

黑龙江永新金矿床金-银系列矿物与载金硫化物特征及成因分析

李士胜¹, 李胜荣¹, 李成禄^{1,2}, 于援帮³, 曾勇杰¹, 袁茂文¹

(1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 黑龙江省地质调查研究总院, 黑龙江 哈尔滨 150036; 3. 黑龙江省地质矿产局, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 永新金矿位于嫩江-黑河构造混杂岩带的南段, 为近几年新发现的受构造带控制的蚀变岩型金矿床。通过光学显微镜、电子探针及背散射观测对永新金矿床的金-银系列矿物与载金硫化物进行了系统研究, 发现金-银系列矿物以自然金为主, 银金矿次之, 粒径多集中在 5~20 μm , 以包体金、裂隙金为主, 粒间金较少, 成色为 843~917, 平均 888; 载金硫化物有黄铁矿和方铅矿, 以黄铁矿为主; 早阶段黄铁矿粒径较大, 以立方体为主, 较破碎; 主成矿阶段黄铁矿粒径较小, 以立方体和五角十二面体为主。黄铁矿 Co-Ni-As 三角图显示成矿与岩浆热液关系密切, 金矿物成色与黄铁矿的 Fe/(S+As) 值指示矿床形成于中深成中温环境。与克拉通破坏型(胶东型)和造山型金矿床比较, 永新金矿床与两者既有相近之处, 又有明显区别。

关键词: 永新金矿床; 金-银系列矿物; 金成色; 载金硫化物; 矿床成因

中图分类号: P578.1⁺; P578.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0115-13

Characteristics of the gold-silver minerals and auriferous sulfides in the Yongxin gold deposit of Heilongjiang Province and their genetic significance

LI Shi-sheng¹, LI Sheng-rong¹, LI Cheng-lu^{1,2}, YU Yuan-bang³, ZENG Yong-jie¹
and YUAN Mao-wen¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin 150036, China; 3. Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China)

Abstract: The Yongxin gold deposit located in the southern part of the Nenjiang-Heihe tectonic mélange zone is a newly discovered altered rock type gold deposit controlled by tectonic belt. The gold-silver minerals and auriferous sulfides in this deposit were systematically studied by optical microscope, electron microprobe analysis and back scattered electron images, and the results show that gold-silver minerals are mainly native gold, subordinate electrum, and minor amounts of intergranular gold, with the crystal size in the range of 5 to 20 μm and mainly occurring as inclusions and fissure fillings. The fineness varies from 843 to 917, 888 on average. Gold-silver minerals were found in pyrite and galena, mainly pyrite. At the early stage of mineralization, the crystalline form of coarse-grained yrite was mainly cubic and crushed by late stress. At the main ore-forming stage, the crystalline

收稿日期: 2017-06-22; 接受日期: 2017-09-30

基金项目: 黑龙江省国土资源科研项目(201603); 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项课题(2016YFC0600106)

作者简介: 李士胜(1992-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事成因矿物学与找矿矿物学研究, E-mail: lisscugb@163.com; 通讯作者: 李胜荣(1956-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事成因矿物学与找矿矿物学及环境与生命矿物学研究, E-mail: lisr@cugb.edu.cn.

form of fine-grained pyrite was dominated by cubic and pentagonal dodecahedron. The Co-Ni-As phase diagram shows that mineralization was closely related to magmatic fluids, the Fe/(S+As) ratio of the pyrite and the fineness indicate that this deposit was formed at the medium temperature and medium to deep mineralization environment. The Yongxin gold deposit is partially similar to and yet obviously different from decratonic (Jiaodong type) and orogenic gold deposits.

Key words: Yongxin gold deposit; gold-silver minerals; gold fineness; auriferous sulfide; ore genesis

Fund support: Heilongjiang Provincial Land and Resources Research Project (201603); National Key Research and Development Program “Deep Resource Exploration and Exploitation” (2016YFC0600106)

嫩江-黑河构造混杂岩带位于兴蒙造山带的东部,大兴安岭北段的东坡,区域上受西伯利亚板块和华北板块控制。现已发现的金矿床如上马场乡金矿、三道湾子金矿、小泥鳅河金矿等多集中在嫩江-黑河构造带的北东部(吕军等, 2009; 余宏全等, 2012; 汪岩等, 2015; 张渝金等, 2016; 王凤博等, 2016)。永新金矿是嫩江-黑河构造混杂岩带南段近几年新发现的最重要的金矿床,为受构造带控制的蚀变岩型金矿(袁茂文等, 2017)。该矿床的深入研究,对全面认识整个构造混杂岩带金的成矿规律有重要意义。

目前,永新金矿床的研究仅限于野外地质调查、地表及深部勘探工程揭露的蚀变类型、基础地质特征和成矿规律的初步认识(李成禄等, 2013; 曲晖等, 2014; 袁茂文等, 2017),对矿床的控矿构造、成岩成矿时代和成矿物质来源等方面尚未开展系统研究。金矿物的形态、成分及成色和赋存状态等特征能定性提供成矿深度、成矿温度和金的矿化机制等方面的信息(赵令湖等, 2000; 梁俊红等, 2000; 卢振权等, 2000; 代文军等, 2011),载金矿物特别是黄铁矿的形态和成分等特征研究能提供矿床成因类型和找矿信息(Bralia *et al.*, 1979; 陈光远等, 1989; 严育通等, 2012a, 2012b)。本文从矿物学的角度,利用光学显微镜和电子探针对于永新金矿的金-银系列矿物及载金硫化物特征进行了系统研究,探讨了该矿床的成矿温度、形成深度和热液来源,并与克拉通破坏型(胶东型)和造山型金矿进行了比较,其结果可为进一步找矿和选矿工作提供重要的参考信息。

1 矿床地质特征

永新金矿位于嫩江县霍龙门乡南东方向,区域上位于嫩江-黑河构造带的西南缘(图 1),为多宝山斑岩铜矿外围近几年新发现的受构造控制的蚀变岩

型金矿。永新金矿区地表西北部出露早二叠世正长花岗岩,西南部主要出露早石炭世花岗质糜棱岩(曲晖等, 2014; 袁茂文等, 2017)。沿早二叠世正长花岗岩和花岗质糜棱岩的接触带发育细晶闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩等岩脉及小侵入体,其中闪长玢岩和花岗斑岩出露面积较大。矿区北东向构造发育,近南北向断裂次之,岩体的接触带、糜棱岩带、角砾岩体和蚀变矿化带主要受北东向构造控制。矿体主要沿早二叠世正长花岗岩和花岗质糜棱岩接触带靠近花岗质糜棱岩一侧近平行成群出现,走向 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,倾向北西,倾角 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。I 号金矿体是矿区的主要矿体,矿体长约为 375 m,最宽 73.4 m,最窄 6.8 m,沿北东向展布(图 1)。

永新金矿成矿作用明显表现出同期多阶段矿化的特点,通过野外观察与室内光学显微镜、电子探针分析、扫描电镜相结合,将该矿床的成矿过程划分为 4 个阶段,即黄铁矿-石英阶段(I):生成以乳白色粗粒自形-半自形石英为主,少量自形粗粒黄铁矿分布于石英脉中,典型的矿物组合为石英、黄铁矿,该阶段为成矿早期,基本不含金矿物。石英-黄铁矿阶段(II):大量中细粒半自形黄铁矿集合体沿石英脉及其边缘分布,主要矿物为石英、黄铁矿,伴有极少量的黄铜矿、自然金和银金矿。石英-多金属硫化物、碲化物阶段(III):该阶段仍以石英、黄铁矿为主,其次为方铅矿、黄铜矿、自然金、银金矿和碲化物,已确定的碲化物有碲银矿、碲铅矿、辉碲铋矿。石英-碳酸盐阶段(IV):典型矿物组合为石英、方解石、黄铁矿,石英、方解石多呈细小脉体生长,黄铁矿颗粒较少,主要呈浸染状产出。其中,黄铁矿-石英阶段和石英-黄铁矿阶段为矿化早期;石英-多金属硫化物、碲化物阶段为主成矿期;石英-碳酸盐阶段为成矿阶段晚期,它标志着整个成矿过程的结束。

