等;粒度差异较大,在 5~280 μ m 不等,但主要以细粒、微粒居多。样品中金矿物赋存状态主要包括晶隙金、包体金和裂隙金。其中晶隙金占主导地位,所占比例超过 60%,主要赋存于石英、长石以及黄铁矿等矿物颗粒边缘交界处;其次为包体金和裂隙金,主要赋存于黄铁矿颗粒内部以及裂隙中(图 2)。

选取粒度较大且具有代表性的金矿物进行了



a—金包含于黄铁矿颗粒中; b—金赋存于黄铁矿与石英晶隙间; c—金赋存于黄铁矿颗粒裂隙中; d~f—金和黄铁矿背散射图像。

图 2 金矿物、黄铁矿的反射光和背散射图像

Fig. 2 Reflected light and backscattered images of gold minerals and pyrites (a. Gold is contained in pyrite particles; b. Gold occurs between pyrite and quartz crystal gap; c. Gold occurs in the cracks of pyrite particles; d~f. Backscattered images of gold and pyrite)

24个样品点的电子探针分析,结果显示: Au含量为32.86%~84.80%,平均值为69.78%; Ag含量为14.61%~64.28%,平均值为28.26%。除主量元素外,还含有Fe、Cu、S等元素(表1)。对于部分颗粒较大的金矿物,从内部到边缘, Au含量由高到低,平均变化量2.01%; Ag含量由低到高,平均变化量2.25%,表现为银壳结构。Au可以与Ag形成完全类质同象系列,通常将Ag含量在0~15%的金矿物称为自然金,在16%~50%称为银金矿,在51%~80%称为金银矿,在86%~100%称为自然银^[28]。根据电子探针测试结果,新立金矿中的金矿物绝大部分为银金矿,占本次金矿物测试总量的83.33%,其Au/Ag=2.62;自然金占比为12.50%,其Au/Ag=5.68;还有少量金银矿,占4.17%,其Au/Ag=0.51。

金矿物化学成分除主量元素外,还有Zn、Fe、Cu、Co、S等微量元素被检出。微量元素含量总和随金成色降低而增高。这些元素中,有些以类质同象替换进入金矿物晶格,如Cu、Zn、S等;有些则以机械混入形式存于金矿物内,如Fe、Co、Ni等。矿区金矿物微量元素Cr、Fe、S含量较高,含少量Cu和Zn。

表1 金矿物中元素电子探针分析结果

Table 1 EPMA analysis results of elements in gold minerals

样品点号	Ag (%)	As (%)	Au (%)	Co (%)	Cr (%)	Cu (%)	Fe (%)	Ni (%)	S (%)	Se (%)	Zn (%)	总计 (%)
YT-YK1-1	26.58	-	70.25	-	-	0.00	0.56	-	-	-	0.00	97.39
YT-YK1-2	26.49	-	72.39	-	-	0.36	0.61	-	-	-	0.15	100.00
YT-YK2-1	36.39	-	60.19	-	-	1.70	1.72	-	-	-	0.00	100.00
YT-YK2-2	64.28	-	32.86	-	-	0.33	0.28	-	-	-	0.00	97.75
YT-YK3-1	14.89	-	83.87	-	-	0.23	0.97	-	-	-	0.05	100.01
YT-YK3-2	19.30	-	80.62	-	-	0.00	0.08	-	-	-	0.00	100.00
YT-YK4-1	14.96	-	83.90	-	-	0.00	0.31	-	-	-	0.31	99.48
YT-YK4-2	14.61	-	84.80	-	-	0.29	0.31	-	-	-	0.00	100.01
XL-YK2-8	45.26	-	51.87	-	0.07	0.08	0.55	-	0.17	-	-	98.00
XL-YK2-9	36.42	-	61.98	-	-	-	1.28	0.01	0.26	-	0.01	99.97
XL-YK2-10	35.81	-	63.52	-	-	-	1.12	-	0.22	0.04	-	100.71
XL-YK2-11	38.85	-	58.01	-	0.51	0.02	0.65	-	0.15	-	-	98.19
XL-YK3-1	21.71	0.01	78.15	-	0.65	-	-	-	0.01	-	-	100.53
XL-YK3-2	21.19	-	77.64	0.02	0.43	-	0.37	-	0.02	-	-	99.66
XL-YK3-4	21.95	-	76.80	-	0.64	-	0.05	0.02	0.04	-	-	99.50
XL-YK3-5	21.66	-	76.76	-	0.49	-	0.03	-	0.01	-	0.05	99.01
XL-YK4-4	27.95	-	69.44	-	-	-	0.81	-	0.13	-	-	98.33
XL-YK4-5	28.20	-	70.61	-	-	-	0.84	-	0.15	-	-	99.80
XL-YK4-6	29.27	-	69.52	0.02	-	-	1.62	-	0.18	0.02	-	100.64
XL-YK4-12	24.57	-	73.06	0.02	1.69	-	0.03	-	0.03	-	0.01	99.40
XL-YK4-13	25.87	-	72.94	-	0.90	-	-	-	-	-	-	99.72
XL-YK4-14	23.21	-	70.37	-	3.60	0.32	0.27	-	0.05	-	0.05	97.87
XL-YK4-15	27.61	-	67.91	-	3.16	-	0.05	-	0.01	-	-	98.75
XL-YK4-18	31.10	-	67.22	-	0.91	-	0.22	0.02	0.09	-	0.02	99.58

