

刘晓通,毛光周,王向军,等. 山东沂沭断裂带中段南小尧金矿元素地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(1): 76-90.

LIU Xiao-tong, MAO Guang-zhou, WANG Xiang-jun, et al. Elemental Geochemistry Characteristics and Their Geological Significance of Nanxiaoyao Gold Deposit in the Middle of Yishu Fault Zone, Shandong, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(1): 76-90.

山东沂沭断裂带中段南小尧金矿 元素地球化学特征及其地质意义

刘晓通^{1,2}, 毛光周^{1,2*}, 王向军³, 安鹏瑞¹, 孟令强¹, 宋立国¹, 何铁良¹

(1. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东省地质科学研究院
国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室/山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室,
山东 济南 250013; 3. 兖州煤业有限公司兴隆庄煤矿, 山东 济宁 272100)

摘要:南小尧金矿位于山东沂沭断裂带中段,发育蚀变岩型和石英脉型金矿体。通过对南小尧金矿3种矿石(黄铁绢英岩化绿片岩、黄铁矿化绿泥石化糜棱岩和石英-硫化物脉)及黄铁矿主、微量元素特征分析,探讨其成矿物质与成矿流体特征、构造条件和成矿机制。结果表明:3种矿石整体富集Co、Ni,稀土元素总含量较低,成矿流体来源于深部,Eu异常为弱的负异常向正异常过渡,流体的性质可能发生变化;黄铁矿Au与Ag质量分数之比低于0.5且贫As,成矿流体的温度较高;3种矿石的形成可能与火山活动有关,其中黄铁绢英岩化绿片岩和石英-硫化物脉的形成与火山、次火山热液有关,火山热液可能来自于燕山期的火山活动;矿石原岩可能为沉积岩和偏碱性的中—基性岩浆岩,矿石的成矿物质可能来源于深部地幔。综上所述,南小尧金矿的成矿物质与成矿流体均来自于深部,由于火山-岩浆活动而向上涌入,随着大气降水的注入,成矿环境由弱还原向弱氧化转变,这种转变加速了Au的沉淀,使Au在不同的构造位置富集成矿,形成不同类型的金矿。

关键词:地球化学;金矿;成矿物质;成矿流体;微量元素;硫同位素;原位分析;沂沭断裂带

中图分类号:P595;P611.3⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2018)01-0076-15

Elemental Geochemistry Characteristics and Their Geological Significance of Nanxiaoyao Gold Deposit in the Middle of Yishu Fault Zone, Shandong, China

LIU Xiao-tong^{1,2}, MAO Guang-zhou^{1,2*}, WANG Xiang-jun³, AN Peng-rui¹,
MENG Ling-qiang¹, SONG Li-guo¹, HE Tie-liang¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization and Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization Subordinated to Ministry of Land and Resources/Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resources Utilization in Shandong Province, Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, Shandong, China; 3. Xinglongzhuang Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Jining 272100, Shandong, China)

收稿日期:2017-10-17;修回日期:2017-12-07 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41572063,41772125);

国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室/山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室开放项目(2013003);
山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室开放项目(DMSM201403)

作者简介:刘晓通(1992-),男,山东威海人,山东科技大学理学硕士研究生, E-mail: skdliuxiaotong@126.com。

* 通讯作者:毛光周(1978-),男,甘肃甘谷人,山东科技大学副教授,工学博士, E-mail: gzmaonjunwu@163.com。

Abstract: Nanxiaoyao gold deposit, is located in the middle of Yishu fault zone, Shandon, develops the altered type and quartz vein type ores. According to the characteristics of major and trace elements of three types of ores (including greenschist with beresitization, mylonite with pyritization and chloritization, and quartz-sulfide vein) and pyrites in Nanxiaoyao gold deposit, the characteristics of metallogenic materials and fluids, tectonic settings and metallogenic mechanism were discussed. The results show that the three types of ores are enriched in Co and Ni, and depleted in REE, indicating that their metallogenic fluids may be all from the deep, and the Eu varies from slightly negative anomaly to positive anomaly, showing that the characteristics of metallogenic fluids may be changed; the ratio of mass fraction of Au to Ag of pyrite is less than 0.5, and As is poor, indicating that the temperature of fluid is high; the formation of all ores may be related to volcanism, and the metallogenic fluid of greenschist with beresitization, and quartz-sulfide vein could be from volcanic and subvolcanic activities in Yanshanian; the protoliths of ores may be sedimentary rocks and alkaline intermediate-basic magmatic rocks, and the metallogenic materials of ores may be derived from deep mantle. In conclusion, the metallogenic materials and fluids in Nanxiaoyao gold deposit are all derived from deep; because of the upward with the volcanic-magma activity, the metallogenic environment changes from weak reduction to weak oxidation by blend of meteoric water, enhancing the Au precipitation and forming the distinct gold deposits in different tectonic settings.

Key words: geochemistry; gold deposit; metallogenic material; metallogenic fluid; trace element; sulphur isotope; in-situ analysis; Yishu fault zone

0 引 言

沂沭断裂带不仅是划分鲁东、鲁西两个地质构造单元的区域性断裂,也是山东境内规模最大的控矿导矿构造^[1-2]。在断裂带两侧,金属矿床分布广泛,以金矿床尤为明显,形成了胶东和鲁西两个金矿化区^[1,3-6],其中胶东地区是中国最重要的金矿集中区,黄金资源储量占全国的 1/3 以上,鲁西地区的金矿虽然不如胶东地区分布广泛,但也有平邑归来庄特大型金矿存在^[4,7-8]。而在沂沭断裂带中段仅发现了龙泉站、牛家小河、南小尧等小型金矿^[7-9],但随着勘探程度的不断加深,该地区也具有较好的金矿勘查和研究价值^[10]。前人研究认为,沂沭断裂带金矿成矿作用受多重因素的影响,富含金质的基底矿源层、晋宁期韧性剪切作用以及燕山期大规模火山-岩浆活动是区内金成矿的主导因素^[11-12]。目前,对沂沭断裂带中段金矿成矿物质来源有以下几种认识:①成矿物质来源于深部岩浆^[11-13],在中生代构造伸展背景下,软流圈不断上涌不仅为金成矿带来了热量,也携带成矿物质沿断裂向上侵入^[11-12];②成矿物质来源于变质基底岩系^[14-16],沂沭断裂带变质基底岩系中 Au 丰度较高,变异系数大,可能是区内金成矿的母岩^[11],但不同矿床矿源层存在一定的差别,

龙泉站金矿的成矿物质主要来自于沂水岩群和泰山岩群^[14],牛家小河金矿的成矿物质来源于沂水岩群^[15-16]。对成矿流体的研究也存在不同的认识:①成矿流体主要为壳源流体,后期有大气水的参与^[12,14];②成矿热液来源于深部,以岩浆热液为主,与中生代岩浆活动关系密切^[17-18],成矿过程受大气水影响^[11];③变质热液参与了金矿化过程^[15-16],变质热液与早寒武纪变质沉积作用有关^[19]。对矿床类型的划分主要有以下 3 种观点:①蚀变岩型金矿^[11,20];②绿岩带型金矿^[17];③前寒武纪热液石英脉型金矿^[19-20]。整体而言,与胶东及鲁西金矿相比,沂沭断裂带内金矿的研究程度较低,对成矿物质与成矿流体来源等认识较为薄弱、观点不一,成矿规律的研究也不够系统,这可能是制约本区金矿找矿突破的原因之一。南小尧金矿位于山东省沂水县城以东的汞丹山隆起区^[11],矿石类型丰富,是研究沂沭断裂带中段金矿成矿作用较为理想的选择。

在不同成矿环境中,元素的存在形式与演化规律也存在着差异^[2,21],因此,利用与成矿作用相关的元素组合和同位素特征可以有效示踪成矿物质与成矿流体的来源,以此来揭示矿床成因^[2-4,21-22]。在矿床学研究中,主、微量元素特征是划分矿床类型、恢复原岩类型、判别成矿条件等的基本参数^[23-25];同位

素地球化学研究则是获取成矿物质与成矿流体特征、确定成矿时代的重要方法与手段^[22,24-26]。近年来,LA-ICP-MS 原位微区分析技术由于分析速度快、操作方便、分析精度高等优点,在矿床成因研究中得到了广泛应用^[27-30],为矿床研究的精确化提供了一种非常重要的方法。本文以沂沭断裂带中段南小尧金矿的矿石以及黄铁矿和方铅矿为研究对象,分析矿石主、微量元素特征,硫化物原位微量元素和硫同位素特征,探讨南小尧金矿的成矿作用,为沂沭断裂带中段金矿成矿机制的深入研究提供依据和基础,并为该地区金矿勘探及深部预测工作提供理论支撑。

1 区域地质概况

1.1 区域成矿背景

沂沭断裂带是郯庐断裂带的山东段,由 4 条近平行的主干断裂(昌邑—大店、安丘—莒县、沂水—汤头、郯鄯—葛沟)组成,具有“两堑夹一垒”的构造样式^[7,31-32]。南小尧金矿位于沂沭断裂带中段汞丹山隆起区之上,处于沂水—汤头断裂东侧,位于山东省沂水县城东 7 km 处^[11,17](图 1)。