矿床的热液蚀变较为强烈,主要有钾长石化、绢英岩化、绿泥石化、碳酸盐化和高岭土化(袁茂文等,

2017)。金矿体与绢英岩化关系密切,尤其与烟灰色 硅化关系最为密切。

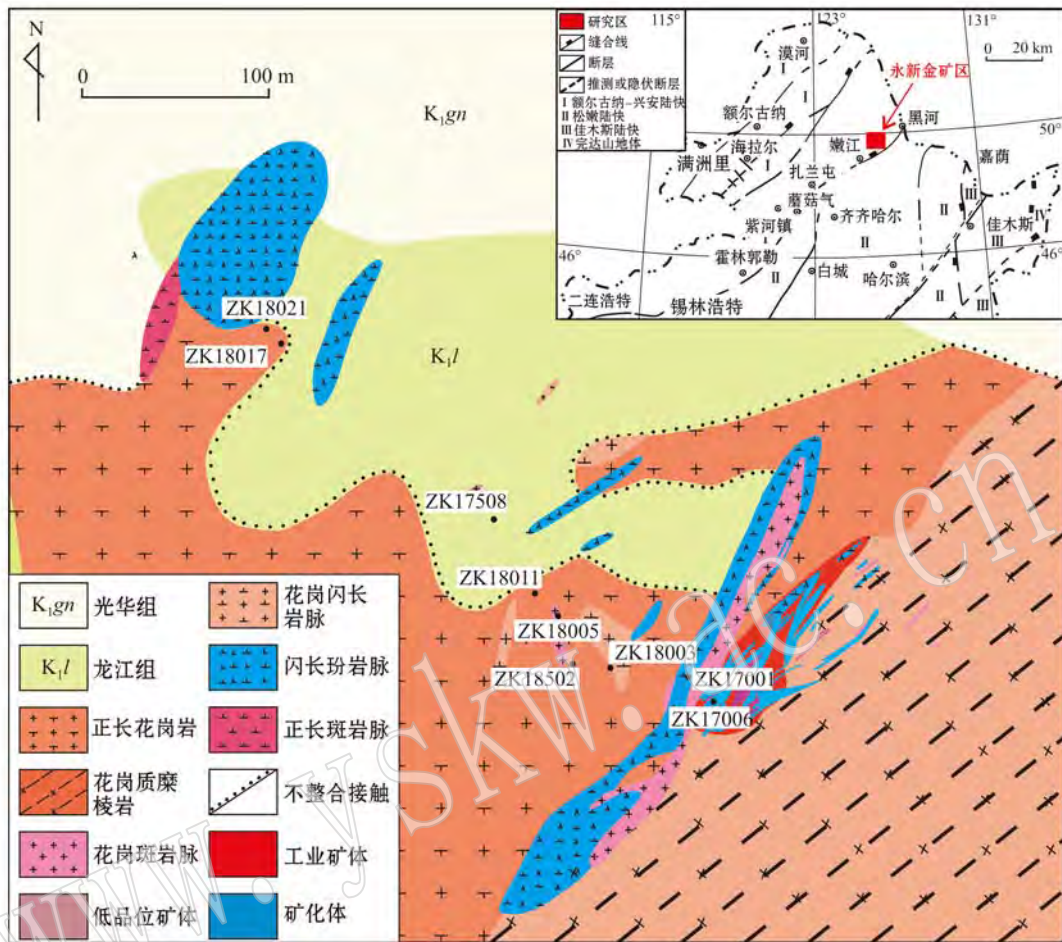


图 1 永新金矿床矿区地质图(据袁茂文等,2017 修编)

Fig. 1 Geological sketch map of the Yongxin gold deposit (modified after Yuan Maowen *et al.*, 2017)

2 样品及分析方法

本次研究的所有样品均为深部钻孔岩芯样,涉及的 9 个钻孔分别为 ZK170 勘探线的 1、6 号钻孔, ZK175 勘探线的 8 号钻孔, ZK180 勘探线的 3、5、11、17 和 21 号钻孔, ZK185 勘探线的 2 号钻孔(图 1), 所采集的样品主要来自石英-黄铁矿阶段和石英-多金属硫化物、碲化物阶段,从中选取了具有代表性的样品,将其磨成探针片或光片,通过反光显微镜对光片进行详细的矿相学观察,大致查明样品的矿物组成、结构构造和共生关系,圈出测试区域,然后对光片表面进行喷碳处理。金-银系列矿物与载金硫化物成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成,仪器型号 JXA-8230,定量化成分分析工作条件

为加速电压 20 kV,电流 20 nA,束斑直径 5 μm ,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,执行标准为 GB/T 15074-2008《电子探针定量分析方法通则》,分析精度为 0.01%。

3 金-银系列矿物特征

3.1 赋存状态、形态和粒度

金-银系列矿物绝大多数嵌布于黄铁矿中,仅少数嵌布于石英与黄铁矿的接触部位或石英中,呈麦粒状和浑圆粒状、不规则粒状、角砾状、脉状和树叉状,其中以浑圆粒状、不规则粒状、角砾状和脉状为主(图 2)。对 11 块矿石光片中的 44 粒金-银系列矿物进行了统计,根据形态不同统计出麦粒状和浑圆粒状 7 粒(15.9%)、不规则粒状 12 粒(27.3%)、角

砾状 7 粒(15.9%)、脉状和树叉状 18 粒(40.9%); 根据粒度不同划分出极微细粒($d < 5 \mu\text{m}$)、微细粒($5 \leq d < 10 \mu\text{m}$)、细粒($10 \leq d < 20 \mu\text{m}$)和中粒($20 \leq d < 50 \mu\text{m}$), 其中极微细粒 5 粒(11.4%)、微细粒 24