注:表中“-”代表低于电子探针分析测试检测限。

3.2 载金矿物黄铁矿的矿物学特征

黄铁矿是新立金矿最主要的金属硫化物,也是重要的载金矿物,通常呈团块状、网脉状、浸染状等分布在矿石中。对样品的手标本和矿石薄片进行观察,发现新立金矿热液期不同成矿阶段的黄铁矿特征存在一定差异:在早期(石英-黄铁矿阶段)黄铁矿颗粒粗大,呈斑点状或团块状分布于矿石中,矿物晶体以立方体为主,自形-半自形,受应力作用破碎较严重,矿物颗粒裂纹发育,可见多金属硫化物和金银矿物充填于其中;在中期(石英中-细粒黄铁矿阶段)黄铁矿粒度细小,形态较复杂,主要以脉状集合体的形式赋存于矿石中,与灰白色石英、绢云母等矿物共生,矿物晶体多呈半自形-他形粒状,以立方体为主,还可见八面体、五角十二面体等晶形,粒度在0.1~1mm不等,可见少许裂纹;在晚期(金银多金属硫化物阶段)黄铁矿颗粒细小,可见五角十二面体等晶形,常与黄铜矿、方铅矿等硫化物共生,呈细脉状或浸染状分布于矿石中,矿物晶体半自形粒状,粒度细小,通常在0.05mm左右。此阶段黄铁矿与金关系最为密切,是金成矿的主要阶段。

新立金矿黄铁矿电子探针 47 个样品点分析结果显示,主量元素中 S 含量为 51.69%~53.78%,平均值为 53.19%,略低于理论值;Fe 含量为 45.69%~47.62%,平均值为 46.52%,略低于理论值。Fe 的类质同象替换主要为 Co;S 的类质同象替换主要为 As。

Co 元素在所有样品均有检出,含量在 0.02%~0.15%不等,平均为 0.05%;Ni 元素只在部分样品中检出,含量在 0.01%~0.15%,平均为 0.03%;As 元素含量在 0.01%~0.61%,平均为 0.11%。此外,还有 Cu、Zn、Se 以及少量 Au 和 Ag 被检出(表 2)。