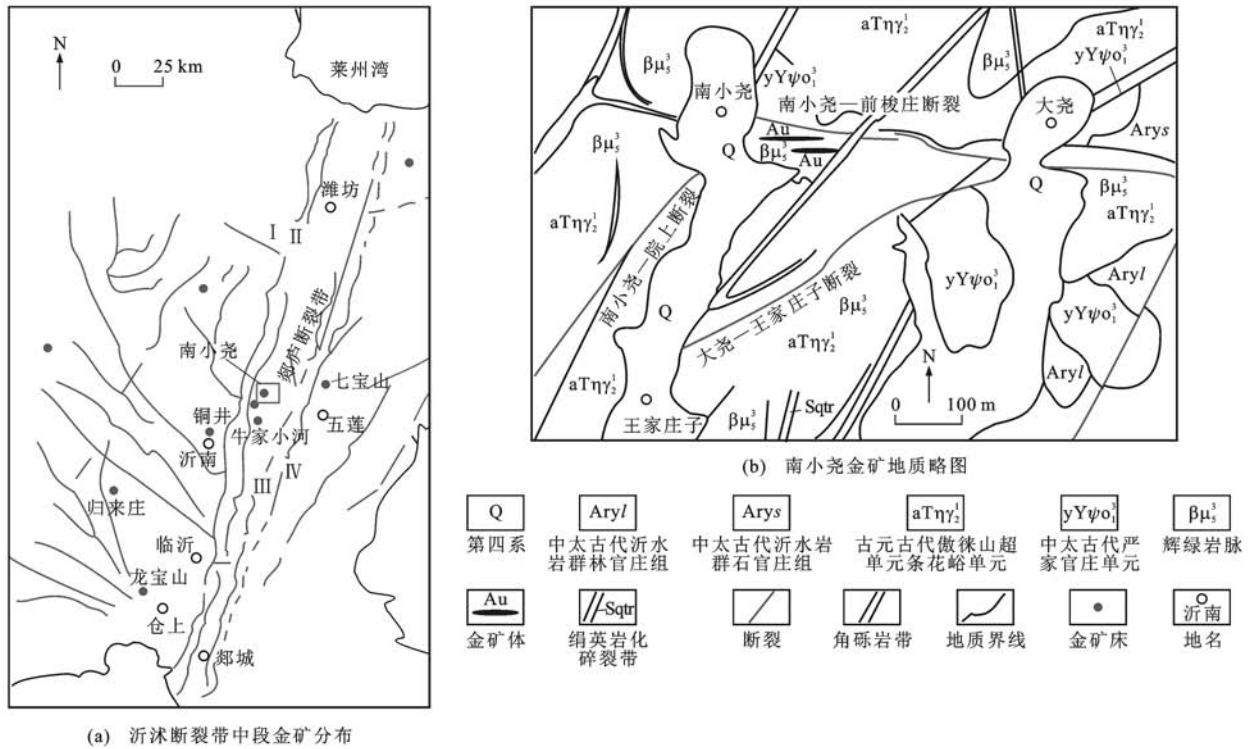
南小尧金矿中太古代沂水岩群和新太古代泰山岩群呈大小不等的包体出露于变质变形侵入岩中。区内岩浆岩分布广泛,主要发育有太古宙及古元古

代花岗岩,这些花岗岩呈多期多次侵入特点,总体上表现为片麻岩-花岗岩穹窿,中生代岩体规模小而零星,其脉岩较发育^[11]。

构造特征显示脆性断裂较为发育(图 1)。其主要断裂有:①南小尧—前梭庄断裂,走向近 EW 向,倾向南,倾角 56°~70°,断裂带内赋存金矿体,为主要的控矿导矿构造^[11,31];②大尧—王家庄子断裂,走向近 NE 向,倾向 125°~140°,倾角 56°~75°,在山东省沂水县大尧村西南及水库溢洪道至王家庄子地段具有金矿化现象^[11];③南小尧—院上断裂,走向为 NNE 向,倾向 NW,倾角 60°~70°,切穿南小尧—前梭庄断裂,其力学性质为张扭性^[11]。

1.2 矿床地质特征

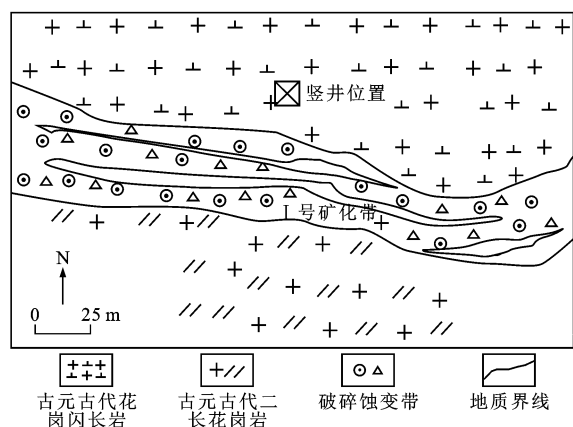
南小尧金矿床位于南小尧—前梭庄断裂的西段,产于基底变质变形花岗岩中,由两条近 EW 向的矿化带组成,I 号矿化带位于矿床北部,II 号矿化带位于南部,两者相距 55 m^[18]。I 号矿化带为含金绿泥石化糜棱岩带,呈 96°~276°展布,倾向 SSW,倾角浅部较陡,向下则渐缓,受南小尧—前梭庄断裂严格控制,赋存 3 层较大矿体^[11](图 2)。II 号矿化带为含金黄铁矿化、硅化碎裂片麻岩带,其走向与 I 号矿化带近平行,倾向南,倾角陡立,可达 85°;该矿化带赋存两层矿体,其中上层矿体脉幅极



I 为郯鄯—葛沟断裂;II 为沂水—汤头断裂;III 为安丘—莒县断裂;IV 为昌邑—大店断裂;图(a)引自文献[12];图(b)引自文献[31]

图 1 山东沂沭断裂带中段构造位置

Fig. 1 Structural Map of the Middle of Yishu Fault Zone, Shandong



图件引自文献[18]

图2 南小尧金矿+30 m中段平面图

Fig. 2 Geological Map at +30 m Level in Nanxiaoyao Gold Deposit

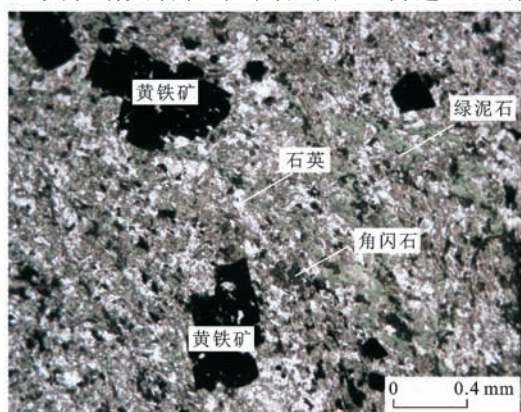
窄,不足0.2 m, Au品位虽较高,但无法工业开采^[18]。

通过野外实地考察及对矿石样品观察发现,区内共有3种矿石建造,分别为黄铁绢英岩化绿片岩、黄铁矿化绿泥石化糜棱岩和石英-硫化物脉。

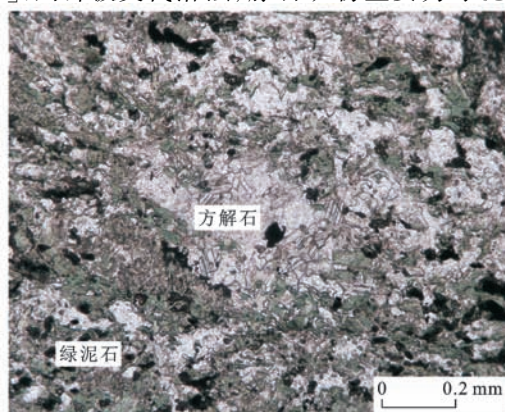
(1)黄铁绢英岩化绿片岩的矿石构造主要有块

状构造、浸染状构造。由于经历了不同的变质作用,矿物自形程度低,具有溶蚀结构、交代残余结构等。蚀变矿物以绿泥石为主,局部有绢云母化、硅化、碳酸盐化[图3(a)、(b)];矿石矿物以黄铁矿为主,呈半自形—他形,粒径较大(200~510 μm),晶形以立方体为主,溶蚀结构发育[图3(a)、(c)、(d)],局部可见脉状黄铜矿[图3(d)],闪锌矿呈他形分布在黄铁矿内部或裂隙间[图3(c)];脉石矿物以绿泥石为主,斜长石、石英次之,局部可见绢云母、残留的角闪石[图3(a)]以及碳酸盐。

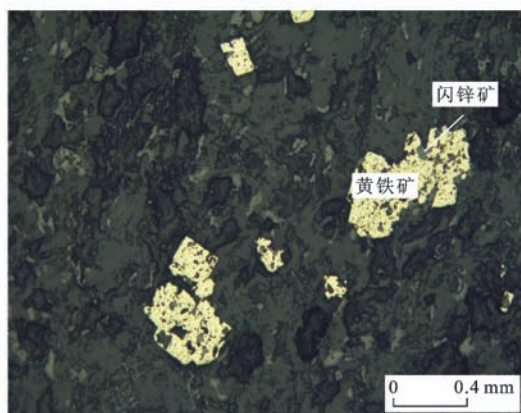
(2)黄铁矿化绿泥石化糜棱岩是区内主要的矿石类型,矿石的主要构造有块状构造、细脉浸染状构造、眼球状构造等。矿石自形程度较低,具有溶蚀结构、交代结构等。不同矿物的排列具有一定的定向性[图4(a)、(b)],可见石英“眼球体”,绿泥石化、碳酸盐化显著[图4(a)、(c)];矿石矿物以黄铁矿为主,黄铁矿自形程度较高,晶形以立方体为主,五角十二面体晶形较少,矿物颗粒粒径主要集中在100~400 μm 之间,呈浸染状、星点状、细脉状分布[图4(b)、(d)],局部被交代溶蚀;脉石矿物主要为绿泥石、石