粒(54.5%)、细粒 14 粒(31.8%)、中粒 1 粒(3.0%)。金-银系列矿物赋存状态主要有包体金、粒间金和裂隙金。

(1) 包体金: 已发现的 44 粒金矿物中有 19 粒为

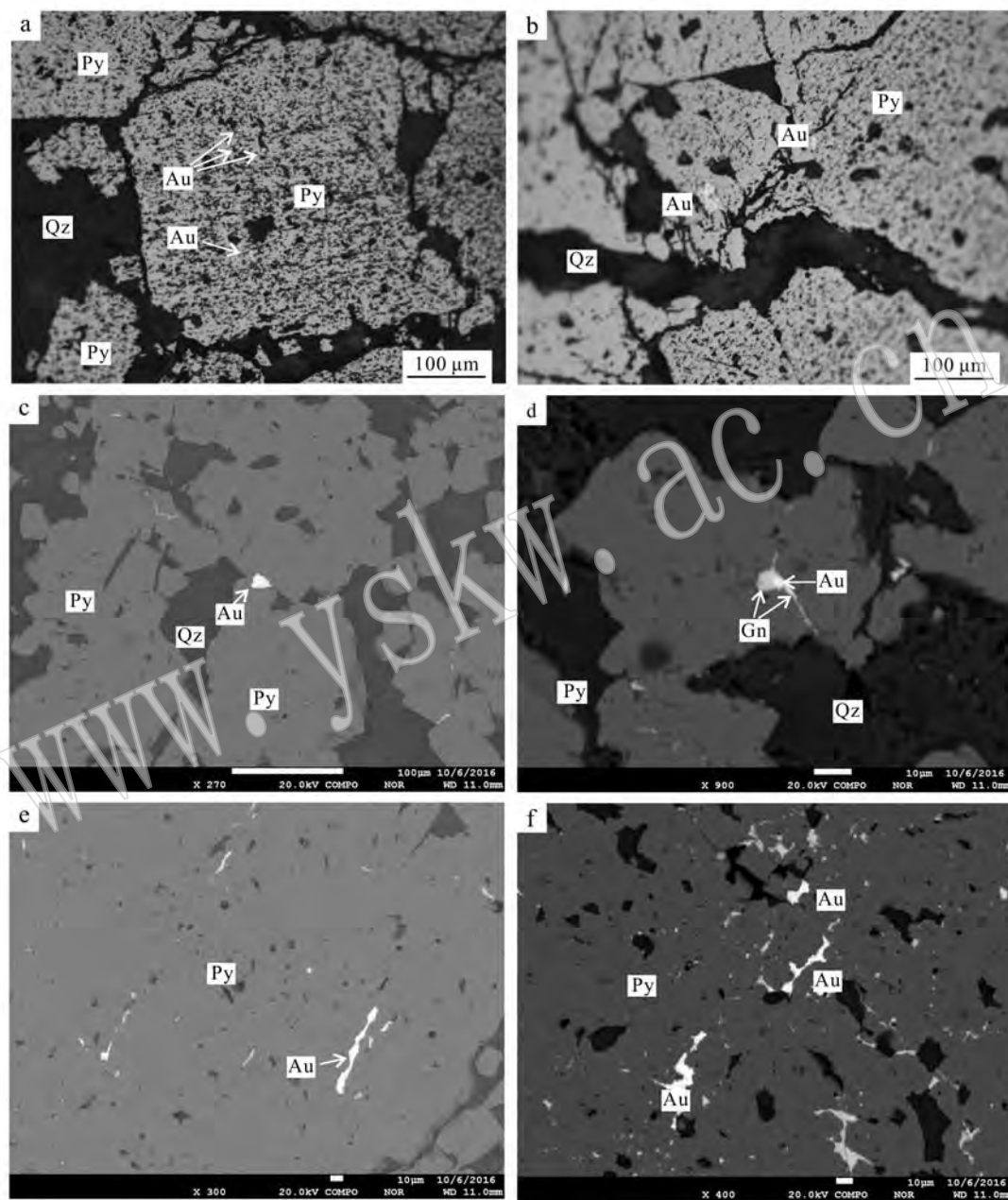


图 2 永新金矿床金-银系列矿物赋存状态反光显微镜(a、b)、背散射(c~f)图像

Fig. 2 Reflected light microscopy (a, b) and back scattered electron images (c~f) of the modes of occurrence of gold-silver minerals in the Yongxin gold deposit

a—黄铁矿中呈麦粒状、不规则粒状的包体金; b—黄铁矿与石英接触部位的粒间金; c—黄铁矿粒间呈角砾状的粒间金; d—方铅矿中呈浑圆粒状的包体金; e—充填于黄铁矿裂隙中的裂隙金; f—充填于多孔状黄铁矿裂隙中的裂隙金; Py—黄铁矿; Au—金-银系列矿物; Gn—方铅矿; Qz—石英

a—irregular inclusion gold found within the pyrite; b, c—intergranular gold between pyrites and quartz; d—granular inclusion gold found in galena; e, f—fissure gold filled in fissures of smooth and porous pyrite; Py—pyrite; Au—gold-silver mineral; Gn—galena; Qz—quartz

包体金, 占总数的 43.2%, 呈单颗粒的形式包裹在黄铁矿中, 极少数颗粒包裹在方铅矿和石英中。形态多呈麦粒状、不规则粒状(图 2a), 大小为 $3\sim 16\ \mu\text{m}$, 以细粒、微细粒为主。包体金的形成早于粒间金和裂隙金。

(2) 粒间金: 已发现的金矿物中有 9 粒为粒间金, 占总数的 20.4%。粒间金多出现在黄铁矿的晶隙中及黄铁矿与石英的接触部位, 形态多呈脉状、角砾状, 大小为 $7\sim 31\ \mu\text{m}$, 以细粒、微细粒为主。

(3) 裂隙金: 已发现的金矿物中有 16 粒为裂隙金, 占总数的 36.4%, 出现率仅次于包体金, 绝大多数位于黄铁矿的裂隙中, 极少数出现在石英的裂隙中, 以脉状、细脉状、树叉状为主(图 2f), 大小为 $4\sim 19\ \mu\text{m}$, 细粒金与微细粒金基本上持平。裂隙金形成明显晚于黄铁矿和石英。

3.2 化学成分

对 44 粒金-银系列矿物的形态和赋存状态研究后, 选取了具代表性的 21 粒进行了电子探针分析, 其中光片 ZK17006-1g1 中的两粒 Fe、S 元素明显异常, 其 S/Fe 值接近黄铁矿的理论值 2, 认为高出的 Fe、S 来自黄铁矿, 结合其粒径及金的赋存部位, 认为可能因为矿物粒径太小导致测试过程中有少量的黄铁矿成分混入。去除这两个不可用数据后, 其他金-银系列矿物中 Au 元素含量为 79.92%~89.02%, 平均 85.96%; Ag 元素含量为 7.97%~15.30%, 平均 11.12%; 平均 Ag/Au 值为 0.128(表 1)。Au 元素含量普遍偏高, Au、Ag 元素含量比值较稳定, 变化较小。金-银系列矿物的分类标准比较多, 本文以 Ag 含量来进行划分, Ag 元素含量在 0~15% 称为自然金, 16%~50% 称为银金矿, 51%~85% 称为金银矿, 86%~100% 为自然银。按这一划分标准, 永新金矿金-银系列矿物基本上是以自然金的形式存在, 少数为银金矿。银金矿主要分布在标高为 300 m 的矿体内。

金-银系列矿物中除了 Au、Ag 元素外, 还含有 Fe、S、Te、Zn、Bi、Co 和 Ni 等微量元素, As、Cu、Pb、Pt 和 Pd 等元素含量整体低于检测线。金-银系列矿物中 S、Fe 普遍存在, 其中 Fe 元素的含量仅次于 Au、Ag 元素, 明显高于其他元素, 平均值达到 1.55%, 表明 Au 元素具有较强的亲铁性。金-银系列矿物还比较富含 Co、Ni、Bi 等中高温元素, 尤其是中温元素 Bi, 含量为 0.44%~0.73%, 平均 0.57%, 指示金矿床形成于中温环境。

3.3 金的成色

金成色研究能提供非常重要的地质信息。本文对不同标高和不同赋存状态金矿物的成色进行了统计, 采用的计算方法为 $\text{Au}/(\text{Au} + \text{Ag}) \times 1\ 000$ 。结果表明, 包体金平均成色为 881(表 1), 粒间金平均成色为 881, 裂隙金平均成色为 888; 不同标高金的平均成色为 843~917(图 3), 平均为 888, 其中在 300 m 标高处金成色相对较低, 为银金矿。

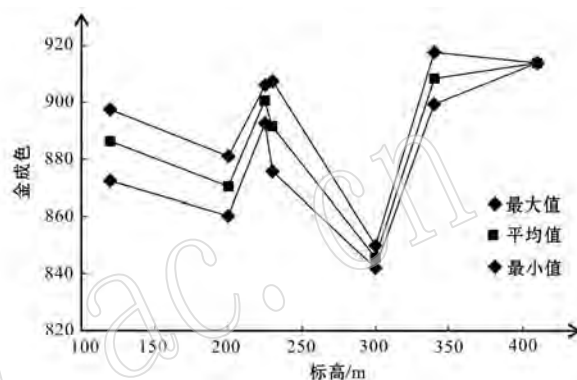


图 3 不同标高金矿物平均成色变化图

Fig. 3 Change of average gold fineness at different elevations

整体上, 永新矿区金矿物成色无论是包体金、粒间金还是裂隙金, 金成色普遍较高, 这与金-银系列矿物形成深度非常吻合。

4 载金硫化物特征

通过光学显微镜和背散射图像观察后, 发现金-银系列矿物与黄铁矿的关系极为密切, 绝大多数赋存于黄铁矿及其裂隙中, 极少数以包体的形式赋存于方铅矿中(图 2)。本文重点研究了黄铁矿的晶体形态和化学成分。