表 2 载金黄铁矿中元素含量电子探针分析结果

Table 2 EPMA analysis results of elements in gold-bearing pyrites

样品点号	S (%)	Fe (%)	As (%)	Se (%)	Co (%)	Ni (%)	Cu (%)	Zn (%)	Cr (%)	Pb (%)	Au (%)	Ag (%)	总计 (%)
XL-YK2-2	53.50	46.54	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	100.09
XL-YK2-4	53.31	46.50	-	-	0.04	-	0.03	0.02	-	-	-	-	99.90
XL-YK2-6	53.35	46.79	0.05	-	0.04	-	0.02	-	-	-	0.05	-	100.31
XL-YK2-7	53.22	46.14	0.11	-	0.05	-	-	-	0.01	-	-	-	99.53
XL-YK2-12	53.01	47.05	0.37	-	0.03	-	-	-	-	-	0.04	-	100.51
XL-YK2-13	53.42	46.94	0.03	-	0.06	-	-	-	-	-	-	0.02	100.48
XL-YK2-14	52.93	46.35	0.56	-	0.05	-	-	0.03	-	-	-	-	99.94
XL-YK3-3	52.74	45.70	-	-	0.06	0.02	-	-	0.01	-	-	-	98.53
XL-YK3-6	53.63	45.90	-	-	0.07	-	-	-	-	-	-	0.01	99.64
XL-YK4-1	53.23	47.62	0.03	0.01	0.06	-	-	0.01	-	-	-	-	100.97
XL-YK4-3	52.49	46.17	0.11	-	0.06	0.09	0.10	-	-	0.05	-	-	99.07
XL-YK4-7	53.16	45.69	-	-	0.05	-	0.03	0.01	-	-	0.04	-	98.98
XL-YK4-8	53.34	46.39	0.11	0.05	0.15	0.15	0.01	-	0.02	-	-	-	100.23
XL-YK4-9	53.04	46.89	0.07	-	0.12	0.11	0.03	-	0.03	-	-	-	100.31
XL-YK4-10	52.89	46.18	0.04	-	0.05	0.01	0.03	-	-	-	-	-	99.20
XL-YK4-11	53.11	46.58	-	-	0.04	0.01	-	-	-	-	-	-	99.75
XL-YK5-1	52.64	46.25	0.61	-	0.06	-	0.03	-	-	-	-	-	99.60
XL-YK5-2	53.05	46.74	0.42	-	0.06	-	-	0.03	-	-	-	-	100.29
XL-YK5-3	53.64	46.30	0.01	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-	100.01
XL-YK5-4	53.13	45.92	0.48	-	0.07	-	-	-	-	-	-	-	99.61
XL-YK5-5	53.20	46.39	0.35	0.01	0.03	-	0.01	-	-	-	-	-	100.01
XL-YK5-6	53.16	46.29	0.54	-	0.03	-	0.02	-	-	-	-	-	100.06
XL-YK6-1	52.69	47.09	-	-	0.04	-	-	0.02	-	-	-	-	99.85
XL-YK6-2	51.69	46.45	0.18	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	98.36
XL-YK6-3	52.88	46.82	0.17	-	0.08	-	0.02	-	-	-	-	0.01	99.99
XL-YK7-1	53.00	46.77	0.05	-	0.05	-	-	-	-	-	0.02	-	99.91
XL-YK7-2	53.25	46.40	0.16	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	99.86
XL-YK7-3	53.46	47.06	0.11	-	0.04	0.01	0.02	0.03	0.02	-	-	-	100.74
XL-YK7-4	53.19	46.84	0.07	-	0.03	0.03	-	-	-	-	-	-	100.18
XL-YK7-5	53.32	46.86	0.04	-	0.06	0.02	0.02	-	-	-	-	-	100.33
XL-YK7-6	52.09	46.82	-	-	0.06	0.03	-	-	0.29	-	-	-	99.29
XL-YK10-1	53.45	46.57	0.10	0.02	0.09	0.01	-	-	-	-	-	-	100.26
XL-YK10-2	53.63	46.90	0.02	0.02	0.04	-	-	-	-	-	0.03	-	100.64
XL-YK10-3	53.46	46.66	-	0.03	0.04	-	-	-	-	-	-	-	100.20
XL-YK10-4	53.39	46.59	-	0.02	0.06	-	0.03	-	-	-	-	-	100.08
XL-YK11-1	53.41	46.39	-	-	0.04	-	-	-	0.03	-	-	-	99.88
XL-YK11-2	53.29	46.12	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	99.43
XL-YK11-3	53.59	46.45	-	-	0.09	-	-	-	0.01	-	0.02	-	100.17
XL-YK11-6	53.33	45.94	0.09	0.02	0.07	0.04	-	-	-	-	-	-	99.49
XL-YK11-8	53.64	46.46	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-	100.14
XL-YK11-11	53.04	45.91	-	-	0.06	-	0.02	-	-	-	-	-	99.04
XL-YK12-1	53.78	46.78	-	-	0.06	0.02	-	0.03	-	-	0.03	-	100.70
XL-YK12-2	53.63	46.88	-	-	0.04	0.05	0.03	-	-	-	0.02	0.02	100.67
XL-YK12-3	53.45	46.72	0.04	-	0.06	-	0.02	-	-	-	-	-	100.31
XL-YK12-4	53.61	46.49	-	0.02	0.04	0.01	-	-	-	-	-	-	100.18

注:表中“-”代表低于电子探针分析测试检测限。

黄铁矿为岛状硫化物矿物,标准分子式为 $\text{Fe}[\text{S}]_2$,理想状态下主量元素 $w(\text{Fe})$ 和 $w(\text{S})$ 的值分别为46.55%和53.45%, $\text{S}/\text{Fe}=2$ 。但实际中 S/Fe 原子比值通常不等于2,当 $\text{S}/\text{Fe}<2$ 称为硫亏损,当 $\text{S}/\text{Fe}>2$ 称为铁亏损^[29]。新立金矿黄铁矿 Fe 和 S 含量均低于理论值, S/Fe 比值为1.99,硫略亏损。