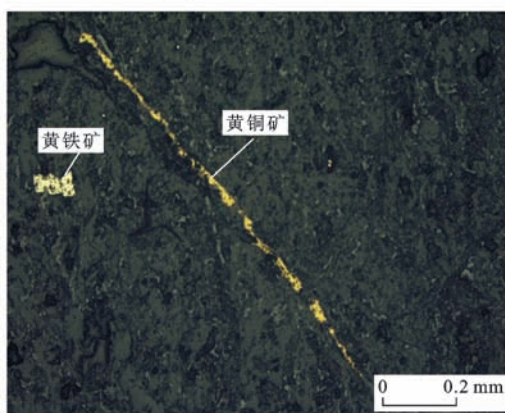
(a) 矿石矿物组合



(b) 矿石中的方解石



(c) 矿石中的黄铁矿与闪锌矿



(d) 矿石中的脉状黄铜矿

图3 黄铁绢英岩化绿片岩镜下照片

Fig. 3 Micrographic Photos of Greenschist with Beresitization

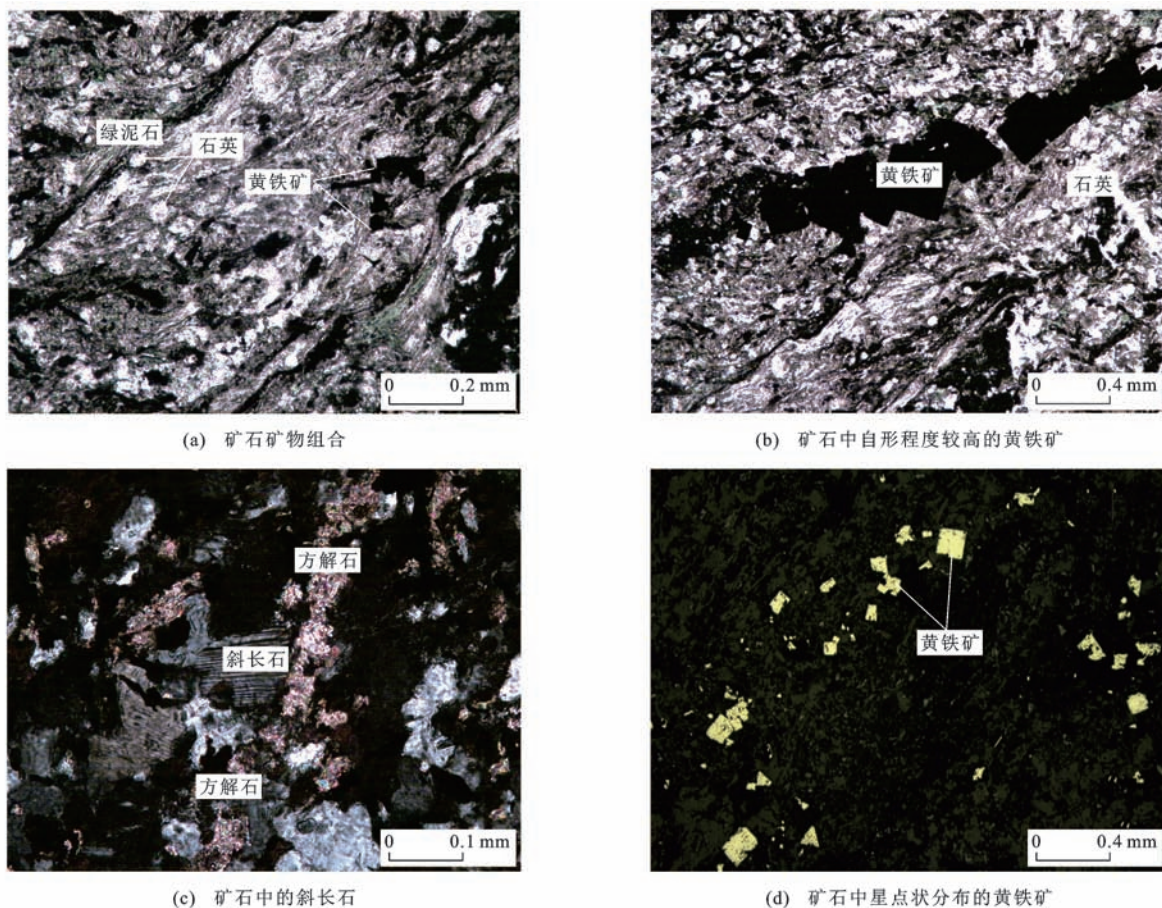


图 4 黄铁矿化绿泥石化糜棱岩镜下照片

Fig. 4 Micrographic Photos of Mylonite with Pyritization and Chloritization

英、方解石,并含有少量斜长石,碳酸盐脉体呈细脉状或网格状切穿矿石[图 4(a)、(c)]。

(3)石英-硫化物脉的矿石主要为脉状构造,硅化、碳酸盐化明显;矿石中石英以微细粒—细粒他形结构为主;矿石矿物为黄铁矿、方铅矿,黄铁矿颗粒较小($50\sim 260\ \mu\text{m}$),自形程度较高,可见溶蚀结构[图 5(a)、(b)],方铅矿有明显的黑三角孔,呈他形

[图 5(b)];脉石矿物主要为石英、碳酸盐[图 5(a)]。

根据脉体之间的穿插关系、矿石构造以及矿物组合特征,南小尧金矿可划分为 4 个阶段:石英-黄铁矿-绿泥石化阶段、多金属硫化物-绢云母化-绿泥石化阶段、石英-多金属硫化物阶段、碳酸盐化阶段(表 1)。该金矿矿石中碎裂或溶蚀的黄铁矿是主要的载金矿物^[11]。

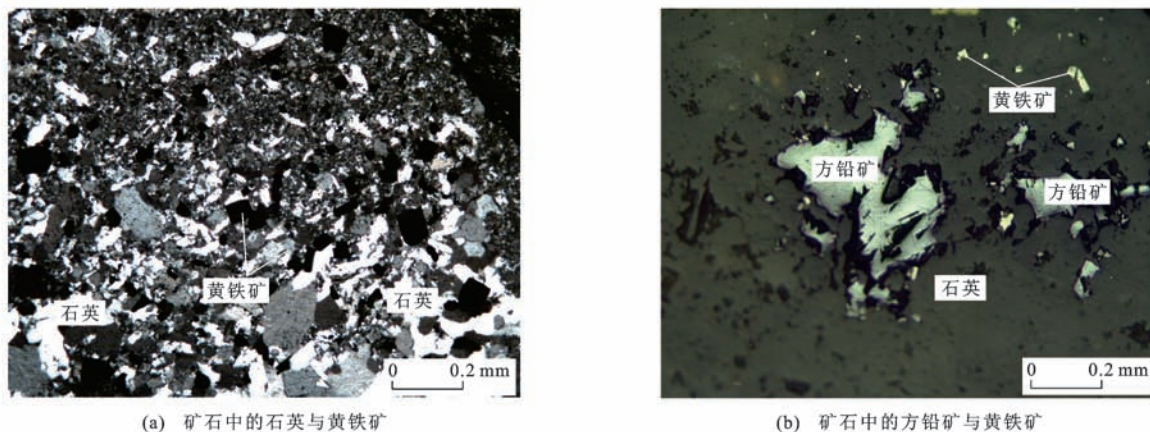


图 5 石英-硫化物脉镜下照片

Fig. 5 Micrographic Photos of Quartz-sulfide Vein

表 1 矿化阶段与矿化特征

Tab. 1 Mineralization Stages and Their Characteristics

矿化阶段	矿化特征
石英-黄铁矿-绿泥石化阶段	主要矿物组合为黄铁矿+石英+绿泥石,黄铁矿自形程度较高,颗粒较小[图 4(a)、(b)],以立方体晶形为主,五角十二面体晶形较少,呈浸染状、星点状、细脉状分布,局部被交代溶蚀[图 4(b)、(d)]
多金属硫化物-绢云母化-绿泥石化阶段	主要生成的矿物为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、石英、绢云母、绿泥石等,黄铁矿颗粒较大,以立方体晶形为主,多数具溶蚀结构,具浸染状构造(图 3)
石英-多金属硫化物阶段	主要矿物组合为黄铁矿+方铅矿+石英,呈脉状构造,黄铁矿颗粒较小,自形程度较高,部分具有溶蚀结构,方铅矿呈他形(图 5)
碳酸盐化阶段	方解石以脉状或网脉状构造充填于矿石中[图 3(a)、图 4(c)]

表 2 矿石主量元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Major Elements of Ores

岩性	黄铁绢英岩化绿片岩	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩								石英-硫化物脉
样品编号	NX Y-1	NX Y-2	NX Y-3	NX Y-5	NX Y-6	NX Y-7	NX Y-8	NX Y-9	NX Y-10	NX Y-4
w(SiO ₂)/%	26.44	44.66	48.37	47.58	46.63	47.00	52.17	42.45	48.90	76.68
w(TiO ₂)/%	2.44	4.34	3.82	3.49	3.86	4.62	2.95	4.26	4.35	0.37
w(Al ₂ O ₃)/%	9.22	13.73	12.24	11.33	13.21	13.34	9.53	12.83	12.13	5.24
w(TFe ₂ O ₃)/%	9.98	15.18	11.65	11.82	12.76	13.78	10.39	13.78	14.64	6.01
w(MnO)/%	0.29	0.21	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.09	0.04
w(MgO)/%	3.40	4.85	3.90	3.99	5.25	4.66	3.69	5.62	4.15	0.37
w(CaO)/%	23.98	7.63	7.31	6.78	5.07	5.11	8.06	7.72	3.05	2.89
w(Na ₂ O)/%	2.05	2.97	3.08	2.26	2.57	3.19	2.56	3.02	2.81	2.06
w(K ₂ O)/%	0.98	0.25	1.11	2.27	2.04	1.24	0.66	0.53	1.89	0.98
w(P ₂ O ₅)/%	0.35	0.51	0.47	0.38	0.41	0.51	0.31	0.43	0.45	0.06
烧失量/%	18.80	5.09	6.08	7.02	6.20	5.11	7.71	6.97	6.19	3.97
w _{total} /%	97.93	99.42	98.15	97.04	98.12	98.68	98.16	97.75	98.65	98.67