4.1 黄铁矿

永新矿区的黄铁矿十分发育, 在 4 个成矿阶段均有出现, 但各阶段晶形、自形程度和粒径都有所变化。黄铁矿-石英阶段和石英-黄铁矿阶段的黄铁矿结晶程度较好, 粒径较大, 表面较干净, 但受后期成矿作用的影响, 颗粒较破碎, 金矿物主要赋存于黄铁矿的裂隙中, 晶形以立方体为主; 石英-多金属硫化物、碲化物阶段的黄铁矿粒径细小, 立方体和五角十二面体黄铁矿均有出现(图 4c), 相比于黄铁矿-石英阶段和石英-黄铁矿阶段, 石英-多金属硫化物阶段

表 1 永新金矿床金-银系列矿物电子探针化学成分分析结果
Table 1 EPMA data of gold-silver minerals in the Yongxin gold deposit

w_B/ %

样号	赋存状态	Au	Ag	Te	Fe	S	Zn	Bi	Co	Ni	总量	成色/‰	定名
ZK17006-1g1	包体金	88.52	8.35	0.03	2.21	0.13	0.03	0.65	0.03	bd1	99.96	913.8	自然金
	裂隙金	79.92	14.13	0.08	3.57	1.75	0.02	0.42	0.02	bd1	99.93	849.8	自然金
	包体金	81.49	15.30	0.03	2.37	0.05	0.04	0.65	bd1	0.03	99.97	842.0	银金矿
	包体金	82.26	15.06	—	1.45	0.05	0.02	0.59	—	0.05	99.47	845.3	银金矿
ZK17508-1g1	包体金	82.94	12.33	0.35	3.00	0.11	—	0.59	0.03	0.03	99.38	870.5	自然金
	粒间金	84.33	13.70	—	1.18	0.02	—	0.68	—	0.01	99.91	860.2	自然金
	包体金	85.72	11.57	0.07	2.23	0.03	0.11	0.56	—	0.04	100.33	881.0	自然金
	裂隙金	85.51	12.51	—	1.50	0.15	0.09	0.60	—	—	100.35	872.4	自然金
ZK18017-2g1	包体金	85.90	10.92	—	1.89	0.01	0.02	0.56	—	—	99.33	887.2	自然金
	粒间金	86.06	11.91	0.02	1.24	0.06	—	0.55	—	0.01	99.85	878.5	自然金
	裂隙金	87.20	9.98	—	1.27	0.04	0.03	0.51	—	0.03	99.06	897.3	自然金
	粒间金	87.96	10.33	0.03	0.77	0.03	—	0.58	0.01	0.06	99.86	894.9	自然金
ZK18011-1g1	裂隙金	86.92	12.35	0.03	0.41	—	0.04	0.48	—	0.04	100.39	875.6	自然金
	包体金	89.02	9.10	—	0.95	0.09	—	0.59	0.01	—	99.76	907.3	自然金
ZK18005-5g1	粒间金	87.35	10.52	—	0.89	0.05	0.03	0.47	—	—	99.36	892.5	自然金
	包体金	87.73	9.44	0.15	2.10	0.02	0.03	0.44	0.05	0.05	100.00	902.9	自然金
	裂隙金	88.17	9.14	0.01	1.41	0.09	—	0.53	0.01	—	99.35	906.1	自然金
ZK17001-3g1	裂隙金	87.61	9.81	—	1.34	0.04	0.02	0.57	—	0.04	99.51	899.3	自然金
	裂隙金	88.59	7.97	—	1.75	0.11	0.02	0.74	—	—	99.19	917.5	自然金

注：以 ZK17006-1g1 为例，ZK 表示钻孔，17006 表示 170 勘探线 6 号钻孔，-1 表示第 1 个采样点，g1 表示采样点采的第 1 块光片；— 表示低于检测限；部分元素含量过低未见表。

的黄铁矿表面麻点较多(图4b);石英-碳酸盐阶段的黄铁矿较少,由于成矿晚期温度较低,黄铁矿主要以细脉状的形式出现。

永新金矿床载金黄铁矿中S含量为52.92%~53.88%,平均53.34%(理论值为53.45%);Fe含量为45.63%~47.14%,平均46.38%(理论值为46.55%),这与岩浆热液型金矿Fe的平均值非常吻合(严育通等,2012b)。S/Fe值最小为1.95,最大为2.04,平均值2.00,与理论值2非常吻合。As含量为0.009%~0.102%,平均0.039%;Ag含量为0.001%~0.023%,平均0.01%;Au含量为0.002%~0.092%,平均0.029%;Co含量为0.038%~0.138%,平均0.079%;Ni含量为0.001%~0.239%,平均0.031%;Se、Pb、Ge和Bi等元素含量整体上低于检测线(表2)。

4.2 方铅矿

永新金矿床载金方铅矿粒径较小,在光学显微镜下不易观察,背散射图像显示方铅矿主要以包体的形式存在于黄铁矿中或沿着黄铁矿裂隙充填(图4d、4e),方铅矿中可见以包体形式存在的金-银系列矿物(图2b)。

方铅矿中S含量为13.14%~14.19%,平均13.64%;Pb含量为83.06%~84.58%,平均83.88%;除含有S、Pb外还含有Fe、Ag、Te、Ge等元素,其中Fe含量为0.95%~1.55%,平均1.28%;Ag含量为0.31%~1.07%,平均0.75%;Ge含量为0.17%~0.44%,平均0.28%;Au、As、Cu、Zn等元素含量整体低于检测线(表2)。

5 讨论

5.1 成矿温度及深度估算

永新矿区金-银系列矿物以自然金为主,银金矿较少,金矿物的形态、成色、粒径、成分等蕴含着丰富的地质信息。据前人研究,金矿物的成色在一定程度上与其形成深度有关,一般内生热液成因的金矿物由深部至浅部金矿物成色逐步降低(赵令湖等,2000;梁俊红等,2000;李成禄等,2011;朴庭贤,2014),这一变化规律与Ag和Au的活度有关。Ag的活度比Au大,从热液中心向外迁移时,Ag比Au迁移得更远,虽Ag可以任意比例类质同像替换Au,但深部压力比较大,不利于Ag类质同像替换Au,一般从深部到浅部金矿物有由自然金向银金矿再向金

银矿过渡的趋势(Palyanova, 2008; Li *et al.*, 2001)。金矿物的粒径一定程度上也能反映成矿温度和深度,在温度较高和较深的成矿环境中,金矿物的粒径较小(代文军等,2011; Palyanova *et al.*, 2012; 胡海祥等,2013)。

翟裕生等(2011)对热液矿床的成矿深度进行了划分,矿床形成于4.5~1.5 km为深-中深环境,1.5 km~近地表为浅-超浅环境。永新矿区金矿物成色在843~917之间,平均888,根据金成色与深度的关系可知金矿物形成于中深成环境。金矿物平均粒径为0.01 mm,以细-微粒为主。在金成色与成矿温度关系图(图5,卢振权等,2000)中,金矿物成色全都落在中温区的中上部,再结合金矿物富含中温元素Bi,认为该金矿床形成于中深成中温环境。

陈光远等(1989)认为黄铁矿中Fe/(S+As)值与其深度具有较好的相关性,相关系数为0.878,浅、中、深部的Fe/(S+As)值分别为0.926、0.863、0.846。永新矿区黄铁矿的Fe/(S+As)值在0.850~0.890之间,均值为0.869,也进一步指示其形成于中深成环境。