3.3 金矿物标型特征及地质意义

金成色表示金的千分含量,与矿床类型、成矿物质来源、成矿温压条件等密切相关^[30-31],是重要标型特征之一,也是探究矿床成因的重要参数^[31-32]。本文中金成色由公式: $\text{Au 含量}/(\text{Au 含量}+\text{Ag 含量}+\text{其他元素含量})\times 1000$ 计算得到。结果显示,新立金矿金成色较低且变化范围较大,最高成色为834.9,最低仅336.2,平均值为699.8,样品金成色主要集中于600~750之间,金矿物总体上以中低成色为主,反映了矿床形成温度为中低温、成矿时代较新、成矿深度中等偏浅的成矿环境。

黄铁矿形态与其形成时的地质条件如温度、压力、硫逸度等因素有关。黄铁矿的形态、粒度、化学成分等特征对探究金矿的形成条件和成矿作用具有重要的标型意义^[3,33-34]。通常,主成矿期的黄铁矿多以中细粒为主,晶体形态较为复杂,裂隙发育有利于金矿物赋存。新立金矿中期黄铁矿,以五角十二面体、八面体及其聚形为主,表明该阶段黄铁矿形成于中低温且硫逸度较高的环境中^[30,35];从早期到晚期黄铁矿晶形呈现粗粒自形立方体-中细粒半自形五角十二面体-细粒他形的演化趋势,反映出成矿流体温度逐渐降低的特征。

黄铁矿的微量元素通常是在该矿物形成过程中捕获的^[36],不同地质条件下形成的黄铁矿,其微量元素成分及含量存在差异。如 As 、 Co 、 Ni 等可以反映矿床形成环境,对探究矿床成因具有指示意义。通常高温条件下黄铁矿富含亲铁和亲石元素,如 Cu 、 Bi 、 Zn 、 As 等,且 Co 含量高于 1000×10^{-6} ,中温条件下常富亲铜元素 Cu 、 Au 、 Pb 、 Ag 等, Co 含量在 $100\times 10^{-6}\sim 1000\times 10^{-6}$ 之间;低温条件下高活动性的亲铜元素 Hg 、 Sb 、 Ag 、 As 等含量较多, Co 含量小于 100×10^{-6} ^[37]。新立金矿样品中黄铁矿含有微量元素 Co 、 Ni 、 As 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Se 、 Au 、 Ag 等, Co 对 Fe 的类质同象替代较少,含量主要集中在0.04%~0.07%,表明成矿流体成分复杂且矿床形成于中低温的环境^[38]。黄铁矿 $w(\text{Fe})/w(\text{S}+\text{As})$ 比值对黄铁矿形成深度具有指示意义,通常浅部形成的黄铁矿该比值为0.926,中部为0.863,深部为0.846^[33]。研究区

黄铁矿 $w(\text{Fe})/w(\text{S}+\text{As})$ 比值范围为0.85~0.90,平均值为0.87,表明新立金矿黄铁矿主要形成于中部偏浅的环境。 Co/Ni 值^[39-40]在0.67~9.00之间,平均值为2.83。 $\text{Co}-\text{Ni}$ 投图结果显示,样品点主要落在“热液成因”及其附近区域内;黄铁矿 $\text{As}-\text{Co}-\text{Ni}$ 三角图解显示,样品点主要落在“岩浆热液型或低温浅成热液型”区域内,与 $\text{Co}-\text{Ni}$ 图解结果一致,表明成矿期黄铁矿与中低温热液有关(图3)。

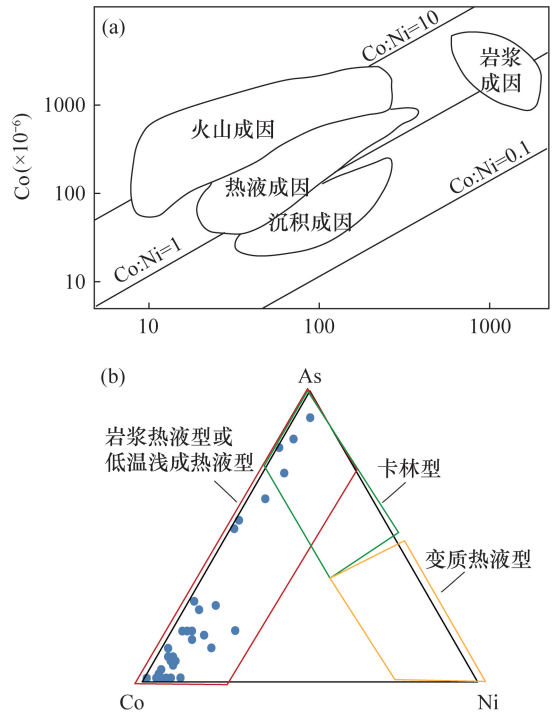


图3 黄铁矿 (a) $\text{Co}-\text{Ni}$ 图解和 (b) $\text{As}-\text{Co}-\text{Ni}$ 三角图解 (底图据严育通等,2012^[2])