注:w(·)为元素或化合物含量;w_{total}为主量元素总含量。

黄铁矿主、微量元素原位分析在中国科学院地球化学研究所完成。所用仪器为 LA-ICP-MS,其中激光剥蚀系统为 GeolasPro,剥蚀孔径分别为 23、33 μm,脉冲频率为 10 Hz,等离子体质谱仪为 Agilent 7700X。仪器具体操作方法详见文献[34],分析结果见表 4。

黄铁矿硫同位素原位分析测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。所用仪器为 LA-ICP-MS,其中激光剥蚀系统为 Geolas2005,剥蚀孔径为 33 μm,脉冲频率为 8 Hz,等离子体质谱仪为 Agilent 7500a,标样为 WS-1 和

2 样品采集与分析方法

样品主要采于沂沭断裂带中段南小尧金矿矿坑,共计 10 件,分别为黄铁绢英岩化绿片岩(简称“绿片岩矿石”)(样品 NX Y-1)、黄铁矿化绿泥石化糜棱岩(简称“糜棱岩矿石”)(样品 NX Y-2、NX Y-3、NX Y-5~NX Y-10)和石英-硫化物脉(简称“石英-硫化物矿石”)(样品 NX Y-4),分别对应前 3 个成矿阶段。

10 件矿石样品的主、微量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素分析采用 XRF 法在 RIX2100 XRF 仪上完成,精度优于 5%,微量元素分析在 ELAN6100DRC ICP-MS 上完成。用标样 BHVO-1、AGV-I 和 G-2 做分析样品元素含量的校正标准,工作流程及仪器操作方法详见文献[33]。矿石主量元素与微量元素分析结果分别见表 2、3。

WS-2。工作流程及仪器操作方法详见文献[35],分析结果见表 5。

3 元素地球化学特征

3.1 矿石主量元素特征

所有样品的 SiO₂ 含量(质量分数,下同)为 26.44%~74.68%。绿片岩矿石 SiO₂ 含量最低,为 26.44%;糜棱岩矿石 SiO₂ 含量为 42.45%~52.17%,平均值为 47.22%;石英-硫化物矿石 SiO₂ 含量最高,为 76.68%,这与其岩性关系密切。剔除 SiO₂ 含量小于 43%的样品^[36],多数矿石样品的里特

表 3 矿石微量元素分析结果

Tab. 3 Analysis Results of Trace Elements of Ores

岩性	黄铁绢英岩化绿片岩	黄铁矿化绿泥石化糜棱岩								石英-硫化物脉
样品编号	NXY-1	NXY-2	NXY-3	NXY-5	NXY-6	NXY-7	NXY-8	NXY-9	NXY-10	NXY-4
$w(\text{Li})/10^{-6}$	17.17	22.08	20.98	25.90	34.39	30.06	22.26	28.79	25.28	16.43
$w(\text{Be})/10^{-6}$	0.93	1.72	1.48	0.97	1.24	1.52	1.17	1.52	1.01	0.37
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	16.68	28.03	22.05	24.05	26.00	30.88	20.55	28.51	28.83	4.48
$w(\text{V})/10^{-6}$	258.37	434.82	340.22	316.45	413.12	396.70	309.71	427.19	302.85	24.91
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	35.12	66.32	48.61	64.46	67.41	82.57	60.91	76.29	86.96	20.60
$w(\text{Co})/10^{-6}$	28.19	38.98	31.34	37.92	37.62	40.65	30.16	39.60	42.48	7.28
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	42.01	65.53	55.00	67.13	68.45	74.70	58.27	75.37	80.86	22.42
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	18.90	50.90	10.74	17.06	28.92	119.02	8.51	45.81	23.53	3.51
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	80.61	99.29	120.34	139.17	187.59	136.58	105.39	171.46	149.39	13.61
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	18.00	29.81	23.59	19.68	26.06	25.45	20.23	27.02	20.48	4.19
$w(\text{Ge})/10^{-6}$	1.21	1.55	1.29	1.12	1.28	1.41	1.42	1.36	0.91	0.68
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	27.89	7.60	33.06	59.63	61.40	36.59	17.56	14.52	51.82	25.70
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	644.48	387.22	181.74	177.05	158.06	165.22	249.04	201.53	135.29	153.14
$w(\text{Y})/10^{-6}$	26.62	41.72	40.47	33.04	34.81	43.86	29.68	37.87	25.02	8.97
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	179.78	290.78	255.05	212.67	234.03	294.75	177.32	259.79	246.13	48.75
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	20.54	33.28	31.95	24.71	26.79	33.29	20.58	29.51	29.39	2.90
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	0.07	0.32	0.18	0.16	0.27	0.20	0.07	0.28	0.16	0.06
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	192.85	99.01	304.30	450.03	373.52	313.60	128.41	173.45	408.00	294.81
$w(\text{La})/10^{-6}$	19.59	35.66	26.86	25.29	28.11	34.40	23.24	29.63	29.49	9.28
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	45.52	82.70	64.49	57.12	65.23	79.09	52.89	69.28	64.68	20.40
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	6.07	11.38	8.53	7.38	8.43	10.86	6.81	8.97	8.50	2.46
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	28.07	47.98	38.08	32.65	37.47	45.95	29.99	39.38	38.47	10.45
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	6.68	11.19	9.10	7.65	8.87	11.39	7.13	9.50	8.35	2.39
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	3.40	3.47	2.71	2.40	2.69	3.70	2.74	2.97	2.27	1.20
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	6.16	9.96	8.24	7.05	8.09	10.32	6.77	8.55	6.99	2.07
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.90	1.50	1.33	1.15	1.27	1.55	1.02	1.35	0.95	0.28
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	5.08	8.42	7.94	6.76	7.35	8.86	5.72	7.81	5.21	1.53
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.95	1.56	1.54	1.26	1.34	1.66	1.04	1.45	0.97	0.28
$w(\text{Er})/10^{-6}$	2.40	3.93	4.09	3.17	3.32	4.18	2.56	3.68	2.52	0.70
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.32	0.52	0.58	0.42	0.43	0.56	0.34	0.49	0.34	0.09
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	1.92	3.11	3.62	2.45	2.50	3.32	2.00	2.86	2.06	0.57
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.28	0.43	0.52	0.34	0.35	0.47	0.28	0.40	0.30	0.08
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	4.30	7.11	6.25	5.23	5.82	7.38	4.39	6.39	6.20	1.19
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	1.29	2.13	1.90	1.59	1.76	2.18	1.31	1.90	1.91	0.17
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	6.93	10.16	8.76	24.78	38.61	71.69	11.86	51.88	55.12	1 412.13
$w(\text{Th})/10^{-6}$	2.03	3.31	2.88	2.31	2.65	3.34	1.95	2.89	2.83	2.07
$w(\text{U})/10^{-6}$	0.74	0.87	2.32	2.68	13.42	1.00	0.79	0.80	1.02	1.39
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	127.33	221.81	177.65	155.10	175.44	216.30	142.52	186.31	171.11	51.77
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	109.32	192.39	149.78	132.51	150.80	185.39	122.79	159.72	151.77	46.18
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	18.01	29.43	27.86	22.60	24.65	30.92	19.72	26.59	19.34	5.59
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	6.07	6.54	5.38	5.86	6.12	6.00	6.23	6.01	7.85	8.26
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	7.32	8.22	5.32	7.42	8.08	7.43	8.35	7.42	10.26	11.77
Eu 异常	1.59	0.98	0.94	0.98	0.95	1.02	1.19	0.99	0.88	1.61
Ce 异常	1.02	1.00	1.04	1.01	1.03	1.00	1.02	1.03	0.99	1.03

注: w_{REE} 为稀土元素总含量; w_{LREE} 为轻稀土元素含量; w_{HREE} 为重稀土元素含量; $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值。

表 4 不同矿石的黄铁矿主、微量元素分析结果

Tab. 4 Analysis Results of Major and Trace Elements of Pyrites from Different Ores

矿石类型	糜棱岩矿石		绿片岩矿石		石英-硫化物矿石	
编号	1	2	1	2	1	2
$w(\text{Fe})/\%$	37.741	44.386	45.241	37.741	45.054	44.734
$w(\text{S})/\%$	46.317	55.497	55.497	46.317	53.802	55.079
$w(\text{As})/10^{-6}$	5.043	15.686	2.226	5.043	0.666	—
$w(\text{Co})/10^{-6}$	101.590	586.081	14.330	101.589	0.532	106.417
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	53.671	160.795	10.695	53.671	2.508	251.768
$w(\text{Au})/10^{-6}$	0.154	2.371	0.035	0.154	0.015	0.094
$w(\text{Ag})/10^{-6}$	0.015	0.200	0.549	2.371	0.181	0.203
$N(\text{S})/N(\text{Fe})$	2.210	2.190	2.105	2.148	2.090	2.155
$w(\text{Co})/w(\text{Ni})$	1.792	3.640	1.340	1.893	0.212	0.423
$w(\text{Au})/w(\text{Ag})$	0.097	0.844	0.063	0.065	0.081	0.463
$w(\text{Fe})/(w(\text{S})+w(\text{As}))$	0.735	0.725	0.831	0.815	0.827	0.812

注: $N(\cdot)$ 为元素的原子丰度;“—”表示低于检测限。

表 5 不同矿石的黄铁矿硫同位素分析结果

Tab. 5 Analysis Results of Sulfur Isotope of Pyrites from Different Ores

矿石类型	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}$ 值/ $\%$
糜棱岩矿石	黄铁矿	-0.9
		1.8
		1.7
石英-硫化物矿石	方铅矿	-1.7
		-1.8
	黄铁矿	0.4
		1.0
绿片岩矿石	黄铁矿	1.4
		1.5