综合金矿物及载金黄铁矿的标型特征,认为永新金矿床形成于中深成中温成矿环境。

5.2 矿床成因类型

永新金矿矿体主要沿早石炭世正长花岗岩和花岗质糜棱岩接触带靠近花岗质糜棱岩一侧分布,矿床成因与岩浆岩密切相关。梁俊红等(2000)阐述了不同类型金矿床的成色特点,其中区域岩浆热源热液矿床金成色变化小,为623~992,平均为693~962,一般大于800,个别低者为632。永新金矿床金矿物成色为843~917,平均888,与区域岩浆热源热液矿床金成色非常吻合,因此认为永新金矿床为岩浆热液矿床。

前人对黄铁矿中的Fe、S、Co、Ni、As等微量元素特征已经做过大量研究(陈光远等,1989;李胜荣等,1996;严育通等,2011;申俊峰等,2013;曹素巧等,2014),证实这些微量元素特征对于矿床成因具有良好的指示意义。例如黄铁矿中的As可以类质同像替换S,而As元素是典型的低温元素,因此As元素趋向于低温富集(陈光远等,1989),它的含量取决于大气水/岩浆水的比值。在高温的岩浆水中,大量的Co以类质同像形式替代Fe,而Ni类质同像有限,一般形成不连续的固溶体。研究表明,金矿床中黄铁矿的Co/Ni值(Bralia *et al.*, 1979; 陈光远等,

表 2 永新金矿床载金硫化物电子探针化学成分分析结果
Table 2 EPMA data of auriferous sulfides in the Yongxin gold deposit

w_B/ %

载金硫化物	样号	S	Fe	Ag	Au	Cu	Pb	Zn	Ge	Co	Ni	As	Sb	Te	总量
黄铁矿	17001-3g5	53.31	46.37	0.02	—	—	—	—	—	0.09	0.01	0.05	—	0.01	99.85
		53.64	46.25	—	—	0.01	0.06	0.04	—	0.09	—	—	—	0.03	100.11
	17006-1g1	53.88	45.85	0.02	—	—	—	—	—	0.10	—	0.04	—	—	99.89
		53.49	46.10	—	—	0.03	—	0.04	—	0.07	0.24	0.01	—	—	99.97
		53.55	45.81	—	—	—	—	—	—	0.10	0.01	0.01	0.01	—	99.50
		53.15	46.16	0.02	0.02	—	0.07	0.05	—	0.07	—	0.02	0.02	—	99.58
	17006-2g1	53.58	46.90	0.01	—	—	—	—	—	0.07	—	0.07	—	0.01	100.63
		53.45	47.03	—	—	—	—	—	—	0.07	—	0.02	0.01	0.01	100.59
	17508-1g1	53.13	46.36	—	0.01	0.02	—	—	—	0.08	0.04	0.04	0.04	0.01	99.71
		53.20	46.20	0.01	0.01	—	—	—	—	0.04	0.01	0.04	0.03	—	99.53
黄铁矿	18003-3g1	53.17	46.27	—	0.01	—	—	—	—	0.11	—	—	0.02	0.01	99.58
		53.09	46.16	—	0.06	—	0.07	—	—	0.07	—	—	0.02	—	99.46
	18017-2g1	53.31	45.76	—	—	0.04	—	0.02	—	0.07	—	—	0.02	—	99.22
		53.01	46.30	—	—	—	—	0.02	—	0.07	—	0.02	—	—	99.43
	18021-1g1	52.92	47.14	0.01	0.09	0.01	—	—	—	0.09	0.02	0.01	0.02	0.02	100.32
		53.30	47.02	0.01	—	—	—	—	—	0.08	—	0.02	0.03	0.01	100.45
	18502-1g1	53.04	47.08	—	—	0.02	—	0.03	—	0.07	—	—	—	—	100.25
		53.32	46.34	—	—	—	—	—	—	0.05	—	0.05	—	—	99.76
	14005-2g1	53.58	46.02	0.01	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—	99.67
		53.30	45.63	—	0.01	—	—	—	—	0.08	—	0.10	—	—	99.11
方铅矿	18003-3g1	53.25	46.56	—	0.08	—	—	—	—	0.07	—	0.02	—	0.04	100.02
		53.45	46.22	0.02	—	0.02	—	0.01	—	0.04	0.01	—	—	—	99.76
	18502-1g1	53.48	46.19	0.01	0.01	—	—	—	—	0.10	0.03	0.05	0.01	—	99.88
		53.56	46.83	—	0.06	—	—	0.01	—	0.12	—	0.07	—	0.01	100.65
	14005-2g1	53.46	47.11	—	0.01	—	—	0.08	—	0.14	0.02	0.10	—	—	100.91
		53.29	46.38	—	0.01	—	—	—	—	0.07	—	0.01	—	—	99.77
	18502-1g1	13.14	0.95	0.99	—	—	84.23	—	0.23	0.01	—	—	—	—	99.55
		13.82	1.48	0.63	—	0.02	84.22	—	0.19	—	—	—	—	—	100.36
	18502-1g1	14.19	1.20	1.07	—	0.01	83.32	—	0.17	0.01	0.06	—	—	0.19	100.21
		13.47	1.55	0.72	—	—	83.06	—	0.35	—	—	—	—	0.05	99.22
		13.60	1.23	0.31	—	0.06	84.58	—	0.44	—	0.04	—	0.04	0.05	100.34