Fig. 3 (a) $\text{Co}-\text{Ni}$ diagram and (b) $\text{As}-\text{Co}-\text{Ni}$ triangular diagram of pyrites (Base map according to Yan, et al., 2012^[2])

综上所述,新立金矿中的金矿物与载金黄铁矿研究表明,主成矿期热液流体具有中浅成、中低温、流体硫逸度高、冷却缓慢、物质供应充分等特点,与前人研究结果一致^[22-23,27],与断裂带内三山岛金矿和仓上金矿成因相似。

4 结论

本文采用电子探针结合光学显微镜的分析手段,对新立金矿中的金矿物和载金黄铁矿进行了较为详细的成因矿物学研究,查明了金矿物和载金黄铁矿的形态、粒度、赋存状态和成分等特征。

电子探针分析结果表明,新立金矿中主要金矿物为银金矿、少量自然金和金银矿,金成色在336.2~834.9不等,平均为699.8。载金矿物主要为黄铁矿,其形态标型呈粗粒立方体形-中细粒五角十二面体形-细粒立方体形的演化趋势,反映了不同成矿阶段热液流体温度逐渐降低的演化过程;成分标型特征显示,成矿热液具有典型的中浅成、中低温特点。新立金矿为重熔岩浆期后热液交代破碎带蚀变岩型金矿床,热液蚀变期存在三阶段矿化,其中第三阶段为主成矿期,且在多阶段叠加复合部位更易富集成矿。

5 参考文献

- [1] Tan J, Wei J H, He H Y, et al. Noble gases in pyrites from the Guocheng—Liaoshang gold belt in the Jiaodong Province; Evidence for a mantle source of gold [J]. *Chemical Geology*, 2018, 480: 105–115.
- [2] 严育通,李胜荣,贾宝剑,等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 214–226.
Yan Y T, Li S R, Jia B J, et al. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 214–226.
- [3] 王杰亭,谢建平,卢邦飞,等. 老挝爬奔金矿金矿化及其围岩蚀变过程元素迁移[J]. *地质调查与研究*, 2018, 41(2): 108–112.
Wang J T, Xie J P, Lu B F, et al. Elements migration of gold mineralization and wall-rock alteration process of the Phabon gold deposit in Laos [J]. *Geological Survey and Research*, 2018, 41(2): 108–112.
- [4] 李洪,李军,嵯传源,等. 山东旧店金矿成因矿物学研究及其意义[J]. *山东国土资源*, 2016, 32(3): 1–9.
Li H, Li J, Zhuo C Y, et al. Mineralogy study and its significance of the origin of Jiudian gold deposit in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2016, 32(3): 1–9.
- [5] 陈皓龙. 郯庐及其旁侧地块(招远、蚌埠)断裂构造特征与演化[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
Chen H L. Fracture characteristics and evolution on the Zhaoyuan and Bengbu part of the Tan—Lu Fault Belt [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [6] 郭林楠,黄春梅,张良,等. 胶东罗山金矿床成矿流体来源:蚀变岩型和石英脉型矿石载金黄铁矿稀土与微量元素特征约束[J]. *现代地质*, 2019, 33(1): 121–136.
Guo L N, Huang C M, Zhang L, et al. Source of ore-forming fluids in the Luoshan gold deposit, Jiaodong; Constrains from REE and trace element features of auriferous pyrite in the altered-rock type and auriferous quartz vein type ores [J]. *Geoscience*, 2019, 33(1): 121–136.
- [7] 张万全. 蚀变岩型金矿床地质特征及找矿方向分析[J]. *世界有色金属*, 2018(5): 99–100.
Zhang W Q. Geological characteristics and prospecting direction of altered rock type gold deposits [J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(5): 99–100.
- [8] 王振军,李伟明,原波. 山东三山岛—新立—仓上金矿床构造叠加晕特征浅析[J]. *黄金科学技术*, 2013, 21(4): 48–53.
Wang Z J, Li W M, Yuan B. Features of structural superimposed halos in Sanshandao—Xinli—Cangshang gold deposits, Shandong Province [J]. *Gold Science and Technology*, 2013, 21(4): 48–53.
- [9] 张尧. 胶东新立金矿床构造控矿作用[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2013.
Zhang Y. Structural ore control of Xinli gold deposit in Jiaodong [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [10] 杨林,王庆飞,刘学飞,等. 胶东控矿断裂断层泥形成与演化:以新立金矿床为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(4): 908–918.
Yang L, Wang Q F, Liu X F, et al. Compositions and genesis of the fault gouge in the ore-controlling fault in Jiaodong Peninsula: A case study from the Xinli gold deposit [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(4): 908–918.
- [11] Yang L Q, Deng J, Goldfarb R J, et al. Ar-40/Ar-39 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): 1469–1483.
- [12] 杜利明,胡创业,付世兴,等. 胶东莱州新立金矿床深部三山岛断裂物化探异常特征及找矿靶区预测[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(3): 563–571.
Du L M, Hu C Y, Fu S X, et al. Characteristics of geophysical and geochemical anomalies and prospecting target prediction around the Sanshandao Fault in the Xinli gold deposit, Laizhou, Jiaodong Peninsula [J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(3): 563–571.
- [13] Liu Y Z, Yang L Y, Wang S R, et al. Origin and evolution of ore-forming fluid and gold-deposition processes at the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. *Minerals*, 2019, 9(3): 189.
- [14] 梁亚运,刘学飞,刘龙龙,等. 胶东蚀变岩型金矿金矿