曼指数高于 3.3(图 6),属碱性岩,有利于 Au 的富集^[37-38]。糜棱岩矿石与绿片岩矿石相比,除 CaO、SiO₂ 之外,其他主量元素含量差异不大,K₂O、Na₂O 含量均较低,而 MgO、TFe₂O₃ 等含量均较高,这可能与糜棱岩矿石中绿泥石含量较高有关;而绿片岩矿石 CaO 含量明显高于其他样品,这与矿石被多条方解石脉切穿有关;石英-硫化物矿石与糜棱岩矿石相比,除 SiO₂ 外,其他元素的含量均较低。

3.2 矿石微量、稀土元素特征

南小尧金矿矿石成矿元素(Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb)富集程度见图 7。糜棱岩矿石 Cr、Co、Ni、Zn 元素均相对富集,而 Cu、Pb 元素富集程度差异较大;绿片岩矿石(样品 NXY-1)成矿元素相对富集较弱,Cu、Pb 元素相对贫化;石英-硫化物矿石(样品 NXY-4)除 Pb 富集程度高以外,其他成矿元素相对

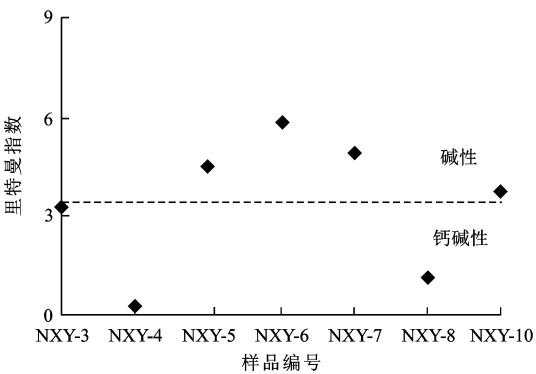


图 6 矿石里特曼指数分布

Fig. 6 Distribution of Rittmann Indexes of Ores

贫化,Pb 异常富集可能是由方铅矿所致。

南小尧金矿矿石大陆上地壳标准化不相容元素蛛网图(图 8)显示,3 种矿石的蛛网图存在差异。相比于大陆上地壳,绿片岩矿石富集 Sr、Nb,亏损高场强元素 Th、Hf、Ta;糜棱岩矿石整体上富集 Nb、Ce、Sm、Tb,亏损 Sr、Hf、Th;石英-硫化物矿石则富集 Sm、Tb,亏损高场强元素 Zr、Ta。矿石的 Zr、Hf、Ta 元素亏损越强烈,表明成岩时碱性越小^[39-40],这与主量元素分析结果一致,也说明成矿流体具有一定的氧化性^[40]。

南小尧金矿矿石球粒陨石标准化稀土元素配分模式(图 9)显示,3 种矿石轻稀土元素较为富集,配分模式为平缓右倾型。糜棱岩矿石稀土元素总含量为 $(142.52\sim 221.81)\times 10^{-6}$,平均值为 189.99×10^{-6} ,轻、重稀土元素含量之比($w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$)为 5.38~7.85,平均值为 6.24,轻、重稀土元素之间分馏较弱, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}、w(\text{Gb})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值

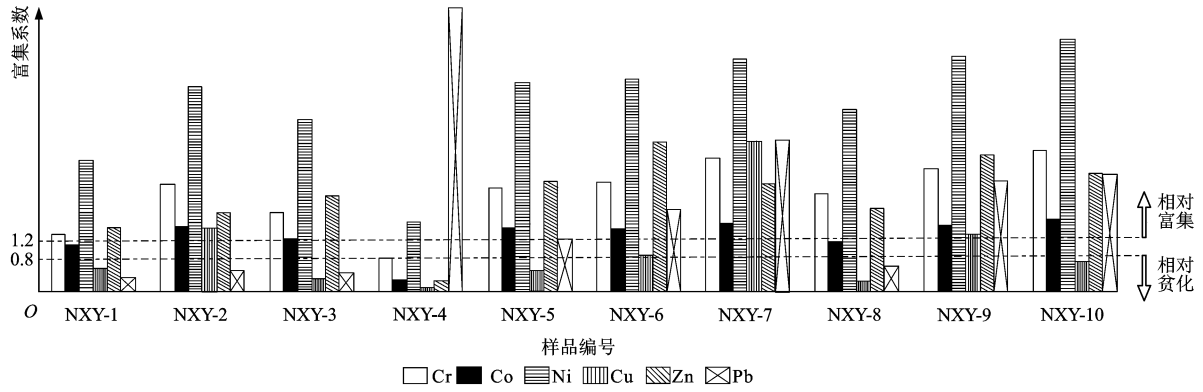
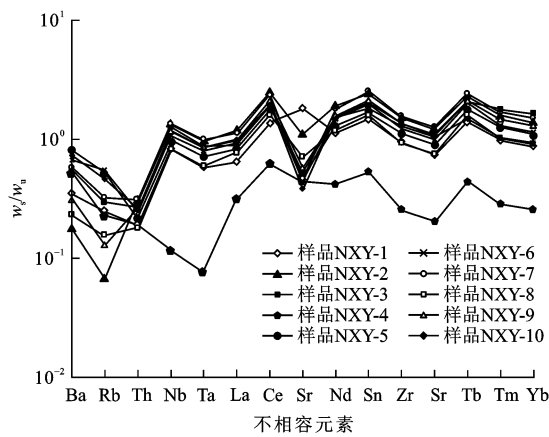


图 7 矿石成矿元素富集系数柱状图

Fig. 7 Histogram of Enrichment Factors of Ore Mineralization Elements



w_s 为样品含量; w_u 为大陆上地壳含量; 大陆上地壳含量引自文献[16]

图 8 矿石大陆上地壳标准化不相容元素蛛网图

Fig. 8 UCC-normalized Incompatible Element Spider Diagram of Ores

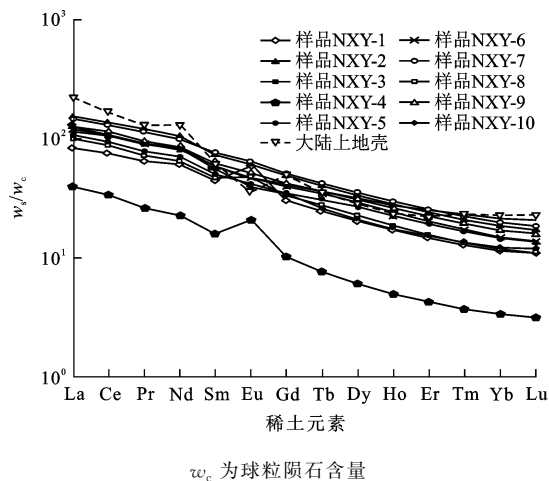


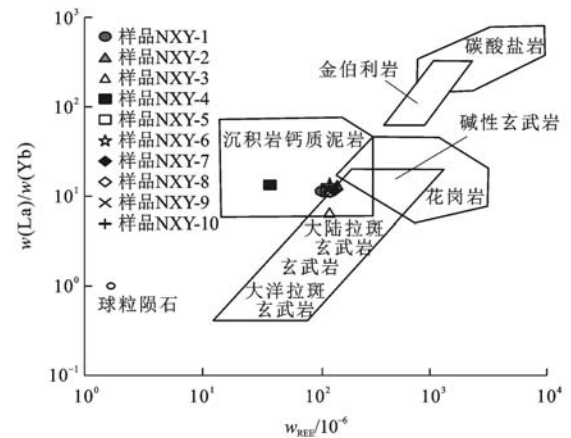
图 9 矿石球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 9 Chondrite-normalized REE Pattern of Ores

分别为 2.06、2.53, 表明轻、重稀土元素内部分馏均较弱; Eu 异常为 0.88~1.19, Ce 异常为 0.99~1.04, 不同矿石之间存在微弱的差别, 变化从弱负异常到弱正

异常, 表明成矿环境的性质可能发生了变化^[11]。绿片岩矿石稀土元素总含量较低, 为 127.33×10^{-6} , 轻、重稀土元素含量之比为 6.07, 表明轻、重稀土元素的分馏程度不大, $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 值为 1.90, 轻稀土元素之间存在着较弱的分馏, $w(\text{Gb})_N/w(\text{Yb})_N$ 值为 2.65, 表明重稀土元素分馏程度较弱, 轻稀土元素内部分馏较重稀土元素内部分馏更强; Eu 异常为 1.59, 为明显的正异常, 而 Ce 无明显异常, 表明成矿环境为弱氧化环境。石英-硫化物矿石稀土元素总含量最低, 为 51.77×10^{-6} , 轻、重稀土元素含量之比为 8.26, 轻、重稀土元素分馏较前两种矿石更强, $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 值为 2.50, $w(\text{Gb})_N/w(\text{Yb})_N$ 值为 3.02, 轻、重稀土元素内部分馏程度均不高, 重稀土元素分馏程度略大, Eu 异常为 1.61, 显示明显正异常, Ce 异常不明显, 表明成矿环境为弱氧化环境。

在 La/Yb-REE 图解(图 10)中, 所有样品投点位置均落在沉积岩区, 除样品 NXY-4 外, 其余样品



图件引自文献[14]

图 10 矿石 La/Yb-REE 图解

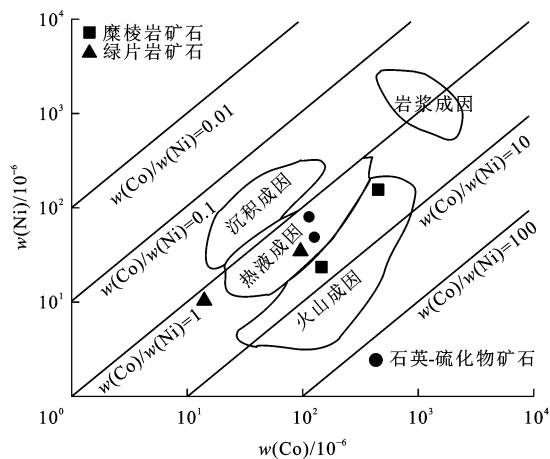
Fig. 10 La/Yb-REE Diagram of Ores

投点位置整体靠近玄武岩区,且样品 NXY-3 投点位置位于沉积岩区与玄武岩区的相交区域,表明成矿物质主要来源于沉积岩,可能混有太古宙偏碱性的中—基性火山岩^[11,14]。