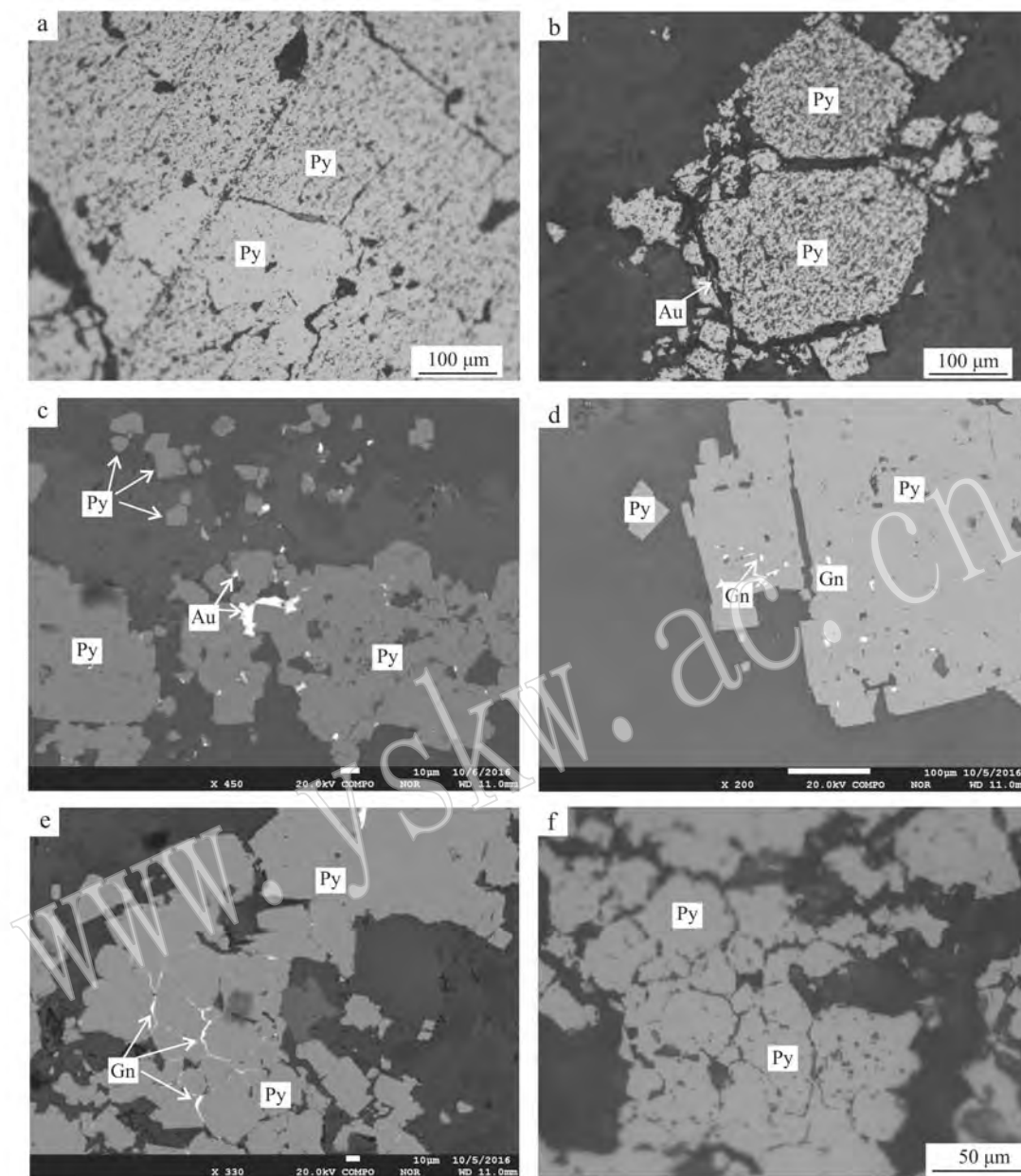


图 4 永新金矿床载金硫化物反光显微镜(a、b)、背散射(c~f)图像

Fig. 4 Reflected light microscopy (a, b) and BSE images (c~f) of auriferous sulfides in the Yongxin gold deposit

a—多孔状黄铁矿环绕早期较干净黄铁矿；b—多孔状立方体、五角十二面体黄铁矿共存，细粒黄铁矿沿早期粗粒黄铁矿边缘生长；c—裂隙金沿黄铁矿的接触部位充填；d—黄铁矿中呈浑圆状、角砾状的方铅矿包体，粒径与金矿物相近；e—方铅矿沿黄铁矿的接触部位充填；f—与 e 相对应，方铅矿粒径细小，反光显微镜下很难发现；Py—黄铁矿；Au—金矿物；Gn—方铅矿

a—relatively clean pyrite surrounded by later porous pyrite; b—porous cube and pentagonal dodecahedron pyrites coexistent, fine-grained pyrite growing along the margin of early coarse-grained pyrite; c—fissure gold filled along the contact area of pyrite; d—a rounded, brecciform galena found as small inclusions within the pyrite, with the size similar to that of the gold mineral; e—galena filled along the contact area of pyrite; f—corresponding to the e. galena occurring as small veins along the contact area of pyrite, difficult to find in the light microscope; Py—pyrite; Au—gold mineral; Gn—galena

1989; 李胜荣等, 1996; 刘洪涛等, 2011)及 Co-Ni-As 三角图可以用来指示金矿床的成因类型(严育

通等, 2012a, 2012b)。不同成因黄铁矿的 Co/Ni 值不同, 火山成因的黄铁矿 Co/Ni 值在 5~22 之间, 沉

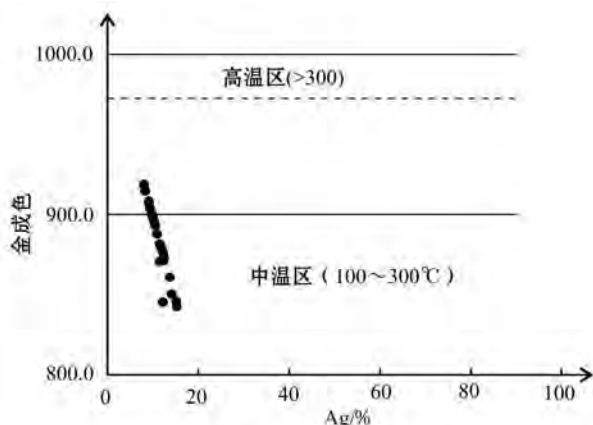


图 5 永新金矿床金成色与成矿温度图解
(据卢振权等, 2000)

Fig. 5 Illustration of gold fineness and metallogenic temperature in Yongxin gold deposit (modified after Lu Zhenquan *et al.*, 2000)

积成因的黄铁矿 Co/Ni 值一般小于 0.63, 热液成因黄铁矿 Co/Ni 值一般为 1.17, 岩浆成因黄铁矿 Co/Ni 值在 0.09~12 之间(刘洪涛等, 2011)。永新金矿床载金黄铁矿的 Co/Ni 值为 2~9.6, 平均 5.6, 与岩浆成因黄铁矿的 Co/Ni 值非常吻合, 可据此认为永新金矿床为岩浆热液矿床。载金黄铁矿的 Co-Ni-As 三角图(图 6)也表明永新金矿成矿热液以岩浆热液为主。

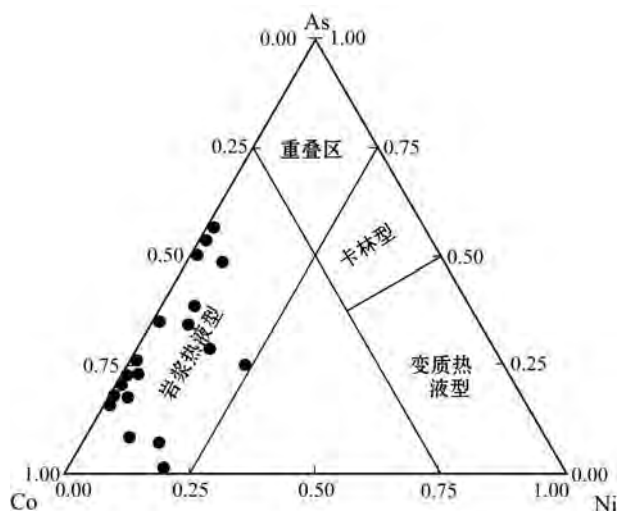


图 6 永新金矿床载金黄铁矿 Co-Ni-As 三角图
(底图据严育通等, 2012b)

Fig. 6 Co-Ni-As triangular diagram of gold-bearing pyrite in the Yongxin gold deposit (modified after Yan Yutong *et al.*, 2012b)

5.3 与其他金矿的对比

造山型金矿床与克拉通破坏型(特别是胶东型)金矿床是全球最为重要的金矿类型,也是目前研究的热点之一。造山型金矿床典型的特点有:变质流体为主要的成矿流体,金元素及矿化剂硫与沉积地层关系密切;金发生高效沉淀的关键因素是流体压力骤降,而不是流体温度的降低;造山型金矿床的时空分布规律与超大陆拼合有关(杨利亚等, 2013; 邱正杰等, 2015)。克拉通破坏型(胶东型)金矿床与岩石圈减薄、克拉通破坏导致大范围的岩浆活动关系极为密切(Li *et al.*, 2013, 2014; Li and Santosh, 2014, 2017; 朱日祥等, 2015; Li *et al.*, 2015, 2016; 范宏瑞等, 2016),它与造山型金矿床的本质区别在于成矿流体以岩浆流体为主,成矿构造背景为伸展构造(朱日祥等, 2015)。

成矿流体方面,永新金矿床成矿流体以岩浆热液为主,接近于克拉通破坏型金矿。金高效沉淀方面,永新金矿床早成矿阶段的黄铁矿以立方体为主,主成矿阶段以立方体和五角十二面体为主,由黄铁矿晶形变化可知,永新金矿床金矿物沉淀的主要因素是成矿流体的温度降低,这方面与克拉通破坏型较为相近。在大地构造背景上,受古亚洲洋萎缩、闭合的影响,早石炭世至早二叠世,兴安地块和松嫩-张广才岭地块开始沿嫩江-黑河一带汇聚拼贴,嫩江-黑河一带遭受了强烈的挤压造山作用及造山后的伸展作用(张梅生等, 1998; 孙德有等, 2000);早、中侏罗世发生了大规模的剪切-走滑造山作用(汪岩等, 2013),晚侏罗世一早白垩世区域内的流纹岩与地幔柱上涌导致上覆岩石圈伸展(葛文春等, 2000)。早石炭世至早中侏罗世,永新金矿区域地质背景与造山型金矿非常接近,晚侏罗世至早白垩世又与克拉通破坏型相近。