- 物微区地球化学特征[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 3441-3454.
- Liang Y Y, Liu X F, Liu L L, et al. The micro-geochemical characteristics of gold from altered fracture-type gold deposit in Jiaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(11): 3441-3454.
- [15] 高建伟, 申俊峰, 李国武, 等. 胶东三山岛北部海域金矿黄铁矿晶胞参数与热电性特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(6): 1205-1214.
- Gao J W, Shen J F, Li G W, et al. Characteristics of cell parameters and thermoelectricity of the pyrite in the Sanshandao north offshore gold deposit, Shandong Province, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(6): 1205-1214.
- [16] 赵睿, 刘学飞, 潘瑞广, 等. 胶东新立构造蚀变岩型金矿床元素地球化学行为[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3420-3440.
- Zhao R, Liu X F, Pan R G, et al. Element behaviors during alteration and mineralization: A case study of the Xinli (altered rock type) gold deposit, Jiaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(11): 3420-3440.
- [17] 王建, 朱立新, 马生明, 等. 胶东三山岛北海域金矿床热液蚀变作用研究[J]. 地质通报, 2020, 39(11): 1807-1826.
- Wang J, Zhu L X, Ma S M, et al. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic Linglong-type granite-hosting gold mineralization at the Haiyu gold deposit, Jiaodong Gold Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1807-1826.
- [18] 杨林. 胶东新立金矿控矿构造特征和矿化强度分布[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- Yang L. Characteristics of ore controlling structures and distribution of mineralization intensity in Xinli gold deposit, Jiaodong [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [19] 荆国强, 廉康, 胡菲菲, 等. 利用电子探针研究甘肃陇南赵家庄金矿载金矿物特征[J]. 岩矿测试, 2018, 37(5): 490-498.
- Jing G Q, Lian K, Hu F F, et al. Application of EPMA to study the characteristics of gold-bearing minerals in the Zhaojiazhuang gold deposit in Longnan, Gansu Province [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(5): 490-498.
- [20] 李洪奎, 杨永波, 耿科, 等. 山东大地构造相研究方法划分方案与基本特征[J]. 山东国土资源, 2014, 30(4): 1-12.
- Li H K, Yang Y B, Geng K, et al. Division scheme and basic characteristics of tectonic facies research methods in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2014, 30(4): 1-12.
- [21] 尹业长. 胶西北金矿集区金成矿作用与成矿模型[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- Yin Y C. Gold mineralization and metallogenic model of the Jiaoxibe gold deposit concentrated area [J]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [22] 王君亭, 孙宗峰. 山东省莱州市新立金矿床成矿规律研究及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- Wang J T, Sun Z F. Study on metallogenic regularity and metallogenic prediction of Xinli gold deposit in Laizhou, Shandong Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [23] 张丕建, 刘殿浩, 李国华, 等. 胶东中生代盆地边缘区金矿成矿特征和找矿方向[J]. 地质调查与研究, 2015, 38(4): 273-276.
- Zhang P J, Liu D H, Li G H, et al. Gold metallogenic features and prospecting in the margin of the Mesozoic Basins, Jiaodong Peninsula [J]. *Geological Survey and Research*, 2015, 38(4): 273-276.
- [24] 黄晋荣, 陈志方, 姜宇. 山西右玉金矿床地质成因认识及找矿方向[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(3): 185-193.
- Huang J R, Chen Z F, Jiang Y. Geological genesis and prospecting direction of Shanxi Youyu gold deposit [J]. *Geological Survey and Research*, 2019, 42(3): 185-193.
- [25] 马宾. 胶东半岛三山岛海底金矿地质特征及成因研究[J]. 世界有色金属, 2020(13): 84-85.
- Ma B. Geological characteristics and genesis of Sanshandao submarine gold deposit in Jiaodong Peninsula [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(13): 84-85.
- [26] 王立功, 祝德成, 郭瑞朋, 等. 胶西北仓上、三山岛岩体二长花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究[J]. 地质学报, 2018, 92(10): 2081-2095.
- Wang L G, Zhu D C, Guo R P, et al. Geochemistry, zircon U-Pb age and Lu-Hf isotopes of the Cangshang and Sanshandao monzogranites in the northwestern Jiaodong Peninsula, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(10): 2081-2095.
- [27] 刘日富, 周鑫, 吕雨璐, 等. 胶东三山岛—仓上断裂带控矿规律与找矿勘查实践[J]. 地质与勘探, 2019, 55(2): 528-541.
- Liu R F, Zhou X, Lyu Y L, et al. Ore-controlling regularity and prospecting practice in the Sanshandao—Cangshang Fault Zone, Jiaodong area [J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(2): 528-541.