3.3 黄铁矿主、微量元素特征

理论上,主量元素 S 和 Fe 原子比为 2。由表 4 可知,南小尧金矿矿石中,黄铁矿所有分析点 S 和 Fe 原子比均大于 2,在 2.09~2.23 之间,表现为明显的 Fe 亏损,表明黄铁矿可能发生了类质同象替代^[41]。

黄铁矿中的 Fe 常被 Co 和 Ni 以类质同像替代,S 常被 As 替代^[42-43]。矿石中 Co、Ni、As 含量均比较低,糜棱岩矿石中黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值为 1.792 和 3.640,石英-硫化物矿石中黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值为 0.212 和 0.423,绿片岩矿石中黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值较高,为 1.340 和 1.893。在黄铁矿 Ni-Co 图解(图 11)中,糜棱岩矿石落在火山成因区的边缘,而绿片岩矿石与石英-硫化物矿石均落在热液成因区内,表明糜棱岩矿石的形成与火山活动有关,而其他两种矿石的形成与热液活动有关。结合 As-Co-Ni 图解(图 12)对成矿热液类型进行判别,绿片岩矿石和石英-硫化物矿石均落在火山与次火山热液型区域,表现出贫 As 的热液特征。所有矿石中黄铁矿 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 值均小于 0.5,表明成矿时的温度较高^[42-43];As 含量极低,为 $(0 \sim 2.23) \times 10^{-6}$,也表明成矿温度较高^[43]。



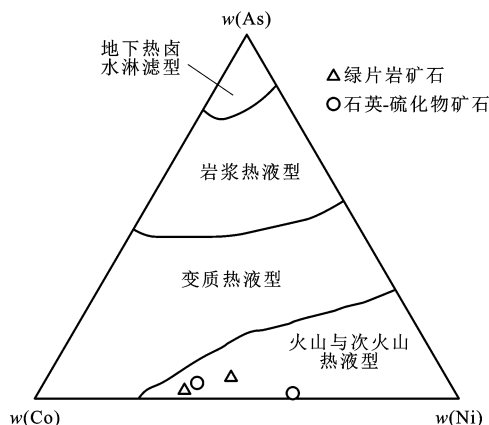
图件引自文献^[42]

图 11 黄铁矿 Ni-Co 图解

Fig. 11 Ni-Co Diagram of Pyrites

3.4 黄铁矿硫同位素特征

硫同位素示踪可以反映成矿物质的来源^[42-43]。一般认为,自然界中的硫主要有 3 种来源^[44]:①地幔硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 0‰,多在 $0‰ \pm 3‰$;②海水硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 20‰;③生物硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,



图件引自文献^[43]

图 12 黄铁矿 As-Co-Ni 图解

Fig. 12 As-Co-Ni Diagram of Pyrites

为 $-40‰ \sim 50‰$ 。南小尧金矿黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.8‰ \sim 1.8‰$,明显属于地幔硫的特征,表明成矿物质来源于深部地幔。

4 讨 论

4.1 成矿物质与成矿流体特征

成矿物质与成矿流体特征的判别对研究矿床成因具有重要意义。通过对矿石地球化学特征对比发现,南小尧金矿 3 种矿石的成矿物质与成矿流体虽然具有一定的相似性,但也存在差异。3 种矿石 Co、Ni 元素普遍存在并富集,暗示着这 3 种矿石的成矿热液可能来源于深部^[45],黄铁矿低 $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$ 值、贫 As 的特征表明成矿流体为高温流体。3 种矿石微量元素的变化存在着差异(图 8),可能代表着 3 种不同的成矿阶段。微量元素 Sr、Nb 对矿石成因具有较好的指示作用。糜棱岩矿石明显亏损 Sr,表明岩石受到了强烈的蚀变作用,绿片岩矿石则明显富集 Sr,表明成岩过程中蚀变较弱^[27];绿片岩矿石与糜棱岩矿石的 Nb 相对富集,而石英-硫化物矿石的 Nb 略亏损,结合地质实际分析认为,前两种矿石的形成可能受到了偏基性的岩石影响^[39]。3 种矿石的球粒陨石标准化稀土元素配分模式均为轻稀土元素富集,平缓右倾型,轻、重稀土元素之间分馏较弱。一般而言,深源物质的稀土元素总含量较浅源物质低^[46-47],糜棱岩矿石稀土元素总含量平均值为 189.99×10^{-6} ,绿片岩矿石稀土元素总含量为 127.33×10^{-6} ,石英-硫化物矿石稀土元素总含量最低,为 51.77×10^{-6} ,三者的稀土元素总含量均介于上地壳与地幔之间,表明成矿作用可能受到了深部流体的影响^[47-48]。矿石黄铁矿硫同位素特征也显

示,硫化物中的 S 来源于深部地幔,这与李洪奎对沂沭断裂带中段金矿床的稳定同位素研究结果^[11]一致。糜棱岩矿石 Eu 异常介于弱正异常与弱负异常之间,这反映了成矿环境可能发生了变化^[47-48];绿片岩矿石和石英-硫化物矿石 Eu 为正异常,表明成矿环境可能为弱氧化环境,推测可能有大气降水混入^[11,49],这也表明成矿流体可能经历了相对富斜长石源区的水岩作用^[49-50];在研究区内中生代燕山期闪长岩的 Au 含量最高,是同期其他类型岩浆岩的 7~14 倍^[11],在金矿床钻孔中可见燕山期闪长岩产出^[11],据此推测成矿流体与闪长岩发生过物质成分的交换,同时大气降水混入使得成矿流体出现 Eu 正异常,成矿流体萃取了 Au 并运移,使 Au 在控矿构造内富集,因此,燕山期闪长岩可能是南小尧金矿的 Au 来源之一。在沂沭断裂带中段,泰山岩群、沂水岩群、燕山期岩浆岩的 Au 平均含量、变异系数以及标准离差均较大,是沂沭断裂带内金矿的主要矿源层^[11,14-16],南小尧金矿矿石的稀土元素特征与区内沂水岩群相比差异较大(表 6),因此,排除其作为

表 6 矿石与沂水岩群稀土元素特征

Tab. 6 REE Characteristics of Ores and Yishui Group

矿石类型	$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	$w(\text{La})/w(\text{Yb})$	$w(\text{Pr})/w(\text{Sm})$	$w(\text{Eu})/w(\text{Sm})$	$w(\text{La})/w(\text{Sm})$	资料来源
糜棱岩矿石	180.78	6.24	10.89	0.97	0.31	3.19	本文
绿片岩矿石	127.33	6.06	10.20	0.91	0.51	2.93	
石英-硫化物矿石	51.77	8.25	16.41	1.03	0.50	3.88	
沂水岩群	117.26	16.59	37.91	1.72	0.26	8.84	文献[16]

注:糜棱岩矿石数据为平均值。

4.2 构造条件

区域性剪切带对金矿床的分布具有重要的控制作用,且金矿床往往分布在其派生的次级断裂中^[24,50]。通常,剪切带脆性程度较高,易于形成脉状矿体,而韧性程度较高易于形成浸染状矿体^[24]。此外,在脉体两侧,蚀变带的蚀变程度向外围由强变弱也可发育浸染状矿体,即同一热液体系在不同构造条件下的不同矿化形式^[51]。南小尧金矿位于沂水—汤头断裂面下盘的次级断裂南小尧—前梭庄断裂内,具有两种类型的矿体:一种是浸染状矿体;另一种为脉状矿体。早期浸染状矿体形成于韧性剪切带的构造环境中^[11,50],而晚期浸染状矿体与脉状矿体可能属于同一热液体系,脆性断裂是其主要控矿构造,形成时代相差不大,因此,南小尧金矿控矿构造为叠加在区域性韧性剪切带中的脆性断裂。这种韧-脆性断裂既满足成矿所需的温度压力条件和较为封闭的体系,又扩大了成矿的空间^[52-53],对金矿

南小尧金矿母岩的可能性。La/Yb-REE 图解(图 10)表明,3 种矿石的成岩物质均来源于沉积岩,除石英-硫化物矿石外,其他样品均可能混入了偏碱性的基性火山岩,结合区内基础地质资料推断,太古宙泰山岩群和偏碱性的中—基性火山岩可能为矿石的形成提供了物质来源^[11]。黄铁矿 Ni-Co 图解(图 11)和 As-Co-Ni 图解(图 12)显示,糜棱岩矿石与另外两种矿石在成因上存在一定区别,但均与火山活动有关,其中绿片岩矿石与石英-硫化物矿石的成矿热液为火山与次火山热液,这可能与燕山期岩体的火山岩期和次火山岩期有关^[11]。

综上所述,3 个成矿阶段的成矿流体均来源于深部,从早至晚,由弱还原性逐渐过渡为弱氧化性,可能与后期大气降水混入有关,后两个阶段(即绿片岩矿石和石英-硫化物矿石)的成矿流体为火山和次火山热液,流体温度较高。3 个阶段矿石的成矿物质可能均有来自于沉积岩与偏基性火山岩的成分,成矿物质主要来源于深部,表现为地幔物源的特征,后两个阶段成矿物质可能有燕山期闪长岩的贡献。