前人研究表明,造山型金矿床金矿物以自然金为主,银金矿次之,金矿物成色普遍偏高,多为 800~900,金的粒度普遍偏小以显微-超显微为主,粗粒较少(李光琪等, 2013)。克拉通破坏型(胶东型)金矿床金矿物浅部以银金矿为主,深部以自然金为主,金矿物成色和粒径变化较大,金矿物成色低者小于 400,高者可达 800 以上(宋明春等, 2011; 李成禄等, 2011; 朴庭贤, 2014; 梁亚运等, 2015; Li *et al.*, 2015)。永新金矿床金矿物以自然金为主,银金矿较少,金矿物成色在 843~917 之间,平均 888,金矿物成色特点与造山型金矿床十分接近。

综合上述分析,认为永新金矿床在矿床成因和金矿物的沉淀机理上与克拉通破坏型(胶东型)金矿较为相近,但在金矿物成色、粒径及金矿物以自然金为主上与造山型金矿床又有很大的相似性。

6 结论

(1) 永新金矿床金-银系列矿物以自然金为主,银金矿次之,成色为 843~917,平均 888。粒径多集中在 5~20 μm ,平均 10 μm ,以细-微粒金为主。赋存状态有包体金、裂隙金和粒间金,以包体金为主,裂隙金次之,粒间金较少。

(2) 载金硫化物以黄铁矿为主,极少为方铅矿。早阶段黄铁矿以立方体为主,主成矿阶段立方体、五角十二面体均有出现;方铅矿粒径较小,以包体的形式存在于黄铁矿中或沿着黄铁矿裂隙充填。

(3) 金矿物成色与黄铁矿的 $\text{Fe}/(\text{S} + \text{As})$ 值指示永新金矿床形成于中深成中温环境。载金黄铁矿 Co/Ni 值和 $\text{Co}-\text{Ni}-\text{As}$ 三角图显示永新金矿床成矿流体以岩浆热液为主。与拉通破坏型(胶东型)和造山型金矿床比较,永新金矿床既与两者有相近之处,又有明显区别。

References

- Bralia A, Sabatini G and Troja F. 1979. Revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems-Evidences from Southern Tuscany pyritic deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 14 (3): 353~374.
- Cao Suqiao, Jia Jinsheng, Zhong Zengqiu, *et al.* 2014. Composition and sulfur isotope characteristics of auriferous pyrite from the Shilongtou gold deposit in Kaihua, western Zhejiang Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33 (5): 937~946(in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng, *et al.* 1989. Genetic Mineralogy and Prospecting of Jiaodong Gold Deposit[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Dai Wenjun, Luo Xiaogang, Shi Wenquan, *et al.* 2011. Gold mineral characteristic and occurrence state of Dashui gold deposit in Gansu[J]. *Gold*, 32 (8): 16~21(in Chinese with English abstract).
- Fan Hongrui, Feng Kai, Li Xinghui, *et al.* 2016. Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong and Korean peninsulas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (10): 3 225~3 238(in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, *et al.* 2000. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'anling[J]. *Earth Science*, 25 (2): 172~178(in Chinese with English abstract).
- Hu Haixiang, Niu Guiqiang, Liu Honglan, *et al.* 2013. The occurrence characteristics of gold in the Jiaojia Gold Deposit[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32 (6): 931~937(in Chinese with English abstract).
- Li Chenglu, Li Shengrong, Luo Junyan, *et al.* 2011. Characteristics of gold-bearing minerals in the Yixingzhai gold deposit, Fanshi County, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 38(1): 119~128(in Chinese with English abstract).
- Li Chenglu, Qu Hui, Zhao Zhonghai, *et al.* 2013. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic implications of Early Carboniferous granites in Huolongmen area, Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 40 (3): 859~868(in Chinese with English abstract).
- Li Guangqi, Li Jiemei, Wang Meijuan, *et al.* 2013. Characteristics of gold mineral in Chinese orogenic gold deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (S2): 329~329(in Chinese with English abstract).
- Li L, Li S R, Santosh M, *et al.* 2016. Dyke swarms and their role in the genesis of world-class gold deposits: insights from the Jiaodong peninsula, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 2~22.
- Li L, Santosh M and Li S R. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 589~611.
- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, *et al.* 1996. Genetic Mineralogy of Rushan Gold Ore Field, Jiaodong[M]. Beijing: Geological Publishing House, 92~97 (in Chinese).
- Li S R, Deng J, Hou Z Q, *et al.* 2001. Regional fracture and gold denudation in the Gondise tectonic zone, Tibet: Evidence of Ag/Au value[J]. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl.): 121~127.
- Li S R and Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 56 (1): 376~414.
- Li S R and Santosh M. 2017. Geodynamics of heterogeneous gold mineralization in the North China Craton and its relationship to lithospheric destruction[J]. *Gondwana Research*, 50: 267~292.
- Li S R, Santosh M, Zhang H F, *et al.* 2013. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. *Gondwana Research*, 23(1): 141~160.
- Li S R, Santosh M, Zhang H F, *et al.* 2014. Metallogeny in response to lithospheric thinning and craton destruction: Geochemistry and U-Pb zircon chronology of the Yixingzhai gold deposit, central North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 56 (1): 457~471.
- Liang Junhong, Liu Haibo, Wang Jianguo, *et al.* 2000. The meaning of the typomorphic characteristics of native gold and its fineness feature in the researches of ore deposit[J]. *Gold*, 21(12): 1~5(in Chinese with English abstract).

- Liang Yayun, Liu Xuefei, Liu Longlong, *et al.* 2015. The micro-geochemical characteristics of gold from 'altered fracture-type' gold deposit in Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (11): 3 441~3 454(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Li Zhongman and Li Dazhong. 2011. Application of pyrite standard features in prospecting: A case study of Zhaojiapuzi Gold Mine[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1): 58~60(in Chinese).
- Lu Zhenquan, Chen Xueming, Zhu Chengwei, *et al.* 2000. Mineralogical characteristics of the Sanjiazi gold deposit in Qinglong county, Hebei[J]. *Regional Geology of China*, 19 (3): 330~335(in Chinese with English abstract).
- Lü Jun, Zhao Zhidan, Cao Yaping, *et al.* 2009. Geological characteristics and genesis of the Shandaowanzi gold deposit in Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 36 (4): 853~860(in Chinese with English abstract).
- Palyanova G. 2008. Physicochemical modeling of the coupled behavior of gold and silver in hydrothermal processes: Gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implications[J]. *Chemical Geology*, 255(3~4): 399~413.
- Palyanova G A, Kokh K A and Seryotkin Y V. 2012. Formation of gold-silver sulfides and native gold in Fe-Ag-Au-S system[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 53(4): 321~329.
- Piao Tingxian. 2014. The Occurrence State of Gold and Silver Mineral and Metallogenic Mechanism from Shihu Au Deposit, Hebei Province [D]. China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Qiu Zhengjie, Fan Hongrui, Cong Peizhang, *et al.* 2015. Recent progress in the study of ore-forming processes of orogenic gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 34 (1): 21~28(in Chinese with English abstract).
- Qu Hui, Zhao Zhonghai, Li Chenglu, *et al.* 2014. Geology and genesis of the Yongxin gold deposit in Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 23(6): 520~524(in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, *et al.* 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571~594(in Chinese with English abstract).
- Shen Junfeng, Li Shengrong, Ma Guanggang, *et al.* 2013. Typomorphic characteristics of pyrite from the Linlong gold deposit: Its vertical variation and prospecting significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (3): 55~75(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Song Yingxi, Cui Shuxue, *et al.* 2011. Characteristic comparison between shallow and deep-seated gold ore bodies in Jiaojia super large gold deposit, northwestern Shandong peninsula[J]. *Mineral Deposits*, 30 (5): 923~932(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Li Huimin, *et al.* 2000. The age of A-type granite after orogenic in the northwest of Xiaoxing'anling and its relationship with the eastward extension of the Suolunshan-Hegenshan-Zhalaithe collision zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45 (20): 2 217~2 222(in Chinese).
- Wang Fengbo, Yang Yanchen, Bo Junwei, *et al.* 2016. Metallogenic characteristics and prospecting signs of Shangmachang Gold Deposit in the north part of Great Khingan Mountains[J]. *Gold*, 37(9): 10~14(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Yang Xiaoping, Na Fuchao, *et al.* 2013. Determination and geological implication of the granitic mylonite in Nenjiang-Heihe Tectonic belt[J]. *Geology and Resources*, 26 (6): 452~459(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Fu Junyu, Yang Fan, *et al.* 2015. Contraction and Extension in Nenjiang-Heihe tectonic belt: Evidence from the late Paleozoic granitoid geochemistry[J]. *Jouenal of Jilin University*, 45 (2): 374~388(in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong and Li Shengrong. 2011. Pyrite typomorphic characteristics and stable isotope studies of Liukou gold deposit in Jiaodong, China[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 31 (4): 58~66(in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, *et al.* 2012a. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19 (4): 214~226(in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Zhang Na, *et al.* 2012b. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Gold*, 33 (3): 11~16(in Chinese with English abstract).
- Yang Liya, Yang Liqiang, Yuan Wanming, *et al.* 2013. Origin and evolution of ore fluid for orogenic gold traced by D-O isotopes: A case from the Jiapigou gold belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (11): 4 025~4 035 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Maowen, Zeng Yongjie, Li Chenglu, *et al.* 2017. Quantitative and positioning study on the hydrothermal alteration and the Nenjiang-Heihe mélange zone, Heilongjiang province[J]. *Geoscience*, 31 (2): 278~289(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen and Cai Keqin. 2016. *Mineral Deposits (3rd Edition)*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 123~123(in Chinese).
- Zhang Meisheng, Peng Xiangdong and Sun Xiaomeng. 1998. The Paleozoic tectonic geographical pattern of Northeast China[J]. *Liaoning Geology*, (2): 12~17(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yujin, Zhang Chao, Wu Xinwei, *et al.* 2016. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic marine volcanic from the Zhalantun area in northern Dahinggan mountains and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90 (10): 2 706~2 720(in Chinese with English abstract).