- [28] 王濮. 系统矿物学[M]. 北京:地质出版社,1987.
Wang P. Systematic mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [29] 孙雨沁,于学峰,单伟,等. 胶东焦家断裂带3000m深部矿化特征及金矿物赋存状态[J]. 地球学报,2020,41(6):919-937.
Sun Y Q, Yu X F, Shan W, et al. Mineralization characteristics and modes of occurrence of gold minerals at the depth of 3000 meters in Jiaojia Fault Zone, Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6):919-937.
- [30] 张然. 山东省辽上金矿成因矿物学研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
Zhang R. Genetic mineralogy study of Liaoshang gold deposit in Shandong Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [31] 张永峰,耿洪,吕作刚. 冀北东坪金矿自然金标型特征[J]. 辽宁地质,1998(4):261-265.
Zhang Y F, Geng H, Lyu Z G. Typomorphic characteristics of natural gold from Dongping gold deposit in North Hebei Province [J]. Liaoning Geology, 1998 (4):261-265.
- [32] Yan Y T, Zhang N, Li S, et al. Mineral chemistry and isotope geochemistry of pyrite from the Heilangou gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. Geoscience Frontiers, 2014, 2:205-213.
- [33] 雷万杉,张严飞,刘亚剑,等. 豫西陆院沟蚀变岩型金矿床黄铁矿标型研究[J]. 地学前缘,2017,24(2):1-10.
Lei W S, Zhang Y F, Liu Y J, et al. Typomorphic characteristics of Au-bearing pyrites from Luyuangou altered gold deposit, western Henan Province [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2):1-10.
- [34] 许杨,蓝廷广,舒磊,等. 胶东三山岛金矿床黄铁矿As富集机制及其对金成矿作用的指示[J]. 矿床地质,2021,40(3):419-431.
Xu Y, Lan T G, Shu L, et al. Enrichment mechanisms of arsenic in pyrite from Sanshandao gold deposit (Jiaodong Peninsula, China) and implications for gold metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 2021, 40 (3): 419-431.
- [35] 迟乃杰,韩作振,单伟,等. 胶西北焦家断裂带深部载金黄铁矿标型特征研究及其地质意义[J]. 地球学报,2020,41(6):949-962.
Chi N J, Han Z Z, Shan W, et al. Typomorphic characteristics of gold-bearing pyrite in Jiaojia Fault deep zone of northwest Jiaodong Peninsula and its geological significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6):949-962.
- [36] 郑卫杰. 不同类型金矿黄铁矿微量元素和热电性标型特征[D]. 北京:中国地质大学(北京),2016.
Zheng W J. Typomorphic characteristics of trace elements and thermoelectricity of pyrite in different types of gold deposits [J]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [37] 赵凯,杨立强,李坡,等. 滇西老王寨金矿床黄铁矿形貌特征与化学组成[J]. 岩石学报,2013,29(11):3937-3948.
Zhao K, Yang L Q, Li P, et al. Morphology and chemistry composition of pyrite in the Laowangzhai gold deposit, Ailaoshan orogenic belt, SW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(11):3937-3948.
- [38] 周文雅. 细微浸染型金矿床中黄铁矿的标型特征及意义[J]. 岩矿测试,2001,20(2):100-105.
Zhou W Y. Typomorphic peculiarities and significance of the pyrite in the veinlet-disseminated gold deposits [J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20(2):100-105.
- [39] 周学武,李胜荣,鲁力,等. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,2005,24(4):317-326.
Zhou X W, Li S R, Lu L, et al. Research on the composition typomorphism of pyrite from Longkeng gold-silver mineralization district in Wuyi, Zhejiang Province, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(4):317-326.
- [40] Bralía A, Sabatini G, Troja F. A reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems [J]. Mineralium Deposita, 1979, 14 (3): 353-374.