的形成极为有利。

4.3 成矿机制

成矿早期,来自于深部的成矿热液沿深大断裂不断上涌喷发,沿泰山岩群和中—基性火山岩建造的片理充填成矿并发生蚀变,形成早期浸染状的矿石。随着沂沭断裂带活动的加强,容矿空间进一步扩大,燕山期岩浆岩侵入,火山活动剧烈,不仅为金矿化提供了热源,同时火山和次火山热液携带大量的成矿物质向上侵入。由于裂隙较早期更为发育,大气降水不断注入,成矿流体的温度与压力降低,流体性质也逐渐发生了变化,加速了流体相中 Au 的沉淀并使 Au 在构造破碎带中富集成矿,形成了交代成因的浸染状矿石和沿裂隙充填的含金方铅矿-黄铁矿-石英脉。

5 结 语

(1) 山东沂沭断裂带中段南小尧金矿的成矿阶

段可划分为 4 个阶段,分别为石英-黄铁矿-绿泥石化阶段、多金属硫化物-绢云母化-绿泥石化阶段、石英-多金属硫化物阶段、碳酸盐化阶段。

(2)绿片岩矿石、糜棱岩矿石、石英-硫化物矿石的矿化形式存在差异。Sr 元素特征表明,糜棱岩矿石遭受了较为强烈的蚀变,而其他矿石蚀变程度较低;Nb 元素特征表明,糜棱岩矿石与绿片岩矿石中可能混有基性岩浆岩;南小尧金矿矿石中 Ni 元素整体富集,暗示成矿热液来自于深部地幔。

(3)糜棱岩矿石 Eu 介于弱正异常与弱负异常之间,反映了成矿流体性质可能发生了变化,绿片岩矿石与石英-硫化物矿石的 Eu 均为正异常,暗示着成矿流体流经富斜长石源区和大气降水的注入,含 Au 较高的闪长岩可能为其提供成矿物质;3 种矿石的稀土元素特征与沂水岩群相差较大,排除了其作为矿源层的可能性。

(4)黄铁矿硫同位素特征显示,南小尧金矿的成矿物质主要来源于地幔;黄铁矿微量元素特征表明各成矿阶段与火山-岩浆活动关系密切,成矿流体来源于深部,且温度较高,其中绿片岩矿石和石英-硫化物矿石的形成与燕山期火山和次火山热液活动有关。

(5)目前,南小尧金矿的研究依然较为薄弱,对成矿流体与成矿物质的来源特征认识仍然不足,如矿体下部闪长岩是否为其矿源层还有待进一步论证,成矿时代缺少直接的限定,因此,将来可以采用载金矿物(如黄铁矿)的地球化学研究来获得更为准确的成矿信息。

参考文献:

References:

- [1] 邹为雷,沈远超. 浅议沂沭断裂系及其邻区金矿成矿作用演化[J]. 地质与勘探,2001,37(1):20-26.
ZOU Wei-lei, SHEN Yuan-chao. A Discussion on Metalizational Pattern of Gold Ore in Yishu Fault System [J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(1): 20-26.
- [2] DENG J, WANG Q F, WAN L, et al. A Multifractal Analysis of Mineralization Characteristics of the Da-yingezhuang Disseminated-veinlet Gold Deposit in the Jiaodong Gold Province of China[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 40(1): 54-64.
- [3] DENG J, WANG Q F. Gold Mineralization in China: Metallogenic Provinces, Deposit Types and Tectonic Framework[J]. Gondwana Research, 2016, 36: 219-274.
- [4] XU W G, FAN H R, HU F F, et al. Geochronology of the Guilaizhuang Gold Deposit, Luxi Block, Eastern North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb and Fluorite-calcite Sm-Nd Dating[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 390-399.
- [5] YANG L Q, DENG J, GUO L N, et al. Origin and Evolution of Ore Fluid, and Gold-deposition Processes at the Giant Taishang Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 585-602.
- [6] MA L, JIANG S Y, HOFMANN A W, et al. Rapid Lithospheric Thinning of the North China Craton: New Evidence from Cretaceous Mafic Dikes in the Jiaodong Peninsula[J]. Chemical Geology, 2016, 432: 1-15.
- [7] 于学峰,宋明春,李大鹏,等. 山东金矿找矿突破进展与前景[J]. 地质学报,2016,90(10):2847-2862.
YU Xue-feng, SONG Ming-chun, LI Da-peng, et al. Prospecting Breakthroughs and Prospect of Gold Deposits in Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2847-2862.
- [8] 田京祥,李秀章,宋志勇,等. 鲁西中生代金矿形成时代、物质来源及问题讨论[J]. 地质学报,2015,89(8):1530-1537.
TIAN Jing-xiang, LI Xiu-zhang, SONG Zhi-yong, et al. Environment, Formation Age and Material Sources of Mesozoic Gold Deposits in Western Shandong: A Synthesis [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(8): 1530-1537.
- [9] 李洪奎,李英平,田京祥,等. 沂水县龙泉站金矿地质特征及找矿前景[J]. 山东国土资源,2005,21(6/7):69-72.
LI Hong-kui, LI Ying-ping, TIAN Jing-xiang, et al. Geological Characteristics and Ore-probing Future of Longquanzhan Gold Deposit in Yishui County [J]. Shandong Land and Resources, 2005, 21(6/7): 69-72.
- [10] 郝兴中,吴立新,李现超,等. 山东沂沭断裂带中段地质特征及金矿预测模型[J]. 地质学刊,2014,38(3):392-398.
HAO Xing-zhong, WU Li-xin, LI Xian-chao, et al. Geological Characteristics and Gold Prospecting Model in Middle Sector of Yishu Fault Belt in Shandong[J]. Journal of Geology, 2014, 38(3): 392-398.
- [11] 李洪奎. 沂沭断裂带构造演化与金矿成矿作用研究[D]. 青岛:山东科技大学,2010.
LI Hong-kui. Study on Tectonic Evolution and Gold Mineralization in Yishu Fault Belt [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.

- [12] 石文杰. 山东沂沭断裂带及邻区晚中生代构造-岩浆活动与金成矿作用[D]. 武汉:中国地质大学, 2014.
SHI Wen-jie. The Late Mesozoic Tectonic-magmatic Evolution Process in the Yishu Fault Zone and Adjacent Regions, Shandong Province: Implication for Gold Mineration[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [13] 石文杰, 魏俊浩, 谭 俊, 等. 郯庐断裂带晚白垩世金成矿作用: 来自龙泉站金矿床黄铁矿 Rb-Sr 年代学证据[J]. 地球科学, 2014, 39(3): 325-340.
SHI Wen-jie, WEI Jun-hao, TAN Jun, et al. Late Early Cretaceous Gold Mineralization in Tan-Lu Fault Zone: Evidence from Rb-Sr Isotopic Dating of Pyrite from Longquanzhan Gold Deposit[J]. Earth Science, 2014, 39(3): 325-340.
- [14] 何 玲, 杨 斌, 陈 艳, 等. 沂水龙泉站金矿地质地球化学特征与成矿作用分析[J]. 矿床地质, 2010, 29(增 1): 937-938.
HE Ling, YANG Bin, CHEN Yan, et al. Geochemical Characteristics and Mineralization Analysis of Longquanzhan Gold Deposit in Yishui[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(S1): 937-938.
- [15] 孔灵芝, 刘其臣. 山东沂南牛家小河金矿床特征及找矿前景[C]//中国金属学会. 2003 中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社, 2003: 232-235.
KONG Ling-zhi, LIU Qi-chen. The Geological Characters and Exploration Prospects of Gold Deposit in Niujia-xiaohe, Yinan, Shandong [C] // The Chinese Society for Metals. The CSM Steel Congress in 2003. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 232-235.
- [16] 王向军. 沂沭断裂带中段牛家小河金矿成因探讨[D]. 青岛: 山东科技大学, 2016.
WANG Xiang-jun. The Genesis of Niujiaxiaohe Gold Deposit in the Middle of Yishu Fault[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2016.
- [17] 孔庆友, 张天祯, 于学峰, 等. 山东矿床[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2006.
KONG Qing-you, ZHANG Tian-zhen, YU Xue-feng, et al. Deposit in Shandong[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2006.
- [18] 李洪奎, 杨永波, 王岳林. 沂水南小尧金矿同位素年代学特征及其地质意义[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(1): 1-7.
LI Hong-kui, YANG Yong-bo, WANG Yue-lin. Isotopic Geochronological Characteristics and Implications of the Nanxiaoyao Gold Deposit in Yishui[J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(1): 1-7.
- [19] 李洪奎, 杨永波. 沂水南小尧金矿锆石 U-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 山东国土资源, 2009, 25(3): 22-26.
LI Hong-kui, YANG Yong-bo. U-Pb Isotopic Geochronological Characteristics and Implications of Zircon in Nanxiaoyao Gold Deposit of Yishui[J]. Shandong Land and Resources, 2009, 25(3): 22-26.
- [20] 王巧云, 郝兴中, 李秀章, 等. 沂沭断裂带中段及西侧金矿成矿类型及成矿作用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2017, 44(1): 120-128.
WANG Qiao-yun, HAO Xing-zhong, LI Xiu-zhang, et al. Analysis of Typical Metallogenic Types and Mineralization of Gold Deposits in the Yishu Fault Belt, Shandong, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2017, 44(1): 120-128.
- [21] 戴 霜, 刘 博, 闫宁云, 等. 南祁连党河南山地区中酸性浅成侵入体和岩脉岩石地球化学特征及其与金矿成矿关系[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(6): 753-765.
DAI Shuang, LIU Bo, YAN Ning-yun, et al. Geochemical Characteristics of Intermediate-acid Hypabyssal Intrusions and Dykes in Danghenanshan Area of South Qilian and Its Implications on the Gold Mineralization [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(6): 753-765.
- [22] 毛光周, 王向军, 邓冰红, 等. 金属矿床成矿物质来源的几种常用同位素地球化学研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2016, 35(1): 19-29.
MAO Guang-zhou, WANG Xiang-jun, DENG Bing-hong, et al. Geochemical Analysis of Several Common Isotopes in Ore-forming Material Sources of Metal Deposits[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2016, 35(1): 19-29.
- [23] 于 昆, 刘国生, 陈皓龙, 等. 夏甸金矿床主、微量元素特征及其地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(10): 2621-2633.
YU Kun, LIU Guo-sheng, CHEN Hao-long, et al. Major and Trace Elements Characteristics of Xiadian Gold Deposit and Its Implications [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(10): 2621-2633.
- [24] 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1997.
Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Geochemistry of Ore Deposit[M]. Beijing: Geological