- Zhao Linghu, Bian Qiujuan and Zhang Hankai. 2000. Genetic Mineralogy of the Gold Field in the Ural Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~103(in Chinese).
- Zhu Rixiang, Fan Hongrui, Li Jianwei, *et al.* 2015. Decratonic gold deposits[J]. Science China: Earth Sciences, 45 (8): 1 153~1 168 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹素巧, 贾锦生, 钟增球, 等. 2014. 浙西开化龙头金矿含金黄铁矿的成分标型及硫同位素特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 33 (5): 937~946.
- 陈光远, 邵 伟, 孙岱生, 等. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 代文军, 雒晓刚, 史文全, 等. 2011. 甘肃大水金矿床金的赋存状态和金矿物特征[J]. 黄金, 32(8): 16~21.
- 范宏瑞, 冯 凯, 李兴辉, 等. 2016. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用[J]. 岩石学报, 32(10): 3 225~3 238.
- 葛文春, 林 强, 孙德有, 等. 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. 地球科学, 25(2): 172~178.
- 胡海洋, 牛桂强, 刘洪澜, 等. 2013. 焦家金矿主矿区金矿石的赋存特征[J]. 岩矿测试, 32(6): 931~937.
- 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 等. 2011. 山西繁峙义兴寨金矿床金矿物特征研究[J]. 中国地质, 38(1): 119~128.
- 李成禄, 曲 晖, 赵忠海, 等. 2013. 黑龙江霍龙门地区早石炭世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 中国地质, 40(3): 859~868.
- 李光琪, 李杰美, 王美娟, 等. 2013. 中国造山型金矿床金矿物特征[J]. 矿物学报, (s2): 329~329.
- 李胜荣, 陈光远, 邵 伟, 等. 1996. 胶东乳山金矿田成因矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 92~97.
- 梁俊红, 刘海波, 王建国, 等. 2000. 自然金的标型及成色特征在金矿床研究中的意义[J]. 黄金, 21(12): 1~5.
- 梁亚运, 刘学飞, 刘龙龙, 等. 2015. 胶东蚀变岩型金矿矿物微区地球化学特征[J]. 岩石学报, 31(11): 3 441~3 454.
- 刘洪涛, 李忠满, 李大中. 2011. 黄铁矿标型特征在找矿中的应用: 以赵家堡子金矿为例[J]. 矿物学报, (s1): 58~60.
- 卢振权, 陈学明, 朱成伟, 等. 2000. 河北青龙三家子金矿矿物学特征[J]. 中国区域地质, 19(3): 330~335.
- 吕 军, 赵志丹, 曹亚平, 等. 2009. 黑龙江三道湾子金矿床地质特征及成因探讨[J]. 中国地质, 36(4): 853~860.
- 朴庭贤. 2014. 河北石湖金矿金、银矿物的赋存状态及成矿机理[D]. 中国地质大学(北京).
- 邱正杰, 范宏瑞, 丛培章, 等. 2015. 造山型金矿床成矿过程研究进展[J]. 矿床地质, 34(1): 21~38.
- 曲 晖, 赵忠海, 李成禄, 等. 2014. 黑龙江永新金矿地质特征及成因[J]. 地质与资源, 23(6): 520~524.
- 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. 岩石学报, 28(2): 571~594.
- 申俊峰, 李胜荣, 马广钢, 等. 2013. 玲珑金矿黄铁矿标型特征及其大纵深变化规律与找矿意义[J]. 地学前缘, 20(3): 55~75.
- 宋明春, 宋英昕, 崔书学, 等. 2011. 胶东焦家特大型金矿床深、浅部矿体特征对比[J]. 矿床地质, 30(5): 923~932.
- 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 2000. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. 科学通报, 45(20): 2 217~2 222.
- 王凤博, 杨言辰, 薄军委, 等. 2016. 大兴安岭北段上马场金矿床成矿特征及找矿标志[J]. 黄金, 37(9): 10~14.
- 汪 岩, 付俊霞, 杨 帆, 等. 2015. 嫩江-黑河构造带收缩与伸展——源自晚古生代花岗岩类的地球化学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(2): 374~388.
- 汪 岩, 杨晓平, 那福超, 等. 2013. 嫩江-黑河构造带中花岗质糜棱岩的确定及地质意义[J]. 地质与资源, 22(6): 452~459.
- 严育通, 李胜荣. 2011. 胶东流口金矿黄铁矿成因矿物学及稳定同位素研究[J]. 矿物岩石, 31(4): 58~66.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 2012a. 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, 19(4): 214~226.
- 严育通, 李胜荣, 张 娜, 等. 2012a. 不同成因类型金矿床成矿期黄铁矿成分成因标型特征[J]. 黄金, 33(3): 11~16.
- 杨利亚, 杨立强, 袁万明, 等. 2013. 造山型金矿成矿流体来源与演化的氢-氧同位素示踪: 夹皮沟金矿带例析[J]. 岩石学报, 29 (11): 4 025~4 035.
- 袁茂文, 曾勇杰, 李成禄, 等. 2017. 黑龙江省嫩江-黑河构造混杂岩区永新金矿热液蚀变与矿化关系定量及定位研究[J]. 现代地质, 31(2): 278~289.
- 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 2011. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 123~123.
- 张梅生, 彭向东, 孙晓猛. 1998. 中国东北区古生代构造古地理格局[J]. 辽宁地质, (2): 12~17.
- 张渝金, 张 超, 吴新伟, 等. 2016. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代海相火山岩年代学和地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 90(10): 2 706~2 720.
- 赵令湖, 边秋娟, 张汉凯. 2000. 乌拉山脉金矿田成因矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~103.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等. 2015. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1 153~1 168.