Genetic Mineralogy and Geological Significance of Gold Minerals and Gold-bearing Pyrites from the Xinli Gold Deposit in the Jiaodong Area

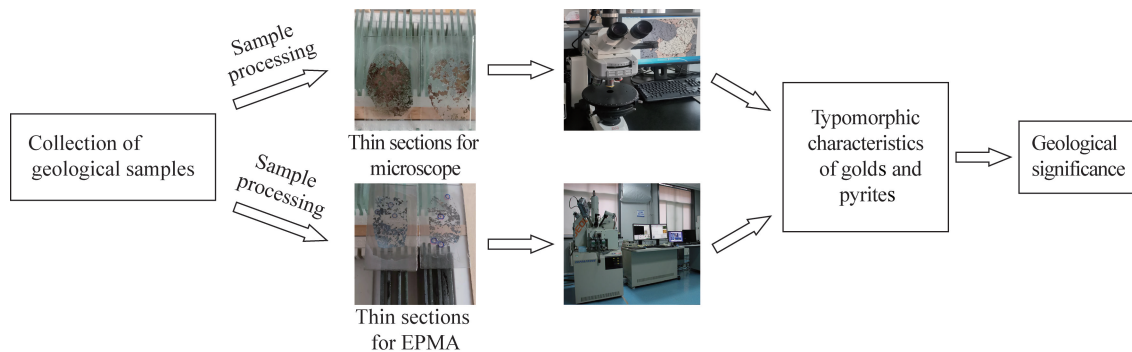
ZHANG Ran¹, XIAO Zhibin^{1*}, FU Chao^{1*}, FU Shixing², ZHU Zhaoming²

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250101, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The mineralogical characteristics of gold minerals and gold-bearing pyrites from the Xinli gold deposit in the Jiaodong area were studied using electron probe microanalysis.
- (2) The vast majority of gold deposits are electrum deposits, and gold-bearing pyrites are mostly tetrahedral and pentagonal dodecahedral.
- (3) The third stage of the hydrothermal period of the Xinli gold deposit is the main mineralization stage, the hydrothermal solution in this stage has the characteristics of medium hypabyssal and medium-low temperature.

**ABSTRACT**

BACKGROUND: In Shandong Province, northwest of the Jiaodong area is the most important gold metallogenic area. The Xinli gold deposit is not only an important deposit in the Sanshandao—Xinli metallogenic belt, but also one of the most typical gold deposits in this area. Research on the Xinli gold mine has been carried out for years and has achieved many fruitful results, however, the mineralogical characteristics and mineral typomorphic characteristics of gold minerals and gold-bearing minerals still need to be studied further.

OBJECTIVES: To investigate the mineralogical characteristics and geological significance of gold minerals and gold-bearing pyrites from the Xinli gold deposit.

METHODS: Polarized light microscope identification and electron probe microanalysis were the main methods in the research of gold minerals and gold-bearing minerals. The geological significance was explored through mineral typological characteristics.

RESULTS: The results show that most of the gold minerals in the Xinli gold deposit are electrum, a small amount of native gold and kustelite. The gold fineness ranges from 336.2 to 834.9, with an average of 699.8. The content of S in gold-bearing pyrite is 51.69%–53.78%, with an average of 53.19%; Fe content is 45.69%–47.62%, with an average of 46.52%; The S/Fe value is 1.99, and sulfur is depleted slightly.

CONCLUSIONS: The morphological typomorphism of gold-bearing pyrites shows an evolutionary trend from coarse-grained cubic shape to medium- and fine-grained pentagonal-dodecahedral shape and then to fine-grained cubic shape, which reflects the gradual reduction of hydrothermal fluid temperature in different metallogenic stages. The compositional typomorphic characteristics indicate that the ore-forming hydrothermal solution has typical characteristics of medium hypabyssal and medium-low temperature. Therefore, it is considered that there are three stages of mineralization in the hydrothermal alteration period of the Xinli gold deposit, of which the third stage is the main mineralization period.

KEY WORDS: Xinli gold deposit; electron probe microanalyzer; gold minerals; gold-bearing pyrites; genetic mineralogy