- Publishing House, 1997.
- [25] 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): 2433-2450.
ZHANG Chao, HUANG Tao, LIU Xiang-dong, et al. Hydrothermal Alteration of the Xincheng Gold Deposit, Northwestern Jiaodong, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(8): 2433-2450.
- [26] DENG J, WANG C M, BAGAS L, et al. Insights into Ore Genesis of the Jinding Zn-Pb Deposit, Yunnan Province, China: Evidence from Zn and In-situ S Isotopes[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 90: 943-957.
- [27] 邢 波, 郑 伟, 欧阳志侠, 等. 粤西庙山铜多金属矿床硫化物原位微区分析及 S 同位素对矿床成因的制约[J]. 地质学报, 2016, 90(5): 971-986.
XING Bo, ZHENG Wei, OUYANG Zhi-xia, et al. Sulfide Microanalysis and S Isotope of the Miaoshan Cu Polymetallic Deposit in Western Guangdong Province, and Its Constraints on the Ore Genesis[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 971-986.
- [28] WONG K W, ZHOU M F, CHEN W T, et al. Constraints of Fluid Inclusions and In-situ S-Pb Isotopic Compositions on the Origin of the North Kostobe Sediment-hosted Gold Deposit, Eastern Kazakhstan [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 81: 256-269.
- [29] 严乐佳, 朱 光, 林少泽, 等. 沂沭断裂带新构造活动规律与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1452-1467.
YAN Le-jia, ZHU Guang, LIN Shao-ze, et al. Neotectonic Activity and Formation Mechanism of the Yishu Fault Zone[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(7): 1452-1467.
- [30] 陈炳翰, 王中亮, 李海林, 等. 胶东台上金矿床成矿流体演化: 载金黄铁矿稀土元素和微量元素组成约束[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2518-2532.
CHEN Bing-han, WANG Zhong-liang, LI Hai-lin, et al. Evolution of Ore Fluid of the Taishang Gold Deposit, Jiaodong: Constraints on REE and Trace Element Component of Auriferous Pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2518-2532.
- [31] 孙绪德, 尹 升, 张海芳. 沂水县王家庄子矿区金矿床地质特征[J]. 山东国土资源, 2014, 30(4): 27-31.
SUN Xu-de, YIN Sheng, ZHANG Hai-fang. Geological Characteristics of Gold Deposit in Wangjiazhuangzi Mine in Yishui County[J]. Shandong Land and Resources, 2014, 30(4): 27-31.
- [32] 李洪奎, 崔传源, 耿 科, 等. 郯-庐断裂带陆内伸展构造: 以沂沭断裂带的表现特征为例[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 73-84.
LI Hong-kui, ZHUO Chuan-yuan, GENG Ke, et al. Intra-continental Extensional Tectonics of the Tan-Lu Fault Zone: An Example from the Appearance Characteristics of the Yishu Fault Zone[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 73-84.
- [33] YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353-370.
- [34] HUANG X W, GAO J F, QI L, et al. In-situ LA-ICP-MS Trace Elements Analysis of Magnetite: The Fenghuangshan Cu-Fe-Au Deposit, Tongling, Eastern China [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 746-759.
- [35] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In-situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [36] 赵元艺, 李小赛, 吴德新, 等. 江西德兴金山金矿晋宁期花岗岩超糜棱岩的发现及意义[J]. 地质与勘探, 2014, 50(5): 805-822.
ZHAO Yuan-yi, LI Xiao-sai, WU De-xin, et al. Discovery of Jinningian Granitic Ultramylonite in Jinshan Gold Deposit, Dexing Area, Jiangxi Province and Its Significance[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(5): 805-822.
- [37] WANG S Y, FAN W L. Gold Solubility in SiO_2 -HCl- H_2O System at 200 °C: A Preliminary Assessment of the Implications of Silicification with Regard to Gold Mineralization[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1994, 13(1): 13-23.
- [38] 陈毓川, 李兆鼎, 毋瑞身, 等. 中国金矿床及其成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
CHEN Yu-chuan, LI Zhao-nai, WU Rui-shen. Overview of China Gold Deposit and Its Metallogenic Regularity[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001.
- [39] 薛怀民, 马 芳, 宋永勤. 扬子克拉通北缘随(州)—枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1116-1130.
XUE Huai-min, MA Fang, SONG Yong-qin. Geochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Data of Neoproterozoic Meta-magmatic Rocks in the Suizhou-Zaoyang Area, Northern Margin of the Yangtze Craton, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1116-1130.
- [40] 姜 珊, 武文治. 造山后与后造山花岗岩类的高场强

- 元素特征及原因浅析[J]. 山东工业技术, 2015(16): 209-210.
- JIANG Shan, WU Wen-zhi. Analysis and High Field Strength Element Characteristic of Post-orogenic and Orogenic Granite[J]. Shandong Industrial Technology, 2015(16): 209-210.
- [41] 赵 静, 梁金龙, 韩 波. 水银洞金矿与阳山金矿载金矿物成分分析及金的赋存状态[J]. 科技通报, 2017, 33(1): 24-31.
- ZHAO Jing, LIANG Jin-long, HAN Bo. The Component Analyses of Au-bearing Minerals and the Occurrence of Gold in Shuiyindong and Yangshan Carlin-type Gold Deposits, China[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(1): 24-31.
- [42] 毛光周, 华仁民, 高剑峰, 等. 江西金山含金黄铁矿的稀土元素赋存状态研究[J]. 矿物学报, 2006, 26(4): 409-418.
- MAO Guang-zhou, HUA Ren-min, GAO Jian-feng, et al. Existence of REE in Different Phases of Gold-bearing Pyrite in the Jinshan Gold Deposit, Jiangxi Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(4): 409-418.
- [43] 曹素巧, 贾锦生, 钟增球, 等. 浙西开化石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, 2014, 33(5): 937-946.
- CAO Su-qiao, JIA Jin-sheng, ZHONG Zeng-qiu, et al. Composition and Sulfur Isotope Characteristics of Auriferous Pyrite from the Shilongtou Gold Deposit in Kaihua, Western Zhejiang Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(5): 937-946.
- [44] 陕 亮, 郑有业, 许荣科, 等. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. 地质与资源, 2009, 18(3): 197-203.
- SHAN Liang, ZHENG You-ye, XU Rong-ke, et al. Review on Sulfur Isotopic Tracing and Hydrothermal Metallogenesis[J]. Geology and Resources, 2009, 18(3): 197-203.
- [45] 曾 茜, 陈守余, 赵江南. 个旧卡房蚀变花岗岩地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 地质找矿论丛, 2016, 31(2): 163-171.
- ZENG Xi, CHEN Shou-yu, ZHAO Jiang-nan. Geochemical Characteristics of Kafang Altered Granite in Gejiu City and Its Relationship with Mineralization [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2016, 31(2): 163-171.
- [46] 陈翠华, 赵德坤, 顾雪祥, 等. 云南老寨湾金矿床成矿物质来源探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 23-30.
- CHEN Cui-hua, ZHAO De-kun, GU Xue-xiang, et al. Discussion on Ore-forming Material Sources of the Laozhaiwan Gold Deposit, Yunnan[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(1): 23-30.
- [47] 黎 彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976(3): 167-174.
- LI Tong. Chemical Element Abundances in the Earth and Its Major Shells[J]. Geochimica, 1976(3): 167-174.
- [48] 温亦品. 额尔古纳东珉铅锌银矿床地球化学特征研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- WEN Yi-pin. The Study on Geochemistry Feature of Dongjun Ergun Lead-zinc-silver Deposits[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [49] 马玉波, 邢树文, 张 彤, 等. 内蒙古额尔古纳地区比利谷大型铅锌银矿床稀土微量元素地球化学特征及成矿意义[J]. 地质学报, 2015, 89(10): 1841-1852.
- MA Yu-bo, XING Shu-wen, ZHANG Tong, et al. Geochemical Characteristics of REE and Trace Elements in the Biliyagu Large Pb-Zn Ag Deposit of E'erguna Area, Inner Mongolia and Their Metallogenic Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(10): 1841-1852.
- [50] 孔红杰. 韧性剪切带及其控矿作用研究: 以沂沭断裂带中段为例[D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.
- KONG Hong-jie. Study of the Ductile Zone and Its Control over Metallization: Take an Example of Gold Deposit in the Middle Section of the Yishu Fault Belt [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2005.
- [51] ROBERT F, BROWN A C. Archean Gold-bearing Quartz Veins at the Sigma Mine, Abitibi Greenstone Belt, Quebec: Part I, Geologic Relations and Formation of the Vein System[J]. Economic Geology, 1986, 81(3): 578-592.
- [52] 彭恩生. 断裂带的韧-脆性转化与成矿[J]. 地球物理学进展, 1993, 8(4): 118-125.
- PENG En-sheng. Ductile-brittle Transition of Fracture Zone and Mineralization[J]. Progress in Geophysics, 1993, 8(4): 118-125.
- [53] 牛树银, 孙爱群, 刘晓煌, 等. 胶东地区北泊金矿构造特征及其控矿作用[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(6): 1-7.
- NIU Shu-yin, SUN Ai-qun, LIU Xiao-huang, et al. Structural Characteristics and Its Ore-controlling Role of the Beibo Gold Deposit in Jiaodong Area[J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(6): 1-7.